

光纤传感原理 与应用技术

崔三烈 编著 哈尔滨工程大学出版社



PDG

TP212

C97

459757

光纤传感原理与应用技术

崔三烈 编著



5 (30)



00459757



哈尔滨工程大学出版社

(黑)新登字第9号

DV22/03
内 容 简 介

光纤传感技术是新兴技术。光纤传感器被列入现代传感技术发展
方向之一,已广泛应用于各种物理量的测量,它具有其它类型传感器无
可比拟的优点,发展前景十分广阔。本书系统而重点的阐述了光纤波导
的基本理论及光纤特性,光纤传感原理与传感技术,用光纤传感器探测
各种物理量的方法和大量典型传感器及应用实例。

本书可作为大专院校研究生的专业教材或教学参考书,教师的参
考读物,也可作为从事光纤传感研究、设计、制造和应用的科技人员的
参考读物。

光纤传感原理与应用技术

崔三烈 编著

责任编辑 辛 英

哈尔滨工程大学出版社出版发行

新华书店经销

哈尔滨市海鸿电脑排版中心制版

哈尔滨工程大学印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 10.625 字数 266 千字

1995年4月 第1版 1995年4月 第1次印刷

印数:1—1000册

ISBN 7-81007-534-9

TN·7 定价:8.00元

前 言

光纤传感技术是一门多学科的新技术,它是光纤及光通讯技术迅速发展的产物。光纤传感器被列入现代传感技术发展方向之一,它具有一些常规传感器无可比拟的优点,显现出巨大的开发潜力,受到了世界各国科研、工业、军事等部门的高度重视,因而获得了迅速的发展。光纤传感器是通过测量光纤中传输的光波的特征参量的变化来实现各种物理参量的测量。

光纤传感器可广泛用于位移、振动、转动、压力、弯曲、应变、速度、加速度、电流、磁场、电压、温度、声场、流量、浓度、pH 值等各种物理参量的测量,并具有灵敏度高、响应速度快、无源性、防燃防爆、防电磁干扰、超高电绝缘、耐腐蚀、体积小、重量轻、成本低等优点,发展前景十分广阔。

本书系统地阐述了光纤波导的基础理论、光纤传感原理和检测技术,并例举了大量的典型光纤传感器及应用实例。书中引用了大量国内外发表的新资料,力图反映光纤传感技术的新水平和发展动向。

本书具有系统性强、重点突出、概念清楚、应用实例多、内容较新的特点。

本书共分五章,第一、二章阐述了光纤波导、模式耦合理论和光纤的基本特征,是设计和应用光纤传感器的理论基础。第三章介绍了光纤传感器用的光源和光探测器及特性。第四章论述了各种光调制原理及检测技术,它是组成各光纤传感器的技术基础,也是全书的核心。第五章讲述了用光纤传感器探测各种物理量的方法,并以国内外发展的光纤传感器为实例加以说明,着重介绍探测原理及方法,这是本书的重点内容。

本书第一、二、四、五章由崔三烈编著,第三章由徐彦德编著。

本书是在作者多年的教学经验、科研成果和公开发表的论文的基础上,并查阅大量国内外发表的资料而编写的。

本书主要为检测技术及有关测试专业的研究生、大专院校教师和从事光纤传感器研究、设计、制造和应用的科技人员编写的。本书可作为大专院校研究生的专业教材或教学参考书、教师的参考读物,也可作为从事光纤传感器研究和使用的科技人员的参考读物。

在本书编写过程中得到周福洪教授、王琥教授、寿瑞兰副教授和陈伟强副教授的指导和大力帮助,在此表示谢意。

在本书编写过程中,因某些客观条件所限,加上作者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,热情希望读者批评指正。

目 录

第一章 绪论.....	(1)
§ 1.1 光纤传感器的特点及分类	(2)
§ 1.2 光纤传感器的发展概况及展望	(5)
第二章 光纤的传光特性	(10)
§ 2.1 光纤的结构及分类.....	(10)
§ 2.2 阶跃光纤.....	(13)
§ 2.3 渐变折射率光纤.....	(43)
§ 2.4 光纤模式耦合理论.....	(60)
§ 2.5 光纤的偏振与双折射.....	(67)
§ 2.6 光纤的色散特性.....	(77)
§ 2.7 光纤的损耗.....	(80)
§ 2.8 特殊光纤.....	(84)
第三章 光纤传感用光源与光探测器	(95)
§ 3.1 光纤传感用光源.....	(95)
§ 3.2 光纤传感用光探测器	(107)
第四章 光纤传感原理与探测.....	(128)
§ 4.1 光强度调制及解调技术	(128)
§ 4.2 相位调制及探测	(143)
§ 4.3 偏振调制技术	(158)
§ 4.4 频率及波长调制技术	(170)
第五章 光纤传感器及其应用.....	(180)
§ 5.1 光纤温度传感器	(180)
§ 5.2 光纤压力传感器	(206)
§ 5.3 光纤位移传感器	(226)

§ 5.4	光纤振动传感器	(242)
§ 5.5	光纤速度、流速和流量传感器	(248)
§ 5.6	光纤加速度传感器	(261)
§ 5.7	光纤图像传感器	(268)
§ 5.8	光纤电流、电压传感器	(277)
§ 5.9	光纤磁场传感器	(286)
§ 5.10	光纤光谱传感器	(291)
§ 5.11	光纤旋转传感器——光纤陀螺	(298)
§ 5.12	光纤遥测系统	(313)

参考文献

第一章 绪 论

光纤传感器是本世纪 70 年代中期发展起来的一种新型传感器,它是光纤和光通讯技术迅速发展的产物。光纤是一种新型材料,它与其它材料比有许多独特的性质。首先,光纤有良好的传光性能,它对光波的损耗目前可低到 0.2dB/km ,甚至更低。其次,频带宽。这是因为光纤传输的是光,而光的频率特别高,现在所用的光频率在 $10^{14}\sim 10^{15}\text{Hz}$ 的范围里,它比微波高 5 个数量级。光纤的第三个特性是它本身就是一个敏感元件,即光在光纤中传输时,光的特性如振幅、相位、偏振态等将随检测对象发生变化而相应变化。光从光纤射出时,光的特性得到调制,通过对调制光的检测,便能感知外界的信息。这就是光纤传感器的基本原理。显然,光纤传感器是一种新型的传感器,它与以电为基础的传感器相比有根本的区别。光纤传感器用光而不用电来作为敏感信息的载体,用光纤而不用导线作为传递敏感信息的媒质。因此,它同时具有光纤及光学测量的一些极宝贵的特点。

光纤同其它材料相比还有电绝缘性能好,不受电磁干扰,无火花,能在易燃、易爆的环境中使用。由于光纤极细,可塑性好,故能放置在小孔和缝隙等被测场点,而且对被测场点扰动小。光纤的原料硅资源丰富,其价格低廉。

随着现代科学技术的迅猛发展,自 70 年代中期以来出现了许多特殊光纤,如一种性能灵敏地随着射线辐照而发生变化的光纤;在光纤外面涂上一层特殊层材料,以提高光纤对外界信息的敏感能力的传感专用光纤;一些特殊断面,如椭圆芯光纤、熊猫光纤、蝴蝶结光纤以及其它特殊用途的红外光纤、紫外光纤、激光光纤、荧

光光纤等。由于出现许多特殊光纤,又促使光纤通讯技术和光纤传感技术迅猛发展,它们之间关系是相辅相成的。

光纤传感器,目前已广泛应用于国防军工、工业农业生产、环境保护、生物医学、计量测试、交通运输、自动控制和家用电器等领域。当前光纤传感器主要利用了光纤的传光和传感两种特性。可以预料,随着光纤技术的不断发展,随着光学波导、集成光学及非线性光学、微光学等不断深入研究和交叉影响及发展,光纤会有更多的其它特性被用来作光纤传感器,而在众多领域中得到更广泛的应用。

§ 1.1 光纤传感器的特点及分类

一、光纤传感器的特点

光波是短波长的电磁波,它可以产生干涉、衍射、偏振、反射、折射等现象。光纤具有径细量轻、透光性、电绝缘性、无感应性、柔软性、带宽等优点。将光的上述特点和光纤结合起来,可以做成各式各样的光纤传感器。因此,光纤传感器具有高灵敏度、高精度、高速度、高密度、适应各种恶劣环境下使用以及非接触、非破坏和使用简便等特点,下面分别叙述这些特点。

1. 高灵敏度、高精度、高速度检测

利用光的干涉、分光现象可实现高精度、高灵敏度检测。光是短波长的电磁波,通过光的相位就可得到光程 nl 的准确信息。使信号光和参考光相干涉,通过平方律检测器件,由光强即可知其相位。用此种干涉计,可获得一维、二维或三维信息。用一维干涉计可测出精度为 $10^{-6}(\text{rad})$ 的相位变化,若测量位移,其精度可达 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{nm}$ 。

光纤干涉仪是一维干涉仪,因使用很细的单模光纤,故只要感受微小机械外力,或温度变化,就很快改变光程 nl ,可达到高精度

检测。

光纤陀螺比机械陀螺灵敏度高很多,目前其测量精度可达 $0.1^\circ/\text{h}$,即地球转速的 $1/150$ 。又如,在光纤上套上磁致伸缩材料,可做磁场传感器,可测 $8 \times 10^{-7} \text{ A/m}$ 磁场强度,其灵敏度与量子干涉仪相近。

分光法也可用于高灵敏度、高精度、高速及气体检测。可用于灵敏度 1ppm 以下的高性能公害气体及甲烷等可燃易爆气体的监测。

由于光传播速度最快,能传送二维信息,所以能用于高速测量。

2. 高密度

用透镜可对直径按波长顺序排列的光点进行聚光。目前实用的磁光存贮器,它将信号存贮在磁光盘上,根据从位串反射的激光强度的变化,读出记录信号。由于激光可聚光到 $1\mu\text{m}$ 以下,故磁光盘一般比触针法的高密度磁盘更高,特别是它能非接触读出,将得到更大发展。

3. 环境适应性

光纤传感器所用元件,如光纤和透镜等,对电无感应,无放电现象,绝缘性高,化学稳定性也好。所以,光纤传感器适用各种复杂的环境,尤其是在高电压、腐蚀性强、易燃、易爆环境下安全可靠。

例如,以高电压、大电流为测量对象的电力传感器,其耐电压及抗电磁干扰的技术指标很高,很安全。

4. 非接触,非破坏

在医学和流体力学中,往往需要测量粒子的速度及流量。目前,用激光多普勒效应可对速度进行非接触测量。将激光射到被测反射体上,其反射光产生多普勒频移,让它与原激光进行干涉,产生的信号其频差与反射体速度成正比。因多普勒激光速度计测量的动态范围宽,有良好的线性,故获得广泛的应用。

偏光分析仪也能对物体表面进行非接触、非破坏性测量。它通过精确测量反射光的偏振状态,测出物体的光学常数及表面状态。目前,偏光分析仪已半导体化,应用于测定钢板表面油膜等。

5. 简便性

光传感器用单一的测量方法和信号处理方法,故相对而言光传感器更为简便。

众所周知,位移的测量是最基本的。把测物体的形变和位移变为中间环节,通过膜片、双金属片的形变可测出压力、温度。不用干涉法,而用反射法就可测出物体位移,精度达到几微米至几十微米。

总之,光纤传感器具有很多特点或优点,有些优点是现有机械的、电磁的、电子的方法无法实现或无法比拟的。因此,光纤传感技术具有很强的生命力和广泛的应用前途。

二、光纤传感器的分类

1. 按工作原理分:光纤传感按其工作原理分可分为两大类。一类是功能型光纤传感器(或称传感型传感器)。在这类传感器中,光纤不仅起传光作用,而且还利用光纤在外界因素,如温度、压力、电场、磁场等等作用下,使其传光特性发生变化以实现传感测量。第二类是非功能型传感器(或称传光型传感器)。在这类传感器中,光纤仅仅作为传光的媒介,光纤是不连续的,其间有中断,中断部分要加上其它敏感元件才能构成传感器。

2. 按检测对象分:有光纤温度传感器、光纤位移传感器、光纤流量传感器、光纤压力传感器、光纤速度传感器、光纤加速度传感器、光纤磁场传感器、光纤电流传感器、光纤电压传感器、光纤图像传感器和医用光纤传感器等。

3. 按光在光纤中被调制的原理分:有光纤强度调制传感器、光纤相位调制传感器、光纤偏振态调制传感器、光纤频率调制传感器和光纤波长调制传感器。

§ 1.2 光纤传感器的发展概况及展望

1977年,美国海军研究所开始执行光纤传感系统计划,从这以后光纤传感器在世界许多实验室里出现。从70年代中期到80年代中期近十年的时间,光纤传感器已达近百种,它在国防军事部门、科研部门以及制造工业、能源工业、医学、化学和日常消费部门都得到实际应用。从目前看,已有一些形成产品投入市场,也有一些已做成样机进行工业实验,但大量的还是处在实验室研究阶段。世界上光纤传感器研究工作开展较早的几个国家情况是这样的。

美国在光纤传感器研究方面开始最早,投资最大,仅1983年投资12~14亿美元,已有许多研究成果申请了专利。美国从事光纤传感器的有美国海军研究所(NRL)、美国宇航局(NASA)、西屋电气公司、斯坦福大学等28个主要单位。

日本制定了1979—1986年“光应用计划控制系统”的七年规划,投资达70亿美元。计划将光纤传感器应用于大型工厂以解决强电磁场干扰及易燃、易爆等恶劣环境中信息测量、传输和生产全过程的控制问题。日本松下电气、三菱、东京大学等24家著名公司、大学从事光纤传感器研究。从1980年7月到1983年6月,申请光纤传感器的专利达464件,涉及11个领域,其中光纤位移传感器80件,光纤气体传感器65件。日本松下电器公司生产的光纤电流(磁场)表、光纤电压表和光纤温度计已进入市场。磁场测量范围上限为4700Oe,电压上限为220V,测量精度都为 $\pm 1\%$;温度测量范围为 $-10\sim +40^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。

德国的光纤陀螺的研究规模和水平,仅次于美国而居世界第二位,西门子公司早在1980年就制成了高压光纤电流互感器实验样机。

英国政府十分重视光纤传感器技术,英国有中央电气研究所、

标准电信研究所、伦敦大学、南安普顿大学等 9 个主要公司、学校从事光纤传感器的研究工作。英国中央电气研究所研制的高压电流的光纤测量装置,伦敦大学研究的光纤陀螺、水听器,曼彻斯特大学研制的光纤传感器和无源多路测量系统,牛津大学研究的光全息以及南安普敦大学和 York 公司联合研究的高双折射光纤、激光光纤、光学无源器件、光纤测试仪器都有很高水平。

我国光纤传感器的研究工作刚工始,1983 年国家科委新技术局在杭州召开了光纤传感器的第一次全国性会议。目前研究工作主要在高等院校和科研所。研究的光纤传感器用于测量电流、电压、电场、磁场、温度、水声压力、位移、速度、转动、应力、液位等物理量,并已取得初步成果。用于光纤传感器的光纤,有源和无源器件,国内也有单位研制,有的已有产品,有的正在进行或积极筹备进行研制。

我国对光纤传感器的研究极为重视,在“七·五”规划中提出了 15 项光纤传感器项目,预计“十·五”期间研制成功的品种将可达到美、日等国 80 年代初、中期水平。

光纤传感器的发展与光纤通信的发展密切相关,因为光通信的许多基础技术和元器件,如光源、光纤、耦合器、连接器、接收器件等,都可以用到光纤传感技术上。但是,作为传感器家族的光纤传感器,它有许多与光通信不同的特殊问题,这些问题的研究和解决,推动着光纤传感器的发展。

目前,从大量的文献资料中看到光纤传感器的研究有如下动向:

1. 继续深入研究传感器的理论和技术,发展新原理的光纤传感器。

许多文章资料表明,目前对光纤传感器的基本原理的研究愈来愈深入,振幅、相位传感器日趋完善,而对波长、时间分辨信息的传感器也在进行着深入的研究。它们的物理机制,检测电路,主要

局限,典型例子的概略情况,如表 1-1 所示。

表 1-1 光纤传感器的物理机制

传输信息形式	物理机制	检测电路	主要局限性	典型例子
相位	信号和参考光纤之间(或不同传播模)的干涉;迈克尔逊干涉仪、马赫-泽德干涉仪、法布里-珀罗干涉仪、塞格纳克干涉仪	条纹计数或分路相位检测	激光噪声和稳定性,小相移测量;排除不希望有的寄生效应(其他物理量)的影响	光纤陀螺仪,水听器,动态压力和应力测量的多模测量仪,光纤电流测量仪
强度(振幅)	由于吸收、辐射和折射系数变化对传输光的调制	模拟电路	对光源强度变化范围和连续损耗(长距离)的校正	多模微弯曲损耗的应力、压力计;光编码
波长	光谱与吸收、辐射和折射系数的变化有关	二个固定波长的辐值比较或扫描波长的模拟信号比较	要有适合的扫描波长源,波长与线损耗有关	用可变的法布里-珀罗共振腔,双折射单晶半导体带隙偏移的温度测量
时间分辨信息	利用单模光纤的瞬态吸收或发射特性具有反馈的光纤回路的渡越时间	时延脉冲分析	在光纤中的模态时间色散	用稀土铁荧光光的时延温度计。用西林柯夫光的核辐射诊断
偏振	旋转光张量的变化	偏振分析器和辐值比较	光纤中自发的和固有的双折射	高压电流测量仪,光高斯计

2. 解决光纤传感器的长时间漂移影响,为实用化铺平道路。

为了使光纤传感器从实验研究过渡到工业应用,近年来国外对光纤传感器样机进行了长时间的考察,发现目前大多数光纤传感器实际测量的主要问题是存在相当大的长时间漂移影响,对此问题进行了深入研究,提出了许多解决问题的方法。

许多文献认为光纤传感器的相当大的时间漂移影响来自组成光纤传感器测量系统的各个部分,如光纤的衰减,耦合器和分束器特性的不完善,光纤输出的不稳定和检测器的响应等。为了从技术上解决漂移问题,提出采用参考光路信号可以解决。由于光学结构的漂移对测量带来的影响,认为参考通道和多路传输是先进技术。用这一技术和必要的调节可以确保由光纤传感器系统达到完全平衡。无论哪种形式的光纤传感器,采用“比较”技术都可使传感器获得长时间的稳定。这样就可以使光纤传感器实用化。

3. 从单一传感器的研究进入传感器系统的研究,并和微型计算机结合形成光纤遥测系统。单一光纤传感器的研究工作已进入到其实用化阶段,但单一传感器存在一定局限性,无法适用于多参数、多变量的测量要求。

光纤传感器系统的一种形式是采用多路传输光学无源传感器系统,其核心问题是如何节省电路,寻求哪一种通道可以更有效的传输由各个光纤传感器取得的信息。为此,需要利用纤维光路之间、几个无源传感器之间、数据遥测通道之间的多路传输。

多路传输大致有三种基本结构。一是采用时分多路传输结构,如空间上分离的多个光纤传感器用相同的光纤连接在同一无源信号通道上,所有的传感器都被调制成同一光特性(如强度)在工作时间内实现多路传输。

二是正交传播调制的局部多路传输。即用单点光纤传感器来测量多个物理量,其光特性也可由强度、相位、频率、偏振、颜色来调制。

三是采用光纤被覆技术。如改变光纤上的被覆层能使声传感器改变为磁传感器或其它类型的传感器。在同一根光纤上采用不同的被覆层,可构成多路光纤传感器。

由于光纤传感器具有光纤遥测技术的内在相容性的优点,它可与现有光纤数据传输组成光纤遥测系统。如光纤液面和流量的传感器与遥测装置结合,用于危险环境的加工过程,控制工业和环境中的易燃、易爆等液体的液面和流量的检测。

4. 基础技术和基础元件的研究取得很大进展,它们的可靠性和稳定性有了很大提高。

如英国研究的低双折射光纤、蝴蝶结光纤和日本的熊猫光纤都有很高的水平。国外还用掺杂或被覆技术制造各种特殊光纤,如激光光纤、螺旋光纤等。

德国西门子公司近期研制的一种精致的氮氛激光器重 70g,直径 25mm,高 146mm,功率 0.5W。另外,国外对半导体激光器,特别是单模 GaAlAs 固体激光器、发光二极管、光电二极管作了深入研究。目前,0.8 μ m 带的光电元件开发研究已基本结束,进入产品化,其稳定性和可靠性都能满足要求。

目前,对检测系统的研究才刚开始,光纤传感器作为一项新兴技术还处在研究发展的阶段。

第二章 光纤的传光特性

光纤传感原理与技术是以光纤的导波现象为基础的。光纤中传输的光波的特征参量如相位、振幅或强度、偏振态、波长和模式等,对外界环境因素如温度、压力、电流、磁场、转动等,都很敏感。因此,通过检测光纤中传输的光波的特征参量的变化可以实现对各种物理参量的测量。这就是光纤传感原理与技术的中心内容。

研究光波在光纤中传播的理论主要包括射线理论和模式理论。射线理论是把光看作射线,应用几何光学中的反射和折射原理解释光波在光纤中传播的物理现象。射线理论简单直观,容易理解,对简单问题可以得到精确的结论,但对复杂问题只能给出粗糙的结果。模式理论是把光波当作电磁波,把光纤当作光波导,根据电磁场理论中的麦克斯韦方程组求得波动方程,然后采用解偏微分方程的标量近似法或严格的矢量解法,求得电磁场分布的模式来解释光纤中的光传输现象。用模式理论,原则上可以比较完整和全面地解释光纤中光的传播现象。但由于求解方面困难,对一些现象的解释需要同射线理论联系起来。本章用射线理论和模式理论分析阶跃光纤的导波特性,用射线理论分析渐变折射率光纤的导波特性,以便为学习光纤传感器的人们提供基础知识。

§ 2.1 光纤的结构及分类

一、光纤的结构

光纤一般由纤芯、包层、涂敷层及护套构成,是一多层介质结构的对称圆柱体,如图 2-1 所示。纤芯位于光纤的中心部位,它是