

光纤光栅传感器及其应用

鲍吉龙 章献民 陈抗生 周文
(浙江大学信电系 杭州 310027)

摘要:回顾了光纤光栅传感器领域的发展和最新研究动态,概述了光纤光栅传感器的实际应用,尤其是民用工程建设上的应用。

关键词:光纤光栅 传感器 灵巧结构 灵巧建筑

Progresses and applications of fiber grating sensor

Bao Jilong ,Zhang Xianmin ,Chen Kangsheng ,Zhou Wen

(Department of Information Science and Electronic Eng. Zhejiang University , Hangzhou 310027)

Abstract : The recent research progress of optical fiber sensor was reviewed in this paper. Based on the wide application requirements ,the researches of optical fiber sensors mainly focus on four fields (1) transverse strain optical fiber sensor (2)high sensitivity and high resolution fiber sensor (3)low cast and high sensitive detection technology (4)the most active filed is practical application technology of fiber sensors including package technique ,temperature compesation technique and sensors network technology.

Key words : fiber grating sensor smart structure smart building

引 言

光纤 Bragg 光栅是一种沿光纤长度方向折射率的周期扰动形成的元件。光纤光栅的制造源于光纤的光敏特性^[1]。自从 1987 年 ,Meltz G 等人实现了光纤 Bragg 光栅的 UV 光侧面写入技术^[2]以后 ,世界各地的许多研究机构对光纤光栅产生了极大的兴趣。

光纤光栅的应用主要集中在通信领域和传感器领域。光纤光栅传感器技术的发展和实用化是极其缓慢的 ,主要受通信领域应用需求的推动 ,其主要原因是 ,虽然光纤光栅传感器具有其它许多传感器无法比拟的优点 ,例如 ,抗电磁干扰、尺寸小(标准裸光纤为 $125\mu\text{m}$)、重量轻、耐高温好(工作温度上限可达 $400^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$)、复用能力强、传输距离远(传感器到解调端可达几公里)、耐腐蚀、高灵敏度、被动器件、易形变等等 ,但是光纤光栅的制造成本和可靠性一直制约着它的大规模应用。随着通信技术的迅速发展 ,对于光纤 Bragg 光栅的需求激剧增加 ,同时 ,光纤光栅的制造技术也日趋成熟和可靠 ,这些因素促进了光纤光栅的成批量生产的出现 ,也使光纤光栅传感器的制作成本大幅下降 ,可靠性得到提高 ,光纤光栅开始走向实用化。

光纤光栅传感器的应用前景是十分广阔的 ,早在 1988 年 ,就成功地在航空、航天领域中用于有效的无损检测技术^[3] ,同时 ,光纤光栅传感器也可应用于化学、工业、电力、水电、船舶、煤矿等领域。最近 ,应用的焦点集中到了民用工程领域 ,目的在于开发可在混凝土组件和结构中 ,例如建筑物、桥梁、水坝、容器、高速公路、机场跑道等 ,测定其结构的完整性和内部应变状态的可能技术 ,从而建立灵巧结构。

1 光纤光栅应变、温度传感原理

光纤 Bragg 光栅传感器的基本原理是 :当光栅周围的温度、应变、应力或其它待测物理量发生变化时 ,将导致光栅周期或芯芯折射率的变化 ,从而产生光栅 Bragg 信号的波长位移 ,通过监测 Bragg 波长位移情况 ,即可获得待测物理量的变化情况。

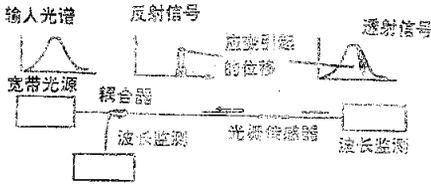


图 1 光纤光栅传感器的基本原理图

光纤光栅传感器的基本工作原理如图 1 所示。光栅的 Bragg 波长 λ_B 由下式决定 :

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中 , Λ 为光栅间隔或周期 , n 为芯模有效折射率。当宽光谱光源照射光纤时 ,由于光栅的作用 ,在 Bragg 波长处的一个窄带光谱部分将被反射回来。反射信号的带宽与几个参数有关 ,特别与光栅长度有关 ,在多参数传感器应用中 ,典型的光栅反射带宽是 0.05 ~ 0.3nm。

由于应变、温度变化对光栅产生的扰动将导致器件 Bragg 波长的位移 ,Bragg 波长随应变和温度的位移为 :

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \{ [1 - (n^2/2) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]]\epsilon + [\alpha + (dn/dt)/n] \Delta T \} \quad (2)$$

式中 , ϵ 是外加应变 , P_{ij} 是光弹性张量的普克尔压电系数 , ν 是泊松比 , α 是光纤材料的热膨胀系数 , ΔT 是温度变化量。因此 ,通过波长位移测量即可获得应变和温度的变化数据。

2 光纤光栅传感器及系统

2.1 基本光栅传感器

基本的光栅传感器如图 1 所示 ,其工作原理如上所述。询问传感器的最成功技术之一是使用可调谐带通滤波器 ,最普遍使用的是 F-P 滤波器 ,也可使用声光滤波器 ,FBG 滤波器。实际应用中使用的光纤光栅传感器均由此变化而来。一些光栅传感器返回的信息直接被编码成波长 (它是一个绝对参数) ,输出不受光的强度、光纤连接和耦合损耗、光源功率等因素的影响 ,这是光栅传感器的最重要优点之一。利用光栅传感器的波长编码特性 ,可实现光栅传感器的波分复用。如果把不同的光谱部分与特定的传感器所在空间位置相联系 ,则使应变、温度或其它物理量的准静态分布传感成为可能。

图 2 是一个可寻址 60 个光栅传感器的系统^[5]。在这一系统中 ,由 PC 控制驱动单模光纤开关 ,用 F-P 可调谐滤波器及 PC 机探测 5 个独立的各有 12 个 FBG 传感器的系统应变。这些传感器串用 1.3 μ m ELED 光源 (~150 μ W 功率)通过一个 3dB 耦合器和光开关照明 ,对每一个传感器的应变探测周期为 2.5s。系统实现的最小分辨率为 $\pm 1\mu\epsilon$,30min 测量周期内漂移小于 $\pm 3\mu\epsilon$ 。很显然 ,若使用多口开关 ,利用这一系统可监测更多的传感器。

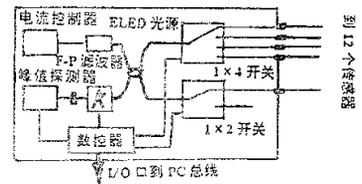


图 2 60 通道 FBG 传感器系统

结合时分复用和波分复用技术 ,准分布式传感器的数量可望进一步增加。

2.2 啁啾光栅传感器及系统

前面所介绍的光栅传感器系统 ,光栅几何结构是均匀的 ,对于单参数的定点测量很有效 ,

但是,在需要同时测量应变和温度或者测量应变或温度沿光栅长度的分布时,就显得力不从心。一个替代的方法是采用啁啾光纤光栅传感器。

人们对于啁啾光栅的兴趣最初集中在高比特远程通信系统中它的色散补偿能力,最近证明,用于色散补偿的光纤光栅稍作修改即可用于应变和温度传感器的新领域。啁啾光栅是通过改变沿光栅长度的光栅周期、平均折射率或同时改变两者来实现。Byron 等人首先通过在光栅区圆锥化光纤制备成功了啁啾光栅^[6],啁啾光栅传感器大致可分为圆锥光栅传感器、反射仪啁啾光栅传感器和内光栅传感器。

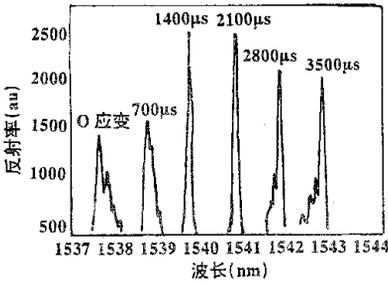


图3 圆锥度从 115 ~ 105 μm 的啁啾光栅反射谱

原理上,人们能够使用这种器件同时测量应变和温度^[7]。

内光栅传感器是一个相对较新的、潜在的有用器件。该器件利用了沿光栅长度分布的非均匀物理量产生的反射光谱的变化,通过对反射光谱作详细分析,可获得被测物理量沿光栅长度的连续分布。长度从 5mm 到 10cm 变化的光栅传感器已有报道,空间分辨率低达 0.4mm。

2.3 长周期光栅传感器

长周期光纤光栅(LPG)也是由光纤折射率的周期调制决定的。典型的 LPG 有数百微米的周期,长度大约为 1~3cm,折射率调制深度 $\geq 10^{-4}$ 。LPG 在 1 个特殊的波长上把纤芯的光耦合进包层: $n\lambda_i = |n_{01} - n_{clad}^{(i)}| \Lambda$ (3) 式中, n_{01} 是芯模的有效折射率, $n_{clad}^{(i)}$ 是第 i 个轴向对称包层模的有效折射率。光在包层中将由于包层/空气界面的损耗而迅速衰减,留下一串损耗带或导模中的共振。

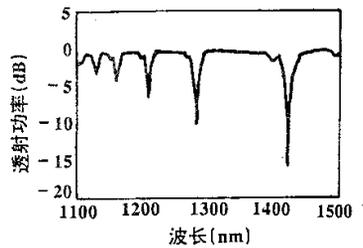


图4 一个 LPG 的传输光谱

一个独立的长周期光栅可能在一个很宽的波长范围上有许多的共振,如图 4 所示。

LPG 为光纤传感器开辟了一个新天地。LPG 共振的中心波长主要取决于芯和包层的折射率差,因此,由应变、温度或外部折射率变化而产生的任何变化都能在共振中产生大的波长位移。LPG 在给定波长上的共振带的响应通常有不同的幅度。这些特性使 LPG 适用于多参数传感器。

图 5 显示了 1 个混合 FBG/LPG 传感器系统^[8],传感器包含 3 个光栅,1 个 LPG,共振定位在 1306nm 的波长 λ_{LPG} 上,两个 FBG,中心波长为 $\lambda_{b1} = 1293\text{nm}$, $\lambda_{b2} = 1321\text{nm}$ 。在这一系统中,观察到的 LPG 波长随温度的位移 7 倍于 FBG,而应变响应大约是 FBG 的 50%。通过对反射波长 λ_{b1} , λ_{b2} 及 λ_{LPG}

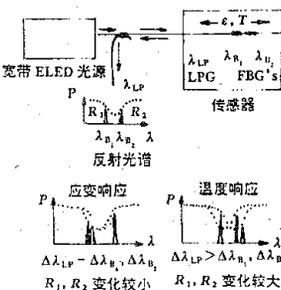


图5 FBG/LPG 混合传感系统及其光谱特性
万方数据

位移及相对位置的预先校准,便可同时测定外加应变和温度变化。

2.4 Bragg 光栅激光传感器

光纤 Bragg 光栅主要用于应变、温度和高分辨率的动态应变监控。光纤 Bragg 光栅激光传感器的基本形式为利用两个 Bragg 波长匹配的光栅建立光纤内腔或者一个光栅与一个宽带反射器组合构成内腔,在两个光栅或光栅与反射器之间的区域使用掺杂光纤(例如掺铒),以便允许光泵浦提供腔增益和光激励。当被构建为一个传感元件时,激光腔和光栅经受的环境条件的变化能够通过监测输出特性的变化,例如输出波长变化而探测到。对于在光栅自身上的温度和应变变化,激光器输出波长的位移和监测与普通光栅传感器相同。像普通 FBG 传感器一样,光栅内在的波长寻址能力也使分布式激光传感器可实现^{9]}。

图 6 是已经实现的两个光纤激光传感器的例子。在图 6a 中,由波长匹配的两个光栅建立的短光腔光纤激光器被远距离泵浦。长度短达约 3cm 的光栅激光器,其光谱响应与普通 FBG 相同,但输出光的带宽比普通 FBG 传感器更窄。图 6b 显示了一个串接了许多 FBG 反射器在复合腔结构中的系统^{9]}。在这个系统中,每一个激光器由部分宽带反射器和 FBG 元件之一构成,能够同时激励。每一个激光器预设在不同的工作波长,其输出用波长探测系统同步分析。

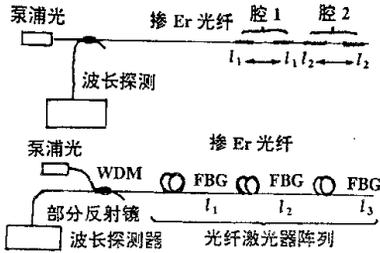


图 6 光纤光栅激光传感系统
a—短腔 FBG 激光器
b—复合腔 FBG 激光器

FBG 激光传感器极有前途的应用之一是作为小型的高灵敏度传感器,已有文献报道这种类型激光器的输出线宽小于 50kHz,这就可以探测到非常弱的激光腔动态应变扰动,对弱动态应变产生非常高的灵敏度。

2.5 多轴温度和应变光栅传感器及系统

前面所介绍的几种光栅传感器,监测的应变基本上都是沿着光栅长度方向,即轴向应变监测。但是,在许多应用场合,往往需要垂直于光栅长度方向的应变感测。

Schulz W L 等人开发了一个基于保偏光纤的双波长光栅的多轴应变和温度传感器^[10]。这种传

感器可以测量 3 个坐标轴方向上的应变和温度,若双重光栅的 Bragg 波长分别为 1300nm 和 1550nm,当中心位于 1300nm 和 1550nm 的两个宽带光源输入到多轴传感器时,将产生 4 个反射光谱峰,其中两个峰与 1300nm 的两个极化轴有关,另外两个峰与 1550nm 有关,这 4 个峰给出了 4 个独立信息部分,即轴向应变、温度、两个相互正交的轴向的应变。轴向应变影响光谱峰对的位移,如图 7 所示,例如,以

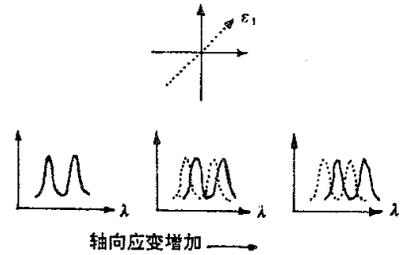


图 7 多轴传感器在轴向应变变化时的光谱响应

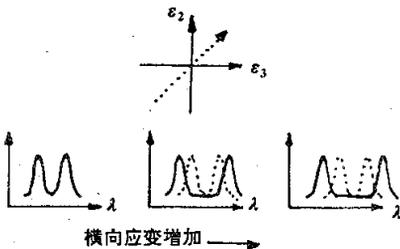


图 8 横向应力变化时多轴传感器的光谱响应

1300nm 写入的光栅经受 1000 $\mu\epsilon$ 的应变时,将产生 1nm 的光谱峰位移,而横向应变影响峰值

对峰间隔的变化,如图8所示。图9是实现多轴应变、温度传感的系统。

3 光纤光栅传感器的应用

3.1 复合材料

光纤光栅传感器的首选应用之一是嵌入到环氧树脂-光纤复合材料中。这里的传感器首先用作复合材料制造期间的固化监测,此后形成材料的光纤神经而作为应变传感器。嵌入传感器可被用于监测结构的健康状况,或者利用反馈操作机构控制应力、振动状态或结构形状,从而形成“灵巧结构”。

这方面的研究工作已进行了5年,在航天飞机的叶轮片、翼梁、船体、复合结构管道样品的实验室测试中证明是成功的。并成功地用于McDonnell Douglass DC-X轨道卫星。

3.2 民用结构

光纤光栅传感器的复用阵列可广泛地用于民用结构中,包括桥梁、水坝、管线、隧道、矿场、核存储容器、天然气压力灌、建筑物、道路等。传感器可外加于结构表面或嵌入混凝土结构中。

在民用建筑领域,嵌入式传感器的应用可分为三个方面,即(1)结构监测和损坏检测(2)实验应力分析(3)系统和服务设施的管理和控制。

首先,光纤光栅传感器被嵌入混凝土结构组件,诸如梁架、圆柱、弧形平板和其它形状组件中,以便使混凝土中的应力、应变、弯曲、固化、裂缝和滑塌等得到实时监测,同时可测量结构整体的位移、倾斜和弯曲。

在实验应力分析领域,光纤可制成灵敏的、多用途的传感器,用于在实验研究中测量结构成员的力学性能,利用这些信息,可确定更精确的设计因素,使结构设计更安全,建设费用更经济。这对于形状复杂,难于获得分析解的结构和组件特别有用。例如利用光纤传感器网嵌入机场跑道,检测飞机着陆和起飞期间跑道道面的应力。用这种形式获得二维应力分布图,这对道面的重新设计和维护都是十分有用的。

应用的第三方面主要考虑建筑物服务设施,如供暖、空调、电分布和消耗、保安、火警等,利用光纤传感器监测适当参量的工作状态,可使他们工作在更有效和更经济的状态下,以便于构成“灵巧建筑”。

3.3 正在出现的其它应用

如果光纤光栅传感器及其辅助设备的成本能降到电传感器的水平,则新的应用领域将不断出现。尽管传感器元件很贵,光纤光栅传感器的复用能力将减小每个测量点的成本。

在电力工业和电厂应用中,光纤光栅传感器是最适合的。因为光纤传感器是一种介质,它们抗电磁干扰,能够在电传感器无法使用的场合,如变压器、发电机、马达等设备中发挥作用。也可作为测量供电线弯曲及电线塔、电极负载等的传感网。

在其它领域,光纤光栅传感器还可在气体管道、自来水管道及化学工业中发挥重要作用。

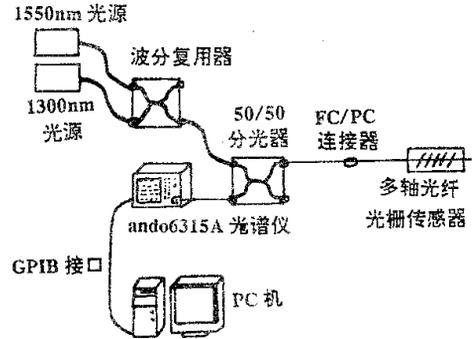


图9 多轴应变、温度传感器的解调装置

4 结 论

在光纤光栅传感器领域,最近的发展趋势表明,比较热门的研究方向大致可分为3个方面。首先是对传感器本身的研究,能进行横向应变感测的传感器是一个重要内容,此外,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也是研究的热点。其次,是对光栅反射信号或透射信号分析和测试系统的研究,目标是开发低成本、小型化、可靠且灵敏的探测技术。最后,也是目前最热门的研究方向,是光栅传感器的实际应用研究,包括封装技术、温度补偿技术、传感器网络技术。

参 考 文 献

- 1 Hill K O ,Fujii Y ,Johnson D C *et al.* A P L ,1978 ;32 :647 ~ 649
- 2 Meltz G ,Morey W W ,Glenn W H. Opt Lett ,1989 ;14 :823 ~ 825
- 3 Udd E. Overview of Fiber Optic Applications to Smart Structures. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Plenum Press , 1998
- 4 Morey W W ,Meltz G ,Glenn W H. Proc SPIE Fiber Optic & Laser Sensors VII ,1989 ;1169 :98
- 5 Davis M A ,Bellemore D G ,Putnam M A *et al.* Electron Lett ,1996 ;32 :1393
- 6 Byron K C ,Sngden K ,Brichenv T *et al.* Electron Lett ,1993 ;29 :1659
- 7 Putnam M A ,Williams G M ,Friebele E J. Electron Lett ,1995 ;31 :309
- 8 Patrick H J ,Williams G M ,Kersey A D *et al.* IEEE Photon Technol Lett ,1996 ;8 :1223 ~ 1225
- 9 Alavie A T. IEEE Photon Technol Lett ,1993 ;5 :1112
- 10 Schulz W L ,Udd E ,Seim J M *et al.* SPIE ,1998 ;3325 :212

*

*

*

作者简介 鲍吉龙,男,1965年2月出生。副教授,在读博士生。主要从事光纤通信及光纤传感技术研究。

万方数据

收稿日期:1999-02-01

收到修改稿日期:1999-06-29