

一种新型光纤布喇格光栅振动传感器研究*

孙汝蛟¹ 孙利民¹ 孙 智¹ 淡丹辉¹ 刘小会²

(1 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

(2 上海紫珊光电技术有限公司, 上海 201103)

摘 要 为适合土木工程实际所需, 提出了一种新型的、可放大振动信号、工作频带宽的光纤光栅低频加速度传感器. 进行了参量优化设计, 并在不同阻尼情况下进行了灵敏度、线性度、横向抗干扰和幅频特性等性能试验. 试验结果表明: 所设计的光纤光栅振动传感器方案是可行的; 其线性度好, 抗横向干扰能力强, 通过合理调整阻尼, 灵敏度可达到 90 pm/ms^{-2} , 上限工作频率可取在系统无阻尼固有频率的 80% 左右.

关键词 加速度传感器; 光纤光栅传感器; 低频加速度传感器

中图分类号 TN253; U44

文献标识码 A

文章编号 1004-4213(2007)01-0063-5

0 引言

光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 振动传感器的研究在国内开始于 20 世纪 90 年代初. 1996 年, 清华大学在 FBG 特性研究中就对 FBG 加速度传感器提出了设计思路, 此后国内很多高校和科研单位, 从不同的角度对 FBG 加速度传感器的设计提出具体的探讨和研究. 文献[1]采用等强度悬臂梁作为弹性元件提出的光纤光栅加速度传感器的灵敏度约为 20 pm/ms^{-2} ; T. A. Berkoff^[2]、M. D. Todd^[3]、Akira Mita^[4]也先后提出了自己的设计思路. 但是这些设计因为灵敏度低并不能很好的满足土木工程低频(一般零点几赫兹到几赫兹^[5])振动测试的需要, 主要集中体现在: 结构不合理, 如采用悬臂梁结构, 因光纤光栅栅区直接粘贴在悬臂梁表面, 易产生啁啾或多峰现象致使测试不准, 且振动信号偏小; 无人工附加阻尼, 造成工作范围窄, 上限工作频率约为无阻尼固有频率的 20%, 且工作时自由振动衰减缓慢, 影响传感器工作性能. 本文提出了一种可放大振动信号、工作频带宽的光纤布喇格光栅低频加速度传感器, 以适合土木工程实际所需.

1 FBG 加速度传感器设计原理

设计结构原理如图 1. 设计中光纤光栅两端直接固定在外壳上, 避免了栅区粘贴带来的光纤光栅反射波啁啾或多峰现象; 合理调整人工阻尼可以使传感器有较宽的频响范围, 上限工作频率约为无阻尼固有频率的 80%, 且幅值和相位失真均较小. 由于人工阻尼的存在, 延长了使用器件的寿命.

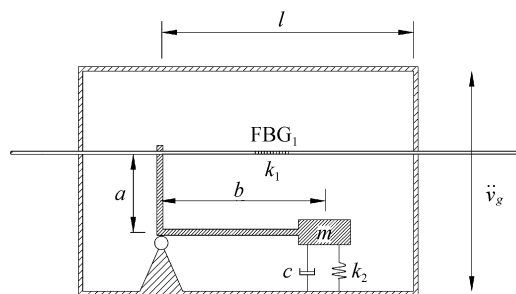


图 1 光纤布喇格光栅加速度传感器原理
Fig. 1 The mechanism of the new FBG accelerometer

该系统的运动都可看作弹簧(k)-阻尼(c)-质量块(m)的单自由度系统, 系统的动力学方程^[6]为

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + ky = -m \ddot{v}_g \quad (1)$$

式中 y 为质量块和外壳的相对位移, v_g 为被测物相对地面振动的位移, $v_g = \ddot{v}_{g0} \sin \omega t$, k 为系统刚度, $k = (a/b)^2 k_1 + k_2$.

该结构动力稳态响应的振幅是

$$\rho = \frac{m \ddot{v}_{g0} D}{k} \quad (2)$$

式中 D 为动力放大系数, 表达为

$$D = [(1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2]^{-1/2}$$

在实际工作中, 为了保证加速度振动传感器能有较宽的频响范围且幅值和相位失真均较小, 应要求阻尼比 ξ 选择在 0.6~0.7 之间, 这样加速度传感器的上限工作频率就可取在系统无阻尼固有频率的 80% 左右, 例如

$$\xi = \frac{c}{c_c} = 0.6, 0 < \beta = \frac{\omega}{\omega_0} < 0.8 \text{ 时}, D \approx 1.$$

这样, 当加速度传感器在其工作频带内工作时, 光纤光栅的应变为

$$\epsilon = \frac{a/b}{l} \rho = \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{k} \cdot \ddot{v}_{g0} \quad (3)$$

由光纤光栅应变传感原理可知

* 国家自然科学基金(重点)(50538020, 5042012133)、教育部重点项目和上海市科委基金(03dz11003, 04dz12041)资助
Tel: 021-65986590 Email: rujiao.sun@163.com
收稿日期: 2006-05-22

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

代入上式整理得

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-P) \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{k} \cdot \ddot{v}_{g0} = K \ddot{v}_{g0} \quad (4)$$

式中 $\Delta\lambda_B$ 为波长变化, P 为光纤有效弹光系数, 传感器的灵敏度系数为

$$K = \lambda_B(1-P) \cdot \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{k} = \lambda_B(1-P) \cdot \frac{a/b}{l} \cdot \frac{m}{(a/b)^2 k_1 + k_2} \quad (5)$$

可见光纤光栅的波长变化与待测结构物的加速度成线性关系, 这样通过测量波长变化就可实现加速度的测量.

在特定最优灵敏度系数时传感器的量程为

$$\ddot{v}_{g0\max} = \frac{\Delta\lambda_{B\max}}{K_{\text{opt}}} \quad (6)$$

$$\ddot{v}_{g0\min} = \frac{\Delta\lambda_{B\min}}{K_{\text{opt}}} \quad (7)$$

式中 $\Delta\lambda_{B\max}$ 为光纤光栅的最大波长变化值, $\Delta\lambda_{B\min}$ 为解调设备最小探测波长变化值.

2 参量优化

光纤光栅的材料一旦确定, 则光纤的抗拉刚度也为常量, 即 $k_1 = \frac{E_g A}{l}$, E_g 、 A 为光纤光栅材料的弹性模量和截面积. 对其他参量进行优化, 以到使传感器灵敏度达到最优.

设 $s = k_2/k_1$, $t = a/b$, 则式(5)为

$$K = \lambda_B(1-P) \frac{m}{E_g A} \cdot \frac{t}{s+t^2} \quad (8)$$

由式(8)对 t 求导得

$$\frac{dK}{dt} = \lambda_B(1-P) \frac{s-t^2}{(s+t^2)^2} \cdot \frac{m}{E_g A} \quad (9)$$

所以, $(s-t^2)m=0$ 时, 灵敏度系数 K 取得最佳值; 因 $m \neq 0$, 因此 $s=t^2$ 时

$$K_{\text{opt}} = \lambda_B(1-P) \frac{m}{2E_g A t} \quad (10)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(a/b)^2 k_1 + k_2}{m}} = t \sqrt{\frac{2E_g A}{ml}} \quad (11)$$

此时, 满足灵敏度系数最优的其他各参量取值为

$$t_{\text{opt}} = \omega_0 \sqrt{\frac{m}{2k_1}} = \omega_0 \sqrt{\frac{ml}{2E_g A}} \quad (12)$$

$$a_{\text{opt}} = b t_{\text{opt}} = b \omega_0 \sqrt{\frac{ml}{2E_g A}} \quad (13)$$

$$k_{2\text{opt}} = t_{\text{opt}}^2 k_1 = (m\omega_0^2/2) \quad (14)$$

由以上分析可以得到, 光纤光栅加速度传感器的

结构参量对灵敏度系数和固有频率都有较大的影响, 而且这些影响是互相制约的. 由各自的表达式可得

$$K_{\max} \omega_0 = \lambda_B(1-P) \sqrt{\frac{m}{2E_g A l}} \quad (15)$$

所以在实际参量选择的时候, 要综合考虑灵敏度系数 K_{\max} 和固有频率 ω_0 的要求, 在土木工程领域要保证传感器的工作频带的情况下, 尽量增大灵敏度系数.

光纤光栅应用于微弱振动传感, 不仅要求严格的温度补偿, 还要求它具有高的灵敏度. 本文还推荐采用两个光纤 FBG₁ 和 FBG₂ 的方案^[7] 来实现温度自补偿(图 2).

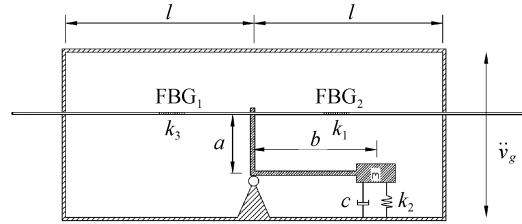


图 2 温度自补偿型光纤布喇格光栅加速度传感器原理
Fig. 2 The mechanism of the temperature-compensated FBG accelerometer

$$K_{\max} = \lambda_B(1-P) \frac{m}{2E_g A t} \quad (16)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(a/b)^2 k_1 + k_2}{m}} = 2t \sqrt{\frac{E_g A}{ml}} \quad (17)$$

$$K_{\max} \cdot \omega_0 = \lambda_B(1-P) \sqrt{\frac{m}{E_g A l}} \quad (18)$$

同单光纤光栅相比, 双光栅加速度传感器不仅实现了温度自补偿, 还将工作频段提高了 1.414 倍, 但是加工难度也相应提高了.

3 新型 FBG 加速度传感器性能试验

根据上节理论分析, 制作了单光纤光栅加速度传感器模型. 为了消除横向应变对测量结果的影响, 质量-弹簧系统应不与传感器外壳接触, 并且采用“L”型板, 端面设计成矩形, 宽度远大于厚度, 这样可以通过提高抗弯刚度减少横向干扰的影响. 在振动质量块处设计了一定程度的过载保护措施, 避免传感器在工作过程中因过大激励超出量程而损坏器件. 通过性能试验调整不同阻尼性能的阻尼液, 使加速度传感器的阻尼尽量接近临界阻尼来抑制系统的自由振动模态, 使传感器有较宽的频响范围且幅值和相位失真均较小. 最终选择如图 3 新型光纤光栅振动传感器, 铍青铜充当弹性材料, 黄铜制备振动质量块 $m=19.5\text{g}$, “L”型板 a 为 1.5mm , b 为 19mm , 光纤长约 15mm , 直径为 0.125mm .

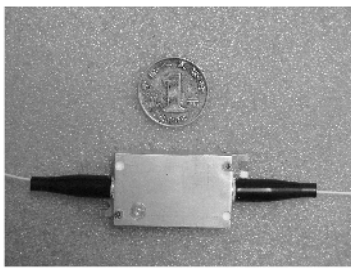


图3 光纤光栅加速度传感器
Fig.3 The prototype FBG accelerometer

性能试验的振动源由美国 MB Dynamics 公司产标定台系统提供. 试验中,由信号发生器产生一定频率的正弦波,经过功放台驱动振动平台产生一定方向上的振动作为激励. 本试验采用刚性连接,所以可以把振动台的振动直接作为传感器的激励.

3.1 灵敏度和线性度试验

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间数量关系的线性程度. 对于加速度传感器而言,线性度是指在规定的加速度范围内加速度传感器的灵敏度随不同加速度的变化^[8-9]. 试验中固定振动台的振动频率为 5 Hz,改变输入加速度值,测得相同频率不同加速度输入时传感器的线性度情况. 采用不同粘度(粘度 5 cp,粘度 20 cp 和粘度 40 cp)的硅油阻尼液注入到传感器系统中,测试不同粘度的阻尼液对灵敏度的影响.

经过最小二乘法拟合得到不同粘度阻尼液时波长幅值与加速度关系曲线如图 4. 5 cp 时的拟合曲线为: $y(\Delta\lambda) = 105.86302x(a)$,相关系数 $R = 0.99963$,线性度为 2.1%; 20 cp 时的拟合曲线为: $y(\Delta\lambda) = 92.54973x(a)$,相关系数 $R = 0.99893$,线性度为 3.4%; 40 cp 时的拟合曲线为: $y(\Delta\lambda) = 24.40202x(a)$,相关系数 $R = 0.99925$,线性度为 2.8%. 由图 4 可知,随着阻尼液粘度的增大,加速度传感器的灵敏度逐渐减小;同时也可以得出,该光纤光栅加速度

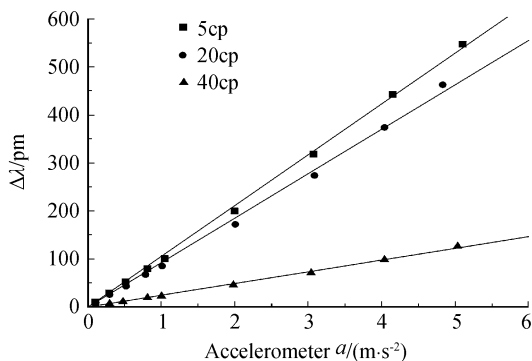


图4 光纤光栅加速度传感器在不同粘度阻尼液时的灵敏度和线性度
Fig.4 The sensitivity and linearity of the prototype FBG accelerometer with different damping liquid

传感器有较好的线性度.

对于单自由度的低频光纤光栅加速度传感器来说,横向干扰特性也是一项重要指标. 本试验在上述光纤光栅加速度传感器的结构中用粘度为 20 cp 硅油作为阻尼液,在测振方向和与测振方向垂直的横轴方向分别加以 $0.5 m/s^2$ 加速度的周期振动,图 5 是其时程曲线,分别显示了测振方向和横轴方向的工作性能. 在给定条件下,测振方向振动时传感器的振幅为 50.81 pm,横轴方向的振幅是 2.75 pm,干扰程度为 5.4%. 干扰原因除了传感器结构设计原因以外,还与解调设备的分辨率和重复性有关,试验所用解调设备分辨率为 1 pm,重复性为 2 pm,所以从测试结果来看,本文提出的加速度传感器结构设计表现出了优异的横向抗干扰能力.

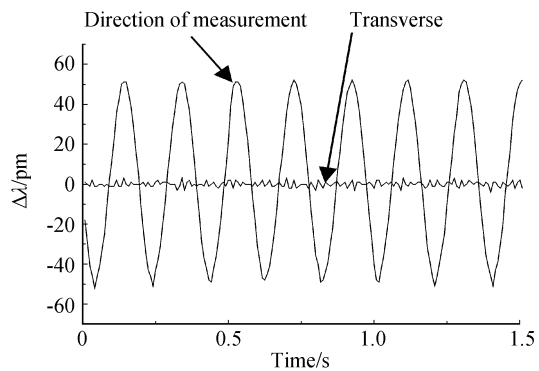


图5 光纤光栅加速度传感器横向抗干扰特性
Fig.5 The transverse anti-jamming ability of the prototype FBG accelerometer

3.2 幅频性能试验

如果采用不外加阻尼措施,那么光纤光栅加速度传感器的阻尼主要由空气阻尼和结构材料的内阻尼构成. 由于这些阻尼力很小,工作时加速度传感器系统本身自由振动长时间很少衰减,叠加到被测信号中去,造成测量不准. 合理调整人工阻尼可以使传感器有较宽的频响范围且幅值和相位失真均较小,并且人工阻尼的存在,能防止其工作在共振区时由于幅值过大引起传感器部件损坏,延长传感器的使用寿命.

由加速度传感器力学模型幅频特性理论分析中可知,随着阻尼比的增加,加速度传感器的共振频率向低频处移动,同时共振频率处的峰值也逐渐减小^[6]. 对于本文提出的加速度传感器设计结构,在不同粘度阻尼液提供的阻尼下试验了其幅频特性,试验中给激励器施加的加速度值为 $0.3 m/s^2$,对传感器进行了扫频测试.

从图 6 可以看出,通过合理调整阻尼,可以改变加速度传感器的共振区特性. 通过对该结构在不同

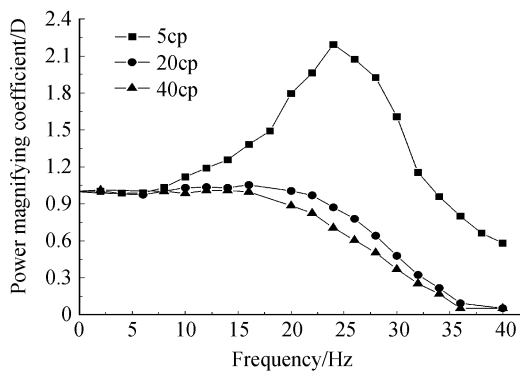


图6 光纤光栅加速度传感器在不同阻尼情况时的幅频特性
Fig. 6 The variation of the prototype FBG accelerometer with damping and frequency

阻尼下的特性分析,本文设计结构可以选用粘度为20 cp的硅油阻尼液作为传感器的阻尼,其灵敏度为 90 pm/ms^{-2} .

3.3 新型FBG加速度传感器对比试验

为了验证所设计的加速度传感器的工作性能,本文做了加速度传感器的对比试验.试验装置如图7,

振动台为 Quanser Consulting Inc. 产 ST2 型振动台,参考传感器为振动台自备伺服式加速度传感器,振动采用正弦激励.图8是在某一激励下光纤布喇格光栅加速度传感器的时域曲线和频域曲线,图9是同一激励下振动台自备传感器的时域曲线和频域曲线.通过比较可知该新型光纤光栅加速度传感器具有优良的测试性能.

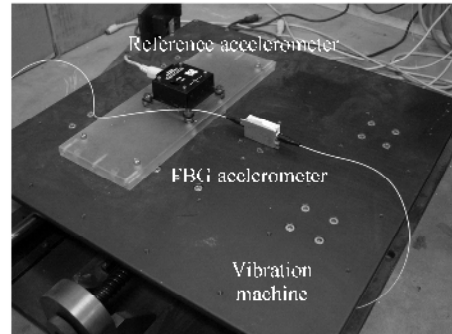


图7 光纤光栅加速度传感器对比试验装置图
Fig. 7 The experimental system on the prototype FBG accelerometer

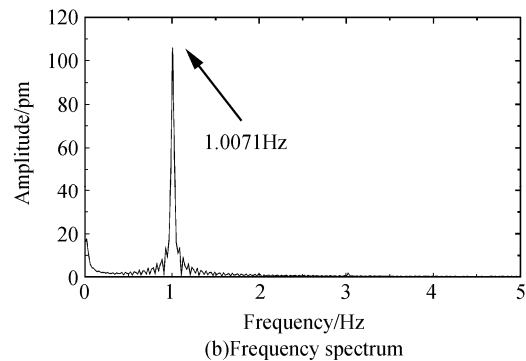
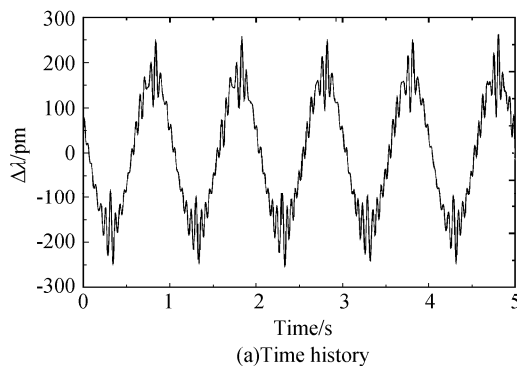


图8 光纤光栅加速度传感器响应时域和频域曲线
Fig. 8 Time history and frequency spectrum from the prototype FBG accelerometer

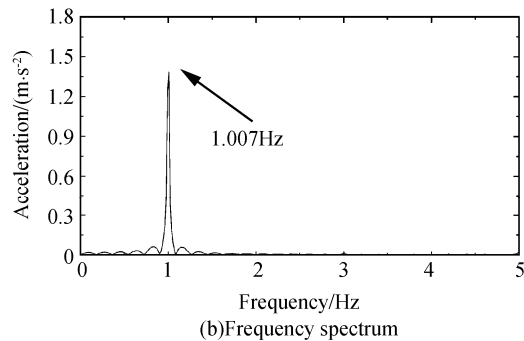
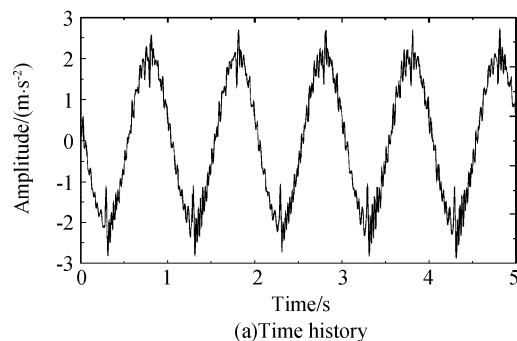


图9 参考传感器响应时域和频域曲线
Fig. 9 Time history and frequency spectrum from the reference

4 结论

本文提出了一种新型的适合土木工程用的低频光纤光栅加速度传感装置,并且进行了优化设计.试验结果表明,所设计的光纤光栅振动传感器方案可行,其线性度好,抗横向干扰能力强,合理调整阻尼,

灵敏度达到 90 pm/ms^{-2} ,上限工作频率可取在系统无阻尼固有频率的80%左右.结合土木工程实际应用还可以进一步调整传感器的制作,从而提高其性能.

致谢:本论文的完成过程中得到上海紫栅光电科技有限公司支持帮助,在此表以衷心感谢!

参考文献

- [1] DAI Feng, HUANG Guo-jun. An acceleration sensor based on fiber bragg gratings[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(1):26~27.
戴锋, 黄国君. 一种布喇格光纤光栅加速度传感器[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(1):26~27.
- [2] BERKOFF T A, KERSEY A D. Experimental demonstrain of a fiber bragg grating accelerometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, **8**(12):1677~1679.
- [3] TODD M D, JOHNSON G A, ALTHOUSE B A, *et al.* Flexural beam-based fiber bragg grating accelerometers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(11):1605~1607.
- [4] AKIRA Mita, ISAMU Yokoi. Fiber bragg grating accelerometer for buildings and civil infrastructures[C]. *SPIE*, 2001, **4330**:479~486.
- [5] YANG Xue-zhi, YAN Pu-qiang, ZHANG Duan, *et al.* Research on DP transducer and its application in measurement of self-vibration characteristics of railway-bridge [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 1997, **17**(6):51~56.
杨学志, 严普强, 张锻, 等. DP 传感器研究及桥梁自振特性测试[J]. *振动、测试与诊断*, 1997, **17**(6):51~56.
- [6] CLOUGH R W, PENZIEN Joseph. Dynamics of Structures [M]. University Avenue Berkeley, California 94704, USA, 1995:45~46.
- [7] DONG Xin-yong, ZHANG Ying, GUAN Bai-ou, *et al.* Experimental research of fiber grating circumflexion sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9):806~809.
董新永, 张颖, 关柏鸥, 等. 光纤光栅曲率传感的实验研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(9):806~809.
- [8] PENG Bao-jin, LIAO Mao, LIAO Yan-biao, *et al.* Study on measuring sensitivity of fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1633~1637.
彭保进, 廖茂, 廖延彪, 等. 光纤水听器灵敏度测试研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1633~1637.
- [9] LI Hui-min, JING zhi-bin. Employment of resonance to test the degree of linearity of vibration transducer[J]. *MINING R&D*, 2004, **24**(3):51~52.
李慧敏, 荆志彬. 用谐振方法测试振动传感器的线性度[J]. *矿业研究与开发*, 2004, **24**(3):51~52.

Design Research of Fiber Bragg Grating Accelerometer

SUN Ru-jiao¹, SUN Li-min¹, SUN Zhi¹, DAN Dan-hui¹, LIU Xiao-hui²

(1 State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji Univ., Shanghai 200092)

(2 Shanghai Synet Optics Technology Corporation, Shanghai 201103)

Received date:2006-05-22

Abstract For the application in civil engineering filed, a novel FBG accelerometer design concept, which can amplify the signal amplitude and broaden the range of working frequency, is presented. An optimal design is conducted. Finally, some performance tests are performed to evaluate the sensitivity, linearity, transverse anti-jamming ability and amplitude-frequency characteristic of the prototype FBG accelerometer with different damping. The result shows that the design concept is feasible and the sensitivity and the upper limit working frequency are respectively up to 90 pm/ms^{-2} and about 80% of no-damping initial frequency.

Key words Accelerometer; FBG sensor; Low-frequency-measurement accelerometer



SUN Ru-jiao was born in Shandong province in 1976. He received the B. S. degree from the Department of Civil Engineering, Shandong Institute of Technology in 1999 and the Master degree from the Highway College, Chang'an University in 2003. Now he is a Ph. D. candidate of the Department of Bridge Engineering, Tongji University. He engages in FBG sensing technology for bridge health monitoring.