



全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

DIANZI CELIANG JISHU

电子测量技术

赵丽 主编



黄河水利出版社

全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

电子测量技术

主 编 赵 丽 王春霞

副主编 刘 琳 徐思成 陶高峰

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本教材是根据高等职业教育人才培养的“淡化理论,够用为度,培养技能,重在应用”的原则,为了配合教学改革、提高教学质量,结合编者近二十年的教学经验和学习体会而编写的。

全书共分11章,包含三大部分内容:第一部分为第一、二章,主要介绍电子测量技术的特点、测量误差理论与测量结果的处理;第二部分为第三至十章,主要介绍电子测量基本原理和电子测量技术的应用;第三部分为第十一章,主要介绍计算机测试技术及其在新领域中的应用。

本教材适合高等职业教育电子、通信、电气、电机等及其相关专业教学使用,也可作为成人高等教育电子仪器与测量、检测技术与仪器仪表、应用电子技术、通信工程、电子工程等专业学生的教学用书,还可作为从事电类专业的工程测试技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子测量技术/赵丽,王春霞主编. —郑州:黄河水利出版社,2012.1

全国高等职业教育机电类“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0024 - 0

I. ①电… II. ①赵…②王… III. 电子测量技术 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 005521 号

策划编辑:王文科 电话:0371 - 66025273 E-mail:wwk5257@163.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:郑州海华印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:15.75

字数:383千字

版次:2012年1月第1版

印数:1—4 000

印次:2012年1月第1次印刷

定价:32.00元

前 言

当今世界,电子技术被广泛应用到工业、农业、科研和人们日常生活中的各个领域。电子测量技术在当前科学技术中占据了重要的地位。随着大量高端科技的发展和应用,传统的电子测量技术已不能满足实际需要。电子测量不断朝着更高的精度、更快的检测速度和更高的智能水平以及自动化的方向发展,由此出现了大量复杂的高端测量技术和仪器。在这种情况下,很多相关领域都对专业技术人员提出了电子测量技术方面的要求,因此很多高等院校的电子信息、测控、检测、自动化、电气等相关专业开设了电子测量技术课程。为此,我们根据多年电子测量方面教学、科研工作的经验,在参考了其他同类教材的基础上编写了本书。

全书内容由浅入深,从电子测量技术的基础入手,逐步构建整个电子测量技术的知识体系。在编写过程中,本书将篇幅的重点放在概念的介绍和理论体系的构建上,突出技术的应用;在理论方面,避免烦琐的数学推导,重点介绍理论公式的物理含义和实际应用。

本书编写人员及编写分工如下:焦作大学王春霞编写第一至四章;郑州职业技术学院陶高峰编写第五章;河南质量工程职业学院徐思成编写第六章;郑州职业技术学院赵丽编写第七、八章;河南工业职业技术学院刘媛媛、马茵编写第九章;三门峡职业技术学院刘琳编写第十、十一章。本书由赵丽、王春霞担任主编,并由赵丽负责统稿,由刘琳、徐思成、陶高峰担任副主编。

由于电子测量技术所涵盖的内容非常广泛,编者不可能对所有领域都有深入研究,因此书中难免有不当之处,敬请读者批评指正,在此深表谢意。

编 者

2011 年 9 月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 测量与计量的基本概念	(1)
第二节 电子测量的内容与特点	(2)
第三节 电子测量仪器的分类	(3)
第四节 电子测量的方法和注意事项	(4)
第五节 电子测量技术的发展概述	(4)
第六节 本课程的学习方法	(5)
本章小结	(5)
习 题	(5)
第二章 测量误差及数据处理的基本知识	(6)
第一节 测量误差的基本原理	(6)
第二节 测量误差	(7)
第三节 测量数据的处理	(12)
第四节 误差的合成与分配	(16)
本章小结	(19)
习 题	(19)
第三章 电路元件参数的测量	(20)
第一节 概 述	(20)
第二节 电阻的特性与测量	(21)
第三节 电容的测量	(26)
第四节 电感的测量	(30)
第五节 半导体二极管的测量	(32)
第六节 半导体三极管的测量	(35)
第七节 集成电路参数的测量	(37)
第八节 晶体管特性图示仪	(41)
本章小结	(44)
习 题	(45)
第四章 电流的测量	(46)
第一节 直流电流的测量	(46)
第二节 交流电流的测量	(48)
第三节 电流测量仪表	(48)
本章小结	(50)

习 题	(50)
第五章 电压测量	(51)
第一节 概 述	(51)
第二节 直流电压的测量	(52)
第三节 交流电压的测量	(61)
第四节 分贝的测量	(75)
第五节 噪声电压的测量	(78)
第六节 失真度的测量	(88)
第七节 功率的测量	(96)
第八节 万用表实例	(101)
本章小结	(108)
习 题	(109)
实验一 电压表波形响应的研究	(110)
实验二 变压器变比及直流稳压电源纹波系数的测量	(111)
第六章 时间、频率与相位的测量	(113)
第一节 概 述	(113)
第二节 常用测量频率的方法	(114)
第三节 电子计数器及其应用	(119)
第四节 相位差的测量	(135)
本章小结	(137)
习 题	(138)
实 验 电子计数器的应用	(139)
第七章 信号发生器	(140)
第一节 概 述	(140)
第二节 低频信号发生器	(143)
第三节 函数信号发生器	(146)
第四节 高频信号发生器	(150)
第五节 合成信号发生器	(152)
第六节 扫频信号发生器	(157)
第七节 脉冲信号发生器	(161)
本章小结	(162)
习 题	(162)
第八章 示波器	(163)
第一节 概 述	(163)
第二节 示波管及显示波形的原理	(164)
第三节 通用示波器	(171)
第四节 取样示波器	(178)
第五节 记忆示波器	(183)
第六节 数字存储示波器	(184)

第七节 示波器的基本测试技术	(186)
本章小结	(195)
习 题	(195)
第九章 频域测量	(197)
第一节 扫频仪简介与分类	(197)
第二节 扫频分析仪	(197)
第三节 信号的频谱分析方法	(206)
第十章 逻辑分析仪	(211)
第一节 概 述	(211)
第二节 逻辑分析仪与示波器的比较	(211)
第三节 逻辑分析仪的组成与技术指标	(213)
第四节 逻辑状态分析仪	(216)
第五节 逻辑分析仪的应用	(217)
第十一章 自动测试系统	(221)
第一节 概 述	(221)
第二节 智能仪器与个人仪器系统	(227)
第三节 VXI 总线仪器系统	(235)
第四节 虚拟仪器	(240)
参考文献	(243)

第一章 绪 论

俄国著名科学家门捷列夫指出:没有测量就没有科学。电子测量技术已经广泛应用于人类生活的各个方面,无论是科学研究、工业制造,还是现代军事装备的研制和维护,都离不开先进的电子测量工具。电子测量技术和仪器水平已经成为衡量一个国家科技发展和生产技术水平的重要标准,也是军事实力的重要体现。

第一节 测量与计量的基本概念

一、测量与电子测量的定义

测量一般是指用仪表测定被测对象的物理量的工作过程。广义地讲,测量不仅包括对被测的物理量进行定量的测量,而且还包括对更广泛的被测对象进行定性、定位的测量,例如故障诊断、无损探伤、遥感遥测、矿藏勘探、地震源测定、卫星定位等。而测量结果也不仅仅是由量值和单位来表征的一维信息,还可以用二维或多维的图形、图像来显示被测对象的属性特征、空间分布、拓扑结构等。广义测量原理可以通过信息获取过程来说明,包括信息感知和信息识别两个环节。

电子测量一般是指利用电子技术和电子设备对电量或非电量进行测量,获得测量结果的过程。

二、测量的分类

电子测量方法多样,为了便于分析和研究,将其分为以下几类:

- (1)时域测量。测量被测信号的幅度与时间的函数关系。
- (2)频域测量。测量被测信号的幅度与频率的函数关系。
- (3)调制域测量。测量被测信号的频率随时间变化而变化的特性。
- (4)数据域测量。测量数字量或电路的逻辑状态随时间变化而变化的特性。

三、测量与计量的关系

电子测量学是测量学的一个重要分支。测量必然与计量密切相联系。计量是以《中华人民共和国计量法》作为规范的具有法制效力的基准量的测量,它能保证测量的准确性和一致性,保证在不同的地方用不同的量具进行测量的结果具有确定的有效性和通用性。为使在不同的地方用不同的手段测量同一量时所得的结果一致,这就要求具有统一的单位、基准、标准和测量器具。

计量是一种特殊形式的测量,它把被测量与国家计量部门作为基准或标准的同类单位量进行比较,以确定合格与否,并给出具有法律效力的《检定证书》。计量是利用技术和法制手段实现单位统一和量值准确可靠的测量。计量的三个主要特征是统一性、准确性和法

制性。

计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,它在工农业生产、科学技术、国防建设以及人民生活等各个方面起着技术保证和技术监督的作用。

第二节 电子测量的内容与特点

一、电子测量的内容

电子测量,从广义上说,是指以电子科学技术为手段而进行的测量,即以电子科技理论为依据,以电子测量仪器和设备为工具,对电量和非电量进行的测量;从狭义上说,是指利用电子科学技术对电子学中有关的电量进行的测量,其内容包括以下几个方面:

- (1) 电能量的测量,如测量电流、电压、功率等。
- (2) 电子元件和电路参数的测量,如测量电阻、电容、电感、品质因数以及电子器件的参数等。
- (3) 电信号的特征和质量的测量,如测量信号的波形、频谱、调制度、失真度和信噪比等。
- (4) 基本电子电路特征的测量,如测量滤波器的截止频率和衰减特性等。
- (5) 特性曲线的测量,如测量放大器幅频特性曲线与相频特性曲线等。

二、电子测量的特点

广义的电子测量有别于其他的测量,有以下突出的特点:

(1) 测量范围宽。电子测量的频率范围很宽,可测零频(直流量),以及 $10^{-4} \sim 10^{12}$ Hz 的交流量,个别特殊的测量还可测更高的频率。

(2) 仪器量程范围宽。量程是仪器所能测试各种参数的范围。电子仪器具有相当宽广的量程。例如,一台高灵敏度的新型数字电压表可以测出从 nV(纳伏)至 kV(千伏)的电压,量程达 11 个数量级。一台用于测量频率的电子计数器式频率计,其量程可达 17 个数量级。

(3) 测量准确度与灵敏度高。从整体上而言,电子测量的准确度比其他测量方法高得多,特别是对频率和时间的测量,由于采用了原子频标和原子秒作为基准,使误差减小到 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ 量级,这是目前人类在测量准确度方面达到的最高标准。一只普通钟表的误差一昼夜约差 30 s,但铯原子钟的误差是几千年仅差 1 s。电子测量的准确度高,使得它在现代科技领域得到广泛的应用。人们往往把其他参数转换成频率再进行测量,以提高测量的准确程度。例如,许多数字式电压表就是把电压转换成时间或频率再进行测量。又如,发射人造卫星的控制和遥测系统也广泛地应用了电子测量方法,这是因为在这些地方测量如果不够准确,最后一级火箭的速度有千分之二的相对误差,卫星就会偏离预定轨道 100 km。真是“差之毫厘,失之千里”,可见应用现代科技提高测量精度的重要性。

(4) 测量速度快。电子测量具有其他测量无法比拟的高速度,这是它在现代科学技术领域内得到广泛应用的一个重要原因。例如,对导弹发射中的运动参数和工业自动控制系统中的在线测量都需要快速实现,这样才能及时发出控制信号,及时调整。此外,在采用多次测量求平均值以减小误差的过程中,也要用到高速测量,这样在短时间内各次测量的环境

条件才接近不变。

(5)易于实现远距离测量和长期不间断测量。可以把电子仪器或与它连接的传感器放到人体不便于长期停留的恶劣环境或无法到达的区域(如人造卫星、深海、地下核反应堆内、人体内部等)进行遥测,而且可以用于那些需要长期不间断测量的场合,例如用短路或断路方法对有些物理现象进行长期监测或对缓慢变化的现象长期测量,电子测量都有它独到的方便之处。

电子测量结果的显示方法比较清晰、直观,例如发光二极管的直接数字显示给读数带来方便,荧光屏示波显示形象而直观地给出被测量的特征。测量结果也可以通过直接打印、绘图或自动启动指示灯及警铃显示。

(6)能够与现代电子信息系统紧密结合,组成自动化信息检测和处理系统。电子技术使测量过程的自动化易于实现,特别是大规模集成电路和微型计算机的应用,使电子测量出现了崭新的局面。在测量中可以实现程控、遥控、自动转换量程,自动调节、自动校准、自动诊断故障和自动修复,测量结果的自动记录,自动完成数据运算、分析和处理。带微处理机的智能仪器,具有记忆存储、逻辑判断、数学运算和命令识别等智能特点,是一代灵巧多用、高性能、多功能的新仪器。此外,还可以利用微机通过标准接口母线连接多台仪器,组成自动测试系统,快速准确地完成大量测试任务。

电子测量技术的一系列优点使其广泛地应用于科学技术的各个领域。大到天文观测、宇宙航天技术,小到物质结构、基本粒子,从复杂深奥的生命、细胞、遗传问题到日常的工农业生产、医学、商业等各部门,都越来越多地利用了电子测量技术。

第三节 电子测量仪器的分类

测量中用到的各种电子仪表、电子仪器及辅助设备统称为电子测量仪器。电子测量仪器种类繁多,主要包括通用仪器和专用仪器两大类。通用仪器是指应用面广、灵活性好的测量仪器。专用仪器是为特定目的专门设计制作的,适于特定对象的测量。

按照仪器功能,通用电子测量仪器分为以下几类:

(1)信号发生器(信号源)。信号发生器是在电子测量中提供符合一定技术要求的电信号产生仪器,如正弦信号发生器、脉冲信号发生器、函数信号发生器、随机信号发生器等。

(2)电压测量仪器。电压测量仪器是用于测量信号电压的仪器,如低频毫伏表、高频毫伏表、数字电压表等。

(3)示波器。示波器是用于显示信号波形的仪器,如通用示波器、取样示波器、记忆存储示波器等。

(4)频率测量仪器。频率测量仪器是用于测量信号频率、周期等的仪器,如指针式、数字式频率计等。

(5)电路参数测量仪器。电路参数测量仪器是用于测量电阻、电感、晶体管放大倍数等电路参数的仪器,如电桥、Q表、晶体管特性图示仪等。

(6)信号分析仪器。信号分析仪器是用于测量信号非线性失真度、信号频谱特性等的仪器,如失真度测试仪、频谱仪等。

(7)模拟电路特性测试仪。模拟电路特性测试仪是用于分析模拟电路幅频特性、噪声

特性等的仪器,如扫频仪、噪声系数测试仪等。

(8)数字电路特性测试仪。数字电路特性测试仪是用于分析数字电路逻辑特性等的仪器,如逻辑分析仪、特征分析仪等,是数据域测量不可缺少的仪器。

测量时应根据测量要求,参考被测量与测量仪器的有关指标,结合现有测量条件及经济状况,尽量选用功能相符、使用方便的仪器。

第四节 电子测量的方法和注意事项

一、电子测量方法

在电子测量中应用最普遍的测量方法有直接测量、间接测量和组合测量。

(1)直接测量。直接测量是指直接从仪器上得到被测量的量值的测量方法。使用这种方法不需要运用函数关系来计算测量的结果,因此直接测量简单、方便。例如,用电压表测量电压。

(2)间接测量。间接测量是指利用被测量和测量的量之间已知的函数关系,间接得到被测量的量值的测量方法。例如,欲测量放大电路的电压放大倍数 A_u ,先测量输出电压 U_o 和输入电压 U_i ,然后由 $A_u = U_o/U_i$ 算出 A_u 。

(3)组合测量。组合测量是兼用直接测量和间接测量的测量方法。测量时,将被测量与另外几个测量组成联立方程,求得被测量的大小。

在选择测量方法时,应首先研究被测量本身的特性,所需要的精确程度、环境条件及所具有的测量设备等因素,综合考虑后,再确定采用哪种测量方法和哪些测量设备。测量方法选择得当,可以得到准确的测量结果。否则,即便使用高性能的仪器也得不到正确的测量数据,而且还有可能损坏测量仪器、仪表以及被测元器件或设备。

二、电子测量注意事项

电子技术实际测量中的注意事项有以下几点:

(1)实验前应对实验数据有所估计,以便及时发现测量数据的谬误。

(2)若时间允许,每个数据都应测量几次,通过比较测量值,分析引入误差的因素,尽可能提高测量的准确度。

(3)由于测量值等于指示值加上误差,所以要注意测量仪器、元器件的误差范围对测量结果的影响。测量前,应掌握测量仪器的误差及校准、维护等情况,在记录测量数据时,要注明有关误差或决定测量的有效位数。

(4)正确估计方法误差的影响。电子技术中采用的理论公式多为近似公式,这会带来方法误差。此外,选取元器件时参数均用标称值,与计算出的真实值有一定的差异,这也将带来实验的误差。因此,在实验中,我们还要考虑理论计算值的误差范围。

第五节 电子测量技术的发展概述

电子测量技术是测量技术与电子科学共同发展与相互作用的结晶。自然科学的发展对

测量工具不断提出更高的要求,是推动电子测量科学发展的直接动力。随着电子技术的快速发展,电子测量技术也经历了从低级到高级的发展过程。从电子测量的基本工具——电子仪器的特征来看,电子测量技术大致经历了以下四个阶段:

(1)模拟化仪器阶段。较早期的测量仪器,基本上是利用电磁原理,采用机械式结构和指针式显示的,典型的有指针式万用表、真空管电压表。

(2)数字化仪器阶段。在该阶段,数字技术得到了广泛应用。典型的数字化仪表有数字电压表、数字频率计等。这类仪表具有体积小、质量轻、精度高、便于携带等特点,是目前使用最普遍的仪表。

(3)智能仪器阶段。这一阶段的仪器由于内置了微处理器,具有相当好的自动检测和数据处理能力。

(4)虚拟仪器阶段。这一阶段的电子测量技术的特点,就是利用通用计算机作为硬件平台,添加必要的专业模块,扩展相应的软件,构成全新的测试系统,具有更大的灵活性和应用范围。

第六节 本课程的学习方法

电子测量技术是本专业的一门实践性很强的技术基础课。在学习电路分析和电子技术的基础上,学习本门课程可使学生了解电子测量最基本的测量原理和测量方法,掌握一定的测量误差分析、不确定度评定和测量数据处理的基本测量知识,同时也能锻炼实际动手能力,提高解决问题、分析问题的能力,为完成相关的测量和从事科学实验奠定初步基础。

本章小结

本章主要介绍了电子测量的定义,测量与计量的关系,电子测量的内容、分类和特点,电子测量技术的发展历程和重要作用,最后介绍了本课程的学习方法。

习 题

- 1-1 解释名词:测量、电子测量。
- 1-2 叙述直接测量、间接测量、组合测量的特点,并各举一两个测量实例。
- 1-3 叙述电子测量的主要内容与特点。
- 1-4 电子测量仪器大致可以分为哪几类?列举一些常用的电子测量仪器。
- 1-5 选择测量方法时主要考虑的因素有哪些?

第二章 测量误差及数据处理的基本知识

物理实验离不开对物理量的测量。由于测量仪器、测量方法、测量条件、测量人员等因素的限制,测量结果不可能绝对准确,所以需要对测量结果的可靠性作出评价,对其误差范围作出估计,并能正确地表达实验结果。

本章的主要内容包括误差的定义、分类、特征、来源以及减少误差的办法,实验数据处理和实验结果表达,误差的合成和分配原理等方面的基本知识。这些知识不仅在每个实验中都要用到,而且是今后从事科学实验工作所必须了解和掌握的。

第一节 测量误差的基本原理

物理实验不仅要定性地观察物理现象,更重要的是要找出有关物理量之间的定量关系,因此就需要进行定量的测量。测量就是借助仪器用某一计量单位把待测量的大小表示出来。根据获得测量结果方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量。由仪器或量具可以直接读出测量值的测量称为直接测量。例如,用米尺测量长度,用天平称质量。需依据待测量和某几个直接测量值的函数关系通过数学运算获得测量结果的测量称为间接测量。例如,用伏安法测电阻,已知电阻两端的电压和流过电阻的电流,依据欧姆定律求出待测电阻的大小。

一个物理量能否直接测量不是绝对的。随着科学技术的发展、测量仪器的改进,很多原来只能间接测量的量现在可以直接测量了。比如,车速的测量可以直接用测速仪进行直接测量。物理量的测量大多数是间接测量,但直接测量是一切测量的基础。

一个被测物理量,除用数值和单位来表征它外,还有一个很重要的表征它的参数,这便是对测量结果可靠性的定量估计。这个重要参数却往往容易为人们所忽视。假设得到一个测量结果的可靠性几乎为零,那么这种测量结果还有什么价值呢?因此,从表征被测量这个意义上来说,对测量结果可靠性的定量估计与其数值和单位至少具有同等的重要意义,三者是缺一不可的。

一、绝对误差

在一定条件下,某一物理量所具有的客观大小称为真值。测量的目的就是得到真值。但由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制,测量结果与真值之间总有一定的差异,即总存在测量误差。设测量值为 X ,相应的真值为 A_0 ,测量值与真值之差 ΔX 称为测量误差,又称为绝对误差,简称误差。其可用下式表示,即

$$\Delta X = X - A_0$$

误差存在于一切测量之中,测量与误差形影不离,分析测量过程中产生的误差,将影响降低到最低程度,并对测量结果中未能消除的误差作出估计,是实验测量中不可缺少的一项

重要工作。

二、相对误差

相对误差并不能作为比较测量结果准确度高低的依据。测量的准确程度不仅与测量误差的大小有关,还与被测量的大小有关。在相同的绝对误差情况下,被测量的量值越大,测量的准确度越高。为了确切地反映测量的准确程度,引出了相对误差的概念。在实际应用中,相对误差有以下几种:

(1) 实际相对误差。它是用绝对误差与真值之比的百分数来表示的,用 γ_A 表示,即

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

由于真值无法知道,所以计算相对误差时常常用 X 代替 A_0 ,即标称相对误差。

(2) 标称相对误差。它是用绝对误差与仪器的测量值之比的百分数来表示的,用 γ_X 表示,即

$$\gamma_X = \frac{\Delta X}{X} \times 100\% \quad (2-2)$$

在这种情况下, X 可能是公认值,或高一级精密仪器的测量值,或测量值的平均值。

(3) 满度相对误差,即引用误差。它是用绝对误差与仪器的满度值之比的百分数来表示的,用 γ_m 表示,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta X}{X_m} \times 100\% \quad (2-3)$$

相对误差用来表示测量的相对精确度,用百分数表示,一般情况下保留两位有效数字。

第二节 测量误差

一、测量误差的概念和常用测量术语

一旦参照一定的标准,选定合适的测量方法,人们即可在一定的测量条件下,借助科学的测量工具,开展实际的测量活动。而实际测量所得结果的误差有多大,是误差理论所要解决的问题。在讨论测量误差问题的过程中,经常用到以下术语:

(1) 真值与示值。真值是指被测对象在测量过程中所具有的实际量值。示值是指测量仪器读数装置所显示出的被测量的量值。

(2) 测量误差。测量误差是指测量结果与真值之间的差异。

(3) 等精度测量和非等精度测量。等精度测量是指在保持测量条件不变的情况下进行的多次测量,每一次测量都具有相同的可靠性,每一次测量的精度都是相等的。非等精度测量是指在测量条件不能维持不变的情况下进行的多次测量,不能确保每一次测量的精度是一致的。

(4) 测量准确度。测量准确度是指测量结果与真值接近的程度,因而它是系统误差的反映。测量准确度高,则测量数据的算术平均值偏离真值较小,测量的系统误差小,但数据较分散,偶然误差的大小不确定。

(5)测量精密度。测量精密度是指在同样测量条件下,对同一物理量进行多次测量时,所得结果彼此间相互接近的程度,即测量结果的重复性、测量数据的弥散程度,因而测量精密度是测量偶然误差的反映。测量精密度高,则偶然误差小,但系统误差的大小不明确。

(6)测量不确定度。测量不确定度是指在测量过程中误差可能变化的最大幅度。

(7)测量正确度。测量正确度是指对多次有效的测量结果所取的算术平均值与真值的接近程度。两者误差越小,测量正确度越高。

二、测量误差的来源和分类

根据误差的性质和产生的原因,误差可分为三类:系统误差、随机误差和粗大误差。

(一)系统误差

系统误差是指在同一条件(指方法、仪器、环境、人员)下多次测量同一物理量时,结果总是向一个方向偏离,其数值一定或按一定规律变化。系统误差的特征是具有一定的规律性。

1. 系统误差产生的原因

系统误差的来源有以下几个方面:

(1)仪器误差。它是由于仪器本身的缺陷或没有按规定条件使用仪器而造成的误差,如螺旋测径器的零点不准,天平不等臂等。

(2)理论误差。它是由于测量所依据的理论公式本身的近似性,或实验条件不能达到理论公式所规定的要求,或测量方法不当等所引起的误差,如实验中忽略了摩擦、散热、电表的内阻等。

(3)个人误差。它是由于观测者本人生理或心理特点造成的误差,如有人用秒表测时间时,总是使之过快。

(4)环境误差。它是外界环境性质(如光照、温度、湿度、电磁场等)的影响而产生的误差。例如,环境温度升高或降低使测量值按一定规律变化。

产生系统误差的原因通常是可以被发现的,原则上可以通过修正、改进加以排除或减小。分析、排除和修正系统误差要求测量者有丰富的实践经验。这方面的知识和技能在我们以后的实验中会逐步地学习,并要很好地掌握。

2. 减少系统误差的方法

(1)从根源上采取措施减小系统误差。在测量工作开始前,尽量消除产生误差的来源,或设法防止受到误差来源的影响,这是减小系统误差最好、也是最根本的方法。具体方法有:

①在测量原理和测量方法上尽力做到正确、严格。

②测量仪器定期检定和校准,正确使用仪器。

③注意周围环境对测量的影响,特别是温度对电子测量的影响较大。

④尽量减少或消除测量人员主观原因造成的系统误差。应提高测量人员业务技术水平和工作责任心,改进设备。

(2)用修正方法减少恒值系差。具体方法有:

①零示法。消除指示仪表不准的误差。

②替代法。用标准值代替被测量。

③微差法。不彻底的零示法。

(二) 随机误差

在相同测量条件下,多次测量同一物理量时,误差的绝对值符号的变化,时大时小、时正时负,以不可预定方式变化着的误差称为随机误差,有时也称为偶然误差。

引起随机误差的原因也很多,与仪器精密度和观察者感官灵敏度有关,如无规则的温度变化、气压的起伏、电磁场的干扰、电源电压的波动等。这些因素不可控制,又无法预测和消除。

1. 随机误差的特点

当测量次数很多时,随机误差就显示出明显的规律性。实践和理论都已证明,随机误差服从一定的统计规律(正态分布),其特点表现为:

- (1) 单峰性。绝对值小的误差出现的概率比绝对值大的误差出现的概率大。
- (2) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的概率相同。
- (3) 有界性。绝对值很大的误差出现的概率趋于零。
- (4) 抵偿性。误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

因此,增加测量次数可以减小随机误差,但不能完全消除。

2. 产生随机误差的主要原因

- (1) 测量仪器产生噪声,零部件配合不良等。
- (2) 温度及电源电压的无规则运动,电磁干扰等。
- (3) 测量人员感觉器官的无规律变化产生的读数偏差。

在测量中,随机误差是不可避免的。随机误差是由大量微小的没有确定规律的因素引起的,比如外界条件(温度、湿度、气压、电源电压等)的微小波动、电磁场的干扰、大地轻微震动等。当多次测量时,测量值和随机误差服从概率统计规律。可用数理统计的方法,处理测量数据,从而减少随机误差对测量结果的影响。

3. 随机误差分散程度的计算

根据统计学,一组测量数据可由总体平均大小和分散程度来描述。算术平均值说明了测量值的总体平均大小。

1) 数学期望

数学期望反映随机变量的平均特性。其定义如下:

当 X 为离散型随机变量时,其数学期望可用下式表示,即

$$\mu = E(X) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i \quad (2-4)$$

当 X 为连续型随机变量时,其数学期望可用下式表示,即

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \quad (2-5)$$

测量数据的分散程度通常用测量的方差和标准偏差来表示。标准偏差将方差开方,取正平方根。

2) 方差和标准偏差

方差是用来描述随机变量与其数学期望的分散程度。

设随机变量 X 的数学期望为 $E(X)$, 则 X 的方差定义为

$$D(X) = E(X - E(X))^2 \quad (2-6)$$

X 的标准偏差定义为

$$\sigma = \sqrt{D(X)} \quad (2-7)$$

标准偏差同样描述随机变量与其数学期望的分散程度,并且与随机变量具有相同量纲。同样,测量数据的数学期望 $E(X) = \mu$, 方差 $D(X) = \sigma^2$ 。

随机误差和测量数据的分布形状相同,因为它们的标准偏差相同,只是横坐标相差 μ 。

标准偏差是代表测量数据和测量误差分布离散程度的特征数。标准偏差越小,则曲线形状越尖锐,说明数据越集中;标准偏差越大,则曲线形状越平坦,说明数据越分散。

由于实际测量只能做到有限次测量,从实用目的出发,可用贝塞尔公式来计算有限次测量数据标准偏差。

贝塞尔公式定义:当 n 为有限次时,可以用剩余误差来计算标准偏差的估计值。剩余误差(或称为残差)为各次测得值与算术平均值之差,即

$$\nu_i = x_i - \bar{x} \quad (2-8)$$

式中 ν_i ——剩余误差;

x_i ——测量值;

$\bar{x}$ ——测量值的算术平均值。

标准偏差的估计值的计算公式为

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \nu_i^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2-9)$$

式中 $\hat{\sigma}$ ——标准偏差的估计值;

ν_i ——剩余误差;

n ——测量次数;

x_i ——测量值;

$\bar{x}$ ——测量值的算术平均值。

$\hat{\sigma}$ 值越小,表示测量值越集中; $\hat{\sigma}$ 值越大,表示测量值越分散。另外,当 $n = 1$ 时,该值是不定的,这说明一次测量数据是不可靠的。

标准偏差的估计值还可以用贝塞尔公式的另一种表达式求出,即

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} (\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2)} \quad (2-10)$$

式中 $\hat{\sigma}$ ——标准偏差的估计值;

n ——测量次数;

x_i ——测量值;

$\bar{x}$ ——测量值的算术平均值。

4. 随机误差的处理原则

由于随机误差具有抵偿性,理论上当测量次数 n 趋于无限大时,随机误差趋于零。只要选择合适的测量次数使测量精度满足要求,就可将算术平均值作为最后的测量结果。

(三) 粗大误差

粗大误差又称为疏失误差或粗差,它是在一定的测量条件下,测量值明显偏离实际值所造成的测量误差。