

177179

高等学校教材



热工过程检测仪表

东北电力学院 程大亨 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书在介绍测量技术的基本理论和基本知识的基础上,较详细地阐述了测量温度、压力、流量、料位、某些工质成分以及位移、振动等机械量所用的常用传感器、变换器和显示仪表的工作原理、构造、线路及特性,并作误差分析,其目的是提高读者认识、分析、应用和改进测量方法及测量仪表的能力。

本书为高等学校生产过程自动化专业“热工测量及仪表”课程的教材,也可供其他专业学生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工过程检测仪表/程大亨主编.-北京:中国电力出版社,1997

高等学校教材

ISBN 7-80125-315-9

I. 热… II. 程… III. 热工仪表:检测仪表-高等学校-教材 IV. TK31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 04596 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市水利局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23 印张 517 千字

印数 0001—5000 册 定价 21.10 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据 1988 年全国高等学校热动类专业热工自动控制、热工测量仪表教学组扩大会议制定的教材编审计划，并按“热工测量及仪表”课程教学大纲的精神编写的，可作为高校生产过程自动化专业“热工测量及仪表”课程的教材，也可供其他专业学生及工程技术人员参考。

当前，随着火力发电机组迅速向大容量、高参数方向发展，机组自动化水平迅速提高，检测技术日益显得重要，新型仪表和先进的检测技术也不断出现。作者力图尽量把新方法、新技术和新仪表引入本书。

本书内容共分九章，除第一章介绍测量技术的基本理论和基本知识外，其余各章均按被测参数种类分别介绍常用传感器、变换器及显示仪表的原理、构造（线路）、特点和误差分析，并单列一章介绍通用的热工显示仪表。为适应课程的需要，本书新增了电厂转动机械的位移、振动等参数测量的内容。为便于读者学习、掌握好课程内容，在各章后面均列出了复习思考题及习题。

本书由东北电力学院程大亨（编写第一、二、三及九章）和华北电力大学李国光（编写其余各章）编写，由程大亨主编。东南大学吴永生老师任主审，对全书提出了许多宝贵意见与建议。此外，在本书编写过程中还得到其他一些单位及个人的帮助，这一切对保证本书的顺利完稿起到重要作用，在此一并表示衷心的感谢。

限于作者水平有限，书中不足与错误之处在所难免，敬请广大读者给予批评指正。

编 者

1996 年 4 月

目 录

前 言	
绪 论	1
1. 测量技术的基本知识	4
1.1 测量与误差	4
1.1.1 测量与误差 1.1.2 测量方法的分类	5
1.2 仪表的组成与分类	5
1.2.1 计量器具 1.2.2 仪表的组成 1.2.3 测量系统 1.2.4 热工仪表及其分类	9
1.3 误差概述	9
1.3.1 误差的来源 1.3.2 误差的分类 1.3.3 随机误差 1.3.4 系统误差 1.3.5 异常值的判断与剔除 1.3.6 误差的传递 1.3.7 误差的合成 1.3.8 不确定度	24
1.4 仪表的质量指标	24
1.4.1 仪表的质量指标 1.4.2 仪表的检定	29
1.5 测量单位与量值的传递	29
1.5.1 测量单位及法定计量单位 1.5.2 量值的传递	31
1.6 热工检测系统简介	31
复习思考题	32
习题	33
2. 温度测量	35
2.1 概述	35
2.1.1 温标 2.1.2 测温仪表的分类	40
2.2 热电偶测温法	40
2.2.1 热电偶的工作原理 2.2.2 热电偶的有关性质 2.2.3 热电偶的基本定律 2.2.4 冷端温度的影响及处理 2.2.5 测量信号的线性化处理	56
2.3 热电偶的种类与构造	56
2.3.1 对热电极材料的要求 2.3.2 定型热电偶 2.3.3 未定型热电偶 2.3.4 热电偶的构造 2.3.5 热电偶的校验	69
2.4 热电阻测温	69
2.4.1 测温原理 2.4.2 标准化热电阻的种类、性质与构造 2.4.3 热电阻测温的误差分析 2.4.4 热电阻的测量方法	76
2.5 接触测温法的传热误差	76
2.5.1 导热误差的分析 2.5.2 辐射传热误差的分析 2.5.3 表面温度测量的传热误差 2.5.4 高速气流的温度测量	82
2.6 非接触式测温仪表	82
2.6.1 物体的热辐射 2.6.2 光学高温计 2.6.3 光电高温计 2.6.4 比色高温计 2.6.5 辐射高温计 2.6.6 红外测温仪	96
复习思考题	96
习题	96

3. 热工显示仪表	99
3.1 动圈式显示仪表	99
3.1.1 原理与构造 3.1.2 动圈表在热工测量中的应用	
3.2 平衡式显示仪表	108
3.2.1 手动电位差计 3.2.2 电子电位差计 3.2.3 自动平衡电桥 3.2.4 新型平衡式仪表简介	
3.3 数字显示仪表	124
3.3.1 概述 3.3.2 A/D 转换器 3.3.3 数字显示器 3.3.4 线性化方法 3.3.5 标度变换 3.3.6 模块化电路 3.3.7 整机线路举例	
3.4 应用微机的新型显示仪表简介	141
3.4.1 3081/4081 型混合式记录仪的结构及工作原理 3.4.2 3081/4081 型混合记录仪的主要功能	
3.4.3 3081/4081 型混合记录仪的特性	
复习思考题	144
习题	145
4. 压力测量	147
4.1 压力测量的基本知识	147
4.1.1 压力的概念与表示方法 4.1.2 压力的单位 4.1.3 压力测量仪表 4.1.4 压力标准与量值传递	
4.2 液柱式压力计	150
4.2.1 U 形管压力计 4.2.2 单管压力计 4.2.3 斜管微压计	
4.3 弹性式压力计	154
4.3.1 弹性元件 4.3.2 膜盒压力表 4.3.3 弹簧管压力表 4.3.4 双波纹管差压计	
4.4 压力信号远传变换方法	162
4.4.1 电感式位移变换 4.4.2 电容式位移变换 4.4.3 力平衡式压力变换 4.4.4 霍尔式压力变换 4.4.5 应变式压力变换	
4.5 压力(差压)变送器	173
4.5.1 电感式压力(差压)变送器 4.5.2 1151 系列电容式压力(差压)变送器 4.5.3 扩散硅压力(差压)变送器 4.5.4 力平衡式压力(差压)变送器	
4.6 压力表的选择与测压系统	193
4.6.1 压力表的选择 4.6.2 测压系统导压信号管路及附件	
4.7 工业压力表的检定	196
4.7.1 压力标准器——活塞式压力计 4.7.2 工业弹簧管压力表的检定与调整	
复习思考题	198
习题	199
5. 流体流量测量	200
5.1 概述	200
5.1.1 流量测量在生产过程中的重要性 5.1.2 流量的表示方法 5.1.3 流量的测量方法与仪表 5.1.4 流体流量测量中的几个基本概念 5.1.5 流量标准的建立及标准装置	
5.2 涡轮流量计	206
5.2.1 涡轮流量计的组成及流量测量原理 5.2.2 流量指示积算器	
5.3 转子流量计	212
5.3.1 玻璃管转子流量计 5.3.2 金属管转子流量计	

5.4 靶式流量计	216
5.4.1 概述 5.4.2 测量原理	
5.5 测点流速法流量测量	219
5.5.1 测点流速法流量测量原理 5.5.2 测点流速的测量	
5.6 其他流量计简介	230
5.6.1 电磁流量计 5.6.2 卡门涡街流量计 5.6.3 超声流量计 5.6.4 质量流量计	
复习思考题	238
6. 节流式流量计	239
6.1 概述	239
6.2 标准节流装置	239
6.2.1 标准节流装置的组成与类型 6.2.2 适用的流体条件 6.2.3 适用的管道条件	
6.2.4 节流件的结构形式 6.2.5 压力损失 6.2.6 标准节流装置的误差	
6.3 流量公式	246
6.3.1 不可压缩流体的流量公式 6.3.2 可压缩流体的流量公式 6.3.3 流出系数 C 和膨胀系数 ϵ	
6.4 标准节流装置的计算	254
6.4.1 流量计算 6.4.2 标准节流装置的设计计算 6.4.3 标准节流装置流量测量的不确定度	
6.4.4 标准节流装置的附加误差 6.4.5 流量测量的补偿	
6.5 非标准节流装置	268
6.5.1 锥形入口孔板 6.5.2 $\frac{1}{4}$ 圆弧孔板 6.5.3 声速喷嘴	
6.6 节流式流量计信号管路的安装	271
复习思考题	272
习题	273
7. 液位测量	274
7.1 液位测量概述	274
7.1.1 概述 7.1.2 液位测量的方法 7.1.3 锅炉汽包水位测量	
7.2 云母水位计	278
7.2.1 工作原理 7.2.2 云母水位计的误差	
7.3 差压水位计	279
7.3.1 水位-差压转换原理 7.3.2 差压水位的压力校正 7.3.3 差压水位系统与零点迁移	
7.4 电接点水位计	284
7.4.1 水位转换原理与水位测量筒的结构 7.4.2 显示仪表 7.4.3 电接点水位测量的误差	
复习思考题	293
8. 火电厂生产过程中的物质成分分析	294
8.1 概述	294
8.1.1 物质成分分析测量系统的组成与仪表 8.1.2 火电厂生产过程中的成分分析仪表	
8.2 锅炉烟气的成分分析	295
8.2.1 烟气分析指导燃烧的原理和取样与预处理装置 8.2.2 氧化锆氧量计 8.2.3 热导式 CO_2 分析仪	
8.3 热导式氢分析仪	310
8.3.1 概述 8.3.2 调整组件 8.3.3 变送器 8.3.4 交流稳压器和二次仪表	
8.4 红外线气体分析仪	313

8.4.1 概述	8.4.2 红外线气体分析仪的物理基础知识	8.4.3 红外线气体分析仪的结构组成	
8.4.4 红外线气体分析仪			
8.5 电导式成分分析仪			319
8.5.1 概述	8.5.2 电导分析仪的基本原理	8.5.3 DDD-32A 型工业电导仪	
复习思考题			329
9. 位移、振动和转速测量			330
9.1 位移测量			330
9.1.1 电感式位移测量装置	9.1.2 差动变压器	9.1.3 电涡流式传感器	
9.2 振动测量			337
9.2.1 磁电式测振方法	9.2.2 电涡流式振动传感器	9.2.3 复合式振动传感器	
9.3 转速的测量			342
9.3.1 离心式转速表	9.3.2 发电机式转速表	9.3.3 磁阻式测速方法	9.3.4 磁敏式测速传感器
9.3.5 电涡流法测转速			
复习思考题			348
附录			349
附录 1 标准正态分布函数 $F(z)$ 和概率密度 $f(z)$ 表			349
附录 2 t 分布临界值 t_α 表			350
附录 3 铂铑 10-铂热电偶分度表			350
附录 4 铂铑 13-铂热电偶分度表			351
附录 5 铂铑 30-铂铑 6 热电偶分度表			352
附录 6 镍铬-镍硅 (镍铝) 热电偶分度表			352
附录 7 镍铬-康铜热电偶分度表			353
附录 8 铁-康铜热电偶分度表			353
附录 9 铜-康铜热电偶分度表			354
附录 10 铂热电阻分度表			354
附录 11 铜热电阻分度表 (Cu50)			355
附录 12 铜热电阻分度表 (Cu100)			355
参考文献			356

绪 论

测量是人类对自然界诸事物进行定量的工作，或者说是利用某种方式和手段获取被测对象的有关参数数值大小的过程。在这一过程中，人们借助专门的工具，通过试验和试验数据的分析计算，求得被测参数的数值。因此，可以说测量就是为取得某一未知参数数值而做的全部工作，包括测量的误差分析和数据处理等工作在内。从认识论角度看，可把测量看成是人类耳、目等感觉器官的极其重要的扩展与延伸，但测量比人的感官能获得更客观、更准确的信息，有更为宽广的量限及更迅速的反应。

测量（检测）技术是研究测量方法、测量原理、测量工具及测量数据处理的科学技术，是整个自然科学技术的一个重要分支。

测量工作十分重要。科学研究、工农业生产等领域离开测量将陷入盲目、混乱状态，更不能保证工作的正常开展及工作质量。在自动控制系统中，作为测量工具的测量（检测）仪表更是不可缺少的重要组成部分。它既对前次操作、控制的效果进行检验，又为下一步控制提供依据。随着自动化水平的不断提高，检测技术的作用将变得越来越重要。

检测技术及仪器仪表的发展和进步是与科学研究及生产的需要和发展密切相关的。它的发展过程大致可分成三个时期：

(1) 手工艺时代 在 20 世纪前，科研人员多数是个体劳动，理论与实验研究往往分不开，在天文、物理、化学与生物等方面的科学家大多根据需要自己制作仪器。工业生产应用的仪表大多属于简单的机械指示式仪表，而且只是作为被测对象的配套设备被采用。

(2) 仪器工程时代 在电子技术发展的基础上，由于电子管与晶体管的放大作用以及光电、压电及热电等效应的广泛应用，电测法及自动记录仪表在科研及工业领域被普遍采用。一些科研单位已有专门的仪器工程师，仪器仪表工业已成为独立的行业。工业生产过程对自动化的要求已使仪器仪表成为必不可少的设备。

(3) 仪器科学时代 近年来，由于各种新技术、新材料、新器件和电子计算机的广泛应用，一个新的、仪器仪表科学的时代已经到来。其总的发展趋势是：一方面应用电子计算机对一些传统的测量方法进行详细的理论分析，找出其设计参数中的相互关系，从而进行最优设计；另一方面是尽量采用新技术、新材料和新器件组成先进的检测系统。这两者的有机结合，必将促进检测技术快速发展。

目前，检测技术、仪器仪表的发展动向主要可概括为以下几点：

(1) 半导体技术的发展促进了仪表的更新换代。从 60 年代集成电路问世以来，已经历了四代变化，半导体技术的惊人发展对仪器仪表技术的发展起了很大的促进作用。它实现了仪表器件的集成化和微型化，提高了仪表的可靠性和使用寿命，降低了仪表的成本和维护费用，增加了仪表新产品的种类和设计弹性。

(2) 物性型固体传感器开辟了检测仪表的新途径。物性型传感器是在半导体技术基础

上，进一步实现“材料、器件、电路、仪表”一体化的新型检测仪表。它按照物理化学转换形式分，已有热敏、光敏、压敏、力敏、气敏、湿敏、磁敏、辐射转换等种类。近来半导体材料微观机理的研究，必将有力地促进新的物性型固体传感器的开发。另外，物性型固体传感器配用集成电路后便有复合功能，缩小了体积，增强了信号处理能力。可以预计，物性型固体传感器的发展必将给检测仪表带来新的变革。

(3) 模拟数字混合测量技术带动测量技术发展。由于电子技术与数字化技术的迅速发展，人们一直习惯采用的模拟测量法正转向模拟数字混合测量法和模型图像测量法方向发展。这种把数字仪表的高精度和模拟仪表的连续直观联系起来，把多参数定性定量测量技术和数字信息处理结合起来的测量方法的出现，将成为测量技术转向的一个标志。

(4) 微处理机的普及应用将导致仪表的技术革命。目前微处理机和微型计算机的出现被公认为具有无限发展潜力，甚至被推崇为第二次工业革命的标志。它的诸多优点使新的测量技术几乎没有不考虑采用微机的。可以设想，不久的将来各种仪表都将会带上微机而具有不同程度的智能。

(5) 光电子技术的应用将推动检测技术的发展。近年来光电子技术得到了迅速发展，这种光学技术与光电技术的结合，不仅用于信息的接收和显示，还可用于信息的检测、转换和远距离传送。这种光电混合式传感器的研制越来越受到人们的重视。它的内部设有模拟/数字转换和频率转换，可将输出信号变换成光数字信号进行传输。因此新型电子光学转换器的半导体激光器件、集成光路器件配以光导纤维传输技术和信息处理技术，正在开拓着一种新型应用光电技术的图像处理测量系统的结构。显然，光电子技术的发展和应用将推动检测技术的新发展。

根据不同的依据，测量技术有多种不同的分类方法。常见的分类方法有：按被测参数的种类分类；按被测参数在测量过程中是否变化分类；按仪表与被测对象是否接触分类；按取得测量结果的方式分类等。

生产过程中诸参数的测量常被称为过程检测，又称在线检测。本书所介绍的参数测量基本均属于过程检测范畴。工业生产过程常见的检测参数的分类见表 0-1。

表 0-1 工业生产过程检测参数分类

热工量	温度、热量、热流、压力、真空度、压差、流速、流量、物位等
电工量	电压、电流、电阻、电功率、频率、磁场、射线量 (α 、 β 、 γ) 等
物性与成分量	成分、浓度、粘度、粒度、浊度、湿度、露点、水分、密度、酸碱度、分子量、纯度等
状态量	机械运转状态：启停、振动、位移、声音等 设备异常状态：过热、泄漏、变形、裂纹、磨损、过负荷等 产品在线检测：表面质量、疵品、形状等 仪表装置状态：绝缘、断线、电源等

应该指出，被测的参数一般是不受行业、部门限制的。例如温度、压力等参数，在电力、冶金、石油、化工等工业部门及其他行业均是需测的重要参数，这体现了测量技术的

“共性”，即通用性；反过来，测量同一种参数，随着被测对象、介质、参数数值范围以及对测量要求的不同，又往往需要采用不同的测量方法、测量仪表，它们之间有时甚至有很大的差异，这就反映出测量技术的“个性”，即特殊性。这种通用性与特殊性的共存，是测量技术的一大特点。

随着测量技术的发展，其工作日益繁杂，涉及的范围越来越广。为适应需要，世界各国均按工作职能的差异逐步形成了测量技术方面的专业化分工。在我国，习惯把测量工作分成计量、仪表制造和应用三个方面。

计量 计量部门主要从事测量技术的管理工作。它的主要任务是贯彻国家法定的计量单位；建立、复制、保存基准和标准器具，并进行标准的传递；颁布计量法规，管理监督测量器具；研究精密测量器具、方法；研究误差理论；参加国际有关的计量工作等。

仪器制造 仪器生产厂家及仪器仪表研究单位从事此类工作。其任务是生产、供应定型的仪器、仪表，并研究新的测量方法及仪表，以满足测量的需要。

应用 应用部门的任务是对具体的被测对象组织测量活动，目的是及时、准确地获得可靠的测量结果。

热工测量是热力生产过程中各热工参数的测量技术。热工测量所采用的仪器、仪表称为热工仪表。本书除介绍温度、压力等热力状态参数的测量外，还将介绍流量、料位、部分工质的成分及某些机械量的测量技术。

1. 测量技术的基本知识

在介绍各种热工参数的具体测量方法、测量原理及测量仪表之前，本章将先介绍有关测量技术的基本概念及基本知识，以求读者对测量技术有一个总体认识。

1.1 测量与误差

1.1.1 测量与误差

测量是利用某种工具并以实验或计算的方法获取被测参数数值的过程。具体说，是指被测参数与预先确定的被测参数的“单位”进行比较，并获取比值的过程。测量的基本公式如下：

$$x = aU_x \quad (1-1)$$

式中 x ——被测参数（被测量）的数值；

U_x ——测量单位；

a ——测量获得的比值，又称为测量值。

aU_x 是测量的结果。考虑到测量过程一般有误差存在，实际的关系式应该是

$$x \approx aU_x$$

有人提出，从测量基本公式看，测量过程有三要素：一是测量单位，它必须预先被确定，并以实物加以复现；二是测量方法，它是将被测量与其单位进行比较的实验方法；三是测量工具，它是测量过程的具体体现与实施者，是为求取比值而实际使用的一些仪器仪表与设备。

计量是测量技术的主要内容之一。它是为保证计量单位统一和量值准确可靠这一特定目的而做的测量工作，因此是测量的一种特定形式。其方法是以公认的计量基准、标准为基础，依据计量法规和计量检定系统（表）进行量值传递来保证单位的统一和测量的准确。

获得准确的测量结果是对测量的首要要求。但实际上测量结果与被测参数实际值之间总会存在或大或小的差异，这个差异称为误差。误差的必然性是公认的事实，其原因可以从两个角度作简单解释：其一，测量过程可视为信号的传递、变换与处理过程，由于测量方法、测量仪表的不完善及其他因素的影响，信号不可避免地会有失真、畸变和能量损失；其二，测量可看成是人类借助某些工具观察、了解客观事物的过程，由于科学技术水平对人类认识水平的限制，决定了观察、认识事物必然存在偏差。

事物总是一分为二的。在面对误差不可避免这一现实的同时，还应看到科学技术的进步与检测技术的发展，为提高测量精确度、减少误差创造了条件。随着科学研究及生产水平的提高与发展，人们对测量精确度的要求也随之提高，因此解决这一问题将是从事检测工作的技术人员的重要职责和艰巨任务。

1.1.2 测量方法的分类

测量方法与测量原理具有不同的概念。测量方法是指实现被测量与单位进行比较并取得比值所采用的方法。而测量原理是指仪器、仪表工作所依据的物理、化学等具体效应。

根据分类依据的不同，测量方法主要有以下几种分类方法：

(一) 直接测量与间接测量

(1) 直接测量 被测量与单位能直接比较，立即得到比值，或者仪表能直接显示出被测参数数值的测量方法被称为直接测量法。例如用尺测物体长度，用水银温度计测温度等。

(2) 间接测量 采用此种测量方法不能直接得到测量结果，它需要先测出一个或几个与被测量有一定函数关系的其他量，然后根据此函数关系计算出被测量的数值。人们常把该被测量称为间接测量量，而把能由仪表直接测出的被测量称为直接测量量。在实际工作中经常会碰到间接测量的情况。例如金属材料的电阻率 ρ 值目前还不能直接测得，但可通过测一段圆截面金属线的长度 l 、直径 d 和电阻值 R ，最后由公式 $\rho = \pi d^2 R / (4l)$ 计算出 ρ 的数值。

在过程检测中，多数采用直接测量法，间接测量用得不多。但这两种方法在一定条件下是能相互转化的。当前只能用间接测量法测量的某些参数，随着测量技术的发展及新型仪器仪表，尤其是采用微机的智能化仪表的出现，将来可能用直接法就能测量。

(二) 接触测量与非接触测量

用接触测量法测量时，仪表的某一部分（一般为传感器部分）必须接触被测对象（被测介质）。而采用非接触测量法时，仪表的任何部分均不与被测对象接触。过程检测多数采用接触测量法。

(三) 静态测量与动态测量

在测量过程中，如被测参数恒定不变，则此种测量称为静态测量。测量随时间变化的参数的方法称为动态测量。动态测量的分析与处理比静态测量繁杂得多。过程检测中的被测参数不可能始终保持不变，因此严格讲均属动态测量。但由于仪表的反应一般很迅速，多数过程检测参数的变化又较缓慢，在仪表响应的短时间内被测参数可近似视为恒定不变，因此可近似当成静态测量对待。这样近似，可以使分析处理大为简化，而分析结果与实际情况又不致有大的出入。

1.2 仪表的组成与分类

1.2.1 计量器具

可以单独地或与辅助设备一起，用以直接或间接确定被测量值的器具或装置称为计量器具。计量器具一般可分为实物量具、计量仪器仪表、计量装置和用于统一量值的标准物等。

量具是具有固定形态、用来复现或提供定量的一个或多个已知量值的计量器具，它一般没有指示器。量具又可分为单值量具（如砝码、量块、标准电阻等）和多值量具（如砝码组、量块组等）。

计量仪器（仪表）是将被测量值转换成可直接观察的示值或等效信息的计量器具，它是可单独地或连同其他设备一起用以进行计量的装置，例如电流表、压力表、温度计等仪器仪表。

为确定被测量值所必需的计量器具和辅助设备的总体称为计量装置。如光电高温计检定装置、晶体管图示仪标准装置等。

计量器具按其在检定系统表的位置可分为计量基准、计量标准和工作计量器具。

能复现、保存和传递量值，并经国家鉴定，作为统一全国量值依据的计量器具，称为计量基准。按国家计量检定系统表规定的精确度标准等级，用于检定较低等级计量器具或工作计量器具的计量器具称为计量标准。用于实际测量而不适用于检定工作的计量器具叫做工作计量器具。

1.2.2 仪表的组成

虽然随被测对象、参数、测量条件、测量方法及仪表工作原理等情况的差异，各种仪表构造、电气线路、外形以致具体组成会各不相同，但是根据仪表各组成部分在信号处理中的功能不同，原则上可把所有仪表均看成由以下四个基本功能环节组成。这样处理有利于对仪表进行分析研究，也利于对仪表改进与完善。

（一）传感器

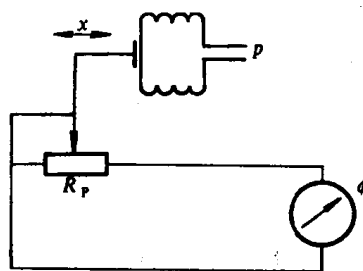


图 1-1 仪表的组成

传感器（也称感受件、敏感元件、检测元件）处于测量仪表与被测对象相互联系的接口位置，它直接从对象中提取被测量的信息，感受其变化并变换成相应的便于测量的其他量，作为输出信号。所有传感器均依据其本身的某些物理、化学等效应以实现其测量功能。当被测参数变化时，传感器本身的某个参数将发生相应改变，这个参数就可作为传感器的输出信号。以图 1-1 所示的弹性波纹管测压力的情况为例，被测压力变化时，波纹管受压力的作用

产生变形，其自由端产生一个与压力相应的位移变化 x 。这里的波纹管就是测压的传感器，而位移 x 就是传感器的输出信号。

传感器的输出信号是整个仪表（测量系统）的原始信号，是信号进一步处理的依据。传感器计量性能的优劣将直接影响整个仪表的质量，因此它是仪表的关键环节。为此，对传感器的要求比较严格。其主要要求如下：

- （1）稳定性 在工作条件下，传感器的物理、化学性质应稳定。
- （2）单值性 传感器的输出信号与被测参数在数值上应呈单值关系，最好是线性关系。
- （3）灵敏性 输出信号大，灵敏度高。

（4）响应的选择性 希望传感器的输出信号只响应被测参数的变化，其他因素不影响输出信号。因为其他因素对输出信号的影响会直接造成测量误差，因此这一要求很重要。实际上这又很难满足。实践证明，任何传感器的输出信号除随被测参数变化外，或多或少地总会受到其他因素的影响，其输出信号的数值随之作或大或小的变化。为解决这一矛盾，一方面应尽力寻找响应选择性良好的传感器，以尽量减小干扰因素的影响；另一方面对于干扰

因素的影响采取针对性的补偿措施,以减少甚至消除此类影响带来的误差。

(5) 超然性 多数传感器在测量时需与被测对象(被测介质)相接触,这将使测点及其附近的参数值产生变化,最终测到的将不是被测参数原有的真实值。因此,选择的传感器对被测对象状态的影响应该尽量小,或者说要求传感器的超然性要好。

(6) 经济性 价格便宜。

(二) 变换器

变换器(变送器、转换器)的功能是根据要求对来自传感器的输出信号进行处理,其方式有:放大,变换信号的性质(最常见的是把非电量信号转换成电量信号),信号的统一,信号的线性化、开方等。例如在图 1-1 中加一个电位器,就可把波纹管自由端的位移信号 x 转变成电位器的电阻信号 R_p 。在这里,电位器起到了把非电量转换成电量的作用。

对变换器的主要要求是应保证转换精确度,即在信号处理中应尽量减小信号的失真、畸变。

(三) 显示部分

显示部分(显示仪表、显示装置)是整个仪表(测量系统)的输出部分,它与观察者联系,其功能是最最终把被测参数的数值向观察者直接反映出来。例如在图 1-1 中再配上一块电阻测量仪表,并且把电阻测量仪表标尺直接按压力刻度,测量时即可由该表显示出被测压力的数值。这里的电阻测量仪表就是压力测量的显示装置。

显示装置按其显示方式的不同可分为模拟式、数字式和屏幕显示三种。

模拟式显示方式是当前应用最广的一种。它通过指针在标尺(刻度盘)上的相应位置或记录笔在记录纸上画出的曲线反映出被测参数的瞬时值或变化趋势。此类显示装置结构简单,价格便宜,显示形象,能直观地反映出参数的变化方向与变化快慢。但它们的精确度一般较低,动态性能较差,在读数时存在主观“读表”误差。模拟式显示装置有多种显示功能,主要有指示、记录、信号(报警)及积算等。

数字式显示装置采用数码管等显示器件直接以数字形式显示被测参数的数值。这种显示装置的电气线路较复杂,价格比模拟式仪表高,但动态性能较好,精确度较高,而且没有“读表”误差。另外,便于和计算机数据采集监测系统信息进行信息联络。这种显示方式目前正处于发展、成熟阶段,在工业中的应用已较为广泛。另外,近几年国内各仪表生产厂家均已开始定型生产一种模拟数字混合式显示仪表,这种仪表集中了上述两种显示方式的优点。

屏幕显示技术是电视技术与计算机技术综合应用的产物,往往作为计算机数据采集(监测)系统的组成部分。它既可在屏幕上以模拟或数字形式显示被测参数值,也可根据需要以表格、生产流程图等形式显示一组参数数值,或以曲线反映参数的变化趋势。采用屏幕显示能方便操作人员掌握全面情况,而且可大大减少控制盘上仪表的数量,有利于降低操作人员监视盘面的劳动强度、提高监视盘面的水平,从而有利于提高生产的安全性、经济性,因此这是一种理想的显示方式。但由于这种装置技术复杂,对操作人员的技术水平要求高,而且价格昂贵,因此只是在大型设备上应用较为合理。

本书主要介绍模拟显示方式和模拟显示仪表。

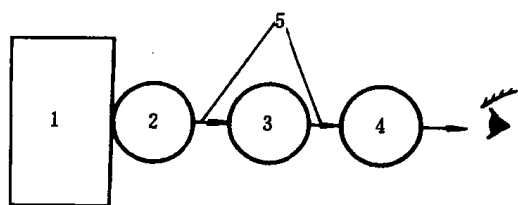


图 1-2 环节间的联系

1—被测对象；2—传感器；3—变换器；
4—显示装置；5—传输通道

(四) 传输通道

传输通道起到在仪表各环节间进行信号传递、输送的作用。由于它在任何仪表中均是必不可少的，所以本书把它也作为仪表的基本功能环节对待。传送电气信号的电缆、导线，传送压力信号的管道以及传送光信号的光纤均可作为传输通道。应该强调，传输通道虽然只简单地起信号的传输作用，但处理不当，也会影响整个仪表（系统）的性能，严重时甚至使仪表无法正常工作。

仪表无法正常工作。

仪表各基本功能环节的相互联系可用图 1-2 表示。

1.2.3 测量系统

在实际工作中，仅用一块仪表往往无法达到测量的目的（例如测量某个参数），需用若干独立的测量设备（包括仪表）以一定的方式组合起来才能满足测量要求。这种为实现一定测量目的的几个测量设备的组合就称为测量系统。例如用差压原理测量锅炉汽包水位的测量系统，它由平衡容器、差压变送器和电气显示仪表组合而成。不同的测量系统的复杂程度会有很大的差异，简单的系统只包含一块仪表，例如用水银温度计测温度，而复杂的系统要由若干个测量设备和测量仪表组成。

1.2.4 热工仪表及其分类

热力生产过程中诸如温度、压力等状态参数的测量方法称为热工测量。实现热工测量所用的测量工具称为热工仪表。热工测量及仪表不仅在火电厂热力生产过程中占有重要地位，在化工、石油、冶金等工业部门及科学研究中也都不可缺少。

按不同的依据，可把热工仪表作不同的分类。常见的分类方法如下：

(1) 按参数种类不同，热工仪表可分为温度、压力、流量、料位、成分分析及机械量等测量仪表。

(2) 按显示功能的不同，可分为指示仪表、记录仪表、积算仪表及信号式仪表等。

(3) 按仪表组成系统的方式不同，可分为直接变换式和平衡式两种仪表。

仪表的组成系统常用信号框图表示。直接变换式仪表的系统是开环系统，例如图 1-1 所示的压力测量仪表的系统框图可画成图 1-3 所示的形式。图中三个方框分别代表波纹管、电位器和电阻测量仪表， K_1 、 K_2 和 K_3 分别为三个环节的传递系数。为分析方便，设 $K_1 = x/p$ ， $K_2 = R_p/x$ ， $K_3 = \phi/R_p$ （ ϕ 为电阻测量仪表指针的位移值）。这样很容易得出整个仪表的输入-输出关系为

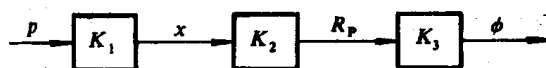


图 1-3 直接变换式仪表的系统方框图

这样很容易得出整个仪表的输入-输出关系为

$$\phi = K_1 K_2 K_3 p \quad (1-2)$$

直接变换式仪表的构造、线路简单，因此价格便宜。但其功能较少，测量精确度较低。由式 (1-2) 可知，要保证此类仪表的输入与输出信号间有稳定、准确的数量关系，使仪表

有良好性能,就要求组成仪表的所有部分都要有良好的性能。任何一个环节的性能得不到保证,就会使整个仪表的性能受到影响。这是直接变换式仪表的精确度等性能不易保证的原因所在。

平衡式仪表的系统方框图是闭环的,在系统中引入了负反馈,正向环节一般带有放大倍数很高的放大器。以后面将介绍的电子电位差计为例,其系统方框图可画成图 1-4 形式。图中 K_1 为正向

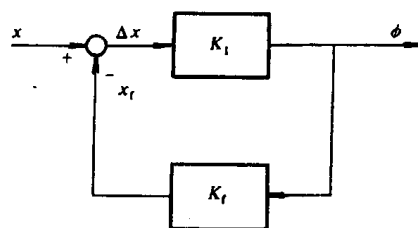


图 1-4 电子电位差计的系统方框图

环节的传递系数, K_f 为反馈环节的传递系数。这样的系统的输入-输出关系为

$$\phi = \frac{K_1}{1 + K_1 K_f} x \quad (1-3)$$

由于正向环节有一个放大器,且 $K_1 \gg 1$, 所以

$$\phi = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + K_f} x \approx \frac{1}{K_f} x \quad (1-4)$$

可见,只要保证 $K_1 \gg 1$, 仪表的性能就基本上与正向环节的性能无关,而只由反馈环节的性能决定。实际采用的反馈环节均较简单,而且其准确性、稳定性容易得到保证,这是平衡式仪表精确度高的原因。另外,这类仪表既有放大器又有附加能源,因此做功能力大,能完成多种功能。此类仪表的正向环节往往包含一个积分环节(例如伺服电动机),因此在静态时,必然存在 $\Delta x = 0$, $x = x_f$ 。即使正向环节不含积分环节,但考虑到 $K_1 \gg 1$, 仪表输出信号 ϕ 的变化值又是有限的,因此 $\Delta x = x - x_f \approx 0$, 即 $x \approx x_f$, 即 x 与 x_f 之间处于平衡状态,平衡式仪表的名称就源于此。平衡式仪表性能虽比直接变换式仪表好,但由于结构与线路复杂,价格就要高得多。

1.3 误差概述

随着对测量精确度的要求日益提高,对测量误差的理论研究已越来越引起人们的重视。有关误差理论的内容十分丰富,专著也很多,此处不作详细论述。本节只简单介绍误差的基本概念、基本理论方面的有关内容。

误差是测量的给出值与被测参数的真值之间的差值,以公式表示为

$$\delta = x - a \quad (1-5)$$

式中 δ ——误差;

x ——给出值即测量值;

a ——真值。

给出值可能是测得值(测量值、测量结果)、仪表的示值、被测参数的实验值或标称值。被测参数的真值是在测量条件下被测参数的实际值。由于误差的必然性,一般情况下真值是无法求得的。人们经常提到的真值往往是指以下两种情况之一:一是理论真值,例如三角形三个内角之和为 180° , 在理想的交流电路中纯电感、纯电容上的电压降与电流在相位

上相差 90° 等, 理论真值实际很少应用; 二是约定真值, 即人为把某一数值确认为真值, 例如人们定义的某个物理量的计量标准就是计量学的约定真值, 人们还常把高一级精确度的仪表的示值当成约定真值或称为相对真值。

误差 δ 可正可负, 而且与被测参数具有相同的量纲, 所以又把它叫做绝对误差。

1.3.1 误差的来源

不同的条件下, 产生误差的原因及影响误差的因素可能各不相同。但从总体看, 误差来源可概括成以下几个方面。

(1) 仪器装置误差 它分成三个方面: 一是标准器误差, 它的误差将通过检定传递给被检定的下一级仪器、仪表; 二是仪器仪表误差, 指仪器、仪表本身的不完善引起的误差; 三是仪表的附件带来的误差。

(2) 环境误差 指仪表的周围环境条件 (如温度、电磁场等) 变化使仪表示值改变引起的误差。

(3) 方法误差 指由于测量方法或计算方法不完善或者不合理产生的误差。例如在测量方法选择时忽略了某个影响较大的因素的干扰作用, 仪表各环节间匹配不当等引起的误差。

(4) 人员误差 人员分辨力限制、固有习惯或反应缓慢等原因引起的误差, 例如前面提到的采用模拟显示方式时的“读表”误差。

1.3.2 误差的分类

按照性质不同, 可把误差分成系统误差、随机误差和粗大误差三种。

(1) 系统误差 对某个恒定不变的参数作等精确度多次重复测量^①, 如误差的符号与大小均不变或随某个因素作有规律的变化, 此类误差就称为系统误差。例如对于均匀分度的仪表, 由于零位不准会在每次测量结果中引入一个符号与大小均恒定不变的误差; 又如用钢卷尺测量长度, 由于材料性质决定钢卷尺自身长度会随温度作规律变化, 所以测量结果的误差随工作温度作规律变化。这两种误差均为系统误差。

系统误差一般是由一个或少量几个对测量影响明显的因素所引起的。对系统误差处理的办法一般有两类: 一类是设法找出引起误差的因素, 然后采用恒定某些测量条件的方法, 从根本上消除这些因素所引起的误差; 另一类是找出这些因素的影响的规律, 然后采取针对性的措施在测量中进行一定方式的补偿^② 或对测量结果进行数值修正。

(2) 随机误差 (偶然误差) 对恒定的参数作多次等精确度测量, 各次测量的误差或大或小、或正或负, 以不可预知的形式变化, 这样的误差称为随机误差。

随机误差是由多个对测量影响微小的随机因素引起的误差。由于无法掌握此类误差的规律, 因此无法用处理系统误差的类似方法进行处理。误差理论将主要讨论随机误差的性质、统计规律以及误差估计等内容。

(3) 粗大误差 明显歪曲测量结果, 超出在规定条件下的预期值的误差, 称为粗大误

① 对参数作一组多次测量, 各次测量条件 (包括测量方法、仪表、环境条件及人员) 均保持相同, 则称这组测量为等精确度测量。

② 补偿是指采用特殊结构、附加装置、线路或特殊材料等以消除某个条件变化所造成的误差的措施。