



高等院校电子信息与电气学科特色教材

江苏省精品课程教材

传感器原理与应用技术

童敏明 唐守锋 董海波 编著

清华大学出版社



高等院校电子信息与电气学科特色教材

江苏省精品课程教材

传感器原理与应用技术

童敏明 唐守锋 董海波 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以传感器应用技术的角度,详细介绍了电阻应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、热电阻式传感器、热电偶式传感器、集成温度传感器、霍尔传感器、光电传感器、半导体传感器、超声波传感器、压电式传感器等常用传感器的工作原理和典型应用,以及传感器信号采集与处理技术,介绍了传感器创新应用方法,列举了应用实例。

本书可作为电气工程、自动化、信息技术、测控技术等专业学生的专业基础课教材,也可供有关专业师生及从事测试工程工作的工程技术人员参考。

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

传感器原理与应用技术/童敏明,唐守锋,董海波编著. —北京:清华大学出版社,2012.1
(高等院校电子信息与电气学科特色教材)

ISBN 978-7-302-26291-6

I. ①传… II. ①童… ②唐… ③董… III. ①传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 141683 号

责任编辑:盛东亮

责任校对:李建庄

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 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:17.5 字 数:434 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版 印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元

出版说明

随着我国高等教育逐步实现大众化以及产业结构的进一步调整,社会对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这反映到高等学校的定位与教学要求中,必然带来教学内容的差异化和教学方式的多样性。而电子信息与电气学科作为当今发展最快的学科之一,突出办学特色,培养有竞争力、有适应性的人才是很多高等院校的迫切任务。高等教育如何不断适应现代电子信息与电气技术的发展,培养合格的电子信息与电气学科人才,已成为教育改革中的热点问题之一。

目前我国电类学科高等教育的教学中仍然存在很多问题,例如在课程设置和教学实践中,学科分立,缺乏和谐与连通;局部知识过深、过细、过难,缺乏整体性、前沿性和发展性;教学内容与学生的背景知识相比显得过于陈旧;教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息与电气学科人才还不能很好地满足社会的需求等。为了适应 21 世纪人才培养的需要,很多高校在电子信息与电气学科专业建设和课程建设方面都做了大量工作,包括国家级、省级、校级精品课的建设等,充分体现了各个高校重点专业的特色,也同时体现了地域差异对人才培养所产生的影响,从而形成各校自身的特色。许多一线教师在多年教学与科研方面已经积累了大量的经验,将他们的成果转化为教材的形式,向全国其他院校推广,对于深化我国高等学校的教学改革是一件非常有意义的事。

为了配合全国高校培育有特色的精品课程和教材,清华大学出版社在大量调查研究的基础之上,在教育部相关教学指导委员会的指导下,决定规划、出版一套“高等院校电子信息与电气学科特色教材”,系列教材将涵盖通信工程、电子信息工程、电子科学与技术、自动化、电气工程、光电信息工程、微电子学、信息安全等电子信息与电气学科,包括基础课程、专业主干课程、专业课程、实验实践类课程等多个方面。本套教材注重立体化配套,除主教材之外,还将配套教师用 CAI 课件、习题及习题解答、实验指导等辅助教学资源。

由于各地区、各学校的办学特色、培养目标和教学要求均有不同,所以对特色教材的理解也不尽一致,我们恳切希望大家在使用本套教材的过程中,及时给我们提出批评和改进意见,以便我们做好教材的修订改版工作,使其日趋完善。相信经过大家的共同努力,这套教材一定能成

为特色鲜明、质量上乘的优秀教材,同时,我们也欢迎有丰富教学和创新实践经验的优秀教师能够加入到本丛书的编写工作中来!

清华大学出版社

高等院校电子信息与电气学科特色教材编委会

联系人:盛东亮 shengdl@tup.tsinghua.edu.cn

前言

传感器技术是信息技术的核心之一。随着人类探索空间的拓展,人们需要获得的信息种类日益增多,要求各种信息的获取技术(即传感技术)满足信息化发展的需要。

从传感器应用技术的角度出发,本书内容涵盖了传感器的原理、传感器的测量电路、传感器的应用、传感器信号采集与处理技术、创新设计方法及案例等内容。

全书共分14章,第1章是传感器概述,介绍传感器对科学发展的重要性,传感器的组成和定义,研究发展方向,以及传感器检测装置的基本性能——静态特性和动态特性,标定与校准。第2章~第12章介绍了11种常用传感器的原理、测量电路和应用。第13章为传感器信号采集与处理技术,介绍传感器数据采集装置的功能和结构,多路模拟开关和采样/保持器,数据采集装置的技术性能,数据采集系统设计的基础知识,以及传感器信号数字滤波技术、标度变换技术、非线性补偿技术。第14章为创新设计方法及案例,介绍检测技术创新应用的思维方法和技巧;案例取自日常生活中的真实事件,给出利用检测技术解决的方案。

从培育学生实际应用和创新能力出发,本书力求突出以下特点:

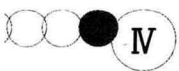
(1) 每章结构上按照本章要点、学习要求、本章内容、知识拓展(或创新、设计与应用)、本章小结、习题的形式编写。

(2) 本教材属专业基础课教学用书,内容涉及面较宽,侧重基本概念、基本原理和应用方法,避免烦琐的理论推导和公式演算。

(3) 传感器作为检测技术的关键,种类很多,本教材重点介绍了电阻应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、热电阻式传感器、热电偶传感器、集成温度传感器、霍尔传感器、光电传感器、半导体传感器、超声波传感器、压电式传感器等常用传感器,引导读者掌握传感器应用的基本方法。

(4) 为了适应应用型创新人才的培养要求,本教材在章节内容或习题中设计了一些实践问题,并特别增加了创新设计方法及应用案例的章节。

本书可作为电气工程、自动化、信息技术、测控技术等专业学生的专业基础课教材,也可供有关专业师生及从事测试工程工作的工程技术人员参考。



由于编写时间仓促,传感器技术发展迅速,书中难免有不妥之处,殷切希望各院校师生及广大读者提出宝贵意见。

作者

2011年10月

目 录

绪论	1
第 1 章 传感器概述	3
1.1 传感器的基本知识	3
1.1.1 传感器的重要性	3
1.1.2 传感器的定义和组成	5
1.1.3 传感器的物理基础	6
1.2 传感器的分类	7
1.3 传感器的发展趋势	11
1.4 测量方法及检测装置的基本性能	14
1.4.1 测量方法的分类	14
1.4.2 真值与平均值	17
1.4.3 检测装置的基本性能	17
1.5 传感器检测系统的静态特性	18
1.5.1 传感器静态特性的一般知识	18
1.5.2 传感器的主要静态性能指标	21
1.6 传感器检测系统的动态特性	25
1.6.1 一阶检测系统	26
1.6.2 二阶检测系统	27
1.7 传感器检测系统的标定与校准	28
1.7.1 标定与校准的概念	28
1.7.2 标定的基本方法	28
1.7.3 标定系统的组成	29
1.7.4 传感器的静态标定及设备	29
1.7.5 传感器的动态标定及设备	30
本章小结	30
知识拓展	31
习题	32
第 2 章 电阻应变式传感器	33
2.1 电阻应变式传感器的工作原理	33
2.1.1 电阻应变片(计)	33
2.1.2 应变片的动态响应特性	48
2.1.3 电阻应变片的温度误差及其补偿	50

2.2	电桥原理及电阻应变片桥路	55
2.2.1	电桥概述	55
2.2.2	不平衡单臂电桥的工作特性	57
2.2.3	差动电桥的工作特性	58
2.2.4	双差动电桥的工作特性	59
2.2.5	相对臂电桥的工作特性	59
2.2.6	提高不平衡电桥输出线性度的方法	59
2.2.7	直流电桥的调零	60
2.2.8	交流电桥及其平衡	61
2.3	电阻应变式传感器的典型应用	64
2.3.1	电阻应变式传感器应用特点	64
2.3.2	电阻应变式传感器应用	65
	本章小结	69
	创新设计	69
	习题	70
第3章	电容式传感器	71
3.1	电容式传感器的工作原理	71
3.1.1	电容式传感器的定义	71
3.1.2	电容式传感器的工作原理	71
3.2	电容式传感器的工作特性	72
3.2.1	变极距型电容传感器	72
3.2.2	变面积型电容传感器	75
3.2.3	变介质型电容传感器	76
3.2.4	电容式传感器的其他特性	78
3.3	电容式传感器的结构及抗干扰问题	79
3.3.1	温度变化对结构稳定性的影响	80
3.3.2	温度变化对介质介电常数的影响	80
3.3.3	绝缘问题	81
3.3.4	电容电场的边缘效应	81
3.3.5	寄生电容	82
3.4	电容式传感器的测量电路	83
3.4.1	调幅型测量电路	83
3.4.2	谐振测量电路	86
3.4.3	脉冲宽度调制电路	88
3.5	电容式传感器的应用	90
3.5.1	膜片电极式压力传感器	90
3.5.2	电容加速度传感器	91
3.5.3	电容式称重传感器	91

3.5.4	电容测厚仪	92
3.5.5	电容式微位移传感器(容栅传感器)	92
3.5.6	电容湿度传感器	93
	本章小结	93
	创新设计	93
	知识拓展	94
	习题	95
第4章	电感式传感器	96
4.1	自感式传感器	96
4.1.1	闭磁路式自感传感器(变气隙型自感传感器)	97
4.1.2	螺管插铁型自感传感器	98
4.1.3	差动自感传感器	98
4.1.4	自感传感器的测量电路	100
4.1.5	自感传感器的主要误差	103
4.2	互感式传感器	103
4.2.1	螺管型互感传感器	104
4.2.2	互感传感器的主要性能	105
4.2.3	差动变压器的测量电路	107
4.3	电涡流式传感器	109
4.3.1	电涡流传感器原理	110
4.3.2	电涡流传感器特性分析	111
4.3.3	高频反射电涡流传感器	112
4.3.4	低频透射电涡流传感器	112
4.3.5	测量电路	113
4.4	电感式传感器的应用	113
4.4.1	电(自)感式传感器的应用	113
4.4.2	差动变压器式传感器的应用	115
4.4.3	电涡流传感器的应用	116
	本章小结	118
	创新设计	118
	习题	119
第5章	热电阻式传感器	120
5.1	金属热电阻	120
5.1.1	金属热电阻的工作原理、材料	120
5.1.2	常用金属热电阻	121
5.1.3	金属热电阻传感器的结构	122
5.1.4	金属热电阻传感器的测量电路	122

5.1.5	金属热电阻应用	123
5.2	半导体热电阻	124
5.2.1	热敏电阻分类及结构	125
5.2.2	热敏电阻的特性	126
5.2.3	新材料热敏电阻	126
5.2.4	热敏电阻的线性化	127
5.2.5	热敏电阻应用	128
	本章小结	130
	创新设计	130
	习题	130
第 6 章	热电偶传感器	131
6.1	热电偶传感器的测温原理	131
6.2	热电偶应用定则	132
6.3	常用热电偶	133
6.4	补偿导线与冷端补偿	134
6.4.1	补偿导线	134
6.4.2	冷端补偿(基准接点补偿)	135
6.5	热电偶实用测量线路	135
6.5.1	测量单点温度的基本测温线路	135
6.5.2	测量两点之间温差的测温线路	136
6.5.3	测量平均温度的测量线路	136
6.5.4	测量多点温度之和的测温线路	137
6.5.5	若干只热电偶共用一台仪表的测量线路	137
6.6	热电偶应用实例	138
6.6.1	K 型热电偶测温应用	138
6.6.2	热电偶火药燃烧气体温度的测量	139
	本章小结	139
	创新设计	140
	习题	140
第 7 章	集成温度传感器	141
7.1	集成温度传感器基本工作原理	141
7.2	集成温度传感器的信号输出方式	142
7.2.1	电压输出型	142
7.2.2	电流输出型	142
7.3	一些常用集成温度传感器	143
7.4	集成温度传感器的应用	145
7.4.1	采用集成温度传感器的液位报警器	145

7.4.2 采用集成温度传感器的数字式温度计	146
7.4.3 空气流速检测	146
7.4.4 恒温土壤加热器	147
本章小结	147
创新设计	148
习题	148
第8章 霍尔传感器	149
8.1 霍尔效应和工作原理	149
8.2 霍尔元件连接方式和输出电路	151
8.2.1 基本检测电路	151
8.2.2 霍尔元件的连接方式	151
8.2.3 霍尔电势的输出电路	152
8.3 霍尔元件的测量误差和补偿方法	153
8.3.1 零位误差及补偿方法	153
8.3.2 温度误差及其补偿	153
8.4 霍尔传感器的应用	155
8.4.1 位移检测	155
8.4.2 霍尔转速测量装置	156
8.4.3 霍尔开关电子点火器	156
本章小结	157
创新设计	157
习题	158
第9章 光电式传感器	159
9.1 光电效应及光电器件	159
9.1.1 光电效应	159
9.1.2 光电管、光电倍增管	160
9.1.3 光敏电阻	162
9.1.4 光敏二极管和光敏三极管	164
9.1.5 光电池	167
9.2 光电式传感器的光源及测量电路	169
9.2.1 光电式传感器的光源	169
9.2.2 光电式传感器的测量电路	170
9.3 一般形式的光电传感器及其应用	171
9.3.1 一般形式的光电传感器	171
9.3.2 光电传感器的应用	172
本章小结	174
创新设计	174



习题	174
第 10 章 半导体传感器	175
10.1 半导体气敏传感器	175
10.1.1 半导体气敏传感器概述	175
10.1.2 半导体气敏传感器的机理	176
10.1.3 电阻型半导体气敏传感器	177
10.1.4 非电阻型半导体气敏传感器	179
10.1.5 气敏传感器应用	180
10.2 半导体湿敏传感器	181
10.2.1 湿度测量的名词术语	181
10.2.2 半导体湿敏传感器	182
10.2.3 湿敏元件对电源的特殊要求	185
10.2.4 湿度传感器的应用	185
本章小结	187
创新设计	187
习题	188
第 11 章 超声波传感器	189
11.1 超声波及其物理性质	189
11.1.1 超声波的波型及其传播速度	190
11.1.2 超声波的反射和折射	190
11.2 超声波传感器	191
11.2.1 超声探头的分类	192
11.2.2 超声换能器	192
11.3 超声波传感器应用	194
11.3.1 超声波流量传感器	194
11.3.2 超声波物体/物位检测	195
11.3.3 锻件探伤	196
11.3.4 声呐	196
11.3.5 超声测风速、风向	197
本章小结	197
创新设计	198
知识拓展	198
习题	200
第 12 章 压电式传感器	201
12.1 压电式传感器的工作原理	201
12.1.1 压电效应	201

12.1.2	压电效应表达式	202
12.1.3	石英晶体的压电效应机理	203
12.1.4	压电陶瓷的压电效应机理	205
12.1.5	压电式传感器	206
12.1.6	压电式传感器的特性	207
12.2	压电式传感器的等效电路及测量电路	210
12.2.1	压电式传感器的等效电路	210
12.2.2	压电式传感器的测量电路	211
12.3	压电式传感器的应用	213
12.3.1	压电式加速度传感器	213
12.3.2	大型设备设施的振动监测	214
12.3.3	压电式金属加工切削力测量	214
12.3.4	PVDF 心音脉搏传感器	215
12.3.5	高分子材料压电式传感器	215
	本章小结	216
	创新设计	216
	习题	216
第 13 章	传感器信号采集与处理技术	217
13.1	传感器数据采集装置的功能	218
13.2	数据采集装置的结构配置	218
13.2.1	多路扫描数据采集结构	219
13.2.2	多路数据并行采集结构	219
13.3	多路模拟开关和采样/保持器	220
13.3.1	多路模拟开关	220
13.3.2	采样/保持器	223
13.4	数据采集装置的技术性能	224
13.4.1	分辨率与精度	224
13.4.2	采样速度	225
13.5	数据采集系统设计	225
13.5.1	数据采集系统设计的基本原则	225
13.5.2	系统设计的一般步骤	226
13.6	数字滤波技术	229
13.6.1	算术平均值法	230
13.6.2	移动平均滤波	231
13.6.3	加权平均滤波	232
13.6.4	中值法	233
13.6.5	一阶惯性滤波法	233
13.6.6	抑制脉冲算术平均法	234



13.7 标度变换	235
13.7.1 标度变换原理	235
13.7.2 非线性检测信号的标度变换	235
13.8 非线性补偿技术	236
13.8.1 线性插值法	237
13.8.2 二次抛物线插值法	237
13.8.3 查表法	238
本章小结	239
知识拓展	242
习题	244
第 14 章 创新设计方法及案例	246
14.1 检测技术创新设计方法	246
14.1.1 检测技术创新设计的一般步骤	246
14.1.2 检测技术创新设计的基本方法	247
14.2 检测技术创新设计案例	248
14.2.1 设计案例一：司机瞌睡监测提醒装置	248
14.2.2 设计案例二：跳远犯规检测器	249
14.2.3 设计案例三：安全输液报警器	250
14.2.4 设计案例四：雨天自动收衣装置	251
14.2.5 设计案例五：玻璃破碎监测系统	252
14.2.6 设计案例六：热电阻真空度测量装置	253
14.2.7 设计案例七：台灯照度检测及自动调光装置	254
14.2.8 设计案例八：防止酒后驾车装置	254
14.2.9 设计案例九：燃气灶防干烧装置	255
14.2.10 设计案例十：公交投币箱假硬币检测仪	256
知识拓展	257
创新设计	258
参考文献	261

绪 论

1. 本教材的性质和内容

传感器原理与应用技术是当今信息技术的重要组成部分。它是研究信息提取、信息转换和信息处理的理论与应用技术的学科。

传感器原理与应用技术的信息提取是从自然界、社会、生产过程中或科学实验中获取人们需要的信息,如压力、重量、速度、温度等;信息的转换是将采集的信息转换成可以进行传输、显示及其他便于处理的信号;信息处理的目的是人们把已经获得的信息进行加工、运算、分析或综合,以便进行显示、报警、预测、计量、保护、控制、调度和管理等,达到预防自然灾害或事故的发生、实现生产和管理的自动化、提高生产效率和产品质量、顺利完成科学研究的试验探索等任务。

传感器原理与应用技术不仅是一门实用性很强的学科,而且是一门综合性、边沿性的学科。其综合性表现在它综合了传感器技术、误差理论、信号处理、电子技术、单片机技术、人工智能、模糊处理等理论和技术;边沿性表现在其检测技术渗透到各个不同的学科领域,如机械、电气、信息、采矿、勘探、环保、化工、建筑、生物、医学等。

2. 传感器原理与应用技术的广泛应用及发展前景

传感器检测技术是人类感觉器官的扩展和延伸,是人类观察自然和测量自然界各种现象的电路手段。人类通过视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉获得外部信息,而检测技术则通过不同的传感器获得外部信息,其范围和能力远远超过人类。比如:人的视觉能力是非常有限的,但是激光传感器却可以非常精确地探测地球至月球的距离,其测量误差已达毫米(mm)级;红外传感器可以清晰地观察夜间的事物;超声波传感器可以“听”见人耳听不见的超声波;人的嗅觉只能识别少量有刺激性的气味,但气体传感器不仅识别的气体种类多,而且可以非常准确地识别气体的浓度,比如大家所熟悉的煤气,当煤气泄漏时,人们之所以能够嗅出,是有意在煤气中人为掺入了少量的 H_2S ,而真正燃烧的气体 CO 是没有气味的,若不掺入 H_2S ,人的嗅觉就不灵了,但是传感器却可以非常灵敏地检测出这些气体;传感器的触觉比人更敏感和准确,比如人们一般会用手触摸额头,以判断是否发烧,但这种判断是不准确的,因此医生要用体温表或测温仪对人体进行较精确的测试,此外对压力、重量等的测量也是如此,先进的检测手段能够精确地对压力、重量等进行计量;人的味觉能够大致地识别酸甜苦辣,但是味觉传感器却能够非常精确地识别食品的含糖量、酸碱度等。

传感器检测技术的应用是非常广泛的。传感器检测技术在军事方面的应用促进了许多先进的军事武器的诞生,如各种命中率高的导弹、飞弹、导弹防御系统、武器瞄准系统、智能地雷、无人驾驶飞机等;传感器检测技术在医疗方面的应用生产了许多先进的医疗诊断设

备,如 X 光透射仪、超声波诊断仪、CT 诊断仪、核磁共振诊断仪等;传感器检测技术在工矿安全方面的应用,对保障生产安全发挥了重要的作用,如矿井顶板监测、煤与瓦斯突出预测、可燃易爆气体泄漏的监测等;传感器检测技术是生产自动化中必不可少的重要环节,如自动机床、食品的自动配料生产控制、各种电子设备的自动装配生产线等;传感器检测技术还广泛地应用于航天、机器人等先进制造领域中,并发挥着重要的作用。

传感器检测技术虽然得到广泛的应用,但是检测技术还在不断地发展,还存在许多需要解决的问题。比如目前人们可以检测的是地震发生后的规模,即准确地检测出地震的级别,但是如何在地震发生前进行预报,还是一个世界级的难题。为什么有些动物在地震发生前有异常的行为?这说明地震的发生有一些前兆,或是电磁场的变化,或是地球内壳发出的某种声波,人们正在进行积极的研究,相信很快就能得到解决。目前人们探测火灾主要采用离子或光电式的烟雾传感器和温度传感器,这些检测技术只能对火灾发生后的状态进行检测报警。如何在火灾发生前进行监测预警,对避免或减小火灾的损失是非常重要的。人们也在对此进行研究,也提出了各种有效的方案,比如分析火灾发生前的气体特征就是一种很有前途的火灾预警方法。癌症及其他一些诸如肿瘤等疑难疾病,发现得越早,越有希望治愈。目前有些疾病难以早期发现,比如胰腺癌,一旦发现便是晚期,治愈率很低。是否利用先进的检测技术解决这个问题?人们对此进行了大量的研究,并发现在人体内细胞病变时,往往其局部温度要高于周围的温度,如果能够探测到这一温度的变化,完全可以早期发现癌症及肿瘤,尽早采取措施进行治疗。人体生物电信息检测是一个具有广泛应用前景的研究课题,其中有一个应用涉及“学习”问题。人们有一个梦想,如果能够将人们通过感觉器官获得知识的生物电信息检测出来,则完全可以将书本的内容转换成相应的电信息输送给人的大脑,那时候,学习的模式将产生巨大的变化。在高速公路上,由于汽车速度较快,在天气不好、能见度较差时,经常发生汽车追尾碰撞事故,这种事故有望利用先进的检测技术去解决。

3. 本教材的目的

使学生掌握传感器原理与应用技术的基本概念、基本理论,掌握常用传感器的工作原理、检测电路和典型应用,熟悉和了解信号处理变换及抗干扰等常用技术,为今后的工作及其他专业课程的学习奠定基础。

思考问题

- (1) 在我们的日常生活中,传感器检测技术的应用无所不在,如冰箱、空调、洗衣机等。传感器检测技术是如何应用的?它们发挥了哪些作用?
 - (2) 在我们周围还有什么新问题可以应用传感器检测技术解决?
-