



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GUOCHENG CANSHU
JIANCE JI YIBIAO

过程参数 检测及仪表

常太华 苏杰 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

自动控制理论(第四版)
自动控制理论(第三版)
自动控制原理
自动控制原理-理论篇
16/32位微机原理及接口技术
可编程序控制器原理及应用
接口与通信
电磁测量技术
电磁场导论
电机学(第三版)
电机学(第二版)
电机学
电机理论基础
微特电机及系统
电气工程概论
电气工程概论
电气工程概论
电气工程CAD技术
电力系统概论
电气信息技术基础
电力系统基础(第二版)
电力工程
发电厂电气部分
发电厂及变电站的二次回路
电力系统继电保护原理(第四版)
微型机继电保护基础(第三版)
电力网继电保护原理
现代高压电网继电保护原理
电力系统自动装置原理(第四版)
电力系统自动化(第五版)
电力系统自动化(第二版)
电力系统故障分析(第三版)
电力系统分析(第三版)
电力系统规划
高电压技术(第二版)
高电压技术(第二版)
电能计量技术
电力建设工程造价控制与管理
电能质量分析与控制
智能控制系统及应用
MATLAB在电气工程中的应用
交直流调速系统与MATLAB仿真

过程参数检测及仪表
电力企业管理
电力技术经济原理
电力市场(第三版)
电力市场运营系统(第二版)
电气工程及其自动化专业英语
电力新技术概论

孙扬声
文 锋
于希宁
杨 平
朱有产
郁汉琪
王保义
李宝树
孟昭敦
牛维扬
胡虔生
陈世元
凌跃胜
程 明
熊信银
李建华
肖登明
冯林桥
杨淑英
夏安邦
杨以涵
尹克宁
姚春球
何永华
贺家李
杨奇逊
孙国凯
李晓明
杨冠城
李先彬
王 葵
刘万顺
于永源
程浩忠
赵智大
张一尘
王月志
黄宵宁
肖湘宁
张国忠
李维波
周渊深

常太华
卢建昌
肖先勇
杜松怀
刘继春
苏小林
王仁祥

ISBN 978-7-5083-8720-8



9 787508 387208 >

定价: 36.00元



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GUOCHENG CANSHU
JIANCE JI YIBIAO

过程参数 检测及仪表

常太华 苏 杰 编
周 渭 潘 笑 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书首先介绍了检测技术的基本知识，然后按照测量参数的分类，分别介绍了温度、压力、流量、液位、成分量、机械量等参数的检测方法和相关仪表，最后介绍了检测装置的抗干扰技术以及检测技术的新发展及应用情况。

本书可作为高等院校相关专业的本科生教材，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

过程参数检测及仪表 / 常太华, 苏杰编. —北京: 中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-8720-8

I. 过… II. ①常…②苏… III. ①自动检测—高等学校—教材 ②检测仪表—高等学校—教材 IV. TP274 TP216

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 057207 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 6 月第一版 2009 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.5 印张 547 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

近些年来,热力发电厂的机组不断向大容量、超高参数方向发展,新的检测方法和新的检测仪表不断地得到应用。为适应电力事业的发展,编者在多年教学实践的基础上,将历年讲稿、讲义不断修改补充,完成了《过程参数检测及仪表》的编写。

编者在编写本书时,除保留当前生产中使用较广的测量方法及仪表外,对一些最新应用的新技术和新型检测仪表也进行了介绍,力求做到叙述清楚、重点突出、体系完整、内容丰富及书中内容与实际生产过程的有机结合。本书第1章和第2章重点介绍了测量方法、测量系统、测量误差等方面的内容,使学生对测量技术有一个总体认识。第3~10章,主要介绍了温度、压力、流量、液位、分量、机械量等参数的检测方法和仪表,这些是本书的重点内容,学生要牢固掌握。第11章对检测装置的抗干扰技术进行了介绍,这部分内容对学生以后解决实际工程问题很有帮助。第12章介绍了检测技术的新发展及应用情况,有助于拓宽学生的知识面。

本书第1章至第11章由华北电力大学的常太华、苏杰编写,第12章由华北电力大学的全卫国编写,全书由常太华整理定稿。编者在编写这本书的过程中参考和引用了许多专家学者的有关著作,在此致以谢意。西安电子科技大学的周渭教授对全书进行了仔细的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此也表示深深的谢意。

由于编者水平有限,书中不妥、疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2008年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 测量的意义及发展方向	1
1.2 测量方法	2
1.3 测量系统	3
1.4 测量仪表的主要性能指标	5
1.5 仪表的检定	8
本章小结	8
思考题与习题	9
第 2 章 测量误差分析与处理	11
2.1 测量误差的概念	11
2.2 直接测量误差的分析与处理	12
2.3 间接测量误差的分析与处理	22
2.4 测量不确定度	23
本章小结	28
思考题与习题	28
第 3 章 接触式温度检测及仪表	30
3.1 温度测量的基本知识	30
3.2 热电偶温度计	35
3.3 热电阻温度计	55
3.4 新型温度传感器	68
3.5 测温实例	74
本章小结	79
思考题与习题	80
第 4 章 非接触式温度检测及仪表	82
4.1 热辐射测温的基本知识	82
4.2 光学高温计及光电高温计	84
4.3 辐射高温计	87
4.4 比色高温计	89
4.5 红外测温仪	91
本章小结	93

思考题与习题	93
第 5 章 压力检测及仪表	95
5.1 压力测量的基本知识	95
5.2 液体压力计	98
5.3 弹性式压力计	102
5.4 压力(差压)变送器	112
5.5 压力表的选择和安装	123
5.6 工业压力表的校验与调整	125
本章小结	128
思考题与习题	129
第 6 章 流量检测及仪表	131
6.1 流量测量的基本知识	131
6.2 容积式流量计	134
6.3 速度式流量计	136
6.4 差压式流量计	144
6.5 质量流量计	157
6.6 其他流量计简介	162
6.7 流量标准装置	167
本章小结	170
思考题与习题	172
第 7 章 节流式流量计	174
7.1 概述	174
7.2 流量公式	175
7.3 标准节流装置的组成及适用范围	177
7.4 标准节流装置中有关系数的确定和误差估计	185
7.5 标准节流装置的计算	190
7.6 流量测量的温度、压力补偿	200
7.7 非标准节流装置	202
7.8 节流式流量计信号管路的安装	205
本章小结	206
思考题与习题	207
第 8 章 液位检测及仪表	209
8.1 液位测量概述	209
8.2 云母水位计及双色水位计	210
8.3 电接点水位计	213
8.4 差压式水位计	221
8.5 其他液位测量方法	228

8.6 液位仪表的选用	235
本章小结	236
思考题与习题	236
第9章 成分分析仪表	238
9.1 成分分析仪表概述	238
9.2 氧化锆氧分析仪	240
9.3 红外线气体分析仪	244
9.4 热导式气体分析仪	248
9.5 工业气相色谱仪	251
9.6 电导式分析仪	254
9.7 工业酸度计	258
9.8 硅酸根分析仪	262
9.9 成分分析仪表的特殊问题	265
本章小结	266
思考题与习题	267
第10章 机械量检测及仪表	269
10.1 位移测量	269
10.2 振动测量	276
10.3 转速测量	280
本章小结	284
思考题与习题	285
第11章 检测装置的干扰抑制技术	286
11.1 干扰的形成	286
11.2 差模干扰与共模干扰	290
11.3 抑制干扰的措施	292
本章小结	301
思考题与习题	302
第12章 检测新技术	303
12.1 现场信号的采集 (信号的调理与采集)	303
12.2 软测量技术	308
12.3 多传感器数据融合	316
12.4 虚拟仪器	325
本章小结	330
思考题与习题	331
附录 I	333
附录 II	338
参考文献	349

第1章 绪 论

1.1 测量的意义及发展方向

所谓测量,就是用实验的方法和专门的工具,将被测量与同种性质的标准量(即测量单位)进行比较,求取二者比值,从而找到被测量数值大小的过程。测量的基本方程式为

$$X = \alpha U \quad (1-1)$$

式中 X ——被测量;
 U ——测量单位;
 α ——比值。

由于测量过程中不可避免地有误差存在,任何测得值都只能近似地反映被测量的真值,故式(1-1)变为

$$X \approx \alpha U \quad (1-2)$$

从式(1-1)可知,测量过程包含三要素,即测量单位、测量方法和测量工具。任何测量只有确定测量单位、选择测量器具和测量方法、设计测量系统和进行正确的操作,才能确定测量结果的可靠程度。

现代化的生产过程是高效、连续的过程,为了确保生产安全,保证产品的产量和质量,减少能源消耗和降低成本,必须对反映生产过程进行的各种参数如温度、压力、流量、物位、分量、机械量等进行自动检测和控制。完成工艺参数检测处理的仪表称为过程检测仪表。

例如,在热电厂中,通过对温度、压力等参数的测量,可及时反映热力设备的运行工况,为运行人员提供操作依据;为自动化装置准确、及时地提供信号;为运行的经济性计算提供数据。因此,对生产过程参数实时、可靠的检测,是保证热力设备安全、经济运行及实现自动化的必要条件,也是经济管理、环境保护、研究新型热力生产系统和设备的重要手段。

检测是意义更为广泛的测量。检测技术现已逐步成为一门完整的、独立的学科。这门科学研究的主要是测量原理、测量方法、测量工具和测量数据的处理。根据测量对象的差异,检测技术可分为若干分支,例如热工测量、电学测量、力学测量、光学测量等。检测技术的各个分支既有研究的共同点,如测量系统分析、测量误差的分析与处理理论;又有各自不同的特点,如各种不同物理参数的测量原理、测量方法和测量工具。

随着生产的发展,新的检测任务不断提出,而科学技术的发展,特别是新材料、新技术的出现,以及微处理机的广泛应用,加快了检测仪表的发展,在提高检测系统的测量精度、扩大测量范围、延长使用寿命、提高可靠性的同时,使检测技术向智能化的方向发展。具体来说,检测技术及仪表的发展趋势主要表现在以下几个方面。

- (1) 传感器逐渐向集成化、数字化、智能化、网络化、组合化方向发展;
- (2) 不断拓展测量领域和范围,努力提高检测精度和可靠性;
- (3) 软测量技术、数据融合处理方法等新技术得到迅速发展和广泛应用;

- (4) 非接触式检测技术得到重视和发展;
- (5) 检测系统智能化。

1.2 测量方法

测量方法是实现被测量与其测量单位相比较所采用的方法。它不同于测量原理。测量原理是指仪表工作所基于的物理效应和化学效应。

根据检测仪表与被测对象的特点,测量方法主要有以下几种分类方法。

1.2.1 按测量结果产生的方式来分类

(1) 直接测量:指应用测量仪表直接读取被测量的方法。如用压力表测量容器中气体的压力等。

(2) 间接测量:指通过测量与被测量有函数关系的其他量而得到被测量值的一种方法。例如为了测量某电阻值的大小,通过测量流过该电阻的电流和在该电阻上的电压降,通过计算便可求出其电阻值。

(3) 组合测量:指为了同时确定多个未知量,将各个未知量组合成不同的函数形式,用直接或间接的测量方法获得一组数据,通过求解方程组来求得被测量的方法。例如测量某电阻的电阻温度系数,其电阻与温度的关系为 $R_t = R_0(1 + at + bt^2)$, 式中 R_t 、 R_0 分别为温度 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时的电阻值,可以直接测得。要取得系数 a 和 b , 需要解一个二元一次方程组。

1.2.2 按被测量与单位的比较方式来分类

(1) 偏差法:在测量过程中,利用仪表指针相对于刻度线的位移来直接指示被测量大小的测量方法。例如使用单管压力计测量压力,管中水银柱偏离初始零刻度点的偏移量就显示了被测压力值。

(2) 零差法:在测量过程中,用指零机构的零位指示检测测量系统的平衡状态;通过比较被测量与已知标准量的差值或相位,调节已知标准量的大小,使两者达到完全平衡或全部抵消,从而得出测量值大小的方法。例如天平、平衡电桥和电位差计均采用此种方法。

(3) 微差法:通过将被测量与已知标准量进行比较,取得差值,再用偏差法测得此差值,测量结果是已知标准量和偏差法测得值的代数和。由于测量过程中无需调整标准量,因此,对被测量的反应较快。微差式仪表特别适用于在线控制参数的检测。

1.2.3 按被测量在测量中的状态来分类

(1) 静态测量:测量过程中,被测量不随时间变化。例如理想恒温水槽中水的温度的测量,风洞流场稳定状态下气流速度的测量等。

(2) 动态测量:被测量随时间变化的测量。例如发电机组启停过程中各参数的测量、爆炸时气体参数的测量。

需要说明的是,绝对不随时间变化的量是不存在的。实际测量中,只是将那些随时间变化较慢的量近似看成是静态的量,对这种量的测量可认为是静态测量。

1.2.4 按测量仪表与对象的关系来分类

(1) 接触测量:指仪表检测元件与被测对象直接接触,直接承受被测参数的作用或变化,从而获得测量信号,并检测其信号大小的方法。

(2) 非接触测量:指仪表不直接接触被测对象,而是间接承受被测参数的作用或变化,

从而达到检测目的的方法。其特点是不受被测对象影响，使用寿命长，适用于某些接触式检测仪表难以胜任的场合，但一般情况下，测量准确度较接触式仪表低。

1.2.5 按测量条件的不同来分类

(1) 等精度测量：对某一固定被测量进行重复测量，所取得的测量数据可以认为是在相同的测量精度条件下得到的。

(2) 非等精度测量：对某一被测量进行测量得到的数据，其精度可判定是不等的。造成精度不等的原因，可能是由于条件的改变、所用测量设备不同或更换，也可能是因为数据来源的不同。

在选择测量方法时，要综合考虑下列因素：①被测量本身的特性；②所要求的测量准确度；③测量环境；④现有测量设备等。对某一变量的测量来说，测量方法若选择不当，即使有精密的测量仪表和设备，也往往不能得到满意的结果。

1.3 测 量 系 统

1.3.1 测量系统的组成

在测量技术中，为了测量某一被测量的值，总要使用若干个测量设备，并按照一定的方式连接组合起来。这种连接组合即构成了一种测量系统。例如，在火电厂中测量锅炉给水流量时，常用标准孔板获得与流量有关的差压信号，然后将差压信号通过压力信号管路送入差压变送器，经过转换与运算变成电信号，再通过连接导线将电信号传送给显示仪表，最后显示出被测流量值。不同测量系统的复杂程度会有很大差异。简单的系统只包含一块仪表，例如用水银温度计测量温度，而复杂的系统要由若干个测量设备和测量仪表组成。

测量系统规模的大小及其复杂程度与被测量的多少、被测量的性质以及具体的被测对象密切相关。图 1-1 给出了一个涵盖各功能模块的测量系统的构成框图。它包含将被测量转换成电量或电路元件参数的检测部分；进行阻抗匹配、信号变换和放大等处理的变换部分；对变换得到的数字信号进行去伪存真和特征提取的分析处理部分；表达测量结果和对结果进行存储的显示记录部分；以及将信号传送到控制器、其他测量系统或上位机系统的通信接口部分。

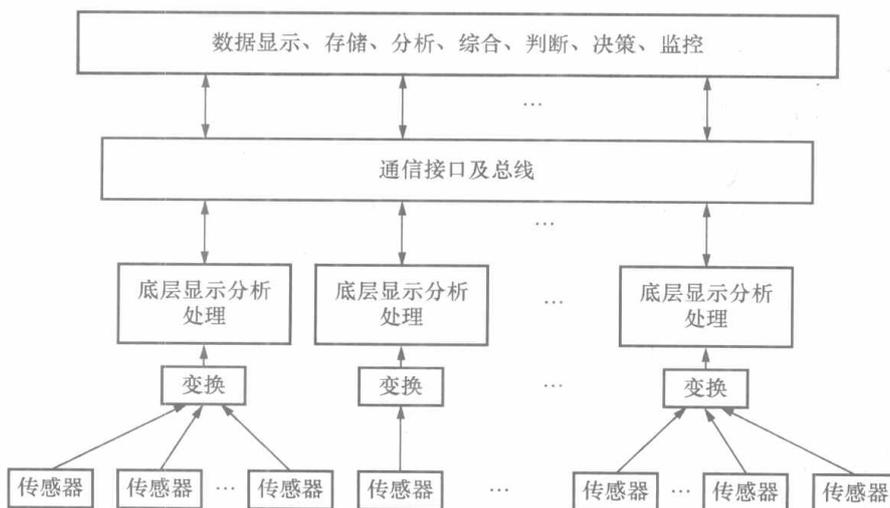


图 1-1 测量系统的一般构成

一个完整的检测过程，一般应包括：

(1) 信息的提取——用传感器来完成。信号是信息的载体。一般将被测信息转换成电信号，也就是说，把被测信息转换成电压、电流或电路参数（电阻、电感、电容）等电信号输出。

(2) 信号的放大、转换与传输——用中间转换装置来完成。一般是把信号放大并转换成传输方便、功率足够的电量（如电流、电压或频率）。信号的传输也包括通过网络的传输。

(3) 信号的显示和记录——用显示器、指示器或记录仪完成。

(4) 信号的处理和分析——用计算机、数据分析仪、频谱分析仪等来完成。找出被测信息的规律，为研究和鉴定工作提供有效依据，为控制提供信号。

1.3.2 测量系统各部分的作用

1.3.2.1 检测部分

检测 (Detection) 部分是测量系统中形式最多样、与被测对象关联最密切的部分。担当检测功能的器件统称为传感器 (Sensor)。

传感器也称为敏感元件、一次元件，是与被测对象直接发生联系的环节。它接收来自被测介质的能量，感受其变化并变换成相应的便于测量的其他量，作为输出信号。传感器性能的优劣将直接影响整个测量系统的质量，它是仪表的关键环节。

对传感器有以下几点要求。

(1) 传感器的输出信号与被测参数在数值上应呈单值关系，最好是线性关系；

(2) 传感器的输出信号应该只响应被测参数的变化，其他一切可能的输入信号（包括噪声信号）不能影响输出信号；

(3) 传感器对被测对象状态的影响应尽量小。

传感器负责把被测量作为信号提取出来并传输到信号变换部分。许多情况下，检测和变换并没有明确的界限，因为传感器实质上完成的也是一种变换，即将被测量或被测对象的特征参数转化为有用信号的变换。

传感器的合理选择建立在使用者对被测对象和各种传感器特性充分了解的基础上。选择时要充分考虑测量精度要求、被测量变化范围、被测对象所处的环境条件以及对传感器体积和整个检测系统的成本等的限制。

1.3.2.2 信号变换部分

信号变换 (Signal Conversion) 是使检测的信号变换成适合于分析处理的信号。进行变换时，重要的是考虑原始信号中哪些信息是希望了解的，以及如何不丢失和不歪曲有用信息。

完成信号变换的电路有时又称为信号调理电路 (Signal Conditioning Circuits)。信号变换部分的任务是多种多样的，例如，传感器的输出阻抗很高时，信号变换部分进行阻抗变换；传感器的输出信号微弱时，信号变换部分进行信号的放大；信号淹没在噪声中时，信号变换部分进行抑制噪声的处理；需要进行电流传输时，信号变换部分进行电压/电流变换；需要进行数字信号的传输时，变换部分进行模拟/数字转换（简称模数转换）。还可以变换信号的性质（最常见的是把非电量信号转换成电量信号）、信号的线性化、开方等。

对于信号变换部分，不仅要求其性能稳定、精确度高，而且应使信息损失最小。

1.3.2.3 分析处理显示部分

显示部分是测量系统的输出部分。测量系统通过它的显示元件向观察者反映被测参数的

数值。

显示元件按其显示方式的不同可分为模拟式显示元件、数字式显示元件和屏幕式显示元件三种。

(1) 模拟式显示元件：以指示器与标尺的相对位置来连续指示被测参数的值。其结构简单，价格低廉，但读数容易产生视差。记录时，以曲线形式给出数据。

(2) 数字式显示元件：直接以数字形式给出被测参数的值，不存在读数时的视差。与模拟式显示元件相比，其直观性较差。记录时，可以打印输出数据。

(3) 屏幕式显示元件：既可显示模拟曲线，又能显示数值，或两者同时显示，具有形象和易于读数的优点，并有利于进行被测参数之间的比较。它是目前最先进的显示方式。

显示元件按照显示功能的不同，可分为指示式、记录式、积算式、调节式显示元件。

常规的测量只是将传感器获得的信号进行放大和变换，以进行显示或传送，而分析处理则需由人工完成。以计算机为基础的分析处理（Data Analysis and Processing）部分的加入，使得现代检测系统具有强大的问题解析能力，且使得对复杂系统的实时控制成为可能。

随着计算机技术和信号处理技术的发展，现代检测系统在科学研究和工业生产中的地位日趋重要。通过信息论、系统论、控制论、预测论、智能与模糊推理、相关理论、谱分析、随机过程、卡尔曼滤波、自适应滤波、模式识别、故障诊断、神经网络和小波变换（时域、频域联合分析）等现代理论的运用，分析处理功能使得现代检测系统能解决过去常规检测无法解决的问题，真正实现检测的自动化和智能化。

1.3.2.4 通信接口与总线（Communication Interface and Bus）部分

通信接口与总线部分的基本功能是管理两个不同系统之间的数据、状态和控制信息的传输和交换。一个大型检测系统中有许多测量分系统或测量节点，分系统向上位机传送数据信息和测量状态、上位机向下发布命令或各分系统之间交换信息都通过接口进行。

总线是从任意一个源点到任意一个终点的一组传送数字信号的公共通道，它是各种信号线的集合。接口与总线是相辅相成的两个方面，总线更多的是指一种规范、一种结构形式；而接口多指完成通信的硬件系统。

1.4 测量仪表的主要性能指标

仪表的性能指标是评价仪表性能好坏、质量优劣的主要依据，也是正确选择和使用仪表所必须具备的知识，它与仪表的设计、制造质量有关，影响测量的准确度。

仪表的性能是多方面的，主要有计量性能、操作性能以及可靠性、经济性等。仪表操作性能主要是指操作维修是否方便、能否安全可靠运行以及抗干扰与防护能力的强弱等。仪表经济性方面的指标有功耗、价格、使用寿命等。

下面对仪表的计量方面的质量指标和可靠性指标加以介绍。

1.4.1 仪表的计量性能指标

1.4.1.1 测量范围与量程

测量范围是指在正常的工作条件下，测量系统或仪表能够测量的被测量值的总范围。其最低值和最高值分别称为测量范围的下限和上限，测量范围用下限值至上限值来表示；测量范围上限与下限的代数差称为测量量程。

1.4.1.2 准确度

仪表的准确度是表示测量结果与被测真值之间的接近程度。

1. 仪表示值误差

绝对误差：仪表的测量值与真实值之间的代数差，即

$$\delta = x - \alpha \quad (1-3)$$

式中 δ ——绝对误差；

x ——被测量的测量值；

α ——被测量的真实值。

在工程中，往往很难知道被测变量的真实值。一般采用标准表的指示值作为测量的“真实值”。

若将测量值加上一个与绝对误差大小相等，而符号相反的代数值 C ，便可求得被测量的真实值，即

$$\alpha = x + C \quad (1-4)$$

式中 C ——该示值的修正值，在实际工作时通过示值加修正值的方法对示值进行修正，可提高测量结果的精确度。

相对误差：测量值的绝对误差与其真实值的比值，以百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\delta}{\alpha} \times 100\% \quad (1-5)$$

引用误差：测量值的绝对误差与测量仪表的量程之比的百分数，即

$$\gamma_A = \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中 γ_A ——引用误差；

A ——仪表的量程。

2. 仪表的基本误差

在规定的正常工作条件下（例如环境温度、湿度、振动、电源电压、频率等），仪表在全量程范围内各点示值误差中绝对值最大的误差称为仪表的基本误差。一般可用绝对误差（ δ_j ）和引用误差（ γ_y ）两种形式表示。

仪表的基本误差可通过对仪表的实际检定求得，不同的仪表其基本误差一般不同。

仪表不在规定的正常工作条件下工作时，由外界条件变动引起的额外误差，称为附加误差。例如，当仪表的工作温度超过规定的范围时，将引起温度附加误差。

3. 仪表的允许误差和精度等级

仪表的允许误差是指在正常工作条件下，为了保证仪表的质量，国家规定的各类仪表的基本误差不能超过的限值，称为允许误差。某台仪表的基本误差小于或等于该表规定的允许误差时，为合格仪表，否则为不合格仪表。

以引用误差（ γ_y ）形式表示的允许误差去掉百分号余下的数值就称为仪表的精度等级。例如仪表的允许误差 $\gamma_y = 1.5\%$ ，则仪表精度等级为 1.5 级。仪表的精度等级通常用一定的形式标在仪表的标尺上。如在等级数字 1.5 外加一个圆圈或三角形。我国工业仪表精度等级的国家标准系列为：0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4，共七个等级。

1.4.1.3 灵敏度

仪表的灵敏度是指当输入量变化很小时，其输出信号的变化值 Δy 与引起这种变化的对

应输入信号变化值 Δx 的比值, 用 S 表示, 即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-7)$$

1.4.1.4 线性度 (非线性误差)

线性度反映了仪表的输入—输出特性曲线与选用的对比直线之间的偏离程度。仪表的线性度用实测输入—输出特性曲线与理想拟合直线之间的最大偏差与量程之比的百分数来衡量。线性度又称为非线性误差。人们希望仪表的输入—输出关系最好呈线性特性。对模拟仪表, 具有线性特性则分度均匀、读数方便; 对数字仪表, 则不用另加线性化处理环节。实际仪表很难实现理想的线性特性。

选定的理想拟合直线不同, 所得的线性度也不同。如有端基线性度、零基线性度、最小二乘线性度等。

1.4.1.5 变差 (回差、滞后误差)

在外界条件不变的情况下, 仪表上、下行程输入—输出曲线之间的最大偏差对量程范围的百分比称为仪表的变差。变差又称为回差或滞后误差。

变差反映了仪表工作时所得的上升曲线与下降曲线经常出现不重合的现象。引起变差的原因很多, 例如仪表各机械元件间的间隙与摩擦、弹性元件的不完全弹性、磁性元件的磁滞现象等均会引起变差。变差是反映仪表精密度的一个指标, 合格的仪表要求变差不得大于仪表的允许误差。

1.4.1.6 重复性

同一工作条件下, 按同一方向输入信号, 并在全量程范围多次变化信号时, 对应于同一输入值, 仪表输出值的一致性称为重复性。重复性是以全量程上最大的不一致值相对于量程范围的百分数来表示的。

1.4.2 仪表的可靠性

随着现代工业生产自动化程度的日益提高, 测量仪表的任务不仅是提供精确的读数, 而且常常是自动化生产过程中的一个组成部分。测量仪表的故障会影响控制系统, 甚至会导致整个生产装置的严重事故。衡量检测仪表的可靠性还没有专门的尺度, 目前主要用三个指标来描述, 它们是保险期、有效期和狭义可靠性。

(1) 保险期: 仪表使用后能有效地完成规定任务的期限, 超过了这一期限可靠性就逐渐降低。

(2) 有效性: 仪表在规定时间内能正常工作的概率。概率的大小取决于系统故障率的高低、发现故障的快慢和故障修复时间的长短。

(3) 狭义可靠性: 由结构可靠性和性能可靠性两部分组成。前者指仪表在工作时不出故障的概率, 后者指仪表能满足原定要求的概率。

定量描述检测仪表可靠性的度量指标有可靠度、故障率、平均无故障工作时间、平均故障修复时间等。可靠度 $R(t)$ 是指仪表在规定工作时间内无故障的概率。如有 100 台同样的仪表, 工作了 1000h 后只坏了一台, 就可以说这批仪表在 1000h 后的可靠度是 99%。反之这批仪表的不可靠度 $F(t)$ 就是 1%。显然 $R(t) = 1 - F(t)$ 。故障率 λ 是指仪表工作到 t 时刻时单位时间内发生故障的概率。可靠度和故障率的关系是 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 。所谓平均无故障工作时间是指仪表在相邻两次故障间隔内有效工作时的平均时间, 用 MTBF (Mean Time

Between Failure) 来代表。对于不可修复的产品来说, 把从开始工作到发生故障前的平均工作时间用 MTTF (Mean Time to Failure) 代表。两者可统称为“平均寿命”, 它的倒数就是故障率。例如, 某种检测仪表的故障率为 2%/kh, 就是说 100 台这样的检测仪表在工作 1000h 后, 可能有 2 台仪表发生故障。或者说, 这种仪表的平均无故障工作时间是 50000h。平均故障修复时间 MTTR (Mean Time to Repair) 是指仪表出现故障到恢复工作时的平均时间。

1.5 仪表的检定

为评定仪表的计量性能 (准确度、灵敏度等), 并确定其性能是否合格所进行的全部工作称为检定, 又称校验。检定是计量工作的主要任务之一, 仪表出厂、验收时要检定, 使用过程中检定工作也要定期进行。检定工作应依照国家法定的检定技术文件进行。

按产生被测量标准量值的方法不同, 仪表的检定方法可归纳成标准物质法和示值比较法两种。

(1) 标准物质检定法。标准物质是指能提供某一种参数的标准量值的物质。例如在某种标准条件下, 纯金属的固-液相平衡点 (熔点) 温度为恒定值即可作为温度检定的标准量值。一种标准物质一般只能提供一个标准量值。用被检定仪表去测标准物质提供的标准量以确定其性能的方法就称为标准物质检定法。用这种方法检定的精确度较高, 但操作复杂, 而且只能检定一个点。它适于对精密仪器、标准器具的检定。

(2) 示值比较检定法。这种方法是用标准表对被检定仪表进行检定。被检表和标准表同时测同一被测量, 把标准表的示值当成真值 (约定真值), 比较二者的示值以确定被检仪表有关性能指标, 这就是示值比较检定法。为保证检定工作的质量, 一是要求标准表的精确度要足够高, 一般要求其允许误差应小于 $(1/4 \sim 1/10)$ 被检表的允许误差; 二是在检定时, 应严格保证标准表与被检表测量的是同一参数值。

本章小结

一、测量的基本概念

测量的过程就是比较变换的过程。测量是用实验的方法和专门的工具, 将被测量与同种性质的标准量 (即测量单位) 进行比较, 求取二者比值, 从而找到被测量数值大小的过程。它是利用各种物理和化学效应, 将物质世界的有关信息通过测量的方法赋予定性或定量结果的途径。测量包含三要素, 即测量单位、测量方法和测量工具。

二、测量方法

测量方法是实现被测量与其测量单位比较所采用的方法。根据检测仪表与被测对象的特点, 测量方法可分为直接测量、间接测量、组合测量; 偏差法、零差法、微差法; 静态测量、动态测量等。

三、测量系统

测量系统包含检测部分、分析处理部分、显示记录部分以及通信接口部分。

检测部分: 将被测量转换成电量或电路元件参数, 有时称为传感器;

分析处理部分：进行阻抗匹配、信号变换和放大等处理的变换部分，对变换得到的数字信号进行去伪存真和特征提取；

显示记录部分：表达测量结果和对结果进行存储；

通信接口部分：将信号传送到控制器、其他测量系统或上位机系统。

四、测量仪表的主要性能指标

仪表的计量性能指标包括量程、准确度、线性度、变差、灵敏度、重复性等。

仪表的准确度表示测量结果与被测真值之间的接近程度。准确度合格的仪表，其基本误差不能大于允许误差。

仪表的变差反映了仪表工作时所得的上升曲线与下降曲线不重合的程度。

在检验一台仪表时，如果该表的准确度或变差不满足规定的要求，则该表为不合格仪表。

在使用仪表时，必须明确：仪表的精度等级高，不一定代表测量结果准确度高。它们之间相互依存，但有区别。

仪表的可靠性目前主要有三个指标来描述，它们是保险期、有效期和狭义可靠性。

五、仪表的检定

为评定仪表的计量性能（准确度、灵敏度等），并确定其性能是否合格所进行的全部工作称为检定，又称校验。仪表的检定方法有标准物质法和示值比较法两种。

思考题与习题

1. 测量过程包含哪三要素？测量方法与测量原理各是什么含义？
2. 什么是真值？什么是约定真值？
3. 完整的检测系统包括哪几部分？各部分有什么作用？
4. 仪表的精度等级是如何规定的？请列出常用的一些等级。
5. 什么是检测装置的静态特性？其主要技术指标有哪些？
6. 什么是仪表的测量范围及上、下限和量程？彼此有什么关系？
7. 什么是仪表的变差？造成仪表变差的因素有哪些？合格的仪表对变差有什么要求？
8. 有人想通过减小表盘标尺刻度分格间距的方法来提高仪表的精度等级，这种做法能否达到目的？
9. 用标准压力表来校准工业压力表时，应如何选用标准压力表精度等级？可否用一台精度等级为 0.2 级、量程为 0~25MPa 的标准表来检验一台精度等级为 1.5 级、量程为 0~2.5MPa 的压力表？为什么？
10. 某弹簧管压力表的测量范围为 0~1.6MPa，精度等级为 2.5 级。校验时在某点出现的最大绝对误差为 0.05MPa，问这块仪表是否合格？为什么？
11. 现有两台压力检测仪表甲和乙，其测量范围分别为 0~100kPa 和 -80~0kPa，已知这两台仪表的最大绝对误差均为 0.9kPa，试分别确定它们的精度等级。
12. 某位移传感器，在输入位移变化 1mm 时，输出电压变化 300mV，求其灵敏度。
13. 某压力表，量程范围为 0~25MPa，精度等级为 1.0 级，表的标尺总角度为 270°，给出检定结果如表 1-1 所示。

表 1-1

检 定 结 果

被测压力 p (MPa)	0	5	10	15	20	25
示值 X (MPa)	0.1	4.95	10.2	15.1	19.9	24.9

试求：

- (1) 各示值的绝对误差；
- (2) 仪表的基本误差，该仪表是否合格？
- (3) 仪表的平均灵敏度。

14. 现有 2.5 级、2.0 级、1.5 级三块测温仪表，对应的测量范围分别为 $-100 \sim +500^\circ\text{C}$ 、 $-50 \sim +550^\circ\text{C}$ 、 $0 \sim 1000^\circ\text{C}$ ，现要测量 500°C 的温度，其测量值的相对误差不超过 2.5%，问选用哪块表合适？

15. 有一台精度等级为 2.5 级、测量范围为 $0 \sim 10\text{MPa}$ 的压力表，其刻度标尺的最小分格应为多少格？

第2章 测量误差分析与处理

人们在对自然界的各种现象进行研究时,由于实验方法和实验设备的不完善、周围环境的影响以及人们认识能力的限制等,测量和实验所得数据和被测量的真值之间不可避免地存在差异,在数值上表现为误差。随着科学技术的发展和人们认识水平的提高,虽可将误差控制得越来越小,但始终不能完全消除它。

研究误差的意义在于:

- (1) 正确认识误差的性质,分析误差产生的原因,以便减小和消除误差;
- (2) 正确认识误差和实验数据,合理计算所得结果,以便在一定条件下得到最接近于真值的数据;
- (3) 正确组成测量系统,合理选择仪器和测量方法,以便在最经济的条件下得到最理想的结果。

2.1 测量误差的概念

2.1.1 测量误差的来源

1. 测量装置的误差

用来以固定形式复现标准量值的标准量具、进行测量时使用的仪器或仪表以及仪器的附件及附属设备不可避免地都含有误差。

2. 环境误差

在测量过程中,由于各种环境因素与规定的标准状态不一致,引起测量装置和被测量本身的变化而造成的误差。例如环境温度、湿度、工作电压、电磁场干扰、振动等引起的误差。

3. 方法误差

测量方法、计算方法不完善或不合理等原因引起的误差。例如测量电位差时没有考虑连接导线上电压降的影响而产生的误差;电气测量仪表与被测对象之间阻抗匹配不当引起的误差。

4. 人员误差

由于测量者感官的分辨能力、视觉疲劳、固有习惯等而对测量实验中的现象与结果判断不准确而造成的误差。例如对模拟仪表刻度值的读取就很容易产生人员误差。

2.1.2 测量误差的分类

按照测量结果中存在的误差的特点与性质不同,测量误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差。随机误差的大小和符号在测量前是不能知道的,但随着测量次数的增多,遵循一定的统计规律。系统误差是指在同一条件下多次测量同一量值时,大小和符号保持不变,或按一定的规律变化的误差,通常这类误差可以预先设法知道。粗大误差的发生是由于测量者的粗心大意,或环境条件的突然变化而引起的。此误差值较大,明显歪曲了测量结果,故应

判断其是否存在，将此类误差剔除。

值得说明的是，虽可将误差分为三类，但各类误差在一定的条件下可以相互转换。系统误差和随机误差之间既有区别又有联系，并无绝对的界限。对某项具体误差，在一定条件下为系统误差，而在另一条件下可为随机误差，反之亦然。随着对误差性质认识的深化和测试技术的发展，可把过去作为随机误差的某些误差分离出来作为系统误差处理，或把某些系统误差当作随机误差处理。

2.1.3 测量误差的表示

由于各种因素的影响，误差存在于各种测量的测得值中，即

$$\text{误差} + \text{真值} = \text{测得值}$$

测量误差通常采用绝对误差和相对误差两种方式来表示。

常见的绝对误差可以用真误差、剩余误差、最大绝对误差、算术平均误差、标准误差、或然误差、极限误差等方法表示。

绝对误差与根据需求和方便的取值之比值称为相对误差。由于绝对误差可能为正值或负值，因此相对误差也可能为正值或负值。对应不同相比的取值，相对误差可用实际相对误差、示值相对误差、引用相对误差、最大相对误差、分贝误差等方法表示。

2.2 直接测量误差的分析与处理

2.2.1 随机误差的分析与处理

根据测量条件的不同，可把测量分为等精度测量和不等精度测量。假设粗大误差和系统误差已被排除，本节主要对等精度测量时的随机误差加以讨论。

2.2.1.1 随机误差的定义和分布特点

1. 定义

在相同的条件下对同一被测量进行多次重复测量，误差的大小和符号的变化没有一定规律，且不可预知，这类误差称为随机误差。

随机误差是由很多暂时未能掌握或不便掌握的微小因素综合作用的结果。例如：仪表内部存在有摩擦和间隙等不规则变化，测量过程中温度的微小波动、湿度与气压的微小变化以及电磁场的变化，测定时测量人员的瞄准、读数的不稳定等，造成测量结果中不可避免地存在随机误差，且随机误差或大或小，或正或负，就个体来说变化是无规律的。但在相同的条件下，只要测量次数足够多，从总体来看，随机误差是服从一定的统计规律的。

2. 分布的特点

在对大量的随机误差进行统计分析后，总结出随机误差的分布一般具有以下四个特点。

(1) 有界性。在一定的测量条件下，测量的随机误差总是在一定的、相当窄的范围内变动，绝对值很大的误差出现的概率接近于零。也就是说，随机误差的绝对值实际上不会超过一定的界限。

(2) 单峰性。绝对值小的误差出现的概率大，绝对值大的误差出现的概率小，零误差出现的概率比任何其他数值出现的概率都大。

(3) 对称性。绝对值相等的正误差与负误差出现的概率相同，其分布呈对称性。

(4) 抵偿性。在等精度测量条件下，当测量次数趋于无穷大时，全部随机误差的算术平

均值趋于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad (2-1)$$

2.2.1.2 随机误差的正态分布特征

理论和实践都证明了大多数的随机误差都服从正态分布的规律, 其分布密度函数为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (2-2)$$

如果用测量值 x 本身来表示, 则

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-3)$$

式中 δ ——随机误差;

x ——测量值;

μ ——被测量的真值;

σ ——标准误差, 也称为均方根误差。

μ 和 σ 确定之后, 正态分布就完全确定了。正态分布密度函数 $f(\delta)$ 的曲线如图 2-1 所示。从该曲线可以看出, 正态分布很好地反映了随机误差的分布规律。

1. 真值 μ

设 x_1, x_2, \dots, x_n 为 n 次测量所得的值, 则算术平均值 \bar{x} 为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-4)$$

因

$$\delta_i = x_i - \mu \quad (2-5)$$

则

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = \sum_{i=1}^n x_i - n\mu$$

由随机误差的抵偿性可知, 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0$$

故 $n \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\bar{x} = \mu \quad (2-6)$$

这说明当测量次数无限增大时, 算术平均值最接近于真值。

2. 均方根误差 σ

均方根误差的定义式为

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (2-7)$$

由于随机误差的存在, 测得值一般各不相同, 它们围绕着该测量列的真值散布。均方根误差 σ 反映了测量值在真值附近的散布程度, 具有与随机误差 δ 相同的量纲。在一定的条件下进行一系列测量时, 随机误差 δ 的分布是完全确定的, σ 值也是完全确定的。虽然任何单次测量值的误差 δ_i 可能都不等于 σ , 但可以认为这一系列测量值具有同样的均方根误差 σ , 而不同条件下进行的两列测量, 一般来说具有不同的 σ 。

不同 σ 值的正态分布密度曲线如图 2-2 所示。由图 2-2 可见, σ 越小, $f(\delta)$ 减小得越

快, 曲线越尖锐; 反之, σ 越大, $f(\delta)$ 减小得越慢, 曲线越平坦。 σ 小表明测量列中数值较小的误差占优势, 测量的可靠性大, 即测量精度高。 σ 大表明测量列中数值较大的误差占优势, 测量的可靠性小, 即测量精度低。

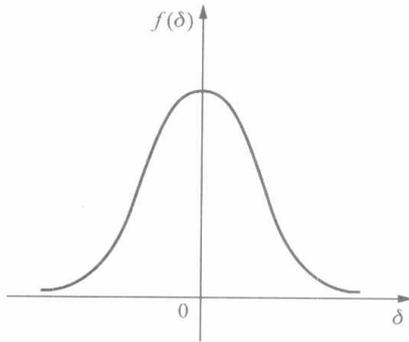


图 2-1 正态分布密度曲线

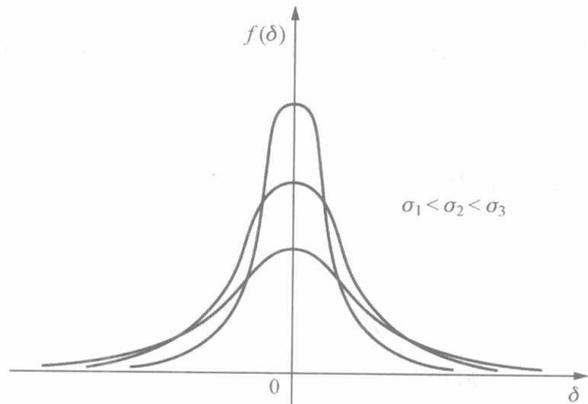


图 2-2 不同 σ 值的正态分布密度曲线

当被测量的真值未知时, 按式 (2-7) 不能求得均方根误差。这时用算术平均值代替真值, 用残余误差 v_i 代替真误差 δ_i , 得到均方根误差的估计值。可以证明, 均方根误差的估计值 $\hat{\sigma}$ 计算公式为

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (2-8)$$

式中 v_i ——剩余误差或残余误差, $v_i = x_i - \bar{x}$ 。

式 (2-8) 称为贝塞尔 (Bessel) 公式。利用此式可由残余误差求得单次测量的均方根误差的估计值。

3. 算术平均值的均方根误差

如果在相同的条件下将同一被测量分成 m 组, 对每组重复测量 n 次, 则每组测量值都有一个平均值 \bar{x} 。由于随机误差的存在, 这些算术平均值也各不相同, 而是围绕真值有一定的分散性, 即算术平均值与真值间也存在着随机误差。用 $\sigma_{\bar{x}}$ 表示算术平均值的均方根误差, 由概率论中方差运算法则可以求出

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2-9)$$

可以看出, 在有 n 次测量的等精度测量列中, 算术平均值均方根误差为单次测量均方根误差的 $1/\sqrt{n}$ 。当测量次数 n 越大时, 算术平均值越接近被测量的真值, 测量精度也越高。

在有限次测量中, 以 $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ 表示算术平均值均方根误差的估计值, 有

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (2-10)$$

2.2.1.3 随机误差的工程计算

随机误差出现的性质决定了人们不可能准确地获得单个测量值的真误差 δ_i 的值。我们所能做的只能是在一定的概率意义下估计随机误差数值的范围, 或者求得随机误差出现在给定区间的概率。

现在计算随机误差在给定区间内出现的概率。

由概率积分可知, 随机误差正态分布曲线下的全部面积相当于全部误差出现的概率, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/(2\sigma^2)} d\delta = 1 \quad (2-11)$$

对于服从正态分布的测量误差 δ , 出现于区间 $[a, b]$ 内的概率为

$$P(a \leq \delta \leq b) = \int_a^b \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/(2\sigma^2)} d\delta \quad (2-12)$$

考虑到正态分布密度函数的对称性, δ 出现于区间 $[-a, a]$ 的概率为

$$P(-a \leq \delta \leq a) = P(|\delta| \leq a) = 2 \int_0^a \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\delta^2/(2\sigma^2)} d\delta \quad (2-13)$$

由前面介绍可知, 均方根误差 σ 的大小反映了测量值在真值附近的散布程度, 即随机误差在某一区间内出现的概率与均方根误差 σ 的大小密切相关, 所以可取 σ 的若干倍来描述对称区间。

令 $a = z\sigma$, 则 $z = a/\sigma$, 代入式 (2-13), 得

$$P(|\delta| \leq a) = P(|\delta| \leq z\sigma) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-z^2/2} dz = 2\Phi(z) \quad (2-14)$$

函数 $\Phi(z)$ 称为概率积分, 不同的 z 对应不同的 $\Phi(z)$ 。

若某随机误差在 $\pm z\sigma$ 范围内出现的概率为 $2\Phi(z)$, 则随机误差超出此区间的概率为

$$\alpha = 1 - 2\Phi(z) \quad (2-15)$$

【例 2-1】 计算 z 分别等于 1、2、3 时对应的置信概率 P 。

解 如图 2-3 所示, 当 $z=1$ 时, 区间为 $[-\sigma, \sigma]$, 此时

$$P(|\delta| \leq \sigma) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^1 e^{-z^2/2} dz = 0.6828 \approx \frac{1}{3}$$

当 $z=2$ 时, 区间为 $[-2\sigma, 2\sigma]$, 此时

$$P(|\delta| \leq 2\sigma) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^2 e^{-z^2/2} dz = 0.9545 \approx \frac{1}{22}$$

当 $z=3$ 时, 区间为 $[-3\sigma, 3\sigma]$, 此时

$$P(|\delta| \leq 3\sigma) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^3 e^{-z^2/2} dz = 0.9973 \approx \frac{1}{370}$$

由上面的计算结果可以看出, 当 $z=1$, 即 $|\delta| \leq \sigma$ 时, 在 3 次测量中有 1 次的误差超出 $\pm\sigma$ 范围; 当 $z=2$, 即 $|\delta| \leq 2\sigma$ 时, 在 22 次测量中只有 1 次的误差超出 $\pm 2\sigma$ 范围; 当 $z=3$, 即 $|\delta| \leq 3\sigma$ 时, 在 370 次测量中只有 1 次的误差超出 $\pm 3\sigma$ 范围。在一般测量中, 测量次数很少超过几十次, 因此可以认为大于 $\pm 3\sigma$ 的误差是不可能出现的, 通常把这个误差称为单次测量的极限误差 δ_{lim} , 即

$$\delta_{\text{lim}} = \pm 3\sigma \quad (2-16)$$

当 $z=3$ 时, 对应的概率 $P = 99.73\%$ 。

$\Phi(z)$ 与 z 的关系见表 2-1。

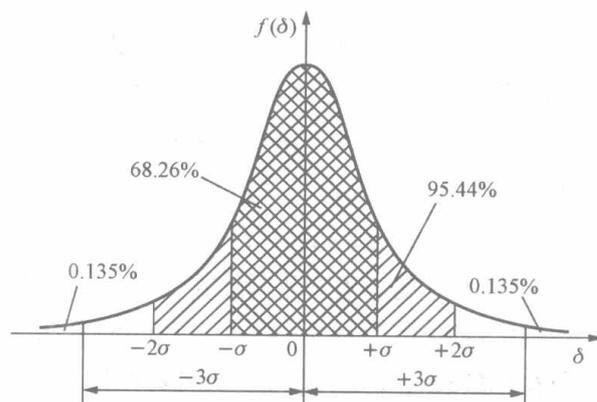


图 2-3 z 分别等于 1、2、3 时对应的置信概率 P

表 2-1

 $\Phi(z)$ 与 z 的关系

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0.00	0.0000	0.75	0.2734	1.50	0.4332	2.50	0.4938
0.05	0.0199	0.80	0.2881	1.55	0.4394	2.60	0.4953
0.10	0.0398	0.85	0.3023	1.60	0.4452	2.70	0.4965
0.15	0.0596	0.90	0.3159	1.65	0.4505	2.80	0.4974
0.20	0.0793	0.95	0.3289	1.70	0.4554	2.90	0.4981
0.25	0.0987	1.00	0.3413	1.75	0.4599	3.00	0.49865
0.30	0.1179	1.05	0.3531	1.80	0.4641	3.20	0.49931
0.35	0.1368	1.10	0.3643	1.85	0.4678	3.40	0.49966
0.40	0.1554	1.15	0.3749	1.90	0.4713	3.60	0.499841
0.45	0.1736	1.20	0.3849	1.95	0.4744	3.80	0.499928
0.50	0.1915	1.25	0.3944	2.00	0.4772	4.00	0.499968
0.55	0.2088	1.30	0.4032	2.10	0.4821	4.50	0.499997
0.60	0.2257	1.35	0.4115	2.20	0.4861	5.00	0.49999997
0.65	0.2422	1.40	0.4192	2.30	0.4893	—	—
0.70	0.2580	1.45	0.4265	2.40	0.4918	—	—

我们把区间 $(-z\sigma, z\sigma)$ 称为置信区间，对应的概率 $P = P(-z\sigma \leq \delta \leq z\sigma)$ 称为置信概率， $z\sigma$ 称为置信限， z 称为置信因子， $\alpha = 1 - P$ 称为显著性水平或置信水平。

置信区间和置信概率共同表明了测量结果的可信程度。对于同一测量结果，置信区间越宽，置信概率越大。置信概率的取值可根据试验的要求及该项测量的重要性而定。要求越高，置信概率越小。

对某一被测量进行测量，其结果可表示为在一定的置信概率下，以测量列的算术平均值或单次测量值为中心，以置信区间半长为界限的量。置信区间半长，是测量的误差限，亦即测量误差。

若以单次测量值表示测量结果 X ，有

$$X = \text{单次测量值} \pm \text{置信区间半长} \quad (P = \text{置信概率})$$

例如： $X = \text{单次测量值} \pm 3\hat{\sigma} \quad (P = 99.73\%)$

$$X = \text{单次测量值} \pm 2\hat{\sigma} \quad (P = 95.45\%)$$

若以算术平均值表示测量结果 X ，有

$$X = \text{算术平均值} \pm \text{置信区间半长} \quad (P = \text{置信概率})$$

例如： $X = \bar{x} \pm 3\hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (P = 99.73\%)$

$$X = \bar{x} \pm 2\hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (P = 95.45\%)$$

值得注意的是，在实际测量中的子样容量通常很小（例如 $n < 10$ ），甚至于测量值只有 2~3 个，并且不知道该测量条件下的测量精密度大小，如果按上述方法去推断 $\hat{\sigma}_{\bar{x}}$ 就很不准确。子样容量越小，这种情况就越严重，这是因为上述方法是以子样平均值服从正态分布为条件的，而小子样平均值偏离了正态分布，可能产生较大的误差。这时应以 t 分布的置信系数 $t_{\alpha}(v)$ 代替正态分布的置信系数 z 来增大同样置信概率下的置信区间。 t 分布的置信系数

$t_\alpha(\nu)$ 与置信水平和自由度都有关, 即考虑了子样容量的大小, 其数值如表 2-2 所示。当 n 趋于无穷大时, t 分布趋向于正态分布。

对于小子样, 其测量结果最终应表示为

$$X = \bar{x} \pm t_\alpha(\nu)\hat{\sigma}_x = \bar{x} \pm t_\alpha(\nu) \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (P = \text{置信概率})$$

【例 2-2】 对某量进行 6 次测量, 测得数据为: 802.40、802.50、802.38、802.48、802.42、802.46, 试给出测量结果的最佳表达式 (要求测量结果的置信概率为 99%)。

解 因为是小子样, 采用 t 分布置信系数来估计置信区间。

(1) 求平均值 \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = 802.44$$

(2) 求 \bar{x} 的标准误差估计值 $\hat{\sigma}_x$

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{6 \times 5} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.019$$

(3) 根据给定的置信概率 $P=99\%$, 求得置信水平 $\alpha=1-P=0.01$; 自由度 $\nu=6-1=5$, 查表 2-2, 得 $t_\alpha(\nu) = 4.03$ 。所以, 测量结果为

$$X = \bar{x} \pm t_\alpha(\nu)\hat{\sigma}_x = 802.44 \pm 0.08 \quad (P = 99\%)$$

在例 2-2 中, 若以正态分布计算测量结果, 对于给定的置信概率 $P=99\%$, 查表 2-1, 得到 $z=2.58$, 则测量结果为

$$X = \bar{x} \pm z\hat{\sigma}_x = 802.44 \pm 0.05 \quad (P = 99\%)$$

由此例题可以看出当 n 不大时, 两种方法所得结果相差是比较大的。从原理分析, 采用 t 分布来估计精度参数是比较严密的。

表 2-2 t 分布的置信系数 $t_\alpha(\nu)$ 数值表

$t_\alpha(\nu)$	$\alpha=1-P$			$t_\alpha(\nu)$	$\alpha=1-P$		
	0.0027	0.01	0.05		0.0027	0.01	0.05
$\nu=n-1$				$\nu=n-1$			
1	235.80	63.66	12.71	20	3.42	2.85	2.09
2	19.21	9.92	4.30	21	3.40	2.83	2.08
3	9.21	5.84	3.18	22	3.38	2.82	2.07
4	6.62	4.60	2.78	23	3.36	2.81	2.07
5	5.51	4.03	2.57	24	3.34	2.80	2.06
6	4.90	3.71	2.45	25	3.33	2.79	2.06
7	4.53	3.50	2.36	26	3.32	2.78	2.06
8	4.28	3.36	2.31	27	3.30	2.77	2.05
9	4.09	3.25	2.26	28	3.29	2.76	2.05
10	3.96	3.17	2.23	29	3.28	2.76	2.05
11	3.85	3.11	2.20	30	3.27	2.75	2.04
12	3.76	3.05	2.18	40	3.20	2.70	2.02

续表

$\alpha=1-P$				$\alpha=1-P$			
$t_a(v)$	0.0027	0.01	0.05	$t_a(v)$	0.0027	0.01	0.05
$v=n-1$				$v=n-1$			
13	3.69	3.01	2.16	50	3.16	2.68	2.01
14	3.64	2.98	2.14	60	3.13	2.66	2.00
15	3.59	2.95	2.13	50	3.11	2.65	1.99
16	3.54	2.92	2.12	80	3.10	2.64	1.99
17	3.51	2.90	2.11	90	3.09	2.63	1.99
18	3.48	2.88	2.10	100	3.08	2.63	1.98
19	3.45	2.86	2.09	∞	3.00	2.58	1.96

2.2.2 系统误差的分析与处理

2.2.2.1 系统误差的定义与分类

在同一条件下，多次测量同一量值时，误差的大小和符号保持不变，或者按一定的规律变化，这类误差称为系统误差。前者称为恒值系统误差，后者称为变值系统误差。在变值系统误差中，又可按误差变化规律的不同分为累进系统误差、周期性系统误差和按复杂规律变化的系统误差。累进系统误差是指误差随测量过程时间（或被测量值）的延伸而呈线性递增或递减；周期性系统误差是指误差按周期规律变化，最常见的为正弦周期性系统误差；按复杂规律变化的系统误差的变化规律比较复杂，这类误差可用实测经验曲线来表示。例如，仪表指针零点偏移将产生恒值系统误差；电子电位差计滑线电阻的磨损将导致累进性的系统误差；而测量现场电磁场的干扰，往往会引入周期性的系统误差。

2.2.2.2 系统误差产生的原因

系统误差是由固定不变的或按确定规律变化的因素所引起的，这些误差因素是可以掌握的。

(1) 测量装置方面的因素：由于测量设备、实验设备不完善，或安装、调整、使用不当而引起的误差。如标尺的刻度偏差、刻度盘和指针的安装偏心、仪器各导轨的误差、天平的臂长不等、测量仪表未经校准投入使用等。

(2) 环境方面的因素：测量时实际温度与标准温度存在偏差，在测量过程中温度、湿度等按一定规律变化。

(3) 测量方法的因素：使用的测量方法不正确，或者测量方法所赖以存在的理论本身不完善而引起的误差。如使用大惯性仪表测量脉动气流的压力，得到的测量结果不可能是气流的实际压力。

(4) 测量人员方面的因素：观测者在刻度上估计读数时，习惯偏于某一方向等。

系统误差就个体而言是有规律的，其产生的原因往往是可知的或者是能够掌握的。因此，系统误差的处理多属测量技术上的问题，可以通过实验的方法加以消除，也可以通过加修正值的方法加以修正。修正值的数值与系统误差的数值相等，但符号相反。

由于系统误差是和随机误差同时存在于测量数据之中，且不易被发现，多次重复测量又不能减小它对测量结果的影响，这种潜伏性使得系统误差比随机误差具有更大的危险性。因此发现和减小或消除系统误差，就显得十分重要。否则，对随机误差进行的严格数学处理的效果将甚微，甚至失去意义。

2.2.2.3 系统误差的发现方法

1. 实验对比法

实验对比法是改变产生系统误差的条件,进行不同条件的测量以发现系统误差。此方法适用于发现恒值系统误差。例如,在制作温度基准的水三相点(273.16K,即0.01℃)时,若不能保证水的纯度,制造出的三相点瓶所复现的温度就会产生恒值系统误差,此误差的大小会随水中所含杂质的多少而变化。为了发现恒值系统误差的存在,必须利用其他测温办法进行严格的校对。

2. 残余误差观察法

将测得值按测量的先后顺序列出,计算出全部残余误差 v_i 。若残余误差 v_i 按近似的线性规律递增或递减,且在测量开始与结束时误差符号相反,则可判断测量结果中存在累进系统误差;若残余误差符号有规律地逐渐由负变正、再由正变负,且循环交替重复变化,则可判断测量结果中存在周期性系统误差。

3. 残余误差校核法

(1) 马利科夫准则:将测得值按测量的先后顺序列出,计算出全部残余误差 v_i ,用前一半测得值的残余误差之和减去后一半测得值的残余误差之和,若差值显著不为零,则可判断测量结果中存在累进系统误差。

(2) 阿贝-赫梅特准则:将测得值按测量的先后顺序列出,计算出全部残余误差 v_i ,求出测量列的标准误差估计值 $\hat{\sigma}$,令

$$u = \left| \sum_{i=1}^{n-1} v_i v_{i+1} \right| = |v_1 v_2 + v_2 v_3 + \cdots + v_{n-1} v_n| \quad (2-17)$$

若

$$u > \sqrt{n-1} \hat{\sigma}^2 \quad (2-18)$$

则认为该测量列中含有周期性系统误差。

2.2.2.4 系统误差的一般处理原则

1. 从产生误差根源上消除误差

在测量之前,应该尽可能预见到系统误差的来源,设法消除之;或者使其影响减少到可以接受的程度。如为了防止测量过程中仪器零位的变动,测量开始和结束时都需检查零位。测量仪表经校准后再投入使用。如果误差是由外界条件引起的,应在外界条件比较稳定时进行测量,当外界条件急剧变化时应停止测量。

2. 用修正方法消除系统误差

预先将测量器具的系统误差检定或计算出来,做出误差表或误差曲线,然后取与误差数值大小相等而符号相反的值作为修正值,将实际测得值加上相应的修正值,即可得到不包含该系统误差的测量结果。

3. 选择恰当的测量方法以消除系统误差

在实际测量时,尽可能采用有效的测量方法,以消除或减弱系统误差对测量结果的影响。

(1) 采用对置法可消除恒值系统误差。这种方法的实质是交换某些测量条件,使得引起恒值系统误差的原因以相反的方向影响测量结果,从而抵消其影响。对置法也称交换法。

(2) 例如在等臂天平上称重, 若天平的两臂长有误差, 则会带来恒值系统误差。设天平的两臂长为 l_1 、 l_2 , $l_1 \neq l_2$, 如图 2-4 所示, 先将被测量 X 放于左边, 标准砝码 P 放于右边, 调平衡后, 则有

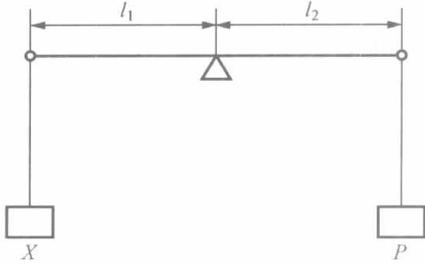


图 2-4 天平称重

$$X = \frac{l_2}{l_1} P$$

将 X 、 P 交换位置后, 由于 $l_1 \neq l_2$, P 将换为 P' 才能与 X 平衡, 即

$$P' = \frac{l_2}{l_1} X$$

取

$$X = \sqrt{PP'} \approx \frac{P + P'}{2}$$

即可消除因两臂不等而带来的系统误差。

(3) 采用对称观测法可消除累进系统误差。若在测量过程中存在某种随时间呈线性变化的系统误差, 则可以通过对称观测法来消除。具体地说, 就是将测量以某一时刻为中心对称地安排, 取各对称点两次测定值的算术平均值作为测量结果, 即可达到消除累进系统误差的目的。由于许多系统误差都随时间变化, 而且在短时间内可认为是线性变化, 如果条件允许, 均宜采用对称观测法消除系统误差。

(4) 采用半周期法, 可以很好地消除周期性系统误差。对周期性系统误差, 可以相隔半个周期进行两次测量, 取两次读数平均值, 即可有效地消除周期性系统误差。例如仪表指针的回转中心与刻度盘中心不同心所引起的周期性系统误差, 可采用半周期法予以消除。

2.2.3 粗大误差的分析与处理

2.2.3.1 粗大误差的定义及产生的原因

粗大误差是指明显歪曲了测量结果而使该次测量失效的误差, 也称为疏失误差。含有粗大误差的测量值称为坏值或异常值。

产生粗大误差的原因很多, 主要有:

(1) 主观原因: 测量者在测量时粗心大意、操作不当或过于疲劳而造成错误的读数或记录, 这是产生粗大误差的主要原因。

(2) 客观原因: 测量条件意外的改变 (如外界振动、机械冲击、电源瞬时大幅度波动等), 引起仪表示值的改变。

对粗大误差, 除了设法从测量结果中发现和鉴别而加以剔除外, 重要的是要加强测量者的工作责任心和严格的科学态度。此外, 还要保证测量条件的稳定。

2.2.3.2 判别粗大误差的准则

在判别某个测得值是否含有粗大误差时, 要特别慎重, 应作充分的分析和研究, 并根据判别准则予以确定。

1. 3σ 准则 (莱伊特准则)

对于某一测量列, 若各测得值只含有随机误差, 则根据随机误差的正态分布规律, 其残余误差落在 $\pm 3\sigma$ 以外的概率约为 0.3%, 即在 370 次测量中只有一次测得值的残余误差 $|v_i| > 3\sigma$ 。如果在测量列中, 发现有大于 3σ 的残余误差的测得值, 即

$$|v_i| > 3\sigma \quad (2-19)$$

则可以认为它含有粗大误差, 应予以剔除。

实际使用时,标准误差取其估计值 $\hat{\sigma}$,且按莱伊特准则剔除含有粗差的坏值后,应重新计算新测量列的算术平均值及标准误差,判定在余下的数据中是否还有含粗大误差的坏值。

莱伊特准则是判定粗大误差存在与否的一种最简单的方法,它是以测量次数充分大为前提的。当测得值子样容量不很大时,因为所取界限太宽,容易混入该剔除的数据,使用莱伊特准则判定粗差不太准确。特别是当测量次数 $n < 10$ 时,即使测量列中有粗大误差,使用莱伊特准则也判定不出来。

当测量次数较少时,采用格拉布斯准则判定粗大误差的存在比较合理。

2. 格拉布斯准则

设对某量作多次等精度独立测量,得到一测量列: x_1, x_2, \dots, x_n 。当 x_i 服从正态分布时,计算得到

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$v_i = x_i - \bar{x}$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2}$$

将 x_i 按大小顺序排列成顺序统计量

$$x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$$

计算首、尾测得值的格拉布斯准则数

$$g_{(1)} = \frac{\bar{x} - x_{(1)}}{\hat{\sigma}}, \quad g_{(n)} = \frac{x_{(n)} - \bar{x}}{\hat{\sigma}}$$

取定置信水平 α (一般为 0.05 或 0.01),根据子样容量 n 和置信水平 α ,从表 2-3 中查出相应的格拉布斯准则临界值 $g_0(n, \alpha)$ 。若 $g_{(i)} \geq g_0(n, \alpha)$,即判断该测得值含有粗大误差,应予以剔除。

表 2-3 格拉布斯准则临界值 $g_0(n, \alpha)$

$g_0(n, \alpha)$		α		$g_0(n, \alpha)$		α	
		0.05	0.01			0.05	0.01
n				n			
3		1.15	1.16	17		2.48	2.78
4		1.46	1.49	18		2.50	2.82
5		1.67	1.75	19		2.53	2.85
6		1.82	1.94	20		2.56	2.88
7		1.94	2.10	21		2.58	2.91
8		2.03	2.22	22		2.60	2.94
9		2.11	2.32	23		2.62	2.96
10		2.18	2.41	24		2.64	2.99
11		2.23	2.48	25		2.66	3.01
12		2.28	2.55	30		2.74	3.10
13		2.33	2.61	35		2.81	3.18
14		2.37	2.66	40		2.87	3.24
15		2.41	2.70	50		2.96	3.34
16		2.44	2.75	100		3.17	3.59

注意当 $g_{(1)}$ 和 $g_{(n)}$ 都大于 $g_0(n, \alpha)$ 时, 应先剔除 $g_{(i)}$ 大者, 再重新计算 \bar{x} 和 $\hat{\sigma}$, 这时子样容量为 $(n-1)$, 再进行判断, 直至余下的测得值中不再发现坏值。

2.3 间接测量误差的分析与处理

间接测量是通过直接测量与被测量之间有一定函数关系的其他量, 按照已知的函数关系式计算出被测量。由于各个直接测量值中有误差存在, 因此间接测量值中也必然有误差。

2.3.1 间接测量中系统误差的传递

在间接测量中, 函数关系的一般形式为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

式中 x_1, x_2, \dots, x_m ——各个直接测量值;

y ——间接测量值。

对于以上函数, 其增量可用函数的全微分表示, 则有

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} dx_m \quad (2-20)$$

若已知各个直接测量值的系统误差 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$, 由于这些误差值皆较小, 可用来近似代替微分量 dx_1, dx_2, \dots, dx_m , 从而可近似得到函数的系统误差 Δy 为

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \Delta x_m \quad (2-21)$$

式 (2-21) 为间接测量中系统误差的传递公式, $\frac{\partial f}{\partial x_i} (i = 1, 2, \dots, m)$ 为各个直接测量值的误差传递系数。

2.3.2 间接测量中随机误差的传递

随机误差是用表征其分散程度的标准差来评定的。间接测量中随机误差的传递, 是研究函数 y 的标准差与各直接测量值 x_1, x_2, \dots, x_m 的标准差之间的关系。

设函数关系的一般形式为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

函数 y 的标准差与各直接测量值 x_1, x_2, \dots, x_m 的标准差之间的关系为

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 \sigma_{x_m}^2 + 2 \sum_{i \neq j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \rho_{ij} \sigma_{x_i} \sigma_{x_j}} \quad (2-22)$$

式中 $\frac{\partial f}{\partial x_i} (i = 1, 2, \dots, m)$ ——各个直接测量值的误差传递系数;

ρ_{ij} ——相关的两直接测量值 x_i 、 x_j 之间的相关系数。

若各直接测量值是相互独立的, 相关系数 ρ_{ij} 为零, 则式 (2-22) 可以简化为

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m}\right)^2 \sigma_{x_m}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2} \\ &= \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_m^2} \end{aligned} \quad (2-23)$$

式中 D_i ——局部误差, $D_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i}$ 。

式(2-23)为随机误差传递的基本公式。

2.3.3 误差分配

任何测量过程皆包含有多项误差,测量结果的总误差由单项误差的综合影响来确定。误差分配是在给定测量结果总误差的允许误差后,通过合理进行误差分配,确定各单项误差,以保证测量精度。

由式(2-23)可知,若已给定 σ_y ,需确定 D_i ,使其满足

$$\sigma_y \geq \sqrt{D_1^2 + D_2^2 + \cdots + D_m^2} \quad (2-24)$$

显然,式中 D_i 可以是任意解,为不确定解。因此常按下列步骤求解。

(1) 按等作用原则分配误差,即令 $D_1 = D_2 = \cdots = D_m$ 。注意当有的误差已经确定而不能改变时,应先从给定的允许总误差中除掉,然后再对其余误差项进行误差分配。

(2) 根据测量的难易程度,对各局部误差进行调整,即对难以实现测量的误差项适当扩大,对容易实现测量的误差项尽可能缩小,而对其余误差项不予调整。

(3) 验算调整后的总误差。若计算的实际总误差超出给定的允许误差范围,应选择可能缩小的误差项再予缩小误差;若实际总误差较小,可适当扩大难以测量的误差项的误差。

2.3.4 微小误差取舍准则

测量过程中包含的误差,有的数值较小,计算测量结果的总误差时可不予考虑,这种误差称为微小误差。微小误差的取舍准则是被舍去的误差必须小于或等于测量结果总标准差的1/3至1/10。

按照微小误差取舍准则,在计算总误差或误差分配时,若发现有微小误差,可不考虑该误差对总误差的影响。选择高一级精度的标准器具时,其误差一般应为被检器具允许总误差的1/10~1/3。

2.4 测量不确定度

实践证明,测量误差总是客观存在的,特别是测量结果常常伴随有随机误差,造成了测量的不准确性或不确定性。但是由于被测量的真值在大多数情况下是未知的,因此也就无法确切地知道测量误差的准确值。由此引出了测量不确定度的概念。

2.4.1 测量不确定度的定义和分类

测量不确定度的正式定义为:“表征合理地赋予被测量值的分散性并与测量结果相联系的参数。”这说明,测量不确定度是指测量结果的不可信程度,是可用于定量地表达被测量测量结果分散程度的参数。这个参数可以用标准偏差表示,也可以用标准偏差的倍数或置信区间的半宽度来表示。

不确定度可以分为标准不确定度 u 、合成标准不确定度 u_c 和扩展标准不确定度 U 或 U_p 。标准不确定度按其评定方法分为A类和B类,可用 U_A 、 U_B 表示两类方法评定的不确定度。

2.4.2 标准不确定度的评定

用标准偏差表示的不确定度就称为标准不确定度,用 u 表示。测量结果通常由多个测量数据子样组成,表示各个测量数据子样不确定度的标准偏差,称为标准不确定度分量,用 u_i 表示。

2.4.2.1 标准不确定度的 A 类评定

A 类评定是用统计分析法评定, 其标准不确定度 u_A 等于由 n 次等精度测量得到的测量列的标准偏差 σ , 即 $u_A = \sigma$ 。

在同一条件下对被测变量 x 进行 n 次等精度测量, 由 n 个测得值求得单次测量标准差 σ , 则 x 的标准不确定度 u_A 的数值按下列情况分别确定: 如果用单次测得值作为测量结果的估计值, 则 $u_A = \sigma$; 如果用 n 次测量的平均值作为测量结果的估计值, 则 $u_A = \sigma/\sqrt{n}$ 。

2.4.2.2 标准不确定度的 B 类评定

B 类评定不用统计分析法, 而是基于其他方法估计概率分布或分布假设来评定标准差并得到标准不确定度。

设被测量 X 的估计值为 x , 其标准不确定度的 B 类评定是借助于影响 x 可能变化的全部信息进行科学判定的。这些信息可能是: 以前的测量数据、经验或资料; 有关仪器和装置的一般知识; 制造说明书和检定证书或其他报告所提供的数据; 由手册提供的参考数据等。

采用 B 类评定法, 需先根据实际情况分析, 对测量值进行一定的分布假设, 可假设为正态分布, 也可假设为其他分布, 常见有下列几种情况。

(1) 当测量估计值 x 受到多个独立因素影响, 且影响大小相近, 则假设为正态分布, 由所取置信概率 P 的分布区间半宽 a 与包含因子 k_p 来估计标准不确定度, 即

$$u_B = \frac{a}{k_p} \quad (2-25)$$

式 (2-25) 中包含因子 k_p 的数值由正态分布积分表查得。

(2) 当估计值取自有关资料, 所给出的测量不确定度 U_x 为标准差的 k 倍时, 则其标准不确定度为

$$u_B = \frac{U_x}{k} \quad (2-26)$$

(3) 若根据信息, 已知估计值 x 落在区间 $(x-a, x+a)$ 内的概率为 1, 且在区间内各处出现的机会相等, 则 x 服从均匀分布, 其标准不确定度为

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2-27)$$

(4) 当估计值 x 受到两个独立且皆是具有均匀分布的因素影响, 则 x 服从在区间 $(x-a, x+a)$ 内的三角分布, 其标准不确定度为

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2-28)$$

(5) 当估计值 x 服从在区间 $(x-a, x+a)$ 内的反正弦分布, 其标准不确定度为

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (2-29)$$

2.4.2.3 自由度的确定

不确定度评定的质量如何, 可用自由度来说明, 每个不确定度都对应着一个自由度。将不确定度计算表达式中总和所包含的项数减去各项之间存在的约束条件数, 所得差值称为不确定度的自由度。

1. 标准不确定度 A 类评定的自由度

A 类评定的标准不确定度的自由度 ν 为标准差 σ 的自由度。标准差的计算方法不同, 其

自由度也有所不同。用贝塞尔公式计算的标准差，其自由度 $\nu = n - 1$ 。

2. 标准不确定度 B 类评定的自由度

对 B 类评定的标准不确定度 u 的自由度由相对标准差来确定，自由度 ν 的计算式为

$$\nu = \frac{1}{2\left(\frac{\sigma_u}{u}\right)^2} \quad (2-30)$$

式中 σ_u ——评定 u 的标准差；

$\frac{\sigma_u}{u}$ ——评定 u 的相对标准差。

表 2-4 给出了标准不确定度 B 类评定时不同的相对标准差 σ_u/u 所对应的自由度 ν 。

表 2-4 相对标准差 σ_u/u 所对应的自由度 ν

σ_u/u	0.71	0.50	0.41	0.35	0.32	0.29	0.27	0.25	0.24	0.22	0.18	0.16	0.10	0.07
ν	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	50	100

2.4.3 合成标准不确定度

当测量结果受多种因素影响形成了若干个不确定度分量时，则测量结果的标准不确定度用合成标准不确定度 u_c 表示。

2.4.3.1 间接测量中的测量不确定度的合成

设被测量 Y 的估计值 y 是由 m 个直接测得值 x_1, x_2, \dots, x_m 的函数关系求得，即

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

且各直接测得值 x_i 的测量标准不确定度为 u_{x_i} ，测量结果 y 的标准不确定度 u_c 的计算公式为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (u_{x_i})^2 + 2 \sum_{i \neq j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right) \rho_{ij} u_{x_i} u_{x_j}} \quad (2-31)$$

式中 ρ_{ij} ——任意两个直接测量值 x_i 与 x_j 不确定度的相关系数。

若 x_i 、 x_j 的不确定度相互独立，则 $\rho_{ij} = 0$ ，式 (2-31) 成为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (u_{x_i})^2} \quad (2-32)$$

2.4.3.2 无确定函数关系时的测量不确定度的合成

若引起不确定度分量的各种因素与测量结果间没有确定的函数关系，则应根据具体情况按 A 类评定或 B 类评定方法来确定各不确定度分量 u_i 的值，然后再求得合成标准不确定度，即

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2 + 2 \sum_{i \neq j} \rho_{ij} u_i u_j} \quad (2-33)$$

如各个分量都是独立的，则 $\rho_{ij} = 0$ ，式 (2-33) 即为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2} \quad (2-34)$$

2.4.4 扩展标准不确定度

用合成标准不确定度表示测量结果的不确定度时，由其所表示的测量结果含被测量真值

的概率仅为 68%。在一些实际工作中,有时要求给出的测量结果区间包含被测量的大部分值,即包含被测量真值的置信概率较大,为此用扩展标准不确定度表示测量结果。

在合成标准不确定度 u_c 确定后,扩展标准不确定度由合成标准不确定度 u_c 乘以包含因子 k 得到,记为 U

$$U = ku_c \quad (2-35)$$

式中 k ——包含因子,由 t 分布的临界值 $t_\alpha(v)$ 给出。

$t_\alpha(v)$ 中的 v 是合成标准不确定度 u_c 的自由度,根据给定的置信概率 P 计算的置信水平 α 与自由度 v 查 t 分布表,得到 $t_\alpha(v)$ 的值。当各不确定度分量 u_i 相互独立时,合成标准不确定度 u_c 的自由度 v 的计算式为

$$v = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (2-36)$$

式中 v_i ——各标准不确定度分量 u_i 的自由度。

若各不确定度分量的自由度 v_i 缺少资料而无法计算 v ,则不能确定包含因子 k 的值。为求得扩展标准不确定度,一般情况下可取包含因子 $k=2\sim 3$ 。

2.4.5 测量结果与测量不确定度的表示

对测量不确定度进行分析与评定后,应给出测量不确定度的最后报告。

1. 报告的基本内容

当测量不确定度用合成标准不确定度表示时,应给出合成标准不确定度 u_c 及其自由度 v ;当测量不确定度用扩展标准不确定度表示时,除给出扩展标准不确定度 U 外,还应该说明它计算时所依据的合成标准不确定度 u_c 、自由度 v 、置信概率 P 和包含因子 k 。

在不确定度报告中应尽可能提供更详细的信息。例如,给出原始观测数据;描述被测量估计值及其不确定度评定的方法;列出所有的不确定度分量、自由度及相关系数,并说明它们的获取方法等,以提高测量结果的使用价值。

2. 测量结果的表示

在表示测量结果时,不确定度可用合成标准不确定度 u_c 表示,也可用扩展标准不确定度 U 表示。用合成标准不确定度作为被测量 Y 的估计值 y 的测量不确定度,其测量结果可表示为 $Y = y \pm u_c$;用扩展标准不确定度作为测量不确定度,测量结果可表示为 $Y = y \pm U$ 。最后报告的合成不确定度或扩展标准不确定度,其有效数字一般不超过两位,不确定度的数值与被测量的估计值末位对齐。若计算出的 u_c 或 U 的位数较多,作为最后的报告值时就要修约,依据“三分之一准则”将多余的位数舍去。修约时,先令测量估计值最末位的一个单位作为测量不确定度的基本单位,再将不确定度取至基本单位的整数位,其余位数按微小误差取舍准则,若小于基本单位的 $1/3$ 则舍去,若大于或等于基本单位的 $1/3$,舍去后将最末整数位加 1。

测量结果的具体表示方法见测量不确定度应用实例。

2.4.6 测量不确定度应用实例

【例 2-3】 现采用直接测量圆柱体的直径 D 和高度 h 的方法,来计算圆柱体的体积。由分度值为 0.01mm 的 0 级千分尺重复 6 次测量直径 D 和高度 h (D 和 h 的基本尺寸均为 10mm),测得数据如表 2-5 所示。

表 2-5

测 量 数 据

D_i/mm	10.085	10.085	10.090	10.080	10.085	10.080
h_i/mm	10.105	10.115	10.115	10.110	10.110	10.105

试给出最后测量结果。

解

1. 测得值的处理

直径 D 和高度 h 的测量平均值为: $\bar{D} = 10.084\text{mm}$, $\bar{h} = 10.110\text{mm}$, 体积 V 的测量结果的估计值为

$$V = \frac{\pi \bar{D}^2}{4} \bar{h} = 807.4\text{mm}^3$$

按贝塞尔公式计算 \bar{D} 和 \bar{h} 的标准差分别为

$$\hat{\sigma}_{\bar{D}} = 1.54\mu\text{m} \approx 1.5\mu\text{m}; \quad \hat{\sigma}_{\bar{h}} = 1.82\mu\text{m} \approx 1.8\mu\text{m}$$

2. 测量不确定度各分量的分析评定

分析测量方法可知, 对体积 V 的测量不确定度影响显著的因素主要有直径和高度的重复测量引起的不确定度, 应采用 A 类评定方法; 千分尺示值误差引起的不确定度, 应采用 B 类评定方法。

(1) 直径 D 的重复测量引起的标准不确定度分量 $u_A(\bar{D})$ 为

$$u_A(\bar{D}) = \hat{\sigma}_{\bar{D}} = 1.5\mu\text{m}$$

(2) 高度 h 的重复测量引起的标准不确定度分量 $u_A(\bar{h})$ 为

$$u_A(\bar{h}) = \hat{\sigma}_{\bar{h}} = 1.8\mu\text{m}$$

(3) 千分尺的示值误差引起的标准不确定度分量 $u_B(\bar{D})$ 和 $u_B(\bar{h})$:

查检定规程, 测 10mm 尺寸时 0 级千分尺的示值误差为 $\pm 2\mu\text{m}$, 按均匀分布, 分布区间的半宽 $a = 2\mu\text{m}$, 其标准不确定度为

$$u_B(\bar{D}) = u_B(\bar{h}) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15 \approx 1.2\mu\text{m}$$

3. 直径 D 和高度 h 的算术平均值的合成不确定度 $u_c(\bar{D})$ 和 $u_c(\bar{h})$

$$\begin{aligned} u_c(\bar{D}) &= \sqrt{u_A(\bar{D})^2 + u_B(\bar{D})^2} \\ &= \sqrt{1.5^2 + 1.2^2} = 1.9\mu\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_c(\bar{h}) &= \sqrt{u_A(\bar{h})^2 + u_B(\bar{h})^2} \\ &= \sqrt{1.8^2 + 1.2^2} = 2.16 \approx 2.2\mu\text{m} \end{aligned}$$

4. 体积 V 的合成标准不确定度 $u_c(V)$

$$u_c(V)^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial D}\right)^2 \times u_c(\bar{D})^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial h}\right)^2 \times u_c(\bar{h})^2$$

$$\frac{\partial V}{\partial D} = \frac{\pi D h}{2} = \frac{\pi \times 10 \times 10}{2} = 157.1\text{mm}^2$$

$$\frac{\partial V}{\partial h} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 10^2}{4} = 78.6\text{mm}^2$$

于是有

$$\begin{aligned}
 u_c(V) &= \sqrt{157.1^2 \times 0.0019^2 + 78.6^2 \times 0.0022^2} \\
 &= \sqrt{0.089 + 0.030} = 0.35 \text{mm}^3
 \end{aligned}$$

5. 给出最后测量结果

对一般精度的测量，可不计算自由度。计算扩展不确定度 U 取包含因子 $k=2$ ，相应的置信概率 $P=0.95$ 。

$$U_{95} = 2u_c(V) = 2 \times 0.35 = 0.7 \text{mm}^3$$

最后测量结果为

$$V = (807.4 \pm 0.7) \text{mm}^3, P = 0.95$$

本章小结

一、测量误差的概念

在测取被测变量的过程中，由于测量方法、测量仪表、测量环境以及测量者等多方面的原因，使得测量结果不可避免地出现误差。误差的大小反映了测量结果的准确程度。

从误差的特点与性质来说，误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

二、直接测量误差的分析与处理

系统误差、随机误差和粗大误差产生的原因不相同，各具有不同的特点，因而处理方法不同。如多次重复测量是不能减小系统误差对测量结果的影响的，因此发现和减小或消除系统误差，是十分重要的。而随机误差的分布服从一定的统计规律，因而可在一定的概率意义下估计随机误差的范围，或者求得随机误差出现在给定区间的概率。含粗大误差的测量结果毫无意义，应根据判别准则予以确定后再做处理。

三、间接测量误差的分析与处理

间接测量是通过直接测量与被测量之间有一定函数关系的其他量，按照已知的函数关系式计算出被测量。由于各个直接测量值中有误差存在，因此间接测量值中也必然有误差。

间接测量值中的系统误差和随机误差可利用各自的误差传递公式计算得到。

四、测量不确定度

测量不确定度是指测量结果的不可信程度，是可用于定量地表达被测参量测量结果分散程度的参数。

不确定度可以分为标准不确定度 u 、合成不确定度 u_c 和扩展不确定度 U 或 U_p 。标准不确定度有 A 类和 B 类两类评定方法。

对测量不确定度进行分析与评定后，应给出测量不确定度的最后报告。

思考题与习题

1. 请分别从误差的数值表示方法、出现的规律、使用的条件和时间性将误差进行分类。
2. 何谓系统误差？系统误差有何特点？
3. 试举例说明系统误差可分几类？如何发现系统误差？
4. 随机误差产生的原因是什么？随机误差具有哪些性质？
5. 说明置信概率、显著性水平、置信系数、置信区间的含义。

6. 为什么说一个测量结果必须要同时附有相应的置信概率的说明, 否则测量结果是无意义的?

7. 测量结果的随机误差为什么要用均方根误差 σ 表示? 写出均方根误差的计算式。

8. 为什么在对测量数据处理时应剔除异常值? 如何判断测量数据列中存在粗大误差?

9. 按误差出现的规律, 请将下列误差进行分类。

(1) 用一只电流表测量某电流, 在相同条件下每隔一定时间重复测量 n 次, 测量数值间有一定的偏差;

(2) 用万用表测量电阻时, 由于零点没有调整, 测得的阻值始终偏大;

(3) 由于仪表放置的位置问题, 使观测人员只能从一个非正常的角度对指针式仪表读数, 由此产生的读数误差;

(4) 由于仪表刻度(数值)不清楚, 使用人员读错数据造成的误差;

(5) 用热电阻测量温度, 由于导线电阻引起的测量误差;

(6) 要求垂直安装的仪表, 没有能按照规定安装造成的测量误差。

10. 写出间接测量误差的传递公式。

11. 用一台压力检测仪表对某一被测对象进行多次重复测量, 得到如下数据(单位为 kPa): 101.1, 100.8, 101.3, 101.1, 101.0, 101.5, 100.4, 101.2, 100.6, 100.6。请计算被测压力的大小(假定测量列中不含有系统误差和粗大误差)。

12. 对某量进行 10 次测量, 测得数据为 14.7、15.0、15.2、14.8、15.5、14.6、14.9、14.8、15.1、15.0, 试判断该测量列中是否存在系统误差。

13. 对某量进行 15 次测量, 测得数据为 28.53、28.52、28.50、28.52、28.53、28.53、28.50、28.49、28.49、28.51、28.53、28.52、28.49、28.40、28.50。若这些测得值已消除系统误差, 试用莱伊特准则和格拉布斯准则分别判断该测量列中是否含有粗大误差的测量值。

14. 对某容器内液体的温度作多次重复测量, 其测量数据如下(从小到大排列): 64.20, 64.21, 64.23, 64.23, 64.24, 64.25, 64.26, 64.26, 64.27, 64.27, 64.28, 64.28, 64.28, 64.28, 64.29, 64.29, 64.29, 64.30, 64.30, 64.30, 64.31, 64.31, 64.32, 64.32, 64.33, 64.34, 64.42, 64.51。求该容器的温度。

15. 对于习题 14 的测量数据, 请用不确定度来表示测量结果。

16. 已知铜电阻阻值与温度的关系为 $R_t = R_{20}[1 + \alpha_{20}(t - 20)]$, 20°C 时铜电阻阻值 $R_{20} = (6 \pm 0.018)\Omega$, $\alpha_{20} = (0.004 \pm 0.000\ 04)^\circ\text{C}^{-1}$, 求铜电阻在温度 $t = 30^\circ\text{C}$ 时的电阻值及其误差。

17. 某个热电阻温度测量系统, 已知热电阻的基本误差为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$, 温度显示仪表的基本误差为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 引线电阻、线路中的接触电阻, 以及仪表、线路工作环境温度变化、电磁场干扰等原因引起的附加误差为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。试计算该热电阻温度测量系统的误差。

第3章 接触式温度检测及仪表

3.1 温度测量的基本知识

任何物体的物理化学特性都与温度密切相关,无论科学研究、生产和生活中都离不开对温度的测量。温度在生产过程中是一个普遍且重要的物理量。在电力生产过程中,最普遍的交流形式是热量的交换,温度是最重要的被测量之一。在工业生产过程中,温度对许多产品的质量和产量都有很大影响,因此需要严格地测量和控制温度。

我们对周围环境或物体冷热的感觉,以及自然界中的热效应,都是用温度这个物理量来描述的。温度是衡量物体冷热程度的物理量。从微观上讲,物体温度的高低标志着组成物体的大量分子无规则运动的剧烈程度,即对其分子平均动能大小的一种量度。分子运动越快,平均动能越大,物体越热;运动越慢,平均动能越小,物体越冷。

温度定义本身并没有提供衡量温度高低的数值标准,因此不能直接加以测量,只能借助于冷热温度不同物体间的热交换以及物体的某些物理性质随冷热程度不同而变化的特性来加以间接测量。两个温度不同的物体,在仅能发生热交换的条件下互相接触,热量将由温度高的物体传给温度低的物体,经过一定时间后达到热平衡状态,表现出相同的温度。人们利用这一原理,用已知物质的物理性质和温度之间的关系,设计出各种接触式温度测量仪表,如利用物质热胀冷缩制成玻璃温度计;利用物质的电阻值随温度变化制成电阻温度计;利用物质的热电效应制成热电偶温度计等。除此之外,利用物体的热辐射现象还可制成非接触式温度测量仪表,如光学高温计等。

3.1.1 测温仪表的分类

测温仪表按使用范围,可分为高温计和温度计。高温计的测量温度一般在 600°C 以上,温度计的测量温度一般在 600°C 以下。按测量方式分,可分为接触式测温仪表和非接触式测温仪表。在接触式测温仪表中,按测温原理分为膨胀式温度计、压力式温度计、热电偶温度计、热电阻温度计和半导体温度计等。非接触式测温仪表主要为辐射式高温计。其详细分类如表3-1所示。各种测量仪表的优缺点见表3-2。

表3-1 测温仪表的分类

按测量方式分类	按测量原理分类		按测量方式分类	按测量原理分类	
	接触式温度计	膨胀式温度计		液体膨胀式温度计	接触式温度计
固体膨胀式温度计			半导体热敏电阻温度计		
压力式温度计		充气压力式温度计	非接触式温度计	辐射式高温计	单色辐射高温计
		充液体压力式温度计			辐射高温计
		充有机蒸汽压力式温度计			比色高温计
热电偶温度计		标准材料热电偶温度计			
		特殊材料热电偶温度计			

表 3-2 各种测温仪表的优缺点

测温仪表的种类	优 点	缺 点
玻璃液体温度计	结构简单, 测量准确, 使用方便, 价格低廉	易碎, 不能记录与远传
双金属温度计	结构简单, 机械强度大, 价格低廉	精度低, 量程和使用范围均有限
压力式温度计	结构简单, 不怕振动, 具有防爆性, 价格低廉	精度低, 远距离测量时仪表的滞后性较大
热电偶温度计	测温范围广, 精度高, 便于远距离、多点、集中测量	需进行冷端温度补偿, 在低温段测量精确度较低
热电阻温度计	测量精度高, 便于远距离、多点、集中测量	不能测量高温, 不能测点温, 热惯性较大
辐射式高温计	测温元件不破坏被测物体的温度场, 测温上限高, 不受被测物体的腐蚀和毒化, 可测运动物体的温度	测量精度不高, 环境条件会影响测量准确度, 对测量值修正后才能获得真实温度

3.1.1.1 膨胀式温度计

1. 玻璃液体温度计

基于液体的热胀冷缩特性来制造的温度计即液体膨胀式温度计, 通常液体盛放于玻璃管之中, 又称玻璃液体温度计。由于液体的热胀冷缩系数远远大于玻璃的膨胀系数, 因此通过观察液体体积的变化即可知温度的变化。

玻璃液体温度计由感温泡(也称玻璃温包)、工作液体、毛细管、刻度标尺及膨胀室(也称安全泡)等组成。图 3-1 所示为常用棒式玻璃液体温度计。当被测温度升高时, 温包里的工作液体因膨胀而沿毛细管上升, 根据刻度标尺可以读出被测介质的温度, 为防止温度过高时液体膨胀胀破温度计, 在毛细管顶部留一膨胀室。

玻璃液体温度计按用途分可分为标准水银温度计, 实验室和工业用温度计。按工作液体不同分为水银温度计、酒精温度计和甲苯温度计等。水银作为工作液体, 由于它不易氧化、不沾玻璃、易获得高纯度、熔点和沸点间隔大, 能在很大温度范围内保持液态, 特别是 200°C 以下体积膨胀系数线性度好, 因此得到广泛的应用。普通水银温度计测量范围在 $-50\sim+300^{\circ}\text{C}$ 之间。若采用石英玻璃管, 在水银上面空间充以一定压力的氮气, 其测量上限可达 600°C , 甚至更高。

使用玻璃液体温度计应注意以下问题。

(1) 读数时视线应正交于液柱, 避免视差误差。

(2) 注意温度计的插入深度。标准温度计和许多精密温度计背面一般标有“全浸”字样, 要做到液柱浸泡到顶; 工业用温度计一般要求“局浸”, 应将尾部全部插入被测介质中或者插入到标志的固定位置深度, 否则将引起测量误差。局浸式因大部分液柱露出, 受环境温度影响较大, 精度低于全浸式温度计。

(3) 由于玻璃的热后效应, 使玻璃泡体积变化, 引起温度计零点漂移, 出现示值误差, 因此要定期对温度计进行校验。

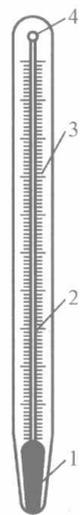


图 3-1 玻璃液体温度计

1—玻璃温包; 2—毛细管;
3—刻度标尺; 4—膨胀室

玻璃液体温度计读数直观、测量准确、结构简单、价格低廉，因此被广泛地应用于实验室和工业生产各领域。其缺点是碰撞和振动时易断裂，信号远传困难。

2. 双金属温度计

双金属温度计的感温元件是用两片线膨胀系数不同的金属片叠焊在一起制成的。双金属受热后由于膨胀系数大的主动层 B 的膨胀量大于膨胀系数小的被动层 A，造成了双金属向被动层 A 一侧弯曲，如图 3-2 所示。在规定的温度范围内，双金属片的偏转角与温度有关。双金属温度计就是利用这一原理制成的。

工业上广泛应用的双金属温度计如图 3-3 所示。其感温元件为直螺旋形双金属片，一端固定，另一端连在刻度盘指针的芯轴上。为了使双金属片的弯曲变形显著，要尽量增加双金属片长度。在制造时把双金属片制成螺旋形状，当温度发生变化时，双金属片产生角位移，带动指针指示出相应温度。

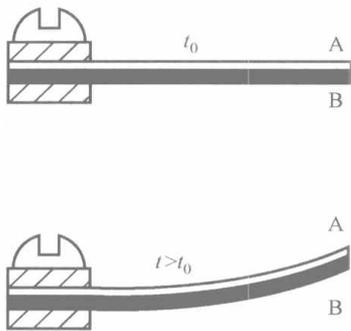


图 3-2 双金属片

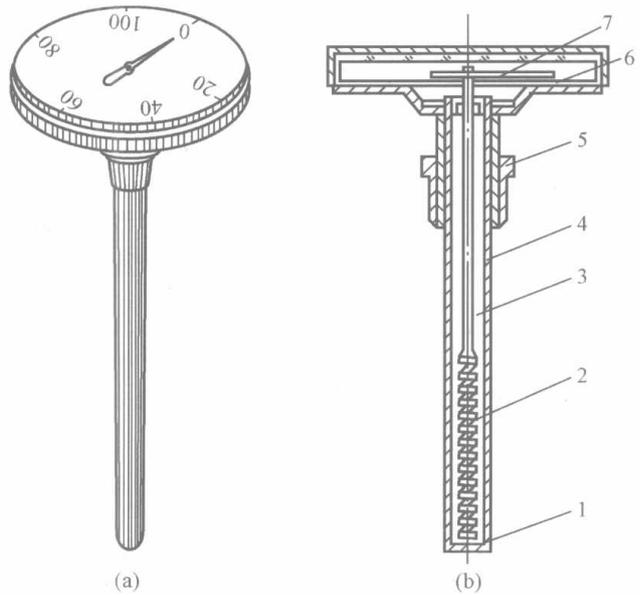


图 3-3 双金属温度计

(a) 外形；(b) 内部结构

1—固定端；2—双金属螺旋；3—芯轴；4—外套；
5—固定螺帽；6—度盘；7—指针

最简单的双金属温度开关是由一端固定的双金属条形敏感元件直接带动电接点构成的，如图 3-4 所示。温度低时电接点接触，电热丝加热；温度高时双金属片向下弯曲，电接点断开，加热停止。温度切换值可用调温旋钮调整，它可以调整弹簧片的位置，也就改变了切换温度的高低。

双金属温度计结构简单、耐振动、耐冲击、使用方便、维护容易、价格低廉，适用于振动较大场合的温度测量。目前国产双金属温度计的使用温度范围 $-80 \sim +500^{\circ}\text{C}$ ，精度为 1.0 级、1.5 级和 2.5 级，型号为 WSS。

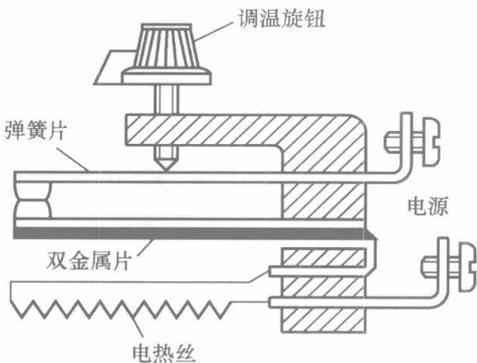


图 3-4 双金属温度开关

3.1.1.2 压力式温度计

压力式温度计的原理也是基于物质受热膨胀的原理，但它不是靠物质受热膨胀后体积变化来指示温度，而是靠在密闭容器中的压力变化来指示温度。因此这种温度计是由测温温包与压力表组成的一体化结构，只不过压力表的表盘上是温度刻度。压力式温度计如图 3-5 所示，它主要由温包、毛细管和压力弹性元件（如弹簧管、波纹管等）组成。三者内腔相通，共同构成一个封闭的空间，内装工作物质。当温包受热后，

工作物质膨胀, 由于容积是固定的, 所以压力升高, 使弹簧管变形, 自由端产生位移带动指针指示温度。根据工作物质的不同又分为气体、液体和蒸汽式压力温度计。气体式一般充氮气, 温包体积大, 线性刻度。液体式一般充二甲苯或甲醇, 温包体积小, 线性刻度。蒸汽式一般充有丙酮、氯甲烷、乙醚等, 它是利用低沸点蒸发液体的饱和蒸汽压力随温度变化的性质工作的, 但其刻度是非线性的。

3.1.2 温度标尺

温度标尺又简称为温标, 它是用数值表示温度的一整套规程。建立现代化的温标必须具备三个条件: ①固定温度点。物质是由分子组成的, 在不同温度下它会呈现固、液、气三相。利用物质的相平衡点可以作为温标的固定温度点, 也称为基准点, 它具有确定的温度值。②测温仪器。确定测温仪器的实质是确定测温质和测温质, 如铂电阻温度传感器的测温质是铂金属丝, 而测温质是电阻。③温标方程。用来确定各固定点之间任意温度值的数学关系式称为温标方程, 也称为内插公式。温标是用一些物质的“相平衡温度”作为固定点刻在“标尺”上, 而固定点中间的温度值则用内插公式来描述。

温标的发展经历了几百年的历史过程。历史上曾经建立过许多的温标。

3.1.2.1 经验温标

借助某一种物质的物理量与温度变化的关系, 用实验方法或经验公式所确定的温标, 称为经验温标, 有华氏、摄氏、兰金氏、列氏温标等。

(1) 华氏温标规定水的沸点温度为 212°F , 氯化氨和冰的混合物为 0°F , 冰的熔点为 32°F , 在沸点和冰点之间等分为 180 份, 每一份为 1 华氏度 (1°F)。

(2) 摄氏温标把冰点定为 0°C , 水的沸点定为 100°C , 将两个固定点中间等分为 100 份, 每一份为 1 摄氏度 (1°C)。

经验温标的缺点在于它的局限性和随意性。例如当被测温度在冰点和沸点之外时就无法进行标定了, 因而具有局限性。即使在冰点和沸点之内, 经验温标选择的测温物质是水银, 它的纯度不同, 其膨胀性质也不同, 具有任意性。

3.1.2.2 热力学温标

物理学家开尔文根据卡诺热机的原理提出了热力学温标, 即根据热力学第二定律来定义温度的数值, 这样就可以与任何物质的性质无关了。

根据卡诺定理, 可以得到方程式

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (3-1)$$

它表示工质在温度 T_1 时从高温热源吸收热量 Q_1 , 而在温度 T_2 时向低温热源放出热量 Q_2 。如果指定了一个定点温度 T_2 的数值, 就可以由热量的比例求得未知量 T_1 。

由于卡诺热机是不存在的, 只好从与卡诺原理等效的理想气体状态方程入手来复现热力

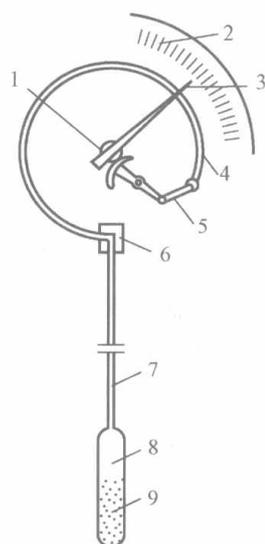


图 3-5 压力式温度计构成示意图

1—传动机构; 2—刻度盘; 3—指针; 4—弹簧管; 5—连杆; 6—接头; 7—毛细管; 8—温包; 9—工作介质

学温标。考虑到实际气体与理想气体的差异，当用气体温度计测量温度时，总要进行一些修正，因此，气体温标的建立相当繁杂，而且使用同样繁杂，很不方便。

3.1.2.3 国际温标

国际温标是用来复现热力学温标的，自 1927 年建立以来曾先后作了多次修改，以便更好地符合热力学温标。1989 年 7 月第 77 届国际计量委员会 (CIPM) 批准的国际温度咨询委员会 (CCT) 制定的新温标是 ITS-90。我国自 1994 年 1 月 1 日起全面实施 90 国际温标至今。

ITS-90 由温度单位、1990 年国际温标的通则、1990 年国际温标的定义、补充资料和早期温标的差值四部分组成。此外，还有定期公布的新的补充资料和近似技术两个文件。

1. 温度单位

在 ITS-90 中，热力学温度 (符号 T) 是基本的物理量，其单位为开尔文 (符号为 K)，水三相点的热力学温度定义为 273.16K。

考虑到早期温标的定义习惯，ITS-90 中仍保持摄氏温度符号 (符号为 t) 来表示温度，摄氏温度的单位为摄氏度 (符号为 °C)，它定义为

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15 \quad (3-2)$$

因此，水的三相点为 0.01°C。

2. ITS-90 国际温标的通则

ITS-90 国际温标的通则中规定，ITS-90 的温度范围由 0.65K 向上直到用普朗克辐射定律和单色辐射实际上可测量的最高温度。在 ITS-90 中，将整个温度范围定义成若干个温区和分温区。某些温区和分温区是重叠的，重叠区的温度定义有差异，然而这些定义是等效的。在相同温度下使用此差异的定义时，只有高精度的不同测量之间的数值差才能显示出来，在相同温度下，即使使用同一个温度定义，对于两支可以接受的内插仪器，如电阻温度计，亦可产生细微的差值。实际上这些差值可以忽略不计。

3. ITS-90 国际温标的温度定义

(1) 温度固定点。ITS-90 规定了 17 个固定点温度，其中 14 个为物质的平衡点 (6 个三相点，7 个凝固点，1 个熔点)，另外 3 个为由规定的温度计在指定的某温度附近测量确定，见表 3-3。

表 3-3 ITS-90 定义的温度固定点

序号	物质平衡状态	温度值	
		T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$
1	氮蒸气压点	3~5	-270.15~-268.15
2	平衡氢三相点	13.803 3	-259.346 7
3	平衡氢蒸气压点 (或氦气体温度计点)	≈17	≈-256.15
4	平衡氢蒸气压点 (或氦气体温度计点)	≈20.3	≈-252.85
5	氦三相点	24.556 1	-248.593 9
6	氧三相点	54.358 4	-218.791 6
7	氩三相点	83.805 8	-189.344 2
8	汞三相点	234.315 6	-38.834 4
9	水三相点	273.16	0.01

续表

序号	物质平衡状态	温度值	
		T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$
10	镓熔点 (M)	302.914 6	29.764 6
11	铟凝固点 (F)	429.748 5	156.598 5
12	锡凝固点 (F)	505.078	231.928
13	锌凝固点 (F)	692.677	419.527
14	铝凝固点 (F)	933.473	660.323
15	银凝固点 (F)	1 234.93	961.78
16	金凝固点 (F)	1 337.33	1 064.18
17	铜凝固点 (F)	1 357.77	1 084.62

(2) 内插仪器。ITS-90 国际温标分为 4 个温区，各个温区中使用的内插仪器为：

- 1) 0.65~5.0K 之间为³He 和⁴He 蒸汽压温度计；
- 2) 3.0~24.556 1K 之间为³He 和⁴He 定容气体温度计；
- 3) 13.803 3~961.78℃之间为铂电阻温度计；
- 4) 961.78℃以上为光学或光电高温计。

有关这些温度计的分度方法和相应的内插公式，在 ITS-90 文本中有详细的介绍，可以参考。

3.1.2.4 温标的传递

国际实用温标由各国计量部门按规定分别保持和传递，由定义固定点及一整套基准仪表复现国际温标，再通过基准和标准测温仪表逐级传递。一般实用工作温度计的检定装置采用各种恒温槽和管式电炉，用比较法进行检定。比较法是将标准温度计和被校温度计同时放入检定装置内，以标准温度计测定的温度为已知，将被校温度计的测量值与其相比较，从而确定被校温度计的精度。

3.2 热电偶温度计

自从 1821 年赛贝克发现热电效应以来，随着测温技术的发展，热电偶已成为应用最广泛的测温元件之一。

3.2.1 热电偶的测温原理及基本定律

热电偶温度传感器将被测温度转化为毫伏 (mV) 级热电势信号输出。它通过连接导线与显示仪表 (如电测仪表) 相连接组成测温系统，实现远距离温度自动测量、显示或记录、报警及温度控制等，如图 3-6 所示。热电偶温度传感器本身虽然不能直接指示出温度值，但习惯上被称为热电偶温度计。

热电偶温度传感器的敏感元件是热电偶。热电偶由两根不同的导体或半导体一端焊接或绞接而成，如

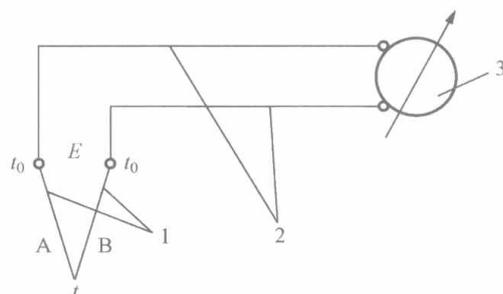


图 3-6 热电偶测温示意图

1—热电偶；2—连接导线；3—显示仪表

图 3-6 中 A、B 所示。组成热电偶的两根导体或半导体称为热电极；焊接的一端称为热电偶的热端，又称测量端、工作端；与导线连接的一端称为热电偶的冷端，又称参考端、自由端。

热电偶的热端一般要插入需要测温的生产设备中，冷端置于生产设备外，如果两端所处温度不同，则测温回路中会产生热电势 E 。在冷端温度 t_0 保持不变的情况下，用显示仪表测得 E 的数值后，便可知道被测温度的大小。

热电偶温度计一般用于测量 500°C 以上的高温，长期使用其测温上限可达 1300°C ，短期使用时可达 1600°C ，特殊材料制成的热电偶可测量的温度范围为 $2000\sim 3000^{\circ}\text{C}$ 。

由于热电偶的性能稳定、结构简单、使用方便、测温范围广，且有较高的准确度，信号可以远传，因此在工业生产和科学实验中应用十分广泛。

3.2.1.1 热电偶测温原理

把两种不同的导体或半导体两端相接组成如图 3-7 所示的闭合回路，当两接点分别置于 t 和 t_0 （设 $t > t_0$ ）两种不同温度时，则在回路中就会有电动势存在，称为热电势，常用符号 $E_{AB}(t, t_0)$ 表示。形成的回路电流称为热电流。这种现象称为塞贝克效应，即热电效应。热电偶就是基于热电效应而工作的。

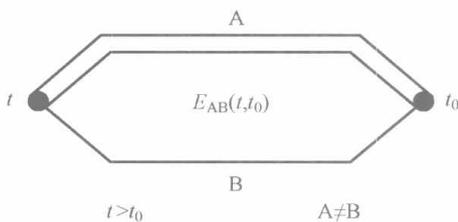


图 3-7 热电偶回路

理论和实验已经证明热电偶回路产生的热电势由接触电势和温差电势两部分组成，下面以导体为例说明热电势的产生机理。

1. 接触电势

不同的导体由于材料不同，电子密度不同，设 $N_A > N_B$ 。当两种导体相接触时，从 A 扩散到 B 的电子数比从 B 扩散到 A 的电子数多，在 A、B 接触面上形成从 A 到 B 方向的静电场 E_s ，如图 3-8 所示。这个电场又阻碍扩散运动，最后达到动态平衡，此时接点处形成电位差，这个电位差称为接触电势。接触电势的大小与接点处温度高低及导体电子密度有关。温度越高，接触电势越大；两种导体电子密度的比值越大，接触电势也越大。如导体 A 和 B 相接触，接点温度为 t ，则接点处的接触电势为 $\phi_{AB}(t)$ ，函数 ϕ_{AB} 的形式只与 A 和 B 的性质有关。

2. 温差电势

同一根导体两端处于不同温度，导体中会产生温差电势。如图 3-9 所示，导体 A 两端温度分别为 t 和 t_0 。温度不同，从高温端移动到低温端电子数比低温端移动到高温端的多，于是在高、低温端之间形成静电场。与接触电势的形成同理，形成温差电势 $e_A(t, t_0)$ ，其大小可表示为

$$e_A(t, t_0) = \psi_A(t) - \psi_A(t_0) \tag{3-3}$$

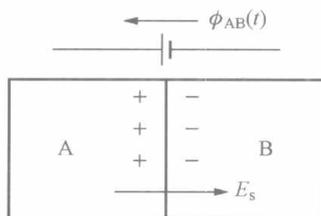


图 3-8 接触电势

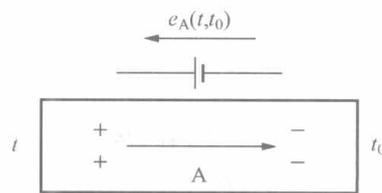


图 3-9 温差电势

式(3-3)中,函数 ψ_A 的形式只与导体A的性质有关。 $e_A(t, t_0)$ 只与导体材料的电子密度和导体两端温度及其分布有关,而与导体长度、截面大小、沿导体长度上的温度分布无关。

3. 热电偶回路总电势

热电偶回路接触和温差电势分布如图3-10所示,则热电偶回路总电势为

$$\begin{aligned} E_{AB}(t, t_0) &= \phi_{AB}(t) + e_B(t, t_0) - \phi_{AB}(t_0) - e_A(t, t_0) \\ &= \phi_{AB}(t) + \psi_B(t) - \psi_B(t_0) - \phi_{AB}(t_0) - \psi_A(t) + \psi_A(t_0) \\ &= [\phi_{AB}(t) + \psi_B(t) - \psi_A(t)] - [\phi_{AB}(t_0) + \psi_B(t_0) - \psi_A(t_0)] \\ &= f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0) \end{aligned} \quad (3-4)$$

式(3-4)说明:

(1) 热电偶回路的总电势与相应热电极材料的性质及两接点温度 t 和 t_0 有关。在热电极材料一定时, $E_{AB}(t, t_0)$ 是两端点温度的函数差。注意不是温度差的函数,且热电势与温度的关系不呈线性关系。其大小取决于热电偶两个热电极材料的性质和两端接点温度,而与热电极几何尺寸无关。

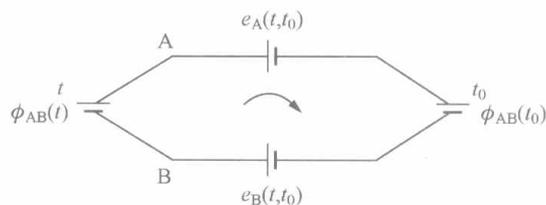


图3-10 热电偶回路电势分布

(2) 若将冷端温度 t_0 保持恒定,则对一定材料的热电偶,其总热电势就只是热端温度 t 的单值函数,即 $E_{AB}(t, t_0) = f_{AB}(t) - C$ 。只要测出热电势的大小,就能得到热端温度(被测温度)的数值。这就是热电偶的测温原理。

热电偶的热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 与温度 t 的数量关系称为热电特性,可用数据表或曲线表示,称为热电偶分度表或分度特性曲线。不同材料制成的热电偶在相同温度下产生的热电势是不同的。迄今为止,热电特性还不能由理论计算确定,通常都是在规定热电偶冷端温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 条件下,通过实验实测求出。常用热电偶的分度表参见书后附录I。

3.2.1.2 热电偶的基本定律

热电偶的基本定律是正确使用热电偶测温时的理论依据。

1. 均质导体定律

由一种均质材料组成的闭合回路,不论材料上温度如何分布以及材料的粗细长短如何,回路中均不产生热电势。反之,如果回路中有热电势存在,则材料必为非均质的。

可见,热电偶必须由两种不同的材料构成。

这条规律还要求组成热电偶的两种材料A和B必然各自都是均质的,否则会由于沿热电偶长度方向存在温度梯度而产生附加电势,从而因热电偶材料不均匀引入误差。因此在进行精度测量时要尽量对热电极材料进行均质性检查和退火处理。

2. 中间导体定律

不同导体组成的热电偶回路,当接点温度相同时,回路总热电势为零。如图3-11所示,三种均质导体A、B和C组成闭合回路,接点温度均为 t_0 ,根据中间导体定律有

$$E_{ABC}(t_0) = f_{AB}(t_0) + f_{BC}(t_0) + f_{CA}(t_0) = 0 \quad (3-5)$$

由此定律可得到如下结论。

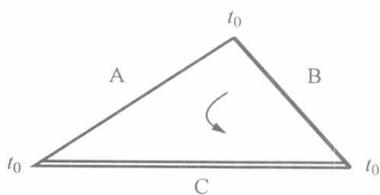


图3-11 中间导体定律示意图

(1) 在热电偶回路中接入第三种均质导体，只要中间接入的导体两端具有相同的温度，就不会影响热电偶回路的热电势。

在热电偶测温应用中，中间导体的接入不外乎图 3-12 (b)、(c) 两种方式所示，基本原理如图 3-12 (a) 所示。对图 3-12 (a) 进行证明。

证明：图 3-12 (a) 所示回路的总电势为

$$E_{ABC}(t, t_0) = f_{AB}(t) + f_{BC}(t_0) + f_{CA}(t_0) \tag{3-6}$$

由式 (3-5) 和式 (3-6) 可得出

$$E_{ABC}(t, t_0) = f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0) \tag{3-7}$$

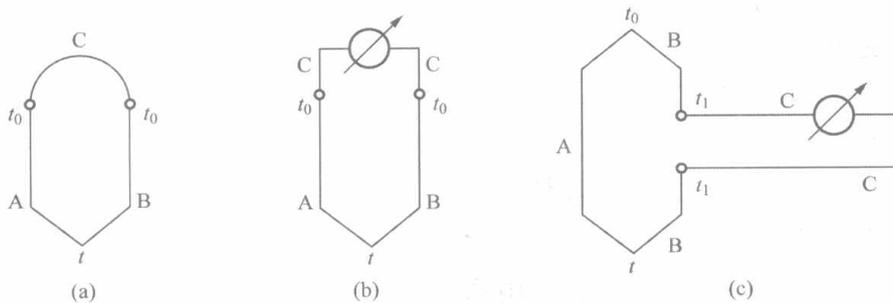


图 3-12 接入中间导体的热电偶测温回路
(a) 基本原理；(b) 冷端接入；(c) 中间接入

图 3-12 (b)、(c) 形式同理可得到证明。

在热电偶实际测温应用中，常采用热端焊接、冷端开路的形式，冷端经连接导线与显示仪表连接构成测温系统，如图 3-12 (b) 所示方案。中间导体定律表明热电偶回路中接入测量热电势的仪表，只要仪表处于稳定的环境温度，原热电偶回路的热电势将不受接入测量仪表的影响。同时该定律还表明热电偶的接点不仅可以焊接而成，也可以借用均质等温的导体加以连接。

(2) 如果两种导体 A、B 对另一种参考导体 C 的热电势为已知，则这两种导体组成热电偶的热电势是它们对参考导体热电势的代数和。

证明：对图 3-13，有

$$E_{AC}(t, t_0) = f_{AC}(t) - f_{AC}(t_0) \tag{3-8}$$

$$E_{CB}(t, t_0) = f_{CB}(t) - f_{CB}(t_0) \tag{3-9}$$

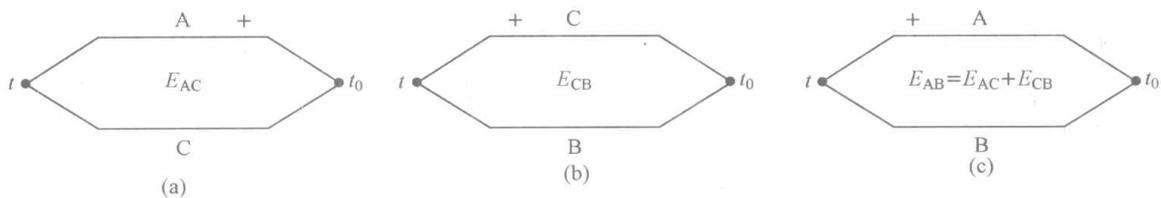


图 3-13 不同材料构成的热电偶热电势之间的关系

(a) 导体 A、C 组成的热电偶；(b) 导体 C、B 组成的热电偶；(c) 导体 A、B 组成的热电偶

由式 (3-8) 和式 (3-9) 得到

$$E_{AC}(t, t_0) + E_{CB}(t, t_0) = f_{AC}(t) - f_{AC}(t_0) + f_{CB}(t) - f_{CB}(t_0) \tag{3-10}$$

根据中间导体定律

$$f_{AB}(t_0) + f_{BC}(t_0) + f_{CA}(t_0) = 0 \quad (3-11)$$

$$f_{AB}(t) + f_{BC}(t) + f_{CA}(t) = 0 \quad (3-12)$$

得到

$$f_{AB}(t_0) = f_{AC}(t_0) + f_{CB}(t_0) \quad (3-13)$$

$$f_{AB}(t) = f_{AC}(t) + f_{CB}(t) \quad (3-14)$$

将式(3-13)和式(3-14)代入式(3-10),可得

$$E_{AC}(t, t_0) + E_{CB}(t, t_0) = f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0) \quad (3-15)$$

参考电极又称为标准电极。因为铂的物理、化学性能稳定,熔点高,易提纯,复制性好,所以标准电极常用纯铂丝制作。这个结论大大简化了热电偶的选配工作。只要取得一些热电极与标准铂电极配对的热电势,其中任何两种热电极配对的热电势就可通过计算求得。

3. 中间温度定律

接点温度为 t_1 、 t_3 的热电偶产生的热电势等于接点温度分别为 t_1 、 t_2 和 t_2 、 t_3 的两支同性性质热电偶产生的热电势的代数和, t_2 称为中间温度。如图3-14所示,即有

$$E_{AB}(t_1, t_3) = E_{AB}(t_1, t_2) + E_{AB}(t_2, t_3) \quad (3-16)$$

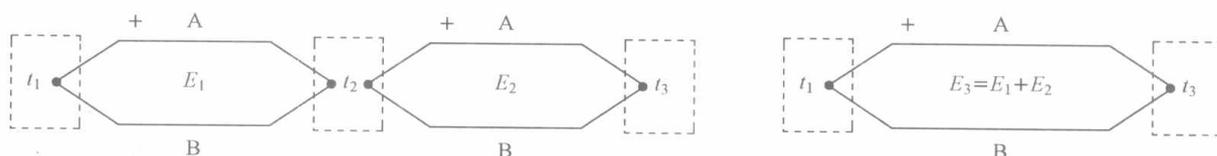


图3-14 中间温度定律示意图

证明:

$$\begin{aligned} E_{AB}(t_1, t_2) + E_{AB}(t_2, t_3) &= f_{AB}(t_1) - f_{AB}(t_2) + f_{AB}(t_2) - f_{AB}(t_3) \\ &= f_{AB}(t_1) - f_{AB}(t_3) \\ &= E_{AB}(t_1, t_3) \end{aligned}$$

热电偶分度表是冷端温度 $t_0=0^\circ\text{C}$ 时热电势与热端温度的关系,冷端温度 $t_0\neq 0^\circ\text{C}$ 时不能直接使用分度表。利用中间温度定律则可视实际冷端温度 t_0 为中间温度,满足

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0) \quad (3-17)$$

式中 $E_{AB}(t, t_0)$ ——热电偶回路产生的热电势;

$E_{AB}(t, 0)$ ——热电偶热端温度对应的热电势;

$E_{AB}(t_0, 0)$ ——热电偶冷端温度对应的热电势。

式(3-17)说明,当冷端温度 t_0 在任何数值时,经过适当修正均可采用热电偶的分度表求出热电势与温度间的数值关系。

3.2.2 热电偶的构造及标准化热电偶

3.2.2.1 热电偶的构造

工业热电偶有普通型热电偶和铠装热电偶两种。为保证热电偶的正常工作,热电偶的两电极之间以及与保护套之间都需要良好的电绝缘,而且耐高温、耐腐蚀和冲击的外保护套管也是必不可少的。常用的热电偶是由热电极(热偶丝)、绝缘材料(绝缘管)和保护套管等部分构成的。

1. 普通型热电偶

图 3-15 所示为普通型热电偶的结构,它一般由热电极、绝缘套管、保护套管和接线盒组成。贵金属热电极直径不大于 0.5mm,廉金属热电极直径一般为 0.5~3.2mm;绝缘套管一般为单孔或双孔瓷管;外保护套管要求气密性好,有足够的机械强度,还要求导热性好和稳定的物理化学特性,最常用的材料为铜及铜合金、钢和不锈钢以及陶瓷材料。整支热电偶的长度由安装条件和插入深度决定,一般为 350~2000mm。

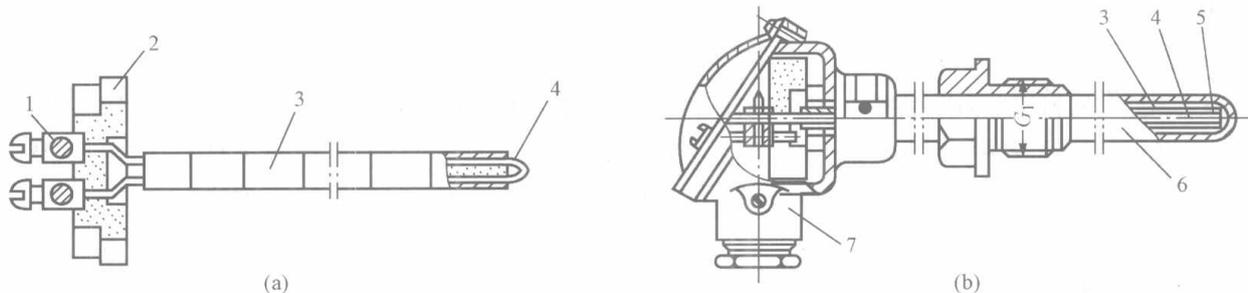


图 3-15 普通型热电偶的结构

(a) 内部结构; (b) 带保护套管的热电偶

1—接线柱; 2—接线座; 3—绝缘套管; 4—热电极;

5—热电偶热端; 6—保护套管; 7—接线盒

2. 铠装热电偶

铠装热电偶的测温元件是将热电偶丝、绝缘材料(氧化镁粉等)和金属保护套管三者组合装配后,经拉伸加工而成的一种坚实的组合体。它的外径一般为 0.5~8mm,其长度可根据需要截取。铠装热电偶测量端的热容量小、响应速度快、挠性好,可以安装在狭窄或结构复杂的测量场合,而且耐压、耐振、耐冲击,因此在多种领域得到了广泛的使用。

常见的铠装热电偶测量端结构型式如图 3-16 所示。

图 3-16 (a) 碰底型:热电偶的测量端与金属套管接触并焊在一起,它适用于温度较高、环境较差的场合。

图 3-16 (b) 不碰底型:测量端单独焊接后填以绝缘材料,再将套管端部焊牢,测量端与套管绝缘。它适用于电磁干扰较大和要求热电极与套管绝缘的仪表等设备上,这种型式应用最多。

图 3-16 (c) 露头型:测量端暴露于金属套管外面,测量时热电极直接与被测介质接触,绝缘材料暴露。它只适用于测量温度不太高、干燥的介质,其动态响应最快。

图 3-16 (d) 帽型:把露头型的测量端套上一个用套管材料做成的保护套,用银焊密封起来。

3.2.2.2 标准化热电偶

热电偶的品种很多,各种分类方法也不尽相同。按照工业标准化的要求,可分为标准化热电偶和非标准化热电偶两种。

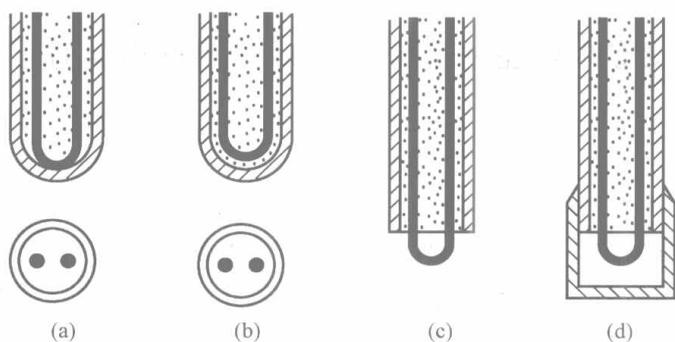


图 3-16 铠装热电偶测量端的结构形式

所谓标准化热电偶是指工艺上比较成熟，能批量生产，性能稳定，应用广泛，具有统一分度表并已列入国际和国家标准文件的热电偶。标准化热电偶可以互换，精度有一定的保证，并有配套的显示、记录仪表可供选用，应用方便。

到目前为止，国际电工委员会（IEC）共推荐了8种标准化热电偶。它们的型号和热电极用英文字母表示，第一个字母表示热电偶的类型，也称为分度号。第二个字母是P或N，分别代表热电偶的正极和负极。我国目前完全采用国际标准并制定了我国热电偶的系列型谱。在执行90国际温标（ITS-90）后，我国的热电偶分度表国家标准为GB/T 16839.1—1997，热电偶允差国家标准为GB/T 16839.2—1997。标准化热电偶的名称、分度号、测量范围、精确度等级允差如表3-4所示。几种典型标准化热电偶的分度表见附录I。

下面简要介绍各种标准化热电偶的性能和特点。

表3-4 标准化热电偶技术数据

热电偶名称 (国标号)	分度号	热电极代号	100℃电势 (冷端0℃) /mV	测温上限/℃		
				热电极直径 /mm	长期	短期
铂铑10—铂 (GB/T 3772—1998)	S	SP	0.646	0.5	1400	1600
		SN				
铂铑13—铂 (GB/T 1598—1998)	R	RP	0.647	0.5	1400	1600
		RN				
铂铑30—铂铑6 (GB/T 2902—1998)	B	BP	0.033	0.5	1600	1700
		BN				
镍铬—镍硅 (GB/T 2614—1998)	K	KP	4.096	0.3	700	800
		KN		0.5	800	900
镍铬硅—镍硅镁 (GB/T 17615—1998)	N	NP	2.774	0.8, 1.0	900	1000
				1.2, 1.6	1000	1100
				2.0, 2.5	1100	1200
				3.2	1200	1300
镍铬—铜镍 (GB/T 4993—1998)	E	EP	6.319	0.3, 0.5	350	450
				0.8, 1.0, 1.2	450	550
				1.6, 2.0	550	650
				2.5	650	750
铜—铜镍 (GB/T 2903—1998)	T	TN	4.279	3.2	750	900
				0.2, 0.3	150	200
				0.5, 0.8	200	250
				1.0, 1.2	250	300
铁—铜镍 (GB/T 4994—1998)	J	JP	5.269	1.6, 2.0	300	350
				0.3, 0.5	300	400
				0.8, 1.0, 1.2	400	500
				1.6, 2.0	500	600
		JN		2.5, 3.2	600	750

续表

热电偶名称 (国标号)	级 别					
	I 级		II 级		III 级	
	温度范围/°C	允许误差/°C	温度范围/°C	允许误差/°C	温度范围/°C	允许误差/°C
铂铑 10—铂 (GB/T 3772—1998)	0~1100	±1	0~600	±1.5	—	—
	1100~1600	± [1 + 0.003 (t - 1100)]	600~1600	±0.002 5 t	—	—
铂铑 13—铂 (GB/T 1598—1998)	0~1100	±1	0~600	±1.5	—	—
	1100~1600	± [1 + 0.003 (t - 1100)]	600~1600	±0.002 5 t	—	—
铂铑 30—铂铑 6 (GB/T 2902—1998)	—	—	600~1700	±0.002 5 t	600~800	±4
	—	—	—	—	800~1700	±0.005 t
镍铬—镍硅 (GB/T 2614—1998)	-40~+375	±1.5	-40~+333	±2.5	-167~+40	±2.5
	375~1000	±0.004 t	333~1200	±0.007 5 t	-200~-167	±0.015 t
镍铬—铜镍 (GB/T 4993—1998)	-40~+375	±1.5	-40~+333	±2.5	-167~+40	±2.5
	375~800	±0.004 t	333~900	±0.007 5 t	-200~-167	±0.015 t
铜—铜镍 (GB/T 2903—1998)	-40~+125	±0.5	-40~+133	±1	-67~+40	±1
	125~350	±0.004 t	133~350	±0.007 5 t	-200~-67	±0.015 t
铁—铜镍 (GB/T 4994—1998)	-40~+375	±1.5	-40~+333	±2.5	—	—
	375~750	±0.004 t	333~750	±0.007 5 t	—	—

1. 铂铑 10—铂热电偶 (分度号 S)

这是一种贵金属热电偶, 偶丝线径规定为 0.5mm。其正极 (SP) 的名义化学成分为铂铑合金, 其中含铑为 10%, 含铂为 90%。负极为纯铂, 故俗称单铂铑热电偶。它长期使用的最高温度可达 1300°C, 短期使用可达 1600°C。这种热电偶的复制性好, 测量准确度高, 宜在氧化性及中性气氛中长期使用, 在真空中可短期使用, 但不能在还原性气氛及含有金属或非金属蒸气中使用, 除非外面套有合适的非金属保护套管, 防止这些气氛和它直接接触。S 型热电偶的不足之处是热电势较小、灵敏度低、高温下机械强度下降、对污染敏感、金属材料昂贵, 因而一次性投资大。

2. 铂铑 13—铂热电偶 (分度号 R)

铂铑 13—铂热电偶的综合性能与 S 型热电偶相当, 在我国一直难于推广, 除在进口设备附带的测温装置上有所应用外, 国内测温很少采用。但根据国外有关研究表明, R 型热电偶在稳定性和复现性方面均好于 S 型热电偶, 而我国尚未开展这方面的研究。

3. 铂铑 30—铂铑 6 热电偶 (分度号 B)

这也是贵金属热电偶, 热电偶丝线径规定为 0.5mm。其正极 (BP) 和负极 (BN) 的名义化学成分均为铂铑合金, 只是含量不同, 故俗称双铂铑热电偶。该热电偶长期使用最高温度可达 1600°C, 短期使用可达 1800°C。B 型热电偶具有准确性高、稳定性好、测温温区宽、使用寿命长等优点, 适用于氧化性和惰性气氛中, 也可短期用于真空中, 但不适用于还原性气氛或含有金属或非金属蒸汽气氛中。它还有一个明显的优点是参比端无需进行冷端补偿, 因为在 0~50°C 范围内热电势小于 3μV。B 型热电偶不足之处是热电势率较小、灵敏度低、

高温下机械强度下降、抗污染能力差，贵金属材料昂贵，一次性投资大。

4. 镍铬—镍硅热电偶（分度号 K）

镍铬—镍硅热电偶是目前用量最大的廉金属热电偶，其用量为其他热电偶的总和。正极（KP）的名义化学成分为 Ni : Cr = 90 : 10，负极（KN）的名义化学成分为 Ni : Si = 97 : 3。其使用温度为 $-200 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。K 型热电偶具有线性度好、热电势较大、灵敏度较高、稳定性和复现性均好、抗氧化性强、价格便宜等优点，能用于氧化性和惰性气氛中。K 型热电偶不能在高温下直接用于硫、还原性或还原、氧化交替的气氛中，也不能用于真空中。

5. 镍铬硅—镍硅镁热电偶（分度号 N）

镍铬硅—镍硅镁热电偶为廉金属热电偶，它是一种最新国际标准化的热电偶。正极（NP）的名义化学成分为 Ni : Cr : Si = 84.4 : 14.2 : 1.4，负极（NN）的名义化学成分为 Ni : Si : Mg = 95.5 : 4.4 : 0.1。其使用温度范围为 $-200 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 。N 型热电偶具有线性度好、热电势较大、灵敏度较高、稳定性和复现性好、抗氧化性强、价格便宜等优点，其综合性能优于 K 型热电偶，具有很大的应用前景。它的缺点是在高温下不能直接用于硫、还原性或还原、氧化交替的气氛中，也不能用于真空中。

6. 镍铬—康铜热电偶（分度号 E）

这是廉金属热电偶，其正极（EP）为镍铬 10 合金，化学成分与 KP 相同，负极（EN）为铜镍合金，名义化学成分为 55% 的铜、45% 的镍以及少量的钴、锰、铁等元素。该热电偶使用温度为 $-200 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 。E 型热电偶电动势之大，灵敏度之高属所有标准化热电偶之最，宜制成热电堆来测量微小的温度变化。E 型热电偶可用于湿度较大的环境里，具有稳定性好、抗氧化性能高、价格便宜等优点。但不能在高温下用于硫、还原性气氛中。

7. 铁—康铜热电偶（分度号 J）

铁—康铜热电偶是一种价格低廉的热电偶。它的正极（JP）的名义化学成分为纯铁，负极（JN）是铜镍合金，常被通俗地称为康铜。其名义化学成分为 55% 的铜、45% 的镍以及少量的钴、锰、铁等元素。尽管它也叫康铜，但不能用 EN 或 TN 来代替。铁—康铜热电偶测温范围为 $-40 \sim 750^{\circ}\text{C}$ ，但常使用的温度范围为 $0 \sim 750^{\circ}\text{C}$ 。J 型热电偶线性度好，热电势大，灵敏度高，稳定性和复现性都较好，价格便宜，已得到广泛的应用。它可用于真空、氧化、还原和惰性气氛中。但正极铁在高温下氧化较快，故测温上限受到限制。

8. 铜—康铜热电偶（分度号 T）

它是一种最佳的测量低温的廉金属热电偶。它的正极（TP）是纯铜，负极（TN）是铜镍合金，俗称为康铜，它与 EN 可以通用，但与 JN 不能通用。铜—康铜热电偶测量温区为 $-200 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 。它的线性度好，热电势大，灵敏度高，稳定性和复现性好，价格便宜。特别是在低温 $-200 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 区间使用，年热电势漂移小于 $3\mu\text{V}$ 。但 J 型热电偶的正极铜在高温下抗氧化能力差，故使用上限受到限制。

8 种标准化热电偶热电势与温度之间的关系如图 3-17 所示。

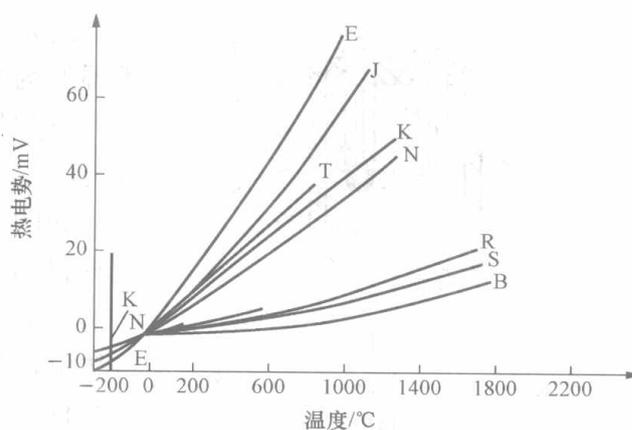


图 3-17 标准化热电偶热电势与温度之间的关系

3.2.3 热电偶的冷端处理方法

由热电偶的测温原理可知,热电偶的输出电势 $E(t, t_0)$ 不仅随热端 t 变化,同时也要受到 t_0 的影响。在实际使用时,热电偶的冷端放置在距热端很近的大气中,受高温设备和环境温度波动的影响较大,因此冷端温度不可能是恒定值,为消除冷端温度变化对测量的影响,可采用下述几种冷端温度补偿方法。

3.2.3.1 计算法

在实际应用中,热电偶的参比端往往不是 0°C ,而是环境温度 t_1 ,这时测量出的回路热电势要小,因此必须加上环境温度 t_1 与 0°C 之间温差所产生的热电势后才能符合热电偶分度表的要求。根据中间温度定律有

$$E(t, 0) = E(t, t_1) + E(t_1, 0) \quad (3-18)$$

可用室温计测出环境温度 t_1 ,从分度表中查出 $E(t_1, 0)$ 的值,然后加上热电偶回路热电势 $E(t, t_1)$,得到 $E(t, 0)$ 值,反查分度表即可得到准确的被测温度 t 值。

【例 3-1】用镍铬—镍硅 (K) 热电偶进行温度测量,热电偶冷端温度 $t_0 = 35^\circ\text{C}$ 时产生的热电势为 17.537mV ,试求热电偶所测的热端温度。

解查 K 分度表 $E_K(35, 0) = 1.407\text{mV}$,则

$$E_K(t, 0) = E_K(t, 35) + E_K(35, 0) = 17.537 + 1.407 = 18.944\text{mV}$$

反查 K 分度表,得

$$t = 460.14^\circ\text{C}$$

这里需要特别强调的是,由于热电势的非线性,因此热电势是温度函数的差,而不是温差的函数。

采用此法人工进行冷端补偿在测温现场使用很不方便,因此只适用于实验室。

现场中利用热电偶信号采集卡,并依靠软件编程实现了计算法对热电偶冷端的自动补偿。在计算机监控系统中,有专门设计的热电偶信号采集卡 (I/O 卡中的一种),一般有 8 路或 16 路信号通道,带有隔离、放大、滤波等处理电路。使用时要求把热电势信号通过补偿导线与采集卡上的输入端子连接起来,在每一块卡上都在接线端子附近安装有热敏电阻,在采集卡驱动的支持下,计算机每次都采集各路热电势信号和热敏电阻信号。根据电阻信号可得到 $E(t_0, 0)$,再按计算修正法计算出每一路的 $E(t_0, 0)$ 值,就可以得到准确的 t 值了。

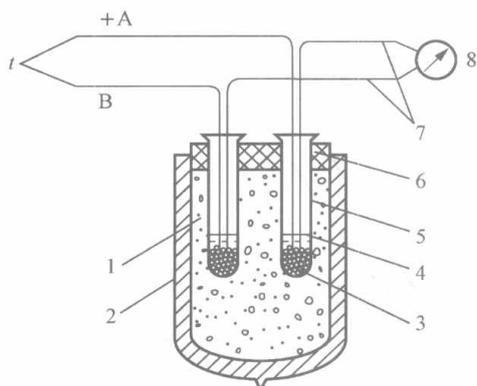


图 3-18 冰点槽

- 1—冰水混合物; 2—保温瓶; 3—变压器油;
4—蒸馏水; 5—试管; 6—盖;
7—铜导线; 8—显示仪表

3.2.3.2 冰点槽法

这是一种最为直接的方法,就是把热电偶的冷端置于温度为 0°C 的冰水混合物中,使热电偶冷端温度恒为 0°C ,这时热电偶的输出电势为 $E(t, 0)$,由此可直接从分度表中查取温度 t 值。

如图 3-18 所示,在一个保温瓶里有冰水混合物,在密封的盖子上插入试管,试管的直径应尽量小并有足够的插入深度。试管底部有少量高度相同的变压器油,将热电偶的冷端插到试管里,并保证补偿导线和铜导线接触良好。

冰点槽法是一种精度很高的参比端温度处理方法,

适用于实验室中的精密测量和检定热电偶时使用。由于半导体制冷技术和精密控温技术的发展,目前我国已研制出电子式冰点恒温装置,它使参比端保持在 0°C ,稳定性在 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 以内,并且体积小,操作简单,使用方便。

3.2.3.3 补偿导线法

一般温度显示仪表放在远离热源、环境温度 t_0 较稳定的地方(如控制室),而热电偶通常做得比较短(满足插入深度即可),其冷端(即接线盒处,温度为 t'_0)在现场。若用普通铜导线连接,冷端温度变化将给测量结果带来误差。若将热电极做得很长,使冷端延伸到温度恒定的地方,一方面对于贵金属很不经济,另一方面热电极线路不便于敷设且易受干扰,显然不可行。解决这一问题的方法是使用补偿导线。

补偿导线是由两种不同性质的廉价金属材料制成的,在一定温度范围内($0\sim 100^{\circ}\text{C}$)与所配接的热电偶具有相同的热电特性的特殊导线。用补偿导线连接热电偶和显示仪表,由于补偿导线具有与热电偶相同的热电特性,将在热电偶回路中产生 $E'(t'_0, t_0)$ 的热电势, $E'(t'_0, t_0)$ 等于热电偶在相应两端温度下产生的热电势 $E(t'_0, t_0)$ 。根据中间温度定律,热电偶与补偿导线产生的热电势之和为 $E(t, t_0)$,因此补偿导线的使用相当于将热电极延伸至显示仪表的接线端,使回路热电势仅与热端和补偿导线与仪表接线端(新冷端)温度 t_0 有关,而与热电偶接线盒处(原冷端)温度 t'_0 变化无关。

补偿导线起到了延伸热电极的作用,达到了移动热电偶冷端位置的目的。正是由于使用补偿导线,在测温回路中产生了新的热电势,实现了一定程度的冷端温度自动补偿。如果新冷端温度不能恒定在 0°C ,则不能实现冷端温度的“完全补偿”,还需要配以其他补偿方法。必须指出,补偿导线本身不能消除新冷端温度变化对回路热电势的影响,应使新冷端温度恒定。

补偿导线分为延伸型(X)补偿导线和补偿型(C)补偿导线。延伸型补偿导线的金属材料与热电极材料相同;补偿型补偿导线所选用的金属材料与热电极材料不同。常用热电偶补偿导线见表3-5。

表3-5 常用热电偶补偿导线

补偿导线型号	配用热电偶	补偿导线材料		补偿导线绝缘层着色	
		正 极	负 极	正 极	负 极
SC	S	100Cu	99.4Cu+0.6Ni	红色	绿色
KC	K	100Cu	60Cu+40Ni	红色	蓝色
KX	K	90Ni+10Cr	97Ni+3Si	红色	黑色
NC	N	100Fe	82Cu+18Ni	红色	灰色
NX	N	84Ni+14.5Cr+1.5Si	95.5Ni+4.5Si	红色	灰色
EX	E	90Ni+10Cr	55Cu+45Ni	红色	棕色
JX	J	100Fe	55Cu+45Ni	红色	紫色
TX	T	100Cu	55Cu+45Ni	红色	白色

在使用补偿导线时,要注意补偿导线型号与热电偶型号匹配、正负应与热电偶正负极对应连接、补偿导线所处温度不超过 100°C ,否则将造成测量误差。

3.2.3.4 仪表机械零点调整法

如果热电偶冷端温度比较恒定，而且与热电偶配套的显示仪表机械零点调整又方便，那么就可以采用机械零位调整法实现冷端温度处理。我们预先已测出冷端温度，就可以直接将仪表机械零点从0点处调到 t_0 处，这相当于在输入热电偶产生热电势 $E(t, t_0)$ 以前，就直接给输入电势 $E(t_0, 0)$ ，使得接入热电偶后，输入仪表的电势为 $E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0)$ 。此时，仪表指针就能指出热端温度 t 。比如当冷端温度为 30°C 时，应将机械零位调在 30°C 上。这种方法一般用于对测量准确度要求不高的场合，如果冷端温度经常变化，则此法不宜采用。

3.2.3.5 冷端温度补偿器

冷端补偿器是一个直流不平衡电桥，在它的四个桥臂中有一个是铜电阻，作为测温元件，其余三个臂由阻值恒定的锰铜电阻制成。电桥与热电偶的连接如图3-19所示。

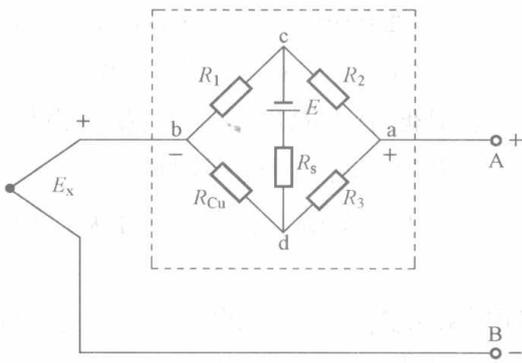


图 3-19 冷端温度补偿电桥

特别要注意的是，桥臂 R_{Cu} 必须和热电偶的冷端尽量靠近，使它们处于同一温度下。设计时使 R_{Cu} 在 20°C 下的阻值和其余三个桥臂 R_1 、 R_2 和 R_3 完全相等， $R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega$ ， $R_{Cu}^{20} = 1\Omega$ ， $E = 4\text{V}$ 。这时电桥处于平衡状态，图3-19中a和b之间的电压，即冷端补偿器输出电压 $U_{ab} = 0$ 。当冷端温度 $t_0 > 20^\circ\text{C}$ 时，回路热电势将减小，但这时 R_{Cu} 增大，使电桥不平衡，出现 $U_{ab} > 0$ 而且极性为a正、b负。

这时 U_{ab} 与热电势 $E(t, t_0)$ 同向串联，电势叠加增大，起到了补偿作用。如果限流电阻 R_s 选择合适，可使 U_{ab} 增大值恰好等于回路热电势减小的值，就完全避免了 t_0 的变化带来的影响，而且把冷端相当于固定在 20°C ，完成了热电偶冷端处理和补偿功能。当 $t_0 < 20^\circ\text{C}$ 时，情况正好相反，同样实现了对热电偶冷端的补偿。

如平衡点温度为 20°C ，即冷端温度 $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ，在使用时与其配套的显示仪表的机械零点就应调至 20°C 。

3.2.4 热电势的测量及热电偶多路温度检测通道

3.2.4.1 热电势的测量

根据热电偶的测量原理，当冷端温度一定时，热电偶回路的热电势只是被测温度的单值函数。因此，可以在回路中加入热电势的测量仪表，通过测量热电偶回路的热电势来得到被测温度值。常用的测量热电势的仪表有动圈式仪表、电位差计和数字式电压表等。这里仅对电位差计作一介绍。

电位差计是利用电压平衡的原理工作的。它将被测电势与已知的标准电势进行比较，当两者的差值为零时，被测电势就等于已知电势。图3-20所示为电位差计原理图。 U_B 为已知的可调电压， U_X 为被测电压，J为高灵敏度的检流计。若 $U_X \neq U_B$ ，则回路中有电流，检流计J偏转。这时调整 U_B ，同时观察检流计J指针。当检流计J指零时，有 $U_X = U_B$ 。由于 U_B 为已知电压，故 U_X 也可得到。

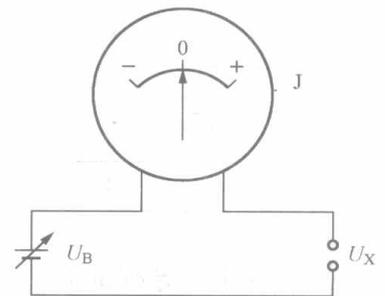


图 3-20 电位差计原理图

电位差计理论上可以达到极高的准确度，工业用的也可达到0.5级以上。但在测量过程中由于需要调平衡，所以反应慢，结构也较复杂。电位差计有手动电位差计和电子电位差计两种。

1. 手动电位差计

手动电位差计的原理电路见图3-21。它有三个回路：工作电流回路、工作电流标准化回路、测量回路。测量时，开关K合到测量位置，测量回路接通。回路电压方程为

$$U_X - I_S R_{AB} = I \Sigma R \quad (3-19)$$

式中 U_X ——被测电压；

I_S ——工作电流；

I ——测量回路电流；

ΣR ——测量回路总电阻 (R_{AB} 、检流计内阻和被测电压源内阻等)。

移动触点B，使检流计J指零 ($I=0$)，于是有

$$U_X = I_S R_{AB} \quad (3-20)$$

可以看出，影响电位差计测量准确性的关键是工作电流值 I_S 和电阻值 R_{AB} 的准确度，以及测差装置（检流计）的灵敏度。 R_{AB} 是锰铜丝绕制的电阻，电阻值不随温度变化，精度高。测量时若 I_S 固定已知，就可根据触点B的位置确定被测电势 U_X 的数值。为此测量过程中需对 I_S 进行校准，使它成为一个确定的标准电流。

在电位差计中是用标准电池 E_N 和标准电阻 R_N 来校准 I_S 的，这个工作称为工作电流标准化。图3-21中将开关K合到标准位置，调 R_S 使检流计J指零 ($I_B=0$)，得

$$E_N = I_S R_N \quad \text{或} \quad I_S = E_N / R_N \quad (3-21)$$

E_N 是标准电池的电动势，准确度高而且稳定。其电动势随温度的变化也可精确算出，并能作相应的校正。 R_N 的阻值可制造得相当准确。因此可得到准确的工作电流值 I_S 。

将式(3-21)代入式(3-20)有

$$U_X = \frac{E_N}{R_N} R_{AB} \quad (3-22)$$

式(3-22)说明，由 R_{AB} 的阻值，即滑线电阻触点的位置就可确定待测电势的值。

手动电位差计的测量过程自始至终需要人的参与，因此它不能连续、自动地指示出被测电势，常用于实验室中。若用于生产过程中的连续测量，则必须使用电子电位差计。

2. 电子电位差计

电子电位差计也是根据电压平衡原理进行工作的。与手动电位差计比较，它是用伺服电机及一套机械传动机构代替人手进行电压平衡操作，用放大器代替检流计来检查不平衡电压并控制伺服电机的工作。电子电位差计的原理框图如图3-22所示，它主要由测量桥路、放大器、伺服电机、指示机构及记录机构组成，有的还附加有调节装置。同步电机用以带动记录纸移动。

电子电位差计的工作过程是：热电势与已知的直流电压（即测量桥路的输出）相比较，比较后的差值电压（即不平衡电压）经放大器放大后，输出足以驱动伺服电机的功率。伺服

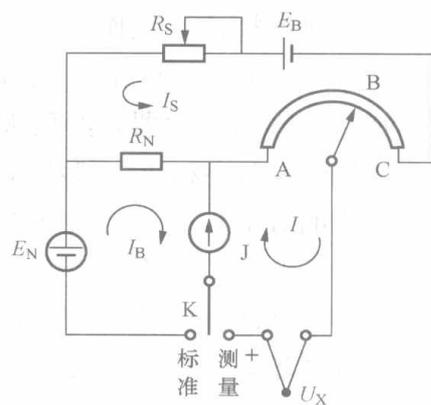


图 3-21 手动电位差计原理电路

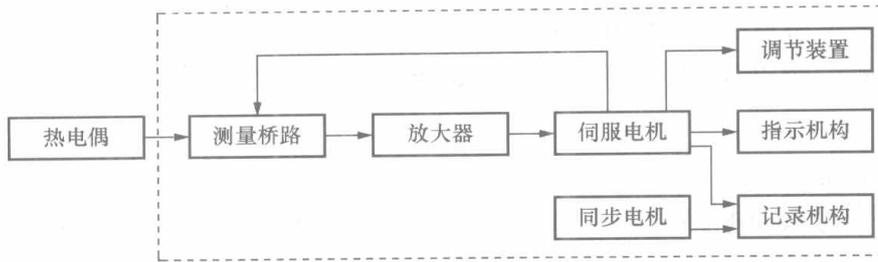


图 3-22 电子电位差计的原理框图

电机转动时通过一套传动系统带动测量桥路中的滑动触点移动，改变桥路的输出，直至两者差值为零，伺服电机不再转动。伺服电机在带动滑动触点的同时还带动指示记录机构，指示记录出待测温度。

下面对测量桥路加以分析。

(1) 测量桥路的工作原理。电子电位差计是采用桥式电路来测量电势的，它的基本电路如图 3-23 所示。用桥路上 a、b 两点之间的电位差来和热电偶的电势相比较，若两者不相等，其差值输入放大器，经放大后驱动伺服电机转动，以改变滑动触点 a 的位置，直到 a、b 两点之间的电势和热电势相等，电机才停止动作。测量系统平衡时，滑动触点的位置就代表热电势的数值，也就代表热电偶所测的温度数值。这种桥式电路又称为双测量电路。把由 R_4 、 R_{np} (R_P 、 R_B 和 R_M 三个电阻并联后的等效电阻)、 R_G 所构成的电路叫上支路，把由 R_2 、 R_3 所构成的电路叫下支路。这种电路的优点在于：①测量的起始值不仅可以从零电位或正电位开始，而且可以从负电位开始；②可以实现热电偶冷端温度的补偿。

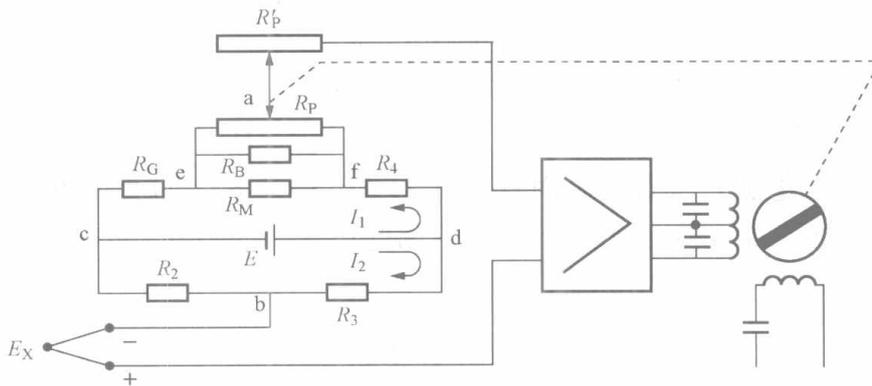


图 3-23 电子电位差计的桥式测量电路

(2) 测量电路中各电阻的作用及要求：

1) 桥臂电阻 R_2 ：在测量毫伏电压时，它是一个锰铜丝双绕固定电阻；在配用热电偶测量温度时，它是一个铜电阻，作为热电偶冷端温度补偿电阻，安装在电位差计接线端子处，也可用符号 R_{Cu} 表示。

如图 3-23 所示，在系统平衡时，有 $U_{ab} = E_X$ ，即 $E_X = I_1(R_{ae} + R_G) - I_2 R_{Cu}$ 。其中 R_{ae} 为 a 和 e 点之间的并联等效电阻。若此时热电偶的热端温度不变，冷端温度升高，则 E_X 减小。由于 R_{Cu} 与热电偶冷端处于相同的温度，此时 R_{Cu} 随之增大， $I_2 R_{Cu}$ 增大，使得 U_{ab} 亦减小。通常设计在 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内， $I_2 R_{Cu}$ 的增大和 E_X 的减小相抵消，则电位差计的指示值就不会受热电偶冷端温度变化的影响，由此起到温度补偿作用。这里所指热电偶的冷端，实际上是

与热电偶相配的补偿导线的冷端，它是接到电子电位差计的接线端子上的。当采用的热电偶确定以后，仪表工作时的冷端温度为 t_0 ，此时 R_2 的数值 (R_2^0) 也就确定了。

2) 下支路限流电阻 R_3 ：是一个固定电阻。它与 R_2 配合，保证下支路的电流为 2mA 的规定值。当 R_2 采用铜电阻时，它的阻值随温度而变化，因此，下支路工作电流 I_2 只是在仪表的标准工作温度（取 25℃）时才为 2mA。

3) 起始值电阻 R_G ：是决定仪表刻度起始值的电阻。当滑动触点移至最左端起点时，桥路输出电压应该相应于测量下限时的热电势，有 $E_{\text{始}} = I_1 R_G - I_2 R_{\text{Cu}}$ 。 R_G 越大，下限时的热电势也越大，测量下限值越高，反之亦然。

起始值电阻 R_G 由 R'_G 和微调电阻 r_g 两部分串联而成。采用 r_g 既便于调整阻值，又能降低对电阻 R'_G 的制造精度要求。 r_g 的数值约为 1Ω。

4) 上支路限流电阻 R_4 ：它与 R_{np} (R_P 、 R_B 和 R_M 三个电阻并联后的等效电阻)、 R_G 相串联，使上支路电流为 4mA 的规定值。

5) 滑线电阻 R_P ：它是测量桥路中一个很重要的部件，仪表的示值误差、记录误差、变差、灵敏度以及仪表运行的平滑性等都与滑线电阻的质量好坏有关。因此，对滑线电阻材料的耐磨、抗氧化、线间绝缘及电阻的非线性误差等方面都有很高的要求。滑线电阻常用的材料是锰铜丝，也可采用卡玛合金丝或银钯合金丝等。还有采用坚硬的导电塑料来制造滑线电阻的，它比金属制的滑线电阻更耐磨。在结构上，滑线电阻除要求装配牢靠、接触可靠外，还采用了双滑线结构。在图 3-23 中 R_P 是桥路电阻，另一个电阻 R'_P 两端被短路，作为电桥的引出线。这种结构的优点是：滑动触点容易支承，同时，可抵消滑动触点和滑线电阻之间产生的附加热电势。对滑动触点的材料除要求抗氧化性能要好之外，特别要求它和滑线电阻的接触热电势要很小，否则滑动触点在滑线电阻上滑动时会发热而产生较大的误差。

6) 工艺电阻 R_B ：它是 R_P 的并联电阻。由于工艺上的原因滑线电阻 R_P 很难绕制得十分精确，其数值也不便增减。为此给 R_P 并联一个电阻 R_B ，用调整 R_B 的方法使并联后的总阻值为一固定值，通常为 90Ω。在仪表使用过程中，当 R_P 磨损后阻值发生变化时，也可用改变 R_B 的大小来进行调整。

7) 量程电阻 R_M ：是决定仪表量程大小的电阻。它的大小由电位差计的测量范围及采用的热电偶分度号来决定。

从图 3-23 可以看出，滑线电阻的滑动触点 a 从 R_{np} 始端滑到终端电位的升高值恰好与仪表的电压量程 ΔE 相等，即 $I_1 R_{\text{np}} = \Delta E$ 。而 $R_{\text{np}} = \frac{90 R_M}{90 + R_M}$ 。可见 $\Delta E \uparrow \rightarrow R_{\text{np}} \uparrow \rightarrow R_M \uparrow$ ，也就是 R_M 越大，它从上支路工作电流中所分出的电流就越小，仪表的量程就越大。反之 R_M 越小，则量程越小。 R_M 由电阻 R'_M 与微调电阻 r_m 串联而成，通过调整 r_m 的阻值能方便地微调仪表量程。 r_m 的数值约为 1Ω。

上面所述的电阻 R_3 、 R_G 、 R_M 、 R_B 及 R_4 都是采用温度系数很小的锰铜丝进行无感双线绕制而成的。

(3) 测量桥路的供电形式和工作电流选取。目前我国生产的电子电位差计测量桥路是由稳压电源提供 1V 直流电压。工作电流一般取在 2~10mA 范围内，较多的是把上支路电流取为 4mA，把下支路电流取为 2mA，总的工作电流为 6mA。

3.2.4.2 热电偶多路温度检测通道

通用热电偶测量要先对热电偶输出的信号进行放大、补偿、线性化、A/D 转换后由数据总线传输至 CPU 进一步进行处理。如图 3-24 所示，为了节省硬件，在热电偶多路温度检测通道设计中常使多路测点通过多路开关的切换共用放大、冷端补偿以及 A/D 转换电路。其中，冷端补偿方法可根据不同场合与需要进行选择。

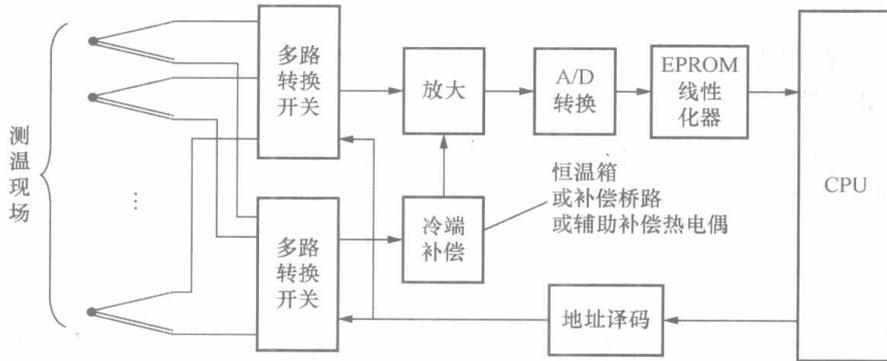


图 3-24 热电偶多路温度测量

1. 补偿热电偶法

在使用冷端恒温补偿法进行多路热电偶温度测量时，可以采用硬件上的电势补偿，也可以采用软件计算的方式补偿。

(1) 硬件补偿。如图 3-25 所示，通过硬件连接热电偶补偿，进而实现了多路热电偶测温的冷端补偿，其原理如图 3-26 所示。

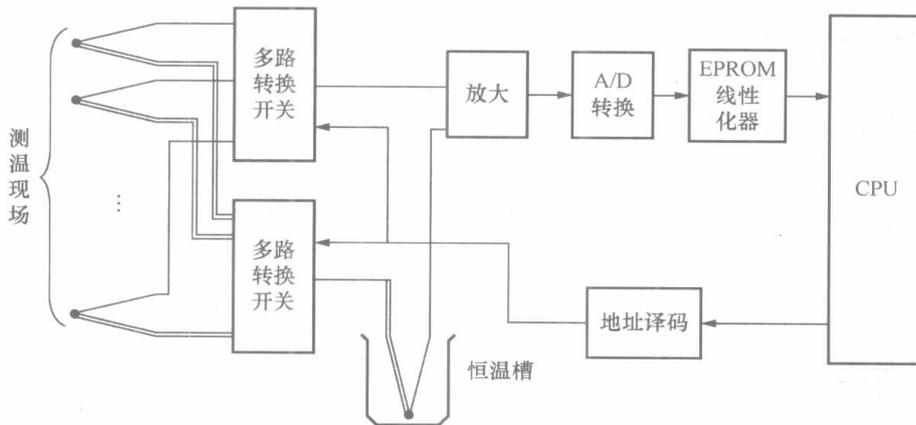


图 3-25 采用硬件补偿热电偶多路温度测量

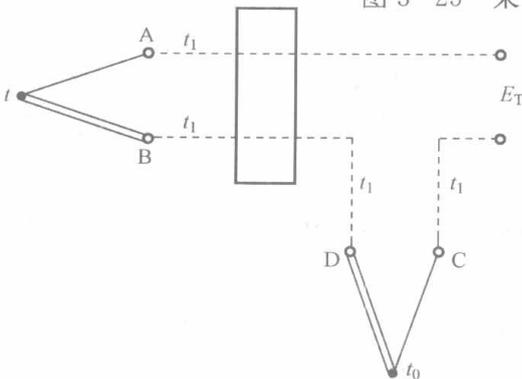


图 3-26 热电偶补偿原理

其中

$$E_T = E_{AB}(t, t_1) - E_{CD}(t_0, t_1)$$

$$= E_{AB}(t, t_1) + E_{CD}(t_1, t_0)$$

$$E_{AB}(t_1, t_0) = E_{CD}(t_1, t_0)$$

$$E_T = E_{AB}(t, t_1) + E_{AB}(t_1, t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

(2) 软件补偿。如图 3-27 所示，该方法是将恒温槽中的补偿热电偶看成一个独立的测温热电偶，通过信号处理电路对其热电势进行采集处理，然后

在 CPU 中使用软件计算的方法将其作为补偿值同其他多路测温热电偶的信号进行叠加，进而实现冷端补偿的功能。

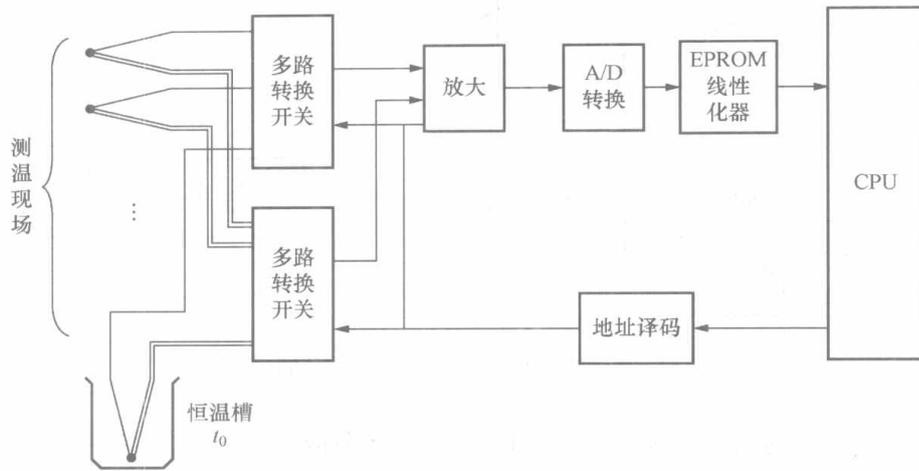


图 3-27 采用软件补偿热电偶多路温度测量

2. 补偿电桥法

(1) 共用电桥补偿。在一些热电偶类型比较相近的多点进行温度测量，例如温度巡测系统中多使用共用的冷端补偿电桥，其原理如图 3-28 所示。

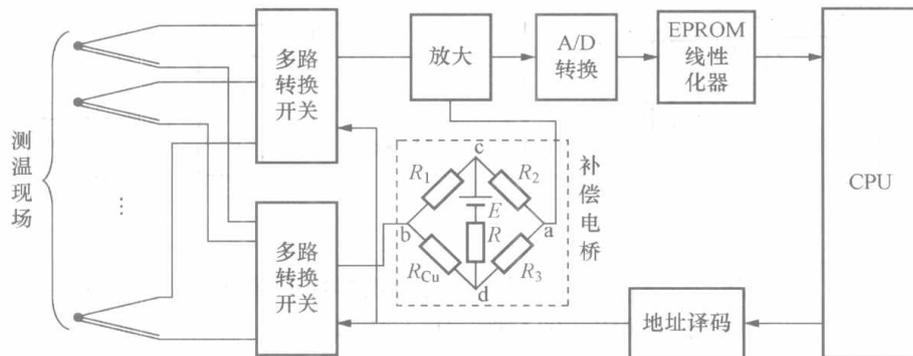


图 3-28 共用电桥补偿多路热电偶测温

(2) 独立电桥补偿。共用电桥多路热电偶补偿结构较简单，但却要求多路热电偶测量状况大致相同，否则会产生较大的补偿误差；且一般要将补偿电路设计在置于控制室的检测仪表中，测量现场到控制室的长距离容易产生误差，因此在一些场合可以为每路热电偶设计独立的补偿电桥。

如图 3-29 所示，独立电桥补偿是为每路热电偶专门设计了一路补偿电桥，其电桥参数根据各路测量点的工作状态设计，大大减小了补偿误差；而且在很多设计中将前置的多路冷端补偿电桥做成一个独立补偿器置于测量现场，有效地降低了长线路信号传输造成的误差。

3. 集成电路补偿法

随着集成 IC 的飞速发展，出现了专门针对热电偶的串行模数转换器，它能独立完成信号放大、冷端补偿、线性化、A/D 转换及 SPI 串口数字化输出功能，如 MAX6675 等。在具体使用时，可根据实际需要为每路热电偶配备独立的集成温度采集 A/D 芯片或使用共用的集成 A/D 芯片。

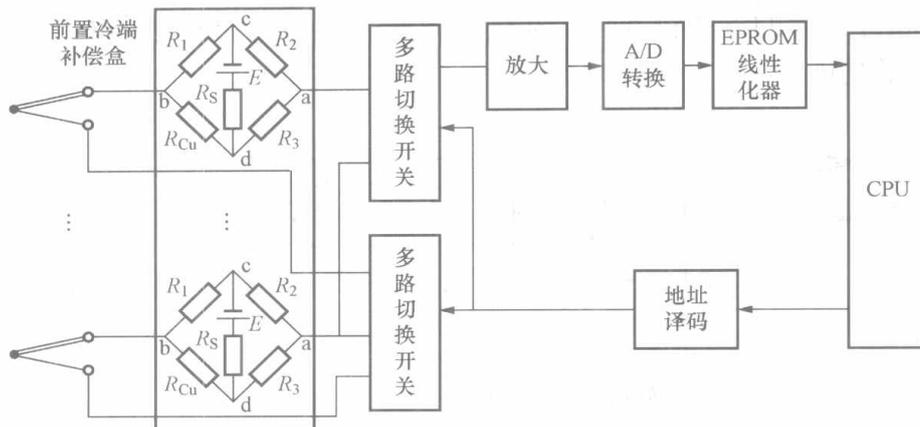


图 3-29 独立电桥补偿多路热电偶测温

如图 3-30 所示，每路温度测量点各自配用一个集成 A/D 测温芯片，这样采样线路误差较小，稳定性相对较高，但是造价也较图 3-30 (a) 所示电路高出很多。而图 3-30 (b) 所示共用集成 A/D 转换芯片的方案造价低，但是由于热电偶检测信号直接经过多路开关电路，中间的精度及抗干扰能力就难以得到保证。

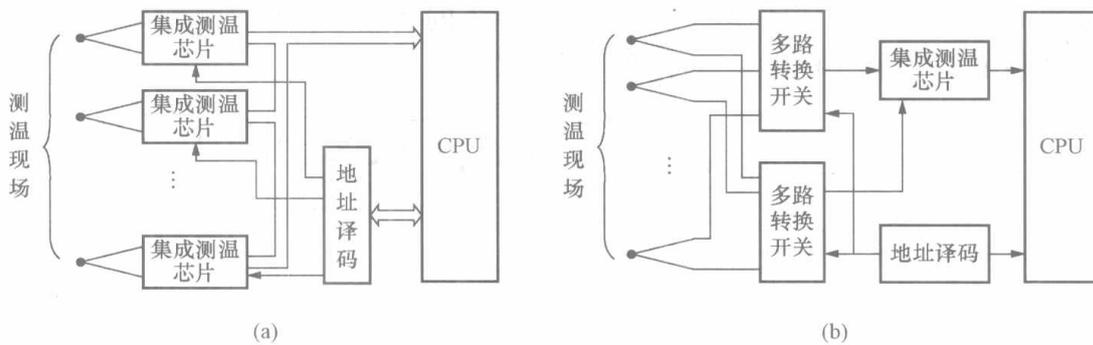


图 3-30 基于集成测温芯片的多路测量通道

(a) 独立集成 A/D 转换；(b) 共用集成 A/D 转换

3.2.5 热电偶温度计的应用

3.2.5.1 热电偶测温的特殊电路

1. 串联测量回路

采用串联多支热电偶测温的回路如图 3-31 所示。如果有若干同型号热电偶正向串联起来，所有热端感受同一所测温度，则称为热电堆。多支特性相同的热电偶，安装在不同的部位，适于检测微小的温度变化。产生的热电势为各支热电偶的热电势的总和，故灵敏度高。平均温度则为总热电势除以热电偶的支数 N 。但应用串联热电偶回路时应当注意两点：其一，几支串联热电偶，其电阻值应相等；其二，如果某支热电偶短路，却未及时察觉，会造成极大的误差。

2. 并联测量回路

将几只相同型号、规格的热电偶并联起来使用的测温回路称为并联测量回路，见图 3-32。并联测量回路的总热电势等于所用热电偶的平均值，即

$$E = \frac{E_1 + E_2 + \cdots + E_n}{n} \quad (3-23)$$

并联测量回路的热电势与单只热电偶的热电势相当，但其相对误差为单只热电偶的 $1/n$ 。

当其中一只热电偶断路时,不影响整个测温工作。并联测量回路常被用来测量平均温度或用于需要准确测量温度的场合。

3. 热电偶的反接

将两只相同型号的热电偶的电极反向串联起来,并保持两热电偶的冷端的温度相同(见图3-33),称为反接回路。使用反接回路时,在显示仪表上显示的数值为两热电偶的差。所以此回路被用来进行温差测量。

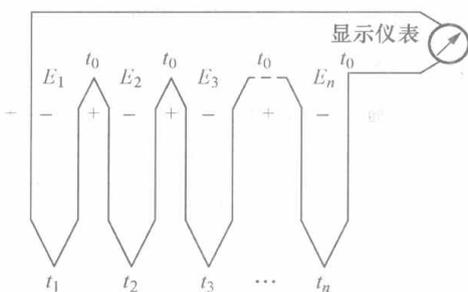


图 3-31 串联回路

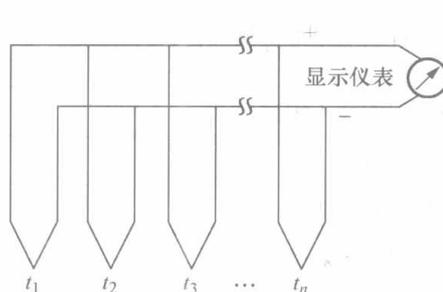


图 3-32 并联回路

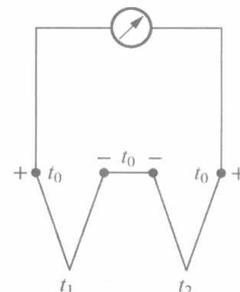


图 3-33 反接回路

3.2.5.2 热电偶测温的误差分析

热电偶在正确安装和使用条件下,测温误差来源有以下几个方面:热电偶基本误差、冷端温度变化误差及配用显示、控制仪表的误差等。这些误差虽然具有随机性,但可按允许误差计算。

(1) 热电偶的分度误差。这是因为热电偶是按产品批量统一分度的,不可避免地存在误差,以 ϵ_t 表示。

(2) 热电偶冷端温度补偿误差。工业应用中不可能将冷端保持在 0°C ,就是在实验室条件下也可能有波动。采用补偿导线,以 ϵ_r 表示。采用冷端补偿电桥,以 ϵ_c 表示。

(3) 显示仪表误差。显示仪表产生的误差,以 ϵ_d 表示。显示仪表的误差根据仪表的精度等级得出。

(4) 总误差。总误差 ϵ 一般可采用和根法计算,即

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_t^2 + \epsilon_r^2 + \epsilon_c^2 + \epsilon_d^2} \quad (3-24)$$

上述几项误差就是热电偶测温的基本误差。

3.2.5.3 热电偶的故障处理

热电偶测温时产生的故障现象、产生故障的可能原因及处理方法见表3-6。

表 3-6 热电偶常见故障原因及处理方法

故障现象	可能原因	处理方法
热电势低于实际值 (显示仪表示值偏低)	热电偶内部潮湿	保护管和热电偶烘干,检查漏水原因
	热电极局部短路或接线盒处局部短路	取出热电极,检查漏电原因,绝缘管绝缘不良,应予更换;清洁接线柱,排除短路原因,更换补偿导线或重新改接
	补偿导线用错或极性接反,热电偶型号与仪表不匹配	更换热电偶及补偿导线
	热电极腐蚀或变质	剪去变质部分,重焊工作端;或更新热电偶

续表

故障现象	可能原因	处理方法
热电势高于实际值 (显示仪表示值偏高)	补偿导线与热电偶不匹配	更换补偿导线
	热电极变质	更换热电偶
	绝缘破坏造成外电源进入热电偶回路	检查干扰源并排除, 修复或更换绝缘材料
	冷端温度偏高(测负温时)	调整冷端温度或进行校正
热电势不稳 (仪表示值常波动)	接线柱与测量端接触不良, 时连时断	将接线柱和热电极冷端擦净, 重新拧紧, 若存在断电, 应焊接好
	热电偶安装不牢或振动	采取减振措施, 将热电偶固定安装
	外界干扰	检查干扰源, 进行屏蔽或接地
无热电势输出 (显示仪表无指示)	测量线路短路	找到短路处, 接好, 更换绝缘
	热电偶回路断线	找到断线处, 重新连接
	接线柱松动	拧紧接线柱

3.2.6 热电偶的校验

热电偶经过一段时间的使用后, 由于氧化、腐蚀、还原、高温下再结晶等因素的影响, 使它与原分度值或标准分度表的偏离越来越大, 以致产生较大误差, 准确度下降。因此需对热电偶定期校验以监视其热电特性的变化, 保持其准确性。校验是对热电偶热电势和温度的已知关系进行校核, 检查误差的大小。

表 3-7 常用热电偶校验温度点

分度号	热电偶材料	校验点温度/℃
S	铂铑 10—铂	419.527, 660.323, 1084.62
B	铂铑 30—铂铑 6	1100, 1300, 1500
K	镍铬—镍硅	400, 600, 800, 1000, (1200)
E	镍铬—康铜	(200) 400, 600, 700

根据国际实用温标 ITS-90 规定, 除标准铂铑 10—铂热电偶必须进行三点(金、银、锌的凝固点温度)分度外, 其余各种实用性热电偶必须在表 3-7 所列的温度点进行比较式检验。

如图 3-34 所示, 比较式校验设备由交流稳定电源、调压器、管式电炉、冰点槽、切换开关、直流电位差计和标准热电偶组成。管式电炉用电阻丝做加热元件, 炉体长度为 600mm, 中部应有长度不小于 100mm 的恒温段。电位差计的精度等级不小于 0.03 级。

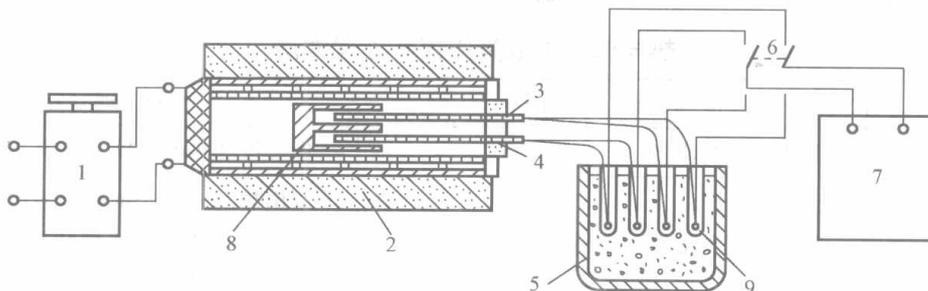


图 3-34 热电偶校验装置示意图

- 1—调压变压器; 2—管式电炉; 3—标准热电偶; 4—被校热电偶; 5—冰点槽;
6—切换开关; 7—直流电位差计; 8—镍块; 9—试管

校验的基本方法是把标准热电偶与被校热电偶的测量端置于管式电炉内的恒温段，参比端置于冰点槽内以保持 0°C 。用电位差计测量各热电偶的电势，然后比较其结果，以确定被校热电偶的误差范围或确定其热电特性。

校验时应注意：

(1) 用调压器调节电炉的加热温度时，应使其稳定在如表3-7所列各校验温度点 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 范围内；读数时要求恒温区的温度变化每分钟不得超过 0.2°C ；每个校验温度点的读数不得少于4次。

(2) 冰点槽内必须是均匀的冰水混合物，保持 0°C ；热电偶参比端必须插入冰点槽的中部，且相互绝缘。

(3) 被校验热电偶若是铂铑10—铂材料，校验前要进行退火和清洗处理，然后才允许将测量端裸露于标准铂铑—铂热电偶测量端。被校热电偶若为廉金属材料，则应用封头细套管保护标准热电偶，以免其被污染。被校廉金属热电偶的测量端可紧靠在封头套管的外部顶端。

(4) 同时被校验的热电偶可以有多支，读数顺序是标准热电偶 \rightarrow 1号被校热电偶 \rightarrow 2号被校热电偶 \rightarrow 3号被校热电偶 \rightarrow …… \rightarrow N号被校热电偶；从N号被校热电偶反序读数 \rightarrow …… \rightarrow 标准热电偶。如此按正反顺序多次读取数据，然后进行数据整理和数据分析。

例如用标准铂铑10—铂热电偶校验II级镍铬—镍硅热电偶，在 800°C 校验点附近测得标准热电偶的热电势读数平均值为 7.376mV ，被校热电偶的热电势读数平均值为 33.604mV 。已知标准热电偶证书中写明，在热端为 800°C ，冷端为 0°C 时的热电势为 7.342mV ，而在分度表上，热端为 800°C ，冷端为 0°C ，热电势为 7.345mV 。

首先计算出标准热电偶在 800°C 时的电势误差为 $7.342 - 7.345 = -0.003\text{mV}$ ，可见标准热电偶电势值相对于分度表是偏低的，因此要把标准热电偶的读数平均值加上该电势误差，即 $7.376 + 0.003 = 7.379\text{mV}$ ，然后从分度表中查出 7.379mV 相对应的 803°C ，此温度即为标准热电偶与被校热电偶热端的真实温度。

用被校热电偶的平均读数从分度表中查出相对应的温度为 808°C ，将它们与 803°C 进行比较后，得到在 803°C 时被校热电偶的温度误差为 5°C 。

对II级镍铬—镍硅热电偶，由表3-4可知，在 $333 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 其允许误差为 $\pm 0.75\% |t|$ 在热端温度为 803°C 时的允许误差为 $0.75\% \times 803 = 6^{\circ}\text{C}$ ，由于在 803°C 时被校热电偶的温度误差为 5°C ，小于 6°C ，因被校热电偶在 800°C 校验点是合格的。

其他校验点的计算也按上述方法进行，可求得热电偶在各校验点的温度误差。经校验，若误差超出范围，则不能使用。

3.3 热电阻温度计

3.3.1 热电阻测温原理及特点

用热电偶测量 500°C 以下温度时，输出的热电势小，测量精度低，于是可采用热电阻测温。工业用铂电阻测温可达 -200°C ；特殊情况铜电阻温度计可测到 3.4K 的低温。电阻温度计有许多优点：中、低温时测量精度高，不需要冷端温度补偿，电阻信号便于远传。其缺点是：不能测量太高温，感温部分体积大，热惯性大；不能测取某一点的温度，只能测量

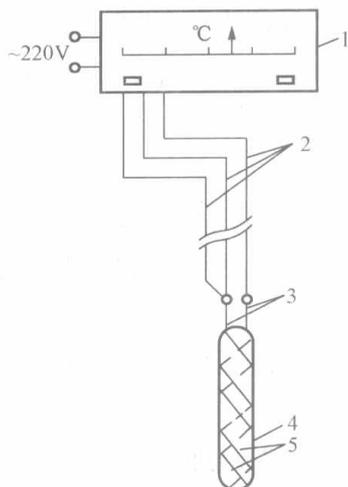


图 3-35 热电阻测温系统

- 1—显示仪表；2—连接导线；
3—引出线；4—云母支架；
5—电阻丝

一个区域的平均温度；在应用时需要外供电源；连接导线电阻易受环境温度影响而产生测量误差。

热电阻测温系统由热电阻、连接导线和测量电阻值的显示仪表所组成，如图 3-35 所示。

热电阻是根据金属导体或半导体的电阻随温度变化而改变的性质工作的。大多数金属电阻每升高 1°C 其阻值约增加 $0.4\% \sim 0.6\%$ ，而半导体热敏电阻却减少 $3\% \sim 6\%$ 。

大多数金属导体的电阻值 R_t 与温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 的关系可表示为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (3-25)$$

式中 R_0 —— 0°C 时的电阻值；

A 、 B 、 C ——与金属材料有关的常数。

大多数半导体材料的电阻值 R_T 与热力学温度 $T(\text{K})$ 的关系为

$$R_T = Ae^{B/T} \quad (3-26)$$

式中 R_T ——温度为 $T(\text{K})$ 时的电阻；

A 、 B ——取决于其材料与结构的常数，均为正值；

e ——自然对数之底。

表示电阻与温度之间灵敏度的参数是电阻温度系数 α ，它是温度每变化 1°C 时，材料电阻的相对变化值，即

$$\alpha = \frac{dR}{R} \times \frac{1}{dt} \approx \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \times 100} \quad (1/^{\circ}\text{C}) \quad (3-27)$$

显然 α 越大，电阻温度传感器越灵敏。通常，电阻温度系数与温度有关，所以电阻与温度呈非线性关系。

做成热电阻的材料应有较高的电阻温度系数，最好电阻温度系数与温度无关，近似为常数。其次化学物理稳定性好，易于提纯和复制以及价格便宜等。工业中常用的热电阻材料是铂和铜，其次是铁、镍等。

金属的纯度可用比值 $\frac{R_{100}}{R_0}$ 表示。 $\frac{R_{100}}{R_0}$ 越大，纯度越高，其 α 值越大，且稳定性也好；反之 α 值小也不易稳定。 α 值还与制作工艺有关，例如电阻丝在拉伸过程中，电阻丝的内应力会引起 α 值变化。故电阻丝在制成热电阻后须进行退火处理，以消除内应力。

3.3.2 标准化热电阻及半导体热敏电阻

3.3.2.1 标准化热电阻

标准化热电阻是指具有统一分度号、互换性强的工业热电阻，主要有铂电阻与铜电阻。

1. 铂电阻

铂电阻的特点是稳定性好、准确度高、性能可靠、测温范围宽。但在还原性气氛中，特别是在高温下很容易被还原性气体污染，铂丝将变脆，并将改变电阻与温度间的关系。因此，必须用保护套管把电阻体与有害的气氛隔离开来。铂电阻被广泛用于工业上和实验室中。

绕制铂电阻感温元件的铂丝纯度是决定温度计精度的关键。铂丝纯度愈高其稳定性、复

现性越好,测温精度也愈高。铂丝纯度常用 R_{100}/R_0 表示, R_{100} 和 R_0 分别表示 100°C 和 0°C 条件下的电阻值。对于工业用铂电阻温度计 R_{100}/R_0 为 1.385。

铂电阻的温度特性表示如下:

在 $-200\sim 0^\circ\text{C}$ 之间

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)] \quad (3-28)$$

在 $0\sim 850^\circ\text{C}$ 之间

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (3-29)$$

式中 R_t —— $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值;

R_0 —— 0°C 时的电阻值;

A、B、C——常数,对于工业用铂电阻, $A=3.9083 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$, $B=-5.775 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2}$, $C=-4.183 \times 10^{-12}^\circ\text{C}^{-4}$ 。

国产标准化工业铂电阻的分度号为 Pt10 和 Pt100,表示其 R_0 分别为 10Ω 及 100Ω 。后者用得较多。工业用铂电阻的技术性能如表 3-8 所示。Pt100 的分度表见附录 I。

表 3-8 铂电阻和铜电阻的技术性能

热电阻名称	代号	分度号	R_0/Ω		R_{100}/R_0		测温范围/ $^\circ\text{C}$	基本误差	
			公称值	允许值	名义值	允许误差		温度范围/ $^\circ\text{C}$	允许值/ $^\circ\text{C}$
铂热电阻	WZP (IEC)	Pt10	10	A级 ± 0.006	1.385	± 0.001	$-200\sim 850$	A $-200\sim 850$ B	$\Delta t = \pm(0.15 + 2 \times 10^{-3}t)$ $\Delta t = \pm(0.3 + 5 \times 10^{-3}t)$
		Pt100		A级 ± 0.006					
铜热电阻	WZC	Cu50	50	± 0.05	1.428	± 0.0002	$-50\sim 150$	$-50\sim 150$	$\Delta t = \pm(0.3 + 6 \times 10^{-3}t)$
		Cu100	100	± 0.1					

铂电阻的热电阻体是用很细的铂丝 ($0.03\sim 0.07\text{mm}$) 绕在云母、石英或者陶瓷支架上,如图 3-36 所示。

2. 铜电阻

铜电阻的价格比较便宜,电阻值与温度几乎是线性关系,且电阻温度系数也比较大,材料容易提纯,工业上在 $-50\sim +150^\circ\text{C}$ 测温范围内使用较多。铜电阻的缺点是容易氧化,其电阻率 ρ 比较小,所以做成一定阻值的热电阻时体积就不可能很小。一般用在低温及没有腐蚀性的介质中。

铜电阻的分度号是 Cu50 和 Cu100,表示其 R_0 分别为 50Ω 及 100Ω 。

铜电阻在其测量范围内的温度特性可表示为

$$R_t = R_0[1 + at + \beta t(t - 100) + \gamma t^2(t - 100)] \quad (3-30)$$

式中 R_t —— $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值;

R_0 —— 0°C 时的电阻值;

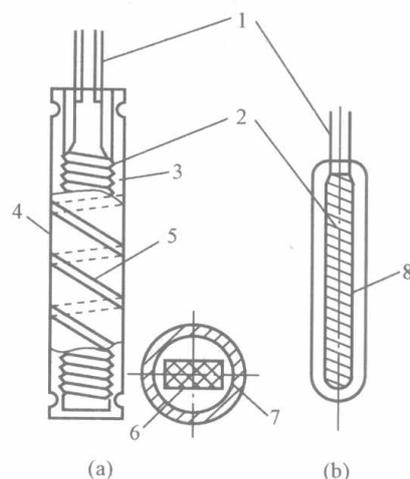


图 3-36 铂电阻体结构

1—银引出线; 2—铂丝; 3—锯齿形云母骨架;
4—保护用云母片; 5—银绑带; 6—铜电阻横截面; 7—保护套管; 8—石英骨架

α 、 β 、 γ ——常数，对于工业用铜电阻， $\alpha=4.280 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ， $\beta=-9.31 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$ ， $\gamma=1.23 \times 10^{-9} \text{ } ^\circ\text{C}^{-3}$ 。

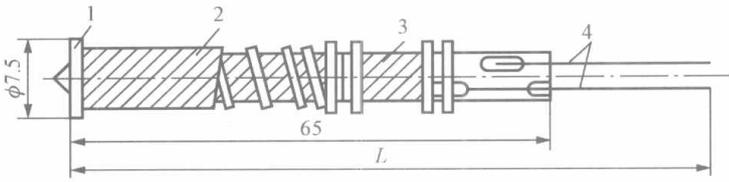


图 3-37 铜电阻体结构

1—线圈骨架；2—铜热电阻丝；3—补偿组；4—铜引出线

工业用铜电阻的技术性能如表 3-8 所示。

铜电阻的电阻体是用直径 0.1mm 的绝缘铜线采用无感双线绕法绕在圆柱形塑料支架上制成的，如图 3-37 所示。

3.3.2.2 半导体热敏电阻

热敏电阻是用金属氧化物半导体材料制成的测温敏感元件。制作热敏电阻的材料主要是氧化锰、氧化镍、氧化铜、氧化钴、氧化镁、氧化钛等。按某种比例把几种氧化物混合、研磨后加进粘合剂，埋入适当的引线（如铂丝等），挤压成形再经烧结而成。热敏电阻有正温度系数（PTC）、负温度系数（NTC）和临界温度系数（CTR）三种，它们的温度特性曲线如图 3-38 所示。温度检测用的主要是负温度系数热敏电阻，PTC 和 CTR 热敏电阻则利用在特定温度下电阻值急剧变化的特性构成温度开关器件。

负温度系数热敏电阻的阻值与温度的关系可近似表示为

$$R_T = R_{T_0} e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \tag{3-31}$$

式中 R_T 、 R_{T_0} ——热敏电阻在温度为 T 、 T_0 时的电阻值；

B ——取决于半导体材料和结构的常数。

根据电阻温度系数 α 的定义，可求得负温度系数热敏电阻的 α 值为

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2} \tag{3-32}$$

由式（3-32）可以看出， α 值为负，并与 T^2 成反比。负温度系数热敏电阻的 T_0 为 25°C ，所以标准电阻值 $R(25^\circ\text{C})$ 和 B 值是它的两个重要参数，应选择合适的值使热敏电阻在测温范围内有较好的精度和稳定性。

负温度系数的热敏电阻主要由单晶以及锰、镍、钴等金属氧化物制成，测温范围为 $-50 \sim 300^\circ\text{C}$ 。它可制成不同的结构形式，如图 3-39 所示。

与金属测温电阻相比，半导体热敏电阻的优点是：电阻系数大，一般为金属电阻的几十倍，灵敏度高；电阻率大，在使用时引线电阻所引起的误差可以忽略；体积小，热惯性小，可测点温。它的不足之处主要是：非线性严重，互换性差，部分产品稳定性不好。但由于其结构简单、热响应快、灵敏度高并且价格便宜，因此在汽车、家电等领域得到大量应用。

3.3.3 热电阻的结构

与热电偶一样，工业热电阻的结构有普通型和铠装型。它们都由感温元件（热电阻体）、引出线、保护套管、接线盒、绝缘材料等组成。普通型热电阻是将感温元件焊上引线组装在一端封闭的金属或陶瓷保护套管内，再装上接线盒制成。铠装热电阻是将电阻感温元件、引

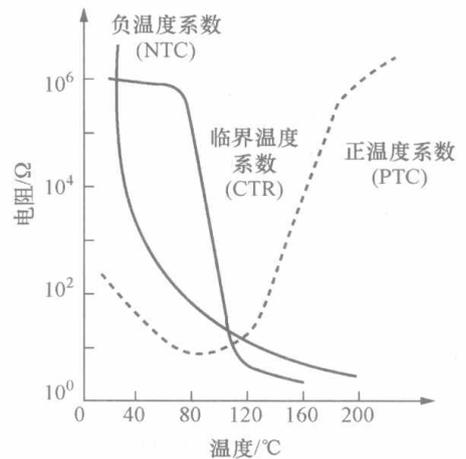


图 3-38 各种热敏电阻的特性曲线

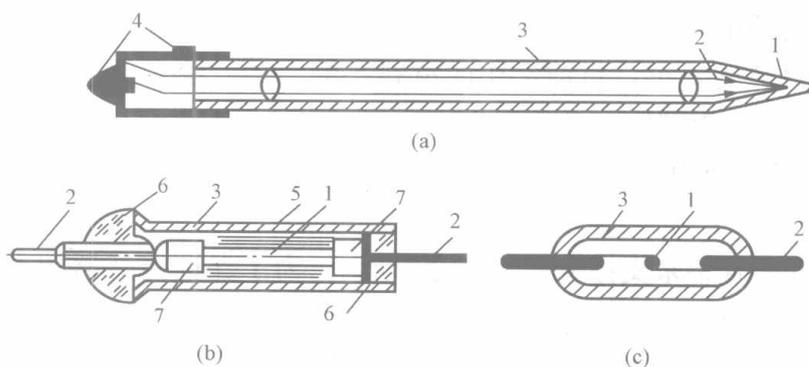


图 3-39 半导体热敏电阻结构

(a) 带玻璃保护管的；(b) 柱形的；(c) 带密封玻璃柱的

1—电阻体；2—引出线；3—玻璃保护管；4—引出极；5—锡箔；6—密封材料；7—导体

线、绝缘粉末组装在不锈钢管内再经模具拉伸的坚实整体，具有坚实、抗振、可挠、线径小、使用安装方便等特点。普通型和铠装型热电阻结构示意图如图 3-40 所示。

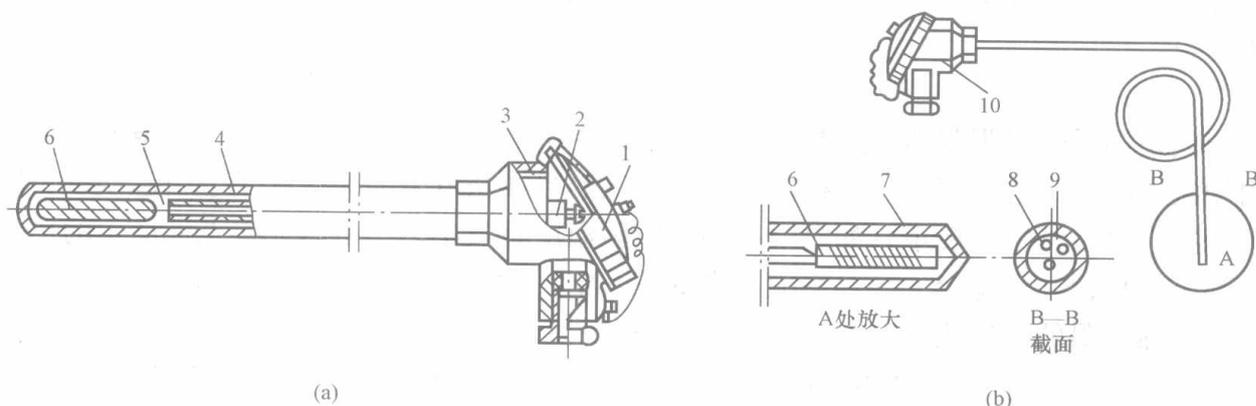


图 3-40 热电阻的结构示意图

(a) 普通工业热电阻；(b) 铠装热电阻

1—接线盒；2—接线柱；3—接线座；4—保护套管；5—引出线；6—感温元件；7—金属套管；8—金属导线；9—绝缘材料；10—接线盒

3.3.3.1 电阻体材料

电阻体是温度敏感元件，其材料性能对传感器的好坏有关键性的影响。对电阻体材料的要求包括：

(1) 电阻温度系数大且与温度无关。这样能保证传感器具有良好的灵敏度和线性度。一般纯金属的电阻温度系数 α_{t_0} 在 $0.35\% \sim 0.65\% K^{-1}$ 范围；半导体的 α_T 要高得多，在 $-(2\% \sim 8\%) K^{-1}$ 范围。金属的电阻温度系数与材料的纯度有关，纯度越高 α_{t_0} 越大。半导体热敏电阻的 α_T 与材料的比例以及制造工艺有关。

(2) 电阻材料的电阻率大。这样可使电阻体的体积较小，因而热惯性也较小。对金属材料来说，电阻率大使得可以用较粗的金属丝，从而改善了机械性能和稳定性，又不使参考温度时的电阻过小，这样有利于显示仪表测量电阻值。

(3) 材料的复现性和稳定性好。金属材料能较好地满足这方面的要求，半导体材料要差些，但目前已出现在高温下长期工作时稳定性较好的半导体材料。

(4) 材料的价格低廉。

根据对热电阻材料的要求,目前常用的材料是铜、铂、镍和钨等。在低温方面还发展了碳、铈铁合金等材料的热电阻。

3.3.3.2 骨架、引出线和保护套管

1. 骨架

金属热电阻需要有骨架来支撑电阻体(金属丝)。为了保证传感器的准确度、稳定性、体积和寿命等技术性能方面的要求,对骨架的材料和结构有一定的要求,主要包括以下几方面。

(1) 在传感器的测量范围内电气绝缘性能好,以防漏电等影响阻值;

(2) 在使用温度范围内有足够的机械强度和刚度,以防振动和冲击造成损坏及变形;

(3) 膨胀系数小,最好与电阻体的膨胀变形一致,当温度变化时不会造成电阻体变形而产生应力;

(4) 不对电阻体产生污染,影响其阻值稳定;

(5) 其他要求,如比热小、易加工和便宜等。

通常用于铂和镍电阻的骨架材料是云母、玻璃、石英和陶瓷等;用于铜电阻的骨架材料多为塑料。

2. 引线

引线是测量热电阻阻值所必需的零件。引线有一定的阻值和它自己的电阻温度系数,它们附加到电阻体上造成误差。引线向电阻体导入热量或从电阻体导出热量也引起误差。因此对引线材料要有一定的要求,如电阻率小、电阻温度系数小、与电阻体接点处产生的热电势应尽量小、化学性质稳定、导热率应尽量低等。常用的引线有铂、金、银和铜丝。

国产热电阻的引出线有两线制、三线制和四线制三种。

(1) 两线制:在热电阻体的电阻丝两端各连接一根导线的引线方式为两线制,见图 3-41 (a)。这种热电阻测温时都存在引线电阻变化产生的附加误差。

(2) 三线制:在热电阻体的电阻丝的一端连接两根引出线,另一端连接一根引出线,此种引出线方式称为三线制,见图 3-41 (b)。采用三线制连接的目的是减小引线电阻变化引起的附加误差。

(3) 四线制:在热电阻体的电阻丝两端各连接两根引出线,称为四线制,见图 3-41 (c)。在测温时,它不仅可以消除引出线电阻的影响,还可以消除连接导线间接触电阻及其阻值变化的影响。四线制多用在标准铂热电阻的引出线上。

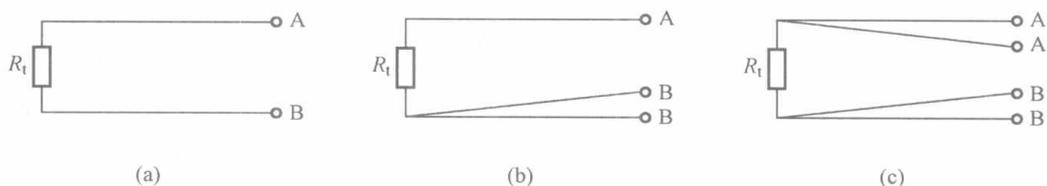


图 3-41 热电阻感温元件的引出线形式

(a) 两线制; (b) 三线制; (c) 四线制

R_t —热电阻感温元件; A、B—接线端子的标号

3. 保护套管

工业用金属热电阻的保护套管与热电偶的保护套管类似,这里不再赘述。

3.3.4 热电阻阻值的测量及热电阻多路温度检测通道

3.3.4.1 热电阻阻值的测量

电阻阻值的测量方法很多，为人熟知。热电阻阻值的测量，常采用电桥。电桥按电源分为直流电桥和交流电桥；按工作方式分为平衡电桥和不平衡电桥。平衡电桥又包括手动平衡电桥和自动平衡电桥。

1. 平衡电桥

(1) 手动平衡电桥。手动平衡电桥测量电阻的原理线路如图 3-42 所示。图中 R_2 和 R_3 为两个锰铜丝绕制的已知电阻（通常令 $R_2 = R_3$ ）， R_1 为可变电阻。 R_t 为热电阻，采用两线制接线方式接入桥路， R_L 为连接导线的电阻， G 为检流计， E 为电池。

电桥平衡时，检流计中无电流通过，根据电桥平衡原理有

$$R_1 R_3 = R_2 (R_t + R_L) \quad (3-33)$$

因为

$$R_2 = R_3 \quad (3-34)$$

所以得

$$R_t = R_1 - R_L \quad (3-35)$$

在滑线变阻器 R_1 上进行电阻或温度刻度，根据 R_1 的滑动触点位置便可确定热电阻的阻值。

从式 (3-35) 可知， R_t 不仅取决于 R_1 的触点位置，还与 R_L 有关，而 R_L 是随环境温度而变化的，这就使测量结果有误差。

为了减小此误差，可采用如图 3-43 所示的三线制连接方法，此时电桥的平衡条件为

$$R_1 + R_w = (R_t + R_w) \frac{R_2}{R_3} \quad (3-36)$$

利用式 (3-34)，可得

$$R_t = R_1 \quad (3-37)$$

可见三线制接法有利于消除连接导线电阻变化对测量的影响。

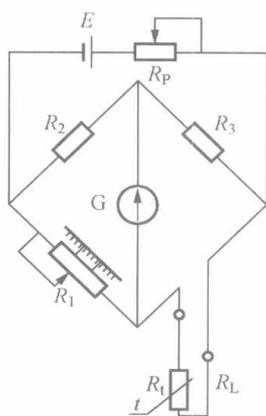


图 3-42 手动平衡电桥测量电阻的原理线路

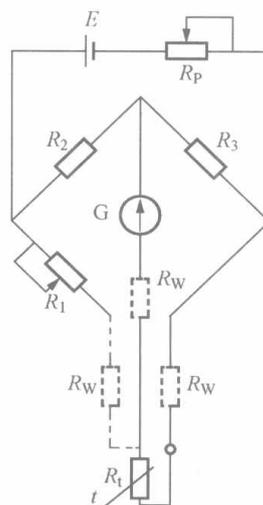


图 3-43 手动平衡电桥测量电阻的三线制线路

还有一种四线制测量线路，如图 3-44 所示。在四线制测量线路中，当 $R_1 = R_2$ 时，称

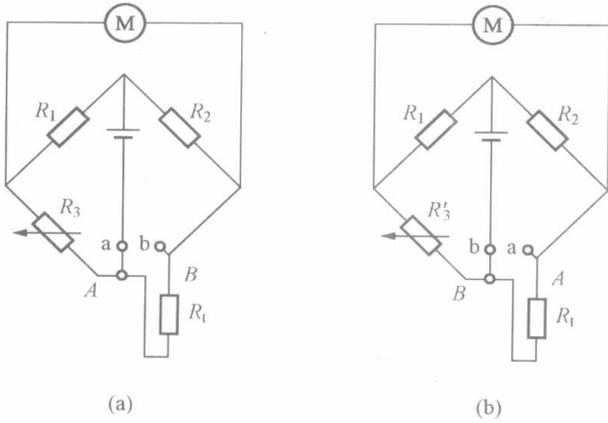


图 3-44 四线制平衡电桥测量线路
(a) 热电阻正向连接; (b) 热电阻反向连接

为对称桥路。测量分两步进行。

第一步，首先将电桥的接点处于图 3-44 (a) 的位置，当电桥平衡时，有

$$R_3 + A = B + R_t \quad (3-38)$$

式中 A 、 B ——引线电阻。

第二步，将测量线路切换到图 3-44 (b) 所示的位置，则有

$$R'_3 + B = A + R_t \quad (3-39)$$

将式 (3-38) 和式 (3-39) 相加整理得

$$R_t = \frac{R_3 + R'_3}{2} \quad (3-40)$$

由式 (3-40) 可以看出， R_t 中不再包含接线电阻的项，因而完全消除了接线电阻对 R_t 的测量结果的影响。

此外，当把切换开关从图 3-44 (a) 切换到图 3-44 (b) 所示位置时，同时改变了热电阻中的电流方向，从而可以消除寄生热电势的影响。

四线制线路是测量电阻的最精密方法，在精密测量中得到了广泛的应用。

(2) 自动平衡电桥。自动平衡电桥与热电阻配套使用，可对被测温度进行连续指示及记录。它与电子电位差计比较，除测温元件及测量桥路不同外，其他部分基本相同。

自动平衡电桥的测量桥路 (见图 3-45) 与电子电位差计的测量桥路相似，其等效电阻 R_N 也是由三个电阻 (R_P 、 R_B 、 R_5) 组成的。 $R_P // R_B$ 为 90Ω ， R_5 是量程电阻， R_6 为确定仪表起点的电阻， R_L 为连接导线的等效电阻。为减小环境温度变化时连接导线电阻的变化所引起的测量误差，也采用三线制连接法，并统一规定每根铜导线电阻 $R_1 = 2.5\Omega$ (20°C 时)。

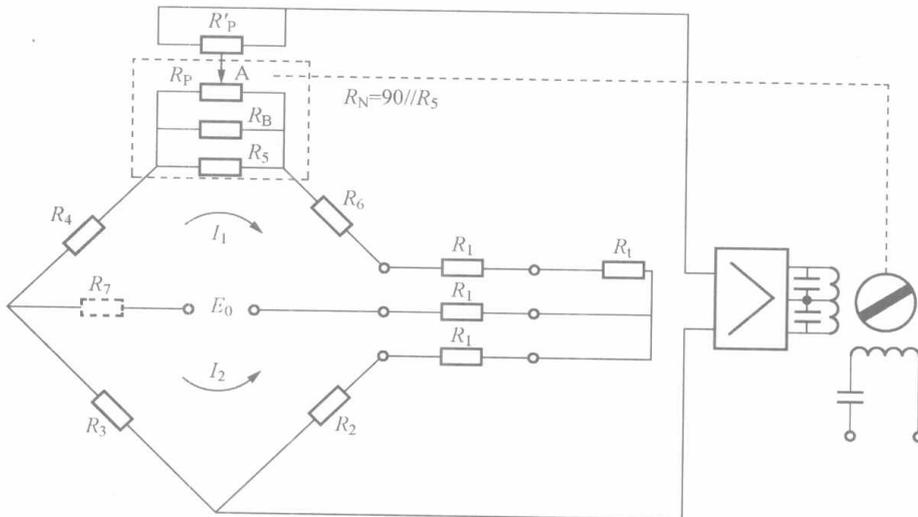


图 3-45 自动平衡电桥的测量桥路

当被测温度变化时， R_t 阻值变化，电桥将失去平衡。这一不平衡电压引至放大器输入端，经放大后推动伺服电机带动滑动触点移动，以改变上支路两个桥臂阻值的比例，直至使桥路满足平衡条件为止。伺服电机在带动滑动触点的同时还带动指示记录机构，指示记录出待测温度。

供桥电源有直流和交流两种，直流电源电压为 1V ，交流电压为 6.3V 。交流电桥应在电源

支路中串入限流电阻 R_7 ，以保证流过热电阻及各桥臂电阻的电流不超过允许值 ($\leq 6\text{mA}$)；直流电桥则不用 R_7 。

自动平衡电桥与电子电位差计在外形结构上十分相似，许多基本部件完全相同。但它们终究是不同用途的两种自动平衡仪表，其主要区别体现为：

1) 配用的感温元件不同。自动平衡电桥在测温时与热电阻相配用；电子电位差计则配接热电偶，它能与输出直流电势信号且具有低输出阻抗的传感器相配合，也可用来测量其他参数。

2) 工作原理不同。当仪表处于平衡时（此时可逆电机停转），自动平衡电桥的测量桥路也处于平衡状态，测量桥路无输出；电子电位差计的桥路本身则处于不平衡状态，桥路有不平衡电压输出，只不过这一电压值与被测电势相补偿而使仪表达达到平衡。

3) 感温元件与测量桥路的连接方式不同。自动平衡电桥的感温元件热电阻，采用普通铜导线三线制接法接至仪表的接线端子上，且对导线电阻有要求，它是电桥的一个臂；电子电位差计的感温元件热电偶，使用补偿导线接至仪表的接线端子上，它并非测量桥路的桥臂。

4) 电子电位差计的测量桥路具有对热电偶冷端温度进行自动补偿的功能，自动平衡电桥不存在这一问题。

2. 不平衡电桥

用不平衡电桥测量电阻的原理线路如图 3-46 所示。图中 E 为电源， R_1 、 R_2 、 R_3 为电桥各桥臂的固定电阻， R_t 为热电阻， R_D 为电桥显示仪表的内阻。

根据不平衡电桥的原理，通过显示仪表中的电流 I_D 为

$$I_D = U_{ab} \frac{R_1 R_t - R_2 R_3}{R_D (R_1 + R_3)(R_2 + R_t) + R_1 R_3 (R_2 + R_t) + R_2 R_t (R_1 + R_3)} \quad (3-41)$$

其中， U_{ab} 是电桥端点 a 和 b 之间的电压。因为 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_D 的阻值是固定的，所以 I_D 只与 R_t 和 U_{ab} 有关。如果保持 U_{ab} 不变，则 I_D 只是 R_t 的函数，这时显示仪表指针的偏转角就代表 R_t 的大小。

两线制不平衡电桥测量电阻和温度的优点是线路简单、直观。为了减小两线制测量的误差，也可采用三线制不平衡电桥，其测量线路原理如图 3-47 所示。有一点要说明，三线制不平衡电桥中，连接导线电阻随环境温度变化带来的测量误差不能完全消除，但可以减小到允许的误差范围之内。

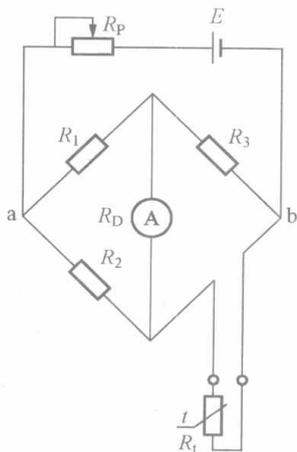


图 3-46 不平衡电桥原理线路图

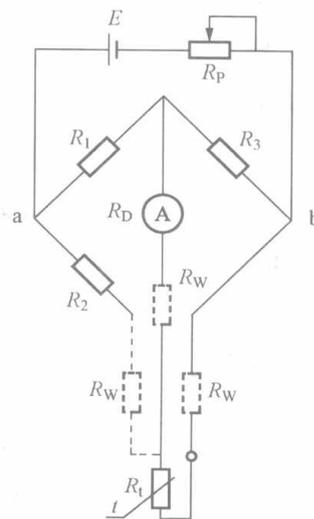


图 3-47 三线制不平衡电桥测量线路

热电阻与电桥的实际接线示意图如图 3-48、图 3-49 所示。

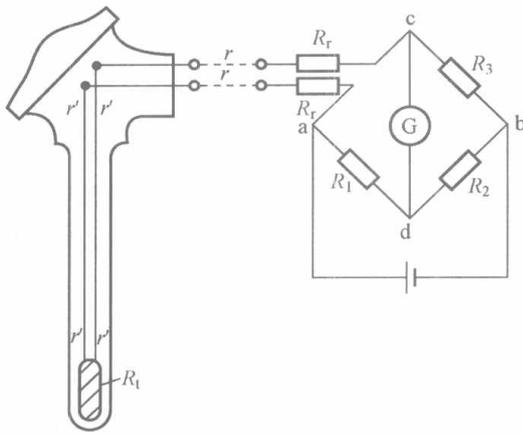


图 3-48 热电阻的两线制接法示意

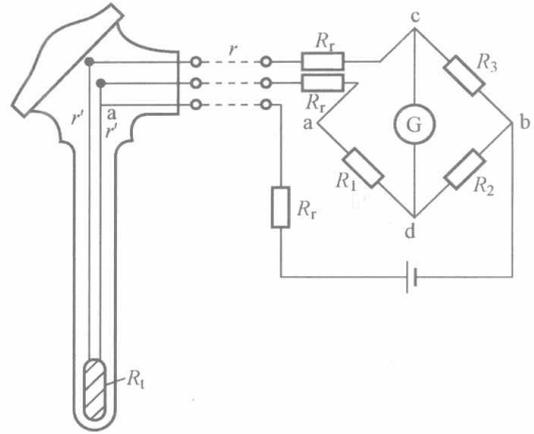


图 3-49 热电阻引线的三线制接法示意

3.3.4.2 热电阻多路温度检测通道

对于热电阻的多路温度检测通道，就是要将多路电阻值转变为电压信号，然后通过多路开关的选择实现多路温度的测量。其中实现电阻值到电压信号的转换常用的有恒流驱动法与电桥测量法。

1. 恒流驱动法

恒流驱动法实质上就是通过恒流流过测温热电阻，将电阻信号转换成电压信号进行测量的方法。在使用恒流驱动的转换方式时只可以采用三线制和四线制的引线结构。

(1) 四线制多路测量。新型集成 A/D 芯片集成了信号滤波、放大、A/D 转换等功能，热电阻在一个恒流源的驱动下直接和该芯片进行连接，即可构成热电阻检测通道。

图 3-50 所示为多路四线制的接线，K1、K2、K3 是多路模拟开关，箭头表示通过电阻 R_r 电流 I 的走向，K1 用于切换电流，K2、K3 用来切换输入的差分电压，根据恒流驱动的原理可得

$$R_r/R_t = U_{R_r}/U_{R_t} \quad (3-42)$$

$$R_t = R_r \times U_{R_t}/U_{R_r} \quad (3-43)$$

式中 U_{R_r} ——电阻 R_r 两端电压，已经作为参考电压直接引入集成测温 A/D 芯片的参考电压端；

U_{R_t} ——热电阻两端电压，作为测量电压由多路开关切换进行测量。

相对于集成 A/D 芯片的高阻抗，开关 K2、K3 的导通电阻以及长线 B、C 的电阻可以忽略不计；模拟开关 K1 导通电阻的串入以及长线电阻的影响可以改变 I ，却并不影响 R_r 、 R_t 两端电压的比值，式 (3-43) 会保持不变。因此，四线制的独特优点是对线电阻的对称性无特殊要求。

(2) 三线制多路测量。如图 3-51 所示，多通道三线制电路与图 3-50 所示的四线制多路测温电路相比较省去了长线 A，电流 I 从 B 线馈入。在这种三线制中，要求 B、D 两引线的电阻相等，设其值为 δ_r ，由 B、D 两引线电阻使 INH 端增加了 $2\delta_r I$ (I 为 R_t 中的电流)。电路中选择 R_1 与 R_2 阻值相等，选择运放放大倍数为 2，因此 INL 两端的电压也相应升高了 $2\delta_r I$ ，达到了自动补偿的目的。

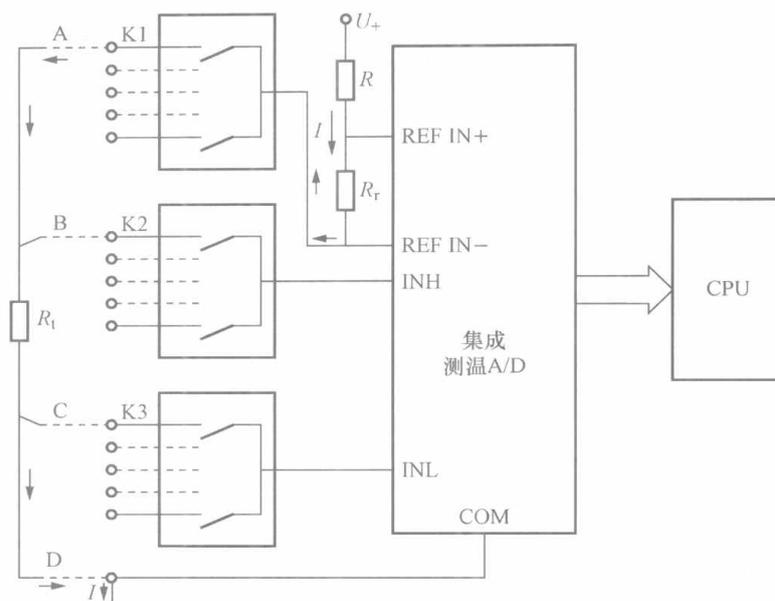


图 3-50 恒流驱动四线制多路测温

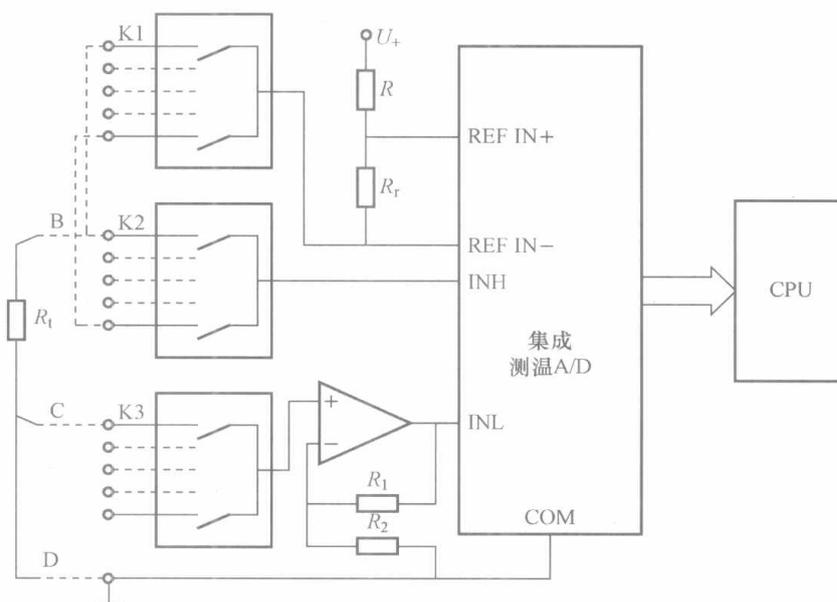


图 3-51 恒流驱动三线制多路测温

2. 电桥测量法

在热电阻多路温度测量中，可以通过模拟多路开关的选择使多路热电阻共用一个测量桥路，也可以为各路热电阻分别设计一个独立桥路，所不同的是后者虽然结构较为复杂，但能够更好地消除导线以及多路开关产生的误差，在实际设计中常常使用独立的测量桥路。

(1) 三线制电桥多路测量。图 3-52 所示为典型的三线制热电阻电桥多路测量电路，在 $R-T$ 转换中，电桥电源 E 必须十分稳定，一般要求电源误差小于 0.1% ，因为 E 的误差将直接影响桥路的输出。

电桥中一般取桥臂电阻 $R_1 = R_2$ ，同时为了使变换器在整个变换范围内有线性变换关系，桥臂电阻 R_1 、 R_2 应远大于被测电阻 R_T 。 r_1 、 r_2 和 r_3 是线路电阻，由于 r_1 、 r_2 对输出电压有直接影响，故实际使用中将 $r_1 \sim r_3$ 调整为 5Ω 。

总之 R_1 、 R_2 、 R_3 、 r_1 、 r_2 对输出电压都有直接影响，故要求它们的电阻稳定性和准确度都比较高，否则将影响整个仪表的测量准确度。

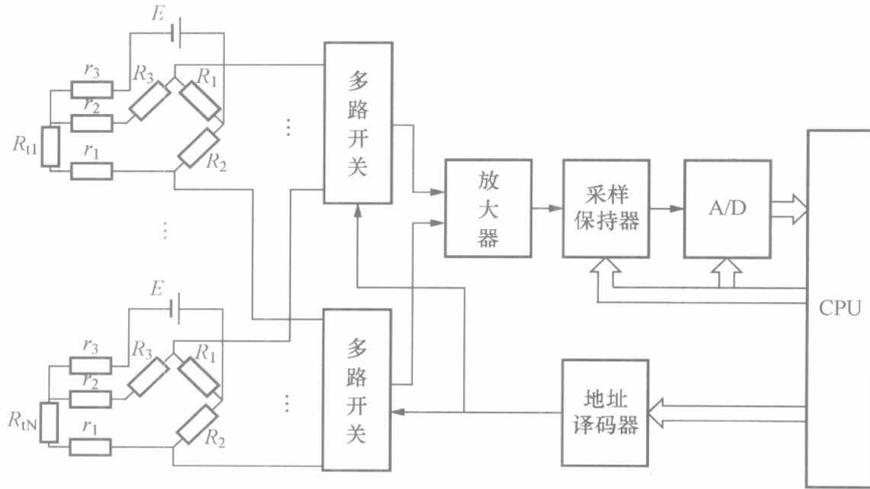


图 3-52 三线制热电阻电桥多路测量电路

(2) 两线制电桥多路测量。两线制热电阻电桥测量实质上是一种采用共用测量电桥的方法。安装在工业现场的热电阻以两线的方式直接连接到置于控制室的多路转换开关，经过选通后再通过测量电桥采集以及进行相应处理。对于多路开关以及连接线所产生的阻值误差可以考虑以软件算法的方式在数据处理中调试消除，其原理如图 3-53 所示。

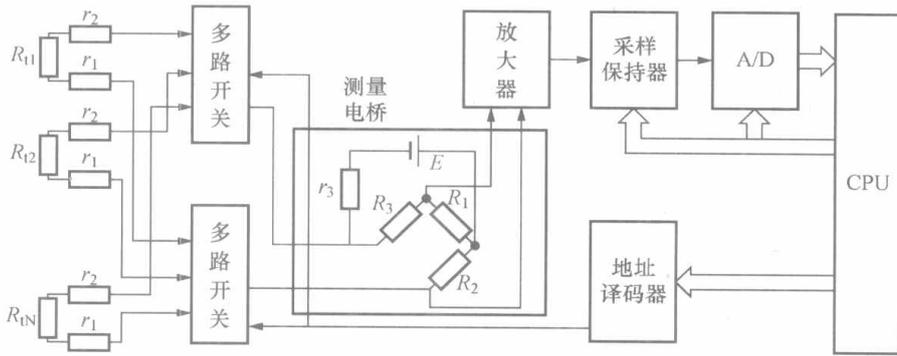


图 3-53 两线制热电阻电桥多路测量电路

3.3.5 热电阻温度计的应用

3.3.5.1 热电阻的误差分析

热电阻温度计若使用不当，会产生较大的误差。可能产生误差的因素主要有以下几个方面。

(1) 动态误差。由于电阻体体积较大，热容量较大，其动态误差比热电偶大，这也制约了热电阻在快速测温中的应用。测温时待温度计与介质完全达到热平衡后才能进行测量，否则将会带来较大的误差。

(2) 连线电阻变化引起测量误差。测温时，都需要一定长度的引出线。引出线多为铜线，其阻值会随环境温度变化。由于连线电阻的变化与热电阻阻值变化产生叠加，故使测量结果产生误差，减小此项误差的方法是热电阻与测量电路连接时采用三线制或四线制接线方式。

(3) 热电阻通电发热引起误差。在实际测温中, 必须有电流流过电阻感温元件, 并在其中产生焦耳热, 从而引起电阻感温元件温度的上升。电阻感温元件的温度上升导致了电阻值的增加, 会带来测量误差。为了减小因自热效应带来的误差, 规定电阻中流过的电流不能超过规定值。

(4) 机械力带来的误差。热电阻的电阻丝在绕制后都要经过严格的退火处理, 以最大限度地消除内应力。当热电阻受到冲击、振动等机械力的作用时, 会导致电阻丝的变形、弯曲而产生内应力, 从而改变其电阻值和电阻温度特性, 带来测量误差。

(5) 氧化带来的误差。热电阻长期使用在高温氧化条件下时, 其阻值会因氧化而变化, 带来测量误差。

(6) 淬火效应的误差。当热电阻从高温下快速冷却时, 其作用相当于淬火。淬火作用会在热电阻内产生应力, 还可以产生微观组织缺陷。这些都会引起电阻值的变化, 带来测量误差。

3.3.5.2 热电阻的故障处理

热电阻的常见故障是电阻短路或断路, 其中以断路为多, 这是由于电阻丝较细所致。断路和短路极易判别, 用万用表欧姆档可方便检查。在运行中常见故障及处理方法见表 3-9。

表 3-9 热电阻常见故障及处理方法

故障现象	可能原因	处理方法
显示仪表示值偏低或示值不稳	保护管内有金属屑、灰尘; 接线柱间积灰以及热电阻短路	除去金属屑, 清扫灰尘, 找出短路点, 加好绝缘
显示仪表指示无穷大	热电阻或引出线断路	更换热电阻或焊接断线处(焊毕要校验)
显示仪表指示无穷小	显示仪表与热电阻接线有误或热电阻短路	改正接线, 找出短路处, 加好绝缘
阻值与温度关系有变化	热电阻材料受腐蚀变质	更换热电阻

3.3.6 热电阻的校验

热电阻在投入使用之前要进行校验, 在投入使用后也要定期进行校验, 对于标准电阻采用定点法进行校验, 即在几种物质的相平衡点温度下进行校验, 关于这方面的工作, 我国有统一规程, 可参阅有关资料, 工业上使用的热电阻常用比较法进行校验。

校验设备如下: 标准玻璃温度计一套(或者标准铂电阻温度计)、加热恒温器一套($-50 \sim 500^{\circ}\text{C}$)、标准电阻(10Ω 或者 100Ω) 一个、电位差计一台、分压器和切换开关各一个。

校验时按以下步骤进行:

(1) 按图 3-54 接线, 并检查是否

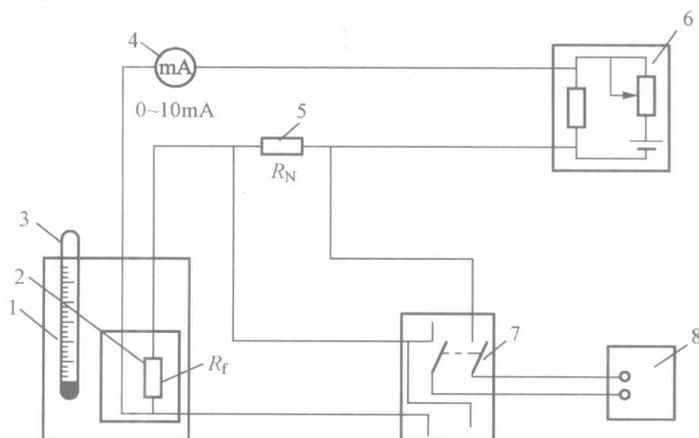


图 3-54 热电阻校验的接线图

1—加热恒温器; 2—被校验电阻体; 3—标准温度计; 4—毫安表;
5—标准电阻; 6—分压器; 7—双刀双掷开关; 8—电位差计

正确。

(2) 将电阻体放在恒温箱内,使之达到校验点温度并保持恒温,然后调节分压器使毫安表指示约为 4mA (电流不可过大,以免热电阻发热影响测量精度),将切换开关切向标准电阻 R_N 的一边,读出电位差计示值 V_N ;然后立即将切换开关切向被校热电阻一边,读出电位差计示值 V_t 。按 $R_t = \frac{V_t}{V_N} R_N$ 公式求出 R_t 。在同一校验点需反复测量几次,计算出几次测量的 R_t 值(指同一校验点)。取其平均值与分度表比较,看其误差是否大于允许误差。如果误差在允许误差范围内,则认为该校验点的 R_t 值合格。

(3) 再取被测温度范围内的 10%、50%和 90%的温度作校验点重复以上校验,如均合格,则此热电阻校验完毕。

热电阻的校验除上述方法外,也有用只校验 R_0 与 $\frac{R_{100}}{R_0}$ 的方法,如该两个参数的误差不超出允许误差的范围(见表 3-8),即认为热电阻合格。这个方法也就是校验 0°C 和 100°C 的热电阻阻值。此时加热恒温器换用冰点槽及水沸腾器。

3.4 新型温度传感器

随着科学技术的迅猛发展,新效应、新材料、新工艺的不断发现以及信号处理方法的不断改进,推动了温度传感器的发展。在温度测量方面,以集成温度传感器、总线式数字温度传感器具有代表性。

3.4.1 集成温度传感器

集成温度传感器是利用晶体管 PN 结的电流、电压特性与温度的关系,把感温 PN 结及有关电子线路集成在一个小的硅片上,构成一个小型化、一体化的专用集成电路片。集成温度传感器具有体积小、反应快、线性好、价格低等优点。由于 PN 结受耐热性能和特性范围的限制,它只能用来测量 150°C 以下的温度。

按输出电量类型的不同来区分,集成温度传感器可分为电压型、电流型两种。电流型传感器输出阻抗极高,因此可以简单地使用双股绞线传输数百米远;电压型传感器的优点是直接输出电压、输出阻抗低,易于与读出或控制电路连接。

3.4.1.1 电流型集成温度传感器

典型的代表器件是美国模拟器件公司生产的单片集成两端感温集成电流源 AD590。

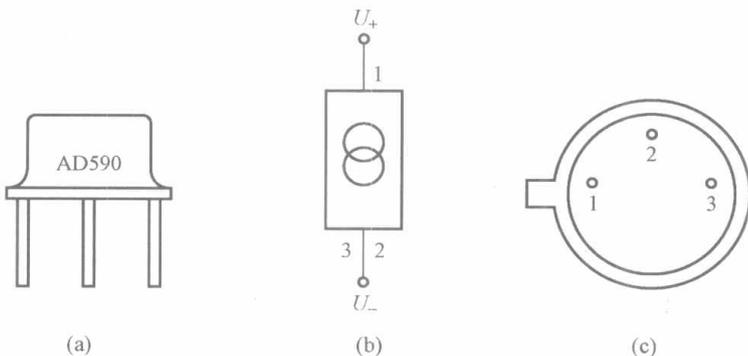


图 3-55 AD590 的外形和电路符号

(a) 外形; (b) 电路符号; (c) 引脚

1. AD590 (SL590) 外形、电路符号和引脚功能

AD590 的输出电流与环境绝对温度成正比,可以直接制成绝对温度仪。

AD590 有 I、J、K、L、M 等型号系列,SL590 是仿 AD590 的产品。SL590 和 AD590 可以直接互换使用。它们采用金属管壳封装,外形和电路符号如图 3-55 所示。若集

成温度传感器的输出电流 I_0 与温度成正比, 则称其为电流型集成温度传感器。AD590 集成温度传感器各引脚功能如表 3-10 所示。

2. 内部电路

AD590 内部电路由两只 PN 结对管组成的温度敏感元件和恒流源组成, 如图 3-56 所示。

其中 V1 和 V2 是相互匹配的晶体管, I_1 和 I_2 分别是 V1 和 V2 管的集电极电流, 由恒流源提供。V1 和 V2 管的两个发射极和基极电压之差 ΔU_{be} 可表示为

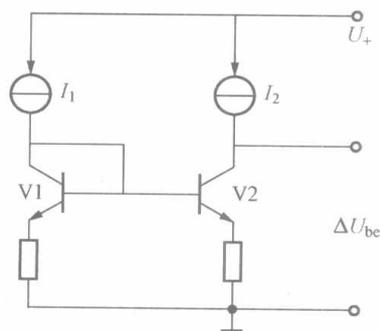


图 3-56 AD590 集成温度传感器基本原理图

表 3-10 AD590 集成温度传感器各引脚功能

引脚编号	符号	功能
1	U_+	电源正端
2	U_-	电流输出端
3		金属外壳, 一般不用

$$\Delta U_{be} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_2} \gamma\right) \quad (3-44)$$

式中 q ——电子电荷量 ($1.59 \times 10^{-19} \text{C}$);

K ——波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$);

T ——绝对温度;

γ ——常数, 由设计和制造决定。

由式 (3-44) 可知, ΔU_{be} 正比于绝对温度 T , 这就是集成温度传感器的测温原理。

3. 主要特性和应用

AD590 的灵敏度为 $1\mu\text{A/K}$, 具有良好的互换性和线性关系, 在整个使用温度范围内误差在 0.5°C 以内。它还具有消除电源波动的特性, 即使电源电压从 5V 变化到 15V , 电流也只在 $1\mu\text{A}$ 以内变化, 即只有 1°C 以下的变化, 因而广泛应用在高精度温度测量和计量等方面, 其主要特性见表 3-11。

表 3-11

AD590 集成温度传感器的主要特性

参数名称	AD590I	AD590J	AD590K	AD590L	AD590M
最高正向电压/V	44				
最高反向电压/V	-20				
工作温度范围/ $^\circ\text{C}$	-55~+150				
储存温度/ $^\circ\text{C}$	-65~+175				
工作电压范围/V	4~30				
额定输出电流/ μA	298.2				
额定温度系数/ $(\mu\text{A}/^\circ\text{C})$	1				
非线性(-55~+150)/ $^\circ\text{C}$	± 3	± 1.5	± 0.8	± 0.4	± 0.3
校正误差(在 25°C 时) / $^\circ\text{C}$	± 10	± 5	± 2.5	± 1	± 0.5

(1) 温度测量电路。图 3-57 所示为一个简单的测温电路。AD590 在 25°C (298.16K) 时, 理想输出电流为 $298.16\mu\text{A}$, 但实际上存在一定误差, 可以在外电路中进行修正。将 AD590 串联一个可调电阻, 在已知温度下调整电阻值, 使输出电压 U 。满足 1mV/K 的关系 (如 25°C 时, U_0 应为 298.16mV)。调整好以后, 固定可调电阻, 即可由输出电压 U 。读出所处的热力学温度。

(2) 控温电路。简单的控温电路如图 3-58 所示。AD311 为比较器，它的输出控制加热器电流，调节 R_T 可改变比较电压，从而改变了控制温度。AD581 是稳压器，为 AD590 提供一个合理的稳定电压。

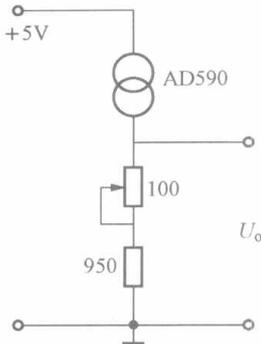


图 3-57 简单的测温电路

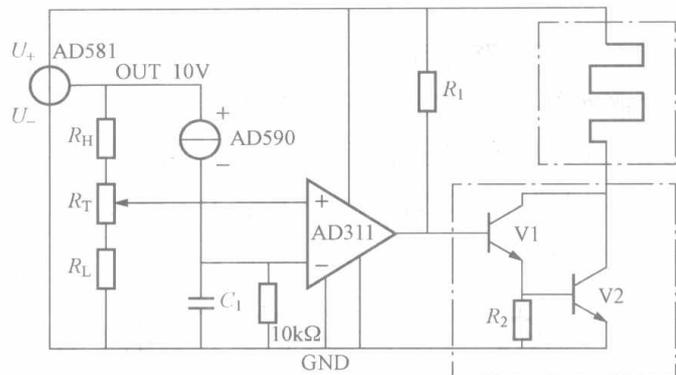


图 3-58 简单的控温电路

3.4.1.2 电压型集成温度传感器

若集成温度传感器的输出电压 U_o 与温度成正比，则称其为电压型集成温度传感器。LM35 系列是美国国家半导体公司生产的电压输出式集成温度传感器，它们具有很高的工作精度和较宽的线性工作范围，输出电压与摄氏温度成正比。

1. LM35 外形、电路符号和引脚功能

LM35 系列包括五种型号：LM35、LM35A、LM35C、LM35CA、LM35D，采用金属封装和塑封两种形式，其外形和电路符号如图 3-59 所示。各引脚功能见表 3-12。

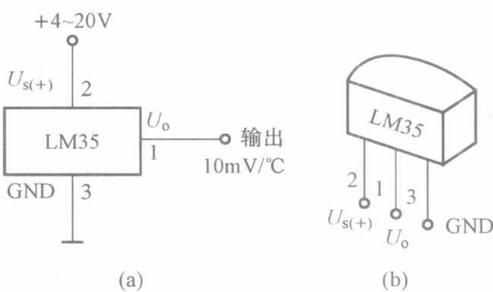


图 3-59 LM35 集成温度传感器外形和电路符号

(a) 电路符号；(b) 外形

表 3-12 LM35 系列集成温度传感器各引脚功能

引脚编号	符号	功能
1	U_o	输出端
2	$U_{s(+)}$	电源正端
3	GND	接地端

2. 内部电路

LM35 电压型集成温度传感器内部电路由 PN 结对管、基准电压和运算放大电路三部分组成，其电路框图见图 3-60。

3. 主要特性和应用

LM35 灵敏度为 $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，输出电压与摄氏温度成正比，且无需校正，所以使用很方便，不需要外接任何元件即可构成最基本的摄氏温度计，其电路如图 3-61 所示。

当 LM35 用来测量正温度时，只需单电源供电。 U_s 为电源电压，取 $4\sim 30\text{V}$ 。输出电压 U_o 与温度 t 的关系为

$$U_o = 10 \times t(\text{mV}) \tag{3-45}$$

例如： 25°C 时， $U_o = 250\text{mV}$ ； 100°C 时， $U_o = 1000\text{mV}$ 。

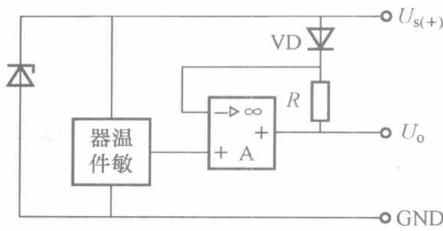


图 3-60 LM35 内部电路框图

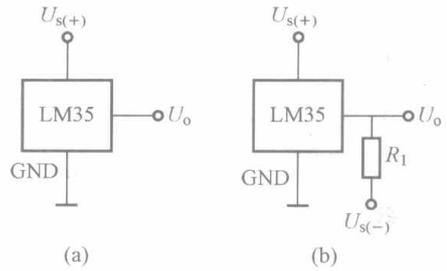


图 3-61 LM35 构成的摄氏温度计电路
(a) 测量正温度电路；(b) 测量正负温度电路

若需要测量正负温度，则应采用正负电源，此时输出灵敏度不变。

例如：-20℃时， $U_o = -200\text{mV}$ ；+50℃时， $U_o = 500\text{mV}$ 。

图 3-61 中 R_1 值的计算式为

$$R_1 = |U_s| / 50\mu\text{A}$$

LM35 线性良好，精度可达 0.5℃，工作电压宽，耗电量小，输出阻抗低，应用广泛，其主要特性见表 3-13。

表 3-13 LM35 系列集成温度传感器主要特性

参数名称	LM35/35A	LM35C/35CA	LM35D
工作温度范围/℃	-55~+155	-40~+110	0~100
精度/℃	$\pm 0.4 / \pm 0.2 (t=25^\circ\text{C})$	$\pm 0.4 / \pm 0.2 (t=25^\circ\text{C})$	± 0.4
工作电压范围/℃	4~30	4~30	4~30
静态电流/ μA	56	56	56
灵敏度/(mV/℃)	10	10	10

3.4.2 总线式数字温度传感器

总线式数字温度传感器属于智能化产品，其主要优点是采用数字化技术，能以数字形式直接输出被测温度值，具有测温误差小、分辨率高、抗干扰能力强、能够远程传输数据、用户可设定温度上下限、越限自动报警、自带串行总线接口等优点。典型的产品有 DS1820、DS18B20、DS18S20、DS1821、DS1822、DS1624、DS1629 等型号。

该传感器根据串行总线来划分，有单线总线、二线总线两种类型，输出为 9~12 位的二进制数据，测温分辨率一般可达 0.5~0.062 5℃。DS1624 型高分辨率数字温度传感器能够输出 13 位二进制数据，其分辨率高达 0.031 25℃。下面以 DS18B20 为例对总线式数字温度传感器加以介绍。

3.4.2.1 DS18B20 的结构

DS18B20 是 DALLAS 公司生产的一线式数字温度传感器，具有 3 引脚 TO-92 小体积

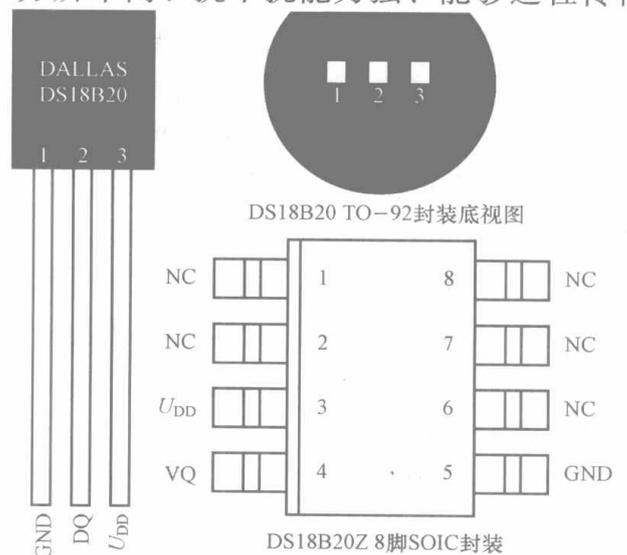


图 3-62 DS18B20 管脚图

1—电源地 (GND)；2—数字信号输入/输出端 (DQ)；
3—外接供电电源输入端 (U_{DD})

封装形式,如图 3-62 所示。温度测量范围为 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$,可编程,为 9~12 位 A/D 转换精度,测温分辨率可达 0.0625°C 。被测温度用符号扩展的 16 位数字量方式串行输出。其工作电源既可在远端引入,也可采用寄生电源方式产生。多个 DS18B20 可以并联到 3 根或 2 根线上,CPU 只需一根端口线就能与诸多 DS18B20 通信,占用微处理器的端口较少,可节省大量的引线和逻辑电路。以上特点使多个 DS18B20 非常适用于远距离多点温度检测系统。

DS18B20 内部结构如图 3-63 所示,主要由 4 部分组成,即 64 位 ROM、温度传感器、非易失性温度报警触发器 TH 和 TL、配置寄存器。

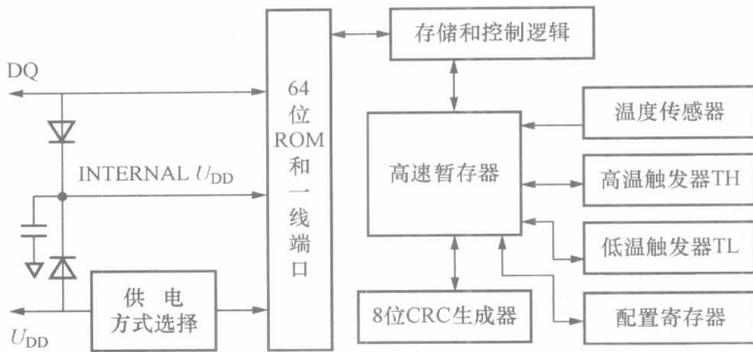


图 3-63 DS18B20 内部结构框图

温度报警上下限值 TH 和 TL (掉电后依然存在)。DS18B20 在完成温度变换后,所测温度值将自动与存储在 TH 和 TL 内的触发值相比较,如果测温结果高于 TH 或低于 TL,DS18B20 内部的报警标志就会被置位,表示温度超出了测量范围。

3.4.2.2 DS18B20 的测温原理

DS18B20 的测温原理如图 3-64 所示,图中低温度系数晶振的振荡频率受温度的影响很小,用于产生固定频率的脉冲信号送给减法计数器 1,高温系数晶振随温度变化其振荡频率明显改变,所产生的信号作为减法计数器 2 的脉冲输入。图 3-64 中还隐含着计数门,当计数门打开时,DS18B20 就对低温度系数振荡器产生的时钟脉冲后进行计数,进而完成温度测量。计数门的开启时间由高温系数振荡器来决定。每次测量前,首先将 -55°C 所对应的基数分别置入减法计数器 1 和温度寄存器中,减法计数器 1 和温度寄存器被预置在 -55°C 所对应的一个基数值。减法计数器 1 对低温度系数晶振产生的脉冲信号进行减法计数,当减法计数器 1 的预置值减到 0 时温度寄存器的值将加 1,减法计数器 1 的预置将重新被装入,减法计数器 1 重新开始对低温度系数晶振产生的脉冲信号进行计数,如此循环直到减法计数器 2 计数到 0 时,停止温度寄存器值的累加,此时温度寄存器中的数值即为所测温度。图 3-64 中的斜率累加器用于补偿和修正测温过程中的非线性,其输出用于修正减法计数器的预置值。

被测温度用符号扩展的 16 位数字量方式串行输出,如图 3-65 所示。前面 5 位为符号位,如果测得的温度大于 0,这 5 位为 0,只要将测得的数值乘以 0.0625 即可得到实际温度;如果温度小于 0,这 5 位为 1,

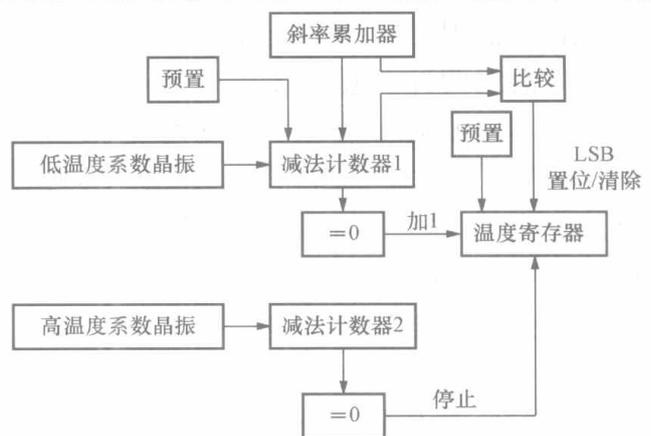


图 3-64 DS18B20 的测温原理图

测得的数值需要取反加 1 再乘以 0.062 5 即可得到实际温度。温度/数字对应关系如表 3-14 所示。

	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
LS Byte	2^3	2^2	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}
	bit 15	bit 14	bit 13	bit 12	bit 11	bit 10	bit 9	bit 8
MS Byte	S	S	S	S	S	2^6	2^5	2^4

图 3-65 温度测量转换数据

例如： $+125^{\circ}\text{C}$ 的数字输出为 07D0H， $+25.062\ 5^{\circ}\text{C}$ 的数字输出为 0191H， $-25.062\ 5^{\circ}\text{C}$ 的数字输出为 FE6FH， -55°C 的数字输出为 FC90H。

表 3-14 DS18B20 若干温度与其串行数字对照表

温度/ $^{\circ}\text{C}$	数字输出二进制	数字输出十六进制	温度/ $^{\circ}\text{C}$	数字输出二进制	数字输出十六进制
+125	0000 0111 1101 0000	07D0H	0	0000 0000 0000 0000	0000
+85	0000 0101 0101 0000	0550H	-0.5	1111 1111 1111 1000	FFF8H
+25.062 5	0000 0001 1001 0001	0191H	-10.125	1111 1111 0101 1110	FF5EH
+10.125	0000 0000 1010 0010	00A2H	-25.062 5	1111 1110 0110 1111	FE6FH
+0.5	0000 0000 0000 1000	0008H	-55	1111 1100 1001 0000	FC90H

3.4.2.3 DS18B20 使用中注意事项

DS18B20 虽然具有测温系统简单、测温精度高、连接方便、占用口线少等优点，但在实际应用中也应注意以下几方面的问题。

(1) 较小的硬件开销需要相对复杂的软件进行补偿，由于 DS18B20 与微处理器间采用串行数据传送，因此，在对 DS18B20 进行读写编程时，必须严格保证读写时序，否则将无法读取测温结果。在使用 PL/M、C 等高级语言进行系统程序设计时，对 DS18B20 操作部分最好采用汇编语言实现。

(2) 在 DS18B20 的有关资料中均未提及单总线上所挂 DS18B20 数量问题，容易使人误认为可以挂任意多个 DS18B20，在实际应用中并非如此。当单总线上所挂 DS18B20 超过 8 个时，就需要解决微处理器的总线驱动问题，这一点在进行多点测温系统设计时要加以注意。

(3) 连接 DS18B20 的总线电缆是有长度限制的。这主要是由总线分布电容使信号波形产生畸变造成的。因此，在用 DS18B20 进行长距离测温系统设计时要充分考虑总线分布电容和阻抗匹配问题。

(4) 在 DS18B20 测温程序设计中，向 DS18B20 发出温度转换命令后，程序总要等待 DS18B20 的返回信号，一旦某个 DS18B20 接触不好或断线，当程序读该 DS18B20 时，将没有返回信号，程序进入死循环。这一点在进行 DS18B20 硬件连接和软件设计时也要给予一定的重视。

(5) 测温电缆线建议采用屏蔽 4 芯双绞线，其中一组接地线与信号线，另一组接 U_{DD} 和地线，屏蔽层在源端单点接地。

3.5 测温实例

采用接触式测温方法测量温度时, 温度计指示的温度只是感温元件本身的温度。若要使测温仪表的感温元件输出反映被测温度, 需满足以下条件。

- (1) 温度计和被测对象组成孤立的热平衡系统;
- (2) 温度计的热容和热阻为零。

但实际测温中, 温度计除与被测对象进行热交换外, 还要与周围环境交换热量; 另外, 温度计的热容和热阻也不可能为零。各种因素的影响使得温度计的输出与被测真实温度不同, 有时两者的差别很大。单靠提高测温仪表的准确度是不能减小此偏差的, 只有通过分析测温对象, 选择合理的测温技术, 才有可能获得准确的温度值。

3.5.1 管道内流体温度的测量

在生产中经常遇到管道中流体温度测量问题。比如电厂中主蒸汽温度测量、锅炉给水温度测量等。测量管内流体温度的示意图如图 3-66 所示。

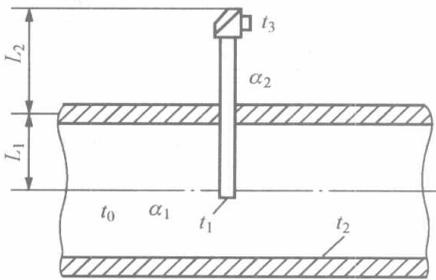


图 3-66 测量管内流体温度的示意图

管道中流过温度为 t_0 的流体, 管道周围介质温度为 t_3 , 如果 $t_3 < t_0$, 这时就有热量沿测温元件向外导出, 这就是导热损失。由于存在导热误差, 使测温元件温度 t_1 比流体温度 t_0 要低, 也即产生了导热误差 $t_1 - t_0$ 。这时如果测温管附近无低温冷壁, 管道内温度又高, 这种情况下测温管对管子内壁的辐射散热影响可以忽略。在以上情况下, 根据传热学原理, 可得出导热误差的关系式, 即

$$t_1 - t_0 = - \frac{t_0 - t_3}{\text{ch}(b_1 L_1) \left[1 + \frac{b_1}{b_2} \text{th}(b_1 L_1) \text{cth}(b_2 L_2) \right]} \quad (3-46)$$

其中

$$b_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 V_1}{\lambda_1 F_1}}, \quad b_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2 V_2}{\lambda_2 F_2}}$$

式中 α_1 、 α_2 ——管内、外介质对测温管之间的放热系数;
 λ_1 、 λ_2 ——管内、外两段测温管的热导率, $\lambda_1 = \lambda_2$;
 V_1 、 V_2 —— L_1 、 L_2 两段测温管的截面周长, $V_1 = V_2 = \pi d_1$;
 F_1 、 F_2 ——管道内、外两段测温管的截面积, $F_1 = F_2$;
 L_1 、 L_2 ——管道内、外测温管的长度。

分析式 (3-46) 可知, 要想减小这个误差, 需要减小分子项, 增大分母项, 现在我们来讨论一下误差公式。

$$1. (t_0 - t_3) \downarrow \Rightarrow (t_1 - t_0) \downarrow$$

$(t_0 - t_3)$ 为管道当中流体与管外介质的温差, 为了减小这个误差应该把露在管道外侧的测温管用保温材料包起来, 使得测温管露出部分的温度提高, 减小热电偶对外导热损失。

$$2. \text{ch}(b_1 L_1) \uparrow \text{ 和 } \text{th}(b_1 L_1) \uparrow \Rightarrow (t_1 - t_0) \downarrow$$

由双曲余弦 $\text{ch}(b_1 L_1)$ 和双曲正切 $\text{th}(b_1 L_1)$ 的特性曲线可知, 要使 $\text{ch}(b_1 L_1)$ 和 $\text{th}(b_1 L_1)$ 增

大, 必定有 $b_1 L_1$ 增大。

(1) L_1 为管内测温管长度, 要使 L_1 增加也就是使插到管内的测温管长度增加, 所以在现场中要把测温管安装到管道中心线上, 但不超过中心线, 否则测温管易断裂。

$$(2) b_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 V_1}{\lambda_1 F_1}} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \alpha_1 \uparrow \\ \lambda_1 \downarrow \\ F_1 \uparrow \end{cases}$$

α_1 为管道介质对测温管的对流放热系数, α_1 增加能使 b_1 增加, 要增大 α_1 应该把感受件放到管道流速最高的地方, 即管道中心轴线上。

λ_1 是测温管材料的热导率, 要想减小 λ_1 , 测温管常采用导热性质不良的材料, 如陶瓷、不锈钢来制造。

$\frac{V_1}{F_1}$ 为测温管截面周长与截面积之比, $V_1 = \pi d_1$, $F_1 = \frac{\pi(d_0 + d_1)}{2} \delta$, $\delta = \frac{d_1 - d_0}{2}$, 其中 d_0 为测温管内径, d_1 为测温管外径, δ 为测温管厚度, 如图 3-67 所示。要使 $\frac{V_1}{F_1}$ 增加, 必有 $\frac{V_1}{F_1} = \frac{4d_1}{d_1^2 - d_0^2}$ 增加, 所以一般应该使 d_1 尽量小, δ 也尽量小, 也就是应将测温管制成外形细长, 而壁厚很薄的形状。

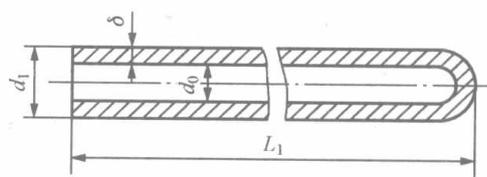


图 3-67 测量管的尺寸

$$3. \text{cth}(b_2 L_2) \uparrow \Rightarrow (t_1 - t_0) \downarrow$$

由双曲余切 $\text{cth}(b_2 L_2)$ 特性曲线可知, $\text{cth}(b_2 L_2) \uparrow$ 必有 $b_2 L_2 \downarrow$ 。其中, L_2 为管道外测温管长度, L_2 减小就是使测温管露出部分缩短; $b_2 = \sqrt{\frac{\alpha_2 V_2}{\lambda_2 F_2}}$, $\frac{V_1}{F_1} = \frac{V_2}{F_2}$, $\lambda_1 = \lambda_2$, 与前面相同, 这里 α_2 下降可使 b_2 值减小, α_2 是管外介质对测温管之间的对流放热系数。要使 α_2 减小, 采取的措施就是在测温管露出部分加绝热层, 以减小管道外介质对感受元件外露部分的对流放热系数。

综合以上分析, 对管内流体温度进行测量时温度计的安装通常要考虑以下几点。

(1) 测点位置要选在有代表性的地点, 不能在温度的死角区域。

(2) 要保证测温元件有一定的插入深度, 元件的感温点应处于管道中心流速最大处。对于直径大的管道, 测温元件可垂直插入; 为增加插入深度, 可迎着流体流动的方向斜向插入测温元件; 对于内径较小的管道, 测温元件可插入弯头处或加装扩大管。图 3-68 给出了几种常见的测温元件安装方式。

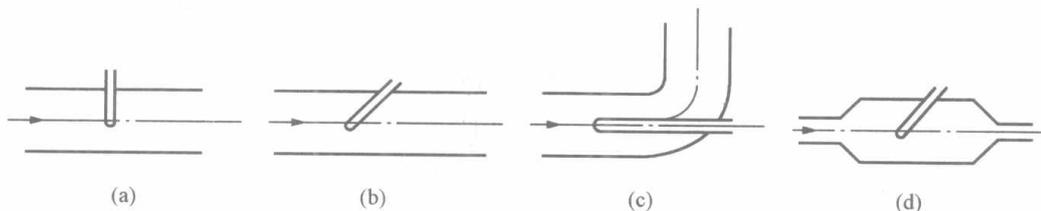


图 3-68 几种常见测温元件安装方式

(a) 垂直安装; (b) 倾斜安装; (c) 弯管处安装; (d) 扩大管安装

(3) 对于高温管道, 在测点引出处要加保温材料隔热, 以减小热损失带来的测量误差。

图 3-69 所示为温度计安装在蒸汽管道不同位置上测温的情况。该管道内径是 100mm, 汽压 3MPa, 汽温为 386°C, 流速为 30~35m/s。

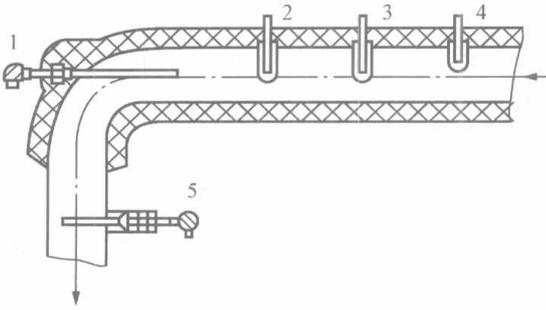


图 3-69 温度计不同安装方式的比较

图 3-69 中, 1 号采用铂电阻温度计, 安装在管道拐弯处, 沿管道中心线插得很深, 温度计迎着气流, 安装部位的管道有很厚的绝热层, 测温管露出部分很少。此情况下温度计示值为 386°C , 测温误差接近于零。

2 号采用玻璃管水银温度计, 垂直气流方向插入, 温包处于管道中心线位置, 外露部分短且测温管外有绝热层, 温度计示值为 385°C , 测量误差为 -1°C 。

3 号与 2 号的不同之处是测温管的直径和管道厚度都比较大, 温度计示值为 384°C , 误差达到了 -2°C 。

4 号和 2 号的不同之处是测温管没有插到管道中心, 温度计示值为 371°C , 误差达到 -15°C , 即 -4% 左右。

5 号也是用铂电阻温度计, 垂直于气流方向插入管道中心, 外露部分较长且外露部分及管道均未保温。温度计示值为 341°C , 测量误差达到 -45°C , 即 -12% 。

从图 3-69 可以看出, 在测量管道中流体温度时, 如果遵循前面提出的原则来安装温度计, 测量误差是可以减小的。

在电厂高温高压主蒸汽管道上不允许在弯头等应力较大的地方 (如图 3-69 的 1 处) 打孔, 在直管段上斜着打孔使开孔较大, 一般也不采取。因此, 在高温高压管道上一般采取在直管段上将测温传感器直插安装的办法, 这就使传感器插入深度受到限制。另外, 插入部分在高速气流冲刷下容易出现振动断裂事故, 也应缩短插入部分。但这样做将产生较大的导热误差。对此可采用高压焊接固定锥形热电偶的安装方式。如图 3-70 所示, 在测温套管的中间有一个环形空腔, 在套管与管道连接处留有三个空隙, 蒸汽可以从这里进入空腔对套管加热。这样就大大减小了测温套管端部轴向的温度梯度, 也就减小了导热引起的误差。

3.5.2 壁面温度测量

壁面温度的测量一般也可分为接触法 (如热电偶等) 和非接触法 (如红外测温仪等)。热电偶因其热接点小、测量范围大、准确度较高, 常用来测量壁面温度。用热电偶测量壁面温度和一切接触式的测温方法一样, 由于被测表面沿热电偶有热量导出破坏了被测表面的温度场, 使热电偶所测量的温度实际是破坏温度场以后的表面温度, 因此就产生了测量误差。这个误差与被测壁面的导热性能有关, 导热性能差, 误差大; 另外还与热电偶与壁面的接触方式及焊接形式有关。

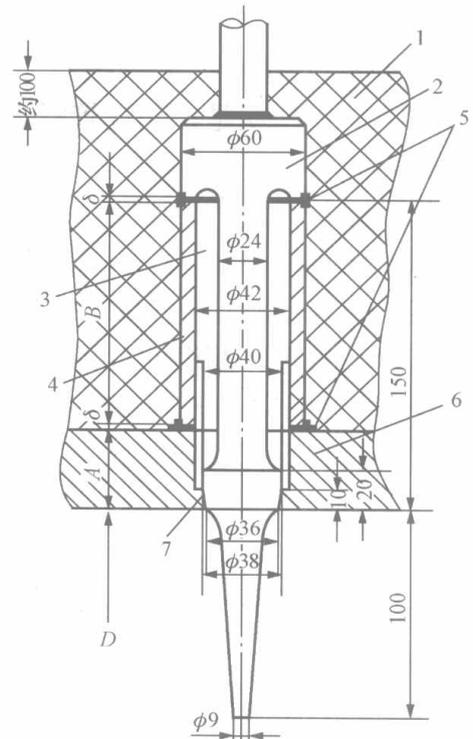


图 3-70 高压焊接固定锥形热电偶的安装方式

1—保温层; 2—高压焊接固定锥形热电偶; 3—充满蒸汽的热套; 4—垂直套管; 5—电焊接口; 6—主蒸汽管道壁; 7—卡紧固定

热电偶与被测壁面的接触方式基本有四种，如图 3-71 所示。

图 3-71 (a) 所示为点接触，热电偶的测量端直接与被测表面相接触；图 3-71 (b) 所示为面接触，先将热电偶的测量端与导热性能良好的金属片（如铜片）焊在一起，然后再与被测表面接触；图 3-71 (c) 所示为等温线接触，热电偶的测量端与被测表面直接接触，热电极从测量端引出时沿表面等温敷设一段距离（约 20 倍电极直径）后引出；图 3-71 (d) 所示为分立接触，两热电极分别与被测表面接触，通过被测表面构成回路（壁面必须是导体）。

对于上述四种接触法，图 3-71 (c) 所示方式误差最小，因为热电极已与被测表面等温敷设一段距离后才引出，散热量主要由等温敷设段供给，使测量端的温度梯度比另三种方式要小得多；图 3-71 (b) 方式次之，因为散失的热量由金属片所接触的那块表面上共同分担；图 3-71 (a) 所示方式误差最大，因为导热损失全部集中在一个点上，热量不能得到充分补偿；图 3-71 (d) 所示方式有两个接触点，其误差小于图 3-71 (a) 但劣于图 3-71 (b) 和图 3-71 (c)。

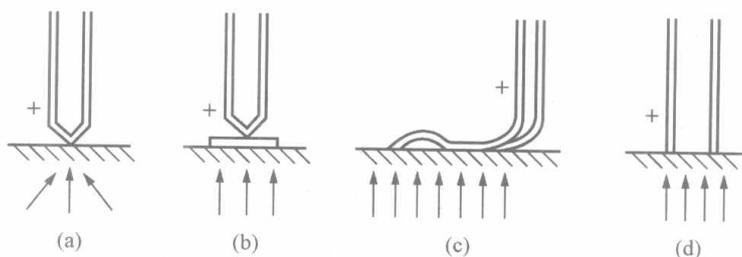


图 3-71 热电偶与被测表面的接触方式

(a) 点接触；(b) 面接触；(c) 等温线接触；(d) 分立接触

测量误差不仅仅与热电偶测量端的接触方式有关，而且与被测面的导热能力有关，如被测固体表面为玻璃、陶瓷等，它们的导热性能差，这时采用图 3-71 (a) 所示接触方式，则误差很大，而采用图 3-71 (b) 所示接触方式则误差大大减小，这是因为金属片导热性能好，当金属片有比较大的面积时，导走相同的热量所需要的温度差会大大减小，使热电偶测量端温度不致降低太多。

如果热电极的直径粗，则散失热量多，测量端温度改变就大；直径细，向外散失热量少，测量端温度改变就小。如果壁面上方气流的速度增大，则热电极散失热量就多，测量端温度改变就大；反之，也就小些。当测量管壁表面温度时，管壁厚度增加，则温度误差就小，这是由于热电极向外导走热量，很快就由管壁的其他部分补充了，因而测温误差就减小。

由以上分析可知，测量壁面温度时要优先考虑以下情况。

- (1) 在强度允许的条件下，尽量采用直径小、导热系数低的热电偶；
- (2) 优先考虑等温线敷设；
- (3) 被测材料为非良导热体，可用面接触方式；
- (4) 如被测材料允许，表面开槽敷设对提高测量精度更为有利。

3.5.3 高温气体温度测量

在测量锅炉烟道中烟气温度时，由于烟道的管径很大，测温元件插入深度有时可达 2m，应注意减小套管的导热误差和向周围环境的辐射误差。

因为辐射换热与温度的四次方成正比。因此，随被测气体温度的升高，温度计的辐射换热损失比导热损失所占比例增大。当测温管安装地点附近有温度较低的受热面时，辐射换热引起的误差占主要地位。

图 3-72 中挡板 1 是为了控制烟气流向的, 绝热层 2 用以提高测温管外介质温度。在采用了这些措施以后, 可以认为由于沿测温管散热而引起的误差接近于零。这时测温管仅以热辐射的方式散失部分热量给管壁, 使测温管的温度 t_1 比流体温度 t_0 低, 因而造成的测量误差称为热辐射误差。

热辐射误差的计算式为

$$T_1 - T_0 = -\frac{C_1}{\alpha}(T_1^4 - T_2^4) \quad (3-47)$$

式中 C_1 ——辐射散热系数, $C_1 = \sigma \epsilon_T$, 其中 σ 为全辐射体的斯忒藩—玻尔兹曼常数, 等于 $5.67032 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

ϵ_T ——测温管表面的发射率;

α ——管内介质和测温管之间放热系数;

T_2 ——管壁的热力学温度。

要想减小辐射误差, 可以从以下几个方面考虑。

(1) $(T_1^4 - T_2^4)$ 减小, 即减小测温管端部温度 T_1 与管壁温度 T_2 的差别。

为了减小这个数值, 要妥善选择测温管的装设位置。测温管装设地点的烟道内壁要让烟气流过, 以提高此处的壁温。

再有, 想办法把测温管和冷壁面隔离开来, 使得测温管不直接对冷壁面进行辐射, 减小这项误差通常采用加隔离罩的方法, 如图 3-73 所示。

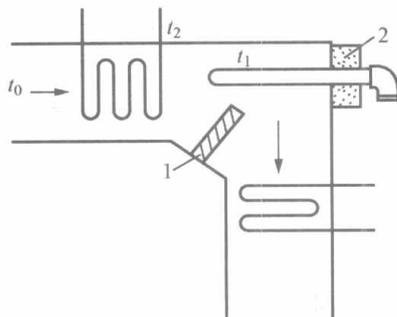


图 3-72 测量高温烟气示意
1—挡板; 2—绝热层

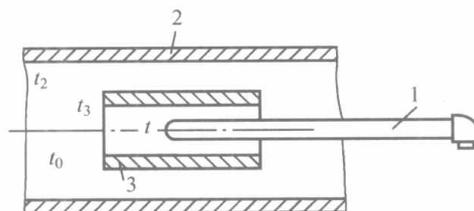


图 3-73 用防辐射隔离罩的测温示意
1—测温管; 2—冷表面; 3—隔离罩

用隔离罩把测温管和冷壁面隔离开后, 由于烟气直接流过隔离罩的内外壁, 加热了隔离罩, 使隔离罩的温度比壁面温度高得多, 这时对冷壁面的辐射散热量也减小, 从而使测温管表面温度较接近于烟气温度, 减小了测温误差。加隔离罩后的热辐射误差为

$$T - T_0 = -\frac{C_1}{\alpha_1}(T^4 - T_3^4) \quad (3-48)$$

与式 (3-47) 相比, 由于 $T_3 > T_2$, 可见测量误差降低了。

(2) C_1 减小。 $C_1 = \sigma \epsilon_T$, 由于 σ 是常数, 所以减小测温管表面发射率 ϵ_T 可使 C_1 减小, 从而使辐射换热误差降低。为此要采用发射率较小的材料作套管, 如耐热合金钢。另外在加工时可将套管打磨抛光, 这样可减小发射率。高温下大多采用陶瓷保护管, 陶瓷管的表面发射率较大, 会使测温误差增大。为减小误差有时直接用裸丝热电偶测温。

(3) α_1 增加。由辐射误差公式可知, 为了减小热辐射误差的影响, 必须增加气流和测温管之间的对流放热系数 α_1 。对于 α_1 的增加, 一是尽可能将温度计安装在气流速度和湍流

度都比较大的地方，并使气流垂直绕流温度计，以便得到较大的对流换热系数；另外可采用抽气式热电偶，抽气热电偶示意图如图 3-74 所示。

当高压蒸汽或压缩空气从喷嘴中喷出时，由于速度很大，在喷嘴局部产生了负压，在此负压作用下，使气流沿图 3-74 中所示方向高速地抽走，这样在热电偶处就形成了高速气流，使放热系数 α_1 增大。抽气速度越大， α_1 就越大，误差就越小。应当指出使抽气达到很大数值是要消耗很多能量的，因此抽气热电偶只能在试验情况下采用。

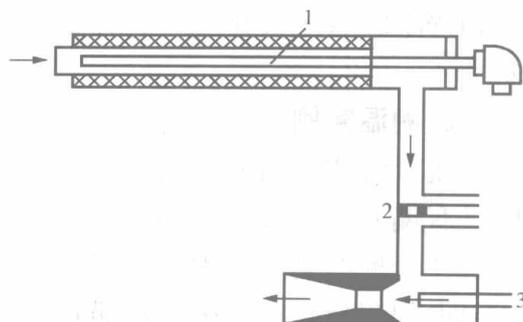


图 3-74 抽气热电偶示意图

1—热电偶感受件；2—调速节流阀；
3—蒸汽喷嘴

本章小结

一、热电偶温度传感器

热电偶温度传感器基于热电效应原理而工作。热电偶测温时的三条基本定律在指导热电偶的实际应用和回路电势分析是非常重要的。

热电偶有不同的构造，分为普通型热电偶（由热电极、绝缘管、保护套管及连接盒等组成）、铠装热电偶（将热电极、绝缘管和保护套管三者组合加工成一坚实整体）、热套式热电偶（用于大型机组的主蒸汽温度测量）等。热电偶的种类很多，工业生产中常使用标准化热电偶测温。

为了消除热电偶的冷端温度变化对测量的影响，可采用计算法、冷端恒温法、补偿导线法及冷端温度补偿器等，对热电偶的冷端温度进行修正和补偿。

测量热电势可使用电位差计。使用热电偶测量温度，要先对热电偶输出的信号进行放大、补偿、线性化、A/D 转换后由数据总线传输至 CPU 进一步进行处理。

为了保证测量准确，热电偶在使用前、使用一段时间后要定期进行周期性的检验。工业用热电偶的检验项目主要有外观检查和允许误差检验两项。

二、热电阻温度传感器

将热电阻插在测温场所，被测温度变化会引起热电阻阻值变化，测出电阻值，便可得到温度的数值。

目前生产中常用的热电阻有铂电阻（分度号 Pt10、Pt100）、铜电阻（分度号为 Cu50、Cu100）。其中铂电阻的准确度高、稳定性好、性能可靠；铜电阻的线性度好、灵敏度高，但测温上限不超过 150°C 。

热电阻按结构类型不同分为普通型热电阻和铠装热电阻等。除感温元件外，热电阻的其余结构和热电偶基本相同。

测量热电阻值可使用电桥。为减小线路电阻随环境温度变化带来的测量误差，热电阻与电桥连接时要采用三线制或四线制接线方式。在热电阻的多路温度检测通道中，首先要将多路电阻值转变为电压信号，然后通过多路开关的选择实现多路温度的测量。其中实现电阻值到电压信号的转换常用的有恒流驱动法与电桥测量法。

热电阻的校验一般在实验室中进行。除标准的铂电阻温度计作三定点（水三相点、水沸

腾点和锌凝固点) 校验外, 实验室和工业用的铂或铜电阻温度计的校验方法有比较法和两点法两种。

三、测温实例

采用接触式测温方法测量温度时, 温度计指示的温度只是感温元件本身的温度, 与被测温度是有偏差的, 且靠提高测温仪表的准确度是不能减小此偏差的。只有通过分析测温对象, 选择合理的测温技术, 才有可能获得准确的温度值。对管内流体温度、壁面温度、高温烟气温度的测量是生产中经常遇到的, 要掌握为减小测温误差采取的措施。

四、其他温度检测仪表

1. 膨胀式温度计

液体膨胀式温度计结构简单, 价格低廉, 测量范围一般在 $-50 \sim 300^{\circ}\text{C}$ 。双金属温度计的测量范围较宽, 为 $-80 \sim 500^{\circ}\text{C}$, 但测量滞后较大。

2. 压力式温度计是基于密闭容器中气体、液体或低沸点蒸发液体受热压力增大的原理工作的, 具有结构简单、使用方便等特点。

3. 新型温度传感器是近些年来出现的测温元件。这类传感器体积小、灵敏度高、响应速度快, 正在逐步应用起来。

需要指出的是, 测温仪表的选用要根据测温范围、测温准确度、测温环境、成本等方面进行综合考虑, 力求做到对温度的准确、可靠和快速测量。

思考题与习题

1. 温标的三要素是什么? 常用的温标有哪些? 它们之间有什么关系?
2. 双金属温度计是怎样工作的? 它有什么特点?
3. 热电偶测温原理是什么? 热电偶回路产生热电势的必要条件是什么?
4. 采用热电偶测温时为什么要进行冷端温度补偿? 冷端温度补偿的方法有哪些?
5. 常用的标准化热电偶有哪些? 各有什么特点?
6. 在热电偶测温电路中采用补偿导线时, 应如何连接? 需要注意哪些问题?
7. 简述手动电位差计的工作原理及使用方法。
8. 手动电位差计的测量电路只有一条支路, 而电子电位差计的测量电路由两条支路组成 (实际上是一个电桥电路)。为什么要采用这种形式?
9. 简述热电偶多路温度检测通道中各组成部分的作用。
10. 试述热电阻测温原理, 并说明常用热电阻的种类及 R_0 值的大小。
11. 画出热电阻与平衡电桥的三线制连接图。说明这种连接方式的优点。
12. 热敏电阻测温有什么特点? 按温度系数分类热敏电阻可分为几种类型?
13. 试比较热电偶测温 and 热电阻的不同之处? (可以从原理、系统组成和应用场合三个方面来考虑)。
14. 用测温元件热电偶或热电阻构成测温系统测量温度时, 应各自注意哪些问题?
15. 热电阻与配套的温度显示仪表构成温度测量系统, 请分析显示仪表出现下列情况的原因:
 - (1) 显示仪表指示值始终偏大;

- (2) 显示仪表指示到最大极限值;
- (3) 显示仪表指示到最小极限值;
- (4) 显示仪表指示值不稳。

16. 以图 3-50 为例, 分析热电阻采用四线制连接可以减小长引线电阻变化造成的误差的原理。

17. 分析接触测温方法产生测温误差的原因, 在实际应用中采取哪些措施以减小测温误差?

18. 简述 AD590 的测温原理。

19. 用分度号为 K 的镍铬—镍硅热电偶测量温度, 在没有采取冷端温度补偿的情况下, 显示仪表指示值为 500°C , 而这时冷端温度为 60°C 。试问实际温度应为多少? 如果热端温度不变, 设法使冷端温度保持在 20°C , 此时显示仪表的指示值应为多少?

20. 现用一支镍铬—镍硅热电偶测某换热器内温度, 其冷端温度为 30°C , 而显示仪表机械零位为 0°C , 这时指示值为 400°C , 若认为换热器内的温度为 430°C , 对不对? 为什么? 正确值为多少?

21. 用两只 E 分度号的热电偶测量两点温差, 已知直流电位差计分别测得热电偶 A 和 B 的电势值为 30.63mV 和 24.49mV , 冷端温度 $t_0=25^{\circ}\text{C}$, 求 t_1 、 t_2 及温差 t_1-t_2 。

22. 如图 3-75 所示温度测量系统, 已知 $t=500^{\circ}\text{C}$, $t_c=30^{\circ}\text{C}$, $t_0=20^{\circ}\text{C}$, 对于下列情况求温度显示仪表的读数 ($^{\circ}\text{C}$)。

(1) 补偿导线, 冷端补偿器和显示仪表使用正确;

(2) 补偿导线接反, 其他使用正确;

(3) 补偿导线使用正确, 显示仪表 (包含冷端补偿器) 错配成 E 型的;

(4) 补偿导线, 冷端补偿器和显示仪表都错配成 E 型的。

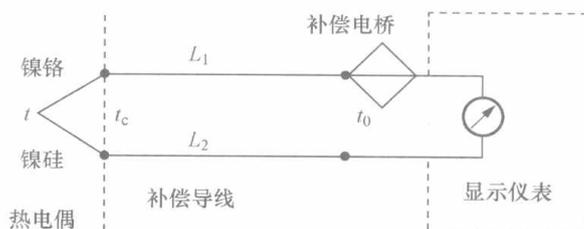


图 3-75 温度测量系统

23. 检定配热电偶的温度显示仪表时, 常用标准电势输入代替实际热电偶的热电势。现要检定 K 型温度显示仪表在 700°C 时的准确度, 问应输入多大的标准电势 (检定时环境温度为 25°C)?

24. 镍铬—镍硅热电偶与电子电位差计配套测温, 热电偶自由端温度 $t_0=42^{\circ}\text{C}$ 。如果不采用补偿导线而采用普通铜线进行热电偶与显示仪表之间的连接, 设仪表接线端子处的温度为 28°C , 求电子电位差计指示在 385°C 时, 由于不用补偿导线所带来的误差是多少?

25. 有一配镍铬—镍硅热电偶的电子电位差计, 在测量过程中错配了铂铑 10—铂热电偶, 此时仪表指示 196°C , 问所测的实际温度是多少 (此时仪表外壳温度为 28°C)?

26. 一只分度号为 Cu_{100} 的热电阻, 在 130°C 时它的电阻 R_t 是多少 (要求精确计算和估算)?

27. 已知某负温度系数的热敏电阻, 温度为 0°C 时的阻值为 6324Ω 。热敏电阻的材料常数 $B=2274\text{K}$ 。试求温度为 100°C 时的电阻值及电阻的变化率。

28. 用套管式温度计测量管道内蒸汽温度, 已知套管壁厚为 1.5mm , 长度为 50mm , 套管热导率 $\lambda=40\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, 蒸汽与套管间对流系数 $\alpha=100\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, 并忽略辐射换热。当温度计读数为 160°C , 管壁温度为 40°C 时, 求:

(1) 蒸汽实际温度是多少?

(2) 如果要求测量误差小于 0.5% , 温度计插入管道的最小深度是多少?

第4章 非接触式温度检测及仪表

非接触式测温仪表是目前高温测量中应用广泛的一种仪表,主要应用于冶金、化工、铸造以及玻璃、陶瓷和耐火材料等工业生产过程中。非接触式测温仪表是利用物体的辐射能随其温度而变化的原理制成的。在测量时,只需把温度计光学接收系统对准被测物体,而不必与物体接触,因此可以测量运动物体的温度并不会破坏物体的温度场。另外由于感温元件只接收辐射能,它不必达到被测物体的实际温度,从理论上讲测量上限是没有限制的,因此可测高温。这类温度计大致分成两类,一类是通常所说的光学辐射式高温计,包括光学高温计、光电高温计、辐射高温计、比色高温计等;另一类是红外辐射温度计,包括全红外线辐射型、单色红外辐射型、比色型等。

辐射测温方法广泛应用于 900°C 以上的高温区测量中,近年来随着红外技术的发展,测温的下限已下移到常温区,大大扩展了非接触式测温的使用范围。

4.1 热辐射测温的基本知识

任何物体的温度高于绝对零度时,因其内部带电粒子的运动,都会以一定波长的电磁波的形式向外辐射能量,其中以热能方式向外发射的那一部分称为热辐射。图4-1所示为电磁波谱。辐射温度探测器所能接收的热辐射波段约为 $0.3\sim 40\mu\text{m}$,属于可见光和红外线的波长范围。

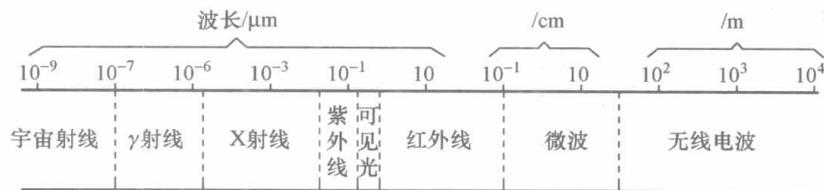


图 4-1 电磁波谱

4.1.1 热辐射测温的基本定律

1. 普朗克定律与维恩公式

全辐射体的光谱辐射出射度 $M_{0\lambda}$ 与波长 λ 和温度 T 的关系可由普朗克定律表示为

$$M_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (\text{W}/\text{m}^3) \quad (4-1)$$

式中 C_1 ——普朗克第一辐射常数, $C_1 = 3.7413 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$;

C_2 ——普朗克第二辐射常数, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

在温度 $T < 3000\text{K}$ 和可见光波长(波长 λ 较小)范围,式(4-1)可以简化成维恩公式,即

$$M_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (\text{W}/\text{m}^3) \quad (4-2)$$

式中符号含义同式(4-1)。

由式(4-1)和式(4-2)可知,在波长一定时, $M_{0\lambda}$ 就只是温度的单值函数,二者有一一对应关系,这是单色辐射高温计的理论依据。

2. 斯忒藩—玻尔兹曼定律

全辐射体的辐射出射度 M_0 (波长从 $0 \sim \infty$) 与温度 T 的关系为

$$M_0 = \int_0^{\infty} M_{0\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad (4-3)$$

式中 σ ——斯忒藩—玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.67032 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

可见,全辐射体的辐射出射度 M_0 是温度的单值函数,测得辐射出射度可求出被测物体的温度,这是辐射高温计的理论依据。

需要说明的是,由于实际物体不是全辐射体,式(4-1)~式(4-3)用于实际物体时可用以下方法修正,即

$$M_\lambda = \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (4-4)$$

$$M_\lambda = \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (4-5)$$

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (4-6)$$

式中 ϵ_λ ——实际物体在波长 λ 下的光谱发射率 (光谱黑度);

ϵ ——实际物体的全辐射发射率 (发射率)。

发射率 ϵ 是实际物体的辐射出射度与相同温度下全辐射体的辐射出射度之比。对于全辐射体, $\epsilon = 1$; 对于实际物体, $0 < \epsilon < 1$ 。

4.1.2 辐射测温的常用方法

辐射测温一般有下面三种方法。

1. 亮度测温

它是通过测量目标在某一波段的辐射亮度来获得目标的温度的。按这种方法工作的测温仪表称为亮度测温仪,它所测出的温度是目标的亮度温度。这种测温仪通常使用限定入射辐射波长的滤光片来选择接收特定波长范围内的目标辐射。但是,为了在测量较低温度时能够获得足够的辐射能量,往往选用较宽的辐射波段。亮度测温仪的特点是结构简单、使用方便、灵敏度较高,而且能够抑制某些干扰,因此在高温或低温范围都有较好的使用效果。但是,这种测温仪测出的亮度温度与目标的真实温度 T 有一定的偏差。

2. 全辐射测温

它是通过测量物体发出的全辐射能量 ($\lambda = 0 \sim \infty$) 来测量物体的温度的。按这种方法工作的测温仪表称为辐射测温仪,它所测出的是目标的辐射温度,在数值上它完全遵从斯忒藩—玻耳兹曼定律的四次方关系。实际的全辐射测温仪,并非要求真正测量全部波长的辐射能量,这样可以简化测温仪的结构,使用更加方便。全辐射测温仪的灵敏度较低,用这种测温仪测量得到的目标辐射温度与其真实温度 T 之间有较大偏差。

3. 比色测温

所谓比色测温,就是利用两组 (或多组) 带宽很窄的不同单色滤光片,搜集两个 (或多个) 相近波段内的辐射能量,转换成电信号后在电路上进行比较,由此比值确定目标温度。按这种方法工作的测温仪表称为比色测温仪,它所测出的是目标的比色温度。比色测温仪的特点是灵敏度较高,测出的比色温度与目标真实温度 T 偏差较小,在中、高温范围内使用效果较好,抗干扰能力强。缺点是结构较为复杂,价格比较昂贵。

4.2 光学高温计及光电高温计

4.2.1 光学高温计

光学高温计是目前工业中应用较广的一种非接触式测温仪表。精密光学高温计用于科学实验中的精密测试；标准光学高温计用于量值的传递，例如在物质熔点、热容量和相变点的测定中使用。光学高温计可用来测量 800~3200℃ 的高温，一般可制成便携式仪表。

由式 (4-4) 和式 (4-5) 可知，在波长一定时，物体的光谱辐射出射度 M_λ 就只是温度的单值函数。只要能测得物体的光谱辐射出射度 M_λ ，就能得到物体的温度。但是直接测量光谱辐射出射度比较困难。由物理学可知，物体在高温状态下会发光，具有一定的亮度。物体的光谱辐射亮度（又称单色亮度）与同一波长下的光谱辐射出射度成正比，即

$$L_\lambda = \frac{1}{\pi} M_\lambda \quad (4-7)$$

而 M_λ 与温度 T 有关，所以受热物体的光谱辐射亮度 L_λ 也就反映了该物体的温度。需要说明的是，由于不同物体具有不同的光谱发射率 ϵ_λ ，因此即使它们的亮度相同，它们的温度也是不同的。这就使得按某一种物体的温度刻度的光学高温计不能用来测量光谱发射率不同的另一物体的温度。为使仪表具有通用性，高温计按全辐射体的温度来刻度。当测量实际物体的温度时，所测得的结果不是物体的实际温度，而是对应亮度下全辐射体的温度，称为亮度温度，通过换算才能得到被测物体的真实温度。

亮度温度的定义是：若实际物体在波长为 λ 、温度为 T 时的单色亮度 L_λ 与全辐射体在波长为 λ 、温度为 T_s 时的单色亮度 $L_{0\lambda}$ 相等，则把 T_s 称为该实际物体在波长为 λ 时的亮度温度。根据亮度温度的定义，可推导出实际物体温度 T 与其亮度温度 T_s 的关系。

由于

$$L_\lambda = L_{0\lambda} \quad (4-8)$$

利用式 (4-5)、式 (4-7) 和式 (4-8)，可得

$$\frac{1}{\pi} \epsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} = \frac{1}{\pi} C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_s}} \quad (4-9)$$

经整理可得

$$T = \frac{C_2 T_s}{\lambda T_s \ln \epsilon_\lambda + C_2} \quad (4-10)$$

在已知实际物体的光谱发射率 ϵ_λ 和测得亮度温度 T_s 后，用式 (4-10) 即可求出物体的真实温度 T 。因为 ϵ_λ 的数值在 0 和 1 之间，故仪表读得的亮度温度总是低于真实温度。

由于直接测量光谱辐射亮度较难实现，因此光学高温计采用了亮度比较的方法。工业用光学高温计分为两种，一种为隐丝式，另一种为恒定亮度式。隐丝式光学高温计的具体实现方法为：在光学高温计中装一只亮度可调的灯泡，作为比较光源。该灯泡的光谱辐射亮度与其灯丝的电气参数（电流、电压降或电阻）之间有已知的确定关系，因此测出其电气参数即知其亮度，进而可知温度值。测温时，在某一波长下用灯丝的光谱辐射亮度与被测物体的光谱辐射亮度进行比较，通过改变灯丝电流人工调整灯丝的亮度，使二者亮度相等，最终实现温度测量。恒定亮度式光学高温计是利用减光楔来改变被测物体的亮度，使它与恒定亮度的高温灯泡相比较，当两者亮度相等时，根据减光楔旋转的角度来确定被测物体的亮度温度。

由于隐丝式光学高温计的结构和使用方法都优于恒定亮度式，所以应用广泛。

国产 WGG2 型光学高温计的结构原理图如图 4-2 所示。

整个光学高温计由光学系统与电测系统两部分组成。光学系统包括物镜、目镜、灯泡、红色滤光片、灰色吸收玻璃等。移动物镜可把被测物体的成像落在灯丝所在平面上。移动目镜使人眼同时清晰地看到被测物体与灯丝的成像，以比较二者的亮度。在进行被测物体和灯丝亮度比较时，必须加入红色滤光片 5，以造成单色光（红光）。图 4-3 画出的是红色滤光片的光谱透过系数 τ_λ 曲线和人眼的相对光谱敏感度 v_λ 曲线。两条曲线的共同部分就是透过滤光片后人眼所能感觉到的光谱段，约为 $0.62 \sim 0.72 \mu\text{m}$ 。该波段的重心波长 $\lambda = 0.66 \mu\text{m}$ ，称为光学高温计的“有效波长”。这是单色辐射光学高温计的一个重要的特征参数，在高温计的设计和温度换算中都必须用到它。灰色吸收玻璃只有在需要扩展测温量程时才插入使用。它的作用是在保证标准灯泡钨丝不过热的情况下能增加高温计的测量范围。当亮度温度超过 1400°C 时，钨丝开始升华，使其阻值改变，且在灯泡壁下形成暗黑膜，从而改变了灯丝的温度—亮度特性，给测量造成误差。为此，当被测物体亮度温度高于 1400°C 时，光路中要加入吸收玻璃，以减弱进入光学高温计的辐射强度，这样可以利用最高温度不超过 1400°C 的钨丝灯去测量比 1400°C 高的物体温度。电测系统包括灯泡、电源、调整电阻及测量线路。调整电阻可改变灯丝电流，以控制灯丝的亮度。测量线路用来测量与灯丝亮度相应的灯丝的电、电压降或电阻等电气参数，并最终显示温度示值。在图 4-2 中采用的是测灯丝两端的电压降，不同型号的光学高温计的测量线路各有差异。

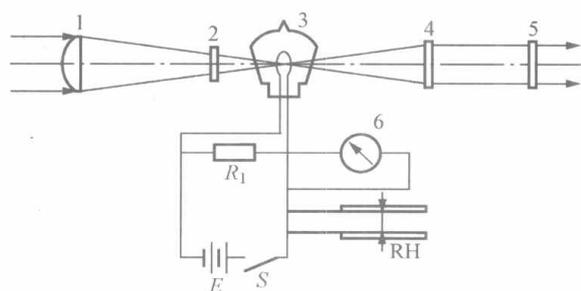


图 4-2 WGG2 型光学高温计结构原理图

1—物镜；2—灰色吸收玻璃；3—灯泡；4—目镜；
5—红色滤光片；6—显示仪表

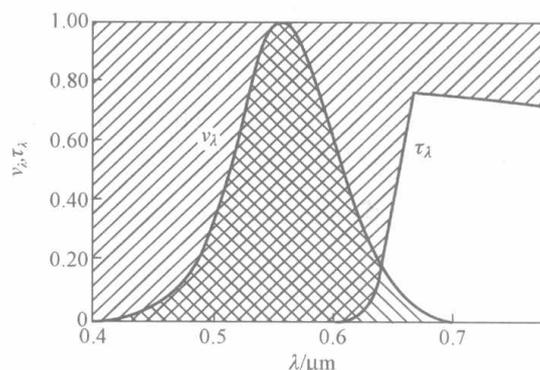


图 4-3 红色滤光片的光谱透过系数 τ_λ 和人眼相对光谱敏感度 v_λ 曲线

使用光学高温计时，人眼看到的图像如图 4-4 所示。在被测对象的背景上有一根灯丝，如背景暗而灯丝发亮，则说明灯丝亮度高于被测物体，应调整灯丝电流使其亮度降低；如背景亮而灯丝发黑，则灯丝亮度比被测物体低，应调整灯丝电流增高灯丝亮度。直到灯丝隐灭而看不清（即灯丝顶部与对象分不清），说明二者亮度相等，即可读取测量结果了。

使用光学高温计应注意以下几点。

(1) 非全辐射体（非黑体）的影响。
被测物体往往是非全辐射体（非黑体），

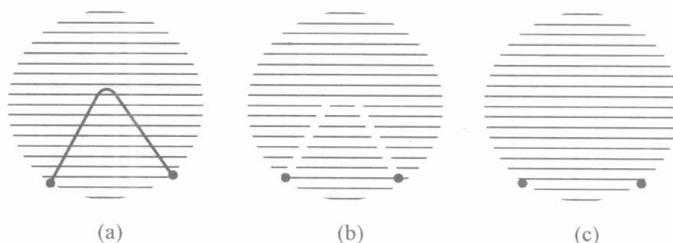


图 4-4 灯丝与物像亮度比较
(a) 灯丝亮度低；(b) 灯丝亮度偏高；
(c) 灯丝和物像亮度一致（灯丝隐灭）

且其光谱发射率 ϵ_λ 不是常数，它与波长 λ 、物体表面情况及温度高低有关。通常将 ϵ_λ 视为常数，并由式 (4-10) 修正读数 T_s 得到 T ，可认为消除了非全辐射体的影响。

(2) 中间介质的影响。光学高温计与被测物体之间的中间介质，如灰尘、水蒸气、烟雾及二氧化碳等对被测物体的辐射能有一定吸收作用，因而造成测温误差。在实际测量时可用压缩空气吹净光路上的杂质，且光学高温计距离被测物体不要太远，一般在 $1\sim 2\text{m}$ 之内比较合适。

(3) 反射光的影响。光学高温计不宜测量反射光很强的物体，如日光灯发出的冷光辐射及燃油器喷嘴近口处发出的光辐射，它们的光波段都低于 $0.36\mu\text{m}$ 属紫外线范围，不属于热辐射。

光学高温计在测量物体温度时，是由人的眼睛来判断亮度平衡状态，带有测量人的主观性。当被测温度低于 800°C 时，光学高温计对亮度无法进行平衡。同时测量温度是不连续的，使得难以做到被测温度的自动记录。因此，能自动平衡亮度和自动连续记录被测温度示值的光电高温计得以发展和应用。

4.2.2 光电高温计

光电高温计采用光电元件作为敏感元件，感受辐射源的亮度变化，并根据被测物体亮度与温度的关系确定温度的高低。图 4-5 (a) 示出了光电高温计的工作原理，被测物体的辐射能量通过物镜、光阑、带孔的遮光板、滤光片投射到光电元件上。反馈灯的辐射能量通过遮光板上的另一个孔和同一滤光片，也投射到同一光电元件上。在遮光板前面装有调制片，调制片在电磁场作用下作机械振动，交替打开和遮住孔 3 和孔 5，使上述两束辐射能交替投射到光电元件上。当这两束辐射能量（即亮度）不同时，光电元件输出对应于两辐射能量差的交变电信号。此反映差值的信号经放大电路放大后用来改变反馈灯的电流，从而改变反馈灯的亮度，直到差值信号为零，这时反馈灯的亮度与被测物体的亮度相同。因此，通过反馈灯电流的大小就可以确定被测物体的温度。

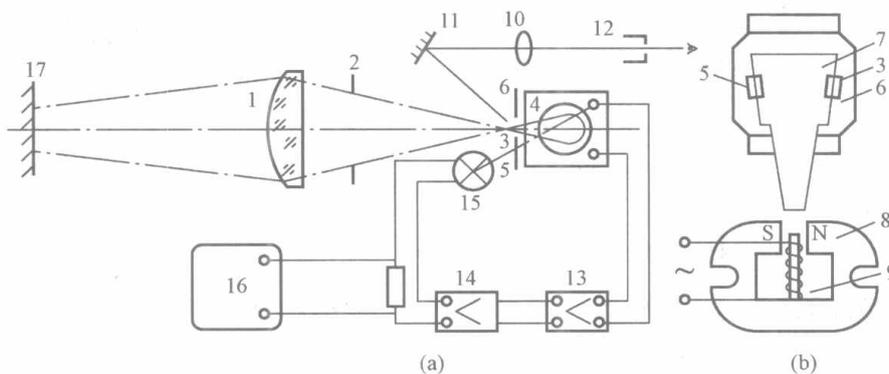


图 4-5 光电高温计的工作原理

(a) 工作原理示意图；(b) 光调制器

- 1—物镜；2—孔径；3、5—孔；4—光电器件；6—遮光板；7—调制片；8—永久磁铁；
9—激磁绕组；10—透镜；11—反射镜；12—观察孔；13—前置放大器；
14—主放大器；15—反馈灯；16—电位差计；17—被测物体

为保证物像能清晰地聚焦到光电元件的受光面上，光电温度计一般设有人工瞄准系统，它由图 4-5 (a) 中的反射镜 11、透镜 10 和观察孔 12 组成。

光电高温计避免了人工误差，灵敏度高、准确度高、响应速度快。改变光电元件的种类，可以改变光电高温计的使用波长，就能够适用于可见光或红外光等场合。例如用硅光电池可测 $600\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 和以上范围；用硫化铅元件可测 $400\sim 800^{\circ}\text{C}$ 和以下范围。这类仪表分段的测温范围可达 $150\sim 3200^{\circ}\text{C}$ 。

4.3 辐射高温计

辐射高温计的理论基础是斯忒藩—玻耳兹曼定律，即测量全辐射体所有波长的辐射总能量，通过公式 $M_0 = \sigma_0 T^4$ 可确定全辐射体的温度，加以修正可得到实际物体的温度。

辐射高温计的工作原理如图 4-6 所示。聚光镜 1 将物体发出的辐射能经过光阑 2、3 聚集到受热片 4 上。在受热片上装有热电堆，热电堆是 8~12 支热电偶或更多支热电偶串联而成，见图 4-7。热电偶的热端汇集到中心一点，冷端位于受热片的四周，受热片输出热电势为所有热电偶输出热电势之和。设测量时冷端的温度为室温 T_0 ，热端的温度为 T_1 ，在 T_0 恒定时，热电堆所产生的热电势 E 与 T_1 有确定的函数关系，记为 $E = f(T_1)$ ；而受热片的温度高低和聚光镜所接受的辐射通量成正比，也就是和被测物体温度 T 的四次方成正比，即

$$E = f(T_1) = kT^4 \quad (4-11)$$

由于函数关系 $E = f(T_1)$ 可以通过标定的方法确定，所以 T_1 和 T 或 E 和 T 的关系也是可以确定的，这样就可以通过 T_1 或 E 来测定物体的温度 T 。

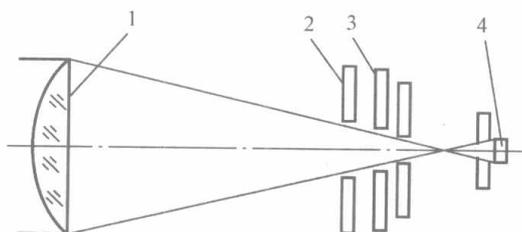


图 4-6 辐射感温器的工作原理图

1—透镜；2—可变光阑；3—固定光阑；4—接收元件

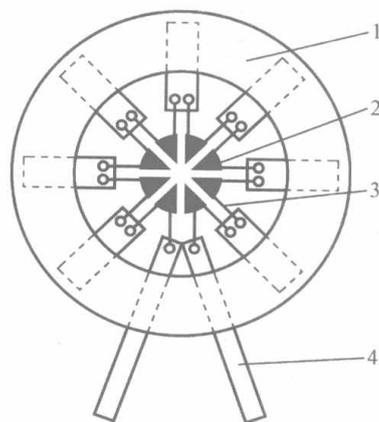


图 4-7 热电堆的结构

1—云母片；2—受热靶面；
3—热电偶丝；4—引出线

辐射温度计的显示器也是按全辐射体分度的，用它测量发射率为 ϵ 的实际温度时，其示值并非真实温度，而是被测物体的“辐射温度”。辐射温度的定义是：若温度为 T 的被测物体的辐射出射度 M 等于温度为 T_p 的全辐射体的辐射出射度 M_0 时，则温度 T_p 称为被测物体的辐射温度。由辐射温度的定义，可得物体的实际温度 T 与物体的辐射温度 T_p 之间的关系为

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\epsilon}} \quad (4-12)$$

式中 ϵ ——被测物体的发射率。由于 $\epsilon < 1$ ，故所测定的 $T_p < T$ 。

由于辐射感温器的热接收元件是热电堆，当环境温度发生变化时，冷端温度也发生变化，同样输出电势也发生变化，这将带来测量误差。为了稳定冷端温度，辐射高温计采取了以下几种方法。

(1) 加水冷套。如 WFT-201 型的感温器，其水冷套为铝合金，内部装有耐火玻璃，见图 4-8。

(2) 冷端自动补偿器。WFT-20 型辐射感温器的冷端补偿器是补偿光阑，这种补偿光阑由双金属片控制，见图 4-9。双金属片的一端固定在框架上，补偿片垂直焊接在双金属片的自由端上。当环境温度升高时，热电堆的冷端温度也升高，热电堆的热电势输出将减小。这时双金属片的温度也升高，双金属片由轴心向外伸展，补偿片向外移动，光阑孔径相应扩大，射到热电堆上的辐射能增加，热电堆的输出也增加，使热电堆的输出电动势得到补偿。

辐射高温计的显示仪表可用电位差计、毫伏计、数字显示器等。使用毫伏计应按标尺上面规定的外接电阻配好才能正确显示温度。

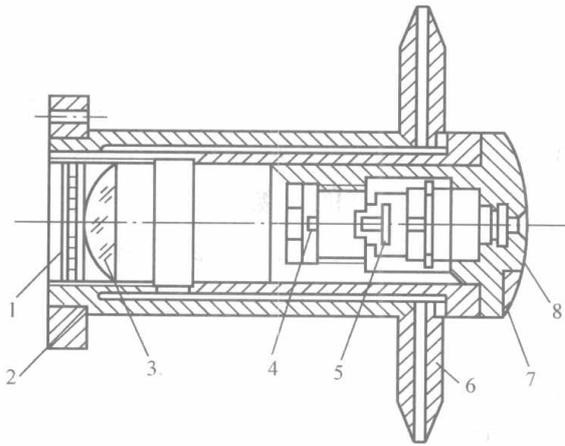


图 4-8 WFT-201 型辐射感温器的水冷结构

1—防火玻璃；2—安装法兰；3—物镜；4—调整光阑；
5—热电堆；6—冷水管；7—接线座；8—目镜

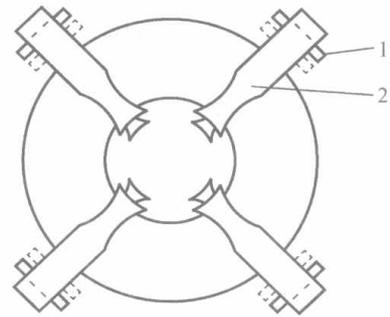


图 4-9 补偿光阑

1—补偿片；2—双金属片

使用辐射高温计应注意以下几点。

(1) 物体的发射率 ϵ 随物体成分、表面状态、温度和辐射条件有着较大范围的变化，因此应尽可能准确地得到被测物体的有关数据或者创造人工全辐射体条件⁴，例如将细长封底的碳化硅管或氧化铝管插入被测对象，以形成人工全辐射体。

(2) 高温计和被测物体之间的介质，如水蒸气、二氧化碳、尘埃等对热辐射有较强的吸收，而且不同介质对各波长的吸收率也不相同，为此高温计与被测物体之间距离不可太远。同时，辐射感温器应安装在干净的环境中，并要经常清洁维护。

(3) 使用时环境温度不宜太高，以免引起热电堆参比端温度变化，增加测量误差。虽然设计温度计时对参比端温度有一定的补偿措施，但还做不到完全补偿。例如被测物体温度为 1000°C ，环境温度为 50°C 时，高温计指示值偏低约为 5°C ；环境温度为 80°C 时示值偏低 10°C ，环境温度高于 100°C 时则须加水冷套以降温。

(4) 被测物体到高温计之间距离 L 和被测物体的直径 D 之比 (L/D) 有一定限制。当比值太大时，被测物体在热电堆平面上成像太小，不能全部覆盖住热电堆十字形平面，使热电堆接收到辐射能减少，温度示值偏低；当比值太小时，物像过大，使热电堆附近的零件受热，参比端温度上升，也造成示值下降。例如 WFT-202 型高温计规定：当 $L=0.6\text{m}$ 时， L/D 为 15；当 $L=0.8\text{m}$ 时， L/D 为 19；当 $L>1\text{m}$ 时， L/D 为 20。为了减少中间介质的吸收作用， L 值最好不要超过 1m 。

(5) 当热源的温度发生变化时, 辐射高温计的感温器一般需要几到十几秒后才能重新达到平衡。过早地读数会带来误差。

辐射高温计的特点是能自动测量温度, 其输出为电量, 适于远传和自动控制, 是在线温度检测常用的一种仪表。

辐射高温计可用于箱式炉温度测量。箱式炉是一个密闭空间, 当炉门关闭时, 炉膛近似于全辐射体状态, 因此从窥视孔或专门测温孔瞄准炉内工件用辐射高温计测量温度是比较准确的。因为窥视孔用云母片隔离, 需要事先校对好它的吸收系数, 或者为了测温将云母片改成可以移去的部件, 以便测量温度时把它移开。还有一种比较妥善的方法是在炉壁上安装专门的测温管, 它是用碳化硅或金属陶瓷做的一端封口的管子, 插入炉内的长度 L 为其直径的 $8 \sim 10$ 倍。辐射高温计在规定距离内对准管底, 如图 4-10 所示。测温管插入炉内部分, 保持与炉膛内相同的温度, 由管底向管口辐射能量, 近似于一个全辐射体辐射源, 因此, 用辐射高温计对准测温管底测量的温度, 无需修正发射率, 其结果接近真实温度。

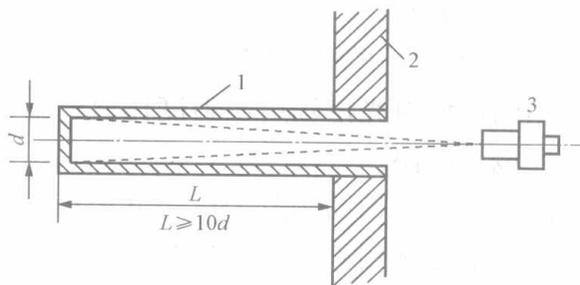


图 4-10 测温管示意图

1—测温管; 2—炉墙; 3—高温计

4.4 比色高温计

比色高温计是通过测量被测物体在两个或两个以上波长的光谱辐射亮度之比来测量温度的。它的特点是准确度高、响应速度快, 可观察小目标 (最小可到 2mm)。比色测温法也称双色测温法或颜色测温法。

根据维恩偏移定律, 当温度升高时全辐射体的最大光谱辐射出射度向波长减小的方向移动, 使两个固定波长 λ_1 和 λ_2 的亮度比随温度而变化。因此, 测量其亮度比值可知其相应温度。若全辐射体的温度为 T_c , 则相应于波长 λ_1 和 λ_2 的亮度分别为

$$B_{0\lambda_1} = CC_1 \lambda_1^{-5} e^{-C_2/\lambda_1 T_c} \quad (4-13)$$

$$B_{0\lambda_2} = CC_1 \lambda_2^{-5} e^{-C_2/\lambda_2 T_c} \quad (4-14)$$

两式相比后, 可求得

$$T_c = \frac{C_2 [(1/\lambda_2) - (1/\lambda_1)]}{\ln(B_{0\lambda_1}/B_{0\lambda_2}) - 5 \ln(\lambda_2/\lambda_1)} \quad (4-15)$$

如果波长 λ_1 和 λ_2 是确定的, 那么测得两波长下的亮度比 $B_{0\lambda_1}/B_{0\lambda_2}$, 根据式 (4-15) 就可求出 T_c 。

比色高温计也是按全辐射体进行分度的, 温度计显示的温度称为比色温度。比色温度的定义为: 若温度为 T 的实际物体在两个不同的波长下的亮度比值与温度为 T_g 的全辐射体在同样两波长的亮度比值相等, 则把 T_g 称为实际物体的比色温度。

根据比色温度的定义, 再应用维恩公式, 可以推导出物体实际温度 T 和比色温度 T_c 的关系为

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln(\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2})}{C_2(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)} \quad (4-16)$$

式中 ϵ_{λ_1} 、 ϵ_{λ_2} ——分别为实际物体在辐射波长为 λ_1 和 λ_2 时的光谱发射率。

根据上面的 T 和 T_c 关系式，可知比色高温计具有如下特点。

(1) 对于全辐射体，因为 $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2} = 1$ ，所以 $T = T_c$ ；对于灰体，由 $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2} \neq 1$ ，同样 $T = T_c$ ；对于一般物体， $\epsilon_{\lambda_1} \neq \epsilon_{\lambda_2}$ ，则 $T \neq T_c$ 。对于金属物体，一般是短波的 ϵ_{λ_1} 大于长波的 ϵ_{λ_2} ，则 $\ln(\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2}) > 0$ ，比色温度将高于物体实际温度。对于其他物体，视 ϵ_{λ_1} 和 ϵ_{λ_2} 的大小而定。

(2) 比色高温计和光学高温计、辐射高温计相比较，它的测量准确度高。因为实际物体的 ϵ_{λ_1} 和 ϵ_{λ_2} 的比值变化要比 ϵ_{λ} 和 ϵ 的变化小得多，因此比色高温计受发射率变化的影响比前两种高温计要小。

(3) 中间介质如水蒸气、二氧化碳、尘埃等对 λ_1 和 λ_2 的辐射均有吸收，尽管吸收率不一定相同，但对光谱辐射出射度比值的影响相对比较小。所以比色高温计可在周围气氛较恶劣的环境下测温。

比色温度计的结构分为单通道和双通道两种，单通道又可分为单光路和多光路两种；双通道又有带光调制和不带光调制之分。所谓通道是指在比色温度计中使用探测器的个数。单通道是用一只探测器接收两种波长光束的能量，双通道是用两只探测器分别接收两种波长光束的能量。所谓光路是指光束在进行调制前或调制后是否由一束光分成两束进行分光处理。没有分光的为单光路，分光的则为双光路。

图 4-11 是国产 WDS-II 光电比色高温计的原理示意图。由图 4-11 (a) 可知，被测物体的辐射能经物镜 1 聚焦后，经平行平面玻璃 2、中间有通孔的回零硅光电池 3，再经透镜 4

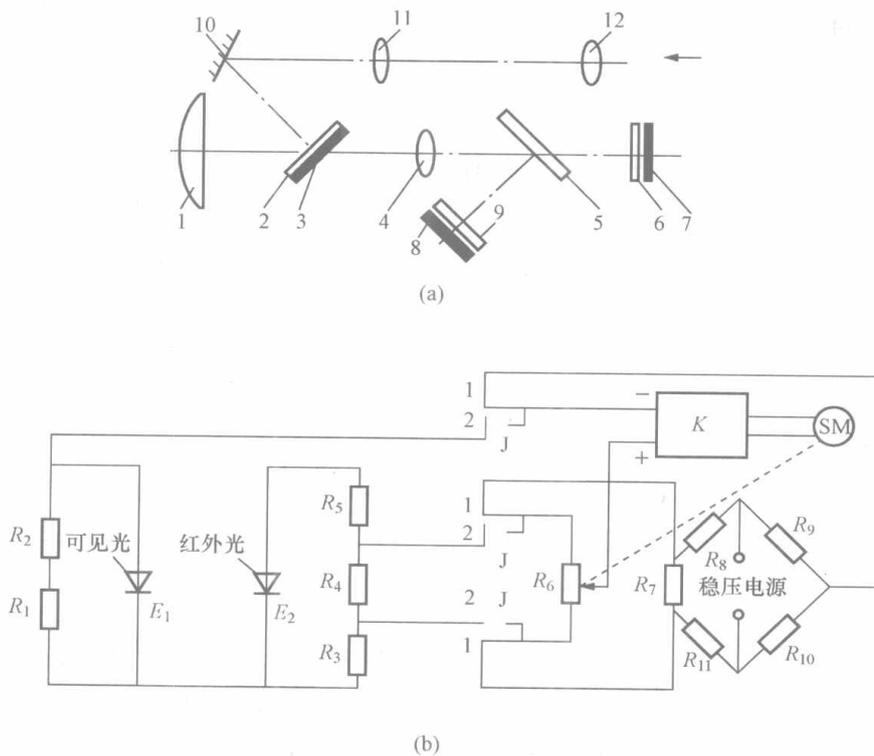


图 4-11 WDS-II 型光电比色高温计的工作原理

(a) 光路系统；(b) 测量线路图

1—物镜；2—平行平面玻璃；3—回零通孔硅光电池；4—透镜；5—分光镜；6—红外滤光片；7—硅光电池 E_2 ；8—硅光电池 E_1 ；9—可见光滤光片；10—反射镜；11—倒像镜；12—目镜

到分光镜5。分光镜的作用是反射 λ_1 而让 λ_2 通过,将可见光分成 λ_1 ($\approx 0.8\mu\text{m}$)、 λ_2 ($\approx 1\mu\text{m}$)两部分。一部分的能量经可见光滤光片9,将少量长波辐射能滤除后,剩下波长约为 $0.8\mu\text{m}$ 的可见光被硅光电池8(即 E_1)接收,并转换成电信号 U_1 ,输入显示仪表;另一部分的能量则通过分光镜5,经红外滤光片6将少量可见光滤掉,剩下波长为 $1\mu\text{m}$ 的红外光被硅光电池7(即 E_2)接收,并转换成电信号 U_2 送入显示仪表。

由两个硅光电池输出的信号电压,经显示仪表的平衡桥路测量得出其比值 $B=U_1/U_2$,比值的温度数值是用全辐射体进行分度的。显示仪表由电子电位差计改装而成,其测量线路如图4-11(b)所示,当继电器J处于位置2时,两个硅光电池 E_1 、 E_2 输出的电势在其负载电阻上产生电压,这两个电压的差值送入放大器推动可逆电机M转动。电机将带动滑线电阻 R_6 上的滑动触点移动,直到放大器的输出电压是零为止。此时滑动触点的位置则代表被测物体的温度。继电器J处于位置1时,仪表指针回零。

在WDS-II型光电比色高温计中选用的两波长分别为可见光与红外光。如果两个波长均选在红外光波段,则该仪表称为红外比色温度计,可用来测量较低温度。

4.5 红外测温仪

红外测温仪是红外辐射测温仪的简称,也称红外温度计。红外辐射又称红外线,它是一种人眼看不见的光线,波长范围大致在 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ 的频谱范围之内,分为四个区域,即近红外区、中红外区、远红外区和极远红外区。自然界中任何物体,只要它的温度高于绝对零度(-273.16°C),就会有红外线向周围空间辐射。

红外辐射在大气中传播时,由于大气中的气体分子、水蒸气以及固体微粒、尘埃等物质的吸收和散射作用,使辐射在传输过程中逐渐衰减。但空间的大气、烟云对红外辐射的吸收程度与红外辐射的波长有关,特别对波长范围在 $2\sim 2.6\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的三个波段吸收相对很弱,红外线穿透能力较强,透过率高,统称它们为“大气窗口”。这三个波段对红外探测技术特别重要,因为红外探测器一般都工作在这三个波段(大气窗口)之内。

红外辐射出射度与辐射源的温度之间仍遵循热辐射的基本定律。根据普朗克定律绘制的辐射曲线中可知,2000K以下的曲线最高点所对应的波长已不是可见光,而是红外线,所以较低温度的测量要采用红外测温仪表。红外测温仪表是一种测温上限较低的仪表,可测量 $0\sim 400^\circ\text{C}$ 范围的温度。

红外测温仪是根据被测目标的红外辐射能量与温度成一定函数关系而制成的仪器。工作时,首先把物体发射的红外辐射能量搜集起来转换成电信号。然后,对电信号进行放大、处理,并利用物体温度与其辐射功率大小(目前都表现为信号电压高低)的一一对应关系,显示出物体温度的测量结果。

红外测温仪由光学系统、红外探测器、信号处理放大部分及显示仪表等部分组成。其中光学系统与红外探测器是整个仪表的关键,而且它们具有特殊的性质。红外光学材料又是光学系统中的关键器件,它是对红外辐射透过率很高,而对其他波长辐射不易透过的材料。红外探测器的作用是把接收到的红外辐射强度转换成电信号。它有光电型和热敏型两种类型。光电型探测器是利用光敏元件吸收红外辐射后其电子改变运动状况而使

电气性质改变的原理工作的，常用的光电探测器有光电导型和光生伏特型两种。热敏型探测器是利用了物体接收红外辐射后温度升高的性质来测量温度的。根据测温元件的不同，又有热敏电阻型、热电偶型及热释电型等几种。在光电型和热敏型探测器中，前者用得较多。

下面以图 4-12 所示的红外测温仪为例介绍其原理及结构。被测物体 1 的辐射能由窗口 2 进入光学系统，首先到达分光片 3。分光片是由能透过红外线的专门光学材料制成的，中间沉积了某种反射材料。红外线能透过分光片，而其他波长的辐射能被反射出去，不能透过。透过分光片的红外线经过聚光镜 4、调制盘 5 被调制成脉冲红外波长，它投射到置于黑体腔中的红外光敏探测器 6 上，最终转换成交变的电信号输出。使用黑体腔是为了提高光敏探测器的吸收能力，提高灵敏度。由于探测器输出的交变电信号与被测温度和黑体腔温度均有关，所以必须恒定黑体腔的温度，以消除背景温度的影响。黑体腔的温度由温度控制器控制在 40°C 。输出的电信号经运算放大器 A1 和 A2 整形、放大后，送入相敏功率放大器 7，经解调器 8 整形后的直流电流由显示器指示温度。由分光片反射出来的其他波长的光波反射到反光片 11，经透镜 12、13，目镜 14 组成的目镜系统，可以观察到被测目标及透镜 12 上的十字交叉线，以瞄准被测目标。

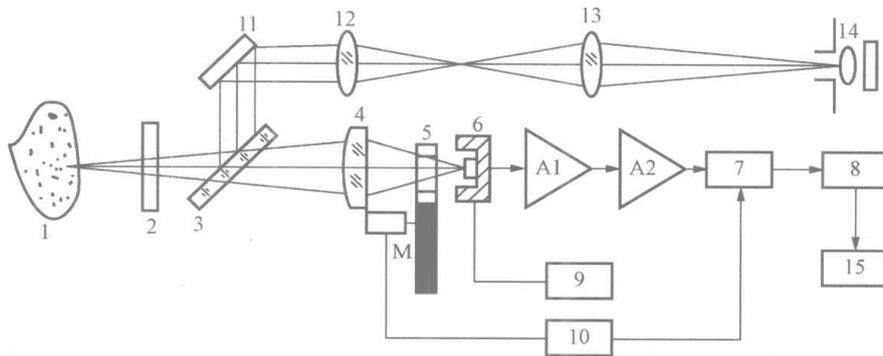


图 4-12 红外测温仪

1—被测物体；2—窗口；3—分光片；4—聚光镜；5—调制盘；6—红外探测器；7—相敏功率放大器；8—解调、整形部分；9—温度控制器；10—信号发生器；11—反光片；12、13—透镜；14—目镜；15—显示仪表

图 4-13 所示为美国 Raytek 公司生产的 MT4 便携式红外测温仪。MT4 红外线测温仪

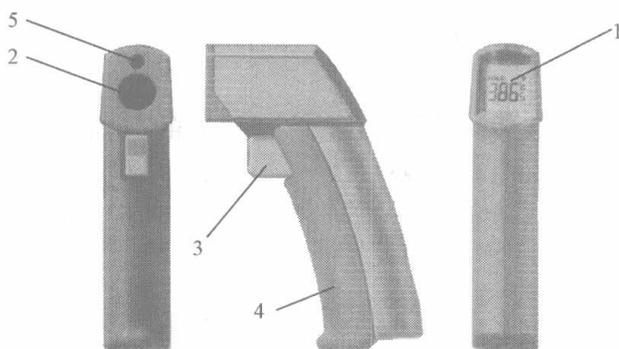


图 4-13 MT4 便携式红外测温仪

1—液晶显示 (LCD)；2—光学元件；3—扳机；4—电池盒；5—激光

又叫 MINITEMP 红外线温度计，它通过接收被测物体发射、反射和传导的能量来测量其表面温度。测温仪内的探测元件将采集的能量信息送到微处理器中进行处理，然后转换为数字信号在 LCD 液晶屏上显示。该仪表携带测量方便，测温范围为 $-18 \sim +275^{\circ}\text{C}$ ，响应时间为 500ms (95%响应)，精度为读数值 $\pm 2\%$ 。

红外测温在电力系统中的应用已日趋广泛。便携式红外测温仪主要用来测量高压隔离开关接头和触头的温度、高压线夹的温度、设备引流接点的温度等。

本章小结

一、热辐射测温的理论基础

它是利用物体的辐射能随其温度而变化的原理制成的。基于的基本定律有普朗克定律、斯忒藩—玻尔兹曼定律。

二、分类

这类温度计大致分成两类，一类是通常所说的光学辐射式高温计，包括光学高温计、光电高温计、辐射高温计、比色高温计等；另一类是红外辐射温度计，包括全红外线辐射型、单色红外辐射、比色型等。

三、光学高温计、辐射高温计和比色高温计的比较

光学高温计是通过测量物体在某一波段的辐射能量来获得物体的温度的。它所测出的是目标的亮度温度，经过修正后可得到物体的实际温度。光学高温计工作时一般都采用亮度比较的方法。它的特点是结构简单、灵敏度较高，但测量结果易受物体光谱发射率变化及中间介质吸收的影响。

辐射高温计是通过测量物体发出的全辐射能量来获得物体的温度的。它所测出的是目标的辐射温度，经过修正后可得到物体的实际温度。辐射高温计的灵敏度较低，测量结果更易受物体发射率变化及中间介质吸收的影响。

比色高温计是通过测量物体发出的两个（或多个）相近波段内的辐射能量的比来测量物体的温度的。它所测出的是目标的比色温度，经过修正后可得到物体的实际温度。比色测温仪的特点是灵敏度较高，在中高温范围内使用效果较好，测量结果受物体发射率变化及中间介质吸收的影响小。缺点是结构较为复杂，价格比较昂贵。

四、红外测温仪

红外测温仪的基本原理是以被测目标的红外辐射能量与温度成一定函数关系而制成的仪器。红外辐射出射度与辐射源的温度之间仍遵循热辐射的基本定律。较低温度的测量要采用红外测温仪表。

非接触式测温仪表是目前高温测量中应用广泛的一种仪表。在测量时温度计不必与被测物体接触，因此可以测量运动物体的温度，并不会破坏物体的温度场，从理论上讲测量上限是没有限制的。

思考题与习题

1. 辐射测温方法的特点是什么？常用的辐射式测温仪有哪几类？
2. 什么是光学高温计的亮度温度？它与实际被测温度有什么关系？
3. 光学高温计中的红色滤光片和灰色吸收玻璃的作用是什么？
4. 辐射温度的意义是什么？辐射高温计中的热电堆起什么作用？
5. 比色高温计与光学高温计和辐射高温计相比有何优点？
6. 说明红外辐射的特征，并分析红外测温仪的工作原理。
7. 为什么对高温计提出测量距离的要求？对光学高温计、辐射高温计和比色高温计的

距离要求一样吗？为什么？

8. 用光学高温计测某炉膛内烟气温度，仪表示值 $T_s = 1300^\circ\text{C}$ 。若有效波长 $\lambda = 0.66\mu\text{m}$ ，炉膛发射率 $\epsilon_\lambda = 0.7 \pm 0.05$ ，求：

(1) 炉膛内烟气的实际温度；

(2) 由 ϵ_λ 的变化所引起的测温误差。

9. 用辐射高温计测量磨光的钢板的表面温度，钢板发射率 $\epsilon = 0.85$ ，计算当示值温度 $T_p = 727^\circ\text{C}$ 和 $T_p = 1727^\circ\text{C}$ 时钢板表面的实际温度；如果把发射率估计成 $\epsilon' = 0.68$ ，求由此带来的测温误差。

10. 用比色高温计测得比色温度 $T_c = 1927^\circ\text{C}$ ，比色光线波长分别为 $\lambda_1 = 0.4\mu\text{m}$ ， $\lambda_2 = 0.58\mu\text{m}$ ，被测物体在相应波长下的光谱发射率分别为 $\epsilon_{\lambda_1} = 0.39$ ， $\epsilon_{\lambda_2} = 0.35$ ，试确定被测物体的实际温度。

第5章 压力检测及仪表

5.1 压力测量的基本知识

在工业生产中,压力如同其他的状态参数一样,是工业生产过程中不可缺少的监视和控制参数。通过对液体、蒸汽和气体压力的测量和控制,不仅可以保证生产过程的正常运行,还可以达到高产、优质、低消耗和安全生产的目的。它是保证工业生产过程经济性和安全性的重要环节。例如在火电厂中,为了保证锅炉、汽轮机以及辅机等设备的安全、经济运行,就必须对生产过程中的水、汽、油、空气等工质的压力进行检测。凝汽器内的真空、炉膛负压、汽包压力、主蒸汽压力、给水压力、各处油压和烟风压力等,都是运行中需要经常监视的重要参数。差压测量还广泛地应用于流量和液位测量中。在化工生产中,压力是决定其反应过程的重要参数。例如在合成氨的生产中,压力太低合成氨的产量就很低,而压力太高又会对安全生产带来一定的影响。

检测压力的仪表称为压力表或压力计。

5.1.1 有关压力的基本概念

5.1.1.1 压力的定义

工程上将均匀而垂直作用于物体单位面积上的力称为压力,实际上就是物理学中所称的“压强”。其基本公式为

$$p = \frac{F}{A} \quad (5-1)$$

式中 p ——压力, Pa;

F ——均匀垂直作用力, N;

A ——受力面积, m^2 。

5.1.1.2 压力的表示方法

在工业技术上,为了使用上的方便,采用多种表示压力的方法,主要有:

(1) 大气压力。大气压力是指地球表面上的空气因自重所产生的压力,它随测定点的位置和气象情况的不同而不同。大气压力一般用 p_b 表示。

(2) 绝对压力。以绝对压力零线(绝对真空)作起点的压力称为绝对压力,用符号 p_a 表示。它表征某一测定点真正所受到的压力。

(3) 表压力。以大气压力 P_b 为参考零点所表示的压力称为表压力,用符号 p 表示。通常压力测量仪表处于大气之中,故其测得的压力值等于绝对压力和大气压力之差,即为表压力。

当绝对压力高于大气压力时, $p > 0$, 称为正压力或正压,简称压力。当绝对压力低于大气压力时, $p < 0$, 称为负压力或负压,通常也称为真空。

表压力、绝对压力、大气压力三者之间的关系为

$$p = p_a - p_b \quad (5-2)$$

可用图 5-1 表示。

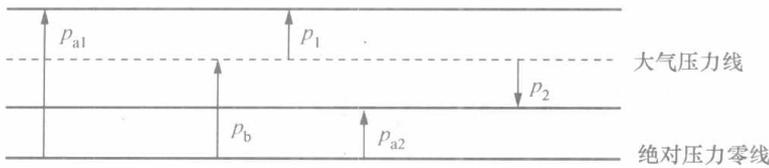


图 5-1 各压力之间的相互关系

(4) 差压。两个压力互相比
较，其差值称为差压，用 Δp 表
示。 $\Delta p = p_1 - p_2$ ($p_1 > p_2$)。

5.1.2 压力的单位

压力的单位是一个导出单位。
在国际单位制 (SI) 和我国的法定

计量单位中，压力单位为帕斯卡，简称“帕”，符号为 Pa。其物理意义为在 1m^2 的面积上垂直作用且均匀地作用着 1N 的力，即

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

由于“帕”这个单位在实际使用中过小而不方便，目前我国生产的各种压力表都统一用 kPa (千帕) 或 MPa (兆帕) 为基本单位。

我国以前常用的压力单位有工程大气压 (kgf/cm^2)、毫米水柱 (mmH_2O)、毫米汞柱 (mmHg) 以及标准大气压等单位，现在国外生产的压力表，常用巴 (bar)、毫米英寸 (mminch)、磅力每平方英寸 ($1\text{bf}/\text{in}^2$) 等其他非国际单位制的压力单位。各压力单位之间的数值换算关系见表 5-1。

表 5-1 压力单位换算关系

单位名称及符号	帕 Pa	巴 bar	毫米水柱 mmH_2O	毫米汞柱 mmHg	标准大气压 atm	工程大气压 kgf/cm^2	磅力每平方英寸 lbf/in^2	托 torr
帕 Pa	1	1×10^{-5}	1.01972×10^{-1}	7.5006×10^{-3}	9.86923×10^{-6}	1.01972×10^{-5}	1.4504×10^{-4}	7.5062×10^{-3}
巴 bar	1×10^5	1	1.01972×10^4	7.5006×10^2	9.86923×10^{-1}	1.01972	1.4504×10^1	7.5062×10^2
毫米水柱 mmH_2O	9.80665	9.80665×10^{-5}	1	7.3555×10^{-2}	9.6784×10^{-5}	1×10^{-4}	1.42226×10^{-3}	7.361×10^{-2}
毫米汞柱 mmHg	1.333224×10^2	1.333224×10^{-3}	1.35951	1	1.316×10^{-3}	1.35951×10^{-3}	1.934×10^{-2}	1
标准大气压 atm	1.01325×10^5	1.01325	1.01332×10^4	7.69999×10^2	1	1.01332	1.46959×10	7.6056×10^2
工程大气压 kgf/cm^2	9.80665×10^4	9.80665×10^{-1}	1×10^4	7.3555×10^2	9.6784×10^{-1}	1	1.42235×10	7.3610×10^2
磅力每平方英寸 lbf/in^2	6.89476×10^3	6.89476×10^{-2}	7.0306×10^2	5.171	6.8046×10^{-2}	7.0306×10^{-2}	1	5.1753×10
托 torr	103322×10^2	103322×10^{-3}	1.3585	1	1.3159×10^{-3}	1.3585×10^{-3}	1.93368×10^{-2}	1

5.1.3 压力测量仪表的分类

对目前常用的压力测量仪表，可以从不同的角度进行分类。

(1) 按被测量的种类可分为表压压力表 (包括压力表、真空表和压力真空表)、绝对压力表和差压计。

(2) 按压力表使用的条件可分为普通型、耐震型、耐热型、耐酸型、禁油型、防爆型等压力表。

(3) 按压力表的功能可分为指示型、记录型、远传变送型、指示报警型、指示调节型等。

(4) 按压力表的工作原理又可分为液体压力计、弹性式压力计、物性式压力计、活塞式

压力计、压力变送器等。

5.1.4 压力量值的传递与检定系统

将国家计量基准所复现的计量单位量值通过各等级计量标准（或其他传递方式）传递到工作计量器具，以保证被计量的对象量值的准确一致的全部工作称之为量值传递。

根据压力仪表的准确度不同，可将压力仪表分为基准器、标准器和工业用压力仪表。基准器是国家最高的压力标准器，保存在国家计量部门。它又可以分为国家基准器（主基准器）、副基准器和工作基准器。国家基准器用于复现和保存计量单位量值，由副基准

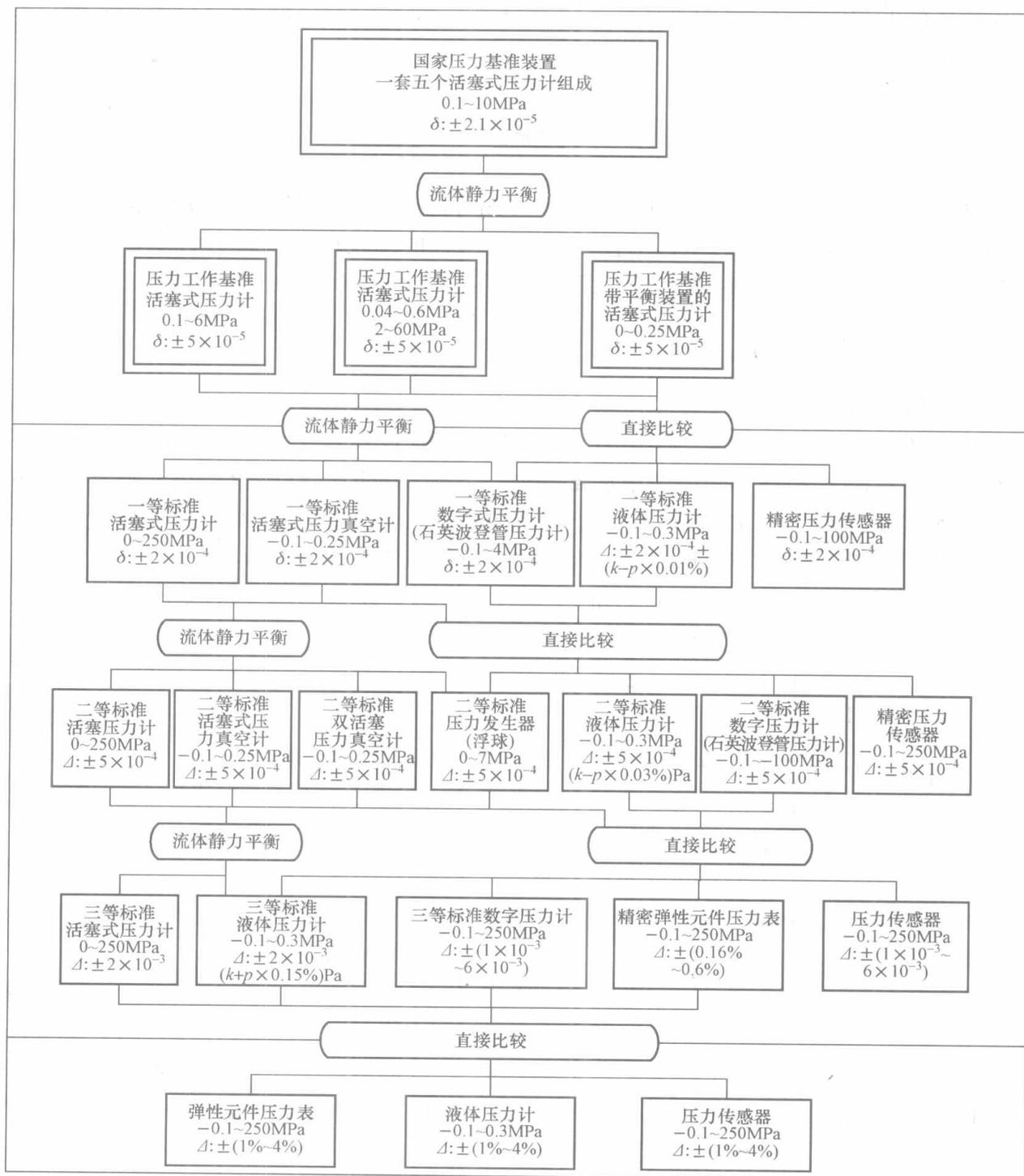


图 5-2 压力计量器具计量检定系统

器承担量值传递工作。工作基准器经过与国家基准器或副基准器校准或比对,成为检定计量标准的计量器具,可复制多套保存在全国各地的主要部门。标准器分为一等标准、二等标准和三等标准。由工作基准器将压力工作基准传递到一等标准器,再由一等标准器传递到二等标准器,然后由二等标准器传递到三等标准器,最后由三等标准器传递到工作压力仪表。

计量检定必须按照国家计量检定系统进行。我国实行的压力计量器具计量检定系统如图 5-2 所示。按照压力计量器具计量检定系统进行检定,既可保证被检测量仪表的准确性,又可避免用过高准确度的仪表来检定低准确度的仪表,减少了高准确度仪表的使用次数,同时也满足了检定工作的需要。

5.2 液体压力计

液体压力计是最早使用的压力仪表之一。它是利用一定高度的液柱所产生的压力平衡被测压力,采用液柱高度差来测量压力的。液体压力计的结构简单,读数直观,测量准确度高,价格便宜。但其测压上限不高,常用于较小压力、大气压和负压的测量中。

液体压力计的种类较多,有 U 形管压力计、杯形压力计、倾斜式压力计、补偿式微压计、钟罩式压力计、水银气压计等。

5.2.1 U 形管压力计

在液体压力计中,最常用、结构最简单的压力计是 U 形管压力计,其结构如图 5-3 所示。它主要由一根 U 形玻璃管或两根底部相通、内截面相同的玻璃管 1 和 2 组成,被固定在带有双面刻度的标尺 3 的底板 4 上,其零点在标尺 3 的中央位置。U 形管的两个平行的直管又称为肘管。测压时,在 U 形管内装有一定数量的液体,称为封液。

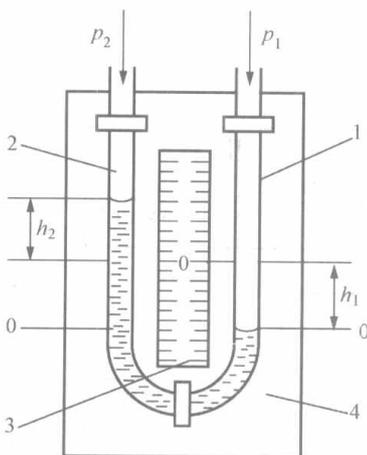


图 5-3 U 形管压力计结构示意图

根据流体静力学原理,通入 U 形管的差压或压力与液柱高度差 h 的关系为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho - \rho_1)gh = (\rho - \rho_1)g(h_1 + h_2) \quad (5-3)$$

式中 g ——当地重力加速度, m/s^2 ;

ρ 、 ρ_1 ——封液密度、封液上面介质的密度, kg/m^3 ;

h ——液柱高度, $h = h_1 + h_2$, m ;

p_1 、 p_2 ——高、低压侧的压力, Pa 。

若测量时封液上面的介质是气体,因 $\rho_1 \ll \rho$, 则有

$$p_1 = p_2 + \rho g(h_1 + h_2) \quad (5-4)$$

由式 (5-3) 和式 (5-4) 可知,通过读取液柱的高度变化 h_1 和 h_2 就可得到待测压力值。

由于制作材料的机械强度与读数便利的限制,液柱高度一般不超过 1.5m。当测量较高的压力时,可采用密度较大的物质如水银等作工作介质;当测量较小的压力时,为了提高准确度,可采用密度较小的液体如水、酒精等作工作介质。

使用 U 形管压力计测压力时需要取得两个液柱高度的读数,这会带来较大的读数误差。同时当待测压力较小时,液柱的高度变化就很小,灵敏度较低。为此需对 U 形管压力计的

结构进行改进。

5.2.2 杯形压力计

杯形压力计又称单管压力计，它是将 U 形压力计的一根肘管用杯形容器代替，另一根肘管保持不变。杯形压力计可测量小压力、真空及差压等，结构如图 5-4 所示。大截面的杯形容器 1 的上部有开口接嘴，下部与测压管 3 组成连通器，各连接处必须保证密封，使工作液体不致流失或泄漏。标尺可以是单独的，也可以是直接刻在肘管的玻璃上。在底座上有调整水平的水准器或铅垂，以调整压力计的垂直工作位置。

根据流体静力学原理，有

$$p_1 = p_2 + g(\rho - \rho_1)(h_1 + h_2) \quad (5-5)$$

由于压力计中封液的体积是一定的，因此有

$$A_1 h_1 = A_2 h_2 \quad (5-6)$$

式中 A_1 ——杯形容器截面积（内径为 D ）；

A_2 ——肘管截面积（内径为 d ）。

从而

$$h_1 = \frac{A_2}{A_1} h_2 = \frac{d^2}{D^2} h_2 \quad (5-7)$$

根据式 (5-5) 和式 (5-7)，可将所测的差压表示为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h_2 \left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right) (\rho - \rho_1) g \quad (5-8)$$

由式 (5-8) 可知，当 d 、 D 一定时，系数 $\left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right)$ 为常数；封液密度 ρ 和封液上面的介质密度 ρ_1 为定值时，只要读取肘管中液面上升高度 h_2 就可测得差压值 Δp 。

考虑到肘管内径 d 远小于杯形容器的内径，即 $\frac{d^2}{D^2} \ll 1$ ，在测量要求不高时，有

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h_2 (\rho - \rho_1) g \quad (5-9)$$

在火力发电厂测量风压或烟道负压时，常使用杯形压力计的变形仪表——多管压力计，如图 5-5 所示。

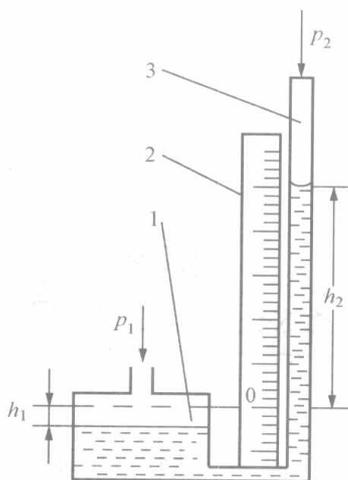


图 5-4 杯形压力计原理图

1—杯形容器；2—标尺；3—测压管

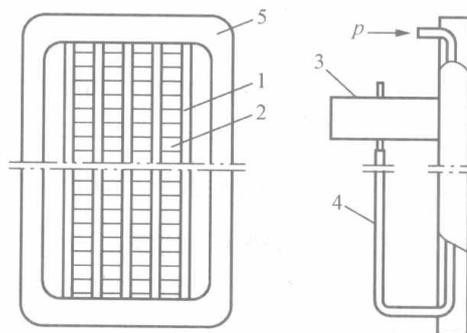


图 5-5 多管压力计

1—测量管；2—刻度标尺；3—容器；
4—塑料管；5—表壳

多管压力计在使用时可以同时接入多个被测量的正压或多个被测量的负压。它的杯形容器的内径比肘管的内径要大许多,因而可以忽略对肘管示值的影响。封液多是带颜色的水。

5.2.3 倾斜式微压计

将杯形压力计的肘管做成倾斜的形式,就是倾斜式微压计。它是一种测量微小压力的测量仪表,可以测量微小正压、负压及差压。

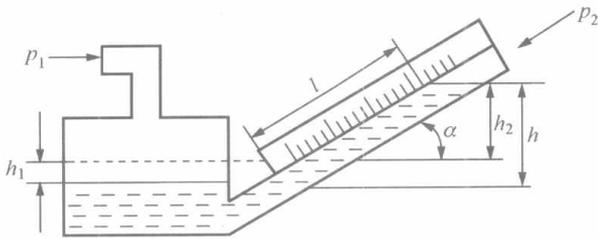


图 5-6 倾斜式微压计原理图

图 5-6 所示为倾斜式微压计的原理图。测量正压时,被测压力与杯形容器连接;测量负压时被测压力与肘管连接;测量差压时,将较高的压力通入杯形容器,将较低的压力通入肘管。在差压的作用下,倾斜角为 α 的斜管中的封液液面升高了 h_2 ,杯形容器内液面下降了 h_1 ,所以

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho - \rho_1)gh = (\rho - \rho_1)g(h_1 + h_2) \quad (5-10)$$

由于微压计一般用于测量气体的压力,故 ρ_1 可忽略。考虑到封液在倾斜肘管中的长度 l 和 h_2 的关系,以及压力表中的封液体积一定,有

$$h_2 = l \sin \alpha \quad (5-11)$$

$$h_1 = l \frac{A_2}{A_1} = l \left(\frac{d^2}{D^2} \right) \quad (5-12)$$

式中 A_1 、 D ——杯形容器截面积和内径;

A_2 、 d ——肘管截面积和内径。

所以有

$$\Delta p = l \left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right) \rho g = Kl \quad (5-13)$$

其中

$$K = \rho g \left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right)$$

由式 (5-13) 可以看出,若 d 、 D 和所用封液密度 ρ 都为定值,当倾斜角 α 也一定时,则 K 为常数,这时可以读得 l 的数值表示被测差压 Δp 或

被测压力 p_1 (p_2 为大气压力)。由于 $\left(\frac{d^2}{D^2} + \sin \alpha \right) < 1$,

显然液柱长度 $l > \left(\frac{d^2}{D^2} + \sin \alpha \right) l$,即仪表示值 l 比竖直

高度的液柱增大了 $1 / \left(\frac{d^2}{D^2} + \sin \alpha \right)$ 倍,从而可使读数灵

敏度提高。当同一台微压计的 ρ 、 g 都不变时,测量

管倾斜角 α 越小,微压计的测量范围也越小,灵敏

度越高。实际使用时, α 角一般不能小于 15° ,这是因为 α 角太小,因毛细现象产生的液面波动不易稳定下来,反而会造成读数不稳定。

图 5-7 所示为可变倾角的倾斜式微压计。它的封

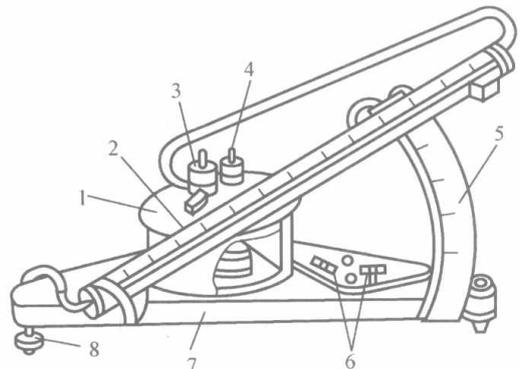


图 5-7 可变倾角的倾斜式微压计

1—杯形容器; 2—带标尺测量管; 3—多向阀;
4—零点调节器; 5—支架; 6—水平指示器;
7—底板; 8—定位螺丝

液为乙醇,测量压力时,肘管的倾斜角是可调节的,弧形支架上刻有 0.2、0.3、0.4、0.6 和 0.8 等不同的常数,它们就是相应倾角 α 的系数 K 。倾斜测量管可以分别固定在不同的倾斜角上,从而可以得到不同的测量范围。实际测量中,将倾斜测量管上读取的数值 $l(\text{mm})$ 乘以常数 K ,就是被测压力值。弧形支架上的数字是在分度条件下给出的,测量结果以 Pa 为单位。

5.2.4 液体压力计的测量误差分析及其修正

液体压力计的准确度主要取决于液柱高度读数的准确度、环境温度的变化及使用地点重力加速度的数值。

1. 毛细现象

毛细现象使封液表面形成弯月面,不仅引起读数误差,而且会引起液柱的升高或降低。毛细现象引起的测量误差与封液性质和管径 d 有关。一般可近似估算因毛细现象而产生的读数误差。以 U 形管压力计为例,当封液是水时,读数值的修正值为 $-\frac{30}{d}\text{mm}$;当封液是水银时,读数值的修正值为 $+\frac{14}{d}\text{mm}$ 。此误差不随液柱高度而改变,是可以修正的系统误差。

实际使用中,也可以首先确定零点的弯月面的位置,并测量弯月面的最高点或最低点随压力变化的高度,在这种情况下就没有必要再作修正了。然而对于变截面测量管,上述的修正仍是必要的。

2. 温度变化对测量结果的影响与修正

温度变化会对标尺长度和封液的密度产生影响。标尺的定标是在 20°C 的情况下进行的,使用中若偏离规定的温度,则需对温度变化后的测量结果进行修正。在一般的工业测量中可只考虑封液密度随温度变化所造成的附加误差。

这里以 U 形管压力计为例说明封液密度受温度影响的修正方法。

设 U 形管压力计分度时的温度为 20°C ,对应的密度为 ρ_{20} ,使用时的温度为 $t^\circ\text{C}$,对应的密度为 ρ_t 。如果直接用读数值 $h'_1+h'_2$ 作为被测量值 h_1+h_2 ,其修正方法为

$$h_1 + h_2 = \frac{\rho_t}{\rho_{20}}(h'_1 + h'_2) \quad (5-14)$$

3. 重力加速度对测量结果的影响与修正

重力加速度随地球纬度和海拔的不同而不同。如果仪表的刻度标尺是按标准地区重力加速度刻度的,在使用地点改变后,由于重力加速度发生改变,则需要对测量结果进行修正。设标准重力加速度为 g_n ,测量地点的重力加速度为 g ,如果直接用读数值 $h'_1+h'_2$ 作为被测量值 h_1+h_2 ,其修正方法为

$$h_1 + h_2 = \frac{g}{g_n}(h'_1 + h'_2) \quad (5-15)$$

4. 读数误差

液体压力计是通过读取液柱的高度来得到待测压力的,而读数误差是不可避免的,从而使液体压力计产生测量误差。读数误差主要是由于人的视差及仪器的放置方法不正确造成的。

在每个检定点上,一般每次直接读数的视差为 $0.2\sim 0.5\text{mm}$ 。被测量的压力越大,因视差而引起的相对误差就越小。在读数时设法使视线保持水平,尽可能地缩短标尺与测量管之间的距离,可减小读数误差。

使用仪器安放不垂直时,会使液柱倾斜一个角度,从而产生读数误差。在测量时注意使

仪器垂直安放，另外可进行修正计算。

由于使用的封液不同，它们在玻璃管内的液面形状是不相同的。当采用浸润液体如水、酒精等作为工作介质时，由于液体附着在玻璃管的内壁上，其液面成为凹面，这时读数要读液面的最低点；当采用非浸润液体如水银等作为工作介质时，由于液体不附着在玻璃管的内壁上，其液面成为凸面，这时读数要读液面的最高点。

5.3 弹性式压力计

弹性式压力计现也称为弹性元件压力表，是生产过程中使用最为广泛的一类压力计。它具有结构简单、坚固耐用、性能可靠、现场使用维护方便、价格便宜、体积小、指示清楚和测量范围宽等特点，可以直接测量气体、油、水、蒸汽等介质的表压力、绝对压力和差压。

弹性式压力计主要由弹性元件、机械传动放大机构、指示机构、外壳与机座等部分组成。

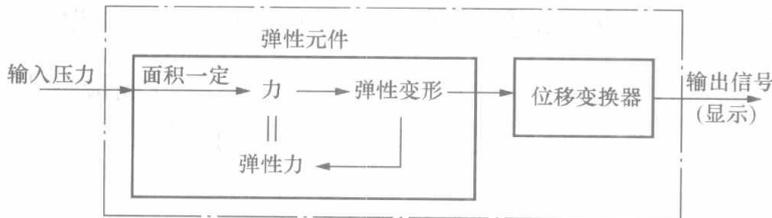


图 5-8 弹性式压力计的原理框图

它是基于弹性元件受压后产生的弹性变形与压力大小有确定关系的原理工作的。弹性式压力计的原理框图如图 5-8 所示。有压力的流体作用于有确定受压面积的弹性元件时，弹性元件就受到与被测压力成正比的力而变形。

在弹性极限内，与变形相应的弹性力平衡了作用力时，变形量的大小可以反映被测压力。因为变形量太小，利用位移变换器把该变形量转变成刻度盘上的指针位移或电信号可指示出被测压力。

5.3.1 弹性元件

弹性元件是测压仪表的关键元件。为了保证仪表的精度、可靠性及良好的线性特性，弹性元件必须工作在弹性限度范围内，且弹性元件的弹性后效和弹性滞后要小，温度系数也要低。

常用的弹性元件有弹簧管、膜片、膜盒、波纹管等。

制作弹性元件常用的材料有锡青铜、磷青铜、铍青铜、黄铜、不锈钢、锰钢等。新型弹性材料有钯—金系无磁恒弹性合金、锰—钯系无膨胀恒弹性合金等。

5.3.1.1 弹性元件的基本特性

弹性元件是弹性式压力计中的敏感元件，它的特性直接关系到压力计性能的好坏。

1. 弹性特性

弹性元件产生的变形（位移或转角）与所加载荷（压力、力或力矩）之间的关系称为弹性元件的弹性特性。

不同类型的弹性元件的弹性特性是不同的，可用曲线表示，如图 5-9 所示， s 表示弹性元件的位移， φ 表示弹性元件的转角， p 、 F 和 M 分别表示作用在弹性元件上的压力、力与力矩。弹性元件的弹性特性可能是线性的（如图 5-9 中曲线 1，弹簧管的特性曲线属此类），也可能是非线性的（如图 5-9 中曲线 2 或 3，膜片、膜盒的特性曲线属此类）。弹性元件的弹

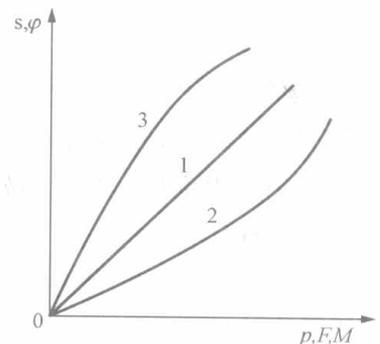


图 5-9 弹性元件的弹性特性

性特性还可用公式的形式表示。

2. 刚度和灵敏度

使弹性元件产生单位位移所需要的载荷量（压力、力或力矩），称为弹性元件的刚度。弹性元件承受单位载荷（压力、力或力矩）时所产生的位移量称为灵敏度。以相同的压力作用在弹性元件上，变形大的表示灵敏度高，但刚度小；变形小的灵敏度低而刚度大。

3. 蠕变和疲劳形变

弹性元件持续承受载荷，当作用压力取消后，不能恢复到原来的尺寸和形状，这种特性称为弹性元件的蠕变。

弹性元件在频繁交变载荷的作用下，当载荷取消后，不能恢复原来形态，这种特性称为弹性元件的疲劳形变。蠕变和疲劳形变将会影响压力表的精确度。

4. 弹性迟滞和弹性后效

弹性元件在弹性范围内加载荷与减载荷时，在同一压力下，正反行程输出值的不重合性称为弹性元件的弹性迟滞，如图 5-10 (a) 所示。

当加在弹性元件上的载荷停止变化或被取消时，弹性元件的形变并不是立即就完成，而是要经过一定的时间才完成相应的形变，这种特性称为弹性后效，如图 5-10 (b) 所示。

弹性元件的弹性迟滞和弹性后效是在工作过程中同时产生的，它是使仪表产生变差和零位误差的主要原因。图 5-10 (c) 则表示弹性迟滞和弹性后效。

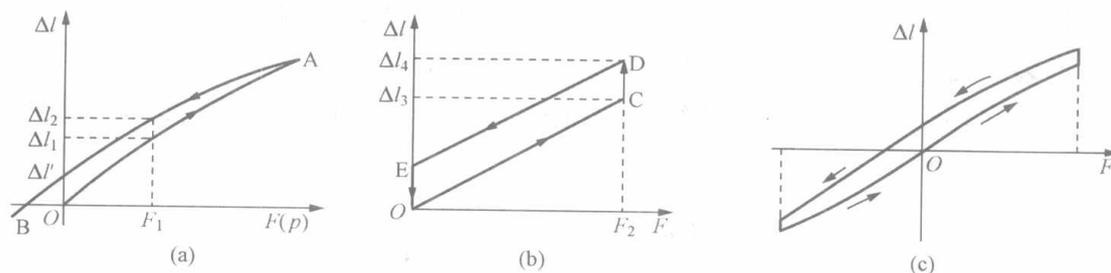


图 5-10 弹性元件的部分特性

(a) 弹性迟滞；(b) 弹性后效；(c) 弹性滞环

弹性元件的弹性特性只是在一定的范围内成立。当所加载荷超过了某一值时会产生永久变形，此载荷值称为弹性元件的比例极限。在实际使用时，对弹性元件应选取适当的安全系数

$$k = \frac{p_{\text{比}}}{p_{\text{max}}} \quad (5-16)$$

式中 $p_{\text{比}}$ ——弹性元件的比例极限；

p_{max} ——弹性元件使用时的最大压力；

k ——安全系数，一般取 1.5~2.5。

加大安全系数是减小弹性迟滞和弹性后效的最有效方法。

5. 温度特性

弹性元件周围环境的温度变化，会引起材料的弹性模量发生变化，从而引起弹性元件的刚度、灵敏度发生变化而带来温度误差。

温度变化引起的误差 η 为

$$\eta = \alpha_E \Delta t \tag{5-17}$$

式中 Δt ——温度变化量， $\Delta t = t - t_0$ ；

α_E ——弹性模量的温度系数。

制作弹性元件的材料有高弹性合金（如黄铜、铍青铜、不锈钢）和恒弹性合金（如 Ni42CrTiAl 合金）。高弹性合金的弹性模量随温度变化而有较明显的改变，恒弹性合金的弹性模量的温度系数很小。

5.3.1.2 弹性元件的类型

1. 膜片和膜盒

膜片是一种沿外缘固定的片形测压弹性元件。按工作面形状分为平膜片、波纹膜片；按刚度分为弹性膜片和挠性膜片，如图 5-11 所示。膜片在压力的作用下各处产生弹性变形。其弹性位移最大的地方是中心部位，通常取其中心部位位移作为被测压力的信号。

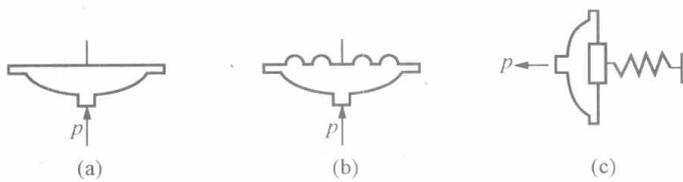


图 5-11 膜片结构示意图

(a) 平膜片；(b) 波纹膜片；(c) 挠性膜片

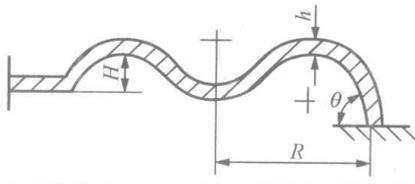
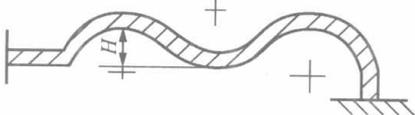
平膜片是具有扁平面的、厚度一定的圆形薄片。当中心位移很小时，它的压力—位移之间有良好的线性关系。平膜片测量压力时位移很小，常用于测量较高的压力。

波纹膜片是压有许多同心波纹的圆形薄片，其波纹的形状有正弦波、梯形波、锯齿波、弧形波等，见表 5-2。影响波纹膜片性能的主要参数有膜片材料、厚度、工作直径以及波纹形状、波纹深度和外缘波纹等。增大膜片的直径和减少膜的厚度，都可以提高膜的灵敏度。波纹膜片常用于测量低压。

表 5-2 常用的膜片、膜盒波形及其特性

波纹类别	波纹名称	波形示意	主要特征
中间波 (不带大边缘)	正弦波		波形平滑，适宜制造较厚的膜片。在相同的压力下，膜片的位移较大，灵敏度较高，但模具较复杂，常制成近似正弦波
	梯形波		在相同的压力作用下，膜片的位移仅次于正弦波。为避免集中应力，在其顶部常常带有一小圆弧
	锯齿波		制造方便，但波纹较深时，容易引起应力集中而产生裂缝。膜片的特性较好（即线性度好）。在相同的压力作用下，膜片的位移较小
	弧形波		加工工艺较好，膜片的特性和位移介于正弦波和锯齿波之间

续表

波纹类别	波纹名称	波形示意	主要特征
外缘波 (带大边缘)	圆弧形		膜片的特性主要取决于外缘波纹的升角 θ 。在相同的压力和波纹深度下，升角大，其位移就大，可以成倍增加，而且还可以获得较理想的膜片特性（即线性度最好）
	圆筒形		

在工程技术上，常用经验公式来计算膜片的位移，即

$$\Delta l = p \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{D^4}{k_1 h^3 + k_2 D^2 h} \quad (5-18)$$

式中 Δl ——膜片中心在压力 p 作用下的位移；

μ ——膜片材料的泊松比；

E ——膜片材料的弹性模量；

D ——膜片的工作直径；

h ——膜片厚度；

k_1 、 k_2 ——与型面几何尺寸有关的系数。

为了提高灵敏度，把两个波纹膜片沿周边焊接起来，成为膜盒，如图 5-12 所示。膜盒分为开口膜盒和闭口膜盒两种。开口膜盒是内腔与大气相通的膜盒，其灵敏度为单个膜片的两倍。如要得到更高的灵敏度，把数个膜盒串联在一起组成膜盒组。膜盒组用于记录式压力表中，测量的压力范围在 0.2~40kPa 之间。

开口膜盒用于表压测量。

闭口膜盒是内腔抽成真空的真空膜盒，或内腔充填气体或液体的充填膜盒。真空膜盒可用于测量作用于膜盒外部的绝对压力。

除了上面所述的金属膜片外，还有采用丁腈橡胶、涤纶等制作的挠性膜片。这种膜片的中央部分用两块小金属圆片夹持，只起

隔离被测介质的作用，被测压力全由膜片另一侧的弹簧来平衡，如图 5-11 (c) 所示。挠性膜片一般用来测量较低的压力或真空。

2. 弹簧管

弹簧管又称波登管，是一种具有非圆截面、弯曲成圆弧形的空心管子，管子截面的短轴方向与管子弯曲的半径方向一致。弹簧管分为单圈弹簧管和多圈弹簧管。多圈弹簧管又有空间螺旋形和平面螺旋形之分，如图 5-13 所示。

弹簧管的一端封闭处于自由状态，为自由端；另一端焊接在压力表的管座上固定不动，并与被测压力的介质相通。弹簧管的截面有用于低压测量的扁圆形和椭圆形，用于高压测量的 8 字形、厚壁扁圆形以及灵敏度很高的变壁厚截面和波纹管截面等，如图 5-14 所示。

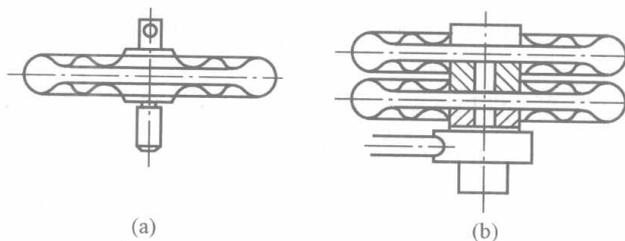


图 5-12 膜盒

(a) 单膜盒；(b) 膜盒组

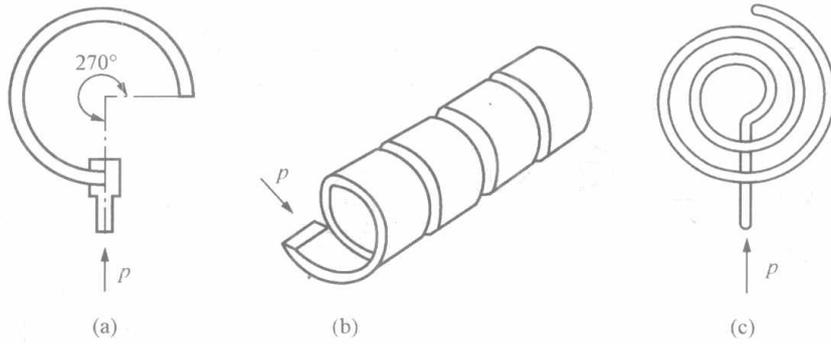


图 5-13 弹簧管的结构

(a) 单圈弹簧管；(b) 空间螺旋形；(c) 平面螺旋形

具有一定压力的被测介质进入弹簧管内腔时，由于短轴方向的面积较长轴方向大，非圆形截面力图变成圆形，使管子的刚度增加有伸直的趋势，而使自由端产生位移，此位移与被测压力相对应。

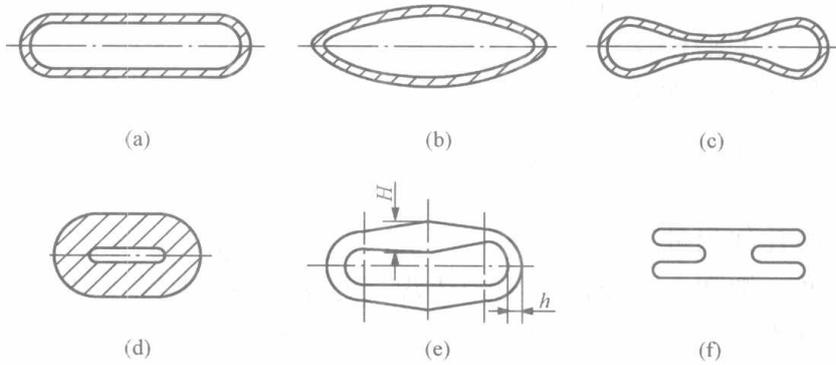


图 5-14 弹簧管的各种横截面

(a) 扁圆形；(b) 椭圆形；(c) 8 字形；(d) 厚壁扁圆形；(e) 变壁厚截面；(f) 波纹管截面

弹簧管自由端位移与压力的关系和很多因素有关。下面以椭圆形截面的单圈弹簧管为例对弹簧管受压后的变形情况作一定性分析。

如图 5-15 所示，设弹簧管内通入的压力较管外高，椭圆截面的长轴为 $2a$ 、短轴为 $2b$ ，弹簧管弯曲半径外侧为 R_1 、内侧为 R_2 ，初始中心角为 γ ，并设 R'_1 、 R'_2 、 b' 、 γ' 为受力变形后的相应值，且弹簧管变形后长度不改变。

由于弹簧管变形后长度不变，则有如下关系

$$\begin{aligned} R_1 \gamma &= R'_1 \gamma' \\ R_2 \gamma &= R'_2 \gamma' \end{aligned} \tag{5-19}$$

两式相减得

$$(R_1 - R_2) \gamma = (R'_1 - R'_2) \gamma'$$

即

$$2b\gamma = 2b'\gamma' \tag{5-20}$$

弹簧管内充压后，短轴增大，即 $b' > b$ 。由式 (5-20) 可知， $\gamma' < \gamma$ ，此时自由端向外移动，该位移量相应于某一压力值。同样，当弹簧管内通入的压力

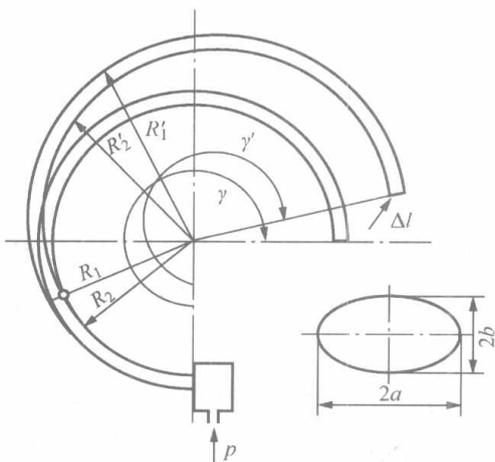


图 5-15 弹簧管变形示意图

低于管外压力时,自由端会向内移动。设

$$\begin{cases} b' = b + \Delta b \\ \gamma' = \gamma - \Delta\gamma \end{cases} \quad (5-21)$$

代入式(5-20),可得

$$\Delta\gamma = \frac{\Delta b}{b + \Delta b} \gamma \quad (5-22)$$

由式(5-22)可以看出,弹簧管原来弯曲的角度越大,管截面短轴越短,则角度变化 $\Delta\gamma$ 越大,也就是自由端位移越大。为了得到较高的灵敏度,可以采用螺旋形多圈弹簧管。

弹簧管自由端位移与管内通入压力的关系,目前只能用半理论公式表示,然后用实验方法给出。

对于薄壁扁圆形截面的弹簧管,弹簧管中心角角度的变化与压力的关系为

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = p \frac{1-\mu^2}{E} \frac{R^2}{b\delta} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + x^2} \quad (5-23)$$

式中 $\Delta\gamma$ ——弹簧管中心角角度变化量;

γ ——弹簧管初始中心角;

R ——弹簧管工作半径;

μ ——弹簧管材料泊松比;

E ——弹簧管材料弹性模量;

δ ——弹簧管壁厚;

a 、 b ——弹簧管截面长、短轴半径;

α 、 β ——与比值 a/b 有关的系数;

x ——弹簧管的几何参数, $x = R\delta/a^2$ 。

对某特定管子而言,式(5-23)中除 p 外均已知,用常数 C_1 表示,则式(5-23)变为

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = C_1 p \quad (5-24)$$

弹簧管自由端位移 Δl 与管子中心角角度的变化之间的关系为

$$\Delta l = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} R [(\gamma - \sin\gamma)^2 + (1 - \cos\gamma)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5-25)$$

当 $\gamma = 270^\circ$ 时,则有

$$\begin{aligned} \Delta l &= 0.58R \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \\ &= 0.58RC_1 p = Cp \end{aligned} \quad (5-26)$$

其中

$$C = 0.58C_1 R$$

由式(5-26)可知,弹簧管经过精心设计制造加工后,在一定压力范围内,其输入—输出关系一般为线性。

单圈弹簧管自由端的位移量不能太大,一般不超过 $2 \sim 5\text{mm}$ 。为了提高弹簧管的灵敏度,增加自由端的位移量,可采用多圈弹簧管。多圈弹簧管多用于压力记录仪表中。

3. 波纹管

波纹管是一种壁面具有等间距同心环状波纹、一端封闭的薄壁圆管,也称为波纹筒,结

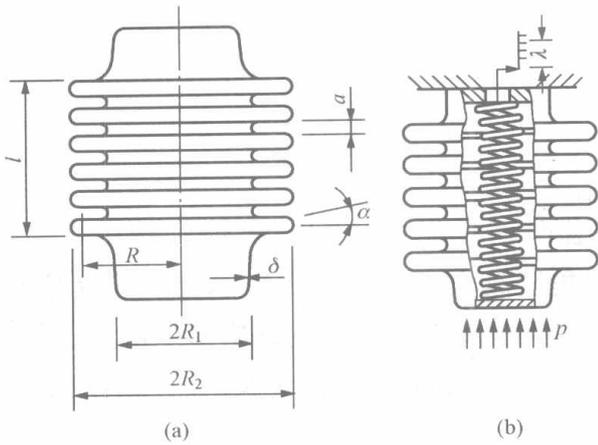


图 5-16 波纹管

(a) 波纹管结构示意图；(b) 与弹簧组合使用的波纹管

构如图 5-16 (a) 所示。波纹管的开口端固定，由此引入被测压力。当它受到轴向力作用，或在其内腔与周围介质的差压作用下，封闭端将产生位移，此位移与压力在一定范围内呈线性关系。由于波纹管受压时的线性输出范围比受拉时的大，故常在压缩状态下使用。为了改善仪表性能，提高测量精度，便于改变仪表量程，实际应用时波纹管常和刚度比它大几倍的弹簧结合起来使用 [如图 5-17 (b)]。这时，其性能主要由弹簧决定。

波纹管种类很多，但大体上可分为无缝波纹管和有缝波纹管两类。

无缝波纹管是由整片材料加工而成的，加工过程容易，成本低。波纹截面的形状大致有五种，如图 5-17 所示。波纹管封闭端的弹性位移与被测压力的关系为

$$\Delta l = F \frac{1-\mu^2}{E\delta} \frac{n}{A_0 + \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + B_0 (\delta^2/R^2)} \quad (5-27)$$

$$\alpha = \frac{2R-a}{2(R_2 - R_1 - 2R)}$$

式中

- F ——波纹管轴向方向的受力 ($F = \text{压力} \times \text{受力面积}$)；
- μ ——材料的泊松比；
- E ——材料的弹性模量；
- δ ——成型前材料的厚度；
- n ——波纹数；
- R ——波纹圆弧半径；
- R_2 ——波纹管外半径；
- R_1 ——波纹管内半径；
- a ——相邻两波纹的间隙；

A_0 、 A_1 、 A_2 、 B_0 ——与 R 、 R_2 、 R_1 有关的系数。

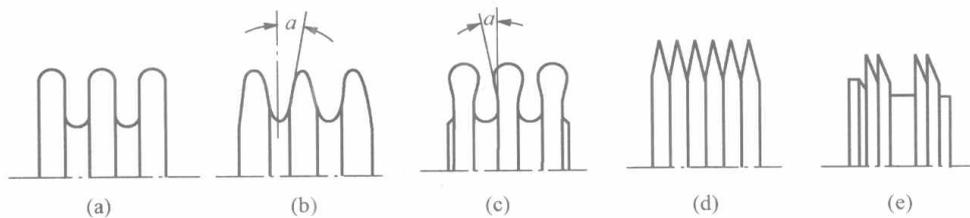


图 5-17 波纹管截面形状

(a) U形；(b) C形；(c) Ω形；(d) V形；(e) 锯齿形

波纹管受力的有效面积

$$A_e = \pi \left(\frac{R_2 + R_1}{2} \right)^2 \quad (5-28)$$

则

$$F = A_e p \quad (5-29)$$

故有

$$\Delta l = p\pi \left(\frac{R_2 + R_1}{2} \right)^2 \frac{1 - \mu^2}{E\delta} \frac{n}{A_0 + \alpha A_1 + \alpha^2 A_2 + B_0(\delta^2/R^2)} \quad (5-30)$$

波纹管的特性曲线如图 5-18 所示, 在 A、B 点范围内, 波纹管的刚度为一常数。波纹管伸长到达 B 点时, 由于位移太大使刚度急剧增加, 波纹管的输出—输入将偏离线性关系。波纹管压缩到达 A 点时, 由于波纹紧靠, 也使刚度急剧增加, 波纹管的输出—输入也将偏离线性关系。

有缝波纹管是由许多对环状膜片沿内、外周边焊接而成的。虽然制作工艺复杂些, 但其性能要比无缝波纹管优越得多。

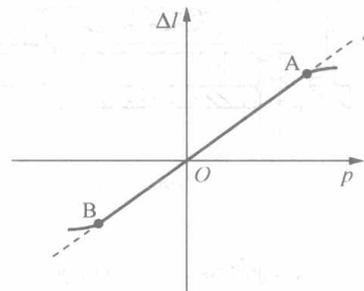


图 5-18 波纹管特性曲线

5.3.2 膜片压力表和膜盒压力表

5.3.2.1 膜片压力表

膜片压力表中的膜片有平膜片和波纹膜片两种。其结构如图 5-19 所示。具有同心波纹的膜片 1 被固定于上膜盖 4 和下膜盖 2 的中间, 两膜盖的边缘用带孔紧固螺钉 3 加以连接。当被测压力由接头 9 引入到膜腔后, 膜片 1 就产生弹性变形而产生相应的位移。此位移通过连杆组 5 经传动放大机构 6 的放大, 使指针 7 在表盘 8 上指示出被测压力值。

膜片压力表的准确度较低, 一般只达到 2.5 级, 测量范围仅为 0~6MPa。

5.3.2.2 膜盒压力表

膜盒压力表是用膜盒作弹性元件, 适用于测量微小压力和真空。目前国产的膜盒压力表的型号有 YE 系列、YEJ 系列、ZYE 系列等。

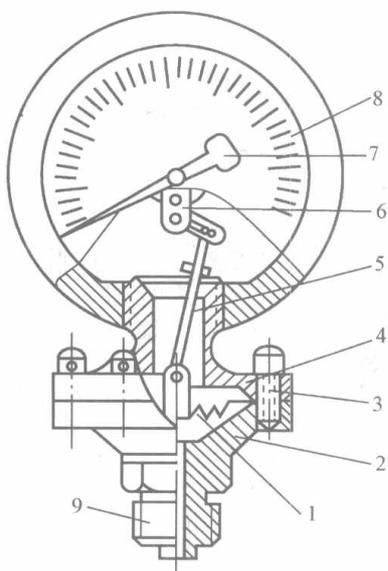


图 5-19 膜片压力表

- 1—波纹膜片; 2—下膜盖; 3—紧固螺钉;
4—上膜盖; 5—连杆组; 6—传动机构;
7—指针; 8—表盘; 9—接头

膜盒压力表的结构如图 5-20 所示, 当被测介质从管接头 16 经导压管引入波纹膜盒 4 时, 波纹膜盒受压扩张产生位移。此位移通过弧形连杆 8, 带动杠杆架 11 使固定在调零板 6 上的转轴 10 转动, 通过连杆 12 和杠杆 14 驱使指针轴 13 转动, 固定在转轴上的指针 5 在刻度板 3 上指示出压力值。

指针轴上装有游丝 15 用以消除传动机构之间的间隙。在调零板 6 的背面固有限位螺丝 7, 以避免膜盒过度膨胀而损坏。为了补偿金属膜盒受温度的影响, 在杠杆架上连接着金属片 9。在机座 2 下面装有调零螺杆, 旋转调零螺杆 1 可将指针调至初始零位。

膜盒压力表的外形有圆形和矩形两种。矩形膜盒压力表有指示式和电接点式两种。

5.3.3 弹簧管压力表

弹簧管压力表是应用非常广泛的测压仪表。它可以测量压力, 也可以测量真空。常见的弹簧管压力表有单

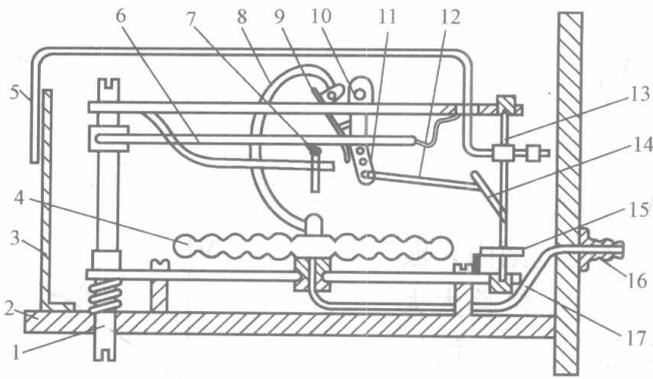


图 5-20 膜盒压力表

1—调零螺杆；2—机座；3—刻度板；4—膜盒；5—指针；6—调零板；7—限位螺丝；8—弧形连杆；9—双金属片；10—轴；11—杠杆架；12—连杆；13—指针轴；14—杠杆；15—游丝；16—管接头；17—导压管

移通过拉杆 7 带动扇形齿轮作逆时针偏转，进而带动中心齿轮作顺时针偏转，于是固定在中心齿轮上的指针 4 也作顺时针偏转，从而在面板的刻度标尺 3 上显示出被测压力的数值。由于自由端的位移量与被测压力之间具有比例关系，因此弹簧管压力表的刻度标尺是均匀的。在中心齿轮上的游丝 9 的作用是消除扇形齿轮与中心齿轮间的传动啮合间隙，以减小仪表的变差。改变调整螺钉 10 的位置，可改变仪表机械传动的放大系数，从而实现压力表的量程调整。

单圈弹簧管压力表的传动关系如图 5-22 所示。当弹簧管充压后，自由端移动，其位移方向与拉杆的原方向的夹角是 α ，拉杆 AB 被弹簧管带动移到 A'B'。A 点移动了 Δl 。通过曲柄连杆和齿轮传动，中心齿轮带动指针在表盘上指示出被测压力。

在自由端位移很小时，指针转角 φ 与 Δl 的关系近似为

$$\varphi = \frac{Z_1}{Z_0} \times \frac{\Delta l \cos \alpha}{r \sin \theta} \times \frac{180^\circ}{\pi} \quad (5-31)$$

式中 Z_1 ——扇形齿轮的齿数；
 Z_0 ——中心齿轮的齿数；
 r ——拉杆 BO' 的长度，常用来调整 φ 和 Δl 间的比例关系；
 θ ——拉杆与曲柄间的夹角，用来调整 φ 和 Δl 间的线性关系；
 α ——自由端位移方向与拉杆原始方向的夹角。

由式 (5-31) 可知，当 Z_1 、 Z_0 、 r 、 α 、 θ 为定值时， φ 和 Δl 为成正比关系。在测量过程中， Z_1 、 Z_0 、 r 不变， Δl 很小， α 的变化也不大。但 θ 值是不固定的，随 Δl 的变化而变。一般在被测压力为满量程的一半时，使 $\theta=90^\circ$ 。

5.3.3.2 多圈弹簧管压力表

多圈弹簧管压力表的结构如图 5-23 所示。扁圆

圈弹簧管压力表和多圈弹簧管压力表。按精度分，有精密压力表、标准压力表、普通工业压力表。按照适用的条件分，有耐震型、耐热型、耐腐蚀型、抗冲击防爆型以及专用压力表等。

5.3.3.1 单圈弹簧管压力表

单圈弹簧管压力表的结构如图 5-21 所示。它主要由弹簧管、齿轮传动机构（包括拉杆、扇形齿轮、中心齿轮等）、指针、刻度盘、外壳等几部分组成。被测压力由接头 1 引入弹簧管中，当弹簧管内的压力高于管外压力时，弹簧管 5 的自由端产生向右上方向扩张的变形及位移，自由端的位移通过拉杆 7 带动扇形齿轮作逆时针偏转，进而带动中心齿轮作顺时针偏转，于是固定在中心齿轮上的指针 4 也作顺时针偏转，从而在面板的刻度标尺 3 上显示出被测压力的数值。由于自由端的位移量与被测压力之间具有比例关系，因此弹簧管压力表的刻度标尺是均匀的。在中心齿轮上的游丝 9 的作用是消除扇形齿轮与中心齿轮间的传动啮合间隙，以减小仪表的变差。改变调整螺钉 10 的位置，可改变仪表机械传动的放大系数，从而实现压力表的量程调整。

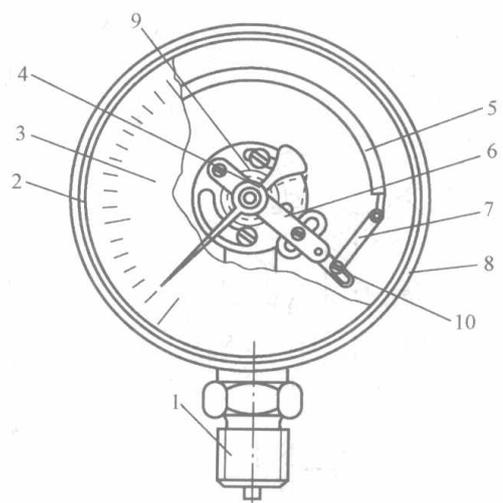


图 5-21 单圈弹簧管压力表的结构示意图

1—接头；2—衬圈；3—刻度盘；4—指针；5—弹簧管；6—传动机构（机芯）；7—拉杆；8—表壳；9—游丝；10—调整螺钉

形截面的螺旋形弹簧管 3 的一端固定在表壳上，经导管 2 与引压管接头 1 相连接，另一端为封闭的自由端与杠杆 4 和轴 5 相连接。当被测介质压力由接头 1、导管 2 进入弹簧管 3 时，弹簧管因受压逐渐伸直展开，自由端产生位移，轴 5 转动，通过支架 6 和 7、拉杆 8 等传动机构，使指针端部的笔头 9 在记录纸 14 上记录下被测压力的变化曲线。

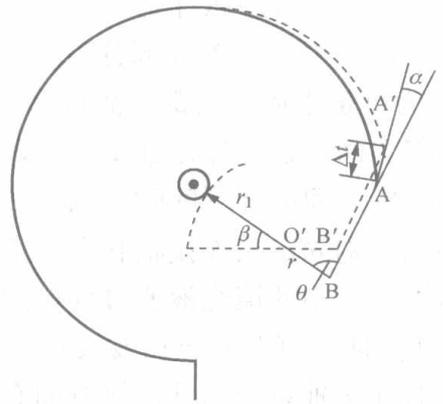


图 5-22 单圈弹簧管压力表的传动示意图

多圈弹簧管的自由端转动力矩较大，除了可以记录压力外，还可带电接点装置、电感传送装置、气动传送装置等以扩大其功能。多圈弹簧管压力表的测量范围为 0~16MPa。

5.3.3.3 电接点压力表

在某些工业生产中，有时需要将被测介质压力保持在一定范围内。利用电接点压力表可以简便地在压力偏离给定范围时自动发出报警信号，提醒操作人员或通过中间继电器实现某种联锁控制。

电接点压力表的结构和工作原理如图 5-24 所示。它是在普通弹簧管压力表上加装一套上下限触点机构。压力表指针上有动触点 2，表盘上另有可调节的指针，上面分别有静触点 1 和 4。当压力超过上限给定数值（此数值由上限给定指针上的触点 4 的位置确定）时，动触点 2 和静触点 4 接触，红色信号灯 5 的电路接通使红灯发光。若压力过低，则动触点 2 和下限静触点 1 接触，接通绿色信号灯的电路使绿灯发光。静触点 1、4 的位置可根据需要进行调节。

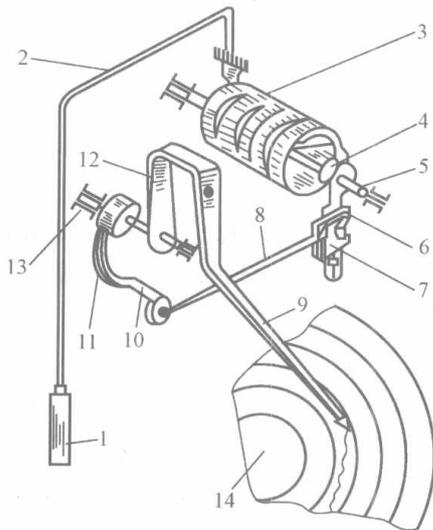


图 5-23 多圈弹簧管压力表的结构示意图

- 1—管接头；2—导管；3—弹簧管；4—杠杆；5、13—轴；
- 6、7—支架；8—拉杆；9—记录笔（指针）；
- 10、11—连杆；12—桥形杆；14—记录纸

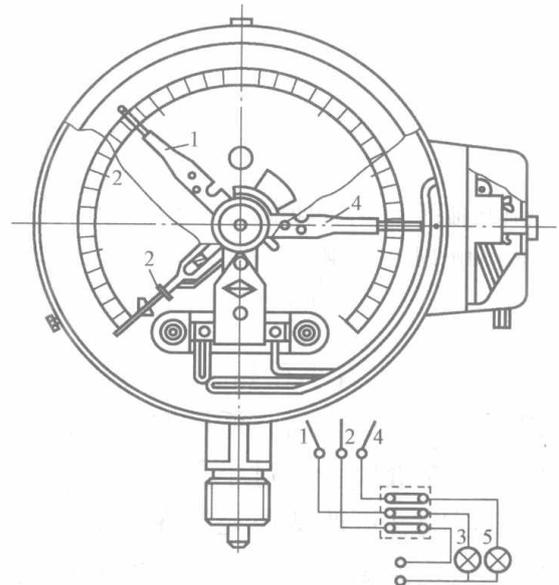


图 5-24 电接点压力表的结构示意图

- 1、4—静触点；2—动触点；3—绿灯；5—红灯

5.3.4 波纹管式差压计

波纹管式差压计是以波纹管为弹性元件的测压仪表。有单波纹管 and 双波纹管两种，主要用作流量和液位测量的显示仪表。

双波纹管差压计是一种应用较多的直读式仪表，主要由测量机构、传动机构、记录机构以及机械积算装置等部分组成，其结构如图 5-25 所示。高压室波纹管 B_1 和低压室波纹管 B_2 为测量主体，内部充满低膨胀系数的填充液，感受引入的差压信号。波纹管两端有刚性端盖，两端盖用连接轴 1 刚性地连接起来成为一体。高、低压室波纹管通过阻尼环 11 与中心基座 8 间的环形间隙，以及中心基座上的阻尼旁路 10 相通。量程弹簧组 7 在低压室，它两端分别固定在连接轴和中心基座上。当被测差压接入高、低压测量室时，高压室波纹管被压缩，其中的填充液通过环形间隙和阻尼旁路流向低压室波纹管，使其伸长。同时量程弹簧 7 被拉伸，直至差压在波纹管上形成的力与量程弹簧及波纹管上产生的弹性力相平衡为止。这时连接轴系统向低压侧方向有移动，通过挡板 3 推动摆杆 4 使扭力管 5 转动，从而使与扭力管固定在一起的芯轴发生扭转，扭转角变化传送给仪表的显示机构，显示出相对应的被测差压值。

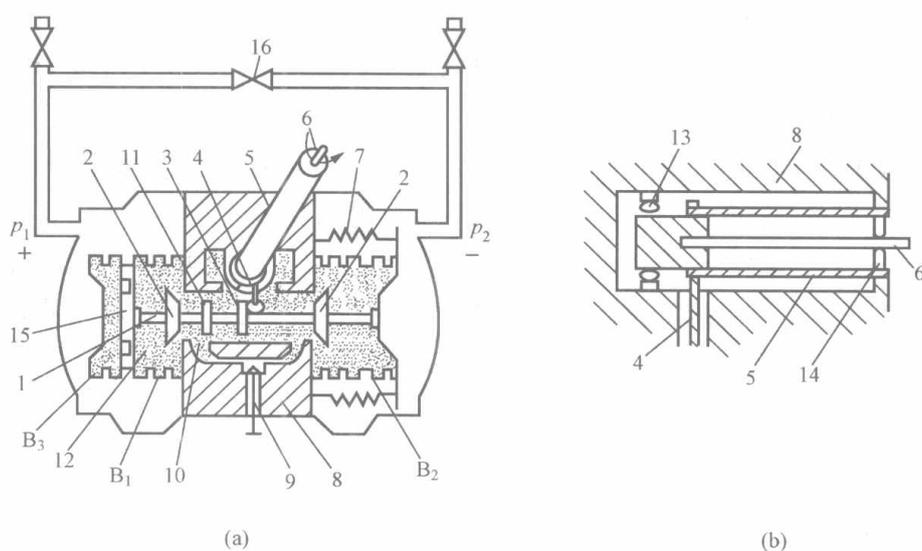


图 5-25 双波纹管压差计结构

(a) 内部结构；(b) 扭力管

- 1—连接轴；2—单向保护阀；3—挡板；4—摆杆；5—扭力管；6—芯轴；7—量程弹簧组；8—中心基座；
9—阻尼阀；10—阻尼旁路；11—阻尼环；12—填充液；13—滚珠轴承；14—玛瑙轴承；15—隔板；
16—平衡阀； B_1 —高压室波纹管； B_2 —低压室波纹管； B_3 —补偿波纹管

补偿波纹管 B_3 有小孔和高压室波纹管相通。当温度变化时，高、低压室波纹管内填充液的体积要变化。由于高、低压室波纹管由连接轴连为一体，总体积基本不变，这时多余或不足部分的填充液就会通过小孔流入或流出充液温度补偿波纹管，起到温度补偿作用。

调节阻尼阀 9 可改变填充液在阻尼旁路 10 中的流动阻力，防止仪表迟延过大或差压变化频繁引起系统振荡。当仪表所受的差压过大或单向受压时，连接轴上的单向保护阀 2 就与中心基座上的阀座紧靠，将高、低压室隔断，防止波纹管继续变形而损坏，起到保护作用。

5.4 压力（差压）变送器

随着生产的不断发展，对检测仪表的测量精度、测量范围、动态特性及远距离传输等，都提出了更高的要求。为了实现对压力参数的集中检测和控制，在需要远传压力信号时，从

安全、方便和减小迟延方面出发,需要将测压弹性元件输出的位移或力变换成统一的电信号,以便远距离传送和信号处理。

根据工作原理的不同,压力信号的变送方法主要有电感式、力平衡式、电容式、霍尔式、振弦式、应变式和光纤式等。

尽管测量压力、差压或真空的变送器结构有所不同,但从原理上讲是一样的。测压力时,只要将差压变送器的 p_- 端接大气;测真空时,将差压变送器的 p_+ 端接大气。

下面对目前电厂中常用的电容式压力(差压)变送器和扩散硅式压力(差压)变送器加以介绍。

5.4.1 电容式压力(差压)变送器

5.4.1.1 概述

电容式压力(差压)变送器是利用弹性元件受压变形来改变可变电容的电容量。在变送器中,以测压弹性膜片为电容器的可动极板,它与固定极板之间形成一可变电容。随被测压力变化,膜片产生位移,使电容器的可动极板与固定极板之间的距离改变,从而改变了电容器的电容量,这样就完成了压力信号与电容量之间的变换。

将激励电压加于电容器,产生的交变电流经整流、控制、放大,输出 $4\sim 20\text{mA}$ 直流电流。这就是电容式压力(差压)变送器的基本工作原理。

电容式压力(差压)变送器系统构成框图如图 5-26 所示。它主要由测量部分和转换放大部分组成。测量部分感受被测压力并将其转换成电容量的变化,转换放大部分则将电容变化量转换成 $4\sim 20\text{mA}$ 标准电流信号。该变送器具有精确度高、动态性能好、灵敏度高、单向过载保护性能好、调整方便、体积小、重量轻等一系列优点,已经广泛地应用在电力、石油、化工等各领域的生产过程中。目前使用较多的有西安仪表厂生产的 1151 系列、北京远东仪表厂生产的 1751 系列、上海自动化仪表一厂生产的 1151 系列、光华仪表厂的 CECC 系列、美国 Fisher-Rosemount 公司的 1151SMART 系列和 3051 系列产品。电容式差压变送器外形如图 5-27 所示。

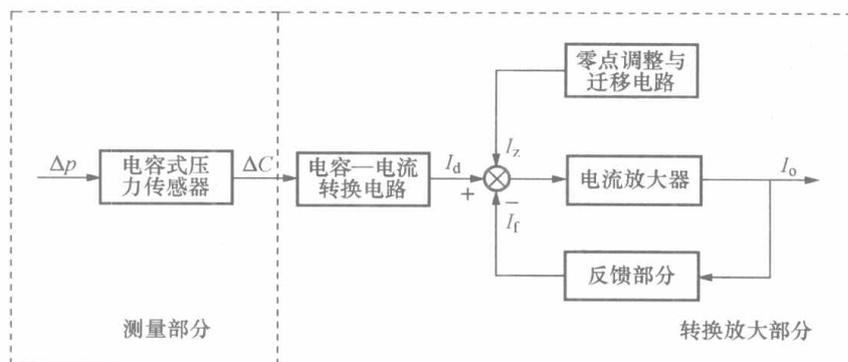


图 5-26 电容式压力(差压)变送器系统构成框图

5.4.1.2 测量部分

1. 结构

测量部分的核心是一个球面电容器,一般为差动电容结构,见图 5-28。测量膜片作为感压元件,是由弹性稳定性好的特殊合金薄片(例如合氏合金、蒙耐尔合金等)制成,作为差动电容的活动电极。它在压差作用下,可左右移动约 0.1mm 的距离。在弹性膜片左右有

两个用玻璃绝缘体磨成的球形凹面，采用真空镀膜法在该表面镀上一层金属薄膜，作为差动电容的固定极板。测量膜片焊接在两个杯体之间。杯体外侧焊上隔离膜片，在两室的空腔中充满硅油（或氟油）以便传递压力。

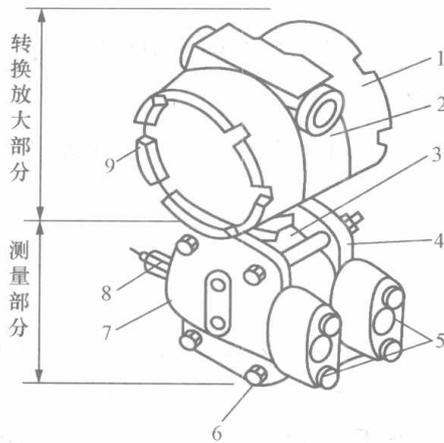


图 5-27 电容式差压变送器外形

- 1—线路板罩盖；2—线路板壳体；3—差动电容敏感部件；
- 4—低压侧法兰；5—引压管接头；6—紧固螺栓；
- 7—高压侧法兰；8—排气/排液阀；9—排线端罩盖

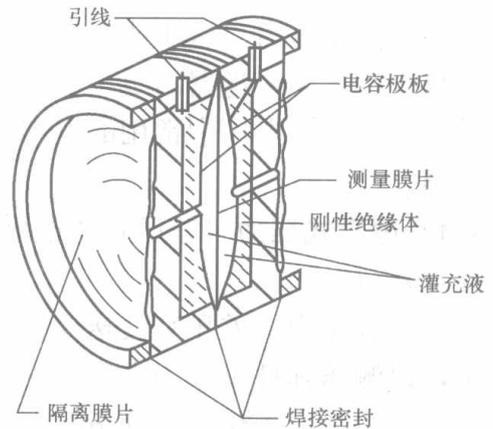


图 5-28 电容式压力（差压）变送器测量部分结构示意图

当隔离膜片分别承受高压和低压时，通过内充的硅油传压使测量膜片产生与差压成正比的微小位移，从而引起测量膜片与固定极板间的电容产生差动变化。差动变化的两电容由引线接到测量电路。

2. 差压—电容的转换关系

由于测量膜片是在施加预张力条件下焊接的，其厚度很薄，预张力很大，致使膜片的特性趋近于绝对柔性薄膜在压力作用下的特性，因此输入差压 Δp 与测量膜片位移 Δd 的关系可表示为

$$\Delta d = K_1 \Delta p \tag{5-32}$$

式中 K_1 ——由膜片预张力、材料特性和结构参数所确定的系数。在电容式压力变送器制造好之后， K_1 为常数，即测量膜片位移 Δd 与输入差压 Δp 之间成线性关系。

如图 5-29 所示，当被测差压 $\Delta p = 0$ 时，测量膜片与两边弧形电极之间距离相等，设其间距为 d_0 ，这时两电容值 C_1 和 C_2 相等，称为初始电容值，用 C_0 表示。若不考虑边缘电场的影响，其电容可表示为

$$C_0 = C_1 = C_2 = K \frac{\epsilon A}{d_0} \tag{5-33}$$

- 式中 ϵ ——两个电极间介质的介电常数；
- A ——极板相对面积；
- d_0 ——可动极板与固定极板间的初始距离；
- K ——与所取单位有关的系数。

当被测差压 $\Delta p \neq 0$ 时，测量膜片在 Δp （假设 $p_1 > p_2$ ）作用下向左产生微小位移 Δd ，使两电容 C_1 和 C_2 不再相等，它们分别为

$$C_1 = K \frac{\epsilon A}{d_0 + \Delta d} \tag{5-34}$$

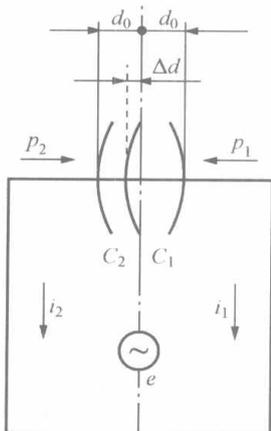


图 5-29 差动电容及转换部分原理

$$C_2 = K \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d} \quad (5-35)$$

因此, 两个电容的电容量之差 ΔC 为

$$\Delta C = C_2 - C_1 = K\epsilon A \left(\frac{1}{d_0 - \Delta d} - \frac{1}{d_0 + \Delta d} \right) \quad (5-36)$$

可见, 两个电容的电容量之差 ΔC 与测量膜片位移 Δd 成非线性关系。但若取两电容量之差与两电容量之和的比值, 即取差动电容的相对变化值, 则有

$$\frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (5-37)$$

将式 (5-32) 代入式 (5-37), 即得

$$\frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} = \frac{K_1}{d_0} \Delta p = K_2 \Delta p \quad (5-38)$$

式中 K_2 ——比例常数, $K_2 = K_1/d_0$ 。

可见差动电容的相对变化值与 Δp 成线性关系。

5.4.1.3 转换放大部分

转换部分的原理如图 5-29 所示。高、低压室的电流分别为

$$i_1 = \omega e C_1 \quad (5-39)$$

$$i_2 = \omega e C_2 \quad (5-40)$$

式中 ω ——高频振荡电源的角频率, $\omega = 2\pi f$;

e ——高频振荡电源的电压。

为方便得到电流与差压的关系, 在电路设计中使 i_2 与 i_1 之和等于常数, i_2 与 i_1 之差为输出信号, 即有

$$i_2 + i_1 = \omega e (C_2 + C_1) = I_c (\text{常数}) \quad (5-41)$$

$$i_2 - i_1 = \omega e (C_2 - C_1) = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} I_c \quad (5-42)$$

将式 (5-38) 代入式 (5-42), 可得

$$i_2 - i_1 = \frac{K_1 \Delta p}{d_0} I_c \quad (5-43)$$

由于 d_0 、 K_1 、 I_c 均为常数, 若令 $K = K_1 I_c / d_0$, 则有

$$i_2 - i_1 = K \Delta p \quad (5-44)$$

由此可见, 采用差动电容方式, 即可消除硅油介电常数随温度变化带来的影响, 并使输出的差动信号仅与中心膜片的位移有关, 与外加差压成正比, 而不受高频电压频率、幅值变化的影响, 提高了变送器的精度和稳定度。

电容式差压变送器的电路主要由解调器、振荡控制放大器、振荡器、基准电压电路、调零电路、量程调整电路、电流控制放大器、电流转换电路、电流限制电路、阻尼调整电路、反极性保护电路等组成, 如图 5-30 所示。图中的差动信号即 $i_2 - i_1$, 共模信号即 $i_2 + i_1$ 。

振荡器产生的高频交流激励电压供给电容回路, 将载有信号的电容转换成电流信号。解调器将流过电容的交流电流解调成直流电流, 一是输出差模信号电流, 该电流代表差动电容的相对变化, 输出到振荡控制放大器进行控制放大, 使之成为 $4 \sim 20 \text{mA}$ DC 输出。二是输出共模电流。该电流送到振荡控制放大器的输入端, 目的是保证振荡器的输出电压稳定。保

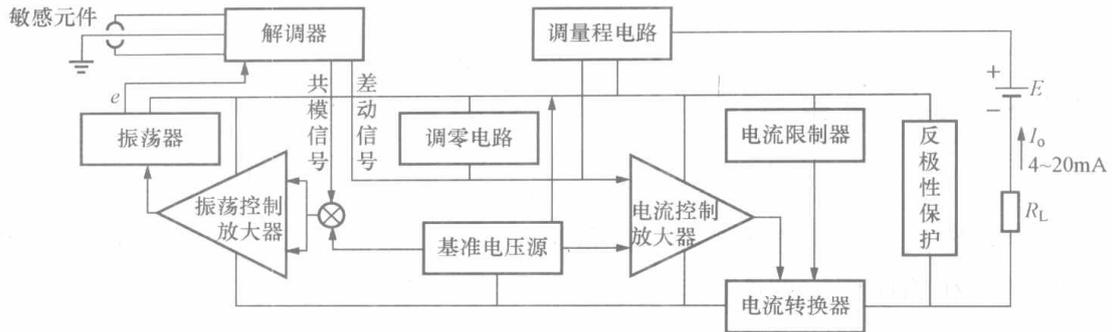


图 5-30 变送器转换放大部分原理框图

证其稳定的原因是当电容量变化时，流过电容的电流会随之发生变化，而振荡器输出变化时，流过电容的电流也随之发生变化。为了消除振荡器输出变化的影响，将振荡控制放大器与解调器、振荡器连接构成深度负反馈控制电路，以保证振荡器的输出电压稳定。利用调零电路、量程调整电路、电流控制放大器、电流转换电路（功率放大）、阻尼调整电路可实现零点、量程、阻尼调整等功能。由电流限制电路和反极性保护电路完成输出电流限制和外接电压保护功能。线性调整功能由线性调整电路完成。

5.4.1.4 3051C 型差压变送器

3051C 型差压变送器是美国 Fisher-Rosemount 公司开发生产的一种二线制智能差压变送器。智能差压变送器的精度、可靠性、稳定性均优越于模拟式差压变送器，它可以输出模拟和数字信号，通过现场总线网络可与上位计算机相连。

图 5-31 所示为其原理框图。它由传感组件和电子组件两部分组成，采用了专用集成电路（ASIC）和表面安装技术（SMT）。

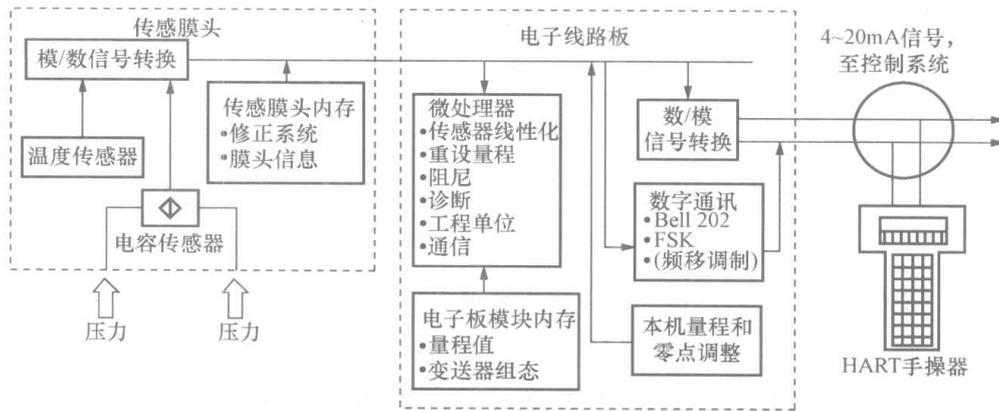


图 5-31 3051C 型差压变送器（4~20mA）原理框图

1. 工作原理

3051C 型智能差压变送器的检测元件采用高精度的电容式压力传感器，其工作原理与模拟式电容差压变送器相同。但 3051C 差压变送器除了电容式压力传感器之外，还配置了温度传感器，用来补偿热效应带来的误差。两个传感器的信号通过 A/D 转换器转换为数字信号送到电子组件，微处理器完成对输入信号的线性化、温度补偿、数字通信、自诊断等处理后，得到一个与输入差压对应的 4~20mA 直流电流或数字信号作为变送器的输出。

在电子组件的 EEPROM 存储器中存有变送器的组态数据，当遇到意外停电，其中数据

仍然保存,所以恢复供电之后,变送器能立即工作。

3051C型智能差压变送器所用的手持通讯器为275型,其上带有键盘及液晶显示器。它可以接在现场变送器的信号端子上,就地设定或检测,也可以在远离现场的控制室中,接在某个变送器的信号线上进行远程设定及检测。为了通讯方便,信号回路必须有不小于 250Ω 的负载电阻。

2. 组态

对3051C变送器的组态可以通过数据设定器或任何支持HART通讯协议的上位机来完成。组态可分为两部分。首先,设定变送器的工作参数,包括测量范围、线性或平方根输出、阻尼时间常数、工程单位选择;其次,可向变送器输入信息性数据,以便对变送器进行识别与物理描述,包括给变送器指定工位号、描述符等。

5.4.2 扩散硅式压力(差压)变送器

扩散硅式压力(差压)变送器是电阻应变式变送器的一种。它采用IC(集成电路)技术,在半导体材料硅基片上用扩散工艺形成应变电阻,用作压力(差压)测量敏感元件。

由于单晶硅材料的弹性性能很高,其弹性滞后和蠕变很小,且其压阻效应又很大,故测压的转换精度很高。变送器体积小、动态性能好、工作可靠、结构简单、重量轻,可以测量几十千赫的脉动压力,能在恶劣的环境条件下工作,便于实现显示数字化。

5.4.2.1 扩散硅压阻片的测压原理

一段长为 L 、截面积为 A 和电阻率为 ρ 的电阻体,其电阻值 R 为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5-45)$$

对式(5-45)取对数并求微分后得到

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (5-46)$$

对于半导体压阻片在受压(或拉)后,引起其电阻相对变化的主要原因是电阻率的变化,如忽略 L 和 A 变化的影响,则式(5-46)可写成

$$\frac{dR}{R} \approx \frac{d\rho}{\rho} \quad (5-47)$$

对于简单的纵向压缩和拉伸,半导体的电阻率变化与应力 σ 的关系为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi\sigma \quad (5-48)$$

式中 π ——压阻系数,与半导体种类以及应力方向和晶轴方向之间的夹角有关。

应力 σ 与变形后的应变变量 $\epsilon = \frac{dL}{L}$ 的关系为

$$\sigma = E\epsilon \quad (5-49)$$

式中 E ——材料的弹性模量。

将式(5-47)、式(5-48)和式(5-49)合并后,得到

$$\frac{dR}{R} \approx \frac{d\rho}{\rho} = \pi E\epsilon = K_1\epsilon \quad (5-50)$$

式中 K_1 ——半导体压阻片的灵敏度系数, $K_1 = \pi E$ 。

半导体材料的灵敏度系数较大,并且其值随温度而变。温度越高,该值越小,故测量压

力时要考虑温度的补偿。

当半导体压阻片与弹性元件处于一体，因受压而发生同一应变时，应变量 ϵ 与被测压力 p 成正比，即

$$\epsilon = K_2 p \tag{5-51}$$

式中 K_2 ——结构常数，与弹性元件的结构形状、材料性质及压阻片在弹性元件上所处的位置有关。

将式 (5-51) 代入式 (5-50) 得

$$\frac{dR}{R} = K_1 K_2 p = K p \tag{5-52}$$

其中

$$K = K_1 K_2$$

由此可见，半导体压阻片的电阻变化率与被测压力成正比，这就是扩散硅压阻片的测压原理。

5.4.2.2 扩散硅式压力（差压）变送器的组成

扩散硅式压力（差压）变送器的构成框图如图 5-32 所示。

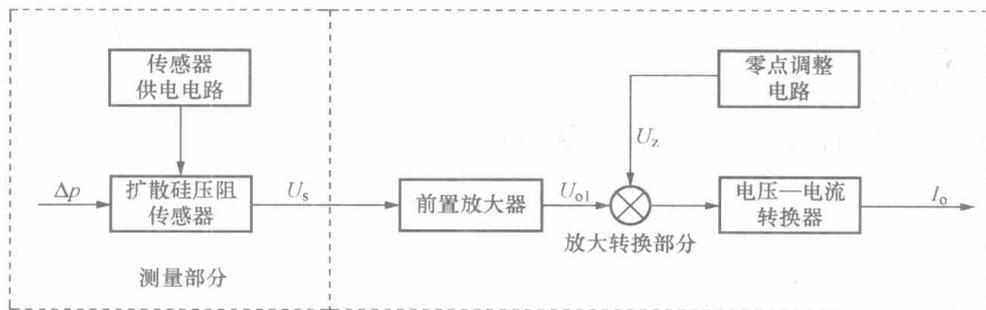


图 5-32 扩散硅式压力（差压）变送器构成框图

输入差压 Δp ，作用于测量部分的扩散硅压阻传感器上，压阻效应使硅材料上扩散电阻（应变电阻）的阻值发生变化，从而使这些电阻组成的电桥产生不平衡电压 U_s ， U_s 由前置放大器放大为 U_{o1} ， U_{o1} 与调零电路产生的调零信号 U_z 的代数和送入电压—电流转换器转换为整机的输出信号 I_o 。

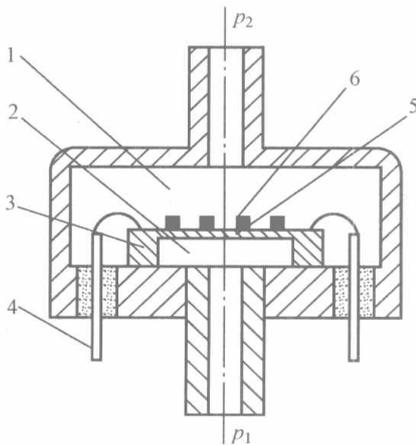


图 5-33 扩散硅压力（差压）传感器结构

- 1—低压腔；2—高压腔；3—硅杯；
- 4—引线；5—硅膜片；6—扩散电阻

扩散硅式压力（差压）变送器主要由测量部分和放大转换部分组成。

1. 测量部分

扩散硅压力（差压）传感器结构如图 5-33 所示，采用硅杯压阻传感器为敏感元件，通常是在硅膜片上用离子注入和激光修正方法形成四个阻值相等的扩散电阻，应用中将其接成惠斯顿电桥形式。

设硅膜片下部受均匀分布的压力 P 作用，则膜片表面上各点的应力与其作用半径 r 的关系为

$$\sigma_r = \frac{3P}{8h^2} [r_0^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)]$$

$$\sigma_t = \frac{3P}{8h^2} [r_0^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)]$$

式中 σ_r 、 σ_t ——径向应力和切向应力；
 h 、 r_0 ——硅膜片厚度和半径；
 r ——应力作用半径，即电阻距硅膜片中心的距离；
 μ ——泊松比，对硅 $\mu=0.35$ 。

膜片上的应力分布如图 5-34 所示。由图 5-34 可见：

(1) 在膜片的中心处， $r=0$ ，具有最大的正应力（拉应力），且 $\sigma_r=\sigma_t$ ；在膜片的边缘处， $r=r_0$ ，纵向应力 σ_r 为最大的负应力（压应力）。

(2) 当 $r=0.635r_0$ 时，纵向应力 $\sigma_r=0$ ；当 $r>0.635r_0$ 时，纵向应力 $\sigma_r<0$ ，为负应力（压应力）；当 $r<0.635r_0$ 时，纵向应力 $\sigma_r>0$ ，为正应力（拉应力）。

(3) 当 $r=0.812r_0$ 时，横向应力 $\sigma_t=0$ ，仅纵向应力 $\sigma_r<0$ 。

根据以上分析，在硅膜片上扩散电阻时，四个电阻的布置如图 5-35 所示。其中两个电阻处于中心位置 ($r<0.635r_0$)，使其受拉应力；而另两个电阻处于边缘位置 ($r>0.635r_0$)，使其受压应力。四个应变电阻排成直线，只要位置合适，可满足

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} \quad (5-53)$$

这样就可以组成差动效果，通过测量电路，获得最大的电压灵敏度。

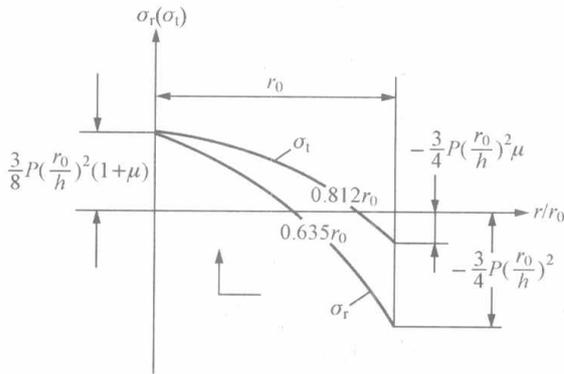


图 5-34 硅膜片上应力分布

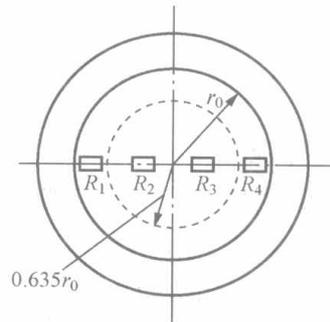


图 5-35 硅杯膜片上的电阻布置

2. 放大转换部分

扩散硅式压力（差压）变送器的放大转换部分的电路图如图 5-36 所示。它由应变电桥、温度补偿网络、恒流源、输出放大及电压—电流转换单元等组成。

电桥由电流值为 1mA 的恒流源供电。硅杯未承受负荷时，因 $R_1=R_2=R_3=R_4$ ， $I_1=I_2=0.5\text{mA}$ ，故 A、B 两点电位相等 ($U_{AC}=U_{BC}$)，电桥处于平衡状态，因此电流 $I_0=4\text{mA}$ 。硅杯受压时， R_2 减小， R_4 增大，因 I_2 不变，导致 B 点电位升高。同理， R_1 增大， R_3 减小，引起 A 点电位下降，电桥失去平衡（其增量为

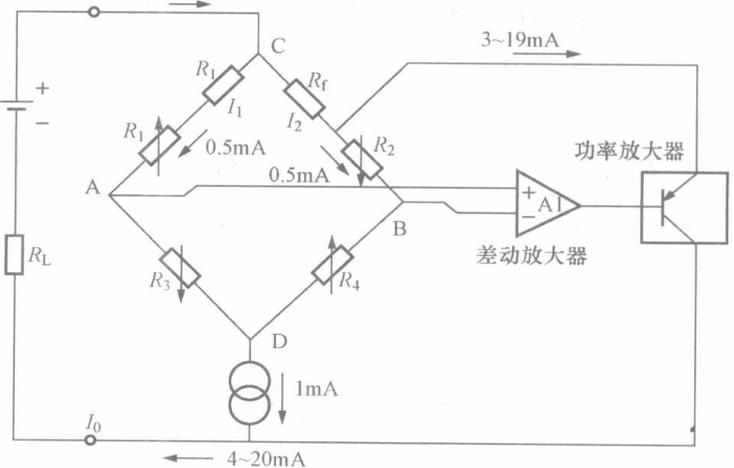


图 5-36 变送器放大转换电路原理图

ΔU_{AB})。A、B 间的电位差 ΔU_{AB} 是运算放大器 A1 的输入信号，它的输出电压经过电压—电流变换器转换成相应的电流 ($I_0 + \Delta I_0$)，这个增大了的回路电流流过反馈电阻 R_f ，使反馈电压增加 $U_f + \Delta U_f$ ，于是导致 B 点电位下降，直至 $U'_{AC} = U'_{BC}$ 。扩散硅应变电桥在差压作用下达到了新的平衡状态，完成了“力平衡”过程。当差压为量程上限值时， $I_0 = 20\text{mA}$ ，变送器的净输出电流 $I = 20 - 4 = 16\text{mA}$ 。

5.4.3 ST3000 差压变送器

ST3000 差压变送器是由 Honeywell 研制开发出的二线制变送器，它将输入的差压信号转换成 4~20mA 直流电流或数字信号输出，其原理框图如图 5-37 所示。它的检测元件是采用扩散硅压阻传感器。但与模拟式扩散硅差压变送器不同的是，ST3000 差压变送器所采用的是复合型传感器，该传感器在单个芯片上集成了测量差压、温度、静压用的三种感温元件。

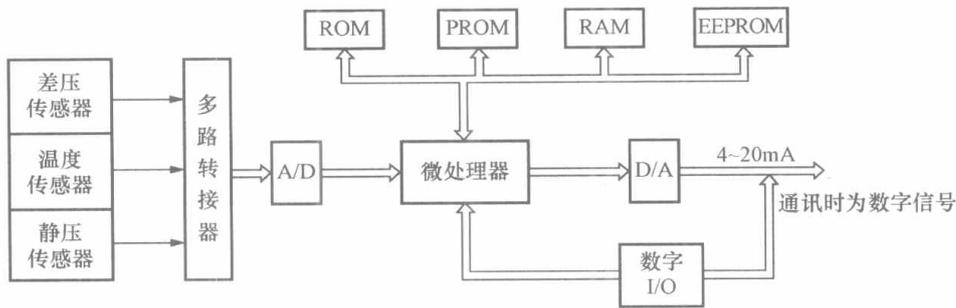


图 5-37 ST3000 差压变送器的原理框图

5.4.3.1 工作原理

被测差压作用于正、负压侧隔离膜片，通过填充液传递到复合传感器，使传感器的扩散电阻阻值发生变化，由不平衡电桥检出这一变化，经 A/D 转换送入微处理器。与此同时，复合传感器上的两种辅助传感器（温度传感器和静压传感器）检出环境温度和静压参数，也经 A/D 转换送入微处理器。微处理器从 PROM 中取出在变送器生产时存入的各种补偿数据（如差压、温度、静压特性参数和输入输出特性等），对三种数字信号进行运算处理，得到一个与输入差压对应的 4~20mA 直流信号和数字信号，作为变送器的输出。

图 5-37 中 ROM 里存有微处理器工作的主程序，它是通用的。PROM 里所存内容则根据每台变送器的压力特性、温度特性而有所不同。它是在加工完成之后，经过逐台检验，分别写入各自的 PROM 中，使变送器依照其特性自行修正，保证材料工艺在稍有分散性因素下仍能获得较高的精确度。此外，变送器所允许的整个工作参数范围内的输入输出特性数据，也都存入 PROM 里，以使用户对量程或测量范围有灵活迁移的余地。

RAM 是微处理器运算过程中必不可少的存储器，它也是通过现场通讯器对变送器进行各项设定的记忆硬件。例如变送器的标号、测量范围、线性或开方输出、阻尼时间常数、零点和量程校准等，一旦经过现场通讯器逐一设定之后，即使把现场通讯器从连接导线上去掉，变送器也应该按照已设定的各项数值工作，这是因为 RAM 已经把指令存储起来。

EEPROM 是 RAM 的后备存储器，它在仪表工作时存储着与 RAM 中同样的数据。当仪表因故障停电后恢复供电时，EEPROM 中的数据会自动传递到 RAM。因此该变送器不需要后备电池。

数字输入输出 (I/O) 接口的作用, 一方面是使来自现场通讯器的脉冲信号能从 4~20mA DC 信号导线上分离出来送入 CPU; 另一方面是使变送器的工作状态、已设定的各项数据、自诊断的结果、测量结果等送到现场通讯器的显示器上。

现场通讯器为 SFC 型, 它具有液晶显示及 32 个键的键盘, 由电池供电, 用软导线即可在控制室与某个变送器的信号导线连接, 用于远方设定和检查, 也可到现场接在变送器信号线端子上, 进行就地设定和检查。SFC 读取变送器的输出数字信号, 并对变送器进行组态。只要连接点与电源间有不小于 250Ω 的电阻就能进行通讯, 变送器来的信号线要接 250Ω 电阻才能将 4~20mA DC 信号变为 1~5V 的联络信号。

半导体复合型传感器是一种在单个芯片上形成差压测量用、温度测量用和静压测量用三种敏感元件的传感器。ST3000 差压变送器采用复合型传感器和综合误差补偿技术, 有效克服了扩散硅压阻传感器对温度和静压变化敏感以及存在非线性的缺点, 提高了变送器的测量精度, 拓宽了量程范围。

5.4.3.2 组态 (设定)

由现场数据通讯器对变送器进行组态, 输入变送器编号、输出形式、测量范围、阻尼时间常数、差压 (压力) 单位等。ST3000 系统接线如图 5-38 所示。

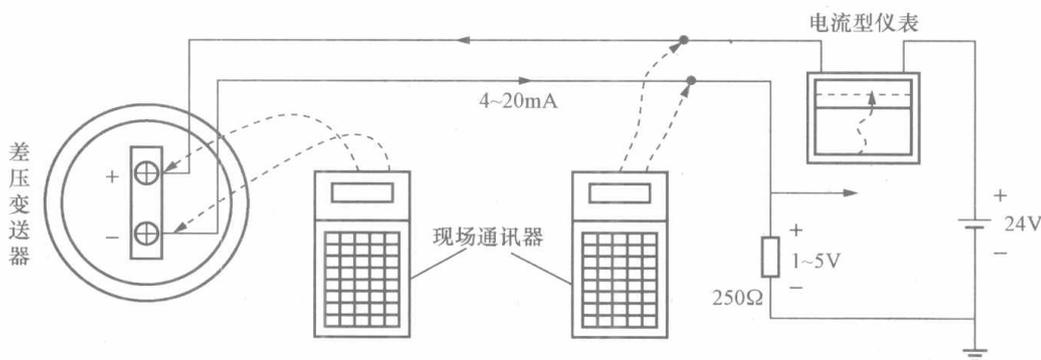


图 5-38 ST3000 系统接线

5.4.4 EJA 型智能差压 (压力) 变送器

EJA 型智能差压 (压力) 变送器由于体积小、重量轻、不受安装场所的限制、能有效地克服静压、温度等环境因素的影响, 长期连续运行仍保持优于 ±0.075% 的精度和高的可靠性与稳定性, 以及具有完善的自诊断功能和通讯功能的特点, 自 1994 年投放市场以来, 深受广大用户的好评。

图 5-39 所示为 EJA 智能差压 (压力) 变送器组成原理图, 它由膜片组件与智能转换部件两部分组成。

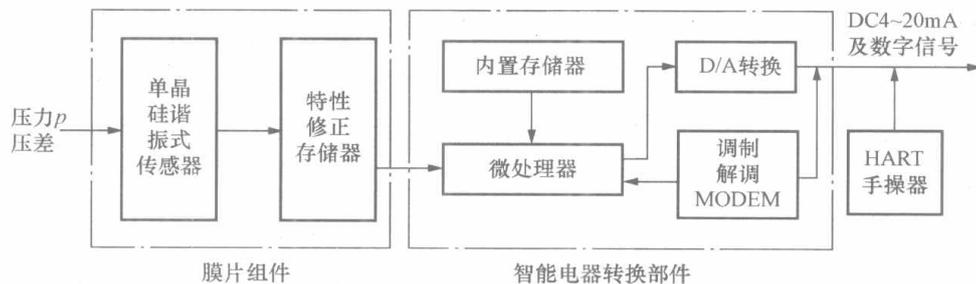


图 5-39 EJA 智能差压 (压力) 变送器组成原理图

5.4.4.1 膜片组件

膜片组件由谐振式传感器和特性参数存储器两部分组成。谐振式传感器是利用微机械加工技术，在一个单晶硅膜片表面的中心和边缘制作两个形状、尺寸、材质完全一致的 H 形状的谐振梁制成的，见图 5-40 (a)。H 形硅谐振梁处于永久磁铁提供的磁场中，与变送器、放大器等组成一正反馈回路，让谐振梁在回路中产生振荡，见图 5-40 (b)。当谐振电流注入 H 形谐振梁时，谐振梁受磁场作用而振动，于是谐振梁切割磁力线而产生感应电动势，电动势的频率与梁的振动频率相同。感应电动势经放大后，一方面输出，另一方面经正反馈提供梁的激振电流，以维持梁的等幅振动。

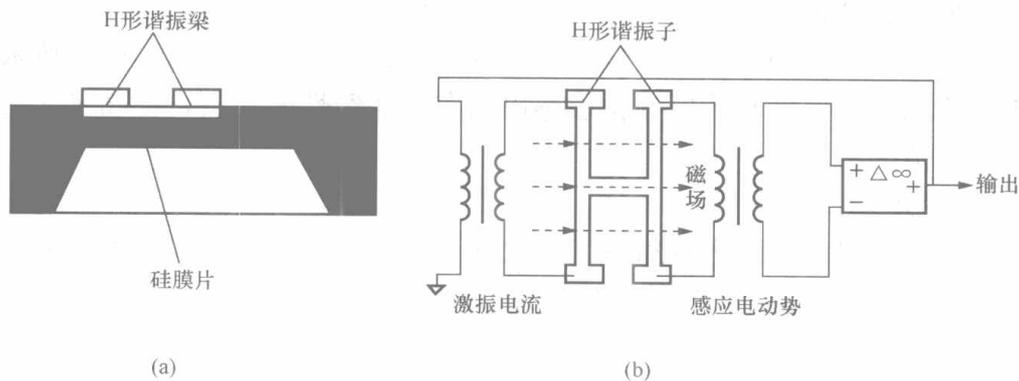


图 5-40 谐振梁的结构及其激励

(a) 结构；(b) 工作原理

由谐振式传感器的工作原理可知，当被测差压 $\Delta p = 0$ 时，谐振梁的振动频率等于谐振梁力学系统的固有频率 f_0 。当 $\Delta p \neq 0$ 时，处于膜片中心位置的谐振梁由于受到压缩力作用，其振动频率减小，而处于膜片边缘位置的谐振梁由于受到张力作用，其振动频率增加，见图 5-41。两谐振梁的振动频率之差值 $\Delta f = f_1 - f_2$ 即为传感器的输出信号， Δf 与被测差压（压力）成正比。

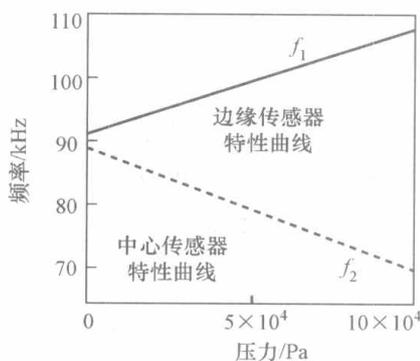


图 5-41 差压与梁的振动频率的关系

特性修正存储器存储经过三维标定的传感器的差压、温度、静压以及传感器的输入、输出特性修正数据，在测量过程中，经微处理按照一定的规律进行运算或数据融合，从而消除了对灵敏度的影响，提高了变送器的精度、稳定性和可靠性。

5.4.4.2 智能转换部件

智能转换部件的核心是微处理器 (CPU)。首先，CPU 在规定的时间内对 Δf 进行计数，将频率信号 Δf 转换成数字量，然后根据预先存储于特性修正存储器内的数据对传感器的输入/输出特性进行修正，从而得到代表被测差压（压力）的精确的数字量，一方面经 D/A 转换输出 4~20mA DC 统一标准信号；另一方面经调制解调器 (MODEM) 输出一个符合 HART 协议的数字信号叠加在 DC 4~20mA 信号之上，作为数字通讯之用。数字通讯时，频率信号不对 DC 4~20mA 信号产生任何扰动影响。

EJA 智能差压（压力）变送器通过输入/输出接口与外部的 HART 手操器以数字通讯方式传递数据。用户可方便地调节变送器的有关参数和故障诊断等。

5.5 压力表的选择和安装

5.5.1 压力表的选择

为了使工业生产过程中的压力测量达到经济、合理和有效，正确地选择压力表是十分重要的。压力表选择的原则是根据工艺过程对压力测量的要求、被测介质的性质和现场环境情况等条件来确定仪表的种类、型号、量程、精度和指示形式。

1. 压力表种类和型号的选择

(1) 从工艺要求来考虑：需要观察压力的变化情况时选用记录式压力表，如波纹管压力表或多圈弹簧管压力表；需远距离传送压力信号时可选用压力变送器；需报警或位式调节，可选用电接点压力表等。

(2) 从被测介质性质来考虑：对一般腐蚀性介质，应选用耐酸压力表、不锈钢为膜片的膜片压力表；具有强腐蚀性、含固体颗粒、粘稠液等介质，应选用膜片压力表，其膜片的材质，必须根据测量介质的特性选择；对氧气、氢气、乙炔等特殊的介质，应选用专用压力表。

(3) 从使用环境来考虑：对易燃、易爆的场合，使用电气压力表时，应选择防爆型压力表；在机械振动较强的场合，应选用耐振压力表等；在大气腐蚀性较强、粉尘较多和易喷淋液体等环境恶劣的场合，宜选用密闭式全塑压力表。

2. 压力表量程的选择

为了保证测压仪表安全可靠地工作，仪表的量程要根据被测压力的大小以及在测量过程中被测压力变化的速度等条件来选取。选取仪表量程要留有余量，在测量稳定压力时，最大被测工作压力不能超过压力表量程的 $2/3$ ；在测量脉动压力时，最大被测工作压力不能超过压力表量程的 $1/2$ ；而在测量高压时，最大被测工作压力不能超过压力表量程的 $3/5$ 。为了保证测量准确度，被测压力的最小值应不低于压力表量程的 $1/3$ 。按此要求算出仪表量程后，实取稍大的相邻系列值。目前我国压力（差压）仪表测量范围的标准系列值是 $(1, 1.6, 2.5, 4, 6) \times 10^n \text{kPa}$ （其中 n 为自然整数，可为正、负值）。

测量差压的仪表还应注意工作压力的选择，应使其与被测对象的工作压力相对应。

3. 压力表精度的选择

压力表精度主要是根据生产允许的最大测量误差来确定。在确定仪表的精度时，应以实用、经济为原则。一般就地指示用弹性压力表，选用 1.0 级、1.6 级或 2.5 级，压力变送器类精度为 0.2~0.5 级。

【例 5-1】 某容器内的最高工作压力为 $1.0 \sim 1.1 \text{MPa}$ ，要求测量值的绝对误差小于 $\pm 0.06 \text{MPa}$ ，试确定用于测量该容器内压力的弹簧管压力表的量程和精度。

解 根据压力波动范围，可按稳定压力考虑，该仪表的量程应为

$$1.1 \div \frac{2}{3} = 1.65 \text{MPa}$$

根据仪表产品量程的系列值，应选用量程 $0 \sim 2.5 \text{MPa}$ 的弹簧管压力表。

由于要求测量值的绝对误差小于 $\pm 0.06 \text{MPa}$ ，所选用压力表的允许误差应小于

$$\frac{\pm 0.06}{2.5 - 0} \times 100\% = \pm 2.4\%$$

故应选用 1.5 级的弹簧管压力表。

由以上分析可知，测量容器内的压力应选用量程为 0~2.5MPa，1.5 级的普通弹簧管压力表。

5.5.2 压力检测系统的安装

压力检测系统由取压口、导压管、压力表及一些附件组成。正确选取压力表很重要，而合理的压力检测系统也是准确测量的保证。

1. 取压口的位置

取压口是从被测对象上引取压力信号的开口。选择取压口的原则是要使选取的取压口能反映被测压力的真实情况。取压口位置选取原则可遵循以下几条。

(1) 取压口的位置要选在被测介质直线流动的管段上，不要选在管道拐弯、分岔、死角及流束形成涡流的地方。

(2) 取压口开孔的轴线应垂直设备的壁面，其内端面与设备内壁平齐，不应有毛刺或突出物。

(3) 流体为气体时，取压口应在管道水平中心线以上，以防止凝结液体造成水塞；流体为蒸汽或液体时，取压口应在管道水平中心线以下 45°角范围，以防止积气造成气塞。

(4) 取压口处在管道阀门、挡板前后时，其与阀门、挡板的距离应大于 2~3 倍的 D (D 为管道直径)。

2. 导压信号管路

导压信号管路的作用是将被测压力从取压口传递到测压仪表。管路的长短和导管的粗细对测量静压是没有影响的。但被测压力变化时，测压仪表的测量容积或多或少有些改变，使得导管中的流体也发生移动而产生能量的损耗，影响测压系统的动态特性（如传递迟延、是否振荡等）。引压管路在传递压力的同时，由于该管路中介质的静压力作用会对压力仪表产生附加压力，正常情况下，该附加压力可以通过对压力仪表的零点调整或计算进行修正。这就要求引压管路中介质的密度必须稳定，否则会产生较大的测量误差。导压信号管路的安装应保证压力传递的精确性和快速性，一般应遵循以下原则。

(1) 为了不致因阻力过大而产生测量迟延，导压信号管路的内径一般为 6~10mm，长度不得超过 50m。为防止高温介质在温度很高时进入仪表，导压管也不能过短，如介质为蒸汽时一般导压管应长于 3m。

(2) 导压管路水平敷设时，要保持 1:10~1:20 的倾斜度。当被测介质为液体时，从导压管向仪表方向向下倾斜；介质为气体时，则向上倾斜。

(3) 当导压信号管路较长并需要通过露天或热源附近时，还应在管道表面敷设保温层，以防管道内介质汽化或冻结。在取压口与仪表之间要装切断阀，以备仪表检修时使用，切断阀应靠近取压口。

(4) 根据被测介质情况，在导压信号管路上要加装附件，如加装集液器、集气器以排除积液或积气；加装隔离器，使仪表与腐蚀性介质隔离；加装凝液器，防止高温蒸汽介质对仪表的损坏等。

3. 压力表的安装

(1) 压力表尽可能安装在温度为 0~40℃，相对湿度小于 80%，振动小，灰尘少，没有腐蚀性物质的地方。对电气压力表还要求安装在磁干扰小的地方。

(2) 压力表必须垂直于水平面安装, 所在地光线要充足或具有良好的照明。

(3) 测量特殊介质时, 要考虑必要的防护措施。

1) 测量高于 60°C 以上的介质的压力时, 压力表之前要加装 U 形管或环形盘管等形式的冷凝器, 使其存储一部分冷凝介质, 以免启动仪表时高温介质直接进入仪表。

2) 测量腐蚀性介质的压力时, 除选择具有防腐性能的压力表外, 还可以装设隔离容器, 用隔离容器中的隔离液将被测介质与测压元件隔离开来。

3) 测量波动剧烈和频繁的压力时, 应在压力表前装设针形阀、缓冲器, 必要时还应装设阻尼器。

具体的安装情况如图 5-42 所示。

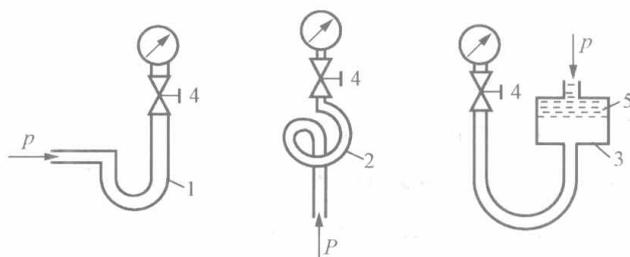


图 5-42 压力表的安装

1—U 形管冷凝器; 2—环形盘管冷凝器; 3—隔离容器;
4—截止阀; 5—隔离液

5.6 工业压力表的校验与调整

工业压力表在使用以前或使用一段时间以后, 都应根据相应的规程进行检定 (校验), 看是否符合自身精度。所谓检定 (校验) 就是将被校压力表和标准压力表通以相同的压力, 比较它们的指示数值。在标准表的量程大于或等于被校表量程情况下, 所选用的标准表的允许误差绝对值应不大于被校仪表允许误差绝对值的 $1/4$, 此时认为标准表读数就是真实值。如果被校仪表对于标准仪表的基本误差小于被校仪表的允许误差, 则认为被校仪表精度合格。

工业上常用的压力校验仪器是活塞式压力计和压力校验泵。活塞式压力计是用砝码法校验精密压力表、低一等级的活塞式压力计, 也可用来校验一般压力表。压力校验泵则是用标准表比较法来校验工业用压力表。

5.6.1 活塞式压力计

活塞式压力计是利用压力作用在活塞上的力与砝码重力相平衡的原理工作的。它具有精确度等级高 ($0.002\% \sim 0.2\%$)、测量范围宽 ($-0.1 \sim 2500\text{MPa}$)、计量性能稳定、结构简单、使用方便及不易损坏等优点。其不足之处是压力示值不能连续显示, 且由于活塞与活塞筒之间存在间隙, 在压力作用下使工作液体发生泄漏等。

活塞式压力计由活塞、活塞筒、压力泵、砝码等组成, 压力计中的工作液一般采用洁净的变压器油或蓖麻油等。其工作原理如图 5-43 所示。通过手轮带动压力泵活塞运动而产生的压力 p 作用于活塞上时, 就有一个与该压力成正比的力 T 作用在活塞上, 此力的方向垂直向上。加砝码于活塞上, 砝

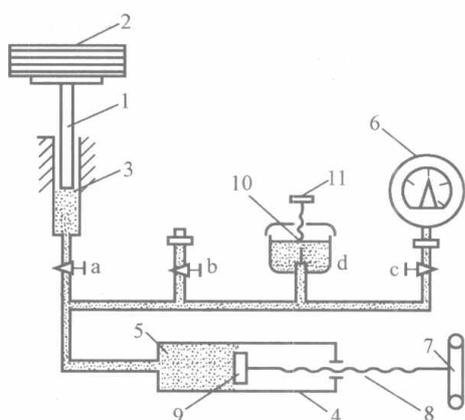


图 5-43 活塞式压力计

1—测量活塞; 2—砝码; 3—活塞筒; 4—螺旋压力发生器; 5—工作液; 6—被校压力表;
7—手轮; 8—丝杆; 9—压力泵活塞;
10—油杯; 11—进油阀;
a、b、c—切断阀; d—进油阀

码重力将作用于活塞上。当砝码和测量活塞（包括托盘）的重力 F 与力 T 平衡时，有平衡方程式

$$F = T = Ap \quad (5-54)$$

由式 (5-54) 可得

$$p = \frac{F}{A} = \frac{(m + m_0)g}{A} \quad (5-55)$$

式中 A ——活塞的有效面积；

m 、 m_0 ——砝码和活塞的质量（包括托盘）；

g ——使用地点的重力加速度。

由式 (5-55) 可知，当活塞达到力平衡时，被测压力可根据砝码重力 F 与活塞有效面积 A 的比值来计算。对于一定的活塞式压力计，其有效面积为常数，活塞和托盘的质量也是固定不变的，因此由平衡时所加砝码的质量就可知道被测压力 p 的数值。活塞式压力计在出厂前一般已将砝码校好，并标以相应的压力值。在校验压力表时，只要静压力达到平衡，直接读取砝码上的数值即可知道油压系统内的压力，从而可对压力表进行校验。

表 5-3 活塞式压力计的精确度等级

等 级	允许误差
国家基准压力计	$\pm 0.002\%$
工业基准压力计	$\pm 0.005\%$
一等标准压力计	$\pm 0.02\%$
二等标准压力计	$\pm 0.05\%$
三等标准压力计	$\pm 0.2\%$

按活塞系统结构和加放砝码方式的不同，活塞式压力计可分为简单活塞式压力计、带承重杆的活塞式压力计、带平衡装置的活塞式压力计、带倍增器的活塞式压力计、可控间隙活塞式压力计、浮球式压力计等。由于活塞式压力计可以达到很高的测量精确度，因而可以作为基准器、工作基准器和标准器使用。活塞式压力计的精确度等级如表 5-3 所示。

5.6.2 工业弹簧管压力表的检定与调整

1. 检定内容

对工业弹簧管压力表的检定采用和标准压力表比较的方法。检定时应按照国家计量检定规程进行，如《弹簧管式一般压力表、真空表和压力真空表检定规程》(JJG 52—1999)。主要检定项目为：外观、零位、示值误差、回程误差、轻敲位移和指针偏转平稳性等。规程中对检定前的准备（标准器准备、辅助设备与工具、环境条件、检定用工作介质等）、检定项目（外观检查、零位和示值检定）和检定方法、检定结果的处理和检定周期等都有明确规定。

2. 示值检定方法

(1) 均匀增压至刻度上限，保持上限压力三分钟，然后均匀降压至零。在此过程中用目力观测指针的偏转平稳性，若指针有卡住或跳动，应消除后再继续下面的工作。

(2) 一般压力表的示值检定按标有数字的分度线进行（通常为大刻度线、零点、上限点，4~6 个点）。检定时逐渐平稳地升压或降压，按上、下行程进行。上行程加压或下行程减压到检定点时，要进行两次读数，一次是指针达到检定点时的读数，一次是轻敲仪表外壳后的读数。

数据处理：利用检定数据计算压力表的变差和基本误差。在同一检定点的上、下行程第一次读数之差为压力表的示值变差，所有示值变差的最大值（绝对量）为压力表的变差。在同一检定点的上、下行程的第二读数之差为压力表示值的轻敲位移值。压力表的变差和轻敲

位移值都应满足规程要求。检定点的上行程示值或下行程示值与标准表示值之差为压力表的示值误差，其中最大值（绝对量）为压力表的基本误差。按规程要求，其基本误差不应超过该压力表的允许误差。

3. 调整

示值检定后若压力表的基本误差超出其允许误差，通常需要进行压力表的调整。弹簧管压力表常调整的部位有指针的定位、曲柄长度（图 5-22 中的 BO' ， $BO'=r$ ）、拉杆和曲柄之间的夹角 θ 以及游丝的初始弹力。检定后出现的情况及调整方法举例如下。

(1) 具有定值系统误差，即每个校验点处误差的大小和方向都一样，如图 5-44 (a) 所示。这时可按正确指示重装指针，有调零机构时重调零。

(2) 具有负误差或正误差，且误差的绝对值随指针转角增大而越来越大，如图 5-44 (b) 所示。这时以调整曲柄长度 r 为主。由式 (5-31) 可知，对图 5-44 (b) 中曲线 4 情况可减小 r ，对曲线 5 情况可增大 r 。若曲线 4、5 的非线性严重，即误差的绝对值随压力变化不是正比例的，这时应检查在指针位于量程一半处， θ 角是不是 90° 。若不是 90° ，则要调整仪表传动机构底座的角度。

(3) 若全程前半部分误差为正，并逐渐减小。后半部分误差为负，并逐渐增大，指针转角达不到全程。量程中部误差最小；或者，在量程前半部分出现递减的负误差，后半部分出现递增的正误差，指针转角超过全程，量程中部误差也最小，如图 5-44 (c) 所示。这时在指针位于量程一半处，使 θ 角等于 90° ，并适当调整 r 来配合。

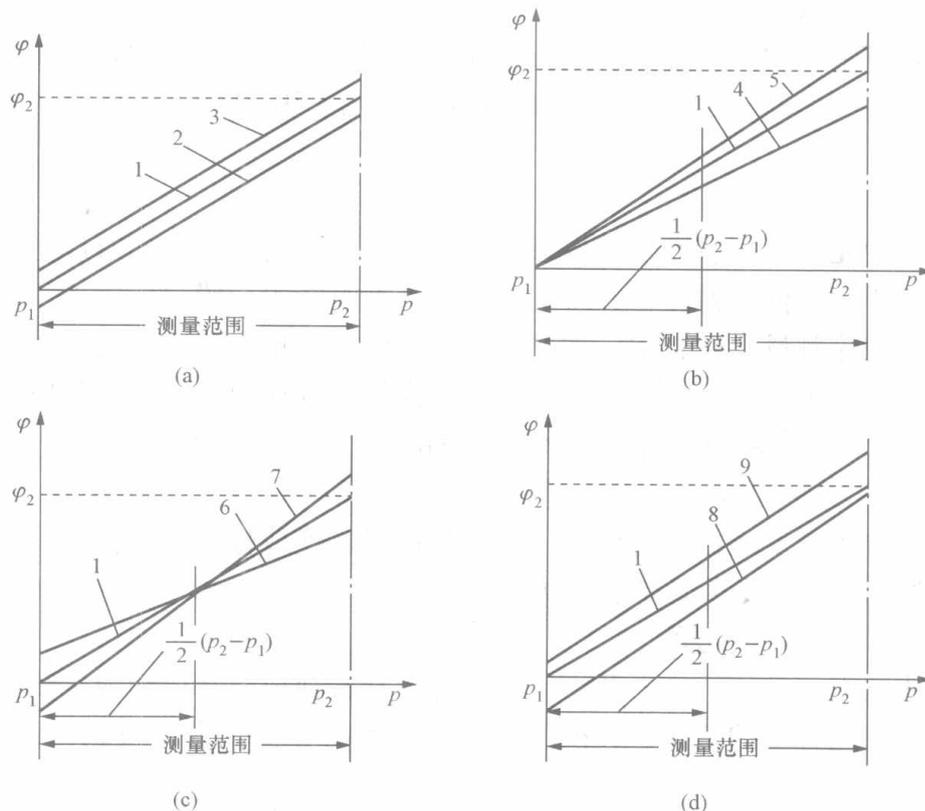


图 5-44 弹簧管压力表的检定情况举例

(a) 定值系统误差；(b) 变值系统误差；(c)、(d) 变值系统误差（含有定值系统误差）

1—正常显示；2—显示偏小一个定值；3—显示偏大一个定值；4—上限偏小；5—上限偏大；

6—量程偏小；7—量程偏大；8—有定偏差且下限偏大；9—有定偏差且上限偏大

(4) 对图 5-44 (d) 所示的情况, 可以结合 (1) 和 (2) 的方法进行调整。

(5) 如果出现个别点超差现象或指针跳动, 可能是传动系统磨损、脏污或夹卡异物等原因, 需要检修。

(6) 如果因超压、蠕变等原因使弹性元件发生永久变形, 仪表应报废。

本章小结

一、压力的表示方法

我们这里所说的压力是物理学中的压强。测量的压力有绝对压力、表压力、真空度, 这些压力之间有一定的关系。国际单位制中, 压力的单位是帕斯卡, 工业中常用千帕、兆帕。国外生产的压力表, 常用巴 (bar)、毫米英寸 (mminch)、磅力每平方英寸 (lbf/in²) 等其他非国际单位制的压力单位。这些单位之间有一定的换算关系。

二、压力检测系统

到目前为止, 几乎所有的压力测量都是接触式的。一个完整的压力检测系统包括取压口、引压管路和压力检测仪表。为了保证准确测量压力, 检测系统中还需要增加许多附件。

p → 引压管路 → 就地指示的压力表 (弹簧管压力表等)

$p(\Delta p)$ → 引压管路 → 压力 (差压) 变送器 [电容式压力 (差压) 变送器等] → 显示、记录和调节仪表

三、常用的测压仪表

对压力仪表有不同的分类方法。按压力表的工作原理可分为液体压力计、弹性式压力计、物性式压力计、活塞式压力计、压力变送器等。生产中常用的是弹性式压力计和压力变送器。

1. 弹性式压力计

它是利用弹性元件受压后产生的变形量大小与所作用的压力之间有确定对应关系的原理工作的。常用的弹性元件有弹簧管、膜片、膜盒、波纹管等。膜盒压力表主要用于微压的测量。弹簧管压力表能测量真空、中压和高压, 可靠耐用, 价格低廉, 是应用范围广、应用历史长的就地指示式压力仪表。其中装有上下限触点机构及相应电气线路的电接点压力表, 还可用于双限报警。波纹管差压计主要用作流量和液位测量的显示仪表。

2. 压力 (差压) 变送器

利用压力 (差压) 变送器可将压力 (差压) 信号转换成标准的电信号输出, 以实现压力的远程检测和控制。压力信号远传变换方法很多, 本章主要介绍了电容式压力 (差压) 变送器和扩散硅压力 (差压) 变送器。

(1) 电容式压力 (差压) 变送器: 由测量部分和转换放大部分组成。测量部分感受被测压力并将其转换成电容量的变化, 转换放大部分则将电容变化量转换成 4~20mA 标准电流信号。

(2) 扩散硅式压力 (差压) 变送器: 扩散硅式压力 (差压) 变送器是电阻应变式变送器的一种。它采用 IC (集成电路) 技术, 在半导体硅基片上用扩散工艺形成应变电阻。输入差压 Δp 作用于应变电阻上, 使它们的阻值发生变化, 利用电桥、前置放大器和电压—电流转换器转换后成为 4~20mA DC 信号。

四、压力表的选用和校验

根据不同的被测压力大小、波动情况、工艺要求、介质性质、现场环境条件，来选用不同种类、量程、精度、型号的仪表。选用原则是经济、合理、安全、有效。

压力表的校验方法有：①砝码法，校验仪表为活塞式压力计，一般用于校验标准表或0.35级以上的精密压力表；②比较法，对同一个被测压力值进行测量时，用标准表的指示值与被校表的指示值相比较，从而计算出被校表的误差大小。一般用于校验工业用压力表。

思考题与习题

1. 试述压力的定义。表压力、绝对压力、负压力（真空度）之间有什么关系？一般工业用压力表读出的是什么压力？
2. 测压仪表有哪几类？各基于什么原理？
3. 试分析影响液柱式压力计测量准确度和灵敏度的主要因素。
4. 弹性式压力计的测量原理是什么？常用的弹性元件有哪些类型？
5. 弹簧管压力表的弹簧管截面为什么要做成扁圆形或椭圆形的，可以做成圆形截面吗？
6. 试述弹簧管压力表的主要组成和测压过程。
7. 画出电容式压力（差压）变送器的变换过程示意图，并推导电容—差压转换关系式。
8. 简述扩散硅压力（差压）变送器的工作原理和特点。硅膜片上扩散电阻的位置怎样决定？
9. 以 ST3000 为例，试述智能型压力（差压）变送器的组成和特点。
10. 简述压力表的选择原则。
11. 压力表与测压点所处高度不同时，如何进行读数修正？
12. 某容器的顶部压力和底部压力分别为 -50kPa 和 300kPa ，若当地的大气压力为标准大气压，试求容器顶部和底部处的绝对压力以及顶部和底部间的差压。
13. 有一斜管微压计，示值 $l=80\text{mm}$ ， $K=0.6$ ，酒精封液测量时密度 $\rho_1=793\text{kg/m}^3$ ，仪表分度时密度 $\rho_{20}=808\text{kg/m}^3$ （ 20°C 温度）。求被测压力 p_2 为多少毫米水柱（ mmH_2O ）。已知大气压 $P_b=1$ 工程大气压。
14. 用弹簧管压力表测量蒸汽管道内压力，仪表低于管道安装，二者所处标高为 1.6m 和 6m 。若仪表指示值为 0.7MPa ，试求蒸汽管道内的实际压力值。已知蒸汽凝结水的密度 $\rho=966\text{kg/m}^3$ ，重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。
15. 有一工作压力约为 6.3MPa 的容器，采用弹簧管压力表测量其压力，要求测量误差不大于压力示值的 1% ，试选择压力表的量程和精确度等级。
16. 某台空气压缩机的缓冲容器，其工作压力变化范围为 $0.9\sim 1.6\text{MPa}$ ，工艺要求就地观察容器内压力，且要求测量误差不得大于罐内压力的 $\pm 5\%$ ，试选用一台合适的压力表（类型、量程、精度）。
17. 用 10MPa 量程的标准压力表来检定一只量程为 10MPa 、精确度等级为 2.5 级的工业压力表。问应选用何种精确度等级的标准压力表？若改用 16MPa 量程的标准压力表，则精确度等级又为多少？
18. 已知弹簧管压力表的温度系数 $\alpha_T=0.0001$ ，当仪表所处的环境温度为 40°C ，与设

计环境温度 20°C 不同时, 该压力表将产生温度附加误差。试求被测压力为 650kPa 时仪表的温度附加误差。

19. 现校验了三只 2.5 级, $0\sim 6\text{MPa}$ 的弹簧管压力表, 结果如表 5-4 所示。试分析各个表产生误差的原因, 应如何调整才能交付使用?

表 5-4 所得校验数据

标准表 (MPa)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1 号压力表读数/MPa	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
2 号压力表读数/MPa	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5
3 号压力表读数/MPa	1.5	2.6	3.7	4.8	5.9

第6章 流量检测及仪表

6.1 流量测量的基本知识

对流量参数的检测在工业生产和人民生活中都是必不可少的。流量仪表在生活中的应用是家用燃(煤)气表和家用水表。在电力、冶金、石油、化工、轻工等工业生产过程中,工质流量是判断生产过程的工作状况、衡量设备的效率和经济性的重要指标,流量检测也是企业能源管理的重要手段。如在火力发电厂热力过程中,需要连续监视水、汽、煤和油等的流量或总量。它们对保证电厂在最佳参数下运行及安全运行具有重要意义。在火电厂中,主蒸汽流量累积误差若为2%~3%,则将引起煤耗计算误差10克/度左右,这对评价电厂的经济性会有很大影响;又如大容量锅炉瞬时给水流量减少或中断,都可能造成严重的爆管或干锅事故。由此可见,对流量的准确、及时的测量是非常重要的。

随着科学技术的发展,人们对于流量检测精度的要求也越来越高,需要检测的流体品种也越来越多,检测的对象从单相流到双相、多相流,工况条件有高温、低温、高压、低压等。因此,人们根据不同测量对象的物理性能,运用不同的物理原理和规律,设计制造出了各种类型的流量仪表,应用在工艺流程中配比参数的控制及油、气、水等能源的计量,实现了工业生产过程的自动检测和控制,流量仪表已经成为过程控制检测仪表中的重要部分。

6.1.1 流量的定义和单位

流量是指流过管道某一截面的流体量。随着工艺要求的不同,它的测量又可分为瞬时流量和累积流量的测量。

1. 瞬时流量

人们所说的流量常指瞬时流量,它是在单位时间内流过管道某一截面流体的数量。若流体数量以质量表示,称为质量流量;流体数量以体积表示,称为体积流量。用数学表达式可以表示为

$$q_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \rho u A \quad (6-1)$$

$$q_v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt} = u A \quad (6-2)$$

式中 q_m ——质量流量, kg/s;
 q_v ——体积流量, m³/s;
 V ——流体体积, m³;
 m ——流体质量, kg;
 t ——时间, s;
 ρ ——流体密度, kg/m³;
 u ——管内平均流速, m/s;
 A ——管道横截面积, m²。

质量流量和体积流量的关系为

$$q_m = \rho q_v \quad (6-3)$$

对应表示方法，常用的单位为：

质量流量：kg/s (千克/秒)，kg/h (千克/小时)，t/h (吨/小时)；

体积流量：m³/s (立方米/秒)，m³/h (立方米/小时)，L/min (升/分)。

2. 累积流量

累积流量常称为总量，它是指在一段时间内流过管道某一截面的流体总量，可以用体积和质量来表示。在数值上它等于瞬时流量对时间的积分，数学表达式可以表示为

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} q dt \quad \text{或} \quad Q = \sum_{i=1}^n q_i \Delta t \quad (6-4)$$

式(6-4)中，前式是总量的定义及计算法则，后一公式适用于计算机运算，其中 Δt 为采样时间， i 为采样点数。

6.1.2 流量测量仪表的分类

流量测量的方法很多，其测量原理和采用的仪表结构各不相同。分类可以按不同原则划分，至今尚未有统一的分类方法。

1. 按输出信号分类

按输出信号，流量计可分为脉冲频率信号输出和模拟电流（电压）信号输出两类。

脉冲频率信号输出的流量计称为脉冲频率型流量计，如涡轮流量计、涡街流量计或带发信装置的容积式流量计等。模拟电信号输出的流量计称为模拟输出型流量计，如差压式流量计、转子流量计等。

2. 按测量原理分类

按不同的测量原理，流量仪表可分为容积式、速度式和质量式三类。

容积式流量计是利用流体在单位时间内连续通过固定容积的数目作为测量依据的流量仪表，有腰轮流量计、椭圆齿轮流量计、刮板流量计等。

速度式流量计是以测量流体在管道内的流动速度作为测量依据的流量仪表，有差压式流量计、涡轮流量计、涡街流量计、电磁流量计、超声波流量计等。

质量流量计主要是利用测量流过流体的质量 M 为测量依据的流量仪表。它具有测量精确度不受流体的温度、压力、粘度等变化影响的优点，可分为直接质量式流量计和间接质量式流量计。直接质量式流量计有科里奥利质量流量计、热式质量流量计等。间接质量式流量计是通过不同仪表的组合来间接推知质量流量的量值，如利用体积流量计和密度计组合测量质量流量。

6.1.3 流量测量中常用的术语

1. 流量范围

流量计的流量范围是指流量计在正常使用条件下，测量误差不超过允许值的最大至最小流量范围。最大与最小流量值的代数差称为流量量程。在保证仪表的准确度的条件下可测的最大流量与最小流量的比值通常称为流量计的量程比。

2. 额定流量

流量计在规定性能或最佳性能时的流量值，称为该流量计的额定流量。

3. 流量计特性曲线

流量计特性曲线是描述随流量变化流量计性能变化的曲线，主要有两种不同的表示形

式：一种是表示流量计的某种特性（通常是流量系数或仪表系数，也有的是某一与流量有关的输出量）与流量 q 或雷诺数 Re 的关系；另一种是表示流量计测量误差随流量 q 或雷诺数 Re 变化的关系，这种特性曲线一般称为流量计的误差特性曲线。

流量计的特性曲线可以通过对流量计进行理论分析而得到，而更为准确可靠的方法是通过流量计的检定，即在整个流量计的流量范围上进行一系列的实验得到。

4. 流量系数

流量计的流量系数表示通过流量计的实际流量与理论流量的比值，一般是通过实验确定。

5. 仪表系数

流量计的仪表系数表示通过流量计的单位体积流量所对应的信号脉冲数。它是脉冲信号输出类型流量计的一个重要参数。

6. 重复性

流量计的重复性表示用该流量计连续多次测量同一流量时给出相同结果的能力。

7. 线性度

流量计的线性度表示在整个流量范围上的特性曲线偏离最佳拟合直线的程度。对于用仪表系数 K 来评定流量计特性的脉冲输出流量仪表来说，其线性度通常用整个流量范围的平均仪表系数 \bar{K} 与仪表系数对平均值的最大偏差 ΔK 的比值 $\Delta K/\bar{K}$ 来表示。

6.1.4 流量测量中常用的物理参数

在对工业管道流体进行流量测量时，要遇到一系列反映流体属性和流动状态的物理参数。常用参数有流体的密度、流体的粘度、绝热指数和等熵指数以及雷诺数等。

1. 流体的密度 ρ

单位体积内流体的质量称为密度，以 ρ 表示。由于流体的密度是其状态（压力、温度）的函数，即流体的密度 ρ 随压力 p 和温度 t 而变化，因此在测量流量时应该考虑流体状态对密度的影响。

在低压及常温下，压力变化对液体密度的影响很小，所以工程计算上往往可将液体视为不可压缩，即可不考虑压力变化的影响。对于气体，温度、压力变化对其密度的影响较大，所以在流量测量中必须考虑其影响。

2. 流体的粘度 η

流体具有粘性，当流体在管道内流动时，紧贴管壁的流体将被粘附于管壁上，而管中心的流体则以一定速度流动。所以，由于粘性力作用，管内各流体层将形成一定规律的速度分布。

粘度也是温度 t 、压力 p 的函数。当温度上升时，液体的粘度就下降，气体的粘度则上升。在工程计算上，液体的粘度，只需考虑温度对它的影响，仅在压力很高的情况下才需考虑压力的影响。水蒸汽及气体的粘度与压力、温度的关系十分密切。

表征流体的粘度，通常采用动力粘度 η 和运动粘度 ν 。

流体动力粘度 η 是当该流体的速度梯度等于 1 时，接触液层间单位面积上的内摩擦力。流体的动力粘度 η 可理解为两个相距 1m、面积各为 1m^2 的流体层以相对速度 1m/s 移动时相互间的作用力。动力粘度 η 在工程单位制中的单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ，在国际单位制中，动力粘度 η 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

由于流体的粘度和密度有关，将动力粘度 η 与流体密度之比称为运动粘度 ν 。在工程单位制中，运动粘度 ν 的单位为 cm^2/s ；在国际单位制中，运动粘度 ν 的单位为 m^2/s 。

3. 绝热指数及等熵指数

测量气体或蒸汽的流量时，需要了解流体流经流量测量元件（例如节流元件）时的状态变化，为此需要知道被测气体或蒸汽的绝热指数或等熵指数。

流动工质在状态变化（由一种状态转变至另一种状态）过程中若不与外界发生热交换，则该过程称为绝热过程。若绝热过程没有（或不考虑）摩擦生热，即为可逆绝热过程。根据熵的定义，在可逆绝热过程中熵值不变（即 $S = \text{常数}$ ），故可逆的绝热过程又称为等熵过程。例如，流体流经节流元件时，因为节流元件很短，其与外界的热交换及摩擦生热均可忽略，所以该过程可近似认为是等熵过程。在此过程中，流体的压力 p 与比容 v 的 k 次方的乘积为常数，即 $pv^k = \text{常数}$ ， k 称为等熵指数。实际气体的等熵指数，可从有关手册的图表上查取。如空气的等熵指数为 1.40，过热蒸汽的等熵指数为 1.30。

4. 雷诺数 Re

根据流体力学中的定义，流体流动的雷诺数是流体流动的惯性力 F_g 与其粘性力（内摩擦力） F_m 之比，即

$$Re = \frac{F_g}{F_m} = \frac{v \rho l}{\eta} \quad (6-5)$$

式中 v ——特征流速，在管流中为有效截面上的平均流速， m/s ；

ρ ——流体密度， kg/m^3 ；

η ——在工作状态下流体的动力粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

l ——流束的定型尺寸，在圆管流中为管道内径， m 。

当流体在圆管内流动时，雷诺数的流量表达式为

$$Re_D = 345 \times 10^{-3} \frac{q_m}{D_t \eta} \quad (6-6)$$

式中 q_m ——质量流量， kg/h ；

D_t ——工作温度下的管道内径， mm ；

η ——动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

雷诺数是判别流体状态的准则。一般认为，管道雷诺数 $Re < 2320$ 为层流状态，而当雷诺数大于此值时，流动将开始转变成紊流状态。在工程应用中，认为雷诺数相等的流动其流动是相似的，因而流量仪表在某种标定介质（通常气体流量计用空气，液体流量计用水）中标定得到的流量系数可以根据在相同雷诺数下流量系数相等的原则换算出另一种介质（被测介质）的流量（或流速）。这是许多流量计实际标定的理论基础。

6.2 容积式流量计

容积式流量计，也称为正排量流量计，是出现较早的一类流量仪表。它多数是用于测量流经管路的流体的体积流量，广泛应用于测量石油类流体（如原油、汽油、柴油、液化石油气等）、饮料类流体（如酒类、食用油等）、气体（如空气、低压天然气及煤气等）以及水的流量。

工业上,应用容积法测量流量的方法,与日常生活中用容器计量体积的方法相类似,只是为适应工业生产的情况,需要在密闭管道中连续地测量流体的体积,所以这种测量方法,实际上是用容积积分的方法,直接测量流体的体积总量。

常用的容积式流量计有椭圆齿轮流量计、腰轮(罗茨)流量计、刮板流量计、旋转活塞式流量计、圆盘式流量计、膜式气体流量计、湿式气体流量计等。

6.2.1 容积式流量计的工作原理

容积式流量计内部都有一个具有一定容积的“计量空间”,该空间是由仪表内的运动部件和仪表壳体构成的。流体通过流量计,就会在流量计进出口之间产生一定的压力差。流量计内的运动部件(简称转子)在这个压力差作用下将产生旋转,并将流体由入口排向出口。在这个过程中,流体一次次地充满流量计的“计量空间”,并不断地被送往出口。流出流体的总量为

$$V = nV_0 \quad (6-7)$$

式中 V_0 ——运动部件每循环转动一次,从流量计内送出的流体体积;

n ——运动部件的旋转次数。

容积式流量计是一种无时基的仪表,其测量时间间隔是任意选取的,因此,一般不用它来测量瞬时流量,而是常用来计量累积流量(又称总量)。

下面以椭圆齿轮流量计为例加以说明。

椭圆齿轮流量计的壳体内装有两个转子,它是把两个椭圆形柱体的表面加工成齿轮,互相啮合进行连动。动作过程如图6-1所示,图中 p_1 表示流量计进口流体压力, p_2 表示流量计出口流体压力。在图6-1(a)所示状态,由于 $p_1 > p_2$, 转子B虽受到流入流体的压力,但不产生旋转力,而转子A在压差 $\Delta p = p_1 - p_2$ 的作用下沿箭头方向旋转,这时由于两个转子互相啮合,因此,各自绕自身的转动轴按箭头方向旋转,变成图6-1(b)所示的状态。在图6-1(b)的状态下,在流体压差的作用下,两个转子都产生了沿箭头方向的旋转力,边啮合旋转,边推移到图6-1(c)的状态。图6-1(c)的状态与图6-1(a)的状态相反,转子B产生旋转力,互相啮合旋转,又回到了图6-1(a)的状态。这样一边啮合旋转一边使流体充满转子和壳体之间所构成的半月形截面的空间,并从流入口送至流出口。转子每转动一周,排出四个半月形体积的流体[见图6-1(d)],因而根据齿轮的转数便可以计算出排出流体的数量,由图6-1可知,流量的总量为

$$V = 4nV_0 = 4n\left(\frac{1}{2}\pi R^2 - \frac{1}{2}\pi ab\right)\delta = 2\pi n(R^2 - ab)\delta \quad (6-8)$$

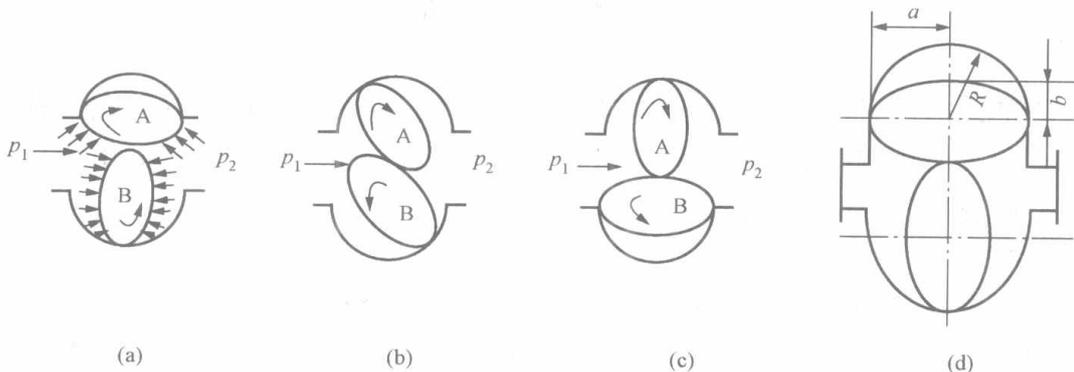


图6-1 椭圆齿轮流量计工作原理示意图
(a)、(b)、(c) 动作过程; (d) 半月形容积计算示意图

式中 n ——椭圆齿轮的旋转次数；
 V_0 ——半月形测量室的容积；
 R ——容积室的半径；
 a 、 b ——椭圆齿轮的长半轴和短半轴；
 δ ——椭圆齿轮的厚度。

6.2.2 容积式流量计的特点

容积式流量计有如下几个优点。

(1) 测量准确度高，一般可达士 (0.1%~0.5%)，是所有流量仪表中测量精度最高的一类仪表，且其特性一般不受流动状态的影响。除脏污介质和特别粘稠的流体外，可用于各种液体和气体的流量测量。

(2) 安装管道条件对流量计计量精度没有影响，流量计前不需要直管段，这使得容积式流量计在现场使用有极重要的意义。

(3) 测量范围较宽，典型的流量量程比可为 5:1 到 10:1，特殊的可达 30:1。

(4) 直读式仪表可直接得到流体总量，使用方便。

容积式流量计的缺点如下：

(1) 机械结构较复杂，体积庞大笨重，一般只适用于中小口径仪表。

(2) 大部分容积式流量计只适用于洁净单相流体。测量含有颗粒、脏污物的流体时需安装过滤器，测量含有气体的液体时必须安装气体分离器。

(3) 在测量过程中会给流动带来脉动，大口径仪表会产生较大噪声，甚至使管道产生振动。

(4) 容积式流量计的适用范围不够宽，要根据被测介质和测量范围的不同，选择合适的流量计。

对容积式流量计，还有一点要说明的是，从原理上讲，容积式仪表的准确度受流量大小、流体粘性的影响很小。但由于齿轮等运动部件与壳体之间存在间隙，除湿式气体流量计外，仪表在进出口差压作用下，都存在着通过间隙的漏流现象，从而引起测量误差，特别在小流量时，由于漏流相对比较大，误差就很大。为减小该误差，除了提高加工精度和材料的耐磨性外，还可使用伺服式容积流量计。再者，漏流量的大小与流体粘度有关，粘度较高的流体漏流量较小，故容积式流量计适合测量高粘度的流体。

6.3 速度式流量计

速度式流量计是以测量流体在管道内的流动速度作为测量依据的流量仪表，有差压式流量计、涡轮流量计、涡街流量计、电磁流量计、超声波流量计等。下面以涡街流量计、涡轮流量计和超声波流量计为例加以介绍。

6.3.1 涡街流量计

涡街流量计是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型流量仪表。它的主要优点是输出是与流量成正比的脉冲信号，抗干扰性能好，便于远距离传输，适用于流体总量测量；测量精度高，一般可达士 (1%~2%)；压力损失较小，量程比宽，可达 30:1；结构简单牢固，安装费用较低；适用于液体、气体、蒸汽的流量测量。不足之处是该流量计要配置足够长的直

管段,才能保证测量精确度,不适用于低雷诺数的流量测量,满管式仪表的通径大都在300mm以下。

6.3.1.1 测量原理

涡街流量计是利用流体力学中的卡门涡街现象测量流量的。如图6-2所示,把一个非流线型阻流体垂直插入管道中,流体以一定的速度在管道中流动。当流体绕过阻流体流动时,产生附面层分离现象,在非流线型阻流体的后侧形成有规则的漩涡列,左右两侧漩涡的旋转方向相反,这种漩涡称为卡门涡街。这些涡街多数是不稳定的,只有形成相互交替的内旋的两排涡街列,且涡街两列漩涡的宽度与单列两涡之间的距离之比满足

$$\frac{h}{l} = 0.281 \quad (6-9)$$

这时所产生的涡街列才是稳定的。

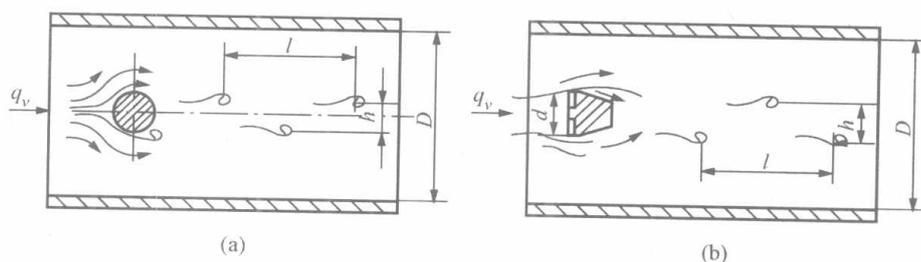


图6-2 卡门涡街列

(a) 圆柱卡门涡街列; (b) 三角柱卡门涡街列

实验表明,单侧涡街列漩涡脱落的频率 f 与阻流体处的平均流速 \bar{v}_d 成正比,与阻流体的特征尺寸成反比,即

$$f = S_t \frac{\bar{v}_d}{d} \quad (6-10)$$

式中 S_t ——斯特罗哈尔数,无因次;

d ——阻流体特征尺寸。

根据流体流动的连续性,阻流体处的流通面积 A_d 与管道的截面面积 A_D 之比 m 为

$$m = \frac{A_d}{A_D} = \frac{\bar{v}_D}{\bar{v}_d} \quad (6-11)$$

式中 \bar{v}_D ——管道截面的平均流速。

由式(6-10)和式(6-11)得

$$\bar{v}_D = m \frac{d}{S_t} f \quad (6-12)$$

流量为

$$q_V = \frac{\pi}{4} D^2 \bar{v}_D = \frac{\pi}{4} D^2 m \frac{d}{S_t} f \quad (6-13)$$

由式(6-13)可知,当漩涡发生体的形状、尺寸确定后,就可通过测定单侧涡街列漩涡脱落的频率 f 来测量流量。

斯特罗哈尔数与漩涡发生体的形状及雷诺数有关。当雷诺数 Re 在 $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^6$ 的范围内 S_t 基本是一个常数。 S_t 的数值对于圆柱体为0.2,对于等边三角形柱体为0.16。对直径为 D 的圆管,截面比 m 为

$$m = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\frac{d}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} + \arcsin \frac{d}{D} \right] \quad (6-14)$$

当 $d/D < 0.3$ 时, 有

$$m \approx 1 - 1.25 \times \frac{d}{D} \quad (6-15)$$

所以, 体积流量与频率 f 之间的关系为

$$q_V = \frac{\pi}{4} D^2 \left(1 - 1.25 \times \frac{d}{D} \right) \frac{d}{S_t} f \quad (6-16)$$

6.3.1.2 涡街流量计的结构

涡街流量计由传感器和转换器两部分组成。传感器包括漩涡发生体、检测元件、安装架和法兰等。转换器包括前置放大器、滤波整形电路、接线端子、支架和防护罩等。智能式仪表还将 CPU、存储单元、显示单元、通信单元及其他功能模块也装在转换器内, 形成智能型和组合型涡街流量计。

漩涡发生体是涡街流量计的关键部件, 一般采用 1Cr18Ni12Mo2Ti 不锈钢。漩涡发生体的几何参数大多通过实验确定。漩涡发生体的形状按柱形分, 有圆柱、三角柱、梯形柱、T 形柱等; 按结构分, 有单体、双体和多体之分。

对漩涡分离频率 f 的检测方法很多, 可以分为两大类。一类是检测漩涡发生后在漩涡发生体上受力的变化频率, 即受力检测类, 一般可用应力、应变、电容、电磁等检测技术。另一类检测漩涡发生后在漩涡发生体附近的流动变化频率, 即流速检测类, 一般可用热敏、超声、光电(光纤)等检测技术。

如图 6-3 所示, 应力式涡街流量计是在漩涡发生体内(或漩涡发生体外部)埋置压电晶体, 利用压电晶体检测所受到的交变应力, 输出交变的电荷信号, 经电荷放大、滤波、整形后输出与漩涡频率相应的脉冲信号或电流信号。压电传感器响应快、信号强、制造成本低、工作温度范围宽、可靠性好, 但抗振性较差, 可用于液体、气体、蒸汽流量的测量。

超声式涡街流量计是在漩涡发生体下游对称安装超声波发射换能器及接收换能器, 发射换能器将等幅连续的声波发射到流体中去, 声波横穿流体传播。当声波通过漩涡时引起声束偏转, 每一对旋转方向相反的漩涡对声波产生一个周期性的变化。接收换能器接收声波并转换成电信号, 经电路放大、检波、整形后获得漩涡信号, 如图 6-4 所示。这种仪表具有非接触测量的优点且具有较高的检测灵敏度。一般用于温度变化较小的气体和含气量很小的液体流量测量。

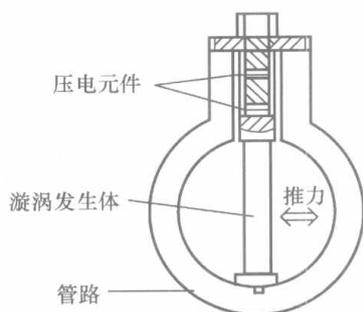


图 6-3 应力式涡街流量计

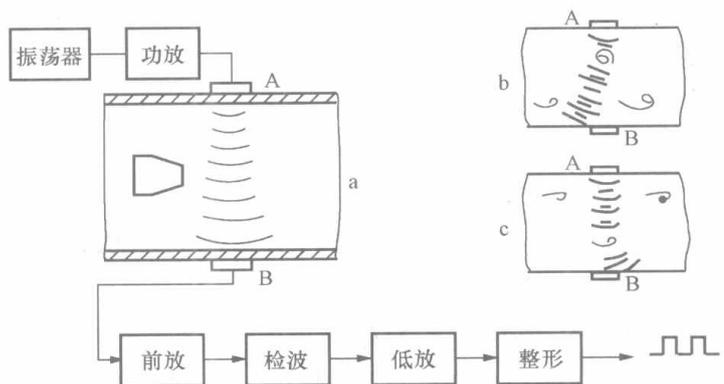


图 6-4 超声式涡街流量计

转换器将检测元件检测到的微弱电信号进行放大、滤波、整形等处理，输出与流量成比例的脉冲信号。对于流量显示仪，一般还转换成 $4\sim 20\text{mA}$ 的标准信号输出。其电路框图如图 6-5 所示。

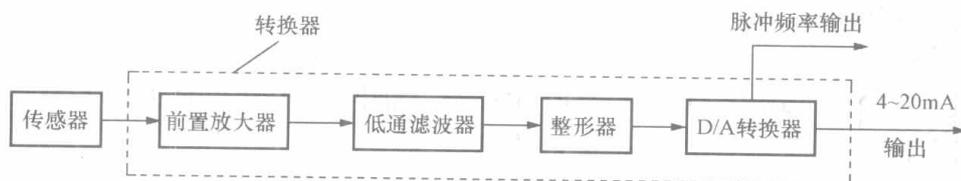


图 6-5 转换电路框图

6.3.2 涡轮流量计

涡轮流量传感器是一种精密流量测量仪表，适用于测量低粘度的介质，如水、柴油、汽油等。与相应的流量积算仪表配套可用于测量液体的流量和总量。

涡轮流量计是利用安装在管道中可以自由转动的涡轮感受流体的速度变化，从而测定管道内的流体流量。图 6-6 所示为涡轮流量计的组成框图。

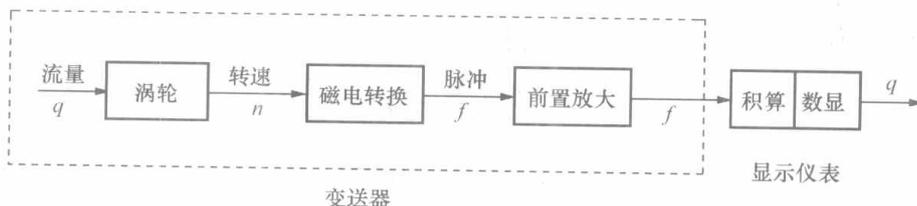


图 6-6 涡轮流量计的组成框图

6.3.2.1 涡轮流量计的构成和工作原理

涡轮流量计测量本体的结构如图 6-7 所示。流量计主要由壳体、导流器、支承、涡轮和磁电转换器组成。涡轮是测量元件，它由导磁系数较高的不锈钢材料制成，轴芯上装有数片呈螺旋形或 F 直形的叶片。流体作用于叶片，使涡轮转动。壳体和前后导流器由非导磁的不锈钢材料制成，导流器对流体起导直作用。在导流器上装有滚动轴承或滑动轴承，用来支撑转动的涡轮。磁电感应信号检出器包括磁电转换器和前置放大器，磁电转换器由线圈和磁钢组成，安装在管壁上，用于产生与叶片转速成比例的电信号；前置放大器放大微弱电信号，使之便于远传。

流体通过涡轮流量计时推动涡轮以转速 n 匀速转动。假设此时叶轮转动的摩擦阻力、流体粘性阻力及感应线圈中感应电流所引起的电磁反作用力矩的影响均可不计。设涡轮叶片与轴线的夹角为 θ (见图 6-8)，叶轮的半径为 r_0 ，流体的流通面积为 A_0 ，流体流经叶

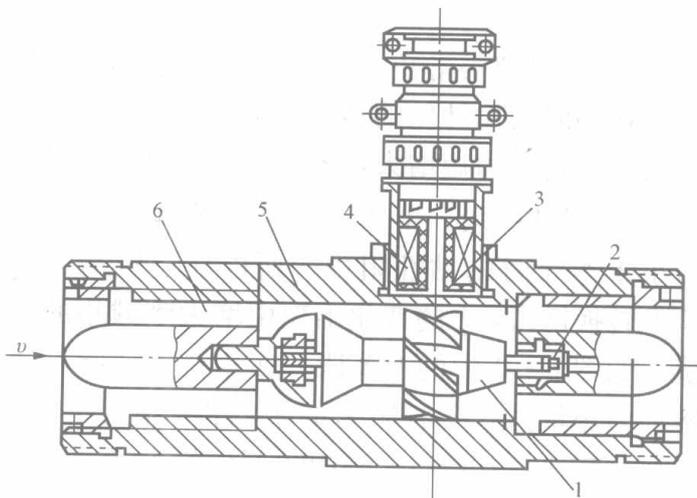


图 6-7 涡轮流量计结构

1—涡轮；2—支承；3—永久磁钢；4—感应线圈；
5—壳体；6—导流器

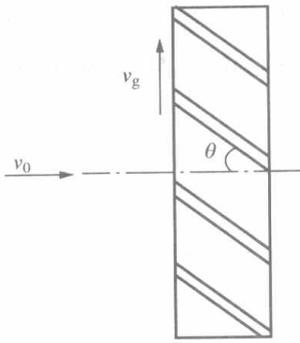


图 6-8 涡轮叶片与轴线的夹角

轮相应半径 r_0 处的轴向流速为 v_0 ，切向流速为 v_g ，故有

$$v_g = 2\pi r_0 n \quad (6-17)$$

$$\tan\theta = \frac{v_g}{v_0} = \frac{2\pi r_0 n}{v_0} \quad (6-18)$$

$$q_v = C v_0 A_0 = \bar{v} A_0 \quad (6-19)$$

式中 C ——与叶轮参数、轴向流速分布有关的系数；
 \bar{v} ——平均流速。

$$q_v = C \frac{2\pi r_0 A_0}{\tan\theta} n \quad (6-20)$$

当涡轮结构一定时， A_0 、 r_0 、 θ 为常数，故 q_v 正比于 n 。

转速 n 的测量有磁电法、光电法、霍尔效应法等。我国生产的涡轮流量计一般采用磁电法。其原理是：当用铁磁材料制成的叶片旋转通过固定在壳体上的永久磁钢时，磁钢磁路中磁阻发生周期性变化，从而使永久磁钢外部感应出交流电脉冲信号，其频率 f 为

$$f = zn \quad (6-21)$$

式中 z ——涡轮上的叶片数。

将式 (6-21) 代入式 (6-20) 中，得

$$q_v = C \frac{2\pi r_0 A_0}{\tan\theta} \frac{1}{z} f = \frac{1}{\zeta} f \quad (6-22)$$

$$\zeta = \frac{f}{q_v} = \frac{z \tan\theta}{C 2\pi r_0 A_0} \quad (6-23)$$

式中 ζ ——涡轮流量计的仪表常数。

在一定时间间隔内对流量进行积分，得累积的总流量为

$$Q_v = \int_{t_1}^{t_2} q_v dt = \frac{1}{\zeta} \int_{t_1}^{t_2} f dt = \frac{1}{\zeta} N \quad (6-24)$$

式中 N ——在 $t_1 \sim t_2$ 时间间隔内流过 Q_v 流体时输出的脉冲数。

仪表常数 ζ 的意义为单位体积流量输出的脉冲数。从理论上说，在一定条件（流体性质、状态、变送器结构、流量一定）下， ζ 是一个常数。当上述条件变化时， ζ 值也随之变化。

图 6-9 是仪表常数 ζ 随 Re_D 变化的特性曲线。小流量时，由于流体冲击叶轮的转动力矩小，各种阻力对叶轮的转速影响相对较大，故 ζ 值较小，如图 6-9 中的 EF 段。随着流量的增大叶轮转动力矩增大，各种阻力对叶轮转速的影响相对较小， ζ 的变化是增大趋势，如图 6-9 中的 FC 段，由于层流状态流体的粘性阻力小于紊流时的粘性阻力，所以在层流与紊流状态转换区段， ζ 的变化出现由增大到减小的峰值，如图 6-9 中的 CA 段。在紊流区，叶轮的转动力矩较大，各种阻力的影响相对较小， ζ 值的变化较小，如图 6-9 中的 AB 段。

大流量时，由于叶轮的转速较大，流体对叶轮的冲击作用相对减弱（转动力矩减小），而叶轮顶部与管壁之间的漏流随之增大，各种阻

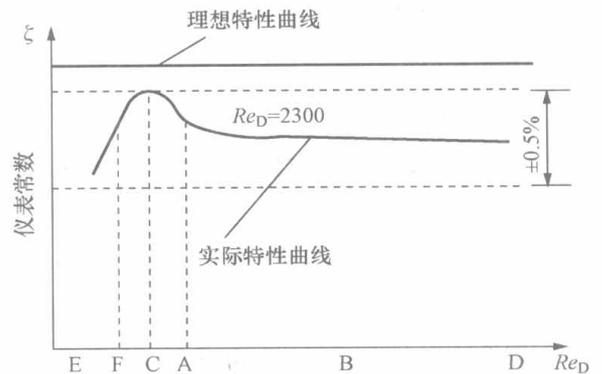


图 6-9 $\zeta \sim Re_D$ 特性曲线

力对叶轮转速的影响相对又增大,故 ζ 值又减小,如图6-9中的BD段。通常仪表允许使用在特性曲线的平直部分,使 ζ 的线性度在 $\pm 0.5\%$ 以内,复现性在 0.1% 以内。涡轮流量计出厂时, ζ 值由厂家根据适用的流体标定给出。

涡轮流量计的显示仪表是一个脉冲频率测量和计数的仪表,根据单位时间的脉冲数和一段时间的脉冲数,分别显示瞬时流量和累积流量。它的电路主要有两部分:瞬时流量显示电路和总量显示电路。涡轮流量计的显示仪表原理框图如图6-10所示。

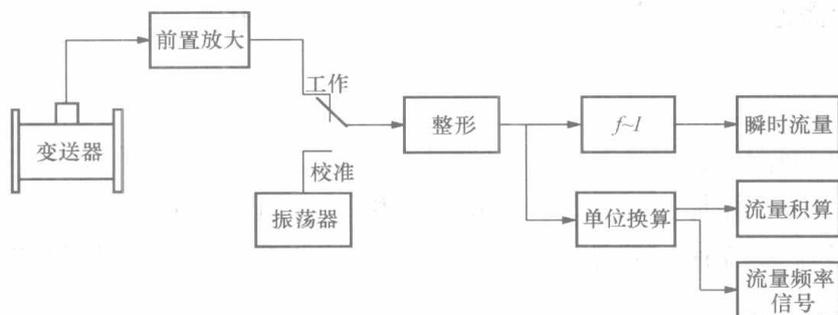


图 6-10 涡轮流量计的显示仪表原理框图

6.3.2.2 涡轮流量计的特点和使用

1. 涡轮流量计的特点

(1) 精度高,其基本误差为 $\pm (0.2\% \sim 1.0\%)$,精密时可达 $\pm (0.1\% \sim 0.2\%)$,可作为流量的标准仪表。

(2) 量程比可达 $10:1$,刻度线性。

(3) 动态特性好,时间常数达 $1 \sim 50\text{ms}$,可检测脉动流。

(4) 线性好,能耐高压达 $5 \times 10^7 \text{Pa}$;压力损失小,约为 $5 \sim 75 \times 10^3 \text{Pa}$ 。

(5) 输出为与流量成正比的脉冲数字信号,抗干扰能力强,易于累积,便于与计算机相连进行数据处理。

2. 使用注意事项

(1) 要求被测介质洁净,以减少对轴承的磨损,并防止涡轮被卡住。对于不洁净介质,应在变送器前加装过滤器。据统计,目前现有产品中大约使用 $2000 \sim 5000\text{h}$ 就须更换转子的轴承。其工作温度范围为 $-20 \sim +100^\circ\text{C}$,主要取决于转子的轴承材料。

(2) 介质的密度和粘度的变化对指示值有影响。由于变送器的流量系数一般是在常温下用水标定的,所以密度改变时应该重新标定。对同一液体介质,密度受温度、压力的影响很小,可忽略其影响;对于气体介质,由于密度受温度和压力变化的影响较大,必须对密度进行补偿。一般随着粘度的增高,最大流量和线性范围均减小。涡轮流量计出厂时是在一定粘度下标定的,因此粘度变化时必须重新标定。

(3) 仪表的安装方式要求与出厂时校验情况相同,应按规定方向安装流量计,绝不可逆向安装。一般要求水平安装,避免垂直安装,必须保证变送器前后有一定长度的直管段。对于工业测量,一般要求上游 $15D$ 、下游 $5D$ 的直管长度。为消除二次流动,最好在上游端加装整流器。

6.3.3 超声波流量计

超声波流量计是20世纪70年代随着集成电路技术的迅速发展才开始得到实际应用的一

种非接触式仪表。与传统的流量仪表相比，它测量流量时不接触被测介质，不破坏流体的流场，没有压力损失；对介质几乎无要求，不仅可以测液体、气体的流量，而且对两相介质（主要是应用多普勒法）的流体流量也可以测量；测量准确度几乎不受被测流体温度、压力、密度、粘度等参数的影响；量程比一般可达 20 : 1。

超声波流量计按测量原理，可以具有多种不同的形式，大致可分为传播速度差法（包括时差法、相位差法、频差法）、多普勒法、波束偏移法、噪声法、漩涡法、相关法等。从测量精度上考虑，传播速度差法较好，是目前超声波流量计中应用较多的方法。下面以传播速度差法为例加以介绍。

6.3.3.1 测量原理

超声波在流动的流体中传播时，可以载上流体流速的信息。在流体中超声波向上游和向下游的传播速度由于叠加了流体的流速而不相同，因此，可以根据超声波向上、下游传播时间之差测得流体流速，进而得到流量。对速度的测量主要有时差法、相位差法或频差法。

设静止流体中的声速为 c 、流体流速为 v ，超声波发生器与接收器之间距离为 L ，则超声波向上游和下游传播的时间差为

$$\Delta t = \frac{L}{c-v} - \frac{L}{c+v} = \frac{2Lv}{c^2 - v^2} \quad (6-25)$$

一般情况下，液体中声速 c 在 1000m/s 以上，多数工业系统中的流速远小于声速，即 $v^2 \ll c^2$ ，所以

$$\Delta t \approx \frac{2Lv}{c^2} \quad (6-26)$$

如果超声波发生器发出的是连续正弦波，则上、下游接收到的超声波的相位差为

$$\Delta \varphi = 2\pi f \Delta t = \frac{4\pi fLv}{c^2} \quad (6-27)$$

式中 f ——超声波的发射频率。

由式 (6-26) 和式 (6-27) 可以看出，只要测得 Δt 或 $\Delta \varphi$ 就能求得流速 v 。但由于流体中声速 c 是随流体温度和成分而变化的，水中声速 c 的温度系数为 0.2%/°C，因而被测流体温度变化时就会带来测量误差。

采用频率法可消除声速 c 的影响。上、下游接收到的超声波的频率之差为

$$\Delta f = \frac{c+v}{L} - \frac{c-v}{L} = \frac{2v}{L} \quad (6-28)$$

可见在频率法中，频率差与声速 c 无关，因此工业上常用频率法。

从图 6-11 (a) 可以看出，实际应用中由于超声波探头需安装在管道之外，超声波通路与管道轴线成一定的夹角，故超声波顺流和逆流时的频率为

$$f_1 = \frac{1}{t_1} = \left[\frac{\frac{D}{\sin\theta}}{c + v\cos\theta} + \tau_0 \right]^{-1} \quad (6-29)$$

$$f_2 = \frac{1}{t_2} = \left[\frac{\frac{D}{\sin\theta}}{c - v\cos\theta} + \tau_0 \right]^{-1} \quad (6-30)$$

式中 c ——超声波在静止流体中的声速；

τ_0 ——超声波在管壁和声楔中传播时间与电路延迟时间之和。

频差为

$$\Delta f = f_1 - f_2 \approx \frac{\sin 2\theta}{D \left(1 + \frac{\tau_0 c \sin \theta}{D}\right)^2} v \quad (6-31)$$

超声波流量计测得的是超声波通路上流体的平均流速，也就是沿管道直径上的平均流速，它不等于求体积流量所需要的管道截面上的平均流速 \bar{v} ，在用超声波流量计测量流量时，要考虑到截面平均流速 \bar{v} 与沿直径平均流速之间关系的影响，体积流量与频率差 Δf 之间的关系为

$$q_v = \frac{\pi}{4} D^2 \bar{v} = \left\{ \frac{1}{k} \left[\frac{\pi}{4} \frac{D(D + c\tau_0 \sin \theta)^2}{\sin 2\theta} \right] \right\} \Delta f \quad (6-32)$$

式中 k ——流量修正系数。

6.3.3.2 结构

超声波流量计由超声波换能器、电子线路及流量显示和积算系统三部分组成。超声波换能器将电能转换为超声波能量，将其发射并穿过被测流体，接收换能器接收到超声波信号，经电子线路放大并转换为代表流量的电信号，供显示和积算。

超声波流量计的换能器常用的为压电换能器。它利用的是锆钛酸铅等压电材料的压电效应。每个超声波流量计至少有一对换能器：发射换能器和接收换能器。发射换能器是采用适当的发射电路，利用元件的逆压电效应，把电能加到压电元件上，使其产生超声波，沿某一角度射入流体中传播；接收换能器则是利用正压电效应，通过接收超声波并转变为电能，实现信号检测。换能器通常由压电元件和声楔构成。压电元件一般均为圆形，沿厚度方向振动。声楔起到固定压电元件的作用，使超声波以合适的角度射入流体中。要求超声波透过声楔后能量损失小，一般希望透射系数尽可能接近 1。

利用超声波测量流体的流量时，由于测量的液体流速在每秒数米以下，而液体中的声速约 1500m/s，因而流速带给声速的变化量至多不过是 10^{-3} 数量级，当测量流速要求精度达到 1% 时，对声速的测量精度要求为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。随着电子测量技术的进步，有了工业上实用的超声波流量计。

超声波流量计的电子线路包括发射、接收、放大和信号处理线路。它将接收换能器收到的超声波信号转换成代表流量的电信号，送入显示与积算系统，最后由显示与积算仪表将被测流体的瞬时流量和累积流量显示出来。频率差超声波流量计的电路原理框图如图 6-11 (b) 所示。

两个超声波换能器分别装在管道外壁的两侧。这两个换能器结构、性能完全相同。控制系统定时给出信号，控制收发转换开关，使两个超声波换能器交替发射和接收超声波，保证系统在顺循环和逆循环交替的情况下工作。若某一时刻产生顺循环脉冲，则另一时刻产生逆循环脉冲，顺、逆循环脉冲先后通过倍频器增大 M 倍，得到 Mf_+ 、 Mf_- ，再通过取样门送入可逆计数器进行频差运算，得到频率差 $M\Delta f$ 。经数模转换将 $M\Delta f$ 转换为相应的电压或电流，即可显示出瞬时流量。将与瞬时流量相应的电压或电流转换为频率并除以仪表常数 ζ 即可得出流量累积值。数模转换后的电量还可再经电压、电流转换为标准电流 0~10mA DC 或 4~20mA DC 输出。

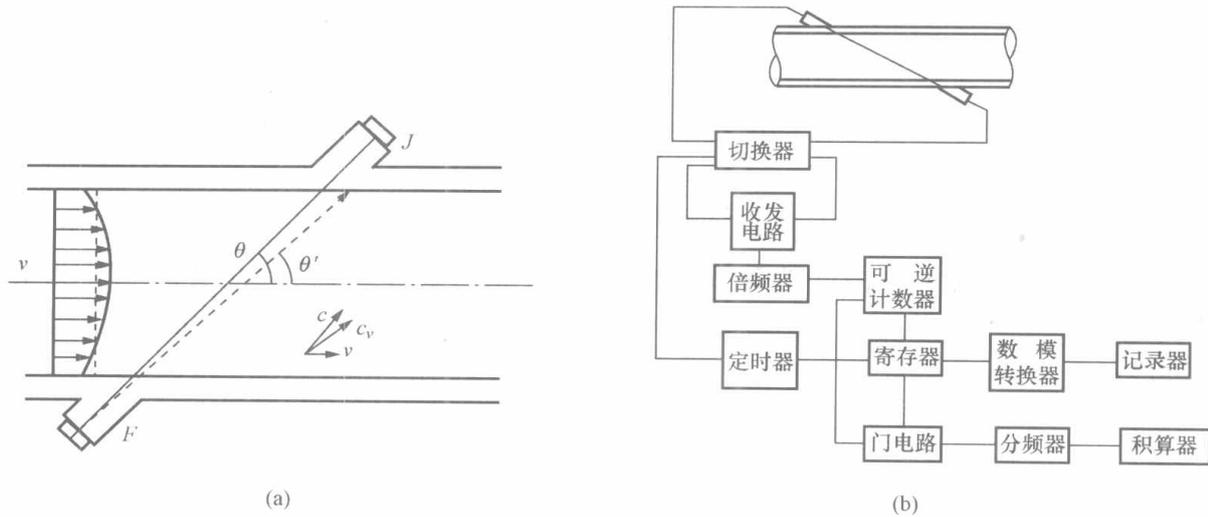


图 6-11 频率差超声波流量计
(a) 测量原理图；(b) 电路原理框图

6.4 差压式流量计

差压式流量计属于速度式流量计里的一种。差压式测量方法是流量或流速测量方法中使用历史最久和应用最广泛的一种。它们的共同原理是伯努利定律，即通过测量流体流动过程中产生的差压来测量流速或流量。这种差压可能是由于流体滞止造成的，也可能是由于流体通流截面改变引起流速变化而造成的。属于这种测量方法的流量计有毕托管、均速管、节流变压降流量计等。这些流量计的输出信号都是差压，因此其显示仪表为差压计或差压变送器。

6.4.1 选点测速法

选点测速法是在管道截面上选择一些测点，通过对测点处的流速进行测量进而计算流量的方法。若能直接测得管道截面上的平均流速 \bar{v} ，则流体的体积流量 $q_V = \bar{v}A$ ， A 为管道截面积。若测得的是管道截面上的某一点流速 v ，则流体的体积流量 $q_V = kvA$ ， k 为截面上的平均流速与被测点流速的比值，它与管道内流速分布有关。因此测点位置的确定非常重要。

6.4.1.1 测点位置的确定方法

1. 有流速分布数学模型

(1) 圆管中流动呈层流状态。管道中流体的流速分布是有一定规律的，沿管道截面上的流速按旋转抛物面分布。其数学模型为

$$v = v_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (6-33)$$

式中 v_{\max} ——管道中心处的最大流速；
 v ——离管道中心 r 处的流速；
 R ——管道半径；
 r ——离管道中心的距离。

管道中心处的流速最大，而距轴线 $\frac{\sqrt{2}}{2}R$ 处的流速的大小为截面上平均流速值 \bar{v} ，即 $v\left(\frac{\sqrt{2}}{2}R\right)=\bar{v}$ 。因此在管道距轴线 $\frac{\sqrt{2}}{2}R$ 处测量其流速 $v\left(\frac{\sqrt{2}}{2}R\right)$ ，则流量为

$$q_V = A\bar{v} = Av\left(\frac{\sqrt{2}}{2}R\right) \quad (6-34)$$

式中 A ——管道流通截面积。

(2) 圆管中流动呈紊流状态。其截面上的流速分布规律较层流复杂。对于充分发展的紊流，圆管中心轴线处的流速最大，截面上的流速呈旋转对称分布。由于存在流体的径向流动，流速分布曲线随 Re_D 的增大而逐渐变平。从理论上说代表平均流速的测点位置，因流量不同而不同。

1) 流速分布符合尼古拉兹模型。对于光滑管道（即 $K_s/D < 0.004$ ，其中 D 为管道内径， K_s 为管道内壁的绝对粗糙度）可由尼古拉兹提出的数学模型表示圆管中紊流下的流速分布，即

$$v = v_{\max} \left(\frac{R-r}{R} \right)^{1/n} \quad (6-35)$$

式中 n ——与流动雷诺数有关的系数，其值见表6-1。

表6-1

指数 n 与雷诺数的关系

Re	4×10^3	2.3×10^4	1.1×10^5	1.1×10^6	3.2×10^6
n	6	6.6	7	8.8	10

在确定了流速分布的数学模型后，从理论上就很容易得到代表测量截面上平均流速的测点位置 r_{av} 和平均流速 \bar{v} 。对于尼古拉兹模型，在模型中有两个变化的参数 n 和 v_{\max} ，因此确定 r_{av} 时需要有两点的流速值。 r_{av} 和 \bar{v} 的确定方法分别为

$$\begin{aligned} q_V &= \int_0^R 2\pi r v(r) dr \\ &= \int_0^R 2\pi r v_{\max} \left(\frac{R-r}{R} \right)^{1/n} dr \\ &= \pi R^2 \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} v_{\max} \end{aligned} \quad (6-36)$$

因而

$$\bar{v} = v_{\max} \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (6-37)$$

由 $\bar{v}=v(r_{av})$ ，可得

$$\frac{R-r_{av}}{R} = \left[\frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \right]^n \quad (6-38)$$

由式(6-38)可知，代表测量时的平均流速测点位置随流量变化。要计算 \bar{v} 的值，则需先确定 n 和 v_{\max} 的值。

在测量截面上任意选定两点，测得的流速值分别为 $v_1=v(r_1)$ ， $v_2=v(r_2)$ ，有如下两个方程

$$\begin{cases} v_1 = v_{\max} \left(\frac{R-r_1}{R} \right)^{1/n} \\ v_2 = v_{\max} \left(\frac{R-r_2}{R} \right)^{1/n} \end{cases} \quad (6-39)$$

联立求解上述方程组, 得到 n 和 v_{\max} , 由式 (6-37) 计算得到 \bar{v} 。为简单方便, 可将两点中的一点选在中心轴线处 ($r_2=0$), 故有

$$n = \frac{\lg \frac{R-r_1}{R}}{\lg \frac{v_1}{v_{\max}}} \quad (6-40)$$

式 (6-40) 中, r_1 是选定的, v_1 和 v_{\max} 是测定的。由式 (6-37) 计算出 \bar{v} 从而可得待测流量值。

按照式 (6-35) 模型, 选择测量截面上的两点, 用其流速计算流量, 对于自动测量来说不是很方便。我们希望用一点的流速来计算流量, 这从理论上讲是不可能的。但理论分析表明, 当雷诺数 Re_D 在 $4 \times 10^3 \sim 3.2 \times 10^6$ 范围内时, 代表平均流速测点位置的变化范围为 $0.7547R \sim 0.7633R$ 。有研究推荐在充分紊流情况下基于式 (6-35) 模型用 $r^* = 0.7418R$ 处的流速 $v(r^*)$ 计算平均流速为

$$\bar{v} = av(r^*) \quad (6-41)$$

式中 a ——系数, $a=0.99104859$ 。

使用式 (6-41) 计算的平均流速, Re_D 在 $4 \times 10^3 \sim 3.2 \times 10^6$ 范围内, 其误差 (与模型的理论平均流速对比) 可达到满意的程度。

2) 流速分布符合对数—线性数学模型。它是将圆管中的流速分布分段描述, 在管壁区域和中心区域的流速分布分别符合下述模型

$$v = A \lg \left(\frac{y}{R} \right) + B \quad (\text{管壁区域}) \quad (6-42)$$

$$v = A \lg \left(\frac{y}{R} \right) + B + C \frac{y}{R} \quad (\text{中心区域}) \quad (6-43)$$

式中 A 、 B 、 C ——常数;

y ——测点到管壁的距离;

R ——圆管半径。

在非充分发展紊流的情况下, 该模型也能较准确地符合实际情况。根据此模型可确定一些测点位置, 用这些测点处的流速 v_i 便可求得平均流速 \bar{v} 。对于圆管, 各点的权值相等, 平均流速为

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (6-44)$$

对数—线性模型也适用于矩形管道, 但各测点的权值 w_i 不相等, 对各测点的流速进行加权平均, 平均流速为

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i v_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6-45)$$

表 6-2 所示为符合对数—线性模型时的圆管截面上的测点位置，图 6-12 和表 6-3 是该模型决定的矩形管道截面上的测点位置和相应测点的权值。

表 6-2 对数—线性法圆管截面上的测点位置

半径上的测点数	r_i/R
3	0.3586 ± 0.0100
	0.7302 ± 0.0100
	0.9358 ± 0.0032
5	0.2776 ± 0.0100
	0.5658 ± 0.0100
	0.6950 ± 0.0100
	0.8470 ± 0.0076
	0.9622 ± 0.0018

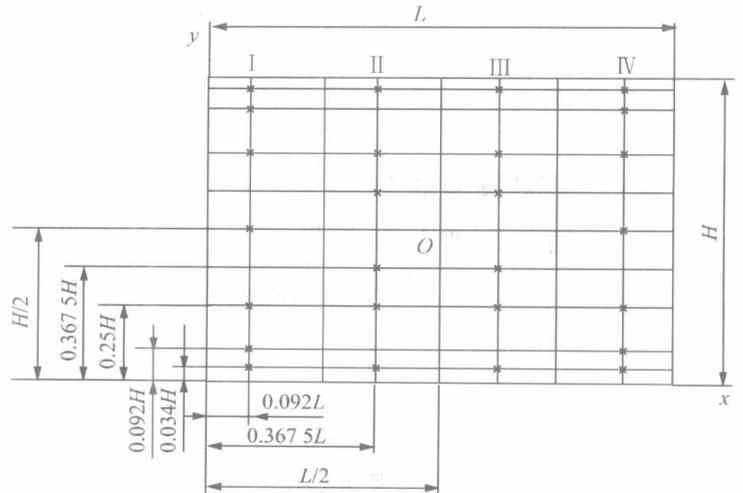


图 6-12 对数—线性法矩形管道截面上的测点位置

表 6-3 对数—线性法矩形管道截面上的测点位置

w_i	X/L	I	II	III	IV
		Y/H	0.092	0.3675	0.6325
	0.034	2	3	3	2
	0.092	2	—	—	2
	0.250	5	3	3	5
	0.3675	—	6	6	—
	0.500	6	—	—	6
	0.6325	—	6	6	—
	0.750	5	3	3	5
	0.908	2	—	—	2
	0.966	2	3	3	2

2. 无流速分布数学模型

在实际应用时，上述方法很难付之实施，因为管道中的种种阻流件对流动的影响，无论对于层流还是紊流，往往需要很长的直管段才能形成典型的流速分布。同时，由于其他因素的影响，也会造成流速分布不对称或不稳定，使得实际圆管截面的流速分布不能按理论的方法确定。通常的做法是将管道截面分为面积相等的几部分，然后测出每一部分的特征点流速，并以该特征点流速代表每一部分的平均流速，将该流速乘以每一部分的面积，可以得到通过该小块面积的流量。再把每一小块面积的流量累加起来，就是通过整个管道的流量。所以，如何正确地选择特征点的位置，使测得的各特征点的值所代表的流速分布能更接近于实际的流速分布是很关键的。目前比较常用的有等环面法、高斯数值积分法、切比雪夫数值积分法等。

(1) 等环面法

将半径为 R 的圆管分成 n 个面积相等的同心圆环（最中间的为圆），在每一个同心圆环的面积等分处设置测点，以这点所测的速度值代表整个圆环的平均速度，故流量 q_V 近似计算为

$$q_V = \frac{\pi R^2}{n} [v(r_1) + v(r_2) + \cdots + v(r_n)] \quad (6-46)$$

式中 n ——等环圆面的个数；

$v(r_i)$ ——等环圆面上的流速。

从圆管中心开始，各测点离圆心的距离 $r_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的计算式为

$$r_i = \sqrt{\frac{2i-1}{2n}} R \quad (6-47)$$

等分圆环数 n 与管道直径有关，管径愈大，分成的圆环面个数越多，误差越小。此方法适宜于大管径流量测量，国际标准规定测点一般不少于 20 点，可根据流速分布均匀情况适当增减。

(2) 高斯数值积分法

此时测点的位置按高斯数值积分法确定，流量计算为

$$q_V = \frac{\pi R^2}{2} \sum_{i=1}^n A_i v(r_i) \quad (6-48)$$

式中 n ——测点数；

r_i ——测点位置（距中心轴线距离）；

A_i ——测点权值。

当 $n=2$ 时，测点位置为

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.4597R & A_1 &= 1 \\ r_2 &= 0.8881R & A_2 &= 1 \end{aligned}$$

当 $n=3$ 时，测点位置为

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.3357R & A_1 &= 0.5556 \\ r_2 &= 0.7071R & A_2 &= 0.8889 \\ r_3 &= 0.9420R & A_3 &= 0.5556 \end{aligned}$$

当 $n=4$ 时，...

用高斯数值积分法测量流量时，各测点的权值不同（ $n>2$ 时），进行流量计算时会麻烦些，但该法的计算精确度比其他近似计算方法要高。

(3) 切比雪夫数值积分法

此时测点的位置按切比雪夫数值积分法确定，流量计算为

$$q_V = \frac{\pi R^2}{2} A \sum_{i=1}^n v(r_i) \quad (6-49)$$

式中 A ——测点权值。

当 $n=2$ 时，测点位置为

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= 0.4597R \\ r_2 &= 0.8881R \end{aligned} \right\} A = 1$$

当 $n=3$ 时, 测点位置为

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= 0.3827R \\ r_2 &= 0.7071R \\ r_3 &= 0.9239R \end{aligned} \right\} A = \frac{2}{3}$$

当 $n=4$ 时, ...

用切比雪夫数值积分法进行流量计算时, 各测点权值是相同的, 进行数据处理时会简单些。

6.4.1.2 选定测点的流速测量方法

测量管道截面上测点的流速, 目前常使用的传感测量装置及仪表有动压测量管、热线风速计、热球风速计等。根据使用要求和适用的条件, 动压测量管又包括毕托管、均速管、翼形动压管等。

1. 毕托管

毕托管是一根双层结构的弯成直角的金属小管, 如图 6-13 所示。在毕托管的头部迎流方向开有一个小孔, 称为全压孔。在毕托管头部下游某处又开有若干小孔, 称为静压孔。毕托管所测得的流速是毕托管头部顶端所对的那一点流速。

在毕托管没有插入流场时, 设某一点的流速为 v , 静压为 p 。为了测得该点流速, 将毕托管顶端的小孔对准此点, 并使毕托管轴线与流向平行。这时由于插入了毕托管, 毕托管顶端小孔处的流速被滞止为零, 压力由原来的静压 p 上升到滞止压力 p_0 (或称全压 p_0)。 p_0 不但包含了流体原来的静压力 p , 而且还包含了由流体动能转化为静压力的部分, 即包含了流速 v 的信息, 只要从 p_0 中将原来的静压 p 减去, 就可得到流速值 v 。

根据流体的伯努利方程, 可以推出毕托管头部所对应点的流速 v 与毕托管的全压 p_0 和静压 p 之差的关系为

$$v = \alpha(1-\epsilon) \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p)} \quad (6-50)$$

式 (6-50) 中, α 为毕托管校正系数, 用来修正由于全压孔和静压孔的位置不一致及流体滞止过程中的能量损失等因素造成的差异, 可在实验室风洞中测定。 $(1-\epsilon)$ 为可压缩性校正系数, 用于修正测量可压缩流体 (气体) 时流体压缩性带来的影响。当流体为液体时, $\epsilon=0$ 。当马赫数小于 0.25 时, $(1-\epsilon)$ 可用下列关系式确定, 即

$$(1-\epsilon) = \sqrt{1 - \frac{1}{2\kappa} \frac{\Delta p}{p} + \frac{\kappa-1}{6\kappa^2} \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2} \quad (6-51)$$

式中 κ ——被测流体的等熵指数;

p ——测点处的静压力;

Δp ——毕托管输出的差压。

国际标准里推荐了几种形式的毕托管, 称为标准毕托管。对于标准毕托管, $\alpha=1$ 。图 6-13 所示为具有椭圆头部的标准毕托管, 它的头部廓形由两个 1/4 椭圆组成, 两 1/4 椭圆相距为全压孔直径 d_1 , 整个椭圆的长轴为 $4d$, 其中 d 为毕托管探头直径, 因此椭圆短轴为 $(d-d_1)$, 头部长为 $2d$ 。毕托管直径 d 不超过 15mm, 全压孔直径 d_1 应在 $0.1d \sim 0.35d$ 之间。静压孔应在距离毕托管头部 $8d$ 处并沿探头圆周等距离分布, 静压孔数目不少于 6 个, 孔径不得超过 1mm, 全部探头表面应光滑, 全压孔轴线应与探头轴线同心, 孔的边缘应尖

锐，孔的直径应至少在长度 $1.5d$ 范围内不变化。

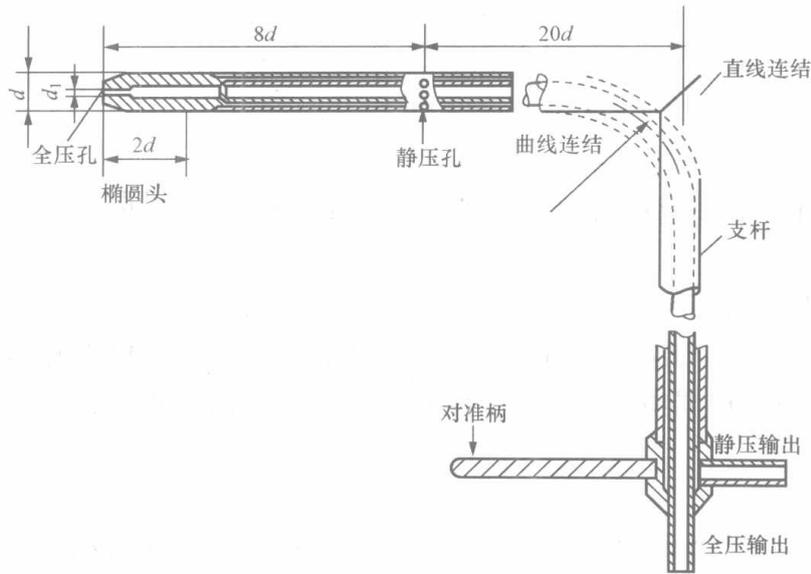


图 6 - 13 毕托管的结构

2. 均速管

均速管始于 20 世纪 60 年代。它的结构简单，容易加工，成本低廉，不可恢复的压力损失小，大约只相当于节流装置的百分之几；流量传感器是插入式探头，安装简易，可以在不断流的情况下进行装卸和维护，而且性能稳定。

均速管流量探头主要有阿牛巴 (Annubar)、威力巴 (Verabar)、威尔巴 (Wellbar)、德尔塔巴 (Deltaflow)、托巴 (Torbar)、双 D 巴等几种。它们的共同特点都是具有结构简单的插入式探头，适于测量气体、蒸汽和液体的流量，管道内径从十几毫米到几米，使用范围很广。由于均速管的取压孔直径仅几毫米到十几毫米，取压孔容易堵塞，一般不适于测量含尘或粘度大的流体；其次差压信号较小，通常用微差压或低差压变送器作二次仪表。均速管尚未标准化，故制作的均速管应经过标定后才能使用。

均速管流量探头多采用菱形、T 字形、椭圆形与子弹头形等形式。均速管的开孔位置与数目也各不相同，迎流方向的全压孔 (或称高压孔) 设在管的前端，开孔数目有 2、4、5 等个数 (即管道半径对应的开孔数目)，视管径大小而定。开孔的布置位置按前面介绍的对数—线性法或对数—切比雪夫法计算得到。静压孔设在测杆的背部或侧面，开孔数目可有一个或几个，形式多样。

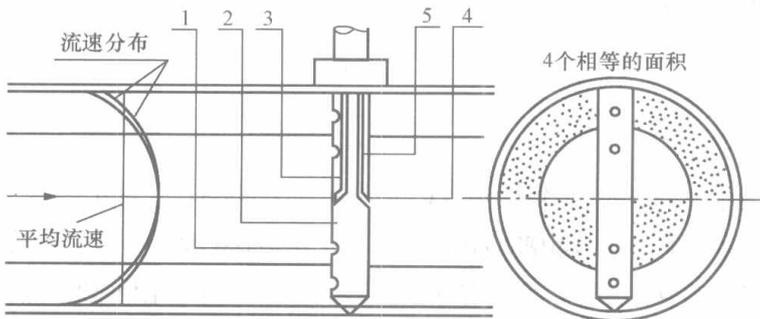


图 6 - 14 阿牛巴流量计原理

- 1—全压孔 (迎流孔)；2—检测杆；3—全压均值管；
- 4—静压孔；5—静压引压管

(1) 阿牛巴 (Annubar) 流量计。阿牛巴管是一种均速流量探头，配以差压变送器和流量积算仪可组成阿牛巴流量计，用来测量气体、液体和蒸汽的流量。阿牛巴管的结构如图 6 - 14 所示。基本结构是一根中空的金属杆，称为检测杆，检测杆上迎流方向开有成对的测压孔，测量管道中流

体的平均全压 p_1 ，在检测杆背流方向上测量流体静压 p_2 。全压孔可以有两对、三对和四对。目前较好的一种全压孔选点方法是切比雪夫法。它的两对全压孔在 $r_1/R = \pm 0.4597$ ， $r_2/R = \pm 0.8881$ 的地方。

将 p_1 、 p_2 分别引入差压变送器，测出两者的压差 Δp ，便可得到流体的流量。实用流量方程式为

$$\begin{aligned} q_V &= 0.12645 K_r Y_r F_r D^2 \sqrt{\Delta p / \rho} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \\ q_m &= 0.12645 K_r Y_r F_r D^2 \sqrt{\Delta p \rho} \quad (\text{kg}/\text{h}) \end{aligned} \quad (6-52)$$

式中 D ——管道内径，mm；

Δp ——压差，kPa；

ρ ——流体密度， kg/m^3 ；

K_r 、 Y_r ——均速管流量系数和气体膨胀系数（对液体 $Y_r = 1$ ）；

F_r ——雷诺数修正系数，由实验求得，或由生产厂提供。

阿牛巴流量计适用的范围：管径 $D = 25 \sim 2500\text{mm}$ （特殊达 5000mm ），工作压力 $\leq 5\text{MPa}$ ，工作温度 $\leq 400^\circ\text{C}$ ，雷诺数 $\geq 10^4$ ，流速要求气体为 5m/s 、液体为 0.5m/s 、蒸汽为 9m/s 以上。

(2) 威力巴 (Verabar) 流量计。威力巴 (Verabar) 流量计是由美国 Veris 公司研制推出的一种产品。适用于大口径煤气、烟道气、电厂风流量测量。该套流量计是由威力巴探头和计算显示单元构成，具有测量范围宽、压力损失小（压损仅为最大差压的 3%，高效节能）、防堵性好、不断气检修、不易结污、可在线清洗等特点。

1) 威力巴探头。威力巴 (Verabar) 流量计的探头采用子弹头形截面、高强度的无缝整体结构，如图 6-15 所示。材质为 316L（含钼不锈钢种），特殊的可采用哈氏合金。流量计探头在高、低压区有按一定规则排列的多对（一般为三对）取压孔。高压孔在子弹头前端部形成的高压区，由于高压区围绕着探头，可阻止流体中的微粒进入取压孔；低压孔位于探头侧后两边，流体与探头的分离点以前，流体从表面斜掠而过，可减小低压孔被堵塞的可能性。探头头部作了粗糙化处理。根据空气动力学原理，流体流过粗糙表面，形成一个稳定的紊流边界层，有利于提高低流速状态下的测量精度，延伸了探头的量程下限。

2) 工作原理。测量时威力巴流量探头垂直插入管道固定安装。如图 6-16 所示，当流体流过探头时，在其前部产生一个高压分布区，高压分布区的压力略高于管道的静压，根据伯努利方程，流体流过探头时速度加快，在探头后部产生一个低压分布区，低压分布区的压力略低于管道的静压。利用探头上的高、低压取压孔，分别测量流体的全压力（包括静压力和平均流速压力） p_1 和静压力 p_2 ，将 p_1 和 p_2 分别引入差压变送器，测量出差压 $\Delta p = p_1 - p_2$ ，可计算出流体的流量。

3) 流量测量系统的性能指标。它的测量精度为 $\pm 1\%$ ，重复性为 $\pm 0.1\%$ ，量程比大于 $10:1$ 。其测量上限取决于探头强度，测量下限

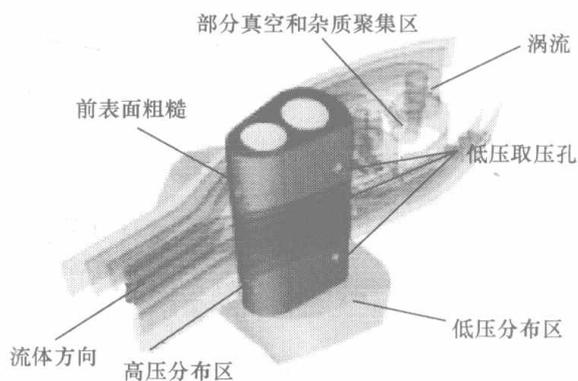


图 6-15 威力巴探头

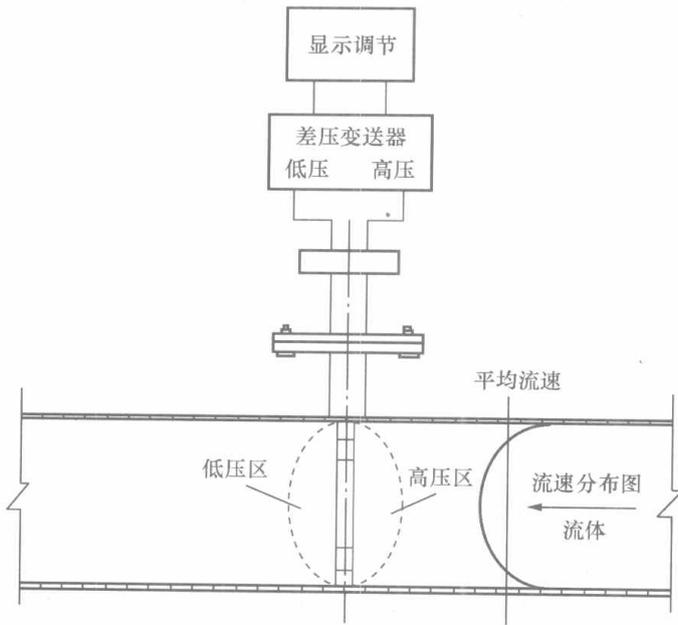


图 6-16 威力巴流量计

取决于测量最小差压要求。它适用于圆管和方管，要求介质是单向流动的、单相的气体、蒸汽及粘度不大于 10 厘泊的液体，要充满管道。适用压力范围 0~40MPa，温度范围 -180~+550℃。

3. 翼形动压管

翼形动压管是火力发电厂目前测量大口径矩形管道送风流量普遍应用的一种传感装置。翼形动压管的常用结构如图 6-17 所示。其前端为圆柱体，后端是两块尾板，夹角为 22°36'，整体呈翼形。前端半圆直径 2R 根据截面比 $m = A/A_1$ 而定 (A 为流通面积， A_1 为管道截面积)，一般定为 $m = 0.35 \sim 0.38$ 。翼形动压管的长度 l_0 一般定为 $3.0 \times 2R$ ，全压

孔开 3 个，一个在 $\frac{1}{2}H$ 处 (H 为矩形管道高)，另两个孔在上下对称的位置开，孔距 $\frac{1}{3}H$ 。前缘有全压导管，其导压口 A 输出压力 p_+ 。装置两侧有连通的静压导管，其导压口 C 输出压力 p_- 。翼形动压管输出的信号为 $\Delta p = p_+ - p_-$ ，输出的差压 Δp 代表了平均流速。

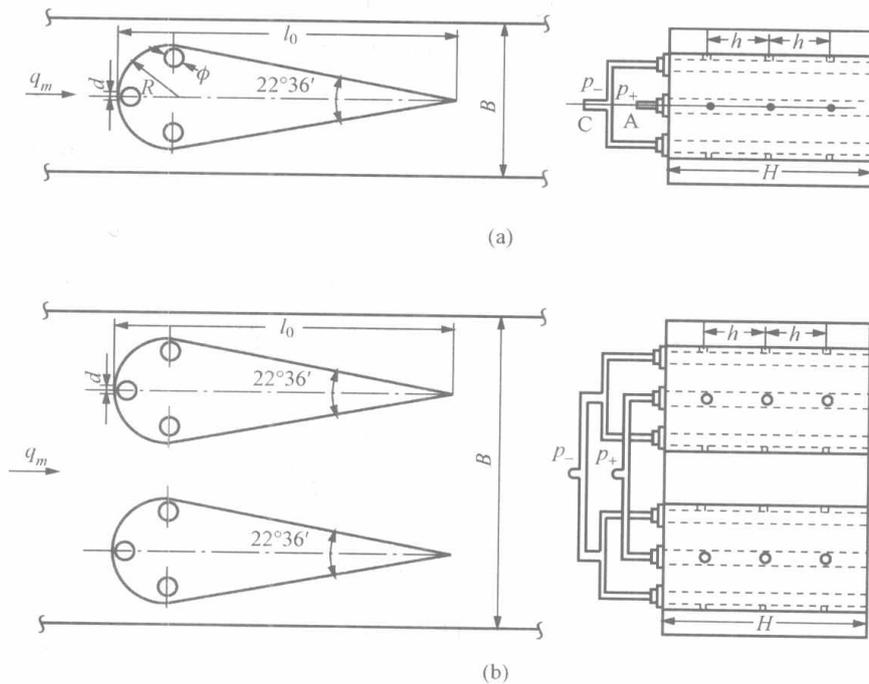


图 6-17 翼形动压管结构

(a) 单翼形测速管；(b) 双翼形测速管

B—风道宽度；H—风道高度；2R—翼形测速管宽度； l_0 —翼形测速管长度； d —翼形测速管感压孔直径； ϕ —翼形测速管传压管直径

当流体流经翼形动压管时，全压口 A 处的流体完全被滞止，在圆柱面上的流体分布为

$$v_0 = 2v_A \sin\theta \tag{6-53}$$

流体在静压口 C 处的流速为 $v=2v_A$ 。对于定常流动, 由伯努利方程得到

$$p_- + \frac{1}{2}\rho(2v_A)^2 = p_+ \quad (6-54)$$

$$v_A = \sqrt{\frac{1}{2\rho}(p_+ - p_-)} \quad (6-55)$$

流量公式为

$$q_V = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (6-56)$$

式中 α ——流量系数。

流量系数 α 主要取决于截面比 m 和管道雷诺数 Re_D 。目前电厂测量大管道送风流量时, 其雷诺数低, 在截面比 m 为 0.35~0.38 的范围内, 流量系数 α 变化不很大, α 值一般根据实验数据确定。

由式 (6-53) 可以看出, 翼形动压管与毕托管相比, 对同样的流速 v_A , 前者输出的差压是后者的 4 倍。因而翼形动压管的灵敏度高, 输出大, 有利于信号的转换, 有利于提高抗干扰的能力和测量精确度。

当管道面积比较大时, 可以在管道中同一位置安装多个翼形动压管, 每个翼形动压管的全压管和静压管都各自并接起来, 如图 6-17 (b) 所示。

翼形动压管结构简单, 制造方便, 体积大, 一般是根据使用工况而具体设计安装。由于目前的试验数据还不充分, 精确度不高, 还未达到标准化。

4. 文丘里动压管

文丘里动压管的结构原理如图 6-18 所示, 目前多被用于大截面管道内低雷诺数流体的流量测量。与均速管和翼形动压管相比, 文丘里动压管输出灵敏度要高。这主要是利用了文丘里管的节流作用, 提高了流速, 从而增大了输出的差压值 ($\Delta p = p_1 - p_2$)。测量时把文丘里管置入管道中, 输出的差压 Δp 为文丘里管喉部流速动压, 它比被测流速的动压值大许多。输出的差压 Δp 与被测流体的动压之比称为动压放大系数 K 。文丘里动压管的动压放大系数 K 值可达 6~7, 一般称文丘里动压管为动压放大器。

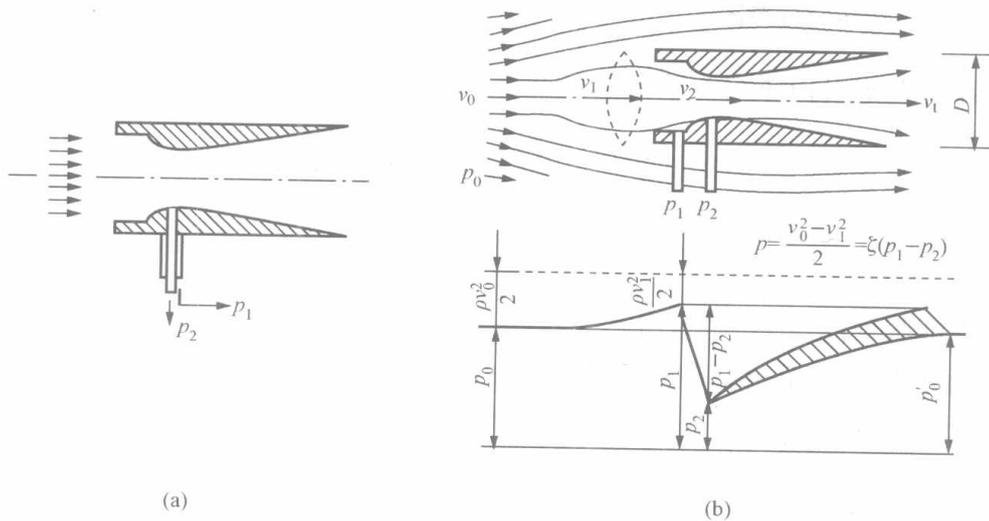


图 6-18 文丘里动压管的结构原理
(a) 文丘里动压管; (b) 绕文丘里管流动时的压力分布

双重文丘里动压管用于火电厂的风量测量。双重文丘里动压管的动压放大系数可提高到15~30。内文丘里管主要起节流作用，外文丘里管主要起导流和抽吸作用。这种结构可提高输出的差压值和稳定性。

用文丘里动压管作为流量测量装置，其流量公式为

$$q_v = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (6-57)$$

式中 α ——流量系数，通过实验数据计算或实际标定给出。

6.4.2 弯管流量计

6.4.2.1 工作原理及流量公式

稳定流动的流体通过弯管时，由于离心力的作用，在进入弯管前 $2D$ 左右流体内侧被加速，而流体外侧被减速，直至进入弯管流体的流速形式成为近似于自由旋流理论描述的梯形速度流动模式，且在弯管 45° 截面处达到最大。由于流速的变化，在弯管内、外侧壁上产生压力差 Δp 。曲率半径一定的 90° 弯头，在离开其弯曲中心最远位置和最近位置上所测得压力差的平方根正比于流体的流速，即正比于流体的流量。图 6-19 所示为流体通过具有水平弯曲面的平卧弯管时，弯管外侧壁及内侧壁上的流体压力示意图。

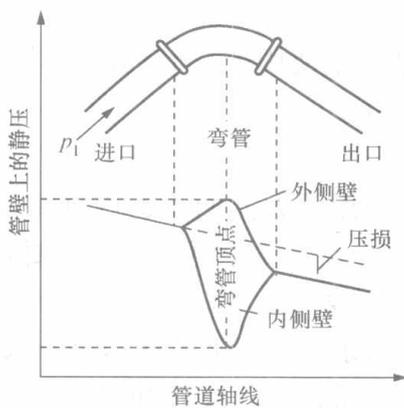


图 6-19 弯管流量计弯管内压力分布图

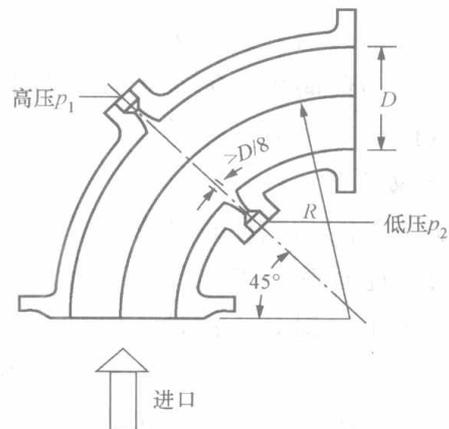


图 6-20 弯管流量计取压孔

利用强制旋流理论可以推导出弯管流量计的理论流量公式为

$$q_m = \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (6-58)$$

$$q_v = \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (6-59)$$

式中 q_v ——通过弯管的流体的体积流量；
 q_m ——通过弯管的流体的质量流量；
 D ——弯管的内径；
 R ——弯管的曲率半径；
 ρ ——运行工况下流体的密度；
 p_1 ——弯管外侧壁压力；
 p_2 ——弯管内侧壁压力。

对于实际情况,引入校正因子 α ,有

$$\begin{aligned} q_v &= \alpha \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \\ &= C \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \end{aligned} \quad (6-60)$$

$$\begin{aligned} q_m &= \alpha \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)} \\ &= C \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{2\rho (p_1 - p_2)} \end{aligned} \quad (6-61)$$

式中 C ——流量系数, $C = \alpha \sqrt{\frac{R}{2D}}$ 。

α 的数值与弯管的几何结构尺寸(曲率半径 R 和内径 D) 有密切关系,即流量系数 $\alpha = f(R, D)$ 。当弯管传感器的几何结构尺寸确定之后,只要测取弯管 45° 截面的内、外侧差压 Δp 和流体的密度 ρ 就可以确定流体的流量。

弯管流量计是一种尚未标准化的差压式流量计,测量时没有附加压损,安装简易且价格低廉。

6.4.2.2 测量系统的组成

弯管流量计一般包括弯管传感器、差压变送器、压力变送器和温度变送器及显示仪表(弯管流量计的主机)。差压变送器用来检测弯管传感器产生的差压值,温度变送器测出的温度信号和压力变送器测出的压力信号一起送到显示仪表中,由主机中单片机进行必要的逻辑分析和计算,从而显示出流量值。弯管流量计的系统组成如图 6-21 所示。

流体的温度、压力变化会影响流体的密度。系统是否配置压力和温度变送器,要根据具体测量对象来决定,对于测量蒸汽或其他气体介质的系统,原则上必须配置温度和压力变送器,来对蒸汽或气体进行必要的实时温度、压力补偿。

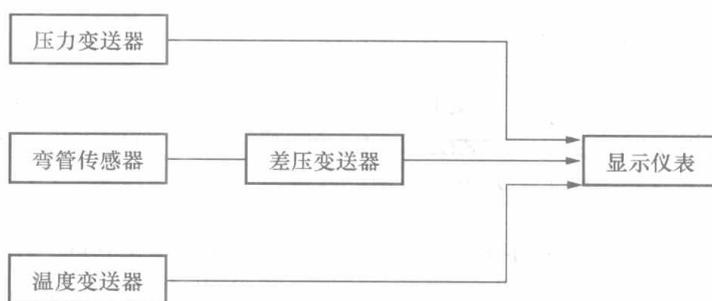


图 6-21 弯管流量计的系统组成

6.4.2.3 主要特点

弯管流量计广泛应用于石油、化工、电力、冶金、钢铁等行业的液体、气体和蒸汽流量测量,能在管径 $10\text{mm} \sim 2000\text{mm}$ 的大范围管道中精确测量各种流体的流量。

(1) 弯管传感器结构简单,耐高温、高压,耐磨损,免维护,可在潮湿、粉尘、振动等各种恶劣的环境中正常工作。传感器具有对称性,可满足双向测量。

(2) 流量计的量程比宽,可达 $10:1$,安装维护方便。测量准确度可达到 $\pm 1.0\%$ 。

(3) 流量计安装时是将作为弯管传感器的标准弯头代替原来安装在管道上的弯头进行流量测量,没有插入件或者节流件等流量转换环节和元件,因此是无附加压力损失的节能型流量测量装置。

(4) 直管段要求不严格。在实际应用时只需保证前 $5D$ 、后 $2D$ 直管段,远低于其他流量测量装置的要求。

(5) 弯管流量计尚未标准化, 需单独标定。

6.4.3 内锥流量计

内锥流量计源于美国麦克罗米特 (McCrometer) 公司, 因其节流部件呈圆锥形, 英文名称为 V-Cone Flowmeter, 引入我国后被称为内锥流量计, 也有人称为 V 型锥流量计。

内锥流量计仍是一种通过节流测取差压以反映流量大小的节流装置。节流件为一个悬挂在管道中央的锥形体, 高压 p_1 取自锥体前流体未扰动 (即未形成节流, 流体未加速) 的管壁; 低压 p_2 取自后锥体中央, 并通过引压管引至管外, 其差压 Δp 的平方根与流量成正比。该流量计适于测量空气、煤气、高温含尘烟气、自来水、工业用水、污水、泥浆等流体的流量。火电厂中可用于送风流量的测量。

6.4.3.1 工作原理

如图 6-22 所示, 流体接近锥体时的压力为 p_1 。当流体通过锥体节流区时, 由于管道截面积变小而流速增大, 锥体下游的静压会降低, 并且在锥体末端取压口处压力降到最小, 引出该处压力 p_2 。测取这两处的压力差 Δp , $\Delta p = p_1 - p_2$, 即可得到流体的流量。

6.4.3.2 标准内锥流量公式

流量公式的形式如下所示

$$q_m = \frac{\pi}{4} \frac{D^2 \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} C_D Y \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (6-62)$$

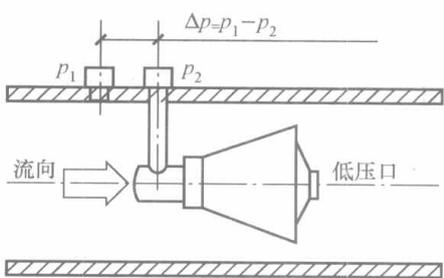


图 6-22 内锥节流装置原理示意图

式中 q_m ——质量流量, kg/s;
 D ——运行工况下流量计内径, m;
 ρ ——运行工况下流体密度, kg/m³;
 β ——运行工况下节流比系数;
 C_D ——流出系数;
 Y ——可膨胀系数;
 Δp ——差压, Pa。

节流比系数 β 用来描述一个节流装置的节流程度, 它等于节流装置在节流件处的最小流通面积与节流装置内部截面积比值的平方根。计算式为

$$\beta = \frac{\sqrt{D^2 - d'^2}}{D} = \frac{d'}{D} \quad (6-63)$$

式中 d' ——内锥节流装置的等效开孔圆直径, m。

标准内锥的可膨胀性系数 Y 的计算公式为

$$Y = 1 - (0.649 + 0.696\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p} \quad (6-64)$$

式中 κ ——等熵指数;

p ——流体静压力, Pa。

标准内锥流出系数的一个估计式为

$$C_D = 1 - \left(1 - \frac{0.0254}{D + 0.0254}\right)\beta + \left(2.5 - \frac{0.1638}{D + 0.0635}\right)\beta^2 - \left(2.15 - \frac{0.2313}{D + 0.1194}\right)\beta^3 \quad (6-65)$$

6.4.3.3 测量系统

一次仪表产生的差压信号, 由差压变送器进行测量, 然后送入流量积算仪或计算机进行

处理。对于温度、压力变化太大或计量要求较高的介质，有时还需要进行温度、压力的修正。

6.4.3.4 主要特性

不考虑压力传感仪表和二次仪表的误差，内锥流量计装置本身的不确定度可以达到 $\pm 0.5\%$ ，重复性小于 $\pm 0.1\%$ ，量程比可达 $10:1$ 。它要求的直管段很短，上游需 $0\sim 3D$ 的直管段，下游需 $0\sim 1D$ 的直管段，或者说包括流量计本体在内整个计量段的长度在 $7D$ 之内。压力损失 $\delta_p = (1.3 - 1.25\beta)\Delta p$ ，雷诺数允许范围为 $5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^7$ 。

由于内锥流量计内部无易损部件，耐用且防堵性好，免维护，长期稳定性好，非常适用于脏污流体的流量测量。

6.5 质量流量计

质量流量计通常可分为两大类：直接式质量流量计和间接式（推导式）质量流量计。直接式质量流量计直接输出与质量流量相对应的信号，反映质量流量的大小。间接式质量流量计采用密度或温度、压力补偿的方法，即在测量体积流量的同时，测量流体的密度，或者测量流体的温度、压力值，按一定的数学模型自动换算出相应的密度值，再将密度值与体积流量值相乘可求得质量流量。

6.5.1 直接式质量流量计

直接式质量流量计的输出信号直接反映质量流量，其测量不受流体的温度、压力变化的影响。目前得到较多应用的直接式质量流量计是科里奥利质量流量计（Coriolis Mass Flowmeter, CMF），此外还有热式质量流量计和冲量式质量流量计等。

6.5.1.1 科里奥利质量流量计

力学理论告诉我们，质点在旋转参照系中做直线运动时，同时受到旋转角速度 ω 和直线速度 v 的作用，即受到科里奥利（Coriolis）力，简称科氏力的作用。目前，应用科氏力原理做成的流量计，其一次元件有各式各样的几何形状，如双U形或三角形、双S形、双W形、双K形、双螺旋形、单管多环形、单J形、单直管形以及双直管形等，可以直接测量流体的质量流量，它没有轴承、齿轮等活动部件，管道中无插入部件，维护方便，准确度高。

1. 基本结构和工作原理

科里奥利质量流量计是利用流体在振动管中流动时能产生与流体质量流量成正比的科里奥利力原理制成的一种直接式质量流量仪表。双U形科里奥利流量传感器的基本结构如图6-23所示。两根几何形状和材料力学性质完全一致的U形管，牢固地焊接在流量计进出口间的支承座上，并在一驱动线圈的作用下以一定频率绕流量计进口、出口轴线[即图6-24(a)中的O—O轴]振动。被测流体从U形管中流

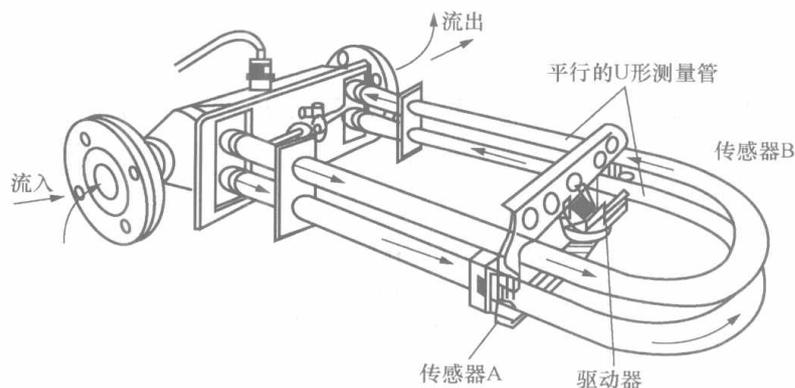


图 6-23 双 U 形科里奥利流量传感器的基本结构

过, 其流动方向与振动方向垂直。由理论力学可知: 当某一质量为 m 的物体在旋转 (在此为振动) 参考系中以速度 u 运动时, 将受到一个力的作用, 其值为

$$F_k = 2m\omega \times u \quad (6-66)$$

式中 F_k ——科氏力;

u ——物体的运动速度矢量;

ω ——旋转角速度矢量。

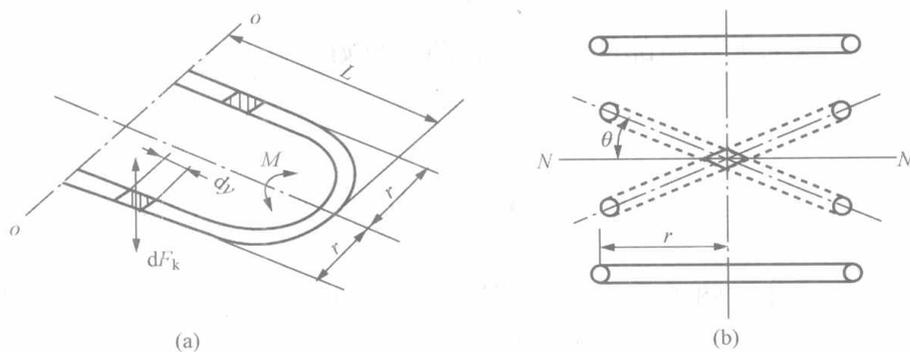


图 6-24 U 型管受力振动变形示意

由于同一 U 形管流道上进出口的两根平行直管内流体流动方向相反, 使 U 形管两直管段受到的作用力相反, 产生一扭矩 M_c 。

如图 6-24 所示, 如果 U 形管两根平行直管段结构是对称的, 则直管上的长为 dy 的微元所受扭矩为

$$dM_c = 2rdF_k = 4ru\omega dm \quad (6-67)$$

式中 ω ——旋转角速度矢量。实际的流量计 U 形管并不旋转, 而是以一定频率振动, 角速度是一个以正弦规律变化的值;

dF_k ——微元 dy 管道所受科氏力的绝对值。显然, U 形管振动时 dF_k 也为一正弦规律变化值, 两平行管所受的力在相位上相差 180° ;

dm 、 u —— dy 管内流体质量和流体流速, $u = dy/dt$ 。

式 (6-67) 可以写成

$$dM_c = 4r\omega(dy/dt)dm = 4r\omega q_m dy \quad (6-68)$$

式中 q_m ——质量流量, $q_m = dm/dt$ 。

式 (6-68) 两端积分得

$$M_c = \int dM_c = \int 4r\omega q_m dy = 4r\omega q_m L \quad (6-69)$$

在扭矩 M_c 作用下, U 形管产生的弹性反作用力矩 M_f 为

$$M_f = K_s \theta \quad (6-70)$$

式中 K_s ——U 形管扭转变形弹性系数;

θ ——U 形管产生的扭矩转角 [见图 6-24 (b)]。

在稳态情况下存在 $M_c = M_f$, 由式 (6-69) 和式 (6-70) 可得

$$q_m = \frac{K_s \theta}{4r\omega L} \quad (6-71)$$

即质量流量与扭转角 θ 成正比。

如果 U 型管端（自由端）在振动中心 $N-N$ 位置时垂直方向的速度为 u_p ($u_p = L\omega$)，则 U 型管两根直管端 A、B 先后通过振动中心平面 $N-N$ 的时间差为

$$\Delta t = \frac{2r\theta}{u_p} = \frac{2r\theta}{L\omega} \quad (6-72)$$

式中 r ——直管到扭振中心线的距离 [见图 6-24 (b)]。

将式 (6-72) 中的 θ 代入到式 (6-71) 中，有

$$q_m = \frac{K_s\theta}{4r\omega L} = \frac{K_s}{8r^2}\Delta t \quad (6-73)$$

式 (6-73) 中， K_s 和 r 对确定的流量计而言为已知值。所以只要在振动中心 $N-N$ 上装两个光电（或磁电）探测器，测出两根直管段振动通过中心平面 $N-N$ 的时间间隔 Δt ，就可以由式 (6-73) 求得流体的质量流量。

由式 (6-73) 可以看出，科氏质量流量计的输出信号 Δt 仅与质量流量 q_m 有关，而与被测流体的物性参数如密度、粘度及压力温度无关。

2. 流量计的特点

科氏质量流量计适用于密度较大或粘度较高的各种流体，含有固体物的浆液和含有微量气体的液体，以及有足够密度的高压气体（否则不够灵敏）。由于测量管振幅可视为非可动部件，测量管内无阻流和活动部件，从而使得流量计更便于维护和清洗。流体的密度、粘度、温度、压力变化对测量结果无影响，真正实现了高精度的直接质量流量测量。流量计对上游侧的流速分布不敏感，从而在流量计的前后不必设置很长的直管段。它的测量精度较高，最高精度可达到流量读数的 $\pm 0.1\%$ ，量程比宽，可达 $100:1$ 。

这种流量计的缺点是：对振动较为敏感，故对传感器的抗扰防振要求较高；不适用于低密度介质和低压气体；不适用于大管道，目前局限于直径 150（或 200）mm 以下中小管径的流量测量；测量管内壁磨损、腐蚀和结垢，影响测量精度较大。

6.5.1.2 热式质量流量计

利用流体热交换原理构成的流量计称为热式质量流量计（Thermal Mass Flowmeter, TMF）。其工作机理是利用外热源对被测流体加热，测量因流体流动造成的温度场变化，从而测得流体的质量流量。热式流量计中被测流体的质量流量可表示为

$$q_m = \frac{P}{c_p\Delta T} \quad (6-74)$$

式中 P ——加热器功率；

c_p ——被测流体的定压比热；

ΔT ——加热器前后温差。

若采用恒定功率法，测量温差 ΔT 可以求得质量流量。若采用恒定温差法，则测出热量的输入功率 P 就可以求得质量流量。

图 6-25 所示为一种非接触式对称结构的热式流量计示意图。加热器和两只测温铂电阻安装在小口径的金属薄壁圆管外，测温铂电阻 R_1 、 R_2 接于测量电桥的两臂。在管内流体静止时，电桥处于平衡状态。当流体流动时则形成变化的温度场，两只测温铂电阻阻值的变化使电桥产生不平衡电压，测得此信号可知温差 ΔT ，即可求得流体的质量流量。

热式流量计适用于微小流量测量。当需要测量较大流量时，要采用分流方法，仅测一小

部分流量，再求得全流量。热式流量计结构简单，压力损失小。其缺点是灵敏度低，测量时还要进行温度补偿。

6.5.1.3 冲量式流量计

冲量式流量计用于测量自由下落的固体粉粒的质量流量，由冲量传感器及显示仪表组成。冲量传感器感受被测介质的冲力，经转换放大输出与质量流量成比例的标准信号。如图 6-26 所示，自由下落的固体粉料对检测板—冲板产生冲击力。垂直分力由机械结构克服而不起作用，水平分力则作用在冲击轴上，并通过机械结构的作用与反馈测量弹簧产生的力相平衡。水平分力的大小可表示为

$$F_m = q_m \sqrt{2gh \sin\alpha \sin\gamma} \quad (6-75)$$

式中 q_m ——物料的质量流量；
 h ——物料自由下落至冲板的高度；
 γ ——物料与冲板之间的夹角；
 α ——冲板安装角度。

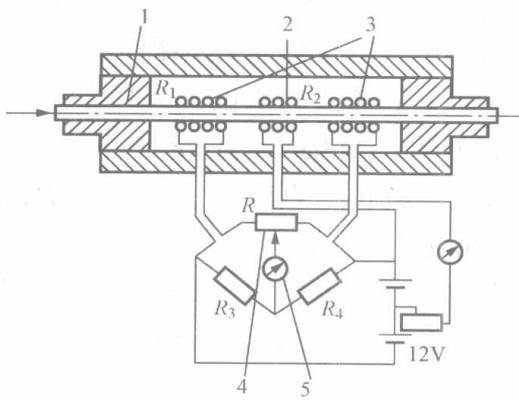


图 6-25 热式流量计示意图

1—镍管；2—加热线圈；3—测温线圈；
4—调零线圈；5—电表

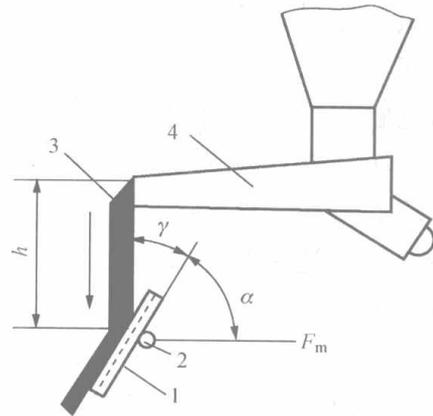


图 6-26 冲量式流量计工作原理

1—冲板；2—冲板轴；3—物料；
4—输送机

检测装置检测冲板轴的位移量，经转换放大后输出与流量相对应的信号。

冲量式流量计结构简单，安装维修方便，使用寿命长，可靠性高。由于检测的是水平分力，所以检测板上有物料附着时也不会发生零点漂移。冲量式流量计适用于各种固体粉料介质的流量测量，从粉末到块状物以及浆状物料。流量计的选择要从被测介质的大小、重量和正常工作流量等方面考虑。正常流量应在流量计最大流量的 30%~80% 之间。改变流量计的量程弹簧可以调整流量测量范围。

6.5.2 间接式质量流量计

间接式质量流量计可分为组合式（也可称推导式）质量流量计和补偿式质量流量计。它们实际上是一种质量流量测量方法。尤其是补偿式质量流量计，在流量测量领域得到了比较广泛的应用。

6.5.2.1 组合式质量流量计

组合式质量流量计是在分别测量两个参数的基础上，通过运算器计算得到质量流量值。可以采用以下三种方式来构成组合式质量流量计。

(1) 检测 ρq_V^2 的流量计（通常采用差压式流量计）和密度计的组合，如图 6 - 27 所示；

(2) 检测 q_V 的流量计（如容积式流量计、电磁流量计、涡轮流量计、超声波流量计等）和密度计的组合，如图 6 - 28 所示；

(3) 检测 ρq_V^2 的流量计和检测 q_V 的流量计的组合，如图 6 - 29 所示。

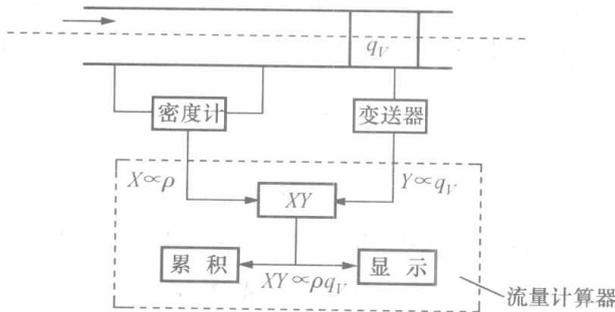


图 6 - 28 q_V 检测器与密度计的组合

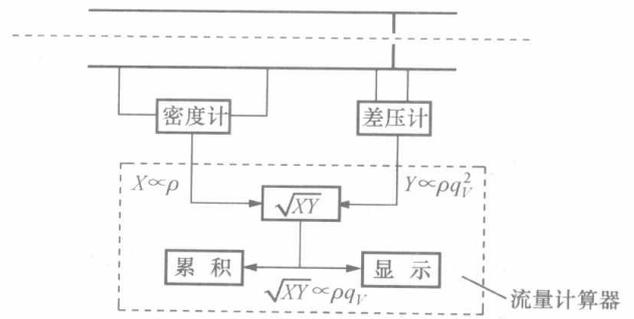


图 6 - 27 ρq_V^2 检测器与密度计的组合

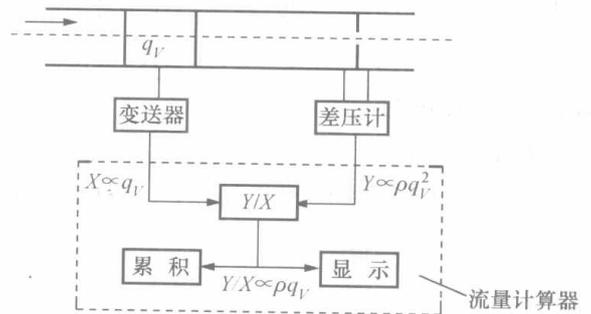


图 6 - 29 ρq_V^2 检测器与 q_V 检测器的组合

6.5.2.2 补偿式质量流量计

补偿式质量流量计在用体积流量计或检测 ρq_V^2 的流量计测量流体流量的同时，也测量流体的温度和压力，然后利用流体密度 ρ 与温度 t 、压力 p 的关系求出该流体状态下的流体密度，经计算求得质量流量值。其测量系统如图 6 - 30 所示。可以看出，对质量流量进行温度、压力补偿的关键问题是要找出适合于被测介质的尽量简单的函数关系式 $\rho = f(t, p)$ 。

对于测量 q_V 的流量计，如容积式流量计、涡轮流量计等，其质量流量的表达式为

$$q_m = \rho q_V = q_V f(t, p) \tag{6-76}$$

测得体积流量和温度、压力后，根据式 (6 - 76) 进行补偿计算 [见图 6 - 30 (a)]。

对于测量 ρq_V^2 流量计，如差压式流量计，其质量流量的表达式为

$$q_m = K \sqrt{\rho \Delta p} = K \sqrt{\Delta p f(t, p)} \tag{6-77}$$

测得差压信号和温度、压力后，根据式 (6 - 77) 进行补偿计算 [见图 6 - 30 (b)]。

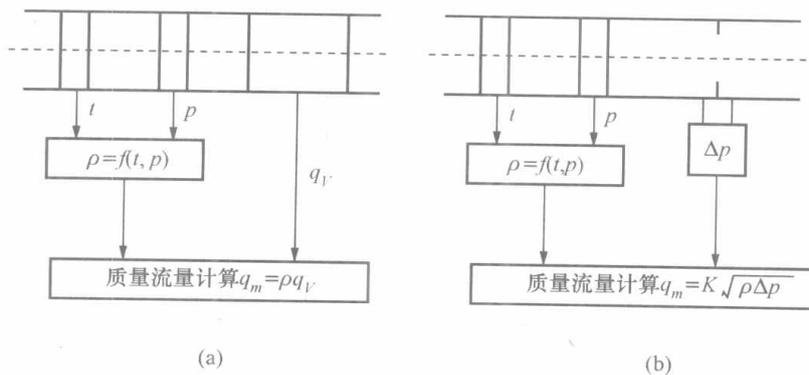


图 6 - 30 补偿式质量流量计原理

6.6 其他流量计简介

6.6.1 转子流量计

转子流量计又称为浮子流量计、恒压降变截面流量计，是工业生产过程中应用较为广泛的一类流量计。转子流量计按其制造材料的不同，可分为玻璃管转子流量计和金属管转子流量计。玻璃管转子流量计结构简单，浮子的位置清晰可见，刻度直观，成本低廉。但由于耐压能力低，一般为就地直读式，用于常温、常压下透明介质的流量测量。金属管转子流量计工作时无法看到浮子的位置和工作情况，需用间接的方法给出浮子的位置，一般有就地指示型和信号远传型，其多用于高温、高压、不透明及腐蚀性介质的流量测量。下面主要介绍玻璃管转子流量计。

6.6.1.1 结构组成

玻璃管转子流量计主要由一个向上渐扩的锥形管和一个置于锥形管中可以上下自由移动的浮子组成，如图 6-31 所示。锥形管材料一般是高硼硬质玻璃或有机玻璃，其锥度根据流量而定，在 1:20~1:200 范围内。锥管表面有流量的刻度线（百分数或流量刻度线）。浮子的材料可采用不锈钢、铝、胶木、聚四氟乙烯塑料等。其结构形式如图 6-32 所示。

为了使浮子在锥形管中移动时不致碰到管壁，以前采用的方法是在浮子上开几条斜的槽沟，流体流经浮子时，作用在槽上的力使浮子绕流束中心旋转以保持浮子工作时居中和稳定。现在常用的方法是在浮子中心加一导杆或使用带棱筋的玻璃锥管起导向作用，使浮子只能在锥形管心线上下运动，保持浮子工作稳定。

常用的 LZB 型系列玻璃管转子流量计的结构形式有三种：表盘式、可换式、固定式，它们适用的管径不同：对于表盘式结构，适用的管径为 4、6、10mm；对于可换式结构，适用的管径为 15、25、40mm；对于固定式结构，适用的管径为 50、80、100mm 等。

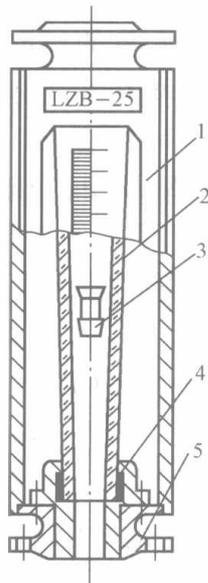


图 6-31 玻璃管转子流量计

1—罩壳；2—玻璃锥管；3—浮子；
4—密封填料；5—连接法兰

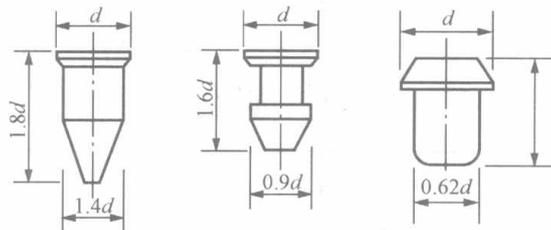


图 6-32 浮子结构形状

6.6.1.2 工作原理

转子流量计两端用法兰或螺纹连接的方式垂直地安装在测量管路上。当被测流体自下而上流过流量计时，流体作用于浮子，使浮子受到向上的作用力，作用力大小与浮子上下游两侧的压力差及有效作用面积有关。再有浮子受到重力作用，其方向是向下的，同时在流体中浮子又受到向上的浮力的作用，因此当一定流量的流体流入转子流量计时，浮子会沿锥形管上下移动。当浮子移动到适当位置的时候，作用在浮子上的上述力相互平衡，浮子就稳定地

悬浮在某一高度上。由于测量过程中，浮子的重力和流体对浮子的浮力是不变的，故稳定时浮子受到的差压也始终是恒定的。流量增大时，差压增加，浮子上升，浮子与管壁之间环形流通面积增大，差压又减小。直至浮子上下的差压恢复原来的大小，这时浮子就稳定在新的位置上。因此在仪表结构、流体一定的情况下，浮子悬浮的高度就代表了被测流量。转子流量计的工作原理图如图 6-33 所示。

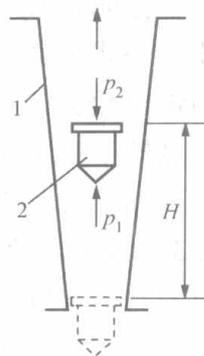


图 6-33 转子流量计的工作原理图
1—锥形管；2—转子

浮子处于锥形管中，相当于流通面积 A_0 可变的节流件。根据节流原理，流体流经节流件（浮子）前后所产生的差压与体积流量的关系为

$$q_v = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (6-78)$$

式中 α ——与浮子形状、尺寸、流体的流动状态和流体性质等有关的流量系数；
 ρ ——流体密度。

若忽略流体对浮子的摩擦力，则浮子平衡于某一高度时，差压对浮子的作用力加上流体对浮子的浮力，等于浮子的重力，即

$$A_f \Delta p + V_f \rho g = V_f \rho_f g \quad (6-79)$$

由此可知

$$\Delta p = \frac{V_f}{A_f} (\rho_f - \rho) g \quad (6-80)$$

式中 V_f ——浮子体积；
 A_f ——浮子的有效面积；
 ρ_f ——浮子材料的密度；
 g ——当地的重力加速度。

将式 (6-78) 和式 (6-80) 合并，可得体积流量 q_v 与通流面积 A_0 之间的关系为

$$q_v = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2gV_f}{A_f}} \sqrt{\frac{\rho_f - \rho}{\rho}} \quad (6-81)$$

考虑到浮子是在锥形管中运动，锥形管中环形通流面积 A_0 与浮子在管中的高度 H 之间的关系为

$$A_0 = \pi(2rH \tan\theta + H^2 \tan^2\theta) \quad (6-82)$$

式中 r ——浮子的半径；
 H ——浮子的高度；
 θ ——锥形管母线与轴线的夹角。

因为锥形管的锥度很小，故 $H^2 \tan^2\theta$ 一项可以略去不计， A_0 与 H 近似成正比，即

$$A_0 \approx CH \quad (6-83)$$

式中 C ——与圆锥管锥度有关的比例系数。

因此可得体积流量与浮子高度的关系式

$$q_v = \alpha CH \sqrt{\frac{2gV_f}{A_f}} \sqrt{\frac{\rho_f - \rho}{\rho}} \quad (6-84)$$

实验证明,式(6-84)可作为按浮子高度来刻度流体流量的基本公式。

流量公式中的流量系数 α 与浮子的形状以及流体的雷诺数等有关,对于一定的浮子形状,当雷诺数大于某一数值时,流量系数趋于一常数。

玻璃转子流量计的示值显示有两种:一种是在锥管上由转子的高度直接读出流量值,另一种是采用百分刻度(分为等分和非等分刻度)。

6.6.1.3 转子流量计的刻度修正

由式(6-84)可知,对一定的转子流量计在测量不同的流体时,转子在锥形管内上升的高度与体积流量之间的关系不同。一般情况下,生产厂家用水或空气作为介质,在标准状态下对转子流量计进行标定。

当转子流量计实际使用时被测流体不是水或空气,或被测流体是水或空气,但流体的压力、温度不是处于标准状态时,就应对转子流量计的刻度进行修正,否则会对流量测量带来误差。

被测流体密度变化对刻度的影响可用下式校正,即

$$q_v = q'_v \sqrt{\frac{(\rho_f - \rho)\rho_0}{(\rho_f - \rho_0)\rho}} \quad (6-85)$$

式中 q'_v 、 q_v ——仪表体积流量读数和体积流量的准确值;

ρ_0 、 ρ ——仪表分度时和使用时的流体密度。

当被测流体和标定流体相同但所需量程不同时,通过改变转子的材料可改变仪表的量程。这时有

$$q_v = q'_v \sqrt{\frac{\rho'_f - \rho}{\rho_f - \rho}} \quad (6-86)$$

式中 q'_v 、 q_v ——仪表上原来的体积流量刻度数和改量程后新的体积流量刻度数;

ρ_f 、 ρ'_f ——仪表分度时和改量程后转子的材料密度;

ρ ——被测介质密度。

6.6.1.4 特点

(1) 适用于小管径和低雷诺数的中小流量测量。常用转子流量计口径在40~50mm以下,最小口径能做到1.5~4mm,最大口径玻璃管转子流量计为100mm,金属管转子流量计为150mm。如果选用粘度不敏感形状的浮子,只要雷诺数大于40或300,转子流量计的流量系数将不随雷诺数变化,流体粘度的变化也不影响流量系数。这比其他类型流量计的最小雷诺数要低得多。

(2) 压力损失较低。玻璃转子流量计的压力损失一般为2~3kPa,较高者在10kPa左右,金属管转子流量计一般为4~9kPa,较高者在20kPa左右。

(3) 上游直管段的要求较低。

(4) 测量范围宽,量程比一般为10:1,采用特殊结构的转子流量计可使量程比达到750:1,价格便宜。

使用转子流量计时要注意,流量计必须垂直地安装在无振动的管道上,不应有明显的倾斜,否则会产生附加误差。

6.6.2 靶式流量计

靶式流量计于20世纪60年代开始应用于工业流量测量,主要用于解决高粘度、低雷诺

数流体的流量测量。其结构比较简单,维护方便,不易堵塞,适用于测量高粘度、高脏污及有悬浮固体颗粒介质的流量。靶式流量计的缺点是压力损失较大,测量精度不太高。目前已广泛应用于冶金、石油、化工、能源、食品、环保等各个领域的流量测量。

6.6.2.1 工作原理

在管道中垂直于流动方向安装一圆盘形阻挡件,称之为“靶”,如图6-34所示。靶与管壁之间形成环形通流截面,故把靶又称为环形孔板。流体经过时,由于受阻使靶受到一推力作用,此作用力与流速之间存在着一定关系。靶连接在变送器主杠杆的一端,经变送器将靶上所受推力转换为统一的电流信号输出,测此电流即可得到流体流量。

由于靶的节流作用和靶对流速的滞止作用,在靶两侧产生了差压 Δp 。差压作用在靶上对靶产生推力 $F = A\Delta p$,其中 A 为靶面积。 F 与环形间隙中流体平均流速 v 之间的关系为

$$F = A\Delta p = AK \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\pi}{8} K d^2 \rho v^2 \quad (6-87)$$

式中 d ——靶直径;
 ρ ——流体密度;
 K ——系数。

考虑到通过流量计的流体质量流量

$$q_m = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) v \rho \quad (6-88)$$

式中 D ——管道直径。

令直径比 $\beta = d/D$,合并式(6-87)和式(6-88),可得质量流量 q_m 与推力 F 之间的关系为

$$q_m = \sqrt{\frac{\pi}{2}} K_a D \left(\frac{1}{\beta} - \beta \right) \sqrt{F \rho} \quad (6-89)$$

式中 K_a ——靶式流量计的流量系数, $K_a = \sqrt{\frac{1}{K}}$;

F ——作用在靶上的力。

由式(6-89)可知,在被测介质密度 ρ 、管道内径 D 、靶直径 d 和流量系数 K_a 一定的情况下,输出力的平方根与流量成正比。通过测量输出的推力即可测定被测介质流量大小。

流量系数 K_a 的数值由实验确定。实验结果表明,在管道条件与靶的形状确定的情况下,当雷诺数 Re_D 超过某一限值时, K_a 趋于平稳。由于此限制较低,所以这种流量计对于高粘度、低雷诺数流体更为合适。

6.6.2.2 靶式流量计的测力方法及特点

靶式流量计的测力方法与差压变送器类似,通过杠杆机构将靶上所受力引出,按照力矩平衡方式将此力转换为相应的电动信号或气动信号,由显示仪表显示流量值。近年来出现了应变式靶式流量计和智能靶式流量计。应变式靶式流量计直接采用应变式力传感器感受靶作用力;智能靶式流量计采用电容式力传感器作为敏感传递元件,同时加入了智能处理技术。

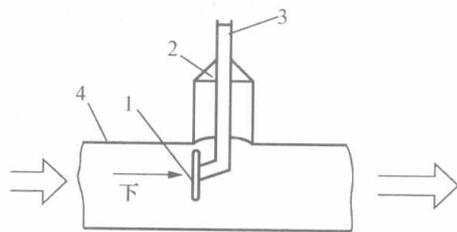


图 6-34 靶式流量计示意图

1—靶; 2—接变送器; 3—主杠杆;
4—管壁

6.6.3 电磁流量计

电磁流量计是 20 世纪 60 年代随着电子技术的发展而迅速发展起来的新型流量测量仪表。它的工作原理基于法拉第电磁感应定律，目前已广泛地应用于自来水、工业用水、海水、污水、污泥、化学药品、泥浆等导电液体流量的测量。

6.6.3.1 工作原理

如图 6-35 所示，设在均匀磁场中，垂直于磁场方向有一直径为 D 的管道。管道由导

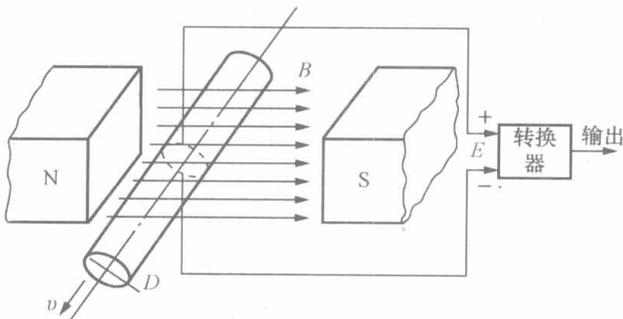


图 6-35 电磁流量计基本工作原理

磁材料制成，内表面衬挂绝缘衬里。当导电液体在管道内以流速 v 流动时，导电流体切割磁感应强度为 B 的磁力线，因而在与磁场及流动方向垂直的方向上产生感应电动势。如安装一对电极，则电极间产生和流速成比例的电位差 E 为

$$E = C_1 B D \bar{v} \quad (6-90)$$

式中 C_1 ——常数，与公式中参量单位有关；
 \bar{v} ——流体的平均流速。

由式 (6-90) 可得

$$\bar{v} = \frac{E}{C_1 B D} \quad (6-91)$$

所以流量

$$q_V = \frac{\pi D^2}{4} \bar{v} = \frac{\pi D E}{4 C_1 B} \quad (6-92)$$

由于永久磁场产生的感应电动势为直流，可导致电极极化或介质电解，引起测量误差，所以工业用仪表中多使用交变磁场。此时

$$B = B_m \sin \omega t \quad (6-93)$$

感应电动势为

$$E = C_1 B_m \sin \omega t D \bar{v} = 4 C_1 q_V B_m \sin \omega t / (\pi D) = K q_V \quad (6-94)$$

式中 $K = 4 C_1 B_m \sin \omega t / (\pi D)$ ，称为电磁流量计的仪表常数。

当测量导管内径 D 和磁感应强度 B 不变时，感应电动势 E 与体积流量 q_V 成线性关系。利用电极测出感应电动势 E 就可求得流体流量。

6.6.3.2 电磁流量计结构

电磁流量计主要由电磁流量传感器和转换器两部分组成。电磁流量传感器安装在工艺管道上，主要由磁路系统、测量导管、电极、外壳、内衬及干扰调整机构等部分组成，如图 6-36 (a) 所示。它的作用是将流经管内的液体流量值线性地变换成感应电动势信号，并通过传输线将此信号送到转换器中去。转换器的作用是将变送器送来的流量信号进行比较、放大，并转换成统一标准的输出信号，以实现对被测液体流量的远距离指示、记录、积算或调节，其原理如图 6-36 (b) 所示。

由图 6-36 (b) 可以推得，当 $K_A \beta K_H B_H$ 远大于 1 时，有

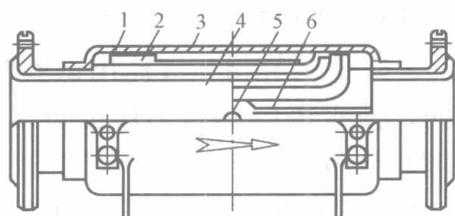
$$q_V = \frac{\pi C_2 \beta K_H D}{4 C_1} I_0 = C I_0 \quad (6-95)$$

式中 β ——反馈系数；

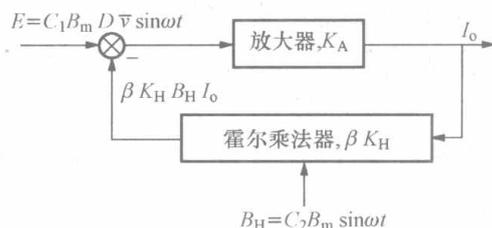
K_H ——霍尔乘法器系数；

C_2 ——比例系数；

C ——分度系数， $C = \frac{\pi C_2 \beta K_H D}{4 C_1}$ 。



(a)



(b)

图 6-36 电磁流量计结构示意图

(a) 电磁流量计变送器的结构；(b) 转换器

1—外壳；2—激励线圈；3—磁轭；4—内衬；5—电极；6—绕组支持件

采用上述转换原理较好地削弱了电源的影响，抑制了干扰，提高了测量精确度，保证良好的线性特性。放大器的设计可以使转换器有较高的恒流性能和较高的输入阻抗以及良好的抑制变送器输出中正交干扰的性能。

6.6.3.3 主要特点

(1) 被测介质必须是导电的液体，要求电导率为 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ S/cm}$ 范围。不能检测气体、蒸汽和石油制品等的流量。配合各种衬里材料，可测量各种酸、碱、盐溶液及泥浆、矿浆、纸浆等介质的流量。

(2) 测量管内无可动部件，便于维护管理；无阻流部件，因此压力损失很小。

(3) 输出电流和流量具有线性关系，并且不受流体的密度、粘度、温度、压力和电导率变化的影响。

(4) 口径范围可从几毫米到 3m，可测正反双向流量，也可测脉动流量。

(5) 量程比通常为 $20:1 \sim 50:1$ ($0.5 \text{ m/s} \sim 10 \text{ m/s}$)，满量程流速范围宽。

(6) 由于衬里材料和电气绝缘材料限制，一般使用的温度范围为 $0 \sim 200^\circ\text{C}$ 。因电极是嵌装在导管上的，使用工作压力一般不超过 4MPa。

使用电磁流量计时应注意使管道内充满液体，最好把管道垂直设置，让流体自上而下流动。流量计上游管道要有一定长度的直管段。

6.7 流量标准装置

流量标准装置是实现流量仪表标定或校验的设备。为使各制造厂家生产的各类流量仪表的流量值统一，并达到一定的测量精确度，需要对新制造或使用中的流量仪表进行标定或校验。下面介绍几种流量标准装置。

6.7.1 静态容积法液体流量标准装置

静态容积法是通过计量在测量时间内流入标准计量容器的流体体积，以求得流量的方法。该装置作为流量传递标准，可以标定各种测量液体介质的流量计，如漩涡式、涡轮式、

转子式、电磁感应式等流量计，同时也是研究流量计量测试方法的标准设备，系统精确度在 $\pm(0.1\% \sim 0.5\%)$ 之间。

一种典型的装置结构如图 6-37 所示。它由稳压水源、夹表器、调节阀、换向器和标准量器等组成一个循环回路，用水作循环流体。校验前首先用水泵 3 将水池 1 中的水打入高位水塔 5，在整个校验过程中使水塔处于溢流状态，以维持系统的压头稳定不变。打开截止阀 6，水通过上游侧直管段（试验段）7、被校流量计 8、流量调节阀 9 等流出试验管路。在试验管路的出口装有换向器 10，用来改变液体的流向，使水可以流入工作量器 11 或 12 中。换向器启动时能触发计时器，以保证水量和时间的同步计量。

校验流量计时，可根据流量的大小选用一个工作量器计量水量。若选用工作量器 11，

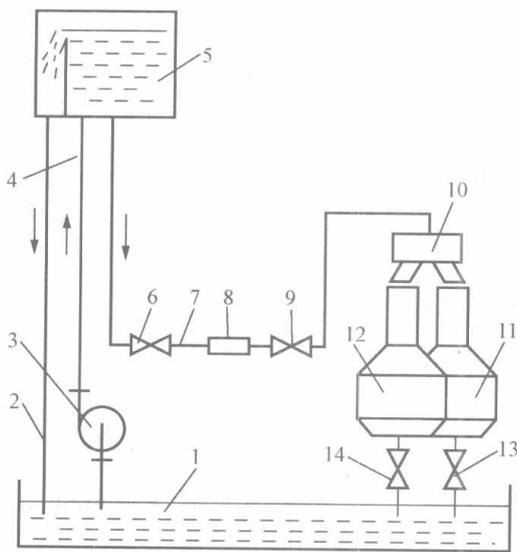


图 6-37 静态容积法液体流量标准装置

- 1—水池；2—排水管；3—水泵；4—进水管；
5—高位水塔；6—截止阀；7—试验段；
8—被校表；9—调节阀；10—换向器；
11、12—工作量器；13、14—放水底阀

则关闭工作量器 11 的放水底阀 13，打开工作量器 12 的放水底阀 14，并将换向器置于使水流切向工作量器 12 的位置。用调节阀 9 将流量调到所需流量，待流量稳定后，启动换向器，将水流由工作量器 12 切换入工作量器 11，在换向器动作的同时启动计时器计时和被校流量计的脉冲计数器计数，当达到预定的水量或脉冲数或时间时，操作换向器，使水流由工作量器 11 切换到工作量器 12，待容器内水位稳定时，记录工作量器 11 所收集的水量 V_0 和计时器显示的测量时间 t 以及脉冲计数器显示的脉冲数（或被检流量计的流量指示值）。

标准的平均流量为

$$q_{V0} = \frac{V_0}{\Delta t} \quad (6-96)$$

将求得的标准流量 q_{V0} 与被校表流量示值 q_V 比较以求得被校表的误差。

6.7.2 标准体积管流量标准装置

标准体积管属于动态容积法流量标准装置，适用的工作流体为液体，可以对较大流量的流量计进行检定。其在结构上有多种类型。按置换器的运动方向，可分为单向型和双向型；按使用球体数量，可分为单球式、双球式和三球式；按现场安装还可分为立式和卧式。

一种三球式标准体积管的结构与测量系统如图 6-38 所示。它主要由标准体积管段、检测开关、密封球、投射装置、闸门等部分组成。标准体积管段是一回形的弯曲等直径圆管，在图 6-38 中是由检测器 A 到检测器 B 的一段，其容积是一定的。它的内表面经过严格加工，并有涂层。密封球用有机材料制成，它的作用是密封隔离、发信号、清理管道等。在密封球中装有磁性材料或磁性的金属材料，检测器 A、B 为磁感应装置。闸门可以控制密封球能否到达投射装置，闸门 V 可以暂留密封球。只要将闸门拉开，密封球即通过闸门。投射装置 G 的工作是把密封球向前推动，将密封球投入检测器 A 上游管中。

当被测流体从入口 C 进入并连续流动时，通过手动或自动方式把密封球投入检测器 A 以上的管中。当密封球经过检测器 A 处时，检测器 A 发出一触发信号，启动计数器。当它

经过检测器 B 处时，检测器 B 发出另一触发信号，关闭计数器。两个触发信号之间的脉冲计数代表了时间 ΔC ，检测器 A、B 之间的管段容积是经过准确地标定过的，即 ΔV 是确定的，因此测得 $\Delta\tau$ 就可以求得瞬时体积流量。

国内固定装置的球型标准体积管已有定型产品，其公称通径为 100~600mm，最大计量段容积值达 15m³，可测流量上限值达 3000m³/h，重复性优于 0.02%。球型标准体积管流量装置还可做成车装式，可移动到现场校验仪表。

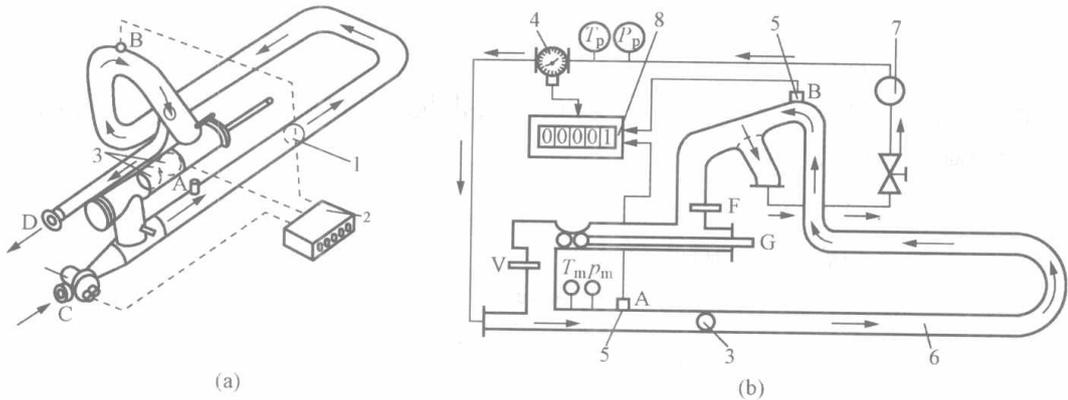


图 6-38 标准体积管流量标准装置

(a) 三球式标准体积管；(b) 标准体积管测量系统

1—行走球；2—脉冲计数器；3—密封球；4—被校表；5—检测器；
6—标准体积管；7—泵；8—计数器

6.7.3 钟罩式气体流量标准装置

钟罩式气体流量标准装置结构如图 6-39 所示，它主要由液槽、钟罩、平衡锤、计时器、流量调节阀、杠杆式压力补偿装置等组成，是一个恒压源并能给出标准容积的装置。该装置以经过标定的钟罩有效容积为标准容积计量仪器，当钟罩下降时，钟罩内的气体经试验管道排往被校表，用钟罩排出的气体标准体积来校验流量仪表。

该装置内钟罩重量与平衡锤的重量差值为一常数，从而对钟罩内的气体形成一个恒定的压力。当有气体流经流量表排出时，气压减小，钟罩因此而下降，可保证在一次校验中，气体以恒定的流量排出钟罩。钟罩下降后浸入水中的部分增加，水对钟罩的浮力也增加，因此又会使钟罩内的气压有所减小。为了消除浮力的影响，该装置中设置了杠杆式压力补偿装置。补偿装置通过横杆上的重块给钟罩提供向上的附加作用力，随着钟罩的下降，重块对钟罩向上的作用力也减小，从而补偿浮力的增加，使得钟罩内的气压保持恒定。

校验时，先将钟罩升起（通入压缩空气或吊起吸入空气），调整流量调节阀达到所需要的流量，此时钟罩内空气排出，流过被检定流量仪，钟罩下降。钟罩从某一高度下降时开始计时，下降到某一高度时

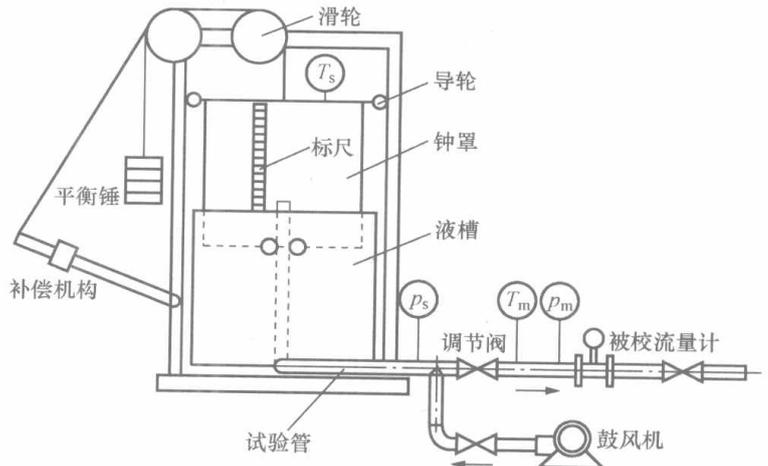


图 6-39 钟罩式气体流量标准装置

停止计时。将被校表的指示体积与标准体积进行比较,计算出被校表的测量误差,多点比较后即可评价被校表的精确度。

6.7.4 标准流量计法

标准流量计法是利用精确度高一等级的标准流量计与被校验流量计串联的校验装置,让流体同时通过标准表和被校表,比较两者的示值以达到校验的目的。这种流量校验装置,因其费用较低、携带方便、操作简便,近年来已为人们所认可和重视,其相应的检定规程为JJG 643—1994。

常用的标准流量计有涡轮流量计、腰轮流量计、椭圆齿轮流量计、科里奥利质量流量计、伺服流量计等。校验装置中串联的仪表间要妥善地安装整流器和足够长的直管段,以保证上游仪表不影响下游仪表。

标准流量计法流量装置的缺点是连续使用标准表会使其特性随时间而变化(如涡轮流量计作标准表时轴承磨损的影响),因此要定期校验复核检定周期内的标准表精确度和稳定性。检定复核标准表有“在线”和“离线”两种方法。在线法配备一台与标准流量计同规格,平时不使用的副标准流量计,安装在被校流量计的位置上,以副标准流量计复核标准流量计。离线法是取下标准流量计到其他流量标准装置上校验复核。

在校验时标准流量计受外界突发因素影响而变化(如涡轮流量计轴承进入异物),操作者一般是不易发现的。为保证所使用的标准流量计的可靠性,可用两台标准流量计串联,两台标准流量计给出相同的结果,可认为标准流量计状态正常;还可通过并联若干台标准流量计作为标准表,以扩大流量范围。

本章小结

一、流量计的种类

常用的流量仪表的基本情况如表6-4所示。

表6-4 各类流量仪表的性能比较

对比项目	理论公式	检测原理	输出信号与流量关系	精确度	测量介质	压力损失	直管段要求	可移动部件
椭圆齿轮流量计	$q=Kn$	通过流量计标准容积的数量	成比例	$\pm(0.1\% \sim 0.5\%)$	液体、气体	(包含过滤器)大	无	有
涡轮流量计	$q=f/\xi$	涡轮转数	成比例	$\pm(0.2\% \sim 1.0\%)$	液体、气体	(包含过滤器)较大	上游侧 20D 下游侧 5D	有
YF-100型涡街流量计	$q=K/f$	漩涡数	成比例	$\pm 1\%$	液体、气体、蒸汽	小	上游侧 (10~20)D 下游侧 5D	无
超声波流量计	$q=K\Delta f$ (频差法)	超声波顺流和逆流的频率差	成比例	$\pm(2\% \sim 3\%)$	液体、气体	无	上游侧 >10D 下游侧 >5D	无

续表

对比项目	理论公式	检测原理	输出信号与流量关系	精确度	测量介质	压力损失	直管段要求	可移动部件
内锥流量计	$q=K\sqrt{\Delta p}$	锥体前后差压	成开方	$\pm 0.5\%$	液体、气体、蒸汽	较大	上游侧 0~3D 下游侧 0~1D	无
转子流量计	$q=KH$	转子的高度	成比例	$\pm(1\% \sim 2\%)$	液体、气体	小且恒定	无	有
电磁流量计	$q=\frac{\pi D}{4} \times \frac{e}{B}$	感应电动势 e	成比例	$\pm 0.5\%$	导电液体	很小	上游侧 (5~10)D 下游侧无	无
靶式流量计	$q=K\sqrt{F}$	靶上作用力 F	成开方	$\pm 1\%$	液体	大	上游侧 >5D 下游侧 >3D	无
科氏质量流量计	$q_m=k\theta$	U形管扭转角 θ	成比例	$\pm 0.2\%$	各种流体	小	无	有

被测介质的复杂性和多样性使得流量计种类繁多。首先是被测流体的种类超过万种；其次被测介质在管道中的流动状态不同，可能是层流、紊流和脉动流；被测流体的流量范围相差极大，从每分钟几滴到每小时数百吨；被测介质温度可相差上百倍，有的高达 600℃ 以上，而有的低至 -259℃，压力的变化范围更大。因此每种流量计只适用某类介质和一定的流量范围，还没有一种流量计是万能的。

正确使用流量计才能发挥仪表的作用，一定要根据被测流体的性质和范围选择适用的流量仪表，流量计的选用以适用、可靠为依据，不要追求高、精、尖、新，要根据流量计厂家的要求进行安装和使用。

二、流量计的校验

流量计的校验一般有直接测量法和间接测量法两种方法。

直接测量法也称为实验校验法，是以实际流体流过被校验仪表，再用别的标准装置测出流过被校仪表的实际流量，与被校仪表的流量值作比较，或将待标定的仪表进行分度。这种方法也有人称为湿式检定。实验校验方法获得的流量值既可靠又准确，是目前许多流量仪表校验所采用的方法，也是目前建立标准流量的方法。

间接测量法是以测量流量仪表传感器的结构尺寸或其他与计算流量有关的量，并按规定方法使用，间接地校验其流量值，获得相应的准确度。这种方法相对于湿式检定也被称为干式检定。间接法校验获得的流量值没有直接校验法准确，但它避免了必须要使用流量标准装置特别是大型流量装置带来的困难。

三、流量检测方面需解决的问题

(1) 对于气体，其密度受被测介质的温度、压力影响变化很大，为消除密度变化产生的影响，最好的方法是实现气体的质量流量的测量。然而气体质量流量计种类极少，热式气体质量流量计适用于单组分气体或固定的多组分气体的检测，对于变组分的低压气体的流量测量问题仍需解决。

(2) 液体流量测量仪表大多是速度式流量计，它们是靠检测元件测出流体在管道中的平均流速从而获得流体体积流量的仪表。由于流体的平均流速与流体在管道内沿径向速度分布有关，而速度分布又与流量的大小、检测元件前后直管段长度有关，为了保证速度式流量计的测量精度，需要规定流量测量范围和前后直管段的长度，同时还要通过标定进行修正。对于大口径管道的流量测量，为降低成本，较多采用插入式检测元件，它只能给出检测元件所在处的平均流速，用它经过修正后来代替整个管道上的平均流速，所产生的误差将难以估计。速度分布的影响是造成速度式流量计测量误差的一个主要原因，因而找到一个有获取速度分布能力的检测元件势在必行。

(3) 多相流流体的流量测量提到日程。多相流的特点是被测参数多、流动形态复杂，影响因素多，目前还没有实用化的多相流流量计。

思考题与习题

1. 什么是流量和总量？有几种表示方法？相互之间的关系是什么？
2. 什么是流量检测仪表的量程比？当实际流量小于仪表量程比规定的最小流量时会产生什么影响？
3. 以椭圆齿轮流量计为例，说明容积式流量计的工作原理。容积式流量计的测量误差主要来源于什么？
4. 涡街流量计如何从结构方面保证产生稳定的“卡门涡街”？漩涡频率与哪些因素有关？对漩涡频率有哪几种检测方法？
5. 涡轮流量计的仪表常数的含义是什么？仪表常数的大小与哪些因素有关？
6. 超声波流量计的特点是什么？其测速方法有几种？
7. 用测一点的流速来测量管道内瞬时流量方法的前提是什么？测点的位置在管截面的什么位置上较好？
8. 均速管与威力巴流量计各有何特点？弯管流量计和内锥流量计的工作原理是什么？
9. 转子流量计有哪些类型？它与孔板有何异同？
10. 说明电磁流量计的工作原理。电磁流量计使用中有什么要求？
11. 质量流量测量有哪些方法？科里奥利质量流量计是根据什么原理工作的？
12. 对于下列左边的流量测量需求，请在右边选择最合适的流量测量仪表。

(1) 含杂质的导电液体流量	A. 科里奥利质量流量计
(2) 流速较低的清洁汽油流量	B. 转子流量计
(3) 微小的气体流量	C. 电磁流量计
(4) 流量变化不大，雷诺数较大的蒸汽流量	D. 容积式流量计
(5) 管道直径为 25mm，密度易变的液体质量流量	E. 涡街流量计
13. 已知被测介质在工作状态下的体积流量为 $293\text{m}^3/\text{h}$ ，工作状态下介质密度为 $19.7\text{kg}/\text{m}^3$ ，求流体的质量流量。
14. 已知某流量计的最大可测流量为（标尺上限） $40\text{m}^3/\text{h}$ ，流量计的量程比为 10 : 1，则该流量计的最小可测流量为多少？
15. 有一台椭圆齿轮流量计，某一天 24h 走字数为 120 字。已知积算系数为 $1\text{m}^3/\text{字}$ ，

求这天的物料量是多少？平均流量是多少？

16. 用涡街流量计测量某流体的流量，已知漩涡发生体的迎流面宽度为 $d=14.3\text{mm}$ ，斯特罗哈尔数 St 约为 0.16，管道直径 $D=50\text{mm}$ ，管道中流体的平均流速为 $0.5\sim 4\text{m/s}$ ，问漩涡的频率范围是多少？

17. 检定一台涡轮流量变送器，当流过 16.05m^3 流体时，测得 41 701 个脉冲，则仪表的仪表常数 ζ 是多少？

18. 某一用水标定的转子流量计，满度值为 $1000\text{dm}^3/\text{h}$ ，转子密度为 7.92g/cm^3 ，现用来测密度为 0.789g/cm^3 的乙醇流量，其测量上限是多少？若将转子换为密度 2.861g/cm^3 的铝时，其测量上限是多少？

19. 用超声波流量计测水的流量。已知管径 $D=150\text{mm}$ ，超声波发射与接收装置之间的距离 $L=450\text{mm}$ ，声波在水中的传播速度 $c=1500\text{m/s}$ ，超声波频率 $f=28\text{kHz}$ 。当流量为 $500\text{m}^3/\text{h}$ 时，试确定超声波在顺流和逆流中的传播时间差和相位差。

20. 用皮托管测量管道风流量（常温，常压）， $\rho=1.247\text{kg/m}^3$ ，皮托管常数 $K_d=1$ ，可压缩修正系数 $K_\rho=1$ ，管道直径 $d=500\text{mm}$ ，在管道中心 $r_1=0$ 处，测得 $\Delta p_1=343\text{Pa}$ ，在 $r_2=200\text{mm}$ 处，测得 $\Delta p_2=240\text{Pa}$ ，流速分布模型为 $v=v_{\max}\left(\frac{R-r}{R}\right)^{1/n}$ 。求管道风流量 q_v 为多少？

第7章 节流式流量计

7.1 概 述

节流式流量计是目前工业生产中应用最为广泛的一类流量测量仪表，可用来测量气体、液体和蒸汽的流量。在整个工业流量测量领域中，节流式流量计占流量仪表总数的一半以上。火电厂中，给水流量、蒸汽流量等都采用这种流量计进行测量，而其他流量计都因被测介质的高压力、高温大多不能适用。

节流式流量计的工作原理是，在管道中设置节流件，流体流经节流元件时由于流通面积的变化，发生节流现象，在节流件的前后两侧产生压力差（差压）。实践证明，对于一定形状和尺寸的节流件，一定的测压位置和前后直管段，在一定的流体参数情况下，节流件前后的差压与流量之间有一定的函数关系。因此，可以通过测量节流件前后的差压来测量流量。节流式流量计也称为变压降式流量计。

节流式流量计通常由能将流体流量转换成差压信号的节流装置、传输压力信号的管路和测量差压并显示流量的差压计（或差压变送器）组成，如图7-1所示。安装在流通管道中的节流装置也称“一次装置”，它包括节流件、取压装置和前后直管段。显示装置也称“二次装置”，它包括压力信号管路和测量中所需的仪表。

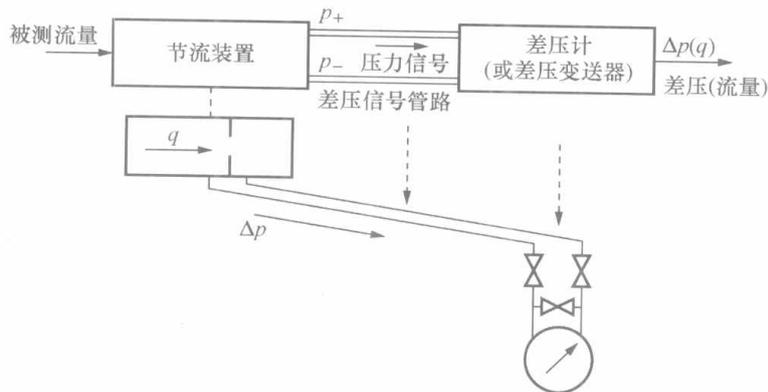


图7-1 节流式流量计组成

节流装置有标准化和非标准化两类。标准化节流装置在对节流装置进行设计计算时要严格遵循国家标准或国际标准。按标准进行设计、安装、使用的标准节流装置，其差压和流量的关系不需要进行实验标定，即可在已知的不确定度范围内进行流量测量，故使用方便。非标准节流装置多用于脏污介质、高粘度、低雷诺数、非圆管道截面、超大及过小管径等流量测量。它们的测量原理和计算方法与标准节流装置相同，所不同的是非标准节流装置没有统一标准化的数据、资料，没有统一的误差计算方法等。

不少国家对节流装置做了很多研究工作。为使设计、制造、安装、使用等环节都能满足一定的要求，使之标准化，在标准中对标准节流装置结构、适用的条件、安装及检验方法都做了严格的规定。我国也于1976年开始对节流装置进行系统的实验研究，目前我国使用的

是1993年2月3日颁布的《用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量的流量测量节流装置》(GB/T 2624—1993)。

7.2 流量公式

7.2.1 流体的流动情况

如果在充满流体的管道中固定放置一个流通面积小于管道截面积的节流件，则管内流束在通过该节流件时就会造成局部收缩。在收缩处，流速增加，静压力降低，因此，在节流件前后将产生一定的压力差。图7-2给出了流体在节流件前后压力和速度的变化情况。

从图7-2中可知，在截面A之前，流体未受节流件影响，流束充满管道，流动方向与管道中心线平行，流束直径为 D ，流束中心压力为 p_A ，平均流速为 \bar{v}_A ，流体密度为 ρ_1 。流体通过截面A后，由于受到节流件的影响，在节流件前流体就向中心加速，在截面B处流束截面收缩到最小，此时流速最大、压力最低，流束直径为 d' ，流束中心压力为 p_B ，平均流速为 \bar{v}_B ，流体密度为 ρ_2 。截面B的位置与节流件的形状有关。通过截面B之后流束向外扩散，流速降低，静压升高，直到截面C处流束又充满管道。图7-2中实线代表管壁处静压力，点划线代表管道中心处静压力。由于流体的粘性和局部阻力以及静压差回流等的影响将造成涡流，这时沿管壁流体的静压变化和轴线上不同。节流件前后涡流的形成以及流体的沿程摩擦，使得流体具有的总机械能的一部分不可逆地变成了热能，散失在流体内，在流束充分恢复后，静压力 p_C 不能恢复到原来的数值 p_A ，而有一个压力降落，这个压力降落就是流体流经节流件后的压力损失 δ_p 。

7.2.2 流量公式

流量公式就是差压和流量之间的关系式，它是利用伯努利方程和流体流动连续性方程来推导的。但完全从理论上计算出差压和流量之间的关系目前仍是不可能的，关系式中的各个系数只能靠实验确定。考虑到在节流过程中由于不可压缩流体的密度不变化，而可压缩流体因膨胀其密度发生变化，因此在推导不可压缩流体与可压缩流体的流量公式时略有不同。但为了使用上的一致和方便，两类流体的流量公式在形式上已统一起来。

7.2.2.1 不可压缩流体的流量公式

对于不可压缩流体，有 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 。在充分紊流的理想情况下，对图7-2中的截面A和截面B，列出流体流动的伯努利方程和连续性方程为

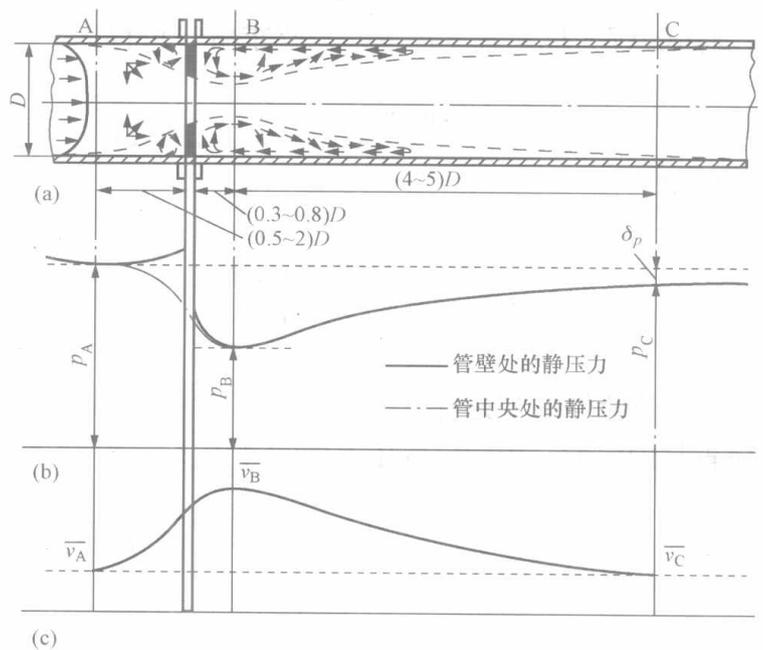


图7-2 流体节流时的流动状态

(a) 流线和涡流区示意；(b) 沿轴向静压力的变化；

(c) 沿轴向流速的变化

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{1}{2} C_A \bar{v}_A^2 = \frac{p_B}{\rho} + \frac{1}{2} C_B \bar{v}_B^2 + \frac{1}{2} \xi \bar{v}_B^2 \quad (7-1)$$

$$\frac{\pi}{4} D^2 \bar{v}_A = \frac{\pi}{4} d'^2 \bar{v}_B \quad (7-2)$$

式中 D 、 d' ——截面 A、截面 B 处流束的直径；

\bar{v}_A 、 \bar{v}_B ——截面 A、截面 B 处的流束的平均流速；

p_A 、 p_B ——截面 A、截面 B 处的流束的中心静压力；

ρ ——流体密度；

C_A 、 C_B ——动能修正系数（与流速分布有关）；

ξ ——节流件的阻力系数。

将式 (7-1)、式 (7-2) 联立求解，可得

$$\bar{v}_B = \frac{1}{\sqrt{C_B - C_A (d'^2/D^2)^2 + \xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_A - p_B)} \quad (7-3)$$

定义

$$\mu = \left(\frac{d'}{d}\right)^2 \quad (\text{收缩系数})$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (\text{节流件直径比})$$

其中 α 为节流件的开孔直径，考虑到流束最小截面 B 的位置随流速变化而变化，而实际取压点的位置是固定的，用固定取压点处的静压 p_1 、 p_2 替代 p_A 、 p_B 时，须引入一个取压系数 ψ ，即

$$\psi = \frac{p_A - p_B}{p_1 - p_2}$$

故式 (7-3) 可写成

$$\bar{v}_B = \frac{\sqrt{\psi}}{\sqrt{C_B - C_A \mu^2 \beta^4 + \xi}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (7-4)$$

所以，可得质量流量

$$q_m = \rho \frac{\pi}{4} d'^2 \bar{v}_B = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{C_B - C_A \mu^2 \beta^4 + \xi}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (7-5)$$

定义流量系数 d 和流出系数 C

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{C_B - C_A \mu^2 \beta^4 + \xi}}$$

$$C = \alpha \sqrt{1 - \beta^4}$$

于是，不可压缩流体的流量公式为

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho \Delta p} \quad (7-6)$$

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (7-7)$$

其中

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

α 或 C 是由实验方式确定的，从前面分析可知，它们的大小与节流件形式、取压方式、

β 值、雷诺数 Re_D 、管道粗糙度因素有关。过去的标准推荐使用流量系数 α ，现在的标准中推荐使用流出系数 C 。

7.2.2.2 可压缩流体的流量公式

对于可压缩流体， $\rho_1 \neq \rho_2$ ，流体密度的变化是不可忽视的。为方便起见，规定公式中的 ρ 用节流件前的流体密度， C 值仍取相当于不可压缩流体时的数值，而把全部的流体可压缩性影响用可膨胀性系数 ϵ 来考虑（当流体为可压缩性流体时， $0 < \epsilon < 1$ ；流体为不可压缩流体时， $\epsilon = 1$ ）。所以流量公式可以写成

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho_1 \Delta p} \quad (7-8)$$

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} \beta^2 D^2 \sqrt{2\rho_1 \Delta p} \quad (7-9)$$

或

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \quad (7-10)$$

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} \beta^2 D^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_1}} \quad (7-11)$$

式中 ρ_1 ——没有发生节流时可压缩流体的密度；

d 、 D ——工作温度下节流件开孔直径、管道直径。

流量公式中各量的单位为：体积流量 q_v — m^3/s ；质量流量 q_m — kg/s ；直径 d 或 D — m ；密度 ρ_1 — kg/m^3 ；差压 Δp — Pa 。

工业生产过程中，对流量公式中的各量常采用的单位为：体积流量 q_v — m^3/h ；质量流量 q_m — kg/h ；直径 d 或 D — mm ；密度 ρ_1 — kg/m^3 ；差压 Δp — Pa 。流量公式成为下面的实用形式

$$\begin{aligned} q_m &= 0.004 \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon d_i^2 \sqrt{\rho_1 \Delta p} \\ &= 0.004 \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \beta^2 D_i^2 \sqrt{\rho_1 \Delta p} \end{aligned} \quad (7-12)$$

$$\begin{aligned} q_v &= 0.004 \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon d_i^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}} \\ &= 0.004 \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \beta^2 D_i^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_1}} \end{aligned} \quad (7-13)$$

其中， $0.004 = 3600 \times \sqrt{2} \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-6}$ 。

7.3 标准节流装置的组成及适用范围

7.3.1 标准节流装置的组成与类型

标准节流装置由标准节流件、符合标准的取压装置和节流件前后直管段（节流件前 $10D$ ，后 $5D$ ）三部分组成，如图 7-3 所示。

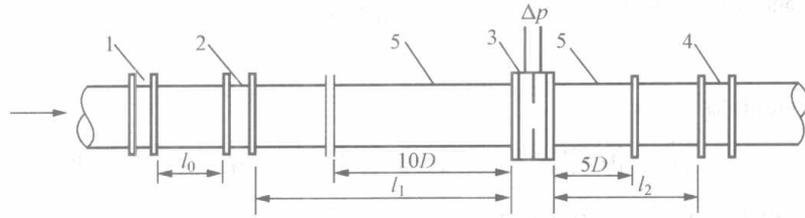


图 7-3 标准节流装置的组成

1—上游第二阻流件；2—上游第一阻流件；3—节流件；
4—下游第一阻流件；5—测量直管段

我国 GB/T 2624—1993 标准中规定的标准节流装置有：

- (1) 角接取压标准孔板；
- (2) 法兰取压标准孔板；
- (3) D 和 $\frac{1}{2}D$ 取压标准孔板；
- (4) 角接取压标准喷嘴（ISA1932 喷嘴）；
- (5) D 和 $\frac{1}{2}D$ 取压长径喷嘴；
- (6) 经典文丘里管（入口圆筒段上取压和喉部取压）；
- (7) 文丘里喷嘴（上游角接取压和喉部取压）。

7.3.1.1 标准节流件

国家标准中目前已经规定的标准节流件有标准孔板、标准喷嘴（包括 ISA1932 喷嘴和长径喷嘴）、文丘里管及文丘里喷嘴。在国家标准中对节流件的形状，结构参数以及使用范围作了严格的规定。

1. 标准孔板

标准孔板是一块具有圆形开孔、与管道同心、直角入口边缘非常锐利的薄板。其结构形式如图 7-4 所示。

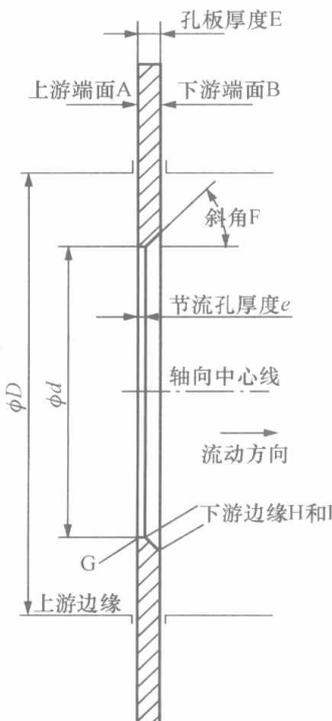


图 7-4 标准孔板

节流孔前段圆筒形孔径 d 是标准孔板的一个重要尺寸。孔板各部分的结构尺寸、粗糙度在标准中都有具体的规定。

(1) 上下游端面 A、B 的粗糙度。上游端面 A 的粗糙度参数 R_a 应小于 $0.0001d$ 。下游端面 B 应与 A 面严格保持平行，面粗糙度可较 A 面稍低。

(2) 孔板厚度 E 和节流孔厚度 e 。节流孔厚度 e 应满足 $0.005D \leq e \leq 0.02D$ 。在任意两点上测得的 e 值之差不得超过 $0.001D$ ，其表面粗糙度参数同 A 面。

孔板厚度 E 应在 e 和 $0.05D$ 之间，当 $50\text{mm} \leq D \leq 64\text{mm}$ 时， E 只要不大于 3.2mm 即可。在孔板任意点上测得的 E 值之差不得大于 $0.001D$ 。

(3) 孔板边缘（G、H 和 I）尖锐度。上游入口边缘 G 和下游边缘 H、I 应无划痕和毛刺。尤其是对于影响流出系数较大的上游边缘 G，要求边缘半径不大于 $0.0004d$ ，即边缘是尖锐的。如果孔板厚度 $E > e$ ，则孔的下游端应做成一个扩散的圆锥表面，

倾斜角 F 为 $45^\circ \pm 15^\circ$ 。表面粗糙度应达到上游端面 A 的水平。

(4) 节流孔的圆度。孔板开孔为正圆。任何情况下, 孔径 d 不小于 12.5mm, 其轴线应垂直于上游端面 A。孔径是不少于四个单测值的算术平均值, 这四个单测值应均匀分布, 而任意单测值与平均值之差不得超过直径平均值的 $\pm 0.05\%$ 。

标准孔板的结构简单, 加工方便, 成本低。

2. 标准喷嘴

标准喷嘴有两种形式: ISA1932 喷嘴、长径喷嘴。

(1) ISA1932 喷嘴。其结构形式如图 7-5 (a) 所示。它由垂直于轴线的入口平面 A、圆弧面 B 和 C 构成的收缩部分、圆筒形喉部 E 和防止边缘被损伤所要求的保护槽 F 等部分组成。圆筒形喉部 E 的孔径 d 是节流孔的特征孔径, 喷嘴各部分结构尺寸、粗糙度在标准中都有严格的规定。

1) 入口平面 A。入口平面 A 是以轴线为圆心, 直径为 $1.5d$ 的圆周和直径为管道内径 D 的圆周所围成的环形平面, 环宽为 $\frac{1}{2}(D-1.5d)$, 表面粗糙度参数 R_a 不得大于 $0.0001d$ 。当 $\beta = \frac{2}{3}$ 时, 环形宽度将为零。当 $\beta > \frac{2}{3}$ 时, 直径为 $1.5d$ 的圆周将大于管道内径 D 所形成的圆周, 此时应该将喷嘴上游侧端面切去一段 ΔL , 使平面部分 A 的最小直径恰好等于管道内径 D , 如图 7-5 (b) 所示。切去部分的轴向长度为

$$\Delta L = \left[0.2 - \left(\frac{0.75}{\beta} - \frac{0.25}{\beta^2} - 0.5225 \right)^{\frac{1}{2}} \right] d \quad (7-14)$$

2) 进口圆弧曲面 B 和 C。B 和 C 是喷嘴收缩段的第一段圆弧形曲面和第二段圆弧形曲面。B 面分别与端面 A 和 C 相切, 半径为 R_1 , C 面分别与 B 面和圆筒形喉部 E 相切, 半径为 R_2 。当 $\beta < 0.50$ 时, $R_1 = 0.2d \pm 0.02d$, $R_2 = (d/3) \pm 0.03d$; 当 $\beta \geq 0.50$ 时, $R_1 = 0.2d \pm 0.006d$, $R_2 = (d/3) \pm 0.01d$ 。

3) 圆筒形喉部 E。圆筒中心与管道中心重合, 直径为 d , 圆筒形长度为 $0.3d$ 。由不少于四个单测值的算术平均值求得。四个单测值应均匀分布, 每个单测值与平均值之差应不超过直径平均值的 $\pm 0.05\%$ 。

4) 出口边缘 f 和保护槽 F。喷嘴出口边缘 f 应保持尖锐, 无明显倒角。保护槽 F 主要用来保护出口边缘 f 的尖锐度。保护槽直径 C 应不小于 $1.06d$, 轴向长度小于或等于 $0.03d$,

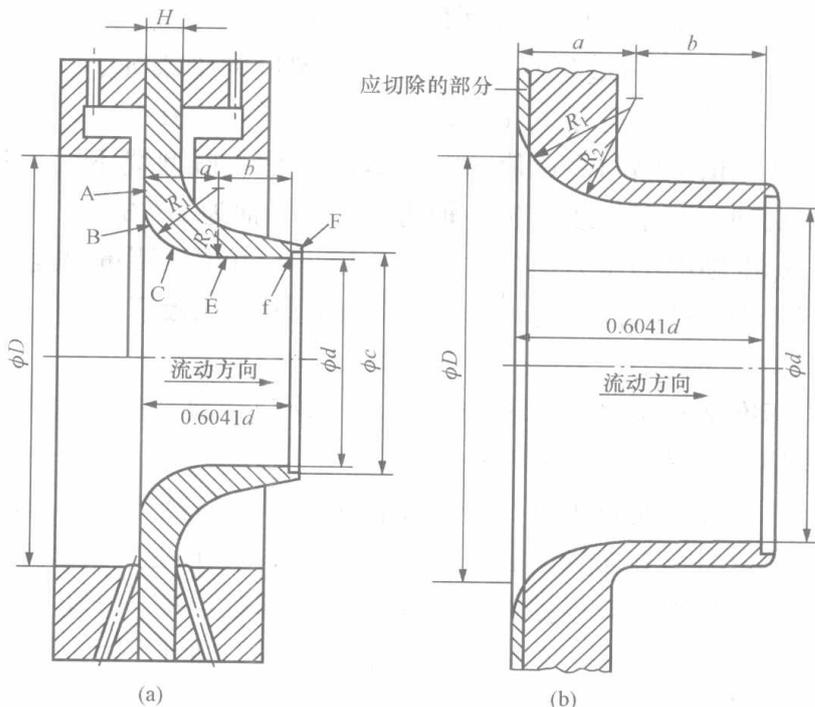


图 7-5 标准喷嘴

(a) $\beta \leq \frac{2}{3}$; (b) $\beta > \frac{2}{3}$

高度为 $(c-d)/2$ 。

5) 喷嘴轴向长度。不包括出口边缘保护槽 F 的长度, $0.30 < \beta \leq 2/3$, 喷嘴总长度为 $0.604 1d$; $2/3 < \beta \leq 0.80$, 喷嘴总长度为 $\left[0.404 1 + \left(\frac{0.75}{\beta} - \frac{0.25}{\beta^2} - 0.522 5\right)^{1/2}\right]d$ 。

(2) 长径喷嘴。长径喷嘴有两种形式: 一种为高比值喷嘴 ($0.25 < \beta \leq 0.80$); 一种为低比值喷嘴 ($0.20 < \beta \leq 0.50$)。当 β 值介于 $0.25 \sim 0.50$ 之间时, 可采用任意一种结构形式的喷嘴。其轴向截面如图 7-6 所示。这两种形式的喷嘴都是由形状为 $\frac{1}{4}$ 椭圆的入口收缩部分和圆筒形喉部组成的。

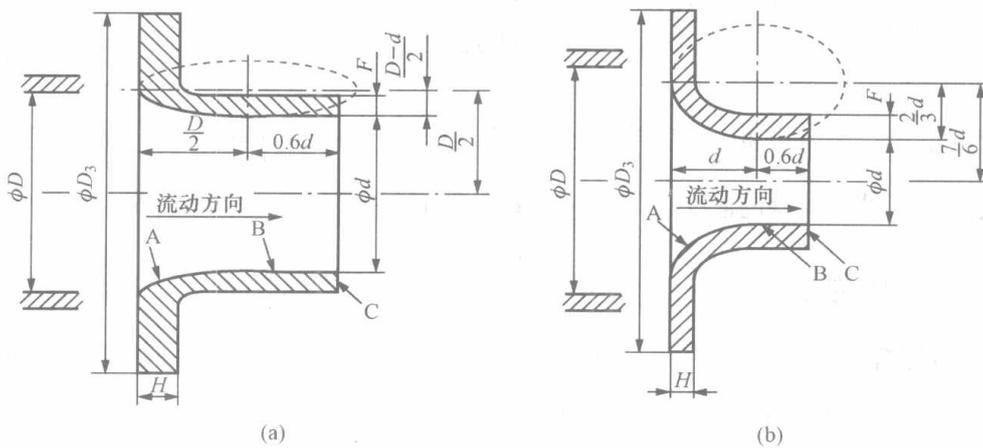


图 7-6 长径喷嘴

(a) 高比值 ($0.25 \leq \beta \leq 0.80$); (b) 低比值 ($0.20 \leq \beta \leq 0.50$)

高比值喷嘴的收缩段是一个 $1/4$ 椭圆旋转曲面 A。椭圆圆心距管道轴线为 $D/2$, 其长轴平行于管道轴线, 长半轴为 $D/2$, 短半轴为 $(D-d)/2$ 。喉部是直径为 d 的圆筒面 B, 长度为 $0.6d$ 。管道内壁与喉部外表面的距离应大于或等于 3mm , 入口端面厚度 H 应大于或等于 3mm , 并小于或等于 $0.15D$ 。喉部的壁厚 F 应在 $3 \sim 13\text{mm}$ 之间。

低比值喷嘴与高比值喷嘴类似, 只是入口型线不同, 其椭圆的圆心在距管道轴线 $7d/6$ 处, 长轴平行于轴线, 长半轴为 d , 短半轴为 $2d/3$ 。

标准喷嘴的压力损失比标准孔板小, 可用于测量温度和压力较高的蒸汽、气体流量。但它的价格比孔板高, 适用的管道直径范围比孔板窄。

3. 文丘里管

标准文丘里管也分两种型式: 一种为经典文丘里管简称文丘里管, 另一种为文丘里喷嘴, 每一种又分长、短两种。

(1) 经典文丘里管。经典文丘里管由入口圆筒段 A、圆锥收缩段 B、圆筒形喉部 C 以及圆锥扩散段 E 组成, 如图 7-7 所示。其内表面是一个对称于管道轴线的旋转表面, 该轴线与管道轴线同轴。根据经典文丘里管的圆锥收缩段 B 内表面的制造方法以及收缩段 B 与喉部 C 相交处的廓形, 经典文丘里管可分成三种形式: 粗铸收缩段文丘里管、机械加工收缩段文丘里管和粗焊铁板收缩段文丘里管。这三种形式的文丘里管的制造方法不同, 应用范围有所不同。

经典文丘里管入口段 A 的直径和管道内径 D 相同, 该段上开有取压孔, 长度一般取 D ,

仅对粗铸收缩段取 D 和 $0.25D+250\text{mm}$ 中的较小者。圆筒段 A 的直径 D 的单测值与平均值之差应不超过 $\pm 0.4\%$ 。圆锥形收缩段 B、圆筒形喉部 C 及扩散段 E 的尺寸和锥角如图 7-7 所示，喉部直径 d 的单测值与平均值之差不得大于 $\pm 0.1\%$ 。扩散段 E 的最小端直径应不小于喉部直径 d 。当扩散段 E 的出口直径小于管道内径 D 时，称其为“截尾的”文丘里管，而当出口直径等于管道内径 D 时，则称为“不截尾的”文丘里管。扩散段 E 可截去其长度的 35%，对压力损失没有明显影响。

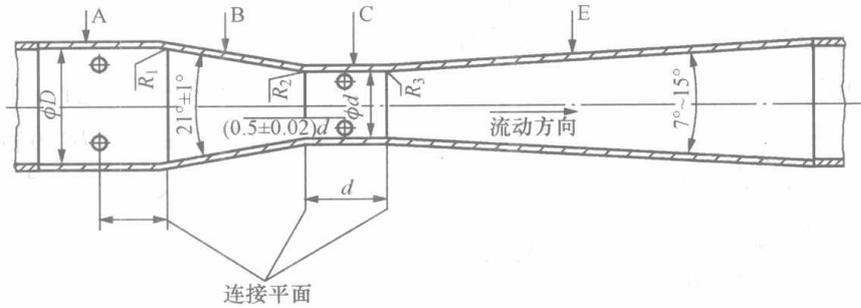


图 7-7 经典文丘里管

(2) 文丘里喷嘴。文丘里喷嘴由收缩段、圆筒形喉部和扩散段构成。入口收缩段与标准喷嘴完全相同，喉部由长度为 $0.3d$ 的 E 和长度为 $(0.4\sim 0.45)d$ 的圆筒段组成。其上开有负压取压孔。扩散段与喉部的连接不必圆滑过渡，扩散角（小于 30° ）和扩散段的长度对流出系数的影响不大，只影响压力损失，因此，可像文丘里管一样将其截短，如图 7-8 所示。

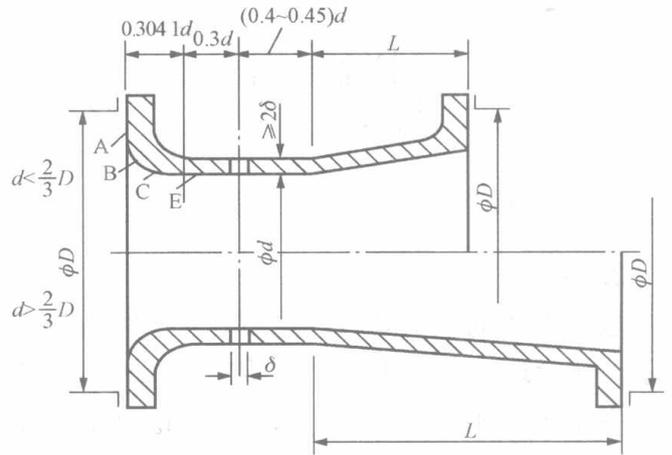


图 7-8 文丘里喷嘴

7.3.1.2 取压装置

节流式流量计的输出信号就是节流件前后取出的差压信号。取压孔在节流件前后的位置不同，取出的差压值也不同。对同一个节流件，采用的取压方式不同，流量公式中的相应系数也将不同。目前国内通常采用的取压方式有理论取压法、 $D-D/2$ 取压法（也称径距取压法）、角接取压法和法兰取压法等，最常用的为后面三种。相应的取压装置有角接取压装置、法兰取压装置和 $D-D/2$ 取压装置。

1. 角接取压

角接取压装置的上下游取压管中心位于节流件前后端面与管道所形成顶角处。角接取压装置有环室取压和单独钻孔取压两种，其结构如图 7-9 中上、下两部分所示。环室取压的前、后环室装在节流件两边，环室夹在法兰之间。法兰和环室、环室和节流件之间放有垫片并夹紧。前后环室的厚度分别为 S 和 S' ，它们应满足 S （或 S' ） $\leq 0.5D$ ，前后环室的开孔直径 D_f 应相等，并等于管径 D 以保证不凸入管内。允许 $D_f \geq D$ ，但应 $D_f \leq 1.04D$ ，并满足下式的要求

$$\frac{D_f - D}{D} \times \frac{S(\text{或 } S')}{D} \times 100 \leq \frac{0.1}{0.1 + 2.3\beta^4}$$

环室通过与节流件之间的环隙和管道内部相通。环隙可以是全周上的连续环隙，也可以

是等角配置的不少于四个的断续环隙，环隙宽度 a 应满足

$$\beta \leq 0.65 \text{ 时, } 0.005D \leq a \leq 0.03D$$

$$\beta > 0.65 \text{ 时, } 0.01D \leq a \leq 0.02D$$

对于任意 β 值，环隙宽度 a 应在 $1 \sim 10\text{mm}$ 之间。为起到均压作用，环腔的横截面积 $c \times h \geq \frac{1}{2} \pi D a$ 。

采用环室取压的目的是可以取出节流件前后的均衡压差，提高测量精度。但当管道直径大于 500mm 时，环室加工困难，这时多采用单独钻孔取压。

单独钻孔取压时（见图 7-9 下半部分），上下游压力分别从节流件前后两个夹紧环取出。

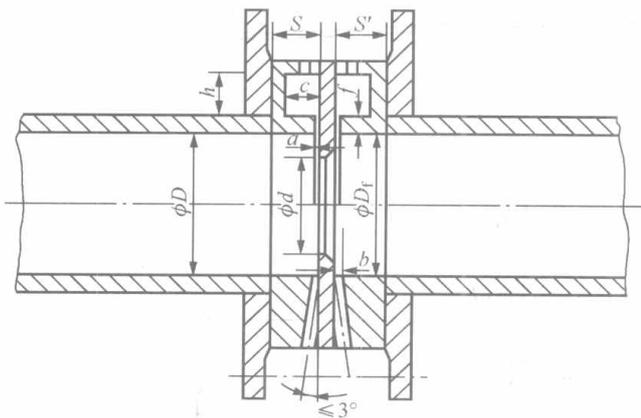


图 7-9 角接取压装置结构

取压口的轴线应尽可能以 90° 角度与管道轴线相交。取压口的直径与环室取压的环隙宽度 a 一样。当被测介质为蒸汽时，取压口直径 b 应在 $4 \sim 10\text{mm}$ 之间。

角接取压法的主要优点是当实际雷诺数大于界限雷诺数时，流出系数只与直径比 β 有关，沿程压力损失变化对差压测量的影响小。其主要缺点是对取压点的安装要求严格，如果安装不准确，对差压测量精度影响较大。另外取压管的脏污和堵塞不易排除。

2. 法兰取压

法兰取压的上下游取压点中心位于距离孔板上下游端面 25.4mm （1 英寸）处，如图 7-10 所示。法兰取压装置由两个带取压孔的取压法兰组成。上下游取压孔直径 b 相同，取压孔直径 b 应小于 $0.13D$ ，同时小于 13mm 。取压孔轴线分别与孔板上下游端面之间的距离为

对于 $\beta > 0.6$ ， $D \leq 150\text{mm}$ ， $S = S' = (25.4 \pm 0.5)\text{mm}$ ；

对于 $\beta \leq 0.6$ ，或 $\beta > 0.6$ 但 $150\text{mm} \leq D \leq 1000\text{mm}$ ，有 $S = S' = (25.4 \pm 1)\text{mm}$ 。

法兰取压装置在制造和使用上比较方便，而且通用性较大。但它的流出系数除与 β 和 Re_D 有关外，还跟管径 D 有关。

3. $D-D/2$ 取压（又称径距取压）

取压孔只有一对，上游取压孔中心线与节流件上游端面距离 l_1 等于 D ，允许偏差为 $\pm 0.1D$ 。下游取压孔中心线与节流件上游端面距离 l_2 等于 $0.5D$ ，允许偏差 $\beta \leq 0.6$ 时为 $\pm 0.02D$ ， $\beta > 0.6$ 时为 $\pm 0.01D$ 。取压孔必须符合单独钻孔取压的全部要求，取压孔中心线必须与管道中心线垂直。

7.3.2 标准节流装置的适用范围

标准孔板两侧的差压信号可以采用角接取压、法兰取压和 $D-D/2$ 取压。ISA1932 喷

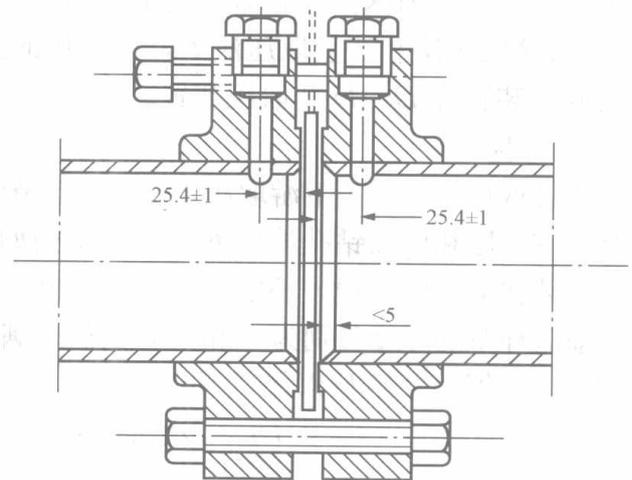


图 7-10 法兰取压装置结构

嘴角接取压装置有单独钻孔和环室取压。长径喷嘴采用 $D-D/2$ 取压。标准节流装置的适用范围如表 7-1 所示。

表 7-1 标准节流装置的适用范围

节流装置		孔径 d/mm	管径 D/mm	直径比 β	雷诺数 Re
标准孔板	角接取压	$d \geq 12.5$	$50 \leq D \leq 1000$	$0.2 \leq \beta \leq 0.75$	$\beta \leq 0.45, Re_D \geq 5000$ $\beta > 0.45, Re_D \geq 10000$
	法兰取压				$Re_D \geq 1260\beta^2 D$
	$D-D/2$ 取压				$Re_D \geq 1260\beta^2 D$
标准喷嘴	角接取压		$50 \leq D \leq 500$	$0.3 \leq \beta \leq 0.80$	$0.3 \leq \beta < 0.44$ $7 \times 10^4 \leq Re_D \leq 10^7$ $0.44 \leq \beta \leq 0.80$ $2 \times 10^4 \leq Re_D \leq 10^7$
长径喷嘴	$D-D/2$ 取压		$50 \leq D \leq 630$	$0.2 \leq \beta \leq 0.80$	$10^4 \leq Re_D \leq 10^7$
文丘里管	粗铸收缩段		$100 \leq D \leq 800$	$0.3 \leq \beta \leq 0.75$	$2 \times 10^5 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$
	加工收缩段		$50 \leq D \leq 250$	$0.4 \leq \beta \leq 0.75$	$2 \times 10^5 \leq Re_D \leq 1 \times 10^6$
	粗焊收缩段		$200 \leq D \leq 1200$	$0.4 \leq \beta \leq 0.70$	$2 \times 10^5 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$
文丘里喷嘴		$d \geq 50$	$65 \leq D \leq 500$	$0.316 \leq \beta \leq 0.775$	$1.5 \times 10^5 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$

7.3.2.1 标准节流装置适用的流体条件

使用标准节流装置时,流体的性质和状态必须满足下列条件。

- (1) 满管流——流体必须充满管道和节流装置,并连续地流经管道。
- (2) 单相流——流体必须是牛顿流体,在物理学和热力学上是均匀的、单相的流体,或者可认为是单相的流体。具有高分散程度的胶质溶液(例如牛奶),可认为相当于单相流体。
- (3) 定常流——流体流量不随时间变化或变化非常缓慢。
- (4) 无相变流——流体流经节流件时不发生相变。
- (5) 无旋流——流体在流经节流件前,流束是平行于管道轴线的无旋流。

标准节流装置不适用于脉动流和临界流的流量测量。

7.3.2.2 适用的管道条件

节流式流量计的测量准确度,除与节流件本身的加工精度和取压装置有关外,还与流体的流动状态有关。在标准中给出的流出系数,是在流体到达节流件上游 $1D$ 处管道截面上的流动状态已接近典型的充分发展的紊流流动状态且无旋涡的条件下得到的。为了在实际测量时能满足或接近这样的条件,对节流装置的管道条件,如管道长度、管道圆度以及内表面粗糙度等提出了严格的要求。

1. 节流件前后应有足够长的直管段 L

最小直管段 L 由三段长度 (l_0, l_1, l_2) 组成,见图 7-3, l_1 是节流件与上游第一阻流件之间的直管段最小长度,由第一阻流件形式和 β 值决定,按表 7-2 查算。 l_0 是上游第一阻流件与上游第二阻流件之间的直管段,由第二阻流件的形式和 $\beta=0.7$ (无论 β 的实际值为多少) 决定,按表 7-2 给出值的一半计算。 l_2 是节流件到下游阻流件直管段的最小长度,

无论下游阻流件的形式如何,均取决于 β 的值,由表7-2查算。

表7-2中所给出的数值是各直管段长度的最小值,实际使用时直管段的长度一般要大于其最小值。在研究工作中,推荐使用至少两倍于表7-2所给出的上游直管段长度(括号外数值)。

如果上、下游直管段中有一段的长度在表7-2给出的括号外数值与括号内数值之间,则要在流出系数的不确定度上算术相加 $\pm 0.5\%$ 的附加不确定度。如果上、下游直管段中有一段的长度小于表7-2给出的括号内数值或者上、下游直管段有两段或三段同时在表7-2给出的括号外数值与括号内数值之间,则由此产生的流量附加误差应实际测定。

表7-2中所列的阀应为全开状态。调节流量的阀门应位于节流件的下游,而上游的切断阀最好是“闸阀”型的。

如果节流件上游为几个 90° 的弯头串接的形式,则可以将其视为平面或空间多个弯头的情况, l_1 查表, $l_0=0$,也可以将此 l_1 、 l_0 布置在节流件与弯头和弯头与弯头之间,其中 l_0 、 l_1 的计算同前所述。

表7-2 孔板、喷嘴和文丘里喷嘴所要求的最小直管段长度(管径 D 的倍数)

直径比 $\beta \leq$	节流件上游侧阻流件形式和最短直管段长度							节流件下游最短直管段长度(包括在本表中的所有阻流件)
	单个 90° 弯头或三通(流体仅从一个支管流出)	在同一个平面上的两个或多个 90° 弯头	在不同平面上的两个或多个 90° 弯头	渐缩管(在 $1.5D \sim 3D$ 的长度内由 $2D$ 变为 D)	渐扩管(在 $1D \sim 2D$ 的长度内由 $0.5D$ 变为 D)	球阀全开	全孔球阀或闸阀全开	
0.20	10 (6)	14 (7)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	4 (2)
0.25	10 (6)	14 (7)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	4 (2)
0.30	10 (6)	16 (8)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	5 (2.5)
0.35	12 (6)	16 (8)	36 (18)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	5 (2.5)
0.40	14 (7)	18 (9)	36 (18)	5	16 (8)	20 (10)	12 (6)	6 (3)
0.45	14 (7)	18 (9)	38 (19)	5	17 (9)	20 (10)	12 (6)	6 (3)
0.50	14 (7)	20 (10)	40 (20)	6 (5)	18 (9)	22 (11)	12 (6)	6 (3)
0.55	16 (8)	22 (11)	44 (22)	8 (5)	20 (10)	24 (12)	14 (7)	6 (3)
0.60	18 (9)	26 (13)	48 (24)	9 (5)	22 (11)	26 (13)	14 (7)	7 (3.5)
0.65	22 (11)	32 (16)	54 (27)	11 (6)	25 (13)	28 (14)	16 (8)	7 (3.5)
0.70	28 (14)	36 (18)	62 (31)	14 (7)	30 (15)	32 (16)	20 (10)	7 (3.5)
0.75	36 (18)	42 (21)	70 (35)	22 (11)	38 (19)	36 (18)	24 (12)	8 (4)
0.80	46 (23)	50 (25)	80 (40)	30 (15)	54 (27)	44 (22)	30 (15)	8 (4)
	阻流件						上游侧最短直管段长度	
对于所有的直径比 β	直径比 ≥ 0.5 的对称骤缩异径管						30 (15)	
	直径 $\leq 0.03D$ 的温度计套管和插孔						5 (3)	
	直径在 $0.03D \sim 0.13D$ 之间的温度计套管和插孔						20 (10)	

注 1. 表中所列为位于节流件上游或下游的各种阻流件与节流件之间所需要的最短直管段长度。

2. 不带括号的值为“零附加不确定度”的值。

3. 带括号的值为“ 0.5% 附加不确定度”的值。

4. 直管段长度均以直径 D 的倍数表示,它应从节流件上游侧端面量起。

2. 管道圆度

标准节流装置适用于圆形截面管道。在节流件上游至少 $2D$ 长度范围内, 管道应是圆的。管道直径 D 应该实测, 不得用管道公称直径。上游测量管直径应是上游取压口的上游 $0.5D$ 长度范围内的平均直径, 该平均直径应是至少在垂直轴线的三个横截面上测得的内径平均值, 其中两个横截面距上游取压口分别为 $0D$ 和 $0.5D$, 每个截面上至少等角距测取 4 个内径单测值, 任意单测值与平均值的偏差不得大于 $\pm 0.3\%$ 。符合这一要求的管道就算满足管道圆度要求, 其算术平均值 D 可作为节流装置设计计算的依据。

在离节流件上游端面至少 $2D$ 范围内的下游直管段上, 管道内径与节流件上游的管道平均直径 D 相比, 其偏差应在 $\pm 3\%$ 之内。

3. 管道内壁粗糙度

管道内表面至少在节流件上游 $10D$ 和下游 $4D$ 的范围内应清洁, 并满足有关粗糙度的规定。标准孔板、标准喷嘴等节流件, 其上游管道内表面相对粗糙度上限值分别应满足表 7-3、表 7-4 的要求。

表 7-3 标准孔板上游管段相对粗糙度 (K/D) 上限值

$\beta = \frac{d}{D}$	≤ 0.3	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.45	0.50	0.60	0.75
$10^4 K/D$	25.0	18.1	12.9	10.0	8.3	7.1	5.6	4.9	4.2	4.0

表 7-4 ISA1932 喷嘴上游管段相对粗糙度 (K/D) 上限值

β	≤ 0.35	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	0.60	0.70	0.77	0.80
角接取压 $10^4 K/D$	25	18.6	13.5	10.6	8.7	7.5	6.7	6.1	5.6	4.5	4.0	3.9	3.9

7.3.3 压力损失

流体流经节流件时, 由于流体微团的碰撞以及在节流件前后附近产生涡流, 将产生能量损失。这种能量损失表现为不可恢复的压力损失。压力损失与直径比 β 和流速 (或流量) 有关, 通过实验可得到它们之间的关系。对于角接标准孔板、法兰标准孔板、径距标准孔板、ISA1932 喷嘴、长径喷嘴等标准节流装置的压力损失可近似计算为

$$\delta_p = \frac{\sqrt{1-\beta^4} - C\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4} + C\beta^2} \Delta p \quad (7-15)$$

对于标准孔板其压力损失的计算式为

$$\delta_p = (1 - \beta^{1.9}) \Delta p \quad (7-16)$$

7.4 标准节流装置中有关系数的确定和误差估计

在流量测量节流装置中, 流出系数 C 和可膨胀性系数 ϵ 是两个极为重要的参数。由式 (7-8) ~ 式 (7-13) 可知, 当 C 和 ϵ 确定以后, 流量 q_V 或 q_m 与差压 Δp 之间的关系才能确定下来。

7.4.1 流出系数 C 及其不确定度

标准节流装置的流出系数 C 值是通过在流量试验台上测定 q_m 和与之相对应的 Δp , 然后用流量公式计算得到的。实验表明, 流出系数 C 与节流件的形式、取压方式、直径比 β 以及雷诺数 Re_D 等因素有关。在一定的节流件和取压方式下, 测量直管段满足相对粗糙度上限要求, 节流件满足适用范围条件时, 流出系数 C 是关于 β 和 Re_D 的函数。在国家标准中提供了流出系数 C 的经验公式或数据表。

7.4.1.1 标准孔板的流出系数 C 及其不确定度

标准中取得的孔板的 C 值的原始实验, 对于角接取压是在相对粗糙度为 $K/D \leq 3.8 \times 10^{-4}$ 的管道中进行的, 而对于径距取压则是在 $K/D \leq 10 \times 10^{-4}$ 的管道中进行的。但如果在孔板上游直管段至少 $10D$ 长度范围内, 管道粗糙度满足表 7-3 的要求, 则直管段其余部分管道粗糙度不符合要求也可使用。

在规定条件下, 流出系数 C 主要取决于 β 、 Re_D , 即 $C = f(\beta, Re_D)$ 。标准孔板的流出系数 C 由 Stolz 方程确定。

对于角接取压标准孔板, 有

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75} \quad (7-17)$$

对于法兰取压标准孔板, 有

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75} + 2.2860 \frac{\beta^4}{D(1-\beta^4)} - 0.8560 \frac{\beta^3}{D} \quad (7-18)$$

(D :mm, $D_{20} \geq 58.62$ mm)

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75} + 0.0390 \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.8560 \frac{\beta^3}{D} \quad (7-19)$$

(D :mm, $D_{20} < 58.62$ mm)

对于 D 和 $D/2$ 取压标准孔板, 有

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.75} + 0.0390 \frac{\beta^4}{1-\beta^4} - 0.01584\beta^3 \quad (7-20)$$

对于上述三种取压方式, 若 β 、 D 、 Re_D 和 K/D 已知且无误差, 则 C 值的百分率不确定度 δ_c/C (置信概率为 95%) 为

当 $\beta \leq 0.6$ 时, $\delta_c/C = \pm 0.6\%$;

当 $0.6 < \beta \leq 0.75$ 时, $\delta_c/C = \pm \beta\%$ 。

7.4.1.2 标准喷嘴 (ISA 1932 喷嘴) 的流出系数 C 及其不确定度

标准喷嘴 C 值的原始实验是在相对粗糙度 $K/D \leq 3.8 \times 10^{-4}$ 的管道中进行的, 但只要喷嘴上游侧至少有 $10D$ 长度的管道的粗糙度满足表 7-4 的要求, C 值仍然可用。

对于角接取压标准喷嘴, 其流出系数为

$$C = 0.9900 - 0.2262\beta^{4.1} - (0.00175\beta^2 - 0.0033\beta^{4.15}) \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{1.15} \quad (7-21)$$

对于长径喷嘴

$$C = 0.9965 - 0.00653\beta^{0.5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0.5} \quad (7-22)$$

若不考虑 β 、 D 、 Re_D 的不确定度，并假定管道的 K/D 在规定的极限之内，则 C 值的百分率不确定度 δ_C/C （概率为 95%）为

当 $\beta \leq 0.6$ 时， $\delta_C/C = \pm 0.8\%$ ；

当 $\beta > 0.6$ 时， $\delta_C/C = \pm (2\beta - 0.4)\%$ 。

为方便设计使用，在 $\frac{q_{m\max}}{q_{m\min}} \leq 4$ 的流量测量范围内， C 的相对变化不超过 $\pm 0.5\%$ ，即

$\left| \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}} \right| \leq 0.5\%$ ，这时工程中认为 C 是常量。在标准中给出了相应 β 值的最小雷诺数推荐值 $Re_{D\min}^*$ ，设计使用时满足 β 对应的 $Re_{D\min}^* < Re_{D\min}$ ，即满足 $\left| \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}} \right| \leq 0.5\%$ 关系式。角接取压标准孔板、角接取压标准喷嘴不同 β 值下的 $Re_{D\min}^*$ 值见表 7-5 和表 7-6。

表 7-5 角接取压标准孔板适用的最小雷诺数 $Re_{D\min}^*$ 推荐值

β	$Re_{D\min}^*$	β	$Re_{D\min}^*$	β	$Re_{D\min}^*$
0.220	5.00×10^3	0.425	2.13×10^4	0.625	6.27×10^4
0.250	8.00×10^3	0.450	2.49×10^4	0.650	7.16×10^4
0.275	9.00×10^3	0.475	2.87×10^4	0.675	9.21×10^4
0.300	1.30×10^4	0.500	3.29×10^4	0.700	9.48×10^4
0.325	1.70×10^4	0.525	3.75×10^4	0.725	1.11×10^5
0.350	1.90×10^4	0.550	4.27×10^4	0.750	1.32×10^5
0.375	2.00×10^4	0.575	4.85×10^4	0.775	1.59×10^5
0.400	2.00×10^4	0.600	5.51×10^4	0.800	1.98×10^5

表 7-6 角接取压标准喷嘴适用的最小雷诺数 $Re_{D\min}^*$ 推荐值

β	$Re_{D\min}^*$	β	$Re_{D\min}^*$	β	$Re_{D\min}^*$
0.320	4.05×10^4	0.500	4.94×10^4	0.675	4.66×10^4
0.350	3.93×10^4	0.525	5.22×10^4	0.700	3.42×10^4
0.375	3.95×10^4	0.550	5.49×10^4	0.725	2.00×10^4
0.400	4.04×10^4	0.575	5.69×10^4	0.750	2.00×10^4
0.425	4.19×10^4	0.600	5.78×10^4	0.775	2.97×10^4
0.450	4.40×10^4	0.625	5.69×10^4	0.800	5.19×10^4
0.475	4.66×10^4	0.650	5.35×10^4		

7.4.1.3 文丘里管和文丘里喷嘴的流出系数 C 及其不确定度

在给出的使用范围内，文丘里管的流出系数 C 为一常数。但应避免同时采用 D 、 β 和 Re_D 的极限值，否则流出系数 C 的不确定度很可能会增加。

具有粗铸收缩段的经典文丘里管, 流出系数 $C=0.984$, 百分率不确定度 $\delta_c/C=\pm 0.7\%$;

具有机械加工收缩段的经典文丘里管, 流出系数 $C=0.995$, 百分率不确定度 $\delta_c/C=\pm 1\%$;

具有粗焊铁板收缩段的经典文丘里管, 流出系数 $C=0.985$, 百分率不确定度 $\delta_c/C=\pm 1.5\%$;

文丘里喷嘴的流出系数 $C=0.9858-0.196\beta^{4.5}$, 百分率不确定度 $\delta_c/C=\pm(1.2+1.5\beta^4)\%$ 。

为了使用方便, 附录 II 中给出了角接取压标准孔板、ISA1932 喷嘴和长径喷嘴的流出系数的值, 这些值不供精确内插, 更不允许外推。

7.4.2 可膨胀性系数 ϵ 及其不确定度

影响可膨胀性系数 ϵ 的因素有很多。当节流件形式、取压方式确定后, 其可膨胀性系数 ϵ 值取决于 $\Delta p/p_1$ 、 κ 和 β 的值, 即

$$\epsilon = f\left(\beta, \frac{\Delta p}{p_1}, \kappa\right)$$

其中 κ 是被测流体的等熵指数, 对于过热蒸汽可近似取 $\kappa=1.3$, 对于空气 $\kappa=1.4$ 。

为限制流体可压缩性对流量测量的影响, 标准规定节流装置的 $\Delta p/p_1 < 0.25$, 即 $p_2/p_1 > 0.75$ 。

7.4.2.1 标准孔板的可膨胀性系数 ϵ 及其不确定度

对于角接取压标准孔板、法兰取压标准孔板、径距取压标准孔板, 其可膨胀性系数 ϵ 的经验计算公式为

$$\epsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad (7-23)$$

若 β 、 $\Delta p/p_1$ 和 κ 是已知的且无误差, 则标准孔板 ϵ 值的百分率不确定度 $\frac{\delta_\epsilon}{\epsilon}$ (概率 95%) 为 $\pm 4 \frac{\Delta p}{p_1} \%$ 。

7.4.2.2 标准喷嘴的可膨胀性系数 ϵ 及其不确定度

标准喷嘴 (ISA 1932 喷嘴和长径喷嘴) 的可膨胀性系数 ϵ 的计算式为

$$\epsilon = \left[\left(\frac{\kappa \tau^{(2/\kappa)}}{\kappa - 1} \right) \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{(2/\kappa)}} \right) \left(\frac{1 - \tau^{(\kappa-1)/\kappa}}{1 - \tau} \right) \right]^{1/2} \quad (7-24)$$

其中

$$\tau = 1 - \frac{\Delta p}{p_1} = \frac{p_2}{p_1}$$

标准喷嘴 ϵ 值的百分率不确定度 $\frac{\delta_\epsilon}{\epsilon} = \pm 2 \frac{\Delta p}{p_1} \%$, 置信概率为 95%。

7.4.2.3 文丘里管和文丘里喷嘴的可膨胀性系数 ϵ 及其不确定度

文丘里管和文丘里喷嘴的可膨胀性系数 ϵ 也按式 (7-24) 计算。其百分率不确定度为

$$\frac{\delta_\epsilon}{\epsilon} = \pm (4 + 100\beta^8) \frac{\Delta p}{p_1} \%$$

7.4.2.4 标准节流装置流量测量不确定度的计算

用标准节流装置进行流量测量时,即使完全符合前述对标准节流装置设计、制造、安装和使用等方面的要求,但由于流量公式中各项参数的测量都存在一定的不确定度,所以通过流量公式求得的流量值必然也存在一定的误差。可以用不确定度来表示这个误差的大小,它不仅与每一个参量的不确定度有关,还与这些参量的函数组成形式有关。

在工业测量中,可以认为流量公式中各参数,如 C 、 ϵ 、 ρ_1 、 d 、 D 和 Δp 为彼此独立的量,并考虑 C 对 β 的依存关系而引入 D 值测量不确定度的影响,通过间接测量值的误差传递定律,可得出求取流量值相对不确定度的计算公式为

$$\frac{\delta_{q_m}}{q_m} = \pm \left[\left(\frac{\delta_C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta_\epsilon}{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta_d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta_{\rho_1}}{\rho_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7-25)$$

由于直管段长度不符合要求而引入的 $\pm 0.5\%$ 附加不确定度应加在流出系数 C 的不确定度上一起计算。

(1) 流出系数和可膨胀性系数的不确定度 $\frac{\delta_C}{C}$ 和 $\frac{\delta_\epsilon}{\epsilon}$: 其估算方法如前所述。

(2) 节流件孔径的不确定度 $\frac{\delta_d}{d}$: 与量器的误差、 λ_d 值误差和工作温度 t 值误差有关。当节流件工作在设计工作温度时,此项误差主要取决于量器的误差,一般在按照标准规定的方法实测的情况下,按置信概率 95% 估算, $\frac{\delta_d}{d}$ 最大值估计为 $\pm 0.07\%$ 。

(3) 管径的不确定度 $\frac{\delta_D}{D}$: 其影响因素与 $\frac{\delta_d}{d}$ 相同,在按标准规定实测的情况下,按置信概率 95% 估算, $\frac{\delta_D}{D}$ 的最大值估计为 $\pm 0.4\%$,若所用的 D 为管径的公称尺寸,则 $\frac{\delta_D}{D}$ 最大值估计为 $\pm 2\%$ 。

(4) 差压测量值的不确定度 $\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p}$: 原则上它应包括差压信号管路、变送器、显示仪表所形成的差压值的不确定度,可用各环节不确定度取均方根值求得。若信号管路安装正确,可不计误差;这时按变送器和差压计的精度等级来估计差压测量误差。一般认为差压计的最大绝对误差 3 倍于差压计测量 Δp 的标准偏差。根据差压计的精确度等级估算出置信概率 95% 时的 $\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p}$ 值: $\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{\Delta p} \times (\text{差压计允许绝对误差})$ 。

在此附带说明一下,由于流量 q_m 与 Δp 的开平方成正比,当流量的量程比 $B = q_{\max}/q_{\min}$ 较大时,差压之比则更大。如 $B = 10:1$ 时,则 $\Delta p_{\max} : \Delta p_{\min} = 100:1$ 。显然,当流量较小时,对应的差压值比较小,这会使得测量的相对误差增大。为此,节流式流量计的量程比规定为 $B = (3 \sim 4):1$ 。

(5) 密度值的不确定度 $\frac{\delta_{\rho_1}}{\rho_1}$: $\frac{\delta_{\rho_1}}{\rho_1}$ 的估计比较复杂, ρ_1 是节流件上游取压孔处流体在工作状态下的密度值。由流体的工作状态(压力、温度)查表可得到密度值。表中所列密度值是其压力、温度没有误差(或误差很小)时所对应的数值,该密度值的标准偏差没有考虑温

度、压力的误差，而在实际测量中则必须考虑到它们的影响。此时密度值的标准偏差将增大，这主要是附加了温度、压力误差对 ρ_1 的影响。在各种不同的测温 and 测压精确度下，对

表 7-7 液体 σ_{ρ_1}/ρ_1 值 (含密度表误差)

测温条件 $\sigma_t/t(\%)$	σ_{ρ_1}/ρ_1 (%)
0	± 0.03
± 1	± 0.03
± 5	± 0.03

于液体的标准偏差 $\frac{\sigma_{\rho_1}}{\rho_1}$ 估计值如表 7-7 所示；对于

气体和水蒸气的标准偏差 $\frac{\sigma_{\rho_1}}{\rho_1}$ 估计值，如表 7-8、

表 7-9 所示。按置信概率 95% 估计为 $\frac{\delta_{\rho_1}}{\rho_1} = 2 \frac{\sigma_{\rho_1}}{\rho_1}$ 。

表 7-8 气体 σ_{ρ_1}/ρ_1 值 (含密度表误差)

测压条件 $\sigma_{p_1}/p_1(\%)$	测温条件 $\sigma_t/t(\%)$	σ_{ρ_1}/ρ_1 (%)
0	0	± 0.05
± 1	± 1	± 1.5
± 1	± 5	± 5.5
± 5	± 1	± 5.5

表 7-9 水蒸气 σ_{ρ_1}/ρ_1 值 (含密度表误差)

测压条件 $\sigma_{p_1}/p_1(\%)$	测温条件 $\sigma_t/t(\%)$	σ_{ρ_1}/ρ_1 (%)
0	0	± 0.02
± 1	± 1	± 0.5
± 5	± 5	± 3.0
± 1	± 5	± 1.5
± 5	± 1	± 2.5

7.5 标准节流装置的计算

标准节流装置的计算，根据实际的需要大致可分成如下两类。

(1) 已知管道内径 D 与节流件开孔直径 d 、取压方式、被测流体参数等必要条件，要求根据所测得的差压值 Δp 计算被测介质的流量。

(2) 已知管道内径 D 及其布置情况、被测介质的参数性质、流量范围，要求设计一个标准节流装置。即进行以下工作：①选择节流件形式和确定节流件开孔直径；②选择差压变送器型号和量程范围；③推荐节流件在管道的安装位置；④计算流量测量不确定度。

通常，我们将第一类命题叫做校验计算。这类命题中，节流装置已经存在，流体参数已知，目的是对测得的流量进行校验。第二类命题叫做设计计算。这类命题中，管道条件和流体参数已知，目的是设计一套节流装置，包括确定节流件孔径 d 、差压变送器量程、安装位置以及总流量测量不确定度。

7.5.1 第一类命题的计算步骤

在式 (7-8) 中，已知工作温度 t 下的管道内径 D_t 、节流件的开孔直径 d_t 、差压 Δp 、流体密度 ρ 和粘度 η 等参数，并通过计算可得到直径比 β 和可膨胀性系数 ϵ ，此时未知的是 C 和 q_m 。而流出系数 $C = f(\beta, Re_D)$ 是雷诺数 Re_D 的函数，雷诺数 Re_D 又与流量 q_m 有关，因此不能用流量公式直接计算出流量值。

由于已知雷诺数 Re_D 的计算公式为

$$Re_D = 0.354 \frac{q_m}{\eta D_t} \quad (7-26)$$

同时

$$C = f(\beta, Re_D) \quad (7-27)$$

联立式(7-8)、式(7-26)和式(7-27), 求解上述代数方程组, 就可得到要求计算的流量 q_m 值。

7.5.1.1 计算步骤

1. 辅助计算

(1) 查表得到管道材料的线膨胀系数 λ_D 、节流件材料的线膨胀系数 λ_d , 由已知的管道直径 D_{20} 和节流件开孔直径 d_{20} 计算工作状态下的管道内径 D_t 及节流件开孔直径 d_t , 即

$$D_t = D_{20}[1 + \lambda_D(t - 20)]$$

$$d_t = d_{20}[1 + \lambda_d(t - 20)]$$

(2) 计算直径比

$$\beta = \frac{d_t}{D_t}$$

(3) 根据计算得到的 β 、等熵指数 κ 、差压值 Δp 、被测流体的工作压力 p_1 , 查表或计算得到流体的可膨胀性系数 ϵ , 即

$$\epsilon = f\left(\beta, \frac{\Delta p}{p_1}, \kappa\right)$$

对于液体, $\epsilon=1$ 。

(4) 查表求得被测介质在工作状态下的密度 ρ 、粘度 η 、管道内壁的粗糙度 K/D 。

(5) 根据节流件前后阻流件的安装情况, 检查管道的直管段长度是否符合最小直管段长度的要求, 检查管道粗糙度是否符合要求。当管道直管段长度或管道粗糙度不符合计算要求时, 应停止计算。

2. 迭代计算

在计算流体流量时, 由于流量公式中的未知数不只一个, 且未知数之间有一定的关系, 所以通常采用迭代算法求解, 将流量公式即式(7-12)和式(7-26)中已知量重新组合在等号一边, 形成迭代计算中的一个不变量, 即

$$A = 0.354 \times 0.004 \frac{\epsilon d_t^2 \sqrt{\rho_1 \Delta p}}{\eta D_t \sqrt{1 - \beta^4}} \quad (7-28)$$

迭代计算中的变量

$$Re_{D_i} = AC_{i-1} \quad (7-29)$$

迭代方程为

$$C_i = f(\beta, Re_{D_i}) = f(\beta, AC_{i-1}) \quad (7-30)$$

选择迭代计算的流出系数初始值 C_0 , 由式(7-30)进行递推式的迭代计算。经过 i 次的迭代计算得到的 C_i 值如果满足迭代计算的精密度判据值, 则可认为 $C_i = C$, 由此便可计算出流量的具体数值。迭代计算结束的判别式为

$$\left| \frac{C_i - C_{i-1}}{C_i} \right| < Z_n \quad (7-31)$$

一般取精密度判据 $Z_n = 1 \times 10^{-n}$ ($n \geq 5$)。迭代计算流程如图 7-11 所示。

进行迭代计算时有时收敛的速度缓慢, C_i 的计算可按快速收敛的弦截法得到, 即

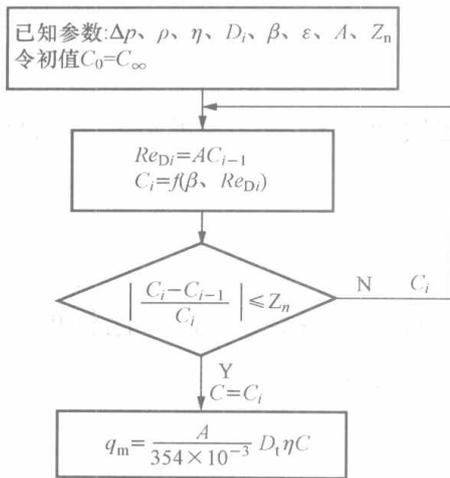


图 7-11 计算流量命题的迭代计算流程

其中

$$C_i = C_i^* - \delta_{i-1} \frac{C_{i-1} - C_{i-2}}{\delta_{i-1} - \delta_{i-2}} \quad (7-32)$$

$$\delta_i = \frac{C_i - C_{i-1}}{C_i}$$

当 $i=1$ 时, $C_1 = C_1^* = f(\beta, AC_0)$

当 $i=2$ 时, $C_2 = C_2^* = f(\beta, AC_1)$

当 $i=3$ 时, $C_3 = f(\beta, AC_2) - \delta_2 \frac{C_2 - C_1}{\delta_2 - \delta_1}$

$$\delta_2 = \frac{C_2 - C_1}{C_2}, \delta_1 = \frac{C_1 - C_0}{C_1}$$

可使用计算机编程完成上述迭代计算,且能取得较高的计算精度。

7.5.1.2 计算举例

【例 7-1】 被测流体为过热蒸汽, 已知工作压力 (表压力) $p_1 = 13.24 \text{ MPa}$, 工作温度 $t = 550^\circ\text{C}$; $D_{20} = 221 \text{ mm}$; 管道材料为 X20CrMoWV121 钢, 旧无缝钢管; 节流装置采用角接取压标准喷嘴, $d_{20} = 153.16 \text{ mm}$, 材料为 1Cr18Ni9Ti; 节流件前后的直管段符合设计要求; 差压 $\Delta p = 100.42 \text{ kPa}$ 。求差压 Δp 对应的流量 q_m 。

解 (1) 辅助计算。

工作压力 (绝对): $p_a = p_1 + p_b = 13.24 + 0.1 = 13.34 \text{ MPa}$

查表得到过热蒸汽密度 $\rho_1 = 38.371 \text{ kg/m}^3$, 过热蒸汽动力粘度 $\eta = 31.23 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 管道线膨胀系数 $\lambda_D = 12.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 节流件线膨胀系数 $\lambda_d = 18.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 过热蒸汽等熵指数 $\kappa = 1.29$ 。计算:

$$D_t = D_{20} [1 + \lambda_D (t - 20)] = 222.44 \text{ mm}$$

$$d_t = d_{20} [1 + \lambda_d (t - 20)] = 154.64 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{d_t}{D_t} = 0.6952$$

$$\tau = 1 - \frac{\Delta p}{p_1} = 0.992415$$

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{\kappa \tau^{(2/\kappa)}}{\kappa - 1} \right) \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{(2/\kappa)}} \right) \left(\frac{1 - \tau^{(\kappa-1)/\kappa}}{1 - \tau} \right) \right]^{1/2} = 0.99381$$

$$A = 0.354 \times 0.004 \frac{\varepsilon d_t^2 \sqrt{\rho_1 \Delta p}}{\eta D_t \sqrt{1 - \beta^4}}$$

$$= 0.354 \times 0.004 \times \frac{0.99381 \times 154.64^2 \times \sqrt{38.371 \times 100.42 \times 10^3}}{\sqrt{1 - 0.6952^4} \times 222.44 \times 31.23 \times 10^{-6}}$$

$$= 10858072.5$$

(2) 根据题意可知, 直管段长度和粗糙度符合要求。

(3) 迭代计算流量 q_m :

利用式 (7-21), 令式中 $Re_D = \infty$, 此时流出系数的初始值为

$$C_0 = C_\infty = 0.9900 - 0.2262 \times (0.6952)^{4.1} = 0.93905$$

则

$$Re_{D1} = AC_0 = 10\,196\,272.98$$

将 Re_{D1} 的值代入式 (7-21), 得

$$C_1 = 0.939\,042$$

同理可得

$$Re_{D2} = AC_1 = 10\,196\,186.12$$

根据 Re_{D2} , 再利用式 (7-21) 计算 C_2 , 得

$$C_2 = 0.939\,042$$

这时

$$\left| \frac{C_2 - C_1}{C_2} \right| < Z_n = 1 \times 10^{-6}$$

迭代计算结束, 所以得

$$\begin{aligned} q_m &= \frac{A}{0.354} D_t \tau C \\ &= \frac{10\,858\,072.5}{0.354} \times 222.44 \times 31.23 \times 10^{-6} \times 0.939\,042 \\ &= 200\,087 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

7.5.2 第二类命题的设计计算步骤

已知: 被测流体及其工作压力 p_1 、工作温度 t , 最大流量 $q_{m\max}$ 、常用流量 $q_{m\text{ch}}$ 、最小流量 $q_{m\min}$, 管道材料、内径 D_{20} 、新旧程度, 节流件前后管道及阻流件的情况。给出的限制条件有最小直管段 $L \leq L_x$ (实际直管段长度); 压力损失 $\delta p_{\max} \leq \delta p_y$ 。

要求完成以下工作:

- (1) 选定节流件的形式 (类型、取压方式);
- (2) 选定差压计;
- (3) 计算 C 、 ϵ 、 β 、 d_{20} ;
- (4) 计算所需最小直管段 l_0 、 l_1 、 l_2 , 并验算 $L \leq L_x (L = l_0 + l_1 + l_2)$;
- (5) 计算最大压损 δp_{\max} , 并验算 $\delta p_{\max} \leq \delta p_y$;
- (6) 计算所设计的节流装置的测量不确定度。

对于该命题, 根据已知条件完成设计计算, 结果不是唯一的。因为在被测流体的管道上安装的节流件, 其 β 值是可大可小的。由于在已知条件中用户提出了限制要求 ($L \leq L_x$, $\delta p_{\max} \leq \delta p_y$), 所以设计结果是在满足限制要求下的多种设计结果。

该命题的设计计算是在一个确定的流量下进行的。考虑到差压流量计在分度时, 为提高测量精确度, 使用的 C 和 ϵ 值是常用流量 $q_{m\text{ch}}$ 对应下的数值, 所以设计计算选定在常用流量 $q_{m\text{ch}}$ 下进行。

设计步骤如下:

- (1) 选定节流件的型式。如果用户提出的压力损失限值比较大或不要求, 可以选定标准孔板。如用户提出的压损限值较小, 可以选定标准喷嘴或文丘里管等。对于取压方式, 根据标准中提供的方式确定。目前在火力发电厂常用角接取压标准孔板测量锅炉给水流量, 用角接取压标准喷嘴 (ISA1932) 或径距取压长径喷嘴测量过热蒸汽流量。

对于标准孔板或喷嘴所选用的材料根据适用的流体及工作条件确定。在火电厂, 给水流

量及过热蒸汽流量测量常用的材料为不锈钢。

(2) 选定差压计。包括选定差压计的型号；确定差压计的满刻度流量 $q_{m\max}^*$ 以及对应的最大差压 Δp_{\max} 。

1) 差压计型号的选定。主要取决于现有的差压计产品。目前我国差压计的系列产品主要有：CW 系列双波纹管差压计、CM 系列、CPC 系列膜片差压计、1151、3051 电容式差压变送器等。选用差压变送器作为 $\Delta p \sim I$ 的转换时要注意与之配套的显示仪表（动圈表、自动电位差计、数字仪表等）。如果用户要求还能显示总量值，则要选择具有积算功能的差压计。

2) 差压计满刻度流量值 $q_{m\max}^*$ 的确定。

$q_{m\max}^*$ 的确定是根据用户给出的最大流量 $q_{m\max}$ 向上圆整到规定系列值中的一个邻近值。规定的流量计满刻度系列值为

$$q_k = a \times 10^n$$

其中 $a=1, 1.2, 1.6, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8$; $n=0$ 或任意正整数或负整数。

例如， $q_{m\max} = 230\text{t/h}$ 圆整到 $q_{m\max}^* = 250\text{t/h}$ 。

3) 对应的 Δp_{\max} 的确定。 Δp_{\max} 的确定是节流装置设计计算中的关键步骤。它不完全依靠计算来确定，而是在考虑一些相互矛盾的因素后选择一个最佳的 Δp_{\max} 。

定性地讲，选择较大的差压上限，至少有以下几个好处：

①需要的测量直管段长度较短；②测量精度较高；③适用的流量范围较宽。因为较大的差压能使 β 值较小，从而使推荐使用的最小雷诺数较小，而实际使用的最小雷诺数大于推荐使用的最小雷诺数的可能性大，测量范围较宽。

但是，较大的差压会引起较大的压力损失。所以可以从限制条件出发选择最大差压。

(a) 满足 $L \leq L_x$ 时的 Δp_{\max} 取值范围的确定。由 $l_0 = f(\beta=0.7, \text{上游第二阻流件形式})$ 确定出 l_0 值。取 $l_2 = 5D$ ，则 $l_1 = L_x - l_0 - l_2$ ，由 $l_1 = f(\beta, \text{上游第一阻流件形式})$ 确定出 β^* 。 β^* 是最小直管段 $L=L_x$ 时对应的直径比。

根据最小直管段长度 L 与 β 的关系可知，要满足 $L \leq L_x$ ，则必须使得设计确定的 β 满足 $\beta \leq \beta^*$ 。通过以下计算可确定 Δp_{\max} 的取值范围，即

$$C = f(\beta^*, Re_{Dch})$$

$$\Delta p_1 = \frac{q_{m\max}^{*2}}{2\rho_1 \left(\frac{\pi}{4} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^{*4}}} \beta^{*2} D_t^2 \right)^2} \quad (\text{令 } \epsilon = 1) \quad (7-33)$$

$$\text{而} \quad \Delta p_{\max} = \frac{q_{m\max}^{*2}}{2\rho_1 \left(\frac{\pi}{4} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \beta^2 D_t^2 \right)^2} \quad (\text{令 } \epsilon = 1) \quad (7-34)$$

显然应有

$$\Delta p_1 \leq \Delta p_{\max}$$

(b) 满足 $\delta_{p_{\max}} \leq \delta_{p_y}$ 时 Δp_{\max} 取值范围的确定。

确定差压上限的计算式为

标准孔板

$$\Delta p_{\max} = (2 \sim 2.5) \delta_{p_y}$$

标准喷嘴

$$\Delta p_{\max} = (3 \sim 3.5)\delta p_y$$

(c) 满足最小雷诺数推荐值 $Re_{D_{\min}}^*$ 时的 Δp_{\max} 取值范围的确定。在标准中给出了标准孔板和标准喷嘴的最小雷诺数推荐值。设计计算应满足 $Re_{D_{\min}}^* < Re_{D_{\min}}$ 以保证流出系数 C 值变化的要求。

令 $Re_{D_{\min}} = Re_{D_{\min}}^*(\beta^*)$, 利用表 (7-5) 或表 (7-6) 估算相应的 β^* 值。得到的 $\beta^* > 0.5$, 可取 $\beta^* = 0.5$; 若 $\beta < 0.5$, 可取 $\beta^* = \beta$, 则有

$$C = f(\beta^*, Re_{D_{ch}})$$

$$\Delta p_2 = \frac{q_{m\max}^{*2}}{2\rho_1 \left(\frac{\pi}{4} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^{*4}}} \beta^{*2} D_t^2 \right)^2} \quad (\text{令 } \epsilon = 1) \quad (7-35)$$

而

$$\Delta p_{\max} = \frac{q_{m\max}^{*2}}{2\rho_1 \left(\frac{\pi}{4} \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \beta^2 D_t^2 \right)^2} \quad (\text{令 } \epsilon = 1) \quad (7-36)$$

则应有

$$\Delta p_2 \leq \Delta p_{\max}$$

在火电厂中, 给水流量 $q_{m\min}$ 、过热蒸汽流量 $q_{m\min}$ 对应的 $Re_{D_{\min}}$ 值一般都较大, 基本能满足 $Re_{D_{\min}}^* < Re_{D_{\min}}$ 的要求。在确定 Δp_{\max} 时, 一般不考虑此项限制, 只需在设计计算完毕后进行适用性的检验即可。

(d) 可压缩流体满足 $\frac{\Delta p}{p_1} < 0.25$ (即 $\frac{p_2}{p_1} > 0.75$) 时的 Δp_{\max} 取值范围的确定。设 $\Delta p_3 = 0.25p_1$, 则应有

$$\Delta p_{\max} \leq \Delta p_3$$

对于此项限制, 在确定 Δp_{\max} 时, 可暂不考虑, 只是在确定 Δp_{\max} 后再进行检验是否满足上述要求即可。

(e) 不可压缩流体满足流体流经节流件不发生汽化 (不发生相变) 要求的 Δp_{\max} 取值范围的确定。此时应有 $p_2 \leq p_s$ (p_s 为当时温度下的饱和压力), 也即 $(p_1 - \Delta p) > p_s$ 或 $(p_1 - p_s) > \Delta p$ 。

设

$$\Delta p_4 = p_1 - (1.2 \sim 1.3)p_s$$

则应有

$$\Delta p_{\max} \leq \Delta p_4$$

在火电厂给水流量的测量中, 远远不会发生流经节流件时水发生汽化的情况。因此在电厂给水流量测量时, 确定 Δp_{\max} 不由此考虑。

在确定 Δp_{\max} 时, 如果出现矛盾的情况, 则要适当放宽已知条件中的限制要求。最后确定 Δp_{\max} 的值时, 要考虑选择差压值满量程规定的系列值, 这些系列值包括: $(1, 1.6, 2.5, 4, 6) \times 10^n$, 其中 n 为 0 或正、负整数。

选择连续可调量程的差压计更容易满足限制要求。

确定 Δp_{\max} 值后, 常用流量对应的差压 Δp_{ch} 应为

$$\Delta p_{ch} = \left(\frac{q_{mch}}{q_{m\max}^*} \right)^2 \Delta p_{\max} \quad (7-37)$$

(3) 迭代计算。计算 C 、 ϵ 、 β 、 d_{20} 时, 也需要利用相关的公式进行迭代计算。计算是在常用流量 q_{mch} 和差压 Δp_{ch} 下进行, 涉及的公式有

$$q_{mch} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d_t^2 \sqrt{2\rho_1 \Delta p_{ch}} \quad (7-38)$$

$$C = f(\beta, Re_{Dch}) \quad (7-39)$$

$$\epsilon = f\left(\beta, \frac{\Delta p_{ch}}{p_1}, \kappa\right) \quad (7-40)$$

1) 辅助计算:

$$p_a = p_1 + p_b$$

查出流体密度 $\rho_1(p_a, t)$ 、管道线膨胀系数 λ_D 、管道粗糙度 K 、节流件材料线膨胀系数 λ_d 、流体等熵指数 κ (过热蒸汽 $\kappa=1.30$; 空气 $\kappa=1.40$)、流体的动力粘度 $\eta(p_a, t)$, 并计算 $\frac{\Delta p_{ch}}{p_1}$ 、 $\frac{K}{D_t}$ 值及以下量

$$D_t = D_{20} [1 + \lambda_D (t - 20)]$$

$$Re_{Dch} = \frac{4}{\pi} \frac{q_{mch}}{\eta D_t}$$

$$Re_{Dmin} = \frac{4}{\pi} \frac{q_{mmin}}{\eta D_t}$$

2) 迭代计算 C 、 ϵ 、 β 、 d_{20} 。将式 (7-8) 中的所有已知量放在等式的一边作为不变量, 记为 A , 即

$$A = \frac{q_m}{\frac{\pi}{4} D_t^2 \sqrt{2\rho_1 \Delta p_{ch}}} \quad (7-41)$$

将未知量放在等式的另一边, 所以迭代公式为

$$A = \frac{C\epsilon\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (7-42)$$

设弦截法计算中的变量为

$$X = \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} = A/(C\epsilon) \quad (7-43)$$

则在假设第一个 C_0 和 ϵ_0 后, 就可根据式 (7-43) 和流出系数 C 及可膨胀系数 ϵ 的计算公式进行迭代计算。迭代初值可假设为 $\epsilon_0=1$, C_0 可根据不同的节流件假设:

对于标准孔板, 可设 $C_0=0.5959+0.0312\beta^{2.1}-0.1840\beta^8$;

对于标准喷嘴, 可设 $C_0=0.9900-0.2262\beta^{4.1}$ 。

迭代的具体步骤如下:

① 根据节流件的形式, 假设 C_0 和 ϵ_0 。对于液体, 令 $\epsilon=1$ 。

② 将 C_0 和 ϵ_0 代入式 (7-43) 计算变量 $X_1=A/(C_0\epsilon_0)$ 。

③ 根据 X_1 计算直径比 β_1 , 即

$$\beta_1 = \left(\frac{X^2}{1+X^2} \right)^{1/4}$$

得到 β_1 值后, 计算流出系数 C_1 和可膨胀系数 ϵ_1 。差值 $\delta_1=A-X_1C_1\epsilon_1$ 。

④将 C_1 和 ϵ_1 代入式 (7-43) 可得变量 $X_2 = A / (C_1 \epsilon_1)$, 根据第③步可得 β_2 、流出系数 C_2 、可膨胀系数 ϵ_2 和差值 δ_2 。

⑤将 X_1 、 X_2 、 δ_1 和 δ_2 代入弦截法计算公式

$$X_n = X_{n-1} - \delta_{n-1} \frac{X_{n-1} - X_{n-2}}{\delta_{n-1} - \delta_{n-2}}$$

得 X_3 , 根据第③步可得 β_3 、 C_3 、 ϵ_3 和差值 δ_3 。

⑥如果 $\left| \frac{\delta_n}{A} \right| \leq e$, $e = 1 \times 10^{-n}$, 一般 $n \geq 5$, 迭代计算结束。根据 X_n 就可以求得 β_n , 从而求得节流件开孔直径 d_t 。

(4) 计算节流件的安装位置和最大压损 $\delta_{p_{\max}}$ 。根据节流装置直管段长度要求和实际的管路布置系统, 可得节流件的最佳安装位置, 并验算 $L \leq L_x$ ($L = l_0 + l_1 + l_2$); 计算最大压损 $\delta_{p_{\max}}$, 并验算 $\delta_{p_{\max}} \leq \delta_{p_y}$ 。

(5) 计算所设计的节流装置的测量不确定度。计算流程如图 7-12 所示。

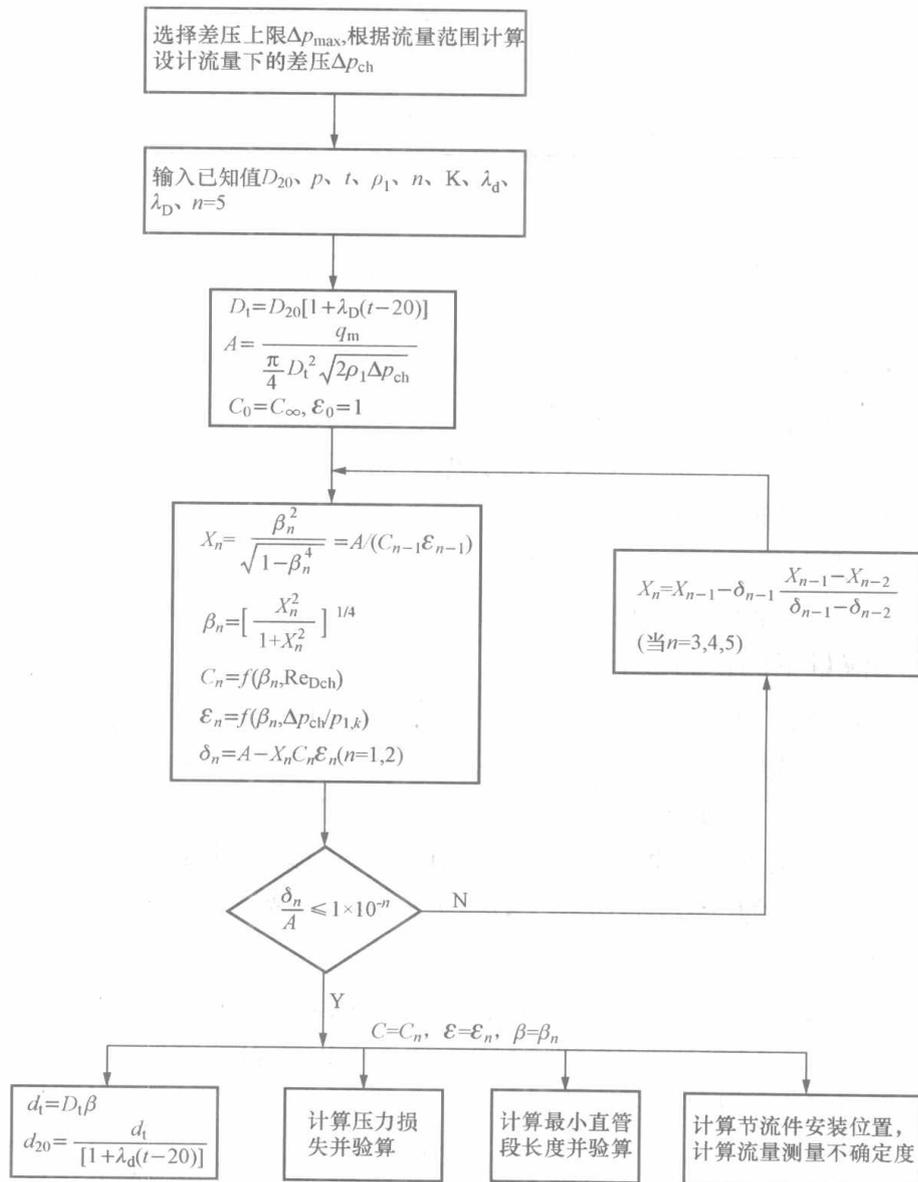


图 7-12 标准节流装置设计计算流程图

【例 7-2】设计任务书如表 7-10 所示。

表 7-10 设计任务书

序号	项 目	符号	单位	数 值
1	被测介质名称			过热蒸汽
2	流量测量范围: 正常	q_{mch}	t/h	200
	最大	q_{mmax}	t/h	250
	最小	q_{mmin}	t/h	100
3	介质绝对压力	p_a	MPa	13.34
4	工作温度	t	°C	550
5	管道内径 (20°C 实测值)	D_{20}	mm	221
6	管道材料			X20CrMoWV121 无缝管
7	正常流量下允许的压力损失	δp_y	kPa	59
8	管路系统布置			

要求设计一套标准节流装置。

解 考虑到用户对压力损失的要求,选取的节流件为标准喷嘴,采用角接取压,材料为 1Cr18Ni9Ti。

(1) 求工作状态下各介质参数。由介质的工作温度和工作压力查附录 II 中的相应表格得工作状态下过热蒸汽的粘度 $\eta = 31.83 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 密度 $\rho_1 = 38.3475 \text{ kg/m}^3$, 管道的线膨胀系数 $\lambda_D = 12.3 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm} \cdot \text{°C})$, 取过热蒸汽的等熵指数 $\kappa = 1.3$ 。

(2) 求工作状态下管道直径

$$\begin{aligned} D_t &= D_{20} [1 + \lambda_D (t - 20)] \\ &= 221 [1 + 12.3 \times 10^{-6} (550 - 20)] = 222.44 \text{ mm} \end{aligned}$$

(3) 计算常用流量下的雷诺数 Re_D

$$Re_D = 0.354 q_m / D_t \eta = 0.354 \times 200\,000 / (222.44 \times 31.83 \times 10^{-6}) = 10^7$$

(4) 选取差压计。从用户对压力损失的要求出发,取

$$\Delta p_{\max} = 3 \delta p_y = 3 \times 59 = 177 \text{ kPa}$$

选取最靠近的差压系列值,取 $\Delta p_{\max} = 160 \text{ kPa}$ 。参考附录表 II, 可选用 1151DP 电容式差压变送器, 其量程范围为 $(3175 \sim 19\,050) \times 9.81 \text{ Pa}$, 耐静压为 14MPa。变送器差压量程调整在 $0 \sim 160 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

本例中流体的最大流量为 250t/h, 所以流量计流量刻度上限 $q_{m\max}^*$ 定为 250t/h。

验算 $\Delta p_{\max} / p_1 = 160 \times 10^3 / 13.34 \times 10^6 = 0.012 < 0.25$, 符合规定。

(5) 计算常用流量下的差压值

$$\Delta p_{ch} = \left(\frac{q_{mch}}{q_{m\max}^*} \right)^2 \Delta p_{\max} = \left(\frac{200}{250} \right)^2 \times 160 = 102.4 \text{ kPa}$$

(6) 迭代计算 β 值和 d 值。

1) 求不变量 A , 得

$$A = \frac{q_m}{0.004 D_t^2 \sqrt{\rho_1 \Delta p}} = \frac{200\,000}{0.004 \times 222.44^2 \times \sqrt{38.3475 \times 102\,400}} = 0.509\,947\,8$$

2) 设 $C_0 = 1$, $\epsilon_0 = 1$ 。

3) 据公式

$$X_n = A / (C_{n-1} \epsilon_{n-1})$$

$$\beta_n = \left(\frac{X_n^2}{1 + X_n^2} \right)^{1/4}$$

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\kappa \tau^{2/\kappa}}{\kappa - 1} \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \tau^{2/\kappa}} \frac{1 - \tau^{(\kappa-1)/\kappa}}{1 - \tau}}$$

$$C = 0.990\,0 - 0.226\,2\beta^{4.1} - (0.001\,75\beta^2 - 0.003\,3\beta^{4.15})(10^6/Re_D)^{1.15}$$

$$\delta_n = A - X_n C_n \epsilon_n$$

进行迭代计算, 从 $n=3$ 起, X_n 用快速弦截法公式

$$X_n = X_{n-1} - \delta_{n-1} \frac{X_{n-1} - X_{n-2}}{\delta_{n-1} - \delta_{n-2}}$$

进行迭代计算, 精度判别公式为 $E_n = \delta_n / A$, 假设判别条件为 $|E_n| \leq 5 \times 10^{-10}$ ($n=1, 2, \dots$), 则 X_n 、 β_n 、 C_n 、 ϵ_n 、 δ_n 、 E_n 的计算结果列于表 7-11。

当 $n=4$ 时, 求得的 E 小于预定精度, 因此得

$$\beta = \beta_4 = 0.692\,213\,1$$

$$C = C_4 = 0.939\,933\,2$$

表 7-11

迭代计算中间结果

n	1	2	3	4
X	0.509 947 8	0.542 795 5	0.545 886 9	0.545 808 0
β	0.674 009 7	0.692 202 7	0.692 202 7	0.692 213 1
C	0.945 112 2	0.939 936 2	0.939 936 2	0.939 933 2
ϵ	0.994 545 1	0.993 843 2	0.993 823 5	0.993 823 4
δ	$3.085\,992 \times 10^{-2}$	$2.654\,433 \times 10^{-3}$	$1.806\,021 \times 10^{-5}$	0
E	$6.051\,584 \times 10^{-2}$	$5.205\,304 \times 10^{-3}$	$3.541\,580 \times 10^{-5}$	0

4) 求 d_t , 得

$$d_t = D_t \beta = 222.44 \times 0.692\,213\,1 = 153.975\,882\text{mm}$$

(7) 验算压力损失。根据式 (7-15) 可得正常流量下的压力损失为

$$\begin{aligned} \delta p_{\text{ch}} &= \frac{\sqrt{1 - \beta^4} - C\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4} + C\beta^2} \Delta p_{\text{ch}} = \frac{\sqrt{1 - (0.692\,213\,1)^4} - 0.939\,933\,2 \times (0.692\,213\,1)^2}{\sqrt{1 - (0.692\,213\,1)^4} + 0.939\,933\,2 \times (0.692\,213\,1)^2} \Delta p_{\text{ch}} \\ &= 0.323 \Delta p_{\text{ch}} = 0.323 \times 102\,400 = 33.1 \times 10^3 \text{Pa} < \delta p_y \end{aligned}$$

压力损失验算合格。

(8) 验算流量

$$q_m = 0.004 \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon d_t^2 \sqrt{\Delta p \rho_1}$$

$$= \frac{0.004 \times 0.939\ 93}{\sqrt{1 - 0.692\ 21^4}} \times 0.993\ 82 \times 153.975\ 9^2 \sqrt{102\ 400 \times 38.347\ 5} \text{ kg/h}$$

$$= 199\ 998.19 \text{ kg/h}$$

(9) 确定 d_{20} 。喷嘴材料为 1Cr18Ni9Ti, 查表得 $\lambda_d = 18.2 \times 10^{-6}$, 则

$$d_{20} = \frac{d_t}{[1 + \lambda_d(t - 20)]} = \frac{153.975\ 882}{[1 + 18.2 \times 10^{-6}(550 - 20)]} \text{ mm} = 152.504\ 8 \text{ mm}$$

(10) 确定安装位置。根据 $\beta = 0.7$ 和管路系统, 查表 7-2 可得

$$l_0 = 10D = 2.224 \text{ m}$$

$$l_1 = 36D = 8.008 \text{ m}$$

$$l_2 = 7D = 1.557 \text{ m}$$

根据实际管路系统情况, 可将节流装置安装在表 7-2 所示任务书中的图示位置上。但节流件前直管段长度 l_1 不满足长度要求, 在流出系数不确定度上应算术相加 $\pm 0.5\%$ 的附加不确定度。

(11) 计算流量测量总不确定度。对于标准喷板, 由于 $\beta > 0.6$, 则

$$\delta_C/C = \pm (2\beta - 0.4)\% = \pm (2 \times 0.692\ 21 - 0.4)\% = \pm 0.984\ 42\%$$

$$\delta_\epsilon/\epsilon = \pm 2(\Delta p/p_1)\% = \pm 2 \times 102\ 400/(13.24 \times 10^6) = \pm 0.015\ 468\%$$

设 $\delta_D/D = \pm 0.1\%$, $\delta_d/d = \pm 0.05\%$, 选定的差压变送器为 0.2 级, 则

$$\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{\Delta p} \times (\text{差压计允许绝对误差}) = \frac{2}{3} \times \frac{1}{102\ 400} \times 0.2\% \times 160\ 000 = 0.21\%$$

假设温度, 压力的测量不确定度为 $\pm 1\%$, 则 $\delta_\rho/\rho = \pm 1\%$ 。

所以, 总不确定度为

$$\frac{\delta_{q_m}}{q_m} = \pm \left[\left(\frac{\delta_C}{C} \right)^2 + \left(\frac{\delta_\epsilon}{\epsilon} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left(\frac{\delta_d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta_\rho}{\rho} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$= \pm \{ (0.984\ 42 + 0.5)^2 + 0.015\ 468^2 + [2 \times 0.692\ 21^4 / (1 - 0.692\ 21^4)]^2$$

$$\times 0.1^2 + [2 / (1 - 0.692\ 21^4)]^2 \times 0.05^2 + 1/4(0.21)^2 + 1/4\}^{1/2} \%$$

$$= \pm 1.576\ 4\%$$

7.6 流量测量的温度、压力补偿

标准节流装置设计时是在一个确定的工况 (常用流量 q_{mch} 、工作压力 p_1 、工作温度 t) 下进行的, 这个工况称为设计工况。在设计时, 把流量公式中的流出系数 C , 可膨胀性系数 ϵ 和流体密度 ρ 均作为不变常数来考虑, 则有被测流量 q 正比于 $\sqrt{\Delta p}$ 。若使用流量显示仪表直接显示瞬时流量, 则其刻度是按设计工况下的参数进行的。但在实际流量测量中, 通过流量计的流体流量、成分、压力、温度等由于多种原因常会有所波动, 不能完全符合标准节流装置的设计参数。这时, 两种状态下相同流量通过时, 示值会不相同; 或者说相同的示值, 反映的流量却不一样。这样就会引起较大的测量误差, 所以有必要对节流式流量计进行温度和压力的补偿。

当流体的温度、压力和流量偏离了设计工况时, 流量公式中的流出系数 C 、膨胀系数 ϵ 、直径比 β 、管径 D_t 、流体密度 ρ_1 等都发生了变化 (相对设计给出的值)。在这些影响中, 流

体密度的变化影响最大。如果仅仅考虑对温度、压力而引起的流体密度变化的影响进行补偿,称为流量测量的压力、温度校正。如果全面考虑工况的影响,对 C 、 ϵ 、 β 、 D_t 、 d_t 、 ρ_1 等参数进行实时计算,则称为流量测量的全补偿。

7.6.1 流量示值的压力、温度修正

设设计工况时流体密度为 ρ_s , 实际工况下的流体密度为 ρ_y , 根据流量公式和仪表分度状况有

$$q_{ms} = K\sqrt{\rho_s \Delta p} \quad (7-44)$$

$$q_{my} = K\sqrt{\rho_y \Delta p} \quad (7-45)$$

由式 (7-44) 和式 (7-45) 可得

$$q_{my} = \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_s}} q_{ms} = b_p q_{ms} \quad (7-46)$$

式中 q_{ms} ——流量仪表显示值;

q_{my} ——被测流量值;

K ——常数, $K=0.004 \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \epsilon \beta^2 D_t^2$;

b_p ——校正系数, $b_p = \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_s}}$ 。

流体的密度受压力、温度影响比较大,特别是对可压缩流体影响更大。在火力发电厂中,蒸汽流量因压力、温度变化可使其密度变化很大,以致仪表的示值严重偏离被测实际值。

在利用式 (7-46) 进行校正计算时, ρ_y 值是根据实际工况下的压力、温度查表或用经验公式计算得到的。

【例 7-3】 某节流式流量计,设计时过热蒸汽温度为 500°C 、蒸汽压力为 13.729MPa ,实际运行中过热蒸汽温度为 480°C 、蒸汽压力为 14.219MPa 。当仪表指示流量为 220t/h 时管道内实际蒸汽流量为多少?

解 查附表 II, 得到

$$p_s = 13.729\text{MPa}, t_s = 500^\circ\text{C} \text{ 时}, \rho_s = 43.44\text{kg/m}^3$$

$$p_y = 14.219\text{MPa}, t_y = 480^\circ\text{C} \text{ 时}, \rho_y = 47.21\text{kg/m}^3$$

由式 (7-46) 可得

$$q_{my} = \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_s}} q_{ms} = \sqrt{\frac{47.21}{43.44}} \times 220 = 229.34 \quad (\text{t/h})$$

由上面的计算结果可以看出,仪表指示流量为 220t/h 时,实际蒸汽流量为 229.34t/h ,仪表指示流量偏低了 9.34t/h ,相对误差达 -4.0% 。

7.6.2 在线运行中流体参数的补偿

若设计时的参数值仍用脚码 s 表示,运行中某时刻的参数值用脚码 y 表示,则节流装置输出差压为 Δp 时,两种情况下的流量分别为

$$q_{ms} = \frac{C_s}{\sqrt{1-\beta_s^4}} \epsilon_s \frac{\pi}{4} d_s^2 \sqrt{2\rho_{1s} \Delta p} \quad (7-47)$$

$$q_{my} = \frac{C_y}{\sqrt{1-\beta_y^4}} \epsilon_y \frac{\pi}{4} d_y^2 \sqrt{2\rho_{1y} \Delta p} \quad (7-48)$$

这时有

$$q_{my} = \frac{\sqrt{1-\beta_s^4} C_y \epsilon_y d_y^2}{\sqrt{1-\beta_y^4} C_s \epsilon_s d_s^2} \sqrt{\frac{\rho_{1y}}{\rho_{1s}}} q_{ms} \quad (7-49)$$

直接由流体的温度和压力的变化利用式 (7-49) 进行校正是困难的, 可以在变量 ρ_1 、 ϵ 、 β 、 d_1 和 C 中找出主要变量来进行信号的自动补偿。工程上, 对流体密度 ρ_1 和可压缩性系数 ϵ 的补偿是不可忽视的。

目前实现流量测量自动补偿的仪表称为智能化流量计, 组成框图如图 7-13 所示。所使用的压力、温度、差压 (流量) 信号通过变送器输出标准化的电流信号而进入流量仪表, 在仪表内用软件来实现一些参数的计算。智能化流量计不但可以实现测量的自动补偿, 同时可以方便地实现总量计算、报警、模拟量或数字量输出。

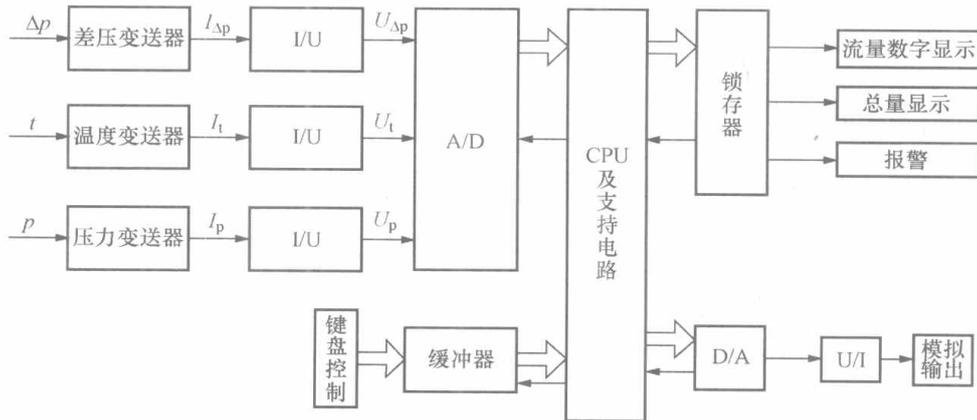


图 7-13 智能化流量计硬件组成框图

7.7 非标准节流装置

从前面的介绍可知, 只有在符合标准要求的条件下, 才能使用标准节流装置正确地测量流量。但在工程实际应用中, 有时并不能满足这些要求。例如, 实际使用的雷诺数 Re_D 远小于标准推荐使用的最小雷诺数 Re_{Dmin} ; 被测介质是含有固体微粒或有气泡析出的液体, 或是含有固体微粒或液滴的气体, 而不满足“单相流”的要求等。在这些情况下, 非标准节流装置就显示出它的优越性。它们有的适用于低雷诺数的流量测量, 有的适用于脏污介质的流量测量。下面介绍两种常用的非标准节流装置。

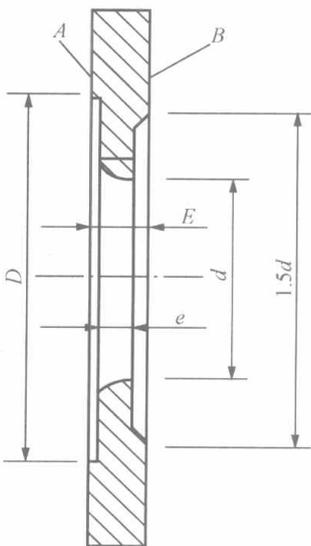


图 7-14 1/4 圆孔板

7.7.1 1/4 圆孔板

1/4 圆孔板是一种使用广泛的非标准节流件, 主要用于低雷诺数的流体流量测量。它的取压方式有角接取压和法兰取压两种, 当 $D < 40\text{mm}$ 时只能采用角接取压。其形状与标准孔板相似, 只是其节流孔的入口边缘是半径为 r 的 1/4 圆弧, 如图 7-14 所示。入口边缘半径 r 与孔径 d 之比 r/d 与直径比 β 之间的关系如表 7-12 所示。

表 7-12

1/4 圆孔板的 r/d 与 β 的关系

β	r/d	β	r/d	β	r/d
0.25	0.101 2	0.37	0.110 0	0.49	0.131 8
0.26	0.101 5	0.38	0.111 3	0.50	0.135 0
0.27	0.102 2	0.39	0.112 5	0.51	0.138 8
0.28	0.102 9	0.40	0.114 0	0.52	0.142 9
0.29	0.103 4	0.41	0.115 6	0.53	0.147 4
0.30	0.104 0	0.42	0.117 1	0.54	0.152 2
0.31	0.104 8	0.43	0.118 8	0.55	0.158 0
0.32	0.105 6	0.44	0.120 5	0.56	0.164 6
0.33	0.106 4	0.45	0.122 2	0.57	0.171 9
0.34	0.107 1	0.46	0.124 3	0.58	0.179 3
0.35	0.108 0	0.47	0.126 6	0.59	0.191 5
0.36	0.108 9	0.48	0.129 0	0.60	0.208 3

1/4 圆孔板的使用范围为

$$d \geq 15\text{mm}; D \geq 25\text{mm}; 0.245 \leq \beta \leq 0.6; 500 \leq Re_D \leq 2.5 \times 10^5$$

最大雷诺数 $Re_{D_{\max}}$ 与截面比 $m (\beta^2)$ 的关系如表 7-13 所示。

在使用范围内的流出系数为

$$C = 0.738 23 + 0.330 9\beta - 1.161 5\beta^2 + 1.508 4\beta^3$$

可膨胀系数 ϵ 的计算公式同标准喷嘴。系数百分率不确定度为

当 $\beta \geq 0.316$ 时, $\delta_C/C = \pm 2\%$;

当 $\beta < 0.316$ 时, $\delta_C/C = \pm 2.5\%$;

$\delta_\epsilon/\epsilon = \pm 33(1-\epsilon)\%$ 。

表 7-13

1/4 圆孔板适用的最大雷诺数

m	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.394
$Re_{D_{\max}}$	6×10^4	7×10^4	10^5	1.4×10^4	2×10^4	2.2×10^4	2.4×10^4	2.5×10^5		

7.7.2 偏心孔板

偏心孔板主要用于脏污介质和有气泡析出或含有固体微粒的液体流量测量,也可用于含有固体微粒或液滴的气体流量测量。偏心孔板形状与标准孔板相似,只是将节流孔的中心偏向管道的一边,直至节流孔与管道内圆相切,如图 7-15 所示。取压方式可以采用角接取压(只能用单独钻孔取压)、法兰取压等,取压口应设置在远离节流孔的一侧。

(1) 角接取压。角接取压时偏心孔板的使用范围为

$$d \geq 50\text{mm}; 100\text{mm} \leq D \leq 1000\text{mm};$$

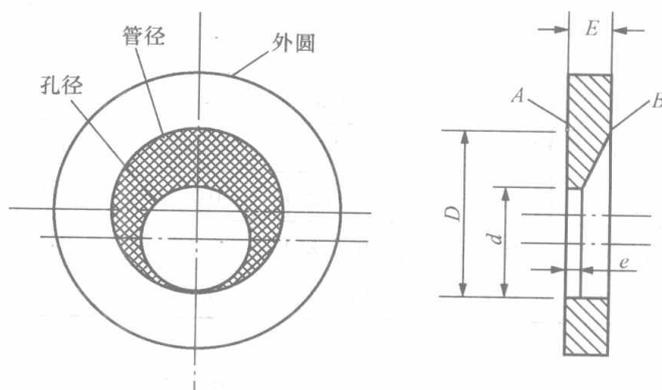


图 7-15 偏心孔板

$0.46 \leq \beta \leq 0.84$; $2 \times 10^5 \beta \leq Re_D \leq 10^6$ 。

流出系数的计算式为

$$C = 0.93548 - 1.68892\beta + 3.0428\beta^2 - 1.79893\beta^3$$

如果使用的是粗糙管, 可用粗糙管修正系数 F_K 乘以流出系数 C 来修正。

$$F_K = 1.0319 - (0.017849 + 0.012566\beta^2) \lg_{10}(D/K) + 0.093895\beta^2$$

可膨胀系数 ϵ 的计算公式同标准孔板。系数百分率不确定度为

当 $0.46 \leq \beta \leq 0.75$ 时, $\delta_C/C = \pm 1\%$;

当 $0.76 \leq \beta \leq 0.84$ 时, $\delta_C/C = \pm 2\%$;

$\delta_\epsilon/\epsilon = \pm 33(1-\epsilon)\%$ 。

(2) 法兰取压。法兰取压时偏心孔板的使用范围为

$$0.30 \leq \beta \leq 0.80; 10^4 \leq Re_D \leq 10^6; D \geq 100\text{mm}$$

流出系数的计算式为

$$C = A_1 + \frac{A_2}{\sqrt{Re_D}}$$

其中

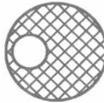
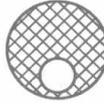
$$A_1 = C_{\max} - 1.11111(C_{\max} - C_{\min}); A_2 = 1.11111(C_{\max} - C_{\min})。$$

C_{\max} 和 C_{\min} 的值如表 7-14 所示。系数百分率不确定度为

当 $D=100\text{mm}$ 时, $\delta_C/C = \pm 1.9\%$;

当 $D>100\text{mm}$ 时, $\delta_C/C = \pm 1.4\%$ 。

表 7-14 法兰取压偏心孔板的 C_{\max} 和 C_{\min} 值

β	取压口 位置如图  取压口 位置如图 							
	$D=100\text{mm}$		$D=150\sim 350\text{mm}$		$D=100\text{mm}$		$D=150\sim 350\text{mm}$	
	C_{\max}	C_{\min}	C_{\max}	C_{\min}	C_{\max}	C_{\min}	C_{\max}	C_{\min}
0.30	0.6175	0.6085	0.6240	0.6140	0.6165	0.6065	0.6210	0.6140
0.35	0.6230	0.6135	0.6270	0.6170	0.6225	0.6130	0.6258	0.6180
0.40	0.6275	0.6175	0.6290	0.6195	0.6278	0.6175	0.6300	0.6230
0.45	0.6325	0.6220	0.6325	0.6225	0.6335	0.6215	0.6348	0.6270
0.50	0.6360	0.6250	0.6370	0.6258	0.6380	0.6240	0.6395	0.6320
0.55	0.6400	0.6275	0.6395	0.6275	0.6440	0.6260	0.6450	0.6355
0.60	0.6440	0.6285	0.6423	0.6280	0.6480	0.6275	0.6510	0.6410
0.65	0.6485	0.6310	0.6428	0.6275	0.6523	0.6285	0.6590	0.6440
0.70	0.6535	0.6320	0.6430	0.6248	0.6560	0.6295	0.6650	0.6445
0.75	0.6585	0.6320	0.6440	0.6200	0.6580	0.6300	0.6680	0.6408
0.80	0.6660	0.6315	0.6450	0.6160	0.6610	0.6300	0.6700	0.6320

测量含气液体时, 节流孔应向管道上方偏心; 测量含固体微粒的液体和气体流量时, 节流孔应向管道下方偏心。测量管道应水平安装。

这两种非标准节流件的流量公式、标准误差计算公式和设计计算方法与标准节流件相同。

7.8 节流式流量计信号管路的安装

采用节流式流量计进行流量测量时,按规定的各项技术要求,正确安装仪表,对于保证整个流量测量系统的测量误差在允许的 $\pm(1\% \sim 2\%)$ 范围内也是非常重要的。一般要求:

(1) 安装时必须保证节流件开孔与管道同心,节流件端面与管道轴线垂直。节流件上下游侧必须有一定长度的直管道。

(2) 连接节流装置与差压计的导压管的长度,应尽量使差压仪表靠近节流装置,一般为 $10m \times 2$ 。导压管主要采用无缝钢管制成,外径 $\phi 14mm$,壁厚 $2 \sim 4mm$ 。

(3) 差压仪表与节流装置的相对位置根据被测介质的种类而定。

1) 测量液体和蒸汽流量时,应优先选用差压计低于节流装置的敷设方式,这样可使测量管道内不易有气泡存在,也可节省导压管最高点的排气阀,如图7-16(a)和图7-18(a)所示。

2) 测量气体时,应优先选用差压仪表高于节流装置的敷设方式,以利于管道内冷凝液回流到工艺管道内,如图7-17(b)所示。

3) 当导压管水平安装时,导压管必须保持一定的坡度,在一般情况下,应保持 $1:10 \sim 1:20$,测量气体时导压管应从检测点向上倾斜;测量液体和蒸汽时,导压管应从检测点向下倾斜。

(4) 测量管路排放阀。

1) 从安装、维护、减少管件的角度出发,优选五阀组的连接方式,其次为三阀组,尽量不用分散的阀门连接方式。

2) 测量气体流量时,差压仪表高于节流装置,在安装时可不设排放阀;差压仪表低于节流装置时,采用五阀组排液,或采用三阀组同时最低点设置直孔式排放阀,如图7-17所示。

3) 测量液体时,差压仪表低于节流装置,采用五阀组排液,或在导压管的最低处设排液阀;差压计高于节流装置时除按上述连接外,还需在最高点处设置直孔式排放阀,如图7-16所示。

4) 测量蒸汽时,差压仪表不论高低,均需采用五阀组排液或在最低点设排液阀,同时必须在导压管的最高点设置冷凝容器,使蒸汽冷凝成液体后将测量信号传递给差压变送器,减少测量误差,如图7-18(a)所示。

(5) 对粘度高、腐蚀性强、易结晶、结冻的流体,应采用隔离器和隔离液,使被测介质的信号通过隔离液送给差压变送器,如图7-18(b)所示。

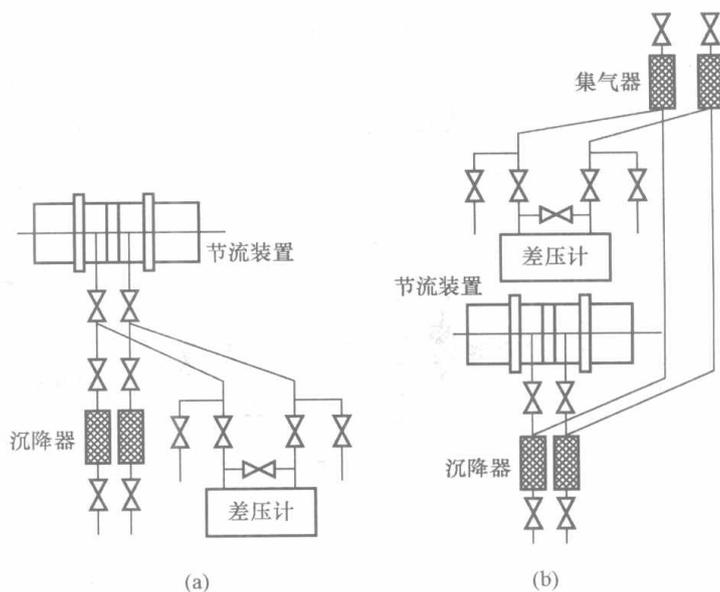


图7-16 液体流量测量时信号管路的敷设方式
(a) 差压计位于节流装置下方; (b) 差压计位于节流装置上方

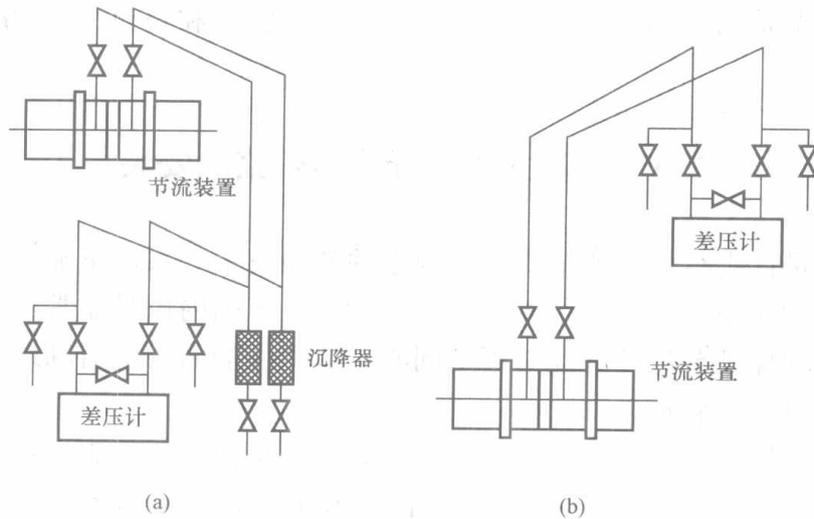


图 7-17 气体流量测量时信号管路的敷设方式

(a) 差压计位于节流装置下方；(b) 差压计位于节流装置上方

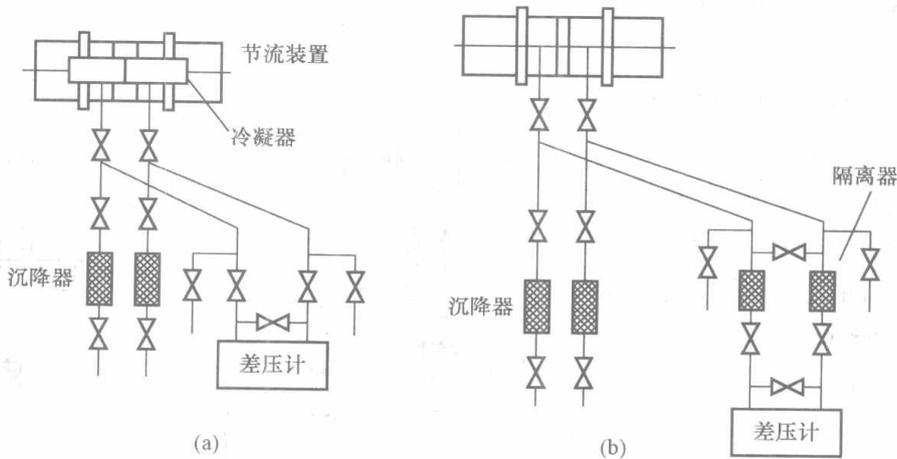


图 7-18 蒸汽和腐蚀性介质流量测量时信号管路的敷设方式

(a) 测量蒸汽时信号管路的安装；(b) 测量腐蚀性介质时信号管路的安装

本章小结

一、节流式流量计的测量原理及组成

节流式流量计是利用节流现象进行流量测量的。在一定的条件下，节流件前后的差压与流量之间有一定的函数关系。它由节流装置、压力信号管路和差压计（或差压变送器）三部分组成。

节流装置有标准节流装置和非标准节流装置两类。标准节流装置在对节流装置进行设计计算时要严格遵循标准节流装置设计、安装和使用的国家标准 GB/T 2624—1993，其流量与差压的关系按理论公式标定，并有统一的基本误差计算方法，一般不需要进行实验标定。由于标准化节流装置应用方便，在火电厂中，给水流量、蒸汽流量等都采用标准节流装置进行测量。

二、标准节流装置

标准节流装置由标准节流件、取压装置和节流件前后直管段（节流件前 $10D$ ，后 $5D$ ）

三部分组成。

(1) 标准节流件。电厂常用的标准节流件是标准孔板和标准喷嘴。

(2) 取压装置。对标准孔板，其取压装置为角接取压、法兰取压和径距取压。标准喷嘴有两种结构形式，即 ISA1932 喷嘴和长径喷嘴。ISA1932 喷嘴采用角接取压，长径喷嘴采用径距取压。角接取压又包括环室取压和单独钻孔取压两种结构形式。

(3) 对节流件前后直管段的要求。当节流件前后遇有弯头、阀门等局部阻流件时，节流件前后直管段 l_1 、 l_0 和 l_2 必须符合规定要求。

三、流量公式

流量公式就是差压和流量之间的关系式。由于流量与差压的平方根成正比，为了直接显示出流量信号，节流装置所产生的差压由差压变送器转换后送给开方器进行开方运算，然后再送给显示仪表显示或累计装置进行累计。当流体参数偏离设计值时，会给流量测量带来误差，目前工业上广泛采用带有压力、温度自动补偿的智能流量计。

四、节流装置的计算命题

节流装置主要有两类计算命题。第一类命题是已知管道内径 D 与节流件开孔直径 d 、取压方式、被测流体参数等必要条件，要求根据所测得的差压值 Δp 计算被测介质的流量。第二类命题已知管道内径 D 及其布置情况、被测介质的参数性质、流量范围，要求设计一个标准节流装置。

五、非标准节流装置

生产中测量介质流量时，有时会出现不符合标准要求的技術条件的情况，这时就不能使用标准节流装置，非标准节流装置也就显示出它的优越性。非标准节流件的流量公式、标准误差计算公式和设计计算方法与标准节流件相同。

六、节流式流量计信号管路的安装

要按规定的各项技术要求，正确安装仪表。

思考题与习题

1. 什么是标准节流装置？标准节流装置包括哪几个部分？我国的标准节流装置国家标准规定了几种节流件的形式？相应的取压方式是什么？
2. 为什么标准节流装置能在工业上得到广泛的应用？在使用标准节流装置时对流体、流动状态和管道都有哪些要求？
3. 如何从理论上推导出节流装置的流量公式？流出系数和可膨胀系数受哪些因素影响？压力损失与哪些因素有关？
4. 标准节流装置的计算命题有哪几类？画出各类命题的计算框图。
5. 用标准节流装置对流体的流量进行测量，当流体参数偏离设计值时应如何进行校正？
6. 为什么标准节流装置的量程比只能是 $1:3 \sim 1:4$ ？
7. 说明用标准节流装置测气、液、蒸汽的流量时，其取压口位置、信号管道的敷设特点。
8. 已知某节流装置最大流量为 100t/h 时，产生的差压为 40kPa 。试求差压计在 10kPa 、 20kPa 、 30kPa 时，分别流经节流装置的流量为多少？

9. 用孔板测气体流量, 给定设计参数 $p=0.8\text{kPa}$, $t=20^\circ\text{C}$, 而实际工作参数 $p_1=0.5\text{kPa}$, $t_1=40^\circ\text{C}$, 现场仪表指示 $3800\text{m}^3/\text{h}$, 求实际流量是多少?

10. 已知过热蒸汽压力 $p_1=13\text{MPa}$ (绝对压力), 工作温度 $t_1=550^\circ\text{C}$; 管道内径在工作温度下为 $D_t=222.6\text{mm}$, 差压计刻度最大流量 $q_m=250\text{t/h}$, 相应最大差压 $\Delta p_{\max}=210\text{kPa}$ 。标准喷嘴在工作温度下孔径 $d_t=146.25\text{mm}$, 现场允许压力损失 $\delta_{p_0}=55\text{kPa}$ 。试核算常用刻度流量 $q_0=200\text{t/h}$ 时的流量指示误差及压力损失是否符合要求?

11. 已知被测流体为水, 工作压力 (表压力) $p=14.71\text{MPa}$, 工作温度 $t=215^\circ\text{C}$; 管道 $D_{20}=233\text{mm}$; 材料为 20 号钢新无缝管; 节流装置采用法兰取压标准孔板, 材料为 1Cr18Ni9Ti, $d_{20}=117.34\text{mm}$, 差压 $\Delta p=156.91\text{kPa}$ 。求:

(1) 差压 Δp 对应的流量 q_m ;

(2) 计算流量测量时的压力损失 δ_p 。

12. 按下列设计任务书所给数据, 设计标准节流装置。

(1) 被测介质: 过热蒸汽;

(2) 质量流量: $q_{m\max}=252\text{t/h}$, $q_{m\text{ch}}=198\text{t/h}$, $q_{m\min}=100.8\text{t/h}$;

(3) 介质参数: $p_1=13\text{MPa}$ (绝对压力), $t_1=550^\circ\text{C}$;

(4) 允许压力损失: $\delta_p \leq 55\text{kPa}$;

(5) 管道内径: $D_{20}=221\text{mm}$;

(6) 管道材料: 12CrMoV;

(7) 节流件形式: 角接取压标准喷嘴;

(8) 节流件材料: 1Cr18Ni9Ti;

(9) 要求差压计形式: 电容式差压变送器;

(10) 管路情况如图 7-19 所示。

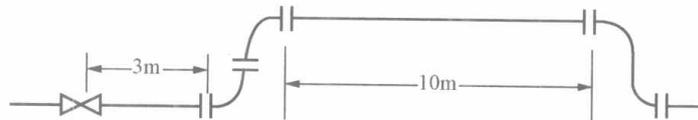


图 7-19 管路情况

第8章 液位检测及仪表

物位测量包括液位测量和料位测量，液位测量是最重要的部分，是一门测量气—液、液—液或液—固分界面位置的测量技术。液位检测包括液位、液位差、相界面的连续测量，定点信号报警、控制、多点测量以及液位巡回检测等方面的技术。

液位测量是当液位发生变化时，利用液位敏感元件把相应的能够表示液位变化且易于检测的物理量变化值检测出来。这个物理量可能是电量参数，或机械位移，也可能是声速、能量衰减变化、静压力的变化等。再把这些电量的或非电量的物理量变化值采用相应的信号处理技术转换成能够用来显示的信号。

8.1 液位测量概述

8.1.1 液位测量的意义

通过液位的测量可确定容器之中原料或产品的数量，掌握液位是否在规定范围内，判断并调节容器中物料的流入量、流出量，以保证生产过程的正常进行及设备的安全运行。在现代化的生产过程中，液位的监视和控制是极其重要的。

比如火电厂的生产过程中，一般要测量汽包水位、凝汽器水位、除氧器的水位等。锅炉汽包内的水位直接影响汽水系统循环的效果以及送出蒸汽的质量。水位过高或急剧波动时，会引起蒸汽品质恶化和带水，造成受热面结盐，严重时会导致汽轮机水冲击振动，叶片损坏；水位过低会引起排污失效，炉内加药进入蒸汽，甚至引起下降管带汽，影响到锅炉水循环工况，造成炉管大面积爆破；如果出现汽包“满水”或“干锅”情况，将导致水冲击汽轮机或水冷壁的大面积损坏事故发生，严重影响到机组的安全经济运行。因此锅炉汽包水位是锅炉运行监控的一项重要指标，汽包锅炉至少配置两只彼此独立的就地水位计和两只远传汽包水位计。锅炉汽包的水位不仅要求能在控制室进行显示、记录，以供监控人员进行监视，而且水位信号还要提供给水位自动控制系统，以进行水位的自动控制。对于其他工业生产过程同样也存在上述情况。

8.1.2 液位测量的特点

(1) 稳定的液面是一个规则的表面，但是当物料有流进流出时，会有波浪使液面波动。在生产过程中还可能出现沸腾或起泡沫的现象，使液面变得模糊。

(2) 大型容器中常会有各处液体的温度、密度和粘度等物理量分布不均匀的现象。

(3) 容器中的液体呈高温、高压、高粘度或含有大量杂质、悬浮物等。

以汽包水位为例，汽包水位具有以下特点：

(1) 汽包内水汽无明显分界面。汽包运行时内部汽水处于饱和状态，水中带汽，汽中夹带水珠，炉水中充满着大小汽泡，饱和汽则夹带大量飞溅水珠，接近水面的水中汽泡比下面多，而在汽侧，越接近水面，水珠越多，汽水无分界面。图8-1给出了沿汽包高度汽水密度变化曲线。

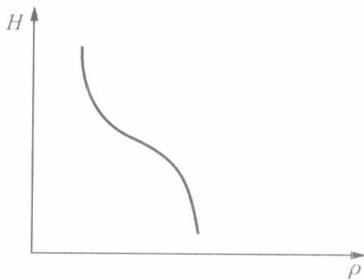


图 8-1 汽包内汽水密度随高度变化曲线

在火电厂中汽包的水位名称有三种，即实际水位、重量水位和指示水位。

实际水位也称真实水位，它定义为汽包内每根垂线上取出汽水混合物湿度的最大变化率这个点，然后由无数这样的点所连成的液面。由于这些点很难找出，故还不能测出这种实际水位。

目前，锅炉运行时的汽包水位按重量水位进行控制。所谓重量水位是对运行中锅炉汽包内汽水状态的一种假设，即运行中某一瞬时，汽包的全部出口、入口封闭，水侧中的汽回到汽侧，汽侧中的水回到水侧，而且平静下来，此时汽包内的汽水界面称为重量水位。汽包水位检测系统即测量汽包的重量水位，它表征着锅炉负荷量与给水流量的平衡程度。

水位计所能测出的汽包水位值称为指示水位。设计和制造某种水位计时，其指示水位值等于重量水位值，才能保证锅炉水位的正常运行。

(2) 汽包内水位忽上忽下剧烈周期波动。来自省煤器的不饱和水冲击着水面，负荷增减、汽压变动以及炉膛燃烧中心偏移，造成水位波动，汽水混和物进入汽包分离器，经消能后仍有剩余循环流动速头附在水中进入汽包水侧，对汽包水位起扰动和上涌作用。

(3) 炉水中含有盐碱，受汽水冲击形成泡沫，如水质严重恶化，会形成大量泡沫。

(4) 汽包水位横切面的特点是中间凸起，水位在汽包壁呈带状升高，并超过中间部位。

(5) 虚假水位的存在。当蒸汽流量突然增加时，从锅炉的物质平衡关系来看，蒸汽流量大于给水流量，水位应下降，但实际情况并非这样，由于蒸汽用量增加，瞬间必然导致汽包压力的下降。虽然锅炉的给水量小于蒸发量，但在一开始时，水位不仅不下降反而上升，然后再下降（反之，蒸汽流量突然减少时，则水位先下降，然后再上升），这种现象称之为“虚假液位”。“虚假液位”现象属于反向特性，变化速度很快，变化幅度与蒸发量扰动大小成正比，也与压力变化速度成正比，这给控制带来一定困难。

由于水位存在以上特点，给水位的准确测量带来一定难度。

8.2 云母水位计及双色水位计

8.2.1 云母水位计

云母水位计实际上是一根连通管，是利用连通器的原理进行工作的，如图 8-2 所示。对低压锅炉，可以用玻璃板作水位计观察窗。对高压炉，由于炉水对玻璃有较强的腐蚀性，时间稍长玻璃板的透明度就变差，不利于观察，故高压锅炉用优质云母片作水位计观察窗。

若使用云母水位计测量汽包水位，由于水位计处于汽包外部，因散热使水位计中水的平均温度低于汽包压力下水的饱和温度，水位计中水的密度大于汽包压力下的饱和水的密度，云母水位计的示值水柱高度低于汽包重量水位高度 H 。云母水位计显示的水位与汽包内重量

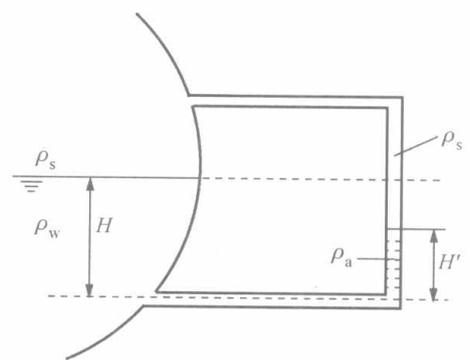


图 8-2 云母水位计

水位的关系为

$$H = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_w - \rho_s} H' \quad (8-1)$$

式中 ρ_s ——汽包内饱和蒸汽密度；

ρ_w ——汽包内饱和水密度；

ρ_a ——云母水位计测量管内水柱的平均密度；

H ——汽包内重量水位；

H' ——云母水位计水位显示值。

因云母水位计的温度低于汽包内温度而产生的示值误差 δ_H 为

$$\delta_H = H' - H = \frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_w - \rho_s} H' \quad (8-2)$$

又由式 (8-1) 得

$$H' = \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_a - \rho_s} H \quad (8-3)$$

故

$$\delta_H = \frac{\rho_w - \rho_a}{\rho_a - \rho_s} H \quad (8-4)$$

由式 (8-2) 与式 (8-4) 可以看出, δ_H 不但与云母水位计的温度有关 (根本原因), 而且还与汽包工作压力和云母水位计测量基准线位置及汽包内的重量水位有关。由于 ρ_a 与水位高度、汽包工作压力、环境温度及测量筒散热情况等有关, 其数值很难确定, 故对水位计的示值进行实时校正是非常困难的。电厂运行中总结的经验为: 在额定工况下, 对中压炉 $H = H' + (25 \sim 35) \text{ mm}$, 高压炉 $H = H' + (40 \sim 60) \text{ mm}$ 。具体取值大小根据水位计的保温情况等条件而定。

云母水位计可直接反映汽包水位, 直观、可靠, 但只能就地监视, 并且液位显示不够清晰, 尤其当水位超出水位计可视范围时, 很难正确判断是满水还是缺水。为此对云母水位计的结构加以改进, 成为双色水位计。

8.2.2 双色水位计

8.2.2.1 双色水位计的工作原理

双色水位计也是基于连通器原理工作的水位计, 它是由云母水位计发展而来的。双色水位计改进了云母水位计结构, 辅以光学系统, 利用光从空气进入蒸汽或水产生不同的折射, 使汽水界面显示成红、绿两色的分界面, 显示清晰, 并可利用工业摄像系统等方式远传显示。在火电厂中可用于测量汽包水位、高压加热器水位等。

双色水位计的工作原理如图 8-3 所示。光源 8 发出的光经过红色和绿色滤光玻璃 (10 和 11) 后, 仅红光和绿光到达组合透镜 12。由于组合透镜的聚光和色散作用, 形成了红绿两束光, 射入测量室 5。测量室 (即连通器空间) 由钢座和两块光学玻璃板 13 以及垫片、云母片等构成, 两玻璃板与测量室轴线呈一定角度, 因而有水部分形成一段“水棱镜”。入射到测量室的红、绿光束, 绿光的折射率比红光的折射率大, 有水的部分, 由于水形成棱镜的作用, 绿光偏转较大, 正好射到观察窗 17, 红光束则未能到达观察窗口, 如图 8-3 (c) 所示, 从观察窗看到水柱呈绿色。在测量室的充满汽的部分未能形成棱镜效应 (或者说棱镜效应极弱), 由于蒸汽和空气的光学性质接近, 这时红光束正好到达观察窗口, 而绿光因不

发生折射偏转不能射到窗，从观察窗看到汽柱呈红色，如图 8-3 (b) 所示。

用于超高压及以上压力的双色水位计，其光学玻璃板不作成一长条，而是沿水位计高度开多个圆形窗口，因而光学玻璃板（或云母片）就相应作成圆形，这种双色水位计称为多窗式双色水位计。其优点是玻璃板小，受力较好；缺点是小窗之间有一小段不透明，成为看不见水位分界面的盲区。若测量室用长条玻璃板做成可连续观测水位的双色水位计，称为单窗式双色水位计。

为了减小由于测量室温度低于容器内温度而引起的误差，双色水位计有时设有加热室 4。利用蒸汽的加热，使测量室水温接近容器内温度。当被测对象为锅炉汽包时，测量室水温接近饱和温度。为了防止锅炉压力突降时测量室中水柱沸腾而影响测量，从安全方面考虑，测量室内的水柱温度还应有一定的过冷度。

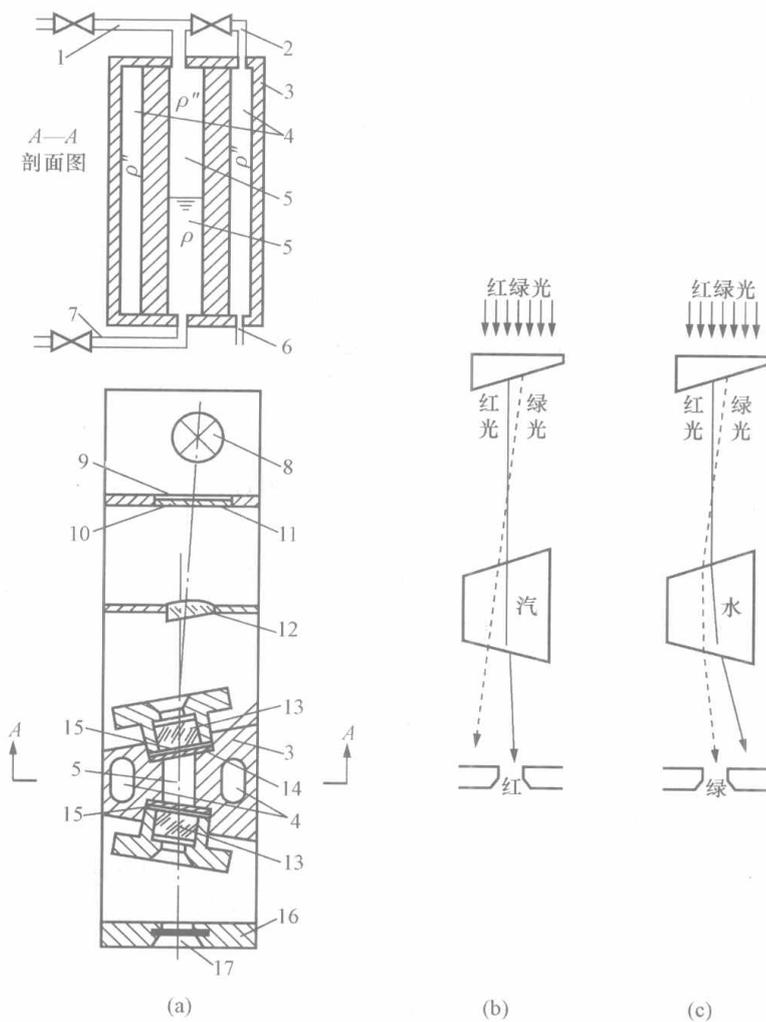


图 8-3 双色水位计原理示意

(a) 结构示意；(b)、(c) 光路示意

- 1—汽侧连通管；2—加热用蒸汽进汽管；3—水位计本体；4—加热室；
- 5—测量室；6—加热蒸汽出口管；7—水侧连通管；8—光源；
- 9—毛玻璃；10—红色滤光玻璃；11—绿色滤光玻璃；
- 12—组合透镜；13—光学玻璃板；14—垫片；
- 15—云母片（高压以上锅炉用）；
- 16—保护罩；17—观察窗

8.2.2.2 双色水位计存在的问题及改进

在锅炉运行的过程中双色水位计存在的问题很多，主要是云母片泄漏，汽水侧一、二次阀泄漏，水位计看不清，显示存在盲区，严重影响了机组安全经济运行。

云母片泄漏是汽包水位计不能运行的主要原因，云母片泄漏的主要原因包括云母片质量差和检修工艺不正确。而汽水侧一、二阀泄漏造成水位计停运的主要原因是阀门质量造成的。再有水位计中水质不好易造成云母片结垢使显示模糊，频繁排污又易造成表计热变形而泄漏。

针对双色水位计存在的问题，对双色水位计的结构进行了改进。如图 8-4 所示，利用汽包内的饱和蒸汽经汽侧取样管 2 和汽侧取样阀门 1 进入伴热管 11，给水位计表体 4 加热，阻止水位计 8 内的饱和水向外传热，再利用冷凝罐 14 内冷凝后的饱和水给双色水位计 8 内的水置换，加速双色水位计 8 内的水循环，使双色水位计 8 内的水接近饱和水温度，从而消除水位计测量管内水柱密度对水位测量造成的偏差，使得水位计 8 内的水位在任何

时候、任何工况下接近汽包内的真实水位，达到准确监视汽包水位的目的。

饱和汽伴热管 11 在安装时将排水管 12 接至低于汽包中心下 15m 的汽包下降管处。进入饱和汽伴热管 11 的饱和蒸汽在其中冷凝后流到下降管中，由于排水管与汽包下降管的连接处处于汽包下大于 15m 的地方，排水管中的水位不会上升到水位计表体内部，使得饱和汽伴热管中始终充满饱和蒸汽，起到对表体和水位计管中的水进行加热的目的。

利用冷凝器内冷凝后的饱和水置换表计内的水，加速了表计内的水循环，由于置换的新水为饱和蒸汽冷凝后的饱和水，含盐低，这样减少了云母片结垢，延长了表计的排污周期，从而减少了表计的热变形，也就减少了表体的泄漏，延长了表体的检修周期，降低了维护费用。

由于它的显示部分是由两侧水位管的五窗云母组成的，相邻云母窗口有一定重叠度，因而消除了显示盲区。

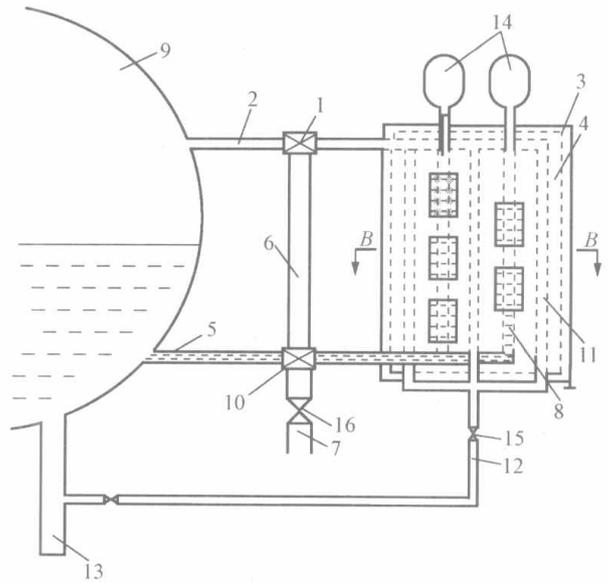


图 8-4 一种无盲区低偏差双色水位计原理图

- 1—汽侧取样阀门；2—汽侧取样管；3—光源箱；
- 4—水位计表体；5—水侧取样管；6—平衡管；
- 7—排污管；8—双色水位计；9—汽包；
- 10—水侧取样阀门；11—饱和汽伴热管；
- 12—排水管；13—汽包下降管；
- 14—冷凝罐；15—排水阀门；
- 16—排污阀门

8.3 电接点水位计

电接点水位计是火电厂锅炉汽包、高压加热器、除氧器水位测量中普遍应用的一种水位计。它的特点是指示受容器内压力的影响较小，在锅炉起停等变参数工况下，仪表在控制室内能准确指示水位；测量延时小，投运速度快；结构简单，造价低，运行可靠，调校方便。

8.3.1 工作原理

电接点水位计是利用连通器的原理将水位反映到测量筒内。以汽包水位测量为例，由于汽包内饱和蒸汽及凝结水介质的电阻率相差极大（锅炉炉水，其电阻率一般在 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下，蒸汽的电阻率一般在 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上），安装在测量筒壁上的电极若被水浸没，该电极在所接入的电路中处于低电阻状态（相当于开关闭合），若被汽浸没则电极在所在电路中处

于高电阻状态（相当于开关打开）。由被水接通的电接点位置可表示水位，再利用灯光或数字就可显示水位。

电接点水位计由水位传感器和显示仪表组成，如图 8-5 所示。

8.3.2 水位传感器

电接点水位传感器一般由测量筒（连通容器）、电接点座和电接点以及阀门等部件组

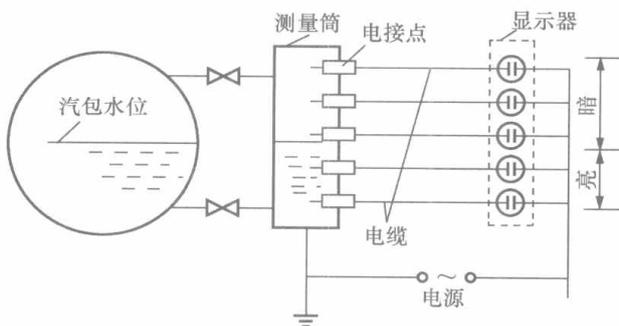


图 8-5 电接点水位计原理示意图

成,如图 8-6 所示。

测量筒和待测液位的容器连通,一般用 20 号钢无缝钢管制成。其长度由水位测量范围决定,直径和厚度主要根据工作压力、温度和安装电极的开孔个数、距离来确定,以保证开孔后有足够的强度。阀门主要在检修水位计时使用。

电接点的数目应以满足运行中监视水位的要求来确定,传统的汽包电接点水位计的电接点数多为 15 个、17 个或 19 个。电接点安装时在高度上的间距是不均匀的,在正常水位附近要密一些,并采用交错开孔安装电极的方法,将测量筒圆周以 120° 的夹角等分成三竖行,这样加大了相邻电极之间的距离以保证水位容器的强度。

15 点: $0, \pm 15, \pm 30, \pm 50, \pm 100, \pm 150, \pm 200, \pm 250\text{mm}$

17 点: $0, \pm 15, \pm 30, \pm 50, \pm 100, \pm 150, \pm 200, \pm 250, \pm 300\text{mm}$

19 点: $0, \pm 15, \pm 30, \pm 50, \pm 75, \pm 100, \pm 150, \pm 200, \pm 250, \pm 300\text{mm}$

电接点是水位传感器的关键部件,它直接影响测量的准确性和可靠性。在高温高压下工作的电接点必须有足够的强度、良好的绝缘性和抗腐蚀的能力。电接点的结构如图 8-6 (c) 所示。当汽包水位达到某一电极处,接通它与公共电极之间形成的电接点,供远距离显示水位、报警之用。

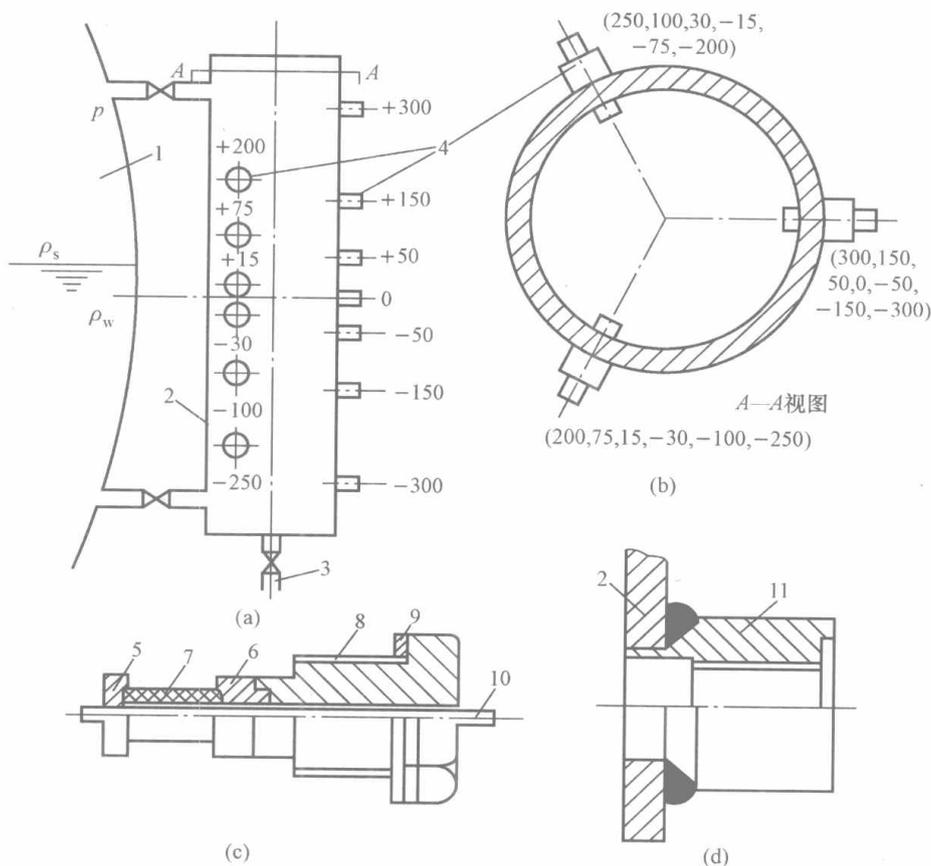


图 8-6 电接点水位测量筒

- (a) 外形; (b) A—A 视图; (c) 高压炉电接点; (d) 电接点固定座
 1—汽包; 2—测量筒壳; 3—排污管; 4—电接点; 5、6—瓷封件; 7—瓷管;
 8—固定螺丝; 9—紫铜垫圈; 10—接点芯; 11—固定座

在使用中应对电接点缓慢预热,防止汽流冲击电极和温度骤变损坏电极。在测量筒充分

冷却后再拆卸电极，防止电极螺栓和电极座的螺纹损坏。此外，在检修中不应敲打电极，以免电极受振损坏。

水位传感器的测量误差来源包括：

(1) 散热引起的误差。水位测量筒与待测液位的容器的连接是连通方式，处于容器外部。由于散热，测量筒内水柱温度低于待测液位的容器内的温度，所以测量筒内水柱高度低于待测液位的容器内的水位。测量筒内水温造成的这种测量误差是较大的，在实际的水位测量中要采取一些措施以减小其影响。采取的措施有：水位测量筒的安装尽量地离待测液位的容器近些；适当加粗汽侧和水侧的连通导管；对水位测量筒的顶部不保温，增加凝结水量，其余部分保温以减少散热。

(2) 不连续指示引起的误差。电接点在安装上是不连续的，因而接点之间的水位变化不能反映，有盲区存在。电接点间距对示值的影响是负误差，误差的大小取决于测量筒内水柱的高度。这种误差由于结构原因不能消除。

(3) 汽包工作压力的影响。由于电接点水位测量筒内的水为汽包工作压力下的非饱和水，故电接点水位计受待测液位的容器内压力的影响较差压式水位计小得多。

8.3.3 显示仪表

对水位的显示采用灯光电路显示较为方便。每个电接点对应一套灯光显示电路。目前与之配套使用的显示仪表种类较多，有氖灯显示仪表、红绿灯显示仪表、发光二极管显示仪表、电子发光屏显示仪表。如果用数字电路对电接点状态进行逻辑判断，其水位可用数字显示。

8.3.3.1 氖灯显示仪表

氖灯显示仪表是电接点水位计早期的一种显示仪表。电接点的通断信号可直接用氖灯来显示，如图 8-7 所示。为了避免极化现象，采用交流电源供电。为安全起见，单数接点和双数接点分别由两组电源供电。图 8-7 中的 R_1 为氖灯限流电阻，限制通过氖灯的工作电流不超过额定值，以延长氖灯的使用寿命；电阻 R_2 为并联分流电阻，是为了防止电缆的分布电容形成交流通路而造成在电接点不接通时氖灯仍起辉。

8.3.3.2 红绿灯光显示仪表

与电接点水位测量筒配套的红绿灯光显示仪表包括了与电接点数目相同、电路结构一样的灯光电路。一种红绿灯光显示电路如图 8-8 所示。

当电接点 DJ_i 被水淹没时，24V 的交流电压在 R_1 上的分压增大，经二极管 V_4 整流、电容 C_1 滤波，其直流电压经 R_2 、 R_3 分压后加到晶体管 V_1 基极的电压较大，致使 V_1 导通。此时的 V_1 发射极为高电位， V_2 导通，绿灯亮。同时 V_3 截止，红灯不亮（流经 R_6 支路电流不能使红灯发光）。

当电接点 DJ_i 处于汽侧中时，24V 交流电压在 R_1 上的分压较小， V_1 截止， V_2 截止，绿灯不亮，流经 R_6 支路的电流不能使绿灯发光。直流电源电压经绿灯与 R_6 分压，使 V_3 导通，红灯亮。

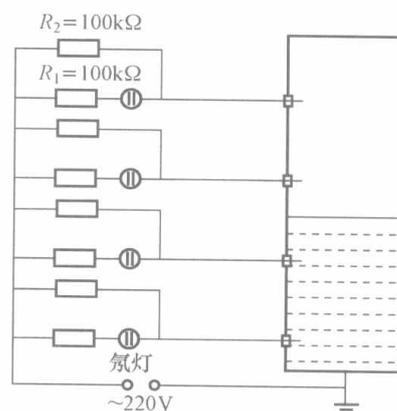


图 8-7 氖灯显示电路

水位显示屏如图 8-9 (a) 所示。其内部结构如图 8-9 (b) 所示，是一个长方形槽形盒子，盒内用很薄的隔片隔成与电接点数相同的一系列暗室，每个暗室内水平安装了红灯、绿灯各一个（或用普通灯加红色、绿色透光片）。暗室上下排列顺序与电接点排列顺序对应，槽形盒子面板上盖截面为半圆形的有机玻璃屏，使灯光分散，从而在显示屏上可获得光色均匀的红绿光带。

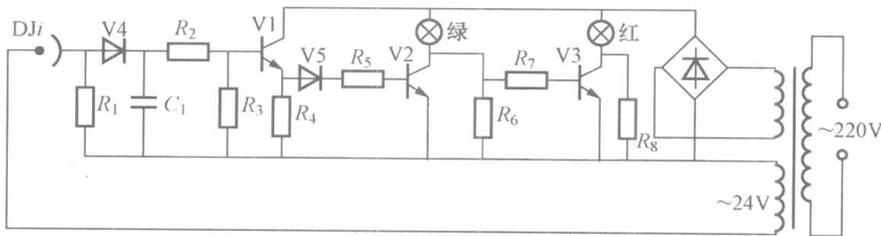


图 8-8 红绿灯光显示电路

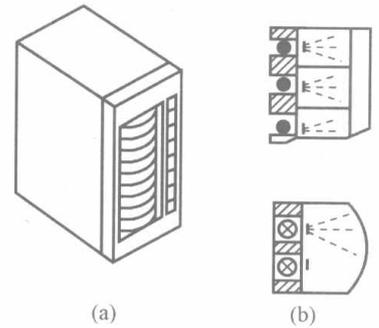


图 8-9 水位显示屏结构
(a) 外形；(b) 内部结构

8.3.3.3 数字电接点显示仪表

与电接点水位测量筒配套的数字显示仪表不同于一般的工业数字显示仪表。由于水位测量筒输出的是数字信号（电接点状态），因此显示仪表中没有 A/D 转换部件。又由于水位测量筒只有 19 个电接点，因此显示仪表只显示 19 个水位数字量。以上特点决定了数字电接点水位计的电路构成结构。下面对火电厂普遍应用的 DYS-19 数字电接点水位计做一介绍。

DYS-19 适用于电厂锅炉汽包水位测量，配套使用 19 点电接点的水位测量筒。其功能包括：

- (1) 显示：三位数字和+、-号（显示器件为辉光数字管）；
- (2) 报警：±50mm 水位报警显示并有接点信号输出；
- (3) 保护：±200mm 水位保护接点信号输出；
- (4) 输出模拟信号：0~10mA（对应-300~+300mm）。

DYS-19 电路组成框图如图 8-10 所示。

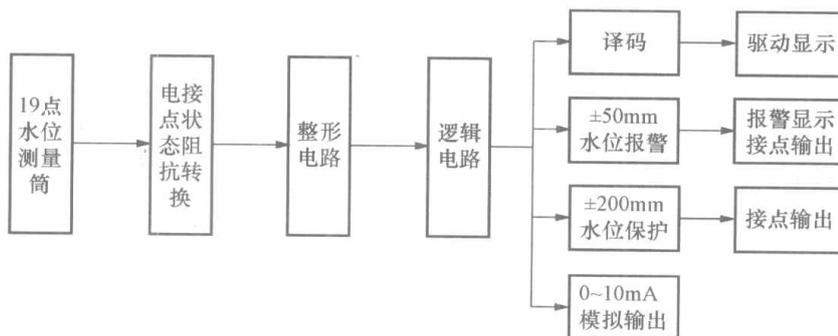


图 8-10 DYS-19 电路组成框图

(1) 阻抗转换、整形、逻辑判断电路。整形电路和逻辑判断电路使用了小规模集成电路 DM22（双四“与非”门）。电接点的状态通过取样阻抗转换电路输出与 DM22 逻辑电平相配的

电平信号。每个电接点对应的取样阻抗转换电路和整形电路都是相同的，如图 8-11 (a)、(b) 所示。DJ_i 电接点在水中，N_i = “1”，M_i = “0”，在汽中，N_i = “0”，M_i = “1”。

逻辑判断电路是仪表核心电路，每个电接点对应一套。逻辑判断电路的任务是判断该对应的电接点是否为处于水中最高位置的电接点，如图 8-11 (c) 所示。

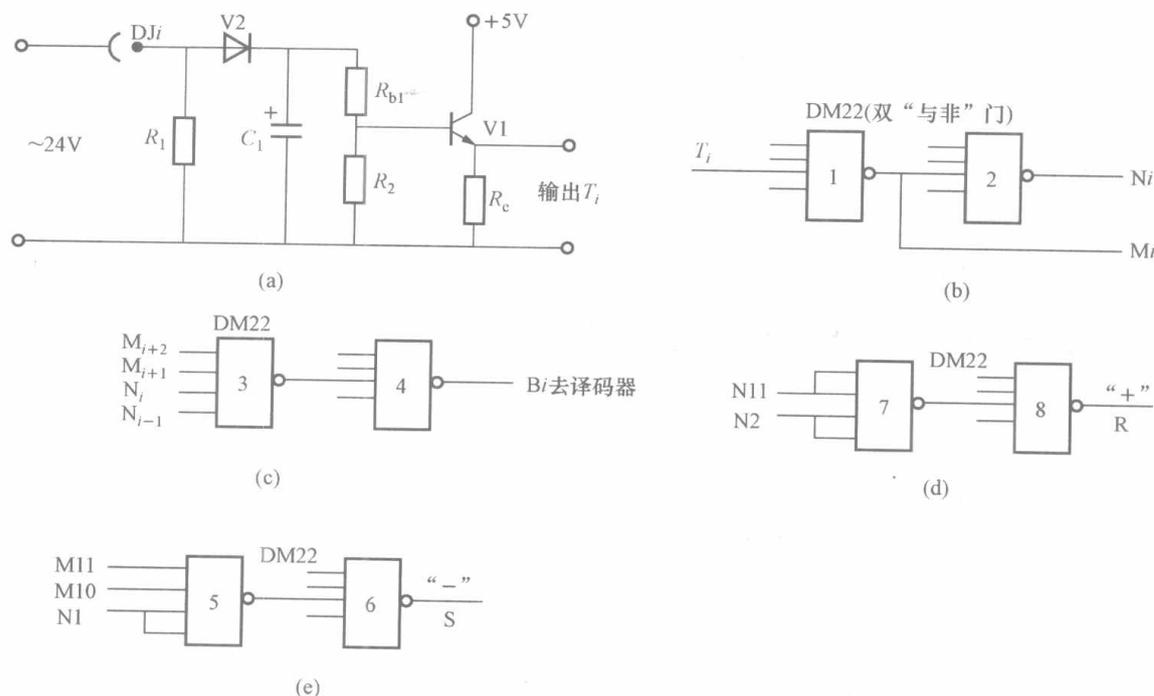


图 8-11 电接点状态取样阻抗转换与整形电路、逻辑判断电路

(a) 状态取样及阻抗转换；(b) 整形电路；(c) 逻辑判断电路；

(d) 正号逻辑判断电路；(e) 负号逻辑判断电路

逻辑判断电路对于是浸入水中最高位置的电接点， $B_i = “1”$ ，对于不是浸入水中最高位置的电接点， $B_i = “0”$ 。上述 $B_1 \sim B_{19}$ 逻辑信号中，相应的逻辑信号经二极管或门译码电路译码后输出，送到相应的（百、十、个位）显示器灯丝驱动电路，以驱动显示器。

对于显示水位 (ΔH) 正负号的逻辑判断电路如图 8-11 (d)、(e) 所示，其电路输出直接送到符号数字管相应灯丝（+、-）的驱动电路。

(2) 译码电路。译码电路为二极管组成的“或”门电路。译码电路对应着百、十、个位数码管的相应的显示灯丝。由于显示的水位数字只有 19 个，而每位数码管显示辉光的灯丝也只有几个。如百位数码管只有 0、1、2、3，十位数码管只有 0、1、3、5、7，个位数码管只有 0、5。所以仪表中有 11 个二极管或门译码电路。每个译码电路的输入逻辑信号为可能显示的水位相应的逻辑判断信号。译码电路如图 8-12 所示。驱动显示电路如图 8-13 所示。

(3) $\pm 50\text{mm}$ 水位报警电路。只要 DJ13(+50mm) 浸没在水中，仪表就有报警显示和接点信号输出。只要 DJ8(-30mm) 处于汽中，仪表也有报警显示和接点信号输出。因此报警电路输入信号是来自相应电接点的整形电路的输出信号，电路如图 8-14 所示。

(4) $\pm 200\text{mm}$ 水位保护电路。只要电接点 DJ17(+200mm) 浸在水中，仪表就有保护接点信号输出。只要电接点 DJ4(-150mm) 处在汽中，仪表也会有保护接点信号输出。因

此保护电路的输入信号使用相应电接点的整形电路的输出信号，电路如图 8-15 所示。

(5) 0~10mA 模拟输出电路。0~10mA 模拟电流输出电路采用了若干支路电流求和方式。每条支路对应于一个电接点，每条支路能否发生电流取决于对应电接点整形电路的输出 N_i 。每条支路产生电流的大小取决于该支路对应的电接点与向下相邻电接点的间距。电接点 DJ1 对应着 $\Delta H = -300\text{mm}$ ，电流为 0mA。该电路由 18 条电流发生支路组成，每条支路的构成形式是相同的，如图 8-16 所示。

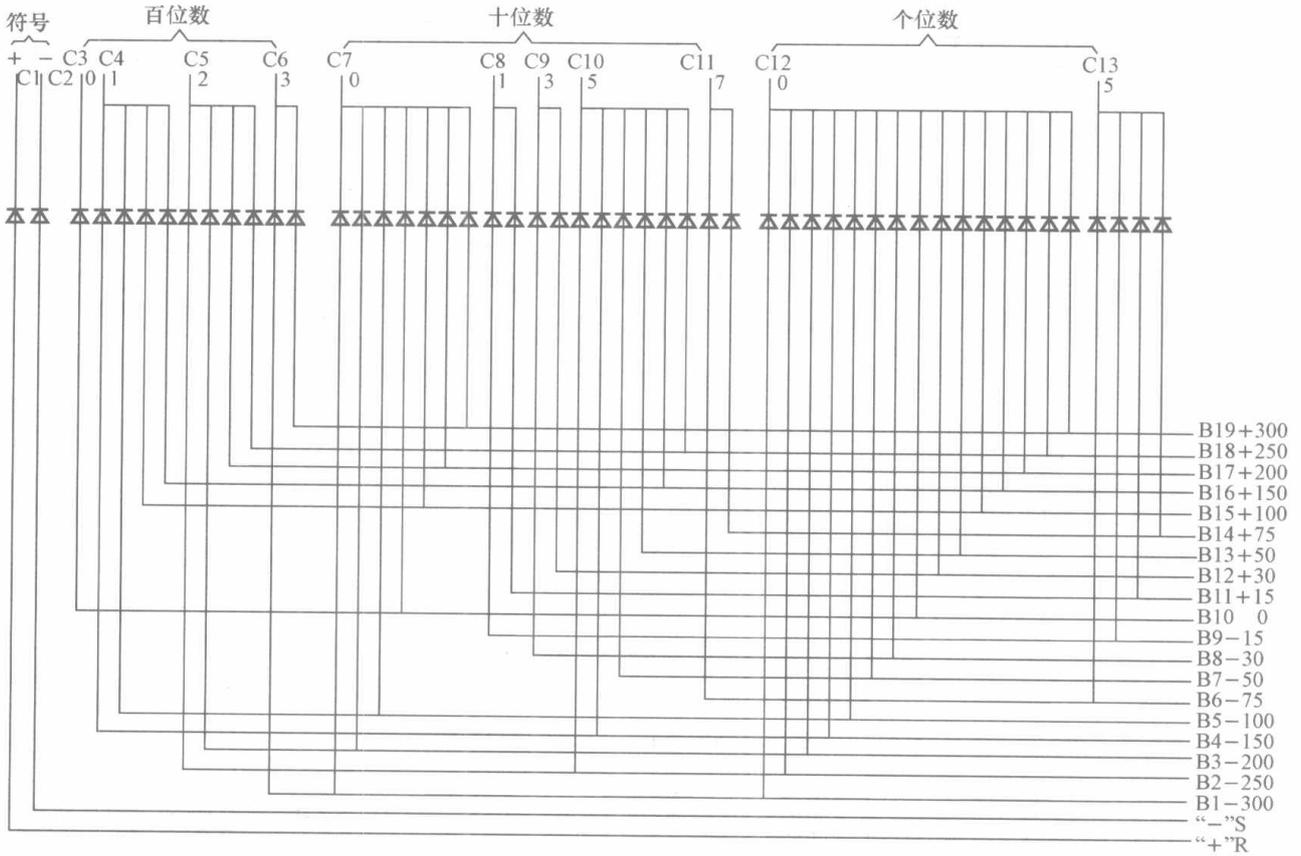


图 8-12 译码电路

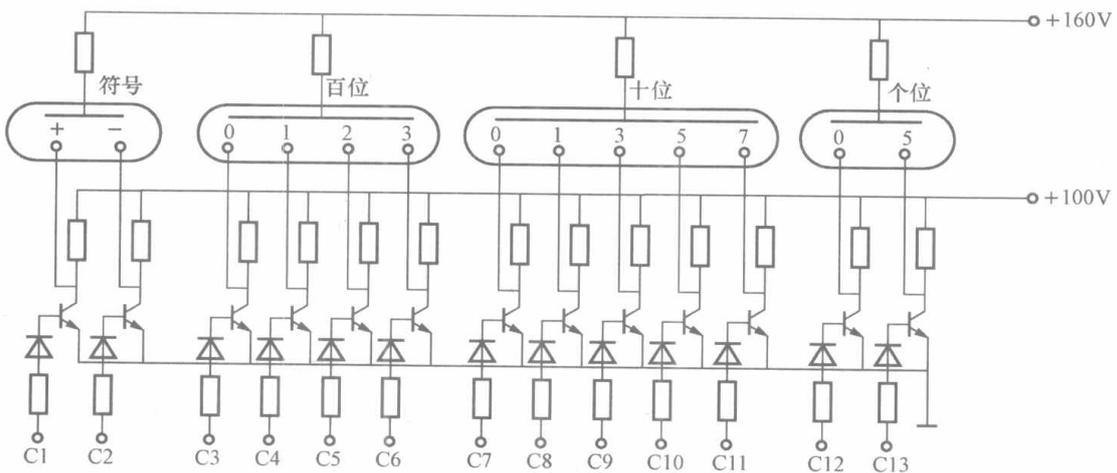


图 8-13 驱动显示电路

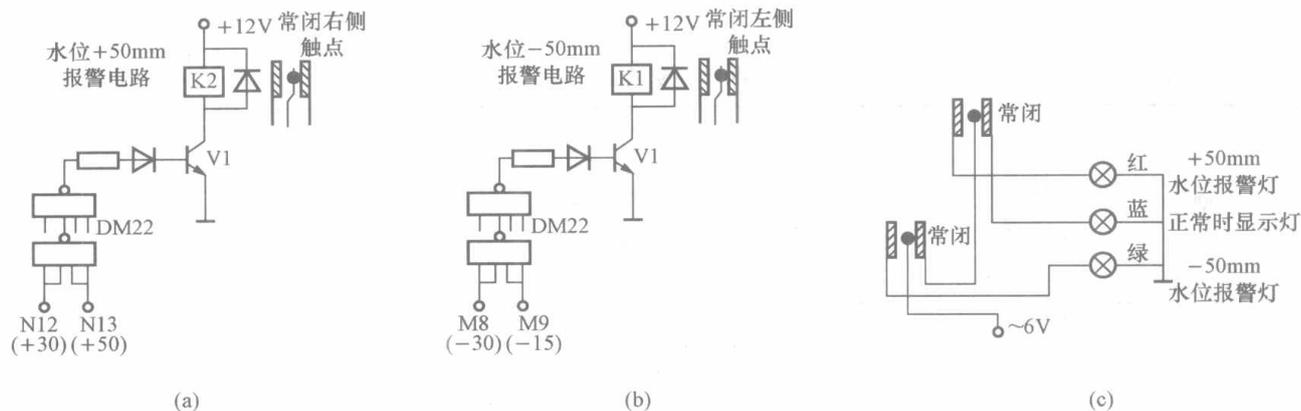


图 8-14 报警电路

(a) +50mm 水位报警电路；(b) -50mm 水位报警电路；(c) 报警灯光显示电路

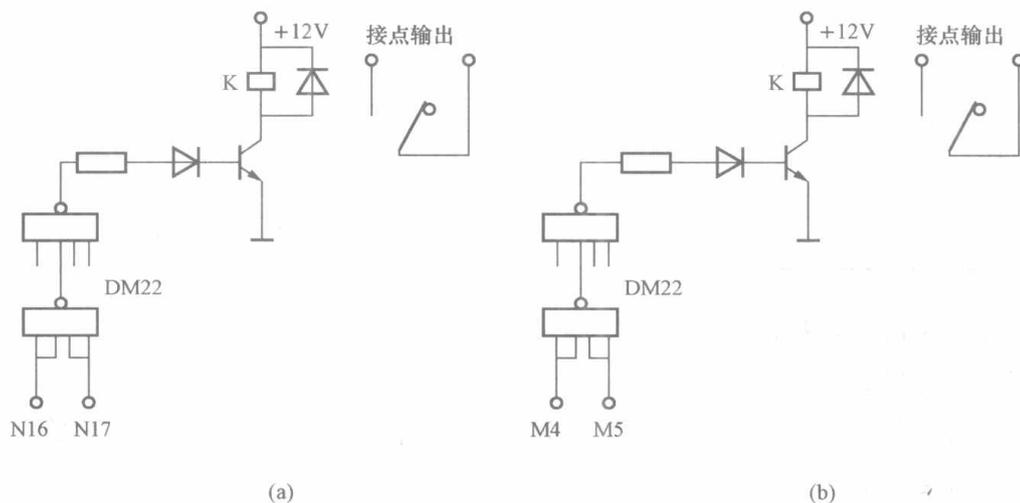


图 8-15 保护电路

(a) +200mm 保护；(b) -200mm 保护

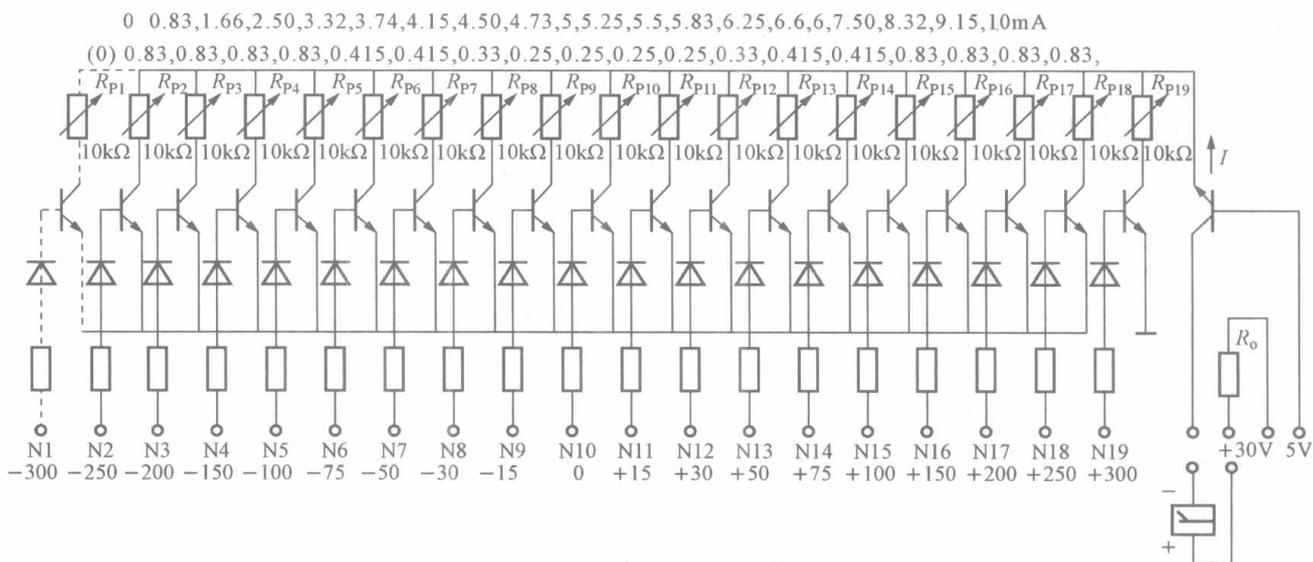


图 8-16 0~10mA 模拟电流输出电路

常用电接点水位计如表 8-1 所示。

表 8-1 常用电接点水位计

型号	接点个数	测量范围 /mm	测量筒		显示仪表		用于主要容器或说明
			工作压力 /MPa	工作温度 /°C	显示方式	输出触点	
GDR-1	19	±300	18.24	358	电致发光屏 (DFS-2 型)	报警	汽包 (测量筒带恒温套)
DYS-19	19	±300	15.2	350	数字	报警、保护	汽包
SWJ-4 (B&W 公司)	19 17	±300 ±250	14.7 11.2	340 320	双色发光二极管	报警、保护	汽包
DJS-15A	15	±250	15.2	350	荧光色带加数字	报警、保护	汽包
UDZ-02-19Q	19	±300	15.7	350	发光二极管	报警、保护	汽包
UDZ-01-17Q	19	±300	4.4	250			汽包
UDZ-02-17G	17	0~1000	15.7	350			高压加热器
UDZ-01-17Y	17	0~1700	4.4	250			除氧器
UDX-12	5	620	9.4	360	灯光	报警	压力容器

8.3.4 电接点水位计在使用中存在的问题及改进

8.3.4.1 存在的问题

(1) 由于相邻两电接点有一定距离, 水位信号变化是阶跃的。它的指示是不连续的, 两电极之间的距离是仪表的不灵敏区, 不便于实现水位自动控制。

(2) 存在测量筒内水柱温降造成的误差, 使示值低于重量水位。由于测量筒水侧部分的散热比云母水位计少, 因此电接点水位计指示较接近重量水位。

(3) 电接点使用寿命较低, 经长时间运行, 会出现腐蚀现象, 发生泄漏, 需在运行中退出仪表进行更换。故障率高, 维护量大, 影响安全。

(4) 随着使用压力增高, 测量筒取样负误差增大, 亚临界压力下负误差在 0 位时可达 145mm, 高水位时停炉值可达 250mm。

(5) 测量筒在锅炉运行时“满水”或“缺水”必须解列, 停炉后又需及时恢复测量, 使用不方便。

8.3.4.2 电接点水位计的改进

针对电接点水位计存在的问题, 对电接点水位计从如下几方面进行改进。一种改进后的测量筒结构如图 8-17 所示。

(1) 测量筒内部设置笼式内加热器, 使测量筒水柱温度接近饱和水温, 水位测量精度高。在测量筒内部设置笼式内加热器, 利用饱和汽加热水样。加热器上口敞开, 来自汽侧取样管的饱和蒸汽进入加热器, 像汽笼一样加热水柱。

饱和蒸汽在加热器中放出汽化潜热, 其凝结水由排水管引至下降管。为保证排水管侧水位不会升至加热段而减小加热面积, 要求连通点选在汽包中心线下 15m。这样可使压力为 6.0MPa 时, 排水管中水位在加热器之下 0.5m; 当压力低于 1.0MPa 时, 水位才会接近加

热器底部影响加热，而 1.0MPa 以下压力时取样误差很小，可忽略不计。所以，加热系统能适应锅炉变参数运行，保证全工况真实取样。

此外，来自汽侧取样管的饱和蒸汽在冷凝器中冷凝，大量凝结水（温度为饱和水温）沿壁而下，分区收集，由布置在饱和蒸汽中的数根疏水管在不同深度疏至水样中，将低温水样置换出测量筒。

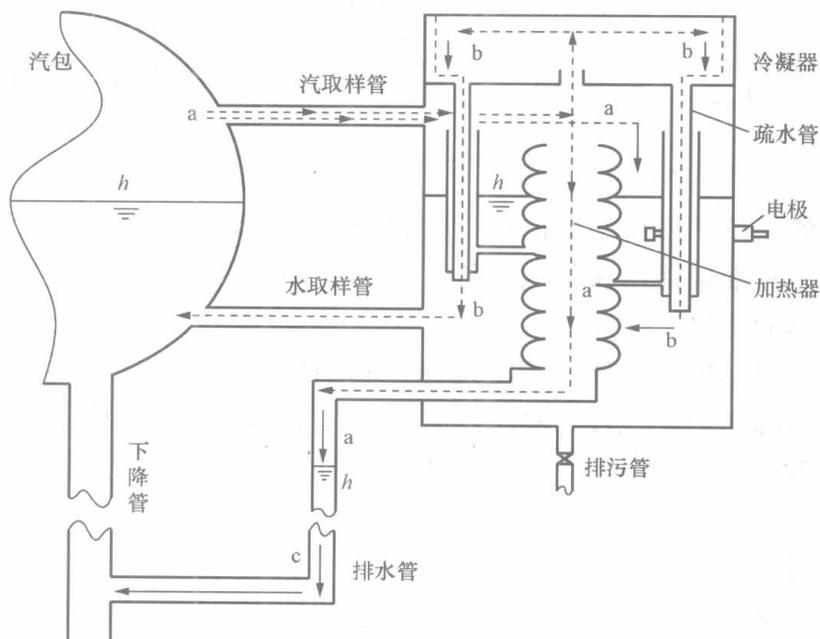


图 8-17 改进的测量筒示意图

a—汽包；b—冷凝器水流；c—加热器凝结水流；h—水面

(2) 改进电极组件的结构及采取水质自优化措施以提高电极的可靠性。传统电极组件的密封紧力随压力增加而减小，需要预紧力很大，加之采用硬靠机械密封，密封可靠性低，热紧性能差。一种柔性自密封电极组件可以利用筒内本身压力增加密封紧力，压力愈高，自紧力愈大。加上安装预紧力，有足够紧力保证密封不泄漏。柔性密封材料可耐 1000℃ 高温，承压强度高，回弹性能与热紧性能好。电极带有拆卸螺纹，拆卸方便。电极安装时有 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 仰角，可有效防止电极挂水与水渍。

设置的冷凝器可实现取样水质自优化。大量纯净的蒸馏水进入水室，将水质较差的旧水样压回汽包，形成自动净化置换回路，水样为“活水”。其好处是：

- 1) 免排污。水质好，减轻了对电极的污染。
- 2) 可增大水样电阻率，利于减小工作电流，减缓电极的腐蚀而延长寿命。
- 3) 水质稳定，水样上下水阻率分布较均匀，利于提高二次仪表测量的稳定性，不必经常调整仪表临界水阻。

4) 水侧取样管中有连续流向汽包的高温水流，当汽包水位大幅度升降时，电极承受的热冲击较小。

8.4 差压式水位计

差压式水位计是通过把液位高度的变化转换成差压信号来实现水位的测量的，主要由水

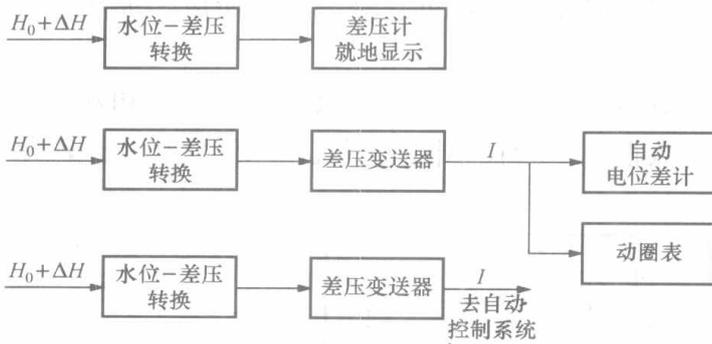


图 8-18 差压水位测量系统

位—差压转换装置（又称平衡容器）、压力信号管路和差压计（或差压变送器）组成。差压水位测量系统一般有三种组成形式，即就地显示、信号远传显示记录、信号远传输出，如图 8-18 所示。

差压式水位计是应用非常广泛的一种水位计。它可以连续显示水位，也可以发报警信号和向水位调节器提供信号。

但其指示值受待测液位容器内压力变化的影响大，只有对差压式水位计的指示值进行压力补偿，才能比较准确地反映待测水位。在火力发电厂中可用于汽包水位、高压加热器水位、除氧器水位等的测量。

水位与差压的转换是通过平衡容器实现的。利用平衡容器可形成一个恒定的水静压力，与被测水位形成的水静压力相比较，输出二者之差。平衡容器的结构有单室平衡容器、双室平衡容器及双差压平衡容器等形式。下面以对汽包水位的测量为例对差压式水位计加以介绍。

8.4.1 单室平衡容器

单室平衡容器的结构如图 8-19 所示。由汽包进入平衡容器的蒸汽不断凝结成水，并由于溢流而保持一个恒定水位。当容器内水的密度一定时，形成恒定的水静压力 p_+ ，汽包水位也形成一个水静压力 p_- 。二者相比较，就得到与水位成比例的差压。

汽包水位计的标尺，习惯以正常水位 H_0 为零刻度（零水位），超过正常水位为正水位（ $+\Delta H$ ），低于正常水位为负水位（ $-\Delta H$ ）。

根据流体静力学原理，单室平衡容器的差压—水位关系为

$$\begin{aligned} \Delta p &= L\rho_a g - (H_0 + \Delta H)\rho_w g - (L - H_0 - \Delta H)\rho_s g \\ &= L(\rho_a - \rho_s)g - H_0(\rho_w - \rho_s)g - \Delta H(\rho_w - \rho_s)g \end{aligned} \quad (8-5)$$

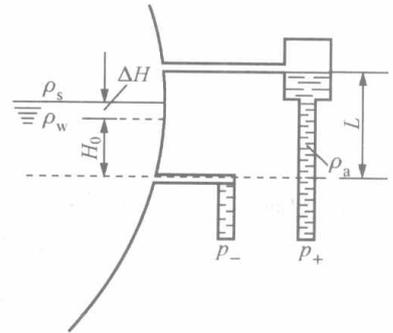


图 8-19 单室平衡容器的结构

式中 Δp ——水位计输出的差压， $\Delta p = p_+ - p_-$ ；

ρ_a —— p_+ 侧水柱的密度；

ρ_w ——饱和水密度；

ρ_s ——饱和蒸汽密度；

H_0 ——正常水位值；

ΔH ——显示水位值。

由式 (8-5) 可知，当平衡容器结构一定（即 L 确定）、汽包压力一定（ ρ_w 、 ρ_s 确定）及 ρ_a 一定时，正、负压管的差压输出与汽包水位呈线性关系。水位增高，输出差压减小，根据差压数值就可知道相应的水位。

但上述平衡容器在实际使用中，存在着下列问题。

(1) 由于平衡容器向外散热，正压容器中的水温由上至下逐步降低，其数值很难准确确

定。平衡容器内的温度随使用条件而变，在测量过程中密度 ρ_a 不能保持恒定而引起误差。

(2) 差压式水位计一般是在汽包工作在额定工作压力下分度的，分度时的饱和水和饱和蒸汽的密度为额定工作压力对应的密度值。差压式水位计只有汽包工作在额定工作压力下使用时，其指示才正确。但在机组启、停或滑压运行时，汽包内工作压力变化很大，水位计的指示会产生很大误差。

对第一个问题的解决方法是采用保温和蒸汽加热的方法，此时的平衡容器为双室平衡容器。

8.4.2 双室平衡容器

在图 8-20 所示的双室平衡容器中，给固定水柱增装了蒸汽保温室，使得固定水柱的温度达到了汽包内的汽水温度，因而消除了固定水柱非饱和状态时温度的影响。双室平衡容器的差压—水位关系为

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_+ - p_- = L\rho_w g - (H_0 + \Delta H)\rho_w g - (L - H_0 - \Delta H)\rho_s g \\ &= (L - H_0 - \Delta H)(\rho_w - \rho_s)g\end{aligned}\quad (8-6)$$

由式 (8-6) 可以看出，①输出的信号差压 Δp 与 ΔH 成负线性关系（汽包压力不变时）；②汽包压力变化时，输出仍受压力的影响（水位不变时）；③不同水位时压力影响所产生的误差是不同的。

当汽包压力为额定工作压力 p_e 时，差压—水位的分度关系为

$$\Delta p_e = (L - H_0 - \Delta H)(\rho_{we} - \rho_{se})g \quad (8-7)$$

式中 ρ_{we} 、 ρ_{se} ——汽包额定工作压力下的饱和水和饱和蒸汽的密度。

当汽包压力为实际工作压力 p 时，差压—水位的关系为

$$\Delta p = (L - H_0 - \Delta H)(\rho_w - \rho_s)g \quad (8-8)$$

式中 ρ_w 、 ρ_s ——汽包实际工作压力下的饱和水和饱和蒸汽的密度。

在 ΔH 不变的情况下，汽包压力的变化所产生的输出误差 $\delta_{\Delta p}$ 为

$$\delta_{\Delta p} = \Delta p - \Delta p_e = (L - H_0 - \Delta H)(\Delta\rho_w - \Delta\rho_s)g \quad (8-9)$$

式中 $\Delta\rho_w = \rho_w - \rho_{we}$ ； $\Delta\rho_s = \rho_s - \rho_{se}$ 。

由式 (8-9) 可知，对于图 8-20 所示的双室平衡容器，其输出虽然消除了固定水柱温度的影响，但受汽包工作压力的影响还是比较大的。

【例 8-1】 如图 8-20 所示，设 $L=600\text{mm}$ ， $H_0=300\text{mm}$ ，求 $p_1=10\text{MPa}$ 和 $\Delta H=0$ 时的输出差压 Δp_{10} 等于多少？若压力降为 $p_2=5\text{MPa}$ ，再求 $\Delta H=0$ 时的输出差压 Δp_5 等于多少？

解 (1) 查饱和密度表（附表 II）可知

$p_1=10\text{MPa}$ 时， $\rho_{w10}=688.4\text{kg/m}^3$ ， $\rho_{s10}=55.6\text{kg/m}^3$ ；

$p_2=5\text{MPa}$ 时， $\rho_{w5}=777.7\text{kg/m}^3$ ， $\rho_{s5}=25.4\text{kg/m}^3$ 。

(2) 在 $\Delta H=0$ 时，平衡容器的输出

$$\begin{aligned}\Delta p &= (L - H_0 - \Delta H)(\rho_w - \rho_s)g \\ \Delta p_{10} &= (0.6 - 0.3) \times (688.4 - 55.6) \times 9.81 = 1862\text{Pa}\end{aligned}$$

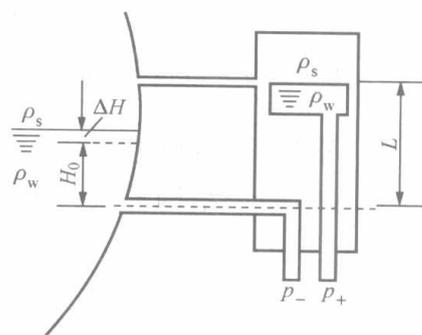


图 8-20 双室平衡容器的结构

$$\Delta p_5 = (0.6 - 0.3) \times (777.7 - 25.4) \times 9.81 = 2214 \text{Pa}$$

(3) 以 Δp_{10} 为分度值, 误差为

绝对误差 $\Delta p_5 - \Delta p_{10} = 2214 - 1862 = 352 \text{Pa}$

相对误差 $\frac{\Delta p_5 - \Delta p_{10}}{\Delta p_{10}} \times 100\% = \frac{352}{1862} \times 100\% = 18.9\%$

由例 8-1 可以看出, 汽包压力变化对水位测量的影响是很大的。图 8-21 给出了饱和水和饱和蒸汽密度曲线。从图 8-21 中可见, 随着压力的降低, 密度差 ($\rho_w - \rho_s$) 增大。由于

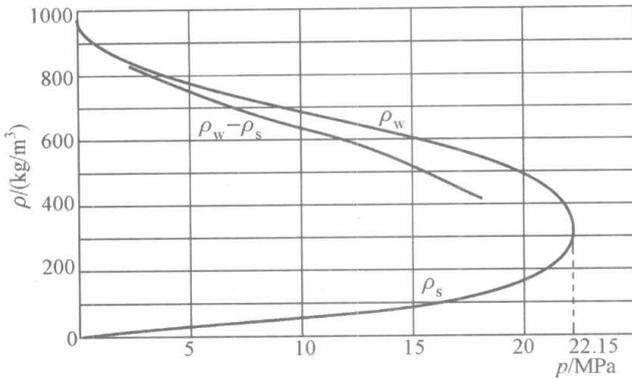


图 8-21 饱和水和饱和蒸汽密度曲线

双室平衡容器的结构尺寸 L 总是大于 H , 所以从式 (8-9) 可知, 当汽包压力低于额定值时, ($\rho_w - \rho_s$) 增大使输出差压 Δp 增大, 因而使差压式水位计指示偏低。由此产生的水位指示误差还与水位 H 、平衡容器结构尺寸 L 有关。($L-H$) 越大, 指示误差也越大, 也就是说, 低水位比高水位误差大。目前常用两种方法来减小或消除此误差: 一是进一步改进平衡容器的结构; 另一方法是对平衡容器输出的有误差的信号引入压力校正。

8.4.3 双差压平衡容器

一种双差压结构补偿式平衡容器如图 8-22 所示。平衡容器输出的差压 $\Delta p = p_+ - p_-$ 为信号差压, $\Delta p' = p_+ - p'_+$ 为补偿差压。

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_+ - p_- \\ &= (L - H_0 - \Delta H)(\rho_w - \rho_s)g \end{aligned} \tag{8-10}$$

$$\begin{aligned} \Delta p' &= p_+ - p'_+ \\ &= L_1(\rho_w - \rho_s)g \end{aligned} \tag{8-11}$$

故

$$Y = \frac{\Delta p'}{\Delta p} = \frac{L - H_0 - \Delta H}{L_1} = \frac{L - H_0}{L_1} - \frac{\Delta H}{L_1} \tag{8-12}$$

由式 (8-12) 可以看出, 两差压信号经过处理计算后得到的信号 Y 只与平衡容器的结构尺寸和水位有关, 而与汽包工作压力无关, 完全消除了工作压力的影响。但是它有两个缺点: ①平衡容器结构复杂。②虽然不需要装设校正用压力变送器, 但却要装设校正用差压变送器。差压变送器及其管路系统相对较复杂, 测量可靠性差, 容易产生附加误差。

8.4.4 汽包水位信号的压力校正

单纯地改进平衡容器的结构来减小汽包压力变化对差压式水位计测量的影响, 存在着一定的局限性。为了使差压式水位计在启、停炉的全过程中比较准确

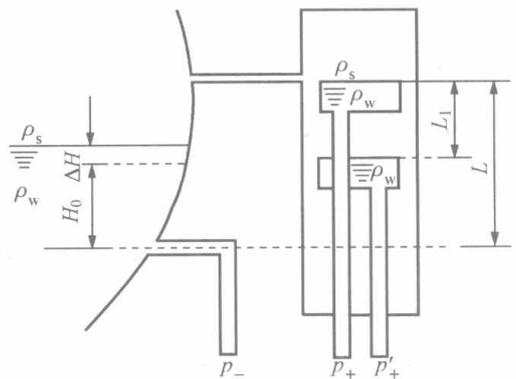


图 8-22 双差压平衡容器

地指示水位值，可对平衡容器输出的有误差的差压信号引入汽包压力信号进行一定的校正计算，校正由于汽包压力偏离额定值所带来的误差。

8.4.4.1 校正原理

校正计算的实质就是对平衡容器输出的差压 Δp ，在计算水位时使用实际压力下的汽水密度，而不是用额定压力下的密度。以图 8-19 所示的单室平衡容器为例，其输出的差压与水位的关系为

$$\Delta p = L(\rho_a - \rho_s)g - H_0(\rho_w - \rho_s)g - \Delta H(\rho_w - \rho_s)g$$

整理可得

$$\begin{aligned} \Delta H &= \frac{L(\rho_a - \rho_s)g - \Delta p}{(\rho_w - \rho_s)g} - H_0 \\ &= \frac{L \times f_1(p) - \Delta p}{f_2(p)} - H_0 \end{aligned} \tag{8-13}$$

其中

$$\begin{aligned} f_1(p) &= (\rho_a - \rho_s)g \\ f_2(p) &= (\rho_w - \rho_s)g \end{aligned}$$

汽包压力与密度差的关系，即 $(\rho_a - \rho_s) \sim p$ 和 $(\rho_w - \rho_s) \sim p$ 的关系可用几段直线形成的折线来更好地逼近，即

$$\begin{aligned} (\rho_a - \rho_s)g &= K_1 - K_2 p \\ (\rho_w - \rho_s)g &= K_3 - K_4 p \end{aligned} \tag{8-14}$$

式 (8-14) 中， K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 皆为常数。汽包压力在不同变化范围内时，这些常数取值也不同。

将式 (8-14) 代入式 (8-13)，得

$$\Delta H = \frac{L(K_1 - K_2 p) - \Delta p}{K_3 - K_4 p} - H_0$$

即为汽包压力校正计算公式。需要说明的是，一般情况下平衡容器内的水的密度与周围环境温度有关。由于参比水柱处于低温区，室温的变化不会导致过大的测量偏差，故补偿时 ρ_a 可取 40℃ 时的密度。

8.4.4.2 校正计算的实现

具有压力校正计算的差压式水位测量系统框图如图 8-23 所示。

8.4.5 差压式液位变送器的零点迁移问题

8.4.5.1 无迁移、正迁移和负迁移

在使用差压式液位计测量液位时，根据不同的场合和使用条件，差压式液位变送器存在着无迁移、负迁移和正迁移三种情况，如图 8-24 所示。

1. 无迁移

如图 8-24 (a) 所示，差压变送器正、负

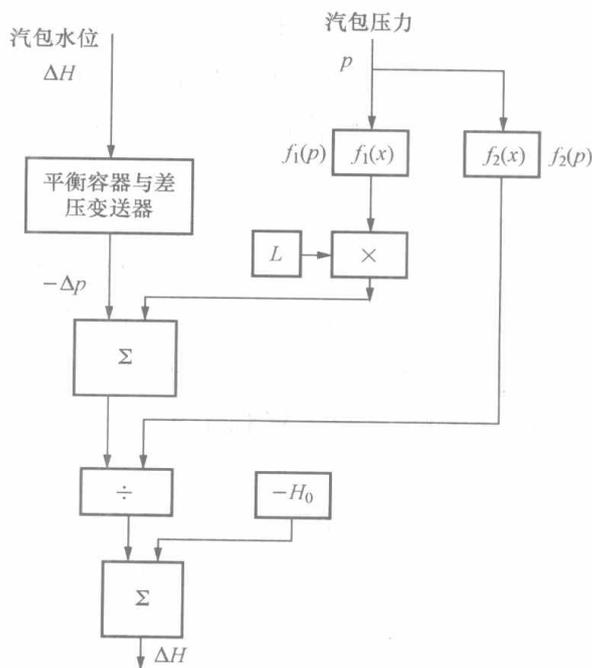


图 8-23 带压力校正的汽包水位测量系统框图

压室分别与容器下部（液面基准面）和上部（气相压力或汽相压力）取压点相连通。设被测介质密度为 ρ ，变送器正负压室差压为 Δp ，水位高度为 H ，则有 $\Delta p = \rho g H$ ，即差压与水位高度成比例变化。假设采用输出为 $4 \sim 20 \text{mA}$ 的电动变送器，并假设对应于水位的变化所要求的仪表量程为 $\Delta p = 6000 \text{Pa}$ ，则变送器的特性曲线如图 8-25 中线 A 所示。 Δp 为 0 时，输出电流 I 为 4mA ； Δp 为 6000Pa 时， I 为 20mA ，为区别下面两种情况，我们称这种情况为“无迁移”。

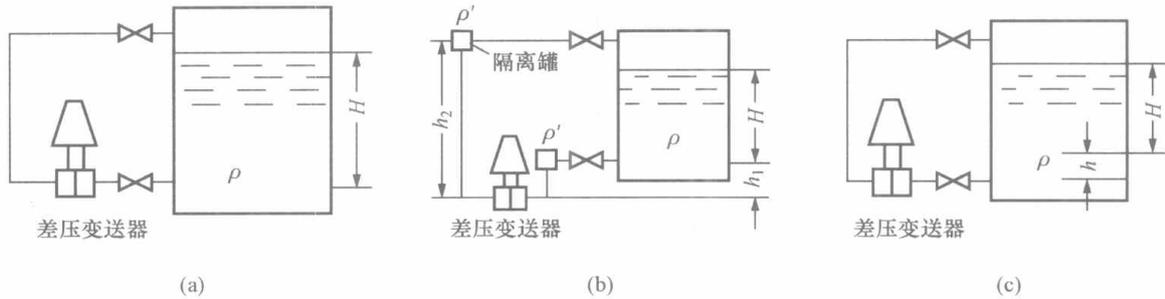


图 8-24 差压式水位计检测水位原理图

(a) 无迁移；(b) 负迁移；(c) 正迁移

2. 负迁移

如图 8-24 (b) 所示，为防止被测介质堵塞或腐蚀导压管以及保持负压室的液柱高度恒定，在变送器正、负压室与取压点之间分别装有隔离罐，并充以隔离液，此时正、负压室的压力分别为

$$p_1 = \rho' g h_1 + \rho g H + p_g \quad (8-15)$$

$$p_2 = \rho' g h_2 + p_g \quad (8-16)$$

正、负压室的差压为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g H - \rho' g (h_2 - h_1) \quad (8-17)$$

式中 p_1 、 p_2 ——变送器正、负压室的压力，Pa；

ρ 、 ρ' ——被测液体和隔离液的密度， kg/m^3 ；

h_1 、 h_2 ——隔离罐至变送器正、负压室的高度，m；

p_g ——容器中气相（或汽相）压力，Pa。

由式 (8-17) 可知， $H=0$ 时， $\Delta p = -\rho' g (h_2 - h_1) < 0$ ，此时差压变送器的输出低于其下限值 4mA ，且由于实际工作中常常 $\rho' > \rho$ ，所以即使 H 为上限值都有可能使变送器输出低于 4mA ，这样变送器就无法正常工作。此时需要在变送器上调整迁移量，即在维持原来量程不变的条件下，同时减小变送器输入的上、下限，使变送器的输出与液位成比例变化，这个过程称为负迁移。迁移量为

$$B = \rho' g (h_2 - h_1) \quad (8-18)$$

由 h_2 、 h_1 和 ρ' 即可求出负迁移量 B 。

【例 8-2】 设 $H=0 \sim 0.6 \text{m}$ ， $\rho' = 1.2 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ， $\rho = 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ， $h_1 = 1.89 \text{m}$ ， $h_2 = 2.40 \text{m}$ ， $g = 9.81 \text{m}/\text{s}^2$ ，差压变送器输出为 $4 \sim 20 \text{mA}$ ，试计算变送器的量程和迁移量的值。

解 仪表量程为

$$\Delta p = \rho g H = 10^3 \times 9.81 \times 0.6 = 6 \times 10^3 \text{Pa}$$

负迁移量为

$$B = \rho'g(h_2 - h_1) = 1.2 \times 10^3 \times 9.81 \times (2.40 - 1.89) = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Δp 的下限值

$$\Delta p_{\min} = -6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Δp 的上限值

$$\Delta p_{\max} = \Delta p + \Delta p_{\min} = 6 \times 10^3 - 6 \times 10^3 = 0 \text{ Pa}$$

安装前, 将变送器测量范围调整到 $(-6 \times 10^3 \sim 0) \text{ Pa}$, 即 $H=0$, $\Delta p = -6 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时, 变送器输出电流 I 为 4 mA ; $H=0.6 \text{ m}$, $\Delta p=0$ 时, I 为 20 mA 。变送器输出特性曲线如图 8-25 中的 C 线所示。

3. 正迁移

在实际应用中, 有时变送器位于液位基准面下, 如图 8-24 (c) 所示。此时作用在变送器正负压室的差压为

$$\Delta p = \rho g(H + h) \quad (8-19)$$

式中 h ——变送器正、负压室至液位基准面的距离。

当 $H=0$ 时, $\Delta p = \rho gh > 0$, 变送器输出高于下限值 4 mA ; 当 H 为上限值时, 变送器输出高于 20 mA 。此时, 需要在维持原来量程不变的前提下, 调整迁移量, 同时增大变送器输入的上、下限, 使 H 为 0 时输出为 4 mA , H 为上限值时输出为 20 mA , 此过程为正迁移。正迁移量为

$$A = \rho gh \quad (8-20)$$

只要知道 ρ 、 g 、 h , 即可知道正迁移量 A 。

【例 8-3】 设 $h=0.6 \text{ m}$, $H=0 \sim 0.6 \text{ m}$, $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho=10^3 \text{ kg/m}^3$, 差压变送器输出为 $4 \sim 20 \text{ mA}$, 试计算变送器的量程和迁移量的值。

解 仪表的量程

$$\Delta p = \rho g H = 10^3 \times 9.81 \times 0.6 = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

正迁移量

$$A = \rho gh = 10^3 \times 9.81 \times 0.6 = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Δp 的下限值

$$\Delta p_{\min} = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Δp 的上限值

$$\Delta p_{\max} = \Delta p + \Delta p_{\min} = 6 \times 10^3 + 6 \times 10^3 = 1.2 \times 10^4 \text{ Pa}$$

安装前, 把变送器测量范围调整到 $6 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^4 \text{ Pa}$, 使 $H=0$, $\Delta p = 6 \times 10^3 \text{ Pa}$ 时, $I=4 \text{ mA}$; $H=0.6 \text{ m}$, $\Delta p = 1.2 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, $I=20 \text{ mA}$ 。变送器特性曲线如图 8-25 中的 B 线所示。

迁移量的相对值可表示为

$$d = \frac{\text{迁移量}}{\text{测量范围}} \times 100\% \quad (8-21)$$

图 8-25 中 A 线表示迁移量为 0, 或无迁移; B 线表示正迁移 100%; C 线表示负迁移 100%。迁移只是同时改变量程的上下限, 而不是改变量程。

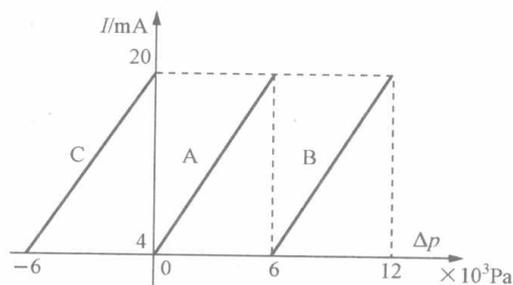


图 8-25 正、负迁移特性

8.4.5.2 平衡容器构成的差压式水位计的零点迁移

由前可知,差压式水位计的差压 Δp 与水位 ΔH 的关系为负线性关系,若将平衡容器中的压力 p_+ 和 p_- 分别接到差压计或差压变送器的正压侧和负压侧,则水位越高,显示的数值越小,水位的显示不符合读数习惯。为了使显示或输出的电气信号适合人们的正常习惯(水位升高时显示的数值增大),则需要将 Δp 信号与差压计或差压变送器信号反接,即 Δp 信号中的压力 p_+ 和 p_- 分别接到差压计的负压侧和正压侧(如图 8-26 所示),然后再对差压计和差压变送器进行零点负迁即可。

以图 8-26 所示的平衡容器为例说明零点迁移的方法。在图 8-27 (a) 中,直线 1 是平衡容器的输出特性(负线性关系),直线 2 是差压变送器反接后,变送器接收的差压信号 $-\Delta p$ 与 ΔH 的关系曲线(正线性关系)。在图 8-27 (b) 中,直线 1 是差压变送器未零点负迁时的输出特性(Δp 与 I 的特性曲线);为得到 $-\Delta p$ 与 I 的输出特性,需将差压变送器的零点负迁 100%,如图 8-27 (b) 中直线 2 所示。平衡容器输出 Δp_{\max} 时,变送器输出 $I=4\text{mA}$,对应的水位 $\Delta H=-H_0$ 。变送器输出 $I=12\text{mA}$ 时, $\Delta H=0$ 。当平衡容器输出 $\Delta p=0$ 时,变送器输出 $I=20\text{mA}$,对应的水位 $\Delta H=L-H_0$ 。

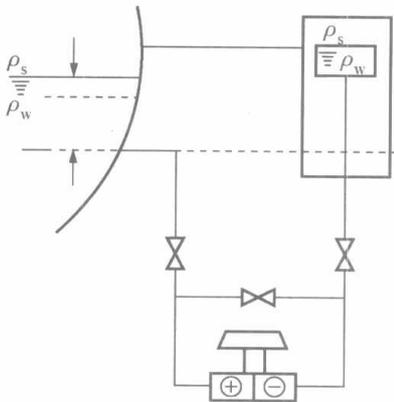


图 8-26 平衡容器与差压变送器的连接

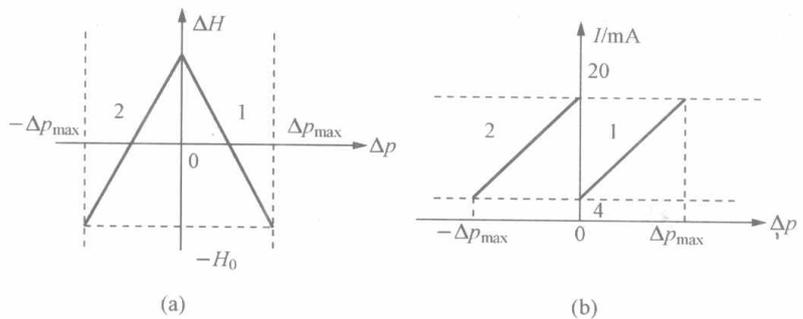


图 8-27 差压变送器的零点负迁原理
(a) 差压-水位显示曲线; (b) 差压变送器输出特性

8.5 其他液位测量方法

8.5.1 浮力式液位计

浮力式液位计是应用最早的一种液位测量仪表。它结构简单,价格便宜,维护也比较简单。随着变送方法的改进至今仍然为工业生产所广泛采用。应用浮力原理测量液位,大致可以分为两种类型:一种是恒浮力式液位计,在测量过程中浮力不变,浮子永远漂浮在液面上,浮子的位置随着液面高低而变化,检测浮子的位移量,便可以知道液位的高低;另一种是变浮力式液位计,在测量过程中浮力是变化的,浮筒浸没在液体里,由于浮筒被浸没的程度不同,浮筒所受的浮力也不同,检测出浮筒所受的浮力的变化,便可以知道液位的高低。下面对恒浮力式液位计加以介绍。

8.5.1.1 测量原理

典型的恒浮力式液位计为浮子式液位计,其工作原理图如图 8-28 所示。

设浮子的重量为 W ,平衡锤重量为 G ,浮子的截面积为 A ,浸没于液体中的高度为 h ,

液体密度为 ρ 。当液位高度为 H 时, 测量系统达到平衡状态, 作用在浮子上的合力为零, 有

$$W - F_{\text{浮}} = G \quad (8-22)$$

其中

$$F_{\text{浮}} = hA\rho g$$

当液位升高后, 浮子被浸没的高度增加 Δh , 使浮子所受浮力增加

$$\Delta F_{\text{浮}} = \Delta hA\rho g \quad (8-23)$$

系统的原稳定平衡状态被破坏, 有

$$W - (F_{\text{浮}} + \Delta F_{\text{浮}}) < G \quad (8-24)$$

由于向上浮力的增加, 浮子在平衡锤的牵引下, 向上做相应的位移, 直到系统达到新的平衡状态。作用在浮子上的合力又恢复为 $W - F_{\text{浮}} = G$ 。

比较式 (8-22) 和式 (8-24), 为了满足系统受力平衡的要求, 浮子上升的位移量 ΔH 与液位的增量是完全相同的。浮子的位移可以直接反映液位的变化量。同时由式 (8-22) 可见, 系统受力平衡关系与液位的高度 H 无关, 液位稳定不变时, 浮子所受的浮力是一个恒定值。因此这种液位计称为恒浮力式液位计。

8.5.1.2 恒浮力式液位计的种类及应用

常见的恒浮力式液位计可分为: 带有钢丝绳 (或钢带) 的浮子式液位计、浮球式液位计和依靠浮子电磁性能传递信号的液位计。

1. 带有钢丝绳 (钢带) 的浮子式液位计

大型的贮罐多使用这类液位计。浮子重锤液位计如图 8-28 所示。液位的高低通过连接浮子的钢丝绳传递给平衡重锤, 由它的位置高低显示出相应的液位。这种液位计的缺点是精度不够高, 信号不能远传。

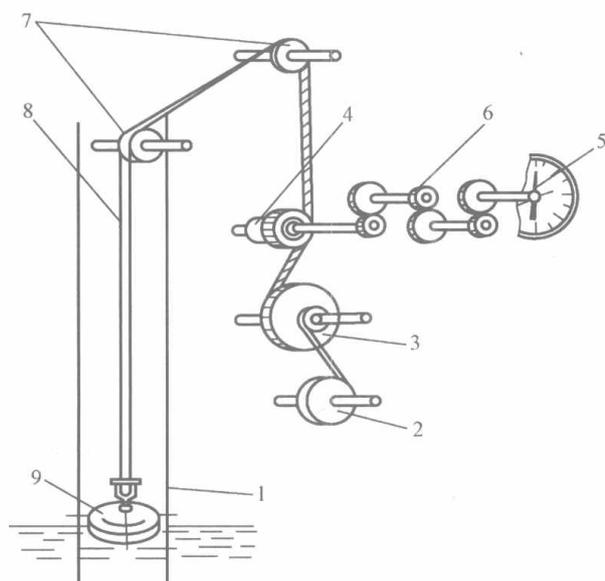


图 8-29 浮子钢带液位计测量原理

1—导向钢管; 2—盘簧轮; 3—钢带轮; 4—链轮;

5—指示盘; 6—齿轮; 7—导轮;

8—钢带; 9—浮子

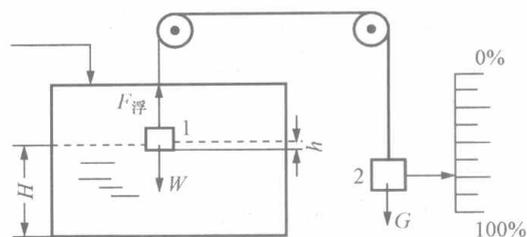


图 8-28 恒浮力式液位计工作原理图

1—浮子; 2—平衡锤

对浮子重锤液位计加以改进, 成为浮子钢带液位计。图 8-29 所示为浮子钢带液位计测量原理图。这种液位计由传感器和显示变送器组成。传感器安装在罐顶上, 从传感器顶部伸出一根测量钢带, 钢带的端部吊有浮子, 当浮子在全量程范围内上下移动变化时, 钢带对浮子的拉力基本不变。浮子的自重大于钢带的拉力, 浮子部分浸入液体中。由于拉力不变, 所以浮子浸入液体的深度不变, 因而可以认为浮子与液位严格同步运动, 扣除一固定初值后, 浮子的位置就代表了液位。

浮子的位置用钢带伸出传感器的长度来计量, 钢带上每隔 50mm 穿一个小孔, 链轮上装有 4 枚定位针, 两针相距也是 50mm。钢带运动时, 定位针恰好穿进钢带的小孔内, 钢带通过定位针带动链轮转动。钢带移动 200mm,

链轮旋转一周，用磁性耦合的方法将链轮的转动传到液位变送器，转换成相应的电信号。

显示仪表完成译码、计数、显示和 D/A 转换功能。通过 5 位数字显示，精度可达到 0.03 级~0.02 级，量程可达 20~30m，并可带有串行异步通信功能。

2. 浮球式液位计

对于温度、粘度较高，而压力不太高的密闭容器内的液体介质的液位测量，一般可采用浮球式液位计。如图 8-30 所示，浮球由不锈钢制成。它通过连杆与转动轴相连，转动轴的另一端与容器外侧的杠杆相连，并在杠杆上加一平衡锤，组成以转动轴为支点的杠杆系统。一般要求浮球的一半浸入液体时，实现系统的力矩平衡。当液位升高时，浮球被液体浸没的深度增加，浮球所受的浮力增加，破坏了原有的力矩平衡状态，平衡锤拉动杠杆作顺时针方向转动，浮球上升，直到浮球的一半浸没在液体中时，杠杆系统恢复了力矩平衡，浮球停留在新的位置上。如果在转动轴的外端安装指针或信号转换器，就可方便地进行液位的就地指示、控制。

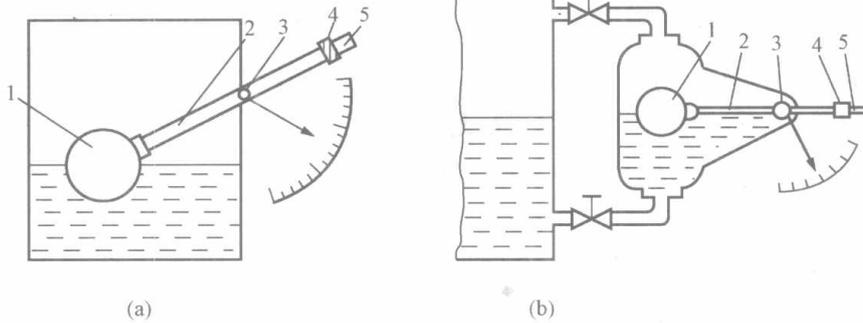


图 8-30 浮球式液位计

(a) 内浮式；(b) 外浮式

1—浮球；2—连杆；3—转动轴；4—平衡锤；5—杠杆

浮球式液位计分内浮式和外浮式两种。将浮球直接装在容器内部为内浮式，如图 8-30 (a) 所示。当容器直径很小时，可在容器外侧另做一浮球室与容器相通，为外浮式，如图 8-30 (b) 所示。外浮式便于维修，但它不适用于粘稠或易结晶、易凝固的液体，内浮式的特点则与此相反。

这种仪表由于机械杠杆臂长度的限制，所以量程通常较小。常作为液位控制系统中的液位信号器使用。

3. 翻板式液位计

翻板式液位计是利用浮子电磁性能传递液位信号。在火力发电厂用来测量除氧器的水位。其组成及工作原理如图 8-31 所示。翻板用极轻而薄的导磁材料制成（如薄铁片），装在摩擦很小的轴承上，翻板的两侧涂以非常醒目的不同颜色的漆。从液位起始点开始，每隔一段距离在翻板上刻上液位高度的具体数字。磁钢封装在浮子内。带有磁的浮子随液位变化而升降时，吸动翻板翻转。若从 A 向看，浮子以下翻板为一种颜色，浮子以上翻板为另一种颜色。翻板装在铝制支架上，支架长度和翻板数量随测量范围及精度而定。

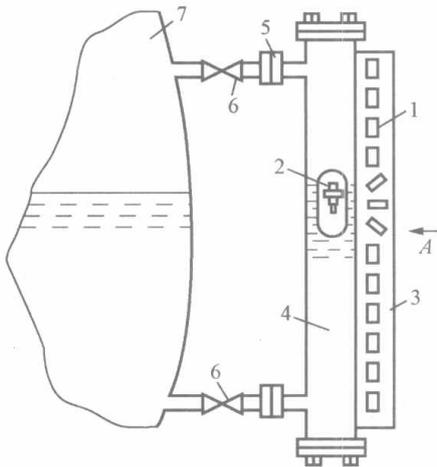


图 8-31 翻板式液位计

1—翻板；2—内装磁钢的浮子；3—翻板支架；
4—连通容器；5—连接法兰；
6—阀；7—被测容器

翻板式液位计结构牢固,工作可靠,显示醒目,测量时不会产生火花,宜在易燃易爆场合使用。其不仅可就地指示液位,也可附加液位极限报警,实现远距离液位报警和监控。其缺点是当被测介质粘度较大时,浮子与器壁之间易产生粘附现象,使摩擦增大。严重时,可能使浮子卡死而造成指示错误并引起事故。

8.5.2 电容式液位计

电容式液位计是将被测介质液位的变化转换成液位计电容的变化这一原理工作的。电容式液位计适用于各种导电或非导电液体的液位测量,结构简单,无可动部件,动态响应快,基本上不需要专门维护,应用范围较广。但测量时要求被测介质的介电常数与空气介电常数差别大,且由于在电容量的检测中使用高频电路,对信号传输时的屏蔽要求较高。

8.5.2.1 电容式液位计的测量原理

电容式液位计的测量原理如图8-32所示。由两个长度为 L ,半径分别为 R 和 r 的圆筒形金属导体,中间隔以绝缘物质便构成圆筒形电容器。当两圆筒间充以介电常数为 ϵ_0 的气体时,则两圆筒间的电容量为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{R}{r}} \quad (8-25)$$

如果电极的一部分被介电常数为 ϵ_x 的液体所浸没,高度为 l ,电容器可视为两部分电容的并联组合,此时电容器的电容量为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0(L-l)}{\ln \frac{R}{r}} + \frac{2\pi\epsilon_x l}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln \frac{R}{r}} + \frac{2\pi l(\epsilon_x - \epsilon_0)}{\ln \frac{R}{r}} = C_0 + \Delta C \quad (8-26)$$

电容的增量为

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{2\pi l(\epsilon_x - \epsilon_0)}{\ln \frac{R}{r}} = Kl \quad (8-27)$$

从式(8-27)可知,当 ϵ_x 、 ϵ_0 、 R 和 r 保持不变时,电容量的增量 ΔC 与电极被浸没的长度 l (等于液位 H)成正比关系。因此,测量电容量的增量,就可知道液位 H 的高低。

8.5.2.2 电容式液位计的构成

电容式液位计由传感器及配套的显示仪表组成。由于被测液体有导电与非导电之分,同时液位贮槽的材料也有导体与非导体的区别等,所以传感器中的测量电极有多种类型,如图8-33所示,图中 L =测量范围+110mm。

8.5.2.3 电容量的检测

工业生产中应用的电容液位计,由于在其量程范围内的电容变化量一般都很小,采用直接测量都较困难。因此需要通过电子线路的放大和转换后才能显示和远传。测量电容的方法较多,如电桥法、谐振法和充放电法等。

利用电容充放电法来测量电容的液位计方框图如图8-34所示。电容液位检测元件把液位的变化变为电容的变化,测量前置电路利用充放电原理把电容变化变成直流电流,经与调零单元的零点电流比较后,再经直流放大,然后进行指示或远传。晶体管振荡器用来产生高频信号,经分频后,通过多芯屏蔽电缆传给测量前置电路完成充放电过程。

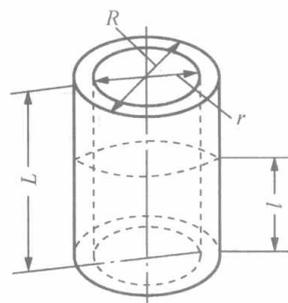


图8-32 电容式液位计的测量原理

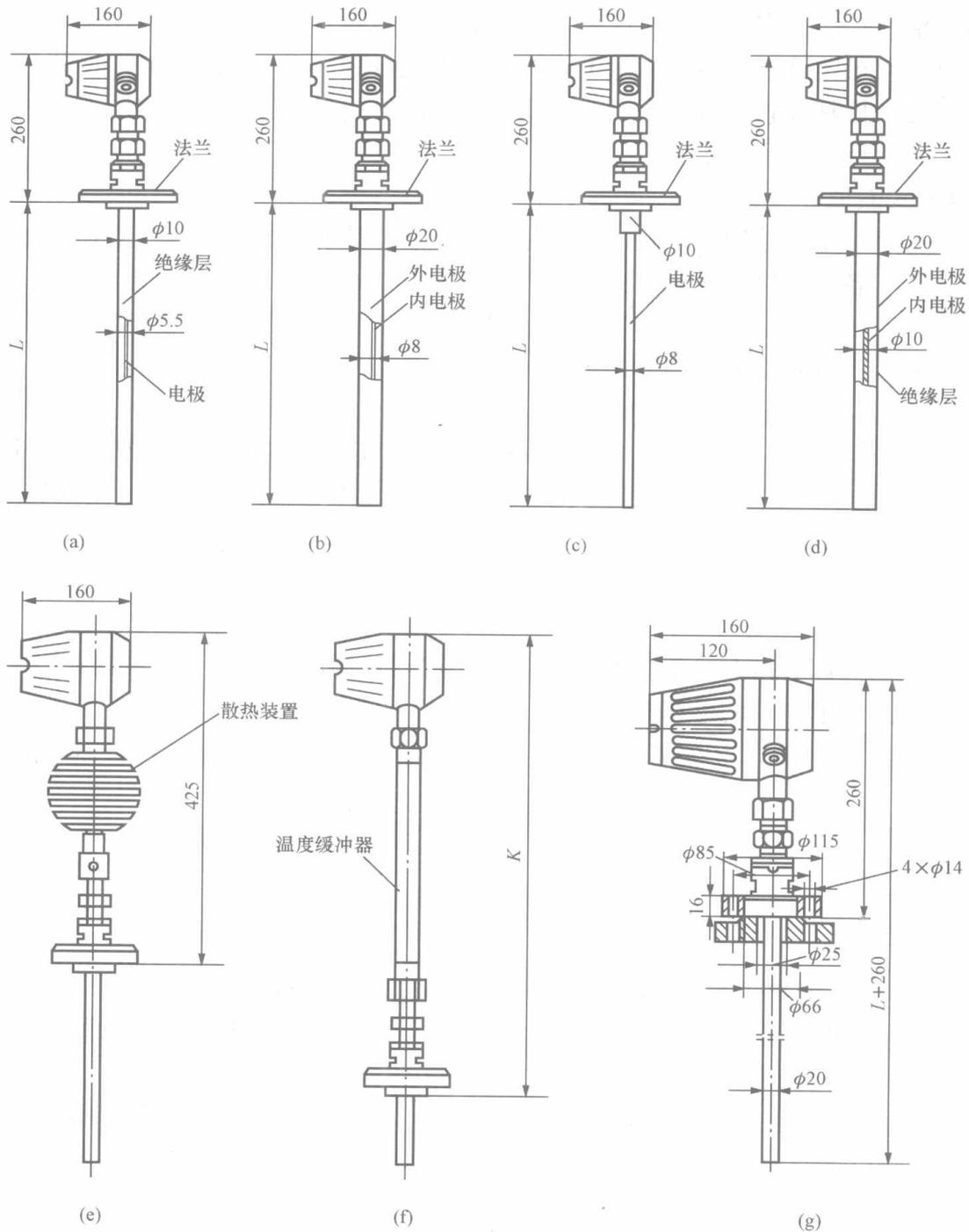


图 8-33 电容液位传感器外形和安装

(a) 套管式；(b) 同轴式；(c) 裸极式；(d) 复合式；
(e) 高温型；(f) 低温型；(g) 法兰安装式

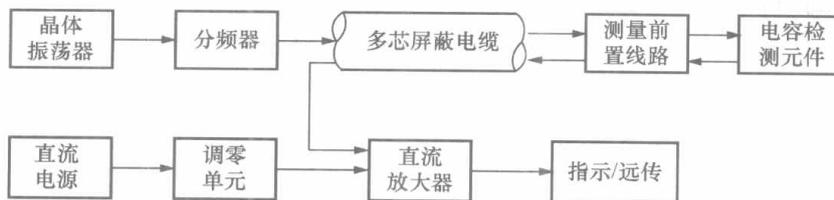


图 8-34 利用充放电法的电容液位计方框图

8.5.2.4 射频导纳电容物位计

射频导纳电容物位计是20世纪90年代发展起来的,是电容物位计的换代产品。它是由检测与变送两部分组成,检测部分由探头作为电容器的一极,与容器壁(或辅助电极)构成电容传感器。变送器由射频振荡器、解调器、放大器、电压/电流转换器等组成,它与前述电容物位计不同的是,后者采用100kHz射频电源,测量的是阻抗的倒数——导纳,故有射频导纳电容物位计之称。100kHz射频电源加在由电感和电容组成的电桥上,通过电桥的零位与相位平衡调整,使电桥平衡,输送给解调器的电压为零。当容器中的物位上升时,传感器的电容量增大,电桥失去平衡,则送给解调器电压将增大,电桥的不平衡电压信号经解调与放大处理,转换成与物位变化成比例的标准电流信号,远传至控制室进行集中显示、记录和在线控制。仪表对电抗和容抗进行综合处理,克服了一般电容传感器单纯测量电容所引起的误差。它的电路和传感器独特,几乎可测量生产过程中所有介质的物位,不受温度、湿度、流体粘度与密度变化的影响。

8.5.3 超声波液位计

超声波在介质中传播时,被吸收而减弱。声波的频率越高,方向性越强,则介质中衰减越大。声波遇到不同的分界面时会产生反射、折射等现象。利用声波的这些特性,制成各种超声波物位计。

超声波物位计可以分为以下两类。

(1) 定点发信超声波物位计:它是由于物位的升降及介质吸收或反射声波,使透过的声能被通断,以实现开关作用。

(2) 连续测量超声波物位计:声波发射到分界面(即物料表面或液体表面)后产生反射,由接收换能器接收反射回波,由发射到接收的时间间隔及声速,可得物位高度。

这里重点介绍连续测量超声波液位计。

8.5.3.1 基本原理及方案

超声波液位计是利用回声测距原理进行工作的。由于超声波可以在不同介质中传播,所以超声波液位计分为气介式、液介式及固介式三类,最常用的是气介式和液介式。图8-35是液介式与气介式超声波液位计的几种测量方案。(a)、(b)为液介式,(c)、(d)为气介式;而(a)、(c)两种方案发射和接收都是由一个探测器完成的,是单探头式;(b)、(d)是一个发射一个接收的双探头式。

对于液介式,探测器安装在液罐底部,有时也可安装在容器底外部。对于图8-35(a)所示的单探头形式,探头发出的超声波脉冲经过液体传至液面,在经液面反射回到原来的发射器,此时发射器又变成了接收器,接收了超声波脉冲。如果从发射到接收超声波脉冲的时间间隔为 t ,则探头距液面的高度 L 为

$$L = \frac{1}{2} Ct \quad (8-28)$$

式中 C ——超声波在被测介质中的传播速度。

由式(8-28)可知,如果准确知道介质中声波传播速度 C ,再能测得时间,就可以准确测量液位高度。

对于图8-35(c)所示的方案,与图8-35(a)所示方案基本一致,只是这里超声波在空气介质中传播,探头应放在高出液位可能达到的高度上。

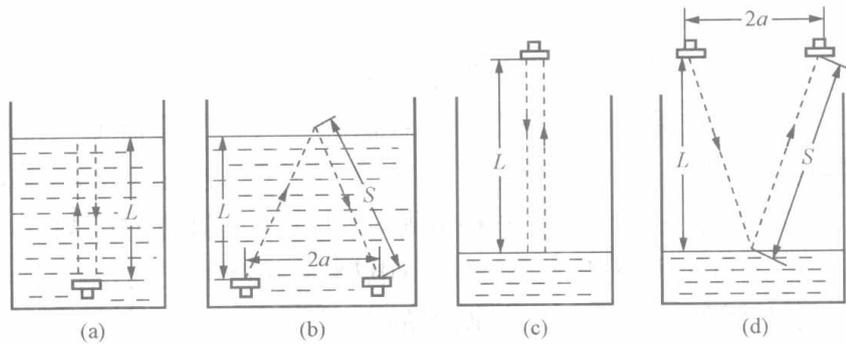


图 8-35 超声波液位计的几种方案原理

(a) 液介式单探头；(b) 液介式双探头；(c) 气介式单探头；(d) 气介式双探头

图 8-35 中的 (b)、(d) 是双探头式，声波经过的路程是 $2S$ ，即

$$S = \frac{1}{2} Ct \quad (8-29)$$

$$L = \sqrt{S^2 - a^2} \quad (8-30)$$

式中 a ——两个探测器之间距离之半。

对于单探头与双探头方案的选择，主要应以测量对象的具体情况考虑。一般多采用单探头方案，因为单探头简单、安装方便、维修工作量也较小，另外它可以直接测出距离 L ，不必修正。

但在一些特殊情况下，也不得不选择双探头方案。例如，探测距离较远，为了保证一定灵敏度，必须加大发射功率，用大功率换能器。但这些大功率换能器作为接收探测器时灵敏度都很低，甚至无法用于接收。在这种情况下，只好用一个灵敏度高的接收探测器。

另外，对单探头方案还有一个接收探测器的“盲区”问题。在应用同一探头作发射器又作接收器时，在发射超声波脉冲时，要在探头上加以较高的激励电压，这个电压虽然持续时间较短，但在停止发射时，在探头上仍存在一定时间的余振。如果在余振时间将探测器转向接收放大线路，则放大器的输入将还有一个足够强的信号。显然在这段时间内，即便能收到回波信号，也很难被分辨出来，因此称这段时间为盲区时间。探测器的盲区时间与结构参数、工作电压、频率等因素有关，可以通过实验确定。在知道盲区时间以后，再求得声速，就可以确定盲区距离。由于盲区距离的限制，采用单探头方案时，不能测量小于盲区距离的液位。采用双探头方案时，从理论上讲没有盲区问题，实际上，由于难以避免的电路耦合及非定向声波对接收器的作用，在发射超声脉冲时，接收线路中也将产生微弱的输出，也可以认为有一定的盲区，但它要比单探头小得多。

8.5.3.2 声速校正

从式 (8-29) 可见，要想通过测量超声波传播时间确定液位，声波传播速度 c 必须恒定。实际上声波传播速度在不同介质中都不一样，如在 0°C 时，空气中声波传播速度约为 331m/s ，在水蒸气中为 404m/s ，而在氢气中将为 1269m/s 。即使在同一介质中，温度不同声速也不同，例如， 0°C 空气中的声速为 331m/s ，而当温度为 100°C 时速度增加到 387m/s 。因此为了能准确测量液位，必须对温度修正。通常可在超声波探头附近安装温度传感器，自动补偿声速因温度变化对物位测量的影响。还可使用校正具，定期校正声速。

8.5.3.3 回波时间测量

液位计中回波时间的测量可采用双稳法测时。这种测时方法是利用一个双稳电路来计

时,即触发发射电路的脉冲同时触发这个双稳电路,当反射的回波前沿到达这个接收器时,再用这个接收波前沿脉冲触发双稳,使之翻回。显然这个双稳脉冲输出的方波宽度就是要测的回波时间。

如果采用数字显示,就可以利用一个门电路,使得只在双稳输出方波这段时间内对脉冲信号发生器送来的脉冲计数,用脉冲数表示方波延续的时间,最后再用数字显示装置显示出脉冲数。

超声波液位计无机械可动部分,安装维护方便;探头不与被测介质接触,可以实现非接触测量,适用有毒、高粘度及密封容器的液位测量,并能实现防爆,且超声波探头的寿命长。其缺点是声速易受介质的温度和压力的影响,且介质的翻腾、气泡和波浪会使声波乱反射而产生测量误差。

8.6 液位仪表的选用

液位仪表应在深入了解工艺条件、被测介质的性质、测量控制系统要求的前提下,根据液位仪表自身的特性进行合理的选配。

根据仪表的应用范围,液面测量应优先选择差压式仪表、浮筒式仪表和浮子式仪表。当不满足要求时,可选用电容式、辐射式等仪表。

仪表的结构形式和材质应根据被测介质的特性来选择。主要考虑的因素为压力、温度、腐蚀性、导电性;是否存在聚合、粘稠物沉淀、结晶、结膜、气化、起泡等现象;密度和粘度的变化情况;液体中含悬浮物的多少;液面扰动的程度等。

仪表的显示方式和功能,应根据工艺操作及系统组成的要求确定。当要求信号传输时,可选择具有模拟信号输出功能或数字信号输出功能的仪表。

仪表量程应根据工艺对象实际需要显示的范围或实际变化范围确定。除供容积计量用的液位仪表外,一般应使正常液位处于仪表量程的50%左右。

仪表计量单位采用m和mm时,显示方式为直读物位高度值的方式。如计量单位为%时,显示方式为0~100%线性相对满量程高度形式。

仪表精度应根据工艺要求选择,但供容积计量用的液位仪表,其精度等级应在0.5级以上。

液位仪表选型可参见表8-2。

表 8-2

液位仪表选型推荐表

测量对象 仪表名称	液 体		液/液界面		泡沫液体		脏污液体	
	位式	连续	位式	连续	位式	连续	位式	连续
差压式	可	好	可	可	—	—	可	可
浮筒式	好	可	可	可	—	—	差	可
磁性浮子式	好	好	—	—	差	差	差	差
电容式	好	好	好	好	好	可	好	差
带式浮子式	差	好	—	—	—	—	—	差
吹气式	好	好	—	—	—	—	差	可

续表

测量对象 仪表名称	液 体		液/液界面		泡沫液体		脏污液体	
	位式	连续	位式	连续	位式	连续	位式	连续
电极式（电接触式）	好	—	差	—	好	—	好	—
辐射式	好	好	—	—	—	—	好	好

注 表中“—”表示不能选用。

本章小结

一、双色水位计

基于连通器的原理工作，显示的水位直观、可靠。由于加入了光学系统，利用光从空气进入蒸汽或水产生不同的折射，使汽水界面显示成红、绿两色的分界面，显示清晰，并利用工业电视进行远传显示。

二、电接点水位计

利用汽（气）、水介质的电阻率相差很大的性质来测量水位。其主要由水位传感器和显示仪表组成。电接点水位计的优点是指示值受容器内工作压力的影响小，适应锅炉变参数运行，在锅炉启停过程中也能比较准确地反映水位变化，且结构简单，迟延小。其缺点是显示容易偏低，指示不连续。电接点水位计的显示方式有氖灯显示、红绿灯光显示和数字显示等。

三、差压式水位计

利用平衡容器将水位信号转换成相应差压信号实现水位测量。平衡容器输出的差压 Δp 与水位 H 呈单值函数关系。水位越高，输出差压越小；水位越低，输出差压越大。

单室平衡容器是结构最简单的平衡容器。但在实际使用中存在问题，因此必须进行改进。改进的方法有两种：一是改进平衡容器的结构；二是采用容器内压力自动补偿措施。改进后的差压式水位计的准确度有很大的提高。

四、浮子式液位计

根据恒浮力原理工作，它的测量范围宽，测量性能稳定，在大型贮罐的液位连续测量及容积计量中常采用。

五、电容式液位计

根据电容变化与液位变化成一定关系的原理工作，主要用于腐蚀性液体、沉淀性流体及一些化工介质的液面连续测量。这种仪表易受电磁场干扰的影响，所以用高频信号传输，并选用屏蔽电缆等。由于粘性导电液体的依附作用，常出现虚假液位，应采取措施消除。

六、超声波液位计

利用回声测距的原理工作，可以实现非接触测量。超声波在介质中的传播速度易受介质的温度、成分等变化的影响，是影响液位测量的主要因素。

思考题与习题

1. 火电厂中，为保证机组的安全经济运行，有哪些主要设备需进行液位测量？
2. 何谓汽包的重量水位？监督重量水位的重要性是什么？

3. 云母水位计和电接点水位计为什么测不到重量水位?
4. 常用的锅炉汽包水位测量方法有几种? 测量原理是什么? 有何优、缺点?
5. 机组正常运行时, 测量汽包水位的各种水位计的指示是否一致? 在锅炉启、停过程中须监视哪种水位计? 正常运行时主要监视哪种水位计?
6. 画出简单平衡容器结构图, 并推导出其“水位—差压”特性公式。
7. 对于开口容器和密封压力容器用差压式液位计测量时有何不同?
8. 差压水位计产生测量误差的因素有哪些? 如何减小测量误差?
9. 对差压水位计的输出进行汽包压力补偿的原理是什么? 画出单室平衡容器水位测量系统框图。
10. 利用差压变送器测量液位时, 为什么要进行零点迁移? 如何实现迁移?
11. 翻板式液位计是如何工作的?
12. 电容式液位计测量导电和非导电介质的液位时, 其测量原理有什么不同? 它的测量结果受哪些因素的影响?
13. 超声波液位计的工作原理是什么? 影响超声波液位计测量精确度的因素有哪些?
14. 已知单室平衡容器 $L=640\text{mm}$, $H_0=320\text{mm}$, 汽包压力为 17MPa , 冷却水平均密度 $\rho_a=994\text{kg/m}^3$, 饱和水密度 $\rho_w=565.29\text{kg/m}^3$, 饱和蒸汽密度 $\rho_s=119.03\text{kg/m}^3$, 试计算出汽包水位 ΔH 为 -320 、 -160 、 0 、 $+160$ 、 $+320\text{mm}$ 时产生的差压各是多少?
15. 已知在额定运行工况下, 汽包的重量水位分别为 -100mm 和 $+80\text{mm}$ 时, 平衡容器实际输出差压分别为 4600Pa 和 3700Pa , 试求汽包重量水位分别为 -320 、 -160 、 0 、 $+160$ 、 $+320\text{mm}$ 时产生的差压各是多少?
16. 对单室平衡容器, $L=640\text{mm}$, $H_0=320\text{mm}$, 16MPa 下饱和水密度 $\rho_w=584.76\text{kg/m}^3$, 饱和蒸汽密度 $\rho_s=107.18\text{kg/m}^3$, 当汽包压力由 17MPa 下降至 16MPa 时, 冷却水平均密度 $\rho_a=994\text{kg/m}^3$, 试计算 $\Delta H=0$ 时产生的差压为多少?

17. 图 8-36 所示为带迁移装置的差压变送器组成的某立式容器水位测量装置示意图 (在汽相引出管上装有冷凝罐)。为保证该系统输出的电流信号与水位成正比, 试问:

- (1) 图中是否有错误? 若有错误, 另画一个正确的图。
- (2) 在正确的图中, 用差压变送器来测量液位时, 安装前应当把差压范围调整到多少? 已知 $\rho_1=915.8\text{kg/m}^3$, $\rho_2=983.4\text{kg/m}^3$, $\rho_3=2.621\text{kg/m}^3$, $h_1=3000\text{mm}$, $h_2=1000\text{mm}$, $h_3=7000\text{mm}$ 。液位的变化范围 $H=2000\text{mm}$ 。

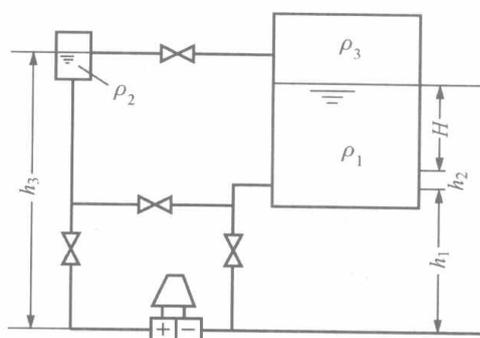


图 8-36 水位测量装置示意图

18. 用电容法测量某容器内非导电液体的液位。已知电极外径为 3mm , 容器内径为 4200mm , 液体和液面上方气体的相对介电常数分别为 4 和 1 , 液位变化范围为 12m 。求由电极和容器壁面组成的电容器在液位等于零、液位为满量程时的电容值, 并求电容的最大变化量。

第9章 成分分析仪表

生产过程中,除了监控温度、压力、流量等参数外,还要分析和控制燃料、工质和排放物等的成分,这对保证运行安全、产品质量和生产经济性也是非常重要的。例如:

(1) 锅炉排放物有烟气、排污水和排灰渣等,如果处理不好,对大气和水源、农田等都会造成污染,因此应监督排放物中的有害成分,不得超过环保规定的值。一般规定火电厂中烟囱高度为150m时,SO₂的排放量为2400kg/h以下;烟囱高度为100m时,SO₂的排放量不得超过1200kg/h。氮氧化物(折算为NO₂)不得超过230kg/h(烟囱高度为100m时)。

(2) 锅炉的给水和蒸汽中含有盐分、溶氧及二氧化硅等,会形成水垢和腐蚀设备。轻则降低机组效率,影响经济性,增加维修工作;重则可能造成受热面过热、降低强度而引起不安全问题(如爆管等)。氢冷发电机的氢气纯度不足,可能有爆炸的危险。这些都应进行监控。

(3) 热效率是锅炉运行经济性的指标,因此在线测定热效率是指导锅炉经济运行的最好依据。在反平衡计算法中与过程成分分析有关的项目是化学未完全燃烧热损失 q_3 、机械未完全燃烧热损失 q_4 。为此,对燃煤锅炉要求在线测量灰渣中的可燃物含量,以及排烟中的残余可燃气体(CO、H₂、CH₄等)的含量。由于技术原因,锅炉效率仪尚待研究和定型。因此,实时分析烟气成分目前仍然是判断燃烧状况、监视锅炉经济运行的主要手段。

9.1 成分分析仪表概述

用于检测物质的组成和含量以及物质的各种物理特性的装置称为成分分析仪表。

9.1.1 成分分析方法

成分分析的方法有两种类型:一种是定期取样,在实验室中对样品进行化学分析测定的实验室分析方法;另一种是利用可以连续测定被测物质含量或性质的分析仪表进行在线连续分析方法。相应的分析仪表有实验室用分析仪表和工业用自动分析仪表两种。

9.1.2 自动分析仪表的组成

自动分析仪表一般由自动取样装置、预处理系统、传感器、信息处理系统、显示仪表、整机自动控制系统六部分组成。它们之间的关系如图9-1所示。

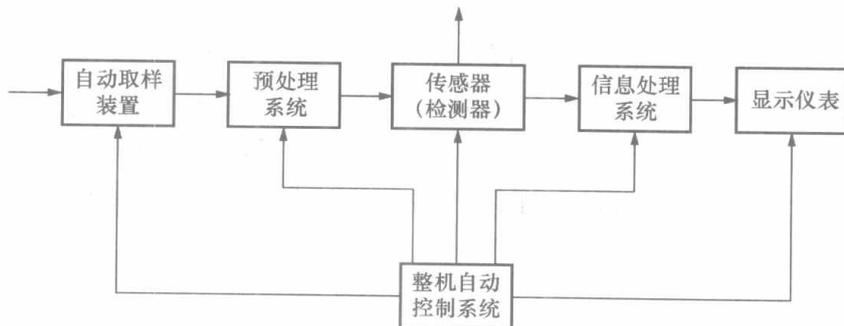


图 9-1 自动成分分析仪表的基本组成

1. 自动取样装置

它的任务是从生产设备中自动、快速地提取有代表性的待分析样品，送到预处理系统。可以有多种取样方式，如正压取样和负压取样。

2. 预处理系统

它的任务是将取出的待分析样品加以处理，以满足传感器对待分析样品的要求。可以采用诸如冷却、加热、气化、减压、过滤等方式对采集的分析样品进行适当的处理。预处理系统包括各种物理或化学的处理设备。

3. 传感器

传感器（又称检测、转换器）是分析仪表的核心部分，是将被分析物质的成分或物理性质转换成电信号输出。不同分析仪表、不同的转换形式，有不同的传感器。

4. 信息处理系统

对传感器输出的微弱信号进行放大、转换、运算、补偿等处理，给出便于显示仪表显示的电信号。

5. 显示仪表

显示仪表接收来自信号处理系统的电信号，以指针的位移量、数字量或屏幕图文显示方式显示出被测成分的数量大小。

6. 整机自动控制系统

它用于控制各个部分的协调工作，使取样、处理和分析的全过程可以自动连续地进行。同时消除或降低客观条件对测量的影响。

有些分析仪表并不一定都包括以上六个部分，如有的分析仪表传感器直接放在试样中，就不需要取样和预处理系统。

9.1.3 常用成分分析仪表的分类

1. 按被测成分分类

(1) 氧量表：用来监测混合气体（如燃烧产物）中氧的含量，如氧化锆氧量计；用来测量汽、水中溶解氧的水中溶氧表。

(2) 氢表：监测氢冷发电机中氢气的纯度。

(3) 二氧化碳分析仪：对混合气体（如烟气体）中 CO_2 含量进行监测。如热导式 CO_2 分析仪、红外线 CO_2 分析仪等。

(4) 盐量表：用来监测汽、水中的含盐量，如纳表、电导仪等。

(5) 二氧化硅分析仪：监测水和蒸汽中 SiO_2 含量。

此外还有磷酸根、溶解铁、余氯、pH 值等分析仪表。

2. 按仪器的工作原理分类

(1) 电化学式分析仪表，如电导仪、酸度计、氧化锆氧分析仪。

(2) 热学式分析仪表，如热导式氢分析仪。

(3) 磁学式分析仪表，如热磁式氧量计。

(4) 光学式分析仪表，如红外线气体分析仪。

(5) 色谱式分析仪表，如气相色谱仪、液相色谱仪。

此外还有射线式分析仪表、电子光学式和离子光学式分析仪表等。

9.2 氧化锆氧分析仪

氧含量分析仪是目前工业生产中应用较多的在线分析仪表,广泛地应用在火力发电、采暖、炼油、化工、轻纺、环保等工业领域内。例如,在火力发电厂中,动力锅炉燃烧质量的好坏,直接关系到电厂燃料消耗率的高低。为了使燃料达到完全燃烧,同时又不过多地增加排烟量和降低燃烧温度,要控制燃料与空气的比例,使过剩空气系数 α 保持在一定范围内。一般对燃煤炉 α 在1.20~1.30之间,对燃油炉 α 在1.10~1.20之间。而过剩空气系数的大小可通过分析炉烟中 O_2 的含量来判断。使用氧化锆氧分析仪可以测量烟气中的含氧量,及时控制燃料和空气的比例,使燃烧维持在良好的状态下。

氧化锆氧分析仪又称氧化锆氧量计,因其具有结构简单、反应速度快(测高、中氧含量时,时间常数 $T < 3s$)、灵敏度高、适于分析高温气体等特点,故应用广泛。

9.2.1 工作原理

9.2.1.1 氧化锆固体电解质的导电机理

氧化锆(ZrO_2)固体电解质,在常温下具有单斜晶系结构,不导电。在高温 $1150^\circ C$ 时,晶型发生变化,由单斜晶系转变成立方晶系,有一定的导电能力。当温度降至常温时,它又变回为单斜晶系。如果在 ZrO_2 材料中加入一定量的氧化钙(CaO)或氧化钇(Y_2O_3),经高温烧结,+2价的钙离子 Ca^{2+} 会进入 ZrO_2 晶体而置换出+4价的锆离子 Zr^{4+} 。置换出的锆离子 Zr^{4+} 与数量不足的氧离子结合而形成带有氧离子空穴的氧化锆材料,成为一种不再随温度变化的萤石性立方晶体。这种材料被称为空穴型氧化锆晶体,是一种高致密的工业陶瓷材料。

空穴型氧化锆晶体中有氧离子空穴,其数量与混合的 CaO 数量有关。当有外界氧离子存在时,氧离子会自动地填入晶体中的空穴,也可以自由地移动。由于空穴型氧化锆材料在 $650^\circ C$ 以上的高温下是一种氧离子的良导体,故它是一种固体电解质。

9.2.1.2 氧化锆氧分析仪的工作原理

氧化锆氧分析仪是基于电化学中浓差电池的原理工作的。

氧浓差电池的原理如图9-2所示。在 $ZrO_2 \cdot CaO$ 固体电解质片的两侧,用烧结法制成几微米到几十微米厚的多孔铂电极,并焊上铂丝作为引线,就构成了浓差电池。多孔铂电极具有催化氧分子和氧离子之间正逆变反应作用。

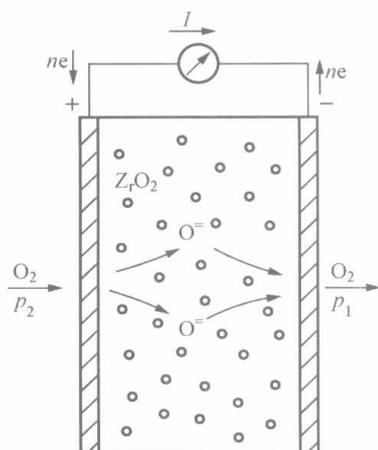


图9-2 氧浓差电池原理图

在浓差电池左侧通入氧浓度(容积浓度)已知的参比气样(如空气),氧分压为 p_2 ;右侧通入待分析气样,氧分压为 p_1 。当浓差电池两侧氧浓度不等时,浓度大的一侧的氧分子在该侧的铂电极上结合两个电子形成氧离子,然后通过氧化锆材料晶格中的氧离子空穴向氧浓度低的一侧泳动,当到达低浓度一侧时在该侧电极上释放两个电子形成氧分子放出,从而在两电极之间形成静电场。由于静电场的存在,阻碍了氧离子从高浓度侧向低浓度侧扩散,加速了低浓度侧的氧离子向高浓度侧的迁移,最后扩散作用和电场作用达到平衡,形成稳定的电势差。该电位差称为氧浓差电池的浓差电势 E 。

高浓度侧的氧分子渗入多孔铂电极后,在铂电极上发生还原反应



因氧分子从铂电极上夺取电子而生成氧离子,使铂电极失去电子,带正电,成为浓差电池的阳极。

氧离子通过氧化锆材料到达低浓度侧的铂电极,释放出电子,形成氧分子,在铂电极上发生氧化反应



因铂电极得到电子,带负电,成为浓差电池的阴极。

浓差电势的大小由能斯特公式确定,即

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{p_2}{p_1} \quad (9-1)$$

式中 R ——理想气体常数, $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

T ——浓差电池温度(池温), K ;

F ——法拉第常数, $96487\text{C}/\text{mol}$;

n ——电极反应时一个氧分子输送的自由电子数 ($n=4$);

p_2 ——参比气体的氧分压;

p_1 ——待测气体的氧分压。

当参比气体的总压力与待测气体的总压力相等均为 p 时,式(9-1)可化成

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{p_2/p}{p_1/p} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (9-2)$$

式中 φ_2 、 φ_1 ——参比气体及待测气体中的氧容积浓度。

空气中氧量一般为 20.8% ,在总压力为一个大气压下,可以得出 E 与 φ_1 的关系式为

$$E = 4.9615 \times 10^{-2} T \lg \frac{20.8}{\varphi_1} \quad (9-3)$$

由式(9-2)和式(9-3)可知,当氧浓差电池温度恒定,以及参比气体浓度 φ_2 一定时,电池产生的氧浓差电势将与待测气样氧浓度 φ_1 成单值函数关系。通过测量氧浓差电势的数值,就可得出被测气体的氧含量。

值得一提的是,氧分析仪在工作时,将氧化锆内外侧都通上相同气体(空气或烟气),按式(9-3)计算应得 0mV 的电势。事实上每只氧化锆氧分析仪都达不到零值毫伏,这是因为氧化锆管制造过程中总是存在有结构上的不对称及晶格缺陷。解决零位电动势(本底电势)的方法是调节显示仪表机械零位或通过给定器补偿掉。

由以上分析可知,要正确测量出待测气样中的含氧量(浓度),必须保证以下的条件。

(1) 氧化锆传感器需要恒温或在计算电路中采取补偿措施,以消除传感器温度(池温)对测量的影响。因当 φ_1 一定时,浓差电动势 E 与 T 成正比。故组成测量系统时,必须保证氧化锆管所处的温度恒定或进行补偿。补偿方法之一是测取池温,取得池温的信号, $E_T = K_T T$,在计算电路中进行补偿运算,即

$$\frac{E}{E_T} = \frac{R}{nFK_T} \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (9-4)$$

因此,根据对工作温度处理的方式不同,氧化锆氧分析仪分为恒温式和补偿式两种。

(2) 氧化锆传感器要在一定高温下工作,以保证有足够高的灵敏度。

池温愈高, 传感器输出的灵敏度愈高。对于氧化锆传感器来说, 一般是工作在 $650\sim 850^{\circ}\text{C}$ 范围内。

(3) 保持参比气样的压力与待测气样的压力相等, 以保证两种气体的氧分压之比能代表氧含量比。

(4) 保持参比气样和待测气样有一定的流速, 以保证测量的准确性。由于浓差电池在工作时两极板侧的气样有氧浓度趋于一致的倾向, 测量时保持两种气样具有一定的流速才能不断更新, 以保证两极板侧气样的真实性。

根据安装方式的不同, 氧化锆氧分析仪分为抽出式和直插式两类。抽出式测量系统带有抽气和净化装置, 能除去气样中的杂质和二氧化硫等有害气体, 有利于保护氧化锆探头, 测量准确度高。但系统结构复杂, 且延迟较大, 多用于石油化工生产中, 最高可测 1400°C 气体的含氧量。直插式测量系统响应快, 多用于锅炉、窑炉烟气的含氧量测量, 它的使用温度一般在 $600\sim 850^{\circ}\text{C}$ 之间。

9.2.2 测量系统

氧化锆氧分析仪由氧化锆探头 (又称传感器、检测器)、变送器两部分组成。探头的作用是将氧量转换成电动势信号, 而变送器的作用是将电动势信号转换为氧量显示和 $4\sim 20\text{mA}$ 直流输出, 供记录仪或控制系统使用。

氧化锆管是氧化锆探头的核心部分, 它由氧化锆固体电解质管、铂电极和引线构成, 包括有封头式和无封头式两种形式, 如图 9-3 所示。

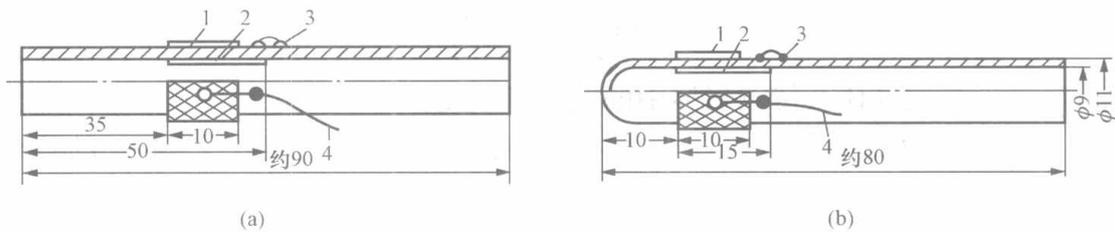


图 9-3 氧化锆管的结构

(a) 无封头式; (b) 有封头式

1、2—电极; 3、4—引线

9.2.2.1 直插定温式氧化锆测量系统

图 9-4 所示为直插定温式氧化锆测量系统组成框图。系统由氧化锆探头、温度控制器、毫伏变换器及显示记录仪表组成。

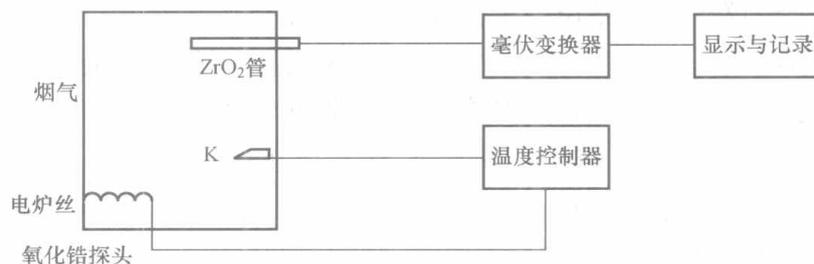


图 9-4 直插定温式氧化锆测量系统组成框图

9.2.2.2 直插补偿式氧化锆测量系统

图 9-5 (a) 所示为直插补偿式氧化锆探头示意图, 由热电偶的输出 E_T 通过函数发生器

转换成与绝对温度 T 成比例的信号，和氧化锆输出的电势 E 一起送到除法电路，即可对温度变化进行补偿。图 9-5 (b) 所示为温度补偿原理框图。

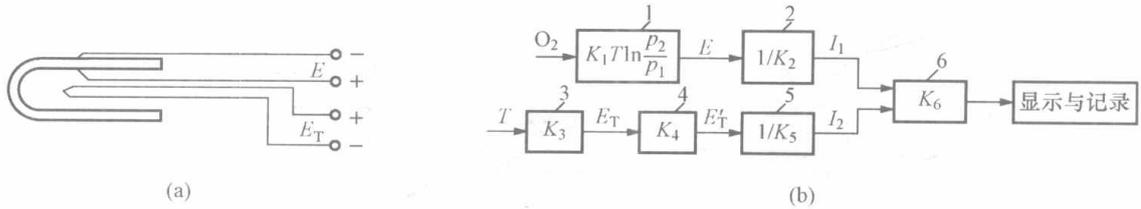


图 9-5 直插补偿式氧化锆氧分析仪

(a) 探头示意图；(b) 温度补偿原理框图

1—氧化锆管；2、5—毫伏变送器；3—热电偶；4—函数发生器；6—除法器

以单片机为控制核心的智能型氧量分析仪能在线连续稳定地测量烟气中的氧量浓度，可显示氧量的百分含量、温度等多种参数，并能输出 4~20mA 的线性模拟信号。智能型氧化锆氧分析仪主要由氧化锆探头、氧量变送器及输出单元组成，如图 9-6 所示。

氧化锆探头由测量电池、加热器、热电偶、过滤元件、电缆接线端子及金属外壳等组成。被测气体通过过滤器（或校验气体通过传导管）进入测量电池测量端，与测量电极接触作为测量臂，而另一侧参比电极与自然对流吸入空气接触构成参比臂。利用温度控制系统可将氧化锆探头保持在恒定的工作温度（如 700℃）。氧化锆管的工作温度由热电偶测量，并由固态继电器控制电炉的加热。

氧量变送器由电压跟随放大电路、模/数转换电路、主机控制单元、显示电路及外壳等组成。

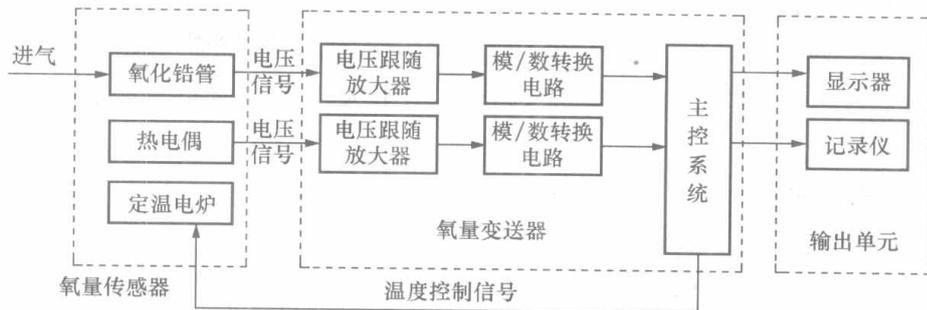


图 9-6 智能型氧化锆氧分析仪结构示意图

主机控制单元以单片机为核心，对数字信号进行采集、处理和控制在显示屏上，同时将数字信号转换为 0~10mA 或 4~20mA DC 标准电流信号输出。此外，可在运行中进行自检，并通过电缆实现对传感器的温度控制、过热保护和故障监督。

9.2.3 氧化锆氧分析仪的应用举例

火力发电厂中，使用氧化锆氧分析仪可以测量烟气中的含氧量。测量时，氧化锆管直接插入到烟道高温部分，如图 9-7 所示。在一端封闭的氧化锆管内外侧，分别通过空气和被测烟气，在管外装有铂铑—铂热电偶，测定氧化锆管的工作温度，并通过毫伏变换器和温控装置去控制电炉电流，从而达到定温控制。为了防止炉烟尘粒污染氧化锆，加装了多孔性陶瓷过滤器。用泵抽吸烟气和空气，使它们的流速在一定范围内，同时使空气和烟气侧的总压力大致相等。

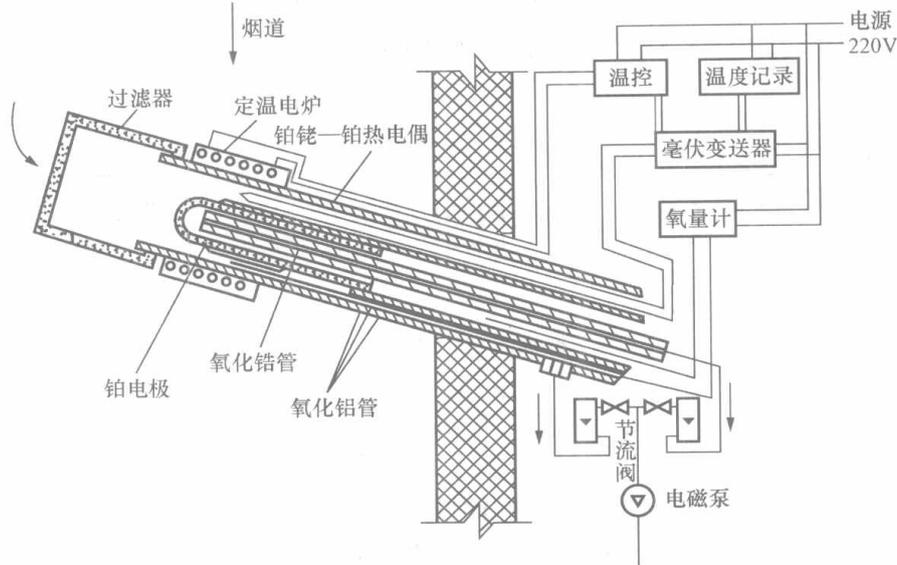


图 9-7 直插定温抽气式氧化锆氧分析仪

9.3 红外线气体分析仪

红外线气体分析仪是应用气体对红外线光吸收原理制成的一种仪表。它可用于 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 H_2O （水汽）等非对称分子结构气体含量的分析测量，具有灵敏度高、反应快、分析范围宽、选择性好、抗干扰能力强等特点，是应用比较多的一种光学式分析仪表，被广泛地应用于工业流程中气体的连续自动监测，分析混合气体中某组分的含量测量。如冶炼工业中的 CO 、 CO_2 含量测量，电站锅炉燃烧炉烟中 CO 、 CO_2 含量测量，以及化工、石油工业流程中气体的分析等，也可用于大气污染气体的监测和医学上某些气体的监测。

9.3.1 红外线的基本知识

9.3.1.1 红外线的特征

红外线是一种电磁波，它的波长范围大致在 $0.76\sim 1000\mu\text{m}$ 的频谱范围之内，与可见光一样具有反射、折射、散射等性质。红外线的最大特点就是具有光热效应，它是光谱中最大的光热效应区。

另外，红外线在介质中传播时，会由于介质的吸收和散射作用而衰减。根据红外理论，许多化合物分子在红外波段都具有一定的吸收带，吸收带的强弱及所在的波长范围由分子本身的结构决定。只有当物质分子本身固有的特定的振动和转动频率与红外光谱中某一波段的频率相一致时，分子才能吸收这一波段的红外辐射能量，将吸收到的红外辐射能转变为分子振动动能和转动动能，使分子从较低的能级跃迁到较高的能级。实际上，每一种化合物的分子并不是对红外光谱内所有波长的辐射或任意一种波长的辐射都具有吸收能力，而是有选择性地吸收某一个或某一组特定波段内的辐射。这个所谓的波段就是分子的特征吸收带。气体分子的特征吸收带主要分布在 $1\sim 25\mu\text{m}$ 波长范围内的红外区。例如， CO 气体能吸收的红外波长为 $2.37\mu\text{m}$ 和 $4.65\mu\text{m}$ ， CO_2 的特征吸收波长为 $2.78\mu\text{m}$ 和 $4.26\mu\text{m}$ ， CH_4 的特征吸收波长为 $3.3\mu\text{m}$ 和 $7.65\mu\text{m}$ 。

9.3.1.2 朗伯—贝尔定律

气体对红外线的吸收服从于朗伯—贝尔定律，其关系式为

$$I = I_0 e^{-KCL} \tag{9-5}$$

式中 I ——出射光强；

I_0 ——入射光强；

C ——吸收介质的浓度；

L ——光程；

K ——取决于介质特性的吸收系数。

由式(9-5)可见，当红外辐射穿过待测组分的长度 L 和入射红外辐射的强度 I_0 一定时，由于 K 对某一种特定的待测组分是常数，故透过的红外辐射强度 I 仅仅是待测组分摩尔百分浓度 C 的单值函数，其关系如图9-8所示。通过测定透射的红外辐射强度，可以确定待测组分的浓度。以这一原理为基础发展起来的光谱仪器，称为红外气体分析仪。

9.3.2 红外气体分析仪的工作原理及结构组成

9.3.2.1 红外气体分析仪类型

红外气体分析仪按不同分类方法可分为工业型和实验室型；色散型（分光式）和非色散型（非分光式）等。

分光式是根据待测组分的特征吸收波长，采用一套光学分光系统，使通过被测介质层的红外线波长与待测组分特征吸收波长相吻合，进而测定待测组分的浓度。

非分光式是光源的连续波谱全部投射到待测样品上，而待测组分仅吸收其特征波长的红外线，进而测定待测组分的浓度。工业过程主要应用这类仪表。其主要类型如图9-9所示。

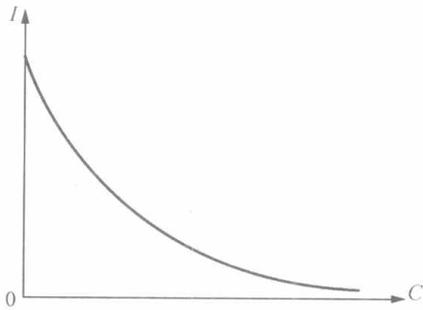


图9-8 贝尔定律确定的 $I-C$ 关系曲线



图9-9 工业红外气体分析仪类型

9.3.2.2 工作原理

红外线气体分析仪是根据待测气体在特征吸收波长上吸收红外线能量的原理工作的。气体吸收红外辐射后，气体的温度上升或压力上升，这种温度和压力的变化与待测组分浓度有关，通过测量变化的温度或压力就可测出待测组分的浓度。

红外线通过被测介质后，被吸收的能量与待测组分的浓度满足朗伯—贝尔定律，通过检测透射的红外线的强度，可求出待测组分的浓度。

9.3.2.3 红外线气体分析仪的结构组成

红外线气体分析仪一般由光源、气室、接收元件、切光片和窗口等组成，典型的结构如图9-10所示。

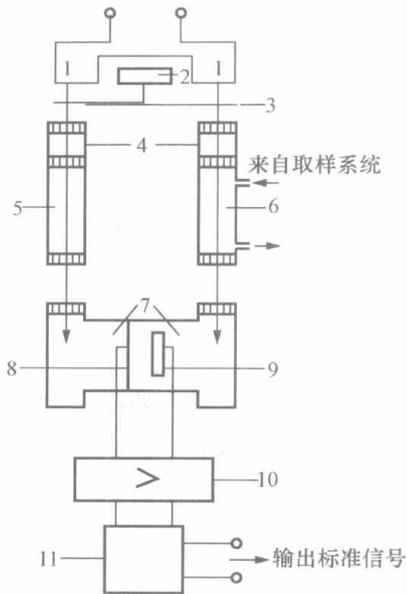


图 9-10 红外气体分析仪原理图

- 1—光源；2—同步电机；3—切光片；
4—滤波室；5—参比室；6—测量室；
7—检测室；8—薄膜；9—定片；
10—电气单元；11—微机系统

1. 光源

光源的作用是产生两束能量相等而又稳定的红外光束，多由通电加热镍铬丝所得。辐射区的光源分两种，一种是单光源，一种是双光源。单光源是用一个光源通过两个反射镜得到两束红外线，进入参比室和测量室，保证了两个光源变化一致。双光源结构则是参比室和测量室各用一个光源。与单光源相比，双光源因热丝放光不尽相同而产生误差。但单光源安装调整比较困难。

2. 滤光元件

其作用是吸收或滤去可被干扰气体吸收的红外线，去除干扰气体对测量的影响。滤光元件通常有两种，一种是充以干扰气体的滤光室，另一种是滤光片。滤光片是在晶片表面上喷涂若干涂层，使它只能让待测组分所对应的特征吸收波长的红外线透过，而不让其他波长的红外线透过或使其大大衰减，从而把各种干扰组分的特征吸收波长的红外线都过滤掉，使干扰组分对测量无影响。

3. 测量室和参比室

测量室和参比室的两端用透光性能良好的 CaF_2 晶片密封。参比室内封入不吸收红外辐射的惰性气体，测量室则连续通入被测气体。测量室的长短与被测组分浓度有关，一般测量室的长度为 $0.3 \sim 200\text{mm}$ 。

4. 检测器

检测器的作用是接收从红外光源辐射出的红外线，并转化成电信号。有光电导式和薄膜电容式两种检测器。

光电导检测器只对某一波长范围内的红外线能量能吸收，它必须和滤波效果较好的滤光片配合使用。目前用的较多的材料是碲化钢。

大多数红外线分析仪都采用薄膜电容式检测器，其原理结构如图 9-11 所示。检测器的两个吸收室分别充有待测气体和惰性气体的混合物。两个吸收室间用薄金属膜片隔开。因此，当测量室发生了吸收作用时，到达吸收室试样光束比另一吸收室的参比光束弱，于是检测吸收室气压小于参比吸收室中的气压。而金属隔膜和一个固定电极构成了一个电容的两个极板。此电容器的电容变化与吸收室内吸收红外线的程度有关。故测量出此电容量的变化，即可确定出样品中待测气体的浓度。

5. 切光片

切光片在电机带动下对光源发出的光辐射信号做周期性切割，将连续信号调制成一定频率（一般为 $2 \sim 25\text{Hz}$ ，常用 6.25Hz ）的交变信号（一般为脉冲信号）。因为若红外线是不随时间而变化的恒定光束，则检测器的薄膜总是处于静态受力，向一个方向固定变形。这样既影响薄膜使用寿命，又使待测组分有微小变化时，薄

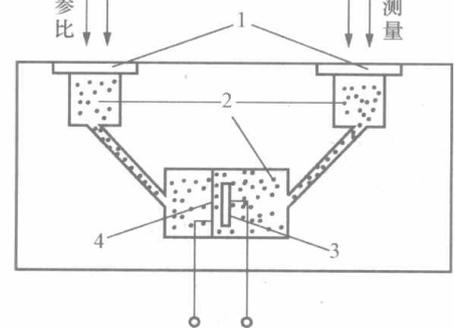


图 9-11 薄膜电容式检测器

- 1—窗口玻璃；2—吸收室；
3—固定电极（定片）；
4—可动电极（动片）

膜相对位移量小，电气测量比较困难。因此，在红外线分析仪中采用切光片把红外线光束调制成时通时断地射向气室和检测器的脉冲光束，从而把电容检测器的直流输出信号变为交流信号，提高了灵敏度和抗干扰能力，也便于信号放大。切光片在几何上应严格对称，这样调制的光波信号也是对称的方波。

6. 微机系统

微机系统的任务是将红外探测器的输出信号进行放大变成统一的直流电流信号，并对信号进行分析处理，将分析结果显示出来，同时根据需要输出浓度极值和故障状态报警信号。对信号的处理包括：干扰误差的抑制，温漂抑制，线性误差修正，零点、满度和中点校准，以及量程转换、量纲转换、通道转换、自检和定时自动校准等。

9.3.3 QGS-08 型红外线气体分析仪

QGS-08 型红外线气体分析仪是北京分析仪器厂引进德国麦哈克公司先进技术生产的产品。适用于连续分析 CO、CO₂、CH₄、SO₂ 等 23 种气体在混合气中的含量。

由于分析仪设计成卧式结构，可以容纳较长气室，因而可作气体浓度的微量分析（如 CO：0~30 μ L/L；CO₂：0~20 μ L/L）。它具有整体防震结构，改变量程或测量组分，只要更换气室或检测器即可。电气线路采用插件板形式，以便更换或增添新的印刷板，维护量较小。

QGS-08 型红外线气体分析仪属于非分光型红外线分析仪，带薄膜电容式检测器。检测器由两个吸收室组成，它们相互气密，在光学上是串联的。先进入辐射的称为前吸收室，后面的称为后吸收室。前吸收室由于较薄主要吸收谱带中心的能量，而后吸收室则吸收余下的两侧能量。检测器的容积设计使两部分吸收能量相等，从而使两室内气体受热产生相同振幅的压力脉冲。当被分析气体进入气室的分析边时，谱带中心的红外辐射在气室中首先被吸收掉，导致前吸收室的压力脉冲减弱，因此压力平衡被破坏，所产生的压力脉冲通过毛细管加在差动式薄膜微音器上，被转换为电容的变化。通过放大器把电容变化变成与浓度成比例的直流测定值，从而测得被测组分的浓度。其结构原理示意图如图 9-12 所示。

由于待分析气样中的灰尘、水汽等在测量气室中的沉积和冷凝，会给仪表的测量准确度、零位稳定性带来不利的影响，还可能使仪器不能正常工作。因此为了保证进入分析仪表的气体干燥、清洁、没有腐蚀性，需要装设预处理装置，如图 9-13 所示。取样系统包括气体减压、净化、流量监测等部分。水封的作用是保证送到分析仪表中去的气样压力不致过高，有稳压作用。

气体温度超出 100 $^{\circ}$ C 时应加装水冷却器。预过滤器内装棉花，用以过滤气样中的灰尘、机械杂质及焦油。化学过滤器主要滤掉 SO₂、H₂S 和 NH₃ 等腐蚀性气体。化学过滤器内装无水硫酸铜试剂（CuSO₄ 96%，

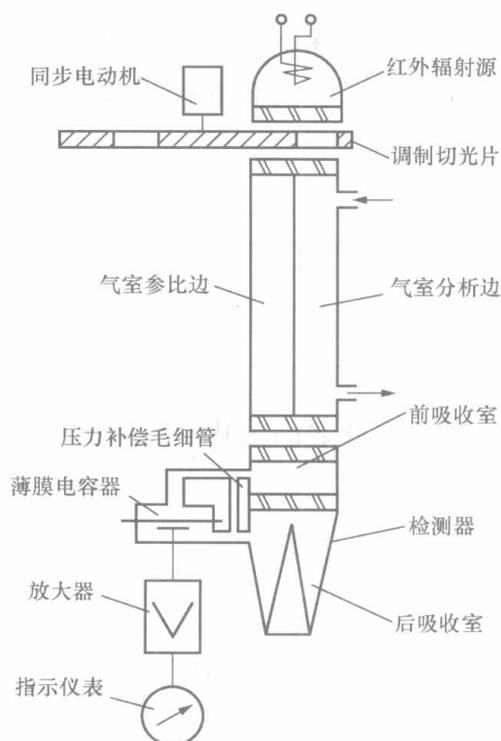


图 9-12 QGS-08 型红外线气体分析仪原理示意图

MgO.2%，石墨粉2%用水合成形300~400℃烘干)。当试剂失效后，便由原来的蓝色变成黑褐色。干燥过滤器内装干燥剂（氯化钙或硅胶）用来干燥气体。

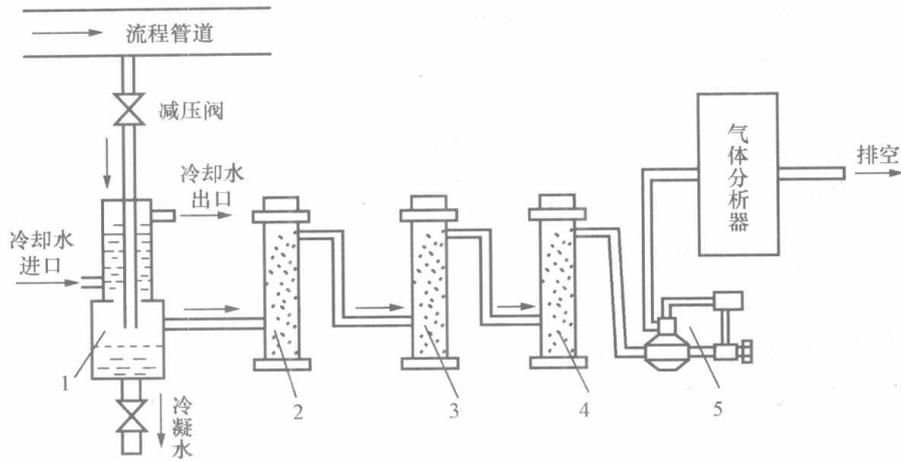


图 9-13 预处理装置示意图

1—水冷却器；2—预过滤器；3—化学过滤器；4—干扰过滤器；5—流量控制器

9.4 热导式气体分析仪

热导式气体分析仪是使用最早的一种物理式气体分析仪，它是利用不同气体导热特性不同的原理进行分析的。常用于分析混合气体中的 H_2 、 CO_2 、 NH_3 、 SO_2 等组分的百分含量。

9.4.1 工作原理

各种气体都具有一定的导热能力，但是导热程度有所不同，即各有不同的导热系数。经实验测定，气体中氢和氨的导热能力最强，而二氧化碳和二氧化硫的导热能力最弱。气体的导热率还与气体的温度有关。表 9-1 列出了 $0^\circ C$ 时以空气热导率为基准的几种气体的相对热导率。

表 9-1

气体在 $0^\circ C$ 下的相对热导率

气体名称	N_2	O_2	CO_2	SO_2	H_2	CO	CH_4
相对热导率	0.998	1.015	0.615	0.344	7.13	0.964	1.318

对于彼此之间无化学反应的多组分的混合气体，它的热导率与各组分的热导率及各组分的体积百分含量有关，即

$$\lambda = \lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 + \dots + \lambda_n C_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i C_i \quad (9-6)$$

式中

λ ——混合气体的总热导率；

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ——混合气体中各组分的热导率；

λ_i ——混合气体中第 i 组分的热导率；

C_1, C_2, \dots, C_n ——混合气体中各组分的体积百分含量；

C_i ——混合气体中第 i 组分的体积百分含量。

如果被测组分的热导率为 λ_1 ，其余组分为背景组分，并假定它们的热导率近似等于 λ_2 。又由于 $C_1 + C_2 + \dots + C_n = 1$ ，将它们代入式(9-6)后可得

$$\lambda \approx \lambda_1 C_1 + \lambda_2 (C_2 + C_3 + \dots + C_n) = \lambda_1 C_1 + \lambda_2 (1 - C_1) = \lambda_2 + (\lambda_1 - \lambda_2) C_1 \quad (9-7)$$

即有

$$C_1 = \frac{\lambda - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (9-8)$$

在 λ_1 、 λ_2 已知的情况下，测定混合气体的总热导率 λ ，就可以测定被测组分的体积百分含量。

9.4.2 热导式气体分析仪的检测器和测量电路

9.4.2.1 检测器

由于气体的热导率很小，直接测量比较困难，所以热导式气体分析仪大多是把气体热导率的变化转换成金属材料电阻值的变化。通过对金属材料电阻值进行测量，来反映出被测组分的体积百分含量。通常把将热导率转换成电阻值的部件称为热导式气体分析仪的检测器，又称热导池。

热导池的结构如图9-14所示。用导热良好的金属制成的长圆柱形小室内，装有一根细的铂或钨电阻丝，电阻丝与腔体有良好的绝缘。电阻丝通过两端引线通以一定强度的电流 I ，使其维持一定的温度 t_n ， t_n 高于室壁温度 t_c 。热导池一般放在恒温装置中，故室壁的温度恒定。被测气体由小室下部引入，从小室上部排出，电阻丝的热量通过混合气体向室壁传递，其热平衡温度将随被测气体的热导率变化而变化。电阻丝温度的变化使其电阻值也发生变化。在一定条件下，电阻丝在热平衡状态下的电阻值与混合气体的热导率之间存在单值函数关系。通过测量电阻的变化就可得知气体组分的变化。

检测器结构有分流式、对流式、扩散式、对流扩散式四种。图9-15所示为目前常用的对流扩散式结构型式。待测气体从主气路中流过时，一部分气体以扩散方式进入测量室中，被电阻丝加热，形成上升的气流。由于节流孔的限制，一部分气体经过节流孔进入支气路中，被冷却后向下方移动，最后排入主气路中，这样气体流过测量气室的动力既有对流作用，也有扩散作用，故称为对流扩散式。这种结构既不会产生气体倒流现象，也避免了气体在测量室内的囤积，从而保证待测气体有一定流速。检测器的反应速度快、滞后小，且气体流量的波动影响小。

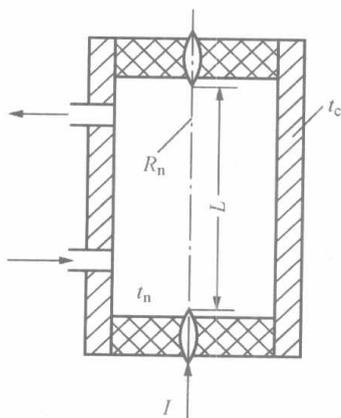


图 9-14 热导池的结构

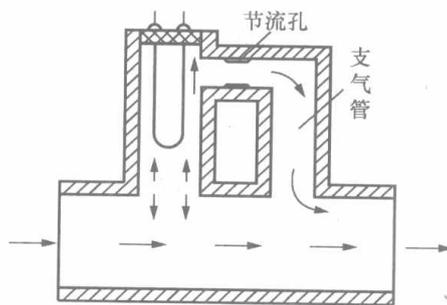


图 9-15 对流扩散式热导池

9.4.2.2 测量电路

通过检测器的转换作用，把被测组分含量的变化转换成了电阻值的变化。对电阻的测量常采用电桥。热导式气体分析仪的测量电路有单电桥测量电路和双电桥测量电路。双电桥测量电路如图 9-16 所示。I 为测量电桥，II 为参比电桥。测量电桥中 R_1 、 R_3 气室中通入被测气体， R_2 、 R_4 气室中充以测量下限气体；参比电桥中 R_5 、 R_7 气室充以测量上限气体， R_6 、 R_8 气室中充以测量下限气体。参比电桥输出一固定的不平衡电压 U_{AB} 加在滑线电阻 R_p 的两端，测量电桥输出电压 U_{CD} 的变化随着被测组分含量的变化而变化。若 D、E 两点之间有电位差 U_{DE} ，则经放大器放大后，推动可逆电机转动，带动滑线电阻 R_p 的滑动点 E 移动，直到 $U_{DE}=0$ ，放大器无输入信号，此时 $U_{CD}=U_{AE}$ 。滑线电阻滑动点 E 的位置对应于测量电桥的输出电压 U_{CD} ，即反映出待测气体的含量。

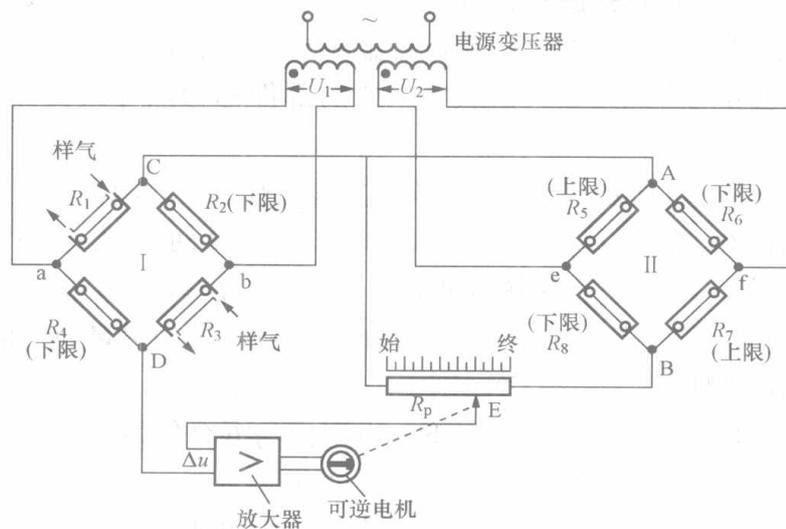


图 9-16 双电桥测量电路

9.4.3 热导式气体分析仪的应用

热导式气体分析仪常用于锅炉烟气分析和氢纯度分析。

火电厂中使用 RD-7AG 型分析仪来分析烟气中 CO_2 的含量。烟气中的组分有 CO_2 、 N_2 、 CO 、 H_2 、 SO_2 及水蒸气等，其中 H_2 、 SO_2 热导率相差太大，应在预处理时除去。剩余的背景气体热导率相近，并与被测气体 CO_2 的热导率有显著差别。从热导率来看，烟气成为双成分（ CO_2 和其余成分）混合气体，其热导率与这两成分的比例有关，通过测量烟气的热导率来测量 CO_2 的含量。

火电厂中使用 QRD-1102 型氢分析仪来测量氢冷发电机的冷却氢气的纯度（含量），以监视爆炸条件时氢含量的下限值。测量的背景气体是空气。

QRD-1102 型热导式氢分析仪不需要复杂的预处理装置；由调整组件、变送器、二次仪表和交流稳压器等部分组成，如图 9-17 所示。

调整组件的作用是使混合气体的流量保持在 $0.5\sim 1\text{L}/\text{min}$ ，变送器完成待分析气体热导率的传感变送功能。它采用的是图 9-16 所示的双电桥测量线路。全套的 QRD-1102 型氢分析仪配有一台交流稳压器，它输出稳定的 220V 电压作为变送器内工作变压器一次侧绕组的供电电压，配套的二次仪表为交流电压平衡式仪表。

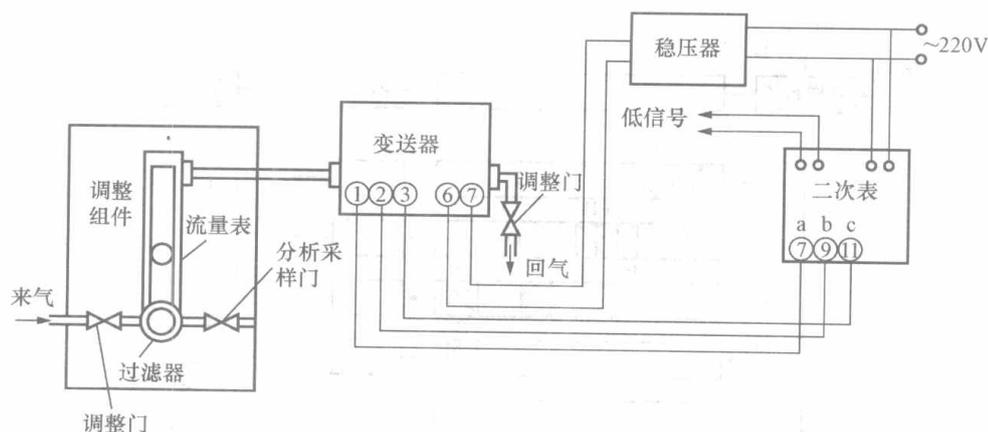


图 9-17 QRD-1102 型氢分析仪结构组成

9.5 工业气相色谱仪

色谱分析仪是一种多组分的分析仪器。色谱分析的基本原理是：使被分析样品在“流动相”的推动下流过“色谱柱”（内装填充物，称固定相），由于样品中各组分在流动相和固定相中分配情况不同，它们从色谱柱中流出的时间不同，从而达到分离不同组分的目的。

根据固定相和流动相的状态，色谱分析可分为气相色谱和液相色谱。前者用气体作流动相，后者用液体作流动相。固定相也可有两种状态，即固体或液体。气相色谱仪在电力系统中，主要用于分析大型变压器中油产生的各种气体，以迅速检测变压器的故障。在火电厂中也可用来分析烟气成分。下面仅对气相色谱仪加以介绍。

9.5.1 工作原理

当一定量的气体在纯净的载气（称为流动相）的携带下通过具有吸收性能的固体表面，或通过具有溶解性能的液体表面（这些固体和液体称为固定相）时，由于固定相对流动相所携带气体的各组分的吸附能力或溶解度不同，气体中各组分在流动相和固定相中的分配情况是不同的，可以用分配系数 K 表示，即

$$K_i = \frac{\varphi_s}{\varphi_m} \quad (9-9)$$

式中 φ_s ——组分 i 在固定相中的浓度；

φ_m ——组分 i 在流动相中的浓度。

固定相均匀填充在一定直径和长度的玻璃或不锈钢细管中形成色谱柱，混合物在色谱柱中的分离过程如图 9-18 所示。分配系数大的组分不易被流动相带走，因而在固定相中停留的时间较长；相反，分配系数小的组分在固定相中停留的时间较短。样品中各组分在固定相和流动相中分配系数的微小差异，引起组分在移动过程中移动速度的微小差异，并累积成组分之间移动路程之间的较大差异，从而使样品中各组分得到分离。分离后的各组分按时间上的先后次序由流动相带出色谱柱，进入检测器检出。在记录仪上得到的以时间和电压为坐标的曲线表征了从色谱柱流出的组分及其浓度的变化，此曲线称为流出曲线。各组分的峰形在时间上的分布图称为色谱图。

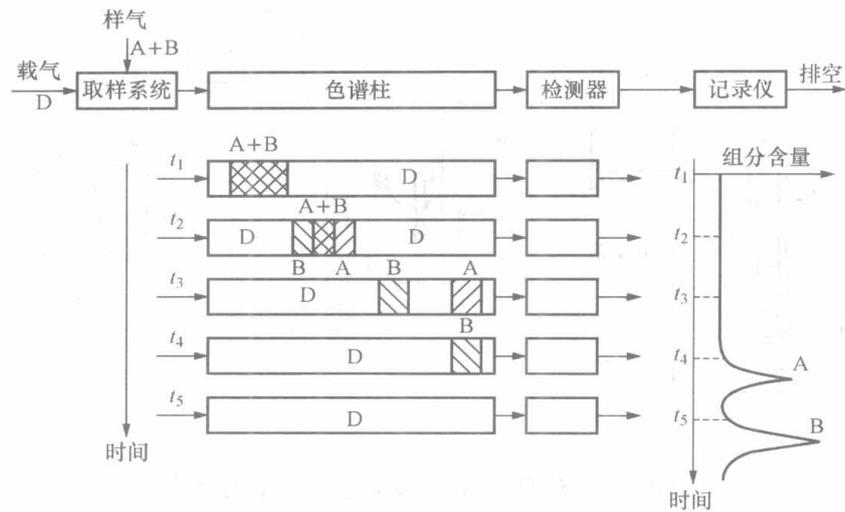


图 9-18 混合物在色谱柱中的分离过程

9.5.2 工业气相色谱仪的基本构成

工业气相色谱仪主要由样气预处理系统、载气预处理系统、取样系统、色谱柱、检测器、信号处理系统、记录显示仪表、程序控制器等组成，如图 9-19 所示。

在程序控制器的控制下，载气经预处理系统减压、干燥、净化、稳压、稳流后，再经取样装置到色谱柱、检测器后放空。被测气体经预处理系统后，通过取样装置进入仪表，被载气携带进入色谱柱，混合物通过色谱柱后被分离成单一组分，然后依次进入检测器，检测器就根据各组分进入的时间及其含量输出相应的电信号，经过数据处理的显示仪表直接显示出被测各组分的含量。

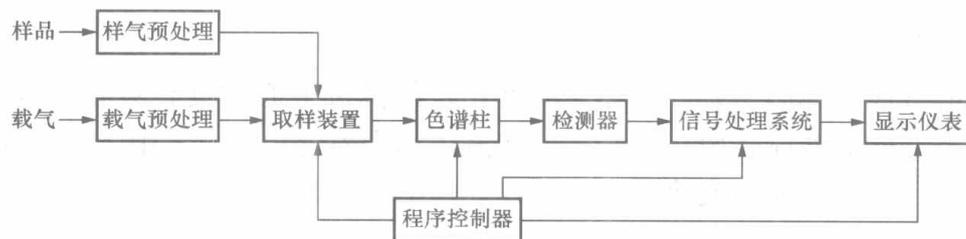


图 9-19 工业气相色谱仪的基本构成

1. 载气系统

载气系统包括载气源及压力流量调节器。载气应不被固定相吸附或溶解，通常用氦气、氢气、氮气等。

2. 取样装置

取样需在时间和体积上集中，即在瞬时内完成进样。工业气相色谱仪中，要求待分析样品自动地、周期地、定量地送入色谱柱。这个任务由取样阀在程序控制器控制下完成。

3. 色谱柱

色谱柱是色谱分析仪的核心部件，它起着把混合气体分离成各个单一组分气体的作用。不同的分析对象对色谱柱的形式、填充材料及柱子尺寸有不同的要求。

常用色谱柱的柱管采用对所要分离的样品不具有活性和吸附性的材料制造。一般用不锈钢和铜做柱管，柱管内径为 4~6mm。柱长主要由分配系数决定，分配系数越接近的物质所

需的柱越长，长度为 0.5~15m。为了便于柱温的控制和节省空间，色谱柱做成螺旋状，螺旋柱管的曲率半径为 0.2~0.25m。

用固定液做固定相的色谱柱称为气液色谱柱。它的固定相由担体和涂敷在担体上的高沸点的有机化合物（固定液）组成。担体是用来支撑固定液的多孔固体颗粒。工业气相色谱柱中所用的担体主要是硅藻土型担体，如红色担体 6102、201，白色担体 101 等。固定液在使用温度下应不挥发或挥发极微，对样品中被分离的组分应有一定的溶解能力及分配系数。常用的固定液有各种烃类、有机脂类、高级醇类等。

气固色谱柱的填充柱中，填充有吸附性能的固体吸附剂。吸附剂应有较大的吸附面积，与样气及载气不起化学反应，对不同组分有不同的吸附能力。常用的吸附剂有氧化铝、硅胶、活性炭、分析筛等。

4. 检测器

气相色谱检测器的作用是检测从色谱柱中随载气流出来的各组分的含量，并把它们转换成相应的电信号，以便测量和记录。根据检测原理的不同，检测器可分为浓度型检测器和质量型检测器两种。

浓度型检测器测量的是载气中某组分浓度瞬间的变化，即检测器的响应值和组分的浓度成正比。如热导式检测器和电子捕获检测器等。

质量型检测器测量的是载气中某组分进入检测器的速度变化，即检测器的响应值和单位时间进入检测器某组分的量成正比。如氢火焰离子化检测器和火焰光度检测器。

在工业气相色谱仪中主要用热导式检测器和氢火焰离子化检测器。

(1) 热导式检测器。热导式检测器由于灵敏度适宜、通用性强（对无机物、有机物都有响应）、稳定性好、线性范围宽、对样品无破坏作用、结构简单、维护方便，得到了广泛应用。

热导式检测器的工作原理与热导式气体分析仪中的热导池工作原理相同。经过色谱柱分离后的样品组分，在载气的带动下，进入热导检测器，由热导检测器把样品中各组分浓度的高低转换成电阻值的变化，再由桥路把电阻值的变化转换成电信号输出，由显示仪表显示出各组分浓度的大小。

(2) 氢火焰离子化检测器。氢火焰离子化检测器简称氢火焰检测器。这种检测器对大多数有机化合物具有很高的灵敏度，一般比热导式检测器的灵敏度约高 3~4 个数量级，能检测至 10^{-9} 级的痕量物质。但它仅对在火焰上被电离的含碳有机化合物有响应，对无机化合物或在火焰中不电离或很少电离的组分没有响应，因此它只应用在对含碳有机物的检测中。

氢火焰离子检测器的原理图如图 9-20 所示。带有样品的载气与纯氢气混合进入检测器，从喷气口喷出。点火丝通电，点燃氢气。碳氢化合物在燃烧中产生离子和电子，其数目随碳氢化合物所含碳原子数目的增大而增大。在火焰周围的电极间加有 100~300V 的电压，

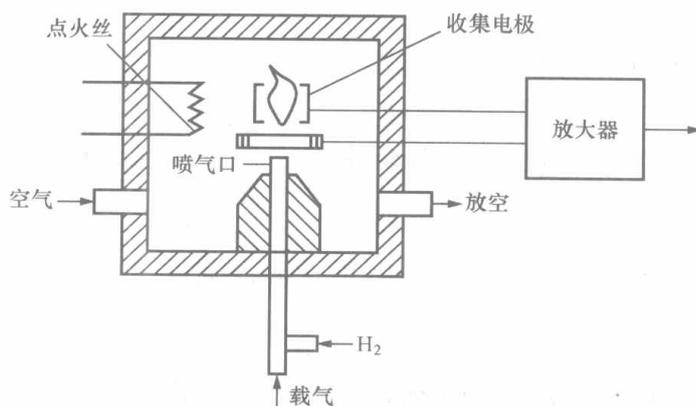


图 9-20 氢火焰离子化检测器原理图

在此电场的作用下，离子和电子沿不同方向运动，形成电流，其大小即反映了被测组分的浓度。

色谱柱和检测器是在同一恒温条件下工作的，为此设有温度控制电路来保证检测器和色谱柱恒温。

9.6 电导式分析仪

电导式分析仪是一种历史比较悠久、应用也比较广泛的分析仪表。用来分析酸、碱溶液的浓度时，常称为浓度计；直接指示电导的就称为电导仪；用来测量蒸汽和水中的盐浓度时称为盐量计。

在火电厂中，电导式分析仪不仅可用于连续监督各段汽、水的受污染程度，也可用于监督凝汽器冷却水的泄漏，补给水、凝结水、除盐水处理中离子交换器的失效程度以便控制其运行的终点和再生。动力机组的给水和蒸汽中的盐分是引起设备结垢的原因，它会影响热力设备的安全经济运行。在高压锅炉中，对于过热蒸汽和给水的电导率要求小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

9.6.1 工作原理

9.6.1.1 溶液的电导与电导率

以水为溶剂的酸、碱和盐类溶液，称为电解质溶液。电解质溶液中存在着正负离子。当在该溶液中插入一对电极，并外接电源时，正负离子在电场作用下，分别向两个电极移动，在回路中就产生了电流。电解质溶液常称为液体导体，这类导体的导电能力随着温度升高而增强，常用电导率表示其导电能力。根据欧姆定律，溶液的电阻为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (9-10)$$

式中 R ——电解质溶液的电阻， Ω ；

ρ ——电解质溶液的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

L ——电解质溶液导电极板之间的距离， m ；

A ——电解质溶液导电极板的有效截面积， m^2 。

溶液的电导为

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{A}{L} = \gamma \frac{A}{L} \quad (9-11)$$

$$\gamma = G \frac{L}{A} \quad (9-12)$$

式中 G ——电解质溶液的电导， S ；

γ ——电解质溶液的电导率， S/m 。

溶液的电导率 γ 的物理意义是：当电极的面积为 1m^2 ，两电极相距 1m 时，中间充以电解质溶液所具有的电导。

令 $K = \frac{L}{A}$ ， K 称为电极常数，则有

$$\gamma = GK \quad (9-13)$$

电导率 γ 的大小表示了溶液导电能力的大小，它与电极常数无关，但与溶液电解质的种类、性质、浓度及溶液的温度等因素有关。测量电导 (S 或 μS) 的仪器称为电导仪，测量电导

率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) 的仪器称为电导率仪。当电极常数 $K=1$ 时, 则电导与电导率的数值相同。

9.6.1.2 电导率与溶液浓度的关系

为了用电导率表示溶液浓度的多少, 引入摩尔电导率的概念。在相距 1m 、面积各为 1m^2 的两电极之间, 充以 $1\text{mol}/\text{L}$ 浓度的某种溶液, 所呈现的电导值称为该种溶液的摩尔电导率, 用符号 “ Λ_m ” 来表示, 其单位为 $\text{S}/(\text{m} \cdot \text{mol}/\text{L})$ 。

当溶液的摩尔浓度为 C (mol/L) 时, 不考虑正负离子的相互作用和温度对溶液导电能力的影响, 溶液的电导率为

$$\gamma = \Lambda_m C \quad (9-14)$$

式中 γ ——电解质溶液的电导率, S/m 。

当溶液取质量浓度 σ (kg/L) 时, 它与摩尔浓度 C 的关系为

$$C = \frac{\sigma}{M} \quad (\text{mol}/\text{L}) \quad (9-15)$$

式中 M ——溶质的摩尔质量, kg/mol 。

将式 (9-15) 代入式 (9-14), 得

$$\gamma = \frac{\Lambda_m}{M} \sigma \quad (9-16)$$

当被测溶液浓度不高 (接近无限稀释) 时, 一定物质的摩尔电导率可看成是常数, 从上面各式可以看出, 电阻、电导和电导率与溶液浓度有确定关系, 溶液电导率随溶液浓度增加而增加。但当溶液浓度过高时, 由于正负离子间距离变短, 部分正负离子又重新组合成化合物, 故电导率随浓度增加反而减小。这两种情况下, 溶液电导率均与溶液浓度呈单值关系。

当溶液浓度介于中等浓度范围内时, 溶液电导率与溶液浓度不再是单值函数关系。所以应用电导法只能测量低浓度或高浓度的溶液, 且电解质溶液的电导率与其浓度的关系是通过实验取得的。

9.6.1.3 影响电导率测定的因素

1. 溶液温度

电导率大小与电解质在水中的电离度及离子迁移速度有关。当温度上升时, 电离度增大, 同时溶液粘度降低, 离子运动阻力减小, 在电场作用时, 离子定向移动加快, 电导率增大; 反之, 电导率下降。以电导率大小来评定水的品质或溶液浓度时, 应指明测试电导率的温度。我国电力系统中均以 25°C 为基准温度来评定电导率的测量。

工业在线电导仪通常在其测量电路中设置温度补偿电路来消除温度的影响。

2. 电极的极化

当没有电流通过电导池时, 电极处于平衡状态; 当电流通过时, 电极电位平衡值发生了偏差, 称为极化现象, 产生极化的主要有浓差极化和电化极化。电极极化后阻碍了溶液中正负离子的导电, 使测量产生误差, 为此使用的电源必须采用交流。

3. 电极系统的电容

当交流电通过电导池时, 电导池除表现电阻作用外, 还呈现容抗作用, 如图 9-21 所示。由电容容抗 X_C 与其自身的电容量 C 及电源频率 f 之间的关系

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (9-17)$$

可知: 电源频率越高, C_1 、 C'_1 呈现的容抗越小, 即它们对正弦交流电的限制作用就越小,

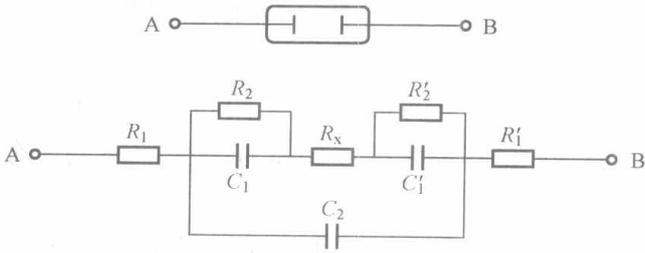


图 9-21 电导池交流等效电路

R_1 、 R_1' —电极本身电阻； R_2 、 R_2' —极间极化电阻；
 R_x —极间电解质溶液电阻； C_1 、 C_1' —静电容；
 C_2 —极间电容

对电极极化电阻 R_2 、 R_2' 的旁路作用就越大，频率高到一定程度时， C_1 、 C_1' 可近似视为对交流电呈短路状态， R_2 、 R_2' 可忽略不计，电导池等效电阻就可认为不受静电容和电极极化的影响，十分逼近电解质溶液电阻 R_x 。但是，如果电源频率过高，则电解质电容 C_2 的容抗作用减小而对 R_x 的分流作用增大，同时传输电缆分布电容的影响也更加明显，即流过 C_2 与电缆分布电容的电流增大，给测量带来不利的影响。

因此，在一些电导率仪表中，设置了电容补偿电路，以减少寄生电容的影响。

4. 可溶性气体

一些可溶性气体如 CO_2 、 NH_3 等溶于水，产生了 H^+ 和 OH^- 离子，使溶液的导电能力增强，电导率升高，影响了电导率测量。为此测量电导率之前应先采取除气措施。

9.6.2 溶液电导的测量方法

溶液电导是通过测量两电极之间的电阻求出的。溶液电阻的测量目前常用的方法有以下两种。

9.6.2.1 分压测量线路

分压测量线路如图 9-22 所示。两个极板之间的溶液电阻 R_x 和外接的固定电阻 R_k 串联，在交流电源 u 的作用下，电阻 R_k 上的分压为

$$u_k = \frac{uR_k}{R_x + R_k} \tag{9-18}$$

测量时电源电压 u 保持恒定， u_k 与 R_x 之间为单值对应关系，测得 u_k 就可得知溶液的浓度。这种测量方法适用于低浓度、高电阻电解质溶液的测量。

9.6.2.2 电桥测量线路

应用平衡电桥或不平衡电桥均可测量溶液电阻。图 9-23 所示为平衡电桥法测量原理线路图，调整触点 a 的位置可使电桥平衡。电桥平衡时，有

$$R_x = \frac{R_3}{R_2} R_1 \tag{9-19}$$

通过电桥平衡时触点 a 的位置可知 R_x 的大小，进而可确定溶液浓度大小。平衡电桥法适用于高浓度、低电阻溶液的测量，对电源电压的稳定性要求不高。

9.6.3 电导式分析仪在火电厂中的应用

DDD-32B 型工业电导仪是一种普及型的在线监测仪表，在电厂中应用十分广泛。它由电导检测器、转换器和显示仪表三部分组成，组成框图如图 9-24 所示。配套的检测器有三种电极常数 (K 为 0.01、0.1、1.0) 的电极，可以得到不同的测量范围 ($0 \sim 0.1 \mu S$ 至 $0 \sim 1000 \mu S$ 等五种量程)；输出信号为 $0 \sim 10mA$ 或 $0 \sim 10V$ ；精度为 $\pm (3\% \sim 5\%)$ ；被测介

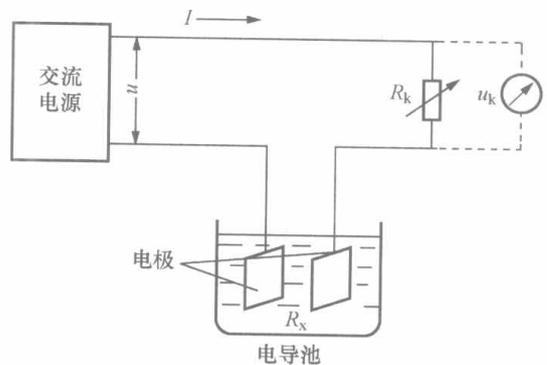


图 9-22 分压法测量线路原理图

质温度 0~60℃，压力 1MPa，能实现被测介质的温度自动补偿。

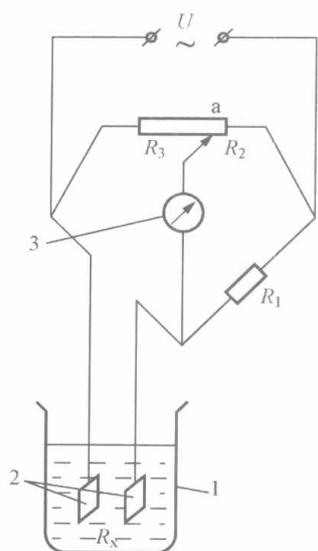


图 9-23 平衡电桥法测量原理线路图

1—电导池；2—电极片；3—检流计

1. 检测器

DDD-32B 型工业电导仪的检测器结构示意图如图 9-25 所示。检测器呈圆柱形，由绝缘材料压铸而成。其内装有两个电极，一个圆柱形的不锈钢内电极和一个圆筒形的不锈钢外电极。另外，还安装了一支铂电阻温度计，用来作为温度补偿电极。内电极的上部有一段涂有塑料的绝缘层，它与在其外的外电极之间距离决定了电极常数。被测溶液从下部进入，侧面流出。测量时被测溶液处在流动状态，并连续地流过电极。

2. 转换器

转换器的作用是将检测器中溶液的电导转换成电信号输出，送给显示仪表对溶液的电导、电导率或浓度进行指示、记录和作为调节仪表的输入信号。DDD-32B 型工业电导仪采用分压式测量电路，并有分布电容和温度补偿电路。

3. 显示仪表

显示仪表为通用产品，只要满足输入信号，用户可以自行选用。

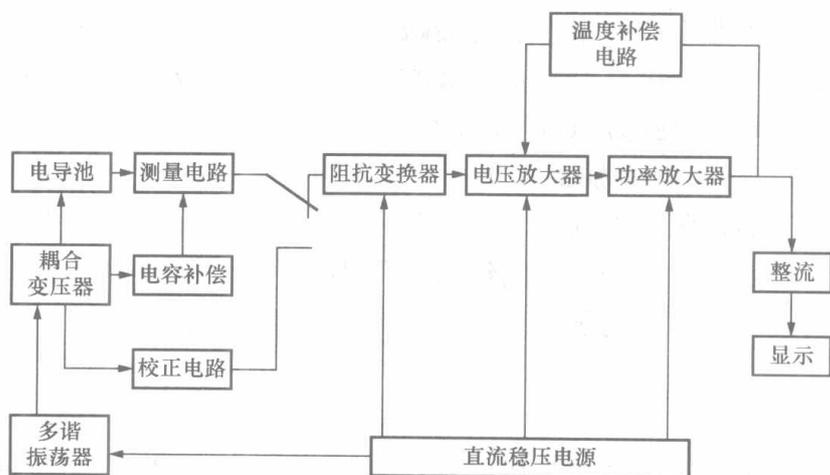


图 9-24 DDD-32B 型工业电导仪组成框图

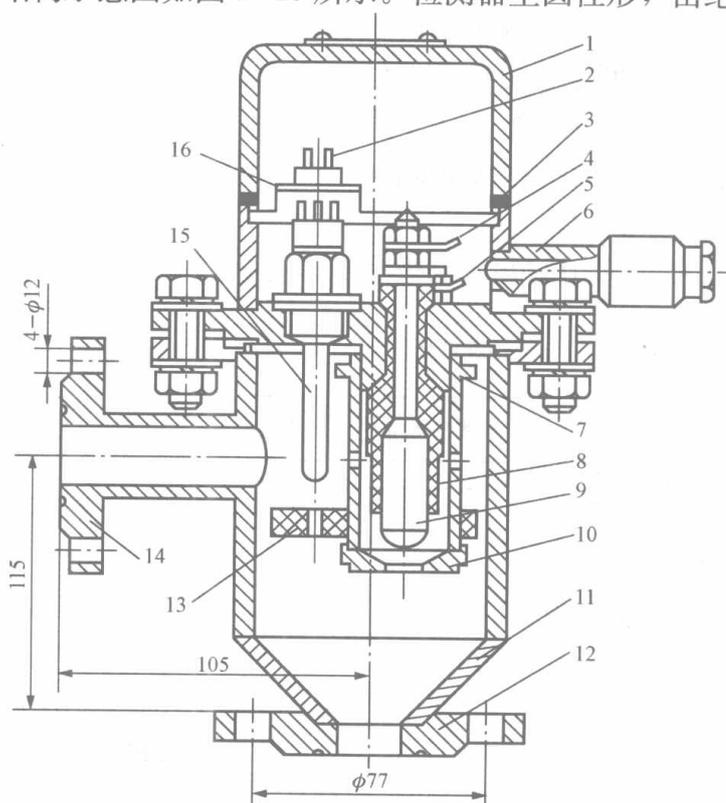


图 9-25 DDD-32B 型工业电导仪的检测器结构示意图

1—防护罩；2—温度补偿接线头；3—密封橡皮圈；4—测量电极接线头；
5—外电极接线头；6—出线套管；7—外电极固定螺圈；8—内电极涂层；
9—内电极；10—外电极；11—检测器外壳；12—进水法兰盘；
13—挡板；14—出水法兰盘；15—温度补偿电阻；
16—固定螺帽

9.7 工业酸度计

工业生产中水溶液的酸碱度对氧化反应、还原反应、结晶、吸附、沉淀等的进行都有重要影响。酸度计是测量溶液酸碱度的仪表，又称为 pH 计。

9.7.1 工业酸度计的测量原理和基本结构

9.7.1.1 测量原理

酸、碱、盐水溶液的酸碱度统一用氢离子的浓度来表示。

由于氢离子浓度的绝对值很小，为了表示方便，常用 pH 值来表示氢离子的浓度。pH 值是溶液中氢离子浓度的常用对数的负值，即

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$$

与之相应有：pH=7 为中性溶液，pH>7 为碱性溶液，pH<7 为酸性溶液。

工业酸度计是采用电位式分析方法原理工作的。根据电化学原理，任何一种金属插入导电溶液中，在金属与溶液之间将产生电极电动势，此电极电动势与金属性质、溶液的性质以及溶液的浓度和温度有关。采用镀有多孔铂黑的铂片，用其吸附氢气，可以起到与金属电极类似的作用。电极电位是一个相对值，一般规定标准氢电极的电位为零，作为比较电极。

测量 pH 值一般使用由测量电极、参比电极与被测溶液共同组成的原电池。测量电极的电位随被测溶液中氢离子的改变而变化，参比电极的电位恒定。原电池的电动势为参比电极与测量电极间电极电位的差值。通过测量原电池的电动势的变化即可测出溶液的 pH 值。

9.7.1.2 基本结构

pH 计的组成示意图如图 9-26 所示。它由发送部分和检测部分组成。

1. 参比电极

工业中常用的参比电极有甘汞电极和银—氯化银电极。

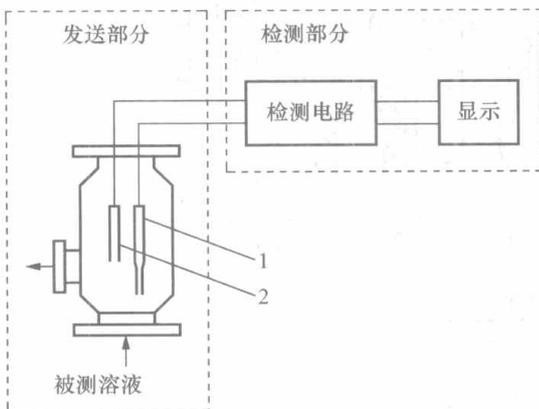


图 9-26 pH 计的组成示意图

1—参比电极；2—工作电极

甘汞电极是由金属汞（Hg）、甘汞（ Hg_2Cl_2 ）和氯化钾溶液（KCl）组成的电极，结构见图 9-27。它分内管和外管两部分。内管中分层装有汞（Hg）和糊状的甘汞（ Hg_2Cl_2 ）。内管下端的棉花起支撑作用。这样就使金属汞插入到具有相同离子的糊状电解质溶液中，于是存在电极电位 E_0 。内管插在装有饱和 KCl 溶液的外管中，KCl 溶液通过棉花渗入糊状甘汞中，使甘汞呈液态状。外管末端用多孔陶瓷芯堵住。当整个甘汞电极插入被测溶液时，电极外管中的 KCl 溶液将通过多孔陶瓷渗透到被测溶液中，起到离子连通的作用。甘汞电极的电极电位由能斯特公式定量描述，即

$$E = E_0 - \frac{RT}{F} \ln[\text{Cl}^-] \quad (9-20)$$

式中 E ——电极电位；

E_0 ——标准电极电位；

R ——气体常数, $8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$;

T ——溶液的绝对温度, K ;

F ——法拉第常数, $9.6487\times 10^4\text{C}/\text{mol}$ 。

式(9-20)表明,甘汞电极的电极电位在一定温度下,仅由 Cl^- 的活度所决定,不受其他离子影响。常见的甘汞电极内充 KCl 溶液,其浓度为 3.5mol/L (饱和态)、 1mol/L 、 0.1mol/L 。甘汞电极结构简单,使用方便,在一般情况下,电极电位稳定。缺点是电极电位受温度的影响较大。

银—氯化银($\text{Ag}-\text{AgCl}$)电极结构如图9-28所示。在铂丝上镀银,然后放在稀盐酸中通电,形成氯化银薄膜沉积在银电极上。将电极插入饱和 KCl (或 HCl)溶液中,就成为银—氯化银电极。在一定的温度下,银—氯化银电极电位只与 KCl (或 HCl)溶液的浓度有关。这种电极结构简单,稳定性和重复性均好于甘汞电极,特别是在高温条件下(250°C),其电极电位仍很稳定,但其价格较贵。

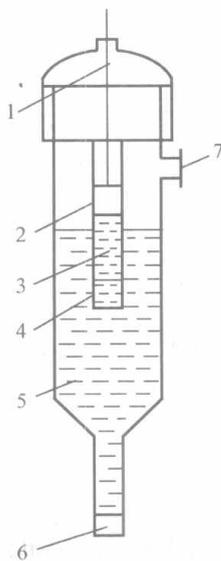


图 9-27 甘汞电极的结构

1—电极引线; 2—汞(水银); 3—甘汞(氯化亚汞); 4—棉花;
5—饱和 KCl 溶液; 6—多孔陶瓷; 7—注入口

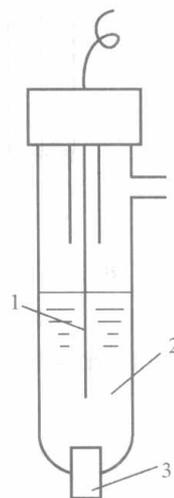


图 9-28 银—氯化银电极结构

1— $\text{Ag}-\text{AgCl}$; 2— KCl 溶液; 3—陶瓷塞

2. 测量电极

玻璃电极是使用最为广泛的测量电极,其结构如图9-29所示。玻璃电极的下端为一个球泡,是由 pH 敏感玻璃膜制成的,膜厚约 0.2mm ,且可以导电。球内充以 pH 值恒定的缓冲溶液,作为内参比溶液。另外还装有银—氯化银电极或甘汞电极作为内参比电极。内参比溶液使玻璃膜与内参比电极间有稳定的接触,从而把膜电位引出。玻璃电极插入被测溶液后, pH 敏感玻璃膜的两侧与不同氢离子浓度的溶液接触,通过玻璃膜可以进行氢离子交换反应,从而产生膜电位,此膜电位与被测溶液的氢离子浓度有特定的关系。

玻璃电极的特点是性能稳定、能在较强的酸碱溶液中工作,并在相当宽的范围($\text{pH}=2\sim 10$)内有良好的线性关系。但其内阻较高,检测部分要采用高阻转换器。一般工作温度为 $20\sim 95^\circ\text{C}$ 。

以玻璃电极为测量电极、甘汞电极为参比电极,两电极同时插到被测溶液中,就构成了

一个简单的 pH 发送器。该发送器输出的总电动势 E 为

$$E = E_0 + 2.303 \frac{RT}{F} (\text{pH}_x - \text{pH}_0) \quad (9-21)$$

由式 (9-21) 可知, 当溶液温度 T 一定时, 发送器输出的电动势 E 随被测溶液的 pH 值而变化。当温度变化时, 会对测量带来误差。因而在检测部分的电路中设置了温度补偿环节。

图 9-30 所示为 pH 发送器输出电动势 E 与溶液 pH 值的关系曲线 ($\text{pH}_0=2, 20^\circ\text{C}$)。曲线表明在 $\text{pH}=1\sim 10$ 的范围内, 二者为线性关系。在 $\text{pH}=2$ 处, 电动势为零的点称为玻璃电极的零点。在零点两侧, 总电动势的极性相反。

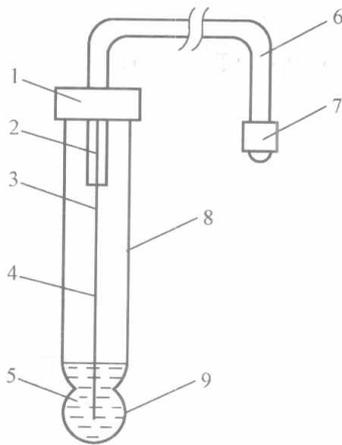


图 9-29 玻璃电极的结构

- 1—电极帽; 2—玻璃管; 3—铂丝; 4—Ag-AgCl;
- 5—内参比溶液; 6—屏蔽引线; 7—插头;
- 8—电极支杆; 9—pH 敏感玻璃膜

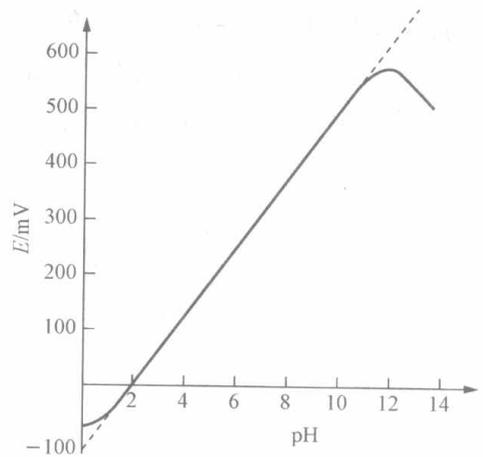


图 9-30 电动势与 pH 值的关系

图 9-31 所示为发送器在不同温度下一簇 pH— E 关系曲线, 该簇曲线有一个共同的交点, 称为等电位点, 该点对应的 pH 值称为等电位 pH 值, 用 pH_A 表示。显然, 当溶液 pH 值为 pH_A 时, 无论温度如何变化, 发送器输出的电动势都不变 (为 E_A)。并且对不同的溶液, 等电位具有相同的 pH 值, 均为 2.5。

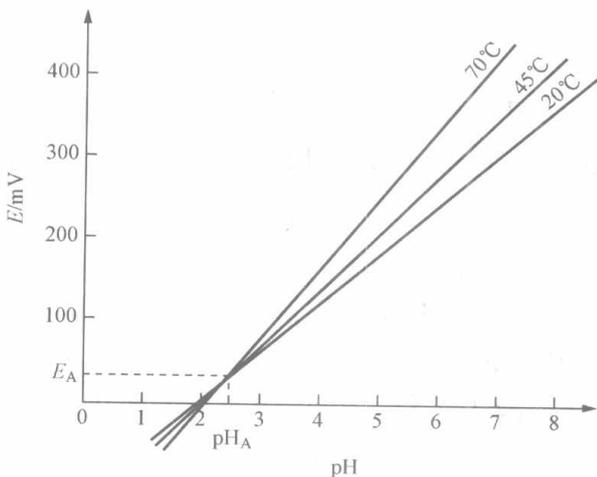


图 9-31 电动势随温度变化特性

9.7.2 PHG-21B 型工业酸度计

PHG-21B 型工业酸度计可连续自动分析、测量工业流程中水溶液的酸碱度。发送器装于分析现场, 测量仪表则安装在就地仪表盘上或中央控制室内, 它们之间用高绝缘低噪声屏蔽电缆连接。

PHG-21B 型酸度计有单量程和双量程两种类型。单量程仪表的测量范围为 $\text{pH}2\sim\text{pH}10$, 其配套电极是零电位 pH 值为 2 的电极。双量程仪表的测量范围为 $\text{pH}7\sim\text{pH}0$ 、 $\text{pH}7\sim\text{pH}14$, 它与零电位 pH 值是 7 的电极

配套使用。PHG-21B型酸度计是由酸度发送器（测量电池系统）和变送器（高阻毫伏计）两大部分组成的。

9.7.2.1 酸度发送器

酸度发送器的作用是把工业流程中水溶液的 pH 值转换成相应的电动势信号送给测量仪表，主要由参比电极、测量电极、温度补偿铂电阻、外壳等组成。酸度发送器有不同的结构以适用于不同的测量条件和安装条件。

图 9-32 所示为可拆卸的沉入式发送器 PHGF-12 的结构。这种发送器适用于测量开口容器中溶液的酸碱度。插入深度有 0.5、1、1.5m 等几种。

其他型号的发送器有 PHGF-13（常压沉入式带自动清洗发送器，适用于测量开口容器中对电极有微量沾污的溶液）、PHGF-21（常压流通式发送器，适用于装在常压流通的管道中）、PHGF-22（压力流通式发送器，适用于压力 0.1~1.0MPa 的流通管道溶液酸碱度的测量）、PHGF-23（常压流通式带自动清洗发送器，适用于测量常压管道内对电极有微量沾污的溶液）等。不论何种形式的发送器，内部都有一块高绝缘接线板以保证良好绝缘。

9.7.2.2 变送器

变送器的作用是将发送器输出的高内阻信号放大并转换成与其成比例的低内阻电压（电流）信号，送给显示仪表指示相应的 pH 值。变送器由参量振荡器、交流放大、整流、直流功率放大、显示输出、定位调节、电源等部分组成。它将发送器输出的直流电压信号，经过调制放大和解调后，输出至显示仪表。热敏电阻将被测溶液的温度信号转变成电阻信号，也输出到变送器，以进行温度补偿。变送器原理框图如图 9-33 所示。

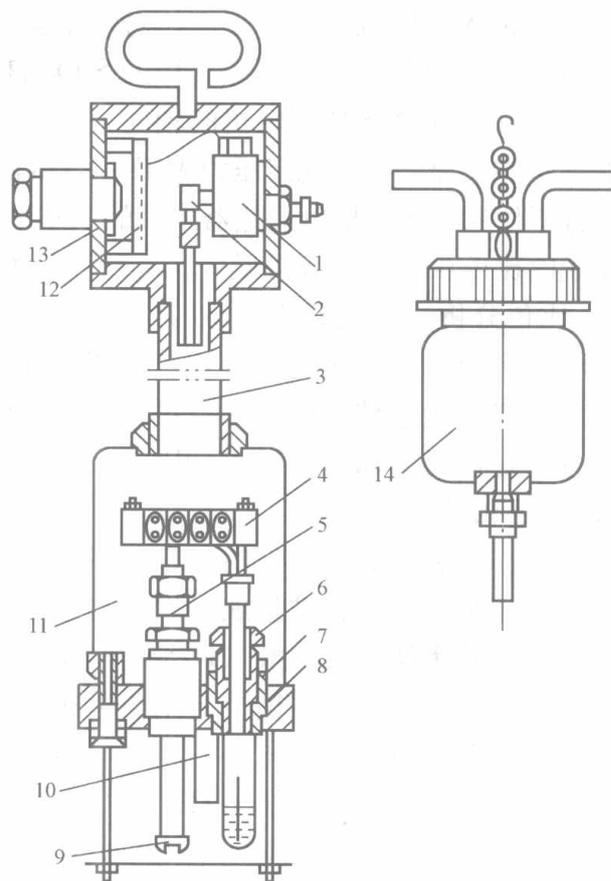


图 9-32 PHGF-12 型沉入式酸度发送器结构图
1—甘汞电极；2—甘汞电极接嘴；3—主轴部分；4—接线板；
5—盐桥；6—紧固螺母；7—密封橡皮；8—测量电极；
9—盐桥调节螺丝；10—铂电阻体；11—测量部分；
12—接线盒；13—接线盒盖板；14—塑料容器

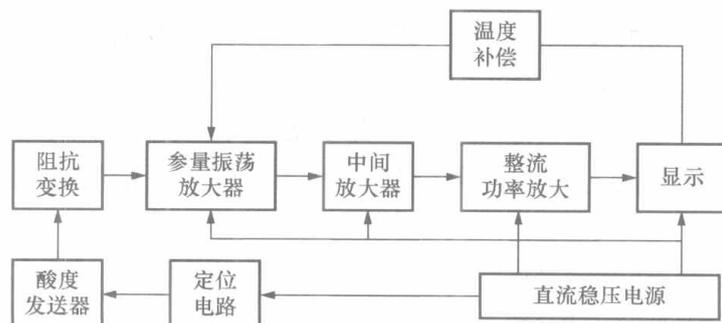


图 9-33 PHG-21B 型工业酸度计变送器原理框图

9.8 硅酸根分析仪

在天然水中常溶有硅酸化合物，这是天然水与含有硅酸盐的物质接触的结果。作为机、炉工质的汽、水物质中同样溶解有各种硅酸化合物。若给水中硅酸化合物含量偏高，则将全部带入炉内。在汽包炉中，硅酸化合物一部分沉积在水冷壁管中，另一部分随排污水排掉。呈硅酸形态的硅酸化合物中，有相当一部分被饱和蒸汽所溶解携带进入汽轮机，最终大部分以 SiO_2 的形态在汽轮机的低压级中沉积。在直流炉中，硅酸化合物除一部分沉积在受热面中，其余均带入汽轮机，所以直流炉对给水含硅量的要求更加严格。如给水含硅量长期不合格，会使汽轮机内蒸汽通流部分沉积的 SiO_2 日趋增多，蒸汽通流截面越来越小，将会限制汽轮机的出力，还会增加汽轮机的轴向推力，危及汽轮机的安全运行。

在汽水品质监督中，规定压力大于 10MPa 的给水和蒸汽中硅酸根的含量不超过 $15\mu\text{g}/\text{kg}$ 。硅酸根分析仪通常用于检测过热器出口的主蒸汽中的含硅量。目前国内火电厂的各种硅酸根仪都采用光电比色法，它具有灵敏度高、稳定性好、使用方便等优点。

9.8.1 比色分析法测硅原理

光学比色分析是利用化学反应使分析溶液中被测组分转变成有色化合物，然后利用朗伯—贝尔定律测量这种有色化合物对光的吸收程度，最后得出被测组分的浓度。硅酸根含量的测定分为显色反应和光的吸收（比色）两个基本过程。

9.8.1.1 硅钼蓝显色反应

硅钼蓝显色反应是将无色的含有硅酸盐的水样通过以下四次化学反应得到具有蓝色水样的结果，其蓝色浓度与含硅量成比例。其反应过程如下：

(1) 将含硅水样与一次酸 (H_2SO_4 , 0.3mol/L) 反应得到正硅酸 H_4SiO_4 。

(2) 正硅酸在一定的酸度下与钼酸生成淡黄色的硅钼黄杂多酸 $\text{H}_8[\text{Si}(\text{Mo}_2\text{O}_7)_6]$ （简称硅钼黄），其反应式为

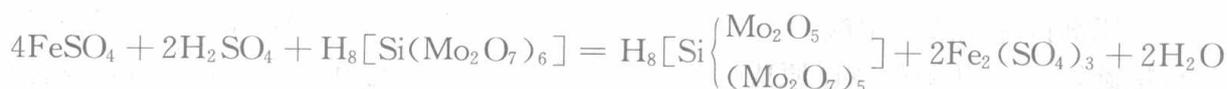


硅钼黄在较强的酸性溶液 ($\text{pH} < 2.5$) 中，其黄色要渐渐退色，须相当长的时间才达到稳定。反之，如果在较弱的酸性溶液 ($\text{pH} > 4$) 中，其产生的黄色较浅，随放置时间的延长而逐渐变深，经过相当长的时间才趋于稳定。强酸溶液中的硅钼黄是 β 酸，弱酸溶液中的硅钼黄是 γ 酸，两者都不稳定，为此应调节硅钼黄溶液的 pH 值，使之形成稳定性好的酸型。

(3) 硅钼黄溶液中再加入二次酸 (H_2SO_4 , 1.5mol/L)，使硅钼黄杂多酸的 pH 值适量（推荐值为 0.8~1.0），于是形成稳定型的 α 酸。但是这种 α 型结构的黄色硅钼酸能吸收多种波长的色光，给测量带来了干扰，为此须进行络合反应。所谓络合反应是指能产生络合物的反应。络合物是一种具有稳定性的配位键，且在水溶液中不易被离解的复合离子或分子的化合物。因水样同样含有磷酸盐，而产生磷钼黄，于是再加入适量的柠檬酸以形成能抑制磷钼黄的络合物。

(4) 因为硅钼蓝（是一种络合物）的测定灵敏度优于硅钼黄。故在 α 型硅钼黄杂多酸的络合物溶液中加入还原剂溶液（甲酸、抗坏血酸或硫化亚铁等），将黄色的硅钼酸还原成蓝色的硅钼蓝溶液。

当还原剂采用硫酸亚铁 FeSO_4 时, 其反应式为



其中 $\text{H}_8\left[\text{Si}\begin{matrix} \text{Mo}_2\text{O}_5 \\ (\text{Mo}_2\text{O}_7)_5 \end{matrix}\right]$ 是硅钼蓝络合物, 其蓝色与含硅量成正比。

9.8.1.2 光的吸收定律

一束具有相应波长的单色光透过有色溶液时, 由于一部分光被有色溶液中的吸光粒子吸收, 光的辐射能减弱。其中含有的有色物质的浓度越大, 液层越厚, 即有色溶液的吸光粒子数越多, 则被吸收的光也越多, 透过的光越弱。

透过有色溶液后的光强与有色组分浓度满足关系式

$$I = I_0 e^{-KLC} \quad (9-22)$$

式中 I_0 ——入射光强;

I ——透射光强;

K ——吸收系数;

L ——光程;

C ——有色组分浓度。

式(9-22)即为朗伯—贝尔定律。可以看出, 在比色皿的光程 L 已知时, 溶液的透光率 (I/I_0) 的对数仅与被测溶液的有色组分浓度 C 成反比。

对于硅钼蓝络合物溶液其呈现的是蓝色, 说明它的吸光颜色(称为补色)是黄色, 所以采用的单色滤光片的工作波长应是蓝色的互补色波长。

在测量硅含量时, 将被测溶液分成两路, 一路经过硅钼蓝显色反应, 另一路不经过硅钼蓝显色反应。两路溶液分别进入比色皿, 测取它们的透光度后相比较, 可测得含硅量的多少。

9.8.2 BF-8061 型硅酸根监测仪

BF-8061 型硅酸根监测仪是引进英国肯特 (Kent) 公司技术制造的产品。在火力发电厂中用于检测阴离子交换器出口水、混床出口水、凝结水再处理水、锅炉水和饱和水蒸气中硅酸根的浓度。该仪器量程有: $0\sim 50$ 、 $0\sim 100$ 、 $0\sim 200$ 、 $0\sim 500$ 、 $0\sim 1000$ 、 $0\sim 2000\mu\text{g/L}$ (SiO_2)。精度: $<200\mu\text{g/L}$ 时, $\pm 2\mu\text{g/L}$; $\geq 200\mu\text{g/L}$ 时, 读数值的 $\pm 2\%$ 。重复性为满量程的 $\pm 1\%$ 。输出信号为 $0\sim 10\text{mA}$ 或 $4\sim 20\text{mA}$; $0\sim 10\text{V}$; 数字刻度 $0\%\sim 100\%$ 。

BF-8061 型硅酸根监测仪由化学系统、光学系统和电路系统三部分组成。图 9-34 所示为该仪器流程示意图。

9.8.2.1 化学系统

如图 9-34 所示, 水样经热交换器 1、入口传感器组件 2 后, 经三通管分为两路, 一路为被分析样品, 一路为参比样品。被分析样品由多通道蠕动泵 3 输送, 在进入第一级混合器 6 之前, 通过蠕动泵的另一通道(仪器中为红色标志)将硫酸加入样品中, 其目的是调节水样的 pH 值。经酸化的水样进入第一级混合器 6 后, 由蠕动泵紫色通道加入钼酸铵, 充分混合后, 再经过恒温反应螺旋管 7, 在此硅酸根与钼酸黄生成硅钼黄。通过蠕动泵的橙色通道, 将含有柠檬酸的硫酸加至第二级混合器 9 前, 加入硫酸使水样 pH 值进一步降低至 $0.8\sim 1.0$, 柠檬酸作为水样中磷酸根的掩蔽剂, 可破坏磷酸根络合物。混合物在第二级混合

器 9 中充分混合后,再经第二个恒温反应螺旋管 10 进入第三级混合器 11。蠕动泵的棕色标志通道将还原剂抗坏血酸一甲酸(或 1-2-4 酸)加入第三级混合器 11,充分混合后,经恒温显色螺旋管 12,硅钼黄被还原成硅钼蓝,然后进入测量比色皿。与此同时,参比样品也由蠕动泵输送,经延时螺旋管 5、温度平衡螺旋管 8(与 12 装在同一恒温支板上),进入参比比色皿。该仪器的设计,使得从蠕动泵前三通分流的水样能同时到达测量比色皿和参比比色皿,这样可使样品颜色引起的误差得到自动补偿。6、9、11 三级混合器都有磁力搅拌棒,能对其中的样品和试剂进行充分混合。

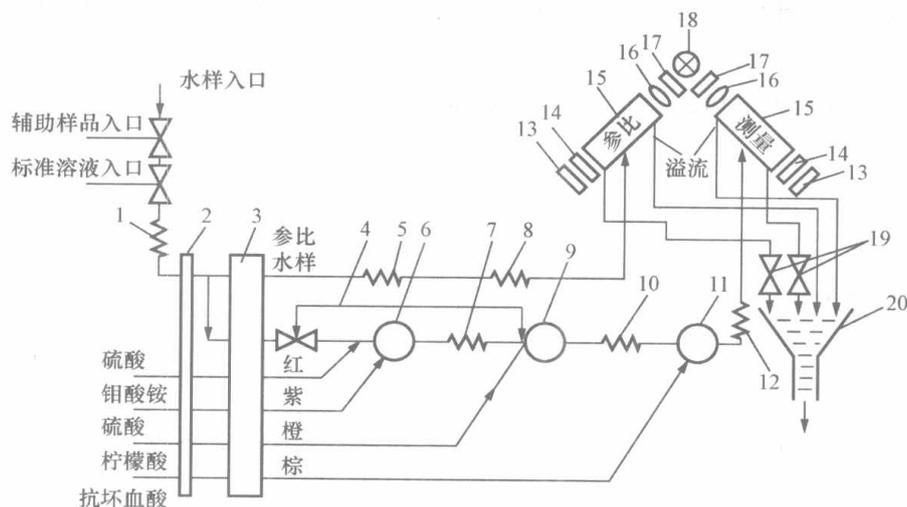


图 9-34 BF-8061 型硅酸根监测仪流程图示意图

- 1—热交换器; 2—入口传感器组件; 3—蠕动泵; 4—自动调零样品管; 5—延时螺旋管;
6—一级混合器; 7—恒温反应螺旋管; 8—温度平衡螺旋管; 9—二级混合器;
10—恒温反应螺旋管; 11—三级混合器; 12—恒温显色螺旋管; 13—光电池;
14—滤光片; 15—比色皿; 16—透镜; 17—隔热片; 18—光源;
19—排污节流电磁阀; 20—排污总管

9.8.2.2 光路系统

光路系统由光源(石英卤灯)、样品比色皿、参比比色皿、隔热片、透镜、滤光片和光电池组成,见图 9-34。

反应样品的颜色深度,正比于溶液中硅酸根的浓度,并反映在对测量光束的吸收上。两个比色皿内的溶液对光吸收之差(即吸光度之差)被光电池转换成电信号,由电子放大器处理并显示。

图 9-35 所示为 BF-8061 型硅酸根监测仪的监测周期,其工作时序如下:

(1) 监测周期开始时,激发灯约亮 5s,在灯亮 0~4.5s 期间作为灯丝预热。从 4.5~5.0s 期间,放大器中的样品保持电路开始工作,从两个光电池取得电信号,并存到下一周期重新检测为止。

(2) 排污节流电磁阀从第 5s 开始吸合,6.5s 关闭,排掉已检测过的测量比色皿和参比比色皿中的液体。

(3) 排污节流电磁阀关闭后,输液系统开始向测量比色皿和参比比色皿充溶液,约 45s 充满。继续充液,使两比色皿保持溢流,直至下一周期排液。

整个周期约需 60s,所以仪器每 60s 更新读数一次,但初始响应要经 8min 的延时。

9.8.2.3 电路系统功能简介

(1) 仪器具有两种显示方法。一种以数字显示,可直接读出水样中硅的浓度;另一种以线性电机记录仪显示,可记录水样中硅的浓度。

(2) 仪器能通过电路进行斜率校正,可确保高浓度测定时的线性。

(3) 仪器每隔 3、6、12、24h

或 2、4、8d 可自动进行空白工作程序,校对零点,该程序也可在现场手动或远控执行。在执行此程序期间,报警停止,并能远程显示传感器的调零状态。

(4) 仪器在箱体温度过高或过低、试剂断流、样品断流、补偿失效、含硅量偏高或偏低和电源故障等情况下可自动报警。仪器不正常时,可远控仪器进入备用状态。

(5) 电子测量电路将每个测量结果储存一周期后予以显示,这样仪器可对前后两次的测量结果进行比较,并能自动消除监测器读数和记录曲线上出现的异常值。

(6) 在水样中断时,仪器具有自动切换进样功能。水箱罐上装有一个样品中断热敏探头,当样品中断时,它可以使检测器自动切换到辅助样品入口位置。当水样罐中的水样流恢复正常时,样品中断热敏探头便被样品淹没,使检测器与水样接通,并切断辅助样品通道。

(7) 该仪器与附加设备相结合可组成多流程在线监测器,在 2~6 个流程之间可编程序自动切换,每个流程的循环周期为 10min。在测量流程水样中断时,也可自动进行流程切换。

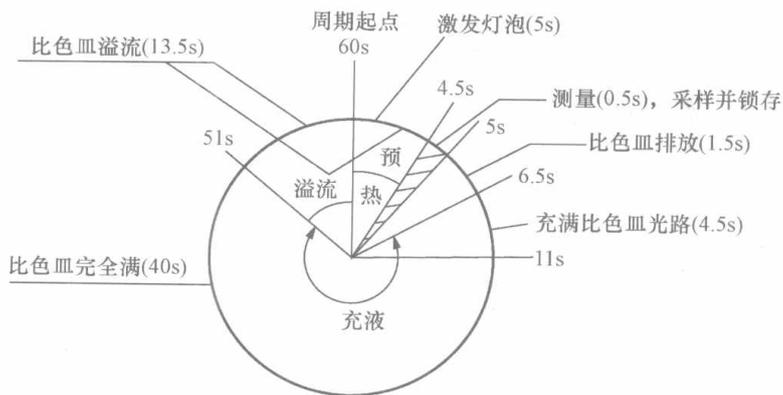


图 9-35 BF-8061 型硅酸根监测仪的监测周期

9.9 成分分析仪表的特殊问题

9.9.1 取样及预处理

取样系统不仅是将被测样品从生产流程中取出并送至分析仪,而且要根据成分分析仪的实际要求,对样品进行除湿、除尘、除油污、除腐蚀性物质等处理,还要根据现场需要增设有害或干扰成分处理装置、试样温度控制装置、流量显示调节装置及流路切换装置等,以确保成分分析仪安全高效工作。取样一般应遵循以下原则。

(1) 取出的样品应尽可能有代表性。取样点不能设置在生产设备或管线的死角,或有空气渗入以及发生生产过程不应有的物理化学反应的区域。

(2) 取样要防止组分间发生化学反应。对于燃烧过程高温炉气,取样时应当使用诸如冷却等措施使组分间的化学反应立即终止,使样品最大限度保持初始组分。

(3) 应尽可能满足分析仪器对样品所提出的技术要求,例如应满足温度、湿度、含尘量、流量、压力、非腐蚀性、非干扰性等方面的要求。

(4) 应尽快传送样品,以减少时间滞后;在可能及允许的情况下,取样管线应尽量短。

(5) 在危险场所(易爆、易燃、剧毒等)取样时,应非常注意安全装置的设置及采取可靠的保护措施。

取样及预处理环节易被忽视,在设计、安装、投运在线成分分析系统时一定要多下功夫,才能获得预期的效益。

9.9.2 滞后问题

成分分析仪表的检测原理及结构一般比较复杂,加之增设了取样及预处理系统,使仪表的响应时间相对较长,滞后较大。

如果生产流程中使用的分析仪器仅作为在线检测使用,滞后情况尚可接受。但若使用分析结果对生产过程进行自动控制,太长的滞后时间将严重影响过程自动控制的质量。所以在能满足分析结果的准确性及节约投资的前提下,力求选择响应速度快的分析仪表和滞后小的取样及预处理系统。

9.9.3 分析仪的标定

要获得准确可信的示值,必须定期标定仪表。一般使用准确度较高的仪器(如奥氏气体分析仪)作为标准,对工业分析仪进行标定。也可以用配制好的成分含量准确的已知标准气体或溶液样品,对分析仪器进行对比鉴定。根据仪器的状况及被分析过程的重要性,标定的周期通常为每周或每日一次。

本章小结

一、氧化锆氧分析仪

应用氧浓差电池原理,将氧含量的变化转换成氧浓差电动势的变化,进而测量出浓差电动势的大小可知被测氧含量的高低。氧化锆探头工作在 $T=850^{\circ}\text{C}$ 左右时灵敏度最高,适用于氧含量小于 10% 的氧量测量。

二、红外线气体分析仪

主要利用了不同气体对红外线的波长有选择的吸收性和热效应两个特点进行工作的。其理论基础是朗伯—贝尔定律。红外线气体分析仪的检测器有光电导检测器和薄膜电容式检测器两种,测量方法分直读式和补偿式两类。

三、热导式气体分析仪

其测量原理是在满足测量条件下,将混合气体中某一组分含量的变化转换成混合气体的导热系数的变化,经过热导池将导热系数的变化转换成电阻的变化,通过测量电阻变化可知被测组分浓度的大小。该表的测量条件是:①除 λ_1 外, $\lambda_2 \approx \lambda_3 \approx \dots \approx \lambda_n$; ② $\lambda_1 \ll \lambda_2$; ③混合气体的温度基本恒定。热导式气体分析仪一般可以用来测量混合气体中的 H_2 含量,也可以测量 CO_2 和 SO_2 的含量。

四、工业气相色谱仪

利用色谱分离技术和检测技术,对混合物进行分离后检测,从而实现对多组分的复杂混合物进行定性分析和定量分析。色谱柱是工业气相色谱仪的心脏;色谱仪的检测器包括热导式检测器和氢火焰离子检测器等多种类型。

五、工业电导仪

在一定条件下,溶液的电导或电导率仅与溶液的体积浓度 C 有关,测得两电极间溶液的电导就可知溶液的浓度大小。溶液电导(电阻)的测量采用交流电源供电,有分压法测量电路和电桥法测量电路。由于溶液的电导容易受温度的影响,故在测量装置中要采取相应的

补偿措施。

六、工业 pH 计

pH 值是溶液中氢离子浓度的常用对数的负值。工业 pH 计是利用化学原电池的电动势与溶液酸、碱度成单值函数关系的特性进行工作的。用甘汞电极、银—氯化银电极作参比电极，用玻璃电极、锑电极等作工作电极组成原电池，测量出原电池的电动势的大小，就可知道被测溶液的酸、碱度。工业 pH 计由发送器（检测器）、高阻转换器和显示仪表组成。

七、硅酸根分析仪

它是利用化学反应使分析溶液中被测组分转变成有色化合物，然后利用朗伯—贝尔定律测量这种有色化合物对光的吸收程度，最后得知被测组分的浓度。对硅酸根含量的测定分为显色反应和光的吸收（比色）两个基本过程。BF-8061 型硅酸根监测仪由化学系统、光学系统和电路系统三部分组成。

思考题与习题

1. 在线成分分析系统为什么要有采样和预处理装置？
2. 氧化锆氧分析仪的探头测量含氧量应满足什么条件？
3. 氧化锆氧分析仪的氧浓差电动势与氧浓差电池温度有关，而实际使用时池温常会发生变化，你认为可采取哪些方法来消除池温变化对氧浓差电动势的影响？
4. 当被测气体中存在可燃性组分，能否用氧化锆氧分析仪测量气体中的氧含量？为什么？
5. 为使氧化锆氧分析仪的输出特性线性化，试给出一种线性化方案。
6. 简述红外线气体分析仪的测量原理。红外线气体分析仪的基本组成环节有哪些？
7. 在红外线气体分析仪中，是否一定要有滤波气室？滤波气室的作用是什么？
8. 判断下列气体哪些能用红外线气体分析仪分析？
 C_2H_4 , C_2H_5OH , O_2 , CO , CH_4 , H_2 , NH_3 , CO_2 , C_3H_8
9. 简述热导式气体分析仪的工作原理，它对测量条件有什么主要的要求？
10. 热导式气体分析仪中热导池的工作原理是什么？参比气室在测量中起什么作用？
11. 气相色谱分析仪由哪几部分组成？各部分有何作用？常用的检测器类型有哪几种？
12. 在色谱分析法中，固定液起什么作用？载气起什么作用？
13. 试述电导式分析仪的工作机理。影响电导池测量精度的因素是什么？
14. DDD-32B 型工业电导仪的组成和各部分作用如何？
15. pH 计常用的参比电极和工作电极有哪些？写出甘汞电极和玻璃电极组成原电池的表达式。为何它必须与高输入阻抗的测量仪器配用？
16. 硅酸根分析仪是如何工作的？
17. 利用氧化锆氧分析仪测混合气体中的含氧量，若用空气作参比气体，其氧含量为 20.8%，如测量时温度控制在 $700^\circ C$ ，并测得浓差电动势 $E=22.64mV$ ，此时参比气体与待测气体压力相等。求待测气体的含氧量。
18. 氧化锆氧分析仪设计烟温为 $800^\circ C$ ，不计本底电动势，其显示仪表指示氧量为 10.392%。但此时发现实际烟温是 $650^\circ C$ ，且存在本底电动势 $0.4mV$ 。试求：此时烟气实际

含氧量是多少? 仪表指示相对误差是多少?

19. 某混合气体由 H_2 、 N_2 和 CH_4 组成, 现用热导式气体分析仪测量含量。求下列混合物在 $0^\circ C$ 时的热导率, 并根据结果进行分析 [$0^\circ C$ 时, H_2 、 N_2 和 CH_4 的热导率分别为 $0.1741 W/(m \cdot K)$ 、 $0.0244 W/(m \cdot K)$ 、 $0.0322 W/(m \cdot K)$]。

- (1) H_2 : 75%, N_2 : 24%, CH_4 : 1%;
- (2) H_2 : 70%, N_2 : 24%, CH_4 : 6%;
- (3) H_2 : 70%, N_2 : 29%, CH_4 : 1%;
- (4) H_2 : 75%, N_2 : 19%, CH_4 : 6%。

20. 某厂用热导式气体分析仪来测量锅炉烟气中的 CO_2 含量。已知烟气中含 O_2 (5%), N_2 (76%), CO (1.1%), SO_2 (0.5%), CO_2 (16%), H_2 (0.4%), 水蒸气 (1%)。问:

- (1) 该烟气能否通过取样管直接进入分析仪的热导检测器中? 为什么?
- (2) 求混合气体的热导率;
- (3) 求经过预处理后的混合气体进入热导检测器的热导率;
- (4) 当水蒸气含量变为 1.5%, N_2 含量减为 75.5%, 其他组分的含量不变时, 计算进入热导检测器混合气体的热导率;
- (5) 当 CO_2 含量变为 8%, O_2 含量变为 13%, 其他组分的含量不变时, 计算进入热导检测器混合气体的热导率;

计算时各气体的热导率分别为 O_2 (0.0311), N_2 (0.0308), CO (0.0297), SO_2 (0.0084), CO_2 (0.0244), H_2 (0.2195), 水蒸气 (0.0298), 单位为 $W/(m \cdot K)$ 。

21. 已知电导池内有两个面积均为 $1.25 cm^2$ 的平行电极, 它们之间距离为 1.5cm。在装满电解溶液后测定电阻值为 $1.09 k\Omega$ 。试计算该溶液的电导率及电极常数。

22. 由实验手册得知 $NaCl$ 的摩尔电导率在 $25^\circ C$ 时为 $0.1254 S/(cm \cdot mol/L)$ 。测得含有 $NaCl$ 的溶液电导率为 $36 \mu S/cm$ 。试求该溶液的摩尔浓度和质量浓度分别为多少?

第 10 章 机械量检测及仪表

机械量检测仪表是用来对尺寸、位移、力、重量、转矩、速度和振动等参数进行测量的仪表。检测机械量的传感器大多数是把这些参数转换成电量，再用电测仪表进行测量。

火电厂的汽轮机组是一种高速旋转的大型设备，为了保障机组运行的经济性，其转动部分（如转子、叶片、主轴）与静止部分（如汽缸、喷嘴和隔板、汽封）之间的间隙都设计得很小。在机组启动、运行和停止过程中，动、静部分相对膨胀、收缩量较大。如果发生动静部分摩擦、碰击，就有可能产生汽轮机的轴封磨损、叶片断裂，甚至整机损坏的事故。此外，当汽轮机调速系统发生故障，以及主轴发生弯曲时，机组将产生超速及过大的振动。为了保证机组的安全运行，汽轮机上应装设转速、轴向位移、热膨胀、振动及大轴弯曲等机械参数的测量仪表和装置。这些仪表通常可称为汽轮机保护仪表或机械参数测量仪表。

10.1 位 移 测 量

测量位移的传感器种类很多，工作原理各不相同。目前火电厂中测量位移常使用的传感器有电涡流式传感器和电感式位移测量装置。

10.1.1 电涡流式传感器

电涡流式传感器可分为高频反射式和低频透射式两类。下面主要介绍应用广泛的高频反射式电涡流传感器。

10.1.1.1 组成

电涡流传感器由探头、延伸电缆、前置器三部分组成，如图 10-1 所示。探头的外形如图 10-2 (a) 所示。它的外形与普通螺栓十分相似，头部有扁平的感应线圈，把它固定在不锈钢螺栓一端，感应线圈的引线从螺栓的另一端与高频电缆相连。

10.1.1.2 工作原理

电涡流式传感器是在涡流效应的基础上建立起来的。

如图 10-2 (b) 所示，在探头的线圈中通上高频 $f=1\sim 2\text{MHz}$ 电流 i 时，线圈周围就产生了高频电磁场。如果线圈附近有一金属板，金属板内就要产生感应电流 i_e 。此电流在金属板内是闭合的，故称为涡流。根据焦耳-楞次定律，电涡流 i_e 产生的电磁场与感应线圈的电磁场方向相反，这两个磁场相互叠加，改变了通电线圈的电感。进一步分析可知，线圈电感的改变程度与线圈的几何形状、尺寸、激励电流强度 i 和频率 f 、金属材料的电阻率 ρ 和磁导率 μ 以及线圈与金属之间的距离 d 等多个因素有关。对于具体的传感器，线圈的形状与尺寸以

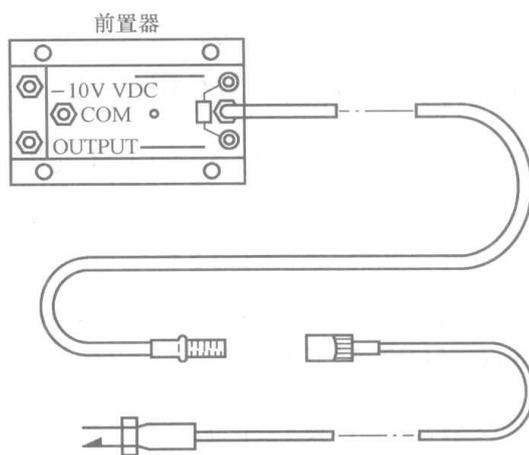


图 10-1 电涡流传感器的组成

及 i 和 f 均是确定的, 选定金属, ρ 和 μ 也是定值, 因此线圈的电感 L 将只随线圈与金属导体间的距离 d 改变, 两者间具有单值对应关系。

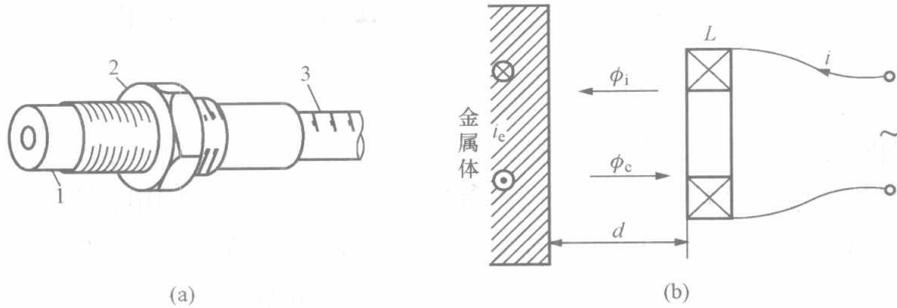


图 10-2 电涡流传感器

(a) 外形; (b) 结构示意图

1—头部线圈; 2—固定螺帽; 3—高频电缆

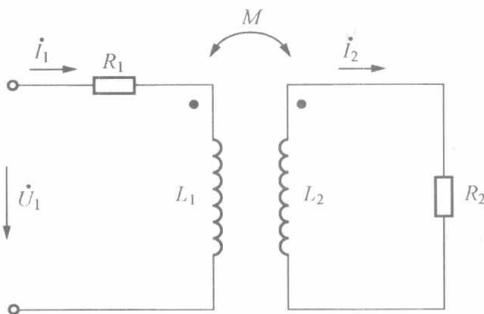


图 10-3 电涡流传感器的等效电路

把金属导体形象地看作一个短路线圈, 它与传感器线圈有磁耦合。于是可得到图 10-3 所示的等效电路图。图 10-3 中 R_1 、 L_1 为传感器线圈的损耗电阻和电感; R_2 、 L_2 为被测金属体的等效电阻和电感; \dot{U}_1 为线圈的高频激励电压; M 为两线圈的互感量, M 值随着距离 d 的减小而增加。

根据基尔霍夫定律, 由图 10-3 可列出下列方程式

$$\begin{aligned} (R_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 \\ -j\omega M \dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2) \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned} \tag{10-1}$$

对上述方程联立求解, 可得

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_1) \dot{I}_1 - j\omega M \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2} \dot{I}_1 \\ &= \left[\left(R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) + j\omega \left(L_1 - L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) \right] \dot{I}_1 \\ &= [(R_1 + R'_2) + j\omega(L_1 - L'_2)] \dot{I}_1 \\ &= Z \dot{I}_1 \end{aligned} \tag{10-2}$$

式中 Z ——涡流磁场反作用下的线圈反射阻抗, $Z = R + j\omega L = (R_1 + R'_2) + j\omega(L_1 - L'_2)$;

R'_2 、 L'_2 ——分别称为等效电阻反射量和等效电感反射量, $R'_2 = R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$, $L'_2 =$

$$L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}。$$

可以看出, 线圈的品质因数 Q 由原来的 L_1/R_1 降低为 $(L_1 - L'_2)/(R_1 + R'_2)$, 这是由金属涡流磁场作用引起的。

反射阻抗中实数部分为 $R = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}$, 是等效损耗电阻 R_1 、 R_2 和互感量 M 的函数。显然, 当线圈与被测体之间距离 d 减小时, 其值增大, 这一变化与被测物体是否为

磁性材料无关。

反射阻抗虚数部分为 $L=L_1-L_2 \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2+\omega^2 L_2^2}$ ，其中 L_1 与静磁效应，即被测物体是否为磁性材料有关；第二项与电涡流效应有关。当线圈与被测物体之间的距离 d 减小时，静磁效应和涡流效应都会对电感 L 产生影响。当被测物体为软磁材料时，若 d 减小，则 L_1 增加大于 L_2' 增加，故线圈的等效电路 (L_1-L_2') 增大；如果被测物体为非铁磁材料或硬磁材料，则线圈等效电感 (L_1-L_2') 随着 d 的减小而减小。

总之，当被测物体确定时，被测位移 d 的变化使检测线圈的电感 (L_1-L_2') 、阻抗 Z 和品质因数 Q 发生改变，测知这些量的大小，即可求出被测位移 d 。

10.1.1.3 测量电路

测量线圈电感的方法有电感法、阻抗法和品质因数法，其中电感法又可分为调幅式和调频式。

1. 调幅式测量方法

图 10-4 所示为调幅式测量原理图。石英晶体振荡器产生一稳频稳幅的高频信号 E ，用来激励由传感器线圈 L 和电容 C 组成的 LC 并联谐振电路。谐振回路输出一个受位移 d 控制的稳频调幅信号。

图 10-5 示出了三根谐振曲线。曲线 1 是在无金属体接近时 ($d=\infty$) 得到的。当回路的振荡频率 ω_0 等于晶体振荡器供给的高频信号频率时，回路的阻抗 Z_0 最大，因而输出电压 U_0 也为最大。

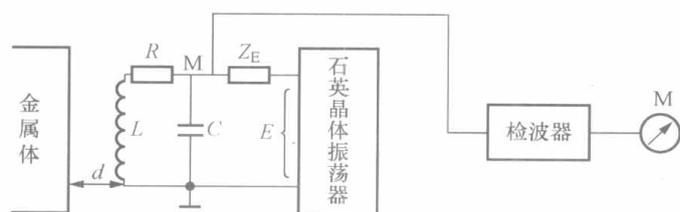


图 10-4 调幅式测量原理示意图

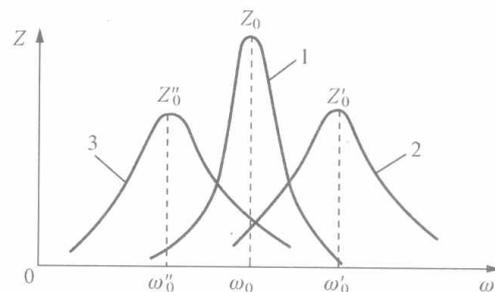


图 10-5 谐振曲线波形图

当被测体接近传感器线圈时，线圈的等效阻抗发生变化，回路失谐，谐振峰向两边移动。线圈离被测体越近，回路的等效阻抗 Z 越小，输出电压也跟着减小。曲线 2 是在有非铁磁性和硬磁性材料靠近时得到的。曲线 3 是在软磁性材料靠近时得到的。

2. 调频式测量方法

将传感器线圈 L 和电容 C 组成并联谐振电路，在接入的振荡器中作为选频网络，随后测取振荡器的输出电频率，此电频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 与线圈电感有关，也即与被测距离 d 有关。

常用的振荡器有电容三点式或电感三点式振荡器。通过电路的检波、滤波、功率放大及线性化处理，振荡器的不同输出频率可以转换成电压信号。

输出电压 U_0 与距离 d 之间的关系曲线如图 10-6 所示。曲线的中间一段是直线，在安装传感器时必须调整好初始间隙。传感器线性范围的大小、灵敏度高高低都与线圈形状、尺寸有关。线圈直径增大时，线性范围相应增大，灵敏度则降低。经验表明，被测体表面积为探

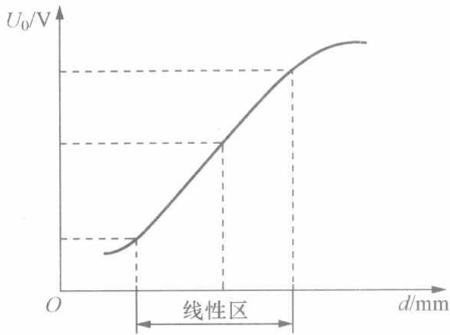


图 10-6 涡流传感器的特性曲线

头直径的三倍以上时，传感器的线性范围一般为线圈外径的 $1/3 \sim 1/5$ ，线圈最好做成扁平圆片形状。

我国大型汽轮机上使用的 Philips 公司的 RMS700 系列和美国 Bently 公司的 7200 系列汽轮机监视保护装置中，都采用了电涡流传感器。

对于 RMS700 系列的高频涡流位移传感器，当线性测量范围为 $\pm 0.5\text{mm}$ 时，灵敏度为 16V/mm ；测量范围为 $\pm 1.0\text{mm}$ 时，灵敏度为 8V/mm ；测量范围为 $\pm 2\text{mm}$ 时，灵敏度为 4V/mm 。

10.1.2 电感式位移测量装置

电感式传感器种类很多，根据转换原理不同，可分为自感式和互感式两种；根据结构型式不同，可分为气隙型和螺管型两种。

图 10-7 所示的位移测量装置采用了变气隙互感式原理，从结构上可看成由电感式位移传感器和位移指示仪表组成。

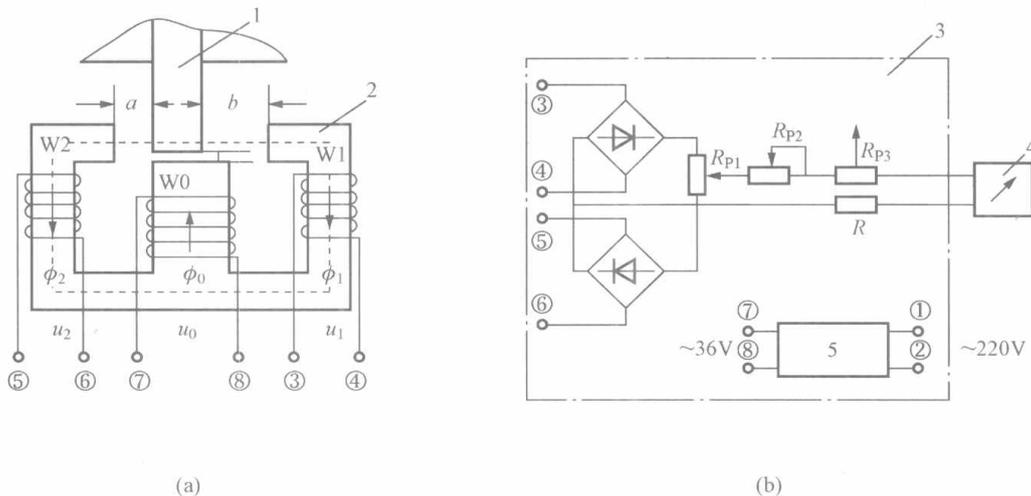


图 10-7 电感式位移测量装置结构示意图

(a) 电感式位移传感器结构；(b) 位移指示仪表组成

1—被测物体的凸缘；2—电感位移发信器；3—调整装置；4—显示仪表；5—磁饱和稳压器

该传感器的发信器结构是用“III”形硅钢片叠成铁芯，在铁芯中间芯柱上绕有一组原线圈 W_0 ，两侧芯柱上各绕有一组线圈 W_1 、 W_2 。在安装时，应注意使被测位移部件（例如汽轮机转子）的凸缘位于“III”形铁芯上部缺口中。

当初级线圈输入一稳定的交流电压 u_0 后，产生的磁通分别穿过两边的铁芯，在次级线圈 W_1 、 W_2 上感应出电压。当转子静止时，处于“III”形铁芯中转子凸缘的两侧间隙 a 、 b 相等，感应的电压 u_1 和 u_2 相等；当汽轮机运行中轴向位移时，转子凸缘移动（例如向右），则间隙 $a > b$ ，感应的电压 $u_1 > u_2$ 。

发信器的输出电压分别送至两个桥式整流电路，经整流比较后送至显示仪表，从按位移标度的显示仪表上可读出被测物体的位移数值。在图 10-7 (b) 中， R_{P1} 为调零电位器，用于调整显示仪表的初始刻度； R_{P2} 为调满度电位器，用于调整显示仪表的满度值； R_{P3} 则用于调整送至记录仪表或其他保护装置信号的大小。

线性变化差动变压器 (LVDT) 也采用了螺管型互感式原理, 是美国 Bently 公司 7200 系列中线性位移传感器, 可用于测量汽轮机的热膨胀、相对热膨胀和轴向位移, 也可用于汽阀调节的行程机构中。

图 10-8 所示为线性变化差动变压器 (LVDT) 结构示意图。它由三个绕组组成, 其中 L_0 为励磁绕组, 由 1kHz 的振荡器作为交流稳压的励磁电源。 L_1 和 L_2 为输出绕组, 二者反向串接, 输出的总交流电动势是两个绕组交流感应电动势的差值, 它将正比于铁芯偏离中心位置的位移。此交流信号经解调后变成直流电压信号。7200 系列线性差动变压器在其测量范围内具有线性的输出特性, 即输出电压与位移成正比。其特性曲线如图 10-9 所示。图中画出了位移量程范围分别为 0~25mm、0~50mm 和 0~100mm 的输出特性曲线, 其灵敏度分别为 0.35V/mm、0.4V/mm 和 0.14V/mm。当铁芯处于中间对称位置时, 输出信号为零。而铁芯偏离中心左右移动时, 将输出正或负的直流电压信号, 而且此信号与铁芯位移呈线性关系。该信号可直接供给指示和记录仪表使用。

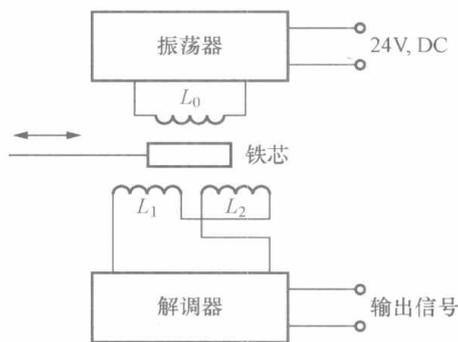


图 10-8 LVDT 结构示意图

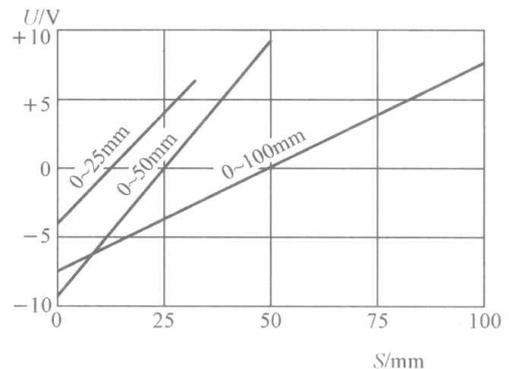


图 10-9 LVDT 的输出特性曲线

下面给出线性变化差动变压器的输出电动势与被测位移量之间关系的推导过程。

令励磁绕组 L_0 的端电压为 \dot{U}_0 , 励磁电流为 \dot{I}_0 , 电流的角频率为 ω , 副绕组 L_1 、 L_2 中互感电动势分别为 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 , 有

$$\dot{E}_1 = -j\omega M_1 \dot{I}_0 = -j\omega \frac{\dot{U}_0}{Z_0} M_1 \quad (10-3)$$

$$\dot{E}_2 = -j\omega M_2 \dot{I}_0 = -j\omega \frac{\dot{U}_0}{Z_0} M_2 \quad (10-4)$$

式中 M_1 、 M_2 ——分别为线圈 L_1 、 L_2 与 L_0 的互感系数, 其值各为

$$M_1 = k_1 \sqrt{L_0 L_1} \quad (10-5)$$

$$M_2 = k_2 \sqrt{L_0 L_2} \quad (10-6)$$

式中 L_0 、 L_1 、 L_2 ——分别为线圈各自的电感量;

k_1 、 k_2 ——分别为线圈 L_0 与 L_1 和 L_0 与 L_2 的耦合系数, 若两个线圈结构尺寸一定, 则 k_1 、 k_2 也一定, 两者越紧密, 则 k 值越大。

线圈的电感 L 与匝数 W 的平方及磁阻 R 有关, 即

$$L = \frac{W^2}{R_1 + R_2} = \frac{W^2}{\frac{l-x}{\mu_0 S} + \frac{x}{\mu S}} \quad (10-7)$$

式中 l ——单个线圈总磁路长度；

x ——单个线圈含铁芯（其导磁率为 μ ）的磁路长度；

$l-x$ ——单个线圈含气隙（其导磁率为 μ_0 ）的磁路长度；

S ——磁路通量截面积。

由于实际的 $x \ll l$ 及 $\mu_0 \ll \mu$ ，故可以忽略式（10-7）中分母第二项（磁阻小的部分）。再将铁芯的磁路长度写为 $x = x_0 + \Delta x$ （其中 x_0 为无被测位移量时 x 的值， Δx 为被测位移量），且令铁芯向左位移，这时各副绕组及其励磁绕组的电感量可以分别写为

$$L_1 = \frac{W_1^2 \mu_0 S}{l - x_0 - \Delta x}, \quad L_0 = \frac{W_0^2 \mu_0 S}{l - x_0 - \Delta x} \quad (10-8)$$

$$L_2 = \frac{W_2^2 \mu_0 S}{l - x_0 + \Delta x}, \quad L_0 = \frac{W_0^2 \mu_0 S}{l - x_0 + \Delta x} \quad (10-9)$$

将式（10-8）和式（10-9）代入式（10-5）和式（10-6），再分别代入式（10-3）和式（10-4），可得

$$\dot{E}_1 = -j\omega \frac{\dot{U}_0}{Z_0} k_1 \sqrt{L_0 L_1} = -j\omega \frac{\dot{U}_0}{Z_0} k_1 \frac{W_0 W_1 \mu_0 S}{l - x_0 - \Delta x} \quad (10-10)$$

$$\dot{E}_2 = -j\omega \frac{\dot{U}_0}{Z_0} k_2 \sqrt{L_0 L_2} = -j\omega \frac{\dot{U}_0}{Z_0} k_2 \frac{W_0 W_2 \mu_0 S}{l - x_0 + \Delta x} \quad (10-11)$$

差动副绕组是对称的，令 $k_1 = k_2 = k$ ， $W_1 = W_2 = W$ 。当副绕组开路时，因无反射阻抗 $Z_0 = j\omega L_0$ ，于是差动互感电动势为

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 = -\frac{\dot{U}_0}{L_0} k \frac{W_0 W \mu_0 S}{l - x_0} \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta x}{l - x_0}} - \frac{1}{1 + \frac{\Delta x}{l - x_0}} \right) \quad (10-12)$$

可以写为：

$$\Delta \dot{E} = -\frac{2\dot{U}_0}{L_0} k \frac{W_0 W \mu_0 S}{(l - x_0)^2} \Delta x = -K \Delta x \quad (10-13)$$

由此可见，线性变化差动变压器的输出电动势之差正比于位移量 Δx 。其比例常数 K 取决于原绕组端电压 U_0 、电感 L_0 、耦合系数 k 、绕组匝数 W_0 和 W 、气隙导磁率 μ_0 、磁通面积 S 及绕组尺寸 l 、 x_0 等。式（10-13）中负号表示感应电动势方向与原电压 \dot{U}_0 方向相反。

如果差动绕组带有负载 $Z_1 = Z_2 = Z$ ，则因阻抗反射，采用的公式会复杂一些。但经过简化，也可获得类似式（10-13）的比例关系。

10.1.3 位移测量应用举例

10.1.3.1 汽轮机轴向位移的测量

1. 汽轮机产生轴向位移的危害

位于汽轮机轮毂上的叶片在运行过程中受到汽流的冲击，叶片的叶轮前后两侧存在着差压，形成一个与汽流方向相同的轴向推力；轮毂两侧转子轴的直径不等，隔板汽封处转子凸肩两侧的压力不等，也要产生作用于转子上的轴向力，所以转子受到一个由高压端指向低压端的轴向推力。对于 300MW 的机组，这样的轴向推力在额定工况下有 14 吨力，最大可达 20 吨力，而汽轮机转子重量仅约 8.2 吨力。于是汽轮机必须设置推力盘、推力瓦块及轴承装置组成的推力轴承。推力轴承用于承受转子的轴向推力，借以保持转子和汽缸及其他静止部件的相对位置，使机组动静部分之间有一定的轴向间隙，保证汽轮机组的正常运行。

当轴向推力过大时,推力轴承过负荷,使推力盘挤压推力瓦块,破坏两者之间的润滑油膜,致使推力瓦表面的乌金烧熔,转子窜动,或者汽轮机动静部分发生摩擦,造成叶片折断、大轴弯曲、隔板和叶轮碎裂等恶性事故。

2. 汽轮机轴向位移的测量

为了监视汽轮机推力轴承的工作状况,一般在推力瓦上装有温度测点(回油温度计),再有,在转子凸缘处装上“III”形铁芯[见图10-7(a)]或高频涡流位移检测装置,以测取运行中的实际轴向位移量。300MW汽轮发电机正常运行时,轴向位移量为0.381~2.159mm;超过以上范围,且在0.254~2.268mm范围之内,则必须减负荷运行;最后若超出0.254~2.268mm范围,则应停机跳闸保护。

10.1.3.2 汽轮机热膨胀和相对热膨胀测量

1. 机组热膨胀的危害

汽轮机的汽缸和转子在启动、停机过程中,或在运行工况发生变化时,都会由于温度变化而产生不同程度的热膨胀。

汽缸受热而膨胀的现象称为“缸胀”。汽轮机的汽缸是以滑销系统死点为热膨胀零点计算的,越偏离该死点,则热膨胀(或收缩)量也越大。为了保证机组的安全运行,防止汽缸热膨胀不均,发生卡涩或动静部分摩擦事故,必须对缸胀进行监视。

转子受热时也要发生膨胀。由于转子体积较小,温升和热膨胀较快,而汽缸的体积较大,温升和热膨胀相对要慢一些。当转子和汽缸的热膨胀还没有达到稳定之前,它们之间存在较大的热膨胀值,简称“胀差”(或“差胀”)。汽轮机的转子以推力轴承点作为热膨胀的死点,越偏离该死点,转子的热膨胀(或收缩)量也越大。若机组启停或运行过程中胀差变化过大,超过了动静叶片或轴封轴向设计时预留的间隙,将会使动静部分发生摩擦,引起机组强烈振动,以致造成机组损坏事故。

2. 机组热膨胀的测量

测量缸胀或差胀的传感器可以用“III”形铁芯传感器[见图10-7(a)]、高频涡流传感器或LVDT线性变化差动变压器。

图10-10所示为300MW机组高、中、低压缸缸胀和差胀的配置示意图。因为是高温、高压机组,图中均采用内、外双缸结构。图10-10中2是差胀测量装置,因为转子凸缘是相对汽缸为基础的“III”形铁芯而位移的。图10-10中6为热膨胀装置,因为汽缸边缘的膨胀量是以测量汽轮机为基础的高频涡流线圈的相对位移量。

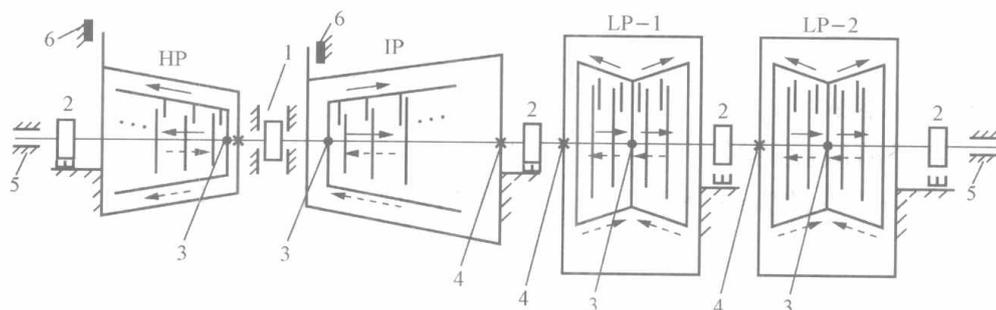


图 10-10 300MW 机组高、中、低压缸缸(差)胀的配置示意图

1—推力轴承—转子死点; 2—差胀装置; 3—内汽缸死点; 4—外汽缸死点; 5—支持轴承;
6—缸胀装置; HP—高压汽缸; IP—中压汽缸; LP-1、2—低压汽缸 1 和低压汽缸 2

10.2 振 动 测 量

振动是经常发生的一种物理现象。机械振动在很多情况下总是有害的, 它会使机器的零部件加快失效, 破坏机器的正常工作, 降低设备的使用寿命, 甚至导致机器部件损坏而产生事故。

在火电厂中, 汽轮机由于转轴失稳、转子动平衡欠佳及转系中心不准, 在运行中会产生不同程度的振动。振动过大, 会加速轴封的磨损, 使得转动部件的疲劳强度下降、调速系统不稳定, 甚至引起重大事故。因此, 在汽轮机启停和运行中, 对轴承和大轴的振动必须严格进行监视。

用来表述振动状态的参数有: 振动的位移 $x(t)$ 、振动的速度 $v(t) = \frac{dx}{dt}$ 、振动的加速度 $a(t) = \frac{d^2x}{dt^2}$ 、振动的频率 ω 、振动的烈度 x_{rms} 和振动的频谱。若振动复合波形中的简谐振动为正弦波, 则它们的关系为

$$x(t) = X \sin(\omega t + \varphi) \quad (10-14)$$

$$v(t) = X\omega \cos(\omega t + \varphi) = V \cos(\omega t + \varphi) \quad (10-15)$$

$$a(t) = -X\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = -A \sin(\omega t + \varphi) \quad (10-16)$$

式中 ω ——振动角频率;

φ ——振动相位角;

X 、 V 、 A ——分别为振动的位移量、振动速度幅值和振动加速度幅值。

国际标准 ISO 2372—1974 中规定用振动烈度作为描述振动状态的特征量, 并规定在机器的重要位置上 (例如轴承和地脚固定处等) 所测得的振动速度的最大有效值, 作为机器的振动烈度。

如果测得随时间变化的振动速度 $v(t)$ 后, 则可计算出振动速度的有效值 v_{rms} 为

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (10-17)$$

式中 T ——计算时所取的某一时间间隔。

在利用计算机进行离散数据处理时, 式 (10-17) 可写成

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (10-18)$$

式中 N ——采样样本数目;

v_i ——速度经离散后的样本值。

当振动只有两个接近的频率分量, 并形成拍振动时, 可计算出拍振动速度的均方根值为

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{4} (v_{\text{max}}^2 + v_{\text{min}}^2)} \quad (10-19)$$

式中 v_{max} ——拍腹部的峰值;

v_{min} ——拍腰部的幅值。

当使用指示均方根的仪表时, 拍振动速度的均方根值的近似计算式为

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2}(R_{\text{max}}^2 + R_{\text{min}}^2)} \quad (10-20)$$

式中 R_{max} ——仪表的最大示值；

R_{min} ——仪表的最小示值。

由上述分析可知，机器的振动烈度是在给定的工作或环境条件下，在选定的位置上，直接测量或由式(10-17)~式(10-20)计算出的振动速度的最大的有效值。目前我国汽轮机还采用振动的幅值大小作为评价振动强弱的参数，例如300MW机组，其轴颈处正常振幅应小于 $76\mu\text{m}$ ，最大也不应超过 $127\mu\text{m}$ 。一般说来不能由主频率下的位移幅值推算出烈度值，只有在单频振动和在 $100\sim 1000\text{Hz}$ 的整个频率范围内可以测定速度有效值时[见式(10-20)]，才能由主频率的位移幅值推算出烈度值。

汽轮机的振动测量方法有多种。按照测量振动的相对位置，可以分为轴承座的绝对振动、轴与轴承座的相对振动和轴的绝对振动。根据测振传感器的原理不同可以分为接触式和非接触式两类。接触式振动传感器有磁电式、压电式，非接触式振动传感器有电容式、电感式和电涡流式等。

10.2.1 磁电式传感器

磁电式传感器是利用电磁感应原理，将运动速度转换成线圈中的感应电动势输出，分为机械振动系统和磁电感应系统部分。其原理结构如图10-11和图10-12所示。

10.2.1.1 机械振动系统

传感器的机械振动系统可以用一个集中质量、集中弹簧和集中阻尼组成的二阶系统来表示。在图10-11中，质量块1通过弹簧2和阻尼器3装在传感器的基座上。测振时传感器的基座随外界被测振动物体而振动，此时质量块 m 就与基座产生相对运动。

设被测振体的绝对振动位移为 x_0 ，质量块 m 的绝对振动位移为 x_m ，则质量块与振动物体之间的相对位移 x_t 为

$$x_t = x_m - x_0 \quad (10-21)$$

根据运动学原理有

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} + C \frac{dx_t}{dt} + Kx_t = 0 \quad (10-22)$$

式中 m ——质量块的质量，kg；

C ——系统的阻尼系数，kg/s；

K ——系统中弹性元件的刚度，kg/s²。

将式(10-21)代入式(10-22)得

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} + C \frac{d}{dt}(x_m - x_0) + K(x_m - x_0) = 0 \quad (10-23)$$

应用微分算子 $D = \frac{d}{dt}$ 代入式(10-23)，得

$$(mD^2 + CD + K)x_m = (CD + K)x_0 \quad (10-24)$$

由式(10-24)可得

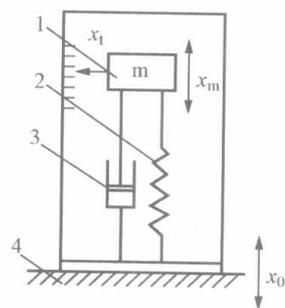


图 10-11 振动系统模型

1—质量块；2—弹簧；3—阻尼器；
4—被测振体

$$\frac{x_m - x_0}{x_0}(D) = \frac{-D^2}{D^2 + 2\xi\omega_0 D + \omega_0^2} \quad (10-25)$$

其中

$$\xi = \frac{C}{2\sqrt{mK}} \quad (10-26)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (10-27)$$

式中 ξ ——阻尼比；

ω_0 ——振动系统的固有频率。

假设被测振体作简谐运动

$$x_0 = X_0 \sin \omega t \quad (10-28)$$

以 $D=j\omega$ 代入式 (10-25) 可得到频率响应函数为

$$\frac{x_m - x_0}{x_0}(j\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2j\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\xi} \quad (10-29)$$

其振幅比 B 为

$$B = \left| \frac{x_t}{x_0} \right| = \left| \frac{x_m - x_0}{x_0} \right| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left[2\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\xi\right]^2}} \quad (10-30)$$

由式 (10-30) 可以看出, 当振动物体的频率 ω 比传感器的固有频率 ω_0 高很多时, 质量 (也称地震质量) m 与振动物体之间的相对位移 x_t 接近振动物体的绝对位移 x_0 , 质量块相当于一个静止的基准。这种传感器有时也称为惯性式传感器或地震传感器。

10.2.1.2 磁电感应系统

磁电式传感器的结构如图 10-12 所示。传感器的磁钢 4 与壳体 2 固定在一起。芯轴 5 穿

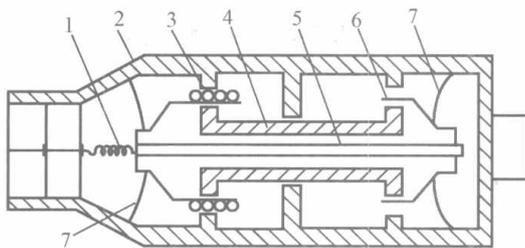


图 10-12 磁电式传感器的结构示意图

1—引线；2—壳体；3—线圈；4—磁钢；
5—芯轴；6—阻尼杯；7—弹簧片

过磁钢的中心孔, 并由左右两片柔软的圆形弹簧片 7 支承在壳体上。芯轴的一端固定着一个线圈 3; 另一端固定一个圆筒形铜杯 (阻尼杯 6)。当振动频率远远高于传感器的固有频率时, 线圈接近静止不动, 而磁钢则跟随振动体一起振动。这样, 线圈与磁钢之间就有相对运动, 其相对运动的速度等于物体的振动速度。线圈以相对速度切割磁力线, 传感器就有正比于振动速度的电动势信号输出。

根据电磁感应原理, 线圈 3 中感应电动势为

$$E = WBL \frac{dx_t}{dt} = -WBL \frac{dx_0}{dt} \quad (10-31)$$

式中 W ——线圈匝数；

L ——单匝线圈长度, m；

B ——磁感应强度, T。

将式 (10-28) 代入式 (10-31) 得

$$E = -WBL\omega X_0 \cos\omega t \quad (10-32)$$

由于磁电式传感器的输出电动势与振动速度 $\frac{dx_0}{dt}$ 成正比, 故也称为速度传感器。可以看出, 这种速度传感器的输出信号不仅与被测振幅 X_0 有关, 还与其振动频率 ω 有关。

若利用积分放大器对电动势进行积分, 得到

$$\int_0^t E dt = -WBL \int_0^t v dt = -WBL \int_0^t \omega X_0 \cos\omega t dt = -WBL X_0 \sin\omega t \quad (10-33)$$

取其最大值 (峰值), 则为

$$\int_0^t E_{\max} dt = WBL X_0 \quad (10-34)$$

这样, 积分放大器的输出只与振动的幅值成正比, 而与振动的频率无关了。

如果将振动速度传感器的交变信号用平方检波特性的仪器测量, 可直接显示振动点的振动烈度。

10.2.2 机组振动监测系统

振动监测系统通常具有下列测振内容。

(1) 采用复合式振动传感器测取主轴的绝对振动量。

表 10-1 所示为一些国家或公司对轴振动的评价标准参考表。

表 10-1 轴振动评价标准参考表

国家或公司	正常值/ μm	报警值/ μm	紧急停机值/ μm
ISO 轴相对振动	≤ 80	≥ 165	≥ 250
ISO 轴绝对振动	≤ 100	≥ 200	≥ 300
国产 300MW 机组	50~60	90~110	130~160
美国西屋公司		≥ 125	≥ 254
美国 GE 公司	≤ 100	≥ 127	≥ 178
日本三菱公司	≤ 50	≥ 125	≥ 200
日本日立公司	≤ 76	≥ 125	≥ 152

(2) 由振动量及转速工况确定安全 (S)、报警 (A)、停机 (T) 的区域, 以指导机组的实时工况操作。采用振动位移和振动速度两种信号综合, 可以及时防止机组动、静部分的摩擦。

(3) 采用矢量监视器测知转速与振动幅值及相角以指导机组启动或停止过程中的轴故障 (如裂纹) 或动平衡程度的征兆出现与否。

(4) 采用频谱仪对振动信号进行频谱分析, 对振动频率、相位、振幅等参数作实时记录, 通过对启停过程的分析, 了解机组存在的某种隐患、缺陷。

由于机组的振动伴随着运行而存在, 转子自然是引起振动的主要原因。当振动异常时, 反映在主轴上的振动要比轴承座的振动明显得多。因此监视主轴的振动尤为重要。下面对于测取主轴绝对振动量的复合式振动传感器的工作原理加以介绍。

复合式振动传感器是由一个电涡流传感器和一个速度传感器组合而成的, 放在一个壳体内, 壳体可以安装在机组的同一个测点上, 如图 10-13 所示。

电涡流传感器用于测量主轴相对于轴承座的振动, 即主轴的相对振动; 而速度传感器用

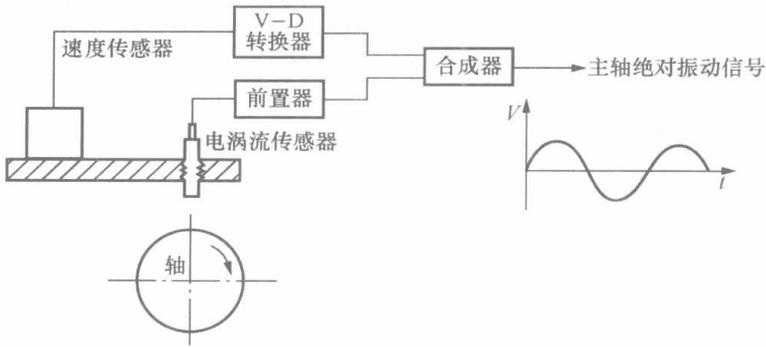


图 10-13 复合式振动传感器示意图

于测量轴承座的绝对振动。速度传感器输出的速度信号经 V-D 转换器（积分器）转换，变为绝对振动的信号，与电涡流传感器输出的相对振动信号一起输入合成器，在合成器内进行矢量相加，然后输出主轴的绝对振动信号。主轴的绝对振动测量是根据相对运动原理实现的。

设 U_{s-b} 表示主轴相对于轴承座的振动矢量； U_{b-g} 表示轴承座相对于自由空间的振动矢量，根据相对运动原理，可得主轴相对于自由空间的振动矢量 U_{s-g} 为

$$U_{s-g} = U_{b-g} + U_{s-b} \tag{10-35}$$

其振动矢量关系如图 10-14 所示。

图 10-14 中， U_{s-g} 和 U_{b-g} 之间存在相位差 φ ，这是由油膜及轴承结构等因素决定的。如能测得 U_{s-b} 和 U_{b-g} ，即可得出 U_{s-g} ，实现主轴相对于自由空间的振动测量。

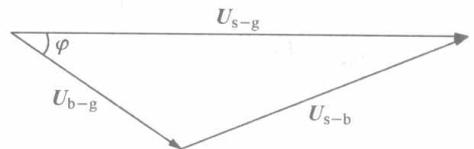


图 10-14 振动矢量图

图 10-15 给出了复合式振动传感器电路框图。电涡流传感器所测得的位移变化量 ΔH ，通过前置器转换为电压变化 ΔU_1 ，经放大后获得振动信号变化量 U_1 ；速度传感器所测 ΔU 经 V-D 转换器，把速度信号变换为位移信号 ΔU_2 ，经放大后获得振动位移信号电压 U_2 。为了得到正确的幅值和相位关系，在频响范围的低频端进行相位补偿。两个振动位移信号电压 U_1 和 U_2 同时输入到加法器上，加法器输出端输出的便是轴的绝对振动位移信号，再经高通滤波，峰-峰值检波后送表头显示。

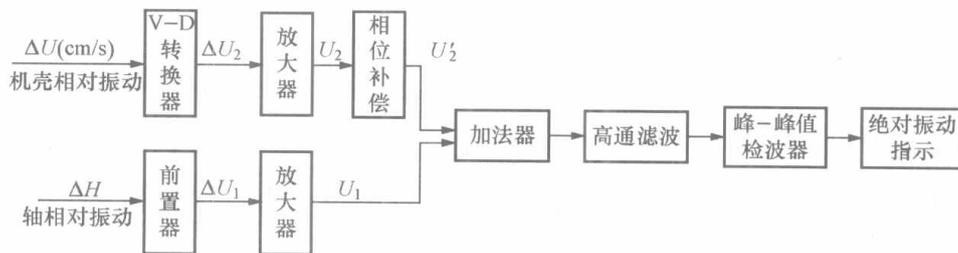


图 10-15 复合式振动传感器电路框图

10.3 转速测量

转速是热力机械的一个重要参数。火电机组要维持电网的周波不变，就必须及时调节汽轮机的转速，使其维持在 3000r/min。汽轮机高速旋转时，各转动部件会产生很大的离心力，这个离心力直接与材料承受的应力有关，而离心力与转速的平方成正比。在设计时，转动部件的强度裕量是有限的。运行时若转速超过额定值，就会发生严重损坏设备事故，甚至会造成飞车事故。特别是在启动升速过程中，还会遇到临界转速的影响，使机组产生较大的

振动,甚至发生共振而大大超过设计强度,故在启/停过程中也要求准确地测量转速,尽快越过各个临界值转速。

10.3.1 转速传感器

测量转速常用的有磁阻式、磁敏式和涡流式转速传感器。

10.3.1.1 磁阻式转速传感器

图 10-16 (a) 所示为开磁路磁阻式转速传感器,传感器由永久磁铁 1、软铁 2、感应线圈 3 组成,齿数为 z 的齿轮 4 安装在被测转轴上。当齿轮随转轴旋转时,齿的凹凸变化引起磁性变化,致使线圈中磁通发生变化,感应出幅值交变的电动势,感应电动势的频率为

$$f = \frac{n}{60}z \quad (10-36)$$

式中 z ——周齿数;

n ——被测转速, r/min。

当传感器测速齿轮的齿数为 60 时,则 $f=n$,说明传感器输出的脉冲电压的频率在数值上与所测转速相同。

开磁路磁阻式转速传感器结构比较简单,但输出信号较小,另外当被测轴振动较大时,传感器输出波形失真较大。在振动强的场合往往采用闭磁路磁阻式转速传感器,如图 10-16 (b) 所示。它是由装在转轴 5 上的内齿轮 6、外齿轮 7、线圈 8 及永久磁铁 9 构成,内外齿轮的齿数相同均为 z ,转轴是连接到被测转轴上与被测轴一起转动,使内外齿轮相对运动,使磁路气隙周期变化,在线圈中产生感应电动势,电动势频率也由式 (10-36) 决定。

由于感应电动势的幅值取决于切割磁力线的速度,因而也与转速成一定比例。当转速太低时,输出电动势很小,以致无法测量,所以磁阻式转速传感器有一个下限工作频率,为 50Hz (闭磁路式的下限可降为 30Hz)。

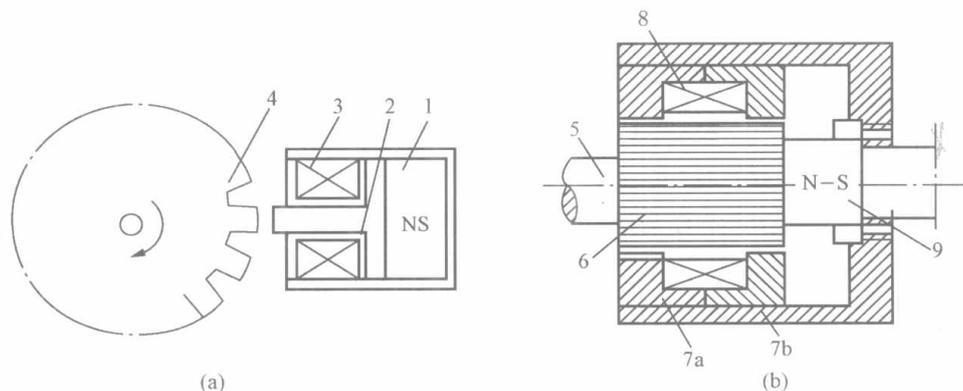


图 10-16 磁阻式转速传感器

(a) 开磁路磁阻式转速传感器; (b) 闭磁路磁阻式转速传感器

1、9—永久磁铁; 2—软铁; 3—感应线圈; 4—齿轮; 5—转轴; 6—内齿轮; 7a、7b—外齿轮; 8—线圈

磁阻式转速传感器采用转速—脉冲变换电路,如图 10-17 所示。传感器感应电压由二极管 V 削去负半周,送到 V1 进行放大,再由射极跟随器 V2 送入 V3 和 V4 组成的射极耦合触发器进行整形,得到方波输出信号。

10.3.1.2 磁敏式转速传感器

磁敏式转速传感器采用磁敏差分原理进行转速测量。传感器内装有一个小永久磁铁;在

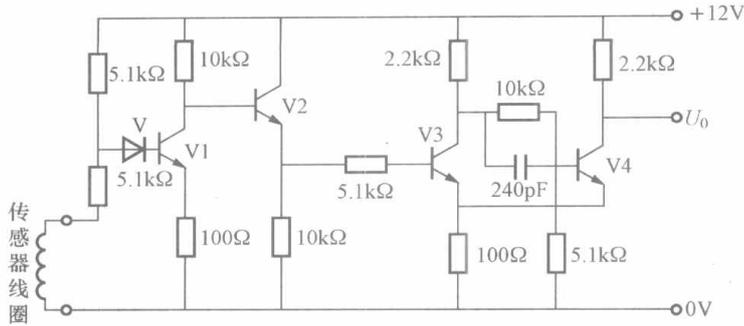


图 10-17 磁阻式转速—脉冲变换电路

磁铁上装有两个相互串联的磁敏电阻。当软铁或钢等材料制成的测速齿轮接近传感器旋转时，传感器内部的磁场受到干扰，磁力线发生偏移，磁敏电阻的阻值发生变化，两个磁敏电阻 R_1 、 R_2 串联接成差动回路，与传感器电路中的两个定值电阻 R_3 、 R_4 组成一个惠斯登电桥。图 10-18 (a)

所示为传感器安装示意图，图 10-18 (b) 所示为磁敏式转速测量电路示意图。

当测速齿轮随主轴旋转，某一个齿的顶部接近传感器时，由于磁场的变化，两个磁敏电阻 R_1 、 R_2 的阻值均发生变化，一个阻值增大，另一个阻值减小，桥路失去平衡，输出电压信号；当该齿离开传感器时，磁场向反方向改变，两个磁敏电阻 R_1 、 R_2 的阻值与刚才的变化方向相反，桥路输出极性相反的电压信号。电桥输出的电压信号经触发电路 5 和快速推挽直流放大电路 6，成为一个边沿很陡的脉冲信号。输出的脉冲信号的频率与测速齿轮的齿数和被测转速的关系见式 (10-36)。

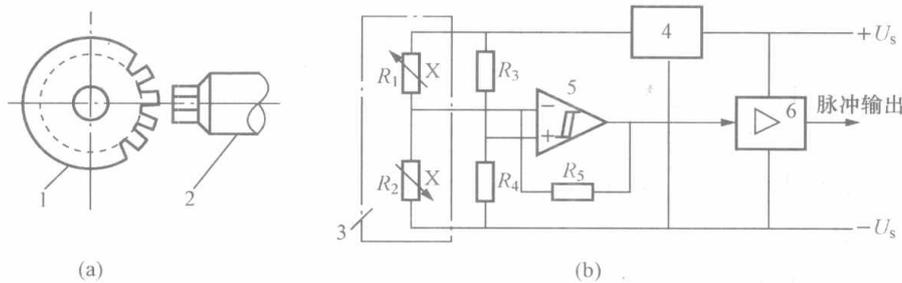


图 10-18 磁敏式转速测量装置示意图

(a) 传感器示意图；(b) 磁敏式转速测量电路示意图

1—测速齿轮；2—传感器；3—磁敏电阻；4—稳压器；5—触发电路；6—放大电路

10.3.1.3 涡流式转速传感器

采用电涡流传感器测速时，在旋转轴上开一条或数条槽，或者在轴上安装一块有轮齿的圆盘或圆板，在有槽的轴或有轮齿的圆板附近装一只电涡流传感器。当轴旋转时，由于槽或齿的存在，电涡流传感器将周期性地改变输出信号电压，此电压经过放大、整形变成脉冲信号，然后输入频率计指示出脉冲数，或者输入专门的脉冲计数电路指示频率值。此脉冲数(或频率值)与转速相对应。如有 60 个槽或齿，若频率计指示 3000Hz，则转速为 3000r/min，这时每分钟的转数就可直接读出。如果轴上无法安装齿形圆板或者不能开槽，那么也可利用轴上的凹凸部分来产生脉冲信号，例如轴上的键槽等。这种传感器的测量范围很宽，转速在 1~10 000r/min 范围内均可测量。

10.3.2 转速监测器

上述三种传感器都是把转速转换成与转速成比例的脉冲信号。要读出转速，还必须计算这些脉冲数。根据计算方法分为测频率法和测周期法，相应的监测仪器为数字转速监测器和零转速监测器。

10.3.2.1 数字转速监测器

数字转速监测器的型式有许多, 工作原理大致相同。这里仅以火电厂常用的 JSS-2 型数字显示式转速表为例进行介绍。JSS-2 型数字显示式转速表的原理框图如图 10-19 所示。

转速信号经过转速传感器转换为脉冲信号, 经放大整形电路将转速传感器

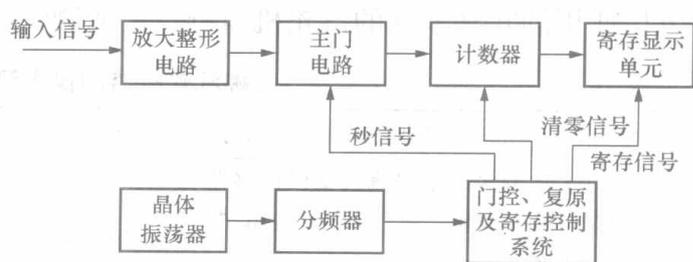


图 10-19 JSS-2 型数字显示式转速表的原理框图

送来的脉冲信号放大整形为同一频率的方波信号。主门电路接受开门指令控制, 定时开启, 使放大整形后的方波信号能够通过主门送至计数器。门控电路、复原及寄存控制系统在一个测量周期内按一定的时间顺序发出秒信号 (即开门信号)、寄存信号及清零信号。当控制系统发出秒信号时, 主门电路开启, 传感器输出的脉冲信号经放大整形再经主门电路后, 由计数器进行计数。秒信号结束后, 主门电路关闭, 计数器停止计数, 同时, 由控制系统发出寄存信号, 使计数器所计的脉冲数存入寄存显示单元, 显示出计数的数值 (即测量出的转速值)。随后清零信号使计数器清零, 为下一个测量周期做好准备, 如此循环往复。晶体振荡器则用来产生标准的时间脉冲, 以供整机作为控制脉冲使用。

由式 (10-36) 可知, 当 $z=60$ 时, 转速传感器感应电动势的频率 f 与被测转速 n 在数值上相等。同时, 又因为转速表的主门开启时间一般为 1s, 所以, 计数器所计的数值刚好是所测的转速值。

10.3.2.2 零转速监测器

零转速监测器用于连续监视机组的零转速状态。由于被测转速很低, 如果还是采用上述的计数法测频率, 则量化误差很大。为了提高低频测量的准确度, 通常采用反测法, 即先测出被测信号的周期 T_x , 再以周期的倒数来求得被测频率 f_x 。图 10-20 所示为测周期的原理框图。

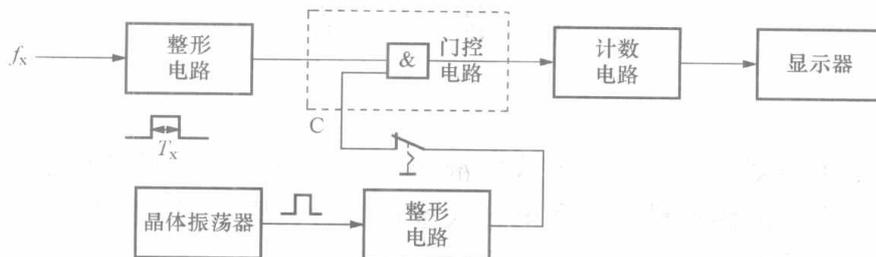


图 10-20 周期测量原理框图

测周期时, 门控信号是整形后的被测信号, 即门控时间为被测信号的周期 T_x , 而晶振信号经整形后直接输入门控电路, 相当于被测信号。不难理解, 计数器的记数值为 N 时, 被测周期 T_x 为

$$T_x = \frac{N}{f_c} = NT_c \quad (10-37)$$

式中 f_c 、 T_c ——分别为晶体振荡器的振荡频率和周期。

当转速传感器发出的脉冲周期大于预定的报警周期时, 说明汽轮机的转速很低, 为了防止大轴弯曲, 需启动盘车装置。因此, 控制电路将使报警继电器动作。

以上对转动机械的位移、振动及转速测量的主要方法及原理进行了介绍。表 10-2 中对火电厂使用的几种系列的汽轮机监测仪表的测量原理做了综合的比较。

表 10-2 几种汽轮机监测仪表测量原理的比较

名称	美国本特利公司的 7200 系列	西德飞利浦公司 RMS700 系列	国产汽轮机保护监测装置
轴向位移	双通道电涡流式轴向位移监视器, 逻辑“或”报警, 逻辑“与”停机	单、双通道电涡流式轴向位移监视器	5000 系列采用电感式测量原理; 8000 系列采用电涡流式测量原理
差胀	电涡流传感器 (线性范围 12.5mm, 25mm), 也有用螺管式差动变压器 (LVDT) 作差胀传感器的	电涡流式传感器, 若监测范围要求大时, 可用两个涡流探头相对布置, 差动连接, 以扩大线性范围	5000 系列采用电感式测量原理; 8000 系列采用电涡流式或 LVDT 式测量原理
缸胀	螺管式差动变压器 (LVDT) 测量缸胀		
转速	电涡流传感器通过键相槽发脉冲, 在 600r/min 时, 供排汽缸喷水控制, 另外, 设有零转速监测供低速盘车控制	磁敏差分原理, 双通道转速继电器, 一路监视零转速; 另一路在转速 > 600r/min 时, 记录仪由输入偏心度信号切换到输入转速信号	5000 系列采用磁阻脉冲式传感器测转速; 8000 系列采用电涡流式传感器测转速, 超速时发出报警信号, 低速时能触发盘车装置
偏心度	采用电涡流式传感器和键相传感器测量主轴偏心度峰—峰值		
振动	采用电涡流式传感器和速度传感器组合成的双探头径向振动传感器监视轴的绝对振动, 也可监视轴的相对振动或轴承座的绝对振动	采用地震传感器测量轴承座的绝对振动, 采用电涡流式传感器测量轴与轴承座的相对振动	5000 系列采用磁电式传感器测量轴承座的绝对振动; 8000 系列采用双探头电涡流式传感器测量轴的绝对振动、相对振动或轴承座的绝对振动

本章小结

一、位移测量

测量位移的方法很多, 主要有机械式、液压式、电感式、差动变压器式和电涡流式等。目前常用的有电涡流式位移测量装置和电感式位移测量装置, 用于测量汽轮机转子的轴向位移、汽缸、转子之间的相对膨胀位移以及汽缸热膨胀量。

二、振动测量

振动测量大致有两方面的内容: ①振动基本参数的测量, 即测量振动物体上某点的位移、速度、加速度、频率和相位; ②结构或部件的动态特性的测量, 即以某种激振力作用在被测件上, 使它产生受迫振动, 测量输入 (激振力) 和输出 (被测件振动响应), 从而确定被测件的固有频率、阻尼、刚度和振型等动态参数。振动测量仪表一般由测振传感器、积分放大器及显示仪表等部分组成。目前常用的测振传感器有磁电式传感器和电涡流传感器。火电厂中振动测量仪表用于测量汽轮机的振动及主泵的振动。

三、转速的测量

火电机组要维持电网的周波不变, 就必须及时调节汽轮机的转速, 使其维持在 3000r/min。

测量转速常用的有磁阻式、磁敏式和涡流式转速传感器。这三种传感器都是把转速转换成与转速成比例的脉冲信号。要读出转速，还必须计算这些脉冲数。根据计算方法分为测频率法和测周期法，相应的监测仪器为数字转速监测器和零转速监测器。

思考题与习题

1. 为了保证机组的安全运行，对汽轮机需要监视哪些机械量？
2. 位移测量仪表在电厂中有哪些用途？简述测量轴向位移传感器的工作原理。
3. 电涡流传感器由哪几部分组成？其最大特点是什么？请设计一个用电涡流传感器测位移的检测系统。
4. 高频反射式电涡流传感器越靠近铁磁物体，其线圈的电阻和电感分别是增大还是减小？
5. 汽轮机不但装设相对膨胀测量装置，而且还装设热膨胀测量装置，试分析能否撤去一种测量装置？
6. 振动测量仪表一般由哪几部分组成？振动系统中要求被测定的参数有哪些？一般只要求测振仪表测定哪些参数？
7. 利用复合式振动传感器如何得到轴的绝对振动位移信号？
8. 用磁电式拾振器测量汽轮机组振动，必须配置积分放大器的原因是什么？
9. 测量转速常用的传感器有哪些？简述磁敏式转速传感器的工作原理。
10. 数字转速监测器与零转速监测器有何不同？
11. 假设被测体的振动是简谐振动，其位移的峰值为 2mm，频率为 20kHz。试求：
 - (1) 振动速度和振动加速度的幅值；
 - (2) 若振动加速度的幅值是 0.5g，则位移的峰值是多少？
12. 对灵敏度为 $60.4(\text{V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s})$ 的磁电式振动传感器，当输入是一个正弦波振动，其位移 $x(t) = 1 \times 10^{-6} \sin 628t$ 时，试求传感器的输出电动势及输出电动势的频率。

第 11 章 检测装置的干扰抑制技术

工业生产中检测装置的使用条件很复杂,被测量往往被转换为微弱的低电平信号,并远距离传输送至显示仪表,这时经常会有一些与被测量无关的电量(电压或电流)与有用的信号一起进入检测装置之中。这些与被测量无关的影响检测装置正常工作的非信号电量(电压或电流)就称为“干扰”。

在测量过程中,由于这些干扰的存在,轻则使测量装置示值误差加大、灵敏度降低、指示不稳、零点漂移、严重失真或超差等,重则使测量结果完全失常。因此,有效地排除和抑制各种干扰,保证检测装置能在实际应用中可靠地工作,已成为必须探讨和解决的问题。

11.1 干扰的形成

11.1.1 形成干扰的三要素

干扰源、耦合通道和接收电路是形成干扰的三个要素。三要素之间的联系如图 11-1 所示。

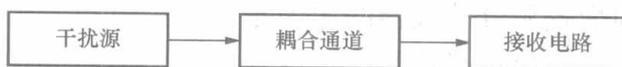


图 11-1 形成干扰的三要素之间的联系

干扰必须通过一定的耦合通道或传输途径才能对检测装置的正常工作造成不良的影响。

11.1.2 常见的干扰耦合方式

11.1.2.1 电磁耦合

电磁耦合又称互感耦合,它是由于两电路之间存在互感而产生的,一个电路中电流的改变引起磁交链而耦合到另一个电路。若某一电路有干扰,则同样可以通过互感而耦合到另一电路中。

在大功率变压器、交流电机、强电流电力线等周围存在较强的交变磁场,如果仪表信号线在其附近通过,就会受到交变磁场影响而产生交变电动势,形成工频干扰,如图 11-2 所示。

雷击、接触器触点发生火花,具有电容或电感的回路断开或闭合时,均会产生高频的无线电波,同样会在仪表回路中产生高频干扰。

电磁耦合及等效电路如图 11-3 所示。图 11-3 中 I_n 为电路 A 中的干扰电流源, M 为两电路之间的互感, U_{nc} 为 B 中所引起的感应干扰电压。可以得出

$$U_{nc} = j\omega MI_n \quad (11-1)$$

式中 ω ——电流干扰源 I_n 的角频率。

分析式 (11-1) 可以得出,干扰电压 U_{nc} 正比于干扰源的电流 I_n 、干扰源的角频率 ω 和互感 M 。

11.1.2.2 静电耦合

静电耦合又称电容耦合,是



图 11-2 交变磁场电磁感应产生干扰

由于两个电路之间存在着寄生电容，使一个电路的电荷影响到另一个电路。信号线靠近电网线敷设，电网线与信号线之间存在分布电容，因电网线与两信号线距离不等，分布电容也不同，从而会由于静电耦合而产生感应电压，形成差模干扰 e_s ，如图 11-4 所示。

仪表测量线路受静电耦合传输干扰的示意图及等效电路如图 11-5 所示。 U 为干扰源电压； X_i 为被干扰电路的输入阻抗； C_s 为造成静电耦合的寄生电容。根据图 11-5 (b) 所示的等效电路，可以写出在 X_i 上干扰电压的表达式为

$$U_a = \frac{j\omega C_s X_i}{1 + j\omega C_s X_i} U \tag{11-2}$$

式中 ω ——干扰源 U 的角频率。

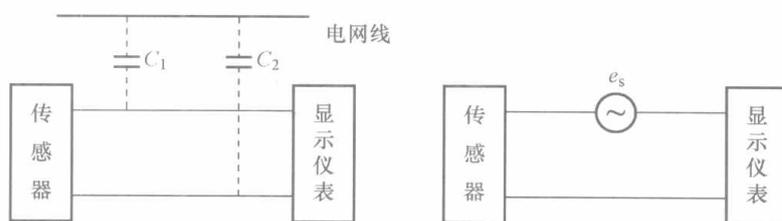


图 11-4 静电耦合产生干扰

考虑到一般情况下有 $|j\omega C_s X_i| \ll 1$ ，故式 (11-2) 可简化为

$$U_a = j\omega C_s X_i U \tag{11-3}$$

若干扰信号 $U=5V$ ，分布电容为 $0.01pF$ ，信号频率为 $1MHz$ ，放大器输入阻抗为 $100k\Omega$ ，则此干扰在放大器输入端所造成的干扰电压 $U_s=31.4mV$ ，再经放大倍数为 100 的放大器后，在放大器输出端的干扰电压为 $3.14V$ ，可见其影响是很大的。

由式 (11-3) 可以得到以下结论。

- (1) 干扰源的频率越高，静电耦合引起的干扰也越严重。
- (2) 干扰电压与接收电路的输入阻抗成正比，降低接收电路的输入阻抗可减少静电耦合的干扰。

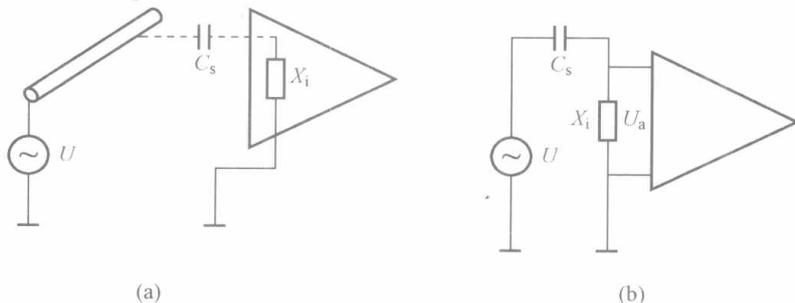


图 11-5 静电耦合传输干扰

(a) 示意图；(b) 等效电路

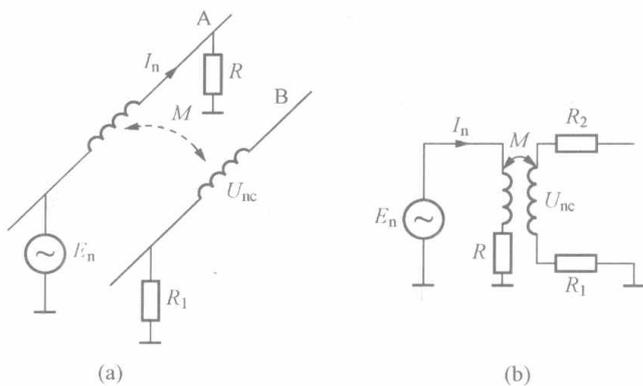


图 11-3 电磁耦合及等效电路

(a) 电磁耦合的实际情况；(b) 等效电路

(3) 通过合理布线和适当防护措施以减小分布电容，可减少静电耦合的干扰。

11.1.2.3 公共阻抗耦合

公共阻抗耦合就是多个电路通过共有阻抗造成的耦合。当某一电路的电流通过共有阻抗时，会在共有阻抗上产生电压，该电

压就可能成为其他电路的干扰。干扰电压正比于公共阻抗和噪声源电流。

公共阻抗耦合是检测仪表中很常见的一种干扰，例如：

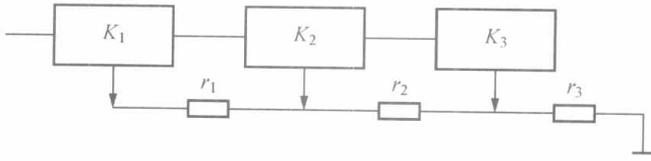


图 11-6 接地线阻抗耦合干扰

(1) 由接地线阻抗形成的公共阻抗耦合干扰。多台电子测量装置的公共线接地时，若在接地线上有较大电流通过，会通过接地线阻抗产生公共阻抗耦合干扰，如图 11-6 所示。

(2) 由电源内阻形成的公共阻抗耦合干扰。当用同一个电源同时对多个仪表供电时，如有高电平电路的输出电流流过电源，这个电流就会在电源内阻上产生压降，形成干扰电压，造成对其他低电平电路的干扰，如图 11-7 所示。

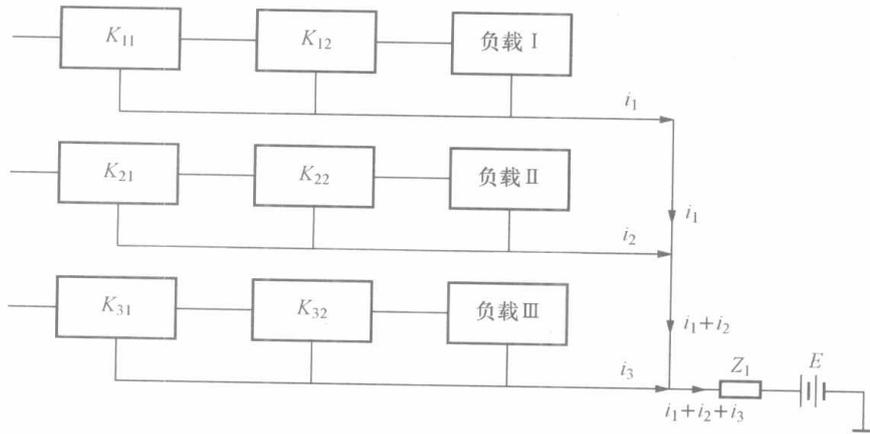


图 11-7 电源内阻抗耦合干扰

(3) 信号输出电路的相互干扰。当电子测量装置的信号输出电路带有多路负载时，如果有任一路负载发生变化，此变化都将通过输出阻抗公共耦合而影响到其他输出电路，如图 11-8 所示。

公共阻抗耦合等效电路可用图 11-9 表示。图 11-9 中， Z_c 表示两个电路之间的共有阻抗， I_n 表示干扰源的电流， U_{nc} 表示被干扰电路的干扰电压。

根据图 11-9，可写出被干扰电路的干扰电压 U_{nc} 的表达式为

$$U_{nc} = I_n Z_c \tag{11-4}$$

可见公共阻抗耦合干扰电压 U_{nc} 正比于共有阻抗 Z_c 值和干扰源电流 I_n 。若要消除公共阻抗耦合干扰，首先要消除两个或几个电路之间的共有阻抗。

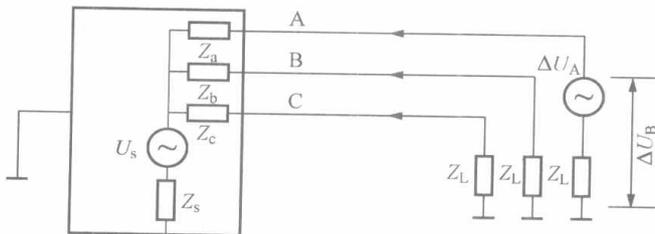


图 11-8 输出阻抗引起的共阻抗干扰

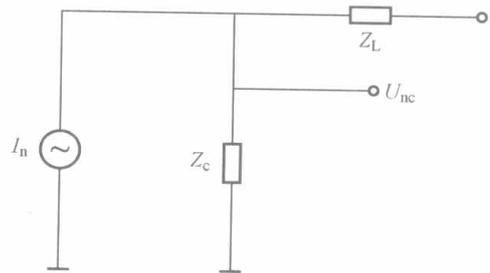


图 11-9 公共阻抗耦合等效电路

11.1.2.4 漏电流耦合

当信号线路与动力线路之间绝缘低劣，或信号线路之间绝缘低劣时，就可能出现导电性

接触，给信号线路引入共模干扰电压，其等效电路如图 11-10 所示。图 11-10 中， E_N 表示噪声电动势， R_m 为漏电阻， Z_i 为漏电流流入电路的输入阻抗， U_N 为干扰电压。由图 11-10 可以写出 U_N 的表达式为

$$U_N = \frac{Z_i}{R_m + Z_i} E_N \quad (11-5)$$

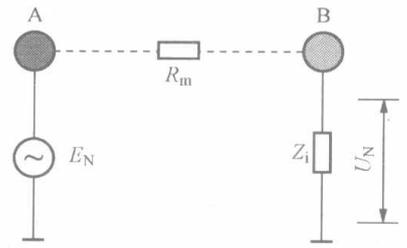


图 11-10 漏电耦合等效电路

漏电流耦合经常发生在用仪表测量较高的直流电压的场合；或在检测装置附近有较高的直流电压源时；或在高输入阻抗的直流放大器中。

若直流放大器的输入阻抗 $Z_i = 10^8 \Omega$ ，干扰源电动势 $U_N = 15V$ ，绝缘电阻 $R_m = 10^8 \Omega$ ，可以得出

$$U_N = 0.149V$$

从以上估算过程可知，对于高输入阻抗放大器来说，即使是微弱的漏电流干扰，也将造成严重的后果。所以必须提高与输入端有关电路的绝缘水平。

漏电流耦合的实例如图 11-11 所示，使用热电偶测量温度时，耐火砖在高温下的绝缘性电阻大大下降，热电偶的陶瓷套管、绝缘子在高温下绝缘性能同样大大下降。因此在高温下，电加热设备的电源会通过热电偶保护套管泄漏到热电偶上，形成高温漏电，从而在热电偶与地之间产生一个共模干扰电压 e_c 。

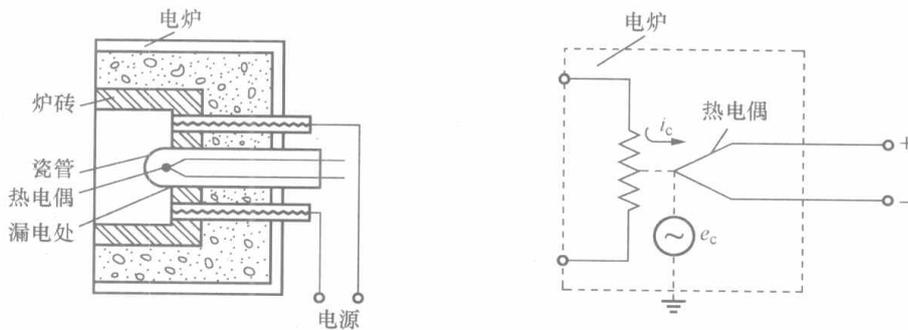


图 11-11 高温漏电干扰

11.1.2.5 外线路附加电动势

在测量系统中，由于不同金属零件或导线相接触，当其两端接点处于不同温度时，会产生附加电动势；两种金属因某种原因进入酸、碱、盐溶液，产生化学电动势。这种电动势均为直流，在接线端子板或是干簧继电器等处容易产生，对仪表影响极大，应尽量避免这种干扰出现。

11.1.2.6 不等电位接地

同一信号回路多点接地，“大地”成为信号回路的一部分。由于实际大地电阻不为零，因此当大地中流过电流时，在不同点上就会产生不等电位现象。如果仪表输入回路中存在

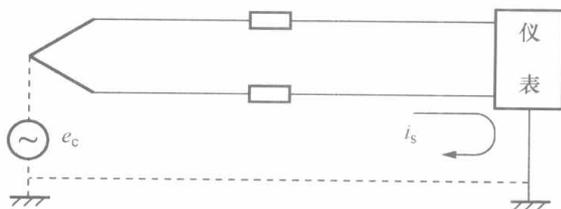


图 11-12 地电位干扰

两个或多个接地点，就可能出现因接地点不等电位而产生共模干扰 e_c 。特别是出现接地故障电流或有直接雷击电流时，将出现强大的大地杂散电流，大地上不同接地点可能出现明显的电位差 e_c 。

如图 11-12 所示，这个电位差经信号线路产

生干扰电流 i_s ，在导线电阻上产生压降，转换为差模干扰电压影响仪表。

11.2 差模干扰与共模干扰

各种噪声源产生的干扰是通过各种耦合方式及传输途径进入检测装置的。根据干扰进入信号测量电路的方式以及与有用信号的关系，可将干扰分为差模干扰与共模干扰。

11.2.1 差模干扰

差模干扰又称横向干扰、正态干扰或串模干扰等。它使测量装置的两个信号输入端子的电位差发生变化，即干扰信号与有用信号是按电压源形式串联起来作用于输入端的。由于它和有用信号叠加起来直接作用于输入端，因此直接影响测量结果。差模干扰可用图 11-13 所示的两种方式表示。

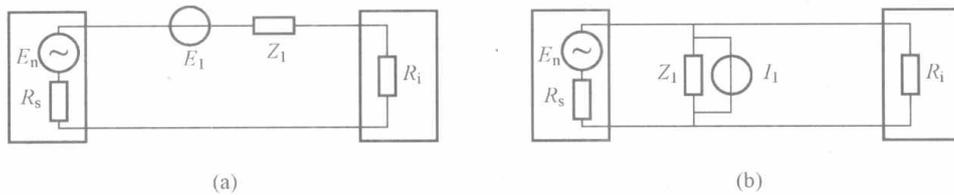


图 11-13 差模干扰等效电路
(a) 串联电压源形式；(b) 并联电流源形式

图 11-13 中， E_1 表示等效干扰电压， I_1 表示等效干扰电流， Z_1 表示干扰源的等效内阻抗。当干扰源的等效内阻抗较小时，宜用串联电压源形式；当干扰源的等效内阻抗较大时，宜用并联电流源形式。

造成差模干扰的原因很多，电磁耦合可产生差模干扰。图 11-14 (a) 表示用热电偶进行温度测量时，由于有交变磁场 Φ 穿过信号传输回路，从而产生感应电动势，造成差模干扰。再有，热电偶焊在带电体上引进干扰。在一些特殊要求的测温场合下，需要将热电偶的热端焊在用电流加热的金属试样表面上，如图 11-14 (b) 所示的 C、D。由于在金属试样的各点上存在电位差，因而引入差模干扰电压 u_{CD} ： $u_{CD} = u_{AB} \frac{CD}{AB}$ 。式中 u_{AB} 表示试样两端的加热电压； CD 表示热电偶焊点间的距离； AB 表示试样长度。高压直流电场通过漏电流对动圈式检流计也可造成差模干扰，如图 11-14 (c) 所示。

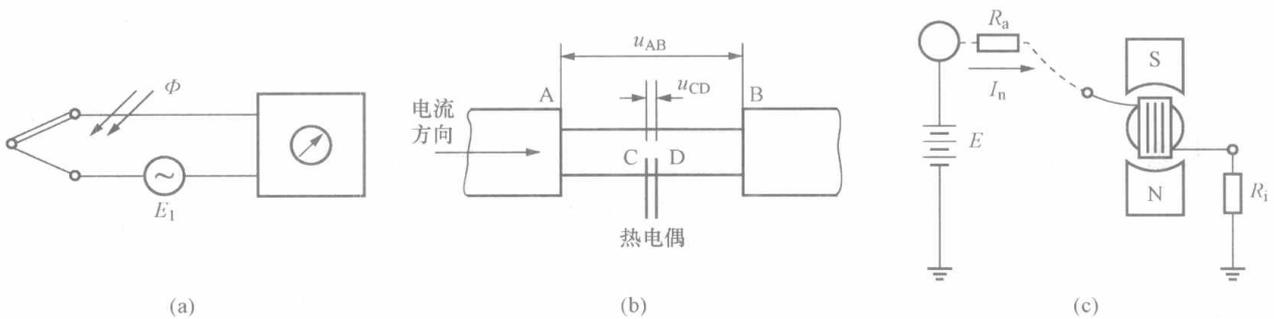


图 11-14 差模干扰产生的原因
(a) 温度测量系统的差模干扰；(b) 热电偶焊在通过电流的导体上引进差模干扰；
(c) 动圈式检流计的差模干扰

常用的消除差模干扰的方法有：①用低通输入滤波器滤除交流干扰；②尽可能早地对被测信号进行前置放大，以提高回路中的信噪比；③在选取组成检测系统的元器件时，可以采用高抗扰度的逻辑器件，通过提高阈值电平来抑制低噪声的干扰，或采用低速逻辑部件来抑制高频干扰；④信号线应选用带屏蔽层的双绞线或电缆线，并有良好的接地系统。

11.2.2 共模干扰

共模干扰又称纵向干扰、对地干扰、同相干扰、共态干扰等。它是相对于公共的基准地（接地点），在测量系统的两个输入端子上同时出现的干扰，如图 11-15 所示。这种干扰可以是直流电压，也可以是交流电压，其幅值可达几伏甚至更高。造成共模干扰的主要原因是被测信号的参考接地点和检测装置输入信号的参考接地点不同。虽然它不直接影响测量结果，但当信号输入电路参数不对称时，它会转化为差模干扰，对测量产生影响。

共模干扰通常用等效电压源表示。图 11-16 给出了一般情况下的共模干扰电压源等效电路。图 11-16 中， U_n 表示干扰电压源， Z_{cm1} 、 Z_{cm2} 表示干扰源阻抗， Z_1 、 Z_2 表示信号传输线阻抗， Z_{s1} 、 Z_{s2} 表示信号传输线对地的漏阻抗， R_i 表示仪表输入电阻， R_s 表示信号源内阻。

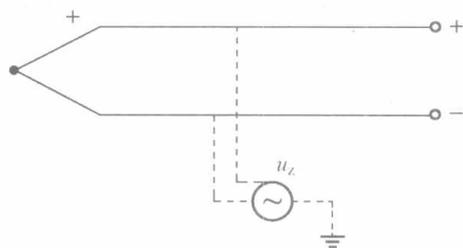


图 11-15 共模干扰

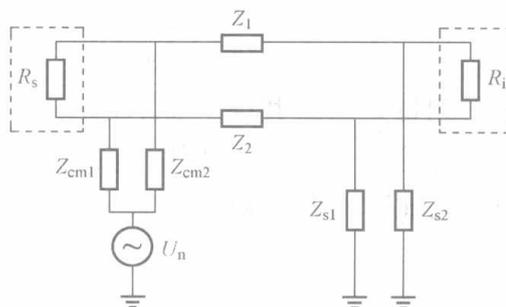


图 11-16 共模干扰等效电路

由图 11-16 可知，共模干扰电流的通路只是部分与信号电路共有，且共模干扰会通过干扰电流通路和信号电流通路的不对称性转化为差模干扰，从而影响测量结果。

常见的共模干扰耦合有以下几种。

(1) 在测量系统附近有大功率电气设备，因绝缘不良漏电，或三相动力电网负载不平衡，零线有较大电流时，都存在着较大的地电流和地电位差。这时，若测量系统有两个以上接地点，则地电位差就会造成共模干扰。

(2) 当电气设备的绝缘性能不良时，动力电源会通过漏电阻耦合到测量系统的信号回路，形成干扰。

(3) 在交流供电的电子测量仪表中，动力电源会通过电源变压器的一、二次绕组间的杂散电容、整流滤波电路、信号电路与地之间的杂散电容与地构成回路，形成工频共模干扰。

11.2.3 共模干扰向差模干扰的转化

共模干扰对仪表的影响比差模干扰小，但在一定条件下，共模干扰会转化为差模干扰，其对仪表的影响大大加强。

如果组成信号传输外线路的桥路不平衡，共模干扰可以转化为差模干扰，转化原理如图 11-17 所示。

信号传输线路对地存在一定的分布电容和漏电阻，阻抗为 Z_1 、 Z_2 ，它们与输入线路内

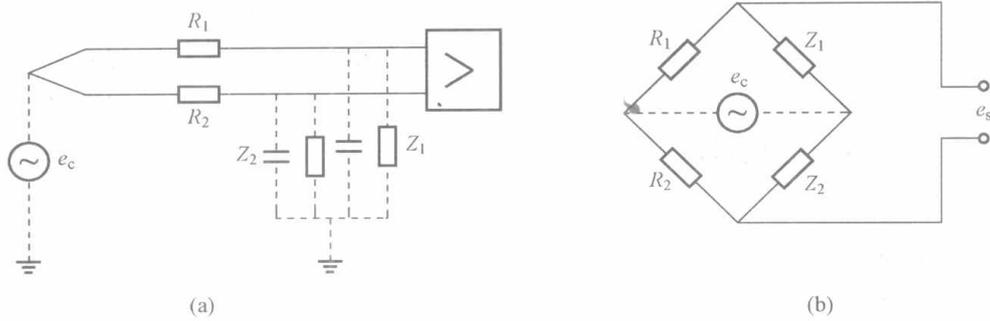


图 11-17 共模干扰通过不平衡电桥转化原理图

(a) 共模干扰的引入; (b) 等效电路

阻 R_1 、 R_2 组成桥路，如果电桥不平衡，则共模干扰电压 e_c 将转化为差模干扰电压 e_s 进入仪表，其大小为

$$e_s = \left(\frac{R_2}{R_2 + Z_2} - \frac{R_1}{R_1 + Z_1} \right) e_c \quad (11-6)$$

很显然，桥路不平衡程度越大，转换成的差模干扰越大。

由于共模干扰只有转换成差模干扰才能对检测仪表产生干扰作用，所以共模干扰对测量系统的影响大小取决于共模干扰转换成差模干扰的大小。可以利用“共模干扰抑制比”值的大小来衡量测量系统对共模干扰的抑制能力。

共模干扰抑制比定义为作用于测量系统的共模干扰信号与使测量系统产生同样输出所需的差模信号之比。通常以对数形式表示为

$$CMRR = 20 \lg \frac{U_{cm}}{U_{cd}} \quad (11-7)$$

式中 U_{cm} ——作用于测量系统的共模干扰信号；

U_{cd} ——使测量系统产生同样输出所需的差模信号。

共模干扰抑制比也可定义为检测仪表的差模增益 K_d 与共模增益 K_c 之比，即

$$CMRR = 20 \lg \frac{K_d}{K_c} \quad (11-8)$$

$CMRR$ 值越高，说明系统对共模干扰的抑制能力越强。

共模干扰是一种常见的干扰源，常采用的抑制共模干扰的方法有：

(1) 采用双端输入的差分放大器作为仪表输入通道的前置放大器，是抑制共模干扰的有效方法。设计比较完善的差分放大器，在不平衡电阻为 $1\text{k}\Omega$ 的条件下，共模抑制比 $CMRR$ 可达 $100\sim 160\text{dB}$ 。

(2) 采用变压器或光耦合器把各种模拟负载与数字信号隔离开来，也就是把“模拟地”与“数字地”断开。被测信号通过变压器耦合或光电耦合获得通路，共模干扰由于不成回路而得到有效的抑制。

(3) 可以采用浮地输入双层屏蔽放大器来抑制共模干扰。这是利用屏蔽方法使输入信号的“模拟地”浮空，从而达到抑制共模干扰的目的。

11.3 抑制干扰的措施

要想有效地抑制干扰，首先要发现干扰源，在干扰源处杜绝干扰是积极的措施。有些干

扰,如自然干扰及某些现场环境干扰是不可避免的。这时,削弱干扰通道对干扰的耦合,以及提高接收电路的抗干扰能力就显得非常重要。

1. 消除干扰源

消除干扰源是抑制干扰的积极、主动的措施。无法消除干扰源时,可采取抑制措施。

一般来说,电压或电流剧变的地方就是干扰源。如继电器通断、电容充电、电机运转、集成电路开关工作等都可能成为干扰源。

消除和抑制干扰源的方法可采用低噪声电路、瞬态抑制电路和稳压电路等。所用器件尽可能采用噪声低、高频特性好、稳定性高的电子元件。器件选择不当可能产生新的干扰源。

2. 割断干扰耦合路径

对于以“电路”的形式侵入的干扰,可采取提高绝缘性能、改变接地形式及采用隔离变压器、光耦合器等措施切断干扰途径。采用退耦、滤波等手段也可引导干扰信号的转移。对于以“辐射”的形式侵入的干扰,一般采取各种屏蔽措施,如静电屏蔽、电磁屏蔽、磁屏蔽等。

3. 提高接收电路的抗干扰能力

电磁干扰是电子设备的主要干扰形式。一般来说,高输入阻抗的电路比低输入阻抗的电路易受干扰;模拟电路比数字电路的抗干扰能力差;布局松散的电子装置比结构紧凑的易于接收干扰。为削弱电路对干扰的敏感性,可以采用滤波、选频、双绞线、对称电路和负反馈等措施。一个设计良好的检测装置应该具备对有用信号敏感、对干扰信号尽量不敏感的特性。

此外,还可采用软件抑制干扰。通过编入一定的程序进行信号处理和分析判断,达到抑制干扰的目的。

不同生产装置和所在区域,干扰的来源、类型、强度、分布不同,所涉及的仪表设备要求也不同,经常采用的措施有以下几种。

11.3.1 隔离

隔离有两种含义,即可靠的绝缘和合理的布线(考虑间距和走向)。仪表信号线路与电力线路及能产生交变磁场的设备,相隔距离应按有关规定执行。当测量系统含有模拟与数字、低压与高压混合电路时,必须对电路各环节进行隔离,这样还可以同时起到抑制漂移和安全保护的作用。隔离的方法主要是采用隔离变压器或光电耦合。

1. 隔离变压器

两个不同的接地点总会存在一定的电位差,由此会形成地环路电流,如图 11-18 所示。地环路电流对信号电路直接形成干扰。采用隔离变压器可以阻隔地环路电流。如图 11-19 所示,电路 1 输出信号经变压器耦合到电路 2,而地环路则被截断。

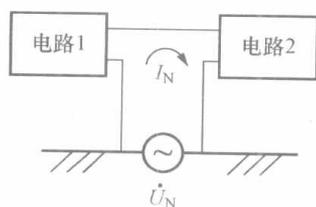


图 11-18 地环路干扰

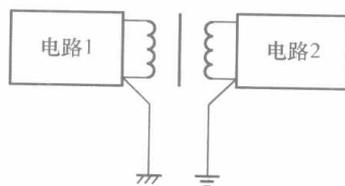


图 11-19 变压器阻隔地环路

由于变压器不能用于直流信号（直流信号经调制后也可以使用，但使系统复杂程度和成本提高），因此这种隔离方法在测量直流或低频信号时受很大限制。

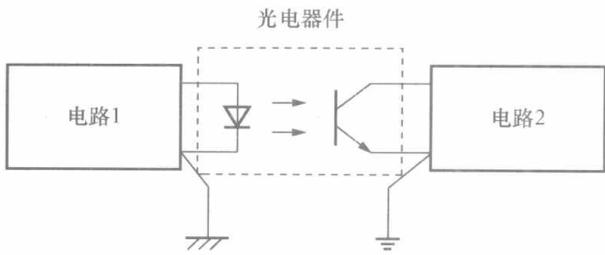


图 11-20 光电耦合截断地环路

光管和晶体管之间为无导线连接，因此它既传输了信号又截断了地环路。

2. 光电耦合

在直流或低频测量系统中，多采用光电耦合的方法。如图 11-20 所示，光耦合器是由发光二极管和光敏晶体管组成的。发光二极管的发光强度随电路 1 输出电流的大小而变化，光强的变化使光敏晶体管电流变化，从而将电路 1 的信号传到电路 2 中。由于光电器件的

11.3.2 屏蔽

屏蔽技术主要是抑制电磁感应对检测装置的干扰，它是利用铜或铝等低阻材料或导磁性良好的铁磁性材料把元件、电路、组合件或传输线等包围起来以隔离内外电磁的相互干扰。屏蔽一般分为静电屏蔽、电磁屏蔽、低频磁屏蔽、驱动屏蔽。

1. 静电屏蔽

静电屏蔽是指处于静电平衡状态下，导体内部各点等电位，故在导体内部无电力线。因此采用导电性能良好的金属作屏蔽盒，并将它接地，可使其内部的电力线不外传，同时也不使外部的电力线影响其内部。

图 11-21 表示了静电屏蔽的原理。设导体 A 点带有电荷 +Q，B 为低电阻的金属材料制造的屏蔽盒，屏蔽盒接大地。

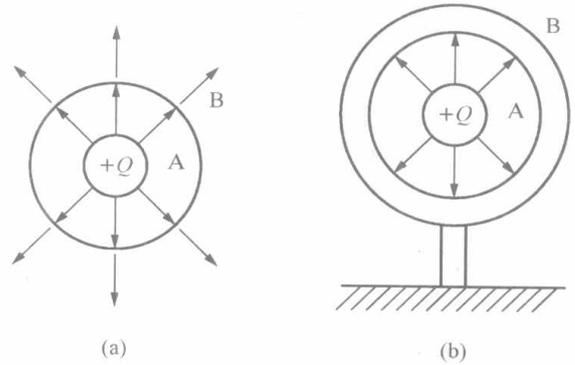


图 11-21 静电屏蔽的原理

(a) 非屏蔽；(b) 屏蔽

图 11-22 所示为静电屏蔽在实际布线中的应用。如果在 A、B 两导线之间敷设一条接地导线 G，则 A、B 间的电性耦合将明显减弱，显然 $C_N > C'_N$ 。

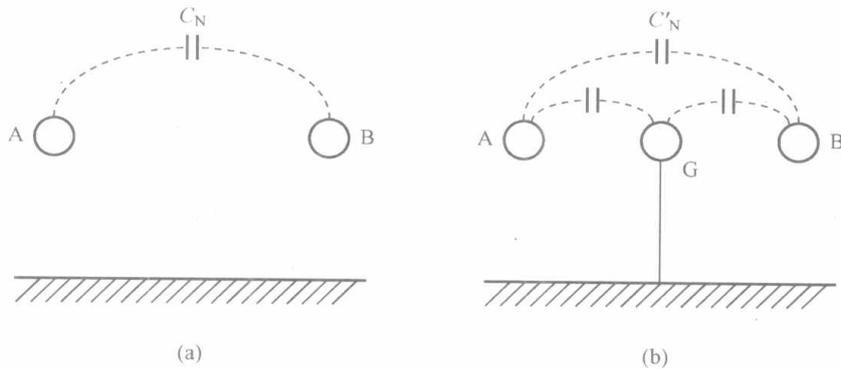


图 11-22 接地导线的静电屏蔽作用

(a) 非接地情况；(b) 接地情况

静电屏蔽能防止静电场的影响，用它可以消除或削弱两电路之间由于寄生分布电容耦合而产生的干扰。静电屏蔽时，可以在屏蔽导体上任意开缝，以防止涡流损耗。

静电屏蔽的典型应用之一，是在电源变压器的一次侧与二次侧绕组之间，插入一个梳齿形导体，并将其接地，可以防止两绕组之间的静电耦合。

2. 电磁屏蔽

电磁屏蔽主要防止交变电场的影响。其基本原理是采用导电良好的金属屏蔽罩、屏蔽盒等，将被保护的电路包围在其中，屏蔽体良好接地。利用高频电磁场对屏蔽金属的电磁感应作用，在屏蔽金属内产生涡流，用涡流产生的磁场抵消或减弱干扰磁场的影响，从而得到屏蔽的效果。

电磁屏蔽的必要条件是在屏蔽导体内流过高频电流，而且电流必须在抵消干扰磁通的方向上。它主要用来防止高频电磁场的影响，对低频磁场干扰的屏蔽影响很小。

屏蔽层的材料必须选择导电性能良好的低电阻金属，如铜、铝或镀银铜板等。根据高频集肤效应原理，高频涡流仅流过屏蔽层的表面一层，因此，屏蔽层的厚度仅需考虑结构强度就可以了。生产现场中的干扰源，例如机电设备、电源开关等强干扰设备，应有铁质壳体屏蔽；电力线路单独敷设时，本身应使用带盖的钢质电缆槽（或隔板）或穿线钢管敷设，通过电磁屏蔽，使干扰对信号的耦合可能性减小。

基于涡流反磁场作用的电磁屏蔽，在原理上与屏蔽体是否接地无关系。但若将电磁屏蔽层接地，可同时兼有静电屏蔽的作用。也就是说，用导电良好的金属材料制成的接地电磁屏蔽层，可同时起到电磁屏蔽和静电屏蔽两种作用。

3. 低频磁屏蔽

低频磁场由于其频率低，趋附效应很小，吸收损耗小，并且由于其波阻抗低，反射损耗也很小，电磁屏蔽对这种低频磁通干扰的屏蔽效果是很差的。

低频磁屏蔽的原理如图 11-23 所示，A 为磁性干扰源，B 为受影响的磁性对象，C 为屏蔽体。磁屏蔽体要选择高磁导率的铁磁材料，如电工纯铁、硅钢片、坡莫合金等实现磁屏蔽或提供磁旁路。由于屏蔽材料的磁导率很高，因此为磁场提供了一条磁阻很低的通路，空间的磁场会集中在屏蔽材料中，从而使敏感器件免受磁场干扰。屏蔽体要有一定厚度或者采用多层屏蔽，以减小磁阻。屏蔽体无需接地。

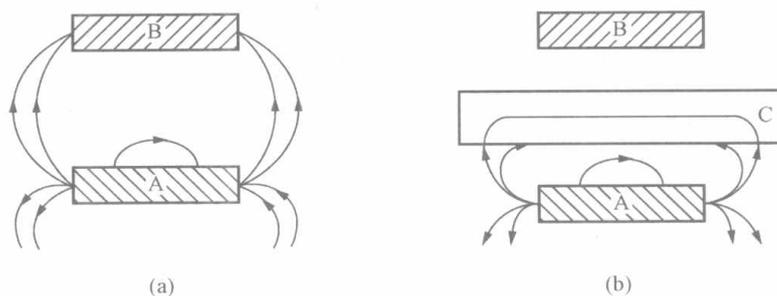


图 11-23 低频磁屏蔽的原理

(a) 无屏蔽体情况；(b) 有屏蔽体情况

屏蔽体要有一定厚度或者采用多层屏蔽，以减小磁阻。屏蔽体无需接地。

4. 驱动屏蔽

驱动屏蔽又称“电位跟踪屏蔽”，就是用被屏蔽导体的电位通过 1:1 电压跟随器来驱动屏蔽导体的电位，其原理如图 11-24 所示。若 1:1 电压跟随器是理想的，则导体 B 与屏蔽层 C 二者等电位。尽管导体 B 和屏蔽层 C 之间有寄生电容存在，但因 B 与 C 等电位，故此寄生电容不起作用。因此驱动屏蔽能有效地抑制通过寄生电容产生的耦合干扰。

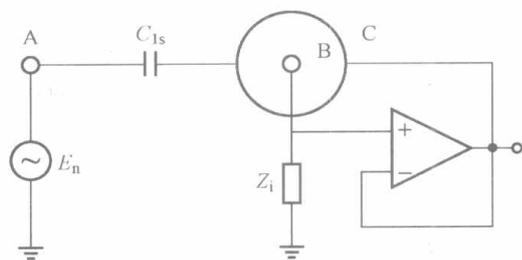


图 11-24 驱动屏蔽

综上所述，在现场中敷设信号线时要注意：现

场中带盖的钢质电缆槽和穿线管兼有静电屏蔽能力及一定的电磁屏蔽能力。因此远距离信号线传输宜采用钢质电缆槽、穿线管进行屏蔽敷设。当电缆槽内安放不同用途、不同电压等级的电线电缆时，应分类布置，如毫伏类低电平信号、本安线路、开关量连锁线路、电源线路等，应使用钢质隔板分类敷设，进行补充屏蔽；小型装置以及现场接线箱引出线的分支线路宜用钢管分类穿管走线。

对重要的信号线，尤其是毫伏级低电平信号线，宜用带屏蔽的电线电缆，此方法是抗静电感应干扰的最有效方法。

11.3.3 双绞线

所谓双绞线，是由成对的两根导线（线芯）相互绞扭而形成的电线电缆。两根导线的位置反复交替，纵观全线路，其与干扰源间的分布电容几乎相等，因交变磁场感应或静电感应产生的干扰电动势几乎可以相互抵消（线路电阻对称情况下），残留的差模干扰电动势就很小了。

双绞线一般由两根 22~26 号绝缘铜导线相互缠绕而成，如果把一对或多对绞合导线放在一个绝缘套管中便构成了双绞线电缆。两根导线相互扭合，其扭绞节距的长短与该导线的线径有关。线径越细，扭绞节距越短，抑制感应噪声的效果越明显，但成本增加。

双绞线主要用来传输模拟信号，也适用于数字信号传输，对较短距离的数字信号传输效果好。双绞线在信号传输应用中具有传输距离远、传输质量高、抗干扰能力强、布线方便、造价低廉等优点。但其对信号也存在着较大的衰减，并且产生波形畸变。所以在用双绞线远距离传输信号时，必须采取放大、补偿等措施。

双绞线分为屏蔽双绞线和非屏蔽双绞线两种。屏蔽双绞线电缆的外层由一层金属箔包裹，从而能抑制双绞线向外辐射电磁波，同时具有很高的信号传输速率。但屏蔽双绞线造价相对较高，安装施工也比非屏蔽双绞线电缆困难。

双绞线抗干扰有效、经济，可明显抑制静电感应和交变磁场引入的干扰，是优先考虑的措施之一。

11.3.4 实现正确接地

接地是保证人身安全、抗噪声干扰的一种技术方法。在设计中若能把接地和屏蔽正确地结合，就能很好地消除外界干扰的影响。所谓接地是指将一个点与某个电位基准面用导体连接起来建立低电阻的导电通道。这里的“地”通常是指以下两种：一种是“大地”（安全地），接地的目的是为电气设备提供一个保护接地，或者是满足静电屏蔽的要求；一种是“信号基准地”（信号地），接地的目的是为系统或电路的各部分提供一个稳定的基准电位，并以低的阻抗为信号电流回流到信号源提供通路。

1. 检测装置的地线

(1) 屏蔽接地线及机壳接地线。这类地线是对电磁场的屏蔽，也能达到安全防护的目的，一般是接大地。

传输电线电缆的屏蔽层、电气器件的屏蔽罩以及起屏蔽作用的钢质电缆槽、穿线钢管等的接地属于屏蔽接地。屏蔽接地可实现对电线电缆、元器件、仪表设备的有效抗干扰，不出现电荷累计，保证设备和人身的安全。

将信号线路的屏蔽层接地，给干扰安排一条合理的泄漏途径，可避免或减少干扰进入测量系统。在信号线路的屏蔽层接地时，要注意接地方法，不能使屏蔽层中形成电流流动，以

免对信号线产生干扰。通常屏蔽层接地只能在信号回路某一侧接地，不能两侧同时接地。

(2) 信号接地线。它是电子装置的输入与输出的零电位接地线（基准电位线），但不一定真正接大地。信号地线又分两种：模拟信号地线及数字信号地线。因模拟信号一般较弱，容易受干扰，故对地线要求较高，而数字信号一般较强，对地线要求可降低些。为了避免两者之间相互干扰，两种地线应分别设置。

(3) 功率地线。功率地线是大电流网络部件（如中间继电器的驱动电路等）的零电位接地线。大电流网络部件电路的电流在地线中产生的干扰作用大，因此对功率地线也应有一定的要求，有时在电路上功率地线与信号地线是互相绝缘的。

(4) 交流电源地线（即交流 50Hz 地线）。它是噪声源，必须与直流地线相互绝缘，在布线上也应使两种地线远离。

2. 常见的接地方式

(1) 电路的一点接地和多点接地。一般高频电路应就近多点接地，低频电路应一点接地。因为在低频电路中，布线和元件间的电感影响很小，而公共阻抗影响很大，所以应一点接地。在高频时，地线具有电感，因而增加了地线阻抗，而且地线变成了天线，向外辐射噪声信号，所以要多点接地。通常频率在 1MHz 以下用一点接地，频率在 10MHz 以上用多点接地。

一点接地又分单级电路一点接地和多级电路一点接地两种情况。

图 11-25 所示为单级电路的一点接地方式。图 11-25 中单级选频放大器电路中有 7 个线端需要接地，如果只从原理图的要求进行接线，则这 7 个线端可以任意接在接地母线的各个点上，如图 11-25 (a) 所示。由于母线本身存在电阻，不同点间的电位差就有可能成为这级电路的干扰信号。因此采用图 11-25 (b) 所示的一点接地方式就会避免这种现象的发生。

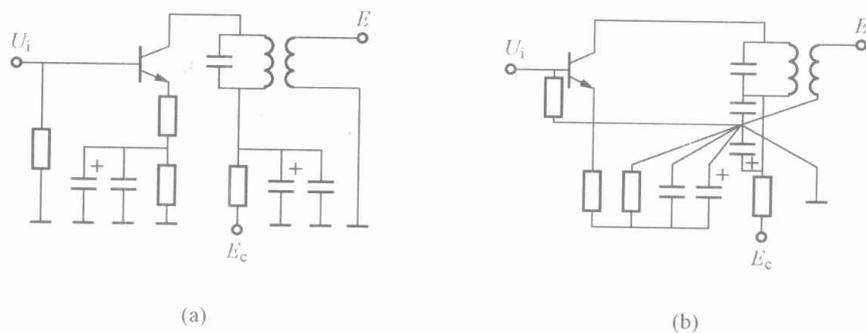


图 11-25 单级电路的一点接地

(a) 任意点接地；(b) 一点接地

图 11-26 所示为多级电路的一点接地方式。在图 11-26 (a) 所示的多级电路的串联接地中，多级电路通过一段公用地线后再在一点接地。它虽然避免了好点接地可能产生的干扰，但是在这段公用地线上仍存在着 A、B、C 三点不同的对地电位差。当各级电平相差较大时，高电平电路将会产生较大的地电流干扰到低电平电路中去。由于这种接地方式布线简便，因此常用在级数不多、各种电平相差不大以及抗干扰能力较强的数字电路中。图 11-26 (b) 采用了并联接地方式。在这种方式中，各电路的接地电位只与本电路的地电流和导线阻抗有关，各电路的地电流之间不会形成耦合。这种接地方法最适用于低频电路，共接地线

噪声得到有效抑制。但是，这种接地方式不能用于高频。因为许多根相互靠近又很长的导线，对于高频信号会呈现出电感而使地线阻抗增加，同时也会造成各地线间的电感耦合，而且地线间的分布电容也会造成彼此耦合。

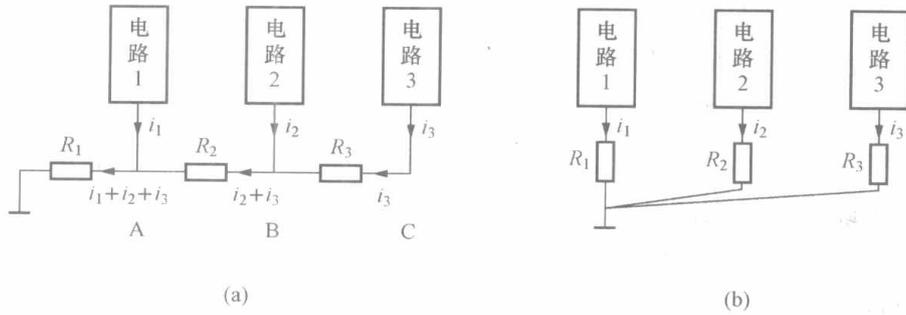


图 11-26 多级电路的一点接地
(a) 串联接地；(b) 并联接地

上述两种接地都属于一点接地方式，主要用于低频系统。在高频系统中通常采用多点接地方式，如图 11-27 所示。在这种系统中各个电路或元件的地线以最短的距离就近连到地线汇流排（通常是金属底板）上。因为地线很短（通常远小于 25mm），底板表面镀银，所以它们的阻抗都很小。多点接地不能用在低频系统中，因为各个电路的地电流流过地线汇流排的电阻会产生公共阻抗耦合噪声。

一般的选择标准是，在信号频率低于 1MHz 时，应采用单点接地方式；而当信号频率高于 10MHz 时，采用多点接地系统是最好的。对于频率处于 1~10MHz 之间的系统，可以采用单点接地方式，但地线长度应小于信号波长的 1/20。如不能满足这一要求，应采用多点接地。

(2) 检测系统接地。一个系统如果在两点接地，例如传感器在现场接地，检测装置部分在主控室接地，由于大地各处电位是不相同的，两点接地会产生较大的共模干扰电压。它所产生的干扰电流流经信号线，转化为差模干扰，对检测装置带来很大的影响。

例如在图 11-28 中， U_s 、 R_s 为信号电压及其内阻， R_1 、 R_2 为外传输线等效电阻， R_i 为放大器的输入电阻， U_G 、 R_G 为两接地点之间的地电位差和地电阻。

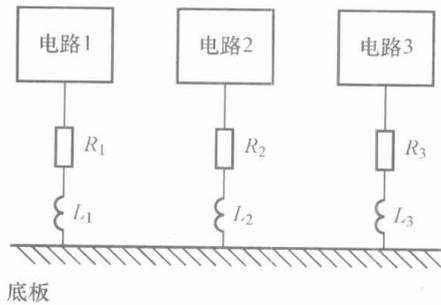


图 11-27 多点接地方式

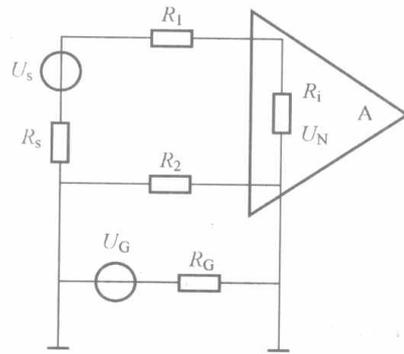


图 11-28 检测装置的两点接地

设 $U_G=100\text{mV}$ ， $R_G=0.1\Omega$ ， $R_s=1\text{k}\Omega$ ， $R_1=R_2=1\Omega$ ， $R_i=10\text{k}\Omega$ ，则可计算出干扰电压 $U_N=90\text{mV}$ ，即 100mV 的地电压几乎都加到放大器输入端上，这样可能会造成信号电压被干扰电压淹没的严重后果，使系统无法正常工作。将上述问题改为一点接地，并保持信号

源与地隔离，系统只在放大器的输入处一点接地，则上述干扰将下降到微伏级。由此可见，一点接地可以使干扰得到显著的抑制，是抑制共模干扰的重要技术措施。

通常检测系统至少有三个分开的地线，即信号地线、保护地线和电源地线。这三种地线应分开设置，最后要汇集在一起，在一点上再通过专用地线与大地相连，构成系统地线。系统地线包括地线带、接地干线和接地极板。图 11-29 说明了这三种地线的接地方式。若使用交流电源，电源地线和保护地线相接，干扰电流不可能在信号电路中流动，避免了因公共地线各点电位不均所产生的干扰。这是一种消除共阻抗耦合干扰的重要方法。

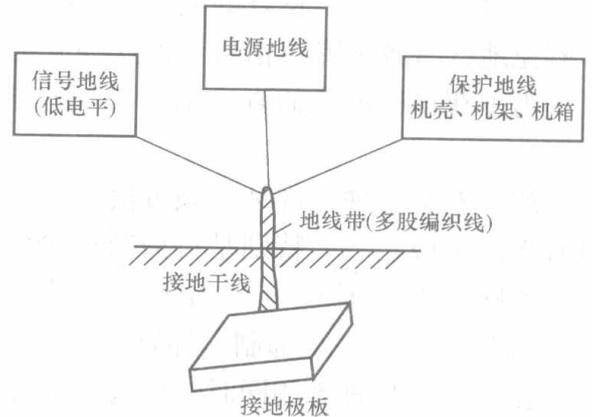


图 11-29 各种地线的分开设置

3. 信号回路正确接地

一般仪表内部电路的基准电位为信号回路公用端子的电位，该公用端子与仪表接地端子是绝缘的，即仪表内部电路的“地”是浮空“逻辑地”，“逻辑地”保证内部电路各点正确电位。仪表接地端子连接大地，实现仪表的“屏蔽接地”，有效抑制外部干扰。

在出现信号回路接地时，一般要采用以下方法。

(1) 信号回路单点接地：所谓单点接地即或者现场信号源接地，或者控制室接地，两者只取其一。

(2) 信号回路隔离接地：当同一信号回路既要求现场信号源接地，又要求控制室一侧接地时，可用变压器耦合型隔离器（如配电器、隔离型安全栅等）或光电隔离器，把两接地点之间的信号隔开。

(3) 信号回路相关接地点等电位：当信号回路两端同时接地时，可以使用等电位方法有效抑制地回路产生的干扰。

11.3.5 浮置技术

浮置又称浮空、浮接。如果检测装置的输入放大器的公共线，既不接机壳也不接大地，则称为浮空。浮空的目的是要阻断干扰电流的通路。浮空后，检测电路的公共线与大地（或机壳）之间的阻抗很大。被浮置的测量系统，测量电路与机壳或大地之间无直流联系。

例如图 11-30 所示的测温系统，其前置放大器通过三个变压器与外界联系。B1 是输出变压器，B2 是反馈变压器，B3 是电源变压器。前置放大器的两个输入端子均不接外壳和屏蔽层，也不接大地。两层屏蔽之间互相绝缘，外层屏蔽接大地，内层屏蔽延伸到信号源处接

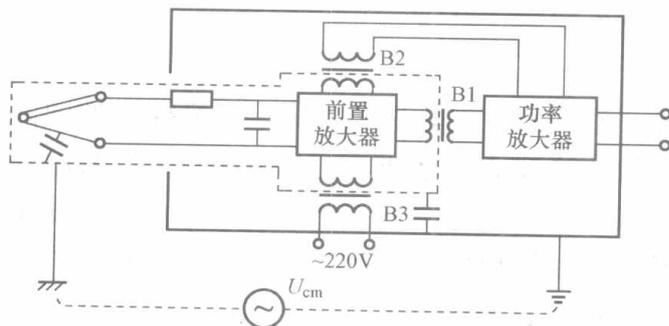


图 11-30 浮置的温度测量系统

地。从图 11-30 中可以看出，采用浮置后地电位差所造成的干扰电流大大减小，而且该电流为容性漏电流。

浮置与屏蔽接地相反，它是通过阻断干扰电流的通路实现抗干扰的。测量系统被浮置后，明显地加大了系统的信号放大器公共线与大地或外壳之间的阻抗，大大减小了共模干扰电流。但由于有寄生电容

的存在,容性漏电流干扰依然存在。

11.3.6 加装滤波器

有时尽管采用了良好的电、磁屏蔽措施,但在传感器信号输出到下一环节的过程中仍不可避免地含有各种噪声信号,而这些无用的信号将同有用信号一起被与传感器配用的电路放大。为了获得被测量的真实值,必须有效地抑制无用信号的影响,滤波器就可以起到这种作用。

滤波器是一种允许某一频带信号通过,而阻止某些频带信号通过的网络,是抑制干扰的最有效的手段之一,特别是对抑制经导线耦合到电路中的噪声干扰效果更显著。

实践表明,通过电源窜入的干扰噪声,往往占有很宽的频带,可以近似从直流到1000MHz。要想完全抑制这样宽的频率范围的干扰,只采取单一的滤波措施是很难办到的,必须在交流侧和直流侧同时采取滤波措施,而且还要与隔离变压器配合使用,才能收到良好的效果。

当信号源为热电偶等信号变化缓慢的传感器时,利用小体积、低成本的无源RC低通滤波器将对差模干扰产生较好的抑制效果。直流供电的仪表,其直流电源往往被几个电路共用。为了避免通过电源内阻造成几个电路之间互相干扰,应在每个电路的直流进线与地线之间加装退耦滤波器。使用交流电源的测量仪表,经电源线传导耦合到测量电路中的干扰,都会对仪表工作造成影响,因而在交流电源进线端子间加装滤波器是十分必要的。

滤波器的安装和使用应注意以下几点。

(1) 为了防止由于滤波器输入线路和输出线路的感应而导致性能下降,滤波器的输入及输出线必须采用屏蔽电缆或将导线置于金属管中,电缆外壳或金属管应与滤波器外壳连接,并要接地。

(2) 在浮地系统中,滤波器外壳应与设备机架或机箱绝缘,以防止设备带电。

(3) 滤波器接地不仅是为了安全,主要还在于可提高滤波器抑制共模干扰的能力。因此在可能的情况下设备和滤波器均应有可靠的接地装置。在浮地系统中,滤波器和电网之间应接入1:1的隔离变压器,然后将滤波器外壳与系统的地可靠连接。

11.3.7 软件抗干扰技术

采用前面介绍的硬件抗干扰措施抑制干扰是十分必要的,但是由于干扰存在的随机性,尤其是在一些比较恶劣的外部环境下工作的检测装置,抗干扰效果还不够理想。在提高硬件系统抗干扰能力的同时,软件抗干扰以其设计灵活、节省硬件资源、可靠性好越来越受到重视。但必须注意,由软件实现的硬件功能,一般响应时间比硬件实现长。将微机的软件干扰抑制技术与硬件干扰抑制技术相结合,可大大地提高检测装置工作的可靠性。常用的软件干扰抑制技术主要有数字滤波、指令冗余技术、软件陷阱技术等。

1. 数字滤波

数字滤波具有很多硬件滤波器没有的优点。它是由软件算法实现的,不需要增加硬件设备,只要在程序进入控制算法之前,附加一段数字滤波的程序即可。各个通道可以共用一个数字滤波器,而不像硬件滤波器那样存在阻抗匹配问题。它使用灵活,只要改变滤波程序或运算参数,就可实现不同的滤波效果,很容易解决较低频信号的滤波问题。目前先进的数字滤波方法有卡尔曼滤波、自适应滤波、自适应卡尔曼滤波、小波滤波等。常用的数字滤波方法有算术平均值法、中位值法、抑制脉冲算术平均法(复合滤波法)。

(1) 算术平均值法。算术平均值法是对同一采样点连续采样 N 次, 然后取其平均值。算术平均值法是用得最多和最简单的方法, 对周期性波动的信号有良好的平滑作用, 其平滑滤波程度完全取决于 N 。当 N 较大时, 平滑度高, 但灵敏度低, 即外界信号的变化对测量计算结果的影响小; 当 N 较小时, 平滑度低, 但灵敏度高。因此应按具体情况选取 N 。如对一般流量测量, 可取 $N=8\sim 16$; 对压力测量可取 $N=4$ 。

(2) 中位值法。中位值滤波法是对某一被测参数连续采样 n 次 (一般取 n 为奇数), 然后把 n 次采样值按大小排列取中间值为本次采样值。中位值滤波能有效地克服偶然因素引起的波动和脉冲干扰。对温度、液位等缓慢变化的被测参数采用此法能收到良好的滤波效果, 但对于流量、压力等快速变化的参数一般不易采用中位值滤波。

(3) 抑制脉冲算术平均法。从以上的讨论分析可知, 算术平均值对周期性波动信号有良好的平滑作用, 但对脉冲干扰的抑制能力较差。而中位值法有良好的去脉冲干扰能力, 但是由于它受各采样点连续采样次数的限制, 阻碍了其性能的提高。因此, 在实际应用中往往把前面介绍的两种方法结合起来使用, 形成复合滤波算法。其特点是先用中位值法滤掉采样值中的脉冲干扰, 然后把剩下的各采样值进行平滑滤波。

由于这种滤波方法兼容了算术平均值法和中位值法的优点, 所以无论是对缓慢变化的过程信号还是对快速变化的过程信号, 都能起到很好的滤波效果。

2. 冗余技术

当干扰信号通过某种途径作用到 CPU 上, 使 CPU 不能按正常状态执行程序, 从而引起混乱, 这就是所说的程序“跑飞”。对程序“跑飞”后使其恢复正常的—个最简单的方法是通过人工复位, 使 CPU 重新执行程序。采用这种方法虽然简单, 但需要人的参与, 而且复位不及时。因此可从软件设计上考虑在程序“跑飞”时如何自动恢复到正常状态下运行。冗余技术是经常用到的方法, 它包括指令的冗余设计和数据程序的冗余设计。

指令的冗余设计, 就是在一些关键的地方人为地插入一些单字节的空操作指令 NOP。当程序“跑飞”到某条单字节指令上时, 就不会发生将操作数当成指令来执行的错误。应该注意的是, 在一个程序中“指令冗余”不能使用过多, 否则会降低程序的执行效率。

数据和程序的冗余设计的基本方法是在 EPROM 的空白区域, 再写入一些重要的数据表和程序作为备份, 以便系统程序被破坏时仍有备份参数和程序维持系统的正常工作。

抗干扰问题是仪表正确使用中不可忽视的问题, 必须认真分析, 针对具体情况采取有效措施, 必要时采用多种措施并用的手段, 进行隔离、屏蔽、芯线对绞、抑制地回路干扰以及正确接地等。

本章小结

一、干扰的类型

从不同的角度出发, 干扰有不同的分类方式。根据干扰进入信号测量电路的方式以及与有用信号的关系, 可将干扰分为差模干扰和共模干扰。

二、干扰产生的原因

电磁耦合、静电耦合、公共阻抗耦合、外线路附加电动势、不等电位接地、漏电耦合等是产生干扰的主要原因。

三、干扰源形成干扰的三要素

干扰源、耦合通道和接收电路是形成干扰的三个要素。围绕这三个要素，根据具体情况，可以有针对性地采取相应的抗干扰措施。这些措施归纳起来有三条：一是消除干扰源；二是割断干扰耦合路径；三是提高接收电路的抗干扰能力。

四、具体的抗干扰措施

具体的抗干扰措施有隔离（采用隔离变压器和光电耦合技术）、屏蔽（静电屏蔽、电磁屏蔽、低频磁屏蔽和驱动屏蔽）、采用双绞线、实现正确接地（屏蔽接地、信号回路正确接地）、浮置技术、在仪表输入端加装滤波器、软件抗干扰技术（数字滤波技术、指令冗余技术、软件陷阱技术）等。

抗干扰问题是仪表正确使用中不可忽视的问题，必须认真分析，针对具体情况采取有效措施，必要时采用多种措施并用的手段。学习仪表的抗干扰应与电力线路、补偿导线的敷设联系起来，分析原因，指导从事电气和信号线路敷设工作。灵敏度高的仪表线路中均有多种多样的抗干扰措施，认真体会这些措施，对仪表的设计、安装和维护都有重要的意义。

思考题与习题

1. 干扰产生的原因通常有哪些？
2. 什么是差模干扰、共模干扰和共模干扰抑制比？
3. 形成干扰的三要素是什么？研究它们的目的是什么？
4. 常用抗干扰措施有哪些？
5. 屏蔽有哪几类？各有何特点？
6. “接地”的概念是什么？一般有哪几种地线？一点接地和多点接地各有什么特点？
7. 什么是浮置技术？试通过实例加以说明。

第 12 章 检测新技术

随着科学技术与生产水平的高速发展,对检测技术与检测系统的要求越来越高,检测技术的自动化和智能化,成为现代检测技术的重要标志。由于计算机技术、数字信号处理技术和人工智能技术等高新技术在检测技术与仪器仪表领域的应用,使得检测技术发生了质的变化。各种检测新技术的迅速发展和应用,使得检测技术无论在深度和广度上都得到了进一步的发展。其中,软测量技术、多传感器信息融合技术、虚拟仪器技术等成为检测技术与仪器仪表领域新的组成部分,并在许多领域发挥了重要的作用。

12.1 现场信号的采集(信号的调理与采集)

近年来,随着生产过程自动化水平的不断提高,以微机为核心的智能仪表和智能测控系统在生产现场使用越来越广泛,对现场信号的采集技术要求不断提高,传统的单一信号的信号变送器已不适应现今对多参数、实时信号的采集。现代智能测控系统对信号采集的要求是:功能多样、适应性强、采集信息量大、实时性要求高等。所以,具备这些特点的各种信号调理与采集的板、卡和机柜在现场应用越来越多。

数据采集的任务是采集被测信号,并经 ADC(模数转换器)将其转换成数字量。一个典型的数据采集系统一般由信号调理电路、数据采集电路、计算机通信电路等组成,其原理框图如图 12-1 所示。

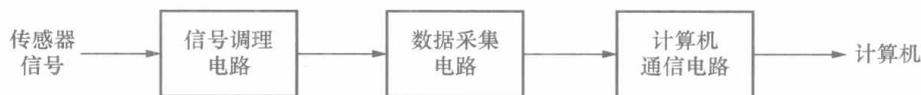


图 12-1 数据采集系统框图

12.1.1 信号的类型

在对现场信号采集之前,需用传感器完成信号的获取,并将之转换为可以采集的有用信号。有用信号一般表现为两种类型,即模拟信号和数字信号。

模拟信号可以分为静态信号和动态信号,动态信号又分为时域信号和频域信号。

(1) 静态信号。相对于时间不变化或缓慢变化的信号,也可称为直流信号,例如温度、液位、电源电压、流量等。由于直流信号是静态或变化速率缓慢的,所以要更注重测量该信号幅值的精确度而非时间或变化速率,对直流信号一般可以采用比较小的采样频率。

(2) 动态信号。相对于时间变化较快的信号。如果需要了解它的波形,则把它作为一个时域信号来处理。时域信号常用峰值、到达峰值的时间、上升下降时间、斜率及峰值的形状来表示。为了测量时域信号的形状,必须在一系列准确的时刻测量单个幅值,这时候需要比较高的采样频率。例如要检测一个快速的脉冲,采样周期必须小于脉冲周期;如果关心这个脉冲的上升、下降时间的话,那么就应用更高的采样频率。

如果需要了解动态信号的频率成分,则可把它作为一个频域信号来处理。要得到准确的

频率信息，采样频率必须满足采样定理，即采样频率大于信号最大频率成分的两倍。工程实际中一般使用信号最高频率成分 4~10 倍作为采样频率。

数字信号有两种形式，即通断信号和脉冲信号。

(1) 通断信号。常用“1”和“0”，或“是”和“非”来表示，故又称开关量信号；它与信号的即时数字状态有关，TTL 电路的输出就是常见的通断信号。

(2) 脉冲信号。由一系列状态变化组成，它可以由状态变化的数目、变化发生的速率以及单个或多个状态之间的时间来表示。例如码盘式传感器的输出就是脉冲序列信号，它可以用数字逻辑电路来测量。

12.1.2 信号的调理

数字信号的采集一般采用数字电路即可完成，采集前一般不需要进行信号调理。

对于各种模拟信号，需要不同的传感器首先将其转换为电信号。由于大多数传感器输出信号非常小，且对噪声非常敏感。因此，在将它们转换为数字量前常需要进行放大、滤波和隔离等处理，即信号调理，完成这项工作的硬件设备，称为信号调理器。图 12-2 所示为一些常见信号所需要的信号调理。

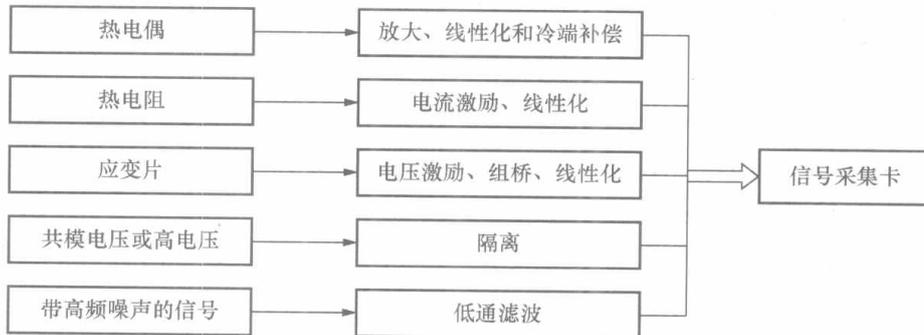


图 12-2 常见信号所需的信号调理

信号调理电路一般包括放大、隔离、滤波、线性化处理及传感器激励等部分。

(1) 放大。放大是最常见的一种信号调理。对电信号的放大主要有两个作用：提高信号模数转换的精度和减少噪声。将有用电压区间的值放大，可以增加转换后数字信号的精度，提高信噪比（SNR）。虽然数据采集设备也有对信号进行放大的作用，但它同时也将噪声放大；若在信号源附近的信号调理模块中放大信号，则噪声的破坏作用就会被降低，从而使信噪比提高。使用屏蔽电缆或双绞线，要尽量缩短电缆长度以减少噪声。将线缆远离交流电源线有助于减少 50~60Hz 的噪声。

(2) 隔离。隔离的作用是将传感器信号同计算机信号隔开，保证系统安全和被测信号的准确。例如，当被检信号含有可能对计算机或人体有害的高压脉冲时，则会损坏计算机或伤害操作者。进行隔离的另一个原因是确保数据采集设备的测量不受地电位差异的影响。因为信号地和数据采集设备地的电位不一定相同，当地电位相差很大时，可能影响测量准确度，甚至损坏测试系统。

(3) 滤波。滤波的作用是将无用信号从有用信号中滤除。许多信号调理设备中都有 4Hz 的低通滤波器，它适合于滤除输电线 50Hz 的交流噪声；另一些常见的滤波器类型包括低通、高通和带通滤波器，可以有效地选择有用信号，提高模数转换的精度，滤除无用信号。

(4) 线性化处理。许多传感器的输入—输出特性是非线性的，故应先将非线性关系近似

为线性关系,即线性化处理,从而使电压信号与物理单位之间实现正确换算,提高测量的准确性。

(5) 传感器激励。应变片、热电阻等许多传感器都需要外部电压和电流的激励来进行物理现象的测试。一些信号调理设备中就可以提供这些必要的激励。

12.1.3 信号的采集

信号的采集就是将被测信号如温度、压力、电压、电流等,转换为数字量并传递到计算机中。典型的信号采集系统包括采样—量化—编码三个过程,如图12-3所示。

(1) 采样。采样是以离散时间间隔为基准(一组脉冲序列)对连续的模拟信号 $x(t)$ 进行测量。脉冲序列可以看作是一个采样开关,只在开关闭合的短时间内允许信号通过,相当于用1去乘输入信号,输出信号等于此刻相应的输入值。所以,采样后的时间离散信号 $x(n)$ 为一系列的窄脉冲,它的包络线与输入信号相同。

采样是按一定的采样时间间隔 T 进行的, T 的倒数 $f_s=1/T$ 称为采样频率。为了使采样信号可以不失真地恢复成原始信号,根据采样定理,采样频率至少是被测信号最高频率的两倍才不至于产生波形失真。

(2) 量化和编码。输入信号经过采样后,还需要将其转换为数字形式。将一组连续的模拟信号变换为一组离散值的过程称为量化。量化的过程是通过 A/D 转换器来完成的。

量化的精度由 A/D 转换器的位数 n 来决定,当输入模拟信号的电压范围为 $0 \sim U_{FS}$ 时,相邻两个量化电平的间隔为

$$\Delta = U_{FS}/2^n \quad (12-1)$$

在量化之后,即可按照一定的编码规则进行编码,如一个8位二进制的编码为:000、001、010、011、100、101、110、111,分别代表0、1、2、3、4、5、6、7。

12.1.4 数据采集卡的组成与功能

12.1.4.1 数据采集卡的组成

目前一个典型的数据采集系统一般由数据采集卡(或装置)和计算机以及相应软件组成。数据采集卡上装有信号调理电路、采样保持电路、模数转换电路等系统的前向通道各单元,同时还设置有数据输出的后向通道。这种数据采集卡可直接插入计算机内的任意总线扩展槽内,与计算机组成数据采集系统。

数据采集卡主要由以下几个部分组成。

(1) 测量放大器。它是数据采集系统的第一个环节,其主要功能是将测量信号放大或衰减到采样环节的量程范围内,同时抑制共模干扰、提高信噪比和信号质量。通常实际采集系统中测量放大器的增益是可调的,设计者可以根据输入信号的幅值大小选择不同的增益倍

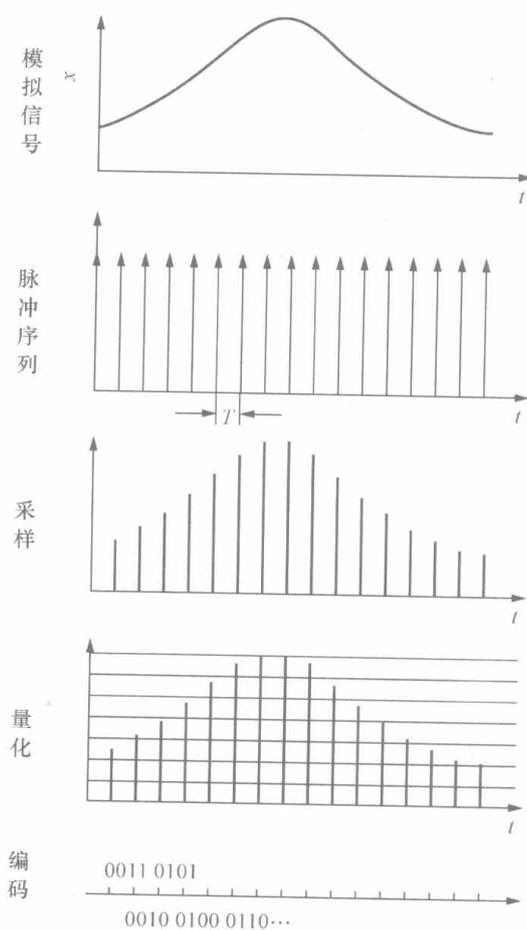


图12-3 模拟信号的采集与转换的过程

数。它的主要性能指标为:

- 1) 高输入阻抗 ($10^{12} \sim 10^{14} \Omega$)。
- 2) 低偏流 ($< 10^{-5} \text{ A}$)。
- 3) 高共模抑制比 ($> 10^6$)。
- 4) 对称差分输入。
- 5) 工作稳定性。
- 6) 单端输出。

测量放大器的性能直接决定了数据采集系统的精度,同时数据采集卡的成本很大程度也取决于测量放大器的类型。

(2) 模拟多路开关。模拟多路开关是一个具有公共输出端的开关阵列,用于从多路模拟输入中选择一路输出,从而实现多参数多路信号的分时采集。通过它可以利用一个高性能的 A/D 转换器来测量多路模拟信号。

模拟多路开关由模拟开关、独立的开关驱动器和逻辑控制三部分组成。驱动器提供开关通断信号;控制逻辑确定切换通道的顺序。多路模拟开关一般有三种工作方式。

1) 顺序方式:按照预先确定的某种顺序依次接通。

2) 随机访问方式:根据通道地址寻址,随机访问选择采集通道。当数据采集系统由计算机控制时,通常采用随机访问方式。

3) 手控方式:通过手动开关,使多路开关从一个通道进到另一通道。

模拟多路开关分为两大类,即机电型开关和半导体开关。机电型开关速度较低,一般在每秒一千次以下。半导体开关体积小、可靠性好,工作速度可达每秒百万次,并能保持一定的准确度。

(3) 采样/保持器。采样/保持器 (S/H) 取出待测信号在某一瞬时的值,即实现了信号的时间离散化,并在 A/D 转换过程中保持不变。采样/保持器信号的存储时间范围从微秒以下到几分钟。如果被测信号变化很缓慢,也可以不用采样/保持器。

(4) A/D 转换器。A/D 转换器将输入的电压信号转化为数字量输出,并完成信号幅值的量化。数据采集卡的核心是 A/D 转换器,并附有控制软件。A/D 转换器的基本参数有通道数、采样频率、分辨率和输入信号范围等。

A/D 转换器类型很多,常用的有计数型、逐次逼近型、双积分型等。

以上四个部分是组成数据采集卡的主要部分。其他相关电路如定时/计数器、总线接口电路等也集成在一块电路板上,共同完成对输入信号的数据采集、放大及模数转换等任务。很多数据采集卡上还装有数/模 (D/A) 转换器,它处在 PC 的输出通道,用于将计算机输出的数字量转换为模拟量,从而实现控制功能。不同的数据采集卡的复杂程度和功能都有所不同,应根据需要合理选择使用。

一个好的数据采集卡不仅应具备良好的性能和高可靠性,还应提供高性能的驱动程序和简单易用的高层语言接口,使用户能较快地建立可靠的应用系统。近年来,由于多层电路板、可编程仪器放大器、即插即用、系统定时控制器、多数据采集板实时系统集成总线、高速数据采集的双缓冲区以及实现数据高速传送的中断、DMA 等技术的应用,使得最新的数据采集卡能保证仪器级的高准确度与可靠性。

12.1.4.2 数据采集卡的信号采集

接入数据采集卡的信号根据参考点的不同,可以分为接地信号和浮动信号两种类型,如图12-4所示。

接地信号是信号的一端直接接地的电压信号,它的参考点是系统地(例如大地或建筑物的地)。最常见的接地信号源是通过墙壁上的电源插座接入大地的设备,例如信号发生器和电源供电设备等。

浮动信号是不连接到大地等绝对参考点的电压信号。常见的浮动信号有电池组、电池供电源、热电偶、变压器、隔离放大器等设备。

对于不同信号的测量,数据采集卡可以有三种不同的连接方式:差分方式DIFF(differential)、单端有参考地方式RSE(referenced single-ended)和单端无参考地方式NRSE(nonreferenced single-ended)。

(1) 差分输入方式。在差分输入方式中,信号的正、负极分别接入两个信道,所有的输入信号都有各自的地参考点,如图12-5所示。通常差分测试系统是一种理想的测试系统,它不仅可以抑制接地回路的感应误差,还在一定程度上抑制拾取的环境噪声。缺点是:每一路信号都占用两个信道,是单端测试系统的两倍,造成资源的浪费。所以,一般在输入信号满足下列条件时,才使用差分测试系统。

- 1) 低电平信号,如小于1V的信号;
- 2) 信号电缆较长或没有护套,环境噪声较大;
- 3) 任何一个输入信号要求单独的参考点。

单端输入方式中,所有信号都参考一个公共参考点即仪器放大器的负极。当输入信号符合以下条件时可以使用单端输入方式。

- 1) 高电平信号,通常大于1V;
- 2) 电缆比较短的(通常小于5m)或有合适护套,环境无噪声;

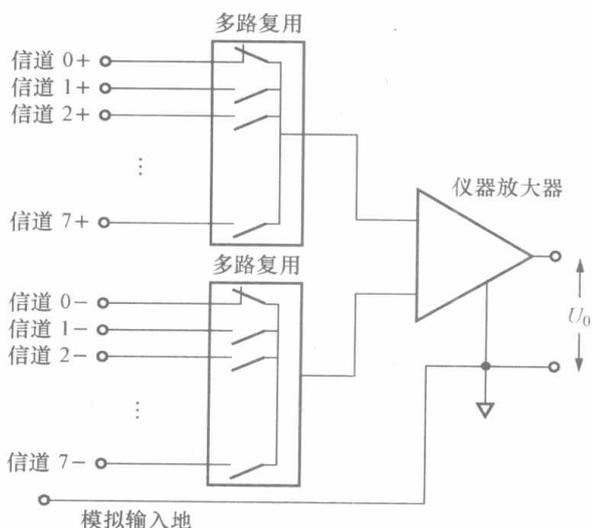


图 12-5 差分输入方式

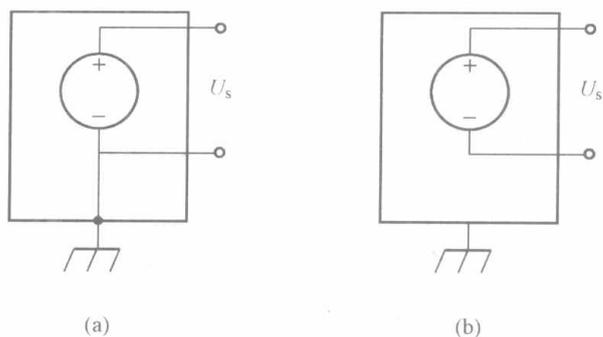


图 12-4 信号的类型

(a) 接地信号; (b) 浮动信号

3) 所有信号在信号源可以共享一个公共参考点。

单端测试系统分为有参考地输入方式和无参考地输入方式。

(2) 单端有参考地输入方式。单端有参考地输入方式用于测量浮动信号,它把信号参考点与仪器模拟输入地连接起来,如图12-6所示。

(3) 单端无参考地输入方式。单端无参考地输入方式用于测试接地信号。与单端有参考地测试系统不同的是:因为所有输入信号都已经接地了,所以信号参考点不需要再接地,如图12-7所示。

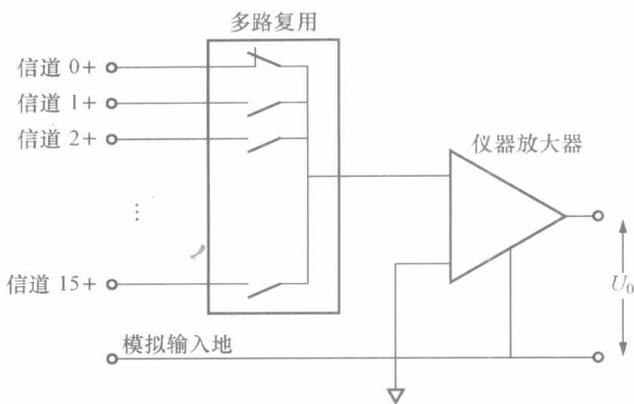


图 12-6 单端有参考地输入方式

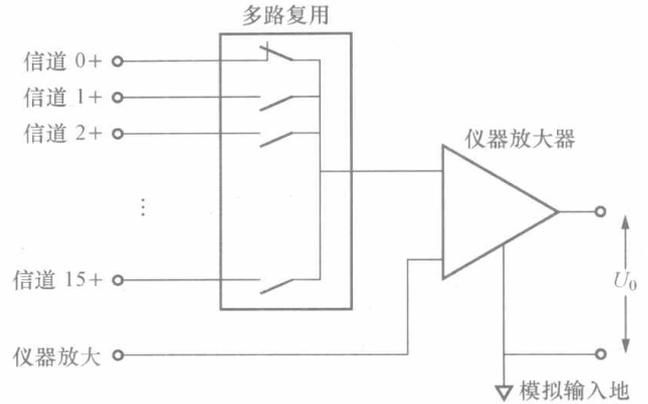


图 12-7 单端无参考地输入方式

12.1.4.3 数据采集卡的几个性能指标

(1) 分辨率：是数据采集卡的精度指标，用模/数转换器的位数来表示。位数越多，分辨率越高，测量就越精确，可区分的输入电压信号就越小。

(2) 量程范围：由模/数转换器能够数字化的最大和最小模拟信号的电压值来确定。一般多功能数据采集卡提供多种可选范围来处理不同的电压，这样能将信号范围与模/数转换器范围进行匹配，可以有效地利用分辨率，得到精确的测量信号。

其他指标还有采样频率、通道数、放大器增益等。

此外，数据采集卡需要相应的驱动软件才能发挥作用，因此，商品化的数据采集卡都配套有相应的数据采集卡驱动软件。数据采集卡的驱动软件的主要功能有：数据采集卡的连接、操作管理和资源管理，并且驱动软件隐含了低级、复杂的硬件编程细节，而提供给用户简明的操作使用界面，供用户在此基础上编写应用软件，减少用户编写驱动软件的工作。

12.2 软测量技术

目前，由于技术或经济的原因，在许多工业生产过程中，存在大量尚难以或暂时无法通过传感器直接进行检测的变量。这些变量对于提高产品质量和保证生产安全起着重要的作用，是在工业生产过程中必须加以严格监控的过程参数。如锅炉煤粉仓的粉位、多相流流量、精馏塔的产品组分浓度、生物发酵罐中的生物量参数及高炉铁水的含硅量等。为解决这类变量的检测与控制，一方面可以通过开发和使用新型检测仪表或传感器来解决；另一方面，可以应用软测量技术构造软仪表来解决，且这项技术在近年来取得了重大发展。

12.2.1 软测量的概念与特点

12.2.1.1 软测量的概念

软测量就是一种利用较易在线测量的辅助变量和离线分析信息去估计不可测或难测变量的方法。采集过程中比较容易测量的变量称为辅助变量；难以直接检测或控制的待测过程变量称为主导变量。它的基本思想就是：依据某种最优准则，选择一组既与主导变量有密切联系又容易测量的变量，通过构造某种数学关系，实现对主导变量的在线估计。

一般情况下，被测对象的输入输出关系如图 12-8 所示。图 12-8 中 y 代表主导变量， θ 代表可测的辅助变量， d 和 u 分别表示可测的干扰和控制变量。软测量的目的，就是利用所

有可获得的辅助变量求取主导变量的“最优”估计值 \hat{y} ，构造从可测信息集 $\hat{\theta}$ 到 \hat{y} 的映射，即

$$\hat{y} = K(s)\hat{\theta}(s) \quad (12-2)$$

一般地，可测信息集 $\hat{\theta}$ 包括所有的可测主导变量 y （或主导变量 y 中部分可测的量）、辅助变量 θ 、控制变量 u 和可测干扰 d 。在这样的框架结构下， \hat{y} 的性能将依赖于过程的描述、噪声和扰动的特性、辅助变量的选取以及“最优”的含义，即给定的某种准则。

可见，软测量技术是一种间接测量技术，它是以易测的辅助变量为基础，利用易测的辅助变量和待测的主导变量过程之间的数学关系（也称为软测量模型），通过各种数学计算和估计，采用软件编程以计算机程序的形式实现对待测过程变量的测量。以软测量技术为基础，实现软测量功能的实体可称为软仪表。

12.2.1.2 软测量技术的特点

软测量的基本思想其实在许多检测系统中已得到应用。例如针对复杂流动的相关式流量测量仪表，其基本原理是在流体流动管道上、下游分别安装两个传感器获取流动噪声信号，通过计算两个信号的相关函数并由其峰值位置获得流体流经两个传感器所需时间，根据两个传感器之间的安装距离和管道有关参数即可进一步推算出流体流速和流量。近年来，软测量技术在许多工业实际装置上得到了成功的应用，正逐渐成为针对复杂工业过程检测和控制在一种新的测量技术。

相对于传统的测量技术，软测量技术具有以下特点：动态响应快、功能强、通用性好、灵活性强、性能价格比高、适用范围宽；而且硬件配置较灵活、开发成本低、维护相对容易，且各种变量检测可以集中于一台工业控制计算机上，无需再为每个待测变量配置新的硬件。软测量能够解决许多用传统仪表和检测手段无法解决的难题，是对传统测量手段的重要补充。

现在，在工业控制领域，DCS 技术得到了广泛的使用。各种反映生产过程工况的过程参数由传感器测量，并传送给监控计算机进行集中的监控和存储，这就为软测量的实现提供了坚实的物质基础。软测量技术可以利用这一硬件平台，仅需找到各种数学模型，通过软件技术达到对难测信号的检测和控制，而不必增加任何硬件成本。

12.2.2 软测量技术的主要内容

软测量技术的内容主要包括以下四个方面。

- (1) 辅助变量的选择；
- (2) 测量数据的处理；
- (3) 软测量模型的建立；
- (4) 模型的在线校正。

12.2.2.1 辅助变量的选择

辅助变量的选择就是从可测变量集中确定适当数目的变量构成辅助变量集，它是建立软测量模型的第一步，对于软测量的成功与否相当重要。辅助变量的选择一般是从机理分析入手；若缺乏机理知识，则可利用回归分析的方法找出影响被测主导变量的各种因素，但这需要大量的观测数据。



图 12-8 被测对象的输入输出关系

辅助变量的选择包括变量类型、变量数目和检测点的选择。这三个方面是互相关联、互相影响的,由被测过程的特性决定。此外,还受设备价格和可靠性、安装和维护的难易程度等外部因素制约。

(1) 变量类型的选择。变量类型的选择要考虑到变量的灵敏性、特异性、过程适用性、精确性和鲁棒性等特性。针对一个具体过程,选择范围就是对象的可测变量集,通常是有限的。

(2) 变量数目的选择。辅助变量可选数目的下限是被估计的变量数。而最佳数目则与过程的自由度、测量噪声以及模型的不确定性有关。首先,从系统的自由度出发,确定二次变量的最小数目;然后,结合具体过程的特点适当增加,以更好地处理动态性质等问题。一般的做法是:选择辅助变量往往先根据工艺知识,初选出与主导变量关系最为密切的变量,然后通过相关分析与工艺专家知识相结合,最后筛选出数量上比较合适的辅助变量。

(3) 检测点位置的选择。检测点位置的选择方案很多,十分灵活。主要根据工作过程的特点选择检测精度高,且能反映过程参数变化的位置作为检测点的位置。

12.2.2.2 测量数据的处理

从现场采集的测量数据,由于受到仪表精确度的影响,一般都不可避免地带有误差;同时,这些数据在传输过程中还会受到外部因素干扰的影响。若将这些测量数据直接用于软测量,可能导致软仪表测量性能的大幅度下降,严重时甚至导致软测量的失败。

输入数据的正确性和可靠性直接关系到软仪表的精度,因此输入数据的预处理成为软测量技术中必不可少的一步。测量数据的处理主要包括数据变换和误差处理两部分内容。

(1) 数据变换:是指对传感器测量的数据进行标度变换、线性化处理、加权函数等方面的工作。其中,标度变换可以改善算法的精度和稳定性;线性化处理可以有效地降低被测对象的非线性特性;权函数可实现对变量动态特性的补偿。数据变换可以直接影响过程模型的精度和非线性映射能力,以及数值优化算法的运行结果。

数据转换包括直接转换和寻找新变量代替原变量两种方法。例如,对工业过程中常出现的在数值上相差几个数量级的测量数据,就应利用合适的因子进行变换,这样可以有效地利用各种测量数据和信息。对于原测量对象的非线性特性,可以采用诸如进行对数转换的方法,从而有效地降低测量对象的非线性。

(2) 误差处理:对测量数据进行误差处理主要是对随机误差和粗大误差的处理。

随机误差主要受随机因素的影响,如操作过程的微小波动或检测信号的噪声等。它的处理通常采用数字滤波的方法,如中值滤波、算术平均值滤波、高低通滤波、带通滤波和一阶惯性滤波等。随着对系统精度要求提高,又提出了数据协调技术,数据协调技术的实现方法有主元分析法、正交分解法等。

粗大误差主要是指由于仪表的系统偏差、传感器失灵及其他操作失误带来的误差,它的特点是数据偏离比较严重。粗大误差的出现几率很小,但它的存在会严重恶化数据的品质,可能导致软测量甚至整个过程优化的失效。常用的处理方法有:统计假设检验法(如残差分析法、校正量分析法等)、广义似然比法和贝叶斯法等。对于特别重要的过程变量还可采用硬件冗余的方法以提高测量数据的安全性。

12.2.2.3 软测量模型的建立

软测量模型是软测量技术的核心,它不同于一般意义下的数学模型,它强调的是通过二

次变量来获得对主导变量的最佳估计，常用的方法有工艺机理分析、回归分析、状态估计、模式识别、人工神经网络、模糊数学、过程层析成像、相关分析等方法。

12.2.2.4 测量模型的在线校正

任何软测量模型的适应能力都是有限的，它不可能适应所有的工况。工业实际装置在运行过程中，随着操作条件的变化，其过程对象特性和工作点不可避免地要发生变化和漂移，因此在软仪表的应用过程中，必须对软测量模型进行在线校正才能适应新的工况。

软测量模型在线校正包括模型结构的优化和模型参数的修正两方面。具体方法有Kalman滤波技术在线修正模型参数，更多的则是利用了分析仪表的离线测量值进行在线校正。为解决软仪表模型结构在线校正和实时性两方面的矛盾，有人提出了短期学习和长期学习的校正方法。短期学习是在不改变模型结构的情况下，根据新采集的数据对模型中的有关系数进行更新；而长期学习则是在原料、工况等发生较大变化时，利用新采集的较多数据重新建立模型。在线校正有自适应法、增量法和多时标法。根据实际过程的要求，多采用模型参数自校正方法。但是，尽管在线校正如此重要，目前在软测量技术中，有效的在线校正方法仍不够多，今后必须加强这方面的研究以适应实际的需要。

12.2.3 常用的软测量方法

常用的软测量方法实质上就是建立软测量模型的方法，其中常用的方法包括工艺机理分析、回归分析、状态估计、模式识别、人工神经网络、过程层析成像、相关分析等方法。下面就几种主要的软测量方法进行介绍。

1. 基于工艺机理分析方法

基于工艺机理分析的软测量建模主要是运用质量平衡方程和物理、化学方程，如物料平衡方程、能量平衡方程、传热方程、化学反应动力学方程、热力学方程和流体力学方程等，通过对过程对象的机理分析，经过合理简化确定不可测主导变量与可测辅助变量（即各可测过程变量）之间的数学关系，建立起估计主导变量的数学模型，这种模型通常称为机理模型。

这类模型一般比较复杂，模型中需要确定的系数较多；同时，由于对实际工业生产过程机理的认识还不够，因此要建立机理模型来估计一些过程变量还有一定的困难。该方法不适用于机理尚不完全清楚的复杂工业过程。这类方法也可以与其他方法配合使用。

2. 基于状态估计方法

如果一个被测对象的状态变量中包括主导变量，辅助变量由可以直接测量得到的变量组成，且被测对象的状态方程和观测方程已知，则可以采用状态估计的方法来完成对待测变量的软测量。

假定已知对象的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ev \\ y = Cx \\ \theta = C_0x + w \end{cases} \quad (12-3)$$

式中 x ——过程的状态向量；

y 、 θ ——分别表示过程的主导变量和辅助变量；

v 、 w ——白噪声；

u ——过程输入变量；

A 、 B 、 C 、 E ——状态方程的系数矩阵。

如果系统的状态关于辅助变量完全可观, 则该软测量就转化为典型的状态观测和状态估计问题。采用 Kalman 滤波器可以从辅助变量中得到状态的估计值。目前扩展 Kalman 滤波器、自适应 Kalman 滤波器和扩展 Luenberger 观测器已成功用于发酵反应的发酵率和尾气中二氧化碳含量、精馏塔塔顶产品组成、反应器反应速率等参数的软测量问题中。但对于复杂工业过程, 常常会遇到持续缓慢变化或不可测扰动, 此时会导致显著误差。

3. 基于回归分析方法

根据大量的历史操作数据即生产记录数据, 作数学回归分析, 得到操作变量之间的统计规律。此类模型形式简单, 求解方便。但要建立一个精度较高的统计模型, 首先要有准确的、足够多的基础数据, 或通过专门的实验, 取得所需的基础数据; 另外还要选择合理的模型结果。这种建模的优点是, 不必考虑过程机理, 只应用统计回归分析建立系统输入、输出关系; 缺点是由于不必深究机理, 有时所建立的函数关系不能反映复杂的内在机理。

回归分析是多变量统计分析中的一种常用方法, 它可以分为线性回归和非线性回归, 一元回归和多元回归。为了简单起见, 只介绍线性回归问题。

假设变量 y 是 x_1, x_2, \dots, x_N 的函数, 且满足关系式

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_N x_N \quad (12-4)$$

式中 a_1, a_2, \dots, a_N 为待定系数, 称为 N 元线性回归系数。

若将式 (12-4) 写为矩阵形式为

$$y = a^T x \quad (12-5)$$

其中, $a = (a_1, a_2, \dots, a_N)^T$, $x = (1, x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ 。

回归分析的过程实际上就是求取回归系数的过程。具体做法是, 利用获得的 M 次实验的观测数据 (y_i, x_i) , 其中, $i=1, 2, \dots, M$, 通常 $M \geq N$, 代入

$$y^T = x^T a \quad (12-6)$$

采用最小二乘法求解以上矩阵, 可得 N 元线性回归系数的估计值为

$$\hat{a} = (x^T x)^{-1} x^T y \quad (12-7)$$

以上介绍了多元线性回归的基本方法。工程中, 常用的回归分析方法有多元线性回归 (MLR)、最小二乘法回归 (LS)、部分最小二乘法回归 (PLS)、主元回归分析法 (PCR) 和逐步回归 (MSR) 等。其中比较常用的方法为主元回归分析法 (PCR) 和部分最小二乘法回归 (PLS)。对于线性系统, 采用 PCR 和 PLS 的效果完全一样; 对于非线性系统, 后者效果稍好。工业过程中常通过对生产过程历史数据的回归分析, 建立质量指标的软测量模型, 在线估计产品质量。

回归分析法算法简单, 是建立软测量模型的最常用方法之一。但它同样存在局限性, 如需要较多的数据样本, 对测量误差比较敏感。只能得到变量间的稳态关系是它存在的最大问题。

4. 基于人工神经网络方法

基于人工神经网络的软测量建模方法是近年来研究最多、发展很快和应用范围很广的一种方法。由于能适用于高度非线性和严重不确定性系统, 因此它为了解决复杂系统过程参数的软测量问题提供了一条有效途径。采用人工神经网络进行软测量建模有两种形式: 一种是利用人工神经网络直接建模, 用神经网络来代替常规的数学模型描述辅助变量和主导变量间的关系, 完成由可测信息空间到主导变量的映射; 另一种是与常规模型相结合, 用神经网络来

估计常规模型的模型参数，进而实现软测量。

基于人工神经网络的软测量技术，不需要过多地了解被测对象的工作机理，只需将其等效为一个黑箱，根据被测对象的输入输出数据直接建模。它是将辅助变量作为人工神经网络的输入，主导变量作为其输出，通过网络的学习来解决不可测变量的软测量问题，并且具有较强的鲁棒性。

在软测量技术应用领域里，大多数被测对象都属于非线性、复杂性的系统，要建立较高精度的估计模型是十分困难的；并且工业过程的时变性要求估计模型有较好的自适应性。而基于人工神经网络的软测量技术正好可以解决上述问题。基于神经网络的软测量技术包括数据预处理、训练样本的选取、网络训练等步骤。数据预处理包括数据采集、滤波、格式化（如归一化等）、降维等。经过预处理的数据作为输入样本来训练神经网络，通过对样本数据的学习建立起软测量模型，便可以完成对不可测变量的实时估计。测量效果好坏直接和神经网络的训练相关，如何构造训练样本是其关键。此外，采用更多的训练样本会改善系统模型的精确性和扩大其应用范围。

常用的软测量神经网络一般采用三层结构、两次映射实现工况的非线性拟合。理论上已经证明，两次映射对任意的非线性映射具有万能逼近能力。神经网络的各种算法，如最小二乘法、遗传算法、聚类算法等都是从大量的输入、输出数据中训练出最佳的模型结构，这就要求这些数据必须能如实有效地反映真实工况，从而使模型的适应性能较强，并能够适用于各种生产工况和装置。需要指出的是，神经网络类型和结构、训练样本的空间分布和训练方法对人工神经网络的性能有极大的影响。目前，在软测量建模中广泛应用的人工神经网络结构有 BP 网络、RBF 网络和 RNN 网络等。

BP (Back Propagation) 网络属于多层前向网络 MFN (Multilayer Feedforward Networks)。理论上已经证明，只要多层前向网络允许有足够多的神经元，任何非线性连续函数都可由一个三层前向网络以任意精度来逼近。此外，网络的并行处理信息特点使得网络由输入层至输出层的前向传播相当迅速。

BP 网络是由输入层、一层或多层隐单元、输出层组成的。BP 网络的工作信号正向传播：输入信号从输入层经过隐单元，传向输出层，在输出端产生输出信号。在信号向前传递过程中网络的权值是固定不变的，如果在输出层不能得到期望的输出，则转入误差信号反向传播。误差信号由输出端开始逐层向后传播，在误差信号反向传播的过程中，网络的权值由误差反馈进行调节，通过权值的不断修正使网络的实际输出更接近期望输出。图 12-9 所示为含有一个隐层的 BP 网络示意图。

BP 算法充分利用了多层前向网络的结构优势，在正反向传播过程中每一层的计算都是并行的，算法在理论上比较成熟，且已有许多商用软件可供使用。但 BP 算法存在几个问题：①对一些复杂的问题，训练时间很长，收敛速度太慢；②当输入一个新样本进行权值调整时，可能破坏网络权值对已学习样本的匹配情况；③BP 算法实质上是对目标函数进行负梯度搜索寻优，因此可能陷入局部极小。

近年来，随着人们对人工神经网络研究的深

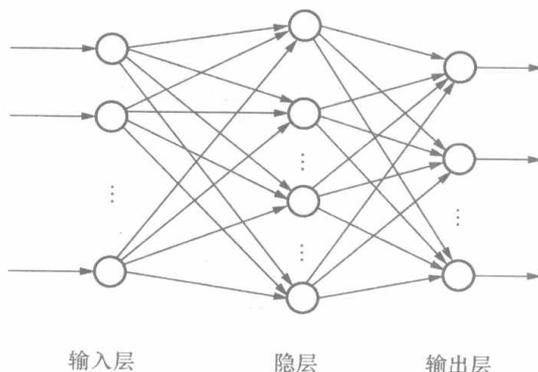


图 12-9 含有一个隐层的 BP 网络示意图

人,其他类型的神经网络也逐渐应用于软测量技术。其中,在各种文献中出现比较多的有模糊神经网络、支持向量机、小波神经网络和CMAC(小脑模型)神经网络等。但到目前为止,实际中使用的人工神经网络基本上都是稳态的,难以迅速适应不可测变量的变化,其准确性依赖于样本的数量和质量。为了解决这些问题,研究人员也提出了很多新的方法,大家可以参考有关文献。

5. 基于模糊技术的方法

模糊技术是基于模糊数学的理论。模糊数学是人们处理复杂系统的一种有效手段,通过模拟人脑的近似推理和综合决策过程,处理模型未知和不精确性的控制问题,使控制算法的可控性、适应性和合理性提高。已经证明,采用模糊模型也可以以任意精度逼近任意的连续非线性函数。该技术应用于软测量领域,适用于复杂系统被测对象呈现亦此亦彼的不确定性,难以用数学表达式描述的情况。

实际应用中常将模糊技术和其他人工智能技术相结合,例如将模糊数学和人工神经网络相结合构成模糊神经网络,将模糊数学和模式识别相结合构成模糊模式识别,这样可互相取长补短,以提高软仪表的效能。

在实际使用中,上述这些方法都具有其优点和局限性,有效地结合在一起使用,会提高软测量模型的精度和适应性。

12.2.4 软测量技术的设计步骤与应用

12.2.4.1 软测量的设计步骤

一般地,软测量技术的开发设计流程包括6个步骤,如图12-10所示。

步骤1: 机理分析、选择辅助变量。

首先要了解和熟悉软测量对象以及整个系统的工艺流程,明确任务。大多数软测量属于灰箱系统,通过机理分析可以确定影响软测量目标的相关变量,并通过分析各变量的可观性、可控性初步选择辅助变量。

步骤2: 建立软测量模型。

建立准确的测量模型是软测量中最为重要的环节。

步骤3: 数据采集和预处理。

在软测量应用的实践中,必须采集大量的数据和对这些数据进行处理,以使所建立的软测量模型以及对主变量的估计值更准确。这些数据包含用于软测量建模的数据和对模型校验的数据,以及辅助变量的测量采集的数据等。

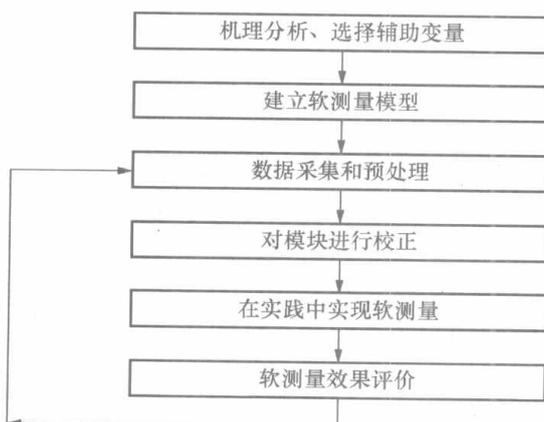


图 12-10 软测量技术的设计流程图

步骤4: 校正软测量模型。

模型的校正模块可以对所设计的软测量模型进行短期和长期校正,以适应不同的需求。为避免突变数据对模型校正的不利影响,短期校正时还将附加一些限制条件。

步骤5: 在实践中实现软测量。

将离线得到的软测量模型和数据采集及预处理模块、模型校正模块以软件的形式嵌入到控制系统中。可以考虑设计安全报警模块和易于操作的用户界面。

步骤 6: 软测量效果评价。

在软测量运行期间,采集软测量对象的实际值和模型估计值,根据比较结果评价该软测量模型能否满足工艺要求。

12.2.4.2 软测量技术在流量测量中的应用

圆管中紊流流动,是工程技术领域最常遇到的流动状态。在水力光滑管条件下,当流体达到充分紊流时,管道截面上的流速分布会满足一定的分布规律(即数学模型);此时管道轴心处的流体流速为截面上的最大流速,由它的大小就可以确定管道截面上流速的具体分布形式。由于特定管道截面上的流速大小直接与流量相关,根据圆形管道的体积流量公式

$q_V = \int_0^R v(r) 2\pi r dr$, 就可以积分算出体积流量的大小,其中 $v(r)$ 为流速分布公式。

常用的紊流流速分布模型主要有三种:指数分布模型、对数分布模型和对数—线性分布模型。由于在不同雷诺数下上述三种模型有不同的表达形式,在管道满足水力光滑和流动达到充分紊流时,可以认为流速分布是雷诺数的函数 $v(r) = f(Re_D)$ 。由此可以得出流体体积流量的大小满足以下方程组

$$\begin{cases} q_V = \int_0^R v(r) 2\pi r dr \\ Re_D = \frac{4}{\pi} \frac{\rho q_V}{D \eta} \\ v(r) = f(Re_D) \end{cases} \quad (12-8)$$

以上方程组为非线性方程组,不能直接用代数方法解出结果。但由此方程组可以得到 $q_V = F(q_V)$ 的函数,它满足 $x_{n+1} = f(x_n)$ 的迭代形式,可以用迭代计算的方法求解此方程组。实验结果表明,迭代过程收敛,即可以求解流量值,且收敛速度很快。

如何运用软测量技术测量出管道流量呢?我们选择基于工艺机理分析的方法,对流体流动状态进行分析,进而得出流动状态与流量的关系:管道满足水力光滑和流动达到充分紊流时,流速分布是雷诺数的函数,即 $v(r) = f(Re_D)$ 。

下面的工作就是确定主导变量和辅助变量。主导变量是管道流量 q_V ;辅助变量选择管道轴心处的流体流速为截面上的最大流速 v_{max} 。由于最大流速 v_{max} 的测量相对于其他点的流速,测量起来更容易,且准确度更高。这种一点法测量流量的方法,我们把它称为最大流速法。那么,软测量模型如何确定?根据现有的知识,描述紊流流速分布的模型主要有三种,即指数分布模型、对数分布模型和对数—线性分布模型;我们的工作就是将这三个模型转换为与雷诺数 Re_D 的函数形式。所以有

$$\frac{v(r)}{v_{max}} = \left(\frac{R-r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (12-9)$$

$$v(r) = A \ln \frac{y}{R} + C \quad (12-10)$$

$$v(r) = A \ln \frac{y}{R} + B \frac{y}{R} + C \quad (12-11)$$

通过实验,我们得出了这三个模型的雷诺数 Re_D 的函数形式:

对于指数分布模型: $n(Re_D) = \sum_{i=0}^7 a_i t^i$ 。其中, $t = Re_D \times 10^{-4}$; a_i 是系数,在不同的雷诺

数范围内,取不同的值。

对于对数分布模型: $A(Re_D) = \sum_{i=0}^8 a_i t^i$, $C = v_{\max}$ 。其中, a_i 是系数, 具体取值可参考有关文献。

对于对数—线性分布模型: $A = \sum_{i=0}^8 a_i t^i$, $B = \sum_{i=0}^8 b_i t^i$, $B + C = v_{\max}$ 。其中, a_i 、 b_i 是系数, 具体取值可参考有关文献。

联立以上公式即可得到流量测量的软测量模型, 将以上软测量模型 $v(r) = f(Re_D)$ 代入式 (12-8), 进行迭代运算, 即可计算出管道的流量 q_V 。

整个软测量系统结合虚拟仪器技术构成, 主要由计算机、应用软件和仪器硬件三部分组成。其中, 仪器硬件即是由流速传感器、差压变送器、信号调理电路、多功能数据采集卡构成; 它将

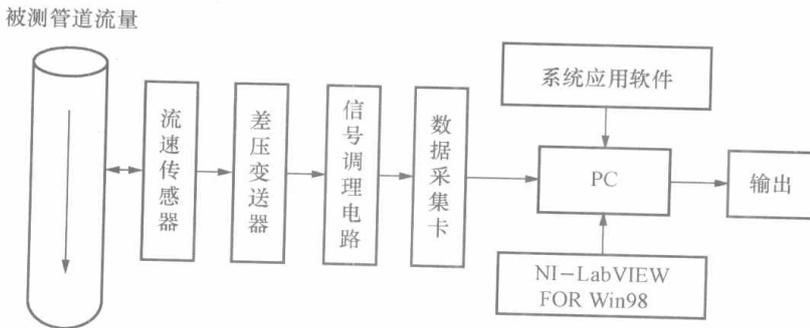


图 12-11 气体流量软测量系统结构

现场信号进行采样, 流速传感器 (一般是毕托管) 测量的是代表最大流速的差压信号 Δp , 然后由差压变送器将差压信号 Δp 转换成 4~20mA 的标准信号, 经信号调理电路由数据采集卡采集到 PC 上。在 PC 和 NI-LabVIEW 软件平台构造基于虚拟仪器的软测量系统, 如图 12-11 所示。

应用上述软测量系统进行气体流量的测量, 测量误差基本控制在 $\pm 3\%$ 以内, 精度最高达 0.1%, 对三种软测量模型进行比较可得, 基于对数分布的软测量模型的测量精度最高, 基本在 $\pm 2\%$ 以内; 其他两种软测量模型的测量精度稍差。

为了提高测量系统的测量精度, 将三种模型的测量结果进行加权算术平均后形成一个新的软测量模型, 实验结果表明它的精度要高于上述三种模型中的任何一种的精度, 测量误差基本控制在 $\pm 1\%$ 左右, 完全可以满足现场测量的要求。主要问题是权值的确定带有人为因素, 还需要通过实验进一步确定新模型的权值大小。

12.3 多传感器数据融合

多传感器数据融合 (又称为多传感器信息融合), 是 20 世纪 70 年代后发展起来的一门新兴学科。多传感器数据融合就是将来自多个传感器的数据或多源信息作为一个整体进行综合分析处理, 从而得出更为准确、可靠结论的一种技术。其核心就是对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理, 从而产生新的有意义的信息, 而这种新信息是任何单一传感器所无法产生的。它是人类和其他生物系统中普遍存在的一种基本功能, 人们总是在自觉或不自觉地将各种信息进行综合处理后再加以应用, 所以这项技术实际上是人脑处理复杂问题的功能模拟。

12.3.1 多传感器数据融合的定义

多传感器数据融合 (简称数据融合) 的定义有多种提法, 其中, 被广泛接受的定义为: 数据融合是对多传感器信息的获取、表示及其内在联系进行综合处理和优化的技术。

根据信息论的观点可知,信息分为互补信息、冗余信息、协同信息(交叉信息)。数据融合技术就是充分利用了多个传感器的资源,通过对各种传感器参数及其观测信息的合理支配与使用,将各传感器检测到的在空间和时间上互补的与冗余的信息,依据某种优化准则组合起来进行自动分析和综合,产生对被测对象的一致性解释与描述,找到各种信息的内在联系和规律;从而剔除无用的和错误的信息,得出更为准确和可靠的结论。数据融合技术可以精确地反映出被测对象的特征,消除信息的不确定性,提高传感器的可靠性。经过融合的多传感器信息具有容错性、互补性、实时性和低成本性等特征。

数据融合是一个多学科交叉的研究领域。有些学科相对成熟,有理论基础支持其具体的应用;也有些学科相对不够成熟,如启发式推理理论及其他一些特殊方法。所以,多传感器数据融合仍有非常广阔的发展前景。

多传感器数据融合与单一传感器信息相比具有精度高、容错性好、互补性强、可靠性高、实时性快等优点。其缺点是:增加了系统的复杂性、成本大、功耗高等。

多传感器数据融合最早是美国军方的研究项目。在美国发动的两次战争——海湾战争和科索沃战争中,多传感器数据融合技术都得到了应用,并发挥了巨大作用,取得了积极的效果。随后,多传感器数据融合作为军方的尖端技术迅速应用到民用领域,并同样取得了惊人的发展。

多传感器数据融合技术的理论和应用由于涉及电子信息、人工智能、计算机和自动化等多个学科,概括起来,多传感器数据融合技术目前主要应用于以下几个领域。

(1) 工业过程控制领域:主要用于控制系统的在线优化、高级控制、系统辨识、模式识别等方向;

(2) 工业参数的检测领域:主要应用于一些重要的过程参数检测和难测参数的检测,如多相流体的流量、气体成分检测、生物发酵罐的菌体浓度,化学反应器的产品质量等;

(3) 工业机器人领域:如模式识别与推理技术,机器人视觉等;

(4) 军事、海关、交通、金融、缉毒等其他领域。

12.3.2 多传感器数据融合的分类与结构

多传感器数据融合,对融合数据进行处理的前提条件是:每个传感器得到的数据信息必须是对同一目标的同一时刻的描述。在一个多传感器系统中,来自不同传感器的数据信息,都是该传感器对其特定环境特征的空间和时间描述。由于各传感器在空间位置和数据采集时间上的差异,造成这些信息描述的差异。必须在融合处理前对这些数据进行适当处理,如组合、配准、关联、相关、估计和分类等,将这些数据映射到同一参考空间并保证在时间上的同步。例如,不同的测量位置的传感器(如超声波传感器),由于各自所处位置不同,所得数据的参考坐标系就有所不同,必须将这些数据统一到同一参考坐标系中,这些数据才能使用。

在多传感器系统中,各种传感器的数据具有不同特征,可能是实时的或非实时的、模糊的或确定的、互相支持的或互补的,也可能是互相矛盾或竞争的。因此,数据融合的结构有多种不同的形式,其分类方法也各不相同。

(1) 根据数据处理的不同层次,多传感器数据融合可以分为数据级、特征级和决策级。

数据级融合主要是将来自不同传感器的数据直接组合后得到统一的输出数据,数据级融合的主要目的是为了获得对被观测对象的统一的数据描述,用到的关键技术包括数据转化、

相关和关联等。其优点是保持了尽可能多的原始信息源信息；缺点是处理的数据量太大，速度慢，实时性较差。

特征级融合主要是为了获得关于被测对象的统一特征描述，可以根据各个传感器的数据直接融合出特征，也可以先根据各个传感器数据分别提取出特征，然后再融合。特征级融合属于信息的中间层次融合，既保留了足够的原始信息，又实现了一定的数据约简，有利于实时处理，因此是比较适用的一种方法。

决策级融合是多传感器数据融合的最终目的，可以由特征融合后得到统一决策，也可以根据单一传感器作出的决策最后再融合得到统一的决策。决策融合属于高级融合，其数据通信量小，实时性好，可以处理非同步信息，能有效融合不同类型的信息；而且在一个或几个信息源失效时仍能继续工作，容错性好。但其原始信息的损失、被测对象先验知识获取的困难及知识库的过大等特性是其在应用前必须解决的问题。

(2) 根据数据融合发生的地点，多传感器数据融合可以分为集中式、分布式和混合式。

集中式融合又称为中央级融合，它的特点是存在一个融合中心，其收集来自所有传感器子系统的数据、特征或决策并完成融合计算。分布式融合（又称为传感器级融合）中没有明显的融合中心，各传感器系统都可以看成一个融合中心，它们通常构成一个网络通过通信获得其他传感器的数据并不同程度地完成融合计算。混合式是既有分布式融合也有集中式融合。

(3) 根据数据融合中各传感器系统的连接方式，多传感器数据融合系统又可以分为串联、并联和串并联混合式。

串联型融合是指，先将两个传感器数据进行一次融合，再把融合的结果与下一个传感器数据进行融合，依次进行下去直至所有的传感器数据都融合完为止。串联融合时，每个传感器既具有接收数据、处理数据的功能，又具有信息融合的功能，各传感器的处理同前一级传感器输出的信息有很大关系，最后一个传感器综合了所有前级传感器输出的信息，得到的输出将作为串联融合系统的结论。因此，串联融合时，前级传感器的输出对后级传感器输出的

影响比较大。

并联型融合是指，所有传感器输出数据都同时输入给数据融合中心，传感器之间没有影响，融合中心对各种类型的数据按适当的方法进行综合处理，最后输出结果。并联融合时，各传感器的输出之间不会相互影响。

串并联混合型多传感器数据融合是串联和并联两种形式的综合，可以先串联后并联，也可以先并联后串联。串联型融合和并联型融合的结构如图 12 - 12 所示。

串联融合结构的优点是具有

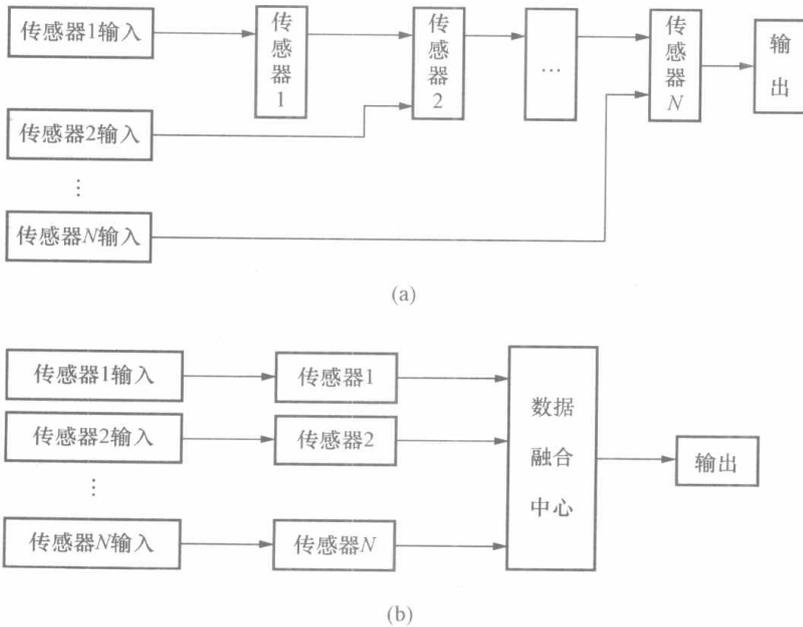


图 12 - 12 数据融合的串联结构与并联结构

(a) 串联型；(b) 并联型

很好的性能及融合效果,但它对线路的故障非常敏感。并联融合结构只有当接收到来自所有传感器的信息后才对信息进行融合,信息优化效果更好,而且可以防止串联结构信息融合的缺点,但是其信息处理速度比串联结构慢。串并联混合型则是结合了两者的优点,具有较好的融合特性。

另外,多传感器信息融合的方法也可分为数值型融合和非数值型融合两类。前者解决系统的定量描述问题,即在一组相关的数据中得出一个统一的结论,提高系统测量的精度;后者用以给出系统的定性表达或决策。

虽然多传感器数据融合系统的结构有多种分类形式,但它们之间实际上可以是相互涵盖的,并不互相矛盾。例如串联融合可以看成是一种分布式融合。

12.3.3 多传感器数据融合的一般方法

多传感器数据融合的方法涉及多方面的理论和技术,如信号处理、估计理论、不确定性理论、模式识别、最优化技术、神经网络和人工智能等。数据融合的方法很多,总结起来,可分为两大类,即现代方法和经典方法。

多传感器数据融合的现代方法,主要采用人工智能和信息论的方法。其中,人工智能的方法有模糊逻辑、产生式规则、神经网络方法、遗传算法和模糊集合理论等;信息论的方法有聚类分析、模板法、熵理论等。经典方法,又通称为概率统计方法,主要采用统计方法和估计方法。其中,统计方法有贝叶斯估计、经典推理方法、DS证据理论、品质因数法等;估计方法有加权算术平均、最大似然法、最小二乘法和卡尔曼滤波。

多传感器数据融合的经典方法,主要解决系统的定量描述,即在一组相关数据中得出一个统一的结论,提高系统检测的精度;人工智能方法主要给出系统的定性表达或决策。这两种数据融合方法也是目前比较常用的方法。与概率统计方法相比,人工智能方法对信息的表示和处理更加接近人类的思维方式,适合于高层次上的应用,但它本身还不够成熟和系统化。信息论方法中,聚类分析的方法应用较为普遍,其他两种方法还只有一些理论研究成果。

多传感器数据融合的实质是不确定信息的处理,因此现有的多传感器数据融合方法主要是根据两类应用目的提出的:一类是为了消除测量数据中的不确定性,此类方法主要针对由不同传感器得到的关于环境中同一特征信息的融合,如加权平均法、统计方法等。另一类是用于物体的识别与分类,此类方法是先由每个传感器进行局部处理,再将其送入融合中心进行整体决策,如D-S证据推理法、决策方法、模糊逻辑方法等。

应该指出,多传感器数据融合方法之间没有严格的界线,每种融合方法都存在着优点和局限性,将它们组合起来使用可以形成性能更好的融合方法。

下面将介绍几种常用的数据融合方法。

12.3.3.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波(KF)用于实时融合动态的低层次冗余传感器数据。该方法用测量模型的统计特性递推方法,决定统计意义下的最优融合数据估计。如果系统具有线性动力学模型,且系统噪声和传感器噪声可用高斯分布的白噪声模型来表示,则卡尔曼滤波可以为融合数据提供唯一的统计意义下的最优估计。卡尔曼滤波的递推特性使系统数据处理不需大量的数据存储和计算。

一般的卡尔曼滤波状态估计方程是

$$\hat{X}_{k+1} = \Phi(k+1/k)X_k + \Gamma(k)u(k) \quad (12-12)$$

式中 \hat{X}_{k+1} —— $(k+1)$ 时刻 (当前时刻) n 维目标状态向量的估计值;

X_k —— k 时刻 (前一采样时刻) 目标状态向量;

$u(k)$ —— p 维输入或控制信号;

$\Phi(k+1/k)$ —— $(k+1)$ 时刻到 k 时刻系统的 $n \times n$ 维状态转移矩阵;

$\Gamma(k)$ —— $n \times p$ 维输入控制加权矩阵。

由式 (12-13) 可以看出, 卡尔曼滤波是一种线性递推的滤波算法。它是在测得的新数据加上前一时刻的估计值, 由系统本身的状态转移方程和一套递推公式求得新检测量的估计值。具体的卡尔曼滤波算法可参考有关文献, 这里不再赘述。

卡尔曼滤波在目标跟踪、导航、定位、状态估计等方面得到广泛的利用。但是, 采用单一的卡尔曼滤波器对多传感器组合系统进行数据统计时, 也存在很多问题。

(1) 在组合信息大量冗余的情况下, 计算量将以滤波器维数的三次方剧增, 实时性不能满足。

(2) 传感器子系统的增加使故障随之增加, 在某一系统出现故障而没有来得及被检测出时, 故障数据会污染整个系统, 使可靠性降低。

为解决这些问题, 又有学者提出了分散卡尔曼滤波 (DKF) 和扩展卡尔曼滤波 (EKF) 的方法。分散卡尔曼滤波可实现多传感器数据融合完全分散化, 它的优点在于每个传感器节点失效不会导致整个系统失效。而扩展卡尔曼滤波的优点在于可以有效克服数据处理不稳定性或系统模型线性程度误差对融合过程产生的影响。

12.3.3.2 贝叶斯估计

贝叶斯 (Bayes) 准则是多传感器数据融合技术应用最早的融合算法。下面简单介绍一下 Bayes 准则的基本概念。

设事件 A 和 B 都是事件域 E 中发生的事件, 且事件 B 发生的概率为 $P(B)$, 则有

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (12-13)$$

式中 $P(A | B)$ —— 事件 B 发生的条件下事件 A 发生的概率;

$P(A \cap B)$ —— 事件 A 和事件 B 同时发生的概率。

式 (12-13) 为传统概率论中的条件概率公式, 进一步可推出

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)} \quad (12-14)$$

式 (12-14) 即为贝叶斯统计理论的基本公式。

Bayes 估计是融合静态环境中多传感器底层数据的一种常用方法。其信息描述为概率分布, 适用于具有可加高斯噪声的不确定性信息。假定完成任务所需的有关环境的特征信息 (被测对象) 用向量 f 表示, 通过传感器获得的数据信息用向量 d 来表示, d 和 f 都可看作是随机向量。信息融合的任务就是由数据 d 推导和估计环境 f 。假设 $P(f | d)$ 为随机向量 f 和 d 的联合概率分布密度函数, 由贝叶斯公式可得

$$P(f | d) = \frac{P(d | f)P(f)}{P(d)} \quad (12-15)$$

信息融合通过数据信息 d 作出对环境 f 的推断, 即求解 $P(f | d)$ 。

实际中应用较多的方法是寻找最大后验估计 g , 即

$$P(g | d) = \max P(f | d) \quad (12-16)$$

根据概率论知识可知, 最大后验估计 g 满足

$$P(g | d)P(g) = \max P(d | f)P(f) \quad (12-17)$$

Bayes 估计方法在利用样本提供的信息时也充分利用了先验的信息 $P(d)$, 以先验分布为出发点, 克服了古典统计中精度和信度是前定的, 即在采样之前就确定下来, 而不依赖于样本的不合理性。但主观 Bayes 方法要求所有概率都是独立的, 实际系统不易实现, 同时要求给出先验概率和条件概率也是比较困难的, 且不能区分“不确定”和“不知道”。

12.3.3.3 D-S 证据理论

D-S 证据理论, 是 1967 年由 Dempster 提出, 后由他的学生 Sharer 于 1976 年加以扩充和发展的, 它可以看成是一种广义贝叶斯理论。该方法通常用来对检测目标的大小、位置以及存在与否进行推断, 是目前数据融合技术中比较常用的一种方法。

D-S 证据理论是根据事件发生后的结果 (证据) 探求事件发生的主要原因 (假设) 的过程。由多个信息源得到的信息构成该理论中的所有证据, 利用这些证据构造相应的基本概率赋值函数 m 函数。 m 函数可以是人们主观给出或凭经验和感觉给出的, 也可以结合其他方法如以神经网络方法得到相对客观的 m 函数的值。

假设 F 为所有可能证据所构成的有限集, 则各证据 x_i 的基本概率分布函数 m 函数的性质包括

$$\begin{aligned} m(\phi) &= 0 \\ 0 &\leq m(x_i) \leq 1 \\ \sum_{x_i \subset F} m(x_i) &= 1 \end{aligned}$$

下一步, 为集合 F 中的某个元素即某个证据引入信任函数 Bel , 表示对每个证据的信任程度, 信任函数 Bel 的性质包括

$$\begin{aligned} B(F) &= 1 \\ B(\phi) &= 0 \end{aligned}$$

由基本概率赋值函数定义与之相对应的信任函数 Bel 为

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B), \quad A, B \in F \quad (12-18)$$

构造似然函数 Pls 为

$$Pls(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (12-19)$$

其中, \bar{A} 为 A 的补集。区间 $[Bel(A), Pls(A)]$ 称为 A 的信任区间 (不确定区间), 代表 A 信任度的上下限。

D-S 证据理论是概率论的推广, 它满足更弱的公理系统。它采用信任度函数 Bel 表示不确定性, 而不是用概率表示, 这样便可以区分“不知道”和“不确定”, 同时也不需要先验概率和条件概率密度。并且证据理论可以实现对证据的组合, 而主观 Bayes 方法则不能。证据理论的这些优良性能使其在数据融合中得到了广泛应用。

但是, 当证据理论的推理链较长时, 合成公式使用很不方便, 而且它需要各证据之间是彼此独立的, 实际上有时难以满足上述要求。随着推理过程的增加, 识别框架变得很复杂, 且计算量也大大增加。此外, 组合规则的组灵敏度高, 即基本概率赋值的一个很小变化都可以导致结果发生很大变化。

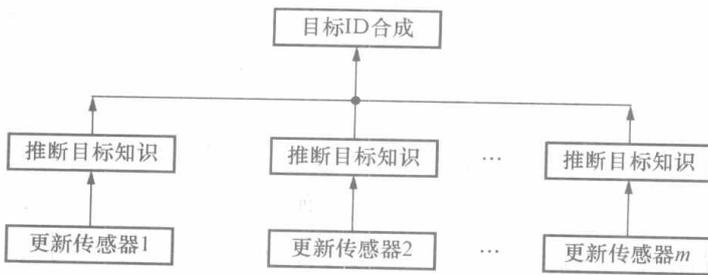


图 12-13 D-S 证据理论的推理结构

综上所述，D-S 证据理论有三个基本要点，即基本概率赋值函数 m 、信任函数 Bel 和似然函数 Pls 。它的证据推理结构分 3 级，推理结构如图 12-13 所示。

第 1 级为目标合成。其作用是把来自独立传感器的观测结果合成为一个总的结果输出。第 2 级为推断。其作用是获得传感器的观测结果并进行推理，将传感器观测结果扩展成目标报告。这种推理的基础是一定的传感器报告以某种可信度在逻辑上会产生可信度的某些目标报告。第 3 级为更新，各种传感器一般都存在某些随机的误差，所以在时间上充分独立的来自同一的传感器的一组连续报告，比任何单一报告可靠。因此，在推理和多传感器合成之前，要先组合更新传感器的观测数据。

D-S 证据理论在多传感器数据融合中的基本应用过程，如图 12-14 所示。它首先计算各个证据的基本概率赋值函数 m 、信任度函数 Bel 和似然函数 Pls ，然后用 D-S 组合规则计算所有证据联合作用下的基本概率赋值函数、信任度函数和似然函数。最后根据一定的决策规则，选择联合作用下的支持度最大的假设。

12.3.3.4 聚类分析法

聚类分析算法是一组启发式算法，在不精确已知模式类数目的标识性应用中，这类算法很有用，它主要用于目标识别和分类。

聚类分析算法首先需定义一个聚类标准，按照此种聚类准则将数据聚类分组。一般情况下，聚类分析是按照目标间相似性把目标空间划分为若干子集，划分的结果应使表示聚类质量的准则函数为最大。当用距离来表示目标间的相似性时，其结果将判别空间划分若干区域，每一区域相当于一个类别。常用的距离函数有明氏 (Minkowsky) 距离、欧式 (Euclidean) 距离、曼氏 (Manhattan) 距离、类块距离等。判别聚类优劣的聚类准则，一种是凭经验，根据分类问题选择一种准则；另一种是确定一个函数，当函数取最佳值时认为是最佳分类。

聚类方法实现的过程，可以分为以下几个步骤。

- (1) 从观测数据中选择一些样本数据。
- (2) 定义特征变量集合以表征样本中的实体。
- (3) 计算数据的相似性，并按照一个相似准则划分数据。
- (4) 检验划分成的类对于实际应用是否有意义，检验各模式的子集是否很不相同，若不是，则合并相似子集。
- (5) 反复将产生的子集加以

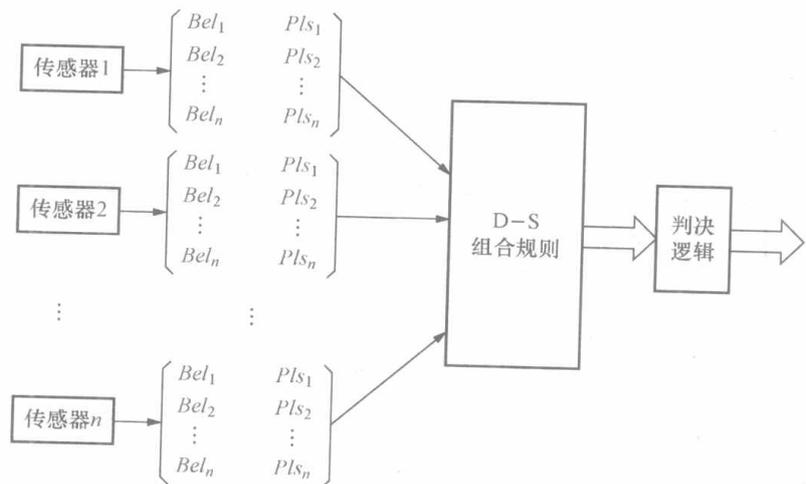


图 12-14 D-S 证据理论的数据融合过程

划分,并对划分的结果使用步骤4检验,直到再没有进一步的细分结果,或者直到满足某种停止准则为止。

聚类方法有很大的主观倾向性,因此在使用聚类分析方法时应对其有效性和可重复性进行分析,以形成有意义的属性聚类结果。

12.3.3.5 神经网络法

人工神经网络是一种模仿人脑信息处理机制的网络系统,它是由大量简单的人工神经元广泛链接而成的。它不需系统的物理模型,有很强的非线性处理能力,并具有自学习、自组织、自适应及并行性和容错性,可对多传感器传递来的经特征提取的各种数据进行分析、判断和处理。因此人工神经网络是一种较好的数据融合方法。常见的基于神经网络的多传感器数据融合系统,如图12-15所示。

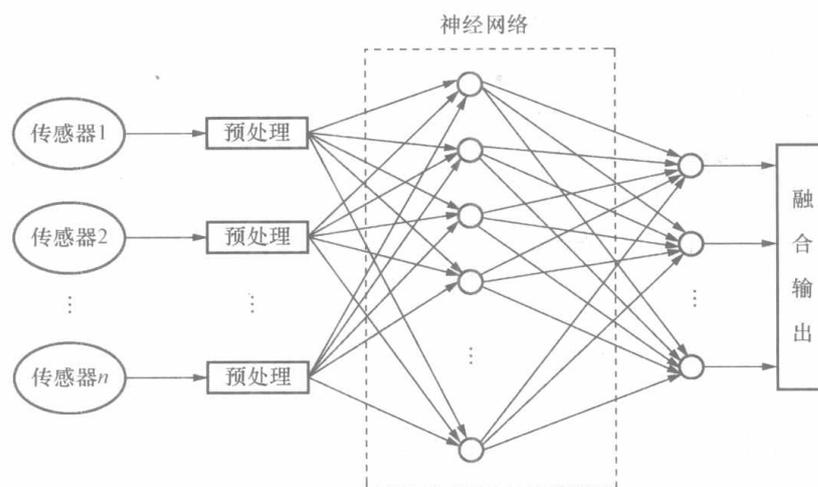


图 12-15 基于神经网络的多传感器数据融合系统

采用人工神经网络进行多传感器数据融合,首先要根据系统的要求及传感器的特点选择合适的神经网络结构模型,如BP网络、RBF网络或Hopfield网络等,然后再根据经验知识,通过训练样本对神经网络模型进行离线学习,确定网络模型结构的具体形式以及连接权值的大小。这部分内容在软测量技术中已有介绍,不再赘述。

12.3.3.6 模糊逻辑法

在多传感器数据融合系统中,传感器获取的数据信息由于受到传感器本身精度、环境中各种干扰因素的影响,存在着各种不确定性及一定的模糊性,难以用传统的二值逻辑进行判断。由Zadeh教授提出的模糊集合理论是一种解决不精确不完全信息的有效方法。

在多传感器数据融合方法过程中,存在的不确定性信息可以直接用模糊逻辑表示,然后采用模糊变换和模糊推理的方法,根据模糊集合理论的各种演算,对各种命题进行合并,进而实现数据融合。

模糊逻辑的关键在于确立隶属度函数 $\mu(\cdot)$,其类似于0和1之间的值进行概率分布,即: $\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$ 。隶属度函数 μ_A 可根据具体情况选取,如高斯函数、三角函数、梯形函数、S形函数等。

12.3.3.7 加权平均法

它是最简单、最直观的融合多传感器低层数据的方法。其融合模型为

$$Y = \sum_{k=1}^n r_k x_k \quad (12-20)$$

式中 Y ——数据融合结果；

x_k ——第 k 组传感器测量数据；

r_k ——第 k 组传感器测量数据的加权系数， $0 \leq r_k \leq 1$ 。

加权平均法的全部系数的确定，是该方法是否成功的关键。它的确定方法一般是根据经验或统计结果给出，也可以结合专家系统、人工神经网络等其他数据融合方法计算得出。

多传感器数据融合的方法还有表决法、专家系统、产生式规则、遗传算法等，由于篇幅所限，不再予以介绍。大家可以根据需要有选择地进行学习。

12.3.4 多传感器数据融合存在的问题与展望

虽然数据融合已得到了广泛的应用，但至今为止未形成一套完整的理论体系和有效的融合算法。绝大部分都是针对特定的问题、特定的领域来研究，也就是说目前数据融合的研究都是根据问题的种类、特定的对象、特定的层次建立自己的融合模型和推理规则。有的在此基础上形成所谓的最佳方案，但所谓的最佳准则、最佳判断等只是在理论上的讨论，若应用到实际上还有很大的距离。即使在实际中得到了应用的融合方法，也没有一个完善的评价体系对之作出合理的评价。所以，多传感器数据融合系统的设计带有一定的盲目性，有必要建立一套完整的方法论体系来指导数据融合系统的设计。具体的不足之处有：

- (1) 未形成基本的理论框架和有效广义模型及算法；
- (2) 并联的二义性是数据融合的主要障碍；
- (3) 融合系统的容错性或稳健性没有得到很好的解决；
- (4) 对数据融合的具体方法的研究尚处于初步阶段；
- (5) 数据融合系统的设计还存在许多实际问题。

随着传感器技术、数据处理技术、计算机技术、网络技术、人工智能技术、并行计算机的软件和硬件技术等相关技术的发展，多传感器数据融合必将成为未来复杂工业系统智能检测与数据处理的重要技术。从目前收集到的国内外研究资料来看，多传感器数据融合的研究方向可归纳如下：

- (1) 改进融合算法以进一步提高融合系统的性能。目前，将模糊逻辑、神经网络、进化计算、粗集理论、支持向量机、小波变换等计算智能技术有机地结合起来，是一个重要的发展趋势。
- (2) 如何利用有关的先验数据提高数据的融合性能，也是一个需要认真研究的问题。
- (3) 开发并行计算的软件和硬件，以满足大量数据且计算复杂的多传感器融合的要求。
- (4) 研究出能处理多传感器集成与融合的集成电路芯片，以及传感器模型和接口标准化是当前系统硬件的主要发展方向。
- (5) 未知和动态环境中多传感器集成与融合的研究。
- (6) 采用并行计算机结构的多传感器集成与融合的研究。
- (7) 开展虚拟现实技术的研究，为多传感器数据融合研究提供理想的仿真平台。

总之，多传感器数据融合技术无论向哪个方向发展，人们越来越重视实际中的应用。好的理论并不能保证应用的成功，只有对理论和实际有深刻的理解，并能将理论准确地、充分地运用到实际应用中，才能说是真正的成功。

12.4 虚拟仪器

由于微电子技术、计算机技术的高速发展,以及它们在测量技术与仪器仪表技术上的应用,使检测技术在许多方面突破了传统的概念,发生了质的变化。1986年,美国国家仪器(NI)公司提出了虚拟仪器VI(Virtual Instrument)的概念。这种集计算机技术、通信技术和测量技术于一体的模块化仪器一经产生,便得到世界范围内的认同,并在检测技术领域、仪器仪表领域得到广泛应用。虚拟仪器是继模拟仪表、数字仪表以及智能仪表之后的又一个新的仪器概念。

12.4.1 虚拟仪器的概念

虚拟仪器是指在以计算机为核心的硬件平台上,将测试系统的硬件资源和计算机的软件资源有效结合所实现的一种计算机仪器系统。虚拟仪器的实质是利用计算机显示器模拟传统的控制面板,以多种形式输出检测结果,利用计算机软件实现信号数据的运算、分析和处理,利用计算机的I/O接口设备完成信号的采集、测量与调理,从而完成各种测试功能。使用虚拟仪器时,用户可以用鼠标和键盘操作显示屏上的“虚拟”按钮或面板,就如同使用一台专用检测仪器。

虚拟仪器的“虚拟”主要包含以下两方面的含义。

(1) 虚拟仪器面板上的各种“控件”与传统仪器面板上的各种仪器所完成的功能是相同的,并由各种开关、按钮、显示器等实现仪器电源的“通”和“断”、被测信号“输入通道”和“放大倍数”等参数设置、测量结果的“数值显示”和“波形显示”等。

传统面板上的器件都是实物,而且是由手动操作完成的,而虚拟仪器面板控件是外形与实物相像的“图标”,每个控件的“通”、“断”、“放大”等动作是通过用户对计算机鼠标或键盘的操作来完成的。因此,设计虚拟仪器面板的过程就是在面板设计窗口中摆放所需的控件,然后对控件进行合适的属性设置。

(2) 虚拟仪器测量功能是由软件编程来实现的。在以计算机为核心组成的硬件平台支持下,仪器的功能是通过软件编程设计来实现。测试软件可以由生产厂商编写,也可以由用户自己设计和定义,充分体现了“软件即仪器”的观点。

目前,基于PC的A/D及D/A转换、开关量输入/输出、定时计数的硬件模块,在技术指标及可靠性等方面已相当成熟,而且价格上也有优势;常用传感器及相应的调理模块也趋向模块化、标准化。这使得用户可以根据自己的需要定义仪器的功能,选配适当的基本硬件功能模块并开发相应的软件,不需要重复采购计算机和某些硬件模块。

虚拟仪器的出现是仪器发展史上的一场革命,代表着仪器发展的最新方向和潮流,成为信息技术的一个重要应用领域。经过十几年的发展,VI技术本身的内涵不断丰富,外延不断拓展,目前已发展成具有GPIB、PC-DAQ(Data Acquisition)、VXI和PXI四种标准体系结构的开放技术。虚拟仪器提高了仪器的使用效率,降低了仪器的价格,可以更方便地进行仪器硬件维护、功能扩展和软件升级。它已经广泛地应用于工业测量、物矿勘探、生物学、振动分析、故障诊断、航天航空、军事工程、建筑、交通、教学及科研等诸多领域。

虚拟仪器与传统仪器相比,具有以下几个特点。

(1) 在通用硬件平台确定以后,测试软件取代了传统仪器的硬件来完成仪器的各项

功能。

(2) 仪器的功能用户可以根据需要由软件来定义，而不是事先由厂家定义好的。传统仪器或者功能单一，或者具有多功能但使用中很多功能闲置，且价格昂贵；虚拟仪器可以实现多种测试功能，用户不必购买多台不同功能的传统仪器，可以根据自己的需要定义仪器功能。

(3) 仪器性能的改进和功能的扩展，只需由用户更新相关软件来实现，而不必购买新的仪器。

(4) 虚拟仪器的技术更新周期短，一般为 1~2 年，而传统仪器则需要 5~10 年。

(5) 虚拟仪器是一个开放、灵活的系统，可与计算机技术同步发展，也可与网络及其他周边设备互联以实现多种功能。

虚拟仪器之所以具有传统仪器不可能具备的特点，根本原因就在于虚拟仪器的核心是软件。软件决定了一台虚拟仪器的主要功能。

12.4.2 虚拟仪器的构成

虚拟仪器实质上是一种计算机仪器系统，它是由通用仪器硬件平台（简称硬件平台）和应用软件两大部分组成的。

12.4.2.1 虚拟仪器硬件平台的构成

虚拟仪器硬件平台的构成，主要有两部分。

(1) 计算机。它一般是一台 PC 或者工作站，是硬件平台的核心。

(2) I/O 接口设备。I/O 接口设备主要完成被测输入信号的采集、放大、模/数转换。不同的总线形式都有其相应的 I/O 接口硬件设备，如利用 PC 总线的数据采集卡/板（简称为数采卡/板，DAQ）、GPIB 总线仪器、VXI 总线仪器模块、串口总线仪器等。虚拟仪器的构成方式主要有 5 种类型，如图 12-16 所示。

1) PC-DAQ 系统：是以数据采集板、信号调理电路及计算机为仪器硬件平台组成的插卡式虚拟仪器系统。这种系统采用 PCI 或计算机本身的 ISA 总线，将数据采集卡/板（DAQ）插入计算机的空槽中即可。

2) GPIB 系统：是以 GPIB（General Purpose Interface Bus，通用接口总线）标准总线仪器与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器测试系统。

GPIB 技术是 HP 公司在 20 世纪 70 年代创建的一种通用仪器总线，在虚拟仪器技术发展的初级阶段它起到了利用计算机增强传统仪器功能的作用。通用接口总线 GPIB 标准的特点是当 PC 总线变化时只需改变 GPIB 接口卡，仪器端可以保持不变。一个典型的 GPIB 测

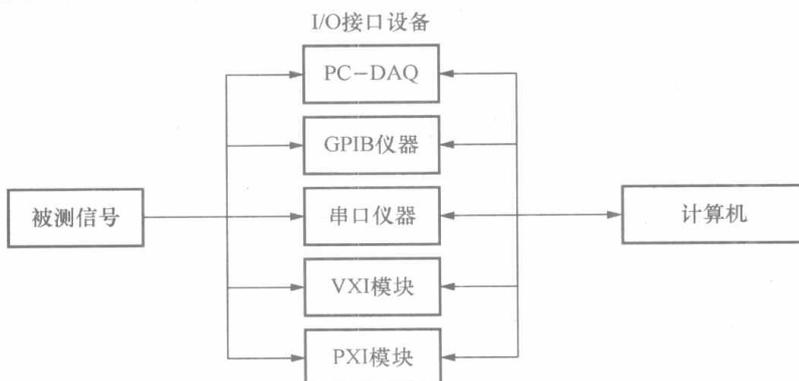


图 12-16 虚拟仪器的构成方式

试系统一般由一台 PC、一块 GPIB 接口板卡和若干台带有 GPIB 接口的仪器通过串联的标准 GPIB 电缆连接而成。在标准情况下，一块 GPIB 接口卡最多可以带 14 台仪器，每段电缆长 1.5m。利用 GPIB 技术可以实现计算机对仪器的操作和控制，使测试工作由手工操作单台仪器向

大型综合的自动化测试系统迈进了一大步。

3) VXI 系统: 是以 VXI 标准总线仪器模块与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器测试系统。

VXI (VMEbus Extensions for Instrumentation) 总线是 1981 年由 Motorola 等公司联合发布的以 VME 计算机总线为基础的一种仪器扩展总线, 之后计算机和仪器仪表行业的公司都加入到 VXI 总线联盟中来。1987 年又对标准进行了修改, 允许用户将不同厂家的模块用于同一机箱内, 为虚拟仪器的应用提供了方便。VXI 总线的特点是通用性、开放性强, 扩展性好, 它能保持每个仪器之间精确定时和同步, 具有 40Mbps 的高数据传输率。多年来 VXI 模块化仪器被认为是虚拟仪器最理想的硬件平台。

采用 VXI 总线的虚拟仪器一般由每台主机构成一个 VXI 小系统, 每个子系统最多包括 13 个器件, 一个 VXI 系统最多可包括 256 个器件, 一个器件可以作为一个单独的插件, 也可以由多个器件组成一个插件。插件与 VXI 总线通过连接器连接, 主机箱、主机架、插件和连接器都有标准尺寸和结构。在 VXI 总线系统中, 器件是系统的基本单元, 计算机、计数器、数字仪表、信号发生器和多路开关等都可以作为器件加入到 VXI 总线系统中。VXI 器件之间的通信是基于分层规则、主从模式。在单 CPU 系统中, CPU 是主, 其他器件是从, 在多 CPU 系统中, 从机需要通过公共接口轮流与主机通信。

4) PXI 系统: 是以 PXI 标准总线仪器模块与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器测试系统。

尽管 VXI 的稳定性和可靠性都很好, 技术也非常成熟, 但是由于在新型计算机中已经不存在 VME 总线, 所以基于现行的计算机总线的新的仪器总线标准又应运而生, PXI (PCIeXtensions for Instrumentation) 就是建立在 PCI (Peripheral Component Interconnect) 上的新的仪器总线标准, PXI 使运行在新型计算机上的机器视觉、运动控制等自动化装置与传统仪器又可以连接起来了。

5) 串口系统: 是以 Serial 标准总线仪器与计算机为仪器硬件平台组成的虚拟仪器测试系统。

无论上述哪种 VI 系统, 都通过应用软件将仪器硬件与计算机相结合。其中, PC-DAQ 测量系统是构成 VI 的最基本的方式, 也是最廉价的方式。

12.4.2.2 虚拟仪器的软件系统

软件是虚拟仪器的重要组成部分, 开发虚拟仪器必须有合适的软件工具, 目前的虚拟仪器软件开发工具有如下两类。

(1) 文本式编程语言: 如 Visual C++、Visual Basic、Labwindows/CVI 等。

(2) 图形化编程语言: 如 LabVIEW、HPVEE 等。

这些软件开发工具为用户设计虚拟仪器应用软件提供了最大限度的方便条件与良好的开发环境。

虚拟仪器软件由两部分构成, 即应用程序和 I/O 接口仪器驱动程序。虚拟仪器的应用程序包含两方面功能的程序: ①实现虚拟面板功能的软件程序; ②定义测试功能的流程图软件程序。I/O 接口仪器驱动程序完成特定外部硬件设备的扩展、驱动与通信。

文本式编程语言属于面向对象的编程技术, 虽然采用了可视化编程语言环境, 但对普通计算机用户来说, 编程难度较大, 不易升级和维护。图形化编程语言属于图形编程技术, 它

简单易学、应用程序界面直观易懂。目前，最常用的虚拟仪器软件主要是美国 NI 公司开发的图形化编程语言 LabVIEW。

12.4.3 LabVIEW 模块化编程语言

NI 公司开发的面向仪器和测控过程的图形化开发平台 LabVIEW 和交互式开发平台 LabWindows/CVI 是两种较普及的商品开发环境，其特点是编程非常方便、人机交互界面友好，具有强大的数据可视化分析和仪器控制能力，并提供与其他语言的接口以便实现底层操作和大量数据处理。下面重点介绍 LabVIEW 图形化开发平台。

12.4.3.1 LabVIEW 编程语言概述

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, 实验室虚拟仪器工程平台) 是一种基于 G 语言 (Graphics Language, 图形化编程语言) 的虚拟仪器软件开发工具。它采用图标代替编程语言来创建应用程序，使用数据流编程方法来描述程序的执行。

LabVIEW 软件中集成了 GPIB、VXI、RS-232 和 RS-485、数据采集、运动控制和视频产品等硬件的数据通信的全部功能。尽管它已为许多应用提供了开发工具，但仍然是一个开放的开发环境。各厂商可以开发其产品的 LabVIEW 库函数程序以及驱动程序，方便用户在 LabVIEW 环境下使用其产品。LabVIEW 内置了方便链接 TCP/IP、SQL 数据库、Active X 等软件标准的库函数。

LabVIEW 是一个通用编程系统，它不但能完成一般的数学运算与逻辑运算及输入输出功能；还带有专门的用于数据采集和仪器控制的库函数和开发工具，以及专业的数学分析程序包，基本上可以满足复杂的工程计算和分析的需求。LabVIEW 为虚拟仪器设计者提供了一个便捷、轻松的设计环境，设计者利用它可以像搭积木一样，构建出自己的仪器系统和仪器面板，而无需进行烦琐的程序代码的编写。

LabVIEW 环境下开发的程序称为虚拟仪器 (简称 VI)，主要由三个部分组成，即前面板、框图和图标/连接器。

(1) 前面板：是 VI 的交互式用户界面，它类似于常用仪器的面板。前面板上包括旋钮、按钮、图形及其他控制元件和指示器 (如示波器等)，可以完成键盘、鼠标对程序的数据输入或通过指示器观察显示结果。在运行 VI 时，前面板一般是打开的，这样可以通过它把输入数据传送给执行程序，并接收程序输出进行观测，此时用户看到的是与实际硬件仪器相似的操作面板。

(2) 框图：是 VI 的源代码，它是由图标、连线等符号组成的。框图是实际的可执行代码，是对具体的编程问题的图形化解决方案。VI 的执行是由数据流来控制的。

(3) 图标/连接器：指定了数据流进流出 VI 的路径。在框图中，图标是 VI 的图形符号，它表示较低层的 VI、内部函数和程序控制结构；连接器则定义了输入和输出，所有的 VI 都有图标和连接器。VI 是一种模块化、分层次的程序结构，它可以作为主程序来调用其他 VI (即子 VI)，也可以作为其他程序的子 VI 被调用。

12.4.3.2 创建虚拟仪器的过程

创建虚拟仪器大致分三个步骤。

(1) 创建前面板。它是虚拟仪器的交互式用户接口，包含旋钮、按钮、图形和其他的控制与显示对象。通过鼠标和键盘输入数据、控制按钮，可在计算机屏幕上观看结果。

(2) 创建流程图。通过连线将输出、接收数据的对象连接起来，图形化编程语言从流程图中接收命令，流程图即是虚拟仪器的源代码。

(3) 创建图标和连接。当一个图标被放置在一个流程图中时，它就是一个子仪器或者是子 VI 程序。子仪器的控制和显示对象从调用它的流程中获得数据，然后将处理后的数据返回给它。连接是对应于子仪器控制和显示对象的一系列连线端子。图标既包含虚拟仪器用途的图形化描述，也包含仪器连线端子的文字说明。连接更像是功能调用的参数列表。连线端子类似于参数。每个终端都对应于前面板的一个特别的控制和显示对象。每个虚拟仪器都有一个连接。在前面板的仪器图标上单击鼠标右键，选择 Show Connector 选项，即可看到该仪器的具体连接。

由于 LabVIEW 的这种模块化编程理念，使得 VI 的编写更加便捷，且可以实现更强的仪器功能。例如，我们可以把一个复杂的问题逐步划分为一系列的简单子任务，为每一个子任务都创建一个 VI，并把它们作为子 VI 装配到顶层 VI 中，从而完成一个复杂问题的编程。由于每一个子 VI 都可以单独运行，使得程序的调试非常方便和快捷，也便于查找出编程的错误。此外，每一个子 VI 都具有特定的软件功能，这些子 VI 可以在程序中重复使用，或使用到其他程序中，从而可以大大提高程序的开发效率。

总之，LabVIEW 采用了直观的前面板与框图式编程技术，使用图形语言进行编程，界面直观形象，对无编程经验的工程师来说是一个非常好的选择。

12.4.3.3 LabVIEW 的特点

LabVIEW 是建立在易于使用的 G 语言基础之上的编程语言，采用图形、图标和连线编制程序，使用数据流的程序控制方法，大大简化了科学计算、工程监控和测试的软件开发，是一种地道的工程师编程语言。概括起来，LabVIEW 具有以下一些特点。

- (1) 具有图形化的编程方式，采用“所见即所得”的可视化技术。
- (2) 提供了丰富的数据采集、分析及存储的库函数。
- (3) 具有灵活的调试手段，即提供了传统的程序调试手段，例如可在源代码上设置断点，单步执行程序；同时也提供了独具特色的调试工具，例如使用高亮线显示数据的运行情况，便于设计者观察数据的流动状况及运行结果。
- (4) 32 位程序编译器编译生成 32 位的应用程序，保证用户程序的高速执行。
- (5) 集成了很多仪器硬件库，如 PCI、GPIB、VXI、PXI、RS-232/485、USB、分布式数据采集、图像获取、机器视觉、运动控制等硬件功能。便于开发者使用不同的接口设备及仪器，而不需要他们熟练掌握这些仪器的特性。
- (6) 开放式开发平台，提供大量与外部代码和软件进行链接的机制，如 DDL、DDE、ActiveX 等。
- (7) 具有强大的网络功能，支持常用的网络协议，方便网络及远程测试仪器的开发。

12.4.4 虚拟仪器的设计方法

虚拟仪器发展很快，将虚拟仪器技术应用于工程机械的测试系统实例很多。一般根据具体要求进行相应的硬件和软件设计，完成检测要求，并作结果分析。

例如：采用 LabVIEW 开发平台设计一个基于 PC-DAQ 的虚拟仪器测试系统，其结构如图 12-17 所示。

图 12-17 所示的虚拟仪器测试系统的工作流程如下：

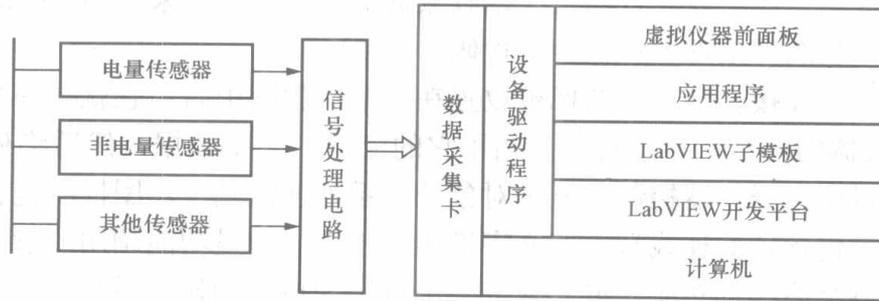


图 12-17 基于 PC-DAQ 的虚拟仪器测试系统的结构

- (1) 通过各种传感器测量被测信号，将其转换为电量信号；
- (2) 信号处理（调理）电路将传感器输出的电量信号进行整形、转换、滤波处理，变成标准信号；
- (3) 数据采集卡采集信号处理电路的电压信号，并转换为计算机能处理的数字信号；
- (4) 通过设备驱动程序，将数字信号送入计算机；
- (5) 在 LabVIEW 平台下，调用信号处理子模板，编写仪器功能流程、功能算法，设计虚拟仪器前面板；
- (6) 形成具有不同仪器功能的应用程序。

如果将仪器功能划分为一些通用模块，那么任何一台仪器，按最基本的形式可分解为以下三个主要模块。

- (1) 输入：进行信号调理并将输入的模拟信号转换成数字形式以便处理。
- (2) 输出：将量化的数据转换成模拟信号并进行必要的信号调理。
- (3) 数据处理：通常，一个微处理器或一台数字信号处理器（DSP）即可使仪器按要求完成一定功能。

将具有一种或多种功能的通用模块组建起来，就能构成任何一种仪器。虚拟仪器就是利用通用的仪器硬件平台，调用不同的测试软件构成不同功能的仪器。例如：一台频谱分析仪包括一个输入部分和一个数据处理部分；一台任意波形发生器包括一个输出部分和一个数据处理部分。

本章小结

一、现场信号的采集

随着计算机技术、人工智能技术和数字信号处理技术的发展，出现了许多新的测量方法和检测技术。其中，数据采集系统的发展，改善了现场信号的采集精度和采集速度，并实现了信号的数字化，直接满足了计算机检测和控制要求。

- (1) 信号的类型：模拟信号和数字信号。数字信号有通断信号和脉冲信号；模拟信号可分为静态信号和动态信号，动态信号又分为时域信号和频域信号。
- (2) 信号调理：一般包括放大、隔离、滤波、线性化处理及传感器激励等部分。
- (3) 数据采集系统：包括采样—量化—编码三个过程。数据采集系统由测量放大器、模拟数字开关、采样/保持器、A/D 转换器组成。

(4) 数据采集卡的连接方式。差分方式、单端有参考地方式和单端无参考地方式。

二、软测量技术

软测量技术是一种利用较易在线测量的辅助变量和离线分析信息去估计不可测或难测变量的方法。软测量技术的内容包括四个方面。

(1) 辅助变量的选择：包括变量类型的选择、变量数目的选择、检测点位置的选择。

(2) 测量数据的处理：包括数据变换和误差处理两部分内容。

(3) 软测量模型的建立：常用的方法包括工艺机理分析、回归分析、状态估计、模式识别、人工神经网络、过程层析成像、相关分析等。

(4) 模型的在线校正：表示为模型结构和模型参数的优化过程。

三、多传感器数据融合技术

多传感器数据融合技术是将来自多个传感器的数据或多源信息作为一个整体进行综合处理，从而得出更为准确、可靠结论的一种技术。

(1) 数据融合的结构形式：根据数据处理的不同层次，可以分为数据级、特征级和决策级；根据数据融合发生的地点，可以分为集中式、分布式和混合式；根据数据各传感器系统的连接方式，可以分为串联、并联和串并联混合式。

(2) 多传感器数据融合的方法：现代方法和经典方法。现代方法主要采用人工智能和信息论的方法。经典方法主要是统计方法和估计方法。

四、虚拟仪器技术

虚拟仪器技术就是在以计算机为核心的硬件平台上，将测试系统的硬件资源和计算机的软件资源有效结合所实现的一种计算机仪器系统。

虚拟仪器实质上是一种计算机仪器系统，它是由通用仪器硬件平台（简称硬件平台）和应用软件两大部分组成的。

(1) 硬件平台主要有两部分：计算机和 I/O 接口设备。根据 I/O 接口设备不同，虚拟仪器主要有 5 种构成方式：PC-DAQ 系统、GPIB 系统、VXI 系统、PXI 系统、串口系统。

(2) 虚拟仪器应用软件：文本式编程语言，如 Visual C++、Visual Basic、LabWindows/CVI 等；图形化编程语言，如 LabVIEW、HPVEE 等。

(3) LabVIEW 是一种基于 G 语言（图形化编程语言）的虚拟仪器软件开发工具。它采用图标代替编程语言来创建应用程序，使用数据流编程方法来描述程序的执行。

LabVIEW 环境下开发的程序称为虚拟仪器（简称 VI），由三个部分组成，即前面板、框图和图标/连接器。

思考题与习题

1. 信号调理的概念及作用是什么？
2. 信号采集系统由几部分组成？各部分的功能是什么？
3. 什么是软测量技术？软测量技术有哪些优点？
4. 常用的软测量技术有哪些？
5. 简述软测量系统的设计步骤。

6. 多传感器数据融合的定义是什么? 与单传感器技术相比有哪些优点?
7. 多传感器数据融合的分类方法有哪些? 每种分类中, 包含有哪种融合方法?
8. 软测量技术与多传感器数据融合技术有哪些异同点?
9. 虚拟仪器的概念是什么? 与传统仪器相比, 虚拟仪器有什么特点?
10. 利用 LabVIEW 软件创建虚拟仪器的步骤是什么?

附录 I

表 I - 1 铂铑 10—铂热电偶分度表 (分度号为 S, 冷端温度为 0°C, mV)

温度/°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.000	-0.053	-0.103	-0.150	-0.194	-0.236	—	—	—	—
0	0.000	0.055	0.113	0.173	0.235	0.299	0.365	0.433	0.502	0.573
100	0.646	0.720	0.795	0.872	0.950	1.029	1.110	1.191	1.273	1.357
200	1.441	1.526	1.612	1.698	1.786	1.874	1.962	2.052	2.141	2.232
300	2.323	2.415	2.507	2.599	2.692	2.786	2.880	2.974	3.069	3.164
400	3.259	3.355	3.451	3.548	3.645	3.742	3.840	3.938	4.036	4.134
500	4.233	4.332	4.432	4.532	4.632	4.732	4.833	4.934	5.035	5.137
600	5.239	5.341	5.443	5.546	5.649	5.753	5.857	5.961	6.065	6.170
700	6.275	6.381	6.486	6.593	6.699	6.806	6.913	7.020	7.128	7.236
800	7.345	7.454	7.563	7.673	7.783	7.893	8.003	8.114	8.226	8.337
900	8.449	8.562	8.674	8.787	8.900	9.014	9.128	9.242	9.357	9.472
1000	9.587	9.703	9.819	9.935	10.051	10.168	10.285	10.403	10.520	10.638
1100	10.757	10.875	10.994	11.113	11.232	11.351	11.471	11.590	11.710	11.830
1200	11.951	12.071	12.191	12.312	12.433	12.554	12.675	12.796	12.917	13.038
1300	13.159	13.280	13.402	13.523	13.644	13.766	13.887	14.009	14.130	14.251
1400	14.373	14.494	14.615	14.736	14.857	14.978	15.099	15.220	15.341	15.461
1500	15.582	15.702	15.822	15.942	16.062	16.182	16.301	16.420	16.539	16.658
1600	16.777	16.895	17.013	17.131	17.249	17.366	17.483	17.600	17.717	17.832
1700	17.947	18.061	18.174	18.285	18.395	18.503	18.609	—	—	—

表 I - 2 铂铑 30—铂铑 6 热电偶分度表 (分度号为 B, 冷端温度为 0°C, mV)

温度/°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0.000	-0.002	-0.003	-0.002	-0.000	0.002	0.006	0.011	0.017	0.025
100	0.033	0.043	0.053	0.065	0.078	0.092	0.107	0.123	0.141	0.159
200	0.178	0.199	0.220	0.243	0.267	0.291	0.317	0.344	0.372	0.401
300	0.431	0.462	0.494	0.527	0.561	0.596	0.632	0.669	0.707	0.746
400	0.787	0.828	0.870	0.913	0.957	1.002	1.048	1.095	1.143	1.192
500	1.242	1.293	1.344	1.397	1.451	1.505	1.561	1.617	1.675	1.733
600	1.792	1.852	1.913	1.975	2.037	2.101	2.165	2.230	2.296	2.363
700	2.431	2.499	2.569	2.639	2.710	2.782	2.854	2.928	3.002	3.087
800	3.154	3.230	3.308	3.386	3.466	3.546	3.626	3.708	3.790	3.873

续表

温度/°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
900	3.957	4.041	4.127	4.213	4.299	4.387	4.475	4.564	4.653	4.743
1000	4.834	4.926	5.018	5.111	5.205	5.299	5.394	5.489	5.585	5.682
1100	5.780	5.878	5.976	6.075	6.175	6.276	6.377	6.478	6.580	6.683
1200	6.786	6.890	6.995	7.100	7.205	7.311	7.417	7.524	7.632	7.740
1300	7.848	7.957	8.066	8.176	8.286	8.397	8.508	8.620	8.731	8.844
1400	8.956	9.069	9.182	9.296	9.410	9.524	9.639	9.753	9.868	9.984
1500	10.099	10.215	10.331	10.447	10.563	10.679	10.796	10.913	11.029	11.146
1600	11.263	11.380	11.497	11.614	11.731	11.848	11.965	12.082	12.199	12.316
1700	12.433	12.549	12.666	12.782	12.898	13.014	13.130	13.246	13.361	13.476
1800	13.591	13.706	13.820	—	—	—	—	—	—	—

表 I - 3 镍铬—镍硅热电偶分度表 (分度号为 K, 冷端温度为 0°C, mV)

温度/°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	-5.891	-6.035	-6.158	-6.262	-6.344	-6.404	-6.441	-6.458	—	—
-100	-3.554	-3.852	-4.138	-4.411	-4.669	-4.913	-5.141	-5.354	-5.550	-5.730
-0	0.000	-0.392	-0.778	-1.156	-1.527	-1.889	-2.243	-2.587	-2.920	-3.243
0	0.000	0.397	0.798	1.203	1.612	2.023	2.436	2.851	3.267	3.682
100	4.096	4.509	4.920	5.328	5.735	6.138	6.540	6.941	7.340	7.739
200	8.138	8.539	8.940	9.343	9.747	10.153	10.561	10.971	11.382	11.795
300	12.209	12.624	13.040	13.457	13.874	14.293	14.713	15.133	15.554	15.975
400	16.397	16.820	17.243	17.667	18.091	18.516	18.941	19.366	19.792	20.218
500	20.644	21.071	21.497	21.924	22.350	22.776	23.203	23.629	24.055	24.480
600	24.905	25.330	25.755	26.179	26.602	27.025	27.477	27.869	28.289	28.710
700	29.129	29.548	29.965	30.382	30.798	31.213	31.628	32.041	32.453	32.865
800	33.275	33.685	34.093	34.501	34.908	35.313	35.718	36.121	36.524	36.925
900	37.326	37.725	38.124	38.522	38.918	39.314	39.708	40.101	40.494	40.885
1000	41.276	41.665	42.053	42.440	42.826	43.211	43.595	43.978	44.359	44.740
1100	45.119	45.497	45.873	46.249	46.623	46.995	47.367	47.737	48.105	48.473
1200	48.838	49.202	49.565	49.926	50.286	50.644	51.000	51.355	51.708	52.060
1300	52.410	52.759	53.106	53.451	53.795	54.138	54.479	54.819	—	—

表 I - 8 铂热电阻分度表 ($R_0=100\Omega$, $\alpha=0.003851^\circ\text{C}^{-1}$, 分度号为 Pt100, Ω)

温度/ $^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-200	18.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—
-100	60.26	56.19	52.11	48.00	43.88	39.72	35.54	31.34	27.10	22.83
-0	100.00	96.09	92.16	88.22	84.27	80.31	76.33	72.33	68.33	64.30
0	100.00	103.90	107.79	111.67	115.54	119.40	123.24	127.08	130.90	134.71
100	138.51	142.29	146.07	149.83	153.58	157.33	161.05	164.77	168.48	172.17
200	175.86	179.53	183.19	186.84	190.47	194.10	197.71	201.31	204.90	208.48
300	212.05	215.61	219.15	222.68	226.21	229.72	233.21	236.70	240.18	243.64
400	247.09	250.53	253.96	257.38	260.78	264.18	267.56	270.93	274.29	277.64
500	280.98	284.30	287.62	290.92	294.21	297.49	300.75	304.01	307.25	310.49
600	313.71	316.92	320.12	323.30	326.48	329.64	332.79	335.93	339.06	342.18
700	345.28	348.38	351.46	354.53	357.59	360.64	363.67	366.70	369.71	372.71
800	375.70	378.68	381.65	384.60	387.55	390.48	—	—	—	—

表 I - 9 铜热电阻分度表 ($R_0=100\Omega$, $\alpha=0.004280^\circ\text{C}^{-1}$, 分度号为 Cu100, Ω)

温度/ $^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
-0	100.00	95.71	91.41	87.11	82.80	78.48	—	—	—	—
0	100.00	104.29	108.57	112.85	117.13	121.41	125.68	129.96	134.24	138.52
100	142.80	147.08	151.37	155.67	159.96	164.27	—	—	—	—

附录 II

表 II - 1 水和水蒸气的动力粘度 ($\eta \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

绝对压力 p/MPa 温度 $t/^\circ\text{C}$	0.1	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	饱和状态		温度 $t/^\circ\text{C}$
								水	水蒸气	
0	1792	1781	1770	1759	1749	1740	1731	1792	9.22	0
20	1003	1001	999.3	997.7	996.3	995.0	993.9	1003	9.73	20
40	653.2	653.6	654.0	654.5	655.0	655.6	656.2	653.1	10.31	40
60	466.9	467.9	469.0	470.1	471.2	472.3	473.4	466.8	10.94	60
80	355.0	356.3	357.6	358.9	360.2	361.5	362.8	354.9	11.60	80
100	12.27	283.6	234.9	286.2	287.6	288.9	290.2	282.1	12.28	100
120	13.02	233.4	234.7	236.1	237.4	238.7	240.0	232.1	12.97	120
140	13.79	197.4	198.7	200.0	201.3	202.6	203.9	196.1	13.67	140
160	14.58	170.7	172.0	173.3	174.5	175.8	177.0	169.6	14.37	160
180	15.37	150.4	151.6	152.9	154.1	155.3	156.5	149.4	15.07	180
200	16.18	134.5	135.7	137.0	138.2	139.4	140.6	133.6	15.78	200
220	16.99	121.7	122.9	124.2	125.4	126.6	127.8	121.0	16.49	220
240	17.81	111.0	112.3	113.6	114.9	116.1	117.3	110.5	17.22	240
260	18.63	101.6	103.1	104.5	105.8	107.1	108.4	101.5	17.98	260
280	19.46	18.91	94.6	96.2	97.7	99.1	100.5	93.41	18.80	280
300	20.29	19.86	86.4	88.3	90.1	91.7	93.2	85.81	19.74	300
320	21.12	20.79	20.76	80.2	82.4	84.4	86.2	78.27	20.89	320
340	21.95	21.70	21.71	70.6	74.1	76.8	79.1	70.21	22.52	340
360	22.78	22.60	22.65	23.24	62.7	67.9	71.3	60.21	25.53	360
380	23.61	23.49	23.57	24.05	25.66	52.2	61.7	—	—	380
400	24.44	24.37	24.49	24.91	25.96	28.98	43.66	—	—	400
420	25.27	25.25	25.39	25.78	26.61	28.32	32.38	—	—	420
440	26.10	26.11	26.28	26.66	27.37	28.62	30.90	—	—	440
460	26.93	26.97	27.16	27.53	28.17	29.19	30.82	—	—	460
480	27.75	27.82	28.03	28.40	28.99	29.87	31.17	—	—	480
500	28.57	28.67	28.89	29.26	29.82	30.61	31.70	—	—	500
520	29.38	29.51	29.74	30.12	30.64	31.37	32.33	—	—	520
540	30.20	30.34	30.59	30.96	31.47	31.14	33.01	—	—	540
560	31.01	31.12	31.38	31.75	32.25	32.88	33.67	—	—	560
580	31.81	31.95	32.22	32.58	33.06	33.67	34.40	—	—	580
600	32.62	32.76	33.04	33.41	33.88	34.45	35.15	—	—	600

表 II - 2 水和水蒸气的密度

绝对压力 p/MPa	饱和温度 $t_s/^\circ\text{C}$	饱和水密度 $\rho'_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	饱和蒸汽密度 $\rho''_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	下列温度值 ($^\circ\text{C}$) 时, 水和水蒸气的密度 ρ' 、 $\rho''/(\text{kg}/\text{m}^3)$															
				0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
0.1	99.63	958.41	0.5901	999.80	998.30	992.26	983.19	971.63	0.5896	0.5577	0.5294	0.5040	0.4812	0.4604	0.4413	0.4239	0.4077	0.3928	0.3789
0.2	120.23	942.68	1.1288	999.90	998.40	992.36	983.19	971.72	958.13	942.86	1.0693	1.0161	0.9690	0.9259	0.8865	0.8511	0.8183	0.7880	0.7599
0.3	133.54	931.53	1.6505	999.90	998.40	992.36	983.28	971.72	958.22	942.86	1.6207	1.5366	1.4624	1.3959	1.3358	1.2812	1.2311	1.1851	1.1425
0.4	143.62	922.59	2.1625	1000.0	998.50	992.46	983.28	971.82	958.22	942.95	925.93	2.0665	1.9631	1.8716	1.7895	1.7150	1.6472	1.5845	1.5272
0.5	151.85	915.08	2.6680	1000.0	998.50	992.46	983.38	971.82	958.31	942.95	925.93	2.6069	2.4716	2.3535	2.2477	2.1524	2.0657	1.9865	1.9135
1.0	179.88	887.00	5.1467	1000.3	998.70	992.65	983.57	972.10	958.59	943.22	926.27	907.52	5.1440	4.8567	4.6104	4.3956	4.2052	4.0323	3.8760
1.5	198.28	866.70	7.5959	1000.5	999.00	992.95	983.77	972.29	958.77	943.49	926.53	907.77	887.23	7.5529	7.1124	6.7431	6.4267	6.1463	5.8928
2.0	212.37	849.91	10.047	1000.8	999.20	993.15	984.06	972.57	959.05	943.75	926.78	908.10	887.63	865.05	8.7943	8.2251	7.7413	7.3333	6.9681
2.5	223.94	835.28	12.516	1001.0	999.40	993.34	984.25	972.76	959.32	944.02	927.04	908.43	887.94	865.43	840.55	11.850	11.169	10.600	10.109
3.0	233.34	822.17	15.011	1001.3	999.60	993.54	984.45	972.95	959.51	944.29	927.39	908.68	888.26	865.80	840.97	14.667	13.725	12.963	12.321
3.5	242.54	810.04	17.538	1001.5	999.90	993.74	984.64	973.24	959.79	944.55	927.64	909.01	888.57	866.18	841.40	813.80	16.434	15.434	14.613
4.0	250.33	798.66	20.105	1001.8	1000.1	994.04	984.93	973.43	959.97	944.82	927.90	909.34	888.97	866.55	841.89	814.33	19.327	18.028	16.992
4.5	257.41	787.96	22.717	1002.0	1000.3	994.23	985.12	973.71	960.25	945.00	928.16	909.67	889.28	867.00	842.32	814.86	22.452	20.764	19.470
5.0	263.92	777.73	25.374	1002.3	1000.5	994.43	985.32	973.90	960.43	945.27	928.42	909.92	889.60	867.30	842.74	815.39	784.31	23.674	22.065
6.0	275.56	758.32	30.855	1002.8	1001.0	994.93	985.80	974.37	960.98	945.81	929.02	910.50	890.31	868.13	843.67	816.39	785.61	30.148	27.655
7.0	285.80	739.97	36.576	1003.3	1001.4	995.32	986.19	974.75	961.45	946.34	929.54	911.08	890.95	868.81	844.52	817.46	786.91	751.48	33.944
8.0	294.98	722.39	42.571	1003.8	1001.9	995.72	986.68	975.23	961.91	946.79	930.06	911.74	891.58	869.56	845.38	818.46	788.21	753.18	41.237
9.0	303.31	705.27	48.876	1004.2	1002.3	996.21	987.07	975.70	962.37	947.33	930.67	912.33	892.30	870.32	846.24	819.54	789.45	754.77	713.17
10.0	310.96	688.42	55.556	1004.7	1002.8	996.61	987.56	976.18	962.83	947.78	931.19	912.91	892.94	871.08	847.10	820.48	790.64	756.37	715.41
11.0	318.04	671.73	62.617	1005.2	1003.2	997.01	987.95	976.56	963.30	948.32	931.71	913.49	893.58	871.84	847.96	821.49	791.89	757.92	717.57
12.0	324.64	655.01	70.175	1005.7	1003.6	997.41	988.34	977.04	963.76	948.77	932.23	914.08	894.21	872.52	848.75	822.50	793.08	759.47	719.68
13.0	330.81	638.16	78.309	1006.2	1004.1	997.90	988.83	977.42	964.23	949.31	932.75	914.66	894.85	873.29	849.62	823.45	794.28	760.98	721.76
14.0	336.63	620.96	87.032	1006.7	1004.5	998.30	989.22	977.90	964.69	949.76	933.27	915.25	895.50	873.97	850.41	824.47	795.42	762.49	723.80
15.0	342.12	603.14	96.618	1007.3	1005.0	998.70	989.61	978.38	965.16	950.30	933.79	915.83	896.14	874.74	851.21	825.42	796.62	763.94	725.74
16.0	347.32	584.76	107.18	1007.7	1005.4	999.20	990.10	978.76	965.62	950.75	934.32	916.42	896.78	875.43	852.08	826.38	797.77	765.40	727.70
17.0	352.26	565.29	119.03	1008.2	1005.8	999.60	990.49	979.24	966.09	951.29	934.84	916.93	897.42	876.12	852.88	827.27	798.91	766.81	729.55
18.0	356.96	544.07	132.73	1008.7	1006.3	1000.0	990.88	979.62	966.56	951.75	935.37	917.52	897.99	876.81	853.68	828.23	800.00	768.23	731.42
19.0	361.44	519.99	149.25	1009.2	1006.7	1000.4	991.38	980.10	966.93	952.20	935.89	918.11	898.63	877.50	854.48	829.12	801.09	769.59	733.19
20.0	365.71	490.68	170.27	1009.7	1007.2	1000.8	991.77	980.49	967.40	952.74	936.42	918.61	899.28	878.19	855.21	830.08	802.18	770.95	734.97

续表

绝对压力 p/MPa	饱和温度 $t_s/^\circ\text{C}$	饱和水密度 $\rho'_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	饱和蒸汽密度 $\rho''_s/(\text{kg}/\text{m}^3)$	下列温度值 ($^\circ\text{C}$) 时, 水和水蒸气的密度 $\rho', \rho''/(\text{kg}/\text{m}^3)$															
				320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	700
0.1	99.63	958.41	0.5901	0.3660	0.3541	0.3428	0.3322	0.3223	0.3130	0.3041	0.2959	0.2879	0.2805	0.2734	0.2667	0.2602	0.2541	0.2483	0.2227
0.2	120.23	942.68	1.1288	0.7337	0.7092	0.6868	0.6653	0.6456	0.6266	0.6090	0.5924	0.5764	0.5615	0.5470	0.5336	0.5208	0.5084	0.4968	0.4456
0.3	133.54	931.53	1.6505	1.1029	1.0661	1.0318	1.0000	0.9699	0.9416	0.9141	0.8889	0.8651	0.8425	0.8210	0.8013	0.7819	0.7634	0.7457	0.6684
0.4	143.62	922.59	2.1625	1.4738	1.4243	1.3780	1.3348	1.2943	1.2563	1.2206	1.1867	1.1547	1.1245	1.0958	1.0686	1.0428	1.0180	0.9945	0.8921
0.5	151.85	915.08	2.6680	1.8464	1.7838	1.7253	1.6711	1.6202	1.5723	1.5272	1.4848	1.4447	1.4067	1.3708	1.3365	1.3041	1.2732	1.2438	1.1150
1.0	179.88	887.00	5.1467	3.7341	3.6023	3.4807	3.3670	3.2616	3.1636	3.0713	2.9842	2.9019	2.8249	2.7510	2.6817	2.6157	2.5536	2.4938	2.2331
1.5	198.28	866.70	7.5959	5.6657	5.4585	5.2659	5.0916	4.9261	4.7733	4.6318	4.4984	4.3725	4.2535	4.1425	4.0355	3.9355	3.8402	3.7495	3.3557
2.0	212.37	849.91	10.047	7.6453	7.3529	7.0872	6.8399	6.6138	6.4061	6.2112	6.0277	5.8548	5.6948	5.5432	5.3996	5.2632	5.1335	5.0125	4.4803
2.5	223.94	835.28	12.515	9.6768	9.2937	8.9366	8.6207	8.3264	8.0601	7.8064	7.5700	7.3529	7.1480	6.9541	6.7705	6.5963	6.4350	6.2814	5.6085
3.0	233.34	822.17	15.011	11.765	11.273	10.832	10.432	10.067	9.7314	9.4251	9.1324	8.8652	8.6133	8.3752	8.1500	7.9428	7.7399	7.5529	6.7431
3.5	242.54	810.04	17.538	13.914	13.303	12.762	12.276	11.833	11.427	11.055	10.652	10.387	10.088	9.8058	9.5420	9.2937	9.0580	8.8339	7.8740
4.0	250.33	798.66	20.105	16.129	15.387	14.734	14.152	13.626	13.148	12.708	12.303	11.927	11.577	11.249	10.941	10.653	10.380	10.122	9.0171
4.5	257.41	787.96	22.717	18.416	17.525	16.748	16.064	15.449	14.892	14.382	13.914	13.481	13.079	12.703	12.350	12.021	11.710	11.416	10.158
5.0	263.92	777.73	25.374	20.786	19.724	18.811	18.015	17.301	16.661	16.077	15.542	15.051	14.592	14.168	13.770	13.398	13.046	12.716	11.305
6.0	275.56	758.32	30.855	25.800	24.325	23.089	22.036	21.106	20.280	19.535	18.857	18.235	17.662	17.132	16.639	16.176	15.743	15.335	13.607
7.0	285.80	739.97	36.576	31.260	29.231	27.601	26.233	25.050	24.010	23.084	22.247	21.487	20.790	20.145	19.547	18.990	18.471	17.982	15.924
8.0	294.98	722.39	42.571	37.286	34.518	32.373	30.628	29.146	27.863	26.731	25.720	24.808	23.969	23.207	22.497	21.844	21.231	20.657	18.255
9.0	303.31	705.27	48.876	44.092	40.258	37.467	35.249	33.411	31.857	30.488	29.283	28.201	27.211	26.316	25.491	24.728	24.021	23.359	20.602
10.0	310.96	688.42	55.556	51.975	46.577	42.918	40.128	37.864	35.984	34.364	32.938	31.666	30.516	29.481	28.531	27.655	26.838	26.089	22.957
11.0	318.04	671.73	62.617	61.538	53.648	48.804	45.290	42.535	40.274	38.358	36.684	35.211	33.887	32.701	31.616	30.618	29.700	28.843	25.329
12.0	324.64	655.01	70.175	669.30	61.728	55.249	50.787	47.438	44.743	42.481	40.535	38.835	37.327	35.971	34.746	33.625	32.595	31.636	27.724
13.0	330.81	638.16	78.309	672.54	71.327	62.344	56.689	52.604	49.383	46.751	44.504	42.553	40.850	39.308	37.922	36.670	35.511	34.447	30.120
14.0	336.63	620.96	87.032	675.63	83.264	70.323	63.091	58.072	54.230	51.177	48.591	46.361	44.425	42.699	41.152	39.761	38.476	37.300	32.541
15.0	342.12	603.14	96.618	678.61	612.63	79.491	70.028	63.857	59.347	55.741	52.798	50.277	48.100	46.168	44.444	42.882	41.477	40.177	34.977
16.0	347.32	584.76	107.18	681.48	618.24	90.334	77.700	70.077	64.683	60.533	57.143	54.289	51.840	49.677	47.778	46.062	44.504	43.085	37.425
17.0	352.26	565.29	119.03	684.23	623.36	103.99	86.207	76.746	70.323	65.488	61.614	58.411	55.648	53.277	51.177	49.285	47.574	46.019	39.888
18.0	356.96	544.07	132.73	686.91	628.14	122.93	95.932	83.963	76.278	70.671	66.269	62.617	59.595	56.948	54.615	52.549	50.684	48.996	42.355
19.0	361.44	519.99	149.25	689.51	632.63	153.47	107.24	91.827	82.576	76.104	71.073	66.979	63.573	60.680	58.140	55.866	53.850	52.002	44.843
20.0	365.71	490.68	170.27	692.04	636.82	182.55	120.88	100.48	89.366	81.766	76.046	71.480	67.705	64.475	61.690	59.242	57.045	55.066	47.371

注 临界状态参数 $p=22.115\text{MPa}$, $t=374.12^\circ\text{C}$, $\rho=317.763\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 II - 3 节流件和管道材料的线膨胀系数 λ

$\lambda \times 10^6 / ^\circ\text{C}^{-1}$	温度范围 / $^\circ\text{C}$						
	20~100	20~200	20~300	20~400	20~500	20~600	20~700
材料							
A3 钢	11.75	12.41	13.45	13.60	13.85	13.90	—
A3F, B3 钢	11.6	—	—	—	—	—	—
10 号钢	11.60	12.60	—	13.00	—	14.60	—
20 号钢	11.16	12.12	12.78	13.38	13.93	14.38	14.81
45 号钢	11.59	12.32	13.09	13.71	14.18	14.87	15.08
1Cr13, 2Cr13	10.59	11.00	11.50	12.00	12.00	—	—
1Cr17	10.00	10.00	10.50	10.50	11.00	—	—
12CrMoV	10.8	11.79	12.35	12.80	13.20	13.65	13.80
10CrMo910	12.50	13.60	13.60	14.00	14.40	14.70	—
Cr6SiMo	11.50	12.00	—	12.50	—	13.00	—
X20CrMoWV121							
X20CrMoV121	10.80	11.20	11.60	11.90	12.10	12.30	—
1Cr18Ni9Ti	16.60	17.00	17.20	17.50	17.90	18.20	18.60
普通碳钢	10.60~12.20	11.30~13.00	12.10~13.50	12.90~13.90	—	13.50~14.30	14.70~15.00
工业用钢	16.60~17.10	17.10~17.20	17.60	18.00~18.10	—	18.80	—
红铜	17.20	17.50	17.90	—	—	—	—
黄铜	17.80	18.80	20.90	—	—	—	—
12Cr3MoVSiTiB*	10.31	11.46	11.92	12.42	13.14	13.31	13.54
12CrMo*	11.20	12.50	12.70	12.90	13.20	13.50	13.80

* 采用该列数据时, 工作温度 t 下的管道内径 D 和节流件开孔直径 d 应采用下式计算:

$$D = D_{20}[1 + \lambda_D(t - 25)]; \quad d = d_{20}[1 + \lambda_d(t - 25)]$$

采用其余各列数据时, 工作温度 t 下的管道内径 D 和节流件开孔直径 d 应采用下式计算:

$$D = D_{20}[1 + \lambda_D(t - 20)]; \quad d = d_{20}[1 + \lambda_d(t - 20)]$$

表 II - 4 管壁等效绝对粗糙度 K 值

材 料	条 件	K/mm
黄铜、紫铜、铝、塑料、玻璃	光滑、无沉积物	< 0.03
铜	新的, 冷拔无缝管	< 0.03
	新的, 热拉无缝管	0.05~0.10
	新的, 轧制无缝管	0.05~0.10
	新的, 纵向焊接管	0.05~0.10
	新的, 螺旋焊接管	0.10
	轻微锈蚀	0.10~0.20
	锈蚀	0.20~0.30
	结皮	0.50~2
	严重结皮	> 2
	新的, 涂复沥青	0.03~0.05
	一般的, 涂复沥青	0.10~0.20
镀锌的	0.13	
铸铁	新的	0.25
	锈蚀	1.0~1.5
	结皮	> 1.5
	新的, 涂复	0.03~0.05
石棉水泥	新的, 有涂层的和无涂层的	< 0.03
	一般的, 无涂层的	0.05

表 II - 5

角接取压标准孔板的流出系数 C 值

Re_D	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
β	C											
	0.5970	0.5970	0.5970	0.5970								
0.22	0.6007	0.5993	0.5984	0.5981	0.5978	0.5977	0.5976	0.5974	0.5973	0.5972	0.5972	0.5972
0.24	0.6018	0.6000	0.5990	0.5986	0.5982	0.5981	0.5979	0.5977	0.5975	0.5975	0.5975	0.5975
0.26	0.6031	0.6009	0.5996	0.5991	0.5987	0.5985	0.5983	0.5980	0.5978	0.5978	0.5977	0.5977
0.28	0.6044	0.6019	0.6003	0.5997	0.5992	0.5989	0.5987	0.5983	0.5982	0.5981	0.5981	0.5980
0.30	0.6060	0.6029	0.6011	0.6004	0.5997	0.5994	0.5992	0.5987	0.5985	0.5984	0.5984	0.5984
0.32	0.6077	0.6040	0.6019	0.6011	0.6003	0.6000	0.5997	0.5991	0.5989	0.5988	0.5987	0.5987
0.34	0.6095	0.6053	0.6028	0.6018	0.6010	0.6005	0.6002	0.5996	0.5993	0.5991	0.5991	0.5991
0.36	0.6115	0.6066	0.6037	0.6026	0.6016	0.6012	0.6008	0.6001	0.5997	0.5995	0.5995	0.5995
0.38	0.6136	0.6081	0.6048	0.6035	0.6024	0.6013	0.6014	0.6005	0.6002	0.6000	0.5999	0.5999
0.40	0.6159	0.6096	0.6059	0.6044	0.6031	0.6025	0.6020	0.6011	0.6006	0.6004	0.6003	0.6003
0.42	0.6184	0.6113	0.6070	0.6054	0.6039	0.6032	0.6026	0.6016	0.6011	0.6008	0.6008	0.6008
0.44	0.6210	0.6130	0.6082	0.6064	0.6047	0.6039	0.6033	0.6021	0.6016	0.6013	0.6012	0.6012
0.46	0.6238	0.6148	0.6095	0.6074	0.6056	0.6047	0.6040	0.6027	0.6021	0.6017	0.6017	0.6016
0.48	—	0.6167	0.6108	0.6085	0.6064	0.6005	0.6047	0.6032	0.6025	0.6021	0.6021	0.6021
0.50	—	0.6187	0.6121	0.6096	0.6073	0.6062	0.6053	0.6037	0.6030	0.6026	0.6025	0.6025
0.51	—	0.6197	0.6128	0.6101	0.6077	0.6066	0.6057	0.6040	0.6031	0.6027	0.6027	0.6026
0.52	—	0.6207	0.6135	0.6107	0.6182	0.6070	0.6060	0.6042	0.6034	0.6025	0.6208	0.6208
0.53	—	0.6217	0.6141	0.6112	0.6086	0.6073	0.6063	0.6044	0.6036	0.6031	0.6030	0.6030
0.54	—	0.6228	0.6148	0.6117	0.6090	0.6077	0.6066	0.6047	0.6037	0.6032	0.6031	0.6031
0.55	—	0.6238	0.6155	0.6123	0.6094	0.6080	0.6069	0.6049	0.6039	0.6034	0.6033	0.6032
0.56	—	0.6249	0.6162	0.6128	0.6098	0.6084	0.6072	0.6050	0.6040	0.6035	0.6034	0.6034
0.57	—	0.6259	0.6168	0.6133	0.6102	0.6087	0.6074	0.6052	0.6041	0.6036	0.6035	0.6034
0.58	—	0.6270	0.6175	0.6138	0.6105	0.6089	0.6077	0.6053	0.6042	0.6036	0.6035	0.6035
0.59	—	0.6280	0.6181	0.6143	0.6108	0.6092	0.6079	0.6054	0.6043	0.6036	0.6035	0.6035
0.60	—	0.6291	0.6187	0.6147	0.6111	0.6094	0.6080	0.6055	0.6043	0.6036	0.6035	0.6035
0.61	—	0.6301	0.6193	0.6151	0.6114	0.6096	0.6082	0.6055	0.6043	0.6036	0.6034	0.6034
0.62	—	0.6311	0.6198	0.6155	0.6116	0.6098	0.6083	0.6055	0.6042	0.6035	0.6033	0.6033
0.63	—	0.6320	0.6203	0.6158	0.6118	0.6099	0.6083	0.6054	0.6041	0.6033	0.6032	0.6032
0.64	—	0.6330	0.6208	0.6161	0.6119	0.6099	0.6083	0.6053	0.6039	0.6031	0.6030	0.6029
0.65	—	0.6339	0.6212	0.6164	0.6120	0.6099	0.6082	0.6051	0.6037	0.6028	0.6027	0.6027
0.66	—	0.6348	0.6216	0.6165	0.6120	0.6099	0.6081	0.6048	0.6033	0.6025	0.6023	0.6023
0.67	—	0.6356	0.6219	0.6167	0.6120	0.6097	0.6079	0.6045	0.6029	0.6021	0.6019	0.6019
0.68	—	0.6363	0.6222	0.6167	0.6118	0.6095	0.6076	0.6041	0.6025	0.6016	0.6014	0.6014
0.69	—	0.6370	0.6223	0.6167	0.6116	0.6092	0.6072	0.6036	0.6019	0.6010	0.6008	0.6008
0.70	—	0.6376	0.6224	0.6165	0.6113	0.6088	0.6067	0.6030	0.6012	0.6003	0.6001	0.6000
0.71	—	0.6382	0.6224	0.6163	0.6109	0.6083	0.6061	0.6023	0.6004	0.5994	0.5993	0.5992
0.72	—	0.6386	0.6222	0.6160	0.6103	0.6076	0.6054	0.6014	0.5995	0.5985	0.5983	0.5983
0.73	—	0.6389	0.6220	0.6155	0.6097	0.6069	0.6046	0.6004	0.5985	0.5974	0.5972	0.5972
0.74	—	0.6391	0.6216	0.6149	0.6089	0.6060	0.6036	0.5993	0.5973	0.5962	0.5960	0.5959
0.75	—	0.6392	0.6211	0.6141	0.6079	0.6049	0.6025	0.5980	0.5959	0.5948	0.5946	0.5945

表 II - 6

ISA1932 喷嘴的流出系数 C 值

Re_D	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	2×10^6	1×10^7
β	C								
0.30	—	—	—	0.9855	0.9865	0.9878	0.9882	0.9883	0.9884
0.32	—	—	—	0.9847	0.9858	0.9873	0.9877	0.9878	0.9879
0.34	—	—	—	0.9838	0.9850	0.9866	0.9871	0.9872	0.9873
0.36	—	—	—	0.9828	0.9840	0.9859	0.9864	0.9865	0.9866
0.38	—	—	—	0.9816	0.9830	0.9849	0.9855	0.9856	0.9857
0.40	—	—	—	0.9803	0.9818	0.9839	0.9845	0.9846	0.9847
0.42	—	—	—	0.9789	0.9805	0.9827	0.9833	0.9834	0.9835
0.44	0.9616	0.9692	0.9750	0.9773	0.9789	0.9813	0.9820	0.9821	0.9822
0.45	0.9604	0.9682	0.9741	0.9764	0.9781	0.9805	0.9812	0.9813	0.9814
0.46	0.9592	0.9672	0.9731	0.9755	0.9773	0.9797	0.9804	0.9805	0.9806
0.47	0.9579	0.9661	0.9722	0.9746	0.9763	0.9788	0.9795	0.9797	0.9797
0.48	0.9567	0.9650	0.9711	0.9736	0.9754	0.9779	0.9786	0.9787	0.9788
0.49	0.9554	0.9638	0.9700	0.9726	0.9743	0.9769	0.9776	0.9777	0.9778
0.50	0.9542	0.9626	0.9689	0.9715	0.9733	0.9758	0.9766	0.9767	0.9768
0.51	0.9529	0.9614	0.9678	0.9703	0.9721	0.9747	0.9754	0.9756	0.9757
0.52	0.9516	0.9602	0.9665	0.9691	0.9709	0.9735	0.9743	0.9744	0.9745
0.53	0.9503	0.9589	0.9653	0.9678	0.9696	0.9722	0.9730	0.9731	0.9732
0.54	0.9490	0.9576	0.9639	0.9665	0.9683	0.9709	0.9717	0.9718	0.9719
0.55	0.9477	0.9562	0.9626	0.9651	0.9669	0.9695	0.9702	0.9704	0.9705
0.56	0.9464	0.9548	0.9611	0.9637	0.9655	0.9680	0.9688	0.9689	0.9690
0.57	0.9451	0.9534	0.9596	0.9621	0.9639	0.9664	0.9672	0.9673	0.9674
0.58	0.9438	0.9520	0.9581	0.9606	0.9623	0.9648	0.9655	0.9656	0.9657
0.59	0.9424	0.9505	0.9565	0.9589	0.9606	0.9630	0.9638	0.9639	0.9640
0.60	0.9411	0.9490	0.9548	0.9572	0.9588	0.9612	0.9619	0.9620	0.9621
0.61	0.9398	0.9474	0.9531	0.9554	0.9570	0.9593	0.9600	0.9601	0.9602
0.62	0.9385	0.9458	0.9513	0.9535	0.9550	0.9573	0.9579	0.9580	0.9581
0.63	0.9371	0.9442	0.9494	0.9515	0.9530	0.9551	0.9558	0.9559	0.9560
0.64	0.9358	0.9425	0.9475	0.9495	0.9509	0.9529	0.9535	0.9536	0.9537
0.65	0.9345	0.9408	0.9455	0.9473	0.9487	0.9506	0.9511	0.9512	0.9513
0.66	0.9332	0.9390	0.9434	0.9451	0.9464	0.9481	0.9487	0.9487	0.9488
0.67	0.9319	0.9372	0.9412	0.9428	0.9440	0.9456	0.9460	0.9461	0.9462
0.68	0.9306	0.9354	0.9390	0.9404	0.9414	0.9429	0.9433	0.9434	0.9435
0.69	0.9293	0.9335	0.9367	0.9379	0.9388	0.9401	0.9405	0.9405	0.9406
0.70	0.9280	0.9316	0.9343	0.9353	0.9361	0.9372	0.9375	0.9375	0.9376
0.71	0.9268	0.9296	0.9318	0.9326	0.9332	0.9341	0.9344	0.9344	0.9344
0.72	0.9255	0.9276	0.9292	0.9298	0.9303	0.9309	0.9311	0.9311	0.9312
0.73	0.9243	0.9256	0.9265	0.9269	0.9272	0.9276	0.9277	0.9277	0.9278
0.74	0.9231	0.9235	0.9238	0.9239	0.9240	0.9241	0.9242	0.9242	0.9242
0.75	0.9219	0.9213	0.9209	0.9208	0.9207	0.9205	0.9205	0.9205	0.9205
0.76	0.9207	0.9192	0.9180	0.9176	0.9172	0.9168	0.9166	0.9166	0.9166
0.77	0.9195	0.9169	0.9150	0.9142	0.9136	0.9128	0.9126	0.9126	0.9125
0.78	0.9184	0.9147	0.9118	0.9107	0.9099	0.9088	0.9084	0.9084	0.9083
0.79	0.9173	0.9123	0.9086	0.9071	0.9060	0.9045	0.9041	0.9040	0.9040
0.80	0.9162	0.9100	0.9053	0.9034	0.9020	0.9001	0.8996	0.8995	0.8994

表 II - 7

长径喷嘴的流出系数 C 值

Re_D	1×10^4	2×10^4	5×10^4	1×10^5	2×10^5	5×10^5	1×10^6	5×10^6	1×10^7
β	C								
0.20	0.9673	0.9759	0.9834	0.9873	0.9900	0.9924	0.9936	0.9952	0.9956
0.22	0.9659	0.9748	0.9828	0.9868	0.9897	0.9922	0.9934	0.9951	0.9955
0.24	0.9645	0.9739	0.9822	0.9864	0.9893	0.9920	0.9933	0.9951	0.9955
0.26	0.9632	0.9730	0.9816	0.9860	0.9891	0.9918	0.9932	0.9950	0.9954
0.28	0.9619	0.9721	0.9810	0.9856	0.9888	0.9916	0.9930	0.9950	0.9954
0.30	0.9607	0.9712	0.9805	0.9852	0.9885	0.9914	0.9929	0.9949	0.9954
0.32	0.9596	0.9704	0.9800	0.9848	0.9882	0.9913	0.9928	0.9948	0.9953
0.34	0.9584	0.9696	0.9795	0.9845	0.9880	0.9911	0.9927	0.9948	0.9953
0.36	0.9573	0.9688	0.9790	0.9841	0.9877	0.9910	0.9926	0.9947	0.9953
0.38	0.9562	0.9680	0.9785	0.9838	0.9875	0.9908	0.9925	0.9947	0.9952
0.40	0.9552	0.9673	0.9780	0.9834	0.9873	0.9907	0.9924	0.9947	0.9952
0.42	0.9542	0.9666	0.9776	0.9831	0.9870	0.9905	0.9923	0.9946	0.9952
0.44	0.9532	0.9659	0.9771	0.9828	0.9868	0.9904	0.9922	0.9946	0.9951
0.46	0.9522	0.9652	0.9767	0.9825	0.9866	0.9902	0.9921	0.9945	0.9951
0.48	0.9513	0.9645	0.9763	0.9822	0.9864	0.9901	0.9920	0.9945	0.9951
0.50	0.9503	0.9639	0.9759	0.9819	0.9862	0.9900	0.9919	0.9944	0.9950
0.51	0.9499	0.9635	0.9756	0.9818	0.9861	0.9899	0.9918	0.9944	0.9950
0.52	0.9494	0.9632	0.9754	0.9816	0.9860	0.9898	0.9917	0.9944	0.9950
0.53	0.9490	0.9629	0.9752	0.9815	0.9859	0.9898	0.9917	0.9944	0.9950
0.54	0.9485	0.9626	0.9750	0.9813	0.9858	0.9897	0.9917	0.9944	0.9950
0.55	0.9481	0.9623	0.9748	0.9812	0.9857	0.9897	0.9917	0.9943	0.9950
0.56	0.9476	0.9619	0.9746	0.9810	0.9856	0.9896	0.9916	0.9943	0.9950
0.57	0.9472	0.9616	0.9745	0.9809	0.9855	0.9895	0.9916	0.9943	0.9949
0.58	0.9468	0.9613	0.9743	0.9808	0.9854	0.9895	0.9915	0.9943	0.9949
0.59	0.9463	0.9610	0.9741	0.9806	0.9853	0.9894	0.9915	0.9943	0.9949
0.60	0.9459	0.9607	0.9739	0.9805	0.9852	0.9893	0.9914	0.9942	0.9949
0.61	0.9455	0.9604	0.9737	0.9804	0.9851	0.9893	0.9914	0.9942	0.9949
0.62	0.9451	0.9601	0.9735	0.9802	0.9850	0.9892	0.9914	0.9942	0.9949
0.63	0.9447	0.9599	0.9733	0.9801	0.9849	0.9892	0.9913	0.9942	0.9949
0.64	0.9443	0.9596	0.9731	0.9800	0.9848	0.9891	0.9913	0.9942	0.9948
0.65	0.9439	0.9593	0.9730	0.9799	0.9847	0.9891	0.9912	0.9941	0.9948
0.66	0.9435	0.9590	0.9728	0.9797	0.9846	0.9890	0.9912	0.9941	0.9948
0.67	0.9430	0.9587	0.9726	0.9796	0.9845	0.9889	0.9912	0.9941	0.9948
0.68	0.9427	0.9584	0.9724	0.9795	0.9845	0.9889	0.9911	0.9941	0.9948
0.69	0.9423	0.9581	0.9722	0.9793	0.9844	0.9888	0.9911	0.9941	0.9948
0.70	0.9419	0.9579	0.9721	0.9792	0.9843	0.9888	0.9910	0.9941	0.9948
0.71	0.9415	0.9576	0.9719	0.9791	0.9842	0.9887	0.9910	0.9940	0.9948
0.72	0.9411	0.9573	0.9717	0.9790	0.9841	0.9887	0.9910	0.9940	0.9947
0.73	0.9407	0.9570	0.9715	0.9789	0.9840	0.9886	0.9909	0.9940	0.9947
0.74	0.9403	0.9568	0.9714	0.9787	0.9839	0.9886	0.9909	0.9940	0.9947
0.75	0.9399	0.9565	0.9712	0.9786	0.9839	0.9885	0.9908	0.9940	0.9947
0.76	0.9396	0.9562	0.9710	0.9785	0.9838	0.9884	0.9908	0.9940	0.9947
0.77	0.9392	0.9560	0.9709	0.9784	0.9837	0.9884	0.9908	0.9939	0.9947
0.78	0.9388	0.9557	0.9707	0.9783	0.9836	0.9883	0.9907	0.9939	0.9947
0.79	0.9385	0.9555	0.9705	0.9781	0.9835	0.9883	0.9907	0.9939	0.9947
0.80	0.9381	0.9552	0.9704	0.9780	0.9834	0.9882	0.9907	0.9939	0.9947

表 II - 8

可膨胀性系数 ϵ 值 (标准孔板)

p_2/p_1		0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.85	0.80	0.75
β	β^4	$k=1.2$							
0.000	0.000	0.993	0.986	0.980	0.973	0.966	0.949	0.932	0.915
0.562	0.100	0.993	0.985	0.978	0.970	0.963	0.944	0.926	0.907
0.669	0.200	0.992	0.984	0.976	0.968	0.960	0.940	0.920	0.900
0.740	0.300	0.991	0.983	0.974	0.966	0.957	0.936	0.914	0.893
0.750	0.316	0.991	0.983	0.974	0.965	0.957	0.935	0.913	0.892
		$k=1.3$							
0.000	0.000	0.994	0.987	0.981	0.975	0.968	0.953	0.937	0.921
0.562	0.100	0.993	0.986	0.979	0.973	0.966	0.949	0.932	0.914
0.669	0.200	0.993	0.985	0.978	0.970	0.963	0.945	0.926	0.908
0.740	0.300	0.992	0.984	0.976	0.968	0.960	0.941	0.921	0.901
0.750	0.316	0.992	0.984	0.976	0.968	0.960	0.940	0.920	0.900
		$k=1.4$							
0.000	0.000	0.994	0.988	0.982	0.977	0.971	0.956	0.941	0.927
0.562	0.100	0.994	0.987	0.981	0.975	0.968	0.952	0.936	0.921
0.669	0.200	0.993	0.986	0.979	0.973	0.966	0.949	0.931	0.914
0.740	0.300	0.993	0.985	0.978	0.971	0.963	0.945	0.926	0.908
0.750	0.316	0.993	0.985	0.978	0.970	0.963	0.944	0.926	0.907
		$k=1.66$							
0.000	0.000	0.995	0.990	0.985	0.980	0.975	0.963	0.951	0.938
0.562	0.100	0.995	0.989	0.984	0.979	0.973	0.960	0.946	0.933
0.669	0.200	0.994	0.988	0.983	0.977	0.971	0.957	0.942	0.928
0.740	0.300	0.994	0.988	0.981	0.975	0.969	0.953	0.938	0.922
0.750	0.316	0.994	0.987	0.981	0.975	0.969	0.953	0.937	0.922

表 II - 9

可膨胀性系数 ε 值 (喷嘴、文丘里管和文丘里喷嘴)

p_2/p_1		1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.85	0.80	0.75
β	β^4	$k=1.2$								
0.000	0.000	1.000	0.987	0.975	0.962	0.949	0.936	0.903	0.869	0.834
0.562	0.100	1.000	0.986	0.971	0.957	0.942	0.928	0.891	0.854	0.817
0.669	0.200	1.000	0.983	0.967	0.950	0.934	0.918	0.877	0.837	0.797
0.740	0.300	1.000	0.981	0.961	0.942	0.924	0.905	0.860	0.816	0.773
0.795	0.400	1.000	0.977	0.954	0.932	0.911	0.890	0.839	0.791	0.745
0.800	0.410	1.000	0.976	0.953	0.931	0.909	0.888	0.837	0.788	0.742
		$k=1.3$								
0.000	0.000	1.000	0.988	0.977	0.965	0.953	0.941	0.910	0.878	0.846
0.562	0.100	1.000	0.987	0.973	0.960	0.947	0.933	0.899	0.864	0.829
0.669	0.200	1.000	0.985	0.989	0.954	0.939	0.924	0.886	0.848	0.810
0.740	0.300	1.000	0.982	0.964	0.947	0.929	0.912	0.870	0.828	0.787
0.795	0.400	1.000	0.978	0.957	0.937	0.917	0.897	0.850	0.804	0.760
0.800	0.410	1.000	0.978	0.957	0.936	0.915	0.895	0.847	0.801	0.757
		$k=1.4$								
0.000	0.000	1.000	0.989	0.978	0.967	0.956	0.945	0.916	0.886	0.856
0.562	0.100	1.000	0.988	0.975	0.963	0.950	0.938	0.906	0.873	0.840
0.669	0.200	1.000	0.986	0.971	0.957	0.943	0.929	0.893	0.858	0.822
0.740	0.300	1.000	0.983	0.967	0.950	0.934	0.918	0.878	0.839	0.800
0.795	0.400	1.000	0.980	0.960	0.941	0.922	0.904	0.859	0.815	0.773
0.800	0.410	1.000	0.980	0.960	0.940	0.921	0.902	0.857	0.813	0.770
		$k=1.66$								
0.000	0.000	1.000	0.991	0.982	0.972	0.963	0.953	0.929	0.903	0.877
0.562	0.100	1.000	0.990	0.979	0.968	0.958	0.947	0.920	0.892	0.863
0.669	0.200	1.000	0.988	0.976	0.964	0.952	0.939	0.909	0.878	0.846
0.740	0.300	1.000	0.986	0.972	0.958	0.944	0.930	0.895	0.861	0.826
0.795	0.400	1.000	0.983	0.966	0.950	0.934	0.918	0.878	0.840	0.802
0.800	0.410	1.000	0.983	0.966	0.949	0.932	0.916	0.876	0.837	0.799

表 II - 10

差压计的基本参数

仪表型号	仪表结构	显示仪表类型	测量范围		仪表基本误差 (%)	被测介质压力 (MPa)
			流量 (t/h, kg/h, m ³ /h)	压差 (kPa)		
CW _B -280	双波纹管 差压计	单指示		CWC 型 100, 160, 250, 400	±1.0	6.4, 16, 32
CW _B ^C -282		指示带积算			±1.5	
CW _B ^C -274		指示带气变送			±1.5	
CW _B ^C -276		指示带电变送			±1.5	
CW _B ^C -410		单记录			±1.0	
CW _B ^C -610		单记录			±1.0	
CW _B ^C -612		记录带积算			±1.5	
CW _B ^C -415		记录带气调节			±1.5	
CW _B ^C -615		记录带气调节			±1.5	
CW _B ^C -430		双参数记录 (流量、压力)			±1.0	
CW _B ^C -630						
1151DR		电容式 差压 变送器			有配套的 4~20mA 直流指示表	
1151DP	0-1.3~7.5		±0.2	14		
	0-6.2~37.4					
	0-31.1~186.8					
	0-117~689.5					
1151HP	0-345~2068		±0.25	31.5		
	0-1170~6895					
3051CD	0-6.2~37.4	±0.075	25			
	0-31.1~186.8					
	0-117~689.5					
	0-345~2068					
EJA110A	谐振式 差压 变送器			0-0.12~6.22	±0.075	3.5
				0-0.62~62.2		
				0-2.48~248		
				0-20.7~2070		
				0-138~13 800		
				0-0.5~10		
EJA120A	0-1~100	±0.075	16			
	0-5~500					
EJA130A	0-140~14 000	±0.075	0.05			
	0-0.1~1					
	0-1~100	±0.075	32 (42)			
	0-5~500					

续表

仪表型号	仪表结构	显示仪表类型	测量范围		仪表基本 误差 (%)	被测介质 压力 (MPa)
			流量 (t/h, kg/h, m ³ /h)	压差 (kPa)		
PMD70	电容式 差压 变送器	有配套的 4~20mA 直流指示表	1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.2, 4, 5, 6.3, 8×10 ⁿ <i>n</i> 为正或负的 整数或零	-2.5~2.5	±0.075	10
				-10~10		
PMD75	扩散硅 差压 变送器			-50~50		
				-300~300		
				-1~1	±0.075	16 (42)
				-3~3		
				-10~10		
				-50~50		
				-300~300		
				-1600~1600		
				-4000~4000		

参 考 文 献

1. 周泽存, 刘馨媛. 检测技术. 北京: 机械工业出版社, 1993.
2. 吕崇德. 热工参数测量与处理. 北京: 清华大学出版社, 2001.
3. 张宝芬. 自动检测技术及仪表控制系统. 北京: 化学工业出版社, 2000.
4. 孟华. 工业过程检测与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
5. 赵玉珠. 测量仪表与自动化. 山东: 石油工业出版社, 1997.
6. 李军, 贺庆之. 检测技术. 北京: 中国轻工业出版社, 1992.
7. 张国忠, 赵家贵. 检测技术. 北京: 中国计量出版社, 1998.
8. 程大亨. 热工过程检测仪表. 北京: 中国电力出版社, 1997.
9. 何适生. 热工参数测量及仪表. 北京: 中国水利电力出版社, 1990.
10. 姚士春. 压力仪表使用维修与检定. 北京: 中国计量出版社, 2003.
11. 苏彦勋. 流量计量与测试. 北京: 中国计量出版社, 1993.
12. 梁国伟, 蔡武昌. 流量测量技术与仪表. 北京: 机械工业出版社, 2002.
13. 杜如彬, 柯象恒. 液位检测技术. 北京: 原子能出版社, 1987.
14. 吴永生, 方可人. 热工测量及仪表. 北京: 水利电力出版社, 1995.
15. 施文康, 余晓芬. 检测技术. 北京: 机械工业出版社, 2002.
16. 杜维. 过程检测技术及仪表. 北京: 化学工业出版社, 1998.
17. 张秀彬. 热工测量原理及其现代技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1995.
18. 刘元扬. 自动检测和过程控制. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
19. 何金田. 自动检测技术. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
20. 方彦军, 程继红. 检测技术与系统设计. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
21. 崔志尚. 温度计量与测试. 北京: 中国计量出版社, 1998.
22. 张宏建, 王化祥, 周泽魁等. 检测控制仪表学习指导. 北京: 化学工业出版社, 2006.
23. 王俊杰. 检测技术与仪表. 湖北: 武汉理工大学出版社, 2002.
24. 杜水友. 压力测量技术及仪表. 北京: 机械工业出版社, 2005.
25. 张宏建, 蒙建波. 自动检测技术与装置. 北京: 化学工业出版社, 2004.
26. 戚新波. 检测技术与智能仪器. 北京: 电子工业出版社, 2005.
27. 张毅. 自动检测技术及仪表控制系统. 北京: 化学工业出版社, 2005.
28. 张欣欣, 孙艳华. 自动检测技术. 北京: 清华大学出版社, 2006.
29. 林德杰. 过程控制仪表及控制系统. 北京: 机械工业出版社, 2004.
30. 王化祥. 自动检测技术. 北京: 化学工业出版社, 2004.
31. 周杏鹏. 现代检测技术. 北京: 高等教育出版社, 2004.
32. 孟华. 工业过程检测与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
33. 林锦国. 过程控制系统仪表装置. 南京: 东南大学出版社, 2001.
34. 杜鹃. 测量仪表与自动化. 东营: 石油大学出版社, 2003.
35. 葛长虹. 工业测控系统的抗干扰技术. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
36. 于洋. 在线分析仪器. 北京: 电子工业出版社, 2006.
37. GB/T 16839.1—1997 热电偶—第1部分: 分度表. 国家技术监督局发布, 1997.
38. GB/T 16839.2—1997 热电偶—第2部分: 允差. 国家技术监督局发布, 1997.

39. GB/T 4989—1994 热电偶用补偿导线. 国家技术监督局发布, 1994.
40. GB/T 3772—1998 铂铑 10—铂热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
41. GB/T 1598—1998 铂铑 13—铂热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
42. GB/T 2902—1998 铂铑 30—铂铑 6 热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
43. GB/T 2614—1998 镍铬—镍硅热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
44. GB/T 17615—1998 镍铬硅—镍硅镁热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
45. GB/T 4993—1998 镍铬—铜镍 (康铜) 热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
46. GB/T 2903—1998 铜—铜镍 (康铜) 热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
47. GB/T 4994—1998 铁—铜镍 (康铜) 热电偶丝. 国家质量技术监督局发布, 1998.
48. JJG 229—1998 工业铂、铜热电阻. 国家质量技术监督局发布, 1998.
49. JJG 351—1996 工业用廉金属热电偶. 国家技术监督局发布, 1996.
50. JJG 52—1999 弹簧管式一般压力表、压力真空表和真空表. 国家质量技术监督局发布, 1999.
51. GB/T 2624—1993 流量测量节流装置—用孔板、喷嘴和文丘里管测量充满圆管的流体流量. 国家质量技术监督局发布, 1993.
52. 赵岚, 齐德荣. 热电阻测温电路非线性补偿. 传感器技术, 2002, 21 (5).
53. 杜西亮, 孙慧明. 多项式回归在智能传感器线性化中的应用. 传感技术学报, 2005, 18 (1).
54. 高庆中. 工业铂电阻测温技术中热电势的影响. 计量技术, 1995 (4).
55. 季舟筠. 流量测量的新技术—V 型内锥式节流装置 [J]. 江西电力, 2004 (5).
56. 刘跃. 内锥流量计的探讨. 自动化仪表, 2004 (3).
57. 张景超. 光纤辐射温度测试仪的研究. 半导体光电, 2000 (1).
58. 陈兴梧. 数字式温度计 DS18B20 的特性及应用. 国外电子元器件, 2003 (2).
59. 许秀. 科里奥利质量流量计. 工业仪表与自动化装置, 2005 (1).
60. 高志强, 肖艳. 弯管流量计测量原理及应用. 传感器世界, 2005 (7).
61. 崔学雷. 热式质量流量计的应用及工程设计. 冶金自动化, 2000 (5).
62. 戴祯建. 流量测量仪表选用探讨. 中国计量, 2005 (8).
63. 李会军, 赵东升. 火电厂汽包水位测量误差分析及措施. 华北电力技术, 2007 (1).
64. 刘吉川, 于剑宇, 褚得海. 汽包水位测量新技术. 中国电力, 2006 (3).
65. 刘元胜. 电接点水位计测量误差的特点. 自动化仪表, 2002 (4).
66. 顾兴俊. MSI COMPACT 分析仪在火电厂烟气监测中的应用. 电子环境保护, 2003 (3).
67. 曹杰玉. 电厂电导率表在线检验技术的研究与应用. 热力发电, 2006 (12).
68. 刘墨杰. 在线恒温 pH 计的研究. 东北电力学院学报, 2001 (2).
69. 张永怀. 红外气体分析器. 分析仪器, 2002 (3).
70. 张旭. 微机测控系统抗干扰技术探讨. 电测与仪表, 2003 (8).
71. 李耀民, 邬义杰. 测控系统抗干扰设计. 电工技术, 2002 (9).
72. Hetsroni G. Handbook of multiphase System. Hemisphere Publishing Cooperation, 1982.
73. Hall D L. Multisensor Data Fusion, ARL reviewer, 2001.
74. Stroupe A, Martin M c, Balch T. Distributed Sensor Fusion for Object Position Estimation by Multi-Robot Systems. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001.
75. LabVIEW User Manual. National Instruments Corporation. USA. 2001.
76. Smair Trabelsi, Stuart O. Nelson. Density-independent Functions for On-line Microwave Moisture Meters: A General Discussion. Measurement Science & Technology, 1998, (9).
77. Pressure Sensor Device Data. Motrola Semiconductor Products Sector Phenix, Arizona USA, 1994.

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "6L+H56iL5Y+C5pWw5qOA5rWL5Y+K5Luq6KGoXzEyMjc5MDI4LnppcA==",
  "filename_decoded": "\u8fc7\u7a0b\u53c2\u6570\u68c0\u6d4b\u53ca\u4eea\u8868_12279028.zip",
  "filesize": 89509612,
  "md5": "5a5660912345644f6d90588eb7f659ef",
  "header_md5": "9e8d300b1e9e7b7fa14c9c627a828105",
  "sha1": "b7163457b1b3f90e8d9945fc7eede6e31f1a3cc0",
  "sha256": "b4e6ea6d1f2be374719d518ce8fafa65c22b3bd47f6e408de562ebec13593f35",
  "crc32": 2226339540,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 108568748,
  "pdg_dir_name": "\u2563\u00b2\u2502\u2560\u2593\u256c\u2569\u00b2\u255d\u221e\u2593\u0393\u255d\u2591\u2565\u255f\u2592\u03c6_12279028",
  "pdg_main_pages_found": 350,
  "pdg_main_pages_max": 350,
  "total_pages": 358,
  "total_pixels": 2269112832,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```