



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Sensors and Measurement Technologies

传感器与检测技术

王俊杰 曹丽 等 编著

Wang Junjie Cao Li



清华大学出版社

全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

Sensors and Measurement Technologies

传感器与检测技术

清华大学

王俊杰 曹丽 等 编著

Wang Junjie Cao Li

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分4篇20章,全面系统地介绍了在科学研究和工业生产领域广泛使用的传感器和检测技术的各种知识。

第1篇介绍了基础知识和基本概念,包括基本名词术语、典型测量系统和测量方法、测量单位和国际单位制等。还介绍了近似数的修约与运算法则,数据的表示和实验曲线拟合的方法,以及测量不确定度的评定、计算与表示方法。

第2篇介绍了传感器的原理、信号转换及应用,包括应变电阻式和电容式传感器、压电效应和压电传感器、各种类型的光电传感器及其集成器件、磁敏传感器及性能比较、物理式气体传感器的类型和工作原理、生物化学式传感器的研究进展和智能传感器的功能特点等。

第3篇介绍了自动检测技术、测量仪表的情况,分章讲述针对温度、压力、流量、物位和成分分析五大参数的检测技术。

第4篇介绍了在检测技术领域快速发展的新技术和检测系统,介绍了虚拟仪器、AS-i现场总线和多传感器数据融合技术。最后简要介绍了软测量技术和现场无线总线技术方面的知识。

本书可作为高等学校自动化及相关专业的本科生教材,同时也可供从事传感器、检测技术、仪器仪表研究和应用等方面工作的技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

传感器与检测技术/王俊杰等编著. —北京:清华大学出版社,2011.4

(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-23994-9

I. ①传… II. ①王… 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(2010)第209038号

责任编辑:王一玲

责任校对:焦丽丽

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjtc@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:35.25 字 数:750千字

版 次:2011年4月第1版 印 次:2011年4月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.50元

产品编号:017433-01

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问 (按姓氏笔画排序):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员 (按姓氏笔画排序):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)
陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)



为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层次、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

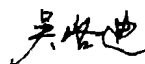


自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20 世纪 50 年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的伟大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业与战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分汲取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实

践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师,致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

 教授

2005 年 10 月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教学,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设基础知识与最新知识有机融合的教材?如何充分利用现代技术,适应现代大学生的接受习惯,改变教材单一形态,建设数字化、电子化、网络化等多元

形态、开放性的“广义教材”？等等，这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版，对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境，一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限，本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在许多不当甚至谬误之处，还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴信 院士

2005 年 10 月于清华大学



在“国家中长期科学和技术发展规划纲要”中,明确提出了要重点发展“智能感知技术”和“传感器、智能化检测控制技术”的要求。传感器与检测技术是自动化学科的重要组成部分,随着科学技术的迅速发展,使得“检测技术与自动化装置”这个二级学科无论在基础理论、系统结构方面,还是在设计程序、实验方法方面都发生了根本性的变革,向着数字化、智能化和网络化方向发展。当前迫切要把新的知识和方法引入到教学中,使教学内容与全球技术发展同步,教材与世界教材接轨。

本书共分4篇,全面地介绍了在科学研究和工业生产领域广泛使用的传感器和检测技术的各种知识。

第1篇介绍了基础知识和基本概念,包括基本名词术语、典型测量系统和测量方法、测量单位和国际单位制等。还介绍了近似数的修约与运算法则,数据的表示和实验曲线拟合的方法。最后讲解了测量不确定度的评定、计算与表示方法。

第2篇介绍了传感器的原理、信号转换及应用,包括应变电阻式、电容式和压电式传感器,各种类型的光电、磁敏、气体及生化传感器的功能特点及典型应用等。

第3篇介绍了自动检测技术、测量仪表的有关知识,包括温度、压力、流量、物位和成分分析五大参数的检测技术,对每一种参数测量方法的分类、特点、适用范围等加以说明,然后选择具有代表性的测量方法和仪表,从原理、结构、应用方面加以分析。

第4篇介绍了在检测技术领域快速发展的新技术和检测系统,首先介绍了虚拟仪器的概念及系统组成与分类、硬软件和开发环境。接着介绍了AS-i现场总线测控系统,它是一种典型的连接传感器和执行器的工业控制底层的现场总线技术。还介绍了多传感器数据融合技术,包括融合框架和融合算法。最后简要介绍了软测量技术和现场无线总线技术方面的知识。

本书具有以下特点:

第一,内容全面。包含了从测量的基础知识到过程和运动控制系统中常用的参数检测技术和方法,介绍了测量元器件、仪表和系统的有关内容,为读者提供了一个全面了解现代检测技术的平台。

第二,讲述翔实。对每一种传感器和每一种仪表,从原理、结构、技术

特性和指标以及使用方法等方面都进行了详细的分析和讲解,理论完整,图文并茂,详细实用,为读者学习、理解和应用提供了一个很好的工具。

第三,求新求变。科学技术的快速发展,带动传感器和检测技术发生了巨大的变化,本书力求紧跟时代的进步,把最新的技术奉献给读者,全面地介绍了测量不确定度评定、虚拟仪器、AS-I 现场总线以及多传感器数据融合等新技术内容,为读者了解并紧跟世界科技发展的潮流提供了一个窗口。

本书可作为高等学校自动化及相关专业的本科生教材,同时也可作为从事传感器、检测技术、仪器仪表研究和应用方面技术人员的参考用书。

参加本书编写的有清华大学自动化系王俊杰教授(第1篇的第1~3章,第3篇的第11~15章,第4篇的第16、17章);曹丽副教授(第2篇的第4~8章及第6章的第6.1~6.5节);赵勇教授(第2篇的第9、10章及第6章的6.6节);彭黎辉教授(第4篇的第18章)和陆耿讲师(第4篇的第19、20章)。全书由王俊杰教授主编。

由于编者水平有限,书中难免会有不妥、错漏之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2010年7月于清华园

第1篇 基础知识

第1章 基础知识和基本概念	3
1.1 传感器与检测技术的发展历史与作用	3
1.2 测量技术名词	5
1.2.1 测量	5
1.2.2 量值	5
1.2.3 [量的]真值	6
1.2.4 [量的]约定真值	6
1.2.5 精确度	6
1.2.6 [测量]误差	6
1.2.7 修正值	7
1.2.8 相对误差	8
1.2.9 引用误差和精度等级	8
1.2.10 量程	8
1.2.11 范围度	9
1.2.12 计量	9
1.2.13 校准	9
1.2.14 量值传递	9
1.2.15 溯源性	10
1.2.16 仪表的零点迁移和量程迁移	10
1.2.17 仪表的死区、滞环误差和回差	11
1.2.18 灵敏度和分辨力	12
1.2.19 信噪比	12
1.2.20 线性度误差	12
1.2.21 重复性误差	12
1.2.22 仪表的可靠性	13
1.2.23 检测元件或传感元件	13
1.2.24 [测量]传感器	14
1.2.25 变送器	14

1.2.26 计、表和仪(器)	15
1.3 典型的测量系统	15
1.3.1 第一级——敏感元件-传感器级	16
1.3.2 第二级——信号调理级	16
1.3.3 第三级——读出记录级	17
1.4 多种测量方式	18
1.4.1 直接与间接测量	18
1.4.2 串联型(开环)与反馈型(闭环)测量	19
1.4.3 能量变换型与能量控制型测量	20
1.4.4 接触式与非接触式测量	21
1.4.5 静态与动态测量	21
1.5 提高精度的系统结构与测量方法	23
1.5.1 补偿测量结构	23
1.5.2 差分测量结构	24
1.5.3 基于同步叠加的去噪方法	25
1.5.4 基于响应速度的分离方法	25
1.5.5 滤波放大与调频放大方法	26
1.5.6 陷波放大方法	26
1.5.7 锁定放大方法	27
1.6 测量单位和国际单位制	28
1.6.1 量和单位	28
1.6.2 国际单位制	30
1.6.3 法定计量单位	33
1.6.4 国际单位制和法定计量单位使用注意事项	34
练习题及思考题	34
第2章 测量数据处理	36
2.1 测量数据中粗大误差的判定和剔除	36
2.1.1 粗大误差的概念	36
2.1.2 粗大误差的剔除准则	37
2.2 测量数据中系统误差的发现和修正	40
2.2.1 系统误差的概念	40
2.2.2 系统误差的判别方法	41
2.2.3 减小系统误差的方法	44
2.3 近似数的修约与运算	48
2.3.1 近似数的修约	48
2.3.2 有效数字	50

2.3.3 近似数的运算	51
2.4 数据的图形表示	53
2.4.1 图形表示的规则	54
2.4.2 选择坐标系和绘制曲线	54
2.5 最小二乘法与实验曲线拟合	56
2.5.1 最小二乘法原理	57
2.5.2 直线和曲线拟合	57
2.5.3 典型经验公式的选择与检验	60
练习题及思考题	62
第3章 测量不确定度的评定与表示方法	63
3.1 测量不确定度的定义及与测量误差的比较	63
3.1.1 预备知识	63
3.1.2 u 、 u_c 和 $U(U_p)$ 值的评定	67
3.2 标准不确定度、合成标准不确定度和扩展不确定度的计算	68
3.3 测量不确定度的 A 类和 B 类评定	70
3.4 测量结果和测量不确定度的表示	72
3.5 温度检测中不确定度评定与表示方法的实例	72
3.6 相对合成标准不确定度在差压式流量计中的应用	75
练习题及思考题	76

第2篇 传感器原理

第4章 电阻式电容式传感器	79
4.1 应变电阻传感器	79
4.1.1 金属电阻丝应变片	79
4.1.2 半导体应变元件	81
4.2 应变电阻转换电路	81
4.3 应变片的种类及应用	83
4.4 电容式传感器	85
4.4.1 电容式传感器工作原理	85
4.4.2 电容式传感器的种类	85
4.4.3 差动电容传感器	87
4.5 电容式传感器的特性	88
4.5.1 减小环境温度湿度变化的影响	88
4.5.2 漏电阻、激励频率和材料的绝缘性	88
4.5.3 减小边缘效应	89

4.5.4	屏蔽电极	89
4.6	电容式传感器的应用	90
4.6.1	工业液位计	90
4.6.2	电容式接近传感器	90
4.6.3	差动电容式加速度传感器	92
4.6.4	电容式差压传感器	95
4.6.5	电容式倾斜仪	96
4.6.6	容栅位移传感器	96
4.7	电容传感器测量电路	97
4.7.1	运算放大器电路	97
4.7.2	电桥电路	98
4.7.3	充放电式差动电容开关转换电路	98
4.7.4	充放电式差动脉冲调宽电路	98
4.7.5	振荡电路	99
4.8	电容传感器的使用注意事项	100
4.8.1	减少外界干扰	100
4.8.2	减少寄生电容	101
	练习题及思考题	102
第5章	压电传感器	103
5.1	压电效应和压电方程	103
5.2	压电材料	104
5.2.1	压电晶体	104
5.2.2	压电陶瓷	107
5.2.3	压电薄膜	107
5.3	压电传感器的信号调理电路	108
5.3.1	压电传感器电压放大电路	109
5.3.2	压电传感器电荷放大电路	110
5.4	压电式加速度传感器	111
5.5	压电逆效应的应用	111
5.6	超声波传感器	113
5.6.1	超声波的波型、波速	114
5.6.2	超声波的反射、折射和波型转换	115
5.6.3	声波的衰减	117
5.6.4	超声空化效应	117
5.6.5	超声波传感器的结构和等效电路	117
5.6.6	超声波测距、测厚原理	119

5.6.7 超声波流量计	121
5.6.8 超声成像	123
5.6.9 声表面波 SAW 传感器器件	123
练习题及思考题	124
第 6 章 光电传感器	125
6.1 概述	125
6.1.1 光的特性	126
6.1.2 光源种类	128
6.2 光电传感器元件	130
6.2.1 光敏二极管	130
6.2.2 光敏三极管	132
6.2.3 光敏电阻	134
6.2.4 光电倍增管	136
6.2.5 光耦合器	137
6.2.6 彩色传感器	137
6.2.7 CCD 图像传感器	138
6.2.8 CMOS 图像传感器	140
6.3 红外传感器	141
6.3.1 热释电型红外传感器	142
6.3.2 热电堆型红外传感器	143
6.4 光电位置检测传感器	143
6.5 太阳能电池	145
6.6 光纤传感器	146
6.6.1 光学纤维的结构和原理	146
6.6.2 非功能型光纤传感器	148
6.6.3 功能型光纤传感器	150
练习题及思考题	150
第 7 章 磁敏传感器	152
7.1 概述	152
7.1.1 磁场强度和磁敏传感器种类	153
7.1.2 地磁场和电子罗盘	154
7.2 霍尔传感器	156
7.2.1 霍尔传感器原理	156
7.2.2 霍尔传感器的应用	158
7.3 磁阻元件	161

7.3.1 各向异性磁阻 AMR 元件	162
7.3.2 巨磁阻 GMR 元件	165
7.3.3 磁阻传感器的应用	166
7.4 磁阻抗元件	166
7.4.1 磁阻抗效应	166
7.4.2 磁阻抗 MI 元件	167
7.5 感应式磁电传感器	169
7.5.1 磁通门传感器	169
7.5.2 自感式位移传感器	170
7.5.3 互感式位移传感器-差动变压器	171
7.5.4 电涡流传感器	174
练习题及思考题	175
第 8 章 气体传感器	176
8.1 概述	176
8.2 半导体气体传感器	177
8.2.1 氧化物半导体气体传感器	177
8.2.2 MOSFET 气体传感器	179
8.3 振动频率型气体传感器	180
8.3.1 表面弹性波传感器	180
8.3.2 晶振膜传感器	180
练习题及思考题	181
第 9 章 生化传感器	182
9.1 概述	182
9.2 新型生化传感器	184
9.2.1 蛋白传感器	184
9.2.2 肽纳米管生化传感器	185
9.2.3 碳纳米管生化传感器	186
9.2.4 微机械生化传感器	188
9.2.5 石英晶体传感器	191
9.2.6 光寻址生化传感器	192
练习题及思考题	193
第 10 章 智能传感器	194
10.1 概述	194
10.1.1 智能传感器可实现的功能	194