

# 一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光栅应变传感器

陈剑<sup>1</sup>, 郭永兴<sup>2\*</sup>, 张礼朋<sup>3</sup>

<sup>1</sup>华南理工大学广州学院电气工程学院, 广东 广州 510800;

<sup>2</sup>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;

<sup>3</sup>中国水利水电第三工程局有限公司, 陕西 西安 710024

**摘要** 提出一种由双玻璃纤维薄片、石英光纤布拉格光栅, 及两段玻璃纤维护管组成的, 并采用高温胶黏剂封装的片式应变传感器。该传感器不含金属材料, 不受强电力电磁干扰。制备出 3 个传感器原型, 将其安装在等强度悬臂梁上进行全面的性能测试实验。测试结果表明: 3 个传感器均具有良好的测量重复性(误差小于 3.43%)和线性(线性拟合系数均大于 0.999), 应变灵敏度一致性高; 温度补偿误差在 22 pm 以内, 补偿能力良好; 还具有良好的抗蠕变性能。因此, 所设计的传感器具有优越的测量性能, 能够满足野外环境下电力设施的长期应变监测要求。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 应变传感器; 玻璃纤维; 安全监测

中图分类号 TP242; TP212

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.090601

## A Glass-Fiber Packaged Fiber Bragg Grating Strain Sensor

Chen Jian<sup>1</sup>, Guo Yongxing<sup>2\*</sup>, Zhang Lipeng<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510800, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;

<sup>3</sup> Sinohydro Bureau 3 Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** This study proposes a sheet strain sensor comprising two glass-fiber flakes, a silica fiber Bragg grating, and two glass-fiber tubes that is packaged by a high temperature-resistant adhesive. The strain sensor contains no metal material, facilitating resistance to strong power and electromagnetic interference. Three sensor prototypes are manufactured and arranged on a constant strength cantilever beam for comprehensive performance test. Experimental results show that all three sensors possess good measuring repeatability (repeatability error < 3.43%), fitting linear correlation coefficients (> 0.999), and consistency for measuring sensitivities. The sensors also demonstrate good temperature compensation ability (within 22 pm) and creep resistance. These test results indicate that the proposed sensor has a superior measurement performance and can meet the requirements of long-term strain monitoring for electric power facilities in the wild.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; strain sensor; glass-fiber; safety monitoring

**OCIS codes** 060.3735; 050.2770; 060.2370

## 1 引言

输电铁塔等重大电力设施的安全监测技术备受重视, 在台风、覆冰等恶劣环境下其关键部位的形变状态一直是科研人员关心的问题。传统的电测技术

因易受输电环境中电磁干扰、自然界雷击等影响, 应用局限性明显。以光为信号、不受电磁干扰影响的光纤传感为电力环境下传感、检测、监测提供了极佳的技术支撑, 分布式光纤、光纤光栅等技术在电力设施安全监测中逐渐得到应用<sup>[1]</sup>。在所有的监测参量

收稿日期: 2019-08-20; 修回日期: 2019-09-09; 录用日期: 2019-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(51605348, 51827812)、武汉市科技计划项目(2019010702011308)

\* E-mail: yongxing\_guo@wust.edu.cn

中,应变最为基础,也最为重要,它是弯曲、扭转、位移等变形的最直接反映,因此基于光纤原理的有效应变传感检测技术一直是科研人员的关注重点。作为光纤传感的一种,光纤布拉格光栅(FBG)采用波长编码,波长信号不受光源功率波动的影响,且不同波长的光栅可复用在同一根光纤上,对轴向应变非常敏感,在重大电力设施的应变测量中发挥了重要作用。

目前,基于光纤布拉格光栅的应变测量技术主要包括两种:1)采用胶黏剂将裸光栅直接粘贴或嵌入到被测对象表面或内部<sup>[1-2]</sup>。这种方法表面上操作简单方便,但在工程实际中,由于裸光栅十分脆弱,在野外等现场粘贴时,不易精确控制光栅装置的直线度和方向,且裸光栅易折断。因此该方法更适用于实验室开展科研测试,工程现场适应性较差。2)将光纤光栅封装在专门设计的弹性体或基片内,光栅得到保护,往被测物体上安装时操作性更好。该方法在封装光栅时,光栅的固定方式主要有两种——栅区全部粘贴固定和预拉伸后栅区两侧的光纤固定<sup>[3-4]</sup>,封装基体主要有三种——管式结构体<sup>[5-7]</sup>、表面弹性结构体<sup>[8-12]</sup>和基片<sup>[13]</sup>。将光纤光栅封装至管式应变标距体内,一般用于埋入被测物体内部,测量混凝土应变<sup>[4]</sup>、桥梁变形<sup>[5-6]</sup>等。表面应变测试时,光纤光栅往往被封装至特殊设计的表面安装式弹性结构体内,并采用柔性铰链结构来实现光纤光栅的应变灵敏度灵活设计<sup>[8-10]</sup>。在上述两种结构体内,光纤光栅普遍采用的是预拉伸后栅区两侧光纤固定的封装方式,虽然可以保障光栅不易啮啾,但由于预拉伸量有限,被测对象的负向应变测量范围易受到限制。此外,在安装时往往需要在被测物体上打孔等,易破坏本体的结构强度。另外一种固定方式是将光纤光栅通过栅区全部粘贴固定的方式封装在基片内<sup>[11-13]</sup>,光纤光栅可随着被测物体整体拉伸或压缩,应变测量的量程更大。该方式中,可直接将光栅粘贴在被测物体上,不改变被测本体的结构。

本文设计出一种可用于野外电力铁塔变形应变监测的光纤布拉格光栅应变传感器。若采用封装至管式、表面式弹性结构的设计,安装时破坏被测结构,电力设备不允许;而现有的基片式封装尺寸较大,操作不便,且未考虑电力铁塔存在日照高温等实际工况。为此,本文采用与石英光纤布拉格光栅同质的玻璃纤维薄片和玻璃纤维维护管,利用高温胶黏剂将光纤布拉格光栅压制、封装在两层玻璃纤维片内。光栅与纤维板同质,热胀冷缩性能相同,粘合固

定更可靠,且具备高温环境适应性。相关实验测试结果表明,所设计的传感器性能良好,在电力铁塔等设施的应变监测中将具有良好的适用性。

## 2 传感器设计与制备方法

### 2.1 传感器封装结构

如图1所示,所提出的应变传感器主要包括两片玻璃纤维薄片、单模石英光纤布拉格光栅(栅区的有效长度约为8 mm),以及两根玻璃纤维维护管。玻璃纤维薄片的厚度为0.2 mm,宽度为5 mm,总长度为30 mm,两端的梯形部分(长5 mm)用于夹覆玻璃纤维维护管,中间20 mm长的区域用于夹覆光纤布拉格光栅;两段外径均为1 mm的玻璃纤维维护管分别保护栅区两侧的尾纤,护管深入至纤维薄板的梯形内,光纤布拉格光栅拉直后沿薄片长度方向平整布置在中央位置。在两层薄片内敷设耐高温胶黏剂,采用专门的压制夹具将上述各部件压平后,高温固化形成一体。

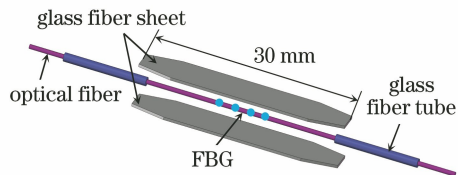


图1 光纤布拉格光栅应变传感器的封装结构图

Fig. 1 Package structure of the proposed FBG strain sensor

### 2.2 制备方法

图2所示为光纤布拉格光栅应变传感器的制备方法与流程。图2(a)为专门加工制造的、与玻璃纤维薄片和护管尺寸匹配的压制夹具,图2(b)为各个零部件在固化前的位置示意图。首先将下方薄片放置在金属平台上,套有护管的光纤光栅拉直后置于薄片中央位置,护管端部位于薄片的梯形区域内;其次,采用美国Epoxy Technology公司生产的糊状耐高温胶黏剂均匀涂覆在光纤光栅、下方薄片和护管上,然后盖上涂有胶黏剂的第二薄片,清除多余的胶黏剂后使用夹具压住上述各部件,并将夹具使用胶带固定(薄片下方的金属平台表面区域涂有油脂,防止胶黏剂固化过程中因与金属平台粘接而无法分离);最后,将上述各封装部件整体放入温度为120 °C的温度箱内,如图2(c)所示,5 min后取出,实现光纤光栅、玻璃纤维薄片、玻璃纤维维护管的融合固定,形成如图2(d)所示的片式封装的光纤光栅应变传感器。

该封装设计的技术优势主要有如下3点:1)组

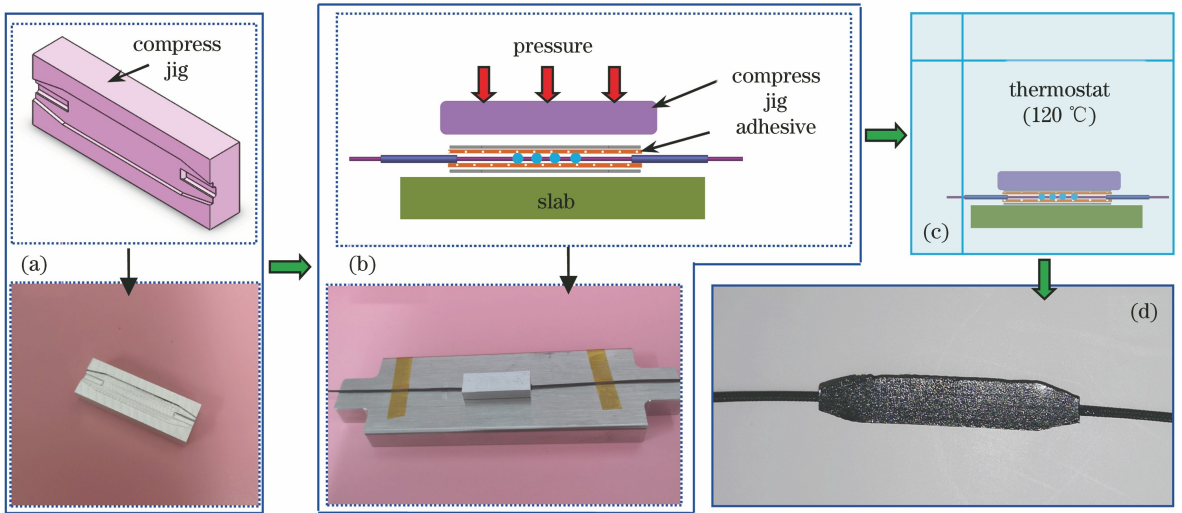


图2 光纤布拉格光栅应变传感器的制备过程。(a)压制夹具及照片;(b)传感器部件封装示意图及照片;  
(c)传感器置于高温箱时的示意图;(d)传感器照片

Fig. 2 Preparation process for the FBG strain sensor. (a) Compress jig and its photo; (b) package diagram for sensor components and its photo; (c) sensor in high-temperature thermostat; (d) photo of the FBG strain sensor

成光纤光栅应变传感器的玻璃纤维板、玻璃纤维管与石英光纤光栅同质,并且采用的胶黏剂为光学玻璃专用胶,它们之间无热膨胀系数差异,因此四者之间的黏合将更加牢固,更有利于形成整体的传感体;2)所有封装部件均为非金属,不受电力环境中强电磁的干扰,环境适应性更强;3)玻璃纤维板可耐170 °C高温、玻璃护管可耐300 °C高温,封装过程也是采用耐高温胶黏剂在120 °C高温环境中进行,传感器将具备良好的高温适应性和稳定性,更好地满足电力设施在野外强光照条件下表面60~70 °C的实际工况需求。

### 3 实验测试与分析

对设计的光纤光栅应变传感器性能进行测试,搭建了如图3所示的实验装置,包括悬臂梁加载装置、光纤布拉格光栅解调器、计算机等。制备了3个应变传感器(标识为sensor 1~3),将它们布置在等强度悬臂梁表面,悬臂梁固定在支架上,可在梁自由端悬挂标准砝码实现加载。应当指出的是,所设计的应变传感器的中段部分(矩形结构)含有光纤光栅,是应变测量的敏感区域,两端的梯形结构为非传感区域,因此在应变传感器粘贴布置过程中,只需要将中段的矩形部分粘贴即可,这样可以避免出现因全部粘贴而带来的整个传感器应力分布不均的情况。将本课题组自主研发的基于CCD原理的光学解调器用于实时记录实验过程中3个传感器的波

长,解调器的波长分辨率0.1 pm,精度可达3 pm,采集频率设定为20 Hz。

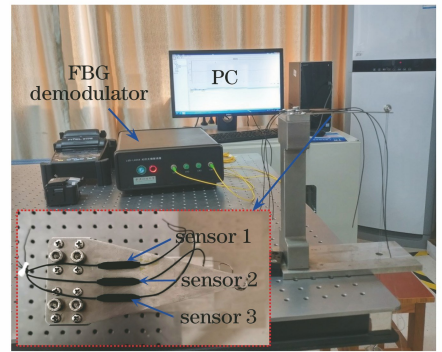


图3 光纤布拉格光栅应变传感器实验测试装置  
Fig. 3 Schematic of the testing device for the proposed FBG strain sensors

首先测试了传感器的应变响应性能,在等强度悬臂梁的自由端从0开始,依次悬挂100 g的标准砝码至8个,每个砝码加载后均保持5~8 s,待波长输出稳定后,再逐个取下砝码,直至0,形成一次循环实验。重复该循环实验3次。图4为整个实验过程中3个应变传感器波长输出变化量的时程图,从图4的实时数据中提取出每个加载测试点的稳定波长变化量,可得到如图5(a)~(c)所示的3个传感器在3次循环实验中进程和回程的6条波长变化量差值与梁表面弯曲应变的关系曲线,进一步地,对这6条曲线的算术平均值进行线性拟合,可得到3个应变传感器的具体灵敏度数值[图5(d)~(f)].如

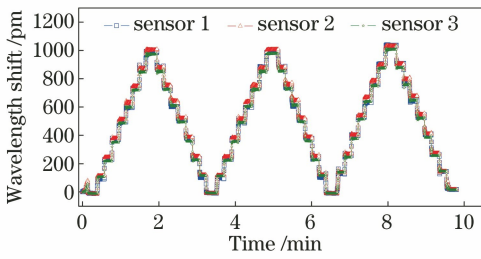


图4 应变性能三次循环测试时程图

Fig. 4 Time-history curves in three loop tensile test for strain performance

表1所示,对图5中3个传感器的测试数据进行重复性误差计算对比,并将灵敏度、线性度进行对比,发现这3个传感器均具有良好的测量重复性,重复性误差的最大值仅为3.43%;3个传感器测量的线性度均超过0.999;sensor 1和sensor 3的应变响应灵敏度几乎相等,而sensor 2的灵敏度略大,这主要是由传感器自身的封装工艺误差,以及布置至悬臂梁时产生的粘贴误差引起的,3个传感器整体上表现出良好的一致性,说明所设计的传感器具有良好的应变测量能力。

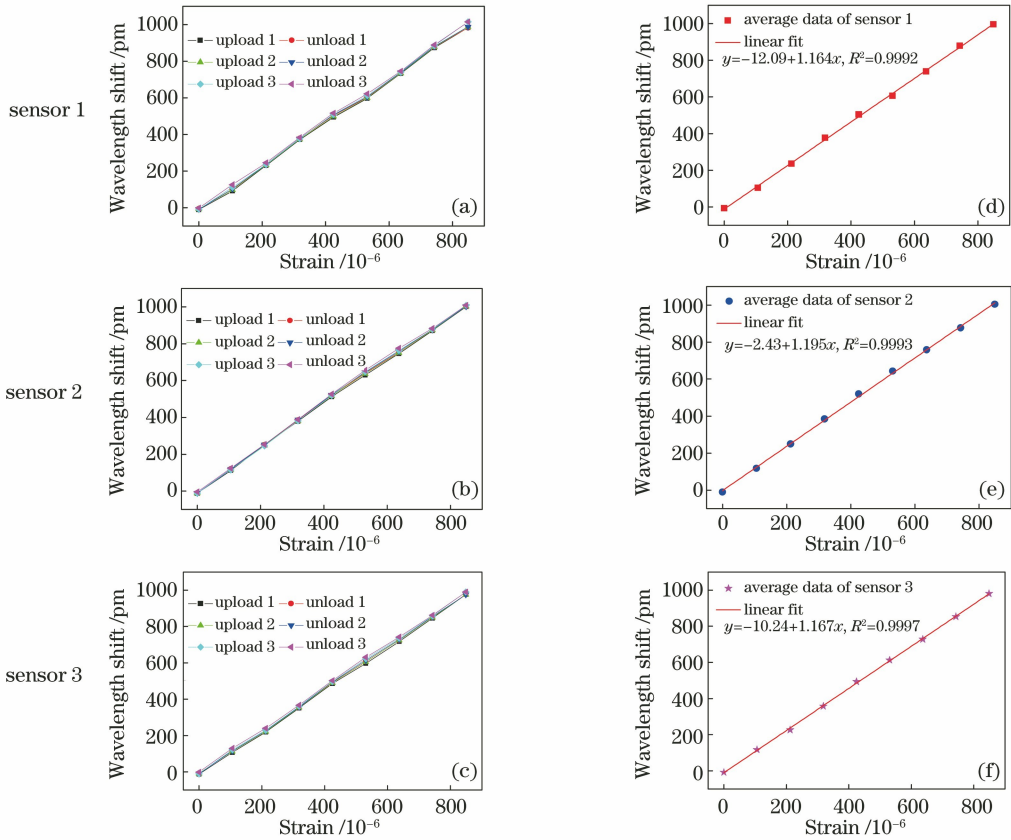


图5 实验结果。(a)~(c)测试进程和回程的6条波长变化量差值曲线;(d)~(f)均值拟合情况

Fig. 5 Experimental results. (a)–(c) Six differential outputs of the wavelength shifts; (d)–(f) linear fitting results of average of experimental data

表1 三个传感器的应变测量性能对比

Table 1 Comparison of the strain measurement performance of the three sensors

Sensor	Sensitivity / $\mu\text{m}$	Linearity $R^2$	Repeatability error / %
1	1.164	0.9992	3.35
2	1.195	0.9993	2.88
3	1.167	0.9997	3.43

其次,由于光纤布拉格光栅对轴向应变和环境温度交叉敏感,因此应变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应变准确测量

的重要指标。实际测量中,往往将两个应变传感器分别安装在被测对象发生正、负应变的对应面上,或者将其中一个传感器布置在被测对象上、另外一个传感器布置在相同材质但不受力的物体表面,当作温度补偿光栅。这两种方法均是两个传感器波长变化量的差值输出作为应变测量结果,将环境温度引起的同向波长漂移通过差值后剔除。假设粘贴在悬臂梁上的3个传感器互为温度补偿光栅,将它们放置在温度试验箱中,从室温24℃升高至75℃,实时记录3个传感器的波长数据。如

图6所示,左侧纵轴表示3个传感器的实时波长变化量,右侧纵轴表示它们两两之间的差值,即温度补偿后传感器的输出信息(理论上差值后的补偿输出为0)。可以看到,差值输出的波动范围仅在22 pm以内,考虑到解调器自身的精度以及温度箱的控制波动问题,说明3个传感器之间已具有良好的温度补偿能力。

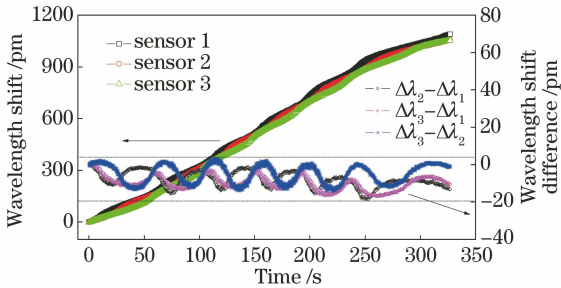


图6 三个传感器的温度补偿能力测试结果

Fig. 6 Test results of temperature compensating capacities for the three sensors

抗蠕变性能是指在外界荷载不变的情况下,传感器输出值的稳定能力,该性能对长期实时监测的精确性具有重要影响,为此对3个传感器的抗蠕变性能进行测试。鉴于传感器需要长期在野外的电力铁塔上测量,夏季铁塔表面温度可能达到60℃以上,为此本研究将实验装置放置在大型温度箱内,当箱内温度稳定在70℃时手动触发一个恒定的弹簧拉伸力,保持超过160 min后再恢复至空载状态,观察该过程中传感器波长的波动情况。如图7所示,3个传感器波长漂移量表现出良好的稳定性,最大波动量小于19 pm,选取第90 min处的数据放大后发现,短期内的波动量很小,基本在光学解调器的波长精度波动范围内,进而证明所设计的光纤光栅应变传感器具有良好的抗蠕变能力。

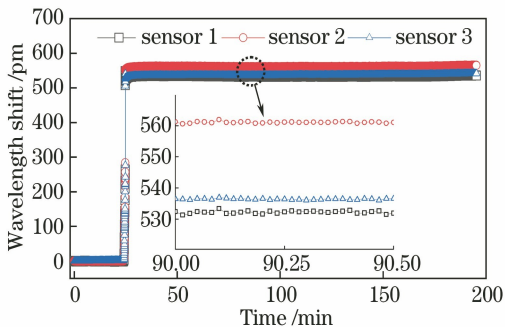


图7 三个传感器蠕变性能测试时程图

Fig. 7 Time-history curves of creep performance tests of the three sensors

## 4 结 论

设计出一种玻璃纤维封装的光纤布拉格光栅应变传感器,脆弱的石英光纤光栅得到完好的封装保护,工程现场的可操作性和适应性更强。对所设计的3个传感器的性能进行全面测试,结果表明,采用所提出的封装方法和工艺制备的应变传感器在线性、重复性、一致性、温度补偿能力及抗蠕变性能等方面均表现出良好性能,在野外恶劣环境的电力铁塔等设备的应变监测中具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Xie K, Zhang H Y, Zhao Y S, et al. Structural health monitoring of power transmission system based on optical fiber sensor under transmission line galloping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070606.  
谢凯, 张洪英, 赵衍双, 等. 导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070606.
- [2] Arsenault T J, Achuthan A, Marzocca P, et al. Development of a FBG based distributed strain sensor system for wind turbine structural health monitoring [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(7): 075027.
- [3] Guo Y X, Kuang Y, Xiong L, et al. Sensing and temperature-compensation characteristics of fiber Bragg gratings under different packaging ways [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110601.  
郭永兴, 匡毅, 熊丽, 等. 不同封装方式的光纤光栅传感与温补特性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110601.
- [4] Chen G, Ding K Q, Feng Q B, et al. Strain transfer mechanism of end-bonding fibre Bragg grating sensors based on linear viscoelasticity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 110604.  
陈光, 丁克勤, 冯其波, 等. 线黏弹性端接布拉格光纤光栅传感器应变传递机理[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 110604.
- [5] Biswas P, Bandyopadhyay S, Kesavan K, et al. Investigation on packages of fiber Bragg grating for use as embeddable strain sensor in concrete structure [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 157(1): 77-83.
- [6] Zhao X F, Song G B, Fernandez M, et al. Research on one kind of long sensing gauge fiber Bragg grating

- sensor with pretension [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(5): 576-579.
- 赵雪峰, 宋钢兵, Fernandez M, 等. 一种预张拉大标距光纤光栅应变传感器的研究[J]. 光电子·激光, 2009, 20(5): 576-579.
- [7] Guo Y X, Zhang D S, Zhou Z D, et al. A novel surface-mounted FBG strain sensor and its application in highway bridge engineering [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(3): 435-441.
- 郭永兴, 张东生, 周祖德, 等. 表面式FBG应变传感器及其在高速公路桥梁工程中的应用[J]. 光电子·激光, 2014, 25(3): 435-441.
- [8] Yuan Z L, Gong Y, Ma Y Y, et al. Structure optimization of fiber Bragg grating strain sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1261-1266.
- 袁子琳, 龚元, 马耀远, 等. 光纤布喇格光栅应变传感器结构优化研究[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1261-1266.
- [9] Wang T T, Yuan Z L, Gong Y, et al. Fiber Bragg grating strain sensors for marine engineering [J]. Photonic Sensors, 2013, 3(3): 267-271.
- [10] Guo Y X, Kong J Y, Liu H H, et al. Design and investigation of a reusable surface-mounted optical fiber Bragg grating strain sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2016: 16(23): 8456-8462.
- [11] Xu X Y, Zhu X Y, Xiao S Q. Multi-loop desensitization fiber Bragg grating strain sensors using low temperature plasma technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070602.
- 徐潇宇, 朱星盈, 肖少庆. 应用低温等离子体技术的多环减敏型FBG应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070602.
- [12] Zhu X Y, Liu H L, Ni Y, et al. New double-loop desensitization FBG strain sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030605.
- 朱星盈, 刘化利, 倪屹, 等. 新型双环减敏式光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030605.
- [13] Zhou Y H, Zhao Z G, Li Y N, et al. An embedded FBG strain sensor used in the dry-type air-core reactor health monitoring [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(3): 422-426.
- 周延辉, 赵振刚, 李英娜, 等. 一种埋入式FBG应变传感器在干式空芯电抗器健康监测中的应用[J]. 光电子·激光, 2015, 26(3): 422-426.