



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家级精品教材

检测技术

第4版

上海交通大学 施文康
合肥工业大学 余晓芬

主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品教材

检 测 技 术

第 4 版

主 编	施文康	余晓芬	
参 编	孙长库	许陇云	吉小军
主 审	靳世久	安志勇	梅杓春



机 械 工 业 出 版 社

本书系统地阐述了检测技术中关于电磁量、长度量、机械量、热工量、环境量等基本参量的典型检测原理和方法以及相关的基础知识。

书中以注重学科基础为宗旨,减少了对仪器具体结构的介绍,而着重叙述基本的检测原理、检测方法、系统框图、应用实例和检测新技术,目的是使读者建立设计检测过程的整体概念,掌握本专业检测技术的基础理论和专门知识。本书力求论述全面系统、内容丰富新颖。为帮助读者理解和掌握各章内容,每章末均设有一定量的思考题和习题。

本书主要作为高等学校测控技术与仪器专业的专业课教材,也可作为仪器科学与技术学科内各二级学科非本专业本科毕业的研究生教材和部分自动化专业本科教材以及机械、电气类其他相关专业的教学参考书,还可供广大检测科技工作者自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

检测技术/施文康,余晓芬主编. — 4版. — 北京:机械工业出版社, 2015.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-50063-6

I. ①检… II. ①施…②余… III. ①传感器-检测-高等学校-教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 084912 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤

责任校对:刘怡丹 封面设计:张 静

责任印制:李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2015 年 6 月第 4 版第 1 次印刷

184mm×260mm·22 印张·519 千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-50063-6

定价:46.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书在其前3版的基础上改写而成,但与第1版旨在实现“测控技术与仪器”宽口径专业整合之初“检测技术”适用教材的从无到有,第2版旨在填补内容的空缺和第3版着重于在内容上体现时代性、实用性以及在叙述上强调可教性、可读性有别。本次修订将进一步发扬精品精神,精益求精,在文字和内容上认真推敲,以发扬特色、注重基础、删繁求简、吐故纳新,力求在质量上有一个显著的提升,在编排上的一个重大调整是将原先“速度、转速和加速度测量”与“机械振动的测试”两章整合为“速度、加速度和振动测量”,其他各章均有新内容加入和一些陈旧内容的退出。为适应创新性人才培养目标的要求,在各章末精心设计了思考题和习题。本书各版次分别被列为普通高等学校“十五”“十一五”“十二五”国家级规划教材。本书由教育部仪器科学与技术学科教学指导委员会委托上海交通大学、合肥工业大学、天津大学、上海理工大学联合编写,博采众长,是一个大协作的产物。

本课程的实践性、综合性很强。书中力求理论和实践密切结合,教学中宜配以相应的实验、综合课程设计等环节。上海交通大学、合肥工业大学等院校网页均有相关教学课件可供读者参考。

本书主要作为全国高等学校测控技术与仪器专业的本科专业课教材,也可作为仪器科学与技术学科内各二级学科非本专业本科毕业的研究生教材和部分自动化专业本科教材以及机械、电气类其他相关专业的教学参考书,还可供广大检测科技工作者自学和参考。本书学科涉及面广、知识面宽、内容经典又不失新颖,这对教师和学生都是挑战,特别对教师要求具有较高的业务和教学能力。希望通过本书的教学,对读者今后的学习和工作有较大的帮助。本书适用于48~54学时的教学安排,各使用学校可根据各自的教学计划、课程衔接、专业特色按需选用相关章节。编者建议讲深讲透绪论,帮助学生对仪器仪表专业的地位、作用有一个正确、全面、客观的认识,以增强学习的动力,激发强烈的事业心和高度的责任感。

本书由上海交通大学施文康、合肥工业大学余晓芬主编。上海交通大学施文康编写第一、九、十、十二章,合肥工业大学余晓芬编写第五、六章,天津大学孙长库、王鹏编写第七、八章,上海理工大学许陇云编写第二、十一章,上海交通大学吉小军编写第三、四章。

本版教材由天津大学靳世久教授、长春理工大学安志勇教授、南京邮电大学梅杓春教授主审,感谢他们的严格把关和宝贵建议。借此机会一并感谢的还有为前三版做过大量编、审工作的居滋培教授、徐锡林教授、童玲教授、樊玉铭教授以及钟先信、丁天怀、费业泰、周百令、陈明仪、曾周末、徐科军、王祈、孔力、赵建、俞建卫、王宏涛、徐从裕、王标等同行老师的一贯支持与帮助。感谢中国航天集团 102 研究所缪宙宵研究员、上海自动化仪表研究院范铠研究员、上海环境监测中心周亚康副研究员等对本书编写所给予的帮助,特别是在实践性方面的真知灼见。感谢众多学者所公开的大量参考文献使本书编者有条件集思广益、开拓思路。感谢教育部、上海市教委给予本书的历次奖励和支持。感谢众多兄弟院校对本书的信任和厚爱。感谢所有给予本书以关心和帮助的朋友。

尽管全体编者都尽心尽力,但缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 绪论 1

第一节 检测的基本概念 1

一、检测的地位与作用 1

二、检测系统的基本组成 1

三、单位制 2

四、量值的传递与溯源 4

第二节 检测技术研究的主要内容 4

第三节 本课程的任务以及与其他课程的 关联 5

第四节 检测技术的发展方向 6

思考题 9

第二章 测试系统 10

第一节 测试系统的组成 10

第二节 测试系统的数学模型及频率 特性 11

一、测试系统的数学模型 11

二、线性系统的性质 13

三、传递函数 14

四、环节的串联和并联 14

五、频率响应函数 15

六、频率特性及其图像 16

七、一阶、二阶系统的频率特性 17

八、理想频率响应函数 21

第三节 测试系统对瞬态激励的响应 22

一、单位脉冲输入和系统的脉冲 响应函数 22

二、单位阶跃输入和系统的阶跃 响应 22

三、测试系统对任意输入的响应 23

第四节 测试系统频率特性的测定 25

一、正弦信号激励 25

二、阶跃信号激励 25

第五节 测量仪器的特性 27

一、测量仪器的准确度及其定量 指标 27

二、重复性 29

三、灵敏度、分辨力、鉴别力阈 和信噪比 29

四、标称范围、量程、测量范围和动态 范围 30

五、漂移、回程误差、死区和 线性度 30

六、工作频率范围、响应特性和响应 时间 32

第六节 测量不确定度 33

一、测量不确定度的含义 33

二、标准不确定度的评定 33

三、自由度及其确定 34

四、测量不确定度的合成 34

五、测量不确定度评定实例——电压 测量的不确定度计算 35

思考题 36

习题 36

第三章 信号描述及分析 38

第一节 概述 38

一、确定性信号 38

二、随机信号 39

三、连续信号与离散信号 39

四、信号的描述和评价 40

第二节 傅里叶变换与频谱分析 42

一、傅里叶变换的原理 42

二、傅里叶变换的基本形式 43

三、频谱分析的应用实例 46

第三节 信号滤波 47

一、经典滤波器的工作原理 47

二、经典滤波器的分类和主要参数	48	四、磁阻效应法	87
第四节 相关分析及其应用	50	五、磁通门法	88
一、相关函数的定义	50	六、其他磁测量技术简介	92
二、相关函数的应用	50	第六节 材料磁特性测量技术	93
第五节 随机信号描述与分析	52	思考题	97
一、随机过程的定义和分类	52	习题	97
二、随机信号的统计特性	53	第五章 长度及线位移的测量	98
第六节 短时傅里叶变换	56	第一节 概述	98
第七节 小波变换	58	一、长度单位和定义	98
第八节 Hilbert-Huang 变换与经验模态 分解	60	二、长度量值传递系统	98
一、算法简介	60	三、长度测量的标准量	98
二、EMD 方法对实际漏磁信号的处理 实例	61	四、阿贝原则	99
思考题	64	五、长度测量的环境标准要求	99
习题	64	第二节 长度尺寸的测量	99
第四章 电学与磁学量的测量	66	一、常见尺寸的测量	100
第一节 概述	66	二、大尺寸的测量	107
第二节 电学量测量	67	三、微小尺寸的测量	111
一、电学量测量简介	67	四、测量误差分析	113
二、电压、电流的测量	69	第三节 形位误差和异形曲面的测量	116
三、电阻、电容、电感的测量	70	一、形位误差的测量	116
四、电功率的测量	72	二、异形曲面的测量	120
第三节 频率的测量	72	第四节 表面粗糙度的测量	124
一、直接测频法	72	一、测量仪器	125
二、测周法	73	二、评定参数	128
三、多周期同步测频法	74	第五节 线位移量的测量	130
四、频率测量专用芯片	75	一、大位移量的测量	130
五、微波频率的测量	75	二、物位的测量	132
第四节 相位差的测量	76	第六节 纳米测量技术	135
一、脉冲计数法测相位	76	一、扫描隧道显微镜	135
二、基于 FFT 的相位测量	77	二、原子力显微镜	136
三、相关法测相位	78	三、大量程的纳米测量技术	137
四、基于集成芯片的相位测量	79	思考题	138
第五节 磁场测量技术及仪器	80	习题	138
一、磁测量技术简介	80	第六章 角度及角位移的测量	141
二、磁感应法测磁	82	第一节 概述	141
三、霍尔效应法	83	一、角度单位及量值传递	141
		二、角度的自然基准和圆周封闭 原则	141

三、实物基准与分度误差的特性	141	一、力矩传递法	215
第二节 单一角度尺寸的测量	144	二、力平衡法	218
一、直接测量	144	三、能量转换法	219
二、间接测量	148	第四节 压力的测量	219
第三节 圆分度误差的测量	154	一、压力量值的溯源和传递	220
一、圆分度误差评定指标	154	二、压力测量仪	220
二、圆分度误差的绝对测量	155	三、真空测量	226
三、圆分度误差的相对测量	158	四、超高压测量	230
四、圆分度误差的组合测量	159	思考题	230
第四节 角位移量的测量	161	习题	231
一、单自由度角位移的测量	161	第九章 温度的测量	232
二、多自由度角位移的测量	166	第一节 概述	232
思考题	168	一、温度的基本概念和测量方法	232
习题	168	二、温标	233
第七章 速度、加速度和振动的测量 ..	170	第二节 膨胀式温度计和压力式 温度计	233
第一节 概述	170	一、膨胀式温度计	234
第二节 速度的测量	171	二、压力式温度计	235
一、线速度的测量	171	第三节 热电偶温度计	236
二、角速度的测量	179	一、热电效应和热电偶	236
三、转速测量	183	二、热电偶基本定律	237
第三节 加速度的测量	187	三、标准化热电偶	238
一、加速度测量的基本原理	187	四、热电偶的参比端处理	239
二、基于位移的加速度测量	187	五、测温电缆	241
三、基于惯性力的加速度测量	189	六、薄膜热电偶	242
第四节 振动测试	193	第四节 电阻温度计	242
一、振动的基本类型	193	一、铂电阻温度计	243
二、振动测试系统	196	二、铜电阻温度计	243
三、振动激励装置	196	三、半导体热敏电阻	244
四、振动系统参量的测量	200	四、热电阻温度计的测量误差	245
思考题	204	五、P-N 结与集成电路温度传感器	246
习题	204	第五节 光辐射测温方法及仪表	247
第八章 力、力矩和压力的测量	205	一、热辐射基本定律	247
第一节 概述	205	二、辐射温度计	249
第二节 力的测量	206	三、亮度温度计	250
一、力的测量方法	206	四、颜色温度计	252
二、测力仪	206	五、光导纤维测温技术	253
三、称重	210	思考题	257
第三节 力矩的测量	215		

习题	257	四、电化学测试技术	301
第十章 流量的测量	259	五、室内空气的监测	302
第一节 概述	259	六、PM _{2.5} 检测介绍	305
一、流量的概念	259	第四节 水污染的监测	306
二、流量计的分类	259	一、概述	306
第二节 总量测量仪表	261	二、原子吸收光谱法及其应用	309
一、椭圆齿轮流量计	261	三、色谱法原理及其应用	310
二、腰轮流量计(罗茨流量计)	262	四、质谱法原理及其应用	315
三、容积式流量计的误差	262	五、联用技术	317
第三节 差压式流量计	262	思考题	321
一、差压式管道用流量计	262	习题	322
二、差压式明渠流量计	265	第十二章 现代测试系统	323
第四节 流体阻力式流量计	266	第一节 概述	323
一、转子流量计	266	第二节 智能仪器	323
二、靶式流量计	268	第三节 虚拟仪器	324
第五节 测速式流量计	269	一、基本概念	324
一、电磁流量计	269	二、虚拟仪器的组成	325
二、涡轮流量计	271	三、虚拟仪器应用举例	327
三、超声波流量计	272	第四节 网络化仪器和网络化传感器	328
第六节 振动式流量计	274	一、网络化测试技术	328
第七节 质量流量计	276	二、网络化测试系统的组成	328
一、直接式质量流量计	277	第五节 微型仪器	330
二、推导式质量流量计	278	第六节 综合测控系统	330
思考题	280	第七节 工程应用实例	332
习题	280	一、电梯导轨多参数测量系统	333
第十一章 环境量的测量	281	二、海底敷缆测量系统	334
第一节 概述	281	三、管道缺陷的漏磁检测系统	336
一、环境量和环境检测	281	四、端面摩擦磨损试验机	337
二、环境检测的特点	281	五、计算机辅助水泵试验测试系统	338
三、环境检测的方法	282	六、基于数字图像分析的深孔表面质量 检测系统	339
第二节 噪声的测量	283	七、大型电力变压器综合在线监测 系统	340
一、测量项目和评价参数	284	八、海洋浮标	340
二、测量仪器	288	思考题	341
三、噪声的测量方法	291	习题	341
第三节 大气污染的监测	292	参考文献	343
一、大气污染形式和监测项目	293		
二、大气监测原理和方法	294		
三、光谱测试技术及仪器	296		

第一章 绪 论

第一节 检测的基本概念

一、检测的地位与作用

世上万物千差万别，含有大量的信息。无论是现代化大生产、科学研究，还是人们的日常生活、医疗保健、所处环境，无不包含着大量的有用信息。正像物质和能源是人类生存和发展所必需的资源一样，信息也是一种不可缺少的资源。物质提供各种各样有用的材料；能源提供各种形式的动力；而信息向人类所提供的则是无穷无尽的知识与智慧。信息化是当今社会的一大特征，检测技术作为信息科学的一个分支起着越来越重要的作用。我国著名科学家钱学森院士指出：“新技术革命的关键技术是信息技术。信息技术是由测量技术、计算机技术、通信技术三部分组成，测量技术是关键和基础。”因为检测技术除了能为相关学科分支提供所需的信息原材料外，它本身也融信息的采集、调理、处理、控制与输出为一体，形成完整的测控系统及仪器设备，以满足越来越多和越来越高的需求。例如，在工业生产中对产品质量的控制，在科学研究中对未知世界的探求，在生物医学工程中对人体生命活动的监视和诊断，在人类赖以生存的外部世界内对环境和各类设施的监测和控制，以及在对航天飞机、飞船、人造卫星、导弹等空间领域的开发利用方面，都离不开检测技术。信息工业的要素包括信息的获取、存储、处理、传输和利用，而信息的获取主要是靠仪器仪表来实现。检测技术是信息工业的基础。如果获取的信息是错误的，那么对其后续的存储、传输、处理等进一步操作都是毫无意义的。没有现代化的检测技术，也就没有现代化的生产和现代化的社会生活。检测和控制更是密不可分的，检测是控制的前提条件，而控制又是检测的目的之一。所以，仪器仪表是信息产业的一个重要组成部分，是信息工业的源头，被誉为工业生产的“倍增器”，科学研究的“先行官”，军事上的“战斗力”，社会上的“物化法官”，遍及“农轻重、海陆空、吃穿用”各个领域，是一个国家科技水平和综合国力的重要体现，应予以高度重视和大力发展。

二、检测系统的基本组成

顾名思义，检测技术包含着“检”和“测”两个内容。“检”就是力图发现被测对象中的某些待测量并以信号形式表示出来，它是在所用技术能及的范围内回答“有无”待测量的操作；“测”则是将待测量的信号加以量化，是以一定的精确度回答待测量“大小”的问题。工程中，“检测”被视为“测量”的同义词或近义词。国家标准对测量定义为：测量是指以确定对象属性和量值为目的的全部操作。

一个完整的检测系统除“检”和“测”的基本功能外,还应该对检测过程的操作控制、数据的传输和分析处理等环节。也就是说,检测系统一般应包括:

信息的提取——用传感器来完成。信号是信息的载体。一般将被测信息转换成电信号,即把被测信息转换成电压、电流、频率等电信号输出。

信号的转换存储与传输——用中间转换装置来完成。一般是把信号转换成传输方便、功率足够,可以被传输、存储、记录并具有驱动能力的电压量,或将这个电压量转换为数字量以供后续数字化设备所需。

信号的显示和记录——用显示器、指示器、各类磁或半导体存储器和记录仪完成。

信号的处理和分析——用数据分析师、频谱分析师、计算机等来完成。找出被测信息的规律,给出测得信息的精确度,为研究和鉴定工作提供有效依据,为控制提供信号。如今,一些单一功能的仪器可通过计算机软件来取代或方便组合,构成“虚拟仪器”。不断发展完善的分析理论和算法能将深藏在紊乱、微弱信号中的有用信息挖掘整理显露出来。图 1-1 为一个典型的检测系统框图。

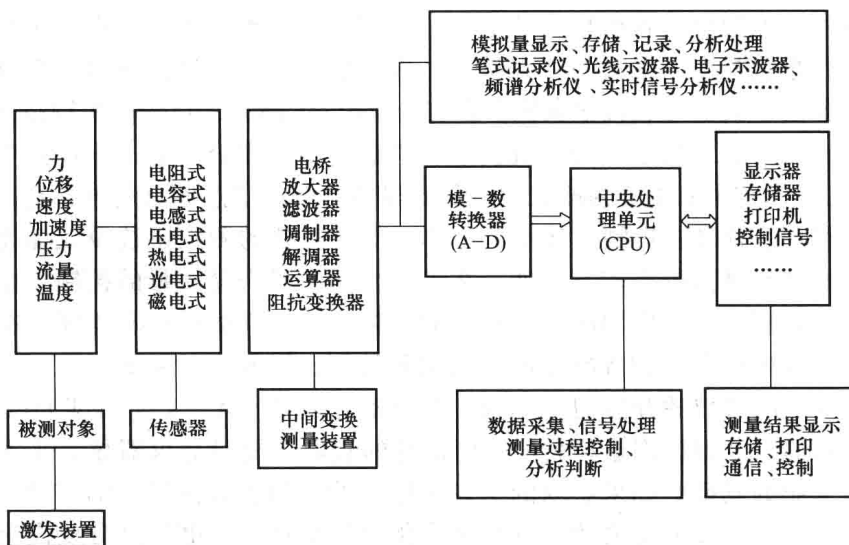


图 1-1 典型测试系统框图

综上所述,检测技术归纳起来,有如下三种功能:

- 1) 被测对象中参数测量功能。
- 2) 过程中参数监测控制功能。
- 3) 测量数据分析、处理和判断功能。

三、单位制

测量是人们对客观事物取得定量认识的一种手段。用以定量表示同类量量值而约定采用的那个已知特定量被称作该类的计量单位。例如,将“秒”作为“时间量”的计量单位。按类似约定规则确定的一套完善的制度及其全部单位的总体,称为计量单位制。最普遍使用的是国际单位制,它是在 1960 年第十一届国际计量大会(CGPM)上通过的,用

符号“SI”(Standard International)表示。

(一) 国际单位制的构成

国际单位制由基本单位及补充单位、导出单位、倍数单位三大块组成，如图 1-2 所示。

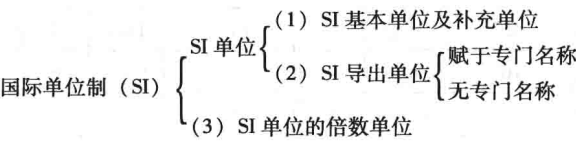


图 1-2 国际单位制的组成

(1) SI 基本单位、补充单位 SI 基本单位共有 7 个，补充单位共有两个，如表 1-1 所示。

表 1-1 基本单位及补充单位

量	单位名称和符号	量	单位名称和符号
基 本 单 位		基 本 单 位	
长度	米(m)	物质的量	摩尔(mol)
质量	千克(kg)	发光强度	坎德拉(cd)
时间	秒(s)	补 充 单 位	
电流	安培(A)	平面角	弧度(rad)
热力学温度	开尔文(K)	立体角	球面弧度(sr)

(2) SI 导出单位 由 SI 基本单位及补充单位通过选定的公式而导出的单位。其主要有两种，一种是有专门名称和符号的，一般是以科学家名字命名的，如表 1-2 所示；另一种是以基本单位、补充单位、导出单位等组合而成的，不具有所赋予专门符号的常用导出单位，如表 1-3 所示。

表 1-2 导出单位及其被赋予的专门符号

量	单位	符号	公 式	量	单位	符号	公 式
电容	法拉	F	C/V	频率	赫兹	Hz	1/s
电导	西门子	S	A/V	磁通量	韦伯	Wb	V · s
电感	亨利	H	Wb/A	磁通密度	特斯拉	T	Wb/m ²
电势(电压)	伏特	V	W/A	功率	瓦特	W	J/s
电阻	欧姆	Ω	V/A	压强、压力	帕斯卡	Pa	N/m ²
能量(功、势量)	焦耳	J	N · m	电荷量	库仑	C	A · s
力	牛顿	N	kg · m/s ²				

表 1-3 不有所赋予专门符号的常用导出单位

量	公 式	量	公 式	量	公 式
加速度	m/s ²	密度(质量)	kg/m ³	速度	m/s
角加速度	rad/s ²	密度(能量)	J/m ³	(绝对)黏度	Pa · s
角速度	rad/s	热通量	W/m ²	体积	m ³
面积	m ²	力矩	N · m		



(3) SI 单位的倍数单位 SI 单位词头前冠以十进制倍数或分数代号以扩大或缩小原有单位，成为 SI 单位的倍数单位，如表 1-4 所示。

表 1-4 倍数单位前缀

倍数和分数	前缀	符号	倍数和分数	前缀	符号	倍数和分数	前缀	符号	倍数和分数	前缀	符号
10^{18}	Exa	E	10^6	Mega	M	10^{-1}	Deci	d	10^{-9}	Nano	n
10^{15}	Peta	P	10^3	Kilo	k	10^{-2}	Centi	c	10^{-12}	Pico	p
10^{12}	Tera	T	10^2	Hector	h	10^{-3}	Milli	m	10^{-15}	Femto	f
10^9	Giga	G	10	Deka	da	10^{-6}	Micro	μ	10^{-18}	atto	a

(二) 我国的法定计量单位

我国的法定计量单位是以国际单位制为基础，根据我国的实际情况，适当增加了一些其他单位而构成的，如表 1-5 所示。

表 1-5 国家选定的非国际单位制单位

序号	量的名称	单位名称	单位符号	序号	量的名称	单位名称	单位符号
1	时间	分	min	5	速度	节	kn
		[小]时	h	6	质量	吨	t
		日(天)	d			原子质量单位	u
2	平面角	[角]秒	($''$)	7	体积	升	L(l)
		[角]分	($'$)	8	能	电子伏	eV
		度	($^{\circ}$)	9	级差	分贝	dB
3	旋转速度	转每分	r/min	10	线密度	特[克斯]	tex
4	长度	海里	n mile	11	面积	公顷	hm ²

四、量值的传递与溯源

(一) 量值的传递

任何计量器具，都具有不同程度的误差，必须用适当等级的计量标准进行周期检定，以保证其误差在允许的范围之内。

将国家计量基准所复现的计量单位量值，依次逐级传递给下一等级的计量器具。这一过程称为量值传递。这种自上而下的活动带有强制性。

(二) 量值的溯源

量值的溯源是从下而上，主动地由基层企业根据测量准确度的要求，自主地寻求具有较佳不确定度的参考标准进行测量设备的校准，甚至与国家或国际的计量基准进行比对和校准。这种自下而上的活动则是量值传递的逆过程。

正常运行的量值传递和溯源是正常生产和质量保证的前提。

第二节 检测技术研究的主要内容

为实现对某一特定量的检测，需要涉及测量原理、测量方法、测量系统和测量数据处

理等。测量原理是指实现测量所依据的物理、化学、生物等现象与有关定律的总体,例如热电偶测温时所依据的热电效应,压电晶体测力时所依据的压电效应,激光测速时所依据的多普勒效应等。一般说来,对应于任何一个信息,总可以找到多个与其对应的信号;反之,一个信号中也往往包含着许多信息。这种信息、信号表现形式的多样化给检测技术的发展提供了广阔的天地。对于一个量的测量可通过若干种不同的测量原理来实现。发现与应用新的测量原理,从事相应传感器的开发研究是检测工程技术人员最富有创造性的工作,选择合适的、性价比好的测量原理也是测试人员最为日常的工作。要选择好的测量原理,必须充分了解被测量的物理化学特性、变化范围、性能要求、成本开销、设备条件和外界环境等。这些都要求检测工程技术人员知识面广,具有扎实的基础理论、专业知识和优良的实践动手能力及创新意识。

测量方法是指测量原理确定后,根据测量任务的具体要求所采用的不同策略,有电测法或非电测法、模拟量测量法或数字量测量法、单次或多次测量、等精度或不等精度测量、直接测量或间接测量法,偏差测量法或零位测量法等。确定了测量原理和测量方法,便可着手设计或选用各类装置组成测量系统,并对测量数据进行必要的整理加工、分析处理,得出符合客观实际的结论。

第三节 本课程的任务以及与其他课程的关联

检测技术是一门综合性技术。现代检测系统常常是集光机电于一体的、软硬件相结合的、具有智能化和自动化的系统,甚或虚拟化、网络化的系统。它涉及传感器技术、电子技术、光电技术、控制技术、计算机技术、数据处理技术、精密机械设计技术等众多基础理论和基础技术。

本课程是在修完各类相关技术基础课程后进行的专业教学课程。本课程着重培养学生灵活、合理应用所学的基础技术知识,全面考虑精度、稳定性、经济性、可行性、寿命、使用维修方便性与环境适应性等方面的各种要求,从选择、发现测量原理、测量方法入手,设计开发各类测量系统;或掌握现有检测仪器设备的性能,并合理选用;对测量值进行误差分析、验证并加以控制。可以说,对本课程掌握的程度在很大程度上能反映出一个测控技术人员的综合业务能力。

人类历史上很早就有关于测量仪器的记载,现代测量仪器更是种类繁多。本课程不可能也没有必要对测量仪器作产品式的认知学习,而是围绕对典型被测量所用的典型原理、方法系统展开讨论,归纳出检测技术的一些共同的基本原理和特性,以便举一反三、灵活应用,激发学生获取新知识的进取精神和探索新领域的创新意识,为培养宽厚型、复合型、开放型、创新型的高层次、高水平、高素质优秀人才的总目标而努力。

总之,通过本课程的学习,要求学生能做到:

- 1) 掌握常用检测技术的基本理论。
- 2) 熟练掌握各类典型传感器的基本原理、适用范围和工程应用。
- 3) 提高可持续发展的自学能力和自主创新的开拓精神。
- 4) 具有检测系统的机、电、计算机方面的总体设计能力和技术开发、实践动手



能力。

5) 具有实验数据处理和误差分析能力。

第四节 检测技术的发展方向

现代科学技术的迅猛发展为检测技术的进步和发展创造了条件。同时,也不断地向检测技术提出更新更高的要求。尤其是计算机技术、微电子技术和物理、化学基础学科成果的不断涌现,使得检测技术和仪器仪表得到了划时代的进步和发展。将测量和控制自然地组合在一起的“测控技术与仪器”专业近十多年来以异乎寻常的速度向前发展,受到普遍的欢迎。可以预见,伴随着我国由制造大国向制造强国发展的步伐,这种发展趋势将变得越来越强劲。

测试仪器仪表近 20 年来发展的突出特点是向着智能仪器、虚拟仪器和网络化仪器及远程测控方向发展,计算机视觉检测技术近年来也受到极大的关注。

对智能仪器的认识已从过去宣传广告般的将具有少许校正、补偿功能的计算机化仪器号称为智能仪器这种状态中解放出来,而是将人工智能的理论、方法和技术较大范围地应用于仪器,使其具有类似于人类智能化的特性或功能。智能仪器中一般都使用嵌入式微处理器系统芯片(SOC)、数字信号处理器(DSP)、专用电路(ASIC)或可编程逻辑门阵列(如PLD、CPLD、FPGA等),带有处理能力很强的软件,具有采集信息、与外界对话、记忆存储、处理信息、输出控制信息、自检自诊断、自补偿自适应、自校准、自学习等功能。

虚拟仪器概念的引入使传统仪器仪表的面貌发生了革命性的变化。“软件就是仪器”已成为现实,应用图形化编程语言 LabVIEW、LabWindows、CVI、VEE 等开发软件,用户可以自己定义自己的仪器,方便地创建仪器软面板,或通过 VXI、PXI、PCI 仪器总线自由地将各测试模块组合成完整的测试系统,或将 GPIB、RS-232 等接口的传统仪器自由组合起来,从而大大扩展了仪器的功能,节省了不少硬件资源。

网络技术大大缩小了时间和空间领域,人类所居住的地球好像成了一个小村落,世界上所发生的事情好像就在街坊邻里间。网络化仪器则把远在千里的测控任务犹如放在本实验室进行。现场网络化、智能化仪器(或传感器)通过嵌入式 TCP/IP 软件,使它们与计算机一样,成为网络中独立的结点,用户可通过浏览器或符合规范的应用程序即可实时浏览这些测试信息。无线传感器网络具有自组网的能力,使散布的各别检测节点能灵活地根据现场情况组合起来,发挥群体的优势。

作为制造业升级的“工业 4.0”是一个灼热的关键词,它的最大价值在于整个产业链上实现彻底的信息化,使制造业从需求、设计、制造、销售、运行、服务等诸环节组成一个完整的产业生态链,实现工业化与信息化的“两化融合”。

机器视觉检测技术之所以得到了快速发展,是因为视觉是一个有待于进一步开发的巨大的信息资源宝库。因为人们从外界所获取的信息有一半以上是由视觉获得的,即视觉大约占 60%,听觉占 20%,触觉 15%,味觉 3%,嗅觉 2%。机器视觉就是用机器代替人眼来做测量和判断,它起步于 20 世纪 80 年代,经历了从黑白图像到彩色图像、模拟到数字、二维到三维,图像处理、图像识别(模式识别)到图像理解(景物分析)的不同层

次的发展。根据这几年的发展来看,图像传感技术的不断更新与提高在其中起着至关重要的作用。例如,基于 MOS 工艺的 CCD 图像传感器多年来一家独大的局面也在相当大的程度上由性能上各有千秋的 CMOS 图像传感器所打破;同时,采用非晶硅或非晶硒的平板图像探测器的中技术(Digital Radiography, DR)已成为对结构内部缺陷、复合材料图像无损检测领域的新宠。与此同时,嵌入式系统也将扮演越来越重要的角色。

作为检测技术的一个重要分支,无损检测在航空、航天、船舶、石化等领域有着特别广泛的应用,除了很常见的超声、磁学、X 光技术外,激光散斑技术、DR 技术、激光扫描雷达等也纷纷引入到检测领域。

微纳米检测(包括 MEMS 检测、纳米检测)已成为一种前沿的检测技术并引起了广泛的关注。它对微纳米技术的发展起着极其关键的支撑作用。由于 MEMS 具有结构尺寸小、集成度高等特点,纳米技术更是集中于纳米尺度上的操作、分析,当尺寸缩小到一定范围时,许多物理现象将与宏观世界有很大差别,包括尺度效应和表面效应、微流体力学、微观力学和热力学、微机械特性和微摩擦学、微光学等。因此,传统的精密检测技术与方法已不能完全满足需要,一些新型的检测手段的研究开发是摆在检测工作者面前的一个迫切任务。目前,隧道扫描显微镜、原子力显微镜、近场光学显微镜等已进入微纳米检测领域,更令人欣喜的是,2014 年诺贝尔奖颁给了美国、德国的三位科学家,他们发展了超分辨率荧光显微技术,突破了沿袭一百多年的显微镜分辨率极限,使得对活体细胞内部的蛋白质、DNA 等有机分子的观察成为可能。另一方面,微纳米技术的进步所提供的微型构件、微型驱动器、微型传感器和微型执行器等基础元件,给仪器仪表的微型化、集成化创造了有利条件。检测工作者应该时刻掌握这些新技术发展的动态,及时应用和开发这些新技术的成果。

从仪器仪表本身的角度看,微型仪器也是人们长期追求的目标。至今,这个梦想已部分地成为现实:掌上式频率计和频谱分析仪早已面市,手提式血液分析系统已可取代一大套大型生化仪器,手提式微金属检测仪可方便地检测水质等。用于元素分析的质谱仪按理说是一台庞大的设备,它应具有真空、电离、探测等许多部分,但目前已做得如台式计算机般大小,并已着手向手提式方向发展。这些都得益于计算机技术、微电子技术、表面封装技术、信号处理技术、微机械技术的长足进步。

云计算是互联网发展的新阶段。云计算是以虚拟化技术为基础、以按需付费为商业模式,具备弹性扩展、动态分配和资源共享等特点的新型网络化计算模式。在云计算模式下,软件、硬件、平台等 IT 资源将作为基础设施,以服务的方式提供给使用者。

云计算把信息变成了像水和电一样,任何时候、任何地点用户都可以随用随取。正像早期的电力供应是每个建筑自己发电,而现在则是电网发电,插上插头就可以用电。有观点认为,下一个十年里,计算将由‘端’走向‘云’,最终全部聚合到云中,成为纯‘云’计算的时代。国家确定了 10 项典型应用示范工程“十朵云”:工业云、金融云、科技云、电力智能云、中小企业云等面向不同行业领域的“专业云”和政务云、教育云、健康云、交通云、文化云等“民生云”。这种发展趋势必将对仪器仪表产生重大的影响。例如,可以应用“仪表云”实现无线传感器之间的连接。

同样地,随着计算机技术、信号分析处理技术和检测理论的发展,软测量技术(Soft

Sensor Technology) 及其应用也常见于文献、刊物、报端。这是利用易测参量与难以直接测量的参量之间的数学关系,通过数学计算和方法估计,在测定易测量的基础上实现对待测量的测定。其实质是基于间接测量的思想,是对传统意义上的间接测量的扩展。它不仅有助于检测由于技术或经济等方面的原因造成的难以直接测量的参量,扩大测量范围,而且可以更深刻地发掘包含在测得的信号中的丰富信息,如被测对象的二维或三维空间、时间的分布信息、状态估计、诊断和趋势分析信息等。同时,软测量技术能为测量系统的动态校准及动态特性改善提供一种有效手段,对测量系统进行误差补偿、误差分离,提高测量系统的精度和可靠性。软测量技术的关键是建立表征辅助变量(易测变量)与主导变量(难以直接测量的待测变量)之间数学关系的软测量模型。按建立数学模型的方法不同,可将软测量技术分为机理建模、回归分析、状态估计和辨识、模式识别、人工神经网络、模糊数学、相关分析、过程层析成像、非线性处理(小波分析、混沌和分形技术等)。目前,这些理论和方法已越来越完善,并开发了许多相应的“软仪器”。

宇宙是无限的,因此人类认识世界、改造世界的目标是无止境的。随之,测控技术面临的挑战也是不间断的。这些挑战可概括为:

(1) 测量精度向亚纳米级、纳米量级挺进 例如,发现石墨烯的英国曼彻斯特大学安德烈·海姆(Andre Geim)和康斯坦丁·沃肖洛夫(Knstantin Novoselov)获2010年诺贝尔物理学奖,引起世界轰动。石墨烯这种材料的厚度仅为0.335nm,它比钻石还硬,比最好的钢铁强100倍。时隔不久,2012年中、美科学家又发现了一种超越石墨烯的神奇新材料——铋锑合金,被认为有望成为未来产业革命的基础。一旦这种材料制成计算机芯片,其速度会比现有的硅芯片快很多倍,电子在这种材料中的传播速度将比在硅中快几百倍。将来,基于这些材料的微器件制造、测试都有赖于纳米领域的检测技术。新发现、新发明、新技术的这种异乎寻常快的发展节奏是对我们的极大激励与挑战。

(2) 测量尺度向大、极大尺寸发展 如航天航空、船舶制造领域,测量的对象是庞然大物,就其制造的相对精度而言是个很高的要求,如船舶、飞机为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$,空间探测为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 数量级。

(3) 测量条件向复杂化、极端化方向发展,在非传统领域的应用发展更迅猛。上天、入地、下海,全方位地向未知世界进发,是一个大国对人类的贡献,同时也是个艰巨的任务。例如,对于地球的深入研究,至今仍保持的钻探深度记录为12.26km(前苏联),仅相当于地球半径的0.2%;如果再想向地心深入,其难度可想而知。

海洋不仅是重要的航运通道,又是一个潜在的资源宝库,但人们对海平面2000m以下有太多未知,人类对深海海底的了解,还不如对月球、火星表面了解得多。海底最深处为11034m(西太平洋马里亚纳群岛东南侧),我国蛟龙号(载人)设计深度为7000m(2010年8月26日已达3759m,2011年7月26日达5038.5m,2012年6月27日潜至7062m马里亚纳海沟)。海洋是一个巨大的天然资源宝库,例如新发现的天然气水合物“可燃冰”中碳的储量据估计超过目前全部矿物燃料的总和,有希望成为未来能源的主体。

上述仪器仪表发展的总趋势,今后将变得更快、更深、更广。

我们的祖先在科学仪器的发展创造方面有过辉煌的历史,无论在度量衡、计时,还是