

·光电系统·

光纤传感技术的发展与应用

杜志泉,倪 锋,肖发新

(河南科技大学材料科学与工程学院,河南 洛阳 471023)

摘 要:随着光纤传感技术的不断发展,几乎在各个领域得到研究与应用。首先介绍了光纤的结构与分类,光纤传感器的工作原理、分类及其特点,光纤弯曲损耗;其后介绍了光纤传感技术的发展现状及其在各领域的应用;最后是对光纤传感技术发展的进一步展望。

关键词:光纤传感技术;光纤传感发展;光纤传感应用

中图分类号:TP212.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-06-0007-06

Development and Application of Optical Fiber Sensing Technology

DU Zhi-quan, NI Feng, XIAO Fa-xin

(College of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: With the development of optical fiber sensing technology, fiber sensors are researched and applied in various fields. Firstly, the structures and classifications of optical fiber, the operation principles, classifications and the characteristics of fiber sensors as well as optical fiber bending loss are introduced. And then, the development and application of optical sensing technology in various fields are introduced. At last, the development of optical fiber sensing technology is forecasted further.

Key words: optical fiber sensing technology; optical fiber sensing development; optical fiber sensing application

近年来,全球传感器的产量和年增长率均保持在10%以上,目前全球从事传感器生产和研制的单位达5 000多家。传感技术作为当今世界迅猛发展起来的技术之一,已经成为衡量一个国家科学技术水平发展的重要标志。先进传感器朝着灵敏、精巧、适应性强、智能化和网络化方向发展。光纤传感技术是20世纪70年代末兴起的技术领域,在全世界成为研究热门,已与光纤通信并驾齐驱^[1]。

作为被测量信号载体的光波和作为光波传播媒质的光纤,具有一系列独特的、其他载体和媒质难以相比的优点,例如:具有抗电磁和原子辐射干扰的性能;径细、质软、质量轻的机械性能;绝缘、无感应的电气性能;耐水、耐高温、耐腐蚀的化学性能等,它能够在人达不到的地方(如高温区)或者对人有害的地区(如核辐射区),起到人的耳目的作用,而且还能超越

人的生理界限,接收人的感官所感受不到的外界信息。因此,光纤传感技术一问世就受到极大重视,几乎在各个领域得到研究与应用,成为传感技术的先导,推动着传感技术蓬勃发展^[2]。光纤传感技术是以光电子学器件为基础、以光纤通讯和集成光学的技术为前提创造性地发展起来的。光通讯技术的发展也促进了光纤传感器的发展^[3]。

1 光纤的结构及其分类

1.1 光纤的结构

光纤是光导纤维的简称。目前最主要的通信光纤的材质是高纯度的石英玻璃为主,掺少量杂质锗、硼、磷等。光纤的典型结构是一种细长多层同

轴圆柱形实体复合纤维。自内向外为:纤芯、包层、涂覆层、护套。一般纤芯采用石英纤维,包层采用玻璃,涂覆层采用聚氨基甲酸酯或硅酮树脂,护套采用尼龙或聚乙烯等塑料^[4]。核心部分为纤芯和包层,二者共同构成介质光波导,形成对光信号的传导和约束,实现光的传输,所以又将二者构成的光纤称为裸光纤。涂覆层又称被覆层,是一层高分子涂层,主要对裸光纤提供机械保护,因裸光纤的主要成分为二氧化硅,它是一种脆性易碎材料,抗弯曲性能差、韧性差。为提高光纤的抗微弯性能,涂覆一层高分子涂层。另外,如将若干根裸光纤集束成一捆,相互间极易产生磨损,导致光纤表面损伤而影响光纤的传输性能,为防止这种损伤,采取的有效措施就是在裸光纤表面涂一层高分子材料。

光纤是用光透射率高的电介质(如石英、玻璃、塑料等)构成的光通路,纤芯的折射率比包层的折射率稍大,这样利用全反射的原理把光约束在纤芯内并沿着光纤轴线传播。当入射光线在纤芯和包层界面满足全反射条件时,光波就能沿着纤芯向前传播^[5]。

1.2 光纤的分类

1.2.1 按光纤的材料分类

(1)高纯度石英(SiO_2)玻璃纤维:这种材料的光损耗比较小,在适当波长时,最低损耗约为0.47 dB/km。锗硅光纤,包层用硼硅材料,其损耗约为0.5 dB/km。

(2)多组分玻璃光纤:用常规玻璃制成,损耗也很低。如硼硅酸钠玻璃光纤,在适当波长时,最低损耗为3.4 dB/km。

(3)塑料光纤:用人工合成导光塑料制成,其损耗较大,可达到100~200 dB/km。但其质量轻,成本低,柔软性好,适用于短距离导光。

1.2.2 按光纤的折射率分类

根据光纤纤芯与包层折射率的分布情况,可把光纤分为阶跃型光纤和渐变折光纤两类^[4]。

(1)阶跃型光纤:这种光纤的纤芯和包层的折射率都是一个常数,纤芯的折射率高于包层的折射率,折射率在纤芯与包层的界面处有一个突变。进入这种光纤的光线只要满足全反射原理,就会在纤芯中沿

折线路径向前传播。(2)渐变型光纤:这种光纤包层的折射率为一常数,纤芯的折射率从中心开始随其半径的增加而逐渐变小,到包层与纤芯的界面处折射率下降到包层的折射率。进入这种光纤的光线因入射角不同将沿着波浪形曲线路径向前传播。

1.2.3 按光纤的传输模式分类

根据光纤的传输模式,可把光纤分为单模和多模两种^[4]。光纤的传输模式是指光进入光纤的入射角度。当光在直径为几十倍光波长的纤芯中传播时,以各种不同角度进入光纤的光线,从一端传至另一端时,其折射或弯曲的次数不尽相同,这种以不同角度进入纤芯的光线的传输方式称为多模式传输。可传输多模式光波的光纤称为多模光纤。如果光纤的纤芯直径为5~10 μm ,只有所传光波波长的几倍,则只能有一种传输模式,即沿着纤芯直线传播,这类光纤称为单模光纤。多模光纤可以是阶跃型,也可以是渐变型,而单模光纤大多为阶跃型。

2 光纤传感器的工作原理

2.1 光纤的传光原理

光的全反射现象是研究光纤传光原理的基础。根据几何光学原理,当光线以较小的人射角 θ_1 由光密介质1射向光疏介质2(即 $n_1 > n_2$)时(见图1),则一部分入射光将以折射角 θ_2 折射入介质2,其

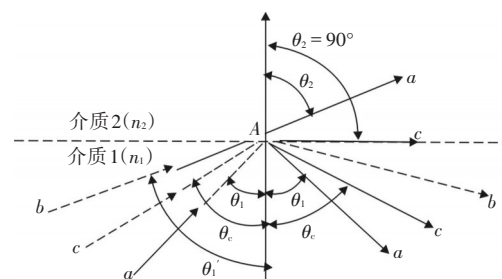


图1 光纤的传光原理

余部分仍以 θ_1 反射回介质1。

依据光折射和反射的斯涅尔(Snell)定律,当 θ_1 逐渐增大,直至 $\theta_1 = \theta_c$ 时,透射入介质2的折射光也逐渐折向界面,直至沿界面传播。对应于折射角 $\theta_2 = 90^\circ$ 时的入射角 θ_1 称为临界角 θ_c ;当 $\theta_1 > \theta_c$ 时,光线将不再折射入介质2,而在介质1(纤芯)内产生连续向前的全反射,直至由终端面射出。这就是光纤传光的工作原理。

光在纤芯和包层的界面处的全反射是光在光纤中传播的必要条件。在全反射情况下,光在光纤中的传输功率可达99.9%。如果光纤制造不理想,在纤芯与包层界面处有缺陷,就会导致有折射光进入包层,从而造成光的功率损耗^[4]。

2.2 光纤传感器基本构成及原理

光纤传感器是利用光导纤维的传光特性,把被测量转换为光特性(强度、相位、偏振态、频率、波长)改变的传感器。光纤传感器一般由光源、入射光纤、出射光纤、光调制器、光探测器及解调器等组成(如图2所示)。其基本工作原理是将来自光源的光经过入射光纤送入调制区,光在调制区内与外界被测量相互作用,使光的性质(如光的强度、波长、频率、相位、偏振态等)发生变化而成为被调制的信号光,再经出射光纤送入光探测器、解调器而获得被测参数^[5]。

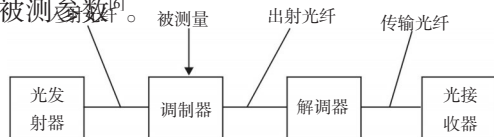


图2 光纤传感器的一般构成

3 光纤传感器的分类

3.1 按传感原理分类

光纤传感器按传感原理可分为两类:一类是传光型(或称非功能型)传感器;另一类是传感型(或称功能型)传感器^[6]。

3.1.1 非功能型传感器

非功能型传感器是利用其他敏感元件感受被测量的变化,光纤仅作为信息的传输介质,常采用单模光纤。光纤在其中仅起导光作用,光照在光敏感元件上受被测量调制^[7]。其优点是无需特殊光纤及其他特殊技术,比较容易实现,成本低。缺点是灵敏度较低。因此,常用于灵敏度要求不太高的场合。目前实际应用的光纤传感器大多是非功能型的。

3.1.2 功能型传感器

功能型传感器是利用光纤本身的特性把光纤作为敏感元件,被测量对光纤内传输的光进行调

制,使传输光的强度、相位、频率或偏振态等特性发生变化,再通过对被调制过的信号进行解调,从而得出被测信号。光纤在其中不仅是导光媒质,而且也是敏感元件,光纤同时具有“传”和“感”的功能,光在光纤内受被测量调制,多采用多模光纤^[7]。其优点是结构紧凑,灵敏度高。缺点是须用特殊光纤,成本高。典型例子,如光纤陀螺等。

3.2 其他分类方法

光纤传感器按被调制的光波参数不同可以分为强度调制光纤传感器、相位调制光纤传感器、频率调制光纤传感器、偏振调制光纤传感器和波长(颜色)调制光纤传感器。光纤传感器按被测对象的不同可以分为光纤温度传感器、光纤压力传感器、光纤位移传感器、光纤浓度传感器、光纤电流传感器、光纤流速传感器等^[8]。

4 光纤传感器的特点

光纤传感器用光纤作为传递信息的媒介,具有光纤和光学测量的一些特点^[9]:(1)抗电磁干扰。光纤传感器应用光纤的光学特性,因此可以抵抗电磁干扰,特别适用于大电流、强磁场、强辐射等环境,能够解决很多传统传感器无法解决的问题;(2)电绝缘。光纤传感器中的光纤是电介质,敏感元件也可用电介质制作,因此具有良好的电绝缘性,特别适合高压供电系统的测量;(3)高灵敏度。利用光作为信息载体,具有光学测量高灵敏度的特点,可以实现某些精密测量;(4)低损耗。由于光纤的传输损耗很小,因此利用光纤传感器技术可实现对被测量的远距离监控。

例如光纤温度传感器,与传统的温度传感器相比,它具有许多优点:电绝缘、抗电磁干扰、非侵入性和高灵敏度,容易实现对被测信号的远距离监控。其几何形状有多方面的适应性,传输频带宽,可以是一个电气无源系统。因此还具有耐水性好、抗腐蚀性强、可高密度传输数据等特点^[10]。

5 光纤弯曲损耗

在实际使用光纤的过程中不可避免地存在弯曲,此外为了获取具有某些特殊性质的器件,也需要将光纤弯曲(如光纤偏振器)。因此,研究光纤弯

曲对其特征参量的影响非常重要^[11]。当光纤弯曲曲率大到一定程度后,光的传输途径会改变,一部分光渗透到包层中或者穿过包层成为辐射模向外泄漏损失掉,从而产生弯曲损耗^[12]。光纤弯曲损耗分为微弯损耗和宏弯损耗两种。

5.1 微弯损耗

微弯损耗是光纤的曲率半径比光纤直径小,通常是光纤轴产生微米级的弯曲(微弯)引起的附加损耗。光纤微弯传感器是利用光纤的微弯损耗效应来探测外界物理量的变化,是典型的强度调制型光纤传感器。目前,光纤微弯传感已是较成熟的传感手段。但是光纤微弯传感系统需要外加变形器来形成有效的传感部位,要求变形器具有很高的精度;同时在一些特殊场合,例如智能结构中的应用就受到了限制;而且微弯光纤弯曲部分的尺寸只在微米级,这使微弯传感器只能在很小的位移范围内操作,所能感测的外界变化量较小^[12]。

5.2 宏弯损耗

当光纤弯曲时,光在弯曲部分中进行传输,要想保持同相位的电磁场在一个平面里,则传导模的平面波前必须以弯曲光纤的曲率中心为中心旋转,故越靠近外侧,其沿光纤轴的纵向速度必须越大,当超过某个临界曲率时,相速度就会大于包层平面波的相速度,传导模就会变成辐射模,从而引起光束功率的损耗,这就是宏弯损耗^[13]。宏弯损耗是光纤的曲率半径比光纤直径大的多的弯曲(宏弯)引起的附加损耗。相比之下,光纤宏弯传感器具有使用时不需要外加变形器、结构简单、易操作、灵敏度高、稳定性好等优点,因此,应用范围更加广泛^[12]。

6 光纤传感技术的发展现状与应用

6.1 光纤传感技术的发展现状

近年来,随着研究的深入和技术的创新,光纤传感技术取得了较快的发展,其中比较突出地体现在以下四个方面^[14]。

(1)光纤光栅传感器^[2,15]。光纤光栅传感器是最近几年国内外传感器领域的研究热点之一。常见的光纤光栅传感器通过测量布喇格波长的漂移实

现对被测量的检测。光纤光栅传感器具有灵敏度高,易构成分布式结构,在一根光纤内可以实现多点测量,可对大型构件进行实时安全监测,也可以代替其他类型结构的光纤传感器,用于化学、压力、加速度传感中。光纤光栅传感器由于其独特的优势,适用于多种场合测量。国内外对其进行了大量的研究,主要集中在以下几个方面:对具有高灵敏度、高分辨率,且能同时感测应变和温度变化的传感器研究;开发低成本、小型化、可靠且灵敏的探测技术系统的研究;实际应用研究,包括封装技术、温度补偿技术、传感网络技术。目前,随着实用、廉价的波长解调技术进一步发展完善,光纤光栅传感技术已经向成熟阶段接近,部分也已经商用化。但在性能和功能方面需要提高。

(2)阵列复用传感系统^[6-17]。阵列式光纤传感系统即采用波分复用、空分复用、时分复用等方式,将单点光纤传感器阵列化,实现空间多点的同时或者分时传感,也称为准分布式系统。目前应用最为广泛的是光纤光栅阵列传感和基于干涉结构的阵列光纤传感系统。阵列化光纤传感的优点是可以实现大范围、长距离多点传感,是大规模光纤传感发展的一个重要趋势。今后,阵列式光纤传感系统的研究方向是综合复用方式的应用,如相干光纤光栅组结构,将光纤光栅高波长选择性能、易与光纤耦合、插入损耗低的优点与干涉型结构灵敏度高、检测速度快的优点相结合,非常适合大规模组网传感。而阵列化的发展方向也对各个传感元的灵敏度、稳定性、批量制作可重复性、解调的快捷准确等提出新的要求。

(3)分布式光纤传感系统^[17-18]。分布式光纤传感系统是根据沿线光波分布参量,同时获取在传感光纤区域内随时间和空间变化的被测量的分布信息,可以实现长距离、大范围的连续、长期传感,也是当今光纤传感发展的一个重要趋势。目前,基于各种散射机理的分布式传感系统是光纤传感领域的一个研究热点,包括后向瑞利散射分布式光纤传感技术、基于自发及受激拉曼散射的分布式传感技术、基于自发及受激布里渊散射的分布式光纤传感技术、前向传输模耦合技术等。不同技术具有自身的特点,在具体应用中应该根据需要恰当选择。分布式光纤传感系统在空间上具备测量的连续性,避免使用大量分立的传感元件,降低了传感部分的系统

成本。

(4)智能化光纤传感系统^[17,19]。目前光纤传感的智能化主要体现在光纤传感与通信技术及计算机技术的融合,实现各种功能的智能化,实现信号获取、存储、传输、处理于一体。智能化光纤传感系统在许多新型应用领域受到广泛关注,如智能材料、环境感知、声发射检测、石油测井等。基于光纤传感的智能材料可以实现对周围环境变化的自判断性、自适应性、自诊断性、自修复性等诸多性能,在汽车工业、航空航天、医疗、安防、体育及土木工程等领域有着广泛的应用。

6.2 光纤传感技术的应用^[6,9,20]

光纤传感器的应用范围很广,几乎涉及国民经济和国防上所有重要领域和人们的日常生活,尤其可以安全有效地在恶劣环境中使用,解决了许多行业多年来一直存在的技术难题,具有很大的市场需求。主要表现在以下几个方面。

(1)建筑工程。在建筑工程中,可以利用光纤传感器实时监测桥梁、大坝、重要建筑物等的温度、应力、压力、振动、倾角等物理量,以评估其短期及长期的结构安全性能。例如桥梁、大坝、油田等的干涉陀螺仪和光栅压力传感器可预埋混凝土、碳纤维增强塑料及各种复合材料中,用于测试应力松弛、施工应力和动荷载应力,从而评估桥梁短期施工阶段和长期营运状态的结构性能。目前,光纤传感技术主要为“点式”。对大型工程来说,点式光纤传感技术感应分布分散,若问题部位不分布在布有传感器的点上,则不敏感甚至不感应,极易造成疏漏。南京大学工程管理学院张旭莘教授提出的“基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术”填补了这项技术在国内的空白。连续分布式光纤传感器可以将任何一项大型建筑工程与互联网连接起来,通过温度和应力的检测,24小时监测工程的“健康状况”。例如在温度检测方面的应用。常用的温度检测方法很多,如热敏电阻式、热电偶式等,它们都是基于温度变化引起其物理参数(电阻值、电势等)的变化原理实现温度的检测。若在微波能应用、电力机械设备等高温、强腐蚀、强电磁干扰等恶劣环境中实现温度检测,传统的温度检测方法不再适用,而光纤温度传感器解决了这一困难,且温度检测分辨率高、灵敏度高、测温范围宽^[21]。线型光纤温度传感系统是一种用于实时测量空间温度场分布的传感系统,可对光纤所敷设

部位的温度分布进行不间断的监测,遇异常的温度变化则锁定事故部位并立即报警,特别适用于要在大范围进行多点温度测量的场合。应用这种新型的在线监测传感技术构建的新型感温探测系统,提高了消防自动报警的可靠性、灵敏度、准确度^[22]。

(2)电力系统。在电力系统中,需要测定温度、电流等参数,如对高压变压器和大型电机的定子、转子内的温度检测等,由于电类传感器易受强电磁场的干扰,无法在这些场合中使用,只能用光纤传感器。例如电厂的电流电压光纤传感器;用布拉格光栅传感器网络对发电机、转换器进行温度、振动监测;用复合光纤对高压体进行分布式拉曼温度“热点”探测及 Brillouin 压力监测。

光纤传感器以其特有的抗电磁干扰能力在电力系统中可用于测量电流、电压、温度等参数。基于光时域反射 OTDR(optical time-domain reflectometry)的布里渊分布式光纤传感器通过测量背向瑞利散射光得到沿光纤的衰减分布,对光缆衰减特性和断点的测量性能良好,但是由于瑞利散射光基本不受温度和应力等外界条件的影响,所以这种测量方式不能用于检测环境温度和应力对光纤性能的影响,其应用受到了一定的限制。基于布里渊光时域反射(BOTDR, Brillouin optical time-domain reflectometry)的分布式光纤传感系统与在光纤测量中广泛应用的 OTDR 相似。BOTDR 光纤传感系统测量的是光纤的自发布里渊散射信号,其信号强度非常微弱,但可以采用相干检测技术提高系统信噪比。这种方案可单光源、单端工作,系统简单,实现方便,而且可同时监测光纤断点、损耗、温度和应变。目前已经报道了测量距离 30 km 以上、温度分辨率 4 °C、空间分辨率 20 m 的温度和应变同时测量的系统,该系统在只测量温度时,测量距离可达 150 km。

(3)石油化工系统。在石油化工系统、矿井、大型电厂等,需要检测氧气、碳氢化合物、CO 等气体,采用电类传感器不但达不到要求的精度,更严重的是会引起安全事故。因此,研究和开发高性能的光纤气敏传感器,可以安全有效地实现上述检测。光纤传感器可以克服恶劣的井下环境取代传统的电子传感器,实现油井的持气率、含水率、压力、温度、多相流和声波的测量。目前在石油测井系统中主要应用的是非本征光纤 F-P 腔传感器。非本征光纤 F-P 腔传感器主要是基于光的多光束干涉原理,利用温

度、压力变化与光纤F-P腔之间的对应关系,实现温度和压力的测量。

(4)环境监测、食品安全。在环境监测、临床医学检测、食品安全检测等方面,由于其环境复杂,影响因素多,使用其他传感器达不到所需要的精度,并且易受外界因素的干扰,采用光纤传感器可以具有很强的抗干扰能力和较高的精度,可实现对上述各领域的生物量的快速、方便、准确地检测。目前,我国水源的污染情况严重,临床检测、食品安全检测手段比较落后,光纤传感器在这些领域具有良好的市场前景。

石油污染已经成为我国水域环境的主要问题之一,为了掌握石油污染的动态变化趋势,需实时在线测量水中石油浓度。燕京大学的王书涛、崔彦彦等从荧光测量的基本原理出发,研究了水中矿物油荧光检测机理、用荧光法和全光纤传感技术实现石油浓度测量的可行性,建立了水中油浓度的测算模型,确定了其荧光检测的最佳激发波长和荧光波长范围,根据得到的荧光特性设计了荧光激发、吸收和传输的光学系统。该方法可广泛应用于水中油检测方面^[23]。

(5)医学及生物传感器。医学临床应用光纤辐射剂量计、呼吸系统气流传感系统;圆锥形微型FOS测量氧气浓度及其他生物参数;用FOS探测氢氧化物及其他化学污染物;光纤表面细胞质粒基因组共振生物传感器;生物适应FOS系统应用于海水监测、生化技术和医药。在临床医学上,由于光纤传感器柔软、小巧、自由度大、绝缘、不受射频和微波干扰、测量精度高,常用于对人体血管等的探测,人体外科校正和超声波场测量等。光纤内窥镜使得检查人体的各个部位几乎都是可行的,且操作中不会引起病人的痛苦与不适,其中光纤血管镜已应用于人类的心导管检查中。光纤内窥镜不仅用于诊断,目前也正进入治疗领域中,例如息肉切除手术等。光纤温度传感器在癌症治疗方面的研究和应用正日益兴起。目前在临床医学中应用最多的仍然是分布式光纤传感器。

(6)军事安防。光纤传感器可用于水声探潜(光纤水听器)、光纤侧导、姿态控制(光纤陀螺)、航天航空器的结构损伤探测(智能蒙皮)以及战场环境的探测等方面。在航空航天领域中,战术导弹用光纤陀螺测量导弹运动过程中的俯仰角、偏航角和

横滚角,以引导导弹准确命中目标。美国首先采用光纤陀螺精确制导炸弹,在伊拉克等战场上已取得较好的效果。光纤陀螺还应用于雷达无人控制直升机的姿态控制。目前能广泛应用于海防领域的光纤传感器是研发最早、发展最快的光纤水声传感器(光纤水听器),由光纤水听器构成的海防传感网络系统,是目前正在开发的新型防卫系统,该系统已开始用于海上边防和重要军事地区的海防警戒。近几年发展起来的基于光纤传感技术的光纤网络安全警戒系统也开始在边防及重点区域防卫中得到推广应用。目前,世界上发达国家使用的安全防卫系统就是基于分布式光纤传感网络系统的安全防卫技术。

7 光纤传感技术发展的主要方向

光纤传感技术及其相关技术的迅速发展,满足了各类控制装置及系统对信息的获取与传输提出的更高要求,使得各领域的自动化程度越来越高,作为系统信息获取与传输核心器件的光纤传感器的研究非常重要^[6]。目前,光纤传感器技术发展的主要方向是^[20]:(1)多用途。即一种光纤传感器不仅只针对一种物理量,更要能够对各种物理量进行同时测量;(2)提高分布式传感器的空间分辨率、灵敏度,降低其成本,设计复杂的传感器网络工程。注意分布式传感器的参数,即压力、温度,特别是化学参数(碳氢化合物、一些污染物、湿度、PH值等)对光纤的影响;(3)新型传感材料、传感技术等开发;(4)在恶劣条件下(高温、高压、化学腐蚀)低成本传感器(支架、连接、安装)的开发和应用;(5)光纤连接器及其他微技术(微机械、微流态学、喷镀薄膜等)结合的微光学技术。

8 展望

光纤传感技术经过20余年的发展也已获得长足的进步,出现了很多实用性的产品,然而实际的需要是各种各样的,光纤传感技术的现状仍然远远不能满足实际需要^[6],还有许多有待研究的课题^[16]:(1)传感器的实用化研究,提高传感系统尤其是传感器的性价比;(2)传感器的应用研究,在现有的研究成果基础上,大力开展应用研究和应用成果宣传;(3)新传感机理的研究,开拓新型光纤传感器;

(下转第17页)

可扩展性,对于后续光电信息控制领域的仿真研究意义重大。

参考文献

- [1] 陈蕾,方崑源. 作战仿真技术与展望[J]. 科技资讯, 2012(26).
- [2] 张鹏,黄健,赵鑫业,等. 基于BOM组件模型的可组合性研究[J]. 系统仿真学报,2011(8).
- [3] 周彦,戴剑伟. HLA仿真程序设计[M]. 北京:电子工业出版社,2002:12-13.
- [4] 罗广成,王汝群,李修和,等. 基于HLA复杂电磁环境下的

对抗仿真模拟系统[J]. 电子信息对抗技术, 2012(5).

- [5] 龚建兴,韩超,邱晓刚,等. 构建可扩展的HLA联邦成员框架[J]. 系统仿真学报,2006,18(11):3126-3130.
- [6] 龚建兴,钟蔚,黄健,等. 基本对象模型(BOM)在HLA仿真系统中的应用[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 327-331.
- [7] SISO base object model product development group. Guide for Base Object Model (BOM) Use and Implementation [Z]. SISO-STD-003-2006.2006.
- [8] 彭春光,龚建兴,黄柯棣. 基于基本对象模型的仿真模型组装器的研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12):3175-3178.

(上接第12页)

(4)传感器用特殊光纤材料和器件的研究,例如:增敏和去敏光纤、荧光光纤、电极化光纤的研究等。这些将是以后传感器进一步发展的趋势。只有加大对光纤传感领域人力、物力、财力的投入,才能进一步提高光纤传感技术的水平,促进其在各个领域得到更为广泛的应用,发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 张森,王臻,刘孟华,等. 光纤传感技术的发展及应用[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2007(3):6-8.
- [2] 侯俊芳,裴丽,李卓轩,等. 光纤传感技术的研究进展及应用[J]. 光电技术应用,2012,27(1):49-53.
- [3] 李艳萍,张丽红,伦翠芬,等. 反射式强度调制型光纤压力传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(1):180-183.
- [4] 李登道,耿杰,王文通. 光纤的结构及其传输特性分析[J]. 山东科技大学学报,2004,23(4):39-42.
- [5] 吕晖,马晓红,赵华凤,等. 光纤结构与特性实验设计[J]. 实验技术与管理,2011,28(7):43-46.
- [6] 李文植. 光纤传感器的发展及其应用综述[J]. 科技创业月刊,2005(7):153-154.
- [7] 卢一鑫,杨璐娜. 光纤传感器的应用现状及未来发展趋势[J]. 科技信息,2011(3):113-114.
- [8] 王秀彦,吴斌,何存富,等. 光纤传感技术在检测中的应用与展望[J]. 北京工业大学学报,2004,30(4):406-411.
- [9] 王鹏宇. 光纤传感技术及其应用[C]//第二十六届中国(天津)2012IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议,天津,2012,9.

- [10] 李晓沛,邹亚琪,马军山. 光纤宏弯损耗与温度传感的理论分析[J]. 光学仪器,2012,34(2):44-49.
- [11] 曲直,孙秀平,何杰,等. 单模双折射光纤弯曲传输损耗的研究[J]. 物理实验,2004,24(9):40-42.
- [12] 彭星玲,张华,李玉龙. 光纤宏弯传感器研究进展[J]. 光通信技术,2012,36(11):42-45.
- [13] 薛梦驰. 光纤弯曲损耗的研究与测试[J]. 电信科学, 2009,25(7):57-62.
- [14] 贾琦. 光纤传感技术的发展及应用[J]. 中国包装工业, 2014(8):73.
- [15] 杨兴,胡建明,戴特力. 光纤光栅传感器的原理及应用研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2009,26(4):101-105.
- [16] 廖廷彪,黎敏. 光纤传感器的今天与发展[J]. 传感器世界,2004,10(2):6-12.
- [17] 王燕花. 新型光纤传感系统的研究与实现[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [18] 胡晓东,刘文晖,胡小唐. 分布式光纤传感技术的特点与研究现状[J]. 航空精密制造技术,1999,35(1).
- [19] 邝泳聪,李风. 基于DSP的通用型光纤位姿传感信息处理模块[J]. 机电工程技术,2005,34(12):27-29.
- [20] 何慧灵,赵春梅,陈丹,等. 光纤传感器现状[J]. 激光与光电子学进展,2004,41(3):39-41.
- [21] 郑宏军,黎昕,杨恒新. 两种典型的光纤传感器研究现状与发展趋势[J]. 传感技术学报,2001,14(4):281-284.
- [22] 陆振华. 光纤温度传感系统在火灾探测中的应用[J]. 低压电器,2007(20):27-31.
- [23] 王书涛,崔彦彦. 光纤荧光式测水中矿物油浓度[J]. 红外与激光工程,2012,41(3):780-783.