

高等学校教材



# 工业自动化 仪表与过程控制

(第4版)

**GONGYE ZIDONGHUA  
YIBIAO YU GUOCHENG KONGZHI**

主编 张根宝

西北工业大学出版社

高等学校教材

# 工业自动化仪表与过程控制

(第4版)

主编 张根宝  
编者 黄敏 马汇海 李艳  
赵艳 姜丽波

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书全面系统地介绍了工业自动化仪表与过程控制的基础知识和最新内容。主要包括:检测的基本知识、工业生产过程中常规参数(温度、压力、流量、物位等)的检测方法及测量仪表、调节仪表、显示仪表、执行器、自动控制系统的基本概念、简单过程控制系统、复杂过程控制系统以及一些典型的工业生产过程控制系统等内容。

本书既可作为高等学校自动控制、仪表、化工、工艺等专业学生的教材,亦可供从事生产过程控制的科研人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工业自动化仪表与过程控制/张根宝主编. —4版. —西安:西北工业大学出版社,2008.8  
ISBN 978-7-5612-1686-6

I. 工… II. ①张… III. ①工业仪表:自动化仪表②工业—过程控制 IV. ①TH86  
②TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第070515号

- 出版发行:西北工业大学出版社  
通信地址:西安市友谊西路127号 邮编:710072 电话:(029)8493844  
网 址:www.nwpup.com  
印刷者:陕西向阳印务有限公司  
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张:23.75  
字 数:590千字  
版 次:2008年8月第4版 2008年8月第1次印刷  
定 价:36.00元

# 前 言

---

随着现代科学技术的迅猛发展,自动化仪表、计算机及控制技术的不断完善和发展,新工艺、新技术、新设备不断出现;各类生产工艺技术不断改进、提高,生产过程向连续化、大型化转变;对生产过程内在规律的深入研究,制造出了大量先进的自动化成套设备及装置。例如集散控制系统(DCS)、可编程控制器(PLC)、现场总线(FB)等。同时,生产过程控制由常规仪表控制向计算机全过程控制发展;控制规律由常规PID控制向先进控制(APC)、优化控制发展;生产过程自动化水平由局部自动化向综合自动化发展。为了适应这些发展要求,各类生产过程工艺专业技术人员必须具有过程自动化及仪表的基本知识;在工艺设计与技术改造中,熟悉生产过程自动控制的主要内容及具体方案,并与自动化技术人员密切合作。自动化工程技术人员不仅要完全掌握自动化仪表、计算机及自动控制技术等方面的基本知识,而且要熟悉生产工艺过程的特点和解决其控制难题,这样才能合理设计和维护生产过程自动化工程。本书正是为适应这种需要而编写的。

本书全面系统地介绍了工业自动化仪表与过程控制的基础知识和最新内容。首先,在工业自动化仪表方面介绍了测量的基本知识,深入地叙述了工业自动化仪表的基本内容(如测量和变送仪表、调节仪表、显示仪表、执行器等内容);其次,在过程控制方面介绍了自动控制系统的基本概念和简单的过程控制系统,深入地叙述了复杂过程控制系统的主要内容;最后介绍了一些典型的工业生产过程控制系统。

本书编写过程中力求涵盖工业自动化仪表与过程控制工程的精华内容,尽量增加现代检测技术和控制技术中较为实用的内容,做到概念清楚、深入浅出、详略得当。每章后附有思考题与习题,便于读者检查学习效果。

本书共分9章,由陕西科技大学测控教研室张根宝老师主编,黄敏、马汇海、李艳、赵艳、姜丽波参编。

由于作者水平有限,书中的不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2006年5月

# 目 录

---

<b>第 1 章 检测技术的基本知识</b> .....	1
§ 1.1 概述 .....	1
§ 1.2 检测仪表的分类与组成 .....	2
§ 1.3 检测仪表的品质指标 .....	4
§ 1.4 测量误差及误差分析 .....	7
§ 1.5 系统误差的消除方法.....	10
§ 1.6 随机误差及其估算.....	12
§ 1.7 误差的综合.....	16
§ 1.8 测量结果的数据处理.....	20
思考题与习题 .....	25
<b>第 2 章 检测仪表与传感器</b> .....	27
§ 2.1 温度检测及仪表.....	27
§ 2.2 压力检测及仪表.....	47
§ 2.3 流量检测及仪表.....	65
§ 2.4 物位检测及仪表.....	88
思考题与习题 .....	95
<b>第 3 章 显示仪表</b> .....	98
§ 3.1 模拟式显示仪表.....	98
§ 3.2 数字式显示仪表 .....	110
思考题与习题.....	129
<b>第 4 章 自动调节仪表</b> .....	130
§ 4.1 概述 .....	130
§ 4.2 基本控制规律及其对系统过渡过程的影响 .....	131
§ 4.3 模拟式控制器 .....	138
§ 4.4 数字式控制器 .....	146

思考题与习题.....	156
<b>第 5 章 执行器.....</b>	<b>158</b>
§ 5.1 气动执行器 .....	158
§ 5.2 电动执行器 .....	168
§ 5.3 电-气转换器及电-气阀门定位器 .....	169
思考题与习题.....	170
<b>第 6 章 自动控制系统的基本概念.....</b>	<b>172</b>
§ 6.1 工业自动化的主要内容 .....	172
§ 6.2 自动控制系统的组成 .....	174
§ 6.3 工艺管道及控制流程 .....	176
§ 6.4 自动控制系统的方框图 .....	178
§ 6.5 自动控制系统的分类 .....	181
§ 6.6 自动控制的过渡过程和品质指标 .....	182
§ 6.7 被控对象的数学模型 .....	188
思考题与习题.....	203
<b>第 7 章 简单过程控制系统.....</b>	<b>207</b>
§ 7.1 简单控制系统的结构与组成 .....	207
§ 7.2 被控变量的选择 .....	209
§ 7.3 操纵变量的选择 .....	211
§ 7.4 测量元件特性的影响 .....	215
§ 7.5 控制器控制规律的选择 .....	217
§ 7.6 控制器参数的工程整定 .....	220
思考题与习题.....	226
<b>第 8 章 复杂过程控制系统.....</b>	<b>228</b>
§ 8.1 串级控制系统 .....	228
§ 8.2 比值控制系统 .....	240
§ 8.3 前馈控制系统 .....	245
§ 8.4 多冲量控制系统 .....	251
思考题与习题.....	253
<b>第 9 章 典型工业生产过程控制系统.....</b>	<b>256</b>
§ 9.1 传热设备的控制 .....	256
§ 9.2 精馏过程的控制 .....	270
§ 9.3 制浆造纸过程的控制 .....	290
§ 9.4 流体输送设备的控制 .....	299

§ 9.5 化学反应器的控制 .....	305
思考题与习题 .....	313
<b>附录 I</b> .....	316
附表 1 铂铑 <sub>10</sub> -铂热电偶分度表 .....	316
附表 2 镍铬-康铜(铜镍)热电偶分度表 .....	321
附表 3 镍铬-镍硅热电偶分度表 .....	322
附表 4 铂电阻分度表 .....	325
附表 5 铜电阻 Cu50 分度表 .....	328
附表 6 铜电阻 Cu100 分度表 .....	329
附表 7 常见压力表规格及型号 .....	330
附表 8 自控工程设计字母代码 .....	331
附表 9 仪表安装位置的图形符号表示 .....	332
<b>附录 II 参考实验</b> .....	333
实验一 数字调节器的基本操作 .....	333
实验二 系统温度的测量过程 .....	343
实验三 系统液位的测量过程 .....	346
实验四 温度变送器的校验 .....	349
实验五 弹簧管压力表的校验 .....	353
实验六 压力变送器的校验 .....	357
实验七 气动调节阀实验测量 .....	362
实验八 对象特性实验测量 .....	365
<b>参考文献</b> .....	368

# 第 1 章 检测技术的基本知识

## § 1.1 概 述

### 1.1.1 检测的概念

所谓过程检测是指在生产过程中,为及时掌握生产情况和监视、控制生产过程,而对其中一些变量进行的定性检查和定量测量。

检测的目的是为了获取各过程变量值的信息。根据检测结果可对影响过程状况的变量进行自动调节或操纵,以达到提高质量、降低成本、节约能源、减少污染和安全生产等目的。

通过测量可以得到被测量的测量值,然而测量目的还未全部达到,为了准确地获取表征对象特征的定量信息,还要对实验结果进行数据处理与误差分析、估计结果的可靠性等,以便为保证安全生产、提高经济效益,保证产品的质量,实现生产过程的自动化,以及科学研究等提供可靠的数据。至于检测技术,其意义更加广泛。它是指下面的全过程:按照被测对象的特点,选用合适的测量仪器与实验方法,通过测量及数据的处理和误差分析,准确得到被测量的数值,并为提高测量精度、改进测量方法及测量仪器,为生产过程的自动化等提供可靠的依据。

检测技术涉及的内容非常广泛,包括被检测信息的获取、转换、显示以及测量数据的处理等技术。随着科学技术的不断进步,特别是随着微电子技术、计算机技术等高科技的发展以及新材料、新工艺的不断涌现,检测技术也在不断发展,已经成为一门实用性和综合性很强的新兴学科。

检测仪表作为人类认识客观世界的重要手段和工具,应用领域十分广泛,工业过程是其最重要的应用领域之一。工业过程检测具有如下特点:

(1) 被测对象形态多样 有气态、液态、固态介质及其混合物,也有的被测对象具有特殊性质(如强腐蚀、强辐射、高温、高压、深冷、真空、高粘度、高速运动等)。

(2) 被测参数性质多样 有温度、压力、流量、物位等热工量,也有各种机械量、电工量、化学量、生物量,还有某些工业过程要求检测的特殊参数(如纸浆的打浆度、浓度、白度、硬度、得率、黑液波美度等)。

(3) 被测变量的变化范围宽 如被测温度可以是 $1\ 000^{\circ}\text{C}$ 以上的高温,也可以是 $0^{\circ}\text{C}$ 以下的低温甚至超低温。



(4) 检测方式多种多样 既有离线检测,又有在线检测;既有单参数检测,又有多参数同时检测;还有每隔一段时间对不同参数的巡回检测;等等。

(5) 检测环境比较恶劣 在工业生产过程中,存在着许多不利于检测的影响因素,如电源电压波动,温度、压力变化,以及在工作现场存在水汽、烟雾、粉尘、辐射、振动等。因此要求检测仪表具有较强的抗干扰能力和相应的防护措施。

针对工业过程检测的上述特点,要求检测仪表不但具有良好的静态特性和动态特性,而且要对不同的被测对象和测量要求采用不同的测量原理和测量手段。因此,检测仪表的种类繁多,而且为了适应工业过程对检测技术提出的新要求,还将有各式各样的新型仪表不断涌现(如带有微处理器的智能仪表)。

### 1.1.2 测量的单位

数值为1的某量,称之为该量的测量单位或计量单位。由于测量单位是人为定义的,它带有任意性、地区性与习惯性等。例如,质量的单位就有公斤、市斤、磅、克、盎司、克拉等;长度的单位就有米、市尺、英尺、海里、码等。这些单位还是不够科学和严格的。单位制的混乱和不统一,不仅在世界各国,而且在一个国家内部都是存在的,它给人们的生活、生产及科学技术的发展等带来了极大的不便和困难,因此测量单位必须予以统一。同时,随着生产和科学技术的发展,对测量精确度的要求越来越高,因此,也必须提高测量单位的准确性与科学性。1993年由国家技术监督局颁布的《国际单位制及其应用》的国家强制性标准采用国际标准ISO 1000《国际单位制(SI)》(1991年第6版)见表1-1-1。计量单位种类庞杂,数量繁多,本书不作赘述。读者使用时,可参阅有关书刊。

表 1-1-1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安[培]	A
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
发光强度	坎[德拉]	cd

## § 1.2 检测仪器的分类与组成

检测仪器是能确定所感受的被测变量大小的仪器。它可以是传感器、变送器和自身兼有检出元件和显示装置的仪器。

传感器是能接受被测信息,并按一定规律将其转换成同种或别种性质的输出变量的仪器。输出为标准信号的传感器称为变送器。所谓标准信号,是指变化范围的上下限已经标准化

的信号(例如,4 ~ 20 mA DC,20 ~ 100 kPa 等)。

检测仪表可按下述方法进行分类:

(1) 按被测量分类 可分为温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、机械量检测仪表以及过程分析仪表等。

(2) 按测量原理分类 如电容式、电磁式、压电式、光电式、超声波式、核辐射式检测仪表等。

(3) 按输出信号分类 可分为输出模拟信号的模拟式仪表、输出数字信号的数字式仪表,以及输出开关信号的检测开关(如振动式物位开关、接近开关)等。

(4) 按结构和功能特点分类 按照测量结果是否就地显示,分为测量与显示功能集于一身的一体化仪表和将测量结果转换为标准输出信号并远传至控制室集中显示的单元组合仪表;按照仪表是否含有微处理器,分为不带有微处理器的常规仪表和以微处理器为核心的微机化仪表。后者的集成度越来越高,功能越来越强,有的已具有一定的人工智能,常被称为智能化仪表。目前,有的仪表供应商又推出了“虚拟仪器”的概念。所谓“虚拟仪器”是在标准计算机的基础上加一组软件或(和)硬件,使用者操作这台计算机,即可充分利用最新的计算机技术来实现和扩展传统仪表的功能。这套以软件为主体的系统能够享用普通计算机的各种计算、显示和通信功能。在基本硬件确定之后,就可以通过改变软件的方法来适应不同的需求,实现不同的功能。虚拟仪器彻底打破了传统仪表只能由生产厂家定义,用户无法改变的局面。用户可以自己设计、自己定义,通过软件的变化来更新自己的仪表或检测系统,改变传统仪表功能单一或有些功能用不上的缺陷,从而节省开发、维护费用,减少开发专用检测系统的时间。

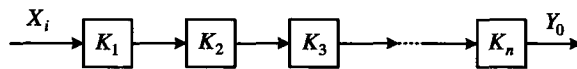


图 1-2-1 开环测量系统的构成方式

不同类型检测仪表的构成方式不尽相同,其组成环节也不完全一样。通常,检测仪表由原始敏感环节(传感器或检出元件)、变量转换与控制环节、数据传输环节、显示环节、数据处理环节等诸环节组成。检测仪表内各组成环节,可以构成一个开环测量系统,也可以构成闭环测量系统。开环测量系统是由一系列环节串联而成,其特点是信号只沿着从输入到输出的一个方向(正向)流动,如图1-2-1所示。一般较常见的检测仪表大多为开环测量系统。例如,如图1-2-2所示的温度检测仪表,以被测温度为输入信号,以毫伏计指针的偏移作为输出信号的响应,信号在该系统内仅沿着正向流动。闭环测量系统的构成方式如图1-2-3所示,其特点是除了信号传输的正向通路外,还有一个反馈回路。在采用零值法进行测量的自动平衡式显示仪表中,各组成环节即构成一个闭环测量系统。



图 1-2-2 温度检测系统示例

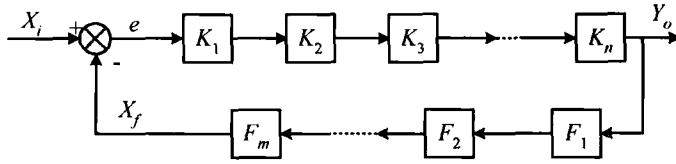


图 1-2-3 闭环测量系统的构成方式

### § 1.3 检测仪表的品质指标

根据工业过程检测的特点和需要,对检测仪表的品质有多种要求,现将较常用的品质指标做以介绍。

#### 1. 灵敏度

灵敏度是指检测仪表在到达稳态后,输出增量与输入增量之比,即

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1-3-1)$$

式中  $K$ ——灵敏度;

$\Delta Y$ ——输出变量  $Y$  的增量;

$\Delta X$ ——输入变量  $X$  的增量。

对于带有指针和刻度盘的仪表,灵敏度亦可直观地理解为单位输入变量所引起的指针偏转角度或位移量。

当仪表具有线性特性时,其灵敏度  $K$  为一常数,如图 1-3-1(a) 所示。反之,当仪表具有非线性特性时,其灵敏度将随着输入变量的变化而改变,如图 1-3-1(b) 所示。

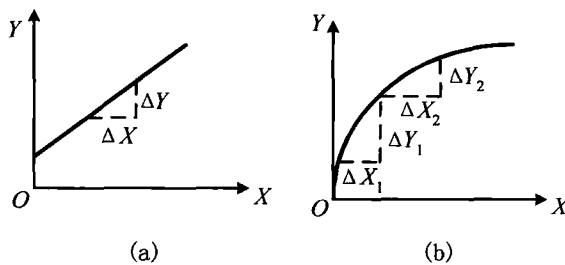


图 1-3-1 仪表的灵敏度

(a) 线性仪表; (b) 非线性仪表

#### 2. 线性度

在通常情况下,总是希望仪表具有线性特性,亦即其特性曲线最好为直线。但是,在对仪表进行校准时常常发现,那些理论上应具有线性特性的仪表,由于各种因素的影响,其实际特性曲线往往偏离了理论上的规定特性曲线(直线)。在检测技术中,采用线性度这一概念来描述仪表的校准曲线与规定直线之间的吻合程度,如图 1-3-2 所示。校准曲线与规定直线之间最大

偏差的绝对值称为线性度误差,其线性度可表示为

$$L = \frac{|Y_{01} - Y_{02}|}{Y_{\max}}$$

### 3. 分辨率

分辨率反映仪表能检测出被测量的最小变化的能力,又称分辨能力。当输入变量从某个任意值(非零值)开始缓慢增加,直至可以观测到输出变量的变化时为止的输入变量的增量即为仪表的分辨率。分辨率可以用绝对值来表示,也可以用满刻度的百分比来表示。例如,某位移传感器的分辨率为0.001 mm,某指针式仪表的分辨率为0.01%F.S(F.S表示满量程)等。

对于数字式仪表,分辨率是指数字显示器的最末一位数字间隔所代表的被测量值。例如,某光栅式位移传感器与100细分的光栅数显表相配时的分辨率为0.0001 mm,与20细分的光栅数显表相配时的分辨率为0.0005 mm等。

### 4. 滞环、死区和回差

仪表内部的某些元件具有储能效应,例如弹性变形、磁滞现象等,其作用使得仪表检验所得的实际上升曲线和实际下降曲线常出现不重合的情况,从而使得仪表的特性曲线形成环状,如图1-3-3所示。该种现象即称为滞环。显然在出现滞环现象时,仪表的同一输入值常对应多个输出值,并出现误差。

仪表内部的某些元件具有死区效应,例如传动机构的摩擦和间隙等,其作用亦可使得仪表检验所得的实际上升曲线和实际下降曲线常出现不重合的情况。这种死区效应使得仪表输入在小到一定范围后不足以引起输出的任何变化,而这一范围则称为死区。考虑仪表特性曲线呈线性关系的情况,其特性曲线如图1-3-4所示。因此,存在死区的仪表要求输入值大于某一限度才能引起输出的变化,死区也称为不灵敏区。

也可能某个仪表既具有储能效应,也具有死区效应,其综合效应将是以上两者的综合。典型的特性曲线如图1-3-5所示。

在以上各种情况下,实际上升曲线和实际下降曲线间都存在差值,其最大的差值称为回差,亦称变差,或来回变差。

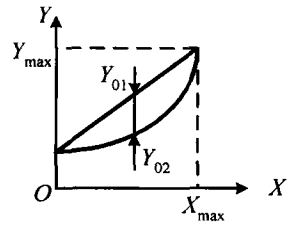


图 1-3-2 仪表的线性度

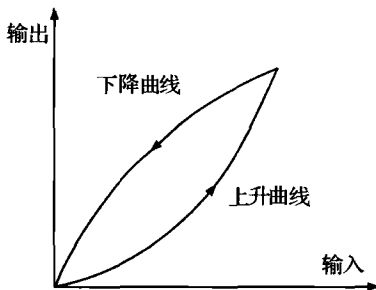


图 1-3-3 滞环效应分析

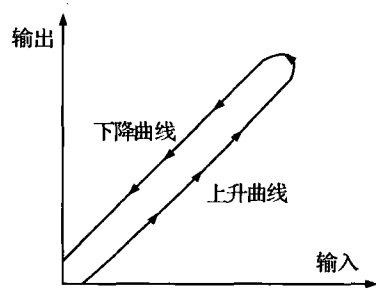


图 1-3-4 死区效应分析

### 5. 重复性和再现性

在同一工作条件下,同方向连续多次对同一输入值进行测量所得的多个输出值之间相互

一致的程度称为仪表的重复性,它不包括滞环和死区。例如,在图 1-3-6 中列出了在同一工作条件下测出的仪表的 3 条实际上升曲线,其重复性就是指这 3 条曲线在同一输入值处的离散程度。实际上,某种仪表的重复性常选用上升曲线的最大离散程度和下降曲线的最大离散程度中的最大值来表示。

再现性包括滞环和死区,它是仪表实际上升曲线和实际下降曲线之间离散程度的表示,常取两种曲线之间离散程度最大点的值来表示,如图 1-3-6 中所示。

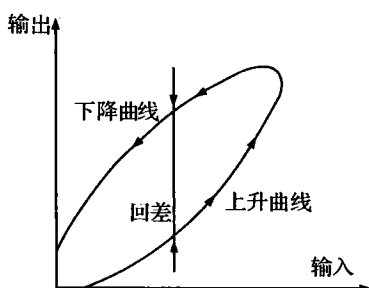


图 1-3-5 综合效应分析

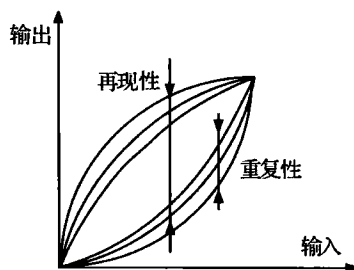


图 1-3-6 重复性和再现性分析

重复性是衡量仪表不受随机因素影响的能力,再现性是仪表性能稳定的一种标志,因而在评价某种仪表的性能时常同时要求其重复性和再现性。重复性和再现性优良的仪表并不一定精度高,但高精度的优质仪表一定有很好的重复性和再现性。

#### 6. 精确度

被测量的测量结果与(约定)真值间的一致程度称为精确度。仪表按精确度高低划分成若干精确度等级,见表 1-3-1。根据测量要求,选择适当的精确度等级,是检测仪表选用的重要环节。

表 1-3-1 工业常见仪表精度等级

精度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
允许误差 / (%)	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
引用误差 / (%)	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 2.0	≤ 2.5	≤ 5.0

#### 7. 长期稳定性

长期稳定性是仪表在规定时间(一般为较长时间)内保持不超过允许误差范围的能力。

#### 8. 动态特性

动态特性指被测量随时间迅速变化时,仪表输出追随被测量变化的特性。它可以用微分方程和传递函数来描述。但通常以典型输入信号(阶跃信号、正弦信号等)所产生的相应输出(阶跃响应、频率响应等)来表示。

## § 1.4 测量误差及误差分析

### 1.4.1 研究误差的意义

人类为了认识自然与改造自然,就需要不断地对自然界的现象进行测量和研究,在工程上就需要对各种工程参数进行测量和研究。由于测量方法和检测设备的不完善,周围环境的影响以及人们认识能力所限等,测量值和真值之间存在一定的差异,在数值上即表现为误差。随着科学技术的日益发展、人们认识能力的增长和知识水平的提高,虽可将误差控制得愈来愈小,但始终不能完全消除它。误差存在的必然性和普遍性,已为实践所证实。为了充分认识并进而减小或消除误差,必须对测量过程中始终存在的误差进行充分地研究。其意义归纳起来有:① 正确认识误差的性质,分析误差产生的原因,以便消除或减小它;② 正确处理数据,合理计算所得结果,以便在一定条件下,得到更接近于真值的数据;③ 正确组成检测系统,合理设计检测系统或选用测量仪表、选择正确的检测方法,以便在最经济的条件下,得到最理想的测量结果。

### 1.4.2 误差的定义

所谓测量误差是测量值与真值之差,它反映了测量质量的好坏。

自然界中的一切物体都是处于永恒的运动中,而被测量的真值的确定是假定在一定的时间内,实际上不变的被测量的真正大小,所以真值具有时间和空间的含义。真值可定义为在某一时刻和某一位置或状态下,某量的效应体现的客观值或实际值。

一般说来,真值是未知的,因此其误差也是未知的。有些情况真值是可以知道的。可知的情况有以下几种:

(1) 理论真值,如平面三角形三个内角之和恒为  $180^\circ$ 。

(2) 计量学约定值,如国际计量大会决定:长度单位是光在真空中( $1/299\,792\,458$ )秒时间间隔内所经路径的长度为 1 米(m);质量单位是铂铱合金的国际千克原器为 1 千克(kg);时间单位秒(s)是铯 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;电流强度单位安培(A)是一个恒定电流强度,若保持在真空内相距 1 m 的两无限长的圆截面可忽略的平行圆直导线内,该电流在这两导体之间每米长度上产生的作用力等于  $2 \times 10^{-7}$  N;热力学单位开[尔文](K)是水三相点热力学温度的  $1/273.16$ ;发光强度单位坎[德拉](cd)是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为  $540 \times 10^{12}$  Hz 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为  $(1/683)$  W/sr。物质的量单位摩[尔](mol)是一物系的物质的量,该物质中所包含的结构粒子粒数与  $0.012$  kg 碳 12 的原子数目相等。

凡满足以上条件呈现出的量值都是真值。

(3) 标准器相对真值,高一标准仪器的误差与低一级标准仪器或普通仪器的误差相比,当为其  $1/3 \sim 1/10$  时,即可认为前者的示值是后者的真值。在实际测量中,以无系统误差情况下足够多次测量所获一系列测量结果的算术平均值作为真值。

测量值是所用检测系统或仪表检测被测量的显示值。

### 1.4.3 误差分类

在测量过程中,测量误差按其产生的原因不同,可以分为三类。

#### 1. 系统误差

在同一条件下,多次测量同一被测参数时,测量结果的误差大小与符号均保持不变或在条件变化时按某一确定规律变化的误差。它是由于测量过程中仪表使用不当或测量时外界条件变化等原因所引起的。

必须指出,单纯地增加测量次数是无法减少系统误差对测量结果的影响,但在找出产生误差的原因之后,便可通过对测量结果引入适当的修正值而加以消除。系统误差决定测量结果的准确性。

#### 2. 随机误差

在相同条件下,对某一参数进行重复测量时,测量结果的误差大小与符号均不固定,且无一定规律的误差。产生随机误差的原因很复杂,是由许多微小变化的复杂因素共同作用的结果所致。

对单次测量来说,随机误差是没有任何规律的,既不可预测,也无法控制,但对于一系列重复测量结果来说,它的分布服从统计规律。因此,可以取多次测量结果的算术平均值作为最终的测量结果,以算术平均值均方根误差的 2~3 倍作为随机误差的置信区间,相应的概率作为置信概率,可减小误差对测量结果的影响。随机误差决定测量结果的精密度。

#### 3. 疏忽误差

测量结果显著偏离被测量的实际值所对应的误差。产生的主要原因是由于工作人员在读取或记录测量数据时的疏忽大意所造成的,带有这类误差的测量结果毫无意义,因此应加强责任心,细心工作,避免发生这类误差。

### 1.4.4 误差的表示方法

测量误差的表示方法有多种,其含义、用途各异,分别叙述如下:

#### 1. 绝对误差

被测量的测量值  $x$  与其真值  $L$  之间的代数差  $\Delta$ ,称为绝对误差。即

$$\pm \Delta = x - L \quad (1-4-1)$$

绝对误差一般只适用于标准量具或标准仪表的校准。在标准量具或标准仪表的校准工作中实际使用的是“修正值”。修正值与绝对误差大小相等,符号相反。其实际含义是真值等于测量值加上修正值,即

$$\text{真值} = \text{测量值} + \text{修正值}$$

采用绝对误差表示测量误差,不能确切地说明测量质量的好坏。例如,温度测量的绝对误差  $\Delta = \pm 1^\circ\text{C}$ ,测量  $1400^\circ\text{C}$  的钢水,是不易达到的测量结果;若测量人的体温,这种测量结果则达到了荒谬的程度。

#### 2. 相对误差

绝对误差与被测量的真值之比,称为相对误差。因测量值与真值很接近,工程上常用测量值代替真值来计算相对误差,其定义为

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \approx \frac{\Delta}{x} \quad (1-4-2)$$

式中  $\delta$ ——相对误差；

$x, L$ ——含义同绝对误差中的定义。

实际应用中常用百分数表示，即

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \approx \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1-4-3)$$

例如，测量温度的绝对误差为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ，水的沸点温度真值为  $100^\circ\text{C}$ ，测量的相对误差为

$$\delta = \frac{1}{100} \times 100\% = 1\% \quad (1-4-4)$$

### 3. 引用误差

仪表指示值的绝对误差  $\Delta$  与仪表量程  $B$  之比值，称为仪表示值的引用误差。引用误差常以百分数表示，亦称相对百分误差，记为

$$\delta_m = \frac{\Delta}{B} \times 100\% \quad (1-4-5)$$

#### 1.4.5 准确度、精密度和精确度

测量的准确度又称正确度，表示测量结果中的系统误差大小程度。系统误差愈小，则测量的准确度愈高，测量结果偏离真值的程度愈小。测量的精密度表示测量结果中的随机误差大小程度。随机误差愈小，精密度愈高，说明各次测量结果的重复性愈好。

准确度和精密度是两个不同的概念，使用时不得混淆。如图 1-4-1 所示形象地说明了准确度与精密度的区别。图中，圆心代表被测量的真值，符号  $\times$  表示各次测量结果。由图可见，精密度高的测量不一定具有高准确度。因此，只有消除了系统误差之后，才可能获得正确的测量结果。一个既“精密”又“准确”的测量称为“精确”测量，并用精确度来描述之。

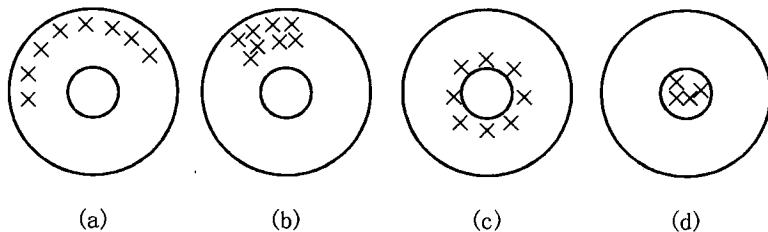


图 1-4-1 准确度与精密度的区别

- (a) 低准确度，低精密度；(b) 低准确度，高精密度；  
(c) 高准确度，低精密度；(d) 高准确度，高精密度

精确度所反映的是被测量的测量结果与(约定)真值间的一致程度。精确度高，说明系统误差与随机误差都小。



## § 1.5 系统误差的消除方法

系统误差直接影响测量的精确度,现介绍其基本的消除方法。

### 1.5.1 消除误差产生的根源

首先从测量装置的设计入手,选用最合适的测量方法和工作原理,以避免方法误差;选择最佳的结构设计与合理的加工、装配、调校工艺,以避免和减小工具误差。此外,应做到正确地安装、使用,测量应在外界条件比较稳定时进行,对周围环境的干扰应采取必要的屏蔽防护措施,等等。

### 1.5.2 对测量结果进行修正

在测量之前,应对仪器仪表进行校准或定期进行检定。通过检定,可以由上一级标准(或基准)给出受检仪表的修正值。将修正值加入测量值中,即可消除系统误差。

所谓修正值,是指与测量误差的绝对值相等而符号相反的值。例如,用标准温度计检定某温度传感器时,在温度为  $50^{\circ}\text{C}$  的测温点处,受检温度传感器的示值为  $50.5^{\circ}\text{C}$ ,则测量误差为

$$\Delta x = x - L = 50.5 - 50 = 0.5^{\circ}\text{C}$$

于是,修正值  $C = -\Delta x = -0.5^{\circ}\text{C}$ 。将此修正值加入测量值  $x$  中,即可求出该测温点的实际温度

$$L = x + C = 50.5 - 0.5 = 50^{\circ}\text{C}$$

从而消除了系统误差  $\Delta x$ 。

修正值给出的方式不一定是具体的数值,也可以是一条曲线、一个公式或图表。在某些自动检测仪表中,修正值已预先编制成相应的软件,存储于微处理器中,可对测量结果中的某些系统误差自动修正。

### 1.5.3 采用特殊测量法

在测量过程中,选择适当的测量方法,可使系统误差抵消而不带入测量值中去。下面介绍几种常用测量方法。

#### 1. 恒定系差消除法

(1) 零示法 零示法属于比较法中的一种,它是将被测量与已知的标准量进行比较,当两者的差值为零时,被测量就等于已知的标准量。电位差计就是采用零示法的典型示例。

电位差计测量热电偶热电势的工作原理如图 1-5-1 所示。图中,  $R$  为高线性度的线绕电阻,  $I$  为恒定的工作电流,  $G$  为高灵敏度的检流计,  $E_x$  为被测的未知热电势。测量时调节滑动触点  $C$  的位置,可改变  $R_{CB}$  上的压

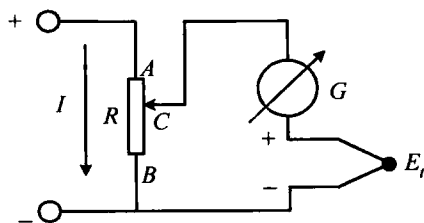


图 1-5-1 电压平衡原理图