



普通高等教育“十五”国家级规划教材

机械工程测试 技术基础

第3版

熊诗波 黄长艺 主编



TM938.8

9-2

普通高等教育“十五”国家级规划教材

机械工程测试技术基础

第3版

主 编	熊诗波	黄长艺			
参 编	程 珩	李文英	杨洁明	熊晓燕	
	郑 渝	马怀祥	武 兵		



机械工业出版社

本版教材吸取作者近十余年来的教学经验和科技新成就,对第2版作了较大的修改,增加了“声和声发射的测量”一章,加强传感器章节的内容,并用新编写的“计算机测试系统和虚拟仪器”来更换原来的《计算机辅助测试》一章。本版教材仍保持注重物理概念和工程应用的阐述、重点突出、条理清晰和分析透彻的优点,便于教和学。

全书包括信号及其描述,测试装置的基本特性,常用传感器与敏感元件,信号的调理与记录,信号处理初步,位移测量,振动测试,声与声发射测量,应变、力与扭矩测量,流体参量的测量,计算机测试系统与虚拟仪器等十一章。

本书可作为高等学校机械类专业及相近专业本科生的教材,也可供大专、夜大和成人教育有关专业选用,还可作为有关专业高等学校教师、研究生和工程技术人员的良好参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程测试技术基础/熊诗波,黄长艺主编. —3版. —北京:
机械工业出版社, 2006.5
普通高等教育“十五”国家级规划教材
ISBN 7-111-19050-5

I. 机… II. ①熊…②黄… III. 机械工程-测试技术-高等学校-教材 IV. TG806

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 041366 号

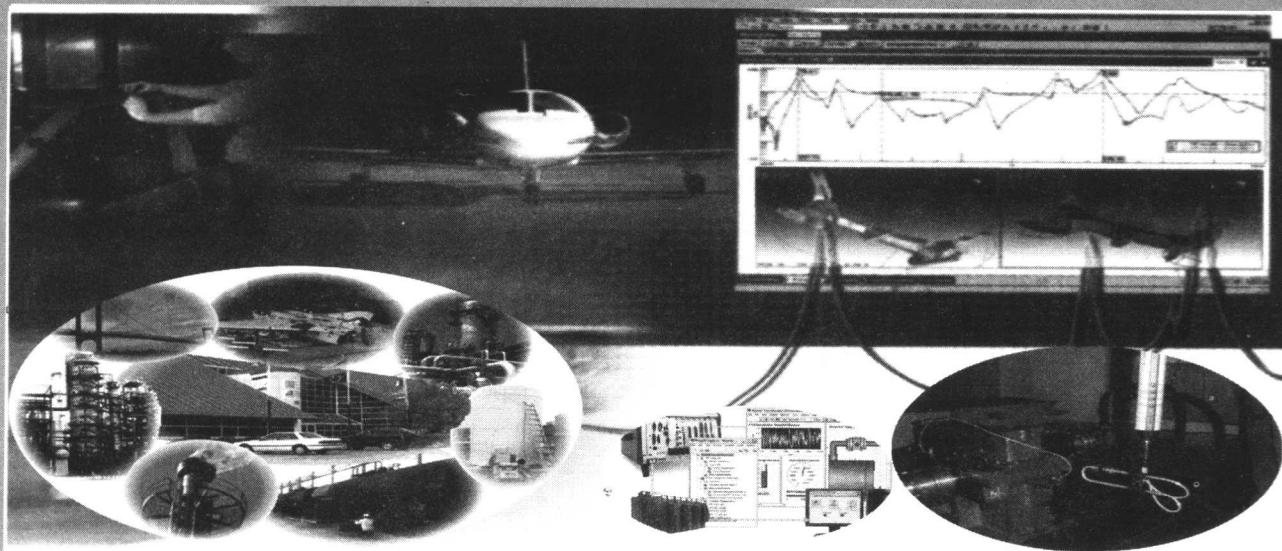
机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:高文龙 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新
封面设计:张静 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006 年 6 月第 3 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·18.5 印张·454 千字
定价:26.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68326294
编辑热线电话(010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

目 录

绪论	1	第一节 电桥	127
第一节 测试技术概况	1	第二节 调制与解调	133
第二节 测量的基础知识	4	第三节 滤波器	139
思考题与习题	16	第四节 信号的放大	146
第一章 信号及其描述	18	第五节 测试信号的显示与记录	150
第一节 信号的分类与描述	18	思考题与习题	152
第二节 周期信号与离散频谱	21	第五章 信号处理初步	154
第三节 瞬变非周期信号与连续频谱	27	第一节 数字信号处理的基本步骤	154
第四节 随机信号	36	第二节 信号数字化出现的问题	155
思考题与习题	40	第三节 相关分析及其应用	161
第二章 测试装置的基本特性	42	第四节 功率谱分析及其应用	168
第一节 概述	42	第五节 现代信号分析方法简介	173
第二节 测量装置的静态特性	47	思考题与习题	175
第三节 测量装置的动态特性	48	第六章 位移测量	176
第四节 测试装置对任意输入的影响	56	第一节 概述	176
第五节 实现不失真测量的条件	57	第二节 常用的位移传感器	177
第六节 测量装置动态特性的测量	59	第三节 位移测量的应用	182
第七节 负载效应	62	思考题与习题	185
第八节 测量装置的抗干扰	63	第七章 振动测试	187
思考题与习题	66	第一节 概述	187
第三章 常用传感器与敏感元件	68	第二节 惯性式传感器的力学模型	188
第一节 常用传感器分类	68	第三节 振动测量传感器	193
第二节 机械式传感器及仪器	71	第四节 振动测量系统及其标定	203
第三节 电阻、电容与电感式传感器	72	第五节 激振试验设备及振动信号简介	206
第四节 磁电、压电与热电式传感器	88	思考题与习题	211
第五节 光电传感器	99	第八章 声与声发射测量	212
第六节 光纤传感器	107	第一节 概述	212
第七节 半导体传感器	110	第二节 声测量传感器与仪器	218
第八节 红外测试系统	116	第三节 声强测量与噪声源辨识	221
第九节 激光测试传感器	120	第四节 声发射测量传感器与仪器	222
第十节 传感器的选用原则	124	思考题与习题	227
思考题与习题	125	第九章 应变、力与扭矩测量	228
第四章 信号的调理与记录	127	第一节 应变与应力的测量	228
		第二节 力的测量	234
		第三节 扭矩的测量	240
		思考题与习题	245

第十章 流体参量的测量	246	第二节 插卡式测试系统	269
第一节 压力的测量	246	第三节 仪器前端	270
第二节 流量的测量	256	第四节 仪器控制	273
思考题与习题	266	第五节 智能仪器简介	276
第十一章 计算机测试系统与虚拟		第六节 虚拟仪器	277
仪器	267	思考题与习题	282
第一节 概述	267	参考文献	283



结 论

第一节 测试技术概况

一、测试和测量系统

测试技术是测量和试验技术 (Measurement and Test Technique) 的统称。试验是机械工程基础研究、产品设计 (特别是创新设计、动态设计和控制系统设计) 和研发的重要环节。在现代机电设备的研发和创新设计、老产品改造以及机电产品全寿命的各个过程的研究中, 试验研究是不可缺少的环节。在工程试验中, 需要进行各种物理量的测量, 以得到准确的定量结果。当然, 不仅是各类工程试验需要测量, 机器和生产过程的运行监测、控制和故障诊断也需要在线测量。这时, 测量系统大多就是机器和生产线的重要组成部分。本书主要内容是测量技术和仪器 (Measurement and Instrumentation)。关于试验技术, 读者可参阅其他书籍。

工程测量可分为静态测量和动态测量。静态测量是指不随时间变化的物理量的测量, 例如机械制造中通过被加工零件的尺寸测量, 试图得到制成品的尺寸和形位误差。动态测量是指随时间变化的物理量的测量, 也是本书的主要研究对象。

在产品开发或其他目的的试验中, 一般要在被测对象运行过程中或试验激励下, 测量或记录各种随时间变化的物理量, 通过随后的进一步处理或分析, 得到所要求的定量的试验结果。在运行监测或控制系统中, 实时测量的各种时间变量则用于过程参数监视、故障诊断或者作为控制系统的控制、反馈变量。不同的用途对测量过程和结果的要求也不同, 例如在反馈控制系统中, 可能要求测量系统的输出以很小的滞后 (理想的情况是没有滞后) 不失真地跟踪以一定速率变化的被测物理量。如果只要求不失真地测量和显示物理量变化过程, 则对滞后就没有要求。因此, 不同的用途和要求, 测量系统的组成环节及其构成方式也不同。本节只讨论测量系统的一般构成。而不同测量环节的原理、特性及系统构成细节将在以后各章讨论。

一般来说,测量系统的用途如图 0-1 所示。

测量系统的一般构成如图 0-2 所示。

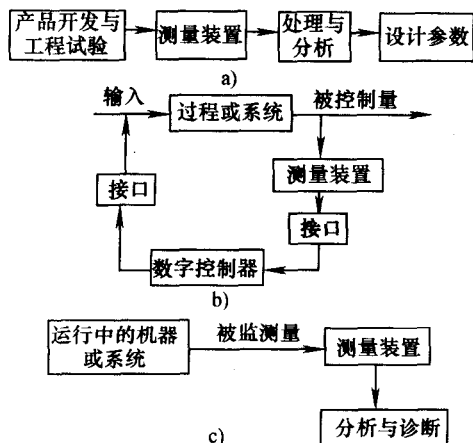


图 0-1 测量系统的用途

a) 产品开发与工程试验过程 b) 过程与系统控制

c) 监测与诊断

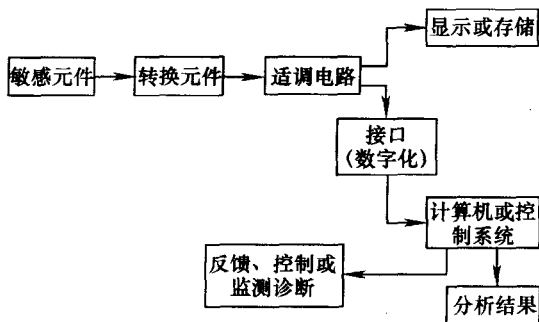


图 0-2 测量系统的一般构成

图中实验及各种过程中的物理量真值、变量或测量值,若随时间变化,通常称为信号。

图 0-2 中被测物理量(或信号)作为测量系统的输入,它经传感器变成可作进一步处理的电量,经信号调理(放大、滤波、调制解调等)后,可以通过模/数转换变成数字信号,从而得到数字化的测量值,将其送入计算机(或仪器控制系统)进行分析与存储,用于各种用途。

模拟信号是泛指随时间连续变化的物理信号(各种随时间变化的物理量),经传感器变换后成为电信号,但同样还是模拟信号。这种信号在时间上是连续的,可以取任意时间值;在幅值(大小)上也是连续的,即可以得到任意的合理值。数字量虽然也表示随时间变化的物理量,但在时间和幅值上都是离散的,亦即只能得到一定间隔的离散的物理量序列,而幅值的变化也不是连续的,而是以某个最小量(最小量化电平)的个数来表示。一般传感器的输出(经或未经信号调理)是模拟量,而只有数字量才能被计算机所接受,才能进行各种数字计算或处理。由模拟量到数字量必须通过图中所示的“数字化”处理,即“模/数转换”。

二、测试技术的发展概况

现代生产的发展和工程科学研究对测试及其相关技术的需求极大地推动了测试技术的发展,而现代物理学、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又为测试技术的发展提供了知识和技术支持,从而促使测试技术在近 20 年来得到极大的发展和广泛应用。例如工程创新设计,特别是动态设计对振动分析的需求促使振动测量方法、传感器和动态分析技术与软件的迅速发展;对汽车性能和安全性要求的不断提高,使得“汽车电子”技术得到迅速发展,这种发展是以基于总线技术的传感器网络的发展为基础。现代工程测试技术与仪器的发展主要表现在以下方面:

1. 新原理新技术在测试技术中的应用

近 20 年来,随着基础理论和技术科学的研究进展,各种物理效应、化学效应、微电子

技术,甚至生物学原理在工程测量中得到广泛应用,使得可测量的范围不断扩大,测量精度和效率得到很大提高。例如在振动速度测量中,激光多普勒原理的应用,使得不可能安装传感器进行测量的计算机硬盘读写臂与磁盘片等轻小构件的振动测量成为可能;使用自动定位扫描激光束,使得大型客机机翼、轿车本身等大型物体的多点振动测量达到很高的效率,只需几分钟时间就可完成数百点的振动速度测量;高达 10MHz 以上采样频率的数据采集系统可实现伴随金属构件裂纹发生与发展的脉冲声发射信号的测量等。类似的例子不胜枚举。

2. 新型传感器的出现

随着人造晶体、电磁、光电材料、半导体与其他功能新材料的出现,微电子和精密、微细加工技术的发展,作为工程测量技术基础的传感器技术得到迅速发展。这种发展包括新型传感器的出现、传感器性能的提高及功能的增强、集成化程度的提高以及小型、微型化等。微电子技术的发展有可能把某些电路乃至微处理器和传感测量部分集成为一体,而使传感器具有放大、校正、判断和某些信号处理功能,组成所谓的“智能传感器”。这些方面的有关细节将在以后各章中讨论。

3. 计算机测试系统与虚拟仪器的应用

传感器网络及仪器总线技术、Internet 网与远程测试、测试过程与仪器控制技术,以及虚拟仪器及其编程语言等的发展都是现代工程测试技术发展的重要方面。

三、课程的主要环节和本书概要

本课程的研究对象是机械工程领域的设计、控制和运行监测中常用物理量及其他工程量的测量和测量装置与系统的性能,包括物理量和其他工程量的测量方法、测试中常用的传感器、信号调理电路及记录、显示仪器的工作原理,测量装置基本特性的评价方法、测试信号的分析 and 处理等。每章均给出思考题与习题。

对高等学校机械类的各有关专业而言,“机械工程技术基础”是一门技术基础课。通过本课程的学习,培养学生能合理地选用测试装置并初步掌握静、动态测量和常用工程试验所需的基本知识和技能,为学生进一步学习、研究和处理机械工程技术问题奠定基础。

学生在学完本课程后应具有下列几方面的知识:

- 1) 掌握信号的时域和频域的描述方法,建立明确的信号频谱结构的概念;掌握频谱分析和相关分析的基本原理和方法,掌握数字信号分析中的一些基本概念。
- 2) 掌握测试装置基本特性的评价方法和不失真测试条件,并能正确地运用于测试装置的分析和选择。掌握一阶、二阶线性系统动态特性及其测定方法。
- 3) 了解常用传感器、常用信号调理电路和记录、显示仪器的工作原理和性能,并能较合理地选用。
- 4) 对动态测试工作的基本问题有一个比较完整的概念,并能初步运用于机械工程中某些参量的测量和产品的试验。

本课程具有很强的实践性。只有在学习中密切联系实际,加强实验,注意物理概念,才能真正掌握有关理论。学生只有通过足够和必要的实验才能受到应有的实验能力的训练,才能获得关于动态测试工作的比较完整的概念。也只有这样,才能初步具有处理实际测试工作的能力。

作为一门课程,测试技术既综合应用了许多学科的原理和技术,又被广泛应用于各个学科中。作为高等教育中的一门课程,它在教学计划中,有其特定的地位、作用和范围。它必

须以前期课程为基础来展开讨论和培养学生掌握测试技术的基本理论、基本知识和基本技能。

第二节 测量的基础知识

在机械（或机电）系统试验、控制和运行监测中，需要测量各种物理量（或其他工程参量）及其随时间变化的特性。这种测量需通过各种测量装置和测量过程来实现。于是，测量装置和过程在总体上需满足什么样的要求，才能准确测量到这些物理量及其随时间的变化是我们关心的问题。为使测量结果具有普遍的科学意义需具备一定的条件：首先，测量过程是被测量的量与标准或相对标准量的比较过程。作为比较用的标准量值必须是已知的，且是合法的，才能确保测量值的可信度及保证测量值的溯源性。其次，进行比较的测量系统必须进行定期检查、标定，以保证测量的有效性、可靠性，这样的测量才有意义。

本节讨论与此相关的一些基本概念。

一、量与量纲

量是指现象、物体或物质可定性区别和定量确定的一种属性。不同类的量彼此可以定性区别，如长度与质量是不同类的量。同一类中的量之间是以量值大小来区别的。

1. 量值

量值是用数值和计量单位的乘积来表示的。它被用来定量地表达被测对象相应属性的大小，如 3.4m、15kg、40°C 等。其中，3.4、15、40 是量值的数值。显然，量值的数值就是被测量与计量单位之比值。

2. 基本量和导出量

在科学技术领域中存在着许许多多的量，它们彼此有关。为此专门约定选取某些量作为基本量，而其他量则作为基本量的导出量。量的这种特定组合称为量制。在量制中，约定地认为基本量是相互独立的量，而导出量则是由基本量按一定函数关系来定义的。

3. 量纲和量的单位

“量纲”代表一个实体（被测量）的确定特征，而量纲单位则是该实体的量化基础。例如，长度是一个量纲，而厘米则是长度的一个单位；时间是一个量纲，而秒则是时间的一个单位。一个量纲是惟一的，然而一种特定的量纲——比如说长度——则可用不同的单位来测量，如英尺、米、英寸或英里等等。不同的单位制必须被建立和认同，亦即这些单位制必须被标准化。由于存在着不同的单位制，在不同单位制间的转换基础方面也必须有协议。

在国际单位（SI）制中，基本量约定为：长度、质量、时间、温度、电流、发光强度和物质的量等七个量。它们的量纲分别用： L 、 M 、 T 、 θ 、 I 、 N 和 J 表示。导出量的量纲可用基本量量纲的幂的乘积来表示。例如，导出量一力的量纲是 LMT^{-2} ，电阻的量纲是 $L^2MT^{-3}I^{-2}$ 。工程上会遇到无量纲量，其量纲中的幂都为零，实际上它是一个数。弧度（rad）就是这种量。

二、法定计量单位

法定计量单位是强制性的，各行业、各组织都必须遵照执行，以确保单位的一致。我国的法定计量单位是以国际单位制（SI）为基础并选用少数其他单位制的计量单位来组成的。

1. 基本单位

根据国际单位制 (SI), 七个基本量的单位分别是: 长度——米 (Metre)、质量——千克 (Kilogram)、时间——秒 (Second)、温度——开尔文 (Kelvin)、电流——安培 (Ampere)、发光强度——坎德拉 (Candela)、物质的量——摩尔 (Mol)。

它们的单位代号分别为: 米 (m)、千克 (kg)、秒 (s)、开 (K)、安 (A)、坎 (cd)、摩 (mol)。

国际单位制 (SI) 的基本单位的定义为:

米 (m) 是光在真空中, 在 $1/299792458$ s 的时间间隔内所经路程的长度。

千克 (kg) 是质量单位, 等于国际千克原器的质量。

秒 (s) 是铯 - 133 原子基态的两个超精细能级间跃迁对应的辐射 9192631770 个周期的持续时间。

安培 (A) 是电流单位。在真空中, 两根相距 1m 的无限长、截面积可以忽略的平行圆直导线内通过等量恒定电流时, 若导线间相互作用力在每米长度上为 2×10^{-7} N, 则每根导线中的电流为 1A。

开尔文 (K) 是热力学温度单位, 等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

摩尔 (mol) 是一系统的物质的量, 该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳 - 12 的原子数目相等。使用摩尔时, 基本单元可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子, 或是这些粒子的特定组合。

坎德拉 (cd) 是一光源在给定方向上的发光强度, 该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射, 且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ W/sr。

2. 辅助单位

在国际单位制中, 平面角的单位——弧度和立体角的单位——球面度未归入基本单位或导出单位, 而称之为辅助单位。辅助单位既可以作为基本单位使用, 又可以作为导出单位使用。它们的定义如下:

弧度 (rad) 是一个圆内两条半径在圆周上所截取的弧长与半径相等时, 它们所夹的平面角的大小。

球面度 (sr) 是一个立体角, 其顶点位于球心, 而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积。

3. 导出单位

在选定了基本单位和辅助单位之后, 按物理量之间的关系, 由基本单位和辅助单位以相乘或相除的形式所构成的单位称为导出单位。

三、测量、计量、测试

测量、计量、测试是三个密切关连的术语。测量 (Measurement) 是指以确定被测对象的量值为目的而进行的实验过程。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。因此研究测量、保证测量统一和准确的科学被称为计量学 (Metrology)。具体地说, 计量学将研究可测的量、计量单位、计量基准、标准的建立、复现、保存及量值传递、测量原理与方法及其准确度、观察者的测量能力, 物理常量及常数、标准物质、材料特性的准确确定, 以及计量的法制和管理。实际中, 计量一词只用做某些专门术语的限定语, 如计量单位、计量管理、计量标准等。所组成的新术语都与单位统一和量值准确可靠有关。测量的意义则更为广泛、更为普遍。测试 (Measurement and test) 是指具有试验性质的测量, 或测量和试验

的综合。

一个完整的测量过程必定涉及到被测对象、计量单位、测量方法和测量误差。它们被称为测量四要素。

四、基准和标准

为了确保量值的统一和准确,除了对计量单位作出严格的定义外,还必须有保存、复现和传递单位的一整套制度和设备。

基准是用来保存、复现计量单位的计量器具。它是具有现代科学技术所能达到的最高准确度的计量器具。基准通常分为国家基准、副基准和工作基准三种等级。

国家基准是指在特定计量领域内,用来保存和复现该领域计量单位并具有最高的计量特性,经国家鉴定、批准作为统一全国量值最高依据的计量器具。

副基准是指通过与国家基准对比或校准来确定其量值,并经国家鉴定、批准的计量器具。在国家计量检定系统中,副基准的位置仅低于国家基准。

工作基准是指通过与国家基准或副基准对比或校准,用来检定计量标准的计量器具。它的设立是为了避免频繁使用国家基准和副基准,免得它们丧失其应有的计量特性。在国家计量检定系统中,工作基准的位置仅低于国家基准和副基准。

计量标准是指用于检定工作计量器具的计量器具。

工作计量器具是指用于现场测量而不适用于检定工作的计量器具。一般测量工作中使用的绝大部分就是这一类计量器具。

五、量值的传递和计量器具检定

通过对计量器具实施检定或校准,将国家基准所复现的计量单位量值经过各级计量标准传递到工作计量器具,以保证被测对象量值的准确和一致。这个过程就是所谓的“量值传递”。在此过程中,按检定规程对计量器具实施检定的工作对量值的准确和一致起着最重要的保证作用,是量值传递的关键步骤。

所谓计量器具检定(Verification of measuring instrument),是指为评定计量器具的计量特性,确定其是否符合法定要求所进行的全部工作。检定规程是指检定计量器具时必须遵守的法定技术文件。计量器具检定规程的内容包括:适用范围、计量器具的计量特性、检定项目、检定条件、检定方法、检定周期以及检定结果的处理等。计量器具检定规程分为国家、部门和地方三种。它们分别由国家计量行政主管部门、有关部门和地方制定并批准颁布,作为检定所依据的法定技术文件,分别在全国、本部门、本地区施行。

所有的计量器具都必须实施相应的检定。其中社会公用的计量标准、部门和企事业单位使用的最高计量标准,用于贸易结算、医疗卫生、环境监测等方面的某些计量器具,则必须由政府计量行政主管部门所属的法定计量检定机构或授权的计量检定机构对它们实施定点定期的强制检定。检定合格的计量器具被授予检定证书和在计量器具上加盖检定标记;不合格者或未经检定者,则应停止使用。

六、测量方法

测量的基本形式是比较,即将被测量与标准量进行比对。可根据测量的方法、手段、目的、性质等对测量进行分类。这里仅介绍常见的按测量值获得的方法进行分类,把测量分为直接测量、间接测量和组合测量。

1. 直接测量

指无需经过函数关系的计算,直接通过测量仪器得到被测值的测量。如温度计测水温、卷尺测量靶距等。根据被测量与标准量的量纲是否一致,直接测量可分为直接比较和间接比较。直接把被测物理量和标准量作比较的测量方法称为直接比较。如卷尺测量靶距,利用惠斯通电桥来比较两只电阻的大小等。直接比较的一个显著特点是待测物理量和标准量是同一物理量。间接比较则是利用仪器把原始形态的待测物理量的变化变换成与之保持已知函数关系的另一种物理量的变化,并以人的感官所能接受的形式在测量仪器上显示出来。例如用水银温度计测体温是根据水银热胀冷缩的物理规律,事先确定水银柱的高度和温度之间的函数关系,从而可以用水银柱的高度作为被测温度的度量。这里是通过热胀冷缩的规律把温度的高低转化为水银柱的高度,然后根据水银柱高度间接得出被测温度的大小。

直接测量按测量条件不同又可分为等精度(等权)直接测量和不等精度(不等权)直接测量两种。对某被测量进行多次重复直接测量,如果每次测量的仪器、环境、方法和测量人员都保持一致或不变则称之为等精度测量。若测量中每次测量条件不尽相同,则称之为不等精度测量。

2. 间接测量

指在直接测量值的基础上,根据已知函数关系,计算出被测量的量值的测量。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就属于间接测量。

3. 组合测量

指将直接测量值或间接测量值与被测量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。组合测量实质是间接测量的推广,其目的就是不提高计量仪器准确度的情况下,提高被测量值的准确度。

七、测量装置

测量装置(测量系统)是指为了确定被测量值所必需的器具和辅助设备的总体。其组成部分已在前面介绍过(见图0-2)。

讨论测量装置往往会涉及到一些术语,正确理解它们对掌握本课程的内容有着重要作用。这此术语包括:

1. 传感器

它是直接作用于被测量,并能按一定规律将被测量转换成同种或别种量值输出的器件。

2. 测量变换器

提供与输入量有给定关系的输出量的测量器件。显然,当测量变换器的输入量为被测量时,该测量变换器实际上就是传感器;反过来,传感器也就是第一级的测量变换器。当测量变换器的输出量为标准信号时,它就被称为变送器。在自动控制系统中,经常用到变送器。

3. 检测器

用以指示某种特定量的存在而不必提供量值的器件或物质。在某些情况下,只有当量值达到规定的阈值时才有指示。化学试纸就是一种检测器。

4. 测量器具的示值

由测量器具所指示的被测量值。示值用被测量的单位表示。

5. 准确度等级

用来表示测量器具的等级或级别。每一等级的测量器具都有相应的计量要求,用来保持其误差在规定极限以内。

6. 标称范围

也称为示值范围。测量器具标尺范围所对应的被测量示值的范围。例如温度计的标尺范围的起点示值为 -30°C ，终点示值为 $+20^{\circ}\text{C}$ ，其标称范围即为 $-30 \sim +20^{\circ}\text{C}$ 。

7. 量程

标称范围的上下限之差的模。上例的量程就是 50°C 。

8. 测量范围

在测量器具的误差处于允许极限内的情况下，测量器具所能测量的被测量值的范围。

9. 漂移

测量器具的计量特性随时间的慢变化。

八、测量误差

应当清楚认识到，测量结果总是有误差的。误差自始至终存在于一切科学实验和测量过程中。

1. 测量误差定义

测量结果与被测量真值之差称为测量误差，即

$$\text{测量误差} = \text{测量结果} - \text{真值} \quad (0-1)$$

并常简称为误差。此定义联系着三个量，显然只需已知其中的两个量，就能得到第三个量。但是，在现实中往往只知道测量结果，其余两个量却是未知的。这就带来许多问题，例如：测量结果究竟能不能代表被测量、有多大的可置信度、测量误差的规律是怎样的、如何评估它等等。

(1) 真值 x_0 是被测量在被观测时所具有的量值。从测量的角度来看，真值是不能确切获知的，是一个理想的概念。

在测量中，一方面无法获得真值，而另一方面又往往需要运用真值。因此引进了所谓的“约定真值”。约定真值是指对给定的目的而言，它被认为充分接近于真值，因而可以代替真值来使用的量值。在实际测量中，被测量的实际值、已修正过的算术平均值，均可作为约定真值。实际值是指高一等级的计量标准器具所复现的量值，或测量实际表明它满足规定准确度要求，可用来代替真值使用的量值。

(2) 测量结果 由测量所得的被测量值。在测量结果的表述中，还应包括测量不确定度和有关影响量的值。

2. 误差分类

如果根据误差的统计特征来分，可以将误差分为：

(1) 系统误差 在对同一被测量进行多次测量过程中，出现某种保持恒定或按确定的方式变化着的误差，就是系统误差。在测量偏离了规定的测量条件时，或测量方法引入了会引起某种按确定规律变化的因素时就会出现此类误差。

通常按系统误差的正负号和绝对值是否已经确定，可将系统误差分为已定系统误差和未定系统误差。

在测量中，已定系统误差可以通过修正来消除。应当消除此类误差。

(2) 随机误差 当对同一量进行多次测量中，误差的正负号和绝对值以不可预知的方式变化着，则此类误差称为随机误差。测量过程中有着众多的、微弱的随机影响因素存在，它们是产生随机误差的原因。

随机误差就其个体而言是不确定的,但其总体却有一定的统计规律可循。

随机误差不可能被修正。但在了解其统计规律性之后,还是可以控制和减少它们对测量结果的影响。

(3) 粗大误差 这是一种明显超出规定条件下预期误差范围的误差,是由于某种不正常的原因造成的。在数据处理时,允许也应该剔除含有粗大误差的数据,但必须有充分依据。

实际工作中常根据产生误差的原因把误差分为:器具误差、方法误差、调整误差、观测误差和环境误差。

3. 误差表示方法

根据误差的定义,误差的量纲、单位应当和被测量一样。这是误差表述的根本出发点。然而习惯上常用与被测量量纲、单位不同的量来表述误差。严格地说,它们只是误差的某种特征的描述,而不是误差量值本身,学习时应注意它们的区别。

常用的误差表示方法有下列几种:

(1) 绝对误差 就是直接用式(0-1)来表示。它是一个量纲、单位和被测量一样的量。

(2) 相对误差

$$\text{相对误差} = \text{误差} \div \text{真值} \quad (0-2a)$$

当误差值较小时,可采用

$$\text{相对误差} \approx \text{误差} \div \text{测量结果} \quad (0-2b)$$

显然,相对误差是无量纲量,其大小是描述误差和真值的比值的大小,而不是误差本身的绝对大小。在多数情况下,相对误差常用%、‰或百万分数(10^{-6})来表示。

例 0-1 设真值 $x_0 = 2.00\text{mA}$, 测量结果 $x_r = 1.99\text{mA}$ 。则误差 $= (1.99 - 2.00)\text{mA} = -0.01\text{mA}$; 绝对误差 $= -0.01\text{mA}$; 相对误差 $= -0.01/2.00 = -0.005 = -0.5\%$ 。

(3) 引用误差 这种表示方法只用于表示计量器具特性的情况中。计量器具的引用误差就是计量器具的绝对误差与引用值之比。而引用值一般是指计量器具的标称范围的最高值或量程。例如,温度计标称范围为 $-20 \sim +50^\circ\text{C}$, 其量程为 70°C , 引用值为 50°C 。

例 0-2 用标称范围为 $0 \sim 150\text{V}$ 的电压表测量时,当示值为 100.0V 时,电压实际值为 99.4V 。这时电压表的引用误差为

$$\text{引用误差} = (100.0\text{V} - 99.4\text{V}) \div 150\text{V} = 0.4\%$$

显然,在此例中,用测量器具的示值来代替测量结果,用实际值代替真值,引用值则采用量程。

(4) 分贝误差 分贝误差的定义为

$$\text{分贝误差} = 20 \times \lg(\text{测量结果} \div \text{真值}) \quad (0-3a)$$

分贝误差的单位为 dB。对于一部分的量(如广义功),其分贝误差需改用下列公式

$$\text{分贝误差} = 10 \times \lg(\text{测量结果} \div \text{真值}) \quad (0-3b)$$

单位仍为 dB。根据此定义,当测量结果等于真值,即误差为零时,分贝误差必定等于 0dB。

分贝误差本质上是无量纲量,是一种特殊形式的相对误差。在数值上分贝误差和相对误差有着一定的关系。

例 0-3 计算例 0-1 的分贝误差。

$$\text{分贝误差} = 20 \times \lg(1.99 \div 2.00) \text{dB} = -20 \times 0.00218 \text{dB} = -0.044 \text{dB}$$

最后, 必须特别指出, 初学者往往不注意区分误差和误差特征量这两个完全不同的概念, 以致无法理解某些问题。

下面利用一个简图(见图 0-3)来说明测量误差和其分布特征量的关系。

图中 x_0 ——被测量真值;
 x_i ——第 i 次的测量值;
 μ ——测量值概率分布的期望(平均值);
 σ ——测量值概率分布的标准偏差, 是常用的误差特征量之一;
 δ_i ——第 i 次测量的误差值;
 δ_{ri} ——第 i 次测量的随机误差值;
 δ_s ——系统误差。

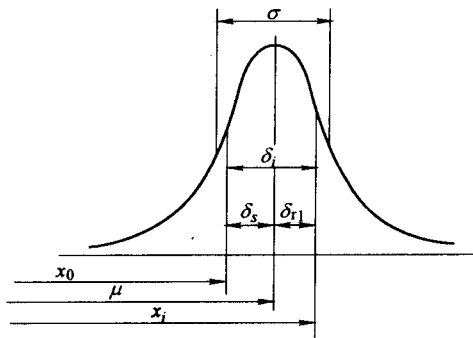


图 0-3 测量误差及其分布特性的特征量

从原则上来说, μ 为测量值的平均值; σ 却不是误差值, 而是描述随机误差分布特性的特征量, 简言之, 是误差的统计特征量之一。为了强调这些概念之间的区别, 图 0-3 是在特定的系统误差 δ_s 和测量值服从正态分布 $N(\sigma, \mu)$ 下作出的。

不言而喻, 误差值和分布的标准偏差是不一样的。各次测量的误差值彼此不同。误差分布的标准偏差能说明误差值分散程度, 在许多场合下考查它比考查误差值简易可行, 因而有些人在用语上常把两者混为一谈。

九、测量精度和不确定度

测量精度是泛指测量结果的可信程度。从计量学来看, 描述测量结果可信程度更为规范化术语有: 准确度、精密度、正确度和不确定度等。

1. 测量精密度

表示测量结果中随机误差大小的误差; 也是指在一定条件下进行多次测量时所得结果彼此符合的程度。不能将精密度简称为精度。

2. 测量正确度

表示测量结果中系统误差大小的程度; 它反映了在规定条件下测量结果中所有系统误差的综合。

3. 测量准确度

表示测量结果和被测量真值之间的一致程度。它反映了测量结果中系统误差和随机误差的综合。也可称为测量精确度。

4. 测量不确定度

表示对被测量真值所处量值范围的评定; 或者说, 对被测量真值不能肯定的误差范围的一种评定。不确定度是测量误差量值分散性的指标, 它表示对测量值不能肯定的程度。测量结果应带有这样一个指标。只有知道测量结果的不确定度时, 此测量结果才有意义和用处。完整的测量结果不仅应包括被测量的量值, 还应包括它的不确定度。用测量不确定度来表明测量结果的可信赖程度。不确定度越小, 测量结果可信度越高, 其使用价值越高。

测量不确定度的概念、符号和表达式长期存在着不同程度的分歧和混乱。根据国家技术

监督局的有关规定,本教材将以国际计量局(BIPM, The International Bureau of Weights and Measures)于1980年提出的建议《实验不确定度的规定建议书 INC—1 (1980)》为依据来介绍测量不确定度的概念、符号和表达式。

不确定度一般包含多种分量。按其数值的评定方法可以把它们归入两类:A类分量和B类分量。

A类分量是用统计方法算出来的,即根据测量结果的统计分布进行估计,并用实验标准偏差 s (即样本标准偏差)来表征(详见下节)。

B类分量是根据经验或其他信息来估计的,并可用近似的、假设的“标准偏差” u 来表征。

在本节的最后,有三个问题值得读者注意:

首先,精密度、准确度和正确度都是用它们的反面——不精密、不准确和不正确的程度来作定量表征的。例如,人们规定准确度为若干计量单位或真值的百分之几,其意思是所得测量结果和真值之间的差(即误差的绝对值)或相对误差将不超过该规定的范围。这种表征方式意味着这个数值愈大,精密度、准确度和正确度愈低,也就是愈不精密、愈不准确和愈不正确。

其次,在实际中,很少使用“正确度”一词,尤其近年来广泛使用不确定度,以及国际计量大会建议尽量避免使用系统不确定度和随机不确定度两个术语以后,系统不确定度的反面——正确度就更少应用了。

其三,测量重复性和复现性也是评价测量质量的重要概念。测量重复性是指在实际相同测量条件(即同一测量程序、同一测量器具、同一观测者、同一地点、同一使用条件)下,在短时间内对同一被测量进行连续多次测量时,其测量结果之间的一致性。测量重复性可用测量结果的分散性来定量表示。测量复现性是指在不同测量条件(即不同测量原理和方法、不同测量器具、不同观测者、不同地点、不同使用条件、不同时间)下,对同一被测量进行测量时,其测量结果之间的一致性。测量复现性可用测量结果的分散性来定量表示。

十、测量器具的误差

测量器具在完成测量任务的同时也给测量结果带来误差。在研究测量器具的误差时,会涉及到下面的一些概念。

1. 测量仪器的示值误差

它是指测量器具的示值与被测量真值(约定真值)之差。例如电压表的示值 V_i 为30V,而电压实际值 V_t 为30.5V,则电压表的示值误差等于 $-0.5V$ 。

2. 基本误差

指测量仪器在标准条件下所具有的误差,也称为固有误差。

3. 允许误差

指技术标准、检定规程等对测量仪器所规定的允许的误差极限值。

4. 测量器具的准确度

指测量器具给出接近于被测量真值的示值的能力。

5. 测量器具的重复性和重复性误差

测量器具的重复性是指在规定的使用条件下,测量器具重复接收相同的输入,测量器具给出非常相似输出的能力。测量器具的重复性误差就是测量器具造成的随机误差分量。

6. 回程误差

也称为滞后误差,是指在相同条件下,被测量值不变,测量器具行程方向不同时,其示值之差的绝对值。

7. 误差曲线

表示测量器具误差与被测量之间的函数关系的曲线。

8. 校准曲线

表示被测量的实际值与测量器具示值之间函数关系的曲线。

十一、测量结果的表达方式

从误差定义出发,每次测量就有一个误差值。而这个误差值包含着各种因素产生的分量,其中必定包含随机误差。显然,由一次测量误差是无法判明测量误差的统计特性的。只有通过多次重复测量才能由这些测得值的统计分析中获得误差的统计性质。

从概率统计学来看,要完全掌握测量数据和误差的概率分布性质,需要足够多次的乃至无限次的测量。但在实际实验中,只能测量有限次,因而,测量数据只是总体中的一个样本。尽管由此也能获得相应的统计量,但这些统计量却只能是测量数据总体特征量的某种估计值,它们只能近似地反映出实验数据及误差的统计性质。

尽管用样本的统计量来作为测量数据总体特征量的估计值会带来相应的统计采样误差,但是从解决问题的角度来看,这样做却是可行的。因此,测量数据处理的基本任务就是求得测量数据的样本统计量,以便得到一个既接近真值又可信的估计值以及它偏离真值的程度的估计。

本教材将在这些估计值符号顶上加一“^”符号。

1. 回顾某些概率统计学的概念

误差分析和数据处理的基础是概率统计学。为了正确理解关于数据处理的讨论,回顾概率统计学的某些概念并把它们和测量联系起来是必要的。

从测量方面来看,每次测量将获得一个测得值,它是测量随机数据总体中的一个个体实现。对同一量重复进行多次测量,将获得一组测得值 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$, 这组数据称为测量序列。它是随机数据的一个样本实现(简称样本),其容量为 n 。测量序列的算术平均值 $\bar{x}$ (也就是样本平均值),由下式来定义

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (0-4)$$

从测量角度来看,总体期望值 μ 即是真值 x_0 。样本平均值 $\bar{x}$ 是总体期望值 μ 的无偏估计值,即可令 $\bar{x} = \hat{\mu}$, 因而 $\bar{x}$ 可用来估计真值 x_0 。

测量序列的标准偏差 s 由下式定义

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (0-5)$$

它就是样本标准偏差,它和总体标准偏差 σ 不一样,不可混淆。但它确实是总体标准偏差 σ 的无偏估计值,因而可令 $s = \hat{\sigma}$ 。

要特别指出,上述说法并没有局限于某种分布,而是适用于各种分布。