双长周期光栅调制的光纤光栅光谱分析及其在智能结构监测中的应用

芦吉云,梁大开,张晓丽^{*},朱 珠

南京航空航天大学,航空科技智能材料与结构重点实验室,江苏南京 210016

摘 要 提出一种双长周期光栅(LPFG)调制光纤Bragg 光栅(FBG)传感器光谱的方法。双LPFG是由两个 中心波长一致的LPFG构成,FBG反射光谱位于双LPFG透射光谱的线性范围内。在对FBG及双LPFG光 谱分析的基础上,利用双LPFG的带阻滤波特性,获得FBG反射光经双LPFG调制后的出射光谱并进行分 析。将FBG粘贴于钢梁表面,当钢梁产生弯曲应变时,FBG光谱的中心波长发生偏移,经双LPFG调制的 FBG光谱的峰值随之变化,引起双LPFG出射光强的变化。采用光电探测器监测经双LPFG调制后FBG的 输出光强,得滤波后光强与FBG中心波长变化成线性关系,可探测的材料(钢梁)最小应变为1.05μ。将该 方案应用于光纤智能结构冲击监测中,采用摆锤冲击法对四边固支碳纤维板(CFP)试件进行冲击,利用 FBG测量板结构的冲击响应信号,系统采集到的动态信号时域波形及频谱与电涡流位移计的测量结果吻合 得很好,实验结果表明采用该调制、解调方案测量结构的冲击响应是可行的。研究结果为FBG在光纤智能 结构动态监测领域提供了实验参考。

关键词 光纤 Bragg 光栅传感器;长周期光纤光栅;冲击监测;应变 中图分类号:O433.4 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)12-3429-05

引 言

2

光纤光栅传感器(fiber bragg grating, FBG) 全兼容于光 纤^[1],体积小易于埋入智能结构与其他光纤器件融合构成光 纤智能结构^[2]。FBG对温度、应变敏感,是性能优良的传感 元件,通过对 FBG光谱及中心波长的分析,可获得智能结构 内部或周围环境参量的变化^[3],实现智能结构的健康监测。 目前,可对 FBG的光谱及谐振波长进行监测的仪器主要有 光谱仪、光纤光栅解调仪等,解调频率较低,难以实现光纤 智能结构的动态监测;而高速光纤光栅解调仪价格昂贵,且 可解调 FBG的数目有限,限制了光纤光栅在智能结构领域 中的应用^[46]。

为解决这一问题,人们相继提出了多种传感调制、解调 方案,如光纤光栅匹配滤波方案、干涉解调法和可调谐法布 里珀罗腔法、非平衡马赫曾德尔干涉仪解调法等^[7-10]。这些 方案各有优缺点,如光纤光栅匹配滤波法结构简单但精度不 高;干涉解调法仅局限于测量动态应变,不适于对绝对应变 的测量;高精度的可调谐法布里珀罗腔价格较高,滤波损耗 大;非平衡马赫曾德尔干涉仪具有响应速度快、分辨率高的 优点,但它极易受环境干扰,因此只适用于检测动态应 变^[6,11,12]。文中提出一种双长周期光栅(long period fiber grating,LPFG)调制 FBG光谱的方法,LPFG具有制作成本 低、无背向反射、结构紧凑等优点,因此该方法具有广泛的 应用价值。

本文利用了 LPFG 的带阻滤波这一特性^[13],获得 FBG 反射光经过 LPFG调制后的透射光谱并对透射光谱进行分 析。双 LPFG是由两个中心波长相同的 LPFG构成,利用双 LPFG光谱中的线性段^[14],要求光纤 Bragg 光栅反射光谱恰 好在这一线性范围内,通过探测经双 LPFG滤波后光强的变 化,来反推 FBG中心波长的变化。将该方法应用于光纤智能 结构动态冲击响应监测中进行验证,实验结果表明该解调方 法可对低速冲击信号进行监测,具有成本低、测试重现性 好、分辨率高等优点,研究结果为今后采用 FBG监测智能结 构冲击响应信号提供了一种新方法。

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

Agileng 83437A 型宽带光源(美国 Agileng), 波长范围

收稿日期: 2008-10-10,修订日期: 2009-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(60477031)和国家自然科学基金重点项目(60535020)资助

作者简介: 芦吉云, 女, 1980 年生, 南京航空航天大学航空科技智能材料与结构重点实验室博士研究生 e-mail:lujiyun @nuaa.edu.cn *通讯联系人 e-mail: zlxi_nuaa @nuaa.edu.cn

为 870~1 670 nm; AQ6317C 光谱分析仪(日本横河); HP 8153A 光波万用表(美国 Agileng)可将波长范围为 400~ 1 700 nm 的光信号转化为电压信号;传感 FBG与LPFG,耦 合器;电涡流传感器,示波器;碳纤维板等。

1.2 FBG与LPFG光谱分析

光谱测量示意图如图 1 所示, 文中仅考虑宽带光源输出 1 525~1 535 nm 范围内的光谱, 该波段光经过 Y型耦合器 入射至中心波长不同的 FBG, 超过 90%的光被原路反射经 耦合器后 50%的光返回至光源, 其余 50%经过双 LPFG滤 波后进入光谱分析仪或光波万用表进行分析。

由光谱仪测量的 LPFG 与 FBG 光谱见图 2 所示,设中 心波长 1 530.360 nm 的 LPFG 为 LPFG1,中心波长为 1 530.040 nm 的 LPFG 为 LPFG2。双 LPFG 是由中心波长 分别为 1 530.360 及 1 530.040 nm 的 LPFG 构成,由于 LPFG制作工艺的局限,无法获得两个中心波长完全一致的 LPFG,使得双 LPFG在 1 530 nm 波长附近存在光谱噪声, 故仅考虑波长在 1 525~1 529 nm 和 1 531~1 535 nm 范围 内的光谱。由 LPFG光谱曲线可以看出在 1 526~1 529 nm 和 1 531~1 534 nm 波长范围内光功率与波长可近似认为成 线性关系,其中 LPFGI 透射谱在该段波长范围内斜率最小; 双 LPFG的光谱斜率最大。实验中采用的 FBG反射光谱的 中心波长分别为 1 527.050 和 1 527.843 nm。由图 2 可见 FBG反射光谱与 LPFG2 及双 LPFG的透射谱曲线相交,故 只有 LPFG2 与双 LPFG可作为边缘滤波器对 FBG进行调 制。







在中心波长为 1 527.050 nm 的 FBG波长变化 200 nm

同时中心波长为 1 527.843 nm 的 FBG波长偏移 500 nm 的 情况下,经LPFG2 及双LPFG调制的 FBG的出射谱变化情 况见图 3 和图 4 所示。随着 FBG中心波长的增加,谐振波长 对应的光功率逐渐减小,通过图 4 与图 3 测量结果的对比可 得 FBG在相同中心波长漂移情况下,经双LPFG调制后的 光强变化量较大。



Fig. 3 Spectrum change of FBG modulated by LPFG2

1: Befor loding; 2: After loding



Fig. 4 Spectrum change of FBG modulated by double LPFG 1: Befor loding; 2: After loding

2 模 型

通过实验的方法给出经 LPFG 调制后 FBG出射光强与 FBG中心波长之间的关系,并对 LPFG与双 LPFG两种调制 方法进行评价。将中心波长为 1 527.843 nm 的 FBG粘贴于 弯曲试验架台钢梁上表面,在线性应力-应变范围内可得, 钢梁的应力与应变关系为^[15]

$$m = 0.338 6 \times 10^{-6} P$$
 (1)

采用 NAF 型数字测力仪测量弯曲载荷 P,用上述监测系统中的光谱仪测量光栅的中心波长,光波万用表测量经 LPFG 及双 LPFG 调制后 FBG 反射光的光功率,实验模型见 图 5 所示。通过弯曲试验架向试件均匀加载,试件产生弯曲, 进而发生形变,因此粘贴在试件表面的 FBG 的中心波长也 发生变化。当载荷 P由 0N 增至 2000N 过程中,利用光谱仪 实时测量 FB G 中心波长的变化,中心波长每偏移 70 pm,记 录下对应的出射光的光功率,实验结果如图 6 所示。

由图 6 中的拟合曲线可知, 经 LPFG2 调制后的光功率









与 FBG中心波长几乎成线性,线性拟合度为 0.997 9,关系 为

$$p_1 = -4.3271 + 6580 \tag{2}$$

当采用双 LPFG滤波法调制 FBG时,由光波万用表探测的光功率与 FBG中心波长成线性,拟合度为 0.998 3,关 系如下

$$p2 = -8.0324 + 12234 \tag{3}$$

实验中光波万用表可探测的最小光功率变化量为 0. 01 dB,根据(2)和(3)式可得对应的波长偏移量分别 2. 3 和 1. 25 pm,采用 LPFG2 及双 LPFG 两种滤波法所对应的弯曲载荷 增量分别为 $P_1 = 57 N$ 和 $P_2 = 3 N$,由(1)式计算得应变为 1 = 1. 93 µ 和 2 = 1. 05 µ 。因此,采用双 LPFG 调制法在线 性度以及波长分辩率方面均优于单根 LPFG,因此,在以下 的实验中选用双 LPFG 做为滤波器。

3 实验与结果分析

将波长为1527.050 nm的FBG粘贴于四边固支的碳纤 维板(CFP)试件表面,其中试件尺寸为600 mm×600 mm× 2.16 mm,材料为T300/QY8911,钢质固支架的边框宽度为 15 mm。采用摆锤冲击法对试件进行冲击,利用FBG测量板 结构的冲击响应信号。当CFP受到冲击后,在冲击载荷作用 下FBG的反射波长发生变化,经双LPFG调制后,FBG中 心波长的变化转换为光功率的实时变化,经光波万用表的模 拟输出端转化为电压信号,通过放大、滤波电路进行解调, 由数据采集卡 NIDAQCard·6024E将信号输入至计算机显 示。为进一步验证该解调方法的可靠性,同时采用AEC73-D 电涡流传感器对冲击信号进行探测,并与FBG监测的信号 进行对比,实验示意图如图7所示。



Fig 7 Experimental setup for impact mornitoring using FBG and eddy current sensor

设示波器采样频率为 2 kHz, 冲击摆长为 900 mm, 摆 锤质量为 5.03 g, 直径为 20 mm, 角度为 60°, FBG、铝箔粘 贴位置分别为(90, 280 mm)、(90, 310 mm)。当冲击点位于 (185, 380 mm)时, 分别利用 FBG、电涡流传感器监测 CFP 的冲击响应信号,并对信号进行频谱分析,结果见图 8 所示。 图 8(a)和(b)分别为采用 FBG、电涡流传感器监测的冲击响 应信号,由图 8(a)与(b)对比可知,由 FBG解调系统测量的 信号与电涡流传感系统测量信号的谐振频率相同均为 53 和 100 Hz,且对应的幅值基本相同。分别对两种传感器监测的 时域信号进行分析,在 0~0.02 ms 时间段内振动波形略有 不同,由于 FBG直接粘贴于 CFP 表面,而电涡流传感探头 与 CFP 有一定距离,在冲击摆与 CFP 接触的初始时间段内 电涡流传感探头测得的信号有延迟;在 0.02~0.6 ms 时间 段内振动波形基本相同。根据上述分析可得采用双 LPFG 调 制的 FBG光信号经解调系统后的输出信号与电涡流传感器 监测到的冲击响应信号基本吻合。



Fig. 8 Impulse response signals

(a) : FBG sensor; (b) : Eddy current sensor

4 结 论

3432

利用LPFG及双LPFG透射光谱中的线性段对FBG反 射光谱进行调制,当FBG的中心波长发生偏移后,由 LPFG2、双LPFG调制的FBG的出射光谱会发生相应变化, 因此,出射光强会发生改变。通过实验确定两种滤波方式出 射光强与FBG中心波长偏移之间的关系,得出采用双LPFG 解调FBG在线性度及波长分辩率方面均优于单根LPFG的 结论,因此,在 CFP 结构冲击监测实验中采用了双 L PFG 解 调法。采用该解调系统对四边固支的 CFP 结构的冲击进行 监测,由 FBG测量的冲击响应信号与电涡流传感器的监测 结果进行对比,发现信号波形基本一致,测得 CFP 结构的一 阶、二阶固有频率为 53 和 100 Hz 与采用正弦扫频法测量 CFP 结构的一、二阶固有频率相同,证明采用该调制、解调 方案测量板结构的冲击响应是可行的。

参考文献

- [1] Ran Zengling, Rao Yunjiang. Sensors and Actuators, 2007, 15(2): 415.
- [2] Zhao Yong, Liao Yanbiao. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 1(41): 1.
- [3] Davis M A, Kersey A D. Electron. Lett., 1995, 31(10): 822.
- [4] Lee Jung-Ryul, Tsuda Hiroshi, Toyama Nobuyuki. NDT & E International, 2007, 40(1): 85.
- [5] Tsuda Hiroshi, Lee Jung Ryul. Composites Science and Technology, 2007, 67(7): 1238.
- [6] Tsuda H, Koo J H. Journal of Materials Science Letters, 2003, 22(13): 935.
- [7] Ohn M M, Huang S Y, Measures R M. Electron. Lett., 1997, 33(14): 1242.
- [8] Brady G, Kalli K, Webb DJ. Opt. Lett., 1995, 20(11): 1340.
- [9] Kersey A D, Ribeiro A B L, Morey W W. Opt. Lett., 1993, 18(10): 972.
- [10] Takedaa S, Minakuchic S, Okabec Y, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36: 903.
- [11] BhatiaV, Vengsarkar A M. Opt. Lett., 1996, 21(9): 692.
- [12] GU Zheng xian, XU Yamping, DENG Chuamlu(顾铮先, 徐艳平, 邓传鲁). Acta Optica Sinica(光学学报), 2008, 28(2): 220.
- [13] Chambers A R, Mowlem M C, Dokos L. Composites Science and Technology, 2007, 67(6): 1235.
- [14] LIU Bo, TONG Zheng-rong, CHEN Shao-hua, et al (刘 波, 童峥嵘, 陈少华, 等). Acta Optica Sinica (光学学报), 2004, 24(2): 199.
- [15] ZHANG Shuang yin, LIU Ji-qing, YU Xiao-xia, et al (张双寅, 刘济庆, 于晓霞, 等). Mechanical Properties of Composite Structures(复合材料结构的力学性能). Beijing: Beijing Institute of Technology Press(北京:北京理工大学出版社), 1992. 124.

Spectral Analysis of Fiber Bragg Grating Modulated by Double Long Period Grating and Its Application in Smart Structure Monitoring

LU Ji-yun, LIANG Da-kai, ZHANG Xiao-li*, ZHU Zhu

The Aeronautical Science Key Laboratory for Smart Material and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract Spectrum of fiber bragg grating (FBG) sensor modulated by double long period grating (LPFG) is proposed in the paper. Double LPFG consists of two LPFGS whose center wavelengths are the same and reflection spectrum of FBG sensor is located in linear range of double LPFG transmission spectrum. Based on spectral analysis of FBG and double LPFG, reflection spectrum of FBG modulated by double LPFG is obtained and studied by use of band-hider filter characteristics for double LPFG. An FBG sensor is attached on the surface of thin steel beam, which is strained by bending, and the center wavelength of FBG sensor will shift. The spectral peak of FBG sensor modulated by double LPFG. Experiment demonstrates that the relation of filtering light intensity from double LPFG. Experiment demonstrates that the relation of filtering light intensity from double LPFG. Experiment is 1.05 µ. This solution is used in impact monitoring of optical fibre smart structure, and FBG sensor is applied for impulse response signal monitoring induced by low-velocity impact, when impact pendulum is loaded to carbon fiber-reinforced plastics (CFP). The acquired impact response signal and fast Fourier transform of the signal detected by FBG sensor agree with the measurement results of eddy current displacement meter attached to the FBG sensor. From the results, the present method using FBG sensor is found to be effective for monitoring the impact. The research provides a practical reference in dynamic monitoring of optical fiber smart structure field.

Keywords Fiber bragg grating sensor; Long-period fiber grating; Impact monitoring; Strain

(Received Nov. 10, 2008; accepted Jan. 20, 2009)

* Corresponding author