

## FBG 传感器和电阻应变仪的振动监测特性

龚华平, 杨 效, 屠于梦, 宋海峰, 董新永

(中国计量学院 光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘 要:** 将光纤布拉格光栅(FBG)传感器和电阻应变片固定在等强度梁上,研究了两种传感器的振动监测性能,总结比较了其优缺点。通过固定在等强度梁末端的电机来产生振动,测试了 FBG 传感器和电阻应变片监测到随时间变化的振动信号,并分析了振动信号经傅里叶变换(FFT)的频谱图。实验结果表明,FBG 传感器和电阻应变片监测到振动信号的时域图基本一致,但是 FBG 传感器监测到振动信号经 FFT 变换的频谱图出现较明显的二次谐波和三次谐波,电阻应变仪监测到的频谱图出现的谐波较弱。在实验中还观察到,在有电磁干扰情况下,电阻应变仪监测不到振动信号,而 FBG 传感器正常工作,不受电磁干扰。

**关键词:** 光纤传感器; 光纤布拉格光栅; 电阻应变片; 等强度梁; 振动监测

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0810-04

## Vibration detection characteristics of FBG sensor and resistance strain gauge

Gong Huaping, Yang Xiao, Tu Yumeng, Song Haifeng, Dong Xinyong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Fiber Bragg grating (FBG) sensor and resistance strain gauge sensor were fixed on the uniform strength beam. Vibration detection characteristics of two kinds of sensors were investigated. The advantage and disadvantage of two kinds of sensors were compared. Vibration was caused by a motor which was fixed at the end of uniform strength beam. The vibration signal in time domain was measured, which was monitored by FBG sensor and resistance strain gauge sensor simultaneously, and the frequency spectrum was analyzed from the vibration curve through FFT. The results show that the vibration graph monitored by FBG sensor is consistent with the vibration graph monitored by resistance strain gauge sensor. But the frequency spectrum monitored by FBG sensor has second harmonic and third harmonic obviously. The frequency spectrum monitored by resistance strain gauge sensor has weak subharmonic. The experiment investigation also indicates that the vibration signal can not be monitored by resistance strain gauge under the electromagnetic interference conditions, but can be monitored by FBG sensor.

**Key words:** optical fiber sensor; fiber Bragg grating; resistance strain gauge; uniform strength beam; vibration detection

收稿日期: 2012-07-10; 修订日期: 2012-08-12

基金项目: 浙江省科技厅重大科技专项(2009C11049)

作者简介: 龚华平(1977-),男,副教授,硕士生导师,博士,主要从事光纤传感方面的研究。Email: gonghp@163.com

## 0 引言

光纤光栅传感器作为新型的光无源传感器件,因具有抗电磁干扰、高灵敏度、可分布式测量以及传感准确性与光源的光强无关等特性而具有广泛的应用前景。自从 1989 年 Meltz 成功实现光纤光栅紫外光侧面写入技术以来,利用布拉格光纤光栅(FBG)的布拉格光波长具有随外应力和温度改变而产生漂移的特点来对应力和温度进行传感监测。随着光纤光栅制备工艺的日趋成熟,人们对其在光传感方面的研究变得更为广泛和深入。光纤光栅应用于普通微振动传感就是一个典型的研究领域。由于其自身独有的特点,光纤光栅在振动传感方面的研究正在逐渐受到人们的青睐<sup>[1-6]</sup>。电阻应变片在监测振动方面,因具有质量轻、频率响应范围宽、价格低廉、且易粘贴等优点,得到较为广泛的应用<sup>[7]</sup>。到目前为止,利用 FBG 传感器和电阻应变仪同时对振动监测进行比较的实验研究还没有文献报道。文中将 FBG 传感器和电阻应变片一起固定在等强度悬臂梁上,利用两种传感器同时监测等强度梁产生的振动。测试分析了两种传感器监测的振动信号的时域图以及经 FFT 变换后的频谱图。研究了两种传感器的振动监测性能,总结比较其优缺点。为在不同环境要求下选择适合的传感器进行振动监测提供参考。

## 1 实验原理

根据光纤耦合模理论(CMT)<sup>[8]</sup>,当宽谱光在光纤光栅中传输时,将产生模式耦合,满足布拉格条件的光被反射:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: $\Lambda$  为光栅周期; $n_{\text{eff}}$  为有效折射率。应力的变化会导致  $n_{\text{eff}}$  和  $\Lambda$  发生改变,从而导致反射波长的变化,其关系式为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-P)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: $P$  为光纤的有效弹光系数; $\Delta\varepsilon$  为应变变化量。对于目前广泛应用的纯熔融石英光纤, $P=0.22$ 。在实验室条件下,忽略温度的影响,当外界应力发生变化时,引起光纤光栅 Bragg 波长的偏移量为<sup>[9]</sup>:

$$\Delta\lambda_B = 0.78\lambda_B\Delta\varepsilon \quad (3)$$

FBG 传感器的波长漂移  $\Delta\lambda_B$  与等强度梁自由端偏离平衡位置的距离(即振动幅度)成正比。当等强度梁有最大位移时,FBG 布拉格波长受到最大调制。当 FBG 上受到一个振动的微扰时,那么它会产生周期性的应变。于是这个 FBG 的中心反射波长将产生周期性的相对与原 Bragg 波长的左右漂移,检测这个周期性漂移的信号就可以获取振动的信息。由此可知,外加的振动信号,被转变成应变信号施加在 FBG 上,在一个振动周期内,FBG 会不停地被拉伸、压缩、拉伸再压缩,从而使相对应的 Bragg 波长左右移动<sup>[10-11]</sup>。等强度梁的应变由下式决定<sup>[12]</sup>:

$$\varepsilon = \frac{hX}{l^2} \quad (4)$$

式中: $h$  为等强度梁的厚度; $l$  为梁的长度; $X$  为等强度梁的挠度<sup>[8]</sup>。根据公式(2)、(4)可得:

$$\Delta\lambda_B = \frac{(1-P)h}{l^2} X\lambda_B \quad (5)$$

FBG 传感器的中心波长在外界应力的作用下产生波长漂移,利用高速波长解调仪解调出波长变化,即可确定应变的变化情况,从而获得振动信息。

## 2 实验装置

文中实验采用美国 MICRON OPTICS 公司生产的 sm130 光纤光栅解调仪,精度为 2 pm,最高采样频率为 1 000 Hz。光纤传感器采用宁波杉工有限公司生产的金属封装 FBG 传感器,无外加应变时中心波长为 1 547.779 nm。采用秦皇岛兰德科技有限公司生产的 BZ2204-2A 动态应变采集仪,电阻应变片为 120  $\Omega$  直列式表面粘贴。将 FBG 传感器和电阻应变片固定在等强度梁上,通过电机带动等强度梁振动,测试两种传感器的振动监测性能。等强度梁的厚度  $h$  为 4 mm,长度  $l$  为 560 mm。实验装置如图 1

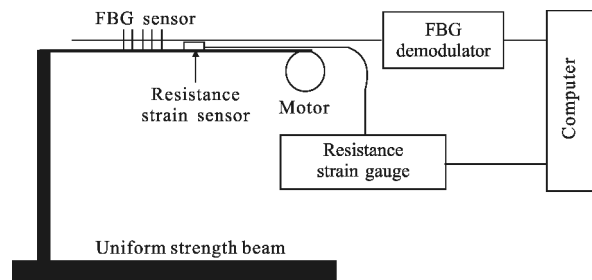


图 1 实验设置

Fig.1 Experimental setup

所示。在等强度梁末端的电机工作产生振动,使等强度梁产生周期性应变。FBG 解调仪内集成的宽带光源发出的信号光传输到 FBG 传感器,由振动导致 FBG 传感器发生应变,FBG 反射信号光进入光纤光栅解调仪,然后将获得的波长信息传输到电脑进行显示。同时,电阻应变片也将振动信号传输到动态应变采集仪并显示在电脑上。

### 3 实验结果与分析

动态测试结果如图 2 所示。图 2(a)显示 FBG 反射波长随时间变化的振动信号的时域图。FBG 监测到的平均最大波长漂移量为  $60 \mu\text{m}$ ,根据 FBG 的灵敏度为  $1.5 \text{ pm}/\mu\text{m}$ (静态测试的标定结果),可知 FBG 监测到的振动产生的最大应变为  $40 \mu\text{m}$ ,即 FBG 传感器监测到振动信号的振幅峰值为  $40 \mu\text{m}$ 。图 2(b)显示的是电阻应变仪监测到应变随时间变化的振动信号的时域图。电阻应变片监测到的最大峰值应变为  $36.2 \mu\text{m}$ 。同时,分别对 FBG 和电阻应变仪监测的时域应变数据峰值求标准差,得到的结果分别为 34.292 0 和 35.401 3。根据图 2(a)、(b)以及 FBG 和电阻应变仪监测的时域应变数据峰值的标准差比较可知,FBG 传感器和电阻应变仪监测到振动信号的时域波形相关系数为 0.91。

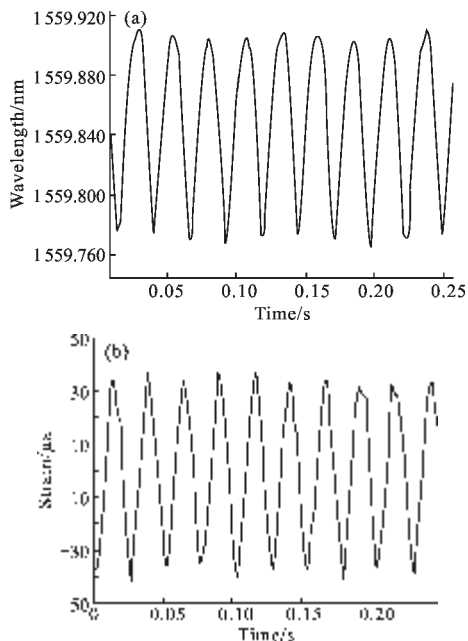


图 2 FBG 和电阻应变片测量的振动信号的时域图  
Fig.2 Time domain graph of the vibration signal monitored by FBG and by resistance strain gauge

图 3 显示 FBG 传感器监测到的振动信号经 FFT 变换后的频谱图。由图 3 可知,FBG 传感器监测到振动信号的频谱图显示一次谐波频率为  $38.7 \text{ Hz}$ ,并出现较明显的二次谐波和三次谐波。其频率分别为  $77.4 \text{ Hz}$  和  $116.1 \text{ Hz}$ ,幅度分别比一次谐波低  $7 \text{ dB}$  和  $12 \text{ dB}$ 。图 4 显示电阻应变仪监测到振动信号经 FFT 变换后的频谱图。由图 4 可知,电阻应变仪监测

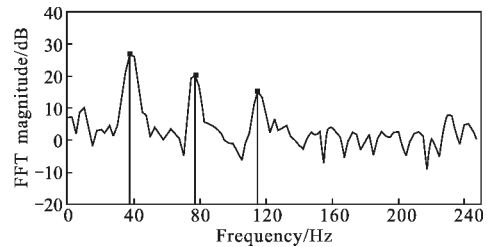


图 3 FBG 传感器监测到振动信号经 FFT 变换后的频谱图  
Fig.3 Spectrum of vibration signal monitored by FBG after FFT transformation

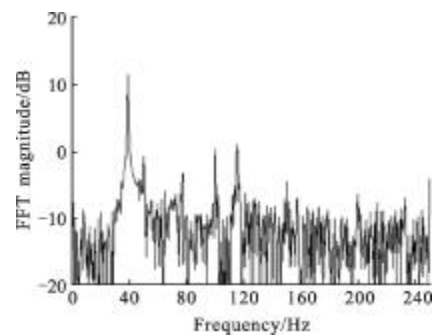


图 4 电阻应变片监测到振动信号经 FFT 变换后的频谱图  
Fig.4 Spectrum of the vibration signal monitored by the resistance strain gauge after FFT transformation

到振动信号的频谱图显示频率为  $39.1 \text{ Hz}$ ,且没有出现高次谐波。FBG 传感器和电阻应变仪监测到振动的基频分别为  $38.7$  和  $39.1$ ,频率测量的误差仅为  $1\%$ 。电机自身的振动带动了等强度梁发生振动,实验使用的等强度梁的长度较长,有  $560 \text{ mm}$ ,而电机的功率较小,导致电机产生的振动不能完全带动整个等强度梁梁臂各个部位产生同频率的振动。FBG 传感器本身长度为  $100 \text{ mm}$ ,而电阻应变片长度只有  $10 \text{ mm}$ ,相对于等强度梁,电阻应变片为点测量,而 FBG 为面测量。因此 FBG 检测到的振动信号有很强的高次谐波,而电阻应变片的谐波干扰比较弱。实验中还观察到,当外界环境存在电磁干扰时,比如电阻应变仪靠近电脑、电磁吸合式振动台等有电磁干扰

的仪器,则电阻应变片监测不到数据,不能正常工作。而FBG传感器不受电磁干扰影响,仍能正常工作。

#### 4 结 论

将FBG传感器和电阻应变片一起固定在等强度梁上,研究了两种传感器的振动监测的性能。测试了FBG传感器和电阻应变片监测到随时间变化的振动信号,并分析了振动信号经FFT变换的频谱图。实验结果表明,FBG传感器监测到振动信号的幅度为 $40\ \mu\epsilon$ ,电阻应变片监测到的振动信号的幅度为 $36.2\ \mu\epsilon$ 。两者监测到振动信号的时域图基本一致。两种传感器监测到的振动信号经FFT变换后的频谱图有一些差别。电阻应变片监测到的频谱图显示频率为 $39.1\ \text{Hz}$ ,且没有出现高次谐波。而FBG传感器监测到的频谱图显示一次谐波频率为 $38.7\ \text{Hz}$ ,且出现较明显的二次谐波和三次谐波。但是当外界环境存在电磁干扰时,电阻应变仪监测不到振动信号,不能正常工作,而FBG传感器仍能正常工作,不受电磁干扰的影响。FBG传感器抗电磁干扰能力比电阻应变片强。

#### 参考文献:

- [1] Kersey Alan D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology [J]. *Optic Fiber Technology*, 1996, 2: 291-317.
- [2] Tarun Kumar Gangopadhyay. Prospects for fibre Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers in fibre-optic vibration sensing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 113(1): 20-38.
- [3] Zhou Wenjun, Dong Xinyong, Gong Huaping, et al. Fiber Bragg grating-based temperature-insensitive vibration sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (5): 939 - 942. (in Chinese)  
周文俊, 董新永, 龚华平, 等. 光纤布拉格光栅温度不敏感振动传感器[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 939-942.
- [4] Chen Zhemin, Chen Jun, Wu Xiaodong, et al. Real-time measurement of harmonic frequency with fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32 (9): 1230 - 1234. (in Chinese)  
陈哲敏, 陈军, 吴晓冬, 等. 基于布拉格光纤光栅谐振频率的实时测量[J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1230-1234.
- [5] Li Lan, Dong Xinyong, Zhao Chunliu, et al. Simply-supported beam-based fiber Bragg grating vibration sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2497-2500. (in Chinese)  
李岚, 董新永, 赵春柳, 等. 简支梁结构的光纤光栅振动传感器[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2497-2500.
- [6] Liu Haitao, Chen Jianping, HSU Luke. Study on fiber grating petroleum pressure sensor and its reliability[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1243-1246. (in Chinese)  
刘海涛, 陈建平, HSU Luke. 光纤光栅原油压力传感器实验及其可靠性研究[J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1243-1246.
- [7] Yan Hong, Zhao Meiyun. Application of resistance strain gauge in the mechanical vibration measurement [J]. *Sensor World*, 2008, 14(8): 28-30. (in Chinese)  
晏红, 赵美云. 电阻应变计在机械振动测量中的应用[J]. *传感器世界*, 2008, 14(8): 28-30.
- [8] Maaskant R, Alavie T, Measures MR, et al. Fibre optic Bragg grating sensors for bridge monitoring [J]. *Cement and Concrete Composite*, 1997, 19: 21-33.
- [9] Ning Chenxiao, Zhang Xushe. Experimental research on FBG monitoring vibration parameters [J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2006, 25(4): 41-45. (in Chinese)  
宁辰校, 张戌社. FBG振动参数监测试验研究 [J]. *传感器与微系统*, 2006, 25(4): 41-45.
- [10] Wu Fei, Li Lixin, Li Zhiqian. Theoretical analysis of fiber bragg grating characterization by applying transverse force[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(4): 472-476. (in Chinese)  
吴飞, 李立新, 李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受力特性的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, 33(4): 472-476.
- [11] Liu Chunyu, Yu Youlong, Zhang Ximing et al. Passive fiber Bragg grating sensor for the mechanical vibration monitoring based on cantilever beam tuning technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1067-1069. (in Chinese)  
柳春郁, 余有龙, 张昕明, 等. 基于悬臂梁调谐技术的光纤光栅无源振动监测[J]. *光子学报*, 2003, 32(9): 1067-1069.
- [12] Zhu Qiongchang, Wang Shili, Zhang Qinghe, et al. Optimization on the highly accuracy equal strength beam for calibration [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2000, 28(2): 7-11. (in Chinese)  
朱琼昌, 王时礼, 张清河, 等. 高精度等强度标定梁的优化[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2000, 28(2): 7-11.