

线性滤波法高速解调技术中的测量有效性研究

陈 显¹ 余尚江¹ 杨吉祥¹ 林 明²

(¹总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023
²湖南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要 光纤光栅在不均匀应变场中会由于其反射谱的展宽而带来测量误差。线性滤波法是一种适合于高频瞬变信号的解调方法, 在光纤光栅参数取典型值时, 使用传输矩阵法对线性滤波法解调光纤光栅在不均匀应变场中反射谱的过程进行了数值模拟。模拟结果表明, 固定应变峰值为 $3000 \mu\epsilon$, 应变波波长大于 0.0025 m 时, 测量相对误差不超过 3% ; 固定应变波长 0.05 m , 应变波幅值小于 $10000 \mu\epsilon$ 时, 应变误差不超过 0.25% 。使用 Hopkinson 压杆装置对数值模拟结果进行了验证, 结果与数值分析结论较为吻合。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 解调; 线性滤波法; 误差

中图分类号 TP212.74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20092901.0145

Measurement Efficiency of High-Speed-Demodulation by Linear Filtering Method

Chen Xian¹ Yu Shangjiang¹ Yang Jixiang¹ Lin Ming²

(¹ The Third Academy of Engineer General Staff, Luoyang, Henan 471023, China
² College of Material Science & Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract The reflectivity spectrum of the fiber Bragg grating (FBG) will get wider when loaded in the unhomogeneous strain field, and error is brought into the measurement. Linear filtering method is used for high frequency wave demodulation. The demodulation process was simulated by transmission-matrix method with typical FBG parameters. The results show that the measurement error is lower than 3% when the peak strain is stuck to $3000 \mu\epsilon$ and the strain wavelength is larger than 0.0025 m . The measurement error is lower than 0.25% when the strain wavelength is 0.05 m and the peak strain is smaller than $10000 \mu\epsilon$. The numerical result agrees well with the experiment on the slide Hopkinson pressure bar.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; demodulation; linear filtering method; error

1 引 言

近年来国内外对光纤光栅物理量的传感特性进行了多方面的研究^[1~3]。同时, 光纤光栅解调技术也得到了不断发展, 提出了多种解调方法, 如光谱仪检测法、滤波法、干涉法和可调谐光源法等^[4~11]。在光纤光栅的几种解调方法中, 线性滤波法是一种全光纤式解调方法, 由于在解调系统中没有机械扫描部件, 适用于高速瞬变信号的解调, 且其基于输出光强与波长存在的函数关系, 通过测量输出光强即可获得波长信息, 适用于动、静态测量, 输出线

性度较好。本文在光纤光栅参数取典型值时, 使用传输矩阵法对线性滤波法解调光纤光栅在不均匀应变场中反射谱的过程进行了数值模拟, 并使用 Hopkinson 压杆装置对数值模拟结果进行了验证。

2 线性滤波法

线性滤波法解调原理如图 1 所示。宽带光源发光二极管(LED)发出的光由 3 dB 耦合器 1 进入光纤光栅传感器, 其中波长满足布拉格(Bragg)条件的光被传感光栅反射后返回耦合器, 耦合器 1 的出

收稿日期: 2008-03-11; 收到修改稿日期: 2008-06-30

作者简介: 陈 显(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事测试技术方面的研究。E-mail: foxofdesert2003@yahoo.com.cn

导师简介: 余尚江(1968-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事传感器及动态测试技术等方面的研究。

射光经另一 3 dB 耦合器 2 后分为强度相等的两束, 一束直接通过光电探测变成电信号, 再经前置放大器和低通滤波器后作为系统的参考信号, 另一束经

线性边缘滤波器, 再经光电转换及放大、滤波后输出。由此通过光电转换将波长变化的光信号转变为易于观测的电信号。

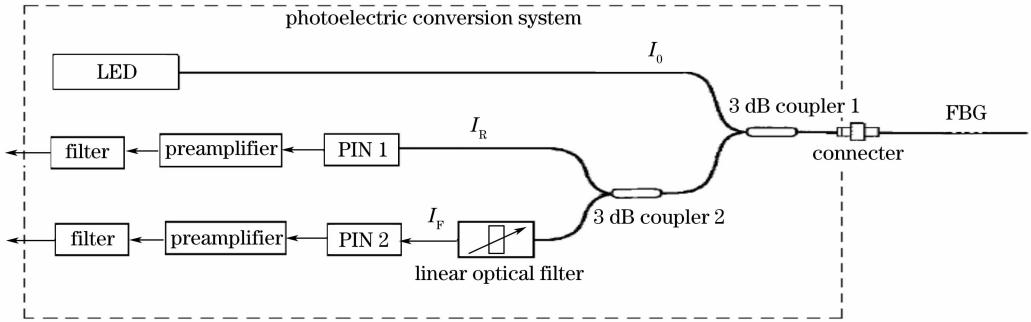


图 1 线性滤波法解调原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of demodulation principle by linear filtering method

线性滤波器的透射谱可用归一化的光谱透射率曲线 $H(\lambda)$ 来表示, 透射谱在所使用的一定的波长范围内认为是线性的, 可用线性函数近似表示为

$$H(\lambda) = A\lambda + B. \quad (1)$$

光电探测器 PIN1 接收到的光强

$$I_R(\lambda) = \alpha I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中, $R(\lambda)$ 为布拉格光栅 (FBG) 的反射光功率谱密度。 α 为耦合器分光比造成的衰减, I_0 为入射光的光强。经过线性滤波器滤波后由光电探测器 PIN2 接收到的光强为

$$I_F(\lambda) = \alpha I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda - \lambda') H(\lambda') d\lambda', \quad (3)$$

解调仪的实际输出

$$I(\lambda) = \frac{I_F(\lambda)}{I_R(\lambda)}, \quad (4)$$

可消除入射光光强 I_0 输出波动的影响。

3 传输矩阵法

由于光纤光栅的反射谱随加载于其上的应变场变化规律较为复杂, 因此只能用数值方法对其特性进行模拟。传输矩阵法是计算光纤光栅反射谱的一种优良方法, 可以很精确地模拟反射谱的变化。

非均匀光栅中的每个光栅均匀段由 2×2 矩阵描述, 将所有矩阵连乘则描述了整个光纤光栅。设光纤光栅被分成 M 个小的均匀光栅, 经过第 k 个小光栅时前向和后向传输光的慢变振幅分别表示为 A_k^+ 、 B_k^+ , 则

$$[A_k^+, B_k^+]^T = T_k [A_{k-1}^+, B_{k-1}^+]^T, \quad (5)$$

式中 T_k 为矩阵^[12]:

$$T_k = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \delta_z) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \delta_z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \delta_z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \delta_z) & \cosh(\gamma_B \delta_z) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \delta_z) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$\gamma_B = \sqrt{\kappa^2 - \zeta^{+2}}$, ζ^+ 和 κ 为第 k 段的局部耦合系数:

$$\zeta^+ = 2\pi \overline{\delta n_{\text{eff}}} + 2\pi n_{\text{eff}} [1/\lambda - 1/\lambda_0] - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} v \overline{\delta n_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

δ_z 描述为^[13]

$$\delta_z = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda(z)} \right] \right\}, \quad (9)$$

$\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 为 FBG 的平均折射率变化, $\varphi(z)$ 为光栅周期的啁啾或相移, v 为与折射率调制有关的条纹可见

度, 通常视光栅的反射率强弱在 $0.5 \sim 1$ 间取值, Λ_0 为未加应变的光栅栅格周期。

整个光栅结构则能够用下式描述:

$$[A_M^+, B_M^+]^T = T_M T_{M-1} \cdots T_k \cdots T_1 [A_{k-1}^+, B_{k-1}^+]^T. \quad (10)$$

经计算即可获得光纤光栅的反射谱, 对于某一波长 λ 光反射率为

$$\rho = |B_M^+(\lambda) / A_M^+(\lambda)|. \quad (11)$$

4 数值计算与分析

光纤光栅参量： $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ， $n_{\text{eff}} = 1.46$ ， $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 2 \times 10^{-4}$ ， $\nu = 1$ ， $p_e = 0.26$ ， $\Lambda_0 = 530.8 \text{ nm}$ ，并取线性滤波器参量 $A = 109$ ， $B = 5000$ ， $L =$

0.005 m 。固定应变峰值为 $3000 \mu\epsilon$ ，改变应变波长，当应变波长分别取 0.2 m 、 0.1 m 、 0.08 m 、 0.05 m 、 0.02 m 、 0.01 m 、 0.005 m 时的反射谱变化如图 2 所示。

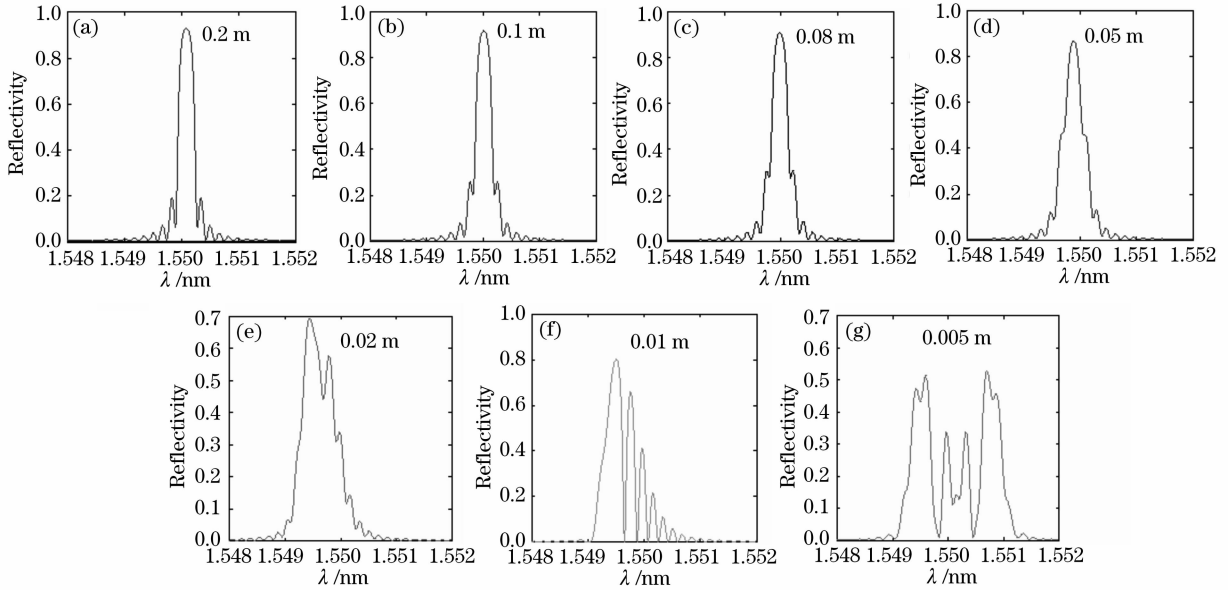


图 2 随应变波长变化的反射谱

Fig. 2 Reflectivity spectrum as a function of strain wavelength

图 2 可见，随着应变波长的减小，由于不均匀应变将导致光纤光栅反射谱的畸变。为评估线性滤波法对畸变反射谱信号的解调能力，将其对畸变反射谱的解调输出与应变平均化后的解调输出进行比较，即与对光纤光栅整个标距上所加载的应变作积分平均后的值通过解调器后的输出进行比较。

在 $0.03 \sim 0.0025 \text{ m}$ 间均匀布置 55 个点后使用传输矩阵法进行计算，解调输出值如图 3(a)。由于应变波场中的光纤光栅所测的即为光纤光栅标距上的平均应变，因此可认为应变平均化后解调输出为理论输出，从而可对实际应变检测输出的相对误差进行计算，计算所得相对误差如图 3(b) 所示。

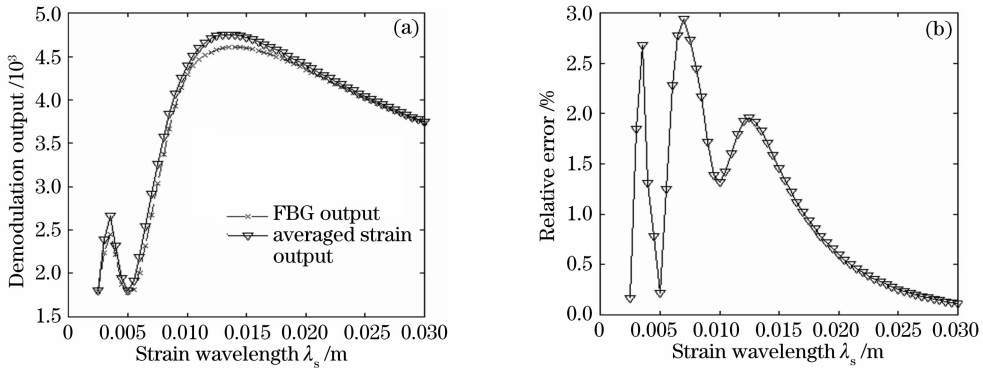


图 3 应变波长变化时的解调输出(a)和相对误差(b)

Fig. 3 Demodulation output(a) and relative errors as a function of strain wavelength (b)

从图 3(a) 可见，实际应变解调输出与平均化后解调输出变化趋势基本接近，但曲线略有差异。通过对相对误差的计算可知，由于光纤光栅的长度不可忽略造成的相对测量误差呈振荡特性。随着应变波长的增大，相对误差振幅呈下降趋势。

为研究应变峰值大小对测量误差的影响，固定应变波长，改变应变峰值。固定应变波长为 0.05 m ，应变峰值分别取 $100 \mu\epsilon$ ， $500 \mu\epsilon$ ， $1000 \mu\epsilon$ ， $2000 \mu\epsilon$ ， $4000 \mu\epsilon$ ， $6000 \mu\epsilon$ ， $8000 \mu\epsilon$ 。使用传输矩阵法进行计算，不同应变峰值所对应的反射谱如

图 4 可见反射谱出现了展宽。类似的, 计算得到解

调输出如图 5(a)。相对误差如图 5(b)。

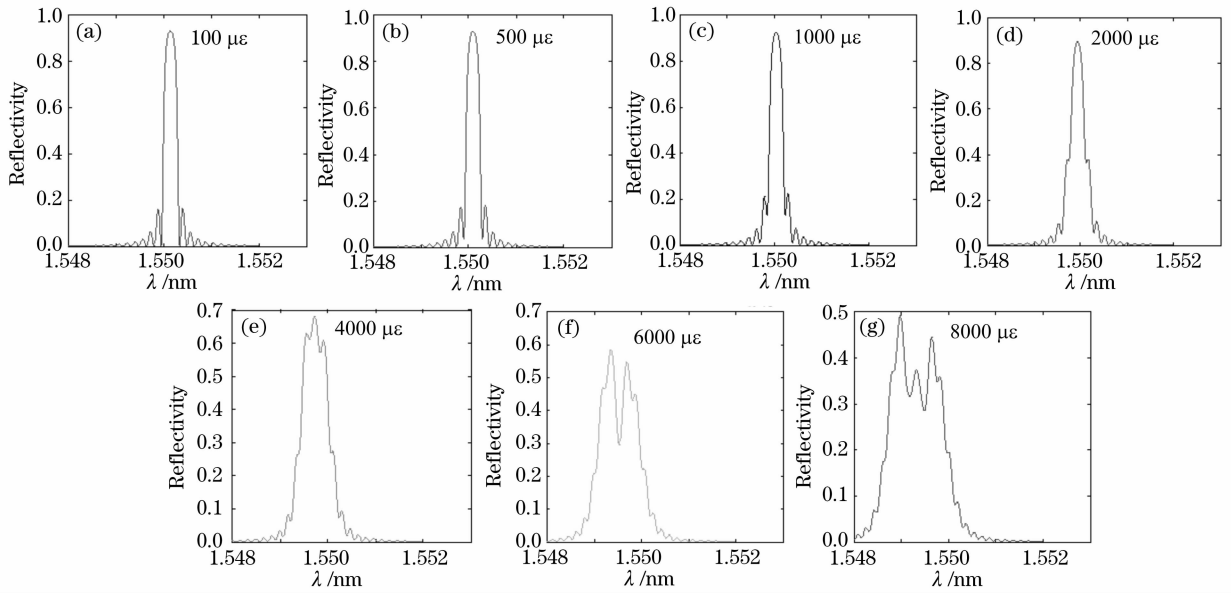


图 4 随应变峰值变化的反射谱

Fig. 4 Reflectivity spectrum as a function of strain wave peak value

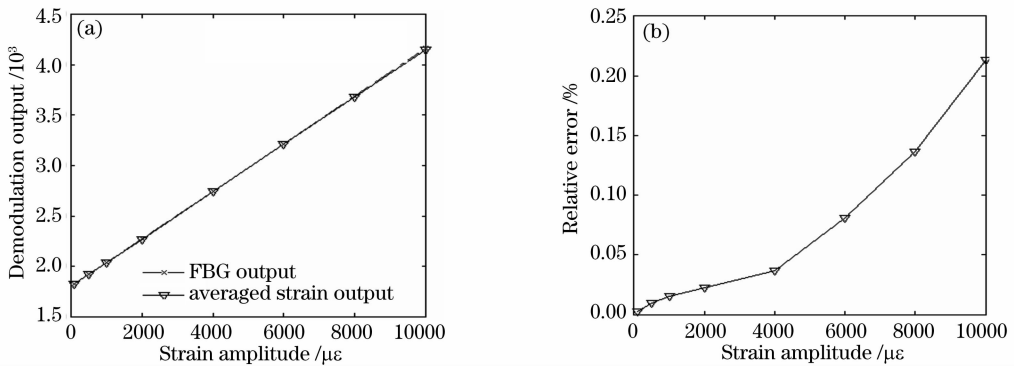


图 5 应变波峰值变化时的解调输出(a)和 相对误差(b)

Fig. 5 Demodulation output(a) and relative error (b) as a function of strain wave peak values

计算表明, 实际应变解调输出与应变平均化后解调输出非常接近, 应变波幅值变化对应变测量误差影响较小, 8000 $\mu\epsilon$ 时仅为 0.14 %, 10000 $\mu\epsilon$ 时不超过 0.25 %。

5 实验及结果

实验在霍普金森杆装置(SHPB)上进行, 压杆直径为 100 mm, 输入杆、输出杆和吸收杆的长度分别为 4.5 m、2.5 m 和 1.8 m, 可选择的子弹长度为 1.6 m、1.0 m、0.5 m。子弹采用压缩气体驱动, 电触点式气压表控制, 气压连续可调, 控制方便。子弹的动能吸收采用缓冲装置, 弹速采用测速仪记录, 压杆上贴有高精度电阻式应变片(RSG), 应变

信号由超动态应变仪采集, 由外设连接接口(PCI)数据采集系统记录并显示。

布拉格光纤光栅和用于比较的电阻应变计被粘贴于入射杆上, 位置相近。通过适当的调节, 可使炮弹撞击入射杆后产生高频冲击信号, 粘贴于入射杆上的光纤光栅和电阻应变计感应高频冲击信号, 最后应变计的响应经宽带超动态应变放大器放大后输出显示, 光纤光栅的响应由自行研制的基于线性滤波法的高速解调仪解调后输出显示。

由图 6(a)可见, 在应力波上升时间较长时, 光纤光栅测量结果与应变计测量结果基本吻合, 曲线重合度较高, 即测量误差较小。而随着上升时间的减小, 重合度逐渐下降。在图 6(f)中应力波的高频部分, 光纤光栅测量结果明显出现了误差。

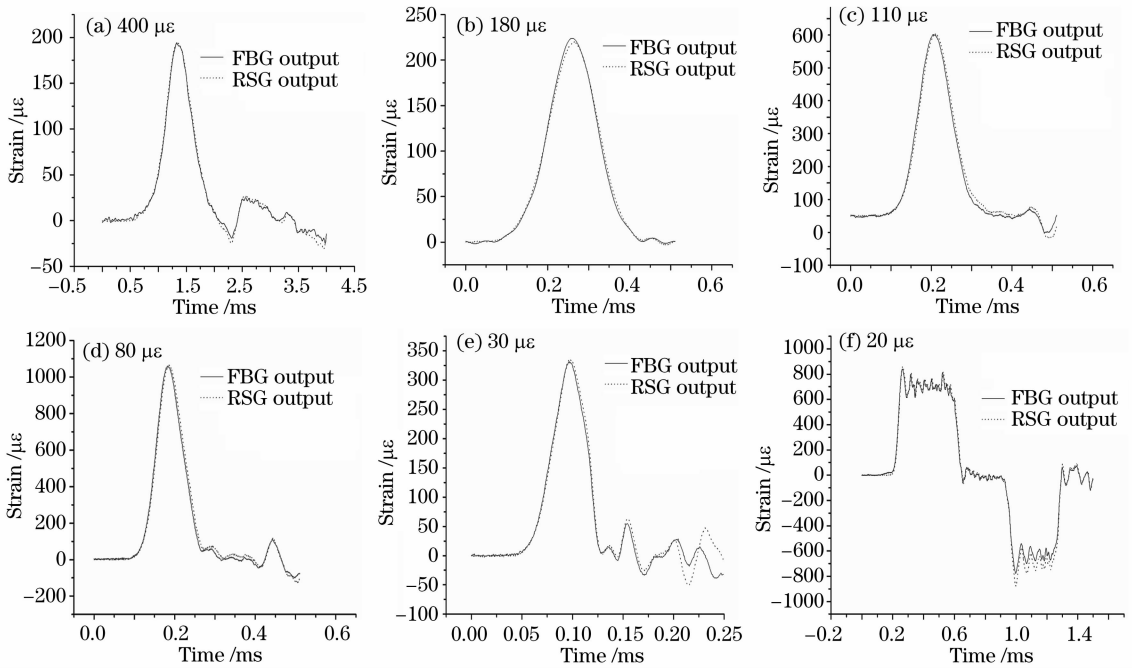


图 6 不同上升时间时的解调仪和应变计的输出

Fig. 6 Output of RSG and FBG at different risetime

实验结果表明,在应力波频率较高时会出现较为明显的测量误差,而应力波幅值对测量误差的影响较小。这与数值分析得出的结论一致。

6 结 论

1) 传输矩阵法是一种优良的分析模拟光纤光栅行为特性的方法,通过数值方法模拟可以对测量结果的有效性进行评估;

2) 线性滤波法是一种适合于高频瞬变信号测量的解调方法,在各参量取典型值,分别固定应变幅值改变应变波波长以及固定应变波波长改变应变幅值时,数值模拟结果表明,相对误差分别不超过 3% 和不超过 0.25%,该结果对于评估测量结果的有效性提供了参考依据;

3) 随着应变波波长的减小,光纤光栅啁啾化程度加深,相对测量误差呈振荡增大,而随着应变波幅值的增加,相对测量误差单调增大。

4) Hopkinson 压杆实验结果表明,在应力波频率较高时出现较为明显的测量误差,与数值分析结果吻合。

参 考 文 献

1 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Research on bandwidth-modulated and temperature-independent single fiber Bragg grating displacement sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 15~20

郭 团, 赵启大, 刘丽辉. 带宽调制型单光纤光栅温变无补偿位移传感[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 15~20

2 Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating pressure sensing with plane round metal diaphragm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 80~84
尉 婷, 乔学光, 贾振安等. 平面圆形膜片式光纤布拉格光栅温度补偿压强传感[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 80~84

3 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Light intensity-referred and temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 207~211
郭 团, 赵启大, 刘丽辉等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 207~211

4 Wang Weibo. Present status for measuring Bragg wavelength in fiber Bragg grating sensors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **42**(5): 85~91

王维波. 测量光纤光栅传感器中布拉格波长移动量的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **42**(5): 85~91

5 Wang Qifu, Qiao XueGuang, Jia Zheng'An *et al.*. Review of signal demodulation methods for fiber Bragg grating sensor[J]. *Study on Optical Communications*, 2006, **135**(3): 67~70
王其富, 乔学光, 贾振安等. 光纤光栅传感器信号解调方法综述[J]. *光通信研究*, 2006, **135**(3): 67~70

6 Zhang Xinming, Yu Youlong, Zhu Yong. Techniques for fiber Bragg grating sensor system demodulation [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(4): 17~20

张昕明, 余有龙, 朱 勇. 光纤光栅传感系统信号解调技术[J]. *光电子技术与信息*, 2002, **15**(4): 17~20

7 Li Zhiqian, Xu Mingyan, Tang Jing *et al.*. Study on techniques of signal demodulation in fiber Bragg grating sensing system[J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(4): 36~41

李志全, 许明妍, 汤 敬等. 光纤光栅传感系统信号解调技术的研究[J]. *应用光学*, 2005, **26**(4): 36~41

8 Ying Jing, Chen Dingfang. Demodulation methods in fiber grating sensor system [J]. *J. Hubei Polytechnic University*, 2002, **17**(2): 84~87

尹 进, 陈定方. 光纤光栅传感系统中的解调技术[J]. *湖北工学院学报*, 2002, **17**(2): 84~87

- 9 Chen Changyong, Qiao Xueguang, Jia Zheng'an *et al.*. Demodulation of wavelength-encoded signal in fiber grating sensing application [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(2): 121~126
陈长勇, 乔学光, 贾振安等. 光纤光栅传感应用中的波长编码信号解调技术[J]. *半导体光电*, 2003, **24**(2): 121~126
- 10 Li Zhiqian, Li Yaping, Zhu Dandan *et al.*. Demodulation scheme for filtering method based fiber Bragg grating sensing [J]. *J. Appl. Opt.*, 2006, **27**(4): 327~331
李志全, 李亚萍, 朱丹丹等. 基于滤波法的光纤光栅传感解调方案[J]. *应用光学*, 2006, **27**(4): 327~331
- 11 Wu Zhaoxia, Wu Fei, Jiang Xueying. Research on techniques for fiber grating sensor system demodulation based on optical wavelet filtering [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2004, **17**(3): 453~456
吴朝霞, 吴飞, 蒋学英. 基于光学小波滤波的光纤光栅传感解调方法的研究[J]. *传感技术学报*, 2004, **17**(3): 453~456
- 12 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *IEEE Journal of Light Wave Technology*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 13 Yun Binfeng, Lü Changgui, Wang Zhuyuan *et al.*. Numerical analysis of fiber Bragg grating under inhomogeneous strain fields [J]. *Journal of Optoelectrics · Laser*, 2006, **17**(2): 151~154
恽斌峰, 吕昌贵, 王著元等. 非均匀应变场中光纤布拉格光栅的数值分析[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(2): 151~1