



面向21世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

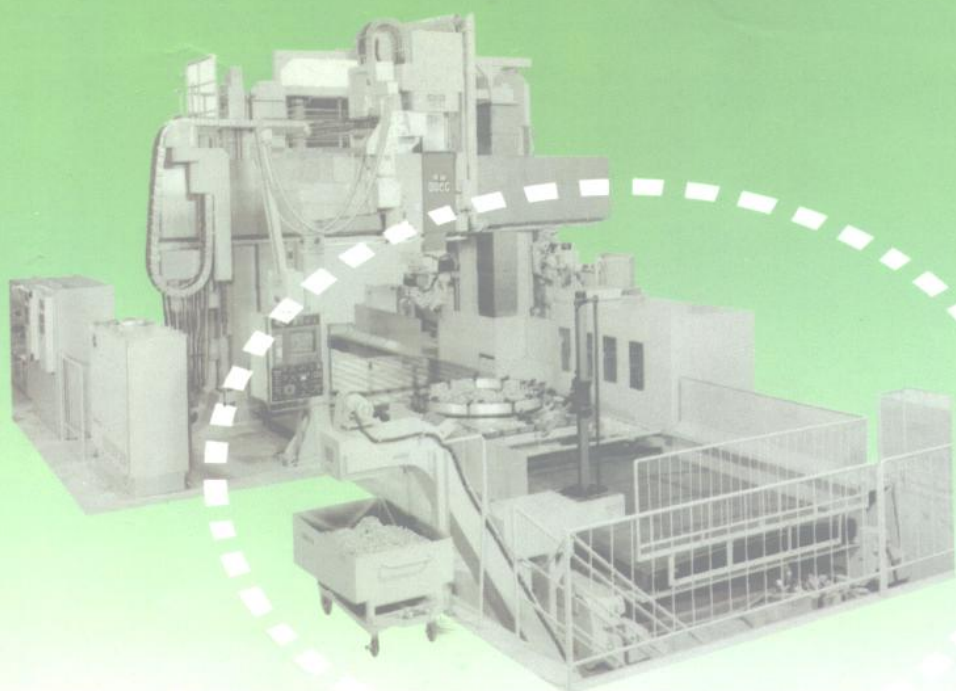
普通高等教育“九五”部级重点教材



普通高等教育机电类规划教材

# 机械工程测量 与试验技术

厦门大学 黄长艺  
华中理工大学 卢文祥 主编  
太原理工大学 熊诗波



机械工业出版社  
China Machine Press

普通高等教育“九五”部级重点教材  
普通高等教育机电类规划教材

# 机械工程测量与试验技术

主编 黄长艺 卢文祥 熊诗波  
编者 杜润生 陈文芴 杨洁明  
主审 洪迈生



机械工业出版社

本书为机械工业部“九五”教材规划的部重点教材。

本书根据当前教改精神编写，有助于推动专业课程改革。内容体现测量、试验兼顾，测量为主；静、动态量测量兼顾，动态量测量为主的思路。全书共分三篇：机械工程测量技术基础、常用参量的测量和机械工程试验技术。机械工程测量技术基础篇包括：测量基础知识，实验数据描述，测量装置特性，测量器具及传感器，信号调理、显示、记录、存储和信号处理初步。给出学生必备的测量基础知识，是教学评估的依据。常用参量的测量篇讲述了几何量和常见物理量的测量方法，为前篇的应用和深化，为不同学校、专业提供选择的余地。机械工程试验技术篇介绍品质试验、控制元件和系统试验、机械系统动态性能试验。密切结合计算机的应用，培养学生开发能力，也为学校实验教学的建设提供范例。

本书可作为高等学校机械类专业本科生的教材，也可供大专、夜大和成人教育有关专业选用。还可供有关工程技术人员参阅。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械工程测量与试验技术/黄长艺等主编.—北京：机械工业出版社，2000.7

普通高等教育“九五”部级重点教材·普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07597-8

I. 机… II. 黄… III. 机械工程-测试技术-高等学校-教材 IV. TG8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 05350 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 孙淑卿 版式设计：霍永明 责任校对：孙志筠

封面设计：李雨桥 责任印制：路琳

北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·21.5 印张·526 千字

0 001 - 6000 册

定价：29.50 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)68993821、68326677-2527

2P38/22

## 前 言

随着新专业目录的公布和实施,机械类的数个专业最终归为“机械工程及其自动化”专业。这是深入教改的重大步骤。它牵涉到教育思想、教学过程、课程设置、课程内容和教材的全面改革。为了适应新形势的需要,测试技术课程内容和教材自然必须进行相应的改革。为此《测试技术》教材被列为机械工业部“九五”教材规划中的部重点教材。

本教材定名为《机械工程测量与试验技术》。由黄长艺(教授,厦门大学)、卢文祥(教授,华中理工大学)、熊诗波(教授,太原理工大学)、杜润生(教授,华中理工大学)、陈文芩(副教授,厦门大学)和杨洁明(副教授,太原理工大学)编写。主编为黄长艺、卢文祥、熊诗波。

本教材由洪迈生(教授,上海交通大学)主审。

“测试技术”在1978年被正式列入原机制专业教学计划。

20年教学改革实践表明,“测试技术”是一门重要的技术基础课,它在培养学生、改造专业和促进科技发展等方面有着重要作用,因此受到各院校普遍的重视,列为本科教学的主干课程和研究生学位课程。有资料表明,国外著名大学如MIT同样也很重视这样的课程,给予较多的课时和较高的学分。

在工科的本科教育中,加强测试—仪器学(Measurement and Instrumentation)的教育是科学技术发展的必然,是教育改革的必然,是近30多年来国内外大学教学改革的一股潮流。测试—仪器技术是当今世界的关键和普遍应用的技术,是人类获取知识和信息的主要工具之一,是科技进步的主要支柱之一。科技发展的历史和现状也表明,对测试—仪器技术了解较多的人,往往能取得更多更大的成绩,因为他们能及时有效地使用最新最先进的仪器设备和测试方法,能在更深入、更精确、更全面的层次上来观察和研究问题。总之,测试—仪器技术的飞速发展和广泛使用,使之渗透到各行各业,从而造成各行各业的科技人员都需要接受测试—仪器技术方面的教育,掌握必要知识的局面。

无论是“机械设计制造及其自动化”专业,还是口径更宽的“机械工程及其自动化”专业,都和大多数理工科专业一样,属于需要较多的、扎实的测试—仪器技术知识,因而应设立正规的系统性课程来进行这方面教育的专业。

在我国,虽然20年来,测试技术课程的教学改革取得巨大的成绩,出版了一批好教材和取得一批教学研究成果,一批教师因此获得优秀教材奖或优秀教学研究成果奖。但是,在教育必须多方面地适应科学技术的飞跃发展和不断进步着的社会需求的新形势下,测试技术课程也必须进行相应的改革。首先,必须调整课程内容的深度和广度来增强适应性。一般说来,将按照适当增大广度、增加解决问题的线索、减小深度的思路来选择内容。其次,将本门课程的研究对象确定为“机械工程领域中常用量和性能品质的测量和试验”。和以前本门课程的研究对象(动态物理量)相比,增加了静态几何量的测量以及性能品质的测量和试验。其三,及时删除过时内容,补充新内容、新知识。

因此,本教材将分为:机械工程测量技术基础、常用参量的测量和机械工程试验技术等三篇。在机械工程测量技术基础篇中,给出通才教育、宽口径专业所必需的测量基础知识。

每章给出习题或思考题。可以说,这一篇对于各类学生都是必要的,也可作为教学评估的基本依据。常用参量的测量篇是作为基础篇的实际应用和深化。其中编入了几何量和多种物理量的测量方法。这为各类学校、不同专业方向和组织教学的需要提供选择的余地。在机械工程试验技术篇中编入机械工程试验技术基础、机器整机与部件的性能试验、机器的动态性能试验和机器控制元件与控制系统试验的内容,目的是介绍已经广泛应用的机器(整机或零部件)的品质试验、动态性能试验、控制元件和控制系统试验。无论从培养学生素质,还是适应科研、产品设计需要来看,品质试验和动态性能试验日益显得重要。此篇在进一步深化已学知识、贴近实践和领会计算机在测试中应用,培养学生适应社会发展需要的能力能起到良好的作用,也有助于引导某些学校实验教学和实验室的建设。

“测试技术”这一名称虽从1978年天津会议即开始使用。但此后出版的教材却较少直接用此四个字作为书名的。在计量行业中,关于“测试”一词的权威解释也许当推国家技术监督局颁布的《JJG1001—91通用计量名词及定义》中所说的:“测试(measurement and test)具有试验性质的测量。注:测试也可以理解为测量和试验的综合。”显然,此解释前后的意义并不完全一样。

我们赞同上注的看法,并认为,测量和试验既密切相关,却不是一回事。测量和试验的基本知识都应列入本专业的教学计划中。过去的教材主要的是测量方面的内容,试验方面相对弱了点。为了更好地反映当前本专业对“测试技术”的要求,我们把教材取名为《机械工程测量与试验技术》。同时,考虑到原教材中试验方面相对弱了点、学生对组成测试系统方面的知识的不足和需要加强与计算机的相结合的事实,适当增加试验技术方面的内容,并构成新的一篇“机械工程试验技术”。其中包括:机械工程试验技术基础、机器整机与部件的性能试验、机器的动态性能试验。我们企盼这些知识有助学生开发能力的提高,增强他们的适应性。

必须郑重指出,测试技术课程对于“机械工程及其自动化”专业始终应定位为技术基础课。多年教学实践表明,离开此定位是有害无益的,本教材也是依此来编写的。

1998年8月和1999年8月,机械设计制造及其自动化专业教学指导委员会第三、第四次会议审议了本书的编写大纲和编写思路的汇报。

编写过程中得到全国高校机械工程测试技术研究会的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

作为教材,应当吸取各方面的观点和成就,因此本书在编写过程中,参阅了许多文献,如书后所列的文献,从中得益非浅,在此特向有关作者深表谢意。尤其要对我们过去的合作者——《机械工程测试技术基础(第2版)》的全体作者表示深深的谢意,因为本书多处引用了该书的内容或观点。

由于编者水平所限和成书期限短促,书中定有许多缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

编者

1999年9月

# 目 录

前言		
绪言	1	
<b>第一篇 机械工程测量技术基础</b>		
第一章 测量的基础知识	4	
第一节 量和测量	4	
第二节 测量方法和测量装置	7	
第三节 测量误差	8	
第四节 测量器具的误差	12	
第五节 测量数据处理及测量结果的表达方式	12	
第六节 间接测量结果的综合	17	
习题	21	
参考文献	22	
第二章 静动态(实验)数据描述	23	
第一节 静动态(实验)数据的分类	23	
第二节 周期信号与离散频谱	27	
第三节 瞬变非周期信号及其连续频谱	33	
第四节 随机信号	39	
习题	43	
参考文献	44	
第三章 测量装置的基本特性	45	
第一节 概述	45	
第二节 测量装置的静态特性	47	
第三节 测量装置的动态特性	48	
第四节 测试装置对任意输入的响应	56	
第五节 实现不失真测量的条件	58	
第六节 测量装置动态特性的测量	59	
第七节 负载效应	62	
第八节 测量装置的抗干扰	63	
习题	66	
参考文献	67	
第四章 常用的测量方法、器具及其传感器	68	
第一节 概述	68	
第二节 普通机械、电气式传感器及仪器	70	
第三节 光学传感器及仪器	87	
第四节 气动量仪	97	
第五节 半导体传感器及仪器	99	
第六节 红外线检测及仪器	108	
第七节 传感器的选用原则	112	
习题	113	
参考文献	114	
第五章 模拟信号调制、滤波和模数转换	116	
第一节 模拟信号调制	116	
第二节 滤波器	123	
第三节 A/D转换	128	
习题	132	
参考文献	133	
第六章 数据的显示、记录与存储	134	
第一节 模拟显示	134	
第二节 数字显示	135	
第三节 磁记录	140	
第四节 光盘式记录	142	
习题	145	
参考文献	145	
第七章 信号处理初步	146	
第一节 数字信号处理的基本步骤	146	
第二节 离散傅里叶变换	147	
第三节 信号数字化出现的问题	148	
第四节 几种常用的处理方法	153	
第五节 提高测试数据信噪比的		

常用技术介绍 .....	166	参考文献 .....	264
习题 .....	168		
参考文献 .....	169		
<b>第二篇 常用参量的测量</b>			
第八章 几何量及位移的测量 .....	170	第十四章 机械工程试验技术基础 .....	265
第一节 阿贝原则 .....	170	第一节 机械工程试验的类型及	
第二节 表面粗糙度测量 .....	171	系统构成 .....	265
第三节 形位误差的测量 .....	176	第二节 GP-IB 仪器试验系统及	
第四节 回转轴径向运动误差的测量 .....	186	应用实例 .....	267
第五节 几何量测量中的误差分离 .....	188	第三节 模块式仪器试验系统及实例 .....	272
参考文献 .....	190	第四节 现场总线试验系统与	
第九章 振动测量 .....	191	智能传感器 .....	278
第一节 振动测试的力学原理——单自由		第五节 计算机辅助试验系统的软件 .....	284
度系统的受迫振动 .....	191	参考文献 .....	294
第二节 振动测量传感器 .....	195	第十五章 机器整机与部件的	
第三节 振动测量系统及其校准 .....	202	性能试验 .....	295
第四节 基本振动参量的测量 .....	205	第一节 概述 .....	295
习题 .....	206	第二节 机器及其部件的振动	
参考文献 .....	207	环境试验 .....	296
第十章 声测量 .....	208	第三节 机械传动系统的试验 .....	298
第一节 声测量基础 .....	208	第四节 液压传动系统的试验 .....	303
第二节 声测量常用仪器 .....	216	参考文献 .....	308
第三节 噪声测量中的若干问题 .....	221	第十六章 机器控制元件和	
习题 .....	223	系统的试验 .....	309
参考文献 .....	223	第一节 概述 .....	309
第十一章 应变和力的测量 .....	225	第二节 系统动态特性试验的	
第一节 应变、应力的测量 .....	225	时域方法 .....	314
第二节 力的测量 .....	230	第三节 系统动态特性试验的	
参考文献 .....	237	频域方法 .....	315
第十二章 温度测量 .....	238	第四节 自动控制元件和系统的	
第一节 温度基准量 .....	238	试验实例 .....	320
第二节 温度测量方法 .....	239	参考文献 .....	324
参考文献 .....	247	第十七章 机器结构的动态试验 .....	325
第十三章 流体参量的测量 .....	248	第一节 概述 .....	325
第一节 压力的测量 .....	248	第二节 模态试验的理论基础 .....	325
第二节 流量的测量 .....	258	第三节 频响函数测量技术 .....	332
		参考文献 .....	337

# 绪 言

## 一、测试技术的重要性

测试的基本任务是获取有用的信息，然后将其结果提供给观察者或输入给其他信息处理装置、控制系统。因此，测试技术是属于信息科学范畴，是信息技术三大支柱(测试控制技术、计算技术和通信技术)之一。

测量是以确定被测物属性量值为目的的全部操作。测试是测量和试验的综合。人类在从事社会生产、经济交往和科学研究活动中，都与测试技术息息相关。

测试是人类认识客观世界的手段，是科学研究的基本方法。科学探索需要测试技术，用定量关系和数学语言来表述科学规律和理论也需要测试技术，检验科学理论和规律的正确性同样需要测试技术。可以认为，精确的测试是科学的根基。

在工程技术领域中，工程研究、产品开发、生产监督、质量控制和性能试验等，都离不开测试技术。特别是近代自动控制技术已越来越多地运用测试技术，测试装置已成为控制系统的重要组成部分。日常生活用具，如汽车、家用电器等方面也离不开测试技术。

总之，测试技术已广泛地应用于工农业生产、科学研究、国内外贸易、国防建设、交通运输、医疗卫生、环境保护和人民生活的各个方面，起着越来越重要的作用，成为国民经济发展和社会进步的一项必不可少的重要基础技术。因而，使用先进的测试技术也就成为经济高度发展和科技现代化的重要标志之一。

机械工业担负着装备国民经济各个部门的任务。在改革开放的过程中，机械工业面临着更新产品、革新生产技术、改善经营管理、提高产品质量、提高经济效益和参与国际市场竞争的挑战。测试技术将是机械工业对付上述挑战的基础技术之一。

## 二、测试过程和测试系统的一般组成

信息总是蕴涵在某些物理量之中，并依靠它们来传输的。这些物理量就是信号。就具体物理性质而言，信号有电信号、光信号、力信号等等。其中，电信号在变换、处理、传输和运用等方面，都有明显的优点，因而成为目前应用最广泛的信号。各种非电信号也往往被转换成电信号，而后传输、处理和运用。

在测试工作的许多场合中，并不考虑信号的具体物理性质，而是将其抽象为变量之间的函数关系，特别是时间函数或空间函数，从数学上加以分析研究，从中得出一些具有普遍意义的理论和方法。这些理论和方法极大地发展了测试技术，并成为测试技术的重要组成部分。这些理论和方法就是信号的分析 and 处理技术。

一般说来，测试工作的全过程包含着许多环节：以适当的方式激励被测对象、信号的检测和转换、信号的调理、分析与处理、显示与记录，以及必要时以电量形式输出测量结果。因此，测试系统的大致框图可用图 0-1 来表示。

测试工作所希望获取的信息，有可能已载于某种可检测的信号中，也有可能尚未载于可检测的信号中。对于后者，测试工作就包含着选用合适的方式激励被测对象，使其产生既能充分表征其有关信息又便于检测的信号。例如，许多系统的特性参量在系统的某些状态下，



可能没有显示出来，或者显示得很不明显，以致难于检测出来。因此，若要测量这些特性参量，就需要激励该系统，使其处于能够充分显示这些参量特性的状态中，以便有效地检测载有这些信息的信号。

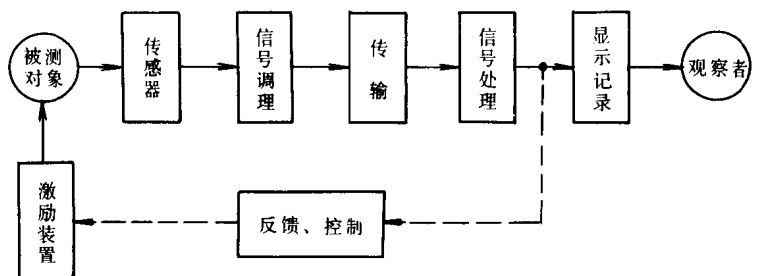


图 0-1 测试系统框图

传感器受被测量的直接作用后能按一定规律将被测量转换成同种或别种量值输出。其输出通常是电信号。

信号调理环节把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这时的信号转换，在多数情况下是电信号之间的转换。例如，将幅值放大、将阻抗的变化转换成电压的变化等等。

信号处理环节接受来自调理环节的信号，并进行各种运算、滤波、分析，将结果输至显示、记录或控制系统。

信号显示、记录环节以观察者易于认识的形式来显示测量的结果，或者将测量结果存储，供必要时使用。

在所有这些环节中，必须遵循的基本原则是各环节的输出量与输入量之间应保持一一对应和尽量不失真的关系(通常是线性关系)，并必须尽可能地减小或消除各种干扰。

应当指出，并非所有的测试系统都具备图 0-1 中所有环节，尤其是虚线连接的环节和传输环节。实际上，环节与环节之间都存在着传输。图中的传输环节是专指较远距离的通信传输。

测试技术是一种综合性技术，对新技术特别敏感。要做好测试工作，需要综合运用多种学科的知识，注意新技术的运用。

### 三、课程的研究对象和性质

本课程所研究的对象是机械工程领域中常用物理、几何量的测量和性能、品质试验。具体而言包括：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，测试信号的分析和处理，以及常见几何、物理量的测量方法，机械工程常用的产品品质试验、机械系统的动态性能试验、控制元件和控制系统试验。本书共分三篇：机械工程测量技术基础、常用参量的测量和机械工程试验技术等三篇。在测量技术基础篇中，给出本专业所必需的测量基础知识。每章给出习题或思考题。这一篇对于各类学生都是必要的，也可作为教学评估的基本依据。参量测量篇是作为基础篇的实际应用和深化。其中编入几何量和多种物理量的测量方法。各学校可按本校专业要求、办学条件和师生特点，挑选若干章节进行讲授。试验篇在介绍计算机辅助试验系统(CAT)组成的一般问题的基础上，介绍了机械工程试验技术基础、机器品质试验、机械系统动态性能试验、控制元件和系统试验等，目的是介绍工程试验基础知识和已经广泛应用的产品品质试验、机械系统的动态

性能试验、控制元件和控制系统试验。此篇可以深化已学知识、贴近实践和领会计算机在测试中应用,培养学生素质和开发能力,适应科研、产品设计和社会发展需要的能力,也有助于引导某些学校实验教学和实验室的建设。鉴于各校情况差异很大,此篇如何教学,更需密切结合本校实际认真研究选材。

对高等学校机械类的各有关专业而言,“机械工程测量和试验技术”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打下基础。

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,建立明确的信号的频谱结构的概念;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 and 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。

作为一门学科,测试技术既综合应用许多学科的原理和技术,又被广泛应用于各种学科中。然而,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。它必须以前序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、基本能力和技能;同时,也不宜超越其特定的课程范围,更不应试图取代其他课程的任务和作用。恰当地把握课程间的分工和配合是编写教材和教学中理应遵循的。

# 第一篇 机械工程测量技术基础

## 第一章 测量的基础知识

在生产实践和科学实验中,需要观测大量的现象及其参量的变化。这些量可以通过测量装置变成容易测量、记录和分析的某种形式的量或信号。这些量或信号包含着反映被测系统的状态和特性的某些有用的信息,是人们认识客观事物内在规律、研究事物之间的相互关系、预测未来发展的依据。

本章将介绍测量领域中的一些基本概念。

### 第一节 量和测量

#### 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℃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,它们彼此往往有着关系。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。

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。

3. 量纲和量纲法则 在量制中,任何一个量可用基本量的幂的乘积的表达式来表示,此表达式就称为该量的量纲。在国际单位制中,七个基本量的量纲分别是: $L$ 、 $M$ 、 $T$ 、 $\theta$ 、 $I$ 、 $N$  和  $J$ 。不难理解,导出量—力的量纲就是  $LMT^{-2}$ ,电阻的量纲是  $L^2MT^{-3}I^{-2}$ 。通常某量  $x$  的量纲可记为  $\dim x$ 。

在任何一个量与其他量之间的关系式中,等号两侧的量纲应当相同,这就称为量纲法则。可利用量纲法则来检验任何物理公式的正确性。例如在  $RC$  电路中,有

$$RC \frac{d(y)}{d(t)} + y(t) = x(t) \quad (1-1)$$

式中  $x(t)$ ——输入电压;

$y(t)$ ——输出电压；

$R$ ——电阻；

$C$ ——电容。

等号右侧电压 $x(t)$ 的量纲是 $L^2MT^{-3}I^{-1}$ 。根据量纲法则，左右侧量纲相等；两项相加，每项量纲应相等，则左侧每项量纲也应为 $L^2MT^{-3}I^{-1}$ 。由此可见， $\dim\left[RC\frac{d(y)}{dt}\right]=L^2MT^{-3}I^{-1}$ 。因此， $\dim(RC)=T$ 。式(1-1)中的 $RC$ 被称为该电路的时间常数，是因为它的量纲是时间的缘故。

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。能不能规范地使用法定计量单位是有无法制观念的表现。大学生应该学会正确使用法定计量单位。

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)、光强度——坎德拉(Candela)、物质的量——摩尔(Mole)。它们的代号分别为：米(m)、千克(kg)、秒(s)、开(K)、安(A)、坎(cd)、摩(mol)。

国际单位制(SI)的基本单位的定义如下：

米(m)是光在真空中，在 $1/299792458$ 秒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的 $9192631770$ 个周期的持续时间。

安培(A)是电流单位。在真空中，两根相距 $1\text{m}$ 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 $2\times 10^{-7}\text{N}$ ，则每根导线中的电流为 $1\text{A}$ 。

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 $0.012\text{kg}$ 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；但必须给予指明。

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 $540\times 10^{12}\text{Hz}$ 的单体辐射，且在此方向上的辐射强度为 $1/683\text{W/sr}$ 。

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、测试是三个密切关联的术语。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。如果测量是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、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比对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比对或校准,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较低等级计量标准或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的计量器具。

### 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 instruments),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、部门和地方检定规程三种。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，分别在全国、本部门、本地区施行，作为检定所依据的法定技术文件。

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，应停止使用。

## 第二节 测量方法和测量装置

### 一、测量方法分类

测量方法是指在实施测量中所涉及的一套理论运用和实际操作。其中包括了测量原理和获得测量结果的方式。

测量方法可按多种原则来分类。通常较多按下列原则来分类：

1) 按是否直接测定被测量的原则来分类，可分为直接测量法和间接测量法。直接测量法是指不必测量与被测量有函数关系的其他量，而能直接得到被测量值的测量方法。用量筒测量流体容积、用等臂天平测量物体质量都属于直接测量法。而通过测量与被测量有函数关系的其他量，来得到被测量值的测量方法则称为间接测量法。通过测量长度来确定矩形面积，通过测量电流强度、电压来确定电功率的测量方法都属于间接测量法。间接测量法在计量学中具有特别重要的意义。在测量领域中，广泛使用一种被称为定义测量法的间接测量法，那就是按照被测量的单位的定义，通过测量其中相关的基本量来确定被测量的方法。

2) 按被测量是否直接和已知的同种量进行比较的原则，可分为直接比较测量法和替代测量法。前者是将被测量直接和已知值的同种量相比较，从而得到被测量的量值的。后者则用选定的、已知其值的同种量替代被测量，使指示装置得到相同效果从而确定被测量的量值。曹冲称象用的就是替代测量法。

3) 按传感器是否与被测物体作机械接触的原则可分为接触测量和非接触测量。后者可避免传感器对被测物体的机械作用及对其特性的影响，也可避免传感器受到磨损。

值得注意，在讨论测量问题时，有时会遇到“静态测量”和“动态测量”两个术语。其中“静态”和“动态”是专指被测量是否随时间而变化的，而不是指被测物体处于机械静止或运动中。静态测量期间，被测量值可以认为是恒定的；而在动态测量期间，被测量值是随时间而变化的。因此，在动态测量中，要确定被测量就必须测量它的瞬时值及其随时间而变化的规律。实际上，在进行静态测量和动态测量时，两者对测量装置特性的要求和测得数据的处理是有很大的差别的，工作中必须密切注意。

### 二、测量装置及有关的术语

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“绪言”中介绍过(见图 0-1)。

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内容有着重要作用。这些术语包括：

**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。

**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。

**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。

**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。

**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，来保持其误差在规定极限以内。

**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起点的示值为  $-30^{\circ}\text{C}$ ，终点示值为  $+20^{\circ}\text{C}$ ，其标称范围即为  $-30\sim+20^{\circ}\text{C}$ 。

**量程** 标称范围的上下限之差的模。上例的量程就是  $50^{\circ}\text{C}$ 。

**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。

**漂移** 测量器具的计量特性随时间的慢变化。

### 第三节 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。

#### 一、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

$$\text{测量误差} = \text{测量结果} - \text{真值} \quad (1-2)$$

并常简称为误差。此定义联系着三个量，显然只需其中两个量是已知的，就能得到第三个量。但是，在现实中却往往只有测量结果知道，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。

#### 二、误差分类

1. 根据产生误差的原因可以将误差分为：

(1) 器具误差。此类误差是由测量器具本身存在的缺陷而产生的。它与测量器具的工作原理、结构设计、制造、安装调整等因素有关。

(2) 方法误差。此类误差是由于测量方法不完善所引起的。例如测量方法中使用了近似的数学模型，比如说用直线代替弧线。

(3) 调整误差。此类误差是由于测量前未能将测量器具和被测对象调整到正确位置和状态所引起的。例如，被测量实为零，而测量器具的示值却偏离零位(即所谓的零位误差)，就属于此类误差。

(4) 观测误差。此类误差是由于在测量过程中观测者主观判断不当所引起的。

(5) 环境误差。此类误差是由于在测量过程中环境状态变化所引起的。

其中,(3)和(4)两项合称为人员误差。它们都是由于观测者主观因素或操作失误所引起的。

总之，要消除或减少测量误差就必须从上述几方面分析原因并采取相应措施。

2. 如果根据误差的统计特征来分，却又可以将误差分为：

(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，这就是系统误差。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了，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它；也应当消除此类误差。

(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。

### 三、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。然而习惯上却常用与被测量量纲、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(1-2)来表示。它是一个量纲、单位和被测量一样的量。

2. 相对误差

$$\text{相对误差} = \text{误差} \div \text{真值} \quad (1-3)$$

当误差值较小时，可采用

$$\text{相对误差} \approx \text{误差} \div \text{测量结果} \quad (1-3a)$$

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%、‰或百万分数来表示。

**例 1-1** 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  $70^\circ\text{C}$ ，引用值为  $50^\circ\text{C}$ 。

**例 1-2** 用标称范围为  $0 \sim 150\text{V}$  的电压表测量时，当示值为  $100.0\text{V}$  时，电压实际值为  $99.4\text{V}$ 。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

$$\text{分贝误差} = 20 \times \lg(\text{测量结果} \div \text{真值}) \quad (1-4a)$$

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

$$\text{分贝误差} = 10 \times \lg(\text{测量结果} \div \text{真值}) \quad (1-4b)$$

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关系。

**例 1-3** 计算例 1-1 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(图 1-1)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；

$\mu$ ——测量值概率分布的期望(平均值)；

$\sigma$ ——测量值概率分布的标准偏差，是常用的误差特征量之一；

$\delta_i$ ——第  $i$  次测量的误差值；

$\delta_{ri}$ ——第  $i$  次测量的随机误差值；

$\delta_s$ ——系统误差。

从原则上来说， $\mu$  为测量值的平均值； $\sigma$  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 1-1 是在特定的系统误差  $\delta_s$  和测量值服从正态分布  $N \sim (\sigma, \mu)$  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

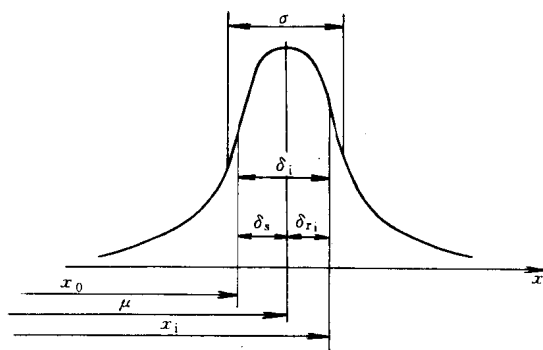


图 1-1 测量误差及其分布特性的特征量