



“十二五” 江苏省高等学校重点教材

能源与动力工程 测试技术

康 灿 代 翠 梅冠华 吴贤芳 编著



科学出版社

(TK-0197.01)



www.sciencep.com



科学出版社互联网入口
南京分社 : (025) 86300572 销售 : (010) 64031535
南京分社 E-mail: nanjing@mail.sciencep.com
销售分类建议: 能源动力与工程

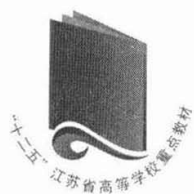
ISBN 978-7-03-050941-3



9 787030 509413 >

定价: 59.00 元





“十二五”江苏省高等学校重点教材
重点教材编号：2015-2-097

江苏高校品牌专业建设工程资助项目

能源与动力工程测试技术

康 灿 代 翠 梅冠华 吴贤芳 编著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了与能源动力类专业相关的测试技术、原理及仪器。全书的主要内容分为九个部分：测试技术的基本概念，误差分析与数据处理，温度测量，压力测量，流速测量，流量测量，转速、转矩与功率测量，振动与噪声测量，测试规范与测试平台。

本书可作为高等学校能源动力类专业本科生的教材，亦可供从事动力工程及工程热物理学科相关研究工作的科技人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

能源与动力工程测试技术/康灿等编著. —北京: 科学出版社, 2016.12

“十二五”江苏省高等学校重点教材

ISBN 978-7-03-050941-3

I. ①能… II. ①康… III. ①能源-测试技术-高等学校-教材 ②动力工程-测试技术-高等学校-教材 IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 283351 号

责任编辑: 胡 凯 李涪汁 丁丽丽 / 责任校对: 张凤琴
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 17 3/4

字数: 345 000

定价: **59.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

随着工程教育认证、卓越工程师教育培养计划的纵深推进,我国的高等工程教育已经步入了一个新的时期。教材一直是工科学生能力培养的重要保障条件之一。能源与动力工程专业与国家重点发展的支柱产业紧密相关,为社会输送了大批优秀人才,他们在各自的岗位上发挥着关键作用。

实验是发现和验证科学理论的重要手段之一。测试技术发展迅速,以流体速度测量为例,从传统的皮托管测速到目前得到成功应用的激光多普勒测速和粒子图像测速技术,测量的精度得到大幅提升。目前,能源与动力工程测试技术的发展向着高精度、高时空分辨率、智能化、集成化等方向发展,作为接受高等工程教育的大学生,有必要对实验原理和相关的实验方法进行系统性的了解与针对性的掌握。

本书围绕若干知识点,以达成学生的能力培养为目标。书中对测量仪器的基本原理、误差分析、数据处理方法、流量测量、压力测量、速度测量、转速转矩测量、振动噪声测量等进行了系统性的阐述,同时注重实验原理和规范。考虑到其他教材上的相关内容和测量技术的更新,本书简化了一些内容,诸如传感器的基本原理、液柱式压力计等,对目前常用的电磁流量计、光学测量方法等进行了重点介绍,并突出了实验标准在测试技术中的指导意义。另外,书中对于关键术语附上了对应的英文名称,这些术语是构成本教材内容体系的关键,也为读者查找相关的英文资料提供关键词。

本书的内容组织考虑到大多数读者的接受能力和教学法的实施,不在超出本科学生专业能力之外开展过多讨论,如果读者对于书中的某些专题感兴趣,可以参考相关的资料。从每一章课后的习题可以对该章内容的知识点进行概括,也可以在此基础上进行拓展。同时建议学生带着问题去学习知识。

本书共9章,其中,第1、2章由康灿编写;第3章由梅冠华编写;第4、5章由康灿编写;第6、7章由康灿和代翠共同编写;第8章由代翠编写;第9章由吴贤芳编写;全书由康灿统稿。

编著者感谢江苏高校品牌专业一期建设工程项目(编号:PPZY2015A029)对本书的资助。限于作者的水平,书中难免出现一些错误和不当之处,欢迎广大读者批评指正,编著者的电子邮箱: cankangujs@126.com。

编著者

2016年5月19日

常用符号表

一、英文字母符号

符号	名称	单位	符号	名称	单位
A	面积	m^2	Nu	努塞尔数	
a	加速度	m/s^2	n	旋转速度	s^{-1} , r/min
c	声速	m/s	P	总压力	Pa
C	阻尼系数			功率	W
C_f	摩擦阻力系数			动量	$\text{kg}\cdot\text{m/s}$
	压力系数, 压强		Pr	普朗特数	
	阻力系数		p	压强	Pa
D, d	直径	m	Q	热量	J
	电位差		q_m	质量流量	kg/s
Eu	欧拉数		q_V	体积流量	m^3/s
F	力	N	R	电阻	Ω
Fr	弗劳德数		R, r	半径	m
f	频率	Hz	Re	雷诺数	
f	透镜焦距	m	S	面积	m^2
G	重力	N	Sr	斯特劳哈尔数	
g	重力加速度	m/s^2	S	位移	m
H, h	水头 (能头),	m		灵敏度	
	水深			周期	s
h	厚度	m	T	热力学温度	K
I	惯性矩	m^4		摄氏温度	$^{\circ}\text{C}$
I	电流	A	t	时间	s
J	比例系数		U	电压	V
K	系统的灵敏度		$u(v, w)$	速度	m/s
	灵敏系数		V	体积	m^3 , L(1)
L, l	长度	m		平均速度	m/s
M	力矩, 转矩	$\text{N}\cdot\text{m}$	z	位置水头	m
Ma	马赫数				
m	质量	kg			

二、希腊文字母符号

符号	名称	单位	符号	名称	单位
α	流动方向角	(°)	λ	沿程阻力系数	
α_v	(叶片) 安放角	(°)		热导率	W/(m·K)
β	切应变	m		波长	m
Γ	绝对粗糙度	m		流量系数	
Δ	线应变	m	μ	动力黏度	Pa·s
δ	介电常数		ν	运动黏度	m ² /s
ε	允许应变	F/m	ρ	密度	kg/m ³
	阻尼比			电阻率	Ω
[ε]	效率		τ	切应力	Pa
ζ	体应变		Φ	相位角差	(°)
η	中心角	rad	ω	角速度	s ⁻¹ , r/min
θ	精度参数		ω_n	固有频率	Hz
σ	标准误差				
π_c	压阻效应系数				
	射流特性系数				
	(体积) 压缩率	Pa ⁻¹			

三、下角标符号

下角标符号	含义	下角标符号	含义
n	法向的	x, y, z	直角坐标
τ	切向的	r, θ, z	柱坐标
s	沿弧长的	R, θ, β	球坐标

目 录

前言

常用符号表

第 1 章 测试技术基本知识	1
1.1 课程概述	1
1.2 测量的基本知识	2
1.3 测量系统的特性	7
思考题与习题	21
第 2 章 误差分析与数据处理	22
2.1 误差的基本概念	22
2.2 系统误差分析	24
2.3 随机误差分析	25
2.4 异常数据的剔除	29
2.5 误差计算	31
2.6 测量数据的处理方法	35
思考题与习题	45
第 3 章 温度测量	46
3.1 温度的基本概念	46
3.2 接触式温度计	48
3.3 非接触式温度计	59
3.4 红外技术在温度测量中的应用	63
思考题与习题	66
第 4 章 压力测量	67
4.1 压力的基本概念	67
4.2 稳态压力的测量	68
4.3 稳态压力指示仪表	77
4.4 动态压力测量	82
4.5 压力传感器及压力测量系统的标定	89
思考题与习题	92

第 5 章 流速测量	93
5.1 流体速度大小的测量	93
5.2 流动方向的测量	94
5.3 三维流场中流向的测量	102
5.4 热线风速仪	108
5.5 激光多普勒测速技术	114
5.6 粒子图像测速技术	130
思考题与习题	134
第 6 章 流量测量	135
6.1 流量测量方法概述	135
6.2 节流式流量计	136
6.3 涡轮流量计	146
6.4 电磁流量计	150
6.5 浮子流量计与涡街流量计	153
6.6 容积式流量计	159
6.7 超声波流量计	161
6.8 质量流量计	163
思考题与习题	165
第 7 章 转速、转矩与功率测量	166
7.1 概述	166
7.2 功率测量概述	173
7.3 转矩的测量	175
7.4 测功器	179
思考题与习题	184
第 8 章 振动与噪声测量	185
8.1 机械振动概述	185
8.2 振动传感器	187
8.3 振动分析仪器与共振法测频系统	196
8.4 振动测量及其应用实例	199
8.5 噪声概述	200
8.6 噪声的物理度量	203
8.7 噪声的评价	210
8.8 传声器与噪声测量方法	215

8.9 噪声测量实例	229
思考题与习题	236
第 9 章 测试规范与测试平台	237
9.1 试验规范	237
9.2 试验方法	253
9.3 正交试验设计与分析	262
9.4 测试平台简介	268
思考题与习题	272
主要参考文献	273

第1章 测试技术基本知识

测试 (measurement and test) 是人们认识客观事物的方法,是具有试验性质的测量,可以看作是测量和试验的统称。测量是以确定被测对象的属性的量值为目的而进行的实验过程,测量的过程是将被测量的值与既定标准量比较的过程,测量离不开测量仪器和测量过程。能源动力类的本科专业以动力工程及工程热物理学科为支撑,试验是该学科科学研究工作的重要方法之一,也是验证新的设计方法与思路的重要手段之一。

在能源与动力工程 (energy and power engineering) 专业中,一般意义的测量是指用仪器直接获得被测数据,比如用尺子测量一段管段的长度;而测试则更贴近工程应用,是指采用简单或系统的方法检查被测对象的运行性能,例如测试一台泵的能量性能是否达标等。测量的结果多为数据,而测试的结果则更多地是评价。实施测量的过程一般为“实验”,而实施测试的过程则多为“试验”。在英文注解中,通常用 experiment 和 measurement 两个单词分别用来表达实验和测量。在本书的后续部分并不对这些词进行严格的区分。

1.1 课程概述

1.1.1 测试技术的重要性

测试技术获得的结果对于提炼科学规律和构建科学理论具有重要意义,同时,测试技术还可被用来检验科学理论和规律。测试技术是科学研究的基础。与能源动力工程相关的技术领域更离不开测试技术,相关的产品开发、产品制造、质量控制、产品性能测试、产品运行故障诊断、工程管理等均需要测试技术。近年来,核电站、火力发电厂、风力发电站、泵站等单位已将测试技术与过程控制和管理成功地结合在一起,有效提升了能源与动力工程装置运行的可靠性和稳定性。

测试技术是科学技术先进程度的重要标志,随着机器人、无人机、GPS 等技术的进步,测试技术的智能化不断提高,应用领域不断延伸,发挥的作用越来越突出。

1.1.2 本课程的主要内容与学习要求

能源与动力工程测试技术课程是一门技术基础课,课程内容主要是与能源动力产业领域相关的测量原理 (measurement principles)、测量方法 (measurement ap-

proaches)、测量仪器 (measurement instruments) 与测量系统 (measurement systems)。通过本课程的学习, 学生应重点解决测量的目的、测量的内容、如何实施测量、测量结果如何处理与分析 4 方面的问题, 并掌握相关的知识与技能, 为解决本领域内的复杂工程问题打下基础。

在学习本课程中, 学生应以下列 6 个方面为学习重点:

- (1) 掌握测试装置的基本原理、测量系统的特性和测量结果误差分析方法;
- (2) 掌握温度、压力和流速三个重要物理量的测量原理与常用的测量方法;
- (3) 掌握常用压力表和压力传感器、测速仪器、流量计的测量原理与使用方法;
- (4) 了解力矩、功率、振动、噪声的测量原理、方法与仪器;
- (5) 了解激光多普勒测速和粒子图像测速的原理与仪器;
- (6) 了解能源动力类专业的测试平台与测试规范。

能源与动力工程测试技术课程尽管针对能源动力类专业, 但是属于多学科交叉的课程。学习该课程需要综合运用多种学科知识。本课程的学习涉及高等数学、概率论、流体力学、传热学、计算机科学、机械振动、声学等多方面的知识, 还有相关的国家标准和国际标准, 所以本课程对于构建学生的专业知识体系具有很好的促进作用。同时, 本课程具有很强的实践性, 是一门实战课程, 在学习中将知识与仪器和测量系统密切结合, 既消化了知识, 又拓宽了视野。最为重要的是, 本课程为创新能力的培养提供了优秀的平台, 基于诸多有形的仪器设备和实际工程问题, 有所侧重地构思基于本专业实际问题的创新性思路, 并通过实实在在的测试数据校验创新性的思路, 真正达到工程能力培养和创新能力培养的目标。

国外很多高校并不设置能源与动力工程专业, 相关的专业模块多归入机械工程 (mechanical engineering) 大类专业中, 所以能源与动力工程测试技术与机械工程测试技术有交叉, 在本书中也体现了这一点。在此基础上, 结合能源动力类专业的特点, 本书突出三个方面的内容, 一是测试技术的原理与方法, 明确测试的要求; 二是测试的规范与标准, 测量仪器的选用、测试装置设计和测量数据的处理要符合相关的规范; 三是思维的拓延与知识的融合, 在理论与实际结合的过程中不断总结与提炼, 提升专业能力。

1.2 测量的基本知识

1.2.1 测量的定义

如前所述, 测量实际上是从物理世界获取被测量 (measurand) 的信息, 并与共同遵守的标准相比较的过程, 在这一过程中, 人们借助工具, 通过获取和处理实验数据, 获得被测量的值和相关特征, 从而认识被测量和其遵循的规律。一个完整

的测量过程离不开测量对象与被测量、测量资源 (测试仪器与辅助设施、测量方法等)、计量单位、测量结果 (包括误差与误差分析方法)、测量环境 5 个要素。

根据被测量在测量过程中是否发生变化, 可将测量过程分为静态测量 (static measurement) 和动态测量 (dynamic measurement) 两类。静态测量是指被测量在整个测量过程中不随时间变化而变化的测量, 被测量可视为恒定量, 如某一定常流动 (steady flow) 中的一个观测点上的静压强 (static pressure)。动态测量是指被测量在测量过程中随时间变化而变化, 例如泵启动过程中的转速 (rotational speed) 和轴承温度。动态测量的过程是获取被测量的瞬时值 (instantaneous value) 的过程, 对测量工具、测量方法和数据处理的要求较高。

1.2.2 获取测量值的方法

根据工程中常用的获取测量值的方法可以将测量分为直接测量 (direct measurement) 和间接测量 (indirect measurement)。

1. 直接测量

使被测量直接与选用的标准量进行比较, 或者用预先标定好的测量仪表进行测量, 从而直接求得被测量数值的测量方法称为直接测量。被测量的数值可直接从测量仪表上获得。在直接测量中又可分为两种获取结果方式, 一种为直接从仪表上读数, 如水银体温计; 另一种方式是借助标准量具获得测量结果。直接测量方法又可进一步分为零值法、差值法和代替法。

(1) 零值法: 被测量的作用与已知量的作用相互抵消, 总效应为零, 这样被测量就等于已知量。例如采用电位差计可测量热电偶在测量温度时产生的热电势的大小。

(2) 差值法: 从仪表上读出的值为待测量与某已知量之差。例如采用 U 形差压计测量压强时, 其两边液柱的高差代表了待测压强与已知压强的差。

(3) 代替法: 用已知量代替被测量, 使已知量与被测量产生的效应相同。例如用天平称量物体的质量时, 用标准砝码的质量代替被测物体的质量。

直接测量按测量条件不同又可分为等精度测量和非等精度测量。前者指的是对同一量进行多次测量, 每次测量的仪器、环境、测量方法和人员都保持一致, 否则为非等精度测量。

2. 间接测量

在被测量无法直接从测量仪器上读出时, 需要通过直接测量与被测量有一定函数关系的量, 而后通过关系式获得被测量的数值, 这种测量方法称为间接测量。

间接测量中的未知量 Y 可表示为

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots) \quad (1-1)$$

式中, $X_1, X_2, X_3, \dots$ 为可以由直接测量测得的物理量。例如叶片泵的输入功率可由下述关系式得出:

$$P = \frac{Tn}{9549} \quad (1-2)$$

式中, T 为转矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$; n 为转速, 单位为 r/min ; P 为功率, 单位为 kW 。借助转速转矩仪测出 T 与 n , 则 P 可由式 (1-2) 得出。

再以气流速度的测量为例, 在没有风速计的情况下欲获得气流的速度也并非完全不可能。如果有一个转速表和一个风车, 可以测得气流吹动风车时风车的转速, 进而可通过风车转速与气流速度之间的关系来计算气流速度。

还有的教材上介绍了直接测量和间接测量之外的一种组合测量方法, 该方法的前提是被测量与待求量之间存在着一定的函数关系, 通过测得的被测量的值求解该函数关系式, 从而获得待求量。

1.2.3 量与量纲 (quantities and dimensions)

量是指现象、物体或物质可定性区别和定量确定的一种属性。不同的量之间可以定性区别, 如长度和温度是不同类的量。同一类中的量之间以量值大小来区别。

1. 量值

量值用数值和计量单位 (unit) 的组合来表示。量值被用来定量地表达被测对象相应属性的大小, 如 1.8 kg , 25°C , 12 s 等, 其中 1.8、25、12 是量值的数值。

2. 基本量和导出量

选取某些量作为基本量 (base quantity), 基本量之间相互独立; 其他量作为基本量的导出量 (derived quantity), 导出量与基本量之间存在着一定的函数关系。

3. 量纲和量的单位

量纲代表一个被测量的确定特征, 而量纲单位则是该被测量得以量化的基础。例如, 质量是一个量纲, 而千克是质量的一个单位; 长度是一个量纲, 英寸是长度的一个单位。一个量纲是惟一的, 但量纲可以用不同的单位来测量。世界上不同国家所使用的单位制 (system of units) 可能不同, 所以不同的单位制有必要被标准化, 单位制之间的转换也必须遵守共同认同的规则。

本书中的量纲和单位遵守国际单位制 (International System of Units, SI) 的规定, 基本物理量有 7 个, 分别为: 长度 (length)、质量 (mass)、时间 (time)、电流 (electric current)、热力学温度 (thermodynamic temperature)、物质的量 (amount of sub-

stance) 和发光强度 (luminous intensity)。这 7 个量的量纲分别用 L、M、T、I、 Θ 、N 和 J 表示。导出量的量纲可以用基本量的量纲表示。例如,速度的量纲为 LT^{-1} , 涡量的量纲为 T^{-1} , 功率的量纲可表示为 ML^2T^{-3} 。无量纲量中的量纲幂次均为零, 无量纲量实际上是一个数。

4. 法定计量单位

法定计量单位是各个行业必须遵守并执行的单位。我国的法定计量单位以国际单位制为基础, 选用了少数其他单位制的计量单位。

国际单位制中规定的 7 个基本物理量的单位分别为: 长度 —— 米 (m)、质量 —— 千克 (kg)、时间 —— 秒 (s)、电流 —— 安培 (A)、热力学温度 —— 开 [尔文](K)、物质的量 —— 摩 [尔](mol)、发光强度 —— 坎 [德拉](cd), 上述括号内为对应的单位符号。

测量必须有基准, 该基准可以确保量值的统一和准确。测量工具也必须经过检定和校准, 且检定和校准需由法定或授权的检定机构进行实施。

1.2.4 测量系统

测量离不开测量系统。目前测量系统的应用已从一般实验室、工业产品、工业流程一直延伸到复杂环境中, 如核反应器和宇宙空间站内部的环境。测量系统可能是一个简单的仪表, 也可能是一个由多个传感器和数据采集模块构成的复杂系统。测量的目的、要求和内容随着场合的不同可能存在很大的差别, 但一个完整的测量系统应该包含三类基本部件: 感受部件、信号传递和处理部件、信号显示和记录部件。有的测量系统还要求有激励装置, 当被测对象受到激励后才能产生便于测量的输出信号, 测量系统组成示意图, 如图 1-1 所示。有的测量系统还要求配带自标定装置。

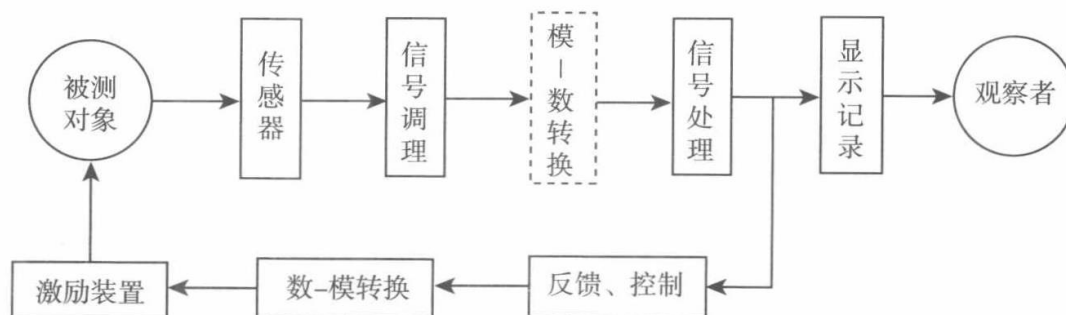


图 1-1 测量系统组成示意图

1. 感受部件

感受部件 (sensing part, sensor) 直接与被测对象发生作用, 它的作用是感受被测量的变化, 随后其内部发生变化并向外发出相应的信号。汽车车灯控制器中采用

的电阻值随环境光强度改变而改变的光敏元件 (photosensitive element) 就属于感受部件。感受部件需满足下列条件:

(1) 只能感受被测量的变化而发出相应的信号, 其他量变化时感受部件不应发出同类信号。

(2) 感受部件发出的信号与被测量之间应呈单值函数关系, 即两者一一对应。

(3) 感受部件对被测量的扰动应尽量小。

在实际应用中, 经常出现感受部件在非被测量变化时也产生内部变化的现象, 在无法回避的情况下, 尽量限制无用信号的量级, 使其远远小于有用信号。在使用金属热电阻测量温度时, 压力同样对电阻产生影响, 这时有必要采用引入修正系数或增加补偿装置的方法消除附加因素的影响。

现代测量系统中的感受部件即传感器。在国家标准 GB/T 7665—2005 中, 传感器的定义为能够感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用输出信号的器件和装置, 通常由敏感元件 (sensing element) 和转换元件 (transducing element) 组成, 如图 1-2 所示。传感器中的敏感元件能直接感受和响应被测量, 而转换元件能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适合于传输和测量的电信号如电阻、电容、电感。电信号易于处理、显示、存储和传输。此时传感器扮演的角色不单单是感受部件。

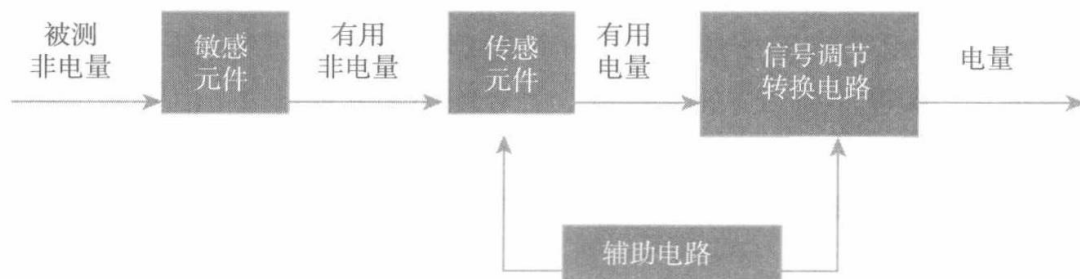


图 1-2 传感器的典型组成

2. 信号传递和处理部件

信号传递和处理部件 (signal transmission and processing element) 的功能是对感受部件发出的信号进行加工或转换后传递给信号显示和记录部件, 这种转换多是电信号之间的转换。例如电阻应变片在工作时发出的是电阻变化值, 它通过电桥转变为电压信号。信号传递和处理部件有时需要对感受部件发出的信号进行各种运算、滤波和分析, 以满足信号显示和记录部件对信号的要求。

单从功能的角度来看, 在采用传统的静压探针进行压强测量时, 若探针和排管之间采用橡皮管进行连接, 则橡皮管就是该测量系统的传递部件。这种传递部件只能在探针和排管之间的距离较短时使用, 并不利于信号的远传。如果距离较远, 则

多采用将压强改变为其他类信号如电信号的方式进行传输、转换和显示。

3. 信号显示和记录部件

信号显示和记录部件 (signal display and recording element) 根据信号传递和处理部件传来的信号显示出被测量的大小及变化。信号显示方式可大致分为指示式、记录式和数字式三种。

(1) 指示式是指以标尺刻度、指针的周向位置、液面位置等显示被测量的数值, 例如波登管式压力表就利用指针的周向位置显示压强大小。指示式的缺点是不能显示被测量的动态变化。

(2) 记录式仪表则可以动态地记录被测量随时间的变化, 如传统测量中采用的磁带记录仪等。

(3) 数字式仪表将模拟量通过模数转换、译码等方法进行转换, 在显示面板上展现出被测量的数值, 如数字式计数器等。由于数字化技术和硬件技术的发展, 目前数字式仪表已成为测量仪表的主流之一。

目前信号的记录多采用计算机系统的数据存储器——硬盘 (hard disk) 来实现, 硬盘中常用的为机械硬盘和固态硬盘。相对于机械硬盘, 固态硬盘的读写速度快、功耗低、防震能力强、工作温度范围宽, 缺点是固态硬盘的最大存储容量较小, 售价较高。

1.3 测量系统的特性

1.3.1 测量系统的基本特性

并不存在针对所有被测量都适用的测量系统。根据被测量的特点、测量的精度要求及其他因素, 需选用合适的测量系统, 测量系统的基本特性要能够使输入的被测量在要求的精度范围内得到体现。一般将外界对系统的作用称为系统的输入 (input) 或激励 (excitation), 而将系统受到这种作用时的输出称为系统的输出 (output) 或响应 (response)。测量系统的功能框图如图 1-3 所示。其中, $x(t)$ 为测量系统的输入, $y(t)$ 为测量系统的对应输出。

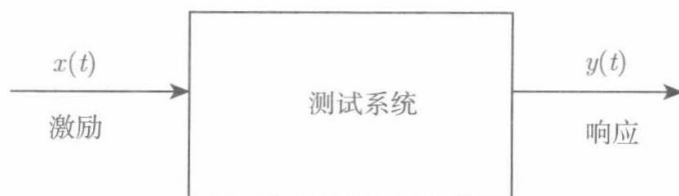


图 1-3 测量系统的功能框图

输出量 $y(t)$ 是否能正确地反映输入量 $x(t)$ 与测量系统本身的特性有着紧密关联。测量系统的特性指的是传输特性, 即系统受到的激励与其做出的响应之间的关系。测量系统的特性可分为静态特性 (static characteristics) 和动态特性 (dynamic characteristics)。对于被测量不变或变化极缓慢的情况, 静态参数即可表达测量系统的特性, 而对于被测量快速变化的情况, 则要求测量系统对被测量的变化迅速做出响应, 此时必须采用动态参数表达测量系统的特性。尽管此处以被测量定义测量系统的静态特性与动态特性, 但对于一个测量系统, 其静态特性与动态特性是相关的。从便于分析的角度出发, 通常将测量系统的静态特性与动态特性分开考虑, 将诱发非线性的因素作为静态特性处理。

理想的测量系统应有单值的、确定的输入-输出关系, 其中以输入与输出呈线性关系为最佳。实际的测量系统往往无法满足线性关系。若系统的输入 $x(t)$ 与输出 $y(t)$ 之间的关系可用线性微分方程描述, 则称该测量系统为线性系统 (linear system), 其方程可以写为

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ & = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (1-3)$$

将方程中最高微分阶 n 称为系统的阶; a_n 、 a_{n-1} 、 $\cdots$ 、 a_0 和 b_m 、 b_{m-1} 、 $\cdots$ 、 b_0 分别为系统的结构特性参数。

如果系统的结构特性参数均不随时间和输入量的变化而变化, 则该方程为常系数微分方程, 所描述的系统为线性定常系统或线性时不变系统。实际的测量系统中, 结构特性参数或多或少会发生变化, 但若设置足够的精确度, 忽略非线性和时变因素, 则可将多数系统作为线性时不变系统处理。

1.3.2 测量系统的静态特性参数

1. 量程

量程 (span) 是指测量系统能够测量的输入量的最大值与最小值之间的范围, 也称为可测范围。在选择测量系统时, 量程是首先要考虑的参数。超量程使用仪表可能会造成仪表损坏。一般认为, 在选择仪表量程前要对被测量的值进行估计, 被测量较稳定时, 其最大值不宜超过仪表满量程的 $\frac{3}{4}$; 若被测量的值波动较大, 则最大值不宜超过仪表满量程的 $\frac{2}{3}$, 且最小值不宜低于满量程的 $\frac{1}{3}$, 在此两个条件中, 优先满足前者。被测量的值接近测量系统可测量的上限时易损坏测量系统的部件, 而被测量的值接近测量系统可测量值的下限时又会造成测量精度下降。

2. 精度

测量系统的精度 (accuracy) 是指在规定条件下, 测量系统在全量程范围内产生的最大绝对误差的绝对值与量程之比, 记为 R , 通常用百分数表示。

$$R = \frac{|\delta_{\max}|}{A} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中, A 为系统的量程; $\delta_{\max}$ 为最大绝对误差。

如某温度计的量程为 50°C , 其最大绝对误差的绝对值为 0.1°C , 则该温度计的精度为

$$R = \frac{0.1}{50} \times 100\% = 0.2\%$$

该仪表的精度等级为 0.2 级。仪表通常会在表盘位置标识其具有的精度等级。

以压力表为例, 一般的精度等级为 0.01、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5 等, 这些属于较高的精度等级; 而工程上采用的压力表精度等级为 1.0、1.5、2.5 等。仪表的精度等级高, 测量误差小, 但相应的仪表价格较高。图 1-4 为某压力表的表盘, 可以看出, 其量程为 6MPa, 该表的绝对误差为

$$6\text{MPa} \times 1.5\% = 0.09\text{MPa} = 90\text{kPa}$$

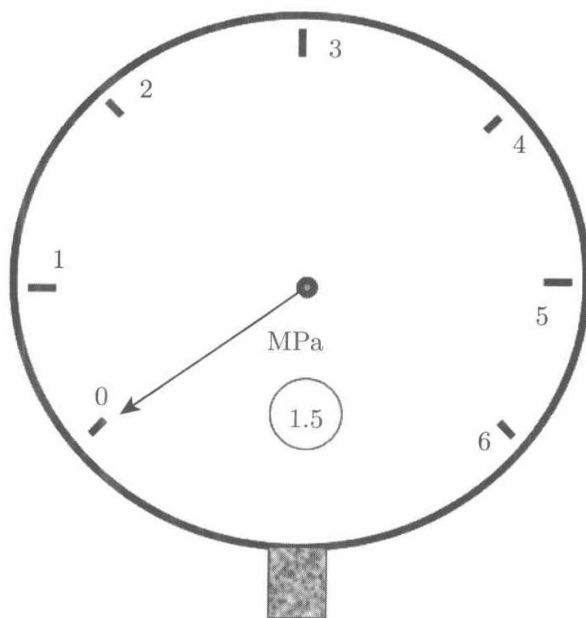


图 1-4 某压力表的表盘

若测量时指针指向 4MPa, 相对误差为

$$\frac{90\text{kPa}}{4\text{MPa}} = 2.25\%$$

若测量时指针指向 0.6MPa, 相对误差为

$$\frac{90\text{kPa}}{0.6\text{MPa}} = 15\%$$

所以,在测量时应该尽量选用量程合适并且精度合适的压力表。测量仪器的精度与被测量的大小无关。

3. 灵敏度 (sensitivity)

灵敏度是测量系统的重要静态特性参数之一。若系统的输入量有增量 Δx , 引起输出产生相应的增量 Δy , 则定义输出量的变化与引起这种变化的相应输入量的变化之比为灵敏度, 通常以极限的形式表示, 记为 S , 即

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-5)$$

灵敏度的几何意义是输出-输入曲线上指定点的斜率。线性测量系统的灵敏度为常量, 表现为 Δy 与 Δx 之间呈线性关系; 而非线性测量系统的灵敏度随输入量的变化而变化。当输出量与输入量的量纲相同时, 灵敏度为无量纲数, 常称为“放大倍数”或“增益”。如果测量系统由多个环节串联而成, 则测量系统总的灵敏度为各个环节灵敏度的乘积。

从灵敏度的定义式可以看出, 灵敏度越高就意味着在相同的输入下, 测量系统可以得到越大的输出, 在设计测量系统时, 灵敏度并非越高越好, 灵敏度越高则测量范围越窄, 系统的稳定性越差。

4. 分辨率 (分辨力)

分辨率 (resolution) 也是一个静态特性参数, 是指测量系统能够检测出的被测量的最小变化量。分辨率是灵敏度的倒数, 也称为灵敏限。

测量系统的分辨率越高, 则其能够检测出的输入量的最小变化值越小。对于数字显示仪表, 常用输出显示的最后一位所代表的输入量表示系统的分辨率; 对于模拟显示仪表, 常用指示标尺最小分度值的 $\frac{1}{2}$ 代表的输入量表示其分辨率。

5. 线性度

线性度 (linearity) 是指测量系统的输入与输出之间保持线性关系的程度。静态测量中测量系统的输出量与输入量之间的关系曲线称为标定曲线 (calibration curve), 该曲线通常通过实验的方法测出。理想的线性系统的标定曲线为直线, 但实际测量系统的标定曲线形状并非直线, 如图 1-5 所示。将标定曲线与拟合曲线 (fitting curve) 之间的偏离程度称为线性度, 也称非线性误差。线性度常用百分数表示, 记为 R_L , 即

$$R_L = \frac{\Delta l_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中, $\Delta l_{\max}$ 为标定曲线与拟合曲线之间的最大偏差, A 为满量程的输出值。

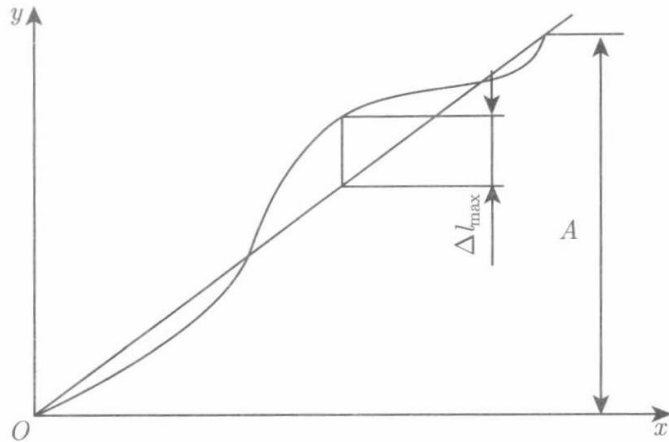


图 1-5 线性度示意图

线性度值越小代表测量系统的线性特性越好。由于线性度计算时参考的拟合直线为根据基准获得, 拟合直线不同, 则线性度值不同。常用的确定拟合直线的方法有两种, 一是两点连线法, 即将标定曲线上通过零点和满量程输出点的连线作为拟合直线, 此方法并不准确, 所以推荐采用第二种方法, 最小二乘法, 该方法的应用使得拟合直线在全量程范围内拟合精度最高, 标定曲线上所有点与拟合直线的偏差的平方和为最小。

6. 迟滞误差

迟滞误差 (hysteresis error) 也称回程误差, 测量系统的输入量从量程下限增加到量程上限的测量过程称为正行程; 反之, 输入量从量程上限减小至量程下限的测量过程称为反行程。在同样的测试条件下, 理想测量系统的正、反行程的标定曲线是完全重合的。但是实际测量系统中这两条曲线并不重合, 这种现象称为迟滞, 如图 1-6 所示。对应于同一输入量, 正、反行程对应的输出量之间的差值称为迟滞差。在全量程范围内的最大迟滞差与满量程输出值之比为测量系统的迟滞误差, 记为 R_H , 即

$$R_H = \frac{\Delta H_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中, $\Delta H_{\max}$ 为正、反行程的标定曲线之间的最大偏差。

引起迟滞误差的因素较多, 通常认为测量系统中的弹性元件、磁性元件等存在滞后现象, 而测量系统中的间隙等因素也可能引起迟滞误差。

7. 重复性

重复性 (repeatability) 是指在相同的测量条件 (测量环境、测量装置、测量仪器、测量人员等) 下, 按同一方向在全量程范围内进行多次测量时标定曲线之间的重复程度, 如图 1-7 所示。用同一方向的最大偏差与满量程理想输出值的百分数表

示, 记为 R_R , 即

$$R_R = \frac{\Delta_{\max}}{A} \times 100\% \quad (1-8)$$

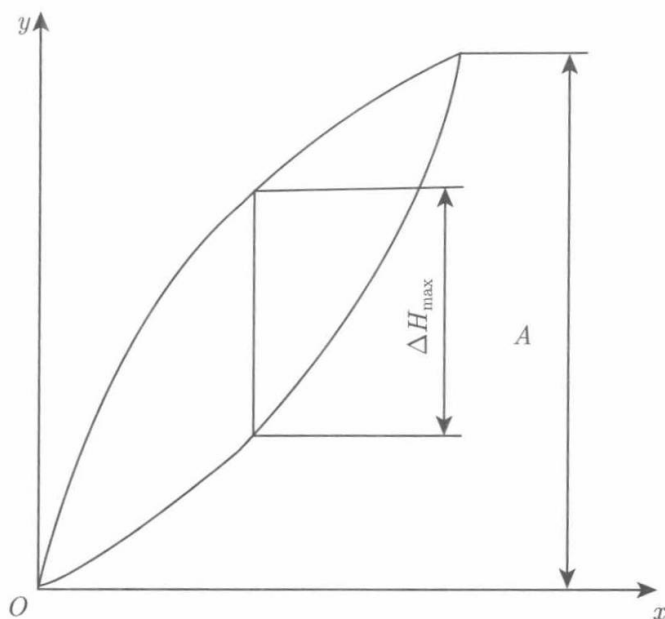


图 1-6 迟滞误差示意图

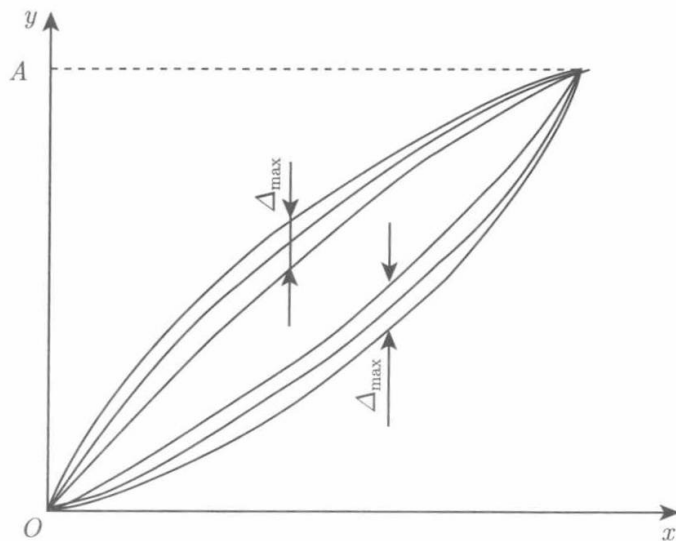


图 1-7 重复性示意图

测量的重复性可用结果的发散性表示。而测量复现性 (reproducibility) 指在不同的测量条件下, 对同一被测量进行测量时, 测量结果之间的一致性。

8. 漂移

漂移 (drift) 是指测量系统的输入量不变时, 输出量发生变化的现象。在测量范围最低值处的漂移称为零点漂移, 简称零漂。仪器自身的结构参数变化可能引起

漂移;而工作环境也会对测量系统的输出产生影响,因环境温度变化引起的测量系统输出量的变化称为温度漂移,通常以环境温度偏离标准温度时的输出值与标准温度下的输出值之差与温度变化之比来表示,记作 ξ_t ,即

$$\xi_t = \frac{y_t - y_{20}}{\Delta t} \quad (1-9)$$

式中, Δt 为测量系统环境温度 t 与标准温度 (一般为 20°C) 之差; y_t 为环境温度为 t 时的测量系统输出值; y_{20} 为标准温度条件下测量系统的输出值。

温度漂移对测量系统的静态特性产生影响,可能使静态特性曲线产生平移,但斜率不变,此时称为温度零点漂移,也可能使静态特性曲线的斜率发生变化,称为温度灵敏度漂移。

另外,测量系统在工作中还可能受到电磁辐射、声、光、电网等因素的干扰而无法保证稳定的输出,这就涉及测量系统的抗干扰能力指标。

1.3.3 测量系统的动态特性

测量系统的动态特性是指输入量随时间变化时,输出与输入之间的动态关系。在研究测量系统动态特性时,往往认为系统参数不变,并忽略迟滞等非线性因素,这时就可以用时不变线性系统微分方程描述测量系统的输出与输入之间的关系。测量系统的动态特性也可用微分方程的线性变换描述,采用初始条件为零的 Laplace 变换可得到传递函数,采用初始条件为零的 Fourier 变换即可得到频响函数。测量系统的动态特性也可用单位脉冲输入的响应来表示。

1. 传递函数

设系统的初始条件为零,即在系统特性考察前输入、输出及其各阶导数均为零,则对式 (1-3) 作 Laplace 变换,得

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0)Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0)X(s) \quad (1-10)$$

定义输出信号与输入信号的 Laplace 变换之比为传递函数 (transfer function),即

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0} \quad (1-11)$$

式中, s 为 Laplace 算子, $s = \beta + j\omega$ 。

传递函数以数学函数的形式表征了系统对输入信号的传输和转换特性,它包含了瞬态、稳态时间响应和频率响应的全部信息。它具有以下几个特点:

(1) 传递函数只反映系统本身的固有特性,与输入量及系统的初始状态无关。

(2) 传递函数是对物理系统特性的数学描述,而与系统的具体物理结构无关。

同一形式的传递函数可表征具有相同传输特性的不同物理系统。

(3) 传递函数中的各个系数是由测量系统本身的结构特性所惟一确定的常数。

(4) 传递函数表达式中的分母取决于系统的结构, 而分子则表示系统与外界之间的联系, 如输入点的位置、输入方式、被测量及测点布置情况等。分母中的幂次 n 代表了系统微分方程的阶数, 若 $n = 2$, 则系统为二阶系统。一般 $n > m$, 即分母中 s 的幂次均高于分子中 s 的幂次, 此时测量系统为稳定系统。

2. 频响函数

传递函数被用来在复数域中描述和考察测量系统的特性, 与在时域中描述和考察测量系统的特性相比有许多优点。频率响应函数 (frequency response function) 则是在频域中描述和考察测量系统的特性, 其定义为测量系统稳态响应输出信号的 Fourier 变换与输入简谐信号的 Fourier 变换之比。与传递函数相比, 频率响应函数易通过实验建立, 且其物理概念更为直观。

在测量系统的传递函数 $H(s)$ 已知的情况下, 令 $H(s)$ 中 s 的实部为零, 即 $s = j\omega$, 可得到频率响应函数 $H(j\omega)$ 。线性时不变系统的频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \cdots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \cdots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (1-12)$$

在 $t = 0$ 时刻将输入信号接入线性时不变系统, 即将 $s = j\omega$ 代入 Laplace 变换, 将 Laplace 变换变成 Fourier 变换。由于系统的初始条件为零, 所以系统的频率响应函数 $H(j\omega)$ 就成为输出 $y(t)$ 、输入 $x(t)$ 的 Fourier 变换 $Y(\omega)$ 、 $X(\omega)$ 之比, 即

$$H(j\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (1-13)$$

频率响应函数来自于输出 $y(t)$ 与输入 $x(t)$ 的 Fourier 变换, 其描述的是系统的简谐输入与其稳态输出之间的关系, 因此在系统响应达到稳定后方可测量频率响应函数。

频率响应函数的复指数形式为

$$H(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-14)$$

式中, $A(\omega)$ 为系统的幅频函数 (amplitude-frequency function); $\varphi(\omega)$ 为系统的相频函数 (phase-frequency function)。

在用曲线描述测量系统的传输特性时, $A(\omega)$ - ω 和 $\varphi(\omega)$ - ω 分别称为系统的幅频特性曲线和相频特性曲线。实际作图时, 对自变量取对数标尺, 对幅值坐标取分贝数, 即作 $20 \lg A(\omega)$ - $\lg(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ - $\lg(\omega)$ 曲线, 该两曲线分别被称为对数幅频特性曲线和对数相频特性曲线, 总称为博德 (Bode) 图。

若将频率响应函数 $H(j\omega)$ 按实部和虚部改写为

$$H(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (1-15)$$

则 $P(\omega)$ 和 $Q(\omega)$ 均为 ω 的实函数, 曲线 $P(\omega)-\omega$ 和 $Q(\omega)-\omega$ 分别称为测量系统的实频特性曲线和虚频特性曲线。若将 $H(\omega)$ 的虚部和实部分别作为纵、横坐标, 则曲线 $Q(\omega)-P(\omega)$ 称为奈奎斯特 (Nyquist) 图。

3. 脉冲响应函数

在初始条件为零的情况下, 在 $t = 0$ 时刻给测量系统输入一个单位脉冲函数, 即 $x(t) = \delta(t)$ 。如果测量系统是稳定的, 则经过一段时间后会恢复到原来的平衡状态。如图 1-8 所示。测量系统对单位脉冲输入的响应称为测量系统的脉冲响应函数 (impulse response function), 用 $h(t)$ 表示。脉冲响应函数同样是测量系统动态特性的时域描述。对于单输入、单输出系统, 输入量 $x(t)$ 、输出量 $y(t)$ 和脉冲响应函数 $h(t)$ 之间的关系为

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (1-16)$$

即测量系统在任意输入下所产生的响应等于系统的脉冲响应函数与输入信号的卷积。

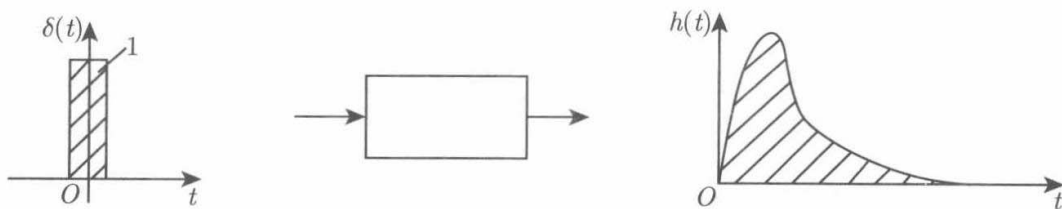


图 1-8 单位脉冲响应函数

对式 (1-16) 两边取 Fourier 变换, 得

$$Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) \quad (1-17)$$

将 $s = j\omega$ 代入上式, 得

$$Y(s) = H(s)X(s) \quad (1-18)$$

测量系统的动态特性在时域、频域和复数域可以分别采用脉冲响应函数 $h(t)$ 、频率响应函数 $H(j\omega)$ 和传递函数 $H(s)$ 来描述。三者存在着一一对应关系。脉冲响应函数 $h(t)$ 与频率响应函数 $H(j\omega)$ 是 Fourier 变换和 Fourier 逆变换的关系, 与传递函数 $H(s)$ 是 Laplace 变换与 Laplace 逆变换的关系。

4. 零阶系统

令输入 $x(t)$ 与输出 $y(t)$ 之间的微分方程 (1-3) 中的微分项系数为零, 则方程简化为

$$a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-19)$$

此为零阶系统 (zero-order system)。

式 (1-19) 可进一步改写为

$$y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t) \quad (1-20)$$

常将上式中的 $\left(\frac{b_0}{a_0}\right)$ 用 S 表示, 称为测量系统的静态灵敏度。

5. 一阶系统和二阶系统

1) 一阶系统

(1) 传递函数

一阶系统 (first-order system) 和二阶系统 (second-order system) 是分析高阶系统的基础。液柱式温度计即属于一阶系统。一阶系统的微分方程为

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-21)$$

转化为

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = \frac{b_0}{a_0} x(t) \quad (1-22)$$

式中, $\frac{a_1}{a_0}$ 具有时间的量纲, 称为时间常数, 用符号 τ 表示; $\frac{b_0}{a_0}$ 为静态灵敏度, 与零阶系统相似, 用 S 表示。 S 值的大小仅表示输出与输入之间放大的比例关系, 因此为便于讨论, 令 $S = 1$, 这种处理方式称为灵敏度归一处理。如此, 上述一阶系统的微分方程变为

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (1-23)$$

对上式作 Laplace 变换, 得

$$\tau s Y(s) + Y(s) = X(s) \quad (1-24)$$

则一阶系统的传递函数:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (1-25)$$

(2) 频率响应函数

一阶系统的频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \quad (1-26)$$

幅频和相频特性分别为

$$A(\omega) = \sqrt{[\operatorname{Re}(\omega)]^2 + [\operatorname{Im}(\omega)]^2} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \omega\tau)^2}} \quad (1-27)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)} = -\arctan(\omega\tau) \quad (1-28)$$

$\varphi(\omega)$ 为负说明输出信号的相位滞后于输入信号的相位。一阶系统的幅频和相频特性曲线如图 1-9 所示。

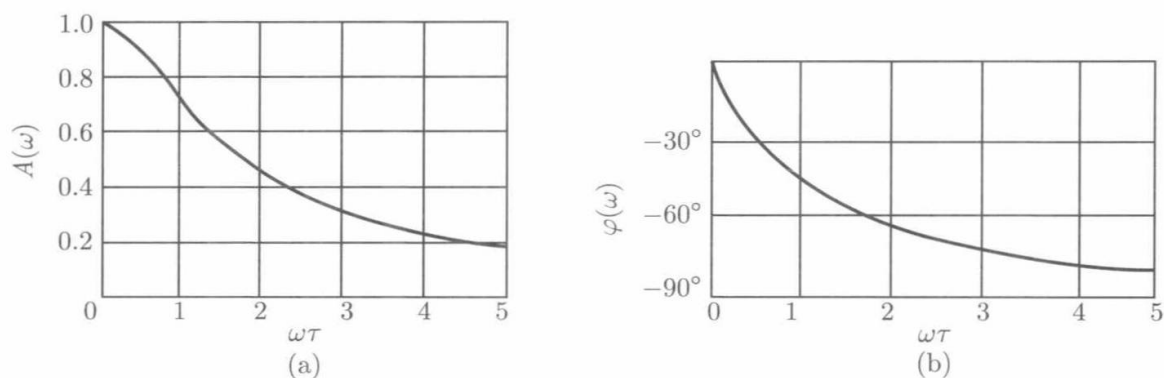


图 1-9 一阶系统的幅频和相频特性曲线

(a) 幅频特性曲线; (b) 相频特性曲线

(3) 脉冲响应函数

一阶系统的脉冲响应函数为

$$h(t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-29)$$

其图形为 (图 1-10)

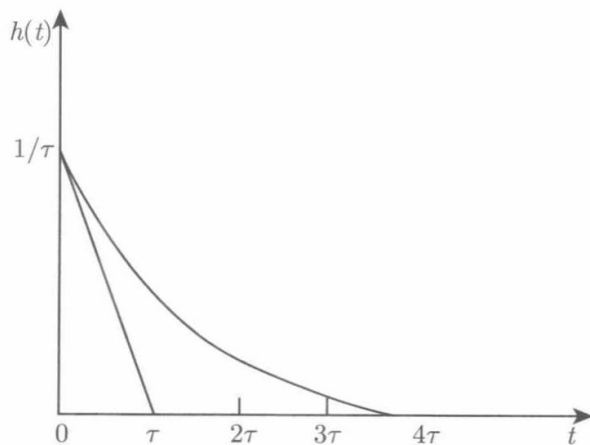


图 1-10 一阶系统的脉冲响应函数

(4) 对阶跃信号的响应

对系统的突然加载或突然卸载都可以看作是对系统施加了一个阶跃输入, 同

时系统的响应充分反映出了系统的动态特性。

对于图 1-11 所示的单位阶跃信号

$$x(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1-30)$$

其 Laplace 变换为

$$X(s) = \frac{1}{s} \quad (1-31)$$

一阶系统的单位阶跃响应如图 1-12 所示。

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-32)$$

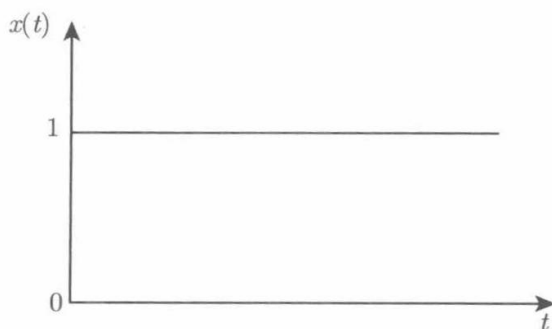


图 1-11 单位阶跃输入

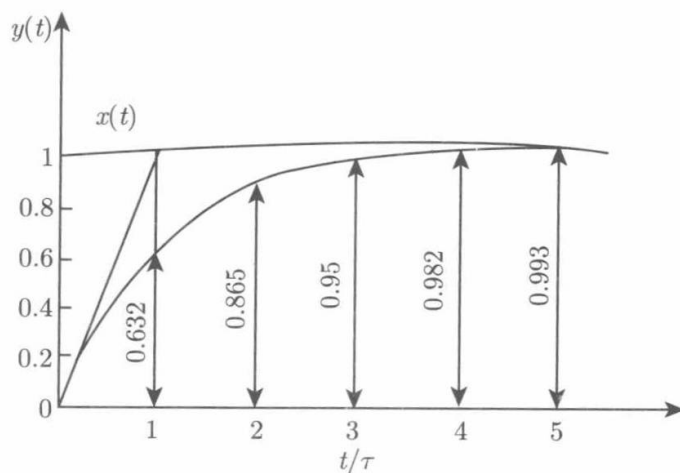


图 1-12 一阶系统的单位阶跃响应

理论上, 一阶系统在单位阶跃激励下的稳态输出误差为零, 当 t 趋于无穷大时达到稳态。所以, 一阶系统的时间常数 τ 越小越好。

2) 二阶系统

(1) 二阶系统的微分方程

二阶系统的微分方程为

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t) \quad (1-33)$$

压电式加速度计、电阻应变片测力计、电容式测声计均属于二阶测量系统。令

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$$

式中, ω_n 为测量系统的固有频率; ζ 为测量系统的阻尼比。此两个参数与测量系统本身相关。如此, 则式 (1-33) 变为

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dy(t)}{dt} + \omega_n^2 y(t) = S\omega_n^2 x(t) \quad (1-34)$$

仍然令 $S = 1$, 则二阶系统的传递函数为

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-35)$$

(2) 二阶系统的频率响应函数

二阶系统的频率响应函数为

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta j \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1-36)$$

幅频和相频特性分别为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1-37)$$

$$\varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (1-38)$$

相应的幅频和相频特性曲线如图 1-13 所示。

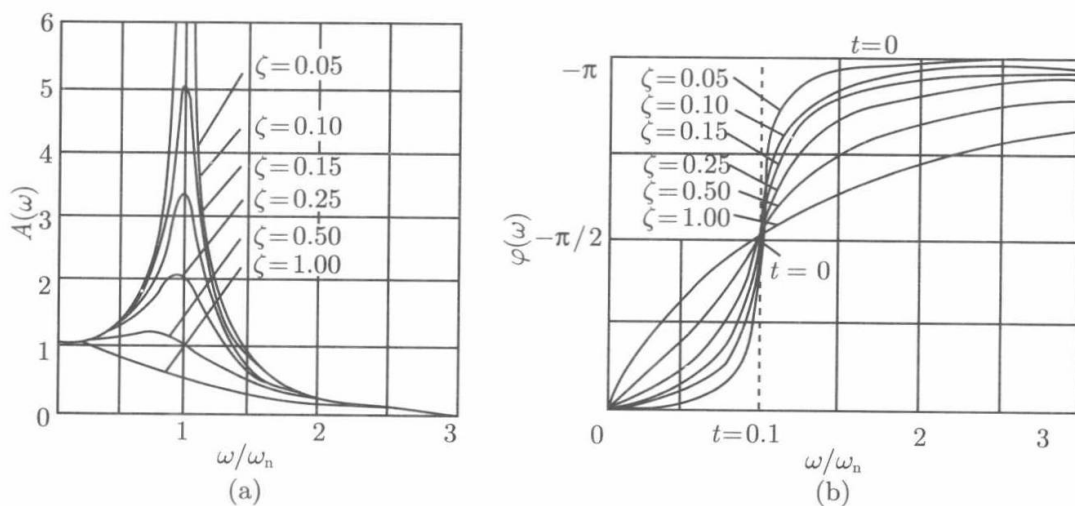


图 1-13 二阶系统的幅频和相频特性曲线

(a) 幅频特性曲线; (b) 相频特性曲线

(3) 脉冲响应函数

二阶系统的脉冲响应函数为

$$h(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t \quad 0 < \zeta < 1 \quad (1-39)$$

其对应的图形如图 1-14 所示。

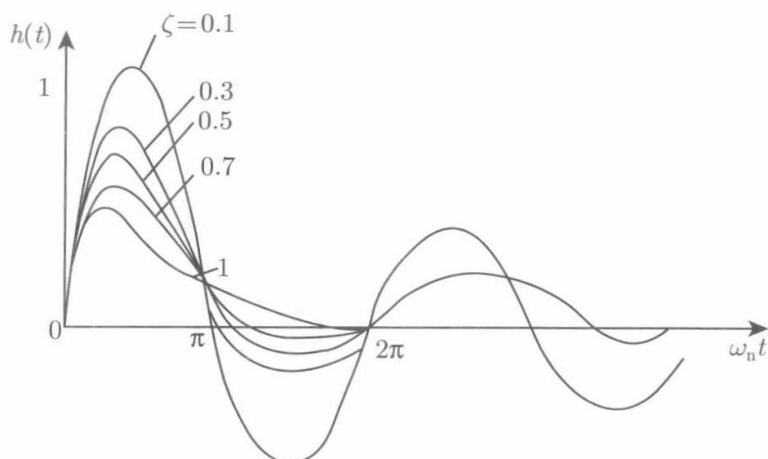


图 1-14 二阶系统的脉冲响应函数

(4) 二阶系统对单位阶跃信号的响应

二阶系统对图 1-15 所示的单位阶跃信号的响应为

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t - \varphi') \quad (\zeta < 1) \quad (1-40)$$

式中, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$

$$\varphi' = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$$

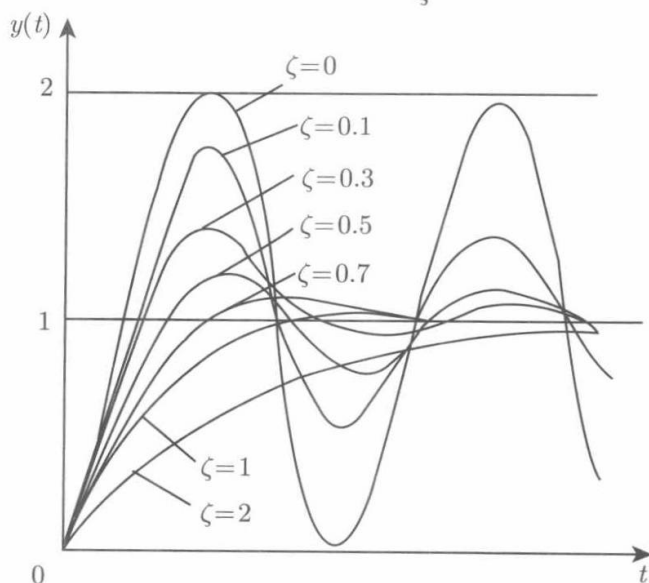


图 1-15 二阶系统的单位阶跃响应

二阶系统在单位阶跃激励下的稳态输出也为零,但固有频率 ω_n 和阻尼比 ζ 对系统的影响不可忽视。系统的固有频率 ω_n 越高,系统的响应越快。阻尼比 ζ 直接影响超调量和振荡次数。 ζ 为零时超调量最大,为 100%,且持续振荡,达不到稳态。 $\zeta \geq 1$ 时,系统实质上由两个一阶系统串联而成,虽然不发生振荡,但达到稳态的时间较长;阻尼比在 0.6~0.8 时,系统达到稳态的时间最短,约为 $(5\sim 7)/\omega_n$,稳态误差在 2%~5%,因此二阶测量系统的阻尼比通常选在 0.6~0.8。

在后续的章节中会发现,测试技术课程综合了多个学科的知识,作为一门技术基础课,该课程具有很强的实践性,所以必须在学习的同时结合实际、加强动手能力培养,并不断巩固理论知识和对概念的理解。

思考题与习题

- 1) 测试的定义。
- 2) 直接测量与间接测量。
- 3) 测量系统的基本组成。
- 4) 传感器的定义。
- 5) 测量系统的静态特性中包含哪些特性参数?
- 6) 影响测量系统线性度的因素有哪些?
- 7) 为何要研究测量系统的动态特性?
- 8) 测量系统的动态特性由哪些函数反映?
- 9) 一阶系统对单位阶跃信号的响应。
- 10) 二阶系统的幅频和相频特性曲线。
- 11) 本专业主要针对哪些物理量开展测试?
- 12) 列举本专业领域中常用的测试仪器。

第2章 误差分析与数据处理

测量的目的是获得被测量的真实值,然而,由于各种因素的影响,通过测量手段所获得的测量结果相对于其真值 (true value) 而言,都是一种近似,即测量结果总是含有误差 (errors) 的。要保证测量误差在允许范围内,一方面需要在仪器选择、测量装置设计等方面进行合理规划,另一方面要采用有效的方法对已获得的测量数据进行分析与处理。一般的工程测试中均需要对误差大小进行分析,找出测量误差产生的原因,并设法避免或减少产生误差的因素,提高测量的精度;其次是通过测量误差的分析和研究,求出测量误差的大小或其变化规律,修正测量结果并评估测量的可靠性。

2.1 误差的基本概念

2.1.1 误差的定义

物理量客观存在的真实值称为真值。从测量的角度来看,真值是不能确切获知的,是一个理想的概念。在测量过程中,一方面无法获得真值,另一方面又需要运用真值,因此引入“约定真值”的概念。约定真值被认为充分接近真值,可以代替真值来使用。在实际测量中,常常将高一等级的计量标准器具所复现的量值或是约定的满足规定准确度要求的值作为真值。另外,有时在真值无法确定的前提下,采用多次测量结果的算术平均值作为约定真值。

将某一物理量的测量值与其真值之差定义为绝对误差 (absolute error), 记为 δ , 它可以是正值也可以是负值, 其计算式为

$$\delta = X - X_0 \quad (2-1)$$

式中, X 为测量值; X_0 为真值。

定义相对误差 (relative errors) 为绝对误差与真值之比, 记为 η , 其表达式为

$$\eta = \frac{\delta}{X_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

误差分析的目的就是要找出引起误差的因素, 设法减少误差, 从而提高测量的精度。另外, 如果对误差进行分析, 能获得测量误差的规律, 则可对测量结果进行修正并评估测量的可靠程度。

在等精度测量过程中,根据误差产生的规律,可以将误差分为系统误差、随机误差和过失误差。只有在等精度测量条件下,对系统误差、随机误差和过失误差进行分析才有意义。另外,根据误差的来源还可以将误差分为仪器误差、人员误差和外界误差。

2.1.2 系统误差

在同一测量条件下,同一观测者在多次重复测量同一量时,测量误差的绝对值和符号保持不变,或在测量条件改变时按一定规律变化的误差为系统误差(system errors)。系统误差的特点是:在同一实验中,其误差值的大小及符号或是固定不变或是按一定规律变化。系统误差具有复现性、单向性和可测性。

可以认为系统误差是由固定不变或按确定规律变化的因素导致。这些因素主要有以下几个方面:

(1) 测量仪器的因素。部分仪器的结构或设计原理存在着缺陷;仪器零部件存在制造偏差;仪器安装不正确;电路的原理误差和电子元器件的性能不稳定等,均可能引起系统误差。

(2) 环境条件。测量时的环境温度、湿度、当地大气压强、电磁场等均可能成为偏离要求环境条件的因素,另外,环境中的温度、湿度等的变化也可能引起误差。

(3) 测量方法。采用近似的测量方法或近似计算公式引起的误差。

(4) 测量人员因素。由于测量人员本身的习惯,在刻度上读数时可能一直偏向某一方向,动态测量时可能在记录信号时有滞后于瞬时值的倾向。

系统误差表明测量结果的正确度,系统误差越小,测量结果越接近被测量的实际值。系统误差是可以根据其产生的原因采取措施减小或消除的。

系统误差产生的原因可能是仪表制造、安装或使用不正确或试验装置受到外界干扰,例如仪表有零点温漂,测量区域受电磁场干扰,测压探针的孔开得不正确等。另一类原因是试验理论和试验方法不完善,例如,测量脉动气流中的速度时,使用了稳态测量的速度探针,由于速度探针频响效果差,它不能准确地反映脉动气流的速度变化。系统误差是客观存在的,有时难以消除,这就只能通过修正测量值才能达到测量精度,修正值是从专门的试验中求得的。例如,采用静压探针或总压探针测量静压或总压时,由于制造探针时,测压孔的位置开得不正确,测量时它会引起测量误差,这可以在风洞上通过对探针校正所得到的系数来对测量结果加以修正。

2.1.3 随机误差

等精度测量条件下,由于偶然因素,多次测量同一物理量时出现测量结果不一致、而且符号都不固定,具有随机性的现象,为随机误差(random errors),随机误

差是由大量随机因素的干扰而产生的。包含随机误差的测量结果总体上服从一定的统计规律,如正态分布规律,可以通过数理统计的方法进行处理,随机误差越大则测量精度越低。

为了提高测量精度,通常采用多次测量同一被测量的方法,在多次测量后发现获得的测量值在剔除了系统误差与过失误差后并不一致,此为随机误差所致,随机误差的大小、正负均无规律,但在测量次数足够多、测量值的样本数足够大时,随机误差的分布符合统计规律,所以随机误差也称为偶然误差或概率误差。

随机误差无法通过实验方法剔除,但可以应用误差理论估计其对测量结果的影响,引起随机误差的因素有:仪表内部的间隙和摩擦、周围环境不稳定对测量对象和测量仪器的影响,如大气压力、温度、电磁干扰、振动等因素的随机变化,都会对测量结果产生影响。

值得注意的是,测量次数增加时,随机误差的算术平均值将逐渐减小,被测量的算术平均值更接近真值。

2.1.4 过失误差

过失误差 (gross errors) 也称为粗大误差,是指测量结果中有非常明显的误差,这种误差应该剔除。导致过失误差的原因,如测量人员读错、记错、算错或错误操作仪表。例如,在用铜 - 康铜热电偶测温时,错误地选用了铂铑 - 铂热电偶分度表,使测量结果明显歪曲,又如,在均匀流动中的同一管道截面上,测得的静压大于总压,这显然是不正确的,这时要检查仪表,并消除产生错误的原因。就其数值而言,过失误差往往都远远超过同一条件下的系统误差和随机误差,它已经不属于偶然误差的范畴,应予以剔除。

2.2 系统误差分析

测量过程首先要检查系统误差,确保系统误差对测量结果的影响在可接受范围内。对于无法补偿的系统误差,可以采取修正测量结果的方法,但修正必须要有依据。

系统误差分为恒值系统误差和变值系统误差。恒值系统误差是整个测量过程中大小和符号都不变的误差。变值系统误差是测量过程中大小和符号都可能变化的误差,其变化可能呈线性、周期性或其他规律。

对于恒值系统误差,其仅对测量结果的平均值产生影响,所以引入与系统误差大小相等且符号相反的修正值对平均值进行修正即可。恒值系统误差对测量值的偏差没有影响。

变值系统误差对测量结果的影响比较复杂,如果已知变值系统误差的规律,则

可以对变值系统误差求算术平均值,从而估计其对被测量算术平均值的影响。若无法确定变值系统误差的符号,则采取求误差绝对值之和的办法,有可能放大该部分系统误差。

测量过程中有许多因素会导致误差,使测量数据的分布变得复杂。从严格意义上讲,测量数据在大多数情况下都不会是正态分布的。然而,目前应用的误差分析公式却建立在正态分布基础上。因此,为了保证误差分析公式应用的有效性,必须在测量过程中消除系统误差,检验数据是否服从正态分布。

在测量结果中,当把系统误差修正过来,并把过失误差除掉后,所得数值的测量精度就取决于随机误差的大小了。

2.3 随机误差分析

2.3.1 随机误差的性质

人们对物理量的测量值进行了细致的统计分析与研究,总结出了随机误差的如下性质:

(1) 随机误差是有界的。人们在多次测量中发现,不论测量次数如何多,测定值总是在相当窄的范围内变动,这也说明随机误差总在相当窄的范围内变动。由于测量精度不一样,测量值的随机误差也不一样,但它总是有界的。

(2) 当测量次数足够多时,大小相等、符号相反的正负随机误差出现的概率相同,也就是说随机误差概率密度曲线是对称的。

(3) 随着对同一物理量所进行的等精度测量次数增加,随机误差的代数和有趋近于零的趋势。

(4) 误差的绝对值越小,出现的次数就越多,当误差为零(测量值等于算术平均值)时,出现的概率最大,这就是误差概率密度曲线的单峰性。

虽然以上四点性质是从观察统计中得到的,但已经被公认,并在此基础上推导出随机误差的正态分布函数。

2.3.2 随机误差概率密度分布曲线

绝大多数随机误差概率密度分布(probability density distribution)符合正态分布规律,正态分布是由高斯提出的,所以也称高斯分布。随机误差概率密度函数 y 的形式是由误差分布的四点性质推导出来的,其表达式为

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2-3)$$

式中, $p(x)$ 为误差等于 x 的概率密度; σ 为均方根误差。

图 2-1 所示为误差分布曲线, 曲线下任何一个范围的面积, 如图中阴影部分, 就是误差大于 x_1 而小于 x_2 出现的概率, 即

$$\int_{x_1}^{x_2} p(x)dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2-4)$$

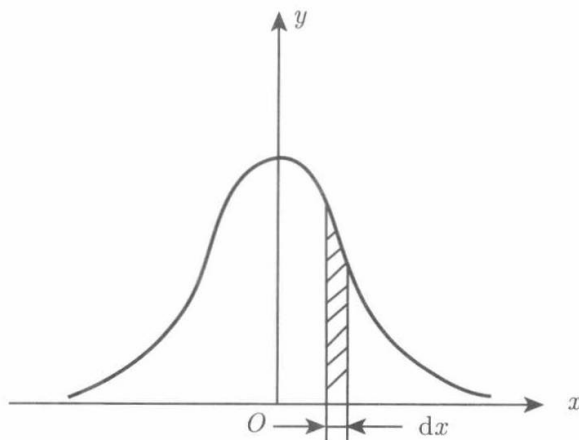


图 2-1 误差分布曲线

而曲线下的全部面积, 就是误差大于 $-\infty$ 而小于 $+\infty$ 出现的概率, 即

$$\int_{x_1}^{x_2} p(x)dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (2-5)$$

随机误差分布曲线有如下性质:

(1) 由于式 (2-3) 内的指数项有 x^2 , 所以曲线必然以 y 轴对称。

(2) 曲线具有单峰性, 在 $x = x_0$ 处 y 达到最大值 $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ 。

(3) 当 $x \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow 0$, 即最大误差存在的概率极小。

从数学上看, 误差分布曲线是一个曲线族, 如图 2-2 所示, σ 是曲线的参变量, σ 越小, y 值随 x 的增加衰减得就越快, 曲线峰越尖锐, 这就是说, 在同样的误差区间内, σ 越小, 其概率值 y 越大, 测量精度越高。

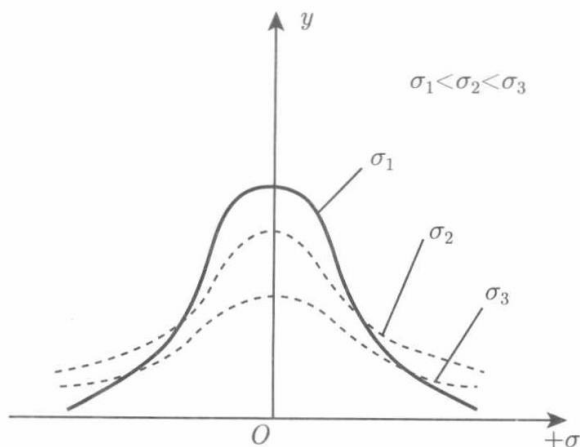


图 2-2 误差分布曲线族

在一组等精度测量中，误差的绝对值的算术平均值称为平均误差：

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - x_0|}{N} \quad (2-6)$$

通常将随机误差出现的范围区间取为 σ 的倍数，即区间为 $\pm k\sigma$ ，不同区间的概率见表 2-1。

表 2-1 出现各种误差的概率

区间	区间内概率	区间外概率
$\pm 0.68\sigma$	0.5	
$\pm \sigma$	0.6827	0.3173
$\pm 1.65\sigma$	0.9010	
$\pm 2\sigma$	0.9545	0.0455
$\pm 2.6\sigma$	0.9906	
$\pm 3\sigma$	0.9973	0.0027
$\pm 4\sigma$	0.9999	

表 2-1 包含着不确定度 (uncertainty) 的意义。由表 2-1 可知，大约每 3 次测量可能出现一次误差的绝对值大于 σ ，大约每 22 次测量中有一次误差的绝对值大于 2σ ，大约 1000 次测量中可能有 3 次误差的绝对值大于 3σ 。在测量误差大于 3σ 的测量值所出现的机会几乎不存在，因此 3σ 被称为极限误差。

由于真值无法测量出来，所以测量误差的具体数值也不可能准确测量出来，但可以由各种判据估计误差绝对值的一个上限 U ，使得

$$|x - x_0| < U \quad (2-7)$$

上式中的 U 称为不确定度，是估计出来的一个总误差限。对于同一测量结果，若估计一个较小的 U 值，则 $|\delta|$ 不小于 U 的可能性就较大，反之，若估计一个较大的 U 值，则 $|x - x_0|$ 不大于 U 就较为可信。如果 $|x - x_0| < \infty$ ，则它是完全可信的。利用误差函数可以求出误差值出现在某一区间 $[-A, A]$ 内的概率为 $p\{|\xi| \leq A\}$ ，区间 $[-A, A]$ 称为置信区间， $\pm A$ 称为置信限， $p\{|\xi| \leq A\}$ 称为误差在该置信区间的置信概率。由此可见，对于同一测量结果，置信区间越宽，则置信概率越大。但是不确定度设定过大则测量结果就失去了意义。

令 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ 为对待测物理量进行 N 次等精度测量所得的结果。当测量次数 N 为无穷大时， $\bar{x}$ 才收敛于期望值。当 N 有限时，测得值 x 在真值附近左右摆动， $\bar{x}$ 也在真值附近左右摆动，但从平均意义来说， $\bar{x}$ 较一次测得的 x 值更接近于真值。由于 $\bar{x}$ 也是随机量，故每做 N 次测量所得的算术平均值 $\bar{x}$ 都不同，定

义 $\sigma_{\bar{x}}$ 为待测物理量平均值的标准误差:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2-8)$$

平均值 $\bar{x}$ 分布的方差比一次测得值 x 的方差小 N 倍, 标准误差减小 $\sqrt{N}$ 倍, 因此多次测量的平均值较一次测得的值更准确。随着 N 增加, $\sigma_{\bar{x}}$ 值下降, 即 $\bar{x}$ 作为 x_0 的估计值更准确。由于 $\sigma_{\bar{x}}$ 值和 $\sqrt{N}$ 成反比, 故 $\sigma_{\bar{x}}$ 的下降速度比 $\sqrt{N}$ 的增加速率小得多, 在实际测量中 N 很少超过 50, 一般范围在 4~20。

对于测量值的随机误差服从正态分布的情况, 取 99.73% 的置信度, 测量结果可表示为

$$\bar{x} \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2-9)$$

2.3.3 测量结果的精确度

精密度 (precision): 同一被测量多次平行测量, 测量值重复性的程度, 随机误差小则精密度高。

准确度 (trueness): 同一被测量多次平行测量, 测量值偏离真值的程度, 系统误差小则准确度高。

精确度 (accuracy): 精密度和准确度的综合, 习惯上称为精度, 较全面地反映了测量误差的大小。测量结果的精度与仪器仪表的精度不同, 仪器仪表的精度与仪器仪表本身有关, 反映仪器仪表性能的优劣, 而测量结果的精度与每次测量相关, 反映测量值的质量。

下面以图 2-3 来说明精密度、准确度和精确度三者之间的关联和区别。甲、乙、丙、丁 4 个人对同一量进行了测量, 每人平行测量了 4 次, 获得了 4 个数值。从图 2-3 中看出, 丙的准确度高, 但精密度低; 乙的精密度和准确度均高; 甲的精密度

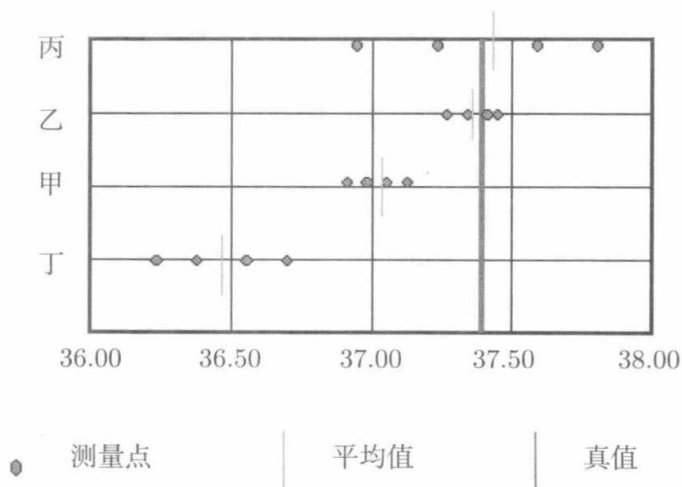


图 2-3 精密度、准确度与精确度

高但准确度低；丁的准确度和精密度均低。从 4 个人的测量结果来看，乙的精确度最高。另外，值得注意的是甲，他的测量很有可能受到了系统误差的影响，若消除系统误差，甲也能获得精确度高的结果。

2.4 异常数据的剔除

测量获得的数据中，往往会有个别数据超出统计规律范畴，这些数据属于可疑数据。如果明确某些可疑数据属于过失误差造成，则可以剔除这些数据。如果没有充分理由剔除这些数据，则需按一定的原则进行判别，以决定是否剔除这些数据。常用的数据判别准则有莱伊特准则、格拉布斯准则、 t 检验准则等。

1. 莱伊特准则

莱伊特准则也称为 3σ 准则。若测量值只含有随机误差，且遵循正态分布规律，根据表 2-1，测量值的偏差超过 3σ 的概率不足 0.3%。因此，对于通常只有几十次的工程测量，可以认为误差超过置信区间 $\pm 3\sigma$ 范围时不再属于随机误差，而是过失误差，应当剔除对应的数据。当然，将正常测量值当做含有过失误差而剔除的概率小于 0.3%。

剔除的方法是计算多次测量所得的各测量值的偏差 Δx_i 的绝对值和标准偏差 3σ ，把其中最大的 $|\Delta x_i|$ 与 3σ 比较，若 $|\Delta x_i| > 3\sigma$ ，则认为第 i 个测量值 x_i 是异常数据进而剔除。剔除 x_i 后，对余下的各测量值重新计算偏差和标准偏差，并按相同的步骤继续检查，直到各个偏差均小于 3σ 为止。

根据统计学原理，莱伊特准则不适用于测量次数 $n \leq 10$ 的场合。

2. 格拉布斯准则

格拉布斯准则假定测量结果服从正态分布，根据顺序统计量来确定可疑数据的取舍。设平行测量 n 次，获得的测量值为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ，测量结果服从正态分布。将测量值由小到大排序，根据顺序统计原则，给出标准化顺序统计量 g ，也可称为格拉布斯准则数。

$$g = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} \quad (2-10)$$

一般认为测量值中的最小值和最大值最为可疑，所以一般最先代入求 g 的为测量值中的最小值或最大值。

根据格拉布斯统计量的分布规律，给定与测量次数和显著度水平（危险率） α 相对应的临界格拉布斯数 $g_0(n, \alpha)$ ，见表 2-2。当求得的 g 大于相应的 $g_0(n, \alpha)$ 时，则认为可疑数据含过失误差，应当舍去。利用格拉布斯准则每次仅能舍去一个可疑数据。当舍去一个数据后，剩下的数据组成新的样本，重新进行判别。

表 2-2 格拉布斯准则数

n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
3	1.153	1.155	17	2.475	2.785	31	2.759	3.119	45	2.914	3.292
4	1.463	1.492	18	2.504	2.821	32	2.773	3.135	46	2.923	3.302
5	1.672	1.749	19	2.532	2.854	33	2.786	3.150	47	2.931	3.310
6	1.822	1.944	20	2.557	2.884	34	2.799	3.164	48	2.940	3.319
7	1.938	2.097	21	2.580	2.912	35	2.811	3.178	49	2.948	3.329
8	2.032	2.221	22	2.603	2.939	36	2.823	3.191	50	2.956	3.336
9	2.110	2.323	23	2.624	3.963	37	2.835	3.204	51	2.964	3.345
10	2.176	2.410	24	2.644	2.987	38	2.846	3.216	52	2.971	3.353
11	2.234	2.485	25	2.663	3.009	39	2.857	3.228	53	2.978	3.361
12	2.285	2.550	26	2.681	3.029	40	2.866	3.240	54	2.986	3.368
13	2.331	2.607	27	2.698	3.049	41	2.877	3.251	55	2.992	3.376

显著度水平代表误判的概率, 显著度水平越低, 则意味着将不含过失误差的数据当作含粗大误差的数据舍弃的错误判断概率减小。

3. t 检验准则

t 检验准则按 t 分布的实际误差分布范围来判断可疑数据, 对重复测量次数较少的情况同样适用。

与其他检验准则不同, t 检验准则先将 n 个测量值中的可疑值 x_j 剔除, 然后对余下的 $(n-1)$ 个数据计算算术平均值 $\bar{x}$ 和标准偏差 σ , 再判断 x_j 是否含有粗大误差。

$$\bar{x} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} x_i \quad (2-11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \bar{x})^2}{n-2}} \quad (2-12)$$

根据测量次数 n 和显著度水平 α , 从表 2-3 查得 k 值。

表 2-3 t 检验准则中的系数 k 值

n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
4	4.97	11.46	10	2.43	3.54	16	2.22	3.08
5	3.56	6.53	11	2.37	3.41	17	2.20	3.04
6	3.04	5.04	12	2.33	3.31	18	2.18	3.01
7	2.78	4.36	13	2.29	3.23	19	2.17	3.00
8	2.62	3.96	14	2.26	3.17	20	2.16	2.95
9	2.51	3.71	15	2.24	3.12	21	2.15	2.93

续表

n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$	n	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
22	2.14	2.91	25	2.11	2.86	28	2.09	2.83
23	2.13	2.90	26	2.10	2.85	29	2.09	2.82
24	2.12	2.88	27	2.10	2.84	30	2.08	2.81

若可疑数据 x_j 满足

$$|x_j - \bar{x}| > k\sigma \quad (2-13)$$

则确认为 x_j 可疑数据, 应予剔除。剔除 x_j 后, 再选择可疑测量值, 进行判断, 直到数据中不含可疑测量数据为止。

2.5 误差计算

在直接测量时, 误差计算可直接由均方根误差、有限次数的均方根误差和算术平均值的标准误差得出。在间接测量的误差计算时涉及误差传递的问题, 被测量的数值是由测得的与被测量有一定函数关系的直接测量量经计算求得, 所以间接测量误差不仅与直接测量量的误差有关, 还与它们之间的函数关系有关。此处对间接测量误差的计算进行详细阐述。

2.5.1 直接测量误差的计算

受条件限制, 试验时对被测量只进行一次测量的情况是经常遇到的。这时只能根据所采用的测量仪表的允许误差来估算测量结果中所包含的极限误差, 看它是否超过所规定的误差范围。实测的读数可能出现的最大相对误差为

$$\delta_{\max} = \delta \frac{A_0}{A} \% \quad (2-14)$$

式中, δ 是仪表的精度等级; A_0 是仪表的量程; A 是实测时仪表读数。

由式 (2-14) 可见, 采用一定量程的仪表, 测量小示值的相对误差比测量大示值的相对误差要大。该问题已在前面进行了解释。

2.5.2 一次测量时间接测量误差的计算

设间接测量中的被测量为 Y , 随机误差为 y ; 直接测量的被测量为 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 它们之间相互独立, 随机误差为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。

Y 和 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 有如下函数关系:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2-15)$$

考虑到误差后则有

$$Y + y = f[(X_1 + x_1), (X_2 + x_2), \dots, (X_n + x_n)] \quad (2-16)$$

把等式右边用泰勒级数展示, 并忽略高阶项, 得

$$\begin{aligned} & f[(X_1 + x_1), (X_2 + x_2), \dots, (X_n + x_n)] \\ &= f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \frac{\partial Y}{\partial X_1} x_1 + \frac{\partial Y}{\partial X_2} x_2 + \dots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} x_n \end{aligned} \quad (2-17)$$

比较式 (2-15)、式 (2-16) 和式 (2-17), 得

$$y = \frac{\partial Y}{\partial X_1} x_1 + \frac{\partial Y}{\partial X_2} x_2 + \dots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} x_n \quad (2-18)$$

或写成

$$\frac{y}{Y} = \frac{\partial Y}{\partial X_1} \frac{x_1}{Y} + \frac{\partial Y}{\partial X_2} \frac{x_2}{Y} + \dots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} \frac{x_n}{Y} \quad (2-19)$$

式 (2-18) 和式 (2-19) 称为间接测量的误差传递公式, 用误差传递公式可以完成两方面工作, 一是用直接测量量的误差来计算间接测量量的误差; 二是根据所给出的被测量的允许误差来分配各直接测量量的误差, 并依此选择合适的仪表。为计算方便, 将常用函数的绝对误差和相对误差列于表 2-4。

表 2-4 常用函数的绝对误差和相对误差

函数	绝对误差 y	相对误差 y/Y
$Y = X_1 + X_2$	$\pm(x_1 + x_2)$	$\pm(x_1 + x_2)/(X_1 + X_2)$
$Y = X_1 - X_2$	$\pm(x_1 + x_2)$	$\pm(x_1 + x_2)/(X_1 - X_2)$
$Y = X_1 X_2$	$\pm(X_2 x_1 + X_1 x_2)$	$\pm\left(\frac{x_1}{X_1} + \frac{x_2}{X_2}\right)$
$Y = X_1 X_2 X_3$	$\pm(X_1 X_2 x_3 + X_2 X_3 x_1 + X_1 X_3 x_2)$	$\pm\left(\frac{x_1}{X_1} + \frac{x_2}{X_2} + \frac{x_3}{X_3}\right)$
$Y = aX$	$\pm ax$	$\pm x/X$
$Y = X^n$	$\pm nX^{n-1}x$	$\pm n \frac{x}{X}$
$Y = \sqrt[n]{X}$	$\pm \frac{1}{n} X^{\frac{1}{n}-1} x$	$\pm \frac{1}{n} \frac{x}{X}$
$Y = X_1/X_2$	$\pm(X_2 x_1 + X_1 x_2)/X_2^2$	$\pm\left(\frac{x_1}{X_1} + \frac{x_2}{X_2}\right)$
$Y = \lg X$	$\pm 0.43429 \frac{x}{X}$	$\pm 0.43429 \frac{x}{X \lg X}$
$Y = \sin X$	$\pm x \cos X$	$\pm x \cot X$
$Y = \cos X$	$\pm x \sin X$	$\pm x \tan X$
$Y = \tan X$	$\pm x / \cos^2 X$	$\pm 2x / \sin(2X)$
$Y = \cot X$	$\pm x / \sin^2 X$	$\pm 2x / \sin(2X)$

例 用量程为 0~10A 的直流电流表和量程为 0~250V 的直流电压表, 测量直流电动机的输入电流和电压, 示值分别为 9A 和 220V, 两表的精度皆为 0.5 级, 试求电动机输入功率可能出现的最大误差。

解: 电流实测的读数可能出现的最大相对误差为

$$\delta_{I_{\max}} = \delta \frac{A_0}{A} \% = \pm 0.5 \times \frac{10}{9} \% = \pm 0.556\%$$

最大绝对误差为

$$9 \times (\pm 0.556\%) = \pm 0.05A$$

电压实测的读数可能出现的最大相对误差为

$$\delta_{V_{\max}} = \delta \frac{A_0}{A} \% = \pm 0.5 \times \frac{250}{220} \% = \pm 0.568\%$$

最大绝对误差为

$$220 \times (\pm 0.568\%) = \pm 1.25V$$

电动机输入功率可能出现的最大误差为

$$\Delta P = \pm (I\Delta V + V\Delta I) = \pm (9 \times 1.25 + 220 \times 0.05) = \pm 22.25W$$

2.5.3 多次测量间接测量误差的计算

设函数

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

式中, Y 是间接测量值; $X_1, X_2, \dots, X_n$ 是直接测量值, 它们相互是独立的。

设在测量中对 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 作了 n 次测量, 则可得出 n 个 Y 值:

$$Y_1 = f(X_{11}, X_{21}, \dots, X_{n1})$$

$$Y_2 = f(X_{12}, X_{22}, \dots, X_{n2})$$

⋮

$$Y_N = f(X_{1n}, X_{2n}, \dots, X_{nn})$$

根据式 (2-18), 每次测量的误差分别为

$$y_1 = \frac{\partial Y}{\partial X_1} x_{11} + \frac{\partial Y}{\partial X_2} x_{21} + \dots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} x_{n1}$$

$$y_2 = \frac{\partial Y}{\partial X_1} x_{12} + \frac{\partial Y}{\partial X_2} x_{22} + \cdots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} x_{n2} \quad (2-20)$$

$$\vdots$$

$$y_n = \frac{\partial Y}{\partial X_1} x_{1n} + \frac{\partial Y}{\partial X_2} x_{2n} + \cdots + \frac{\partial Y}{\partial X_n} x_{nn}$$

根据误差分布规律, 等值的正负误差的数目相等, 故式 (2-20) 中各项平方和中的非平方式可以抵消, 得

$$\sum y_i^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} \right)^2 \sum x_{1i}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} \right)^2 \sum x_{2i}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n} \right)^2 \sum x_{ni}^2 \quad (2-21)$$

将上式两端同除以 n , 得

$$\frac{\sum y_i^2}{n} = \left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} \right)^2 \frac{\sum x_{1i}^2}{n} + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} \right)^2 \frac{\sum x_{2i}^2}{n} + \cdots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n} \right)^2 \frac{\sum x_{ni}^2}{n} \quad (2-22)$$

即

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} \right)^2 \sigma_{X_1}^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} \right)^2 \sigma_{X_2}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n} \right)^2 \sigma_{X_n}^2 \quad (2-23)$$

式中, $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \cdots, \sigma_{x_n}$ 是各直接测量值的标准误差。

间接测量值多次测量时的极限误差为

$$\delta_y = 3\sigma_y \quad (2-24)$$

例 某离心泵能量性能试验中, 同时对额定工况下扭矩 M 和转速 n 各进行 8 次等精度测量, 经过有效性验证的数值列于表 2-5 中, 试求该工况下的有效功率及其误差。

表 2-5 额定工况试验的各测量值

$n/(\text{r}/\text{min})$	3002	3004	3000	2998	2995	3001	3006	3002
$M/(\text{N}\cdot\text{m})$	15.2	15.3	15.0	15.2	15.0	15.2	15.4	15.3

解: 根据式 (1-15) 求出转速 n 和扭矩 M 的算术平均值:

$$\bar{n} = \sum_{i=1}^8 n_i / 8 = 3001 \text{ r}/\text{min}$$

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^8 M_i / 8 = 15.2 \text{ N}\cdot\text{m}$$

转速 n 和扭矩 M 的均方根误差:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (n_i - \bar{n})^2}{8-1}} = 3.4 \text{ r/min}$$

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (M_i - \bar{M})^2}{8-1}} = 0.146 \text{ N} \cdot \text{m}$$

转速 n 和扭矩 M 算术平均值的均方根误差:

$$\sigma_{\bar{n}} = \frac{\sigma_n}{\sqrt{8}} = 1.2 \text{ r/min}$$

$$\sigma_{\bar{M}} = \frac{\sigma_M}{\sqrt{8}} = 0.05 \text{ N} \cdot \text{m}$$

有效功率:

$$P = \bar{M}\bar{\omega} = \bar{M} \frac{2\pi\bar{n}}{60} = \frac{\bar{M}\bar{n}}{9.55} = 4776 \text{ W}$$

有效功率 P 的均方根误差:

$$\begin{aligned} \sigma_P &= \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial n}\right)^2 \sigma_{\bar{n}}^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial M}\right)^2 \sigma_{\bar{M}}^2} = \sqrt{\left(\frac{\bar{M}}{9.55}\right)^2 \sigma_{\bar{n}}^2 + \left(\frac{\bar{n}}{9.55}\right)^2 \sigma_{\bar{M}}^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{15.2}{9.55}\right)^2 \times 1.2^2 + \left(\frac{3001}{9.55}\right)^2 \times 0.05^2} = 15.8 \text{ W} \end{aligned}$$

有效功率 P 的极限误差:

$$\delta_P = 3\sigma_P = 47.4 \text{ W}$$

这样, 试验所得有效功率:

$$P = 4776 \pm 47.4 \text{ W}$$

2.6 测量数据的处理方法

2.6.1 有效数字的概念与运算规则

1. 有效数字

有效数字 (significant digit) 为实际能测得的数字, 测得数值中最后一位是可疑的。有效数字不仅表明数字的大小而且还表明测量的准确度。有效数字保留的位数应根据分析方法与仪器的准确度来确定。

由于存在误差,所以测量数据总是近似值,它通常由可靠数字和欠准数字两部分组成。例如,由手持风速计测得风速大小为 4.63m/s ,其中 4.63 是个近似数, 4.6 是可靠数字,而末位 3 为欠准数字,即 4.63 为三位有效数字。有效数字对测量结果的科学表述极为重要。在工程运算中,有效数字的位数是指从该数左边第一位非零数字数到该数末尾,所包含的数字的个数。最后一位数字是臆测的,而非随意加入的。一般工程运算的小数点后要保留 2 位数字。如 0.013257 和 1.3257 ,它们的有效数字都是 5 位。

当测量误差已知时,测量结果的有效数字与测量误差应保持一致。如测量某压强值为 200.626kPa ,测量误差为 $\pm 0.25\text{kPa}$,这时测量结果应该写成 $200.63 \pm 0.25\text{kPa}$ 。

2. 有效数字中“0”的意义

“0”在有效数字中有两种意义,一种是作为数字定位,另一种是有效数字。数字之间的“0”和末尾的“0”都是有效数字,而数字前面的所有“0”只起定位作用。例:

(1) 10.1430 两个“0”都是有效数字,该数共包含 6 位有效数字。

(2) 0.2104 小数点前面的“0”为定位作用,不是有效数字;而数字中间的“0”是有效数字,该数共包含 4 位有效数字。

(3) 0.0120 “1”前面的两个“0”都是定位作用,而末尾“0”是有效数字,该数共包含 3 位有效数字。

3. 数字修约规则

GB 8170—87《数字修约规则》中规定了“四舍六入五考虑”法则。该法则的具体要求:

(1) 若被舍弃的第一位数字大于 5,则其前一位数字加 1。

(2) 若被舍弃的第一位数字等于 5,而其后的数字全部为零,则看被保留的末位数字为奇数还是偶数(零视为偶数),末位是奇数时进一,末位为偶数不加一。如 28.350 、 28.250 、 28.050 取 3 位数字分别为 28.4 、 28.2 、 28.0 。

(3) 若被舍弃的数字为 5,而其后的数字并非全部为零则进 1。如 28.2501 取 3 位有效数字为 28.3 。

(4) 若被舍弃的数字包括几位数字时,不得对该数字进行连续修约。如 2.154546 只取 3 位有效数字为 2.15 ,而不能采取 $2.154546 \rightarrow 2.15455 \rightarrow 2.1546 \rightarrow 2.155 \rightarrow 2.16$ 的作法。

这样,由于舍入概率相同,当舍入次数足够多时,舍入的误差就会抵消。同时,这种舍入规则使有效数字的尾数为偶数的机会增多,能被除尽的机会比奇数多,有利于准确计算。

4. 有效数字运算规则

当测量结果需要进行中间运算时,有效数字的取舍,原则上取决于参与运算的各数中精度最差的那一项。一般应遵循以下规则:

(1) 当几个近似值进行加、减运算时,在各数中(采用同一计量单位),以小数点后位数最少的那一个数(如无小数点,则为有效位数最少者)为准,即以绝对误差最大的为准,其余各数均舍入至比该数多一位后再进行加减运算,结果所保留的小数点后的位数,应与各数中小数点后位数最少者的位数相同。例如

$$0.0121 + 25.64 + 1.05782$$

正确运算:

$$0.012 + 25.64 + 1.058 = 26.71$$

不正确运算:

$$0.0121 + 25.64 + 1.05782 = 26.70992$$

(2) 进行乘除运算时,在各数中,以有效数字位数最少的那一个数为准,即以相对误差最大的数为准,其余各数及积(或商)均舍入至与该数有效数字位数相同后进行运算。运算结果的有效数字的位数应取舍成与运算前有效数字位数最少的因子相同,如:

$$0.0121 \times 25.64 \times 1.05782$$

应该处理成

$$0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = 0.328$$

(3) 将数平方或开方后,结果可比底数或被开方数多保留一位,如

$$13.7^2 = 187.7; 793^{1/3} = 1.994$$

(4) 用对数进行运算时,所取数的有效数字要与原数的有效数字位数相等,如

$$\lg 5.37 = 0.730$$

(5) 若计算式中出现如 e 、 π 等常数时,可根据具体情况来决定它们应取的位数。

2.6.2 测量数据的图示方法

测量获得的大量数据,只有通过正确的数据表示方法,才能得到明确的测量结果。最常用的数据表示方法有列表法和作图法。作图法是近年来普遍采用的数据表

示方法, 相对于列表法, 作图法直观易读, 且随着计算机绘图软件的发展, 数据图越来越受到青睐。

作图法是用图像来表示数据之间的关系, 其能够形象地显示各个物理量之间的数量关系, 便于比较分析和提炼规律, 例如, 可以依据作图法所画出的图线得到相应的物理量之间的经验公式。目前作图法已成为处理实验数据的常用方法。

要想将测量数据制成一幅完整而正确的二维线图, 必须遵循如下原则及步骤:

(1) 选择合适的坐标;

(2) 确定坐标的分度和标记, 一般用横轴表示自变量, 纵轴表示因变量, 并标明各坐标轴所代表的物理量及其单位 (可用相应的符号表示), 且坐标轴的分度要根据实验数据的有效数字及对结果的要求来确定;

(3) 根据测量获得的数据, 用一定的符号在坐标纸上描出坐标点, 通常一张图上画几条实验曲线时, 每条曲线应采用不同的标记, 以免混淆, 常用的标记符号有 $\circ$ 、 $\bullet$ 、 $\diamond$ 、 $\square$ 等;

(4) 绘制一条与标出的实验点基本相符的图线, 图线尽可能多地通过实验点, 由于有测量误差, 某些实验点可能不在图线上, 应尽量使其均匀地分布在图线的两侧, 图线应是直线或光滑的曲线或折线;

(5) 标注注解和说明, 应在图上标出图的名称, 有关符号的意义和特定的实验条件。

作图法可利用已经作好的图线, 定量地求出待测量或待测量和某些参数之间的关系式。如果作图法得到的是直线, 则求其函数表达式的方法很简单, 因此对于存在非线性关系的图线, 通常借助变量变换的方法将原来的非线性关系转化为新变量的线性关系。

2.6.3 测量数据的曲线拟合

通过实验获得测量数据后, 为了获得有关物理量之间关系的经验公式, 需要对测量数据进行曲线拟合。从几何上看, 就是要选择一条曲线, 使之与所获得的实验数据都能很好地吻合。因此, 求取经验公式的过程也即是曲线拟合的过程。

1. 最小二乘法

用作图法处理数据虽有许多优点, 但它是一种粗略的数据处理方法。不同的人用同一组数据作图, 由于在拟合直线 (或曲线) 时, 有一定的主观随意性, 因而拟合出的直线 (或曲线) 往往是不一样的。由一组实验数据找出一条最佳的拟合直线 (或曲线), 更严格的方法是**最小二乘法 (least square method)**。由最小二乘法所得的变量之间的函数关系称为**回归方程 (regression equation)**。下面简要介绍其原理和在一元线性和非线性拟合中的应用。

设在实验中获得了自变量 x_i 与因变量 y_i 的若干组对应数据 (x_i, y_i) , 在使偏差平方和 $\sum [y_i - f(x_i)]^2$ 取最小值时, 找出一个已知类型的函数 $y = f(x)$ (即确定关系式中的参数)。这种求解 $f(x)$ 的方法称为最小二乘法。

根据最小二乘法的基本原理, 设某量的最佳估计值为 x_0 , 则

$$\frac{d}{dx_0} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 = 0 \quad (2-25)$$

可求出

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

即

$$x_0 = \bar{x}$$

而且可证明

$$\frac{d^2}{dx_0^2} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 = \sum_{i=1}^n (2) = 2n > 0 \quad (2-26)$$

说明 $\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2$ 可以取得最小值。

可见, 当 $x_0 = \bar{x}$ 时, 各次测量偏差的平方和为最小, 即平均值就是在相同条件下多次测量结果的最佳值。

根据统计理论, 要得到上述结论, 测量的误差分布应遵从正态分布 (高斯分布), 这也是最小二乘法的统计基础。

2. 一元线性拟合

设一元线性关系为

$$y = ax + b$$

实验获得的 n 对数据为 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, n)$ 。由于误差的存在, 当把测量数据代入所设函数关系式时, 等式两端一般并不严格相等, 而是存在一定的偏差。为了讨论方便, 设自变量 x 的误差远小于因变量 y 的误差, 则这种偏差就归结为因变量 y 的偏差, 即

$$\nu_i = y_i - (ax_i + b) \quad (2-27)$$

根据最小二乘法, 获得相应的最佳拟合直线的条件为

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum_{i=1}^n \nu_i^2 = 0 \quad (2-28)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum_{i=1}^n \nu_i^2 = 0 \quad (2-29)$$

若记

$$I_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \quad (2-30)$$

$$I_{yy} = \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2 \quad (2-31)$$

$$I_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum (x_i y_i) - \frac{1}{n^2} \sum x_i \sum y_i \quad (2-32)$$

代入方程组可以解出

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2-33)$$

$$b = \frac{I_{xy}}{I_{xx}} \quad (2-34)$$

从上面的讨论可知, 回归直线一定要通过点 $(\bar{x}, \bar{y})$, 这个点叫做该组测量数据的重心。最小二乘法原理是一种在多学科领域中获得广泛应用的数据处理方法。

3. 一元非线性拟合

当两变量之间呈现复杂的非线性关系时, 最小二乘法也可以求出非线性回归方程。若非线性问题, 则可以用下述方程描述, 即

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n \quad (2-35)$$

通常要将非线性问题化解为线性问题, 这样可以使复杂的问题变得容易解决。典型的非线性方程变换见表 2-6。线性化后即可用前述一元线性拟合的方法进行曲线拟合。

表 2-6 非线性方程变换表

非线性方程	线性化方程	线性化变量
$y = a + b \ln x$	$y' = a + bx'$	$y' = a + bx'$
$y = 1 - e^{-ax}$	$y' = \ln \frac{1}{1-y} = ax'$	$y' = a + bx'x' = x$
$y = e^{(a+bx)}$	$y' = \ln y = a + bx'$	$y' = \ln yx' = x$

2.6.4 计算机绘图软件

1. Origin 软件

Origin 软件是目前测试数据后处理时常用的软件, 该软件不但能够根据数据绘图, 还能进行信号处理。Origin 软件在科学作图和数据处理领域享有较高的声誉, 相比于同类软件, 它的功能更为强大。

Origin 软件包括两大类功能：数据分析和科学绘图。Origin 的数据分析功能包括：给出选定数据的各项统计参数平均值 (mean)、标准偏差 (standard deviation)、标准误差 (standard error)、总和 (sum) 以及数据组数 N ；数据的排序、调整、计算、统计、频谱变换；线性、多项式和多重拟合；FFT 变换、相关性分析、FFT 过滤等；可利用约 200 个内建的以及自定义的函数模型进行曲线拟合，并可对拟合过程进行控制；可进行统计、数学以及微积分计算。

利用 Origin 软件不但可以绘制二维图，还可以绘制三维图，其提供了几十种二维和三维绘图模板。二维图形模板有线图模板、散点图模板、柱状图 (histogram) 模板、矢量图 (vector diagram) 模板、极曲线 (polar plot) 模板等，三维图形模板有三维线框图、瀑布图 (waterfall plot)、等高面图等模板。二维图形可独立设置页、轴、标记、符号和线的颜色，可选用多种线型。选择超过 100 个内置的符号。调整数据标记 (颜色、字体等)，选择多种坐标轴类型和显示方式，可以对数据点进行标识和过滤，每页可显示多达 50 个 XY 坐标轴，可输出为各种图形文件或以对象形式拷贝至剪贴板。用户可以自定义数学函数、图形样式和绘图模板，可以和各种数据库软件、办公软件、图像处理软件等方便的连接；可以方便地进行矩阵运算，如转置、求逆等，并通过矩阵窗口直接输出三维图表；可以用 C 语言等高级语言编写数据分析程序，还可以用内置的 Lab Talk 语言编程。

Origin 是一个多文档界面应用程序。一个项目文件可以包括多个子窗口，可以是工作表窗口 (worksheet)、绘图窗口 (graph)、函数图窗口 (function graph)、矩阵窗口 (matrix) 和版面设计窗口 (layout page) 等。一个项目文件中的各窗口相互关联，可以实现数据的实时更新，即如果工作表中的数据被改动之后，其变化能立即反映到其他与之相关联的窗口，比如绘图窗口中所绘数据或数据线可以立即得到更新。

图 2-4、图 2-5 和图 2-6 分别为使用 Origin 软件绘制的二维数据图形，其中，图 2-4 是经过对数据进行分析而绘制的包含误差的二维图；图 2-5 为采用多种符号标识的二维线图；图 2-6 为二维矢量图。由图 2-5、图 2-6 可以看出 Origin 软件对实验数据进行表达的适用性与灵活性。

2. Matlab 软件

Matlab 是 MathWorks 公司于 1982 年推出的高性能的数值计算和数据处理软件，它集数值分析、矩阵运算、信号处理和图形显示于一体，构成了一个方便、界面良好的用户环境。Matlab 软件包括工具箱 (toolbox)，其可以用来求解各类专业问题。Matlab 的主要特点：

(1) 可扩展性。Matlab 最重要的特点是易于扩展，用户不仅可利用 Matlab 所提供的函数及基本工具箱函数，还可方便地构造出专用的函数。从而大大扩展了其应用范围。

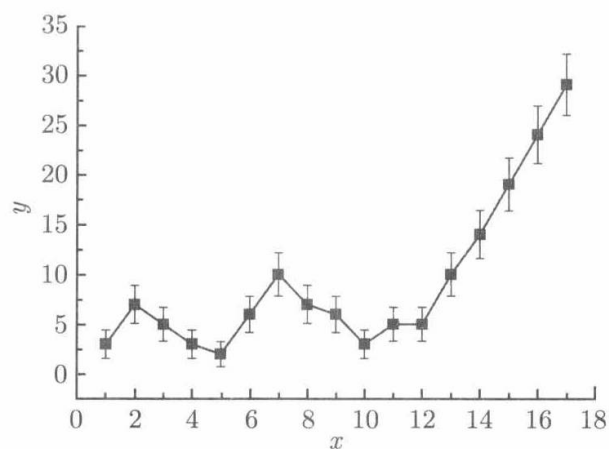


图 2-4 利用 Origin 软件绘制的误差范围图

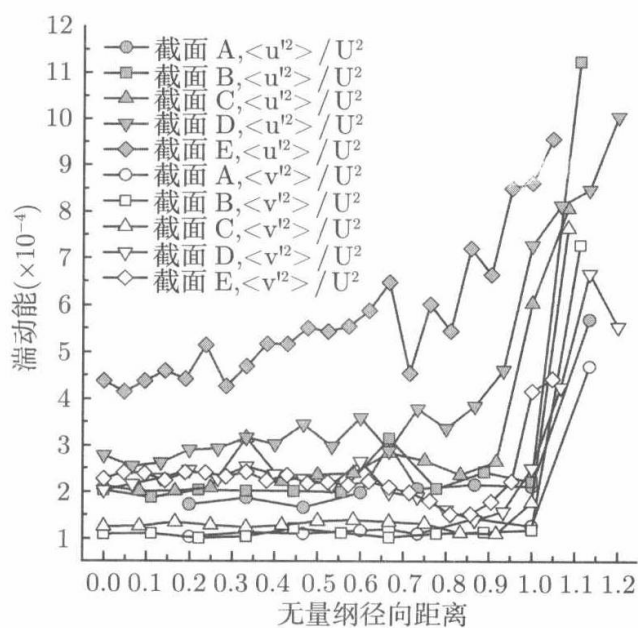


图 2-5 利用 Origin 软件绘制的二维图 (线 + 符号)

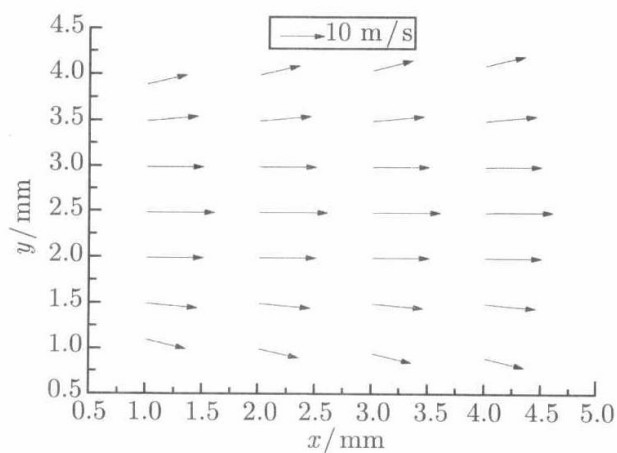


图 2-6 利用 Origin 软件绘制的二维矢量图

(2) 易学易用性。Matlab 不需要用户有高深的数学知识和程序设计能力, 不需要用户深刻了解算法及编程技巧。

(3) 高效性。Matlab 语句功能十分强大, 一条语句可完成十分复杂的任务。如 fft 语句可完成对指定数据的快速傅里叶变换, 这相当于上百条 C 语言语句的功能。它大大加快了工程技术人员的软件开发效率。

Matlab 的强大功能使其在分析测量系统动态特性、处理测量数据和绘制数据图方面具有一定的优势。以下列举两个 Matlab 的程序应用实例。

例 Matlab 的多项式拟合功能

已知变量 x, y 之间的函数关系为

$$y = a_1 x^n + a_2 x^{n-1} + \cdots + a_n x + a_{n+1}$$

现希望通过实验获得一组 $\{x_i, y_i | i = 1, 2, \cdots, m\}$ 测量数据, 确定出系数 $(a_1, a_2, \cdots, a_{n+1})$, 这类问题就是多项式拟合问题。Matlab 中设有专门求解该问题的命令: $p = \text{polyfit}(x, y, n)$, 可用于求 x, y 数组所给数据的 n 阶拟合多项式系数向量 p 。拟合效果通过 Matlab 输出的图形曲线可直观看出, 此处多项式的阶数要设置合适, 过低或过高均得不到理想的结果。下面的程序中给定数组 $x0, y0$, 求拟合三阶多项式, 并图示拟合情况。程序中, “%” 后面为注释语句。

%给定数据对

```
x0=0:0.1:1;
```

```
y0=[-0.447,1.978,3.11,5.25,5.02,4.66,4.01,4.58,3.45,5.35,9.22];
```

%求拟合多项式

```
n=3;
```

```
p=polyfit(x0,y0,n)
```

%图示拟合情况

```
xx=0:0.01:1;
```

```
yy=polyval(p,xx);
```

```
plot(xx,yy,'-b',x0,y0,'.r','MarkerSize',20)
```

```
legend(' 拟合',' 原始数据','Location','SouthEast')
```

```
xlabel('x')
```

程序运行结果如图 2-7 所示。这是 Matlab 的简单应用实例之一。

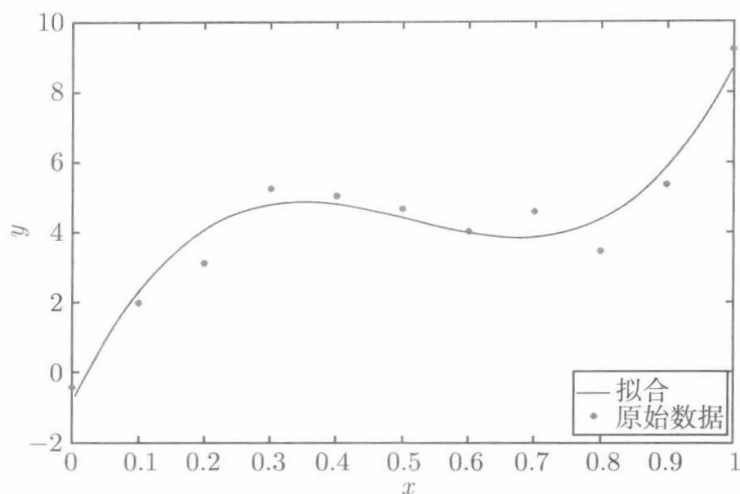


图 2-7 Matlab 拟合多项式结果图

例 用 Matlab 求解二阶系统阶跃响应

下面为 Matlab 求解二阶系统阶跃响应的程序，并能绘制出响应图。

```

clf;
t=6*pi*(0:100)/100;
y=1-exp(-0.3*t).*cos(0.7*t);
plot(t,y,'r-', 'LineWidth',3)           %<命令 3>
hold on
tt=t(find(abs(y-1)>0.05));
ts=max(tt);           %<命令 5>
plot(ts,0.95, 'bo', 'MarkerSize',10)    %<命令 6> 镇定点位置
hold off
axis([-inf,6*pi,0.6,inf]) %横坐标下限及纵坐标上限自动生成
set(gca, 'Xtick',[2*pi,4*pi,6*pi], 'Ytick', [0.95,1,1.05,max(y)])
%<命令 9>
set(gca, 'XtickLabel',{ '2*pi'; '4*pi'; '6*pi'})%<命令 10>
set(gca, 'YtickLabel', {'0.95'; '1'; '1.05'; 'max(y)'} )%<命令 11>
grid on
text(13.5,1.2, '\fontsize{12}{\alpha}=0.3')%<命令 13>
text(13.5,1.1, '\fontsize{12}{\omega}=0.7')%<命令 14>
title('\fontsize{14} \it y=1-e^{-\alpha t}\cos{\omega t}')%<命令 15>
xlabel('\fontsize{14} \bft\rightarrow')

```

```
ylabel('\fontsize{14} \bfy\rightarrow')
```

程序运行结果如图 2-8 所示。

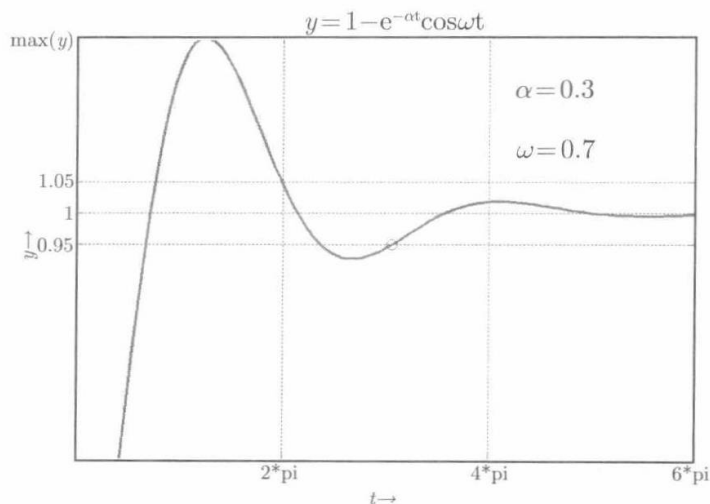


图 2-8 二阶阶跃响应图的标识

命令 3 为用 3 磅粗的红实线画曲线；命令 5 为寻找镇定时间，即从那后，响应与 1 的距离再也不会超过 0.05；命令 9 为设置坐标轴上的分度线位置；命令 10、命令 11 通过手工设置，分别对 x, y 轴的分度线进行标识， x 轴采用 π 的偶倍数标识，以增强可读性，注意命令中的花括号及其中的分号；命令 13、命令 14 采用 12 磅字体书写 $\alpha = 0.3$ 和 $\omega = 0.7$ ；命令 15 使用“斜体”“希腊字符”“上标”和 14 磅字体书写图名。

思考题与习题

- 1) 系统误差能否消除，如何消除？
- 2) 精密度、准确度和精确度之间的关系。
- 3) 举测量实例说明系统误差。
- 4) 解释随机误差。
- 5) 误差传递的原则。
- 6) 去除可疑测量值的办法。
- 7) t 检难准则的具体实施方法。
- 8) 采用计算机软件进行测试数据处理的优点。
- 9) 有效数字的消约原则。
- 10) 如果欲将非平行测量获得的量放在一个样本组里，如何操作？
- 11) 最小二乘法的定义。

第3章 温度测量

3.1 温度的基本概念

从宏观上来讲, 温度 (temperature) 是表征物体冷热程度的物理量, 从微观上来讲, 温度反映了物体分子热运动的剧烈程度。由于物体的物性参数大多都与温度相关, 因此, 温度的精确测量至关重要。在能源与动力工程领域不可避免地会遇到温度测量的问题。就以热力发电厂为例, 补给水的温度、烟气温度、蒸汽温度等均需测量, 温度是关系到设备运行安全性的重要参数之一。

3.1.1 温标

衡量温度高低的标尺为温标 (thermometric scale), 其规定了温度零点和度量单位。目前国际上应用较多的温标有热力学温标、国际实用温标、摄氏温标和华氏温标 (Fahrenheit's thermometric scale)。

目前常用的温标有两种, 一是华伦海特建立的以冰、水和氯化铵的混合物的温度作为 0 度, 以人体口腔和腋下的测得温度为 96 度的华氏温标 ($^{\circ}\text{F}$); 二是摄耳修斯定义的以冰的熔点作为 0 度, 以水的沸点作为 100 度的摄氏温标 ($^{\circ}\text{C}$)。华氏温标和摄氏温标的转换关系为

$$t_{\text{C}} = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) \quad (3-1)$$

式中, t_{C} 为摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$); t_{F} 为华氏温度 ($^{\circ}\text{F}$)。

开尔文 (Kelvin) 根据卡诺循环工作中的热机中, 工质从温度为 T_1 的热源吸收热量 Q_1 和从温度为 T_2 的冷源放出热量 Q_2 , 得出温度与热量的如下关系式:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (3-2)$$

采用该关系, 可只用一个温度基点来确定其他温度, 这便是热力学温标。由于卡诺循环是理想化的, 因此热力学温标的实施实际上是通过理想气体的关系式表达的, 即

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (3-3)$$

热力学温标的符号为 T , 单位为开尔文 (K)。规定水的三相点 (即水的固、液、气三态共存时) 的温度为 273.16K, 即 1K 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$,

热力学温标是一种绝对温标。特别注意的是, 由于水的冰点与其三相点的热力学温度相差 0.01K, 故热力学温标 T 与摄氏温标 t 的关系为

$$T = t + 273.15 \quad (3-4)$$

显然, 热力学温标在实际使用中不太方便, 为此, 1927 年国际计量大会决定采用国际实用温标, 旨在提供一种容易准确地复现, 并且尽可能给出接近热力学温标的实用温标。数十年来, 历经多次修改, 1990 年的国际温度标准 (ITS-90, International Temperature Scale of 1990) 开始实施, 其定义的温度基准点有 17 个, 如表 3-1 所示。

表 3-1 ITS-90 定义基准点

序号	温度		物质	状态
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$		
1	3~5	-270.15~-268.15	He	V
2	13.8033	-259.3467	e-H ₂	T
3	13.8033~17	-259.3467~-256.15	e-H ₂ (或 He)	V(或 G)
4	13.8033~20.3	-259.3467~-252.85	e-H ₂ (或 He)	V(或 G)
5	24.5561	-248.5939	Ne	T
6	54.3584	-218.7916	O ₂	T
7	83.8058	-189.3442	Ar	T
8	234.3156	-38.8344	Hg	T
9	273.16	0.01	H ₂ O	T
10	302.9146	29.7646	Ga	M
11	429.7485	156.5985	In	F
12	505.078	231.928	Sn	F
13	692.677	419.527	Zn	F
14	933.473	660.323	Al	F
15	1234.93	961.78	Ag	F
16	1337.33	1064.18	Au	F
17	1357.77	1084.62	Cu	F

注: V — 蒸气压点; G — 气体温度计点; M — 熔点; F — 凝固点; T — 三相点。

3.1.2 温度计的分类

按测量时是否与待测物相接触, 温度计 (thermometer) 可分为接触式和非接触式。一旦两种温度不同的物体相互接触, 就必然会发生从高温侧到低温侧的热交换, 直至两者温度相等为止, 依据该原理制成的温度计便是接触式温度计。而依据物体辐射能量的大小来测量温度的则是非接触式温度计。常用的温度计及其适用范围如表 3-2 所示。

表 3-2 温度计的分类及其适用范围

温度计分类		适用温度范围
接触式	膨胀式	压力式温度计
		双金属温度计
		水银温度计
		有机液体温度计
	电阻式	铂电阻温度计
		铜电阻温度计
		铱铁电阻温度计
		锆电阻温度计
		镍电阻温度计
		碳电阻温度计
		热敏电阻温度计
	热电偶式	铜-康铜
		铂铑-铂
		镍铬-康铜
		镍铬-镍硅 (镍铝)
非接触式	辐射式	全辐射高温计
		单色光学高温计
		比色光学高温计
		红外温度计

接触式温度计与非接触式温度计各有优缺点:

(1) 由于接触式温度计必须将感温元件与被测物体相接触, 故而会破坏被测温度场, 而非接触式温度计则不会对原温度场带来影响。

(2) 由于热惯性的存在, 接触式温度计的感温元件与被测物体达到热平衡需要一定的时间, 其时间滞后较大; 非接触式温度计由于依据被测物体的辐射来测得温度, 因此响应速度较快。

(3) 由于感温元件所承受的温度范围有限, 因此接触式温度计对于高温物体的测量很受限制, 非接触式温度计则无此问题。

(4) 由于低温物体的辐射很小, 故非接触式温度计不适用于测量较低的温度。

(5) 一般来说, 接触式温度计的测量精度要高于非接触式温度计。

3.2 接触式温度计

3.2.1 膨胀式温度计

大多数物质的体积均会随温度的变化而发生热胀冷缩的现象, 据此特性而制成的温度计称为膨胀式温度计。

1. 玻璃管液体温度计

作为最常见的温度计,该型温度计在玻璃管中填充工作液体,利用其随温度升高而膨胀的特性来指示温度。最为常用的是水银温度计,这是因为水银不粘玻璃,不易氧化,可以在很宽的温度范围内($-38\sim 356^{\circ}\text{C}$)保持液态,而且在 200°C 以下,其膨胀系数几乎与温度呈线性关系,故水银温度计可以作为精密标准温度计使用。

在玻璃管液体温度计的使用上应该注意以下两个问题。

(1) 零点漂移。由于玻璃管的热胀冷缩会造成零点位置的移动,所以需要定期对玻璃管液体温度计校验零点位置。

(2) 露出液柱的修正。使用玻璃管液体温度计时有全浸入和部分浸入式两种,温度刻度是在温度计液柱全部浸入介质中标定的。部分浸入式测量时,液柱只插入一定深度,外露部分处于环境温度之下,若此时环境温度与标定分度时的温度不相同,可按照如下表达式进行修正:

$$\Delta t = \gamma n(t_B - t_A) \quad (3-5)$$

式中, n 为露出部分液柱所占的分度数; γ 为工作液体在玻璃中的视膨胀系数(水银的 $\gamma \approx 0.00016$); t_B 为标定分度条件下外露部分空气温度($^{\circ}\text{C}$); t_A 为使用条件下外露部分空气温度($^{\circ}\text{C}$)。

全浸入式温度计在使用时若未能全部浸入,则对外露部分带来的系统误差修正公式与上式相同,只是式中的 t_B 为温度计测量时的显示值。

玻璃管液体式温度计精度高、读数直观、结构简单、价格便宜、使用方便,因此得到了广泛的应用。但是其温度信号不能远距离传输,故不适用于自动测量系统。

2. 压力式温度计

对于密闭空间内的气体或液体进行加热,则其压力会产生变化,据此原理制成的温度计便是压力式温度计,该型温度计由温包、毛细管和弹簧管所构成的密闭系统和传动指示机构组成,如图 3-1 所示。根据工作介质的不同,压力式温度计可以分为三种:

(1) 采用气体为工质的,称为充气压力式温度计,最常用的填充工质为氮气。测温范围为 $-80\sim 550^{\circ}\text{C}$, 压力与温度的关系接近线性。

(2) 系统内所充工质为低沸点的液体,如氯甲烷(CH_3Cl)、一氯乙烷($\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$)、丙酮($\text{CH}_3-\text{CO}-\text{CH}_3$)、乙醚(CH_3OCH_3)等,其饱和蒸气压随着被测温度而变化,测温范围为 $-20\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。由于饱和蒸气压和饱和温度呈非线性关系,所以此温度计的刻度并不是均匀的。

(3) 采用液体作为工质,如水银(Hg)、二甲苯(C_8H_{10})、甲醇(CH_3OH)等。测温范围为 $-40\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。

使用压力式温度计时，务必要将温包全部浸入被测物质中。当毛细管所处的环境温度有较大波动时会给测量结果带来误差，所以毛细管不能太长，一般应小于60mm。压力式温度计的精度较低，但使用方便，抗振性好，常用来检测容器内的油温或水温。

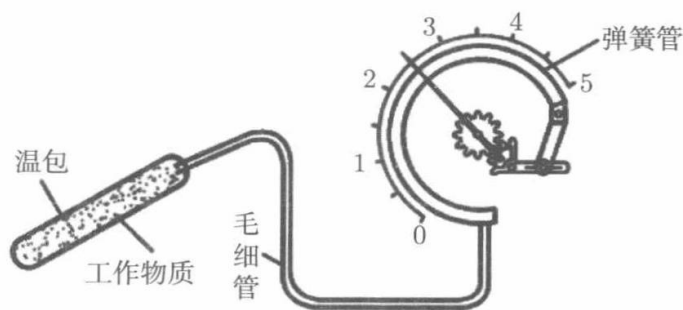


图 3-1 压力式温度计

3. 双金属温度计

将线膨胀系数不同的两种金属构成的金属片作为感温元件，当温度发生变化时，两种金属发生不同程度的膨胀，于是该双金属片便会产生与温度大小成比例的变形，该变形通过相应的传动机构由指针指示出温度数值，这便是双金属温度计 (bimetal thermometer) 的工作原理。双金属温度计的温度测量范围为 $-60\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.2 热电阻温度计

几乎所有物质的电阻率 (resistivity) 都随着自身温度的变化而变化，该现象被称为热电阻效应。利用导体或半导体的电阻值随着温度的变化而变化的特性制成的测温仪表即为热电阻温度计。

导体的电阻值在一定温度范围内可以近似认为与温度成线性关系，即

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (3-6)$$

式中， R_t 为温度为 t 时的电阻值； R_0 为温度为 0°C 的电阻值； α 为导体的电阻温度系数。

半导体的热电阻 (thermal resistance) 与一般导体热电阻的特性相反，其阻值随温度的升高以指数关系急剧下降：

$$R_T = R_0 e^{B/T} \quad (3-7)$$

式中， R_T 为在热力学温度 T 时的电阻值； R_0 为在某一温度 $T_0(\text{K})$ 时的电阻值； B 在不大的温度范围内接近一个常数，其值与半导体材料的成分和制造工艺有关。

半导体热电阻的温度系数 α 可近似由下式表示:

$$\alpha = \frac{dR/R}{dT} = -BT^{-2} \quad (3-8)$$

适于制作热电阻的材料有铂、铜、铁、镍等金属和一些半导体材料。

热电阻温度计由热电阻、变送器、连接导线和显示仪表等几部分组成。由于其测量精度较高、响应速度较快,且在整个测量范围内呈线性关系,因此可以实现远距离测量和数据的自动记录。

热电阻常用的材料有铂和铜,铂热电阻长期使用的温度范围是 $-200\sim 500^{\circ}\text{C}$,铜热电阻长期使用的温度范围为 $-30\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

热电阻温度计的显示仪表主要有动圈式比率计和自动平衡桥两种。

3.2.3 热电偶温度计

1. 热电偶效应和热电偶的基本定律

如图 3-2 所示,将两种不同的导体 A 和 B 组成闭合回路,如果两连接点的温度 T 和 T_0 不同,则在回路中将产生热电动势,形成热电流,这一现象称为热电现象。A、B 两导体称为热电极,它们的组合称为热电偶 (thermocouple),接触热场的 T 端称为工作端,另一端称为自由端。热电偶输出电动势的大小取决于两种金属的性质以及两端的温度,与导线的尺寸、导线中间部分的温度和热电动势测点在电路中的位置无关。

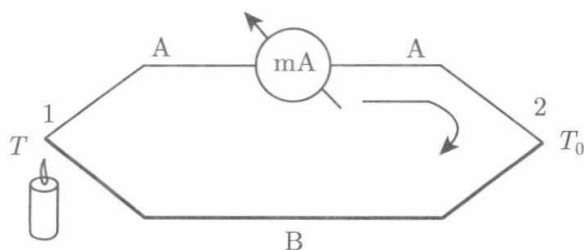


图 3-2 热电偶原理示意图

热电偶的测温范围很广,与其他测温仪器相比,其具有如下优点:

- (1) 测量范围宽且测温下限可达 -250°C ,某些特殊材料制作的热电偶,其测温上限可达 2800°C ,并具有很高的精度。
- (2) 可以实现远距离多点检测,便于集中控制、数字显示和数据自动记录。
- (3) 可制成小尺寸热电偶,热惯性小,适合于快速和动态测量、点温度测量和表面温度测量。

热电偶的基本性质由如下四条基本定律给出:

(1) 均质材料定律

由同一种材料所组成的闭合回路, 不论截面积如何改变, 也不论在电路内存在何种温度梯度, 电路中都不会产生热电动势。反之, 如果回路中存在热电动势, 则该材料必须是非均匀的。

(2) 中间导体定律

在热电偶中插入第三种 (或多种) 均质材料, 只要该材料两端温度相同, 则不论该材料自身是否存在温度梯度, 也无论该材料是接在导体 A 和 B 之间, 还是接在某一种导体之间, 见图 3-3, 皆不会有附加的热电动势发生, 即插入第三种 (或多种) 导体不会使热电偶的热电动势发生变化。这种情况在实际应用中常常碰到, 因为热电偶需要焊接, 以及接入测量仪表等, 该定律保证了上述情况不会对热电偶的测量结果产生影响。

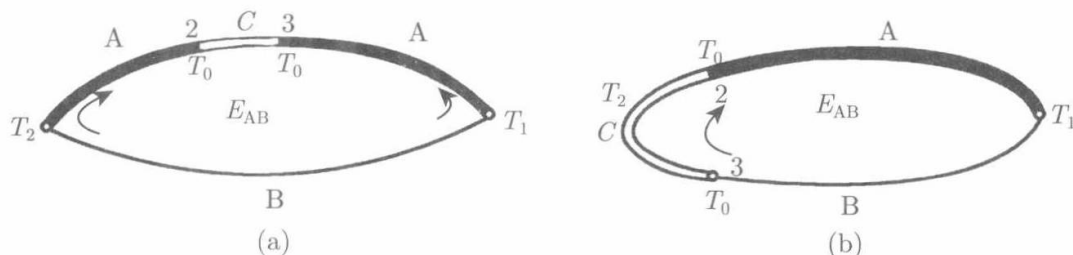


图 3-3 第三种材料接入热电偶回路

(3) 中间温度定律

如图 3-4 所示, 在两种不同材料组成的热电偶回路中, 连接点温度分别为 t 和 t_0 , 热电动势 $E_{AB}(t, t_0)$ 等于热电偶在连接点温度为 (t, t_n) 和 (t_n, t_0) 时相应的热电动势 $E_{AB}(t, t_n)$ 和 $E_{AB}(t_n, t_0)$ 之和, 即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, t_0) \quad (3-9)$$

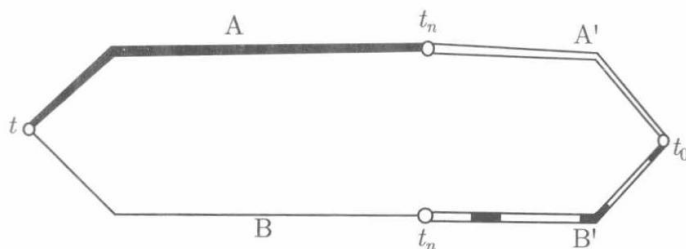


图 3-4 中间温度定律示意图

(4) 标准电极定律

如果两种导体 A 和 B 分别与第三种导体 C 组合成热电偶 AC 和 BC 的热电动势已知, 则由这两种导体 A、B 组合成热电偶 AB 的热电动势为

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AC}(t, t_0) - E_{BC}(t, t_0) \quad (3-10)$$

利用该定律,可很容易地从几个热电极与标准电极组成热电偶时所产生的热电动势,求出这些热电极任意组合时的热电动势。

2. 常用热电偶的材料

理论上,任意两种不同的金属材料或合金都可以组成热电偶,但是为了保证工作可靠和足够的测量精度,热电极材料应满足特定的要求。目前常用的热电偶有:铂铑 10-铂热电偶、铂铑 30-铂铑 6 热电偶、镍铬-镍硅热电偶、镍铬-康铜热电偶等。常用热电偶已经标准化。为满足特殊场合的要求,非标准化热电偶也在飞速发展。比如,测量特高温度的铱铑-铱热电偶,测温上限可达 2000°C ,常用于航天领域中的温度测量。测量低温的镍铬-金铁热电偶的测温范围为 $2\sim 273\text{K}$,该热电偶热电动势稳定,易于加工成丝。

3. 常用热电偶的结构

(1) 普通工业热电偶

如图 3-5 所示,常用的工业热电偶由热电偶、绝缘体、保护管和接线盒等组成。绝缘体大多为氧化铝或工业陶瓷管。保护套管在测量 1000°C 以上时多用金属套管,测量低于 1000°C 温度时可用工业陶瓷或氧化铝,保护套管有时也可不用,以减少热惯性,提高测量精度。

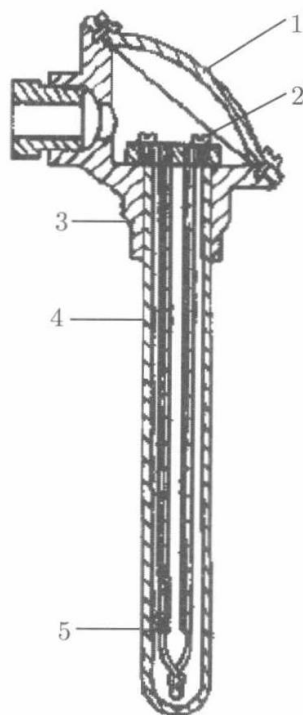


图 3-5 工业热电偶结构图

1-接线盒; 2-接线柱; 3-接线座; 4-保护管; 5-感温元件

(2) 铠装热电偶

有时为了满足测量的特殊需求,要求热电偶具有惯性小、结构紧凑、牢固、抗振、可挠等特点,此时可以采用铠装热电偶,其基本结构如图 3-6 所示。铠装热电偶又分为单芯和双芯两种,由保护套管、热电极和绝缘材料三者组合而成。该型热电偶可以做成细长状,且可以弯曲。

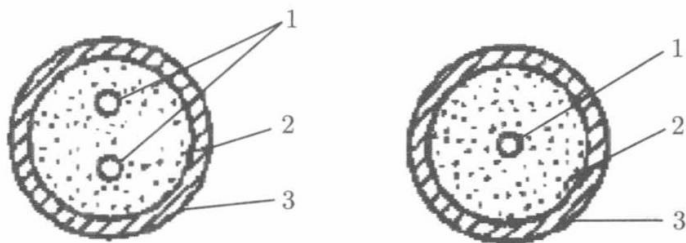


图 3-6 铠装热电偶结构图

1-热电极; 2-绝缘材料; 3-保护套管

(3) 薄膜热电偶

采用真空蒸镀或化学涂层的方法将热电偶材料沉积在绝缘基板上制成的热电偶称薄膜热电偶。这种热电偶适合于壁面温度的快速测量。由于采用了蒸镀技术,热电偶可以做得相当薄,达到微米量级。常用的热电极材料有镍铬-镍硅、铜-康铜等。其使用的温度范围一般为 300°C 以下。

3.2.4 温度计的校验

为保证精确性,必须对温度计进行定期校验。由于不同温度计的工作原理、使用环境和产生误差的原因各有不同,所以校验方法也不尽相同。下面将分别对热电阻和热电偶温度计的校验方法做以介绍。

1. 热电阻温度计的校验

(1) 比较法

将标准水银温度计或标准铂电阻温度计与被校验热电阻温度计一起插入恒温源中,在规定的几个温度点下读取标准温度计和被校温度计的示值并进行比较,其偏差不得超过规定的最大误差。根据所需要校准的温度范围可选取冰点槽、恒温水槽、恒温油槽或恒温盐槽作为恒温源。

(2) 两点法

比较法虽然可以非常精确地校验热电阻温度计,然而其需要多个规格的恒温源,其校正过程要求较高。事实上,一般的工业热电阻温度计仅需校验 0°C 时的电阻值 R_0 和 100°C 时的电阻值 R_{100} ,并检查 R_{100}/R_0 是否符合规定即可。在测定 R_0 时,要将热电阻放在冰点槽内。

在校验 R_{100}/R_0 的数值时, 应该与标准热电阻温度计进行比较。标准热电阻温度计所用材料应与被校验温度计相同, 测量时采用双臂电桥 (半桥工作), 将标准热电阻温度计的电阻作为标准电阻, 被标定热电阻作为未知电阻。测试时, 先在冰点槽内放置 30min 进行电桥平衡, 然后在水沸点槽内放置 30min 再进行电桥平衡。在读数值时, 应当注意两个热电阻是否工作在相同的温度下。取得读数之后, 再用下列公式计算 $\frac{R_{100}}{R_0}$, 即

$$\frac{R_{100}}{R_0} = \left(\frac{R_{100}}{R_0} \right)_B \frac{A_k}{A_0} \tag{3-11}$$

式中, $\left(\frac{R_{100}}{R_0} \right)_B$ 为标准热电阻值, 此值可由有关标准中查得; A_k 为放置在水沸点槽内时的电桥读数; A_0 为放置在冰点槽内时的电桥读数。

2. 热电偶温度计的校验

热电偶在首次使用之前需要进行分度, 即确定热电动势和温度的对应关系。此外, 热电偶在使用一段时间后, 由于氧化、腐蚀、还原等因素的影响, 原分度值会逐渐产生偏差, 使测量准确度下降, 因此需要定期进行校验。

根据国际实用温标 IPTS-68(International Practical Temperature Scale of 1968) 的规定, 除标准铂铑 10-铂热电偶进行三点 (金、银、锌的凝固点温度) 分度外, 其余各种热电偶必须在规定的温度点进行比较式校验, 如表 3-3 所示。

表 3-3 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	600、800、1000、1200
K	镍铬-镍硅	400、600、800、1000
E	镍铬-康铜	300、400、500、600

热电偶校验装置如图 3-7 所示, 其由交流稳压电源、管式电炉、冰点槽、切换开关、测试仪表和标准热电偶等部分组成。

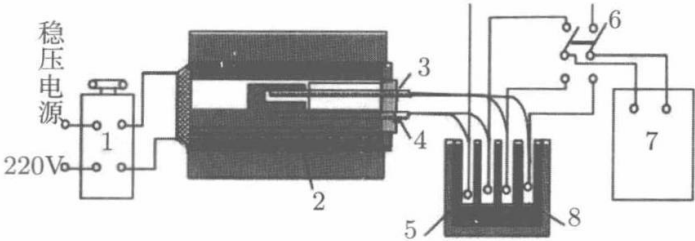


图 3-7 热电偶比较式校验装置

- 1-调压变压器; 2-管式电炉; 3-标准热电偶; 4-被校验热电偶; 5-冰点槽;
6-切换开关; 7-测试仪表; 8-试管

将被校验热电偶与标准热电偶的测量装置置于管式电炉内的恒温端,冷端置于冰点槽内以保持其为 0°C 。用测试仪表测量各热电偶的热电势,然后比较测量值,来确定被校验热电偶的误差范围是否在允许的范围之内。

3.2.5 接触式温度测量误差

若要使得接触式温度计的感温元件所感受的温度与实际被测物体的温度完全一致,必须满足如下两个条件:

(1) 热力学平衡条件。将感温元件与被测对象组成孤立的热力学系统,并且经历足够长的时间,使两者达到完全的热平衡状态。

(2) 当被测对象温度变化时,感温元件的温度能够实时地跟着变化,即传感器的热阻和热容应为零。

实际上,测温过程中不可能完全满足上述两个条件。传感器感温元件除了与被测对象进行热量交换外,还要与周围环境进行热量交换,这将产生测量误差。由于安装的限制,传感器的热阻和热容也不可能做到完全为零。总之,测温误差是不可避免的。

1. 感温元件传热的基本状况

低速流动中感温元件所接收的热量主要来自于被测介质传给感温元件的热量,包括介质对感温元件的导热、辐射和对流换热。感温元件所散发出去的热量基本有如下两个方面:一是感温元件向周围冷壁的辐射散热和传热,二是沿着感温元件向外部介质的传导散热(包括感温元件露在外部介质中的部分辐射散热)。后者在静态或中低速流动介质中测量时会引起较大误差。

2. 误差来源

(1) 感温元件安装的基本要求

测量管道内部流体温度时,感温元件应逆着介质的流动方向安装。若受条件限制无法这样安装时,也可采用迎着被测介质的流动方向斜向插入的方式,或者与被测介质流动方向呈 90° 夹角的方式,如图 3-8 所示。无论如何,应该尽量避免与被测介质形成顺流的情形。

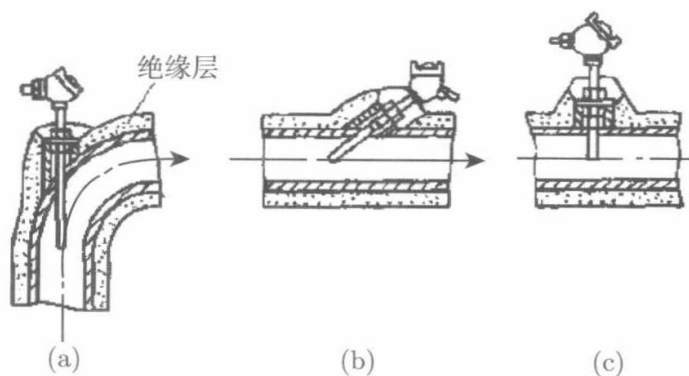


图 3-8 感温元件的安装方式

此外,感温元件应安装于管道中心,因为该处的流速最大。当在管道上倾斜安装时,保护管的顶端需要高出中心线 5~10mm。

事实上,随着感温元件插入深度的增加,测量误差会逐渐减小。为此,插入深度应该符合国家有关试验规范或出厂使用说明的要求。不用保护管时,热电偶的插入深度应该大于热电偶丝直径的 50 倍;测定液体温度时,插入深度应是保护管直径的 9~12 倍;在直径较小的管道上安装感温元件时,可以使用装置扩大管来扩大管径。

在感温元件插入点附近的管道或容器壁外部,还应该包裹足够的绝缘层,以减少由于辐射和导热损失所引起的误差。

(2) 热电偶与被测表面接触方式不同引起的误差

采用热电偶来测量表面温度,具有热接点小、热损失小、测温范围大、精度高、使用方便等优点,因此得到了广泛的应用。常用的热电偶与被测表面的接触方式有四种,分别是点接触式、面接触式、等温线接触式、分立接触式。如图 3-9 所示,点接触式:热电偶测量端接点直接与被测表面接触。面接触式:先将热电偶的测量端接点与导热性良好的金属薄片(如铜片)焊接在一起,然后再与被测表面接触。等温线接触式:热电偶测量端接点固定在被测表面后,再沿着被测表面等温线绝缘敷设至少 20 倍线径的距离,然后引出。分立接触式:两个热电极分别与被测表面接触。

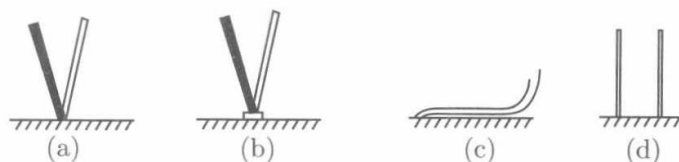


图 3-9 热电偶与被测表面的接触方式

(a) 点接触式; (b) 面接触式; (c) 等温线接触式; (d) 分立接触式

由于等温线接触式的热电偶丝沿着等温线敷设,热接点的导热损失最小,测量误差也最小;点接触式因导热损失全部集中在一个接触点上,热量得不到充分地补充,故测量误差最大。因为面接触式热电偶丝的热损失由导热良好的金属补偿,故测量误差比点接触式的要小。

(3) 热传导引起的误差

当感温元件保护套管顶部温度与装置保护套管的管道壁温度不同时,将有热量沿着套管流向温度较低的管壁,由于该热传导的存在,温度计的感温元件感受到的温度将低于被测介质的温度。热传导测量误差由下式给出:

$$\Delta t_p = t - t_k = \frac{t - t_0}{\cosh \left(L \sqrt{\frac{hS}{\lambda f}} \right)} \quad (3-12)$$

式中, Δt_p 为热传导引起的测量误差; t 为被测介质温度; t_0 为保护套管座处管壁温度; t_k 为感温元件的温度; L 为感温元件插入被测介质的深度; h 为被测介质向感温元件的传热系数; λ 为感温元件材料的热导率; S 为感温元件外围周长; f 为感温元件材料的截面积, $f = \pi(D^2 - D_0^2)/4$; D 为感温元件的外径; D_0 为感温元件的内径。

由上述分析可知, 在实际测量过程中, 应从感温元件的热导率、内外径和插入的深度等方面着手采取措施以减少热传导误差。

(4) 感温元件的响应

由于接触式温度计是依靠热交换来测温度的, 因此在测量动态变化的温度时, 热惯性的存在必然会导致传感器所感受的温度要滞后于介质温度的变化, 即存在着时间滞后。这就使得动态温度的测量十分困难。

温度计的时间滞后主要由以下两种因素造成:

① 感温元件的热惯性: 感温元件由本身的温度 T_1 过渡到新的温度 T_2 需要消耗一定的时间。

② 指示仪表的机械惯性: 感温元件将所获取的热信号传送到仪表的指示装置上需要一定的时间。

若忽略感温元件工作端热辐射和导热的影响, 则动态响应的误差可以近似地表示为

$$T - T_k = \tau \frac{dT_k}{dt} \quad (3-13)$$

式中, T 为被测物体的实际温度; T_k 为温度计的指示温度; τ 为时间常数, 其表征了感温元件响应的快慢。

当 $t = 0$ 时, $T_k = T_0$, T_0 为感温元件起始温度, 求解上式, 可得

$$T_k = T_0 + (T - T_0)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3-14)$$

当 $t = \tau$ 时感温元件所感受到的温度 T_τ 为

$$T_\tau = T_0 + (T - T_0) \times 63.2\% \quad (3-15)$$

影响时间常数大小的因素主要有感温元件的质量、比热容、插入的表面积和表面传热系数等。感温元件的质量和比热容越小, 响应越快; 反之, 时间常数越大, 响应越慢, 此时感温元件的温度越接近平均温度。因此, 在测量瞬时温度时必须采用时间常数小的感温元件, 而在测量平均温度时可以用时间常数大的感温元件。

3.3 非接触式温度计

接触式温度计虽然具有结构简单、可靠性好、精度较高等优点，然而在测量过程中，感温元件与被测对象直接接触，传感器必须能够经受各种测量条件下的腐蚀、氧化、污染、还原等作用，而且感温元件的插入不可避免地会对原温度场分布造成影响。因此，在很多场合，例如需要实现温度连续测量，或者在感温元件不能承受的高温条件下，接触式温度计就无法完成温度测量的任务。此时，必须采用非接触式温度计。

非接触式温度计利用测定物体辐射能的方法测定温度。由于其不与被测介质相接触，不会破坏被测介质的温度场，且动态响应好，因此可以用来测量非稳态热力过程的温度变化情况。另外，其测量上限不受材料性质的影响，测量范围较大，尤其适用于高温测量。

3.3.1 热辐射理论基础

对于温度高于热力学温度零度的任何物体，皆会释放出能量，其中以热能的方式向外发射的那一部分称为热辐射 (thermal radiation)。

根据普朗克定律，绝对黑体的单色辐射出射度 $M_{0\lambda}[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})]$ 为

$$M_{0\lambda} = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (3-16)$$

式中， $c_1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 为普朗克第一辐射常量； $c_2 = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为普朗克第二辐射常量； λ 为波长 (m)； T 为黑体的热力学温度 (K)。

当温度为 3000K 以下时，普朗克定律可用维恩 (Vien) 公式代替：

$$M_{0\lambda} = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T}} \quad (3-17)$$

由上述公式可知，当波长 λ 确定之后，只要能测定相应波长的 $M_{0\lambda}$ 值，便可求出温度 T 。

由普朗克定律确定的单色辐射出射度与波长和温度的关系曲线如图 3-10 所示，当温度升高时，单色辐射出射度随之增加，曲线峰值随着温度增高向波长较小的方向移动。单色辐射出射度峰值处的波长 λ_m 和热力学温度 T 之间的关系由维恩定律表示：

$$\lambda_m T = 2897 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (3-18)$$

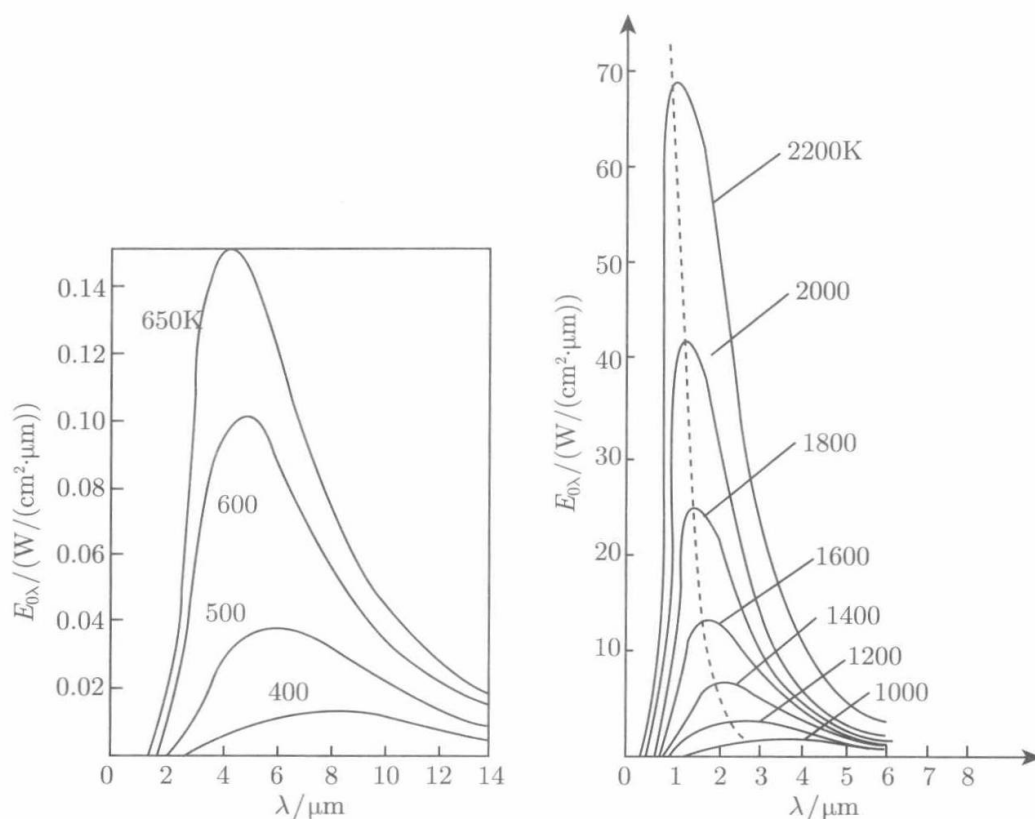


图 3-10 辐射出射度与波长和温度的关系曲线

普朗克定律只给出了绝对黑体单色辐射出射度,若要得到所有波长全部辐射出射度 $M_0(\text{W}/\text{m}^2)$ 的总和,需进行积分处理:

$$M_0 = \int_0^\infty M_{0\lambda} d\lambda = \int_0^\infty c_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda = \sigma_0 T^4 \quad (3-19)$$

式中, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数。上式也称为绝对黑体的全辐射定律,也称为斯忒藩-玻尔兹曼定律。

3.3.2 单色辐射式光学高温计

该高温计利用亮度比较取代辐射出射度比较进行测温。当物体的温度高于 700°C 时,其会明显地发出可见光,且具有一定的亮度,其单色光亮度 $B_{0\lambda}$ 与单色辐射出射度 $M_{0\lambda}$ 成正比,即

$$B_{0\lambda} = CM_{0\lambda} \quad (3-20)$$

式中, C 为比例系数。结合维恩位移公式,可得

$$B_{0\lambda} = Cc_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T_s}} \quad (3-21)$$

式中, T_s 为绝对黑体的温度。

对于实际问题而言, 有如下关系式:

$$B_{\lambda} = CM_{\lambda} = Cc_1\varepsilon_{\lambda} \frac{\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T}} \quad (3-22)$$

式中, B_{λ} 为实际物体的亮度; M_{λ} 为实际物体的单色辐射出射度; ε_{λ} 为实际物体的单色发射率; T 为实际物体的温度。

当温度为 T_s 的黑体的亮度 $B_{0\lambda}$ 与温度为 T 的实际物体的亮度 B_{λ} 相等时, 可得

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_s} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} \quad (3-23)$$

因为 $0 < \varepsilon_{\lambda} < 1$, 故 $T_s < T$ 。用光学温度计直接测到的温度 T_s 称为被测物体的亮度温度 (brightness temperature), 即, 在波长为 λ_m 的单色辐射中, 若物体在温度 T 时的亮度 B_{λ} 和绝对黑体在温度为 T_s 时的亮度 $B_{0\lambda}$ 相等, 则把 T_s 称为被测物体的亮度温度。亮度温度比物体实际温度要低。故必须根据物体表面的单色黑度系数 ε_{λ} 用上式加以修正。

单色辐射式光学高温计主要有灯丝隐灭式光学高温计和光电高温计两种。

1. 灯丝隐灭式光学高温计

灯丝隐灭式光学高温计简称为隐丝式高温计, 是一种典型的单色辐射光学高温计, 在所有辐射式温度计中, 其精度最高, 故常被用来作为基准仪器, 以复现黄金凝固点温度以上的国际实用温标。

隐丝式高温计的工作原理如图 3-11 所示。其工作过程为调整物镜, 使被测物体成像在高温计灯泡的灯丝平面上, 调整目镜, 使被测物体和灯丝清晰成像, 并

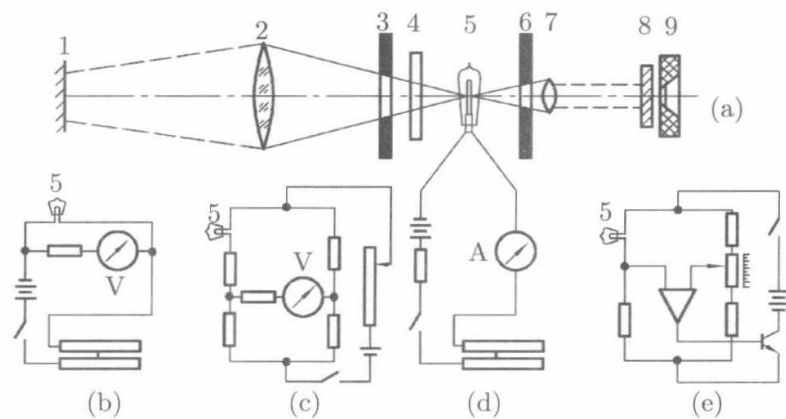


图 3-11 隐丝式光学高温计示意图

(a) 光学系统; (b) 电压表式电测系统; (c) 不平衡电桥式电测系统; (d) 电流表式电测系统;

(e) 平衡电桥式电测系统

1-对象; 2-物镜; 3、6-光阑; 4-减光吸收玻璃; 5-高温计灯泡; 7-目镜;

8-红色滤光片; 9-观测孔; V-电压表; A-电流表

确认二者在同一平面上。将红色滤光片移入视场。调节电测系统的可变电阻, 改变灯泡的加热电流, 灯丝亮度随之改变, 直到灯丝隐没在物体的像中, 即认为二者的亮度相同。而灯丝电流与亮度关系已知, 并在显示器上标出亮度温度值。高温计灯泡本身的亮度与加热电流关系应是稳定的, 光学系统应能保证灯丝隐没在物像中, 这些环节中若出现问题会造成测量误差。

2. 光电高温计

上述灯丝隐灭式高温计由于通过人眼来判断亮度是否达到平衡状态, 容易因为测量人员的主观判断带来观测误差。而且因为测量温度是不连续的, 无法自动记录被测温度。因此, 出现了能够自动平衡亮度和自动记录被测物体温度示值的光电高温计 (photoelectric pyrometer)。

光电高温计采用光电器件作为敏感元件感受辐射的亮度变化, 并将其转化为与亮度成比例的电信号, 该信号经放大处理后被自动记录, 以表示被测物体的温度值。光电高温计的原理如图 3-12 所示。

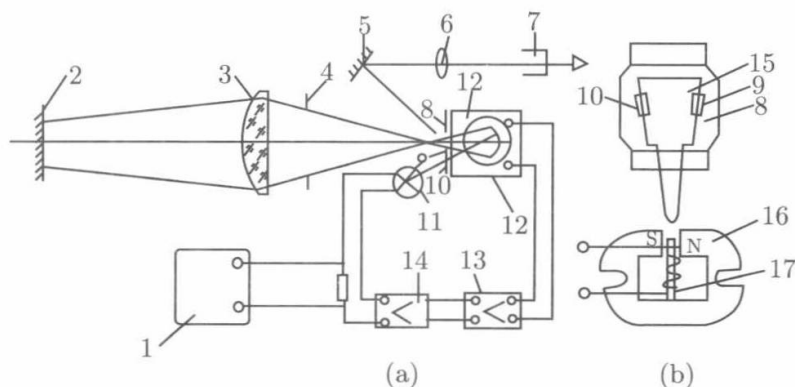


图 3-12 光电高温计示意图

(a) 工作原理示意图; (b) 光调制器

- 1-电位差计; 2-被测物体; 3-物镜; 4-光阑; 5-反射镜; 6-透镜; 7-观察孔;
8-遮光板; 9、10-孔; 11-反馈灯; 12-光电器件; 13-前置放大器; 14-主放大器;
15-调制片; 16-永久磁铁; 17-励磁绕组

图 3-12 中, 被测物体 2 发射的辐射能量经由物镜 3 聚焦后, 通过光阑 4 与遮光板 8 上的孔 9, 透过安装在遮光板上的红色滤光片射至光电器件 (硅光电池) 12 上。为保证精度, 被测物体发出的光束必须盖满孔 9, 这可通过由瞄准透镜 6、反射镜 5 和观察孔 7 组成的观瞄系统进行观察。

从反馈灯 11 发出的辐射能量, 通过遮光板 8 上的孔 10 并透过同一块红色滤光片, 也投射到光电器件 12 上。在遮光板 8 前面放置光调制器, 光调制器的励磁绕组 17 通以 50Hz 交流电, 所产生的交变磁场与永久磁钢 16 相互作用, 使调制片 15 产生 50Hz 的机械振动, 交替地打开和关闭孔 9 与 10, 从而使得被测物体和反馈灯的辐射能量交替地投射到光电器件 12 上。若两辐射能量不相等, 则光电器件

将会产生一个脉冲光电流 I ，其与这两个单色辐射能量之差成比例关系。当 I 经过放大器的负反馈，使反馈灯的亮度与被测物体的亮度相等时，脉冲光电流为零。电位差计 1 用来自动指示和记录光电流 I 的数值，其刻度为温度值。

光电高温计除了由于黑度系数造成的测量误差外，被测物体与高温计之间的介质对辐射的吸收也会给测量结果带来误差，故要求观测点与被测物体之间的距离不应太大，一般在 $1\sim 2\text{m}$ 。

3.4 红外技术在温度测量中的应用

前述辐射式温度计常用于高温测量 (700°C 以上)，其测量原理同样适用于中温测量，此时的辐射不是可见光而是红外辐射 (infrared radiation)，红外辐射的强度需要用红外敏感元件来检测。

3.4.1 红外测温仪

红外测温仪 (infrared thermometer) 的工作原理如图 3-13 所示，其和光电高温计的工作原理相似，为光学反馈式结构。被测物体 S 和参考源 R 的红外辐射经调制盘 T 调制后送至红外探测器 D 。调制盘 T 由同步电动机 M 驱动，探测器 D 的输出电信号经放大器 A 和相敏整流器 K 后送至控制放大器 C 。当参考源和被测物体的辐射强度一致时，参考源的加热电流即代表被测温度。由指示器 I 显示出被测物体的温度值。

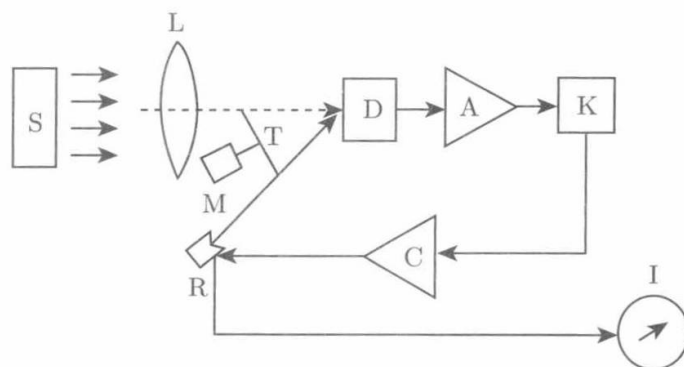


图 3-13 红外测温仪工作原理图

S-被测物体；L-光学系统；D-红外探测器；A-放大器；K-相敏整流器；

C-控制放大器；R-参考源；M-电动机；T-调制盘；I-指示器

红外测温仪的光学系统有透射式和反射式两种。透射式光学系统 (transmissive optical system) 的透镜采用能透过被测温度下热辐射波段的材料制成。如被测温度在 700°C 以上，辐射的波段主要在 $0.76\sim 3\mu\text{m}$ 的近红外区，此时可采用一般光学玻璃或石英透镜；当被测温度在 $100\sim 700^{\circ}\text{C}$ 时，辐射的波段主要在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的中红外

区,此时多采用氟化镁、氧化镁等热压光学透镜;测量低于 100°C 的温度时,辐射波段主要在 $5\sim 14\mu\text{m}$ 的中、远红外波段,多采用锗、硅、热压硫化锌等材料制成的透镜。反射式光学系统 (reflective optical system) 多采用凹面玻璃反射镜,镜的表面镀金、铝、镍、铬等对红外辐射反射率很高的金属材料。

3.4.2 红外热像仪

温度高于绝对零度的任何物体都会因为分子的热运动而发射红外线,而且红外辐射的能量与热力学温度的四次方成正比。热像仪就是根据这一特性来测量温度场的。

1. 红外热像仪的工作原理

红外热像仪 (infrared thermal camera) 利用红外扫描原理测量物体的表面温度分布,其获取来自被测物体各部分射向仪器的红外辐射通量的分布,利用红外探测器的水平扫描和垂直扫描,按顺序直接测量被测物体各部分发射出的红外辐射,综合起来就得到物体发射的红外辐射通量的分布图像,这种图像称为热像图 (thermogram) 或温度场图。

红外热像仪的工作原理如图 3-14 所示。热像仪由光学会聚系统、扫描系统、探测器、视频信号处理器和显示器等几个主要部分组成。目标的辐射图形经过光学系统会聚和滤光,聚焦在焦平面上。焦平面内安置一个探测元件。在光学系统和探测器之间有一套扫描装置,其由两个扫描反射镜组成,分别用作垂直扫描和水平扫描。从目标入射到探测器上的红外辐射随着扫描镜的转动而移动,按次序扫过整个视场。在扫描过程中,入射红外辐射使探测器产生响应。探测器的响应是与红外辐射的能量成正比的电压信号,扫描过程使二维的物体辐射图形转换成一维的电压信号序列。该电压信号经过放大和处理后,由视频监视系统实现热像显示和温度场测量。

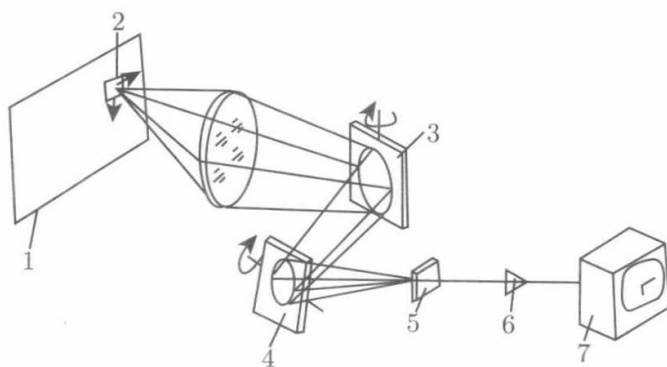


图 3-14 红外热像仪工作原理图

- 1-物空间的视场; 2-探测器在物空间的投影; 3-水平扫描器; 4-垂直扫描器; 5-探测器;
6-信号处理器; 7-视频显示器

2. 红外热像仪系统的组成

红外热像仪系统由扫描系统、红外探测器、视频显示和记录系统组成，其框图如图 3-15 所示。

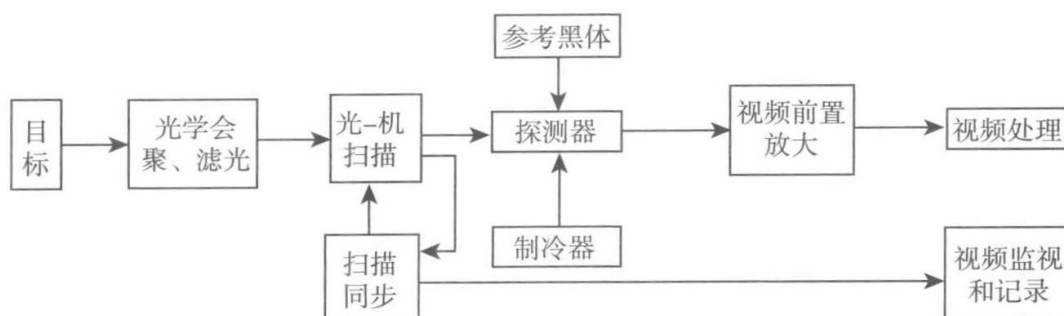


图 3-15 红外热像仪系统的组成框图

(1) 扫描系统

扫描系统是红外热像仪系统的主要组成部分，其使红外探测器 (infrared detector) 按顺序地接收被测物体各微元面积上的红外辐射。测量温度场时往往需要测得二维的温度分布，所以必须进行二维扫描。红外探测器在某一瞬间只能探测到目标上方很小的区域，通常将这一很小区域称之为“瞬时视场”。扫描系统可以在垂直与水平两个方向转动。水平转动时，瞬时视场在水平方向扫过目标区域上的一带状区域。扫描系统垂直转动与水平转动相互配合，在瞬时视场水平扫过一带状区域之后，垂直转动恰好使它回到这一带状之下的区域，接着扫描与前者相衔接的带状区域。如此即可实现对被测对象的面扫描。若红外探测器的响应足够快，在整个扫描过程中，探测器的输出将是一个强弱随着时间变化而且与各瞬时视场发射的红外辐射通量变化相对应的序列电压信号。

(2) 红外探测器

红外探测器是感受红外辐射能量的大小并将其转化为电量的器件。其光谱响应特性、时间常数及探测率都直接影响到热像仪的性能。一般总希望探测器具有高的探测率和小时间常数，以使热像仪有较高的灵敏度和较快的响应。目前常用的红外探测器有热探测器和光电探测器两种，其中光电探测器在热像仪中应用最广。光电探测器的缺点是光谱范围有限，且为了获得最佳灵敏度，使用时需要冷却。

近年来出现了一种新型的多元阵列探测器，其在焦平面或焦平面附近采用电荷转移器件进行多路调制和信息处理，使得实际的焦平面上具有上千个红外探测器。多元阵列电荷转移器件具有自扫描、动态范围大、噪声低等优点。在热像仪中应用这种探测器可以显著提高系统分辨率，缩短响应时间。

(3) 视频显示和记录系统

视频显示和记录系统的作用是把红外探测器提供的电信号转化成可见图像。探测器输出的电压信号经过放大器处理后,作为显示器的视频信号。显示器的扫描系统与目标扫描系统同步,产生全部水平扫描线,这些水平扫描线的起点都在同一垂线上,且在垂直方向上依次下移,在荧光屏上显示出目标图像。根据显示的热图像,可以清晰地了解被测目标温度分布情况。

思考题与习题

- 1) 温标。
- 2) 水银温度计的工作原理。
- 3) 热电偶温度计的工作原理。
- 4) 热电偶温度计的优点。
- 5) 非接触式温度计的缺点。
- 6) 红外热像仪的工作原理。
- 7) 管道内测量流体温度时感温元件的安装方式。
- 8) 例举温度测量的实例并说明温度测量的实施过程。
- 9) 温度计如何校验?

第4章 压力测量

压力是流体力学的重要参数，同时也是能源与动力工程领域重点关注的参数之一。无论是液态介质还是气态介质，无论是高温介质还是常温介质，无论是高速流动还是低速流动，压力均为关注的焦点。本章将系统地阐述压力测量的基本知识、测量方法和测量仪器。

4.1 压力的基本概念

4.1.1 压力的定义

在物理学中，压力指的是两个物体的接触表面的垂直作用力，如液体对于固体表面的垂直作用力，而压强则指的是物体所受的压力与受力面积之比，其用来表征压力的作用效果。在工程学科中，人们常将压强也称之为压力。下面给出压力 p 的具体定义：作用于某个固定点上的压力 p 指的是以该点为中心的微元面积 dA 上所施加的垂直作用力 dF ，即

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} (dF/dA) \quad (4-1)$$

在能源与动力工程领域，人们关心的大多是流体（气体或液体）的压力。若流体静止，则任何一点的任意方向的压力大小均相等，即该点压力与方向无关，这种具有各向同性（isotropic）特性的压力即流体静压力。在受体积力作用（如重力、电磁力等）时，在垂直于该体积力方向的平面上各点压力相同，而沿着该体积力方向则存在压力梯度。若流体运动，则任何一点的不同方向的压力值并不相等，与流动方向一致的压力值最大，为该点的滞止压力（stagnation pressure）或总压力，而垂直于流动方向测得的压力值则称为该点的静压力（static pressure），总压力与静压力的差值为该点的动压力（dynamic pressure）。假设流体为无黏理想流体，并忽略其压缩性，则由流体能量守恒定律可知，沿着一流线的流体变量间存在如下关系（伯努利方程）：

$$p_s + \frac{1}{2}\rho c^2 + \rho gh = \text{const} \quad (4-2)$$

式中， p_s 为静压力； $\frac{1}{2}\rho c^2$ 为动压力； ρ 为流体密度； c 为流体速度； g 为重力加速

度; h 为流体距离某基准面的深度。对于水平方向的稳态流动 (即 $h=0$):

$$p_s + \frac{1}{2}\rho c^2 = \text{const} \quad (4-3)$$

由上式可知, 当流体沿水平方向稳定流动时, 其静压力和动压力之和沿着同一流线保持不变, 即其总压力保持恒定。事实上, 由于黏滞阻力所引起的能量损失, 实际流体的总压力不可能保持为常数, 而是沿着流动方向逐渐减小。

在国际单位制中, 压强的单位是帕斯卡, 简称帕 (Pa), $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$, 由于 1 帕太小, 为方便使用, 常采用千帕 (kPa) 和兆帕 (MPa) 来作为压强单位, $1\text{kPa}=1000\text{Pa}$, $1\text{MPa}=1000\text{kPa}$ 。工程上, 常用的压强单位有工程大气压 (at)、标准大气压 (atm)、巴 (bar)、毫米水柱 (mmH₂O)、毫米汞柱 (mmHg)、公斤力/厘米² (kgf/cm²)、磅力/英寸² (pounds per square inch, psi) 等。

4.1.2 压力的分类

从测量的角度来分, 可以将压力分为稳态压力和瞬态压力。工程中通常将每秒变化量为压力计分度值的 1% 或者每分钟变化量为 5% 以下的压力作为稳态压力, 否则为瞬态压力。

按测量方法和参考零点的不同可以将压力分为绝对压力 (absolute pressure)、表压力 (relative pressure) 两类。以绝对真空作为零点压力标准的压力称为绝对压力。通常在其单位后面附加下标 “abs”。以大气压力作为零点压力标准的压力称为表压力。

表压力与绝对压力之间的关系为: 绝对压力 = 表压力 + 当地大气压力 (4-4)

4.2 稳态压力的测量

4.2.1 绕流原理简介

压力探针 (pressure probe) 是经典的测压仪器。为了更好理解压力探针的工作原理, 首先对绕流原理进行简要介绍。由上节论述可知, 无粘理想不可压缩流体沿着水平方向稳定流动时, 其静压与动压之和沿着流线保持不变, 即

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho c^2 = \text{const} \quad (4-5)$$

式中 p_0 为滞止压力。

若一物体置于流场中, 其表面某点处的流体压力为 p_{s1} , 流速为 c_1 , 则

$$p_{s1} + \frac{1}{2}\rho c_1^2 = p_s + \frac{1}{2}\rho c^2 \quad (4-6)$$

引入压力系数 $K_p = \frac{(p_{s1} - p_s)}{(\rho c^2/2)}$, 由流体力学知识可知, 在任何被绕流的物体上都存在流速为 0 的一些点, 这些点称为临界点, 或滞止点, 这些点上的压力即滞止压力 p_0 :

$$p_{s1} = p_s + \frac{1}{2}\rho c^2 = p_0 \quad (4-7)$$

不难看出, 滞止点处的压力系数 $K_p = 1$ 。在被绕流物体的表面也存在着流体的压力等于来流静压力的点, 即 $p_{s1} = p_s$ 的点, 显然这些点处的 $K_p = 0$ 。

如图 4-1、图 4-2 和图 4-3 分别给出了流体绕流圆柱形、球形、半球形物体时, 其表面的压力分布曲线。对于圆柱形物体, 当 $\varphi = 0^\circ$ 时, $K_p = 1$, 因此圆柱表面的最前缘 A 点为临界点。而当 $\varphi = 30^\circ$ 时, $K_p \approx 0$, 然而此处的曲线斜率较大, 压力变化较为剧烈, 不易获得稳定的压力。当 $\varphi = 140^\circ \sim 220^\circ$ 时, $K_p \approx -0.5$, 虽然 $K_p \neq 0$, 然而此范围内曲线斜率较小, 压力较为稳定。

对于球形物体绕流, 临界点依旧位于 $\varphi = 0^\circ$, 当 $\varphi = 140^\circ \sim 220^\circ$, $K_p \approx 0$, 即 $p_{s1} = p_s$ 。

对于半球形端部的圆柱体绕流问题, 其临界点位置和圆柱以及球形绕流一样, 位于端部, 即 $x=0$ 的点。 $K_p=0$ 的点则在离半球端部 $3d$ (d 为圆柱直径) 处的圆柱表面上。

稳态流动内部的压力测量探针就是依据上述绕流特性所设计和使用的, 下面将对它们进行阐述。

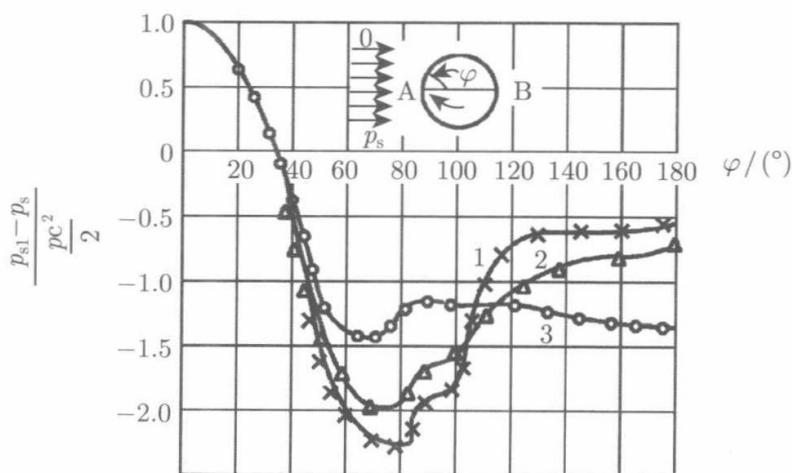


图 4-1 圆柱表面压力分布

1- $Re=2.12 \times 10^5$; 2- $Re=1.66 \times 10^5$; 3- $Re=1.06 \times 10^5$

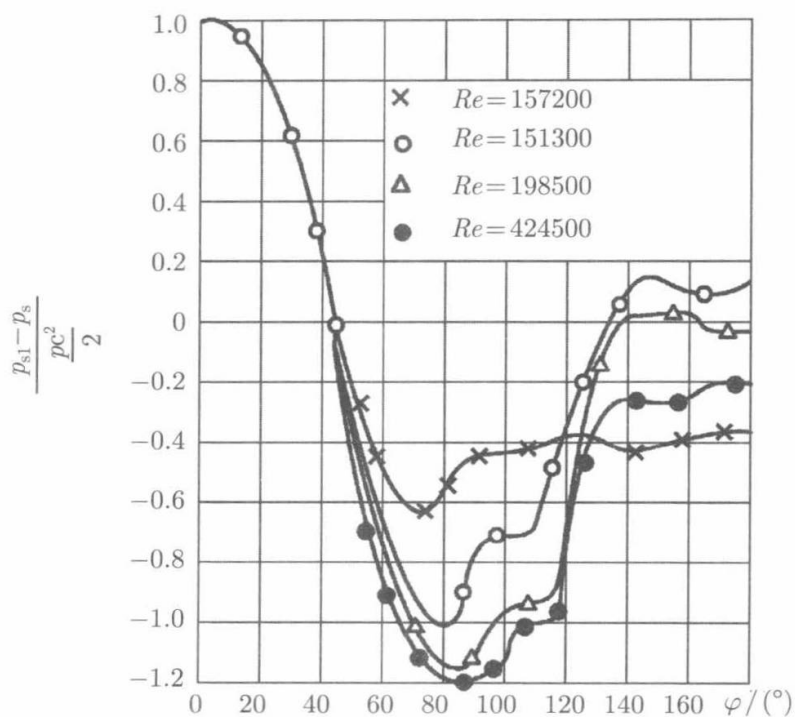


图 4-2 沿球形表面的压力分布

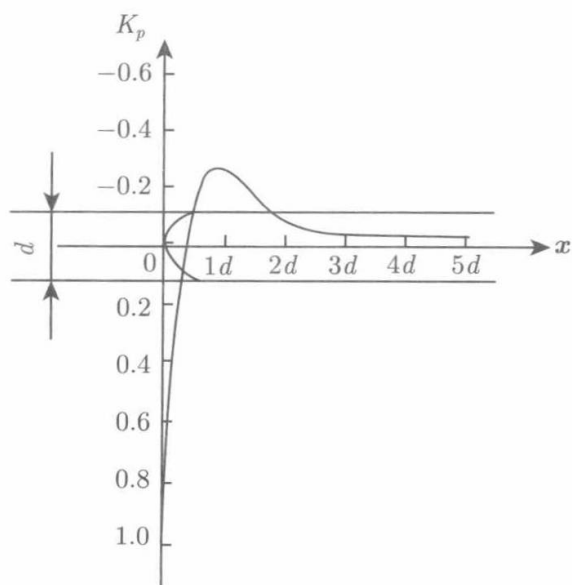


图 4-3 半球表面的压力分布

4.2.2 流体静压的测量及静压探针

由上节论述可知,静压与动压之和沿流线不变,且流体的动压是速度的函数,故流体的静压也与流体速度相关。在流道横截面上的流速往往是呈非线性分布的,因此各点的流体静压力是不相等的。静压的测量有两类,测量作用于流道壁面上的静压力和测量流体中某一点的静压力。

1. 流道壁面上的静压力

为获取流道壁面上的静压力,可通过在流道壁面上开静压孔的方式进行测量,该测压孔应满足如下条件:

- (1) 测压孔应开在直线形管壁上。
- (2) 测压孔的轴线应与壁面垂直。
- (3) 测压孔的直径为 0.5mm 左右,最大不应超过 1.5mm;孔径过大会引起附近流线的严重变形,形成旋涡,带来较大误差;而孔径过小,则加工困难,容易堵塞,测量反应迟缓。
- (4) 测压孔的边缘应整齐和光洁。

2. 流体内部某点的静压力

当需要获取流场内部任一点的静压力时,可选用静压探针来进行测量。置入流场中的探针必须与流线方向平行,且不改变测压区的流线。静压探针通常有如下几种:

(1) “L”形静压探针

该型探针是将一细管弯成“L”形而制成的,其结构简单、加工容易、性能较好,曾获得广泛应用。如图 4-4 所示,为将探针对流场的影响降至最小,其头部为半球形,测压孔应开在距离端部至少 3 倍管径处探针的侧表面。为避免支杆的干扰,测压孔中心至支杆的距离至少应为 8 倍管径。因此,该型探针的轴向尺寸较大,且其对来流方向角度的变化十分敏感,为表征该敏感程度,将造成测量误差为速度头 1% 的偏流角 α 定义为不敏感偏流角。对于该型探针而言,当速度系数 $\lambda \leq 0.85$ 时, $\alpha = \pm 6^\circ$ 。故其适用于流道尺寸较大,且流场内部旋转不大的场合,如压缩机和叶片泵进出口流体静压的测量。

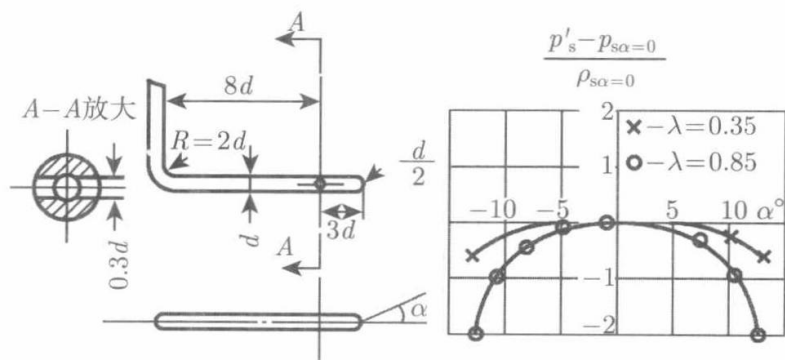


图 4-4 “L”形静压探针结构及其特性曲线

(2) 圆柱形静压探针

圆柱形静压探针由一根圆柱形的细管制成,如图 4-5 所示,根据圆柱绕流的特性,测压孔应该开在背向流体流动方向的一面。当速度系数一定时,在 $-40^\circ < \alpha <$

40° 的范围内, 由其测得的静压 p_s 保持不变, 因此, 该型探针可用于二维流场中的静压力测量。

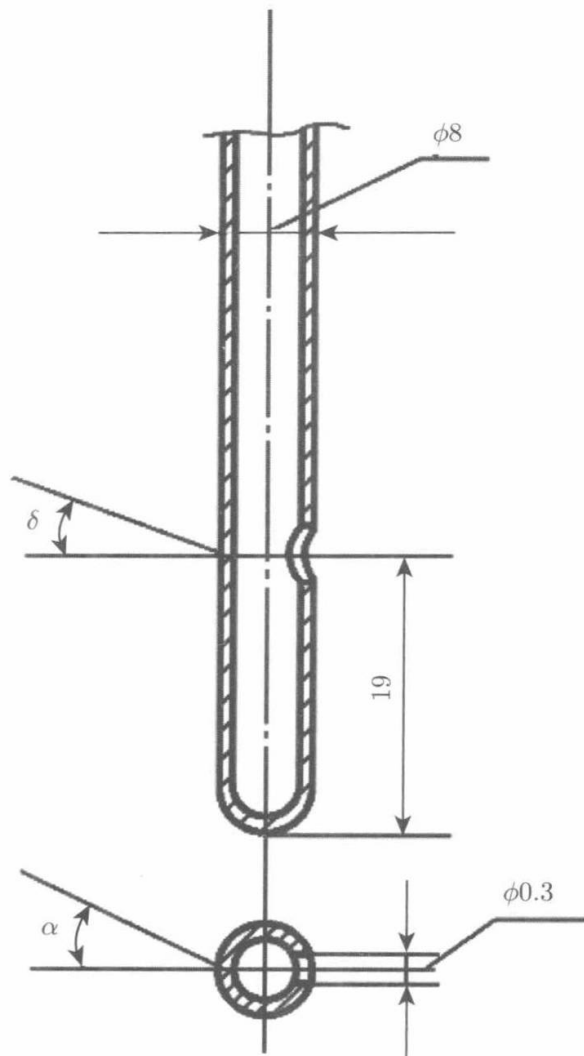


图 4-5 圆柱形静压探针结构示意图

值得注意的是, 由于该型探针的轴线是垂直于流动方向的, 因此对流场的扰动较大, 对扰流物体的压力分布曲线分析可见, 其表面没有压力系数为 0 的点, 只有压力系数近似等于零的点, 因此测出的静压值误差较大。

(3) 导管式静压探针

如图 4-6 所示, 该探针的测压孔位于导管上, 相当于将流场内某点的静压测量变为了流道壁面上流体静压力的测量。其主要应用于三维流动中静压的测量, 其对流动方向变化的不灵敏角度是 $\alpha = \pm 30^\circ$, $\delta = \pm 20^\circ$ 。由于导管加工精度要求较高, 工艺复杂, 探针体积较大, 故其应用受到一定限制。

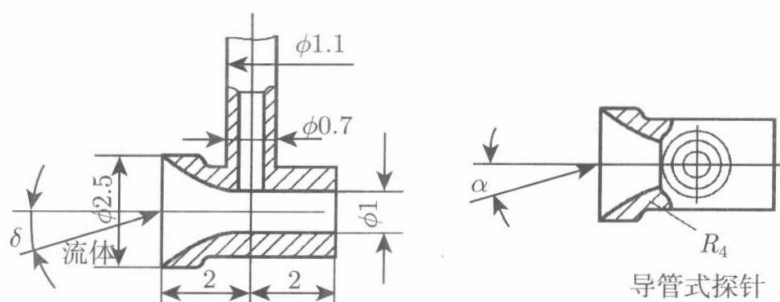


图 4-6 导管式静压探针结构示意图

4.2.3 总压力的测量及总压探针

1. 总压探针的原理及类型

由绕流理论可知,流体中某点的总压力等于流体中被绕流物体上临界点的滞止压力。总压探针就是依据该原理设计而成的。常见的总压探针有如下几种:

(1) “L”形总压探针

如图 4-7 所示,“L”形总压探针与“L”形静压探针相似,不同之处在于其测压孔是位于正对来流方向的探针端部。其对流向偏斜角的灵敏度由探针端部的形状、圆柱管外径 d_1 和测压孔径 d_2 决定。对于 $d_2/d_1=0.3$ 的探针,其对 α 的不灵敏度位于 $\pm 5^\circ \sim 15^\circ$ 。

在低速流动中,当探针与流线平行时,“L”形总压探针的修正系数与探针头部形状、测压孔直径以及前缘到支杆的距离无关。在存在总压梯度的流场中,采用“L”形探针测量总压可得到较高的精度,这是因为测压孔距离支杆较远,受其影响较小的缘故。

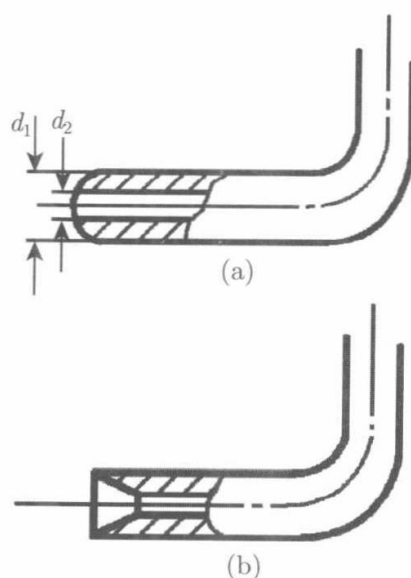


图 4-7 “L”形总压探针结构示意图

(2) 圆柱形总压探针

圆柱形总压探针如图 4-8 所示, 其测压孔位于正对来流的侧面上, 其对流体偏斜不灵敏度 α 随着 d_2/d_1 的增加而增加, 当 d_2/d_1 为 0.4~0.7 时, α 角的不灵敏区间为 $\pm(10^\circ \sim 15^\circ)$, δ 角的不灵敏区间为 $\pm(2^\circ \sim 6^\circ)$ 。(α 角和 δ 角的含义见图 4-5) 该型探针结构简单, 制造容易, 体积小, 便于安装。

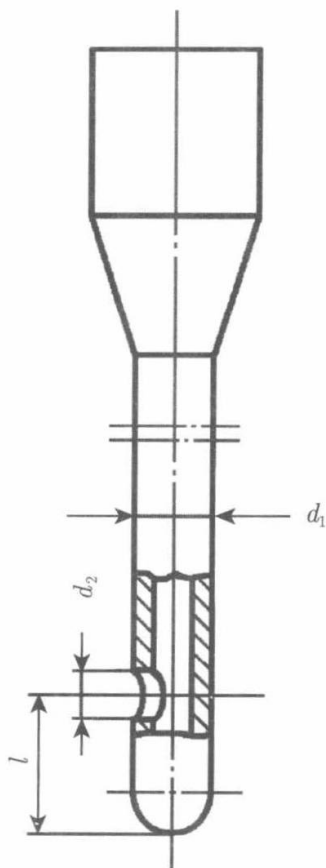


图 4-8 圆柱形总压探针结构示意图

(3) 套管式总压探针

该型探针结构如图 4-9 所示, 在套管内腔有一个进口收敛器和导流管, 使得套管内流动的方向可保持不变。其优点在于对流动偏斜角 α 和 δ 的不灵敏度范围较大, 可达 $\pm(40^\circ \sim 50^\circ)$ 。其缺点在于加工精度要求较高, 尺寸较大, 安装和使用受到一定限制。

2. 总压探针的选用原则

(1) 在 $\delta \leq 15^\circ$ 的三元流体中, 可选用结构简单的“L”形探针, 其结构尺寸的最佳值为 $l/d \geq 2 \sim 3$, $d_2/d_1 = 0.7$ 。

(2) 在 $\delta \leq 35^\circ \sim 45^\circ$ 的三维流场中, 应采用套管式总压探针。

(3) 在 $\delta \leq \pm 4^\circ \sim 6^\circ$ 的二维流体中, 可选用结构简单、尺寸小的圆柱形探针, 其最佳尺寸为 $l/d \geq 1.5$, $d_2/d_1=0.7$ 。

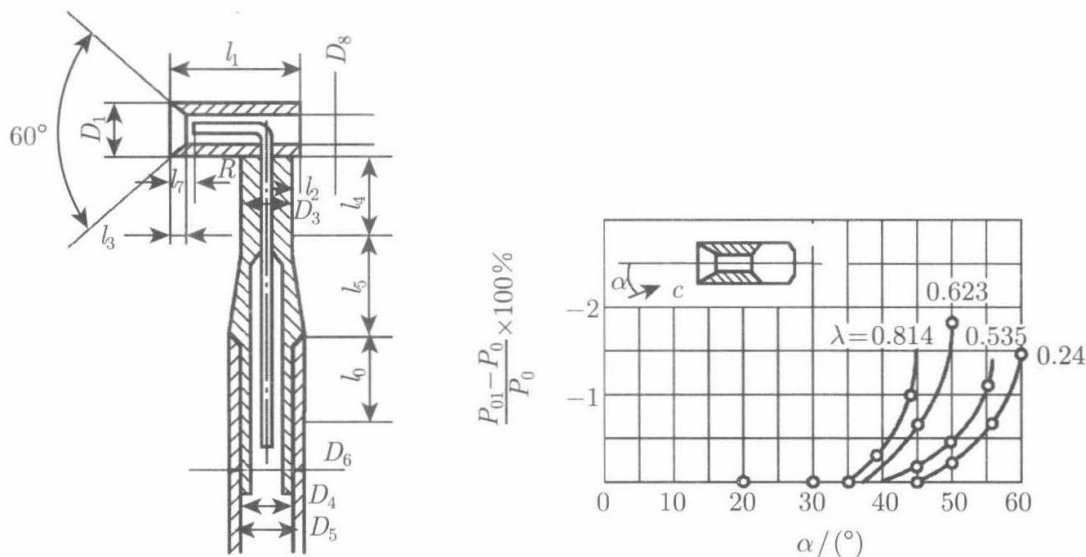


图 4-9 套管式总压探针结构示意图

4.2.4 压力探针的测量误差分析

1. 探针对流场的扰动

使用探针测量总压或静压时, 由于需要将探针置于流场内部, 故必然会对原本的流动状态带来扰动 (disturbance), 使得探针附近的流线发生弯曲, 从而改变局部流体的压力分布。为了尽可能减小探针对流动的扰动, 应将探针的尺寸做得尽量小。

2. 测压孔对测量值的影响

测压孔的不规则形状、测压孔轴线与流线不垂直、测压孔孔径过大等都会引起静压测量的误差。因为当流体流经测压孔时, 流线发生弯曲, 流线沉入到孔中产生离心力, 这将增加测压孔内的压力, 使得所测得的压力高于流体的真实静压力值。该差值的大小与流体速度、测压孔形状、尺寸和方向相关。

3. Ma 对测量值的影响

在气流的压力测量中, Ma 较大意味着气体的压缩性必须要予以考虑, 即需考虑气流密度的变化。在超声速情况下, 探针上会有局部激波产生, 其改变了局部气流压力, 给静压和动压的测量带来了误差。在亚声速气流中, 对于头部为半球形的“L”形探针, 当 $d_2/d_1=0.3$ 、 α 较小时, 测量值与 Ma 无关。

4. Re 对测量值的影响

由伯努利方程给出的总压、静压和动压之间的关系是在理想流体假设下得到的, 而实际流体是有黏性的, 当流体绕探针流动时, 沿探针表面的压力分布与 Re 数有关。当 $Re > 30$ 时, 黏性的影响受限于沿管壁很薄的边界层内部, 从而流体内部的压力通过该边界层时不会发生改变, 因此粘性的影响可以忽略不计。然而当 $Re < 30$ 时, 粘性的影响不容忽略, 可采用下式进行修正:

$$\frac{p_0 - p_s}{\rho c^2 / 2} = 1 + \frac{a}{Re} \quad (4-8)$$

式中, a 为常数, $a \approx 3 \sim 5.6$ 。

在临界点的无量纲压力系数 K_{p_0} 与 Re 数的关系可由下式给出:

$$K_{p_0} = 1 + \frac{4C_1}{Re + C_2\sqrt{Re}} \quad (4-9)$$

式中, C_1 、 C_2 为常数, 其数值选取如下:

- (1) 对于半球形, $C_1=2.0$, $C_2=0.398$;
- (2) 对于球形, $C_1=1.5$, $C_2=0.455$;
- (3) 对于圆柱形, $C_1=1.0$, $C_2=0.457$ 。

5. 速度梯度对测量值的影响

当所测量的流场具有横向速度梯度时, 探针前缘滞止的流体会产生一个向高速区增加的滞止压力梯度。这种表面压力梯度在前缘边界层内会引起流体流动, 并在探针附近导致流体轻微“下冲”。此外, 沿探针表面的粘性在高速区较强, 这也会增加向低速区的“下冲”。流体这种“下冲”作用对静压测量会产生影响, 其作用类似于在均匀流体中探针稍微偏斜了一个角度产生的影响。

在探针支杆的前缘, 也会产生一个滞止压力梯度, 如图 4-10 所示, 并沿探针前缘向低速区下冲, 这将使得测压孔附近的流线偏斜, 造成测量误差。为了消除该影响, 测压孔的位置应该远离支杆, 通常建议静压孔离支杆的距离为 $8d$ 。

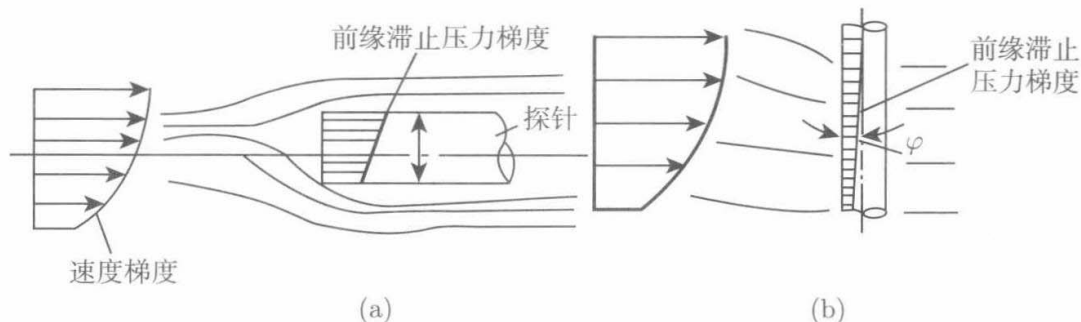


图 4-10 速度梯度的影响

(a) 对探针头部的影响; (b) 对探针支杆的影响

4.3 稳态压力指示仪表

4.3.1 液柱式压力计

液柱式压力计 (liquid column manometer) 是用一定高度的液柱所产生的静压力平衡被测压力的方法来测定压力的测量仪器。它价格低, 而且在 $\pm 0.1\text{MPa}$ 范围内有较高的准确度, 故被广泛地应用于流体压力的测量, 包括测量低压、负压和压差, 主要形式有 U 形管压力计和斜管压力计。

1. U 形管压力计

U 形管压力计可用于测量液体或气体的相对压力和压力差。其结构如图 4-11 所示, 其由一根灌注有一半容积的液体 (常用水、水银、酒精或油等介质) 的 U 形玻璃管和一根标尺所组成, 被测压力为

$$p = hg(\rho - \rho_m) \quad (4-10)$$

式中, h 为液柱的高度差; g 为重力加速度; ρ 、 ρ_m 是工作液体和液面上介质密度。当 $\rho_m \ll \rho$ 时, 上式可近似为

$$p = hg\rho \quad (4-11)$$

一般来说, U 形管压力计的管径不小于 8~10mm, 且其管径大小应上下一致。由于水在较小管径的玻璃管内会产生毛细管现象 (capillarity), 故管径较小的压力计一般采用酒精作为工作液体。

当压力差一定时, 工作液的密度可以决定 U 形管压力计的灵敏度。在同样的压力差下, 工作液为水的液柱高度要比工作液为水银的高; 在 25℃ 下, 水银的密度约为水的密度的 13.5 倍。因此常常采用水银式 U 形压力计测量较大的压力或压差。另外, 由于水和水银的表面张力不同, 充装水银的 U 形管压力计内的液柱上表面呈凸状曲面, 采读压力数据时, 应从凸状曲面的顶点开始算起; 相反, 充装水的 U 形管压力计内的液柱面呈凹状曲面, 应从它的凹状曲面顶点开始读数。

2. 斜管压力计

斜管压力计 (inclined-tube manometer) 的特点是具有放大压力或压力差的作用, 工作液为较纯的酒精。其结构如图 4-12 所示, 将玻璃管倾斜放置, 以更好地显示微小压力值。斜管的刻度范围一般为 250mm。假设斜管的倾角为 α , 斜管内液体长度为 l , 则与被测压力相平衡的液柱高度 h 为

$$h = l(\sin \alpha + A_1/A_2) \quad (4-12)$$

其对应的压力为

$$p = \rho g l (\sin \alpha + A_1/A_2) = Kl \quad (4-13)$$

式中, A_1 、 A_2 分别为玻璃管和容器的横截面积; ρ 为工作液体密度; K 为常数, $K = \rho g (\sin \alpha + A_1/A_2)$ 。

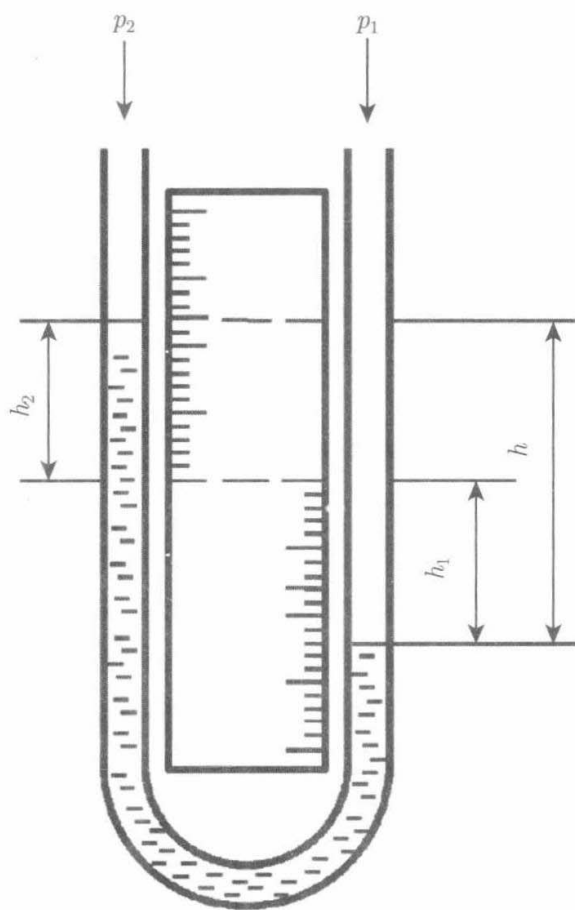


图 4-11 U 形管压力计

常用的斜管压力计上有一个弧形支架, 上面有 0.2、0.4、0.6、0.8 刻度, 即为 K 的值, 测量时只要将支管上的 l 读出, 乘以所对应的 K 值, 即为所测压力或压差的大小。此时测量单位为 mmH_2O , 可依需要转换为国际单位 Pa 。这种压力计的测量范围一般为 $0 \sim 2000 \text{ Pa}$ 。

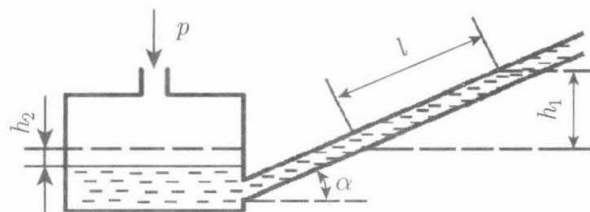


图 4-12 斜管式微压计结构示意图

4.3.2 弹性式压力计

顾名思义,弹性式压力计是采用弹性元件 (elastic element) 作为敏感元件来感受压力,并以其受压变形后所产生的作用力与被测压力相平衡的原理所制成的。

目前常用的弹性式压力计有:弹簧管压力计、膜片式压力计、膜盒式压力计、波纹管压力计等。

1. 弹簧管压力计

如图 4-13 所示,弹簧管压力计 (spring-tube manometer) 由弹簧管、齿轮传动机构和指针等部件组成。其中,弹簧管是一根一端固定的 C 形椭圆截面管子,管子的自由端是封闭的,在其内部加压以后,其截面受力而变圆,使得弹簧管伸展,自由端产生位移,借助拉杆和齿轮传动机构,使得固定于齿轮上的指针旋转,从而指示出被测量的压力值。弹簧管的端部位移量不能太大 (最大为 2~5mm),为了增大该变形量,可采用盘旋形或螺旋形的弹簧管。

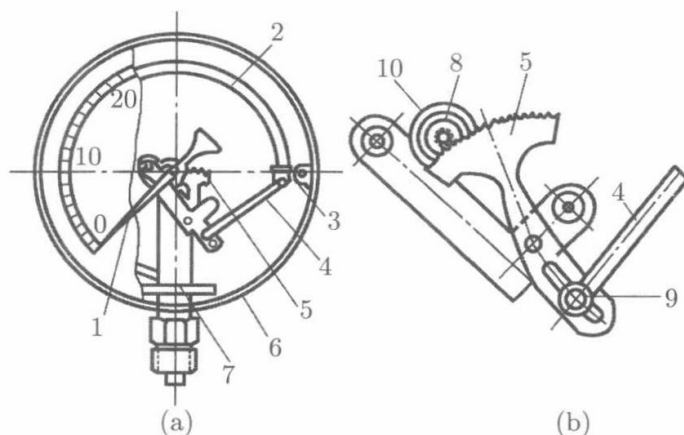


图 4-13 弹簧管压力计示意图

(a) 压力计; (b) 传动部分

1— 指针; 2— 弹簧管; 3— 接头; 4— 连杆; 5— 扇形齿轮;

6— 壳体; 7— 基座; 8— 齿轮; 9— 铰链; 10— 游丝

弹簧管压力计可分为普通型压力计、密封型压力计、充油型压力计、压差计、双针型压力计等。

为了保证弹簧管压力计正确指示和长期使用,在应用中需要注意以下规定:

- (1) 仪表应工作在正常允许的压力范围内;
- (2) 仪表应在环境温度为 $-40 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度大于 80% 的条件下使用;
- (3) 仪表安装处与测定点之间的距离应尽量短,以免指示滞后;
- (4) 在振动情况下使用仪表时需要安装减振装置;
- (5) 测量结晶或粘度较大的介质时,需要加装隔离器;
- (6) 仪表必须垂直安装,而且无泄漏现象;

(7) 仪表的测定点与仪表安装处应在同一水平位置上, 否则将产生附加高度差, 必要时应加以修正;

(8) 如果测量易爆炸、腐蚀性和有毒的流体作用压力时, 应使用特殊的仪表。氧气压力表严禁接触油类, 防止爆炸;

(9) 仪表必须定期校验, 合格后方可使用。

2. 膜片式压力计

膜片式压力计 (diaphragm pressure gauge) 利用金属膜片作为压力感应元件, 膜片为四周固定的圆形薄片, 当膜片两侧面压力不同时, 膜片中部将产生朝向低压侧的变形, 该位移经过传动机构的放大使指针发生偏转。其结构如图 4-14 所示。膜片除了平面膜片外, 还有波纹膜片。波纹膜片是一种压有环状同心波纹的圆形薄膜, 其灵敏度较平面膜片高, 因此其应用较为广泛。

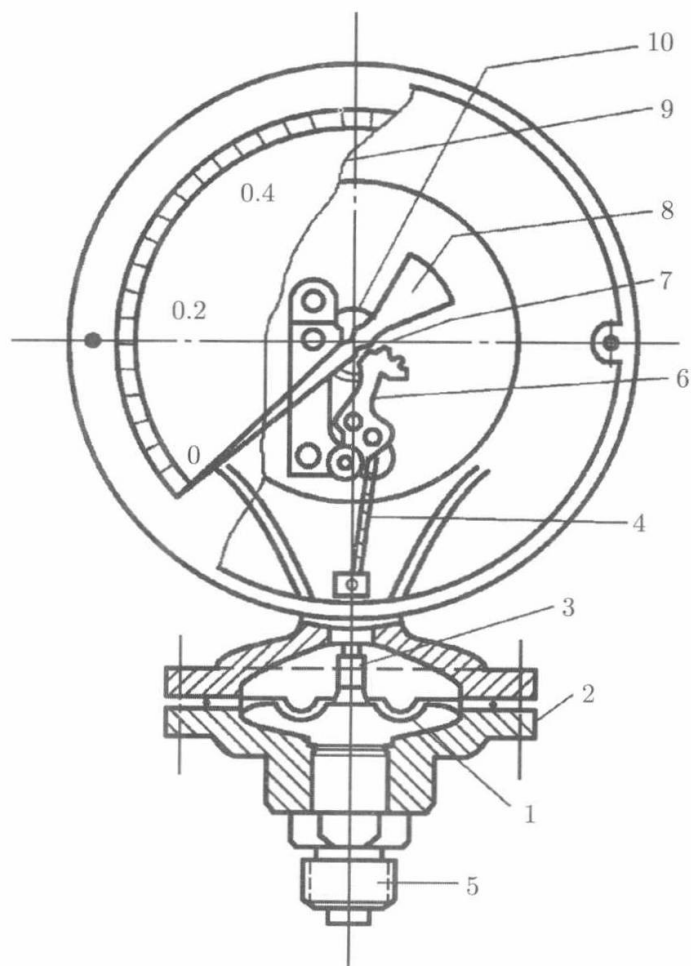


图 4-14 膜片式压力计

1—膜片; 2—凸缘; 3—小杆; 4—推杆; 5—接头;

6—扇形齿轮; 7—小齿轮; 8—指针; 9—刻度盘; 10—套筒

采用不锈钢膜片的膜片式压力计可用于测量对铜和钢及其合金有腐蚀作用或粘度较大的介质的压力或真空度。若采用敞开法兰式或隔膜式结构,还可测量高粘度、易结晶或高温介质的压力或真空度。膜片式压力计的测量范围一般为0~6.0MPa,精度一般为2.5级。

3. 膜盒式压力计

膜盒式压力计 (capsule pressure gauge) 的压力感应元件是利用两个金属膜片相对焊接而成的,其特性因波纹形状和焊接方式的不同而不同。其与膜片式压力计相比,增加了中心位移量,从而提高了灵敏度。其示意图如图4-15所示。为了进一步提高其灵敏度,还可采用多个膜盒串联组合制成多膜盒式压力计。对于膜盒材料为磷青铜的压力计,使用时应保证被测介质对铜合金无腐蚀作用。

膜盒式压力计可用于气体微压和负压的测量,也可实现越限报警,其最大量程为40000Pa,精度一般为2.5级。

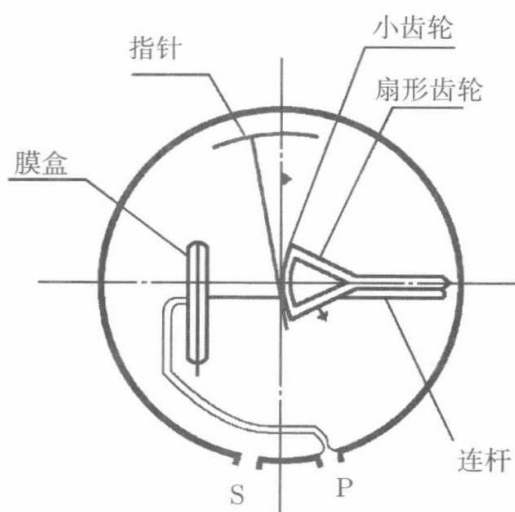


图 4-15 膜盒式压力计

4. 波纹管压力计

波纹管压力计 (bellows pressure gauge) 采用波纹管作为感压元件。波纹管是一种表面上有许多同心环状波形皱纹的薄壁圆管,如图4-16所示。波纹管分为单层和多层两种,多层波纹管内部应力小,可承受压力较高,耐久性好,但各层间存在摩擦力,增大了其迟滞误差。

由于波纹管容易变形,因此其灵敏度较高,在测量低压时它比弹簧管和膜片灵敏得多。但其缺点在于迟滞性强(可达5%~6%),为克服该缺陷,可将刚度比其大5~6倍的弹簧与其一起使用,将弹簧置于管内,这样可使迟滞性减弱至1%。

采用铍青铜波纹管的压力计滞后性弱 (0.4%~1%), 特性稳定, 其工作压力可达 15 MPa, 工作温度可达 150 °C。当要求在高压或有腐蚀性的介质中工作时, 应采用不锈钢波纹管制成的压力计。

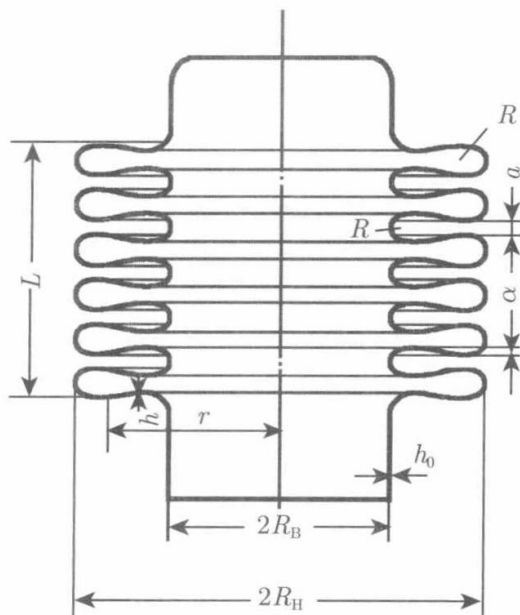


图 4-16 波纹管

4.4 动态压力测量

测量动态压力时, 通常采用压力传感器将压力转变为电信号来进行测量。常见的压力传感器有应变式、压电式、电容式、压阻式、电感式等传感器。

4.4.1 应变式压力传感器

1. 应变效应

金属导体或半导体在发生机械变形时, 其电阻值均会发生变化, 这种现象叫做应变效应 (strain effect)。由物理学可知, 长度为 l , 截面积为 S , 电阻率为 ρ 的导体, 其电阻值为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4-14)$$

对上式进行全微分, 可得

$$dR = \frac{l}{S} d\rho + \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS \quad (4-15)$$

电阻的相对变化为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (4-16)$$

对于截面为圆形的金属丝, 则有 $S = \pi r^2$ (r 为金属丝的半径), $dS = 2\pi r dr$, 因而有

$$dS/S = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2dr/r \quad (4-17)$$

由材料力学可知, 轴向应变与横向应变的关系为

$$dr/r = -\mu \frac{dl}{l} \quad (4-18)$$

式中, μ 为泊松系数。所以

$$dS/S = -2\mu \frac{dl}{l} \quad (4-19)$$

电阻率的变化是由压阻效应引起的, 它和应力 F 之间的关系为 $d\rho/\rho = \pi_e F$ (π_e 为压阻系数)。由材料力学的胡克定律可得应变与应力之间的关系为

$$F = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad (4-20)$$

式中, E 是弹性模量; ε 是应变。

综合上面各式, 可得

$$\frac{dR}{R} = \pi_e E \frac{dl}{l} + \frac{dl}{l} + 2\mu \frac{dl}{l} = (1 + 2\mu + \pi_e E) \frac{dl}{l} = (1 + 2\mu + \pi_e E) \varepsilon = K\varepsilon \quad (4-21)$$

式中, $K=1+2\mu+\pi_e E$ 称为应变丝的灵敏度系数。对于一般的金属丝, $\pi_e E$ 值很小, 可忽略, 因此 $K \approx 1+2\mu$, 一般 K 介于 $1 \sim 2$ 。对于半导体材料, $\pi_e E$ 较大, $\pi_e E \geq 1+2\mu$, 因此 $K \approx \pi_e E$ 。 K 值通常在 $60 \sim 170$ 。由此可见, 半导体应变片 (semiconductor strain gage) 的灵敏度较高, 但由于它受温度变化的影响较大, 性能不稳定, 所以一般仍采用金属材料制作应变片。

2. 应变片及其性能

金属电阻应变片一般分为两类, 一类是丝式应变片, 一类是箔式应变片。丝式应变片结构如图 4-17 所示, 它以一根金属丝弯曲后贴在衬底上, 电阻丝两端焊有引出线。

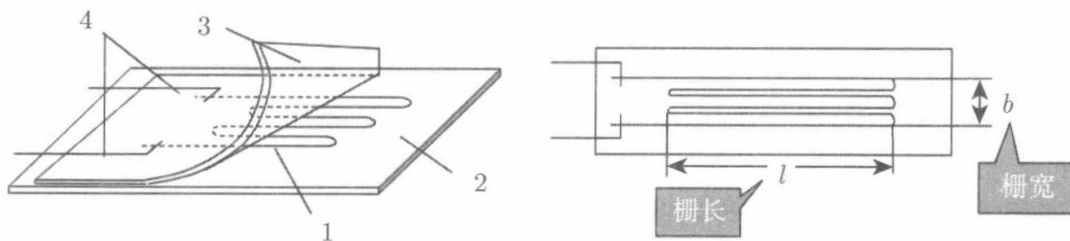


图 4-17 金属丝式应变片

1—敏感栅; 2—基底; 3—盖片; 4—引线

应变片的几何尺寸为基长 l 和栅宽 b 。 l 一般在 $3\sim 75\text{mm}$ 范围内变动； b 的变化范围是 $0.03\sim 10\text{mm}$ 。常用于制作应变片的金属材料有：康铜、镍铬合金、铁镍铬合金及铂铱合金等。

箔式应变片是利用照相、光刻技术将金属箔腐蚀成丝栅制成的，如图 4-18 所示。由于它散热性强，能承载较大的工作电流，从而灵敏度较高，此外它耐蠕变和漂移的能力强，可做成任意形状，便于批量生产，成本较低，因此，箔式应变片较丝式应变片更受欢迎。

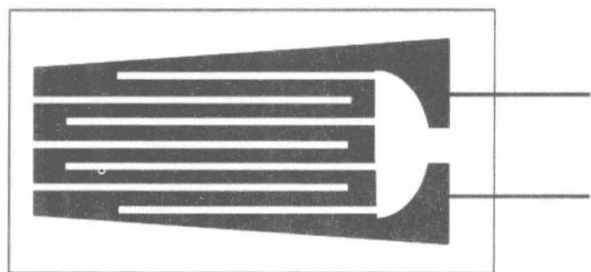


图 4-18 金属箔式应变片

半导体应变片具有灵敏度高，频率响应高的优点，目前国内半导体应变片商品的电阻值范围在 $5\sim 50\Omega$ ，由于它体积小，故可用于制作微型传感器。

3. 应变片的温度误差及其补偿

应变片的电阻变化受温度影响很大，在动态测量中，如果不排除这种影响，则将会给测量带来很大的误差。这种由于环境温度改变而导致的误差，称为应变片的温度误差，又称为热输出。造成温度误差的原因为①敏感栅的金属丝电阻本身随温度变化发生变化；②应变片材料和试件材料的线膨胀系数不一样，使应变片产生附加变形，从而造成电阻变化。为修正该误差，通常采用补偿的办法，如常用的电桥补偿法和应变片自补偿法。

(1) 电桥补偿法

最常用的和效果较好的是电桥补偿法，电桥补偿法有两种。对于第一种方法，准备一块与测试件相同材料的补偿件和两片参数相同的应变片，将其中的一片应变片贴于测试件上，另一片应变片贴在与试件处于同一温度场中的补偿件上，然后将两片应变片接入电桥的相邻两臂上，这样由于温度变化而引起的电阻变化就会互相抵消，电桥的输出将与温度无关而只与试件的应变有关。另一种方法是不用补偿件，而是将测试片和补偿片贴于试件的不同部位，这样其既能起到温度补偿作用，又能提高输出灵敏度。当测试件变形时，测试片和补偿片的电阻将一增一减，因此电桥输出电压增加一倍，从而提高了灵敏度。

(2) 应变片自补偿法

在无位置可以安放补偿件的情况下,出现了一种自身具有温度补偿作用的应变片,这种应变片称为温度自补偿应变片。温度自补偿应变片的应变丝是由两种不同的材料组成的,当温度发生变化时,它们所产生的电阻的变化相等。将它们接入电桥的相邻两臂,则电桥的输出就与温度无关。

4. 应变式压力传感器

应变式压力传感器是由应变片粘贴在感压弹性元件上构成的,它可将被测压力的变化转换成电阻的变化。感压弹性元件根据被测压力的不同可有不同的形式,通常有悬臂梁、圆形薄片、圆筒等形式,如图 4-19 所示。

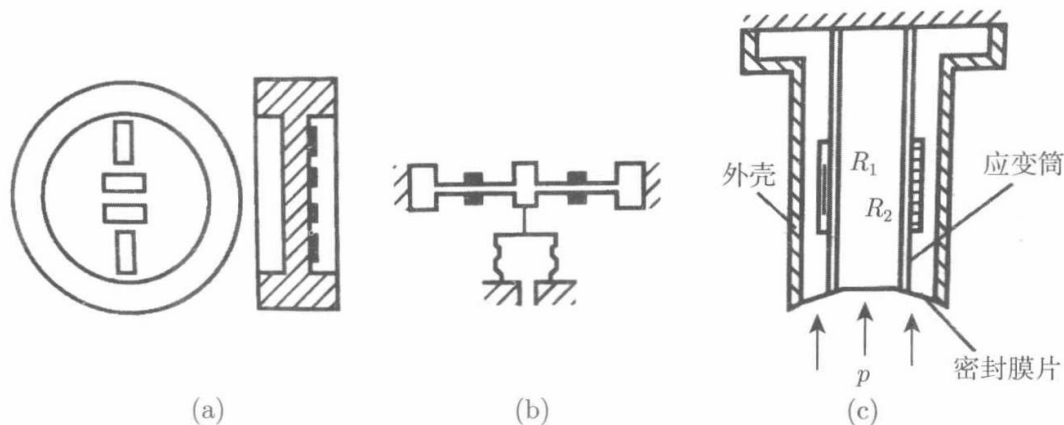


图 4-19 感压弹性元件

(a) 圆膜片; (b) 弹性梁; (c) 应变筒式压力传感器

5. 固态应变式压力传感器

固态应变式压力传感器是一种新型的压力传感器,严格来说也属于应变式压力传感器的一种。它是采用集成电路工艺在单晶硅膜片上扩散一组等值应变电阻制成的,硅膜片置于传感器的压力腔体内,当压力发生变化时,硅膜片产生应变,硅膜片上扩散形成的电阻将产生与被测压力成比例的变化。所以传感器的核心部分是单晶硅膜片,它既是压敏元件,又是变换元件。

固态应变式压力传感器的输出有两种形式:模拟电压和频率信号。固态传感器具有诸多优点,如精度高(误差可小至 0.1%~0.05%)、灵敏度高(灵敏度系数为 100~200)、重复性强、迟滞性弱、尺寸小、重量轻、结构简单、可靠性高、能在恶劣的环境下工作、抗干扰能力强。其缺点是对温度敏感,需要进行温度误差补偿。

4.4.2 压电式压力传感器

晶体是各向异性的,非晶体是各向同性的,某些晶体介质,当沿着一定方向受到压力作用发生变形时,内部就产生极化现象,同时在表面上产生电荷;当机械力

撤掉之后, 又会重新回到不带电的状态。也就是说, 某些电介质材料, 受到压力的时候会产生出电的效应, 这就是所谓的压电效应 (piezoelectric effect)。压电式压力传感器 (piezoelectric pressure transducer) 的工作原理正是这种压电效应。

目前压力传感器中使用的压电材料主要有三类: 一类是压电晶体 (单晶), 如石英晶体、铌酸锂等; 一类是压电陶瓷 (多晶半导瓷), 如钛酸钡、铌酸盐系、铌镁酸铅等; 另一类是高分子压电材料, 如聚氟乙烯等。

压电式压力传感器的结构如图 4-20 所示, 其主要由感压弹性膜片、垫块、压电晶体及引出线、绝缘体等组成。被测压力通过感压膜片施加到压电晶体上, 压电晶体产生的电荷由压在压电晶体间的垫片导出。整个传感器具有自保护功能, 可以防止在被测压力的作用下产生破裂。传感器的头部具有螺纹, 以便旋入被测压力腔内。

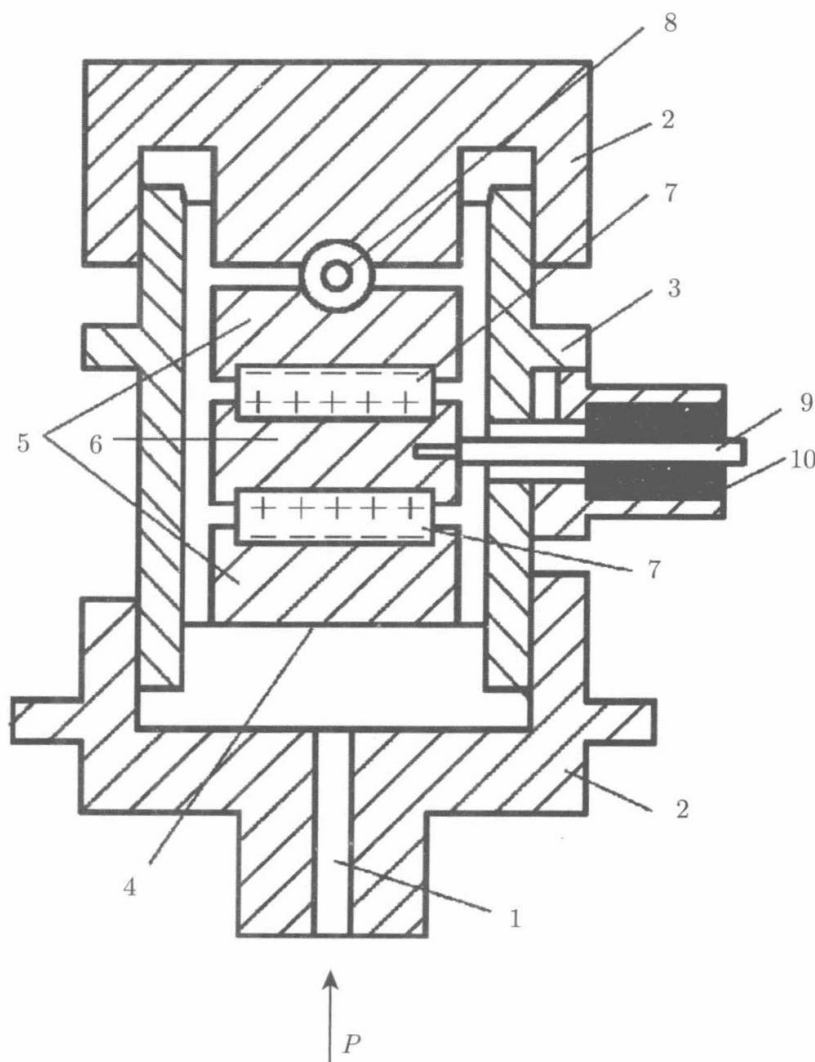


图 4-20 压电式压力传感器结构示意图

1- 压力接头; 2- 压盖; 3- 钢筒; 4- 膜片; 5- 钢垫块;

6- 铜垫块; 7- 压电晶体; 8- 压紧珠; 9- 引出线; 10- 绝缘体

压电式压力传感器输出的是电荷, 只有在外电路负载无穷大, 内部无漏电时, 压电晶体表面产生的电荷才能长时间保持下来, 但实际上负载不可能无穷大, 内部也不可能完全不漏电, 所以通常采用高输入阻抗的放大器来代替理想的情况, 即引入外部的电荷放大器来实现电荷的有效测量。

压电式压力传感器具有体积小、结构简单、可测频带宽、无惯性、滞后小等优点, 但由于无法避免漏电, 故不宜测量频率太低的压力信号, 特别是静态压力。

压电式压力传感器属于发电类传感器, 它在外力作用下无需外界提供电源就有电压输出。这类传感器的最大特点是自振频率高, 可达 200kHz。因此压电式压力传感器最适合于测量高频动态压力, 如火箭发动机压力、飞机发动机燃烧室压力、火炮冲击波压力; 也能用于测量高超声速脉冲气流的激波压力。在这些恶劣环境中, 其他类型的传感器很难胜任, 而压电式压力传感器则具备这样的条件。

压电式压力传感器的缺点是低频性能差, 此外传感器壳体和压电元件的线膨胀系数相差很大, 在温度改变时会引起晶体片原来所受的预紧力发生变化, 导致传感器零点漂移, 严重时会影响其灵敏度和线性度。

4.4.3 电容式压力传感器

1. 工作原理

由绝缘介质分开的两个平行金属板组成的平板电容器, 当忽略边缘效应影响时, 其电容量可表示为

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{\delta} \quad (4-22)$$

式中, ϵ_0 为真空介电常数, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$; ϵ_r 为极板间介质的相对介电常数, F/m ; A 为极板的有效面积, m^2 ; δ 为两极板间的距离 (极距), m 。

若被测量压力的变化使式中 δ , A , ϵ_r 三个参量中任意一个发生变化, 都会引起电容量的变化, 则通过测量电路即可将压力转换为电量输出。此即为电容式传感器 (capacitance pressure transducer) 的工作原理。

2. 电容式压力传感器的类型

根据影响平行板电容器电容的因素如极板间的距离、极板间的遮盖面积和极板间介质的介电常数, 可将平行板电容器分为变极距型、变面积型和变介质型三种类型。作为测压的电容式传感器一般只有变极距型和变面积型。

变极距型电容式压力传感器如图 4-21 所示。变极距型电容式压力传感器的灵敏度与极距平方成反比, 极距越小, 灵敏度越高。一般通过减小初始极距来提高灵敏度。由于电容量 C 与极距呈非线性关系, 故将引起非线性误差。为了减小这一误差, 通常规定测量范围。

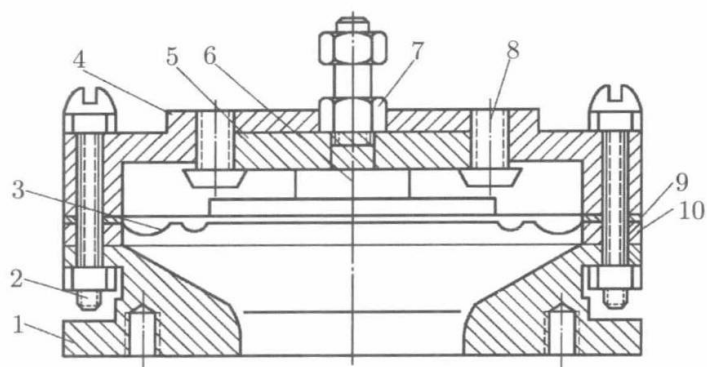


图 4-21 变极距型电容式压力传感器

1— 支座；2— 固定螺丝；3— 膜片；4— 定级片支座；5— 定级片陶瓷支架；6— 定级片；7— 定级片固定螺母；
8— 陶瓷支架的固定螺钉；9— 标准垫片；10— 垫片

变面积距型电容式压力传感器如图 4-22 所示。变面积距型电容传感器有角位移型和线位移型两种，线位移型又有平面线位移型和圆柱体线位移型两种。

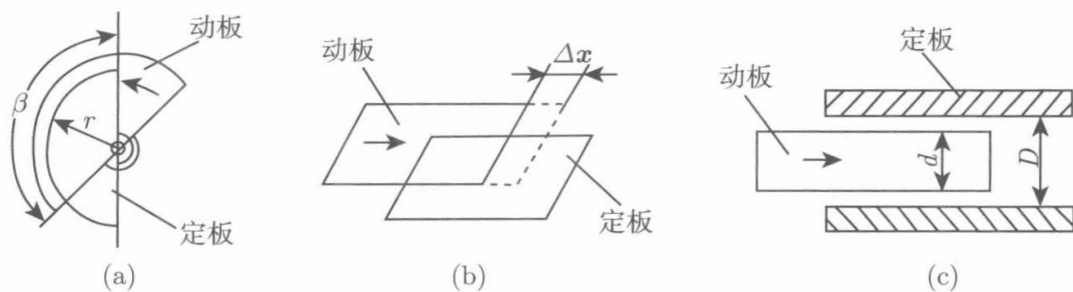


图 4-22 变面积距型电容式压力传感器

(a) 角位移型；(b) 平面线位移型；(c) 圆柱体线位移型

电容式压力传感器以感压弹性元件——金属膜片为电容器的活动极板，与固定在传感器壳体上的另一极板形成一电容器。当感受被测压力时，弹性膜片的变形就使得电容器极板之间的距离发生变化，从而导致了电容 C 的变化，因此，通过测量电容 C 的变化就可得到压力 P 的变化。

电容式压力传感器的优点是灵敏度高，动态响应快，结构简单，输入能量低，不受磁场的影响。缺点是输出阻抗高，负载能力差，传感器与测量电路的连接导线的寄生电容影响大，输出为非线性。电容式传感器的测量电路通常有交流电桥、谐振电路和双 T 网络电路。

4.4.4 霍尔效应压力传感器

1. 霍尔效应

若在某些金属或半导体薄片两端通以控制电流，并在此薄片的垂直方向上加上磁感应强度为 B 的磁场，如图 4-23 所示。则在垂直于电流和磁场的方向上将产

生一电动势, 这一现象称为霍尔效应 (Hall effect)。能产生霍尔效应的薄片称为霍尔元件。

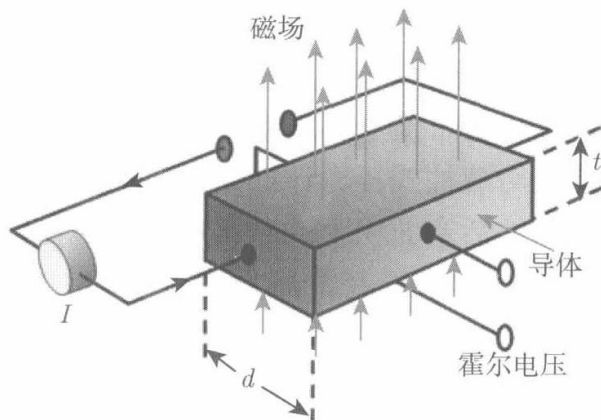


图 4-23 霍尔效应原理图

若霍尔元件的厚度为 $t(\text{mm})$, 磁感应强度为 $B(\text{T})$, 所加的控制电流为 $I_P(\text{mA})$, 则霍尔电压 V_H 可用下式表示:

$$V_H = \frac{R_H I_P B}{t} \quad (4-23)$$

式中, R_H 是霍尔系数。

霍尔元件一般采用半导体材料, 如锗、铟化钢、砷化镓、砷化铟等制作。

2. 霍尔效应压力传感器的结构及特性

霍尔效应压力传感器主要由感压弹性元件、霍尔元件及永久磁体等组成。霍尔元件与感压弹性元件相联接, 当被测压力使感压弹性元件变形时, 处在非均匀磁场中的霍尔元件就被带动, 产生位移, 使得施加于霍尔元件上的磁感应强度 B 发生变化, 从而霍尔元件的输出电势发生变化。显然, 输出电势的变化与被测压力的大小有关。用霍尔效应压力传感器进行测量时应注意, 施加于霍尔元件上的控制电流必须是恒定的, 因此, 一般采用稳压电源供电。测量仪表可直接使用数字电压表。霍尔效应压力传感器具有较高的灵敏度, 测量仪表简单, 可配用通用的动圈仪表来指示结果, 能远距离指示或记录。霍尔效应压力传感器的缺点是受温度影响较大。

4.5 压力传感器及压力测量系统的标定

为了保证压力测量的精度, 测压仪表在首次使用前必须经过标定, 对于长期使用的仪表也要定期标定。标定可分为静态标定和动态标定两种。

4.5.1 静态标定

用实验的方法确定静态特性的工作,称为静态标定 (static calibration)。静态标定通常采用比较法,即在恒定温度下,把相对测量仪表 (如弹性式压力计和各种压力传感器) 的响应和标准压力计或参考压力计的绝对测量仪表 (如液柱式压力计、测压天平等) 的响应进行比较,从而确定测压系统或仪表的静态特性。

当标定压力很高,不能采用液柱式压力计标定时,采用测压天平的标定系统是理想的选择。用直接作用在已知活塞面积上的砝码重力来平衡待标定的压力,这样从已知的活塞面积和砝码重量即可求得待测压力值。

采用测压天平的标定系统如图 4-24 所示,该系统主要由手摇压力泵、带托盘的活塞、砝码、被标定压力表或传感器接口、标准压力表接口等组成。标定时,摇动手柄使托盘升起,在托盘上加放砝码,同时记录被标定压力表的读数或压力传感器的输出。另一种标定方法是,摇动压力泵的手轮,使系统内的压力逐渐升高,通过标准压力表读数,同时记录被标定压力表的读数或压力传感器的输出。用这种装置进行静标定,既方便又灵活,其标定范围为 $10 \sim 10^6 \text{ kPa}$ 。

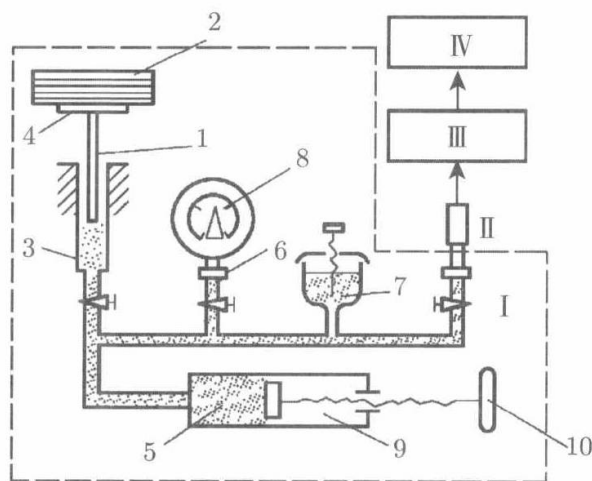


图 4-24 采用测压天平的静态压力标定系统

1- 活塞；2- 砝码；3- 活塞缸；4- 托盘；5- 工作液体；

6- 压力表接头；7- 油杯；8- 压力表；9- 加压泵；10- 手轮

4.5.2 动态标定

动态压力测量系统的标定就是要确定压力传感器或整个压力测量系统对试验信号 (通常是阶跃信号、脉冲信号和周期信号) 的响应,即求出传感器或整个压力测量系统的动态特性参数 (如频率响应函数、固有频率、阻尼比等)。确定测量系统的动态特性有两种方法:一是首先建立测量系统的数学模型,然后用试验函数来求解动态特性;二是用实验方法来确定动态特性。

这里只介绍用实验的方法进行动态标定的步骤。动态标定的压力源可分为两

种形式,非周期性压力发生器和周期性压力发生器。下面以激波管 (shock tube) 为例对标定系统进行主要介绍。

激波管中有由膜片隔开的截面相同的两个空间,在一个腔内充以高压气体,另一个腔处于低压状态。当压差达到某一值时,膜片破裂,造成高压气体向低压腔膨胀,产生一个速度大于膨胀速度的冲击波,它和膨胀波相平行,一个压缩波在相反的方向行进。

利用激波可以得到压力脉冲,它的上升时间极短,约在 10^{-9}s ,持续时间为几个微秒,压力幅值为几个帕到几十万帕。它是一个理想的阶跃压力信号发生器。

采用激波管进行动态标定的基本原理是由激波管产生一个阶跃压力来激励被标定的传感器,并将它的输出记录下来,经计算便可求得被标定压力传感器的传递函数。激波管型压力传感器动态标定系统原理如图 4-25 所示。它由激波管、高压气源、测速和记录几部分组成。气源部分用以给激波管高压腔提供高压压力,气瓶内的高压氮气是经过减压阀、控制阀调节后进入激波管的,控制阀用来控制进气量。膜片破裂后,立即关闭控制阀。减压阀和控制阀均装在操作台上。操作台上还装有放气阀和压力表。压力表用于读取膜片破裂时高压室和低压室的压力值。放气阀用于每次做完试验后将激波管内的气体放掉。

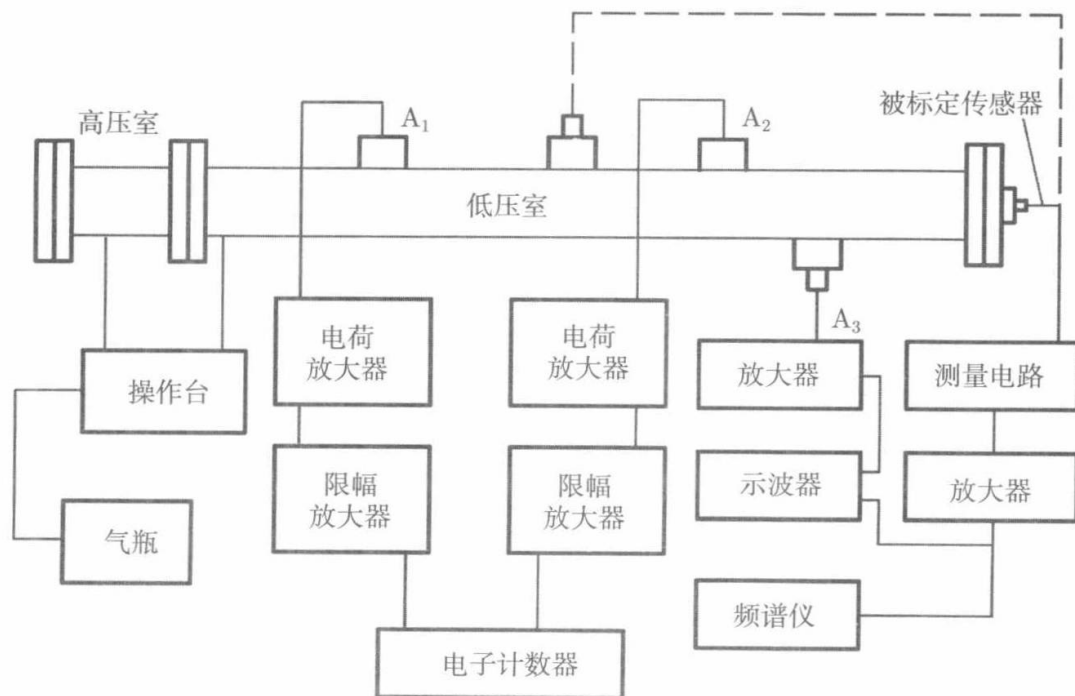


图 4-25 激波管型压力传感器动态压力标定系统示意图

用激波管标定压力传感器时,一般可以标定具有较高固有频率的传感器,其精度可达到 5%。

思 考 题 与 习 题

- 1) 根据压力的定义说明静止流体的静压和稳态运动流体的静压之间的差别。
- 2) 静压探针和总压探针在结构上有什么不同？它们分别是根据什么原理制成的？
- 3) 静压探针通常有哪几种型式？各有什么特点？
- 4) 总压探针通常有哪几种型式？总压探针选用的原则是什么？
- 5) 压力探针的测量误差是由哪些因素造成的？如何减小这些误差？
- 6) 常用的液柱式压力计有哪几种型式，各有什么特点？
- 7) 弹性式压力计通常有哪几种型式？试述它们的测压范围和使用注意事项。
- 8) 应变式传感器如何消除（或减小）由温度变化而引起的误差？
- 9) 试述压电式压力传感器的原理和特点。
- 10) 电容传感器的测量电路通常有哪几种？试述它们的工作原理和特点。
- 11) 试述霍尔传感器的原理和优缺点。
- 12) 试述压力传感器和压力测量系统静态标定的目的，并画出采用测压天平的静态标定系统原理图。
- 13) 如何确定压力传感器和压力测量系统的动态特性？常用的实验方法有哪几种？试述其原理。

第5章 流速测量

流体的流动速度 (flow velocity) 是一个矢量, 它具有大小和方向, 所以测量流体速度时, 应同时测量其大小和方向。最为基本的测速方法为在测点上分别测得总压和静压, 也可用速度探针直接测得总压和静压之差, 然后用伯努利方程求得速度的大小。流体的方向可用方向探针来测量, 根据流体速度的二维或三维特征, 可以相应地用二元方向探针或三元方向探针测出流动的方向。

流速测量技术是能源与动力工程测试技术中最为丰富多彩的一个分支。正在应用的测速技术中, 简单的与复杂的技术之间的跨度很大。

5.1 流体速度大小的测量

传统的流速测量方法以伯努利方程为基础, 只要测出流体的总压, 静压或者两者之差以及流体的密度, 就可利用伯努利方程求出流体速度的大小。测压的方法在上一章已有详细的论述。

如图 5-1 所示的是常见的 L 形速度探针的最佳几何关系。探针头部临界点的中心孔用来测量流体的总压, 侧面孔用来测量静压, 如果把它们连接到同一个 U 形管上, 便能得到确定流体速度的总压与静压之差。

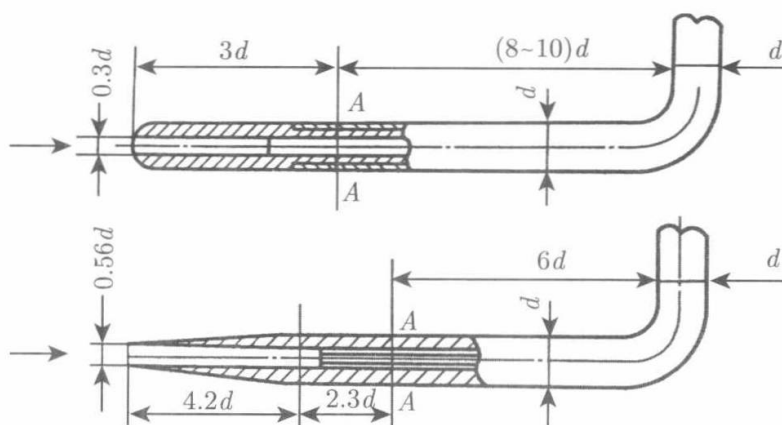


图 5-1 两种 L 形探针示意图

在平面流场中, 流动方向与探针轴线的夹角称为流向偏斜角, 用 α 表示, 流向偏斜角 α 对 L 形速度探针的影响如图 5-2 所示, 图中的压力系数分别为

$$K_{p_s} = (p_{s\alpha} - p_s) / (\rho c^2 / 2) \quad (5-1)$$

$$K_{p_0} = (p_{0\alpha} - p_0)/(\rho c^2/2) \quad (5-2)$$

$$K_{p_{\vec{\alpha}}} = [(p_{\alpha} - p_{s\alpha}) - (p_0 - p_s)]/(\rho c^2/2) \quad (5-3)$$

式中, p_0, p_s 分别为 $\alpha=0$ 时总压孔与静压孔的测量值; $p_{0\alpha}, p_{s\alpha}$ 分别为 $\alpha \neq 0$ 时总压孔与静压孔的测量值。

从图 5-2 中可以看出, 对于头部为半球形的探针 (图中实线所示), 当流向偏斜角在 $\pm 10^\circ$ 的范围内变化时, 探针的读数不改变, 这是因为在这个范围内, 总压和静压均下降, 因而压差 $p_0 - p_s$ 保持不变。对于头部为锥形的探针 (图中虚线所示), 在流向偏斜角为 $\pm 15^\circ$ 时, 总压保持不变, 而静压却对流向偏斜角非常敏感, 只要流向偏斜角 $\alpha \neq 0$, 压力系数 $K_{p_{\vec{\alpha}}} \neq 0$ 。

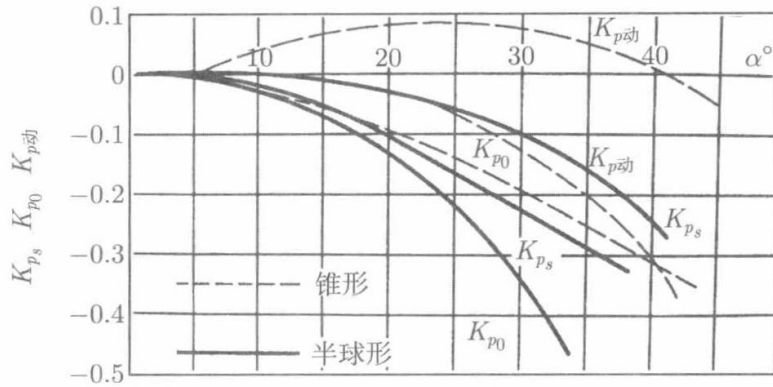


图 5-2 流向偏斜角 α 的影响

由此可见, L 形速度探针的头部形状对探针的特性影响很大。利用速度探针测量流体速度时, 可按下式计算速度的大小:

$$c = [\alpha(p'_0 - p'_s)K_c/\rho]^{1/2} \quad (5-4)$$

式中, K_c 是速度探针校正系数, 由实验确定 $K_c = \frac{(p_0 - p_s)}{(p'_0 - p'_s)}$, 它与探针头部形状、静压孔的位置以及感受部分的加工精度等有关。

除了使用最广泛的 L 形速度探针外, 在一些特殊场合下, 还可采用一些其他形式的探针如吸气式速度探针等。速度探针在使用前必须经过标定。

5.2 流动方向的测量

根据流体力学原理可知, 如果在规则形状的物体表面开两个对称的小孔, 当来流方向正对两孔的对称轴时, 两孔感受的压力相等; 若来流相对于对称轴有一不为零的偏角, 则两孔感受的压力必然不相等。根据这一原理可设计出各类方向探针, 来测量流动方向。

如果在两方向孔的对称轴上再开一个孔, 则当流体按对称轴方向流向探针时此孔感受的压力为总压, 而方向孔上感受的压力应为流体总压与静压之间的某一值。这样, 只要预先将这种探针在校准风洞中进行标定, 用开有三个测孔的探针就可以同时测出二维流场中流体的总压、静压、及流动速度和方向。

5.2.1 方向探针

如图 5-3 所示的是不同形式方向探针的简图。这类探针是基于流体对物体绕流时物体表面的压力与流动方向有确定关系的原理而工作的。

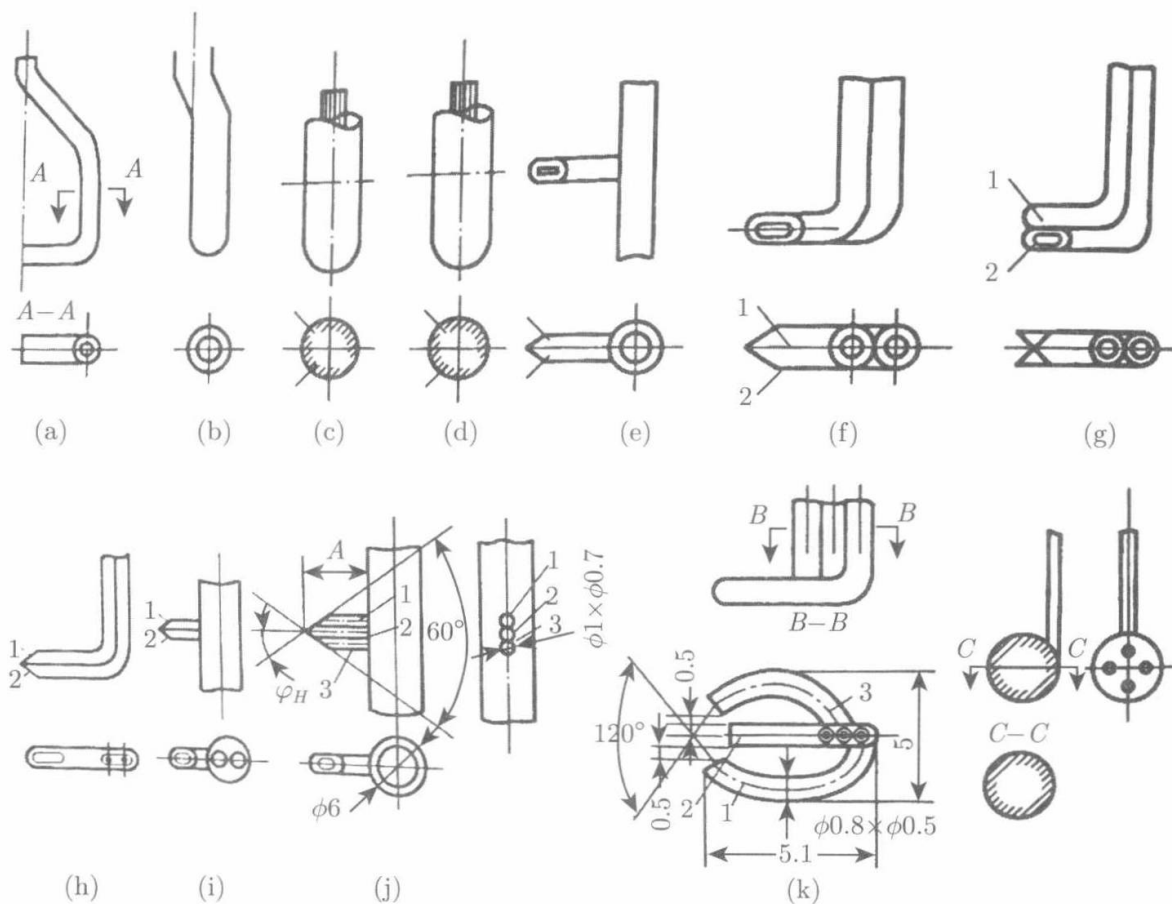


图 5-3 方向探针

方向测量通常有两种方法: 对向测量和不对向测量。对向测量就是使探针绕其本身的轴转动, 当两测孔所指示的压力相等时, 两孔的对称中心就与流动方向一致。这时相对于一定的参考方向 (初始位置) 就可以决定流动方向角。不对向测量就是将两孔的对称轴固定在某一参考方向, 测量两孔的压力差, 根据校正曲线 (两孔压差与流动方向的关系) 确定流体方向。后面将对这两种测量进行详细介绍。

在三元流场中, 有时要把对向测量和不对向测量结合起来使用, 才能确定平面流向角和空间流向角。

在流动方向的测量中, 要用到用来说明方向探针原理的一些参数, 如图 5-4

所示。

图中：

c ——速度；

x, y, z ——参考轴；

α ——速度的平面流向角，即速度 c 在 xy 平面内的投影与 x 轴的夹角；

δ ——速度的空间流向角，流向偏斜角，即速度与平面 xy 的夹角；

x ——探针两侧孔的几何对称轴；

x_0 ——探针的流体动力轴线，即在没有速度梯度的平面流场中，能使两孔压力相等时的轴线；

α_c ——校正角，即探针的几何轴线 x 与 x_0 之间的夹角；

ε ——误差角，即在 xy 平面内存在速度梯度时， x_0 与真实流体方向之间的夹角。

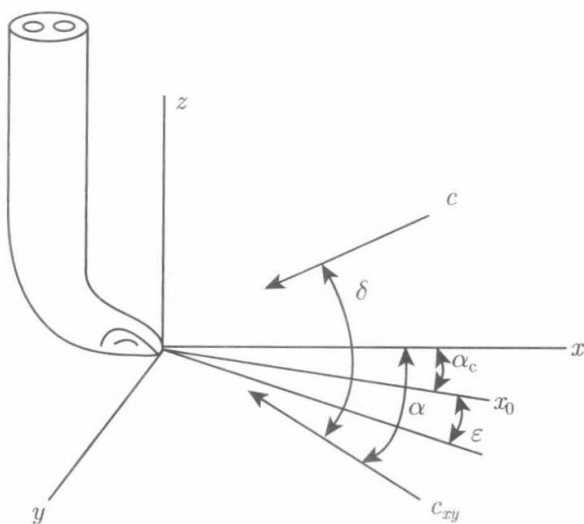


图 5-4 方向探针中的参数

对方向探针来说，灵敏度是一个很重要的指标，所谓方向探针灵敏度就是探针流体动力轴线 x_0 与流动方向偏离单位角度时，在探针两侧孔之间产生的压差的大小，可用下式表示：

$$\Delta p = \frac{d[(p_1 - p_2)/(\frac{\rho}{2}c^2)]}{d\alpha} \quad (5-5)$$

如果流向偏斜角 α 较小，探针两侧孔压差 $p_1 - p_2$ 较大，则探针的灵敏度就高。每种方向探针，都可以找到一个用来测量流动方向的压力孔的最佳位置。

从流体绕流圆柱时在圆柱表面的压力分布曲线可以推得，在 $(p_1 - p_2)/(\rho c^2/2) = 0$ 的点，当流向偏斜角有微小变化时，两侧孔之间都会引起较大的压差。

5.2.2 二维流场中流向的测量

1. 对向测量

在平面流场对向测量中,常用的方向探针有 L 形、U 形及圆柱三孔式探针。以圆柱形三孔式探针为例,其结构如图 5-5 所示,在一个圆柱形的杆上,离开端部一定距离 (一般大于 $2d$) 并在垂直于杆的轴线的同一平面上,开有三个孔,中孔用来测总压,两个侧孔以中孔为对称,并相隔 45° ,用来测量流动方向。利用圆柱形三孔式探针测量流动方向的依据是:流体绕圆柱体流动时,在圆柱表面上任意一点的压力与流速的大小和方向有关,不同流动状态对应的压力分布曲线如图 5-6 所示。图中,理论和试验压力分布曲线之间发生差异的原因是在实际流体中,沿圆柱表面会产生边界层分离。层流时,分离点发生在最小压力点 ($\alpha = 90^\circ$) 之前。而湍流时,流体的动量交换使最小压力点以后的流体边界层都不致分离。边界层的分离,使圆柱体表面的压力分布发生变化。如果分离是对称的,那么这个压力变化不会影响方向探针测量方向的精确性。从图 5-6 可以看出,在 $\alpha = 50^\circ$ 之前,沿圆柱

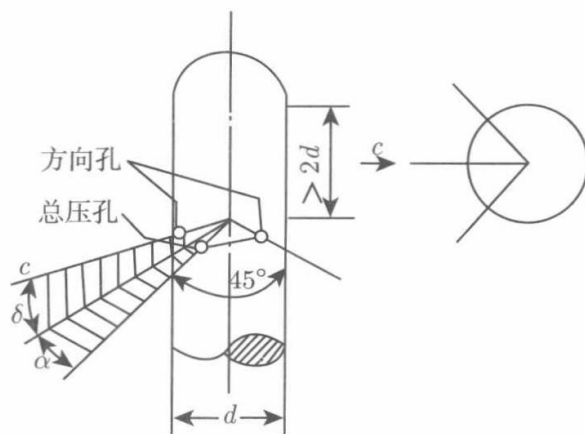


图 5-5 圆柱形三孔式探针

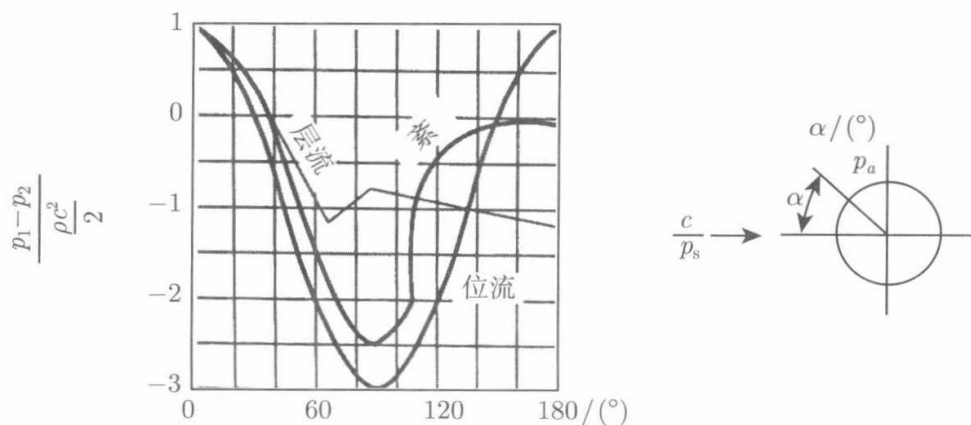


图 5-6 圆柱表面压力分布

表面的压力分布的理论曲线与试验曲线很接近。在 α 介于 $20^\circ \sim 50^\circ$ ，圆柱表面具有较大的压力梯度，所以方向孔应开在中间孔的两侧大约 45° 角的位置，这时两孔对流动方向的变化特别敏感。

为了消除探针端部对测孔的影响，测孔离端部的距离至少应为探针直径的 2 倍，图 5-7 所示的为探针头部形状和距离的影响。

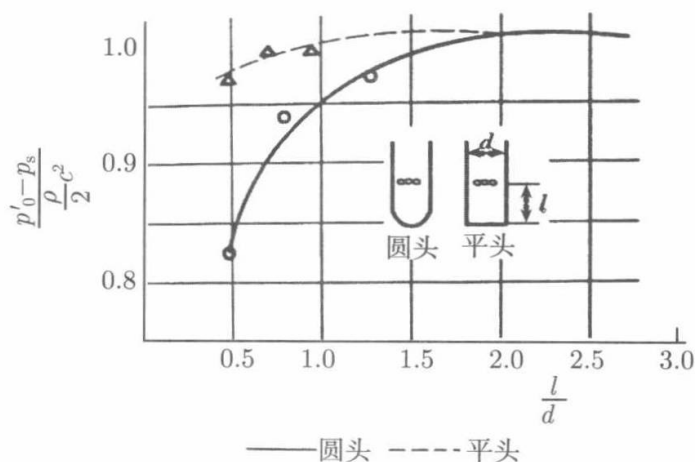


图 5-7 探针头部形状和距离对特性的影响

由于圆柱三孔探针结构简单，尺寸小（压力感受部分的圆柱直径可小至 2.5mm），使用安装方便，因此，广泛用于流体机械进出口处流体速度大小和方向的测量，它用于对向测量时，通常是把两个侧孔接到一个 U 形管压力计上，以测量两个侧孔的压差；探针中孔和其中一个侧孔接第二个压力计，以测量中孔和侧孔的压差；第三个压力计则与中孔连接，以测量中孔压力与大气压之差。当探针绕其本身轴转动，使得两侧孔压力相等时，探针中孔就对准了流向，这时，探针各孔所测的压力可以表示为以下形式：

中孔的压力为

$$p_2 = p_s + K_0 \rho c^2 / 2 \quad (5-6)$$

式中， K_0 是探针中间孔的校正系数。

侧孔压力为

$$p_1 = p_s + K_1 \rho c^2 / 2 \quad (5-7)$$

式中， K_1 是探针一个侧孔的校正系数。

中孔与侧孔压力差为

$$p_2 - p_1 = \left(p_s + \frac{K_0 \rho c^2}{2} \right) - \left(p_s + \frac{K_1 \rho c^2}{2} \right) = \frac{(K_0 - K_1) \rho c^2}{2} \quad (5-8)$$

由式 (5-6) 及式 (5-8), 得

$$p_s = p_2 - \frac{K_0}{K_0 - K_1}(p_2 - p_1) \quad (5-9)$$

将 $p_0 = p_s + \rho c^2/2$ 和式 (5-8) 代入式 (5-9), 得

$$p_0 = p_2 + (1 - K_0)(p_2 - p_1)/(K_0 - K_1) \quad (5-10)$$

流体速度的大小为

$$c = [2(p_2 - p_1)/(\rho(K_0 - K_1))]^{\frac{1}{2}} \quad (5-11)$$

因此, 只要测得中孔压力 p_2 及中孔与侧孔的压力差 $(p_2 - p_1)$, 就可以用上述公式计算流体的静压、总压和速度。式中, 压力 p 都以表压来表示, 当要求绝对压力时, 加上当地大气压 p_a 即可。 K_0 、 K_1 是探针校正系数, 由实验确定, 它们表征探针的总压和速度特性。实际上, 在选用探针时, 一般选用 $K_0=1$, 这时中孔所测压力 p_2 就是总压 p_0 。

2. 不对向测量

(1) 基本原理

在圆柱三孔式探针中, 流动方向、总压、静压和速度与三个测压孔所测出的压力有一定的函数关系, 这些关系分别为探针的方向特性、总压特性、静压特性和速度特性。这些特性也称探针的校正曲线, 它们都可在实验台上求得。

当势流横向流过绕流物体时, 圆柱体表面上任意点的流体速度为

$$c_i = -2c \sin \alpha \quad (5-12)$$

把式 (5-12) 代入势流绕圆柱体流动的伯努利方程, 有

$$\begin{cases} p_1 = p_s + [1 - 4 \sin^2(\theta + \alpha)]\rho c^2/2 \\ p_2 = p_s + [1 - 4 \sin^2 \alpha]\rho c^2/2 \\ p_3 = p_s + [1 - 4 \sin^2(\theta - \alpha)]\rho c^2/2 \end{cases} \quad (5-13)$$

将上式变换就可得到流动方向与三孔压力的函数关系:

$$\frac{p_1 - p_3}{p_2 - \frac{p_1 + p_3}{2}} = -\frac{\sin(2\theta)\operatorname{tg}(2\alpha)}{\sin^2 \theta} \quad (5-14)$$

又因 $p_s = p_0 - \frac{\rho c^2}{2}$, 将其代入式 (5-13), 并变换可得流体总压 p_0 、静压 p_s 以

及代表速度特性的 p_s/p_0 与 α 、 p_1 、 p_2 、 p_3 的函数关系:

$$\frac{p_2 - \frac{p_1 + p_3}{2}}{p_0 - \frac{p_1 + p_3}{2}} = \frac{(1 - tg^2\alpha)tg^2\theta}{tg^2\alpha + tg^2\theta} \quad (5-15)$$

$$\frac{p_2 - \frac{p_1 + p_3}{2}}{p_s - \frac{p_1 + p_3}{2}} = \frac{4\sin^2\theta}{\sec(2\alpha) - \cos(2\theta)} \quad (5-16)$$

$$\frac{p_1 + p_3}{2p_0} = 1 - 4(\sin^2\alpha \cos^2\theta + \cos^2\alpha \sin^2\theta) \left(1 - \frac{p_s}{p_0}\right) \quad (5-17)$$

当侧孔 1 和 3 与中心孔 2 的夹角 $\alpha=45^\circ$ 时, 表示方向、速度、静压和总压特性的函数式分别变为

$$(p_1 - p_3)/[p_2 - (p_1 + p_3)/2] = f_1(\alpha) \quad (5-18)$$

$$(p_1 + p_3)/2p_0 = 2p_s/p_0 - 1 = f_2(\alpha) \quad (5-19)$$

$$[p_2 - (p_1 + p_3)/2]/[p_s - (p_1 + p_3)/2] = f_3(\alpha) \quad (5-20)$$

$$[p_2 - (p_1 + p_3)/2]/[p_0 - (p_1 + p_3)/2] = f_4(\alpha) \quad (5-21)$$

流体速度较高时, 要考虑可压缩性的影响, 这时式 (5-18)~式 (5-21) 不仅是流体方向的函数, 而且与 Ma 数有关。式 (5-18)、式 (5-19)、式 (5-21) 的关系分别如图 5-8~图 5-10 所示。

(2) 测量方法

①根据圆柱形探针测孔 1、3 的压差和孔 1、2、3 的压力值, 然后由方向特性曲线 (图 5-8) 决定 α 角。

②有了 α 角和 p_1 、 p_2 、 p_3 的大小, 利用总压特性就可以求出 p_0 值。

③由已知的 p_1 、 p_3 和 p_0 值, 计算 $\frac{p_1 + p_3}{2p_0}$ 的大小, 根据这个比值和 α 角, 利用速度特性 (图 5-9) 确定 p_s/p_0 的大小, 由式 $p_s = (p_s/p_0)p_0$, 就可以求出静压 p_s 。

④根据 p_s/p_0 可以决定流体的速度系数 λ 数, Ma 和速度 c :

$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} [1 - (p_s/p_0)^{\frac{k-1}{k}}]} \quad (5-22)$$

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{k-1} [(p_s/p_0)^{\frac{k-1}{k}} - 1]} \quad (5-23)$$

$$c = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_s}{\rho_s} [(p_s/p_0)^{\frac{k-1}{k}} - 1]} \quad (5-24)$$

式中， k 为等熵指数。

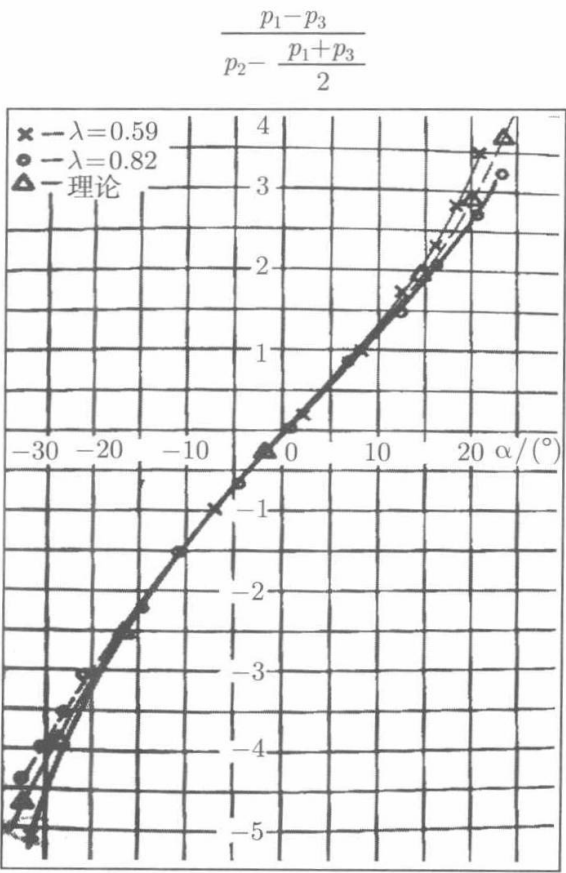


图 5-8 方向特性曲线

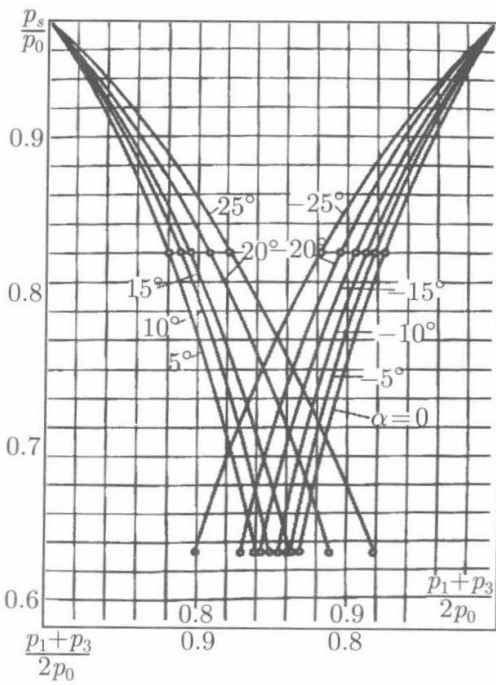


图 5-9 速度特性

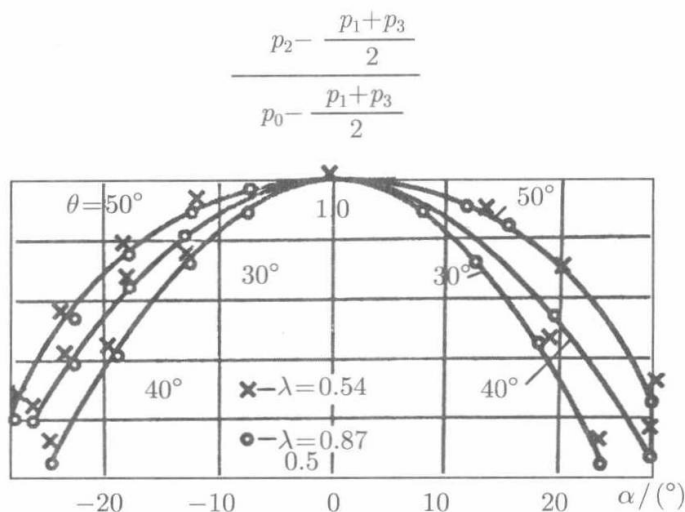


图 5-10 总压特性

(3) 速度梯度对测量的影响

在存在速度梯度的流场中, 当流动的方向与流体动力轴线一致时, 孔 1 和孔 3 所感受的压力不相等, 如果把探针转过一个角度后 1、2 两孔所感受的压力相等, 则这个角就是由于速度梯度的存在而引起的误差角。它与速度梯度的大小、两侧孔中间距离、孔径及探针的灵敏度有关。减小两侧孔中间的距离或减小孔径可以使误差角变小。但孔径过小, 探针的响应时间会增加, 这也降低了探针的灵敏度, 所以在设计探针时应当注意, 既要保持高的灵敏度, 又要使响应时间不致太长。

5.3 三维流场中流向的测量

5.3.1 测量方法

通常采用的测量方法是, 在 xy 平面内, 采用对向测量方法测出 α 角, 而在 xz 平面内, 采用不对向测量方法。根据压力孔的读数, 由校正曲线确定 δ 角的大小。

5.3.2 测量探针

三维流场流向的测量是用三元探针进行的。五孔球形探针 (five-hole spherical probe) 为常用的三元探针之一。图 5-11 所示的是测量三维流体速度最常用的五孔球形探针, 在球面上有五个孔, 中间孔用来测总压, 其他四个孔是方向孔, 也可测量静压和流动速度。如图 5-11 中表示出了探针的基本尺寸。球的直径可以在 5~10mm 之间选取, 测量孔直径为 0.5~1.0mm, 中心孔轴线与侧孔轴线夹角为 45° 。

五孔球形探针的工作原理是: 在球面上任一测量孔的指示压力与绕圆球流动的流速方向有关, 这可以由理想流体绕圆球的流动情况来说明。如图 5-12 所示, 当速度为 v , 静压为 p_s 的流体绕圆球流动时, 在圆球表面上任一点 i 的速度和压力

系数分别为

$$v_i = -\frac{3}{2}c \sin \theta_i \quad (5-25)$$

$$K_p = \frac{p_i - p_s}{\rho v^2 / 2} = 1 - \frac{9}{4} \sin^2 \theta_i \quad (5-26)$$

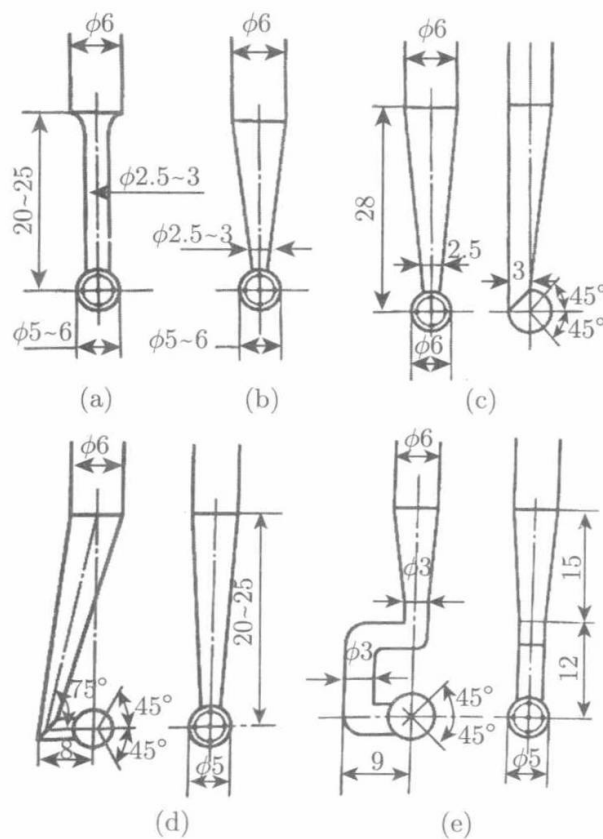


图 5-11 五孔球形探针

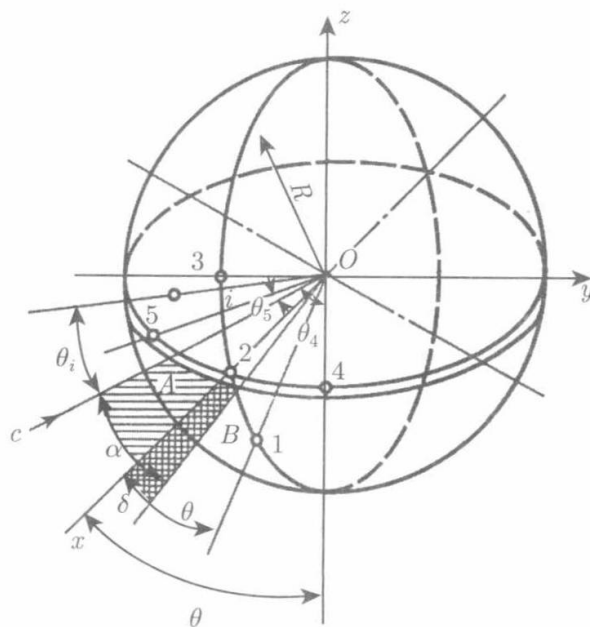


图 5-12 理想流体绕圆球流动

式中, θ_i 为流动方向与 i 点和过球心连线的夹角, 当 $\theta_i=0^\circ$ 时, i 点为 $K_p=1$ 的临界点, 当 $\theta_i=42^\circ$ 时, i 点为 $K_p=0$ 的点。实际上为提高测量方向的灵敏度, 一般取 $\theta_i=45^\circ$ 。

从图 5-13 所示的沿圆球表面的压力分布曲线也可看出 θ 角对流动方向敏感性的影响。理论上在 $\theta=45^\circ$ 时敏感性最强, 而试验表明 $\theta=50^\circ$ 时敏感性最强, 这个偏差与随 Re 的变化而变化的边界层分离点的位置有关。

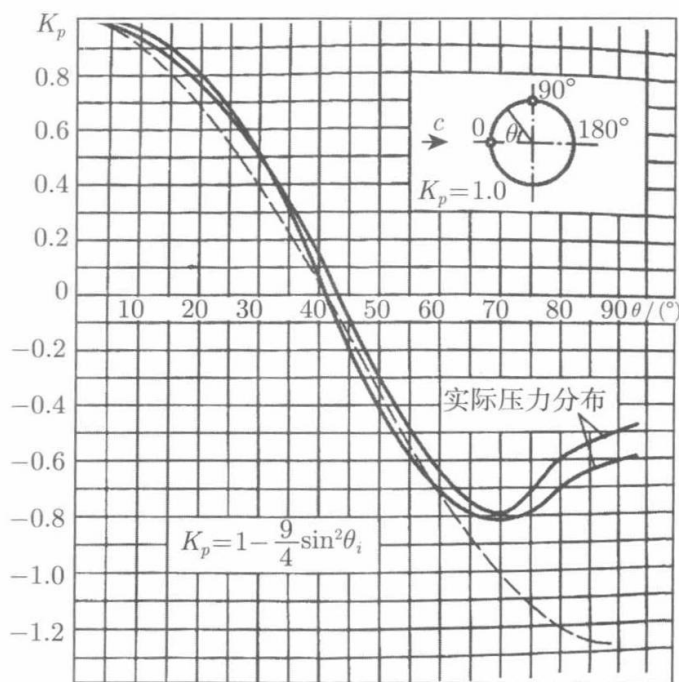


图 5-13 压力分布曲线

利用五孔探针测量流动方向角 α 和流体总压 p_0 时, 可在 xy 平面内转动探针测得, 而空间流动角 δ 、静压 p_s 和速度 c 则可由 1、2、3、4 孔的压力关系及图 5-14 所示的探针的校正曲线求出。

根据理想流体绕圆柱流动的伯努利方程:

$$\begin{aligned}
 p_1 &= p_s + \frac{\rho c^2}{2} \left[1 - \left(\frac{c_1}{c} \right)^2 \right] = p_s + K_1 \frac{\rho c^2}{2} \\
 p_2 &= p_s + \frac{\rho c^2}{2} \left[1 - \left(\frac{c_2}{c} \right)^2 \right] = p_s + K_2 \frac{\rho c^2}{2} \\
 p_3 &= p_s + \frac{\rho c^2}{2} \left[1 - \left(\frac{c_3}{c} \right)^2 \right] = p_s + K_3 \frac{\rho c^2}{2} \\
 p_4 &= p_s + \frac{\rho c^2}{2} \left[1 - \left(\frac{c_4}{c} \right)^2 \right] = p_s + K_4 \frac{\rho c^2}{2}
 \end{aligned} \tag{5-27}$$

得出

$$\begin{aligned} p_3 - p_1 &= (K_3 - K_1) \frac{\rho}{2} c^2 \\ p_2 - p_4 &= (K_2 - K_4) \frac{\rho}{2} c^2 \\ K_\delta &= \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_4} \end{aligned} \quad (5-28)$$

进而得

$$\begin{aligned} K_3 - K_1 &= \frac{p_3 - p_1}{p_0 - p_s} \\ K_2 - K_4 &= \frac{p_2 - p_4}{p_0 - p_s} \\ K_2 &= \frac{p_2 - p_s}{p_0 - p_s} \end{aligned}$$

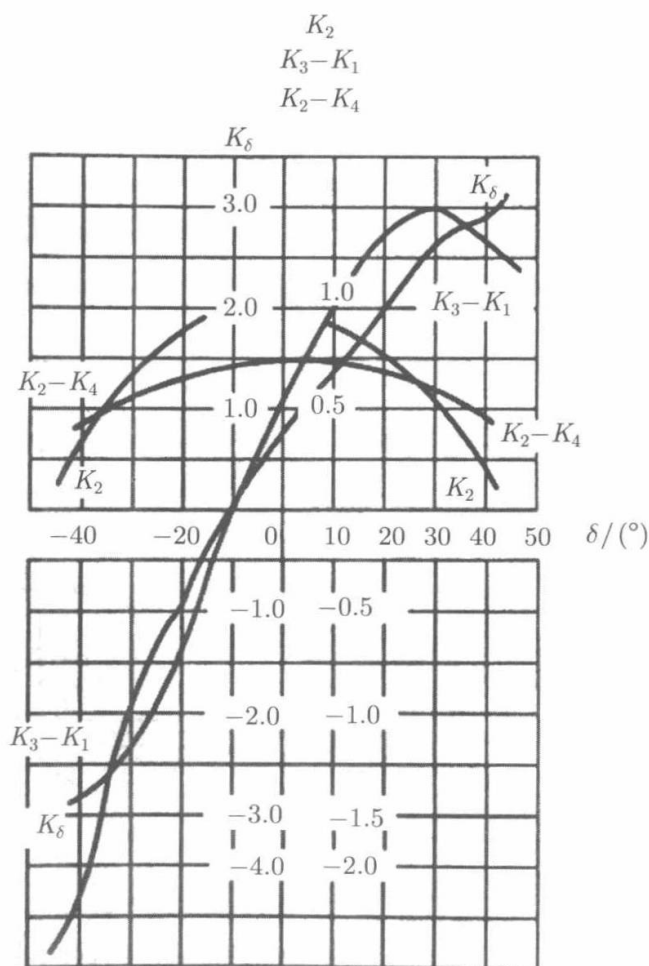


图 5-14 五孔球形探针校正曲线

上述的 K_δ 、 K_2 、 $(K_3 - K_1)$ 及 $(K_2 - K_4)$ 均与 δ 角有关。在校正试验台上首先确定 $K_\delta = f(\delta)$ 、 $K_2 = f(\delta)$ 、 $(K_3 - K_1) = f(\delta)$ 和 $(K_2 - K_4) = f(\delta)$ 等关系，试

验时根据压力计在 1、2、3、4 孔所测得的压力 p_1 、 p_2 、 p_3 及 p_4 的值, 按式 (5-28) 计算出 K_δ 值, 因而利用 $K_\delta = f(\delta)$ 的曲线, 就可找到空间流动方向角 δ , 再由相应的曲线查得 $(K_3 - K_1)$ 、 K_2 和 $(K_2 - K_4)$, 然后利用下述公式决定速度 c 和静压 p_s :

$$c = \left[\frac{2(p_3 - p_1)}{\rho(K_3 - K_1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5-29)$$

或

$$c = \left[\frac{2(p_2 - p_4)}{\rho(K_2 - K_4)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$p_s = p_2 - K_2 \frac{p_2 - p_4}{K_2 - K_4} \quad (5-30)$$

测量三元流场中的流向时, 还可以采用七孔球形探针, 其结构如图 5-15 所示。与五孔探针一样, 七孔探针也是应用流体绕流球体的特性来测量空间流场的流动参数。在 $\phi 6$ 的球面上开设 7 个 $\phi 0.5$ 的感压孔, 4、2、6 三个孔在探针纵剖面上, 2 孔在球头端部; 1、3、5、7 四个孔分别与中心孔 2 成 45° 。七孔探针相对于五孔探针的最大改进是可以使 α 角范围大大增加。从原理上 α 角的范围可以达到 $-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ$, 但由于探针支杆对 6 个孔的影响, 以及校准时所用的风洞与探针支杆的位置对所能校得的 α 角的限制, 最终 α 角的测量范围为 $-60^\circ \leq \alpha \leq +75^\circ$, 可测角度达到了 135° 。

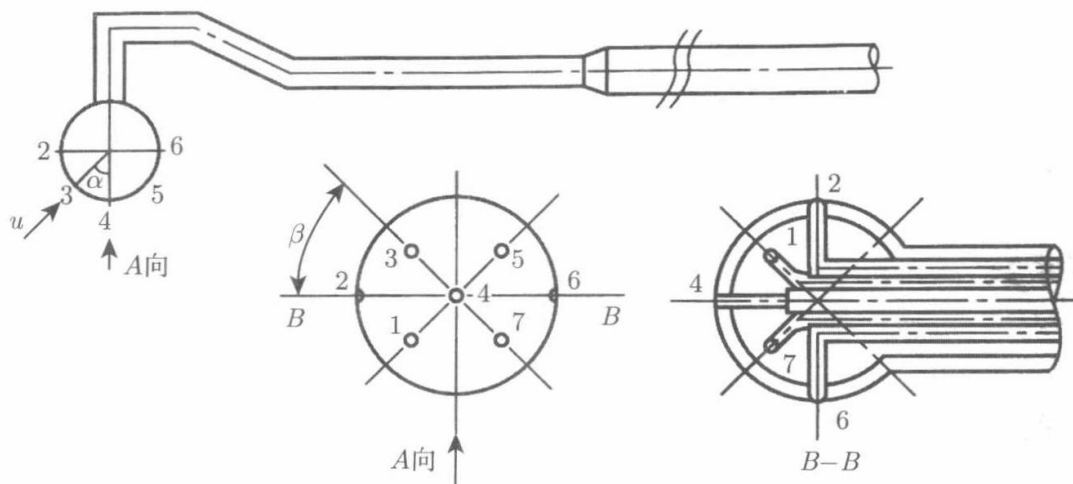


图 5-15 七孔球形探针

根据流体绕流球体理论, 在球面与驻点夹角 $> 45^\circ$ 时, 球面点压力分布将受 Re 的影响, 当与驻点夹角 $< 45^\circ$ 时, 实际压力分布近似与理论压力分布相同。所以七孔探针在使用时, 可以看成是三个分区使用的球面多孔测压管。当 α 角在 $-45^\circ \sim +45^\circ$ 范围内时, 可采用中间的 (1, 3, 4, 5, 7) 五个孔, 当 α 角在

Images have been losslessly embedded. Information about the original file can be found in PDF attachments. Some stats (more in the PDF attachments):

```
{
  "filename": "MTQyMDczMTVf6lO95rqQ5LiO5Yqo5Yqb5bel56iL5rWL6K+V5oqA5pyvLnppcA==",
  "filename_decoded": "14207315_\u80fd\u6e90\u4e0e\u52a8\u529b\u5de5\u7a0b\u6d4b\u8bd5\u6280\u672f.zip",
  "filesize": 28176558,
  "md5": "d8dde231a59f463c612ab3874b92aec5",
  "header_md5": "9c2619825408a90e7b4ede7d8b87f696",
  "sha1": "dd07e3bfa772523781cd314f224c2a630051ac6a",
  "sha256": "f0abeeb4f59944df60512ee1526b8ef6e710ac275c30db912c1b3729731ac2b9",
  "crc32": 2362938042,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 33123570,
  "pdg_dir_name": "14207315_\u2500\u2584\u2558\u2524\u2559\u03b4\u2562\u00bb\u2534\u00aa\u2563\u00f1\u2502\u2560\u2593\u0393\u2569\u2558\u255d\u255d\u2569\u2321",
  "pdg_main_pages_found": 106,
  "pdg_main_pages_max": 106,
  "total_pages": 116,
  "total_pixels": 613225050,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```