



高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

现代测试技术

■ 王 勇 王昌龙 戴尔晗 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

TP274

110

2007

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

现代测试技术

王 勇 王昌龙 戴尔晗 编著

西安电子科技大学出版社

2007

内 容 简 介

本书共七章,分别介绍了测试技术的基本概念、数据处理理论与技术、现代测试仪器与设备、自动测试系统、工业现场总线、网络化测控技术、测试领域的软件技术等。本书各部分的概念相对完整,方便读者阅读,可使其在了解测试系统的组成原理以及测试方案的设计、组织与实现的基础上,掌握现代仪器仪表技术的发展动态与方向以及先进的测量手段与方法。

本书可作为大专院校仪器仪表及自动化相关专业的教材或参考书,也可供从事自动测试系统及网络化测试技术的开发、生产、应用、培训、管理的人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代测试技术/王勇,王昌龙,戴尔哈编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2007.3

高等学校仪器仪表及自动化类专业规划教材

ISBN 978-7-5606-1806-7

I. 现… II. ①王… ②王… ③戴… III. 测试技术—高等学校—教材
IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 020385 号

策 划 臧延新

责任编辑 张 梁 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 18.5

字 数 438千字

印 数 1~4000册

定 价 23.00元

ISBN 978-7-5606-1806-7/TP·0941

XDUP 2098001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

进入 21 世纪以来,测控技术和自动测试系统已广泛地渗入到了生产、科研、试验活动等领域。在我国,自动测控技术已经在通信、汽车、机电、冶金、石化、建筑、纺织、电力、高等教育等众多领域得到广泛的应用,并与相关技术紧密结合,促进了生产力的发展。

随着 IT 产业和通信技术、电子技术、计算机技术的高速发展,生产设备和产品的电子化、数字化、自动化、智能化的程度越来越高,与之配套的电子测量设备就必须适应这种发展要求。随着生产规模的扩大,现代工业测控的对象不再像以往那样局限于一点一地,一个大型自动测控系统的功能部件往往在地理上是分散的,但要求在测控系统内,其信息与管理的集成以集中管理、分布控制、数据共享为策略,从个别参数的测量转变成整个系统特征参数的测量,从单纯的接收显示转变为控制、分析、处理、计算与显示输出,从用单台仪器测量转变为用测量系统测量,从离线测量转变为在线检测,而且这些已介入于安装和制造等综合领域。

综合了通信技术、测量技术、电子技术、自动化技术和计算机技术于一体的广域自动测试系统的研发,已成为国内外知名厂商的重大课题。由于众多需求的推动,自动测试系统技术也有极大的发展,目前正处于从专业测试系统向通用测试系统转变的过程中。

信息技术特别是网络技术和计算机技术的飞速发展,已经对社会生产、生活和管理产生了深远的影响。测控领域因其对新技术的敏感性,而吸收和采纳了几乎最新的信息、通信、电子、计算机方面的技术。传统的测控技术与计算机技术、网络技术和通信技术的融合,使测控技术产生了深刻的变革。原先只能集中在一地的数据采集、数据分析、数据存储和数据表现,可实现地理位置上的分离和逻辑功能上的分离,而测控仪器可通过网络来实现系统的集成。现场总线技术是从 20 世纪 90 年代迅速发展起来的一种用于各种现场自动化设备与其控制系统的网络通信技术,其中,工业以太网也已进入控制领域。现代仪器仪表已经向着计算机化、智能化、网络化、软件化、综合化、多功能化的方向发展。仪器网络化测控技术则是现代测控技术的一个重要发展方向。

强而有力的软件技术的进步,在增强仪器功能和数据处理能力的同时,也为用户自由组合定义测试平台、完善人机界面提供了方便。以计算机软件技术为核心的虚拟仪器,因具有功能强大、测量速度快、自动化程度高、人机界面友善、灵活性强等优点,正越来越受到关注。

本书第 1、3 章由扬州大学的王昌龙博士编写,第 2、6 章由南京邮电大学的王勇博士编写,第 4、5、7 章由南京邮电大学的戴尔哈讲师编写。南京邮电大学的蒋国平博士在本书的编写过程中给予了指导与帮助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2006 年 11 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 测试测量的基本概念	1
1.2 现代电子测量的特点	2
1.3 电子测量的方法	3
1.4 电子测量仪器的分类	4
第二章 数据处理理论与技术	6
2.1 测量误差理论	6
2.1.1 测量误差的分类	6
2.1.2 系统误差的处理	9
2.1.3 随机误差的处理	11
2.1.4 粗大误差的处理	21
2.1.5 测量不确定度	22
2.1.6 测量数据的处理	23
2.2 信号分析、处理与参数估计	25
2.2.1 波形与频谱	25
2.2.2 信号变换与频谱	27
2.2.3 信号的时频域测试	30
2.2.4 信号的复原与处理	32
2.3 测试系统分析	34
2.3.1 测试系统的数学模型	34
2.3.2 典型测试系统	35
2.3.3 最佳检测系统	41
2.4 参数估计理论	44
2.4.1 基于统计分布的参数估计	44
2.4.2 基于模型的参数最小二乘估计	50
2.5 时间序列分析	55
2.5.1 时间序列的参数模型	55
2.5.2 时间序列的谱估计	56
2.6 时频信号分析	64
2.6.1 短时傅里叶变换与小波变换	64
2.6.2 基于 Matlab 软件包的编程示例	70
2.7 测试数据的可视化显示	75
2.7.1 测试数据的组织管理	75
2.7.2 三维可视化发布	77
第三章 现代测试仪器与设备	89
3.1 时域测试	89
3.1.1 存储示波器	89
3.1.2 调制域分析仪	94

3.1.3 时域反射计	97
3.1.4 时域网络分析设备	99
3.1.5 脉冲发生器	99
3.2 频域测试	100
3.2.1 频率特性测试仪	100
3.2.2 频谱分析仪	103
3.2.3 网络分析仪	105
3.3 数据域测试	115
3.3.1 数字信号发生器	115
3.3.2 数字特征分析仪	119
3.3.3 逻辑分析仪	131
3.3.4 边界扫描测试技术	136
3.4 电磁兼容测量	142
3.4.1 电磁兼容测量的基本概念	142
3.4.2 电磁辐射的基本概念	144
3.4.3 电磁兼容测量的主要仪器和设施	146
3.5 无线通信综合测试仪	157
第四章 自动测试系统	162
4.1 自动测试系统概述	162
4.1.1 自动测试系统的概念	162
4.1.2 自动测试系统的应用与发展	162
4.2 测试总线技术	165
4.2.1 GPIB 总线	166
4.2.2 VXI 总线	172
4.2.3 PXI 总线	175
4.2.4 USB 总线	180
4.2.5 IEEE 1394 总线	183
4.2.6 RS-232/RS-485 总线	184
4.3 测试软件	185
4.3.1 测试软件的分类	186
4.3.2 测试软件体系结构	186
4.3.3 测试软件中的一些关键技术	186
4.4 自动测试系统开发过程	191
第五章 工业现场总线	193
5.1 工业现场总线概述	193
5.1.1 现场总线及其控制系统的产生	193
5.1.2 现场总线技术标准	194
5.2 现场总线标准	197
5.2.1 FF 现场总线	202
5.2.2 Profibus 现场总线	212
5.2.3 CAN 现场总线	219
5.2.4 HART 现场总线	225
5.2.5 LonWorks 现场总线	233

5.3 工业以太网	240
第六章 网络化测控技术	245
6.1 网络化测控技术概述	245
6.1.1 网络化测控技术的产生	245
6.1.2 网络化测控技术与仪器	246
6.1.3 网络化测控技术的特点与任务	248
6.2 网络化测控技术建设平台	249
6.2.1 局域网	249
6.2.2 国际互联网	250
6.2.3 无线数据通信网	251
6.2.4 Web 服务器	256
6.3 传统设备的网络化改造	260
6.3.1 嵌入式控制系统	260
6.3.2 系统控制软件	266
6.3.3 系统通信协议	268
6.3.4 广域测控系统的集成	270
第七章 测试领域的软件技术	277
7.1 应用软件开发工具	277
7.1.1 LabVIEW	277
7.1.2 Measurement Studio	279
7.1.3 LabWindows/CVI	281
7.1.4 Visual C++	282
7.1.5 Visual Basic	283
7.1.6 Agilent VEE	284
7.2 通用测试语言	285
参考文献	288

第一章 绪 论

本章重点介绍现代测试测量的基本概念,简要介绍现代电子测量的特点、电子测量的方法、电子测量仪器的分类。

1.1 测试测量的基本概念

测量是人类对客观事物取得数量概念的认识过程,是人们认识和改造自然的一种不可或缺的手段。在自然界中,对于任何被研究的对象,若要定量地进行评价,必须通过测量来实现。在电子技术领域,细致严谨的分析只能来自正确的测量。

测量技术主要研究测量原理、方法和仪器等方面内容。测试测量涉及到宽广频率范围内的所有电量、磁量以及各种非电量的测量。测试测量广泛应用于科学研究、实验测试、工农业生产、通信、医疗及军事等领域。如今,测量技术已经成为一门发展迅速、应用广泛、精确度愈来愈高、对现代科学技术发展起着巨大推动作用的独立学科。

下面介绍一些测试测量的基本概念。

(1) 测量:为确定被测对象的量值而进行的实验过程。

在测量过程中,不可避免地存在着误差。在表示测量结果时应将测量结果与误差同时标注出来,以说明测量结果可信赖的程度。

(2) 量值:由数值与计量单位的乘积表示量的大小。例如:10 mA, 5 V 等。当然,测量的结果也可以用一组数据、曲线或图形等方式表示出来,但它们同样包含着具体的数值与单位。没有单位的量值是没有物理意义的。

(3) 被测量:被测量的量。它可以是待测量的量,也可以是已测量的量。

(4) 影响量:不是被测量,但却影响被测量的量值或计量器具示值的量。例如交流电压的频率等。

(5) 量的真值:某量在所处的条件下被完美地确定或严格定义的量值,或者可以理解为没有误差的量值。量的真值是一个理想的概念,实际上不可能确切得知,只能随着科技的发展及认识的提高去逐渐接近它。就目前而言,按国际的基准量的定义规定,在特定条件下的值可视为是真值。

近年来,在测量不确定度的表述中,鉴于量的真值是一个理想的概念,已不再使用它,而代之以“量的值”或“被测量的值”。

(6) 约定真值:为约定目的而取的可以代替真值的量值。一般来说,约定真值与真值的差值可以忽略不计。故在实际应用中,约定真值可以代替真值。

(7) 示值:对于测量仪器,是指示值或记录值;对于标准器具,是标称值或名义值;对于供给量仪器,是设置值或标称值。

(8) 额定值: 由制造者为设备或仪器在规定工作条件下指定的量值。

(9) 读数: 仪器刻度盘或显示器上直接读到的数字。例如: 以 100 分度表示 50 mA 的电流, 当指针指在 50 处时, 读数是 50, 而示值为 25 mA。有时为了避免差错和便于查对, 在记录测量的示值时应同时记下读数。

(10) 实际值: 满足规定精确度的用来代替真值的量值。实际值可以理解为由实验获得的, 在一定程度上接近真值的量值。在计量检定中, 通常将上级计量标准所复现的量值称为下级计量器具的实际值。

(11) 测得值(测量值): 由测量得出的量值。它可能是从计量器具直接得出的量值, 也可能是通过必要的换算查表等(如系数换算、借助于相应的图表或曲线等)所得出的量值。

1.2 现代电子测量的特点

与其他测量方法和测量仪器相比, 电子测量和电子测量仪器具有以下特点。

1. 测量频率范围宽

电子测量中所遇到的测量对象, 其频率覆盖范围很宽, 低至 10^{-6} Hz 以下, 高至 10^{12} Hz 以上。当然, 不能要求同一台仪器在这样宽的频率范围内工作。通常是根据不同的工作频段, 采用不同的测量原理和使用不同的测量仪器。例如超低频信号发生器、音频信号发生器、高频信号发生器等。当然, 随着技术的发展, 能在相当宽的频率范围内正常工作的仪器不断地被研制出来。例如, 现在一台较为先进的频率计, 其频率测量范围为 $10^{-6} \sim 10^{11}$ Hz。

2. 测量量程宽

量程是指测量范围的上下限值之差或上下限值之比。电子测量的另一个特点是被测对象量值大小相差悬殊。例如, 地面上接收到的宇宙飞船自外空发来的信号功率低到 10^{-14} W; 而远程雷达发射的脉冲功率可高达 10^8 W 以上, 两者之比为 $1:10^{22}$ 。在一般情况下, 使用同一台仪器, 同一种测量方法, 是难以覆盖如此宽的量程的。如前所述, 随着电子测量技术的不断发展, 单台测量仪器的量程也越来越宽。例如, 高档次的数字万用表可直接测量的电阻值的范围为 $3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^8 \Omega$ 。

3. 测量方便灵活

在电子测量中, 各种电量之间的转换很容易实现, 如电压、电流、功率、频率等。对于非电量, 如温度、湿度、压力、位移等物理量, 可通过各种类型的传感器将其转换为电量来测量。可以根据不同的对象、不同的要求, 以不同的方式方法很好地完成测量任务。

在电子测量中, 可以方便地利用各种转换技术, 如分频、倍频、调制、检波、斩波、V/F、A/D、D/A 等。还可以采用先进的信号处理技术, 使测量数据更为准确可靠。电子测量的显示方式也比较清晰、直观。例如, 可以采用发光二极管(LED)、液晶显示(LCD)屏和荧光屏显示。电子测量结果便于打印、绘图、传输、指示或报警。

4. 测量速度快

由于电子测量是基于电子运动和电磁波传播的, 加之现代测试系统中高速电子计算机的应用, 使得电子测量无论在测量速度方面, 还是在测试结果的处理和传输方面, 都可以

以极高的速度进行。这也是电子测量技术广泛用于现代科技各个领域的重要原因。例如神舟六号飞船的发射与运行,如果没有快速、自动的测量与控制则是无法想象的。

5. 可以进行遥测

如前所述,电子测量依据的是电子的运动和电磁波的传播,由此可以将现场各待测量转换成易于传输的电信号,用有线或无线的方式传送到测试控制台(中心),从而实现遥测和遥控。这使得对那些远距离、高速运动的,或者人类难以接近的地方的信号测量成为可能。

6. 易于实现测试智能化和测试自动化

电子测量本身是电子科学一个活跃的分支。电子科学的每一项进步,都非常迅速地在电子测量领域得到体现。随着电子计算机,尤其是功耗低、体积小、处理速度快、可靠性高的微型计算机的出现,给电子测量理论、技术和设备带来了新的革命。

1.3 电子测量的方法

测量技术基本上分为三大类:直接测量法、间接测量法和组合测量法。

1. 直接测量法

直接测量法用于保证测量结果与校验标准一致。在直接测量中,测量者直接测到的量值就是最终所需要的被测量的值。测量过程主要是一个直接的比较过程。例如,为了修正一段电缆的长度,就需要使用一根标尺去衡量它,并将多余部分切掉。假设需要保证电缆长度为 90.0 cm,则校验者须将标尺贴近电缆,将标尺零点对准电缆的一端,并在紧靠 90.0 cm 刻度的位置上做个标记,于是便可切出准确的长度(见图 1-1)。

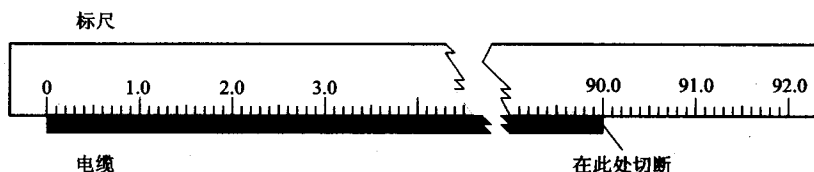


图 1-1 直接比较测量过程

2. 间接测量法

通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各个变量,然后将所测得的数值代入函数关系进行计算,从而求得被测量数值的方法,称为间接测量法。例如,测量透平机械轴功率 P 时,可借用关系式:

$$P = \frac{Mn}{9549}$$

通过直接测量扭矩 M 和转速 n ,然后将测得的数值代入上式,即可以求得轴功率 P 。

3. 组合测量法

测量中使各个未知量以不同的组合形式出现(或改变测量条件以获得这种不同组合),根据直接测量或间接测量所获得的数据,通过解联立方程组以求得未知量的数值的方法,

称为组合测量法。例如,用铂电阻温度计测量介质温度时,其电阻值 R_t 与温度 t 的关系是:

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2)$$

为了确定常数 a 、 b ,首先需要测得铂电阻在不同温度下的电阻值 R_t ,然后联立方程求解,得到 a 、 b 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,建立测压管的方向特性、总压特性和速度特性曲线的经验关系式等。

除按测量结果产生的方式分类外,还可以根据测量中的其他因素分类。

按不同的测量条件,可分为等精度测量与非等精度测量。在完全相同的条件下所进行的一系列重复测量称为等精度测量;反之,在多次测量中测量条件不尽相同的测量称为非等精度测量。

按被测量在测量过程中的状态,可分为静态测量与动态测量。在测量过程中,被测量不随时间而变化,称为静态测量;若被测量随时间而具有明显的变化,则称为动态测量。

实际上,绝对不随时间而变化的量是不存在的。通常把那些变化速度相对于测量速度十分缓慢的量的测量,按静态测量来处理。相对于静态测量,动态测量更为困难。这不仅在于参数本身的变化可能是很复杂的,而且测量系统的动态特性对测量的影响也是很复杂的。因而,动态测量数据的处理有着与静态测量不同的原理与方法。

1.4 电子测量仪器的分类

电子测量仪器有多种分类方法,总的可分为通用和专用两大类。通用电子仪器有较广泛的应用范围,比如示波器、多用表及通用计数器等。专用电子仪器有特定的用途。例如,光纤测试仪器用于测试光纤的特性,通信测试仪器用于测试通信线路及通信设备。另外,电子仪器还可按工作频段分为超低频、音频、视频、高频及微波等;按电路原理可分为模拟式和数字式;按仪器结构可分为便携式、台式、架式、模块式及插件式等;按使用条件又可分为Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ组仪器。Ⅰ组仪器为高精度度仪器,要求工作温度为 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$,湿度为 $30^{\circ}\text{C}(20\sim 75)\%\text{RH}$,只允许有轻微的振动;Ⅱ组仪器要求环境温度为 $0\sim 40^{\circ}\text{C}$,湿度为 $40^{\circ}\text{C}(20\sim 90)\%\text{RH}$,仪器在使用中允许有一般的振动和冲击,通用仪器应符合该组要求;Ⅲ组仪器可工作在室外环境,要求温度为 $-10\sim 50^{\circ}\text{C}$,湿度为 $50^{\circ}\text{C}(5\sim 90)\%\text{RH}$,在运输过程中允许受到振动与冲击。

按照被测参量的特性,电子仪器可分为下列几类。

1. 测量电信号的仪器

这类仪器用于测量电信号的各种特性。它们又可分为时域测试仪器、频域测试仪器及调制域测试仪器三大类。

1) 时域测试仪器

这类仪器用于测试电信号在时域的各种特性。例如:观察和测试信号的时基波形(示波器);测量电信号的电压、电流及功率(电压表、电流表及功率计);测量电信号的频率、周期、相位及时间间隔(通用计数器、频率计、相位计及时间计数器等);测量脉冲占空比、上升沿、下降沿、幅度;测量失真度及调制度等。

2) 频域测试仪器

该类仪器用于测量信号的频谱、功率谱、相位噪声功率谱等。典型仪器有频谱分析仪、信号分析仪等。

3) 调制域测试仪器

这类仪器描述了信号的频率、周期、时间间隔及相位随时间的变化关系,如图 1-2 所示。

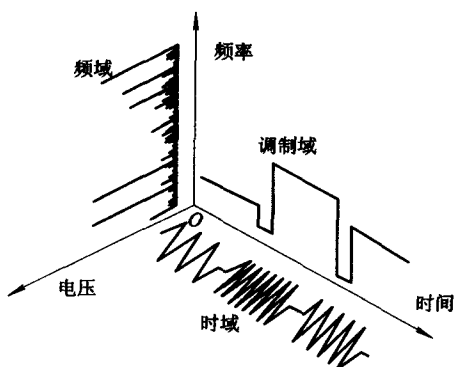


图 1-2 频率、周期、时间间隔及相位随时间的变化关系

美国 KP 公司于 1987 年首先推出了调制域分析仪。使用调制域分析仪可测量诸如压控振荡器(VCO)的暂态过程和频率漂移、调频和调相的线性及失真、数据和时钟信号的相位抖动、脉宽调制信号、扫描范围和周期非线性、旋转机械的启动及运转状况、锁相环路的捕捉及跟踪范围、捷变频信号等,当然也可无间隔地测量稳态信号的频率、周期及相位等。

2. 测量电子元器件及电路网络参数的仪器

这类仪器包括:

- (1) 测量电阻、电容、电感、阻抗、导纳及 Q 值等电子元件参数的仪器。
- (2) 测量半导体分立器件、模拟集成电路及数字集成电路等电子器件特性的仪器。
- (3) 测量各类无源和有源电路网络特性的仪器,包括测量电路的传输系数、频率特性、冲激响应、灵敏度、驻波比及耦合度等特性的仪器。

3. 数据域测试仪器

这类仪器所测试的不是电信号的特性,而是各种数据,主要是二进制数据流。它们所关心的不是信号的波形、幅度及相位等信息,而是信号在特定时刻的状态“0”和“1”。这些特定时刻包括时钟、读/写、输入/输出、选通及芯片选择等信号的有效沿。因此,用数据域测试仪器测试数字系统的数据时,除了输入被测数据流外,还应输入选通信号,以正确选通输入数据流。数据域测试的另一个特点是输入通道数多,例如,当测试微型计算机的地址或数据总线时,输入通道可多达 32 或 64 路。此外,该类仪器还有丰富的显示、触发及跟踪等功能。

第二章 数据处理理论与技术

本章主要介绍测试数据的处理方法,包括误差分析与处理、测试信号的时频域分析、测试系统分析、参数估计、时间序列分析等内容。希望通过本章内容的学习,读者能够掌握数据处理的基本方法。

2.1 测量误差理论

2.1.1 测量误差的分类

测量误差按其来源,可分为人员误差、仪器误差、方式误差、环境误差等;按其表征形式,可分为绝对误差、相对误差(相对真误差、实际相对误差、示值相对误差)、引用误差、容许误差等;按其性质,可分为系统误差、随机误差和粗大误差等。

1. 按表征形式分类

1) 绝对误差

绝对误差定义为示值与真值之差,即

$$\Delta A \stackrel{\text{def}}{=} A_x - A_0 \quad (2-1)$$

式中: ΔA ——绝对误差;

A_x ——示值,可以用测量结果的测量值、标准量具的标称值、标准信号源的调定值或定值代替;

A_0 ——被测量的真值,由于其不可知性,因此常常用约定真值和相对真值代替。

绝对误差可正可负,且是一个有单位的物理量。

绝对误差的负值称之为修正值,也叫补值,一般用 C 表示,即

$$C = -\Delta A = A_0 - A_x \quad (2-2)$$

测量仪器的修正值一般通过计量部门鉴定给出。从定义不难看出,仪器示值加上修正值就可获得相对真值,即实际值。修正值可以以图标、表格、公式等多种形式给出。

2) 相对误差

相对误差定义为绝对误差与真值之比,一般用百分数形式表示,即

$$\gamma_0 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

这里,真值 A_0 也用约定真值或相对真值代替,但在约定真值或相对真值无法知道时,往往用测量值代替,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta A}{A_x} \times 100\% \quad (2-4)$$

应注意,在误差比较小时, γ_0 和 γ_x 相差不大,无须区分;但在误差比较大时,两者相差悬殊,不能混淆。为了区分,通常把 γ_0 称为真值、相对误差或实际值相对误差,而把 γ_x 称为示值相对误差

在实际测量中,测量结果准确度的评价常常使用相对误差,相对误差愈小,准确度愈高。

3) 引用误差

引用误差是为了评价测量仪表的准确度等级而引入的,因为绝对误差和相对误差均不能客观正确反映测量仪表的准确度高。引用误差定义为绝对误差与测量仪器表量程之比,用百分比表示,即

$$\gamma_n \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中: γ_n ——引用误差;

A_m ——测量仪表的量程。

测量仪表的各指示(刻度)值的绝对值误差有正有负、有大有小。所以,确定测量仪表的准确度等级应用最大的应用误差,即绝对误差的最大绝对值 $|\Delta A|_m$ 与量程之比。若用 γ_m 表示最大引用误差,则有

$$\gamma_m = \frac{|\Delta A|_m}{A_m} \times 100\% \quad (2-6)$$

国家标准 GB776—76《测量指示仪表通用技术条件》规定,电测量仪表的准确度等级指数 a 分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0, 共 7 个级,他们的基本误差及最大引用误差不能超过仪表准确度等级指数 a 的百分数,即

$$\gamma_m \leq a\% \quad (2-7)$$

依照上述规定,不难得出:电测量仪表在使用时所产生的最大可能误差可由下式求出:

$$\Delta A_m = \pm A_m a\% \quad (2-8)$$

$$\gamma_x = \pm \left(\frac{A_m}{A_x} \right) a\% \quad (2-9)$$

【例】 某 1.0 级电压表,量程为 300 V,当测量值分别为 $U_1 = 300$ V、 $U_2 = 200$ V、 $U_3 = 100$ V 时,试求出测量值的最大绝对误差和示值相对误差。

解: 根据式(2-8)可得最大绝对误差:

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \Delta U_3 = \pm 300 \times 1.0\% = \pm 3 \text{ V}$$

由式(2-3)可得示值相对误差:

$$\gamma_{U_1} = \frac{\Delta U_1}{U_1} \times 100\% = \pm \frac{3}{300} \times 100\% = \pm 1.0\%$$

$$\gamma_{U_2} = \frac{\Delta U_2}{U_2} \times 100\% = \pm \frac{3}{200} \times 100\% = \pm 1.5\%$$

$$\gamma_{U_3} = \frac{\Delta U_3}{U_3} \times 100\% = \pm \frac{3}{100} \times 100\% = 3.0\%$$

由上例不难看出:测量仪表产生的示值测量误差 γ_x 不仅与所选仪表等级指数 a 有关,而且与所选仪表的量程有关。量程 A_m 和测量值 A_x 相差愈小,测量准确度就愈高。所以,

在选择仪表量程时,测量值应尽可能接近仪表满度值,一般不小于满度值的 $2/3$ 。这样,测量结果的相对误差将不会超过仪表准确度等级指数百分数的 1.5 倍。这一结论只适合于以标度尺上量限的百分数划分仪表准确度等级的一类仪表,如电流表、电压表、功率表;而对测量电阻的普通型欧姆表是不适合的,因为欧姆表的准确度等级是以标度尺长度的百分数划分的。可以证明欧姆表的示值接近其中值电阻时,测量误差最小,准确度最高。

4) 容许误差

容许误差是指测量仪器在使用条件下可能产生的最大误差范围,它是衡量测量仪器的最重要的指标。测量仪器的准确度、稳定度等指标都可用容许误差来表征。按照部颁标准 SJ943—82《电子仪器误差的一般规定》的规定,容许误差可用工作误差、固有误差、影响误差、稳定误差来描述。

(1) 工作误差。工作误差是在额定工作条件下仪器的极限值,即来自仪器外部的各种影响量和仪器内部的影响特性为任意可能的组合时,仪器误差的最大极限值。这种表示方式的优点是可利用工作误差直接估计测量结果误差范围,缺点是采用工作误差估计的测量误差一般偏大。

(2) 固有误差。固有误差是当仪器的各种影响量和影响特性处于基准条件下,仪器所具有的误差。由于基准条件比较严格,因此固有误差可以比较准确地反映仪器所固有的性能,便于在相同条件下对同类进行比对和校准。

(3) 影响误差。影响误差是当一个影响量处在额定使用范围内,而其他所有影响量处于基准条件时,仪器所具有的误差,如频率误差、温度误差等。

(4) 稳定误差。稳定误差是在其他影响和影响特性保持不变的情况下,在规定的时间内,仪器输出的最大值或最小值与其标称值的偏差。

容许误差通常用绝对误差表示,一般有以下三种方式可供选择:

$$\Delta = \pm (A_x \alpha \% + A_m \beta \%) \quad (2-10)$$

$$\Delta = \pm (A_x \alpha \% + n \text{ 个字}) \quad (2-11)$$

$$\Delta = \pm (A_x \alpha \% + A_m \beta \% + n \text{ 个字}) \quad (2-12)$$

式中: A_x ——测量值或示值;

A_m ——量限或量程值;

α ——误差的相对项系数;

β ——误差的固定项系数。

式(2-11)和式(2-12)主要用于数字仪表的误差表示,“ n 个字”所表示的误差是数字仪表在给定量限下的分辨力的 n 倍,即末位一个字所代表的被测量值的 n 倍。显然,这个值与数字仪表的量限和显示位密切相关,量限不同,显示位数不同,“ n 个字”所表示的误差值是不相同的。例如,某四位数字电压表,当 n 为 5,在 1 V 量限时,“ n 个字”表示的电压误差是 5 mV ;而在 10 V 量限时,“ n 个字”表示的电压误差是 50 mV 。通常仪器准确度等级指数由 α 和 β 之和来决定,即 $a = \alpha + \beta$ 。

2. 按性质分类

1) 系统误差

系统误差是指在重复条件下,对同一物理量无限多次测量结果的平均值减被测量的真值。在实际应用中,真值是用约定真值和相对真值来代替的,系统误差只能是近似估计。

系统误差的特点是,其大小、方向是恒定不变的或按一定规律变化的。恒定不变的为已定系统误差,在误差处理中是可被修正的;按一定规律变化的为未定的系统误差,在实际测量中,其方向往往是不确定的,在误差估计时可归结为测量不确定度。

系统误差的来源包括测量设备的基本误差,偏离额定工作条件时产生的附加误差,测量方法理论不完善所带来的方法误差及试验人员测量素质不高产生的人员误差。

2) 随机误差

随机误差是测量示值减去在重复条件下对同一被测量无限多次测量的平均值。

按照测量误差的定义,测量误差包括系统误差和随机误差。对照误差的定义,我们不难看出:在重复条件下无限多次测量的平均值只含有系统误差,也就是说,随机误差的期望为零。这一特性常被称为随机误差抵偿特性。原则上说,凡具有抵偿特性的误差都可以按随机误差进行处理。

随机误差产生于实验条件的微小变化,如温度波动、电磁场扰动、地面振动等。由于这些因素互不相关,人们难以预料和控制,所以随机误差的大小和方向随机不定、不可预测、不可修正。

3) 粗大误差

粗大误差是明显超出规定条件下预期的误差,它是统计异常值,也就是说含有粗大误差的测量结果明显偏离被测量的期望值。产生粗大误差的原因有读错或记错数据,使用有缺陷的计量器具,实验条件的突然变化等。显然,含有粗大误差的测量值是对被测量的歪曲,故应从测量数据中剔除。

应当指出,上述三类误差的定义是科学而严谨的,是不能混淆的。但是在测量实践中,对于测量误差的划分是人为的,是有条件的。在不同的测量场合和不同的测量条件下,误差之间是可以相互转化的。例如指示仪表的刻度误差,对于制造厂同型号的一批表来说具有随机性,属于随机误差;对于特定一块表的误差是固定不变的,属于固定误差。

2.1.2 系统误差的处理

产生系统误差的来源多种多样,因此,要消除系统误差只能根据不同的测量目的,对测量仪器、测量条件、测量方法及测量步骤进行全面分析,以发现系统误差,进而分析系统误差。然后采用相应的措施将系统误差消除或减弱到与测量要求相适应的程度。

1. 从产生系统误差的来源上消除

从产生系统误差的来源上消除或减弱系统误差是最基本的方法。它要求实验者对整个测量过程要有一个全面仔细的分析,弄清楚可能产生系统误差的各种因素,然后在测量过程中予以消除。

2. 利用修正的方法消除

利用修正的方法消除或减弱系统误差是常用的方法,它在智能化仪表中得到了广泛应用。所谓修正的方法,就是在测量或测量过程中,求取某类系统误差的修正值,而在测量的数据处理过程中手动或自动地将测量读数或结果与修正值相加,从测量读数或结果中消除或减弱该类系统误差。若用 C 表示某类系统误差的修正值,用 A_x 表示测量读数或结果,则不含该类系统误差的测量读数或结果 A 可由下式求出:

$$A = A_x + C \quad (2-13)$$

修正值的获得有以下三种途径:

- (1) 从有关资料中查取;
- (2) 通过理论推导求取;
- (3) 通过实验求取。

3. 利用特殊的测量方法消除

系统误差的特点是大小、方向恒定不变,具有可预见性,所以可选用特殊的测量方法予以消除。

1) 替代法

替代法是比较测量法的一种。此方法是先将被测量 A_x 接在测量装置上,并调节测量装置处于某一状态,然后用与被测量相同的同类标准 A_n 代替 A_x ,调节标准量 A_n ,使测量装置恢复原来的状态,于是被测量就等于调整后的标准量,即 $A_x = A_n$ 。例如,在电桥上利用替代法测量电阻,先把被测量电阻 (R_x) 接入电桥,调整电桥的比例臂 (R_1, R_2) 和比较臂 (R_3),使电桥平衡,得

$$R_x = \left(\frac{R_1}{R_2} \right) R_3 \quad (2-14)$$

则被测电阻 R_x 由桥臂参数决定,桥臂参数的误差则带给测量结果。若以标准电阻 R_n 代替被测电阻,调节标准电阻,使电桥重新平衡,得

$$R_n = \left(\frac{R_1}{R_2} \right) R_3 \quad (2-15)$$

显然, $R_x = R_n$, 且桥臂参数的误差不影响测量结果, R_x 仅取决于 R_n 的准确度等级。不难看出,替代法的特点是测量装置的误差不影响测量结果,但测量装置必须有一定的稳定性和灵敏度。

2) 差值法

差值法就是测出被测量 A_x 与标准量 A_n 的差值 $a = A_x - A_n$,再利用 $A_x = A_n + a$ 求出被测量。根据误差传递理论,被测量的绝对误差 (ΔA_x) 由标准量的绝对误差 (ΔA_n) 和被测量差值的绝对值 (Δa) 决定,即

$$\Delta A_x = \Delta A_n + \Delta a \quad (2-16)$$

测量结果的相对误差 $\Delta A_x / A_x$ 为

$$\frac{\Delta A_x}{A_x} = \frac{\Delta A_n}{A_x + a} + \frac{\Delta a}{A_x}$$

当 A_x 与 A_n 接近时,式(2-16)可近似为

$$\gamma_{A_x} = \gamma_{A_n} + \left(\frac{a}{A_x} \right) \gamma_a \quad (2-17)$$

式中: $\gamma_{A_x} = \Delta A_x / A_x$ ——测量结果的相对误差;

$\gamma_{A_n} = \Delta A_n / A_n$ ——标准量具的相对误差,由标准量具的准确度等级决定;

$\gamma_a = \Delta a / a$ ——测量差值 a 的相对误差,由测量差值 a 所选用仪表的准确度等级和量程决定。

从式(2-17)不难看出,测量结果的准确度由标准量具的准确度和测量差值准确度决