



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
国家精品课程教材  
强化工程教育和“学思交融”深度学习模式特色教材

# 传感器与检测技术

第3版

Sensor and Detection  
Technology

胡向东 等编著



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  
国家精品课程教材  
强化工程教育和“学思交融”深度学习模式特色教材

# 传感器与检测技术

第3版

胡向东 李锐 徐洋 编著  
耿道渠 朴昌浩 白银

常州大学图书馆  
藏书章



机械工业出版社

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、国家精品课程教材。本书瞄准新时期传感器与检测技术系统性领域知识构建、素质提升和能力发展的现实需求,力争精准地介绍传感器与检测技术的基础概念、基本原理、典型应用和技术发展。传感器原理、检测技术与检测系统三大模块涵盖:概述、传感器的基本特性、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、热电式传感器、光电式传感器、辐射与波式传感器、化学传感器、生物传感器、新型传感器;参数检测、微弱信号检测、软测量、多传感器数据融合、误差理论与数据处理基础;虚拟仪器、自动检测系统。本书体系结构合理,逻辑清晰,内容新颖,重点突出,工程性强,资源丰富,形式上追求贯穿学习过程的目标导向、问题牵引与“学思交融”深度学习模式,内容上注重经典知识与前沿技术的结合,目标上强调新工科背景下的工程实践应用与创新性思维。

本书体现了以学习者为中心、突出工程教育、好学易用的写作定位;可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、机器人工程、电子信息工程、物联网工程、智能电网信息工程、车辆工程、交通工程、计算机科学与技术、应用物理学等专业本科生教材,也可供从事传感器与检测技术相关领域应用和设计开发的研究人员、工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/胡向东等编著. —3版. —北京:机械工业出版社, 2018.3

国家精品课程教材 强化工程教育和“学思交融”深度学习模式特色教材 “十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-111-58771-2

I. ①传… II. ①胡… 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(2018)第032569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:于苏华 责任编辑:于苏华 王康

责任校对:张征 樊钟英 封面设计:鞠杨

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018年5月第3版第1次印刷

184mm×260mm·28.5印张·691千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58771-2

定价:63.00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

“学而不思则罔，思而不学则殆”

本书的基本遵循：

“注重依托优质学习资源，优化知识路径，深度学习模式启发心智，培养学生学习发展、创新性思维、适应智能感知与仪器工程要求的关键能力”

本书是：

- ◇ 国家精品课程教材
- ◇ “十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
- ◇ 重庆市精品资源共享课教材
- ◇ 重庆市普通高等教育本科“十二五”规划教材
- ◇ 强化工程教育和“学思交融”深度学习模式特色教材

本书所服务的新工科专业包括：

- ◇ 国家级特色专业
- ◇ 教育部卓越工程师培养计划入选专业
- ◇ 测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化等面向智能制造的专业
- ◇ 物联网工程、机器人工程、智能电网信息工程等面向战略性新兴产业的专业

本书的特色：

- ◇ 理念新：体系结构优化、内容新颖、重点突出、工程性强、资源丰富，体现以学习者为中心、突出工程教育、好学易用的写作定位
- ◇ 目标新：强调新工科背景下的工程实践应用与创新性思维
- ◇ 内容新：注重经典知识与前沿技术的结合
- ◇ 形式新：追求贯穿学习过程的目标导向、问题牵引与“学思交融”深度学习模式

# 前 言

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、国家精品课程教材。本书第1版（2009年）、第2版（2013年）先后被国内百余所不同层次和类别的高校选用，教学资源被全国近千名任课教师共享，覆盖面不断扩大；其内容体系优化更新源于国内外高等教育的发展大势、国家精品课程建设的经验积累、长期的课程教学实践和持续改进，并得益于一批教改研究成果的应用推广及教材等课程教学资源使用者的意见反馈。

“工业4.0”“中国制造2025”“互联网+”等发展战略正前所未有地推进信息化与工业化深度融合，重构新时代人们的工作模式、生活范式和思维方式。先进的信息技术成为引领和衡量社会迈向高度现代化的支撑性技术之一，传感器与检测技术位于信息链之首，是泛在感知、智能制造等的基石，助推信息技术成为不同对象相互交叉、联结、融合和涌现的内生动力，新技术、新产业、新业态、新模式层出不穷，以融合创新为核心特征的数字经济与新经济呼唤“新工科”建设，传感器与检测技术被赋予新的、更加伟大的历史使命，便捷、可靠、智能、安全地获取、处理与应用信息，推动建立人机网互联融合的数字化智慧型社会成为新的发展趋势，以进一步解放生产力、提高工作效率、促进人的创造性劳动，满足人民日益增长的美好生活需要。我国政府高度重视仪器仪表产业发展，紧紧抓住第三次信息技术浪潮和第四次工业革命的历史机遇，力推智能感知、物联网、大数据、人工智能、机器人、网络安全等战略性新兴产业；传感器与检测技术有关内容被列入国家中长期科技发展规划“重点领域及其优先主题”，我国仪器仪表产业的一系列战略目标正在实现，仪器科学与技术的研究与产业取得了重大进展，在仪器仪表产品无线化、微型化、集成化、网络化、智能化、安全化、虚拟化等方向紧跟国际发展步伐，并加大具有自主知识产权的先进仪器仪表研制力度。新经济的发展、产业的升级、技术的演进、应用的研发、仪器的使用与维护等需要大批高素质创新型人才为支撑；与此同时，它们也对人才培养的内容和目标提出了与时俱进的新要求，“注重依托优质学习资源，优化知识路径，深度学习模式启发心智，培养学生学习发展、创新性思维、适应智能感知与仪器工程要求的关键能力”是本书的基本遵循。

本书探索进入传感器与检测技术教材改革与建设的“深水区”与“无人区”，顺应与信息技术深度融合的智能检测技术与仪器发展趋势，瞄准新时期传感器与检测技术系统性领域知识构建、素质提升和能力发展的现实需求，力争精准地介绍传感器与检测技术基础概念、基本原理、典型应用与技术发展。传感器原理、检测技术与检测系统三大模块涵盖：概述、传感器的基本特性、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、磁敏式传感器、热电式传感器、光电式传感器、辐射与波式传感器、化学传感器、生物传感器、新型传感器；参数检测、微弱信号检测、软测量、多传感器数据融合、误差理论与数据处理基础；虚拟仪器、自动检测系统。本书体系结构合理，逻辑清晰，内容新颖，重点突出，工程性强，资源丰富，形式上追求贯穿学习过程的目标导向、问题牵引与基于PBL（Problem-





Based Learning) 的“学思交融”深度学习模式,内容上注重经典知识与前沿技术结合,目标上强调新工科背景下工程实践应用与创新性思维。

本书体现以学习者为中心、突出工程教育、好学易用的格局和写作定位,以编写国内一流的传感器与检测技术特色教材为目标。在第2版基础上强化了工程内涵、领域前沿、交流与微思考和创新性思维训练,新增了质疑、工程案例详解、学习拓展与探究式研讨、复杂工程问题实践、学习收获与反思等,突出工程教育和产出导向(Outcomes-Based Education, OBE)理念;每一章都首先给出导学内容,列出本章的知识单元与知识点、能力点、重难点、学习要求和问题导引,彰显教学目标与教材内容的高度统一性,明确学习者的努力方向,强化对自主学习的引领。本书有丰富的优质学习资源支持,配有PPT演示文稿、Flash动画课件、微视频、习题库、试题库、课后习题参考答案(完全版)和精品资源共享课网站等,提供课内学习与课外拓展、课程学习与自评自测相结合的集成学习平台,更多信息请访问机械工业出版社学习考试网:<http://bkks.cmpedu.com>和微信公众号“传感器与检测技术精品资源课程”。

本书可作为高等院校测控技术与仪器、自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化、机器人工程、电子信息工程、物联网工程、智能电网信息工程、车辆工程、交通工程、计算机科学与技术、应用物理学等专业本科生教材,也可供从事传感器与检测技术相关领域应用和设计开发的研究人员、工程技术人员参考。

本书由胡向东、李锐、徐洋、耿道渠、朴昌浩、白银编著,程安宇、陈勇、向敏、蔡军、罗萍、陈功贵等参加了资料的搜集、案例的撰写或修改意见的提供;李仁杰、许奥狄、钱宏伟、郭佳、周巧、陈兆涛、王见、李汀等研究生参与了部分书稿的资料整理、图表绘制等工作;胡向东负责全书的统稿。特别感谢清华大学王俊杰教授,天津大学曾周末教授、靳世久教授,上海交通大学蔡萍教授、田作华教授,西安交通大学韩九强教授,电子科技大学陈光祜教授,重庆大学王代华教授、刘京诚教授、石为人教授,东南大学周杏鹏教授,燕山大学侯培国教授,北京交通大学曾国宏教授,重庆理工大学余成波教授和重庆邮电大学林金朝教授、刘宴兵教授、胡学刚教授等在课程和教材建设与改革过程中给予的指导、支持和帮助,以及参考文献中所列各位作者,包括众多未能在参考文献中一一列出的作者,正是因为他们在各自领域的独到见解和特别的贡献,为编著者提供了宝贵而丰富的参考资料,才能够在总结现有成果基础上,汲取各家之长,不断凝练提升,最终形成这本国家级规划教材的迭代更新版。

本书的编著受到重庆市高等教育教学改革研究重点课题(162022)、国家级新工科研究与实践项目、教育部-中国移动基金项目(MCM20150202)、重庆市巴渝学者计划(精密仪器与机械学科)、重庆市教委科学技术研究项目(KJ1602201)等的资助。机械工业出版社的编辑为本书的高质量出版付出了辛勤劳动,在此一并表示衷心感谢。

传感器与检测技术内容丰富、应用广泛、发展快速,新工科时代的教材内涵建设任重道远;本书的再版体现我们在此领域的最新努力,其间融入了“立德树人、执着育才、锤炼精品、共享教育”的情怀。限于自身的水平和学识,书中难免存在疏漏和错误之处,诚望读者不吝赐教,以利修正,让更多的读者获益。编著者电子邮箱:[huxd@cqupt.edu.cn](mailto:huxd@cqupt.edu.cn)。

编著者

2018年1月于重庆南山(文峰书院)

# 目 录

## 前 言

## 上篇 传感器原理

<b>第1章 概述</b> .....	<b>1</b>	2.2.2 传递函数 .....	27
1.1 课程简介 .....	1	2.2.3 频率响应函数 .....	28
1.1.1 本课程的地位和作用 .....	1	2.2.4 传感器的动态特性分析 .....	28
1.1.2 本课程的内容体系 .....	4	2.3 传感器的标定与校准 .....	32
1.1.3 本课程的任务及目标 .....	5	2.3.1 静态标定 .....	32
1.2 传感器的定义与组成 .....	7	2.3.2 动态标定 .....	33
1.3 传感器的分类 .....	9	学习拓展与探究式研讨 .....	33
1.4 传感器技术的发展 .....	12	习题云 .....	34
1.4.1 提高与改善传感器的性能 .....	12	<b>第3章 电阻式传感器</b> .....	<b>35</b>
1.4.2 开展基础理论研究 .....	13	3.1 工作原理 .....	36
1.4.3 传感器的无线化 .....	16	3.1.1 应变效应 .....	36
1.4.4 传感器的微型化 .....	16	3.1.2 电阻应变片种类 .....	37
1.4.5 传感器的集成化 .....	17	3.1.3 电阻应变片温度误差及其 补偿 .....	39
1.4.6 传感器的网络化 .....	17	3.1.4 工程测试中的注意事项 .....	42
1.4.7 传感器的智能化 .....	18	3.2 测量电路 .....	42
1.4.8 传感器的安全化 .....	19	3.2.1 直流电桥 .....	43
1.4.9 传感器的虚拟化 .....	20	3.2.2 交流电桥 .....	46
学习拓展与探究式研讨 .....	20	3.3 典型应用 .....	49
习题云 .....	20	3.3.1 电阻式力传感器 .....	49
<b>第2章 传感器的基本特性</b> .....	<b>22</b>	3.3.2 电阻式压力传感器 .....	52
2.1 传感器的静态特性 .....	23	3.3.3 电阻式差压传感器 .....	53
2.1.1 线性度 .....	23	3.3.4 电阻式液体重量传感器 .....	54
2.1.2 灵敏度 .....	23	3.3.5 电阻式加速度传感器 .....	55
2.1.3 分辨率 .....	24	学习拓展与探究式研讨 .....	56
2.1.4 迟滞 .....	25	复杂工程问题实践 .....	56
2.1.5 重复性 .....	25	习题云 .....	56
2.1.6 漂移 .....	25	<b>第4章 电感式传感器</b> .....	<b>58</b>
2.2 传感器的动态特性 .....	25	4.1 变磁阻电感式传感器（自感式） .....	59
2.2.1 传感器的数学模型 .....	26		



4.1.1 工作原理 .....	59	6.1.1 压电效应 .....	103
4.1.2 输出特性 .....	60	6.1.2 压电材料 .....	104
4.1.3 测量电路 .....	63	6.2 测量电路 .....	109
4.1.4 变磁阻电感式传感器的应用 .....	66	6.2.1 等效电路 .....	109
4.2 差动变压器电感式传感器 (互感式) .....	67	6.2.2 测量电路 .....	110
4.2.1 变隙式差动变压器 .....	67	6.2.3 压电元件的连接 .....	113
4.2.2 螺线管式差动变压器 .....	70	6.3 典型应用 .....	114
4.2.3 差动变压器电感式传感器的 应用 .....	76	6.3.1 压电式力传感器 .....	114
4.3 电涡流电感式传感器(互感式) .....	77	6.3.2 压电式加速度传感器 .....	114
4.3.1 工作原理 .....	77	6.3.3 压电式交通检测 .....	115
4.3.2 等效电路 .....	78	学习拓展与探究式研讨 .....	116
4.3.3 测量电路 .....	79	习题云 .....	116
4.3.4 电涡流电感式传感器的应用 .....	81	<b>第7章 磁敏式传感器</b> .....	<b>117</b>
学习拓展与探究式研讨 .....	82	7.1 磁电感应式传感器 .....	117
习题云 .....	82	7.1.1 工作原理 .....	118
<b>第5章 电容式传感器</b> .....	<b>83</b>	7.1.2 测量电路 .....	122
5.1 工作原理 .....	84	7.1.3 磁电感应式传感器的应用 .....	123
5.1.1 变面积型 .....	86	7.2 霍尔式传感器 .....	125
5.1.2 变介质型 .....	87	7.2.1 工作原理 .....	126
5.1.3 变极距型 .....	89	7.2.2 测量电路 .....	131
5.2 测量电路 .....	92	7.2.3 霍尔式传感器的应用 .....	131
5.2.1 调频电路 .....	92	学习拓展与探究式研讨 .....	133
5.2.2 运算放大器 .....	93	复杂工程问题实践 .....	134
5.2.3 变压器式交流电桥 .....	94	习题云 .....	134
5.2.4 二极管双T型交流电桥 .....	94	<b>第8章 热电式传感器</b> .....	<b>135</b>
5.2.5 脉冲宽度调制电路 (PWM方式) .....	96	8.1 热电偶 .....	136
5.3 典型应用 .....	98	8.1.1 热电偶测温原理 .....	136
5.3.1 电容式压力传感器 .....	99	8.1.2 热电偶的结构与种类 .....	143
5.3.2 电容式位移传感器 .....	100	8.1.3 热电偶的冷端温度补偿 .....	146
5.3.3 电容式加速度传感器 .....	100	8.1.4 热电偶的实用测温电路 .....	148
5.3.4 电容式厚度传感器 .....	101	8.1.5 热电偶的选用与安装 .....	150
学习拓展与探究式研讨 .....	101	8.1.6 热电偶的应用 .....	151
复杂工程问题实践 .....	102	8.2 热电阻 .....	151
习题云 .....	102	8.2.1 铂热电阻 .....	152
<b>第6章 压电式传感器</b> .....	<b>103</b>	8.2.2 铜热电阻 .....	153
6.1 工作原理 .....	103	8.2.3 热电阻的测量电路 .....	154
		8.2.4 热电阻的应用 .....	155
		8.3 热敏电阻 .....	156





8.3.1 热敏电阻的特性 .....	157	10.2.2 微波传感器的应用 .....	233
8.3.2 热敏电阻的应用 .....	158	10.3 超声波传感器 .....	237
复杂工程问题实践 .....	159	10.3.1 工作原理 .....	237
习题云 .....	159	10.3.2 超声波传感器的应用 .....	241
<b>第9章 光电式传感器 .....</b>	<b>160</b>	学习拓展与探究式研讨 .....	249
9.1 概述 .....	161	复杂工程问题实践 .....	249
9.1.1 光电式传感器的类别 .....	161	习题云 .....	250
9.1.2 光电式传感器的基本形式 .....	162	<b>第11章 化学传感器 .....</b>	<b>251</b>
9.2 光电效应与光电器件 .....	163	11.1 气敏传感器 .....	251
9.2.1 外光电效应型光电器件 .....	164	11.1.1 气敏传感器概述 .....	252
9.2.2 内光电效应型光电器件 .....	168	11.1.2 半导体式气敏传感器的工作 原理 .....	255
9.3 CCD 固体图像传感器 .....	181	11.1.3 气敏传感器的应用 .....	259
9.3.1 CCD 的工作原理 .....	181	11.2 湿敏传感器 .....	261
9.3.2 CCD 固体图像传感器的分类 .....	184	11.2.1 湿敏传感器概述 .....	261
9.3.3 CCD 图像传感器的特性参数 .....	186	11.2.2 常用湿敏传感器的基本原理 .....	263
9.3.4 CCD 固体图像传感器的应用 .....	188	11.2.3 湿敏传感器测量电路 .....	267
9.4 光纤传感器 .....	193	11.2.4 湿敏传感器的应用 .....	268
9.4.1 光纤 .....	193	学习拓展与探究式研讨 .....	270
9.4.2 光纤传感器 .....	196	复杂工程问题实践 .....	270
9.4.3 光纤布拉格光栅 .....	198	习题云 .....	270
9.4.4 光纤传感器的应用 .....	201	<b>第12章 生物传感器 .....</b>	<b>271</b>
9.5 光电式编码器 .....	206	12.1 概述 .....	271
9.5.1 码盘式编码器 .....	206	12.1.1 生物传感器的概念 .....	272
9.5.2 脉冲盘式编码器 .....	209	12.1.2 生物传感器的功能 .....	272
9.5.3 光电式编码器的应用 .....	211	12.1.3 生物传感器的特点 .....	272
9.6 计量光栅 .....	213	12.1.4 生物传感器的分类 .....	273
9.6.1 光栅的结构和工作原理 .....	213	12.2 工作原理 .....	273
9.6.2 计量光栅的组成 .....	215	12.2.1 生物分子特异性识别 .....	274
9.6.3 计量光栅的应用 .....	218	12.2.2 生物放大 .....	275
学习拓展与探究式研讨 .....	219	12.2.3 信号转换与处理 .....	275
复杂工程问题实践 .....	219	12.2.4 几种主要的生物传感器 .....	276
习题云 .....	219	12.3 生物芯片 .....	279
<b>第10章 辐射与波式传感器 .....</b>	<b>221</b>	12.4 生物传感器的应用 .....	280
10.1 红外传感器 .....	221	12.4.1 传统医学领域 .....	280
10.1.1 工作原理 .....	222	12.4.2 非传统医学领域 .....	283
10.1.2 红外传感器的应用 .....	225	12.5 生物传感器的发展 .....	283
10.2 微波传感器 .....	230	学习拓展与探究式研讨 .....	284
10.2.1 工作原理 .....	231		



习题云 .....	284	13.3.1 MEMS 与微加工 .....	297
<b>第 13 章 新型传感器 .....</b>	<b>285</b>	13.3.2 微传感器的概念与特点 .....	299
13.1 智能传感器 .....	285	13.3.3 微传感器的发展现状 .....	300
13.1.1 智能传感器的特点 .....	286	13.4 网络传感器 .....	301
13.1.2 智能传感器的作用 .....	287	13.4.1 网络传感器的概念 .....	301
13.1.3 智能传感器的发展趋势 .....	287	13.4.2 网络传感器的基本结构 .....	302
13.1.4 智能传感器的应用实例 .....	289	13.4.3 网络传感器的类型 .....	302
13.2 模糊传感器 .....	292	13.4.4 基于 IEEE1451 标准的网络 传感器 .....	303
13.2.1 模糊传感器概述 .....	292	13.4.5 网络化测控系统体系结构 .....	305
13.2.2 模糊传感器的结构 .....	293	13.4.6 网络传感器的应用前景 .....	305
13.2.3 典型模糊传感器举例 .....	295	学习拓展与探究式研讨 .....	306
13.3 微传感器 .....	297	习题云 .....	306

## 中篇 检测技术

<b>第 14 章 参数检测 .....</b>	<b>307</b>	16.2 软测量的方法 .....	345
14.1 概述 .....	308	16.2.1 选择辅助变量 .....	345
14.1.1 检测技术的地位和作用 .....	308	16.2.2 处理输入数据 .....	346
14.1.2 参数检测的基本概念 .....	308	16.2.3 建立软测量模型 .....	347
14.1.3 工业检测的主要内容 .....	312	16.2.4 软测量模型的在线校正 .....	349
14.2 参数检测的一般方法 .....	313	16.3 软测量的意义及适用条件 .....	350
14.2.1 过程参数检测 .....	314	习题云 .....	350
14.2.2 机械量参数检测 .....	323	<b>第 17 章 多传感器数据融合 .....</b>	<b>351</b>
14.2.3 其他参数检测 .....	327	17.1 概述 .....	351
14.3 检测技术的发展 .....	327	17.1.1 数据融合的起源 .....	351
学习拓展与探究式研讨 .....	329	17.1.2 数据融合的目的 .....	352
复杂工程问题实践 .....	330	17.1.3 数据融合的定义 .....	352
习题云 .....	330	17.1.4 数据融合的特性 .....	353
<b>第 15 章 微弱信号检测 .....</b>	<b>331</b>	17.1.5 数据融合的优点 .....	353
15.1 概述 .....	331	17.2 数据融合的基本原理 .....	354
15.2 噪声 .....	332	17.2.1 数据融合的层次 .....	354
15.3 微弱信号检测方法 .....	334	17.2.2 数据融合的处理形态 .....	355
15.3.1 相关检测法 .....	334	17.2.3 数据融合模型 .....	355
15.3.2 同步积累法 .....	339	17.2.4 数据融合的关键技术 .....	357
习题云 .....	343	17.3 数据融合的方法 .....	358
<b>第 16 章 软测量 .....</b>	<b>344</b>	17.3.1 随机类方法 .....	359
16.1 概述 .....	344	17.3.2 人工智能类方法 .....	360
		17.4 数据融合系统的应用 .....	361



学习拓展与探究式研讨 .....	362	18.2.5 测量误差的合成 .....	375
习题云 .....	362	18.2.6 测量误差的分配 .....	376
<b>第18章 误差理论与数据处理基础 ...</b>	<b>363</b>	18.3 最小二乘法与回归分析 .....	379
18.1 测量误差概述 .....	363	18.3.1 最小二乘法 .....	379
18.2 测量误差的处理 .....	368	18.3.2 一元线性拟合 .....	382
18.2.1 随机误差的处理 .....	368	18.3.3 多元线性拟合 .....	382
18.2.2 系统误差的处理 .....	371	18.3.4 曲线拟合 .....	383
18.2.3 粗大误差的处理 .....	373	习题云 .....	383
18.2.4 间接测量误差的传递 .....	375		

## 下篇 检测系统

<b>第19章 虚拟仪器 .....</b>	<b>385</b>	20.2.2 系统总体设计 .....	411
19.1 概述 .....	386	20.2.3 采样速率的确定 .....	414
19.1.1 虚拟仪器的基本概念 .....	386	20.2.4 标度变换 .....	415
19.1.2 虚拟仪器的构成与特点 .....	386	20.2.5 硬件设计 .....	416
19.1.3 虚拟仪器技术的应用 .....	389	20.2.6 软件设计 .....	419
19.1.4 虚拟仪器的整体设计 .....	390	20.2.7 系统的集成与维护 .....	419
19.1.5 虚拟仪器的发展方向 .....	390	20.3 典型自动检测系统举例 .....	420
19.2 虚拟仪器系统开发环境 .....	391	20.3.1 自动温度测量系统 .....	420
19.2.1 LabWindows/CVI .....	391	20.3.2 无线传感器网络 .....	422
19.2.2 LabVIEW .....	395	20.3.3 物联网 .....	428
19.3 虚拟仪器系统的数据采集实现 .....	396	20.4 自动检测系统的发展 .....	432
19.3.1 基于 LabWindows/CVI 的数据采集 .....	396	学习拓展与探究式研讨 .....	434
19.3.2 基于 LabVIEW 的数据采集 .....	397	复杂工程问题实践 .....	434
复杂工程问题实践 .....	400	工程案例详解 .....	435
习题云 .....	400	习题云 .....	436
<b>第20章 自动检测系统 .....</b>	<b>401</b>	<b>附录 .....</b>	<b>438</b>
20.1 自动检测系统的组成 .....	402	附录A 传感器样例 .....	438
20.1.1 数据采集系统 .....	402	附录B 中国工程教育专业认证通用标准 (毕业要求) .....	441
20.1.2 输入输出通道 .....	407	附录C 部分习题参考答案 (精减版) ...	441
20.1.3 自动检测系统的软件 .....	407	附录D 传感器与检测技术综合自测试题 .....	442
20.2 自动检测系统的基本设计方法 .....	410	<b>参考文献 .....</b>	<b>443</b>
20.2.1 系统需求分析 .....	410		

# 上篇 传感器原理

## 第1章

### 概 述

知识单元 与知识点	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ 课程简介；</li><li>➤ 传感器的定义、传感器的共性、传感器的基本功能；</li><li>➤ 传感器的组成；</li><li>➤ 传感器的分类；</li><li>➤ 传感器技术的发展趋势。</li></ul>
能力点	<ul style="list-style-type: none"><li>◇ 能复述并解释传感器的概念；</li><li>◇ 能复述传感器的组成、传感器的基本功能和传感器的共性；</li><li>◇ 能比较不同类别的传感器；</li><li>◇ 能复述传感器技术的发展趋势；</li><li>◇ 会结合生活生产实际举例说明传感器的应用。</li></ul>
重难点	<ul style="list-style-type: none"><li>■ 重点：传感器的定义、组成、分类。</li><li>■ 难点：传感器技术的发展趋势。</li></ul>
学习要求	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 了解本门课程的地位、作用、内容体系结构和任务要求；</li><li>✓ 熟练掌握传感器的定义、组成；</li><li>✓ 掌握传感器的分类；</li><li>✓ 了解传感器技术的发展趋势。</li></ul>
问题导引	<ul style="list-style-type: none"><li>→ 为什么要学习传感器与检测技术课程？</li><li>→ 传感器的基本内涵与价值是什么？</li><li>→ 如何理解传感器的发展？</li></ul>

## 1.1 课程简介

### 1.1.1 本课程的地位和作用

“传感器与检测技术”是工科电气类、自动化类、仪器类等专业的一个重要专业（基础）

课，有很广的适应面，其覆盖的知识领域如图 1-1 所示。该课程旨在培养学生适应电子信息、计算机应用、精密仪器、测量与控制等多领域中，具备现代生产与智能制造过程中各种电量、非电量参数的智能感知与数据处理能力。本课程定位于为教学研究型大学的自动化、测控技术与仪器、电气工程及其自动化、物联网工程、智能电网信息工程、机器人工程等专业的本科学生提供“传感器与检测技术”系统性领域知识和创新性思维能力的训练，兼顾电子信息工程、通信工程、车辆工程、交通工程、生物医学工程、应用物理学等广泛专业的人才培养需要；特别强调依托优质学习资源、优化知识路径、深度学习模式启发心智，从适应新经济背景下智能制造、环保节能、生物医药、智慧农业、航空航天、公共安全等产业对智能感知与仪器工程要求的角度，培养学生学习发展，具备本领域坚实的基础知识与掌握信息，善于观察、发现和提炼问题，善于把握解决问题的切入点和创新性思维的关键能力。

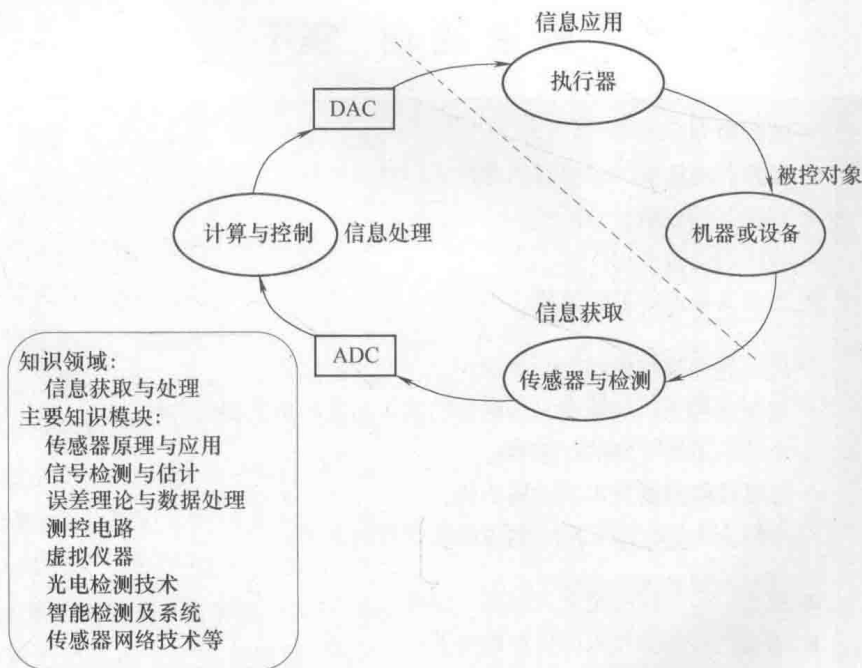


图 1-1 “传感器与检测技术”课程在信息链中所覆盖的知识领域

传感器起源于仿生研究。每一种生物在完成生命周期的过程中都需要频繁地与自身及周围环境交换信息，因此都有感知自身状态或周围环境的器官或组织，如人有眼、耳、舌、鼻、皮肤等，能够获取视觉、听觉、味觉、嗅觉、触觉等信息。传感器位于研究对象与测控系统之间的接口位置，是感知、获取与检测信息的窗口。一切科学实验和生产实践，特别是自动控制系统中要获取的信息，都要首先通过传感器获取并转换为容易传输和处理的电信号。传感器技术可以给人们带来巨大的经济效益和社会效益；自动化水平是衡量一个国家现代化程度的重要指标，而自动化水平的高低将受制于检测、控制类仪表及传感器的种类、数量和质量；在国家创新驱动发展战略的引领下，“互联网+”、智能制造、物联网（The Internet of Things）等为传感器应用提供了广阔的平台；科技越发达，自动化程度越高，对传感器的依赖也就越强烈。这是自上世纪 80 年代以来，国际上将传感器技术列为重点优先发展的高技术的原因。

人类历史上第四次工业革命的进程已经开启，第六次世界科技革命正向我们快步走来，





据推测其高潮大约在 2030 年前后出现；这是一场以信息化、智能化为先导，以生命科技、认知科学为亮点，以新能源、新材料为支点，以环境、生态、健康为关注点，以暗物质、反物质探索为科学前沿的综合性科学与技术的革命；近年来，人们已经感受到新科技革命涌来的风雨之声，产业需求导向、跨界交叉融合，新的科技突破日新月异，以互联网为依托、互联互通为重要手段、数据资源为核心要素、信息技术为内生动力、融合创新为主要特征的数字经济与新经济强势崛起，新技术、新产业、新业态、新模式层出不穷，“工业 4.0”“中国制造 2025”“互联网+”等发展战略正前所未有地推进信息化与工业化深度融合，重构人们的工作模式、生活范式和思维方式，传感器的研制和传感器技术的创新成为影响第四次工业革命进程的重要因素之一。

感知、通信和计算是 ICT (Information and Communications Technology) 技术的三大支柱，信息流是现代社会生产生活流通体系的“神经”，传感器与通信、计算机和自动控制技术等一起构成一条从信息获取、传输、处理和决策应用的完整信息链；传感器是实现物理环境或人类社会信息获取的基本工具，是检测系统的首要环节，是信息链的源头；传感器在信息技术领域的基础性地位和作用使得其在产品检验和质量控制、系统安全经济运行监测、自动化生产与控制系统的构建和推动现代科学技术的进步等方面均有重要意义；甚至新型高端仪器的制造和使用成为催生诺贝尔奖的重要推手。

迄今为止，信息链中的信息应用（自动化与控制）、信息传输（通信）和信息处理（计算机）等部分得到了很好的发展；目前，高端传感器与智能感知已发展为现代科技的前沿技术，世界上许多国家（特别是西方发达国家）将目光转向信息链的前端——信息获取与处理，掀起了以物联网为典型应用，以“无线化、泛在化、智能化、网络化”等为基本特征的第三次信息化浪潮，强化智能信息获取和智能信息处理，以信息为纽带建立人与物理环境更紧密、便捷和安全的逻辑联系。我国政府也高度重视仪器仪表产业的发展，重视传感器与检测技术在信息产业及现代服务业、制造业等行业的重要应用，在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》的“重点领域及其优先主题”部分明确列出“传感器、智能化检测控制技术”“新一代信息功能材料及器件”“传感器网络及智能信息处理”，在“前沿技术”部分提出发展“智能感知技术”“自组织网络技术”的要求，所有这些内容都与“传感器与检测技术”相关联；当前，我国仪器科学与技术取得了重大进展，在仪器仪表产品无线化、微型化、集成化、网络化、智能化、安全化、虚拟化等方向上紧跟国际发展步伐，加大具有自主知识产权的先进仪器仪表的研制力度。

新经济的发展、产业的升级、技术的创新、仪器的研发、使用与维护都需要大批高素质创新型人才作为支撑；与此同时，它们也对人才培养的内容和目标提出了与时俱进的新要求，从学科导向转向产业需求导向、从专业分割转向跨界交叉融合、从适应服务转向支撑引领的“新工科”建设方兴未艾，中央全面深化改革领导小组第 35 次会议指出：“注重培养学生终身学习发展、创新性思维、适应要求的关键能力”。因此，“传感器与检测技术”课程变革愈加迫切、重要性日益提高，其覆盖的专业越来越宽，修读的学生越来越多。这些变化推动着“传感器与检测技术”课程的建设快速地向发展，即以六个“一流”（一流的教师队伍、一流的教学水平、一流的教学内容和教学手段、一流的教学条件、一流的教学管理、一流的教学效果）的精品课程建设理念为指导，坚持“原创性”“高水平”“示范性”“强”的精品课程建设标准，特别注重课程内涵建设、课程特色的培育以及优质资源的共享

水平与示范辐射效应，强调“产学研”结合的课程建设模式，加强“一流课程”建设，支撑“一流专业”发展，为工科电气类、自动化类、仪器类专业学生学习传感器与检测技术知识提供精品课程平台，让优质课程资源有效地服务于适应新时代需要的应用创新型人才培养。



**【问题】** ①“科学是从测量开始的”；②“仪器是认识和改造物质世界的工具”“仪器仪表是工业生产的‘倍增器’，科学研究的‘先行官’，军事上的‘战斗机’，国民活动中的‘物化法官’”。这两个论断分别是哪两个著名科学家提出来的？



### 1.1.2 本课程的内容体系

本课程按照专业培养方案和课程教学大纲的要求，进行了课程内容体系的优化，使课程内容既能充分展示本课程的核心领域知识及其逻辑关系，又能反映该领域的最新技术发展和研究成果，以前沿技术提升课程内涵，体现学科发展方向，并与其他相关课程进行有效衔接。

优化后的课程内容由传感器原理、检测技术和检测系统三大模块组成，如图 1-2 所示。传感器原理部分主要包括传感器的基本特性、各类传统与新型传感器的工作原理与应用（电阻式、电感式、电容式、压电式、磁敏式、热电式、光电式、辐射与波式传感器、化学

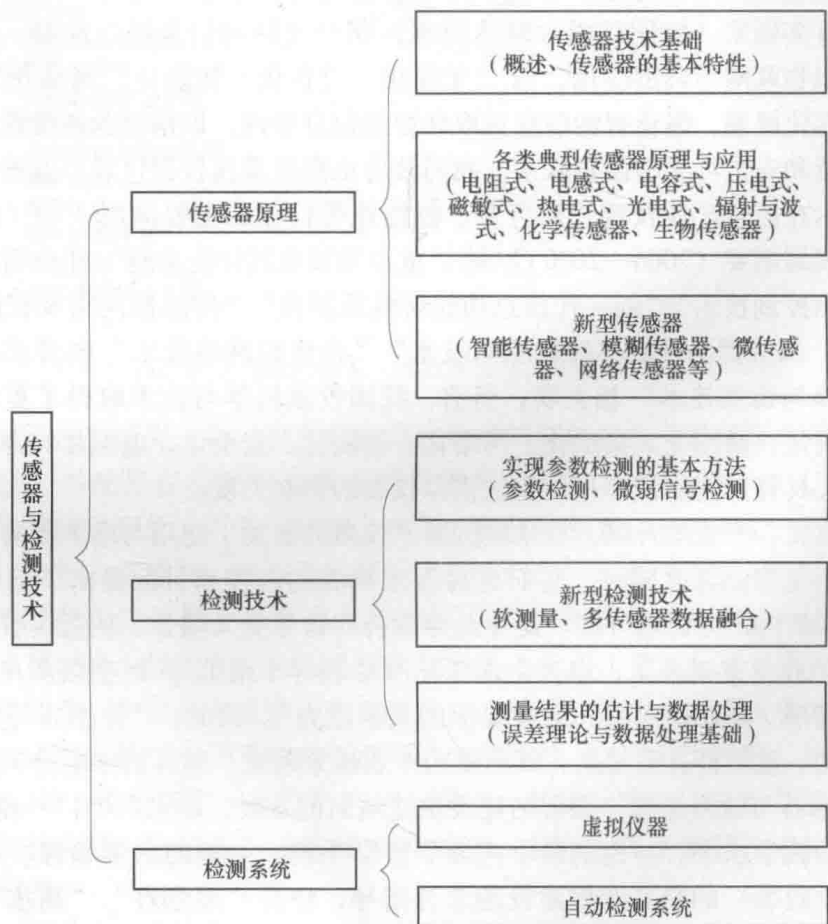


图 1-2 传感器与检测技术课程内容体系



传感器、生物传感器和新型传感器等)；检测技术主要包括参数检测、微弱信号检测、软测量、多传感器数据融合、误差理论与数据处理基础等；检测系统主要包括虚拟仪器和自动检测系统等。着重分析各类传感器的基本工作原理及其测量电路，给出典型应用进一步强化原理阐述并导向应用实践，精心设计的学习拓展与探究式研讨、复杂工程问题实践项目用于培养学生的创新思维和运用所学知识解决实际问题的能力；同时，内容中体现本领域的一些最新发展，如微传感器、生物传感器、模糊传感器、网络传感器、微弱信号检测、虚拟仪器、无线传感网（Wireless Sensor Network）与物联网等。

### 1.1.3 本课程的任务及目标

随着技术的不断发展进步，“传感器与检测技术”已经是一门涉及电工电子、计算机、仪器仪表、光电检测、智能感知、先进控制、精密机械设计、人工智能、大数据处理、信息安全等众多基础理论和前沿技术的综合性技术，现代检测系统通常集光、机、电、算等于一体，软硬件相结合。

“传感器与检测技术”课程以高等数学、概率论与数理统计、大学物理、模拟电子电路、数字与逻辑电路、电路分析基础、信号与系统等课程为基础，着重培养学生掌握传感器与检测技术基本理论、基本方法；本课程是一门实践性很强的课程，在理论学习的同时，要求学生通过实验和实践熟练掌握各类典型传感器的基本原理和适用场合，掌握常用测量仪器的基本工作原理和工作性能，能合理选用常用电子仪器、测量电路等，能根据测量任务要求合理设计测量系统，能对测量结果进行误差分析和数据处理等，达到理论与实践的高度统一，突出能力的培养。

根据教育部高等学校自动化类专业教学指导委员会编撰的《高等学校本科自动化指导性专业规范（试行）》所确定的专业知识领域及其要求，就“传感器与检测技术”课程涉及的知识领域而言，其主要知识单元、知识点和基本要求如表1-1所示。

表 1-1 “传感器与检测技术”课程的知识单元、知识点和基本要求

知识单元	知 识 点		学校专业类型及掌握程度		
			研究教学型	教学研究型	应用型
信息获取与处理的基本概念	检测方法 与原理	检测系统的结构与基本类型	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
		直接与间接测量	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
		接触与非接触测量	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
		静态与动态测量	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
	传感器	传感器的定义、组成	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
		传感器的分类	掌握	掌握	掌握
测量不确定度与回归分析	基本概念	真值、测量准确度的定义	掌握	掌握	掌握
		误差的来源、分类及其表示	掌握	掌握	掌握
	误差的处理与真值的估计	随机误差的估算与修正	掌握	掌握	掌握
		间接测量中误差的传递算法，误差合成与分配的基本方法	掌握	掌握	掌握
		真值的最佳估计值与不确定度	掌握	掌握	掌握

(续)

知识单元	知识点		学校专业类型及掌握程度		
			研究教学型	教学研究型	应用型
测量不确定度与回归分析	回归分析	最小二乘法	掌握	掌握	掌握
		一元线性拟合	掌握	掌握	掌握
		多元线性拟合	了解	了解	了解
		曲线拟合	了解	了解	了解
检测系统的静、动态特性	检测系统的特性	静、动态特性的概念	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
		一般数学模型: 微分方程, 传递函数, 频率响应	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
	静、动态特性指标	静态特性基本参数与指标	熟练掌握	熟练掌握	熟练掌握
		动态响应的特性指标与分析	掌握	掌握	掌握
		频率响应的特性指标与分析	掌握	掌握	掌握
	静态和动态标定与校准	静态标定与校准的基本方法	了解	了解	掌握
动态标定与校准的基本方法		了解	了解	了解	
检测变换原理与传感器	传感器工作原理及应用	电阻式传感器	掌握	掌握	掌握
		电感式传感器	掌握	掌握	掌握
		电容式传感器	掌握	掌握	掌握
		光电式传感器	掌握	掌握	掌握
		磁敏式传感器	掌握	掌握	掌握
		热电式传感器	掌握	掌握	掌握
		压电式传感器	掌握	掌握	掌握
		波式传感器	了解	了解	了解
		辐射式传感器	了解	了解	了解
		化学传感器	了解	了解	了解
		生物传感器	了解	了解	了解
参数检测	过程参数	温度、压力、流量、物位、成份及物性等参数的概念	掌握	掌握	掌握
		常用检测方法	掌握	掌握	掌握
	机械量参数	位移、转速、速度、振动及厚度等参数的检测方法	掌握	掌握	掌握
其他参数	同一被测参数的不同检测方法的性能比较	了解	了解	了解	
自动检测系统设计初步	自动检测系统	组成与基本设计方法	掌握	掌握	掌握
		传感器的选型	掌握	掌握	掌握
		微处理器、A/D转换器选择	掌握	掌握	掌握
		采样速率的确定	掌握	掌握	掌握
		标度变换的概念	掌握	掌握	掌握