

热工测量及仪表

江西省电力学校 袁去惑
沈阳电力专科学校 孙吉星 合编

水利电力出版社

前 言

本书是根据1982年8月“水利电力部中等专业学校‘电厂热工测量及自动化’专业教学计划及课程大纲讨论会”制定的第二轮“热工测量及仪表”课程大纲编写的。讨论认为，原第一轮教材中“测量原理”及“显示仪表”分为两篇的体系，不利于教学的连贯性，故第二轮教材的大纲按照测量参数划分章节，测量原理与显示仪表紧密衔接。对一些可用于多种参数测量的显示仪表给予了适当说明。

本书阐述了各种热工参数的测量原理，常用测量仪表的工作原理、基本结构、部分设计计算以及安装、使用、调校的基本方法；对于近年来生产中采用的新的测量方法及仪表，尽量予以介绍；对于热工测量中逐渐广泛采用的数字显示仪表，本书以单独章节讲述。

本书由江西省电力学校袁去惑、沈阳电力专科学校孙吉星合编，由袁去惑统稿。由重庆电力学校鲁松国主审。在编写过程中，得到重庆电力学校鲁松国、江西省电力学校吴毅强、陈汉秋、谷冰冰的大力支持与帮助；江苏省江都电子仪器厂、北京自动化仪表四厂、南京分析仪器厂、上海宜川仪表厂、上海自动化仪表三厂等提供了大量资料；此外，谷冰冰为本书绘制了许多插图，在此一并致谢。

因编者水平所限、编写仓促，书中定有不妥及错误之处，望读者予以指正。

编者

1986年8月

目 录

前言	
绪论	1
第一章 热工测量基本知识	2
第一节 测量的定义及方法	2
一、测量概述；二、测量方法	
第二节 热工测量仪表的组成及分类	4
一、组成；二、分类	
第三节 测量误差	5
一、测量误差的分类；二、消除和减小测量误差的方法	
第四节 仪表的质量指标	11
一、基本误差；二、质量指标；三、仪表的校验	
第二章 温度测量仪表	15
第一节 温度测量的基本概念	15
一、温标的种类及国际实用温标；二、测温仪表分类	
第二节 热电偶测温原理	18
一、热电效应；二、热电偶基本定律及其应用；三、常用热电偶；四、热电偶的结构；五、热电偶冷端温度补偿；六、热电偶的校验	
第三节 热电阻测温原理	38
一、热电阻测温原理；二、常用的金属热电阻；三、半导体热电阻；四、热电阻的结构；五、热电阻的校验	
第四节 动圈式显示仪表	44
一、工作原理；二、基本结构；三、动圈显示仪表与热电偶的连接电路；四、动圈显示仪表配用热电阻的测量电路；五、校验与调整；六、动圈显示仪表改刻度	
第五节 电子自动平衡式显示仪表	57
一、概述；二、电子自动电位差计；三、电子自动平衡电桥	
第六节 ER180系列自动平衡仪表	90
一、概述；二、仪表性能及规格；三、工作原理；四、校验与调整	
第七节 力矩电机式显示仪表	96
一、概述；二、基本结构及工作原理	
第八节 接触式测温的误差及消除方法	103
一、管内流体的温度测量；二、壁面温度测量	
第九节 其它温度测量仪表	107
一、其它接触式测温仪表；二、非接触式测温仪表	

第三章 压力测量仪表	115
第一节 压力测量概述	115
第二节 液柱式压力计	116
一、U形管液柱压力计；二、单管压力计；三、多管压力计；四、斜管微压计；五、液柱式压力计的误差及修正	
第三节 弹性压力计	121
一、弹性元件工作原理；二、弹性元件特性；三、弹簧管压力表；四、膜盒微压计；五、膜片式差压计；六、双波纹管差压计	
第四节 压力变送器	128
一、电位器式压力变送器；二、电感式压力变送器；三、电容式压力变送器；四、应变式压力变送器；五、压阻式压力变送器；六、振频式压力变送器；七、霍尔压力变送器	
第五节 压力测量仪表的安装与校验	143
一、压力测量仪表的安装；二、压力表校验	
第四章 流量测量仪表	149
第一节 节流变压降式流量计	149
一、节流装置的基本流量公式；二、标准节流装置及其使用条件；三、标准孔板结构及适用范围；四、标准喷嘴结构及适用范围；五、标准节流装置的管道条件及安装要求；六、标准节流装置的制造材料；七、标准节流装置的压力损失；八、标准节流装置的计算；九、标准节流装置的流量测量误差；十、节流变压降式流量计的显示仪表；十一、电子开方器；十二、比例积算器；十三、节流变压降式流量计的压力温度补偿；十四、节流变压降式流量计的安装	
第二节 其他流量测量仪表	212
一、动压测量管（皮托管）；二、靶式流量计；三、转子流量计；四、腰轮流量计及椭圆齿轮流量计；五、涡轮流量计	
第三节 流量计的校验与标定	219
第五章 物位测量仪表	221
第一节 锅炉汽包水位特点及就地式水位计	222
一、汽包水位的特点；二、就地式水位计的基本结构；三、就地式水位计的测量误差	
第二节 差压式水位计	225
一、工作原理；二、汽包工作压力对差压式水位计测量误差的影响规律；三、水位-差压转换容器的改进；四、差压式水位计的汽包压力自动补偿问题；五、差压式水位计的显示仪表	
第三节 电接点水位计	232
一、工作原理；二、电接点及水位容器；三、显示电路	
第四节 音叉料位发讯器	238
一、工作原理；二、安装要求	
第六章 成分分析仪表	240
第一节 概述	240
第二节 热磁式氧量计	241
一、气体的磁化特性；二、环管式热磁氧量计的结构和工作原理；三、直管式热磁氧量计的结	

构和工作原理；四、氧量计的烟气取样系统	
第三节 氧化锆氧量计	248
一、工作原理；二、测量系统；三、氧化锆管输出信号的线性化；四、DH-6型氧气锆氧分 析器	
第四节 热导式气体分析仪	264
一、气体的导热性；二、工作原理；三、测量电路	
第五节 气相色谱分析仪	267
一、工作原理；二、测量系统	
第六节 电导式分析仪	270
一、工作原理；二、测量电路；三、调整与校验	
第七章 输煤量测量仪表	278
第一节 概述	278
第二节 电子皮带秤的传感装置	279
一、荷重传感器；二、测速传感器	
第三节 电子皮带秤的显示与累计电路	282
一、测速单元；二、放大单元；三、积分单元；四、校正频率发生器	
第四节 电子皮带秤的校验	300
一、静态校验；二、动态校验；三、带负荷校验	
第八章 机械量测量仪表	302
第一节 机械位移量测量原理	302
一、机械式位移测量原理；二、液压式位移测量原理；三、电感式位移测量原理	
第二节 转速测量仪表	306
一、测速发电机转速传感器；二、磁性转速传感器；三、光电转速传感器	
第三节 汽轮机主轴偏心度测量仪表	309
一、工作原理；二、安装和使用	
第四节 振动测量仪表	312
一、拾振器；二、积分放大器	
第九章 数字显示仪表	315
第一节 概述	315
一、基本原理及组成；二、模数转换器；三、线性化器	
第二节 JS系列数字显示表	326
一、工作原理；二、整定及使用	
第三节 SZC-01型数字式转速表	342
一、主要技术特性；二、组成及工作原理；三、整机工作综述	
第四节 SXB-40型数字温度巡测仪	354
一、用途、特点及主要技术性能；二、电路工作原理；三、巡测仪的调试	
附录	384
附表 1 铂铑10-铂热电偶分度表	384

附表 2	镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表	388
附表 3	铜-康铜热电偶分度表	392
附表 4	镍铬-康铜热电偶分度表	394
附表 5	铂热电阻(Pt50)分度表	396
附表 6	铂热电阻(Pt100)分度表	398
附表 7	铂热电阻(B _{A1})分度表	400
附表 8	铜热电阻(Cu100)分度表	402
附表 9	铜热电阻(Cu50)分度表	403
附表 10	铜热电阻(G)分度表	403
附表 11	ER180系列自动平衡仪表的规格系列	404
附表 12	各种常用材质的管道内壁绝对平均粗糙度 K _s 值	405
附表 13	节流件和管道常用材质的线膨胀系数($\alpha_l \times 10^6 \frac{1}{^\circ\text{C}}$)	406
附表 14	水和水蒸气的密度	407
附表 15	水和水蒸气的动力粘度($\eta \times 10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$)	413

绪 论

“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，从而根据测量结果，通过控制系统，对生产过程予以正确的调整。因此，测量是监视生产过程的“耳目”，也是实现生产过程自动化的基础。

根据测量的对象、测量的方法不同，“测量技术”的内容是很多的，热工测量只是其中的一种。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，反映这些内容的教材称为《热工测量及仪表》。

火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。由于燃料消耗量极大，电能又要受到用户需求量的制约，因此，高的能量转换效率以及快速稳定的控制，对设备的安全经济运行至关重要。这一切只能依靠自动控制装置予以保证，而自动控制装置的控制指令的发出总是离不开热工测量仪表所提供的被控对象的各种信息。只有通过测量，才能获得被控设备的各种参数值，也只有通过测量，才能知道控制装置的控制效果。因此，热工测量的准确性及快速性就显得更为重要。

热工测量技术随着生产的发展而不断进步，一些测量仪表，已不断发展而趋于成熟，如弹性压力计，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，集中巡测装置也得到越来越广泛的使用。目前，以数字计算机为基础的数字巡回检测系统，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，定期打印制表，以及在事故情况下，追忆打印事故前后被控设备各部分参数，供运行分析及资料累积之用。

随着火电厂单元机组容量及参数的提高，对热工测量技术的要求也愈益提高。特别对感受元件方面有进一步改进、完善的必要。就目前情况说来，热工测量技术仍赶不上自动化技术发展的要求。在一定程度上说已成为自动化技术进一步发展的阻力，即所谓“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要求。

本课程重点是讲述火电厂各种热工参数的测量原理与方法；各种常用的感受件、传感器、变送器及显示仪表的基本工作原理、结构、性能及有关设计计算；仪表的选择、使用、安装原则及校验方法；对近几年来采用的新型测量仪表以及逐渐广泛采用的数字式显示仪表也作了相应的介绍。课程的第一章对有关测量基本知识及测量误差分析方面的知识作了简单介绍，以便使学生运用到火电厂热工控制及自动化生产实践中去。

第一章 热工测量基本知识

第一节 测量的定义及方法

一、测量概述

人类在从事科学研究、工程技术及其他一切生产活动时，为了取得各种有价值的数
据，就必须进行测量。测量是获得各种事物之间定量关系的必要手段。长期以来，人类所
得到的大量科研成果，都包含着测量的功绩。今后，随着科学技术的进一步发展，也要求
有更精确的测量技术作为基础。因此，测量已成为一项专门技术得到迅速的发展。

不同的科技领域，有不同的测量项目及测量特点，热工测量是指热力过程中各种热工
参数及物理量的测量，如温度、压力、流量、物位等。热工测量是保障电厂安全经济运行
以及实现自动控制的基本条件之一。

1. 测量的定义

测量就是采用测量工具（或仪表），通过实验方法将被测量与同性质的标准量（即测
量单位）进行比较，以确定出被测量是标准量多少倍数的过程。其所得倍数就是被测量
值，即

$$L = \frac{x}{b}$$

式中 x —— 被测量；

b —— 标准量（测量单位）；

L —— 所得被测量值。

因此，被测量应由测量值及测量单位两部分组成，即 $x = Lb$ 。

测量单位人为规定，并得到国家或国际公认。以往，各国、各地区测量单位各自不
同，所以同类被测量比较时，必须进行单位换算，很不方便，而且有些测量单位制订的科
学严密性也较差。随着科学技术的发展及国际科技、经济交往的加强，人们迫切要求有统
一的测量单位，并为此做了大量的工作。

2. 国际单位制

一九六〇年，第十一届国际计量大会通过了“国际单位制”，代号为SI，它规定了七
个基本单位，即

长度单位——米（m）；

质量单位——千克（公斤）（kg）；

时间单位——秒（s）；

电流单位——安[培]（A）；

热力学温度单位——开[尔文]（K）；

物质的量单位——摩[尔](mol)；

发光强度单位——坎[德拉](cd)。

由这七个基本单位可以导出其他的物理量单位——导出单位，如力的单位牛[顿](N)，频率单位赫[兹](Hz)等。

国际单位制经过六十多个国家二十几年使用实践证明，它具有科学、合理、精确、实用、简明等优点，给生产建设和科技发展带来很大方便。我国于一九七八年成立了“中国国际单位制推行委员会”，一九八四年二月二十七日国务院发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。法定计量单位是以国际单位制为基础，结合我国实际情况增加了一些非国际单位制单位构成的。在热工测量中，应积极推广使用。

二、测量方法

测量是一项实验工作，为了获得准确可靠的数据，必须根据对象特点，选择合理的测量方法。

根据获得测量结果的程序不同，测量可分：

(1) 直接测量：这是被测量直接与标准量比较而得到测量值的测量方法。用尺测量长度，用玻璃管水位计测量水位等，都是直接测量的例子。

(2) 间接测量：这是已知被测量与某一个或若干个其他量具有一定的函数关系，通过直接测量这些量值，用函数关系式计算出被测量值的测量方法。例如，通过测量长度、宽度求面积，通过测量导线电阻、长度及直径求电阻率，则面积、电阻率等都是间接的测量结果。

(3) 组合测量：组合测量是在测量出几组具有一定函数关系的量值基础上，通过解联立方程求取被测量的方法。例如，在一定温度范围内铂电阻与温度关系为 $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ ，式中 R_0 为 0°C 时的电阻值； R_t 为 $t^\circ\text{C}$ 时的电阻值； A 、 B 为温度系数(常数)。为了求出温度系数 A 、 B ，可以分别直接测出 0°C 、 $t_1^\circ\text{C}$ 、 $t_2^\circ\text{C}$ 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} ，然后解联立方程式：

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

求得 A 、 B 数值。

根据检测装置动作原理不同，测量可分为：

(1) 直读法：被测量作用于仪表比较装置，使比较装置的某种参数按已知关系随被测量发生变化，由于这种变化关系已在仪表上直接刻度，故直接可由仪表刻度尺读出测量结果。例如，用玻璃管水银温度计测量温度时，可直接由水银柱高度读出温度数值。

(2) 零值法(平衡法)：将被测量与一个已知量进行比较，当二者达到平衡时，仪表平衡指示器指零，这时已知量就是被测量值。例如，用天平测量物体质量，用电位差计测量电势都是零值法测量方法。

(3) 微差法：当被测量尚未完全与已知量相平衡时，读取它们之间的差值，由已知量和差值可求出被测量值。用不平衡电桥测量电阻就是微差法测量的例子。

零值法及微差法测量对于减小测量系统误差很有利，因此测量精度高，采用较广泛。

根据仪表是否与被测对象接触，测量可分为：

(1) 接触测量法：仪表的一部分与被测对象接触，受到被测对象的作用才能得出测量结果的测量方法。例如用玻璃管水银温度计测温度时，温度计的温包应该置于被测介质之中，以感受温度的高低。

(2) 非接触测量法：仪表的任何部分都不必与被测对象直接接触就能得到测量结果的测量方法。例如用光学高温计测温，是利用测温对象所产生的热辐射对仪表的作用而实现测温的，因此仪表不必与对象直接接触。

第二节 热工测量仪表的组成及分类

一、组成

火电厂中的热工参数，多数不能直接测量，一般总是借助于一些物质的物理、化学性质的关联性把被测参数转变为其他便于直接测量的相关量，以间接得出被测参数的数值。因此，各种测量仪表尽管工作原理、结构外形等有所不同，但从其各部分结构的功能和作用上看，总不外乎包括三个部分，即感受部件、传输变换部件及显示部件（图1-1）。

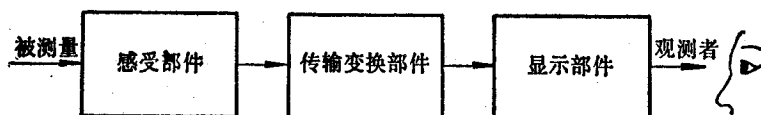


图 1-1 热工仪表组成方框图

1. 感受部件

感受部件是测量仪表中直接与被测对象发生关系的部件，它感受到被测量（被测信号）的大小，并产生一个相应的其他量（输出信号）输送至传输变换部件。例如，玻璃管水银温度计的感受部件是温包（图1-2），它感受被测对象的温度高低并转变成玻璃管内水银柱的高度变化。

仪表能否快速、准确地反映被测量值，很大程度上取决于感受部件。对感受部件的具体要求是：

(1) 输出信号与被测参数变化呈单值函数关系，并有较高的灵敏度，即有较小的被测量变化时，输出信号就有较显著的变化。

(2) 对于非被测量的变化，感受部件输出应不受影响或受影响极微。

(3) 反应快，迟延小。输出信号与输入被测量变化最好呈线性关系。

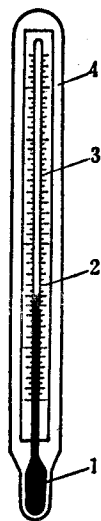


图 1-2 玻璃管水银温度计

1—温包；2—毛细管；3—标尺；4—外壳

感受部件要完全满足上述条件一般比较困难，因而通常在仪表内部采取一些措施加以弥补。例如设置中间放大环节弥补感受部件灵敏度的不足，设置补偿环节克服非被测量的影响以及采用线性化环节克服非线性等。当然这样将使得仪表复杂一些，造价也会提高。

2. 传输变换部件

传输变换部件接受感受部件送入的信号，并输送到显示部件。根据信号的强弱，传输变换部件可以直接将信号传输或将信号放大后传输到显示部件。当感受部件的输出信号不便于远距离传送，或者因某些特定要求需变为统一的某种信号送到显示部件时，传输变换部件可以将感受部件的输出信号变换为相应的其他输出量（如电流、电压、气压等）再传输到显示部件，这种传输变换部件往往构成一独立完整的器件，通称为“变送器”。

3. 显示部件

显示部件接受传输变换部件送入的信号并转变为测量人员可以辨识的信号，它是与人直接联系的部件。例如，玻璃管水银温度计温包内水银感受温度后的体积膨胀量，通过毛细管的传输，变成水银柱的高度变化，人们从刻度尺上就可以读到被测温度的数值。毛细管及刻度尺就是玻璃管水银温度计的显示部件。

根据仪表显示方式不同，一般分模拟显示及数字显示。模拟显示通过指针、液面、光标或图象等形式，反映被测量的连续变化；数字显示则用数字量显示出被测量的大小。

有些仪表根据不同需要，还具有记录、累计、报警及调节等功能，有些还可以巡回检测多个不同的参数。

如果测量仪表的感受部件或变送器与显示部件相距较远，并各自成为一完整的仪表，则习惯称为感受仪表（一次仪表）及显示仪表（二次仪表）。

二、分类

根据仪表用途、原理及结构等不同，热工仪表可分为多种类型。

（1）按被测参数不同，可分温度、压力、流量、物位、成分分析及机械量（位移、转速、振动等）测量仪表。

（2）按用途不同，可分标准用、实验室用及工程用仪表。

（3）按显示特点不同，可分指示式、记录式、积算式、数字式及屏幕式仪表。

（4）按工作原理不同，可分机械式、电气式、电子式、化学式、气动式及液动式仪表。

（5）按装置地点不同，可分就地安装式及盘用仪表。

（6）按使用方式不同，可分固定式和携带式仪表。

在热工生产现场，大多采用结构牢固，能适应较为恶劣环境的工程用仪表，标准仪表常作为实验室校对工程用仪表及作为标准传递之用。

第三节 测量误差

在进行测量工作时，由于仪表本身不完善，测量人员操作不恰当，测量时客观条件的

变化以及尚未为人们所认识的种种原因，都会使得测量值与被测量的真实值不符，即存在测量误差。测量误差可表示为

$$\delta = L - A_0$$

式中 δ ——绝对误差；

L ——测量值；

A_0 ——真实值（真值）。

真值系指所测参数的理论值或定义值，其数值难于得到，在常规测量中，真值常用比所用测量仪表更精确的标准仪表的测量值 A 代替， A 称为实际值。这样测量绝对误差通常表示为

$$\delta = L - A \quad (1-1)$$

除了绝对误差表示形式之外，测量误差还可以用相对误差及折合误差形式表示。相对误差为绝对误差与实际值之比，常用百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\delta}{A} \times 100\% = \frac{L - A}{A} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 γ ——相对误差。

对于大小数值不同的测量值，以相对误差更能比较出测量的准确程度，即相对误差越小，准确程度越高。

折合误差为绝对误差与所用测量仪表的量程之比，也以百分数表示，即

$$\gamma_0 = \frac{\delta}{A_{\max} - A_{\min}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 γ_0 ——折合误差；

A_{\max} , A_{\min} ——分别为测量仪表上限及下限刻度， $A_{\max} - A_{\min}$ 称为测量仪表的量程。

折合误差一般用于比较测量仪表的优劣，在下一节中我们再加以说明。

为了尽可能得到更接近于真值的测量结果，有必要了解及分析测量误差产生的原因以及变化规律，以便改进测量工作、减小及消除测量误差。

一、测量误差的分类

按照测量误差的最基本的性质和特点，可以把测量误差分为三大类：系统误差、随机误差和疏失误差。

1. 系统误差

在相同测量条件下多次重复测量同一量时，如果每次测量值的误差基本恒定不变，或者按某一规律变化，这种误差称为系统误差（或确定性误差）。误差值基本恒定的称为恒值系统误差（恒系差），变化的称为变值系统误差（变系差）。

变值系统误差按其变化规律又可分为累进性的、周期性的及按复杂规律变化的系统误差等几种。

系统误差主要来源于以下几个方面：

（1）测量仪器和测量系统不够完善：例如仪表本身刻度不准；校验该仪表的标准仪表有误差；仪表所依据的测量原理本身就不完善等，都会造成测量系统误差。

(2) 仪表使用不当：如测量设备和电路的安装、布置、调整不当，测量人员操作不熟练、读数不准等引起系统误差。

(3) 外界环境不能满足仪表使用条件：如仪表使用时的环境温度、湿度、电磁场等不满足要求可引起系统误差。

由于系统误差的出现一般是有规律的，其产生原因往往是可掌握的，因此应尽可能设法预见到各种系统误差的具体来源，并极力消除其影响；其次应设法确定出未能消除的系统误差数值并加以修正，以提高测量的准确程度。

系统误差的大小表明了一个测量结果偏离真值的程度，这种测量值偏离真值的程度通常用“正确度”这一词汇表达。系统误差愈小，则表明测量正确度愈高。

2. 随机误差

当设法消除了系统误差之后，在同一条件下反复测量同一量时（亦称等精度测量），每次测量值仍会出现或大或小、或正或负的微小误差，这种误差称为随机误差。由于从表面上看毫无规律，似纯属偶然原因产生，故亦称偶然误差。

随机误差是由于人们认识事物有局限性，对某些复杂的微小变化因素一时还无法掌握或控制而引起的。这种误差虽然表面上看不出有什么明显的规律，但是随着重复测量的增加可以发现：小误差比大误差出现的机会多，正、负误差出现的机会基本相同，即随机误差与其他大量随机事物一样，遵循一定的统计规律。研究随机误差的规律，对估计某一测量系统的精密程度很有意义。浅显地说，如果在一组等精度测量中，绝对值小的随机误差出现率越高，则表明该测量系统的测量“精密度”高，即多次测量值的一致性较好。

随机误差的分布规律可用数学中概率理论的正态分布曲线来表示。图 1-3 就是描述连续型随机变量出现规律的正态分布曲线。横座标表示随机变量，即每次测量值的随机误差，纵座标表示随机变量（即随机误差）的概率分布密度。所谓概率是指某一范围内随机变量出现的次数与随机变量总个数之比值。正态曲线与横座标所包围的面积即代表所有随机变量出现的概率，应为 100%（或者说为 1）。

由图 1-3 可以看出随机误差中的小误差多，大误差少，数值很大的误差几乎没有，绝对值相等的正、负误差出现的机会相等。正因为如此，如果对某一被测值进行了 n 次测量，则由于随机误差正负对称的分布规律，其各个测量值的算术平均值 \bar{L} 应最接近于真值。多次测量所得测量值的算术平均值可表示为

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n}$$

式中 L_i —— 第 i 次的测量值；

n —— 总测量次数。

一般对于多次重复测量，都将算术平均值 \bar{L} 作为测量结果， \bar{L} 被称为最优概值，或最佳估计值。

图 1-3 中出现的 σ 称为标准偏差，亦称均方根误差，在正态分布曲线上 σ 为曲线拐点的横座标值。标准偏差可用下式求得

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - A)^2}{n}} \quad (1-4)$$

式中, L_i ——第 i 次测量值;

A ——被测参数实际值;

n ——测量次数, 一般取15~20次。

可以算出, 如正态分布曲线下的面积为1, 则在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间曲线下的面积为0.683; $-2\sigma \sim +2\sigma$ 之间为0.954; $-3\sigma \sim +3\sigma$ 之间为0.997。也就是说, 在进行多次重复测量时, 随机误差落在 $\pm\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率分别为68.3%、95.4%及99.7%。因此一般可以认为, 在进行测量时, 其随机误差的最大值不会超过 $\pm 3\sigma$, 3σ 值称为极限误差或最大误差。

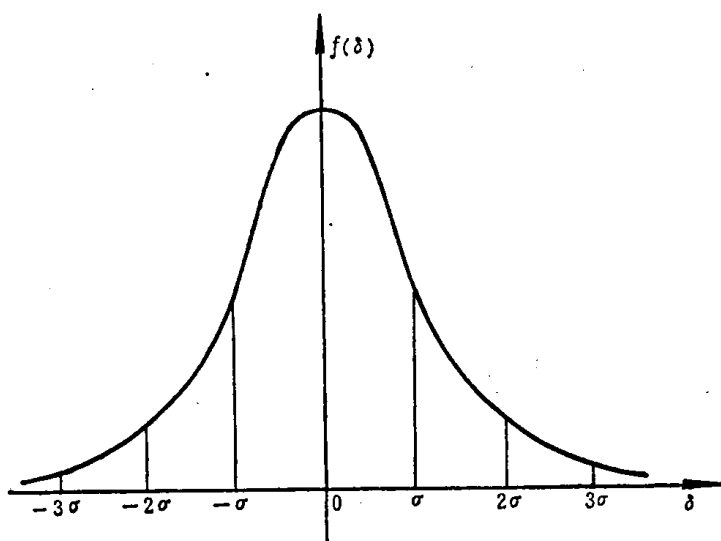


图 1-3 正态分布曲线

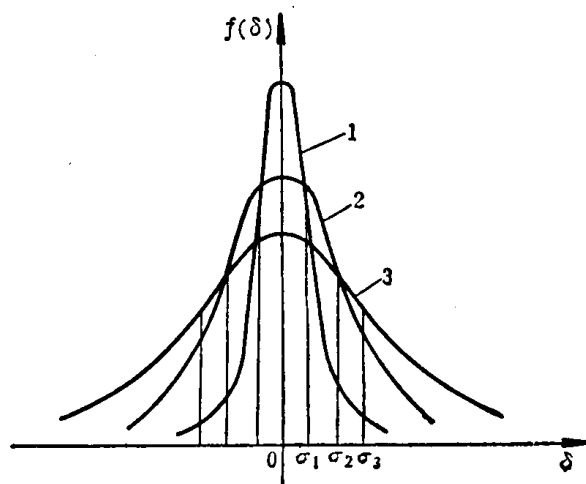


图 1-4 不同 σ 值的三组正态分布曲线

由此可见, σ 本身并不表示某一次具体测量的误差, 而是反映出一组等精度测量随机误差的分散程度。图1-4为三种不同测量系统的随机误差分布曲线。图中 $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$, 所以曲线1对应的测量系统, 小误差密集程度高, 故测量精密度高; 曲线2次之, 曲线3对应的测量精密度最差。

在计算标准偏差 σ 时, 要用到实际值 A , A 值可由更高一级的标准仪表得出。如果不求 A 值, 而用该组测值的算术平均值 \bar{L} 代替, 则

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} \quad (1-5)$$

式中测量次数 n 一般要求达60次以上, 以便有足够的准确性。

3. 粗大误差

由于测量人员操作错误、粗心大意等原因造成的误差, 称为粗大误差(图1-5, b,c)。粗大误差常表现为数值较大, 且没有什么规律。因此在测量时测量人员应有高度责任感并熟悉操作技术, 以避免出现粗大误差。

由以上误差分析可知, “正确度”反映了测量系统误差的大小, “精密度”反映了随

机误差的分散程度。一个好的测量系统，应该既“精密”又“正确”，即系统误差和随机误差都要小，一般用“准确度”（或精度）这一词汇概括。图1-5以射击靶纸为例，示意出精密度、正确度及准确度三者的意义。图中(a)精密度高而正确度低；(b)正确度高而精密度低；只有(c)才是准确度高。

提高测量准确度，可以通过设计合理的测量系统，提高测量人员的技术水平以及正确处理测量数据等方式来实现。

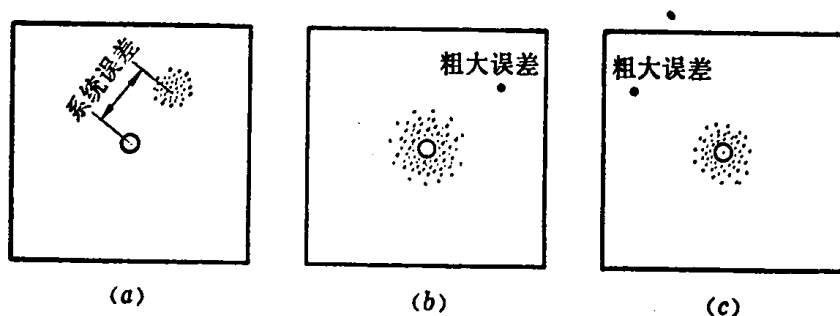


图 1-5 精密度、正确度、准确度概念说明示意图

二、消除和减小测量误差的方法

1. 系统误差的消除

一般随机误差可以通过统计规律予以处理，如通过多次重复测量求出其算术平均值作为测量结果；通过求取标准偏差可以估计出单次测量值的最大误差。对于系统误差也可以通过改进测量技术来减小。通常处理系统误差有以下几种方法：

(1) 消除系统误差产生的根源：测量时使环境条件尽量符合仪表规定的使用条件，熟悉仪表性能，正确安装、调整测量仪表等等，可使系统误差减小。

(2) 在测量结果中加修正值：在测量前用标准仪表确定出测量仪表的修正值；对各种外界影响量（如温度、气压、重力加速度等），要力求确定出修正公式、修正曲线或修正值表格，以便修正测量结果。

(3) 采取补偿措施：在测量系统中采用补偿设备，以在测量过程中自动消除系统误差。例如在热电偶测温时，采用冷端温度补偿器消除热电偶冷端温度变化所产生的系统误差。

(4) 采用消除系统误差的典型测量技术：通常采用的方法有零值法，微差法及对称观测法等。

①零值法：在测量方法分类中，我们已知道这是将被测量与已知标准量比较平衡的过程，所以只要判断平衡的仪表灵敏度足够高，被测量的误差就主要决定标准量的误差而与其他因素无关，而标准量的准确度一般都较高，故测量结果的误差必然较小。

②微差法：这是一种不彻底的零值法。若测出被测量 x 与标准已知量 B 的微小差值为 Δ ，即

$$\Delta = x - B$$

则

$$x = B + \Delta$$

因此

$$\frac{dx}{x} = \frac{dB}{x} + \frac{d\Delta}{x} = \frac{dB}{B+\Delta} + \frac{\Delta}{x} \cdot \frac{d\Delta}{\Delta}$$

当 $B \gg \Delta$ 时, 上式可写成

$$\frac{dx}{x} = \frac{dB}{B} + \frac{\Delta}{x} \cdot \frac{d\Delta}{\Delta} \quad (1-6)$$

式中 $\frac{dx}{x}$ 可视为被测值 x 的相对误差, $\frac{dB}{B}$ 为标准量的相对误差, $\frac{d\Delta}{\Delta}$ 为所测微差的相对误差。当 $x \gg \Delta$ 时, 式 (1-6) 可写成

$$\frac{dx}{x} = \frac{dB}{B}$$

即测量误差基本上只与标准量误差有关, 而与差值测量仪表误差关系甚微。特别是被测量与标准量相差愈小, 测量的准确度就愈高。常用的不平衡电桥或利用不平衡电桥原理的测量仪表, 如XCZ-102动圈表, 都是利用微差法原理测量的仪表。

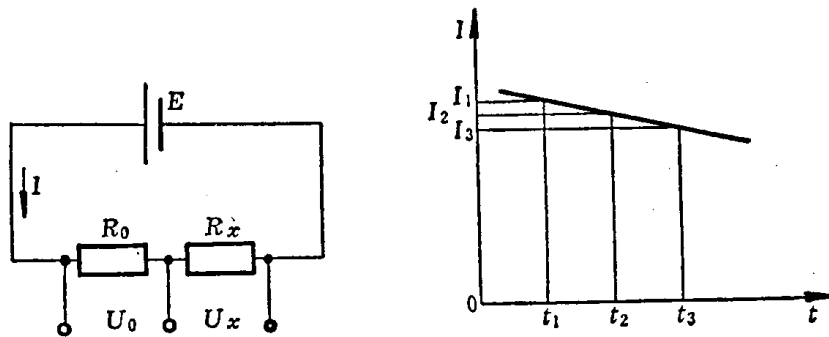


图 1-6 电位差计测电阻的线路及工作电流随时间的变化曲线

③对称观测法: 为了说明方便, 让我们看一测量实例。图1-6是用电位差计测量电阻的线路。工作电流 I 由电源 E 供给, 并通过标准电阻 R_0 及被测电阻 R_x 。一般测量方法是用电位差计先测量出 I 在 R_x 上的电压降 U_x , 再测出 I 在 R_0 上的电压降 U_0 。假定 I 不变, 则由于

$$U_x = IR_x$$

$$U_0 = IR_0$$

可以得到

$$R_x = \frac{U_x}{I} = \frac{U_x}{U_0} R_0 \quad (1-7)$$

但是实际上电流是随时间变化的, 而测量 U_x 和 U_0 又不可能同时进行。设电流随时间线性下降, 并在时刻 t_1 测得 U_x , 时刻 t_2 测得 U_0 , 则

$$U_x = R_x I_1$$

$$U_0 = R_0 I_2$$

而

$$I_2 = I_1 - \Delta I$$

因此可得

$$\frac{U_x}{U_0} = \frac{R_x I_1}{R_0 (I_1 - \Delta I)}$$

$$R_x = \frac{U_{x1}}{U_0} R_0 - \frac{U_{x2}}{U_0} \cdot \frac{\Delta I}{I_1} R_0 \quad (1-8)$$

可见由式(1-8)得出的 R_x 值比由式(1-7)得出的 R_x 要小一个数值,这便是因 I 随时间减小而引起的系统误差。如果采用对称观测法测量,则可消除上述误差。

设在 t_1 时刻测得 R_x 上的电压降为

$$U_{x1} = I_1 R_x$$

在 t_2 时刻测得 R_0 上的电压降为

$$U_{02} = I_2 R_0$$

在 t_3 时刻又测得 R_x 上的电压降为

$$U_{x2} = I_3 R_x$$

求取 U_{x1} 与 U_{x2} 的平均值

$$\bar{U}_x = \frac{U_{x1} + U_{x2}}{2} = \frac{I_1 + I_3}{2} R_x \quad (1-9)$$

若使三次测量时间间隔相等,则

$$\frac{I_1 + I_3}{2} = I_2$$

将这一结果代入式(1-9)并用 $U_{02} = I_2 R_0$ 分别除等式两边,则得

$$R_x = \frac{\frac{1}{2}(U_{x1} + U_{x2})}{U_{02}} R_0 = \frac{\bar{U}_x}{U_{02}} R_0$$

由上式可见, R_x 值不受电流变化的影响,从而消除了电流线性变化而产生的系统误差。

2. 粗大误差的剔除

由随机误差的统计规律可以看到,在一组等精度测量中,大的随机误差出现的概率是极小的,超过 3σ 的误差,其出现概率仅为0.3%,因此如遇到误差大于 3σ 的数据就颇值得怀疑,一般将其剔除,以得到比较符合实际情况的测量结果,这种剔除原则称为“拉依达准则”,是判断粗大误差的方法之一,该准则表达式为

$$\delta_K = |L_K - \bar{L}| > 3\sigma$$

式中 L_K ——应剔除的测量值,亦称坏值;
 \bar{L} ——包括坏值在内的全部测值的算术平均值;
 δ_K ——坏值的误差;
 3σ ——拉依达准则鉴别值。

满足上式的测量值应予以剔除,然后重新计算 \bar{L} 及 σ ,再用准则表达式检查是否有坏值,直至无坏值为止。

第四节 仪表的质量指标

为了正确地选择和使用仪表,必须了解有关评价仪表质量的一系列指标。