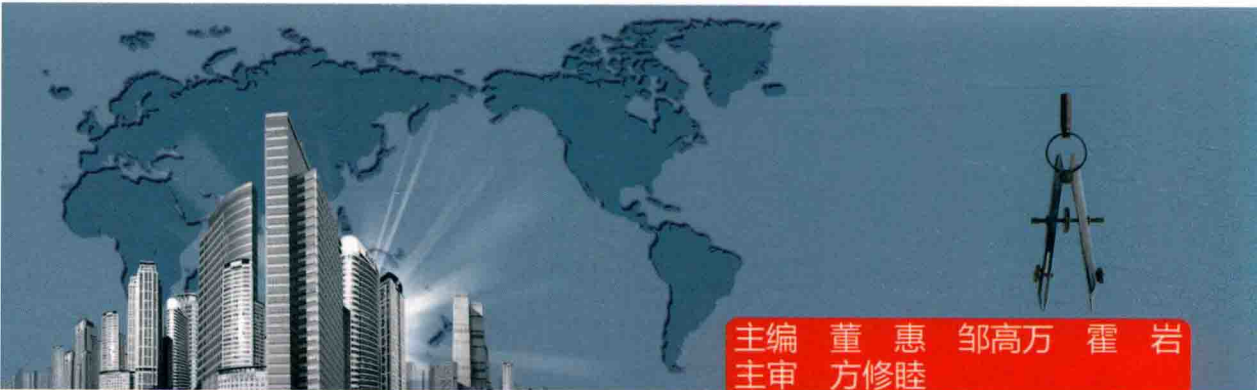


ANZHU HUANJING CESHI JISHU



主编 董 惠 邹高万 霍 岩  
主审 方修睦

# 建筑环境测试技术

(第二版)

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

# 建筑环境测试技术

(第二版)

主编 董惠 邹高万 霍岩

主审 方修睦

## 内 容 简 介

本书体系完整,在介绍测量基本知识的基础上,全面系统地介绍了传统热工参数和建筑环境参数的测量方法、所涉及仪表的工作原理及应用,以及计算机测试技术等内容。

本书共分12章,分别讲述了测量的基本知识、测量误差和数据处理、温度测量、湿度测量、压力测量、流速测量、流量测量、空气质量测量、物位测量、热量测量、建筑环境测量方案设计及计算机测试技术。既包括通常意义上的热工参数,又包括建筑环境所特有的一些参数。

本书可作为建筑环境与能源应用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,霍岩主编. —  
2版. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.3  
ISBN 978-7-5661-1477-8

I. ①建… II. ①董… ②邹… ③霍… III. ①建筑物  
—环境管理—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TU-856

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第058150号

责任编辑 张忠远

封面设计 博鑫设计

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街124号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451-82519328  
传 真 0451-82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 北京中石油彩色印刷有限责任公司  
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16  
印 张 19.5  
字 数 515千字  
版 次 2017年3月第1版  
印 次 2017年3月第1次印刷  
定 价 48.80元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

---

## 第二版前言

本书第一版于2009年出版,经过近十年的使用以及测试技术的发展,原有的内容已不能满足教学的需要;加之专业名称的调整,对建筑环境测试技术的教学内容范围有了更广泛的要求。在此背景下,特对第一版内容进行修订再版。

本教材在保持传统的建筑环境测试技术基础上,力求反映建筑环境测试技术的新成就和新趋向,扩大学生的知识面,提高解决实际技术问题的能力。全书分为3大模块,第1模块重点介绍测试系统的构成及测试系统分析、测量误差的分析与处理,使学生能从系统的角度对测量、测量系统、测量精度有一个总体认识;第2模块重点介绍建筑环境的传统测试方法,在此基础上增加激光测试技术、红外测试技术、两相流测试技术在建筑环境测量中的应用,同时增加传统测量仪表在不同环境下的正确应用;第3模块重点介绍计算机测试技术,使学生能够了解目前在实际科研工作中应用较多的智能传感器、自动数据采集系统以及虚拟仪器等方面内容。

本书可作为建筑环境与能源应用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12章,按48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章、第3章、第5章、第6章、第8章)、邹高万(第2章、第4章、第7章、第9章)、霍岩(第10章、第11章、第12章)编写。由董惠教授负责全书统稿工作,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。

限于编者们的学识有限,错误及不妥之处恳请读者给予批评指正。

编者

2017年2月于哈尔滨工程大学

# 第一版前言

“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(如空气品质参数等)。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 章、第 3 章、第 5 章、第 7 章、第 9 章)、邹高万(第 2 章、第 4 章、第 6 章、第 8 章、第 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,错误及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
1.1 测量概述 .....	1
1.2 测量系统 .....	4
1.3 测量系统分析 .....	8
<b>第 2 章 测量误差和数据处理</b> .....	25
2.1 误差的基本知识 .....	25
2.2 随机误差分析 .....	30
2.3 间接测量的误差分析与处理 .....	34
2.4 粗大误差处理 .....	37
2.5 系统误差分析 .....	40
2.6 测量的有效数字及计算法则 .....	42
<b>第 3 章 温度测量</b> .....	44
3.1 概述 .....	44
3.2 热电偶温度计 .....	47
3.3 膨胀式温度计 .....	62
3.4 电阻式温度计 .....	66
3.5 测温显示仪表 .....	70
3.6 接触式测温技术 .....	77
3.7 非接触式温度计 .....	87
<b>第 4 章 湿度测量</b> .....	94
4.1 概述 .....	94
4.2 干湿球法湿度测量 .....	95
4.3 露点法湿度测量 .....	97
4.4 吸湿法湿度测量 .....	99
4.5 湿度传感器的基本技术指标 .....	106
4.6 湿度计的标定与校正装置 .....	107
<b>第 5 章 压力测量</b> .....	110
5.1 概述 .....	110
5.2 液柱式压力计 .....	112
5.3 弹性式压力计 .....	114
5.4 电气式压力计 .....	117
5.5 压力检测仪器的选择、安装与校准 .....	130
5.6 气流压力测量 .....	134
<b>第 6 章 流速测量</b> .....	140
6.1 测压管测速 .....	140

6.2	热线风速仪测速 .....	146
6.3	激光多普勒流速仪测速 .....	152
6.4	粒子图像测速技术 .....	159
<b>第7章</b>	<b>流量测量 .....</b>	<b>163</b>
7.1	概述 .....	163
7.2	差压式流量计 .....	164
7.3	涡轮流量计 .....	174
7.4	电磁流量计 .....	178
7.5	涡街流量计 .....	183
7.6	超声波流量计 .....	186
7.7	容积流量计 .....	189
7.8	流量计的标定 .....	192
7.9	气液两相流流量测量 .....	194
<b>第8章</b>	<b>空气质量测量 .....</b>	<b>215</b>
8.1	空气气体成分的测量 .....	216
8.2	气体成分分析仪器的校准 .....	239
8.3	空气含尘浓度的测量 .....	243
<b>第9章</b>	<b>物位测量 .....</b>	<b>246</b>
9.1	物位检测的主要方法 .....	246
9.2	静压式液位计 .....	248
9.3	浮力式液位计 .....	250
9.4	电气式液位计 .....	251
9.5	声学式液位计 .....	253
<b>第10章</b>	<b>热量测量 .....</b>	<b>256</b>
10.1	热流密度的测量 .....	256
10.2	热量及冷量的测量 .....	266
10.3	蒸汽热量的测量 .....	269
<b>第11章</b>	<b>建筑环境测量方案设计 .....</b>	<b>271</b>
11.1	通风空调系统风量测量方案设计 .....	271
11.2	建筑物热工性能测量方案设计 .....	278
<b>第12章</b>	<b>计算机测试技术 .....</b>	<b>283</b>
12.1	智能传感器 .....	283
12.2	自动数据采集系统 .....	292
12.3	虚拟仪器 .....	299
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>303</b>

# 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。例如,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

## 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。例如,制冷机组的制冷量、空调温度控制精度、建筑节能指标、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,例如,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比对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。测量方法选择的正确与否,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。在选择测量方法时,要综合考虑各种因素,如被测量本身的特性、所要求的测量精度、测量环境以及现有的测量设备等。只有根据不同的测量对象、测量要求以及测量条件,选择正确的测量方法、构造合适的测量系统、进行正确的操作,才能得到理想的测量结果。

测量方法的分类形式有多种,可以从不同角度进行分类。下面介绍几种常见的分类方法。

#### 1. 按测量手段分类

按测量手段进行分类,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,即直接测量不方便,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  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  时的电阻值,一般为已知量。 $\alpha, \beta$  称为热电阻的温度系数, $t$  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:

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

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

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。

## 2. 按测量方式分类

按测量方式分类,测量方法可分为偏差式测量法、零位式测量法和微差式测量法。

### (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作比较测量法),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,如图1-2所示。

当电桥平衡时,可以得到

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4 \quad (1-5)$$

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(1-5)由比率  $R_1/R_2$  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, 这是它的主要特点, 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, 这是这种测量方法的一个不足。

### (3) 微差式测量法

微差式测量法是将偏差式测量法和零位式测量法相结合, 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, 如图 1-3 所示。

图 1-3 中 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  $x$  与标准量  $s$  之间的差值:  $\delta = x - s$ , 即  $x = \delta + s$ 。可以证明, 只要  $\delta$  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。

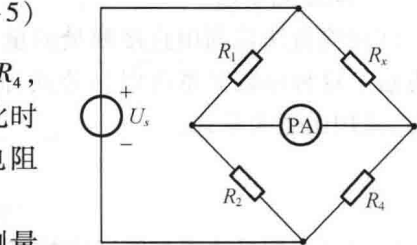


图 1-2 惠斯登电桥测量电阻示意图

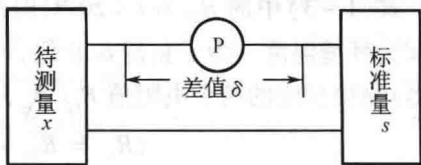


图 1-3 微差式测量法示意图

除以上两种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。

按照不同的测量条件, 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进行了一系列重复测量。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。

按照被测量在测量过程中的状态不同, 可以分为静态测量法和动态测量法; 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, 可以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, 可以分为本地(原位)测量和远地测量(遥测); 按照被测量属性, 又可以分为电量测量和非电量测量等。

## 1.2 测量系统

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差别。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 测量系统的组成

各类测量系统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。一般来讲,无论测量系统在价格、自动化程度、外形、内部结构等方面存在多大差异,通常是由以下三个部分组成的。

#### 1. 感受件

感受件也称为敏感元件,是测量系统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一定直接接触。

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、准确地反映被测量的变化,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,通常的方法是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,任何感受件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。其也称为指针式仪表。它的结构简单、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。它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,即对一种物理量变成性质上不同的另一种物理量。例如,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。例如,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做出指示。

## 1.2.2 测量系统的主要性质

一般地,把外界对系统的作用称之为系统的输入或激励,而将系统对输入的反映称为系统的输出或响应。测量系统如图 1-4 所示。图 1-4 中, $x(t)$  表示随时间变化的输入量,而  $y(t)$  表示测量系统随时间而变化的输出。

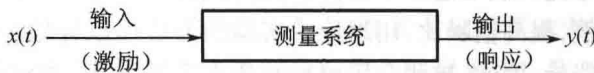


图 1-4 测量系统方框图

理想的测量系统应该具有单值的、确定的输入-输出关系,即对应于每一个输入量,都应只有单一的输出量与之对应,以输出与输入呈线性为最佳。实际系统往往无法在很大范围内满足这种要求,而只能在较小的工作范围内和在一定的误差允许范围内满足这种要求。当系统的输入和输出可以用式(1-6)的常系数微分方程来描述时,则该系统称为定常线性时不变系统。

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \quad (1-6)$$

式中  $t$ ——时间自变量;

$a_i, b_j$ ——不随时间而变化的常数( $i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m$ )。

对于测量系统而言,式(1-6)中的系数  $a_i, b_j$  的大小和量纲是由测量系统的结构及所用的元器件的参数所决定的。而这些元器件的物理参数并非能保持常数,如电子器件中的



电阻、电容、半导体等特性都会受到温度的影响,所以,理想的定常时不变系统是不存在的。但在工程实际中,常可以以足够的精确度认为多数常见物理系统的参数  $a_i, b_j$  是时不变常数,而把一些时变线性系统当作定常线性系统来处理。本书所讨论的仅限于线性定常系统。

若以  $x(t) \rightarrow y(t)$  表示线性定常系统输入与输出的对应关系,则线性定常系统具有如下主要性质。

### 1. 叠加原理

当几个输入同时作用于线性系统时,则其响应等于各个输入单独作用于该系统的响应之和。

若  $x_1(t) \rightarrow y_1(t), x_2(t) \rightarrow y_2(t)$   
 则  $[x_1(t) \pm x_2(t)] \rightarrow [y_1(t) \pm y_2(t)]$  (1-7)

叠加原理表明,对于线性系统,一个输入的存在并不影响另一个输入的响应,各个输入所产生的响应是互不影响的。因此,对于一个复杂的输入,就可以将其分解成一系列的简单输入之和,系统对复杂激励的响应就等于这些简单输入的响应之和。

### 2. 比例特性

若系统的输入扩大  $k$  倍,则其响应也扩大  $k$  倍,即对于任意常数  $k$ ,必有

$$kx(t) \rightarrow ky(t) \quad (1-8)$$

### 3. 微分特性

线性系统对输入导数的响应等于对该输入响应的导数,即

$$\frac{dx(t)}{dt} \rightarrow \frac{dy(t)}{dt} \quad (1-9)$$

### 4. 积分特性

若线性系统的初始条件为零,则对输入积分的响应等于对该输入响应的积分,即

$$\int x(t) dt \rightarrow \int y(t) dt \quad (1-10)$$

### 5. 频率保持性

若线性系统的输入为某一频率的简谐信号,则其稳态响应必是同一频率的简谐信号。证明如下:

若  $x(t) \rightarrow y(t)$

设  $\omega$  为已知频率,根据线性系统比例特性和微分特性,有

$$\omega^2 x(t) \rightarrow \omega^2 y(t), \quad \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \rightarrow \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$$

由线性系统叠加原理,有

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \omega^2 x(t) \rightarrow \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \omega^2 y(t)$$

设输入信号为单一频率的简谐信号,即

$$x(t) = X_0 e^{j\omega t}$$

则有

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = (j\omega)^2 X_0 e^{j\omega t} = -\omega^2 x(t)$$

由此,得

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \omega^2x(t) = 0$$

相应的输出也应为

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \omega^2y(t) = 0$$

于是  $y(t)$  的唯一的可能解只能是

$$y(t) = y_0 e^{j(\omega t + \phi_0)} \quad (1-11)$$

## 1.3 测量系统分析

测量系统的性能在很大程度上决定着测量结果的质量,对于测量系统的性能认识越全面越有可能得到有价值的测量结果。

测量系统的一般特性通常分为静态特性和动态特性两个方面。在静态测量条件下,测量系统的输入量与输出量之间在数值上一般具有一定的对应关系。以静态关系为基础,通常可以定义一组性能指标来描述静态测量过程的品质。在动态测量时,由于测量系统具有一定的惯性,使得系统的输出量不能正确反映同一时刻输入量的真实情况,此时,必须考虑测量系统的动态特性。以动态关系为基础的动态性能指标,是判断动态测量过程品质优劣的标准。

实际上,测量系统的静态特性也同样影响着动态测量条件下测量的品质。这种影响将使描述测量系统动态关系的微分方程变得难以处理。为方便起见,测量系统这两方面的特性将分开讨论。

### 1.3.1 测量系统的静态特性

#### 1. 测量系统静态特性的概念

测量系统的基本静态特性是指被测物理量和测量系统处于稳定状态时,系统输出量与输入量之间的函数关系。这种关系应该是确定的、单值的,否则便无法依据测量系统的输出量去推断被测物理量。

一般情况下,测量系统的输入量  $x$  与输出量  $y$  之间的关系可以用代数方程来描述,即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1-12)$$

式中  $x$ ——系统的输入量;

$y$ ——系统的输出量;

$a_i$ ——决定测量系统基本静态特性的参数,它决定  $x-y$  关系曲线的位置和形状( $i = 1, 2, \cdots, n$ )。

对于理想测量系统,要求其静态特性曲线应该是线性的,或者说在一定范围内是线性的。测量系统的基本静态特性可以通过静态校准来求取,即我们通常所说的标定,得到一组校准数据,可以用最小二乘法求取一条最佳拟合曲线作为测量系统的基本静态特性曲线。

#### 2. 测量系统的静态性能指标

描述测量系统在静态测量条件下测量品质优劣的静态性能指标是很多的。由于测量系统及组成测量系统的仪表等的多样性,各自的静态性能描述也不尽相同。但总的来说,

测量系统的静态性能指标分为两个方面:一方面是描述测量系统的基本功能特性,它决定测量系统工作能力,如量程、灵敏度等;另一方面是描述测量系统的精度特性,它决定测量系统的测量精度,如重复性、迟滞误差等。

### (1) 量程

量程是指测量系统的测量范围,通常指测量系统能够测量的最小输入量和最大输入量之间的范围。

在组成测量系统时,正确地选择测量仪表和量程,进而选择整个测量系统的量程是十分重要的。通常,应对被测量有一个大致的估计,使之落在测量系统量程之内,最好落在系统量程的 $2/3 \sim 3/4$ 处。如果量程选择过小,则会使系统过载而受损;如果量程选择过大,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

$$\delta_j = \frac{\Delta_{\max}}{L_m} \times 100\% \quad (1-13)$$

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 $S$ 表示测量系统对被测量变化的敏感程度,一般定义为测量系统输出增量 $\Delta y$ 与被测量增量 $\Delta x$ 之比,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-14)$$

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。在同一输入量时,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1-5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。

$$H_y = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-15)$$



产生迟滞误差的原因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。

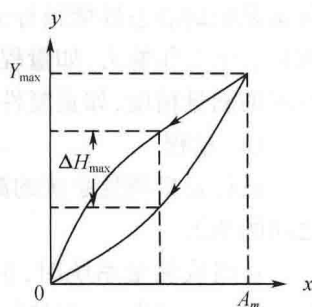


图 1-5 迟滞误差

### (6) 漂移

漂移是指测量系统在输入不变的条件下, 输出随时间而变化的趋势。在规定的条件下, 当输入不变时在规定时间内输出的变化, 称为点漂。在测量系统量程范围内最低值处的点漂, 称为零点漂移。

产生漂移的原因有两方面: 一方面是仪器自身的结构参数变化; 另一方面是周围环境的变化对输出的影响, 如环境中温度、湿度的变化。最常见的漂移是温漂, 即由于周围环境温度的变化而引起输出的变化, 进一步引起测量系统的灵敏度和零位发生漂移, 即灵敏度漂移和零点漂移。

## 1.3.2 测量系统的动态特性

### 1. 测量系统一般动态数学模型

测量系统的动态特性是指输入量随时间变化时, 系统输出随输入而变化的关系。其数学表达式称为系统的动态数学模型, 由系统本身的物理结构所决定, 可以通过支配具体系统的物理定律来获得。在忽略测量系统的某些固有物理特性并进行适当简化处理以后, 一般的测量系统都可认为是线性的, 因此可以用式(1-16)来描述测量系统输入  $x(t)$  与输出  $y(t)$  的关系。

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \quad (1-16)$$

式中,  $a_i$  和  $b_j$  为与测量系统物理参数有关的常数 ( $i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m$ )。

式(1-16)为线性微分方程, 求解该方程, 可以得到测量系统对一定输入量的响应。对此类方程的求解, 已有成熟的方法, 工程上常用的方法就是拉普拉斯(拉氏)变换。对式(1-16)作拉氏变换, 可得

$$a_n s^n Y(s) + \cdots + a_1 s Y(s) + a_0 Y(s) = b_m s^m X(s) + \cdots + b_1 s X(s) + b_0 X(s) \quad (1-17)$$

式中  $X(s), Y(s)$ ——系统输入量和输出量的拉氏变换;

$s$ ——复变量, 称为拉氏算子。

式(1-17)为复数域内的代数方程, 求解该方程则可得复数域上的解, 再利用拉氏反变换则可以得到时间域的解, 即

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] \quad (1-18)$$

应该指出, 关于拉普拉斯变换及拉普拉斯反变换有严格的数学定义, 其积分运算很复杂。在实际使用中, 可以直接运用拉普拉斯变换表, 不必进行复杂的积分运算。