

普通高等院校电气电子类规划系列教材

PUTONG GAODENG YUANXIAO DIANQI DIANZILEI GUIHUA XILIE JIAOCAI

电测试 技术

DIANCESHI JISHU

任良抒 吕晓琴 \ 主 编



西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>

内 容 提 要

全书共分十一章,系统地介绍了测量误差的基本理论与测量数据的处理方法,从电路参数测量、波形测量、电压测量、频率(时间)测量、功率(电能)测量、频域测量、数域测量、非电量测量等方面阐述了电测试技术的基本原理和方法,并对智能化仪器及虚拟测试做了较详尽介绍。本书以电测试技术为主线,在论述测试原理和方法的基础上,介绍了典型的测试仪器以及常用电工指示仪表,论述深入浅出,语言简练,通俗易懂。

本书可作为高等学校电类各专业的测量课教材,也可供从事电测试工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电测试技术 / 任良抒, 吕晓琴主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2012.2
普通高等院校电气电子类规划系列教材
ISBN 978-7-5643-1676-1

I. ①电… II. ①任… ②吕… III. ①电测法—高等学校—教材 IV. ①TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 018443 号

普通高等院校电气电子类规划系列教材

电测试技术

主编 任良抒 吕晓琴

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	胡芬蓉
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都中铁二局永经堂印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	18
字 数	446 千字
版 次	2012 年 2 月第 1 版
印 次	2012 年 2 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1676-1
定 价	32.00 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

前 言

电测试被广泛用于工业农业生产、科学研究和人们的日常生活中，是一门随着科学技术的发展而发展的、非常重要的学科，它与自然科学的发展互相促进、互相推动，因而电测试技术的水平反映了一个国家的科学技术水平。随着科学技术的发展，电测试已从电工测量发展成为电子测量、计算机自动测试及虚拟测试，而目前国内的电测试教材大多将电气测量与电子测量分割开来，也很少涉及非电量测量，故已不适应高校电气类、自动化类专业测量课的需要，这是促使编者编写本书的主要原因。本书兼顾了电气测量、电子测量、非电量测量和计算机化自动测试等诸方面的内容，较全面系统地介绍了电测试技术的原理和方法。

本书内容包括五个方面：① 测量误差分析与测量数据处理；② 电测试指示仪表；③ 传感器及应用；④ 各种测试技术的基本原理和方法；⑤ 计算机化自动测试与虚拟测试。编者编写电测量指示仪表内容，不但考虑了因科学技术的发展而出现的新材料、新工艺、新技术的应用使电测量指示仪表具有新的生命力这一因素，而更重要的是考虑了目前电测量指示仪表仍被广为应用这一国情；考虑到自动智能测试已一统自然界所有被测量，本书以一定的篇幅编写了传感器及应用；而计算机化仪器、自动测试及虚拟测试，则是日新月异、突飞猛进的现代测试技术，因而用了较大的篇幅来介绍。其中各种测试技术是本书的重点。

本书由任良抒等负责编写，并由任良抒主审和统稿。参加编写的有任良抒（绪论和第一、三章）、吕晓琴（第二、八章）、翟旭（第十、十一章）、章春军（第六、七章）、任彦仰（第四、五章）和张江泉（第九章）。

本书内容新颖，叙述简练，概念清楚，原理简明。编写中力图做到：注重基本理论和概念，突出原理和方法，强调实用测试技术，充分体现本课程实践性强的基本特征。在使用对象上，本书适合作为电气类和自动控制类专业的测量课程教材，并可作为电子类专业及测控技术与仪器专业“电子测量”课程的教材，对第五方面内容还可作为少学时的“计算机化自动测试”或“智能仪器”的选修课教材。本书也可供电测试工作的工程技术人员参考。

本书是作者根据多年的教学经验，在历次电测课程讲义的基础上，参考国内外相关教材和资料编写而成的，在编写过程中得到了西南交通大学峨眉校区电气工程系和计算机与通信工程系的大力支持，并得到胡学林老师的关心。在此，编者谨向他们表示诚挚的谢意！

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，殷切希望读者批评指正。

编 者

2011 年 11 月

目 录

绪 论	1
第一章 误差理论与数据处理	5
第一节 测量误差的基本概念	5
第二节 随机误差的统计特性及处理	11
第三节 系统误差的判别及处理	17
第四节 误差的合成与分配	21
第五节 测量数据处理	27
习题一	34
第二章 传感器及应用	36
第一节 概 述	36
第二节 电阻传感器及应用	37
第三节 电容传感器及应用	44
第四节 电感传感器及应用	51
第五节 压电传感器及应用	59
第六节 其他传感器及应用	64
习题二	70
第三章 电测量指示仪表	72
第一节 概 述	72
第二节 磁电系仪表	75
第三节 电动系仪表	88
第四节 电磁系仪表	95
第五节 感应系仪表	97
习题三	99
第四章 电路参数测量	103
第一节 电路参数测量方法	103
第二节 直流电桥	106
第三节 交流电桥	111
第四节 电路参数的智能测量	119
习题四	120

第五章 波形测试技术	123
第一节 概 述	123
第二节 波形测试的基本原理	124
第三节 通用示波器	129
第四节 多波形显示	137
第五节 高频信号观测	139
第六节 波形的记忆与存储	141
第七节 示波器的使用	143
习题五	147
第六章 频率（时间）与相位测量	149
第一节 时频标准及测量方法	149
第二节 电子计数器测量频率	152
第三节 电子计数器测量时间	157
第四节 电子计数器测量相位	161
习题六	162
第七章 电 压 测 量	164
第一节 概 述	164
第二节 交流电压测量	166
第三节 噪声电压测量	173
第四节 电压测量的数字化方法	176
习题七	185
第八章 功率、电能测量	187
第一节 直流功率测量	187
第二节 交流功率测量	189
第三节 电能测量	195
习题八	196
第九章 频 域 测 量	198
第一节 线性系统描述	198
第二节 线性系统频率特性测量	199
第三节 信号非线性失真的测量	207
第四节 信号的频谱分析	211
习题九	217

第十章 数域测量	218
第一节 数域分析和数域测量仪器	218
第二节 逻辑分析仪	222
第三节 逻辑分析仪的应用	230
习题十	238
第十一章 微机在电测试技术中的应用	239
第一节 概 述	239
第二节 微机化仪器的典型功能	240
第三节 智能仪器	245
第四节 个人仪器	255
第五节 自动测试系统	258
第六节 虚拟仪器	269
第七节 虚拟测试	277
习题十一	278
参考文献	279

绪论

一、测量及其意义

1. 测量的含义

测量就是人们借助于专门设备,通过实验的方法,对客观事物取得数量概念的过程。人类总是从感性开始来认识自然现象的,进而达到定量认识,使认识逐步深化,去认识客观事物的本质和规律,最终上升到理性认识。通过测量,人们对自然现象获得定性了解和定量掌握,总结出客观规律,上升为理论,再通过测量来检验这些理论是否正确。因此,测量是人类认识自然、改造自然不可缺少的重要手段。

广义地讲,测量就是为确定被测对象的量值而进行的实验过程,它需要借助专门的设备,将被测对象直接或间接地与同类已知量进行比较,从而获得用数值和量纲共同表示的测量结果。

2. 测量的意义

实践是检验真理的唯一标准,任何自然科学理论都必须通过测量来验证,比如欧姆定律 $R = U/I$,就得通过测量电阻 R 两端的电压 U 及通过电阻 R 的电流 I 才能得到验证;其次,测量是发现新问题,提出新理论的线索和依据。测量中出现的特殊现象,往往是给科学家带来重大发现的“机遇”,能够诱发他们的“灵感”,从中得出新理论;再次,测量是科学研究的重要组成部分,是人类社会实践活动之一,它推动着人类的科学进步。测量被广泛应用于自然科学的一切领域,大可大到宏观的宇宙,如对发射人造地球卫星和宇宙飞船的测控;小可小到微观的粒子,如纳米技术领域的测量;复杂可复杂到生命,这在生命科学和医学领域应用甚广。所以,著名科学家门捷列夫讲得非常精辟:“没有测量,就没有科学”。

随着科学技术和生产的发展,测量已发展成为一门较为完整的技术学科,对国民经济各个领域都至关重要。现代工业大生产有 20%~30% 的工时和费用用于测试方面,借助测量实现对生产质量的管理,提供最佳加工信息,达到最高的生产效率。

科学技术与测量犹如“矛”与“盾”,任何高、精、尖、新的科学技术,都有测量验证它的测量手段;而科学技术的发展,又更新测量技术,推动着测量技术的不断发展。

3. 测量的分类

在测量领域,被测对象种类繁多,所使用的方法也多种多样。人们通常将被测量分为电量和非电量两大类,因而相应的测量方法有电量的电测法、非电量的电测法与非电测量法。由于测量的分类法较多,按照不同的方式划分就有不同的结果,下面介绍主要的分类法。

(1) 按测量的方法分

- 直接测量 在测量中直接得到被测结果,不需要通过任何函数关系进行辅助计算。比如用电压表测量电压,示值即为被测结果。

- 间接测量 在测量中直接得到的是某些量,而被测结果还需要按某种函数关系进行计算才能得到。比如用“伏安”法测欧姆电阻,直接测得量是用电压表测得的电阻两端的电压和用电流表测得的流过电阻的电流,被测电阻值需要按公式 $R = U/I$ 计算间接求得。

- 组合测量 它是以上两种测量方法的组合,得到被测量与另外几个量的联立方程组,求解的最有效方法是利用计算机。

(2) 按测量的条件分

- 等精度测量 在多次测量中,每次测量不但测量仪器设备相同,而且测量的环境因素都不变,甚至包括测量人员都不更换。与之相反的,则是非等精度测量。

(3) 按测量的性质分

- 时域测量 被测量随时间而变化,是时间的函数。例如,用示波器显示电压等波形。

- 频域测量 被测量随频率而变化,是频率的函数。例如,用频谱分析仪对信号进行频谱分析。

- 数域测量 被测量为数据流,主要是对数字仪器、微处理器、计算机等的测量。

随着科学技术的发展,还有一种较新的测量技术叫随机测量,但在性质上还是按照上述三种测量方式进行分类。

此外,根据被测量是否变化,测量还可分为动态测量和静态测量。前者是对动态特性进行测量,后者则是对静态特性进行测量。

4. 测量的结果表示

尽管测量方法很多,但测量结果的表示形式有三种:一是表示成一定的数据;二是表示成一定的曲线;三是表示成一种图形。无论哪种形式,其中都应具备以下三点:

- ① 有一定的数字,其大小反映被测量的数量观念;

- ② 有量纲,它反映被测对象的物理属性;

- ③ 有误差,它反映被测结果的可信赖度。

二、电测及其特点

电测是测量领域的重要组成部分,它包括古典的电工测量技术和突飞猛进的电子测量技术,以及利用敏感元件对非电量进行测试的电测技术。所以,凡利用电技术进行的测量都可称之为电测,电测的核心是电子测量。

电测的内容一般包括以下几类参量:

- ① 电磁能量,即电流、电压、功率、电能、电(磁)场强度等;

- ② 电信号特征量,即频率、相位、波形参数、脉冲参数、失真度等;

- ③ 电路参量,即电阻、电容、电感和网络特性参数(如传递函数、增益、灵敏度、分辨率)及集成电路参数等;

- ④ 电子设备性能,即通频带、选择性、放大倍数、衰减量、灵敏度、信噪比等;

- ⑤ 特性曲线，即幅频特性、相频特性、器件特性等；
- ⑥ 非电参量，即温度、重量、压力、速度、位移、长度等。

上述各类参量测量中，传统观念通常是将利用常用电工仪表进行的测量称为电工测量技术。随着科学技术的迅猛发展，电子技术和计算机技术渗透到测试技术和自动控制工程中，使几乎所有电工测量中常用仪表的功能可通过电子仪器、数字仪表和智能仪器来实现，而且非电量的测量也通过各种功能的传感器由电测试来实现，且成为一种“潮流”。这些新的测试技术有如下显著特点：

① 测量频率范围宽。不但可以测直流，而且可以测 $10^{-5} \sim 10^{12}$ Hz 的交流信号，如此宽的频率范围使电测的应用范围非常广泛。

② 测量量程大。量程是测量范围上限值与下限值之差。高灵敏度的数字电压表可测 nV 级到 kV 级的电压，量程达 11 个数量级。而数字式频率计的量程更宽，上、下限差近 17 个数量级。

③ 测量准确度高。电测的准确度比其他测量都要高很多。例如，发射人造卫星，若控制和遥测系统使最后级火箭的速度误差 2%，则将使卫星偏离预定轨道一百多千米。特别是如今人类采用原子频标和原子秒作基础，使测量频率和时间的准确度达 10^{-13} 数量级。

④ 测量速度快。由于电子测量是通过电子运动和电磁波的传播来进行信息传递，因而测量速度很快。比如，导弹防卫系统，首先要测出敌方导弹的飞行轨道参数等，通过计算机处理，然后确定发射拦截导弹的飞行参数和发射时间等。对现代工业来讲，高效的生产就离不开高速的检测和控制，而且高速检测与控制也是提高产品质量的需要。

⑤ 易于与计算机结合，形成自动化、智能化测量。这是因为电子测量得到的是电信号，容易通过 A/D、D/A 转换与计算机联机。计算机的问世是电子技术的一场革命，推动了现代科技的发展，使人类社会成为计算机的时代。特别是 20 世纪 70 年代后，超大规模集成电路和微处理器的出现，使电子测量跨入智能测量的时代，出现了灵巧多用、高性能、多功能的智能仪器。例如，将各种仪器通过接口母线与计算机相连，则构成自动化测试系统，在计算机控制下可实现一个庞大的测试任务。总而言之，计算机技术的出现给测量带来了革命性的改变，使电测的天地生机勃勃，呈现出一个缤纷的世界，展示出神奇莫测而又无比辉煌的前景。

⑥ 易于实现遥测和长期不间断测量。随着传感器技术的发展，人类已可以对不便长期停留或无法达到的区域进行遥测，且电信号便于传输处理，这就大大拓展了电测的领域。这种测试技术在工业生产、军事和航天领域中应用广泛。

电测的这些优点，正是它得到广泛应用和迅猛发展的原因。需要指出的是，电测技术与自然科学技术的发展相互依赖、互相推动，只要科技发展了，测试技术就随之而发展。所以，一个国家的电测技术水平体现了这个国家的科学技术水平。也正因为如此，电测试技术具有无限生命力，拥有更加光辉灿烂的明天。

三、电测课程的任务

由前述可知，电测的内容十分广泛，涉及的领域较多，作为电测课程，不可能面面俱到都加以介绍。本课程的主要任务是使读者了解电测试的最基本原理和测量方法，具备一定的测量误差分析和数据处理能力，对新技术在电测中的应用有一定的了解。本教材从测试技术出发，对常用电子仪表的原理、使用方法和主要电路做概要介绍。

4 电测试技术

随着科学技术的发展,新的电磁材料的出现和新工艺的问世,使电工仪表在现代电测试技术中占有较为重要的地位,特别是它具有成本低、操作简便等优点,并且其测量准确度又能满足一般工程测量的要求,从而使常用电工仪表在工程上得到较为普遍的应用。鉴于此,本教材用一定的篇幅来介绍最常用的电工仪表的原理及其在测量中的应用。

当然,电测试技术的相当一部分内容是非电量的电测,考虑到强电专业实际应用的需要,本书用了一定的篇幅来介绍传感器及其应用,从而使本教材相对完整,形成了科学的课程内容体系。

本课程是一门理论性和实践性都很强的课程,在注重理论学习的同时要加强对动手能力、实践能力的培养,通过实验教学掌握电测的基本概念、基本原理、基本方法,通过分析和处理实验中出现的各种现象,在实践中培养创新能力,养成作为科技工作者应有的严谨科学态度和科学工作方法。

第一章 误差理论与数据处理

第一节 测量误差的基本概念

人类要认识自然、改造自然，就必须进行测量，但测量不可能准确得到被测物理量的真实大小，总是存在着误差。测量中存在误差是绝对的，而测量误差的大或小则是相对的。对于不同的测量，其测量误差的大小，也就是对测量准确度的要求，是各不相同的。若测量误差太大，其测量工作和测量结果不但毫无意义，甚至会给工作带来极大的危害。随着科学技术的发展和生产水平的提高，对减小测量误差提出了越来越高的要求，因此，控制测量误差的大小是衡量测试技术水平的重要标志，也是衡量科学技术水平的重要标志。

一、测量误差的定义

测量误差，就是测量示值与被测物理量真值间的差别。

所谓真值，是指被测物理量具有的真实大小。真值以一定时空条件而客观存在，具有不可知性，如重力加速度，在地球上不同地点，因空气密度和离地心远近的不同而略有不同，而且随着宇宙的演变和地球的变迁也会发生微弱变化，因而真值通常由计量或由理论给出，是一个近似值，只能是无限趋近。在实际测量中，常把用高一等级的计量标准所测得的量值作为实际值，用来代替真值使用。除此以外，还可以用已修正过的、多次测量的算术平均值来代替真值使用。

二、测量误差产生的原因

既然测量误差在测量中是绝对存在的，那么是什么原因导致这种存在的绝对性呢？这是因为人类对客观世界的认识是永无止境的，对客观世界客观规律的认识总存在局限性。也正因为如此，测量器具的不准确、测量手段的不完善、测量条件的变化，以及测量人员的疏忽或错误等，都会使测量值与被测真值不同而产生误差。所以，人们对测量误差的要求，一是越小越好，二是从误差的来源、测量数据的处理、制订测量方案等方面来尽可能地削弱误差。

三、测量误差的分类

测量误差的分类方法较多，主要有下述几种：

- ① 按误差表示方法分，有绝对误差和相对误差；

- ② 按误差性质分, 有系统误差、随机误差和粗大误差;
- ③ 按误差来源分, 有仪器误差、使用误差、人身误差、方法误差、理论误差、影响误差等。

四、测量误差的表示方法

上面已经讲过, 测量误差有两种表示形式, 即绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

绝对误差是指测量示值与被测物理量真值之差, 可以表示为

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1.1)$$

式中, Δx 为绝对误差, x 为测量示值, x_0 为被测量的真值。

由于绝对误差是两个值之差, 所以应注意:

- ① 绝对误差有单位, 与被测物理量量纲相同;
- ② 绝对误差有大小和正负号, 其中大小反映测量值偏离真值的程度, 而正负号反映测量值偏离真值的方向;
- ③ 绝对误差不反映测量的准确程度。例如, 测 5 V 电压得示值为 4.8 V, 误差为 -0.2 V; 测 100 V 电压得示值为 99.8 V, 误差为 -0.2 V。这两个测量的误差均为 -0.2 V, 单从绝对误差上就看不出测量的准确程度。

对测量值进行修正可得到被测量的实际值, 这个修正值可表示为

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

可见, 修正值 C 是绝对误差的相反数。对于较准确的测量仪器, 在说明书中常以表格、曲线或公式的形式将修正值给出。在自动测量仪器中, 可将修正值编程存储在仪器中, 测量时仪器自动进行修正。

2. 相对误差

绝对误差的优点是直观, 但不足之处就是不能反映测量的准确程度。为弥补这种不足, 就提出了相对误差的概念。相对误差主要有下述三种形式。

(1) 相对真误差

它是绝对误差与被测真值的比, 通常用百分数表示为

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100\% \quad (1.3)$$

- 应注意: ① 相对误差没有单位, 因为它是同量纲值的比; ② 相对误差也有正负号;
- ③ 相对误差能反映出测量的准确程度。例如, 前述介绍绝对误差时列举的两个测量:

$$\text{测 5 V 电压} \quad \gamma = \frac{4.8 - 5}{5} \times 100\% = -4\%$$

$$\text{测 100 V 电压} \quad \gamma = \frac{99.8 - 100}{100} \times 100\% = -0.2\%$$

可见, -0.2% 比 -4% 小得多, 因而测 100 V 电压的准确度高。

另外, 当误差较小、要求不太严格时, 可用示值相对误差来表示, 它定义为绝对误差与测量示值之比, 即 $\gamma_x = \Delta x / x$, 这是近似算法。

(2) 引用误差

相对误差可表示测量的准确程度, 但用来衡量仪表的性能 (即表示整个量程内的准确程度) 则多有不便。因为在仪表的某一量程内测量时, 随被测量的不同有不同的测量示值。若用示值相对误差表示, 则相对误差因分母变化而变化。因此, 在确定仪表的准确程度等级时, 采用引用相对误差 (也称为满度相对误差) 的概念, 即

$$\gamma_n = \frac{\Delta x}{x_m} \times 100\% \quad (1.4)$$

式中, γ_n 为引用误差, Δx 为仪表量程内的基本误差, x_m 为仪表的量程。

为了保险起见, 用最大引用误差来确定仪表的准确度更为合适, 它定义为

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta x_m}{x_m} \times 100\% \quad (1.5)$$

式中, Δx_m 为仪表在量程内不同刻度上的最大基本误差。

根据我国国标 GB 776—65《电气测量指示仪表通用技术条例》的规定, 电气测量指示仪表按最大引用误差划分准确度的等级, 即 $\gamma_{nm} = \pm a\%$, 其等级 a 分为 0.1 、 0.2 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.5 、 5.0 七个等级。由于仪表制造工业的发展, 已有准确度为 0.05 级乃至 0.02 级以上的高准确度仪表。对于 0.2 级仪表, 它的最大引用误差在 $\pm 0.1\% \sim \pm 0.2\%$, 其他等级类推。

值得注意的是, 当选定仪表后进行测量时, 最大示值相对误差可表示为

$$\gamma_x = \frac{\Delta x_m}{x} \times 100\% = \frac{\gamma_{nm} \cdot x_m}{x} \times 100\% = \frac{x_m}{x} \times (\pm a\%)$$

可见, 一旦仪表的等级选定后 (即 a 一定), 被测值越接近所选仪表的量程, 其示值相对误差就越小。因此, 我们在使用仪表测量时, 在一般情况下应使测量的示值尽可能在仪表满刻度 (量限) 的 $2/3$ 以上。根据被测量选择仪表, 既要考虑所选仪表的等级, 也要兼顾仪表的量程, 进行合理选择。

(3) 分贝误差

分贝误差也就是相对误差的对数表示, 在电子学和声学中应用较广, 如放大器增益测量就可用分贝误差来表示。假设被测网络传输函数 (对于放大器, 则称为增益或放大倍数) 为 A_0 , 测量存在误差 ΔA , 测量值 $A = A_0 + \Delta A$, 用分贝表示为

$$\begin{aligned} A[\text{dB}] &= 20 \lg (A_0 + \Delta A) = 20 \lg A_0 \left(1 + \frac{\Delta A}{A_0} \right) \\ &= 20 \lg A_0 + 20 \lg \left(1 + \frac{\Delta A}{A_0} \right) = A_0[\text{dB}] + 20 \lg (1 + \gamma) \quad (\text{dB}) \end{aligned}$$

可见, $A_0[\text{dB}] = 20 \lg A_0 \text{ dB}$ 是传输函数的分贝表示部分, 而另一部分则是分贝误差

$$\gamma[\text{dB}] = 20 \lg(1 + \gamma)(\text{dB}) \quad (1.6)$$

式(1.6)中, $\gamma = \Delta A/A_0$ 是传输函数的相对误差, 可见分贝误差实质上是相对误差的另一种表示方式。

五、测量误差的性质

在测量误差的分类时已讲过, 按误差性质分有系统误差、随机误差和粗大误差, 下面就分别对其概念进行介绍。

1. 系统误差

在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号保持恒定或在条件改变时按一定规律变化的误差称为系统误差。系统误差简称“系差”, 用 ε 来表示。

系统误差的产生原因是多方面的, 常见的有: ① 测量仪器设备在设计 and 制作上有缺陷, 如刻度的偏差、零点不准等; ② 测量时环境条件与仪器要求的不一致, 如温度、湿度、电源、电压变化及周围电磁场的影响等带来的误差; ③ 测量方法不完善, 或依据的理论不严格, 或采用了近似计算公式等, 如利用电压表、电流表按伏安法测量电阻 R 值的方法误差; ④ 测量设备的安装、放置和使用不当等引起的误差; ⑤ 测量人员的不良习惯及生理上的限制等, 如有的测量人员习惯于从左边或右边去读取指针式仪表的示值, 这就必然造成误差。

系统误差的特点, 就是当测量条件一经确定, 系统误差就是一个客观上恒定的值, 多次测量取平均值并不能改变其大小及符号, 这种系统误差称为恒系差。但是, 当测量条件改变时, 系统误差往往是变化的, 其规律有累进性的, 也有周期性的, 还有复杂规律变化的, 这种随测量条件变化的系差称为变系差。

系统误差尽管产生的原因很多, 但其特点要么是恒定的, 要么是变化的。因此, 系统误差是可以采用一定的技术措施来削弱或消除的, 其削弱或消除系统误差的方法, 将在后面予以讨论。

2. 随机误差

在相同条件下多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号均以不可预定的方式变化的误差称为随机误差。随机误差简称“随差”, 用 ξ 表示, 一般是绝对误差形式。

随机误差产生的原因, 主要是那些对测量影响微小而又互不相关的多种因素共同造成的, 也就是随机因素的影响。例如, 仪器内部的器件噪声, 电磁场微变, 空气扰动, 大地微振, 测量人员感觉器官的各种无规律微小变化, 等等。由于这些影响, 尽管宏观上或平均意义上测量条件没变, 如使用仪器的准确度相同、周围环境相同、测量人员同样细心工作等, 但是只要测量装置灵敏度足够高, 就会发现测量结果有上下起伏的变化, 这就是随机误差造成的。

就一次测量而言, 随机误差没有规律、不可预定、不能控制, 也不能用实验的方法加以消除。但是, 当测量次数足够多时, 随机误差总体服从统计规律, 在多数情况下接近正态分布, 部分属均匀分布或其他分布。

随机误差的特点是: 在多次测量中, 随机误差的绝对值不会超过一定的界限, 即有界性;

绝对值相等的正、负误差出现的机会相同，即对称性；随机误差的算术平均值随着测量次数的无限增加而趋于零，也就是说，多次测量中随机误差有相互抵消的特性，即抵偿性。

由于随机误差的上述特点，可以通过多次测量取平均值的方法来削弱随机误差对测量结果的影响。对随机误差的削弱或消除，只有通过数理统计来进行数据处理，而不能通过测试技术来进行。

3. 粗大误差

在一定测量条件下，测量示值明显偏离被测实际值所形成的误差称为粗大误差。粗大误差又叫疏失误差，是令人难以置信的误差。就其产生原因而言，有测量条件突然变化的客观原因，如测量过程中供电电源的瞬时跳变；也有测量人员疏忽的原因，如测错、读错、记错等。就其性质而言，粗大误差可能是过分大的系差，也可能是过分大的随差，因其误差值太大，分类时被单独划分为一类误差。粗大误差所对应的测量值称为坏值，在测量结果中应予以剔除。

六、误差对测量结果的影响及测量结果评价

对于测量误差，若系统误差、随机误差和粗大误差同时存在，其误差对测量结果的影响可用图 1.1 来表示。

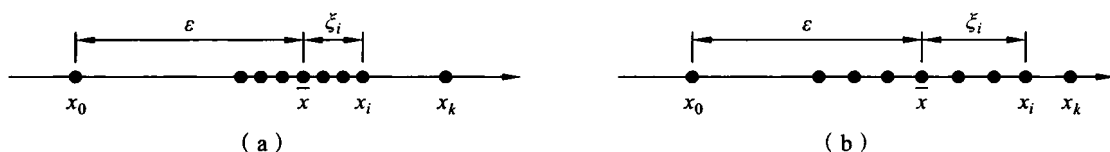


图 1.1 三种误差同时存在的情况

图 1.1 中， x_0 表示真值，小黑点表示各次测量值 x_i ， $\bar{x}$ 表示 x_i 的平均值， ξ_i 表示随机误差， ε 表示系统误差（恒系差）， x_k 表示坏值。

由图可知，坏值 x_k 的存在将严重影响平均值 $\bar{x}$ （图中的 $\bar{x}$ 未考虑 x_k 值影响），从而使 $\bar{x}$ 失去意义，因此整理测量数据时必须先将坏值 x_k 剔除。剔除坏值后，测量值 x_i 与平均值 $\bar{x}$ 的差就是随机误差 ξ_i 。根据抵偿性，通过多次测量取算术平均值的方法可以消除随差 ξ_i 的影响。算术平均值 $\bar{x}$ 与被测真值 x_0 间存在一个恒定系差 ε ， ε 越小，则 $\bar{x}$ 离真值 x_0 越近； ε 为零时， $\bar{x}$ 将趋近于 x_0 。

在图 1.1 (a)、(b) 中，系差 ε 的大小是一样的，但图 (a) 比图 (b) 的测量值集中，也就是分散性要小，对应随机误差 ξ_i 也小。

为了正确说明测量结果，分析测量误差情况，通常用正确度、精密度和准确度来评价。

- **正确度** 指测量值与被测量真值的接近程度，也就是系统误差大小的程度。在图 1.1 中，系统误差 ε 越小，测量平均值 $\bar{x}$ 就离真值 x_0 越接近，正确度就越高。

- **精密度** 指测量值重复一致的程度。相同条件下多次测量同一量，每次测量的值越接近，则测量的精密度就越高。因此，精密度表示测量结果中随机误差的离散程度。在图 1.1 中，图 (a) 的测量值比图 (b) 的测量值集中，则图 (a) 的随机误差分散小，精密度也就高。

- 准确度 反映系统误差和随机误差综合影响的程度，其中包括了正确度和精密度。

图 1.2 是射击靶牌时的弹着点情况，它形象直观地说明了正确度、精密度和准确度三个概念。其中，图（a）表明正确度高而精密度低，图（b）表明精密度高而正确度低，图（c）表明正确度和精密度都高，即准确度高。

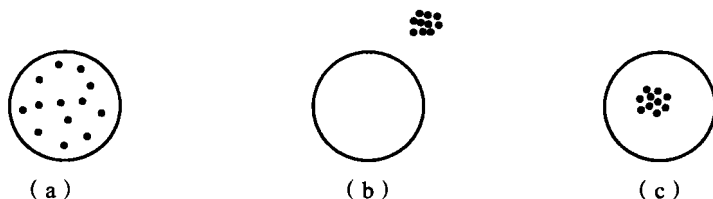


图 1.2 射击靶牌时的弹着点情况

最后应注意几点：

① 实际测量中，系统误差、随机误差和粗大误差并不是一成不变的，在一定条件下它们可以相互转化。例如，同一型号电阻在生产时，各电阻的大小不可能完全相等，这时的误差是随机误差，但当用这样的电阻进行测量时，电阻具有的误差对测量产生的误差就是系统误差。

② 对三种误差进行判别时，它们之间不存在严格的界限。随着人们对误差来源及变化规律认识的加深，对同一因素引起的误差可按不同误差来处理。例如，周围电磁场对测量的影响，当影响较小以至于与其他因素的影响不易区分或规律不易掌握时，其误差可按随机误差来处理；当影响较明显或规律易掌握时，其误差可按系统误差来处理；当影响严重以至于使测量结果明显偏离真值时，其误差可按粗大误差来处理。可见三种误差的划分不是绝对的，具有一定的相对性。但是，对三种误差的划分又是必要的，因为三种不同性质的误差必须采用不同的方法来处理。对于粗大误差，所对应的测量值为坏值，应予以剔除；对于随机误差的影响，应采用统计平均的方法来削弱；对于系统误差，则主要采用一定的测试技术措施来削弱或消除。影响严重以至于使测量结果明显偏离其真值时，其误差应按粗大误差来处理。

七、仪器误差

误差不仅仅是用来表示测量结果的准确程度，也常用来表示仪器的准确程度，如指针式仪表采用引用误差表示等级，电子仪器也用误差表示质量指标。国家标准 GB 6952—86《电子测量仪器误差的一般规定》中对工作误差、固有误差给出了统一的定义；而其他一些与工作条件相关的误差，如影响误差和稳定误差，可由产品标准给出。

固有误差是在基准工作条件下测得的仪器误差。基准工作条件通常是一组比较严格的条件，例如，一般规定温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，交流电源为 $220(1 \pm 2\%) \text{ V}$ 、 $50(1 \pm 1\%) \text{ Hz}$ ，等等。固有误差大都能反映仪器本身的准确程度，同时在基准条件下也便于对仪器的检验与检定。

工作误差是在仪表标准或产品说明书所给出的额定工作条件下测定的仪器误差极限。额定工作条件包括仪器本身的全部使用范围和全部外部工作条件，因此存在这些条件最不利的组合，所以工作误差是误差的极限形式。采用工作误差的优点是，使用者可用其直接估算测量结果误差的最大范围，而缺点是仪器在实际使用中构成条件最不利组合的可能性很小，用其估算测量结果的误差会有些偏大。

影响误差是指某种因素（如温度、频率）的影响特别大，所产生的误差在工作误差中起主要作用，从而单独列出，也是一种误差极限。至于稳定误差，它是专门用来表示随时间变化的误差。

当然，少数仪器仍在按 20 世纪 60 年代的技术规范采用基本误差和附加误差的形式，因不太多见，所以这里不做介绍。

第二节 随机误差的统计特性及处理

随机误差是由多个微小因素共同影响的结果，具有随机性，没有确定的变化规律，它使测量数据产生分散。对一次测量而言，随机误差的大小和符号都不确定，没有规律，但同一条件下多次测量，则发现随机误差使测量数据的分布服从一定的统计规律。利用概率论和统计学来研究随机误差的统计规律，大多接近正态分布，因此我们主要以正态分布的随机误差来进行分析讨论。

一、随机误差的性质及特点

概率论中心极限定理指出：若构成随机变量总和的各独立随机变量足够多，且每个随机变量对总和的影响足够小，则随机变量总和的分布规律服从正态分布。多数情况下，测量中的随机误差正是由对测量值影响微小而又互相独立的多个随机因素造成的，也就是说，测量中的随机误差一般是多个因素造成的许多微小误差的总和。因此，可用概率密度函数来描述测量数据及随机误差的分布，即

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(x)} e^{-[x-M(x)]^2/2\sigma^2(x)} \quad (1.7)$$

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\xi)} e^{-\xi^2/2\sigma^2(\xi)} \quad (1.8)$$

式中， x 为各测量值， ξ 为随机误差， $\sigma(x)$ 及 $\sigma(\xi)$ 为测量值及随机误差分布的标准差， $M(x)$ 是 x 的数学期望值。

式 (1.7)、式 (1.8) 的几何曲线如图 1.3 所示。

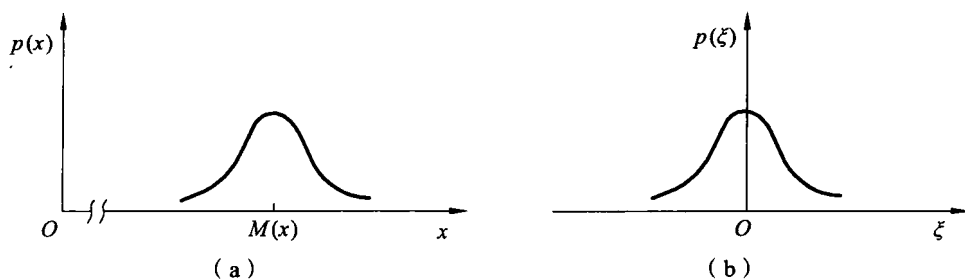


图 1.3 测量数据和随机误差的正态分布