

核反应堆仪表

钱承耀 主编



西安交通大学出版社

□ 责任编辑 / 杨鸿森 □ 封面设计 / 伍胜

ISBN 7-5605-1167-8



9 787560 511672 >



ISBN 7-5605-1167-8/TL · 2

定价: 18.00 元

核反应堆仪表

钱承耀 主编
赵福宇 顾兆林 编

西安交通大学出版社
·西安·

内 容 提 要

本书系统地介绍了核反应堆的各类仪表的原理、结构、性能、使用要求和操作方法。而且针对我国核电事业发展的需要,较详细地叙述了压水核反应堆仪表系统,同时介绍了智能仪表和数字计算机在核反应堆中的应用。

本书为核动力工程专业的大学生教材,亦可供有关专业师生及从事核动力工程和核电厂仪表研究、设计、操作的工程技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

图书在版编目(CIP)数据

核反应堆仪表/钱承耀等编. —西安:西安交通大学出版社,1999.8
ISBN 7-5605-1167-8

I. 核… II. 钱… III. 反应堆-仪表 IV. TL421

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 39823 号

*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路 28 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668316)

西安华宇印刷厂印装

各地新华书店经销

*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:14.625 字数:351 千字

1999 年 10 月第 1 版 1999 年 10 月第 1 次印刷

印数:0 001~1 000 定价:18.00 元

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874

前 言

开发新能源是人类生存与发展的需要,也是社会经济发展的需要。太阳能、潮汐能、风能和地热能,目前虽然经过研究试验已开始应用,但要大规模地用于工业还受到很多条件的限制。现在,比较成熟并已在工业上得到大规模应用的是核能。而核反应堆仪表又是影响核能事业发展的一个重要方面。

本书以大学本科生的讲义《核电站仪表》为基础,结合从事检测技术研究以及为大亚湾核电站进行核电技术人员培训的多年经验,描述了各类核反应堆的仪表系统,介绍了核反应堆的各类仪表的原理、结构、性能、使用要求和操作方法,并针对我国核电事业发展的需要,较详细地叙述了压水核反应堆仪表系统,同时介绍了智能仪表和数字计算机在核反应堆中的应用。全书侧重于核检测仪表的原理及其使用技术的系统介绍。在重点阐述核检测仪表原理的同时,对核反应堆的过程参数检测仪表的工作原理与性能的介绍仍留有相当的篇幅。全书共 13 章,第 1 章绪论;第 2 章测量基本概念;第 3 章到第 6 章核检测仪表;第 7 章到第 12 章核反应堆过程参数检测仪表;第 13 章智能仪表和数字计算机在核反应堆中的应用。本书在内容上注意反映国外新发展起来的一些核反应堆仪表,尽量做到与国内的实际情况相结合。

本书为核动力工程专业的大学生教材,亦可供有关专业师生及从事核动力工程和核电厂仪表研究、设计、运行的工程技术人员参考。

本书由西安交通大学能源与动力工程学院核能与热能工程系钱承耀教授主编并编写第 1 章、第 3~6 章、第 9~13 章,由核能与热能工程系赵福宇副教授编写第 2 章,由化工学院顾兆林副教授编写第 7~8 章。

本书在编写过程中得到了西安交通大学教务处和西安交通大学能源与动力工程学院领导的关心和大力支持。全书由刘文江教授和李崇祥副教授主审,提出了非常宝贵的意见。值此,深表诚挚的谢意!并向曾经帮助过编者的老师,同事和同学们表示衷心的感谢!

在编辑和出版过程中,西安交通大学出版社杨鸿森教授提出不少修改意见,编者在此一并表示感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,谨请读者批评指正。

编者

1998 年 10 月于西安交通大学

目 录

前 言

第 1 章 绪 论

- 1.1 核反应堆仪表的职能 1
- 1.2 自动检测的参数 2
- 1.3 核反应堆的仪表及系统 2

第 2 章 测量的基本概念

- 2.1 测量仪表的组成 5
- 2.2 测量仪表的性能指标 6
- 2.3 测量单位 10

第 3 章 堆芯外核检测仪表及系统

- 3.1 堆芯外的定义 14
- 3.2 核反应堆功率的测量 14
- 3.3 中子探测仪表 15
- 3.4 反应堆堆芯外核检测仪表系统 22
- 3.5 压水堆堆芯外核检测仪表系统 32
- 3.6 快堆堆芯外核检测仪表 33

第 4 章 堆芯内中子通量检测仪表及系统

- 4.1 核反应堆堆芯内的环境 35
- 4.2 核反应堆堆芯内中子通量检测仪表系统 36
- 4.3 压水堆堆芯内中子通量检测仪表系统 48

第 5 章 核辐射剂量监测仪表

- 5.1 核辐射剂量监测方法和仪表 54
- 5.2 核电厂的辐射剂量监测 64

第 6 章 射线探测器与放大器的连接

- 6.1 电压型放大连接方式 71
- 6.2 电流型放大连接方式 72

6.3	电压-电流型放大连接方式	73
第 7 章 温度检测仪表		
7.1	热电偶温度计	76
7.2	电阻温度计	113
第 8 章 压力和压差检测仪表		
8.1	基本概念	126
8.2	常用弹性元件和弹性式压力和压差仪表	127
8.3	压力和压差变送器	134
第 9 章 流量检测仪表		
9.1	流量检测仪表的种类	143
9.2	差压流量计	145
9.3	涡轮流量计	160
9.4	弯管流量计	163
9.5	电磁流量计	164
9.6	压水堆主冷却剂流量测量方法和原理	167
9.7	核电厂主蒸汽流量测量方法和原理	168
第 10 章 液位检测仪表		
10.1	差压式液位检测仪表	170
10.2	超声波液位检测仪表	173
10.3	涡流式液位检测仪表	174
10.4	霍尔液位计	175
10.5	电阻式液位检测仪表	176
10.6	液位检测的参考水柱方法	177
10.7	液位检测的内参考管和外参考管方法	178
10.8	液位检测的参考差压计法	180
第 11 章 位置检测仪表		
11.1	概述	181
11.2	应变式位移检测仪表	182
11.3	差动变压器式位移检测仪表	183
11.4	电感式位移检测仪表	186
11.5	涡流型位移检测仪表	188
11.6	LVDT 接触式位移传感器	190
11.7	LVDT 接触式角位移传感器	192

第 12 章 振动检测仪表	
12.1 概述·····	193
12.2 核反应堆主泵振动测量·····	196
第 13 章 智能仪表和计算机在核反应堆中的应用	
13.1 智能仪表·····	199
13.2 过程计算机系统·····	212

主要参考文献

第 1 章 绪 论

1.1 核反应堆仪表的职能

核反应堆仪表是用来检测象中子通量、 γ 射线通量、压力、温度、位移、应变、流量以及液位等一些参数的。但根据在什么地方使用和如何使用的区别,可以把核反应堆仪表的应用划分为 4 个大的范畴:1. 动力堆的控制和保护;2. 材料试验堆的实验;3. 核反应堆瞬态实验;4. 核动力的空间应用。

1.1.1 核动力堆的应用

对于核动力堆,其运行人员必须具有足够的信息来安全和经济地控制核反应堆,这意味着必须用核反应堆仪表检测出一定的参数,例如核反应堆总功率、冷却剂入口温度、冷却剂出口温度、系统压力、冷却剂总流量以及部件振动、反应性振荡以及燃料元件表面上或者冷却剂通道内部的沉淀物等等。一般来说,核动力堆用的仪表特别是堆芯仪表的最小使用寿命必须等于两次换料停堆之间的时间间隔。因此堆芯温度、压力、流量、应变、位移、中子通量以及液位敏感元件对于核动力堆来说是必不可少的。

1.1.2 材料试验堆实验的应用

材料试验堆中所进行的实验往往是以安装在试验管内的仪表得到益处,这个试验管插在堆芯里面或者在堆芯附近的高通量区域。在这样试验管中的通量水平和温度往往要比核动力堆高得多,因为进行大多数实验是为了得到设计更先进的动力堆必需的数据。通常这些试验管只有非常有限的空间,因此材料试验堆使用的仪表要求是非常高的。裂变气体压力、燃料的膨胀以及包壳应变的测量是必不可少的,因此在材料试验堆中广泛使用堆芯压力、应变、位移、流量和中子通量等检测仪表。

1.1.3 核反应堆瞬态实验的应用

核反应堆瞬态实验应用的仪表均是快响应的堆芯温度、压力、流量、应变、位移和中子通量等检测仪表。

1.1.4 核动力的空间应用

外层空间推进动力和辅助能源核反应堆(简称空间堆)的最近发展提出了新的堆芯仪表的设计问题,这些仪表(包括敏感元件和读数装置)必须经受得住外层空间环境的考验。

1.2 自动检测的参数

核链式反应产生热量和核辐射,因此,核动力堆的检测仪表的主要部分是热敏感元件和核辐射敏感元件。我们知道,虽然在裂变过程中会产生好几种核辐射,但只有中子才可能与裂变事件有单值关系,所以中子敏感元件是最重要的核辐射敏感元件。

业已知道,冷却剂在核反应堆运行和将核能转化成电能的运行过程中起了极其重要的作用,因此,必须用合适的敏感元件对它进行监测,从而决定下列一些主要参数:1. 进入核反应堆的冷却剂温度;2. 离开核反应堆的冷却剂温度;3. 核反应堆内其他位置上的冷却剂温度;4. 进入和流出核反应堆的冷却剂流量;5. 核反应堆内各个冷却管道中冷却剂的流速;6. 离开核反应堆后的冷却剂的放射性强度;7. 冷却剂的纯度;8. 当冷却剂为气体时,其中水蒸汽的含量;9. 控制棒的位置;10. 慢化剂的水位;11. 核反应堆内的水位;12. 一回路系统中的压力;13. 冷却剂出口处的压力;14. 慢化剂的温度。为了自动检测这些参数,必须有温度传感器、流量计、湿度探测器、核辐射敏感元件、位置指示器、压力传感器等。

1.3 核反应堆的仪表及系统

为了使核反应堆和核电厂能正常运行,必须对上述的各种重要参数进行检测,由于核反应堆具有放射性这个特殊问题,人不能靠近检测点,而且核反应堆有些设备包围在厚厚的防护层里边,因此,运用自动化仪表就显得更加重要。

检测仪表只能反映核反应堆和核电厂的运行工况,要使核电厂和核反应堆在给定功率下正常运行还必须有调节仪表和执行仪表。如图 1-1 和图 1-2 分别为压水反应堆和钠冷反应堆测点布置及控制系统的示意图。

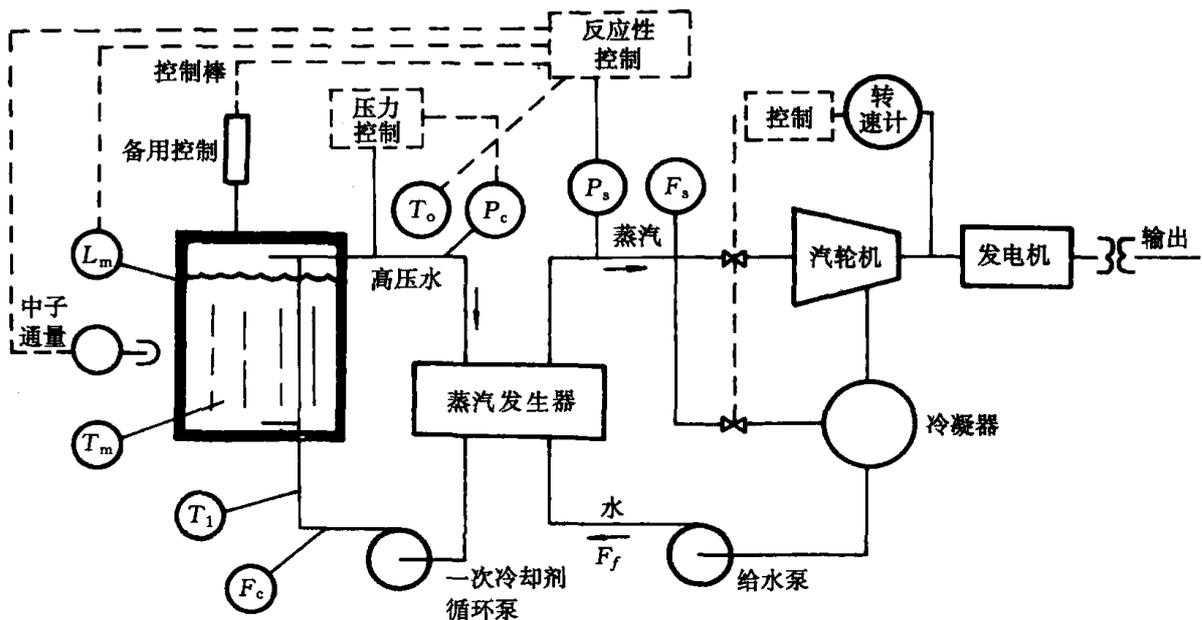


图 1-1 压水反应堆

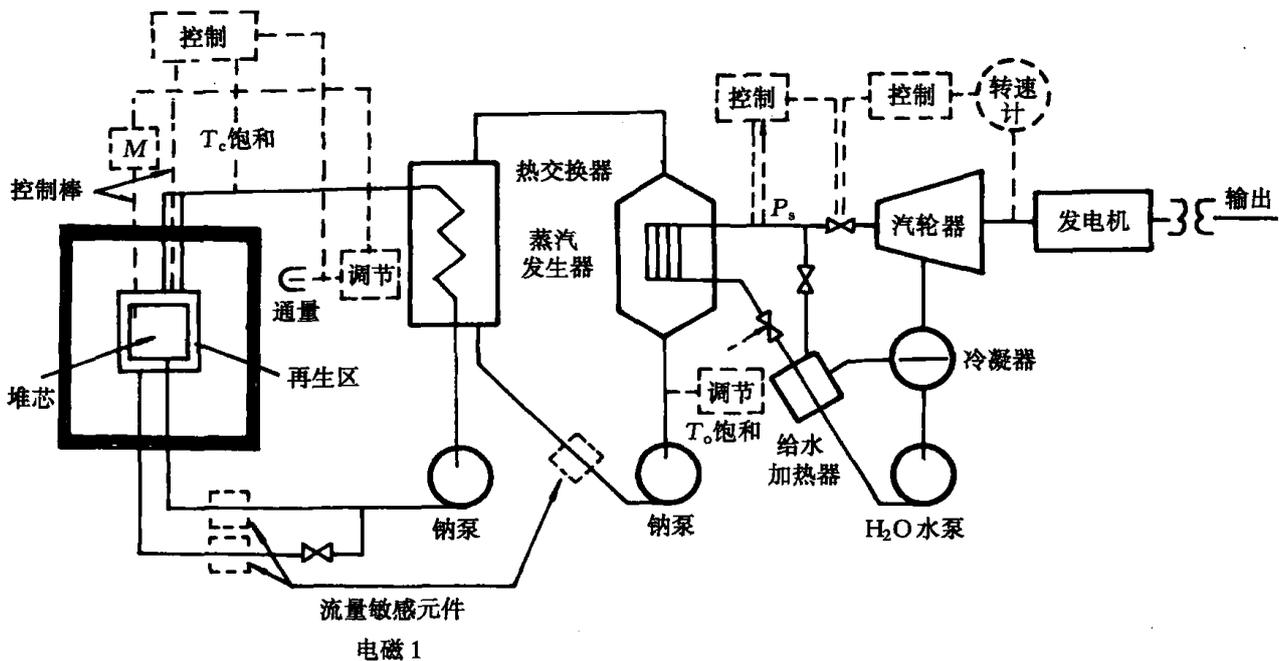


图 1-2 钠冷反应堆

图中 T_1 为进入反应堆的冷却剂温度； T_0 为离开反应堆的冷却剂的温度； F_c 为进入和流出反应堆的冷却剂流量； T_m 为反应堆内慢化剂温度； L_m 为反应堆内慢化剂的水位； P_c 为冷却剂出口处的压力； P_s 为蒸汽压力； F_s 为蒸汽流量； F_f 为给水流量。

检测仪表相当于自动化装置的“眼睛”。若没有来自检测仪表的信号，自动化装置就好比瞎子一样，无法进行操作和控制，更谈不上实现自动化，另一方面，若检测仪表的可靠性差，即使控制装置的精度和可靠性再高，也无意义。因此，必须大力发展检测仪表，提高变送器的可靠性、稳定性和灵敏度。

总之，要保证核反应堆的正常运行，既要有可靠性好、稳定性好、灵敏度高的检测仪表，又要有精度高、可靠性好的调节仪表和执行仪表。

但是，实际的核反应堆和核电厂是一个复杂的多变量相互影响的控制对象。对于一个典型的压水堆核电厂来说，主要有 5 个控制系统：1. 核反应堆功率调节系统；2. 蒸汽排放控制系统；3. 稳压器压力和水位调节系统；4. 蒸汽发生器给水调节系统；5. 汽轮机调速系统。由此可见，在设计这种控制调节系统时，单考虑哪一个系统都是不合适的，必须同时考虑这些系统相互间的影响。在现代有高阶混合式模拟计算机和大型数字计算机的情况下，做到这一点是不困难的。

核电厂除了一、二回路系统以外，还有化学与容积控制系统、硼回收系统等辅助系统，都要有其控制调节系统，都是保证核电厂正常运行和安全必不可少的，前提还是要有高质量的检测仪表、调节仪表和执行仪表。

为了监视核反应堆以及核电厂的核反应堆从释热到发电的整个工艺过程，并为控制调节系统，保护系统输送信号，以确保核反应堆和核电厂安全可靠的运行，核反应堆和核电厂必须要有完整的仪表系统，其主要仪表系统有：1. 核检测系统：包括核反应堆堆外核检测系统和核

反应堆堆芯内中子通量检测系统;2. 过程参数检测系统:包括温度、压力、流量、液位及其他过程参数检测仪表,亦有化学、机械位移以及电量检测仪表;3. 控制棒位置指示系统:包括长棒、短棒以及停堆棒的位置指示系统;4. 控制调节和执行系统:包括调节仪表和执行仪表。

本书着重讨论核反应堆检测仪表及系统。

第 2 章 测量的基本概念

2.1 测量仪表的组成

所谓测量,就是用实验的方法和专门的设备,把要定量的参数(称为被测量)与定义其数值为 1 的同类量(称为测量单位)进行比较,求取二者比值,从而得到被测量的量值(比值乘单位)。设被测量为 x ,其单位为 U_x ,二者的比值为 a ,即 $x/U_x \approx a$ 。所以,被测参数的量值为

$$x \approx aU_x \quad (2-1)$$

式中不用等号是考虑到测量结果 aU_x 有误差,只能近似等于被测量 x 。通常称式(2-1)为测量的基本方程式。

无论简单测量仪表还是复杂测量仪表,就其部件在处理被测量的功能而言,可看成由传感器、变换器和显示装置三个环节组成,它们之间用信号线路或信号管路联系起来。各环节可以分成许多部件,也可以组合在一个整体中。对一些简单仪器,上述环节的界线可能不易明确划分。

2.1.1 传感器

传感器的作用是感受被测量的大小后输出一个相应的信号。它是仪表与被测对象直接发生联系的部分。因为传感器从对象提取被测量的信息,向以后各环节提供原始信号,所以它能否准确地快速给出信号,很大程度上决定了整个仪表的测量质量。对传感器的要求如下:

1. 按被测量的大小,传感器相应发生一个可观测的参数变化作为输出,且此输出与输入之间有稳定的单值函数关系。
2. 非被测量对传感器作用时,对输出的影响应小得可以忽略。所以在寻求传感器所依据的物理现象时,总是希望此现象对被测量的反应特别灵敏,对其它参数的作用反应很小,以致可以忽略。若不能忽略,则应能对影响采取补偿、修正等措施。
3. 在测量过程中,传感器应尽量少地消耗被测对象的能量,并且对于对象的状态没有干扰或干扰极小。非接触测量仪表的传感器能满足这一要求。

2.1.2 变换器

为了将传感器的输出进行远距离传送、放大、线性化或变成统一信号等,需要用变换器来对传感器的输出作必要的加工处理。如压力表中的杠杆齿轮机构就是将弹性元件的小变形转换成指针在标尺上的转动;节流式流量计中装置开方器以得到线性化输出;电动单元组合仪表的毫伏变送器可将热电势转换成 $0 \sim 10\text{mA}$ 的信号等,这些都是变换器的例子。变换器处理输入信号时,应该使信号损失最小,也就是使误差最小。有时变换器就是传感器,例如压力测量中的位移变换器,在测量距离和位移时就是传感器了。

2.1.3 显示装置

显示装置的作用是向观察者显示被测参数的数值和量值。显示可以是瞬时量指示,累积量指示,越限或极限指示(报警),也可以是相应的记录。有时甚至带调节功能去控制生产过程。显示装置(仪表)也称为二次仪表。

由于显示装置是人和仪表联系的主要环节,因此,它的结构应使使用者便于读出数据,并能防止读者的主观误差,数字显示一般就比模拟显示易于减小读数的主观误差。

显示装置有模拟式、数字式和屏幕式3种:

1. 模拟式显示:最常见的结构是指示器(指针)在标尺上移动,连续指示被测量。一般说这是按主观方式读数,读数的最低位总是由读数者估计。模拟显示设备结构简单,价格低廉,目前还是主要的显示形式。记录时则是以曲线形式给出数据。

2. 数字式显示:直接以数字给出被测量值,所以不会有视差。记录时亦可打印出数据。由于这种显示的明显优点,在测量中应用越来越多。但是这种显示的直观形象性较差。

3. 屏幕式显示:这是电视技术在测量显示上的应用,是目前最先进的显示方式。它既能按模拟式给出曲线,也能给出数字,或两者同时显示。屏幕式显示具有形象性和易于读数的优点,并能同时在屏幕上显示大量数据(一种参数或数种参数),有利于比较判断。

2.1.4 传输通道

仪表各环节的输入和输出信号之间的联系要经过传输通道,传输通道可以是导线、管道、光导管或无线电通讯等形式。信号传输通道比较简单,所以往往被人们忽视。实际上,不按规定要求布置和选择传输通道而造成信号失真、信号损失和引入干扰的例子是很多的,严重时根本无法进行测量,例如传输电量时,如果导线的阻抗不匹配,可能导致仪表灵敏度降低,电压或电流信号失真,甚至信号送不进仪表里去。

2.2 测量仪表的性能指标

为了比较和评价仪表优劣,提出一系列反映测量仪表性能的质量指标,如量程、基本误差、精度等级、灵敏度、回差、响应时间、分辨率、可靠性等。工业测量中,单位测量值的误差就是用仪表的精度等级来估计的。因此很有必要了解仪表的性能指标。

用户关心的测量仪表性能大体有如下几方面:

1. 计量方面的特性,如精度等级、分辨率、响应时间、复现性、灵敏度、可靠性等。它们直接影响测量结果的准确性和精密性;

2. 使用操作方便与否,自动化程度如何;

3. 抗干扰能力的强弱,即当使用条件不符合规定的条件时,由于这种偏离对仪表测量特性影响的大小;

4. 防护能力(可靠性和耐用性)的强弱。即机械特性,如对于振动、撞击、加速度和挤压等的承受能力;电气特性,如耐击穿电压、绝缘水平、抗电气干扰的能力、防辐射、防强磁场等;一般大气环境的防护,如灰尘、潮湿、腐蚀、霉蛀和温度波动等;防爆性能,如使用在易燃、易爆场合能否保证安全;

5. 消耗能量情况,即仪表在使用中消耗能量的大小,特别是消耗被测对象的能量应予重视,它直接影响到测量的精确性。

对于研制仪表的部门来说,对上述测量仪表的性能都应加以考虑,力求满足用户的要求。当然在不同使用情况下和不同环境下,对某些要求应严格,而对另一些要求可降低标准或不予考虑。总之,要根据确定的条件,对仪表产品逐项试验鉴定。还要对样机或抽样检查仪表进行长期考验和破坏性试验。但是,在用户方面,并不需要如此,只是在选用仪表时要对反映仪表各方面性能的质量指标进行试验考查,选用最能满足使用要求的仪表。在选用仪表时,反对不管场合需要,盲目追求高、精、尖仪表,应该是考虑到投资要少、维护工作量要少、操作简单、使用方便又能满足测量要求,这才是良好的选择。

用户在使用仪表的过程中,应该定期检定仪表的某些性能。一般是对计量方面的指标进行检查,看是否还符合规定的技术条件,同时也进行测量结果的校正和仪表的调整、检修和决定是否报废及更新等各项工作。

需要指出的是,仪表的性能质量指标并不能完全代表测量结果的质量,也就是说,一块高质量的仪表,如使用不当,会得出不精确的测量结果。

2.2.1 量程

测量仪表能测量的最大输入量和最小输入量之间的范围称为测量仪表的量程或称为测量范围。由指示型仪表刻度盘上的终值和起始值所限定的范围称为示值范围或刻度范围。量程和刻度范围相比多了个允许误差。

在选用仪表时首先要对被测量值有一大致的估计,务使被测量值在仪表量程之内(最好落在三分之二的量程附近),因为在测量过程中,一旦测量值超过仪表的量程,其后果可能使仪表遭受损坏,或使仪表的精度降低。

2.2.2 仪表的基本误差

测量仪表的误差有以下几种表示方法:

1. 示值绝对误差

仪表的指示值(或称示值) x 与被测量的实际值(通常由标准表或标准物质提供的约定真值) x_0 之间的代数差值称为示值的绝对误差 δ ,即

$$\delta = x - x_0 \quad (2-2)$$

2. 示值的相对误差

示值的绝对误差与被测量的实际值之比,称为示值的相对误差 γ ,常用百分数表示,即

$$\gamma = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

相对误差比绝对误差更能反映测量的精确性。

3. 示值的引用误差

示值的绝对误差与该仪表的量程上限(当量程下限为零时)或量程范围之比,以百分数表示,即

$$\gamma_m = \frac{\delta}{A_m} \times 100\% = \frac{x - x_0}{A_m} \times 100\% \quad (2-4)$$

以上所述三种表示方法对每个刻度来说都有不同的数值,不能反映整个仪表精确性方面的质量,综合三种表示方法得出基本误差的表示方法。

4. 仪表的基本误差

在规定的条件下(所有影响量在规定值及其允许的偏差范围内),将仪表的示值和标准表的示值相比较,当被测量平衡地增加和减少的过程中,在仪表全量程取得的诸示值的引用误差中的最大者,称为仪表的基本误差。即

$$R_m = \frac{|\delta|_{\max}}{A_m} \times 100\% = \frac{|x - x_0|_{\max}}{A_m} \times 100\% \quad (2-5)$$

测量仪表的基本误差是表示测量仪表性能的主要指标。

2.2.3 仪表的精度等级

根据仪表设计、制造的质量,出厂的仪表都保证基本误差不超过某一规定值,此规定值叫做允许误差。允许误差(相对值)去掉百分号后的数字便是精度等级。在仪表盘上均注有精度等级。一般工业仪表的精度等级应符合国家系列(0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4等等)。仪表的精度等级加上百分号后就是仪表的允许误差,如0.5级表示,允许误差为0.5%。一个合格仪表,其基本误差应小于或等于允许误差。用户不能按自己检定的基本误差随意给仪表升级使用,但在某种情况下可降级使用。

2.3.4 仪表的变差、附加误差和修正值

1. 仪表的变差

在环境条件符合规定时,令被测量逐渐增加和逐渐减少(或者从不同方向使示值逐渐趋于同一刻度),对仪表的同一示值,上述两次被测量实际值之差,称为示值变差(或称升降变差、来回变差、回差) Δv ,即

$$\Delta v = |x''_0 - x'_0| \quad (2-6)$$

式中 x'_0, x''_0 ——分别为被测量平稳增加或减少时测得的实际值。

仪表的变差小于允许误差则此表合格。

2. 附加误差

当仪表在同一示值时,在技术条件规定的正常条件下和非正常条件下,所对应的被测量实际之差称为附加误差。

3. 修正值

为了得到被测量的实际值 x_0 而应加到仪表示值 x 上的另一个数值 C ,称作修正值(或更正值、校正值),修正值与示值的绝对误差数值相等,符号相反,即

$$C = -\delta = x_0 - x \quad (2-7)$$

试验用标准仪表常附带有修正曲线 $C = f(x)$,或示值修正表。

2.2.5 仪表的灵敏度和分辨力

灵敏度是衡量仪表性能质量的重要指标之一。通常定义为输入变化引起的输出变化 Δl 对输入变化 Δx 之比值,以 S 表示。则

$$S = \frac{\Delta l}{\Delta x} \quad (2-8)$$

式中 Δl 可以是指针的直线位移量或转角大小,或者是数码显示中的数字变化,或者是屏幕显示中的数字变化。

仪表的灵敏度高则示值的位数可以增加,但应注意灵敏度与其允许误差要相适应,过多的位数是提高不了测量精确度的。

仪表的分辨力也是仪表的重要指标之一,它表明仪表响应输入量微小的能力,也称为鉴别力。分辨力不足将引起分辨误差,即在被测量变化到某一定值时,示值仍不变,这个误差也常称为不灵敏区(死区)。

为了定量说明分辨力,常用分辨率(或鉴别阈)的概念:引起仪表示值可见变化的被测量的最小变化。这样定义使确定分辨率的数量比较困难,因为发现仪表指示器的略微变化与操作者有关。

2.2.6 测量仪表的动态特性

动态特性是指仪表示值跟随被测量随时间变化的能力,一般用被测量初始值为零作单位阶跃变化时,仪表示值随时间变化所显示的时间特性来评价。1. 上升时间:示值从稳态值的5%变到95%所需的时间;2. 响应时间:示值从开始变化到进入稳态值加减基本允许误差范围内所需时间;3. 过冲量:示值最大振幅与稳态值之差对稳态值的百分数。

2.2.7 测量仪表的可靠性

测量仪表的可靠性是指在规定工作条件和工作时间内,测量仪表保持原有产品技术性能的能力。随着科学技术的发展对测量仪表的可靠性要求愈来愈高。

测量仪表结构和工作环境的变化在一定程度上影响它的可靠性。近年来研究出确定结构和个别零件寿命的实验方法。用这种方法获得的数据可以求出测量仪表的概率的寿命,这种寿命称为达到第一次损坏时工作等待时间。

周围介质温度、湿度增加,或处于振动和加速状态时,零件的寿命降低。半导体器件和无线电零件在核辐射下,寿命大大减少。受能量足够强的中子辐射后的锗、硅晶体管全部损坏,即使在轻微辐射下它们的寿命也降低很多。同样,辐射使常用云母、陶瓷、塑料、电木和其他绝缘材料的零件寿命减少。并且这些材料寿命降低与辐射源强度和辐射源距离有关。

对于仪表零件的寿命通常理解为保持产品原有特性允许的极限工作小时数。质量欠优的零件,在开始工作的最初100小时内大部分将损坏。

通常损坏零件百分数是在1000小时实验下确定的,设该值为 λ_a ,用 n_a 表示每种类型的零件数, m 为以千小时计的仪表的概率的寿命, λ_K 为在1000小时工作中损坏仪表的百分数,它可用下式算出:

$$\lambda_K = \frac{1}{m} \% = \sum \lambda_a n_a \quad (2-9)$$

各种基本元件或零件的 λ_a 可以在实验室条件下取得。对于工作在恶劣条件下的仪表, λ_a 值可增加10倍,若电子测量仪表工作在恒温,并没有振动的情况下,给出的 λ_a 值可减少10倍。

2.2.8 测量仪表的稳定性

稳定性是指测量仪表示值不随时间和使用条件变化的性能。时间稳定性以稳定度表示,它表示在一段时间内示值的随机变化的大小。使用条件变化的影响用影响误差表示,如环境温度的影响,是以温度每变化 1 度示值变化多少来表示。

2.2.9 复现性

测量仪表的复现性是指同一条件下对同一被测量多次重复测量其示值一致的程度,即

$$E_f = \frac{\Delta f_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% , \text{ 式中 } \Delta f_{\max} \text{ 是全程中重复测量差值最大者。}$$

2.3 测量单位

国家法定计量单位(简称法定单位)是政府以命令的形式明确规定要在全中国采用的计量单位制度。凡属法定单位,在一个国家的任何地区、部门、机构以及个人,都必须严格遵守,正确使用。我国的法定单位是 1984 年 4 月 27 日发布的,其具体应用形式就是《量和单位》国家标准 GB3100~3102,这是我国各行各业都必须执行的强制性、基础性标准。

我国法定单位是以国际单位制(SI)单位为基础,加上我国选定的一些 SI 的单位构成的。具体来说,有以下 5 个部分。

2.3.1 SI 基本单位

共有 7 个,如表 2-1 所示

表 2-1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	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

说明:① 圆括号中的名称,是它前面的名称的同义词,下同。

② 无方括号的量的名称与单位名称均为全称。方括号中的字,在不致引起混淆、误解的情况下,可以省略。去掉方括号中的字即为其名称的简称。下同。

③ 人民生活和贸易中,质量习惯称为重量。

2.3.2 具有专门名称的 SI 导出单位

为了使用上的方便和习惯,给某些导出单位以专门名称。在 SI 中,具有专门名称的导出

单位(包括辅助单位)共有 21 个,如表 2-2 所示。

表 2-2 具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示式例
[平面]角	弧度	rad	
立体角	球面度	sr	
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能[量],功,热量	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率,辐[射能]通量	瓦[特]	W	J/s
电荷[量]	库[仑]	C	$A \cdot s$
电压,电动势,电位	伏[特]	V	W/A
电容	法[拉]	F	C/A
电阻	欧[姆]	Ω	V/A
电导	西[门子]	S	A/V
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
磁通[量]密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	K
光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$
[光]照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	J/kg

2.3.3 我国选定的非 SI 的单位

我国选定的可与 SI 并用的非 SI 的单位共有 16 个(见表 2-3),它们是我国法定单位的组成部分。

需要说明的是,1984 年发布的法定单位,这一部分共 15 个。面积的单位“公顷”,其法定符号为“ hm^2 ”,是新增加的。它是国家技术监督局、国家土地管理局、农业部于 1990 年 12 月 27 日在技监局发[1990]660 号文件《关于改革全国土地面积计量单位的通知》中公布的。由于这个文件是经过国务院批准的,所以“公顷”属于我国法定单位,主要用于较大的耕地、林地、草地面积的计量。本来公顷(ISO 推荐的符号为 ha)是非 SI 的单位,也是非法定单位,只是暂时可与 SI 并用;但从我国选定公顷为法定单位以后,再把它列为非法定单位则是完全错误的。

目前有些辞书、手册就把公顷排除在法定单位之外,有的虽然把它列为法定单位,但符号却仍用 ha。很多科技书刊对公顷的单位符号不用 hm^2 ,也是不对的。a 是公亩的符号,我国法定单位没有选公亩,所以作为公亩倍数单位的公顷的符号 ha,理所当然地应予废弃。

表 2-3 我国选定的作为法定单位的非 SI 的单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	$1\text{min}=60\text{ s}$
	[小]时	h	$1\text{ h}=60\text{ min}=3\,600\text{ s}$
	日,(天)	d	$1\text{ d}=24\text{ h}=86\,400\text{ s}$
[平面]角	[角]秒	"	$1''=(\pi/648\,000)\text{ rad}$
	[角]分	'	$1'=60''=(\pi/10\,800)\text{ rad}$
	度	°	$1^\circ=60'=(\pi/180)\text{ rad}$
旋转速度	转每分	r/min	$1\text{ r/min}=(1/60)\text{ s}^{-1}$
长度	海里	n mile	$1\text{ n mile}=1\,852\text{ m}$ (只用于航程)
质量	吨	t	$1\text{ t}=10^3\text{ kg}$
	原子质量单位	u	$1\text{ u}\approx 1.660\,540\times 10^{-27}\text{ kg}$
体积	升	L,(l)	$1\text{ L}=1\text{ dm}^3=10^{-3}\text{ m}^3$
能	电子伏	eV	$1\text{ eV}\approx 1.602\,177\times 10^{-19}\text{ J}$
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	$1\text{ tex}=10^{-6}\text{ kg/m}=1\text{ g/km}$
面积	公顷	hm^2	$1\text{ hm}^2=10\,000\text{ m}^2$
速度	节	kn	$1\text{ kn}=1\text{ n mile/h}=(1\,852/3\,600)\text{ m/s}$ (只用于航行)

2.3.4 组合单位

由上述单位构成的组合单位,根据一定的规则和习惯,由 SI 基本单位、有专门名称的 SI 导出单位和我国选定的非 SI 的单位构成的组合单位,只要具有物理意义、都是我国法定单位。例如:速度单位 m/s (米每秒),力矩单位 $\text{N}\cdot\text{m}$ (牛米),摩尔热容单位 $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ (焦每摩开)。

2.3.5 由 SI 词头与以上单位构成的倍数单位

SI 词头用于表示各种不同大小的因数,共有 20 个(见表 2-4),其中的 Y, Z, z, y 是新增加的。

表 2-4 SI 词头

名 称	符号	代表的因数	名 称	符号	代表的因数
尧[它](yotta)	Y	10^{24}	分(deci)	d	10^{-1}
泽[它](zetta)	Z	10^{21}	厘(centi)	c	10^{-2}
艾[可萨](exa)	E	10^{18}	毫(milli)	m	10^{-3}
拍[它](peta)	P	10^{15}	微(micro)	μ	10^{-6}
太[拉](tera)	T	10^{12}	纳[诺](nano)	n	10^{-9}
吉[咖](giga)	G	10^9	皮[可](pico)	p	10^{-12}
兆(mega)	M	10^6	飞[母托](fernto)	f	10^{-15}
千(kilo)	k	10^3	阿[托](atto)	a	10^{-18}
百(hecto)	h	10^2	仄[普托](zepto)	z	10^{-21}
十(deca)	da	10^1	幺[科托](yocto)	y	10^{-24}

SI 词头加在法定单位前面构成的十进倍数或分数单位,仍然是我国的法定单位。例如:
 μrad (微弧度), $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$ (千欧米), MJ/kg (兆焦每千克), kg/dm^3 (千克每立方分米), g/ml (克每毫升)。

第 3 章 堆芯外核检测仪表及系统

功率测量仪表及系统是用来测量核反应堆功率和监督核反应堆内中子通量密度变化情况的,并为运行人员、调节系统和保护系统提供数据和信号,从而保证核反应堆的正常运行及其安全。它具有两个方面的功能:运行功能和安全功能。

运行功能:向操纵员提供反应堆装料、停堆、启动直至功率运行工况下的反应堆状态信息。为此,它设有多种量程的堆芯外核仪表,监测反应堆功率、功率变化及功率分布。此外,它还给长棒控制系统提供堆功率信号和闭锁信号,向松动部件和振动监测系统提供中子噪声信号。

安全功能:向反应堆保护系统提供多个紧急停堆信号和允许信号。

3.1 堆芯外的定义

在现代的动力堆中,堆芯边界内的中子通量经常大于 $10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,现在习惯上把堆芯外中子敏感元件定义为受低于 $10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的中子通量照射的敏感元件。

图 3-1 给出了堆芯外中子敏感元件的典型安置方式,从图中可见,敏感元件是在堆壳外面,同时给出了在额定功率运行时,压水堆典型的堆芯外位置上的中子通量、 γ 照射率和温度的量值。

若中子通量不超过 $10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,则可以把堆芯外敏感元件安装在反应堆压力壳内,例如安装在热屏蔽区域内。

3.2 核反应堆功率的测量

核反应堆是通过核裂变而产生热量的,所以通常借助于观察与核裂变过程相联系的“辐射”来测量核反应堆的功率水平,在发生每一次裂变时,都产生带能量的裂变碎片、中子、光子以及其他粒子,这些辐射的数量和组成正比于裂变的数量,这些辐射的发生率正比于裂变率,因而正比于核反应堆的功率。

在产生裂变碎片的裂变事件发生后的很长时间内,大多数的裂变碎片仍是带放射性的,并

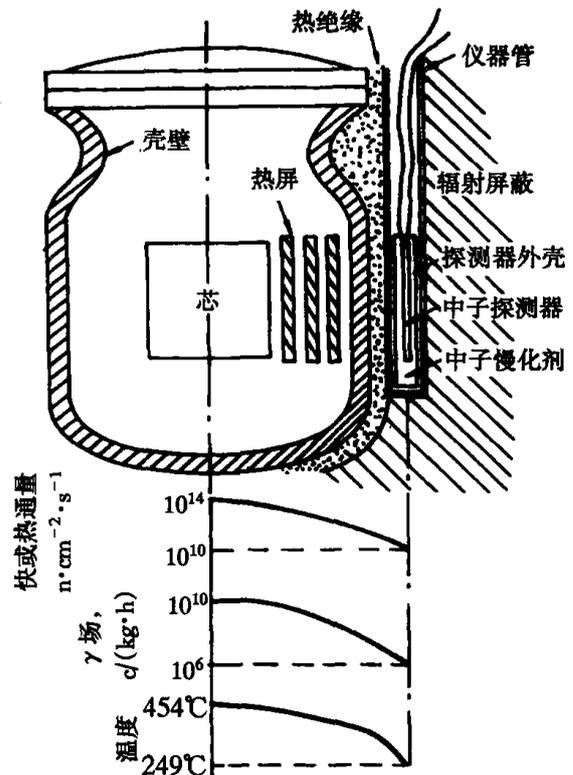


图 3-1 在满功率下,压水堆内中子敏感元件的典型的环境剖面图

连续地发射 β 和 γ 射线。此外,裂变中子和某一些有较高能量的光子也可引起放射性。这种放射性也可以在其产生之后存在很长时间,由总的剩余放射性来的辐射,称为余辉。衰变热或裂变产物活性,贡献出相当于 5% 的反应堆热量,然而,衰变热并不是反应堆功率的一种指示量,它是与反应堆运行的历史有关。

在任何测量中,最合适的方法是使用最直接的方法,因此,反应堆的功率应该通过探测瞬发裂变的辐射来测量,裂变碎片和 β 射线是短射程的,并被阻止在反应堆的燃料元件内。然而,在裂变中伴生的中子和 γ 射线在穿透若干距离之后仍能被探测到。反应堆功率的测量技术就是建立在探测中子、 γ 射线,或两者同时探测的基础上的。

裂变 γ 射线和裂变中子是以多种形式与周围物质相互作用的,在反应堆功率的测量中,最有意义的相互作用过程有以下三种:核反应、反冲或碰撞、电离。

伴随裂变而来的所有辐射的相互作用都能产生热。因此,所产生的热量是核反应堆功率的直接度量。遗憾的是由于热惯性的原因,热是一种十分缓慢的指示量。原则上,任何产生可测效应的裂变中子或 γ 辐射与物质之间的相互作用,都能用于反应堆功率的测量。然而,实际上只考虑选择其中的几种,通常是用堆外中子监测仪表系统来测量和记录反应堆功率,该系统还可以很方便地给出功率的变化速度,为运行人员,调节系统和保护系统提供数据和信号。

3.3 中子探测仪表

由于中子不带电,中子在物质中不能直接引起电离,因此,探测中子和探测带电粒子不同。它是通过中子与原子核的相互作用,产生可以被探测的次级粒子,并记录这些次级粒子。为此,中子探测仪表必须具备能同中子发生核相互作用产生可被探测的次级粒子的物质,这种物质称为“辐射体”。这是中子探测仪表所具有的特点。除此之外,中子探测仪表与其它探测仪表原则上没有什么不同。

3.3.1 中子探测的基本方法

探测中子所涉及到的中子与原子核的相互作用的类型有:产生带电粒子的核反应、核反冲、核裂变和活化等 4 种。

不同能量中子的探测原理和探测器结构差别很大。人们把中子能量习惯地区分为:

- (1)慢中子:能量小于 1keV;
- (2)中能中子:能量为 1~100keV;
- (3)快中子:能量为 0.1~10MeV;
- (4)很快中子:能量为 10MeV~50MeV。

慢中子又可分为热中子、超热中子和共振中子。能量为 0.025 3eV 的中子称为“热中子”。这种热中子与室温下(如 20℃)周围介质的分子处于热平衡状态,其能量相当于分子的热运动能量。

1. 核反应法

中子不带电,它和物质间没有库仑斥力,因此比较容易进入原子核,发生核反应。选择某种能产生带电粒子的核反应,并记录这些带电粒子,就可探测中子了。这是因为中子核反应所产生的带电粒子数和中子与物质作用的反应截面以及中子通量密度成正比。所以通过测得带

电粒子在探测器中产生的脉冲数就可以求出中子通量密度,这种方法称为核反应法。主要用来探测慢中子。

目前应用得最多的是以下 3 种核反应:

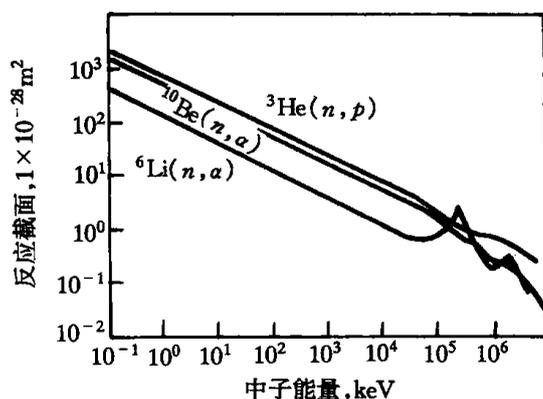
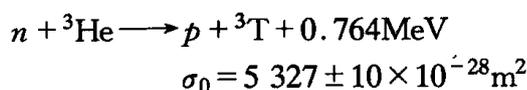
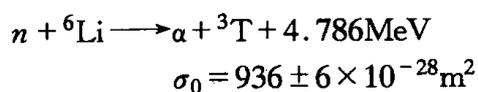
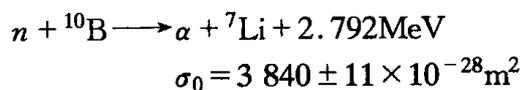


图 3-2 ${}^{10}\text{B}$, ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^3\text{He}$ 的中子反应截面与中子能量的关系

这 3 种核反应的反应截面与中子能量的关系如图 3-2 所示。它们的热中子反应截面 σ_0 很大。慢中子能量范围内,反应截面 σ_0 与中子能量 E_n 的平方根成反比,即

$$\sigma_0 \propto \frac{1}{\sqrt{E_n}} \quad (3-1)$$

利用 $E_n = \frac{1}{2}mv^2$ 关系式,将中子速度替代中子能量,(3-1)式可写成

$$\sigma_0 \propto \frac{1}{v} \quad (3-2)$$

即反应截面与中子速度成反比。这一关系称为截面变化的 $\frac{1}{v}$ 定律。通常利用截面具有 $\frac{1}{v}$ 定律的材料构成的探测器又称为 $\frac{1}{v}$ 探测器。

上述 3 种核反应的反应截面值都很大。中子和其他核作用一般只有几个 10^{-28}m^2 ,所以采用这 3 种核反应来探测中子。

${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应是目前应用得最广泛的。主要原因是硼材料比较容易获得,气态的可选用 BF_3 气体,固态的可选用氧化硼或碳化硼。在天然硼中 ${}^{10}\text{B}$ 只含 19.8%。为了提高探测效率,在制造中子探测器时多用浓缩硼, ${}^{10}\text{B}$ 可浓缩到 96% 以上。

${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{T}$ 反应的优点是放出的能量最大,所以可以把中子产生的信号和 γ 本底较容易区别开来。缺点是 Li 没有合适的气体化合物,使用时只能采用固体材料。天然锂中的 ${}^6\text{Li}$ 只有 7.5%,为提高探测效率,通常也采用高浓缩的氟化锂(天然锂中含 92.5% ${}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}$ 只含

7.5%，高浓缩的 ^6Li 可达90%~95%)，但价格较昂贵。

$^3\text{He}(n, p)^3\text{T}$ 反应的优点是反应截面最大，缺点是反应放出的能量最小，探测器不容易去除 γ 本底。加之，天然氦气中 ^3He 的含量非常低(约 $1.4 \times 10^{-4}\%$)，而制备 ^3He 价格贵，因此仅用在几百 keV 的快中子能谱测量中。

2. 核反冲法

中子与原子核弹性碰撞时，中子的一部分能量传递给原子核，使它发生反冲。这些原子核称为反冲核。反冲核一般具有一定电荷，可以作为带电粒子记录。这种方法称为核反冲法。设中子的能量为 E_n ，中子通量密度为 Φ ，如果薄靶的厚度为 d ，原子密度为 o ，对于一定能量的中子，靶核的弹性散射截面为 σ_s ，则单位面积单位时间内的反冲核数目

$$N_p = \Phi \sigma_s o d \quad (3-3)$$

因为 σ_s 、 o 和 d 是常数，所以由测到的反冲核形成的脉冲数，就可算得中子通量密度。此法主要用于快中子的探测。

核反冲法中辐射体的选择原则：

- (1) 反冲核动能大，易被精确测量；
- (2) 弹性散射截面大；
- (3) 截面与中子能量的关系应是平滑地变化，最好遵循 $1/v$ 定律；
- (4) 反冲核的角分布简单。

按上述原则通常选用含氢物质作为辐射体。根据动量、能量守恒定律，可推出反冲核的质量越小，反冲动能越大。氢核质量最轻，反冲能量最大； E_n (中子能量) $< 4\text{MeV}$ 时，氢的散射截面比氘核的大； $E_n < 20\text{MeV}$ 时，散射截面随能量平滑地变化(见图 3-3)；在 $0.1 \sim 10\text{MeV}$ 内近似遵从 $1/v$ 定律； $E_n < 6\text{MeV}$ ，中子在氢核上的弹性散射，在质心系内的角分布是各向同性的。所以，绝大数反冲型探测器都用含氢物质作辐射体。

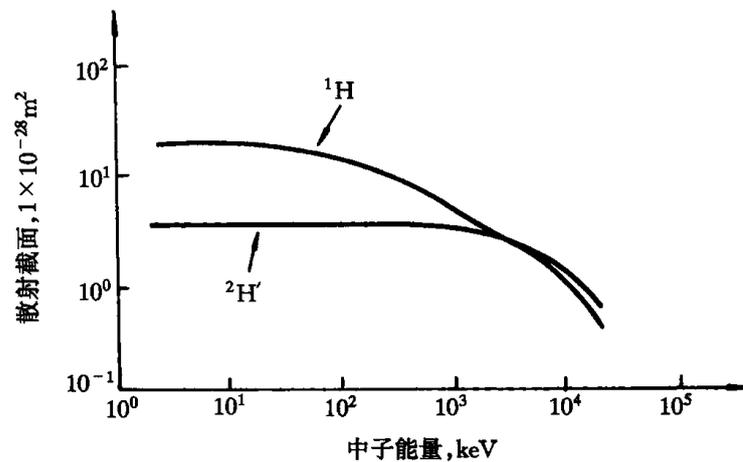


图 3-3 氢的中子散射截面

3. 核裂变法

中子与重核作用可以引起裂变反应，通过测量所产生的裂变碎片数，求得中子通量密度。核裂变的优点是裂变碎片的动能大，一般两个裂变碎片的总动能约为 $150 \sim 170\text{MeV}$ ，每一裂变碎片的动能都在 $40 \sim 110\text{MeV}$ 之间，它形成的脉冲比 γ 本底脉冲大得多，可用于强 γ 辐

射场内中子的测量。这对于探测反应堆的中子通量密度特别有意义。由于慢中子和快中子都可能引起裂变反应,所以裂变探测器探测中子的能量范围较大。探测热中子,采用 ^{233}U , ^{235}U 和 ^{239}Pu 等材料作辐射体,其反应截面与中子能量的关系见图 3-4 所示。这 3 种核素的热中子裂变截面分别为 $530 \times 10^{-28} \text{m}^2$, $580 \times 10^{-28} \text{m}^2$, $742 \times 10^{-28} \text{m}^2$ 。

许多重核只有在入射中子能量大于某个值(称为阈值)后才能发生裂变,因此可利用一系列具有不同阈能的裂变核素来判断中子的能量,这种探测器叫裂变阈探测器,表 3-1 介绍了常用作裂变阈探测器材料的特性。

核裂变的缺点是探测中子的效率低。因为裂变碎片的射程极短,在铀中平均约为 $8 \text{mg}/\text{cm}^2$,裂变材料厚度只能很薄,一般是涂敷成薄膜,即使采用了高浓缩铀,探测中子的效率也仅为 10^{-3} 。采用增加辐射体的面积来提高效率也是不可行的。因为裂变物质本身是放射 α 粒子的,单个 α 粒子的脉冲幅度虽小,但从大面积裂变物质上有大量的 α 粒子发射,在探测器分辨时间内大量小脉冲堆积起来,就会形成超过甄别阈的本底脉冲。

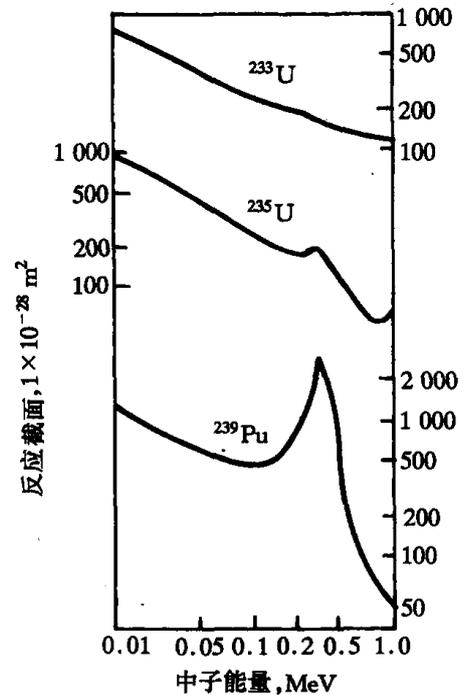


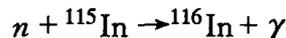
图 3-4 ^{233}U , ^{235}U 和 ^{239}Pu 的裂变截面和能量关系

表 3-1 常用裂变阈探测器材料的特性

裂变材料	热中子裂变截面 (10^{-31}m^2)	阈能 (MeV)	3MeV 时的截面 (10^{-31}m^2)	半衰期 (a)
^{232}Th	<0.2	1.3	0.19	1.41×10^{10}
^{231}Pa	10	0.5	1.1	3.28×10^{10}
^{234}U	<0.6	0.4	1.5	2.45×10^5
^{236}U	—	0.8	0.85	2.34×10^7
^{238}U	<0.5	1.5	0.55	4.47×10^9
^{237}Np	19	0.4	1.5	2.41×10^6

4. 活化法

中子被稳定的原子核吸收后常会形成放射性原子核。这种现象称为“活化”或“激活”。通过测量被活化的原子核发射的粒子则可知道中子通量密度。这就是活化法。例如用 ^{115}In 作活化材料,它受中子照射时发生如下反应:



^{113}In 是放射性的,发生 β 衰变,半衰期为 14.1s.



通过测量 β 粒子的发射率可确定中子通量密度。

中子探测的 4 种基本原理,就是中子和原子核相互作用的 4 种基本作用过程。我们把探测中子的这 4 种基本方法,作定性比较,见表 3-2 所示。

表 3-2 中子探测的基本方法

方法	中子和核的作用	所用材料 (辐射体)	截面($\times 10^{-28} \text{m}^2$)	用途
核反应法	$(n, \alpha), (n, p)$	$^{18}\text{B}, ^6\text{Li}, ^3\text{He}$	$\sim 10^3$	热、慢中子通量密度
核反冲法	(n, n')	H	~ 1	快中子能量密度
核裂变法	(n, f)	$^{235}\text{U}, ^{239}\text{Pu}, ^{233}\text{U}$ 等	$\sim 5 \times 10^2 \sim 1$	热中子通量密度
活化法	(n, γ)	In, Au, Dy	热中子 $\sim 1 \times 10^2$ 共振中子 $\sim 1 \times 10^3$ 快中子 ~ 1	中子通量密度

3.3.2 中子探测仪表的种类

从上述探测中子的 4 种基本方法可知,中子的探测过程可分为两个部分:首先是中子和辐射体发生相互作用产生带电粒子或感生放射性,其次是在某种探测仪表中记录这些带电粒子或感生放射性。由于这些次级粒子种类繁多,所以中子探测仪表的种类也很多,这里仅介绍一些常用的中子探测仪表。

1. 气体探测仪表

(1) 三氟化硼(BF_3)正比计数管

BF_3 正比计数管主要是通过中子脉冲计数来测量中子通量密度。

(2) 长计数管

BF_3 正比计数管主要用于热中子的探测。对于快中子则其效率太低。但若用石蜡(或聚乙烯)使快中子经过慢化后再进入计数管,就可用于探测快中子。例如一种具有聚乙烯外套的 BF_3 计数管,这种计数管从 0~5MeV 快中子的探测效率如图 3-5 所示。从图中我们知道中子能量跨过几个数量级,而其效率相差不超过 5%~10%,所以把这种探测效率平坦区(随能量变化)很长的计数管叫做“长计数管”。不要误认为长计数管是因计数管尺寸长或计数管工作电压坪长而得名,目前性能最好的长计数管,探测能量范围可从热中子延伸到快中子。

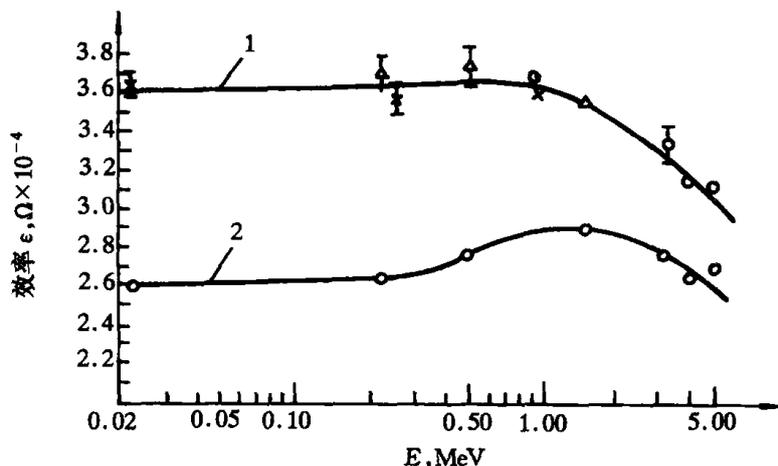


图 3-5 长计数管的探测效率与中子能量的关系

(3) 硼电离室和裂变室

因为在反应堆内中子通量密度和堆功率成正比,所以可以通过中子通量密度的测量来控制反应堆的启动和运行。硼电离室和裂变室是目前监测反应堆的中子通量密不可缺少的核仪表。

硼电离室是在电离室的一个电极上涂上一层浓缩硼 ^{10}B 的膜,利用 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应产生 α 粒子和 ^7Li ,这些次级带电粒子在电离室中引起电流信号。因为记录的是累计电流,所以可用于高中子通量密度的测量。测量范围为 $10^5 \sim 10^{10} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

裂变电离室是在电离室一个电极上涂有可裂变物质(如 ^{235}U)的脉冲电离室。因为裂变碎片的能量比核反应产生的次级粒子的能量大得多,所以裂变室的灵敏度比硼电离室更高, γ 射线影响更小,这优点是其他中子探测器所不能比拟的。因此它更适用于更高的 γ 辐射场内的中子探测。因为裂变碎片的射程很短,所以裂变材料涂层最厚不超过 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ 。因此为了提高探测效率常做成多层裂变室。我国生产的裂变室热中子灵敏度可达 $0.5\text{s}^{-1}/\text{nv}$,最高计数效率可达 10^{-5}s^{-1} 。

2. 固体探测仪表

固体探测仪表,是利用粒子与固体的相互作用,如各种类型的闪烁计数器,半导体探测器等。这里我们只介绍中子闪烁探测器。

中子闪烁探测器的特点是效率高,时间响应快,是最常用的中子探测器之一。

(1) 硫化锌快中子屏

ZnS中子屏有快中子屏和慢中子屏两种。快中子屏是由ZnS(Ag)粉与有机玻璃粉均匀混合,然后热压成圆柱形。它是利用快中子在有机玻璃中产生的反冲质子使ZnS(Ag)发光。再通过光电倍增管将光信号转换成电信号,以此探测快中子。这种闪烁体呈乳白色,对光的透明度不高,厚度不超过7mm。为提高效率,把含有机玻璃粉的ZnS(Ag)闪烁体嵌在有机玻璃筒内制成,形状像花卷,如图3-6所示。它用于测量能量大于0.5MeV的快中子通量密度。

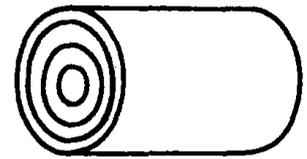


图 3-6 花卷型快中子屏

(2) 硫化锌慢中子屏

慢中子屏是将ZnS(Ag)与含硼化合物(如 B_2O_3)均匀混合在一起,慢中子在 ^{10}B 上产生的 α 和 ^7Li 射入ZnS(Ag)引起闪光,从而使光电倍增管输出信号。由于 ^{10}B 的热中子反应截面很大,所以慢中子屏对热中子和慢中子的效率高,而且易于甄别 γ 本底。热中子的总探测效率为5%~10%。

为了提高效率,将中子屏做成中空,套在具有四面窗的光电倍增管上,这种闪烁体称为“中子杯”。

除了含硼的固体闪烁体外,还有含硼的液体闪烁体也是很有效的中子探测器。

(3) 含锂闪烁体

用铕(Eu)激活的碘化锂闪烁体可用来探测中子。当慢中子与 ^6Li 发生 $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{T}$ 反应后,产生的 α 及 ^3T 在晶体内损失能量而形成闪光。由于反应能高达4.78MeV,因而热中子产生的信号脉冲幅度是一个相当窄的峰。碘化锂闪烁计数器分辨时间可达 $0.3\mu\text{s}$,探测效率非常高。晶体厚度为1cm时探测热中子的效率几乎达100%,探测慢中子的效率平均约为

70%。它的缺点是极易潮解,且原料提纯和晶体制备等比较困难。

另一种含锂闪烁体是由(Ce)激活的锂玻璃,成分是 $\text{LiO}_2 \cdot 2\text{SiO}_2(\text{Ce})$ 。锂玻璃的优点是有好的化学稳定性和光透明性、耐酸、耐化学腐蚀、耐潮解、耐高低温,宜于在恶劣的环境中使用。而且生产工艺简单,可加工成合适的形状。它探测热中子的效率极高,厚度为 0.4cm 时效率已达 100%,探测慢中子和中能中子的效率也较高。表 3-3 给出了锂含量为 6.5%, ^6Li 浓缩到 96% 的锂玻璃闪烁体,厚度为 2.54cm 时对各种能量中子的探测效率。

表 3-3 锂玻璃闪烁体探测效率(%)

中子通量 (keV)	0.01	0.1	1	10	100	250	510	1060	2170	3360
探测效率 (计算值)	89.42	58.54	27.12	9.95	5.30	16.53				
探测效率 (实验值)				9.95	5.20	14.90	3.50	1.56	1.09	1.36

(4) 有机闪烁体

所有有机闪烁体都是富氢物质,所以都可以通过核反冲法探测快中子。有机闪烁体的发光衰减时间特别短,因此可用来测量高中子通量密度。在快中子飞行时间谱仪中,有机闪烁体是唯一可采用的探测器。这种闪烁体效率很高,但对 γ 本底的甄别需要采取特殊的措施,如加上脉冲形状甄别系统。

常用的几种有机闪烁体是:蒽晶体,塑料闪烁体,液体闪烁体。它们的性能见表3-4。

表 3-4 测量中子用各种闪烁体性能

名称	型号	规格(cm)	发光效率 (相对蒽%)	探测效率 (%)	发光衰减 时间	光谱峰位 (10^{10}m)	主要用途
硫化锌 (ZnS)快 中子屏	ST-206 (混合型)	$\phi 32, 40, 50, h7$	300	1	$0.2\mu\text{s}$	4 500	快中子通量密 度,剂量
	ST-207 (花卷型)	$\phi 50 \times 20$	300	2	$0.2\mu\text{s}$	4 500	快中子通量密 度,剂量
硫化锌 (ZnS)慢 中子屏	ST-211 (浓缩硼)	$\phi 50 \times 1.5$ $\phi 40 \times 1.5$	300	10	$0.2\mu\text{s}$	4 500	慢中子通量密 度,剂量
	ST-206 (天然硼)	$\phi 50 \times 1.5$ $\phi 40 \times 1.5$	300	5	$0.2\mu\text{s}$	4 500	慢中子通量密 度,剂量
锂玻璃	ST-602 (浓缩锂)	$\phi 40 \times 10$ $\phi 40 \times 3$	10		$0.1\mu\text{s}$	3 950	热中子,中能 中子
蒽晶体	ST-501	$\phi 10 \sim 50$ $h2 \sim 20$	100		30ns	4 470	发光标准
塑料 闪烁体	ST-401	$\phi < 400$ $h < 250$	40		5ns	4 200	快中子计数
液体 闪烁体	ST-501	$\phi 46, h20 \sim 50$ $\phi 104, h30, 50$	45		3.7ns	4 200	飞行谱仪探头

3.4 反应堆堆芯外核检测仪表系统

反应堆堆芯外核检测仪表系统也是用来保护反应堆的。它监测中子通量,并提供事故停堆和报警信号。在启动和功率运行时,它通过指示反应堆的状态来提供间接的控制功能。堆芯外核检测仪表系统使用了3种型式的仪表通道来提供3种功率水平的保护功能。在每一种仪表的测量范围内(源量程、中间量程和功率量程)都提供了反应堆在该范围内运行时所需要的必要的超功率保护。仪表测量范围的重迭提供了源量程和中间量程及功率量程的连续的保护。随着反应堆功率的增加,在适当的较高量程的仪表投入工作之后,超功率保护的功率水平可按规定增加。降低功率时,它可自动地恢复至限制更严的保护。

为了监测从完全停闭的状态到120%满功率状态的中子通量,采用了几种型式的中子探测器及固体电子电路。功率量程通道能记录高达满功率200%的超功率偏移。

在这两个极端值之间的中子通量复盖范围为 $10^{11} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 因此,需要使用几种仪器来进行监测。最低的量程(源量程)被观察到的最低计数率取决于堆芯中子源的强度以及堆芯停堆反应性的大小。此值一般大于1计数/s。

中间量程的探测器和仪表应选择得使它与量程的高端部分及功率量程的低端部分相重迭。功率量程复盖的范围占总的测量范围的两个多一点数量级。它与中间量程相重迭。测量范围的重迭情况见图3-7所示。

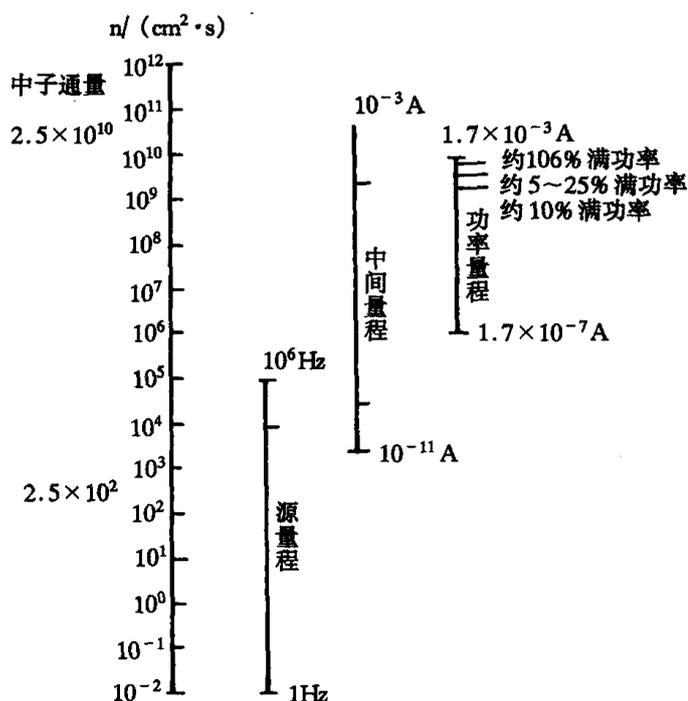


图 3-7 中子探测器和工作范围

上面所述仪表系统能在堆芯初始装料、停堆、启动和功率运行以及装卸料时,提供反应堆中子通量的指示和记录,并能把事故停堆信号、停棒控制信号以及报警信号发送到控制和保护系统。

3.4.1 三个测量范围的核检测仪表系统

监测反应堆功率的核检测仪表,由于反应堆功率可以从零功率到满功率,中子通量密度可从 $0 \sim 10^{11} \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,因此一种检测仪表的量程无法满足测量要求。通常将量程分为三档,分别用不同的核检测仪表。

1. 源量程核检测仪表系统

最低量程称为中子源启动量程,即源量程,其特点是中子通量密度小, γ 本底较小,源量程核检测仪表系统一般采用 BF_3 正比计数管或涂硼正比计数管或裂变电离室,它有两个通道,图 3-8 给出了一个典型通道方块图,它的任务是指示反应堆启动过程中的功率和功率变化速度,同时为保护系统提供功率与周期保护信号。

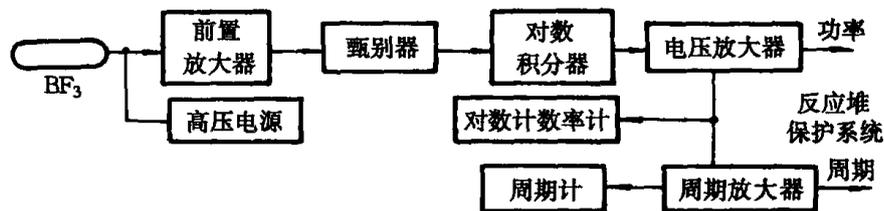


图 3-8 源量程检测仪表系统

2. 中间量程核检测仪表系统

中间量程,中子通量密度已大增, γ 本底较大,所以宜用补偿电流型硼电离室。它担任反应堆启动的后半部分测量功率和周期的任务,在正常运行时也可以使用,它还给反应堆保护系统送去功率与周期保护信号。图 3-9 给出了一个中间量程典型通道方块图。

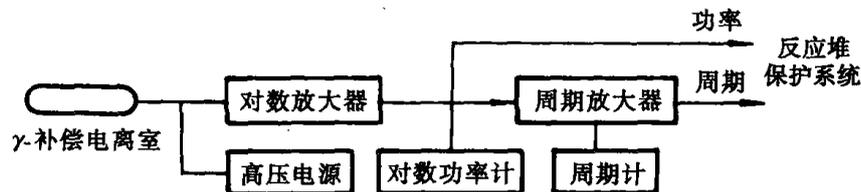


图 3-9 中间量程检测仪表系统

对压水堆来说,一般有两个中间量程通道。系统中对数放大器直接对 γ 补偿电离室送来的电流信号进行放大,然后送往周期放大器求反应堆周期,同时送往反应堆安全保护系统作周期保护信号。

3. 功率量程核检测仪表系统

功率量程是接近或达到反应堆的满功率,这时中子通量密度足够大, γ 本底相对小了。因此,功率量程核测量仪表系统通常使用长中子电离室,它有 4 个位于一次屏蔽层内的探测器孔道。4 个测量通道。长中子电离室输出的比较大的电流信号直接用直流放大器放大,放大后的信号送给控制室功率指示仪表、反应堆功率调节器和安全保护系统。图 3-10 给出了一个功率量程典型通道方块图。

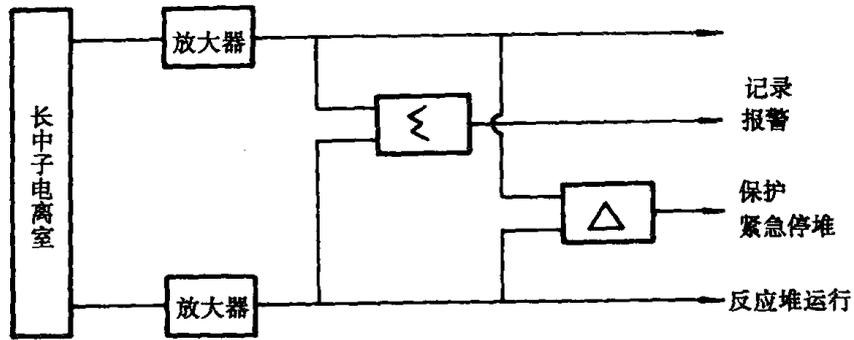


图 3-10 功率量程检测仪表系统

3.4.2 压水堆堆外核检测仪表的布置

压水堆堆外核检测仪表的布置如图 3-11 所示。从图中可见,压水堆堆外核检测仪表系统由 8 个独立的检测通道组成,每个检测通道使用的探测仪表设置在压力壳周围混凝土生物屏蔽层内的孔道中,在堆芯两侧的二个孔道中,每个孔道装有一个源量程探测仪表和一个中间量程探测仪表,四个对角线上的每个孔道中装有一个功率量程检测通道的长中子电离室,长中子电离室内部电极分成两个区段,实际上构成八个小电离室。从四个孔道读数的平均值可求得总功率,由四个孔道读数的偏差,可测出径向功率的不平衡。而从上、下电离室读数的偏差,可以测得中子通量的轴向偏移。由于它能连续、快速测定,所以在反应堆控制和保护中起着重要的作用。长中子电离室应在调试启动阶段功率提升试验中,用堆芯内中子通量检测系统及热功率来校核,堆芯其他两侧的两个孔道留作备用。

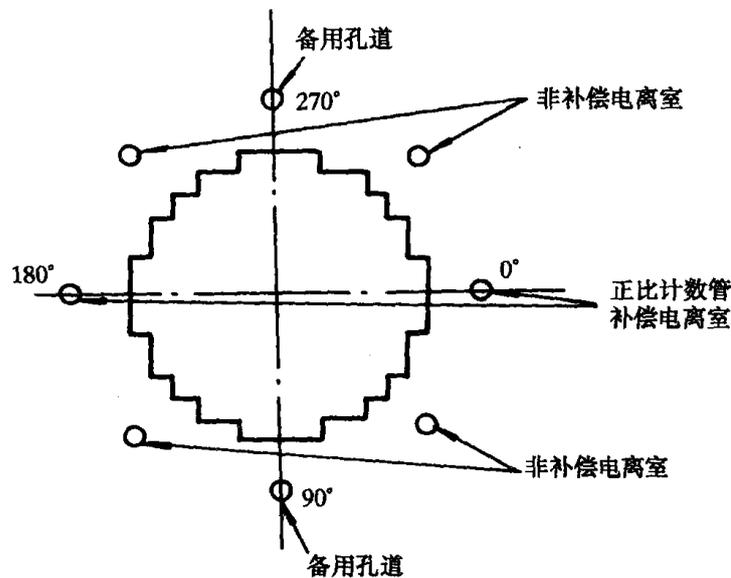


图 3-11 压水堆堆外核检测仪表布置

各检测通道的探测仪表都安装在防潮的探头体内,探测仪表安装孔道均有通风设施,探测仪表所测得的中子通量信息通过同轴电缆连接到设置在各孔道上部的转接盘,各检测通道的显示仪表都安装在控制室内。

3.4.3 堆芯外核检测仪表的原理和结构

1. BF₃ 正比计数管

BF₃ 正比计数管用金属圆管做成,顺着管的轴向紧悬着一根小直径的集电极(通常用钨),管内充以三氟化硼气体,其结构原理如图 3-12 所示,硼吸收中子后发出 α 粒子使三氟化硼电离,一次电离所产生的电子在计数管内电场作用下加速并向集电极移动,它获得的能量足以使其它分子电离,这些电子全部到达中心电极后,在负载电阻上就产生一个电压脉冲,脉冲频率与中子通量水平成线性关系。

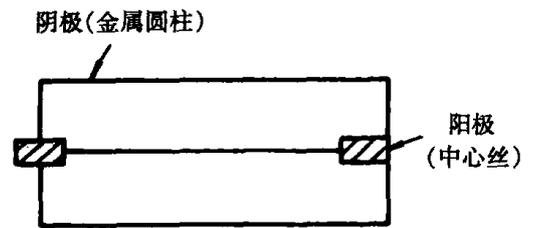


图 3-12 BF₃ 正比计数管的结构原理图

换言之,当工作电压足够大时,入射中子使 BF₃ 气体发生所谓“气体放大”即次电子在高电场作用下,在与气体或分子作相邻两次碰撞之间的自由程中积累了足够的能量,以致可以使气体分子再次被电离,每碰撞一次,电荷载流子的数目增加一倍,电流以倍增系数 $A = 2^n$ (n 为初级电子到达阳极的路径上与气体分子碰撞的平均次数)被放大,这就是说,中子探测器工作在“正比区”,利用正比气体放大特点制作的中子探测器叫“BF₃ 正比计数管”,它的气体放大倍数 A 对一定的外加电压下是常数, A 值甚至可达 10^6 。

一个入射粒子产生的总电荷为:

$$Q = A \frac{\Delta E}{W} e \quad (3-4)$$

式中 ΔE ——一个入射粒子(即中子)进入计数管内,使 BF₃ 电离,中子损失的部分能量;
 W ——比电离能。

根据 BF₃ 计数管的几何形状知道,在距中心电极 x 处的电场强度可以用下式表示:

$$E = V / [x \ln(b/a)] \quad (3-5)$$

式中 V 是两个电极间的外加电压, a 和 b 分别是中心电极和外电极的半径,由此公式,我们可以知道在中心电极附近电场较强,因此,大部分倍增作用发生在中心电极附近。其结构如图 3-13 所示。

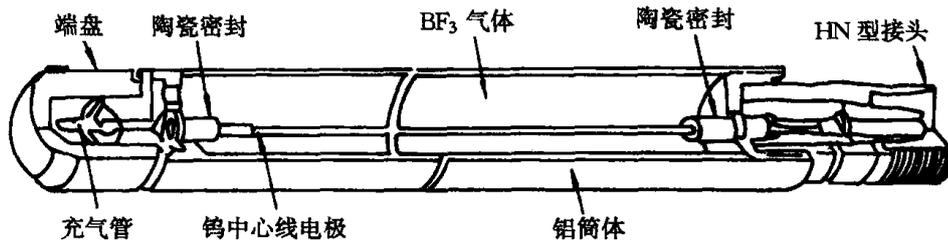


图 3-13 BF₃ 正比计数管的结构图

2. 涂硼正比计数管

每个“源量程”检测线路配备一个涂硼正比计数管。它的灵敏度为 $8A/(n/cm^2 \cdot s)$ 。其工作原理如图 3-14 所示。中心阳极是直径为 $25\mu m$ 的不锈钢,圆筒形阴极是由高纯铝制成。

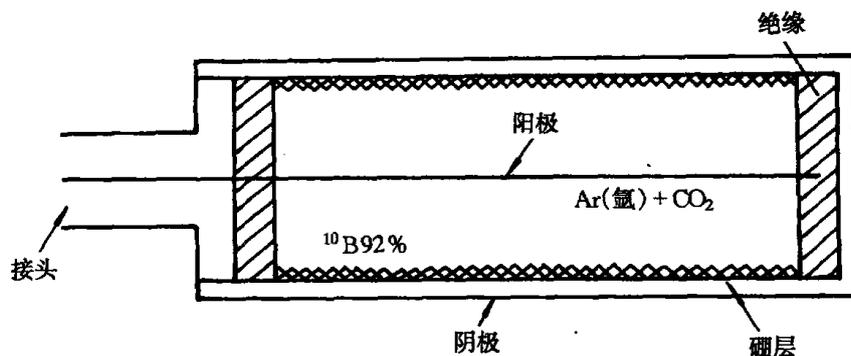
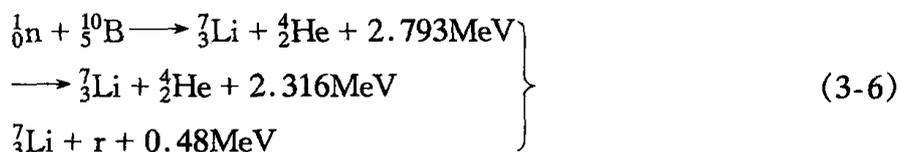


图 3-14 涂硼正比计数管的结构原理图

阴极内表面涂以 ^{10}B 浓度为 92% 的硼,两电极之间相互绝缘,计数管内充以氩气(Ar)和少量的二氧化碳(CO_2)。

入射中子与硼发生核反应



核反应产生的锂离子和 α 粒子使氩气电离,产生电子和正离子。在外电场的作用下,电子和正离子分别向阳极和阴极运动,形成电脉冲(α 脉冲)。 γ 射线也产生电脉冲,但其幅值较小,可用甄别放大器将它和反应堆内其它的 γ 射线产生的小幅度脉冲滤除,只放大 α 脉冲,从而得到只与中子通量成比例的计数。

3. 电离室

(1) 电离室的工作原理和结构

电离室是基于探测入射粒子,与所充物质直接或简接相互作用时,使物质的原子或分子电离而产生的正负离子对来测量放射性强度或入射粒子能量的一种探测器。

电离室主要是由高压电极、收集电极、电极之间的气体以及电极之间绝缘支撑构成,如图 3-15 所示。

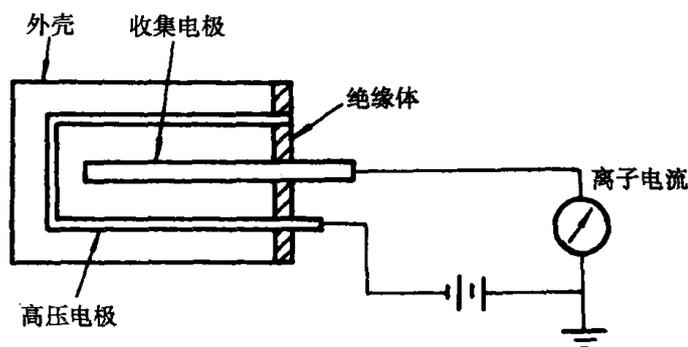


图 3-15 电离室及其电路的结构图

进入电极之间空间的荷电粒子将引起气体分子电离,从而产生正负离子对,假如忽略正负离子的扩散和复合的话,则离子电流可以表达为:

$$I = e \int_A N_0 dA \quad (3-7)$$

式中 e ——电子电荷, 1.6×10^{-19} , C;

A ——电离室灵敏体积, cm^3 ;

N_0 ——单位体积、单位时间内形成的离子对平均数。

若希望知道电离电流的瞬时值, 则必须分别考虑正离子电流 I^+ 和负离子(即电子)电流 I^- 。

用来探测中子的电离室通常有园筒式和平行板式二种, 其内部电极涂以硼, 腔内充以惰性气体(例如氦和氩), 中子使电离室内部气体电离, 在外部电场作用下有一个正比于中子通量密度的电流流过电离室, 该电流在负载电阻上就产生一个正比于功率水平的电压降。

电离室分长短两种, 长电离室与反应堆堆芯一样长, 它由几个结构完全相同的短电离室构成。

电离室的热中子灵敏度一般为 $3.1 \times 10^{-13} \text{A}/(\text{n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 适合测量热中子通量范围为 $10^2 \sim 10^{10} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

裂变电离室是在电离室内部电极涂以 ^{235}U , 腔内充以惰性气体, 中子与 ^{235}U 发生作用, 能产生带高能的正负离子, 从而增加电离室的灵敏度。

(2) 电离室的输出脉冲

这里我们以平行板电离室为例来说明电离室的输出脉冲, 图 3-16 表示了一个平行板电离室的原理。

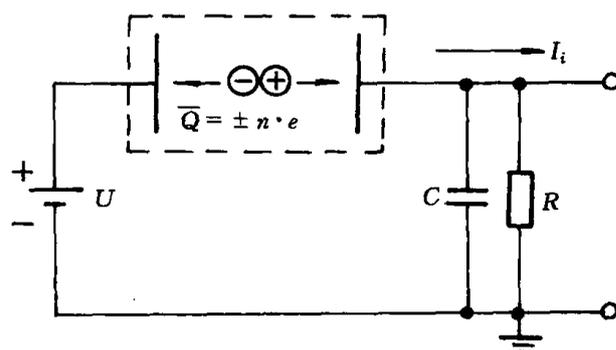


图 3-16 平行板电离室原理图

图中虚线方框代表电离室的本体, U 为外加电压, R, C 表示电离室电路参数(R 为等效负载, C 为包括电离室电极电容, 电路分布电容等在内的等效电容)。

假设一入射粒子进入电离室有效体积内, 使电离室所充物质原子或分子电离, 粒子损失的部分能量为 ΔE , 所产生的离子(正负离子)对数为 n , 此对电荷载流子的总电荷量为 $\bar{Q} = \pm n \cdot e$ ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, 是一个电子的电荷量), 由于外加电场的作用离子作定向运动, 在电离室电路中引起电流 I_i , 电离电流 I_i 与电离室外加电压 U 有一定的关系, 通常工作电压选择在 $I \sim U$ 曲线的“坪”内前三分之一处。

① 比电离能 W

电离过程是一个比较复杂的过程, 入射粒子把能量传递给原子的轨道电子, 其过程是随机的, 但是, 对给定物质产生一对电荷载流子(正、负离子对)所需要的平均能量 W 是一定的, W 值只与被电离物质有关, 而与入射粒子的种类及能量无关, 在气体中, 比电离能 $W \approx 30 \sim 40 \text{eV}/\text{离子对}$, 与气体的性质关系甚小。

若入射粒子所产生的平均离子对数为 \bar{n} , 则有:

$$\bar{n} = \frac{\Delta E}{W} \quad (3-8)$$

设离子对的总平均电荷电量为 \bar{Q} , 则有:

$$\bar{Q} = \pm \frac{\Delta E}{W} \cdot e \quad (3-9)$$

因为电离室输出脉冲幅度 $U = \bar{Q}/C$ (C 为等效电容)
故有

$$U = \frac{e}{WC} \Delta E \quad (3-10)$$

上式说明电离室输出脉冲幅度 U 正比于入射粒子能量 ΔE (认为入射粒子把其全部能量损失在电离室内时), 所以可根据输出脉冲来测量入射粒子的能量大小。若假设入射粒子的强度为 N (单位时间内射入电离室的粒子数), 因为电离室的电流 $I_i = N\bar{Q}$, 因此, 可以根据测得的电离室电流的大小来确定入射粒子的强度。

② 正、负离子的迁移率

在充气电离室内入射粒子产生的电荷载流子(正、负离子), 除做混乱的热运动以外, 它们还在电场强度方向上作有规则的运动, 其运动速度分别为:

$$\omega_+ = \mu_+ \frac{E}{P} \quad (3-11)$$

$$\omega_- = \mu_- \frac{E}{P} \quad (3-12)$$

式中 E ——电场强度, V;

P ——电离室的气压, Pa;

μ_+, μ_- ——为正负离子的迁移率, $\text{cm}(\text{v} \cdot \text{p} \cdot \text{s})$ 。它们是个常数。

③ 电离室输出脉冲形状

在辐射测量中, 被测量的对象是通过探测器的输出讯号来判断的, 电讯号的形状反映了入射粒子的性质, 探测器以后连接的模拟电路也要以此讯号为依据, 因此, 很有必要探讨一下电离室的输出脉冲的形状。

在电离室中, 一个入射粒子所产生的电离电流 I_i 是由正离子成份和负离子成份组成的, 所以有

$$I_i = I_+ + I_- \quad (3-13)$$

现在我们来研究一个平行板电离室的输出脉冲, 为了简化, 我们假定粒子产生的 n 对正、负离子都集中在 x_0 处, 以速度为 $\omega_+(x)$ 运动的正离子由 x_0 到达 x 点的时间为 t , 则有

$$t(x) = \int_{x_0}^x \frac{dx}{\omega_+(x)} \quad (3-14)$$

如图 3-17 所示, 对平行板电离室, 其电场强

度为: $E(x) = \frac{V}{b-a}$, 则可计算出正离子由 x_0 点到达负电极 b 的收集时间 T_+

$$\begin{aligned} T_+ &= \int_{x_0}^b \frac{dx}{\omega_+(x)} = \int_{x_0}^b \frac{P dx}{\mu_+ E(x)} = \int_{x_0}^b \frac{P(b-a)}{\mu_+ V} dx \\ &= \frac{P(b-a)}{\mu_+ V} \int_{x_0}^b dx = \frac{P(b-a)}{\mu_+ V} (b-x_0) \end{aligned} \quad (3-15)$$

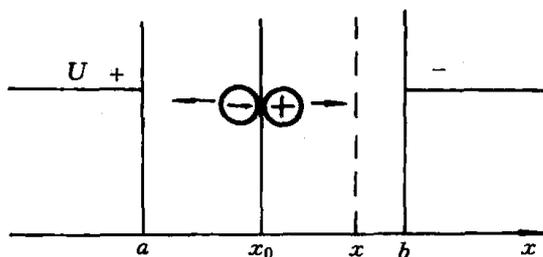


图 3-17 平行板电离室正、负离子运动示意图

由此可见,正离子的收集时间是与它所产生的地点(x_0)有关的,式中 $b-a$ 是平行板电离室二电极的距离, U 为外加电压。同理,负离子到达 a 极的收集时间 T_- 为:

$$T_- = \frac{P(b-a)}{\mu_- V} (x_0 - a) \quad (3-16)$$

1) 电离室的电流脉冲

对平行板电离室,外加电压为 V ,当外加电场之单位时间某一电子的能量变化为 dE/dt ,就等于外加电场时一个电子(即负离子)在单位时间内所作的功 $e \cdot E \cdot \omega_-$,而一个电子在外加电压 V 下所作的功等于一个电子在某一时刻 t 形成的电流 $I_{\text{电子}}(t)$ 与 V 的乘积,所以有

$$V \cdot I_{\text{电子}} = e \cdot E \cdot \omega_- \quad (3-17)$$

即有

$$I_{\text{电子}}(t) = \frac{e \cdot E \cdot \omega_-}{V} = \frac{e \cdot E^2 \cdot \mu_-}{V \cdot P}$$

对于平行板电离室有 $E = \frac{V}{b-a}$, 所以有

$$I_{\text{电子}}(t) = e \frac{V \cdot \mu_-}{P(b-a)}$$

而一个入射粒子产生的电子数(即负离子数)为 n ,其总电荷量为 $Q = n \cdot e$,在此它的电子(即负离子)总电流为:

$$I_-(t) = I_{\text{电子}}(t) = n \cdot e \frac{V \cdot \mu_-}{P(b-a)} = Q \frac{V \cdot \mu_-}{P(b-a)} \quad (3-18)$$

同理可以得出正离子在时刻 t 的离子电流为:

$$I_+(t) = Q \frac{V \cdot \mu_+}{P(b-a)} \quad (3-19)$$

两者的电流脉冲形状如图 3-18 所示。

由图可见,由于负离子运动速度为正离子的 1000 倍左右,所以在极短时间内负离子形成很大的电流脉冲,而正离子形成缓慢的电流脉冲。

2) 电离室的电压脉冲

若电离室电流被 RC 网络积分,就输出电压脉冲,由于测量的要求不同,所选择的 RC 参数就不同,因而电离室的输出脉冲形状就不同,如图 3-19 所示,图中的曲线为 $RC > R_1 C_1 > R_2 C_2 > R_3 C_3$ 。

上面我们讨论了平行板电离室的输出电流及电压脉冲形状,下面对圆筒形(即圆柱形)电离室的电流和电压脉冲作一概略介绍,一个圆柱形电离室如图 3-20 所示,中心电极半径为 a ,为正电极,阴极为圆柱壳,圆柱的半径为 b 。

我们知道,圆柱形电极的电场强度为:

$$E(x) = \frac{V}{x \cdot \ln(b/a)} \quad (3-20)$$

通过计算得到:

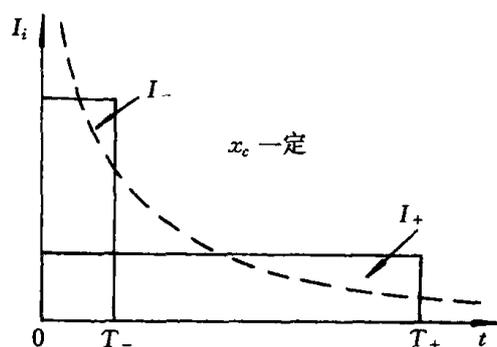


图 3-18 电离室的电流脉冲示意图

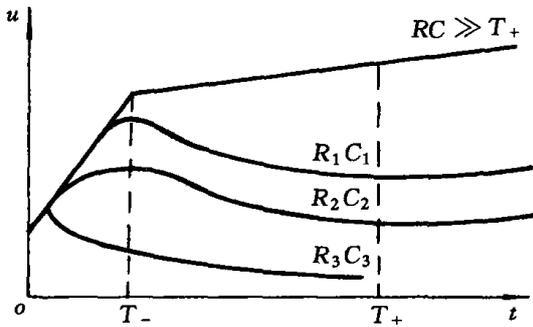


图 3-19 电离室输出电压脉冲形状

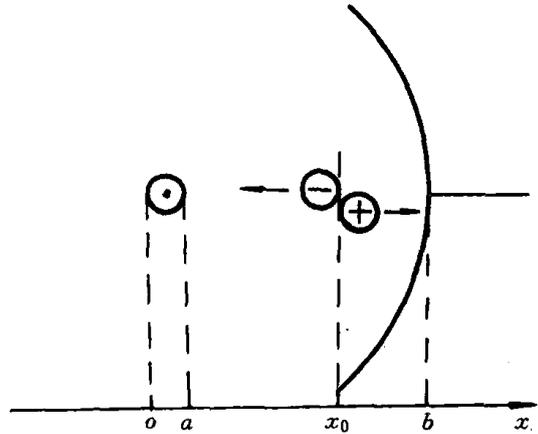


图 3-20 圆柱形电离室原理图

$$T_+ = \frac{P \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2V \cdot \mu_+} (b^2 - x_0^2) \quad (3-21)$$

$$I_+ = \frac{QV\mu_+}{P[\ln\left(\frac{b}{a}\right)]^2} \left[x_0^2 + (b^2 - x_0^2) \frac{t}{T_+} \right]^{-1} \quad (3-22)$$

同理可得

$$I_- = \frac{QV\mu_-}{P[\ln\left(\frac{b}{a}\right)]^2} \left[x_0^2 - (x_0^2 - a^2) \frac{t}{T_-} \right]^{-1} \quad (3-23)$$

$$u_{+\max} = \frac{Q}{c} \frac{\ln\left(\frac{b}{x_0}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (3-24)$$

$$u_{-\max} = \frac{Q}{c} \frac{\ln\left(\frac{x_0}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (3-25)$$

由上列公式可见,圆柱形电离室的电流、电压脉冲都依赖初始电流的位置 x_0 ,由脉冲幅度来测量入射粒子的能量时要考虑这一问题。

图 3-21 表示了圆柱形电离室电流、电压脉冲。

(3) 前置放大电路

电离室的输出脉冲是相当小的,这样的脉冲是不能直接用来作分析用的,还必须将其放大,而放大系统的噪声则又是一个障碍,所以要有一个低噪声前置放大器与探测器相接,使信号予先放大,而且,因为核测量时探测器的探头附近剂量较大,操作者必须远离才行,故前置放大器附带起功放作用,以便把信号传递到远处的主放大器。图 3-22 表示一个负反馈电压灵敏前置放大器, C 代表电离室输出端总电容, R_1, R_2 组成反馈回路,当 $R_1 \gg R_2$ 时,反馈系数 $F \approx R_2/R_1$ 是很小的,由于串联电流负反馈放大倍数为

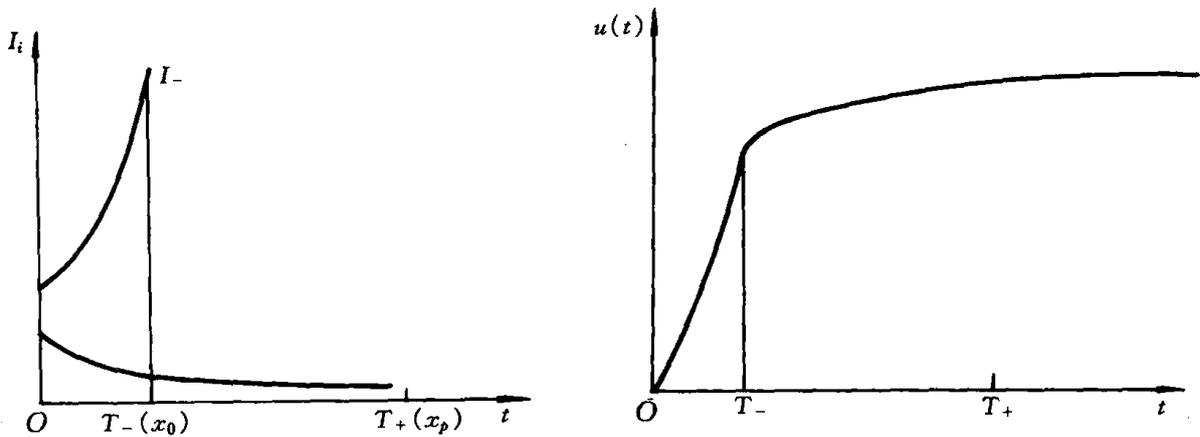


图 3-21 圆柱形电离室的电流和电压脉冲

$$K_{uf} = \frac{K_u}{K_u F + 1} \quad (3-26)$$

当 $F \approx \frac{R_2}{R_1}$ 及 $K_{uf} \gg 1$ 时

$$K_{uf} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3-27)$$

若电离室输出脉冲为 Q/C , 则经前置放大后的输出脉冲幅度为

$$U_{sc} = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{Q}{C} \quad (3-28)$$

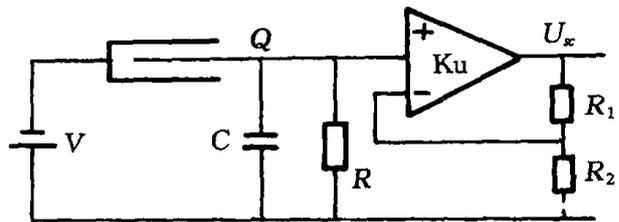


图 3-22 电离室前置放大器原理图

由于采用了较深的负反馈, 电路开环放大倍数较高, 所以电路工作稳定, 它的输入阻抗很高, 因而对小输入讯号灵敏, 我们选用适当的 R 、 C 值, 还可以提高讯号噪声比。

4. γ 补偿电离室

一般电离室存在的问题之一是选择性较差, 特别是在有强 γ 场存在的情况下, 要探测中子, 而中子通量与平均电流有关, 那么就需要计及由于 γ 场引起的电流成份。

γ 射线引起的那部分电流是瞬发 γ 射线引起的, 且正比于由中子引起的电流, 它可指示反应堆功率水平, 并不有害。然而, 由 γ 射线引起的电流的其余部分是相对不变的, 从而产生一个假信号, 即一个不指示功率水平的信号。在高功率水平下, 当中子场较本底 γ 射线强得多时, 这不成问题, 但在低功率水平下, γ 射线对电离室电流的贡献占电离室电流的很大份额, 并且可能超过中子引起的电流。因此, 若在反应堆的中间量程或低量程内用一般电离室来测量堆功率水平, 它的量程就被大大压缩, 不能反映反应堆的真正功率水平。

这个问题可用 γ 补偿电离室来加以解决。

γ 补偿电离室是由同一个壳体内的两个同样的电离室组成。一个室对中子和 γ 射线都敏感, 而另一个室仅对 γ 射线敏感, 两个电离室在电路上连接, 使得其输出相减。 γ 补偿电离室的结构和电路原理如图 3-23 所示。

这种电离室的热中子灵敏度为 $4 \times 10^{-12} \text{A}/(\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 而使用场合的热中子通量范围为 $2.5 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^{10} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

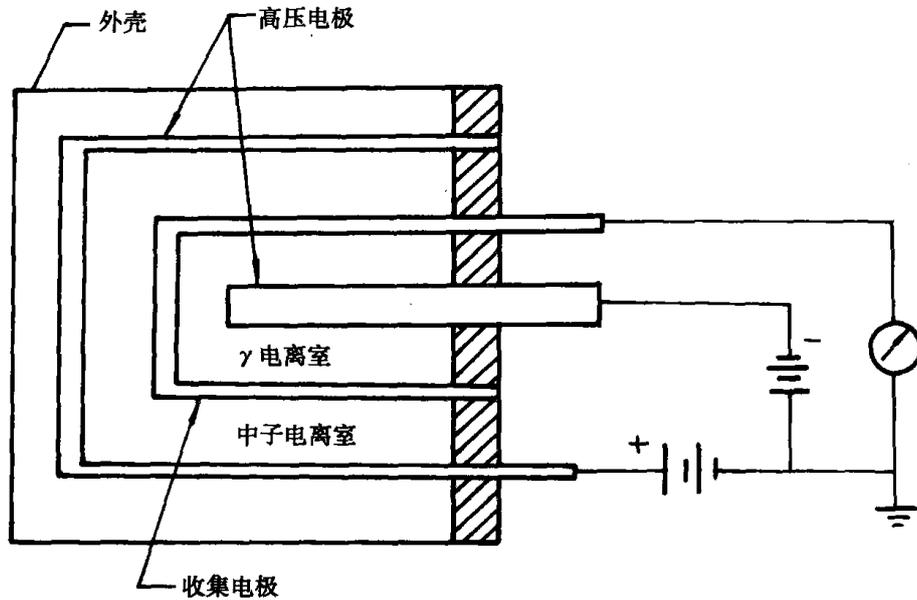


图 3-23 γ 补偿电离室结构和电路原理图

5. 长中子电离室

每个“功率量程”测量线路配备一个长中子电离室，它的灵敏度为 $2.3 \times 10^{-14} \text{A}/(\text{n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ，其工作原理如图 3-24 所示。长中子电离室是由几个短中子电离室组成的。每一个短中子电离室是一个筒形容器，由高压电极和收集电极以及内充混合气体组成。内部充以混合气体：1% 氦 + 6% 氮 + 93% 氩。高压电极内表面和收集电极外表面涂硼。中子打入容器内与硼发生反应而产生的锂离子和 α 粒子使混合气体电离，产生正负离子对。在外加电场的作用下，正负离子分别向阴极和阳极（收集电极和高压电极）运动，形成电脉冲。当中子通量足够大时， γ 射线产生的电流可忽略不计，可以认为测量电阻上只流过中子电流 I_n 。

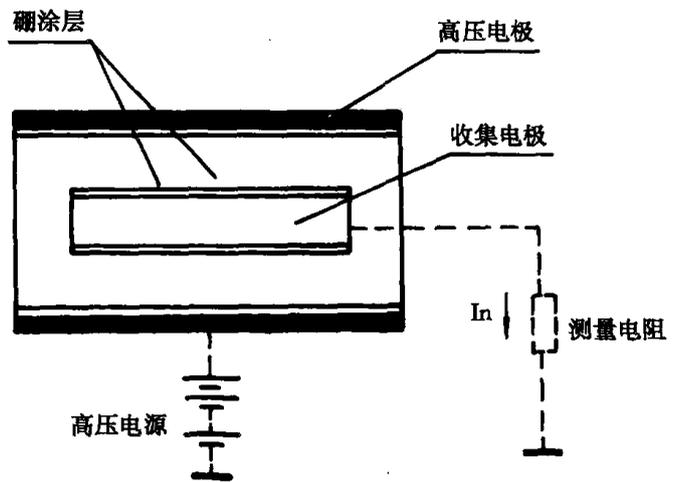


图 3-24 长中子电离室结构原理图

3.5 压水堆堆芯外核检测仪表系统

3.5.1 堆芯外核检测仪表系统的组成

压水堆堆芯外核检测仪表系统由探测器、测量仪表柜和显示设备三部分组成。

1. 探测器

共有 8 个探测器：

- 2 个源量程探测器,采用涂硼正比计数管;
- 2 个中间量程探测器,采用 r 补偿电离室;
- 4 个功率量程探测器,采用长中子电离室。

探测器装于两种容器内。一个源量程和一个中间量程探测器同装一个容器内,容器外径为 160mm,高度为 1 953mm。功率量程探测器装在外径为 180mm,高度为 3 200mm 的容器内。探测器容器置于反应堆压力容器外的仪表井内。

源量程探测器位于堆芯下部 1/4 线的高度上,大约是源棒所在的高度;中间量程探测器位于堆芯中线的高度上。功率量程探测器共有 6 个敏感段,3 个位于堆芯上部,3 个位于堆芯下部。径向看,源量程和中间量程探测器分为 2 对,分别位于 90°和 270°方位上。4 个功率量程探测器布置在 4 个象限上。功率量程探测器的布置保证了可以探测轴向功率不平衡和径向功率不平衡情况。

2. 测量仪表柜

测量仪表柜接收来自探测器的信号,放大和处理以后输往显示设备和其它有关系统。

每个功率量程探测器设有一台仪表柜,源量程和中间量程探测器各有 2 只,对应电子设备置于另外 2 个仪表柜内。这 4 台仪表柜置于不同房间,以实现实体隔离。另外还有 1 台公用仪表柜。仪表柜为抽屉式结构,各种功能的电子线路分放在自身的抽屉内。

3. 显示设备

显示设备位于主控室内和应急停堆盘上,操纵员赖以进行控制反应堆的各项操作。

显示设备主要有:各种量程的显示仪表,记录仪表,视、听报警设备及失水事故监测系统的显示设备(2 台数字表和 1 台终端)。

3.5.2 堆芯外核检测原理

核仪表系统检测的中子通量最小为 $10^{-1}n/(cm^2 \cdot s)$,最大为 $5 \times 10^{10}n/(cm^2 \cdot s)$ 为了复盖这个 11 个数量级的检测范围,采用了 3 种量程的探测器,即源量程探测器(检测 $10^{-1} \sim 2 \times 10^5 n/(cm^2 \cdot s)$ 范围的中子通量)、中间量程探测器(检测 $2 \times 10^2 \sim 5 \times 10^{10} n/(cm^2 \cdot s)$ 范围内的中子通量)和功率量程探测器(检测 $5 \times 10^2 \sim 5 \times 10^{10} n/(cm^2 \cdot s)$ 范围的中子通量)。

3 种探测器的量程有一定范围的重叠,这是为了保证反应堆从源水平到功率水平的整个范围内的控制和保护的连续性,读数互相校核,信号互相连锁。

显示仪表的量程与探测器的量程有所不同。源量程显示仪表的量程为 $1 \sim 10^7$ CPS(中子计数/秒),中间量程显示仪表的量程为 $10^{-11} \sim 10^{-3}$ A(安培),功率量程显示仪表的量程为 $0 \sim 120\% P_n$ (满功率的百分数)。

显示仪表都有两个刻度。源量程和中间量程的右边刻度为倍增时间,功率量程的右边刻度为轴向功率偏差,量程为 $-40 \sim +40\% P_n$ 。

记录仪共有 4 台。2 台 4 笔功率记录仪,量程分别为 $0 \sim 120\% P_n$ 和 $0 \sim 200\% P_n$ 。1 台 4 笔轴向功率偏差 ϕ 记录仪,量程为 $-50 \sim 50\% P_n$ 。1 台 2 笔记录仪记录源量程($1 \sim 10^7$ CPS)、中间量程($10^{-1} \sim 10^{-3}$ A)、功率量程($0 \sim 120\% P_n$)和轴向功率偏差($-50 \sim 50\% P_n$)。

3.6 快堆堆芯外核检测仪表

为了获得快中子反应堆的运行控制和保护动作中必需的信息,在快堆中设置了堆芯外核

第 4 章 堆芯内中子通量检测仪表及系统

堆芯内中子通量检测系统是用来检测稳态工况下堆芯径向和轴向的热中子通量分布,积累燃耗数据,以制定最佳换料方案,监视可能发生的功率分布振荡,即堆芯内中子通量检测系统要完成下列任务:1. 证实计算的堆芯性能;2. 证实堆芯的运行安全裕量;3. 为燃料管理提供输入数据;4. 探测氙引起的功率不对称性或振荡的出现。

当反应堆的功率输出,功率密度或中子通量水平超过某些限度时,在堆寿命期间,反应堆的安全运行不能依赖于从堆芯外仪器取得的数据,操纵员必须自行利用从堆芯中子敏感元件来的信息,以使他能够确定堆芯是否工作在预先确定的安全限度以内。在大型动力堆内,堆芯内中子敏感元件提供了为完成有效的燃料管理程序编制所需的数据,并且对氙引起的功率不对称性或不稳定性进行监测。通常能够用堆芯外仪器探测这样的不对称性或不稳定性,但必须用堆芯内敏感元件来确定它们的准确性质,并提供数据,根据这些数据,操纵员可以进行有效的控制动作。堆芯内中子敏感元件还提供了对芯部性能与芯外探测器响应相互关联的数据。

从实际出发,堆芯敏感元件应该在反应堆以运行期间连续地、或者至少周期性的提供数据,而不应该要求为收集数据而停闭反应堆。

4.1 核反应堆堆芯内的环境

敏感元件在堆内(即堆芯内)工作时所处的环境对敏感元件的材料以及把信号传输至读出仪表的手段是不利的。在大多数情况下,环境包括高中子通量($>10^{12}\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),强 γ 场($>2.58\times 10^{-1}\text{c}/(\text{kg}\cdot\text{h})$),高温($>210^\circ\text{C}$),高压($>6.8947\times 10^6\text{Pa}$)以及其它不希望有的效应,例如由冷却剂流动或沸腾引起的振动,虽然希望堆内敏感元件在这样的恶劣环境中能在堆的整个寿命期间内持续使用是不合理的,但仍然应该把敏感元件设计成在每一次更换反应堆燃料期间,要求对敏感元件的移动或更换不多于1次,大多数堆芯内中子敏感元件都能够连续使用几个换料周期。

在堆芯内敏感元件的设计中,另一个因素是空间的限制。动力堆具有紧密相隔的燃料棒和燃料组件的栅格,可以利用来安装堆芯内敏感元件的间隔很小。因此,堆芯内敏感元件必须结实到足以经受得起核辐射、热和机械力环境的苛刻条件,并且必须小到足以适应可利用的空间。

在满功率的情况下,动力堆芯部的热中子通量要比堆芯外的中子通量大 10^3 倍,典型的数值是 $3\sim 5\times 10^{13}\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,峰值超过 10^{14} 。堆芯内中子敏感元件使用的材料,在预期敏感元件寿命期间内必须能耐受中子损伤。同样地,堆芯内 γ 场要比堆芯外大 10^{13} 倍,在堆芯外处,照射率通常是 $7.74\times 10^{-4}\sim 2.58\times 10^2\text{c}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。在探测器的设计和安装时,都必须考虑到

由于吸收 γ 能量而使敏感元件材料发热的问题,并且必须采取适当的冷却措施,同时还必须考虑到 γ 辐射对材料的损伤问题。

在动力堆内,堆芯内中子敏感元件的工作温度一般是由该处的反应堆冷却剂温度决定的。沸水堆工作在饱和蒸汽条件下,堆内平均温度为 228°C ,在某些使用较高压力以扩大单位容量的情况下,温度范围高至 313°C 。在压水堆中,堆芯部的工作温度随负荷和堆芯内位置而改变,但很少低于 217°C 或超过 332°C 。气冷堆和钠冷堆工作在高于水堆(压水堆和沸水堆)相当多的温度下,气冷堆堆芯温度取决于负荷和堆芯位置,范围从 $343^{\circ}\text{C} \sim 788^{\circ}\text{C}$,而钠冷堆堆芯温度则在 $370^{\circ}\text{C} \sim 540^{\circ}\text{C}$ 范围内变化。

由于水有较高的蒸汽压力,水堆(压水堆和沸水堆)就必须工作在高于气冷堆和钠冷堆的压力下,沸水堆的额定工作压力是 6.89 MPa 。某些早期的沸水堆能工作到 10.3 MPa ,以获得在汽轮发电机处增加蒸汽流量的能力。

大多数压水堆工作在 15.5 MPa 的压力下,堆芯内中子敏感元件的外部护套或外壳,必须经受得起这样的压力而不毁坏,并且必须不透水,这样,就不会因湿气而降低敏感元件和电缆的绝缘电阻。同样,高的工作压力要求精心地进行堆壳开孔的设计和安装,以消除把冷却剂泄漏到大气中去的危险。

在气冷堆中,工作压力从 2.07 MPa 变化到 4.82 MPa ,而在钠冷堆中,工作压力为 13.8 MPa ,对于气冷堆和钠冷堆,在设计堆芯中子敏感元件、电缆和密封时,压力并不引起在高的工作温度下所存在的那样明显的问题。

反应堆冷却剂通过压水堆芯部的平均速度为 4.6 m/s 。沸水堆的芯部能发生整体沸腾,由冷却剂流动以及整体沸腾所产生的振动,必须引起足够的注意。

4.2 核反应堆堆芯内中子通量检测仪表系统

由于堆内中子通量分布与热功率分布之间有直接的关系,所以堆内中子敏感元件的性能优劣是十分重要的。

检测中子通量分布的系统分成 2 种主要的类别:一类是在大量固定的位置上使用固定探测器件的系统,它能提供一维、二维或三维功率分布的信息;另一类是使用移动的(活动的)中子敏感器件,能进行对堆内中子通量的大量扫描,因此可以推得期望的功率分布信息,每一类系统都各有优点和缺点。

反应堆运行期间,固定的探测器随时都能向运行人员提供中子通量的数据。对在移动式探测器相继扫描之间的时间间隔内发生的任何功率分布的反常现象,也能使用它们来发出警报或进行控制和保护。因为探测器是固定位置的,所以必须把它们制造成不要求对它们进行维修。事实上,在没有停闭反应堆时,一般不能够对固定式堆芯内探测器件施行维修或更换。然而,在装置运行期间,由于固定式探测器连续地暴露于芯内环境中,使它们遭受辐照而退化或损伤,因此在换料期间,必须按计划的间隔进行更换,分布于整个反应堆内的固定式探测器能提供离散点上的数据,在其它所有点上的数据必须通过拟合曲线的内插法来取得,通常使用计算机来进行拟合,内插数据中的误差取决于敏感元件之间的间距以及计算机曲线拟合程序的精度。

移动式的或绘图式的中子通量敏感元件系统,虽然不能在所有时刻对报警、控制或保护提

供中子通量分布的信息,但却能够沿着它们经过的整个线路提供连续的中子通量分布信息,尽管这些扰动不大,以致在反应堆运行中没有多大的意义,但从测量结果来看,可以确信所观察到的是整个中子通量分布,即观察到的是真实通量分布的一个准确的一维图象。当然,除非同样地在其它维上有移动式通量探测器,否则,其它两维仍然必须通过计算机内插来充实。

尽管在移动式中子通量敏感元件系统中引入需要定期进行维修的电动机或齿轮箱,然而要求将它们安装在维修时不太困难的地方,因为绘制中子通量图的操作次数是相当少的,并且当不使用探测器时就把它从堆芯内撤出,所以中子通量探测器本身是能够在反应堆的整个寿命期间内持续使用的。

所有的中子通量敏感系统都是测量中子与敏感元件材料之间相互作用产物的特性的。当中子敏感元件长期暴露于中子通量敏感系统中时,它的中子灵敏度(每单位中子通量的输出信号)通常就降低了,而它的 γ 灵敏度(每单位 γ 通量的输出信号)却保持不变,这就导致在中子辐射下信号噪声比的逐步下降。当信号噪声比降低到一个特定值以下时,中子敏感元件的寿命就终止了。由此可以认为,对于暴露于中子— γ 混合场的某中子敏感元件来说,能增高中子— γ 信号比初始值工作的任何设计,都能增加敏感元件的寿命。

4.2.1 堆芯内裂变室

裂变室通常用于堆芯内中子通量敏感元件。在大多数沸水堆中,它们是堆芯内中子探测系统的骨干,对压水堆和沸水堆,在大多数移动式堆芯内探头系统,都用裂变室来作为中子敏感元件。

正像前述中子探测器一样,中子和 γ 对堆芯内裂变室的总输出都有贡献。为了达到一定的中子灵敏度可以改变许多设计参数,但也影响 γ 灵敏度。由于与入射 γ 辐射有关的输出信号与反应堆的功率水平的关系不很明确,如果在探测器寿命的末期,由中子通量引起的输出电流对由 γ 辐照引起的输出电流的比值仍是可以接受的话,则堆芯内裂变室的设计就是最佳的。

1. 裂变室的原理和结构

裂变室是在电离室一个电极上涂上有可裂变物质(如 ^{235}U)的脉冲电离室,其原理和结构同于电离室。因为裂变碎片的能量比核反应产生的次级粒子的能量大得多,所以裂变室的灵敏度比硼电离室更高, γ 射线影响更小,它的优点是其他中子探测器所不能比拟的。因此它更适用于更高的 γ 辐射场内的中子探测。因为裂变碎片的射程很短,所以裂变材料涂层最厚不超过 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ 。因此为了提高探测效率常做成多层裂变室。我国生产的裂变室热中子灵敏度可达到 $0.5\text{s}^{-1}/\text{n}\cdot\text{v}$,最高计数率可达 10^{-5}s^{-1} ,这里 n 为中子密度, v 为中子速度。

2. 影响裂变室性能的因素

为了满足堆芯内裂变室的特殊要求和性能,可以改变的主要设计参数有七个。

(1) 铀的状态

目前有两种基本型式的堆芯内裂变室,一种型式是浓缩氧化铀镀层在探测器外壳的内侧,形成灵敏体积的外壁,如图4-1所示。

第二种型式是在灵敏体积的外表面加上一个浓缩铀-铝合金的机加工套筒,如图4-2所示。探测器中子灵敏度的控制决定于铀镀层或铀—铝套筒的重量和厚度的控制。

(2) 铀的浓缩度

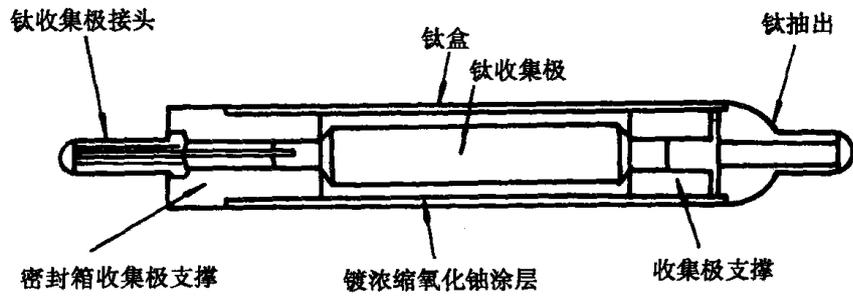


图 4-1 镀氧化铀的芯内裂变室

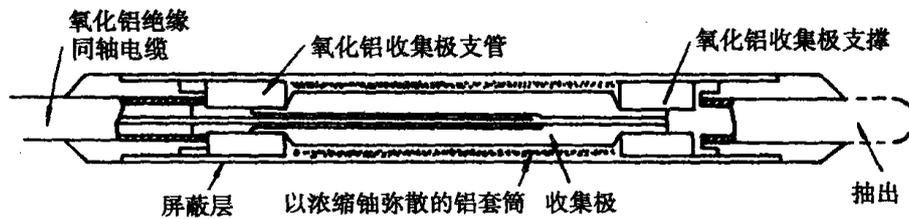


图 4-2 带铀-铝合金套筒的芯内裂变室

因为在中子敏感元件中,铀的浓缩度对 γ 灵敏度没有影响(铀的总质量是常数),所以提高信号噪声比的最好办法是增加敏感元件内所使用的铀的浓缩度,完全浓缩的铀能提供最大的中子灵敏度,而保持同样的灵敏度。

(3) 铀的表面积

对总质量已给定的浓缩铀层来讲,堆芯内裂变室的中子灵敏度与铀的表面积有关。常用改变裂变室的直径与长度来改变表面积,当室的几何形状改变时, γ 灵敏度也发生改变。因此,存在着一种能够产生最高信号噪声比的探测器直径与长度的比。

(4) 充气的类型

裂变室通常充入氩气,它具备所有期望的特性(化学惰性、良好的导热性、低的热中子截面以及合适的电离特性),通常采用的其它充入气体是氮、氦或氩与氮的混合气体。

由于非惰性的气体可能与电离室的材料起化合作用(特别是在有强的核辐射场存在的情况下),使对电离有用的气体减少了,因此希望气体的化学性质是惰性的,希望有高的导热性,以便消除由于信号产生过程中在电离室内产生的热量。如果热中子截面很高,那么充入的气体将被核转变用尽。

(5) 充气压力

只要裂变碎片和 γ 光子的射程大于发射极与收集极之间的间隙,堆芯内裂变室的中子和 γ 灵敏度就正比于充气的压力。多数芯内裂变室都工作在几个大气压力下,以达到较高的中子和 γ 灵敏度,因为 γ 和中子的灵敏度两者同时增加,所以改变充气的压力对探测器的寿命并没有明显的影响。

(6) 发射极-收集极的间隙

在裂变室设计中,决定性的因素是发射极与正电荷的收集极之间距离的大小,由于电离电流是所充气体原子数的函数,所以间隙大产生的电流也大。在低通量下,例如在源量程的水平

下,这种特性是特别重要的。在较高的通量下,必须把间隙减小,以便在达到与超过设计水平的最高中子通量时,保证探测器饱和。

(7) 尺寸的公差

探测器初始灵敏度与中子敏感材料以及发射极间隙中采用的尺寸有关,所以公差积累效应是极端重要的,并且必须予以仔细地考虑。

对于 $90 \times 10^4 \text{kW}$ 级压水堆堆芯检测系统,是在压水堆活性区内有可以抽出的不锈钢导管,小型裂变室可在此导管内移动,裂变室直径 4.75mm,长 60mm,电极为 0.1mm,涂有铀-235、充有氩气,用 Al_2O_3 绝缘。小型裂变室由直径为 1mm 的同轴电缆引出,因裂变室与长 3.6m 的燃料元件棒相比很小,它在堆芯内移动时,所引起的通量畸变可忽略不计。

4.2.2 涂硼室

涂硼室是在电离室的一个电极上涂上一层浓缩硼 ^{10}B 的膜。利用 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反应产生 α 粒子和 ^7Li ,这些次级带电粒子在电离室中引起电流信号。因为记录是累计电流,所以可用于高中子通量密度的测量。测量范围为 $10^5 \sim 10^{10} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

在动力堆内,使用涂 ^{10}B 的电离室作为固定堆芯内中子通量的监测器是可能的,但却是不实际的,其所以不实际,是因为 ^{10}B 的热中子截面比 ^{235}U 大 6 倍,从而导致燃耗太大。例如,在热中子通量 $4 \times 10^{23} \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (对大多数水堆来说,这是满足功率下的典型数值) 中工作 9 个月之后,裂变室的中子灵敏度降至其初始值的 50%。与此对比,在同样的条件下,涂 ^{10}B 的电离室在一个半月内,就降至其初始灵敏度的 50%。在 9 个月工作的末期,涂 ^{10}B 电离室的灵敏度降至其初始灵敏度的 2%,如图 4-3 所示,是在通量 $4 \times 10^{23} \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,把裂变室的灵敏度对时间的关系与涂 ^{10}B 电离室的相应关系进行了比较,涂硼室可以满意地作为移动式堆芯内探头的中子敏感元件,这是因为它暴露于中子通量中的总时间仅仅是反应堆运行的总时间

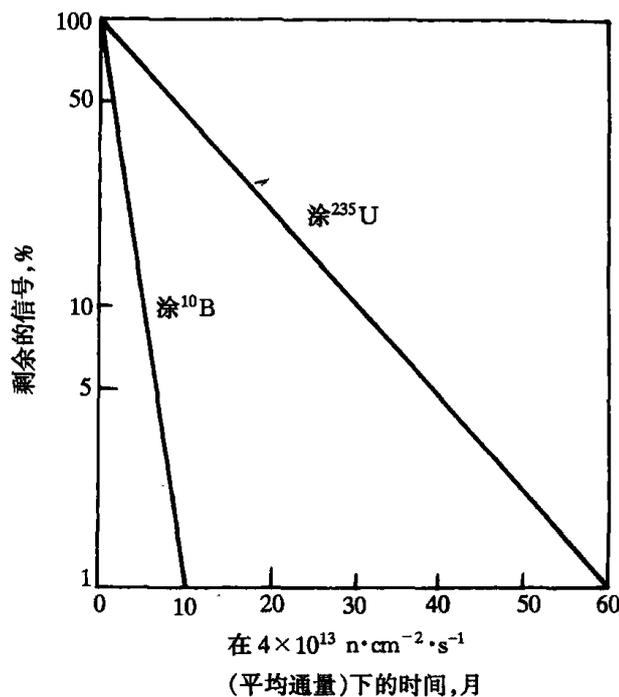


图 4-3 堆芯内电离室的燃耗线

的一小部分,穿过整个芯部所要求的时间很少超过 3min,而穿过堆芯的频率很少多于每个月一次,因此,用于移动式堆芯内探头中的涂硼电离室能满意地工作多年。

4.2.3 堆芯电离室

要使普通的电离室能方便地安装于反应堆壳体内,设计上要做重要的改变。1. 用无机绝缘代替有机绝缘;2. 当温度要求或腐蚀情况使得铝不适用时,用强度较高的、熔点较高的材料代替铝的部分;3. 增加间隙以适应各种部件的膨胀;4. 用高温接头和电缆或者用整体电缆代替常规同轴电缆或三芯电缆和接头;5. 应用的中子灵敏极涂层应在宽的温度范围内能经受得住热考验。

能工作到 371℃ 的电离室其灵敏度可与标准电离室相比拟。灵敏度大约为 $5 \times 10^{-14} \text{A}/(\text{n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})$,工作压力为 4.137MPa,使用温度为 550℃ 的电离室以及灵敏度大约 0.01 计数/ $(\text{n} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})$,使用温度为 550℃,工作压力为 4.137MPa 的裂变电离室都已应用于实际测量工作中。

堆芯电离室必须尺寸小,并能承受比活性区外高得多的通量峰和积分通量。当然,在进入功率区运行时,可以将起动区电离室提升出来,但是,高灵敏度的电离室将省去提升机构的费用并消除了这种机构带来的复杂性。电离室的可靠性同样对反应堆的设计有很大影响,因为,它的可靠性差或寿命短就要求有停堆时间长的更换方案。对起动区的能量测量或通量测绘,一般不要求高的绝对精确度,但对功率区的测量,通常是需要的。所有这些因素对直流型和脉冲型堆芯电离室的研究计划都有影响。在典型的几种动力堆环境中,设计指标也受到堆中温度、压力、 γ 场和中子场的影响。下面只限于讨论电离室设计和结构的一些要求。

1. 堆芯电离室理想的外壳和电极材料应具有下列性能:

- (1) 非常低的中子俘获截面;
- (2) 没有缓发 β 衰变的放射性子代产物;
- (3) 高温时有高的强度和耐腐蚀的能力;
- (4) 良好的机械加工性能和焊接性能;
- (5) 低的热膨胀系数。

因为没有一种材料拥有上述所有的性能,所以,特殊用途的电离室要求从工程上作出权衡。铝长期以来已被满意地选作低温用途的材料,因为它有低的中子俘获截面、良好的加工性能以及迅速衰变的子代产物。不锈钢也被采用,因为它有良好的加工性能、抗腐蚀能力和高强度。低锰不锈钢外壳的电离室所产生的剩余电流可和铝电离室相比。工业纯钛样品也显示出和铝相同的剩余电流特性,但是低蠕变钛合金在相同情况下产生的剩余电流高一个量级。加工钛组件的技术是相当新的。

虽然,从尺寸的角度考虑,外电极应可以作电离室的外壳,但是经验表明在低电平直流或脉冲电离室电路中具有多点接地是不适当的。所以,电极和外壳用不同的材料常常是有好处的。例如,市面上出售不锈钢外壳,氧化铝作绝缘,由钛作外电极的计数器。当中子灵敏电离室工作在输出电流大于 10^{-6}A 时,接地回路一般不会引起麻烦并且较小的电离室是实用的。

氧化铝几乎是用作堆芯电离室极之间的唯一绝缘物。有少数试验用的堆芯电离室也使用了 Mg_2SiO_4 。当电离室里边绝缘体的厚度和表面面积可和连接电缆的相应数据相比拟时,而且如果使用了相同的绝缘材料,那么在连接电缆里产生的漏电流将比在电离室产生的漏电流

大几个数量级。

填充气体的种类、气体压力和气隙宽度,对堆芯电离室工作特性有很大影响。大的气隙和高的气体压力增加了由裂变碎片产生的电荷,但是,由 γ 和 β 辐射产生的电荷以及饱和所需的电压和电荷收集时间也增大了。气体或气体混合物的种类影响到电荷的产生、电荷收集时间和在辐照环境中电离室的寿命。

为了得到良好的中子对 γ 的甄别性能,在另外一些电离室中已使用氦。辐照损伤多半使具有多原子稀有气体混合物的电离室的寿命限制在约 $10^{19} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。堆芯电离室正常情况下使用的间隙宽度范围从 $0.25 \sim 2 \text{ mm}$ 。

2. 统计涨落系统

由于电离室中的电流是由一系列离散的裂变现象所产生的,在外电路中的电流既有直流成分又有交流成分。这些成分的相应幅值是由单个脉冲的形状、脉冲的频率和电路的电阻、电感以及电容来决定的。有人提出了从电离室讯号的交流成分中折取信息的技术,这就是统计涨落技术,即由随机电流脉冲源引起的电流的变化是正比于平均脉冲率和脉冲高度的平方。

当应用于中子通量测量时,统计涨落系统的原理方框图如图 4-4 所示。输出电压的公式:

$$U = \frac{1}{2} \overline{NQ_e^2} Z^2 \frac{\omega_H}{\omega_H + \omega_L} \quad (4-1)$$

式中 U ——讯号大小, V;

\overline{N} ——平均脉冲率, 数/s;

Q_e ——电荷乘上它通过的电势场的分数, C;

Z ——中频通常转移阻抗, Ω ;

ω_H, ω_L ——系统通过交流放大器的上,下截止频率, rad/s。

由图 4-4 和式(4-1)可以得出下列重要的结论:

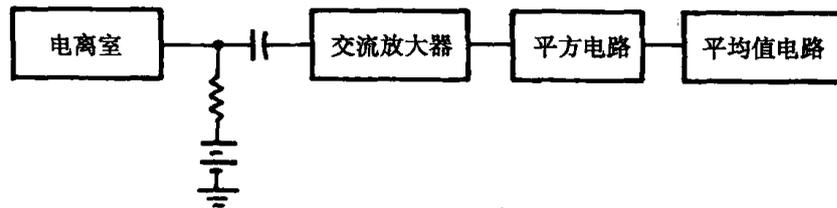


图 4-4 统计涨落系统原理图

(1) 漏电流直流成分由耦合电容阻挡,对输出讯号没有影响;

(2) 比中子产生的脉冲小得很多的 γ 和 β 产生的脉冲,由于式(4-1)中的 Q_e^2 项而大大地衰减了;

(3) 电离室、电缆和放大器输入级的噪音减到最小,因为它将被放大和平方。

3. 中子灵敏电离室的涂层

堆芯使用的中子灵敏电离室的电极上涂以硼混合物、裂变材料或者可转换材料和裂变材料的混合物。这些涂层在工作情况下必须牢固。

设计者可以改变厚度、同位素组分和涂层的表面积来得到所要求的电离室灵敏度。绝对

裂变电离室(即裂变室中每个裂变事件都能产生一个测量脉冲的裂变室)的涂层厚度要受到限制,以使在涂层中无论何处产生的裂变碎片形成的脉冲要比由 α, β, γ 或者电子噪音产生的脉冲要大。如果只要求裂变室或直流电离室测量相对通量数据,那么其涂层厚度可以增加。由于脉冲高度有一个宽的分布,涂层厚的裂变室需要非常稳定的电子线路。另外,因为脉冲叠加,由涂层材料固有的放射性衰变产生的 α 粒子数目可以限制涂层的最大厚度。涂层厚度小于 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 时,裂变脉冲一般比其它脉冲大一倍。通常裂变室涂层厚度的上限大约为 $1\text{mg}/\text{cm}^2$ 。

如果中子灵敏电离室有硼或者裂变材料的涂层时,作为中子辐照函数的电离室灵敏度是由在特定的辐照之后涂层剩余的原子数来决定的。因此,电离室在高通量下长期辐照后,灵敏度将下降。理论上,易裂变的和可转换的材料的混合物所构成的涂层,可以设计成在宽的辐照积分通量范围内有几乎不变的灵敏度。

4. 堆芯电离室的连接电缆

堆芯电离室的连接电缆必须把传送到读数仪表的假电流讯号的数值降低到最小。因为,相当长的一部分电缆暴露在反应堆温度范围和辐照环境中,连接高压的导体和收集电极之间的绝缘电阻可以确定用直流电离室所能够测量的最低通量。如果电缆电阻突然变化而不会产生电流脉冲的话,脉冲型电离室使用绝缘电阻较低的电缆能满意地工作。但是,绝缘电阻低的电缆通常噪声较大。统计涨落系统用的电缆要求实质上与脉冲系统一样。

在连接到读数系统输入端导体中由电子发射或收集所产生的电流也必须减到最小。

在脉冲和统计涨落系统中使用的连接电缆的电容应该降至最小,以获得最大的频带宽度。直径为 0.3375m 的氧化铝绝缘的不锈钢电缆,它典型的电容数值大约为 $400\text{PF}/\text{m}$ 。相同尺寸的石英纤维绝缘电缆的电容大约为 $100\text{PF}/\text{m}$ 。所以,在工业上,已选用石英纤维绝缘电缆作为堆芯电离室的一种。在石英纤维绝缘的不锈钢同轴电缆里面加上总厚度大约为 0.006m 的两层铜网后,改善了这种电缆对噪声的敏感性。

5. 堆芯电离室的应用

这种电离室毫无疑问的是堆芯中子通量测量的最常用仪器。它是唯一能从停堆到满功率范围内测量通量水平的堆芯中子探测器。它也有最快的响应时间。对中子的敏感涂层可以是与燃料相同的易裂变的同位素或者同位素混合物;所以,中子能谱的变化使燃料裂变率与探测器裂变率之比产生的差值,一般来说是很小的。可移动的通量测绘探测器的固定安装是可以实行的。如像电荷灵敏放大器这样的近代电子学系统,有可能分辨间隔仅为几个毫微秒的脉冲;因此,在 γ 或 β 事件数比过去使用高输入阻抗放大器电路测量的数目还要高得多的情况下,能使用脉冲高度或者开关甄别来探测中子裂变现象。过去,堆芯电离室没有实现的可能性,主要是由于存在电缆绝缘电阻、中子灵敏涂层的损耗以及生产微型电离室和电缆成本高等有关的实际问题。这些问题的研究虽然有了很大进展,而且因过去电离室存在问题而大大发展起来的很多其它堆芯中子通量测量方案在不久的将来可能过时,但是问题仍没有完全解决。

表4-1列出了几种堆芯电离室的详细说明。它表明通常几种电离室限定在大约为 $10^{14}\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 的最大中子通量。

最大的热中子通量对 γ 灵敏度的比大约为 $10^{-2}\text{r}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s}/(\text{n}\cdot\text{h})$,最高的工作温度为 550°C 左右,灵敏度减少率大约为每 $10^{19}\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 减少 0.3% 。

表 4-1 堆芯电离室性能说明

外壳材料	探测器绝缘	中子灵敏材料	热中子灵敏度 (A/nv)	γ 灵敏度 (A. h/B)	最大热中子通量 (nv)	最低绝缘电阻 (Ω)	最大工作温度 ($^{\circ}\text{C}$)	探测器外径 (m)	灵敏度减少 (%) (nvt)
Al	Al_2O_3	^{235}U	2.0×10^{-17}	2.5×10^{-14}	1.0×10^{14}	5×10	400	7.5×10^{-3}	
Al	Al_2O_3	^{10}B	1.0×10^{-17}	1.0×10^{-14}	1.0×10^{14}	2×10	400	5.64×10^{-3}	
Ti	Al_2O_3	^{235}U	7.0×10^{-18}	2.5×10^{-14}	1.0×10^{14}		320	5.4×10^{-3}	50 10^{21}
不锈钢	Al_2O_3	^{235}U	2.1×10^{-17}	1.4×10^{-14}	1.4×10^{14}		315	6.9×10^{-3}	
不锈钢	Al_2O_3	^{235}U	1.5×10^{-17}	3.0×10^{-14}	2.0×10^{14}		340	7.65×10^{-3}	1 3×10^{19}
不锈钢		^{235}U	2.0×10^{-17}	2.0×10^{-15}	1.0×10^{14}	3×10	550	3.75×10^{-3}	20 3×10^{20}
Ti	Al_2O_3	^{235}U	7.0×10^{-18}	2.5×10^{-14}	1.5×10^{13}		540	6.9×10^{-3}	

灵敏度大约为 10^{-3} 计数· $\text{cm}^2 \cdot \text{s}/\text{n}$ 的裂变电离室已可工作在 γ 剂量为 $2.58 \times 10^4 \text{c}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ 和 540°C 高的温度下。从所发表的资料难以判断探测器和连接电缆组件的工作极限,但是,一般的电缆限制了组件的工作温度不高于 350°C 。

探测器在它的工作寿命期间内,可容许的灵敏度变化与它特定的用途有关。由于灵敏度的变化正比于探测器的积分输出电流,十分精确的燃耗修正系数能由与每个探测器连接的在线数字计算机计算出结果。因此,中子灵敏度对 γ 灵敏度之比的下落表明应限制探测器中子灵敏材料的允许燃耗值。除中子灵敏涂层以外,材料的辐照损伤也可以限定探测器的寿命。

表 4-1 列出的任何一种中子灵敏电离室,只需简单地去掉中子灵敏涂层就能变成 γ 灵敏电离室。这些类型电离室的 γ 灵敏度是取决于入射 γ 射线的能量。然而,在设计反应堆内用 γ 灵敏电离室测量功率分布的系统时,这一问题不会引起任何实际问题,因为瞬发 γ 能谱不是反应堆位置的函数。

4.2.4 用 γ 温度计测量堆芯中子通量

测量由 γ 射线引起的包裹在热绝缘中的材料发热所致的温升的装置已研制用来测量反应堆堆芯功率分布。这种叫做 γ 温度计的典型装置的结构如图 4-5 所示。选择发热体材料具有的 γ 俘获截面应是:1. 当它在特定的反应堆中受最大的 γ 剂量辐照时,能产生易于测量

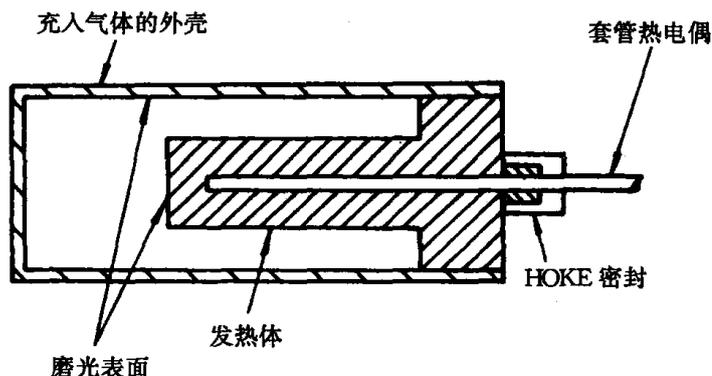


图 4-5 γ 温度计结构图

的温升;2. 足够低的截面使辐射热传递不致造成发射体温度和 γ 通量之间的非线性关系;3. 壳体的内表面是磨得非常光亮的,以减少辐射热的损失,壳体内充以热传导系数低的气体。镍铬-镍铝热电偶或者其它合适的温度测量元件以足够的深度插入到发热体材料中,以使得接触热阻(测量结点和发热体之间)对温度指示值的影响减至最小。热通道的温度通常不直接测量,而由载热剂温度测量来确定。当然,差值热电偶电路能用来测量发热体和热通道之间的温差,假如后者从其它的温度测量中不易得到的话。

和堆芯中子灵敏电离室比较, γ 温度计的优点为:1. 结构简单和价格便宜;2. 不会由于涂层燃耗使得温度变化;3. 信号大小将正比于堆芯小范围内产生的功率;4. 在高的辐照场中,寿命较长;5. 按同一工艺规程生产的探测器性能一致,不需要单独的校验。其缺点是:1. 较大的尺寸(外径大约为 0.8cm);2. 响应时间长(典型的为几分钟);3. 缓发 γ 场强度限制了量程;4. 灵敏度与热通道关系密切(典型的在 160℃ 时比 230℃ 的值大 20%)。

γ 温度计已成功地用于反应堆元件通道功率和轴向功率分布的测量。而且它们是无漂移和高可靠性。

4.2.5 自给能探测器

近年来,堆内通量检测系统开始采用较先进的小型自给能探测器,安置在堆芯内适当的位置上。一般有 30 个左右固定在堆芯内某些点上,另有 4 个可以上下移动的探测器可以在选定的位置上检测通量水平,探测器输出信号经双通道放大器放大后送往记录与数据处理系统。

堆内检测系统的检测范围是 15% ~ 100% 额定功率,相当于热中子通量为 $10^{11} \sim 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1. 自给能探测器的原理和种类

在辐射场中,由于物质与辐射场的相互作用,任何物体都可能因发射和吸收荷电粒子而带电。物体带电的情况与材料及其几何结构有关,置于辐射场中的二相互绝缘的导体(或半导体),由于带电情况和程度不同,它们之间就产生了电势差,若用导线连接它们,则导线中就会有电流流过,这种效应是辐射能量直接转化而来的,它的大小和变化反映出辐射场的特性和变化,自给能探测器就是利用这种现象制成的。

在自给能探测器中是辐射能量直接使电极充电,因此就不需要极化电极以及电源。自给能探测器的测量方式有两种,一种是测量充电电极之间的电势差,这种测量方式多见于剂量仪表;另一种是用弱电流测量仪表连接两个电极,测量流过的电流,这种情况多用于辐射监测仪表。自给能探测器主要有三种:(1) β 流中子探测器;(2)内转换中子探测器;(3)自给能 γ 探测器。

2. 自给能中子探测器的结构和种类及工作原理

(1) 自给能中子探测器的结构

自给能中子探测器目前已广泛应用于反应堆堆芯中子通量的检测,它的一般结构如图4-6所示。

这种探测器由发射体、绝缘体、收集体及电缆组成。中心电极称为发射体,它是由中子灵敏材料制成。发射体是自给能中子探测器的核心部分,它基本上决定了探测器的物理特性。探测器的外壳即是收集体,它是由对中子不灵敏的材料(如因科镍 600,低锰不锈钢或纯镍等)制成,材料的厚度通常是 0.1mm;发射体和收集体之间是绝缘体,通常采用无机绝缘材料(如

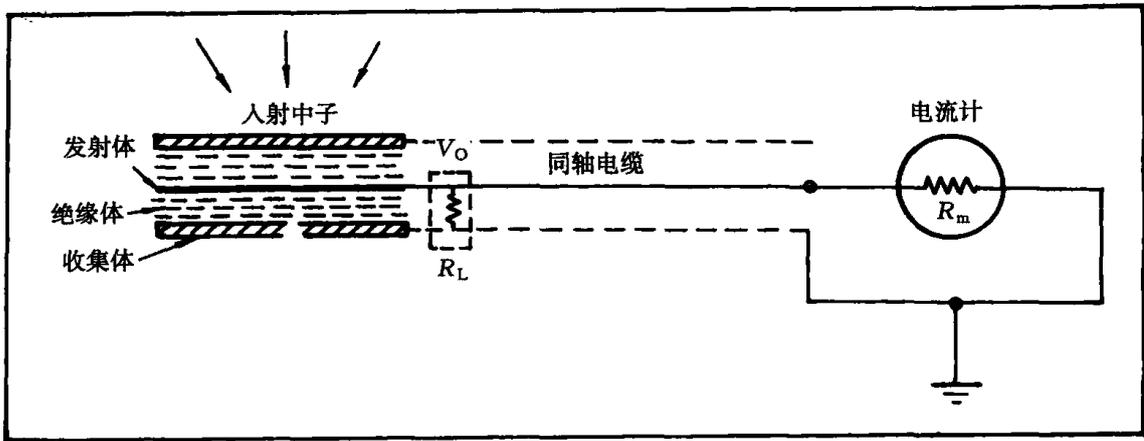


图 4-6 自给能中子探测器的结构图

MgO、Al₂O₃、BeO 等), 绝缘体的厚度通常为 0.2mm 左右, 为了传递自给能探测器的信号必须使用电缆, 电缆连接到探测器的一端, 与探测器几乎处于相同的强辐射场中, 因此不能使用有机绝缘电缆, 通常采用金属外壳—无机绝缘—金属芯线同轴电缆。金属材料一般用因科镍或不锈钢及纯镍等, 无机绝缘材料仍采用 MgO 或者 Al₂O₃。

自给能中子探测器的外径一般为 1~3mm 左右, 其灵敏长度则可以根据需要从几厘米变化到几米, 柔性探头还可以绕制成螺旋形探头, 以提高灵敏度。

(2) 自给能中子探测器的种类和工作原理

发射体与入射中子相互作用而形成电流的机理不同, 探测器对中子场变化的响应也就不同。根据探测器对中子场的响应, 可以将自给能中子探测器分为 β 流中子探测器和内转换中子探测器两类。

① β 流中子探测器

β 流中子探测器又称延迟响应自给能中子探测器, 在这类探测器中, 发射体材料俘获中子后形成短寿命的 β 放射性同位素。活化了的发射体在 β 衰变过程中发射高能电子流, 平衡时, 电极间的电子流形成正比于中子通量的电流, 我们测量这电流就可测出中子通量。 β 流中子探测器的基本原理和一般自给能探测器的基本原理相同, 结构也相似, 如图 4-7 所示。

属于这类自给能中子探测器的发射体材料主要有铯、钷、银等。自给能中子探测器的中子灵敏度主要取决于发射体材料的中子截面。探测器对中子场变化的响应时间取决于中子活化 β 放射性同位素的半衰期。探测器的发射体材料的燃耗与发射体中子截面和几何结构有关。下表给出了几种主要的自给能中子探测器的有关资料。

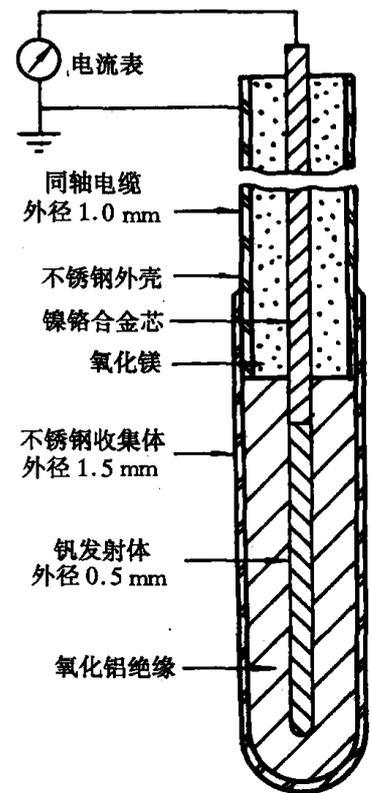


图 4-7 β 流中子探测器示意图

表 4-2 几种主要自给能探测器特性数据表

发射体材料	密度 g/cm ³	中子截面 ($\times 10^{-28}/\text{m}^2$)	探测器响应	反应	相对灵敏度 铊=100	损耗在 10^{14} 通量下 % 每年
铊	12.5	150	$T_{\frac{1}{2}} = \begin{matrix} 42\text{s}(92\%) \\ 4.3\text{min}(8\%) \end{matrix}$	$n\beta$	100	32
钒	5.96	5.1	$T_{\frac{1}{2}} = 3.76\text{min}$	$n\beta$	17.5	1.6
钴	8.9	37.0	瞬时	$n\gamma\beta$	1.5	11
铀	21.5	8.8	瞬时	$n\gamma e + \gamma e$	2.0	1.8

② 内转换中子探测器

内转换中子探测器又称瞬时响应自给能中子探测器,其基本结构和 β 流中子探测器相同,在这类探测器中,发射体原子核俘获中子之后形成处于激发状态的复合核,复合核退激过程中发射 γ 射线。 γ 射线与探测器材料通过康普顿散射,光电效应以及产生电子对等相互作用,转换为荷能电子,这些电子的发射,就形成了探测器的电流,由于这一过程是在极短的时间内发生,所以这类探测器对中子场变化的响应是瞬时的,属于这类探测器的发射体材料主要有钴、钒、镉等。

β 流中子探测器,一般输出信号强度大,可以用在反应堆堆芯通量描绘系统,能给出精确的通量分布,内转换自给能中子探测器可以用于反应堆安全和控制系统。

3. 自给能 γ 探测器

研究表明,动力堆 γ 和中子通量分布十分相近,因此在反应堆保护系统和功率分布测量中应用 γ 探测器的问题,近年来做了不少研究,因为在这两个系统中利用 γ 测量似乎都具有某些比中子测量更优越的地方,优点之一是 γ 探测器与中子探测器相比能够在更大的体积内测量功率密度;优点之二是 γ 探测器的损耗率一般可以忽略不计;优点之三是灵敏度不随时间而变化等,这类探测器的基本原理与 β 流中子探测器的基本原理是相同的。入射的 γ 射线由发射体俘获或者散射时产生康普顿电子和光子,这些电子的一部分逸出,相应地在发射体上产生正电荷,探测器输出一小电流,在平衡状态下,探测器输出的小电流正比于其周围的 γ 通量,因而测量这一电流的大小就可测出 γ 通量的大小。已经研制出用铅、镁、因科镍 600 等材料做发射体的自给能 γ 探测器,但因为自给能 γ 探测器灵敏度低,容易受探测器材料和有关部件杂质活化的影响,目前还不太成熟,尚处于试验阶段。

4. 自给能探测器连接电缆

在连接探测器和读数装置的电缆中,辐照感生的假电流对测量影响很大,因为这个假电流不易与发射体产生的电流区分开来。在高中子通量场或强 γ 射线场中的连接电缆的长度,可能比探测器有效长度大几个量级。因此,通常需要特殊的电缆和读数电路,以减小在单芯同轴电缆中由假电流引起的误差。其中一个试验是,电缆含有两条相同的、相互平行的芯线,其中一条芯线与探测器发射体相连接,另一条芯线在探测器端断路,此电缆与差分放大器电路相连以望得到电缆补偿。当电缆在辐照场中围绕它的轴旋转时,在差分输出电流(相当于任一导体

无补偿输出的一半)中观察到了周期性的变化,但是,具有双芯螺旋形绞合的,螺距为 2cm 的电缆,它产生的差分输出电流比直径差不多的、在相同的辐照场中照射的单芯同轴电缆的输出电流小两个量级。

对 80cm 长的氧化镁绝缘的、不锈钢外壳的同轴电缆,在中子通量为 $10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 和 γ 剂量率为 $5 \times 10^6 \text{ Gy/h}$ 的条件下进行辐照试验时,漏电流正比于所加的偏压,由电缆的电压与电流关系曲线的斜率决定的有效电阻在 150°C 时为 $2 \times 10^8 \Omega$ 。电缆不加电压时,漏电流大约为 $-6 \times 10^{-8} \text{ A}$ 。在相同的通量下,用相同电缆连接的铯探测器的电流与电压的关系曲线与仅仅是电缆的曲线斜率相同,只是平移一恒定距离。因此,在这个特殊探测器中,气体电离产生的电流在观测到的电流中显然不占重要地位。

在铝导管里,同轴电缆受辐照所产生的假电流大约为在相同的辐照条件下不锈钢导管里观测到的假电流的两倍左右。这个试验清楚地表明,当同轴电缆受辐照时所观察到的假电流,明显地与电缆壳体附近的材料以及壳体内材料有关。在另一个试验中,用了一个产生 10^5 Gy/h 剂量率的 γ 源,当受辐照的电缆外包 5 密尔厚的铅时,在直径为 0.018 8m、不锈钢作外壳、氧化镁绝缘的、未规定长度的同轴电缆中产生的假电流从 $6 \times 10^{-10} \text{ A}$ 增加到 $1.2 \times 10^{-8} \text{ A}$ 。

通过试验得出这样的结论:氧化镁、氧化铍和氧化铝的绝缘电阻,在非常低的电压梯度情况下,在使用时不会发生明显变化,由于辐照引起的物理性能和机械性能方面的变化不会使电缆损坏。

5. 自给能探测器的应用

和电离室比较,堆芯功率测量用的 β 流中子探测器的优点是尺寸小,生产费用较低和电子设备较简单。其缺点是响应时间较长,对中子能谱的变化较为灵敏以及探测器单位长度输出电流较小。因为用铯或者钷作为发射体的探测器的衰变常数是秒的量级,因此,它们用在功率水平的自动控制或快速停堆系统是不适合的。所以,它们只限于用来测绘中子通量分布,在这方面它能和活化丝、活化球以及气体活体系统相竞争,因为,虽然这些方法可以测量出更加详细的空间分布数据,但它们由于活化和计数的原因,滞后时间为小时的量级。

同 β 流探测器比较,内转换探测器具有响应时间快的优点,但灵敏度大为降低。

自给能 γ 探测器基本上没有“烧完”的问题,所以,在它的整个使用期内,灵敏度基本上不变。它们对中子的能量和裂变材料的浓度也是不灵敏的,所以,在反应堆堆芯的寿命期间内,不管安装在反应堆任何位置和裂变材料浓度怎样变化,它们都将给出相对裂变率的指示值。采用铅作发射体和铝作收集体的 γ 探测器已取得了良好的结果,但具体的数据没有报道,有关这种较新型的探测器在各种情况下应用的可能性,在得出结论之前,需要作进一步的试验。

用铯和钷作为发射体的几种探测器,在单位中子通量下,长度为 1cm 直径为 0.5mm 和 1.0mm 的铯发射体探测器的灵敏度分别为 $1.33 \times 10^{-21} \text{ A}$ 和 $2.25 \times 10^{-21} \text{ A}$ 。由于在这两种探测器中,铯的数量相差三倍,很明显,甚至在直径比较小的金属体中, β 自屏效应也是十分严重的。在探测器寿命的初期,探测器灵敏度比将燃耗数据外推到时间为零时的值小百分之几。

假如探测器输出电流可以精确地换算为裂变率数据的话,那么,每种探测器或每个探测器均需要在它的严格环境中刻度。自给能中子探测器在安装于反应堆内之后,在只有一种裂变同位素而且堆芯内通量能量均匀分布的反应堆中,相对功率测量可不要求广泛地校验探测器。

用铯发射体的 β 流中子探测器已能在 300°C 温度,累积辐照到 $3 \times 10^{21} \text{ n}/\text{cm}^2$ 的情况下工

作。基于辐照减小一个量级所得到的数据,预计灵敏度减少大约 30%。所以,在探测器寿命期内,得到的测量准确度主要取决于预先推算出来的发射体材料燃耗的准确度。

用钒和钴作为发射体材料的中子探测器已能工作到累积辐照为 $3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ 。钒探测器的灵敏度每 10^{21}n/cm^2 降低大约 1%;钴探测器的灵敏度每 10^{21}n/cm^2 降低大约 2%。钴发射体探测器的本底电流,在辐照达到 $3 \times 10^{22} \text{n/cm}^2$ 之后反应堆停堆时,增加到约为满功率读数的 0.6%。

自给能探测器用于液态金属钠冷却的快堆时,将会出现更多的问题。钠冷却剂中的 γ 射线场,一般比水或气体冷却剂中的高。未来的快中子动力堆的载热剂温度可能达到 482°C 至 649°C ,在这些反应堆中的中子能谱是在快中子或者中能中子能量范围内,那么目前使用的发射体材料的俘获截面会大大地减少。如果一种铯发射体探测器安装在正考虑作为工业应用的任何一种动力快堆中,将产生一个和连接电缆中感生的本底电流同量级的电流。所以,电缆补偿技术,如螺旋形双芯导体方案,显然是需要的。一个未说明类型的 β 流探测器给出一个相反极性的讯号,它随着功率的变化而同时变化,且与预期的讯号相比约大一个量级。显然,需要在钠冷快堆中做性能试验,以便为用于快中子动力堆的自给能探测器进一步提供性能数据。

4.3 压水堆堆芯内中子通量检测仪表系统

这里以大亚湾核电厂 2 台机组反应堆为例来说明压水堆堆芯内中子通量检测仪表系统。

堆内中子通量检测数据分两组进行,输送给纸带图形记录仪和集中数据处理系统存盘,存盘数据再由大容量计算机进行离线处理,输往电厂监督计算机系统,并由它处理和给出功率分布图,从而为反应堆启动和运行提供信息。

4.3.1 压水堆堆芯内中子通量检测仪表系统的职能

堆芯内中子通量检测仪表系统的职能是为反应堆启动和正常运行提供信息,具体分为两个方面。

1. 堆启动期间的职能

- (1) 检查寿命期开始时堆芯功率分布是否与设计时期望的功率分布相符;
- (2) 检查用于事故工况设计的热点因子是否是保守的;
- (3) 校准堆外核检测仪表的电离室;
- (4) 探测反应堆在装料中可能出现的差错。

2. 正常运行时的职能

- (1) 检查与燃耗对应的功率分布是否与设计时期望的功率分布相符;
- (2) 监测各燃料组件的燃耗;
- (3) 校准堆外核仪表;
- (4) 探测堆芯有否偏离正常运行。

4.3.2 堆芯内中子通量检测仪表系统的组成和布置

大亚湾核电厂 2 台机组反应堆内核检测仪表系统组成情况是共有 50 个燃料组件的检测

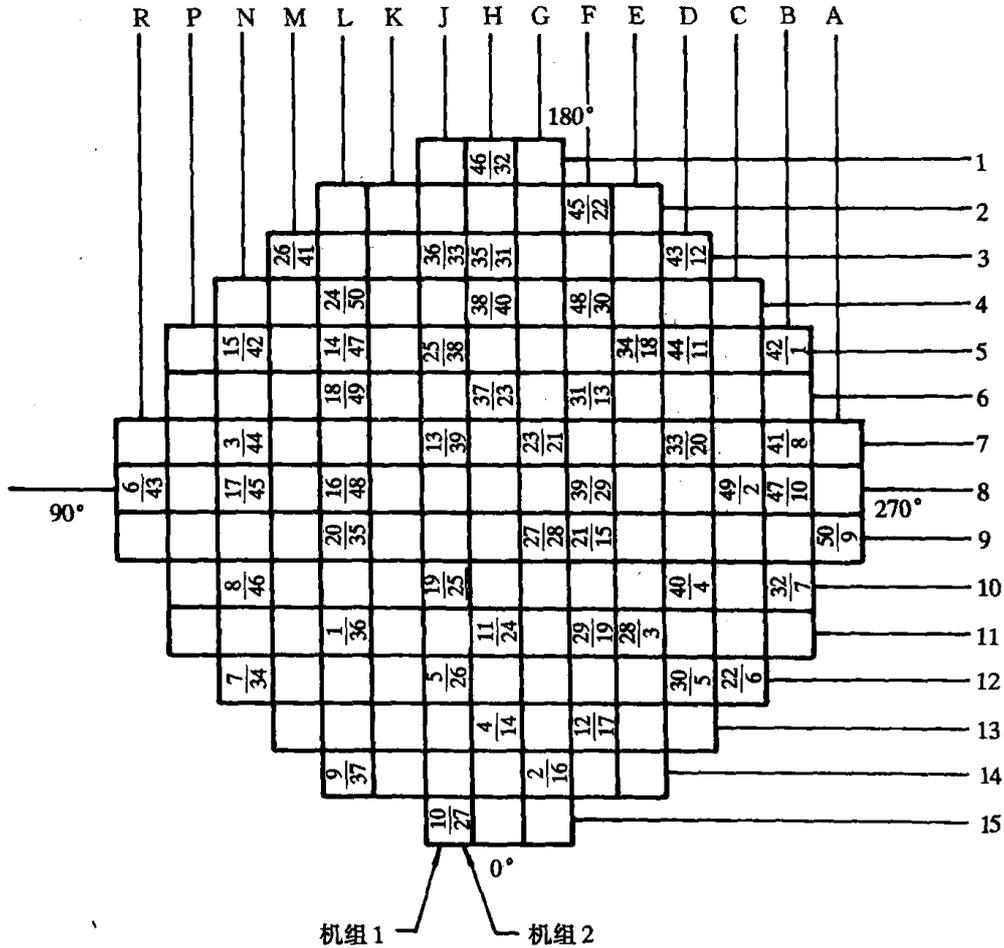


图 4-8 压水堆内中子通量检测通道布置图

通量。探测通道在堆芯内的布置如图 4-8 所示。每个检测通道都有特定的编号,1 号机组的编号标在左方,2 号机组的编号标在右方。检测通道内插入指套管(如图 4-9 所示),探测器在指套管内部移动,从而达到在堆芯整个高度上逐点检测中子通量的目的。

1. 指套管

指套管为空心圆管(如图 4-10 所示),端部由一锥形焊接封闭,由导向管插入检测通道,另一端在密封段处,换料时由检测通道内抽出。

2. 导向管

导向管一端焊在压力容器下封头的套筒上,另一端焊在手动隔离阀上。指套管外壁和导向管内壁为一回路压力边界。

3. 手动隔离阀

手动隔离阀采用能自动减少间隙达到完全气密的球形外壳,阀座焊到密封段上。指套管抽出时它手动关闭,达到主载热剂密封的目的。

4. 密封段

密封段用来保证导向管和指套管之间的静态和动态密封,共分两段,两段之间装有泄漏探测器;

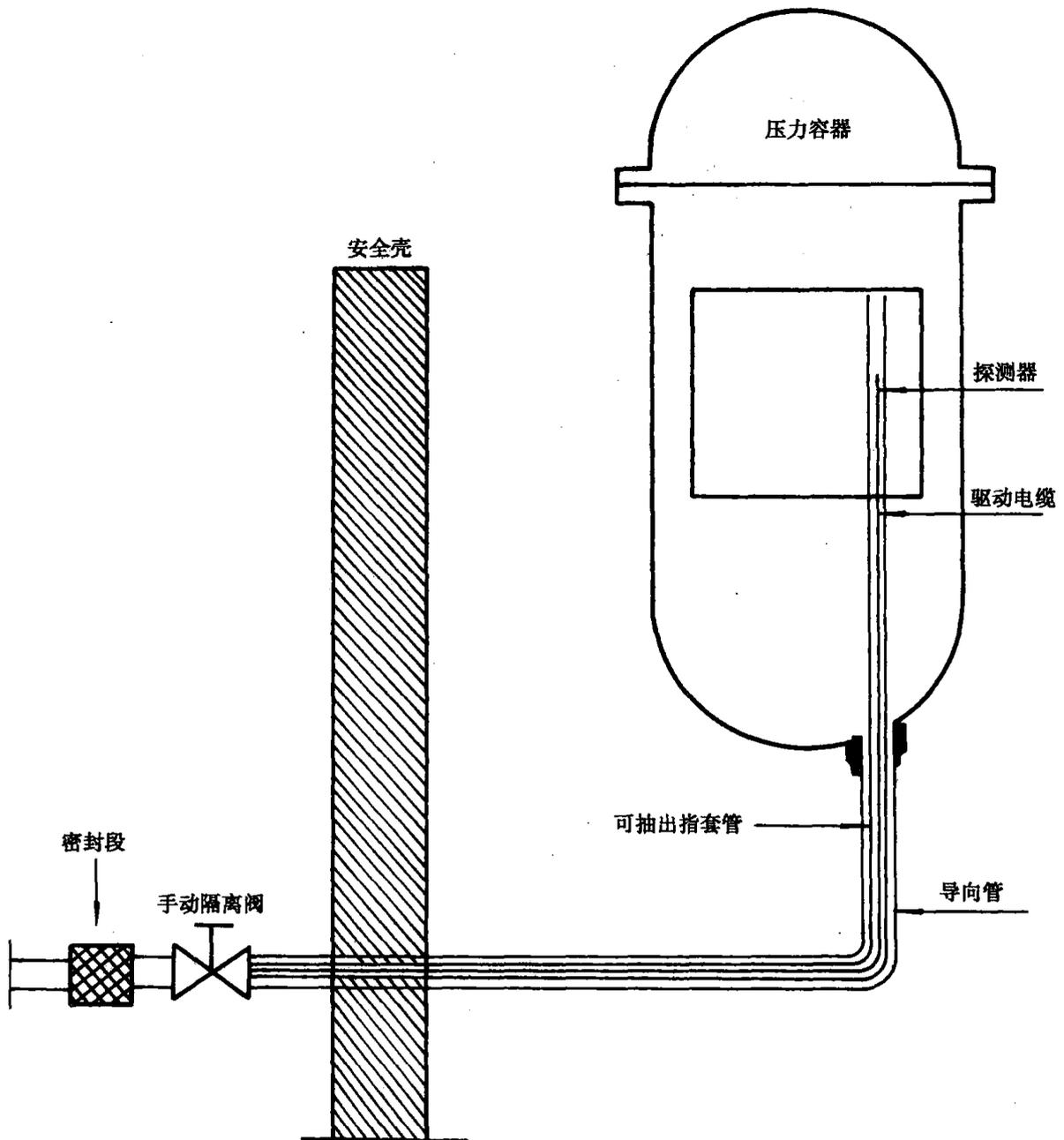


图 4-9 检测通道、指套管、探测器和导向管之间的关系

5. 球检验阀

球检验阀的作用是在指套管内漏时阻止主载热剂通过自动阀外泄,当指套管内漏时,小球会堵住通向自动阀的锥形孔。另一个作用是通过指套管泄漏探测报警,并阻止自动阀开启。

6. 自动阀

自动阀装在球阀和路选择器之间,由不锈钢制成。它们是常闭的,指套管断裂时隔断堆芯来的主载热剂,探测器到来前自动开启,抽出后自动关闭。

7. 驱动装置

驱动装置通过驱动螺旋形电缆来移动与后者相连的探测器。它由齿轮电动机、驱动轮、存

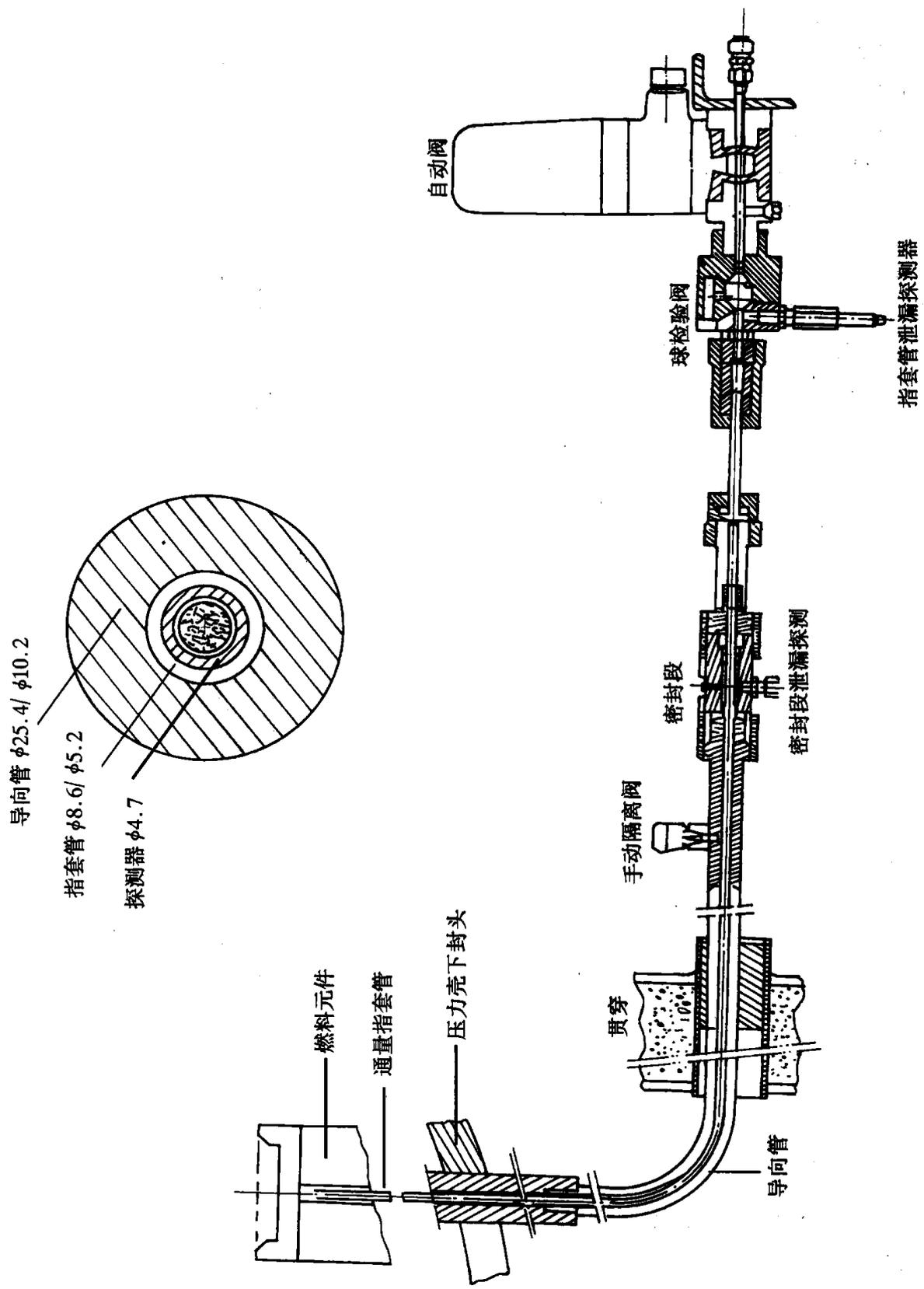


图 4-10 压水堆内中子通量检测系统密封装置

贮卷盘、位置发送器、安全装置和加热元件组成。

8. 传送装置

传送装置由组选择器,路组选择器和路选择器组成。

组选择器的功用是把探测器引入正常路径、救援路径、校准路径或存贮路径。路组选择器的功用是接纳来自正常路径和救援路径的探测器。第4组的路组选择器另外接纳来自校准路径的探测器。路选择器的功用是把探测器引入10个检测通道之一。

9. 读出和控制机柜

读出和控制机柜共有6台,1台公用,另5台对应于5只探测器及其驱动和传动装置。机柜上设有各种显示和控制设备。

10. 探测器

探测器是堆芯通量的敏感元件,使用微型裂变室,其结构如图4-11所示。它由焊接端塞、同心包壳及测量体(灵敏体)三部分组成。微型裂变室与导电及驱动两用的同轴电缆相连接。

微型裂变室外径4.7mm,长66mm,灵敏体长度27mm,它的外壳、外电极以及与之相连电缆的材料均为不锈钢,绝缘材料为氧化铝(Al_2O_3)。

微型裂变室灵敏体内充有纯度为99.9995%的氙气,充气压力为 $1.1 \times 10^5 Pa$ 。电极表面涂有一层厚度为 $0.3 mg/cm^2$ 的二氧化铀, ^{235}U 的浓度为93%。

其工作原理是:热中子射入微型裂变室灵敏体内打在涂有二氧化铀的电极上,使 ^{235}U 核发生裂变。重的带正电的裂变碎片使氙气电离,产生电子-正离子对。电子和正离子在外加电场作用下向两极漂移而形成脉冲,脉冲叠加起来,则形成电流。检测出电流大小,就可以测得中子通量。微型裂变室的输出平均电流 I_0 为:

$$I_0 = S_n \cdot \varphi \quad (4-2)$$

式中 S_n ——微型裂变室对热中子的灵敏度;

φ ——检测区的热中子通量。

4.3.3 核检测仪表读出电路原理

向探测器微型裂变室电极间施高压,与通量水平成比例的输出电流流经负载电阻。负载电阻由数只不同阻值的电阻串、并而成,如图4-12所示。用分压法和分流法取出信号,进行放大再输往计算机或送往记录仪。

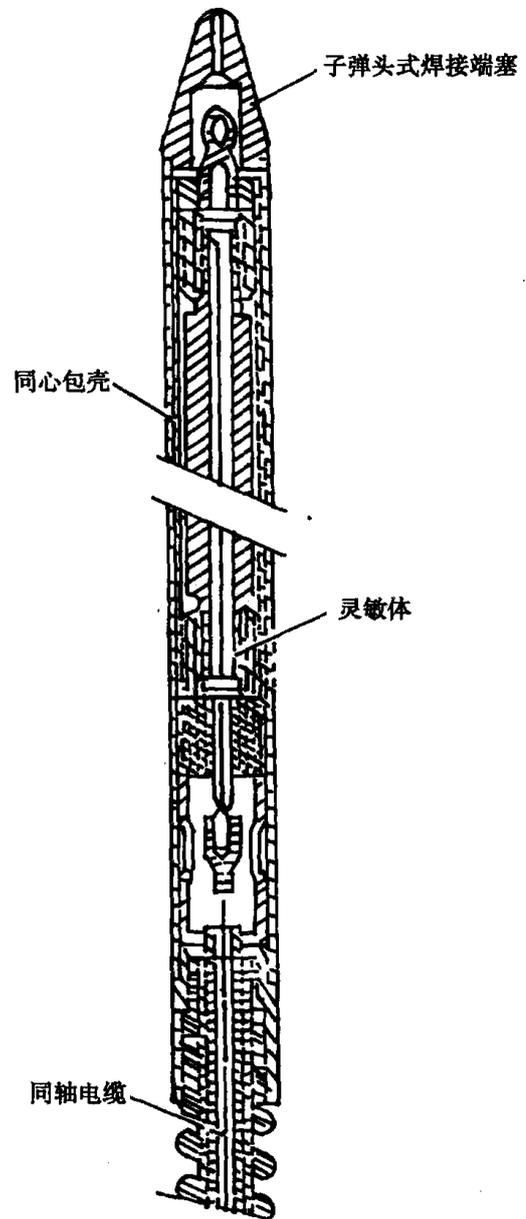


图4-11 微型裂变室

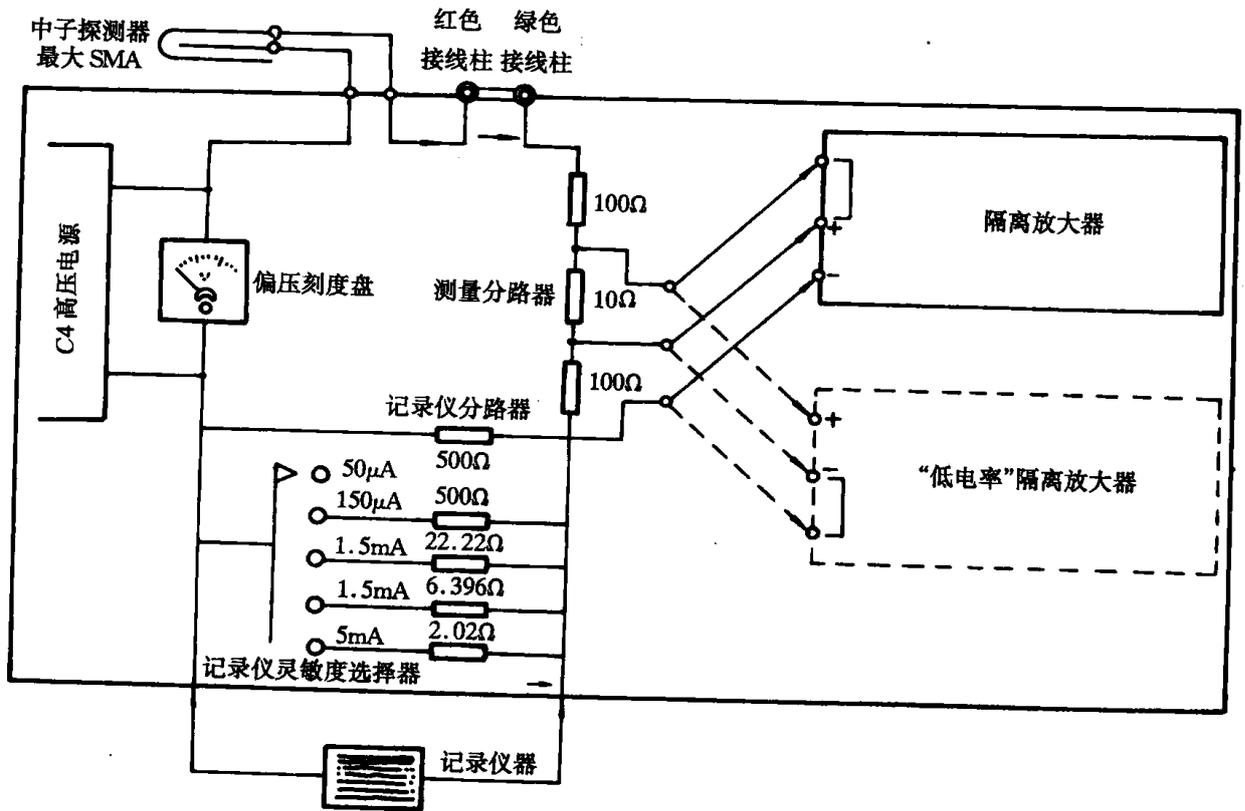


图 4-12 核检测读出电路原理图

第 5 章 核辐射剂量监测仪表

核反应堆无论在正常运行还是出事故的时候,都存在大量的核辐射和排出一定量的放射性物质。要确保工作人员的安全,就需要建立起一整套核辐射监测手段,用测量和定量分析的方法确定辐射场和排出物的放射性。

5.1 核辐射剂量监测方法和仪表

虽然核辐射具有无色、无味,不为人们感觉器官直接察觉的特性,但它也具有自身的运动规律。因此,可以利用它们和物质相互作用所呈现的物理、化学变化进行观察和检测。目前可以应用于核辐射探测的方法很多,有许多探测仪表可供选用。

核辐射检测装置通常由核辐射探测器、探测器输出信号的处理仪器和其它一些附属设备组成。核辐射探测器是完成测量任务的关键部件,整个测量系统的技术指标首先取决于探测器。了解并正确使用探测器是完成测量任务的先决条件。

核辐射探测器的主要作用是进入探测器灵敏区域的核辐射转变成为信号处理设备能够觉察出来的信号,例如电信号、光信号、声信号、热信号等。

这里我们着重介绍用得最多的三类探测器:气体探测器、半导体探测器和闪烁探测器。这三类探测器都是把核辐射转变成为电信号,再由电信号处理设备进行分析和处理。

与三类探测器配合的电信号处理设备大部分是核电子仪器或单元。例如:高压电源、放大器、甄别器、计数器、计数率计、脉冲幅度分析器、符合和反符合单元等。有时,这些电信号处理仪器与计算机连接起来共同运行。有关这一部分的内容已有其它教材详述,这里不再叙述。

若按照技术指标和用途的差别来区分,三类探测器中每一类都有很多种,这里我们侧重讲述在学习这三类探测器时需要了解和掌握的几个主要方面:1. 探测器把核辐射转变为电信号的物理过程;2. 探测器的输出回路及其与探测器输出电信号的关系;3. 探测器的主要技术指标及其用途。

探测器把核辐射转变为电信号的物理过程在很大程度上决定了探测器的主要技术性能和用途。就这三类探测器而言,核辐射转变为电信号的过程不管多么复杂和不同,概括地讲总是分为两个阶段。第一阶段:入射的粒子如果不是带电的,如 γ 光子和中子,则通过与探测器物质的相互作用,转变或产生出带电粒子,这些带电粒子在探测器内的一个特定区域使原子或分子电离和激发;第二阶段:被电离或激发的原子,在探测器的外加电场中作定向移动,因而在探测器外部负载电路中给出一个电流信号,称为探测器的本征电流信号。这个本征电流信号的特点完全取决于核辐射在探测器内转变为电信号的物理过程,而与探测器的外部负载电路无关。

为了使探测器内部产生一定电场,需供给探测器以一定数值的直流电压。在探测器与提

供直流电压的电源之间还有若干个电子元件。为了把本征电流信号改造成适合测量任务需要的电信号,在探测器与电信号处理仪器之间也需要一些电子线路和元件。所有这些元件组成了探测器的外部负载电路。如图 5-1 所示。

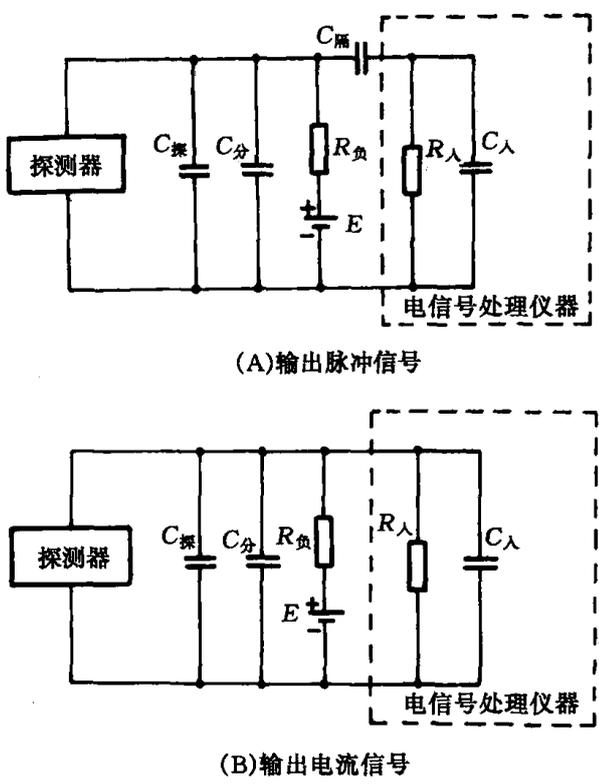


图 5-1 探测器的外部负载电路

- E ——直流电压电源;
- $R_{负}$ ——探测器的负载电阻;
- $R_{入}$ ——电信号处理仪器的输入电阻;
- $C_{入}$ ——电信号处理仪器的输入电容;
- $C_{隔}$ ——把探测器需要的直流电压与电信号处理器输入端隔开的电容;
- $C_{分}$ ——连结探测器和电子元件的电缆线等的分布电容;
- $C_{探}$ ——探测器本身的电容。

对大多数测量任务来说,这三类探测器可以把本征电流信号改造成慢变化的电流信号,也可以改造成脉冲信号,然后再被送到电信号处理仪器中去。输出慢变化的电流信号的状况通常称为探测器的电流型工作状态,而输出脉冲信号的状况称为探测器的脉冲型工作状态。大多数探测器可以工作在这两种状况中的任何一种。

5.1.1 气体探测器

这里主要是指电离室、正比计数器和 G-M 计数器等。因为这三种探测器将核辐射转变成电信号的物理过程都是在探测器内充特定气体的特定体积中进行的,所以它们统称为气体探测器。

气体探测器的结构示意图如图 5-2 所示。

1. 外加电场与离子对收集的关系

正、负离子对在外加电场的作用下作定向运动,但是,实践证明,正极收集到的电子数目(或负极收集到的正离子数目)并不正好等于入射粒子在气体中产生的总的离子对数目,而是随着外加电压的数值而变化。如图 5-3 所示,纵坐标代表电极收集到的离子对的数目,横坐标代表电压的数值,2 条曲线分别表示相应于 β 粒子和 α 粒子所产生的离子对收集的情况。

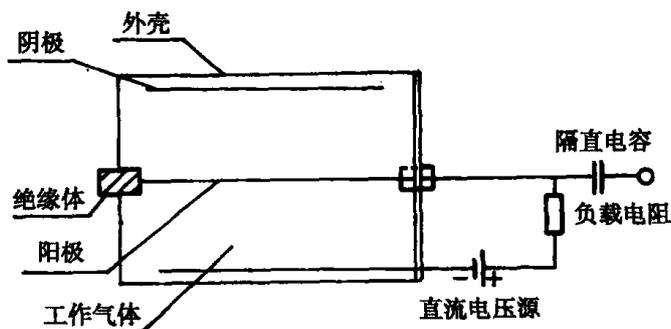


图 5-2 气体探测器结构示意图(圆柱型)

I:复合区,电极收集到的离子对

数目 N 低于由带电粒子产生的总的离子对数目 N_0 。 N_0 中有部分因为复合而消失。

II:饱和区,这是电离室的工作区域,电极收集到的离子对数目 N 正好等于带电粒子产生的总的离子对数目 N_0 。即电极收集到的离子对数目达到饱和。

III:正比区,这是正比计数器通常选择的工作区域,其特点是 N 与 N_0 的比值是个定值。 $M = N/N_0$,

M 完全由探测器的结构与外加直流电压的数值所决定,称为气体放大倍数, M 不随 N_0 而变化,即 N 总是与 N_0 成正比的。

IV:有限正比区,其特点是 M 的数值与 N_0 的大小有关系, N_0 比较大时 M 就比较小,即 N 与 N_0 的正比关系受到限制。

V:G-M 区,是 G-M 计数器的工作区域,其特点是 N 保持定值,仅由计数器的结构与外加电压的数值所决定,与 N_0 无关,从图中可见,两条曲线重合。

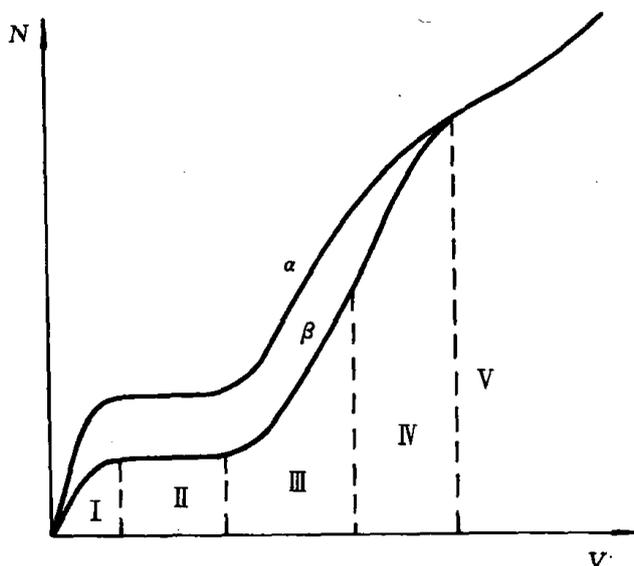


图 5-3 气体探测器电极收集到的离子对数目与外加直流电压 V 的关系

2. 盖革-弥勒计数管

盖革-弥勒计数管(简写 G-M 计数管)的结构简单,使用方便,灵敏度很高,而价格便宜,能满足测量的多方面要求,是目前应用得相当普遍的一种探测工具,它的结构与正比计数器相似,可以做成各种形状。

G-M 计数管工作于电离电流-电压曲线的 G-M 区,由于这时电压更高,电离一经发生,电子便以更高的速度向中央丝极运动,发生比正比区更强烈的“雪崩”现象。

(1) G-M 计数管的特点

① 无法甄别射线的种类,若测 β 和 γ 混合场时则采用吸收层甄别掉 β 射线,以达测量 γ 射线的目的。

② 不宜于测量强 γ 辐射场,因为存在约 10^{-4} s 的“失效时间”,在测量强 γ 辐射时会有漏计数。

③ 适用于低辐射场的测量,因为它具有较高的测量灵敏度。

④ 不需放大器,这就降低了计数设备的价格,因为气体放大倍数很大。

⑤ 只能用作粒子强度的测量,不能用于入射粒子能量的测量。

(2) G-M 计数管的特性

① 坪特性

在放射源强度不变的情况下,计数率随外加电压 V 变化的曲线称为坪曲线,此曲线上计数率基本上不随 V 而改变的一段直线称作计数管的“坪”,其长度叫“坪长”,其斜率称为“坪斜”,一个很好的计数管必须具有很宽的坪。一般为 $100 \sim 300$ V,坪斜不大于 5% (每 100V)。图 5-4 中, V_s 称为起始电压, $V_D - V_G$ 称为“坪区”,即坪长, V_G 称为盖格区电压, V_D 称为实际工作电压。坪区输出变化的百分数与坪长的比称为坪斜。即有

$$\text{坪斜} = \frac{N_D - N_G}{N_G(V_D - V_G)} \times 100\% \quad (5-1)$$

式中, N_D 和 N_G 为对应于电压 V_D 和 V_G 的计数率。

一般情况下正常的计数管的坪斜小于 0.1%。

② 死时间

死时间又称为失效时间,是 G-M 计数管不能对入射粒子计数的时间,一般约在 $100 \sim 300 \mu\text{s}$ 间。

之所以有死时间,是因为计数管在“雪崩电离”之后,正离子鞘屏蔽了电场,造成一定时间内计数的失效。这对于反映时间信息是很不利的。我们用 τ 表示死时间,对于辐射的绝对测量,则就可以按下式对死时间的影响进行校正。

$$N_0 = \frac{N}{1 - \tau N} \quad (5-2)$$

式中 N_0 ——真正计数率;

N ——实测计数率。

③ 探测效率

探测效率为一个粒子通过计数管的灵敏体积而能引起输出脉冲的几率,可以近似的认为 G-M 计数管对带电粒子的探测效率为 100%,而对 γ 射线约为 1% 左右。

G-M 计数管应用相当广泛,可作 α 、 β 、 γ 射线强度的相对测量以及 β 源放射性的绝对测量,可用于固定式也可用于携带式仪器上。

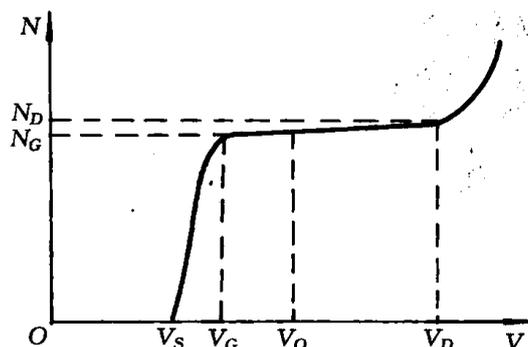


图 5-4 G-M 计数管的坪曲线

5.1.2 固体探测器

利用辐射与固体的相互作用来进行辐射测量的探测器,称为固体探测器,如各种类型的闪烁计数器、半导体探测器等。

1. 闪烁计数器

(1) 闪烁计数器的工作原理

所谓闪烁计数器就是根据射线照射在某些闪烁体上能使它发出闪光的原理进行测量的一种探测器。利用光电倍增管的近代闪烁计数器,现在已成为核探测技术中的重要工具。

闪烁计数器是由闪烁体、光电倍增管和电子线路所组成,其工作原理如图 5-5 所示。当射线照在闪烁体上后发出荧光,利用光导和反光材料,使大部分荧光光子收集到光电倍增管的光阴极上。光子在对光灵敏的阴极上打出光电子,这些光电子经过光电倍增管倍增、放大,倍增后的电子在阳极上产生电压脉冲,此脉冲被电子线路放大和分析后记录下来,这样就完成了对粒子的探测。

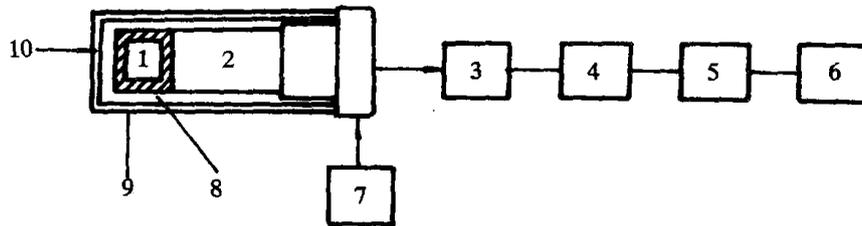


图 5-5 闪烁计数器工作原理示意图

1—闪烁体;2—光电倍增管;3—前置放大器;4—主放大器;5—脉冲幅度分析器;
6—定标器;7—高压电源;8—光导;9—暗盒;10—反光材料

(2) 闪烁体

闪烁体的发光原理是带电粒子通过闪烁体时,它的内部原子或分子被激发处于高能级,而再随即恢复到低能级(基态)时就辐射出光子。对 γ 射线来说,是由于 γ 光子在闪烁体内产生次级电子,这些次级电子能使闪烁体内的分子或原子激发而产生闪光。闪光的持续时间一般为 10^{-6} s 的数量级或更短。

常用于辐射测量的闪烁体很多,一般可分为无机和有机两大类。无机晶体有单晶体(如激活的 NaI 和 Tl 激活的 CsI)和粉末晶体(Ag 激活的 ZnS)。有机闪烁体又可分为有机晶体、有机溶液和塑料闪烁体等。晶态闪烁体多数是由一些超纯物质加上微量的掺杂物质在高温下结晶而成。

(3) 光电倍增管

光电倍增管是闪烁计数器中最重要的部件之一,它的作用是把闪烁体的光信号转换成电信号,并且充当一个放大倍数大于 10^5 的放大器。

光电倍增管由一个光阴极和多个倍增电极(又称打拿极)以及一个阳极组成。光阴极把入射光能量的一部分转变成电子,在闪烁计数器的大多数新式光电倍增管中,把半透明的铯-铍层淀积在玻璃或石英窗的内表面上作为光阴极。光阴极上产生的电子受加速飞回倍增电极,在每个倍增极上均发生电子的倍增现象,每个倍增极的倍增系数 m_i 大约和倍增极之间的电

压成正比例,总倍增系数为 $\prod_{i=1}^{i=k} m_i$, 在这里 k 是倍增电极的个数,光电倍增管的供电电源必须非常稳定以使倍增系数 m_i 的变化最小。倍增电极上涂有能产生二次电子的材料,这种材料在高能电子轰击下产生二次电子,二次电子发射现象有点和光电效应类似,所不同之处在于,二次电子发射过程中,逸出电子是由高能电子而不是由光子产生的。因此光电材料可以用作倍增极涂料,用作倍增极涂料的一些材料是铯锑(CsSb)、银镁氧铯(AgMgOCs)和镁氧(MgO)。

光阴极除了发射光电子以外,还有电子的热发射现象。铯锑(CsSb)光阴极材料的功函数大约是 1.9eV,铯锑光阴极有一个 660nm 的波长阈。在室温下,热能量大于 1.9eV 的电子数量,也就是能从阴极物质中逸出的电子数量是在 $10^2 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $10^4 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。由于热发射产生的这些电子也得到倍增,而且这些电子是造成光电倍增暗电流的主要原因,所谓暗电流是指没有入射核辐射时,光电倍增管中产生的电流。

用光电倍增管探测低能核辐射时,必须减小暗电流,而在低温下运用光电倍增管是一种减小暗电流的好方法。

光电倍增管的工作电压(高压 V)在实际应用中也要注意选择:正高压的优点是可以减少光电倍增管的噪声,这是因为阴极与外套(接地)之间是等电位的,没有微弱放电产生的噪声,其缺点是输出端隔直电容要耐高压,又要接头绝缘可靠,以免发生危险。

负高压:其接法是阳极接地,阴极加负高压,这样就避免了正高压接法的缺点,但却增大了光电倍增管的噪声,故在对噪声的要求不高的情况下可以使用。

从使用角度讲,光电倍增管的主要特性有:

(a) 总灵敏度:它由管子的倍增系数和光阴极发射光电子的灵敏度决定,用 A/lm 表示。总灵敏度随外加电压而增加。

(b) 暗电流:它由下述几个原因而产生:① 各电极,特别是光阴极和前几个打拿极的热电子发射;② 电极间绝缘材料,管座和管子的漏电电流;③ 强电场下才引起的冷电子发射(场致发射);④ 管子内剩余气体被讯号电流电离,可能发生光反馈或正离子反馈,它随工作电压的增加而增加。暗电流对低能射线的测量影响较大,必须设法尽量减少。工作时仔细挑选暗电流小的管子,采取冷却、清洁等措施,以满足工作要求。

(c) 光阴极:光阴极是接受光子而放出光电子的阴极,是光电倍增管最主要的部分,直接影响光电倍增管的灵敏度及分辨率。光阴极的好坏主要是由阴极材料及窗材料所决定,一般应选用灵敏度高(即光电转换效率高)、灵敏层均匀、与所用荧光体具有合适的光谱响应的管子。

(d) 分辨时间:通常在 10^{-9} s 数量级。

一般要求选用总灵敏度高,暗电流及本底脉冲低,分辨时间短,光谱响应好,性能稳定,能长期工作的光电倍增管。测量强放射性时,还应要求光负载能力大等性能。

由于光电倍增管是比较贵重的元件,使用时必须十分小心,应注意:

① 在探头的暗盒透光的情况下(即使透光很少),决不能加高压;

② 为了减少噪音,光电倍增管必须置于绝对黑暗之中工作,并且最好在正式开始工作前几小时先加上电压,使光电倍增管达到稳定工作状态;

③ 如输出脉冲很大,在采取降低高压、选用级数合适的管子等措施后脉冲仍很大,则可以把后几个极联在一起。如要得到正脉冲,可把最后第二个打拿极作为输出端;

④ 分压电阻应是高稳定电阻,并且最好直接焊接在管座上。关键在于管座的材料必须是良好的绝缘体;

⑤ 对于聚焦式光电倍增管,各极间电压有确定的关系,因此要严格调整各极间的电压比,以达到最好的聚焦条件,尤其是调节前三个打拿极的电压比最为重要;

⑥ 磁场对光电倍增管的工作有很大的影响,有的时候,当光电倍增管改变取向时,地磁场也可能影响它的正常工作(主要是环状聚焦型),因此在磁场附近以及作精确测量时,必须采取磁屏蔽措施。

(4) 闪烁计数器的应用

闪烁计数器应用十分广泛,在放射性强度测量方面主要应用于:

① α 粒子的探测:最有效的闪烁体是 ZnS(Ag),它对 α 粒子发光效率高,探测效率几乎达 100%,所以当 α 、 β 同时存在时, α 脉冲易与 β 区别。ZnS(Ag) 闪烁屏可以做得很薄,可稍大于 α 粒子在该物质中的射程,晶体厚度一般选 $5\sim 20\text{mg}/\text{cm}^2$,以 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 为好。ZnS(Ag) 晶体不吸潮,因此使用较方便。

② β 粒子的探测:最常用的是有机闪烁体,可做成任意大小的晶体、液体、固溶液。 β 塑料闪烁体,具有较短的死时间、较长的寿命和较好的稳定性,如减薄闪烁体和提高甄别电压的方法,加上一定的物质屏蔽可以达到对 $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$ 平衡体 10% 的探测效率,1 计数/min 的本底,用于低水平的测量有很大的优越性。低能 β 粒子的测量用液体闪烁计数器十分有效,它具有高灵敏度、高效率、避免窗和源的自吸收、使用方便和测量迅速等优点,能适用多种形式的环境和生物样品的测量。

③ γ 射线探测:用 NaI(Tl) 较为理想,可做成不同大小的各种形状,探测效率有的高达 50%~60%,设法降低本底以后,可以进行很弱 γ 放射性的测量。

根据输出脉冲振幅与入射粒子在闪烁体内的消耗能量之间的已知关系,就能从脉冲高度来分析粒子的能量。用闪烁计数器测量,实际上就是对脉冲高度进行分析。在这方面,可以制成各种闪烁谱仪。例如用蒽晶体或液体闪烁体做 β 闪烁的谱仪,用 NaI(Tl) 晶体与多道脉冲高度分析器相配合成的 γ 谱仪是十分有效的分析工具。

2. 半导体探测器

半导体探测器是近年来发展极其迅速的一种新型核辐射探测器。它具有能量分辨本领好,分辨时间短,阻止本领大等非常优异的性能,在核辐射探测的各个领域已得到越来越广泛的应用。

(1) 半导体探测器的工作原理

实际使用的半导体有两种,一种叫做 N 型,另一种叫做 P 型。它们都是在纯半导体材料中掺入不同杂质而构成的。掺有第三族元素如硼(称受主)的硅或锗叫做 P 型,其中有许多空穴。掺有第五族元素如磷(称施主)的硅或锗叫做 N 型,其中有许多自由电子。通常的半导体计数器材料并不是纯的半导体,而是利用所谓这种 P-N 结型半导体。

P-N 结型半导体探测器就是指 P 型半导体与 N 型半导体直接接触(接触距离小于 10^{-7}cm)组成的一种元件。在接触的交界处由于剩余电子和剩余空穴互相补充,故在交界处电子和空穴的密度特别小,即相当于电阻特别大。在工作时加上反向电压(即 P 型加负电压, N 型加正电压),电子和空穴背向运动,造成了无自由载流子的耗尽层,又称半导体探测器的灵敏体积。当带电粒子进入此灵敏体积后,由于电离产生了电子-空穴对,电子和空穴受电场的

作用,分别向二个电极运动,并被电极收集,从而产生脉冲信号。此脉冲信号被低噪声的电荷灵敏放大器和主放大器放大后,由多道分析器或计数器记录。半导体探测器的工作方块图如图 5-6 所示。

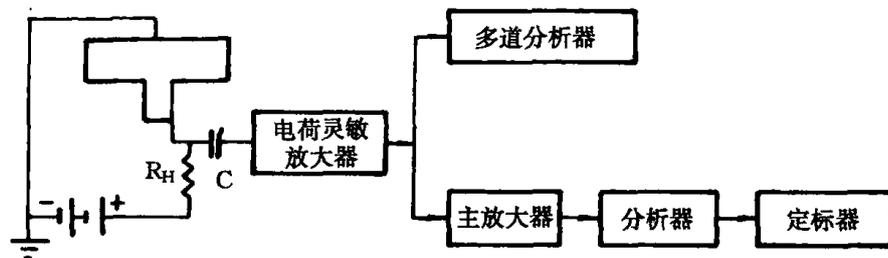


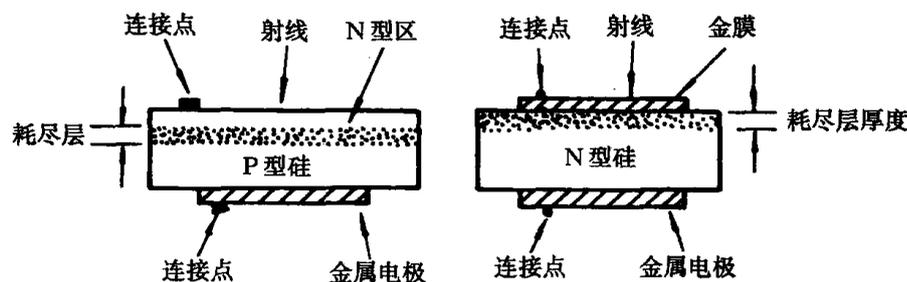
图 5-6 半导体探测器工作方块图

(2) 半导体探测器的种类和结构

半导体探测器有许多不同的类型,目前使用的探测器,可按其制作方法分为 3 种:

① 扩散结型: P 型硅的一侧表面上扩散入一薄层 V 价的磷使之成为 N 型硅,从而构成 P-N 结。这种 P-N 结半导体中, N 型硅一般做得很薄大约 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 。

② 面垒型: 在一片 N 型硅表面蒸发上薄薄的一层金而制成。金薄层约几百个原子层。这一金属-半导体界面有整流特性,也形成耗尽层。工作时以涂金层作为阴极,以 N 型硅作为阳极。以上两种探测器的结构示意图见图 5-7。



(1) 扩散结型

(2) 面垒型

图 5-7 半导体探测器结构示意图

③ 锂漂移型: 它是先将锂(施主)在 P 型晶体上扩散一层,形成 P-N 结,然后在适当温度下加上反向电压,此时锂原子可在电场作用下晶格中漂移,并且它的分布可以在一定区域内,恰恰补偿了 P 型硅内的杂质的作用。用这种方法,可以制造灵敏体积比扩散结型和面垒型厚的探测器。

用上述三种方法制成的硅半导体探测器都可在室温下工作,如果采用现代的致冷技术冷却会大大提高其噪音特性。

锂漂移锗探测器是用漂移技术制成的一种辐射探测器,它可以制成不同型式,以满足不同测量的要求。这种探测器用于 γ 测量性能十分优异,但必须在液态氮的温度(77K)下工作与保存,因为在室温下锂会漂移出晶体,器件被破坏。

除此之外,由硅构成的还有位置灵敏探测器。近几年来为了解决 Ge(Li)探测器工艺周期

长,使用及保存在低温下的困难,采用了化合物半导体材料如 GaAs(砷化镓)、CdTe(碲化镉)、HgI₂(碘化汞)等制成核辐射探测器,扩大了使用温度范围,并获得了较好的能量分辨率和较高的效率。

在使用半导体探测器时,必须要用电荷灵敏前置放大器。这是因为,半导体探测器输出脉冲高度 V 用下式表达:

$$V = \frac{Q}{C} \quad (5-3)$$

式中, Q 为电极收集到的电荷; C 为两极间的电容(包括分布电容)。它与外加偏压 V_0 的关系是 $C = KV_0^{-1/2}$, K 是常数。即电容 C 随外加偏压而变化,也就是说半导体探测器的输出脉冲受外加偏压及分布电容的影响,故采用加入一个小反馈电容的电荷灵敏前置放大器,使得输出幅度仅与反馈电容及收集电荷 Q 有关,这在能量测量中是十分必要的。

(3) 半导体探测器的性能

① 能量分辨率高。在硅中每形成一个电子-空穴对需要 3.5eV 的能量,在锗中需要 2.94eV,而在气体电离室中需要 30eV 左右,闪烁计数器则要 100~500eV,这意味着能量为 5MeV 的 α 粒子能在硅中形成 1.43×10^6 电子-空穴对,统计涨落泊松分布估计时是 1.2×10^3 电子-空穴对,半峰值宽度(FWHM)为 10keV 左右,而气体探测器的半峰值宽度是 29keV,闪烁计数器约为 90keV。如果考虑法诺(Fano)因子,半导体探测器的分辨率将会更高。所以,高分辨率是半导体探测器的固有性质,是由于它所需要的电离能量小决定的。除此之外,这种器件的分辨率还与入射窗效应、外加偏压大小及环境温度有关。

② 在半导体探测器中,射线的能量损失与生成的电子-空穴对的数目间的线性关系好,即输出脉冲幅度与能量成正比。

此外,还有分辨时间短,体积小,寿命长,坚固耐用等优点。

半导体探测器的缺点是器件体积不能做得很大,灵敏层不能很厚,对 X 射线或者 γ 射线(电离本领小)的探测效率较低。

(4) 半导体探测器的特性参数

① 灵敏区厚度(结区厚度) δ

结区是半导体探测器的核心,它的厚度 δ 大小是探测器的关键。探测不同的入射粒子,则 δ 有所不同。探测 α 粒子时,要求 δ 比较小;探测 γ 射线和 X 射线时,要求 δ 比较大;探测 β 射线, δ 介于上述二种情况之间。面垒探测器的 δ 有一定限制,故只宜探测 α 粒子能谱,对 α 效率高,而对 γ ,X 射线的探测效率低。

面垒型灵敏区厚度可由下面经验公式给出

$$\delta = 0.5 \sqrt{\rho \cdot V} \quad [\mu\text{m}] \quad (5-4)$$

式中 ρ ——N 型材料的电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$;

V ——探测器的外加反向工作电压, V。

由式(5-4)可见,结区厚度 δ 与外加电压 V 有关,所以对制成的面垒探测器,根据不同能量的入射粒子,可以适当调节工作电压来调节灵敏区(结区)厚度。

② 结电容 C_d

结电容 C_d 是呈现在半导体探测器两极间的并联电容,也即 P-N 结的电容,实验证明平行板结电容为

$$C_d = 8.9 \frac{\epsilon s}{\delta} \quad (\text{PF}) \quad (5-5)$$

式中 ϵ ——介电常数(硅的 $\epsilon = 11.8$);
 8.9——单位换算系数;
 s ——灵敏区横截面积(mm^2);
 δ ——灵敏区厚度(μm)。

对一制成的半导体探测器来说, ϵ 、 s 是固定不变的, 而只有 δ 可变, 如前所述:
 $\delta = 0.5\sqrt{\rho \cdot V}$, 所以它的输出脉冲为:

$$u_x = \frac{Q}{C_d} = \frac{\delta \cdot Q}{8.9\epsilon \cdot s} = \frac{Q\sqrt{\rho \cdot V}}{17.8 \cdot \epsilon \cdot s} \quad (5-6)$$

看来半导体探测的输出电压 u_x 也与外加电压 V 有关, 这是由于结电容发生变化所致, 是测量中不希望的现象, 利用具有并联电压负反馈的电荷灵敏放大器即可以克服输入电容变化的影响, 使半导体探测器的输出脉冲经过放大后的脉冲幅度只与电荷 Q 有关, 与 C_d 无关。电荷 $Q = \Delta E/W$, 对硅晶体 $W = 3.1\text{eV}$, 而空气的 $W = 30\text{eV}$, 所以对同等能量的 α 粒子, 引起的电压脉冲幅度比气体探测器约大 10 倍左右。

(4) 半导体探测器的应用

由于半导体探测器的优点, 其应用越来越广。在能量测量方面可以做成各种谱仪。在 α 谱测量方面用面积为 950mm^2 的 P-N 结型探测器, 对 5MeV 的 α 粒子, 半峰值宽度可做成 β 谱仪或 γ 谱仪, 特别是用 Ge(Li) 的大体积探测器, 其效率高, 分辨能力强, 适用于环境样品 γ 能谱分析; 在放射性强度测量方面, 主要利用它的低本底特性和“无窗”特性, 做成各种低本底仪器和低能粒子测量仪器; 目前应用于剂量测量中较为成功的有热释光剂量计和荧光玻璃剂量计。

① 热释光剂量计

当射线作用于磷光体时, 电子离开正常位置向四周运动, 直到被固体的晶格缺陷“俘获”为止。在常温下, 电子停留在俘获处的时间很长, 加热后则从陷阱中释放出来。当电子返回到原来位置时就会发出蓝-绿光, 经光电倍增管放大后, 用电子线路对其亮度进行测量, 由于剂量测量前必须消除磷光体中的贮存能量, 因此测量结果无法进行复查。

② 荧光玻璃剂量计(PRL)

当射线作用于银激活磷酸盐玻璃时, 电子首先跃迁到导带, 而后又被俘获在辐射光致发光中心, 这里的束缚深度(或陷阱深度)较深, 以致于用紫外线照射也不能使电子跳回导带, 只能跃迁到激发状态, 随后又很快落回辐射光致发光中心, 在其返回过程中, 则发出橙色的荧光, 这种效应称为辐射光致发光。

荧光玻璃剂量计就是根据这个原理用荧光计测量发光强度, 而后换算出吸收剂量, 由于这种测量不会破坏发光中心, 因此对读数可以多次重复测量。用低原子序数的玻璃可以测量灵敏度低于 12.9c/kg 的 γ 射线照射量。

5.1.3 袖珍剂量计

袖珍剂量计是电离室的一种广泛使用的形式, 它由电离室和装备在同一壳体内的充电—读数机构组成。图5-8表示这种剂量计的一种结构形式。把涂有金属的两条石英丝连接在一

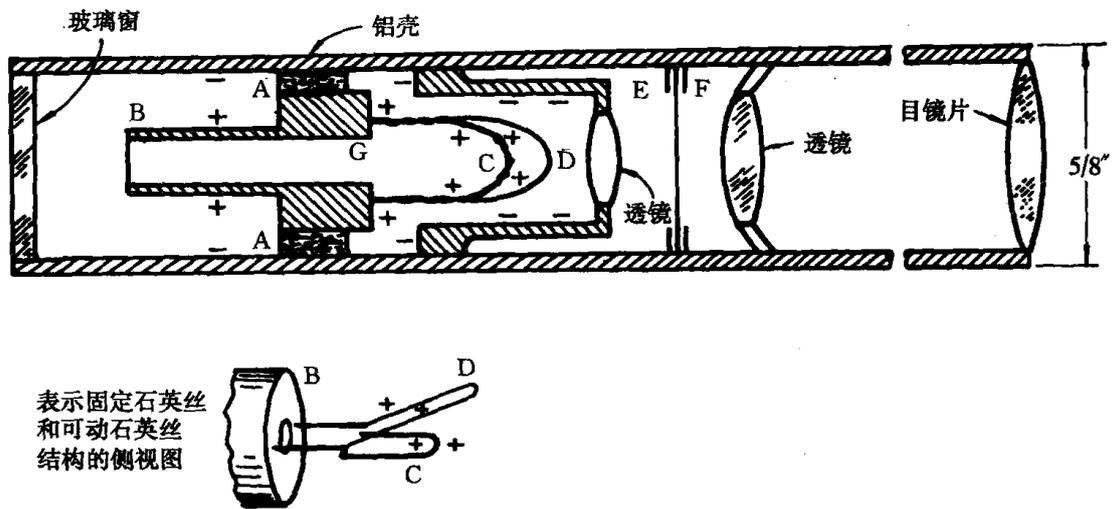


图 5-8 袖珍剂量计

- A—绝缘环;B—充电棒(空心的,准许窗口来的光进入);
 C—固定的有金属涂层的粗石英丝;D—可动的有金属涂层的细石英丝;
 E—金属圆筒;F—透明刻度盘;G—石英丝的金属支架

个圆柱状电极上,其中一条是固定的,另一条是可动的。另外一个电极是剂量计的外壳,两个电极用绝缘体隔开,以便使漏电荷减至最小。使用剂量计时,先用电源给电极充电至最大值,也就是说让可动石英丝偏转到相应于度盘上零读数的位置为止。当核辐射通过剂量计时,所产生的离子将由电极收集,从而逐渐减少电极上的纯电荷量,这就逐渐减少可动石英丝的偏转量,使它到达相应于刻度盘上相应读数的位置。

5.2 核电厂的辐射剂量监测

核电厂的辐射剂量监测的任务是测量核辐射所造成的剂量和排出物的放射性水平,防止工作人员遭受来自 γ 射线的外照射以及由放射性气体或气溶胶引起的内照射。

虽然,核电厂有各种各样的类型,但其需要监测的内容却大致相同,在压水堆型核电厂中建立的监测系统大致有:

- 核燃料元件包壳破损的监测和定位;
- 蒸汽发生器管子破漏的放射性监测;
- 设备冷却水以及其它工艺流程的放射性监测;
- 厂房内 γ 辐射场的监测;
- 工作室内放射性气体与气溶胶的监测;
- 衣服、工具等物体表面污染的测量;
- 个人剂量的测量;
- 环境放射性监测。

汇总以上监测系统的放射性测定值可以判断出核电厂运行的安全性。当发现事故时,可

根据具体情况采取有效的安全措施,防止事故扩大。

5.2.1 核燃料元件包壳破损的监测和定位

目前,反应堆中使用的核燃料元件,除高温气冷堆采用涂敷颗粒燃料之外,一般均带有金属包壳。包壳的作用是包覆燃料芯块防止冷却剂对燃料的化学腐蚀,此外是容纳放射性裂变产物,避免燃料和裂变产物进入冷却剂中。因此,核燃料元件包壳,密闭的一回路和安全壳一起构成了反应堆和核电厂保护环境的“三大屏障”。虽然,核燃料在制造和处理过程中采取了许多措施和严格的产品检验步骤,但在运输和安装过程中有可能会使其产生意外的机械损伤,燃料元件在堆内又是处于高温、高压和高通量辐照的工作环境之中,也难于完全避免燃料元件包壳的破损。为保证核电厂安全运行,提高运行经济性,防止发生严重的放射性裂变产物释放事故,保护环境不受污染,进行核燃料元件包壳破损的监测和定位是十分必要的。

1. 轻水反应堆中燃料元件破损探测方法

核燃料元件包壳破损监测是借助于测量冷却剂中裂变产物的浓度来实现的。其方法大致有: γ 辐射探测法;缓发中子辐射测量法;裂变气体的固体子系产物沉淀法;离子交换法;自动气体色层谱分析法;过滤器分离裂变产物法。在轻水反应堆中应用较多的有:

(1) γ 辐射探测法 核燃料元件包壳破损会导致裂变产物向冷却剂中释放,改变一回路中放射性同位素的平衡浓度。采用高灵敏度的 γ 探测器可以直接对冷却剂中 γ 射线进行测定。为提高探测灵敏度,延长冷却剂样品测量时间,以减少一回路中固有的 γ 射线 ^{16}N ($T_{1/2}=7.35\text{s}$)的影响,有的核电厂则用高分辨率的锗(锂) γ 谱仪代替NaI(Tl)晶体闪烁 γ 谱仪,用能谱测量法消除冷却剂中高放射性本底的影响。

(2)缓发中子辐射测量法 铀-235裂变时产生的瞬发中子占中子总数的99.3%,由 ^{83}Br ($T_{1/2}=5.9\text{s}$), ^{137}I ($T_{1/2}=2.7\text{s}$), ^{87}Br ($T_{1/2}=54.3\text{s}$)裂变碎片所发射的缓发中子约占0.7%。因此,测定冷却剂样品中 ^{137}I 和 ^{87}Br 所发射的缓发中子,可推算出核燃料元件包壳破损的程度。

为提高探测灵敏度,以取得最大的信号-本底比,就需延迟冷却剂样品的测量时间,使得足以消除在冷却剂中由 $^{17}\text{O}(n,p)^{17}\text{N}$ 反应生成的半衰期为4.14s的中子的影响。

缓发中子探测器是由一个四周包围着的慢化材料(石蜡或聚乙烯)的螺旋蛇形管以及放在蛇形管中心的 BF_3 计数管组成。冷却剂样品则直接流经螺旋蛇形管,缓发中子将经过慢化材料慢化并由 BF_3 计数器记录下来。

破损的燃料组件(元件)定位监测可以用核辐射探测方法(或其它物理、化学法),把运行后的单个破损燃料组件(元件)找出来。目前,定位监测的方法虽然很多,但根据美国核电厂多年的运行经验来看,采用轻水慢化和冷却的,以二氧化铀为燃料的商用动力堆并不需要那些运行性能虽良好但花钱多、又麻烦的定位系统。现在已被广泛采用“通量倾斜法”对破损的燃料组件(元件)进行粗糙定位。这一方法就是反应堆在带功率运行时,利用控制束棒逐区进行调整,使堆芯通量发生倾斜。与此同时,用燃料元件包壳破损探测器配合来观察冷却剂中放射性浓度的变化,以达到分区粗糙定位的目的。

在这一基础上如要具体地指出破损的燃料组件,则可采用堆外取样测量。目前应用较多的有湿吸法和干吸法。

湿吸法就是在停堆换料时,将燃料组件(元件)放置在静水中,浸泡一定时间(使水中碘的

放射性积累到一定的浓度)后,抽取水样分别对 ^{131}I 和 ^{133}I 进行测量,用 ^{131}I 与 ^{133}I 的比值进行鉴别。

干吸法就是在停堆换料期间,将燃料组件(元件)放置在一定容积的空气中,经一定时间后(具体时间应根据燃耗深度和冷却时间来定)依靠燃料剩余发热,使裂变气体氙、氪通过元件包壳的破损处向外释放。抽取空气样品进行测量并分析,以具体指出破损的燃料组件(元件)。

2. 快中子反应堆中燃料破损探测方法

探测某一燃料包壳的破损,通常采用两种方法。一种方法是监测覆盖气体的活性,看其是否有明显的增加。另一种方法是探测离开反应堆的钠中是否存在缓发中子。应该说,探测燃料元件漏泄比较容易,但是,确定究竟哪盒组件中的燃料元件发生了漏泄却比较困难。利用气体标记法可以解决这个问题。

(1) 覆盖气体监测

通常,利用覆盖气体监测系统可以发现逃离出燃料棒的裂变产物的存在。从燃料元件泄漏出的裂变产物大部分是惰性气体 Xe 和 Kr 的同位素。许多裂变产物都发射能量较低(大约 100keV)的 γ 射线。在 ^{23}Ne (400keV)和 ^{41}A (1 300keV)高能的 γ 射线占优势的本底中,探测低能量的 γ 活性有一定困难。但是,大量的 Xe 同位素射线的能量相当高。因此,经验证明,对于 LMFBR 系统,探测燃料包壳破损是容易进行的。

和回路式系统相比,在池式反应堆中 ^{23}Ne 的活性相当低。因为 ^{23}Ne 在钠池中滞留时间较长(这使半衰期为 38s 的 ^{23}Ne 可以衰变),而且对钠池液面的扰动也较小。

在覆盖气体系统中,经常使用锗探测器和高分辨率的 γ 谱仪。锗探测器对探测低能 γ 特别灵敏。利用增加覆盖气体中 Xe 和 Kr 同位素浓度的方法,可提高探测器的效率。让覆盖气体气流通过一个活性炭填料柱,就可以提高 Xe 和 Kr 同位素的浓度。利用监测覆盖气体的办法探测燃料元件破损,大约需要几分钟的时间。

(2) 缓发中子监测

用来发现燃料棒包壳破损的第二种方法是探测钠中的缓发中子。这些缓发中子是由夹杂在冷却剂液流中的裂变产物发射出来的。而缓发中子主要来自两种裂变产物: ^{87}Br (半衰期为 56s)和 ^{137}I (半衰期为 25s)。这两种同位素在钠中是溶解的,并且通过钠与暴露的燃料相接触而进入钠中的,或者由于钠在包壳破损处对燃料进行冲蚀,或者是燃料的裂变气体排放到冷却剂中。

缓发中子探测器通常由 BF_3 计数管组成,一般放在一次泵附近。总的探测时间显然是一次回路钠传输时间的函数。所用的时间大约是 1min。

(3) 位置指示器

利用覆盖气体监测系统或者缓发中子探测器系统,可以发现燃料破损问题。但是,这两种方法都不能判断究竟哪一盒组件的燃料棒发生了破损。因为,大型增殖堆大约有 300 盒燃料组件,所以,辨认哪盒组件的燃料棒发生破损是非常重要的。

为此目的而发展起来的一种技术叫作气体标记法。在对燃料进行最后加工时,在每根燃料棒的裂变气体空腔中,注入其组成是唯一的稳定的氙和氪同位素的混合物。同一盒燃料组件中的所有燃料棒注入相同的气体混合物。在 FFTF 的燃料组件和吸收体组件中,所用的特有的气体标记超过 100 种。这些气体标记是由 $^{126}\text{Xe}/^{129}\text{Xe}$ 、 $^{78}\text{Kr}/^{80}\text{Kr}$ 和 $^{82}\text{Kr}/^{80}\text{Kr}$ 组成的三维网络所提供的。把覆盖气体在质谱仪上进行分析,并把所得的结果与堆内所有气体标记预

先确定的分析相比较,就可以判断出哪一盒组件内的燃料棒包壳发生了破损。当然,在分析过程中要对燃料和本底进行修正。图 5-9 给出了测定燃料破损位置的示意图。

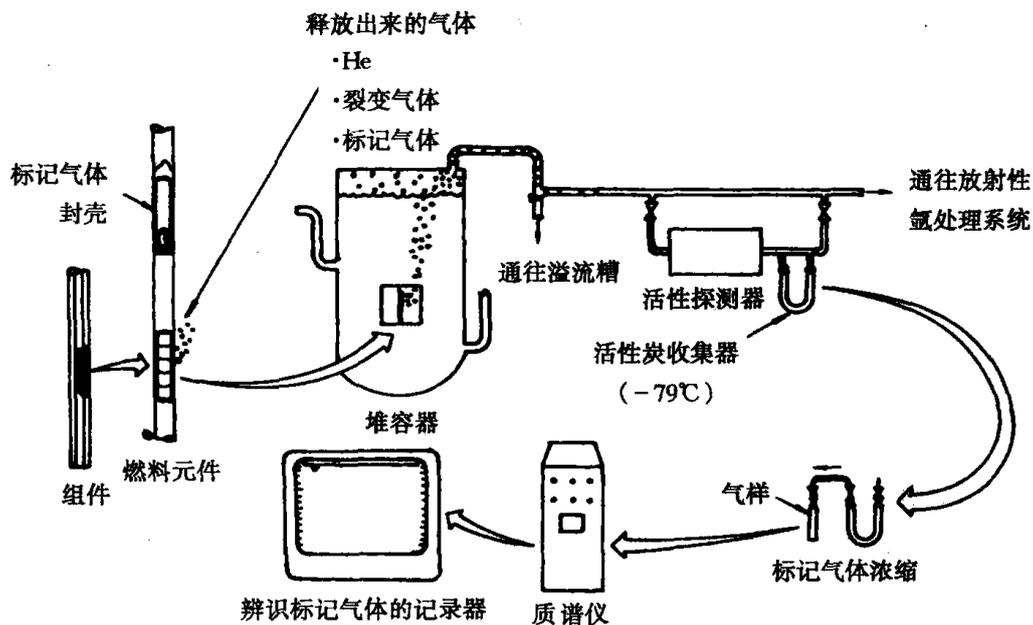


图 5-9 用气体标记法确定燃料破损的位置

5.2.2 蒸汽发生器管子破漏的放射性监测

蒸汽发生器在正常运行期间,一旦蒸汽发生器的管子发生破损,一回路冷却剂就会向二回路渗漏,使蒸汽带有放射性,影响汽轮机及整个汽轮机装置的正常运行和检修。每小时数十吨被污染的污水的排放也会影响电厂周围的环境。蒸汽发生器又属整个核电厂中破损几率最大的设备之一。因此,对于蒸汽发生器破损的监测就显得特别重要。目前,监测蒸汽发生器破损的方法,是用高灵敏的 γ 闪烁探测器对蒸汽发生器下排污水进行连续测量。与此同时还采用高灵敏的 β 闪烁探测器对汽轮机冷凝器抽气器排出的气体进行连续监测。如果蒸汽发生器管子发生大的破损的话,设置在主蒸汽管道外侧的 G-M 型 γ 探测器也可以及时地发觉。

在核电厂运行期间,当监测系统发出高值放射性报警时,应立即自动关闭蒸汽发生器排污阀门并采取措施以降低二回路蒸汽中的放射性水平。

5.2.3 设备冷却水以及其它工艺流程的放射性监测

这些系统的放射性监测主要是监测工艺系统的运行情况,有时也能用来发现某些设备的破损情况。

设备冷却水系统是一个闭合的冷却回路,其目的是为了防止在设备破损时放射性物质污染电厂周围的环境。回路水中的放射性水平一般较低。因此往往采用灵敏度较高的 γ 闪烁探测器对设备冷却水泵入口侧的样品进行连续测量。当监测系统发出高值放射性报警时,立即自动关闭波动箱的排水阀,防止放射性气体污染环境。

至于其它工艺流程的放射性监测将随着反应堆类型的不同会有很大差别,鉴于篇幅有限,

本文不再进行专题介绍。

5.2.4 厂房内 γ 辐射场的监测

核电厂中反应堆、一回路及其主要辅助系统都是放射源,因而核辐射也有很宽的变化范围,其照射量率可以从 $2.58 \times 10^{-10} \text{c}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ 到 $2.58 \times 10^{-8} \text{c}/(\text{kg}\cdot\text{s})$,在进行某些工艺操作时甚至可达到 $2.58 \times 10^{-7} \text{c}/(\text{kg}\cdot\text{s})$ 。

反应堆和核电厂在正常运行情况下,一般在工作人员需要经常往来而照射量率有可能增加的区域设有固定 γ 辐射监测点,作为区域监测。

厂房内固定 γ 辐射监测是将设置在监测点位置上的电离室或 G-M 计数管作为一次仪表,反映现场 γ 照射量率,二次仪表则装置在控制室的剂量仪表屏上,当仪器发出高值报警时,监测现场和仪表屏上都会发出相应的“警告”信号。

5.2.5 厂房内放射性气体和气溶胶浓度的监测

当反应堆和核电厂中所有具有放射性的系统及其所属设备、阀门、管道出现破损时,放射性流体就会通过破损处向工作室内泄漏。放射性气体(主要是氦、氙、碘)和气溶胶(固相或液相悬浮物)会由于空气对流向四周扩散,使工作人员有可能遭受内照射的危险。因此,围绕反应堆、一回路及其辅助系统周围的操作间一般设有放射性气体和气溶胶的监测点。

(1) 放射性气体的采样和测量

在核电厂中,对于那些有可能出现放射性气体而又经常有人来往的场所,通常进行固定式取样测量。

放射性气体浓度的测量是通过抽气泵,使 β 闪烁探测器保持一适当的真空度,打开所需监测点的电磁阀抽取空气样品。这时经过高效率过滤器滤掉微尘后的气体样品进入 β 闪烁探测器内测量。如图 5-10 所示。探测器在运行之前以及在运行中都应定期使用标准源进行标定和校验。

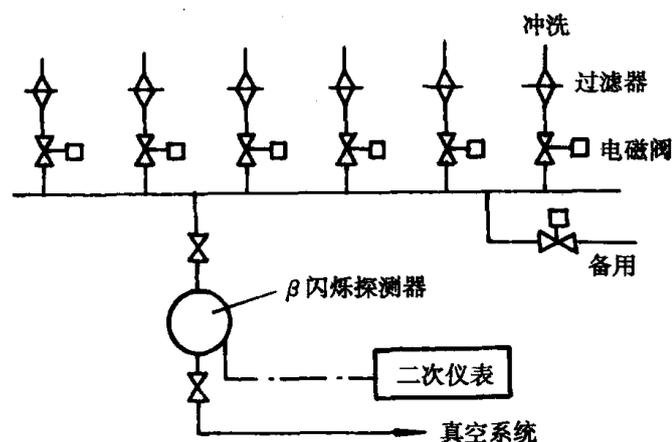


图 5-10 放射性气体取样系统示意图

当放射性气体浓度过高污染探测器腔壁时,就打开冲洗阀,用干净的空气进行冲洗,一直到放射性水平降低到本底时为止。

对于那些需要监测但又没有设立固定监测点的地方,可以用抽有一定真空度的可携式 β 闪烁探测器拿到现场进行采样测量。

(2)放射性气溶胶的采样和测量

装置在测量放射性气体浓度的固定系统中的高效过滤器,可以用来收集放射性气溶胶的样品。

在选样品时,必须注意进入取样管中的气溶胶浓度,应该是取样口处空气中的浓度。因此取样管应可能地短而直,避免粒子粘附在管壁上而造成差错。取样口设置的位置应是人体鼻部附近的高度。

通常是将已经采好样的过滤材料放在 $ZnS(Ag)$ 闪烁计数器和云母窗钟罩型计数器上,来做 α 放射性和 β 放射性测量。

由于空气中存在着天然放射性物质氡和钍放射性气体及其子系产物,干扰气溶胶测量灵敏度的是半衰期为26.8min和10.6h的固体子系产物,它们的浓度分别为 $1.85 \times 10^{-2} Bq/L \sim 3.7 \times 10^{-5} Bq/L$ 和约 $1.48 \times 10^{-4} Bq/L$ 。因此,在测量最大容许浓度低于 $1.85 \times 10^{-2} Bq/L$ 的放射性同位素时,必须要考虑它们的影响。(在核电厂的单个取样测量中,一般采用取样后测量“第二次计数因子”快速判断有无 α 或 β 污染,然后才进行24h的精确测量。)

在核电厂中对于需要连续进行取样和测量的地方(例如安全壳排气系统和烟囱等),通常对放射性气体、 β 和 γ 气溶胶以及碘进行连续取样监测。设置这些仪表的目的是根据派生防护标准制定的容许排放率来严格控制核电厂的排放量,防止气态废物对环境的污染。

5.2.6 衣服、工具等物体表面污染的测量

通常采用的方法是用表面污染测量装置进行直接测量或者对于那些本底水平高又难于进行直接测量的地方可以用“擦拭法”进行间接测量。所谓“擦拭法”就是用微孔滤纸揩擦污染物的表面,并用放射性测量仪器测定附着在纸上的放射性,在经过修正后则可推算出物体表面被放射性污染的程度。

5.2.7 个人剂量的监测

放射性防护规定指出,辐射防护的基本标准(最大容许剂量当量)是针对个人而言的,所以作为放射性监测的第一步,便是对工作人员的受照剂量进行测量。构成个人受照剂量有来自体外放射性照射的“外照射”和放射性物质摄入体内引起的“内照射”两类。外照射剂量监测是通过胶片剂量计、袖珍式剂量笔以及固体器件探测器中的热释光剂量计和荧光玻璃剂量计来实现的。内照射剂量的监测通常是对排泄物中所含放射性物质进行测定,但由于放射性物质摄入人体内部器官后很难排出,因此测量精度很差。

5.2.8 环境放射性监测

进行反应堆和核电厂环境放射性监测的目的是:根据反应堆和核电厂运行所释放的废气、废水、废物量,估算对周围居民和生物构成的辐照,验证放射性同位素排放率,以周围环境中放射性同位素的浓度和所致的剂量对照国家规定的标准,定期向当地机关及卫生机构提供数据,主动接受审查。

要达到这些目的,反应堆和核电厂的环境放射性监测需要进行运行前的资料调查和本底

测量,正常运行期间的常规监测和事故后的环境放射性测量。

1. 反应堆和核电厂运行前的资料调查和本底测量的目的是:获得有关“紧要途径”、“紧要同位素”、“紧要居民组”的资料,为以后评价周围居民实际的和潜在的辐射危害作好准备,并提供运行前环境放射性本底水平的资料。

进行资料调查和本底测量的内容:测量和分析各种环境介质(空气、气溶胶、水、土壤和生物)中的 α 、 β 放射性总强度和主要的同位素;测量地表面的 γ 辐射水平;调查周围环境的水文、地质、气象和自然环境的利用情况;调查周围居民的分布、饮食习惯、从事的职业和嗜好;掌握有关废水、废气在环境中消散稀释的资料。

2. 反应堆和核电厂运行期间的常规监测的目的是:验证放射性物质的排放率,掌握放射性物质在环境介质中的迁移扩散规律,评价周围居民受到的实际的和潜在的放射危害。

监测的内容和方法:①用塑料闪烁体、NaI(Tl)晶体、电离室、G-M计数器测量放射性气体在空气中的浓度或剂量率;对于大气中的氡一般用冷凝法或吸附法取样,再用液体闪烁性计数器或正比计数器测量;大气中的碘一般用活性炭滤纸或滤罐吸附,然后用 γ 谱仪或放化方法分析BiI。②对放射性气溶胶,一般用滤纸吸附,采用衰变法测量总 α 和总 β 放射性。用 γ 谱仪或放化方法分析同位素。③水样一般用蒸发法测量总 β 放射性,用放化方法或 γ 谱仪分析同位素。④生物样品一般用放化方法分析同位素,目前广泛使用低本底 γ 谱仪来分析生物样品中的同位素。

由于环境品中放射性浓度较低,要求环境监测仪器具有灵敏度高(探测效率高、本底低)、长期稳定性好、使用方便、经济和易于维修等特点。测量样品的工作场所必须放在本底实验室内进行。

3. 事故后的环境放射性监测的目的是:要迅速获得关于对人产生直接危害的放射性污染的程度和范围,居民实际接受的剂量以及事故后果和释放的放射性物质在环境中转移的途径等方面的资料。

核电厂事故后采取快速测定可以迅速确定食物及水的污染程度,评价居民吸入和外照射的危害,为迅速撤离人员争取时间,为采取禁止食用、禁止耕种等应急措施提供依据。

第 6 章 射线探测器与放大器的连接

上述各章已谈到射线探测器及有关前置放大器,本章将对于探测器与放大器之间的连接方式作一综合描述。

一般的射线探测器(指输出电信号者)可看作是一个电流脉冲发生器,普通的晶体管本身是一个电流控制元件。两者的连接方式可大致分为:电压型放大,电流型放大和电压-电流型放大 3 类,分别叙述如下:

6.1 电压型放大连接方式

电压型放大的连接方式是延用电子管线路的一种习惯用法,至今还常使用。它的连接如图 6-1 所示,图中 C_1 为探测器二极管间电容, C_2 为放大器的输入电容, R 为探测器的负载(约为 $10\text{k}\Omega \sim \text{M}\Omega$), K 为放大系数为 K 的电压放大器, $i(t)$ 为探测器的输出电流脉冲,输入给放大器 K 的电压脉冲则是电流 $i(t)$ 在 C_1, C_2 电容上对时间的积分:

$$u_{sr} = \frac{\int i(t) dt}{C_1 + C_2} \quad (6-1)$$

式(6-1)的条件是电路的积分时间 $\tau = R(C_1 + C_2)$ 远大于电荷的积累时间。

从图 6-2 的 $i(t)$ 曲线可以看出电流脉冲宽度即为电压脉冲的上升时间。同样可知,探测器输出的很窄的电流脉冲经过这种“电压型连接”就转变成宽得多的电压脉冲了,即所形成的脉冲不再具有反映入射粒子特性的电流脉冲形状了。

对于采用晶体管“电压型连接”的电路,可应用高输入阻抗的电压放大器,如利用串联负反馈电路。

在这种连接方式中,虽然脉冲形状有所变化,但输入给放大器的电压脉冲幅度 $u_{sr \max}$ (u_{sr} 的极大值)仍是与探测器的总输出电荷 $Q = \int i(t) dt$ 成正比的,而 Q 又正比于入射粒子的能量 E , 所以 $u_{sr \max} \propto E$, 故可通过量 $u_{sr \max}$ 的幅度分布来测量入射线的能谱。到目前为止,应用电压型连接方式仍是最普遍的,这

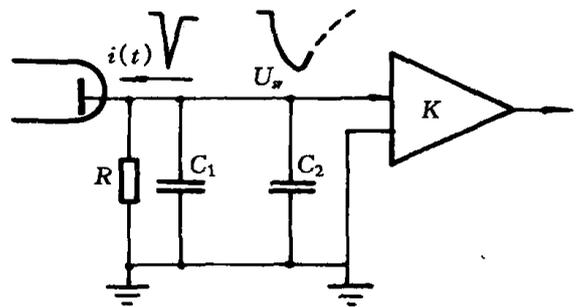


图 6-1 电压放大型连接方式原理图

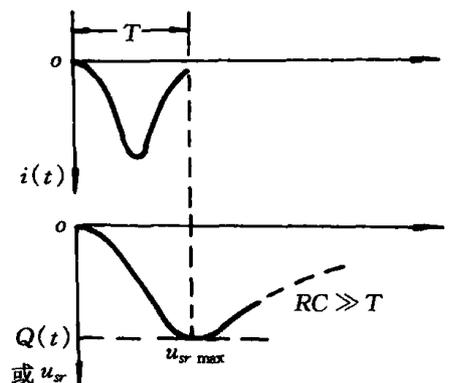


图 6-2 探测器输出电流与电压脉冲图

是因为人们很熟悉它的缘故,并不意味着它完整无缺。

6.2 电流型放大连接方式

从图 6-2 看出,利用电压型放大连接方式使放大器的输入脉冲形状发生变化,脉冲前沿变坏,如果我们用电流放大器来直接放大探测器的输出电流脉冲不就会克服前者的缺点了吗?所以在 60 年代晶体管电路发展以后,电流型放大连接方式就出现了。图 6-3 是这一连接方式的原理图。 K_i 是输入电阻极小的(约 $1 \sim 100\Omega$)电流放大器,要求放大倍数 K_i 恒稳定,线性度要好,多采用很深的并联负反馈(它的输入阻抗 r_{sr} 为无反馈输入阻抗的 $1/2 + k\beta$ 分之一),有时采用其它电流型放大电路等。因为探测器输出端电路时间常数很小($\tau = r_{sr}(C_1 + C_2)$),因此电流型放大器的输入电流 I_{sr} 基本上就等于 $i(t)$ 。由于电流脉冲本身很窄,故这种连接方式可以允许极高的脉冲计数率而不发生明显的重叠现象。

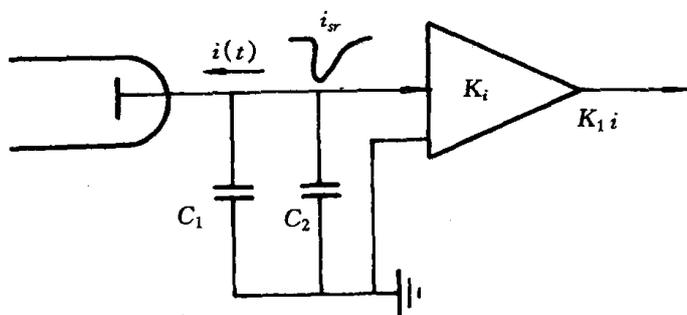


图 6-3 电流型放大器连接原理图

这种放大连接方式可不加前置放大器,探测器的输出电流脉冲可直接通过电缆(在电缆终端接个电阻 R_0 ,使 R_0 与电流放大器输入电阻 r_{sr} 串联后等于电缆的特性阻抗 $Z_0 R_0 + r_{sr} = Z_0$,以达到匹配之目的),然后接至电流放大器(见图 6-4),探测器的高压 V 也是通过同一电缆提供的。图中的 C 为耐高压电容。资料表明,这种连接方式的传递距离可达 500m 甚至更长,这一点无论对生产还是实验研究工作都是很有利的。

这种放大连接方式可不加前置放大器,探测器的输出电流脉冲可直接通过电缆(在电缆终端接个电阻 R_0 ,使 R_0 与电流放大器输入电阻 r_{sr} 串联后等于电缆的特性阻抗 $Z_0 R_0 + r_{sr} = Z_0$,以达到匹配之目的),然后接至电流放大器(见图 6-4),探测器的高压 V 也是通过同一电缆提供的。图中的 C 为耐高压电容。资料表明,这种连接方式的传递距离可达 500m 甚至更长,这一点无论对生产还是实验研究工作都是很有利的。

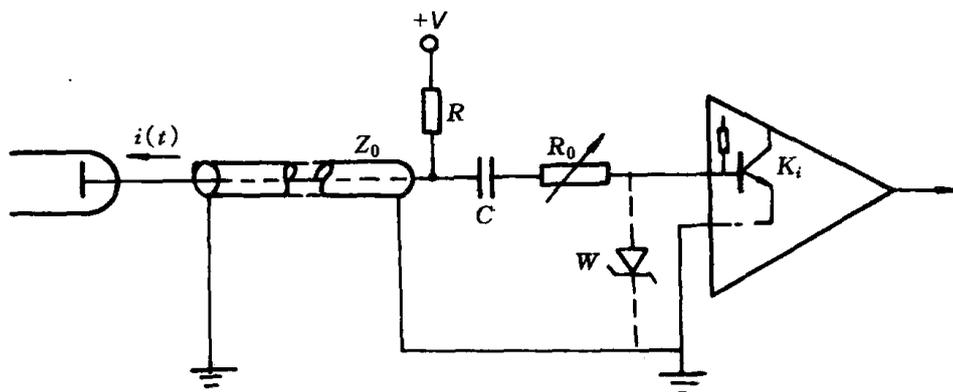


图 6-4 电流型放大器连接情况

由于探测器输出脉冲未经放大,在经过电缆的传递过程中易受到外界的干扰,所以要求电缆的屏蔽要足够好,必要时可采用双层屏蔽的同轴电缆作传输线。如果需要脉冲放大时还可以加先作电流前置放大,虽失去了它固有的优点,但提高了它的抗干扰能力。

由于晶体管耐压低,在开、关高压时或插拔电缆接头时难免产生瞬时高压脉冲,所以必须

加设防护措施。图 6-4 中的低稳压二极管 W ，是加在电流放大器输入端的保护元件。若有负高压脉冲时， W 就被击穿，端电压稳定在 3V 左右，不会使晶体管的 b-e 结反向击穿。若有正高压脉冲时， W 又象普通二极管一样通导，限制了晶体管的输入电压。

6.3 电压-电流型放大连接方式

电压-电流型放大是上述二节放大型的适当组合，它有一定的实用价值。其连接原理图如图 6-5 所示。由图可见，这种连接方式的主要特点在于在 C_1 与 C_2 之间增加了一个电阻 R ， R 的选择是： $RC_1 \gg T$ （电流脉冲宽度） $> r_{sr}C_2$ 。

R 是安装在探测器一边的。由于 RC_1 较大，所以探测器输出的电流脉冲 $i(t)$ 首先被 C_1 积分，形成电压脉冲 u ， $u_m \propto E$ （粒子能量），然后这一电压脉冲经过 R 电阻转换成电流脉冲 $i_{sr}(t)$ ， $i_{sr} = u/R + r_{sr} \approx u/R$ （因为 $R \gg r_{sr}$ ）。传送到电流放大器 K_i 进行放大。电流脉冲正比于入射粒子能量，故可以

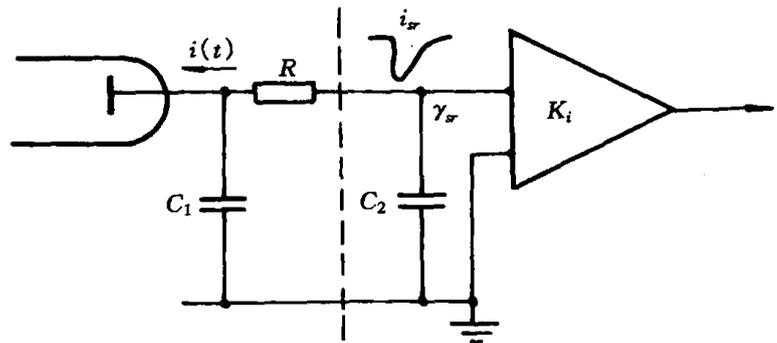


图 6-5 电压-电流型放大连接原理图

测量入射粒子能谱。因为它具有电流输送性质，所以输送距离（探测器到电流放大器的距离）可较远，一般情况下可经由电缆传送到 200m 以外。探测器可以不用前置放大器，又因为它是先经过积分的， i_{sr} 的上升时间就是 $i(t)$ 的电流脉冲宽度。

这种连接方式对盖格弥勒计数器、正比计数器及闪烁计数器的脉冲传送都取得良好的效果。其连接情况如图 6-6 所示。电缆在终端与 R_0 相匹配（ r_{sr} 很小），而且仍使用单根电缆把高压从仪器主体一端传送给远离的探测器（G-M 计数器，正比计数器或闪烁探头），另外探测器的输出电流脉冲也经过这一电缆传送给主体中的电流放大器。

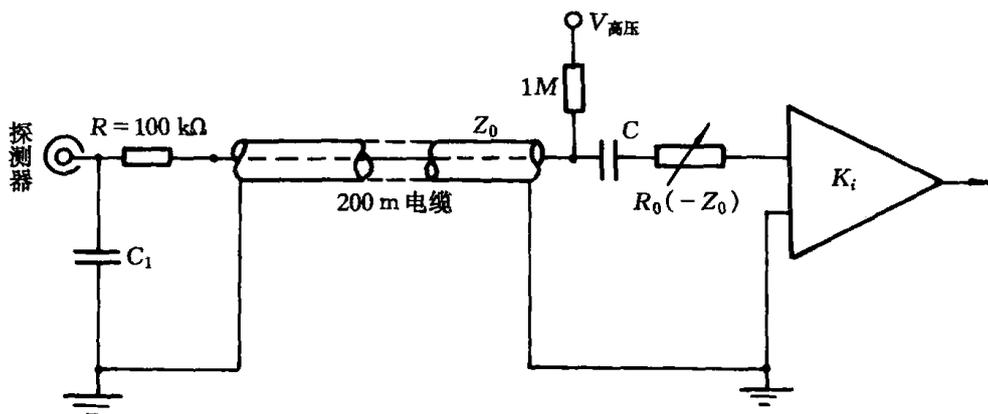


图 6-6 电压-电流型放大连接情况

第 7 章 温度检测仪表

温度是表征物体冷热程度的物理量。温度概念的建立和温度的测量是以热平衡现象为基础的。任何两个冷热程度不同的物体相接触,必然发生热交换现象,热量将由受热程度高的物体向受热程度低的物体传递,直至两个物体的冷热程度完全一致,即达到热平衡。处于同一热平衡状态的两个物体必定拥有一个共同的物理性质,表征这个物理性质的量就是温度。因此温度是一个很重要的物理量,物体的许多物理现象和化学性质都与温度有关,许多生产过程都是在一定的温度范围内进行的。温度对提高产品质量、确保安全生产以及实现自动控制等都具有重要意义。核电厂中主要是反应堆中的温度检测有其独特的问题,因为辐射可以直接影响温度的敏感元件。堆内敏感元件和接收仪表之间的中间件与大多数工业所用的中间件有所不同,当然,用于反应堆的温度敏感元件的选择仍然要注意到一般工业应用中的一些因素,例如腐蚀性、准确度、经济性和可靠性。另外,我们必须注意到反应堆外壳和安全包壳,系统的完整性所提出的严格要求使得设计温度仪表适合的密封性和连接带来了一定的困难。

温度检测仪表分为接触式和非接触式两大类。接触式是基于热平衡原理,被测对象与感温元件必须充分热接触,使两者处于同一热平衡状态,具有同一温度。非接触式是利用被测对象的辐射原理,两者不必接触。温度检测仪表的分类和原理见表 7-1。

核反应堆和核电厂的温度检测仪表,就其原理来说,与火电厂的温度检测仪表没有什么本质的不同,只是型号和结构材料及使用方法根据不同反应堆类型和使用场合而有些差别而已。核反应堆温度检测范围和场合不同而所用温度检测仪表也有所不同。核反应堆温度检测仪表主要采用下列几种:

1. 镍铬-镍铝热电偶温度计

这种温度计主要用于堆内温度的检测。通常,有几十根镍铬-镍铝热电偶。通过贯穿压力壳上封头的导向管,伸向燃料组件出口处,信号经热电偶的延伸线连接到安全壳内的参考端箱里,再经贯穿件与铜导线送给记录仪和数据处理系统。

2. 铂电阻温度计

这种温度计主要用于冷却剂温度的检测。冷却剂温度直接反映了反应堆功率,因此它是核电厂的很重要的过程参数。测得的温度信号送往调节和保护系统,精度要求比较高。所以一般采用铂电阻温度计检测冷却剂温度。这种铂电阻温度计,通常把两支装一个不锈钢套管内,以须相互备用。不锈钢套管与冷却剂接触,避免了铂电阻活化后改变特性。

铂电阻温度计一般安装在由蒸汽发生器进口到出口以及主要出口连接的两条旁路上面,而不直接安装在反应堆进、出口的主管道上。这是因为主管道冷却水流速很大,冲击力也很大,如果把温度计直接插入主管道里,万一温度计受冲击折断,损坏了的温度计随着冷却水很可能跑进堆芯或主泵里造成事故,铂电阻安置在旁路上,带来的问题是由管路长度造成的温度检测的超前与滞后,因此在设计检测系统时必须考虑这种超前与滞后的补偿。

表 7-1 温度检测仪表的分类和原理

仪表种类	测温仪表名称	测温物质	标志温度的属性	测温原理	测温范围	优点	缺点
接触式测温仪表	玻璃液体温度计	汞、酒精等液体	体积	利用液体的体积随温度变化而引起液柱高度改变的性质	-50~400℃	结构简单、使用方便,测量的精确度高,价格便宜	测量上限和精确度受玻璃质量的限制,易碎,不能记录和远传
	压力式温度计	惰性气体、液体、饱和汽	压力	利用定容气体、液体的压力或饱和汽的压力随温度变化的性质	0~500℃	结构简单,不怕振动、具有防爆性,价格低廉	测量精确度低,测量距离较远时,仪表的滞后较大
	双金属温度计	金属	应变	利用双金属片受热变形的性质	0~300℃	结构简单,机械强度大,价格低	测量精确度低,量程和使用范围均有限
	热电阻温度计	金属、半导体	电阻	利用物体的电阻随温度变化的性质	-200~500℃	测量精确度比较高,便于远距离、多点集中测量和自动记录	不能测量高温,由于体积较大,故测量点温度比较困难
	热电偶温度计	金属、半导体	热电势	利用导体或半导体的热电效应的性质	-269~2800℃	测温范围广,测量精确度较高,便于远距离、多点集中测量和记录	需进行冷端温度补偿,测低温时,精度比较差,且线性差
非接触式测温仪表	辐射高温计	能量	热辐射	利用物体的辐射强度随温度变化的性质	-200~200℃	测量精确度高,仪表的灵敏度高,线性好,便于自动记录	测温范围有限,互换性较差
非接触式测温仪表	辐射高温计	能量	热辐射	利用物体的辐射强度随温度变化的性质	100~2000℃	感温元件不破坏被测介质的温度场,时间常数小,测温范围广	只能测高温,低温段精度很差,环境条件会影响测量精度

3. 声学 and 声波测温装置

由于高温气冷堆的高温环境,特别是最早的一些高温气冷堆,除热电偶之外,还需要堆芯内的温度探测器。例如美国的龙堆就使用了一个共振探头超声波温度计;美国的桃花谷堆使用了声学温度计安装在八个选定的燃料元件的芯块内,作为附加的堆芯温度测量系统。安装它们一方面可以在启动期间作堆芯热电偶的补充,一方面在堆芯寿命接近结束时,在邻近的热电偶发生故障之后,至少提供最少数量的堆芯热点的温度指示。声学温度计系统必须符合堆芯中子节省的要求。例如为了在桃花谷堆上使用这种温度计,对八个所选的燃料元件的石墨块进行了修改,以便能在预期的热点位置上容得下一个探测器的体积。特殊的芯块要分段做、精确地钻孔,然后再联结起来。系统必须十分精心地设计,特别要避免由于尖状物和其它急剧

的机械过渡导致谐振和反射作用。

7.1 热电偶温度计

热电偶温度计由热电偶,电测仪表及连接导线所组成。是目前应用最广泛的温度计,也是最普通的核电厂的反应堆常用的温度检测仪表。它广泛用来检测 $100\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度,长期使用可测 1300°C ,短期使用可测 1600°C ,特殊材料制成的热电偶还可以测量更高或更低的温度,例如可测 $-270^{\circ}\text{C}\sim 2800^{\circ}\text{C}$ 。

热电偶温度计之所以在反应堆核电厂中得到广泛的应用是由于热电偶尺寸小,适用于宽的温度范围以及对辐射损伤相对地不灵敏,同时这种温度计有较高的准确度。而且基于热电偶能把温度转变为电信号,这样就便于信号的远传和实现多点切换检测。

经过热电偶辐照效应的理论研究认为:由金属做成的热电偶若在辐照期间电导率不发生变化,则其校验曲线不随原子错位而变化。同时,由于辐射引起的缺陷作用,热电偶的热电势变化率应该不超过 2%。并考察了镍铬-镍铝,铁-康铜,铜-康铜,铂-铂 10%铯,钨-铼,钨-钨 26%铼等 6 种热电偶在热中子通量 $1\times 10^{14}\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 下辐照较长时间,由于核转变造成成分的理论计算的变化,得到的结论是,在所探讨的热电偶中镍铬-镍铝是最稳定的,铁-康铜次之。其余 4 对热电偶在辐照期间发生了成分的变化,从而必然造成热电偶性质的变化。对于这些材料的每一种曲线可以给出其成分随辐照时间的变化。在 6 个月中, $10^{14}\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 的热中子通量可以使 20% 的铯转变为钡,10% 的铼转变为钨,0.5% 的铜转变为镍和锌。

经过热电偶辐照效应的实验研究,发现在热中子积分通量达 $4.2\times 10^{20}\text{n}/\text{cm}^2$ 下辐照的镍铬-镍铝热电偶刻度曲线没有表现出明显的变化,热中子积分通量辐照大于 $1\times 10^{21}\text{n}/\text{cm}^2$ 的镍铬-镍铝热电偶的刻度曲线也没有明显的变化,这就证实了理论推算,即镍铬-镍铝热电偶不应当由于核转变而改变其刻度曲线。在温度大约 400°C 下快中子积分通量大约辐照到 $3\times 10^{21}\text{n}/\text{cm}^2$ 的镍铬-镍铝热电偶,辐照后在 $93\sim 760^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,其刻度曲线正向漂移 $-12\sim -1^{\circ}\text{C}$ 。几种热电偶在 $316\sim 760^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的温度误差几乎是恒定的。这种热电偶在它的使用范围内堆芯测量方面得到了普遍的采用。在温度大约 400°C 下快中子积分通量辐照到 $3.4\times 10^{20}\text{n}/\text{cm}^2$ 的铂-铂铯热电偶在 $316\sim 760^{\circ}\text{C}$ 范围内刻度曲线漂移 $+2.1\%\sim 1.7\%$ 。铂-铂 10%铯热电偶在 1038°C 下热中子积分通量辐照到 $4.2\times 10^{20}\text{n}/\text{cm}^2$ 之后,刻度曲线变化 3%。在温度大约 400°C 下辐照的一个铂-铂 10%铯热电偶,当快中子积分通量达到 3.4×10^{21} 之后,证实了在 $93\sim 760^{\circ}\text{C}$ 范围内刻度漂移小于 1.75%,这些都表明,铂-铂铯热电偶可以适合于快堆使用。

7.1.1 热电效应

1821 年塞贝克发现了热电现象。他发现由两个不同金属组成的电路中,当它们的接点保持不同的温度时,那么在电路中将有电流流动(图 7-1)。如果电流在冷接点从 A 流向 B,则认为导体 A 相对于导体 B 来说是正的。产生的电流之电势叫做塞贝克电势。在特定的温度下,这种电势的变化率叫作在那个温度下对于特定的一对金属的塞贝克系数。塞贝克效应又称热电效应,其电势称为热电势。

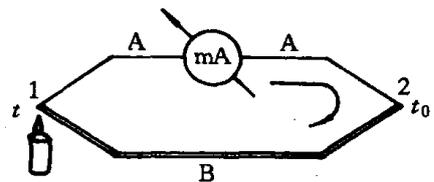


图 7-1 塞贝克效应示意图

由物理学知道,热电势是由接触电势和温差电势两部分组成。

1. 接触电势

接触电势又称珀耳贴电势。其产生的原因是,当两种不同的导体 A 和 B 接触时,由于两者有不同的电子密度。设导体 A 的电子密度为 N_A 大于导体 B 的电子密度 N_B ,则电子在两个方面上扩散的速率就不同。从 A 到 B 的电子数要比从 B 到 A 的为多,结果 A 因失去电子而带正电荷,在 A、B 的接触面上便形成了一个从 A 到 B 的静电场。这个电场将阻碍扩散作用的继续进行,同时加速电子向相反方向转移,使从 B 到 A 的电子数增多,最后达到平衡状态。此时 A、B 之间也形成一电位差,这个电位差称为接触电势,如图 7-2 所示。其数值取决于两种不同导体的性质和接触点的温度。若导体 A 和 B 相接触。接点温度为 t ,则接点处的电位差记为 $e_{AB(t)}$,函数 $e_{AB(t)}$ 的形式只与 A 和 B 的性质有关。

根据物理学的推导,接触电势大小可用下式来计算:

$$e_{AB(t)} = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_{At}}{N_{Bt}} \quad (7-1)$$

式中 e ——单位电荷。等于 4.802×10^{-10} 绝对静电单位;

K ——波尔兹曼常数,等于 1.38×10^{-23} J/K;

N_{At} 、 N_{Bt} ——金属 A、B 在温度 t 时的电子密度;

T ——两金属接触处的绝对温度, K。

从上式可知,接触电势的大小与接头处温度的高低和金属的种类有关。温度越高,两金属的自由电子密度相差越大,则接触电势越大。

2. 温差电势

温差电势又称汤姆逊电势,是一根导体上因两端温度不同而产生的热电势。当同一导体的两端温度不同时,由于高温端的电子能量大于低温端的电子能量。因而从高温端跑到低温端的电子数多于从低温端跑到高温端的电子数,结果,高温端因失去电子而带正电荷,低温端因得到电子而带负电荷。从而在高、低温端之间形成一个从高温端指向低温端的静电场。该电场将阻止电子从高温端跑向低温端。同时加速电子从低温端跑向高温端,最后达到平衡状态,此时在导体两端便产生一个相应的电位差,该电位差称为温差电势。此电势只与导体性质和导体两端的温度有关,而与导体长度,截面大小,沿导体长度上的温度分布无关。如均匀导体 A 两端温度为 t 和 t_0 (如图 7-3 所示),则在导体两端之间的温差电势 $e_A(t, t_0)$ 为

$$e_A(t, t_0) = e_A(t) - e_A(t_0) \quad (7-2)$$

3. 热电偶回路的热电势

将两根不同性质的导体 A 和 B 焊接组成一个闭合回路,称之为热电偶,如图 7-4 所示。图中 N_A 大于 N_B , t 大于 t_0 ,则其接触电势和温差电势方向如图所示。回路的总电势(即塞贝克电势)用符号 $E_{AB}(t, t_0)$ 来表示,此电势等于回路中各电势的代数和:

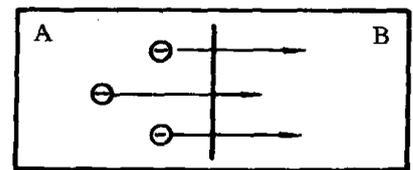
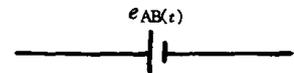


图 7-2 接触电势原理图

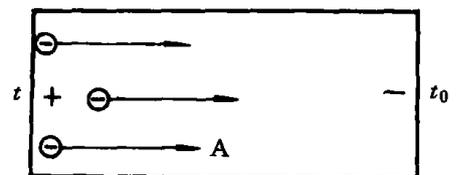
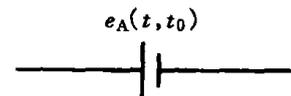


图 7-3 温差电势原理图

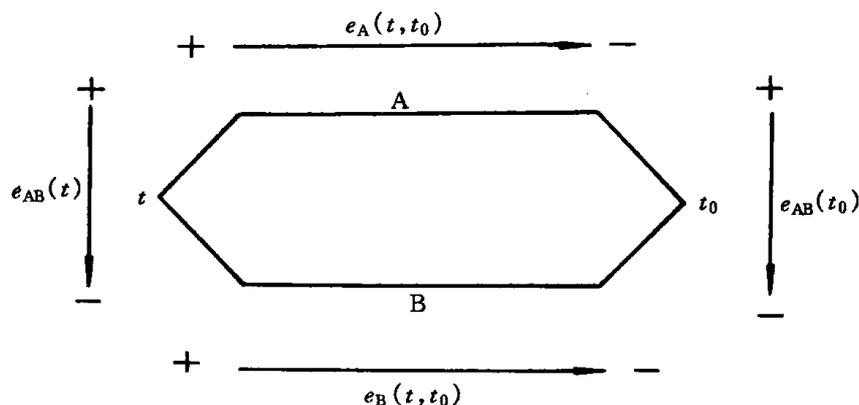


图 7-4 热电偶回路电势

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_B(t, t_0) - e_{AB}(t_0) - e_A(t, t_0)$$

将式(7-2)代入此式得

$$\begin{aligned} E_{AB}(t, t_0) &= [e_{AB}(t) + e_B(t) - e_B(t_0)] - e_{AB}(t_0) - e_A(t) + e_A(t_0) \\ &= [e_{AB}(t) + e_B(t) - e_A(t)] - [e_{AB}(t_0) + e_B(t_0) - e_A(t_0)] \quad (7-3) \\ &= f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0) \end{aligned}$$

式中 $E_{AB}(t, t_0)$ 称为总的热电势, $f_{AB}(t)$ 及 $f_{AB}(t_0)$ 称为分热电势。A 及 B 代表产生热电势的两种导体(或半导体)。角码 A 及 B 的次序表示电位差的方向是由前者指向后者。函数 f_{AB} 的形式并不知道, 所以热电偶的热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 的数值只能用实验方法来确定。 $E_{AB}(t, t_0)$ 只与 A 和 B 的材料性质和温度 t 及 t_0 有关。

若使热电偶的一个接点温度 t_0 保持不变, 则上式中 $f_{AB}(t_0)$ 项也不变, 设为常数 C 。这时上式可写成

$$E_{AB}(t, t_0) = f_{AB}(t) - C \quad (7-4)$$

即热电偶所产生的热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 只和温度 t 有关, 因此, 测量热电势的大小, 就可求得温度 t 的数值, 这就是热电偶温度计的工作原理。

组成热电偶的两种导体或半导体称为热电极。通常把 t_0 端称为热电偶的自由端、参比端或冷端, 而 t 端称为工作端、测量端或热端。若在自由端电流是从导体 A 流向导体 B, 则 A 称作正热电极而 B 称作负热电极, 即测量端失去电子的热电极为正极, 得到电子的热电极为负极。通常规定在 $E_{AB}(t, t_0)$ 中, 写在前面的 A 和 t 分别称为正极和高温端, 写在后面的 B 和 t_0 分别称为负极和低温端, 如果它们的前后位置有一个互换, 则热电势极性相反, 例如 $E_{AB}(t, t_0) = -E_{BA}(t, t_0)$, $E_{AB}(t, t_0) = -E_{AB}(t_0, t)$, 对于 $f_{AB}(t)$ 也是如此, 即 $f_{AB}(t) = -f_{BA}(t)$ 。

7.1.2 热电偶的基本定律

在使用热电偶测量温度时, 还用到热电偶的 3 条基本定律, 它们由实验所确立, 当然也可以从式(7-3)引出和加以证明。现分别叙述如下:

1. 均质导体定律

由一种均质导体(或半导体)组成的闭合回路不论导体(或半导体)的截面积如何以及各处

的温度分布如何,都不能产生热电势。

此定律可以得到如下的推论:(1) 热电偶必须由两种不同性质的材料构成;(2) 由一种材料组成的闭合回路存在温度时,回路如产生热电势则说明该材料是不均匀的。据此,可检查热电极材料的均匀性。

2. 中间导体定律

由不同材料组成的闭合回路中,当各种材料接触点的温度都相同时,则回路中热电势的总和等于零。由此定律可以得到如下的结论:

(1) 在热电偶回路中加入第三、四……种均质导体,只要使加入导体的两端温度相等,则无论加入导体的温度分布如何,都不会影响原来热电偶的热电势的大小。

图 7-5 为两种加入了中间导体的热电偶回路。对图中(a)所示回路,根据式(7-3)可以写出回路的总热电势:

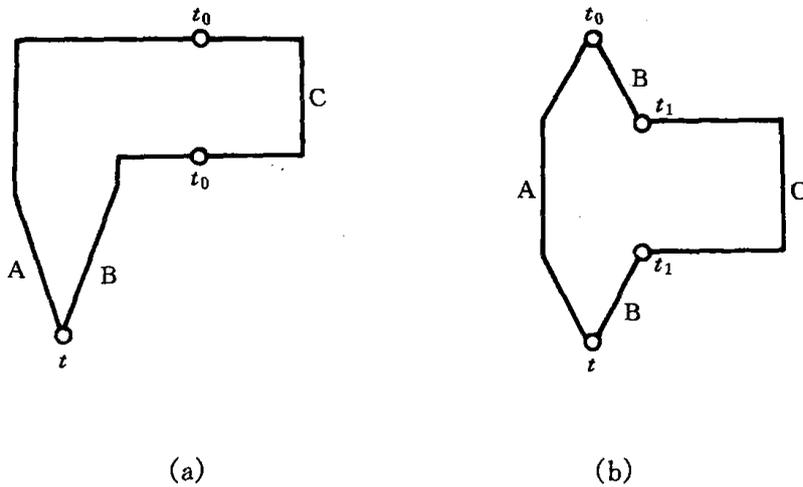


图 7-5 具有中间导体的热电偶回路

$$E_{ABC} = f_{AB}(t) + f_{BC}(t_0) + f_{CA}(t_0)$$

因为

$$f_{AB}(t_0) + f_{BC}(t_0) + f_{CA}(t_0) = 0$$

所以

$$f_{BC}(t_0) + f_{CA}(t_0) = -f_{AB}(t_0)$$

代入上述 E_{ABC} 的表达式中得

$$E_{ABC} = f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0)$$

同样,也可以证明图中(b)所示回路的情况。

根据这个定律,只要热电偶连接显示仪表的两个接点的温度相同,那么仪表的接入对热电偶的热电势没有影响。而且对于任何热电偶接点,只要它接触良好,温度均一,则不论用何种方法连接接点,都不影响热电偶回路的热电势。

(2) 如果两种导体 A、B 对另一种参考导体 C 的热电势为已知。则这两种导体组成热电偶的热电势是它们对参考导体热电势的代数和(如图 7-6)。参考导体亦称标准电极。因为铂的物理、化学性能稳定;熔点高,易

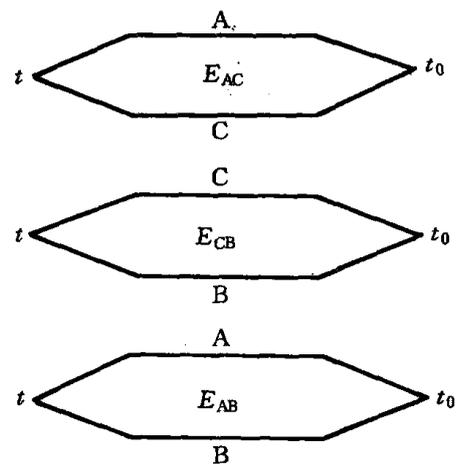


图 7-6 具有中间导体的两种导体构成的热电偶

提纯,复制性好,所以标准电极常用纯铂丝制成。这个结论大大简化了热电偶的选配工作。只要我们取得一些热电极与标准铂电极配对的热电势,则其中任何两种热电极配对时的热电势就可通过计算求得。

3. 中间温度(或连接温度)定律

热电偶在接点温度为 t, t_0 时的热电势等于该热电偶在接点温度为 t, t_n 和 t_n, t_0 时相应的热电势的代数和。或者说,接点温度为 t, t_0 的热电偶,其热电势等于接点温度为 t, t_n 和 t_n, t_0 的两支同性质热电偶的热电势的代数和。这就是中间温度定律的全部内容。即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, t_0) \quad (7-5)$$

如图 7-7 所示。

式(7-5)可以证明如下:

由式(7-3)可得:

$$E_{AB}(t, t_n) = f_{AB}(t) - f_{AB}(t_n)$$

$$E_{AB}(t_n, t_0) = f_{AB}(t_n) - f_{AB}(t_0)$$

两式相加即得

$$\begin{aligned} E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, t_0) \\ = f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0) \end{aligned}$$

将式(7-5)改写为

$$E_{AB}(t, t_n) = E_{AB}(t, t_0) - E_{AB}(t_n, t_0)$$

若 $t_0 = 0^\circ\text{C}$, 则有

$$E_{AB}(t, t_n) = E_{AB}(t, 0) - E_{AB}(t_n, 0) \quad (7-6)$$

由此可见,只要有了参比端为 0°C 的热电偶分度表,利用式(7-6)就可以求出参比端为任何温度 t_n 的热电偶电势。

7.1.3 热电偶参比端温度的处理

由热电偶的测温原理中知道,热电偶热电势的大小不但与热端温度有关,而且与参比端温度有关,只有在参比端温度恒定的情况下,热电势才能正确反映热端温度大小。在实际应用时,热电偶的参比端放置在距热端很近的空气中,受高温设备和环境温度波动的影响较大,因此参比端温度不可能是恒定值。为了消除参比端温度变化对测量的影响,必须对参比端温度加以处理。参比端温度的处理通常有以下几种方法。

1. 计算法(又称热电势修正法)

各种热电偶的分度关系是在参比温度为 0°C 的情况下得到的,若测温热电偶的热端为 $t^\circ\text{C}$,参比端不是 0°C 而是 $t_0^\circ\text{C}$,参比端为 0°C 时的热电势:

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t_0, 0)$$

从这里可知,当 $t_0 \neq 0$ 时,热电偶输出热电势减少了 $E_{AB}(t_0, 0)$,这便是电势误差,如果得出电势 $E_{AB}(t, 0)$ 。然后在分度表中查得温度 t ,便是消除了参比端温度影响以后的测量端温度。

式中 $E(t, 0)$ ——表示参比端为 0°C 的热电势;

$E(t, t_0)$ ——实测值,表示参比端为 $t_0^\circ\text{C}$ 而热端为 $t^\circ\text{C}$ 时的热电势;

$E(t_0, 0)$ ——表示当参比端为 $t_0^\circ\text{C}$ 时应加以校正值,它相当于同一支热电偶在参比端

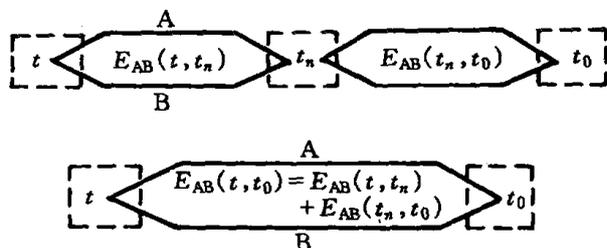


图 7-7 中间温度定律

为 0°C , 热端为 $t_0^{\circ}\text{C}$ 时的热电势, 此值可从热电偶分度表中查得。

例 7-1 用镍铬-镍硅热电偶测量某物质的温度, 测得热电偶输出的热电势为 33.34mV , 室内温度为 35°C , 求此物质的温度是多少?

解 根据参比端温度 $t_0 = 35^{\circ}\text{C}$, 查分度表得 $E(35, 0) = 1.41\text{mV}$ 而 $E(t, t_0) = 33.34\text{mV}$, 代入下式

$$\begin{aligned} E(t, 0) &= E(t, t_0) + E(t_0, 0) \\ &= 33.34 + 1.41 \\ &= 34.75(\text{mV}) \end{aligned}$$

用此电势值再查分度表得此物质的温度 $t = 836^{\circ}\text{C}$ 。

从这里可以看出, 用计算法来补偿参比端温度变化的影响, 适用于实验室, 对于现场使用是很不方便的。

2. 仪表机械零点调整法

如果热电偶参比端温度比较恒定, 或者变化缓慢, 并且与之配套的毫伏计机械零点调整又较方便, 则可采用此法来实现参比端温度的补偿。预先测知热电偶参比端温度(例如室温) t_n , 然后, 将仪表的机械零点从 t_0 (仪表起始点温度) 调至 t_n 处, 这相当于输入电势 $E(t_n, t_0)$, 使得在接入热电偶后, 输入仪表的电势为 $E(t, t_0) = E(t, t_n) + E(t_n, t_0)$, 因此仪表的指针就能指出热端的温度 t 。

应该注意当参比温度变化时需要重新调整仪表的机械零点。如参比端温度经常变化, 此法就不宜采用。这种方法一般用于对测量准确度要求不高的情况。

3. 补偿导线法

一般热电偶都做得比较短(几十厘米至一、二米), 特别是贵金属制成的热电偶就更短, 这样, 热电偶的参比端离被测对象很近, 使参比端温度高且波动较大。所以, 应该用很长的热电偶使参比端延长到温度稳定的地方。这种方法对于价格便宜的热电偶(如镍铬-考铜热电偶)是可行的, 但对于贵金属做的热电偶(如铂铑-铂热电偶)若采用加长的办法, 将会多耗用贵金属, 很不经济, 而且热电极线也不便于敷设。考虑到热电偶参比端所处环境温度常在 100°C 以下, 能够找到某种贱金属丝来代替贵金属丝的延长部分, 其热电性质相当于都用贵金属丝。这种贱金属丝做成各种电缆形式, 称为补偿导线。

如图 7-8 所示, A、B 为要延长的热电偶, C、D 为补偿导线, 这里要求 C、D 满足下列三个条件: (1) 在温度 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内, 由 C、D 组成的热电偶和由 A、B 组成的热电偶的热电性质相同。(2) 电极丝 C 和 A、B 和 D 相接的两个接点温度 t_1 必须相同, 而且 $t_1 < 100^{\circ}\text{C}$, 如果这两个连接点的温度不相等, 则就会造成不易估计的误差。(3) 价格便宜。

利用补偿导线, 将热电偶参比端温度由 t_1 处移到比较稳定的 t_0 处。这时输出的热电势为 $E_{AB}(t, t_0)$, 和温度 t_1 的大小的没有关系。现简述如下: 对于图 7-8 中的热电偶回路的总电势为:

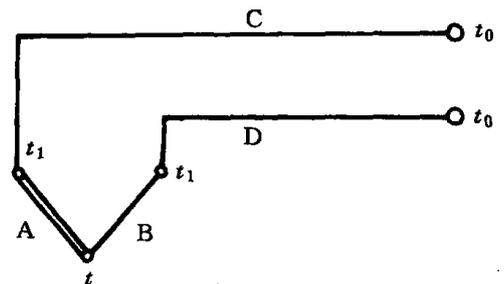


图 7-8 热电偶的延长

$$E_{ABCD} = f_{AB}(t) + f_{BD}(t_1) + f_{DC}(t_0) + f_{CA}(t_1)$$

因为 $f_{AB}(t_1) + f_{BD}(t_1) + f_{DC}(t_1) + f_{CA}(t_1) = 0$

两式相减得

$$E_{ABCD} = f_{AB}(t) - f_{AB}(t_1) + f_{DC}(t_0) - f_{DC}(t_0) - f_{DC}(t_1)$$

又因为在 100℃ 以下有

$$f_{AB}(t_1) = f_{CD}(t_1), \quad f_{AB}(t_0) = f_{CD}(t_0)$$

将它们代入上式得

$$\begin{aligned} E_{ABCD} &= f_{AB}(t) - f_{CD}(t_1) - f_{AB}(t_0) + f_{CD}(t_1) \\ &= f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0) \end{aligned}$$

这种情形从物理意义上来说,如果将一支长热电偶切断又接起来,只不过切去一段贵金属丝,接一段热电性质相同的贱金属丝。

各种热电偶所配用的补偿导线材料及其主要特点见表 7-2。

表 7-2 常用热电偶的补偿导线

热电偶名称	补 偿 导 线				工作端为 100℃ 参比端为 0℃ 时 标准热电势 (mV)
	正 极		负 极		
	材 料	线芯绝缘层 颜 色	材 料	线芯绝缘层 颜 色	
铂铑-铂	铜	红	镍铜	白	0.64 ± 0.03
镍铬-镍硅	铜	红	康铜	白	4.10 ± 0.15
镍铬-考铜	镍铬	绿	考铜	白	6.95 ± 0.30
铁-考铜	铁	白	考铜	白	5.75 ± 0.25
铜-康铜	铜	红	康铜	白	4.10 ± 0.15

补偿导线接线时应注意正负极,补偿导线的正极与热电偶正极相接,负极与负极相接,如果正负极接错将造成不易估计的误差。

4. 参比端恒温法

若参比端温度不能保持恒定,即使使用了补偿导线,进行热电势修正和调整仪表机械零位的方法,仍然可能带来附加误差。为了提高测量精度,常采用参比端恒温法,即将参比端置于恒温器中,恒温器恒定的温度通常是 0℃、20℃ 或 50℃,这里仅介绍两种恒温器。

(1) 冰点槽

0℃ 的恒温常采用冰点槽,如图 7-9 所示。这是一个充满蒸馏水和碎冰块的均匀混合物的容器。为了使两电极绝缘,将参比端分别放在两个试管中、在试管中注入变压器油以改善传热性能。这是一种精度很高的参比端温度处理方法。由于冰点槽法比较麻烦,所以只局限于实验室中使用,现场不宜采用。

(2) 恒温箱

在现场通常采用恒温箱对参比端进行恒温。如图 7-10 所示。

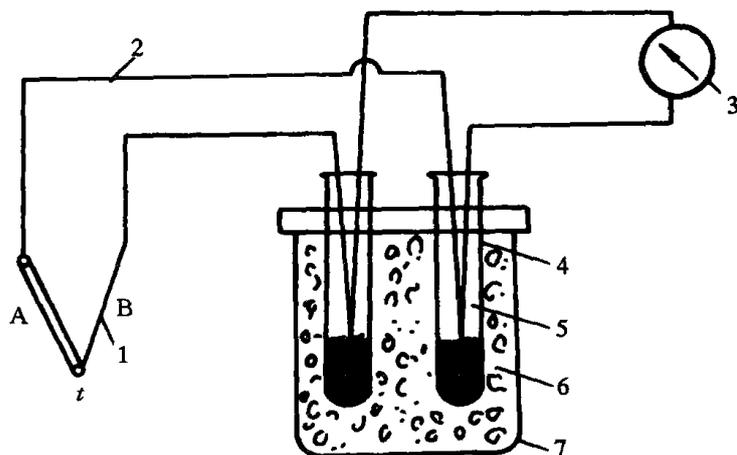


图 7-9 冰点槽恒温法

1—热电偶;2—补偿导线;3—显示仪表;4—试管;
5—变压器油;6—冰水混合物;7—容器

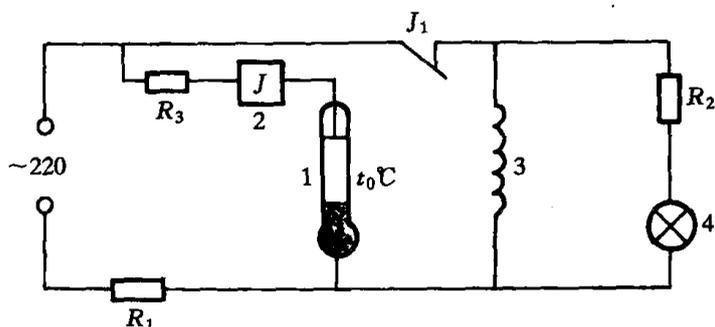


图 7-10 恒温箱线路

1—水银接点温度计;2—继电器;3—加热电阻丝;4—指示灯

当箱内温度达到 $t_0^\circ\text{C}$ 时,水银接点温度计内的水银柱与 $t_0^\circ\text{C}$ 刻度处的定接点接通,继电器 J 线圈通电,这时它的常闭点 J_1 断开,停止加热。当箱内温度下降到 $t_0^\circ\text{C}$ 以下时,水银接点断开,继电器 J 的常闭点闭合,电阻丝通电加热,虽然只有在环境温度低于 $t_0^\circ\text{C}$ 时这种恒温器才能工作。工程上 $t_0^\circ\text{C}$ 常为 50°C 。

5. 参比端温度补偿器

参比端温度补偿器又称补偿电桥法,是产生补偿电势以消除参比端温度的影响的一种装置。利用补偿电桥法来进行参比端温度处理的方法是热电偶测温技术中常用的方法。

(1) 参比端温度补偿器的原理

参比端温度补偿器是利用不平衡电桥产生的电压来补偿热电偶参比端温度变化而引起的热电势的变化。如图 7-11 所示。

补偿器中有一个不平衡电桥,其输出端串联在热电偶回路中,桥臂 R_1 、 R_2 、 R_3 和限流电阻 R_s 均用锰铜绕制而成,其阻值几乎不随温度而变化。 R_{Cu} 为铜电阻,其阻值随温度升高而增大,电桥由 4 伏的直流稳压电源供电。

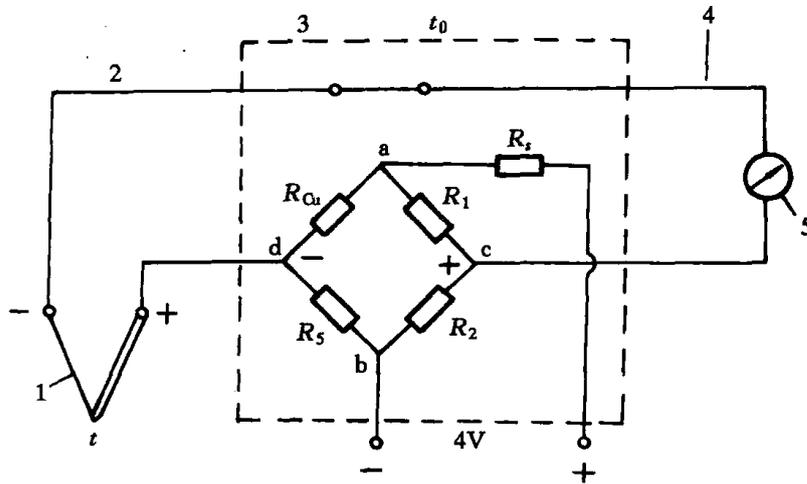


图 7-11 采用参比端温度补偿器的线路图

使用时首先将显示仪表的机械零位调到相应的补偿温度上。处于补偿温度时,电桥四个臂的电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = R_{Cu}$,此时电桥平衡,cd 端无输出,即 U_{cd} 为零。当参比端温度 t_0 离开补偿温度时,例如升高到 t_0' 时,热电偶输出的热电势要减小 $E(t_0', t_0)$ 。这时电桥中的铜桥臂 R_{Cu} 就随温度升高而增大,使电桥失去平衡,输出电压为 U_{cd} 。若 U_{cd} 与 $E(t_0', t_0)$ 数值相等极性相反,结果互相抵消,因而起了参比端温度变化的自动补偿作用。

使用参比端温度补偿器必须与热电偶互相配套,同类型的补偿器的外形和内部接线都是一样的,只要配上不同的限流电阻 R_s 就可以与各种热电偶相配套。 R_s 的改变也就改变了补偿量 U_{cd} 的大小,以适应热电性质不同的各种被补偿的热电偶。

我国目前生产的参比端温度补偿器的补偿温度有 0°C 和 20°C 两种。

与热电偶配接的温度变送器及电子自动电位差计中也有温度补偿电路,而且就作为仪表测量线路的一部分,它们都是将热电偶的冷端温度补偿至 0°C 。

(2) 参比端温度计补偿器的计算:

目前我国的参比端温度补偿器设计中规定 $R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega$,电桥电源 $E = 4\text{V}$,铜电阻 R_{Cu} 在平衡点温度时等于 R_1 ,限流电阻 R_s 的数值由补偿温度的范围和配套的热电偶型号来确定。

由于热电偶的热电性质和补偿电桥输出特性的非线性,致使在补偿范围内一般只在两点温度下能得到完全补偿,在其他温度时只能得到部分补偿。当参比端温度为平衡点温度 t_0 时,电桥输出电势为零,当 t_0 升高为 t_0' 时,热电势减小的数值 $E(t_0', t_0)$ 可根据热电偶的型号从分度表查得,此时要求电桥输出不平衡电势 $U_{cd} = E(t_0', t_0)$ 。

因为热电偶回路的电阻远大于桥路电阻,故在计算时可认为 cd 开路,图 7-11 可简化为图 7-12 所示的电路。

设电桥所处环境温度由平衡点 t_0 升高至 t_0' 时,铜电阻值的增量为 ΔR_{Cu} ,这时补偿电桥

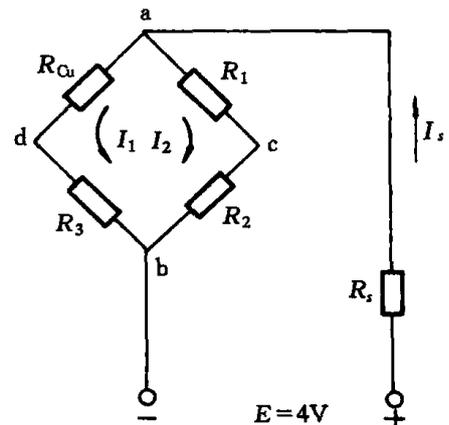


图 7-12 补偿电桥

的等效电阻 R_{ab} 为

$$R_{ab} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 + R_{Cu} + \Delta R_{Cu})}{R_1 + R_2 + R_3 + R_{Cu} + \Delta R_{Cu}}$$

流过 R_s 的电流为

$$I_s = \frac{E}{R_s + R_{ab}}$$

因为 $R_{ab} \ll R_s$, R_s 不随温度而变化, 所以可以近似认为 I_s 也不随温度而变化。由分流公式可得

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_{Cu} + \Delta R_{Cu}} I_s \\ &= \frac{2R_1}{4R_1 + \Delta R_{Cu}} I_s \end{aligned}$$

$$I_2 = \frac{R_3 + R_{Cu} + \Delta R_{Cu}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_{Cu} + \Delta R_{Cu}} I_s = \frac{2R_1 + \Delta R_{Cu}}{4R_1 + \Delta R_{Cu}} I_s$$

电桥输出电压为

$$\begin{aligned} U_{cd} &= U_{ac} - U_{ad} = I_2 R_1 - I_1 (R_{Cu} + \Delta R_{Cu}) \\ &= -\frac{R_1 \Delta R_{Cu}}{4R_1 + \Delta R_{Cu}} I_s \\ &= -\frac{R_1 \Delta R_{Cu}}{4R_1 + \Delta R_{Cu}} \times \frac{E}{R_s + R_{ab}} \end{aligned}$$

若在 t_0' °C 时得到完全补偿, 则应有

$$E(t_0', t_0) = -U_{cd} = \frac{R_1 \Delta R_{Cu}}{4R_1 + \Delta R_{Cu}} \times \frac{E}{R_s + R_{ab}}$$

所以
$$R_s = \frac{R_1 \Delta R_{Cu} E}{(4R_1 + \Delta R_{Cu}) E(t_0', t_0)} - R_{ab}$$

其中 $\Delta R_{Cu} = R_{Cu} \alpha \Delta t$

式中 α ——铜导线电阻温度系数, 是温度的函数, 当 $t = 0^\circ\text{C}$ 时, $\alpha_0 = 4.25 \times 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ 。温度为 t 时

$$\alpha_t = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 t}$$

Δt ——温度补偿范围, 这里 $\Delta t = t_0' - t_0$ 。

因此有

$$R_s = \frac{R_1 R_{Cu} \alpha \Delta t E}{(4R_1 + \Delta R_{Cu}) E(t_0', t_0)} - R_{ab} \quad (7-7)$$

上式中的 $R_1 = R_{Cu} = 1\Omega$, 又因 $R_1 \gg \Delta R_{Cu}$, 所以有 $4R_1 + \Delta R_{Cu} \approx 4R_1$ 和 $R_{ab} \approx 1\Omega$, $E = 4\text{V}$, 热电势的单位用伏(V), 故(3-7)可简化为

$$R_s = \frac{\alpha}{E(t_0', t_0)} \cdot (t_0' - t_0) - 1 \quad (\Omega) \quad (7-8)$$

例 7-2 有一个与 EU-2 型热电偶配套的补偿器。其平衡温度为 20°C , 要求在 30°C 时完全补偿, 试计算 R_s 的数值。

解 (1) 求 α_{30}

$$\alpha_{30} = \frac{\alpha_0}{1 + \alpha_0 t} = \frac{4.25 \times 10^{-3}}{1 + 4.25 \times 10^{-3} \times 30} = 3.769 \times 10^{-3} \quad (1/^\circ\text{C})$$

(2) 求 $E_{\text{EU}-2}(30, 20)$

$$\begin{aligned} E_{\text{EU}-2}(30, 20) &= E_{\text{EU}-2}(30, 0) - E_{\text{EU}-2}(20, 0) \\ &= 1.2\text{mV} - 0.8\text{mV} = 0.4 \times 10^{-3}(\text{V}) \end{aligned}$$

(3) 求 R_s

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{\alpha_{30}}{E_{\text{EU}-2}(30, 20)} \times (30 - 20) - 1 \\ &= \frac{3.769 \times 10^{-3} \times 10}{0.4 \times 10^{-3}} - 1 = 93.35(\Omega) \end{aligned}$$

参比端温度补偿器通常使用在热电偶与动圈仪表配套的测温系统里。如果热电偶与自动电子电位差计或温度变送器配套, 由于这些仪表的测量桥路里已设置了参比端温度补偿电阻, 故不必另行单独配置参比端温度补偿器。

6. 辅助热电偶法

采用辅助热电偶的办法同样可以达到参比端温度补偿的目的。

具体有二种办法

(1) 辅助热电偶参比端恒温法: 如图 7-13 所示。将热电偶的参比端和辅助热电偶的热端放在一起。辅助热电偶的参比端置于恒温箱中, 两种热电偶的热电性质相同。互相串联, 从图中可见, 显示仪表接受的电势为两个热电势之和, 即有

$$E_{\Sigma} = E(t, t_1) + E(t_1, t_0) = E(t, t_0)$$

可以看出, E_{Σ} 只与热电偶温度 t 和辅助热电偶的参比端温度 t_0 有关, 而 t_0 是恒定的, 所以显示仪表的指示值只与 t 有关。

(2) 辅助热电偶热端恒温法: 如图 7-14 所示。将热电偶和辅助热电偶的参比端都置于 t_1 处, 辅助热电偶的热端置于恒温箱内。两种热电偶的热电性质相同, 反相串联。如图所示, 显示仪表接受的热电势为两种热电势之差, 即有:

$$\begin{aligned} E_{\Sigma} &= E(t, t_1) - E(t_0, t_1) \\ &= E(t, t_1) + E(t_1, t_0) = E(t, t_0) \end{aligned}$$

同样消除了因参比端温度 t_0 变化对输入显示仪表的热电势的影响。

利用辅助热电偶进行参比端温度补偿时, 显

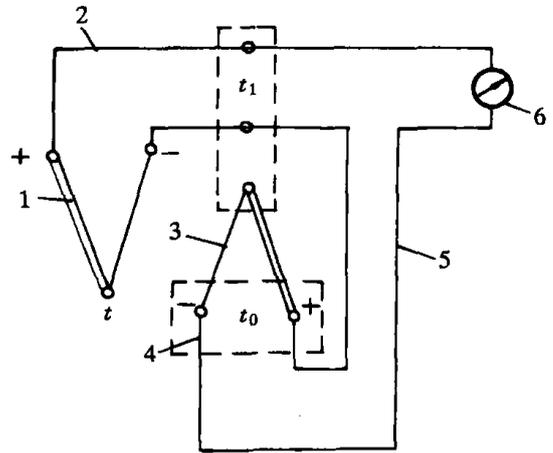


图 7-13 辅助热电偶参比端恒温补偿线路

- 1—主热电偶; 2—补偿导线;
- 3—辅助热电偶; 4—恒温箱;
- 5—铜导线; 6—显示仪表

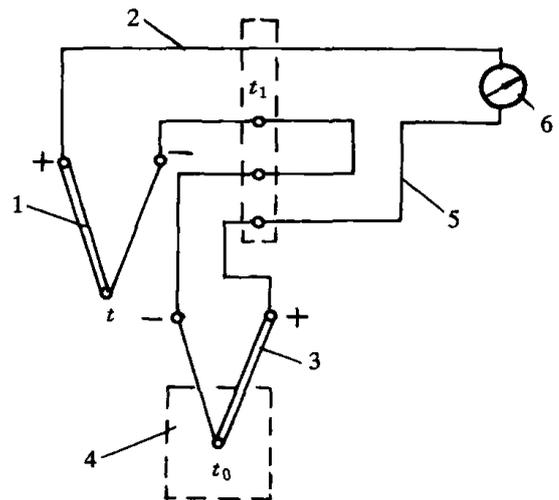


图 7-14 辅助热电偶热端恒温补偿线路

- 1—主热电偶; 2—补偿导线;
- 3—辅助热电偶; 4—恒温箱;
- 5—铜导线; 6—显示仪表

示仪表的机械零位要调整在恒温箱所恒定的温度 t_0 上。

7. 多点参比端温度补偿

为了节省仪表,在同一设备或同一车间里,可利用多点切换开关把几支甚至几十支同一分度号的热电偶接到一块仪表上,这时只需要用一个公共的参比端补偿器。还可以采用另一个办法,如图 7-15 所示,即把所有热电偶的参比端引进一个接线端子盒里,在这个盒子里放置着补偿热电偶(即辅助热电偶)的热端。补偿热电偶可以是一支测温热电偶或是用测温热电偶的补偿导线作成的热电偶。补偿热电偶和

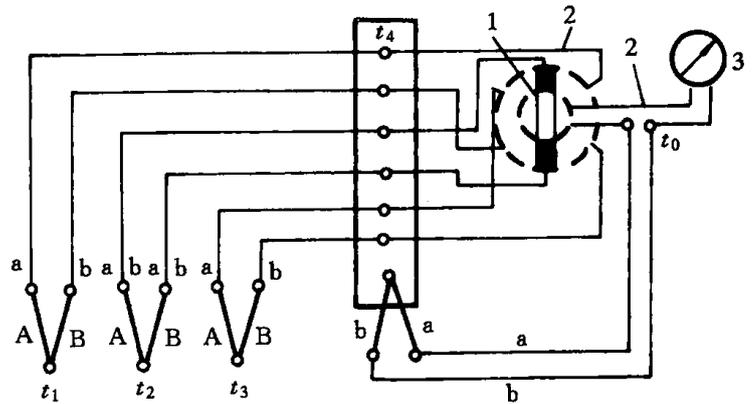


图 7-15 多点参比端温度用补偿热电偶线路

1—切换开关;2—铜导线;3—毫伏表

所有测温热电偶通过切换开关和仪表串联起来,使参比端温度变化引起测温热电偶的热电势变化相互补偿。此时毫伏表的机械零点应调整到补偿热电偶较为恒定的参比温度 t_0 处。也可以把数支热电偶的参比端引到一个电加热的恒温器内,恒温器由电阻丝加热,用水银接点温度计控制恒温器在某一恒定温度(50℃或 60℃),此时与之配套的毫伏表的机械零点应调至恒温箱的恒定温度处。

7.1.4 热电偶的类型

热电偶有标准化热电偶和非标准化热电偶,标准化热电偶是指已由国家标准规定其温度-热电势关系及允许误差的热电偶。相同型号的标准化热电偶有统一的分度表。这里我们仅介绍标准化热电偶。

1. 标准化热电偶

所谓标准化热电偶是指制造工艺比较成熟,应用广泛,能成批生产,质量优良而稳定并已列入工业标准化文件中的那些热电偶。由于标准化文件对同一型号的标准化热电偶规定了统一的热电极材料及其化学成份,热电性质和允许偏差,也就是标准化热电偶具有统一的分度表。对于同一型号的标准化热电偶具有互换性,使用起来十分方便。

我国标准化热电偶主要有以下几种:

(1) 铂铑₁₀-铂热电偶

这是一种贵金属热电偶,其分度号为 LB-3,正极是由 90% 铂和 10% 铑制成的合金丝,负极为纯铂丝。

这种热电偶的优点是:较易得到纯度极高的铂和铂铑,因而便于复制,精确度高。一般用在精密测量中和作为国际实用温标中 630.755~1 064.43℃ 范围内的基准热电偶;它的物理化学稳定性高,宜在氧化性及中性气氛中使用;它的熔点较高,因此测温上限较高,在工业测量中一般用它测量 1 000℃ 以上的温度,可长期连续使用到 1 300℃ 以下,短期测量温度可达 1 600℃。

铂铑-铂热电偶的缺点是:与其它热电偶比较,它的热电势较小,例如 $E(100, 0) =$

0.643mV,价格贵。一般制成直径0.5mm以下的细丝,因而机械强度低,易折断。在还原性气体、金属蒸汽、金属氧化物以及氧化硅(SiO₂)和氧化硫(SO₂)等气氛中使用很快受到沾污而变质。所以在这些气氛中工作时必须另加保护套管。另外,这种热电偶的热电性质非线性较大。热电极在高温下会升华,铯分子渗透到铂铑中去沾污铂极,导致热电偶的热电势不稳定等。

(2) 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶

镍铬-镍硅热电偶的分度号为EU-2,其正极镍铬成份为:9%~10%铬,0.4%硅,其余为镍;负极镍硅成份为:2.5%~3%硅,≤0.6%钴,其余为镍。

它的优点是:因为组成热电偶的两极合金中含有大量的镍,所以具有较强的抗氧化性和抗腐蚀性,化学稳定性好。复制性好,热电势较大,例如 $E(100,0)=4.10\text{mV}$,热电势与温度的线性关系好,热电极材料的价格较便宜,能满足工业测量要求。在1000℃以下可长期连续使用,短期测量可达1300℃,是目前核工业和其它工业部门应用最广泛的热电偶。

它的缺点是:在500℃以上的温度下和还原性介质及硫,硫化物(SO₂、H₂S)的气氛中使用很容易被腐蚀,所以在这种气氛中工作必须加保护套管。另外,它的精度比铂铑-铂热电偶低。

因为镍铬-镍硅热电偶的抗氧化性及热电性质的稳定性较好,所以我国已用镍铬-镍硅代替镍铬-镍铝热电偶。

(3) 镍铬-考铜热电偶

这种热电偶的分度号为EA-2,正极镍铬成份为:9%~10%铬,0.4%硅,其余为镍;负极考铜成份为:56%铜,44%镍。

镍铬-考铜热电偶的最大优点是:热电势大,例如 $E(100,0)=6.95\text{mV}$ 。另外,它的价格便宜。

其缺点是:不能用于高温,测量上限长期使用为600℃,短期使用为800℃。另外,由于考铜合金易受氧化而变质,因此使用时还必须加装保护套管。

(4) 铂铑₃₀-铂铑₆热电偶

这种热电偶的分度号为LL-2,其正负极都是铂铑合金,区别在于铂铑的比例不同。正极30%铑,负极含6%铑。它的抗沾污能力强,实践证明它在测量高达1800℃温度时,还具有较好的稳定性,它的精度较高,适用于氧化性和中性介质,长期使用可测量1400~1600℃,短期测量可达1800℃。

但是它的灵敏度较小,如在1000℃附近约为 $9\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,所以需要配用灵敏度较高的显示仪表。由于在室温附近热电势极小,如 $E(25,0)=-2\mu\text{V}$, $E(50,0)=3\mu\text{V}$,因此使用时一般不需要进行参比端温度补偿措施。

(5) 铜-康铜热电偶

这种热电偶的分度号为CK,其正极为铜,负极为60%铜和40%镍的合金。它的灵敏度较大,热电极容易复制,价格低廉。在低温时其精确度较高,可测量到-200℃的低温。但由于铜极易氧化,因此一般测量上限不超过300℃。

2. 热电偶的分度表

各种热电偶与热电势的函数关系可以用函数形式也可以用列表格的形式表示。但是要找出函数关系的数学表达式是比较困难的,所以在工程应用中常用实验的方法得出温度与热电势的关系做成表格备查。这种表示温度与热电势关系的表格称为热电偶的分度表。各种热电

偶的分度表通常是在冷端温度为零的情况下通过实验得到的。几种标准化热电偶的分度表见表 7-3、表 7-4、表 7-5、表 7-6 和表 7-7。我国标准化热电偶的分度号为了和国际标准接轨,这几年采用了新的分度号,但新老分度表差值不大。

表 7-3 铂铑₁₀-铂热电偶分度表

分度号:LB-3,S

(参比端温度为 0℃)

工作端温度 (℃)	热 电 势 (mV)		工作端温度 (℃)	热 电 势 (mV)	
	LB-3	S		LB-3	S
0	0.000	0.000	400	3.250	3.260
10	0.056	0.055	410	3.346	3.356
20	0.113	0.113	420	3.441	3.452
30	0.173	0.173	430	3.538	3.549
40	0.235	0.235	440	3.634	3.645
50	0.299	0.299	450	3.731	3.743
60	0.364	0.364	460	3.828	3.840
70	0.431	0.432	470	3.925	3.938
80	0.500	0.502	480	4.023	4.036
90	0.571	0.573	490	4.121	4.135
100	0.643	0.645	500	4.220	4.234
110	0.717	0.719	510	4.318	4.333
120	0.792	0.795	520	4.418	4.432
130	0.869	0.872	530	4.517	4.532
140	0.946	0.950	540	4.617	4.632
150	1.025	1.029	550	4.717	4.732
160	1.106	1.109	560	4.817	4.832
170	1.187	1.190	570	4.918	4.933
180	1.269	1.273	580	5.019	5.034
190	1.352	1.356	590	5.121	5.136
200	1.436	1.440	600	5.222	5.237
210	1.521	1.525	610	5.324	5.339
220	1.607	1.611	620	5.427	5.442
230	1.693	1.698	630	5.530	5.544
240	1.780	1.785	640	5.633	5.648
250	1.867	1.873	650	5.735	5.751
260	1.955	1.962	660	5.839	5.855
270	2.044	2.051	670	5.943	5.960
280	2.134	2.141	680	6.046	6.046
290	2.224	2.232	690	6.151	6.169
300	2.315	2.323	700	6.256	6.274
310	2.407	2.414	710	6.361	6.380
320	2.498	2.506	720	6.466	6.486
330	2.591	2.599	730	6.572	6.592
340	2.684	2.692	740	6.667	6.669
350	2.777	2.786	750	6.784	6.805
360	2.871	2.880	760	6.891	6.913
370	2.965	2.974	770	6.999	7.020
380	3.060	3.069	780	7.105	7.128
390	3.155	3.164	790	7.213	7.236

续表 7-3

工作端温度 (℃)	热 电 势 (mV)		工作端温度 (℃)	热 电 势 (mV)	
	LB-3	S		LB-3	S
800	7.322	7.345	1 210	12.035	12.067
810	7.430	7.454	1 220	12.155	12.188
820	7.539	7.563	1 230	12.275	12.308
830	7.648	7.672	1 240	12.395	12.429
840	7.757	7.782	1 250	12.515	12.550
850	7.867	7.892	1 260	12.636	12.671
860	7.978	8.003	1 270	12.756	12.792
870	8.088	8.114	1 280	12.875	12.913
880	8.199	8.225	1 290	12.996	13.034
890	8.310	8.336	1 300	13.116	13.155
900	8.421	8.448	1 310	13.236	13.276
910	8.534	8.560	1 320	13.356	13.397
920	8.646	8.673	1 330	13.475	13.519
930	8.758	8.786	1 340	13.595	13.640
940	8.875	8.899	1 350	13.715	13.761
950	8.985	9.012	1 360	13.835	13.883
960	9.098	9.126	1 370	13.955	14.044
970	9.212	9.240	1 380	14.074	14.125
980	9.326	9.355	1 390	14.193	14.247
990	9.441	9.470	1 400	14.313	14.368
1 000	9.556	9.585	1 410	14.433	14.489
1 010	9.671	9.700	1 420	14.552	14.610
1 020	9.787	9.816	1 430	14.671	14.731
1 030	9.902	9.932	1 440	14.790	14.852
1 040	10.019	10.048	1 450	14.910	14.973
1 050	10.136	10.165	1 460	15.029	15.094
1 060	10.252	10.282	1 470	15.148	15.215
1 070	10.370	10.400	1 480	15.266	15.336
1 080	10.488	10.517	1 490	15.385	15.456
1 090	10.605	10.635	1 500	15.504	15.576
1 100	10.723	10.754	1 510	15.623	15.697
1 110	10.842	10.872	1 520	15.742	15.817
1 120	10.961	10.991	1 530	15.860	15.937
1 130	11.080	11.110	1 540	15.979	16.057
1 140	11.198	11.229	1 550	16.097	16.176
1 150	11.317	11.348	1 560	16.216	16.296
1 160	11.437	11.467	1 570	16.334	16.415
1 170	11.556	11.587	1 580	16.451	16.534
1 180	11.676	11.707	1 590	16.569	16.653
1 190	11.795	11.827	1 600	16.688	16.771
1 200	11.915	11.947			

表 7-4 铂铑₃₀-铂铑₆ 热电偶分度表

分度号:LL-2,B

(参比端温度为 0℃)

工作端温度 (℃)	热电势(mV)		工作端温度 (℃)	热电势(mV)		工作端温度 (℃)	热电势(mV)	
	LL-2	B		LL-2	B		LL-2	B
0	0.000	0.000	440	3.250	3.260	880	3.788	3.790
10	-0.001	-0.002	450	1.002	1.002	890	3.871	3.873
20	-0.002	-0.003	460	1.048	1.048	900	3.955	3.957
30	-0.002	-0.002	470	1.096	1.095	910	4.039	4.041
40	0.000	0.000	480	1.143	1.143	920	4.124	4.126
50	0.003	0.002	490	1.192	1.192	930	4.211	4.212
60	0.007	0.006	500	1.242	1.241	940	4.297	4.298
70	0.012	0.011	510	1.293	1.292	950	4.385	4.386
80	0.018	0.017	520	1.345	1.344	960	4.473	4.474
90	0.025	0.025	530	1.397	1.397	970	4.562	4.562
100	0.034	0.033	540	1.451	1.450	980	4.651	4.652
110	0.043	0.043	550	1.505	1.505	990	4.741	4.742
120	0.054	0.053	560	1.560	1.560	1 000	4.832	4.833
130	0.065	0.065	570	1.617	1.617	1 010	4.924	4.924
140	0.078	0.078	580	1.674	1.674	1 020	5.016	5.016
150	0.092	0.092	590	1.732	1.732	1 030	5.109	5.109
160	0.107	0.107	600	1.791	1.791	1 040	5.203	5.202
170	0.123	0.123	610	1.851	1.851	1 050	5.297	5.297
180	0.141	0.140	620	1.912	1.912	1 060	5.393	5.391
190	0.159	0.159	630	1.973	1.974	1 070	5.488	5.488
200	0.178	0.178	640	2.036	2.036	1 080	5.585	5.583
210	0.199	0.199	650	2.099	2.100	1 090	5.683	5.680
220	0.220	0.220	660	2.164	2.164	1 100	5.780	5.777
230	0.243	0.243	670	2.229	2.230	1 110	5.879	5.875
240	0.267	0.266	680	2.295	2.296	1 120	5.978	5.973
250	0.291	0.291	690	2.362	2.363	1 130	6.078	6.073
260	0.317	0.317	700	2.429	2.430	1 140	6.178	6.127
270	0.344	0.344	710	2.498	2.499	1 150	6.279	6.279
280	0.372	0.372	720	2.567	2.569	1 160	6.380	6.374
290	0.401	0.401	730	2.638	2.639	1 170	6.482	6.475
300	0.431	0.431	740	2.709	2.710	1 180	6.585	6.577
310	0.462	0.462	750	2.781	2.782	1 190	6.688	6.680
320	0.494	0.494	760	2.853	2.855	1 200	6.792	6.793
330	0.527	0.527	770	2.927	2.928	1 210	6.896	6.887
340	0.561	0.561	780	3.001	3.003	1 220	7.001	6.991
350	0.596	0.596	790	3.076	3.078	1 230	7.106	7.096
360	0.632	0.632	800	3.152	3.154	1 240	7.212	7.202
370	0.670	0.669	810	3.229	3.231	1 250	7.319	7.308
380	0.708	0.707	820	3.307	3.308	1 260	7.426	7.414
390	0.747	0.746	830	3.385	3.387	1 270	7.533	7.521
400	0.787	0.786	840	3.464	3.466	1 280	7.641	7.628
410	0.828	0.827	850	3.544	3.546	1 290	7.749	7.736
420	0.870	0.870	860	3.624	3.626	1 300	7.858	7.854
430	0.913	0.913	870	3.706	3.708	1 310	7.967	7.953

续表 7-4

工作端温度 (°C)	热电势(mV)		工作端温度 (°C)	热电势(mV)		工作端温度 (°C)	热电势(mV)	
	LL-2	B		LL-2	B		LL-2	B
1 320	8.076	8.063	1 490	9.993	9.979	1 660	11.966	11.959
1 330	8.186	8.172	1 500	10.108	10.094	1 670	12.083	12.076
1 340	8.297	8.283	1 510	10.224	10.210	1 680	12.199	12.193
1 350	8.408	8.393	1 520	10.339	10.325	1 690	12.315	12.310
1 360	8.519	8.504	1 530	10.455	10.441	1 700	12.431	12.426
1 370	8.630	8.616	1 540	10.571	10.558	1 710	12.547	12.543
1 380	8.742	8.727	1 550	10.687	10.674	1 720	12.663	12.659
1 390	8.854	8.839	1 560	10.803	10.790	1 730	12.778	12.776
1 400	8.967	8.952	1 570	10.919	10.907	1 740	12.894	12.892
1 410	9.080	9.065	1 580	11.035	11.024	1 750	13.009	13.008
1 420	9.193	9.178	1 590	11.151	11.141	1 760	13.124	13.124
1 430	9.307	9.291	1 600	11.268	11.257	1 770	13.239	13.239
1 440	9.420	9.405	1 610	11.384	11.374	1 780	13.354	13.354
1 450	9.534	9.519	1 620	11.601	11.491	1 790	13.468	13.470
1 460	9.649	9.634	1 630	11.617	11.608	1 800	13.582	13.585
1 470	9.763	9.748	1 640	11.734	11.725	1 810		13.699
1 480	9.878	9.863	1 650	11.850	11.842	1 820		13.814

表 7-5 镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表

分度号:EU-2,K

(参比端温度为0°C)

工作端温度 (°C)	热 电 势 (mV)		工作端温度 (°C)	热 电 势 (mV)	
	EU-2	K		EU-2	K
-50	-1.86	-1.889	150	6.13	6.137
-40	-1.50	-1.527	160	6.53	6.539
-30	-1.14	-1.156	170	6.93	6.939
-20	-0.77	-0.777	180	7.33	7.338
-10	-0.39	-0.392	190	7.73	7.737
-0	-0.00	-0.000	200	8.13	8.137
+0	0.00	0.000	210	8.53	8.537
10	0.40	0.397	220	8.93	8.938
20	0.80	0.798	230	9.34	9.341
30	1.20	1.203	240	9.75	9.745
40	1.61	1.611	250	10.15	10.151
50	2.02	2.002	260	10.56	10.560
60	2.43	2.436	270	10.97	10.969
70	2.85	2.850	280	11.38	11.381
80	3.26	2.266	290	11.80	11.793
90	3.68	3.681	300	12.21	12.207
100	4.10	4.095	310	12.62	12.623
110	4.51	4.508	320	13.04	13.039
120	4.92	4.919	330	13.45	13.456
130	5.33	5.327	340	13.87	13.874
140	5.73	5.733	350	14.30	14.292

续表 7-5

工作端温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热 电 势 (mV)		工作端温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热 电 势 (mV)	
	EU-2	K		EU-2	K
360	14.72	14.712	870	36.13	36.121
370	15.14	15.132	880	36.53	36.524
380	15.56	15.552	890	36.93	36.925
390	15.99	15.974	900	37.33	37.325
400	16.40	16.395	910	37.73	37.724
410	16.83	16.818	920	38.13	38.122
420	17.25	17.241	930	38.53	38.519
430	17.67	17.664	940	38.93	38.915
440	18.09	18.088	950	39.32	39.310
450	18.51	18.513	960	39.72	39.703
460	18.94	18.938	970	40.10	40.096
470	19.37	19.363	980	40.49	40.488
480	19.79	19.788	990	40.88	40.897
490	20.22	20.214	1 000	41.27	41.264
500	20.65	20.640	1 010	41.66	41.657
510	21.08	21.066	1 020	42.04	42.045
520	21.50	21.493	1 030	42.43	42.432
530	21.93	21.919	1 040	42.83	42.817
540	22.35	22.346	1 050	43.21	43.202
550	22.78	22.772	1 060	43.59	43.585
560	23.21	23.198	1 070	43.97	43.968
570	23.63	23.624	1 080	44.34	44.349
580	24.05	24.050	1 090	44.72	44.729
590	24.48	24.476	1 110	45.48	45.486
600	24.90	24.902	1 120	45.85	45.863
610	25.32	25.327	1 130	46.23	46.238
620	25.75	25.751	1 140	46.60	46.612
630	26.18	26.176	1 150	46.97	46.985
640	26.60	26.599	1 160	47.34	47.356
650	27.03	27.022	1 170	47.71	47.726
660	27.45	27.445	1 180	48.08	48.095
670	27.87	27.867	1 190	48.44	48.462
680	28.29	28.288	1 200	48.81	48.828
690	28.71	28.709	1 210	49.17	49.192
700	29.13	29.128	1 220	49.53	49.555
710	29.55	29.547	1 230	49.89	49.916
720	29.97	29.965	1 240	50.25	50.276
730	30.39	30.383	1 250	50.61	50.633
740	30.81	30.799	1 260	50.96	50.990
750	31.22	31.214	1 270	51.32	51.344
760	31.64	31.629	1 280	51.67	51.697
770	32.06	32.042	1 290	52.02	52.049
780	32.46	32.455	1 300	52.37	52.398
790	32.87	32.866	1 310		52.747
800	33.29	33.277	1 320		53.093
810	33.69	33.686	1 330		53.439
820	34.10	34.095	1 340		53.782
830	34.51	34.502	1 350		54.125
840	34.91	34.909	1 360		54.466
850	35.32	35.314	1 370		54.807
860	35.72	35.718			

表 7-6 镍铬-考铜热电偶分度表

分度号:EA-2, XK

(参比端温度为 0℃)

工作端温度 (℃)	mV								
-50	-3.11	120	8.43	300	22.99	480	38.41	660	54.26
-40	-2.50	130	9.18	310	23.74	490	39.28	670	55.12
-30	-1.89	140	9.93	320	24.59	500	40.15	680	56.00
-20	-1.27	150	10.69	330	25.44	510	41.02	690	56.87
-10	-0.64	160	11.46	340	26.30	520	41.90	700	57.74
-0	-0.00	170	12.24	350	27.15	530	42.78	710	58.57
+0	0.00	180	13.03	360	28.01	540	43.67	720	59.47
10	0.65	190	13.83	370	28.88	550	44.55	730	60.33
20	1.31	200	14.66	380	29.75	560	45.44	740	61.20
30	1.98	210	15.48	390	30.61	570	46.33	750	62.06
40	2.66	220	16.30	400	31.48	580	47.22	760	62.92
50	3.35	230	17.12	410	32.34	590	48.11	770	63.78
60	4.05	240	17.95	420	33.21	600	49.01	780	64.64
70	4.76	250	18.76	430	34.07	610	49.89	790	65.50
80	5.48	260	19.59	440	34.94	620	50.76	800	66.36
90	6.21	270	20.42	450	35.81	630	51.64		
100	6.95	280	21.24	460	36.67	640	52.51		
110	7.69	290	22.07	470	37.54	650	53.39		

表 7-7 铜-康铜热电偶分度表

分度号:CK 或 T

(参比端温度为 0℃)

工作端温度 (℃)	mV						
-270	-6.258	-90	-3.089	80	3.357	260	12.572
-260	-6.232	-80	-2.475	90	3.813	270	13.137
-250	-6.181	-70	-2.475	100	4.277	280	13.707
-240	-6.105	-60	-2.152	110	4.749	290	14.281
-230	-6.007	-50	-1.819	120	5.227	300	14.860
-220	-5.889	-40	-1.475	130	5.712	310	15.442
-210	-5.753	-30	-1.121	140	6.204	320	16.030
-200	-5.603	-20	-0.757	150	6.702	330	16.621
-190	-5.439	-10	-0.383	160	7.207	340	17.217
-180	-5.261	-0	-0.000	170	7.718	350	17.816
-170	-5.069	0	0.000	180	8.235	360	19.027
-160	-4.865	10	0.391	190	8.758	370	19.027
-150	-4.648	20	0.789	200	9.286	380	19.638
-140	-4.419	30	1.196	210	9.820	390	20.252
-130	-4.177	40	1.611	220	10.360	400	20.869
-120	-3.923	50	2.035	230	10.905		
-110	-3.656	60	2.468	240	11.456		
-100	-3.378	70	2.908	250	12.011		

7.1.4 测温热电偶电势的测量

热电偶把被测温度变换为电势信号,因此可以通过各种电测仪表来测量电势以显示温度。常用测量热电势的仪表有直流毫伏计,电位差计和数字式电压表,电子自动平衡桥等。它们多数是按温度分度,但也有按电势分度的。如以温度分度则需标明热电偶的类型。按电势分度时各类型热电偶通用。

这里仅介绍毫伏计和电位差计

1. 测量热电势的毫伏计方法

在工业上通常用毫伏计作为热电偶温度计的显示仪表,它的准确度虽然不高(一般为 1.0 级),但构造简单,价格便宜,不需要复杂的维护工作。目前中小型企业广泛使用的毫伏计,通常称之为动圈式仪表,实质上是一种测量微安级电流的磁电式仪表。

(1) 毫伏计的工作原理

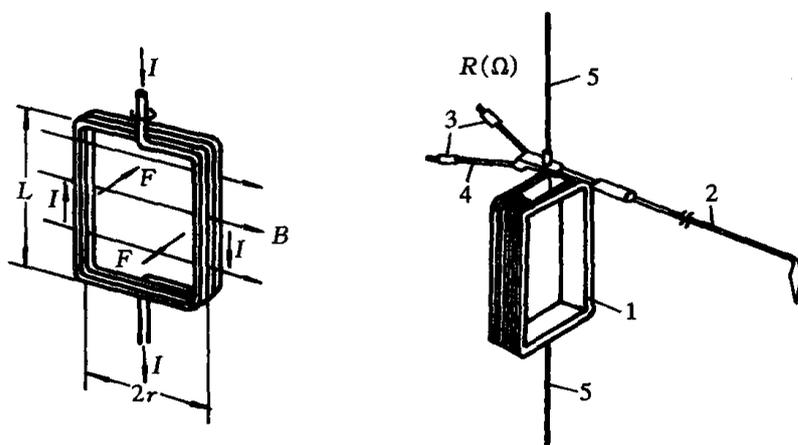


图 7-16 毫伏计的原理结构图

1—动圈;2—指针;3—平衡锤;4—平衡杆;5—张丝

如图 7-16 和图 7-17 所示,在永久磁铁的磁场中,放置一个用细铜丝绕成的可动线圈,动圈的上下用张丝(或游丝、吊丝)固定在仪表支架上。上面一根张丝和线框上固定着仪表的指针。当有电流 I 流过动圈时(这时指由热电偶热电势产生的电流)形成一个磁场,它和永久磁铁的磁场相互作用,就会有力作用在动圈上,力的方向可按左手定则来确定,在仪表结构已定的情况下,力的大小仅由流过线圈的电流大小来决定。即有

$$F = \frac{nBLI}{9810} = CI \text{ (克)}$$

式中 n ——动圈的匝数;

B ——永久磁铁感应强度, T;

L ——动圈有效边长, cm;

I ——流过动圈的电流, A。

两个大小相等,方向相反且不在同一直线上的力 F , 就会产生一个转动力矩 $M, M=2rF$ 。

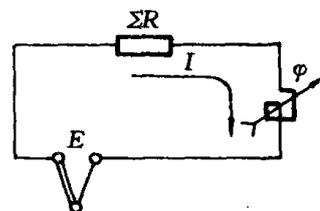


图 7-17 毫伏计测量回路示意图

式中 $2r$ ——线圈的宽度。

与此同时线圈上下的张丝受扭,产生一个反抗力矩 $M_{反}$,当 $M = M_{反}$ 即转动力矩等于反抗力矩时,动圈将停止转动,平衡下来,此时,指针便指出温度的数值,即有

$$M_{反} = W\varphi$$

式中 W ——张丝扭转 1° 时产生的力矩,当张丝的材料性质和几何尺寸已定,则 W 已定;

φ ——张丝被扭转的角度。

当 $M = M_{反} = W\varphi$ 时,即平衡时

$$2rF = 2rCI = W\varphi$$

则

$$\varphi = \frac{2rCI}{W} = \frac{2rC}{W}I = C'I \quad (7-8)$$

可见, φ 是 I 的单值函数,即动圈转角 φ 的大小代表流过动圈的电流 I 之值。

从式(7-8)可知, φ 与 I 是正比关系,对配热电偶的毫伏计来说(如图 7-17 所示),当整个测量回路的电阻 ΣR 一定时,通过动圈的电流就与热电势 E 成比例,因此动圈及固定在其上的指针的偏转角度就反映了热电势的大小。毫伏计的标尺可直接刻以温度数值。

(2) 动圈测量机构中电阻的温度补偿

从图 7-17 可看出动圈流过的电流 $I = E/\Sigma R$,代入式(7-8)中得 $\varphi = C'I = C'\frac{E}{\Sigma R}$,显然只有 ΣR 一定时转角 φ 才能正确地反映热电势 E 的大小。而 $\Sigma R = R_n + R_w$,其中 R_w 是仪表的外接电阻,它包括热电偶本身的电阻、补偿导线和连接导线电阻、冷端补偿器等电阻及外接电阻的调整电阻 R_L , R_L 用锰铜丝绕制,通常用它来调整 $R_w = 15\Omega$ 。由于热电势随所测温度及热电偶腐蚀情况而变化,补偿导线及连接导线电阻随环境温度而变化。这些变化都很难估计,也不能有效地加以补偿,因此必然给测量带来误差致使这种仪表的测温准确度较低。

R_n 是仪表内部的电阻,它包括串联电阻 R_c 及动圈电阻 R_d (见图 7-18)。调整 R_c 的大小可改变仪表的灵敏度,也就是改变仪表的量程范围。 R_c 的值约为 $200 \sim 1000\Omega$,在仪表出厂前已确定,由于 R_c 是用锰铜丝绕制的,它不随温度变化,阻值又较大,因此它的接入使 ΣR 受环境温度的影响相对减小了。

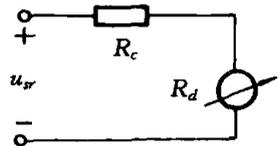


图 7-18 具有串联电阻的测量仪表

磁钢的磁感应强度随温度升高而减弱,导致指针偏转角减小;张丝材料弹性模数随温度升高而降低,导致反作用力矩减小。可以看出,张丝和磁钢随温度变化对测量的影响是相互补偿的。测量机构随温度变化而出现的附加测量误差,主要是由于动圈电阻随温度变化而引起的,而动圈电阻一般为几十欧,其变化不可忽视。当环境温度在 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内变化时,为了保证仪表应有的准确度,仪表内采用了热敏电阻对动圈电阻进行温度补偿。

热敏电阻的阻值随温度升高而降低,与动圈电阻变化的趋势正好相反。但热敏电阻的温度特性是非线性的,使补偿效果不好。如在热敏电阻 R_T 上并联一锰铜电阻 R_B ,并使 R_T 和 R_B 的并联电阻 R_K 的温度特性近似为线性的(见图 7-19),则

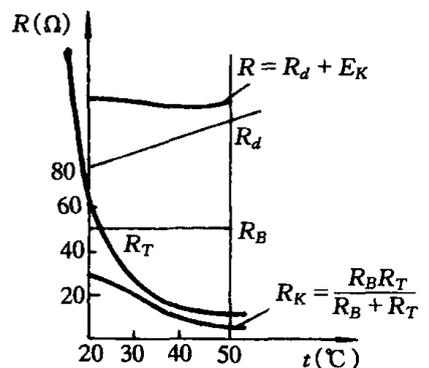


图 7-19 热敏电阻温度补偿曲线

R_K 与动圈电阻 R_d 串联后的电阻 R 随温度变化很小,即能较好地得到温度补偿,其温度测量线路如图 7-20 所示,其中热敏电阻 R_T 在 20°C 时的阻值选为 68Ω ,锰铜电阻 R_B 的阻值选为 50Ω ,并联电阻 R_b 的设置是为了改善仪表的阻尼特性。

毫伏计在安装使用时要尽量远离强磁场(如大电机、大变压器、大电炉附近)。以防止外磁场对仪表指示产生影响。

(3) 毫伏计的改刻度

在实际工作中,往往会遇到已有的仪表和所要使用的热电偶不配套的情况,为了使它们配套,就要对仪表进行改刻度(即量程)。毫伏计的改刻度工作就是根据所要求的测量范围,在满足通过动圈的满刻度电流不变的条件下,重新确定所需要的 R_c 值。

配热电偶的毫伏计测量线路如图 7-21 所示。若仪表原来的量程为 $0 \sim E_1$ 毫伏,通过动圈的满刻度电流为:

$$I_1 = \frac{E_1}{R_d + R_{c1} + R_k + R_w} \quad (7-9)$$

要求的新量程为 $0 \sim E_2$ 毫伏,相应的串联电阻为 R_c ,使通过动圈的满刻度电流为 I_2 ,则有

$$I_2 = \frac{E_2}{R_d + R_{c2} + R_k + R_w} \quad (7-10)$$

因为量程改变,指针偏转角不变,所以有 $I_1 = I_2$ 。

整理上述两式,得

$$R_{c2} = \frac{E_2}{E_1}(R_d + R_{c1} + R_k + R_w) - R_d - R_k - R_w \quad (7-11)$$

式中 $R_k = \frac{R_T R_B}{R_T + R_B}$, R_w 为仪表的外接电阻(包括 R_L),一般 $R_w = R_L + R'_w = 15\Omega$ 。

仪表改刻度后的温度标尺,可用下式计算。

$$L_t = \frac{L_{\max} E_t}{E_2} \quad (7-12)$$

式中 E_t ——仪表改刻度后,对应温度 $t^\circ\text{C}$ 时的电势, mV;

L_{\max} ——仪表标尺长度, mm;

L_t ——仪表改刻度后,温度的零标线到温度的 $t^\circ\text{C}$ 标线之间的直线距离, mm。

例 7-3 试将配 EU-2 型的热电偶,测温范围为 $0 \sim 1200^\circ\text{C}$ 的毫伏计改成配用 EA-2 型热电偶,测温范围为 $0 \sim 800^\circ\text{C}$ 的毫伏计,改刻度后的附加串联电阻为多大? 原毫伏计 $R_d = 30\Omega$, 外接电阻 $R_w = 15\Omega$, $R_k = 50\Omega$ (20°C 时),原附加串联电阻为 $R_c = 350\Omega$ 。

解 首先由热电偶的分度表查得:

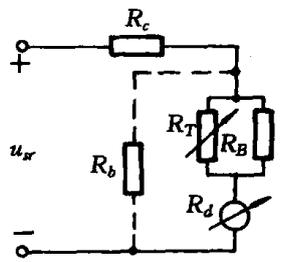


图 7-20 具有温度补偿的测量线路

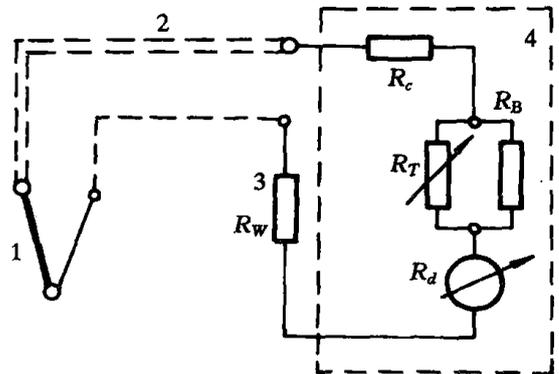


图 7-21 配热电偶的毫伏计测量线路
1—热电偶; 2—补偿导线和连接导线;
3—外接线路调整电阻调整电阻;
4—动圈仪表测量机构

$$E_{EA-2}(800,0) = 66.36\text{mV}, E_{EA-2}(800,0) = 66.36\text{mV}$$

因为
$$\frac{E_{EU-2}(1200,0)}{R_c + R_d + R_k + R_w} = \frac{E_{EA-2}(800,0)}{R_c + R_d + R_k + R_w}$$

所以
$$R_c' = \frac{E_{EA-2}(800,0)}{E_{EU-2}(1200,0)}(R_c + R_d + R_k + R_w) - R_d - R_k - R_w$$

$$= \frac{66.36}{48.81}(350 + 30 + 50 + 15) - (30 + 50 + 15) = 510\Omega$$

(4) XCZ-101 型动圈式仪表

如图 7-22 所示,它与热电偶配套使用。热电偶热端和冷端温度分别为 t_1 、 t_2 ,热电势 E 和电流 I 有下列关系

$$E = I(R_w + R_s + R) = IK \quad (7-13)$$

其中 R_w 为外部总电阻,包括调整电阻 R_c 、导线电阻和热电偶电阻,根据显示仪表规定 R_w 为 15Ω (20°C 时),它与 R_B (50Ω)并联,用来补偿仪表动圈电阻 R_D 随温度的变化, R_P 是阻尼电阻,用来减小动圈转动的阻尼时间; R 为 R_B 、 R_T 和 R_D 及 R_P 的综合电阻值。 R_B 、 R_P 、 R_S 、 R_C 锰铜绕制,不随温度变化,由此可见,热电势 E 与电流 I 成正比关系,因此仪表可以直接用电位差刻度。

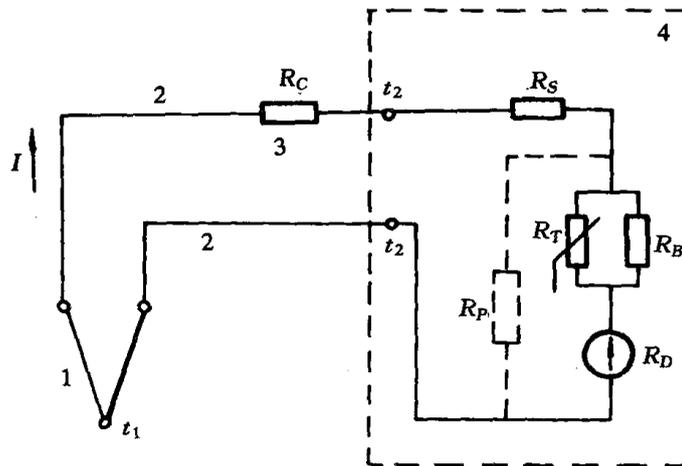


图 7-22 XCZ-101 型动圈式仪表测量原理图

1—热电偶;2—补偿导线;3—调整电阻;4—动圈仪表测量机构

若用温度进行刻度,则要加一个冷端补偿器,如图 7-23 所示,由于冷端补偿器在 20°C 时输出的补偿电压为零,所以使用时动圈式仪表的机械零位应调整到 20°C 处。

2. 测量热电势的电位差计方法

用毫伏计测量热电势虽然很方便,但是它的读数受环境温度和线路电阻的影响较大,测量准确度不高,不宜用于精密测量。而用电位差计可大大减小因上述原因产生的误差,不但可以精确地测量电流和电阻。因此电位差计被广泛应用于实验室、一般工业以及核工业中。

(1) 电位差计的原理

电位差计的工作原理是用一个已知的标准量与被测量相比较,平衡时,二者之差值为零。被测量就等于已知的标准量。这种测量方法亦称补偿法或零值法。

其原理框图如图 7-24 所示。被测量经过变换环节转换为电压值 U 。 U 与从反馈环节来

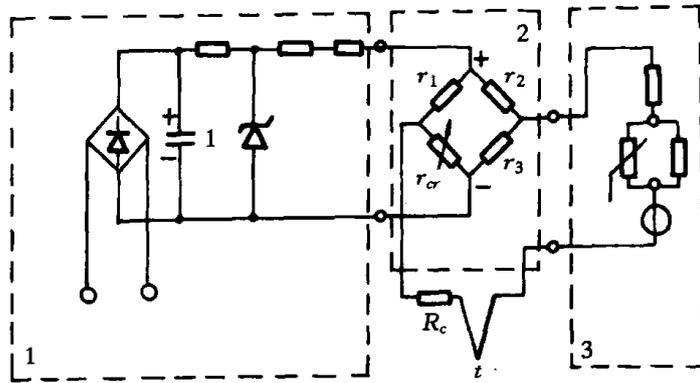


图 7-23 XCZ-101 动圈式仪表测量回路原理图
1—4V 稳压电源;2—冷端补偿器;3—动圈式仪表

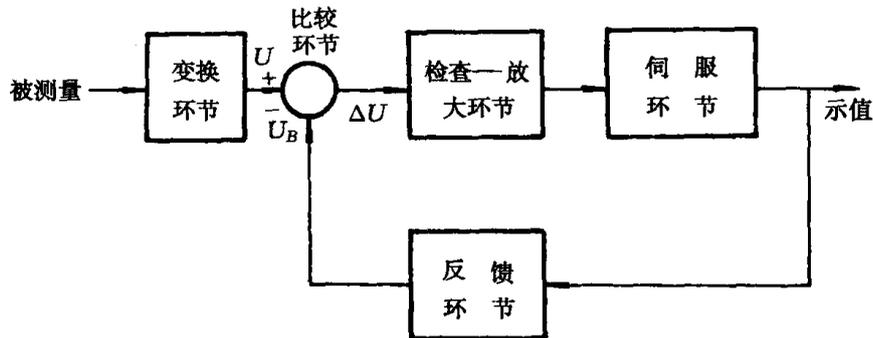


图 7-24 电位差计的原理框图

的反馈电压 U_B 在比较环节进行比较。其电压差 ΔU 经检查—放大环节放大后推动伺服环节。伺服环节带动滑动触点,使 U_B 变化, $U_B = U$, $\Delta U = 0$, 这时系统达到平衡,同时由伺服环节带动指示机构显示出被测量。

同样,用电位差计测量电势的工作原理,是用一个已知的标准电压与被测电势相比较,平衡时,二者之差值为零,则被测电势等于已知的标准电压。标准直流电压常用二种线路,即分压线路和桥式线路来完成。

① 采用直流分压线路的电位差计

图 7-25 为采用直流分压线路的电位差计原理图。通过滑线电阻 R_{ABC} 的电流 I_1 用电流计 M 显示其数值,并且 R_B 将它调整至规定值。在有热电偶的回路中接一只检流计 G,改变滑线电阻器上滑动触点 B 的位置,直至检流计中通过的电流 $I_2 = 0$,即热电偶支路中没有电流通过,这时, $I_1 R_{AB} = E(t, t_0)$ 。由于 I_1 等于规定值,所以 R_{AB} 可代表 $E(t, t_0)$ 。也就是说 $E(t, t_0)$ 的值可根据变阻器滑动触点 B 的位置来确定。在滑动触点 B 的相应位置上可直接刻以毫伏数。因为检流计的灵敏度很高,故可以得到很精确的读数。

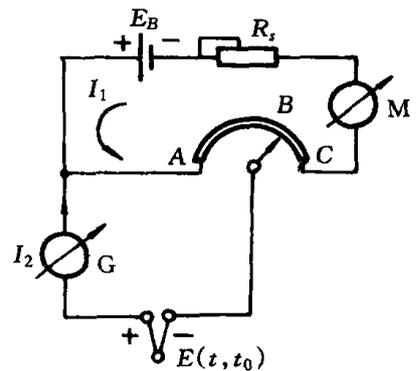


图 7-25 采用直接分压线路的电位差计的原理图

② 采用桥式线路的电位差计

图 7-26 为采用桥式线路的电位差计原理图。当 U_{ab} 为定值,且电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 都不变时,电桥的输出电压 U_{ef} 决定于变阻器滑动触点 B 的位置,调节 B 的位置使检流计 G 指零。这时表明 $U_{ef} = E(t, t_0)$,也就是说 $E(t, t_0)$ 的数值可由变阻器滑动触点 B 的相应位置上可直接刻以毫伏数。

电位差计的特点是,在读数时通过热电偶及其连接导线的电流等于零,因而热电偶及其连接导线的电阻值即使有些变化,不会影响测量结果,使测量准确性大为提高。这点与用毫伏计的测量方法是不同的。但要注意,热电偶连接线路的电阻不能太大,否则会使热电偶支路中的不平衡电流变得很小,以致使检流计读不出偏差来,这样会降低测量的灵敏度和准确度。

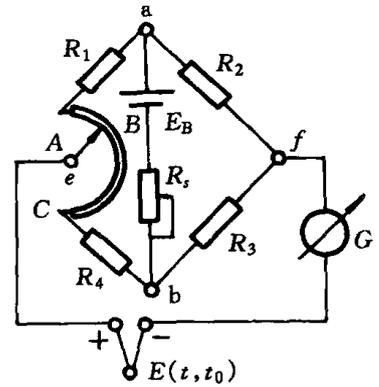


图 7-26 采用桥式线路的电位差计原理图

(2) 手动电位差计

在图 7-24 的系统中,当伺服环节由人手操作时,称为手动电位差计。其原理线路如图 7-27 所示。这种电位差计中采用了直流分压线路。图中标准电池 E_N 、标准电阻 R_N 及检流计 G 组成的回路是用来校准工作电流 I_1 的。校准工作电流时将切换开关 K 接向“标准”,调整 R_s 以改变 I_1 的大小,直到 $I_1 R_N = E_N$ 时,检流计 G 指针指零。因为标准电池的电动势 E_N 是恒定的。 R_N 是用锰铜丝绕制的标准电阻,其值也是不变的。所以当检流计 G 指针指零时 I_1 就符合规定值,这个操作过程通常称作“工作电流标准化”。

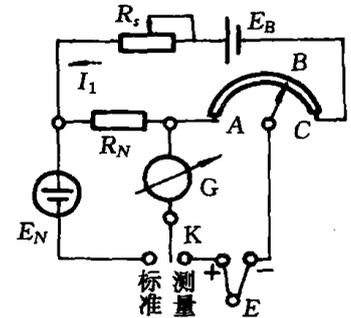


图 7-27 手动电位差计线路

然后将切换开关接向“测量”位置,调整 B 点位置使检流计指针指零。此时 B 的位置就指出被测电势的大小。

由于标准电池及标准电阻的准确度都很高。如上应用了高灵敏度的检流计,所以电位差计可得到较高的测量准确度。标准电池的电动势很稳定,但随温度变化而略有变化。常用的标准电池在 $+20^\circ\text{C}$ 时的电动势为 1.018 V (准确度达 $\pm 0.01\%$)。使用中需注意标准电池不允许通过大于 $1\mu\text{A}$ 的电流。

(3) 电子电位差计

电子电位差计是根据电压平衡原理自动进行工作的,与手动电位差计比较。它是用可逆电机及一套机械传动机械代替了人手进行电压平衡操作,用放大器代替了检流计来检查不平衡电压并控制可逆电机的工作。电子电位差计的原理方框如图 7-28 所示。它主要由测量桥路、放大器、可逆电机、指示及记录机械组成,有的还附加有调节装置。同步电机用以带动记录纸移动。

① 测量桥路的工作原理:电子电位差计是采用桥式线路来测量电势的,它的基本线路如图 7-29 所示。用桥路上 A 、 B 两点之间的电位差来和热电偶的电势相比较,若两者不相等,其差值电压输入放大器,经放大后驱动可逆电机转动,以改变滑动触点 A 的位置直至 A 、 B 两点之间的电位差和热电势相等,电机才停止动作。测量系统平衡时,滑动触点的位置就代表热

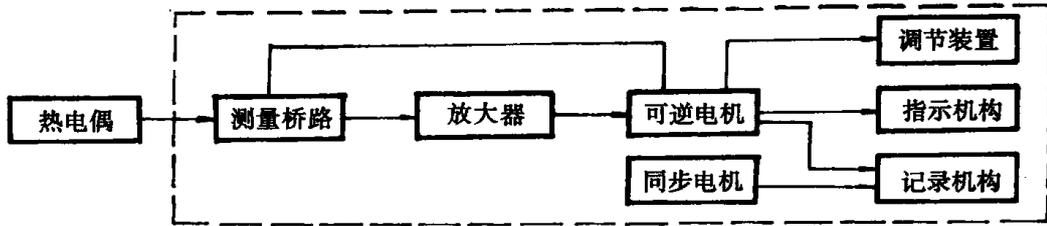


图 7-28 电子电位差计的原理方框图

电势的数值，也就代表热电偶所测的温度数值，这种桥式线路又称为双回路测量线路。把由 R_4 、 R_{np} 、 R_c 所构成的电路叫上支路，把由 R_3 、 R_2 所构成的电路叫下支路，这种线路的优点就在于：测量的起始值不仅可以从零电位或正电位开始，而且可以从负电位开始；可以实现热电偶冷端温度的补偿。

② 测量线路中各电阻(图 7-30 所示)的作用及要求：

冷端温度补偿电阻 R_2 ：在配用热电偶测量温度时，它就是热电偶冷端温度补偿电阻。用铜线绕制而成，也可用符号 R_{Cu} 表示。

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

起始值电阻 R_G ：是决定仪表刻度起始值的电阻。 R_G 越大，仪表的起始值越大。起始值电阻 R_G 由 R_G 和微调电阻 r_g 两部分串联而成。采用 r_g 既便于调整阻值，又能降低对电阻 R_G 的制造准确度要求。 r_g 的数值约为 1Ω。

上支路限流电阻 R_4 ：它与 R_{np} (R_P 、 R_B 和 R_M 3 个电阻并联后的等效电阻)、 R_G 相串联，使上支路电流为 4mA 的规定值。

滑线电阻 R_{np} ：它是测量桥路中一个很重要的部件，仪表的示值误差、记录误差、变差、灵敏度以及仪表运行的平滑性等都与滑线电阻的质量好坏有关。因此，对滑线电阻材料的耐磨、抗氧化，线间绝缘及电阻的非线性误差等方面都有很高的要求。滑线电阻常用的材料是锰铜丝，也可采用银钯合金丝等。在结构上，滑线电阻除要求装配牢靠、接触可靠外，还采用了双滑线结构在图 7-30 中 R_p 是桥路电阻，另一个电阻 R_P 两端被短路，作为电桥的引出线。这种结构的优势，对滑动触点的材料除要求抗氧化性能要好之外，特别要求它和滑线电阻的接触热电势要很小，否则滑动触点在滑线电阻上滑动时会发热而产生较大的误差。

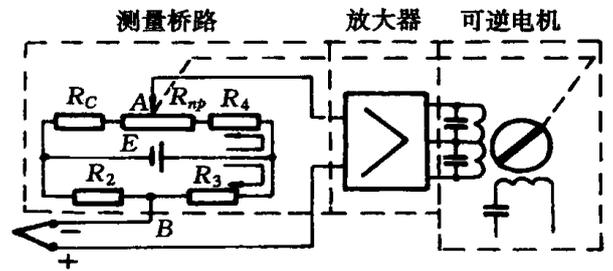


图 7-29 电子电位差计的桥式测量线路

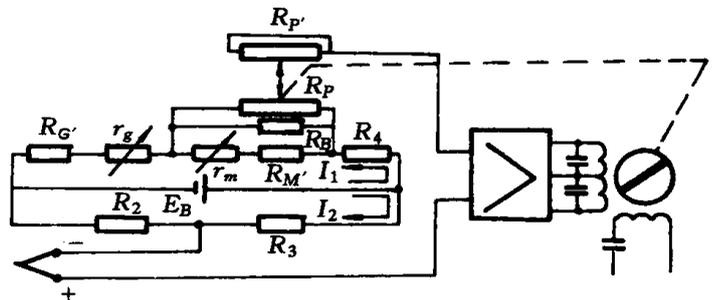


图 7-30 电子电位差计的测量线路原理图

工艺电阻 R_B :它是 R_P 的并联电阻。由于滑线电阻 R_P 的阻值很难绕制得十分精确,为此给 R_P 并联一个电阻 R_B ,用调整 R_B 的方法使并联后的总阻值为一定值,通常为 90Ω 。在仪表使用过程中,当 R_P 磨损后阻值发生变化,也可用改变 R_B 的大小来进行调整。

量程电阻 R_M ,电阻 R_M 是决定仪表量程大小的电阻。它的大小由仪表测量范围与所采用热电偶的分度号来决定,应设计调整成在量程始值时滑点在 R_P 的最左端,在量程终值时滑点在 R_P 的最右端。 R_M 由电阻 R_M' 与微调电阻 r_m 串联而成,通过调整 r_m 的阻值能方便地微调仪表量程。 r_m 的数值约为 1Ω 。

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

③ 测量桥路的供电形式和工作电流选取:目前我国生产的电子电位差计测量桥路是由稳压电源提供 $1V$ 直流电压,工作电流大小是根据仪表最大量程和减小温度变化引起的误差等因素来选择的。工作电流一般取在 $2\sim 10mA$ 范围内,较多的是把上支路电流取 $4mA$,把下支路电流取为 $2mA$,总的工作电流为 $6mA$ 。

3. 测量热电势的温度变送器

为了将被测温度转换成标准统一信号,实现远距离传送,以便统一检测和作为统一的控制信号,需要采用温度变送器。目前广泛应用于工业测量的是 DDZ- II 型和 DDZ- III 型温度变送器,前者是晶体管型,输出为标准统一信号 $0\sim 10mA$,后者是线性集成电路型,输出为标准统一信号 $4\sim 20mA$ 或 $1\sim 5V$ 。

温度变送器由输入回路、放大电路和反馈回路等组成,如图 7-31 所示。输入回路发出和温度相对应的直流毫伏信号 U_1 ,跟来自反馈回路的信号 U_f (平衡补偿电压)相比较,二者的差值送到放大电路,然后转换成直流电流或电压输出。

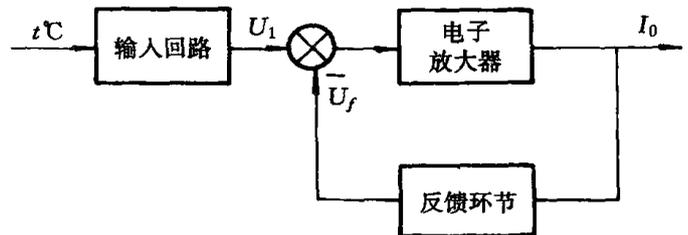


图 7-31 温度变送器方框图

(1) 工作原理

根据电平衡原理组成的温度变送器,其工作原理如图 7-32 所示。放大电路的输入信号是 U_1 与 U_f 的差值, U_1 随温度而改变, U_f 则等于输出电流 I_0 与反馈电阻 R_f 的乘积 ($I_0 R_f$)。温度变化使 U_1 值改变时,放大电路的输出电流 I_0 就增大或减小;同时,反馈电压也相应变化,并与 U_1 进行电平衡补偿。由于电子放大电路具有相当大的放大倍数 K ,因此,即使放大电路的输出信号 ($U_1 - U_f$) 只有很小的变化,也足以使输出电流 I_0 的变动范围达 $0\sim 10mA$ 或 $4\sim 20mA$ 。在稳定状态下,放大电路的输入信号可用下式表达

$$U_1 - U_f = 0 \quad (7-14)$$

$$U_1 \approx U_f = I_0 R_f \quad (7-15)$$

式(7-15)表示仪表的输出量 I_0 和输入量 U_1 之间的关系。从上述分析可以看出:这类仪表的电平衡补偿过程是自动进行的。输入

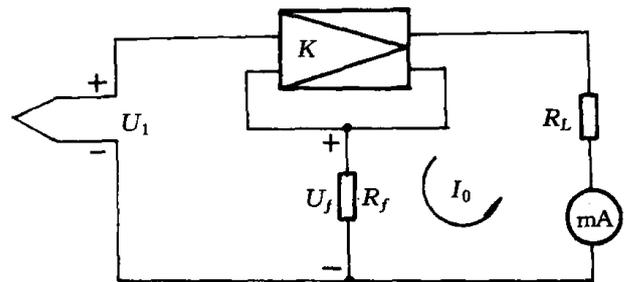


图 7-32 温度变送器组成原理图

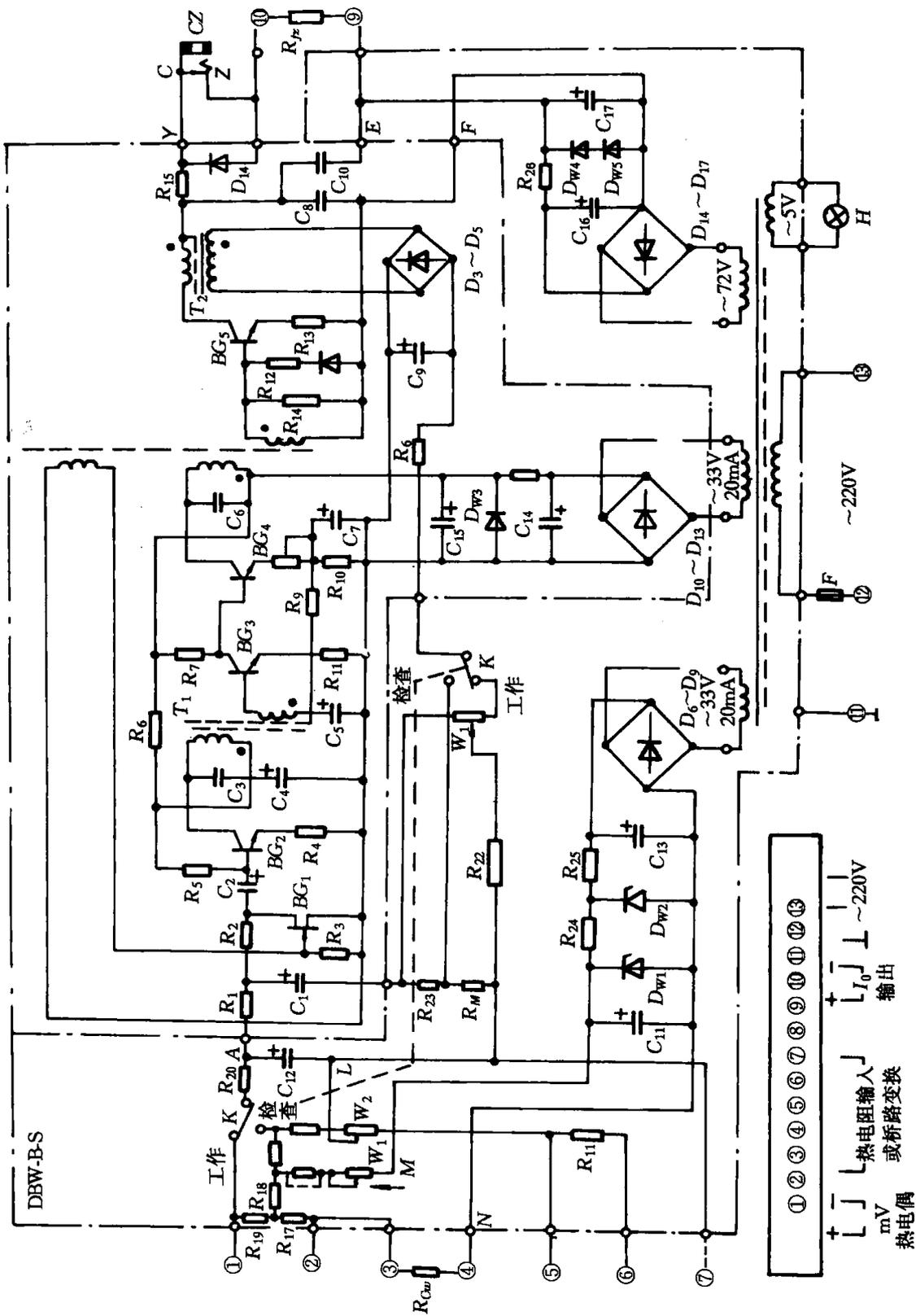


图 7-33 DBW 型温度变送器

量和输出量之间的关系,当 $K \gg 1$ 时,取决于反馈环节,只要反馈环节的输入量和输出量成线性关系,就能保证整个仪表的线性,减小了放大器中由于晶体管本身的非线性因素对仪表的输入量和输出量的影响,由于反馈环节主要是由电阻等元件组成,这就能较好地达到上述要求。

(2) DDZ- II 型温度变送器

当变送器的输入为 $5 \sim 50\text{mV}$ 的直流信号或 $0 \sim 100\Omega$ 的电阻值时,输入信号与输出 $0 \sim 10\text{mA}$ 直流信号之间有良好的线性关系。当热电偶(或热电阻)的毫伏电势值(或电阻值)与被测温度为非线性关系时,变送器的输出电流与温度也是非线性关系。本变送器具有很大的通用性,适用于各种分度号的热电偶和热电阻。

图 7-33 为一只 DDZ- II 型温度变送器典型产品 DBW 型温度变送器的整机线路图,来自热电偶(或热电阻)的信号经输入回路转换成直流毫伏信号 U_1 , U_1 与 R_{23} (或 $R_{23} + R_M$) 上的负反馈信号 U_1 比较后,送到 BG_1 的源、漏极间。 BG_1 的栅极由自激振荡调制放大器的输出信号控制,使源、漏极之间呈近似开关(或变阻)状态工作。当 BG_1 饱和导通时,加在源、漏两极上的信号被短路。当源、漏两极阻断时,上述信号改经 C_2 送至 BG_2 的基极,于是直流信号被 BG_1 调制成交流信号,其频率决定于自激振荡调制放大器的固有频率,约为 $3 \sim 4\text{kHz}$ 。被调制后的交流信号,经 BG_2 、 BG_3 、 BG_4 三级放大,从变压器 T_2 的次级输出。此输出信号经检流和放大, C_{10} 滤波,成为直流电流信号,并流过温度变送器的负载电阻 R_{12} , BG_5 输出的交流部分经 T_3 耦合及 $D_3 \sim D_5$ 全波整流后,反馈到放大器的输入端。

(3) DDZ- III 型温度变送器

III 型比起 II 型仪表有以下特点:

- ① 线路中采用了线性集成电路,变送器的输出信号和被测温度之间呈线性关系;
- ② 输出信号采用了国际标准信号制,现场传输信号为 $4 \sim 20\text{mA DC}$,控制信号 $1 \sim 1.5\text{V DC}$,信号电流与信号电压的转换电阻为 250Ω 。仪表的输出负载采用并联连接;
- ③ 仪表用 $25\text{V} \pm 10\%$ 直流供电而不用 220V 交流,因此干扰较少;
- ④ 精度为 $\pm 0.5\%$;
- ⑤ 防爆型。

图 7-34 是配热电偶 DDZ- III 型温度变送器原理图。

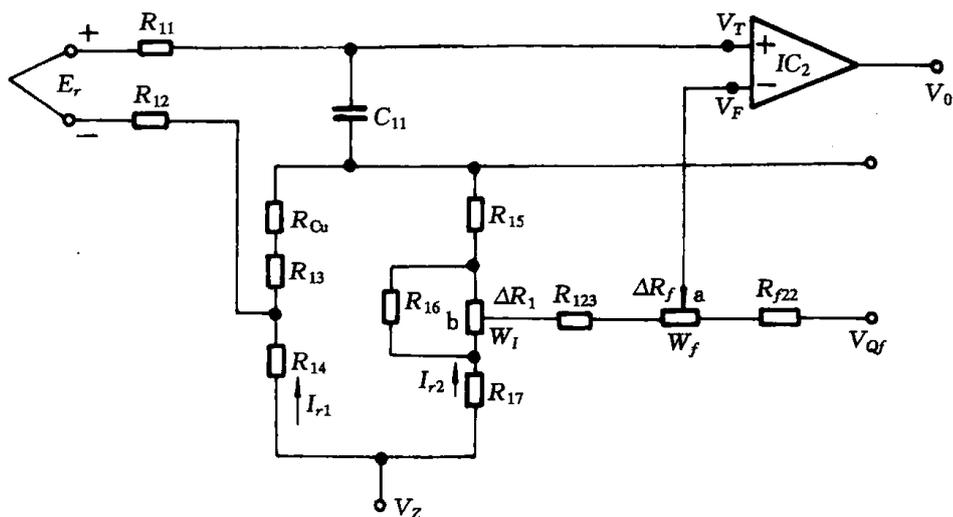


图 7-34 热电偶 DDZ- III 型温度变送器原理图

它与电子电位差计的输入回路有相似之处。由于 R_{Cu} 、 R_{13} 、 R_{14} 、 R_{15} 、 R_{17} 组成电桥起冷端补偿作用, V_Z 为电桥电源, W_1 是用来改变输出零点的起始值, 所不同的是引到放大器 IC_2 输入端的不是 b 而是 a, 这样就给放大器反相输入端一个反馈电压, 所以改变 W_f 的位置就可以改变放大器的闭环放大倍数, 也就调整了量程, 如果要大幅度调整量程则要改变 R_{f22} 。

7.1.5 热电偶的结构和安装

1. 热电偶组件

反应堆热电偶组件由热电偶丝、电绝缘、引线、套管、压力密封以及电接头组成, 其制造方法对热电偶性能的影响是较大的, 使用者必须设计出检验的方法来发现在完整的热电偶组件中不希望有的特性, 同时又不损坏热电偶组件。

图 7-35 给出了已经用于反应堆的热电偶接点的 4 种基本形式。显而易见, 它们称为 (1) 裸露型; (2) 隔离型; (3) 碰底型; (4) 同轴型。形成这些接点的方法可以划分为机械的和焊接的。当选择接点型式时, 考虑的有关因素包括: ① 反应时间的要求; ② 热电偶、绝缘以及套管材料的热膨胀性能; ③ 套管、热电偶、绝缘和周围环境的化学相容性; ④ 在制造、贮存、安装以及运行期间材料的延展性和杂质含量; ⑤ 热电偶组件的效用和费用; ⑥ 对于从接地回路、电离电流等产生的电噪声的敏感性。

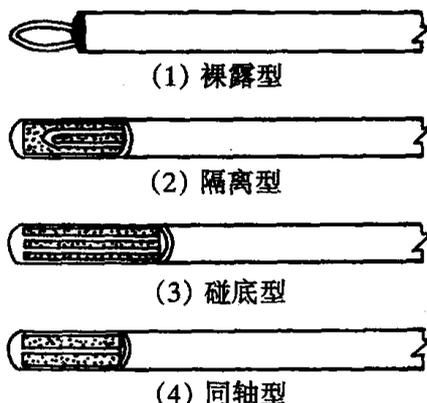


图 7-35 4 种普通的热电偶接点型式

高度压紧的粉末或者高温烧结的小珠是反应堆热电偶组件电绝缘的两种形式。目前还不可能证明一种形式明显地优于另一种形式。当选择绝缘形式时应考虑的因素包括: ① 热电偶组件将承受到的弯曲、扭曲以及振动作用的大小; ② 绝缘材料的最高运行温度; ③ 热电偶丝和套管热膨胀系数之间的差别; ④ 热电偶丝和套管的延展性; ⑤ 要求热电偶丝和热通道之间良好的导热性能, 以防 γ 射线或中子辐射使得热电偶丝过热; ⑥ 不同形式绝缘的热电偶组件的相对费用和效用。

采用压紧粉末绝缘的组件一般比珠状绝缘的组件较少受到由于弯曲、扭曲或振动造成的损坏。粉末绝缘的填压密度可以显著地影响组件抗机械损伤的能力。大约低于 80% 的填压密度将能使热电偶丝可以相互或者相对于套管作径向移动, 而非常高的填压密度可以阻止热电偶丝的轴向移动。

许多粉末状氧化物在适当低于它们的熔点温度下烧结, 由于在烧结过程中杂质的再分布

改变了它们的绝缘性能。烧结期间粉末的收缩也可能导致空泡的再分布,并因此增加了热电偶组件对于机械损伤的敏感性。

如果热电偶丝或引线 with 套管具有不同的热膨胀性能,那么紧密地填压的粉末绝缘可以在热循环过程中不允许丝和套管之间的相对运动。在热循环试验期间,铈-铈丝缩进含有紧密填压氧化镁的不锈钢管内大约有 0.012m。

通常用来制造粉末氧化物绝缘的热电偶组件的型锻、拉伸或滚轧工序可能损坏套管或者热电偶丝;它们甚至可能损坏象铜、康铜、铂以及铂-铈合金等非常柔软的材料。不太柔软的材料对于这种形式的损伤更为敏感。

珠状绝缘只是接触到丝表面积的很小部分,这增加了有效的绝缘电阻,而且在非常高的温度下可以减少分流误差。发现高温烧结的氧化钽小珠绝缘的热电偶可以刻度至 5 082℃。

在堆芯中从热电偶到引线组件的过渡出现有些不同于大多数工业应用中所发现的问题。与测点周围环境有相容特性的套管、绝缘或热电偶材料可能不适合于引线组件,因此,可能要求在相当高的辐射和高温环境中过渡。例如,引线从燃料棒或燃料组件出来并进入反应堆冷却剂的地方可能需要改变套管材料。在这点上必须要有高度完整的密封以防冷却剂泄入燃料棒或者裂变产物泄入冷却剂。热电偶套管、燃料包壳以及冷却剂的性质可能对获得合适的密封有妨碍,因此位于燃料棒内部的套管材料必须要有一个过渡。应该仔细地比较利用热电偶材料作为引线或者改成另外引线材料的相对优点。很明显,由于从热电偶材料到引线材料的变化增加了引入测量误差的可能性。但是,引线材料可以更加柔软,并且有类似于套管热膨胀系数,而且费用较低。每当改变套管材料或引线材料时,也应该考虑到改变绝缘材料。

图 7-36 装设了测量燃料温度热电偶的燃料棒设计图。与燃料相接触的热电偶组件是由钽套管、氧化铍绝缘、铈-铈 26% 铈热电偶组成的。在裂变气体膨胀空间中做了到引线组件的过渡,引线组件由下列材料组成:200 号和 226 号合金做成的导体,氧化铝绝缘以及 304 型不锈钢套管。热电偶组件的上端做成弹簧形式,以便保持热电偶接点和燃料之间的接触,并用来补偿燃料棒内部的燃料、包壳、热电偶组件以及引线组件的热膨胀。在反应堆几个月的运行期间,用这种仪表装备的燃料棒成功地测量了大约达到 1 000℃ 的燃料温度。

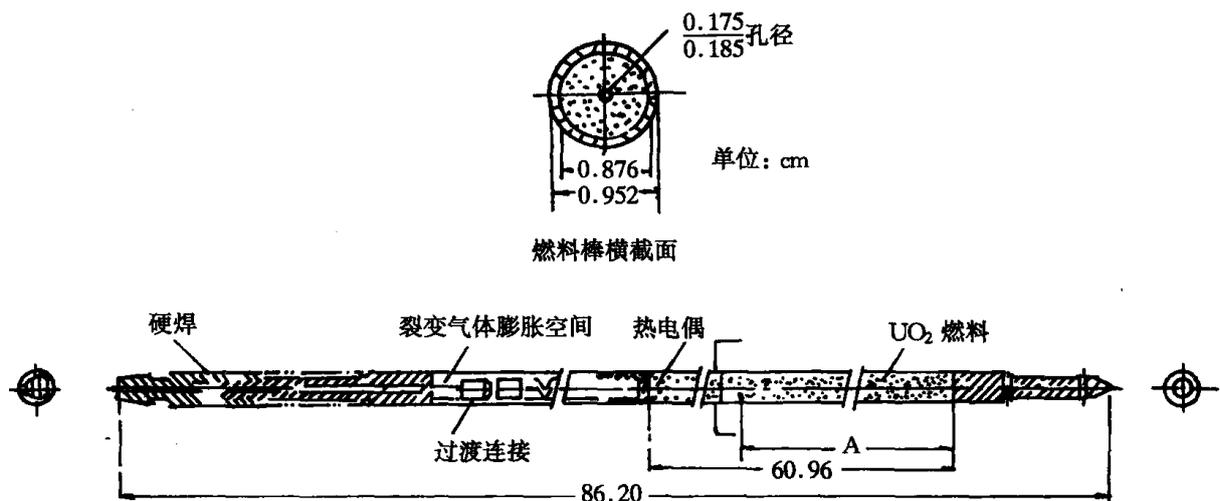


图 7-36 用来测量燃料温度的热电偶组件示意图

为堆芯用的热电偶组件的设计要求寻找出一种引线的自然布置,这种布置不会使燃料的换料操作过分复杂化。如果电接头位于每个燃料组件的顶部,那么这个问题的解决将更加简单,因为在燃料吊装之前就可以拆开引线。又因为在水冷反应堆中水的电阻率是高的,打算使带有触点的电接头暴露在反应堆冷却剂中。带有这种接头装置的热电偶当暴露在水和干蒸汽中时给出了反常的结果。当这种接头浸在水中时,虚假电势要比它暴露在干蒸汽中大些。产生此虚假电势的机理并不清楚。当湿气进入终端盒时观察到类似的虚假电势。很明显,暴露在冷却剂中带有触点的电接头不能应用在液态金属冷却的反应堆中。正在研制用于液态金属的密封电接头,但是这些接头设计成敞开或封闭在惰性气体环境中。热电偶的接头不能放在接头的各部分之间可能出现温度梯度的地方。

在大多数反应堆中使用时,在热电偶引线组件穿过堆壳体的地方要求套管周围有高度可靠的密封。在某些情况下,为了使每根丝满足安全的要求,可能需要附加的密封。这些密封必须仔细地设计以免出现对于热电偶性能不希望有的影响。应该加以考虑的若干因素有热电偶引线的冷加工、在熔接或硬钎焊期间引线或绝缘的污染以及在这个区域中的温度梯度。金属氧化物绝缘的组件总是应该加以密封,以防热电偶套管的接线端位于空气中时湿气进入组件。在设计密封时应考虑到保证这些密封满足技术条件,同时又不损坏热电偶组件的安装、检查和试验方法的困难。

2. 热电偶的电绝缘

在选择反应堆热电偶用的绝缘材料时应考虑的因素是:① 最高运行温度时的电阻率;② 在辐射场中,在预期的热电偶寿命内电阻率的变化;③ 中子截面;④ 导热系数;⑤ 与热电偶及套管材料的化学相容性;⑥ 在辐射场中的尺寸稳定性;⑦ 如果绝缘材料偶然地与反应堆冷却剂、燃料或慢化剂相接触时可能出现的化学反应或其它反应;⑧ 材料的效用和费用,生产含有绝缘物的热电偶组件的制造方法。

因为反应堆的冷却剂温度是在一般工业用途测量的温度范围内,那么冷却剂的热电偶绝缘的选择是相当容易的。然而反应堆燃料温度可以超过许多绝缘材料的熔点,那么测量燃料温度的热电偶绝缘的选择可能是棘手的。在某些情况下,以任何代价也得不到完全满意的材料,因此重要的是确定使用中不容忽视的因素以及那些只是影响测量精度的因素。

通常用作电绝缘的金属氧化物是氧化铝、氧化铍、氧化钙、氧化镁、氧化锆以及氧化钍。低于 1 500℃ 时,这些材料都具有相当高的电阻率,并已成功地用作许多工业和核反应堆用途的热电偶绝缘。在 1 500℃ 以上,这些绝缘材料的性质从属于温度-时间关系、环境、纯度、或许还有化学计量等因素而发生根本的变化。已经得出的结论是,选择氧化铍或氧化钍作为温度在 1 500℃ 以上的热电偶的绝缘是最好的。但是究竟那一个更好些,意见不一。虽然氧化钍具有高的熔点、良好的化学惰性以及相当高的电阻率,但是它的中子俘获截面大使得它不适合于堆芯应用。

氧化铍具有下列优点:良好的热稳定性;在 1 200℃ 和它的熔点之间,在所有金属氧化物中是电阻率最高的;以及相当高的导热系数。缺点是剧烈的毒性;大约 2 000℃ 时开始和钨、钼、钽、铌起化学反应;在辐照期间物理性能改变。然而大量的辐照损伤数据是在温度低于 1 000℃ 时得到的,并且表明,在高温下辐照的低密度、低含水量的氧化铍具有最高的辐照稳定度。

氧化钍具有下列优点:良好的热稳定性;至少温度在 2 700℃ 以下,与钼、钨以及钨-铈合金

还可相容,在高温下具有低的蒸汽压。缺点是抗热冲击的性能不好;导热系数低;由于钽的辐射危险要特殊管理;在高温下长期辐照之后物理特性和电阻率特性不清楚。在真空或者氦气中加热之后,氧化钽从白色变成暗灰色或灰黑色。因为 X 射线衍射和摄谱仪的分析没有发现任何污染,这种颜色的变化是由于化学计量的变化造成的。

因为在不至于影响金属氧化物性能的条件下,多大的杂质浓度是允许的这一点不知道,因此某些机构采取了所有杂质都不希望有的态度,并规定了以最高纯度的绝缘材料用于堆芯热电偶。其它一些机构发现用这些超纯的材料在炉内试验期间没改善热电偶的性能,因而放松了它们的规格要求,以降低成本。在关于绝缘性质与杂质、化学计量以及环境这样一些因素之间的关系能得到更多的资料之前,绝缘材料的选择仍然必须是一件根据特殊用途的要求进行工程判断的事情。

研究了对于高温热电偶应用气体绝缘的可能性。氮、氢、氦和氩在高温时变成为导体,并且发现当利用这些气体作为绝缘时,在 3 682℃ 时无接点的热电偶元件产生的电势与有接点的热电偶的电势可以相比拟。真空绝缘可能适合于某些用途,但是如果在真空室中所有材料在运行温度下蒸汽压不是非常低,那么热电偶丝的污染能够造成测量误差。真空的低导热系数也可能造成真空绝缘的热电偶丝在高辐射场中的过热现象。

3. 套管材料

反应堆的热电偶及其绝缘体通常包在一个保护套管里。套管材料应该和它相接触的材料是相容的,它具有足够的机械强度和延展性,以便在热循环、振动和其它运行工况下保持其完整性,并且在辐照之前是能够使用的。因为套管材料的热电性质一般是不重要的,有许多材料可以选用用于 1 000℃ 以下的温度,但是在较高温度下选择的范围是很有限的。对于温度在 2 000℃ 以上的反应堆环境中,选择只局限于钨、铌、钽、钼及其合金。

测量反应堆冷却剂温度、构件温度以及燃料包壳温度的热电偶一般用和反应堆结构或燃料包壳同样的材料做套管。套管材料和反应堆冷却剂之间的相容性以及把套管密封或连接到反应堆其它部件上去的熔接或硬钎焊通常限定了这种选择。实际应用得到了显著的成功,但是热电偶和套管材料的热膨胀系数之间的差别可以在热电偶中造成应力。某些奥氏体不锈钢套管的镍铬-镍铝热电偶的损坏原因就是这种机理。

燃料内的热电偶套管材料的选择仍然是困难的。在燃料表面温度下与燃料以及冷却剂相容的燃料包壳材料在燃料中心温度下与燃料、热电偶绝缘和热电偶材料并不相容。高温辐照期间材料的物理和化学性质还没有完全了解,而且为了获得原始试验数据所需要的时间通常和反应堆设计、建造的时间表相冲突。燃料元件包壳和热电偶套管或引线套管之间一般要求某种形式的密封,缺乏合适的熔接或硬钎焊技术会限制套管材料的选择。由中子俘获截面大的材料所造成的通量衰减可以改变该元件棒内的温度,这足以使得测量无效。双套管或有陶瓷复面的套管已经应用于某些燃料温度的测量。

4. 热区误差

当热电偶导线经受的温度高到足以显著地降低丝之间或者丝和套管之间的绝缘电阻时,出现了叫做“热区误差”的现象,它起因于分布的塞贝克效应。其模型是:

(1) 热电偶和引线组件被考虑作直流传输线路,热电偶的接点作为线路一端的短路发电机;

(2) 电压源沿线路分布,每个源的数值由特定区域的温度确定;

(3) 热电偶丝之间、热电偶丝与套管之间的分路电阻沿着线路分布,分路电阻的数值由该区域的温度确定;

(4) 引线电阻或者套管电阻分布在线路各点之间;

(5) 线路接收端的阻抗高到可以近似看作无限大的阻抗负载。

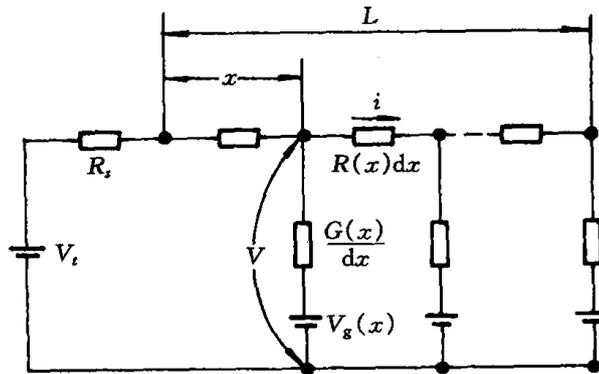


图 7-37 暴露在高温中的热电偶导线的等效电路

图 7-37 表示的热电偶等效电路。其方程是:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} - \frac{dR(x)}{dx} \frac{1}{R(x)} \frac{dv}{dx} - \frac{R(x)}{G(x)} v + \frac{V_g(x)R(x)}{G(x)} = 0 \quad (7-16)$$

式中 v ——在 x 点上的电压;

$R(x)$ ——在 x 点上单位长度线路的导线电阻;

$G(x)$ ——在 x 点上单位长度线路的绝缘电阻;

$V_g(x)$ ——在 x 点沿着线路分布的塞贝克电压源。

为了用计算机计算热区误差,把这个方程编成程序,并且把这些计算的数据和炉内实验数据进行了比较。当考虑到绝缘材料导热系数的不定性时,测量的和计算的热区误差之间的吻合是良好的。

因为绝缘材料的导热系数受温度和辐射的影响,而且上述热区误差分析不允许有辐射造成的导热系数的改变,那么估算由这种形式的计算所得到的热区误差不可能准确。但是,在估算由不同的热电偶组件和安装布置带来的相对误差时是有用的。

当此线必须通过反应堆的高温区域时,热电偶组件的设计应使引线有冷却的条件。这种系统增加的复杂性是很明显的缺点,但是在某些情况下,它对于解决热区误差或材料相容性问题可能是最实际的办法。

5. 装设热电偶造成的温度畸变

每当一个热电偶组件装设在反应堆燃料元件内部时,通常总是必须去掉燃料元件中的若干材料。因此,热电偶感受的温度可能和正常燃料元件在同样的反应堆运行条件下的温度不一样。在设计装有探头的燃料元件以及分析由它们得到的数据时,必须考虑到这种情况。影响反应堆燃料元件中由热电偶引起的温度畸变数值的因素包括:

① 为了给热电偶留出位置所去除的燃料数量;与去除的燃料相比较,热电偶组件的相对导热系数和热容量;

② 在冷却剂通道中装设热电偶所造成的冷却剂流量的减少;

③ 由热电偶附着在包壳上所造成的燃料包壳传热的增强或减弱；

④ 热电偶组件与它所置换掉的材料相比较的相对中子吸收截面和散射截面。敏感接点准确位置的不定性也可以造成测量误差。如果冷却剂通道的热电偶靠近热的表面或冷的表面,那么它可以指示出一个大大不同于冷却剂平均温度的温度值。在几个通道的冷却剂汇流空间中装设热电偶,假如冷却剂在该热电偶位置上没有很好地混合的话,则热电偶指示的温度可能比冷却剂平均温度高得多或低得多。在低导热系数的燃料棒中心和边缘之间可能存在大的温度梯度,那么即使敏感元件小的位移也可能造成温度指示大的变化。

因为有许多因素可以影响装设探头的燃料元件中所测出的温度和正常燃料元件的温度特性之间的关系,那么由装设探头的燃料元件所得到的温度数据可能还不如从传热计算所得到的数据那么确切。

7.1.6 热电偶温度计在压水堆中的应用

压水堆的温度检测仪表采用的热电偶温度计是镍铬-镍铝热电偶温度计。

这种热电偶主要用于堆内温度的检测。下列热电偶镍铬-镍铝,铁-康铜,铜-康铜,铂-铂铑,钨-镍,钨-钨铼,在热中子通量 $1 \times 10^{24} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 下较长时间的辐照,其结论为:镍铬-镍铝最稳定,铁-康铜次之,其余 4 种热电偶在辐照期间都发生了成份的变化,从而必然造成热电偶性质的改变。因此核反应堆内的温度检测常用镍铬-镍铝热电偶。

为了验证堆芯设计参数和计算各热因子,与堆芯中子通量结合起来,可以决定堆芯最大可能输出的功率,所以堆内温度检测,是指检测预定的燃料组件的出口冷却剂的温度。通常有几十根镍铬-镍铝热电偶,通过贯穿压力壳上封头的导向管,伸向燃料组件出口处,信号经热电偶的延伸线连接到安全壳内的冷端箱里再经贯穿件与铜导线送给记录和数据处理系统。

镍铬-镍铝热电偶直径约 3mm,采用不锈钢套管,氧化铝绝缘,尾部接一只插件式热电偶连接器。它的分度误差要求在 277°C 以下为 $\pm 1.1^\circ\text{C}$,在 277°C 至 371°C 之间为 $\pm 0.375\%$ 被测温度。

900MW 压水堆核电站堆内温度检测一般采用 51 根热电偶,集中放在 4 个管柱内,这 4 个管柱通过压力壳顶盖的套筒插到压力壳中,在套管突肩内放了一个筒状部件,热电偶的导向套管就焊在每个筒状部件上,采用锥形压紧密封。热电偶在堆顶有可拆装的双极铬铝接头。

燃料组件冷却剂出口温度检测系统的二次仪表和控制设备均安装在主控室内。

大亚湾核电厂堆芯温度检测是用 40 根镍铬-镍铝热电偶。这 40 根热电偶在堆芯的布置情况如图 7-38 所示。40 根热电偶分成 2 个系列,每个系列 20 根。温度信号由热电偶导线管经 4 根热电偶柱引出。

热电偶在堆芯的安装情况如图 7-39 所示。热电偶的热端固定在所测燃料组件冷却剂出口处、上堆芯支撑板上方的角撑板上。热电偶导线穿入导线管,每 10 根导线管穿入一根热电偶柱。热电偶柱穿过压力容器。导线管穿出热电偶柱之外后,经过热电偶导线管接头。热电偶经过连接器与同材料的延伸线相连。延伸线接往冷端箱。压力容器头部连接器焊在压力容器上。在热电偶柱和压力容器头部连接器之间是可拆密封结构,在导线管和热电偶柱之间是焊接密封结构。热电偶-导线管接头是热电偶和导线之间的可拆密封结构。

冷端箱有 2 个,位于安全壳外。由单根镍线和铬线绞绕组成的延伸线接到冷端箱端子上,由转接铜线将温度信号引至电气厂房的堆芯冷却监测机柜。冷端箱温度由电阻温度计探测,

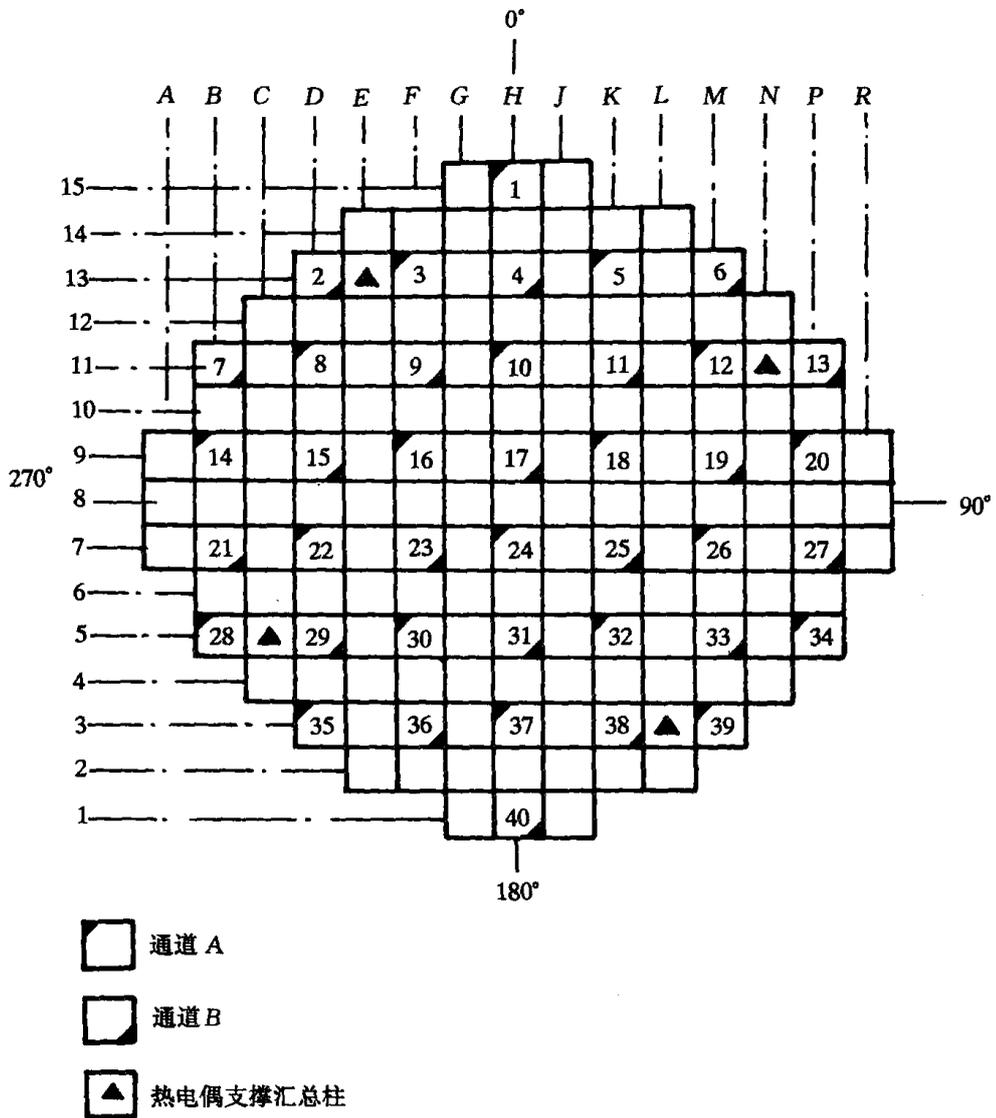


图 7-38 堆芯热电偶布置图

温度信号也输至堆芯冷却监测机框,用以冷端温度补偿。

大亚湾核电站堆芯温度检测所用的镍铬-镍铝热电偶的主要特性是:

$\phi = 3.17\text{mm}$

$L = 6.0 \sim 9.2\text{m}$

量程: $0 \sim 1200^\circ\text{C}$

精度: $\pm 1.5^\circ\text{C}$ $0^\circ\text{C} < T < 375^\circ\text{C}$

$\pm 0.4\%$ $T > 375^\circ\text{C}$

7.2 电阻温度计

对于 500℃ 以下的温度,由于热电偶产生的热电势较小,测量精度较低,所以有时采用电阻温度计来进行测温,尤其对低温测量,电阻温度计用得更多。通常电阻温度计由热电阻、连接导线和测量电阻值的显示仪表所组成。电阻温度计的特点是测量精度高,容易实现远距离测量和自动记录,便于配合温度巡回检测仪表或电子计算机进行温度测量,而且适宜于 500℃ 以下,特别是 200℃ 以下低温范围中应用。不存在冷端问题。因此,电阻温度计在工业上得到了广泛的应用,通常用来测量 -200~+500℃ 之间的温度,特别情况下,测量的低温可达到平衡氢的三相点(13.18K)甚至更低(如铂电阻温度计可测到 3.4K,碳电阻温度可测到 1K 左右)。

7.2.1 热电阻的测温原理

热电阻的测温原理是根据导体(或半导体)的电阻值随温度变化而变化的性质,将电阻值的变化用二次仪表把它测量出来,从而达到测温的目的。

物理学家指出,各种材料的电阻率都随温度变化。若忽略物体的长度和截面温度的变化,则对在参比温度 t_0 下的电阻值 R_{t_0} 和电阻率的温度系数(简称电阻温度系数) α 已知的物体,可以通过测量此物体的电阻来反映其温度。

一般纯金属在温度变化范围不大时,其电阻值与温度的关系近似为:

$$R_t = R_{t_0} [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (7-17)$$

半导体的电阻值与温度的关系为:

$$R_T = R_{T_0} e^{B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad (7-18)$$

$$B = \frac{T_0 T}{T_0 - T} \ln \frac{R_T}{R_{T_0}} \quad (7-19)$$

式中 R_t 、 R_{t_0} 、 R_T 、 R_{T_0} 分别为温度 t 、 t_0 、 T 和 T_0 时对应的电阻值。为了利用物体的电阻来反映其温度,总希望 R_{t_0} 、 α 和 B 等参数为稳定的定值,并且数值尽可能大,以便能够得到灵敏度和精确度都高的电阻温度传感器。

7.2.2 热电阻的种类和结构及分度

1. 热电阻的种类和结构

根据电阻值随温度变化的情况不同,热电阻分为热电阻和热敏电阻两大类,前者材料为金属,称为导体,它的电阻值随温度升高而增大,后者材料为半导体,它的电阻值随温度升高而减小。

热电阻根据使用环境、所用材料和不同精确度等有多种组成形式。目前应用最多的金属热电阻的组成基本上由热电阻丝,支持电阻丝的骨架,引出线和保护套管等 4 部分组成。半导体热电阻多数是整体的小型微型结构,即热电阻直接由引线支持,外敷的绝缘层兼作保护套。

虽然大多数金属(导体)的电阻随温度变化而变化,然而并不是所有的金属都能作为测温的热电阻,因为作为测量温度用的热电阻材料必须满足以下要求:

(1) 电阻温度系数要大。电阻温度系数的定义是:温度变化 1℃ 时电阻值的相对变化量,

用 α 来表示,单位是 $1 / ^\circ\text{C}$,根据定义, α 用下式表示:

$$\alpha = \frac{dR/R}{dT} = \frac{1}{R} \times \frac{dR}{dT} \quad (7-20)$$

必须指出,一般材料的温度系数 α 并非常数,在不同的温度下具有不同的数值。电阻温度系数越大,热电阻的灵敏度越高,测量温度时就越容易得到准确的结果。材料的纯度越高, α 值就越大,杂质越多, α 值就越小,且不稳定。纯金属的温度系数比合金的要高,而且纯金属也较易复制,所以一般多采用纯金属来制造电阻温度计的感受件。当热电阻丝中有内应力时,会引起 α 值的改变,因此电阻丝在制成热电阻体时必须进行退火和老化,以消除内应力的影响。

(2) 在测温范围内要求物理及化学性质稳定。

(3) 要求有较大的电阻率,因为电阻率越大,热电阻体的体积就可以做得小一些,热容量和热惯性就小些,这样对温度变化的响应比较快。

(4) 电阻值与温度的关系要近似线性,以便于分度和读数。

(5) 复现性好,复制性强,容易得到纯净的物质。

(6) 价格便宜。

表 7-8 列出了热电阻的 4 种金属材料的特性。由于铁和镍很难制造得纯净,且因它们的电阻与温度的关系曲线不很平滑,因此用得很少。我国目前只生产铂和铜两种材料的热电阻。下面介绍铂电阻和铜电阻的一些性能。

表 7-8 几种热电阻材料的特性

材料名称	$\alpha_0^{100}(1/^\circ\text{C})$	电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	测温范围 ($^\circ\text{C}$)	电阻丝直径 (mm)	特性
铂	$3.8 \sim 3.9 \times 10^{-3}$	0.098 1	$-200 \sim +500$	0.05~0.07	近似线性
铜	$4.3 \sim 4.4 \times 10^{-3}$	0.017	$-50 \sim +150$	0.1	线性
铁	$6.5 \sim 6.6 \times 10^{-3}$	0.10	$-50 \sim +150$	—	非线性
镍	$6.3 \sim 6.7 \times 10^{-3}$	0.12	$-50 \sim +100$	0.05	近似线性

注 表中 α_0^{100} 代表 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 之间的平均温度系数

(1) 铂热电阻

铂电阻的特点是准确度高,稳定性好,性能可靠。这是因为铂在氧化性气体中,甚至在高温下的物理、化学性质都非常稳定。所以 1968 年国际实用温标 (IPTS-68) 中规定在 $-259.34 \sim 630.74^\circ\text{C}$ 温度区域内以铂电阻温度计作为标准仪器。

但是铂热电阻在还原性气氛中,特别是在高温下很容易被还原气体污染,使铂丝变脆,并改变其电阻与温度之间的关系。因此,在这种情况下,必须用保护套管把电阻体与有害气体隔离开来。铂电阻被广泛用于工业上和实验室中。

在 $0 \sim 630.74^\circ\text{C}$ 温度范围内,铂的电阻与温度的关系表达式为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (7-21)$$

在 $-259.34 \sim 0^\circ\text{C}$ 温度范围内,铂的电阻与温度的表达式为

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (7-22)$$

式中 R_t, R_0 ——温度分别为 $t^\circ\text{C}$ 和 0°C 时铂的电阻值;

$$A, B, C \text{——常数, } A = 3.9847 \times 10^{-3} \times 1/^\circ\text{C}$$

$$B = -5.847 \times 10^{-7} \times 1/^\circ\text{C}^2$$

$$C = -4.22 \times 10^{-12} \times 1/^\circ\text{C}^4$$

铂电阻是用很细的铂丝(0.03~0.07mm)绕在云母、石英或陶瓷支架上做成的。之所以采用这几种材料做支架,是因为这些材料的体膨胀系数小,绝缘性能好,能耐高温,有一定的机械强度。其中云母只能用于 500°C 以下的温度测量中。支架通常做成十字架形、平板形、螺旋形和圆柱形等形式,可见图 7-40 平板形和十字架形支架上开有锯齿形缺口,圆柱形支架上刻有螺纹(用于铜电阻时没有螺纹)。因为铂电阻丝较短,又是裸线,故把铂丝绕在螺纹里以使相邻圈之间绝缘,绕时采用无感双线绕制法。铂丝在绕制前后都需加热退火和老化处理,以消除内应力。

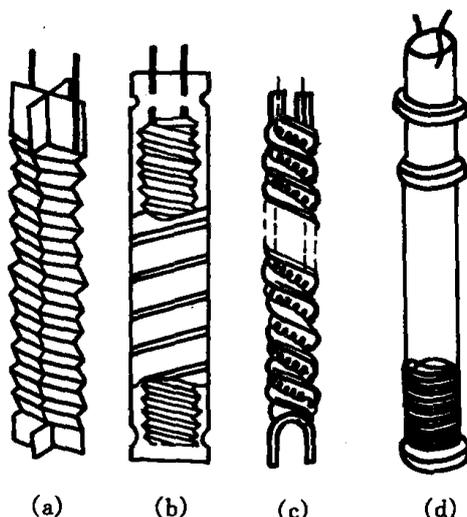


图 7-40 支架形状

(a) 十字架形;(b) 平板形;
(c) 螺旋形;(d) 圆柱形

从电阻体通向接线盒的导线称引出线,铂电阻的引出线必须满足下列要求:

- (1) 对铂电阻丝不产生有害的影响;
- (2) 与铂电阻丝及连接导线间不会产生很大的热电势;
- (3) 化学稳定性要好。

标准铂电阻用直径 0.3mm 的金线或铂线作引出线。工业上用的铂电阻,用直径 1mm 的银线作引出线。低温下用直径 1mm 的铜线作引出线。

使用电桥作测量仪表时,工业用铂电阻的引出线不是 2 根而是 3 根,这样便于采用 3 线制测量线路。有些电阻上的引出线虽然只有 2 根,但使用时可在保护套管接线盒的端钮上接出 3 根导线,以便仍然采用 3 线制测量线路。标准或实验室用铂电阻的引出线有 4 根,以便采用 4 线制测量线路。3 引出线和 4 引出线的热电阻如图 7-41 所示。引出线上套有绝缘套管,以防引出线之间短路。

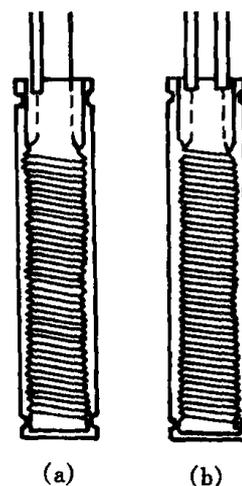


图 7-41 三引出线和四引出线的热电阻体

(a) 三引出线;
(b) 四引出线

为了使热电阻免受腐蚀性介质的侵蚀和外界的机械损伤而延长其使用寿命,一般外面均套有保护套管。对绝缘套管与保护套管的要求与热电偶的一样,结构也相同,此处不再重述。

还有一种微型铂电阻,它的体积小,热惯性小,气密性好。测量范围在 $-200 \sim +500^\circ\text{C}$ 时,它的支架和保护套管均由特殊玻璃制成;测温范围在 $500 \sim 1000^\circ\text{C}$ 时,它的支架则用石英材料制成。微型铂电阻是在刻有螺纹的圆柱形玻

璃棒(或石英支架)上绕 0.04~0.05mm 直径的铂丝(在石英支架上则绕制本身已呈螺旋形的铂丝)制成,引出线用 0.5mm 直径的铂丝制作,外面套有 $\phi 4.5\text{mm}$ 外径的特殊玻璃(或石英管)作为保护套管,其结构如图 7-42 所示。

还可以用腐蚀成栅状的铂金属膜粘贴在塑料底板上(或铂镀在绝缘材料表面上)制成铂电阻,它的形状和电阻应变片相仿,测温时粘贴在被测物体表面上。这种热电阻对温度的反应速度极快,但使用中要防止被测物体表面应变对热电阻值产生的影响。

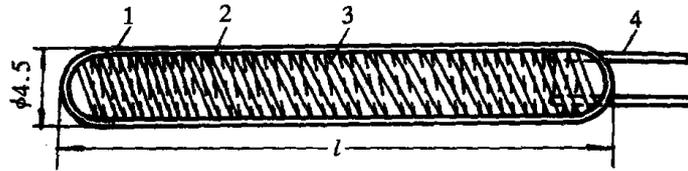


图 7-42 微型铂电阻的结构

1—套管;2—玻璃棒;3—感温铂丝;4—引出线

(2) 铜热电阻

用铜做热电阻材料价格便宜,因此工业生产等精度要求不太高的场合应用较多,它的测温范围为 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$,电阻温度函数表达式为

$$R_t = R_0(1 + \alpha_0 t) \quad (7-23)$$

式中 α_0 ——铜热电阻在温度为 0°C 时的电阻温度系数为 $4.25 \times 10^{-3} 1/^{\circ}\text{C}$;
 R_0, R_t ——铜电阻在温度分别为 t 和 0°C 时的阻值。

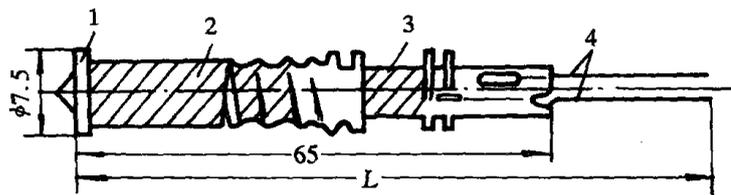


图 7-43 铜电阻

1—线圈骨架;2—铜热电阻丝;
 3—补偿绕组;4—铜引出线

铜热电阻的缺点是铜的电阻率较小,所以要制造一定电阻值的热电阻其铜丝的直径很细,影响机械强度,而且长度很长,这样制成的热电阻体积较大,另外铜易氧化,测温范围不能超过 150°C ,一般使用温度在 100°C 以下,它还不能在有腐蚀性介质中使用。

铜电阻是用直径约 0.1mm 的绝缘铜线采用无感双线绕法绕在圆柱形塑料支架上制成,如图 7-43 所示。用直径为 1mm 的铜丝或镀银铜丝做引出线,并穿以绝缘套管。热电阻和引出线都装在保护套管内。绝缘套管与保护套管的要求与热电偶的相同。

为了改善热传导,在铂电阻体和铜电阻体与保护套管之间,置有金属片制的夹持件或内套管。

(3) 其它热电阻

近年来,在低温和超低温测量方面,开始采用一些新颖的热电阻,如钢、锰、碳等电阻。

① 铟电阻:它是近年发展起来的一种高准确度低温热电阻。铟的熔点约为 156℃,在 4.2~15K 温度区域内其测温灵敏度比铂电阻高 10 倍,故用于铂电阻不能使用的低温范围。用 99.999% 的高纯度铟丝制成的铟电阻,在 4.2K 到室温的整个范围内,其复现性可达到 ±0.001K。铟电阻的缺点是材料很软,复制性很差。

② 锰电阻:锰电阻的特点是,在 2~63K 低温范围内的电阻随温度变化很大,灵敏度高,在 2~16K 的温度范围内,电阻率与温度的平方成正比关系,掺有杂质的 α-锰可以使这个平方关系扩展到 21K,磁场对锰电阻的影响不大,且有规律。锰电阻的缺点是很脆,难以拉制成丝。

③ 碳电阻:碳电阻很适合作液氮温度区域(约 0~4.55K)的温度计,这是因为碳电阻在低温下灵敏度高,热容量小,对磁场不敏感,价格便宜,操作简便。它的缺点是热稳定性较差。

(4) 半导体热敏电阻

半导体热敏电阻通常用来测量 -100℃~300℃ 之间的温度。与金属热电阻相比较,它有如下的优点:负温度系数的半导体热敏电阻的温度系数大,约为 3%~6%,而大多数金属的温度系数仅有约 0.4%~0.6%,因此半导体热敏电阻的测温灵敏度高,它的电阻率 ρ 很大,因此半导体热敏电阻的构造简单、体积小,可以测量点温度,而且测温用的连接导线引起的误差可以忽略。

2. 热电阻的分度

表达温度与电阻值之间关系的表格称为热电阻的分度表。热电阻有标准化热电阻和非标准化热电阻之分,有统一分度表的热电阻称为标准化热电阻。我国工业上常用的标准化热电阻有铂热电阻和铜热电阻。

铂的纯度通常以比值 R_{100}/R_0 来表示, R_{100} 代表在水沸点时铂热电阻的电阻值, R_0 代表在冰点时铂热电阻的电阻值。此比值越大,说明铂的纯度越高,热电阻的稳定性越好。1968 年国际实用温标规定作为基准器的铂电阻,其比值 R_{100}/R_0 不得小于 1.392 5。近年来随着科学技术和工业发展的形势,我国标准化铂热电阻的比值 R_{100}/R_0 也不断提高,因此我国标准化铂热电阻按分度号分有 B₁、B₂、BA₁、BA₂ 和 BA₃ 等几种,其中 B₁、B₂ 两种型号已渐趋淘汰,BA₃ 为新品种。BA₂ 和 BA₃ 又相应的记为 P_{t100} 和 P_{t300}。铂热电阻的分度关系见表 7-9。

铜热电阻阻值与温度的关系在 -50~+150℃ 范围内近似为线性,容易得到纯净的铜材料。我国以前工业上用的铜电阻分度号为 G($R_0=53.00\Omega$),现在全国统一设计后的分度号为 Cu50($R_0=50.00\Omega$)和 Cu100($R_0=100\Omega$),铜热电阻的分度关系见表 7-9。

表 7-9 热电阻分度简表

分度号 R_t (Ω) 温度 (°C)	R_0 (Ω)		B ₁	B ₂	BA ₁	BA ₂ (P _{t100})	BA ₃ (P _{t300})	P _{t50}	G	Cu50	Cu100
	46	100	46	100	300	50	53	50	100		
-200	8.15	17.72	7.95	17.28		8.64					
-150	17.99	39.12	17.85	38.80		19.40					
-100	27.53	359.85	27.44	59.65	178.95	29.82					
-50	36.85	80.10	36.80	80.00	240.00	40.00	41.74	39.24	78.49		

续表 7-9

分度号 R_t R_0 (Ω) 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	B_1	B_2	BA_1	BA_2 (P_{100})	BA_3 (P_{300})	P_{50}	G	Cu50	Cu100
	46	100	46	100	300	50	53	50	100
0	46.00	100.00	46.00	100.00	300.00	50.00	53.00	50.00	100.00
10	47.81	103.94	47.82	103.96	311.89	51.98	55.25	52.14	104.28
20	49.62	107.87	49.64	107.91	323.74	53.96	57.50	54.28	108.56
30	51.42	111.79	51.45	111.85	335.56	55.93	59.75	56.42	112.84
40	53.22	115.70	53.26	115.78	347.34	57.89	62.01	58.56	117.12
50	55.01	119.60	55.06	119.09	359.85	59.85	64.26	60.70	121.40
60	56.80	123.48	56.86	123.60	370.80	61.80	66.52	62.84	125.68
70	58.58	127.35	58.65	127.49	382.48	63.75	68.77	64.98	129.96
80	60.36	131.21	60.43	131.37	394.12	65.69	71.02	67.12	134.24
90	62.13	135.06	62.21	135.24	405.73	67.62	73.27	69.26	138.52
100	63.98	138.90	63.99	139.10	417.30	69.55	75.52	71.40	142.80
110	65.65	142.73	65.76	142.95	428.84	71.48	77.78	73.54	147.08
120	67.41	146.54	67.52	146.78	440.34	73.39	80.03	75.68	151.36
130	69.16	150.34	69.28	150.60	451.81	75.30	82.28	77.83	155.66
140	70.90	154.13	71.03	154.41	463.24	77.20	84.54	79.98	159.96
150	72.64	157.91	72.78	158.21	474.63	79.10	86.79	82.13	164.27
160	74.37	161.68	74.52	162.00	486.00	81.00			
170	76.10	165.43	76.26	165.78	497.34	82.89			
180	77.82	169.18	77.99	169.54	508.61	84.77			
190	79.54	172.91	79.71	173.29	519.87	86.64			
200	81.25	176.63	81.43	177.03	531.09	88.51			
210	82.29	180.34	83.15	180.76	542.28	90.38			
220	84.66	184.34	84.86	184.76	553.43	92.24			
230	86.35	187.72	86.56	188.18	564.55	94.09			
240	88.04	191.39	88.26	191.88	575.63	95.94			
250	89.73	195.06	89.96	195.56	586.67	97.78			
260	91.40	198.71	91.64	199.23	597.68	99.61			
270	93.08	202.34	93.33	202.89	608.66	101.44			
280	94.75	205.99	95.00	206.53	619.60	103.26			
290	96.41	209.59	96.68	210.17	630.50	105.08			

7.2.3 测温热电阻阻值的测量

对于热电阻的电阻值测量,在实验室常用手动电位差计和手动平衡电桥,在工业上常用不平衡电桥和自动平衡电桥。

1. 用电位差计测量电阻

用电位差计测量电阻的线路见图 7-44。图中 E 为电池, R_P 为可变电阻, R_N 为标准电

阻, R_t 为热电阻, S 为切换开关, P 为电位差计。 R_P 的作用是调节通过 R_N 和 R_t 的电流, 此电流过大时会使 R_t 发热而造成测量误差, 通常取 3mA , 最大不应超过 6mA 。

使切换开关接向 R_N , 在电位差计上读出 R_N 两端的电压 U_N , 如果此时通过 R_N (也就是通过 R_t) 的电流为 I , 则

$$U_N = IR_N$$

使切换开关接向 R_t , 测得 R_t 上的电压 U_t , 则

$$U_t = IR_t$$

由上两式可得

$$R_t = \frac{U_t}{U_N} R_N$$

用电位差计测量电阻的方法适用于实验室, 测量结果较准确。

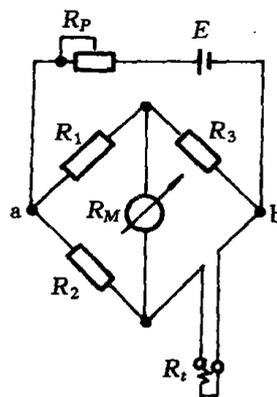
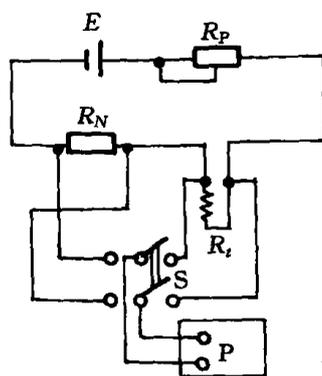


图 7-44 用电位差计测量热电阻的线路 7-45 用不平衡电桥测量电阻的原理线路

2. 用不平衡电桥测量电阻

用不平衡电桥测量电阻的原理线路见图 7-45。图中 E 为电源, R_1 、 R_2 、 R_3 为 3 个固定的桥臂, 电阻值是已知的, R_t 为热电阻, R_M 是测量仪表的电阻, 通常测量仪表就是毫伏计, 毫伏计可用电阻(或温度)刻度。

根据不平衡电桥的原理, 通过毫伏计的电流 I_M 为

$$I_M = U_{ab} \frac{R_1 R_t - R_2 R_3}{R_M (R_1 + R_3)(R_2 + R_t) + R_1 R_3 (R_2 + R_t) + R_2 R_t (R_1 + R_3)} \quad (7-24)$$

式(7-24)中 U_{ab} 是电桥端点 a 和 b 之间的电压。因为 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_M 都是不变的数值, 所以 I_M 只与 R_t 和 U_{ab} 有关。如果保持 U_{ab} 不变, 则 I_M 只是 R_t 的函数, 这时毫伏计指针的偏转角就代表 R_t 的大小。半导体热敏电阻通常也是用不平衡电桥来测量其阻值, 并在表盘上标以温度刻度。现在工业上常用的配热电阻的动圈式仪表, 它的测量线路就是由不平衡电桥构成的, 如图 7-46 所示。线路中由 $R_t + R_w + R_0$ 、 $R_w + R_2$ 、 R_3 、 R_4 组成四个桥臂, R_t 是热电阻, R_w 是外接电阻其中包括连接导线电阻, 其余电阻均为锰铜绕制的固定电阻。桥路中 $R_3 = R_4$; $R_w + R_2 = R_{t_0} + R_w + R_0$ 。其中 R_{t_0} 是仪表刻度起点 $t_0^\circ\text{C}$ 时的热电阻阻值。 R_0 是调节仪表指针起始点的电阻。在 $R_t = R_{t_0}$ 时电桥平衡, 对角线 c 、 d 间无电压输出, 流过毫伏计的电流为零。当被测温度升高, R_t 增大, 电桥不平衡, 毫伏计中有电流流过。温度越高, R_t 阻值

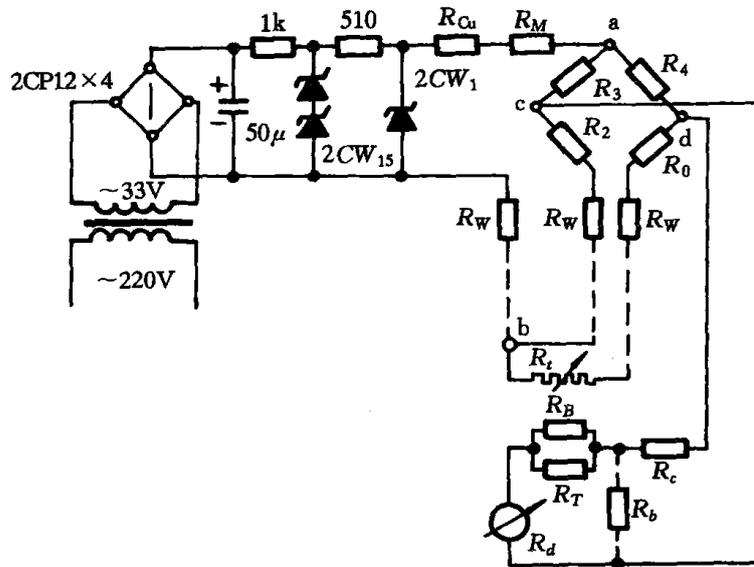


图 7-46 配热电阻的动圈仪表测量原理线路

越大,则输出电压 U_{cd} 越大,毫伏表指针偏转越大,所以仪表指针的指示值就反映了温度的高低。

电桥输出的电压不仅与 R_t 大小有关,而且与电源电压有关,所以电源要采用二级稳压,并考虑了温度补偿,以保证桥压的稳定性。

热电阻与桥路的连接采用 3 线制接法,从热电阻上接出 3 根相同材料、相同直径和长度的导线,它们的电阻都是一样的,受环境温度变化而引起的电阻变化也是一样的,这样可以在很大程度上减小连接导线电阻变化引起的误差。例如在仪表刻度起点,电桥处于平衡状态,这时等式 $R_w + R_2 = R_{t_0} + R_w + R_0$ 两边可消去 R_w ,可看出即使 R_w 随环境温度而变化,电桥仍是平衡的,不会引起附加误差。但是在仪表偏离起始点后,上式两边不相等,桥路处于不平衡状态,这时 R_w 的变化,就会影响输出电压变化,产生附加误差。如果使 $R_4 + R_0 + R_w + R_t \gg \Delta R_w$,则 R_w 的变化 (ΔR_w) 对输出电压的影响就很小。在规定外接电阻 $R_w = 5\Omega$ 的情况下,环境温度在 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内变化引起的最大附加误差不超过 0.5%。

对于不平衡电桥,必须考虑电源引线在环境温度变化时引起的附加误差,因为当电源引线电阻变化时,将使加在电桥上的电压 U_{ab} 发生变化,因而产生误差。在外接电阻为 5Ω 的情况下,环境温度在 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内变化时,这项误差不会超过 0.2%。

过去大量采用比率计来配接热电阻测量温度。由于比率计制造麻烦,还有其它一些缺点,我国现在已经不采用了。现在工业测量上主要采用具有不平衡电桥线路的动圈式仪表来配接热电阻测量温度。

3. 用手动平衡电桥测量电阻

手动平衡电桥测量电阻的方法适用于实验室,它的原理线路如图 7-47 所示。图中 R_2 和 R_3 是两个锰铜丝绕制的已知电阻(通常令 $R_2 = R_3$), R_1 为可变电阻, R_t 为热电阻, R_l 为连接导线的电阻, G 为检流计, E 为电池。

电桥平衡时,此时检流计中无电流通过,根据电桥平衡原理: $R_1 R_3 = R_2 (R_t + R_l)$, 因为 $R_2 = R_3$, 所以可得 $R_t = R_1 - R_l$ 。可以在滑线变阻器 R_1 上进行电阻或温度刻度,也就是说根

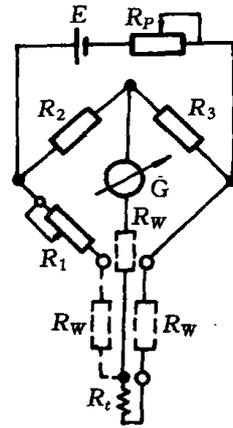
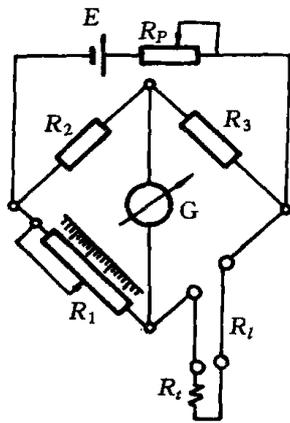


图 7-47 用平衡电桥测量电阻的原理线路 图 7-48 消除导线电阻变化影响的 3 线制电桥线路

据 R_1 的滑动触点位置便可确定热电阻的阻值。而且测量结果与电源 E 的电压大小无关。

从 $R_t = R_1 - R_l$ 式可知, R_t 不仅取决于 R_1 的触点位置, 还与 R_l 有关, 而 R_l 是随环境温度而变化的, 这就使测量结果有误差。为了减小此误差可采用如图 7-48 所示的 3 线制连接方法, 此时电桥的平衡条件为: $R_1 + R_w = (R_t + R_w) \frac{R_2}{R_3}$, 其中 $R_2 = R_3$, 上式化简后得 $R_t = R_1$ 可见 3 线制接法有利于消除连接导线电阻变化对测量的影响。

准确度要求更高的场合, 如实验室中采用铂电阻作为标准器, 可采用 4 线制测量线路, 如图 7-49 所示。

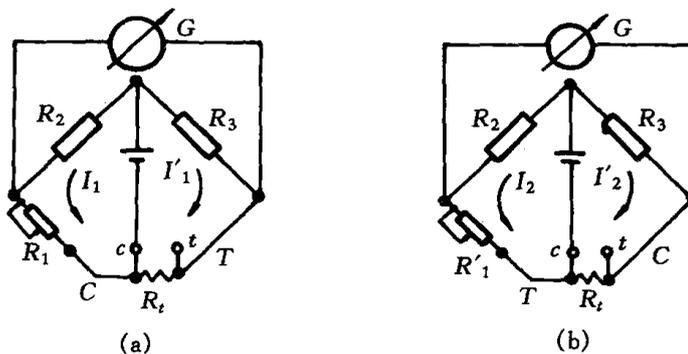


图 7-49 四线制测量线路

热电阻 R_t 的 4 根导线电阻分别为 C 、 c 、 T 、 t 。按图 7-49(a) 接线, 列出回路方程式:

$$I_1(R_2 + R_1 + C + c) + I'_1 c = I'_1(R_3 + T + R_t + c) + I_1 c \quad (7-25)$$

由于 $R_2 = R_3$, 电桥平衡时则有 $I_1 = I'_1$, 上式可写为:

$$R_1 + C = T + R_t \quad (7-26)$$

再按图 7-49(b) 接线, 同理可列出回路方程式:

$$I_2(R_2 + R'_1 + T + t) + I'_2 t = I'_2(R_2 + C + R_t + t) + I_2 t \quad (7-27)$$

由于 $R_2 = R_3$, 电桥平衡时则有 $I_2 = I'_2$, 上式可写为

$$R_1' + T = C + R_t \quad (7-28)$$

由式(3-9),式(3-11)可求得

$$R_t = (R_1 + R_1')/2 \quad (7-29)$$

R_1 、 R_1' 是电桥的两个测量值,由它们求得的 R_t 与导线电阻无关。这种测量方法很麻烦,因此仅用在准确度要求很高的测量中。

平衡电桥在测量电阻值时需不断改变 R_1 的大小,以使通过 G 的电流等于零,测量是手动的和不连续的,因此这种测量方法不适于在现场使用。

4. 用电子平衡电桥测量电阻

电子平衡电桥就是自动的平衡电桥,它可以自动地测量热电阻的阻值,并以对应的温度值进行显示和记录。电子平衡电桥的方框图如图 7-50 所示。

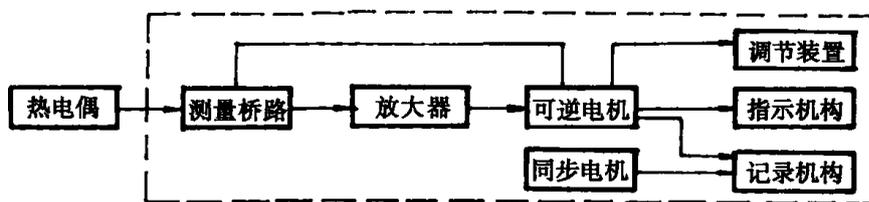


图 7-50 电子平衡电桥的方框图

电子平衡电桥与电子电位差计除了测量桥路外,其它部分几乎是相同的,这里只介绍测量桥路的工作原理。

电子平衡电桥的测量桥路的原理线路如图 7-51 所示。电桥上支路中的 R_t 是热电阻,它与电阻 R_W 、 R_6 ,还有由滑线电阻 R_p 及工艺电阻 R_B 、量程电阻 R_5 并联形成的电阻 R_p 的一部分,组成桥路的一个臂,上支路的另一个桥臂,由电阻 R_4 和 R_p 的另一部分组成。下支路的两个臂分别由 $R_W + R_2$ 和 R_3 组成。除了热电阻外,全部的电阻都是由锰铜丝绕制成。当被测温度引起热电阻 R_t 的阻值变化时,导致电桥不平衡,不平衡电压输至放大器放大后,推动可逆电机带动滑线电阻上的滑点移动,改变上支路两个桥臂的比值,最后使桥路恢复平衡,同时由可逆电机带动指针,指出温度的数值。改变电阻 R_5 ,可以改变仪表的量程。改变电阻 R_5 ,

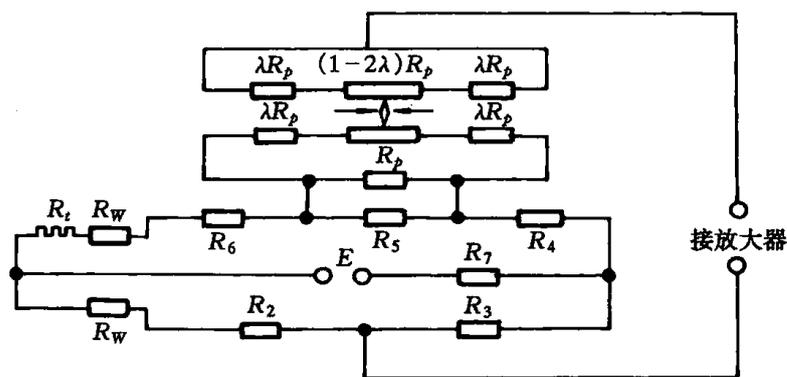


图 7-51 电子平衡电桥的测量桥路

可改变仪表刻度的起始值。 R_2 、 R_3 、 R_4 是固定电阻, R_7 是限流电阻, 用它来限制通过热电阻的电流。

仪表和热电阻的连接也是采用 3 线制接法, 可减小导线电阻因环境温度变化而变化所造成的误差。

测量桥路可以用交流电源也可以用直流电源。当采用交流电源供电时, 桥路输出交流信号, 放大器可不需要变流器, 但此时在放大器的输入端很难装设滤波网络, 外部的干扰信号很容易窜入放大器, 导致放大器饱和, 使仪表的灵敏度下降。另外, 如果在交流电桥的桥臂中存在电感和电容, 就会降低仪表的准确度。例如, 为了防止干扰而采用同芯电缆作为热电阻的引入线, 当这种引入线较长时, 就存在较大的分布电容。直流电桥需要装设变流器及直流电源装置, 交、直流两种电桥我国都生产。交流电桥采用 6.3V 交流电源供电, 直流电桥采用 1V 直流电源供电。

7.2.4 热电阻测量温度的温度变送器

热电阻测量温度的温度变送器也分为 II 型仪表和 III 型仪表, 前者是晶体管型, 输出为标准统一信号 0~10mA, 后者是线性集成电路型, 输出为标准统一信号 4~20mA 或 1~5V。也是由输入回路、放大电路和反馈回路等组成。其工作原理与热电偶测温的温度变送器相同, II 型仪表亦为图 7-33 所示 DBW 型温度变送器。这里介绍 DDZ-III 型仪表。

1. 热电阻 DDZ-III 型温度变送器

图 7-52 是热电阻 DDZ-III 型温度变送器原理图。 V_Z 为集成电路稳压电源, 如果忽略调整电阻 r , 热电阻作为一个桥臂, 当被测温度改变时, R_t 改变, 电桥输出电压作为集成运算放大器 IC_2 的输入信号, V_f 为反馈电压, 它分成两路, 一路为负反馈 i'_1 , 一路为正反馈 i'_2 , 它起着线性化作用。

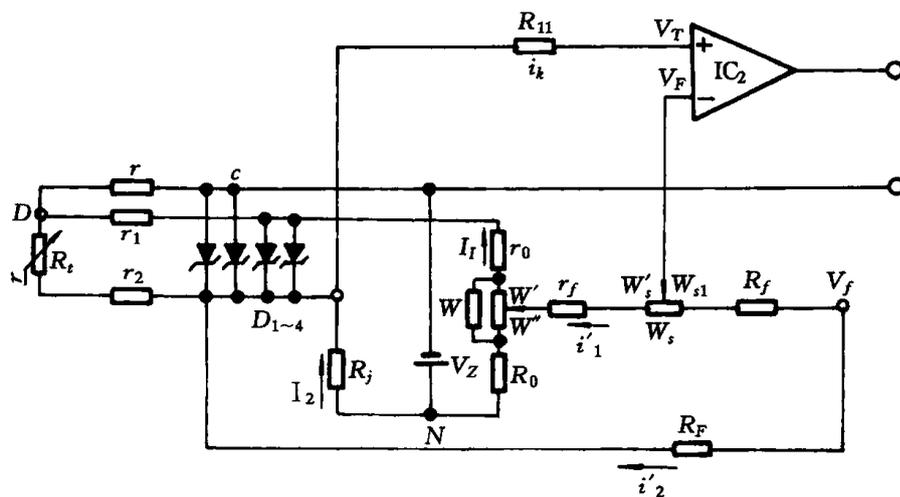


图 7-52 热电阻 DDZ-III 型温度变送器原理图

IC_2 同相输入端的信号由两部分组成, 一是由电源 V_Z 和 R_j 及热电阻 R_t 组成分压器, 提供分压信号。另一路是反馈电压 V_f 和电阻 R_F 及 R_t 组成分压器提供电压信号(起线性化作用)。放大器的反相输入端的输入信号则由 V_Z 和电阻 R_0 、 W 、 r_0 组成调零回路以及反馈电压

V_f 和 R_f 、 W'_s 、 W_{s1} 、 r_f 组成负反馈回路。 W_s 是反馈电压调整电位器,调整它就等于调整了放大器的闭环放大倍数。即改变仪表的量程,若量程范围调整量较大,则可改变 R_f , W 是用来调整输出零点的。

7.2.5 热电阻温度计在压水堆中的应用

热电阻至今未被广泛应用到核反应堆堆芯温度的测量中,其原因是在较高的核辐射场中金属电阻会发生变化,而且变化的数值是辐射形式以及辐射期间和辐射之后金属温度的复杂函数,同时普通热电阻要比热电偶大得多,不便于应用到反应堆堆芯。然而热电阻常用于反应堆进出口冷却剂温度的测量工作中,因为这时处于较低的核辐射场中。

铂热电阻主要用于反应堆冷却剂回路温度的监测。

控制系统和反应堆保护系统所采用的反应堆冷却剂温度,是通过直接浸没在小旁通回路内而不是浸没在反应堆主冷却剂管内的电阻温度探测器来测量的。电阻温度探测器安装在该旁通回路的歧管中,歧管口径比较大,足以装进电阻温度探测器。利用旁通歧管来获得不能放置在反应堆冷却剂回路内的直接浸没式电阻温度探测器的快速响应。在每个反应堆冷却剂环路中,都有两个旁通回路:一个旁通回路用于热段温度测量,一个用于冷段温度测量。

热段歧管中产生流动的驱动水头,是蒸汽发生器进出口压差。分开角度为 120° (在断面上)的3个进水口接收来自热段的样品流。这些样品流在进入歧管前混合在一起。通往蒸汽发生器和反应堆冷却剂泵之间的中间的回返管线,是热段歧管样品流和冷段歧管样品流共用的。冷段歧管的进水接管在反应堆冷却剂泵的下游。因为泵的混合作用,它不需要多个进水口,只采用一个接管就够了。产生冷段歧管水流动的驱动水头是水泵进出口压差。图 7-53 是电阻温度探测器歧管示意图。

这些电阻温度探测器是窄量程($277\sim 332^\circ\text{C}$)探测器。由热段温度和冷段温度可以得到冷却剂回路的平均温度 T_{avg} 和温差 ΔT 。

在旁路上用铂热电阻测量温度有两个作用:① 能得到热段温度和冷段温度;② 产生反应堆控制和保护系统所必须的主回路冷却剂的平均温度信号 T_{avg} 和主回路冷却剂在热段和冷段的温差 ΔT 。

为什么不直接在冷管段和热管段上安装铂热电阻而要在旁路管线上安装铂热电阻测量温度?理由有三点:① 在旁路管线测量能得到更加均匀的流体温度;② 在旁路管线中流体的低流速使得可以利用裸露的、没有套管的响应速度快的铂热电阻元件;③ 旁路系统允许在不需要对一回路采取某些措施的情况下,就可以检修铂热电阻测温元件。

反应堆进、出口冷却剂的温度检测时的具体测量点是:在每条环路上设置了6只铂热电阻,其中热段3只,2只工作,1只备用;冷段3只,2只工作,1只备用。

反应堆冷却剂环路温度,还可以通过安装在每个环路反应堆冷却剂管线测孔内的宽量程($-18\sim 371^\circ\text{C}$)电阻温度探测器测量。这种探测器被用来指示升温 and 冷却期间的温度。

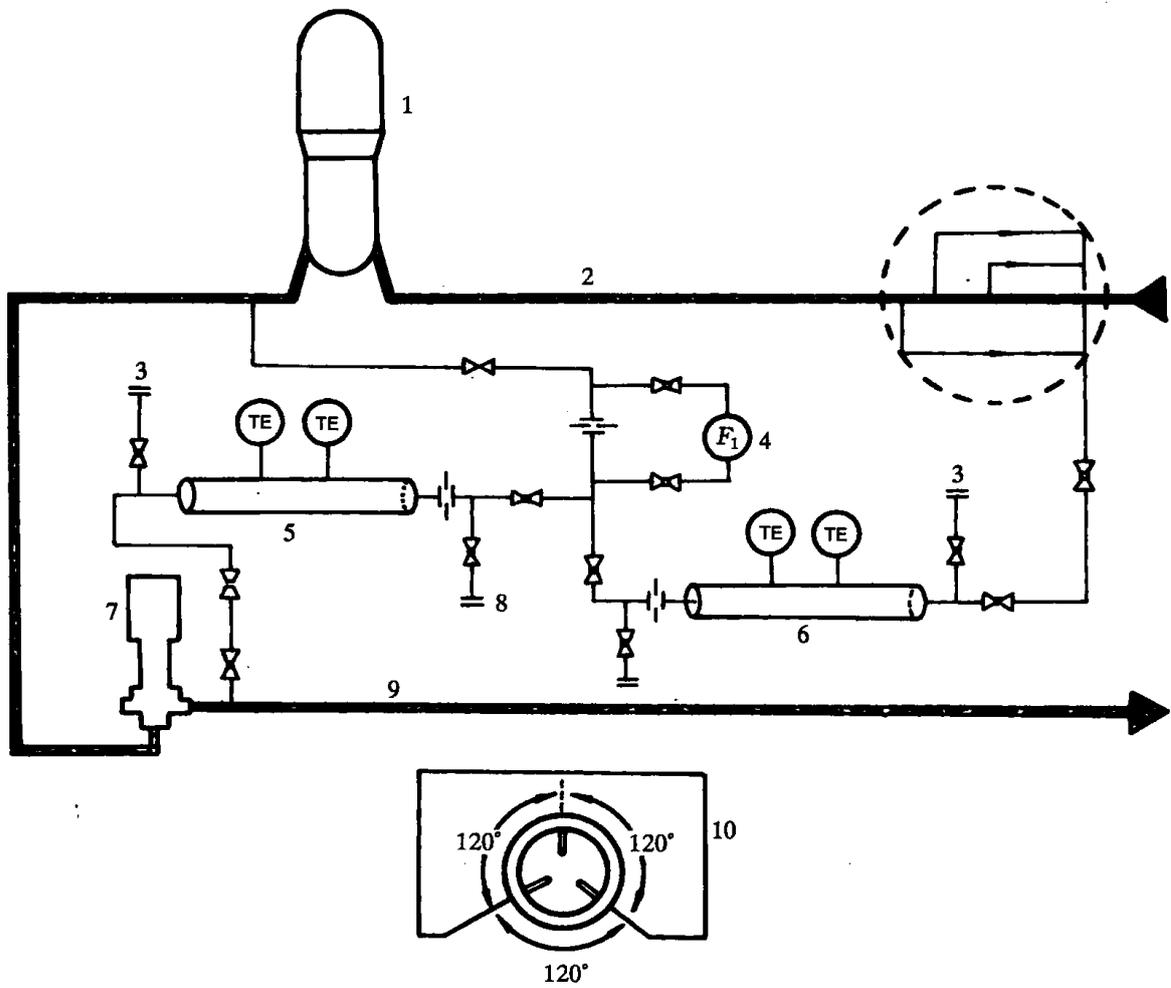


图 7-53 典型的电阻温度计回路

1—蒸汽发生器;2—热段;3—排汽孔;4—旁路流量仪表;5—冷段歧管;6—热段歧管;
7—反应堆冷却剂;8—排水孔;9—冷段;10—热段剖面图;TE—温度探测器;F₁—流量仪表

第 8 章 压力和压差检测仪表

压力是工质热力状态的主要参数之一。在反应堆和核电厂中,为了使各种设备安全经济运行,必须监视和控制压力。

目前反应堆和核电厂中所用的压力和差压检测仪表主要是弹性式压力和压差检测仪表。由于压力和压差信号管路长度有限制,而且敷设不方便,所以通常是用压力、压差变送器将压力和压差信号变换为相应的电信号,经电缆传递到仪表盘以及显示仪表。

8.1 基本概念

按定义,工程技术中压力是指“垂直作用在物体单位面积上的力”。

在国际单位(SI)和我国法定计量单位中,压力的单位是“帕斯卡”,简称“帕”,符号为“Pa”。

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

即 1N 的力垂直均匀作用在 1m^2 的面积上所形成的压力叫 1Pa。

目前并存的几种压力单位之间的换算关系见表 8-1。

表 8-1 压力单位的换算简表

帕	工程大气压	标准大气压	巴	毫米汞柱	毫米水柱	磅力每平方英寸
1	1.01972×10^{-5}	9.86923×10^{-6}	1×10^{-5}	5.0062×10^{-3}	1.01972×10^{-1}	1.45038×10^{-4}
1.01325×10^5	1	9.67841×10^{-1}	9.80665×10^{-1}	7.35559×10^2	1×10^4	1.42233×10^3
1.01325×10^5	1.03323	1	1.01325	7.60×10^2	1.03323×10^4	1.46959×10^1
1×10^5	1.01972	9.86923×10^{-1}	1	7.50062×10^2	1.01972×10^4	1.45038×10^1
1.33323×10^2	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1.33322×10^{-2}	1	1.35951×10^1	1.93368×10^{-2}
9.80665	1×10^{-4}	9.67841×10^{-5}	9.80665×10^{-5}	7.3556×10^{-2}	1	1.42234×10^{-3}
6.89476×10^3	7.0307×10^{-2}	6.8046×10^{-2}	6.89476×10^{-2}	5.17149×10^1	7.0307×10^2	1

由于地球表面存在大气压力,而物体的受压情况又不尽一致,因此在不同的场合下压力有着不同的表示方法,如绝对压力、相对压力、负压力(或真空)、压差等。工程上压力计的指示值多为相对压力,称之为“计示压力”或“表压力”。

如果令 P 为绝对压力, P_0 为当时当地的大气压力, P_e 为表压力,则有

$$P = P_e + P_0$$

或

$$P_e = P - P_0 \tag{8-1}$$

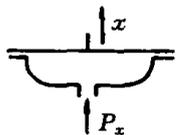
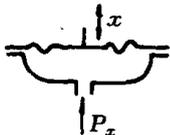
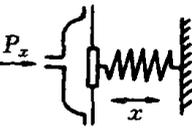
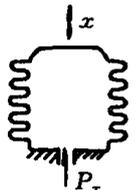
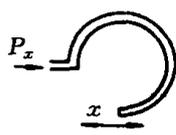
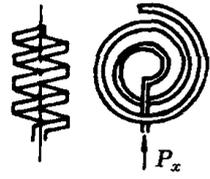
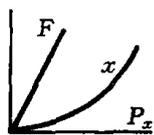
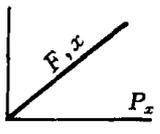
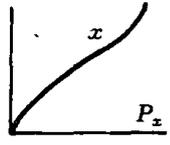
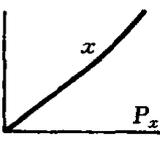
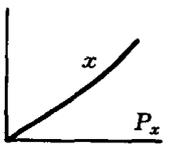
当 $P_e > 0$ 时,表压力 P_e 称为正压,简称压力;当 $P_e < 0$ 时,表压力 P_e 称为负压,或真空,或真空度。

8.2 常用弹性元件和弹性式压力和压差仪表

弹性式压力和压差检测仪表是根据弹性元件受压后产生的变形与压力(压差)大小有确定关系的原理制成的。它适用的压力(压差)范围广($9.80665 \times 10^{-4} \text{Pa} \sim 9.80665 \times 10^8 \text{Pa}$),结构简单,故获得了广泛应用。

目前常见的测压用弹性元件有薄膜式(含膜盒式)、波纹管式和弹簧管式3类。弹性元件常用铍青铜、磷青铜、不锈钢等材料制成。为提高弹性元件的耐温、耐热性能,已研制出多种新型弹性材料,如钯-金系无磁恒弹合金、锰-钯系无膨胀恒弹合金等。各种弹性元件的形式和特性见表8-2所示。

表 8-2 各种弹性元件的性质

类别	名称	示意图	测量范围 (Pa)		输出量特性	动态性质	
			最小	最大		时间常数 (s)	自振频率 (Hz)
薄膜式	平薄膜		$0 \sim 9.8 \times 10^3$	$0 \sim 9.8 \times 10^7$		$10^{-5} \sim 10^{-2}$	$10 \sim 10^4$
	波纹膜		$0 \sim 9.8 \times 10^{-1}$	$0 \sim 9.8 \times 10^5$		$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10 \sim 100$
	挠性膜		$0 \sim 9.8 \times 10^{-3}$	$0 \sim 9.8 \times 10^4$		$10^{-2} \sim 1$	$1 \sim 100$
波纹管式	波纹管		$0 \sim 9.8 \times 10^{-1}$	$0 \sim 9.8 \times 10^5$		$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10 \sim 100$
弹簧管式	单圈弹簧管		$0 \sim 9.8 \times 10$	$0 \sim 9.8 \times 10^8$			$10^2 \sim 10^3$
	多圈弹簧管		$0 \sim 9.8$	$0 \sim 9.8 \times 10^7$			$10 \sim 100$

8.2.1 薄膜式弹性压力(压差)仪表

1. 薄膜式差压计

在表 8-2 中所列出的 3 种薄膜元件中,平薄膜是最简单的一种,它是一金属园板沿周界焊在仪表基座上,当压力通入平薄膜一侧时,使平薄膜中心产生位移(或集中力),被测压力与平薄膜中心位移之间的关系不仅和平薄膜直径、厚度以及材料有关,而且与位移和厚度之间的比值有关,在位移小于 4 倍膜片厚度时近似为线性关系。平薄膜适于测量较高的压力。

挠性膜一般用丁腈橡胶制成,中央部分用两块小金属圆片夹持。为了增大位移,挠性膜常做成有折皱的形式。挠性膜只起隔离被测介质作用,被测压力全由膜片另一侧的弹簧来负担。挠性膜一般用于测量较低的压力或真空。

最常用的波纹膜,它是压成有波浪起伏纹的圆形金属膜片,波纹形状有三角形、梯形和正弦波形等。膜片中心位移与压力之间的关系和膜片直径、厚度、材料、波纹形状、深度及数目有关。波纹膜用于测量较低压力和真空。差动型膜片差压计为其一例,如图 8-1 所示。这种差

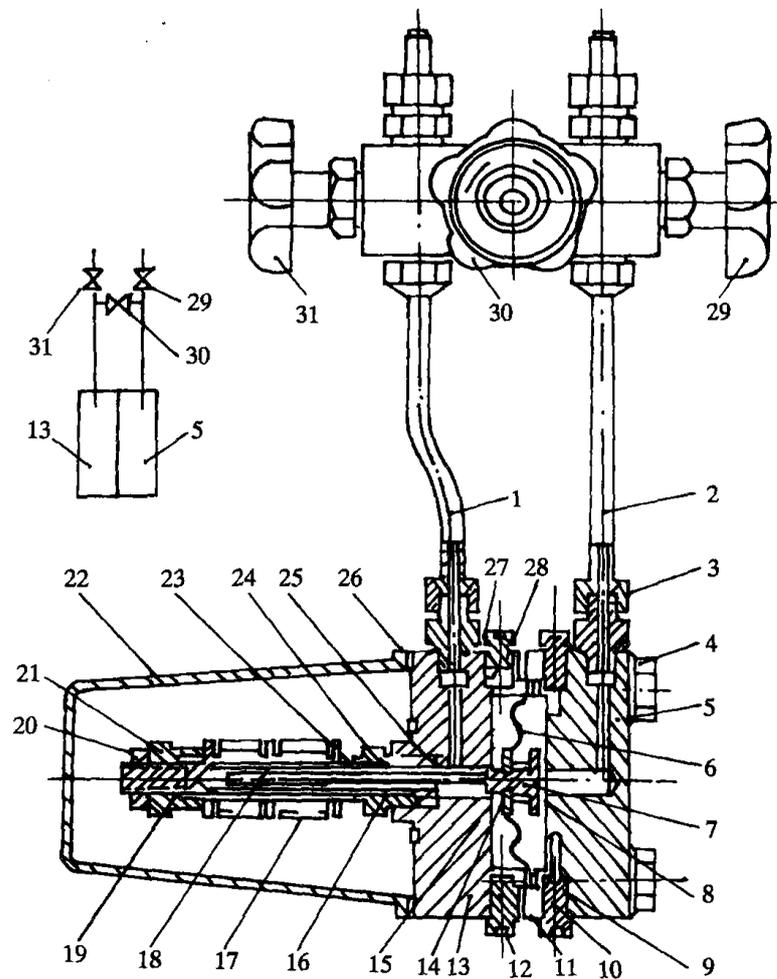


图 8-1 膜片式差压计结构

1—低压导管; 2—高压导管; 3—连接螺母; 4—螺栓; 5—高压室; 6—膜片; 7—差压室单向保护板; 8, 15—单向保护密封环; 9, 10—密封垫圈; 11, 28—滚珠; 12, 27—螺钉; 13—低压室; 14—低压室单向保护板; 16—连杆; 17—差动变压器线圈; 18—铁芯; 19—隔离套管; 20—锁紧螺母; 21—调整螺母; 22—罩壳; 23—弹簧; 24—空心螺栓; 25—密封垫圈; 26—垫片; 29—高压阀; 30—平衡阀; 31—低压阀

压计本身没有刻度,实际上是一个电感式差压变送器。当膜片在差压作用下发生位移时,膜片中心位移通过非磁性不锈钢连杆带动一个用软磁性材料制成的铁芯,使之在差动变压器线圈中移动,从而将位移信号转变为电信号输出,膜片最大允许变形量是很小的,约1mm左右。过大的差压或单向受压就会造成膜片破坏。橡胶密封环和挡板是起单向受压保护作用的,当差压过高时挡板与密封环紧贴,使测量室中的液体被封闭,阻止膜片继续变形。因此在被测介质为气体时,必须先将测量室中灌满液体(水或变压器油),并排净气泡才能起保护作用。另外,差压计测量室中液体应保持清洁,如有固体颗粒会影响密封环和挡板之间的紧贴密封,以致起不到保护作用。

有些膜盒的结构如图8-2所示。它由金属波纹膜、硬芯和基座组成。膜盒中充满硅油,当膜盒两侧受差压作用时,经硅油传压,使膜片产生位移。在单向受压时,被封闭在基座一侧的硅油还起保护膜片的作用。如在基座上加工成与膜片的波纹相同的波形,使膜片单向受压时能紧贴在基座上,亦可起保护作用。

2. 波纹管式差压计

波纹管在受压时线性输出范围较大,故在测量差压时常把较低的压力通入波纹管内部。普遍可用波纹管来测量压力,如在波纹管内加一弹簧则可测一个大气压左右的压力。最近有一种所谓“叠层式”的焊接波纹管,耐压可达 $1.372\ 93 \times 10^7 \sim 6.864\ 65 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。

双波纹管差压计就是波纹管应用的实例,其工作原理如图8-3所示。在中心基座8的左右两侧各装有波纹管2、12,波纹管两端有刚性端盖,两端盖用中心轴5刚性地连结起来成为一体。充液温度补偿波纹管3接在高压波纹管2的外侧,其内腔与2内腔有小孔相通,高、低压室波纹管之间经阻尼旁路9、阻尼环4与中心基座的环形通道连通。波纹管内充满低膨胀系数的填充液,在连结轴5的右端固定着一组量程弹簧16,量程弹簧另一端通过量程弹簧支承板固定在中心基座上。当被测差压接入高、低压测量室时,高压室波纹管被压缩,其中充填液通过环形间隙和阻尼旁路流向低压室波纹管,使其伸长。整个连接轴系统就向低压侧方向移动,并拉伸量程弹簧,直到差压在波纹管底面上形成的力与量程弹簧及波纹管的变形力相平衡为止,即

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{2K + K_1}{A} \Delta S \quad (8-3)$$

式中 K 和 A 为波纹管的刚度和有效面积; K_1 为量程弹簧总刚度; ΔS 为连结轴的位移。由此可见,改变波纹管的刚度和有效面积以及量程弹簧的刚度和数量,就能改变仪表量程。另外,调节微调量程螺母14亦能少量调整量程。

连接轴的移动通过轴上的挡板23推动摆杆24上的微形滚珠轴承,使摆杆摆动,从而扭动扭力管,然后经芯轴把扭转位移传给显示部分。在全量程范围内,波纹管最大位移约5毫米。

由于高、低压室波纹管由连接轴连为一体,总体积一定。当环境温度变化时其中填充液随温度变化而胀缩的体积,通过小孔流入充液温度补偿波纹管3,使其伸缩,这时并不影响连接

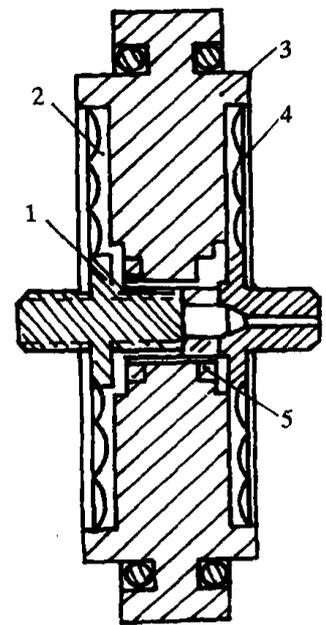


图8-2 膜合结构
1—硬芯;2—硅油
3—基座;4—膜片
5—单向保护密封环

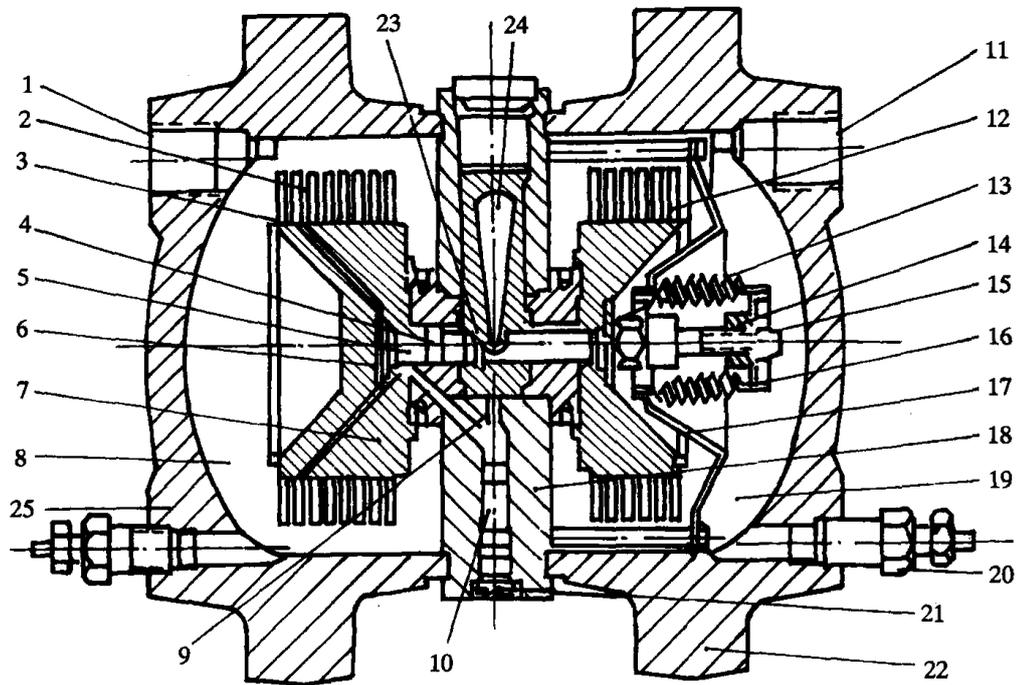


图 8-3 双波纹管差压计结构

1—高压入口;2—高压室波纹管;3—充液温度补偿波纹管;4—阻尼环;5—连接轴;6—单向保护阀;
7—填充液;8—高压测量室;9—阻尼旁路;10—阻尼阀;11—低压入口;12—低压室波纹管;
13—单向保护阀;14—微调量程螺母;15—螺杆;16—量程弹簧;17—量程弹簧支承板;18—中心基座;
19—低压测量室;20—排液(气)针阀;21—阻尼保护室;22—低压室壳体;23—挡板;24—摆杆;
25—高压室壳体

轴的位置,故不影响差压指示值。

当差压值超过测量范围,甚至单向受压时,连接轴的过分移动使轴上的单向阀 6 或 13 与中心基座上的阀座紧靠,阻止填充液的继续流动,填充液封闭于波纹管内防止波纹管继续变形而损坏,起到了单向受压保护作用。

图中阻尼阀 10 是用来改变填充液流动阻力的。关小阻尼阀,使填充液流动速度减慢,使波纹管对快速变化的脉动差压没有反应。

扭力管的作用是在保证填充液密封的情况下传出转角信号,其结构原理如图 8-4 所示。它是用 Ni42CrTi 和 Ni36TiAl 弹性合金管制成,外径 3.2mm,壁厚 0.2mm,扭力管右端固定在中心基座上,左端连接摆杆,随摆杆摆动而扭转,从而带动固定在扭力管左端底部的芯轴转动,传出转角信

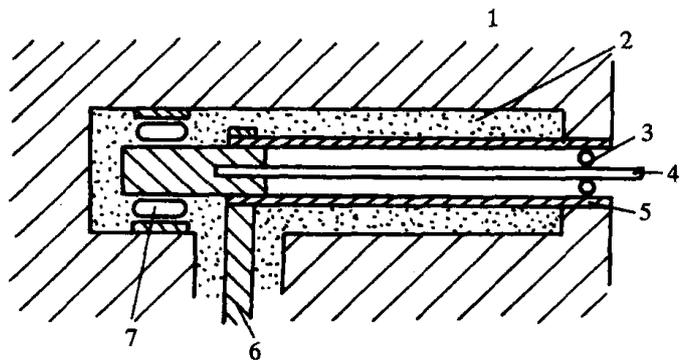


图 8-4 扭力管原理图

1—中心基座;2—填充液;3—玛瑙轴承;
4—芯轴;5—扭力管;6—摆杆;7—滚珠轴承

号。芯轴在全量程范围内输出的 $0^\circ \sim 8^\circ$ 转角通过四连杆机构和扇形齿轮机构放大的 $0^\circ \sim 270^\circ$ 指针转角,指示所测差压值。

3. 弹簧管式压力计

弹簧管式压力计可用于测量真空或 $9.80665 \times 10^4 \sim 9.80665 \times 10^8 \text{Pa}$ 的压力。它是用一根扁圆形或椭圆形截面的管子弯成圆弧形而成。管子一端封闭,另一端固定在仪表基座上,如图 8-5 所示。当固定端通入被测压力,弹簧管承受内压,截面形状趋于变成圆形,刚度增大,弯曲的弹簧管伸展,中心角 γ 变小,封闭的自由端外移。然后通过传动机构带动压力表指针转动,指示被测压力。

在一定压力下弹簧管的输出位移除决定于弹簧管的材料性质(弹性模量 E 和泊松系数 ν)、壁厚 h 、圆径 R 和截面形状等参数外,还与弹簧管的原始中心角 γ_0 成正比。所以增加弹簧管圈数,做成螺旋形多圈弹簧管可以加大其灵敏度和做功能力。多圈弹簧管常用于压力记录仪。

弹簧管所受压力与输出位移之间的关系目前只能以实验方法得到。下式为用于计算薄壁 ($h/b < 0.7 \sim 0.8$) 弹簧管的被测压力 P 与弹簧管中心角相对变化值 $\frac{\Delta\gamma}{\gamma}$ 之间关系的一个经验公式:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = P \frac{1-\nu^2}{E} \times \frac{R^2}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + x^2} \quad (8-4)$$

式中 x ——弹簧管的几何参数, $x = Rh/a^2$;

α, β ——与 a/b 比值有关的系数;

r, R ——弹簧管弯曲圆弧的内径和外径, $R = r + 2b$;

a, b ——弹簧管截面的长轴半径和短轴半径;

h ——弹簧管壁厚。

由于材料加工工艺不同等原因,经验公式与实测值通常会有较大的差别。

弹簧管自由端的位移可通过杠杆机构带动指针转动,如图 8-6 所示。这种机构的指针最大转角为 180° ,通常做成 90° 的回转角。单纯的杠杆机械抗振性能好。最常用的传动机械是杠杆-扇形齿轮机构,如图 8-7 所示。弹簧管的自由端通过拉杆 3 带动扇形齿轮 4 回转,4 又带动固有仪表指针的中

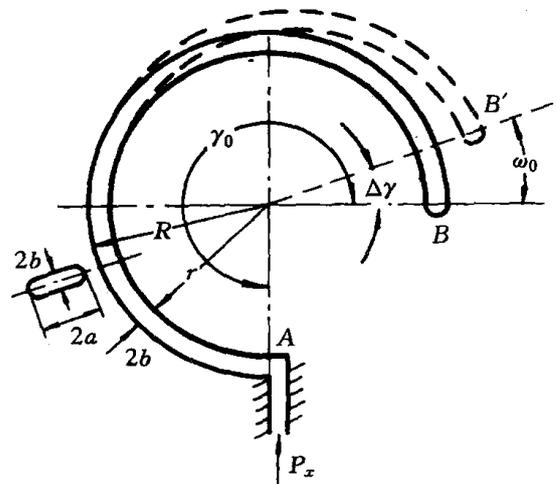


图 8-5 单圈弹簧管

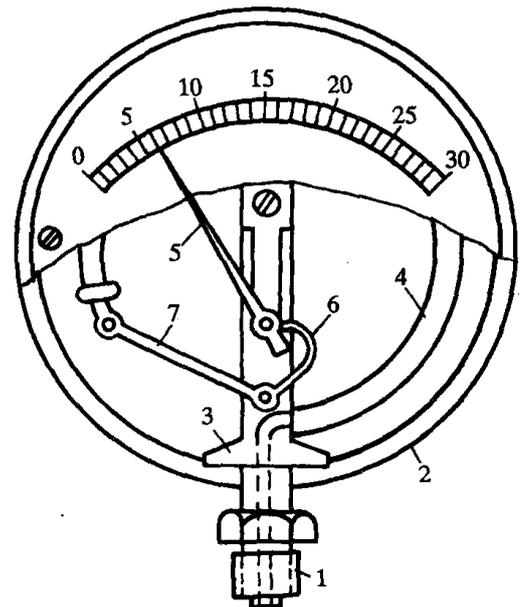


图 8-6 弹簧管压力计

1—压力计接头;2—表壳;3—基座;
4—弹簧管;5—指针;6—曲臂杠杆;7—拉杆

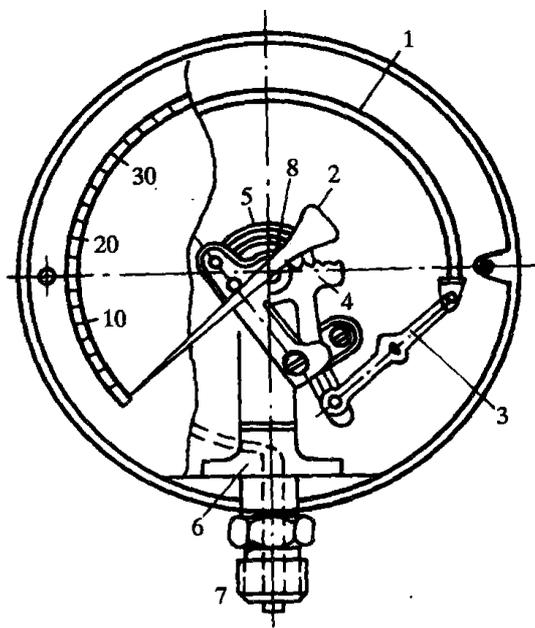


图 8-7 弹簧管压力计
1—弹簧管;2—指针;3—主动拉杆;
4—扇形齿轮;5—游丝;6—基座;
7—表接头;8—中心小齿轮

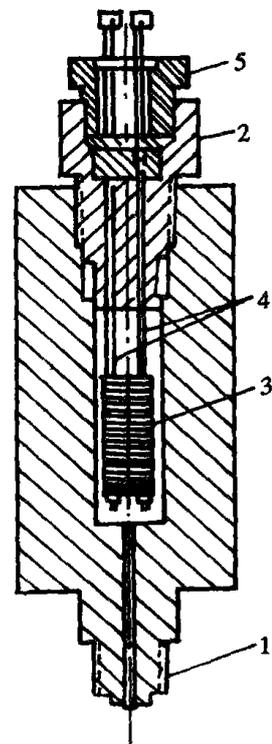


图 8-8 锰铜压阻感受件
1—压力接头;2—引线插块;
3—电阻线圈;4—引线;
5—绝缘材料压盖

心小齿轮 8 转动。游丝 5 用来消除齿隙对指示的影响。这种机构可使指针转动 $270^\circ \sim 280^\circ$ 。

8.2.2 压阻式压力(压差)检测仪表

它是利用金属受压时电阻值发生变化的现象而工作的。通常用于测量 $9.80665 \times 10^8 \text{ Pa}$ 以上的超高压。

压阻式压力计的感受件结构如图 8-8 所示。为了避免温度的影响,绕制电阻线圈的金属丝除应具有很高电阻压力系数外,还应具有很低的电阻温度系数,另外还要求电阻与压力之间具有近于线性的关系,化学性质稳定等。电阻丝材料一般采用锰铜合金丝和金铬合金丝,而以前者使用较普遍。电阻线圈应尽可能无电感和无应力,制作后要在 $130 \pm 5^\circ \text{C}$ 温度下经过 48 小时的温度老化和在最高使用压力老化处理。

在一般使用情况下,压力 P 与电阻的关系可以认为是线性的:

$$P = \frac{1}{K} \left(\frac{R_P}{R_0} - 1 \right) \quad (8-5)$$

式中电阻压力系数 K , 对于锰铜合金约为 $2.54929 \times 10^{-11} / \text{Pa}$ 对于金铬合金约为 $9.6877 \times 10^{-12} / \text{Pa}$;

R_0 ——大气压力作用下电阻线圈的阻值(Ω);

R_P ——在被测压力 P 作用下电阻线圈的阻值(Ω)。

在高精度测量中,压力和电阻的关系可作二次方程关系处理,即

$$P = \alpha(R_P - R_0) + \beta(R_P - R_0)^2 \quad (8-6)$$

式中 α 、 β ——该压阻式压力计的特性参数。

线圈阻值的测量可采用电桥法或电位计法。

8.2.3 压磁式压力(压差)仪表

它是利用铁磁材料在压力(压差)作用下会改变其磁导率的物理现象制成的,其原理结构如图 8-9 所示。密封在外壳 1 中的线圈 3 用 5~10kHz 的高频电源供电,当压力作用在底面弹性膜 2 上时,就使坡莫合金制的铁芯 4 产生机械应力,从而使其磁导率改变,引起线圈阻抗的改变。此阻抗的变化与被测压力有关,并可用不平衡电桥和示波器等测量。这种感受件可用于频率达 1 000Hz 的脉动压力测量。

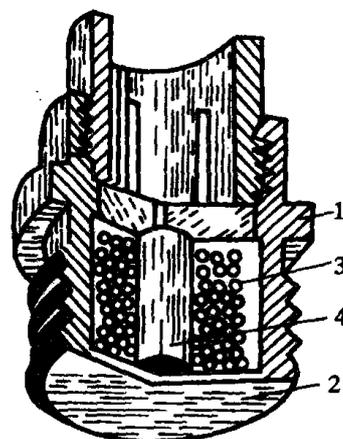


图 8-9 压磁式感受件

- 1—外壳;2—弹性膜;
3—线圈;4—铁芯

8.2.4 压电式压力(压差)仪表

其工作原理是基于晶体的压电效应:当某些晶体受到机械力作用时,其上的电荷发生分离,使晶体一个表面上带正电荷,另一表面上带负电荷。外力去除后晶体立即恢复不带电状态。当垂直于晶体电轴的面上受力,也就是说力平行于电轴作用到晶体上时,晶体的压电效应最大,称之为纵向压电效应。纵向压电效应的电荷量 Q_x 与压力 P 之间的关系为

$$Q_x = KF_x = KS_x P \quad (8-7)$$

式中 K ——晶体的压电系数,如石英的 K 为 $2.1 \times 10^{-11} \text{c/kgf}$;

F_x ——沿晶体电轴方向所受的作用力;

S_x ——垂直于电轴的加压有效面积。

所以,电荷量与压力成正比。所选用的晶体压电系数要大,性能要稳定,常用的压电材料有:天然石英晶体、钛酸钡、锆钛酸铅等。压电式感受件的结构如图 8-10 所示。

压电式压力计具有体积小、结构简单、可测频带宽、无惯性、滞后小等优点;但由于产生的电荷量微小,即使在绝缘非常好的情况下,电荷亦将在十分之几秒的瞬间消失,故它只适用于脉动压力测量。电荷漏损的大小取决于压电晶体的体导电性和面导电性、连结导线的绝缘性能以及二次仪表的输入阻抗。由于晶体本身的内阻很高,所以要求二次仪表输入阻抗很高,因此必须使用阻抗变换器或用电荷放大器与之相配。

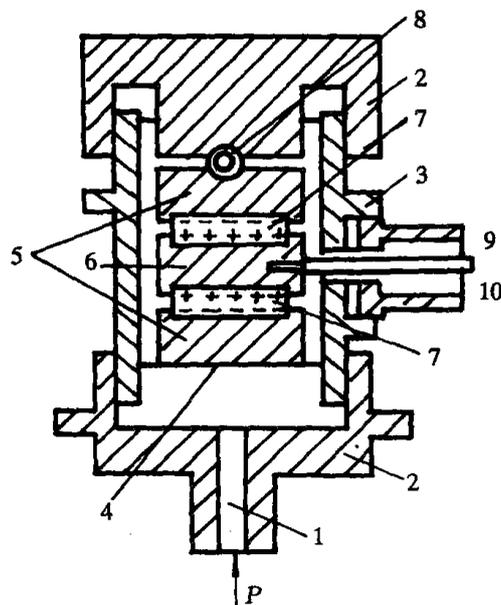


图 8-10 压电式感受件

- 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

8.3 压力和压差变送器

8.3.1 概述

压力和压差检测中通常是采用弹性式压力和压差仪表,一般是用弹性压力计作为就地显示压力仪表,因为这类仪表感受压力和压差变化得到的是机械位移量,即非电量。若未对非电量进行转换而要将取压点的压力或压差信号作远距传送,只有通过压力管路进行传输,但是对于长的传输管路来说,由于沿程压头的损失将会使得传输管末端的压力信号严重偏离原取压点的数值;同时对于测量可压缩性流体的压力时,被测介质在管道流动中,会产生压力信号传输的迟延与压力反射等问题,这也会造成管路末端信号的严重失真;若被测的是易燃的或腐蚀性的或带放射性的流体,则又增加了管路传输的危险性,若被测的是蒸汽尚需对传输管路进行保温等等。如此诸多不便,因此,要对压力和压差信号进行远距离传送的最好最有效的方法是采用电变送的方法。所谓电变送方法就是通过电气位移变换器将压力和压差产生的弹性元件机械位移量转换成某种电气量,然后加以传送。电变送方法有电容式、电感式、力平衡式、波纹管式、膜片式、压阻式、霍尔式等。这里仅介绍其中的几种。

8.3.2 几种压力和压差变送器

1. 电感式压力(压差)变送器

这种变送器是利用弹性元件受压力作用后所产生的位移来改变磁路中空气隙大小,或改变铁芯与线圈之间的相对位置,使线圈的电感量发生改变,从而使压力变化的信号转换成线圈电感量变化的信号。根据这种原理构成的压力(压差)变送器形式很多,其中以差动变压器式应用最为广泛,其结构如图 8-11 所示。线圈的骨架分成长度相等的两段,先把初级线圈均匀密绕在两段骨架上,并将两段线圈头尾串联相接。然后在两段初级线圈外面绕次级线圈,并将两段次级线圈头尾对接。导磁材料制成的铁芯由弹性元件带动在线圈中移动,可改变初级线圈与上、下两段次级线圈的耦合情况。当铁芯处于线圈中间位置时,由于初级线圈与上、下两段次级线圈的耦合情况相同,两段次级线圈中的感应电势 e_1 和 e_2 大小相等。又由于次级线

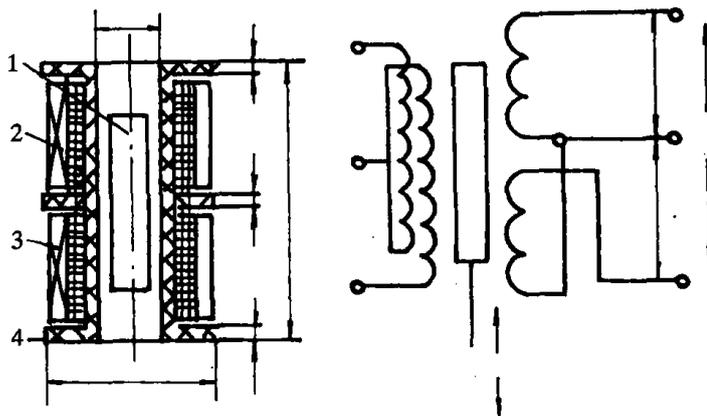


图 8-11 差动变压器结构

1—铁芯;2—初级线圈;3—次级线圈;4—骨架

圈是反相串联,故 e_1 与 e_2 相位相反,因此,这时总的输出电势为零。当铁芯偏离中间位置时,输出一交流电势 u ,其大小取决于铁芯位置偏离中间位置的距离大小,而其相位取决于铁芯处于中间位置以上还是以下,因此也决定了与初级线圈输入电势是同相还是反相。实验证明铁芯在一定距离内的内移与输出电势大小的关系基本上是线性的。此外,输出电势的大小还与差动线圈的匝数等结构参数有关,并随通过初级线圈的电流和供电频率的增加而增加。但是,供电电流将受线圈发热所限制。特别是在低频恒压供电情况下,初级线圈发热所引起的电阻值变化会造成流过初级线圈的电流变化,使输出漂移。所以,初级线圈以采用恒流供电较为有利。

供电频率 $200 \sim 8\,000\text{Hz}$ 时,由于铁芯等处有涡流损失,过高的频率反而会使变送器灵敏度下降。在测量波动压力时,所选频率至少要比压力波动的最高频率高 10 倍。

实际上在两段次级线圈结构非常对称的情况下,铁芯处于中间位置时的输出也不正好为零,这是由于谐波分量的存在,而谐波的平衡状态与基波的不同;另外,也由于两线圈电容不同,使感应电势产生相移,以至使两段次级线圈输出感应电势的相位差不是正好 180° 。在使用中这种残存电势应加以限制,一般不应超过最大输出电势的 0.5% 。

测量差动变压器输出电势的二次仪表一般有毫伏计和自动平衡电子差动仪两种,分别简述如下:

以毫伏计作为二次仪表的线路如图 8-12 所示,它由振荡电源、差动变压器和相敏整流等三个部分组成。

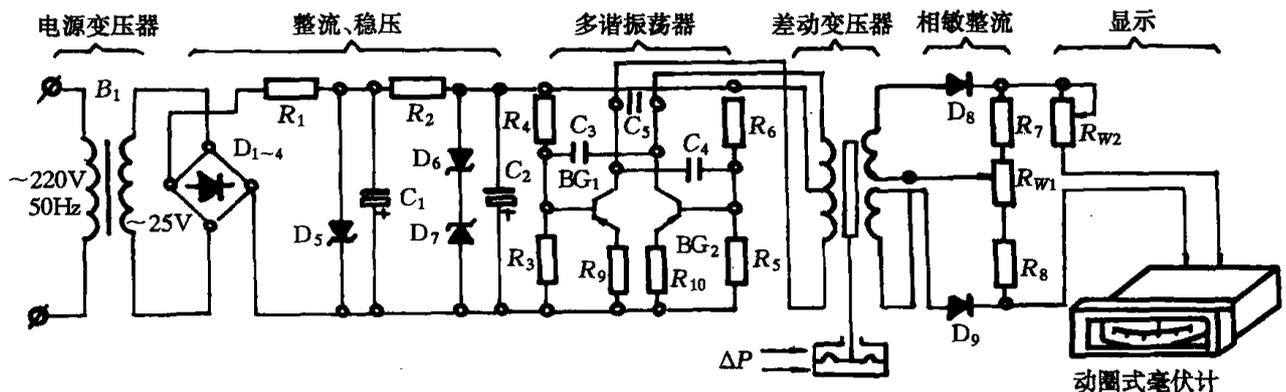


图 8-12 电感式差压变送器配毫伏计线路原理图

为使输出信号不受 220 伏交流电源电压波动的影响,仪表采用内部振荡电源给差动变压器初级线圈供电。交流电源经电源变压器降压,二极管桥式整流和稳压管稳压后得到约 8 伏左右的稳定直流电压,作为多谐振荡器的电源。为了获得较好的温度补偿效果,在第二级稳压电路中采用了两个相同型号的稳压管反接。多谐振荡器由两个 3AX81 三极管组成,差动变压器的两个初级线圈分别作为该两个三极管的负载。振荡器可供给差动变压器初级线圈约 8V, 1Hz 稳定的高频激励电压。谐振电容 C_5 用于滤去大于 1 000 Hz 基波的谐波分量。

相敏整流电路由二极管 D_8 、 D_9 , 电阻 R_7 、 R_8 , 电位器 R_{W1} 组成。 R_{W1} 是用来平衡 R_7 、 R_8 两个电阻的阻值和修正差动差压器残存电势的,即调节仪表的电气零点。二极管 D_8 、 D_9 分别对差动变压器两个次级线圈的输出进行整流,因此在负载电阻 R_7 、 R_8 上可得到两个极性相反的直流电压,这两个电压的差值反映了铁芯位置,并作为差动变压器的输出信号输送到二次仪

表毫伏计。电位器 R_{W2} 用于仪表量程调节。

CPC-B 型差动仪是差动变压器和自动平衡电子差动仪配套使用的实例,其电路原理图示于图 8-13。电子差动仪中也有一个差动变压器,其结构、参数与变送器中的相同,称为工作差动变压器。它的次级线圈与变送器中的发讯差动变压器的次级线圈反相串联,使两个差动变压器输出之差送入电子放大器,经放大后输出 $0\sim 20\text{mA}$ 直流电流,将该电流输送至力矩马达控制绕组使转子产生正转或反转,力矩马达经机械传动机构带动指针移动并带动工作差动变压器中的从动铁芯向上或向下移动,直到两铁芯在两差动变压器的位置相对应为止,此时输入放大器的差动信号为零,放大器输出电流亦为零,力矩马达停止转动,指针指在与发讯差动变压器铁芯位置相对应的刻度上即显示了被测压力或压差值。

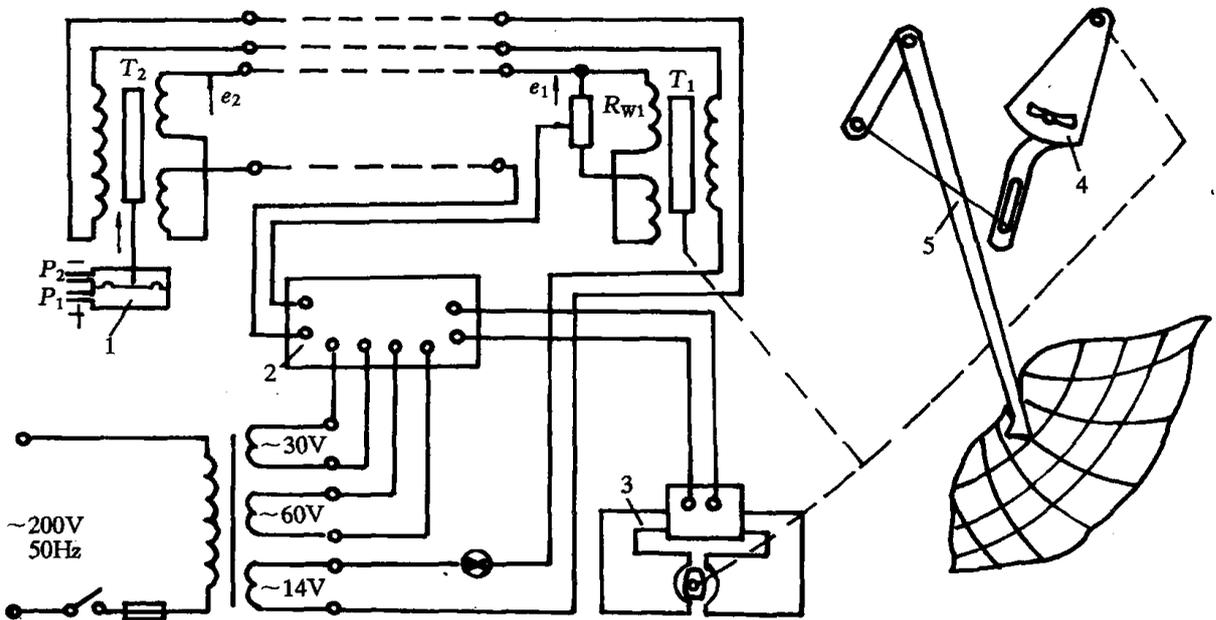


图 8-13 自动平衡电子差动仪电路原理

1—差压计;2—晶体管放大器;3—力矩马达;4—传动杠杆系统;5—记录笔;
 R_{W1} —量程调整电位器; T_1 —工作差动变压器; T_2 —发讯差动变压器

用来放大差动信号的晶体管放大器如图 8-14 所示。 50Hz 的差动信号电压经隔离变压器输至由 $BG_{1\sim 4}$ 组成的 4 级直接耦合电压放大级。为稳定工作点,在第 3 级和第 1 级之间引入深度直流和交流负反馈,调节 R_{W2} 可改变交流负反馈量,以改变放大器的放大倍率,即实现仪表的灵敏度调节。

由 R_{10} 和 C_7 组成的移相环节是用于对电压放大级的输出信号进行相位校正,以使放大后的信号电压的相位最后能与相敏整流功放级的激励电压的相位相适应,从而可以获得最大的功率输出。 BG_5 等所组成的射极跟随器用于获得较大的输出电流来推动功放级。

信号的功率放大是通过由 BG_6 和 4 只二极管 $D_{4\sim 7}$ 组成的半波相敏整流电路来进行的。由电源变压器供给这 1 级 50Hz 、 30V 的激励电压,并把力矩马达的直流控制绕组 M 串接于这个交流供电回路中。当输入差动信号为零时, BG_6 基极无交流信号, BG_6 的基极上将出现交流信号,在信号正半周时 BG_6 导通,从而沟通了相敏整流电路,使控制绕组 M 中有电流通过,而

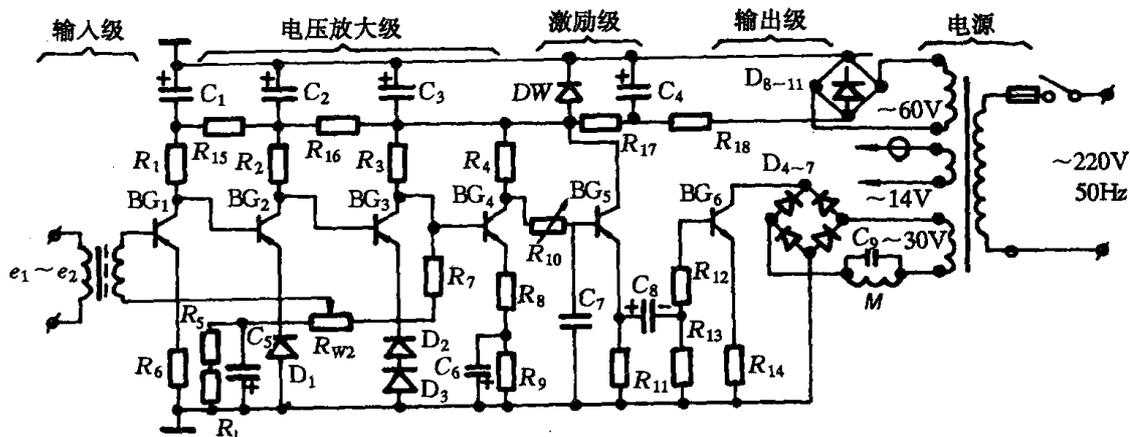


图 8-14 CPC-B 型差动仪的晶体管放大电路

在信号负半周时 BG_6 截止, M 中无电流流过。交流信号相位与所供给的激励电压相位是相同还是相反, 决定了通过力矩马达控制绕组 M 的直流电流的流动方向, 也就是决定了力矩马达是正转还是反转。

力矩马达是一种直流可逆电机, 它的转子为一永久磁铁, 定子的轭铁上绕有控制绕组 M , 当控制绕组中通过直流时, 在轭铁上就形成一对 N 、 S 极, 它与转子永久磁铁的 N 、 S 极相斥还是相吸, 决定于流经控制绕组的电流方向, 即决定于轭铁上形成的极性位置。因此, 随着通过控制绕组的电流方向不同, 马达改变转动方向。当转子转到它的磁极与轭铁上的磁极对齐时, 转子输出力矩为零, 这时马达进入“死区”。因此力矩马达内部有两个用来限位的制动件, 限制转子只能在大约 120° 转角范围内正反转。

2. 霍尔压力(压差)变送器

霍尔压力(压差)变送器是利用霍尔效应把压力作用下所产生的弹性元件位移转换成电势输出的变送器。把半导体单晶薄片置于磁场 B 中, 如在它的两个纵向端面上通以一定大小的控制电流 I , 则在晶体的两个横向端面之间出现电势 U_H , 如图 8-15 所示, 这种现象称霍尔效应, 所产生的电势 U_H 称霍尔电势。上述的单晶片称作霍尔元件或霍尔片。

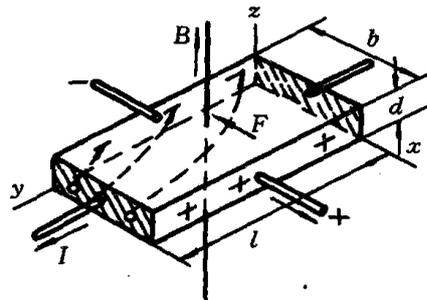


图 8-15 霍尔效应

I —电流; B —磁场; F —磁力

霍尔电势的产生是由于在半导体片中流过控制电流 I 时, 电子受磁场力(方向可由左手定则确定)的作用, 其运动方向(与电流方向相反)发生偏转, 因此在半导体片的一个横端面上造成电子累积而形成负的表面电荷, 在另一横端面上缺少电子而显示出正极性, 于是在两个横端面之间形成了一个电场。由于电场的建立, 产生了电场力, 并阻止电子的偏转。当磁场力与电场力相平衡时, 电子累积亦达到了动平衡状态, 这时建立了稳定的霍尔电势。显然, 控制电流 I 愈大, 磁场愈强, 则偏转的电子愈多, 霍尔电势愈大。可用下式表示它们之间的关系:

$$V_H = K_H IB \quad (8-8)$$

式中 K_H ——霍尔元件的灵敏度,它和元件材料、尺寸等有关。

$$K_H = R_H/d \quad (8-9)$$

式中 R_H ——霍尔系数;

d ——霍尔片厚度。

$$R_H = \rho\mu \quad (8-10)$$

式中 ρ ——霍尔元件材料的电阻率;

μ ——材料的载流子迁移率。

当用稳压电源供电时,供电电压 U 一定,则霍尔电势 V_H 和磁感应强度 B 及供电电压 U 的关系为

$$V_H = \mu \frac{b}{l} UB \quad (8-11)$$

式中 l, b ——霍尔元件的长度与宽度。

由式(8-8)、式(8-11)可见,对于一定的霍尔元件,在供电电压或电流一定时,霍尔电势与霍尔片所处的磁感应强度 B 成正比。

图 8-16 为霍尔效应压力变送器的结构示意图。磁极极靴之间的磁感应强度和位置成线性关系,如图 8-17 所示。固定在弹性元件上的霍尔片放置在 $-\frac{1}{2}y_0$ 到 $+\frac{1}{2}y_0$ 之间磁感应强度 B 具有均匀梯度的磁场内,霍尔片与磁力线垂直。当霍尔片处于极靴间隙的正中位置时,霍尔片两半边所处的磁场方向相反,大小相等,总的霍尔电势输出为零。当霍尔片由弹性元件带动偏离正中位置时,由于两半边所处的磁感应强度不同,霍尔片就有正比于位移的霍尔电势输出。当弹性元件的位移(即霍尔片位移)与被测压力成正比时,变送器输出电势则与被测压力成正比。

由于霍尔元件的灵敏度 K_H 值受温度影响较大,因此变送器的霍尔电势输出还受环境温度的影响。在实际使用中应对霍尔元件进行恒温或采用其它温度补偿措施。例如,在霍尔电势输出回路上串联一温度补偿电桥,此电桥的一臂为铜电阻,其余臂为锰铜电阻,利用铜电阻阻值随环境温度变化造成电桥不平衡输出的变化来补偿环境温度变化对霍尔电势的影响。

另外,还应注意减少由于霍尔片上两霍尔电势输出电极的不对称焊接引起的不等位电势,以及由于霍尔元件各处的电阻率、厚度、材料性质等不均匀引起的不等位电势,以免对测量造成的误差。因为不等位电势的存在,使得即使霍尔元件处于正中平衡位置,其电势输出亦不为零。

霍尔元件作为一种磁电转换元件也可用来测量磁场的磁感应强度,以及把其它和位移、转速等有关的物理量转换为电量。目前已生产霍尔集成电路,它把霍尔元件、电源部分、输出信号放大和处理等线路都集成在同一单晶片上,实现了变送器的小型化。

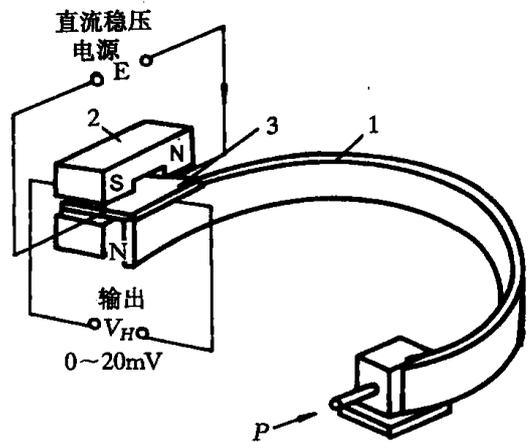


图 8-16 霍尔效应压力变送器结构
1—弹簧管;2—磁钢;3—霍尔片

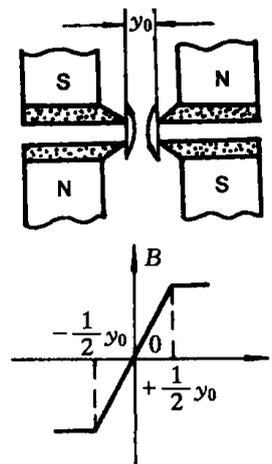


图 8-17 极靴间磁感应强度的分布情况

3. 力平衡式压力(压差)变送器

力平衡式压力(压差)变送器的基本原理是先用压敏元件将压力(压差)变换为集中力,然后与补偿力相比较,当有偏差时,就发出一个电信号(电流或电压)通过电子放大器、传动机构、反馈力发生器等部件,产生一个反馈力,与待测压力变换的集中力相平衡,此时电信号的大小与待测压力成比例,这样就可用电信号的大小来表示待测压力的数值。其工作原理如图 8-18 所示。被测压力 P (或压差 ΔP) 经波纹管转换为力 F_1 ; 作用于杠杆左端 A 点,使杠杆绕支点 O 作逆时针旋转,但稍一偏转,位于杠杆右端的位移检测元件便有感觉,使电子放大器产生一定的输出电流 I_0 , 此电流流过反馈线圈和变送器的负载,并与永久磁钢产生一定的电磁力,使杠杆 B 点受到一个反馈力 F_2 , 形成一个使杠杆作顺时针转动的反力矩。由于位移检测放大器极其灵敏,杠杆实际上只要产生极微小的位移,放大器便有足够的输出电流形成压力矩与作用力矩相平衡。当杠杆处于平衡状态时,输出电流 I_0 (或电压 U_0) 正比于被测压力 P_0 (压差 ΔP)。

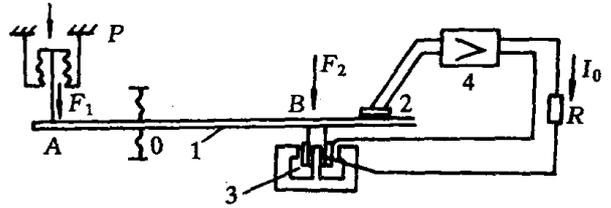


图 8-18 力平衡式压力(压差)变送器原理图

4. 应变式压力(压差)变送器

物体受压后会产生应力和产生弹性变形,在弹性限度之内,应力与变形率(即应变)成比例,因而可以通过测量物体应变来求得物体所受的压力(压差)。应变式压力(压差)变送器就是通过测量胶合在弹性元件上,或者与弹性元件制成一体的应变电阻的阻值大小变化来测量受压弹性元件的应变,从而测得弹性元件所感受的压力(压差)。

(1) 应变效应和压阻效应

弹性元件的应变转换为电阻值的大小是由金属或半导体材料制成的电阻体(即应变片)来完成的。常用的金属应变片有金属丝式、箔式,半导体应变片有体式、薄膜式和扩散式。前者的工作原理是基于金属丝的应变效应,后者是基于半导体的压阻效应。

一段长为 L , 截面积为 A 的圆形电阻丝, 它的电阻值 R 为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (8-12)$$

式中 ρ ——材料的电阻率。

对上式取对数并微分后

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (8-13)$$

上式表明,电阻的阻值变化是电阻长度、截面的几何应变效应和材料电阻率变化的综合结果。

从力学可知,轴的纵向应变与横向应变的关系为

$$\frac{dD}{D} = -\mu \frac{dL}{L} \quad (8-14)$$

式中 D ——电阻丝的直径;

μ ——材料的泊松系数。

考虑到 $\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D}$, 因此可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L}(1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} = \epsilon(1 + 2\mu) + \frac{dP}{\rho} \quad (8-15)$$

式中 ϵ ——电阻的纵向应变 $\epsilon = \frac{dL}{L}$

因而
$$K = \frac{dR}{R} / \epsilon = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} / \epsilon \quad (8-16)$$

式中 K ——应变片的纵向灵敏度(即单位纵向应变所引起的电阻变化率)。

对于金属材料来说,上式中后面一项压阻效应很小,电阻变化主要是由于几何应变效应引起的,即 $K \approx 1 + 2\mu$ 。对于大多数金属材料 $\mu = 0.3$ 左右,所以金属应变片的灵敏度 K 值很小,只有 2 左右。对于半导体来说,由于压阻效应很大(约 60~170 左右),几何应变效应可以忽略,因此 $K \approx \frac{dP}{\rho} / \epsilon$, 称为半导体的压阻效应。

半导体的电阻率 ρ 与晶体中的载流子数目 N_i 和其平均迁移率 μ_{ar} 的乘积成正比,可以表示为

$$\rho = \frac{1}{eN_i\mu_{ar}} \quad (8-17)$$

式中 e ——电子电荷量。

半导体受应力作用后载流子数目和平均迁移率都有变化,变化的大小与符号取决于所用的半导体材料、载流子浓度、晶格上应力作用的方向。对于简单的纵向拉伸和压缩,半导体电阻率变化与应力 σ 的关系为

$$\frac{dP}{\rho} = \alpha_L \sigma \quad (8-18)$$

式中 α_L ——半导体材料的纵向压阻系数。

因此,半导体应变片的纵向灵敏度 K 为

$$K = \frac{dR}{R} / \epsilon = (1 + 2\mu) + \frac{dP}{\rho} / \epsilon \approx \frac{dP}{\rho} / \epsilon = \frac{\alpha_L \sigma}{\epsilon} = \alpha_L E \quad (8-19)$$

式中 E ——半导体材料的弹性模量, $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, 即为应力与应变之比。

所以,半导体应变片的灵敏度 K 与其压阻系数 α_L 一样与半导体材料、渗杂浓度、扩散层厚度、应力相对于晶轴的取向等因素都有关系。例如:渗杂浓度愈低,则压阻灵敏度愈高,但温度对灵敏度的影响也愈大,故制造中可适当选择渗杂浓度来满足灵敏度和温度稳定性两方面的要求。

半导体应变片体积小,灵敏度高,但灵敏度受温度影响较大,使用时要采取温度补偿措施。另外,应变片之间的互换性差,需要个别分度。

(2) 应变式压力(压差)变送器的组成

应变式压力(压差)变送器主要由感压弹性元件,应变片和测量线路三部分组成。也可将感压弹性元件及应变片结合在一起,如用硅片作感压弹性元件,其上扩散电阻元件。其结构主要有膜片式、筒式和组合式三种型式。

① 膜片式:以金属或半导体材料的膜片作弹性元件,当膜片一侧均匀承受压力时,周界固定的膜片发生弯曲变形,在具有电阻元件的另一侧上,半径方向发生应变 ϵ_r , 切线方向发生应

变 ϵ_t , 如图 8-19 所示。

$$\epsilon_r = \frac{3P}{8h^2E}(1 - \mu^2)(r^2 - 3x^2) \quad (8-20)$$

$$\epsilon_t = \frac{3P}{8h^2E}(1 - \mu^2)(r^2 - x^2) \quad (8-21)$$

式中 P ——压力(压差);
 E ——材料的弹性模量;
 μ ——材料的泊松系数;
 h ——膜片厚度, cm;
 r ——膜片有效半径, cm;
 x ——膜片中心到应变计算点的距离, cm。

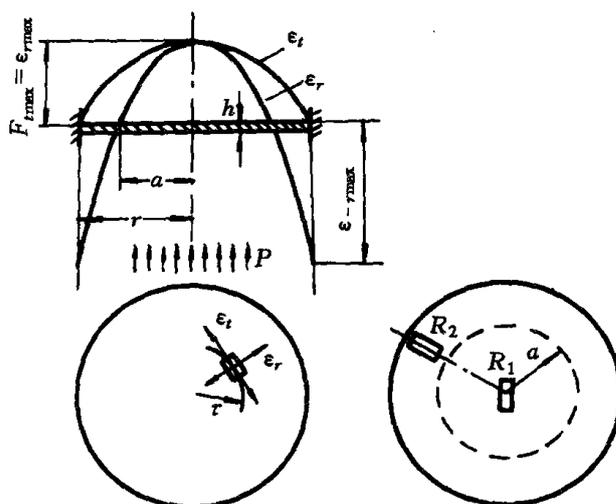


图 8-19 受压膜片的应力分布

在 $x = a = r/\sqrt{3} = 0.58r$ 处, $\epsilon_r = 0$, 径向应变在此圆周处变号, $x > a$ 处为负应变压, $x < a$ 处为正应变压。如将一片应变片贴于正应变压, 另一片贴于负应变压, 如图 8-19 中 R_1 和 R_2 , 两应变片安排成测量电桥的相邻臂, 可以获得较大的输出, 而且有温度补偿作用。

图 8-20 为一用光刻技术制成的箔式金属应变片, 应变电阻分布于整个膜片上, 能充分利用膜的应变, 它的外缘辐射状电阻是用于感受负的径向应变 ϵ_r , 中间圆弧状部分电阻是感受此处较大的正切向应变 ϵ_t , 电阻分为 4 部分, 接成全桥式, 可获得更大的信号输出。

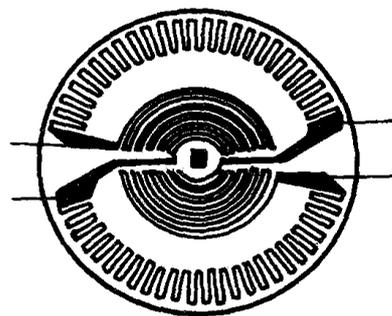


图 8-20 箔式应变片

有的应变片是用单晶硅膜片作为感压压阻膜片的, 它在变送器中既是弹性元件, 又是压阻元件。有的应变片还在硅基底片上集成温度补偿电路的二级运算放大器等。被测介质可直接作用到硅膜片上, 亦可通过刚性较低金属膜片和密封的硅油将压力传递到硅膜片上, 以避免硅片与被测介质的直接接触。

由于单晶硅在 500°C 以下没有弹性滞后、漂移和蠕变, 因此电阻与应变之间有较好的线性关系。另外, 还具有压阻系数高, 动态响应快, 体积小等优点。目前已有用硅膜片制成各种测量范围的固体压力传感器, 其准确度可达 $\pm 0.1\% \sim 0.2\%$ 。

② 筒式: 用一薄壁圆筒作为测压弹性元件, 应变片贴于筒体外壁, 在圆筒端部上还贴有不感受应变的温度补偿电阻片, 如图 8-21 所示。筒内腔与被测压力相连。对于壁厚为 S , 而 S 相对于筒内径 D 为很小的薄壁筒, 筒外壁沿圆周方向的切向应力 ϵ_t 为

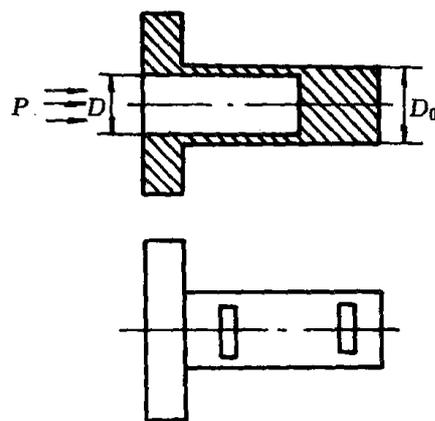


图 8-21 筒式应变压力(压差)传感器

$$\epsilon_t = \frac{PD}{2SE} \left(1 - \frac{1}{2}\mu\right) \quad (8-22)$$

式中 P ——被测压力(压差);
 μ ——筒材料的泊松系数;
 E ——筒材料的弹性模量;
 D ——筒的内径。

筒式弹性元件可测压力(压差)上限较高。选用不同的筒直径和不同弹性模量 E 值的筒材料,可适合于不同的压力测量范围。

③ 组合式:有些应变式压力(压差)变送器的应变片不是直接贴于弹性元件上而是贴在悬臂梁上,然后通过传力杆将感压弹性元件所得到的集中力传递到该悬臂梁上,如图 8-22 所示。

悬臂梁两边贴有应变片,分别感受拉应变和压应变,并作为测量电桥的相邻两臂。悬臂梁的刚度应高于感压弹性元件的刚度,使弹性元件输出为压力(压差),而位移很小,以减小弹性元件的非线性影响。但每种测量系统自振频率低,不适合用来测量高频脉动压力(压差)。如用一薄壁圆筒代替悬臂梁,可增加刚度和测量系统的自振频率,并可实现强制冷却。它一般可用来测量内燃机的燃烧压力,其结构如图 8-23 所示。在圆筒上沿轴向和沿圆周方向各贴一应变片,感受由于被测压力作用于不锈钢膜片而使应变圆筒产生的轴向压缩和圆周方向的拉伸应变。将选两个应变片电阻作为电桥的两个相邻臂。

(3) 应变式压力(压差)变送器的测量线路

应变式压力(压差)变送器的应变片的电阻变化一般经桥式线路转换成电压输出,然后直接测量或者经过放大后测量,亦可转换为统一的直流输出信号。如图 8-24 为一硅固体压力(压差)变送器测量线路原理图。

图中 R_A 、 R_B 、 R_C 、 R_D 为 4 个半导体压阻敏感电阻, R_f 是负反馈电阻,用以稳定整机工作。电桥以 1mA 恒流源供电,整机输出为 4~20mA 的统一信号。

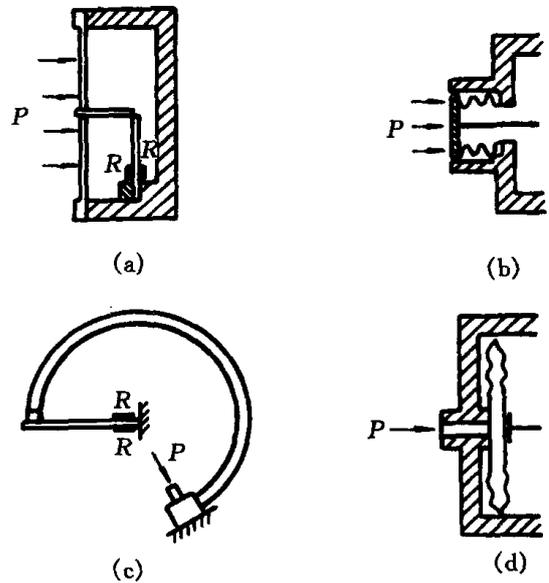


图 8-22 组合式应变压力(压差)传感器

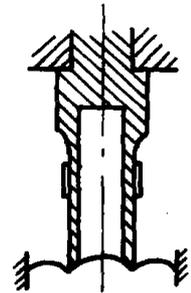


图 8-23 膜片—圆筒式应变压力(压差)传感器

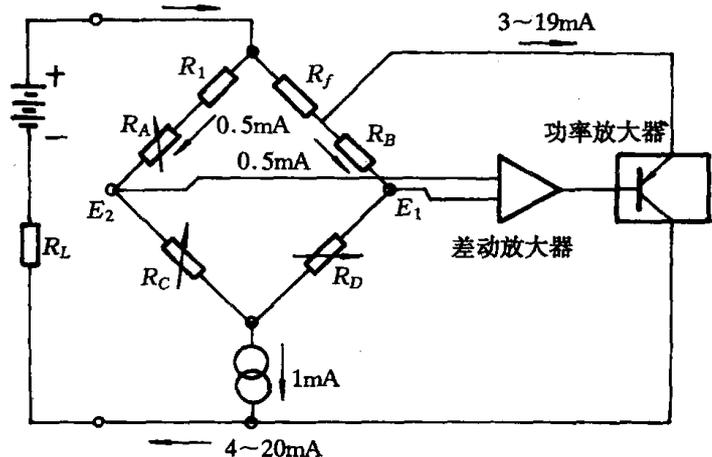


图 8-24 固体压力(压差)变送器测量线路原理图

第 9 章 流量检测仪表

在反应堆和核电厂中,流体(例如给水和蒸汽及冷却剂等)的流量直接反映出设备的效率、负荷高低等运行工况,因此连续监视流体的流量对于反应堆和核电厂安全而经济地运行都有重要的意义。

对于核电厂常规岛来说,流量检测仪表原理和一般火力发电厂的流量检测仪表相似,对其核岛部分来说,检测其流量有它的特殊性,在许多早期的反应堆中,应用安装在反应堆壳体外的压力敏感元件来检测反应堆堆芯流量,效果不好,以后发明了适合于安装在燃料组件中的涡轮流量计,并且早在 1960 年就开始成功地用于沸水堆中,随后在水冷反应堆堆芯的应用说明了此流量计的效果是好的。现在已有其它类型的流量检测仪表。

流体流量就是单位时间内流过的流体的量,称为瞬时流量。在某一段时间间隔内流过的流体的量称为流体的总量。显然,流体的总量可以用在该段时间内瞬时流量对时间的积分得到,所以总量又称为积分流量或累计流量。总量除以得到总量的时间间隔就称为该段时间内的平均流量。

流量可以用单位时间内流过的质量($q_m = dm/dt, \text{kg/s}$)表示,称为质量流量,也可以用单位时间内流过的流体容积($q_v = dV/dt, \text{m}^3/\text{s}$)表示,称为容积流量或体积流量。

显然,上述流量表示式中: m 为流体质量; V 为流体体积; t 为时间。

$$q_m = \rho q_v \quad (9-1)$$

式中: ρ 为流体的密度,随流体的状态而变。

9.1 流量检测仪表的种类

流量检测仪表种类较多,对于反应堆来说用得较多的是涡轮流量计、差压式流量计、电磁流量计,也有的国家考虑应用涡流流量计、热流量计和超声波流量计。

工业上常用的流量检测仪表种类很多,按照其检测原理来分类,大致有 4 类:

1. 差压式流量检测仪表。主要利用管内流体通过节流装置时,其流量与节流装置前后的压差有一定的关系。属于这类流量检测仪表的有标准节流装置、转子流量检测仪表和弯管流量计等。

2. 速度式流量检测仪表。主要利用管内流体的速度来推动叶轮旋转,叶轮的转速和流体的流速成正比。属于这类流量检测仪表的有涡轮流量计、超声波流量计等。

3. 容积式流量检测仪表。主要利用流体连续通过一定容积之后进行流量累计的原理。属于这类流量检测仪表的有椭圆齿轮流量计和腰轮流量计。

4. 其它类型流量检测仪表。如基于电磁感应原理的电磁流量计、涡街流量计等。

各类流量检测仪表的主要优缺点和应用场合及性能见表 9-1。

表 9-1 各类流量检测仪器的优缺点和应用场合及性能比较表

仪表类型	技术参数												
	被测介质	口径、管径 (mm)	流量范围 (m ³ /h)	工作压力 (Pa)	工作温度 (°C)	精度 (%)	最低雷诺数或粘度界限	量程比	压力损失 (Pa)	安装要求	体积重量	价格	使用寿命
节流装置	孔板 喷嘴 文丘里管	500~100	1.5~9 000 1.0~100 000	1.96×10 ⁷	500	±1~2	75×10 ³ ~ 8×10 ⁵	3:1	<1.96×10 ⁴	需装直管段	小	低	
		50~400	5~2 500 50~2 600	1.96×10 ⁷	500	±1~2	>2×10 ⁴	3:1	<1.96×10 ⁴	需装直管段	中等	较低	
		150~400	30~1 800 240~8 000	2.25×10 ⁶	500	±1~2	>8×10 ⁴	3:1	<4.90×10 ³	需装直管段	重	中等	长
转子流量计	波纹管转子流量计 金属管转子流量计	4~100	0.01~40 0.016~1 000	1.97×10 ⁶	120	±1~2.5	>10 000	10:1	9.81×10~ 6.86×10 ³	需垂直管安装	轻	低	中等
		15~150	0.012~100 0.4~3 000	6.27×10 ⁶	150	±2	>100	10:1	2.94×10 ³ ~ 5.88×10 ³	需装直管段	中等	中等	长
容积式流量计	椭圆齿轮流量计 腰轮流量计	10~250	0.005~500	6.27×10 ⁶	120	±0.2~ 0.5	>500	10:1	<1.96×10 ⁴	要装过滤器	重	中等	中等
		15~30	0.4~1 000	6.27×10 ⁶	120	±0.2~ 0.5	>500	10:1	<1.96×10 ⁴	要装过滤器	重	高	中等
速度式流量计	水表 涡轮流量计	15~600	0.45~3 000	9.81×10 ⁵	40~100	±0.2	—	>10:1	<1.96×10 ⁴	水平安装	中等	较低	中等
		4~500 10~50	0.04~6 000 1.5~200	6.27×10 ⁶	120	±1~1.5	20	6:1~ 10:1	<2.45×10 ⁴	有直管段要求且装 过滤器	小	中等	较低
靶式流量计		15~200	0.8~1 400	6.27×10 ⁶	200	±1	>2 000	3:1	<2500	需装直管段	中等	较低	长
电磁流量计		6~1 200	0.1~12 500	1.97×10 ⁶	100	±1	无一定限制	10:1	极小	对直管段要求不高	大	高	长
旋涡式流量计	旋进涡流流量计 涡列流量计	50~150	10~5 000	1.97×10 ⁶	60		—	30:1~ 100:1	11 $\frac{v^2 L}{2g}$	要较短的直管段	中等	中等	长
		150~1 000	1~30	6.27×10 ⁶	150		—	30:1~ 100:1	极小	需要直管段 不准倾斜	轻	中等	长

9.2 差压流量计

差压流量计属于节流式流量仪表的一种类型,在管道中放入一定的节流元件,如孔板、喷嘴等,使流体流过这些阻挡体时,流动状态发生变化,根据流体对节流件的推力或在节流件前后形成的压差等,可以测定流量的大小。

在反应堆壳体内或堆芯流量测量中应用差压流量仪表有关的主要问题是怎样得到可靠的差压测量。在流量仪表和堆壳体外差压变送器之间必须有很长的管子,或者要有一个合适的堆芯差压变送器,以便把信号传送到读数装置,流量仪表和差压变送器之间长的管线所造成的问题包括压头差、管路中的蒸汽泡或气泡,管路中液体的沸腾和凝固,不良的时间反应特性以及由温度梯度造成的液体密度变化等,这里我们就不详细讨论。差压流量仪表在反应堆中应用还须注意到铺设管路的附带问题,即与燃料处理关系发生机械上的干扰现象以及反应堆壳体出来的连接管路地方高度完整的密封要求。

9.2.1 差压流量计的组成

差压流量计主要由三部分组成,如图 9-1 所示。

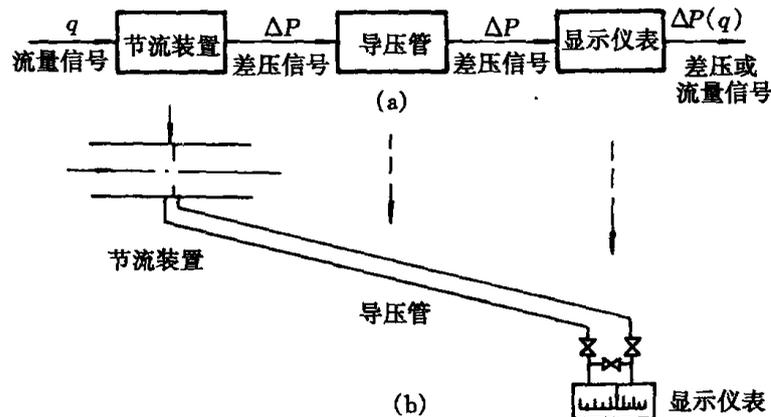


图 9-1 差压流量计示意图

(a)信号变换图;(b)仪表组成示意图

1. 节流装置:包括节流件和取压装置。其功能是将流量信号转换成差压信号;
2. 导压管:其功能是将节流装置前后的压差信号送至显示仪表;
3. 显示仪表:显示压差信号或直接显示被测流量。也可将导压管输出的差压信号经差压变送器转换成标准电信号或气压信号,再由显示仪表指示差压值或直接指示被测流量,或将变送器输出信号送到控制仪表。

9.2.2 差压流量计的工作原理

根据伯努利方程由节流元件前后的压差测量流量的仪表称为差压流量计。例如图 9-2 所示为流体流经节流装置—孔板时的节流现象。

连续流动的流体,当遇到安插在管道内的节流装置时,由于节流装置的流通截面积比管道的截面小,形成流体流通面积的突然缩小,在压头(能量)作用下流体的流速增大,挤过节流孔,形成流束收缩。在挤过节流孔之后,流速又由于流通面积的变大和流束的扩大而降低。与此同时,在节流装置前后的管壁处的流体静压力产生差异,形成压力差 ΔP , $\Delta P = P_1 - P_2$, 并且 $P_1 > P_2$, 此现象称节流现象, P_1 、 P_2 分别为孔板入口侧和出口侧流体的绝对压力。显然,节流装置的作用在于造成流束的局部收缩,从而产生压差。并且,流过的流量愈大,在节流装置前后所产生的压差也就愈大,因此可通过测量压差来测量流体的流量。

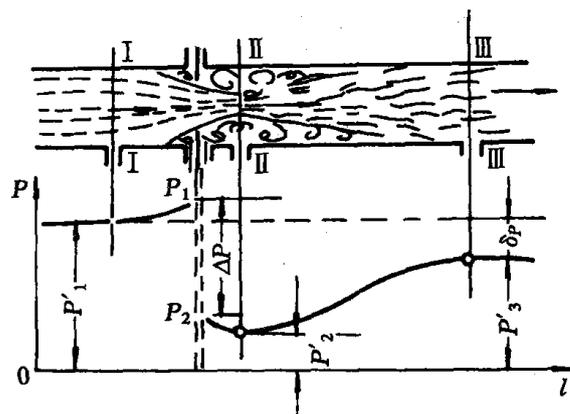


图 9-2 孔板附近流束及压力分布

实验表明,被测介质流经各种节流装置时,其流速和压力分布特性是类似的。图 9-2 是装有标准孔板的水平管道,当流体流经孔板时的流束及压力分布情况。图中管道截面 I—I、II—II、III—III 处流体的绝对压力分别为 P'_1 、 P'_2 、 P'_3 , 各截面流体的平均流速分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 (m/s)。

从图中分析可知:

1. 流速收缩:沿管道轴向连续向前流动的流体,当遇到节流装置的阻挡时,近管壁处的流体由于受到节流装置的阻挡最大,促使流体的一部分动压头转换为静压头,出现了节流装置入口端面近管壁处的流体静压 P_1 的升高(即图中 $P_1 > P'_1$) 并且比管道中心处的静压力要大,即形成节流装置入口端面处产生径向压差。这径向压差使流体产生径向附加速度 v_r , 从而改变流体原来的流向。在 v_r 的影响下,近管壁处的流体质点的流向就与管中心轴线相倾斜,形成了流束的收缩运动。同时,由于流体的惯性,使得流束收缩最小截面的位置不在节流孔中,而位于节流孔之后,并且随流量大小而变。

2. 静压差 ΔP 的产生:由于节流装置造成流束局部收缩,同时流体又是保持连续流动状态,因此在流束截面积最小处流速达到最大。根据伯努利方程式和位能、动能的相互转换原理,在流束截面积最小处的流体静压力最低。同理,在孔板出口端面处,由于流速已比原来增大,因此静压力也就比原来为低($P_2 < P'_1$)。故节流装置入口侧的静压力 P_1 比其出口侧的静压力 P_2 大,前者称为正压,常以“+”标记;后者称为负压,常以“-”标记。并且流量愈大,流束的局部收缩和位能、动能的转换愈显著,因此节流装置两端的压差 ΔP 也愈大,此即为差压流量计的原理。

9.2.3 流量基本公式和实用流量公式

1. 流量基本公式

差压流量计的流量基本公式是定量表示其压差和节流元件孔径与流量之间关系的方程式。或者说是表示流经差压流量计的流量和形成的压差之间关系的方程式。差压流量计中在节流件附近流体的流动状况及其流束和压力分布如图 9-2 所示。从图中可见,流体流经节流件后流体的流速、压力、流束都发生了变化,产生了压力损失。对于特定的节流件,在其上下游

两侧一定的位置上的压差 ΔP 显然与此刻管道中的流体平均流速 \bar{v} (或流量 q_v) 存在着一种确定的关系。即 $\Delta P = f(q_v)$ 或 $q_v = F(\Delta P)$ 。也就是说,一旦确定了节流件(又称阻力件)的形式,同时又已确定了其中的取压方式,则被测流体的流量即有了确定的关系。其确定关系可通过伯努利方程和流动连续方程推导而得到。

通过推导得到流量基本公式如下:

(1) 不可压缩流体的流量基本公式

$$q_m = \alpha \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho\Delta P} = \alpha \frac{\pi}{4} \beta^2 D^2 \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (9-2)$$

$$q_v = \alpha \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta P} = \alpha \frac{\pi}{4} \beta^2 D^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta P} \quad (9-3)$$

(2) 可压缩流体的流量基本公式

$$q_m = \alpha \cdot \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho\Delta P} = \alpha \cdot \epsilon \frac{\pi}{4} \beta^2 D^2 \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (9-4)$$

$$q_v = \alpha \cdot \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta P} = \alpha \cdot \epsilon \frac{\pi}{4} \beta^2 D^2 \sqrt{\frac{2}{\rho}\Delta P} \quad (9-5)$$

式中 d ——节流件开孔截面直径, m;
 ΔP ——节流件前后的差压值, Pa;
 α ——流量系数;
 ρ ——流体介质密度, kg/m³;
 ϵ ——流束膨胀系数, $\epsilon < 1$;
 β ——管径之比, $\beta = d/D$;
 D ——被测流体管道内径, m;
 q_m ——质量流量, kg/s;
 q_v ——体积流量, m³/s。

2. 实用流量公式

在工程上为了简化计算,在流量基本方程式中采用工程上常用单位,并将各单位换算系数和方程式中常数项归并在一起,导出实用流量方程式。

$$q_m = 0.003\ 998\ \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\rho_1 \Delta P} \quad (9-6)$$

$$q_v = 0.003\ 998\ \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\Delta P / \rho_1} \quad (9-7)$$

式中 常数项 $0.003\ 998 = \frac{\sqrt{2}\pi \times 3\ 600}{4 \times 10^6}$

q_m ——质量流量, kg/s;
 q_v ——体积流量, m³/s;
 α ——流量系数;
 ϵ ——流束膨胀系数;
 d ——节流孔开孔直径, mm;
 ΔP ——节流件前后的差压值, Pa;
 ρ_1 ——节流件前流体介质密度, kg/m³。

9.2.4 节流装置

节流装置用于测量流量的工作原理是:在管路中装有局部阻力件,即节流件,当流体经节流件时由于流束收缩,则在节流件的前后产生静压力差,利用压差进而测出流量。

1. 节流装置的类型

在节流装置测量流量的过程中,节流阻力件是关键部件。要确立装置的流量计算公式,必须考虑节流阻力件的类型、节流装置在管道中的结构形式和测量取压方式。

节流件大体上有孔板、喷咀(又分短喷咀与长径喷咀两种)、文丘利管与圆缺孔板等,如图9-3所示。

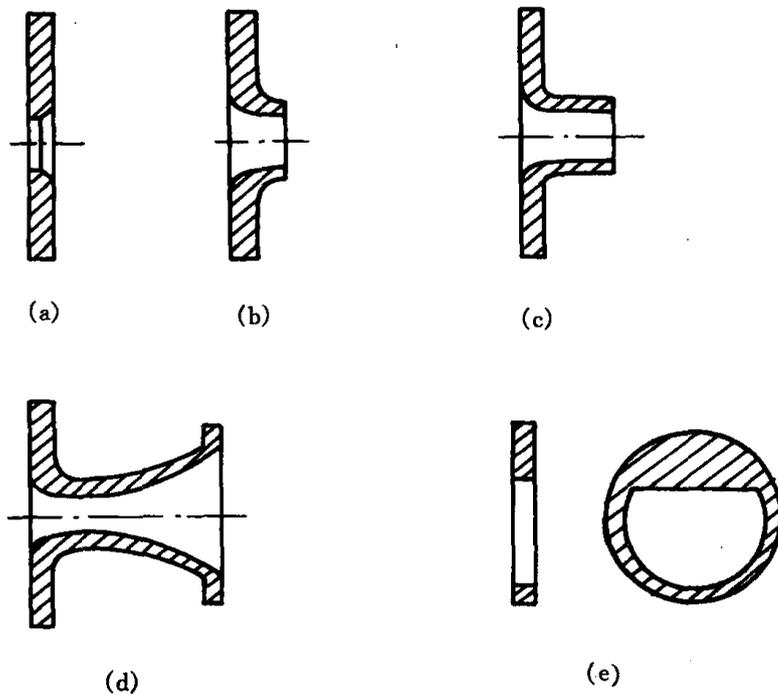


图9-3 节流件的类型

(a)孔板;(b) ISA1932 喷咀;(c)长径喷咀;(d)文丘利管;(e)圆缺孔板

(1) 孔板

图9-3(a)所示为孔板。

孔板有标准孔板和非标准孔板之分。标准孔板有如下几点技术要求:

- ① 进口圆孔应与管道同心安装,其中心线与管道中心线的偏差不得大于 $0.015D \times (1/\beta - 1)$, β 为开孔直径 d 与管道直径 D 的比值,即 $\beta = d/D$;
- ② 圆孔的进口边缘应是严格的直角,不得有毛刺与可见的反光;
- ③ 圆孔深度 e 与孔板厚度 E 不能过大,取值范围: $E = 0.02 \sim 0.05D$, $e = 0.005 \sim 0.02D$; 同时各处测量的 E , 相差不得超过 $0.665D$, 各处测量的 e 相差不得超过 $0.001D$;
- ④ 安装时孔板应与管道垂直,偏差不得超过 $\pm 1^\circ$;
- ⑤ 当 $E \leq 0.02D$ 时,孔板可不作圆锥形出口,即两个端面一致;在上下两端面的粗糙度与

边缘尖锐度完全相同的情况下,可适用于测量双向流动的流体;

⑥ 在加工孔板过程不得使用刮刀或砂布进行修刮或打磨。

(2) 喷咀

图 9-3(b)、(c)所示为喷咀。

喷咀是一种以管道轴线为中心线的旋转对称体,由入口收缩与出口圆筒形喉部光滑过渡形成。喷咀分短喷咀与长径喷咀两种。

喷咀的特征尺寸是其圆筒形喉部的内直径 d , d 应是 8 个等角度直径实测值的平均值。要求喷咀圆筒形喉部任一截面上的直径实测值与平均值的差不得超过 0.05%。喉部出口边缘应有尖锐直角,无毛刺,无损伤,没有目测可见的倒角。边缘保护槽是为避免边缘损伤而设置的。通流孔自入口至出口的轴向截面形线各段必须相切,不得有光滑部分出现。

喷咀在管道上的安装技术要求与标准孔板相同。

(3) 文丘利管

图 9-3(d)所示为文丘利管

文丘利管是由收缩段、圆筒形喉部与圆锥形扩散管三部分组成。按收缩段的形状不同,又分为古典文丘利管和文丘利喷咀。

① 古典文丘利管

古典文丘利管是由入口圆筒段 A、圆锥形收缩段 B、圆筒形喉部 C 和圆锥形扩散段 E 所组成。古典文丘利管的几何型线如图 9-4 所示。

② 文丘利喷咀

文丘利喷咀的型线如图 9-5 所示。它是由呈弧形的收缩段、圆筒形喉部和扩散段组成。

收缩段与短喷咀相同,喉部是由长度 $0.3d$ 的部分 E 和长度 $0.4d$ 到 $0.45d$ 的部分 E' 所组成。扩散段的夹角 Φ 应小于或等于 30° 。当扩散段出口直径小于直径 D 时,称为截头式文丘利

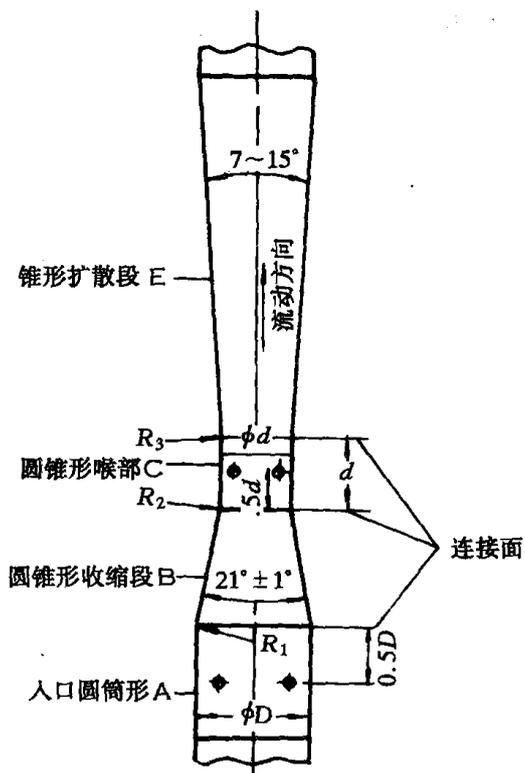


图 9-4 古典文丘利管几何型线

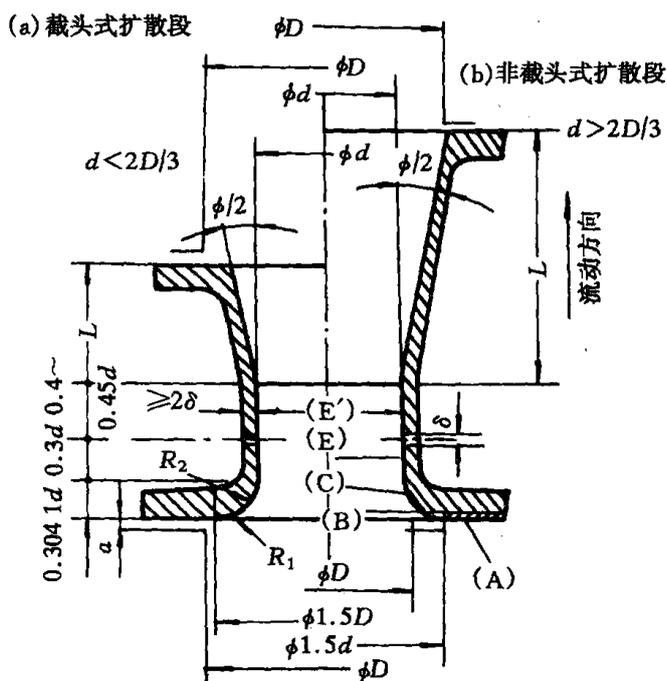


图 9-5 文丘利喷咀

管;若扩散段出口直径等于直径 D 时,称为非截头式文丘利管;扩散段长度 L 的长短并不影响流量系数 α ,但扩散段的夹角对压力损失有影响。

2. 节流装置的组成形式

节流装置一般由节流件、测量管段(节流件前后直管段)与取压部件等三部分组成。如图 9-6 所示。图中的直管段 l_0 、 l_1 和 l_2 的长短由各局部阻力件的形式、节流件类型及 β 值所决定。

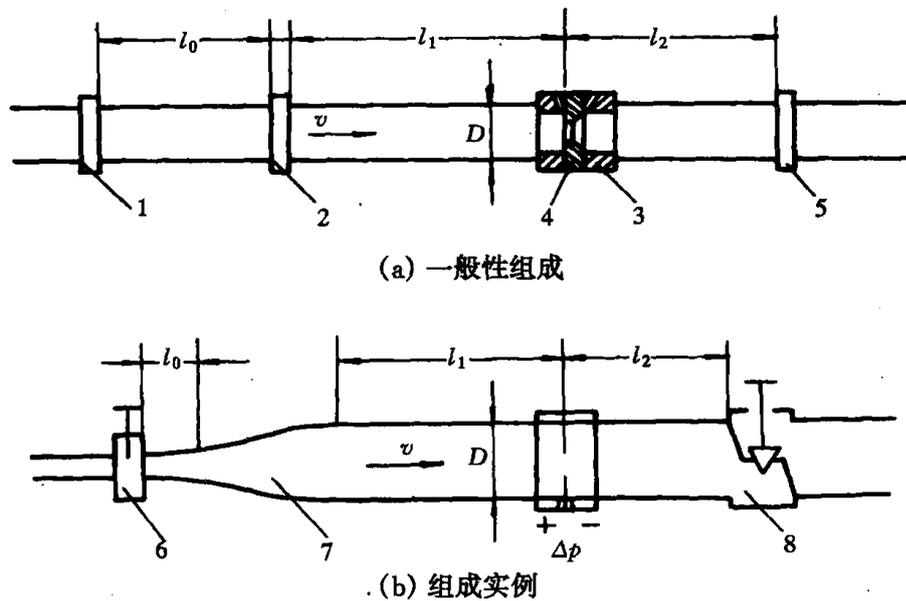


图 9-6 节流件组成形式

1—上游第二局部阻力件;2—上游第一局部阻力件;3—取压部件;4—节流件;
5—下游局部阻力件;6—全开闸阀;7—渐扩管;8—流量调节阀

从测量误差的角度看,直管段越长越好,但实际上总是要受到现场条件的限制,因此需要对其有一般性的要求。

(1) 节流件前后直管段的要求

表 9-2 直接列出了 l_1 和 l_2 由局部阻力件及 β 值所确定的数值范围。表中 l_1 和 l_2 的数值表示为管内径 D 的倍数。取括号外的数值,即具有“零附加不确定度”;取括号内(或内外之间)的数值,则具有“附加不确定度”。

对于实验室用系统, l_1 应至少为括号外数值的一倍。

上游第一阻力件与第二阻力件之间的直管段长度 l_0 按上游第二阻力件的形式和 $\beta=0.7$ (不论所用节流件实际 β 值为多少)在表 9-2 中查得 l_1 数值折半。

如需要在节流件上游安装温度计套管时,除了要满足上述要求外,还需使温度计套管与节流件之间的距离 l 符合以下关系:

- ① 当温度计套管的直径 $\leq 0.03D$ 时, $l=5D(3D)$;
- ② 当温度计套管的直径在 $0.03\sim 0.13D$ 之间时, $l=20D(10D)$ 。

若节流件前有大于 2:1 的骤缩,则除了有上述要求外,尚要使骤缩处距离节流件不得小于 $30D(15D)$ 。

同时,凡实际安装在节流件上游的阻力件形式没有包含于表 9-2 之内的,或所要求的三段直管段有一个小于括号内的数值或两个都在括号内外数值之间,则应在实验室里实际测定差压与流量之间的关系。

表 9-2 节流件上下游直管段长度要求

	节流件上游侧局部阻力件的形式与最小直管段长度 l_1						节流件下游侧最小直管段长度 l_2
	一个 90° 弯头或只有一个支管流动的三通	在同一平面内有多 个 90° 弯 头	在不同平 面内有多 个 90° 弯 头(空间 弯头)	异径管(2D→1D,长 度≥3D;0.5D→1D, 长度≥0.5D)	全开球阀	全开闸阀	
≤0.2	10(6)	14(7)	34(17)	16(8)	18(9)	12(6)	4(2)
0.25	10(6)	14(7)	34(17)	16(8)	18(9)	12(6)	4(2)
0.30	10(6)	16(8)	34(17)	16(8)	18(9)	12(6)	5(2.5)
0.40	14(7)	18(9)	36(18)	16(8)	20(10)	12(6)	6(3)
0.45	14(7)	18(9)	38(19)	18(9)	20(10)	12(6)	6(3)
0.50	14(7)	20(10)	40(20)	20(10)	22(11)	12(6)	6(3)
0.55	16(8)	22(11)	44(22)	20(10)	24(12)	14(7)	6(3)
0.60	18(9)	26(13)	48(24)	22(11)	26(13)	14(7)	7(3.5)
0.65	22(11)	32(16)	54(27)	24(12)	28(14)	16(8)	7(3.5)
0.70	28(14)	36(18)	62(31)	26(13)	32(16)	20(10)	7(3.6)
0.75	36(18)	42(21)	70(35)	28(14)	36(18)	24(12)	8(4)
0.80	46(23)	50(25)	80(40)	30(15)	44(22)	30(15)	8(4)

(2) 节流装置管道条件

① 必须知道节流件 l_1 长度上的管内壁绝对粗糙度 K_S 或相对值 K_S/D , 这些数值原则上由实验确定。对于一般工业上所用管道的 K_S 数值都有表可查;

② 节流件上游侧 $8D$ 以内的管道内壁应没有肉眼可见的明显凹凸, 必要时应对此长度内的管道内壁进行拉光, 以保证得到精确的 D 值和满足圆度的要求;

③ 节流件上游侧的管道内圆度要求是: 任意单侧值与其平均值的偏差不得大于 $\pm 0.3\%$;

④ 节流件下游侧的管道内圆度要求是: 任意单侧值与其平均值的偏差不得大于 $\pm 2\%$ 。

管内径的测量方法是在节流件的上游侧的 $0D$ 、 $0.5D$ 、 $1D$ 与 $2D$ 处取与管轴线垂直的 4 个截面, 在每个截面上以大致相等的角距离测取 4 个内径的单测值, 这 16 个单测值的平均值取为设计节流件时所用的管道内径。

3. 节流装置的取压方式

根据取压口位置可将取压方式概括成: ① 理论取压; ② 法兰取压; ③ 径距取压; ④ 角接取压; ⑤ 损失取压。图 9-7 示出了节流件常见的取压方式及其取压位置。

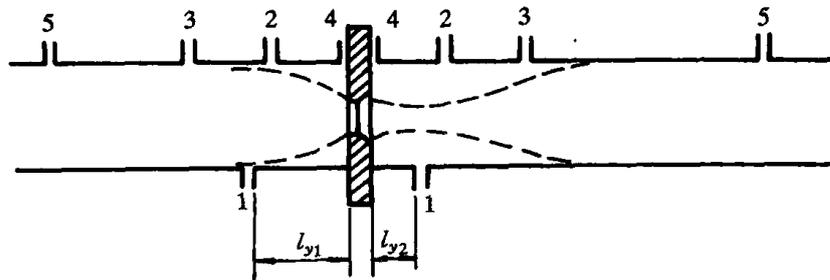
其中理论取压又称缩流取压, 其位置为:

$$l_{y1} = (0.9 \sim 1.1)D; l_{y2} = (0.84 \sim 0.34)D$$

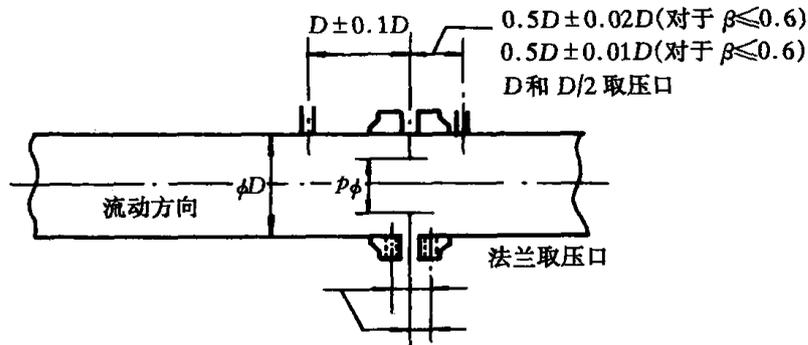
损失取压的位置

$$l_{y1} = 2.5D, l_{y2} = 8D$$

孔板常用的取压方式是角接取压、法兰取压和理论取压等。喷嘴只采用角接取压。文丘利喷嘴的上游取压同喷嘴, 下游取压于喉部。几种常用的节流件适用范围见表 9-3。



(a)



(25.4 ± 0.5)mm (对于 $\beta > 0.6$, $D \leq 150$ mm)

(25.4 ± 1.0)mm (对于 $\beta > 0.6$, 或对 $\beta > 0.6$

但 $150\text{mm} \leq D \leq 1000\text{mm}$)

(b)

图 9-7 取压方式及其取压位置

(a) 五种取压方式及其取压位置; (b) 具有 D 和 $D/2$ 或法兰取压的标准孔板的取压口间距
1-1 为理论取压; 2-2 为法兰取压; 3-3 为径距取压; 4-4 为角接取压; 5-5 为损失取压

表 9-3 节流装置形式及其适用范围

名称		$\beta = d/D$ (mm)	管径 (mm)	Re 范围	适用介质
孔板	角接取压	0.22~0.8	50~1 000	5 000~107	单相流体
	法兰取压	0.2~0.75	50~760	8 000~107	单相流体
	理论取压	0.1~0.8	50~750	6 000~107	单相流体
ISA1932 喷咀		0.32~0.8	50~1 000	$2 \times 10^4 \sim 10^6$	单相流体
长径喷咀		0.2~0.8	50~630	104~107	单相流体
文丘利喷咀		0.316~0.775	65~500	$1.5 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$	单相流体
1/4 圆弧孔板		0.25~0.6	25~750	200~ 2×10^5	任何介质
锥形入口孔板		0.1~0.316	>25	25~104	任何介质
偏心孔板		-	100~400	>105	脏污流体
圆缺孔板		-	100~400	>105	脏污流体

国家标准推荐的角接取压标准孔板适用的最小雷诺数 $Re_{D_{min}}$ 列于表 9-4, 国家标准推荐的标准喷咀适用的最小雷诺数 $Re_{D_{min}}$ 列于表 9-5。

表 9-4 角接取压标准孔板适用的最小雷诺数 Re_{Dmin}

β	Re_{Dmin}	β	Re_{Dmin}	β	Re_{Dmin}
0.220	5.00×10^3	0.425	2.13×10^4	0.625	6.27×10^4
0.250	8.00×10^3	0.450	2.49×10^4	0.650	7.16×10^4
0.275	9.00×10^3	0.475	2.87×10^4	0.675	8.21×10^4
0.300	1.30×10^4	0.500	2.29×10^4	0.700	9.48×10^5
0.325	1.70×10^4	0.525	3.75×10^4	0.725	1.11×10^5
0.350	1.90×10^4	0.550	4.27×10^4	0.750	1.32×10^5
0.375	2.00×10^4	0.575	4.85×10^4	0.775	1.59×10^5
0.400	2.00×10^4	0.600	5.51×10^4	0.805	1.98×10^5

注:角接取压标准孔板在表 9-4 所列的 Re_{Dmin} 以上使用时,对于符合规定的同一套节流装置,并用同一套差压显示仪表测量流量时,量程比为 3(最大不超过 4)。因为流量变化所引起的流量系数的改变与实际值相比,不超过 $\pm 0.5\%$

表 9-5 标准喷嘴适用的最小雷诺数 Re_{Dmin} 推荐值

β	Re_{Dmin}	β	Re_{Dmin}	β	Re_{Dmin}
0.320	4.05×10^4	0.425	4.19×10^4	0.525	5.22×10^4
0.350	3.93×10^4	0.450	4.40×10^4	0.550	5.49×10^4
0.375	3.95×10^4	0.475	4.46×10^4	0.575	5.69×10^4
0.400	4.04×10^4	0.500	4.94×10^4	0.600	5.78×10^4
0.625	5.69×10^4	0.700	3.42×10^4	0.775	2.97×10^4
0.650	5.35×10^4	0.725	2.00×10^4	0.800	5.19×10^4
0.675	4.66×10^4	0.570	2.00×10^4		

注:标准喷嘴在表 9-5 所列的 Re_{Dmin} 以上使用时,对于符合规定的同一套节流装置,并用同一套差压显示仪表测量流量时,量程比为 3(最大不超过 4),因为流量变化所引起的流量系数的改变与实际值相比,不超过 0.5%

目前在工业生产过程中,已将孔板、喷嘴、文丘利管和 1/4 圆孔板等进行了标准化。标准化后的节流件可不必进行个别标定而直接使用,只要管道条件与流体性质符合节流件设计时的要求,其误差也就符合标准。所谓标准化即节流件的外形与尺寸均已标准化,并通大量的试验求得这类标准节流装置流量与差压的关系等式,以“流量测量节流装置国家标准”的形式予以公布。因此凡符合国家标准的节流装置,其流量与差压的关系及测量误差均可按国家标准直接计算确定。

不过必须指出:① 标准节流装置仅仅适用于测量圆形截面管道中的单相、均质流体的流量;② 它要求流体充满管道,在节流件前后一定距离内不发生相变或析出杂质;③ 流体的流速要小于音速;④ 流体的流动属于非脉动流动,流体在流过节流件前的流束应与管轴线平行,不得有旋转流的存在。

目前应用得最广泛的是孔板和喷嘴,尤其是标准化的。因此以下将标准化的孔板和喷嘴为对象予以讨论。

4. 标准节流装置的流量系数 α

标准节流装置的流量系数 α 值是通过实验测得流量 q_m 与相对应的压差 ΔP , 然后用式

(9-2)和式(9-4)计算得到。对于给定的节流装置(包含一定的取压方式),流量系数 α 仅与雷诺数 Re_D 有关。只要节流装置符合标准节流装置的要求,就可以直接引用标准所规定的 α 值,并确定其误差范围。

① 角接取压标准孔板和喷嘴的流量系数 α 值

角接取压标准孔板和喷嘴的求取流量系数的原始实验是在光管(即 $K_S/D \leq 0.0004$)中进行的,所以测量得的流量系数称为光管流量系数 α_0 。 α_0 可根据专门的表格由 β^4 和 Re_D 用线性内插法查得,亦可由有关经验公式计算而得。

工业上实际粗糙管的流量系数可由下式修正

$$\alpha = \alpha_0 F_K \quad (9-6)$$

式中 F_K 为管道粗糙度修正系数(亦可 r_{Re} 表示)。对于孔板有

$$F_K = (r_0 - 1) \left[\frac{\lg Re_D}{6} \right]^2 + 1 \quad (9-7)$$

当 $Re_D \geq 10^6$ 时, $F_K = r_0$, r_0 与 β 、 D 和 K_S 有关,由有关表格查得, r_0 称为标准孔板原始粗糙度修正系数(见表 9-6)。

表 9-6 标准孔板的 r_0

$\beta_0 \backslash \frac{D}{k}$	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	≥ 3400
0.1	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.2	1.003	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.3	1.006	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.4	1.009	1.006	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000
0.5	1.014	1.009	1.006	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000	1.000
0.6	1.020	1.013	1.009	1.006	1.003	1.002	1.000	1.000	1.000
0.64	1.024	1.016	1.011	1.007	1.004	1.002	1.002	1.000	1.000

对于标准喷嘴有

$$F_K = (r_0 - 1) \left[\frac{\lg Re_D}{5.5} \right]^2 + 1 \quad (9-8)$$

r_0 为标准的喷嘴的原始粗糙度修正系数(见表 9-7)。当 $Re_D \geq 3.2 \times 10^5$ 时, $F_K = r_0$ 。

表 9-7 标准喷嘴的 r_0

$\beta_0 \backslash \frac{D}{k}$	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	≥ 3200
0.30	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.40	1.003	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.50	1.008	1.005	1.003	1.002	1.000	1.000	1.000	1.000
0.60	1.014	1.009	1.006	1.004	1.002	1.001	1.000	1.000
0.65	1.016	1.012	1.009	1.007	1.005	1.003	1.002	1.000

② 法兰取压标准孔板的 α 值

求取法兰取压标准孔板 α 值的原始实验是在 $K_S \leq 0.05$ 的粗糙管上进行的。为满足 $K_S/D \leq 0.001$ 的条件, 必须使 $D \leq 50\text{mm}$ 。 α 的确定方法:

(a) 确定法兰取压标准孔板所适用的 Re_D 范围(因为所适用的 Re_D 范围随 β 与 D 的变化而不同);

(b) 确定 α 的值。

$$\alpha = \alpha'_0 F_D F_R \quad (9-9)$$

式中 α'_0 ——只与 β 有关的因素;

F_D ——对管道内径的修正系数;

F_R ——对 Re_D 的修正系数。

α 也可根据有关经验公式进行计算。

5. 标准节流装置的流束膨胀系数 ϵ

标准节流装置用于可压缩性流体时, 其流束膨胀系数 ϵ 与节流件形式、取压方式、 β 值、 P_2/P_1 以及等熵指数 k 等有关。根据空气、水蒸汽和天然气等实验的结果, 按不同的节流件有不同的经验公式。

(1) 角接取压标准孔板的流束膨胀系数 ϵ 的经验公式

$$\epsilon = 1 - (0.3707 + 0.3184\beta^4) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/k} \right]^{0.935} \quad (9-10)$$

此式仅适用于: $P_2/P_1 \geq 0.75$, $50\text{mm} \leq D \leq 1000\text{mm}$ 以及 $0.22 \leq \beta \leq 0.80$ 的范围。

(2) 法兰取压标准孔板的流束膨胀系数 ϵ 的经验公式

$$\epsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta P}{P_1} \cdot \frac{1}{K} \quad (9-11)$$

此式仅适用于 $P_1/P_2 \geq 0.75$, $D = 50 \sim 750\text{mm}$, $\beta = 0.10 \sim 0.75$ 的范围。

(3) 标准喷嘴的流束膨胀系数 ϵ

$$\epsilon = \left\{ \left(1 - \frac{\Delta P}{P_1} \right)^{2/k} \frac{k}{k-1} \left[\frac{1 - \left(1 - \frac{\Delta P}{P_1} \right)^{k-1}}{\frac{\Delta P}{P_1}} \right] \left[\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \left(1 - \frac{\Delta P}{P_1} \right)^{2/k}} \right] \right\}^{1/2} \quad (9-12)$$

此式仅适用于: $P_2/P_1 \geq 0.75$, $D = 50 \sim 550\text{mm}$ 和 $\beta = 0.32 \sim 0.80$ 范围。

6. 标准节流装置的压力损失 δ_p

从上面图 9-6 中可见, 流体在流经标准节流装置时由于涡流等原因会引起流体压力的损失, 其损失的大小因节流件的形式而异。一般说来孔板所造成的损失会比喷嘴大, 但不论哪种节流件都会随 β 值的减小而增大压力损失。压力损失实际上是能量损失, 在设计节流件时应压力损失有所限制, 不能让它超过允许范围。标准节流装置的压力损失可按下式计算:

$$\delta_p \approx \frac{1 - \beta^2 \alpha}{1 + \beta^2 \alpha} \Delta P \quad (9-13)$$

式中 α ——流量系数;

β ——管径之比;

ΔP ——节流件前后之压差。

7. 节流装置的选择

节流装置除节流元件外,还包括取压设备的连接管道及其附件。但是节流装置的选择主要是指选择节流元件和差压计,一般应注意以下原则。

(1) 首先要注意测量精确度的要求,在流量和差压条件相同的情况下,喷嘴的精确度最高;

(2) 要满足允许的压力损失;

(3) 加工时的设备条件和技术力量;

(4) 安装条件方便。

对于标准节流装置,只要严格按照加工和安装要求来使用,则精度可达 $\pm 0.5\% \sim 3\%$ 。

差压变送器量程选择是与节流件设计一起进行的,主要是确定压差的上限,即选择适当的 ΔP_{\max} 。这对使用者来说无须自选。但应该知道,在所选的压差范围内,流量系数 α 基本上是常数,另外,压力损失应不超过允许值。

8. 节流装置的设计计算

对于已有国际标准和国家标准的节流装置,上述已经指出可以不经个别标定,根据标准规定的数据来确定。

$q_m = f_1(\Delta P)$ 或 $q_v = f_1(\Delta P)$ 的关系,这些工作要由计算完成。

这里不是要求大家设计节流装置,而是要知道生产实际中常常有两类命题,应该用不同的方法解决。通常遇到节流装置设计计算的两种命题是:根据节流装置输出的压差计算流量和根据已知条件确定节流装置和选配差压变送器。

(1) 根据节流装置输出的压差计算流量这类命题需要知道管道的内径 D 和材料、节流装置的形式及开孔直径 d 、被测介质的各有关参数、差压变送器的类型及差压值 ΔP 等,要求计算出被测介质的流量。

对这类问题只要能够确定出流量系数 α 和膨胀系数 ϵ ,则可利用流量计算公式计算得到流量值。在计算中需要查阅有关手册资料。

① 流量系数的确定

1) 先按 $\beta = d/D$ 之值从有关表格中选取一光管的原始流量系数 α_{01} (有关光管流量系数 α_0 由表中 β^4 和雷诺数 Re_D 值来决定,通常选取 Re_D 大的数值,如 $Re_D = 10^6$ 对应的 α_0);

2) 根据已选的流量系数,按公式计算流量 q_{01} (ϵ 暂按1考虑);

3) 再以 q_{01} 计算出 Re_D ,如此逐步迭代得到比较合适的 α_0 ;

4) 根据管道条件在有关资料中查得绝对平均粗糙度 K ,再根据 K/D 相对平均粗糙度和 β^2 ,在表9-4和表9-5中查得 r_0 值,然后按下列公式计算出管道粗糙度修正系数 r_{Re} ;

$$r_{Re} = (r_0 - 1) \left(\frac{\lg Re_D}{n} \right) + 1 \quad (9-14)$$

式中 n ——标准孔板为6,标准喷嘴为5.5。

5) 根据 r_{Re} 最后可计算流量系数 α 。

$$\alpha = r_{Re} \cdot \alpha_0 \quad (9-15)$$

② 膨胀修正系数 ϵ 确定

根据 P_1/P_2 、 β 及绝热指数 k 可查有关表格得到。

③ 有了 α 、 ϵ 、 ΔP 即可计算流量

$$q_m = 0.003\ 998\ \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\rho_1 \Delta P} \quad (\text{kg/s})$$

$$q_v = 0.003\ 998\ \alpha \epsilon d^2 \sqrt{\Delta P / \rho_1} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

(2) 根据已知条件确定节流装置和差压变送器

① 向设计厂家提供的数据如下:

- 1) 被测介质(水、蒸汽、空气等);
- 2) 被测流体的流量:最大流量 $q_{V\max}(q_{m\max})$;常用流量 $q_{Vch}(q_{mch})$;最小流量 $q_{V\min}(q_{m\min})$;

3) 被测介质的温度及压力参数;

4) 介质流动管道的直径 D 及材料;

5) 在常用流量下的允许压力损失(δ_P);

6) 管道位置(水平、垂直或倾斜)、管道布置情况及局部阻力件形式。

② 设计计算

根据已知管道内径 D 、被测介质有关参数及被测流量范围,选择合适的节流装置形式并计算开孔直径 d 以及选择差压变送器形式。

对这类问题,由于未知参数较多(如 α 、 ϵ 、 ΔP 、 d 等),因此设计计算困难较多,通常先依靠经验选择几个数据和合并未知数,以减少它的数目(例如,把 $\alpha\beta^2$ 作为一个未知数)来解决,其一般步骤如下:

1) 辅助计算

I) 根据已知 $q_{V\max}(q_{m\max})$,确定所选差压式流量计标尺刻度上限值 $q_v(q_m)$ 。

国产各差压式流量计已标准化,其系列为 1、1.25、1.6、2、2.5、3.2、4、5、6.3、 8×10^n 、 n 为整数或零。所选流量计标尺上限值应靠近并大于等于 $q_{V\max}(q_{m\max})$ 。

II) 根据工作状态下的流体绝对压力 P_1 ,绝对温度 T_1 ,求出流体的粘度 μ (或 ν),密度 ρ_1 ,对于气体还要求出等熵指数 k 等。

III) 根据流体温度和材质查有关资料,可得到所用材质的线膨胀系数 λ ,利用下列公式换算成工作温度下节流孔径 d 和管道内径 D 。

$$d_t = d_{t_0} [1 + \lambda_d (t - t_0)] \quad (9-16)$$

$$D_t = D_{t_0} [1 + \lambda_D (t - t_0)] \quad (9-17)$$

式中 d_{t_0} 、 D_{t_0} ——常温下节流件孔径 d 和管道内径 D ;

d_t 、 D_t ——工作温度下节流件孔径 d 和管道内径 D ;

λ_d 、 λ_D ——节流件和管道材料的线膨胀系数。

IV) 算出最小流量 $q_{V\min}(q_{m\min})$ 和常用流量 $q_{Vch}(q_{mch})$ 所对应的雷诺数 $Re_{D\min}$ 和 Re_{Dch} 。

V) 由有关资料查出管道内壁绝对平均粗糙度 K ,且求出 D/K 值。

2) 确定差压上限 ΔP

I) 对压力损失和直管段长度有特别规定(角接取压)时:

根据规定数据在角接取压速算图上查取差压上限值 ΔP (见 GB2624—81《流量测量装置》)。被测介质为气体时, $P_2/P_1 \geq 0.75$ 。

II) 对压力损失和直管段长度无特别规定(角接取压)时:

$$\Delta P_{\max} = \frac{q_v^2 \max \rho_1}{(0.003\ 998 \alpha_0 \beta^2 D^2)^2} (\text{Pa}) \quad (9-18)$$

或

$$\Delta P_{\max} = \frac{q_m^2 \max}{(0.003\ 998 \alpha_0 \beta^2 D^2)^2 \rho_1} (\text{Pa}) \quad (9-19)$$

式中的 β 值可根据 $Re_{D_{\min}}$, 由表 9-4 或表 9-5 查得, 当 $\beta \geq 0.5$ 时, 取 $\beta = 0.5$; 当 $\beta < 0.5$ 时, 用表中查得的 β 值, 并令 $Re_D = 10^6$, $r_{Re} = 1$, 从 $\alpha_0 = f(\alpha\beta^2, Re_D, \beta)$ 关系表(《流量测量装置》国家标准手册)中查出 $\alpha_0\beta^2$ 值。由上述公式计算出差压值圆整到较其大, 但最接近它的系列值 ΔP 。

被测流体为气体时, 要求 $P_2/P_1 \geq 0.75$ 。否则, 应取较大 β 值, 重新计算差压上限值, 直到符合 $P_2/P_1 \geq 0.75$ 的要求。

Ⅲ) 仅对允许的压力损失有特别规定时, 对角接取压或法兰取压的标准节流装置, 均可按下式计算差压上限值, 并将计算结果圆整到较其小, 但最接近它的系列值 ΔP 。

标准孔板:

$$\Delta P_{\max} = (2 \sim 2.5) \delta_p \quad (9-20)$$

标准喷嘴:

$$\Delta P_{\max} = (3 \sim 3.5) \delta_p \quad (9-21)$$

式中 δ_p ——允许压力损失, 其单位与 ΔP_{\max} 相同。

被测流体为气体时, 要求 $P_2/P_1 \geq 0.75$, 否则, 应放大 β 值, 直至满足 $P_2/P_1 \geq 0.75$ 要求。

3) 计算节流件节流孔径 d_t

在确定流量上限值 q_m (q_v) 和差压上限值 ΔP 之后, 根据常用流量 q_{mch} (q_{vch}) 按下式求出常用差压 ΔP_{ch} :

$$\Delta P_{ch} = \left(\frac{q_{mch}}{q_m}\right) \Delta P = \left(\frac{q_{vch}}{q_v}\right) \Delta P \quad (9-22)$$

令 $\epsilon = 1$, $r_{Re} = 1$, 根据流量公式求 $(\alpha_0\beta^2)_1$:

$$(\alpha_0\beta^2)_1 = \frac{q_{vch}}{0.003\ 998 D_t^2 \sqrt{\Delta P_{ch}/\rho_1}} \quad (9-23)$$

或

$$(\alpha_0\beta^2)_1 = \frac{q_{mch}}{0.003\ 998 D_t^2 \sqrt{\Delta P_{ch}\rho_1}} \quad (9-24)$$

式中 ΔP_{ch} 单位为 Pa。

$(\alpha_0\beta^2)_1$ 确定后, 根据常用流量下雷诺数 (Re_{Dch}) 从 $\alpha_0 = f(\alpha\beta^2, Re_D, \beta)$ 关系表查出 β 的近似值 β_1 和 D/K 由表 9-7 查得 r_0 , 将 r_0 和 Re_{Dch} 代入式 (9-14) 求得管道粗糙度修正系数 (r_{Re})。流束膨胀系数 ϵ 可根据 β_1 、 P_2/P_1 , k 由有关表格得到, 然后, 根据 ϵ 、 r_{Re} 、 $(\alpha_0\beta^2)$ 按下式求出 $(\alpha_0\beta^2)_2$:

$$(\alpha_0\beta^2)_2 = \frac{(\alpha_0\beta^2)_1}{\epsilon r_{Re}} \quad (9-25)$$

根据已知的 Re_{Dch} 和求得的 $(\alpha_0\beta^2)_2$ 值, 查 $\alpha = f(\alpha\beta^2, Re_D, \beta)$ 关系表采用内插法求得 β 的近似值 β_2 和 α_0 , β_2 即为最后确定的孔径比 β 值。

节流孔径 d_t 由下列式子得到:

$$d_t = D_t \beta_2 \quad (9-26)$$

按节流孔径基本相对误差约为 $\pm 0.05\%$ 考虑, 确定 d_t 的加工公差。

用实用流量公式计算实际常用流量 q'_{Vch} 或 q'_{mch} 使之满足下式:

$$|\delta_V(\delta_m)| \leq 0.2\% \quad (9-27)$$

$$\delta_v = \frac{q'_{Vch} - q_{Vch}}{q_{Vch}} \times 100\% \quad (9-28)$$

$$\delta_m = \frac{q'_{mch} - q_{mch}}{q_{mch}} \times 100\% \quad (9-29)$$

式中 δ_V ——常用体流量的相对误差;

δ_m ——常用质量流量的相对误差。

若不满足式(9-27), 必须重新计算 α_0 、 β 和 ϵ 值, 直至满足要求。

若对标准节流装置压力损失有规定, 要使实际的 δ_p 值控制在允许压力损失之内。

根据 β 值和节流件上游侧第一局部阻力件形式确定 l_1 和 l_2 的值, 再根据节流件上游第二个阻力件形式, 确定 l_0 值(见表 9-2)。

9. 在节流装置实际运用中流体工作条件偏离设计条件时的修正

在不考虑 ϵ 随流量及其它参数改变而变化的情况下, 当流体介质的温度和压力变化时, 密度也会相应地变化, 一般要对密度进行修正。修正办法如下:

假设在设计条件下, 以密度不变为前提的流量为 $q_{设}$, 当流体的压力改变时, 实际的流量与设计流量之比会发生改变, 则有

$$q_{实} = q_{设} \sqrt{\frac{\rho_{实}}{\rho_{设}}} \quad (9-30)$$

令 $b_\rho = \sqrt{\frac{\rho_{实}}{\rho_{设}}}$, 称为修正系数

$$q_{实} = q_{设} \cdot b_\rho \quad (9-31)$$

由于实际工作中, 被测介质的温度压力参数经常发生变化, 而用节流装置测量流量时, 又不可能随时进行修正, 所以测量误差就会增大, 因此现在采用微机对温度压力变化实现在线的密度自动校正, 这对提高测量精确度具有重大意义。

10. 节流装置的安装

这是个非常容易被人忽视, 但却对测量准确性有决定意义的重要问题, 大量实践证明, 尽管节流件设计和加工完全符合标准要求, 但安装中不注意, 例如, 标准孔板迎流方向搞反了, 虽然也有差压值, 但测出来的数值却完全错了, 造成了无法估算的误差。因此要对节流装置的安装予以充分的重视。下面以孔板为例提几点主要的要求:

(1) 安装节流装置前必须检查节流元件本体是否符合制造要求, 要校对设计任务书, 以免有错;

(2) 安装的节流件, 其中心线必须与管道中心线在同一轴线上, 其偏差不得超过 $\pm 1^\circ$, 节流元件的端面应与管道中心线相垂直, 其偏差不得大于 $0.001 5D(\frac{1}{\beta} - 1)$, 如果安装出现偏差, 测量误差会随着 β 的增大而增加;

(3) 节流元件前后的直管段有严格的要求, 其目的是为了保证流体的流动稳定。在上游

侧的最小直管段长度与 β 和阻力件形式均有关系。一般上游侧的直管段长度至少应大于 $10D$, 而下游侧的直管段长度至少应大于 $4D$ 。在节流元件(包括环室)前后 $2D$ 长度内的管道上, 不能有突出部分(如温度计插孔等)。管内壁要光滑且不能有椭圆度。实际管子内径应与设计值相一致。

(4) 引压管直径 d , 在试验装置上 d 可取 6mm , 在工程上 d 可取 $10\sim 12\text{mm}$ 。引压管沿水平方向敷设时, 要有大于 $1:10$ 的倾斜度。倾斜的方向与被测方法的性质有关, 如对气体介质, 则应向节流元件倾斜, 以保证气体引向差压变送器。

由于引压管是连接节流装置和差压变送器之间用的信号管路, 为了减少迟延和保证安全起见, 引压管应该按最短距离敷设, 一般总长不超过 5m 。

引压管应常有阀门等必要的附件, 以备与主设备隔离进行检修和冲洗排污之用。如被测介质有腐蚀性时应在引压管上加隔离容器。

(5) 为防止引压管中凝结水冻冰, 在北方地区要加保温装置, 有时甚至要伴热, 伴热有蒸汽、热水和电加热。这些热源应予特殊保证。

(6) 取压口的位置, 对于不同的被测介质应有不同的考虑方法。测量气体时, 应在节流装置的上方取压, 这主要为防止被测气体中有凝结水进入并积存在引压管中。在测量液体时, 取压口最好在节流装置中心线上方 45° 范围内, 以防止气体和固定沉积物进入引压管。

9.3 涡轮流量计

涡轮流量计是一种速度式流量计, 是近几十年来迅速发展起来的新型仪表, 这种流量计具有精度高、压力损失小、量程比大、动态响应好等优点, 可测量多种液体或气体的瞬时流量和流体总量, 并可输出 $0\sim 10\text{mA}\cdot\text{DC}$ 或 $4\sim 20\text{mA}\cdot\text{DC}$ 信号, 输出信号便于远传, 因而在航天工业、核工业及其他工业部门得到了广泛的应用。但是涡轮流量计的读数受流体粘度和密度的影响, 且因其内部有转动部件, 易于被流体的颗粒及污物堵住, 故适用于清洁流体的流量测量。

9.3.1 涡轮流量计的组成

涡轮流量计主要由涡轮流量变送器, 前置放大器、流量指示积算仪等三部分组成。如图 9-8 所示。涡轮流量变送器把流量信号转换成电信号, 经前置放大器放大后由指示积算仪显示被测介质的体积流量和流体总量, 并输出 $0\sim 10\text{mA}\cdot\text{DC}$ 或 $4\sim 20\text{mA}\cdot\text{DC}$ 信号。

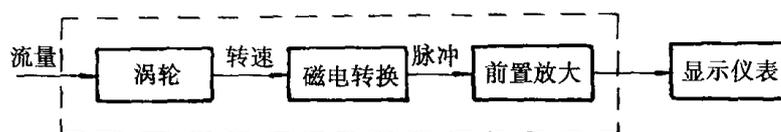


图 9-8 涡轮流量计组成方框图

9.3.2 涡轮流量变送器的结构和工作原理

涡轮流量变送器的结构如图 9-9 所示。由磁钢和感应线圈组成的磁电装置在变送器的壳体上, 涡轮置于摩擦力很小的轴承中。当流体流过变送器时, 推动涡轮旋转并在磁电装置中感应出电脉冲信号, 经放大后送入显示仪表。

涡轮是检测流量的传感器, 叶片由导磁的不锈钢材料制成。为减小流体作用在涡轮上的

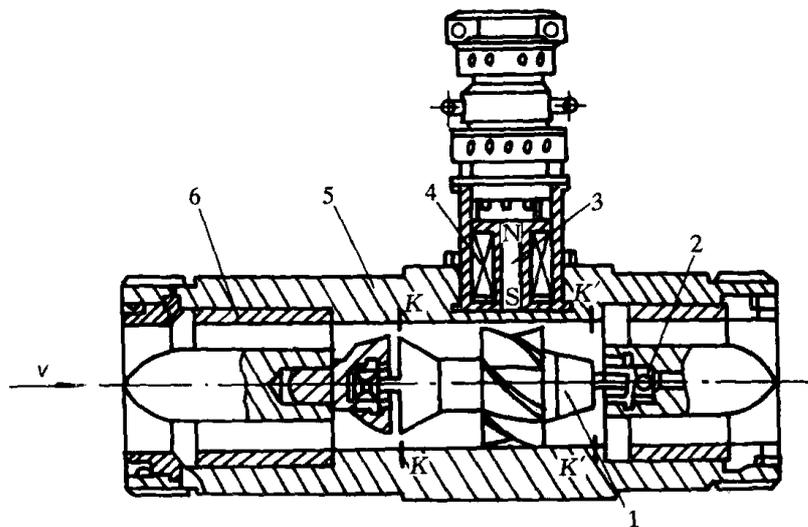


图 9-9 涡轮流量变送器

1—涡轮；2—支承；3—永久磁钢；4—感应线圈；5—壳体；6—导流器

轴向推力,采用反推力方法对轴向推力自动补偿。从涡轮轴体的几何形状可以看出,当流体流过 $K-K$ 截面时,流速变大而静压力下降,以后随着流通面积的逐渐扩大静压力逐渐上升,因而收缩截面 $K-K$ 与 $K'-K'$ 之间产生了不等静压场,此不等静压场所造成的压差作用在涡轮上的轴向分力与流体的轴向推力反向,可以抵销流体的轴向推力,减轻轴承的负荷,以提高变送器的寿命和精度。也可以采取中心轴打孔的方式,通过流体实现轴向力自动补偿。

导流器是由导向环(片)及导向座组成,使流体在进入涡轮前先导直,以避免流体的自旋而改变流体与涡轮叶片的作用角度,从而保证仪表的精度。在导流器上装有轴承,用以支承涡轮。

由线圈降磁钢组成磁电转换装置。当流体通过变送器时,涡轮旋转,叶片周期性的改变磁路磁阻,通过线圈的磁通量发生周期性的变化,因而在线圈内感应出与流量成比例变化的脉冲信号。再经前置放大器放大后远距离(约 500m)传送到二次仪表。前置放大器安装在磁电转换装置接头内,其原理线路如图 9-10 所示。前置放大器电源由二次仪表供给。

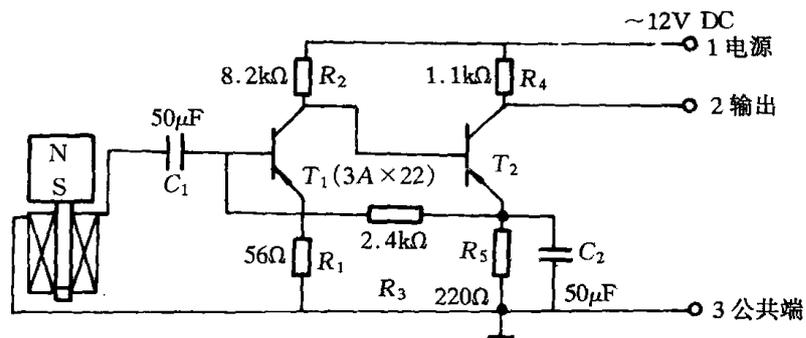


图 9-10 前置放大器原理线路图

在一定的测量范围之内,通过涡轮流量变送器瞬时流量和流体总量可用下式表示:

$$q_v = \frac{f}{\xi} \quad (9-32)$$

$$q'_v = \frac{N}{\xi} \quad (9-33)$$

式中 q_v ——体积流量, m^3/S ;
 q'_v ——流量总量, m^3/S ;
 ξ ——仪表常数(流量系数), $l/L\text{m}^3$;
 f ——脉冲频率;
 N ——脉冲总数。

9.3.3 涡轮流量计的安装使用

1. 变送器应水平安装。为保证测量精度,变送器上游侧直管段不小于 $20D$,下游侧直管段不小于 $15D$, D 为管道内径。
2. 变送器安装时,流体方向应与变送器名牌上指示的流向箭头相符。
3. 变送器上游直管段前应装有过滤器,确保流体中无杂物。
4. 变送器出厂时用常温水标定的,若被测介质与常温水性质不同时,仪表常数应加以修正,或重新用实际要测的介质标定。

9.3.4 涡轮流量计在反应堆中的应用

因为反应堆具有放射性和堆内空间的限制,因而一般的涡轮流量计是不适用的,必须专门设计制造。如图 9-11 所示,为一个适合反应堆中用的涡轮流量计,是由壳体、转子以及测量转子速度的传感器线圈组成的。转子的速度是由叶片的角度和流体的速度确定的。某些类型的涡轮流量计含有永久磁铁部件,从传感器线圈出来的信号是一个交流信号,其频率与磁极对的数目及转子的转速成正比。其他类型的涡轮流量计应用变磁阻型的传感器线圈,每当转子的叶片通过传感器线圈或绕组时产生一个脉冲,把传感器线圈出来的信号放大,并借助于某种频率或周期测量线路转换成正比于流量的信号。

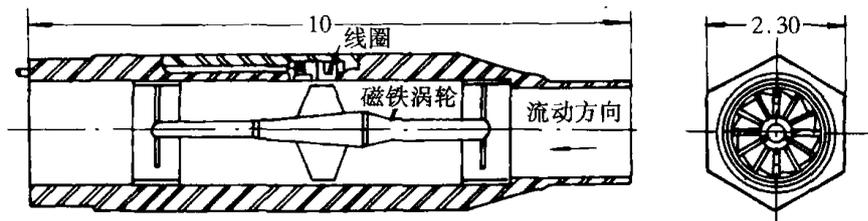


图 9-11 反应堆堆芯涡轮流量计示意图

涡轮流量计寿命主要受转子轴承特性的限制。在水堆中通常选择石墨作轴承和不锈钢作涡轮轴,在快堆中测量钠流量时选用钼制轴颈轴承和合金作涡轮轴。目前已开始全部采用高硬度硬质合金,大大提高了使用寿命。

因为大多数堆芯应用要求垂直安装涡轮的转子。可以在一种流速下通过调整转子的重量来平衡轴承上的水冲击力,以便使轴承的磨损减到最小。另外涡轮叶片的振动可能是一个问

题,需要在整个速度范围上进行仔细的试验,以便在涡轮流量计安装到反应堆之前就发现这些问题。在燃料组件入口处流动模型扰乱也可能产生问题,如果在安装到堆内之前流量计的设计方案没有合适的入口几何形状的校对,就不可能发现这些问题。很显然,涡轮流量计不适合安装在有强磨损材料的系统中。

从图 9-11 中可见,反应堆内所用的涡轮流量计的传感器线圈组件是很小的,这样,安装在流量计壳体上而不增大反应堆燃料组件的外径,经受得住冷却剂温度和压力的作用,并且抗辐照。若在转子或传感器线圈组件中使用永久磁铁,则必须小心地选取抗高温及抗辐照损伤的磁性材料。我们还必须注意到,水漏进传感器线圈和引线组件是很多堆芯应用中遇到的主要问题,因此目前正考虑应用机械密封方法来连接电缆和传感器线圈。线圈和电缆的问题主要与制造和安装工艺有关,所以必须设法提高加工和安装工艺水平。

9.4 弯管流量计

9.4.1 弯管流量计的原理及其流量公式

稳定流动的流体通过弯管时,由于离心力的作用在弯管内、外侧壁上产生压力差。曲率半径一定的 90° 弯管,在离开其弯曲中心最远位置和最近位置上所测得压力差的平方根正比于流体的流速,即正比于流体的流量,这就是弯管流量计的基本原理。

图 9-12 为流体通过具有水平弯曲面的平卧弯管时,弯管外侧壁及内侧壁上的流体压力分布示意图。向心的压力差 $P_1 - P_2$ 在弯管顶点附近达到最大值。

弯管流量计的最简单形式就是一个普通的管道弯头。通常在弯头曲率半径所确定的平面(纵向截面)上离开弯头进口端面 45° 的外表面和内表面上配置取压口,如图 9-13 所示。

利用伯努利方程可以推导出弯管流量计的流量公式:

$$q_m = \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \quad (9-34)$$

$$q_v = \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)} \quad (9-35)$$

式中 q_m ——通过弯管的流体的质量流量;

q_v ——通过弯管的流体的体积流量;

D ——弯管的内径;

R ——弯管的曲率半径;

ρ ——流体的密度;

P_1 ——弯管外侧壁压力;

P_2 ——弯管内侧壁压力。

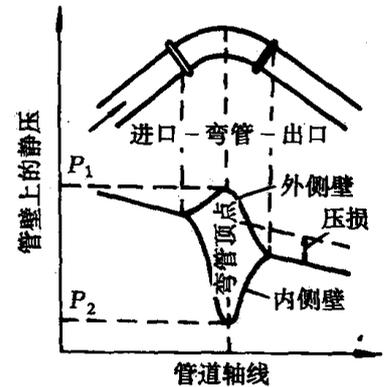


图 9-12 弯管流量计弯管内压力分布图

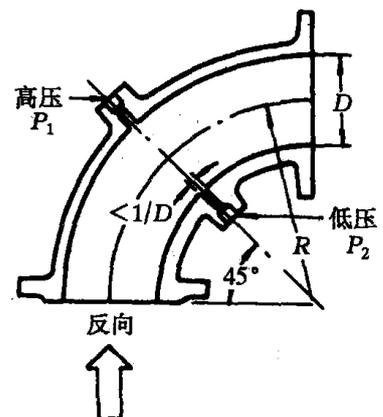


图 9-13 弯管流量计

式(9-34)和(9-35)是根据强制旋流理论推导出的理论流量公式。对于实际情况必须加以校正,所以引入校正因数 α 。则有

$$\begin{aligned} q_m &= \alpha \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \\ &= C \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \end{aligned} \quad (9-36)$$

$$\begin{aligned} q_v &= \alpha \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{R}{2D}} \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \\ &= C \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right) \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)} \end{aligned} \quad (9-37)$$

式中 $C = \alpha \sqrt{R/2D}$, 称为流量系数。

α 的数值决定于取压口的配置位置。当取压口位于离开 90° 弯头进、出口平面都为 45° 的中央直径线最近和最远位置上时, $\alpha \approx 1$ 。假如取那些 R 和 D 的尺寸需经精确测定。弯头内径等于直管内径,且弯头上游的直管长度不小于 $25D$ 时,则 α 数值的分布范围在 0.96 至 1.04 之间,亦即 C 值直接采用 $\alpha \sqrt{R/2D}$,误差为 $\pm 4\%$ 左右。

9.4.2 弯管流量计在反应堆中的应用

由于弯管流量计对给定流量所产生的压差有良好的复现性($\pm 0.2\% \sim \pm 0.1\%$),其精度一般为 $\pm 10\%$,所以相当满意地用于压水堆冷却剂流量的检测和控制。用弯管流量计测量冷却剂流量,可以避免用孔板等流量计测量造成的压力损失。虽然它的测量精度比孔板低但由于它的重复性好,对压水堆冷却剂流量测量来说已经足够了。若对绝对精度有明确的要求,则需对检测系统进行实际流量标定,最好是在现场用实际工作流体进行标定。

对于不经个别标定的实际应用,若精度要求达到 $\pm 3\% \sim 5\%$,必须精确测定弯管的曲率半径 R ,特别要精确测定弯头的内径 D 。弯头的内径与连接管的内径应相等,(偏差在 1% 以内)。弯管流量计用来测量反应堆冷却剂流量必须满足以下条件:

1. 弯管流量计的上下游必须有足够的直管段,上游直管段长至少 $28D$,下游直管段长至少是 $7D$ (D 为管道的内径);
2. 管内流体的雷诺数必须大于 5×10^4 ;
3. 取压口应位于弯管的中央直径上弯管的最外侧和最内侧,取压口直径应大于 $D/8$,同时要特别注意两个取压口的对准。

弯管流量计是一种尚未标准化的差压流量计,它没有附加压损,安装简易而且廉价。

9.5 电磁流量计

电磁流量计是一种测量导电性流体流量的仪表。自40年代后期在工业上应用以来,经过较长期的实践和几代产品的改进,其性能日臻完善,系无阻流元件,阻力损失极微,流场影响小,精确度高,直管段要求低,而且可以测量含有固有颗粒或纤维的液体,腐蚀性及非腐蚀性液体,这些都是其它流量仪表无法相比的。因此,电磁流量计发展很快。

电磁流量计由电磁流量变送器、转换器和显示仪表组成。应用电磁流量计,按照不同的配套形式,可以实现流量的指示、积算、调节、数据处理和自动控制。

9.5.1 电磁流量计的工作原理

电磁流量计的原理如图 9-14 所示。在一段不导磁的测量管两侧装上一对电磁铁,被测液体由管内流过,管壁上在与磁场垂直的方向上有一对与液体接触的电极,根据电磁感应定律,若管道内磁感应强度为 B (特斯拉, T),管内流体的流速为 v (cm/s),切割磁力线的导体的长度就是两个电极间的距离,也就是管道内径 D (cm),则感应电动势 E 为

$$E = B \cdot D \cdot v \times 10^{-8} \quad (\text{V})$$

由于体积流量 q_v (cm³/s) 与流速 v 有如下关系

$$q_v = v \cdot \frac{\pi}{4} D^2$$

故有

$$E = \frac{4B}{\pi D} q_v \times 10^{-8} \quad (9-38)$$

若考虑管道分流和磁场的修正,则有

$$E = \frac{4}{\pi D} B q_v K_1 K_2 \times 10^{-8} \quad (\text{V}) \quad (9-39)$$

式中 B ——磁感应强度, T;

q_v ——体积流量, m³/s;

D ——管道内径, cm;

K_1 ——管道分流修正系数;

K_2 ——磁场修正系数。

K_1 由管道的壁厚和电导率确定的, K_2 取决于极面长度与管道内径的比例,而且当极面与管道之间的气隙很小时,若该比值大于 5,则磁场修正系数 K_2 近似等于 1。

对于一只定型的电磁流量计来说,有下列关系

$$E = \frac{4}{\pi D} B q_v K_1 K_2 \times 10^{-8} = K q_v \quad (9-40)$$

或

$$q_v = CE \quad (9-41)$$

式中 $C = 1/K$, K ——电磁流量计的仪表常数。

由此可见,流量 q_v 正比于感应电动势 E 。通过转换器将其换成 0~10mA·DC 的标准电信号,可作流量指示、累计、记录、调节、控制之用。

实际的电磁流量计中,感应电动势 E 只有几到几十毫伏,为避免电极在直流电流作用下发生极化作用,同时也为了避免接触电势等直流干扰,管道外的磁铁都使用交流激磁,这样磁场是工频变送磁场获得的感应电动势也是交变的。可用专门的交流放大器放大。当然使用交流激磁也会带来新的问题,即交变磁场会直接在电极回路中产生感应干扰电势。由于这种感

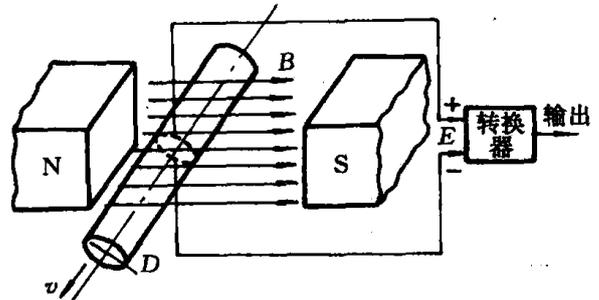


图 9-14 电磁流量计原理

应干扰电势的相位与交变磁感应强度 B 的相位相差 90° ，而流量的感应电动势 E 却是与 B 同相位的，可以从相位上予以区别而抑制之。现在，一般工业用的都是交流磁场的电磁流量计，而直流磁场的电磁流量计多数用于测量液态金属流量的场合。

在使用交流电激磁时，测量管应使用高电阻率的非导磁材料，如玻璃钢或不锈钢等制造，以减少管壁上的涡流。在使用不锈钢作测量管时，除电极需与管壁绝缘外，为避免流体中的电势被管壁短路，影响测量电极输出电势的输出幅度，需在整个测量管的内壁除以绝缘层或衬垫绝缘套管。

9.5.2 电磁流量计在反应堆中应用的优点和存在的问题

电磁流量计在反应堆中应用有下列优点：1. 由于没有阻力件放在流道中，因此压降非常低；2. 在反应堆壳体内无运动部件；3. 压力、温度或流量发生瞬变时不易损坏；4. 时间响应快，容易得到动态数据；5. 流体密度或温度的适当变化不会引起显著的误差；6. 用于液态金属场合，非常低的输出阻抗减少了对于虚假辐射感生电流的敏感性，并减少了由电缆的低绝缘电阻所造成的分流误差。

电磁流量计用于反应堆堆芯可能会有下列缺点：1. 对于高电阻率的冷却剂情况，高的输出阻抗将使得流量计对于下列因素所造成的误差是敏感的：辐射感生电流，电缆的低绝缘电阻，管道材料较低的绝缘电阻；2. 对于在高温和强辐射场中的使用情况，磁铁性能可能难于稳定；3. 流量计的刻度与温度有关；4. 磁路的有效空间将限制磁场强度和输出电压。考虑到上述相对的优缺点，目前电磁流量计仅应用于液态金属作为冷却剂的反应堆中，即应用于液态金属钠作为冷却剂的快堆中，例如图 9-15 所示为一个用于钠冷快堆堆芯冷却剂流量测量的流量计图形。

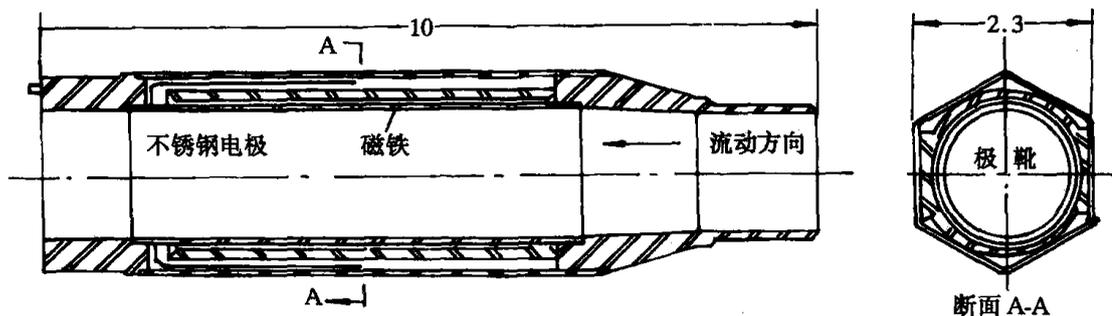


图 9-15 钠冷堆芯电磁流量计

电磁流量计可用于测量电导大于 $10^{-5} \text{ } \Omega/\text{cm}$ 的多种导电液体的体积流量。例如水和含有悬浮颗粒的污水、半固体状态的浆状物、腐蚀性液体以及对卫生要求高的液体的流量测量。但电磁流量计不能用于气体和蒸汽流量的测量。

9.5.3 电磁流量计的安装和使用

1. 电磁流量计应安装在没有强电磁场的环境，附近也不应有大的用电设备。
2. 应将流量变送器的“地”与被测液体和转换器的“地”用一根导线连接起来，并用接地线将其深埋地下，接地电阻应小，接地点不应有地电流。

3. 为保证流量变送器中无沉积物或气泡积存,变送器最好垂直安装,被测流体自下而上流动。

4. 为保证被测液体流速轴对称,变送器前应有一定长度的直管段。上游侧如有弯头、三通、异径管等,变送器前应加 5 倍管径的直管段;如有各种阀,应有 10 倍管径的直管径。下游侧可以短一些。

5. 为方便检修变送器和仪表调零,变送器应加旁路管,这样可以使变送器充满不流动的被测液体,便于仪表调零。

6. 信号线应单独穿入接地钢管,绝不许和电源线穿在一个钢管里。信号线一定要用屏蔽线,长度不得大于 30m。若要求加长信号线,必须采取一定措施,如采用双层屏蔽线等。

7. 被测液体的流动方向应为变送器规定的方向,否则流量信号相移 180°,相敏检波不能检出流量信号,仪表将没有输出。被测液体的流速也有一定限制,最低流速不能低于仪表量程的 10%,最高流速最好不超过 10m/s。

8. 被测液体电导率的下限由变送器的输入阻抗决定。如果输入阻抗为 100MΩ,则被测液体的电导率不得低于 10^{-6} S/cm。

9.6 压水堆主冷却剂流量测量方法和原理

这里以大亚湾核电厂为例来说明压水堆主冷却剂流量的测量。大亚湾核电厂两座压水反应堆主冷却剂流量的测量是利用弯管流量计测量的。

具体测量工作是在反应堆每个环路中段弯管处设置 3 个差压变送器进行测量。在弯管外侧有一个共同的高压测口,在弯管内侧有 3 个低压测口,由弯管弯外和弯内的压差得出主冷却剂的流量,并向反应堆保护系统提供信息。

利用弯管流量计测量主冷却剂流量的方法和原理如图 9-16 所示。这种测量装置基本功能是提供流量是否减少的信息。这种流量测量方法有一个优点,就是不需要把任何部件插到冷却剂流道中。若流道中插入部件将会产生压降,结果或是降低了流量,或是需要增加泵的功率。由冷却剂流动的动力学效应可知,冷却剂流经弯管时,弯头外半径处的压力高于弯头内半径处的压力,因而产生了压差。其流量和压差之间的关系可用下列方程描述:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \left(\frac{q}{q_0}\right)^2 \quad (9-42)$$

式中 ΔP_0 为与参考流量 q_0 相应的压差, ΔP 为与某个不同流量 q 相应的压差。

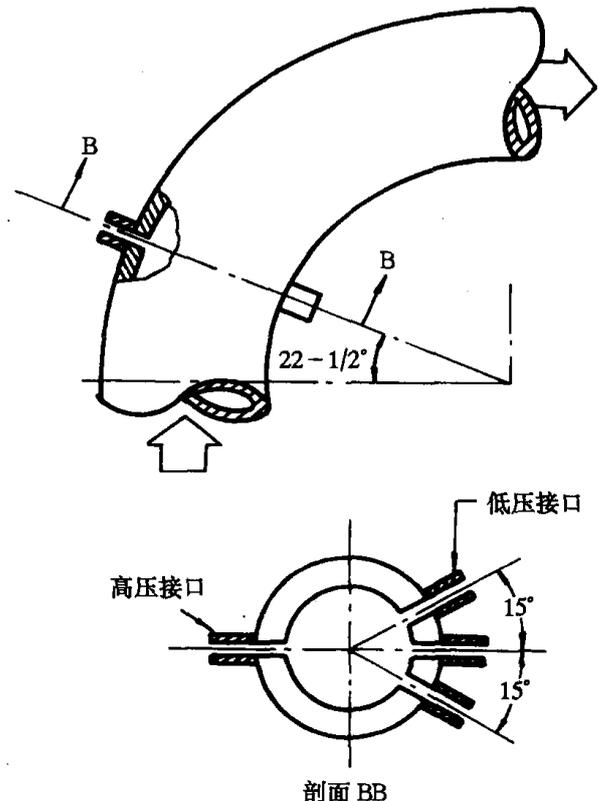


图 9-16 主冷却剂流量测量方法和原理图

参考流量相应的压差 ΔP_0 是在电厂最初启动时确定的值,然后沿此关联曲线外推,从而确定低流量保护整定点。

9.7 核电站主蒸汽流量测量方法和原理

这里以大亚湾电厂为例来说明核电站主蒸汽流量的测量。

大亚湾核电站两座机组主蒸汽流量的测量是采用流量限制器的方法。流量限制器如图 9-17 所示。

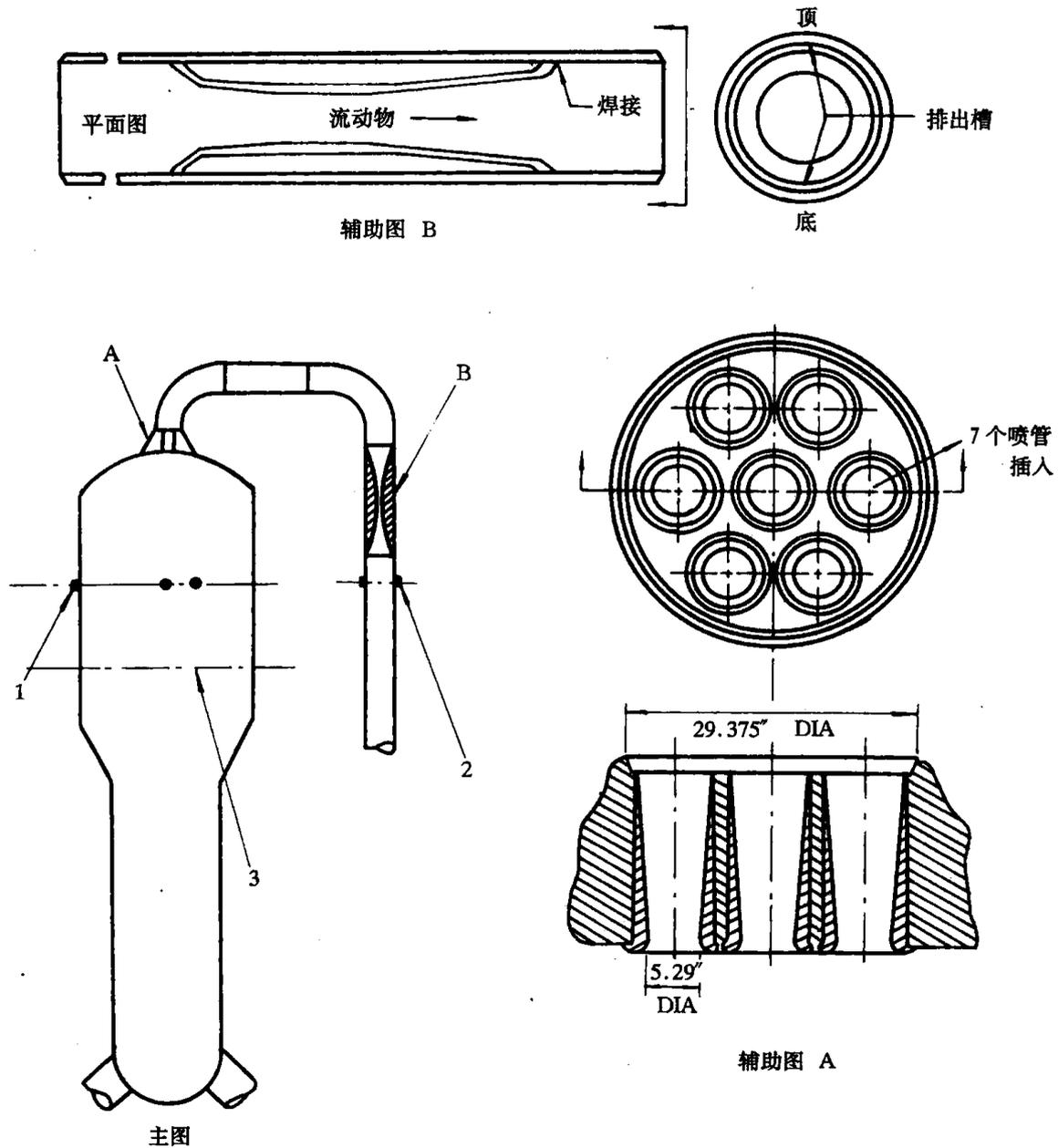


图 9-17 流量限制器

1—上部水位测量接管和测压接管;2—下游测压接管;3—正常水位
A,在蒸汽发生器出口的典型的流量限制器 B,封闭管内的典型流量限制器

其工作原理是利用流量限制器两端之间的压差来测量主蒸汽流量的。具体测量方法有两种,一种方法是在每台蒸汽发生器出口端上设置一个流量限制器,不但可以测量蒸汽流量,而且在流量限制器下游的蒸汽管线破损期间限制最大蒸汽流量,进而也就限制了反应堆冷却剂系统冷却降温的速率;另一种方法是将流量限制器安装在蒸汽发生器出口接管内。每条蒸汽管线上的 3 个蒸汽压力检测器同样地测量蒸汽流量,同时为控制和保护提供信息。

第 10 章 液位检测仪表

液位的高低对于反应堆和核电厂等来说是个重要的参数,例如反应堆冷却剂液位和稳压器内液位直接反映了反应堆和核电厂等的运行工况,关系到反应堆和核电厂等能否安全而经济地运行。液位检测仪表较多,一般认为浮子式液位检测仪表是不可取的,这是因为浮子卡住而产生一个与真实液位信号不可分辨的信号,若将液位检测仪表作为反应堆危急停堆系统的一部分,则仪表非常高的可靠性是很重要的。电容式、压电晶体式、电位计式、电解式、电离式、机械-光学式及半导体液位检测仪表都存在辐射损伤、密封和腐蚀等问题。水银压力计通常是不采用的,因为水银和反应堆冷却剂的偶然混合会导致反应堆系统的严重腐蚀问题。因此反应堆用的液位检测仪表局限于下列几种:1. 差压式液位仪表;2. 超声波或声波液位仪表;3. 电感式、磁阻式及涡流式液位仪表;4. 电阻探头液位仪表。

10.1 差压式液位检测仪表

安装在反应堆壳体外的差压式液位检测仪表已广泛地应用来测量反应堆壳体内冷却剂或减速剂的液位。因为可以把压力(差压)传感器安装在相当弱的辐射场中,那么就不存在核应用方面所特有的问题,然而必须考虑到取压接头问题,因为压力敏感元件可以置于反应堆壳内,也可用与延伸到反应堆壳体外部的取压接头相接的压力(差压)敏感元件,这里必须考虑的因素有:1. 必须满足反应堆安全准则对冷却剂可能流失的限制;2. 长管线对时间响应的限制;3. 安装管线或导线的有效空间;4. 相对价格和由于检验、维修或更换仪表所要求的停堆时间;5. 装置在所要求的持续运行时间内,成功地运行于预定的温度、压力和辐射水平下的可靠性。当堆芯参数的检测是利用反应堆壳体外的敏感元件时,则与之有关的工程问题就与通常在工业仪表系统中遇到的问题相似,这里就不讨论了。

10.1.1 差压式液位检测仪表的工作原理

利用静压差来检测液位的仪表称为差压式液位检测仪表。

如图 10-1 所示,在一个密闭容器中,A 点的静压(气相压力或汽相压力)为 P_A ,B 点的静压为 P_B ,液位高度为 H ,液体的密度为 ρ ,则 A、B 两点间的压差为:

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_B - P_A = \rho g H \\ \text{或 } H &= \frac{P_B - P_A}{\rho g}\end{aligned}\quad (10-1)$$

式中 P_A 、 P_B ——分别为容器中 A、B 两点的静压,Pa;
 ρ ——被测液体的密度,kg/m³;

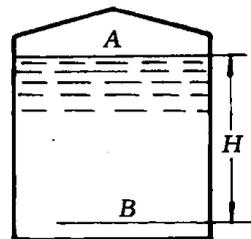


图 10-1 差压式液位检测仪表原理

H ——液位高度, m;
 g ——重力加速度, m/s^2 。

如果容器是开口的, 则有:

$$H = \frac{P_B - P_A}{\rho g} = \frac{P}{\rho g} \quad (10-2)$$

式中 P_A ——大气压, Pa;
 P ——表压(压力表的指示值), Pa。

因为反应堆和核电厂中的容器均为密闭容器。因此, 这里仅讨论密闭容器的液位检测仪表。

10.1.2 密闭容器的液位检测

在反应堆和核电厂中进行密闭容器的液位检测一般采用差压变送器进行检测, 根据不同的场合和使用条件, 用这种方法检测液位存在着无迁移, 负迁移和正迁移 3 种情况, 如图 10-2 所示。

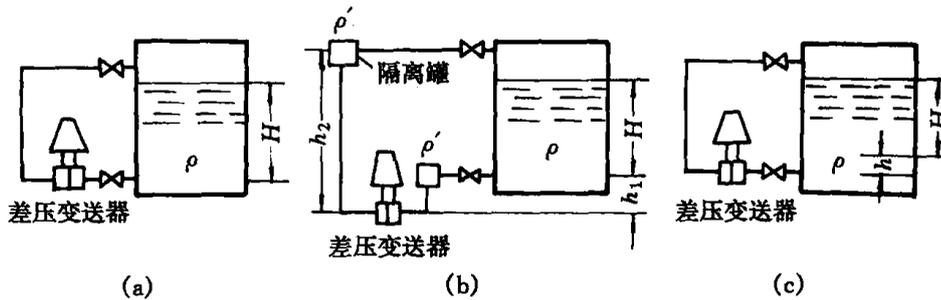


图 10-2 差压变送器检测液位原理图
 (a)无迁移; (b)负迁移; (c)正迁移

1. 无迁移

如图 10-2(a)所示, 差压变送器正、负压室分别与容器下部(液面基准面)和上部(气相压力或汽相压力)取压点相连通。设被测液体密度为 ρ , 变送器正负压室差压为 ΔP , 液位高度为 H , 则有 $\Delta P = \rho g H$ 。差压与液位高度成比例变化。变送器可以用电动的, 也可以用气动的。假设采用输出为 4~20mA 的电动变送器, 并假设对应于液位的变化所要求的仪表量程为 $\Delta P = 6000\text{Pa}$, 则变送器的特性曲线如图 10-3 中线 A 所示。 ΔP 为 0 时, 输出电流 I 为 4mA, ΔP 为 6000Pa 时, I 为 20mA, 为区别下面两种情况, 我们称这情况为“无迁移”。

2. 负迁移

如图 10-2(b)所示, 为防止被测介质堵塞或腐蚀导压管以及保持负压室的液柱高度恒定, 在变送器正、负压室与取压点之间分别装有隔离罐, 并充以隔离液, 此时正、负压室的压力分别为:

$$P_1 = \rho' g h_1 + \rho g h + P_g$$

$$P_2 = \rho' g h_2 + P_g$$

正、负压室的压差为:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g h - \rho' g (h_2 - h_1) \quad (10-3)$$

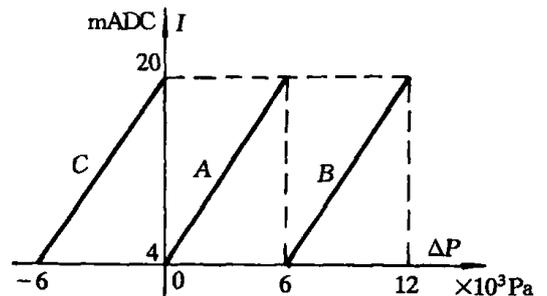


图 10-3 正、负迁移特性

式中 $P_1、P_2$ ——分别为变送器正、负压室的压力, Pa;
 $\rho、\rho'$ ——分别为被测液体和隔离液的密度, kg/m^3 ;
 $h_1、h_2$ ——分别为隔离罐至变送器正、负压室的高度, m;
 P_g ——容器中气相(或汽相)压力, Pa。

由式(10-3)可知, $H=0$ 时, $\Delta P = -\rho'g(h_2 - h_1) < 0$, 此时电动差压变送器的输出低于其下限值 4mA, 并且由于实际工作中, 往往 $\rho' > \rho$, 所以即使 H 为上限值都有可能使变送器输出低于 4mA, 这样变送器就无法正常工作。此时需要在变送器上调整迁移量, 即在维持原来量程不变的条件下, 同时减小变送器输入的上、下限, 使变送器的输出与液位成比例变化, 这个过程称为负迁移, 负迁移量为:

$$B = \rho'g(h_2 - h_1) \quad (10-4)$$

可见, 由 $h_2、h_1$ 和 ρ' 即可求出负迁移量 B 。

设 $H = 0 \sim 0.6\text{m}$, $\rho' = 1.2 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$, $\rho = 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$, $h_1 = 1.89\text{m}$, $h_2 = 2.40\text{m}$, $g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$, 电动差压变送器输出为 4~20mA。

则仪表量程为: $\Delta P = \rho g H = 10^3 \times 9.81 \times 0.6 = 6 \times 10^3 (\text{Pa})$;

负迁移量为: $B = -\rho g (h_2 - h_1) = -1.2 \times 10^3 \times 9.81 \times (2.40 - 1.89) = -6 \times 10^3 (\text{Pa})$;

ΔP 的下限值: $\Delta P_{\min} = -6 \times 10^3 (\text{Pa})$

ΔP 的上限值: $\Delta P_{\max} = \Delta P + \Delta P_{\min} = 6 \times 10^3 - 6 \times 10^3 = 0$

安装前, 将变送器量程调整到 $-6 \times 10^3 \sim 0\text{Pa}$, 即 $H=0, \Delta P = -6 \times 10^3 \text{Pa}$ 时, 变送器输出电流 I 为 4mA, $H=0.6\text{m}, \Delta P=0$ 时, I 为 20mA, 变送器输出特性曲线如图 10-3 中的 C 线所示。

3. 正迁移:

在实际应用中, 有时变送器位置于液位基准面, 如图 10-2(c) 所示。此时作用在变送器正负压室的差压为:

$$\Delta P = \rho g (H + h) \quad (10-5)$$

式中 h ——变送器正、负压室至液位基准面的距离。

当 $H=0$ 时, $\Delta P = \rho g h > 0$, 电动变送器输出高于下限值 4mA; 当 H 为上限值时, 变送器输出高于 20mA。此时, 需要在维持原来量程不变的前提下, 调整迁移量, 同时增大变送器输入的上、下限, 使 H 为 0 时输出为 4mA, H 为上限值时, 仪表输出为 20mA, 此过程为正迁移。正迁移量为:

$$A = \rho g h \quad (10-6)$$

只要知道 ρ, g, h , 即可知道正迁移量 A 。

设 $h = 0.6\text{m}$, $g = 9.81\text{m}/\text{s}^2$, $\rho = 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$, 则 $A = 10^3 \times 9.81 \times 0.6 = 6 \times 10^3 \text{Pa}$, 即 $\Delta P_{\min} = 6 \times 10^3 \text{Pa}$ 。若仪表的量程仍为 $6 \times 10^3 \text{Pa}$, 那么, $\Delta P_{\max} = 6 \times 10^3 + 6 \times 10^3 = 1.2 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

安装前, 把仪表量程调整到 $6 \times 10^3 \sim 1.2 \times 10^4 \text{Pa}$, 使 $H=0, \Delta P = 6 \times 10^3 \text{Pa}$ 时, $I = 4\text{mA}$; $H=0.6\text{m}, \Delta P = 1.2 \times 10^4 \text{Pa}$ 时, $I = 20\text{mA}$ 。变送器特性曲线如图 10-3 中的 B 线所示。

迁移量的相对值可用下式表示:

$$d = \frac{\text{迁移量}}{\text{测量范围}} \times 100\%$$

图 10-3 中 A 线表示迁移量为 0, 或无迁移; B 线表示正迁移 100%; C 线表示负迁移 100%。迁移只是同时改变量程的上下限, 而不是改变量程。应该注意: 仪表改变迁移量之后的量程上限值不能大于仪表测量范围上限值。

10.2 超声波液位检测仪表

一般工业部门使用的超声液位检测仪表已经得到广泛应用, 它是基于声波从两种不同密度的介质分界面反射的原理, 因为没有合适的抗高温和抗核辐射损伤的声波传感器和超声波传感器, 因此这种超声波液位检测仪表还未能能在反应堆液位检测工作中使用。

而基于感受与不同密度的液体相接触的振动系统阻尼阻抗或声阻抗差别的超声波传感器, 当探头与液面相接触时, 传感器感受出膜片的声负荷改变所造成的驱动线圈的电抗变化。如图 10-4 所示, 这种超声波液位检测仪表可以考虑用于反应堆液位的检测, 但是因为这种传感器不能测出振动平面和液体分界面之间的距离, 若不将它的安装在一个机械传动机构上, 则它们只能局限于固定点的测量。

另一种可动探头的超声波液位检测仪表, 它能感受出声波传输线端部的边界状况。超声波驱动的换能器和敏感晶体可以安装在低温、低辐射的环境中, 而只有金属部件暴露在反应堆环境中。如图 10-5 所示。

这种超声波液位检测仪表已经在一些国家成功地用于反应堆液位检测中。

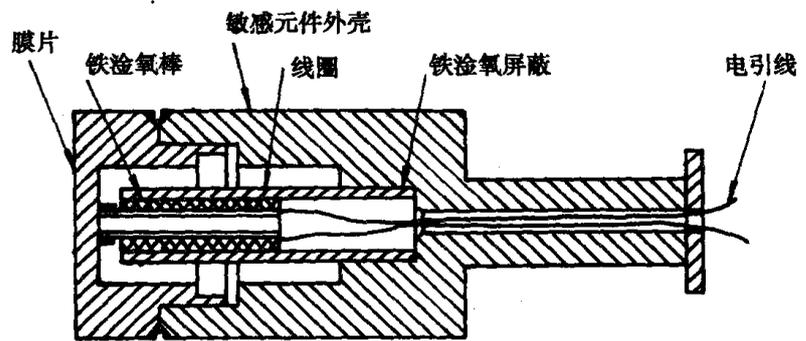


图 10-4 单点液位测量的超声波传感器简图

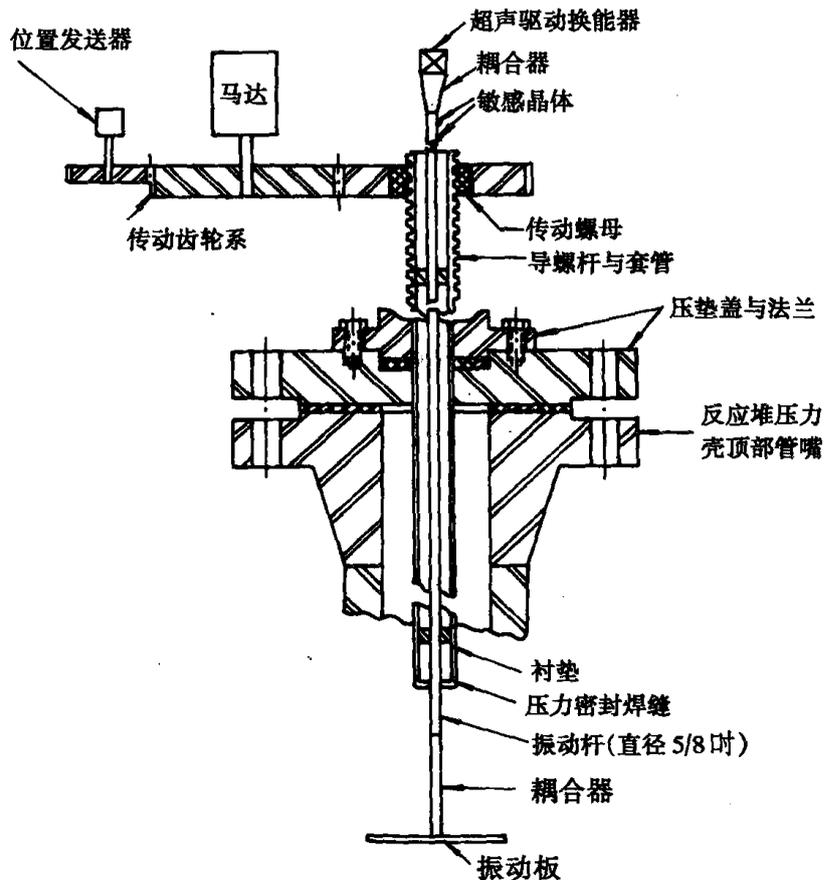


图 10-5 堆用超声波液位检测仪表探头简图

10.3 涡流式液位检测仪表

涡流式液位检测仪表的工作原理是基于导电液体中的涡流感应作用,它包含了电感式和磁阻式液位检测仪表,它是通过感受在射频下工作的线圈的自感或互感变化来实现的。

10.3.1 自感式涡流液位检测仪表

自感式涡流液位检测仪表原则上说可以应用于短量程范围的液位连续指示,但是它应用于反应堆壳体内液位的测量可能只限于固定点的使用。

图 10-6 表示出带有温度补偿线圈装置的固定点的自感式液位检测仪表的电路图。它适用于高液位的报警。如果探头高于液面,那么两个线圈的电感近似相等,通过输出变压器的电流就很小。系统温度的变化对两个线圈起同样的影响作用,而不会引起系统输出的变化。当液面与探头的端头相接触时,敏感线圈的电感变化将引起输出量的变化。

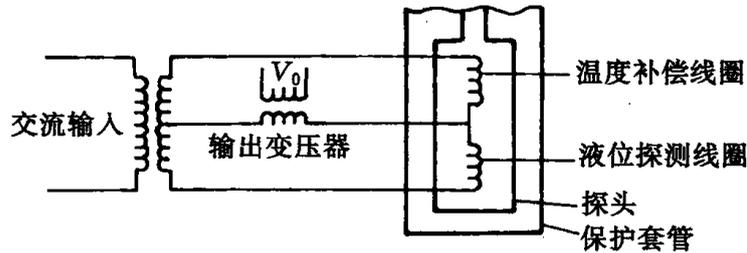


图 10-6 单点测量的涡流液位仪表电路图

对于低液位报警,则要作稍微不同的布置,以便补偿液体的电阻温度系数。在这种情况下,需要感受到与两个线圈同时接触的液位,并检测出与上部线圈脱离接触时的液面。在很多应用场合不需要温度补偿线圈,因为当探头与液体接触时所产生的线圈电感变化要比温度或其它寄生效应造成的电感变化大得多。

10.3.2 互感式涡流液位检测仪表

互感式涡流液位检测仪表分为双线圈互感式和三线圈互感式。图 10-7 是一种双线圈互

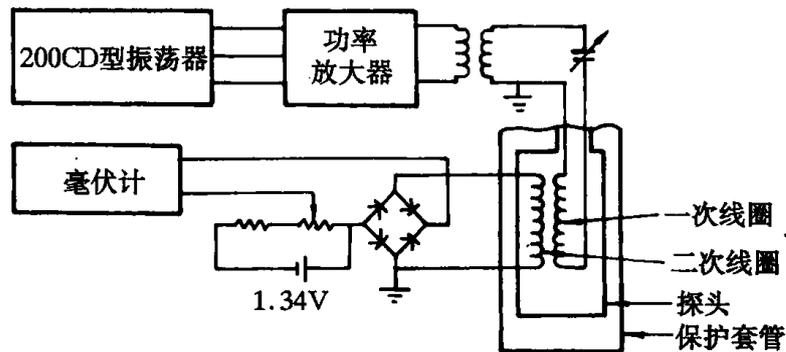


图 10-7 双线圈互感式涡流液位检测仪表示意图

感式的涡流液位检测仪表示意图,二次线圈中的电流正比于一次线圈和二次线圈之间的互感。该电感量受线圈附近材料电导率的影响。图中探头和线路未考虑温度引起的绕阻阻值变化,套管或液体的电导率变化,振荡频率或幅度的变化等因素的变化进行补偿。若在正常液位下面设置一个参考传感器,使用恒流晶体控制的振荡器,并用一个高质量的放大器和同步解调器来代替整流器解调器,则可以减少上述因素的影响。在探头的结构中所用材料均是抗辐照损伤的。

图 10-8 表示三线圈互感式涡流液位检测仪表示意图。这种仪表相当于差动变压器,其中反接的二次绕组的反接输出正比于一次绕组和各个二次绕组之间耦合情况的差值。当将传感器完全侵入导电液体中时,一次绕组和每个二次绕组之间的耦合情况差不多,而输出是最小的。如果传感器从导电液体中完全抽出时,那么也出现同样的情况。可以应用多种线路来检测传感器何时达到液体中一定的高度。二次绕组附近的材料与液体具有相同的涡流耦合系数。因此在唯一的一个液位上得到零读数。同时用伺服机构控制涡流传感器,当传感器相对于液位改变位置时,伺服系统首先感受出传感器输出的变化,然后在恢复伺服系统平衡的方向上移动传感器。这种系统能得到连续的液位指示,但它具备电—机系统所固有的带有运动部件的缺点。

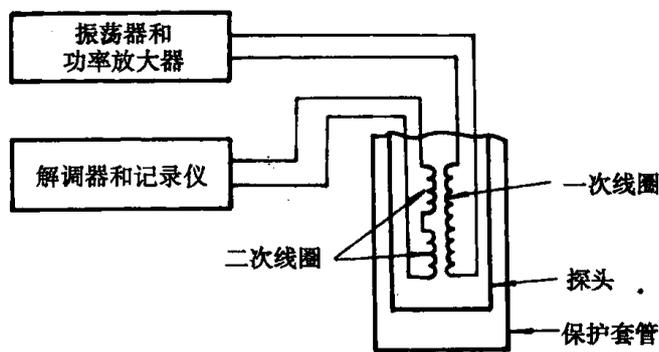


图 10-8 三线圈互感式液位检测仪表

10.4 霍尔液位计

在第八章中提到利用霍尔传感器来检测压力和压差。即霍尔压力或压差检测仪表,这里再简要介绍一下霍尔传感器的工作原理,进而讨论霍尔液位计的工作原理。

霍尔传感器结构简单,形小体轻,无触点,频带宽,动态特性好,寿命长,因而得到了广泛的应用。

1. 霍尔传感器的工作原理

霍尔传感器的工作原理是基于某些半导体的霍尔效应,如图 10-9 所示。一块矩形半导体薄片,在其两端入口通以控制电流 I ,当没有磁场作用时,其 3、4 两端的电位相同。当有磁力线垂直穿过半导体薄片时,3、4 两端便产生了电位差 V_H ,这种现象称为霍尔效应。电位差 V_H 称为霍尔电势。

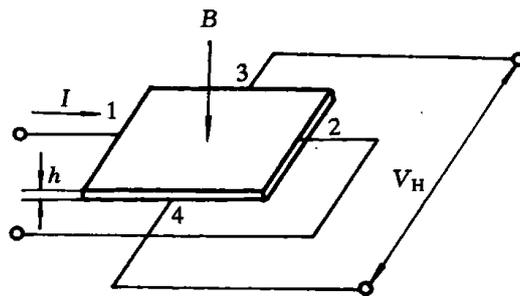


图 10-9 霍尔传感器工作原理

实验表明,霍尔电势的大小与控制电流 I 及磁感应强度 B 成正比,即有

$$V_H = \frac{R_H}{h} \cdot I \cdot B = KnIB \quad (10-7)$$

式中： R_H 为霍尔常数，其值与材料性能有关； h 为霍尔元件的厚度； B 为磁感应强度； Kn 为霍尔元件灵敏系数。

由上式可知，改变控制电流 I 或磁感应强度 B 均可使霍尔电势 V_H 发生变化。利用被测量来改变 I 或 B ，便可由霍尔电势值来确定被测量的值。

2. 霍尔液位计的工作原理

如图 10-10 所示，利用霍尔压力传感器(或霍尔差压传感器)来测量容器中的液位。当被测液位产生的压力作用于固定了激励电流不变的霍尔元件的弹性元件上(膜盒、膜片或弹簧管)，从而使弹性元件产生位移，进而带动霍尔元件在具有均匀梯度的磁场中移动，从而产生霍尔电势，并转换为与液位对应的电信号输出。

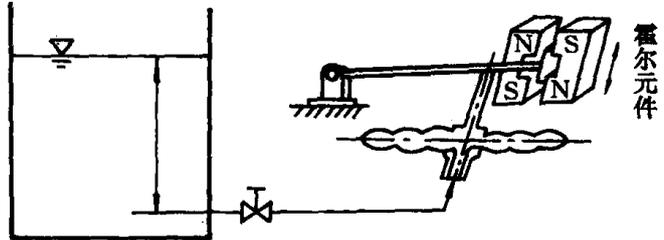


图 10-10 霍尔液位计工作原理

10.5 电阻式液位检测仪表

电阻式液位检测仪表原理是基于液位的变化引起传感器电阻的变化，然后通过测量电阻的变化值来测出液位的高低。这种仪表可以连续测量液位或对液位进行定位控制。

电阻液位检测仪表的原理如图 10-11 所示。其传感器是由两根电阻率很大的丝或棒料所组成，两根丝或棒料的材料和截面积都是相同的。安装时应将丝或棒料两端拉紧，并与容器绝缘。如果忽略其导电介质的电阻，则整个传感器的电阻 R 可用下列式子表示：

$$R = \frac{2\rho}{A}(H - h) = \frac{2\rho H}{A} - \frac{2\rho h}{A} = K_1 - K_2h \quad (10-8)$$

式中 ρ ——丝或棒的电阻率；
 A ——电极横截面积；
 H ——电极全长；
 h ——被测液位；

$$K_1 = \frac{2\rho H}{A}, K_2 = \frac{2\rho}{A}, K_1 \text{ 和 } K_2 \text{ 均为常数。}$$

故 R 和 h 之间是单值函数关系，即 $R = f(h)$ ，因此可以用平衡电桥测量 R 的办法来测量出被测液位 h 。

这种仪表显然不能测量腐蚀性介质和能使极棒表面结垢和生锈等介质，因为这将引起电极表面电阻的变化而影响仪表的精度。

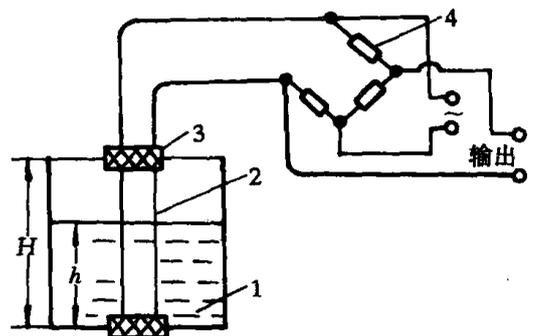


图 10-11 电阻式液位检测仪表原理示意图

1—被测液体；2—电阻传感器电极；
 3—绝缘套；4—平衡电桥

电阻式液位检测仪表没有在水冷反应堆或慢化剂为水的反应堆中得到广泛地应用,这是因为水堆要求使用高电阻率的水,以防反应堆材料腐蚀。只能在液态金属作为冷却剂的反应堆中使用,例如图 10-12 所示为液态金属电阻式液位检测仪表示意图。

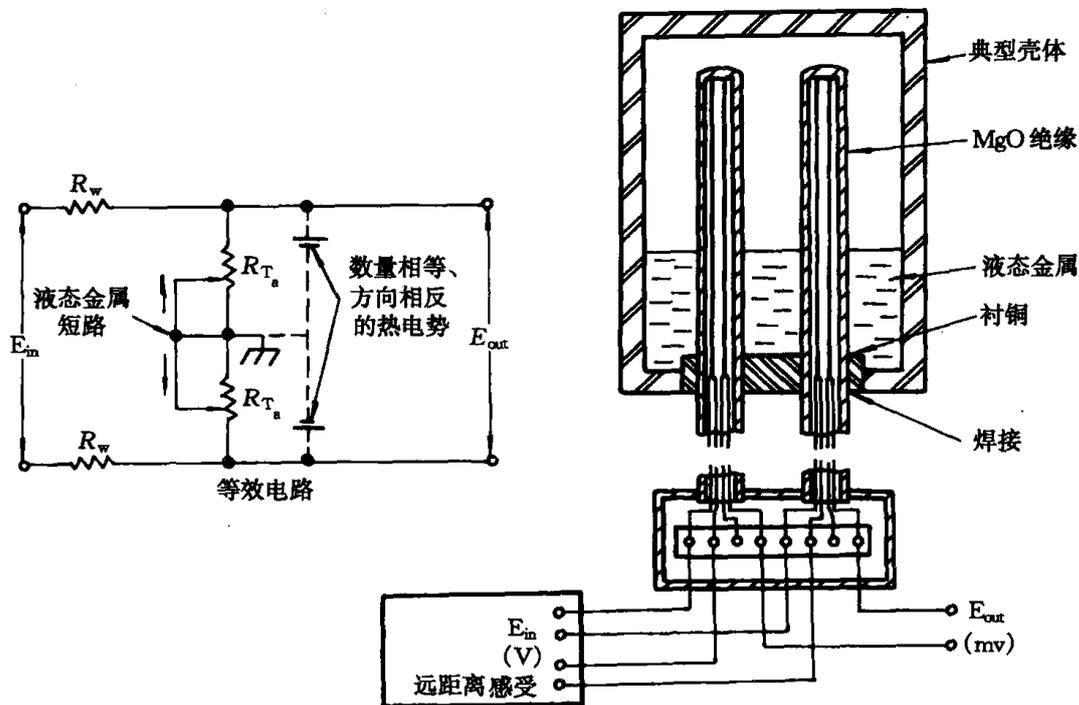


图 10-12 液态金属电阻式液位检测仪表示意图

10.6 液位检测的参考水柱方法

利用参考水柱来检测液位的方法在反应堆及核电厂得到了广泛的应用,例如图 10-13 所示为蒸发器水位检测原理图。从图中可见,上引压管连到一个冷凝水罐上,以便得到一个稳定的参考水柱。参考水柱与差压传感器左侧相连。下引压管接到右侧。由此可得出各指定点的压力为:

$$P_A = P_V + \rho_R g H \quad P_B = P_V + \bar{\rho} g h$$

$$P_A' = P_A + \rho_R g L \quad P_B' = P_B + \rho_L g L$$

故有: $\Delta P = P_A' - P_B' = P_A + \rho_R g L - P_B - \rho_L g L = g(\rho_R H - h\bar{\rho}) + gL(\rho_R - \rho_L)$

的以有:

$$h = \frac{\rho_R(H + L) - (\rho_L L + \frac{\Delta P}{g})}{\bar{\rho}}$$

式中 $\bar{\rho}$ ——为下降通道混合水密度;

ρ_R ——为参考管内水的密度;

ρ_L ——为下引压管内水的密度;

h ——为被测的蒸汽发生器的水位。

在 100% 负荷下, ΔP 的变化范围是: 100% 水位为 $9.6 \times 10^3 \text{Pa}$, 在 0% 水位为

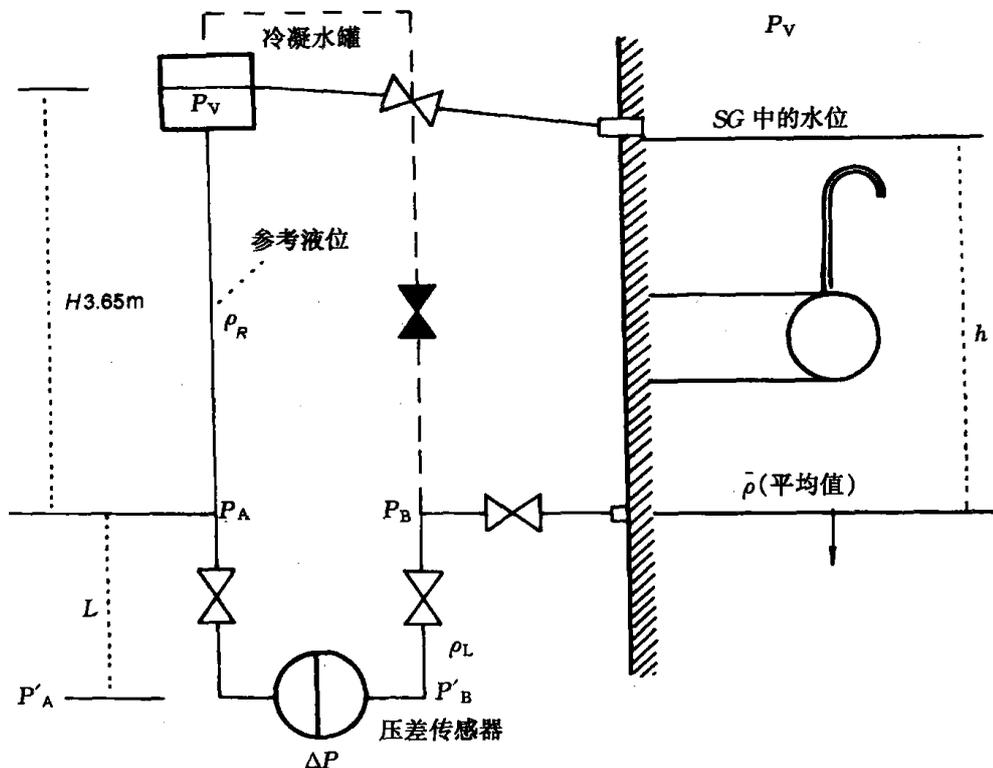


图 10-13 蒸汽发生器水位测量原理图

$3.67 \times 10^4 \text{Pa}$ 。

10.7 液位检测的内参考管和外参考管方法

反应堆和核电厂中的水位检测常采用内参考管和外参考管的方法。

核电厂中稳压器水位的测量通常采用内参考管的差压检测方法。如图 10-14 所示。图中 1# 为参考点引压管, 2# 和 3# 为两个内参考管, 引压管三个引压管口在同一个水平面上。 ΔP_{12} , ΔP_{13} 和 ΔP_{23} , 分别为各引压管之间的压差。由公式

$$\Delta P_{12} = h_1(r_{\text{水}} - r_{\text{汽}}) \quad (10-10)$$

$$\Delta P_{13} = h_2(r_{\text{水}} - r_{\text{汽}}) \quad (10-11)$$

$$\Delta P_{23} = h(r_{\text{水}} - r_{\text{汽}}) \quad (10-12)$$

得

$$h_1 = \Delta P_{12} h / \Delta P_{23} \quad (10-13)$$

$$h_2 = \Delta P_{13} h / \Delta P_{23} \quad (10-14)$$

这里 h_1 为窄量程液位, h_2 为宽量程液位, h 是已知的, 因此只要由差压变送器测得压差 ΔP_{12} , ΔP_{13} 和 ΔP_{23} , 将信号送给一个除法器就可得到稳压器的水位。可见这种方法在理论上与水和汽的重度 $r_{\text{水}}$ 和 $r_{\text{汽}}$ 均无关。

稳压器水位测量也有采用外参考管的办法, 例如大亚湾核电厂稳压器水位测量就是采用的这种方法。其测量原理如图 10-15 所示。

从图中可见, 差压变送器一侧与稳压器下部管咀相连, 以反映水位产生的压力, 另一侧与一

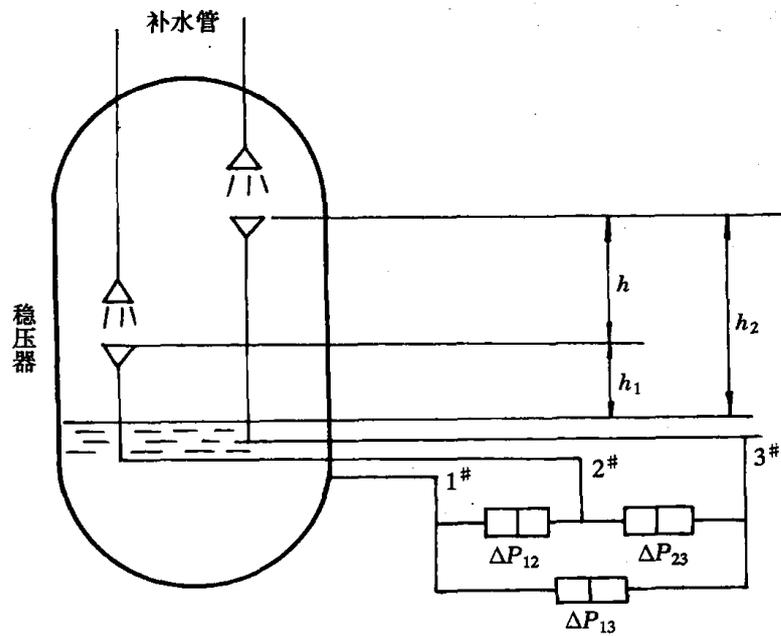


图 10-14 稳压器的水位测量原理(内参考管法)

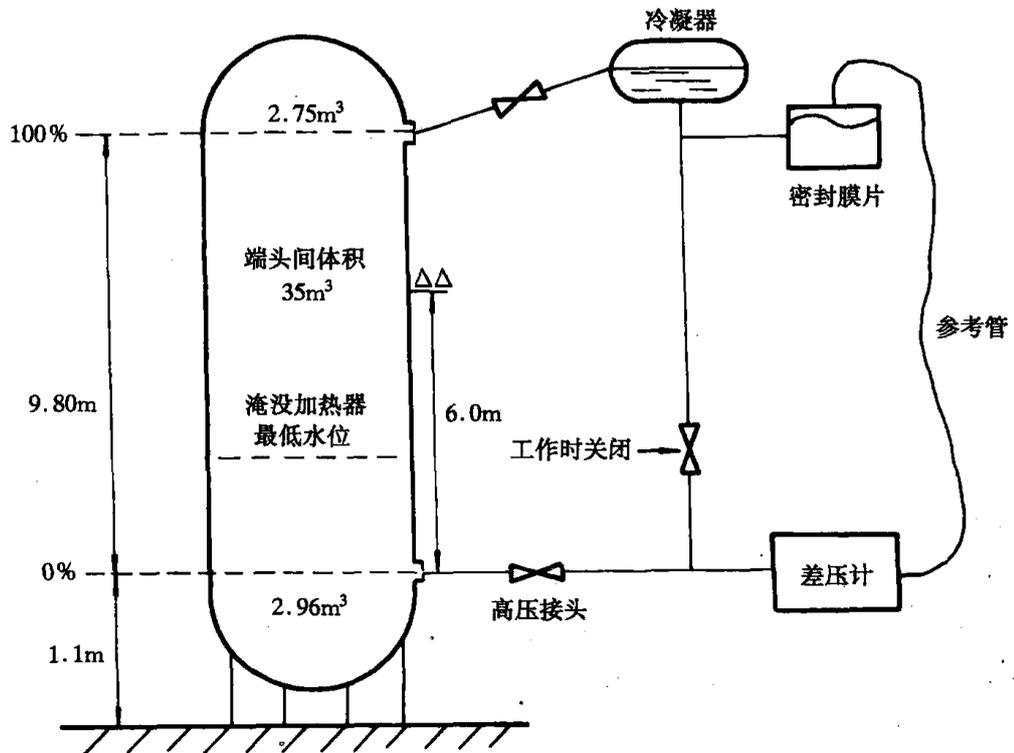


图 10-15 稳压器水位测量原理图(外参考管法)

个参考管相连,参考水管上端通过冷凝器与稳压器汽空间相连,它的中间有一个隔膜把参考管的水和冷凝器隔开,以防止稳压器水中分离出来的氢气形成气泡带入参考管中,影响测量精度。

10.8 液位检测的参考差压计法

采用参考差压计法测量压力容器水位的原理如图 10-16 所示。由图可知,压力容器顶部和底部的压力差 ΔP 为:

$$\Delta P = (H - h)r_V + hr_L \quad (10-15)$$

其中 H 为压力容器高度, h 为压力容器水位高度, r_L 为压力容器内水的重度, r_V 为压力容器内蒸汽重度。

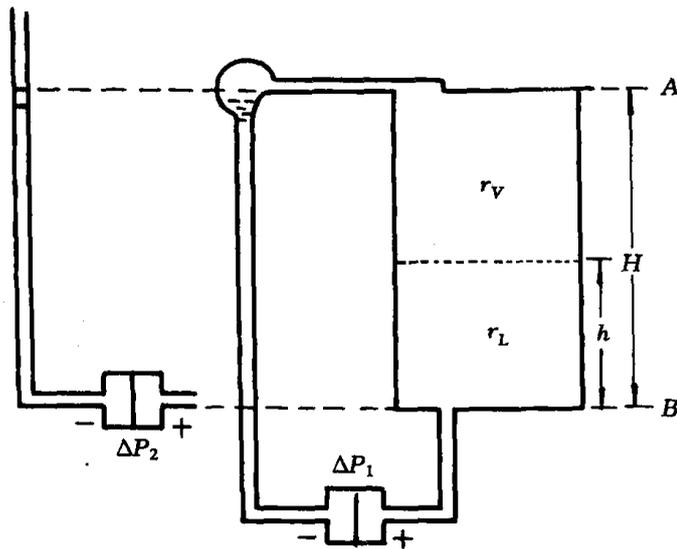


图 10-16 压力容器水位测量原理

由式(10-15)可得 h 为

$$h = \frac{\Delta P - Hr_V}{r_L - r_V} \quad (10-16)$$

而

$$\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2 \quad (10-17)$$

故有:

$$h = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2 - Hr_V}{r_L - r_V} \quad (10-18)$$

式中 ΔP_1 ——窄量程差压计测得的压差;

ΔP_2 ——参考差压计测得的压差。

大亚湾核电厂堆芯水位测量就是采用的这种方法。堆芯水位测量系统主要用于失水事故后监测堆淹没情况,正常充、排水时观察堆内充水情况以及主泵开动时,监测堆芯压差。系统采用了冗余技术,分 A、B 两个通道,每个通道用了 3 台差压计。其中宽量程差压计用来在主泵开动时监测堆芯压差,窄量程差压计用来在主泵未开动时监测堆芯水位,参考差压计用来消除宽、窄量程差压计输出信号中的参考液柱项。

第 11 章 位置检测仪表

11.1 概述

位置检测,实际上就是位移的检测。位移检测是线位移和角位移检测的统称。

位移是向量,它表示物体上某一点在一定方向上的位置变化,因而对位移的度量,除了确定其大小之外,还应确定其方向。一般情况下,应使测量方向与位移方向重合,这样才能真实地检测出位移量的大小。如测量方向和位移方向不重合,则测量结果仅是该位移量在测量方向上的分量。

位移检测时,应当根据不同的被检测对象,选择恰当的检测点、检测方向和检测系统。位移检测系统由位移传感器、相应的测试电路和终端显示装置组成。位移传感器选择恰当与否,对检测精确度影响很大,必须特别加以注意。

位置检测仪表的种类较多,常用的位置检测仪表有下列几种类型:

1. 电位器式位移检测仪表:是利用电位器作为转换元件,将位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;
2. 电容式位移检测仪表:是利用电容转换元件,将位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;
3. 电感式位移检测仪表:是利用电感转换元件,将位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;
4. 变磁阻式位移检测仪表:是利用变磁阻转换元件,将位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;
5. 差动变压器式位移检测仪表:是利用差动变压器转换元件,将位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;
6. 应变式位移检测仪表:是利用应变转换元件,将位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;
7. 光导式位移检测仪表:是利用光导转换元件,将位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;
8. 振弦式位移检测仪表:是利用张紧弦丝的谐振频率随位移变化的特性,通过相应的测量电路,将微小位移量转换成脉冲输出;
9. 数字式位移检测仪表:是将位移量转换成数字形式输出;
10. 电位器式角位移检测仪表:是利用电位器作为转换元件,将角位移量转换为与其成相应关系的电信号输出;

由于密封、辐射损伤或材料腐蚀等问题,常规位移检测仪表不适合在反应堆中应用。因此,这里仅介绍应变式,差动变压器式、电感式、涡流式等几种位移检测仪表。

11.2 应变式位移检测仪表

电阻应变传感器的工作原理在第八章中已介绍过,这里不再讨论,应变式位移检测仪表的工作原理和常用的应变传感器的工作原理是相似的,是通过应变式传感器将位移量转换成电信号。图 11-1 表示了安装于基底材料上的普通丝状或箔状应变丝。基底材料用来使应变丝和金属表面彼此绝缘,普通的基底材料如纸、胶木和环氧树脂及通常作为粘接剂的有机粘合剂

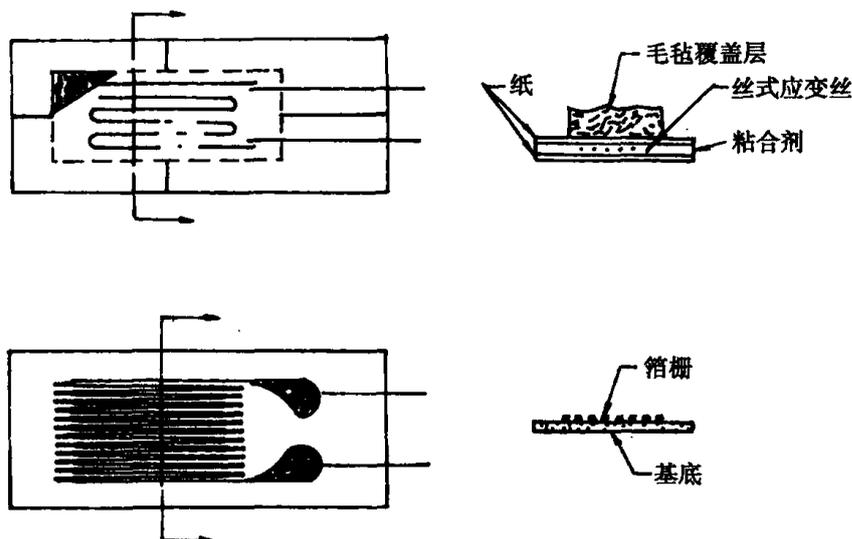


图 11-1 普通的丝式和箔式电阻应变片示意图

扩大到即使是中等强度的辐射场中使用也是不行的。因此,用于核环境的粘合剂和基底材料的选择仅局限于陶瓷材料。试验表明,若应变数据中可对由低的绝缘电阻引起的误差进行修正,那末用陶瓷粘合剂直接将应变丝粘接到金属表面的方法在快中子积分通量 10^{17} n/cm^2 以下均能用于反应堆中。

一种由嵌在陶瓷绝缘中的应变敏感丝做成的应变传感器如图 11-2 所示。它是由绝缘体外包以金属管再加以型制而成的。这种应变传感器组件焊到发生应变的构件上。应变式位移检测仪表已经满意地使用于快中子和热中子通量 10^{11} 和 $10^{13} \text{ n/(cm}^2 \cdot \text{s)}$ 的辐照环境之中。在接受快中子和热中子积分通量分别为 10^{18} 和 10^{20} n/cm^2 后仍能正常工作。在辐射试验终了时,绝缘电阻级为 $2 \text{ M}\Omega$,在反应堆运行期间,其变化为 0.2 至 $0.6 \text{ M}\Omega$ 。在

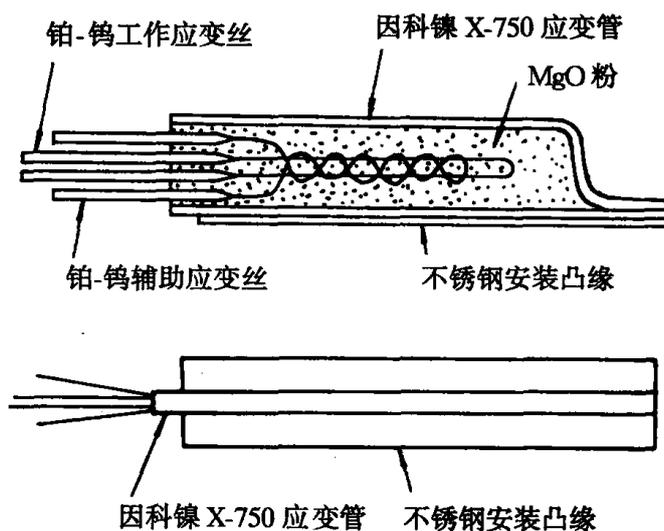


图 11-2 可焊接的电阻应变仪表示意图

工作应变片旁边安装一个辅助应变片可以补偿大约 1.5% 的应变片电阻的变化。这种应变式位移检测仪表长期使用的温度极限为 882℃，而作动态应变检测用时则为 1 182℃。很显然，这种仪表不能用在很薄的材料上或非常弯曲的表面上。

11.3 差动变压器式位移检测仪表

11.3.1 差动变压器式位移检测仪表的工作原理

差动变压器式位移检测仪表是引用差动变压器转换元件将位移的变化转化为原边对两副边绕组互感系数的变化，从而使位移量转换为与其成相应关系的电信号输出。如图 11-3 所示，其接线原理如图 11-4 所示，等效电路如图 11-5 所示。差动变压器的本质是一个变压器，只是其磁路有很长一段在空气中，原边到副边的互感系数随衔铁的移动而变化，而且是差动式的。当副边开路时其输出电压的瞬时值为 $\Delta u = e_1 - e_2$ ，其中 e_1 和 e_2 为两副边的感应电势， $e = -M \frac{di}{dt}$ ， M 为互感系数， i 为原边电流的瞬时值。

$$\Delta u = \frac{di}{dt}(M_2 - M_1) \quad (11-1)$$

式中 M_1 和 M_2 ——原边与副边线圈 W_1 和 W_2 的互感系数。

原边电势 \dot{e} 与电流 i 有如下关系： $i = \frac{\dot{e}}{r + j\omega L}$ ，其中 ω 为电势的角频率， L 为原边的电感。副边的感应电势为： $\dot{e}_1 = -j\omega M_1 i$ ； $\dot{e}_2 = -j\omega M_2 i$ 。副边开路时输出电压为 $\Delta \dot{u} = \dot{e}_1 - \dot{e}_2 = -j\omega i(M_1 - M_2)$ 故有：

$$\Delta \dot{u} = -j\omega \frac{\dot{e}}{r + j\omega L}(M_1 - M_2) \quad (11-2)$$

当 $\frac{\omega e}{r + j\omega L}$ 是一个常值时，输出的开路电压 $\Delta \dot{u}$ 与 $(M_1 - M_2)$ 的线性关系。其输出特性如图 11-6 所示。铁芯在中间位置时输出并不为零，这是由于差动变压器的两个副边线圈不可能制造得完全对称而造成的，因此测量电路必须考虑消除这个非零点输出。差动变压器的测量电路要能反映铁芯位移

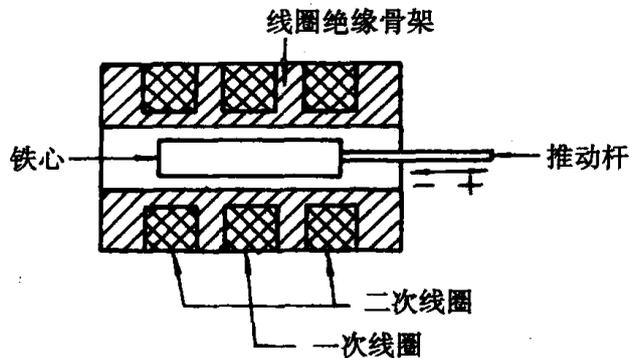


图 11-3 差动变压器

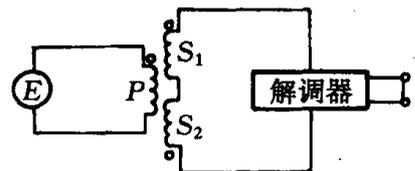


图 11-4 差动变压器接线图

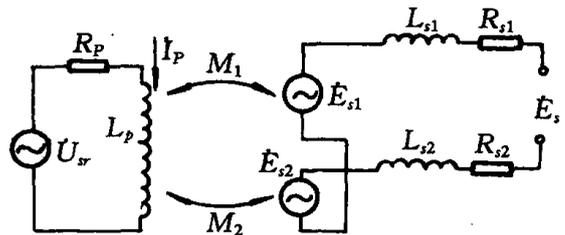


图 11-5 差动变压器等效电路图

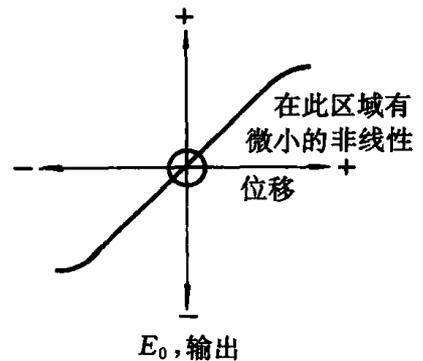


图 11-6 差动变压器输出特性

的极性,又能消除零点残余电压。为此采用相敏检波电路。

11.3.2 差动变压器式位移检测仪表在反应堆中的应用

差动变压器位移检测仪表在反应堆中的应用主要包括下列几个方面:

1. 燃料在包壳内部的轴向膨胀或收缩的检测;
2. 由于温度或压力变化而可能导致燃料包壳的轴向增长的检测;
3. 燃料元件弯曲度的检测;
4. 控制棒或燃料元件振动的检测;
5. 控制棒棒位的检测;
6. 阀门位置指示;
7. 各种构件相对位置的检测。

这种位移检测仪表已经在热中子通量为 $10^{13} \text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的反应堆中应用来检测燃料棒伸长长度,装置的中子积分通量达到 $5 \times 10^{20} \text{n}/\text{cm}^2$ 。差动变压器位移检测仪表已经成功地用于哈尔登沸腾重水反应堆,工作温度可以达到 $300 \sim 650^\circ\text{C}$ 。

图 11-7 表示出用两个差动变压器测量包壳内燃料的位移和包壳相对于元件盒的膨胀的装设方法。除了提供关于燃料棒长期工作特性的数据以外,这一测量方法也可检测由于不适当的冷却而引起的包壳内部燃料的融化。若反应堆元件盒中有一根燃料棒装有这种形式的包壳膨胀探测器,那末就有可能测出局部超功率或冷却不良的情况从而在元件盒中的燃料棒普遍损坏以前能及时停堆。这种形式的探测器已经成功地应用于挪威的沸腾重水反应堆的元件

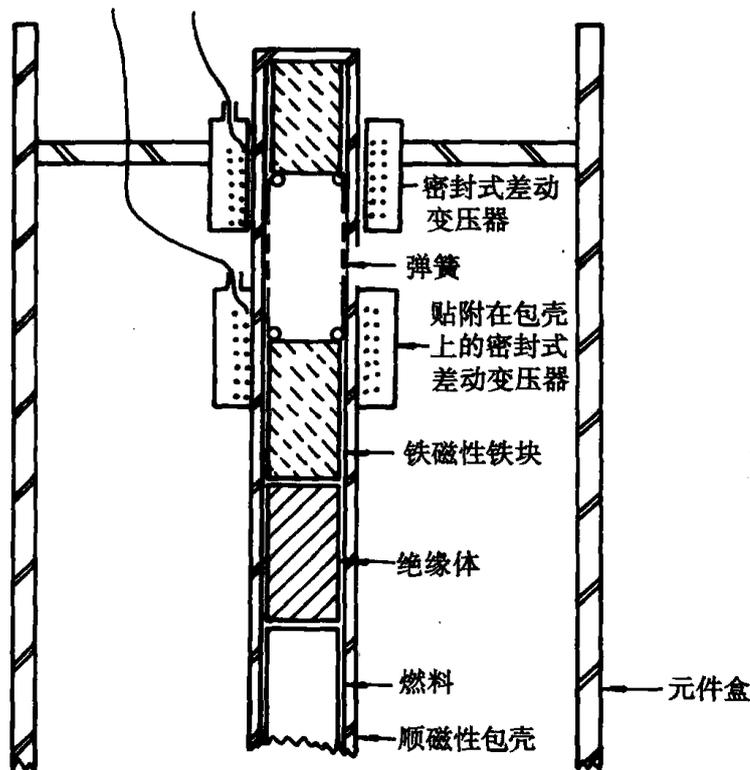


图 11-7 测量燃料和包壳伸长度的差动变压器

盒中。

一种用于局部热点检测的差动变压器,即采用一种专用的插入式耦合变压器代替联接差动变压器组件和引线的标准电气接头,如图 11-8 所示,这种结构可以使燃料换料过程中的联接和拆卸的操作很方便。

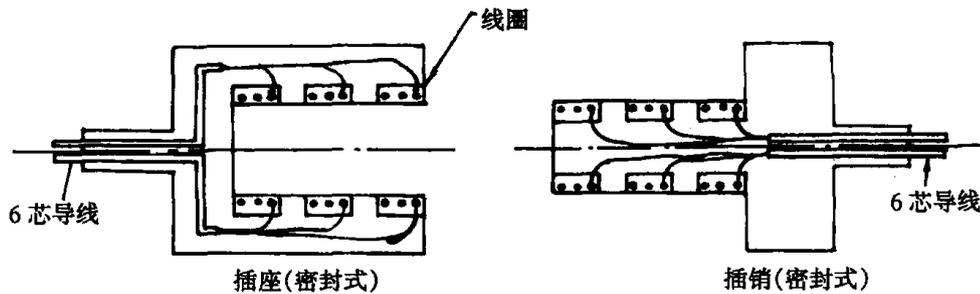


图 11-8 用于差动变压器的插入式耦合变压器示意图

差动变压器式位移检测仪表已经非常成功地用来测量研究过渡过程用的试验堆的许多瞬态试验中的燃料膨胀特性,在这些试验期间,中子通量的峰值曾超过 $10^{15} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。因此,若能对差动变压器进行适当的冷却,则这种仪表就能很满意地用于现有的任何反应堆的短期测量。

11.3.3 控制棒棒位的检测

控制棒棒位的检测是差动变压器式位移检测仪表在反应堆中应用的一个典型例子。

控制棒棒位检测系统是用来检测停堆棒、调节棒和短棒在堆芯中的位置,给出控制棒的“棒到底”和“棒到顶”信号、控制棒之间的失步信号以及为控制和保护系统提供必要的联锁信号。

控制棒棒位检测系统一般由探测器、操作和信号变换装置以及报警与指示器 3 部分组成。探测器是控制棒位置的发讯器;操作与信号变换装置用来选择组、子组或单束棒的位置指示,并变换与处理由探测器送来的信号;报警与指示器在指控“棒到顶”、“棒到底”和失步越限时发出警报信号,并指示正常情况下的控制棒位置。

1. 探测器

反应堆控制棒棒位探测器是差动变压器式传感器构成,它的初级和次级线圈安装在控制棒传动轴压力壳的周围。初级线圈加以交流电压,当控制棒在压力壳内移动时,在变压器次级线圈上感应出反映控制棒位置的脉冲信号,该信号送给信号变换装置进行处理。

2. 操作与信号变换装置

反应堆中的控制棒一般都有几十束之多,不可能在控制室内设置几十块指示仪表。根据控制棒的分组情况,通常每组设置一块指示仪表。但是为了检测每个子组或每束棒的位置,棒位指示系统里安装了组和束的选择开关。

在探测器上产生的差动信号经过多芯电缆送至变换装置中的编码器,由编码器将该差动信号转换为循环码,这个与实际棒位相对应的循环码经过输入/输出设备送至数字显示装置,如果遇有失步、“棒到顶”、“棒到底”,则马上发出报警信号。

大亚湾核电压厂反应堆控制棒棒位检测系统如图 11-9 所示。传动杆上部在测量线圈内

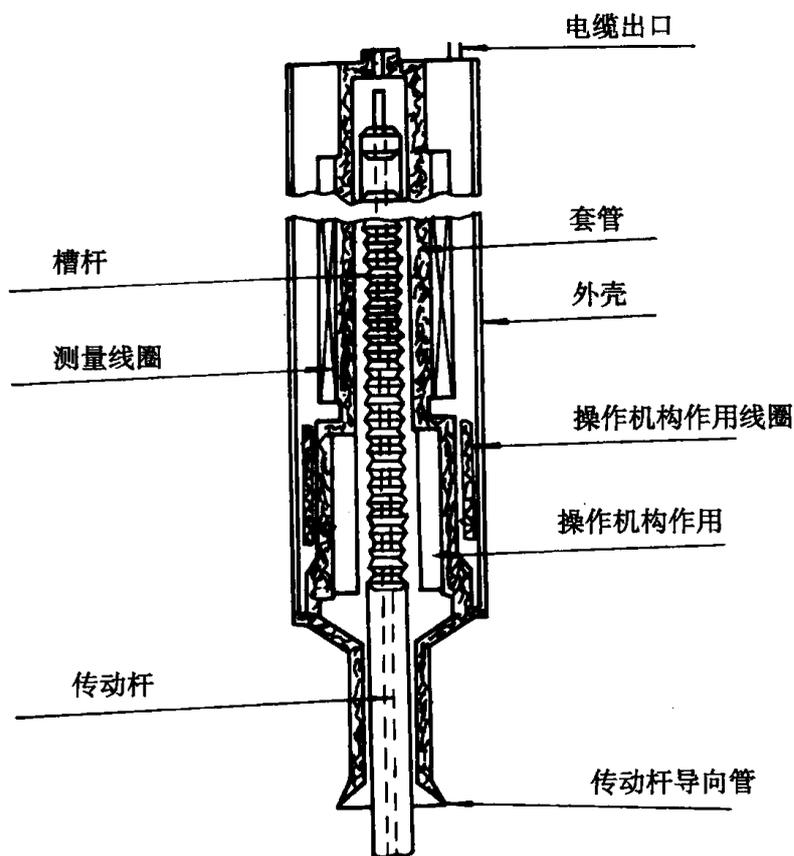


图 11-9 反应堆控制棒棒位检测系统结构原理图

部移动。测量线圈的一次绕组通过交流电,在整个测量高度上均匀绕制。二次线圈共 31 只,每 8 步布置一只,每步 15.875mm,所以二次线圈距离是 127mm。传动杆由导磁材料制成。端部高度以下的二次线圈感生出电压信号,二次线圈采用“隔一正反”接法,结果产生 5 位格兰码。棒位测量电路将其转换,以驱动 30 只指示灯。53 束控制棒的 53 行棒位指示灯装于控制盘上。

11.4 电感式位移检测仪表

这种仪表实质上就是一个带铁芯线圈的仪表,它的工作原理基于机械量变化引起线圈回路磁阻的变化,从而导致电感量变化这一物理现象。

根据定义,线圈的电感为

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (11-3)$$

磁通为

$$\Phi = \frac{NI}{\sum_{i=1}^n R_{m_i}} \quad (11-4)$$

故有

$$L = \frac{N^2}{\sum_{i=1}^n Rm_i} = \frac{N^2}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\mu_i A_i}} \quad (11-5)$$

$$Rm_i = \frac{l_i}{\mu_i A_i} \quad (11-6)$$

式中 L ——线圈电感；
 N ——线圈匝数；
 A_i ——各段导磁材料的截面积；
 Φ ——磁通；
 I ——电流；
 Rm_i ——第 i 段磁路的磁阻；
 μ_i ——第 i 段磁路导磁系数；
 l_i ——第 i 段磁阻长度；
 n ——磁路的段数。

由式(11-5)可见,当线圈匝数一定,介质导磁系数一定。磁路的几何尺寸变化就会导致电感的变化,因此被测物理量引起磁路几何尺寸的变化,就引起了电感的变化。电感传感器又有变间隙型、变面积型,螺管插铁型等3种类型。例如实际工作中应用得较多的变间隙型电感传感器,如图11-10所示。

这种传感器又称为气隙式电感传感器。工作原理是被测物理量使衔铁产生位移,使铁芯和衔铁间的间隙 δ 发生变化,从而引起了磁路几何尺寸的变化,因而使线圈中的电感值 L 产生了变化,这样就使被测量(例如位移)转换为电感值,然后通过电感组成的电桥,输出一个与被测量相对应的电信号,将其输入显示仪表指示被测量。

由图中可见,若 δ 较小,且不考虑磁损,则磁路的总磁阻为

$$R_m = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{l_i}{\mu_i A_i} + \frac{2\delta}{\mu_0 A} \quad (11-7)$$

式中 δ ——气隙的长度；
 μ_0 ——空气的导磁系数；
 A ——气隙截面积。

考虑到导磁体的磁阻比空气隙的磁阻小得多,所以可以忽略导磁体的磁阻,故有

$$L \approx \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta} \quad (11-8)$$

对于一个定型的气隙式电感传感器, N 、 μ_0 和 A 均为常数,则有

$$L = \frac{C}{2\delta} \quad (11-9)$$

式中 C ——常数。

可见,气隙式电感传感器的电感量和气隙 δ 之间是单值的函数关系。

为了提高电感传感器的灵敏度,减少测量误差,实际工作中常常采用两个相同的传感器线

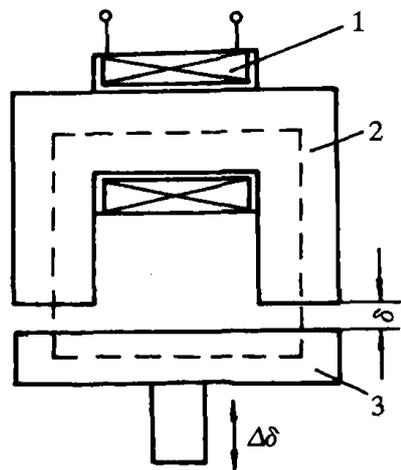


图 11-10 变间隙型电感式传感器的原理图
 1—线圈;2—铁芯;3—衔铁

圈共用一个活动衔铁,构成差动电感传感器,其工作原理如图 11-11 所示。

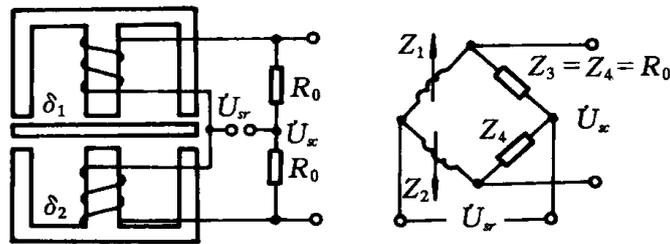


图 11-11 差动电感传感器原理

图中可见,差动电感传感器的两个线圈,一般接在交流电桥的两臂。在初始位置时,即衔铁处在中间位置时, $Z_1 = Z_2$,而 $Z_3 = Z_4$ 是电桥的固定臂,且在工作过程,也始终保持不变。因而从理论上讲,电桥平衡, $\dot{U}_{sc} = 0$ 。当被测物理量使衔铁偏离中间位置时,两个线圈的电感量(或阻抗)一个增加一个减小,电桥失去平衡,即输出与被测量对应的电信号。

11.5 涡流型位移检测仪表

近年来,国内外正发展一种建立在电涡流效应原理上的检测仪表,即电涡流式检测仪表。

这种仪表可以实现非接触检测物体表面为金属导体的多种物理量,具有结构简单、频率响应宽、灵敏度高、测量线性范围大、抗干扰能力强、体积较小等一些特点。目前在测试技术等方面,日益得到重视和采用。

这种电涡流式仪表可以检测位移、振动、厚度、转速、温度等参数,还可以进行无损探伤,因而在测试技术中,是一种有发展前途的仪表。在这里我们主要介绍电涡流式位移检测仪表。

11.5.1 电涡流式检测仪表的原理

电涡流式检测仪表是利用电涡流效应,将一些非电量转换为阻抗的变化(或电感的变化或品质因数的变化),从而进行非电量的检测。

如图 11-12 所示,一个通有交变电流 i_1 的检测仪表线圈由于电流的变化,在线圈周围就产生一个交变磁场 H_1 。如被测导体置于该磁场范围之内,被测导体内便产生电涡流 i_2 ,电涡流也将产生一个新磁场 H_2 , H_2 与 H_1 方向相反,因而抵消部分原磁场,从而导致线圈的电感量、阻抗和品质因数发生变化。

一般地说,检测仪表线圈的阻抗、电感和品质因素的变化与导体的几何形状、导电率、导磁率有关。也与线圈的几何参数、电流的频率以及线圈到被测导体间距离有关。如果控制上述参数中一个参数改变,其余皆不变时,就可以构成测量位移、温度等各种检测仪表。

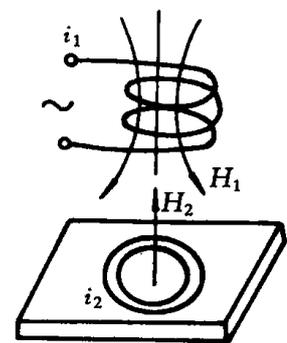


图 11-12 电涡流型检测仪表原理示意图

11.5.2 电涡流型位移检测仪表

电涡流型检测仪表目前在工业生产和科学研究等方面正日益得到广泛地应用。而测量位移是电涡流型检测仪表的主要用途之一,它可以测量金属零件的动态位移,量程可以为 $0\sim 15\mu\text{m}$ (分辨率为 $0.05\mu\text{m}$),或 $0\sim 500\text{mm}$ (分辨率为 0.1%)。凡是可变换成位移量的参数,都可用电涡流型检测仪表来测量,如汽轮机主轴的轴向窜动、金属材料的热膨胀系数、钢水液位、纱线张力、流体压力等。

在满足量程要求的前提下,我们总希望仪表有尽可能高的灵敏度。因此我们必须从以下几个方面注意提高仪表灵敏度:

1. 线圈在满足量程要求的前提下,尽可能小。
2. 线圈薄时,灵敏度高。
3. 减少线圈电阻,提高线圈的品质因数,尽可能选用电阻系数小的导线。
4. 注意被测导体材料的性质对灵敏度的影响。一般来说,被测导体的电导率越高,则灵敏度越高。但当被测物为磁性体时,磁导率效果是与涡流损耗效果呈相反作用的,因此与非磁性体相比,灵敏度低。所以,一般需对被测体加工过程中遗留下来的剩磁进行消磁处理。
5. 线圈框架要求损耗小,介电性能好,膨胀系数小,以提高灵敏度减小误差。
6. 被测导体的被测平面比线圈平面的面积大得较多时,可充分地利用电涡流效应,灵敏度较高且恒定。但在被测体平面的面积小于传感器面积的一半时,则灵敏度降低一半,小得更多时,灵敏度显著降低。
7. 在测量时,传感器线圈周围,除被测导体外,应尽可能避开其它导体,否则将干扰磁场,从而产生线圈的附加损失,降低灵敏度和缩小线性范围。一般,在不属于被测体的金属物体与线圈之间,在传感器线圈本身未加屏蔽的情况下,至少要隔开一个线圈直径的距离。

电涡流式位移检测仪表实际上是线圈和被测导体共同组成了电涡流检测仪表,是利用它们之间的耦合程度的变化来进行测试的。购买来的传感器仅为电涡流检测仪表的一部分,设计和使用中还必须考虑被测导体的物理性能,几何形状和尺寸。电涡流型位移检测仪表分为3类,即变间隙电涡流型位移检测仪表,变面积型电涡流型位移检测仪表和螺管型电涡流型位移检测仪表。这里仅介绍前一类。

变间隙电涡流型位移检测仪表结构很简单,主要是由一个固定在框架上的扁平园线圈组成。线圈用多股漆包线或银线绕制而成,一般放在仪表的顶部。变间隙电涡流型位移检测仪表的原理是基于检测仪表线圈与导体平面之间间隙的变化引起涡流效应的变化,从而导致线圈电感、阻抗和品质因素的变化。见图 11-13。

为使变间隙电涡流式检测仪表小型化,可在线圈内加入磁芯,因为加磁芯可以保证在电感量相同的条件下,减少匝数,提高品质因数。同时加入磁芯可以感受较弱的磁场的变化,因而导致 μ 值的较大变化,从而增大测量范围。

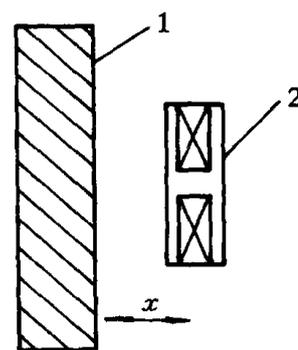


图 11-13 变间隙电涡流型位移检测仪表原理

- 1—被测导体;
2—电涡流检测仪表

11.5.3 涡流型位移检测仪表在核反应堆中的应用

图 11-14 表示了一个涡流型位移检测仪表安装于燃料棒包壳内部来测量燃料芯块相对于包壳运动的情况。并且这种形式的涡流型检测仪表已经用来检测液态金属润滑轴承中润滑膜的厚度。这种检测仪表可在中子通量峰值达 $10^{16} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 和积分通量达 10^{16} n/cm^2 的瞬态试验中用来测量象 0.00025 cm 那样小的位移。

涡流型位移检测仪表已经用于军用脉冲辐射试验堆中,在 2.3×10^{17} 的裂变脉冲和 300°C 的堆芯表面峰值温度下,用来测量振动和位移。这种仪表包含一个工作线圈和一个参考线圈,用来消除辐射和加热的影响。

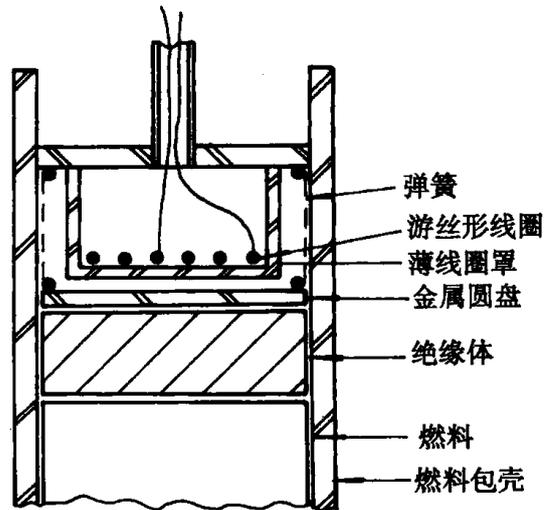


图 11-14 测量燃料伸长度的涡流型位移检测仪表示意图

11.6 LVDT 接触式位移传感器

11.6.1 工作原理

LVDT 是一种机电装置,它所产生的交流输出电压与一个单独的可移动的铁磁心的位移

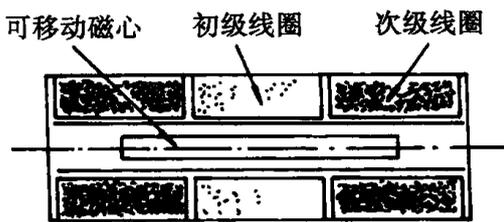


图 11-15 LVDT 结构原理图

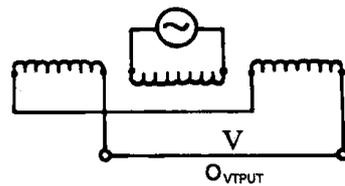


图 11-16 LVDT 中线圈的连接

成比例。装置由两个对称的位于初级线圈两边的同轴次级线圈所构成(见图 11-15)磁心在线圈的孔中沿轴向能自由移动。当初级线圈通以交流电流时,在每一个次级线圈中产生感应电压。

由于线圈是反向串连的(见图 11-16),所以,感应的电压幅值相等,但相位相反,除了很小的被称为零位电压的剩余电压外,它们趋于相互抵消。当磁心偏离零位置时,初级线圈和每一个次级线圈间的耦合便不再相等。

随着磁心位置的改变,其输出电压也不相同,并呈线性的变化(见图 11-17),当磁心从零位的

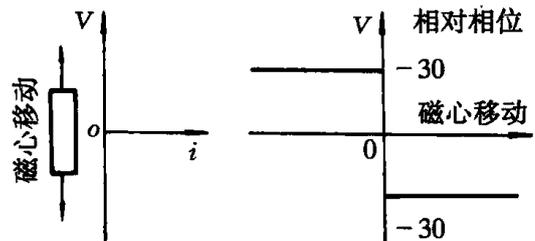


图 11-17 通过信号相位中央的磁心位置对次级线圈输出电压幅值和相位的影响

这一端移动到零位的另一端时,输出电压的相位发生 180° 的突变。

11.6.2 主要特性

1. 线性

良好的线性是 LVDT 的基本特性,但由于转换器的缺陷,磁心最佳的位移范围必须由给定的线性度确定。根据 LVDT 对位移的响应曲线可直观地作出一条最佳的直线(见图 11-18)。

从这些偏差和校准曲线可以得出比率数据。由这些偏差和最大磁心位移(即满量程)间的比率可得到满量程的非线性百分数。这种方法对等于或大于 0.2% 的非线性是可以接受的。但是对于较小的值,由于线粗细、操作者技巧、结果分析等因素,该方法是不精确的。在这种情况下,最好是采用数学方法,比例尺的自动绘图或记录,以便更好的估计偏差。

一种采用最小二乘法进行线性回归的数学处理程序需要使用合适的软件。作为一种抽样方法,或用 LVDT 的特征的详细描述,它是合适的。

2. 带宽

带宽是仅次于线性的最重要的特性。在解调处理之后,必须插入一滤波器,以获得与位移成比例的直流信号。滤波器的设计应综合考虑小的剩余交流分量和较宽的带宽(较小的时间常数)两项同时需要。但是,在不到设计的截止频率,滤波器就起作用,而且,滤波器引起相位的改变,随它的级数(第 n 级滤波器)而增大变化。这决定了第一级滤波器的选择,需以每倍频程衰减为 6dB 达到最小的相位变化,而此时的带宽确定为 -3dB (见图 11-19)这样用带宽的概念不能充分说明 LVDT 的动态特性。最好使用传递函数的概念,因为它同时包含了带宽和相位变化。传递函数是系统输出(由电子支持设备给出的直流信号)对系统输入(转换器磁心的位移)之间的比率。代数系统的一般处理是把传递数看作是各个参数的拉普拉斯变换之比。这一函数描绘了 LVDT 所具有的磁心位移与电子支持设备输出正确相关的特性。传递函数通常由一组曲线所确定。

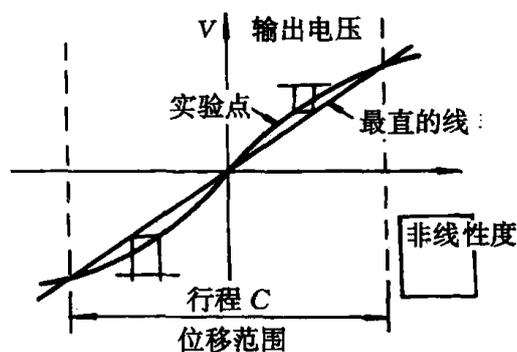


图 11-18 从测量曲线得出的最直的线

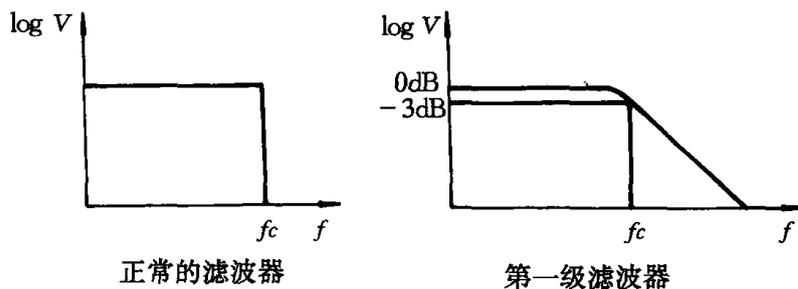


图 11-19 带宽

3. 分辨率

从理论上讲, LVDT 的分辨率是不定的, 实际上它仅受到电子支持设备响应的限制。最小可探测位移受到剩余振荡幅度的限制。因此, 对于给定的一次线圈的激励频率, 较小的带宽将产生一较好的分辨率。

11.7 LVDT 接触式角位移传感器

11.7.1 LA90 系列角位移传感器

LA90 系列角位移传感器的原理如图 11-20 所示。带连接棒的角位移传感器, 外壳直径为 20mm。

当要求把角度移动部件连接到传感器棒上时必须使用 LA90 系列传感器。

磁芯由三个半圆柱体构成, 两个固定在具有 180° 相位差的两个次级线圈的前部, 第三个是可移动的, 与初级线圈前部的传感器旋转棒相连接。

当可移动的半圆柱芯与两个固定的磁芯具有 180° 的相位差时, 两个次级线圈的电动势相互抵消。这就是传感器的电气零位。除了这一位置以外, 电动势与角度位移成比例。

11.7.2 LA270 系列角位移传感器

这是带有光电位计和内装电子设备的角位移传感器, 这种系列角位移传感器以低的价格, 有效地解决了轴或指针角位移的测定。输出信号与旋转角度成比例。

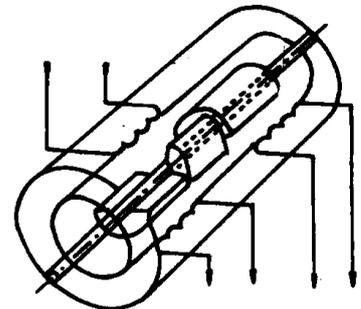


图 11-20 LA90 系列角位移传感器原理

第 12 章 振动检测仪表

12.1 概述

热力机械的振动问题一直是从事动力机械设计、研究、制造和运行工作者十分重视的问题。因为振动的产生,轻则使某些零部件无法正常工作,重则使零部件,甚至整台机器遭到破坏,因此必须防止振动的产生及控制其量级。

对振动问题的认识和控制,单靠理论分析及计算是远远不够的,还必须依靠对振动物体的实际测量。近年来,由于生产及科研的发展,振动测量已成为一门专门的学科,得到了迅速的发展。

12.1.1 振动测量的内容

振动测量大致有两方面的内容:

1. 振动基本参数的测量,即测量振动物体上某点的位移、速度、加速度、频率和相位;
2. 结构或部件的动态特性的测量,即以某种激振力作用在被测件上,使它产生受迫振动,测量输入(激振力)和输出(被测件振动响应),从而确定被测件的固有频率、阻尼、刚度和振型等动态参数。

12.1.2 振动测量的分类

振动测量的方法按振动信号转换的方式可分为电测法、机械法和光学法,其简单原理和优缺点列于表 12-1。

表 12-1 振动测量方法的分类及其简单原理和优缺点

名称	原 理	优 缺 点
电测法	将被测试件的振动量转换成电量,然后用电量测试仪器进行测量	灵敏度高,频率范围及动态、线性范围宽,便于分析和遥测,但易受电磁场干扰。是目前广泛采用的方法
机械法	利用杠杆原理将振动量放大后直接记录下来	抗干扰能力强,频率范围和动态、线性范围窄,测试时会给工件加上一定的负荷,影响测试结果,主要用于低频大振幅振动及扭振的测量
光学法	利用光杠杆原理、读数显微镜、光波干涉原理、激光多普勒效应等进行测量	不受电磁场干扰,测量精确度高,适于对质量小及不易安装传感器的试件作非接触测量,在精密测量和传感器、测振仪标定中用得较多

目前广泛应用的是电测法。机械测量法由于它的传递机件的质量与惯性对被测物体产生

影响,以及它的精度不高,使用不便等因素,在目前热力机械的振动测量中,已很少采用。由于近年来激光技术的发展,激光测振在一些部门中获得了新的进展。尽管这几种测振方法的原理及手段不同,就测量系统的基本环节来说还是大同小异的。这里以电测方法为例,简单介绍一下振动测量的几个基本环节。

12.1.3 振动测量的基本环节

图 12-1 显示了一套由电子仪表组成的振动测量系统。图中用虚线框起来的是属于基本环节部分,其中 II, III, IV 3 个环节有时在同一个仪器里。

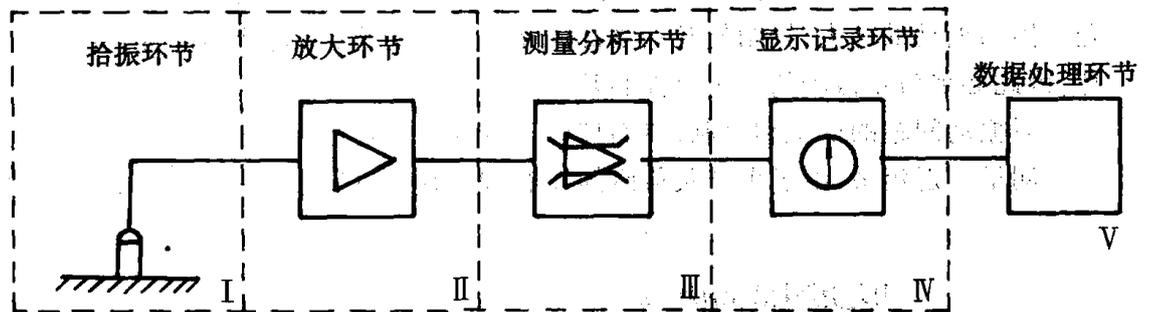


图 12-1 振动测量的基本环节

第 I 为拾振环节:其任务是将被测的振动参量(如位移、速度、加速度等)转变成电信号,以供后接仪器计量、分析和记录。担负这项转换工作的元件叫做传感器或拾振器;

第 II 为放大环节:其任务是将转换后的电信号加以放大,以供计量或者观察。在采用加速度传感器时,通常是由前置放大器来执行此项任务。前置放大器的作用有两个:

1. 用以将加速度传感器的高输出阻抗变换为低输出阻抗,以便和后接仪器的输入阻抗相匹配;

2. 将测量所得的较弱信号直接加以放大;

还可以对振动测量中的位移、速度及加速度三个参量中的其余两个进行微分和积分。

第 III 为测量分析环节:按照不同的测量目的,担任这一任务的可以是线性放大器,也可以是频率分析仪;

第 IV 为显示记录环节:其任务是将测量所得信号加以显示或记录下来,这可以有各种不同的表达方式,相应的就有不同的仪器;

第 V 为数据处理环节:其任务是将测量所得的复杂信号,作进一步的分析、处理及变换。所用仪表有统计分布分析仪、模拟电压读出器、数字编码机、纸带穿孔机、纸带读数机、电传打字机以及电子计算机或专门的信号处理机等。

12.1.4 测振传感器

测振传感器又称拾振器,是把被测物体的振动参量转换成电信号的一种敏感元件。传感器的种类很多,分类方法也不少。按其工作原理不同,可分为无源式(又称参量式)和有源式(又称发电式)两种。无源式测振传感器是将振动而引起的电学参量(如电阻、电容、电感等)的变化转换成电信号的一种传感器。由于它本身不能直接产生电信号,因此它必须接入具有辅

助电源的基本测量电路中,所以称为无源式传感器。常用的无源式传感器有电感式、电容式、电涡流式、变压器式及变阻式等。有源式测振传感器是将被振动的参量直接变成电信号的一种传感器。由于它本身能产生电信号,因此无需辅助电源。常用的有源式测振传感器有感应式(又称电动式或电磁式),压电式,热电式,光电式等。按照传感器的不同安装方式,又分为接触式和非接触式两种。这里仅介绍几种常用的测振传感器。

1. 电磁式测振传感器

电磁式测振传感器是一种利用电磁感应原理测振的传感器。它的种类很多,有可变气隙式(衔铁式),动圈式(线圈在磁隙中运动)和动铁式(磁钢在线圈中运动)。

图 12-2 所示为一种电磁式测振传感器。圆柱形的永久磁铁 2 用铝架 4 固定在圆筒形的外壳 6 里,借助于外壳的导磁性形成一个磁路。在外壳与永久磁铁之间形成两个环形气隙。工作线圈 7 放在右边的气隙中,阻尼环 3 放在左边的气隙中,它们用芯杆 5 连接起来,用弹簧片 1 和 8 支承于外壳上。测振时将传感器固定在被测物体上,传感器的外壳便随着被测物体一起振动。由于支承弹簧足够软,当振动频率超过一定范围后,由线圈、阻尼环和芯杆组成的可动部分近似地保持不动。这样,可动部分即与外壳产生相对运动,使线圈在工作气隙中切割磁力线而产生感应电动势。感应的电信号由接头 9 传出,输送到测量电路中去。

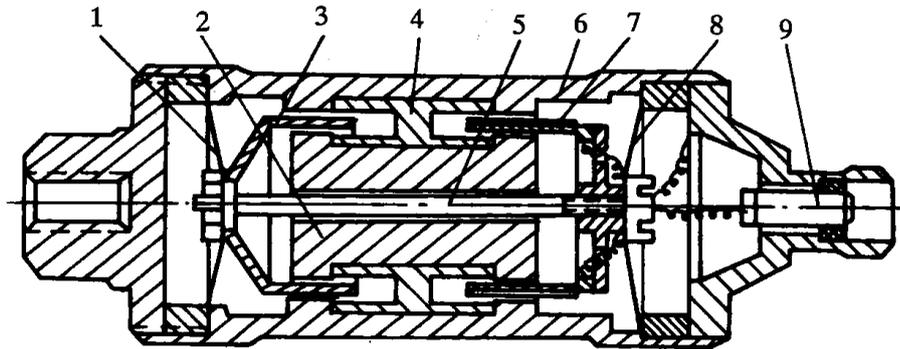


图 12-2 电磁式测振传感器

1—弹簧片;2—永久磁铁;3—阻尼环;4—芯杆;6—壳体;7—工作线圈;8—弹簧片;;9—输出头

根据电磁感应定律可知这种传感器的输出开路电压为

$$E = Bl \frac{dx}{dt} \times 10^{-8} = Bl_{av}Wv \times 10^{-8} \quad (\text{V}) \quad (12-1)$$

式中 B ——磁通密度 T;
 l_{av} ——线圈每匝平均长度 cm;
 W ——工作气隙中线圈的匝数;
 v ——线圈相对于磁铁的线速度 cm/s。

2. 压电式测振传感器

压电式测振传感器是利用压电晶体的压电效应将振动参量转变为电信号的一种传感器。压电式测振传感器是用来测量振动物体的加速度。

压电式测振传感器原理如图 12-3 所示。传感器主要由压电晶体(C)、惯性质量块(m),底座和外壳等部分组成。将传感器固定在被测物体上,随被测物体一起振动。质量块的惯性力

与振动加速度成正比,而惯性力作用在晶片上,由于压电晶体的压电效应,在晶体表面便产生电信号输出。显然,此电信号的大小与受力大小成正比,而所受力的大小又与加速度成正比,因此,电信号与被测物体的振动加速度成正比,从而达到测量加速度的目的。

3. 涡流式测振传感器

· 涡流式测振传感器是利用电涡流感应原理将被测物体的振动位移转换成电信号。

其工作原理如图 12-4 所示,传感器是由一个电感线圈 L 与电容器 C 并联,构成 LC 谐振回路。当被测物体置于无穷远时,将此振荡回路调谐于 1MHz 的频率上。当传感器移近被测物体时,由于 1MHz 高频电流在线圈中产生的磁场 ϕ_i 的感应,使被测导体上产生涡流,此涡流产生磁场 ϕ_e ,其方向与 ϕ_i 的方向相反,抵抗 ϕ_i 的变化。当两磁场叠加后,使电感线圈中的磁通总值因 ϕ_e 而发生变化。由于电感 $L = d\phi/di$,因此 ϕ_e 叠加的结果,使电感值 L 发生变化。因此 LC 谐振回路失谐,其阻抗发生变化,从而使输出电压 E_0 发生变化。 E_0 的变化量与被测物体的材料性质(导磁性及导电性),形状、尺寸以及与传感器的距离 δ 等因素有关。当被测对象确定后, E_0 的变化就只与传感器和被物体之间的距离 δ 的变化有关。因此 E_0 便可表示为 δ 的单值函数

$$E_0 = f(\delta)$$

12.2 核反应堆主泵振动测量

12.2.1 振动传感器的原理、结构和应用

这里以大亚湾核电厂主泵振动测量为例,说明之。

(1) 测量原理

产生的信号电压 U 与悬震的动圈系统的振动速度 $A\omega$ 成正比。

(2) 结构(图 12-5 所示)

传感器元件按功能被分成两部分:测量和阻尼系统。动圈 16 产生测量电压,阻尼筒 4 用作振动系统的电阻尼(涡流制动)。将动圈和阻尼筒用连接管 15 牢固地相互连接起来并用弹簧 17 悬挂在壳体 6 的两侧。

(3) 传感器元件

V23 振动传感器元件通常装在保护壳内。外壳的形状,安装和电缆连接的形式取决于采

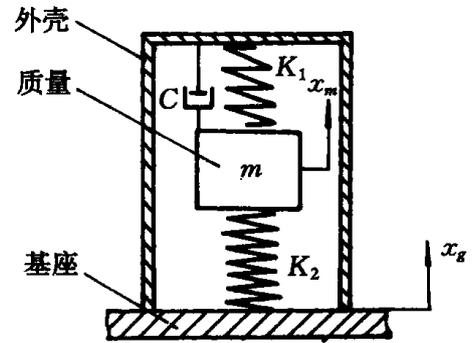


图 12-3 压电式测振传感器原理

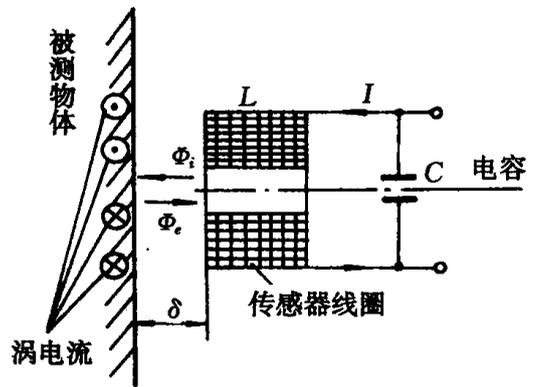


图 12-4 涡流式测振传感器原理

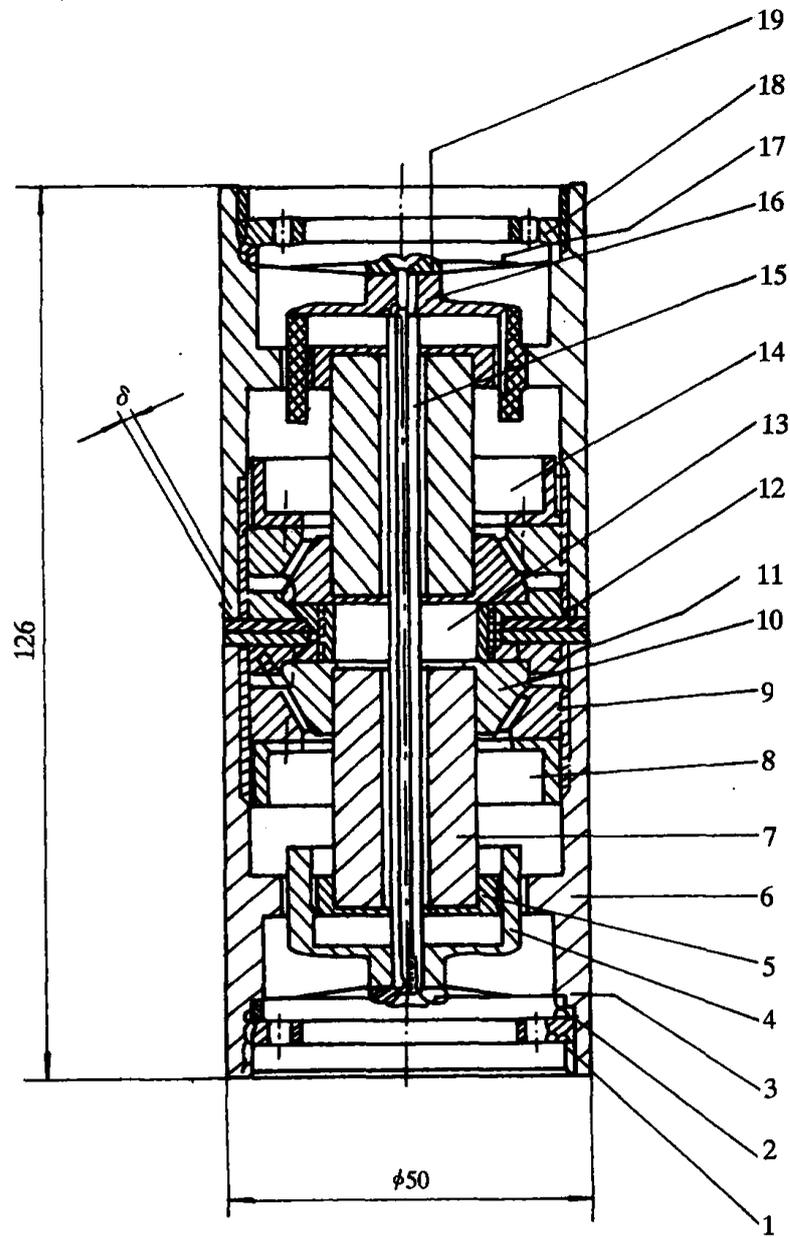


图 12-5 V23DA 振动传感器

- 1—端环;2—夹紧环;3—夹紧环;4—阻尼筒;5—上部磁极帽;
 6—壳体;7—永久磁铁;8—阻尼调整环;9—极环;10—下部磁极帽;
 11—垫环;12—止动环;13—连接环;14—信号电压调整环;
 15—连接管;16—线圈筒;17—弹簧;18—端环;19—夹紧环

用的传感器的型号(V23D、V23DA 等……)。

(4) 应用

V23DA 型振动传感器可用来测量机器部件、汽轮机轴承等的绝对振动。由于它结构坚固,在不损害其功能的情况下,可承受极恶劣的条件。壳体能防尘和防溅水。在振动条件下感应的信号电压值及振动系统的阻尼主要取决于在相应的气隙中的磁感应。两个永久磁铁系统

的气隙感应借助旋转的极环 9 通过改变其背后气隙来调节。因此可以消除制造时含有的磁场值漂移。调节振动系统,使其在 50Hz 时 100 μ 峰-峰值之间振动的信号电压为 0.4V。

12.2.2 反应堆冷却剂泵振动和轴位移测量通道

每台泵有:

1. 2 个振动测量通道,其设备包括:(1) 2 个轴承绝对振动传感器,型号 V23DA;(2) 2 个振动放大器,型号 SK-VL;(3) 2 个报警装置,型号 SK-C2。

2. 2 个轴位移测量通道,其设备包括:(1) 2 个位移传感器,型号 V41BA;(2) 2 个位移放大器,型号 SK-VXO;(3) 1 个双输入的报警装置,型号 SK-2C1。

上述组件安装在有 1 台 SK-PAC 电源单元的机柜中。

大亚湾核电厂 1 号机组的设备表如表 12-2 所示。

表 12-2 设备表

1 号机组(大亚湾核电厂)

	1 RCP 001 PO		1 RCP 002 PO		1 RCP 003 PO	
	振 动	位 移	振 动	位 移	振 动	位 移
传感器	1 RCP 106 mV	1 RCP 150 mm	1 RCP 206 mV	1 RCP 250 mm	1 RCP 306 mV	1 RCP 350mm
	1 RCP 107 mV	1 RCP 151 mm	1 RCP 207 mV	1 RCP 251 mm	1 RCP 307 mV	1 RCP 351 mm

第 13 章 智能仪表和计算机在核反应堆中的应用

随着大规模集成电路及计算机技术的迅速发展以及人工智能理论与技术向检测技术方面的移植,业已发展起来的智能仪表正在不断地以崭新的面貌出现。检测仪表的智能化已是现代仪表发展的主要方向,这是因为智能化测量仪表无论是在检测的准确性、灵敏度、可靠性、自动化程度、运用功能以及解决检测技术问题的深度和广度等方面都优于一般常规仪表。正因如此,检测仪表的智能化已经成为当今检测工作以及所有与检测技术有关的工程界、教育界及科技界人们所普遍关注的问题。对于从事核反应堆工程运行、设计与研究的人员来说,更不例外,其中尤以了解与熟悉智能化仪表的工作原理及其一般的使用方法显得更为必要和重要。

为了使核反应堆安全而又高效率地运行,必须充分掌握核反应堆各部分设备的运行状态,经常对其进行监视使至不致发生危险,并实现其充分发挥所要求性能的运行条件。同时随着单机大容量的大型核电厂的发展,核反应堆设备性能必须要提高,其输出功率必须要扩大,这就对核反应堆的运行技术提出了更高的要求。另一方面,由于对核反应堆的安全性有极高的要求,在核反应堆检测系统中,检测的物理量远较其他一般工业企业多得多,而且还必须边监视这些物理量,边控制核反应堆运行,因此核反应堆通常都装备相当复杂的检测系统。随着核电厂的规模越大,系统越复杂,需要进行检测和控制的量增加得越多。这就使得计算机在核反应堆中得到越来越广泛的应用。

13.1 智能仪表

带有微型计算机或微处理器的仪表,称为智能仪表。它们不仅能进行检测,而且能存储信号和处理数据,同时在自动化系统中接受内部或外部控制指令。

13.1.1 智能仪表的特点

概括起来说,智能仪表有以下 4 个特点:

1. 测量过程的软件控制

智能仪表除完成常规仪表可实现的自稳零放大、自动极性判断、自动量程切换、自动报警、过载保护、非线性补偿、多功能测试与巡回检测等功能外,可实现简单的人机对话、自检、自诊、自校准及 CRT 显示与输出打印、制图等。整个工作过程是在软件控制下进行的。仪表在 CPU 的指挥下,按照软件提供的程序流程不断地取指(指令)与寻址(地址),进行各交换、逻辑判断,驱动某一执行元件,完成一个动作,使仪表的工作按一定的顺序进行下去。在这里,基本操作是以软件形式完成的逻辑转换,这与硬件的工作方式差异很大,也就是说,操作的每一步骤是由若干指令组成。具备软件控制的仪表,其硬件组成是统一的,而不必像过去硬件逻辑中那样在仪表内部安装许多一一对应的专用电路;同时,软件的灵活性非常强,可以随时通过键

盘设定,进行人机对话,来改变执行程序,完成仪表所需要完成的动作和功能,并不需要去改变仪表的硬件。

不过也必须指出,由于软件运行的速度要比硬件慢,所以在一些要求速度较高的地方(如实时处理或实时控制等方面)的应用会受到一些限制,这时就要采用软硬结合的方法,加大硬件在仪表中的比例来提高运行的速度。

2. 数据处理

具有对数据进行存储与运算的数据处理功能是智能仪表的最突出的优点,这主要表现为改善测量精度和对测量结果的再加工两个方面。

在改善测量精度方面,大量的工作是对随机误差及系统误差进行处理。以往,传统的方法是通过手工对测量结果进行处理。这不仅工作量大,效率低,而且往往会由于受到人为的主观因素的影响,使得处理的结果并不理想。虽然,随着通用计算机的普及,这类数据处理可以离线通过计算机来处理,克服人为因素的干扰,但是由于在数据采集到处理难免有时间上的拖延会使最后的结果不能立即反映出来。智能仪表则可以利用其中由设计人员事先开发的计算或处理功能软件(在内藏微机式的仪表中,往往以固化的方式存放于 ROM 中),对测量结果进行及时、在线处理,因此十分方便与快捷。

对测量结果的再加工可使智能仪表提供高质量的信息量。例如智能信号分析系统,不仅可以实时地采集信号的实际波形,并在 CRT 上复现,沿时间轴进行展开或压缩,还可以对其有效值、平均值进行计算,可以找出其峰-峰值、最大值和最小值等特征量;可以对所采集的样本进行数字滤波,将淹没于干扰中的信号提取出来;也可以对样本进行时域分析(如进行相关分析、求卷积、求传递函数等)或频域分析(如求幅值谱、功率谱等)。也就是说,智能仪表可以从原有的测量结果中分析提取出更多的信息量。这类智能仪表在生物医疗、语音分析、模式识别与故障诊断等各个方面有着广泛的应用,而且目前也已开始将其应用于核反应堆及热工过程中的动态模式识别与运行故障诊断的研究工作中。

3. 多功能化

从上面的分析可以看出,智能仪表实际上就是一个小型的计算机,只不过它的内存容量小于一般的计算机罢了,所以在国外,习惯上就干脆称之为电脑仪表。既是“计算机”,对其具备有诸多功能也就不难理解。目前用于电力系统管理的一种“智能化电力需求分析仪”就是一种体现多功能化的智能仪表,它可以测量单相或三相电源的有功功率、无功功率、视在功率、电能、频率、各相电压、电流、功率因数等,还可测量出电能利用的峰值、峰时、谷值、谷时及各项超限时间,可以预置用电量需求计划、自备时钟及日历,具有自动记录、打印、报警及控制等功能。

4. 灵活性强

智能仪表的灵活性不仅表现在其使用方式与功能多样化方面,更主要的是因其性能的控制需靠软件来完成,而软件又极易修改,所以,其灵活性则是传统仪表所根本不可比拟的。

13.1.2 智能仪表的基本结构

就狭义定义的智能仪表而言,智能仪表即微机内存仪表,也就是将单片或多片的微机芯片与仪表有机地结合在一起形成的单机。微机在其中起控制及数据处理作用。图 13-1 示出了这类智能仪表的基本结构。

其中,CPU(中央处理器)为仪表的核心部分,它通过总线及接口电路与输入通道、输出通

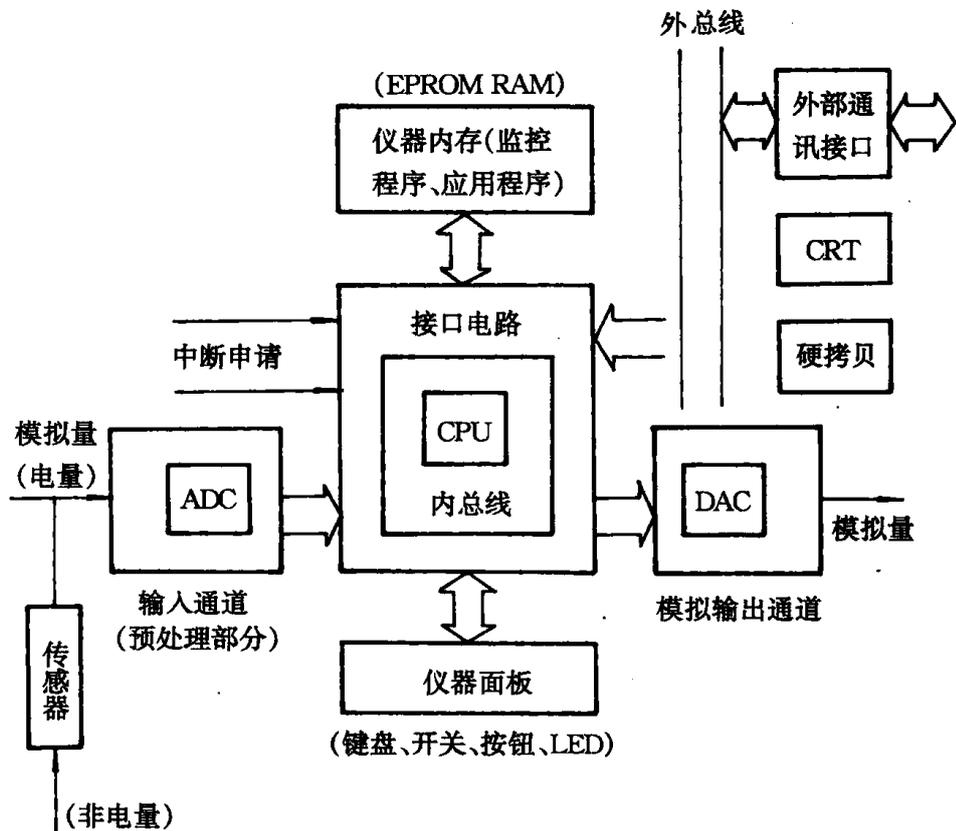


图 13-1 智能仪表系统结构

道、仪表面板及仪表内存相连。EPROM 与 RAM 组成的仪表内存存放仪表所用的监控程序、应用程序和数据库等。中断申请可使仪表有对外部事件进行灵活处理的能力。输入信号通过输入通道进入。输入通道包含输入放大器、抗混叠滤波器、多路转换器、采样/保持器、A/D 转换器、三态缓冲器等，输入通道是决定仪表测量准确度的关键部分。模拟输出通道输出模拟量，其结构包含 D/A 转换器、多路分配器、低通滤波器等。仪表的数字输出可与 CRT 屏幕显示器相连接，或与磁盘、磁卡、X-Y 绘图仪、打印机等相连接以获得硬拷贝。外部通讯接口则为了与外系统的联系。

13.1.3 智能仪表中的数据转换与控制

智能仪表中的数据转换装置包括输入信号的模拟量转换为数字量的模数转换器(ADC)与将仪表的数字量转换为输出模拟量以便于驱动模拟量执行元件的数模转换器(DAC)。

1. 数模转换器(DAC)及其与微机的接口

DAC 是智能仪表中的重要部件，因为它既是以后要介绍的模数转换器(ADC)中的重要组成部分，又是智能控制系统数控输出组成部分。作为 ADC 的组成部分，它用于控制波形发生器；作为数控输出，可去趋动模拟式仪表、硬拷贝（如模拟式绘图仪）、模拟量执行元件（如同服马达）等等。

DAC 由各种电阻网络、电子开关、标准电源、运算放大器等组成。当采用的 DAC 是 8 位时，则其模拟量电压输出 u_0 为：

$$u_0 = u_m \left(\frac{d_7}{2^1} + \frac{d_6}{2^2} + \frac{d_5}{2^3} + \frac{d_4}{2^4} + \frac{d_3}{2^5} + \frac{d_2}{2^6} + \frac{d_1}{2^7} + \frac{d_0}{2^8} \right) \quad (13-1)$$

式中 u_m ——加在 DAC 上的输入标准电压；
 $d_7 \sim d_0$ ——DAC 上的输入数字量。

近年来,随着超大规模集成电路技术的提高,单片 DAC 的集成度越来越大,性能也日益提高,目前在市场上 DAC 已经出现 16 位以上的集成化。因此在一般情况下,都要考虑应用 DAC 芯片,同时还要熟悉 DAC 与微机的接口技术。

以下仅对一般的接口方法作一介绍:

(1) 8 位 DAC 的接口

如果 DAC 为 8 位,则其接口就比较简单,因为智能仪表中常用微机多为 8 位(如 8080/85、Z80、8051 等),其数据总线刚好与其相配。图 13-2 所示即为 8 位 DAC 接口的连接图。

CPU 的 8 位数据线要经过锁存器 74LS273,再将数据输入给 8 位 DAC。这是考虑数据在数据线上停留的时间很短,仅为几微秒,为了使 DAC 能有稳定的输出,当 CPU 的数据送完撤离后,DAC 的输出不变,直到下次数据更新时为止。锁存器还具有使 DAC 与数据线隔离的作用,保证 DAC 不受数据线上其他数据的影响。锁存器的触发端 CP 受 CPU 的 $\overline{\text{IORQ}}$ 、 $\overline{\text{WR}}$ 及锁存器的设备号(外设选通地址号) 27H 的同时控制。

27H 从地址译码器中获得。上述状态在时序上受指令 $\text{OVT}(27\text{H})$ 、A 的控制(A 为累加器)。

锁存器的设备号(外设选通地址号) 27H 的同时控制。

(2) 高于 8 位的 DAC 接口

由于 8 位 DAC 的分辩率及其转换精度是不高的,这是因为它的最低有效位(LSB)较大($= 1/2^8 = 1/256 = 0.4\%$),因此为了提高转换的精度,往往要采用 10 位、12 位、14 位甚至 16 位的 DAC。但对于 8 位微处理器来说,要容纳 8 位以上至 16 位的数据就需要用 2 个地址单元。图 13-3 示出了这类接口的结构线路。2 字节的数据要分两步传

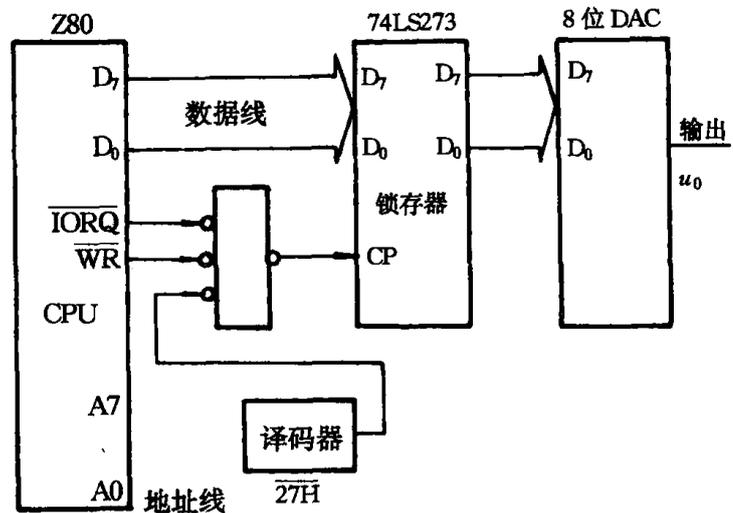


图 13-2 8 位 DAC 与 CPU 的连接

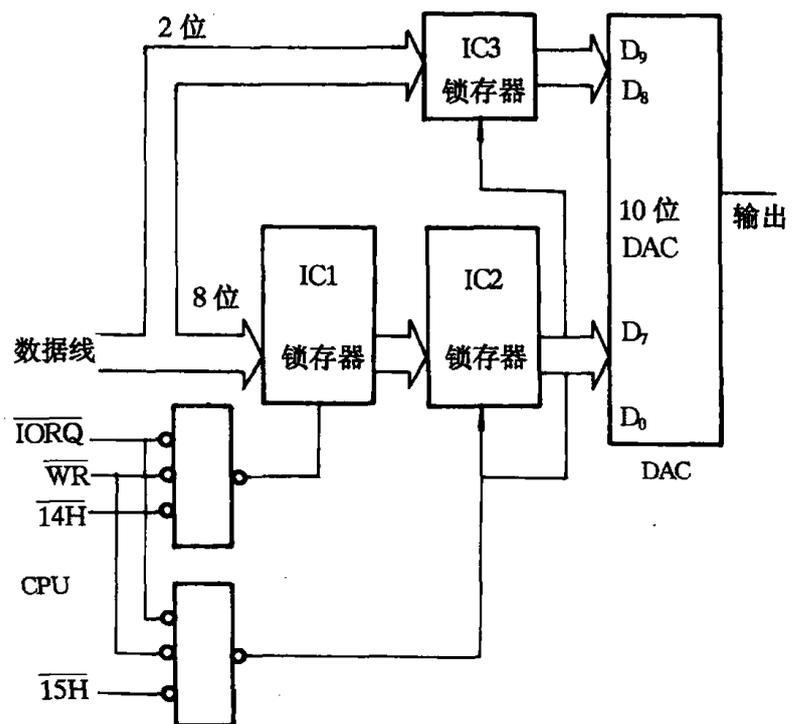


图 13-3 高于 8 位 DAC 与 CPU 的连接

送。第一步,先将低位字节存入锁存器 IC1 中,并等待进入锁存器 IC2;第二步,再将高位字节从数据总线中取出(例如假定 DAC 是 10 位的,从 D₀、D₇ 中取出)送入锁存器 IC3 中,并同时打开锁存器 IC2,让 IC3 和 IC2 组成的 10 位数据同时送入 DAC 中。这种运行方式可以避免当两个字节分开送出时,在 DAC 的输出端会产生暂态上冲或下冲。这时 IC3 和 IC2 组成 10 位锁存器。

典型的接口软件(2 字节 DAC 数据传送的程序)流程图参见图 13-4,程序如下(其中数据的存放首地址为 DATA,一共依次存放 100 个数共 200 个字节):

```

ORG 1 000H
;程序段首地址为 1 000H
START,DATA
;建立数据区地址指针
LD B,100
;建立数值数据指针
DAC:A,(HL)
;取一个数的低位字节
OUT (14H),A
;送给 IC1
INC HL
;地址指针加 1
LD A(HL)
;取此数的高位字节
OUT (15H),A
;两址指针加 1
DJNZ DAC
;送完 100 个数吗?
RET
;子程序返回
DATA:XXH
;数据 1 的低位字节
DB XXH
;数据 2 的高位字节
DB XXH
;数据2 的高位字节
:
END
;汇编结束

```

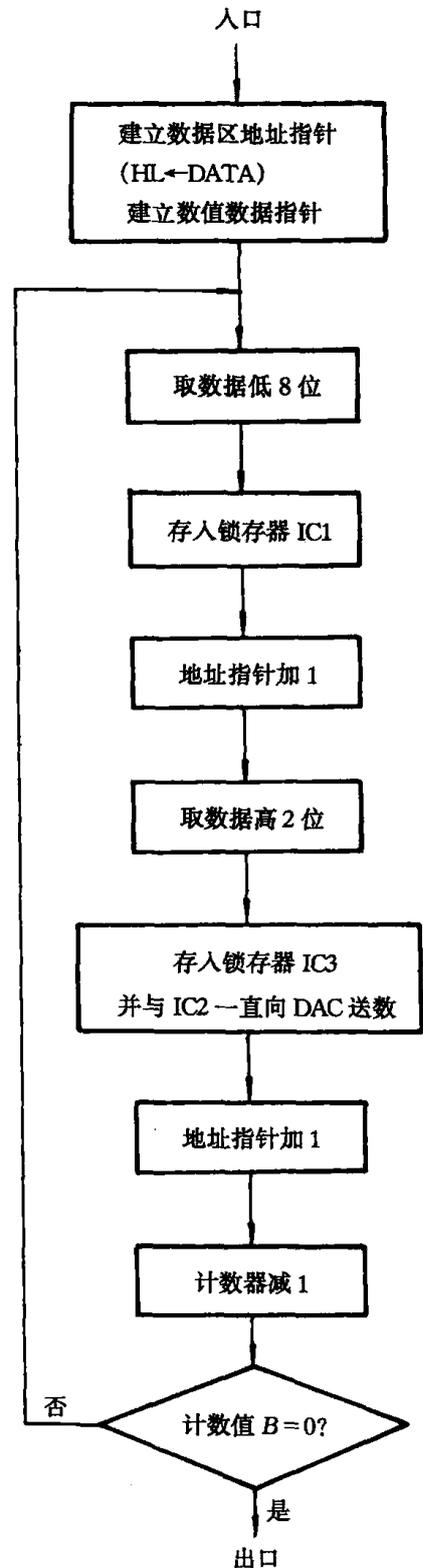


图 13-4 双字节多次传送流程

2. 微机控制的波形发生器

为了模数转换(ADC)、基准校验等的需要,在智能仪表中必须设置阶梯波、锯齿波和正弦波等发生器,而这些波形发生器是采用微处理器对DAC的程序控制来实现的。为简单起见,仅以8位DAC为例加以介绍。此时要产生不同的波形均可采用图13-2所示的电路,只要使用不同的软件即可形成相应的波形。以下即以发生器为例予以说明。

在图13-2中,如果令微处理器的累加器A自身循环增量,每增量一次即向DAC有一个输出。因为当A的内容达到最大值255时,再增量一次,A的内容就变为最小值(零),然后可以继续增加。如此,周而复始,即可从DAC输出端得到一个正向的梯波,如图13-5所示。

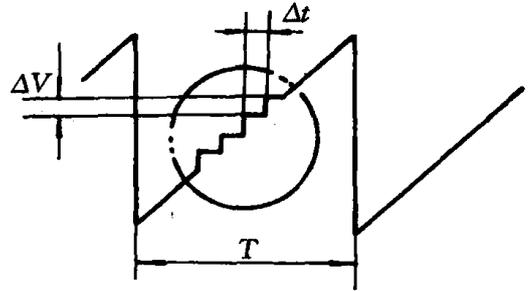


图13-5 正向阶梯波

正向阶梯波的程序如下:

```
ST1: INC A           ;累加器内容增1
      OUT(27H),A     ;从DAC送出一个阶梯电压
      JR ST1         ;返回,连续输出波形
      END            ;汇编结束
```

由图中可以看出,由于每个阶梯较小,因此从宏观上看是一个锯齿波。此处DAC为8位,假定满度电压为10V,则一个阶梯的高度

$$\Delta V = 10/2^8 = 10/256 = 39 \text{ mV}$$

程序执行一次的循环时间为25个时钟周期,若Z80CPU的时钟频率为2.5MHz,其时钟周期为 $T_0 = 0.4\mu\text{s}$ 每个阶梯的宽度 $\Delta t = 25 \times 0.4 = 10\mu\text{s}$ 而一个正向阶梯波的总宽度(锯齿波宽度 $T = 255 \times \Delta t = 2550\mu\text{s}$),即此时正向阶梯波重复频率(锯齿频率)为 $F = 1/T = 392\text{Hz}$ 。可见用软件控制的波形发生器,其频率较低。如果完全依靠改进软件减少其执行周期时间来提高其频率或提高CPU的时钟频率,始终是有限度的,根本的办法不是靠改进硬件电路。这也恰恰说明了前面所说的软件灵活但速度慢。

具有延时的正向阶梯波的程序如下:

```
ST2:   INC A           ;累加器内容增1
        OUT(27H),A     ;从DAC送出一个阶梯电压
        CALL DELAY      ;延时
        JP ST2         ;连续输出阶梯波
        ;延时子程序

DELAY:  EXX;
        EX AF,AF'      ;保护现场
        LD BC,(TIMING) ;装入延时时标
        TDEC:DEC BC    ;BC减量
        LD A,B
        OR C           ;BC=0?
```

```

        JP NZ, TDEC          ;不为 0, 则返回
        EX AF, AF,          ;
        EXX                 ;恢复现场
TIMING: DWXXXXH           ;延时标存放单元
        END                 ;汇编结束

```

在本程序中,通过改变 TIMING 中所赋值的数值,即可改变延时长短,从而改变阶梯波的周期。

将以上两个程序中的指令 INC A 改为 DEC A,即可获得取负向阶梯波输出。如果要想获得任意起始电压和终止电压(如从 2V 到 8V)的阶梯输出,需要先确定起始电压和终止电压所对应的数字量。如:

已知台阶电压 $\Delta V = 39\text{mV}$, 则 2V 所对应的数字量为

$$2\text{V}/39\text{ mV} = 51.2, \text{取 } 51$$

8V 所对应的数字量为

$$8\text{V}/39\text{ mV} = 205.1, \text{取 } 205$$

以下即为从 2V 到 8V 的阶梯波输出程序:

```

ST3: LD A, 33H            ;A 置 2V 数字量
LOOP: OUT(27H), A        ;输出阶梯波
        INC A             ;增量 A
        CALL DELAY        ;延时
        CP OCDH           ;达到 8V?
        JP NZ, LOOP       ;否, 返回继续输出
        JP ST3            ;等, 返回重复输出
        END

```

3. 微机控制组成的模数转换器(ADC)

ADC 是智能仪表的重要环节,它担负着对模拟量输入信号的转换任务,因为微处理器对数据的计算与处理均以数字量的形式进行。早期的 ADC 已经是软硬结合的产品。其结构简单、体积小、功耗低、功能强。下面仅从基本原理的角度出发,并以斜坡式 ADC 为例予以介绍。

图 13-6 示出了纯硬件斜坡式 ADC 的结构及其波形。测量从 $\overline{\text{RESET}}$ (复位信号、低电平有效) 开始, 坡在其负跳变作用下, 两个串联的 8 位二进制计数器与 D 触发器均为零。从 D 触发器的 Q 端输出一个正电位可将计数闸门打开, 时钟脉冲发生器的标准脉冲即可通过闸门进入计数器中进行计数。计数器所形成的二进制数被送到 DAC 上去。DAC 即可以从 0 开始不断地送出一个递增的阶梯波形电压 u_e 到比较器的一个输入端与加在比较器另一个输入端的被测电压 u_x 相比较。当 $u_x > u_e$ 时, 比较器输出电压 $u_0 < 0$, 此时计数器闸门一直是打开的, 随着计数器不断累积计数, DAC 的输出电压 u_e 不断增加, 当 u_e 与 u_x 相等或稍微大一些时(这要取决于 DAC 的分辩率), 比较器翻转, $u_0 > 0$ 。此正跳可使 D 触发器翻转, 其 Q 端输出成为一个低电平。它一方面关闭计数闸门使计数停止, 另一方面从 A 点送出一个负跳变 $\overline{\text{EOC}}$ 或 $\overline{\text{DONE}}$ 表示转换完成。此时从计数器输出的二进制数即为此 DAC 的数字输出, 从而完成了一次模数转换过程。

图 13-7 示出了由软件控制的斜坡式 ADC 的线路及其控制软件和程序流程。从中可见, 硬件较前者简单得多而且工作方式也变得十分灵活。

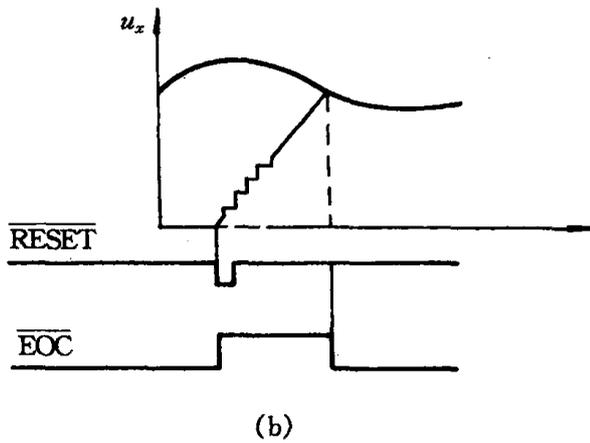
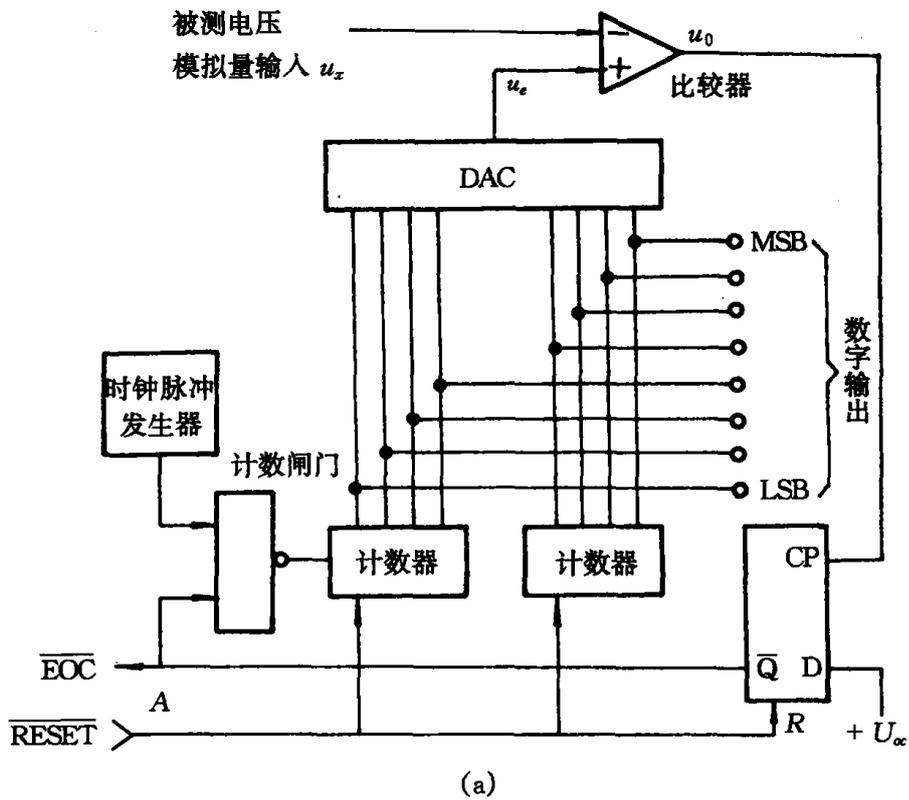


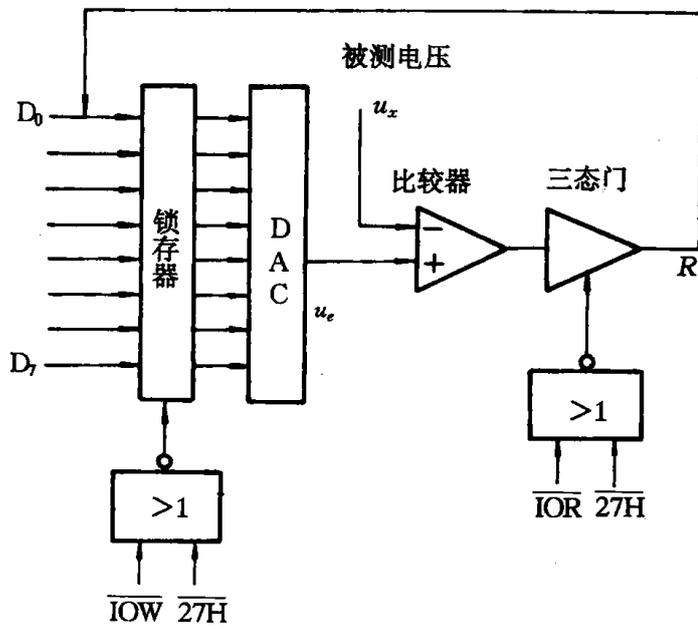
图 13-6 由硬件组成的斜坡式 ADC

采用的方法是在测量前,首先将 CPU 的寄存器 B 清零,然后每次加一个数,在微机输出指令的控制下将此数送往锁存器,并经 DAC 转换成电压 u_e 加在比较器上与被测量 u_x 相比较。每送一个数(每比较一次)要将比较的结果经三态门送回数据总线,在微机输入指令的控制下,在累加器中进行判断。如果 $R = 1$,则说明转换结束,此时寄存器 B 中的数即为测量结果。以下是该接口程序(ADC 为 8 位,测量结束后返回重作):

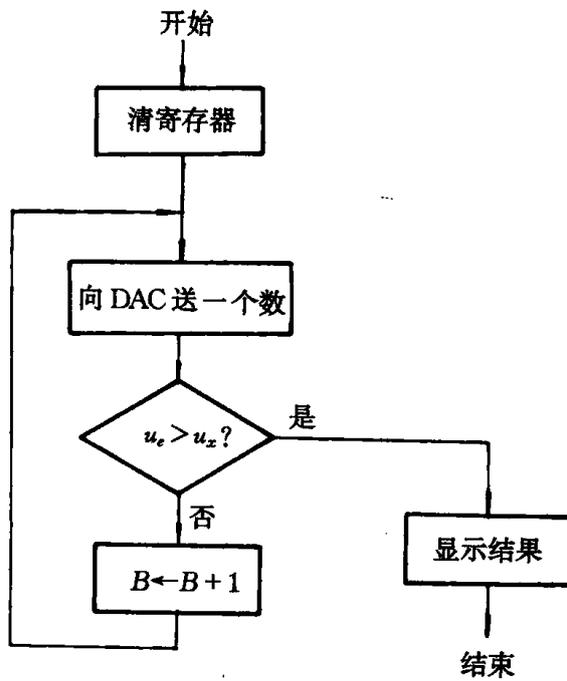
```

START: LD      B,0          ;清寄存器 B
        LD      SP,200H;    设堆栈指针起始地址
DALOOP: LD     A,B          ;

```



(a)



(b)

图 13-7 微机控制的斜坡式 ADC

OUT	(27H), A	; 将 B 中数送给 DAC 去比较
IN A,	(27H)	; 输入比较结果
AND	01H	; 转换完成?
JR	NZ, \overline{EOC}	; 转换完成, 转去显示结果
INC	B	; 转换未完成, 寄存器加 1
JR	DALOOP	; 重新比较

\overline{EOC} :CALL	DISPLY;	显示
JR	START;	返回进行下一次测量
END	START;	汇编结束

该程序对满量程而言要比较 256 次,测量时间每次约 3ms,相当于每秒测量 333 次,可见测量速度不算高。要提高测量速度可采用反馈编码逐次逼近式 ADC。反馈编码逐次逼近式 ADC 与微机控制斜坡式 ADC 在线路上是一样的,所不同的是微机每次送给 DAC 的数不是按 1 递增,而是按 8421 码的顺序从高到低逐位变化。

4. ADC 芯片与微机的接口

随着超大规模集成电路技术的高度发展,上述的 ADC 线路已经有芯片 ADC 在市场上销售。如 ADC 0 801(8 位)、AD574A(12 位)、AD 1 779(片上还带有采样/保持器,转换时间 $10\mu\text{s}$,积分非线性误差 $\pm 0.006\%$)、ADC 876(16 位,最大非线性误差 $\pm 0.0008\%$,转换时间 $2\mu\text{s}$)、AD 1 175K(高精度,22 位,最大非线性误差 $\pm 1\text{ppm}$,转换时间 50ms)、MP 7 684(超高速,8 位,转换时间 50ns,即转换率为 20×10^4 次/s)。有了这一类芯片的出现,自然只要集中去注意其与微机的接口问题。

(1) 8 位 ADC 接口

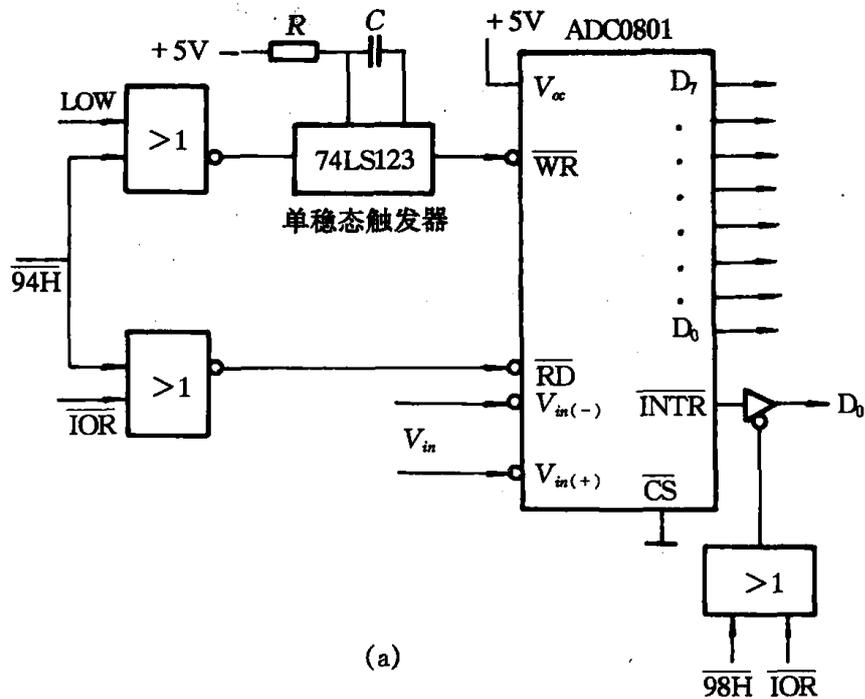
以 ADC080 X($X=1\sim 9$)为例,当 $X=1\sim 4$ 时,输入为差动或单端对地模拟输入,当 $X=5\sim 9$ 时,为 4 对差动模拟输入或 8 个单端对地模拟输入。该系列芯片为 CMOS 芯片,逐次逼近式工作方式,转换时间为 $100\mu\text{s}$,一次取数时间为 135ns。为了接口方便,目前的 ADC 芯片在数字输出端均含有三态门,在不作数据输出时,呈现高阻状态,只有在 CPU 的读数信号触发下才输出数据,然后又恢复到高阻状态。因此这类 ADC 一般均可直接挂到微机的数据总线上。图 13-8 为 ADC 0 801 接口线路。在中断方式接口线路中(图 13-8(b)),其中 $D_0\sim D_7$ 为 8 条数据输出线; \overline{WR} 为启动转换信号(低电平使 ADC 复零,0 \rightarrow 1 时转换开始); \overline{INTR} 为转换结束信号(相当 \overline{EOC} ,低电平有效,可作为转换结束标志位或申请中断); \overline{RD} 为读信号(低电平有效,可打开其中的三态门将数据输出);从 CLKR 及 CLKIN 之间接入 R 与 C 可得到一时钟频率 $f(1/f=1.1RC)$,如 $R=10\text{k}\Omega$, $C=150\text{pF}$, $f=600\text{kHz}$; $V_{in}(+)$ 、 $V_{in}(-)$ 分别为模拟量输入的高端与低端,作为单端输入时, $V_{in}(+)$ 接信号, $V_{in}(-)$ 接地; \overline{CS} 为片选信号;DGND 为数字信号接地,AGND 为模拟信号接地。

在查询方式接口线路中(图 13-8(a)),ADC 的启动端 \overline{WR} 及数据输出端 \overline{RD} 共用一个地址号 94H,而用微机的输出指令端 \overline{LOW} 及输入指令端 \overline{IOR} 加以区分。74LS123 组成的单稳态触发器将微机的输出指令脉冲整形并加宽作用在 \overline{WR} 上,以保证 ADC 的可靠启动。ADC 启动后,微机通过地址号为 98H 的输入端口经三态门将 \overline{INTR} 信号送入数据线 D_0 (或其他数据线)不断地进行监视。当 $\overline{INTR}=0$ 时,说明 ADC 转换完成,微机即可通过输入指令,打开 ADC 的三态门将其输出数据通过总线读入 CPU 中的累加器中,然后再次启动 ADC 进行下一次的转换及取数循环。

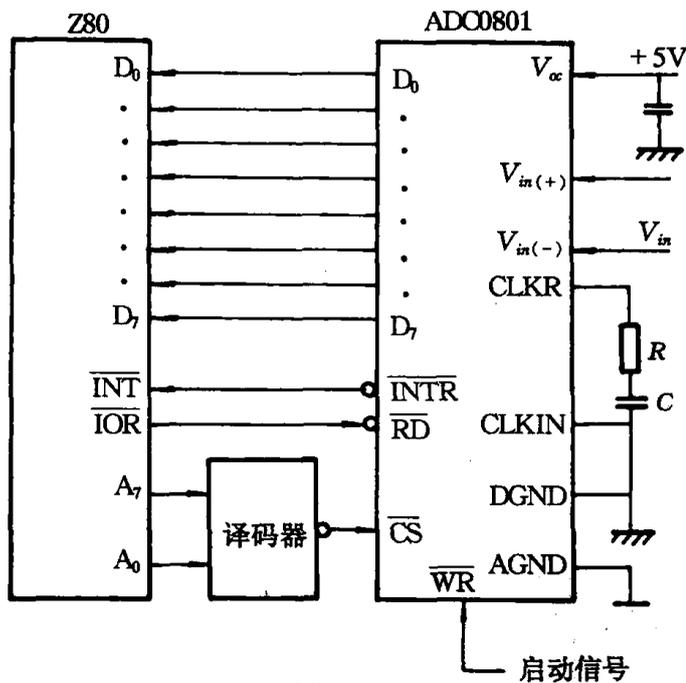
在中断方式接口线路(图 13-8(b))中,ADC 启动后,微机可不去监视 ADC 的工作状况而去执行别的任务。当 ADC 转换完成后, \overline{INTR} 才向 Z80CPU 提出中断申请,Z80CPU 此时即可将 ADC 的输出数据读入累加器之中。

(2) 高于 8 位 ADC 的接口

高于 8 位 ADC 的共同特点是从输出格式上看,都要占用两个 8 位字节的地址。当它们与



(a)



(b)

图 13-8 ADC0801 接口线路图

(a) 查询方式接口; (b) 中断方式接口

8 位微机相连接时,就需要分两次送出数据。如果与 16 位微机相连接,就可以一次性送出数据。显然这种送数方式要快得多。以下仅以 AD574A 与微机的接口线路为例说明(图 13-9)。图中,地址译码器用以控制片选 \overline{CS} , Z80 的 \overline{RD} 及 \overline{WR} 端通过反相器及与非门分别去控制 ADC 的读出或启动。数据模式选择 12/8 端直接接地表示对 Z80 只能按分两次的方式向 ADC 取数

据。采用状态端 STS 去控制 Z80 的中断请求端 \overline{INT} 。

注意:ADC 接口方式多种多样,此处不一一介绍,读者可详细参阅其他文献。

5. 微机对 ADC 的控制

微机对 ADC 的控制基本上可分为 3 种:查询式、中断式与 DMA(直接存储器存取)式。

(1) 查询式

所谓查询式即 CPU 在程序控制下定期地去访问 ADC,首先向 ADC 发出启动信号,然后不断地检查 ADC 的状态标志位,看其是否完成转换。如果转换未完成,CPU 就一直等待下去,直至 ADC 转换完成之后才启动数据缓冲器将 ADC 的数据读入到 CPU,并存在相应的内存单元之中。程序流程如图 13-10 所示。

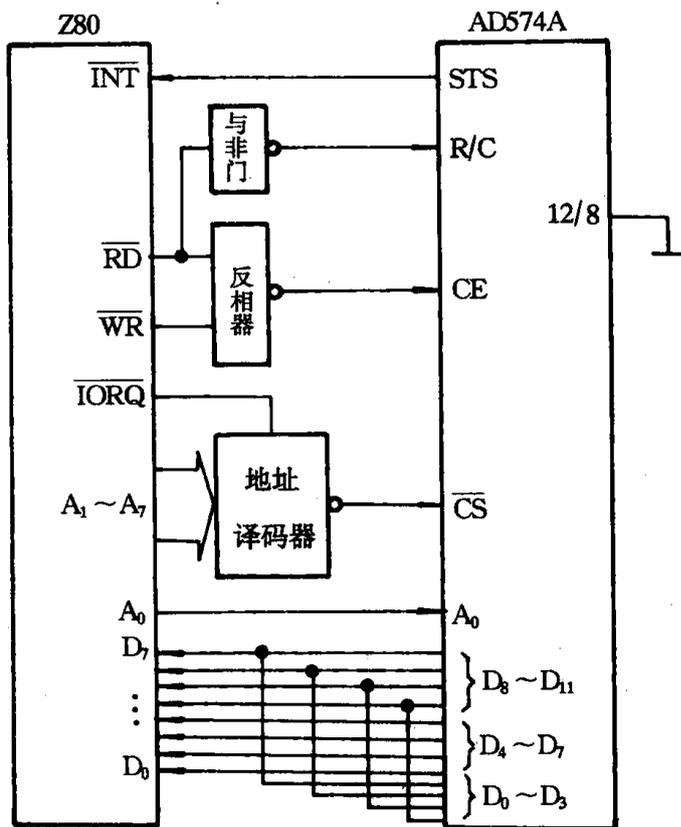


图 13-9 AD574A 与微机以中断方式连接的接口线路

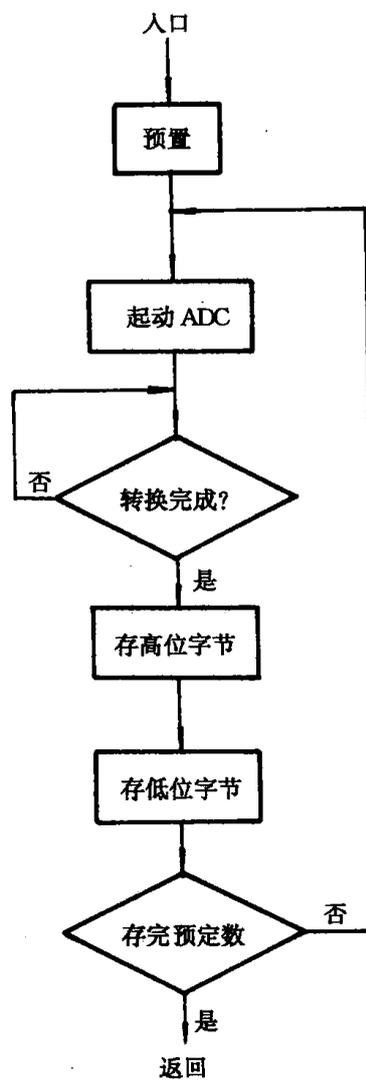


图 13-10 查询方式工作流程

查询方式使用起来比较灵活,软件简单,取数速度较快,但在 ADC 转换期间 CPU 多处于循环等状态,因此计算机的利用率不高。使用断控制方式能够提高计算机的工作效率。

(2) 中断式

中断式即计算机开始工作时,首先预置自己的工作初始状态,然后进入工作主程序而不主

动去访问 ADC 的工作状况。ADC 的启动则由实时时钟、手动或其他方式来控制。图 13-8 的线路为例,启动信号加在 ADC 0 801 的 \overline{WR} 端,当 ADC 0 801 转换完成后,从其 \overline{INTR} 端产生负跳信号加到 Z80 的中断申请端。 \overline{INT} Z80 接受到中断申请信号并响应此中断后即自动转入中断处理程序从 ADC 取数,然后中断返回又去执行被中断的原程序。中断方式具有很大的灵活性,它不仅可提高计算机的利用率,而且可使计算机随时响应 ADC 的中断申请以达到实时数据采集的目的。图 13-11 示出了 CPU 中断响应工作流程。

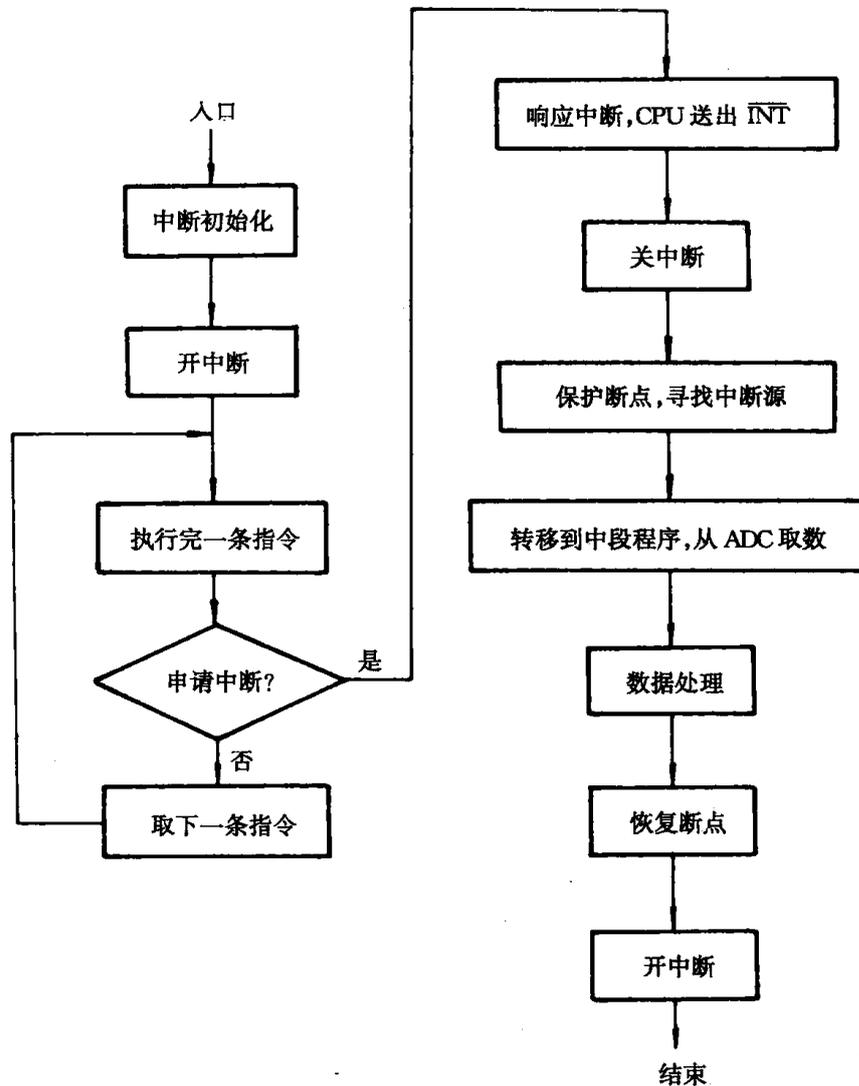


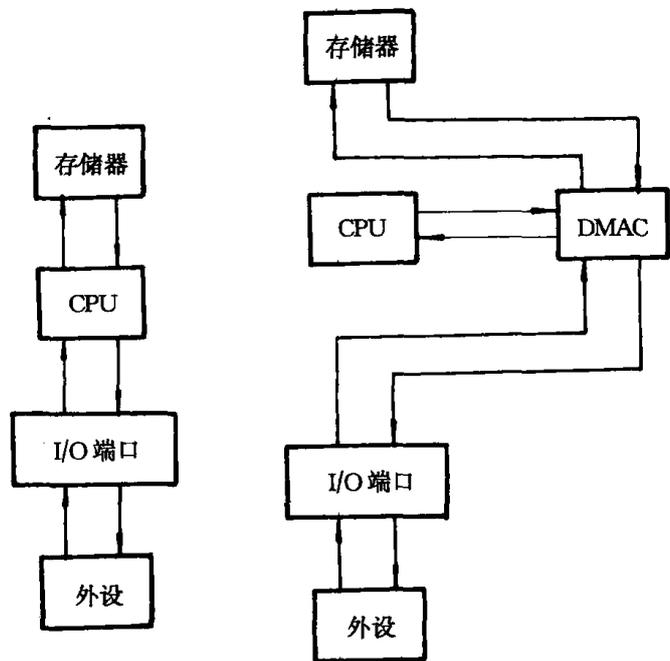
图 13-11 CPU 中断响应工作流程

早期的微处理器仅有一个中断申请端 \overline{INT} (如 8080、68000 等),目前增强型微机(如 8051、8096 等)往往备有多个中断申请端,并有规定好的中断申请优先权顺序,因此也就大大地提高了智能仪表在设计与使用上的方便。

(3)DMA(直接存储器存取)方式

根据微机原理及上述简要介绍明白,查询式与中断式均属于程序或软件控制的方式,其工作速度不会很快,一般在 10~50k 字节/s 左右。这是因为每次取操作数均需要若干指令周

期,要耗费不少时间,另外,数据的输入及输出均要由 CPU 中的累加器或寄存器中转,即输入按外设→累加器(或寄存器)→存储器传送,输出按存储器→累加器(或寄存器)→外设传送,这自然很浪费时间。对于速度高达 100k 字节/s 的 ADC 来说,如仍采用上述的控制方式的话,由于软件取数的速度跟不上,既不能充分发挥高速 ADC 的作用,又有可能在数据采集过程中使数据丢失。图 13-12 所示即为 DMA 传送方式与一般传送方式的比较。对于 DMA 传送,当 CPU 接到 DAC 控制器(DMAC)的中断请求下而响应中断时,CPU 立即与外设端口及存储器脱离(即 CPU 的内部总线呈现高阻浮空状态),暂时停止现行程序的操作并将其总线的控制权交给 DMAC,此时数据的传输即在 DMAC 的控制下直接在外设端口与存储器之间进行。



(a)一般传送方式 (b)DMA 传送方式

图 13-12 DMA 传送方式与一般传送方式的比较

当数据传送结束时,DMAC 即撤回向 CPU 发出的总线申请信号,并放弃对总线的控制,此时 CPU 恢复对总线的控制,并继续运行原先被暂停的程序。

DMA 的最大优点是 CPU 对 DMAC 的响应极快,这一过程不仅享有最高的优先权,而且只要求进行总线浮空即可暂停 CPU 的工作,并不像在响应中断时那样需要进行断点保护(或恢复)、寻找中断源等中间操作。此外,DMAC 全部为硬件逻辑操作而且传送数据是在外设端口与存储器之间进行,因而传数速度极快,一般可达 500k 字节/s 以上。至于高速 ADC 与 DMAC 的接口线路在一般的资料中均可查阅得到,此处不再赘述。

13.2 过程计算机系统

目前的核反应堆采用在线数字过程计算机作为核反应堆的一个主要部分。过程计算机系统履行监测、数据记录和处理的功能,并且完成若干关键的计算。同时,在核反应堆启动和停堆期间,计算机执行控制棒操作程序的要求,即棒价值最小化装置。核反应堆数字过程计算机的应用大致分为 4 个方面:(1)数据处理;(2)程序控制;(3)启动和负荷调整自动化;(4)最佳控制。目前实现最佳控制的还较少,基本上是前面 3 个方面,因此核反应堆赋予计算机的任务是:

(1) 监视核反应堆变量和异常状态,并报警。计算机生产过程通道对核反应堆模拟变量和数字变量进行周期扫描,当这些变量越低或改变状态时,发出声、光报警信号。

(2) 当某些条件接近异常状态或在核反应堆停闭时,为了工程分析而记录核反应堆的有

关变量。

(3) 正常运行情况下,操作员能通过打印数值、数字显示、数字和模拟趋势记录读出单个的或成组的数据、并打印有关的计算机结果、以帮助运行人员分析核反应堆运行状态。

(4) 根据堆内温度检测和通量检测系统送来的数据,进行在线计算,以便对核反应堆状态作迅速的分析与判断,如堆芯通量分布计算、燃耗计算、氙预测等等。

(5) 根据核反应堆监测系统送来的信号,进行事故分析与趋势预报。

(6) 监视核反应堆控制与保护系统的状态,为这些系统提供必要的联锁条件。

因此,过程计算机系统必须是:

(1) 定期测定堆芯的三维功率密度分布,并给出打印记录;

(2) 连续监测堆芯的功率水平,并以事先确定的堆芯运行极限为依据提供报警;

(3) 定期地和按要求地提供堆芯每束燃料棒的同位素浓度数据;

(4) 给棒闭锁电路提供输入,来补充和帮助实施对控制棒操纵的程序限制;

(5) 为核系统的报警输入提供所选取的触点动作状态变化的状态报警记录;

(6) 给出输入事故停堆保护动作机构的触点动作变化顺序在事故停堆后的分析记录,并对所选模拟输入在核反应堆事故停堆前后的分类数据加以记录。

例如表 13-1 是沸水核反应堆的一个用过程计算机监测核系统变量的仪表和控制系统输入一览表。表 13-2 是沸水核反应堆根据过程计算机对反应堆仪表和控制系统信号要求列出的仪表和控制系统输出一览表。

表 13-1 仪表和控制系统输入一览表

主要变量	输入形式	工程单位	数据利用	数据获取方式
中子监测系统				
LPRM 的通量水平	模拟	功率%	堆芯性能	60s 扫描级和程序扫描
APRM 的通量水平 (通道 A 和 C)	模拟	功率%	堆芯性能,事件回忆记录	5s 扫描级和程序扫描
APRM 的通量水平 (通道 B,D,E 和 F)	模拟	功率%	堆芯特性	60s 扫描级和程序扫描
APRM 通道旁路	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
APRM 按水平保护动作 (通量通道 A、B、C、 D、E 和 F)	数字式	状况	顺序预报信号记录	状态改变
APRM 刻度上限按水平 报警(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
APRM 刻度下限按水平 报警(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
APRM 仪表不工作报警 (任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
按流量变换器刻度上 限水平/仪表不工作保 护动作/报警	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
按流量变换器比较器 报警	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
TIP 通量水平(系统 A、B、C、D、和 E)	模拟	功率%	堆芯性能	程序扫描

续表 13-1

主要变量	输入形式	工程单位	数据利用	数据获取方式
TIP 导向管地址(每台机器 4 个输入)(机器 A,B,C,D 和 E)	数字编码组	选出管子位置	堆芯性能	1s 扫描级
堆芯顶部的 TIP 探头	数字式	状况	堆芯性能	自动优先中断
TIP 探头位置	脉冲	脉冲/cm	堆芯性能	自动优先中断
TIP 机器准备好(系统 A,B,C,D 和 E)	数字式	状况	堆芯性能	1s 扫描级
反应堆中子监测系统保护动作(系统 A,B,C 和 D)	数字式	状况	顺序信号器	状态改变
SRM 探测器不在启动位置(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
SRM 刻度上限按水平报警(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
SRM 仪表不工作报警(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
SRM 被旁路(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
IRM 刻度上限按水平保护动作(通道 A,B,C,D,E,F,G 和 H)	数字式	状况	顺序预报信号记录	状态改变
IRM 探测器没有完全就位(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
IRM 刻度上限按水平报警(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
IRM 刻度下限按水平报警(任一通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
IRM 仪表不工作报警(任一道路)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
IRM 被旁路(任一道路)	数字式	状况	状况警报	1s 扫描级
RBM 通量水平(通道 A 和 B)	模拟	功率%		60s 扫描级
RBM 按水平保护动作(两通道之一)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
RBM 刻度下限按水平报警(两通道之一)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
RBM 仪表不工作报警(两通道之一)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
RBM 被旁路(两通道之一或两个通道)	数字式	状况	状况警报记录	1s 扫描级
反 应 堆 手 动 控 制 系 统				
控制棒驱动系统流量	模拟	10 ⁶ t/h	堆芯性能	程序扫描
选取控制棒,控制棒位置,十位;控制棒位置,单位;棒位移警报,棒的选定和驱动	数字编码组	棒数目,切口	堆芯性能和棒价值最小化装置	程序扫描状态改变

续表 13-1

主要变量	输入形式	工程单位	数据利用	数据获取方式
控制提出	数字式	状 况	堆芯性能	1s 扫描级
排水量水位过高紧急停堆保护动作(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
换料联锁	数字式	状 况	状态警报记录	1s 扫描级
控制棒计时器失灵	数字式	状 况	状态警报记录	1s 扫描级
棒分布顺序选择(通道 A 和 B)	数字式	状 况	棒价值最小化装置状态警报记录	1s 扫描级
停堆余量选择	数字式	状 况	棒价值最小化装置状态警报记录	1s 扫描级
RWM 许可的棒插入反射	数字式	状 况	棒价值最小化装置状态警报记录	1s 扫描级
RWM 许可的选棒反射	数字式	状 况	棒价值最小化装置状态警报记录	1s 扫描级
RWM 误差或键锁旁路	数字式	状 况	棒价值最小化装置状态警报记录	1s 扫描级
RWM 闭锁	数字式	状 况	状态警报记录	1s 扫描级
棒提出闭锁	数字式	状 况	状态警报记录	1s 扫描级
排水量水位过高棒闭锁	数字式	状 况	状态警报记录	1s 扫描级
RWM 许可的棒提出反射	数字式	状 况	棒价值最小化装置状态警报记录	1s 扫描级
RPIS 命令	数字式	状 况	状态警报记录	1s 扫描级
给 水 控 制 系 统				
反应堆给水入口流量(通道 A, B 和 C)	模拟	10 ⁶ t/h	堆芯性能事件回忆记录	程序扫描和 5s 扫描级
反应堆压力	模拟	Pa	堆芯性能事件回忆记录	程序扫描和 5s 扫描级
反应堆水位	模拟	m	堆芯性能事件回忆记录	程序扫描和 5s 扫描级
蒸汽总流量	模拟	10 ⁶ t/h	事件回忆记录	程序扫描和 5s 扫描级
低功率水平报警	数字式	状况	棒价值最小化装置	1s 扫描级
低功率水平联锁	数字式	状况	棒价值最小化装置	1s 扫描级
反应堆给水入口温度(A ₁ , A ₂ , B ₁ , B ₂)	模拟	℃	堆芯性能事件回忆记录	程序扫描和 5s 扫描级
反 应 堆 压 力 壳 仪 表 和 控 制 系 统				
反应堆堆芯压降	模拟	Pa	堆芯性能事件回忆记录	程序扫描和 5s 扫描级
反应堆喷射泵总流量(堆芯流量)	模拟	10 ⁶ t/h	堆芯性能事件回忆记录	程序扫描和 5s 扫描级
循环驱动总流量	模拟	10 ⁶ t/h	堆芯特性	程序扫描
循环泵电动机功率(通道 A 和 B)	模拟	10 ⁶ W	堆芯特性	程序扫描

续表 13-1

主要变量	输入形式	工程单位	数据利用	数据获取方式
反应堆水位紧急停堆保护动作(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
反应堆水位堆芯冷却启动(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	状态警报	1s 扫描级
主蒸汽管隔阀没完全打开(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
主蒸汽管泄漏探测(管线 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	状态警报	1s 扫描
反应堆压力过高(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
主蒸汽管流量过高(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	状态警报记录	1s 扫描级
反 应 堆 保 护 系 统				
一回路安全壳压力过高(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
手动紧急停堆(通道 A 和 B)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
反应堆紧急停闭(通道 A 和 B)	数字式	状 况	顺序预报信号记录事件回忆启动	状态改变
控制阀快速关闭紧急停堆保护动作(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
汽轮机断流阀关闭紧急停堆保护动作(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
工 艺 过 程 放 射 性 监 测 系 统				
主蒸汽管放射性过高(通道 A, B, C 和 D)	数字式	状 况	顺序预报信号记录	状态改变
反 应 堆 水 净 化 系 统				
净化系统入口温度	模 拟	℃	堆芯性能	程序扫描
净化系统出口温度	模 拟	℃	堆芯性能	程序扫描
净化系统流量(通道 A 和 B)	模 拟	10 ⁶ t/h	堆芯性能	程序扫描
其 它 系 统				
发电机总功率	模 拟	10 ⁶ W	堆芯性能	程序扫描
发电机能量	模 拟	kW·h/脉冲	堆芯性能	自动优先中断

表 13-2 仪表和控制系统输出一览表

闭锁	不闭锁
TIP 扫描	失速误差探测
TIP 位置恢复操作	奇偶误差控制扫描方式
TIP 堆芯顶部恢复操作	
RPIS 扫描方式	
RPIS 下一根棒	
RWM 顺序选择(A,B)	
RWM 停堆余量选择	
RWM 选择误差	
RWM 低功率	
RWM 插入误差 1 显示(X,Y 位置)	
RWM 插入误差 2 显示(X,Y 位置)	
RWM 顺序组显示(组数)	
RWM 插入闭锁(A,B,C)	
RWM 选择闭锁(A,B,C)	
RWM 提出闭锁(A,B,C)	

表中的几个通量系统是:(1)LPRM(局部功率量程监测系统);(2)APRM(平均功率量程监测系统);(3)TIP(堆芯移动式探测器系统);(4)SRM(源量程监测系统);(5)IRM(中间量程监测系统);(6)RBM(棒闭锁监测系统);(7)RWM(棒价值最小化装置);(8)RPIS(核反应堆保护系统)

13.2.1 计算功能

采用核电站的压力、温度、流量、局部功率量程监测通量水平、控制棒位置以及计算燃料的照射量,依此计算每束燃料组件按每 0.304 8 m 为一段的局部功率密度。由反应堆的热平衡计算出堆芯总的热功率。用迭代算法在堆芯冷却剂流量与堆芯功率分布之间建立起一种相一致的关系。接着把结果整理成堆芯每束燃料的特定轴向区段的局部功率。

计算出堆芯的功率分布以后,计算机运用相应的反应堆运行限制准则,对每个 LPRM 通道确定出报警保护动作给定值(ATS)。ATS 的值就称为与真正记录的 LPRM 读数相比较的最大容许 LPRM 值。这种比较帮助操纵员把堆芯的运行保持在容许的热工限制之内,这些限制是以规定的燃料棒最大功率密度和最小临界热通量比为准则确立起来的。

计算机周期地按要求完成堆芯估算分析程序,完成一个估算周期需要 5~20min。在完成程序以后,为了记录,计算机打印出一个周期的记录。

1. 堆芯快速监测

通常每个 LPRM 的读数每分钟扫描一次。在改变功率水平期间,和提棒或 APRM 通道的检测一样,扫描速度提高到每 5s 一次。在改变功率水平期间的这种更加频繁堆芯监测,和适当的计算方法结合在一起,以新的运行水平为基础,为堆芯热工限制的几乎连续的重复估算提供了对 LPRM 报警保护动作给定值的连续修正。堆芯快速监测是由信息处理机自动启动的,也可以按需要由操纵员提出要求,完成快速扫描计算的时间不超过 3 分钟。这种估算得出了相对于更精确的基本定时估算更保守的 ATS 值(需要长达 20min 来完成)。计算机用它的快速性和较宽的监视范围来响应反应堆的变化,有了这种快速性和宽范围使功率的调度可以更加迅速,而仍然保证不超过热工运行限制。

2. LPRM 的校准

把通量测绘和校准(FMC)设备得出的通量水平和位置数据记入计算机中,然后计算机估

算这些数据并决定调整 LPRM 放大器增益的系数,来补偿由照射引起的灵敏度损失。除了整个堆芯还没有用 FMC 系统进行校准就立即进行调整以外,LPRM 放大器的增益实际上是不变更的。这种增益调整系数的计算给操纵员指出什么时候需要一个这样的校准程序。

3. 燃料的照射

用功率分布数据来确定燃料增加量的分布,这个增加量是从计算初始功率分布的时间起算的;然后用它来修改燃料的累计照射量的分布。将每束燃料的照射量(按分批和位置作出标记)存储起来,用来计算轴向分段功率分布,并按要求打印出来。

4. 控制棒的照射

对每根控制棒按每四分之一长度为一棒,定期确定其照射增加量。相应的累计总照射量定期进行修改,并且按需要打印出来。

5. LPRM 的照射

定期确定每个 LPRM 的照射增加量,并用它来修改电离室的累计照射量和与照射有关的 LPRM 灵敏度损失的修正系数。这些数据需要打印出来。

6. 受照射燃料的同位素成分

计算机具有在线计算能力,可以按月或按要求确定堆芯每束燃料的同位素成分。这种估算包括计算 3 种铀同位素和 5 种钚同位素的重量以及总的铀含量和总的钚含量。对每束燃料的每四分之一长度计算出同位素成分,并按束按批相应地算出总和。分析方法包括:把给定的燃料区段计算出同位素成分,并按束按批相应地算出总和;把给定的燃料区段计算出来的燃料照射量和照射加权空隙率与计算机内存的适用于特定燃料类型的同位素特性联系起来。输出是在穿孔的纸带上,从而减少了计算机的负担,使操纵员可以用纸带阅读机通过 1/0 打字机来得到一个打印的记录。纸带还有灵活性,容许把数据传输到其它的离机装置去作另外的数据处理。

13.2.2 棒价值最小化装置

棒价值最小化装置(RWM)的功能是帮助和给操纵员补充一种监测控制棒的有效后备程序,这种备用程序迫使控制棒遵守已确定的启动、停堆和低功率运行程序。计算机通过启动反应堆手动控制系统棒闭锁线路的适当的选棒闭锁、提棒闭锁和插棒闭锁的联锁信号,来防止操纵员给出与内存的 RWM 程序不符合的控制棒分布形式。存储在计算机记忆装置中的 RWM 程序是建立在控制棒提棒程序基础上的,这种提棒程序设计成把各个控制棒的价值限制在由作为设计依据的棒事故所决定的可接受的水平上(从而使棒价值最小化)。RWM 的功能不会妨碍正常的反应堆运行,并且如果出现故障,它自身也不会引起违反上述目的棒分布方式的形成。RWM 的功能可以被旁路,而且它的棒闭锁功能只有由操纵员启动特定的控制程序才能解除。

RWM 采用了下列的操纵员输入和敏感元件输入:

程序 操纵员可以从两种许可的程序中选取任何一种来给计算机执行。在停堆和每逢反应堆正在高于低功率水平给定值运行时,允许操纵员从程序 A 换到程序 B,或者反过来从 B 换到 A。

停堆剩余反应性试验程序 靠选择这个输入的方案,使操纵员可以将堆芯任何两根控制棒提出或重新插入,而保护所有其他的控制棒都在完全插入的位置上。

正常/旁路方式 备有闭锁开关,使操纵员在电站运行期间的任何时候都可以随意使用 RWM 的棒闭锁功能。

系统的启动/复原 在电站运行期间的任何时候,这种输入是由操纵员开动 RWM 程序使系统启动的。

控制棒的选择 RWM 能辨认操纵员选取控制棒的二进制编码符号。

控制棒的位置 RWM 能辨认控制棒位置的二进制编码符号。

控制棒传动机构选择和驱动 RWM 使用这种输入作为完整的选棒输入数据的一种鉴别逻辑特征。

控制棒的位移 RWM 能辨认采用控制棒位置指示的任一控制棒位置变化。用这种信息来估计其后提出还是容许插入。

反应堆功率水平 用给水流量和蒸汽流量信号来实现两个数字输入,使 RWM 功能可以程序控制。这两个输入是低功率给定值和低功率报警给定值,在功率水平高于 RWM 功能的预定工作范围时,就用这两个输入来使 RWM 的闭锁功能失效。

容许的反射 选棒、提棒和插棒容许的反射输入被 RWM 用做鉴别“反射”对系统硬件的反馈,以保证 RWM 输出的正常响应。

特征输入 RWM 采用所选定的特征输入,如奇偶误差和失速报警,来鉴别信息处理机的完整性和性能。

RWM 为电站的仪器仪表提供的孤立触点输出如下:

闭锁 为了允许或禁止选择、提出或插入一根控制棒,RWM 与反应堆控制系统连锁着。这些动作不影响与控制棒的选择有关的任一仪器仪表的正常显示。

扫描方式 在扫描频率出现最大值的时候,这种 RWM 输出用来同步扫描控制棒位置的数据。

RWM 控制屏备有下列指示:

插入误差 控制棒坐标标志有最多达到二个的插入误差。

提出误差 控制棒坐标标志有一个提出误差。

锁闭组 RWM 程序组数的标志普遍由计算机完成。

程序的选择 RWM 程序的指示最后由操纵员选定。

锁闭顺序 RWM 顺序的指示(A、B 或停堆剩余反应性试验)普遍由计算机完成。

RWM 旁路 指示 RWM 被手动旁路了。

选择误差 控制棒选择误差的指示。

闭锁 指示选择闭锁、提出闭锁或插入闭锁对所有控制棒都是有效的。

低功率—偏离程度 当反应堆的运行功率高于低功率给定值时,通常指示出实际的控制棒分布方式是偏离 RWM 程序的。

13.2.3 监测、报警和记录

1. 模拟监测和报警

为了报警,信息处理机可以对照两种极限类型校准每个模拟输入变量:(1)工艺过程的报警极限按照计算机的计算所确定,或者按照操纵员以一些固定值预先编成的程序;(2)模拟输入信号水平的合理性极限按照操纵员的决定和操纵员编制的程序。

报警程序包括一台音响蜂鸣器、操纵台上的一个报警灯和一个超过工艺过程报警极限变量的打字信息。备有一个解除按钮,可把蜂鸣器和灯光恢复到正常。用一个单响振铃和打字信息来证实变量已恢复到正常。

信息处理机备有这样的能力:如果过程计算机系统运行不正常,就向主控制室报警系统发出报警。报警的不正常情况包括(但不局限于)断电、过热、奇偶报警、失速报警和所选定的程序驱动过程计算机系统的触点。

为了提供过去 10min 的历史数据(事件的回忆记录),信息处理机在每间隔 5s 测量并存储 10 个模拟变量的值。在有需要时,操纵员可以启动这段 10min 数据的打印,并接着停止记录打印输出。处理机以 5min 的周期自动打印出这些变量的值,这种打印是在紧接着反应堆事故停堆之后的一个 5min 周期之前立即就开始的。用处理机内的一个数字信号来指示事故的停堆。操纵员可以终止这些数字的打印。

数字趋势的可能性是为存入操纵员选取的直至 10 个模拟输入和计算变量的值作准备的(趋势记录)。记录周期被限制到一个极小选择性的时间间隔里,这个时间间隔可以按照程序控制的要求进行调整。

2. 数字监测和报警

完成多达 80 个挑选出来的数字输入,为记录关于报警输出机构的触点闭合或打开的程序作准备(顺序警报器记录)。接收到的 4ms 或更分开些的输入报警按顺序区分开来,并且按时间前后打印出来。打印输出包括测试点说明和最接近 17ms 的事件发生时间。

状态报警的功能是每秒扫描一次数字输入,并且提供系统报警的打印记录。这个记录包括测试点说明和事件出现的时间。

3. 报警记录

附带的工艺过程程序所要求的报警的打印记录由装在控制室里操纵台旁边的打字机打出来。用报警的打印输出来向操纵员报告计算系统出故障、系统运行超出容许的限度以及可能有不合理的、不正常的或失灵了的输入敏感元件。

13.2.4 检验和试验

过程计算机系统是自校准的。进行特征检验是为了确定系统硬件的某些部分的操作性能,而进行内程序校验则是为了证明输入信号和选出来的程序计算是在特殊限制之内或是在合理的界限之内。

练习与思考题

1. 核反应堆仪表的职能对于动力堆、试验堆、反应堆瞬态实验、空间堆有什么不同？
2. 为了核反应堆安全和经济地运行,需要检测哪些参数？
3. 压水堆核电厂的控制系统主要有哪几个？
4. 为什么说测量得到的量值都是近似值？在什么情况下,量值才是可信赖的？
5. 某一测温仪表,其精度等级为 0.5 级,若要求温度指示值的误差不允许超过 $\pm 8^{\circ}\text{C}$,试问该测温仪表的测温范围是多大？
6. 测量范围为 $0\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 的测温仪表的误差不允许超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$,请选择其精度等级？
7. 用测量范围为 $0\sim 800^{\circ}\text{C}$ 的测温仪表来测量某一核反应堆冷却剂的温度,得到的最大绝对误差为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$,请确定该仪表的精度等级？
8. 压水堆核电厂、钠冷堆核电厂的核燃料、慢化剂、冷却剂和汽轮机工质有什么相同之处和不同之处？
9. 什么是“堆内”和“堆外”？
10. 说明核反应堆功率的测量方法。
11. 中子探测的基本方法有哪几种？
12. BF_3 正比计数管和长计数管,硼电离室和裂变室有什么相同之处和不同之处？
13. 无机闪烁体和有机闪烁体的应用场合有什么不同？
14. 监测核反应堆功率的中子检测分为哪几个量程？为什么分这几个量程？各用什么样的中子检测仪表？
15. 试推导圆柱体电离室的电流表达式。
16. 简述补偿电离室的工作原理。
17. 堆内核检测仪表和堆外核检测仪表的职能有什么不同？
18. 核反应堆内有什么样的恶劣环境？
19. 堆内裂变室和涂硼室的应用场合有什么不同？
20. 自给能 β 流中子探测器和内转换中子探测器结构工作原理和应用场合有什么相同之处和不同之处？
21. 压水核反应堆堆内和堆外的中子通量检测系统的职能有什么不同？
22. 简述微型裂变室的工作原理。
23. 正比计数管和 G-M 计数器的工作原理有什么相同之处和不同之处？
24. 某一 G-M 计数管的坪斜为 0.16%,与盖格区电压和实际工作电压对应的计数率分别为 260 次/min 和 368 次/min,试问此计数管的坪长为多大？
25. 核反应堆核燃料元件包壳破损如何监测和定位？
26. 核反应堆温度检测仪表主要采用哪几种？

27. 大亚湾核电站核反应堆堆芯冷却剂出口温度为 328.3°C , 若用 K 型热电偶测量其温度时未采取任何冷端温度补偿措施, 当时的环境温度为 35°C , 请问热电偶产生的热电势为多大?

28. 大亚湾核电站核反应堆堆芯冷却剂的出口温度为 328.3°C , 若用 K 型热电偶检测其温度时, 未采取任何冷端温度补偿措施, 热电偶的输出热电势为 12.18mV , 请问当时环境温度是多少?

29. 若用 K 型热电偶与 XCZ-101 仪表配合检测某压水核反应堆的冷却剂的温度, 仪表指示值为 300.3°C , 但未采取任何冷端温度补偿措施, 当时环境温度为 28°C , 请求被检测的冷却剂的真实温度为多少?

30. 一只与 K 型热电偶配套使用的补偿器, 其平衡温度为 0°C , 要求在 30°C 时完全补偿, 试计算此补偿器的限流电阻 R_S 为多大?

31. 若用 K 型热电偶与 XCZ-101 型仪表配合检测某压水反应堆冷却剂的温度, 仪表指示值为 285°C , 但未采取任何冷端温度补偿措施, 针对环境温度的大小, 经过计算法得知, 被测冷却剂的真实温度为 328.3°C , 请问当时的环境温度为多大?

32. 将配 XK 型热电偶测温范围为 $0\sim 800^{\circ}\text{C}$ 的动圈表改成配用 K 型热电偶, 测温范围为 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的动圈表, 试计算改刻度后的附加串联电阻(原来动圈阻为 $R_d = 40\Omega$, 附加串联电阻 $R_C = 400\Omega$, 外接电阻 $R_W = 15\Omega$, $R_K = 60\Omega$)。

33. 某压水堆核电站主蒸汽温度是 283°C 。现有两只高温计, 一只的测量范围是 $0\sim 300^{\circ}\text{C}$, 2 级, 另一只是 $0\sim 600^{\circ}\text{C}$, 1 级。若要求测量误差 $\leq \pm 10^{\circ}\text{C}$ (只考虑仪表引起的误差), 你选哪一只表, 为什么?

34. XK 型热电偶的输出热电势 $E(300, 50)$ 和 $E(500, 250)$ 一样吗?

35. 为什么热电偶测温时, 一般要采用补偿导线?

36. 什么是冷端温度补偿? 用什么方法可以进行冷端温度补偿?

37. 用 K 型热电偶测量某介质温度时, 其仪表指示值为 600°C , 而冷端温度为 35°C , 则实际温度为 635°C , 对不对? 为什么? 正确值应为多少?

38. 用 K 型热电偶测量某介质的温度, 当时的环境温度为 30°C , 测得的热电势为 33.2mV , 试问被测介质的实际温度为多少?

39. 热电阻温度计检测温度时为什么要采用 3 线制接法?

40. 热电阻温度计为什么没有被用来检测核反应堆堆内温度?

41. 用 K 型热电偶检测某介质的温度, 测得的热电势为 20mV , 环境温度为 25°C , 求此介质温度为多少? 若改用 XK 型热电偶测温时, 在相同的条件下, 测得的热电势为多少?

42. 用一只 K 型热电偶检测某压水堆冷却剂温度, 环境温度为 30°C , 若用动圈仪表配套使用(机构零点在 0°C), 其指示值为 400°C , 则认为冷却剂的实际温度为 430°C , 对不对, 为什么? 正确值为多少?

43. 用分度号 R_{t100} 铂电阻测量核反应堆冷却剂温度时, 但错用了 C_{t100} 的分度表, 查得温度为 150°C , 问冷却剂的实际温度为多少?

44. 试述电位差计和温度变送器的的工作原理。

45. 电子自动电位差计和电子自动平衡电桥有什么相同点与不同点?

46. 平衡电桥的精度和不平衡电桥的精度哪一个高? 为什么?

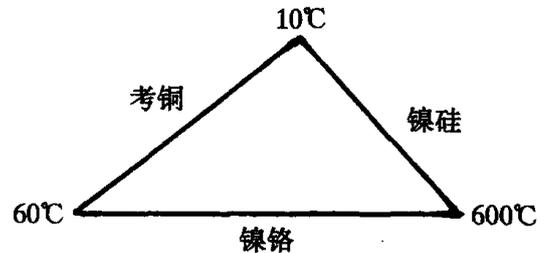
47. 在电子自动平衡电桥中,当热电阻 R_t 短路或断路时,仪表的指针将指在什么地方?为什么?

48. 铂热电阻用于核反应堆冷却剂回路温度的检测中采用什么样的测量方法?为什么采用这种方法?

49. 对 K 型热电偶进行校验,已知检定炉的温度为 400°C 时, K 型热电偶测得的热电势为 14.8mV ,当时的环境温度为 20°C ,问被校 K 型热电偶在校验点上输出的热电势的误差为多大?

50. 求出下图所示的回路的热电势,并画出热电流的方向。

51. 用 S 型热电偶和与之配套的毫伏计来测量温度。在检测时未采取任何冷端温度补偿措施,且毫伏计机构零点在标尺的 0°C 处。问(1)当毫伏计指示在 220°C ,冷端温度为 30°C ,此时被测介质的实际温度为多少?(2)若被测介质温度没有变化,但冷端温度为 50°C ,则毫伏计将指示在什么温度刻度上?(3)对于同一个毫伏计,若用 K 型热电偶,冷端温度为 30°C ,而毫伏计的指示在 220°C ,此时,被测介质的实际温度为多少?



52. 试述电感式压力(压差)变送器,霍尔压力(压差)变送器,力平衡式压力(压差)变送器及应变式压力(压差)变送器的工作原理。

53. 某压力仪表的测量范围为 $0\sim 1\text{MPa}$,精度等级为 1 级,试问此压力仪表元件的最大绝对误差是多少?若用标准压力仪表来校验该压力仪表,在校验点为 0.5MPa 时,标准压力仪表上读数为 0.508MPa ,试问被校压力仪表在这一点是否符合 1 级精度,为什么?

54. 一般涡轮流量计和核反应堆中应用的涡轮流量计有什么相同之处和不同之处?

55. 弯管流量计用于核反应堆冷却剂流量测量必须满足什么样的条件?

56. 电磁流量计在核反应堆中的应用主要用于什么样的核反应堆的冷却剂流量测量?有什么特点?

57. 用 t_0 温度情况下内径为 D 的光管和孔径为 d 的节流装置去测量密度为 ρ_1 的工作温度为 t_1 的不可压缩性流体的流量,其平均值为 q_m 与之对应的压差为 Δp ,若已知管道和孔板材料的线膨胀系数分别为 λ_D 和 λ_d ,试求光管流量系数 α_0 ?

58. 若用量程为 $0\sim 1.5691\times 10^5\text{Pa}$ 的标准节流装置来检测工作压力为 $155\times 10^7\text{Pa}$,工作温度为 328.3°C 的某压水核反应堆的冷却剂流量,管道和角接取压孔板的材料的线膨胀系数分别为 $11.70\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 $12.00\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。在 26°C 情况下管道内径和孔板孔径实测值分别为 222mm 和 154mm 。请求此标准节流装置的最大压力损失为多少 Pa?(注:光管流量系数为 1.0897 ,管道的原始粗糙度修正系数为 1.04 ,雷诺数为 10^6)。

59. 什么是液位测量时的零点迁移问题?怎样进行迁移?其实质是什么?

60. 用于核反应堆液位检测的超声波液位检测仪表有什么特点?

61. 简述互感式涡流液位检测仪表的工作原理?核反应堆液位检测中用涡流液位检测仪表有什么特点?

62. 简述霍尔液位计的工作原理。

63. 电阻式液位检测仪表用于什么样的核反应堆液位检测?这种液位检测仪表为什么不

能用于水冷核反应堆液位检测工作中？

64. 何为液位检测的参考水柱法,参考差压计法,内参考管法和外参考管法? 举例说明它们在核反应堆液位检测中的作用。

65. 简述差动变压器式位移检测仪表的工作原理及在核反应堆中的应用。

66. 简述涡流型位移检测仪表的工作原理及在核反应堆中的应用。

67. 简述 LVDT 接触式位移传感器和角位移传感器的工作原理。

68. 简述核反应堆主泵振动测量的原理。

69. 简述计算机在核反应堆中的应用。

主要参考文献

- 1 杜圣华等. 核电站. 北京: 原子能出版社, 1982
- 2 王汝贍等. 核辐射测量与防护. 北京: 原子能出版社, 1990
- 3 [美]J·F 勃兰德. 核反应堆的堆芯仪表. 北京: 原子能出版社, 1977
- 4 [日]须田信美等. 核电站计算机控制. 刘秀美等译. 北京: 原子能出版社, 1983
- 5 唐明辉等. 热工自动控制仪表. 北京: 水利电力出版社, 1993
- 6 常健生. 检测与转换技术. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 7 王化祥等. 仪表可靠性基础. 天津: 天津大学出版社, 1994
- 8 唐月美等. 仪表可靠性基础. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 9 吴永生. 热工测量及仪表. 北京: 水利电力出版社, 1991
- 10 张子慧. 热工测量与自动控制. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
- 11 沈自钧等. 热工自动化仪表. 北京: 电力工业出版社, 1980
- 12 周培森. 自动检测与仪表. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 13 [美]J. M. 哈勒等. 核动力反应堆仪表和控制系统手册. 郑福裕等译. 北京: 原子能出版社, 1983
- 14 陈济东等. 大亚湾核电站系统及运行. 北京: 原子能出版社, 1994
- 15 朱祖涛. 热工测量和仪表. 北京: 水利电力出版社, 1991
- 16 张步彬. 热工测量原理及其现代技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1995
- 17 陈铁镛等. 压水堆核电站基础培训. 深圳: 广东大亚湾核电站培训中心, 1994
- 18 唐炳生. 高级运行. 深圳: 广东大亚湾核电站培训中心, 1995
- 19 钱承耀. 核电站仪表. 西安: 西安交通大学教材(讲义), 1995
- 20 钱承耀. 压水堆核电站仪表. 深圳: 广东大亚湾核电站培训中心, 1996

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

```
{
  "filename": "MTI2Mzk4NTluemlw",
  "filename_decoded": "12639852.zip",
  "filesize": 22220381,
  "md5": "c29c407c37355e5f04b2d67a0ea99ace",
  "header_md5": "cf4e1b3916a3fb14adb2b90b95f158a8",
  "sha1": "5a5a0ac7418c9a1f6632bf7836ed1de075f1add8",
  "sha256": "1dd6845919367e46621ec842936b0d765d58d49974263770dd03fff825f3a8bf",
  "crc32": 252923755,
  "zip_password": "",
  "uncompressed_size": 23068860,
  "pdg_dir_name": "\u6838\u53cd\u5e94\u5806\u4ee\u8868_12639852",
  "pdg_main_pages_found": 225,
  "pdg_main_pages_max": 225,
  "total_pages": 233,
  "total_pixels": 1557463792,
  "pdf_generation_missing_pages": false
}
```