



普通高等教育电气信息类规划教材



免费电子教案下载

[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



# 检测技术及仪表

樊春玲 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气信息类规划教材

# 检测技术及仪表

主 编 樊春玲  
副主编 赵亚红  
参 编 张春堂 战德志  
主 审 周以琳



机械工业出版社

本教材主要讲述了检测技术的基础知识、传感器与测量系统的基本原理和构成,重点讲述了对压力、温度、流量、物位、工业分析等五大重要参数的测量技术和相关仪表,同时还分析了测量显示仪表的构成和原理。

本教材可作为石油、石化、化工、化纤、环境等相关高等院校的测控技术与仪器、自动化及相关专业的本科生教材,亦可供有关工程技术人员和仪表技术人员阅读参考。

本书配套授课电子教案,需要的教师可登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 2399929378, 电话 010-88379753)。

### 图书在版编目(CIP)数据

检测技术及仪表/樊春玲主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 12

普通高等教育电气信息类规划教材

ISBN 978-7-111-44938-6

I. ①检… II. ①樊… III. ①自动检测-高等学校-教材 ②检测仪表-高等学校-教材 IV. ①TP274 ②TP216

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第283118号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:尚晨

责任印制:张楠

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2014年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·437千字

0001—3500册

标准书号:ISBN 978-7-111-44938-6

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

社服务中心:(010)88361066

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

网络服务

教材网:<http://www.cmpedu.com>

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着工业生产的不断发展,科学技术的突飞猛进,现有的检测理论和测量方法都发生了巨大变化。为了让更多的读者学习检测技术及仪表,笔者根据多年从事检测技术及仪表的教学和研究的经验,深感有必要编写一本简单、实用的检测技术及仪表教材。因此,笔者结合自身体会和经验编写了此书,希望有更多的读者通过对本书的学习可以快速、系统、全面地掌握检测技术及仪表的相关知识内容。

本书力求简单、实用,全书分为7章,具体内容安排如下。

第1章为绪论。主要讲述测量的作用、发展中的检测技术、测量误差的产生分类和处理,以及检测技术基础知识。

第2章为压力测量。主要讲述压力的基本概念与检测方法,并分别详细阐述了液柱式压力计、弹性式压力检测仪表、电气式压力检测仪表,以及压力检测仪表的选择、校验和安装,最后给出压力测量实例。

第3章为温度测量。主要讲述温标及温度检测方法,重点讲述了热电偶测温、热电阻测温、其他接触式温度检测仪表、非接触式温度检测仪表,以及温度检测仪表的选用与安装,最后给出温度测量实例。

第4章为流量测量。主要讲述了流量检测中的基本概念和主要检测方法,并分别讲述了容积式流量计、节流式流量计、靶式流量计、浮子式流量计、电磁式流量计等流量计的工作原理和结构特点,最后给出流量计测量实例。

第5章为物位测量。主要讲述了浮力式液位计、静压式液位计、电容式液位计以及非接触式物位测量的工作原理和结构特点,最后给出了物位测量实例。

第6章为工业分析仪表。主要讲述了热导式气体分析仪、氧量分析仪、pH值的自动测量、湿度的自动测量和密度的自动测量方法和典型仪表。

第7章为测量显示仪表。重点讲解了动圈式模拟式显示仪表和数字式显示仪表的工作原理和结构特点,并简述了微机化检测仪表和最新的检测技术。

本书由樊春玲担任主编,赵亚红副主编、张春堂、战德志参加了编写,周以琳主审。第1章和第4章由樊春玲编写;第2章和第3章由赵亚红编写;第5章和第7章由张春堂编写;第6章由战德志编写。

在本书的编写过程中得到了青岛科技大学相关部门的领导和同事们的支持,陈秀霆、赵慧超、丁玉环、李浩杰、郑彩霞、王迎迎等对书稿进行了资料整理、文字校对以及绘图工作。在此,对上述提到的机构和人员以及对本书中所引用的参考文献的作者一并表示真诚的感谢。

本书配有电子课件,读者可到 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载。

由于水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请广大读者给予批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

第1章 绪论	1
1.1 发展中的测量技术	1
1.2 测量误差	2
1.2.1 误差的产生分类	2
1.2.2 测量误差的处理	5
1.3 检测技术基础	12
1.3.1 检测的基本概念	12
1.3.2 测量系统或仪表的基本技术性能和术语	16
思考题和习题	20
第2章 压力测量	21
2.1 压力的基本概念与检测方法	21
2.1.1 压力的定义与单位	21
2.1.2 压力的表示与检测方法	22
2.2 液柱式压力计	24
2.2.1 液柱式压力计的工作原理	24
2.2.2 液柱式压力计的使用	25
2.3 弹性式压力检测仪表	27
2.3.1 弹性元件	27
2.3.2 弹簧管压力表	30
2.4 电气式压力检测仪表	31
2.4.1 应变式压力传感器	32
2.4.2 压阻式压力传感器	35
2.4.3 压电式压力传感器	37
2.4.4 电容式压力传感器	40
2.4.5 霍尔式压力传感器	46
2.4.6 其他压力传感器	48
2.5 压力检测仪表的选择、校验和安装	51
2.5.1 压力检测仪表的选择	52
2.5.2 压力检测仪表的校验	54
2.5.3 压力检测仪表的安装	55
2.6 压力测量实例	57

2.6.1 应变式压力测量系统 .....	57
2.6.2 电容式压力测量系统 .....	58
思考题与习题 .....	61
<b>第3章 温度测量</b> .....	<b>63</b>
3.1 温标及温度检测方法 .....	63
3.1.1 温标与温标的传递 .....	63
3.1.2 温度检测的方法 .....	66
3.2 热电偶测温 .....	67
3.2.1 热电偶测温原理 .....	67
3.2.2 热电偶的材料与结构 .....	71
3.2.3 热电偶冷端温度的处理 .....	77
3.2.4 热电偶测温线路及误差分析 .....	81
3.3 热电阻测温 .....	83
3.3.1 热电阻测温原理 .....	84
3.3.2 金属热电阻的材料与结构 .....	86
3.3.3 半导体热电阻 .....	90
3.4 其他接触式温度检测仪表 .....	91
3.4.1 膨胀式温度计 .....	91
3.4.2 PN 结测温与集成温度传感器 .....	93
3.5 非接触式温度检测仪表 .....	96
3.5.1 辐射测温的物理基础 .....	96
3.5.2 光学高温计与光电温度计 .....	98
3.5.3 全辐射温度计及比色温度计 .....	101
3.6 温度检测仪表的选用与安装 .....	103
3.6.1 温度检测仪表的选用 .....	103
3.6.2 温度检测仪表的安装 .....	104
3.7 温度测量实例 .....	106
3.7.1 配接 K 型热电偶的数字温度检测仪 .....	106
3.7.2 基于 AD590 的数字温度计 .....	108
思考题与习题 .....	109
<b>第4章 流量测量</b> .....	<b>112</b>
4.1 流量基本概念 .....	112
4.1.1 流量的定义 .....	112
4.1.2 流动状态与流量测量 .....	113
4.1.3 流体流动中的能量状态转换 .....	114
4.1.4 流量检测主要方法及流量计分类 .....	114
4.1.5 流量计的测量特性 .....	116
4.2 容积式流量计 .....	117
4.2.1 测量原理 .....	117

4.2.2 常用仪表 .....	117
4.3 节流式流量计 .....	121
4.3.1 测量原理 .....	123
4.3.2 流量特性 .....	126
4.3.3 节流式流量计的使用特点 .....	129
4.4 靶式流量计 .....	129
4.4.1 测量原理 .....	129
4.4.2 流量系数及压力损失 .....	130
4.4.3 靶式流量计的特点 .....	131
4.5 浮子式流量计 .....	132
4.5.1 传感器的结构和测量原理 .....	132
4.5.2 浮子流量计的工作特性 .....	133
4.5.3 刻度换算 .....	135
4.5.4 浮子流量计的使用特点 .....	135
4.6 电磁式流量计 .....	135
4.6.1 测量原理 .....	136
4.6.2 变送器的结构及特性 .....	136
4.6.3 变送器的信号处理 .....	137
4.6.4 电磁流量计的特点 .....	142
4.7 其他流量计 .....	142
4.7.1 涡轮式流量计 .....	142
4.7.2 漩涡式流量计 .....	144
4.7.3 超声波流量计 .....	146
4.7.4 质量流量计 .....	149
4.8 流量计的选用 .....	153
4.8.1 选用流量计应考虑的因素 .....	153
4.8.2 流量计的选型步骤 .....	157
4.9 流量测量实例 .....	157
4.9.1 高浓度啤酒稀释装置流量检测 .....	157
4.9.2 煤气(天然气)流量检测 .....	158
思考题与习题 .....	159
<b>第5章 物位测量</b> .....	<b>160</b>
5.1 浮力式液位计 .....	160
5.1.1 浮子式液位计 .....	160
5.1.2 变浮力式液位计 .....	163
5.2 静压式液位计 .....	164
5.2.1 静压法液位测量原理 .....	164
5.2.2 压力式液位计 .....	164
5.2.3 差压式液位计 .....	165



5.3	电容式液位计 .....	168
5.3.1	非导电介质的液位测量 .....	169
5.3.2	导电介质的液位测量 .....	170
5.3.3	固体料位的测量 .....	171
5.4	非接触式物位测量 .....	171
5.4.1	超声波物位计 .....	172
5.4.2	光电式物位计 .....	175
5.5	液位测量实例 .....	179
5.5.1	油田注聚液液位检测 .....	179
5.5.2	矿厂井下排水系统液位检测 .....	180
	思考题和习题 .....	181
<b>第6章</b>	<b>工业分析仪表 .....</b>	<b>182</b>
6.1	工业分析仪表简介 .....	182
6.1.1	工业分析仪表的现状与发展趋势 .....	182
6.1.2	工业分析仪表的分类及应用 .....	183
6.1.3	工业分析仪表的基本组成 .....	184
6.2	热导式气体分析仪 .....	185
6.2.1	热导分析的基本原理 .....	185
6.2.2	热导分析仪的检测器 .....	187
6.2.3	热导分析仪的测量桥路 .....	192
6.3	氧量分析仪 .....	193
6.3.1	磁式氧分析仪 .....	194
6.3.2	氧化锆氧量分析仪 .....	199
6.4	pH值的自动测量 .....	202
6.4.1	pH计的结构 .....	202
6.4.2	电位式pH计 .....	203
6.4.3	pH值测量及应用 .....	204
6.5	湿度的自动测量 .....	208
6.5.1	湿度的表示方法 .....	209
6.5.2	干湿球湿度计 .....	209
6.5.3	露点湿度计 .....	210
6.5.4	电解式湿度计 .....	212
6.5.5	电容式湿度计 .....	214
6.5.6	压电晶体振荡式湿度计 .....	215
6.5.7	电阻式湿度计 .....	216
6.6	密度的自动测量 .....	218
6.6.1	密度测量的基本概念 .....	218
6.6.2	液体密度的测量 .....	219
	思考题与习题 .....	230



<b>第7章 测量显示仪表</b> .....	232
7.1 模拟显示仪表 .....	233
7.1.1 动圈式模拟显示仪表概述 .....	233
7.1.2 动圈仪表的组成和工作原理 .....	233
7.1.3 测量线路 .....	237
7.1.4 自动平衡显示仪表 .....	242
7.2 数字式显示仪表 .....	244
7.2.1 数字显示仪表与模拟显示仪表的比较 .....	244
7.2.2 数字显示仪表的组成 .....	245
7.2.3 数字显示仪表的显示器件 .....	248
7.3 微机化检测仪表 .....	248
7.4 最新的检测技术 .....	249
7.4.1 生物传感器 .....	249
7.4.2 仿生传感器 .....	251
7.4.3 一体化测量技术 .....	254
7.4.4 网络化仪表和网络传感器 .....	255
思考题和习题 .....	259
<b>附录</b> .....	260
附录 A 常用热电偶分度表 .....	260
附录 B 常用热电阻分度表 .....	270
<b>参考文献</b> .....	274

# 第1章 绪 论

检测技术和测量仪表在人类不断认识自然和改造自然的过程中起着举足轻重、不容忽视的作用。无论在日常生活中还是在工程、医学、科学实验中，几乎人类在认识和改造自然的各个环节都离不开检测技术的应用。各种各样的测量仪表就像人的视觉、嗅觉、味觉、触觉一样在不断地帮助人们认识和感知世界，可以说如果在当今世界没有检测技术和仪表的存在，人类社会就很难发展和生存。各种新的设备、新的工艺过程的研究与产生，都是与各种参数的检测有着密切关系。随着工业生产的不断发展，科学技术的突飞猛进，对检测技术和仪表提出了许多新的要求，而新的检测技术和仪表的出现又进一步推动了科学技术的发展，所以检测技术的发展程度决定了科学技术的水平，即检测技术及仪表是衡量现代科学技术水平高低的一个标志。

一切科学都建立在精确的数据上，无论是自然科学还是人文科学，都是如此。而精确的数据获取依靠的就是测量。正如著名科学家钱学森曾说过：“信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术。测量技术是关键和基础”。

近20年来，我国自动检测技术有了长足的进步和发展。检测仪表和自动化系统广泛应用于炼油、化工、冶金、电力、电子、轻工、纺织、食品加工等行业。据悉，宝山钢铁集团的技术装备投资中，三分之一的经费用于购置仪器和自控系统。即使在原来认为可以土法生产的制酒工业，今天也需要通过精密的仪器仪表来严格测控各个生产流程，才能创造世界品牌。

精密的仪器仪表的应用是现代生产从粗放型经营转变为集约型经营必须采取的措施，是改造传统工业必备的手段，也是让产品具备竞争力、打入国际市场的必由之路。只有检测技术的不断发展才能促进我国各行各业自动化技术的进步以及科学实验的进步。然而和发达国家相比，我们还有很大的差距，可谓任重而道远。

## 1.1 发展中的测量技术

### 1. 科学技术发展突飞猛进

当今在激光技术、远红外技术、半导体集成技术、超导技术、同位素技术、超声技术、光纤技术、微波技术、仿生技术等方面新的研究成果不断涌现，科学技术的发展呈现突飞猛进的状态。

这些科学技术的飞速发展都离不开测量技术，同时它们的发展也进一步促进了各种测量工具和测量理论的发展。随着信息论的深入研究、基础数学研究的新成果以及各种新算法的提出对测量理论的提升作用是显而易见的。尤其要指出的是，计算机和网络技术的普及与提高更让现代检测技术如虎添翼。

### 2. 测量领域的扩展以及测量准确度的提高

检测技术发展的新成果主要表现在两个方面。一是大大提高了被测参数的准确度。如现

代宇航陀螺仪制造，误差可控制在“纳米级”以内。超大规模集成电路内部线路间距、物理光栅的刻划，其误差控制级别要求更高。检测技术的新发展为被测参数实现超高准确度测量提供了技术保证。二是极大地扩展了测量的对象和领域。在传统工业、农业、商务物流以及科学实验中，大型的复杂对象面临多输入参数和多输出参数的综合测量与控制，这离不开新型测量工具和现代测量理论的支持。此外，航空、航天、遥感遥测、海洋开发、环境保护、现代化战争的演习等，都离不开新型检测技术的支持。

### 3. 测量系统的变革趋势

近年来，基于新型检测理论和检测技术而开发研制的测量系统或新型仪器仪表广泛采用高新科学技术研究的成果、跨学科的综合设计、高精尖的制造技术以及严格的科学管理，从而使得测量系统或仪器仪表领域发生了根本性的变革——现代仪器仪表产品已成为典型的高科技产品。它完全突破了传统的光、机、电的框架，向着计算机化、网络化、智能化、多功能化的方向阔步前进。

纵观历史，剖析现状，展望未来，我们可以预见：传统的仪器仪表将仍然朝着高性能、高准确度、高灵敏、高稳定、高可靠、高环境适应和长寿命的“六高一长”的方向发展；新型的仪器仪表则将朝着微型化、集成化、电子化、数字化、多功能化、智能化、网络化、计算机化、综合自动化、光机电一体化、家庭化、个人化、无维护化以及组装生产自动化、规模化的方向发展。

总之，随着微电子技术、计算机技术、软件技术、网络技术的高速发展及其在仪器仪表中的应用，仪器仪表结构将不断发生新的质的变化。冲破传统思维方式，发展新的测量理论已是测量系统技术革命的大势所趋。

## 1.2 测量误差

在对各种生产过程的参数进行测量时，总会包括有能量形式的一次或多次转换过程，以及测量单位的比较过程。如果这些过程是在理想的环境、条件下进行，即假设一切影响因素都不存在，则检测结果将是十分准确的。但是这种理想的环境和条件实际上是不存在的，例如用检测元件对被测变量进行测量时，势必伴随着各种形式的转换原理，但这种转换往往不是十分准确，而是某种程度的近似，所以总是存在一定的转换误差；还有检测元件进行实际测量时，其实际工作条件往往偏离设计时的工作状态，因而测量值会产生附加误差，同时有些检测元件经过一段时间的使用，会产生磨损，也会产生检测误差。除上述原因外，检测元件的安装位置、方法，以及被测对象，测量者本身，都不同程度地受到本身和周围各种因素的影响，而使检测产生误差，这样就会产生各种类型的误差，它们对检测系统的影响又是各不相同的，下面就误差产生的原因、分类及其处理方法分别予以讨论。

### 1.2.1 误差的产生分类

#### 1. 按误差出现的规律分类

##### (1) 系统误差

按一定规律（如线性、多项式、周期性等函数规律）变化的误差，或是指在同一测量条件下，对同一参数进行多次重复测量时所出现的数值大小和符号都相同的误差称为系统误

差，前者称为变值误差（规律误差），后者为恒值误差。引起系统误差的原因是检测元件转换原理不十分准确；仪表本身材料、零部件、工艺上的缺陷；测试工作中使用仪表的方法不正确；测量者有不良的读数习惯等。因为系统误差有一定的规律，它可归结为一个或几个因素的函数，只要找出其影响因素，引入相应的校正值，该系统误差就可以消除或减小；而对于恒值的系统误差，可以通过仪表零点加以调整。

在我国最新制定的国家计量技术规范 JFF 1001-2011《通用计量术语及定义技术规范》中，系统误差的定义是：在重复测量中保持不变或按可预见方式变化的测量误差的分量。可用对同一被测量进行无限多次重复测量所得结果的平均值  $\bar{y}$  与被测量的真值  $y_0$  之差来表示，即

$$\varepsilon = \bar{y} - y_0 \quad (1-1)$$

$$\bar{y} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1-2)$$

系统误差表明了测量结果偏离真值或实际值的程度。系统误差越小，测量就越准确。所以，系统误差经常用来表征测量准确度的高低。由于实际工作中，重复测量只能进行有限次，所以，系统误差也只能是一个近似的估计值。

## (2) 随机误差

在相同测量条件下（指在测量环境、测量人员、测量技术和测量仪器都相同的条件下）重复多次对同一参数进行测量时，每次的测量结果彼此仍不完全相同，每一个测量值与被测变量的真实值之间或多或少仍然存在着误差。其数值大小和性质都不固定，难以估计，这样的误差，称为随机误差。随机误差是由于测量过程中许多独立的、微小的偶然因素所引起的综合结果。就单次测量而言，随机误差的数值大小和符号难以预测，但在多次的重复测量时，其总体服从从一定的统计规律。从随机误差的统计规律中可了解它的分布特性。随机误差既不能用实验方法消除，也不能修正。但可从理论上估计其对检测结果的影响。

在我国最新制定的国家计量技术规范 JFF 1001-2011《通用计量术语及定义技术规范》中，随机误差的定义是：在重复测量中按不可预见方式变化的测量误差的分量。可用测量结果  $y_i$  与在重复条件下对同一被测量进行无限多次测量所得结果的平均值  $\bar{y}$  之差，即

$$\delta_i = y_i - \bar{y} \quad (1-3)$$

式中， $\bar{y}$  按照公式（1-2）来计算。

随机误差是测量值与数学期望之差，表明了测量结果的弥散性，它经常用来表征测量精度的高低，随机误差越小，精确度越高。因为在实际工作中，不可能进行无限多次测量，只能进行有限次测量，因此，实际计算出的随机误差也只是一个近似的估计值。

## (3) 粗大误差

在相同的条件下，多次重复测量同一值时，明显地歪曲了测量结果的误差，称为粗大误差。粗大误差是由于疏忽大意、操作不当或测量条件的超常变化而引起的。含有粗大误差的测量值称为坏值，所有的坏值都应去除，但不是凭主观随便去除，必须科学地舍弃。正确的实验结果不应该包含粗大误差。

## 2. 按误差表示方法分类

### (1) 绝对误差

设仪表的输出即示值为  $y$ ，真值为  $y_0$ ，则测量误差  $\Delta y$  为

$$\Delta dy = y - y_0 \quad (1-4)$$

即测量误差是测量结果减去被测量的真值。被测量的真值一般是无法直接测量到的，一般用“约定真值”或“相对真值”来代替。约定真值是一个接近真值的值，它与真值之差可忽略不计。实际测量中可以在没有系统误差的情况下，足够多次测量值的平均值作为约定真值。相对真值是指用准确度等级更高的仪器作为标准仪器来测量被测量，它的示值可作为低一级仪表的真值（相对真值有时称为标准值）。

绝对误差是有正、负号并有量纲的。误差  $\Delta y$  越小，表明测量结果  $y$  逼近被测量的真值  $y_0$  的程度越高。我们将  $\Delta y$  称为绝对误差，它的单位和被测量一样，注意它不是误差的绝对值。

## (2) 相对误差

为了能够反映测量工作的精细程度，常用测量误差除以被测量的真值，即用相对误差来表示。相对误差具有正号或负号，无量纲，用%表示。

$$\text{实际相对误差} \quad \delta_{\text{实}} = \frac{\Delta y}{y_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

$$\text{标称相对误差（示值相对出差）} \quad \delta_{\text{标}} = \frac{\Delta y}{y} \times 100\% \quad (1-6)$$

引用误差（相对百分误差）

$$\delta_{\text{引}} = \frac{\Delta y}{\text{量程}} \times 100\% \text{ 或 } \delta_{\text{引}} = \frac{y - y_0}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式(1-5)中， $y_0$  为真值，指被测量的实际值，客观存在的那个量。常常用准确度等级更高的仪表测量所获得的值来代表它。式(1-6)中， $y$  是被测量的标称值（即示值）。为了减少测量中的示值相对误差，在选择仪器仪表的量程时，应该使被测参数尽量接近满度值至少一半以上，这样示值相对误差会比较小。引用误差为仪表的绝对误差与仪表量程之比的百分数表示。在自动化仪表中，通常用最大引用误差来定义仪表准确度等级。

## 3. 按使用时工作条件分类

### (1) 基本误差

基本误差也称固有误差，是指仪表在规定条件下使用所存在的误差。它是由仪表本身的内部特性和制作质量等方面的缺陷造成的。任何仪表都存在基本误差，只是其大小不同而已。

### (2) 附加误差

附加误差是指测量仪表在非标准条件时所增加的误差。非标准条件下工作的测量仪表的误差，必然会比标准条件下的基本误差要大一些，这个增加的部分就是附加误差。它主要是由于外界因素的变化所造成的增加的误差。因此，测量仪表实际使用与检定、校准时的环境条件不同时，它必然会增加误差，这就是附加误差。如经常出现的温度附加误差、压力附加误差等。当测量仪表在静态条件下检定、校准，而在实际动态条件下使用时，也会带来附加误差。

## 4. 按误差的状态分类

### (1) 静态（稳态）误差

当被测量处于稳定不变时的测量误差。

### (2) 动态误差

当被测量处于变化过程中，检测所产生的瞬时误差。

## 1.2.2 测量误差的处理

### 1. 系统误差的处理

系统误差是指在重复性条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得到测量结果的平均值与被测量真值之差。平均值是消除了随机误差之后的真值的最佳估算值，它与被测量真值之间的差值就是系统误差。系统误差是固定的或按一定规律变化的，可以对其进行修正。但是由于系统误差及其原因不能获知，因此通过修正只能对系统误差作有限程度的补偿，而不能完全排除。例如某些测量仪表由于结构上存在问题而引起的测量误差就属于系统误差。

系统误差的表现形式大致可分为：

1) 恒定误差。恒定的系统误差也称为不变的系统误差。在测量过程中，误差的符号和大小是固定不变的，例如仪表的零点没校准好，即指针偏离零点，这样的仪表在使用时所造成的误差就是恒定误差。

2) 线性变化的系统误差。随着某些因素（如测量次数或测量时间）的变化，误差值也成比例增加或减少。例如用一把米尺测量教室的长和宽，若该尺比标准的长度差 1 mm，则在测量过程中每进行一次测量就产生 1 mm 的绝对误差，被测的距离愈长，测量的“一米”次数愈多，则产生的误差愈大，呈线性增长。

3) 周期性变化的系统误差。周期性变化的系统误差的符号与数值按周期性变化。例如指针式仪表，指针未能装在刻度盘中心而产生的误差。这种误差的符号由正变到负，数值也由大到小到零后再变大，重复地变化。

4) 变化规律复杂的系统误差。这种误差出现的规律，无法用简单的数学解析式表示出来。例如，电流表指针偏转角和偏转力矩不能严格保持线性关系，而表盘刻度仍采用均匀刻度，这样形成的误差变化规律非常复杂。

为了消除和减弱系统误差的影响，首先要能够发现测量数据中存在的系统误差。检验方法有很多，下面只介绍两种简单的判断方法。

1) 实验对比法。要发现与确定恒定的系统误差的最好方法是用更高一级准确度的标准仪表对其进行检定，也就是用标准仪表和被检验的仪表同测一个恒定的量。设用标准表以及用被检验仪表重复测量某一稳定量的次数都是  $n$  次，则可以得到标准表的一系列示值  $T_i$  和被检表的一系列示值  $x_i$ ，由此可得到系统误差  $Q$  为

$$Q = \bar{x} - \bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (1-8)$$

用这种方法，不仅能发现测量中是否存在系统误差，而且能给出系统误差的数值。有时，因测量准确度高或被测参数复杂，难以找到高一级准确度的仪表提供标准量。此时，可用相同准确度的其他仪表进行比对，若测量结果有明显差异，表明二者之间存在有系统误差，但还说明不了哪个仪表存在系统误差。有时，也可以通过改变测量方法来判断是否存在系统误差。

2) 残差校核法。设一组测量值为  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，计算求其残差  $v_1, v_2, \dots, v_n$ ，残差计算公式为

$$v_i = x_i - \bar{x} \quad (1-9)$$

然后，按测量次序的先后进行排列，把残差分为前后数目相等的两部分各为  $k$  次， $k = \frac{n}{2}$ ，求这两部分残差之和的差值

$$\Delta = \sum_{i=1}^k v_i - \sum_{i=n-k+1}^n v_i \quad (1-10)$$

若  $\Delta$  显著不为零，则测量中含有线性规律变化的系统误差。这是判断系统误差是否存在的判据，也称为马利克夫判据。

在测量中，系统误差的存在对测量结果有很大影响，所以一旦发现存在系统误差时，要尽量找出原因。先从产生系统误差的根源（测量人员、测量设备、测量方法、测量条件 4 个环节）上进行深入分析研究，找出原因，从而设法消除、减少系统误差。另外，还可以采用对测量结果修正的方法，或改进测量方法，以削弱系统误差的影响。

1) 修正值法。对所使用的测量器具和仪表进行校订，确定其示值与计量标准的差异，然后将这个数值给以相反的符号，修正测量结果。对于固定的或变化很小的系统误差，并且被修正的系统误差远大于其随机误差时，采用修正值的方法，可以提高测量准确度。

2) 改进测量方法。常用的方法有替代法、异号法、补偿法和抵消法等。替代法也称为置换法。例如用电桥测量电阻时（如图 1-1 所示），由于各桥臂自身的恒定系统误差的影响，而使被测电阻  $R_x$  产生误差。所谓替代法就是完成对被测量  $R_x$  测量后，不改变测量条件，立即用一个标准电阻箱  $R_n$  代替  $R_x$  进行同样测量。调整标准电阻箱  $R_n$  并使测量仪表的指示不变（维持原测量状态），则此标准电阻箱的读数  $R_n$  值即为  $R_x$  的值， $R_x = R_n$ ，从而消除了各桥臂误差的影响。

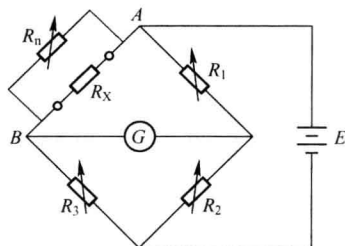


图 1-1 替代法示意图

## 2. 随机误差的处理与测量不确定度的表示

### (1) 随机误差的处理

随机误差的特点是其数值和符号就其个体而言是以随机方式出现的，但就其总体而言是服从统计规律的。对同一被测量进行无限多次重复性测量时，所出现的随机误差大多数是服从正态分布的。

设在重复条件下对某一个量  $x$  进行无限多次测量，得到一系列测得值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则各个测得值出现的概率密度分布可由下列正态分布的概率密度函数来表达

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-L)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-11)$$

式中， $L$  为真值。如果令误差为  $\delta = x - L$ ，则上式可改写为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (1-12)$$

式中， $\sigma$  称为标准偏差，是对一个被测量进行无限多次测量时，所得的随机误差的均方根值，也称均方根误差，即



$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - L)^2} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (1-13)$$

函数  $f(\delta)$  的曲线可参见图 1-2，称为正态分布的随机误差。

由图 1-2 不难看出，正态分布的随机误差具有 4 个特性：绝对值相等的正、负误差出现的概率相同（对称性）；绝对值很大的误差出现的概率接近于零，即误差的绝对值有一定的实际界限（有界性）；绝对值小的误差出现的概率大，而绝对值大的误差出现的概率小（单峰性）；由于随机误差具有对称性，在叠加时有正负抵消的作用，即具有抵偿性。即在  $n \rightarrow \infty$  时，有

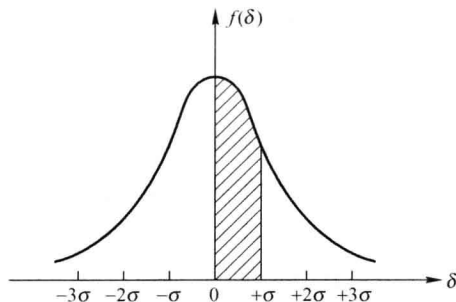


图 1-2 正态分布曲线

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad (1-14)$$

当测量次数无限多时，误差的算术平均值更趋近于零。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad (1-15)$$

假设在无系统误差及粗大误差的前提下，对某一被测量进行测量次数为  $n$  的等准确度测量（等准确度测量是指在相同条件下，用相同的仪器和方法，由同一测量者以同样细心的程度进行多次测量），得到有限多个数据  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。通常把这些测量数据的算术平均值  $\bar{x}$  作为被测量真值  $L$  的最佳估值，即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-16)$$

其理由有如下两点。

第一，利用式 (1-14)、式 (1-15) 两个公式可以证明，当测量次数  $n \rightarrow \infty$  时，各测量结果的算术平均值  $\bar{x}$ （即测量值的数学期望）等于被测量的真值  $L$ ，即

$$\bar{x} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = L \quad (1-17)$$

第二，虽然  $n$  不可能无穷大，即  $\bar{x}$  不可能就是真值，但可以证明，以算术平均值代替真值作为测量结果，其残差的平方和可达到最小值。设  $v$  为残差 [计算见式 (1-9)]，有

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \min \quad (1-18)$$

以上两点理由告诉我们一个事实，即  $\bar{x}$  是最接近于被测量的真值。

理论上是对一个被测量进行无限多次测量时，所得的随机误差的均方根为  $\sigma$ 。但在实际测量中，只能做到有限次测量，而真值要用约定真值，即用它的最佳估计值——多次测得值的算术平均值  $\bar{x}$  来代替。所以在很多情况下是无法用式 (1-13) 来计算  $\sigma$  的。数学家贝塞尔为此推导出标准偏差  $\sigma$  的估算公式，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1-19)$$

由标准偏差的定义可知，标准偏差  $\sigma$  的大小表征了  $x_i$  的弥散性，确切地说是表征了它们在真值周围的分散性。由图 1-3 可以看出， $\sigma$  越小，分布曲线越尖锐，意味着小误差出现的概率越大，而大误差出现的概率越小，表明测量的准确度高，测量值分散性小。标准偏差  $\sigma$  的数值大小取决于具体的测量条件，即仪器仪表的准确度、测量环境以及操作人员素质等。

如前所述，对于有限次等准确度测量，可以用有限个测量值的算术平均值作为测量结果。尽管算术平均值是被测真值的最佳估计值，但由于实际的测量次数有限，算术平均值毕竟还不是真值，它本身也含有随机误差，即如果分几组来测量某一参数，那么就有几个  $\bar{x}$ ，它们也分散在真值周围。假若各观测值遵循正态分布，则算术平均值也是遵循正态分布的随机变量。

算术平均值在真值周围的弥散程度可用算术平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$  来表征。可以证明，算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1-20)$$

式中， $\sigma_{\bar{x}}$  为算术平均值的标准偏差（亦称为测量结果的标准偏差）； $\sigma$  为单次测量的标准偏差（可用“贝塞尔”公式 (1-19) 来计算）； $n$  为单次测量的次数。

由式 (1-20) 可以看出，算术平均值的标准偏差  $\sigma_{\bar{x}}$  比单次测量的标准偏差  $\sigma$  小  $\sqrt{n}$  倍。因此，只要  $n \geq 2$ ， $\bar{x}$  围绕在真值周围的弥散程度远小于单次的测量值  $x_i$ ，这也再一次验证了用  $\bar{x}$  作为测量结果将比某单次测量值  $x_i$  具有更高的准确度。测量次数  $n$  越多， $\sigma_{\bar{x}}$  越小，测量结果的准确度也越高。但是由于  $\sigma_{\bar{x}}$  与测量次数  $n$  的二次方根成反比，故准确度的提高速率随着  $n$  的增加而越来越慢，如图 1-4 所示。

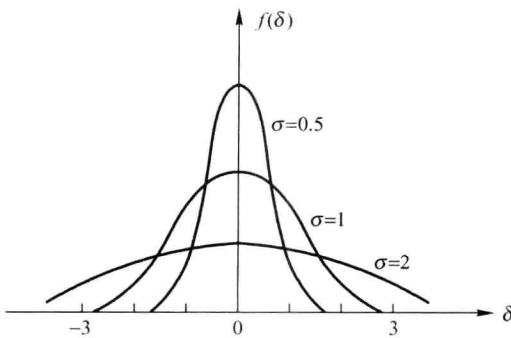


图 1-3  $\sigma$  的大小表征了  $x_i$  的弥散性图

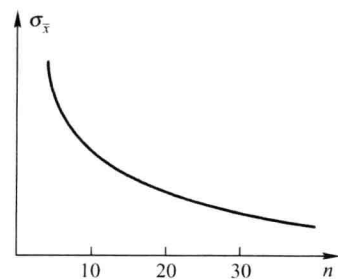


图 1-4 算术平均值的标准偏差与测量次数  $n$  的关系

因此，在实际测量中，一般取  $n$  为 10 ~ 30 次即可，考虑到计算机使用二进制， $n$  可取 8、16 或 32。有时次数如过多，容易引起操作人员的疲劳，随机误差反而增大。即使特别准确的测量也很少超过 100 次。

**【例 1-1】** 甲、乙两人分别用不同的方法对同一电感进行多次测量，结果如下（均无系统误差及粗大误差）。