

传感器电子学及其应用

张福学 编著

国防工业出版社



传感器电子学及其应用

张福学 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书简述了传感器基础知识,深入浅出地论述了各种传感器及其应用。全书分三编,计三十章。第1~4章为第一编,简述传感器概况、传感器与各种效应、传感器功能与集成化,以及传感器的一般性能。第5~14章为第二编,论述各种传感器的原理、结构和性能。第15~30章为第三编,论述各种传感器的应用。

本书可供研究、生产和使用传感器的工程技术人员使用,也可供高等学校光学、磁学、声学、压电铁电学、生物医学、固体物理、计算机应用、仪器仪表与测量、自动控制、惯导技术、电子元件与材料、无线电技术等专业的师生参考。

传感器电子学及其应用

张福学 编著

国防工业出版社 出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 印张15¹/₈ 395千字

1990年11月第一版 1990年11月第一次印刷 印数: 0,001—4,000册

ISBN 7-118-00603-3/TM·14 定价: 12.00元

前 言

人类已进入信息社会，信息技术的基础是传感器技术、通讯技术和计算机技术，它们分别相当于人的“感官”、“神经”和“大脑”。但国内外对传感器技术的重要性早期没有足够的认识，因此，70年代后期发达国家出现了所谓“头脑（计算机）非常发达，而感觉器官（传感器）非常迟钝”的不正常现象，80年代初期国内出现了由于传感器技术落后而严重影响计算机推广应用的被动局面。现在，传感器技术亦是高技术竞争的核心技术已为国内外所公认，日本《日经实业》杂志1979年对今后10年值得注意的技术调查，将传感器列在首位。美国的《星球大战》计划和苏联的《军事航天》计划均将传感器技术列为重点发展技术，国内原电子工业部提出“传感器技术应用与微电子技术相结合，与计算机技术、LSI技术、通讯技术相适应协调发展”。

传感器技术包括传感器材料、传感器、传感器附属电路、传感器与计算机的接口电路、传感器应用等五个部分，因此，它是电子学的继续。但传感器技术又是一门边缘科学，它涉及到电子学以外的生物、医学、化学等技术领域。所以，它又是电子学的延伸，是新一代的电子学，称传感器电子学。

为了推动传感器技术的发展，作者1988年为中国电子报撰写了“传感器电子学及其应用”讲座，1989年为国际电子报撰写了“传感器应用”讲座。讲座连载后，受到广大读者的热烈欢迎，要求扩充内容出版此书。传感器的种类繁多，它是一门分散型技术，同时，它又是涉及多门学科的一门知识密集型技术，内容十分丰富。为了提供较多的传感器技术给读者，本书尽量做到反映该技术领域的全貌，但由于篇幅有限，一般只能简要介绍。书中第十、十四、十六、二十章反映了作者及其合作者的科研成

果，内容较新颖，故作了较详细的叙述。第三十章由高国伟和祖漪清同志撰写，其中包含了他们的科研成果。

国防工业出版社杨其眉和云南大学田文杰等同志分别审阅了全书，北京信息工程学院李擎、肖航、云南大学王自成、中国社会科学院语言研究所杨顺安和华中理工大学高国伟等同志分别审阅了部分章节，机械电子部华北光电技术研究所王秀奎和北京信息工程学院王丽坤、朱蔚彤、范茂彦等同志，为完成本书的出版工作付出了辛勤的劳动。在此，向以上同志表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，书中谬误难免，恳请同志们批评指正。

作 者

目 录

第一编 概 论

第一章 传感器电子学概论	1
§ 1.1 传感器电子学的特点	1
§ 1.2 传感器电子学的重要意义	2
§ 1.3 国外传感器概述	4
§ 1.4 国外传感器现状	5
§ 1.5 国外传感器技术动向	14
§ 1.6 国内传感器发展简史	18
§ 1.7 敏感元器件的研制和生产现状	19
§ 1.8 国内敏感元器件的应用现状	22
§ 1.9 国内传感器开发中存在的问题	23
§ 1.10 对国内开发传感器技术的建议	24
第二章 传感器与各种效应	26
§ 2.1 前言	26
§ 2.2 基本传感器的效应	28
§ 2.3 新效应的传感器	35
§ 2.4 新材料与变换功能	37
第三章 传感器的功能化与集成化	39
§ 3.1 概述	39
§ 3.2 传感器的集成化和功能化	40
§ 3.3 集成化和功能化实例	43
§ 3.4 智能传感器	50
第四章 传感器的一般性能	53
§ 4.1 传感器的静态性能	53
§ 4.2 传感器的动态性能	56

第二编 传 感 器

第五章 光传感器	62
§ 5.1 内光电效应型光传感器	62
§ 5.2 外光电效应型光传感器	65
§ 5.3 热电型光传感器	66
§ 5.4 二维光传感器	67
第六章 光纤传感器	70
§ 6.1 光纤温度传感器	70
§ 6.2 光纤压力和振动传感器	72
§ 6.3 光纤位移传感器	74
§ 6.4 光纤陀螺	77
§ 6.5 光纤形变传感器	78
§ 6.6 光纤速度和流速传感器	79
§ 6.7 光纤加速度传感器	80
§ 6.8 光纤声传感器	82
§ 6.9 光纤磁传感器	83
§ 6.10 光纤电压和电流传感器	85
§ 6.11 光纤电磁场传感器	88
§ 6.12 光纤射线传感器	90
§ 6.13 光纤分光传感器	91
§ 6.14 光纤折射率传感器	93
第七章 热敏传感器	94
§ 7.1 热膨胀型热敏传感器	95
§ 7.2 热电动势型热敏传感器	96
§ 7.3 电阻值变化型热敏传感器	97
§ 7.4 电容量变化型热敏传感器	97
§ 7.5 铁氧体型热敏传感器	98
§ 7.6 压电型热敏传感器	98
§ 7.7 热释电型热敏传感器	99
§ 7.8 晶体管型热敏传感器	100
§ 7.9 其它热敏传感器	100

第八章 磁敏传感器	102
§ 8.1 概述	102
§ 8.2 霍尔器件	103
§ 8.3 磁阻器件	103
§ 8.4 超导量子干涉器件	107
第九章 力敏传感器	110
§ 9.1 压力传感器	110
§ 9.2 应变片	112
§ 9.3 转矩传感器	112
§ 9.4 声传感器	113
§ 9.5 旋转传感器	113
§ 9.6 振动加速度传感器	114
§ 9.7 位置和位移传感器	115
第十章 压电射流速率传感器	117
§ 10.1 前言	117
§ 10.2 工作原理	118
§ 10.3 机械结构	121
§ 10.4 电路	126
§ 10.5 性能试验	128
§ 10.6 动态试验和交叉耦合试验	146
§ 10.7 铜斑蛇炮弹滚动速率传感器	153
§ 10.8 滚动速率传感器在铜斑蛇炮弹中的应用	164
第十一章 气敏传感器	169
§ 11.1 半导体气敏传感器	169
§ 11.2 固体电解质气敏传感器	171
§ 11.3 真空度传感器	172
§ 11.4 气体成份传感器	173
§ 11.5 高频式成份传感器	174
§ 11.6 光学式成份传感器	175
第十二章 湿敏传感器	176
§ 12.1 陶瓷湿敏传感器	176
§ 12.2 水分子亲合力型湿敏传感器	179

§ 12.3	非水分子亲合力型湿敏传感器	181
第十三章	生物传感器	183
§ 13.1	概述	183
§ 13.2	生物传感器的原理和分类	183
§ 13.3	电化学生物传感器	185
§ 13.4	生物电子传感器	189
§ 13.5	光生物传感器	191
§ 13.6	展望	194
第十四章	智能传感器	195
§ 14.1	何谓智能传感器	195
§ 14.2	智能传感器的特征	196
§ 14.3	智能传感器的技术动向	197
§ 14.4	微处理机与结构	201
§ 14.5	智能压力传感器的设计	204
§ 14.6	各种智能传感器 (实例)	212

第三编 传感器的应用

第十五章	传感器在家用电器中的应用	216
§ 15.1	概述	216
§ 15.2	电子炉灶	218
§ 15.3	自动炊饭锅	222
§ 15.4	扫除机	224
§ 15.5	室内空调器	226
§ 15.6	电褥子	228
§ 15.7	风干器	229
§ 15.8	热风取暖装置	230
§ 15.9	煤气浴室	231
§ 15.10	煤气报警器	232
§ 15.11	电唱机	233
§ 15.12	盒式磁带录音座	236
§ 15.13	磁带录像机	238
§ 15.14	摄像机	240

§ 15.15	电视机的无线电遥控	248
§ 15.16	其它家用电器	250
第十六章	传感器在机器人中的应用	251
§ 16.1	概述	251
§ 16.2	视觉传感器	260
§ 16.3	听觉传感器	262
§ 16.4	触觉传感器	264
第十七章	传感器在汽车电子学中的应用	280
§ 17.1	汽车工业与传感器	280
§ 17.2	汽车电子学	280
§ 17.3	汽车发动机控制用传感器	283
§ 17.4	非发动机控制用汽车传感器	286
§ 17.5	公路交通系统用传感器	287
第十八章	传感器在航空航天中的应用	290
§ 18.1	传感器在航空航天中的作用及其特点	290
§ 18.2	航空航天用角参数、加速度和压力传感器	294
§ 18.3	高度、空速和阳光等传感器	297
第十九章	传感器在医学中的应用	302
§ 19.1	医用传感器的特点、作用、分类和动向	302
§ 19.2	传感器在循环系统中的应用	305
§ 19.3	换能器在医学超声仪中的应用	308
§ 19.4	电化学传感器在医学中的应用	311
§ 19.5	生物传感器在医学中的应用	311
第二十章	人体的电场敏感功能及其应用	315
§ 20.1	前言	315
§ 20.2	人体组织的压电性	316
§ 20.3	电场中电偶极子的性能	319
§ 20.4	电场治疗仪	321
§ 20.5	电场治疗法的疗效	323
第二十一章	检测环境污染和公害的传感器	325
§ 21.1	电化学分析式浓度计检测水质和大气污染	325
§ 21.2	检测水质和大气污染的其它浓度计	328

§ 21.3	检测振动和噪声污染的传感器	331
§ 21.4	预防火山和地震的传感器技术	332
第二十二章	传感器在安全与防灾中的应用	334
§ 22.1	安全与防灾用传感器的特点	334
§ 22.2	公安警戒传感器	336
§ 22.3	金属检测器和异常接近传感器	339
§ 22.4	漏泄传感器	341
§ 22.5	火灾传感器	344
第二十三章	传感器在过程工业控制中的应用	349
§ 23.1	过程工业控制与传感器	349
§ 23.2	热敏传感器	353
§ 23.3	流量传感器	357
§ 23.4	压力传感器	361
§ 23.5	液面传感器	364
第二十四章	节能系统与传感器	367
§ 24.1	节能技术与传感器	367
§ 24.2	节能系统	369
§ 24.3	家庭和工业供热控制系统	371
第二十五章	光敏传感器的应用系统	375
§ 25.1	信息装置的功能	375
§ 25.2	输入系统的光敏传感器	375
§ 25.3	非实时和实时图像检测装置	379
§ 25.4	读出装置的光敏传感器	385
§ 25.5	光检测控制系统	387
第二十六章	遥感技术	391
§ 26.1	遥感类型与电子型遥感系统	391
§ 26.2	应用领域	393
§ 26.3	各种遥感器	394
§ 26.4	图像处理系统	398
§ 26.5	利用数据的技术	399
第二十七章	传感器与信息处理装置	402
§ 27.1	概述	402

§ 27.2	传感器信息的处理	403
§ 27.3	传感器信息处理系统	404
§ 27.4	微型计算机处理传感器信息 (实例)	406
第二十八章	传感器在食品工业中的应用	411
§ 28.1	食品工业的特点及面临的问题	414
§ 28.2	食品质量管理用传感器	415
§ 28.3	湿敏传感器在食品生产中的应用	415
§ 28.4	微生物传感器在食品生产中的应用	417
§ 28.5	食品生产过程对传感器的要求	423
第二十九章	传感器在农、牧、渔、林业中的应用	425
§ 29.1	传感器在农田机动设备中的应用	425
§ 29.2	农、林、渔业用传感器	428
§ 29.3	建筑与过程控制用传感器	440
第三十章	个人身份识别技术	447
§ 30.1	概述	447
§ 30.2	手写签字自动核认系统	448
§ 30.3	指纹自动识别系统	455
§ 30.4	声纹自动识别系统	460
参 考 文 献		464

第一编 概 论

第一章 传感器电子学概论

§ 1.1 传感器电子学的特点

传感器是一种能感知某一物理量（或化学量，生物量，……）的信息，并能将该信息转化为有用信号的装置。传感器电子学有如下特点。

一、学科的边缘性

传感器电子学是以各种材料的物理“……效应”、化学“……反应”和生物传感机理作为理论基础，开发新的功能材料，并使材料功能实用化而发展起来的一门新学科。

二、设计的综合性

人类社会，光、声、热、湿度、位移、距离、角度、重量、速度等信息千差万别，所用材料名目繁多，工作环境与技术要求形形色色，传感器与计算机要相互匹配。这一切决定了传感器设计的综合性。

三、功能的潜在性

传感器是人的五官功能的扩展，其功能各种各样。它能代替人的视觉、触觉、听觉等五官感觉的功能；它能检测人的五官不能感觉的现象。

四、应用的广泛性

传感器功能的潜在性决定了应用的广泛性。它既可用于军事工程，又可用于工农业等国民经济各部门，它被誉为“八十年代最具有时代性的大量生产的商品。”

五、测试的精确性

非电量测试技术是传感器计量检测的核心，与通用性强的信

9110096

息处理技术相比,传感器技术是一门因检测对象不同而技术各异的专门技术。各类信息的量程宽,如温度 $-273\sim 40000\text{K}$;压力 $133.322\text{Pa}/\text{cm}^2$ ($1\text{ mmHg}/\text{cm}^2$) $\sim 10^6\text{kPa}$ ($10000\text{kg}/\text{cm}^2$);加速度 $10^{-6}\sim 10000\text{g}$ 。测试精度高,多数产品的精度为 0.25% 、 0.1% ,个别产品精度可优于 0.001% 。动态测试技术难度大,如感湿响应时间,力学量传感器的频响特性与灵敏度测试。

六、工艺的复杂性

传感器的工艺复杂。如微型传感器要求直径为 1 mm 的精加工技术;硅应变片传感器要求厚度小于 $1\mu\text{m}$ 的超薄加工技术;耐压大于 10^6kPa ($1000\text{kg}/\text{cm}^2$) 的压力传感器要求密封技术;智能传感器必须解决“三维”结构的工艺技术。

七、生产的分散性

多数传感器都是多品种小批量生产,故传感器的生产是一种分散型的新兴工业。

§ 1.2 传感器电子学的重要意义

一、促进国民经济各部门的技术进步

传感器广泛应用于国民经济各部门,它对实现生产自动化、合理化、节省人力、提高效率、增加产品功能、确保安全、保护环境、节省资源和能源起着极其重要的作用。传感器的经济效益不仅是它本身的产值与利润,更重要的是每当出现一种新型传感器,往往随之而产生一种智能仪器或一个新的计算机控制系统,从而创造出巨大的经济效益。如氧化锆氧气浓度传感器与计算机配套用于锅炉节能控制系统,即能实时测定锅炉排出的废气中的氧气浓度,以便控制最佳空-燃比,从而减少燃料消耗。一台蒸汽发生量为 $10\text{t}/\text{h}$ 的锅炉,年耗油量约 4000t ,采用装有氧化锆传感器的计算机控制系统后,耗油量下降 3.1% ,每年约节省人民币5万元。

二、提高军事装备的实战能力

利用传感器和计算机发展新一代“智能化”电子武器,能使

武器装备反应速度快，提高命中率，能击中高速飞行目标。

一种新型高性能传感器的出现，通常随之而产生一种新武器。如我们研制的压电射流陀螺，它承受 16000g 的冲击后还能正常工作，平均无故障间隔达 250000 h。这种新型惯性传感器的出现，使炮射导弹姿态控制和炮弹末端控制这个老大难问题得到解决，从而使炮弹变成了导弹。又如我们研制的能验证人的声音、笔迹和指纹特征的传感器有神锁之称。它是军用计算机专家系统的核心部件。它的出现将使国防机要，军事装备和指挥的安全保密系统更科学化和现代化。若将它用于公安部门、刑事案件侦破，以及银行、商店、保密场所和净化厂房的入口管理，将使这些工作发生划时代的变化。

传感器是决定军用武器的性能和实战能力的重要因素，战斗机、导弹、侦察卫星、宇宙飞船、运载火箭和航天飞机等的姿态控制采用各类传感器达几千只。

三、促进科学技术的发展

传感器电子学渗透到科学技术的各个领域，它是发展科学技术不可缺少的新学科。如能测量物体发生的 10^5 磁量子的传感器出现后，过去不能测定的物理参数，根据物体发生的微弱磁量即可测定。这种传感器用于天文测量，精度大大提高，从而使原来的物理常数得到修正。又如用高湿、高压、射线等传感器能检测至今难于检测的各种物理量，使人们便于获得核原料勘探、生产和转换中的各种参数，直接探测宇宙空间和海洋深处的各种信息。

传感器电子学在生物工程的研究中起重要作用。新一代的生物传感器和仿生传感器能够从分子生物学的角度诊断癌症，还能自动控制生物生长过程，监控人的健康。随着生物传感器的发展，人的传感功能（包括人体的特异功能）将得到正确的解释。

随着视觉、听觉、触觉等感觉传感器的开发，能根据外界的各种信息进行“思考”和“判断”并决定行动的初级智能机器人已

问世。

四、丰富和美化人民生活

传感器电子学已深入到人们生活的各个领域，装有光、磁、温度、湿度、气体和压力等传感器的家用电器早已商品化。微波炉最引人注目，它可在短时间内完成解冻、加热、烘烤、烧煮。湿度和气体传感器可用于检测烹调过程中食物的湿度和气体浓度变化。红外线传感器能检测食品温度变化。这些传感器和计算机组成控制系统，便可烹调出味美可口的食品。

家用电冰箱节能用结霜传感器，监视气雾用湿度和气体传感器。传感器和微型计算机构成的控制系统可监控洗衣机洗涤的全过程，从而节水和节电，如漂净度传感器（由发光二极管和光电晶体管组成）通过测定水的透过率即可判断漂净度。气体传感器可用于家用液化气检漏和煤气报警。

磁传感器和光传感器用于监视磁带录相机的磁带运行，霍尔传感器用于测定唱机和录音机的转速。此外，还有防盗、防水等传感器，特别是各种各样的玩具用传感器。

总之，传感器电子学丰富和美化了人民生活，随着传感器电子学的发展，人民生活将更加丰富多彩。

§ 1.3 国外传感器概述

美、日、苏、英、法、西德、荷兰、瑞士、瑞典等发达国家都把传感器技术视为 80 年代的关键技术。如美国国防部最近将传感器技术列为今后 10 年 20 项关键技术之一，苏联的军事航天计划第五条就是传感器，日本开发新技术将传感技术列为第一位。

发达国家重视传感器技术的开发，已收到经济效益。美国的传感器厂家 254 家，仅霍尼韦尔公司 1977 年就投资 8000 万美元开发传感器，目前美国传感器的销售额年增长速度达 20% 左右，1986~1987 年敏感元件销售额约达年平均 4800 万美元，传感器达年平均 3.17 亿美元（1986 年的传感器市场为 4.8 亿美元）。日

本 1984 年以前投资 121 亿日元开发敏感元件与传感器,并大量引进美国的先进技术,因此传感器技术发展十分迅速,仅 1982 年敏感元件的产值就达到 1300 亿日元,1986 年产值约为 1980 年的三倍。西德、法国和英国等西欧国家对传感器技术的发展亦十分重视,敏感元件的年平均增长率高达 32%,预计传感器市场将由 1980 年的 11.3 亿美元增长到 1990 年的 38 亿美元。

§ 1.4 国外传感器现状

§ 1.4.1 产品现状

一、力敏传感器

力敏传感器是将应力、压力等力学量转换成电信号的转换器件。力敏传感器有电阻式、电容式、电感式、压电式和电流式等多种形式,它们各有优缺点。半导体压力传感器的主要技术性能:输出 $3 \sim 20 \text{mV/V}$; 精度 0.25%; 量程 $103.4 \sim 34473.8 \text{kPa}$ ($15 \sim 5000 \text{lb/in}^2$); 频率 $0 \sim 5000 \text{Hz}$; 工作温度 $-55 \sim 120^\circ\text{C}$ 。这种传感器的优点是体积小、成本低,缺点是对湿度十分敏感。压电式力敏传感器的优点是灵敏度高,工作温度范围宽 ($-70 \sim 250^\circ\text{C}$),缺点是成本稍高。近年来,压电式力敏传感器的应用领域和市场销售额明显扩大。

二、热敏传感器

热敏传感器是将温度转换成电信号的转换器件,可分为有源和无源两大类。前者的工作原理是热释电效应、热电效应、半导体结效应。后者的工作原理是电阻的热敏特性,约占热敏传感器的 55%。

美、英、日、苏、荷兰和西德是热敏传感器的主要生产国。日本 1982 年传感器年产量达 12432.8 万只,产值为 62.89 亿日元。1983 年热敏电阻的技术性能:阻值 1、2.5、 $10 \text{k}\Omega$; 工作温度 $-50 \sim 100^\circ\text{C}$; 在 25°C 时的可控性为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 。美、英、日、