

光纤光栅传感器的应用*

詹亚歌[†] 向世清 方祖捷 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室 上海 201800)

摘要 在光纤传感领域,光纤光栅传感技术是十多年来发展最为迅速的技术之一,传感系统本身和应用领域均有了很大发展.文章介绍了光纤光栅的结构、性能以及传感的原理,回顾了光纤光栅传感器在地球动力学、航天器及船舶航运、民用工程结构、电力工业、医学、和化学传感中的应用.

关键词 光纤光栅,中心波长,光纤光栅传感器

Progress in applications and developing prospect of in-fiber Bragg grating sensors

ZHAN Ya-Ge[†] XIANG Shi-Qing FANG Zu-Jie WANG Xiang-Zhao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In-fiber Bragg grating (FBG) sensor technology has become one of the most important developments of this decade in the field of optical fiber sensors. Rapid progress has been made in both sensor system developments and applications in recent years. The structure and properties of the fiber Bragg grating and the principle of the fiber Bragg sensor are first described, followed by a review of recent progress in applications of FBG sensors in geodynamics, large composite and concrete structures, aircraft and vehicles, the electrical power industry, medicine, and chemical sensing.

Key words fiber grating, center-wavelength, fiber grating sensor

1 引言

光纤传感器种类很多,它能够测量许多物理量.相对于机电类传感器,光纤光栅传感器具有一些明显的优势,包括抗电磁干扰、耐高温、体积小、灵活方便等.传统的光纤传感器绝大部分属于“光强型”或“干涉型”.对于光强型传感器,光源的不稳定、光纤的弯曲或连接损耗、探测器的老化等因素都会影响测量的准确性.对于干涉型传感器,其信息的读取是观察干涉条纹的变化,为得到清晰的条纹,通常要求两光路干涉光的光强相等,而且必须有一个固定参考点,这给光纤传感器的应用带来了许多不便.

以光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)为主的光纤光栅传感器,除了具有普通光纤传感器的优势之外,还有一些特别的优势,最主要的是传感信号为波长调制以及复用能力强.其好处在于测量信号不受光纤弯曲损耗、连接损耗、光源起伏和探测器老化等因素的影响;避免了干涉型光纤传感器相

位测量模糊不清等问题;在一根光纤上串接多个布拉格光栅,把光纤嵌入(或粘于)被测结构,可同时得到几个测量目标的信息,并可实现准分布式测量.例如通过实时测量应力、温度、振动等传感信息,以同时进行建筑物健康检测、冲击检测、形状控制和振动阻尼检测时,光纤光栅传感器是最理想的灵敏元件^[1].

某些类型的光纤光栅传感器已经商业化,虽然在性能和功能方面需要不断提高,但可以说光纤光栅传感技术已开始向成熟阶段接近,目前对于光纤光栅传感的研究主要致力于实用和廉价解调系统的研究.这里分几个部分介绍光纤光栅传感器在地球动力学、航天器和船舶航运、民用工程结构、电力工业、医药和化学传感中的应用.

* 上海市科学技术委员会专项基金(批准号 D11661081)资助项目
2003-04-15 收到初稿 2003-06-09 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: zhanygdove@163.com

2 光纤光栅的结构及传感原理

利用紫外激光的干涉条纹在一个较小的长度范围内照射具有光敏性的光纤,可使该段光纤芯的折射率发生周期性的改变,从而形成光纤布拉格光栅,如图1所示.当宽带光源射入具有这种光栅的光纤时,光谱中以光栅的布拉格波长为中心的窄光谱在光栅处被反射,其他大部分将透射而沿原来方向传输,图2为其示意图.

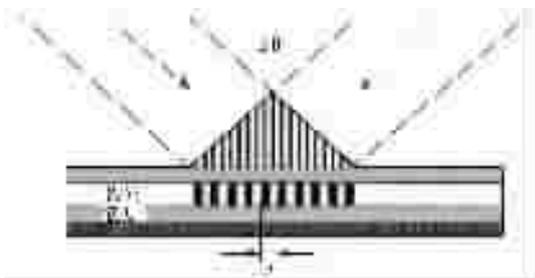


图1 全息法在光纤内制作光纤布拉格光栅的示意图

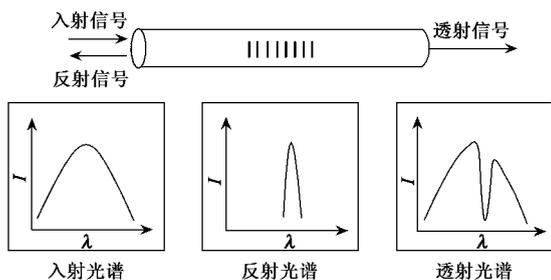


图2 宽带光源经光纤布拉格光栅后的反射和透射谱示意图

当光栅发生应变时,由于弹性变形光栅的周期将发生改变,并且由于光弹效应使纤芯的折射率变化,这将引起中心波长的改变.实验表明,光栅中心波长的改变与光栅应变成良好的线性关系.另外当光栅的温度改变时,热膨胀和热光效应会引起折射率改变.实验也同时表明,光栅中心波长的改变与光栅温度的改变成良好的线性关系.测定光栅的中心波长的改变量,即可计算应变和(或)温度.通过适当转换,这一现象就可以用来传感多种物理量和化学量等.下面分几个方面介绍利用这些原理进行传感测量应用的情况.

3 主要应用

3.1 在地球动力学中的应用

在地震检测等地球动力学领域中,地表骤变等现象的原理及其危险性的估定和预测是非常复杂的,而火山区的应力和温度变化是目前为止能够揭示火山活动性及其关键活动范围演变的最有效手段^[2].光纤光栅传感器在这一领域中的应用主要是在岩石变形、垂直震波的检测以及作为地形检波器和光学地震仪使用等方面^[3].活动区的应变通常包含静态和动态两种,静态应变(包括由火山产生的静态变形等)一般都定位于与地质变形源很近的距离,而以震源的震波为代表的动态应变则能够在与震源较远的地球周边环境检测到.为了得到相当准确的震源或火山源的位置,更好地描述源区的几何形状和演变情况,需要使用密集排列的应力-应变测量仪.光纤光栅传感器是能够实现远距离和密集排列复用传感的宽带、高网络化传感器,符合地震检测等的要求,因此它在地球动力学领域中无疑具有较大的潜在用途.

最近报道指出,光纤光栅传感器已经成功地检测了频率为0.1—2Hz,大小为 10^{-9} ε(应变)的岩石和地表动态应变.另外,光纤光栅传感器切面震波图检测系统也已经实现并有专利授权.在这一领域的应用中,关键是在一根光纤上能够复用并可有效被解调的光纤光栅的数量,图3为结合利用时域反射计(TDR)和波分复用(WDM)的方法实现复用和解调多个光栅传感器示意图,该图中的这一装置将主要用于地震场区的准分布式测量^[2].

最近报道指出,光纤光栅传感器已经成功地检测了频率为0.1—2Hz,大小为 10^{-9} ε(应变)的岩石和地表动态应变.另外,光纤光栅传感器切面震波图检测系统也已经实现并有专利授权.在这一领域的应用中,关键是在一根光纤上能够复用并可有效被解调的光纤光栅的数量,图3为结合利用时域反射计(TDR)和波分复用(WDM)的方法实现复用和解调多个光栅传感器示意图,该图中的这一装置将主要用于地震场区的准分布式测量^[2].

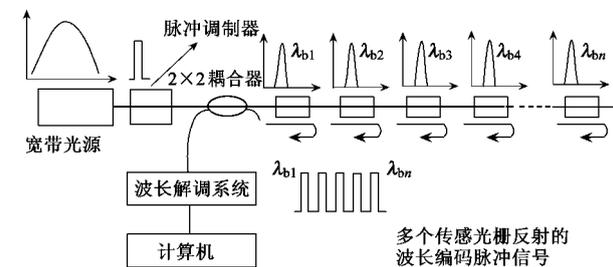


图3 复用和解调多个光纤光栅传感器示意图

3.2 在航天器及船舶中的应用

先进的复合材料抗疲劳、抗腐蚀性能较好,而且可以减轻船体或航天器的重量,对于快速航运或飞行具有重要意义,因此复合材料越来越多地被用于制造航空航天工具(如飞机的机翼)^[3].

为全面地衡量船体的健康状况,需要了解其不同部位的变形力矩、剪切压力、甲板所受的冲击力,对于普通船体大约需要100个传感器,因此波长复用能力极强的光纤光栅传感器最适合于船体检测.光纤光栅传感系统可测量船体的弯曲应力,而且可测量海浪对湿甲板的冲击力.最近,具有干涉探测性

能的 16 路光纤光栅复用系统成功地实现了在带宽为 5kHz 范围内、分辨率小于 $10\text{ n}\varepsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 的动态应变测量^[3]。

另外,为了监测一架飞行器的应变、温度、振动、起落驾驶状态、超声波场和加速度情况,通常需要 100 多个传感器,故传感器的重量要尽量轻,尺寸尽量小,因此最灵巧的光纤光栅传感器是最好的选择。另外,实际上飞机的复合材料中存在两个方向的应变,嵌入材料中的光纤光栅传感器是实现多点多轴向应变和温度测量的理想智能元件。美国和德国非常重视光纤光栅传感器在航空航天业的应用,较早地研究了飞行器上的二维应变及测量。美国国家宇航局在其 X-33 原型机上安装了光纤光栅多方向应变和温度测量系统^[4]。

3.3 在民用工程结构中的应用

民用工程的结构监测是光纤光栅传感器最活跃的领域。力学参量的测量对于桥梁、矿井、隧道、大坝、建筑物等的维护和健康状况监测是非常重要的。通过测量上述结构的应变分布,可以预知结构局部的载荷及健康状况。光纤光栅传感器可以贴在结构的表面或预先埋入结构中,对结构同时进行健康检测、冲击检测、形状控制和振动阻尼检测等,以监视结构的缺陷情况。另外,多个光纤光栅传感器可以串接成一个传感网络,对结构进行准分布式检测,可以用计算机对传感信号进行远程控制。

光纤光栅传感器可以检测的建筑物之一为桥梁。应用时,一组光纤光栅被粘于桥梁复合筋的表面,或在梁的表面开一个小凹槽,使光栅的裸纤芯部分嵌进凹槽得以保护。如果需要更加完善的保护,则最好是在建造桥时把光栅埋进复合筋。由于需要修正温度效应引起的应变,可使用应力和温度分开的传感臂,并在每一个梁上均安装这两个臂。1999 年,在美国的新墨西哥州的一座钢结构桥梁上,安装了 120 个光纤光栅传感器,是当时在一座桥梁上复用最多光纤光栅传感器的记录。

两个具有相同中心波长的光纤光栅代替法布里-珀罗干涉仪的反射镜,形成全光纤法布里-珀罗干涉仪(FFPI),利用低相干性使干涉的相位噪声最小化,这一方法实现了高灵敏度的动态应变测量。用 FFPI 结合另外两个 FBG,其中一个光栅用来测应变,另一个被保护起来,免受应力影响。以测量和修正温度效应,所以 FFPI/FBG 实现了同时测量三个量:温度、静态应变、瞬时动态应变。这种方法兼有干涉仪的相干性和光纤布拉格光栅传感器的优点。已

在 $5\text{ m}\varepsilon$ 的测量范围内,实现了小于 $1\mu\varepsilon$ 的静态应变测量精度、 0.1°C 的温度灵敏度和小于 $\ln\varepsilon\sqrt{\text{Hz}}$ 的动态应变灵敏度^[5]。

另外,由于从混凝土裂缝中辐射的声波可引起动态应变,这一应变可被 FFPI 探测到,FFPI 对声波辐射引起的动态应变有较好的灵敏性,所以可用于检测混凝土结构的健康状况,这在试验上已得到证实。初步的试验结果显示,在频率为几万 Hz 的高频信号时,动态应变测量灵敏度可达到亚 $\text{n}\varepsilon$ 量级^[6]。

3.4 在电力工业中的应用

光纤光栅传感器因不受电磁场干扰和可实现长距离低损耗传输,从而成为电力工业应用的理想选择。电线的载重量、变压器绕线的温度、大电流等都可利用光纤光栅传感器测量。

在电力工业中,电流转换器可把电流变化转化为电压变化,电压变化使压电陶瓷(PZT)产生变形,而利用贴于 PZT 上的光纤光栅的波长漂移,很容易得知其变形,从而得知电流强度。目前已经在 700A 的范围内得到了 $0.7\text{ A}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的电流分辨率^[7],且线性较好,这是一种较为廉价的方法,并且不需要复杂的电隔离。

另外,由大雪等对电线施加的过量的压力可能会引发危险事件,因此在线检测电线压力非常重要,特别是对于那些不易检测到的山区电线。光纤光栅传感器可测电线的载重量,其原理为把载重量的变化转化为紧贴电线的金属板所受应力的变化,这一应力变化被粘于金属板上的光纤光栅探测到。这是利用光纤光栅传感器实现远距离恶劣环境下测量的实例,在这种情况下,相邻光栅的间距较大,故不需快速调制和解调。此外,最近还报道了由两个 1550nm 波段的光纤光栅和解调用的光谱仪所组成的传感器,成功地测量了高压变压器的绕线温度,在较大的温度范围内的测量精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ^[8]。

3.5 在医学中的应用

医学中用的传感器多为电子传感器,它对许多外科手术是不适用的,尤其是在高微波(辐射)频率、超声波场或激光辐射的过高热治疗中,由于电子传感器中的金属导体很容易受电流、电压等电磁场的干扰而引起传感头或肿瘤周围的热效应,这样会导致错误读数。为测定高频辐射或微波场的安全性,需用超声波传感器检测一系列医疗(包括超声手术、过高热治疗、碎结石手术等)中所用的超声诊断仪器的性能。近年来,使用高频电流、微波辐射和激光进行热疗以代替外科手术越来越受到医学界的关

注.而且传感器的小尺寸在医学应用中是非常重要的,因为小的尺寸对人体组织的伤害较小,光纤光栅传感器是目前为止能够做到的最小的传感器.光纤光栅传感器能够通过最小限度的侵害方式测量人体组织内部的温度、压力、声波场的精确局部信息.

到目前为止,光纤光栅传感系统已经成功地检测了病变组织的温度和超声波场,在 30°C — 60°C 的范围内,获得了分辨率为 0.1°C 和精确度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 的测量结果,超声场的测量分辨率为 $10^{-3}\text{atm}/\sqrt{\text{Hz}}$,这为研究病变组织提供了有用的信息^[9].

光纤光栅传感器还可用来测量心脏的效率.在这种方法中,医生把嵌有光纤光栅的热稀释导管插入病人心脏的右心房,并注射入一种冷溶液,可测量肺动脉血液的温度,结合脉功率就可知道心脏的血液输出量,这对于心脏监测是非常重要的.新加坡南洋理工大学已经为国家总医院研制了一种光纤光栅压力传感器,帮助医生对病人进行外科校正.

3.6 在化学传感中的应用

光纤光栅传感器可用于化学传感,因为光栅的中心波长随折射率的变化而变化,而光栅间倏失波的相互作用以及环境中的化学物质的浓度变化都会引起折射率的变化,如图4所示.利用写在侧面磨光的D形光纤上的光栅,可实现了一些化学量的测量,最近报道这种光纤光栅已经成功地测量了材料的折射率^[10].

长周期光栅(long period fiber grating, LPFG)与布拉格光纤光栅一样,也是由光纤轴向上产生周期性的折射率调制而形成,其周期一般大于 $100\mu\text{m}$.它的耦合机理是:向前传输的纤芯基模被耦合入几个特定波长的向前传输的包层模,包层模很快损失掉,所以LPFG基本上没有后向反射,在其透射谱中有几个特定波长的吸收峰.LPFG对光纤包层材料折射率的变化比上述的光纤布拉格光栅更为敏感,包层材料折射率的任何变化都会改变传输光谱的特性,使吸收峰发生改变,所以长周期光栅折射率测量系统的分辨率可实现 10^{-7} 的灵敏度.目前已经用长周期光栅测出了许多化学物质的浓度,包括蔗糖、乙醇、己醇、十六烷、 CaCl_2 、 NaCl_2 等,原则上,任何具有吸收峰谱并且其折射率在1.3和1.45之间的化学物质都可用长周期光栅进行探测.

4 展望

除上述应用外,光纤光栅传感器还在其他领域得到了应用,并且在许多方面的性能都比传统的机

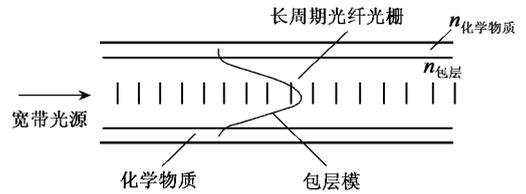


图4 长周期光纤光栅化学传感器示意图

电类传感器更稳定、更可靠、更准确,总之,光纤光栅传感器的应用是一个方兴未艾的领域,有着非常广阔的发展前景.

目前限制光纤光栅传感器应用的最主要障碍是传感信号的解调,正在研究的解调方法很多,但能够实际应用的解调产品并不多,而且价格较高,市场呼唤廉价、高效解调产品的出现.其次,光纤光栅传感器应用中的其他问题也非常重要,如(1)由于光源带宽有限,而应用中一般要求光栅的反射谱不能重叠,因此可复用光栅的数目受到限制;(2)如何在复合材料中同时测量多轴向的应变,以再现被测体的多轴向应变形貌;(3)如何实现大范围、高精度、快速实时测量;(4)如何正确地分辨光栅波长变化是由温度变化引起的还是由应力产生的应变引起的等.有效地解决上述问题对于实现廉价、稳定、高分辨率、大测量范围、多光栅复用的传感系统具有重要意义,这些都有待发展.美国、德国、加拿大、英国等都在致力于新型光纤光栅传感器及解调系统的研究,我国对光纤光栅传感器的研究相对晚一些,但已经有了较大发展.随着实用、廉价的波长解调技术进一步发展和完善,光纤光栅传感器必将在市场上开辟出一片新的天地.

参考文献

- [1] Moery W W, Ball G A, Singh H. Proc SPIE, 1996, 2839: 2
- [2] Pietro F, Giuseppe D N. Optics and Laser in Engineering, 2002, 37: 115
- [3] Vohra S T, Davis M A, Dandridge A et al. In: Proceedings of the 12th International Conference on Optical Fiber Sensors. Williamsburg, USA, 1997
- [4] Wolfgang E, Stephan G, Ines L et al. SPIE, 2001, 4328: 160
- [5] Rao Y J, Henderson P J, Jackson D A et al. Electron. Lett., 1997, 33: 2063
- [6] Sennhauser U, Bronnimann R, Nellen P M. Proc SPIE, 1996, 2839: 64
- [7] Ferdinand P, Ferrsuo O, Lechien J L et al. J Lightwave Technol., 1995, 13: 1303
- [8] Henderson P J, Fisher N E, Jackson D A. In: Proceeding of the 12th International Conference on Optical Fibre Sensors. Williamsburg, USA, 1997. 186
- [9] Tkims C G, Putman M A, Friebele E J. Proc SPIE, 1995, 2444: 257
- [10] Meltz G, Hewlett S T, Love J D, Proc. SPIE, 1996, 2836: 342