

用于输电铁塔的光纤布拉格光栅倾斜传感器

陈剑¹, 郭永兴^{2*}, 朱方东³, 熊丽⁴

¹华南理工大学广州学院电气工程学院, 广东 广州 510800;

²武汉科技大学机械自动化学院, 湖北 武汉 430081;

³宁波良和路桥科技有限公司, 浙江 宁波 315201;

⁴武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081

摘要 提出了一种基于嵌入式光纤光栅和碳纤维等强度梁的倾斜传感器。介绍了传感器的测量原理和制作方法, 进行了全面的测试。研究表明, 传感器在 $\pm 30^\circ$ 量程内的倾斜测量灵敏度达到 $49.73 \text{ pm}/(^{\circ})$, 精度可达 0.101° , 测量重复性误差仅为 0.62% , 测量函数的线性拟合度达到 0.99992 , 且抗蠕变和温度补偿能力良好, 能满足复杂的电力环境下开展长期倾斜监测的要求。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 倾斜传感器; 输电铁塔; 倾斜监测

中图分类号 TP242; TP212

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.080602

Fiber Bragg Grating Inclination Sensor for Transmission Tower

Chen Jian¹, Guo Yongxing^{2*}, Zhu Fangdong³, Xiong Li⁴

¹School of Electrical Engineering, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510800, China;

²School of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

³Ningbo Lianghe Road & Bridge Technology Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315201, China;

⁴Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract A new inclination sensor based on embedded fiber gratings and carbon fiber equi-strength beams is proposed. The measuring principle and the manufacture methods of this sensor are first introduced. Then this sensor is fully tested. The research results show that, within a measurement range of $\pm 30^\circ$, the sensor possesses a sensitivity of $49.73 \text{ pm}/(^{\circ})$, a measurement accuracy of 0.101° , a repeatability error of 0.62% , and a fitting linear correlation coefficient of 0.99992 . Furthermore, the creep resistance and the good temperature compensating abilities are good. The requirement of long-term inclination monitoring under complex electric environments is met.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; inclination sensor; transmission tower; inclination monitoring

OCIS codes 060.3735; 050.2770; 060.2370

1 引言

光纤光栅敏感元件以光为传感信号, 具备无电检测、不受电磁干扰、可耐高温、无零漂、精度高、一根光纤可串接多个光栅测点等优势。自 20 世纪 90 年代起, 光纤光栅传感技术逐步为世人所熟知, 并迅速成为国内外的研究热点, 在机电、土木、船舶

航运和航天航空等领域应用广泛^[1-4]。无电检测、抗电磁干扰的优势, 使其在电力安全监测领域也备受重视^[5]。电力铁塔作为特高压输电线路系统的重要组成部分, 其往往架设于复杂山区, 易受地质灾害、强风等恶劣环境影响而发生倾斜倒塌等现象, 对特高压的安全传输构成严重威胁。为此, 科研人员们基于光纤光栅的传感优势, 开展了很多电力铁塔安全监

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-10-30; 录用日期: 2018-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51605348)

* E-mail: yongxing_guo@wust.edu.cn

测方面的研究。孙媛凯等^[6]组建了一种塔身应变监测的光纤光栅传感网,并通过分批估计和加权平均时序融合分析,对铁塔进行实时运行状态监测。铁塔线路的拉力监测,尤其是覆冰后的拉力监测对线路、铁塔安全尤为重要,马国明等^[7-8]开展了基于光纤光栅的线路拉力监测的研究。铁塔在异常线路拉力、强风等作用下的塔身倾斜状态监测尤为重要,因此光纤光栅倾斜传感器的研制也备受重视。

悬臂梁具有结构简单且性能稳定等特点,成为光纤光栅倾角传感器的经典弹性元件。如马国明等^[7]将表面贴有光纤光栅的金属悬臂梁集成在拉力传感结构体上,使传感器具备拉力和倾角同时测量的能力。Dong 等^[9]将 3 个光纤光栅分别粘贴在 3 个成 120°间隔布置的钢制悬臂梁上,将一个圆心固定的带摆锤的圆盘通过 3 根细线连接在梁自由端,当外界角度发生变化时,圆盘的摆动引起梁的弯曲变形,通过检测 3 个光纤布拉格光栅(FBG)的中心波长变化来表征倾角的大小与方向。上述研究采用金属钢制的悬臂梁作为弹性元件,不宜工作在电力铁塔等强电磁干扰的场合,这是因为虽然光纤光栅本身抗电磁干扰,但金属弹性梁仍会受电磁干扰而扰动,产生变形应变干扰。Jiang 等^[10]把两个粘贴有光纤光栅的等强度悬臂梁间隔 90°固定,当倾角发生变化时,根据倾角变化的方向不同,两个光纤光栅会发生不同的长度变化,通过空间向量和空间几何计算得到倾角的方向与大小分布情况。研究采用的梁为非金属,可避免电磁干扰影响,但测量灵敏度较低,分别仅为 7.1 pm/(°)和 9.9 pm/(°),无法满足铁塔倾斜对高灵敏的要求。谢涛等^[11]将水银柱活塞与悬臂梁结合,将倾斜引起的水银对活塞的压力传递到梁自由端,引起梁表面的光纤光栅波长变化,但该传感器结构较为复杂,实现难度大。

还有直接将光纤光栅自身作为弹性元件的倾角传感器,如 Chen 等^[12]将重物球与预拉后的光纤光栅固定,当倾角变化时,位于盒内的重物球发生滑动,带动光纤光栅波长变化,进而计算出角度的变化。倪凯等^[13]把 4 根光纤光栅的一端等距固定在圆盘上,另外一端固定在摆锤上,倾角发生变化时,4 个 FBG 会发生不同程度的拉伸,通过测量它们的中心波长变化来计算倾角变化。这种直接拉压光纤光栅的倾角传感器,光栅易被拉断,且光栅暴露于空气中,易受水汽的侵蚀而强度降低。

本文设计了一种带有凸台增敏结构的倾角传感器,但梁的材料为金属,且光纤光栅处于拉伸绷紧状

态,不适于电力铁塔的倾斜监测。基于文献[14],采用碳纤维作为悬臂梁材料,通过层叠制作了厚度为 0.4 mm 的梁主体,将两个光纤光栅布置在梁表面,并采用厚度为 0.1 mm 的两个碳纤维薄片进行保护,使光纤光栅稳固地嵌入至碳纤维层中。开展了灵敏度、重复性、温度补偿、蠕变等核心参数的测试,得到了优越的倾斜测量性能,能够满足倾斜输电铁塔的测量要求。

2 传感器设计与制作

如图 1 所示,所提出的倾斜传感器的主体弹性结构为经典的等强度悬臂梁,材料为碳纤维,其是通过细碳纤维丝经过层层叠加并粘贴固定、压制而成,厚度为 0.4 mm,具备良好的平整度和均匀性;两支栅区长度为 8 mm 的 FBG 沿梁中心线分别布置在上下两表面,光栅的中心部分位于梁固定端的等强度边缘处 10 mm,再分别将两个特制的厚度仅为 0.1 mm 的碳纤维薄片(宽度 0.3 mm,长度 20 mm)覆盖在光纤光栅上,敷设入胶黏剂后铺平压紧,固化后光纤光栅完全嵌入至碳纤维层中,可得到完好保护。梁的自由端固定有两个质量块,作为摆锤,梁底端竖直固定在传感器基壳中,当有倾斜角度产生时,质量块带动梁弯曲,两个光纤光栅感知梁表面的弯曲应变而产生反向的波长漂移,利用两个波长漂移量的差值作为传感器的测量输出,以便消除环境温度交叉敏感并提高测量灵敏度。

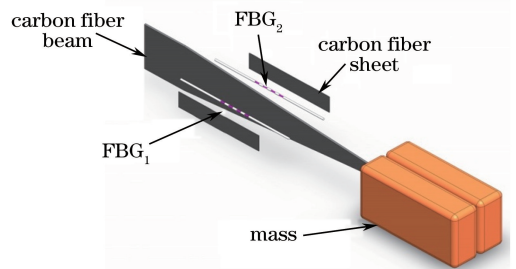


图 1 FBG 倾斜传感器结构原理图

Fig. 1 Structural diagram of FBG inclination sensor

由材料力学知识易知,等强度梁表面的应变 ϵ 与其自由端的垂直受力 F 之间的关系为

$$\epsilon = \frac{6L}{Ebh^2}F, \quad (1)$$

式中: L 为等强度梁的总长; E 为材料的杨氏模量; b 为固定端的宽度; h 为厚度。

如图 2 所示,当有倾斜 θ 发生时,自由端的垂直作用力为

$$F = mg \sin \theta, \quad (2)$$

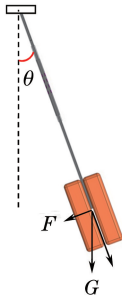


图2 传感器倾斜受力示意图

Fig. 2 Force diagram of sensor under inclination

式中: m 为质量块的质量; g 为重力加速度。结合(1)式和(2)式可得倾斜角度和梁表面应变之间的关系为

$$\varepsilon = \frac{6mgL}{Ebh^2} \sin \theta. \quad (3)$$

根据光纤光栅的基本理论,其中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与轴向作用应变 $\Delta\varepsilon$ 之间的关系为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon, \quad (4)$$

式中: α_f 为光纤的热膨胀系数; ξ 为光纤材料的热光系数; P_e 为光纤材料的弹光系数; λ 为光纤光栅的初始波长。

由材料力学知识可知,悬臂梁的自由端存在弯曲挠度时,其上下两个表面呈现等值反向的弯曲应变^[15],因此粘贴于上下表面的两个光纤光栅在倾斜作用下,波长呈反向漂移,且波长漂移量的差值输出作为传感器输出,剔除了温度影响,再结合(3)式和(4)式可推算出

$$\Delta\lambda = \frac{6mgL(1 - P_e)\lambda}{Ebh^2} \cdot \sin \Delta\theta. \quad (5)$$

(5)式即为倾斜量 $\Delta\theta$ 与其中任意一个光纤光栅中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 之间的理论测量关系。

图3(a)为制作完毕后的碳纤维等强度梁及其主要尺寸,以及嵌入光纤光栅后的弹性体照片,图3(b)为封装至传感器基壳内的传感器照片。

3 实验测试与分析

搭建了如图4所示的倾斜测试装置,光纤光栅倾斜传感器固定在一个旋转台上,旋转台内部安装有一个数字倾斜计作为参考标准,其分辨率为 0.001° 。实验中,先将装置固定在 0° ,然后将装置旋转至 -30° ,以 10° 为步长,增加至 30° ,再降低至 -30° ,形成一次循环实验,最后,再重复该循环实验2次。实验过程中采用基于电荷耦合元件(CCD)原理自主研发的光纤光栅波长解调器实时记录两个光

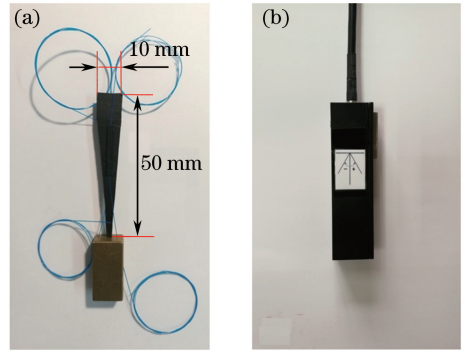


图3 传感器制作。(a)嵌入光纤光栅后的碳纤维梁;(b)封装后传感器照片

Fig. 3 Sensor fabrication. (a) Carbon fiber beam with embedded fiber gratings; (b) photo of sensor after packaging

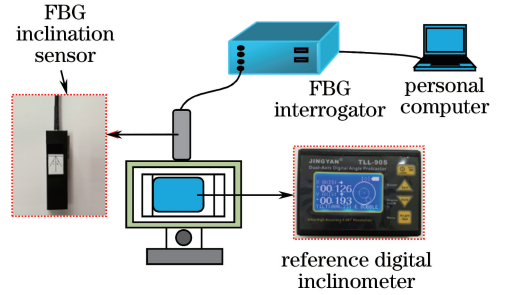


图4 FBG倾斜传感器测试装置示意图

Fig. 4 Schematic of testing device for FBG inclination sensor

栅的波长,解调器的波长分辨率为 0.1 pm ,精度可达 3 pm ,采集频率设定为 20 Hz 。图5(a)为3次重复实验中2个光纤光栅波长变化量的实时数据,其中每个测试值处的波动是由于转动标定装置时在每个测点处存在转动停止、微调至设定角度值等动作引起的,图5(b)为波长变化量差值后(FBG_1 的值减去 FBG_2 的值)的实时数据。

从图5(b)中的实时数据中提取出每个倾斜标定点处稳定的波长变化量数值,可得图6(a)所示的3次循环实验中进程和回程的6条波长变化量差值与倾角之间的关系曲线,可以直观地看出,在 $\pm 30^\circ$ 的量程内,6次进程回程曲线具备良好的重复性,经计算可得3次实验的重复性误差仅为 0.62% 。图6(b)为6条进回程曲线中每个测点处的算术平均值的线性拟合,易得传感器的灵敏度为 $49.73 \text{ pm}/(^\circ)$,且具备优越的测量线性度,线性相关系数 R^2 达到 0.99992 。结合光纤光栅波长解调器的分辨率及精度参数,可知布置有FBG的倾角传感器分辨率可达到 $0.1/49.73 \approx 0.002^\circ$,精度为 $3/49.73 \approx 0.06^\circ$ 。

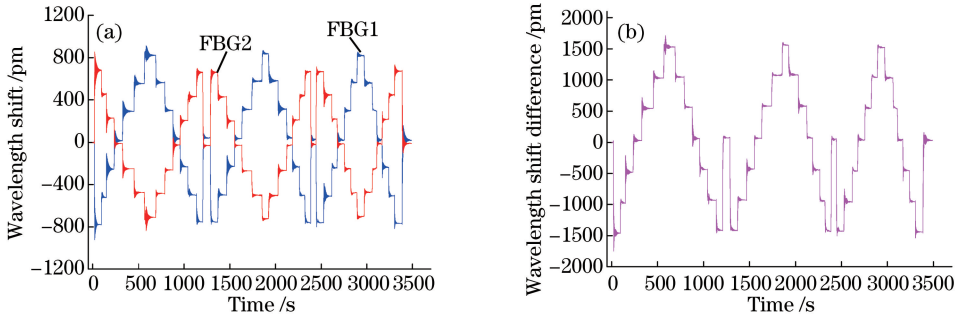


图5 实验结果。(a) 光纤光栅波长变化量的实时数据；(b) 波长变化量差值的输出数据
Fig. 5 Experimental results. (a) Real-time data of wavelength shifts of fiber grating;
(b) output data of wavelength shift difference

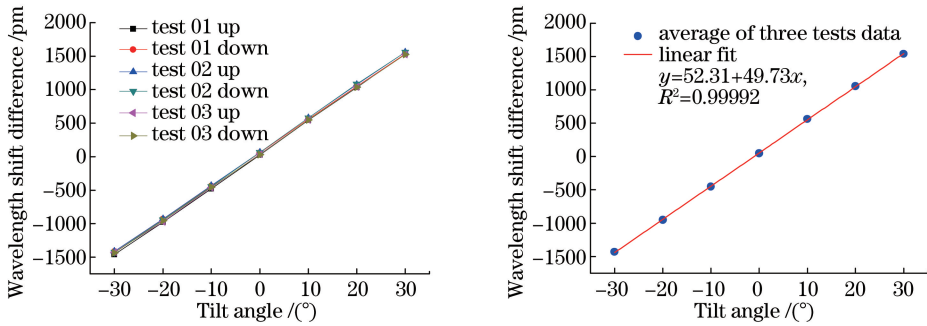


图6 测试数据与拟合。(a) 进程和回程的6条波长变化量差值曲线；(b) 均值拟合结果
Fig. 6 Test data and fitting. (a) Six wavelength shift difference curves during uploading and downloading;
(b) median fitting result

良好的抗蠕变性是传感器长期准确监测的前提,也是检验碳纤维梁中光纤光栅嵌入工艺稳健性的重要指标。将传感器由 0° 状态倾斜至 30° ,并保持超过30 min,解调器以20 Hz的采集频率实时记录下2个光纤光栅的波长数据,图7为整个测试过程的数据时程图,可以看出在传感器倾斜角为 30° 时,波长输出表现出良好的稳定性,说明光纤光栅与碳纤维黏合度高,抗蠕变性良好。

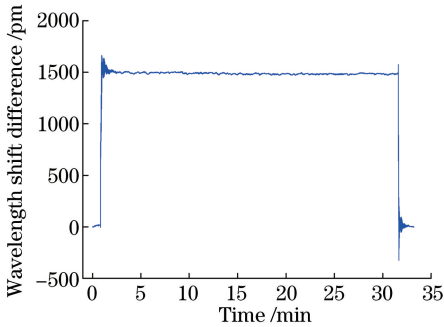


图7 蠕变性能测试的时程图

Fig. 7 Time-history curve of creep performance test

传感器的温度补偿性能同样非常重要,是长期野外工作中保证测量准确性的重要指标,采用差值

输出,理论可以消除温度交叉敏感,但实际的补偿能力还需要温度测试来验证。将封装好的传感器放置在温度试验箱中,从实际环境温度 30°C 升高至 70°C ,实时记录下2个光纤光栅的波长数据。如图8所示,左侧纵轴对应的是2个光纤光栅的实时波长变化量,右侧纵轴为波长变化量的差值输出,即传感器的输出信息,易得,在温度实时变化的环境下,差值输出的波动范围仅在 $-8\sim 4\text{ pm}$ 之间。考虑到解调器自身的精度以及温度箱的温控波动,说明该传感器具备良好的温度补偿能力。

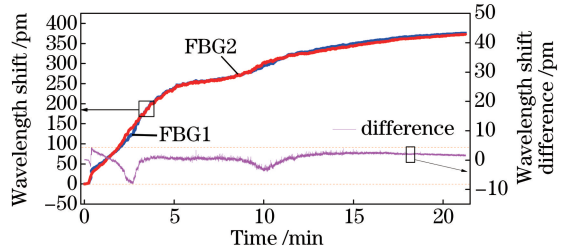


图8 温度测试的时程图

Fig. 8 Time-history curve of temperature test

最后,传感器的实际测量精度受到理论测量函数的拟合误差、解调器精度、温度补偿精度等多个因素,

以及它们之间的交叉作用的影响,为此开展了精度对比测试,将光纤光栅传感器与标准倾角传感器同步倾斜,在 $\pm 30^\circ$ 范围内以 5° 为步长开展测量结果对比。利用标定测试得到的光栅传感器理论测量函数反推

出对应的角度,并与标准倾角传感器数值对比,如图9(a)所示的柱状图以及图9(b)所示的差值情况,可见在所有测试点处,在 0° 测试点处误差最大,为 0.101° ,比单纯由解调精度引起的理论误差 0.06° 大。

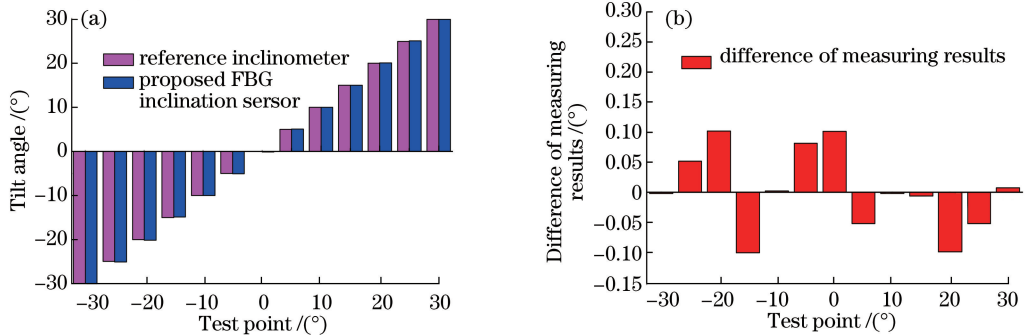


图9 精度测试结果。(a)精度测试对比图;(b)精度绝对差值图

Fig. 9 Precision test results. (a) Comparison diagram for precision test; (b) absolute difference for precision test

4 结 论

研究了一种基于碳纤维等强度梁和光纤光栅的倾斜传感器,作为弹性元件的梁和作为敏感元件的光纤光栅均为非金属材料,不受输电铁塔强电磁干扰的影响。经过测试标定,传感器倾斜测量精度可达 0.101° ,且具备优越的测量重复性、线性、抗蠕变和温度补偿能力,说明传感器内部的黏合度高、封装固定可靠,能够在复杂的野外电力环境下开展长期倾斜监测。

参 考 文 献

- [1] Wang X F, Guo Y X, Xiong L. Hybrid fiber Bragg grating sensor for vibration and temperature monitoring of a train bearing [J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(7): 070604.
- [2] Chen G Y, Ma P, Li J, *et al.* Sensing characteristics of sample fiber Bragg grating based on single helically twisted structure [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090601.
陈高杨, 马鹏, 李杰, 等. 基于单螺旋扭转结构的取样布拉格光纤光栅及其传感特性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090601.
- [3] Li Z Y, Sun W F, Wang H H. Research on the ultra-weak reflective fiber Bragg grating sensing technology based on optical frequency domain reflection technology[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806003.
李政颖, 孙文丰, 王洪海. 基于光频域反射技术的超弱反射光纤光栅传感技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806003.

- [4] Guo Y X, Kong J Y, Xiong H G, *et al.* Advances in robot force/torque tactile sensing technology based on fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050006.
郭永兴, 孔建益, 熊禾根, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的机器人力/力矩触觉传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050006.
- [5] Picanço A F, Martinez M L B, Rosa P C. Bragg system for temperature monitoring in distribution transformers[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(1): 77-83.
- [6] Sun Y K, Li Y N, Hu M Y, *et al.* Research on structure monitoring and sequence fusion of transmission towerbody based on FBG [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(3): 451-455.
孙媛凯, 李英娜, 胡明耀, 等. 输电铁塔塔身光纤光栅结构监测与时序融合研究[J]. 传感技术学报, 2016, 29(3): 451-455.
- [7] Ma G M, Li C R, Quan J T, *et al.* Development of fiber Bragg grating tension & tilt sensor for icing-monitoring of overhead transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 132-138.
马国明, 李成榕, 全江涛, 等. 架空输电线路覆冰监测光纤光栅拉力倾角传感器的研制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 132-138.
- [8] Deng Y S, He H F, Liu F L, *et al.* Application of fiber Bragg grating device in icing monitoring system of transmission lines [J]. Insulators and Surge Arresters, 2014, 259(3): 39-43.
邓元实, 贺含峰, 刘凤莲, 等. 光纤光栅器件在输电线路覆冰监测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2014, 259

- (3): 39-43.
- [9] Dong X Y, Zhan C, Hu K, *et al.* Temperature-insensitive tilt sensor with strain-chirped fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(11): 2394-2396.
- [10] Jiang S C, Wang J, Sui Q M. Distinguishable circumferential inclined direction tilt sensor based on fiber Bragg grating with wide measuring range and high accuracy [J]. Optics Communications, 2015, 355: 58-63.
- [11] 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.
- [12] Chen H J, Wang L, Liu W F. Temperature-insensitive fiber Bragg grating tilt sensor[J]. Applied Optics, 2008, 47(4): 556-560.
- [13] Ni K, Xu H S, He S L. Temperature-independent two-dimensional inclination management with fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1481-1484.
倪凯, 徐海松, 何少灵. 用于二维倾斜测量的温度不敏感的光纤光栅传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1481-1484.
- [14] Zhang Y K, Guo Y X, Li G F. Research of FBG tilt sensor with enhanced sensitivity structure [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2016, 27(3): 253-258.
章易坤, 郭永兴, 李公法. 一种增敏结构的FBG倾角传感器研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(3): 253-258.
- [15] Liu H W. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 140-147.
刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 140-147.