

97

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

建筑环境测试技术

方修睦 主编
方修睦 姜永成 张建利 编
萧曰嵘 主审



A0967591

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑环境测试技术/方修睦主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2002

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

ISBN 7-112-04851-6

I. 建… II. 方… III. 建筑物—测试技术—高等学校—教材 IV. TU1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 042130 号

本书包括建筑环境与设备工程专业经常遇到的温度、压力、湿度、流速、流量、液位、气体成分、环境噪声、环境中放射性等参量的基本测量方法、测试仪表的原理及应用, 同时介绍了测量的基本知识、误差分析及智能仪表与自动测试系统。全书共分十三章。

本书系统性强, 取材新, 内容适用, 便于教学选用。

本书可作为建筑环境与设备工程专业教材, 也可供从事环境监测、供热通风空调、建筑给水排水、燃气供应等公共设施系统设计、制造、安装和运行人员参考。

高校建筑环境与设备工程学科专业指导委员会推荐教材

建筑环境测试技术

方修睦 主编

方修睦 姜永成 张建利 编

萧日嵘 主审

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 $\frac{1}{4}$ 字数: 417 千字

2002 年 7 月第一版 2002 年 7 月第一次印刷

印数: 1—3,500 册 定价: 27.40 元

ISBN 7-112-04851-6

TU·4328 (10330)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

“建筑环境测试技术”课程是面向建筑环境与设备工程专业本科生的一门技术基础课。它涉及供热通风空调、建筑给水排水、燃气供应等公共设施系统及建筑环境中的试验技术、计量技术及非电量电测技术等领域的知识，是设计、安装、运行管理及科学研究必不可少的重要手段。

为适应当前提出的拓宽专业口径、扩大学生知识面，调整学生知识结构的高等工程教育目标，本书在编写中注意融入现代新技术成果和应用经验，力求扩大本教材向读者提供的信息量。注意了从测量系统出发，介绍各类传感器及二次仪表，强调了对测试仪表的原理、选择、应用及标定方法的介绍。特别加强了以现代科技为特征的传感器技术及计算机技术的介绍。为方便教学，在教材的写法上，力求通过基本公式讲授基本原理，通过便于理解的原理示意图或简单实用的结构图讲授测量装置。

本书可作为高等工科院校建筑环境与设备工程专业本科的“建筑环境测试技术”课的教材，亦可供函授、夜大同类专业使用。

本书由哈尔滨工业大学方修睦（第七、八、九、十、十三章）、姜永成（第三、四、五、六、十一章）和张建利（第一、二、十二、十三章）编写。方修睦主编，清华大学萧日嵘教授主审。

由于时间仓促和编者水平有限，错误和不妥之处在所难免，敬请读者不吝指教，并提出建议，以期再版时质量有较大提高。

目 录

第一章 测量的基本知识	1
第一节 测量的基本概念	1
第二节 测量仪表	4
第三节 计量的基本概念	7
第二章 测量误差和数据处理	11
第一节 测量误差	11
第二节 测量误差的来源	15
第三节 误差的分类	16
第四节 随机误差分析	18
第五节 系统误差分析	24
第六节 误差的合成、间接测量的误差传递与分配	28
第七节 测量数据的处理	36
第三章 温度测量	41
第一节 温度测量概述	41
第二节 膨胀式温度计	47
第三节 热电偶测温	50
第四节 热电阻测温	63
第五节 非接触测温	70
第四章 湿度测量	78
第一节 湿度测量概述	78
第二节 干湿球与露点湿度检测	79
第三节 氯化锂电阻湿度传感器	82
第四节 高分子湿度传感器	84
第五节 金属氧化物陶瓷湿度传感器	86
第六节 金属氧化物膜湿度传感器	89
第七节 饱和盐溶液湿度校正装置	90
第五章 压力测量	92
第一节 概述	92
第二节 液柱式压力计	93
第三节 弹性压力计	96
第四节 电气式压力检测	99
第五节 压力检测仪器的选择与校验	102
第六章 物位测量	107

第一节	物位检测的主要方法和分类	107
第二节	静压式物位检测	108
第三节	浮力式物位检测	111
第四节	电气式物位检测	114
第五节	声学式物位检测	116
第六节	射线式物位检测	119
第七章	流速及流量测量	121
第一节	流速测量	121
第二节	流速测量仪表的标定	131
第三节	流量测量方法和分类	134
第四节	差压式流量测量方法及测量仪表	135
第五节	叶轮式流量计	147
第六节	电磁流量计	149
第七节	超声波流量计	151
第八节	涡街流量计	152
第九节	容积流量计	154
第十节	流量计的标定	157
第八章	热量测量	159
第一节	热流密度的测量	159
第二节	热量及冷量的测量	169
第三节	蒸汽热量的测量	172
第九章	气体成分分析	174
第一节	一氧化碳和二氧化碳的测量	174
第二节	二氧化硫的测量	178
第三节	氮氧化物的测量	181
第四节	氧量的测量	183
第五节	气体成分分析仪器的校准	189
第十章	其他参数的测量	194
第一节	环境噪声测量	194
第二节	环境放射性测量	199
第三节	水中含盐量的测定	201
第四节	水中含氧量的测定	203
第十一章	电动显示仪表	205
第一节	显示仪表的构成及基本原理	205
第二节	模拟式显示仪表	210
第三节	数字式显示仪表	216
第十二章	智能仪表与分布式自动测量系统	222
第一节	智能仪表	222
第二节	智能仪表的结构	223

第三节	智能仪表的典型功能	224
第四节	分布式自动测量系统	238
第十三章	测量方案设计	244
第一节	通风空调系统风量测量方案设计	244
第二节	建筑物热工性能测量方案设计	251
附录	259
附录 1	标准化热电偶分度表	259
附表 1	铂铑 30-铂铑 6 热电偶分度表	259
附表 2	铂铑 10-铂热电偶分度表	260
附表 3	铂铑 13-铂热电偶分度表	261
附表 4	镍铬-镍硅 (镍铬-镍铝) 热电偶分度表	262
附表 5	镍铬-康铜热电偶分度表	263
附表 6	铁-康铜热电偶分度表	264
附表 7	铜-康铜热电偶分度表	265
附录 2	标准化热电阻分度表	266
附表 8	公称电阻值为 10 Ω 的铂热电阻分度表	266
附表 9	公称电阻值为 100 Ω 的铂热电阻分度表	266
附表 10	铜热电阻分度表 (Cu100)	267
附表 11	铜热电阻分度表 (Cu50)	267
参考文献	268

第一章 测量的基本知识

第一节 测量的基本概念

人们通过对客观事物大量的观察和测量，形成了定性和定量的认识，通过归纳、整理建立起了各种定理和定律，而后又要通过测量来验证这些认识、定理和定律是否符合实际情况，经过如此反复实践，逐步认识事物的客观规律，并用以解释和改造世界。因此可以说，测量是人认识和改造世界的一种不可缺少和替代的手段。俄国科学家门捷列夫在论述测量的意义时曾说过：“没有测量，就没有科学”，“测量是认识自然界的主要工具”。英国科学家库克也认为：“测量是技术生命的神经系统”。这些话都极为精辟地阐明了测量的重要意义。历史事实也已证明：科学的进步，生产的发展，与测量理论、技术、手段的发展和进步是相互依赖、相互促进的。测量技术水平是一个历史时期、一个国家的科学技术水平的一面“镜子”。正如特尔曼（F.E.Telmen）教授所说：“科学和技术的发展是与测量技艺并行进步相互匹配的。事实上，可以说，评价一个国家的科技状态，最快捷的办法就是审视那里所进行的测量以及由测量所累积的数据是如何被利用的。”

一、测量

测量是运用专门的工具，根据物理、化学、生物等原理，通过实验和计算找到被测量的量值。测量的目的就是尽可能准确及时地收集被测对象的状态信息，以便对生产过程进行正确的控制。例如用压力传感器测量供暖管道的压力；用温度传感器测量恒温室的温度等。

测量是以同性质的标准量与被测量比较，并确定被测量相对标准量的倍数（标准量应该是国际上或国家所公认的和性能稳定的）。

测量的定义也可用公式来表示：

$$L = X/U \quad (1-1)$$

式中 X ——被测量；

U ——标准量（测量单位）；

L ——比值，又称测量值。

由式（1-1）可见 L 的大小随选用的标准量的大小而定。为了正确反映测量结果，常需在测量值的后面标明标准量 U 的单位。例如长度的被测量为 X ，标准量 U 的单位采用国际单位制——米，测量的读数为 L （米）。

测量过程中的关键在于被测量和标准量的比较。有些被测量与标准量是能直接进行比较而得到被测量的量值，例如用天平测量物体的重量。但被测量和标准量能直接比较的情况并不多。大多数被测量和标准量都需要变换到双方都便于比较的某一个中间量，才能进行比较，例如用水银温度计测量水温时，水温被变换成玻璃管内水银柱的高度，而温度的标准量被变换为玻璃管上刻度，两者的比较被变换成为玻璃管内水银柱的高度的比较。这

种变换并不是惟一的，例如用热电阻测量水温时，水温被变换成电阻值，而温度的标准量被变换为电阻的刻度值，温度的比较变换成电阻值的比较。

通过变换可以实现测量，变换也是实现测量的核心，一个新的变换对应着一个新的测量元件、一个新的测量方法的产生。

二、测量方法

一个物理量的测量，可以通过不同的方法实现。测量方法的选择正确与否，直接关系到测量结果的可信赖程度，也关系到测量工作的经济性和可行性。不当或错误的测量方法，除了得不到正确的测量结果外，甚至会损坏测量仪器和被测量设备。有了先进精密的测量仪器设备，并不等于就一定能获得准确的测量结果。必须根据不同的测量对象、测量要求及测量条件，选择正确的测量方法、合适的测量仪器及构造测量系统，进行正确操作，才能得到理想的测量结果。

测量方法的分类形式有多种，下面介绍几种常见的分类方法。

(一) 按测量手段分类

1. 直接测量

它是指直接从测量仪表的读数获取被测量量值的方法，比如用压力表测量管道水压，用欧姆表测量电阻阻值等。直接测量的特点是不需要对被测量与其他实测的量进行函数关系的辅助运算，因此测量过程简单迅速，是工程测量中广泛应用的测量方法。

2. 间接测量

它是利用直接测量的量与被测量之间的函数关系（可以是公式、曲线或表格等）间接得到被测量的量值的测量方法。例如需要测量电阻 R 上消耗的直流功率 P ，可以通过直接测量电压 U ，电流 I ，而后根据函数关系 $P = UI$ ，经过计算，间接获得功率 P 。

间接测量费时费事，常在下列情况下使用：直接测量不方便，或间接测量的结果较直接测量更为准确，或缺少直接测量仪器等。

3. 组合测量

当某项测量结果需用多个未知参数表达时，可通过改变测量条件进行多次测量，根据测量量与未知参数间的函数关系列出方程组并求解，进而得到未知量，这种测量方法称为组合测量。一个典型的例子是电阻器电阻温度系数的测量。已知电阻器阻值 R_t 与温度 t 间满足关系

$$R_t = R_{20} + \alpha (t - 20) + \beta (t - 20)^2 \quad (1-2)$$

式中的 R_{20} 为 $t = 20^\circ\text{C}$ 时的电阻值，一般为已知量。 α 、 β 称为电阻的温度系数， t 为环境温度。为了获得 α 、 β 值，可以在两个不同的温度 t_1 、 t_2 下（ t_1 、 t_2 可由温度计直接测得）测得相应的两个电阻值 R_{t_1} 、 R_{t_2} ，代入式 (1-2) 得到联立方程：

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_{20} + \alpha (t_1 - 20) + \beta (t_1 - 20)^2 \\ R_{t_2} = R_{20} + \alpha (t_2 - 20) + \beta (t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1-3)$$

求解联立方程 (1-3)，就可以得到值 α 、 β 。如果 R_{20} 未知，显然可在三个不同的温度下，分别测得 R_{t_1} 、 R_{t_2} 、 R_{t_3} ，列出由三个方程构成的方程组并求解，进而得到 R_{20} 、 α 、 β 。

(二) 按测量方式分类

1. 偏差式测量法

在测量过程中，用仪器仪表指针的位移（偏差）表示被测量大小的测量方法，称为偏差式测量法。例如使用万用表测量电压，使用水银温度计测量温度等。由于是从仪表刻度上直接读取被测量，包括大小和单位，因此这种方法也叫直读法。用这种方法测量时，作为计量标准的实物并不装在仪表内直接参与测量，而是事先用标准量具对仪表读数，刻度进行校准，实际测量时根据指针偏转大小确定被测量量值。

这种方法的显著优点是简单方便，在工程测量中被广泛采用。

2. 零位式测量法

零位式测量法又称作零示法或平衡式测量法。测量时用被测量与标准量相比较（因此也把这种方法叫做比较测量法），用指零仪表（零示器）指示被测量与标准量相等（平衡），从而获得被测量。利用惠斯登电桥测量电阻是这种方法的一个典型例子，见图 1-1。

当电桥平衡时，可以得到

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 \quad (1-4)$$

通常是先大致调整比率 R_1/R_2 ，再调整标准电阻 R_4 ，直至电桥平衡，充当零示器的检流计 PA 指示为零，此时即可根据式 (1-4) 由比率和 R_4 得到被测电阻 R_x 值。

只要零示器的灵敏度足够高，零位式测量法的测量准确度几乎等于标准量的准确度，因而测量准确度很高，这是它的主要优点，常应用在实验室作为精密测量的一种方法。但由于测量过程中为了获得平衡状态，需要进行反复调节，即使采用一些自动平衡技术，测量速度仍然较慢，这是这种方法的一个不足。

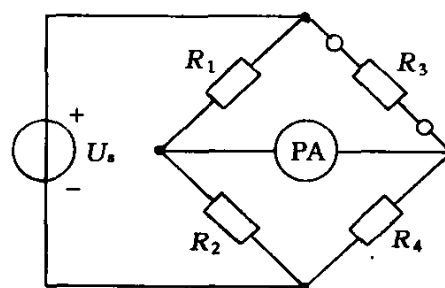


图 1-1 惠斯登电桥测量电阻示意图

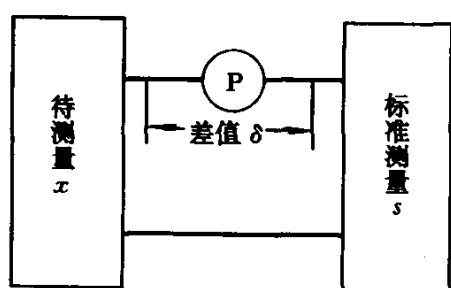


图 1-2 微差式测量法示意图

3. 微差式测量法

偏差式测量法和零位式测量法相结合，构成微差式测量法。它通过测量待测量与标准量之差（通常该差值很小）来得到待测量量值，见图 1-2。

图中 \textcircled{P} 为量程不大，但灵敏度很高的偏差式仪表，它指示的是待测量 x 与标准测量 s 之间的差值： $\delta = x - s$ ，即 $x = s + \delta$ 。可以证明，只要 δ 足够小，这种方法的测量准确度基本上取决于标准量的准确度。而和零位式测量法相比，它又可以省去反复调节标准量大小以求平衡的步骤。因此，它兼有偏差式测量法的测量速度快和零位式测量法测量准确度高的优点。微差式测量法除在实验室中用作精密测量外，还广泛地应用在生产过程参数的测量上。

除了上述几种常见的分类方法外，还有其他一些分类方法。比如，按照对测量精度的要求，可以分为精密测量和工程测量；按照测量时测量者对测量过程的干预程度分为自动测量和非自动测量；按照被测量与测量结果获取地点的关系分为本地（原位）测量和远地测量（遥测），接触测量和非接触测量；按照被测量的属性分为电量测量和非电量测量等等。

三、测量方法的选择原则

在选择测量方法时，要综合考虑下列主要因素：（1）被测量本身的特性；（2）所要求

的测量准确度；(3) 测量环境；(4) 现有测量设备等。在此基础上，选择合适的测量仪器和正确的测量方法。正确可靠的测量结果的获得，要依据测量方法和测量仪器的正确选择、正确操作和测量数据的正确处理。否则，即便使用价值昂贵的精密仪器设备，也不一定能够得到准确的结果，甚至可能损坏测量仪器和被测设备。

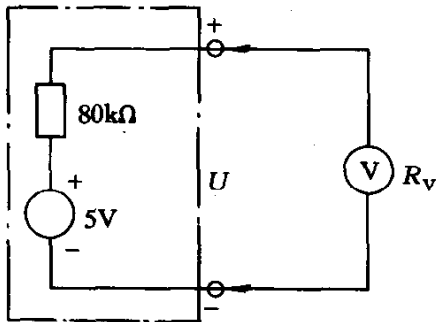


图 1-3 电压表内阻的影响

【例 1】 图 1-3 表示的是用电压表测量高内阻电路端电压的例子。不难看到，电压表内阻的大小将直接影响到测量结果，这种影响通常叫做电压表的负载效应。图中虚线框内表示放大器输出端等效电路， R_V 表示测量用电压表内阻。忽略其他因素，不难算出：当用内阻 $R_V = 10\text{M}\Omega$ 的数字电压表测量时，电压为

$$U = 5 \times \frac{10 \times 10^3}{80 + 10 \times 10^3} = 4.96\text{V}$$

$$\text{相对误差 } \gamma = \frac{4.96 - 5}{5} \times 100\% = -0.8\%$$

而改用内阻 $R_V = 120\text{k}\Omega$ 的万用表电压档测量时，电压为

$$U = 5 \times \frac{120}{80 + 120} = 3\text{V}$$

$$\text{相对误差 } \gamma = \frac{3 - 5}{5} \times 100\% = -40\%$$

可见，这种情况下应选用内阻尽可能大的电压表，否则造成的仪器误差是很大的。有时测量仪表负载效应的存在，会过大地改变被测电路的工作状态，此时的测量结果将失去实际意义。

不应认为，只有使用精密的测量仪器，才能获得准确的测量结果。实际上，有时选择一种好的正确的测量方法，即便使用极为普通的设备，也同样可以得到相当令人满意的测量结果。在设计采用热电阻作为敏感元件的温度测量仪表中，对上述问题要特别加以注意。

第二节 测量仪表

测量仪表是将被测测量转换成可供直接观察的指示值或等效信息的器具，包括各类指示仪器、比较仪器、记录仪器、传感器和变送器等。利用电子技术对各种待测量进行测量的设备，统称为电子测量仪表。为了正确地选择测量方法、测量仪表及评价测量结果，本节将对测量仪表的一般情况，包括它的组成、主要功能、主要性能指标和分类做一些概括介绍。

一、测量仪表的类型

测量仪表有模拟式与数字式两大类。所谓模拟式测量仪表是对连续变化的被测物理量（模拟量）直接进行连续测量、显示或记录的仪表，例如玻璃水银温度计、电子式热电阻温度测量记录仪等，模拟式测量仪表仍在被广泛应用。数字式测量仪表是将被测的模拟量首先转换成数字量再对数字量进行测量的仪表。它将被测的连续的物理量通过各种传感器和变送器转换成直流电压或频率信号后，再进行量化处理变成数字量，然后再进行对数字

量的处理（编码、传输、显示、存储及打印）。相对于模拟式测量仪表，数字式测量仪表具有测量精度高、测量速度快、读数客观、易于实现自动化测量及与计算机连接等优点，由此可见，数字式测量仪表具有广泛的应用领域及发展前景。

二、测量仪表的功能

各类测量仪表一般具有物理量的变换、信号的传输和测量结果的显示等三种最基本的功能。

1. 变换功能

对于电压、电流等电学量的测量，是通过测量各种电效应来达到目的的。比如作为模拟式仪表最基本构成单元的动圈式检流计（电流表），就是将流过线圈的电流强度，转化成与之成正比的扭矩而使仪表指针偏转初始位置一个角度。根据角度偏转大小（这可通过刻度盘上的刻度获得）得到被测电流的大小，这就是一种很基本的变换功能。对非电量测量，更须将各种非电物理量如压力、温度、湿度、物质成分等，通过各种对之敏感的敏感元件（通常称为传感器），转换成与之相关的电压、电流等，而后再通过对电压、电流的测量，得到被测物理量的大小。随着测量技术的发展和需要，现在往往将传感器、放大电路及其他有关部分构成独立的单元电路，将被测量转换成模拟的或数字的标准电信号，送往测量和处理装置，这样的单元电路常称为变送器，它是现代测量系统中极为重要的组成部分。

2. 传输功能

在遥测遥控等系统中，现场测量结果经变送器处理后，需经较长距离的传输才能送到测量中心控制室。不管采用有线的还是无线的方式，传输过程中造成的信号失真和外干扰等问题都会存在。因此，现代测量技术和测量仪表必须认真对待测量信息的传输问题。

3. 显示功能

测量结果必须以某种方式显示出来才有意义。因此，任何测量仪器都必须具备显示功能。比如模拟式仪表通过指针在仪表刻度盘上的位置显示测量结果，数字式仪表通过数码管、液晶或阴极射线管显示测量结果。除此而外，一些先进的仪表，如智能仪表等还具有数据记录、处理及自检、自校、报警提示等功能。

三、测量仪表的主要性能指标

从获得的测量结果角度评价测量仪表的性能，主要包括以下几个方面。

1. 精度

精度是指测量仪表的读数或测量结果与被测量真值相一致的程度。对精度目前还没有一个公认的定量的数学表达式，因此常作为一个笼统的概念来使用，其含义是：精度高，表明误差小；精度低，表明误差大。因此，精度不仅用来评价测量仪器的性能，也是评定测量结果最主要最基本的指标。精度又可用精密度、正确度和准确度三个指标加以表征。

(1) 精密度 (δ)

精密度说明仪表指示值的分散性，表示在同一测量条件下对同一被测量进行多次测量时，得到的测量结果的分散程度。它反映了随机误差的影响。精密度高，意味着随机误差小，测量结果的重复性好。比如某压力表的精密度为 0.001MPa，即表示用它对同一压力进行测量时，得到的各次测量值的分散程度不大于 0.001MPa。

(2) 正确度 (ϵ)

正确度说明仪表指示值与真值的接近程度。所谓真值是指待测量在特定状态下所具有的真实值的大小。正确度反映了系统误差（例如仪表中放大器的零点漂移等）的影响。正确度高则说明系统误差小。

(3) 准确度 (τ)

准确度是精密度和正确度的综合反映。准确度高，说明精密度和正确度都高，也就意味着系统误差和随机误差都小，因而最终测量结果的可信赖度也高。

在具体的测量实践中，可能会有这样的情况：正确度较高而精密度较低，或者情况相反，相当精密但欠正确。当然理想的情况是既正确，又精密，即测量结果准确度高。要获得理想的结果，应满足三个方面的条件：即性能优良的测量仪表、正确的测量方法和正确细心的测量操作。为了加深对精密度、正确度和准确度三个概念的理解，可以以射击打靶为例加以比喻。如图 1-4 中，以靶心比做被测量真值，以靶上的弹着点表示测量结果。其中图 (a) 弹着点分散而偏斜，对应测量中既不精密，也不正确，即准确度很低。图 (b) 弹着点仍较分散，但总体而言大致都围绕靶心，属于正确而欠精密。图 (c) 弹着点密集但明显偏向一方，属于精密度高而正确度差。图 (d) 弹着点相互很接近且都围绕靶心，属于既精密又正确因而准确度很高的情况。

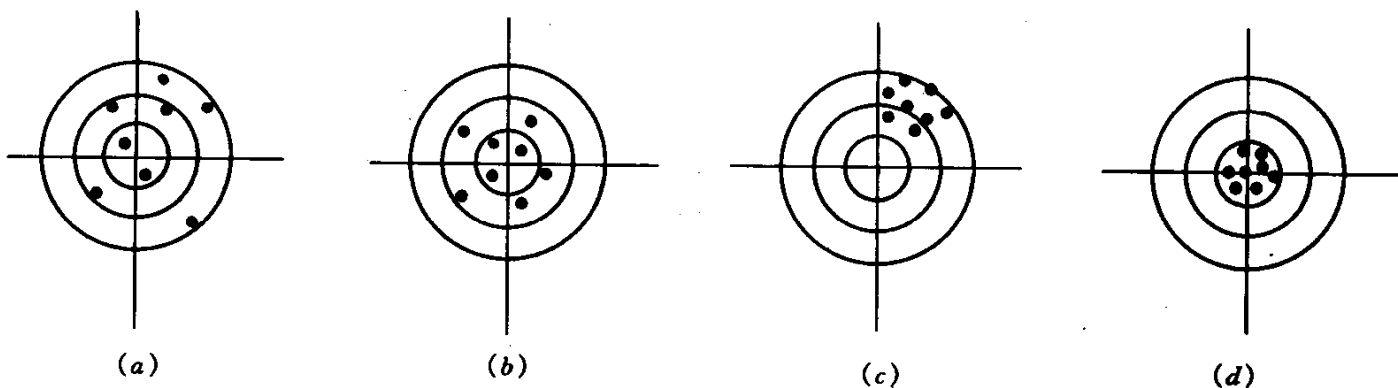


图 1-4 用射击比喻测量

2. 稳定性

稳定度也称稳定误差，是指在规定的时间内、区间和其他外界条件恒定不变的情况下，仪表示值变化的大小。造成这种示值变化的原因主要是仪器内部各元器件的特性、参数不稳定和老化等因素。稳定度可用示值绝对变化量与时间一起表示。例如某数字温度表的稳定度为 $(0.008\% T_m + 0.003 T_x) / (8h)$ ，其含义是在 8 小时内，测量同一温度，在外界条件维持不变的情况下，温度表的示值可能在 $0.008\% T_m + 0.003 T_x$ 的上下波动，其中 T_m 为该量程满度值， T_x 为示值。

3. 输入电阻

前面曾提到测量仪表的输入电阻对测量结果的影响。像电压表等类仪表，测量时并接于待测电路两端，见图 1-3。不难看出，测量仪表的接入改变了被测电路的阻抗特性，这种现象称为负载效应。为了减小测量仪表对待测电路的影响，提高测量精度，通常对这类测量仪表的输入阻抗都有一定要求。仪表的输入阻抗一般用输入电阻 R_i 表示。例如用于测量温度（四线制热电阻法）的电压表输入阻抗为 $R_i = 10M\Omega$ 。

4. 灵敏度

灵敏度表示测量仪表对被测量变化的敏感程度，一般定义为测量仪表指示值（指针的

偏转角度、数码的变化等) 增量 Δy 与被测量增量 Δx 之比。灵敏度的另一种表述方式叫作分辨力或分辨率, 定义为测量仪表所能区分的被测量的最小变化量, 在数字式仪表中经常使用。例如数字式温度表的分辨力为 0.1°C , 表示该数字式温度表上最末位跳变 1 个字时, 对应的温度变化量为 0.1°C , 即这种数字式温度表能区分出最小为 0.1°C 温度变化。可见, 分辨力的值愈小, 其灵敏度愈高。由于各种干扰和人的感觉器官的分辨能力等因素, 不必也不应该苛求仪器有过高的灵敏度。否则, 将导致测量仪器过高的成本以及实际测量操作的困难, 通常规定分辨力为允许绝对误差的 $1/3$ 即可。

5. 线性度

线性度是测量仪表输入输出特性之一, 表示仪表的输出量 (示值) 随输入量 (被测量) 变化的规律。若仪表的输出为 y , 输入为 x , 两者关系用函数 $y=f(x)$ 表示, 如果 $y=f(x)$ 为 $y-x$ 平面上过原点的直线, 则称之为线性刻度特性, 否则称为非线性刻度特性。

6. 动态特性

测量仪表的动态特性表示仪表的输出响应随输入变化的能力。例如模拟电压表由于动圈式表头指针惯性、轴承摩擦、空气阻尼等因素的作用, 使得仪表的指针不能瞬间稳定在固定值上。

最后指出, 上述测量仪表的几个特性, 是就一般而论, 并非所有仪表都用上述特性加以考核。

第三节 计量的基本概念

一、计量

计量和测量是互有联系又有区别的两个概念。测量是通过实验手段对客观事物取得定量信息的过程, 也就是利用实验手段把待测量直接或间接地与另一个同类已知量进行比较, 从而得到待测量值的过程。测量过程中所使用的器具和仪器就直接或间接地体现了已知量。测量结果的准确与否, 与所采用的测量方法、实际操作和作为比较标准的已知量的准确程度都有着密切的关系。因此, 体现已知量在测量过程中作为比较标准的各类量具、仪器仪表, 必须定期进行检验和校准, 以保证测量结果的准确性、可靠性和统一性, 这个过程, 称为计量。计量的定义不统一, 目前较为一致的意见是: “计量是利用技术和法制手段实现单位统一和量值准确可靠的测量。” 计量可看做测量的特殊形式, 在计量过程中, 认为所使用的量具和仪器是标准的, 用它们来校准、检定受检量具和仪器设备, 以衡量和保证使用受检量具仪器进行测量时所获得测量结果的可靠性。因此, 计量又是测量的基础和依据。计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作, 在工农业生产、科学技术、国防建设、国内外贸易以及人民生活等各个方面起着技术保证和技术监督作用。我国国防科技战线的卓越领导人聂荣臻元帅生前指出: “科技要发展, 计量要先行”。《中华人民共和国计量法》第一条就指出, 做好计量工作 “有利于生产、贸易和科学技术的发展, 适应社会主义现代化建设的需要, 维护国家、人民的利益”, 这些都深刻说明了计量工作的重要意义。

计量学是研究测量、保证测量统一和准确的科学, 它研究的主要内容包括: 计量和测

量的方法、技术、量具及仪器设备等一般理论；计量单位的定义和转换；量值的传递和保证量值统一所必须采取的措施、规程和法制等。

二、单位制

任何测量都要有一个统一的体现计量单位的量作为标准，这样的量称作计量标准。计量单位是有明确定义和名称并令其数值为1的固定的量，例如长度单位1米(m)，时间单位1秒(s)等。计量单位必须以严格的科学理论为依据进行定义。法定计量单位是国家以法令形式规定使用的计量单位，是统一计量单位制和单位量值的依据和基础，因而具有统一性、权威性和法制性。1984年2月27日国务院在发布《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》时指出：我国的计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》。我国法定计量单位以国际单位制(SI)为基础，并包括10个我国国家选定的非国际单位制单位，如时间(分、时、天)，平面角(秒、分、度)，长度(海里)，质量(吨)和体积(升)等。在国际单位制中，分为基本单位、导出单位和辅助单位。基本单位是那些可以彼此独立地加以规定的物理量单位，共7个，分别是长度单位米(m)，时间单位秒(s)，质量单位千克(kg)，电流单位安培(A)，热力学温度单位开尔文(K)，发光强度单位坎德拉(cd)和物质单位摩尔(mol)。由基本单位通过定义、定律及其他函数关系派生出来的单位称为导出单位，例如力的单位牛顿(N)定义为“使质量为1千克的物体产生加速度为1米每秒2次方的力”，即 $N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。在电学量中，除电流外，其他物理量的单位都是导出单位，如，频率的单位为赫兹(Hz)，定义为“周期为1秒的周期现象的频率”，即 $\text{Hz} = 1/\text{s}$ ；能量(功)的单位焦耳(J)定义为“1牛顿的力使作用点在力的方向上移动1米所做的功”，即 $J = \text{N} \cdot \text{m}$ ；功率的单位瓦(W)定义为“1秒内产生1焦耳能量的功率”，即 $W = \text{J}/\text{s}$ ；电荷量库仑(C)定义为“1安培的电流在1秒内所传送的电荷量”，即 $C = \text{A} \cdot \text{s}$ ；电位电压的单位伏特(V)定义为“在载有1安培恒定电流导线的两点间消耗1瓦的功率”，即 $V = W/\text{A}$ ；电阻的单位欧姆(Ω)定义为“导体两点间的电阻，当该两点间加上1伏恒定电压时，导体内产生1安培的电流”，即 $\Omega = V/\text{A}$ ，等等。国际上把既可作为基本单位又可作为导出电位的单位，单独列为一类叫做辅助单位。国际单位制中包括两个辅助单位，分别是平面角的单位弧度(rad)和立体角的单位球面角(sr)。

由基本单位、辅助单位和导出单位构成的完整体系，称为单位制。单位制随基本单位的选择而不同。例如，在确定厘米、克、秒为基本单位后，速度单位为厘米每秒(cm/s)；密度单位为克每立方厘米(g/cm^3)；力的单位为达因(dyn)等构成一个体系，称为厘米克秒制。而国际单位制就是由前面列举的7个基本单位、2个辅助单位及19个具有专门名称的导出单位构成的一种单位制，国际上规定以拉丁字母SI作为国际单位制的简称。

三、计量基准

基准是指用当代最先进的科学技术和工艺水平，以最高的准确度和稳定性建立起来的专门用以规定、保持和复现物理量计量单位的特殊量具或仪器装置等。根据基准的地位、性质和用途，基准通常又分为主基准、副基准和工作基准，也分别称作一级、二级和三级基准。

1. 主基准

主基准也称作原始基准，是用来复现和保存计量单位，具有现代科学技术所能达到的

最高准确度的计量器具，经国家鉴定批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据。因此主基准也叫国家基准。

2. 副基准

通过直接或间接与国家基准比对，确定其量值并经国家鉴定批准的计量器具。它在全国作为复现计量单位的副基准，其地位仅次于国家基准，平时用来代替国家基准使用或验证国家基准的变化。

3. 工作基准

经与主基准或副基准校准或比对，并经国家鉴定批准，实际用以检定下属计量标准的计量器具。它在全国作为复现计量单位的地位仅在主基准和副基准之下。设置工作基准的目的是不使主基准或副基准因频繁使用而丧失原有的准确度。

应当了解，基准本身并不一定刚好等于一个计量单位。例如铯-133 原子频率基准所复现的时间值不是 1s，而是 $(919\,261\,770)^{-1}\text{s}$ ，氪 86 长度基准复现的长度值不是 1m，而是 $(1\,650\,763.73)^{-1}\text{m}$ ，标准电池复现的电压值是 1.0186V，不是 1V 等。

四、量值的传递与跟踪，检定与比对

首先介绍几个相关的概念。

1. 计量器具

复现量值或将被测量转换成可直接观测的指示值或等效信息的量具、仪器、装置。

2. 计量标准器具

准确度低于计量基准，用于检定计量标准或工作计量器具的计量器具。它可按其准确度等级分类，如 1 级、2 级、3 级、4 级、5 级标准砝码。标准器具按其法律地位可分为三类：(1) 社会公用计量标准指县级以上地方政府计量部门建立的，作为统一本地区量值的依据，并对社会实施计量监督具有公证作用的各项计量标准。(2) 部门使用的计量标准是省级以上政府有关主管部门组织建立的统一本部门量值依据的各项计量标准。(3) 企事业单位使用的计量标准是企业、事业单位组织建立的作为本单位量值依据的各项计量标准。

3. 工作计量器具

工作岗位上使用，不用于进行量值传递而是直接用来测量被测对象量值的计量器具。

4. 比对

在规定条件下，对相同准确度等级的同类基准、标准或工作计量器具之间的量值进行比较，其目的是考核量值的一致性。

5. 检定

是用高一等级准确度的计量器具对低一等级的计量器具进行比较，以达到全面评定被检计量器具的计量性能是否合格的目的。一般要求计量标准的准确度为被检者的 1/3 到 1/10。

6. 校准

校准是指被校的计量器具与高一等级的计量标准相比较，以确定被校计量器具的示值误差（有时也包括确定被校器具的其他计量性能）的全部工作。一般而言，检定要比校准包括更广泛的内容。

7. 量值的传递与跟踪

指的是把一个物理量单位通过各级基准、标准及相应的辅助手段准确地传递到日常工

作中所使用的测量仪器、量具，以保证量值统一的全过程。

如前所述，测量就是利用实验手段，借助各种测量仪器量具（它们作为和未知量比较的标准），获得未知量量值的过程。显然，为了保证测量结果的统一、准确、可靠，必须要求作为比较标准的准确、统一、可靠。因此，测量仪器量具在制造完毕时，必须按规定等级的标准（工作标准）进行校准，该标准又要定期地用更高等级的标准进行检定，一直到国家级工作基准，如此逐级进行。同样，测量仪器量具在使用过程中也要按法定规程（包括检定方法，检定设备，检定步骤，以及对受检仪器量具给出误差的方式等），定期由上级计量部门进行检定，并发给检定合格证书。没有合格证书或证书失效（比如超过有效期）者，该仪器的精度指标及测量结果只能作为参考。检定、比对和校准是各级计量部门的重要业务活动，主要是通过这些业务活动和国家有关法令、法规的执行，将全国各地、各部门、各行业、各单位都纳入法律规定的完整计量体系中，从而保证现代社会中的生产、科研、贸易、日常生活等各个环节的顺利运行和健康发展。

第二章 测量误差和数据处理

第一节 测量误差

在实际测量中，由于测量器具不准确，测量手段不完善，环境影响，测量操作不熟练及工作疏忽等因素，都会导致测量结果与被测量真值不同。测量仪器仪表的测得值与被测量真值之间的差异，称为测量误差。测量误差的存在具有必然性和普遍性，人们只能根据需要和可能，将其限制在一定范围内而不可能完全加以消除。人们进行测量的目的，通常是为了获得尽可能接近真值的测量结果，如果测量误差超出一定限度，测量工作及由测量结果所得出的结论就失去了意义。在科学研究及现代生产中，错误的测量结果有时还会使研究工作误入歧途甚至带来灾难性后果。因此，人们不得不认真对待测量误差，研究误差产生的原因，误差的性质，减小误差的方法以及对测量结果的处理等。

一、误差

1. 真值 A_0

一个物理量在一定条件下所呈现的客观大小或真实数值称作它的真值。要想得到真值，必须利用理想的量具或测量仪器进行无误差的测量。由此可推断，物理量的真值实际上是无法测得的。这首先因为，“理想”量具或测量仪器即测量过程的参考比较标准（或叫计量标准）只是一个纯理论值，其次，在测量过程中由于各种主观、客观因素的影响，做到无误差的测量也是不可能的。

2. 指定值 A_s

由于绝对真值是不可知的，所以一般由国家设立各种尽可能维持不变的实物标准（或基准），以法令的形式指定其所体现的量值作为计量单位的指定值。例如指定国家计量局保存的铂铱合金圆柱体质量原器的质量为 1kg，指定国家天文台保存的铯钟组所产生的特定条件下铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间为 1s（秒）等。国际间通过互相对比保持一定程度的一致。指定值也叫约定真值，一般就用来代替真值。

3. 实际值 A

实际测量中，不可能都直接与国家基准相对比，所以国家通过一系列的各级实物计量标准构成量值传递网，把国家基准所体现的计量单位逐级比较传递到日常工作仪器或量具上去。在每一级的比较中，都以上一级标准所体现的值当作准确无误的值，通常称为实际值，也叫做相对真值，比如如果更高一级测量器具的误差为本级测量器具误差的 1/3 到 1/10，就可以认为更高一级测量器具的测得值（示值）为真值。在后面的叙述中，不再对实际值和真值加以区别。

4. 标称值

测量器具上标定的数值称为标称值。如标准砝码上标出的 1kg，标准电阻上标出的