



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REGONG CELIANG JI YIBIAO

热工测量 及仪表

(第三版)

朱小良 方可人 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Thermal Energy & Power



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

REGONG CELIANG JI YIBIAO

热工测量 及仪表

(第三版)

朱小良 方可人 编
黄素逸 苏 杰 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书共十三章，主要讲述热工测量及仪表的基本知识；热力发电厂热工过程的各种参数，如温度、压力、流量、水位、炉烟成分的测量方法及测量仪表；热力生产过程中的机械量，如位移、振动、转速等参数的测量方法及测量仪表。

本书可作为普通高等院校能源与动力工程专业热工测量及仪表课程的教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热工测量及仪表/朱小良，方可人编. —3 版. —北京：中国电力出版社，2011.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 1537 - 2

I. ①热… II. ①朱…②方… III. ①热工测量—高等学校—教材②热工仪表—高等学校—教材 IV. ①TK31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 051208 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1981 年 3 月第一版

2011 年 6 月第三版 2011 年 6 月北京第二十七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 446 千字

定价 32.00 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

本书是1995年由吴永生、方可人编写的《热工测量及仪表》（第二版）一书的修订版。十多年来，我国电力行业得到了前所未有的发展，随着发电机组不断向超大容量和超超临界参数变化，新的测量方法和新的测量技术不断出现。为满足高校学生及相关工程技术人员需要，在第三版修订时，尽可能紧密结合专业特点，围绕热工测量原理和应用这一主题，注重基础知识和基本原理部分的阐述，同时，参考了国内外测量技术的新方法和新技术，增加了数字远传接口、新的检测传感设备等内容。此外，考虑到一些普通热工测量元件在工业中还将继续使用，适当保留了一些主要内容，删去了一些过时的、使用较少的部分。

本书由东南大学朱小良、方可人修订，朱小良负责全书统稿工作。全书由华中科技大学黄素逸教授、华北电力大学苏杰教授主审，主审老师提出了许多宝贵的意见和建议，在此深表感谢。在本书的修订过程中得到了许多兄弟院校的同仁以及从事检测方面研究和应用的技术人员的支持，在此深表谢意。

编 者

2011年4月

第三版前言

本教材是1981年由水利电力出版社出版的《热工测量及仪表》教材的修订版，是根据1988年水利电力部热动类专业教学委员会的决定进行修订的。

近十多年来，我国热力发电厂的热力设备有了巨大的发展，随着机组不断向大容量、超高参数方向发展，新的测量方法和新的检测仪表不断出现。因此必须对第一版书中一些陈旧的或很少应用的内容删去，增添一些新颖的、使用较广的测量方法和新型的检测仪表。第二版对第一版教材中热工测量及仪表的基本理论部分仍加以保留并有所加强。

由于水利电力出版社另外出版了《热工测量及仪表习题集》（东北电力学院陈冀九主编，1993年出版）、《热工测量及仪表实验指导书》（东南大学钟继贵编，1991年出版），因此本教材中没有编写习题，实验内容相对较少。

本教材第二版仍由东南大学吴永生（第二至第七章、第八章部分、第十三章）、方可人（绪论、第一章、第八章部分、第九至第十二章）编写，并由浙江大学许冀森主审。在编写过程中得到许多兄弟院校和有关单位的热情支持，四川仪表七厂陶午年、上海自动化仪表三厂何业勋等同志为本教材提供了宝贵的资料，在此一并表示深切的谢意。

编者水平有限，缺乏实践经验，教材中难免有不足或错误之处，希望读者指正。

编 者

1994年7月

目 录

前言

第二版前言

第一章 热工测量的基本概念	1
第二章 测量误差和不确定度	9
第一节 测量误差的基本概念	9
第二节 随机误差的分布规律	10
第三节 直接测量值的误差分析与处理	13
第四节 间接测量误差的分析与处理	17
第五节 粗大误差的检验与坏值的剔除	19
第六节 系统误差	21
第七节 误差的综合	23
第八节 不确定度	24
第三章 温度测量概述	27
第一节 国际温标	27
第二节 各种测温方法简介	33
第四章 热电偶和热电阻温度计	40
第一节 热电现象和关于热电偶的基本定律	40
第二节 标准化与非标准化热电偶	46
第三节 热电偶冷端温度补偿方法	54
第四节 金属测温电阻	56
第五节 半导体热敏电阻	62
第六节 热电偶和热电阻的校验	64
第五章 显示仪表	67
第一节 动圈式显示仪表	67
第二节 平衡式显示仪表及测量电桥	72
第三节 数字式显示仪表	80
第六章 接触测温方法的讨论和热电偶的抗干扰问题	89
第一节 管内流体温度测量	89
第二节 壁面温度测量	92
第三节 高温气体温度测量	93
第四节 热电偶测温的抗干扰问题	98
第七章 非接触测温方法和仪表	102
第一节 辐射测温基本原理	102
第二节 单色辐射高温计	104

第三节	辐射温度计	108
第四节	比色高温计	109
第五节	红外温度计	113
第六节	红外热像仪	116
第八章	压力及差压测量	119
第一节	液柱式压力计	119
第二节	弹性式压力计	122
第三节	压力(差压)传感器和变送器	129
第四节	HART 协议原理与应用	149
第五节	压力和差压测量仪表的校验和使用	156
第九章	流体流量的测量方法	161
第一节	容积式流量测量方法	161
第二节	速度式流量测量方法	164
第三节	差压式流量测量方法	176
第四节	质量流量计	183
第五节	流量测量仪表的校验与分度	188
第十章	节流变压降流量计	191
第一节	标准节流装置	191
第二节	标准节流装置的流量公式	196
第三节	标准节流装置的计算	201
第四节	非标准节流件及其应用	210
第五节	差压计信号管路的安装	212
第十一章	汽包水位测量	215
第一节	云母水位计、双色水位计和电接点水位计	215
第二节	差压式水位计	218
第三节	其他液位测量方法	225
第十二章	炉烟分析	229
第一节	烟气中的氧量测量	231
第二节	红外线气体分析仪	234
第三节	气相色谱分析仪	237
第十三章	旋转机械参数的测量	242
第一节	电涡流式位移传感器	242
第二节	绝对振动测量	248
第三节	转速测量	254
附录 I		260
附录 II		268
参考文献		282

第一章 热工测量的基本概念

一、热工测量的意义

测量是借助专门工具，通过试验测量并对试验数据进行分析、计算，将被测量 X_0 以测量单位 U 的倍数 μ 显示出来的过程，即

$$X_0 = \mu U \quad (1-1)$$

式中 μ ——被测量的真实数值，简称真值。

上式称为测量的基本方程式。然而，实际上可能存在测量方法不够完善，测量工具不够精确，观测者的主观性和周围环境的影响以及所取数值化后的比值数位有限等因素，都会引起测量误差，所以被测量的真值 μ 只能近似等于其测量值 x ，因此式 (1-1) 变为

$$X_0 \approx xU \quad (1-2)$$

由于测量中总存在着测量误差，测量工作者的任务之一就是要尽量使之减小，其方法是应选择合适的测量方法；所用的测量单位必须是稳定的，并且是国家法定或国际公认的，例如国际单位制中所规定的；所用的测量工具必须足够准确，并事先经过检定等。测量方法、测量单位及测量工具是测量过程的三要素。

热工测量是指压力、温度等热力状态参数的测量，通常还包括一些与热力生产过程密切相关的参数测量，如测量流量、液位、振动、位移、转速和烟气成分等。

在火力发电厂中，通过热工参数的测量，可及时反映热力设备的运行工况，为运行人员提供操作依据，为热工自动化装置准确及时地提供信号，为运行的经济性计算等提供数据。因此，热工测量是保证热力设备安全、经济运行及实现自动化的必要条件，也是经济管理、环境保护、研究新型热力生产系统和设备的重要手段。

随着电力工业的快速发展，电厂热力设备日益向大容量、超高参数发展，自动化水平不断提高，对热工测量的准确性、可靠性等要求也越来越高，测点数量越来越多，采用新原理、新材料和新结构的热工仪表不断涌现。据统计，一台 600MW 机组 DCS 系统的 I/O 点数约 8000 点，1000MW 超超临界参数机组 DCS 系统的 I/O 点数为 10 000 多点。图 1-1 所示为热工测量在热力生产过程控制系统中的地位。

我国在 1978 年以后，电力工业的发展非常快，图 1-2 所示为我国 1978~2009 年发电总装机容量变化示意。

二、测量方法

1. 按测量结果的获取方式分

测量方法是实现被测量与测量单位的比较，并给出比值的方法。按测量结果的获取方式来分，测量方法可分为直接测量法和间接测量法。这种分类方法对测量误差的分析很有意义。

(1) 直接测量法。使被测量直接与测量单位进行比较，或者用预先标定好的测量仪器进行测量，从而得到被测量数值的测量方法，称为直接测量法。例如，用直尺测量长度，用压力表测量容器内介质压力，用玻璃温度计测量介质温度等。

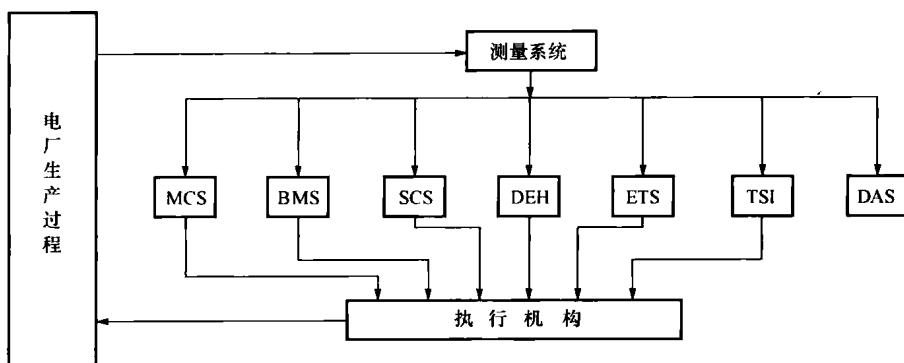


图 1-1 电站生产过程控制系统的组成

MCS—模拟量控制系统；BMS—燃烧器管理系统；SCS—顺序控制系统；DEH—电液调节系统；
ETS—紧急跳闸系统；TSI—汽轮机监视仪表；DAS—数据采集系统

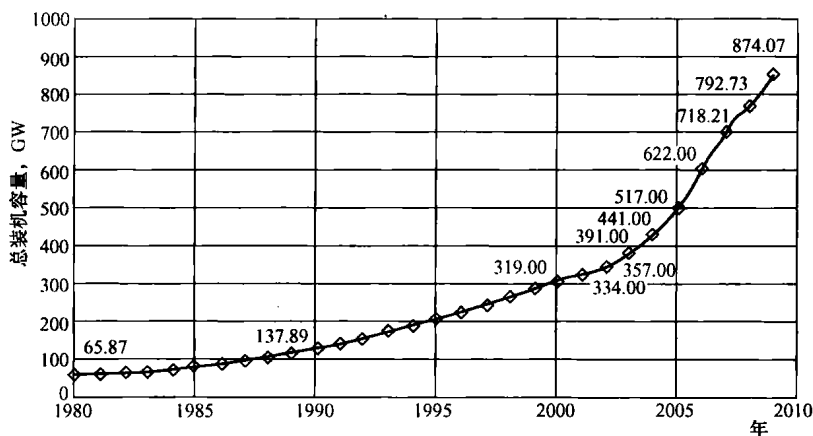


图 1-2 我国 1978~2009 年发电总装机容量变化示意

(2) 间接测量法。通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各变量，再按函数关系进行计算，从而求得被测量数值的方法，称为间接测量法。例如，直接测量过热蒸汽的温度、压力和标准节流装置输出的差压信号，通过计算得到过热蒸汽的质量流量。

2. 按被测量与测量单位的比较方式分

按被测量与测量单位的比较方式来分，测量方法可分为偏差测量法、微差测量法和零差测量法。

(1) 偏差测量法。测量器具受被测量的作用，其工作参数产生与初始状态的偏离，由偏离量得到被测量值，称为偏差测量法。例如，单管压力计在压力作用下，管中水银柱偏离初始零刻度点，偏离量就显示了被测压力值，如图 1-3 所示。

由图 1-3 可知，被测量的值为

$$p_{\text{测}} = \rho g \Delta h$$

(2) 微差测量法。用准确已知的、与被测量同类的恒定量去平衡掉被测量的大部分，然后用偏差

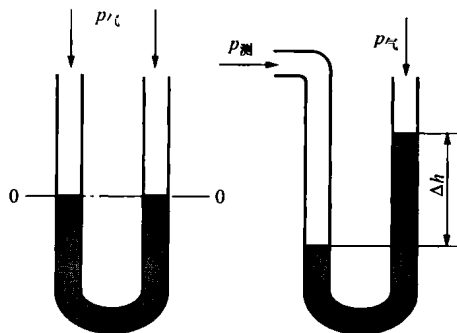


图 1-3 偏差测量法示意

法测量余下的差值，测量结果是已知量值和偏差法测得值的代数和。例如，用微差法检定热电偶时，将同类型的标准热电偶与被校热电偶反向串接，两者的热端同置于检定炉中，冷端置于冰点瓶中，它们的负热电极并接在一起，冷端的正极则和电位差计的两输入端子相连接、用电位差计测量标准热电偶与被校热电偶热电势的差值，如图 1-4 所示。由于标准热电偶热电势的准确度很高，被校热电偶的热电势大部分被其所平衡，两者差值很小，再通过电位差计测量此差值，就可得到较高的测量准确度，即

$$E_X = E_B + \Delta E$$

(3) 零差测量法。用作比较的量是准确已知并连续可调的，测量过程中使它随时等于被测量，也就是说，使已知量和被测量的差值为零，这时偏差测量仪起检零作用，因此，被测量就是已知的比较量。例如。用电位差计测量热电偶产生的热电势。零差测量法比微差测量法具有更高的测量准确度。此方法操作时间较长，更适合于稳定参数的测量。

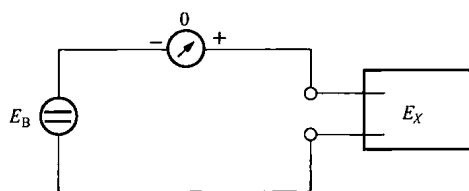


图 1-4 微差测量法示意

3. 按被测量在测量过程中的状态分

按被测量在测量过程中的状态来分，测量方法又可分为静态测量方法和动态测量方法。被测量在测量过程中不随时间变化，或其变化速率相对于测量速率十分缓慢，对这类的测量称为静态测量。若测量过程中，被测量随时间有明显变化，则称为动态测量。一般来说，要得到较高的动态测量准确度很困难，这是由于被测量随时间变化的规律和测量仪器本身的动态特性对测量值有着较为复杂的影响。因此，动态测量的数据处理有着与静态测量不同的原理和方法。

三、热工仪表的组成

热工仪表的种类繁多，尽管各种仪表的原理、结构千差万别，但就其基本功能来看，一般可认为由下列三个基本部分构成。

1. 感受件

感受件直接与被测对象相联系，感受被测量的量值，并将感受到的被测量信号转换成相应的信号输出。例如，热电偶温度计中的热电偶，它把对象的被测温度转换成热电动势。感受件也称敏感元件、一次元件或发送器。对感受件的要求如下：

- (1) 输出信号必须随被测量变化，它们之间的关系是稳定的、可复现的。
- (2) 输出信号只能随被测量变化而变化。如果其他参数的变化会影响感受件的输出，那么，测量过程中这些参数的变化就是测量误差的来源。在这种情况下，一般要使这些参数不变，或附加补偿装置，使这些参数的变化不影响（或很少影响）测量结果。
- (3) 输出信号与被测量之间必须是单值关系，最好是线性关系。

感受件按被测参数分类，有温度感受件、压力感受件等；按输出信号能量的主要来源来分，可分为能量转换型（或称发生器型、有源型，如热电偶、压电式压力传感器等）和能量控制型（或称参数型、无源型，如热电阻、电容式差压变送器等）；按输出信号形式分，有模拟式（其输出信号为连续变化的模拟量）和准数字式（如涡轮流量计、旋涡流量计等，其输出为频率式准数字信号）两种。

2. 显示件

仪表最终是通过它的显示件向观察者反映被测量的变化的。按显示件的功能不同,仪表有以下几种:

(1) 显示被测量瞬时值的,称为显示仪表。按显示方式不同,显示仪表又有模拟显示、数字显示和屏幕显示之分。

(2) 记录被测量随时间变化的,称为记录仪表。在记录仪表中,除了以记录笔的运动来反映被测量变化外,还需要有一个等速运动的部件(一般为同步电动机)来带动记录纸。记录纸形状有长方形的,也有圆形的。笔的类型有墨水型、热敏型和打印型等。

(3) 显示被测量对时间的积分结果的,称为积算仪表或积算器。例如,在测量流量时,如果要测出某个时间间隔内流过的物质总量,就要采用流量积算仪表。

(4) 反映被测量是否超过允许限值的,称信号式仪表。当被测量达到或超出所规定的限值时,仪表可发出声、光信号,引起操作人员注意或使设备停止运行。

(5) 有些显示件可根据被测量与规定值的偏差情况,发出对被测对象进行调节的信号,其调节作用可使被测量保持在预定的数值,也就是说,该显示件附加有调节功能。具有这种调节功能的显示仪表称为带调节的显示仪表。

3. 传送件

传送件的作用是将感受件输出的信号,根据显示件的要求,传输给显示件。根据不同情况,传送件有下列功能:

(1) 单纯起传输作用。当感受件输出的信号只送给显示件时,传送件只起传输作用,如信号导管和电缆。

(2) 将感受件输出的信号放大,以满足远距离传输以及驱动显示、记录装置的需要。

(3) 为了使各种感受件的输出信号便于与显示仪表和调节装置配接,要通过传送件把信号转换成标准化的统一信号。例如,在单元组合仪表中,各种感受件的输出信号都被转换成统一数值范围的气、电信号,这时的传送件常称为变送器。这样,同一种类型的显示仪表常可用来显示不同类型的被测量。

四、仪表内信号的传输过程

测量过程实质上是仪表内信号的转换和传输的过程,这过程中有时也包含着信号能量的转换与放大。因此,仅从信号传输过程来看,仪表中每一次信号转换和传输可作为一个环节,静态条件下每个环节的输出与输入之比,称为该环节的传递系数,也就是该环节的灵敏度。整个仪表是各环节的连接。这种表示方法给仪表的分析带来了方便。仪表各环节之间的连接方式主要有开环连接与闭环连接两种,相应地构成开环系统和闭环系统。

1. 开环系统

在该系统中,仪表中各环节开环串联、信号沿一个方向传输。这类仪表按偏差测量法工

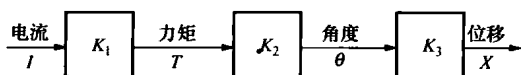


图 1-5 电流表方框图

作,也称直接变换式仪表。图 1-5 所示为直接变换式仪表的一个实例——电流表方框图。输入信号电流 I ,通过磁电系统转换为处于磁场中的可动线圈的转动力矩 T ,转动力矩 T 通过

与张丝反力矩平衡转换成动圈转角 θ ,转角 θ 通过线圈上的指针转换成指针对标尺的位移 X 。在稳定工况下,仪表输入信号 I 与输出信号 X 之间的关系(即仪表的静态特性)可由下式

表示:

$$X = K_1 K_2 K_3 I = KI \quad (1-3)$$

式中 K_1 、 K_2 、 K_3 ——各环节的传递系数,即各环节的灵敏度;

K ——仪表的传递系数,即仪表的灵敏度, $K = K_1 K_2 K_3$ 。

由此可见,对直接变换式仪表,要保证仪表指示准确,必须保持每个环节的灵敏度不变,而由于环境等因素的影响,每个环节灵敏度或多或少总是有变化的,其变化将使仪表产生测量误差。

2. 闭环系统

仪表各环节中的一部分或全部构成负反馈式的闭环连接,这类仪表在闭环部分是按零差测量法工作的,称为平衡式仪表。图 1-6 所示为属于平衡式仪表的电子电位差计的方框图。输入信号为电动势 e ,与电桥(包括滑线电阻)上产生的反馈电压 U 相减,其差值 Δe 经放大器放大后

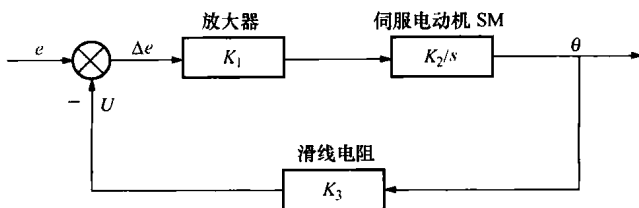


图 1-6 电子电位差计方框图

推动伺服电动机 SM 旋转, SM 旋转带动滑线电阻上的滑动触点移动,从而改变反馈电压 U ,直至 $U=e$ 时, $\Delta e=0$,电动机才停止转动,伺服电动机旋转的角度为 θ ,由上述框图可写出该系统的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{E(s)} = \frac{K_1 \frac{K_2}{s}}{1 + K_1 \frac{K_2}{s} K_3} = \frac{K_1 K_2}{s + K_1 K_2 K_3} \quad (1-4)$$

静态时输入输出关系为

$$\theta = \frac{K_1 K_2}{K_1 K_2 K_3} e = \frac{1}{K_3} e = Ke \quad (1-5)$$

由此可见,闭环系统中仪表的传递系数 K 只与反馈环节的传递系数 K_3 有关,即 $K = 1/K_3$,而与闭环部分中正向环节的传递系数 K_1 、 K_2 无关。因此,仪表对正向环节如放大器等部分的性能要求可降低。 K_3 (滑线电阻)通常要做得比较准确与稳定,这也是采用闭环系统的模拟式仪表有较高准确度的原因。

五、仪表的质量指标

仪表的质量指标主要包括评价仪表计量性能、操作性能、可靠性和经济性等方面的指标。仪表的可靠性是对仪表,特别是过程检测仪表的基本要求。目前常用有效性 (MTBF) 作为仪表的可靠性指标,即

$$\text{有效性} = \frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均修复时间}} \quad (1-6)$$

此外,选用仪表时,首先要了解仪表计量性能方面的指标,主要指标包括以下几个。

1. 准确度

这是表征仪表指示值接近被测量真值程度的质量指标。

(1) 仪表的示值误差。它表征仪表各个指示值的准确程度,常用示值的绝对误差 δ 和示

值的相对误差 r 表示。若仪表指示值为 x , 被测参数的真值为 μ , 则

$$\delta = x - \mu \quad (1-7)$$

$$r = \frac{x - \mu}{\mu} \times 100\% = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% \approx \frac{\delta}{x} \times 100\% \quad (1-8)$$

示值绝对误差与被测量有一致的量纲, 并有正负值之分, 正值表示偏大, 负值表示偏小。绝对误差是表示误差的基本形式, 但相对误差更能说明示值的准确程度。例如, 用温度计测量一炉子温度, 温度计指示值为 1645°C , 炉子真实温度为 1650°C , 示值绝对误差为 -5°C , 示值相对误差为 $-5/1650 \times 100\% = -0.3\%$; 如果测量 100°C 的水, 虽然同样有 -5°C 的示值绝对误差, 但其示值相对误差则为 -5% , 显然后者示值相对误差大得多, 说明后者的测量准确度要低得多。

被测量的真值通常是不知道的, 在校验仪表时, 常用标准仪表的示值、理论值或定义值等所谓约定真值来代替真值。

(2) 仪表的基本误差。在规定的工作条件下, 仪表量程范围内各示值误差中的绝对值最大者称为仪表的基本误差 δ_j , 即

$$\delta_j = \pm |\delta_{\max}|_A \quad (1-9)$$

式中 $|\delta_{\max}|_A$ ——具有量程 A 的仪表, 其示值误差中的绝对值最大者, 仪表量程 A 即仪表测量上限与测量下限之差。

超出正常工作条件引起的误差称为仪表的附加误差。

仪表的引用误差 r_y 定义为仪表示值的绝对误差 δ 与该仪表量程 A 之比, 并以百分数表示, 即

$$r_y = \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (1-10)$$

在仪表量程范围内, 示值误差中绝对误差值最大者与量程之比 (以百分数表示) 称为最大引用误差, $r_{y,\max}$, 即

$$r_{y,\max} = \frac{\pm |\delta_{\max}|_A}{A} \times 100\% \quad (1-11)$$

这样, 按引用误差的形式, 仪表的基本误差也可用最大引用误差来表示。

(3) 仪表的准确度等级。为了保证质量, 对各类仪表规定了其基本误差不能超过的限值, 此限值称为该类仪表的允许误差 (或称基本误差限), 用 δ_{yu} 或 r_{yu} 表示, 因此允许误差也是一种极限误差。

仪表最大引用误差表示的允许误差 r_{yu} 去掉百分号后余下的数字称为该仪表的准确度等级。工业仪表准确度等级的国家标准系列有 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4 七个等级。仪表刻度盘上应标明该仪表的准确度等级。

例如: 一测量范围为 $0 \sim 10\text{MPa}$ 的弹簧管压力计经校验, 在其量程上各点处最大示值绝对误差 $\delta_{\max} = \pm 0.14\text{MPa}$, 则该表的最大引用误差 $r_{y\max} = \frac{\pm 0.14}{10-0} \times 100\% = \pm 1.4\%$ 。若该仪表的准确度等级为 1.5 级, 则该仪表的允许误差 $r_{yu} = \pm 1.5\%$ 。因该仪表的基本误差未超过允许误差, 故认为该仪表的准确度合格。

值得注意的是, 目前关于仪表准确度等级的规定尚未完全统一, 例如, 我国流量计的允许误差是根据在流量计测量上限的 $20\% \sim 100\%$ 范围内, 其示值相对误差 r 不超过某一限值

来规定的, 该示值相对误差的限值去掉百分号后, 就是该流量计的准确度等级。若一台涡轮流量计, 其准确度等级为 0.5 级, 测量上限为 $50\text{m}^3/\text{h}$, 允许误差为 $\pm 0.5\%$, 则在 $10\sim 50\text{m}^3/\text{h}$ 测量范围内, 各点处的示值相对误差 r 不应超过 $\pm 0.5\%$, 而允许的示值绝对误差却随着流量减小而减小, 这是选用和校验仪表时必须注意的。

引起仪表指示值误差的因素很多, 如线性度、回差、重复性、分辨率和漂移等。

2. 线性度 (或非线性误差)

对于理论上具有线性“输入—输出”特性曲线的仪表, 由于各种原因, 实际特性曲线往往偏离线性关系, 它们之间最大偏差的绝对值与量程之比的百分数称为线性度。

3. 回差 (变差)

输入量上升和下降时, 同一输入量相应的两输出量平均值之间的最大差值与量程之比的百分数称为仪表的回差。它通常是由于仪表运动系统的摩擦、间隙, 弹性元件的弹性滞后等因素造成的。

4. 重复性和重复性误差

同一工作条件下, 多次按同一方向输入信号作全量程变化时, 对应于同一输入信号值, 仪表输出值的一致程度称为重复性。对于全行程范围, 在同一工作条件下, 从同方向对同一输入值进行多次连续测量所获得的输出两极限值之间的代数差或均方根误差称为重复性误差。它通常以量程的百分数表示。

5. 分辨率

引起仪表示值可察觉的最小变动所需的输入信号的变化, 称为仪表的分辨率, 也称灵敏限或鉴别域。输入信号变化不至引起示值可察觉的最小变动的有限区间与量程之比的百分数, 称为仪表的不灵敏区或死区。为了保证测量准确, 一般规定不灵敏区不应大于允许误差的 $1/10\sim 1/3$ 。

6. 灵敏度

仪表在到达稳态后, 输出增量与输入增量之比称为仪表的灵敏度, 即仪表“输入—输出”特性的斜率。若仪表具有线性特性, 则量程各处的灵敏度为常数。仪表灵敏度应与仪表准确度相适应, 即灵敏度的高低只需保证仪表示值的最后一位比允许误差 $\delta_{\text{允}}$ 略小即可。灵敏度过低会降低仪表的准确度, 过高会增大仪表的重复性误差。

7. 漂移

在保持工作条件和输入信号不变的条件下, 经过规定的较长一段时间后输出的变化, 称为漂移, 它以仪表量程各点上输出的最大变化量与量程之比的百分数来表示。漂移通常是由电子元件的老化、弹性元件的失效、节流件的磨损、热电偶或热电阻的污染变质等原因引起的。

此外, 在被测量快速变化时, 常常会由于仪表的输出信号跟不上被测量的变化而产生动态误差, 动态误差的大小与仪表的动态特性及被测量的变化规律有关。常用感受件的时间常数与仪表的全行程时间来表征仪表的动态特性。

六、仪表的检定

检定是为了评定仪表的计量性能, 并与规定的指标比较, 以确定仪表是否合格。进行检定工作应遵循国家法定性技术文件, 即国家计量检定规程。规程详细规定了被检仪表的技术条件; 检定用的标准测量器具和设备; 检定项目、方法和步骤; 检定结果处理; 检定证书的

格式和填写要求等。

检定方法一般可分为定点法和示值比较法两类。定点法是提供被检仪表测量所需的某种标准量值，例如已知的某种纯金属相变点温度、标准成分气样等，从而确定仪表的示值误差。工业上常用的是示值比较法，就是用被检仪表与标准仪表同时去测量同一被测量，比较两者的指示值，从而确定被检仪表的基本误差、回程误差等质量指标。一般要求标准仪表的测量上限应等于或稍大于被检仪表的测量上限。标准仪表的允许误差为被检仪表误差的 $1/10 \sim 1/3$ 。在这种情况下，可以忽略标准仪表的误差。将标准仪表的指示值作为被测量的真值。检定点常常取在仪表标尺的整数分度值（包括上、下限）上和经常使用的标尺刻度附近，必要时可适当增加检定点。

第二章 测量误差和不确定度

由于测量过程中所用仪表准确度的限制，环境条件的变化，测量方法的不够完善，以及测量人员自身的原因，测量结果与被测真值之间不可避免地存在差异，这种差异称为测量误差。因此，只有在得到测量结果的同时，指出测量误差的范围，所得的测量结果才是有意义的。测量误差分析的目的在于，根据测量误差的规律性，找出消除或减少误差的方法，科学地表达测量结果，合理地设计测量系统。由于误差的存在使测量结果带有不确定性，不确定度越小，测量结果的质量就越高；反之，其质量越低。测量数据的不确定度是评定测量结果质量高低的一个重要指标。

第一节 测量误差的基本概念

一、测量误差的分类

测量误差是被测量的测得值与其真值之间的差。按照误差的特点与性质，测量误差分为粗大误差、系统误差、随机误差三类。

1. 粗大误差

明显歪曲了测量结果，使该次测量失效的误差称为粗大误差。含有粗大误差的测量值称为坏值。出现坏值的原因有测量者的过失，如读错、记错测量值；操作错误；测量系统突发故障等。在测量时一旦发现坏值，应重新测量。如已离开测量现场，则应根据统计检验方法来判别是否存在粗大误差，以决定是否剔除坏值，但不应无根据轻率地剔除测量值。

2. 系统误差

在同一条件下，多次测量同一被测量，绝对值和符号保持不变或按某种确定规律变化的误差称为系统误差，前者称为恒值系统误差，后者称为变值系统误差。当测量系统和测量条件不变时，增加重复测量次数并不能减少系统误差。系统误差通常是由于测量仪表本身的原因，或仪表使用不当，或测量环境条件发生较大改变等原因引起的。例如，仪表零位未调整好会引起恒值系统误差。系统误差可通过校验仪表，求得与该误差数值相等、符号相反的校正值，加到测量值上来消除。又如，仪表使用时的环境温度与校验时不同，并且是变化的，这就会引起变值系统误差。变值系统误差可以通过实验方法找出产生误差的原因及变化规律，改善测量条件来加以消除，也可通过计算或在仪表上附加补偿装置加以校正。

还有一些未定系统误差尚未被充分认识，因此，只能估计它的误差范围，在测量结果上标明。

3. 随机误差

在同一条件下（同一观测者、同一台测量器具、相同的环境条件等）多次测量同一被测量时，绝对值和符号不可预知地变化着的误差称为随机误差。这类误差对于单个测量值来说，误差的大小和正、负都是不确定的，但对于一系列重复测量值来说，误差的分布服从统计规律。因此，随机误差只有在不改变测量条件的情况下，对同一被测量进行多次测量才能

计算出来。

随机误差大多是由测量过程中大量彼此独立的微小因素对测量影响的综合结果造成的。这些因素通常是测量者所不知道的，或者因其变化过分微小而无法加以严格控制的，如气温和电源电压的微小波动，气流的微小改变等。

值得指出，随机误差与系统误差之间既有区别又有联系，二者并无绝对的界限，在一定条件下它们可以相互转化。随着测量条件的改善、认识水平的提高，一些过去视为随机误差的测量误差可能分离出来作为系统误差处理。

二、测量的精密度、正确度和准确度

上述三类误差都使测量结果偏离真值，通常用精密度、正确度和准确度来衡量测量结果与真值的接近程度。

1. 精密度

对同一被测量进行多次测量，测量的重复性程度称为精密度。精密度反映了测量值中的随机误差的大小。随机误差越小，测量值分布越密集，测量的精密度越高。

2. 正确度

对同一被测量进行多次测量，测量值偏离被测量真值的程度称为正确度。正确度反映了测量结果中系统误差的大小，系统误差越小，测量的正确度越高。

3. 准确度

精密度与正确度的综合称准确度，它反映了测量结果中系统误差和随机误差的综合数值，即测量结果与真值的一致程度。准确度也称为精确度。

对于同一被测量的多次测量，精密度高的准确度不一定高，正确度高的准确度也不一定高，只有精密度和正确度都高时，准确度才会高。图 2-1 说明了这三种情况。

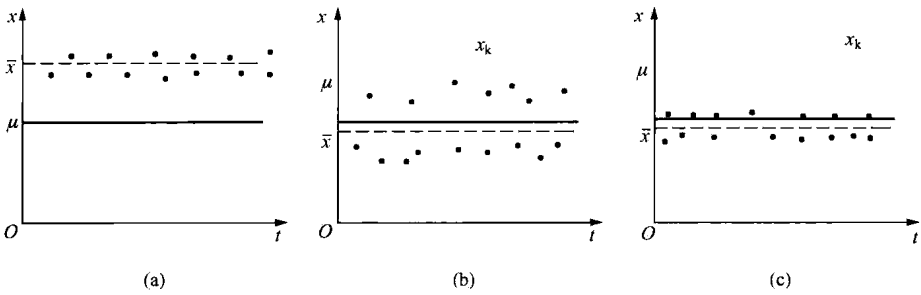


图 2-1 测量值及其误差图

(a) 精密度高；(b) 正确度高；(c) 准确度高

μ —被测量的真值； $\bar{x}$ —多次测量值的平均值；小黑点—各次测量值； x_k —应剔除的坏值； t —测量顺序

第二节 随机误差的分布规律

本节讨论随机误差，并假定在对粗大误差和系统误差讨论之前，所涉及到的测量值都只含有随机误差。

一、随机误差的正态分布规律

随机误差对单个测量值而言，其大小和正负都是随机的。在相同条件下，对同一被测量