

高灵敏抗冲击光纤光栅微振动传感器

张发祥, 吕京生, 姜邵栋, 胡宾鑫, 张晓磊, 孙志慧, 王 昌

(山东省科学院激光研究所 济南研究中心, 山东 济南 250014)

摘 要: 针对高灵敏度的光纤布拉格光栅(FBG)振动传感器的抗冲击可靠性,设计了一种具有有限振结构的双悬臂梁型 FBG 振动传感器,理论分析了结构参数与灵敏度和振动位移的关系,进行了结构优化,确定了限振幅度。制作了限振幅度约为 90 μm 的传感器样品,对传感器的加速度灵敏、频率响应、抗冲击性能进行了测试,结果表明,传感器的加速度灵敏度达到 525 pm/g,谐振频率约为 66 Hz,传感器经过 50 g 反复冲击,频响特性具有良好重复性,表明传感器具有较高的可靠性。

关键词: 光纤传感器; 光纤布拉格光栅; 振动传感器; 高灵敏; 抗冲击

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0822002

High sensitive fiber Bragg grating micro-vibration sensor with shock resistance

Zhang Faxiang, Lv Jingsheng, Jiang Shaodong, Hu Binxin, Zhang Xiaolei, Sun Zhihui, Wang Chang

(Jinan Research Center, Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: For the shock reliability of high-sensitive fiber Bragg grating (FBG) vibration sensor, a dual cantilever FBG vibration sensor with a vibration restricting structures was designed. The relationship between the structural parameters, sensitivity and vibration displacement were analyzed, the structure was optimized and the limit of the vibration amplitude was determined. Sensor sample with a vibration restricting amplitude of about 90 μm was fabricated, and the acceleration sensitivity, frequency response, impact properties of the sensors were tested. The results show that the acceleration sensitivity of the sensor is about 525 pm/g, the resonance frequency is about 66 Hz, and after repeated shocks of about 50g, the frequency response shows good reproducibility, which indicates that the sensor has a high reliability.

Key words: fiber optic sensor; fiber Bragg grating; vibration sensor; high sensitivity; shock resistance

收稿日期: 2015-12-13; 修订日期: 2016-01-15

基金项目: 山东省科技发展计划(2014GGX103005, 2014GSF120017, 2015GSF115006)

作者简介: 张发祥(1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。Email: zhangfx@semi.ac.cn

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)振动传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、易于波分复用、可靠性高等优点,近年来在振动测量领域受到了广泛的关注和研究。低频高灵敏的 FBG 振动传感器在大型工程结构健康监测、周界安防、地震检测等领域有着广泛的应用前景^[1-4],通过增敏设计增加 FBG 振动传感器的灵敏度,提高对低频微弱信号的探测能力,成为近期的研究热点。

基于悬臂梁的 FBG 振动传感器,可以通过梁的机械放大作用,获得极高的灵敏度:王宏亮等^[5]研制了一种基于双等强度悬臂梁式 FBG 振动传感器,在 5~50 Hz 之间的加速度灵敏度约为 208.5 pm/g,赵前程等^[6]设计了一种悬臂梁式 FBG 加速度传感器,固有频率可达到 95Hz,灵敏度达到 300 pm/g, N. Basumallick 等^[7]提出一种悬臂梁式的 FBG 加速度传感器,通过增敏设计,灵敏度达到 450 pm/g,谐振频率高于 10 Hz。此外, J. Zhang 等^[8]提出一种基于弯曲弹性片的 FBG 加速度传感器,灵敏度可达 410.7 pm/g,谐振频率约为 16.7 Hz, K. Li 等^[9]提出一种横向敏感结构的 FBG 加速度传感器,灵敏度可达 1.333 nm/g,谐振频率约为 25 Hz。

尽管通过机械增敏可以大幅提高 FBG 振动传感器的灵敏度,但由于光纤本身非常脆弱,随着灵敏度的提高,传感器在受到碰撞或跌落等大幅度冲击时,极易损坏,提高可靠性对高灵敏度 FBG 振动传感器实用化具有重要意义。文中设计了一种基于双悬臂梁结构的 FBG 低频高灵敏振动传感器,并进一步设计了限振结构,理论分析了结构参数与灵敏度和振动位移的关系,确定了限振幅度,以提高传感器的抗冲击性能,达到野外使用要求。对传感器样本进行了冲击试验,验证了所设计的传感器具有较高的可靠性。

1 基本原理

1.1 FBG 振动传感器基本原理

FBG 振动传感器利用 FBG 的布拉格波长对应变敏感的原理,通过机械结构,将振动加速度量转化

为 FBG 的轴向应变,通过检测相应的波长变化,还原振动信号的信息。FBG 布拉格波长的改变量 $\Delta\lambda$ 与光纤轴向应变 ε_f 的关系为^[10]:

$$\Delta\lambda=(1-p_e)\lambda_B\varepsilon_f \quad (1)$$

式中: λ_B 为布拉格波长; p_e 为光纤的弹光系数。

FBG 的布拉格波长变化,可以通过基于干涉原理的高分辨率波长探测技术进行检测^[11]。FBG 的反射光经过非平衡光纤干涉仪后产生干涉条纹信号,并通过光电探测器进行探测,光强 I 可以表示为:

$$I=I_0(1+k\cos(\Delta\varphi+\varphi_0)) \quad (2)$$

式中: I_0 为探测到的光强; k 为干涉条纹的可见度; $\Delta\varphi$ 为干涉仪两臂相位差变化; φ_0 为初始相位。FBG 布拉格波长的改变量 $\Delta\lambda$ 经臂长差为 d_f 的干涉仪转化为相位差变化:

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi nd}{\lambda_B^2}\Delta\lambda \quad (3)$$

式中: n 为光纤的折射率,通过相位解调技术从干涉条纹中提取相位信息,得到 $\Delta\varphi$,然后利用公式(3)得到 FBG 布拉格波长的改变量 $\Delta\lambda$,实现了高分辨率的波长检测。

1.2 基于双悬臂梁结构的 FBG 低频高灵敏度振动传感器设计

FBG 振动传感器的设计结构如图 1 所示。传感器采用了双悬臂梁结构,由不锈钢线切割而成,组合构成 L 型梁。其中,悬臂梁 1 连接支架和振子,悬臂梁 2 连接振子和 FBG。振子通过悬臂梁 2,将惯性位移转化为对 FBG 的轴向拉伸,导致 FBG 布拉格波长变化。传感器的结构参数与所用符号的对应关系如表 1 所示。

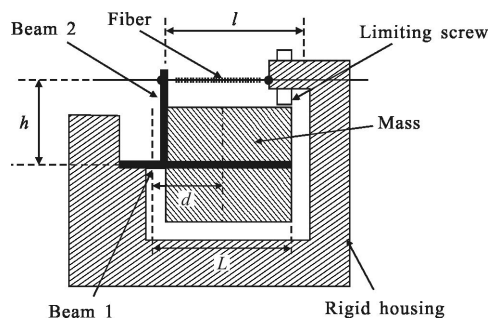


图 1 FBG 振动传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the FBG vibration sensor structure

表 1 传感器结构参数与符号对应关系

Tab.1 Relationship between the structural parameters of sensor and symbols

Symbols	Structural parameters of the sensor
m	Mass
a	Acceleration
d	Distance between the mass and rotation center of the cantilever beam
T	Tension in fiber
h	Relative height between the fiber and cantilever 1
K_1	Rotational stiffness of cantilever 1
K_2	Rotational stiffness of cantilever 2
θ_1	Rotational angle of cantilever 1
θ_2	Rotational angle of the cantilever 2
L	Horizontal distance between the limit screw and cantilever 1

传感器敏感方向加速度为 a 的振动导致传感器结构变化如图 2 所示,由力平衡及几何关系有:

$$mad - Th - K_1\theta_1 = 0 \quad (4)$$

$$Th = K_2\theta_2 \quad (5)$$

$$h(\theta_1 - \theta_2) = \Delta l = \frac{Tl}{A_f E_f} \quad (6)$$

式中: A_f 为光纤的截面积; E_f 为光纤的杨氏模量。求解可得:

$$\theta_1 = \frac{(h^2 A_f E_f + K_2 l) mad}{K_1 h^2 A_f E_f + K_1 K_2 l + K_2 h^2 A_f E_f} \quad (7)$$

$$\Delta l = \frac{K_2 l h m a d}{K_1 h^2 A_f E_f + K_1 K_2 l + K_2 h^2 A_f E_f} \quad (8)$$

由应变的定义,有:

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta l}{l} \quad (9)$$

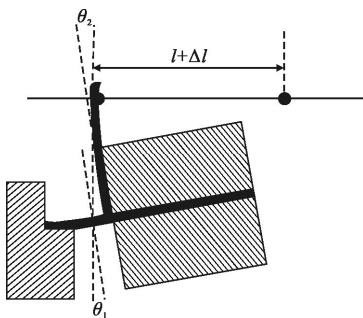


图 2 振动信号下 FBG 振动传感器结构变化示意图

Fig.2 Schematic diagram of the FBG vibration sensor structure changes under vibration

从而由公式(1)和公式(9),得到传感器的加速度灵敏度为:

$$S_a = \frac{\Delta \lambda}{a} = \frac{(1-p_e) h m d \lambda_B}{\frac{K_1}{K_2} h^2 A_f E_f + K_1 l + h^2 A_f E_f} \quad (10)$$

由公式(8)可得单位加速度下振子在限振位置的位移为:

$$D_m = \frac{\theta_1 L}{a} = \frac{\left(\frac{h^2 A_f E_f}{K_2} \right) m d L}{\frac{K_1}{K_2} h^2 A_f E_f + K_1 l + h^2 A_f E_f} \quad (11)$$

文中的传感器采用如下参数: $m=0.045 \text{ kg}$, $d=10 \text{ mm}$, $h=11 \text{ mm}$, $L=16 \text{ mm}$, $p_e=0.22$, $\lambda_B=1550 \text{ nm}$, $A_f=0.0123 \text{ mm}^2$, $E_f=72 \text{ GPa}$, $l=18 \text{ mm}$ 。悬臂梁 1 由厚度为 $t=0.3 \text{ mm}$ 的不锈钢薄片制成,杨氏模量 $E_1=190 \text{ GPa}$,有效宽度为 $b=3 \text{ mm}$,长度为 $q=3 \text{ mm}$,其转动刚度可表示为:

$$K_1 = \frac{E_1 b t^3}{12 q} \quad (12)$$

由公式(10)和公式(11)进行数值模拟,结果如图 3 所示。可见,传感器的灵敏度随悬臂梁 2 转动刚度的提高而增加,并收敛于极大值,振子位移幅度随悬臂梁 2 转动刚度的提高而降低,并收敛于极小值。因此,从传感器灵敏度角度出发,悬臂梁 2 需要保证一定的转动刚度,以保证传感器的灵敏度为极大值。文中采用 $K_2 > 10 \text{ N} \cdot \text{m}$, S_a 约为 500 pm/g , D_m 约为 $3 \text{ } \mu\text{m}$,这就导致了振子相对较小的振动幅度,需要精密的限振结构对振动进行限制,以保证传感器的抗冲击可靠性。在文中的设计中,将光纤光栅的最大波长变化限制在 1.5 nm 以内,由传感器的灵敏度可得限振幅度为 30 m/s^2 ,对应振子位移限制约为 $90 \text{ } \mu\text{m}$ 。

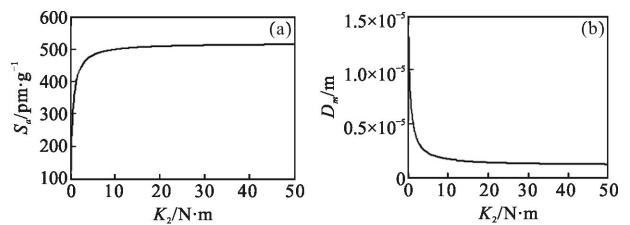


图 3 传感器灵敏度及振动幅度数值模拟

Fig.3 Simulation for sensitivity and vibration displacement of the sensor

2 实验结果

文中制作的传感器样品如图 4 所示,采用

1 530.112 nm 的 FBG，并在传感器封装时施加了约 200 μm 的预拉力，封装后测得 FBG 波长为 1 530.308 nm。采用螺钉对振子进行限振，并在显微镜下调整螺钉顶端与振子的间隙，限振幅度约为 90 μm 。文中所采用的实验系统如图 5 所示，采商用 ASE 光

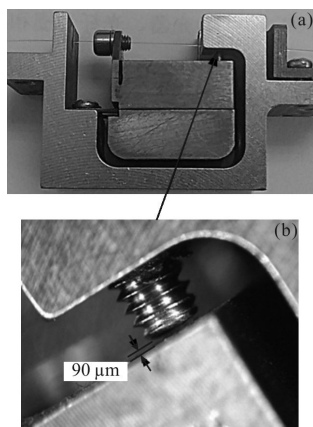


图 4 传感器样品实物图

Fig.4 Prototype of FBG sensor

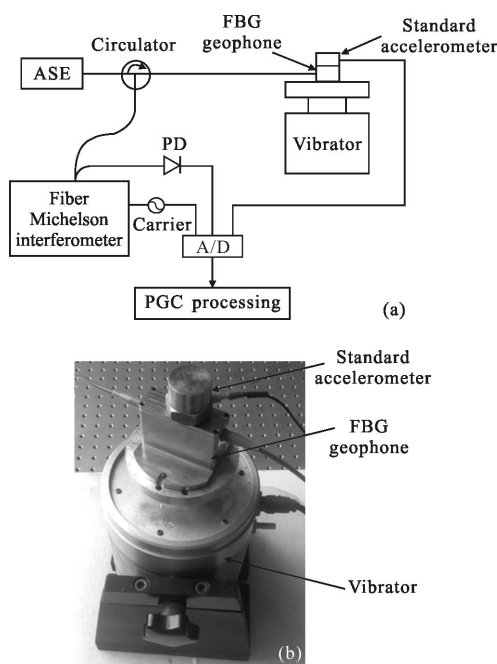


图 5 测试系统的示意图(a)和激振器实物(b)

Fig.5 Schematic diagram of the test system (a) and photograph of the vibrator (b)

源作为 FBG 的光源，采用 1 cm 臂长差光纤迈克尔逊干涉仪，将波长变化转换为相位变化；通过光电探测器对干涉仪的输出信号进行探测，并采用 24 位 A/D 采集转换成数字系统，通过相位产生载波算法^[12](PGC

算法)进行解调，探测相位变化，并还原波长变化。在信号处理中，通过 0.5 Hz 的高通滤波，滤除温度变化等环境因素引起的 FBG 低频波长变化。在激振台上，通过与标准压电加速度计对比的方法，得到了传感器的灵敏度。

在 20 Hz 激励下，传感器加速度灵敏度的线性如图 6 所示，由其拟合结果可知，该传感器的灵敏度为 525 pm/g，在所测试的 0.1~1.2 m/s^2 加速度范围内，线性度为 99.99%，灵敏度具有较高的线性^[1,5,13,14]。

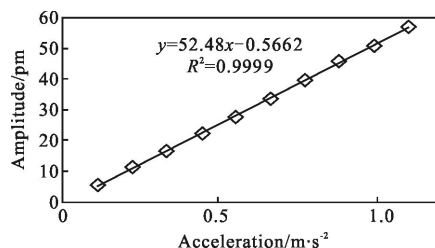


图 6 传感器的加速度灵敏度线性曲线

Fig.6 Linear curve of the acceleration sensitivity of the sensor

为验证样品的抗冲击可靠性，根据 GB/T 24262-2009^[15] 野外仪器和井下仪器冲击试验的要求，对样品进行 1 m 高度沿滑轨自由滑落的冲击试验，并采用压电加速度计监测冲击幅度。对样品进行 10 次冲击，用压电加速度计记录冲击信号，每 2 次冲击后测试一次 FBG 传感器的幅频特性。压电加速度计记录到的冲击信号如图 7 所示，冲击的平均幅度约为 50 g。

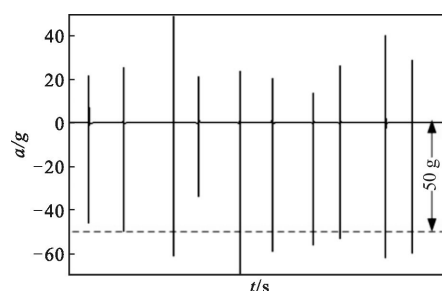


图 7 加速度计的冲击信号

Fig.7 Shock signal of the accelerometer

冲击前后 FBG 的波长变化如图 8 所示，冲击前 FBG 的波长为 1 530.312 nm，冲击后 FBG 波长变为 1 530.293 nm，与冲击前变化 19 pm，远小于预拉力导致的 200 pm 的波长变化，因此可认为冲击并未导致明显的波长变化。冲击过程中传感器的幅频特性测试结果如图 9 所示。可以看出，传感器的谐振频率

约为 66 Hz, ± 1.5 dB 平坦频率范围为 2~40 Hz, 冲击前后, 传感器的幅频特性无明显变化。综合冲击前后波长变化及幅频特性变化, 表明传感器具有较高的抗冲击可靠性, 达到了工程应用的要求。

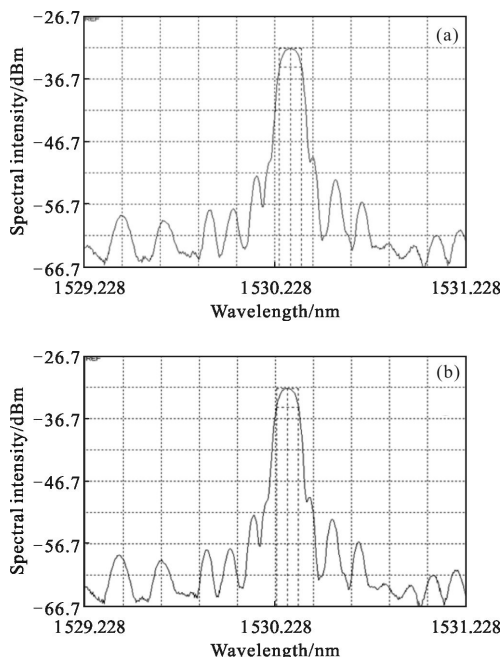


图 8 冲击前(a)后(b)FBG 传感器的光谱图

Fig.8 Spectrum of FBG sensor before (a) and after (b) shock

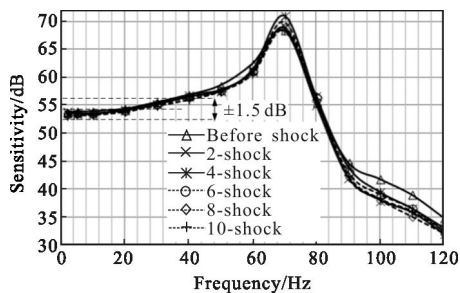


图 9 传感器的幅频响应特性

Fig.9 Amplitude-frequency response of FBG sensor

为评估文中设计的 FBG 微振动传感器的性能, 将传感器样本与地震勘探常用的动圈检波器 DX-10 进行了对比, 将两种传感器一同安装在振动台上, 在同一单频信号的激励下, 比较两种传感器探测信号的信噪比, 如图 10 所示。可见, 对于 10 Hz 的振动信号, 两种传感器的信噪比相当, 对于 2 Hz 的低频信号和 30 Hz 的振动信号, FBG 微振动传感器的探测信噪比高于动圈检波器。这主要是因为动圈检波器在自然频率以下, 灵敏度随频率降低而减小, 而

且动圈检波器属于速度型振动传感器, 自然频率以上, 随着频率升高, 加速度灵敏度也随频率增大而降低。可见, FBG 微振动传感器对于低频和低频信号都具有探测优势, 加之 FBG 传感器具有的抗电磁干扰能力强、易于波分复用、能够远距离传输信号的优势, 必将具有广泛的应用前景。

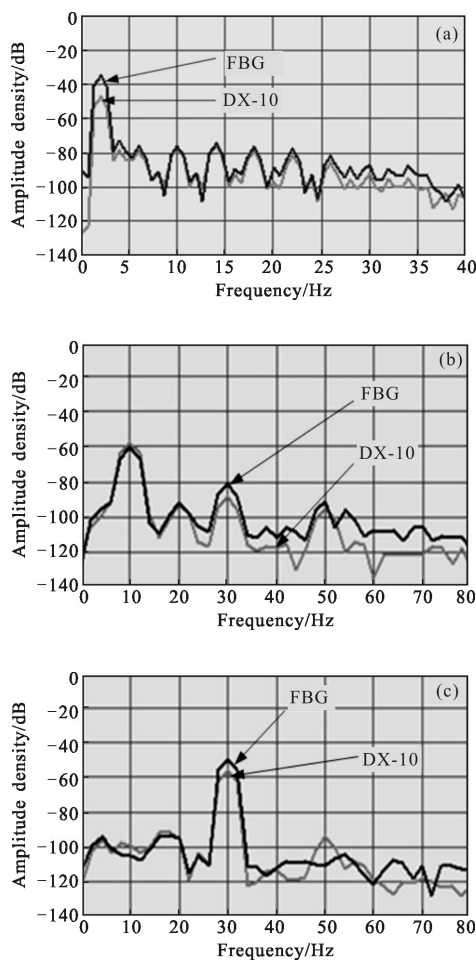


图 10 FBG 微振动传感器与动圈检波器的比较

Fig.10 Comparison between FBG micro-vibration sensor and moving-coil geophone

3 结论

提出了一种基于双悬臂梁结构的高灵敏度 FBG 微振动传感器, 理论分析了传感器的加速度灵敏度与振子的振动位移幅度, 分析了悬臂梁转动刚度的影响, 确定了理论限振幅度为 3 g, 制作了传感器样品, 在显微镜下采用螺钉实现了约为 90 μ m 的机械限振。实验研究了传感器的灵敏度幅频响应特性和抗冲击性能。测试结果表明, 传感器谐振频率约为

66 Hz, ± 1.5 dB 平坦频率范围为 2~40 Hz, 加速度灵敏度达到 525 pm/g, 与理论分析基本吻合; 在幅度约为 50 g 的 10 次反复冲击后, 布拉格波长稳定, 传感器幅频特性无明显改变, 表明达到了抗冲击可靠性的设计目的, 满足了工程应用的要求, 为 FBG 微振动传感器的实用化提供了技术基础。与地震勘探常用的动圈检波器 DX-10 进行了对比, 体现了 FBG 微振动传感器的优势。后续工作将进一步研究 FBG 的冲击应变失效特性, 探索提高 FBG 微振动传感器量程的方案。

参考文献:

- [1] Zeng Yujie, Wang Jun, Yang Huayong, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on L-shaped rigid beam and elastic diaphragm for low-frequency vibration measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (12): 1206005-1-9. (in Chinese)
曾宇杰, 王俊, 杨华勇, 等. 基于 L 形刚性梁与弹性膜片结构的低频光纤光栅加速度传感器 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206005-1-9.
- [2] Gagliardi G, Salza M, Ferraro P, et al. Design and test of a laser-based optical-fiber Bragg-grating accelerometer for seismic applications [J]. *Meas Sci Technol*, 2008, 19: 085306-1-8.
- [3] Weng Yinyan, Qiao Xueguang, Tao guo, et al. A robust and compact fiber bragg grating vibration sensor for seismic measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 12(4): 800-804.
- [4] Zhang Zhili, Fu Zhulin, Zhao Bing, et al. FBG sensing technology application in detection of bastion safety [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 492-496. (in Chinese)
张志利, 付祝林, 赵兵, 等. 光纤光栅传感技术在阵地安全监测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 492-496.
- [5] Wang Hongliang, Zhou Haoqiang, Gao Hong, et al. Fiber grating acceleration vibration sensor with double uniform strength cantilever beams [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(4): 635-641. (in Chinese)
王宏亮, 周浩强, 高宏, 等. 基于双等强度悬臂梁的光纤光栅加速度振动传感器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(4): 635-641.
- [6] Zhao Qiancheng, Dai Yutang, Xu Gang, et al. A new type of fiber grating accelerometer with cantilever beam [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(1): 147-150. (in Chinese)
赵前程, 戴玉堂, 徐刚, 等. 一种新型悬臂梁式光纤光栅加速度传感器 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35 (1): 147-150.
- [7] Basumallick N, Chatterjee I, Biswas P, et al. Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 17(3): 108-115.
- [8] Zhang Jinghua, Qiao Xueguang, Hu Manli, et al. Flexensional fiber Bragg grating-based accelerometer for low frequency vibration measurement [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(9): 090607-1-4.
- [9] Kuo Li, Tommy H T Chan, Man Hong Yau, et al. Very sensitive fiber Bragg grating accelerometer using transverse forces with an easy over-range protection and low cross axial sensitivity [J]. *Applied Optics*, 2013, 52 (25): 6401-6410.
- [10] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors[C]//Fiber Optic and Laser Sensors VII, 1989: 98-107.
- [11] Kersey A D, Berkoff B T A, Morey W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28 (3): 236-238.
- [12] Dandridge A, Tveten A B, Giallorenzi T G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE Journal Quantum Electronics*, 1982, QE-18(10):1647-1656.
- [13] Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Fu Haiwei, et al. Design of FBG acceleration sensor based on two-dot coating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20 (9): 2110-2115. (in Chinese)
刘钦朋, 乔学光, 傅海威, 等. 两点封装的光纤布拉格加速度传感器设计 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20 (9): 2110-2115.
- [14] 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.
- [15] Environmental tests and reliability for petroleum geophysical exploration instrument GB/T 24262-2009 [S]. Beijing: Fenghuang Press, 2009.