

激光与光电子学进展

一体式光纤光栅三维加速度传感器

郭永兴^{1,3*}, 陈敏¹, 熊丽^{1,2}, 周兴林¹, 李聪²¹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;²武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081;³武汉科技大学机器人与智能系统研究院, 湖北 武汉 430081

摘要 提出了一种基于光纤光栅(FBG)的一体式三维加速度传感器。该传感器以十字梁为弹性体,采用有限元分析方法研究了弹性体的应变分布特征,5个光纤光栅按照特定的规则被封装在梁的表面。通过将两两组合的光纤光栅波长漂移量的差值作为传感器不同振动方向的输出信号,实现三维加速度的低耦合测量及温度补偿。振动测试结果表明,该传感器在 x 、 y 和 z 方向的谐振频率分别为2000,1920,1160 Hz,工作频带分别为20~1400 Hz、20~1300 Hz和10~800 Hz,在 x 、 y 和 z 方向的灵敏度分别为1.36,1.70,1.31 pm/g。该传感器具有良好的线性度、弱耦合性和温度补偿能力。

关键词 光纤光学; 三维加速度传感器; 光纤光栅

中图分类号 TN253; TP212.1 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP202158.2106007

Integrated Fiber Grating Three-Dimensional Acceleration Sensor

Guo Yongxing^{1,3*}, Chen Min¹, Xiong Li^{1,2}, Zhou Xinglin¹, Li Cong²¹Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;²Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China;³Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract An integrated three-dimensional acceleration sensor based on fiber Bragg grating (FBG) was presented in this paper. The sensor took the cross-beams as the elastomer, and the strain distribution characteristics of the elastomer were studied by using the finite element analysis method. Five FBGs were encapsulated on the surfaces of the beams according to specific rules. The difference of wavelength shifts of pairwise FBGs was used as the output signal of the sensor in different vibration directions to realize low coupling measurement of three-dimensional acceleration and temperature compensation. The vibration test results show that: the resonant frequencies of the sensor in the x , y , and z directions are 2000, 1920, and 1160 Hz, respectively; the operating frequency bands are 20–1400 Hz, 20–1300 Hz, and 10–800 Hz, respectively; the sensitivities in the x , y , and z directions are 1.36, 1.70, and 1.31 pm/g, respectively. Moreover, the sensor has good linearity, weak coupling, and temperature compensation capability.

Key words fiber optics; three-dimensional acceleration sensor; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.2280; 060.2340; 060.2370

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2020-12-22; 录用日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(52075397,51827812)、湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA033)、武汉市科技计划项目(2019010702011308)

通信作者: *yongxing_guo@wust.edu.cn

1 引言

振动测量在很多领域发挥重要作用。通过微振监测判断地质勘探、油藏以及煤矿等领域潜在的地质灾害活动规律^[1-3],可以达到预警、预报的目的;通过对机械设备进行在线振动监测^[4],可以减少设备故障造成的损失;同时在周界防护、铁路、船舶、生物医学、航空航天等领域进行振动监测意义也十分明显。基于光纤光栅原理的加速度传感器由于具有抗干扰、抗腐蚀、体积小、质量轻和准分布式等独特优点^[5-9]而受到广泛关注。

目前大多数光纤光栅一维加速度传感器,如采用光栅栅区完全封装^[10-12]或栅区两侧的光纤固定封装^[13-14]方法的梁式传感器,将弹性管^[15]、弹性圆柱^[16]以及弹性膜片^[17]等结构作为弹性体的传感器,光纤光栅受到比轴向力更大的横向力的传感器^[18],无法满足多维振动测试的要求,为此许多研究人员探索了实现三维振动监测的设计。蒋奇等^[19-20]采用完全封装的方式分别设计了一种光纤光栅三维分体式加速度传感器。相对于蒋奇等^[19]在 2008 年设计的悬臂梁式传感器,王静等^[20]在 2012 年采用具有较高弹性系数的弹性钢筒,设计了一种高频振动传感器。姜国义等^[21-23]采用两点封装的方式,将每一对光纤光栅悬空固定在 L 梁^[21]或质量块^[22-23]与基体之间。2014 年姜国义等^[21]采用波长调制的方法,设计了一种对温度不敏感的光纤光栅三维加速度传感器。Nan 等^[22-23]设计了一种强度调制型加速度传感器,但该传感器易受光源波动的影响。2015 年 Li 等^[24]将一个一维传感单元和一个二维传感单元组合在一起实现了三维测量。以上分体式传感器大都是将三个一维传感单元分别布置在传感器的 x 、 y 和 z 轴上,然后将三个传感单元的自测轴向加速度进行矢量合成,得到三维加速度信息。这种传感器装配复杂且 3 个传感单元不能共时、共点地测得每个维向上的加速度,易造成三维加速度检测不准确。Morikawa 等^[25-28]采用基于光纤光栅-质量块的中心悬挂结构,设计了一种一体式光纤光栅三维加速度传感器。相对于直接将光纤作为弹性变形元件的结构^[25-26],Jiang 等^[27-28]用嵌有 6 个光纤光栅的支架来支撑质量块,传感器的抗冲击性能和谐振频率得到了提高。

本文根据加速度多维测量的需求,使用十字梁结构的弹性体和呈一定规则布置的 5 个光纤光栅,

形成特殊的三维加速度测量输出,仅使用 5 个光纤光栅就实现了三维加速度测量和温度补偿,该方法具有高谐振频率和低交叉耦合的优点。

2 传感器设计

光纤光栅是一种纤芯内的周期性折射率调制器件,当宽带入射光沿纤芯传输时,光纤光栅反射具有特定波长的窄带部分,而宽带光的其余部分通过纤芯^[29]。当光纤光栅受到轴向拉伸或压缩,或者环境温度变化时,光栅的周期和有效折射率会发生变化,从而使光纤光栅的中心波长产生相应的漂移。应变、温度与中心波长漂移量之间的关系可以表示为^[30]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha_t + \xi)\Delta T, \quad (1)$$

式中: λ_B 为初始中心波长; $\Delta\lambda_B$ 为中心波长漂移量; $\Delta\varepsilon$ 为应变的变化量; ΔT 为温度的变化量; α_t 为热膨胀系数; ξ 为热光系数; P_e 为弹光系数(常温时约等于 0.22)。

2.1 传感器的基本结构

光纤光栅三维加速度传感器的特殊弹性结构设计如图 1 所示。加速度-敏感弹性结构主要包括上盖、弹性体以及底盖。弹性体正交的 4 根横梁用于探测三轴加速度的弹性变形元件,梁表面将布设光纤光栅元件。为了将同一直线上的两个横梁上的光栅串联,弹性体的中心柱上钻有两个供光纤穿过的交叉微通孔。在弹性体环上设计 8 个螺纹孔,弹性体环上部分呈 90°间隔分布的 4 个螺纹孔用于固定上盖,弹性体环下部分的 4 个螺纹孔用于固定下盖。上盖上呈 90°间隔分布的通孔作为固定孔,侧壁的通孔用于光纤穿出。下盖上呈 90°间隔分布的

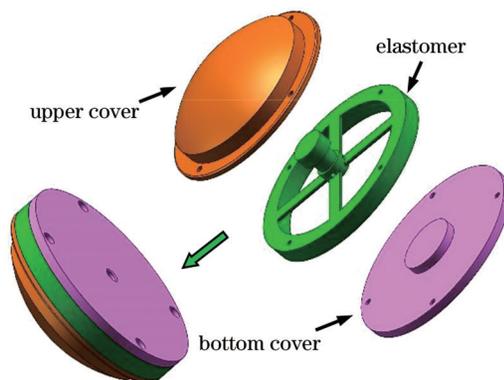


图 1 光纤光栅三维加速度传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional FBG acceleration sensor

沉头孔和中心螺纹孔作为固定孔。将装配好的传感器通过下盖中心的螺纹孔安装在被测物体上。当传感器发生振动时,中心柱产生相应的运动,横梁发生变形。

2.2 应变分布特征

为得到传感器的应变分布特征,通过 ANSYS 软件采用有限元分析的方法对传感器进行静应力分析。由于弹性体是主要的测量元件,所以只分析弹性体在力作用下的应变分布。在有限元分析中,

为了简化结构,弹性体环的螺纹孔被简化为通孔,其直径等于螺纹孔的螺纹直径,带有坐标系的三维简化模型如图 2(a)所示。按照顺时针方向,弹性体的 4 根横梁分别被标记为梁 1、梁 2、梁 3 和梁 4。弹性体的中心轴被标记为 z 轴,梁 1 和梁 3 的中心线位于 x 轴,梁 2 和梁 4 的中心线位于 y 轴。弹性体的材料是 316L 不锈钢,分析中使用的参数如下:杨氏模量 $E=200$ GPa,泊松比 $\mu=0.3$,密度 $\rho=7.98$ g/cm³。每根梁的长、宽、高分别为 22,5,1 mm。

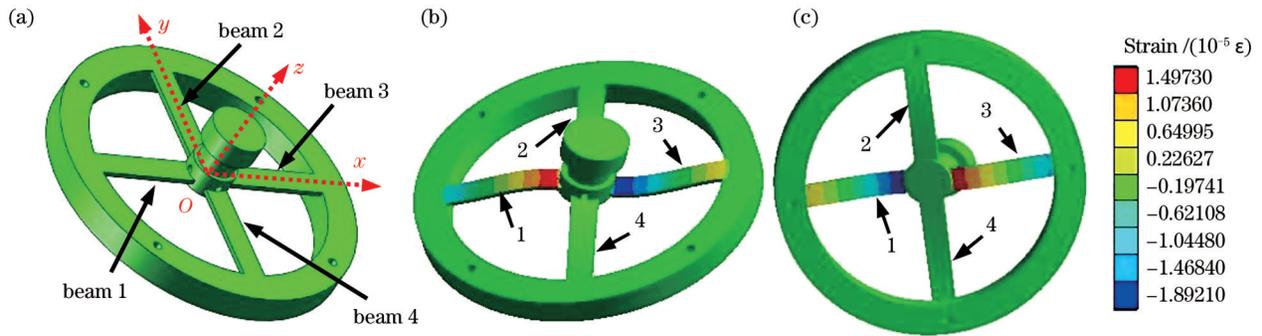


图 2 弹性体在力 F_x 作用下的仿真分析。(a) 三维简化模型; (b) 梁上表面的应变分布; (c) 梁下表面的应变分布
Fig. 2 Simulation analysis of elastomer under force F_x . (a) Three-dimensional simplified model; (b) strain distributions of upper surfaces of beams; (c) strain distributions of lower surfaces of beams

根据上述参数修改模型的材料属性,在对弹性体施加约束后,对中心柱施加沿 x 轴正方向且大小为 1 N 的力。由于光纤光栅沿横梁的中心线附着在梁的表面,因此弹性体的不同表面在 x 方向的应变分布如图 2(b)、(c)所示。紧接着,根据梁表面中心线创建了从中心柱到弹性体环的 5 条路径,梁中心线的示意图以及 5 条路径上应变与距离(两表面中心线与中心柱的距离)的关系分别如图 3(a)、(b)所示。图 3(b)表明,梁 2 和梁 4 上表面中心线处的应变始终

为零,梁 1 和梁 3 上表面的应变数值始终相等,符号相反。梁 1 上表面和梁 3 下表面的应变分布相似,两条应变-位移曲线平行,但是与梁 1 相比,梁 3 下表面产生相等应变的位置与中心柱的距离比梁 1 小了 0.7 mm。由于弹性体结构的特殊性,弹性体在力 F_y 作用下的应变分布与在力 F_x 作用下的结果相反。

与上述操作相同,弹性体在中心柱受到沿 z 轴负方向、大小为 1 N 的力的情况下,5 条路径上应变与距离的关系如图 4 所示。图 4 表明,4 根梁上表面

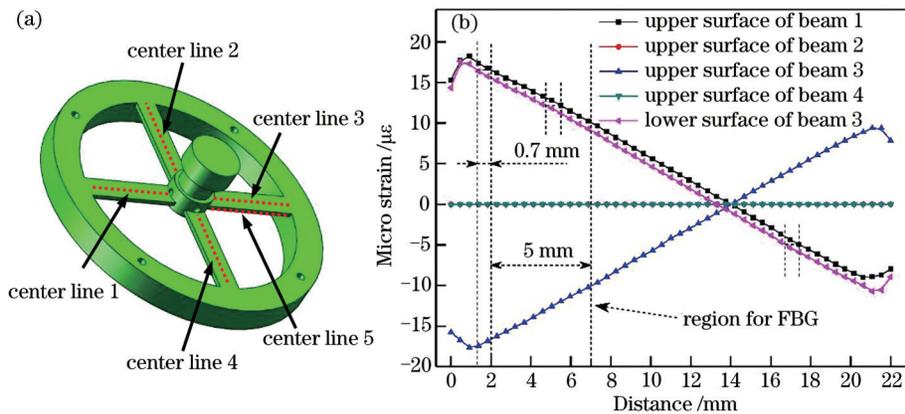


图 3 在力 F_x 作用下特定路径的仿真分析。(a) 梁表面中心线; (b) 5 条路径上的应变与距离的关系
Fig. 3 Simulation analysis of specific paths under force F_x . (a) Center lines of beam surfaces; (b) relationship between strain and distance on five paths

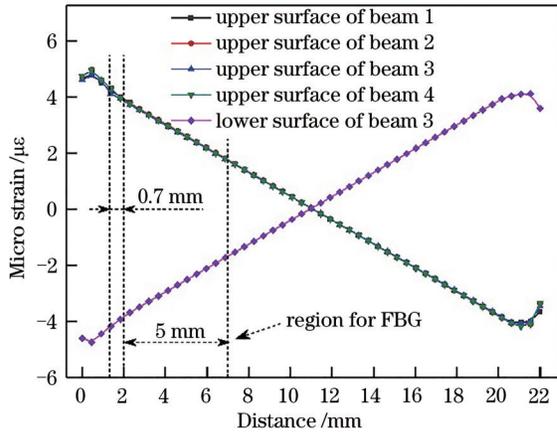


图 4 在力 F_z 作用下 5 条路径的应变与距离的关系
Fig. 4 Relationship between strain and distance on five paths under force F_z

中心线处的应变基本相同,而梁 1 上表面和梁 3 下表面的应变数值基本相等,符号相反。

2.3 光纤光栅的布置以及传感器的工作原理

根据 2.2 节的分析结果,5 个光纤光栅在弹性体上的布置如图 5 所示。从图 3(b)、图 4 和图 5 中可以看到,中心波长分别为 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 的 FBG1~FBG4 分别被封装在梁 1~4 上表面距离中心柱与梁的结合处 2~7 mm 区域的中心线上,而中心波长为 λ_5 的 FBG5 被封装在梁 3 下表面距离中心柱与梁的结合处 1.3~6.3 mm 区域的中心线上。

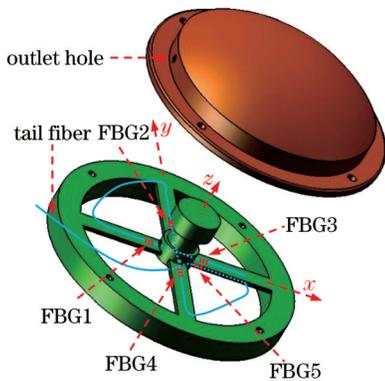


图 5 光纤光栅在弹性体上的布置
Fig. 5 Layout of FBGs on elastomer

由图 3(b)可知,当弹性体在力 F_x 作用下,FBG1 与 FBG3 位于应变较大处且两者产生相反的应变;而当弹性体在力 F_y 或 F_z 作用下,FBG1 与 FBG3 不产生应变或产生相同的应变。由于力与加速度呈一定的线性关系,结合(1)式,FBG1 和 FBG3 由传感器沿 x 轴振动引起的波长漂移量 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_3$ 与应变的变化量 $\Delta\epsilon_{a_x}$ 之间的关系可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_3}{\lambda_3} = 2(1 - P_e)\Delta\epsilon_{a_x} \quad (2)$$

当两个 FBG 中心波长之间的间隔不大时,(2)式可表示为

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_3 = 2\lambda(1 - P_e)\Delta\epsilon_{a_x} \quad (3)$$

因此 FBG1 和 FBG3 由传感器沿 y 轴或 z 轴振动引起的波长漂移量差值为 0。结合传感器在标定实验中所测得的 x 轴的加速度灵敏度 K_x 和常数 b_1 ,可得 FBG1 和 FBG3 由传感器振动引起的波长漂移量差值为

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_3 = K_x \cdot a_x + b_1. \quad (4)$$

因此将 FBG1 和 FBG3 波长漂移量的差值作为传感器的输出信号,可以在不受耦合振动和温度干扰下实现传感器对 x 方向加速度的测量。

由于弹性体结构的特殊性,结合传感器在标定实验中所测得的 y 轴的加速度灵敏度 K_y 和常数 b_2 ,可将 FBG2 和 FBG4 由传感器振动引起的波长漂移量差值表示为

$$\Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_4 = K_y \cdot a_y + b_2. \quad (5)$$

因此将 FBG2 和 FBG4 波长漂移量的差值作为传感器的输出信号,可以在不受耦合振动和温度干扰下实现传感器对 y 方向加速度的测量。

由图 3(b)可知,当弹性体在力 F_x 作用下,FBG5 与中心柱之间的距离比 FBG1 与中心柱之间的距离小 0.7 mm,两者在力 F_x 作用下产生相同的应变;当弹性体在力 F_y 作用下,FBG1 与 FBG5 不产生应变。根据类似的原理,结合传感器在标定实验中所测得的 z 轴的加速度灵敏度 K_z 和常数 b_3 ,可得 FBG1 和 FBG5 由传感器振动引起的波长漂移量差值可表示为

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_5 = K_z \cdot a_z + b_3. \quad (6)$$

因此将 FBG1 和 FBG5 波长漂移量的差值作为传感器对 z 方向振动的输出信号,也可实现相同的效果。由此,该传感器的测量矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_3 \\ \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_4 \\ \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

因此当传感器在任意方向加速度的激励下振动时,通过波长调制和解调技术,将 5 个 FBG 所测测的温度和应变变化转换为光纤光栅波长解调器记录的波长数据。对数据进行处理后,便可得到消除温度变化影响的 FBG1 与 FBG3、FBG2 与 FBG4 以及 FBG1 与 FBG5 波长漂移量的差值,结合加速度灵敏度 K_x 、 K_y 、 K_z 和常数 b_1 、 b_2 、 b_3 以及测量矩阵

[(7)式],便可得到传感器在 x 、 y 和 z 方向的加速度值,通过矢量合成便可测得三维加速度。

利用相位掩模技术,以 3 nm 左右的间隔制备了 5 种不同中心波长的光纤光栅。每个光纤光栅的有效长度和反射率分别约为 5 mm 和 90%。然后将光纤光栅按照图 5 所示的布置方法用胶黏剂粘附在弹性体上。经制备,室温下 FBG1~FBG5 的初始波长分别为 1554.585, 1557.911, 1561.158, 1563.888, 1567.014 nm。传感器直径 $D=67$ mm,高度 $H=26$ mm。

3 实验

图 6 为振动测试与信号采集系统的结构图和

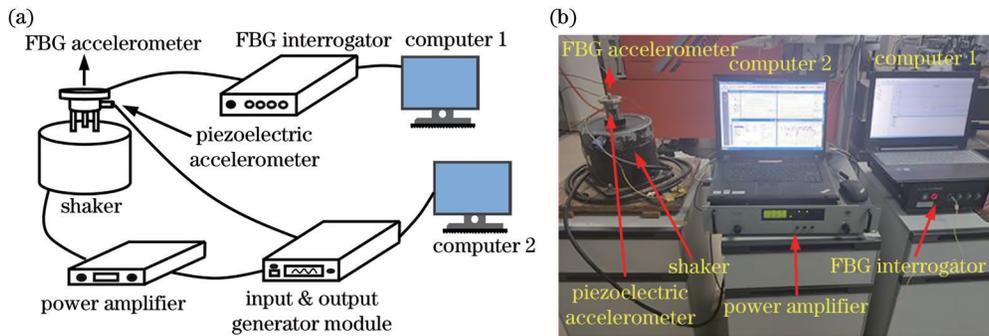


图 6 振动测试与信号采集系统。(a)结构示意图;(b)实物图

Fig. 6 Vibration test and signal acquisition system. (a) Structural diagram; (b) physical prototype

3.1 幅频特性测试

调整传感器与夹具的位置,对传感器在 x 和 y 方向激振的幅频特性进行分析。调节信号发生器模块的输出信号,使激振器加速度的幅值保持为 $1g$ ($g=10 \text{ m/s}^2$),激振频率从 20 Hz 变化到 2500 Hz,传感器在 x 和 y 方向的幅频特性曲线分别如图 7(a)和 7(b)所示。由图 7(a)可知,传感器在 x 方向的谐振频率为 2000 Hz,且在 20~1400 Hz 区

实物图。在系统中,传感器通过夹具固定在激振器 (B&K Type 4808-W-001)上,用于校准的压电加速度计 (B&K Type 4371) 固定在激振器上。信号发生器模块 (B&K Type 3160-A-042) 的输出信号经功率放大器 (B&K Type 2719) 的放大后被送至激振器。根据校准加速度计反馈的振动信息,调节信号发生器模块的输出信号,以控制激振器的激励响应,完成传感器的振动测试。通过实验室自主研发的基于衍射光栅原理的四通道光纤光栅波长解调器 (采集频率: 5000~8000 Hz,精度: 3 pm,分辨率 0.1 pm) 实时记录光纤光栅加速度传感器的波长变化。

域内有较好的频率平坦响应;由图 7(b)可知,传感器在 y 方向的谐振频率为 1920 Hz,且在 20~1300 Hz 区域内有较好的频率平坦响应。最后使激振器加速度的幅值保持为 $1g$,激振频率从 10 Hz 变化到 1800 Hz,传感器在 z 方向的幅频特性曲线如图 8 所示。由图 8 可知,传感器在 z 方向的谐振频率为 1160 Hz,且在 10~800 Hz 区域内有较好的频率平坦响应。

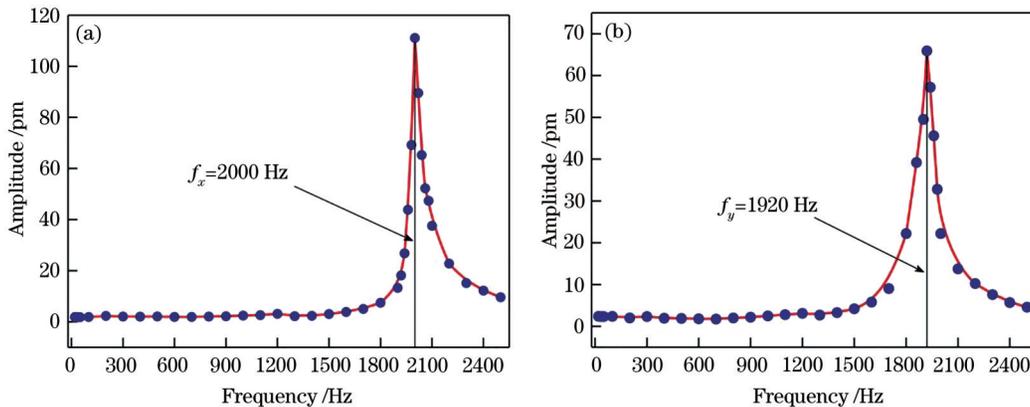


图 7 传感器在 x 和 y 方向的幅频特性曲线。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 7 Amplitude-frequency characteristic curves of sensor in x and y directions. (a) x -direction; (b) y -direction

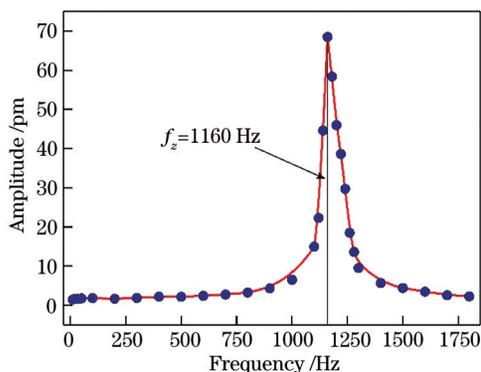


图 8 传感器在 z 方向的幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristic curve of sensor in z -direction

3.2 加速度特性测试

调整传感器与夹具的位置,对传感器在 x 和 y 方向激振的加速度特性进行分析。调节信号发生器模块的输出信号,使激振频率保持为 160 Hz,激振加速度的幅值以 0.5g 的步长从 0.5g 增加到 5g,重复测试三次,传感器在 x 和 y 方向激振的测试结果如图 9 所示。从图 9 中可以看到,传感器在主轴 (x 轴) 的灵敏度、线性度和三次实验的重复性误差分别为 1.36 pm/g、0.9998 和 1.34%,通过比较交叉轴与主轴的灵敏度,得到 y 轴和 z 轴的横向干扰分别为 1.46% 和 5.09%;传感器在主轴 (y 轴) 的灵敏度、线性度和三次实验的重复性误差分别为

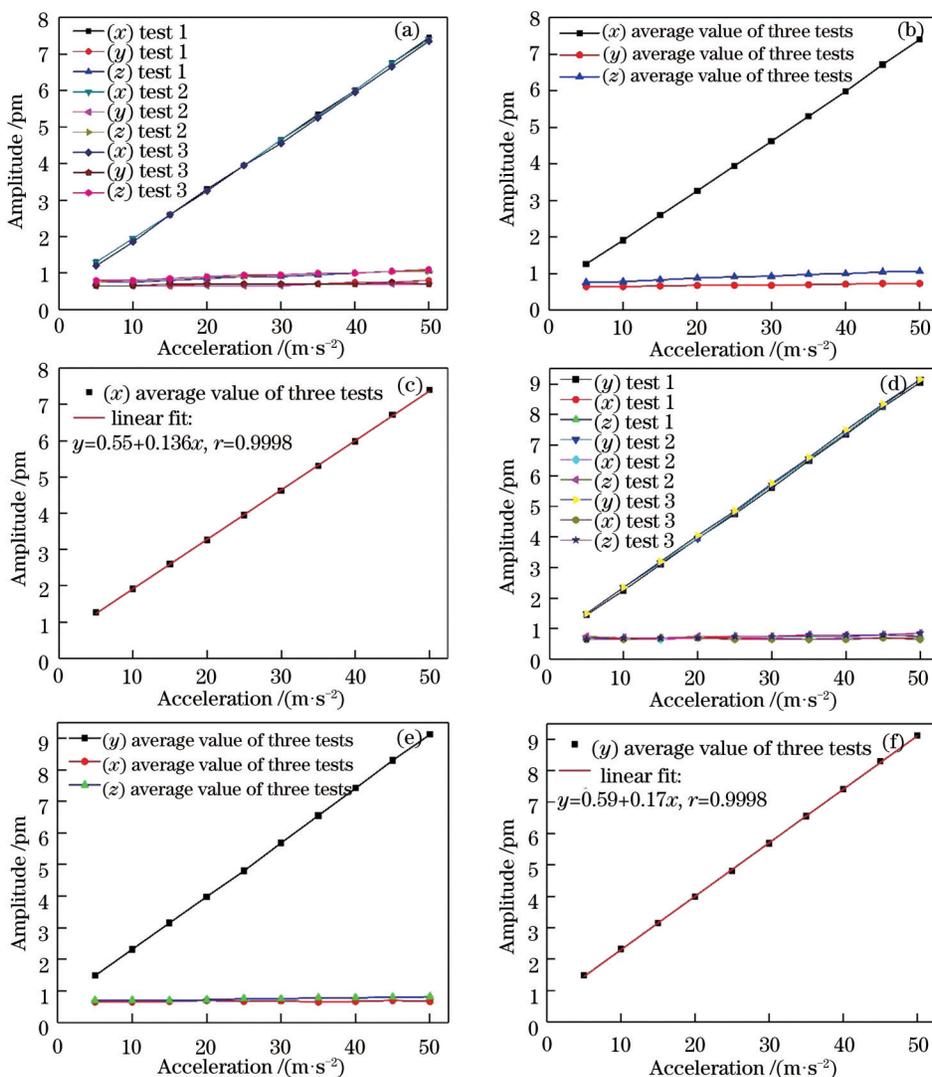


图 9 传感器在 x 和 y 方向激振的测试结果。(a) 三次测试的结果 (沿 x 方向激振); (b) 三次测试的平均值 (沿 x 方向激振); (c) x 轴的线性拟合曲线 (x 方向); (d) 三次测试的结果 (沿 y 方向激振); (e) 三次测试的平均值 (沿 y 方向激振); (f) y 轴的线性拟合曲线 (y 方向)

Fig. 9 Test results of sensor under excitations in x and y directions. (a) Results of three tests (excitation along x -direction); (b) average values of three tests (excitation along x -direction); (c) linear fitting curve of x -axis (x -direction); (d) results of three tests (excitation along y -direction); (e) average values of three tests (excitation along y -direction); (f) linear fitting curve of y -axis (y -direction)

1.7 pm/g、0.9998 和 1.63%， x 轴和 z 轴的横向干扰分别为 0.26% 和 1.68%。最后使激振频率保持为 160 Hz，激振加速度的幅值以 0.5g 的步长从 0.5g 增加到 6g，重复测试三次，传感器在 z 方向激振的测

试结果如图 10 所示。从图 10 中可以看到，传感器在主轴 (z 轴) 的灵敏度、线性度和三次实验的重复性误差分别为 1.31 pm/g、0.9999 和 1.21%， x 轴和 y 轴的横向干扰分别为 4.52% 和 0.84%。

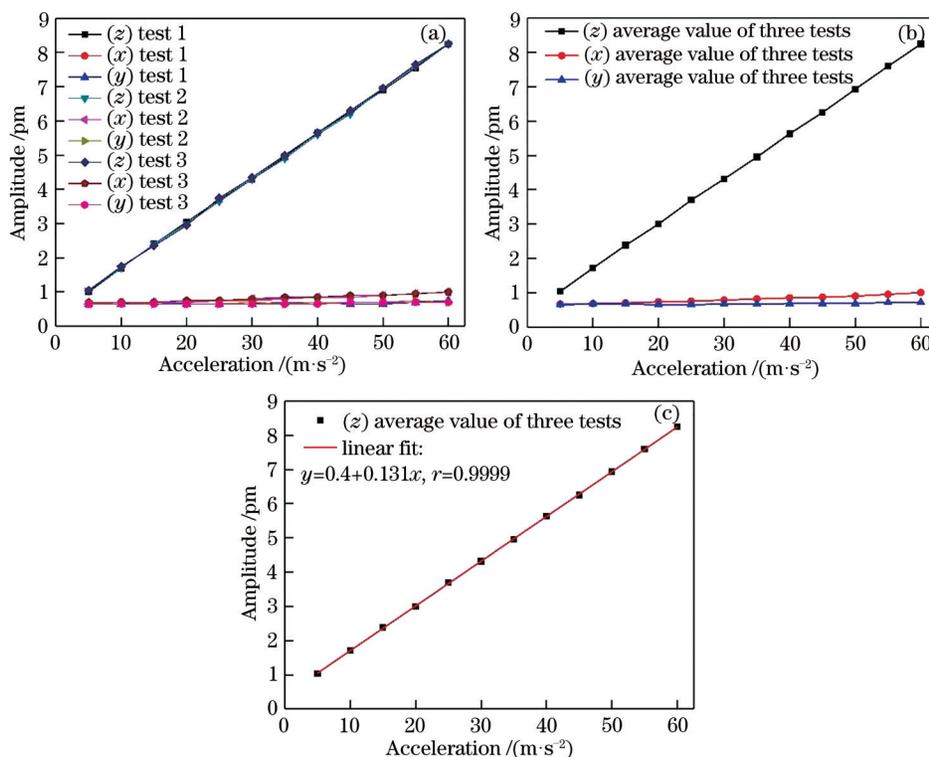


图 10 传感器在 z 方向激振的测试结果。(a) 三次测试的结果；(b) 三次测试的平均值；(c) z 轴的线性拟合曲线
Fig. 10 Test results of sensor under z -direction excitation. (a) Results of three tests; (b) average values of three tests; (c) linear fitting curve of z -axis

为进一步验证传感器的横向抗干扰能力，首先调节信号发生器模块的输出信号，使激振频率分别保持为 50, 200, 500, 800, 1000, 1500, 2000, 2500 Hz，对传感器在 x 和 y 方向激振的加速度特性进行分析。通过比较交叉轴与主轴的灵敏度，得到的横向干扰测试结果如图 11 所示。由图 11(a) 可知：当激

振频率处在 x 、 y 和 z 方向的共同频率平坦区域内，两个方向上的横向干扰变化不大；当激振频率处在 z 方向的频率共振区域内， z 方向上的横向干扰略微增大；当激振频率处在 x 方向的频率共振区域内，两个方向上的横向干扰相对于平坦区域有了一定程度的减小。同样地，当传感器在 y 方向激振时，两个

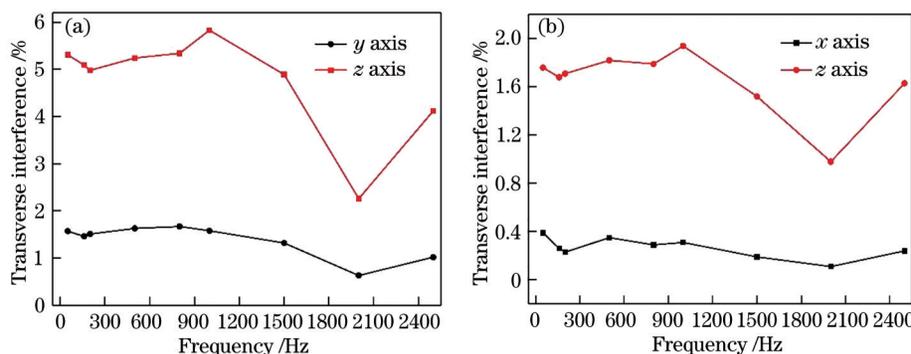


图 11 不同频率下传感器在 x 和 y 方向激振的横向干扰测试结果。(a) x 方向激振；(b) y 方向激振
Fig. 11 Transverse interference test results of sensor under excitations in x and y directions at different frequencies. (a) x -direction excitation; (b) y -direction excitation

方向上的横向干扰呈现类似的变化趋势。由图 11 可知,横向干扰的值没有超过 6%,说明传感器在 x 和 y 方向上振动时具有较好的横向抗干扰能力。

最后调节信号发生器模块的输出信号,使激振频率分别保持为 50, 200, 500, 800, 1000, 1500 Hz, 对传感器在 z 方向激振的加速度特性进行分析。通过比较交叉轴与主轴的灵敏度,得到的横向干扰测试结果如图 12 所示。由图 12 可知:当激振频率处在 z 方向的频率平坦区域内,两个方向上的横向干扰变化不大;当激振频率处在 z 方向的频率共振区域内,两个方向上的横向干扰有了一定程度的减小;当激振频率处在 z 方向的频率衰减区域内,两个方向上的横向干扰相对于平坦区域略微增大。交叉轴横向干扰的值没有超过 5%,说明传感器在 z 方向上振动时具有较好的横向抗干扰能力。

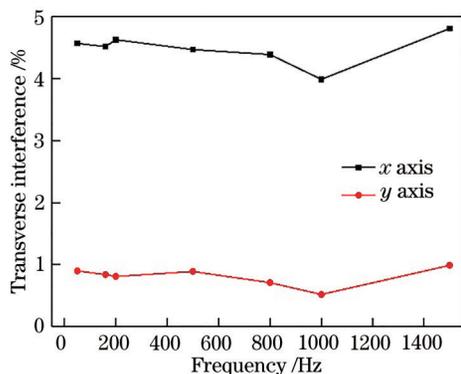


图 12 不同频率下传感器在 z 方向激振的横向干扰测试结果
Fig. 12 Transverse interference test results of sensor under z direction excitation at different frequencies

3.3 温度补偿性能测试

将光栅对的波长漂移量的差值作为传感器的输出信号,用于对温度的差值补偿。该原理是建立在光栅对同向波长漂移量相等的基础上,但是实际上光栅对在外界温度变化下的漂移量不完全相等,对光栅对的差值补偿存在误差,为此对传感器进行了温度补偿性能测试。

图 13 为传感器温度补偿性能测试系统的实物图。将传感器放置在由北京杏林睿光科技有限公司生产的 RLE-GF200 型电热恒温箱中,设定电热恒温箱在 30 min 左右内从室温 20 °C 升高至 70 °C,采用实验室自主研发的基于衍射光栅原理的八通道光纤光栅波长解调器(采集频率:10 Hz,精度:3 pm,分辨率:0.1 pm)实时记录传感器的波长变化。图 14 左侧 y 轴为 5 个 FBG 波长漂移量的实时数据,可见 5 个 FBG 的波长响应基本保持一致;

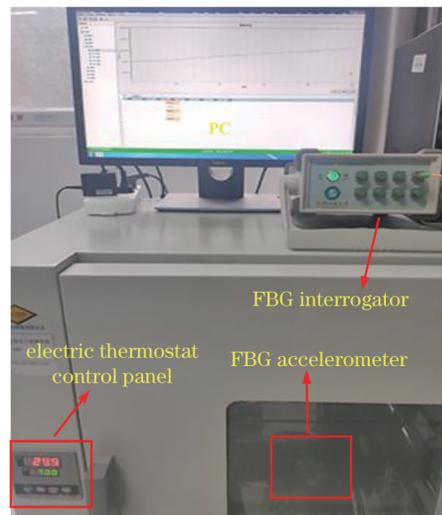


图 13 传感器温度补偿性能测试系统

Fig. 13 Test system for temperature-compensation performance of sensor

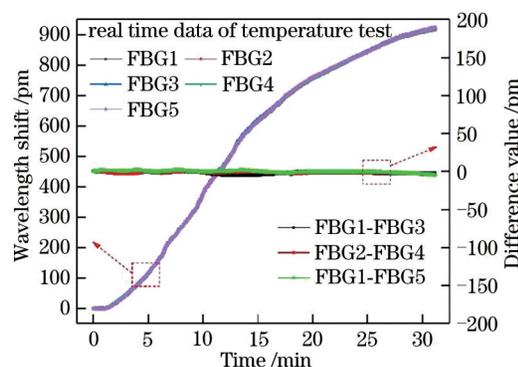


图 14 传感器温度补偿性能测试结果

Fig. 14 Test results of temperature-compensation performance of sensor

图 14 右侧 y 轴为光栅对波长漂移量的差值,即传感器分别在三个方向上的测量输出。在温度实时变化的环境中,三个方向上的测量输出均在 0 附近很小的范围内波动,这说明传感器具备良好的温度补偿能力。

4 结 论

提出了一种基于十字梁结构的加速度传感器,通过 5 个光纤光栅的合理布置,设计了基于光纤光栅的一体式三维加速度传感器,其具备温度自补偿功能。通过各项振动测试,该传感器在 x 、 y 和 z 方向上分别具有高达 2000, 1920, 1160 Hz 的谐振频率,且具有较宽的工作频带,在 x 、 y 和 z 方向的灵敏度分别为 1.36, 1.70, 1.31 pm/g,且在所测试的加速度范围内具有良好的线性测量能力。通过进一

步的横向抗干扰和温度补偿性能测试,验证了传感器具备良好的横向抗干扰和温度补偿能力。实验结果表明,4根梁尺寸的精确加工以及其表面5个光纤光栅的精确封装对传感器的输出结果有较大影响,因此在传感器的实际制作过程中应严格保证弹性体的加工精度,并采用合适的封装方法准确地将5个光纤光栅封装在弹性体特定的位置。

参 考 文 献

- [1] Gautam A, Kumar A, Priye V. Microseismic wave detection in coal mines using differential optical power measurement[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(5): 056111.
- [2] Kamenev O T, Kulchin Y N, Petrov Y S, et al. Fiber-optic seismometer on the basis of Mach-Zehnder interferometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 244: 133-137.
- [3] Wang J Y, Hu B X, Li W, et al. Design and application of fiber Bragg grating (FBG) geophone for higher sensitivity and wider frequency range[J]. *Measurement*, 2016, 79: 228-235.
- [4] Chen W G, Wang J X, Wan F, et al. Review of optical fibre sensors for electrical equipment characteristic state parameters detection[J]. *High Voltage*, 2019, 4(4): 271-281.
- [5] Xiong L, Guo Y X, Jiang G Z, et al. Six-dimensional force/torque sensor based on fiber Bragg gratings with low coupling[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(5): 4079-4089.
- [6] Yan J, Li W, Jiang M S, et al. Shape perception and three-dimensional reconstruction technology of plate structure based on fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1106006.
闫洁, 李伟, 姜明顺, 等. 基于光纤光栅传感器的板状结构形态感知与三维重构技术[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1106006.
- [7] Quan Z Q, Fang X Q, Xue G Z, et al. Strain transfer coupling mechanism of surface-bonded fiber Bragg grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0104004.
权志桥, 方新秋, 薛广哲, 等. 表面粘贴布拉格光纤光栅传感器的应变传递耦合机理研究[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0104004.
- [8] Wei L, Liu Z, Li H C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for “土”-shaped beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106004.
魏莉, 刘壮, 李恒春, 等. 基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106004.
- [9] Li H Y, Rao B Y, Zhao X F, et al. Development of fiber gratings inscribed by femtosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111420.
李宏业, 饶斌裕, 赵晓帆, 等. 基于飞秒激光刻写光纤光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111420.
- [10] Tiwari U K, Saini T S, Negi V, et al. Design and development of a field deployable packaged fiber Bragg grating-based accelerometer[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(1): 014104.
- [11] Udos W, Lee Y S, Lim K S, et al. Signal enhancement of FBG-based cantilever accelerometer by resonance suppression using magnetic damper[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 304: 111895.
- [12] Zhang X L, Liu X M, Zhang F X, et al. Reliable high sensitivity FBG geophone for low frequency seismic acquisition[J]. *Measurement*, 2018, 129: 62-67.
- [13] Ramos M A C, Romero G E S. Cantilever beam vibration sensor based on the axial property of fiber Bragg grating[J]. *Smart Structures and Systems*, 2017, 19(6): 625-631.
- [14] Parida O P, Thomas J, Nayak J, et al. Double-L cantilever-based fiber Bragg grating accelerometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11247-11254.
- [15] Wang X F, Guo Y X, Xiong L, et al. High-frequency optical fiber Bragg grating accelerometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(12): 4954-4960.
- [16] Liu Q P, He X, Qiao X G, et al. Design and modeling of a high sensitivity fiber Bragg grating-based accelerometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5439-5445.
- [17] Li T L, Tan Y G, Zhou Z D, et al. A non-contact FBG vibration sensor with double differential temperature compensation[J]. *Optical Review*, 2016, 23(1): 26-32.
- [18] Li T L, Shi C Y, Tan Y G, et al. A diaphragm type fiber Bragg grating vibration sensor based on transverse property of optical fiber with temperature compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(4): 1021-1029.
- [19] Jiang Q, Jiang H, Sui Q M, et al. Three-component fiber Bragg grating vibration sensor: CN201043915 [P]. 2008-04-02.
蒋奇, 蒋罕, 隋青美, 等. 三分量光纤光栅振动传感

- 器: CN201043915[P]. 2008-04-02.
- [20] Wang J, Wei G Q, Shi B, et al. A three-component fiber Bragg grating vibration sensor: CN102840908A [P]. 2012-12-26.
王静, 魏广庆, 施斌, 等. 一种三分量光纤光栅振动传感器: CN102840908A[P]. 2012-12-26.
- [21] Jiang G Y, Nie D X, Liu H B, et al. On-line vibration monitoring system of oil-immersed transformer with fiber Bragg grating sensor: CN203772406U[P]. 2014-08-13.
姜国义, 聂德鑫, 刘海波, 等. 内置光纤光栅传感器的油浸式变压器振动在线监测系统: CN203772406U [P]. 2014-08-13.
- [22] Nan Q M, Song A L. Research on 3D fiber Bragg grating accelerometer[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(s1): s12302.
- [23] Nan Q M, Li S. Study on 3D CFBG vibration sensor and its application[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(1): 90-96.
- [24] Li T L, Tan Y G, Liu Y, et al. A fiber Bragg grating sensing based triaxial vibration sensor[J]. Sensors, 2015, 15(9): 24214-24229.
- [25] Morikawa S R K, Ribeiro A S, Regazzi R D, et al. Triaxial Bragg grating accelerometer[C]//2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002 (Cat. No.02EX533), May 10-10, 2002, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2002: 95-98.
- [26] Abushagur O M, Abushagur M A G, Narayanan K. Novel three-axes fiber Bragg grating accelerometer [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5877: 58770Z.
- [27] Jiang Q, Yang M. A high sensitivity vector accelerometer based on tri-axial fiber Bragg grating [J]. Optica Applicata, 2012, 42(4): 901-912.
- [28] Jiang Q, Yang M. Simulation and experimental study of a three-axis fiber Bragg grating accelerometer based on the pull-push mechanism[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(11): 115105.
- [29] 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.
- [30] Wu J H, Ye S M, Zhang J Q, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of Jingxiong high-speed railway based on fiber Bragg grating monitoring technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210603.
吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210603.