

考虑温度和应变交叉敏感的光纤布拉格光栅测量研究

丁朋¹, 董小鹏², 叶肖伟³¹中国人民解放军 73089 部队, 江苏 徐州 221000;²厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005;³浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058

摘要 把光纤布拉格光栅(FBG)的有效折射率、周期用二元函数泰勒展开,理论验证 FBG 温度-应变和应变-温度交叉敏感方式相同,得出热光系数和弹光系数均与有效折射率平方成正比例关系的结论;列出温度、应变测量计算方程式,并阐述了计算方法。测试温度、应变同时存在时 FBG 的波长,可知温度-应变和应变-温度交叉灵敏度系数分别为 $-1.4743 \times 10^{-6} \text{ nm}/(\text{°C} \cdot \mu\epsilon)$ 、 $-1.3948 \times 10^{-6} \text{ nm}/(\mu\epsilon \cdot \text{°C})$ 。把 FBG 静力水准仪放置于露天阳台上监测一天内波长变化,代入方程式计算,得到较为精确的水准仪液体深度变化解。结果表明,使用温度、应变计算方程式求解,能够提高 FBG 的测量精度。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 交叉灵敏度系数; 热光系数; 弹光系数

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.020605

Research on Measurement of Fiber Bragg Grating Considering the Cross-Sensitivity of Temperature and Strain

Ding Peng¹, Dong Xiaopeng², Ye Xiaowei³¹73089 PLA Troops, Xuzhou, Jiangsu 221000, China;²Institute of Light-Wave Technology, School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;³College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China

Abstract We get the binary Taylor expansions of the effective refractive index and period of fiber Bragg grating (FBG), verify theoretically that the temperature-strain and strain-temperature cross sensitivities are the same, and make a conclusion that the thermo-optical coefficient and the elasto-optical coefficient are both proportional to the square of the effective refractive index. The calculation equations of temperature and strain are listed, and the method of calculation is expatiated. The wavelengths of FBG under different temperatures and strains are measured, and the cross sensitivity coefficients of temperature-strain and strain-temperature are $-1.4743 \times 10^{-6} \text{ nm}/(\text{°C} \cdot \mu\epsilon)$ and $-1.3948 \times 10^{-6} \text{ nm}/(\mu\epsilon \cdot \text{°C})$. We place the FBG hydrostatic leveling instrument on the open-air balcony for one day, monitor the wavelength changes of FBG, and then calculate and get a more accurate solution to the changes of liquid depth in the hydrostatic level instrument. The experimental results show that using the calculation equations of temperature and strain can improve the measurement accuracy of FBG.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; cross-sensitivity coefficient; thermo-optical coefficient; elasto-optical coefficient

OCIS codes 060.2370; 120.0280; 120.3180; 120.5060

1 引言

目前,光纤布拉格光栅(FBG)传感技术已成功产业化,广泛应用于各种结构的温度^[1]、应变^[2]、位移^[3]

等传感器中。但 FBG 存在的温度和应变交叉敏感的问题,也一直受到学术界的关注。目前,解决温度和应变交叉敏感的问题主要有 2 种方法。1) 用 2 根 FBG 同时对温度、应变进行测量^[4-5],这种方式简便、

收稿日期: 2017-08-31; 收到修改稿日期: 2017-09-06

作者简介: 丁朋(1985—),男,硕士,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: ladinglading123@hotmail.com

经济,大多数 FBG 产品使用此方法,但很少考虑应变(温度)灵敏度系数随温度(应变)变化的问题。2) 对 FBG 包层进行腐蚀^[6]、切除^[7]或者添加涂层^[8]处理,这些方法对 FBG 后期处理要求比较高,其中腐蚀、切除方式对 FBG 级联使用存在光强减弱的问题;制作如 π 相移^[9]、保偏^[10]、横截面积不等^[11]的 FBG 的方法成本较高,但在特殊结构监测使用上不失为一种方法;把 FBG 从中间切开后焊接制造空气腔,2 段 FBG 形成法布里-珀罗腔^[12];把 FBG 与多模光纤^[13]、S 光纤^[14]、双芯光纤^[15]相连,或者与单模光纤端面错位相连^[16],均可形成与温度、应变敏感的光谱。这些方式光路较为复杂,产业化较为困难。

为解决现有 FBG 传感器温度-应变交叉敏感问题,提高测量的精度,国内外学者进行了广泛研究。Farahi 等^[17]探讨双折射光栅相位变化时,把传播常数和光栅长度看作温度和应变的函数,而后用二元函数泰勒展开,分别得出了快、慢轴上中心波长的温度-应变交叉灵敏度系数;贾宏志等^[18]把 FBG 的应变灵敏度系数对温度求导,得出温度-应变交叉灵敏度系数。吕且妮等^[19]把 FBG 的有效折射率和周期看作温度、应变的函数,而后用二元函数泰勒展开,得出了 FBG 的温度-应变交叉灵敏度系数,并计算了在不考虑温度-应变交叉敏感时的误差。丁朋^[20]考虑了温度-应变交叉灵敏度系数,提出修正因子的方法,以提高 FBG 同时测量温度、应变的精度。本文在他们的基础上,利用二元函数泰勒展开的理论方法和 FBG 在温度、应变同时作用时监测中心波长的实验方法,验证了 FBG 温度-应变和应变-温度交叉敏感方式是相同的,并提出 FBG 的热光系数和弹光系数均与有效折射率的平方呈正比例的关系。列出温度、应变的计算方程式,确定使用该方程式计算的方法,并应用于 FBG 静力水准仪液体深度变化的计算中。实验证明,这种计算方法更为简便、准确,为现有 FBG 传感器产品测量精度的提高给出了有效的建设性方法。

2 理论分析

2.1 FBG 有效折射率、周期与温度、应变的关系

FBG 中心波长公式为

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

式中 λ_B 为 FBG 的中心波长, n_{eff} 为有效折射率, Λ 为光栅周期。它们均是温度 T 和应变 ϵ 的函数,关系如下^[18]:

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} = \Lambda, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon} = -p_e n_{\text{eff}}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial T} = \alpha_f \Lambda, \quad (4)$$

$$\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} = \xi n_{\text{eff}}, \quad (5)$$

式中 α_f 为光纤的热膨胀系数, ξ 为光纤的热光系数, p_e 为光纤的有效弹光系数:

$$p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (6)$$

其中 p_{11} 、 p_{12} 为光纤的弹光系数, ν 为泊松比。

2.2 温度-应变、应变-温度交叉敏感分析

对 n_{eff} 、 Λ 分别进行二元泰勒函数展开,得

$$\begin{aligned} n_{\text{eff}}(\epsilon_0 + \Delta\epsilon, T_0 + \Delta T) = & n_{\text{eff}}(\epsilon_0, T_0) + \left(\Delta\epsilon \frac{\partial}{\partial \epsilon} + \Delta T \frac{\partial}{\partial T} \right) n_{\text{eff}}(\epsilon_0, T_0) + \\ & \frac{1}{2} \left(\Delta\epsilon \frac{\partial}{\partial \epsilon} + \Delta T \frac{\partial}{\partial T} \right)^2 n_{\text{eff}}(\epsilon_0, T_0) + \dots, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Lambda(\epsilon_0 + \Delta\epsilon, T_0 + \Delta T) = & \Lambda(\epsilon_0, T_0) + \left(\Delta\epsilon \frac{\partial}{\partial \epsilon} + \Delta T \frac{\partial}{\partial T} \right) \Lambda(\epsilon_0, T_0) + \\ & \frac{1}{2} \left(\Delta\epsilon \frac{\partial}{\partial \epsilon} + \Delta T \frac{\partial}{\partial T} \right)^2 \Lambda(\epsilon_0, T_0) + \dots. \quad (8) \end{aligned}$$

把(7)、(8)式代入(1)式,合并关于 ΔT 和 $\Delta\epsilon$ 的同类项,并舍去 3 次以上项,得

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_B - A_0}{A_0} = & A_1 \Delta\epsilon + A_2 (\Delta\epsilon)^2 + \\ & B_1 \Delta T + B_2 (\Delta T)^2 + C_1 \Delta\epsilon \Delta T, \quad (9) \end{aligned}$$

式中,

$$\left\{ \begin{aligned} A_0 &= n_{\text{eff}}(\epsilon_0, T_0) \Lambda(\epsilon_0, T_0), \\ A_1 &= \frac{\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} \right)_{T=T_0, \epsilon=\epsilon_0}}{A_0}, \\ A_2 &= \frac{\left(\Lambda \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon^2} + n_{\text{eff}} \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \epsilon^2} \right)_{T=T_0, \epsilon=\epsilon_0}}{A_0}, \\ B_1 &= \frac{\left(\Lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right)_{T=T_0, \epsilon=\epsilon_0}}{A_0}, \\ B_2 &= \frac{\left(\Lambda \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial T^2} + n_{\text{eff}} \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial T^2} \right)_{T=T_0, \epsilon=\epsilon_0}}{A_0}, \\ C_1 &= \left\{ \left[\Lambda \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon \partial T} + n_{\text{eff}} \frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \epsilon \partial T} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon} + \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right]_{T=T_0, \epsilon=\epsilon_0} \right\} / A_0 \end{aligned} \right., \quad (10)$$

其中 A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 分别为应变一次、二次灵敏度系数, 温度一次、二次灵敏度系数, 温度-应变交叉灵敏度系数。由于 n_{eff}, Δ 在定义域内有连续偏导数, C_1 项中有

$$\frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon \partial T} = \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon} \right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial \epsilon \partial T} = \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(\frac{\partial \Delta}{\partial T} \right) = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta}{\partial \epsilon} \right), \quad (12)$$

所以 FBG 温度-应变和应变交叉灵敏度系数是相等的。把(2)~(5)式代入(10)式, 当(11)式取 $\frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon \partial T} =$

$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon} \right)$ 时, 得

$$C_1 = (\alpha_f + \xi)(1 - p_e) - 2p_e \xi, \quad (13)$$

同上, 当(11)式取 $\frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \epsilon \partial T} = \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right)$ 时, 若把 α_f 和 ξ 看作常数, 得

$$C_1 = (\alpha_f + \xi)(1 - p_e), \quad (14)$$

此时(13)、(14)式不相等, 所以 α_f 和 ξ 不能看作常数。由于 α_f 比 ξ 小一个数量级, 只考虑 ξ 的作用, 当 $p_e = Bn_{\text{eff}}^2$ (B 为与 FBG 材料物理特性有关的常量), (14)式即可修正得(13)式。

2.3 同时测量 FBG 温度、应变的分析

对(9)式进行分析, 对待测结构进行温度、应变测量时, λ_B 为 FBG 中心波长仪器读取数, A_0 为 FBG 初始中心波长, A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 为测量前已标定参数, ΔT 和 $\Delta \epsilon$ 为待求的温度和应变。由于有 2 个未知变量, 则必须要用 2 个 FBG (或者通过对 1 个 FBG 特殊处理产生 2 个尖峰) 进行测量 (分别记为 FBG1、FBG2)。由(9)式得

$$\begin{cases} \frac{\lambda_{B1} - A_{01}}{A_{01}} = A_{11} \Delta \epsilon + A_{21} (\Delta \epsilon)^2 + B_{11} \Delta T + B_{21} (\Delta T)^2 + C_{11} \Delta \epsilon \Delta T \\ \frac{\lambda_{B2} - A_{02}}{A_{02}} = A_{12} \Delta \epsilon + A_{22} (\Delta \epsilon)^2 + B_{12} \Delta T + B_{22} (\Delta T)^2 + C_{12} \Delta \epsilon \Delta T \end{cases} \quad (15)$$

由(15)式即可求得 $\Delta T, \Delta \epsilon$ 。特殊的情况, 当 2 个 FBG 位于悬臂梁上下表面时, λ_{B2} 项中 $\Delta \epsilon$ 取负; 当应变和温度变化不大时, ΔT 和 $\Delta \epsilon$ 的二次项可以忽略。

3 实验分析

3.1 温度-应变、应变-温度交叉敏感相同验证

图 1 中, 把 1 根 FBG 悬挂在支架上, 一头用 AB

胶水固定, 另一头悬挂重物, 放入高低温交变湿热试验箱中。当 FBG 承载不同重物荷载时, 循环加载温度, 每隔 20 °C 记录一次中心波长。实验中, 自发辐射放大 (ASE) 光源采用实验室自制光源, 光谱采集使用 AQ6317B 型光谱仪, 读取光谱信息时采用 mid 档, 分辨率可以达到 0.01 nm。高低温交变湿热试验箱为 SHIPAC 公司 GR-10KA 型试验箱, 温度控制精度误差约为 1 °C。

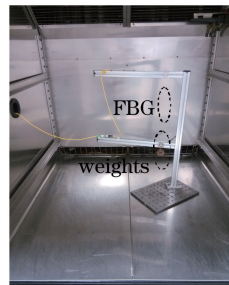


图 1 FBG 同时受温度、应变影响实验图

Fig. 1 Experimental setup to study the effect of temperature and strain on FBG

图 2 为不同应力下的 FBG 温度灵敏度系数一次拟合曲线, 斜率为 $-0.00167 \text{ nm}/(\text{°C} \cdot \text{N})$ 。图 3 为不同温度下的 FBG 应力灵敏度系数一次拟合曲线, 斜率为 $-0.00158 \text{ nm}/(\text{N} \cdot \text{°C})$ 。图 2 是 4 点拟合, 图 3 是 5 点拟合, 这可能造成图 2 的线性度比图 3 的差。利用 FBG 的杨氏模量和光纤的横截面积, 计算出 FBG 的温度-应变和应变-温度交叉敏感灵敏度数分别为 $-1.4743 \times 10^{-6} \text{ nm}/(\text{°C} \cdot \mu\epsilon)$ 、 $-1.3948 \times 10^{-6} \text{ nm}/(\mu\epsilon \cdot \text{°C})$, 两者相差 0.0795×10^{-6} , 原因可能是受实验误差影响, 但差别不大, 近似相等。

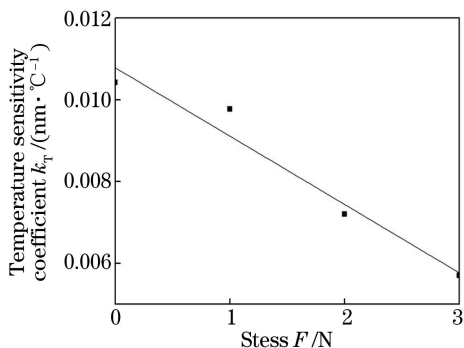


图 2 不同应力下 FBG 温度灵敏度系数一次拟合曲线。

$$k_{TF} = -0.00167 \text{ nm}/(\text{°C} \cdot \text{N}), R^2 = 0.93562$$

Fig. 2 Linear fitting curve of temperature sensitivity coefficient of FBG under different stresses.

$$k_{TF} = -0.00167 \text{ nm}/(\text{°C} \cdot \text{N}), R^2 = 0.93562$$

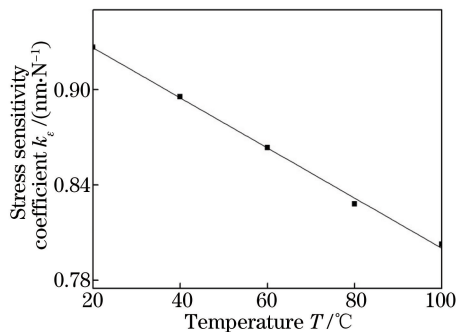


图3 不同温度下FBG应力灵敏度系数一次拟合曲线。

$$k_{FT} = -0.00158 \text{ nm}/(\text{N}\cdot^{\circ}\text{C}), R^2 = 0.99734$$

Fig. 3 Linear fitting curve of stress sensitivity coefficient of FBG under different temperatures.

$$k_{TF} = -0.00158 \text{ nm}/(\text{N}\cdot^{\circ}\text{C}), R^2 = 0.99734$$

3.2 FBG 静力水准仪测量液体深度变化分析

实验中,FBG 静力水准仪使用北京基康公司型号为BGK-FBG-4675的光纤光栅静力水准仪,采用悬臂梁上下表面粘贴FBG的结构。把水准仪放置于室外,监测2个FBG波长的变化,对比温度-应变交叉敏感考虑与否的液体深度变化求解情况。

图4显示3种计算方法FBG静力水准仪内液体深度变化量在一天内的变化情况。客观上容器内液体深度受蒸发影响,但一天内的变化很小。曲线1是不考虑温度-应变交叉敏感计算得到的液体深度,计算结果受环境温度影响较大,与实际误差较大。曲线2是文献[20]图3-13中,通过添加温度-应变交叉敏感修正因子得到的液体深度,基本修正了环境温度的影响。曲线3是通过(15)式计算得到的液体深度,比曲线2更加接近实际液位变化情况,且计算方法更加简单。

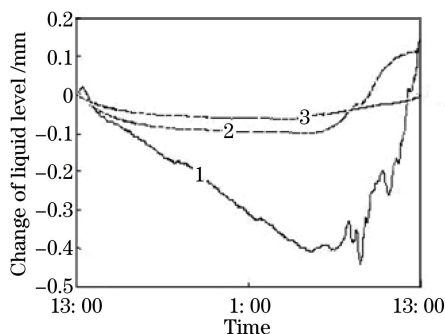


图4 FBG静力水准仪液体深度变化量随时间变化曲线

Fig. 4 Liquid level change curves of FBG hydrostatic levelling instrument in one day

4 结 论

从FBG方程出发,通过二元函数泰勒展开,证

明了FBG的温度-应变和应变-温度交叉灵敏度系数相同,并推导出温度、应变计算方程式。实验结果表明,FBG温度-应变和应变-温度交叉灵敏度系数分别为 $-1.4743 \times 10^{-6} \text{ nm}/(^{\circ}\text{C} \cdot \mu\epsilon)$ 、 $-1.3948 \times 10^{-6} \text{ nm}/(\mu\epsilon \cdot ^{\circ}\text{C})$,两者近似相等。把FBG静力水准仪放置于露天阳台上监测波长变化情况,实验证明用温度、应变计算方程式进行求解能够较为真实地反映液体深度变化情况,并且计算方法简单。因此,建议FBG温度、应变传感器使用前不仅要标定温度、应变敏感一次系数,还要标定温度-应变交叉灵敏度系数,必要时还需标定温度、应变二次敏感系数,并在计算中增加温度-应变交叉敏感项,以便提高FBG测量的精确度。

参 考 文 献

- [1] Du Y, Si J H, Chen T, *et al.* Quasi-distributed high temperature sensor based on fiber Bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 100606.
杜勇, 司金海, 陈涛, 等. 准分布式光纤布拉格光栅高温传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 100606.
- [2] He S L, Hao F H, Liu P F, *et al.* High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0605003.
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605003.
- [3] Qin H Y, Zhu W X, Zhang H L, *et al.* Manufacturing and performance analysis of intelligent steel strand embedded with pressure large scale fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0410001.
覃荷瑛, 朱万旭, 张贺丽, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0410001.
- [4] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, *et al.* Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fiber grating sensors[J]. Electronics Letters, 1994, 30(13): 1085-1087.
- [5] Xie T, Wang X, Li C, *et al.* Fiber Bragg grating differential tilt sensor based on mercury column piston structure[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306002.
谢涛, 王行, 李川, 等. 水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(3):

- 0306002.
- [6] Bhowmik K, Peng G, Luo Y, *et al.* High intrinsic sensitivity etched polymer fiber Bragg grating pair for simultaneous strain and temperature measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2453-2459.
- [7] Marchi G, Stephan V, Dutz F J, *et al.* Femtosecond laser machined micro-structured fiber Bragg grating for simultaneous temperature and force measurements [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34 (19): 4557-4563.
- [8] Sampath U, Kim D, Kim H, *et al.* Fiber-optic sensor for simultaneous strain and temperature monitoring in composite materials at cryogenic condition [C]. Optical Fiber Sensors Conference, 2017: 16999020.
- [9] Liu Q P, Qiao X G, Zhao J L, *et al.* Temperature insensitive acceleration sensing technology based on π phase of double fiber Bragg gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(2): 0205006.
刘钦朋, 乔学光, 赵建林, 等. 双光栅 π 相位差温度不敏感加速度传感技术研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0205006.
- [10] Uchimura R, Wada A, Takahashi N. Fiber Fabry-Perot interferometric sensor using Bragg gratings in polarization maintaining fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2499-2503.
- [11] Zhou Q, Ning T, Pei L, *et al.* Temperature-insensitive fiber Bragg grating strain sensor [J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(6): 414-417.
- [12] Liu Q, Zeng L R, Shu C L, *et al.* Highly integrated FP/FBG sensor for simultaneous measurement of high temperature and strain [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(17): 1715-1717.
- [13] Tong Z R, Wang J Y, Yang X F, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and strain based on core diameter mismatch and fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32 (12): 1206001.
童峥嵘, 王洁玉, 杨秀峰, 等. 基于纤芯失配和光纤布拉格光栅实现温度和应变同时测量 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206001.
- [14] Li J, Zhang W, Gao S, *et al.* Simultaneous force and temperature measurement using S fiber tape in fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(3): 309-312.
- [15] Kang Z X, Sun J, Ma L, *et al.* Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (5): 0506004.
康泽新, 孙将, 马林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统 [J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506004.
- [16] Cao Z, Ji X, Wang R, *et al.* Compact fiber sensor with high spatial resolution for simultaneous strain and temperature measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(5): 1447-1451.
- [17] Farahi F, Webb D J, Jones J D C, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and strain: Cross-sensitivity considerations[J]. Journal of Lightwave Technology, 1990, 8(2): 138-142.
- [18] Jia H Z, Li Y L, Hu M L, *et al.* Analysis of sensitivity of optical fiber Bragg gratings and research on its application [J]. Laser Journal, 1999, 20(5): 12-14.
贾宏志, 李育林, 忽满利, 等. 光纤 Bragg 光栅温度和应变的灵敏度分析及应用探讨 [J]. 激光杂志, 1999, 20(5): 12-14.
- [19] Lü Q N, Zhang Y M, Liu T G, *et al.* Cross-sensitivity of fiber grating sensor measurement [J]. Journal of Tianjin University, 2002, 35(4): 425-438.
吕且妮, 张以谟, 刘铁根, 等. 光纤光栅传感测量中的交叉敏感研究 [J]. 天津大学学报, 2002, 35(4): 425-438.
- [20] Ding P. Research and application of fiber Bragg grating sensor under the action of temperature and strain at the same time [D]. Xiamen: Xiamen University, 2013: 21-31.
丁朋. 温度与应变同时作用下光纤 Bragg 光栅传感器的研究与应用 [D]. 厦门: 厦门大学, 2013: 21-31.