



普通高等教育“十二五”规划教材

工程测试技术与 信号处理

陈国强 范小彬 主 编
李广伦 聂建军 张安超 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

工程测试技术与 信号处理

主 编 陈国强 范小彬
副主编 李广伦 聂建军 张安超
编 写 赵凯辉 康件丽 张明军
主 审 赵俊伟



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。本书注重理论与应用的结合,主要介绍了与工程测试技术相关的基本概念、基础理论和应用技术,对误差理论及数据处理也进行了较为详细的介绍。全书共8章,主要包括:概述、误差理论与试验数据处理、测试信号分析与处理、测试系统的特性、传感器、信号的调理与转换、计算机与现代测试技术、测试技术在工程中的应用。为了配合课堂教学与读者学习,书中各章均配备习题,针对理论较强与数学公式较多的章节配备了相应的MATLAB实例与程序。

本书可作为高等学校机械类各专业以及仪器科学与技术、检测技术与自动化装置等专业的教材,也可作为从事测试技术工作的工程技术人员的工作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

工程测试技术与信号处理/陈国强,范小彬主编. —北京:
中国电力出版社,2013.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-4545-4

I. ①工… II. ①陈…②范… III. ①自动检测—信号处理—高等学校—教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第120204号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp. sgcc. com. cn)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013年9月第一版 2013年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.75印张 435千字

定价 32.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

工程测试技术与信号处理是机械类专业重要的专业基础课程,也是教学计划中为数不多的与电子测试相关的课程之一,在学生知识结构的形成与能力的培养方面起着极其重要的作用。

有关测试技术方面的教材很多,其中有一些堪称经典与优秀教材,它们基本上已形成了完整的内容体系结构。本教材具有很强的理论性与实践性,因此,根据编者多年测试技术教学和应用的经验与体会,在本书编写过程中,进行了如下考虑与尝试。

首先,本书在内容体系结构方面仍然保留了现有教材的主要部分,如信号处理部分、传感器部分、调理部分、应用案例部分,并且在原理讲述、例题讲解等方面都借鉴了大量的经典实例;适当增加现代测试技术的新内容,如新型传感器、虚拟测试技术等,以及测试技术在工程中的应用。

其次,在考虑到机械类专业学生知识结构的基础上,加重了误差理论与数据处理的内容,使学生能够正确认识测试过程中误差产生的原因、性质等,并掌握一些基本的测试数据处理方法。

最后,在介绍相关概念与公式推导的同时,提供了大量的 MATLAB 计算实例,内容直观、形象,便于教师课堂上演示及学生课后自学;可作为实物试验的重要补充,使学生在掌握基本原理的基础上培养运用计算机进行数据与信号处理的意识与能力。

本书共分 8 章,具体内容安排如下。

第 1 章 概述 内容包括测试与信号的基本概念、测试的基础知识、测试与信号处理系统的组成、本课程的内容与教学方法。

第 2 章 误差理论与试验数据处理 内容包括误差与精度及不确定度、误差的基本性质与处理、误差的传递、数据处理的基本方法、动态测试数据的处理、MATLAB 应用实例。

第 3 章 测试信号分析与处理 内容包括信号的分类及描述、周期信号的谱分析、非周期信号的分析、随机信号的处理、常用典型信号的频谱分析、数字信号处理、MATLAB 应用实例。

第 4 章 测试系统的特性 内容包括线性系统及其特性、测试系统的静态特性、测试系统的动态特性、测试系统的响应特性、测试系统特性参数的测定、MATLAB 应用实例。

第 5 章 传感器 内容包括传感器概述、电阻式传感器、电感传感器、电容传感器、压电传感器、磁电传感器、热电传感器、超声波传感器、光电传感器、光纤传感器、其他类型传感器。

第 6 章 信号的调理与转换 内容包括电桥、信号的放大与隔离、信号变换、调制与解调、滤波器、A/D 转换、MATLAB 应用实例。

第 7 章 计算机与现代测试技术 内容包括计算机测试系统、测试总线与接口、虚拟仪器、远程测试、网络化测试、测试技术的发展。

第 8 章 测试技术在工程中的应用 内容包括振动的测量,噪声的测量,应力、应变和扭矩的测量,温度的测量,压力、流速、流量的测量,液位的测量,气体组分的测量,几何

尺寸的图像的测量。

本书由河南理工大学、中原工学院、洛阳理工学院的相关老师联合编写。河南理工大学陈国强、范小彬任主编，洛阳理工学院李广伦、中原工学院聂建军、河南理工大学张安超任副主编，赵俊伟主审。编写分工如下：陈国强与范小彬编写第1章，陈国强编写第2章，范小彬编写第3章，赵凯辉编写第4章，聂建军编写第5章的5.1~5.9节，李广伦编写第6章，张明军编写第5章的5.10、5.11节和第7章，张安超编写第8章，康件丽编写2.6.7的程序。

本书在编写过程中得到了河南理工大学领导和教务处以及机械与动力工程学院的大力支持，也得到了中原工学院、洛阳理工学院领导及相关部门的大力支持，在此表示感谢。

编 者

2013年5月



目 录

前言

1 概述	1
1.1 测试与信号处理的基本内容	1
1.2 测试与信号处理的发展概况	3
1.3 本课程的内容与教学方法	3
思考题与习题	4
2 误差理论与试验数据处理	5
2.1 误差与精度及不确定度	5
2.2 误差的基本性质与处理	9
2.3 误差的合成与分配	25
2.4 数据处理的基本方法	31
2.5 动态测试数据的处理	38
2.6 MATLAB 应用实例	39
思考题与习题	49
3 测试信号分析与处理	51
3.1 信号的分类及描述	51
3.2 周期信号的谱分析	55
3.3 瞬变非周期信号的分析	61
3.4 随机信号的处理	73
3.5 数字信号处理初步	78
3.6 信号的时—频分析	84
3.7 MATLAB 应用实例	87
思考题与习题	91
4 测试系统的特性	93
4.1 线性系统及其特性	93
4.2 测试系统的静态特性	97
4.3 测试系统的动态特性	99
4.4 测试系统的响应特性	107
4.5 测试系统特性参数的测定	113
4.6 MATLAB 应用实例	116
思考题与习题	120
5 传感器	122
5.1 传感器概述	122
5.2 电阻传感器	125

5.3	电感传感器	131
5.4	电容传感器	137
5.5	压电传感器	141
5.6	磁电传感器	145
5.7	热电传感器	150
5.8	超声波传感器	157
5.9	光电传感器	160
5.10	光纤传感器	165
5.11	其他类型的传感器	170
	思考题与习题	176
6	信号的调理与转换	177
6.1	电桥	177
6.2	信号的放大与隔离	180
6.3	信号变换	184
6.4	调制与解调	190
6.5	滤波器	195
6.6	A/D 转换	201
6.7	MATLAB 应用实例	204
	思考题与习题	208
7	计算机与现代测试技术	210
7.1	计算机测试系统	210
7.2	测试总线与接口	212
7.3	虚拟仪器	218
7.4	远程测试	222
7.5	网络化测试技术	225
7.6	计算机与网络测试技术的发展	229
	思考题与习题	230
8	测试技术在工程中的应用	231
8.1	振动的测量	231
8.2	噪声的测量	235
8.3	应力、应变和扭矩的测量	239
8.4	温度的测量	243
8.5	压力、流量和流速的测量	250
8.6	液位的测量	261
8.7	气体组分的测量	266
8.8	几何尺寸的图像测量	271
	思考题与习题	274
	参考文献	276

1 概 述

1.1 测试与信号处理的基本内容

1.1.1 测试的意义

试验是指为了探索、察看某种事物的结果或性能而从事的某种活动。测量则是为确定被测对象的量值而进行的试验过程。如果测量涉及实现单位统一和量值准确可靠则被称为计量，而研究测量、保证测量统一和准确的科学被称为计量学。测试是指具有试验性质的测量，是测量和试验的综合。测试技术是信息技术的重要组成部分，它所研究的内容是信息的提取与处理的理论、方法和技术。

测试的目的是从客观事物中提取有关信息。从物理学观点出发来考虑，信息是物质所固有的，是其客观存在或运动状态的特征。传输信息的载体称为信号，信息蕴含于信号之中。例如，交通路口的红、黄、绿三种颜色灯组成的交通信号灯，司机观察到的是光信号，它们所蕴含的信息分别是“准许车辆通行”、“已越过停止线的车辆可以继续通行”、“禁止车辆通行”；又如，通过制动试验台得到的是汽车制动力等信号，其蕴含着制动系统性能好坏的信息。

测试技术与信号处理广泛应用于社会生产、日常生活、科学研究等国民经济的各个方面。例如，古代利用“步弓”丈量土地，利用“日晷”计量时间等；秦始皇统一了割据的六国形成统一的中央政权，首先做的工作就是统一度量衡，由此可见测试计量技术的重要性；再如，汽车制动性能检测是新出厂汽车需要重点检测的项目之一，目前常用的平板式汽车制动测试系统的大致框图如图 1-1 所示。

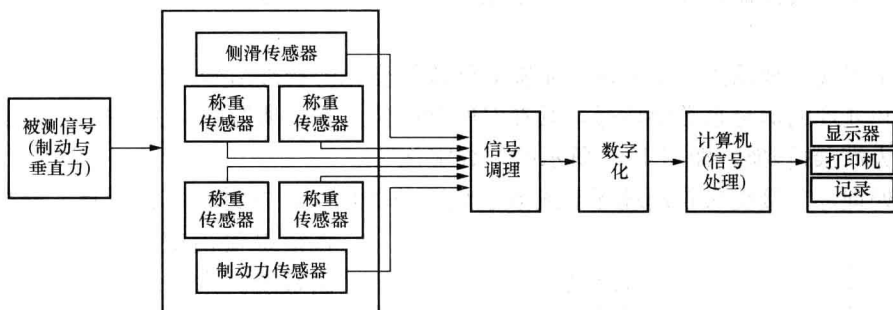


图 1-1 平板式汽车制动测试系统框图

1.1.2 测试方法的分类

可根据测试的方法、手段、目的、性质等对测试进行分类。例如，根据测试值获得的方法不同，可分为直接测试、间接测试和组合测试。

1. 直接测试

直接测试是指无需经过函数关系的计算，直接通过测试仪器得到被测值的测试，如温度计测水温、卷尺测量靶距等。直接测试按测试条件不同又可分为等精度（等权）直接测试和

不等精度（不等权）直接测试。

2. 间接测试

间接测试是指在直接测试值的基础上，根据已知函数关系，计算出被测值的测试。例如通过测定某段时间内火车运动的距离来计算火车运动的平均速度，通过测量扭矩和转速得到某动力机械的输出功率。

3. 组合测试

组合测试是指将直接测试值或间接测试值与被测试值之间按已知关系组合成一组方程（函数关系），通过解方程组得到被测值的方法。

根据是否接触测定被测对象，测试分为接触测试与非接触测试。根据被测量的属性，可以将测量分为电量测量和非电量测量。根据被测参数的不同，可分为热工测量（温度、压力、流量、物位等）、成分测量、机械量测量等。

根据被测量是否随时间变化，测试分为静态测试与动态测试。动态测试中，被测信号随时间变化；静态测试中，被测信号不随时间变化，但是由于动态干扰和测量误差的存在，测得的信号通常也是随时间变化的动态量。被测信号可分为电信号和非电信号。在现代测试技术中，通常将非电信号转换为电信号进行传输、处理和运用。为了数学上分析方便，通常并不考虑信号具体的物理性质，将其抽象为变量之间的函数关系。

1.1.3 测试系统的组成

传感器处于测试系统的最前端，能感受规定的被测量并按一定规律转换成可用输出信号的器件或装置，是包含敏感元件及其辅助电路在内的功能器件。敏感元件是指传感器中能直接感受或影响被测量的部分，内置于传感器中。

传感器输出的电信号通常需要进行放大、种类转换、调制和解调等转换成更适合进一步传输和处理的形式。例如，计算机测试系统中需要将模拟信号转换成数字信号，转换器通常只能接收一定范围的模拟信号，而传感器输出的电信号并不一定在这一范围内，有时还必须经转换后才能送转换器；又如，将各种电信号转换为电压、电流、频率等几种便于处理的电信号。

经传感器或调理输出的信号通常是随时间连续变化的物理信号，即模拟信号。而计算机所能接受和处理的信号是数字信号，其在时间和幅值上都是离散的。由模拟信号到数字信号的过程称为模/数转换，即图 1-1 所示的“数字化”。

信号处理环节接受来自调理环节或数字化环节的信号，并进行各种运算、滤波、分析，

将结果输出值显示、记录或送给控制系统。常用的信号分析方法有频谱分析、相关分析、概率密度分析等。

通过信号分析提取蕴含的信息，可将信号处理的结果进行直观的图形化显示、打印，或用存储设备记录下来，供必要时使用。

在实际测试过程中，系统的复杂程度差异很大。如果希望获取的

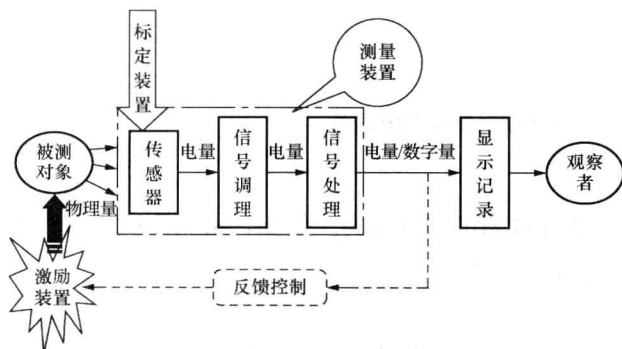


图 1-2 带反馈激励装置的测试系统框图

信息尚未载于可检测的信号中,测试系统还需要根据测试系统实时运行的状态进行反馈,激励被测对象,使其达到测试所要求的预定状态,如图 1-2 所示。

1.2 测试与信号处理的发展概况

测试技术的发展与现代科学技术的发展相辅相成、相互促进。现代科学技术的飞速发展不断对测试技术提出新的挑战,促使新的测试技术不断涌现;现代科学技术(如物理学、信息科学、计算机科学、电子与微机械电子科学与技术)的迅速发展为测试技术的发展提供了知识和技术支持。现代测试技术的发展趋势是:在不断提高灵敏度、精度和可靠性的基础上,主要向小型化、非接触化、多功能化(多参数测量、测量和放大一体化)、智能化和网络化方向发展。

1. 传感器技术的发展

传感器技术同计算机技术与通信技术一起被称为现代信息技术的三大支柱。用仿生学的观点,如果将计算机看成处理和识别信息的“大脑”,将通信系统看成传递信息的“神经系统”,那么传感器就是“感觉器官”。随着人造晶体、纳米材料等功能材料的加速开发与技术的发展,微电子、光电子、生物化学、信息处理技术等各学科、各种新技术的相互渗透和综合利用,新颖、先进的传感器不断出现。传感器技术发展的总趋势是小型化、集成化、多功能化、智能化和系统化。

2. 计算机与现代测试技术

计算机技术与测试技术的深层次结合使测试技术与仪器突破了原有的概念和结构,形成了虚拟仪器、远程测试、网络化测试的架构,这些都是现代测试技术发展的重要方面。虚拟仪器就是计算机硬、软件和总线技术在向其他相关技术领域密集渗透的过程中开发出的新一代仪器,具有功能软件化、功能软件模块化、仪器控件模块化、硬件接口标准化、系统集成化、程序设计图形化、计算可视化等特点。将测试系统与计算机网络相结合,构成信息采集、传输、处理和应用的综合信息网络,形成了远程测试与网络化测试技术。

1.3 本课程的内容与教学方法

本课程是机械类专业的一门技术基础课,研究的对象是机械工程动态测试及各部分工作的原理和处理方法,基本上涵盖了图 1-1 与图 1-2 所示的内容。本书第 2~8 章与测试系统和测试技术各部分的对应关系是:第 2、3 章对应于信号处理部分,其中第 2 章介绍了测量误差的基本性质与测试数据的基本处理方法;第 3 章介绍了信号的分类与频谱分析方法;第 4 章介绍了测试装置的基本特性,讨论了测试装置及其与输入、输出的关系;第 5 章对应于传感器部分,介绍了常用传感器的工作原理与应用方法;第 6 章对应于信号调理与数字化部分,介绍了电桥、信号放大与变换、调制与解调、滤波器及模数转换的基本原理与方法;第 7 章介绍了最新的测试技术与发展方向;第 8 章对应于测试技术的具体应用,介绍了一些特定量的测量。

通过本课程的学习,学生应掌握机械工程测试的基本知识,能够合理选用测试方法与测试装置,为进一步学习与处理工程技术问题奠定基础。本课程的主要学习内容及要点如下。

(1) 理解与测试技术紧密相关的一些概念,对测试技术与测试系统的组成及各部分的功能有一个比较完整的、系统化的认识。

(2) 理解测量误差的概念,掌握误差的分类、主要性质与数据处理的基本方法,掌握信号的分类、时域与频域分析方法,建立明确的信号频谱结构的概念,了解随机信号、数字信号处理的过程与方法。

(3) 掌握测试装置静、动态特性的评价方法,能对简单的测试装置进行特性分析与测定。

(4) 了解常用传感器的工作原理和性能,并能够根据具体的被测对象进行合理的选择。

(5) 掌握常用调理与转换的方法与基本电路,了解模数转换的概念与性能指标。

(6) 了解现代测试技术的发展方向,了解虚拟仪器、远程测试、网络化测试的概念、特性及应用场合。

(7) 掌握机械工程中常见的几种信号的测试方法,如振动、声学、应力、应变、温度等的测量。

本课程具有很强的实践性,在教学与学习过程中,需要理论与实践相结合,特别注意加强试验环节。由于本课程的部分内容公式较多且烦琐,教师讲授与学生学习的过程都较为枯燥,可以充分利用 MATLAB 等软件进行辅助教学。一则可使教学过程变得轻松、直观;二则可以使学生在掌握基本知识的同时培养利用计算机进行数据与信号处理的意识与能力。

思考题与习题

1-1 信号与信息之间的联系与区别是什么?试举例说明。

1-2 结合专业,试举出 3 个测试系统,说明其组成结构并画出系统框图。

1-3 结合专业,简述测试的意义。



2 误差理论与试验数据处理

在一切测量中,由于测量设备与测量方法的不完善、测量环境的影响,测量结果与被测量真值之间会存在差异,这种差异在数学上表现为误差。随着科学技术的发展,测量误差可以控制得越来越小,但是不能完全消除。大量的实践已经证明,误差具有普遍性和必然性,自始至终存在于一切测量之中。充分认识误差的性质与规律、合理设计测量仪器、正确组织测量过程、合理选择数据处理方法可以减小测量误差,得到更接近于真值的结果,提高测量的经济性。

2.1 误差与精度及不确定度

2.1.1 误差

1. 误差的定义与表示方法

(1) 误差。测量误差,简称误差,指测量结果 x 与被测量的真值 x_0 之差,可表示为

$$\delta = x - x_0 \quad (2-1)$$

测量结果可通过直接测量得到,也可通过测得值借助确定的函数关系式计算得到。测量结果包括测得值、测量值、检测值、试验值、示值、名义值、标称值、预置值、给出值等。测量结果又分为单次测量结果和处理后的结果,如平均测量结果。

真值指在观测一个量时,该量本身所具有的真实大小,即与给定的特定量的定义一致的值。所有的被测量在特定的条件下,理论上都有一个对应的客观、实际值存在,称为“理论真值”。被测量的真值通常情况下是未知的,在少数特殊情况下,真值才是可知的。例如,平面直角为 90° ,三角形的三个内角和为 180° ,一个整圆周角为 360° ,国际千克基准的真值为 1kg 。

在测量中,往往需要运用真值,因此引入了“约定真值”。约定真值指对给定的目的而言,它被认为充分接近真值,可以代替真值来使用的量值。约定真值应是理论真值的最佳估计值,包括指定值、约定值和最佳估计值。例如,7个SI基本单位即为指定值,高一级测量装置的测量值即为约定值,多次测量结果的算术平均值即为最佳估计值。

(2) 绝对误差。绝对误差的定义与测量误差的定义相同,即

$$\text{绝对误差} = \text{测量结果} - \text{真值} \quad (2-2)$$

(3) 相对误差。相对误差指绝对误差与被测量的真值之比,因测得值与真值接近,也可用测得值代替真值计算,可表示为

$$\text{相对误差} = \frac{\text{绝对误差}}{\text{真值}} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{约定真值}} \approx \frac{\text{绝对误差}}{\text{测得值}} \quad (2-3)$$

绝对误差具有确定的量纲,与被测量量纲相同;相对误差是无量纲量,通常用百分数形式表示。绝对误差和相对误差都可能为正值或负值。

对于相同的被测量,绝对误差可以评定其测量精度的高低,但不同量级的同种量误差间

的比较时采用相对误差就较为合适。

【例 2-1】 用第一种测量方法测量物体 1 的长度, 真值 $x_{10}=50.00\text{mm}$, 测得值为 $x_1=50.01\text{mm}$; 用第二种方法对物体 1 进行测量, 测得值为 $x_2=49.98\text{mm}$; 用第三种测量方法测量物体 2 的长度, 真值 $x_{20}=500.00\text{mm}$, 测得值为 $x_3=500.01\text{mm}$; 用第四种方法对物体 2 进行测量, 测得值为 $x_4=499.90\text{mm}$ 。试对四个测量进行误差分析。

解 第一种方法的绝对误差为

$$\delta_1 = x_1 - x_{10} = 50.01\text{mm} - 50.00\text{mm} = 0.01\text{mm}$$

相对误差为

$$\frac{\delta_1}{x_{10}} = \frac{0.01\text{mm}}{50.00\text{mm}} = 0.02\%$$

第二种方法的绝对误差为

$$\delta_2 = x_2 - x_{10} = 49.98\text{mm} - 50.00\text{mm} = -0.02\text{mm}$$

相对误差为

$$\frac{\delta_2}{x_{10}} = \frac{-0.02\text{mm}}{50.00\text{mm}} = -0.04\%$$

第三种方法的绝对误差为

$$\delta_3 = x_3 - x_{20} = 500.01\text{mm} - 500.00\text{mm} = 0.01\text{mm}$$

相对误差为

$$\frac{\delta_3}{x_{20}} = \frac{0.01\text{mm}}{500.00\text{mm}} = 0.002\%$$

第四种方法的绝对误差为

$$\delta_4 = x_4 - x_{20} = 499.90\text{mm} - 500.00\text{mm} = -0.10\text{mm}$$

相对误差为

$$\frac{\delta_4}{x_{20}} = \frac{-0.10\text{mm}}{500.00\text{mm}} = -0.02\%$$

由此可知, 第三种方法精度最高, 第二种方法精度最低, 第一种与第四种方法精度相同。

2. 误差的来源

不同的测量, 引起误差的原因千差万别。但是, 测量工作都是在某个特定的环境里, 由测量人员使用测量装置, 按照一定的测量方法对被测量进行测量。因此, 测量误差产生的原因可以归纳为四个方面: 测量装置误差、环境误差、方法误差与人员误差。

(1) 测量装置误差。测量装置误差包括标准量具误差、仪器仪表误差和附件误差。标准量具指以固定形式复现标准量值的器具, 如激光器、标准量块、标准线纹尺、标准刻线尺、标准水银温度计、标准砝码、标准硬度块、标准电阻、标准电池等, 由于加工的限制, 它们本身体现的量值不可避免地含有误差。凡是用来直接或间接将被测量和已知量进行比较的设备, 称为仪器或仪表, 如温度计、电压表、天平、阿贝比较仪等, 在它们的加工、装配中不可避免地存在误差, 这些误差最终都传递给测量结果。在测量中, 为了测量的方便或创造必要的条件, 经常需要采用仪器辅助设备或附件, 如测长仪的标准环规、千分尺的调整棒、电测量中的转换开关及移动测点、连接导线等, 都会产生测量误差。

(2) 环境误差。任何测量总是在一定的环境里进行的。环境因素与规定的标准状态不一

致就会引起测量装置和被测量的变化,造成环境误差。例如,温度的变化引起测量装置机械零部件几何尺寸的变化,也能引起电子元器件参数的变化。仪器仪表在规定要求的测量环境下所具有的误差称为基本误差,偏离此环境时所增加的误差称为附加误差。

(3) 方法误差。方法误差指由于测量方法不完善所引起的误差。例如,通过测量轴的周长 s , 用公式 $d=s/\pi$ 计算直径 d , 无理数 π 的近似取值带来计算误差; 同理, 通过测量直径 d 来计算周长 s , 也会带来计算误差。

(4) 人员误差。人员误差指测量人员生理机能的限制, 固有习惯性偏差, 工作疲劳以及思想情绪变化等因素造成的测量误差。有些测量需多人配合操作才能进行, 由于各测量人员对测量要求的理解不同, 业务熟练程度不同, 反应速度不同, 习惯不同, 配合不好也会引起误差。在一些高精密的测量中, 人员自身的体征也会引起误差。例如, 在使用一些漂浮式测量器具时, 轻微的呼吸就能造成其在液面上左右晃动, 形成读数误差。工作不认真, 麻痹大意, 认识不足, 偶尔的疏忽都会引起误差。如看错 (测量时对错标志)、读错 (将 1 读为 7)、听错、记错 (将 38.694 记为 38.964), 形成结果的严重歪曲。在后续的数据处理中, 必须查找发现混入其中的坏值, 及时剔除。

3. 误差的分类

按照误差的特征, 误差可分为系统误差、随机误差和粗大误差三类。

(1) 系统误差。在同一测量条件下, 多次测量同一量值时, 绝对值和符号保持不变, 或在条件改变时, 按一定规律变化的误差称为系统误差。其产生的原因主要有: 测量装置方面的因素、环境方面的因素、测量方法的因素、测量人员方面的因素等。

根据误差掌握的程度可分为已定系统误差和未定系统误差。虽然未定系统误差的绝对值和符号不能确定, 但通常可以估计出误差范围。

系统误差的特点是有确定的变化规律。按其变化规律可分为不变系统误差 (误差的绝对值和符号固定不变) 和变化系统误差。变化系统误差又分为线性系统误差、周期性系统误差、复杂规律系统误差等。例如, 仪器仪表的零位未校准引起的误差是一个不变系统误差; 温度变化对物体长度影响而产生的误差为线性变化误差; 仪表指针回转中心与刻度盘中心偏心引起的读数误差为周期性变化误差, 变化规律符合正弦曲线。

(2) 随机误差。在同一测量条件下, 多次测量同一量值时, 其绝对值和符号以不可预定方式变化着的误差, 称为随机误差。其产生因素十分复杂, 如电磁场的微变, 传动部件的间隙和摩擦, 连接件的弹性变形, 空气扰动, 气压及湿度的变化, 测量人员的感觉器官的生理变化等。随机误差的出现没有确定的规律, 但是就总体而言服从统计规律。

(3) 粗大误差。超出规定条件下预期的误差, 称为粗大误差, 又称“寄生误差”。粗大误差一般由于操作人员责任心不强、工作疲劳, 或者测量条件的意外改变造成的。例如, 测量人员读错示值、记错数据或计算错误, 突然的机械振动导致测量环境的改变。

三种误差之间是辩证统一的关系, 它们在一定条件下可以相互转化。对某项具体误差, 在此条件下为系统误差, 而在另一条件下可为随机误差, 反之亦然。例如按一定基本尺寸制造的量块, 存在着制造误差, 对某一块量块的制造误差是确定数值, 可认为是系统误差, 但对一批量块而言, 制造误差是变化的, 又成为随机误差。在使用某一量块时, 没有检定出该量块的尺寸误差, 而按基本尺寸使用, 则制造误差属随机误差。若检定出量块的尺寸偏差, 按实际尺寸使用, 则制造误差属系统误差。掌握误差转化的特点, 可将系统误差转化为随机

误差,用数据统计处理方法减小误差的影响;或将随机误差转化为系统误差,用修正方法减小或消除其影响。

总之,系统误差和随机误差之间并不存在绝对的界限。随着对误差性质认识的深化和测试技术的发展,有可能把过去作为随机误差的某些误差分离出来作为系统误差处理,或把某些系统误差当做随机误差来处理。

2.1.2 精度

精度是反映测量结果与真值接近程度的量,它与误差的大小相对应,因此可用误差大小来表示精度的高低,误差小则精度高,误差大则精度低。精度可分为正确度、精密度、准确度。

(1) 正确度。正确度表示测量结果中系统误差大小的程度,指在规定的测量条件下测量中所有系统误差的综合。

(2) 精密度。精密度表示测量结果中随机误差大小的程度,指在一定的测量条件下进行多次测量时所得各测量结果之间的符合程度。

(3) 准确度。准确度是测量结果中所有系统误差与随机误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度,也可称为精确度。

对于具体的测量,精密度高而正确度不一定高,反之亦然。会出现四种状况:正确度高而精密度低,正确度低而精密度高,正确度与精密度都低,正确度与精密度都高。前三种状况准确度都低,只有第四种准确度高。可以形象地用如图 2-1 所示的打靶结果进行表示,以靶心作为真值,靶上的弹着点作为测量结果。如图 2-1 (a) 所示,弹着点分散,但就总体而言却大致都围绕靶心,系统误差小而随机误差大,即正确度高而精密度低;如图 2-1 (b) 所示,弹着点集中,但就总体而言密集但都偏在一边,系统误差大而随机误差小,即正确度低而精密度高;如图 2-1 (c) 所示,弹着点集中又接近靶心,系统误差大和随机误差都小,正确度和精密度都高,即准确度高。

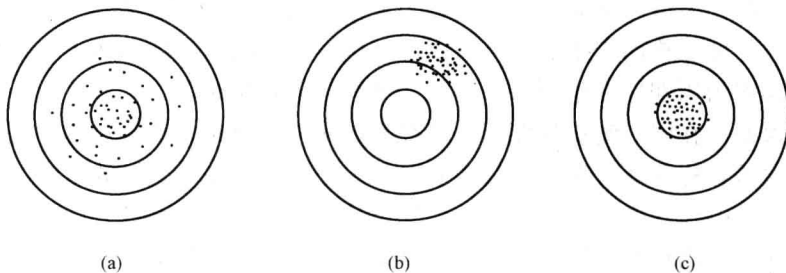


图 2-1 精度示意

2.1.3 不确定度

由于测量误差的存在,被测量的真值难以确定,通常只能得到被测量真值的最佳估计值。既然是估计,必然带有不确定性,因此引入了测量不确定度,用来表征测量结果质量的高低。测量不确定度指表征合理地赋予被测量之值的分散性,与测量结果相联系的参数。也就是说它指测量结果变化的不肯定,是表征被测量的真值在某个量值范围的一个估计。一个完整的测量结果应该包含被测量真值的估计与分散性参数两部分。在测量不确定度的定义下,被测量的测量结果并非一个确定的值,而是一个包含无限个可能值所处于的一个区间。

可以用这个区间的半宽度表示不确定度。用标准差表征不确定度,称为标准不确定度。测量不确定度也可用标准差的倍数或说明了置信概率的区间的半宽度表示,这种不确定度称为扩展不确定度,有时也称为展伸不确定度。

标准不确定度的评定分为 A 类评定和 B 类评定。用对观测数据的统计分析进行评定,称为 A 类评定;不是对观测数据的统计分析,而是根据经验或其他信息估计得到的概率分布来评定,称为 B 类评定。

误差和不确定度都是评价测量结果质量高低的指标,都可作为测量结果的精度评定参数。但是它们之间有明显的区别,需要正确认识与区分。

在定义上,误差是测量结果与真值之差,以真值或约定真值为中心,是一个确定的值,有正负之分(或 0);不确定度以被测量的最佳估计值为中心,是区间的半宽度,恒为正值。误差通常是一个理想的概念,而不确定度是可以定量评定的。

在分类上,误差与不确定度分类的原则不同。误差根据误差的特征和性质分为系统误差、随机误差和粗大误差;不确定度则根据是否用统计方法求得,分为 A 类评定和 B 类评定,两者之间没有优劣之分。A 类评定、B 类评定与随机误差、系统误差的分类之间不存在简单的对应关系。

误差与不确定度之间有区别,也有联系。对误差的充分认识是正确评定不确定度的基础,用不确定度代替误差表示测量结果,易于理解、便于评定,具有合理性和实用性。不确定度是对经典误差理论的有益补充,是其发展的一个重要成果。

2.2 误差的基本性质与处理

2.2.1 随机误差

1. 正态分布

随机误差是由众多的、变化微小的暂时未能掌握或不便掌握的微小因素造成的。在同一测量条件下,对同一量值进行多次重复测量时,得到的一系列测量值包含的误差不同,误差的符号和绝对值以不可预知的方式变化着。虽然随机误差的出现没有确定的规律,但是就总体而言,却具有统计规律性。因此,随机误差属于随机变量,可采用概率论与数理统计的理论进行处理。

大多数随机误差都服从正态分布,因此首先讲解正态分布的随机误差及处理方法。

设被测量的真值为 x_0 , 一系列测得值为 x_i , 则测量列中的随机误差 δ_i 为

$$\delta_i = x_i - x_0 \quad (2-4)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n$ 。

随机误差的正态分布的概率密度函数 $f(\delta)$ 为

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (2-5)$$

式中 σ ——标准差;

e ——自然对数的底,其值为 2.7182...

概率分布函数 $F(\delta)$ 为

$$F(\delta) = \int_{-\infty}^{\delta} f(\delta) d\delta = \int_{-\infty}^{\delta} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}} d\delta \quad (2-6)$$

数学期望 $E(\delta)$ 为

$$E(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta f(\delta) d\delta = 0 \quad (2-7)$$

方差 $D(\delta)$ 为

$$D(\delta) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta^2 f(\delta) d\delta \quad (2-8)$$

平均误差 θ 为

$$\theta = \int_{-\infty}^{+\infty} |\delta| f(\delta) d\delta = 0.7979\sigma \approx \frac{4}{5}\sigma \quad (2-9)$$

由

$$\int_{-\rho}^{+\rho} f(\delta) d\delta = \frac{1}{2}$$

可得或然误差

$$\rho = 0.6745\sigma \approx \frac{2}{3}\sigma \quad (2-10)$$

标准差 σ 取决于测量系统, 当测量系统确定后, 式 (2-5) 对应的曲线唯一确定。 σ 不同, 对应的曲线形状也不同, 图 2-2 给出了 σ 分别为 0.5、1、2 时, 正态分布概率密度函数曲线及 σ 为 0.5 时曲线拐点的横坐标 σ 、右半部分面积重心的横坐标 θ 、平分曲线右半部分面积的垂直直线的横坐标 ρ 。

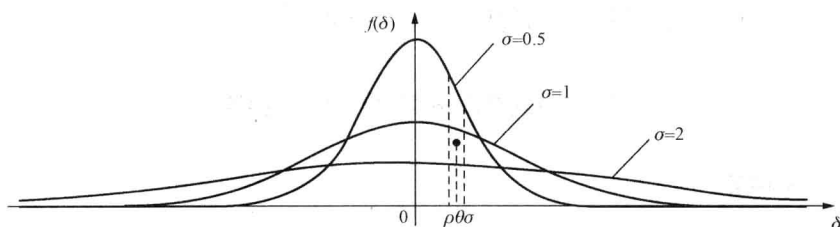


图 2-2 正态分布密度曲线

正态分布的随机误差具有以下四个特性:

(1) 有界性。密度函数 (2-5) 中自变量的取值是无界的, 但是在一定的测量条件下, 随机误差的绝对值不会超过一定的界限, 这称为随机误差的有界性。在科学测量中, 虽然不能确切地获得测量的随机误差, 但是可以通过一定的方法合理估计出随机误差绝对值的界限。

(2) 对称性。绝对值相等的正负误差出现的次数相等, 这称为随机误差的对称性, 即密度函数 (2-5) 的曲线关于纵轴对称。在有限次的测量中, 则表现为大致相等, 随着测量次数的增加, 对称性就更加明显。

(3) 单峰性。绝对值小的误差出现的次数大于绝对值大的误差出现的次数, 但是随机误差不会为零, 总是在零附近波动。

(4) 抵偿性。由对称性可知, 绝对值相等正负误差出现的次数相等, 因此它们可以相互抵消。在有限次测量中, 随机误差的算术平均值随着测量次数的增加而趋于零。

2. 算术平均值

对某一量进行一系列等精度测量, 由于存在测量误差, 其测得值均不相同, 应以全部测