



现代传感器技术 ——面向物联网应用

刘少强 张靖 编

- ◎ 深入讲解现代传感器的原理、技术与应用
- ◎ 着重介绍传感器技术在物联网中的应用
- ◎ 配有教学课件，方便教学使用



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国家级特色专业（物联网工程）规划教材

现代传感器技术 ——面向物联网应用

刘少强 张 靖 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是依托中南大学国家级特色专业(物联网工程)的建设,结合国内物联网工程专业的教学情况编写的。本书系统、全面地介绍了面向物联网应用的现代传感器技术,主要内容涵盖传感器的性能与评价,传感器的基本原理、效应与器件,机械量传感器,热学量传感器,其他物理量传感器,化学和生物传感器,集成传感器和微传感器,智能传感器技术与网络化及接口标准,低功耗的传感器电路设计和数据获取及处理方法,物联网典型应用中的传感器和典型节点方案等。

本书可作为普通高等学校物联网工程及其相关专业的教材,也可供从事物联网及其相关专业的人士阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代传感器技术:面向物联网应用/刘少强,张靖编. —北京:电子工业出版社,2014.2
国家级特色专业(物联网工程)规划教材
ISBN 978-7-121-22381-5



I. ①现… II. ①刘… ②张… III. ①传感器—高等学校—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 010968 号

责任编辑:苏颖杰

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×980 1/16 印张:29 字数:738 千字

印 次:2014 年 2 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

出版说明

会委教材姓

物联网是通过射频识别 (RFID)、红外感应器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备,按约定的协议,把任何物品与互联网相连接,进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络概念。物联网是继计算机、互联网和移动通信之后的又一次信息产业的革命性发展。物联网产业具有产业链长、涉及多个产业群的特点,其应用范围几乎覆盖了各行各业。

2009年8月,物联网被正式列为国家五大新兴战略性新兴产业之一,写入“政府工作报告”,物联网在中国受到了全社会极大的关注。

2010年年初,教育部下发了高校设置物联网专业申报通知,截至目前,我国已经有100多所高校开设了物联网工程专业,其中有包括中南大学在内的9所高校的物联网工程专业于2011年被批准为国家级特色专业建设点。

从2010年起,部分学校的物联网工程专业已经开始招生,目前已经进入专业课程的学习阶段,因此物联网工程专业的专业课教材建设迫在眉睫。

由于物联网所涉及的领域非常广泛,很多专业课涉及其他专业,但是原有的专业课的教材无法满足物联网工程专业的教学需求,又由于不同院校的物联网专业的特色有较大的差异,因此很有必要出版一套适用于不同院校的物联网专业的教材。

为此,电子工业出版社依托国内高校物联网工程专业的建设情况,策划出版了“国家级特色专业(物联网工程)规划教材”,以满足国内高校物联网工程的专业课教学的需求。

本套教材紧密结合物联网专业的教学大纲,以满足教学需求为目的,以充分体现物联网工程的专业特点为原则来进行编写。今后,我们将继续和国内高校物联网专业的一线教师合作,以完善我国物联网工程专业的专业课程教材的建设。

电子工业出版社

教材编委会

出版说明

编委会主任：施荣华 黄东军

编委会成员：（按姓氏字母拼音顺序排序）

董健 高建良 桂劲松

贺建彪 刘连浩 刘少强

刘伟荣 鲁鸣鸣 张士庚

前言

PREFACE

传感器技术是信息技术的三大支柱之一。随着计算机、微电子、材料和通信等关键基础技术,以及应用技术的快速发展,尤其是近几年来消费电子和生物工程、医疗保健等应用领域不断涌现的需求驱动,传感器技术进入了加速发展阶段,并且成为当今多种电子产品技术革新的主动力,传感器的应用也从工业领域扩展到人们的日常生活中。因此,传感器技术也成为电子、电气信息类专业及机电、生医工程等相关专业的核心或主要课程。

传感器技术涉及众多学科和技术门类,其知识内容与应用分布很广,因而传感器课程涉及较多其他课程的知识内容,其工程性和应用性较强。开设传感器技术课程是出于相同的目的,但不同专业的知识基础与结构不同,对学习与应用传感器的要求及其层次各不相同。因此,按专业需要选择合适的课程内容和制定相应的学习目标与要求,可解决或缓解该课程内涵丰富与学时有限之间的矛盾,也有助于在有限学时内实现教学目标、提高教学质量。与此相应,传感器技术课程教学需要符合不同专业学习目标与层次要求的不同教材。

物联网是现代信息技术发展到一定阶段后出现的一种聚合性应用与技术的提升,它是各种感知技术的广泛应用,通过部署多种类型传感器,捕获不同内容和格式的实时信息。“物联天下,传感先行”,传感器是物联网感知世界的首要环节。相应地,传感器技术课程就成为物联网专业必需的核心课程。物联网不仅仅提供了传感器的连接,其本身还具有智能处理的能力,能将传感器和智能处理相结合,从传感器获得的海量信息中分析、加工和处理出有意义的信息,以适应不同用户的需求,发现新的应用领域和应用模式。在传感器的用量、成本、功耗和可靠性等方面,物联网有其不同于传统应用领域的要求,这使其所用传感器与其他领域的传感器既相同又有别,也给传感器技术提供了新的发展动力。

物联网是一种建立在互联网上的泛在网络,其重要基础和核心仍旧是互联网,需通过各种有线和无线网络与互联网融合,将物体的信息实时准确地传递出去。因此,物联网专业有许多的网络、通信和信息处理课程需要学习。该专业对传感器技术课程内容的学习深度要求应低于测控专业,但对内容广度的要求却不亚于测控专业而应高于自动化等专业。目前,有关传感器技术的教材较多,但大多面向测控、自动化、电子信息等专业,符合物联网专业学习目标要求、适应该专业知识结构特点的教材还很少见。因此,有必要编写主要针对物联网专业特点与教学目标要求的传感器技术教材。

基于上述原因,在电子工业出版社和中南大学信息科学与工程学院的支持下,我们以面向物联网工程专业本科教学为目标,根据传感器技术的特点尤其是物联网用传感器的特点与发展趋势,结合作者在测控、自动化、电气、物联网等信息类本科专业的传感器与检测技术课程教学的实践经验和相关科研成果,编写了本书。考虑到以正确选择与应用传感器为主要学习目标的物联网工程专业本科生所具有的知识基础,根据其学习传感器知识的深度与广度需求,本书对传感器技术基础内容的介绍采用了先按转换原理分类介绍传感器原理、后按参量分类介绍具体传感器的混合编排方式,以便于学习基本原理,同时有利于了解、掌握各种传感器的不同特点与应用方式。在全书的内容组织方面,遵循了从基本原理出发、侧重不同传感器的应用及比较、分模块结构布局 and 兼顾经典与现代内容的原则。

本书由四个部分构成。第一部分由第1~3章组成,为传感器技术的基础内容,包括传感器的概述、性能指标与评价、常用的敏感与转换原理和基本量的测量方法与测量电路介绍。第二部分由第4~7章组成,按实用中的测量参量类别,分章介绍了常见物理量传感器和化学及生物量传感器的构成原理、特点及应用。其中对物理量传感器按机械量、热学量和以光学量与电学量为主的其他量进行分章介绍。第三部分由第8~10章组成,介绍了发展中的现代传感器技术,内容包括应用广泛的集成与微传感器、智能传感器技术与网络化接口标准、实现传感器低功耗的关键技术。第四部分即第11章,针对物联网应用的内容,主要介绍了典型应用中的传感器概况和典型传感器节点的解决方案示例。

对于本书的使用可参考如下方式:有关传感器的技术基础与基本原理内容的教学,可以以第一部分为主、结合第二部分的内容选择性地介绍具体参量传感器及应用特点;对于进一步的学习和针对物联网应用的传感器教学,则以第三部分的内容为主,结合第四部分的相应实例内容进行讲解。

为方便读者学习本书介绍的内容,按章编写了思考题与习题。

本书除了供物联网工程专业学生学习外,也可供相关专业学生以及其他从事传感器应用的工程技术人员学习参考。

本书由中南大学刘少强和东南大学张靖编写,其中参考、引用了多位专家、学者的著作、论文,在此一并表示感谢。同时还要感谢樊晓平、施荣华、年晓红、凌玉华和黄东军等教授对编写本书的支持和帮助,感谢陈文见、陈翔、尹超等硕士生的协助。最后要特别感谢本书的策划编辑田宏峰先生给予编者的理解和支持。

传感器的内容非常多,考虑到物联网工程以及其他相关专业的学生具备的基础知识结构不同、学习的要求不同,同时也为了控制篇幅,本书略去了一些实际常用的传感器内容和有关敏感材料的详细介绍,因而可能造成内容选择上的缺失或偏差。由于编者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2013年12月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 传感器的地位和作用	2
1.2 传感器的相关概念	3
1.2.1 测量和测量系统	3
1.2.2 传感器的定义	4
1.2.3 传感器的分类	5
1.3 传感器的一般构成	7
1.3.1 传感器的基本组成	7
1.3.2 传感器的信号调理与接口	9
1.4 传感器技术的特点与发展趋势	11
1.4.1 传感器技术的特点	11
1.4.2 传感器技术的发展趋势	12
1.5 物联网用传感器的特点和发展趋势	13
1.5.1 物联网用传感器的需求及技术特点	13
1.5.2 物联网用传感器的技术与应用发展趋势	14
思考题与习题	14
第 2 章 传感器的性能与评价	17
2.1 传感器的特性概述	18
2.1.1 与测量系统的匹配	18
2.1.2 机械特性	18
2.1.3 工作特性	19
2.2 传感器的误差	19
2.2.1 理想传感器与实用中的局限性	19
2.2.2 误差及其来源	19
2.3 传感器的静态特性	21

2.3.1	输入-输出静态函数关系	21
2.3.2	线性度	22
2.3.3	灵敏度与测量范围	23
2.3.4	迟滞特性与重复性	24
2.3.5	分辨力与阈值	25
2.3.6	稳定性	25
2.3.7	综合误差	26
2.4	传感器的动态特性	26
2.4.1	动态特性分析方法	27
2.4.2	频率响应特性与动态品质的关系	27
2.4.3	时域响应特性与动态品质的关系	30
2.5	传感器的标定	31
2.6	传感器的合理选用	35
	思考题与习题	37
第3章	传感器的基本原理、效应与器件	39
3.1	概述	40
3.2	基本电参量——电阻、电容、电感传感原理与测量	41
3.2.1	电阻传感器与电阻参数的测量	42
3.2.2	电容传感器原理与电容参数的测量	49
3.2.3	电感传感器原理与电感参数的测量	59
3.3	弹性效应和弹性元件	66
3.3.1	弹性敏感元件的基本特性	66
3.3.2	弹性敏感元件的材料	70
3.4	电阻应变效应和压阻效应及器件	72
3.4.1	电阻应变原理和电阻应变片	72
3.4.2	应变片和应变式传感器的特点及应用	74
3.4.3	压阻效应	75
3.5	压电效应与器件	80
3.5.1	压电效应与材料	80
3.5.2	压电元件的等效电路和测量电路	81
3.5.3	压电式传感器的结构	83
3.6	光电效应与传感器件	84
3.6.1	光电效应	84
3.6.2	光电效应主要器件及基本特性	85

3.6.3	集成光电检测器件	89
3.6.4	光电传感器的构成与类型	90
3.6.5	红外传感原理与探测器特点	92
3.7	光纤传感原理与类型	94
3.7.1	光纤传感原理	94
3.7.2	光纤传感器的工作原理及组成	98
3.8	磁电效应和磁敏器件	100
3.8.1	磁电效应与器件结构	100
3.8.2	霍尔效应与半导体器件	101
3.8.3	磁电阻效应与元件	104
3.8.4	磁敏晶体管	109
3.8.5	磁敏器件的应用	111
3.9	磁致伸缩效应和压磁效应	111
3.9.1	磁致伸缩效应	111
3.9.2	压磁效应	112
3.10	热阻效应、热电效应和热释电效应	113
3.10.1	热阻效应与热敏器件	113
3.10.2	热电效应及器件	114
3.10.3	热释电效应及器件	115
3.11	与声波有关的效应与器件	116
3.11.1	超声波检测的原理和超声波换能器	116
3.11.2	声表面波原理与器件	119
3.12	核辐射传感原理	122
3.12.1	核辐射检测的物理基础	122
3.12.2	典型核辐射传感器	123
	思考题与习题	124
第4章	机械量传感器	127
4.1	线位移传感器	128
4.1.1	磁阻式线位移传感器	128
4.1.2	光纤小位移传感器	130
4.1.3	光电式线位移传感器	133
4.2	物位传感器	134
4.2.1	超声波物位传感器	134
4.2.2	电容式物位传感器	135

002	4.2.3 磁致伸缩物位传感器	136
002	4.2.4 核辐射物位计	137
000	4.3 数字式位移传感器	138
110	4.3.1 绝对编码器式角位移传感器	138
110	4.3.2 增量编码器	142
800	4.3.3 光栅精密线位移传感器	144
001	4.4 速度传感器	146
001	4.4.1 光电式速度传感器	146
101	4.4.2 磁电式速度传感器	148
101	4.4.3 多普勒效应测速	149
001	4.5 转速传感器	151
111	4.5.1 光电式转速传感器	151
111	4.5.2 磁电感应式转速传感器	152
111	4.5.3 霍尔式转速传感器	153
011	4.6 加速度传感器	154
111	4.6.1 压电式加速度传感器	154
111	4.6.2 电容式加速度传感器	157
111	4.6.3 电阻应变式、压阻式加速度传感器	158
211	4.7 力传感器	158
811	4.7.1 应变式力与称重传感器	158
811	4.7.2 压电式力传感器	163
011	4.8 压力传感器	164
001	4.8.1 膜片压力传感器	164
001	4.8.2 压电式压力传感器	167
001	4.8.3 光纤压力传感器	169
151	4.9 扭矩传感器	170
001	4.9.1 光栅扭矩传感器	172
001	4.9.2 磁弹性扭矩传感器	173
801	4.10 流量传感器	175
001	4.10.1 差压式流量传感器	176
001	4.10.2 涡轮式流量传感器	177
101	4.10.3 电磁式流量传感器	178
101	4.10.4 漩涡式流量传感器	179
001	4.10.5 超声波流量传感器	179

思考题与习题	180
第5章 热学量传感器	183
5.1 概述	184
5.1.1 温标	184
5.1.2 温度测量的特点	184
5.1.3 测温方法与传感器的分类	185
5.2 基于晶体管参数的温度传感器	186
5.2.1 PN结温度传感器	186
5.2.2 正比于热力学温度核心电路	187
5.3 热电阻温度传感器	191
5.3.1 金属热电阻	191
5.3.2 半导体热敏电阻	194
5.3.3 测温电桥	195
5.4 热电偶	195
5.4.1 热电偶的构成要求与类型	195
5.4.2 热电偶测温所需的工作条件	196
5.5 光纤温度传感器	200
5.5.1 半导体谱带吸收式光纤温度传感器	200
5.5.2 折射式光纤温度传感器	201
思考题与习题	203
第6章 其他物理量传感器	205
6.1 光学量传感器	206
6.1.1 照度传感器	206
6.1.2 亮度传感器	206
6.1.3 色度传感器	207
6.1.4 红外和紫外光传感器	210
6.2 视觉传感器件	212
6.2.1 CCD图像传感器件	212
6.2.2 COMS图像传感器件	219
6.3 电流和电压传感器	225
6.3.1 霍尔电流传感器	225
6.3.2 磁平衡式霍尔电压传感器	226
6.3.3 光纤电压传感器	228

6.3.4	光纤电流传感器	229
6.3.5	光纤电场强度传感器	229
6.4	声传感器	231
6.4.1	电容式传声器	232
6.4.2	驻极体传声器	234
	思考题与习题	235
第7章	化学和生物传感器	237
7.1	化学传感器概述	238
7.2	气体传感器	239
7.2.1	气体传感器概况	239
7.2.2	半导体式气体传感器	242
7.2.3	电化学式气体传感器	244
7.2.4	热化学气体传感器	246
7.2.5	其他气体传感器	247
7.3	湿度传感器	248
7.3.1	概述	248
7.3.2	半导体湿敏电阻元件	249
7.3.3	电容式湿敏元件	252
7.3.4	露点式湿度传感器	253
7.4	离子传感器	254
7.4.1	离子选择电极离子传感器	254
7.4.2	场效应管离子传感器	256
7.5	生物传感器	257
7.5.1	生物传感器概述	257
7.5.2	酶传感器	260
7.5.3	酶传感器的应用	263
7.5.4	免疫传感器	264
	思考题与习题	269
第8章	集成传感器和微传感器	271
8.1	传感器的集成化	272
8.1.1	传感器集成化与集成途径及特点	272
8.1.2	典型集成传感器	274

8.2	机械量微传感器	277
8.2.1	微机械加工技术与机械量微传感器概述	277
8.2.2	典型微机械压力传感器	279
8.2.3	加速度微传感器	282
8.2.4	微机械陀螺	290
8.2.5	微传声器	292
8.3	磁微传感器	293
8.3.1	AMR 磁阻传感器	293
8.3.2	GMR 磁阻传感器	295
8.3.3	微型磁通门磁强计	296
8.4	热和红外辐射量微传感器	299
8.4.1	声表面波温度传感器	299
8.4.2	红外热敏微传感器	300
8.5	化学量和生物量微传感器	302
8.5.1	离子选择微电极	302
8.5.2	基于 MEMS 技术的气体微传感器	305
8.5.3	微悬臂梁式生物传感器	308
8.5.4	基于生物微电子机械系统的细胞传感器	311
	思考题与习题	311
第 9 章	智能传感器技术与网络化及接口标准	313
9.1	智能传感器概述	314
9.1.1	智能传感器的定义与结构	314
9.1.2	智能传感器的功能与性能特点	314
9.1.3	传感器智能化的途径	315
9.2	基本传感器的选用原则	316
9.3	智能化的主要实现方法和技术	317
9.3.1	非线性自校正	318
9.3.2	温度误差补偿	319
9.3.3	自校准和自适应增益及量程调整	323
9.4	网络化智能传感器及接口标准	326
9.4.1	网络化智能传感器	326
9.4.2	智能传感器接口标准——IEEE 1451	329

思考题与习题	337
第 10 章 低功耗的传感器电路设计和数据获取及处理方法	339
10.1 信号调理电路及低功耗设计原则	340
10.1.1 信号调理及低功耗的意义	340
10.1.2 常用信号调理电路功能类型	341
10.1.3 调理电路低功耗设计原则	342
10.2 典型信号调理集成器件及应用	345
10.2.1 专用集成调理器件	345
10.2.2 多功能集成调理器件	349
10.3 低功耗电源管理技术	366
10.3.1 动态电源管理设计	367
10.3.2 电源调整和按负载多方式分时供电	369
10.4 低功耗的数据获取方式——准数字传感器的数据转换与测量	372
10.4.1 频率式传感器的常见实现技术	373
10.4.2 准数字传感器的参数转换	376
10.4.3 时间调制信号的测量法	378
10.5 面向资源有限传感器节点的数字滤波与数据压缩方法	383
10.5.1 适应低端平台的数字滤波技术——中值滤波	384
10.5.2 适应低端平台的数据压缩方法	386
思考题与习题	388
第 11 章 物联网典型应用中的传感器和典型节点方案	391
11.1 物联网典型应用中的传感器及其应用概况	392
11.1.1 智能家居中的传感器	392
11.1.2 环境监测中的传感器	401
11.1.3 健康监护中的人体生理量传感器	409
11.2 传感器节点典型解决方案举例	416
11.2.1 一种可持续监测振动的低功耗无线传感器节点方案	416
11.2.2 一种灌区监测无线传感器网络节点方案	424
11.2.3 一种穿戴式健康监护传感器节点方案	430
思考题与习题	445
参考文献	446

绪论

第1章

绪论



1.1 传感器的地位和作用

人类通过视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉这五种感觉器官来直接获取外界信息，并通过神经将载有外界信息的信号传递给大脑进行分析、综合和判断，从而感知外界事物与信息，并做出相应反应。人类感知外部世界的五官是一种特殊的传感器。在古代，人们观天象而事农耕，察火色而冶铜铁，依靠的是自身的五官。随着科学技术的发展和人类社会的进步，人类在认识和改造自然的过程中意识到仅靠自身天然的感觉器官还远远不够，因此，不断地创造劳动工具，出现了一系列代替、增强和补充人类感官功能的方法和手段，产生了各种用途的人造感官，即被称为“电五官”的传感器。自18世纪产业革命以来，特别是20世纪开始的信息革命后，传感器已成为人类准确、可靠地获取自然和生产领域相关信息的主要工具。

人类社会已进入信息时代，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。在信息时代，人们的社会活动主要依靠对信息资源的开发、利用，而信息资源的开发和利用则有赖于信息技术。

信息技术是通过对外界信息的采集、传输和处理来反映控制所需的过程的技术。信息技术由测量技术、计算机技术、通信技术三部分组成，测量技术是关键和基础。虽然信息技术所涉及的技术领域非常宽广，但作为一个信息技术系统，其构成单元只有三个，即作为测量系统基础的传感器、通信系统和计算机系统。因此，作为获取外界信息窗口的传感器，在信息技术系统中的地位十分重要。

传感器的作用包括信息收集（如计量测试、状态监测）、信息交换（如读/写磁盘和光盘数据）和控制信息采集（如在各种自动控制系统中读取反馈信息）。其中，测量是传感器的基本作用，也是应用传感器的目的。传感器在很大程度上影响和决定了系统的功能。以自动化系统为例，首先要检测到信息，才能去进行自动控制，因此传感器首当其冲。如果传感器不能获取信息，或者所获的信息不确切，那么要显示这些信息并对其进行处理就十分困难，甚至没有意义。没有感受信息的传感器，计算机就得不到任何信号，计算机的各种功能也就无法发挥。因此，传感器关系到一个测控系统的成败。

传感器的重要性还体现在它广泛地应用于各个领域，在国防、航空、航天、交通运输、能源、电力、机械、石油、化工、轻工、纺织等工业部门和环境保护、生物医学工程等领域都已采用大量的传感器，而且也广泛应用到办公设备、家用电器中，如电饭锅、洗衣机、吸尘器、现金出纳机、自动门等。在现代农业发展和工厂化农业的实现过程中也运用了大量的传感器。当前，传感器正大量应用于个人消费电子终端产品中，例如将传感器应用于原本以通信功能为主的移动电话中，既扩展了手机的功能，也为传感器应用开辟了新领域，促进了传感器技术的发展。所以有人把传感器视为“支撑现代文明的科学技术”。