

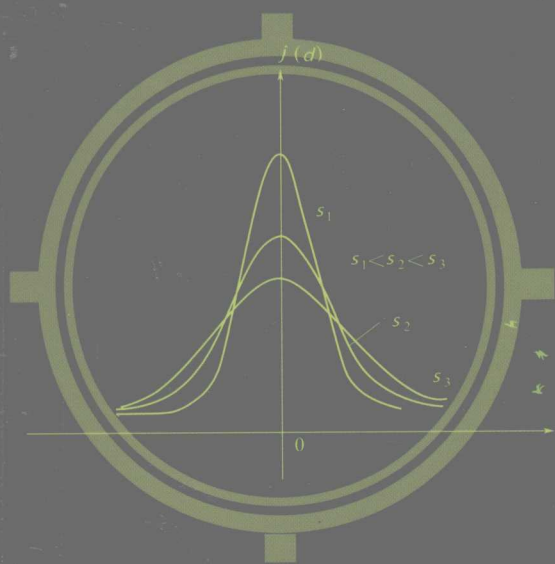


高等院校建筑环境与设备工程专业

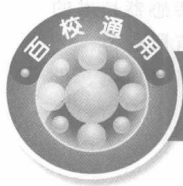
规划教材 >>>>

JIANZHU HUANJING CESHI JISHU  
**建筑环境测试技术**

董惠 邹高万 编 方修睦 审



化学工业出版社



高等院校建筑环境与设备工程专业

规划教材 >>>>

JIANZHU HUANJING CESHI JISHU  
**建筑环境测试技术**

董惠 邹高万 编 方修睦 审



化学工业出版社

·北京·

本书在介绍测量基本知识的基础上,详细介绍了温度、湿度、压力、流速、流量、热量等热工参数的基本测量方法、测试仪表的工作原理及应用,同时对建筑环境所特有气体成分测量也做了较为细致的叙述。在编写中注意融入新技术的应用,较多地反映了传感器技术的先进成果。全书共10章,按40学时编写,在使用时可根据各自的教学需要,有所取舍。

本书可作为建筑环境与设备工程和热能动力工程的专业教材,也可供从事环境监测、供热通风空调、能源利用与自动化等相关专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

建筑环境测试技术/董惠,邹高万编.—北京:化学工业出版社,2009.8

高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材  
ISBN 978-7-122-06029-7

I. 建… II. ①董…②邹… III. 建筑物-环境管理-测试技术-高等学校-教材 IV. TU-856

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第102267号

---

责任编辑:陶艳玲  
责任校对:陶燕华

文字编辑:郑直  
装帧设计:尹琳琳

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京市彩桥印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张11 $\frac{3}{4}$  字数292千字 2009年9月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:24.00元

版权所有 违者必究

高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材

## 编审委员会名单

(姓氏笔画排序)

顾 问：	马最良	傅忠诚				
主 任：	李永安					
副主任：	李念平	陈振乾				
委 员：	丁云飞	马良涛	王 瑛	王智伟	方修睦	卢 军
	冉春雨	付祥钊	白 莉	丛晓春	刘冬华	刘伟军
	刘建龙	刘艳华	苏 成	李九如	李小华	李永安
	李百战	李念平	杨晚生	连之伟	张永泉	张吉光
	张国强	张增凤	陈振乾	周孝清	郑万兵	孟庆林
	侯根富	徐正坦	曹子栋	符永正	彭世尼	董 惠
	解国珍	廉乐明	谭羽非			

# 前 言

“建筑环境测试技术”是建筑环境与设备工程专业的一门技术基础课。其内容大体可分为两大类，一是传统意义上的热工参数测量，二是建筑环境所特有的参数测量（如空气质量参数等）。随着社会发展和生活水平的提高，人们对建筑环境的要求也越来越高，测试技术作为改善建筑环境、实现建筑设备系统优化的技术基础，在建筑环境与设备工程中得到空前的应用，原有的传统测试手段必须要全面拓展，同时需要引入新的测试技术。

本书在介绍测量基本知识的基础上，详细介绍了温度、湿度、压力、流速、流量、热量等热工参数的基本测量方法、测试仪表的工作原理及应用，同时对建筑环境所特有的气体成分测量也做了较为细致的叙述。在编写中注意融入新技术的应用，较多地反映了传感器技术的先进成果。

本书可作为建筑环境与设备工程和热能动力工程的专业教材，也可供从事环境监测、供热通风空调、能源利用与自动化等相关专业技术人员参考。全书共 10 章，按 40 学时编写，在使用时可根据各自的教学需要，有所取舍。

本书由哈尔滨工程大学董惠（第 1、3、5、7、9 章）、邹高万（第 2、4、6、8、10 章）编写。由董惠教授担任主编，负责全书统稿工作，哈尔滨工业大学方修睦教授审阅全稿，并提出了许多宝贵的建议和意见，对此深表谢意。

在编写本书过程中，参考了很多兄弟院校主编的教材，在此一并致谢。

限于编者学识有限，不妥之处恳请读者给予批评指正。

编者

2009 年 2 月

于哈尔滨工程大学

# 目 录

<b>第 1 章 测量的基本知识</b> .....	1	3.2.3 常用热电偶的材料、结构	29
1.1 测量概述 .....	1	3.2.4 热电偶的冷端补偿	32
1.1.1 测量的概念 .....	1	3.3 膨胀式温度计	34
1.1.2 测量方法 .....	2	3.3.1 固体膨胀式温度计	35
1.2 测量仪表 .....	3	3.3.2 液体膨胀式温度计	35
1.2.1 测量仪表的组成 .....	3	3.3.3 压力式温度计	37
1.2.2 测量仪表的主要性能指标 .....	4	3.4 电阻式温度计	37
1.3 测量误差与测量精度 .....	6	3.4.1 电阻式温度计原理	37
1.3.1 测量误差的概念 .....	6	3.4.2 常用热电阻元件	38
1.3.2 测量误差的分类 .....	6	3.4.3 热电阻测温元件的结构	40
1.3.3 测量精度 .....	7	3.5 测温显示仪表	41
<b>第 2 章 测量误差和数据处理</b> .....	9	3.5.1 配接热电偶的测温显示仪表	41
2.1 误差的基本知识 .....	9	3.5.2 配接热电阻的测温显示仪表	45
2.1.1 误差的表示方法 .....	9	3.6 接触式测温技术	47
2.1.2 测量误差的来源 .....	10	3.6.1 影响接触式温度测量的各种因素	47
2.2 随机误差分析 .....	11	3.6.2 高速气流温度测量、速度误差分析	48
2.2.1 随机误差的特性 .....	11	3.6.3 高温气流温度测量、辐射误差分析	51
2.2.2 正态分布的统计性质 .....	12	3.6.4 动态温度的测量、动态误差分析	54
2.2.3 测量结果的表示方式 .....	13	3.6.5 壁面温度的测量	54
2.3 间接测量的误差分析与处理 .....	15	3.7 非接触式温度计	55
2.3.1 间接测量的误差传递 .....	15	3.7.1 单色辐射式光学高温计	56
2.3.2 间接测量的误差分配 .....	17	3.7.2 全辐射高温计	59
2.4 粗大误差处理 .....	17	3.7.3 比色高温计	59
2.4.1 拉伊特准则 .....	18	3.7.4 红外测温仪	60
2.4.2 格拉布斯准则 .....	18	<b>第 4 章 湿度测量</b> .....	61
2.5 系统误差分析 .....	20	4.1 概述 .....	61
2.5.1 系统误差的性质 .....	20	4.1.1 空气湿度的表示方法 .....	61
2.5.2 系统误差的一般消除方法 .....	21	4.1.2 空气湿度的测量方法 .....	61
2.6 测量的有效数字及计算法则 .....	21	4.2 干湿球法湿度测量 .....	61
2.6.1 有效数字 .....	21	4.2.1 普通干湿球湿度计 .....	62
2.6.2 有效数字的计算法则 .....	22	4.2.2 自动干湿球湿度计 .....	62
<b>第 3 章 温度测量</b> .....	23	4.3 露点法湿度测量 .....	63
3.1 概述 .....	23	4.3.1 露点湿度计 .....	63
3.1.1 温标 .....	23	4.3.2 光电式露点湿度计 .....	64
3.1.2 温度计的分类 .....	24		
3.2 热电偶温度计 .....	24		
3.2.1 热电偶的测温原理 .....	25		
3.2.2 热电偶的回路性质 .....	27		

4.4 吸湿法湿度测量	65	微粒	104
4.4.1 氯化锂电阻式湿度计	65	<b>第7章 流量测量</b>	106
4.4.2 电容式湿度计	66	7.1 概述	106
4.4.3 金属氧化物陶瓷湿度传感器	67	7.1.1 流量的概念	106
<b>第5章 压力测量</b>	71	7.1.2 流量测量仪表分类	106
5.1 概述	71	7.2 差压式流量计	107
5.2 液柱式压力计	72	7.2.1 差压式流量计的组成	107
5.2.1 U形管压力计	72	7.2.2 差压式流量计工作原理	108
5.2.2 单管压力计	73	7.2.3 标准节流装置	110
5.2.3 斜管压力计	73	7.3 涡轮流量计	114
5.2.4 液柱式压力计的测量误差及其修正	73	7.3.1 原理及结构	114
5.3 弹性式压力计	74	7.3.2 流量公式	115
5.3.1 弹簧管压力计	74	7.3.3 显示仪表	116
5.3.2 膜式压力计	75	7.4 电磁流量计	117
5.3.3 波纹管式压差计	75	7.4.1 结构及工作原理	117
5.3.4 弹性式压力计的误差及改善途径	76	7.4.2 电磁流量计的转换器	118
5.4 电气式压力计	77	7.4.3 电磁流量计的安装和使用	119
5.4.1 电阻应变片式压力传感器	77	7.5 涡街流量计	120
5.4.2 电感式压力传感器	80	7.5.1 原理与结构	120
5.4.3 霍尔式压力传感器	82	7.5.2 频率信号的检出	121
5.4.4 电容式压力传感器	83	7.5.3 涡街流量计的使用与安装	122
5.4.5 压电式压力传感器	84	7.6 超声波流量计	122
5.5 测压仪表的标定	86	7.7 容积流量计	123
5.5.1 静态标定	86	7.7.1 腰轮流量计	124
5.5.2 动态标定	86	7.7.2 转式气体流量计	124
5.6 气流压力测量	86	7.7.3 薄膜式气体流量计	125
5.6.1 总压测量	87	7.8 流量计的标定	126
5.6.2 静压测量	89	7.8.1 容积法	126
<b>第6章 流速检测</b>	92	7.8.2 质量法	127
6.1 皮托管测速	92	7.8.3 标准体积管法	127
6.1.1 基本构造和测速原理	92	7.8.4 标准流量计对比法	127
6.1.2 平面气流速度的测量	94	<b>第8章 气体成分测量</b>	128
6.1.3 皮托管的标定	96	8.1 概述	128
6.2 热线流速仪测速	96	8.2 一氧化碳和二氧化碳的测量	129
6.2.1 探头构造	97	8.2.1 不分光吸收红外线气体分析仪	129
6.2.2 工作原理	97	8.2.2 电导法—一氧化碳气体分析仪	130
6.3 激光多普勒流速仪测速	98	8.3 二氧化硫的测量	132
6.3.1 工作原理	99	8.3.1 库仑滴定法	132
6.3.2 测量多普勒频移的基本光路系统	100	8.3.2 电导法	133
6.3.3 判断流速方向的频移装置	102	8.3.3 紫外荧光法	134
6.3.4 多维流速的测量	104	8.4 甲醛的测量	135
6.3.5 多普勒测速系统的激光器和散射		8.4.1 酚试剂比色法	135
		8.4.2 乙酰丙酮分光光度法	136
		8.4.3 环境试验舱法	137

8.4.4 常用仪器 .....	138	9.2.1 压力表式液位计 .....	156
8.5 挥发性有机化合物的测量 .....	139	9.2.2 压差式液位计 .....	157
8.5.1 挥发性有机化合物的测量 方法 .....	139	9.3 浮力式液位计 .....	158
8.5.2 常用仪器 .....	141	9.3.1 恒浮力式液位检测 .....	158
8.6 室内放射性物质——氡的测量 .....	142	9.3.2 变浮力式液位检测 .....	159
8.6.1 径迹蚀刻法 .....	142	9.4 电气式液位计 .....	160
8.6.2 双滤膜法 .....	142	9.4.1 导电液体用电容液位传感器 .....	160
8.6.3 气球法 .....	143	9.4.2 非导电液体用电容液位传 感器 .....	161
8.7 氮氧化物的测量 .....	143	9.5 声学式液位计 .....	162
8.7.1 化学发光法 .....	144	<b>第 10 章 热量测量</b> .....	165
8.7.2 库仑滴定法 .....	145	10.1 热流密度的测量 .....	165
8.8 氧量的测量 .....	145	10.1.1 热阻式热流传感器的工作 原理 .....	165
8.8.1 热磁法 .....	145	10.1.2 热流传感器的标定 .....	167
8.8.2 氧化锆法 .....	148	10.1.3 热阻式热流传感器的安装及使用 误差 .....	169
8.9 气体成分分析仪器的校准 .....	151	10.2 热量及冷量的测量 .....	173
8.9.1 零点气供气系统 .....	152	10.2.1 热水热量测量原理 .....	173
8.9.2 渗透管配气系统 .....	152	10.2.2 热水热量测量仪表的构造 .....	173
8.9.3 标准臭氧发生和配气系统 .....	152	10.2.3 热量表的标定及应用 .....	175
8.9.4 动态稀释配气系统 .....	153	10.3 蒸汽热量的测量 .....	176
8.9.5 气相滴定系统 .....	153	<b>参考文献</b> .....	178
<b>第 9 章 物位测量</b> .....	155		
9.1 物位检测的主要方法 .....	155		
9.2 静压式液位计 .....	156		



# 第 1 章 测量的基本知识

## 1.1 测量概述

### 1.1.1 测量的概念

测量是人类对自然界中客观事物取得数量观念的一种认识过程。在这一过程中，人们通过大量的观察和测量，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定理和定律。因此可以说，测量是为取得某一未知参数值而做的全部工作，包括测量的误差分析和数据处理等计算工作在内。

测量是运用专门的工具，根据物理、化学、生物等规律，通过实验和计算找到被测量的量值。所谓测量，就是用实验的方法，把被测量与同性质的标准量进行比较，确定二者的比值，从而得到被测量的量值。

根据上述测量的概念，测量的定义也可以用公式来表示：

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

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。当所选用的标准量单位改变时，求得的比值 $L$ 也将随之产生相应的变化，所以为了正确反映测量结果，常需在测量值的后面标明标准量的单位。例如长度的被测量为 $X$ ，标准量 $U$ 的单位采用国际单位制—— $m$ ，则被测量的数值为 $L(m)$ ；如果标准量的单位改用 $mm$ ，那么被测量的数值变为 $1000L(mm)$ 。

测量过程中的关键在于被测量与标准量的比较。欲使测量的结果有意义，测量必须满足以下要求：

① 用来进行比较的标准量应该是国际上或国家所公认的，且性能稳定；

② 进行比较所用的方法和仪器必须经过验证。

人类的许多知识都是依靠测量得到的。在科学领域中，许多新的发现、新的发明往往是以测量技术的发展为基础的，测量技术的发展推动着科学技术的前进。在生产活动中，新的工艺、新的设备的产生，也依赖于测量技术的发展水平。一旦离开了测量，必然会给工作带来巨大的盲目性。所以，测量的意义可以具体体现为以下两个方面。

(1) 可靠的测量技术是生产过程自动化的先决和必要条件 测量技术的重要应用是对生产过程参数的监测和控制。为了控制生产过程中的某个参数，必须首先测量它，以获得被控参数的实时数据，为控制系统提供必要的信息。所以说，测量是控制的根据，控制是测量的目的。如，欲控制室内温度为某一期望的值，首先应对该房间的温度值进行测量，将房间当前的温度值送给控制系统，通过控制系统所形成的控制作用，对房间的温度进行调节。典型的控制系统如图 1-1 所示。



图 1-1 控制系统示意图

标、燃气热水器的效率等。人们往往通过测量所得到的各种数据来评判事物质量的优劣，如，一项暖通空调工程的设计是否满足要求、施工安装是否满足设计要求等都需要在现场进行温度、湿度、流速、噪声等参数的测量，然后将测量所得的数据与相应的规范要求相对比就可以得到客观的结论。

测量技术对自然科学、工程技术的重要作用越来越为人们所重视，它已逐步形成了一门完整的、独立的学科，主要研究测量原理、测量方法、测量工具和测量数据处理。根据被测对象的差异，测量技术可分为若干分支，如力学测量、光学测量、电学测量、热工测量等。建筑环境测量是针对建筑物所处环境中的有关参数获得具体数据的一项技术活动，主要包括建筑热工环境测量、建筑声环境测量、建筑光环境测量及建筑空气环境测量等几个主要方面。

### 1.1.2 测量方法

一个参数的测量，可以通过不同的方法来实现。所谓测量方法就是实现被测量与标准量比较的方法。测量方法的分类形式有多种，为了有利于研究测量误差，测量方法广泛采取按测量结果产生的方式进行分类。按这种方式进行分类，测量方法可分为直接测量法、间接测量法和组合测量法。

(1) 直接测量法 直接测量法是指被测量直接与选用的标准量进行比较，或者用预先标定好的测量仪器进行测量，从而直接得到未知量的数值。例如：用压力表测量管道水压，用欧姆表测量电阻值等。直接测量法不需要对被测量与其他实测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。纯粹的直接测量用得并不很多，因为在工程上许多参数是不能用直接测量法测得结果的，例如，机组的各种效率、功率等参数，此时需要用所谓的间接测量法才能得到。

(2) 间接测量法 间接测量法是利用直接测量的量与被测量之间的函数关系间接得到被测量量值的测量方法。这种函数关系可以是公式、曲线或表格等。例如，测量管道内不可压缩流体的流速时，采用函数关系式：

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (1-2)$$

通过直接测量法得到管道内的某一截面流体的动压值  $\Delta p$  和流体的密度  $\rho$ ，然后将测量值代入式(1-2)中进行计算，即可得到流速  $v$ 。

间接测量法费时费事，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) 组合测量法 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法。例如，用热电阻温度计测量介质温度时，其电阻值与温度的关系为：

$$R_t = R_{20} + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2 \quad (1-3)$$

式(1-3)中的  $R_{20}$  为  $t = 20^\circ\text{C}$  时的电阻值，一般为已知量。 $\alpha$ 、 $\beta$  称为电阻的温度系数， $t$

(2) 测量是判断事物质量指标的重要手段 任何质量指标都是通过一定的数量来表示的，而这些数量的获取则是通过测量来实现的。如，制冷机组的制冷量、空调温度控制精度、建筑节能指

为环境温度。为了获得  $\alpha$ 、 $\beta$  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(1-3) 得到联立方程：

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_{20} + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2 \\ R_{t_2} = R_{20} + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2 \end{cases} \quad (1-4)$$

求解联立方程(1-4)，就可以得到值  $\alpha$ 、 $\beta$ 。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  $R_{20}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 。

组合测量法在实验室和其他一些特殊场合的测量中使用较多。例如，为透平机械空载下的功率损失与转速的关系建立经验公式而确定转速的系数与指数等。

除以上按测量结果产生的方式对测量方法进行分类外，还可以根据测量中的其他因素进行分类。

按不同的测量条件，可分为等精度测量和非等精度测量。测量条件是指测量者、测量仪器、测量方法、测量环境等因素。所谓等精度测量是指在完全相同的测量条件下所进行的一系列重复测量。反之，在多次测量中，测量条件不尽相同，则称为非等精度测量。

按测量方式，可分为偏差式测量法、零位式测量法、微差式测量法。

按被测量在测量过程中的状态不同，又可分为静态测量法和动态测量法。

在实际测量时，测量方法的选择要综合各方面的因素。如，被测量本身的特征，所要求的测量精度，测量现场的环境，现有的测量设备等。在此基础上，选择合适的测量仪器和测量方法，不应简单地认为，只有使用精密的测量仪表，才能获得准确的测量结果。

## 1.2 测量仪表

测量仪表是将被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。为实现一定的测量目的而将各种测量仪表进行组合则构成测量系统。任何一次有意义的测量，都必须由测量系统来实现。当然，由于测量原理不同，测量精度要求不同，测量系统的构成会有很大的区别。它可能是仅有一只测量仪表的简单测量系统，也可能是一套价格昂贵、高度自动化的复杂测量系统。但是，如果脱离开具体的物理系统，任何一个测量系统都是由有限个具有一定基本功能的测量环节组成的。从这个意义上说，测量系统实际上是若干个测量环节的组合，并可看成是由许多测量环节连接成的测量链。

### 1.2.1 测量仪表的组成

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三种最基本的功能。一般来讲，无论测量仪表在价格、自动化程度、外形、内部结构等方面存在多大差异，通常都是由三个部分组成的。

(1) 感受件 感受件也称为敏感元件，是测量仪表直接与被测对象发生联系的部分。它接收来自被测介质的能量，并且产生一个以某种方式与被测量有关的输出信号。例如，在压力测量系统中，电阻应变片式压力传感器是该系统的敏感元件，它感受压力的变化，同时自身产生一个与之相对应的应变，而应变值的变化导致电阻阻值的变化，最终引起输出电压的变化。需要注意的是，感受件直接与被测对象发生联系的含义并不代表感受件与被测介质直接接触。

感受件在测量系统中所起到的作用是，感受被测参数的变化，随之在其中产生一个内部变化并向外界发出信号。

感受件能否快速、准确地反应被测量的变化，对测量系统的测量质量有着决定性的影响。因此，作为感受件应满足以下几个方面的条件：

- ① 它只能随着被测参数的变化而变化，其他非被测参数的变化不应使它发生变化；
- ② 感受件发出的信号与被测参数之间呈稳定的单值函数关系；
- ③ 在测量过程中，感受件应该不干扰或尽量少干扰被测介质的状态。

实际的感受件很难完全满足这三个条件，尤其是第①项条件，通常限制无用信号在全信号中的比例，提高信噪比，用理论或实验的方法加以补偿。其次，感受件通常都是从被测介质中吸收能量，因此，被测介质要被测量作用所干扰。一个好的感受件，只能尽量减小这种效应，但这种效应在某种程度上总是存在着。因此，任何传感器都不可能是十全十美的，都受到一定使用条件的限制。如果在使用上不加以注意，就会得到错误的测量结果。

(2) 显示件 显示件是测量系统中直接与测量人员发生联系的部分。其作用是向测量人员指出被测参数在数量上的变化，它可以对被测量进行指示、记录，有时还带有调节功能，以控制生产过程。

显示件根据显示方式可分为模拟式、数字式和屏幕式三种。

① 模拟式。最常见的结构是指示器与标尺的相对位置来连续指示被测参数的数值，也称为指针式仪表。其结构简单，价格低廉，但由于测量结果按主观方式读数，所以存在视读误差。记录时通常以曲线形式给出数据。

② 数字式。为克服模拟式显示件所带来的视读误差，可采用数字式显示件。数字式显示件是以数字的形式直接给出被测量的数值。但是，为了实现模拟量的数字显示，需要具有模拟量向数字量转化的环节，所以数字式显示件存在着量化误差。量化误差的大小取决于模-数转换器的位数。

③ 屏幕式。屏幕式显示件既可按模拟方式给出指示器与标尺的相对位置，也可以直接以数字形式给出被测参数的数值，是电视技术在测量中的应用。屏幕显示具有形象性和易于读数的优点，并能在屏幕上显示出大量数据，便于比较判断。

(3) 中间件 中间件是连接感受件与显示件之间的环节。其作用是将感受件发出的信号进行变换，以利于显示件接收。最简单的中间件是单纯起“传递”作用的元件，它将感受件的输出传给显示件。但这种情况只适合于感受件输出的信号较强或显示件的灵敏度很高的场合。感受件输出的信号一般是某种物理量，在大多数情况下，这些物理量在性质上、幅值上总是与显示件所能接收的信号存在差异，必须对感受元件发出的信号进行变换。所以，中间件也称为变换元件。在这里，变换有两层含义，其一是对信号物理性质的变换，即一种物理量变成性质上不同的另一种物理量。如，电阻应变片测量中的电桥，它是将应变的变化转换为输出桥压的变化。其二是对信号幅值上变换，即依据某种特定规律在数值上使某一物理量发生变化，但不改变其物理性质。如，用电子电位差计测量热电动势时，就要将热电动势放大 10 万倍才足以驱动伺服电动机带动指针作出指示。

### 1.2.2 测量仪表的主要性能指标

测量仪表的性能指标决定了测量结果的可靠程度，也是衡量仪表质量好坏和选择仪表的依据。它主要包括仪表的量程、精度、迟滞、灵敏度、线性度及仪表的动态特性几个方面。

(1) 仪表量程 仪表的量程是指仪表的测量范围，通常指仪表能够测量的最小输入量和

最大输入量之间的范围，在数值上等于仪表上的最大值与仪表上最小值之差。

正确地选择仪表的量程是十分重要的。通常，应对被测量有一个大致的估计，使之落在仪表量程之内，最好落在仪表量程的  $\frac{2}{3} \sim \frac{3}{4}$  处。如果仪表量程选择过小，则仪表会因过载而受损；如果仪表量程选择过大，则会使测量精度降低。

(2) 仪表精度 用任何仪表进行测量时，都会存在误差。因此在测量时，不仅需要知道仪表的示值，还要知道仪表的精度。

通常情况下，将仪表测量值的最大示值绝对误差与仪表量程的比值称为仪表的基本误差，用  $\delta_j$  表示，即

$$\delta_j = \frac{\Delta_{\max}}{L_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $\Delta_{\max}$ ——最大示值绝对误差，即在量程范围内，示值与真值之差的最大值；

$L_m$ ——仪表量程。

根据仪表质量不同，通常要求某一类仪表的基本误差不超过某一个规定值，这一规定值称为仪表的允许误差，其在数值上与基本误差相同。在仪表工业中规定，用允许误差去掉“%”的数值表示仪表的精度等级，简称仪表精度。

我国仪表工业目前采用的精度等级序列为：0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0。其中工业用仪表的精度等级一般为 0.5 级以下。

(3) 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  $\Delta y$  与被测量增量  $\Delta x$  之比，即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-6)$$

灵敏度的另一种表达方式称作分辨力或分辨率，定义为测量仪表所能区分的被测量最小变化量，在数字式仪表中经常使用。例如，数字式温度表分辨力为  $0.1^\circ\text{C}$ ，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  $0.1^\circ\text{C}$ ，即这种数字式温度表能区分出最小为  $0.1^\circ\text{C}$  温度变化。可见，分辨力的值愈小，灵敏度愈高。

(4) 迟滞误差 仪表的输入从起始量程增至最大量程的测量过程，称为正行程，反之称为反行程。在同一输入量下，正反两行程造成的输出值之间的差异称为迟滞差值，用  $\Delta H$  表示。如图 1-2 所示，全量程中最大的迟滞差值  $\Delta H_{\max}$  与满量程输出值  $Y_{\max}$  的比值称为迟滞误差，用  $H_Y$  表示。

$$H_Y = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-7)$$

产生迟滞误差主要是由于弹性元件、磁性元件、摩擦等因素造成的，也将其称为变差、回差。

(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  $y$ ，输入阻抗为  $x$ ，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 仪表除具有静态特性外，还具有一定的动态特性。动态特性是指当被测量发生变化时，仪表的显示值随

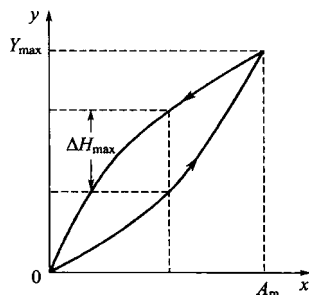


图 1-2 迟滞误差

时间变化的特性曲线。仪表的动态特性体现了仪表输出响应随输入变化的能力。对于任何一个仪表,只要输入量是时间的函数,则其输出量也应是时间的函数。仪表在动态下输出量和它在同一时刻相应的输入量之间的差值称为仪表的动态误差。对于测量仪表而言,动态误差越小,则动态特性越好。衡量仪表动态特性的常用性能指标是时间常数  $T$ 。对于不同的仪表,时间常数  $T$  的定义有所区别。例如,有的仪表将时间常数定义为,以刚刚开始发生变化时的变化速度,示值从一个稳定状态变化到另一个新的稳定状态所需要的时间;而有的仪表将时间常数定义为,示值从稳定值的 10% 上升到稳定值的 90% 所需要的时间。不论是哪种定义方法,对于测量仪表而言,原则上希望时间常数越小越好。

## 1.3 测量误差与测量精度

### 1.3.1 测量误差的概念

任一待测的物理量都具有客观存在的量值,这一量值称为真值,用  $x_0$  表示。而通过测量仪表得到的结果称为测定值,或称为示值,用  $x$  表示。在测量技术中,测定值与真值之间的差值称为测量误差,用  $\Delta x$  表示。如果用数学式子表述测量误差的概念,则有

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-8)$$

在实际测量工作中,由于存在各种各样的影响因素,都会使测量结果与被测量的真值间存在一定的差异,也就是说,测量误差的存在是不可避免的。所以实际上真值是无法测量得到的。而测量的目的是为了取得被测未知量的数值,而真值又是不可得到的,为求得真值,必须要研究误差,只有当误差已知,或在可能范围内时,测得的数据才有意义。

### 1.3.2 测量误差的分类

根据测量误差的性质不同,可将测量误差分为三类,即系统误差、随机误差和粗大误差。

(1) 系统误差 在多次等精度测量同一恒定量值时,误差的绝对值和符号保持不变,或按某种规律变化的误差,称为系统误差,简称系差。如果误差的大小和符号保持不变,则称为恒值系统误差,如,仪表指针零点偏移将产生恒值系统误差。如果误差按一定规律变化,则称为变值系统误差。在变值系统误差中又可分为累进系统误差和周期性系统误差及复杂规律变化的系统误差。

产生系统误差的主要原因可以有以下几个方面:

① 测量仪器设计原理及制作上的缺陷。例如刻度偏差,刻度盘或指针安装偏心,使用过程中零点漂移,安放位置不当等。

② 测量时的环境条件如温度、湿度及电源电压等与仪器使用要求不一致等。

③ 采用近似的测量方法或近似的计算公式等。

④ 测量人员估计读数时习惯偏于某一方向等原因所引起的误差。

系统误差就个体而言是具有规律性的,其产生的原因往往是可知的或是能够掌握的。因此,系统误差的处理多属于测量技术上的问题,可以通过实验的方法加以消除,也可以通过引入更正值的方法加以修正。

(2) 随机误差 随机误差又称为偶然误差,是指对同一恒定值进行多次等精度测量时,其绝对值符号无规则变化的误差。就单次测量而言,随机误差没有规律,其大小和方向完全不可预测,但当测量次数足够多时,其总体服从统计学规律,多数情况下接近正态分布。

产生随机误差的主要原因包括：

- ① 测量仪器元器件产生噪声，零部件配合不稳定、摩擦、接触不良等。
- ② 温度及电源电压的无规则波动、电磁干扰、地基振动等。
- ③ 测量人员感觉器官的无规则变化而造成的读数不稳定等。

由随机误差产生的原因可以看出，随机误差的产生取决于测量过程中一系列随机因素的影响，所以在任何一次测量中，随机误差的存在都是不可避免的。随机误差就个体而言是没有规律的，但就总体而言，随机误差服从一定的统计规律，利用概率论和数理统计的方法，可以从理论上估计随机误差对测定值的影响。

(3) 粗大误差 在一定的测量条件下，测定值明显地偏离实际值所形成的误差称为粗大误差，也称为疏失误差，简称粗差。确认含有粗差的测定值称为坏值，应当剔除不用，因为坏值不能反映被测量的真实数值。

产生粗差的主要原因包括：

- ① 测量方法不当或错误。例如用大量程的压力计测量小压力。
- ② 测量操作疏忽和失误。例如未按规程操作，读错读数或单位，或记录及计算错误等。
- ③ 测量条件的突然变化。例如电源电压突然增高或降低、雷电干扰、机械冲击等引起测量仪器示值的剧烈变化等。

粗大误差就其数值而言往往大大地超过同样测量条件下的系统误差和随机误差，它对测量结果的歪曲是严重的，以致使得测量结果完全不可信赖。因此，一旦发现粗大误差，必须从测量数据中剔除。

### 1.3.3 测量精度

由于测量中存在误差，也就是说测定值偏离真值，用来描述这种偏离程度的指标称为测量精度，与误差的大小相对应。测量误差和测量精度表示了测量系统对于测量结果的精确性与可靠性。测量精度可细分为以下三个方面。

(1) 精密性 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。精密性说明仪表指示值的分散性，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。

(2) 准确度 对同一被测量进行多次测量，测定值偏离被测量真值的程度，称为测量的准确度。准确度说明仪表指示值与真值的接近程度。它反映了系统误差的影响。准确度高则说明系统误差小。

(3) 精确度 精密性与准确度的综合指标称为精确度，简称精度。精确度高，说明精密度和准确度都高，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程度也高。

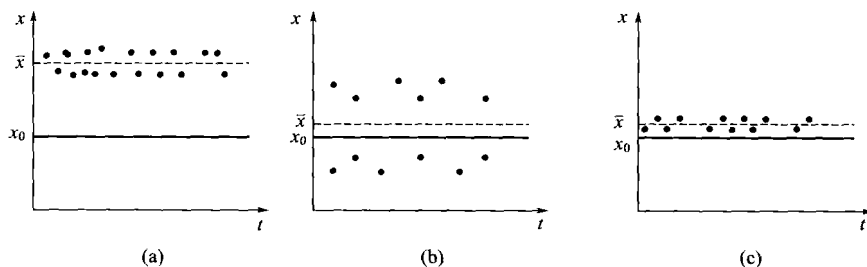


图 1-3 测量精度示意图

对于具体的测量，精密度高的准确度不一定高，准确度高的精密度也不一定高，但精确度高，则精密度和准确度都高。图 1-3 说明了这种情况。图中， $x_0$  代表被测量真值， $\bar{x}$  代表多次测定值的平均值，小黑点代表每次得到的测定值。

图 1-3(a) 中，测定值密集于平均值周围，随机误差小，精密度高，但平均值与真值偏差大，系统误差大，说明测量准确度低。图 1-3(b) 中，测定值的分布离散性大，说明随机误差大，精密度低，但平均值与真值的偏差小，系统误差小，说明测量的准确度高。图 1-3(c) 中，随机误差和系统误差都小，说明测量的精确度高。



## 第 2 章 测量误差和数据处理

测量的目的在于求出某一物理量的真值，而在任何试验中所得到的数据，由于主观和客观因素的影响，都存在误差，如果对于一个物理量进行了  $n$  次测量得到  $n$  组数据，如  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，若以  $x_0$  代表被测量的真值，则其误差为：

$$\begin{cases} \Delta x_1 = x_1 - x_0 \\ \Delta x_2 = x_2 - x_0 \\ \vdots \\ \Delta x_n = x_n - x_0 \end{cases} \quad (2-1)$$

由式(2-1)可知，由于  $x_0, \Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$  皆是未知量，用  $n$  个方程解  $n+1$  个未知量其解是不定的，所以必须对误差进行分析处理，测量所得的数据才有意义。

误差理论所要解决的问题，是认识测量误差存在的规律性，找出消除或减小误差对测量结果影响的方法，尽可能获得逼近被测量真值的正确结果。其具体任务就是在给定条件下，从一组数据中确定一个所谓的最优值，用这个最优值来代替被测的物理量，并对它的精度做出估计。这一过程通常将其称为数据处理。

### 2.1 误差的基本知识

#### 2.1.1 误差的表示方法

所谓误差就是测定值与被测量真值之间的差。在不同的场合，误差有不同的表示方法。最常用的表示方法是将误差分为绝对误差和相对误差两种。

(1) 绝对误差 绝对误差通常简称为误差，其定义为：

$$\Delta x = x - x_0$$

式中  $\Delta x$ ——绝对误差；

$x$ ——测定值；

$x_0$ ——被测量真值。

被测量的真值是指被测量本身的真实数值，它只能是个理论值或定义值。前已述及，被测量的真值是不可知的。在误差理论中，对于等精度测量，当测量次数无限多时，测量结果的算术平均值近似于真值。通常是以标准器所提供的标准值或以高一级的标准仪表测量值作为近似的真实值，又称为实际值。因而绝对误差更有实际意义的定义为：

$$\Delta x = x - A \quad (2-2)$$

式中  $A$ ——被测量的实际值。

对于绝对误差，具有下面几个特点。

- ① 绝对误差是有单位的量，其单位与测定值和实际值相同。
- ② 绝对误差是有符号的量，其符号表示出测定值与实际值的大小关系，若测定值较实际值大，则绝对误差为正值，反之为负值。
- ③ 测定值与被测量实际值间的偏离程度和方向通过绝对误差来体现。