

高职高专教育电类系列教材

GAOZHI GAOZHUAN JIAOYU DIANLEI XILIE JIAOCAI



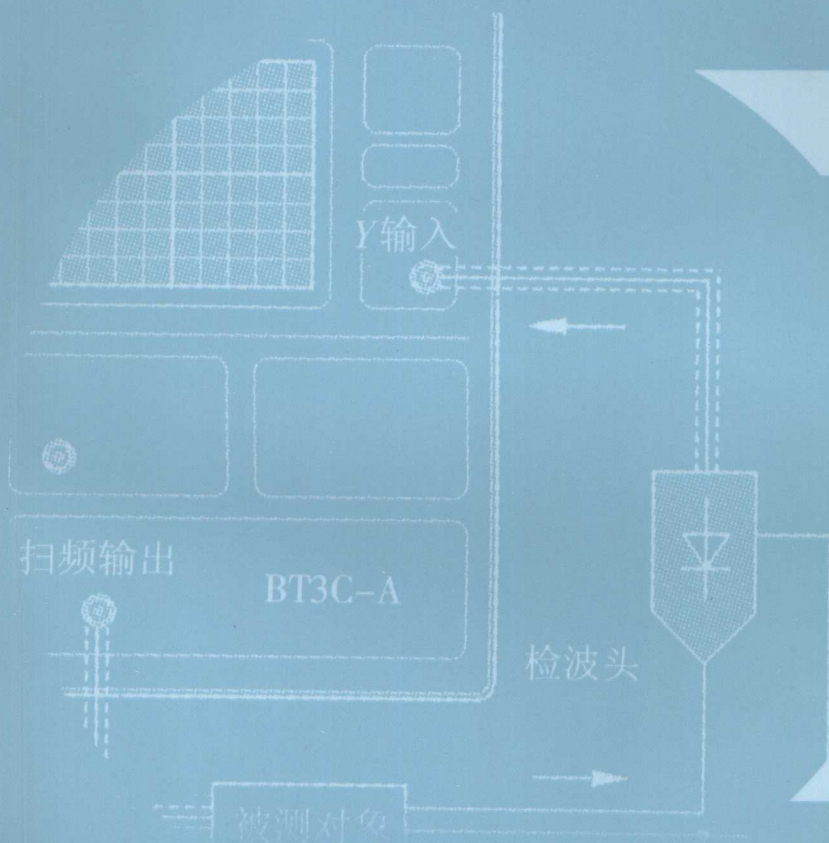
电子测量

安徽省高职高专教育“十一五”规划教材

DIANZI CELIANG

主编 孙忠献 副主编 慈 昂 孙晓雷

主 审 张学亮



安徽科学技术出版社

安徽省高职高专教育“十一五”规划教材

电子测量

●主 编 孙忠献

副主编 慈 昂 孙晓雷

参 编 陈 昕 常 辉 徐 强

主 审 林春芳

图书在版编目(CIP)数据

电子测量/孙忠献主编. —合肥:安徽科学技术出版社,
2007.9
高职高专教育电类系列教材
ISBN 978-7-5337-3810-5

I. 电… II. 孙… III. 电子测量-高等学校:技术学
校-教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 125907 号

电子测量

孙忠献 主编

出 版 人: 朱智润
责任编辑: 何宗华 期源萍
出版发行: 安徽科学技术出版社(合肥市政务文化新区圣泉路 1118 号
出版传媒广场, 邮编: 230071)
电 话: (0551)3533330
网 址: www.ahstp.com.cn
E - mail: yougoubu@sina.com
经 销: 新华书店
排 版: 安徽事达科技贸易有限公司
印 刷: 合肥锐达印务有限责任公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 16.25
字 数: 400 千
版 次: 2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
印 数: 2 000
定 价: 25.00 元

(本书如有印装质量问题, 影响阅读, 请向本社市场营销部调换)

前 言

电子测量仪器仪表的使用是电类工程技术人员从事专业技术工作的基本技能之一。在电子测量技术快速发展且应用范围不断拓展的背景下,本教材参照现阶段高等职业教育电类专业应用型与技能型人才培养要求编写,力图体现实用性、实践性、新颖性、适用性的特色。

本教材在内容安排上,以高职电类专业对电子测量技术理论与实践的实际需求、电子测量仪器仪表的发展为出发点,强调以必需、够用为度。同时充分考虑到专业技能培养需求、各院校教学设备配置与教学环境的多样性,有针对性地安排了多个综合实践单元。

本教材使用时,可根据各院校具体情况采用灵活的教学模式,并可根据需要选择教学内容。采用课堂(含多媒体教学)+实践教学模式时,本教材参考学时安排如下:

章 次	主 要 内 容	理论教学学时	实践教学学时	小计
第一章	电子测量基础	4	0	4
第二章	基本电路元件参数测量仪器	4	4	8
	综合实践 1			
第三章	信号发生器	4	4	8
	综合实践 2			
第四章	电子电压表	6	4	10
	综合实践 3、4			
第五章	频率与时间测量仪器	4	2	6
	综合实践 5			
第六章	通用电子示波器	4	6	10
	综合实践 6			
第七章	常用特性测试仪器		4	8
	综合实践 7、8			
第八章	智能仪器简介	2	0	2
* 附录	* 电工测量及仪器仪表	* 4	* 4	* 8
	* 综合实践 9			
学时合计		32~* 36	24~* 28	56~* 64

本教材可应用于高职院校实训环节。执行过程中,可结合实训时间,在既有的综合实践单元基础上,以专题训练方式进行。专题训练时,可对有关理论进行简化并将其融入仪器仪表实践过程。

本书由安徽职业技术学院孙忠献任主编,并编写第二、四、六、八章和附录 2、3;芜湖仪表研究所慈昂和芜湖职业技术学院孙晓雷任副主编,并编写第一章、附录 1 和其他章节的部分内容;安徽电子信息职业技术学院陈昕编写第三、五章;安徽职业技术学院常辉编写第七章;淮北职业技术学院徐强老师也参与了不少章节的编写并给予了诸多的协助,全书由孙忠献统稿并

完成插图原始稿样绘制。安徽电子信息职业技术学院的林春芳副教授在百忙之中审阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的意见,在此表示谢意!书稿编写过程中,还得到安徽省多所职业技术学院有关领导及专业骨干教师、国内有关仪器仪表生产厂商的帮助,在此也一并表示衷心感谢!

由于编写时间仓促及编者水平有限,本书难免存在缺点、错误与疏漏,恳请有关教师及本书读者予以批评指正!

编 者

目 录

第一章 电子测量基础	1
第一节 电子测量概况	1
第二节 误差及测量数据处理	4
习 题	12
第二章 基本电路元件参数测量仪器	13
第一节 基本电路元件参数测量基础	13
第二节 直流电桥	15
第三节 万用阻抗电桥	20
第四节 数字式 LCR 测量仪	25
习 题	29
综合实践 1 交直流电桥与数字 LCR 测量仪使用	32
第三章 信号发生器	34
第一节 信号发生器概述	34
第二节 低频正弦信号发生器	36
第三节 函数信号发生器	40
第四节 高频信号发生器	46
习 题	54
综合实践 2 信号发生器的使用	55
第四章 电子电压表	60
第一节 电子电压表基础	60
第二节 模拟式电子电压表	64
第三节 数字电压表	72
第四节 数字万用表	81
习 题	96
综合实践 3 电子电压表的使用	97
综合实践 4 数字万用表的使用与扩展	99
第五章 频率与时间测量仪器	101
第一节 频率与时间测量基础	101
第二节 数字式频率计	103
习 题	114
综合实践 5 数字式频率计的使用	115
第六章 通用电子示波器	118

第一节 示波测量与示波器概况·····	118
第二节 通用模拟式电子示波器·····	122
习 题·····	145
综合实践 6 通用模拟式双踪示波器的使用 ·····	150
第七章 常用特性测试仪器 ·····	154
第一节 晶体管特性图示仪·····	154
第二节 频率特性测试仪·····	171
习 题·····	189
综合实践 7 晶体管特性图示仪的使用 ·····	190
综合实践 8 频率特性测试仪的使用 ·····	195
第八章 智能仪器简介 ·····	198
第一节 智能仪器概况·····	198
第二节 虚拟仪器及其应用·····	200
习 题·····	212
附 录 ·····	213
附录 1 电工测量基础 ·····	213
附录 2 常用电工测量仪器仪表 ·····	219
综合实践 9 常用电工测量仪器仪表的使用 ·····	247
附录 3 国际单位制(SI)及电测量常用单位 ·····	250
参考文献 ·····	253

第一章 电子测量基础

测量是通过实验获得被测对象的量值或确定量值依从关系的过程,即:将被测量与已知标准量比较,确定被测量相对于标准量的倍数并用数值或其他形式表示比较的结果。

第一节 电子测量概况

测量技术主要研究测量的原理、方法和仪器。就应用的普遍性而言,以电的方法或形式作为基本手段的电气测量在科学研究、工业生产及日常生活中具有重要地位。电子测量则是电气测量中发展迅速的一个领域,具有测量准确度高、速度快、可被测量的频率范围宽、易于实现测量过程的自动化与智能化、测量设备的多功能与多样化、可实现遥测等优点,已经获得了广泛应用。

一、电子测量的主要内容与基本方法

电子测量是测量技术与电子技术相互结合的产物,它以测量技术理论与方法为基础,采用电子技术手段实现各种电量与磁量的测量。电子测量技术与传感器技术结合还可以实现各种非电量的测量,从而构成工业生产中广泛应用的自动检测与控制系统。

(一)电子测量的主要内容

电子测量建立在电信号测量的基础上,其内容主要包括以下几方面。

1. 基本电量的测量

电子测量的基础内容主要是基本电量的测量。例如,电压、电流和功率等。在此基础上,电子测量的内容可扩展至其他量的测量。例如,阻抗、频率、时间、相位、电场强度、磁场相关量等。

2. 元器件参数及其特性的测量

通过电子测量,可测知电子线路或电气设备常用各种元器件(例如,电阻、电感、电容、晶体管、集成电路等)的参数。电子测量也可用于元器件、单元电路或电子设备整机的特性测量(例如,伏安特性、频率特性等)。

3. 电信号波形与波形参数的测量

电子测量可以测知各种电信号的波形、幅值、相位与相位差、周期与频率、失真度、调制度、频谱构成、噪声、干扰等。

4. 电子设备性能指标测量

电子测量可用于测量各种电子设备的性能指标。例如,设备的灵敏度、增益、带宽、信噪比等。

(二)电子测量的基本方法

完成测量任务的过程一般包括:拟订测量方案并选定正确的测量方法,选择合适的测量工具并组成测量装置或测量系统,进行测量操作并得出测量结果。正确选择测量方法直接关系到后续测量工作能否正常进行。电子测量的方法可按照多种方式分类,常见的分类形式如下。

1. 按照测量形式的差异分类

按照测量形式的差异可将电子测量的方法分为：直接测量、间接测量和组合测量。

直接得出被测量量值的测量方法即为直接测量。例如，使用电压表测量电压。

当被测量不便于直接测量或间接测量的结果比直接测量更为准确时，多采用间接测量方法，即：利用直接测量的量与被测量之间的函数关系（公式、曲线或表格等）得到被测量的值。例如，测量放大器的电压放大倍数 A_u 时，分别测量输出电压 U_o 与输入电压 U_i ，再计算 $A_u = U_o/U_i$ ；测量晶体管集电极电流 I_c 时，考虑到测量的简便性以及仪表接入后对原电路的影响，较多采用直接测量集电极电阻 R_c 上的电压 U_{Rc} 并根据 $I_c = U_{Rc}/R_c$ 算出集电极电流的方法，而较少采用断开集电极电路并串入电流表的测量方法。

当某个被测量与多个未知量有关时，可针对各未知量的特征，以直接测量、间接测量相结合的方法获得测量结果，称为组合测量（联立测量）。例如，在 $0 \sim 650^\circ\text{C}$ 温度区间内，工业用铂热电阻的阻值 (R_t) 与温度 (t) 的关系近似为 $R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$ ，其中， R_0 为元件在 0°C 时的电阻值。测量电阻温度系数 A 、 B 和初始阻值 R_0 过程中，可直接测量 R_0 值。测出 2 组不同温度下的 R_t 后，可由联立方程求解 A 、 B 。

2. 按获取测量结果的方式差异划分

按照测量结果获取方式的差异，可将电子测量的方法分为直读式测量和比较式测量。

直接从仪器仪表的刻度线上读出测量结果或从显示器上直接显示出测量结果的方法称为直读式测量。

使被测量与已知标准量在同一作用对象中比较并达到某种特定状态，该状态下，被测量与已知标准量在量值上满足一定的函数关系，根据已知标准量值可获得被测量值的方法称为比较式测量。比较测量法可分为零值法、差值法和替代法 3 种。如果比较过程结束时的最终状态为某种零状态（零位平衡，通常由指零仪表指示），则称为零值法；若比较的结果以被测量与已知标准量差值形式表现，常被称为差值法；若被测量与替代量（已知标准量）分别作用于相同的对象，通常调节替代量使两者达到相同的状态，则由替代量可知被测量的值，这种测量方法一般称为替代法。

由于已知标准量介入比较过程，且采用高灵敏度指示仪表作比较过程结束时的最终状态指示，使用比较式测量仪器获得测量结果的准确性一般较高。例如，使用直流单臂电桥测量未知电阻，测量过程实质上是反复进行未知电阻值与电桥的比例臂、比较臂参数在特定条件下的比较过程。电桥达到平衡状态时，检流计指零，比较过程结束。平衡状态下，被测电阻值等于比例臂 (R_2/R_3) 与比较臂 (R_4) 的乘积，其中， R_2 、 R_3 、 R_4 为标准电阻。标准电阻的阻值误差远小于普通电阻元件的误差值，且检流计具备高灵敏度特征（电流指示可达 $10^{-7} \sim 10^{-9}\text{A}$ ），由此可保证测量结果具有较高的准确度。

3. 按被测量性质划分

按被测量性质分类，可以把测量方法分为：时域测量、频域测量和数据域测量。

通过时域测量可反映被测对象的参数或特性随时间变化而变化的过程，即：时域特征。例如，测量电压、电流时，其稳态值、有效值多用仪器仪表直接指示，瞬态变化过程则可以通过示波器观察。

通过频域测量可反映被测对象的参数或特性随频率变化而变化的过程，即：频域特征。例如，测量放大器的增益、相移等参数随频率变化的过程，即可获取该放大器的幅频特性与相频特性。

数据域测量主要反映特定时间或时间段内的数字信号逻辑状态或逻辑状态之间的关系。例如,使用具有多通道逻辑分析仪可同时观测逻辑电路输入/输出信号之间的逻辑关系。

二、电子测量的主要特点

(一)测量频率范围宽

采用电子测量的方法,能够测量频率范围达 $10^{-4} \sim 10^{12}$ Hz 的信号。随着电子技术的发展,可测量的信号频率范围还在向着更宽频段扩展。

(二)量程范围宽

量程反映出电子测量仪器可测量的上下限值范围。当被测量的数值相差很大时,测量仪器必须具有足够宽的量程。例如,数字电压表(DVM)可测量微伏至千伏级电压,量程达 9 个数量级。

(三)准确度高

电子测量的准确度高总体上高于其他测量方法。例如,用电子测量方法对频率和时间进行测量时,由于采用原子频标和原子秒作为基准,可以使测量准确度达到 10^{-15} 数量级的高指标。

(四)测量速度快

电信号以电场形式传播,电子测量建立在电信号的传播基础之上,相对于其他测量方法而言,可以达到更高的测量速度,这是电子测量技术广泛地应用于现代科技各个领域的重要原因之一。

(五)易于实现遥测

对于遥远距离或环境恶劣、人体不便接触或无法到达的区域,电子测量可通过传感器进行测量,用计算机进行数据处理和转换,最后以无线方式传输信号。

(六)易于实现测量过程的自动化、智能化与网络化

大规模集成电路和微型计算机的应用使得电子测量仪器在功能上可得到大幅度扩展,同时,测量过程的自动化与智能化程度也可大幅度提高。测量过程易于实现程控、遥控、自动转接量程、自动调节、自动校准、自动诊断故障和自动恢复,测量数据可进行自动记录,自动进行数据运算、分析和处理。借助各种网络平台,现代电子测量已显现出网络化的趋势。

三、电子测量仪器仪表分类

电子测量仪器可按多种方式进行分类,下面介绍两种分类方式。

(一)按指示方式差异分类

根据指示方式的差异可将电子测量仪器分为模拟式、数字式和图像显示等三大类。

模拟式仪表以指针或光标的偏转连续反映被测量的变化,数字式仪表以数字化方式测量并显示被测参数值,图像显示仪表主要用于动态测量或观测。

(二)按适用范围差异分类

就适用范围而言,电子测量仪器可分为通用和专用仪器两大类。通用仪器是为测量某些基本电参数而设计的,具有很强的通用性和较宽的适用范围;专用仪器适用于测量特定的测试对象、测试条件或被测参数。

功能上,通用电子测量仪器通常包括:信号发生器、信号分析仪器、电平测量仪器、频率、时间和相位测量仪器、网络特性测量仪、电子元器件测试仪、电波特性测试仪、辅助仪器等。信号发生器用于提供各种测试所需的信号,信号波形、频率及幅度可根据需要选择。例如,低频信

号发生器、高频信号发生器、脉冲信号发生器、扫频信号发生器、函数信号发生器及噪声信号发生器等。信号分析仪器用来观测、分析和记录各种电量的变化,包括:时域、频域和数据域分析仪。例如,示波器、波形分析仪、频谱分析仪和逻辑分析仪。电平测量仪器主要用于测量电压、电流等。例如,电流表、电压表、电平表和多用表。频率、时间和相位测量仪器可用于测量电信号的频率、时间间隔和相位,例如,频率计、相位计等。网络特性测量仪主要用来测量电气网络的各种特性,电子元器件测试仪用于测量各种电子元器件的电参数。例如,晶体管特性图示仪、集成电路测试仪和LCR测试仪等。电波特性测试仪可用于对电波传播、干扰强度等参量进行测量。例如,测试接收机、场强仪、干扰测试仪等。辅助仪器主要用于配合上述各种仪器对信号进行放大、检波、隔离、衰减。例如,交直流放大器、选频放大器、检波器、衰减器、记录器及交直流稳压电源等。

电子测量仪器的发展大体经历了模拟仪器、数字仪器 and 智能仪器阶段。模拟仪器的基本结构以电磁机械式为基本特征,并借助指针来显示测量结果;数字仪器可以数字方式测量并输出测量结果;智能仪器具备内置微处理器和 GPIB 接口,能进行自动测量并兼有一定的数据处理能力。智能仪器的功能模块以硬件或相对固化的软件形式存在,在开发或应用上缺乏灵活性。虚拟仪器是一种功能意义上的智能化仪器,它以微型计算机为基础,添加测试应用软件和测试所需的硬件模块,具有虚拟的仪器面板和测量信息处理系统。

第二节 误差及测量数据处理

测量工作的直接目的是获取真实反映被测对象特性、状态或状态变化过程的信息,以便根据所获取的信息针对被测对象单元或系统整体做出某种判断、评价或决策。由于多方面因素的影响,测量结果与被测对象的真实状况之间存在一定的偏差。除了事先采取必要的措施减小误差以外,对测量数据进行必要的合乎偏差规律的处理是在具体测量工作完成后需要面对的重要任务。

一、误差及其基本表示形式

误差反映了测量结果与被测量真实情况(真实值或真值)之间的偏差。在实际的测量工作中,由于受到测量方法、测量仪器自身性能、测量条件、操作者等诸多因素的制约,测量结果往往含有不同程度的误差。误差可用测量结果与真值之间的偏差量或偏差的比例两种基本形式表示。

(一)绝对误差

测量值(A_x)与被测量真值(A_0)之间的差值称为绝对误差(Δ),即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-1)$$

测量值指仪器仪表指示的被测量值,也称为指示值或示值。被测量的真值一般无法得到,在检定或校验仪器仪表的工作中,常以高准确度等级标准仪器或计量器具所测得的数值来代替真值,称之为相对真值。

绝对误差反映测量值与被测量真实值之间的偏差量值,其单位与被测量值的单位相同,误差符号可能为正,也可能为负。绝对误差能直观地反映偏差量值,但具有片面性。例如,使用某种电子电压表测量正弦波信号的电压值时,若前后两次针对 20 V 和 200 V 的电压进行测量,绝对误差均为 1 V,其绝对偏差量相等,但仍可看出两次测量结果偏离真实值的程度有差异,其相对比例值约差 10 倍。

(二)相对误差

为全面反映测量结果与真值之间的偏差程度,还需要以相对比例的形式衡量误差,即:相对误差。

绝对误差与被测量的约定值之比称为相对误差,约定值可以是被测量客观存在的真值、示值或仪器仪表的满度值。相对误差通常以百分数表示,其具体表示形式有以下几种。

1. 实际相对误差

绝对误差(Δ)与被测量真值(A_0)之比的百分数称为相对误差(γ_0),即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

被测量真值通常无法直接获取,因此,实际相对误差往往只具有理论上的意义,难以在实际分析误差中直接使用。

2. 示值相对误差

正常测量情况下,仪器仪表的测量值(示值)与真值之间不应出现较大的偏差,实际上常用示值代替真值来反映相对误差,即:绝对误差(Δ)与示值(A_x)之比的百分数,称为示值相对误差(γ_x)即

$$\gamma_x = \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-3)$$

当选择仪表的量限过大时,被测量的示值相对较小,但受到测量条件限制,绝对误差不可能任意小,这种情况下,示值相对误差计算值明显增加,不宜用于反映测量结果偏离真实值的程度。

3. 引用相对误差

绝对误差(Δ)与仪器满度值(A_m)之比的百分数称为引用相对误差或满度相对误差(γ_m),即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

仅从仪器仪表的角度看,在基本工作条件或允许工作条件范围内,最大引用相对误差反映出仪器仪表测量结果的准确性限度,通常以最大引用相对误差为基础定义仪器仪表的准确度。在规定条件下,若使用某仪表测量过程中的最大绝对误差和仪表的满度值分别为 Δ_m 、 A_m ,则仪表的准确度等级(S)与最大引用相对误差之间的关系为

$$S\% = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

准确度为 S 的模拟指示仪表的基本误差最大不超过仪表满度值的 $\pm S\%$ 。

在电子测量中,相对误差也广泛采用分贝(dB)形式表示。

对于功率类电参数有

$$\gamma_p(\text{dB}) = 10\lg(1 + \gamma_{pr}) \quad (1-6)$$

式中, $\gamma_p(\text{dB})$ 为分贝形式表示功率类电参数的相对误差; γ_{pr} 为百分比形式表示的功率类电参数相对误差。如果功率类电参数的百分比相对误差值很小,则

$$\gamma_p(\text{dB}) \approx 4.35\gamma_{pr} \quad (1-7)$$

对于电压、电流类电参数有

$$\gamma_u(\text{dB}) = 20\lg(1 + \gamma_{ux}) \quad (1-8)$$

如果电压、电流类电参数的百分比相对误差值很小,则

$$\gamma_u(\text{dB}) \approx 8.69\gamma_{ux} \quad (1-9)$$

二、误差的来源及分类

(一)测量误差的主要来源

测量误差是各种因素导致的偏差的综合,其来源较复杂,主要包括:仪器误差、方法误差、影响误差、人员误差等。

1. 仪器误差

由测量仪器本身及其附件引入的误差是测量误差的主要来源之一,主要包括:标准器具误差、仪器误差和附件误差等。例如,测量仪器内电路的零点漂移、指针式仪表刻度的误差或非线性引起的误差、数字式仪器的量化误差。

2. 方法误差

由于测量方法不合理而造成的误差称为方法误差。例如,使用伏安法测量电阻或使用普通指针式万用表测量高内阻电路的输出端电压时,容易出现因为测量方法选择不当导致的误差,理论分析可证明:若仅考虑电压表、电流表及指针式万用表的内阻因素,采用伏安法中的电流表外接法时,电阻值测量结果应小于被测电阻的真实阻值;采用电流表内接法时,电阻值测量结果应大于被测电阻的真实阻值;使用普通指针式万用表测量高内阻电路的输出端电压时,测量结果应小于被测电压真实值。

3. 影响误差

由于环境条件与仪表规定的测量条件不一致而造成的误差,称为影响误差。例如,环境温度、仪器仪表预热时间或电源电压波动等因素与要求的条件不一致或超出限定的范围时,容易产生影响误差。

4. 人员误差

人员误差可一般理解为由于测量者自身原因所引起。例如,测量者不按照规定方式读数、操作不当、存在与测量有关的不良习惯、缺乏责任心等。

(二)测量误差的分类

误差分类的标准多种多样,从测量误差产生的原因及特征角度看,误差分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

1. 系统误差

系统误差是指在同一测量条件下,多次测量同一个量时,误差大小和符号均保持恒定或按某种规律变化(例如,有规律地逐渐增大、周期性增大或减小)的一种误差。系统误差总是由某个特定的原因引起的,而且这种原因总是持续存在而不是偶发的。例如,由于仪器自身设计、制造等原因导致的误差,由于选择了不合适的测量方法所导致的误差等。

2. 随机误差

随机误差是由偶发因素引起的一种大小、方向都不确定的误差。例如,由于突发的电源电压波动、空气扰动、环境中突发的电磁干扰等因素所造成的测量误差。由于偶发因素具有随机性,因此,单次或少数几次测量过程中出现的随机误差无规律可循,产生原因也难以预计,但在大量的重复性测量中,随机误差总体上服从统计学规律(例如,正态分布规律)。

3. 粗大误差

粗大误差也简称为粗差,产生系统误差或随机误差的原因均有可能带来粗差,粗差的特点是测量结果较明显地偏离了被测量真实值。导致粗差的常见原因包括:测量人员自身原因、某些突发测量条件的波动等。例如,读数错误、记录错误、测量仪器性能的突变、测量条件的突然

变化等。含有粗差的测量结果一般被称为坏值,应予以剔除。

三、减小测量误差的一般方法

(一)减小系统误差的方法

常用于减小系统误差的方法主要包括:对仪器仪表示值进行修正,采取特殊的测量方法,采用补偿法减小误差等。

1. 对仪器仪表示值进行修正

利用修正值法可尽量减小和修正因为仪器自身原因所导致的系统误差。修正值是校正状态下的被测量相对真值(A_0')与被校正仪表实际读数(A_x')之差,是由计量部门对被校正仪器检查之后确定对测量结果应予以修正的数值(C)。

$$C = A_0' - A_x' = -\Delta' \quad (1-10)$$

修正值通常以量值、修正值表格或修正曲线形式给出,若在测量之前能预先对所用仪表的各个刻度求出校正值,测量时就可以依据实际测量环境中被校正仪表的读数(A_x)和对应的修正值(C)求得被测量的真值。

$$A_0 = A_x + C \quad (1-11)$$

仪器的修正值具有时间性限制,使用的修正值应在仪器的检定有效期内,否则无法保证量值传递的准确性。对于自动化程度较高的测量仪器,可以将修正值预先储存在仪器中,测量时由仪器自动进行修正。

2. 采用特殊的测量方法

在条件允许的前提下,可采用特殊的测量方法减小方法误差,常见的思路包括:零位测量法、替代法、交换法等。

零位测量法的思路是:设法使被测量与可调节的已知标准量进行比较,并使两种量在比较过程结束时相等,仪器仪表的指零处于零位,则被测量值等于已知标准量的值。零位法的测量误差主要取决于标准量具的误差,标准量具的误差较小。

替代法的思路是:在相同的测量条件下,用可调的标准量具替代被测量接入测量装置。调整标准量具,使测量仪表的示值与被测量接入时相同,则此时标准量具的数值即等于被测量。使用替代法时,被测量的结果与仪器本身误差不再受测量仪表的影响,主要取决于标准量具的准确度。一般情况下,标准量具的误差很小,因而可以减小或消除系统误差。

交换法的思路是:在条件允许的情况下,若已知某个导致系统误差的因素对测量仪器的影响,可对一个量重复测量两次,在前后两次测量过程中,设法使导致误差的因素对测量结果的影响恰恰相反,然后取两次测量的平均值作为测量值。例如,为了消除地磁场对电动系仪表的影响,可以在一次测量之后,将仪表调转 180° 重新再测一次,前后两次地磁场对仪表的影响相反,取其前后两次测量的平均值作为测量值;电动系电压表、电流表或功率表使用于直流电路时,为消除测量机构屏蔽层剩磁影响,提高测量精度,可通过负载端钮接线互换方式测量两次,取两次读数的平均值作为测量值。

3. 采用补偿法减小误差

采用补偿法时,需要针对被补偿元件或测量电路的特征及受到误差因素影响后的参数变化规律设计相应的补偿形式与参数。例如,无补偿时,磁电系表头可动线圈的阻抗值随温度上升而上升,可设计锰铜电阻与 NTC 元件并联形式的补偿电路与表头可动线圈串联,选择适当的锰铜电阻和 NTC 元件参数值后,可使整体电阻值几乎不受温度变化的影响。

(二)减小随机误差的方法

根据随机误差的性质,可对一个被测量进行多次重复测量,取各测量结果的平均值作为测量值。

(三)减小粗大误差的方法

要减小粗大误差,首先要强化操作人员的工作责任心和测试技能,其次是尽量采取措施,避免测试环境或测试条件的剧烈波动。正确认真地测量并读取每一个测量数据。如有差错,应尽量及时补测。补测点的分布应根据被测量的变化情况确定,若被测量变化较快,则补测点可分布相对密集。

四、直接测量数据的处理与测量结果的表示

读取模拟指示仪表的指示值时,应根据仪表的指针位于刻度盘最小刻线之间的位置对读数值的末位进行估计,从而获取合乎实际偏差范围的直接测量数据。不可任意改变直接测量数据的位数,否则将严重影响测量数据反映被测量实际量值的有效性。所谓测量数据处理,就是从测量值原始数据中求出被测量的最佳估计值,并计算其准确度。测量结果的表示则是通过修约将测量所得的原始数据表示为符合精度和运算要求的数值。

(一)有效数字及运算规则

采用某种约定规则表示数据时,若绝对误差不超过末位数字的单位的一半时,则从数据左侧数字列中第一个不为零的数字算起,直到末位为止的全部数字(末位可以是0)称之为有效数字。

1. 有效数字舍入规则

有效数字表示法是整理原始数据的常用方法。当原始数据位数超过选定的有效数字位数时,需要按照有效数字舍入规则进行处理。有效数字的舍入规则以保证舍入概率相等为前提,其规则如下(以保留 n 位有效数字为例)。

若原始数据的第 n 位数后面的数值小于第 n 位数的0.5单位时,则第 n 位数保持不变,舍去其后的数字(“舍”);反之,第 n 位数字加1(“入”)。当第 n 位数后面的数值恰为第 n 位数字的0.5单位时,若第 n 位数为偶数,则该位数字不变;反之,第 n 位数字加1(“取偶”)。图示说明见图1-1。

例如,分别对3.278、0.026147、2365、0.5935保留3位有效数字,结果分别为3.28、0.0261(或 2.61×10^{-2})、 2.36×10^3 、0.594(或 5.94×10^{-1})。

由舍入规则可知,舍入处理后的误差不大于末位单位的一半。这种规则称为“0.5误差”原则。

2. 有效数字运算规则

有效数字经舍入处理后,末位数为欠准数字,末位数以前的数字是准确数字。

当多个不同位数的有效数字参与运算时,需要根据测量的准确度确定运算结果的有效数字位数,其有效数字位数应对应于测量误差。若运算关系较为简单,在确定运算结果的有效数字位数时,可以如下规则作参考。

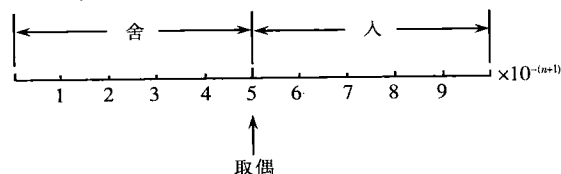


图1-1 有效数字舍入规则示意

(1)近似数进行和差运算时,在参与运算的数中,以小数点后面有效数字位数最少那一位为基础对其余各数据进行舍入,然后进行和

差运算。需要注意:尽量避免十分相近的数进行减法运算。

(2)近似数进行乘除运算时,小数位数较多的数保留的位数应比有效数字位数最少者的位数多1位。运算所得的积(或商)的有效数字位数与原近似值中有效数字位数最少者的位数相等,而与小数点位置无关。

(3)乘方、开方运算时,被乘方、开方数的有效数字位数应比运算结果多取一位有效数字位数。

(4)对数运算时,运算前后的有效数字位数相同。

(二)直接测量数据的表示

直接测量数据可采用列表法、图示法和函数法表示。

列表法表示直接测量数据时,应根据测试的目的和内容,设计出合理的表格,把所得直接测量数据填入。列表法具有简单、快捷的优点,但难以形象地观察直接测量数据所反映的被测量变化趋势或规律。

图示法表示直接测量数据时,可以先根据原始数据的特征选定合适的坐标轴及其单位,然后逐一标注各测量数据的位置,再将各图示点进行小规模分组(通常以2~4个点为一组),画出穿过各组图示点的重心位置的光滑曲线,如图1-2所示。图示法形象、直观,但难以根据图示测量结果直接进行数学分析。

用函数关系式来描述被测量的各物理量之间的相互关系,称为直接测量数据的函数表示,常用的方法包括最小二乘法 and 一元线性回归法。

(三)直接测量数据的处理

直接测量数据中可能同时包含系统误差、随机误差和粗大误差,采取适当的数据处理方法有利于获得被测量的最佳估计值,并计算其准确度。下面以等精度测量数据的处理为例介绍直接测量数据的处理方法。

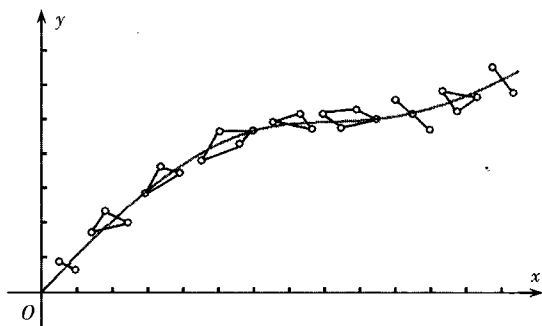


图1-2 使用分组平均法修匀曲线

测量过程中,若测量条件所涉及的各因素均保持不变,对同一被测量所作的次数相同的测量称为等精度测量。利用修正法可对测量值进行修正,将已经减弱系统误差影响的各数据 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 依次列成表格,则等精度测量数据的处理步骤如下:

(1)求出 n 个测量值的算术平均值 $(\bar{x})$ 及测量值 (x_i) 的剩余误差 (v_i)

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (1-12)$$

$$v_i = x_i - \bar{x}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-13)$$

(2)利用贝塞尔公式计算测量值的标准差 (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1-14)$$

(3)利用莱特准则判定含粗大误差的直接测量数据

若 $|v_i| > 3\sigma$,则第 i 次测量值 x_i 存在粗大误差,该值为坏值,应予以剔除。重新求取剩余数据的算术平均值、剩余误差和标准差,并重新判别坏值。循环执行,直至剔除直接测量数据

中的所有坏值。

(4)计算算术平均值的标准差($\sigma_{\bar{x}}$)

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} \tag{1-15}$$

测量结果的不确定度为 $3\sigma_{\bar{x}}$ 。

(5)给出测量结果

$$x = \bar{x} \pm 3\sigma_{\bar{x}} \tag{1-16}$$

【例 1-1】 对某电压进行 10 次等精度测量,利用修正值对测量值进行修正后,具体数值如下:110.4 V,109.8 V,109.7 V,109.6 V,110.3 V,110.0 V,109.9 V,110.2 V,109.9 V,110.1 V,要求对测量数据进行处理,并给出测量结果的报告值。

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_{x_i} (V)	110.4	109.8	109.7	109.6	110.3	110.0	109.9	110.2	109.9	110.1
v (V)	0.4	-0.2	-0.3	-0.4	0.3	0	-0.1	0.2	-0.1	0.1
v_i^2	0.16	0.04	0.09	0.16	0.09	0	0.01	0.04	0.01	0.01

解 ①由测量值 U_{x_i} 求算术平均值 $\bar{U}_x$ 、剩余误差 v_i 和 v_i^2 ,计算结果如下:

$$\bar{U}_x = 110.0\text{V}$$

②计算测量值的标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}(v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_{10}^2)} = 0.26$$

③利用 3σ 准则判断是否存在粗大误差

$$3\sigma = 3 \times 0.26 = 0.78$$

由上表可知,全部数据均满足 $|v_i| < 3\sigma$,无坏值。

④求算术平均值的标准偏差和不确定度(测量次数 $n=10$)

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n} = 0.26 / \sqrt{10} = 0.08$$

⑤测量结果的报告值为

$$U_x = \bar{U}_x \pm 3\sigma_{\bar{x}} = 110.0 \pm 0.2(\text{V})$$

五、工程最大测量误差的估计

受到测试环境条件因素影响,工程测量主要关注测量的准确度。根据测量所采取的方法,工程误差估计一般分为直接测量方式的最大误差估计和间接测量方式的最大误差估计两种。

(一)直接测量方式的最大误差估计

在规定的使用环境条件下,直接测量数据(A_x)可能含有的最大误差(Δ_m)与指示仪表的准确度等级(S)及所选量程值(A_m)有关。根据准确度等级定义,仪表的最大引用相对误差 $\gamma_m = S\%$,则直接测量数据的最大误差为

$$\Delta_m = \pm S\% \times A_m \tag{1-17}$$

如果测量环境不满足规定的工作条件或仪表与测量辅助单元产品配套使用,除需要考虑以准确度等级 S 所表示的基本误差外,计算直接测量的最大误差还应考虑工作条件变化时的附加误差及配套使用的测量单元误差。例如,为扩大 D26 型电动系电压表和功率表的测量范围,可配接电流互感器、电压互感器测量电压和功率(图 1-3),则配接互感器后的测量误差为