

水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器

谢 涛, 王 行, 李 川, 田素辉, 赵振刚, 李英娜

昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500

摘要 为了适应公路边坡倾斜监测的需要,提出了一种新型的水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅(FBG)倾角传感器。传感器所测对象的倾角发生变化时,水银柱在金属壳内的有效长度发生改变,对传压活塞的压力也相应改变。传压活塞通过传力杆将水银的压力传递给等强度悬臂梁自由端,使得粘贴在等强度悬臂梁左右两侧的 FBG 中心波长变化。利用有限元方法在不同倾斜角度下运用两点粘贴法分析等强度悬臂梁与 FBG 的应力特性,根据仿真参数研制了倾角传感器,并对该传感器进行了角度标定实验和温度敏感实验。实验结果表明,FBG 倾角传感器量程范围为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$,灵敏度为 $21.8\text{ pm}/(^{\circ})$,拟合度 R^2 为 0.998,重复性为 1.12%。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 倾角传感器; 有限元分析

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0306002

Fiber Bragg Grating Differential Tilt Sensor Based on Mercury Column Piston Structure

Xie Tao, Wang Xing, Li Chuan, Tian Suhui, Zhao Zhengang, Li Yingna

School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract In order to meet the need of slope monitoring, a new fiber Bragg grating (FBG) differential tilt sensor combining mercury column and piston is proposed. When the tilt angle of measured object changes, the pressure to the piston changes as the effective mercury column length changes in the metal shell. The pressure of the mercury is passed to the free end of the cantilever beam by the piston and leads to the central wavelength change of FBG, which is pasted on the left and right ends of the cantilever beam. By use of the finite element method, the stress characteristics of the cantilever beam and FBG are analyzed with two point bonding method at different tilt angles. According to the simulation parameters, the tilt sensor is developed. Angle calibration test and temperature sensitivity test are carried out on the sensor. Experimental results show that the measuring range of the FBG tilt sensor is $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$; sensitivity is $21.8\text{ pm}/(^{\circ})$; the fitting degree R^2 is 0.998, and the repeatability is 1.12%.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; tilt sensor; finite element analysis

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 060.3738

1 引 言

近年来山体滑坡频发,大规模的边坡失稳灾害会造成村镇、工厂被掩埋,江河、交通阻塞,严重破坏生存环境,已成为威胁人民生命财产安全的主要自然灾害之一。边坡内部位移量是研究和预测边坡稳定性的重要参量。通过在边坡钻孔安装测斜仪,实时监测测斜孔获得的数据是预测边坡失稳灾害的重要依据^[1]。目前用于测斜的倾角传感器主要以电类倾角传感器为主,但是电类传感器是有源器件^[2-3],防水性能、稳定性能与抗腐蚀性能较差,在恶劣环境下长期使用易损坏或发生零点漂移等现象,严重影响了监测信息的有效性、稳定性与置信度。光纤布拉格光栅(FBG)传感器有抗电磁干扰、防水性能强、动态范围宽、灵敏度高、便于组

收稿日期: 2016-08-19; **收到修改稿日期:** 2016-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(51567013)

作者简介: 谢 涛(1974—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感技术、监测检测技术、通信工程方面的研究。

E-mail: 13577029689@163.com

导师简介: 李 川(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术、监测检测技术方面的研究。

E-mail: boatriver@eyou.com

网、可实现分布式测量等优点,为实现边坡灾害监测与预测提供了可行的途径^[4-12]。因此,研究适用于边坡稳定性监测的光纤光栅倾角传感器具有重要的现实意义。倪凯等^[13]设计了基于 FBG 的温度不敏感的倾斜传感器,测量精度高,但光纤光栅容易疲劳受损,测量范围不大;包华龙等^[14]设计了一种双光纤光栅实现温度不敏感的二维倾斜角传感器,对温度不敏感,实现了二维检测,但测量范围不大;章易坤等^[15]设计了一种增敏结构的 FBG 倾角传感器,测量范围大、灵敏度高,但加工难度大。以上方法均很难运用于边坡安全监测中^[16-17],在边坡安全监测中需要一种测量范围大、结构简单、能够进行长期监测的倾角传感器。

本文提出了一种新型的 FBG 倾角传感器,通过水银柱与活塞相结合把倾斜量转化为压力,运用差动原理降低环境温度对检测的影响,实现了倾角的高灵敏度检测。

2 传感器原理与分析

2.1 传感器结构与理论计算

如图 1 所示,FBG 倾角传感器由水银柱金属壳、水银柱支撑架、传压活塞、传力杆、等强度悬臂梁、传感器外壳、FBG、水银管支架、水银、悬臂梁支撑柱组成。水银充满水银柱金属壳,通过传压活塞密闭于水银柱金属壳,水银柱金属壳由水银柱支撑架固定在外壳内,传压活塞右端连接传力杆的左端,传力杆右端连接等强度悬臂梁的自由端,将两组 FBG,即 FBG1 和 FBG2,预拉伸 1000 微应变($\mu\epsilon$)后分别粘贴在等强度悬臂梁的左右两侧,等强度悬臂梁固定端固定于悬臂梁支撑柱上端,悬臂梁支撑柱下端与外壳连接,光栅的导出光纤通过引出孔引出。当倾角传感器所测对象的倾角发生变化时,水银在水银柱金属壳内的有效长度将发生改变,使其对传压活塞的压力发生相应改变,传压活塞通过传力杆把水银的压力传递给等强度悬臂梁自由端,带动粘贴在等强度悬臂梁左右两侧的 FBG 拉伸和压缩,将被测对象倾角变化的检测转化为对 FBG 波长的调制。

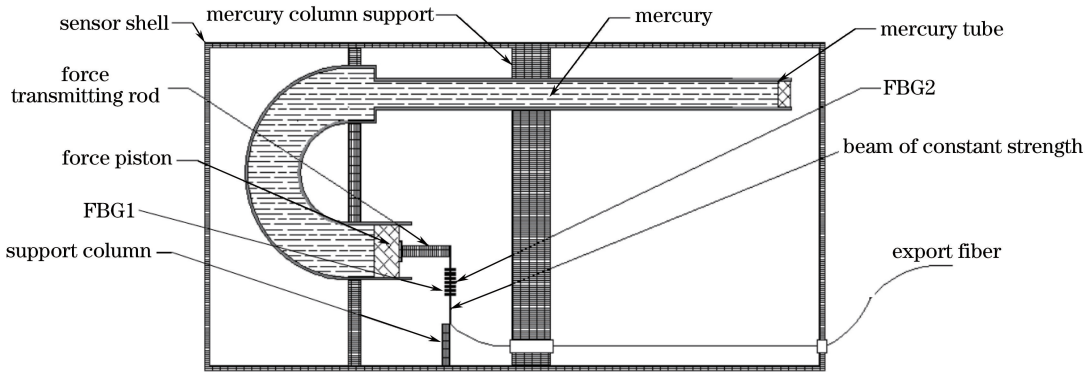


图 1 传感器结构原理图

Fig. 1 Schematic of sensor structure

如图 2 所示,水银对传压活塞所施加的压强 P 可表示为

$$P = \rho g L \sin \theta + \rho g H \cos \theta, \quad (1)$$

式中 ρ 为水银密度, g 为重力加速度, L 为水银柱长度, H 为水银柱转弯部分的高度, θ 为传感器的倾斜角。

传压活塞通过传力杆传递给等强度悬臂梁自由端的压力 F 可表示为

$$F = PS, \quad (2)$$

式中 S 为传压活塞和水银接触面的面积。

等强度悬臂梁左右表面各点的应变为

$$\epsilon = 6Fl / (Bh^2 E), \quad (3)$$

式中 l 为等强度悬臂梁的工作长度, h 为等强度悬臂梁的厚度, B 为等强度悬臂梁固定端的宽度, E 为等强度悬臂梁的弹性模量。

将(1)、(2)式代入(3)式得

$$\epsilon = 6\rho g l S (L \sin \theta + H \cos \theta) / (Bh^2 E). \quad (4)$$

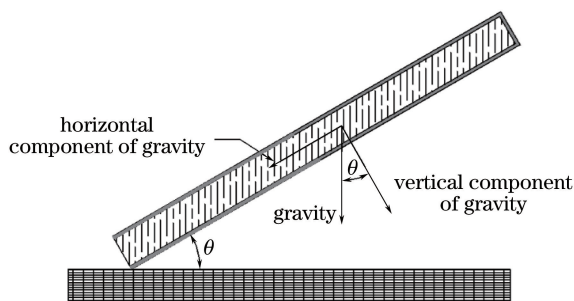


图 2 水银柱受力示意图

Fig. 2 Schematic of mercury column

当等强度悬臂梁受压力 F 的作用弯曲时,左表面受到的是拉伸应变 ϵ ,而右表面受到的是压缩应变 $-\epsilon$,若两组光栅处于同样的温度场中,则应变信号 ϵ 可表示为

$$\epsilon = \frac{\lambda_B(\epsilon, T) - \lambda_B(-\epsilon, T)}{2S_\epsilon \cdot \lambda_B}, \quad (5)$$

式中 $\lambda_B(\epsilon, T)$ 为左表面受到拉伸应变后 FBG1 的反射波长, $\lambda_B(-\epsilon, T)$ 为右表面受到压缩应变后 FBG2 的反射波长, S_ϵ 为 FBG1、FBG2 的应变敏感系数, λ_B 为 FBG1 与 FBG2 的中心波长。该方案属于机械补偿,并不要求额外的温度检测,关键是两组光栅 FBG1 与 FBG2 应由同一型号的光敏光纤制成。

粘贴在等强度悬臂梁左右两侧的光栅 FBG1 与 FBG2 中心波长差值 $\Delta\lambda$ 为

$$\Delta\lambda = \lambda_B(\epsilon, T) - \lambda_B(-\epsilon, T). \quad (6)$$

将(5)、(6)式代入(4)式得

$$\Delta\lambda = 12\rho g S l S_\epsilon \lambda_B (L \sin \theta + H \cos \theta) / (B h^2 E). \quad (7)$$

(7)式为被测对象倾斜角 θ 与 FBG 波长移位 $\Delta\lambda$ 之间的数学模型,通过测量 FBG 波长移位就可以计算出被测对象的倾斜角。由此可知,波长变化量由倾角的正弦量和余弦量共同决定。在实际加工中水银柱长度 L 要远大于水银柱转弯部分的高度 H ,并且小角度的情况下正弦函数要比余弦函数灵敏得多,因此在小角度测量区倾角的正弦量为决定因素。

2.2 有限元分析

运用有限元对所设计的传感器进行了仿真,设定等强度悬臂梁厚度为 1 mm,固定点宽度为 17 mm,工作长度为 60 mm,以 FBG 中点为中心,相隔 10 mm 的两点通过环氧树脂粘贴在悬臂梁上。图 3 为测试倾斜角度为 40° 时等强度悬臂梁与 FBG 应力分布情况。

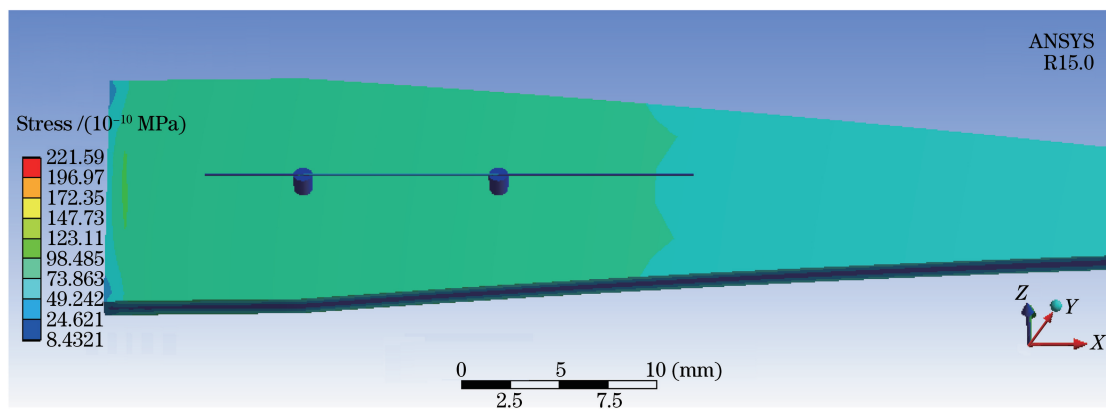


图 3 在 40° 测试环境下 FBG 与悬臂梁应力云图

Fig. 3 Stress image of FBG and cantilever beam when the tilt angle is 40°

表 1 列出了在不同测试倾斜角度下第一、第二粘连点悬臂梁以及 FBG 应力分布情况。由此可以看出,运用两点粘连法把 FBG 粘贴到等强度悬臂梁的应力均匀分布区,当测试角度从 10° 上升到 50° 时,悬臂梁第一粘连点处应力与悬臂梁第二粘连点处应力均非常接近,说明等强度悬臂梁通过两点粘连法粘贴 FBG 后,在其应力均匀分布区应力仍保持均匀分布;光纤光栅的应力随着测试角度的增加而增加,其应力接近粘连两

端悬臂梁的应力值的 1/3, 设定悬臂梁的材料为弹性钢, 弹性模量取 200 GPa, FBG 弹性模量取 75 GPa, FBG 的弹性模量接近悬臂梁弹性模量的 1/3, 根据应变等于应力除以弹性模量, FBG 应变变化接近粘贴点悬臂梁的应变变化。由以上分析可知, 通过两点粘连法, 把 FBG 粘贴到悬臂梁应力均匀分布区, 可以将悬臂梁的应变准确地传递到光纤光栅上。

表 1 不同测试倾斜角度下悬臂梁以及 FBG 应力分布

Table 1 Stress distribution of cantilever beam and FBG for different test angles

Angle / (°)	Stress of cantilever beam at the 1 st adhesion point /MPa	Stress of cantilever beam at the 2 nd adhesion point /MPa	FBG stress /MPa
10	20.42	20.39	7.02
20	40.42	40.41	14.02
30	59.14	59.10	20.35
40	76.02	75.92	26.25
50	90.64	90.52	31.84

3 实验及结果分析

根据仿真数据, 选择水银柱长度为 20 cm、活塞横截面积为 2 cm², 等强度悬臂梁厚度为 1 mm、固定点宽度为 17 mm、工作长度为 60 mm, 研制了 FBG 倾角传感器。把 FBG 按差动方式粘贴到悬臂梁左右两侧, 竖直左右倾斜悬臂梁, FBG 中心波长没有明显变化, 说明在当前设计尺寸下悬臂梁自重对测量没有影响。通过测斜平台、标准角度模块、水平仪、FBG 解调仪, 研究了检测倾角对光栅中心波长的影响, 并通过重复测量实验来研究传感器重复使用中的稳定性, 测试系统如图 4 所示, FBG 解调仪为自制设备, 光纤光栅是外购器件, 中心波长为 1531 nm, 波长误差为 0.5 nm 以内, FBG 长度 10~14 mm, 反射率大于等于 80%。



图 4 倾角传感器测试实物图

Fig. 4 Photo of the tilt sensor test

在保持室温不变的情况下, 对传感器进行倾角标定实验。每 5° 为一步, 置换不同的标准角度模块, 测量范围为 0°~80°, 实验得到传感器压力光栅 FBG1、FBG2 中心波长随倾角的变化曲线, 如图 5 所示。由图 5

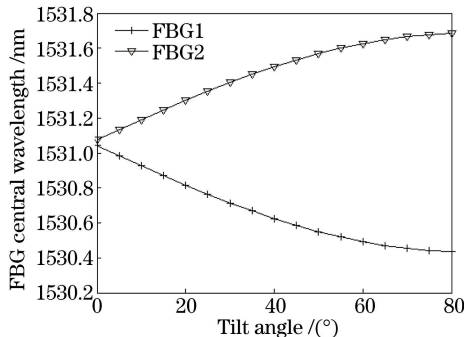


图 5 传感器中心波长随倾角变化曲线

Fig. 5 Sensor central wavelength versus tilt angle

可看出,传感器中心波长在 $0^\circ\sim 80^\circ$ 测量范围内随倾角的变化不是线性的,根据(7)式的理论分析可知,在小角度区倾角的正弦函数值决定波长的变化,正弦函数值在小角度测量区趋近线性变化。观察实验数据,舍去偏离线性测量范围较大的区域,设定传感器的使用量程为 $0^\circ\sim 40^\circ$,在设定量程内分析传感器性能。

3.1 传感器倾角敏感特性

在 $0^\circ\sim 40^\circ$ 测量范围内,对 FBG1 与 FBG2 中心波长差值 $\Delta\lambda$ 、测量倾角 θ 进行数据拟合,得到二者的关系为 $\Delta\lambda = 0.0218\theta + 0.0512$,其关系曲线如图 6 所示。倾角传感器的灵敏度为 $21.8 \text{ pm}/(^{\circ})$,拟合度 R^2 为 0.998。

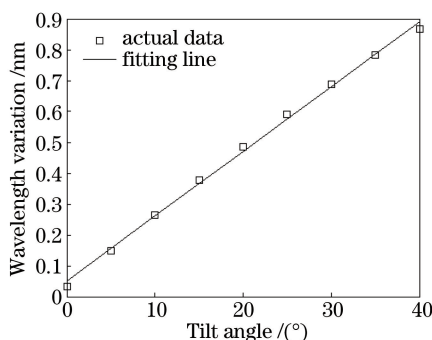


图 6 中心波长变化值随倾角变化

Fig. 6 Wavelength variation versus tilt angle

3.2 传感器温度敏感特性

将传感器放入恒温箱中,逐渐加温,温度范围为 $20\sim 45^\circ\text{C}$,得到传感器中心波长随温度变化曲线,如图 7 所示。拟合实验数据,得到传感器的中心波长 λ_1 、 λ_2 与温度 T 的关系,FBG1 为 $\lambda_1 = 0.02251T + 1531$,FBG2 为 $\lambda_2 = 0.02205T + 1531$,拟合度 R^2 分别为 0.998 和 0.998。

当温度从 20°C 变化到 45°C 时,FBG1 与 FBG2 波长最大变化量分别为 0.5605 nm 和 0.5547 nm ,对比图 6 的实验结果,该波长变化量对应的倾角为 25.71° 和 25.44° 。根据传感器的差动原理,传感器中心波长变化量随温度的变化情况如图 8 所示。传感器在温度从 20°C 变化到 45°C 的过程中,FBG1、FBG2 中心波长差值最大变化量为 0.0319 nm ,该波长变化量对应的倾角变化为 1.46° 。由上述分析可知,使用差动式 FBG 可以明显降低环境温度对测量的影响。

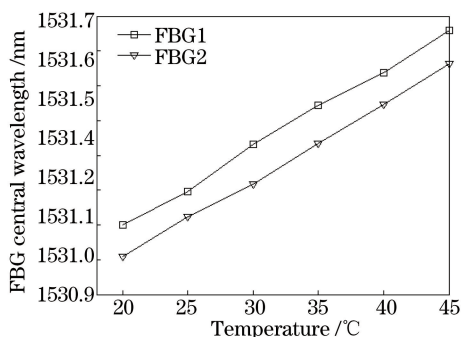


图 7 中心波长随温度变化曲线

Fig. 7 Central wavelength versus temperature

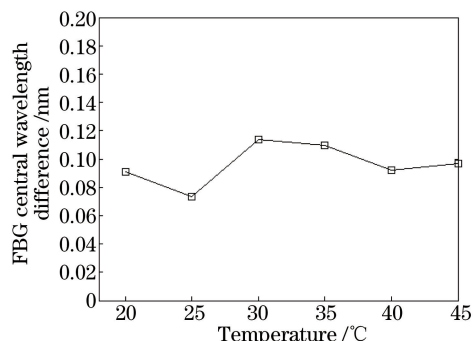


图 8 中心波长差值随温度变化曲线

Fig. 8 Central wavelength difference versus temperature

3.3 传感器的重复性能分析

为了分析重复加载对传感器测试结果的影响,在相同条件下对传感器进行了多次倾角灵敏度标定,FBG1 与 FBG2 中心波长差值 $\Delta\lambda$ 与测量倾角 θ 进行数据拟合,其关系曲线如图 9 所示。图 9 中所示的三次测试中心波长变化量与倾角的关系分别为 $\Delta\lambda = 0.0217\theta + 0.0512$, $\Delta\lambda = 0.0218\theta + 0.0504$ 和 $\Delta\lambda = 0.02179\theta + 0.0507$,拟合度 R^2 为 0.998, 0.998 和 0.998,计算可得重复性为 1.12%。

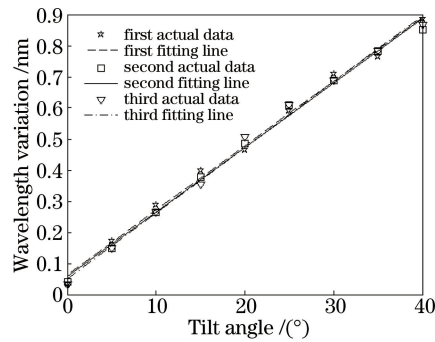


图 9 传感器重复性能测试曲线

Fig. 9 Repeatability curves of the sensor

4 结 论

设计了一种新型的水银柱活塞差动式 FBG 倾角传感器,根据设计模型对传感器进行有限元分析,在测试倾斜角度为 40° 时,对等强度悬臂梁与 FBG 进行了应力特性分析。仿真结果表明,通过两点粘连法,把光纤光栅粘贴到悬臂梁应力均匀分布区,可以把悬臂梁的应变准确地传递到光纤光栅上。根据仿真数据,研制了 FBG 倾角传感器并通过测斜平台、标准角度模块、水平仪、FBG 解调仪对倾角传感器进行了角度标定实验、重复性实验、温度敏感实验。实验结果表明:FBG 倾角传感器量程范围为 $0^\circ \sim 40^\circ$,倾角传感器的灵敏度为 $21.8 \text{ pm}/(\text{^\circ})$,拟合度 R^2 为 0.998,重复性为 1.12%,传感器在温度从 20°C 变化到 45°C 的过程中,FBG1、FBG2 中心波长差值最大变化量为 0.0319 nm ,该波长变化量对应的倾角变化为 1.46° ,验证了使用差动式 FBG 可以明显降低环境温度对测量的影响。在传感器现场安装中,还应考虑环境振动对测量的影响,如监测环境有频繁的振动源,可以在安装时用一些减震物质包裹传感器,再把它安装到测斜孔中,未来可根据实际情况做进一步的研究。设计的传感器通过调整水银柱长度以及活塞横截面积就可以改变传感器的灵敏度,以适应不同的监测需求,可用于边坡倾斜监测。

参 考 文 献

- [1] Li Hongcai, Liu Chuntong, Feng Yongbao, *et al.* Application of FBG bending sensors in landslide forecasting and monitoring[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2015, 26(2): 309-314.
李洪才, 刘春桐, 冯永保, 等. FBG 弯曲传感在滑坡预警监测中的应用研究[J]. 光电子 • 激光, 2015, 26(2): 309-314.
- [2] Chen Jinjun, Wen Zhiyu, Wen Fang, *et al.* A tilt sensor with liquid capacitance plates[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4):119-220.
陈进军, 温志渝, 文 方, 等. 液态电极电容式倾角传感器[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 119-220.
- [3] Lin Yu, Duan Chengli, Piao Linhua, *et al.* The research of two-dimension gas pendulum tilt sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(1): 33-35.
林 宇, 段成丽, 朴林华, 等. 气体摆式二维倾角传感器的结构与信号处理[J]. 压电与声光, 2006, 28(1): 33-35.
- [4] Peng B J, Zhao Y, Zhao Y, *et al.* Tilt sensor with FBG technology and matched FBG demodulating method[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(1): 63-66.
- [5] Au H Y, Khijwania S K, Fu H Y, *et al.* Temperature-insensitive fiber Bragg grating based tilt sensor with large dynamic range[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(11): 1714-1720.
- [6] Ma G M, Li C R, Quan J T, *et al.* A fiber Bragg grating tension and tilt sensor applied to icing monitoring on overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2163-2170.
- [7] Hong C Y, Zhang Y F, Zhang M X, *et al.* Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 244: 184-197.
- [8] 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.

- [9] Bao H L, Dong X Y, Zhao C L, *et al.* Temperature-insensitive FBG tilt sensor with a large measurement range[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6): 968-970.
- [10] Ma Guoming, Li Chengrong, Quan Jiangtao, *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.
- [11] Zhang Kaiyu, Zhao Hong, Zhang Weichao, *et al.* Fiber Bragg grating electrostatic voltage sensor based on uniform strain beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0306003.
张开玉, 赵 洪, 张伟超, 等. 基于等应变梁的光纤光栅静电电压传感器[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0306003.
- [12] Kang Zexin, Sun Jiang, Ma Lin, *et al.* Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain Bragg 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.
- [13] Ni Kai, Xu Haisong, Dong Xinyong, *et al.* Temperature-independent fiber Bragg grating tilt sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2104-2107.
倪 凯, 徐海松, 董新永, 等. 基于光纤布拉格光栅的温度不敏感的倾斜传感器[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2104-2107.
- [14] Bao Hualong, Dong Xinyong, Zhao Chunliu, *et al.* Temperature-insensitive 2D tilt sensor with two fiber Bragg gratings [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2213-2216.
包华龙, 董新永, 赵春柳, 等. 双光纤光栅实现温度不敏感的二维倾斜角传感器[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(11): 2213-2216.
- [15] Zhang Yikun, Guo Yongxing, Li Gongfa. Research of FBG tilt sensor with enhanced sensitivity structure[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, 27(2): 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(2): 253-258.
- [16] Zhang Jinlong, Xu Weiya, Jin Haiyuan, *et al.* Safety monitoring and stability analysis of large-scale and complicated high rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(9): 1819-1827.
张金龙, 徐卫亚, 金海元, 等. 大型复杂岩质高边坡安全监测与分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(9): 1819-1827.
- [17] Xue Jingchun, Li Xibing, Liu Zhixiang. Deformation laws of rock mass and safe alarm system of mine slope based on chaotic theory[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 44(6): 2476-2481.
薛锦春, 李夕兵, 刘志祥. 基于混沌理论的矿山边坡岩体变形规律与安全预警系统[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(6): 2476-2481.