



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

国家精品课程教材

Sensors and Measurement Technologies

传感器与检测技术

周杏鹏 主编
Zhou Xingpeng

孙永荣 仇国富 副主编
Sun Yongrong Qiu Guofu

韩九强 主审
Han Jiuqiang



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

国家精品课程教材

Sensors and Measurement Technologies

传感器与检测技术

东南大学

周杏鹏 主编

Zhou Xingpeng

南京航空航天大学

孙永荣

Sun Yongrong

南京理工大学

仇国富

Qiu Guofu

副主编

西安交通大学

韩九强 主审

Han Jiuqiang

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材、全国高等学校自动化专业系列教材。全书按基础知识篇、传感器技术篇和检测技术篇顺序编排,三者篇幅比例大体为2:5:7。三部分既相对独立,又紧密衔接,前后呼应、循序渐进。本书传感器技术与检测技术两大部分内容所占比例大体平衡,把传感器技术和检测技术融合和有机结合,便于教师组织教学和学生连贯、系统地学习。

本书包含的传感器种类多、检测参量广。书中将经典技术与当前成熟新技术相结合、理论与实际工程应用相结合,注重知识纵向联系与横向比较,能较好地满足多专业类的宽口径素质教学需要并为从事各类自动化工程方面的技术人员提供参考。

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/周杏鹏主编. —北京:清华大学出版社,2010.9
(全国高等学校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-302-23044-1

I. ①传… II. ①周… 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 113363 号

责任编辑:王一玲 文 怡

责任校对:时翠兰

责任印制:杨 艳

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,jsjic@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:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:28 字 数:585千字

版 次:2010年9月第1版 印 次:2010年9月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.00元

产品编号:020841-01

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》



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,组织编写出版了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

《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):

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):

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)



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和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,充分吸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。

吴恪迪 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。

吴澄 院士

2005年10月于清华大学



本书按 48 课内学时编写；按基础知识篇、传感器技术篇和检测技术篇顺序编排，篇幅比例大体为 2 : 5 : 7。三部分既相对独立，又紧密衔接，前后呼应、循序渐进。本书传感器技术与检测技术两大部分篇幅上大体平衡，编排上把传感器技术和检测技术相融合和有机组合，便于教师组织教学，有利于学生连贯、系统地学习及应用。

基础知识篇，作为传感器技术篇和检测技术篇的必备基础知识，包括绪论、误差理论、传感器与检测技术静态、动态特性等内容。设置“误差理论与数据处理”课程的专业，这部分内容可略讲或不讲，作为学生自主学习参考的资料。

传感器技术篇，着重于各种传感器的测量原理、结构特征、影响性能的误差因素和误差特性、测量电路信号处理和传感器的应用介绍。在内容编排上，摒弃了将各种测量原理的传感器独立成章的做法，根据传感器的测量机理进行了分类，按结构型、物性型、固态型、其他类型进行全新的编排和组织。教材理论与实际工程应用紧密结合，注重提高传感器精度以及实际应用时该注意问题的分析。

检测技术篇，重点介绍同一被测物理(或成分)参量常用及新颖有效的检测方法及它们的适用范围或局限性、传感器的选用、检测仪器及系统组成原理等。这样就从根本上克服以往传感技术类教材难以从工程和科研需测参量出发全方位分析和研讨检测方案可行性、适用性与优化的问题；同时也较好地解决了检测技术类教材往往难以从传感器机理、结构特点出发深入讨论不同传感(检测)方案的可行性与局限性的问题；本书这样编排将有利于培养自动化类专业的学生的实际工程应用能力和创新能力。

本书注重理论紧密联系工程实践，突出应用。基础知识篇有序插入一些工程实用性强的例题，各章均有丰富的综合应用性习题与思考题；传感器技术篇各章都有各类传感器常用信号调理电路设计方面的内容；检测技术篇各章均有应用实例，并注意同一参量采用不同检测方案的可行性讨论，每章结尾提供本章检测参量常用测量方法及相应测量仪器应用特点的汇总表，可节省检索时间、提高学习效率和方便读者比较选用。

本书基础知识篇及检测技术篇中第 9 章、第 11 章由东南大学周杏鹏执笔(其中，东南大学王晓俊执笔编写了 3.6 节和第 9、11 章中一些应用实例，东南大学路小波参加了第 11 章部分小节编写，东南大学牛丹负责基础

知识篇中部分插图); 传感器技术篇, 由南京航空航天大学孙永荣执笔; 检测技术篇中第 8 章、第 10 章、第 12 章由南京理工大学仇国富执笔; 第 13 章由东南大学邵云执笔。本书由周杏鹏任主编, 孙永荣、仇国富任副主编。

全书承蒙西安交通大学韩九强教授拨冗审阅, 在此表示诚挚的谢意。

在本书编写过程中, 参考了许多有关的教材、专业期刊、产品样本、技术手册, 在此对本书引用文献的有关作者一并表示感谢。

由于作者水平与能力有限, 本书难免有不足或不当之处, 恳请广大读者批评指正。

作者

2010 年 5 月于南京



第一篇 基础知识篇

第 1 章 绪论	3
1.1 传感器与检测技术的定义与作用	3
1.1.1 传感器的定义	3
1.1.2 检测的定义	3
1.1.3 传感器与检测技术的地位与作用	4
1.2 检测系统的组成	5
1.3 传感器与检测系统的分类	8
1.3.1 传感器的分类	8
1.3.2 检测系统的分类	9
1.4 传感器与检测技术的发展趋势	10
1.4.1 传感器的发展方向	10
1.4.2 检测技术的发展趋势	11
习题与思考题	13
第 2 章 检测技术基础知识	14
2.1 检测系统误差分析基础	14
2.1.1 误差的基本概念	14
2.1.2 误差的表示方法	15
2.1.3 检测仪器的精度等级与工作误差	17
2.1.4 测量误差的分类	18
2.2 系统误差处理	20
2.2.1 系统误差的特点及常见变化规律	20
2.2.2 系统误差的判别和确定	20
2.2.3 减小和消除系统误差的方法	22
2.3 随机误差处理	24
2.3.1 随机误差的分布规律	24
2.3.2 测量数据的随机误差估计	26
2.4 粗大误差处理	28
2.5 测量不确定度的评定	30

2.5.1	测量不确定度的主要术语	31
2.5.2	不确定度的评定	32
2.5.3	测量结果的表示和处理方法	35
	习题与思考题	36
第3章	传感器与检测系统特性分析基础	38
3.1	概述	38
3.2	传感器和检测系统静态特性方程与特性曲线	39
3.3	传感器和检测系统静态特性的主要参数	40
3.4	传感器或检测系统的动态特性	44
3.4.1	传感器或检测系统的(动态)数学模型	44
3.4.2	一阶和二阶系统的数学模型	47
3.4.3	一阶和二阶系统的动态特性参数	48
3.5	传感器与检测仪器的校准	53
3.5.1	传感器或检测仪器的静态校准	53
3.5.2	传感器或检测仪器的动态校准	54
3.6	传感器与检测系统的可靠性	56
3.6.1	可靠性基本概念	56
3.6.2	常用可靠性参数指标	57
	习题与思考题	59

第二篇 传感器技术篇

第4章	结构型传感器	63
4.1	电阻应变式传感器	63
4.1.1	工作原理	63
4.1.2	结构与类型	65
4.1.3	主要特性	69
4.1.4	温度效应及其补偿	72
4.1.5	电桥测量电路	74
4.2	电容式传感器	82
4.2.1	工作原理、类型及特性	82
4.2.2	应用注意事项及措施	86
4.2.3	电容式传感器的测量电路	89
4.3	电感式传感器	94
4.3.1	自感式传感器	95
4.3.2	互感式传感器(差动变压器)	100
4.3.3	电涡流式传感器	106
	习题与思考题	113

第5章 常用物性型传感器	116
5.1 压阻式传感器	116
5.1.1 工作原理	116
5.1.2 结构与类型	120
5.1.3 温度补偿原理与方法	121
5.2 压电式传感器	122
5.2.1 压电效应及压电材料	122
5.2.2 等效电路及测量电路	127
5.2.3 影响压电式传感器性能的主要因素	131
5.3 光电式传感器	133
5.3.1 光电效应及光电器件	133
5.3.2 光电器件的特性	137
5.3.3 光电式传感器与新型光电检测器	140
习题与思考题	143
第6章 固态传感器	145
6.1 磁敏传感器	145
6.1.1 霍尔式传感器	145
6.1.2 其他磁敏传感器	151
6.2 湿敏传感器	153
6.2.1 湿度及湿敏传感器基础	153
6.2.2 氯化锂湿敏传感器	155
6.2.3 半导体及陶瓷湿敏传感器	155
6.2.4 高分子聚合物湿敏传感器	156
6.3 其他固态传感器	158
6.3.1 气敏传感器	158
6.3.2 半导体色敏传感器	161
6.3.3 离子敏感器件(ISFET)	163
习题与思考题	165
第7章 其他传感器技术	166
7.1 红外传感器	166
7.1.1 红外检测的物理基础	166
7.1.2 红外探测(传感)器	168
7.2 超声波传感器	169
7.2.1 超声检测的物理基础	170
7.2.2 超声波(换能)传感器及应用	172
7.3 光纤传感器	173

7.3.1	光纤传感器基础	173
7.3.2	光纤传感器及其应用	175
7.4	传感新技术简介	178
7.4.1	微波传感器	178
7.4.2	核辐射传感器	179
7.4.3	生物传感器	181
	习题与思考题	183

第三篇 检测技术篇

第8章	压力检测技术	187
8.1	概述	187
8.1.1	压力的基本概念与计量单位	187
8.1.2	压力检测方法	188
8.2	常用压力检测仪表	190
8.2.1	弹性压力计	190
8.2.2	电测式压力计	194
8.3	压力检测仪表的选择与安装	200
8.3.1	压力检测仪表的选择	201
8.3.2	压力检测仪表的安装	202
8.3.3	动态压力检测的管道效应	203
	习题与思考题	204
第9章	温度检测技术	206
9.1	概述	206
9.1.1	温标	206
9.1.2	测温方法分类及其特点	209
9.2	接触式测温方法	211
9.2.1	膨胀式温度计及应用特点	211
9.2.2	热电阻测温技术	212
9.2.3	热电偶测温技术	217
9.3	辐射法测温	222
9.3.1	辐射测温的基本原理	223
9.3.2	辐射测温方法及其仪表	225
9.3.3	红外测温与红外成像测温仪	231
	习题与思考题	236
第10章	流量检测技术	237
10.1	流量检测的基本概念	237

10.1.1	流量和流量计	237
10.1.2	流体物理参数与管流基础知识	238
10.1.3	流量检测仪表的分类	242
10.2	流量测量仪表	243
10.2.1	差压式流量计	243
10.2.2	容积式流量计	250
10.2.3	叶轮式流量计	253
10.2.4	电磁流量计	257
10.2.5	流体振动式流量计	259
10.2.6	超声波流量计	263
10.2.7	质量流量计	267
10.3	流量计的校准与标准装置	272
10.3.1	流量计的校准方法	273
10.3.2	液体流量标准装置	273
	习题与思考题	276
第 11 章	物位检测技术	278
11.1	液位检测	278
11.1.1	力学法检测液位	278
11.1.2	电学与电磁法检测液位	281
11.1.3	声学与光学法检测液位	285
11.1.4	其他液位检测技术	287
11.2	料位检测	289
11.2.1	重锤探测与称重法检测料位	289
11.2.2	电磁法检测料位	290
11.2.3	声学法检测料位	291
11.3	相界面的检测	291
11.3.1	分段式电容法检测油水相界面	292
11.3.2	超声波检测液-液相界面	293
11.3.3	磁致伸缩性相界面测量技术	293
11.4	物位仪表分类与选用	294
	习题与思考题	296
第 12 章	机械量检测技术	297
12.1	位移检测	297
12.1.1	位移检测方法	297
12.1.2	线位移检测	298
12.1.3	角位移检测	308
12.2	速度检测	314

12.2.1	速度测量方法	314
12.2.2	线速度测量	316
12.2.3	转速测量	320
12.3	加速度检测	325
12.3.1	加速度测量原理	325
12.3.2	位移式加速度计	327
12.3.3	应变式加速度计	328
12.3.4	微机电系统加速度计	328
12.4	力和转矩检测	330
12.4.1	力的检测	330
12.4.2	转矩测量	335
12.5	机械振动测量	339
12.5.1	概述	339
12.5.2	振动的基本知识	340
12.5.3	振动测量系统	344
12.5.4	振动参量的测量	347
12.5.5	振动测试的应用实例	349
12.6	噪声检测	350
12.6.1	声音和噪声	350
12.6.2	噪声的物理量度	351
12.6.3	噪声的分析与评价	354
12.6.4	噪声测量仪器	357
12.6.5	噪声的测量	359
	习题与思考题	360
第 13 章 成分检测技术		362
13.1	热导式气体分析仪器	362
13.1.1	基本原理	362
13.1.2	热导池(检测器)	365
13.1.3	热导式气体分析仪的应用	369
13.2	红外式成分检测	369
13.2.1	红外式成分检测的原理	369
13.2.2	红外式分析仪的结构	371
13.2.3	红外检测仪的应用	378
13.3	水及大气环境质量检测	378
13.3.1	水环境检测	378
13.3.2	大气环境检测	394
	习题与思考题	407