



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

热工测量 及仪表

张东风 主编



中国电力出版社

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



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书
电力职业技术教育教学改革系列教材

热工测量 及仪表

电力职业技术教育教学改革系列教材
建设委员会

主任 张效胜
副主任 李启涛 张 伟
委员 杨立久 苏庆民 王庆民 王焕金
杨新德 朱正堂 侯仰东 郭光宏
高洪雨 孙奎明 蔡卫敏 马明礼

本书主编 张东风
编 写 沈思雯 张晓娟
主 审 孙奎明



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书共分4篇,按照测量的基础知识、热工测量、热工显示仪表及热工仪表的安装顺序划分为14章,详细地介绍了热工测量的基础知识,温度测量、压力测量、流量测量、液位测量、氧量测量、机械量测量、输煤量测量、开关量测量,热工显示仪表和热工仪表的安装及计算机数据采集系统等方面的知识。书中内容以目前最先进的成熟技术为主,以测量原理、基本结构、系统组成、误差分析、系统安装调试和故障排除为主线,重点讲解电厂中各种热工参数的测量原理和方法。本书在介绍传统测量仪表的基础上,加入了一些先进的智能型仪表,充分反映了热工测量中运用的新知识、新技术、新工艺、新方法。本书注重以能力为本,体现科学体系之长,灵活实用,符合教学规律。

本书是电厂热工仪表及自动装置专业、电厂集控运行专业及电厂热能动力工程专业的主干专业教材,也可作为相近专业热工测量及仪表的教材或教学参考书。由于全书内容紧密联系实际,因此本书既可作为热力发电厂有关生产人员职业技能培训教材,也可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

热工测量及仪表/张东风主编. 北京:中国电力出版社, 2007

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5083-5258-9

I. 热... II. 张... III. ①热工测量—职业教育—教材
②热工仪表—职业教育—教材 IV. TK31

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第029740号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

2007年4月第一版 2007年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16.25印张 393千字

印数 0001—3000册 定价 27.00元

敬告读者

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

版权专有 翻印必究

前言

随着我国火力发电机组日益向大容量、高参数的方向发展，热工测量的要求和热力系统自动控制的水平越来越高，特别是随着计算机技术的广泛应用，新的测量方法和新的检测仪表不断出现，热工测量领域的新技术有了很大的发展。本书除阐述热工测量及仪表的基本理论外，还介绍了热工测量的新技术。

本书删除了一些陈旧的或很少用的内容，增加了一些新颖的、使用较广的测量方法和新型的检测仪表，同时还增加了热工仪表的安装与检修、开关量测量仪表与计算机数据采集系统等内容。

书中章节标题及边题的左上角标注“*”号的内容，可根据学生的实际情况选讲。

本书由山东省电力学校张东风主编，并编写第一章至第九章，第十章和第十一章由山东省电力学校沈思雯编写，第十二章至第十四章由山东省电力学校张晓娟编写。全书由孙奎明主审。

在本书编写过程中，得到了山东省电建一公司、邹县电厂、运河电厂、济宁电厂、石横电厂、菏泽电厂等单位及山东省电力学校领导的大力支持，同时也得到了许多同事的无私帮助，在此深表感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏及不足之处，恳请广大读者赐教。

编者

2007年4月

目 录

前言	
绪 论	1
第一篇 测量的基础知识	
第一章 测量及测量误差	5
第一节 测量的定义及方法	5
第二节 测量误差	7
思考题与习题	18
第二章 热工仪表概述	19
第一节 热工仪表的组成及分类	19
第二节 热工仪表的质量指标	20
第三节 仪表的使用	23
思考题与习题	24
第二篇 热工测量	
第三章 温度测量	25
第一节 温度测量概述	25
第二节 膨胀式温度计	29
第三节 热电偶温度计	34
第四节 热电阻温度计	54
第五节 温度变送器	62
第六节 接触测温方法的讨论	66
思考题与习题	70
第四章 压力测量	71
第一节 压力测量概述	71
第二节 液柱式压力计	72
第三节 弹性压力表	75
第四节 压力(差压)变送器	80
第五节 数字压力表	95
第六节 压力仪表的安装	97
思考题与习题	99

第五章 流量测量	100
第一节 流量测量概述	100
第二节 椭圆齿轮流量计	102
第三节 差压式流量计	103
第四节 超声波流量计	111
* 第五节 其他流量计	114
思考题与习题	122
第六章 液位测量	123
第一节 锅炉汽包水位特点及就地式水位计	123
第二节 差压式水位计	129
第三节 电接点水位计	134
思考题与习题	139
第七章 氧量测量	141
第一节 氧化锆氧量计的工作原理	141
第二节 氧化锆氧量计测量系统	143
第三节 氧化锆氧量计的检修与调试	147
思考题与习题	152
第八章 机械量测量	153
第一节 机械位移量测量仪表	153
第二节 转速测量仪表	159
第三节 振动测量仪表	162
思考题与习题	164
第九章 输煤量测量	165
第一节 电子皮带秤	165
* 第二节 核子皮带秤	169
* 第三节 电子轨道衡	170
思考题与习题	171
* 第十章 开关量测量	172
第一节 开关量测量仪表概述	172
第二节 开关量变送器的常用术语	172
第三节 常用的开关量仪表	173
思考题与习题	176

第三篇 热工显示仪表

第十一章 热工显示仪表	177
第一节 动圈式显示仪表	178
第二节 自动平衡式显示仪表	181

第三节 数字显示仪表	182
第四节 计算机数据采集系统简介	184
思考题与习题	187

第四篇 热工仪表的安装

第十二章 热工检测系统图	188
第一节 基础知识	188
第二节 热工检测系统图	192
思考题与习题	194
第十三章 取源部件和敏感元件的安装	195
第一节 仪表测点的开孔和插座的安装	195
第二节 测温元件的安装	196
第三节 取源阀门的选择与安装	203
第四节 水位取源部件的安装	205
思考题与习题	208
第十四章 仪表和设备的安装	209
第一节 盘内配线	209
第二节 盘上仪表和设备的安装	211
第三节 就地指示仪表的安装	215
第四节 变送器和传感器的安装	217
思考题与习题	220
附 录	221
附表 1 铂铑 10—铂热电偶分度表	221
附表 2 镍铬—镍硅（镍铬—镍铝）热电偶分度表	225
附表 3 铜—康铜热电偶分度表	229
附表 4 镍铬—康铜热电偶分度表	231
附表 5 铂热电阻（Pt50）分度表	233
附表 6 铂热电阻（Pt100）分度表	235
附表 7 铜热电阻（Cu100）分度表	237
附表 8 铜热电阻（Cu50）分度表	238
附表 9 节流件和管道常用材质的线膨胀系数（ $\alpha_l \times 10^6 1/^\circ\text{C}$ ）	239
附表 10 智能变送器主要技术数据	240
附表 11 SI 基本单位	241
附表 12 SI 辅助单位	241
附表 13 有专有名称的 SI 导出单位	241
附表 14 SI 词头	242
附表 15 SI 单位制中的 7 个基本量的量纲	242

附表 16	国家选定的计量单位	242
附表 17	标准孔板和喷嘴的流量系数 ^①	243
附表 18	孔板、喷嘴和文丘里喷嘴所要求的最短直管段长度	244
附表 19	低温区温度量值传递系统 (13.8033K~273.15K)	244
附表 20	中温区温度量值传递系统 (0~630.527℃)	245
附表 21	高温区温度量值传递系统 (630.527~3727℃)	245
附表 22	误差函数表	246
附表 23	t 分布的置信因数 $t_{\nu, 1-\alpha}$ 的数值	246
附表 24	格拉布斯准则临界值 $T(n, \alpha)$ 表	247
附表 25	狄克逊检验法的临界值 $r(n, \alpha)$ 和 r 的计算公式	247
参考文献	249

绪 论

一、热工测量的意义

测量技术是研究测量原理、测量方法和测量工具的一门科学。测量是工业生产中不可缺少的一环，电力、冶金、化工等生产部门几乎都离不开测量工作。通过测量，可以了解生产过程是否符合工艺规程规定，是否达到了预定的质量、安全及技术经济指标，测量是监视生产过程的重要手段。

测量技术的内容很多，热工测量技术只是其中的一种。热工测量技术包括热工参数的测量方法和实现测量的仪表。热工测量原则上是指对压力、温度等热力状态参数的检测；但在伴有热力过程各类生产中，热工部门负责的测量工作还常包括流量、物位、成分、位移、振动和转速等参数的测量。用来测量热工参数的仪表称为热工仪表。

火力发电厂是实现能量转换的工厂，它通过锅炉、汽轮机、发电机及一系列辅助设备，把燃料的化学能顺序转变为热能、机械能，最后转变为电能，通过电网供给用户。发电厂的连续、安全、经济生产和产品质量，都是靠自动控制来保证的。热工测量是控制系统的重要组成部分，是控制系统的感觉环节，它的输出信号是自动调节、程序控制、热工信号和连锁保护的依据。热工测量也提供事故分析、经济核算和运行改进等技术管理工作所需要的原始资料。测量工作的水平直接关系到控制质量的提高、劳动条件的改善、设备寿命的延长和劳动生产率的提高。

生产中需要监视和控制的参数很多，当某些参数偏离正常值时，热工仪表还能发出声光报警信息，以提醒运行人员注意，这就是热工信号。如果热工参数继续偏离至极限值，为保护设备和人身安全，它还能发出保护信息，使有关设备退出运行，这就是热工保护。这一切都离不开热工测量所提供的信息，因此，热工测量在生产中无处不在。图 0-1 是一台 300MW 机组的除氧器及 5 号、6 号低压加热器系统的热工检测系统图。

二、测量技术的发展概况

早期的机械式仪表包括机械式检测元件和机械式指示记录部分，两者是结合在一起的。20 世纪 50 年代以后，由于电子技术的发展，检测传感部分大都采用机电结构，对机械式检测元件感受的信息进行二次变换，采用力或力矩平衡的反馈测量系统，配上相应的放大处理电路，并与显示调节部分相结合，发展成系列化的显示调节仪表。到 20 世纪 70 年代，随着微电子技术的发展，采用集成电路工艺研制出许多固体敏感元件，它与放大处理电路结合起来形成了新型的传感器。20 世纪 80 年代时，传感器开始向集成化、智能化方向发展。测量技术的发展过程如图 0-2 所示。

热工测量技术随着生产的发展而不断进步，一些测量仪表已不断发展并趋于成熟，如弹性压力表，热电偶、热电阻测温仪表已广泛应用于各生产领域，成为常见的压力、温度测量手段，并仍在不断发展。此外，显示方式已由模拟显示发展到数字显示、图形显示、集中巡测等。目前，以计算机为基础的数据采集系统在生产中得到了广泛应用，它不仅能进行一般的监测及报警，而且能提供参数变化率、机组运行效率等数据，能定期打印制表，并在事故

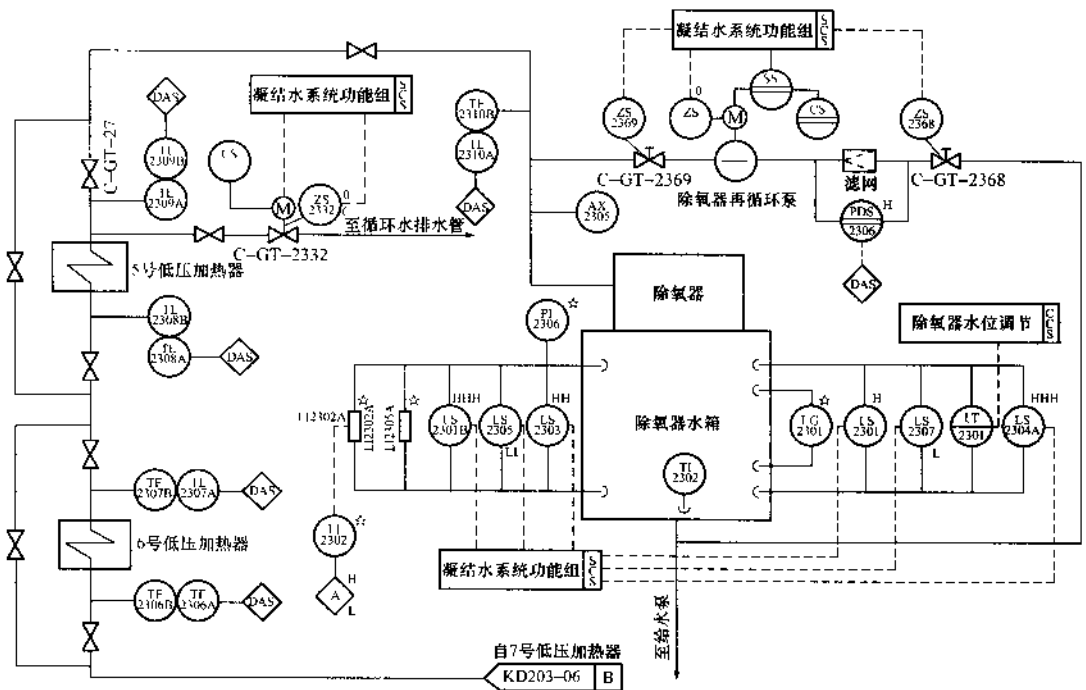


图 0-1 某 300MW 机组除氧器及 5 号、6 号低压加热器系统的热工检测系统图

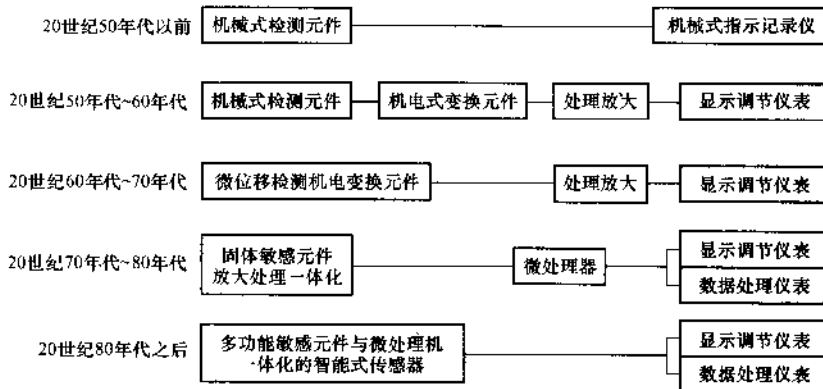


图 0-2 测量技术的发展

情况下追忆打印事故前后被控设备各部分的参数，以供运行分析及资料累积。

随着发电厂单元机组容量及参数的提高，对热工测量的要求也日益提高，特别是感受件（传感器）方面有进一步改进、完善的必要。就目前情况来看，热工测量技术仍赶不上自动化技术发展的要求。在一定程度上，它已成为自动化技术进一步发展的阻力，即所谓的耳目不灵，因此摆在自动化技术人员面前的任务，是如何改进现有热工测量的方法和仪表，创造出更新的测量手段，进一步提高热工测量的准确性、快速性以及长期使用的稳定性，以适应自动化技术的需要。

三、测量技术的发展趋势

测量技术的发展趋势表现在采用有关学科的新技术、新材料以及组合化和智能化 4 个方面。

(1) 在研究各种物理化学效应的应用技术以及信号处理技术的基础上研制新型传感器, 其中激光、超声波、微波和仿生技术的应用尤其受到人们的重视。

(2) 在采用新材料、新工艺的基础上开发新型传感器。改变材料的组成、结构、添加物或采用各种工艺技术, 利用材料形态变化如薄膜化、微小化、纤维化、气孔化、复合化、无孔化等, 提高材料对电、磁、光、热、声、力、吸附、分离、输送载流子、化学、生物等的敏感功能。

(3) 研究传感器组合技术, 提高传感器测量精度。对于有限的敏感元件, 根据不同使用条件来运用各种测量技术和控制技术, 如温度补偿技术、抗电磁干扰技术、高频响应技术、信号处理技术等, 实现不同的组合, 以构成各类传感器。

(4) 敏感元件的小型化、集成化、固体化、多功能化。研制新型场效应敏感元件、厚薄膜和超细微粒子敏感元件、色敏元件、光纤元件等, 发展数字式传感器和智能型传感器, 通过集成工艺实现检测、转换和信息处理一体化, 最终实现传感器的单片智能化。

四、传感器简介

传感器品种繁多、原理各异, 它们是根据不同需要和不同测量对象研制出来的。传感器的分类方法很多。根据现象所属领域不同, 可分为物理传感器、化学传感器和生物传感器; 根据所用敏感元件的材料来分, 有半导体传感器、陶瓷传感器、有机高分子传感器、光纤传感器等; 根据功能来分, 有单功能传感器、多功能传感器、智能传感器、仿生传感器等。比较常用的是按照被检测的参数进行分类。

传感器按照构成原理不同可分为结构型传感器、物性型传感器和智能型传感器三种。

1. 结构型传感器

结构型传感器是利用物理学中场的定律(包括电场、磁场、力场等)构成的传感器, 它的基本原理是以部分结构的位置变化和场的变化来反映被测非电量的大小及其变化。结构型传感器大都采用机电结构和间接信号变换方式。所谓间接变换就是信号经过两次变换, 先将被测信号经过机械式检出元件转换成中间信号, 然后再经过敏感元件转换成电信号输出。例如应变电阻式压力传感器就是通过弹性膜片把被测压力检测出来并转换为应变值, 再用应变电阻元件把应变值转换为便于处理的电信号输出, 如图 0-3 所示。

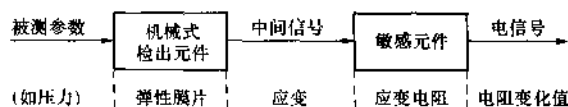


图 0-3 结构型传感器的原理框图

结构型传感器应用最广, 主要采用电磁检测、光电检测、超声波检测、核辐射检测以及电化学、核磁共振等原理制成。结构型传感器中直接感受被测非电量的敏感元件是机械式元件和电磁式元件, 其中弹性敏感元件应用最广。弹性敏感元件把各种形式的非电量转换为应变或位移量。如果弹性敏感元件的输出是应变, 则可以制成各种形式的应变传感器; 如果弹性敏感元件的输出量是位移(线位移或角位移), 则可以制成电感式、电容式、电涡流式或电阻式传感器。

2. 物性型传感器

物性型传感器是利用物质特性（包括各种物理、化学、生物的效应和现象）构成的传感器，它的基本特征与构成传感器敏感材料的特性密切相关。物性型传感器采用直接信号变换方式，就是用一种敏感元件将被测信号直接转变为电信号输出，这是发展最快和最引人注目的新型传感器。利用物质的化学特性构成的传感器称为化学传感器，利用生物学特性构成的传感器称为生物传感器。这两种传感器都属于物性型传感器，它们研制困难但性能优越，发展潜力很大。

固体敏感元件是物性型传感器的关键组成部分。对各种具有敏感功能的材料的研究，即如何利用它们的物理、化学、生物学的特性和效应来构成固体敏感元件，已经形成一门新技术。根据不同应用目的，固体敏感元件通常按照检测参数和元件功能不同进行分类。

3. 智能型传感器

智能型传感器是物性传感器进一步发展的产物。智能型是指除具有检测功能外，还具有自补偿、自校正、自调整、自诊断和逻辑操作、程序控制、自动实现计量和检测最优化等功能。这些功能往往是多功能敏感元件与微处理机或单片微型计算机相结合的结果。美国霍尼韦尔公司研制的 DSTJ-3000 型差压变送器是典型的智能型传感器。它采用集成工艺技术，

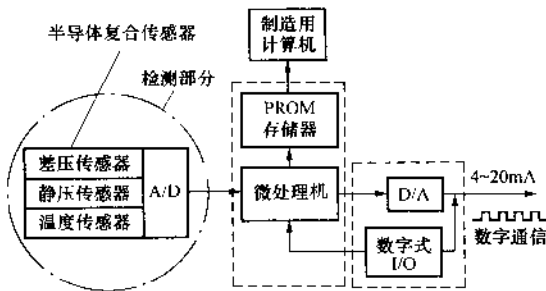


图 0-4 智能传感器原理图

在一块硅片上将测量差压、压力、温度的多功能敏感元件与 CMOS 微处理机结合起来。图 0-4 为这种传感器的原理和数字处理系统框图。它的敏感元件是硅膜片，微处理机能在不同的温度、压力条件下作差压的补偿运算。在产品出厂时，对每台传感器进行编码，并将编码存放在存储器中，以便微处理机进行运算。其精度可达 0.1 级，量程比达 400 :

1，输出经数模转换器（D/A）可变为 4~20mA 的直流模拟信号，它还能把数字信号叠加到模拟传输信号中。由于专用程序能与传感器、电源和负载阻抗任意连接，它还能双向通信，并能在信号传输线的任意位置上远距离的校准零位、调整阻尼、变更测量范围、选择输出（线性的或平方根的）和读出传感器本身的自诊断结果。

本书重点讲述电厂中各种热工参数的测量原理与方法，各种常用的传感器、变送器及显示仪表的原理、结构与性能，仪表的选择、使用、检修、校验及安装，并介绍新型测量仪表、智能仪表和数据采集系统。

第一篇 测量的基础知识

第一章 测量及测量误差

准确地测量热工参数，就要选用合适的测量仪表，采取科学的测量方法及测量技术，同时还必须正确地分析与处理测量结果。

本章主要介绍测量的基本概念、测量误差的基本知识及数据处理的方法。

第一节 测量的定义及方法

一、测量概述

1. 测量的定义

测量就是以确定量值为目的的一组操作，或者说，测量就是利用测量工具，通过实验方法将被测量与同性质的标准量（测量单位）进行比较，以确定被测量是标准量多少倍数的过程。其所得倍数就是测量值，即

$$x = \frac{a}{b} \quad (1-1)$$

式中： a ——被测量；

b ——标准量；

x ——测量值。

可见，被测量由测量值和测量单位两部分组成。

测量单位是为定量表示同种量的大小而约定的定义和采用的特定量，表示测量单位的约定符号叫单位符号。我国采用法定计量单位。

2. 国际单位制（SI）

1960年，第11届国际计量大会通过了“国际单位制”，代号为SI（它是法文Le Systeme International d'Unités的缩写）。它规定了7个基本单位，同时给出了词头、导出单位和辅助单位的规则以及其他一些规定，由此建立了比较完整的国际计量单位制。

国际单位制是在米制基础上发展起来的，它的7个基本单位有严格的定义，其导出单位通过选定的方程式用基本单位来定义，从而使量的单位之间有直接内在的物理联系，使科学技术、工业生产、国内外贸易以及日常生活各方面使用的计量单位都能统一。国际单位制的构成如下

$$\text{国际单位制 (SI)} \left\{ \begin{array}{l} \text{SI 单位} \left\{ \begin{array}{l} \text{SI 基本单位 (共 7 个, 它是国际单位制的基础, 见附表 11)} \\ \text{SI 辅助单位 (共 2 个, 见附表 12)} \end{array} \right. \\ \text{SI 导出单位} \left\{ \begin{array}{l} \text{具有专门名称的 SI 导出单位 (共 19 个, 见附表 13)} \\ \text{组合形式的 SI 导出单位 (如速度的 SI 单位为 m/s)} \end{array} \right. \\ \text{SI 单位的分数与倍数单位} \left\{ \begin{array}{l} \text{SI 单位的十进倍数单位 (见附表 14)} \\ \text{SI 单位的分数单位 (见附表 14)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

由这7个基本单位可以导出其他的物理量单位，称为导出单位。有些导出单位具有专有名称，如力的单位牛顿（N）；还有一些是组合形式的导出单位，即用基本单位和辅助单位

以代数式的乘、除数学运算所表示的单位，如速度的 SI 单位为米每秒 (m/s)。

SI 单位是国际单位制中构成一贯制的那些单位，SI 单位只包括基本单位、辅助单位和导出单位。

SI 单位的倍数单位 (十进倍数单位和分数单位) 是由 SI 单位加 SI 词头构成的。

SI 词头见附表 14，它不能单独使用。词头符号与所紧接的单位符号应作为一个整体对待，它们共同组成一个新单位，并具有相同的幂次，如 $1\text{cm}^3 = (10^{-2}\text{m})^3 = 10^{-6}\text{m}^3$ 。倍数单位可与其他单位构成组合单位。

* 3. 量纲

在量制中，以基本量的幂的乘积表示该量制中一个量的表达式，这个表达式就是该量的量纲。基本量的量纲是其本身。

国际单位制中的 7 个基本量的量纲见附表 15。

量纲因素一律用正体大写字母表示。如力 F 的定义为 $F = ma$ ，力的量纲为 LMT^{-2} ；体积流量的定义为 $q_v = V/t$ ，体积流量的量纲为 L^3T^{-1} 。

* 4. 法定计量单位

1984 年 2 月 27 日，国务院颁布了关于在我国统一实行法定计量单位的命令 (国发 [1984] 28 号)，其中规定我国的计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。

我国法定计量单位包括：①国际单位制的基本单位；②国际单位制的辅助单位；③国际单位制中具有专有名称的导出单位；④国家选定的非国际单位制单位 (见附表 16)；⑤由以上单位构成的组合形式的单位；⑥由词头和以上单位构成的十进倍数和分数单位。

二、测量方法

测量是一种技术工作，为获取准确、可靠的测量数据，必须根据测量对象的具体特点选择合理的测量方法。

1. 根据获得测量结果的方式 (程序) 不同进行分类

(1) 直接测量。被测量直接与标准量进行比较从而得到被测量值的方法。例如用直尺测量物体长度。

(2) 间接测量。通过直接测量与被测量有确定函数关系的有关物理量，然后由已知的函数关系式计算出被测量值的方法。例如要确定长方形面积，则需分别直接测量其长度、宽度，再按面积公式计算即可得到。

(3) 组合测量。是在测出几组具有一定函数关系的量值基础上，通过解联立方程组求取被测量的方法。例如，在一定温度范围内铂电阻与温度关系为

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

为了求出 A 、 B ，可分别直接测出 0 、 $t_1^\circ\text{C}$ 、 $t_2^\circ\text{C}$ 这三个不同温度值及相应温度下的电阻值 R_0 、 R_{t_1} 、 R_{t_2} ，然后解联立方程组

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_0(1 + At_1 + Bt_1^2) \\ R_{t_2} = R_0(1 + At_2 + Bt_2^2) \end{cases}$$

求得 A 、 B 的数值，此种方法称为组合测量。

2. 根据检测仪表工作原理不同进行分类

(1) 直读法。也叫偏位测量法，仪表受到被测量的作用，输出信号发生变化，当达到平衡时，输出信号变化量的大小可“模拟”被测量的量值。于是可直接从测量仪表的刻度尺上

读出测量结果（被测量值）。例如用玻璃液体温度计测量温度，用 U 形管压力计测量压力等都属于直读法。

(2) 零值法（又称平衡法）。就是将被测量与一个已知标准量进行比较，当两者平衡时，检测平衡的仪表指零，这时被测量等于已知的标准量。例如用天平称量物体的质量，用电位差计测量温度等都属于零值法。

(3) 微差法。当被测量 x 尚未完全与已知标准量 b 相平衡时，读取它们之间的差值 Δ ，由已知标准量 b 和差值 Δ 就可求出被测量值 ($x = b - \Delta$)。这种方法叫微差法，是一种不彻底的零值法，例如用不平衡电桥测量电阻就属于微差法。

在以上三种方法中，零值法和微差法对减少测量误差有利，故其测量精度较高，应用较广。

第二节 测量误差

在测量过程中，总是存在着各种各样的影响因素，使得测量结果与被测参数的真实值不相符，即存在测量误差。

一、误差的表示方法

1. 绝对误差

绝对误差是测量值与被测参数的真实值之差。

$$\delta = x - x_0 \quad (1-2)$$

2. 相对误差

相对误差是测量的绝对误差与约定值之比的百分数。根据约定值的不同，相对误差可分为 3 种。

(1) 实际相对误差。测量的绝对误差与被测参数的真实值之比的百分数。

$$\gamma = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

(2) 标称相对误差。测量的绝对误差与仪表示值之比的百分数。

$$\gamma' = \frac{\delta}{x} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x} \times 100\% \quad (1-4)$$

相对误差还有一种表示形式为 ppm（百万分之一），如标准电阻的准确度等级为 100ppm。用相对误差能确切地反映测量结果的好坏。

(3) 引用相对误差（或称为折合误差）。测量的绝对误差与仪表量程之比的百分数。

$$\gamma_c = \frac{\delta}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-5)$$

上述 4 式中

δ ——绝对误差，可正可负（分别表示示值偏大或偏小）；

x ——测量值；

x_0 ——被测量的真实值，常用约定真值代替（标准表的测量值或理论值等）；

$x_{\max} - x_{\min}$ ——测量仪表的量程， x_{\max} 、 x_{\min} 代表测量仪表的上、下限值；

γ 、 γ' ——示值的实际相对误差和标称相对误差，用于比较测量的准确度或质量的高低；

γ_0 折合误差，一般用于比较测量仪表的优劣。

【例 1-1】 有一只体温表和一只炉温表，它们的测温范围分别为 $32 \sim 42^\circ\text{C}$ 和 $0 \sim 1000^\circ\text{C}$ ，如果绝对误差均为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，则折合误差分别是多少？

解：体温表的折合误差为 $\gamma_c = \frac{\delta}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% = \frac{\pm 1}{42 - 32} \times 100\% = \pm 10\%$

炉温表的折合误差为 $\gamma_c = \frac{\delta}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% = \frac{\pm 1}{1000} \times 100\% = \pm 0.1\%$

可见两只温度表的绝对误差虽然相同，但准确程度大不相同，前者应当报废，后者却很难达到如此高的准确程度。因此，测量上常用折合误差来反映仪表的准确程度。

二、误差的分类

从不同的角度可对测量误差作出区分。按测量误差的来源不同，可将其分为装置误差、环境误差、方法误差、人员误差等；按对测量误差的掌握程度不同，可将其分为已知误差和未知误差；按照误差的特征规律（性质）不同，可将其分为系统误差、随机误差和粗大误差等。下面分别介绍系统误差、随机误差和粗大误差。

（一）系统误差

在相同条件下多次重复测量同一被测量时，如果每次测量值的误差恒定不变（绝对值和符号均保持不变）或按某种确定的规律变化，这种误差称为系统误差。

系统误差产生的原因主要有：

- （1）测量仪器或测量系统本身不够完善，如仪表本身刻度不准、测量原理不完善等。
- （2）仪表使用不当，如测量人员操作不当、读数不准等。
- （3）测量时外界环境条件变化，如环境温度、湿度、电磁场影响等。

由于系统误差通常具有一定的规律性，测量时应尽可能地设法消除此类误差或对测量结果加以修正，以提高测量的准确程度。

系统误差的数学描述：在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值（数学期望值）与被测量的真值之差，即

$$\delta_s = x_a - x_0 \quad (1-6)$$

式中 δ_s —— 系统误差；

x_a —— 数学期望值；

x_0 —— 被测量的真值。

假定测量系统或测量条件不变，即使增加重复测量的次数也并不能减少系统误差。在测量过程中，若系统误差很小，则其测量结果就是相当准确的（在此不考虑其他误差的影响），就是说，系统误差的大小反映了测量结果的准确度（即测量结果与被测量真实值的接近程度）。因此，尽可能地发现和消除系统误差，对测量工作具有重要意义。

（二）随机误差

随机误差是指在相同条件下多次测量同一被测量时产生的绝对值和符号不可预知的随机变化着的误差，又称偶然误差。

随机误差的数学描述是：测量结果与数学期望值（ x_a ）之差，即

$$\delta_i = x_i - x_a \quad (1-7)$$

式中 δ_i —— 第 i 次测量产生的随机误差；

x_i ——第 i 次测量值;

x_a ——数学期望值。

* 1. 随机误差的分布

大多数随机误差服从正态分布规律, 在此只讨论服从正态分布规律的随机误差, 误差正态分布曲线如图 1-1、图 1-2 所示。

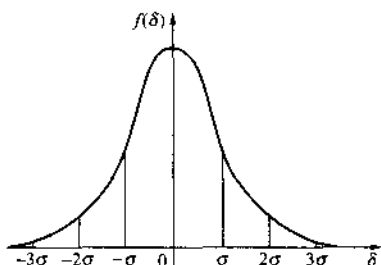


图 1-1 正态分布曲线

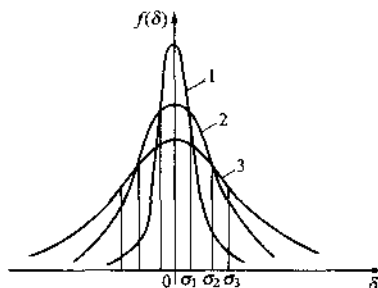


图 1-2 不同 σ 值下的 3 组正态分布曲线

在误差理论中, 称 σ 为标准偏差或均方根误差, 在正态分布曲线上 σ 为曲线拐点的横坐标。标准偏差的定义式

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_a)^2} \quad (1-8)$$

式中 n —— 测量次数。

由统计规律可知, 随机误差落在 $\pm \sigma$ 范围内的概率为 68.3%, 落在 $\pm 2\sigma$ 范围内的概率为 95.4%, 落在 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率为 99.7%。

因此一般可认为, 在进行测量时, 其随机误差的最大值不会超过 $\pm 3\sigma$, 于是把 $\pm 3\sigma$ 定义为极限误差或最大误差。

随机误差具有如下特点:

(1) 单峰性。绝对值小的随机误差出现的概率大于绝对值大的随机误差出现的概率。

(2) 有界性。绝对值很大的随机误差出现的概率趋近于零, 即在实际测量过程中随机误差的绝对值一般不会超出一定的界限。

(3) 对称性。绝对值相等、符号相反的随机误差出现的概率相等, 所以随机误差具有相互抵消的统计规律, 即当测量次数足够多时, 随机误差的代数和趋于零。

(4) 抵偿性。当测量次数 n 逐渐增加而趋于无穷时, 全部随机误差 δ_i 的平均值趋于零, 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_a) = 0 \quad (1-9)$$

此时测量的平均值等于被测量的真值。可见测量结果可利用多次测量求算术平均值的办法获得。

随机误差是测量过程中众多微小因素综合作用的结果, 通常这些因素是人们所不知或因其变化过分微小而无法加以严格控制的。

根据随机误差的正态分布性质, 通过一定的概率运算可估算随机误差 δ 的数值范围, 或者求取误差出现于某个区间 $[a, b]$ 内的概率。由于随机误差具有对称性, 常用对称区间