

现代传感技术

魏永广 刘 存 编著



东北大学出版社

现代传感技术

魏永广 刘 存 编著

东北大学出版社

内 容 简 介

本书简要介绍了现代传感技术及检测技术的概况,阐明了动态测量和其他检测理论及其应用,详细论述了各种传感器的结构、原理。其中第一章为传感技术概况;第二章论述了硅传感器与智能传感器;第三章论述了光与辐射传感器及应用;第四章论述了各种光纤传感器的原理及最新成果;第五章、第六章介绍了近年研究热点——气敏传感器和离子敏传感器。

本书可作为电子科学与技术、测控技术及仪器、电子信息工程、自动化等专业的本科生和研究生教学用书或者参考书,也可供从事电子信息类工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代传感技术/魏永广,刘存编著. —沈阳:东北大学出版社,
2001.4(2001.10 重印)

ISBN 7-81054-608-2

I. 现… II. ①魏…②刘… III. 传感器-技术 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 022208 号

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号 邮政编码 110006)

电话:(024)23890881

传真:(024)23892538

网址:<http://www.neupress.com> E-mail:neuph@neupress.com

东北大学印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本:850mm×1168mm 1/32

字数:185 千字 印张:7.125

2001 年 4 月第 1 版

2001 年 10 月第 2 次印刷

责任编辑:李天泽

责任校对:张淑萍

封面设计:唐敏智

责任出版:杨华宁

定价:20.00 元

前 言

在信息社会中,信息的提取、处理等重要性是显而易见的。随着现代科学技术的发展,对检测技术提出了愈来愈高的要求。检测技术在国民经济中也有极其重要的地位和作用,而作为提取信息的传感器是测量系统的重要组成部分。现在人们已经认识到传感器和检测技术的水平是一个国家的现代化水平的重要标志。

提高检测系统的检测分辨率、精度、稳定性和可靠性,扩大应用范围,开发传感器的新型敏感元件材料,微电子技术、微处理器与传感器结合,使测量智能化、研究多维化、功能多样化的检测系统,研究无接触测量技术,研究新型原理的传感器,探索测量的新理论和新技术是现代检测技术的发展方向。

根据传感器在检测技术中的地位,在本书中用较大的篇幅来介绍传感新理论和新技术。内容上注意突出原理性、系统性、层次性和渐进性。

编写本书的目的是为检测新技术领域提供一本研究和开发用的较全面的参考书,在有限的篇幅内,力求达到能将最新的研究成果介绍给读者。

作 者
2001 年 2 月

111-97/69

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 传感器的位置	1
1.2 传感器的分类	4
1.3 传感技术的发展	6
1.4 智能传感器的发展.....	13
1.5 传感技术基础.....	14
第二章 硅微传感器与智能传感器	34
2.1 概述.....	34
2.2 薄膜技术.....	36
2.3 硅微机械加工技术.....	44
2.4 X 射线深层光刻电铸成型技术.....	62
2.5 微型传感器结构.....	66
2.6 硅压力传感器.....	70
2.7 硅微加速度传感器.....	77
2.8 智能传感器.....	82
第三章 光电传感器	90
3.1 光探测器的物理基础.....	91
3.2 光探测器	100
3.3 热探测器	119
第四章 光纤传感器	123
4.1 光纤基本理论	123

4.2	几种主要光纤波导	134
4.3	光纤的激励与连接	136
4.4	光纤传感器概述	142
4.5	光纤传感器的调制技术	145
4.6	光纤传感器的应用	171
第五章	气敏传感器及应用.....	179
5.1	概 述	179
5.2	电阻型气敏传感器	184
5.3	固体电解质气敏传感器	187
5.4	MOSFET 气敏传感器	189
5.5	气敏传感器的应用	198
第六章	离子敏传感器.....	199
6.1	离子选择电极	199
6.2	ISFET 离子敏传感器	201
6.3	固态参比电极	216
6.4	ISFET 的特点	218
6.5	ISFET 的应用	219
参考文献		221

第一章 绪 论

1.1 传感器的位置

测量是人们认识和改造自然的重要方法。以电子技术、计算机技术为基础的对各种电量和非电量的测量,在现代显然是最重要的测量方法。而且,测量的发展水平也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。科学上的重大发现,往往是通过新的观测手段的发明而取得的。许多成就得益于新的仪器或观测手段的发明创造,现代化建设中,对检测仪器或系统有着更高层次的要求,如在大规模集成电路的研制和生产中,一块集成电路内含有成千上万个门电路,要对它们进行静态、动态和功能测试,没有高性能的测量设备则根本不可能,可以说,大到天体观测、遥感遥测、气象预报、地震找矿,小到物质成分分析、晶体结构测定、原子核子结构研究;军事上的电子侦察、雷达等到民用的工业过程参数测控和医用断层扫描(CT),无一不是现代检测手段的体现。

在现代自动测量系统中,其各个组成部分常常以信息流的过程来划分:信息的获取,信息的转换,信息的显示、信息的处理。首先要获得被测量的信息,把它变换成电量,然后通过信息的转换,把获得的信息变换、放大,再用指示仪或记录仪将信息显示出来,有的还需要把信息加以处理。因此测量系统包括传感器(信息的获得)、测量电路、转换器、数据处理器、信息传输、指示器、记录仪(信息的显示)等几部分,它们之间的关系可用图 1-1 表示。

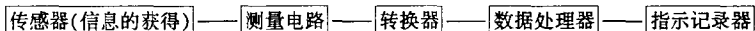


图 1-1 自动测量系统示意

在上述测量系统中,用来获取信息的传感器是第一个环节。传感器就是自动测量系统中一个把待测量变换成某种电信号的装置,是一种获得信息的手段。传感技术是关于传感器原理、设计、制造及应用的综合技术。它在测量系统中占有重要的位置,它能否获得信息和获得的信息正确与否,关系到整个测量或控制系统的成败与精度。如果传感器的误差很大,其后的测量电路、放大器、指示仪和执行器等的精度再高、可靠性再好也将难以提高测量系统的精度或失去意义,甚至会造成灾难。

现代信息技术的三大基础是信息的拾取、传输和处理,也就是传感技术、通信技术和计算机技术。传感器的应用遍及各个领域,它是生产自动化、科学实验、计量核算、监测诊断等系统中不可缺少的。传感器在工业、农业、国防、科学技术等各个领域都极为重要。

在机械制造工业中,需要测量工件尺寸、形状和表面质量,静态或稳态下的性能参数和动态特性。智能机械以机器人为代表。一个机器人要用到大量各种高质量的传感器:如位移传感器、速度传感器、加速度传感器、视觉传感器、听觉传感器、触觉传感器等。传感器的费用占机器人成本的很大一部分。

在电力、石油、化学工业中,为了保证生产过程能正常高效地进行,对工艺参数(如温度、压力、流量等)进行检测和控制,必须采用传感器检测出这些量,以便进行自动控制和集中管理。另外,为确保生产安全,防止事故发生,必须对系统加以监视或保护,这些均需要传感器。

汽车是世界上能源最大消耗者之一,为了节能,防止污染,安全行驶,要用到许多传感器。目前一辆汽车需要几十个传感器,将来也许会用得更多。

在环保方面,有毒、易燃、易爆气体的报警等都需要通过传感器来获得信息。

在医疗卫生方面,用离子敏传感器可以检测出人们血液中钾、钠等离子的含量。有了传感器,打破了传统的检测方法和手段,提高了效率,做到快速准确。

人们探索宇宙空间的奥秘,如果没有高水平的传感器,宇宙飞船无法飞向太空。一个宇宙飞船可看成是一个高性能传感器的集合体。

在国防工业中,使用传感技术和计算机技术发展新一代武器——智能化电子武器。加快武器装备的反应速度,提高命中率都和新型传感器的发现与发展分不开。传感器是决定武器的性能和实战能力的重要因素。飞机、导弹和卫星上都使用了许多的传感器。

家庭电器化是将人们从繁忙的家务劳动中解放出来的必由之路,如电子灶、电冰箱、洗衣机、电熨斗都是靠敏感器件来实现自动化的。

传感器的应用不胜枚举。

由于传感器的使用,才使生产工艺过程的控制和产品性能的检测有保证,所以它是提高产品竞争力的强有力的手段,是获得经济效益的有效途径。据有关资料介绍,全美电站有关数据表明,如果主汽流量测量精度改善 1%,电站的燃烧成本(热效率)将会改善 1%,则每年可节约 3 亿美元;若传感器及其测量仪表可利用率提高 1%,则每年可节约 30 亿美元;美国的电站采用了先进的传感器和控制技术后,使全美经济每年获益达 110 亿美元之多。

近年来,计算机技术发展很快,计算机不断更新换代,它推动了世界科学技术的发展,但传感器落后于计算机的发展。正因如此,近年来,传感技术的重要性越来越为世界各国所认识,世界上许多国家都在努力研究各种新型传感器,改进传统的传感器,开发

各种新型传感器已成为当前发展科学技术的主要课题之一。在 20 世纪,日本把传感器技术列入影响未来发展的六大核心技术之一(六大核心技术为计算机、半导体、通信、激光、超导和传感器技术)。美国把传感器技术列为 20 世纪 90 年代 22 项关键技术之一。西欧各国也都把传感器技术列为发展的重点技术。美国和欧洲传感器市场投资总值的年增长率为 32%,英国传感器销售额 1990 年比 1980 年增长 24 倍。80 年代,日本、西欧市场传感器销售值年增长率为 30%~40%,90 年代,全世界年增长率预计为 8.8%。90 年代以来各方面对传感器的需求也越来越强烈。我国对传感器需求的增长速度也很快,90 年代我国国内市场所需各类传感器 4 亿余件。但是我国目前生产的传感器,无论在品种、数量和质量上都远远满足不了市场的需要。

传感器位于信息系统的最前端。其特性的好坏、输出信息的可靠性对整个系统至关重要,因此,传感器的性能必须适应系统使用的要求。

当前,传感器的发展落后于计算机的发展,据分析,若以 1970 年的价格性能比为 1,1990 年的价格性能比是:执行器(以电动机为例)为 1/10,计算机为 1/1000,传感器为 1/3。可见,传感器的价格性能比居高不下,与其它两个功能块的发展形势不相适应。

1.2 传感器的分类

根据传感器应用的对象、测量的范围、周围的环境等不同,需要使用的传感器大不相同,因而有各式各样的传感器。有很多关于传感器的分类方法,如:以被测的量分类或以传感器的工作原理和敏感材料分类;还有按能量的传递方式分为有源传感器和无源传感器。有源传感器是将非电量转换为电量;无源传感器本身并不是一个换能器,被测非电量仅对传感器中的能量起控制或调剂

作用。所以,它必须具有辅助能源——电源。目前常用的分类方法是前两种:

按被测量分类,可以有以下几类:

(1)热工量传感器:温度、热量、比热、热流、热分布;压力、压差、真空度;流量、流速、风速、物位等传感器。

(2)机械量传感器:位移、尺寸(长度、厚度、宽度、角度)、形状;力、力矩、应力、重量、质量、转速、线速度、振动、加速度、噪声等传感器。

(3)物性和成分量传感器:成分量(化学成分、浓度等);酸碱度、盐度、浓度、黏度;密度、比重等传感器。

(4)状态量:颜色、透明度、磨损量、裂纹、缺陷、泄漏、表面质量等传感器;

按传感器的原理分类,大体上可分为物理型、化学型及生物型三大类。

物理型传感器是利用某些变换元件的物理性质以及某些功能材料的特殊物理性能制成的传感器。如电阻(包括应变电阻电位计、压阻、热电阻)传感器、电感(包括自感、差动变压器)传感器、电容传感器、超声传感器、射线传感器、涡流传感器、磁电传感器、热电传感器、压电传感器、光电(包括光电式、激光、红外、光栅、光导纤维)传感器、谐振(包括振弦、振片、振筒)传感器、霍尔传感器、微波传感器等。

化学传感器是利用电化学反应原理的传感器,如气敏传感器、湿度传感器、离子传感器等。

生物传感器是一种利用生物活性物质选择性的识别和测定生物化学物质的传感器,如酶传感器、免疫传感器等。

在以上两种分类方法中,以被测量分类时,对使用的对象比较明确,而以工作原理分类时,则对传感器所采用的原理比较清楚。还可以把两者结合起来称呼,如光电式转速传感器,电容式压力传

感器等。实际上,这些分类方法并不能包括所有传感器,我们还经常依据传感器的某种特点,使用其它名称来称谓传感器。

1.3 传感技术的发展

随着科学技术、工农业生产、军事等需要的增长,对传感器技术提出了愈来愈高的要求。现代传感器要具有极高的精度、极宽的测量范围、极高的可靠性等。例如,对在线加工检测要求高于 $0.1\mu\text{m}$ 的精度,对火箭发动机内的动态压力测量精度应优于 0.1% ,对材料微观结构的测量达到 10^{-10}m 级。需要极端参数值(超高压、超高温、超低温)和特种参数(如识别颜色、味觉、嗅觉)等极端参数测量用的传感器,例如连续测量液态金属的温度、长时间连续测量高温介质($2500\sim 3000^{\circ}\text{C}$)、极低温度测量(超导)、多相流量测量、脉动流量测量、微压(几十帕)测量、超高压测量、高温高压下成分测量、高精度(0.01%)称重等。

在测量过程中,把传感器置于被测对象上,相当于在被测对象上加一负载,这样多少会影响测量的精度;而在有些被测物上,根本不可能安装传感器。因此,要研究高性能的无接触测量传感器。目前已采用的一些光电传感器、电涡流传感器、超声传感器、辐射传感器等都是这类传感器。

虽然传感器一般较小,但是它的涉及面却非常广。传感器利用的原理包括了各种物理效应、化学反应、生物功能等。虽然一般传感器体积小,重量轻,材料用得不多,但是它们采用的材料却包括了黑色金属、有色金属、稀土金属、工程塑料、半导体材料、陶瓷材料、高分子材料以及各种特殊材料(如压电材料、热电材料、恒弹性材料、高磁导率材料等)。传感器的工艺也包括了机械加工、电加工、化学加工、光学加工以及各种特殊工艺。

利用新的物理效应,化学反应和生物功能研究新型原理的传

感器。如用约瑟夫逊效应可制成超精密的传感器(SQUID),不仅能测量磁,而且对温度、电压、重力进行超精密测量,磁传感器可以进行磁场的 $1/10000$ 的测量。另外利用核磁共振现象,测量温度精度分辨率可达 0.001K 。生物的某些感觉能力简直不可思议。例如研究狗鼻的结构来探索嗅觉传感器,因为狗可以从十四五种混杂的气味中找出特定的一种气味,能感受普通人嗅觉千万分之一的稀释液的气味;鸟的方位感觉很强,一种海燕能从 4910km 外飞回来,对这种归巢性研究,希望能得到一种方位传感器。

现代传感器技术发展的显著特征是:研究新材料、开发利用新功能,使传感器多功能化、微型化、集成化、数字化、智能化。

1.3.1 新材料、新功能的开发

传感器材料是传感技术的重要基础。多数传感器都是利用某些材料的特殊功能来达到测量目的的,传感器中所用敏感元件、变换元件的材料性能、工艺水平,很大程度上决定着传感器的性能与水平。所以,探索已知材料的新的功能或研究具有新功能的新材料都对研制新型传感器有着十分重要的意义。开发新的敏感材料和元件,如半导体材料、陶瓷材料、非晶态合金材料以及高分子聚合材料等。开发新型功能材料是发展传感技术的关键。

半导体材料和半导体技术使传感器技术跃上一个新的台阶。半导体材料与工艺不仅使经典传感器焕然一新,而且发展了许多基于半导体材料的热电、光电特性及种类众多的化学传感器等新型传感器。如各种红外、光电器件(探测器)、热电器件(如热电偶)、热释电器件、气体传感器、离子传感器、生物传感器等。半导体光、热探测器具有高灵敏度、高精度、非接触的特点,由此发展了红外传感器、激光传感器、光纤传感器等现代传感器。

以硅为基体的许多半导体材料易于微型化、集成化、多功能化和智能化,工艺技术成熟。因此,半导体材料应用最广,也最具有

开拓性,是今后一个相当长的时间内研究和开发的重要材料之一。采用特殊工艺制做的多晶硅薄膜,是低价格的光敏、压敏和热敏材料;非晶硅材料具有较好的热电特性(塞贝克系数较大)和应变特性(应变灵敏系数比金属的大一个数量级),对光尤其是可见光的吸收系数比单晶硅大,灵敏度高,对光波长的灵敏度与人眼的相差无几,因此是热敏、压敏和光敏等元件的理想材料。另外,非晶硅薄膜的生长温度低($200\sim 350^{\circ}\text{C}$)、对基体要求不严(可用绝缘材料或有机材料或非晶材料等作基体)、可大面积成膜、膜层机械强度大、工艺简单、价廉。所以,非晶硅材料是最希望的廉价传感器材料,是今后的研究方向之一;硅的异质结外延材料是在蓝宝石衬底上定向外延硅单晶膜而成的材料,简称 SOS 材料,具有耐热($250\sim 450^{\circ}\text{C}$)、绝缘、耐腐蚀、抗核辐射、抗击穿、漏电小、高速响应、高集成性、低功耗等优点,可制成加速度、压力、多功能集成生物敏传感器;化合物半导体材料(如 GaAs, InSb)可以制作力敏、磁敏和光敏元件,它们具有耐高温、抗辐射、电子迁移率高等优点。化合物半导体的一个最重要的发展方向是超晶格材料,它具有由两种极薄(约 0.5nm)半导体交叠组成的周期性多层结构,用分子束外延(MBE)等方法制成,其厚度大于晶体的晶格常数,小于电子的平均自由程,且具有低噪声高电子迁移率,因此灵敏度极高,是检测极微量的高灵敏敏感材料,可用来制成光敏、磁敏、超声波等敏感元件,并可望制成高临界转变温度的超导体,从而制成相当高温下工作的超导量子干涉器件(SQUID),以测量极微弱磁场强度。

最有希望的敏感材料是陶瓷材料、有机材料。近年来功能陶瓷材料发展的很快,在气敏、热敏、光敏传感器中得到广泛的应用。目前已经能够按着人为地设计配方,制造出所要求性能的功能材料。例如,可以不同的配方混合的原料,在精密调制化学成分的基础上,经高精度成型烧结而成为对某一种或某几种气体进行识别的功能识别陶瓷,用以制成新型气体传感器。尽管半导体硅材料

已广泛的应用于制作各种传感器,但其有着工作上限温度低的缺点,限制了其应用范围。按上述方法可自由配方烧结而成的功能陶瓷不仅具备半导体材料的特点,而且其工作温度上限极高,大大地拓宽了其应用领域。

陶瓷是用高温烧结法制成的非金属无机固体材料,它是由晶粒、晶界、气孔、杂质和缺陷构成的多晶聚合物。其宏观性能主要取决于组成和微观结构。通过精选原料,精密调制化学成分,采用粉末冶金方法制成的精细陶瓷,其特点是:物理、化学性能稳定;机械强度较高;耐高温、耐腐蚀;具有孔质结构,吸附力强;可通过材料组分、结构和形态的变化来调节和控制其敏感性能;工艺较简单,适宜批量生产,价格低廉等。它是制作多种敏感元件的主要材料,如制成力敏、压敏、热敏、光敏、声敏、气敏、湿敏和离子敏等敏感元件。因此陶瓷敏感材料与半导体敏感材料一样,在物性型传感器中是极为重要的敏感材料。

陶瓷敏感材料种类繁多,应用广泛,极有发展潜力,常用的有半导体陶瓷、压电陶瓷(主要材料为 BaTiO_3 , PZT , PbTiO_3 等)、热释电陶瓷(如 PZT , LiTaO_3 , 可制作红外敏感元件)、离子导电陶瓷(常称为固体电解质,如 ZrO_2 , $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等)、超导陶瓷(如钇钡铜氧化物,其临界温度已达 300K ,可制成约瑟夫逊结)和铁氧体等。半导体陶瓷是传感器应用的主要材料,其中尤以热敏、湿敏和气敏最为突出。

高分子有机敏感材料是近几年人们极为关注的具有应用潜力的新型敏感材料,可制成热敏、光敏、气敏、湿敏、力敏、离子敏和生物敏等元件。例如,聚偏氟乙烯 PVDF 具有压电效应和热释电效应,其特点是灵敏度高,压电常数比石英高十多倍,压电电压常数为压电陶瓷 PZT 的 21 倍;分辨力高,能分辨 10^{-6}°C 的温度变化;机械强度高,具有成型方便,加工性能好,可制成厚为 $5\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 的大面积挠性膜;声阻抗与水及人体组织的声阻抗接近;频响宽;

化学性能稳定、耐疲劳性高、热稳定性好、吸湿性低。因此 PVDF 可制成血压、脉搏、胎心音、红外、图像、角速度等敏感元件。因此,随着合成技术的发展,高分子有机敏感材料及其复合材料将以其独特的性能而在传感器敏感材料中占有重要的地位。

生物活性物质(如酶、抗体、激素)和生物敏感材料(如微生物、组织切片)对生物体内化学成分具有敏感功能,且噪声低、选择性好,灵敏度高。例如,以酶为敏感材料的生物传感器,其放大倍数一般可达 10^{10} 倍,高者可达 10^{15} 倍;以生物中的抗体做成的薄膜,对相应抗原的选择性比其他材料无法相比的。其灵敏度已超过警犬的灵敏度。因此生物活性物质敏感材料是一种很有前途的新型化学敏感材料,可应用于医疗、工业过程(如发酵过程)和环境检测等领域。

综上所述,进一步研究材料的功能效应,提高现有敏感材料的性能,研究、开发和应用新型敏感材料,将极大地提高敏感材料的功能效应,开拓新型传感器及其应用领域。

1.3.2 新的加工技术

敏感元件的性能除由其材料决定外,还与其加工技术有关,采用新的加工技术,如集成技术、薄膜技术、微机械加工技术、静电封装技术等,能制作出质地均匀、性能稳定、可靠性高、体积小、重量轻、成本低、易集成化的敏感元件。

传感器有逐渐小型化的趋势,小型化为使用传感器带来许多方便。以 IC 制造技术为基础的微机械加工(Micro machining)可使被加工的半导体材料尺寸达到光的波长级,并可以大量生产,从而可以制造出超小型而价格便宜的传感器。微机械加工技术由四种基本技术组成:

- (1)平面工艺技术;
- (2)选择性的化学刻蚀技术;

(3) 固相键合工艺技术;

(4) 机械切断技术。

目前平面工艺技术除包括传统的氧化、光刻、扩散、沉积等微电子技术外,利用薄膜制作快速响应传感器。利用各向异性刻蚀技术可以制成悬臂梁式加速度传感器。固相键合工艺是将两个硅片直接键合为一体而不用中间的粘接剂,也不需外加电场,只需对两对接表面进行活化处理,在室温下把两个热氧化硅片面对面地接触,再经一定温度退火即可使两硅片键合为一体。经键合工艺制成的压力传感器可在更高的工作温度下可靠地工作,由于制造像硅压阻传感器这种超小型压力传感器时是把多个芯片做在同一个基片上的,所以最后需要把每个芯片用分离切断技术分割开来,以避免损伤和残存内应力。

1.3.3 多维、多功能化的传感器

目前的传感器主要是用来测量一个点的参数,但是在科学技术和工程上有时需要测量在一条线上或一个面上的参数,因此需要相应地研究二维乃至三维的传感器。将敏感元件和放大电路、运算电路、补偿电路等利用 IC 技术制做在同一芯片或制成混合式的传感器。实现从点到一维、二维、三维空间图像的检出。

在有些场合,希望能在某一点同时测得两个参数,甚至更多的参数,因此就要求能有测量多参数的传感器。例如,同时能测得一点的温度和湿度,为此在探索和寻求一些敏感元件材料,这种材料能同时感受两个以上参数而变换成不同电量,且互不影响。如利用钛酸钡—钛酸锶组成的多孔陶瓷,其电容量与温度有关,电阻量则与湿度成函数关系,这样从测得的电容和电阻分别可以知道温度和湿度值。如日本开发出的可同时检测 Na^+ 、 K^+ 和 H^+ 离子的传感器,用这种传感器可同时检测血液中的钠、钾和氢离子浓度,对诊断心血管疾病有很大的意义。该传感器的尺寸为 2.5mm