



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

赵学增 编著

现代传感技术 基础及应用

The Basic Theory And Application
Of Modern Transducer

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

清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

现代传感技术 基础及应用

赵学增 编著
Zhao Xuezheng

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书较系统地阐述了现代传感技术的原理和应用,首先介绍了与现代传感技术相关的一些物理效应和新型敏感材料,然后介绍了常用的力学、位移、温度传感器,以及视觉、触觉和微传感器,最后讨论了传感器的误差补偿及抗干扰技术。

本书可作为高等院校机械工程领域工程硕士研究生教材,亦可供有关专业的工程技术人员参考。

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

现代传感技术基础及应用 / 赵学增编著. --北京: 清华大学出版社, 2010.5

(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-21736-7

I. ①现… II. ①赵… III. ①传感器—研究生—教材 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 243859 号

责任编辑: 庄红权 赵从棉

责任校对: 刘玉霞

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: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 刷 者: 北京市昌平环球印刷厂

装 订 者: 北京国马印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×230 印 张: 19

字 数: 411 千字

版 次: 2010 年 5 月第 1 版

印 次: 2010 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 36.00 元

产品编号: 020486-01

前言

为加强工程硕士研究生教育的核心教材建设,全国工程硕士专业学位教育指导委员会启动了全国工程硕士教育核心教材建设工程,本教材是机械工程领域确定的全国工程硕士教育推荐的核心教材之一。

由于各工程硕士培养单位的特色不同,委托培养单位对培养人才也有不同的要求,所以各单位工程硕士的培养方案相差较大。本教材是针对培养方案中设立相关课程的有关培养单位编写的,偏重于反映当前科学研究和工业生产的一般性基础理论和专门知识,以满足机械工程领域工程硕士培养的要求。

传感器是人类在当今信息时代准确可靠地获取自然和生产领域相关信息的主要工具,它在工农业生产、航空航天、海洋探测与开发、资源和环境保护与利用以及生物医学工程等诸多领域有着广泛的利用,在提高基础科学研究水平,以及发展经济和推动社会进步方面有着重要的作用。传感器的发展推动着生产和科技的进步,生产和科技的进步反过来也要求和支持着传感器的发展和进步。

本书较系统地阐述了现代传感技术的原理和应用,全书共分9章。第1章介绍了与现代传感技术相关的基础知识和一些物理效应;第2章介绍了一些新型敏感材料;第3~5章分别介绍了常用的力学、位移和温度传感器;第6、7章介绍了视觉和触觉传感器;第8章介绍了目前发展迅速的微传感器;第9章介绍了传感器的误差补偿及抗干扰技术。

本书是在赵学增教授多年教学的讲稿基础上完成的,绪论、第1、2章由赵学增教授编写,第3、4章由王伟杰副教授编写,第5、6章由黄文涛副教授编写,第7、8章由陈芳博士编写,第9章由王飞博士编写。全书由赵学增教授统稿、整理,由谭久彬教授审稿。

编者

2009年12月

目 录

绪论	/1	
习题	.....	6
第 1 章 传感器基础	/7	
1.1 物理基本定律与传感器	.....	7
1.1.1 守恒定律	.....	7
1.1.2 物质作用定律	.....	8
1.1.3 物质定律	.....	8
1.1.4 统计法则	.....	11
1.2 物理基础效应	.....	12
1.2.1 压阻效应	.....	14
1.2.2 压电效应	.....	15
1.2.3 磁致伸缩效应与压磁效应	.....	17
1.2.4 磁电效应	.....	17
1.2.5 光电效应	.....	20
1.2.6 热电效应	.....	22
1.2.7 热释电效应	.....	23
1.2.8 电光效应	.....	23
1.3 传感器的信息传递与能量转换	.....	24
1.3.1 信号转换方式	.....	24
1.3.2 信息传递	.....	25
1.3.3 能量转换	.....	26
1.3.4 能量变换与阻抗匹配	.....	26
1.4 机电耦合	.....	27

1.4.1	机械系统与电系统的相似性	27
1.4.2	机电系统运动方程	28
1.4.3	机械系统模拟电系统	29
1.4.4	机-电网络	31
1.4.5	电动式动态力测力传感器的机电模拟	32
1.5	传感器静态特性	32
1.5.1	输入-输出静态函数关系式	32
1.5.2	线性度	33
1.5.3	分辨力与阈值	35
1.5.4	灵敏度	36
1.5.5	迟滞和重复性	36
1.5.6	时漂及温漂	37
1.5.7	静态特性标定	38
1.6	传感器动态特性	39
1.6.1	输入信号的分类方法	40
1.6.2	传递函数	41
1.6.3	频率响应函数	41
1.6.4	冲激响应函数	42
1.6.5	频率响应分析	43
1.6.6	时域响应分析	46
1.6.7	动态特性标定	48
	习题 1	51

第 2 章 新型敏感材料 /53

2.1	半导体敏感材料	53
2.1.1	单晶硅的物理特性	53
2.1.2	多晶硅及硅化合物	56
2.2	电子陶瓷	60
2.2.1	电子陶瓷生产工艺	60
2.2.2	压电陶瓷	63
2.2.3	半导体陶瓷	65
2.2.4	压敏陶瓷	69
2.2.5	磁性陶瓷	71
2.2.6	光敏陶瓷	74

2.3 高分子敏感材料	74
2.3.1 非导电型高分子材料	75
2.3.2 复合导电型高分子材料	76
2.3.3 结构型导电高分子材料	79
2.3.4 高分子液晶	81
2.4 形状记忆材料	83
2.4.1 形状记忆合金	83
2.4.2 形状记忆陶瓷	87
习题 2	88

第 3 章 力学量传感器 /91

3.1 应变式多维测力弹性体系统	91
3.1.1 双量程动态测力弹性体系统	91
3.1.2 三维轮辐式加速度弹性体系统	95
3.1.3 六维测力弹性体系统	96
3.2 膜片压力传感器	100
3.2.1 薄膜应变片	100
3.2.2 E 形膜片	101
3.2.3 X 形硅压敏传感器	102
3.2.4 高温膜片压力传感器	104
3.3 压电式压力传感器	105
3.3.1 单自由度动态力学模型	105
3.3.2 压力传感器结构	106
3.3.3 压力传感器的设计	107
3.3.4 压力传感器的非线性	108
3.4 光纤压力传感器	115
3.4.1 光纤的基础知识	115
3.4.2 全内反射光纤压力传感器	115
3.4.3 全光纤干涉压力传感器	116
3.4.4 偏振调制压力传感器	117
3.5 扭矩传感器	118
3.5.1 光栅扭矩传感器	120
3.5.2 磁栅扭矩传感器	121

3.5.3	磁弹扭矩传感器	123
3.6	压电式加速度传感器	125
3.6.1	压缩型加速度传感器	126
3.6.2	剪切型加速度传感器	128
习题 3	.....	130
第 4 章	位移传感器	/131
4.1	数字式位移传感器	131
4.1.1	光栅传感器	131
4.1.2	感应同步器	139
4.1.3	磁栅位移传感器	142
4.2	编码器	144
4.2.1	绝对码编码器	145
4.2.2	增量码编码器	149
4.3	小位移传感器	152
4.3.1	InSb 磁敏电阻器件	152
4.3.2	光强调制位移传感器	156
4.3.3	相位调制位移传感器	160
习题 4	.....	163
第 5 章	温度传感器	/164
5.1	半导体温度传感器	164
5.1.1	单晶非结型温度传感器	164
5.1.2	PN 结型温度传感器	167
5.1.3	集成温度传感器	170
5.2	红外温度传感器	175
5.2.1	红外探测器	175
5.2.2	光量子型红外传感器	177
5.2.3	光电池	178
5.2.4	薄膜热电偶	180
5.2.5	热电堆	181
5.2.6	热释电红外传感器	183
5.3	光纤温度传感器	185

5.3.1	半导体光纤温度传感器	186
5.3.2	荧光衰变式光纤温度传感器	187
5.3.3	辐射式光纤温度传感器	188
5.3.4	折射式光纤温度传感器	191
习题 5	.....	192
第 6 章	视觉传感器 /194	
6.1	电荷耦合器件	194
6.1.1	CCD 的工作原理	194
6.1.2	CCD 的基本参数	196
6.1.3	线阵 CCD	198
6.1.4	面阵 CCD	199
6.1.5	线阵 CCD 测量工件尺寸	202
6.2	CMOS 成像器件	203
6.2.1	CMOS 成像器件的工作原理	203
6.2.2	CMOS 器件的主要性能	208
6.2.3	典型的 CMOS 成像器件	210
习题 6	.....	213
第 7 章	触觉传感器 /214	
7.1	指端应变式触觉传感器	214
7.1.1	电流变流体	215
7.1.2	柔顺指端结构	215
7.1.3	抓握系统	216
7.2	多功能触觉传感器	217
7.2.1	感性测量和识别	218
7.2.2	容性测量和识别	219
7.2.3	温感测量和识别	219
7.3	压阻式阵列触觉传感器	221
7.3.1	压阻材料	221
7.3.2	采样电路	222
7.4	PVDF 触觉传感器	224
7.4.1	PVDF 压敏原理	225

7.4.2	PVDF 超声触觉传感器	225
7.4.3	PVDF 触滑觉传感器	226
7.4.4	PVDF 三维力触觉传感器	227
7.5	人工皮肤触觉	228
7.5.1	人工皮肤的结构	228
7.5.2	信号检测	229
7.5.3	信号提取	230
7.6	接近觉传感器	232
7.6.1	超声接近觉传感器	233
7.6.2	红外接近觉传感器	235
	习题 7	236

第 8 章 微传感器 /237

8.1	微机械加工	237
8.1.1	集成电路加工与微机械加工	237
8.1.2	微机械加工技术	239
8.1.3	体去除工艺	240
8.1.4	表面添加工艺	241
8.1.5	牺牲层技术	244
8.1.6	固相键合	245
8.1.7	封装技术	246
8.2	微压力传感器	247
8.2.1	微压阻式压力传感器	248
8.2.2	微电容式压力传感器	250
8.2.3	微谐振式压力传感器	253
8.3	微加速度传感器	254
8.3.1	硅谐振梁式加速度传感器	254
8.3.2	扭转-差动硅电容式加速度传感器	255
8.3.3	力平衡式硅电容式加速度传感器	255
8.4	微陀螺	257
8.4.1	硅谐振式陀螺	257
8.4.2	梳状谐振轮式陀螺	258
	习题 8	261

第9章 传感器误差补偿及抗干扰技术

/262

9.1 非线性补偿技术	262
9.1.1 非线性产生的原因	262
9.1.2 直接线性化方法	264
9.1.3 非线性电路法补偿	264
9.1.4 数字化非线性补偿	268
9.2 温度误差补偿	270
9.2.1 产生温度误差的原因	270
9.2.2 温度补偿原理	270
9.2.3 温度误差补偿	271
9.3 抗干扰技术	273
9.3.1 干扰的类型	274
9.3.2 噪声耦合方式	275
9.3.3 屏蔽技术	279
9.3.4 接地技术	280
9.3.5 浮空技术	282
9.3.6 隔离技术	283
9.3.7 滤波技术	284
9.3.8 平衡电路	286
9.3.9 脉冲电路噪声抑制	287
9.3.10 抑制信号传输线引入的干扰	289
习题9	290

参考文献

/291

绪 论

人类借助视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉这五种感觉器官从外界直接获取信息,再通过大脑分析和判断后作出相应反应。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活动中,单靠自身的感觉器官已远不能满足要求。因此,一系列代替、加强和补充人类感觉器官功能的方法和手段应运而生,出现了各种用途的传感器,也称之为电五官。传感器是人类在当今信息时代准确可靠地获取自然和生产领域相关信息的主要工具,它在工农业生产、航空航天、海洋探测与开发、资源和环境保护与利用以及生物医学工程等诸多领域有着广泛的应用,在提高基础科学研究水平,发展经济和推动社会进步方面有着重要的作用。从某种程度上说,机械延伸了人类的体力,计算机延伸了人类的智力,而传感器则延伸了人类的感知力。传感器的发展推动着生产和科技的进步,生产和科技的进步反过来也要求和支持着传感器的发展和进步。

1. 传感器的定义

传感器不是一门独立存在的技术,它是根据检测对象的不同,在各个领域中相对独立地发展起来的。从机械制造、化工生产、航空航天、生物工程、医疗医药和信息产业等生产应用领域到各种基础科学研究领域,各种各样的传感器被广泛地研究、开发和使用。传感器在不同的行业和领域有着不同的叫法和名字,表 0-1 给出了传感器在国内外的一些叫法。

表 0-1 传感器在国内外的一些叫法

国外	Transducer, Sensor, Transduction Element, Converter, Gauge, Transponder, Transmitter, Detector, Pick-up, Probe, X-meter
国内	传感器、换能器、变换器、敏感器件、探测器、检出器、检测器、××计(如加速度计)

传感器可以定义为一种以一定的精确度把被测量转换为与之有确定关系的、便于应用的某种物理量的测量器件或装置。

上述定义包含了以下含义:①传感器是测量装置,能完成检测任务;②其输入量是某种被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等;③其输出量是某种便于传输、转换、处理和显示的物理量,如气、光、电量等,目前主要是电量;④输出量与输入量有单值确定的对应关系,并且具有一定的精确度。

2. 传感器的组成

传感器一般由敏感元件和转换元件两部分组成,由于传感器输出信号一般都很微弱,需要相应转换电路将其变为易于传输、转换、处理和显示的物理量形式。另外,除能量转换型传感器外,还需外加辅助电源提供必要的能量,所以有时还有转换电路和辅助电源两部分,传感器的基本组成如图 0-1 所示。

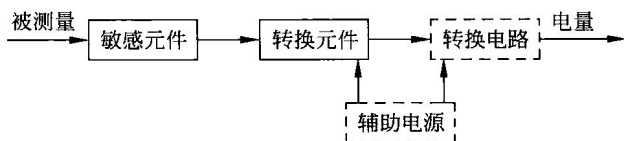


图 0-1 传感器的组成框图

敏感元件:传感器中能直接感受或响应被测量的部分,它的功能是直接感受被测量并输出与之有确定关系的另一类物理量。例如温度传感器的敏感元件的输入是温度,它的输出则应为温度以外的某类物理量,传感器的工作原理一般由敏感元件的工作原理决定。

转换元件:有时需要将敏感元件的输出转换为电参量(电压、电流、电阻、电容、电感等),以便于进一步处理,转换元件是传感器中将敏感元件的输出转换为电参量的部分。

转换电路:如果转换元件输出的信号很微弱,或者不是易于处理的电压或电流信号,而是其他电参量,则需要相应转换电路将其变为易于传输、转换、处理和显示的形式(一般为电压或电流信号)。转换电路的功能就是把转换元件的输出量变为易于处理、显示、记录、控制的信号。有的传感器将转换电路、敏感元件和转换元件做在一起,有些则分开。

辅助电源:有些传感器需外加电源才能工作,辅助电源就是提供传感器正常工作所需能量的电源部分,它有内部供电和外部供电两种形式。

图 0-2 给出了一个典型的电阻应变片式测力传感器,弹性体为敏感元件,它感受被测力 F 并将它转换成应变;电阻应变片是转换元件,它将弹性体输出的应变转换成电阻值的变化;电桥是转换电路,它将电阻值的变化转换成电压 U 输出;电源是辅助电源,它为电桥供电。

实际上,有些传感器的敏感元件和转换元件两部分的区别并不明显,而是二者合为一体。如图 0-3 所示的热电偶,两种金属材料 A 和 B ,其中一端连接在一起放在被测温度为 T 的环境中,另一端放在环境温度为 T_0 的参考环境中,则在回路中将有反映 T 与 T_0 温差的电势产生,利用这个电势可以进行温度测量。

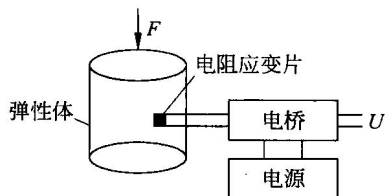


图 0-2 电阻应变片式测力传感器

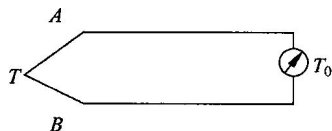


图 0-3 热电偶传感器

对一个传感器而言,敏感元件和转换元件是必不可少的,这两者有时可能合为一体(如上例),而转换电路和辅助电源则不是必须有的。敏感元件和转换元件在结构上常组装在一起,而转换电路和辅助电源与它们有时组装在一起,有时则是装在另外一个独立的电箱之中。

3. 传感器的分类

传感器的种类繁多,功能各异,应用领域广泛。对于同一被测量可用不同转换原理来实现测量,利用同种原理又可以设计出检测不同被测量的传感器,所以传感器有许多不同的分类法。表 0-2 列出了几种传感器的分类。

表 0-2 传感器的分类

分类方法	传感器的种类	说明
按依据的效应	物理传感器、化学传感器、生物传感器等	基于物理效应,如光、电、声、磁、热效应; 基于化学效应,如化学吸附、选择性化学反应等; 基于生物效应,如基于酶、抗体、激素等分子识别和选择功能的生物传感器
按工作原理	应变式、电容式、电感式、电磁式、压电式、热电式、光电式传感器等	传感器依据其工作原理命名
按被测量	位移、速度、温度、压力、气体成分、浓度等	传感器依据被测量命名
按使用的敏感材料	半导体传感器、光纤传感器、复合材料传感器、金属传感器、陶瓷传感器、高分子材料传感器等	传感器依据使用的材料命名
按能量关系	能量转换型传感器、能量控制型传感器	能量转换型直接将被测量转换为输出量的能量; 能量控制型由外部提供能量,而由被测量控制输出量
按构成原理	结构型传感器、物性型传感器	结构型通过敏感元件结构参数变化实现信息转换; 物性型通过敏感元件材料物理性质的变化实现信息转换
按输出信号	数字式传感器、模拟式传感器	输出为数字量; 输出为模拟量

4. 传感器的作用

现代科学技术使人类社会进入了信息时代。现代信息产业的三大技术支柱是传感技术、通信技术和计算机技术,它们分别构成了信息系统的“感官”、“神经”和“大脑”。传感器的主要作用包括信息的收集(如计量测试、状态监测用的传感器)、信息的交换(如读取磁盘和光盘数据的传感器)和控制信息的采集(如各种自动控制系统中用于读取反馈信息的传感器)。在信息时代,人们的社会活动主要依靠对信息资源的开发、获取、传输与处理。传感器是信息采集系统和数据交换系统的重要部件,也是自动控制系统获得控制信息的重要环节,它在很大程度上影响和决定了系统的功能。如在生产自动化过程中,没有合适的传感器就无法建立自动化的生产系统。

传感器的重要性还体现在它广泛地应用于各个学科领域。传感器不仅是计算机、机器人、自动化设备的“感官”及机电结合的接口之一,而且已经深入到国防和人们生命、生活的各个领域。从太空探测到海洋开发,从各种复杂的系统工程到人们日常生活的衣食住行,都已经离不开各种各样的传感器。

1) 传感器在工业检测和自动控制系统中的应用

在机械加工、石油、化工、电力、钢铁等工业生产中需要检测各种工艺参数的信息,通过电子计算机或者控制器对生产过程进行自动控制。

2) 传感器在汽车领域的应用

传感器不仅测量汽车的行驶速度、行驶距离、发动机转速和燃料消耗量等相关参数,而且在新型汽车的安全气囊、防盗抢、防碰撞、电子变速控制、防滑、电子燃料喷射等装置中都起到了非常重要的作用。

3) 传感器在家用电器领域的应用

现代家用电器中,空调、电冰箱、洗衣机、电热水器、照相机、安全报警器、厨房用具等都用到各种各样的传感器。

4) 传感器在医疗仪器和设备中的应用

各种医疗仪器和设备应用传感器对人体温度、血压、心脑电波及肿瘤等进行准确的监测和诊断,以及对治疗和康复效果进行观察检测。

5) 传感器在机器人中的应用

各种功能的机器人上都采用了许多传感器,如位置传感器、速度传感器、触觉传感器、视觉传感器、嗅觉传感器等。

6) 传感器在资源和环境保护中的应用

监测大气、水质及噪声污染的传感器广泛应用于资源和环境保护工作中。

7) 传感器在航空航天中的应用

飞机、火箭等飞行器上,要使用多种先进的传感器对飞行速度、飞行加速度、飞行方向、飞行距离和飞行姿态进行及时准确的测量。

8) 传感器在遥感技术中的应用

在飞机及卫星等飞行器上利用紫外、红外光电传感器及微波传感器探测气象、海洋和地质等情况。

9) 传感器在军事方面的应用

利用红外探测传感器可以观测地形、地貌及敌方的各种军事目标,利用雷达可以搜索、跟踪飞行目标,其他还有红外制导、红外夜视传感器的使用等。

综上所述,传感器的发展推动着生产和科技的进步,生产和科技的进步反过来也要求和支持着传感器的发展和进步。可以说没有传感器就没有现代化的科学技术,没有传感器也没有人类现代化的生活环境。

5. 传感器的发展方向

现代科学技术和生产的发展对传感器提出了越来越高的要求,同时也为传感器的开发提供了丰富的研究手段和技术条件。如何采用新技术、新工艺、新材料以及探索新的理论,使传感器达到新的技术高度是总的发展方向。目前,传感器主要的发展动向:一是进行基础研究,发现新现象,开发传感器的新材料和新工艺;二是实现传感器的集成化与智能化。具体分为以下几个方面。

1) 提高精度和扩大测量范围

随着自动化程度和技术水平的提高,新型传感器应具有更高的灵敏度和精度、更快的响应速度、更好的互换性和更大的测量范围。

2) 低功耗及无源化

多数传感器工作时需要电源,因此在野外或无法取得电源的地方常采用电池或太阳能对传感器进行供电。开发低功耗传感器及无源传感器既可以节省电能又可以扩大传感器的应用范围。

3) 新原理

各种物理、化学和生物现象和效应是传感器工作的基础,所以发现新现象与新效应并将它们应用于传感器技术领域,是研制各种新原理传感器的重要理论基础,意义极为深远。

4) 新材料

随着材料科学的发展,人们已经可以通过控制材料的成分来制造出适用于各种传感器的新型敏感材料和功能材料,并将之应用于传感技术领域。

5) 微型化及集成化

从使用角度讲,传感器的体积越小越好,这就要求利用微细加工等新的方法和工艺制造出体积微型化的传感器,同时研究多种功能集成在一起的传感器也是传感器发展的一个方向。

6) 智能化

随着电子技术的发展,传感器已突破传统的功能。智能传感器模糊了检测系统和传感

器的界限,它本身就是一种带微处理器,兼有检测、判断、信息处理等功能的传感器系统,开辟了“材料、器件、电路、仪表”一体化的新途径。其典型产品如美国霍尼韦尔公司的 ST-3000 型智能传感器,在一个 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的芯片上制作了 CPU(中央处理器), EPROM(存储器)和静压、压差、温度三种传感器。有些传感器还具有可外部设定测量物理量、自动更换量程、自动标定和自动维护功能。

7) 仿生传感器

仿生传感器是模仿人和动物感觉器官的传感器,目前视觉传感器、听觉传感器和触觉传感器发展得较快,而嗅觉传感器和味觉传感器还远不能满足需要。

习题

1. 简述传感器的重要性。
2. 传感器是如何定义的? 传感器还有哪些叫法?
3. 传感器由哪些环节组成? 各有何作用? 哪些环节是必需的? 试举例说明。
4. 传感器都有哪些分类方法? 各是如何划分的?
5. 简述传感器的发展趋势。