

微型高精度光纤布拉格光栅土压力传感器研究

蒋善超 曹玉强 隋青美* 王 静 王 宁 王正方

(山东大学光纤传感技术工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘要 结合不锈钢膜片的特性,研制出一种微型高精度光纤布拉格光栅(FBG)土压力传感器。该传感器通过不锈钢膜片与力学传递元件将土压力转化为光纤光栅的轴向拉力,大大提高了传感器的灵敏度,有效避免了光栅受力不均引起的啁啾效应,同时减小了传感器的体积。通过理论计算,得到该传感器的压力敏感系数为 29.6557 nm/MPa,是裸光栅的 9885 倍。传感器性能测试实验证实该传感器线性度良好,实测压力敏感系数为 27.5 nm/MPa,略小于理论值,其主要原因是应变传递效率低于 1。为进一步提高实验测量精度,采用 Haar 小波变换来减小因光纤光栅解调设备模数(A/D)采样速率及转换精度有限带来波长抖动所产生的仪器误差,实验数据表明经 Haar 小波处理后光栅中心波长的抖动幅值降为原数据的 50%左右。

关键词 光栅;土压力传感器;低啁啾;Haar 小波变换

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0405002

Research on the Micro and High-Precision Fiber Bragg Grating Soil Pressure Sensor

Jiang Shanchao Cao Yuqiang Sui Qingmei Wang Jing Wang Ning Wang Zhengfang

(Optical Fiber Sensing Technology and Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract A micro and high-precision fiber Bragg grating soil pressure sensor based on the characteristics of stainless steel patch is developed. Through stainless steel patch and mechanical transfer element, this sensor transfers soil pressure into axial direction tension of the fiber grating and improves its sensitivity greatly. Because of such design, this sensor reduces its volume largely and avoids the chirp effect caused by grating axial stress effectively. The theoretical calculation pressure sensitive coefficient value of this sensor is 29.6557 nm/MPa, which is 9885 times of the bare grating. The performance test proves that the linearity of this sensor is very well and measured pressure sensitive coefficient is 27.5 nm/MPa and slightly less than the theoretical calculation value, which is mainly caused by strain transfer efficiency lower than 1. In order to improve the experimental measurement precision, Haar wavelet transform is used to reduce the instrument error caused by wavelength dithering brought by the limitation of the sample rate and conversion precision of the demodulating equipment. The experiment data show that the dithering amplitudes of grating central wavelength reduce to 50% of the origin data after Haar wavelet transformation.

Key words grating; soil pressure sensor; low frequency chirp; Haar wavelet transform

OCIS codes 040.1880; 060.2370; 280.5475

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)压力传感器以其体积小、抗电磁干扰、易组网等独特优势,在大型地质工程中

得到了广泛的应用。普通裸光纤光栅的压力敏感系数仅为 0.003 nm/MPa^[1],远不能满足工程测量精度的要求。现有的用于光纤光栅增敏的结构大致可以

收稿日期: 2012-11-05; 收到修改稿日期: 2012-12-24

基金项目: 山东大学自主创新基金(yzc12081)资助课题。

作者简介: 蒋善超(1988—),男,硕士研究生,主要从事新型光纤传感器的研制与应用方面的研究。

E-mail: jiangshanchao88624@126.com

导师简介: 曹玉强(1963—),男,教授,主要从事检测技术及应用方面的研究。E-mail: caoyuqiang@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

分为3种:聚合物封装光栅^[2~4]、金属膜片^[5~7]以及其他如拉杆、圆筒及正弦等机械结构形式^[8~11]。郭明金等^[6]将光栅直接纵向或横向粘贴在膜片中心附近,得到压力敏感系数分别为 87 pm/MPa 和 14 pm/MPa,是裸光栅的几十倍。文献^[4]指出将光栅直接粘贴于膜片中心附近,由于膜片在受到外界压力作用时其应变分布不均匀,导致光栅反射光谱易出现啁啾和光谱展宽现象。张文涛等^[12]设计的 FBG 压力传感器避免了光谱展宽及啁啾现象,但其并没有利用膜片受到外界压力时产生的最大应变即膜片中心处产生的应变。

本文设计的 FBG 压力传感器通过变边三角形金属结构将膜片中心处所受外界压力放大后直接作用于裸光栅两端,除金属结构在栅区两端的作用外,光栅栅区始终处于悬空状态不受其他外界作用的影响,栅区产生均匀应变,避免了光栅反射光谱展宽及啁啾现象。针对因解调设备模数(A/D)采样速率及转换精度有限而导致波长浮动所带来的仪器误差,采用了 Haar 小波变换对实验数据进行处理以提高传感器的探测结果。对该传感器进行性能测试实验,实验数据表明该 FBG 压力传感器压力灵敏度系数高、线性度良好、稳定性较高。

2 传感器结构设计

以光纤光栅为关键敏感元件,研制一种适合测量压力的微型高精度土压力 FBG 压力传感器,其剖视图如图 1 所示。光纤引出孔充分发挥光纤光栅易组网的优势,使得该传感器具有形成局部压力测试网络的特性。应变传递元件中三角形 2(由 H_2 与 L_2 及其斜边组成)的主要作用是当膜片受到外力时发生形变,使传感器应变传递效率不因应变传递元件与外壳底板之间的摩擦而受到影响。为了增大应变传递效率,将应变传递元件的顶端和底座分别与膜片中心与传感器外壳通过快速环氧胶粘贴在一起。

由弹性力学原理可得,在均匀外界压力 p 的作用下,膜片中心产生的径向应变为

$$\epsilon = |\epsilon_r|_{r=0} = \frac{3p}{8Eh^2}(1-\nu^2)(R^2-r^2) = \frac{3pR^2(1-\nu^2)}{8Eh^2}, \quad (1)$$

式中 E 为金属膜片的弹性模量, ν 为膜片泊松比, h 为膜片厚度, R 为膜片半径。

假设膜片与应变传递元件之间的应变传递效率为 100%,当膜片中心受外界压力产生应变为 ϵ ,竖

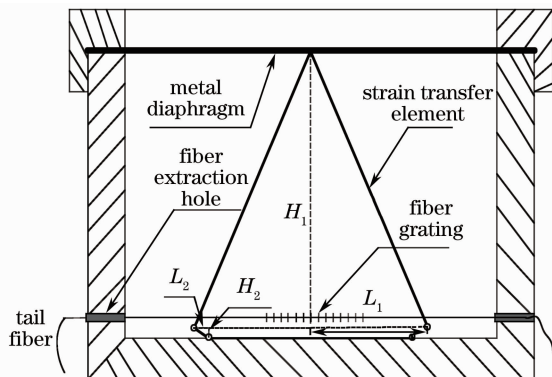


图 1 传感器剖视图

Fig. 1 Cutaway view of the sensor

向即 H_1 方向的应变同样为 ϵ ($H_1 \gg H_2$)。在应变传递过程中,应变 ϵ 的作用使 L_1 和 H_1 的长度改变,但直角三角形斜边长度不变,可得

$$(H_1 - H_1 \cdot \epsilon)^2 + (L_1 + L_1 \cdot \epsilon_{L_1})^2 = H_1^2 + L_1^2, \quad (2)$$

式中 ϵ_{L_1} 为 L_1 方向上的应变。

计算得,直角边 L_1 即光栅的轴向应变为

$$\epsilon_{L_1} = \sqrt{1 + \frac{2H_1^2 \cdot \epsilon}{L_1^2} - \left(\frac{H_1 \cdot \epsilon}{L_1}\right)^2} - 1, \quad (3)$$

对(3)式进行泰勒级数展开得到

$$\epsilon_{L_1} = \frac{1}{2} \left[\frac{2H_1^2 \cdot \epsilon}{L_1^2} - \left(\frac{H_1 \cdot \epsilon}{L_1}\right)^2 \right] - \frac{1}{8} \left[\frac{2H_1^2 \cdot \epsilon}{L_1^2} - \left(\frac{H_1 \cdot \epsilon}{L_1}\right)^2 \right]^2 + \dots, \quad (4)$$

忽略(4)式中高次项,得

$$\epsilon_{L_1} \approx \frac{H_1^2 \cdot \epsilon}{L_1^2}. \quad (5)$$

当光纤光栅只受到外界轴向均匀作用力时,光栅轴向应变与中心波长之间的对应关系为^[13]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (6)$$

式中 P_e 为光纤的有效弹光系数, λ_B 为 FBG 的中心波长。

结合(1)、(5)、(6)式,可得膜片所受外界压力 p 与光纤光栅中心波长的变化量 $\Delta\lambda_B$ 的对应关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \cdot \frac{H_1^2}{L_1^2} \cdot \frac{3R^2}{8Eh^2} (1 - P_e) (1 - \nu^2) \cdot p. \quad (7)$$

取 K_p 为此传感器的压力敏感系数:

$$K_p = \lambda_B \cdot \frac{H_1^2}{L_1^2} \cdot \frac{3R^2}{8Eh^2} (1 - P_e) (1 - \nu^2). \quad (8)$$

该压力传感器选用平面不锈钢 304 金属膜片,其弹性模量 E 为 194 GPa、泊松比 ν 为 0.3,厚度 h

为 0.25 mm,半径 R 为 22 mm。光纤的有效弹光系数 P_e 为 0.22。应变传递元件材料为锰钢且其中 H_1 为 8 mm, L_1 为 6 mm。该传感器敏感元件 FBG 光纤外径为 125 μm , 栅区长度为 10 mm, 其中心波长为 1570 nm, 理论计算得到传感器压力敏感系数 K_p 为 29.6557 nm/MPa。受限于光纤光栅的应变极限为 7860 $\mu\epsilon$ ^[14], 得到该传感器理论可测压力上限为 324.57 kPa, 即该传感器理论可测量程为 0~324.57 kPa。

3 性能测试实验与数据分析

整个性能测试实验主要分为灵敏度实验、温度特性实验及稳定性实验。实验平台主要包括: 光纤光栅解调仪(光源波长范围为 1510~1590 nm, 工作频率为 1~10 Hz; 环形器; 光纤解调仪解调范围为 1510~1590 nm, 分辨率为 1 pm, 采样频率为 1 Hz)、被测对象、恒温箱、6 个标准砝码, 其架构平台如图 2 所示。标准砝码的质量均为 0.5 kg, 其在传感器平面膜片上产生压强理论值为 12.89 kPa。

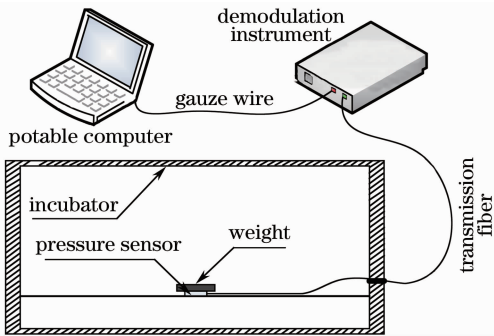


图 2 FBG 压力传感器性能实验架构平台

Fig. 2 Structure platform of the FBG pressure sensor's performance experiment

3.1 灵敏度实验

灵敏度实验过程中控制恒温箱使传感器所处实验环境温度保持在 25 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 温度波动不超过 1 $^{\circ}\text{C}$ 。实验在加载砝码之前开启数据采集系统, 采集此时光纤光栅中心波长作为光栅的初始波长。实验中每增加一个砝码稳定 30~60 s 后记录光纤光栅的中心波长, 取 FBG 中心波长的平均值作为对应外界压力下传感器光纤光栅的中心波长。当增加到 6 个砝码后, 再依次减少砝码个数。重复上述实验过程, 采集加压及卸压两次循环的实验数据。第一次加压实验原始数据及光栅中心波长与外界压力的对应关系如图 3 所示。整个性能实验过程的拟合公式如下: 第一次加压 $y=0.0275x+1569.9$, 线性拟合度为 0.9999; 第二次加压 $y=0.0275x+1570$, 线性拟合度为 0.9998; 第一次减压 $y=0.0274x+1569.7$, 线性拟合度为 0.9999; 第二次减压 $y=0.0274x+1570.1$, 线性拟合度为 0.9996。从上述拟合公式得该传感器的压力敏感系数为 27.5 nm/MPa, 比理论计算值略小, 造成这种结果的主要原因是: 粘接剂快速环氧胶具有一定的弹塑性, 且应变传递元件实现转向的元件之间存在一定的空隙而非理想的紧密连接, 从而导致金属膜片与应变传递元件之间的应变传递效率并没有达到理想的 100%; 膜片中心受外界压力产生应变 ϵ 时, 竖向 H_1 及 H_2 的应变之和为 ϵ , 由于 $H_1 \gg H_2$, 因此在理论计算中将膜片中心受外界压力产生应变近似等价于竖向 H_1 的应变, 没有考虑应变传递元件 H_2 的影响从而导致实测压力敏感系数略小于理论计算值。

3.2 温度特性实验

为确定该传感器结构对光栅是否有温度增敏效

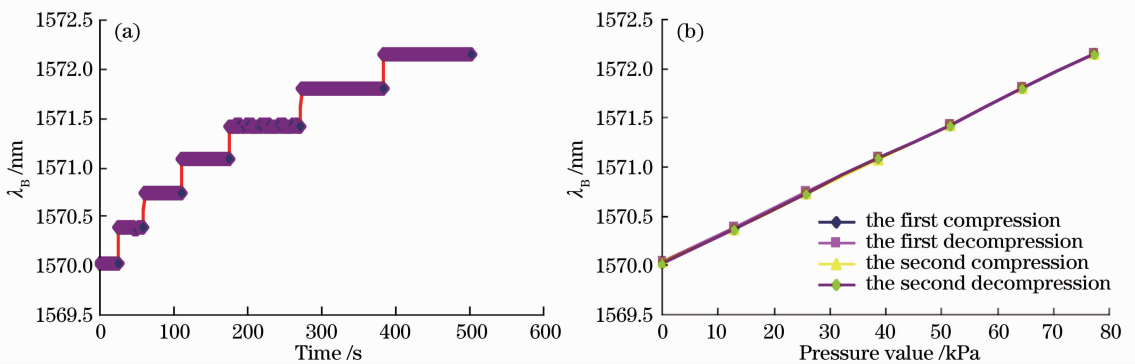


图 3 标定实验实验数据。(a)第一次加压采集到的 FBG 中心波长;(b) FBG 中心波长与外界压力的拟合曲线
Fig. 3 Experimental data of the calibration experiment. (a) FBG central wavelength collected during the first compression; (b) fitting curve of the FBG central wavelength and the external pressure

应,是否可以通过外加温补光栅实现温度补偿,对该传感器进行温度特性实验。在实验框架(图2)传感器上方不放置任何砝码,通过控制恒温箱改变传感器所处环境的温度,记录该传感器光栅中心波长随温度的变化趋势,其实验数据如图4所示。

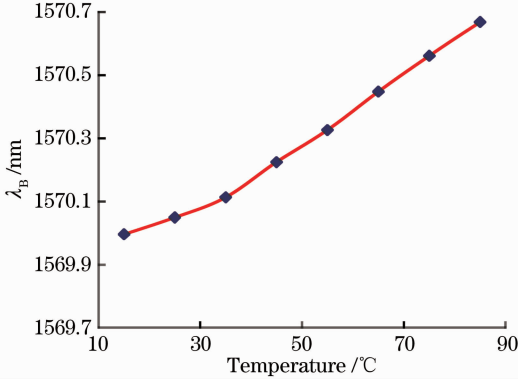


图4 温度特性实验数据

Fig. 4 Test data of temperature experiment

由图4可得,传感器光纤光栅中心波长 λ_B 与温度 T 的对应关系为: $\lambda_B = 0.01T + 1569.8, R^2 = 0.9876$ 。由此可得该传感器光栅温度灵敏度与裸光栅相近,可通过外加温补光栅实现良好的温补功能,大大减小因应变与温度交叉敏感带来的测量误差。

3.3 稳定性实验

对比传感器所受外界压力为0、38.67、77.34 kPa时的光纤光栅反射光谱,检验传感器在外加压力时其光栅反射光谱是否展宽或啁啾,如图5所示。

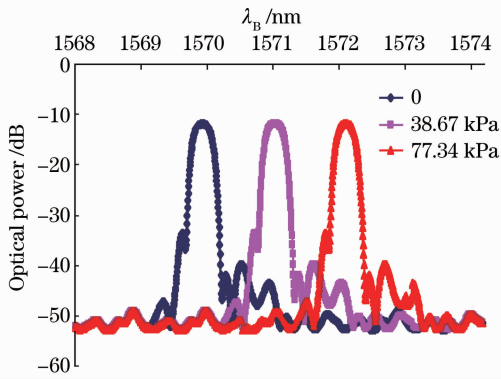


图5 传感器光栅反射谱对比图

Fig. 5 Comparison diagram of the sensor's FBG reflection spectra

由图5可得,传感器所受外界压力为0、38.67、77.34 kPa时其光栅反射光谱3 dB宽度分别为0.205、0.208、0.204 nm,没有明显的光谱展宽,说明该传感器可以有效地避免因光纤光栅栅区受力不均所带来的反射光谱展宽或啁啾。

控制恒温箱温度为25℃,通过在实验框架

(图2)中压力传感器上方放置3块砝码对该传感器进行稳定性实验。实验共进行8次,每次持续1h左右。取每次实验光纤光栅中心波长的平均值作为稳定性实验的实验数据,以其中心波长的均方差作为依据,给出该传感器的稳定性能。实验数据如表1所示。

表1 稳定性实验实验数据

Table 1 Experimental data of stability experiment

Experiment sequence	λ_B /nm
1	1571.088
2	1571.086
3	1571.089
4	1571.090
5	1571.081
6	1571.090
7	1571.087
8	1571.084

由稳定性实验数据计算得光纤光栅中心波长 λ_B 的均方差为 8.31×10^{-3} ,即传感器在受到外界稳定压力时,其光纤光栅中心波长在长时间内的变化幅度很小。

总结上述实验数据可得该传感器线性度好、易温补、低啁啾、稳定性好,具有一定的实用价值。

4 传感器数据处理方法研究

光纤光栅解调设备解调光栅中心波长时会出现波长数据上下浮动的现象,其根本原因在于解调设备的A/D采样速率及转换精度有限。以SM125-500型光栅解调仪为例,其硬件可以达到的测量精度为5 pm,但通过微光光学(MOI)峰值算法可以使SM125-500的测量精度提高10倍,达到0.5 pm。为减小上述问题所带来的仪器误差,本文采用Haar小波变换^[15,16]来处理采集的实验数据。

将光栅中心波长 $\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ 看做长度为 2^n (n 为大于1的整数)的离散序列,记为 $\{a_{n,0}, \dots, a_{n,2^n-1}\}$ 。函数 $f_n(t)$ 展开为

$$f_n(t) = a_{n,0}\phi_{n,0}(t) + \dots + a_{n,2^n-1}\phi_{n,2^n-1}(t). \quad (9)$$

将 $f_n(t)$ 作一次小波变换得 $f_n(t) = a + d$,其中 a 表示小波近似, d 表示小波细节:

$$a = a_{n-1,0}\phi_{n-1,0}(t) + \dots + a_{n-1,2^{n-1}-1}\phi_{n-1,2^{n-1}-1}(t), \quad (10)$$

$$d = d_{n-1,0}\phi_{n-1,0}(t) + \dots + d_{n-1,2^{n-1}-1}\phi_{n-1,2^{n-1}-1}(t), \quad (11)$$

式中 $\phi_{n-1,i}(t)$ ($i = 0, \dots, 2^{n-1} - 1$)为Haar的尺度函数, $\phi_{n-1,j}(j = 0, \dots, 2^{n-1} - 1)$ 为Haar的小波函数。重

复分解多次,可得 $f_n(t)$ 在不同尺度下的尺度函数和小波函数展开式。合理设置小波细节的阈值后还原信号,可得经 Haar 小波变换后的离散光栅中心波长序列,可有效地减小因解调设备的 A/D 采样速率及转换精度有限带来的波长浮动。

以传感器外界压力为 38.67 kPa 时采集到的 16 次 FBG 中心波长为例,Haar 小波二级变换过程中得到的原始数据 s 、二级近似分解 a_2 、二级细节分解 d_2 及一级细节分解 d_1 如图 6 所示。

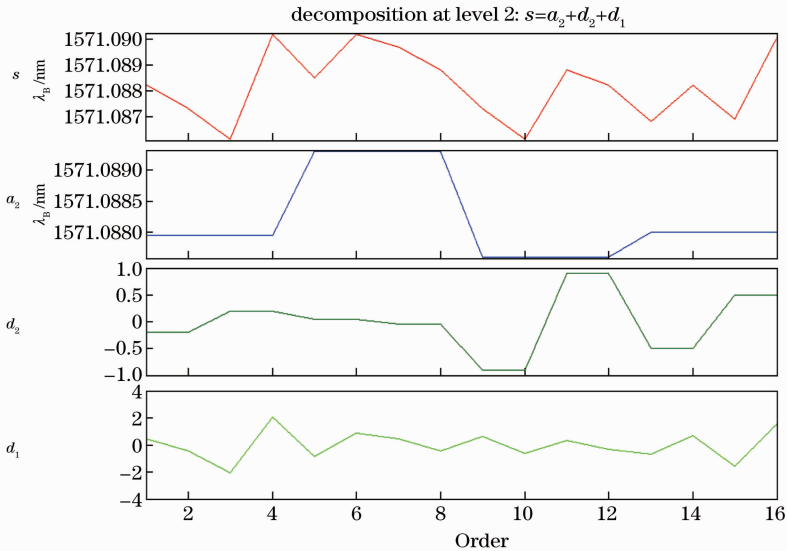


图 6 Haar 小波二级变换过程

Fig. 6 Secondary transformation process of Haar wavelet

设置一级小波细节的阈值为 0.0006,二级小波细节的阈值为 0.0005,还原经 Haar 小波变换后的信号与原始数据的对比如图 7 所示。由图 7 可得原始数据最大波动幅度为 4.1 pm,经过处理后的实验数据中心波长最大波动幅度为 2.3 pm。经 Haar 小波二级变换后中心波长浮动幅度明显减小,其浮动幅值降为原始数据的 50%左右。

高精度 FBG 的土压力传感器。

2) 对该传感器进行性能实验,分析实验数据得该传感器压力与光栅中心波长之间具有良好的线性关系,实测压力敏感系数为 27.5 nm/MPa,且随外界压力的增大光栅反射光谱没有发生啁啾及展宽。总结性能测试实验得该传感器线性度好、低啁啾、易温补、稳定性高,具有一定的实用价值。

3) 采用 Haar 小波变换来减小由光纤光栅解调设备 A/D 采样速率及转换精度有限所带来的波长抖动,实验数据表明经过 Haar 小波处理后 FBG 中心波长的浮动幅值降为原始数据的 50%左右。

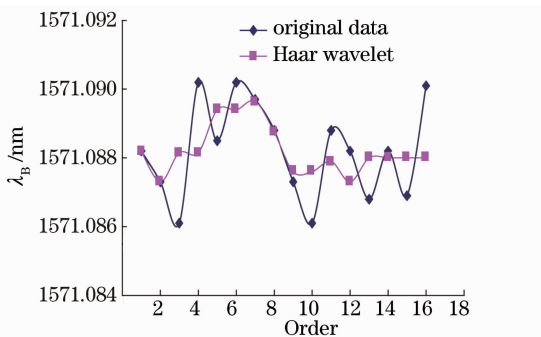


图 7 原始数据与处理后数据的对比图

Fig. 7 Comparison of the original data with the processed data

5 结 论

1) 结合膜片与金属结构两种光栅增敏方式,以光纤光栅为主要敏感元件,研制出一种适用于微型

参 考 文 献

- 1 P. F. Liu, G. J. Liu, Q. Zhao *et al.*. A study of the development and application of fiber Bragg grating pressure sensors[C]. *Optoelectronics and Microelectronics Technology (AISOMT)*, 2011. 232~235
- 2 Y. Zhang, D. J. Feng, Z. G. Liu *et al.*. High-sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, **13**(6): 618~619
- 3 X. S. Cheng, W. W. Qiu, W. X. Wu *et al.*. High-sensitivity temperature sensor based on Bragg grating in BDK-doped photosensitive polymer optical fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(2): 020602
- 4 Y. Q. Tan, H. P. Wang, Z. J. Sun. Calibration method of FBG sensor based on asphalt pavement indoor small size test[C]. *International Conference on Transportation Mechanical and*

- Electrical Engineering, Changchun, 2011. 1390~1394
- 5 Yin Xiaofeng, Jiang Nuan, Yang Huayong *et al.*. A novel fiber grating pressure sensor with high sensitivity based on elastic sheet packaging[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(5): 681~684
殷小峰, 姜 暖, 杨华勇 等. 基于弹性薄片封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(5): 681~684
 - 6 Guo Mingjin, Jiang Desheng, Yuan Hongcai *et al.*. Studies on fiber Bragg grating pressure sensor in different stick up methods [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(6): 417~419
郭明金, 姜德生, 袁宏才 等. 不同粘贴方式的光纤光栅压力传感器的研究[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(6): 417~419
 - 7 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei *et al.*. Study of optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 686~691
王 静, 冯德军, 隋青美 等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 686~691
 - 8 Jiang Nuan, Yang Huayong, Yin Jun *et al.*. Studies on high-sensitivity hydrostatic pressure sensor using fiber Bragg grating [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19** (12): 1595~1598
姜 暖, 杨华勇, 尹 俊 等. 高灵敏度光纤光栅静水压力传感研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(12): 1595~1598
 - 9 Q. Z. Rong, X. G. Qiao, T. Guo *et al.*. Temperature-calibrated fiber-optic refractometer based on a compact FBG-SMS structure[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(3): 030604
 - 10 Chu Xiaohui, Zhang Min, Zhou Hongpu *et al.*. Design and experiment of fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2785~2788
褚晓慧, 张 敏, 周宏朴 等. 一种光纤布喇格光栅压力传感器的设计及试验[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2785~2788
 - 11 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei *et al.*. Optical fiber Bragg grating microphone[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009, (10): 10~12
王 静, 冯德军, 隋青美 等. 光纤 Bragg 光栅传声器设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2009, (10): 10~12
 - 12 Zhang Wentao, Liu Yuliang, Li Fang. Study on improved FBG pressure sensor based on diaphragm [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(1): 43~45
张文涛, 刘育梁, 李 芳. 一种改进的膜片式 FBG 压力传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(1): 43~45
 - 13 Wu Fei. Study of Multi-Mechanics Parameters Measurement and Signal Analysis Technique Based on Fiber Gating [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2007. 14~17
吴 飞. 基于光纤光栅的多力参数测量及信号分析技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007. 14~17
 - 14 黎 敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008. 125
 - 15 Li Jianxin, Cui Yanjun, Zhu Rihong *et al.*. Micro-displacement variation measurement by using laser interference based on wavelet transform[J]. *Chinese J. Laser*, 2012, **39**(8): 0808002
李建欣, 崔艳军, 朱日宏 等. 基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(8): 0808002
 - 16 Li Sikun, Su Xianyu, Chen Wenjing. Analytic image based wavelet transform method for phase reconstruction of optical interferogram with linear-carrier [J]. *Chinese J. Laser*, 2011, **38**(2): 0209002
李思坤, 苏显渝, 陈文静. 基于解析图像的小波变换光学载频干涉全息图相位重建方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0209002

栏目编辑: 王晓琰