

一种高灵敏度的新型光纤光栅倾角传感器

邢心魁^{1,2,3}, 邝卡斌^{1,2,3}, 覃荷瑛^{1,2,3*}¹ 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;² 桂林理工大学广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541004;³ 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 为实现结构的长期安全监测,设计了一种杠杆原理与摆锤结构相结合的光纤光栅倾角传感器,并在此基础上进行了理论分析、数值计算和传感器性能测试。对比分析了数值计算和实验结果,发现二者具有较好的一致性。为增大传感器的灵敏度,对传感器的尺寸参数进行了设计。考虑到光纤光栅与金属材料之间的锚固效率和传感器的制作工艺要求,综合给出了效果最佳的组合值。实验结果表明,所提光纤光栅倾角传感器的有效监测范围为 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$,传感器的灵敏度为 $359.04\text{ pm}/(^{\circ})$,线性相关度可达 0.999 ,测量重复性误差为 3.433% 。此外,所提光纤光栅倾角传感器降低了温度对角度测量的影响,适用于温度变化较大且精度要求较高的工作环境,有良好的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 倾角传感器; 温度自补偿; 安全监测

中图分类号 TP212; TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0706004

Novel Fiber Bragg Grating Tilt Sensor with High Sensitivity

Xing Xinkui^{1,2,3}, Kuang Kabin^{1,2,3}, Qin Heying^{1,2,3*}¹ School of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;² Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;³ Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In order to realize the long-term safety monitoring of the structure, a fiber Bragg grating tilt sensor with the combination of lever principle and pendulum structure is designed. Based on this, theoretical analysis, numerical calculation and performance test of the sensor are carried out. The results of numerical calculation and experiment are compared and analyzed, and it is found that they are in good agreement with each other. In order to increase the sensitivity of the sensor, the size parameters of the sensor are designed. Considering the anchorage efficiency between the fiber Bragg grating and the metal material, and the manufacturing process requirements of the sensor, the best combination value is given comprehensively. The experimental results show that the effective monitoring range of the proposed fiber Bragg grating tilt sensor is $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$, the sensitivity of the sensor is $359.04\text{ pm}/(^{\circ})$, the linear correlation is 0.999 , and the measurement repeatability error is 3.433% . In addition, the proposed fiber Bragg grating tilt sensor reduces the influence of temperature on angle measurement, is suitable for the working environment with large temperature variation and high precision, and has a good application prospect.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; tilt sensor; temperature self-compensation; safety monitoring

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(51768014)、广西创新驱动发展专项(桂科 AA20302006)、广西预应力机具工程技术研究中心(2018-242-G02)

通信作者: *qinheyinglex@163.com

1 引言

近年来随着科技和经济的高速发展,高精度角度测量在航空航天、土木建设和机械安全等领域中的应用越来越广泛,是科学研究和基础设施建设的重要部分^[1-3]。在土木工程领域中,随着结构健康监测要求的提高,对倾角监测的精度和技术水平的要求也越来越高。倾角传感器作为结构倾斜监测中的关键部分,其传感性能直接影响倾角测量的准确性^[4]。目前,广泛应用于工程中的传统倾角传感器以电磁、电容效应等为基本原理,将倾角转换为电信号输出^[5-7],但这类传感器极易受到电磁干扰的影响,进而无法实现远距离实时监测。光纤光栅作为传感元件具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰能力强、抗腐蚀性能好和可串接多个光栅测点构成传感网络等优势^[8],近年来被广泛应用到结构健康监测领域中^[9-12]。基于光纤光栅的优点和发展趋势,国内外都致力于研发用于输电塔^[13-15]、边坡稳定性监测^[16-19],以及桥梁倾斜和挠度监测^[20-21]的光纤光栅倾角传感器。杨俊等^[14]研制了基于光纤光栅传感的双轴倾角传感器,虽然传感器的迟滞误差和重复误差小,但是传感器的线性度和灵敏度不高。谷翠鹏等^[22]设计的基于力学平衡的光纤光栅倾角传感器虽然具有良好的线性度,但是传感器灵敏度低且无法监测倾斜方向。Cui 等^[17]提出了具有刀片-V形槽转动结构的传感器,虽然有效提高了传感器的迟滞性和重复性,但是传感器部件采用螺栓连接,故整体性差、机械摩擦大,且灵敏度不高。杨建宇等^[23]设计了可实现温度自补偿的圆弧铰链式光纤布拉格光栅(FBG)倾角传感器,可实现双向测量且稳定性良好,但传感器灵敏度低且加工难度大。基于干涉原理的光纤倾角传感器可以达到较高的灵敏度,但由于传感器结构的限制,故不利于在结构健康监测中使用。Chen 等^[24]提出的基于 Mach-Zehnder 干涉原理的倾角传感器具有结构简单、测量结果稳定的优点,但制作难度大,且传感器工作时光栅容易受剪损坏。周雨萌等^[25]研发的双锥级联干涉型角度传感器制作工艺简单,但传感器测量范围小。因此,研究适用于土木工程实时监测的高灵敏度光纤光栅倾角传感器具有重要意义。

由于国内对光纤光栅倾角传感器的研究起步较晚,现有的倾角传感器技术很不成熟,工艺水平达不到要求,故无法实现量产并大量投入到实际工程中使用^[22,26]。光纤光栅倾角传感器多为悬臂梁结构,

一般采用弹性较好的金属材料作为悬臂梁,但由于金属弹性模量大,故当传感器达到最大量程时,材料变形量小,光纤光栅的材料性能没有得到充分发挥。此外,悬臂梁结构要求悬臂梁尺寸尽可能小,进而对传感器的制作工艺有较高的要求。因此,本文从原理、结构和材料等方面出发,提出了一种具有新结构的光纤光栅倾角传感器,将杠杆与摆锤结构相结合,使设计的传感器结构更稳定且具有更高的灵敏度和测量精度。由于传感器中采用的是双测点光纤光栅,故可以实现传感器的温度补偿,降低环境温度对传感性能的影响。

2 传感器结构与工作原理

2.1 传感器与工作原理

设计的倾角传感器结构如图 1 所示,由传感器外壳、双测点光纤布拉格光栅(FBG1、FBG2)、金属杆件、质量块、轴承、不锈钢实心轴和金属支撑零件组成。在封装结构中,金属杆件的一端与一质量块连接组成摆锤结构,摆锤另一端与轴承连接,轴承套在不锈钢实心轴上,并通过金属支撑零件固定在金属外壳上。杆件和支撑零件上刻有粘贴光纤光栅的凹槽。传感器中采用双测点光纤光栅,施加一定的预拉力 F 使光纤光栅保持拉紧状态,将光纤光栅粘贴在金属杆件和支撑零件上的凹槽内,两个光栅测点 FBG1、FBG2 分布在杆件两侧,光纤尾纤通过传感器外壳上的通孔引出。将传感器固定在被测物体上,当被测物体和传感器一起发生倾斜时,摆锤受到重力的影响保持垂直向下的趋势,并且绕轴承转动;FBG1、FBG2 产生大小相等、方向相反的轴向应变,引起中心波长发生漂移。

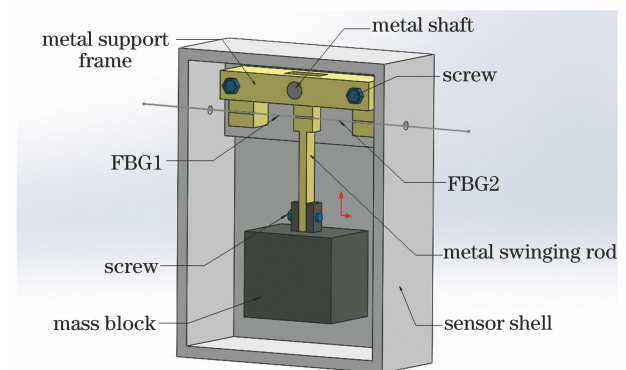


图 1 光纤光栅倾角传感器结构原理图

传感器的受力状态如图 2 所示。当传感器在平面内倾斜时,设倾斜角度为 θ ,质量块和金属杆件在

重力作用下绕实心轴转动。光纤光栅刚度引起的阻力会对摆锤的转动产生影响,摆锤的实际转动角度为 θ_1 ,摆杆与铅垂线之间的夹角为 θ_2 ,即

$$\theta = \theta_1 + \theta_2. \quad (1)$$

假设金属杆件的质量忽略不计,由力矩平衡原理可得

$$mgL \sin \theta_2 + Fl - F'l = Fl + F'l, \quad (2)$$

即

$$mgL \sin \theta_2 = 2F'l, \quad (3)$$

式中: L 为质量块质心到实心轴轴心的距离; l 为实心轴轴心到光纤光栅的距离; m 为质量块的质量; g 为重力加速度; F' 为由倾斜引起的光纤光栅的拉力。

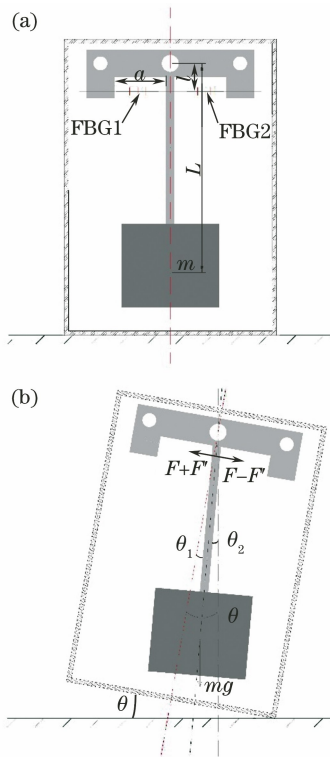


图 2 光纤光栅倾角传感器受力分析图。(a)传感器水平时的受力状态;(b)当倾斜角度为 θ 时,传感器的受力状态

Fig. 2 Force analysis diagram of fiber Bragg grating tilt sensor. (a) Force state of sensor when it is horizontal; (b) force state of sensor when tilt angle is θ

由材料力学可知,由倾斜引起的光纤光栅的拉力 F' 可表示为

$$F' = E\epsilon S, \quad (4)$$

式中: E 为光纤光栅的弹性模量; S 为光纤光栅的截面积; ϵ 为光纤光栅受到的应变。

根据三角形原理,当倾角的转动量很小时,

$\sin(\theta - \theta_1) \approx \theta - \theta_1$, 且

$$\theta_1 = \frac{\Delta a}{l} = \frac{\epsilon a}{l}, \quad (5)$$

式中: a 为光纤光栅两端固定点之间的距离; Δa 为光纤长度的变化量。

联立(1)~(4)式,光纤光栅受到的应变为

$$\epsilon = \frac{\theta}{\frac{2ESl}{mgL} + \frac{a}{l}}. \quad (6)$$

光纤光栅是应变和温度双敏感元件,外界的应变和温度变化均会引起光栅的栅距发生变化。当光波经过光纤光栅时,满足光栅波长的光波会被反射,从而引起波长漂移。波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与温度和应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon, \quad (7)$$

式中: α 为热膨胀系数; ξ 为热光系数; P_e 为光纤光栅的有效光弹系数,取 $P_e = 0.22$; λ_B 为光纤光栅的初始波长; ΔT 为光纤光栅受到的温度影响; $\Delta\epsilon$ 为光纤光栅应变的变化量。

结合传感器的工作原理,单个光栅的波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与倾角 θ 的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e) \frac{\theta}{\frac{2ESl}{mgL} + \frac{a}{l}}. \quad (8)$$

当倾角传感器正常工作时,FBG1、FBG2 发生大小相等、方向相反的轴向应变,即 $\Delta\epsilon_1 = -\Delta\epsilon_2$ (ϵ_1 、 ϵ_2 分别为 FBG1、FBG2 受到的应变)。由于传感器的体积不大,故传感器内部的温度变化相同,此时 FBG1、FBG2 受到的温度影响相同,即 $\Delta T_1 = \Delta T_2$ (T_1 、 T_2 分别为 FBG1、FBG2 处的温度)。联立(6)、(7)式,传感器的倾角变化与波长变化量的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (1 - P_e) \frac{2\theta}{\frac{2ESl}{mgL} + \frac{a}{l}}, \quad (9)$$

式中: λ_{B1} 、 λ_{B2} 为 FBG1、FBG2 处的波长; $\Delta\lambda_{B1}$ 、 $\Delta\lambda_{B2}$ 为 FBG1、FBG2 的波长漂移量。由(9)式可知,光纤光栅的波长变化与传感器的倾角变化成正比关系。传感器采用的双光栅结构可以实现温度自补偿,消除温度对波长变化的影响。

2.2 传感器尺寸设计与制作

本传感器设计的初衷是用于房屋结构倾斜的长期监测。根据相关规范,房屋的倾斜率不应超过 1%。根据调研,市面上出售的光纤光栅倾角传感器

的量程大多为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 。参考现有的倾角传感器,将本文的传感器量程设计为 $-5^\circ \sim 5^\circ$,可满足监测一般结构倾斜的需要。

根据(9)式,传感器的灵敏度由质量块质心到实心轴轴心的距离 L 、实心轴轴心到光纤光栅的距离 l 、质量块的质量 m 和光纤光栅两端固定点之间的距离 a 等参数确定,且参数 L 、 m 的数值越大, a 、 l 的数值越小,传感器灵敏度越高。

若设计的倾角传感器要满足体积小、质量轻和易安装等条件,则需要合理设计传感器的尺寸参数。参考论文和市场调研结果,将传感器的外壳尺寸设计为 $10.8 \text{ cm} \times 7.8 \text{ cm} \times 3.4 \text{ cm}$,设计时需要给摆锤预留转动空间,此时质量块与摆杆的总长度不应超过 80 mm 。质量是影响传感器各项性能的重要因素之一,为提高传感器的传感性能,同时减小传感器的体积,选用密度较大的铅($\rho = 11.34 \text{ g/cm}^3$)作为制作质量块的材料。参数的确定还应考虑传感器的制作工艺,光栅的长度一般为 10 mm ,粘贴时为防止光栅位置偏离,将其固定在凹槽中。光栅左右两端应分别留有 3 mm 左右的光纤端,故 a 的最小值取为 16 mm 。光栅与支撑零件之间的距离过小会导致胶黏剂容易渗入零件与摆杆之间,影响摆杆转动,因此 l 的最小值取为 10 mm 。利用控制质量块的尺寸和摆杆长度的方法,进行传感器尺寸参数的选择,结果如表 1 所示,其中 S_1 为传感器的灵敏度。

表 1 不同尺寸参数下传感器的灵敏度和满量程时的应变值($l=10 \text{ mm}$, $a=16 \text{ mm}$)

Table 1 Sensitivity of sensor under different size parameters and strain value at full scale ($l=10 \text{ mm}$, $a=16 \text{ mm}$)

L / mm	m / kg	$S_1 / [\text{pm} \cdot (\text{^\circ})^{-1}]$	$\epsilon / 10^{-4}$
65.0	0.252	377.32	7.796
	0.286	427.41	8.831
	0.320	477.30	9.862
	0.354	527.00	10.888
67.5	0.212	330.24	6.823
	0.240	373.23	7.711
	0.269	417.62	8.629
	0.297	460.33	9.511
70.0	0.172	278.40	5.752
	0.195	315.19	6.512
	0.218	351.87	7.270
	0.240	386.86	7.993

由表 1 可知,当 $L=65.0 \text{ mm}$ 、 $m=0.286 \text{ kg}$ 和 $L=67.5 \text{ mm}$ 、 $m=0.269 \text{ kg}$ 时,传感器可以在满足外形尺寸要求的同时,达到较理想的灵敏度。考虑到加工工艺水平,本文实际采用的传感器尺寸参数如表 2 所示。根据表 2 的尺寸参数,理论计算得到的传感器灵敏度为 $393.44 \text{ pm}/(\text{^\circ})$ 。

表 2 传感器尺寸参数

Table 2 Dimensional parameters of sensor

Dimension parameter	Value
L / mm	65
l / mm	10
a / mm	16.3
m / kg	0.263
E / GPa	72
S / mm^2	0.0123

在理论计算过程中,将三角函数 $\sin(\theta - \theta_1)$ 简化为 $\theta - \theta_1$,且 θ_1 越小,引入的计算误差越大。当传感器的量程为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 、 $-7^\circ \sim 7^\circ$ 、 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 时,最大计算误差分别为 0.127% 、 0.249% 、 0.510% ,故当量程为 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 时可满足本文需求。

由于光纤光栅在受拉时的应变是均匀的,故为保证当传感器在规定量程内工作时光栅保持受拉状态,光栅要进行预张拉处理,使受压区光栅在工作时呈放张状态。当传感器达到满量程($\pm 5^\circ$)时,理论上波长变化量为 $\pm 1 \text{ nm}$,考虑到预拉力损失等因素,选择在光纤光栅预张拉 2 nm 后,利用胶黏剂将光栅粘贴在金属杆件和支撑零件上的凹槽内。

3 实验结果与分析

将设计的光纤光栅倾角传感器固定在角度标定平台上,为控制角度变化,在标定台上安装型号为 DMI810-15 的电子数显倾角仪,倾角仪的测量精度为 $\pm 0.005^\circ$,分辨率为 0.001° ,测量范围为 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 。将光纤光栅倾角传感器与光纤光栅波长解调仪连接,解调仪的波长分辨率为 1 pm 。传感器实物图和实验装置如图 3 所示。

光纤光栅倾角传感器的设计量程为 $-5^\circ \sim 5^\circ$,设置步长为 0.5° 。在实验前,先将角度标定平台的角度调整为 0° ,记录光纤光栅的初始波长。然后,将角度标定平台的角度调至 -5° ,按照设计的步长将传感器角度逐级增加至 5° 。最后,将传感器角度逐级降低至 -5° ,形成一次循环实验,且待波长稳定后记录每个步长处光纤光栅的波长变化量。在光纤

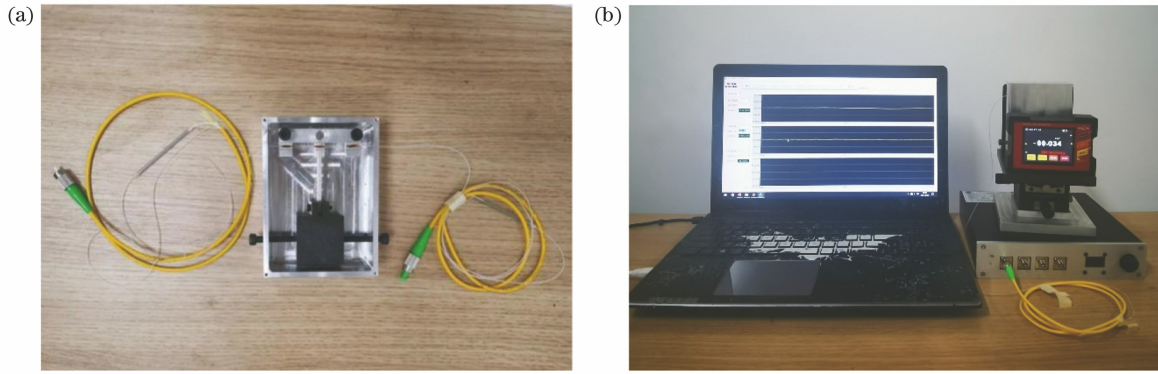


图 3 传感器标定实验。(a) 光纤光栅倾角传感器实物图; (b) 实验装置

Fig. 3 Sensor calibration experiment. (a) Physical image of fiber Bragg grating tilt sensor; (b) experimental installations

光栅倾角传感器进行一次标定实验后, 将实验数据与理论值进行对比, 如图 4 所示, 其中 R^2 为线性相关度。可以发现, 二者在相同角度下的波长变化量具有较好的一致性, 实验值与理论值的最大误差为 4.944%。造成实验值与理论值误差的主要原因是理论计算忽略了光栅涂覆层对光栅刚度的影响。图 4 中正向和反向行程之间的测量的最大误差为 0.14° 。误差的主要来源是: 实验过程中摆锤受到环境震动的影响, 左右摆动, 引起两个光栅存在读数差异。

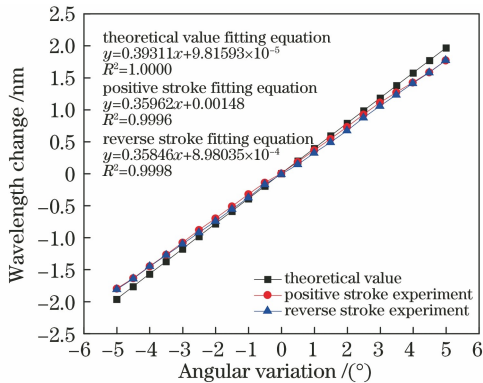


图 4 光纤光栅倾角传感器理论分析和实验对比

Fig. 4 Theoretical analysis and experimental comparison of fiber Bragg grating tilt sensor

为防止传感器使用时安装位置偏离水平状态, 导致使用过程中超出量程, 将传感器的测量范围选定为 $-7^\circ \sim 7^\circ$, 实验结果如图 5。可以发现, 当测量量程为 $-7^\circ \sim 7^\circ$ 时, 传感器能保持良好的传感性能。

在保持室温不变的条件下, 对光纤光栅倾角传感器进行 3 组标定实验, 光纤光栅的波长变化如图 6 和图 7 所示。

在保持同一室温条件下, 进行 9 次传感器标定实验, 并对测量结果进行平均值和标准差计算, 以及误差分析, 计算结果如图 8 所示。实验测量结果的

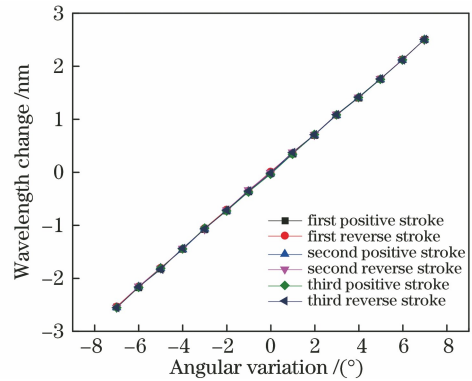


图 5 传感器倾斜 7° 时性能测试

Fig. 5 Performance test of sensor with tilt angle of 7°

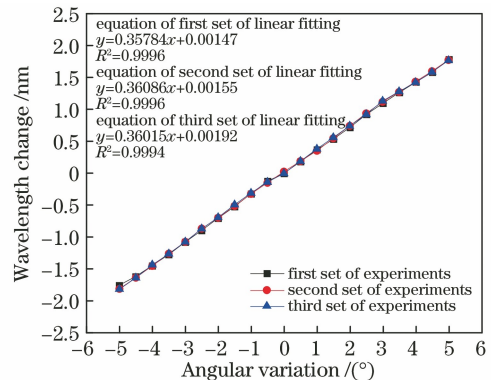


图 6 光纤光栅倾角传感器正行程重复性测试拟合曲线
 Fig. 6 Fitting curve of positive stroke repeatability test of fiber Bragg grating tilt sensor

标准差较小, 最大标准差为 0.0338 nm , 每组测量数据均接近平均值, 即在相同的实验条件下, 测量结果之间的离散度较小。由此分析可得, 本文设计的倾角传感器具有较好的稳定性, 且测量结果具有较高的准确度。

3.1 传感器灵敏度分析

灵敏度是当传感器工作时, 角度变化量和对应的光纤光栅中心波长变化量之比, 其表达式为

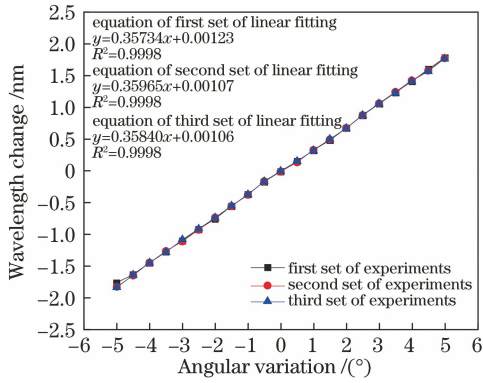


图 7 光纤光栅倾角传感器反行程重复性测试拟合曲线
Fig. 7 Fitting curve of reverse stroke repeatability test of fiber Bragg grating tilt sensor

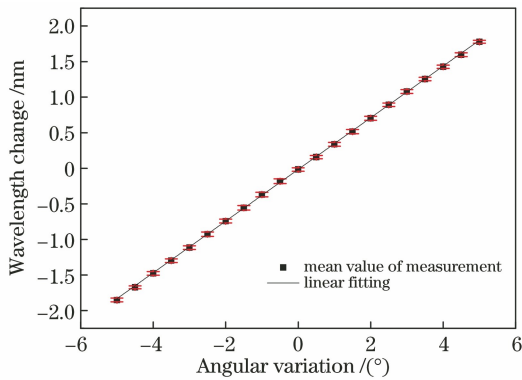


图 8 光纤光栅倾角传感器测量误差分析
Fig. 8 Measurement error analysis of fiber Bragg grating tilt sensor

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx}, \quad (10)$$

式中： x 、 y 分别为倾斜角度和光纤光栅的波长； Δx 、 Δy 分别为倾角变化量和对应的光纤光栅波长变化量。3 次循环实验的灵敏度如表 3 所示。

表 3 光纤光栅倾角传感器的灵敏度

Table 3 Sensitivity of fiber Bragg grating tilt sensor

Test experiment No.	Sensitivity of positive stroke / $[\text{pm} \cdot (^{\circ})^{-1}]$	Sensitivity of reverse stroke / $[\text{pm} \cdot (^{\circ})^{-1}]$
1	357.84	357.34
2	360.86	359.65
3	360.15	358.40

由拟合结果可知,设计的光纤光栅倾角传感器的灵敏度为 $359.04 \text{ pm}/(^{\circ})$, 线性相关度可达 0.999。由于解调仪的波长分辨率为 1 pm , 故光纤光栅倾角传感器的分辨率为 0.003° 。

3.2 传感器线性度分析

线性度反映了传感器在标定实验中的输出特性

曲线与线性拟合曲线不一致的程度,其值越小,说明线性度越好。线性度的数学表达式为

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{FS}} \times 100\%, \quad (11)$$

式中： ΔL_{\max} 为循环实验输出量的平均值与拟合曲线间的最大偏差绝对值； $y_{FS} = y_{\max} - y_{\min}$ 为满量程输出值,其中 y_{\max} 为最大量程时正、反行程输出量的平均值, y_{\min} 为最小量程时正、反行程输出量的平均值。

采用最小二乘法对 3 次循环实验数据的平均值进行线性拟合,拟合公式为 $y = 0.35900x + 9.73480 \times 10^{-4}$ 。将倾斜角度代入拟合曲线得到拟合值,可计算出偏差绝对值,计算结果如表 4 所示。

表 4 光纤光栅倾角传感器线性度误差计算

Table 4 Linearity error calculation of fiber Bragg grating tilt sensor

Angle / $(^{\circ})$	Arithmetic mean value /nm	Fitted value /nm	Absolute deviation /nm
-5.0	-1.8104	-1.7940	0.0163
-4.5	-1.6439	-1.6145	0.0294
-4.0	-1.4543	-1.4350	0.0193
-3.5	-1.2757	-1.2555	0.0202
-3.0	-1.0943	-1.0760	0.0183
-2.5	-0.9058	-0.8965	0.0093
-2.0	-0.7269	-0.7170	0.0099
-1.5	-0.5374	-0.5375	0.0002
-1.0	-0.3512	-0.3580	0.0068
-0.5	-0.1575	-0.1785	0.0211
0	-0.0060	0.0010	0.0070
0.5	0.1615	0.1805	0.0190
1.0	0.3420	0.3600	0.0180
1.5	0.5157	0.5395	0.0238
2.0	0.7004	0.7190	0.0186
2.5	0.8980	0.8985	0.0005
3.0	1.0844	1.0780	0.0065
3.5	1.2514	1.2575	0.0061
4.0	1.4200	1.4370	0.0170
4.5	1.5838	1.6165	0.0327
5.0	1.7728	1.7960	0.0232

由表 4 可知,最大偏差绝对值为 $\Delta L_{\max} = 0.0327 \text{ nm}$, 满量程输出值为 $y_{FS} = 3.5832 \text{ nm}$ 。利用(11)式可计算出光纤光栅倾角传感器的线性度为

0.913%，表明光纤光栅倾角传感器有良好的线性度。

3.3 传感器迟滞性分析

迟滞性又被称为回程误差，反映了传感器的正行程和反行程间输出特性曲线不一致的程度，通常用重复性实验中正、反行程输出的最大差值 ΔH_{\max} 来计算。迟滞性 γ_H 的表达式为

$$\gamma_H = \pm \frac{|\Delta H_{\max}|}{y_{FS}} \times 100\% \quad (12)$$

由表 5 可知，在重复性实验中，正、反行程输出的最大差值绝对值为 $\Delta H_{\max} = 0.0488$ nm，满量程输出值为 $y_{FS} = 3.5832$ nm。由(12)式可计算出光纤光栅倾角传感器的迟滞性为 1.362%。环境震动和零件之间存在的细微摩擦等因素造成的读数误差是影响传感器迟滞性的主要因素。

表 5 重复性实验中正、反行程输出的最大差值绝对值

Table 5 Absolute value of maximum difference between positive and reverse stroke outputs in repeatability experiment

Angle / (°)	$ \Delta H_{\max} $ in first set of experiments / nm	$ \Delta H_{\max} $ in second set of experiments / nm	$ \Delta H_{\max} $ in third set of experiments / nm
-5.0	0.0073	0.0145	0.0198
-4.5	0.0159	0.0114	0.0008
-4.0	0.0015	0.0054	0.0135
-3.5	0.0001	0.0049	0.0150
-3.0	0.0238	0.0356	0.0087
-2.5	0.0237	0.0433	0.0449
-2.0	0.0306	0.0313	0.0451
-1.5	0.0324	0.0435	0.0247
-1.0	0.0473	0.0414	0.0216
-0.5	0.0458	0.0134	0.0269
0	0.0087	0.0378	0.0024
0.5	0.0301	0.0488	0.0372
1.0	0.0458	0.0237	0.0192
1.5	0.0421	0.0460	0.0108
2.0	0.0426	0.0455	0.0210
2.5	0.0466	0.0465	0.0442
3.0	0.0386	0.0449	0.0468
3.5	0.0300	0.0292	0.0421
4.0	0.0182	0.0087	0.0095
4.5	0.0190	0.0189	0.0165
5.0	0	0	0

3.4 传感器重复性分析

重复性反映了传感器在相同测量条件下，连续多次测量时所得的输出特性曲线不一致的程度，其表达式为

$$\gamma_R = \pm \frac{\alpha_1 \Delta\sigma_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% \quad (13)$$

式中： $\Delta\sigma_{\max}$ 为最大标准差； α_1 为置信系数。

采用贝塞尔公式分别计算 3 次循环实验中正、反行程的标准差 $\Delta\sigma$ ，计算结果如表 6 所示。 $\Delta\sigma$ 的表达式为

$$\Delta\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (14)$$

式中： y_i 为光纤光栅波长输出值； \bar{y} 为正行程或反行程的输出平均值； n 为循环实验次数。

表 6 正、反行程标准差计算结果

Table 6 Calculation results of standard deviation of positive and reverse stroke

Angle / (°)	Standard deviation of positive stroke wavelength / nm	Standard deviation of reverse stroke wavelength / nm
-5.0	0.0350	0.0410
-4.5	0.0133	0.0083
-4.0	0.0093	0.0009
-3.5	0.0061	0.0067
-3.0	0.0012	0.0131
-2.5	0.0158	0.0059
-2.0	0.0048	0.0103
-1.5	0.0153	0.0024
-1.0	0.0069	0.0044
-0.5	0.0127	0.0036
0	0.0164	0.0059
0.5	0.0043	0.0091
1.0	0.0138	0.0041
1.5	0.0130	0.0090
2.0	0.0145	0.0020
2.5	0.0104	0.0026
3.0	0.0195	0.0044
3.5	0.0091	0.0078
4.0	0.0051	0.0088
4.5	0.0097	0.0163
5.0	0.0059	0.0059

当置信概率取 99.7% 时，置信系数为 $\alpha_1 = 3$ 。最大标准差为 $\Delta\sigma_{\max} = 0.0410$ nm，满量程输出值为

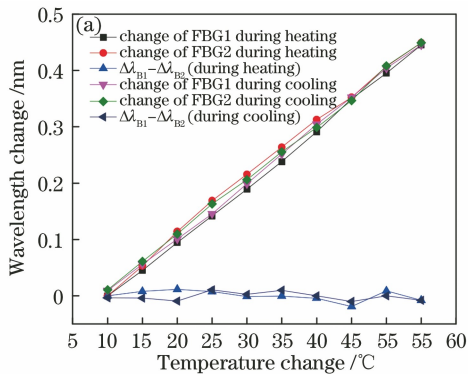
$\lambda_{FS} = 3.5832 \text{ nm}$ 。由(13)式可得光纤光栅倾角传感器的重复性误差为 3.433%，证明光纤光栅倾角传感器有良好的重复性。

3.5 传感器总精度分析

总精度反映了传感器在正常使用条件下实际输出值的准确程度,可以综合评定传感器性能的优劣。总精度 A 的表达式为

$$A = \sqrt{\gamma_L^2 + \gamma_H^2 + \gamma_R^2}, \quad (15)$$

将相关数据代入(15)式,可得光纤光栅倾角传感器的总精度为 3.804%。



3.6 传感器温度补偿特性

将倾角传感器放入恒温箱中,设定温度范围为 10~55 °C,每间隔 5 °C 记录两个光纤光栅的中心波长,得到 FBG1、FBG2 中心波长随温度变化的曲线,如图 9 所示。在温度变化范围内,FBG1、FBG2 中心波长变化量的最大差值为 18.7 pm,对应的倾角变化量为 0.05°,在工作范围内对传感器总量的影响为 0.522%。由上述分析可知,该光纤光栅倾角传感器可以实现温度自补偿,降低了环境温度对倾角测量的影响。

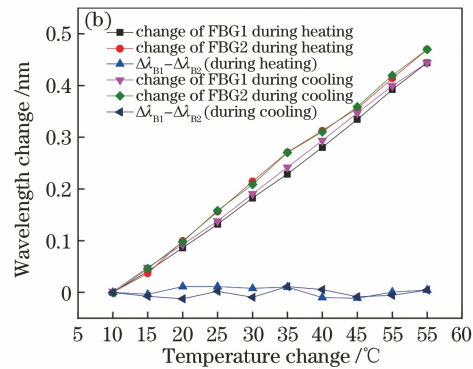


图 9 温度测试结果。(a)水平时 FBG1、FBG2 中心波长随温度的变化;(b)当倾斜 1°时,FBG1、FBG2 中心波长随温度的变化

Fig. 9 Temperature test results. (a) Central wavelengths of FBG1 and FBG2 varying with temperature in horizontal condition; (b) central wavelengths of FBG1 and FBG2 varying with temperature at tilt angle of 1°

3.7 平面外倾斜时传感器性能分析

为保证传感器在实际工程应用中能够更准确地反映倾斜情况,对传感器向平面外倾斜 0°,3°,6°情况进行了标定实验,实验结果如图 10 所示。

将实验结果与标准条件下的测量结果进行对比,当传感器向平面外倾斜 3°、6°时,产生的误差分别为 2.007%、2.509%。实验表明,当传感器向平面外倾斜 6°时,传感器能够保持良好的传感性能,测量误差不大于 3%。

4 传感器综合性能对比

为了更好地分析和优化传感器的传感性能,将设计的倾角传感器与其他类型的光纤倾角传感器

器^[27-29]进行对比,对比结果如表 7 所示。

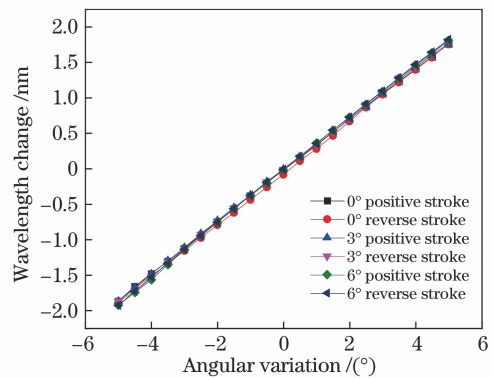


图 10 平面外倾斜时传感器性能测试

Fig. 10 Sensor performance test with out-of-plane tilt

表 7 倾角传感器综合性能对比分析

Table 7 Comparative analysis of comprehensive performance of tilt sensor

Type of tilt sensor	Measuring range / (°)	Sensitivity / [nm·(°) ⁻¹]	Distinguishability / (°)	Linear goodness of fitting
Long period fiber grating tilt sensor	-30-30	0.077	0.260	0.997
Tapered phase shift fiber grating optical inclinometer	30-90	0.023	0.430	0.995
Mach-Zehnder interferometer inclinometer based on long period fiber grating and offset splices	-3-3	0.935		0.978
Proposed sensor	-5-5	0.359	0.003	0.999

由表 7 可知,相较于其他类型的倾角传感器,本文设计的光纤光栅倾角传感器量程、灵敏度适中,分辨率、线性拟合度更高,且结构稳定可靠,可进行温度补偿,更适用于房屋结构倾斜的长期监测。改变光纤光栅的预张力可以改变传感器的量程,以满足其他土木结构安全监测的需要。然而,当量程增大到一定角度时,传感器的线性度等误差随之增大,此时对光纤光栅粘贴和张拉技术的要求更高。

5 结 论

光纤光栅倾角传感器的设计需要考虑多种因素的影响,除传感器的量程、精度等因素外,还要满足传感器的灵敏度、材料强度、外形尺寸和制作工艺等要求。结合现有的倾角传感器结构,将传感器的工作原理与光纤光栅的工作机理直接对应,在满足量程与精度的条件下,设计出灵敏度高、重复性好、体积小和质量轻的光纤光栅倾角传感器。

经过测试标定,当测量范围为 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 时,光纤光栅倾角传感器的测量精度可达 3.804%,灵敏度为 359.04 pm/($^{\circ}$),线性拟合度 R^2 为 0.999,重复性误差为 3.433%。倾角传感器在温度变化范围内,FBG1、FBG2 的中心波长变化量的最大差值为 18.7 pm,对应的倾角变化量为 0.05° ,对传感器总量程的影响为 0.522%,证明双光栅结构可以降低环境温度对倾角测量的影响。实验结果表明,设计的光纤光栅倾角传感器具有良好的灵敏度、线性度、重复性和温度补偿能力,能够在温度变化较大且精度要求较高的条件下开展长期倾斜监测工作。

设计的光纤光栅倾角传感器可以通过调节摆杆长度、质量块质量和光栅预张力大小等方式改变灵敏度和量程,以满足不同监测的需求。此外,本研究是在静态指标下进行传感器的设计研究,但在实际工程应用中,动态荷载对传感器的各项性能会产生一定的影响,进而对适用于复杂条件下的光纤光栅倾角传感器的设计还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Li C, Li X, Yu X Y, et al. Room-temperature wide measurement-range optical fiber Fabry-Perot tilt sensor with liquid marble[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(1): 170-177.
- [3] Zhang W Y, Zhu H R, Li N. Research on stereo grating angle sensor system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2312005. 张文颖, 朱浩然, 李楠. 立体光栅测角传感器系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2312005.
- [4] Jing G Q, Duan F J, Li J S, et al. Statistical analysis on the impacts of excitation sources on tilt sensors' online calibration[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(4): 563-568. 荆根强, 段发阶, 李建双, 等. 倾角传感器在线校准的激励源影响性分析[J]. 计量学报, 2019, 40(4): 563-568.
- [5] Su S Q, Li D C. Research and design of a novel magnetic fluid tilt sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 431-439. 苏树强, 李德才. 新型磁流体水平传感器的研究与设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 431-439.
- [6] Liu Z Z, Zhang W Z, Xue X B, et al. Liquid pendulum based cylindrical surface capacitor tilt sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(7): 1024-1027. 刘志壮, 张文昭, 薛晓铂, 等. 基于液体摆的柱面电容式倾角传感器[J]. 传感技术学报, 2018, 31(7): 1024-1027.
- [7] Ye L X, Lou Z Y, Li X, et al. Dual-axis capacitive inclination sensor based on liquid pendulum [J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(4): 316-324. 叶凌霄, 娄宗勇, 黎霞, 等. 基于液体摆的双轴电容式倾角传感器[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(4): 316-324.
- [8] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001. 廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.
- [9] Qin H Y, Lin Y, Jiang Y, et al. Application of fiber Bragg grating sensor in cable force monitoring of cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2020, 60(10): 51-55. 覃荷瑛, 林勇, 姜涌, 等. 光纤光栅传感器在斜拉桥索力监测中的应用[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 51-55.
- [10] Sun L, Wang X Y, Li C, et al. New double fiber

- Bragg grating static level based on equal strength beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41 (14): 1406005.
- 孙丽, 王兴业, 李闯, 等. 基于等强度梁的新型双光纤光栅静力水准仪[J]. *光学学报*, 2021, 41(14): 1406005.
- [11] Guo Y X, Li C, Zhou X L, et al. Wide-range fiber Bragg grating tilt sensor based on a cam structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20 (9): 4740-4748.
- [12] Xing X K, Jiang X, Liu F F, et al. Research on FBG humidity sensor based on polyimide material [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59 (13): 1328002.
- 邢心魁, 蒋雪, 刘凡凡, 等. 基于聚酰亚胺材料的 FBG 湿度传感器研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1328002.
- [13] Yang H L, Liang S B, Li C, et al. Research of electric power tower tilt angle sensor based on FBG [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(11): 21-24.
- 杨洪磊, 梁仕斌, 李川, 等. 基于 FBG 的电力杆塔倾角传感器研究 [J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(11): 21-24.
- [14] Yang J, Zhang C S, Liang S B, et al. Research on tilt sensor of transmission towers based on optical fiber sensing technology [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2018, 45(9): 683-686.
- 杨俊, 张长胜, 梁仕斌, 等. 基于光纤传感技术的输电杆塔倾斜传感器研究 [J]. *化工自动化及仪表*, 2018, 45(9): 683-686.
- [15] Chen J, Guo Y X, Zhu F D, et al. Fiber Bragg grating inclination sensor for transmission tower [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56 (8): 080602.
- 陈剑, 郭永兴, 朱方东, 等. 用于输电铁塔的光纤布拉格光栅倾斜传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 080602.
- [16] 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.
- [17] Cui P, Zhang W T, Song Y. High resolution inclinometer based on vertical pendulum and fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(11): 110603.
- [18] Xu H B, Li F, Zhao W G, et al. Research on remote automatic monitoring system of high and steep slope based on FBG tilt sensor [J]. *IOP Conference Series*, 2019, 267(4): 042091.
- [19] Wang N S, Hong C Y, Su D, et al. Inclinometer sensors based on fiber Bragg grating and additive manufacturing technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0906005.
- 王南苏, 洪成雨, 苏栋, 等. 基于光纤布拉格光栅和增材制造技术的测斜传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0906005.
- [20] Wu X Z, Ren W X. Design of a novel fiber grating inclinometer [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2008, 25(4): 332-334.
- 伍贤智, 任伟新. 一种新型光纤光栅倾角传感器的研制 [J]. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2008, 25 (4): 332-334.
- [21] Zhang C R, Ge Y X, Hu Z C, et al. Research on deflection monitoring for long span cantilever bridge based on optical fiber sensing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102035.
- [22] Gu C P. Design and experimental study of a novel inclination sensor based on FBG [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2019.
- 谷翠鹏. 新型光纤光栅倾角传感器设计与试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- [23] Yang J Y, Liang L, Tang H M, et al. High sensitivity two-directional FBG inclination sensor with temperature compensation [J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2020, 31(4): 351-356.
- 杨建宇, 梁磊, 唐浩冕, 等. 一种温度自补偿的高灵敏度 FBG 双向倾角传感器 [J]. *光电子·激光*, 2020, 31(4): 351-356.
- [24] Chen N K, Feng Z Z, Wang J J, et al. Interferometric interrogation of the inclination and displacement of tapered fiber Mach-Zehnder interferometers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13 (9): 3437-3441.
- [25] Zhou Y M, Zhao C L, Shi F F, et al. Angle sensor with two cascading abrupt-taper based on interferometer and single mode optical fiber [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2017, 23(4): 543-548.
- 周雨萌, 赵春柳, 时菲菲, 等. 基于单模光纤的双锥级联干涉型角度传感器 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(4): 543-548.
- [26] Zhao X F, Kong X L, Li L. An experimental study of fiber Bragg grating tilt sensor [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30(S1): 243-246.
- 赵雪峰, 孔祥龙, 李乐. 一种光纤光栅倾角传感器的试验研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2010, 30(S1):

- 243-246.
- [27] Wang Y, Zhao C L, Hu L, et al. A tilt sensor with a compact dimension based on a long-period fiber grating[J]. The Review of Scientific Instruments, 2011, 82(9): 093106.
- [28] Moura J P P, Silva S O, Becker M, et al. Optical inclinometer based on phase-shifted Bragg grating in a taper configuration[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8794: 87940D.
- [29] Deng M, Yin F Y, Shi L L, et al. Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a large lateral offset [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9679: 96790V.