

普通高等教育“三海一核”系列规划教材

声学传感器技术 及工程应用

主编 洪连进

高等教育出版社

普通高等教育“三海一核”系列规划教材

声学传感器技术 及工程应用

主编 洪连进

高等教育出版社·北京

内容提要

本书以提高本科教育人才培养质量、强化“三海一核”特色优势为原则,系统地介绍传感器的基本知识,并以声学传感器的应用为目标,配有传感器在水声工程中的应用实例。本书主要内容包括传感器的特性、弹性敏感元件的力学特性、电阻式传感器、电感式传感器、电容式传感器、压电式传感器、声学传感器、超声波传感器、声矢量传感器、水下弱信号检测系统等。本书配有适量的思考题与习题,在一些重点章节有应用实例与分析。

本书是关于以水声工程为应用背景的传感器专业书籍,可作为高等院校和科研院所水声工程专业高年级本科生的教材或参考书,也可作为相关研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

声学传感器技术及工程应用 / 洪连进主编. -- 北京 : 高等教育出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-04-049041-1

I. ①声… II. ①洪… III. ①传感器-应用-水声工程-高等学校-教材 IV. ①TB56

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 300362 号

策划编辑	高云峰	责任编辑	高云峰	封面设计	张楠	版式设计	杜微言
插图绘制	黄云燕	责任校对	刁丽丽	责任印制	尤静		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京明月印务有限责任公司
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 12.75
字 数 310 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址	http://www.hep.edu.cn http://www.hep.com.cn
网上订购	http://www.hepmall.com.cn http://www.hepmall.com http://www.hepmall.cn
版 次	2018 年 3 月第 1 版
印 次	2018 年 3 月第 1 次印刷
定 价	35.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 49041-00

前言

传感器技术是利用各种功能材料实现信息检测的一门综合技术,是现代科学技术领域实现信息化的基础技术之一。随着人类对神秘海洋中各种信息的深入研究,诞生出各种用途的水下声学系统,这些系统均以声波作为水下信息的载体,因此,能够有效探知水下信息的声学传感器则成为了水声系统中最为关键的部件。

本书遵循提高本科教育人才培养质量、强化“三海一核”特色优势的原则,较全面地介绍水声工程领域中经常使用的声学传感器,系统地介绍声学传感器的基本原理和工作特性等。根据水声学的原理,通过水下声学传感器的合理设计,可以将空气介质中使用的某些传感器作为水下声学传感器的结构部件之一,因此,与水下声学传感器有关的一些传感器本书也做了介绍。作者从多年的传感器技术等课程的教学和科研工作中体会到,学习传感器技术的目的在于更好地将它们运用到科学研究和生产实践中。所以,有必要将声学传感器的相关原理与实际应用结合起来,给读者一个较为系统而完整的声学传感器方面的应用知识。本书在编写过程中参考了国内许多传感器方面的优秀教材。

全书共分为 10 章。前 2 章对传感器技术进行基本概述,并给出传感器的一些特性,包括传感器的静态特性和动态特性;第 3 章介绍声学传感器的基本理论,给出了声学的基本物理量;第 4 章介绍传感器常用的材料及基本的弹性敏感元件,包括电学功能材料、磁学功能材料、光学功能材料、热学功能材料及特殊功能材料;第 5 章集中介绍水下声矢量传感器的基本工作原理和分类,给出了水下声矢量测量系统;第 6 章介绍电阻式传感器的基本原理及测量电路,并给出具体的压力传感器和加速度传感器实例;

第7章介绍压电式传感器的工作原理及其设计实例;第8章介绍三种工作原理的电容式传感器及硅微电容式加速度传感器;第9章着重介绍变磁阻式、互感式及电涡流式传感器;第10章介绍超声波的物理性质、超声波传感器及其应用。

哈尔滨工程大学的博士生李玥对本书插图进行了整理并对全书进行了校对,在此深表谢意。

由于作者水平有限,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第1章 概述	1	3.2.1 电动式话筒	42
1.1 传感器的作用及其在水声工程中的地位	1	3.2.2 电容式话筒	42
1.2 传感器的定义与组成	3	3.2.3 驻极体式话筒	44
1.3 传感器的分类	4	3.2.4 压电式声传感器	45
1.4 现代传感器的发展动向	6	3.2.5 振动传感器	45
1.4.1 声学量传感器	7	第4章 传感器的材料及基本弹性敏感元件	47
1.4.2 力学量传感器	8	4.1 传感器的材料	47
1.4.3 光学量传感器	9	4.1.1 电学功能材料	47
1.5 传感器的技术动向	10	4.1.2 磁学功能材料	48
1.5.1 集成化与智能化	10	4.1.3 光学功能材料	48
1.5.2 机械化和系统化	10	4.1.4 热功能材料	49
1.5.3 多样化	11	4.1.5 特殊功能材料	50
1.5.4 扩大应用领域	11	4.2 基本弹性敏感元件	50
思考题与习题	12	4.2.1 弹性敏感元件的基本特性	50
第2章 传感器的特性	13	4.2.2 弹性敏感元件的材料	55
2.1 传感器静态特性的一般知识	14	4.2.3 弹性敏感元件的形式及其力学特性	56
2.1.1 静态特性的表示方法	14	4.2.4 常用弹性元件的设计与计算	60
2.1.2 静态特性的求法	16	第5章 水下声矢量传感器	87
2.2 传感器的主要静态特性指标	17	5.1 水下声矢量传感器的工作原理	87
2.2.1 测量范围和量程	17	5.2 声矢量传感器	89
2.2.2 分辨力和阈值	17	5.3 矢量水听器的基本参数	91
2.2.3 灵敏度	18	5.4 声接收器的分类	94
2.2.4 迟滞	19	5.5 水下复合式矢量水听器	95
2.2.5 重复性	19	5.5.1 压差式矢量水听器	97
2.2.6 线性度	20	5.5.2 复合式同振型矢量水听器	101
2.2.7 重复性	23	5.6 水下声矢量测量系统	105
2.2.8 零漂及温漂	23	第6章 电阻式传感器	109
2.3 传感器的动态特性	25	6.1 电阻应变式传感器的基本原理	109
2.3.1 动态特性的一般数学模型	25	6.1.1 电阻应变效应	109
2.3.2 传递函数和传感器的频率特性	28	6.1.2 结构与分类	111
2.3.3 传感器的动态响应及其动态特性指标	32	6.2 工作特性和主要参数	112
思考题与习题	35	6.2.1 工作状态和灵敏系数	112
第3章 声学传感器的基本理论	36	6.2.2 横向效应和横向效应系数	113
3.1 声学基本量	37	6.2.3 应变极限	114
3.2 声学传感器	42		

6.2.4 零漂和蠕变	114	8.2.1 变间隙式敏感元件	160
6.2.5 机械滞后	115	8.2.2 变面积电容式敏感元件	161
6.2.6 动态特性	116	8.2.3 变介电常数电容式敏感元件	162
6.3 温度误差及其补偿	117	8.2.4 电容式敏感元件的等效电路	163
6.3.1 温度误差	117	8.2.5 差动电容式传感器	163
6.3.2 温度补偿	119	8.3 硅微电容式加速度传感器的结构形式	164
6.4 测量电路	121	思考题与习题	166
6.4.1 电桥的主要特性	121		
6.4.2 单臂工作电桥的非线性误差及差动电桥	122	第9章 电感式传感器	167
6.4.3 应变片的串联与并联式接线法	123	9.1 变磁阻式传感器	167
6.5 电阻应变式传感器	124	9.1.1 变气隙式自感传感器	168
6.5.1 电阻应变式力传感器	124	9.1.2 变面积式自感传感器	170
6.5.2 电阻应变式压力传感器	132	9.1.3 螺管式自感传感器	171
6.5.3 电阻应变式加速度传感器	136	9.2 互感式传感器	173
6.6 半导体应变片及压阻传感器	137	9.2.1 结构与类型	173
6.6.1 压阻效应及半导体应变片	137	9.2.2 工作原理	174
6.6.2 压阻式压力传感器	138	9.3 电涡流式传感器	176
6.6.3 压阻式加速度传感器	141	9.3.1 工作原理	176
		9.3.2 结构类型及线圈参数对性能的影响	178
第7章 压电式传感器	143		
7.1 压电效应	143	第10章 超声波传感器	182
7.2 压电元件常用的结构形式	145	10.1 超声波及其物理性质	182
7.3 测量电路	146	10.1.1 声波的波形及其转换	182
7.4 压电式加速度传感器	150	10.1.2 超声波的反射与折射	183
7.4.1 压电材料及其等效电路	150	10.1.3 超声波传播过程中的衰减	183
7.4.2 一维压电加速度传感器的结构	151	10.2 超声波传感器	184
7.4.3 压电加速度传感器的工作原理	151	10.2.1 厚度振动换能器	184
7.4.4 加速度传感器的频率特性	152	10.2.2 圆柱形压电换能器	185
7.5 三维加速度传感器的工作原理	153	10.2.3 复合棒压电换能器	186
7.6 加速度传感器参量与声学物理量的关系	155	10.2.4 压电陶瓷双叠片弯曲振动换能器	187
思考题与习题	156	10.3 超声波传感器应用举例	188
		思考题与习题	192
第8章 电容式传感器	157		
8.1 电容式传感器的工作原理	157	参考文献	193
8.2 电容式传感器的结构形式	160		

在基础学科研究中,传感器更具有突出的地位。现代科学技术的发展开拓了许多新领域,例如:在宏观上要观察茫茫的宇宙,微观上要观察小到微米、纳米的粒子世界,纵向上要观察天体演化或极短的瞬间反应。此外,还出现了对深化物质认识、开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术研究,如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场,等等。显然,要获取大量人类感官无法直接获取的信息,没有相适应的传感器是不可能的。许多基础科学研究的障碍,首先就在于对象信息的获取存在困难,而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现,往往会导致该领域内的突破。一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱。



图 1.1 防空雷达

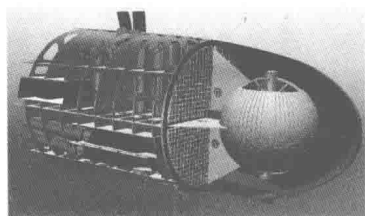


图 1.2 安装在潜艇上的球形声呐

传感器早已渗透到诸如工业生产、医学诊断、生物工程、环境保护、资源调查、海洋探测、文物保护、宇宙开发等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从茫茫的太空到浩瀚的海洋,以至各种复杂的工程系统,几乎每一个现代化项目都离不开各种各样的传感器。由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的重要作用是十分明显的,世界各国都十分重视这一领域的发展。相信不久的将来,传感器技术将会出现一个飞跃,达到与其重要地位相称的新水平。

在雷达(图 1.1 为防空雷达)和电视等无线电设备中,都有一个天线,用它来接收和发射电磁波。同样,在利用声波来传递能量和信息的设备中,也都需要一个相应的组成部分来接收和发射声波,而且它还需要把接收来的声波所携带的能量和信息转换成电的能量和信息,或者反之。在水声工程中把这个组成部分称为水声换能器,或简称换能器。把声能转换为电能的换能器,称为接收器;把电能转换为声能的换能器,称为发射器。从水声发展史来看,水声技术的每一步发展都离不开水声换能器技术的发展。图 1.2 为潜艇上安装的由换能器构成的球形声呐。

早在 19 世纪,由于一批物理学家都对换能器感兴趣,他们在水声事业的发展中不约而同地联系在一起了。在 1840 年就已发现,当线圈中电流变化或线圈中的电流受马蹄形磁铁扰动时会发生响声,这是最早的磁致伸缩演示实验。1842 年,焦耳定量测量了磁致伸缩引起的长度变化,因此,一般认为焦耳是磁致伸缩现象的发现者。1880 年,居里兄弟发现了压电效应,即当压缩某种晶体时,则在某一晶面上会出现电荷。在此之前,有些科学家曾在压电效应方面做过一些实验。库伦曾预言过,加压可能会产生电荷;伦琴也曾著文叙述在应力作用下不同晶面上将出现电荷。这些研究工作,奠定了水声换能器发展的基础,也构成了声呐发展的基石之一。在 19 世纪,为了解决回声定位的问题,美国科学家设计和制造了一种新型动圈式换能器,这种动圈式换能器既可以用作水下通信,又能用来回声定位。利用这项水声换能器技术,在 1914 年就能远距离探测到冰山了。Fessenden 的振荡器工作在 500~1 000 Hz,在第一次世界大战时曾被美国潜艇使用,完成潜艇下潜状态的相互通信。在这个时期,年轻的俄国电气工程师 Contantin Chilowsky 与著名的物理学家郎之万合作,利用电容(静电)发射换能器和一只放在凹曲面焦点上的碳微粒微音器进行试验,在 1916 年收到了海底回波及 200 m 外的一块装甲板的回波。1917 年郎之万转向压电效应研究,并用石英—钢的夹心

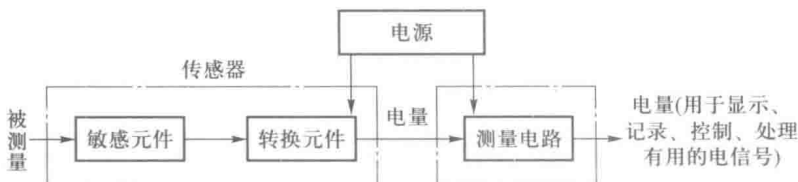
换能器来代替电容发射器。利用该项研究成果,于1918年第一次收到了潜艇的回波,有时甚至可远至1 500 m。第一次世界大战结束以后,水声的实际应用继续发展,约在1925年将回声探测设备定名为探测仪。当时的美国海军研究实验室正在寻求各种对舰艇进行回声定位的实用方法。在这个时期,磁致伸缩发射换能器技术解决了回声定位中的发射换能器所需要的足够功率问题,用酒石酸钾钠的合成晶体代替了压电换能器的主要材料,即天然石英,扩展了压电换能器的材料来源。随着水声换能器技术的发展,美国于1938年开始批量生产声呐。在第二次世界大战初期,大批美国舰艇都装上了水声听测设备和回声定位设备。第二次世界大战后至20世纪60年代,水声换能器技术的发展重点表现在两个方面:一是压电陶瓷材料的工程应用;二是追求高性能的水声换能器的设计。在这近二十年中,依靠水声换能器技术的发展,使声呐装备的工作频段得以向低频发展,声呐的作用距离明显提高,为声呐的可靠工作创造了条件。从20世纪60年代至今,研制出很多高性能的换能器材料,加强了水声换能器的可靠性设计工作。所有这些水声换能器的发展,为新型声呐的发展奠定了重要的基础。拖曳线列阵声呐在世界主要国家海军中的使用、舷侧线列阵声呐的大力发展、主动拖曳线列阵声呐的研制成功等,这些都离不开水声换能器技术的发展。

近代水声换能器技术的发展支撑了近代声呐的发展,这个作用是明显的。随着各种新材料的广泛应用,以及水声换能器设计技术的提高,可以成功研制出各种用途的水声换能器,为水声工程中的诸多任务提供有力的保障。

1.2 传感器的定义与组成

国家标准 GB/T 7665-2005 对传感器的定义是:“能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成”。传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将检测感受到的信息按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求,它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器的组成框图如图1.3所示。

图 1.3 传感器的组成框图



敏感元件是指传感器中能够直接感受或响应被测量的部分，一般是将被测量预先转换成另一种易于变换成电量的物理量，然后再变换成电量。转换元件是指传感器中能够将敏感元件输出的物理量转换成适于传输和测量的电量信号部分。需要指出的是，并不是所有传感器都能明显地分清敏感元件和转换元件两部分，对于压电式传感器来说，这两部分就合二为一了。

测量电路是指将传感器输出的电量变成容易显示、记录、控制和处理的有用电信号的电路。测量电路本身并不是传感器，它的类型视传感器的分类而定。常用的测量电路有交流、直流电桥及其他特殊的电路，如高阻抗输入电路、脉冲宽度调制电路、振荡回路等。

1.3 传感器的分类

目前对传感器尚无统一的分类方法，但比较常用的有以下几种：

1. 按传感器测量的物理量分类

可分为力学量传感器、热学量传感器、光学量传感器、磁学量传感器、电学量传感器、声学量传感器和射线传感器。

2. 按传感器工作原理分类

可分为应变式、压阻式、压电式、光电式、电感式、电压式、差动变压式、电涡流式、光栅、热电偶等传感器；这些传感器的测量原理主要是基于电磁测量原理和固体物理学理论。例如，根据变电阻的原理，相应的有应变式传感器；根据变磁阻的原理，相应的有电感式、差动变压器式、电涡流式传感器。

3. 按照传感器转换能量的方式分类

(1) 能量转换型：这种传感器是直接由被测对象输入能量使其工作的，例如，热电偶温度计、弹性压力计等。但由于这类传感器是被测对象与传感器之间的能量传输，必然导致被测对象状态的变化，从而造成测量误差，如压电式、热电偶、光电式传感器等。

(2) 能量控制型：传感器是从外部供给辅助能量使其工作

的,并由被测量来控制外部供给能量的变化。例如,电阻应变测量中,应变计接于电桥上,电桥工作能源由外部供给,而由于被测量变化所引起应变计的电阻变化来控制电桥的不平衡程度,如电感式测微仪、电容式测振仪等均属此种类型。

4. 按照传感器工作机理分类

(1) 结构型:结构型传感器则是依靠传感器结构参数的变化而实现信号转换的。例如,电容式传感器依靠极板间距离变化引起电容量变化,电感式传感器依靠衔铁位移引起自感或互感变化等。

(2) 物性型:物性型传感器是依靠敏感元件材料本身物理性质的变化来实现信号变换的。例如,利用水银的热胀冷缩现象制成水银温度计来测温,利用石英晶体的压电效应制成压电测力计等。

一般而言,物性型传感器对物理效应和敏感元件的结构都有一定要求,但侧重点不同。结构型传感器强调要依靠精密设计制作的结构才能保证其正常工作,而物性型传感器则主要依靠材料本身的物理特性、物理效应来实现对被测量的感应。

5. 按工作时是否需要外加电源分类

按照这种分类方法,可分为有源传感器和无源传感器。有源传感器敏感元件工作时需要外加电源,如应变式传感器等;无源传感器工作时不需要外加电源,如电动式传感器、压电式传感器。

6. 按照传感器输出信号的形式分类

(1) 模拟式:传感器将诸如应变、压力、位移、加速度等物理量转换为电量(电压、电流)的模拟信号输出。

(2) 数字式:传感器将被测量转换为数字信号输出,如编码器式传感器、光栅传感器等。

由于许多新效应、新材料不断被发现,新的加工工艺不断发展和完善,近十几年来开发出了各种新型传感器,使传感器的分类很难同统一、完备。不同的书籍分类方法略有不同。前面介绍的传感器分类可以概括为表 1.1。

表 1.1 传感器的分类		
分类方法	传感器的种类	备注
按感知被测量所依据的基本效应分类	物理传感器	基于物理效应(光、磁、声、热)
	化学传感器	基于化学效应(吸附、选择性)
	生物传感器	基于生物效应(酶、抗体、激素等分子识别和选择功能)
按被测量分类	压力、位移、速度、加速度、温度、湿度、气体成分等传感器	传感器按被测量来命名

NOTE

续表

分类方法	传感器的种类	备注
按测量原理分类	应变式、电容式、电感式、电磁式、热电式、压电式等传感器	传感器按工作原理命名
按输出量分类	模拟式传感器	输出模拟电信号
	数字式传感器	输出数字电信号
按能量关系分类	能量转换型传感器	将被测量直接转换成输出量的能量,由被测量控制传感器的输出能量,而传感器本身由外部提供能量
	能量控制型传感器	从外部供给辅助能量使其工作,并由被测量来控制外部供给能量的变化
按结构型和物性型分类	结构型传感器	通过传感器元件几何尺寸或形状变化,转换成电阻、电容、电感等物理量变化,从而检测出被测信号。这类传感器应用较多
	物性型传感器	利用传感器元件材料本身的物理性质的变化而实现测量。它是以半导体、电介质、铁电体作为敏感材料的固态传感器
按工作时是否需要外加电源来分类	有源传感器	传感器工作时需要外加电源
	无源传感器	传感器工作时不需要外加电源
按使用的敏感材料分类	半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、金属丝(箔)传感器、高分子材料传感器、复合材料传感器等	传感器按使用的敏感材料命名

1.4 现代传感器的发展动向

所谓现代传感器是指近十几年研究开发出来的、已经或正在走向实用化的传感器。现代传感器(或称新型传感器)是现代科学技术

迅猛发展的产物,其名称具有两方面的含义:第一,与传统的、常见的传感器相比,现代传感器问世时间较短,仅十多年历史;第二,相对于传统的结构型传感器而言,现代传感器大部分属于物性型传感器,它是借助于现代的先进科学技术研发出来的传感器。

1.4.1 声学量传感器

声学传感器近几十年有了新发展,其中以硅、光波导和聚合物制造的传感器发展更为突出。在空气介质中应用时,声学传感器也被称为传声器,俗称话筒,通常也叫麦克风(如图 1.4 所示)。传声器是录音棚、电影电视录音、音乐语言扩声和通信设备拾取语言信号必不可少的电声器件。在海洋、湖泊等水介质中应用时,声学传感器被称为声压水听器(如图 1.5 所示),声压水听器是拾取水下声场信息的重要手段之一。声学传感器是一种将声信号转变为电信号的换能器。在水声工程领域常用的有丹麦 BK-8100 系列水听器、美国 USRD 系列水听器,以及我国国防水声计量一级站研制的 RHS、RHC 和 RHA 系列水听器。



图 1.4 麦克风

目前已研制出超小型硅传声器,属于电容式,频响可达 20 kHz,可与常规电容式传感器相比。声波可调制光波导或光纤中光束的相位和强度,从而制成声传感器。

超声波接近传感器、距离传感器近几年也有很快的发展,由超声测距、导航向超声成像方向发展。国际上已研制出了探测距离为 10 mm、分辨力为 0.1 mm 的超声波传感器,这使超声波传感器在最小探测距离和精度上都有所突破。

智能化发展是欧盟战略的一个重要目标,智能城市建设则是其中的重中之重。目前,由欧盟资助的研发团队开发了一种智能声学传感器(Intelligent Acoustic Sensor),并在西班牙桑坦德成功应用。该智能声学传感器集成了先进的声学分析技术,能够有效地对捕获的各种声音进行智能鉴别,为管理交通、能耗、环保等提供便利,让城市变得更方便、更舒适、更可持续。比如,它能够对捕获的救护车警报声进行智能识别,据此判断救护车行驶的方向,从而通过城市智能交通网调节交通信号灯,以使救护车能无阻碍地快速抵达目的地。此外,通过监控市区内的噪音水平,该智能声学传感器也可以实时地反映市区交通拥堵状况、停车场的空闲程度等,提供给需要的部门或者个人做参考。相比视频监控方式,智能声学传感器能更早地发现紧急情况并进行预警,并且成本更低廉,其未来应用前景十分广阔。在智能声学传感器基础上,有望构建城



图 1.5 声压水听器

NOTE

市的“声学基础设施”,以便进一步提高城市智能化水平。

1.4.2 力学量传感器

在整个传感器领域中,力学量传感器是应用面最广、需求最大的品种,主要用于力、加速度、液位等多种物理量的测试和转换。长期以来,国内外力学量传感器一直以电阻应变式为主,其中主要是金属箔式、硅压阻式两种。金属箔式应变计灵敏度低、应变系数仅为2,采用应变胶粘贴,易受温度、湿度等环境条件影响,并随时间老化,产生零点漂移,迟滞增大,传感器性能随时间变化;硅压阻式应变系数高,然而因材料对温度非常敏感,受环境温度影响大,工作温度范围窄(一般不超过 60°C),而且测量腐蚀性流体压力需要隔离,结构复杂,成本高,使其应用受到限制。虽有薄膜应变式等新型力学量传感器出现,但因其成本高等多种因素,难以满足日益增长的石化、冶金、工业过程控制等需求。厚膜力学量传感器作为新型电阻应变式力学量传感器,近年来,随着其推广应用的不断扩大以及国外产品的进口,在国内倍受关注,已成为传感技术领域的高新技术和前沿之一。

半导体压力传感器领域目前正开展多种新型弹性体结构的研究,如矩形双岛膜结构,巧妙地利用了应力集中效应和非线性补偿以获得高灵敏度和高线性度。由于外应力高度集中于沟槽内,故器件的压力灵敏度比C型硅杯结构高5倍,可实现非线性补偿和过压保护。传统的力学传感器在改善性能的同时也向多维力传感器发展,六维力传感器研究和应用是多维力传感器研究热点。力敏传感器的最新发展是从点的“测量”向“状态的识别”前进,我国研制的柔性光学阵列触觉,结构柔性很好,能抓紧和识别钢球和鸡蛋,而获取硬币的触觉图像比人更胜一筹,已用于机器人分选物品。

加速度传感器也属于力学量传感器,传统的常用加速度传感器是压电传感器。近年来,工作模式已由压缩式发展成弯曲型和剪切型,新研制的压电加速度传感器重量轻的小于 0.1 g ;低频、低 g 值、高灵敏度集成电路式压电加速度传感器具有极高的信噪比,可以检测距离高速公路上数百米外处由于汽车行驶引起的地面振动。

美国恩德福克公司研制了一款整体式结构的压阻式加速度传感器,是目前国际上量程最大($200\ 000\text{ g}$)、频响最好(150 kHz)的加速度传感器。在国际固态传感器会议上报道了三种半导体 g 值开关,测量范围 $230\sim 11\ 000\text{ g}$,各方向抗冲击过载 $30\ 000\text{ g}$ 。加拿

大 Albertar 大学微电子中心研制了厚 $2.2\ \mu\text{m}$ 、长 $180\ \mu\text{m}$ 、宽 $800\ \mu\text{m}$ 的半导体加速度开关,可分级测量 $20\ 000\ \text{g}$ 的加速度,体积小、成本低、数字化是这种 g 值开关的突出特点。

集成化和多功能复合加速度传感器是近期研究热点之一,多个敏感元件和电路集成在一起,能完成多维信息检测和多种信息检测。例如,美国研制的单晶硅多加速度传感器,可以同时测量 3 个线加速度、3 个角加速度和 3 个角速度。

1.4.3 光学量传感器

光学量传感器是工作在可见光或红外光环境中的电子探测器,它将光信号转化成电信号。近年来光学传感器市场不断扩大,到 2020 年市场规模有望达到 340 亿美元。通常,光学传感器是一个大型光学检测系统的一部分,输出的电信号通过不同方式被解释或分析,得出的结果包括人像捕捉、图像呈现、物体移动和物体位置等。光学传感器有许多优点,如非接触和非破坏性测量、几乎不受干扰、高速传输及可遥测、遥控等。光学传感器广泛应用于消费电子、航空航天、国防科研、信息产业、机械自动化、电力能源、智能交通、生物医疗等领域。

由于手持设备对光学传感器需求的增长,如平板电脑和智能手机,全球光学传感器市场正在快速增长。目前,智能手机和平板电脑是市场增长的主要贡献者,只要该市场持续存在,那么对光学传感器的需求也将保持增长。另一方面,与其他传感器相比,CMOS 图像传感器市场暴涨,这主要归因于其广泛的用途。CMOS 图像传感器的应用领域从手机摄像头到医学成像,从汽车倒车影像到安防监控……CMOS 图像传感器的广泛应用使其成为光学传感器市场中最大的细分领域。预计未来 5 年,全球光学传感器市场的复合年增长率为 9.81% ,到 2020 年的市场规模将达到 340 亿美元。

全球自动化行业,尤其是生产过程自动化和工业自动化的市场增长率保持在 6.3% 左右。该行业是全球光学传感器市场的主要增长驱动力之一。光学传感器在自动化领域的应用越来越多,体现在不同的垂直行业,如食品加工、化学制品、石油化工、造纸和纸浆、包装等。基于机器视觉的设备使用 CMOS 图像传感器来监控装配线或其他自动化工艺流程。色彩传感器则用于包装、食品和饮料加工。与 CMOS 图像传感器相比,色彩传感器更便宜、检测更快速,也更容易更换。

光纤传感器是近几十年发展的新型传感器,它是将一根传感光纤沿作用场(压力、应变、温度等)排布,并采用独特的探测技术,对沿光纤传感器传输路径上场的空间分布和随时间变化的信息进行测量与监控。此类传感器只需一个光源和一套探测线路,集传感与传输于一体,可实现远距离测量与监控。由于同时获得的信息量大,单位信息所需的费用大大降低,从而可以获得高性价比。因此,它是一类能与任何点式传感器竞争的十分有希望的传感器,近年来备受人们重视。

1.5 传感器的技术动向

随着传感器技术新原理、新材料和新技术的研究更加深入、广泛,新品种、新结构、新应用的不断涌现,传感器的集成化、智能化、微机械化、系统化和多样化成为其发展趋势。

1.5.1 集成化与智能化

传感器集成化包括两类:一种是同类型多个传感器的集成,即同一功能的多个传感元件用集成工艺在同一平面上排列,组成线性传感器(如 CCD 图像传感器);另一种是多功能一体化,如几种不同的敏感元器件制作在同一硅片上,制成集成化多功能传感器,集成度高,体积小,容易实现补偿和校正,是当前传感器集成化发展的主要方向。传感器的智能化是多种传感功能与数据处理、存储、双向通信等功能的集成,可全部或部分实现信号探测、变换处理、逻辑判断、功能计算、双向通信,以及内部自检、自校、自补偿、自诊断等功能,具有低成本、高精度信息采集、数据存储和通信、编程自动化和功能多样化等特点。目前已出现各种基于模糊推理、人工神经网络、专家系统等人工智能技术的高度智能化的传感器,并已经在智能家居等方面得到利用。

1.5.2 微机械化和系统化

传感器的微型化,主要表现在 MEMS 传感器研发异军突起。