



21 世纪教改系列教材

D I A N Z I G E L I A N G J I S H U

电子测量技术

第 2 版

朱英华 李崇维 编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

21 世纪教改系列教材

电子测量技术

(第二版)

朱英华 李崇维 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

电子测量技术 / 朱英华, 李崇维主编. —2 版. —成都:
西南交通大学出版社, 2008.9
(21 世纪教改系列教材)
ISBN 978-7-5643-0065-4

I. 电… II. ①朱…②李… III. 电子测量—高等学校—
教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 135718 号

21 Shiji Jiaogai Xilie Jiaocai

21 世纪教改系列教材

Dianzi Celiang Jishu

电 子 测 量 技 术

(第二版)

朱英华 李崇维 编

*

责任编辑 张华敏

特邀编辑 高青松 李科亮

封面设计 跨克创意

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川锦祝印务有限公司印刷

*

成品尺寸: 170 mm×230 mm 印张: 17

字数: 305 千字 印数: 500 1—8 000 册

2005 年 8 月第 1 版

2008 年 9 月第 2 版 2008 年 9 月第 3 次印刷

ISBN 978-7-5643-0065-4

定价: 26.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

第二版前言

本教材自 2005 年出版以来，以其理论知识全面、内容新颖以及讲解清晰的特点，受到老师、同学的普遍欢迎，并被许多高校作为馆藏图书。在此期间，收到了不少读者的评价、建议和意见，在此，对于广大读者的关心和支持表示诚挚的感谢。

近年来，电子测量理论、电子测量方法在不断地发展和完善，电子测量仪器也不断地更新。因此，本教材的第二版补充了一些新内容，并对原来的部分内容进行了重写，使之更易于理解，结构上更完善。此外，我们还查阅了大量的文献资料，对原书中说法不妥之处进行了修订，以保证内容的科学性和合理性。

本教材第二版的出版和修订，不仅得到了广大老师、同学的支持和帮助，而且还得到了西南交通大学电气工程学院各级领导的关心和支持，其中晏寄夫副教授、胡鹏飞副教授和金炜东教授对本教材提出了许多宝贵的意见，在此编者表示衷心地感谢。另外，在本教材编写的过程中，参考和引用了部分国内外同行的资料和文献，谨向所有原作者表示感谢。

由于编者水平有限，难免会存在一些错误和不太令人满意的地方，欢迎广大读者多提宝贵意见，谢谢！

编 者

2008 年 8 月

目 录

绪论	1
1 测量误差与测量不确定度	9
1.1 测量误差	9
1.2 测量不确定度	20
1.3 建立数学模型	25
1.4 标准不确定度的评定	26
1.5 合成标准不确定度的评定	37
1.6 扩展不确定度的评定	42
1.7 测量不确定度报告	45
1.8 测量不确定度评定举例	48
习题 1	56
2 示波测量技术	59
2.1 概 述	59
2.2 示波测量的基本原理	61
2.3 模拟示波器	66
2.4 模拟示波器的多波形显示	83
2.5 数字存储示波器	87
2.6 示波器的应用	94
习题 2	98
3 电压测量技术	102
3.1 概 述	102
3.2 磁电式电压表	107
3.3 电子电压表	110
3.4 数字式电压表	118
3.5 数字式多用表	133

3.6 电压测量的应用	138
习题 3	144
4 集中参数阻抗的测量	146
4.1 概 述	146
4.2 电桥法测量阻抗	148
4.3 谐振法测量阻抗	156
4.4 阻抗的数字化测量	160
习题 4	163
5 时间和频率的测量	166
5.1 概 述	166
5.2 频率和时间测量技术简述	168
5.3 电子计数器	170
5.4 电子计数器测量频率	174
5.5 电子计数器测量时间	179
5.6 提高电子计数器测频、测周准确度的方法	184
习题 5	192
6 频域测量技术	193
6.1 概 述	193
6.2 频谱分析仪	196
习题 6	211
7 数据域测量技术	212
7.1 概 述	212
7.2 逻辑分析仪	217
习题 7	225
8 自动测试系统	226
8.1 概 述	226
8.2 测试总线技术	228
8.3 虚拟仪器	255
习题 8	264
参考文献	265

绪 论

一、测量及其重要意义

测量的目的是准确地获取被测参数的值。通过测量，人们可以获得对客观事物数量上的认识，可以从观察客观事物中总结出一般规律来。因而测量是人类认识自然和改造自然的重要手段。从定义上讲，测量是人们为了确定被测对象的量值或确定一些量值的依从关系而进行的实验过程。为了确定被测量的量值，要把它与标准量进行比较，因此，所获得的测量结果的量值一般包括两部分，即数值（大小及符号）和用于比较的标准量的单位名称，如某电阻 $50\ \Omega$ ，某线路流过的电流 $3\ \text{A}$ ，某电压 $-10\ \text{V}$ 等。

在科学技术发展过程中，测量结果不仅用于验证理论，而且是发现新问题、提出新理论的依据。例如，光谱学的精密测量帮助人们揭示了原子结构的秘密；对 X 射线衍射的研究揭示了晶体的结构；利用射电望远镜发现了类星体和脉冲星。这类例子不胜枚举。历史事实证明：科学的进步、生产的发展与测量理论技术手段的发展和进步是相互依赖、相互促进的。因此，测量手段的现代化，已被公认为是科学技术和生产现代化的重要条件和明显标志。

二、电子测量概述

1. 电子测量的内容

电子测量是测量学的一个重要分支，是泛指以电子技术为手段而进行的测量。它是测量技术中发展最为先进的一部分，是测量学和电子学相互结合的产物。

按具体的测量对象来分类，电子测量包括以下几类：

- ① 电能量的测量，如各种频率及波形下的电压、电流、功率、电场强度等的测量。
- ② 电信号特征的测量，如信号的波形和失真度、频率、周期、时间、相位、调幅度、调频指数、噪声以及数字信号的逻辑状态等的测量。

③ 电路参数的测量, 如电阻、电感、电容、阻抗、品质因数、电子器件参数等的测量。

④ 非电量的电测量。在科学研究和生产实践中, 常常需要对各种非电量进行测量。人们通过各种敏感器件和传感装置将许多非电量(如位移、速度、温度、压力、流量等)转换成电信号, 再利用电子测量设备进行测量。

2. 电子测量的特点

与其他测量相比, 电子测量具有以下几个明显的特点。

(1) 测量频率范围宽

电子测量除测量直流外, 还包括测量交流, 其频率范围低至 10^{-6} Hz 以下, 高至 10^{12} Hz。随着当今电子技术的发展, 电子测量正向着更高频段发展。在不同的频率范围内, 不仅被测量的种类会有所不同, 而且所采用的测量方法和使用的测量仪器也不同。例如, 在直流、低频、高频范围内, 电流和电压的测量需要采用不同类型的电流表和电压表。

(2) 量程范围宽

量程是指测量范围的上限值与下限值之差。由于被测量的数值往往相差很大, 因而要求测量仪器具有足够宽的量程。例如, 数字万用表对电阻的测量范围, 小到 $10^{-5} \Omega$, 大到 $10^8 \Omega$, 量程达到 13 个数量级; 数字万用表可测量由纳伏 (nV) 级至千伏 (kV) 级的电压, 量程达 12 个数量级; 而数字式频率计, 其量程可达 17 个数量级。

(3) 测量准确度高

电子测量的准确度比其他测量方法高得多。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 $10^{-15} \sim 10^{-16}$ 的数量级, 这是目前在测量准确度方面达到的最高指标。因此, 人们通常尽可能地把其他参数变换成频率信号再进行测量。例如, 利用 A/D 变换器将电压信号转换为频率, 再用电子计数器计数, 就构成了数字电压表; 利用传感器将重力转换为电信号, 再用电子计数器计数, 就构成了电子秤。

(4) 测量速度快

电子测量是利用电子运动和电磁波传播进行工作的, 它具有其他测量方法通常无法类比的高速度。这也是电子测量技术广泛应用于现代科技各个领域的重要原因。像卫星、宇宙飞船等各种航天器的发射和运行, 没有快速、自动的测量与控制, 简直是无法想像的。

在有些测量过程中, 为了减小误差, 往往会在相同条件下对同一量进行多

次测量,再用求平均值的方法得到结果;但是测量条件容易随时间变化,这时可以采用提高测量速度的方法,在短时间内完成多次测量。

(5) 易于实现遥测和长期不间断的测量

如今,人们可以通过各种类型的传感器或电磁波、光、辐射的方式,对距离遥远或环境恶劣的、人体不便于接触或无法到达的区域(如人造卫星、深海、核反应堆内等)进行电子测量,从而实现遥测、遥控,并且可以在被测对象正常工作的情况下进行长期不间断的测量。

(6) 易于实现测量过程的自动化和测量仪器微机化

由于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。例如,在测量过程中能够实现程控、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恢复,对于测量结果可进行自动记录、自动进行数据运算、分析和处理。

由于电子测量技术有上述一系列优点,因此,它被广泛应用于科学技术的各个领域。

3. 电子测量的方法

一个物理量的测量可以通过不同的方法来实现,测量的方法有多种分类。下面介绍几种常见的分类方法。

(1) 按测量手段分类

按测量手段的不同,测量方法可分为直接测量、间接测量和组合测量。

① 直接测量。测量时,可以直接获取被测量量值的方法称为直接测量。例如,用电压表测量电压,用电桥法测量电阻阻值,用电子计数器测量频率,等等。因此直接测量的测量过程简单迅速,多用于工程测量。

② 间接测量。凡是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),通过计算而得到被测量量值的测量方法称为间接测量。例如,要测量电阻 R 上消耗的直流功率 P ,在没有功率表的情况下,可以先直接测量电压 U 、电流 I ,而后根据函数关系 $P=UI$ 进行计算,“间接”获得功率 P 。间接测量费时、费事,多用在不便直接测量的情况或科学实验中。

③ 组合测量。当某被测量与几个未知量有关,以通过改变测量条件进行多次测量,根据被测量与未知量的函数关系列方程组并求解,从而得到未知量的测量方法称为组合测量。它是一种兼用直接测量和间接测量的方法。组合测量复杂、费时;但易达到较高的准确度,适用于科学实验或一些特殊场合。

(2) 按被测量性质分类

按被测量性质的不同, 测量方法又分为时域测量、频域测量、数据域测量和随机测量。

① 时域测量, 是指以时间为函数的量的测量。例如, 电压、电流等被测量的稳态值和有效值多利用仪表直接进行测量, 它们的瞬时值可通过示波器等仪器显示其波形来进行观测得到, 并可观测其随时间变化的规律。

② 频域测量, 是指以频率为函数的量的测量。例如, 电路的增益、相位移等被测量可通过分析电路的频率特性或频谱特性来进行测量。

③ 数据域测量, 是指对数字量进行的测量。例如, 使用逻辑分析仪可以同时观测许多单次并行的数据; 对于微处理器地址线、数据线上的信号, 既可显示其时序波形, 也可利用“1”、“0”来显示其逻辑状态。

④ 随机测量, 是指对各类噪声、干扰信号等随机量的测量。

除了上述几种常见的分类方法外, 电子测量技术还有许多其他的分类方法, 比如动态与静态测量技术、模拟与数字测量技术、实时与非实时测量技术、有源与无源测量技术、点频和扫频与多频测量技术等。

三、电子测量仪器及其发展概况

用于测量一个量或为测量目的供给一个量的器具称为测量仪器, 包括各种指示仪器、比较式仪器、记录式仪器、信号源和传感器等。利用电子技术测量电量或非电量的测量仪器称为电子测量仪器。

电子测量仪器的发展大体上经历了三个阶段: 模拟式仪器、数字化仪器和自动测试系统。

1. 模拟式仪器

这类仪器在多数实验室仍能看到, 如指针式的电压表、电流表、功率表、晶体管电压表等。它们的基本结构是电磁机械式的, 借助指针来显示测量结果。模拟式仪器功能简单、精度低、响应速度慢。

2. 数字化仪器

数字化仪器是将待测的模拟信号转化为数字信号进行测量, 并以数字方式输出测量结果。这类仪器目前相当普及, 数字电压表、数字频率计就是典型的数字化仪器。数字化仪器精度高、响应速度快, 读数清晰、直观, 测量结果可

打印输出，也容易与计算机技术相结合。

3. 自动测试系统

随着科学技术和生产的发展，测量任务越来越复杂，其工作量也越来越大，对测量准确度和测量速度的要求也越来越高，不仅要求能够连续地实时显示，而且要求能够实时处理大量测试数据。而传统仪器已难以满足这些要求，这就促使人们开发各种自动化仪表。

20 世纪 70 年代中期诞生了以微处理机为基础的智能仪器，它具有键盘操作、可实现自动测量等特点，如智能化数字电压表、数字存储示波器等。70 年代末期，人们利用 GPIB 接口总线将一台计算机和一组电子仪器联合在一起，组成了自动测试系统。80 年代初期，又出现了以个人计算机为基础，用仪器电路板的扩展箱与个人计算机内部总线相连的个人仪器。个人仪器充分利用了计算机的软件和硬件资源，极大地降低了成本，提高了计算机的利用率。1987 年，出现了用于通用模块化仪器结构的标准总线——VXI 总线，为模块化电子仪器提供了一个开放的平台，使不同厂商的产品能够在同一个主机箱内运行。近年来又出现了虚拟仪器，它是一种功能意义上的仪器，是以计算机为核心，由强大的测试应用软件支持的、具有虚拟仪器面板和必要的仪器硬件及通信功能的测量信息处理系统。虚拟仪器充分利用了计算机的软件资源，通过软件完成测试任务，用户甚至只需要对软件进行灵活的组合、集合，就可以组建功能不同的多种虚拟仪器。

近年来，以 Internet 为代表的计算机网络以及相关技术迅速发展，为测量与仪器技术带来了前所未有的发展机遇，网络化测量技术与具备网络功能的新型仪器——“网络化仪器”应运而生，目前已推出了多种网络化仪器仪表。这种网络化仪器仪表是以 PC 机和工作站为基础，通过组建网络来构成测试系统，提高了工作效率并实现了信息资源共享，已成为仪器仪表和测量技术发展的方向之一。

随着现代科学技术的发展，以及多学科技术的创新与融合、测量仪器与计算机及通信的互动，测量目的、测试过程、测试结果等都将随之发生观念上的变化，测量技术和仪器仪表技术也将不断地进步和发展。

四、计量的基本知识

下面介绍一些计量的基本知识，这些知识是从事电子测量的人员必须要了解的。

1. 计 量

计量和测量是相互联系而又有区别的两个概念。测量是通过实验手段对客观事物取得定量信息的过程,也就是利用实验手段把待测量直接或间接地与另一个同类的已知量进行比较,从而得到待测量值的过程。测量过程中所使用的器具和仪器就直接或间接地体现了已知量。测量结果的准确与否,与所采用的测量方法、实际操作和作为比较标准的已知量的准确程度都有着密切的关系。因此,在测量过程中,作为比较标准的各类量具、仪器仪表,必须定期对其进行检验和校准,以保证测量结果的准确性、可靠性和统一性,这个过程就称为计量。“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。”因此计量可看作是测量的特殊形式。在计量过程中,认为所使用的量具和仪器是标准的,用它们来校准、检定受检量具和仪器设备,以衡量和保证使用受检量具和仪器进行测量时所获得的测量结果的可靠性。因此,计量又是测量的基础和依据。计量工作是国民经济中一项极为重要的技术基础工作,在工农业生产、科学技术、国防建设、国内外贸易以及人们生活等各个方面起着技术保证和技术监督的作用。

2. 单位制

任何测量都要有一个统一的体现计量单位的量作为标准,这样的量称作计量标准。计量单位是有明确定义和名称,并令其数值为 1 的固定的量。例如,长度单位 1 米 (m),时间单位 1 秒 (s)等。计量单位必须以严格的科学理论为依据进行定义。法定计量单位是国家以法令的形式规定使用的计量单位,是统一计量单位制和单位量值的依据和基础,因而具有统一性、权威性和法制性。

我国确立了以国际单位制为基础的法定计量单位,并以法律形式强制使用。1984 年 2 月,国务院颁布了《中华人民共和国法定计量单位》,确定了我国法定计量单位以国际单位制为基础,并包括 10 个我国选定的非国际单位制单位,如时间 (分、时、天)、平面角 (秒、分、度)、长度 (海里)、质量 (吨)和体积 (升)等。在国际单位制中,又分基本单位、导出单位和辅助单位。基本单位有 7 个,它们是构成单位制中其他单位的基础,有米 (m)、千克 (kg)、秒 (s)、安培 (A)、开尔文 (K)、摩尔 (mol)、坎德拉 (cd)。由基本单位通过定义、定律及其他函数关系派生出来的单位称为导出单位,例如,频率的单位赫兹 (Hz),能量 (功)的单位焦耳 (J),力的单位牛顿 (N),功率的单位瓦特 (W)等,国际单位制中有 19 个具有专门名称的导出单位。国际上把既可以作为基本单位又可以作为导出单位的单位单独列为一类,称为辅助单位。国

际单位制中包括两个辅助单位，分别是平面角的单位弧度（rad）和立体角的单位球面角（sr）。国际上规定以拉丁字母 SI 作为国际单位制的简称。

3. 计量器具

计量器具是指能直接或间接测出被测对象量值的量具、计量仪器和计量装置。按照用途分类，计量器具可以分为计量基准、计量标准和工作计量器具三类。

(1) 计量基准

计量基准是一个国家直接按物理量单位定义、用以复现和保存计量单位量值，具有最高准确度水平的基准。它是经过法定手段认定，可作为统一全国量值的最高级依据的计量器具。

计量基准一般分为主基准、副基准和工作基准，也可以分别称为一级、二级和三级基准。主基准是原始基准，用作国家基准；副基准为次级基准，可以代替主基准向下传递量值；工作基准是专门用于向下一级标准器具或仪器进行量值传递的。

(2) 计量标准

计量标准是指准确度低于计量基准，用于检定其他计量标准或工作计量器具的计量器具。计量标准的量值由计量基准传递而来。

(3) 工作计量器具

工作计量器具不用于检定工作，只用于日常测定，必须定期用计量标准来检定其性能，判断其是否合格。

4. 计量检定和量值传递

计量检定是指为评定计量器具的计量性能，确定其是否合格所进行的全部工作。按照规定，企、事业单位必须要配备与生产、科研、经营管理相适应的计量检测设施，制定检定办法和制度，对本单位使用的工作计量器具实施定期检定。检定规程由国家制定。规程中对计量器具的计量性能、检定项目、检定条件和方法、检定周期及检定数据处理等，都做了技术规定。

量值传递就是通过计量检定，将国家基准所复现的单位值，经各级计量标准逐级传递到工作用的计量器具，构成一个各种单位的传递网，从而保证在实际测量中所得到的测量数值准确和一致。

国家基准只用来统一为数不多的接近于最高准确度的计量标准。用准确度等级较高的计量标准或计量器具去检定等级低一级的计量标准或计量器具，逐

级检定,以判断其准确度是否在符合规定的范围之内。在每一级的比较中,都认为上一级标准所体现的量值是准确无误的。实际上,测量总存在着误差,因而上下级所体现的单位值并不完全一致,级别越高的越准确。由此可见,量值传递是由上逐级向下传递的,由国家基准或经比对后公认的最高标准开始向下传递,一直传递到工作用计量器具。通过这种量值的传递网络,保证所有量值的统一、标准和一致。

五、“电子测量”课程的主要内容

电子测量的内容极其广泛、繁杂,而且由于测试技术的发展还在不断充实和更新,因此,本教材不可能囊括电子测量技术的全部内容。本课程的主要任务是:使读者了解电子测量技术中最基本的测量原理和测量方法,掌握一定的误差分析、不确定度分析和测量数据处理的能力,并适当介绍一些现代新技术,以适应技术发展的需要。

本课程是一门理论性和实践性都很强的课程,学习中必须理论联系实际,因此,在教学过程中安排了一定数量的实验,使学生在掌握电子测量技术理论的同时,动手能力也得到锻炼和提高。本课程的教学目的是:通过课堂教学、自学、实验、作业等环节,使学生掌握电子测量及电测仪器的基本概念、基本原理、基本方法和基本操作,提高学生的分析、归纳、观察和推理的能力,培养学生严格的科学态度和工作方法,为今后长期从事科技工作打下一定的基础。

思 考 题

1. 什么是测量?什么是电子测量?
2. 被测量的量值含义是什么?
3. 按不同的分类方式,电子测量的基本方法有哪些?
4. 简述直接测量、间接测量和组合测量的特点,并各举一个测量实例。
5. 电子测量包括哪些内容?
6. 简述电子测量的特点。
7. 比较测量和计量的异同。

1 测量误差与测量不确定度

1.1 测量误差

测量误差是测量中的一个基本的问题，实际上任何一种测量都不可避免地会存在误差。虽然对于测量结果的质量现在不再采用误差而是采用不确定度来评定，但误差对于表示和分析测量仪器和设备的准确性，研究改善测量准确度的方法，仍然起着重要的作用。

1.1.1 测量误差的基本概念及表示

1. 基本概念

测量误差，是指测量结果^①与被测量真值^②之差。在实际测量中，由于人们对客观事物认识的局限性及测量器具的不准确、测量手段的不完善、测量环境条件的变化以及测量工作中的失误等原因，都会使测量结果与被测量真值之间存在一定的差异，导致测量误差。

在一定条件下，测量误差是客观存在的确定的值，能反映出测量结果与真值的接近程度。

2. 表 示

测量误差通常采用绝对误差和相对误差两种方法表示。

(1) 绝对误差

设被测量 X 的测量结果为 x ，真值为 A_0 ，则绝对误差 Δx 为

$$\Delta x = x - A_0 \quad (1.1)$$

① 测量结果——由测量赋予的被测量之值。要注意的是，当给出测量结果时，应表明所指的是示值、未修正结果、已修正结果还是平均值。在完整的测量结果表达中，还包括测量不确定度。

② 真值——与给定的特定量定义一致的量。

这里要注意的是,被测量的真值 A_0 是一个理想的概念。在实际中,由于受到各种主观及客观因素的影响,真值往往不可能准确获知,因此,通常采用约定真值^① x_0 (也称为实际值) 替代真值来进行绝对误差的计算,即

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.2)$$

在实际测量中,上一级计量标准所复现的量值或已修正的多次测量的算术平均值可作为约定真值。由于约定真值本身存在不确定性,因此绝对误差实际是具有一定不确定度的测量误差。

绝对误差有大小、符号和量纲,其大小反映测量值偏离真值的程度,其符号表示偏离真值的方向,其量纲与被测量的量纲相同。

(2) 相对误差

相对误差采用百分数的形式来表示误差的大小,有大小和符号,但无量纲。相对误差主要有示值相对误差、实际相对误差和引用相对误差三种。

① 示值相对误差 γ_x , 是指绝对误差 Δx 与被测量示值 x 之比的百分数,用 γ_x 表示,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x} \times 100\% \quad (1.3)$$

② 实际相对误差 γ_{x_0} , 是指绝对误差 Δx 与被测量的约定真值 x_0 之比的百分数,用 γ_{x_0} 表示,即

$$\gamma_{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.4)$$

③ 引用误差 γ_m , 又称为满度相对误差,是指绝对误差 Δx 与仪器的满刻度值 x_m 之比的百分数,用 γ_m 表示,即

$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.5)$$

引用误差一般用于连续刻度的多挡仪表,并常用来评定这些仪表的准确度级别。例如,我国常用电工仪表的准确度级别就是根据引用误差 γ_m 划分为七级: 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5 及 5.0 级。其中 0.1 级仪表的级别最高,表明仪表的 $|\gamma_m| \leq 0.1\%$, 通常也写作 $\gamma_m = \pm 0.1\%$, 表示引用误差 γ_m 处于 $-0.1\% \sim +0.1\%$ 之间。

① 约定真值 —— 赋予被承认的特定量的值, 该值具有与特定量预期用途相适应的不确定度。

1.1.2 测量误差的分类

根据测量误差的性质和特点不同,可将其分为随机误差、系统误差和粗大误差三种。

1. 随机误差

(1) 随机误差的概念

测量结果与在重复性条件^①下对同一量进行无限多次测量所得结果的平均值之差,称为随机误差。

由于实际测量次数的有限性,只能得出测量结果中随机误差的估计值。在有限次测量中,定义每次独立测量值 x_k 与有限次测量的算术平均值 $\bar{x}$ 之差为残差 v_k ,即

$$v_k = x_k - \bar{x} \quad (1.6)$$

当测量次数趋于无穷时,残差的性质就反映了随机误差的性质。

对于单次测量,随机误差没有规律,其大小和方向不可预定;但测量次数足够多时,随机误差总体服从统计规律。因此,可采用概率论及数理统计的方法来分析和研究随机误差。

(2) 随机误差产生的原因

随机误差主要是由对测量观测值影响微小而又互不相关的因素共同作用产生的。例如,测量仪器元器件的噪声,温度、电源电压的无规则波动、电磁干扰以及测量人员感官等多种互不相关的微小因素,这些无法控制的因素的随机变化导致了重复性观测中测量值的分散性。因此,对于随机误差,既不能修正,也不能消除,可以采用增加测量次数,再根据其本身存在的某种统计规律,利用数理统计的方法来加以限制和减小。

(3) 随机误差的性质

根据中心极限定理,如果被研究的随机变量可以表示为大量独立的随机变量之和,且其中每一个随机变量对总和只起微小的作用,则可以认为此随机变量服从正态分布。在测量中,随机误差通常是由多种因素造成的许多微小误差的总和,因此,在大多数情况下,随机误差接近正态分布。服从正态分布的随机误差,其概率分布密度函数为

① 重复性条件——相同的测量程序,相同的观测者,相同地点,在相同条件下使用相同的测量器具,在短时间内进行重复测量。