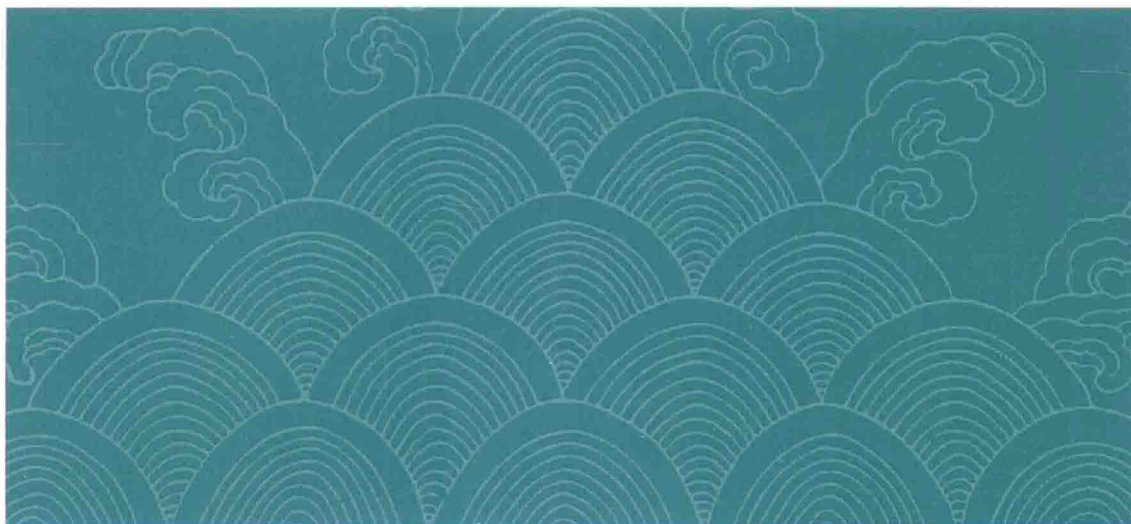


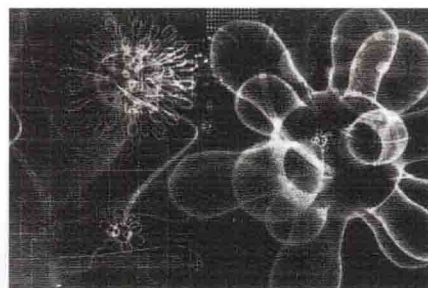


INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY TRAINING PLANNING MATERIALS
SENSOR TECHNOLOGY IN INTERNET OF THINGS



工业和信息技术人才培养规划教材

物联网传感器 技术与应用



Sensor Technology in Internet of Things

物联网核心技术；按“物联网传感器系统架构-各类传感器详细分析-传感器数字化、集成化、智能化、网络化”展开全书

黄玉兰 ◎ 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



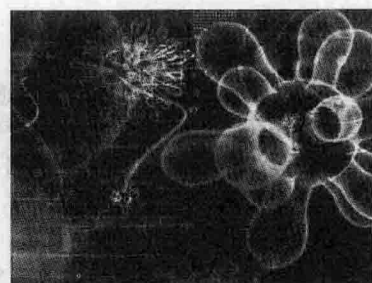
精品系列



INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY TRAINING PLANNING MATERIALS
SENSOR TECHNOLOGY IN INTERNET OF THINGS

工业和信息化人才培养规划教材

物联网传感器 技术与应用



Sensor Technology in Internet of Things

黄玉兰 © 编著

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

物联网传感器技术与应用 / 黄玉兰编著. — 北京 :
人民邮电出版社, 2014.9
工业和信息化人才培养规划教材
ISBN 978-7-115-35731-1

I. ①物… II. ①黄… III. ①互联网络—应用—教材
②智能技术—应用—教材③传感器—教材 IV.
①TP393.4②TP18③TP212

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第138686号

内 容 提 要

本书系统地介绍了传感器的基础知识,详细讲解了各类传感器的工作原理,简要介绍了传感器微型化、集成化、智能化和网络化的发展方向,清晰地阐明了传感器的终极目标是构建物联网。全书共分12章,第1章为物联网与传感器概述;第2章为传感器的一般特性;第3章~第10章详细介绍了电阻式、电容式、电感式、热电式、压电式、磁电式、光电式(包括光电效应、红外、CCD、光纤)、化学(包括离子敏、气敏、湿敏)和生物传感器的转换原理、结构组成、特性分析、测量方法和应用实例;第11章和第12章介绍了传感器的数字化、集成化、智能化和网络化。本书内容丰富,具有可读性、知识性和完整性,不仅全面介绍了传感器的基本理论,也介绍了现代传感器所涉及的机电系统、智能传感器、多传感器信息融合、无线传感器网络和物联网等内容。为便于学习,书中每章均配有例题、小结、思考题和习题。

本书面向应用型人才的培养,适合作为高等院校物联网、电子信息、自动化、计算机应用、机电一体化、测控技术、仪器仪表及相关专业学生的教材。本书对于从事物联网传感器工作的工程师来说也是一本很好的参考书。

◆ 编 著 黄玉兰
责任编辑 王 威
责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16.25
字数: 406千字

2014年9月第1版
2014年9月河北第1次印刷

定价: 44.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315



前 言 PREFACE

传感器是一种检测装置,能够感受到被测量(包括物理量、化学量和生物量等)的信息,并能将检测到的信息变换成其他形式的信号(一般为电信号),是实现自动检测的首要环节。传感器技术是关于传感器设计、制作、测量和应用的综合技术。传感器技术、通信技术和计算机技术并列为信息技术的三大支柱,它们构成了信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”,分别用于完成信息的采集、传输和处理。传感器是现代信息系统的源头,如果没有先进的传感技术,通信技术和计算机技术就成了无源之水、无本之木。

物联网的英文名称为 **The Internet of Things**。由该名称可见,物联网就是“物与物相连的互联网”。这里有两层意思,第一,物联网的基础仍然是互联网,是在互联网基础之上延伸和扩展的一种网络;第二,其用户端延伸和扩展到了任何物体,在物体之间进行信息的交换和通信。

现代传感器技术已经使信息的获取从单一化逐渐向集成化、智能化和网络化的方向发展,特别是微机电系统(MEMS)、智能传感器、多传感器信息融合和无线传感器网络等的出现,将传感器逐步带入了物联网的时代。随着物联网时代的到来,世界开始进入“物”的信息时代。传感器可以获取“物”的准确信息,是实现物联网的基石。

关于本书

随着高等教育对人材培养模式的转变,要求学生注重知识的基础性、完整性和应用性。因此,本书加强了传感器基础知识的阐述和基本理论的讲解,强调了从传统传感器到现代传感器知识体系的完整性,并以技术为主线突出了传感器系统在各个领域的应用实例。

本书内容组织方式

本书通过 12 章内容全面介绍了传感器技术与应用,并体现出传感器的终极目标是实现物联网。本书第 1 章概述了物联网与传感器的系统架构;第 2 章讨论了传感器的一般特性;第 3 章~第 10 章详细讲解了各类传感器的转换原理、结构组成、特性分析、测量方法和应用实例;第 11 章介绍了数字化传感器;第 12 章介绍了集成化、智能化和网络化传感器。

本书特色

- 本书初衷明确,既讨论传统的传感器,又介绍现代传感器的发展方向。
- 本书架构清晰,按“物联网传感器系统架构-各类传感器详细分析-传感器数字化、集成化、智能化、网络化”展开全书。
- 本书视角全面,覆盖了电阻式、电容式、电感式、热电式、压电式、磁电式、光电式(包括光电效应、红外、CCD、光纤)、化学(包括离子敏、气敏、湿敏)和生物传感器。
- 本书面向应用型人才培养,注重物理概念的诠释、工作原理的讲解、测量方法的介绍和应用实例的阐述,避免较深的理论内容和繁杂的公式推导,突出技术的应用性,并保持与现代信息技术发展同步。

本书作者

本书由黄玉兰教授编写。中国科学院西安光学精密机械研究所的博士生夏璞协助完成了本书的资料收集、插图和校对工作，在此表示感谢。夏岩提供了一些物联网和传感器的资料，他在西门子公司工作多年，实践经验丰富，在本书的编写中给出了一些建议，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免会有不足之处，敬请广大专家和读者予以指正。电子邮件地址：huangyulan10@sina.com。

编 者

2014年3月

于西安邮电大学

目 录 CONTENTS

第 1 章 物联网与传感器概述 1

1.1 物联网与传感器的概念	1	1.3.3 传感器微型化、多功能、集成化的发展趋势	7
1.1.1 物联网的概念	1	1.3.4 传感器智能化、多融合、网络化的发展趋势	8
1.1.2 传感器的概念	2	1.4 无线传感器网络	9
1.1.3 传感器是物联网全面感知的基石	2	1.4.1 无线传感器网络的概念	9
1.2 传感器的组成和分类	3	1.4.2 无线传感器网络的结构和特点	10
1.2.1 传感器的组成	3	1.4.3 无线传感器网络的发展阶段	12
1.2.2 传感器的分类	3	1.4.4 物联网中的无线传感器网络	13
1.3 传感器的技术特点和发展趋势	5	本章小结	14
1.3.1 传感器的技术特点	5	思考题和习题	15
1.3.2 传感器新原理、新材料、新工艺的发展趋势	7		

第 2 章 传感器的一般特性 16

2.1 传感器的数学模型和特性	16	2.2.2 动态标定	26
2.1.1 静态模型	16	2.2.3 提高传感器性能的方法	26
2.1.2 静态特性	16	2.2.4 传感器测试不失真的条件	26
2.1.3 动态模型	20	2.3 传感器一般特性举例	26
2.1.4 动态特性	21	本章小结	34
2.2 传感器的标定与校准	25	思考题和习题	34
2.2.1 静态标定	25		

第 3 章 电阻式传感器 36

3.1 弹性敏感元件	36	3.3.2 金属电阻应变片	45
3.1.1 弹性敏感元件的材料	36	3.3.3 测量电路	48
3.1.2 弹性敏感元件的结构	37	3.3.4 金属电阻应变式传感器应用实例	51
3.1.3 弹性敏感元件的基本特性	39	3.4 压阻式传感器	54
3.2 电位器式传感器	40	3.4.1 压阻效应	54
3.2.1 电位器的工作原理	41	3.4.2 半导体应变片	55
3.2.2 电位器的基本结构	42	3.4.3 压阻式传感器应用实例	56
3.2.3 电位器式传感器应用实例	42	本章小结	57
3.3 金属电阻应变式传感器	43	思考题和习题	58
3.3.1 应变效应	43		

第4章 电容式传感器 59

4.1 电容式传感器的工作原理	59	4.3.4 二极管T型网络方式的 测量电路	67
4.2 电容式传感器的类型和特点	60	4.3.5 差动脉冲宽度调制方式的 测量电路	68
4.2.1 变面积型电容传感器	60	4.4 电容式传感器应用实例	70
4.2.2 变极距型电容传感器	61	4.4.1 电容式差压传感器	70
4.2.3 变介质型电容传感器	63	4.4.2 电容测厚仪	70
4.3 电容式传感器的等效电路和 测量电路	65	4.4.3 电容式料位传感器	71
4.3.1 电容式传感器的等效电路	65	本章小结	72
4.3.2 交流电桥方式的测量电路	65	思考题和习题	72
4.3.3 运算放大器方式的测量电路	66		

第5章 电感式传感器 74

5.1 自感式传感器	74	5.2.3 互感式传感器的测量电路	85
5.1.1 自感的定义	74	5.2.4 互感式传感器的应用实例	86
5.1.2 气隙型电感传感器	75	5.3 电涡流式传感器	87
5.1.3 螺管型电感传感器	78	5.3.1 电涡流式传感器的工作原理	88
5.1.4 自感式传感器的等效电路	79	5.3.2 高频反射式电涡流传感器	88
5.1.5 自感式传感器的测量电路	80	5.3.3 低频透射式电涡流传感器	91
5.1.6 自感式传感器的应用实例	82	5.3.4 电涡流式传感器的应用实例	92
5.2 互感式传感器	83	本章小结	94
5.2.1 互感的定义	83	思考题和习题	95
5.2.2 差动变压器式互感传感器	84		

第6章 热电式传感器 97

6.1 热电阻传感器	97	6.2.5 热电偶的实用测温电路	107
6.1.1 金属热电阻	97	6.3 热敏电阻传感器	107
6.1.2 热电阻测量电路	98	6.3.1 热敏电阻的结构和材料	107
6.2 热电偶传感器	99	6.3.2 热敏电阻的基本参数	108
6.2.1 热电效应	99	6.3.3 热敏电阻的主要特性	109
6.2.2 热电偶基本定律	100	6.3.4 热敏电阻的应用实例	110
6.2.3 热电偶的种类和结构	102	本章小结	111
6.2.4 热电偶冷端温度补偿	105	思考题和习题	112

第7章 压电式传感器 114

7.1 压电效应	114	7.1.2 压电效应的工作原理	115
7.1.1 压电效应的现象	114	7.2 压电材料的主要特性	118

7.2.1 压电晶体	119	7.4 压电式传感器的应用实例	125
7.2.2 压电陶瓷	119	7.4.1 压电式传感器的形式和特点	125
7.2.3 新型压电材料	119	7.4.2 压电式加速度传感器	125
7.3 压电式传感器的等效电路和测量电路	120	7.4.3 压电式测力传感器	127
7.3.1 压电元件的结构形式	120	7.4.4 压电式压力传感器	127
7.3.2 压电式传感器的等效电路	121	本章小结	128
7.3.3 压电式传感器的测量电路	121	思考题和习题	129

第 8 章 磁电式传感器 130

8.1 磁电感应式传感器	130	8.2.6 霍尔传感器的应用实例	138
8.2 霍尔传感器	131	8.3 其他磁敏传感器	142
8.2.1 霍尔效应	131	8.3.1 磁敏电阻	143
8.2.2 霍尔元件的主要特性参数	132	8.3.2 磁敏二极管	145
8.2.3 霍尔元件的结构和测量电路	133	本章小结	148
8.2.4 霍尔元件的测量误差与补偿	134	思考题和习题	149
8.2.5 集成霍尔传感器	137		

第 9 章 光电式传感器 150

9.1 概述	150	9.3.3 红外传感器的应用实例	169
9.1.1 光电式传感器的组成	150	9.4 固态图像传感器	172
9.1.2 光电式传感器的分类	151	9.4.1 CCD 的工作原理	173
9.1.3 光源	151	9.4.2 线阵和面阵 CCD 图像传感器	175
9.2 光电效应及光电效应传感器	154	9.4.3 CCD 图像传感器的应用实例	177
9.2.1 光电效应	154	9.5 光纤传感器	179
9.2.2 光电管和光电倍增管	155	9.5.1 光纤的结构、传光原理和分类	179
9.2.3 光敏电阻	157	9.5.2 光纤传感器的结构、特点和分类	181
9.2.4 光敏二极管和光敏三极管	159	9.5.3 光纤传感器的调制方式	184
9.2.5 光电池	161	9.5.4 光纤传感器的应用实例	185
9.2.6 光电效应传感器的应用实例	162	本章小结	189
9.3 红外传感器	165	思考题和习题	190
9.3.1 红外辐射基本知识	166		
9.3.2 红外探测器	167		

第 10 章 化学传感器和生物传感器 192

10.1 化学传感器	192	10.1.3 湿敏传感器	197
10.1.1 离子敏传感器	192	10.2 生物传感器	202
10.1.2 气敏传感器	193	10.2.1 生物传感器的工作原理	203

10.2.2	酶传感器	203
10.2.3	葡萄糖传感器	204
10.2.4	微生物传感器	205

10.2.5	免疫传感器	205
	本章小结	206
	思考题和习题	207

第 11 章 传感器数字化 208

11.1	码盘式传感器	208
11.1.1	接触式码盘编码器	208
11.1.2	光电式码盘编码器	211
11.1.3	码盘式编码器的应用实例	211
11.2	光栅传感器	212
11.2.1	长光栅和莫尔条纹	212
11.2.2	长光栅传感器的结构和 工作原理	213
11.2.3	长光栅传感器的测量电路	215
11.2.4	圆光栅	216
11.2.5	光栅传感器的应用实例	217
11.3	感应同步器	217
11.3.1	直线式感应同步器的结构	218

11.3.2	直线式感应同步器的 工作原理	218
11.3.3	旋转式感应同步器	221
11.3.4	感应同步器的测量系统	222
11.4	频率式数字传感器	222
11.4.1	RC 振荡器式频率传感器	223
11.4.2	振弦式频率传感器	223
11.4.3	振筒式频率传感器	224
11.4.4	频率输出谐振式传感器的 测量方法	225
	本章小结	226
	思考题和习题	227

第 12 章 传感器集成化、智能化和网络化 228

12.1	微机电系统 (MEMS) 及 MEMS 传感器	228
12.1.1	微传感器的材料	229
12.1.2	微传感器的加工工艺	230
12.1.3	硅电容式集成压力传感器	231
12.1.4	硅微机械三轴加速度传感器	231
12.1.5	硅电容式微机械陀螺	232
12.2	智能传感器	233
12.2.1	智能传感器的功能和特点	233
12.2.2	智能传感器的构成和实现	234
12.2.3	智能传感器的典型实例	235
12.2.4	智能传感器的发展前景	240
12.3	多传感器信息融合技术	240

12.3.1	多传感器信息融合的 基本原理	241
12.3.2	多传感器信息融合的 层次和结构	241
12.3.3	多传感器信息融合实例	242
12.4	传感器网络化	243
12.4.1	传感器网络的发展历史	243
12.4.2	现场总线	244
12.4.3	智能微尘	248
12.4.4	传感器网络化的终极 目标——物联网	249
	本章小结	250
	思考题和习题	251

参考文献 252

物联网与传感器概述

物联网是在互联网的基础上,将用户端延伸和扩展到任何物体,进行信息交换和通信的一种网络。物联网被称为继计算机、互联网之后世界信息产业的第三次浪潮。物联网的技术特征是全面感知、互通互连和智慧运行,在物联网中,传感器对物理世界具有全面感知的能力。传感器技术、通信技术和计算机技术并列为信息技术的三大支柱,它们构成了信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”,分别用于完成信息的采集、传输和处理。随着现代传感器技术的发展,信息的获取从单一化逐渐向集成化、智能化和网络化的方向发展,众多传感器相互协作组成网络,又推动了无线传感器网络的发展。传感器的网络化将帮助物联网实现信息感知能力的全面提升,传感器本身也将成为实现物联网的基石。

1.1 物联网与传感器的概念

物联网需要对物体具有全面感知的能力,对信息具有互通互连的能力,并对系统具有智慧运行的能力,从而形成一个连接人与物体的信息网络。传感器是物联网的感觉器官,可以感知、探测、采集和获取目标对象各种形态的信息,是物联网全面感知的主要部件,是信息技术的源头,也是现代信息社会赖以存在和发展的技术基础。

1.1.1 物联网的概念

物联网的定义是,通过射频识别(RFID)、传感器、全球定位系统、激光扫描器等信息传感设备,按照约定的协议,把任何物体与互联网连接起来,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。

物联网的英文名称为 The Internet of Things。由该名称可见,物联网就是“物与物相连的互联网”。这里有两层意思,第一,物联网的核心和基础仍然是互联网,是在互联网基础之上延伸和扩展的一种网络;第二,其用户端延伸和扩展到了任何物体,在物体之间进行信息的交换和通信。

物联网概念的问世,在某种程度上打破了之前对信息与通信技术固有的看法。在物联网的时代,人类在信息与通信的世界里将获得一个新的沟通维度,从人与人之间的沟通和连接,扩展到人与物、物与物之间的沟通和连接。

根据国际电信联盟(ITU)的描述,世界上的万事万物,小到手表、钥匙,大到汽车、楼房,只要嵌入一个微型传感装置,把它变得智能化,这个物体就可以“自动开口说话”。再借助无线网络技术,人就可以和物体“对话”,物体和物体之间也能“交流”。物联网

搭上互联网这个桥梁,在世界的任何一个地方,人类都可以即时获取万事万物的信息。IT 产业下一阶段的任务,就是把新一代的 IT 技术充分运用到各行各业之中,地球上的各种物体将被普遍连接,形成物联网。

1.1.2 传感器的概念

通常将能把被测物理量、化学量或生物量转换为与之有对应关系的电量输出的装置称为传感器。传感器是一种检测装置,能够感受到被测量的信息,并能将检测到的信息变换成其他形式的信号(一般为电信号),是实现自动检测的首要环节。

中华人民共和国国家标准 GB/T 7665—2005 对传感器(Transducer/Sensor)的定义是:能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。根据国家标准 GB/T 7665—2005,传感器应从如下 3 个方面理解。

(1) 传感器的作用——体现在测量上。获取被测量是应用传感器的目的。

(2) 传感器的工作机理——体现在敏感元件上。敏感元件能感受或响应被测量,是传感器技术的核心。

(3) 传感器的输出信号形式——体现在电信号上。输出信号需要解决非电量向电信号转换,微弱电信号向可用电信号转换的问题。

传感器应用场合或应用领域的不同,叫法也不同,传感器也称为变换器、换能器、转换器、变送器、发送器或探测器等。例如,传感器在过程控制中称为变送器;在射线检测中称为发送器、接收器或探头。

1.1.3 传感器是物联网全面感知的基石

在物联网全面感知方面,传感器是最主要的部件。人们为了从外界获取信息,必须借助于感觉器官。而单靠人自身的感觉器官研究自然现象和生产规律,显然是远远不够的。传感器可以用于人无法忍受的高温、高压、辐射等恶劣环境,还可以检测出人不能感知的微弱磁、离子、射线等信息。可以说,传感器是人类感觉器官的延长,因此传感器又称为电五官。传感器与人类五大感觉器官的比较见表 1.1。

表 1.1 传感器与人类五大感觉器官的比较

传 感 器	人的感觉器官
光敏传感器	人的视觉
声敏传感器	人的听觉
气敏传感器	人的嗅觉
化学传感器	人的味觉
压敏、温敏、流体传感器	人的触觉

传感器的应用在现实生活中随处可见。自动门是利用人体的红外波来开关门;烟雾报警器是利用烟敏电阻来测量烟雾浓度;手机的照相机和数码相机是利用光学传感器来捕获图像;电子称是利用力学传感器来测量物体的重量。目前传感器已经渗透到工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断和生物工程等各个领域,从茫茫的太空到浩瀚的海洋,几乎每一个现代化项目都离不开各种各样的传感器。

随着物联网时代的到来,世界开始进入“物”的信息时代,“物”的准确信息的获取,同

样离不开传感器,传感器是整个物联网中需求量最大和最为基础的环节之一。传感器不仅可以单独使用,还可以由大量传感器、数据处理单元和通信单元的微小节点构成无线传感器网络。无线传感器网络是传感器技术与嵌入式计算技术、现代网络及通信技术、分布式信息处理技术的交叉融合,兼具感测、运算和网络能力,是一种全新的信息获取平台,是物联网的重要组成部分,将带来信息感知的一场变革。

1.2 传感器的组成和分类

1.2.1 传感器的组成

传感器通常由敏感元件 (Sensing Element) 和转换元件 (Transduction Element) 组成,敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量 (一般为非电量) 的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成有用输出信号 (一般为电信号) 的部分。例如,应变式压力传感器由弹性膜片和电阻应变片组成,其中弹性膜片是敏感元件,将压力转换为弹性膜片的应变;电阻应变片是转换元件,弹性膜片的应变施加在电阻应变片上,电阻应变片将其转换成电阻的变化量。这里需要说明的是,并不是所有的传感器都能明显区分出敏感元件和转换元件两个部分,有的是二者合为一体。例如,热电偶是一种感温元件,可以测量温度,被测热源的温度变化可以由热电偶直接转换成热电势输出。

传感器转换元件输出的信号 (一般为电信号) 都很微弱,传感器一般还需配以测量电路,有时还需要加辅助电源。测量电路是将转换元件输出的信号进行放大和补偿等,以便于传输、处理、显示、记录和控制等。随着集成技术在传感器中的应用,敏感元件、转换元件、测量电路和辅助电源常组合在一起,集成在同一芯片上。

图 1.1 为传感器的组成框图,包括敏感元件、转换元件、测量电路和辅助电源。传感器把某种形式的能量转换成另一种形式的能量,是具有某种信息处理能力的系统。其中,敏感元件直接感受被测量,并输出与被测量有确定关系的物理量;转换元件将敏感元件的输出作为它的输入,将输入物理量转换为电路参量;测量电路将上述电路参量接入,最后以电信号的方式输出。这样,传感器就完成了从感知被测量到输出电信号的全过程。

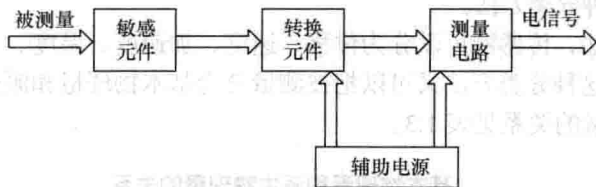


图 1.1 传感器的组成框图

1.2.2 传感器的分类

传感器的品种丰富、原理各异,检测对象几乎涉及各种参数,通常一种传感器可以检测多种参数,一种参数又可以用多种传感器测量。因此,传感器的分类方法非常多,至今为止传感器没有统一的分类方法,人们通常站在不同的角度,突出某一侧面对传感器进行分类。下面是几种常见的传感器分类方法。

1. 按工作原理分类

按工作原理的不同,传感器可分为物理型、化学型和生物型三大类,其中,物理型传感

器又分为物性型传感器和结构型传感器,见表 1.2。这种分类方法对传感器的工作原理有比较清楚的分析,类别较少,本书就是按工作原理对传感器进行分类的。

表 1.2

传感器按工作原理分类

传感器分类	物理型传感器	物性型传感器
		结构型传感器
	化学型传感器	
	生物型传感器	

(1) 物理型传感器

物性型传感器是利用某些功能材料本身所具有的内在特性及效应,将被测量直接转换为电量的传感器。例如,热电偶制成的温度传感器是物性型传感器,它利用金属导体材料的温差电动势效应和不同导体间的接触电动势效应,实现对温度的测量。这类传感器仅与材料有关,通常具有响应速度快的特点,而且易于小型化、集成化。

结构型传感器是以结构(形状、尺寸等)为基础,在待测量的作用下,结构发生变化,利用某些物理规律,获得与待测非电量成比例关系的电信号输出。例如,电容式压力传感器是结构型传感器,当被测压力作用在电容式敏感元件的极板上时,引起电容极板间隙的变化,导致电容值变化,从而实现对压力的测量。这类传感器与材料的关系不大,仅与“结构变化”有关。

(2) 化学型传感器

化学型传感器是利用电化学反应原理,把化学物质的成分、浓度等化学量转化成电信号的传感器。例如,气体传感器和离子传感器都是化学型传感器。

(3) 生物型传感器

生物型传感器是利用各种生物效应构成的传感器。例如,酶传感器、微生物传感器、生理量传感器(血液成分、血压等)、免疫传感器等都是生物型传感器。

2. 按被测量分类

按被测量(输入量)分类,能方便地表示传感器的功能和用途,便于用户应用。生产厂家和用户都习惯于这种分类方法。

按照这种分类方法,传感器可以分为位移、速度、加速度、温度、光、压力、湿度、浓度和流量传感器等。这种分类方法又可以把被测量分为基本物理量和派生物理量两大类,基本物理量和派生物理量的关系见表 1.3。

表 1.3

基本物理量和派生物理量的关系

被测量(基本物理量)		被测量(派生物理量)
位移	线位移	长度、厚度、应变等
	角位移	旋转角、偏转角等
速度	线速度	速度、振动、流量等
	角速度	转速、角振动等
加速度	线加速度	振动、冲击等
	角加速度	角振动、扭矩等

3. 按敏感材料分类

按制造传感器的材料进行分类,可分为半导体传感器、陶瓷传感器、光导纤维传感器和金属传感器等。

4. 按能量关系分类

按能量的关系分类,分为有源传感器和无源传感器两大类。有源传感器是能量转换型传感器,将一种能量形式直接转换成另一种能量形式,一般是将非电能量转换为电能量。无源传感器是能量控制型传感器,不能直接转换能量形式,仅对传感器中的能量起到控制或调节的作用。

5. 按应用范围分类

按应用范围分类,可分为工业用、民用、医用和军用等。若按具体场合,还可以分为汽车用、飞机用和舰船用等。

1.3 传感器的技术特点和发展趋势

传感器在国外的发展已有近 200 年的历史。到了 20 世纪 80 年代,由于计算机技术的发展,国际上出现了“信息处理能力过剩、信息获取能力不足”的问题,为了解决这一问题,世界各国在同一时期掀起了一股传感器热潮,美国也将 20 世纪 80 年代视为传感器技术的年代。近 20 年来,传感器的发展非常迅速,目前全球传感器的种类已超过 2 万余种。

传感器技术包括传感器的研究、设计、试制、生产、检测和应用等,已经形成相对独立的专门学科。随着现代科学技术的发展,作为“电五官”的传感器远远赶不上作为“大脑”的计算机的发展速度,信息采集技术滞后于信息处理技术。传感器正朝着探索新理论、开发新材料、实现智能化和网络化的方向发展,传感器的研究、开发和应用受到高度重视,传感器技术的发展水平已经成为判断一个国家现代化程度和综合国力的重要标志。

1.3.1 传感器的技术特点

传感器技术是涉及传感器的机理研究与分析、传感器的设计与研制、传感器的性能评估与应用等的综合性技术。传感器技术有如下特点。

1. 内容离散,涉及多个学科

传感器的内容离散,涉及物理学、化学、生物学等多个学科。物理型传感器是利用物理性质制成的传感器。例如,“热电偶”是利用金属的温差电动势和接触电动势效应,制成温度传感器;压力传感器是利用压电晶体的正压电效应,实现对压力的测量。化学型传感器是利用电化学反应原理制成的传感器。例如,离子敏传感器是利用电极对溶液中离子的选择性反应,测量溶液的 PH 值;电化学气体传感器是利用被测气体在特定电场下的电离,测量气体的浓度。生物型传感器是利用生物效应制成的传感器。例如,第一个生物传感器将葡萄糖氧化酶固化并固定在隔膜氧电极上,制成了葡萄糖传感器;第二代生物传感器是微生物、免疫、酶免疫和细胞器传感器。

2. 种类繁多,彼此相互独立

传感器的种类繁多,被测参数彼此之间相互独立。被测参数包括热工量(温度、压力、流量、物位等)、电工量(电压、电流、功率、频率等)、机械量(力、力矩、位移、速度、加速度、转角、角速度、振动等)、化学量(氧、氢、一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、瓦斯

等)、物理量(光、磁、声、射线等)、生物量(血压、血液成分、心音、激素、肌肉张力、气道阻力等)、状态量(开关、二维图形、三维图形等)等。这需要开发多种多样的敏感元件和传感器,以适应不同的应用场合和具体要求。

3. 知识密集, 学科边缘性强

传感器技术以材料的力、热、声、光、电磁等功能效应和功能形态变换原理为理论基础,并综合了物理学、化学、生物工程、微电子学、材料科学、精密机械、微细加工和试验测量等方面的知识,具有突出的知识密集性。

传感器技术与许多基础学科和专业工程学的关系极为密切,一旦有新的发现,就迅速应用于传感器,具有学科边缘性。例如,超导材料的约瑟夫逊效应发现不久,以该效应为原理的超导量子干涉仪(SQUID)传感器就问世了,可测 10^{-9}Gs 的极弱磁场,灵敏度极高。

4. 技术复杂, 工艺要求高

传感器的制造涉及了许多高新技术,如集成技术、薄膜技术、超导技术、微细或纳米加工技术、粘合技术、高密封技术、特种加工技术、多功能化和智能化技术等,技术复杂。

传感器的制造工艺难度大、要求高。例如,微型传感器的尺寸小于 1mm ; 半导体硅片的厚度有时小于 $1\mu\text{m}$; 温度传感器的测量范围为 $-196^{\circ}\text{C} \sim 1800^{\circ}\text{C}$; 压力传感器的耐压范围为 $10^{-6}\text{Pa} \sim 10^2\text{MPa}$ 。

5. 性能稳定, 环境适应性强

传感器要求具有高可靠性、高稳定性、高重复性、低迟滞、宽量程、快响应,做到准确可靠,经久耐用,性能稳定。

处于工业现场和自然环境下的传感器,还要求具有良好的环境适应性,能够耐高温、耐低温、耐高压、抗干扰、耐腐蚀、安全防爆,便于安装、调试和维修等。

6. 应用广泛, 应用要求千差万别

传感器应用广泛,航天、航空、兵器、船舶、交通、冶金、机械、电子、化工、轻工、能源、环保、煤炭、石油、医疗卫生、生物工程、宇宙开发等领域,甚至人们日常生活的各个方面,几乎无处不使用传感器。例如,阿波罗 10 运载火箭部分使用了 2 077 个传感器,宇宙飞船部分使用了 1 218 个传感器;汽车上有 100 多个传感器,分别使用在发动机、底盘、车身和灯光电气上,用于测量温度、压力、流量、位置、气体浓度、速度、光亮度、干湿度和距离等。

传感器的应用要求千差万别。例如,有的要求通用性强,有的要求专业性强;有的单独使用,有的与主机密不可分;有的要求高精度,有的要求高稳定性。

7. 生命力强, 不会轻易退出历史舞台

相对于信息技术的其他领域,传感器生命力强,某种传感器一旦成熟,就不会轻易退出历史舞台。例如,应变式传感器已有 70 多年的历史,目前仍然在重量测量、压力测量、微位移测量等领域占有重要地位;硅压阻式传感器也已有 40 多年的历史,目前仍然在气流模型试验、爆炸压力测试、发动机动态测量等领域占有重要地位。

8. 品种多样, 一种被测量可采用多种传感器

传感器品种多样,一种被测量往往可以采用多种传感器检测。例如,线位移传感器的品种有近 20 种之多,包括电位器式位移传感器、磁致伸缩位移传感器、电感式位移传感器、电容式位移传感器、光电式位移传感器、超声波式位移传感器、霍尔式位移传感器等。

1.3.2 传感器新原理、新材料、新工艺的发展趋势

传感器的工作原理是基于各种物理的、化学的、生物的效应和现象,具有这种功能的材料称为敏感材料。可以看出,发现新原理、开发新材料是新型传感器问世的重要基础。此外,采用新工艺也是传感器的发展趋势。

1. 发现新原理

超导材料的约瑟夫逊效应发现不久,以该效应为原理的超导量子干涉仪(SQUID)传感器就问世了。SQUID的基本原理是建立在磁通量子化和约瑟夫逊效应的基础上的,是一种能测量微弱磁信号的极其灵敏的仪器,而且稳定性极高,不受环境温度(温度变化范围为1.9K~400K)干扰,无漂移和老化。SQUID 是进行超导、纳米、磁性和半导体等材料磁学性质研究的基本仪器设备,在生物磁测量、大地测量、无损探伤等方面获得了广泛应用,特别是对薄膜和纳米等微量样品是必需的传感器。

日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度比传统的霍尔器件高,仅次于超导量子干涉仪,而其制造工艺远比 SQUID 简单,可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

2. 开发新材料

在传感器领域开发的新材料包括半导体硅材料、石英晶体材料、功能陶瓷材料、光导纤维材料、高分子聚合物材料等。其中,半导体硅材料包括单晶硅、多晶硅、非晶硅等,具有相互兼容的优良电学特性和机械特性;石英晶体材料包括压电石英晶体、熔凝石英晶体等,具有极高的机械品质因数和非常好的温度稳定性;功能陶瓷材料是由不同配方混合、经高精度成型烧结而成,不仅具有半导体材料的特点,而且工作温度远高于半导体;光导纤维材料是随着光纤技术发展起来的,光导纤维传感器具有灵敏度高、结构简单、体积小、耗电量少、耐腐蚀、绝缘性好、光路可弯曲等特点;高分子聚合物材料是指由许多相同的、简单的结构单元通过共价键重复连接而成的高分子量(通常可达 $10 \sim 106$)化合物,具有絮凝性、粘合性、降阻性、增稠性,可以制成湿度传感器等。

3. 采用新工艺

微细加工是传感器采用的新工艺。以集成电路制造技术发展起来的微机械加工工艺,可使被加工的敏感结构尺寸达到微米、亚微米级,并可以批量生产,从而制造出微型化、价格便宜的传感器。例如,利用半导体工艺,可制造压阻式传感器;利用晶体外延生长工艺,可制造硅-蓝宝石压力传感器;利用薄膜工艺,可制造快速响应气敏传感器;利用各向异性腐蚀工艺,可制造全硅谐振式压力传感器。

传感器微机械加工工艺主要包括如下5个方面。

- (1) 平面电子加工工艺,如光刻、扩散、沉积、氧化等。
- (2) 选择性三维刻蚀工艺,如各向异性腐蚀技术、外延技术、牺牲层技术等。
- (3) 固相键合工艺,如 Si-Si 键合、实现硅一体化结构。
- (4) 机械切割工艺,如分离切断技术(避免损伤)。
- (5) 整体封装工艺,将传感器封装于一个合适的腔体内,隔离外界干扰。

1.3.3 传感器微型化、多功能、集成化的发展趋势

微细加工技术的发展使传感器制造技术有了突飞猛进的发展,多功能、集成化传感器成为发展方向,使得既具有敏感功能、又具有控制执行能力的传感器微系统成为可能。

1. 传感器微型化

传感器微型化是指传感器体积小、重量轻,敏感元件的尺寸为微米级,体积、重量仅为传统传感器的几十分之一甚至几百分之一。微米/纳米技术的问世,微机械加工技术的出现,使三维工艺日趋完善,这为微型传感器的研制铺平了道路。利用各向异性腐蚀、牺牲层技术和 LIGA 技术(X 射线深层光刻、电铸成型、注塑工艺的组合),可以制造层与层之间有很大差别的三维微结构,这些微结构与特殊用途的薄膜和高性能的集成电路相结合,已用于制造多种微型传感器和多功能敏感元件阵,实现了压力、力、加速度、角速率、温度、流量、成像、磁场、湿度、pH 值、气体成分、离子浓度等多种传感器。

2. 传感器多功能

传感器多功能是指传感器能检测 2 种以上不同的被测量。例如,使用特殊陶瓷将温度和湿度敏感元件集成在一起,构成温湿度传感器;利用厚膜制造工艺将 6 种不同的敏感材料(ZnO 、 SnO_2 、 WO_3 、 $\text{WO}_3(\text{Pt})$ 、 $\text{SnO}_2(\text{Pd})$ 、 $\text{ZnO}(\text{Pt})$)制作在同一基板上,构成同时测量 4 种气体(H_2S 、 C_8H_{18} 、 $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}$ 、 NH_3)的传感器;日本将检测 Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 的敏感元件集成在 $2.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 的芯片上,构成多离子传感器,可直接用导管送到心脏内,检测血液中钠、钾、氢离子的浓度。多功能传感器最成功的典型产品是美国 Honeywell 公司研制的 ST-3000 型智能压力传感器,在 $3\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.2\text{mm}$ 的一块基片上,采用半导体工艺,将静压、差压、温度 3 种敏感元件与 CPU、EPROM 集成,工作温度范围为 $-40^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$ 、压力量程范围为 $0 \sim 2.1 \times 10^7 \text{Pa}$,精度高,具有自诊断等功能。

3. 传感器集成化

传感器集成化包含传感器与集成电路(IC)的集成制造技术,以及多参量传感器的集成制造技术,缩小了传感器的体积,提高了抗干扰能力。IC 是采用半导体制作工艺,在一块较小的单晶硅片上制作许多晶体管及电阻器、电容器等元器件,并按照多层布线或隧道布线的方法,将元器件组合成完整的电子电路。

传感器采用敏感元件与检测电路的单芯片集成技术,能够避免多芯片组装时管脚引线带来的寄生效应,改善了器件的性能。传感器单芯片集成技术还可以发挥 IC 技术批量化、低成本的生产优势,将成为现代传感器技术的主流发展方向。

1.3.4 传感器智能化、多融合、网络化的发展趋势

近年来传感器技术得到了较大的发展,同时也有力地推动着各个领域的技术与融合,具有感知能力、计算能力、通信能力、协同能力的传感器应用日趋广泛,作为信息技术源头的传感器技术正朝着物联网的方向发展。

1. 传感器智能化

智能传感器(Intelligent Sensor/Smart Sensor)就是将传感器获取信息的基本功能与微处理器信息分析和处理的功能紧密结合在一起,对传感器采集的数据进行处理,并对它的内部进行调节,使其采集的数据最佳。微处理器具有强大的计算和逻辑判断功能,可以方便地对数据进行滤波、变换、校正补偿、存储和输出标准化,可实现传感器自诊断、自检测、自校验和控制等功能。智能传感器由多个模块组成,其中包括微传感器、微处理器、微执行器和接口电路等,它们构成一个闭环微系统,由数字接口与更高一级的计算机控制相连,利用在专家系统中得到的算法,对微传感器提供更好的校正和补偿。近年来传感器领域还提出了模糊传感器、符号传感器等新概念。总之,智能传感器的功能会更多,精度和可靠性会更高,应