



高等学校“十二五”重点规划教材
信息与自动化系列

传感器原理及应用

主 编 路敬祚

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

传感器原理及应用

主 编 路敬祎

副主编 赵志华 张玉波 齐元俊 葛延良

主 审 刘 霞 殷海双

内 容 简 介

本书共分为 12 章:第 1 章和第 2 章主要介绍传感器的一般特性、常用的新型敏感材料以及传感器的标定与选择等内容;第 3 章到第 11 章系统地介绍电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、磁电式传感器、光电式传感器、热电式传感器、超声波传感器以及辐射式传感器等各种传感器的结构、工作原理、特性、参数、电路以及典型的工程应用等内容;第 12 章详细地介绍光敏电阻、人体红外传感器和酒精传感器在实际工程检测中的应用等内容。

本书取材广泛,内容丰富,理论与实践相结合,可作为测控技术与仪器、电气工程及其自动化、通信工程等相关专业的教材,也可作为从事传感器相关领域科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

传感器原理及应用/路敬祯主编. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社,2013.8
ISBN 978-7-5661-0640-0

I. ①传… II. ①路… III. ①传感器—教材
IV. ①TP238.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 256790 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东市一兴印刷有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 18.25
字 数 441 千字
版 次 2014 年 2 月第 1 版
印 次 2014 年 2 月第 1 次印刷
定 价 33.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

传感器技术是 21 世纪信息技术的关键技术之一,与通信技术和计算机技术一样,被称为信息产业的支柱技术。传感器的应用领域越来越广泛,人们对其要求也越来越高,需求越来越迫切。传感器技术对于现代工业、农业、商业、国防、科研以及医疗等各个领域来说都是必不可少的。本书从工程实际应用和技术发展的角度出发,全面系统地阐述了传感器的相关理论、相关技术以及在工程实际中的具体应用。

本书包括三个方面共 12 章内容:第一方面介绍传感器及其特性等相关知识,包括第 1 章传感器概述和第 2 章传感器的特性及标定;第二方面系统地介绍各种传感器的原理、结构和应用,目的在于使学生掌握各类传感器基本原理和使用技巧,包括第 3 章电阻式传感器、第 4 章电容式传感器、第 5 章电感式传感器、第 6 章压电式传感器、第 7 章磁电式传感器、第 8 章光电式传感器、第 9 章热电式传感器、第 10 章超声波传感器和第 11 章辐射式传感器;第三方面介绍光敏电阻、人体红外传感器和酒精传感器在工程实际检测中的应用,将传感器和工程检测方面的知识有机地联系起来,使学生在掌握传感器原理的基础上,可以更进一步地应用传感器知识来解决工程检测中的具体问题,包括第 12 章传感器原理课程设计实例。

本书既注重传感器技术基础理论的阐述,同时又将工程实际应用贯穿于全书始终,符合当前传感器技术的发展和生产实际的需要。本书可作为测控技术与仪器、电气工程及其自动化、通信工程等相关专业的教材,也可作为从事传感器相关领域科技人员的参考用书。

本书每章内容都有其独立性,在教学过程中,教师可以根据教学对象和专业特点等具体情况对书中的内容进行适当删减和重新组合,也可以进行适当扩展,建议参考学时为 48~64 学时。为适应教学模式、教学方法和教学手段的改革,本书配有多媒体电子课件,欢迎有需要者索取(索取邮箱:ljywdm@126.com)。

为提高本书编写质量,我们组织多位教师参加编写工作。本书由东北石油大学路敬祎老师担任主编,赵志华、张玉波、齐元俊和葛延良四位老师担任副主编。其中,路敬祎编写了第 3 章和第 12 章;赵志华编写了第 2 章、第 6 章和第 11 章;张玉波编写了第 5 章和第 7 章;齐元俊编写了第 4 章和第 9 章;葛延良编写了第 1 章、第 8 章和第 10 章。全书由路敬祎统稿,由刘霞和殷海双两位老师审稿,她们对全书进行了全面、认真和细致的审读,提出了许多宝贵意见和建议;另外殷海双、王冬梅、康朝海和刘远红也参与编写了本书部分章节的内容。在此一并表示感谢。

本书在编写过程中,编者对国内外传感器技术领域的发展进行了充分的跟踪和调研,参考了大量国内外相关教材和学术成果,在此谨向这些文献的作者表示衷心的感谢!

由于传感器技术发展迅速,编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

于东北石油大学

目 录

第1章 传感器概述	1
1.1 传感器的定义与分类	1
1.2 传感器的作用与地位	2
1.3 传感技术的发展	3
1.4 常用的新型敏感材料	5
思考与练习题	10
第2章 传感器的特性及标定	11
2.1 传感器的静态特性	11
2.2 传感器的动态特性	13
2.3 传感器的标定与选择	20
思考与练习题	22
第3章 电阻式传感器	24
3.1 电位器式传感器	24
3.2 应变式电阻传感器原理	33
3.3 电阻应变片的结构、类型及参数	36
3.4 电阻应变传感器测量电路	41
3.5 电阻应变式传感器的温度误差及其补偿	46
3.6 应变式传感器的应用	49
3.7 常用电阻式传感器的使用方法	54
综合技能实训	56
思考与练习题	57
第4章 电容式传感器	59
4.1 电容传感器工作原理	59
4.2 电容传感器的等效电路及测量电路	64
4.3 电容传感器的误差分析	69
4.4 电容传感器的应用及实例	71
综合技能实训	74
思考与练习题	75
第5章 电感式传感器	76
5.1 自感式传感器	76
5.2 差动变压器	80
5.3 电涡流式传感器	91
5.4 电感式传感器的应用	96

综合技能实训	100
思考与练习题	101
第6章 压电式传感器	102
6.1 压电效应和压电材料表	102
6.2 压电传感器等效电路和测量电路	107
6.3 压电传感器的特点	112
6.4 压电传感器应用举例	112
综合技能实训	116
思考与练习题	117
第7章 磁电式传感器	118
7.1 磁电感应式传感器	118
7.2 霍尔传感器	122
7.3 磁敏电阻器	131
7.4 磁敏二极管和磁敏三极管	132
7.5 磁电感应式传感器的设计要点	140
综合技能实训	141
思考与练习题	143
第8章 光电式传感器	145
8.1 光电式传感器的工作原理及基本组成	145
8.2 光电式传感器中的敏感元件	147
8.3 光纤传感器	152
8.4 光纤光栅传感器	158
8.5 光电式传感器安装和实例	162
综合技能实训	170
思考与练习题	171
第9章 热电式传感器	172
9.1 热电偶传感器	172
9.2 热电阻	185
9.3 半导体温度传感器	190
9.4 热电式温度传感器应用	197
综合技能实训	200
思考与练习题	201
第10章 超声波传感器	202
10.1 超声波物理基础	202
10.2 超声波传感器(换能器)	205
10.3 超声波传感器的应用及示例	209
10.4 超声波无损探伤	214
思考与练习题	216

第 11 章 辐射式传感器	218
11.1 核辐射传感器.....	218
11.2 红外辐射传感器.....	227
综合技能实训	234
思考与练习题	238
第 12 章 传感器原理课程设计实例	239
12.1 教室智能照明控制器设计实例.....	239
12.2 车载酒精检测仪设计实例.....	261
参考文献	282

第 1 章 传感器概述

1.1 传感器的定义与分类

1.1.1 传感器的定义

传感器是与人的感觉器官相对应的元件,是以测量为目的,通过接收信号或刺激,以一定精度把被测量转换为与之有确定关系的、易于处理的电量信号输出的装置。国家标准 GB 7665—87 对传感器的定义是“能够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”。该定义包含以下几方面的意思:

- (1) 传感器是测量装置,能完成检测任务;
- (2) 它的输入量是某一被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等;
- (3) 它的输入量是某种物理量,这种量要便于传输、转换、处理、显示等,这种量可以是气、光、电等物理量,但主要是电量;
- (4) 输入和输出有对应关系,且应有一定的精度。

传感器基本组成包括敏感元件、转换元件和转换电路,如图 1-1 所示。

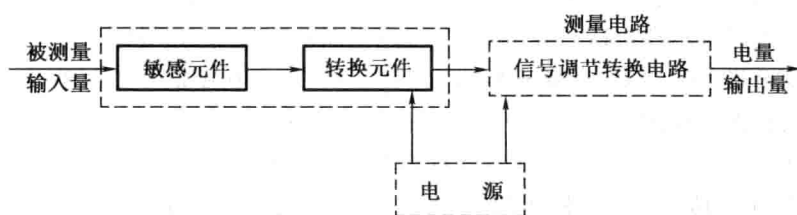


图 1-1 传感器基本组成及工作原理示意图

敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量(输入量)的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件感受的或响应的被探测量转换成适于传输和(或)测量的电信号的部分。

1.1.2 传感器的分类

传感器种类繁多,功能各异。由于同一被测量可用不同转换原理实现探测,利用同一种物理法则、化学反应或生物效应可设计制作出检测不同被测量的传感器,而功能大同小异的同一类传感器可用于不同的技术领域,故传感器有不同的分类法。

(1) 根据传感器感知外界信息所依据的基本效应,可以将传感器分成三大类:基于物理效应如光、电、声、磁、热等效应进行工作的物理传感器;基于化学反应如化学吸附、选择性化学反应等进行工作的化学传感器;基于酶、抗体、激素等分子识别功能的生物传感器。

(2) 按工作原理分类,可分为应变式、电容式、电感式、电磁式、压电式、热电式等传

感器。

(3)根据传感器使用的敏感材料分类,可分为半导体传感器、光纤传感器、陶瓷传感器、金属传感器、高分子材料传感器、复合材料传感器等。

(4)按照被测量分类,可分为力学量传感器、热量传感器、磁传感器、光传感器、放射线传感器、气体成分传感器、液体成分传感器、离子传感器和真空传感器等。

(5)按能量关系分类,传感器可分为能量控制型和能量转换型两大类。所谓能量控制型是指其变换的能量是由外部电源供给的,而外界的变化(即传感器输入量的变化)只起到控制的作用。如用电桥测量电阻温度变化时,温度的变化改变了热敏电阻的阻值,热敏电阻阻值的变化使电桥的输出发生变化(注意电桥的输出是由电源供给的)。

(6)按传感器是利用场的定律还是利用物质的定律分类,可分为结构型传感器和物性型传感器。二者组合兼有两者特征的传感器称为复合型传感器。场的定律是关于物质作用的定律,例如动力场的运动定律、电磁场的感应定律、光的干涉现象等。利用场的定律制成的传感器有电动式传感器、电容式传感器、激光检测器等。物质的定律是指物质本身内在性质的规律。例如弹性体遵从的虎克定律,晶体的压电性,半导体材料的压阻、热阻、光阻、湿阻、霍尔效应等。利用物质的定律制成的传感器有压电式传感器、热敏电阻、光敏电阻、光电管等。

1.2 传感器的作用与地位

人类为了从外界获取信息,必须借助于感觉器官。人类依靠这些器官接受来自外界的刺激,再通过大脑分析判断,发出命令而动作。随着科学技术的发展和人类社会的进步,人类为了进一步认识自然和改造自然,只靠这些感觉器官就显得力不从心了。

随着新技术革命的到来,世界开始进入信息时代。在利用信息的过程中,首先要解决的就是要获取准确可靠的信息,而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。若将信息社会与人体相比拟,电子计算机相当于人的大脑,人类的这种“感官”——接受刺激的元件就是传感器,常将传感器的功能与人类五大感觉器官相比拟:光敏传感器——视觉,声敏传感器——听觉,气敏传感器——嗅觉,化学传感器——味觉,压敏、温敏、流体传感器——触觉,故称传感器为“电五官”。

传感器把各种非电量(物理量、化学量和状态变量等)转换为便于传输、处理、存储和控制的有用信号(一般为电量)。在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在正常状态或最佳状态,并使产品达到最好的质量。因此可以说,没有众多的优良的传感器,现代化生产也就失去了基础。

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,进入了许多新领域,例如在宏观上要观察无边无际的宇宙,微观上要观察微小的粒子世界,纵向上的观察则从长达数十万年的天体演化,到1秒的瞬间反应。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。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,往往会带来该领域内的突破。一些传感器

的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱。

传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程,甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从茫茫的太空,到浩瀚的海洋,以至于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。“没有传感器就没有现代科学技术”的观点已被全世界所公认。以传感器为核心的检测系统就像神经和感官一样,源源不断地向人类提供宏观与微观世界的种种信息,成为人们认识自然、改造自然的有力工具。

1.3 传感技术的发展

传感器的历史可以追溯到远古时代,公元前1000年左右,中国的指南针、记里鼓车已开始使用。古埃及王朝时代开始使用的天平,一直沿用到现在。利用液体膨胀进行温度测量在16世纪前后就已出现。19世纪建立了电磁学的基础,当时建立的物理法则直到现在作为各种传感器的工作原理仍在应用着。

以电量作为输出的传感器,其发展历史最短,但是随着真空管和半导体等有源元件的可靠性的提高,这种传感器得到飞速发展。目前只要提到传感器,一般就是指具有电输出的装置。由于集成电路技术和半导体应用技术的发展,人们研究开发了性能更好的传感器。随着电子设备水平不断提高以及功能不断加强,传感器也越来越显得重要。世界各国都将传感器技术列为重点发展的高新技术,传感器技术已成为高新技术竞争的核心技术之一,并且发展十分迅速。

传感器技术的发展十分迅速的原因有如下几点:

- (1) 电子工业和信息技术的进步促进了传感器产业的相应发展;
- (2) 政府对传感器产业发展提供资助并大力扶持;
- (3) 国防、空间技术和民用产品有广阔的传感器市场;
- (4) 在许多高新技术领域可获得用于开发传感器的理论和工艺。

从市场角度来看,力、压力、加速度、物位、温度、湿度、水分等传感器将保持较大的需求量。

展望未来,传感器将向着小型化、集成化、多功能化、智能化和系统化的方向发展,由微传感器、微执行器及信号和数据处理器总装集成的系统越来越引起人们的广泛关注。传感器市场将会迅速发展,并会加速新一代传感器的开发和产业化。

1. 开发新型传感器

新型传感器包括:①采用新原理;②填补传感器空白;③研究仿生传感器等方面。它们之间是互相联系的。传感器的工作机理是基于各种效应和定律,由此启发人们进一步探索具有新效应的敏感功能材料,并以此研制出具有新原理的新型物性型传感器件,这是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。结构型传感器发展得较早,目前日趋成熟。一般的结构型传感器结构复杂,体积偏大,价格偏高。物性型传感器大致与之相反,具有不少诱人的优点,加之过去发展也不够,如今世界各国都在物性型传感器方面投入大

量人力、物力加强研究,从而使它成为一个值得注意的发展方向。

2. 开发新材料

传感器材料是传感器技术的重要基础,由于材料科学的进步,人们在制造时,可任意控制其成分,从而设计制造出用于各种传感器的功能材料。用复杂材料来制造性能更加良好的传感器是今后的发展方向之一。

可用于制造高性能传感器的材料有:半导体敏感材料、陶瓷材料、磁性材料和智能材料等。如半导体氧化物可以制造各种气体传感器,而陶瓷传感器工作温度远高于半导体,光导纤维的应用是传感器材料的重大突破,用它研制的传感器与传统的传感器相比具有突出的特点。有机材料作为传感器材料的研究,引起国内外学者的极大兴趣。

3. 新工艺的采用

在发展新型传感器中,离不开新工艺的采用。新工艺的含义范围很广,这里主要指与发展新型传感器联系特别密切的微细加工技术。该技术又称微机械加工技术,是近年来随着集成电路工艺发展起来的新技术,它是离子束、电子束、分子束、激光束和化学蚀刻等用于微电子加工的技术,目前已越来越多地应用于传感器领域。例如,利用半导体技术制造出压阻式传感器,利用薄膜工艺制造出快速响应的气敏、湿敏传感器;日本横河公司利用各向异性腐蚀技术进行高精度三维加工,在硅片上构成孔、沟棱锥、半球等各种开头,制作出全硅谐振式压力传感器。

4. 集成化、多功能化

为同时测量几种不同被测参数,可将几种不同的传感器元件复合在一起,制成集成块。例如,一种温、气、湿三功能陶瓷传感器已经研制成功。把多个功能不同的传感器元件集成在一起,除可同时进行多种参数的测量外,还可对这些参数的测量结果进行综合处理和评价,可反映出被测系统的整体状态。

同一功能的多元件并列化,即将同一类型的单个传感元件用集成工艺在同一平面上排列起来,如 CCD 图像传感器。

多功能一体化,即将传感器与放大、运算以及温度补偿等环节一体化,组装成一个器件。

5. 智能化

对外界信息具有检测、数据处理、逻辑判断、自诊断和自适应能力的集成一体化多功能传感器具有与主机相互对话的功能,可以自行选择最佳方案,能将已获得的大量数据进行分割处理,实现远距离、高速度、高精度传输等。

智能传感器是传感器技术与大规模集成电路技术相结合的产物,它的实现取决于传感技术与半导体集成化工艺水平的提高与发展。这类传感器具有多功能、高性能、体积小、适宜大批量生产和使用方便等优点,是传感器重要的发展方向之一。

1.4 常用的新型敏感材料

1.4.1 敏感材料的定义及特性

敏感材料(Sensing Materials)是制造敏感元件的主体材料,是一种能敏锐地感受被测物体的某种物理量的大小和变化,并将其转换成电信号或者光信号的材料。利用敏感材料制备的各种传感器,在自动控制、自动测量、机器人、汽车工业和计算机外部设备等方面有着广泛应用。作为构成传感器的核心,敏感材料的研究包括:基础研究(即物理现象、化学反应和生物效应)、新现象新原理的发现和采用、新工艺和新材料的研发及其新功能和新应用的扩展等。

敏感材料有以下基本特性:

(1)敏感度高。灵敏度高、响应速度快、检测范围宽、检测精度高。对于某种特定被测量具有较高的敏感性,能迅速将指定被测量微小的变化准确地、可重复地变换为相应的电信号输出。

(2)选择性好。在一定条件下,除了对所指定的一种被测量敏感外,对其余变量都不敏感,在环境中同时存在有多种变量的复杂情况下,能准确摄取所指定的被测量信息,选择性好,响应速度快。

(3)可靠性好。材料应具有耐热、耐磨损、耐腐蚀、耐振动和耐过载的特性。

(4)可加工性好。材料应易成形、尺寸稳定、互换性好。

(5)经济性好。材料应具备成本低、成品率高、性价比高的特点。

在选择敏感材料时,首先考虑其敏感性,然后再考虑其他特性。

1.4.2 敏感材料的类别

敏感材料的主要功能是接收光、声、电、热、磁、机械和化学等形式的能量信号,并转换成电信号,实现光电、压电、热电、电化学、电磁等功能的转换。敏感材料种类较多,主要的分类方法有以下几种。

1. 按工作原理分类

按工作原理可将敏感材料分为结构型、物性型和复合型三类。

结构型敏感材料的原理是利用基本的物理定律,其转换(传感)特性首先取决于材料本身的结构。测量过程中,敏感材料中与结构相关的量(厚度、角度和位置等)在被测量的作用下会发生变化,由此获得与该变化成一定比例的电信号。该类型包括测量压力、位移、流量、温度的力平衡式、电容式、电感式等传感器的敏感材料。

物性型敏感材料是利用材料的某种宏观属性的变化,该属性主要包括物理特性、化学特性和生物特性。物理特性敏感材料(如热敏电阻、光敏电阻、巨磁阻效应等)是根据物理特性变化实现信息转换的。根据能量形成方式和能量转换特点不同,物理特性敏感材料又可分为能量转换型和能量控制型。能量控制型敏感材料本身并不能进行能量的交换,被测的非电量只是被调节和控制,在信息的变换过程中,能量须由外电源提供,所以称为“有源敏感材料”,如电阻式、电容式和电感式等电路参量的敏感材料,以及基于应变电阻效应、热阻效应、磁阻效应、光电效应和霍尔效应等达到传感目的的敏感材料都属于此类;能量转换

型敏感材料可将非电量直接转换为电能量,不需要外加电源,所以称为“无源敏感材料”,如热电偶、超声压电片等。化学特性敏感材料是利用电化学反应原理,将物质的组成含量、浓度和 pH 值等变化转换成电信号。生物特性敏感材料则是利用生物活性物质被选择性识别和测定生物体或化学物质成分及特性而达到目的的,由于敏感器件就是敏感材料本身,不涉及“结构”的变化,所以响应速度快,有利于集成化、智能化的发展特征。

复合型敏感材料实际上主要是在物性型材料的基础上增加了一些中间转换环节,并与其他物性敏感材料组合而成。

2. 按功能类型分类(表 1-1)

表 1-1 敏感材料功能类型分类表

被测量类别	被测量参数值
几何特性	长度、角度、位移、形状、表面状态、黏度等
力学特性	力、力矩、转矩、振幅、加速度、流量、硬度、脆性等
温度、湿度特性	温度、热量、热容、热分布、湿度、含水量等
电特性	电流、电压、电阻、电容、电感、频率、相位、霍尔效应等
磁特性	磁通量、磁感应强度、磁矩、磁场强度、磁阻等
声、光特性	噪声、声压、频率、照度、颜色、透明度、图像等
射线特性	剂量、剂量率、波长等
生物、化学特性	浓度、浊度、含量、pH 值、血压、脉搏、体温、心电、脑电、血氧饱和度、酶及抗体识别等

3. 按检测功能的不同分类

根据感知外界信息的原理不同,敏感材料可分为物理类、化学类和生物类。物理类基于力、热、光、电、磁和声等物理效应,化学类基于化学反应,生物类基于酶、抗体和激素等分子识别功能。

4. 其他分类

根据需要还可以将敏感材料从其他角度进行分类。比如按照结晶状态可将敏感材料分为单晶、多晶、非晶和微晶类;按电子结构和化学键可将其分为金属、陶瓷和聚合物三大类;按物理原理可将其分为电参量式敏感材料和磁电式敏感材料和压电式敏感材料等。

在实际工作中,需要根据实际情况对敏感材料进行分析和研究,最终确定选择应用哪一种。

1.4.3 几种新型的敏感材料

1. 光纤

光纤,是光导纤维的简写,它是一种利用光在玻璃或塑料制成的纤维中的全反射原理而制成的光传导工具。光束在玻璃纤维内传输,信号不受电磁的干扰,传输稳定,具有性能可靠、质量高、速度快、线路损耗低、传输距离远等特点。光纤实际是指由透明材料制成的纤芯和在它周围采用比纤芯的折射率稍低的材料制成的包层,并将射入纤芯的光信号,经包层界面反射,使光信号在纤芯中传播前进的媒体。光纤一般是由纤芯、包层和涂敷层构

成的多层介质结构的对称圆柱体。

光纤传感器特点包括:

- (1) 光纤传感器具有优良的传光性能,传光损耗小;
- (2) 光纤传感器频带宽,可进行超高速测量,灵敏度和线性度好;
- (3) 光纤传感器体积很小,质量轻,能在恶劣环境下进行非接触式、非破坏性以及远距离测量。

2. 光子晶体

光子晶体(Photonic Crystal, PHC)是指两种或两种以上介质周期排列构成的人造晶体,是一种介电常数随空间周期性变化的新型光学微结构材料。按光子晶体折射率变化的周期性,可将其分为一维、二维、三维光子晶体,折射率周期性变化产生光子能带和能隙,使频率(波长、能量)处在禁带范围内的光子禁止在光子晶体中传播。当在光子晶体中引入缺陷使其周期性结构遭到破坏时,光子能隙就形成了具有一定频率宽度的缺陷区。

光子晶体因其结构参数设计的多样性使其具有光子晶体带隙特性、光子晶体局域特性、光子晶体慢光特性等独特的传感特性,不仅可以作为敏感器件替代普通光纤构成传感器,提高现有光纤传感器的性能,而且能够开发出各种基于自身特点的新型光纤气敏传感器。

3. 光子晶体光纤

光纤传感器具有灵敏度高、抗干扰、结构简单、体积小、质量轻、光路可弯曲、对被测介质影响小和便于形成网络等特点,但是其耦合损耗较大,保偏特性差,并存在交叉敏感问题等,限制了光纤传感器性能的进一步提高。20世纪90年代中期,英国 Bath 大学的 Knight 等人研制出一种光子晶体光纤,它是一种二维缺陷光子晶体,又称多孔光纤或微结构光纤。其结构特点是光纤横截面具有周期性微孔结构,其优点是具有无截止的单模特性、低损耗灵活特性、灵活的色散特性、可控的非线性、极强的双折射效应和可进行微结构设计改造等。

按导光机理来说,光子晶体光纤可分为折射率导光机理和光子能隙导光机理。光子晶体光纤所具有的无截止单模、不同的色度色散、极好的非线性效应、优良的双折射效应、易于实现多芯传输、损耗特性等特性突破了传统光纤光学的局限,大大扩展了光子晶体光纤的应用范围。

4. 聚合物光纤

聚合物光纤又称塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)。作为光纤材料的聚合物的使用,为传感器应用有效地附加有利条件和特殊性能开辟了道路。聚合物光纤适用于大量不同的尺寸,即使在大的光纤直径下,它们也非常容易弯曲,可以低成本地为耦合器和连接器之类的系统制造所需的光纤和光学元件。

聚合物是由以高折射率的聚合物材料制作的纤芯和以低折射率的聚合物材料制作的皮层所构成的光纤。根据芯区折射率径向分布的不同,可将聚合物光纤分为两类:一类是折射率在纤芯与包层界面突变的光纤,称为阶跃型聚合物光纤(Step - Index POF, SI - POF);一类是折射率在纤芯内按某种规律逐渐降低的光纤,称为渐变型或梯度型聚合物光纤(Graded - Index POF, GI - POF)。

聚合物光纤的性能研究重点主要有以下几点:

- (1) 衰弱。聚合物光纤的衰减主要受限于芯包塑料材料的吸收损耗和色散损耗。通常

选用低折射率和等温压缩率小的塑料材料和通过稳定塑料光纤制造工艺降低结构缺陷,对于塑料材料来说,吸收损耗则是由分子键(碳氢键、碳氟键)伸缩振动吸收和电子跃迁吸收所致的。

(2)色散。当聚合物光纤作为短距离光传输介质,按其折射率分布形状可将其分为两种,即阶跃折射率分布聚合物光纤(由于模间色散作用使入射光发生反复的反射射出的波形相对于入射波形出现展宽,故其传输带宽仅为几十至上百兆赫兹·千米)和梯度折射率分布聚合物光纤(从选择低色散的材料出发,加以优化的梯度折射率分布手段,即可将其折射率分布指数在 $0.85 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 波长范围内选定为 $2.07 \sim 2.33$,从而抑制模间色散,控制出射光波相对于入射光波展宽的效果,进而可制得传输带宽高达几百兆赫兹·千米至 10 吉赫兹·千米的梯度折射率分布的聚合物光纤)。

(3)热稳定性。由塑料材料构成的聚合物光纤在高温环境中工作会发生氧化降解,促使电子跳跃加快,进而引起光纤损耗增大。提高聚合物光纤热稳定性通常的做法是选用含氟或硅的塑料材料来制造聚合物光纤、将聚合物光纤的工作波长选择在大于 660 nm ,以达到聚合物光纤热稳定性长期可靠。

聚合物光纤传感器不仅具有光纤传感器的抗电磁干扰、可远距离遥测等优点,还具有柔韧性强、连接容易、价格便宜等特点,使它在环境污染检测、生物传感中有很好的应用前景。通常根据使用聚合物光纤的不同,将传感器大致分为传统型聚合物光纤传感器、掺杂型聚合物光纤传感器、聚合物光纤光栅传感器及微结构聚合物光纤传感器四种类型。

5. 磁流体

磁流体应用研究现主要集中于密封、阻尼和热传输等领域中。磁流体材料是由强磁性粒子、基液和表面活性剂三者混合而成的一种稳定胶状溶液。它除了有固体磁性材料的强磁性和液体的流动性之外,还具有传感器结构所需要的许多独有特性,如胶体介质悬浮、弹性稳定、惯性体、比例阻尼、磁性液体伺服环等。

磁流体传感器(Magnetic Fluid Sensor, MFS)是磁流体应用的一个重要方面。1983年,美国ATA应用技术公司开发出了高精度的基于磁流体动力学原理的磁流体传感器,广泛应用于大型机器模态分析、航空器风洞试验中各种振动检测。

磁流体的主要特性如下。

(1)磁化特性。这是磁流体最重要、最具特色的物理性质。磁流体呈现超顺磁特性,但是其磁化机理和普通的顺磁性物质不同。普通顺磁性物质的磁化作用仅仅是物质内做轨道运动的电子(相当于微电流)受到外磁场的作用,其轨道平面在某种程度上按照磁场方向作有序排列的结果。磁流体内的固相颗粒是铁磁性材料,其尺寸非常小,只有单畴或亚畴结构,体系中所有的磁性颗粒均已自发磁化至饱和状态,所以磁流体的磁化是磁畴旋转造成的。磁流体另一种可能的磁化机理是悬浮于载液中的磁性颗粒本身的旋转,旋转的程度取决于磁场能量和热运动能量间的平衡,旋转的速度取决于磁场对固体磁性颗粒产生的力矩与磁流体黏性阻力矩间的平衡。磁流体根据其磁化过程的不同分为两种:一种是固相颗粒内磁畴的旋转起主导作用,称为内禀的;一种是固相颗粒在载液中的旋转起主导作用,称为非内禀的或外赋的。磁流体的磁化一般没有磁滞现象,即不存在剩磁和矫顽力,因为磁性颗粒是悬浮于载液中的,当外磁场撤去后,热运动使其变成无规则的状态,即完全退磁。磁流体磁化特性的定量指标是饱和磁化强度 M_s ,表示磁流体在外磁场的作用下可产生的最强磁性。

(2)磁弛豫特性。不管是磁流体在外磁场的磁化过程,还是外磁场撤去后磁流体的退磁过程,都是颗粒磁矩的转向弛豫过程,这有两种机理:一是磁性颗粒自身在载液中的转动,而磁性颗粒内的磁矩相对于磁性颗粒固定不动;二是磁性颗粒内磁矩矢量的转动。当外磁场发生变化时,磁流体的磁化强度也发生变化,这个过程称为磁弛豫。第一种过程称为 Brown 转向弛豫,在此过程中,磁性颗粒的旋转驱动力是分子的碰撞,而阻力是载液的黏性阻力。第二种弛豫过程叫做 Neel 转向弛豫。铁磁性物质的磁化性能并不是各向同性的,而是在物质的不同方向具有不同的磁化曲线。磁流体中的两种弛豫过程哪一种占主导地位,取决于哪种弛豫过程进行得更快,可用特征时间的长短来衡量。

(3)黏度特性。黏度表示流体的流动特性,是流体力学和流变学的重要参数。磁流体的黏度通常要比载液大得多,主要取决于磁性颗粒的体积百分比、固体颗粒的大小、外磁场和温度。磁流体黏度增大的主要原因是由于固相颗粒和载液间的摩擦,以及外磁场的影响。

(4)热力学性质。磁流体是一种固液两相混合的胶体体系,它的热学性质(密度、比热容、传热系数和扩散系数等)通常是其宏观的统计平均值,它是两相的体积分数或质量分数的函数。在考虑这些参数时总是假设磁流体是各向同性的均匀混合物,且两相物质处于平衡态。

(5)光学性质。磁流体大多是暗褐色、不透明的,其光学性质主要包括:双折射特性、透射特性、磁色特性、热透镜效应和可调折射率。

6. 液晶

液晶被发现已经有一百多年,但近年来才获得迅速的发展。因为液晶材料的光电效应被发现,并被广泛地应用在需要低电压和轻薄短小的显示组件上,比如体温卡、电子计数器和计算机显示屏幕等方面,逐渐成为不可或缺的重要材料。

液晶是介于完全规则状态与不规则状态的中间态物质。规则状态在固态晶体中比较常见,它的分子位置和分子轴的方向在三维空间呈规则的排列状态;而不规则状态比较常见于各向同性液体中。两者之间的状态通常称为液晶相或者介晶相。液晶和液体一样可以流动,但在不同方向上其光学特性不同,显示出类似晶体的性质。某些情况下,液晶出现于具有明显不等轴分子的有机物中。不等轴分子有序化导致的直接结果是力学、电、磁和光的性质的各向异性。液晶是处于液体状态的物质,具有一般流体的部分特征,因此它的分子质心分布是随机的或者是部分有序的,但是分子的取向一定是有序的,即液晶是分子取向有序的流体。按照形成条件和组成来分类,液晶可分为热致性液晶(Thermotropic Liquid Crystals)和溶质性液晶(Lyotropic Liquid Crystals)两类。

热致性液晶的组成大部分是有机物,在高温时是各向同性的液体,低温时是各向异性的固体,相变过程为固体在加热的条件下能够转变为液晶,继续加热转变为液体;同时在冷却的条件下发生可逆的转变。

液晶是处于固态和液态之间,兼有液体流动性、连续性和固体的某种有序排列的中介物质。它的独特性质在于它对各种外界因素(如热、电、磁、光、声、应力、化学气体和辐射等)的微小变化都非常敏感,很小的外界能量就能使它的结构发生变化,从而使其功能发生响应的变化。

思考与练习题

1. 什么是传感器,它由哪几个部分组成,分别起到什么作用?
2. 传感器技术的发展动向表现在哪几个方面?
3. 传感器的性能参数反映了传感器的什么关系,静态参数有哪些,各种参数代表什么意义,动态参数有哪些,应如何选择?
4. 简述传感器的主要分类方法。