

二维低频光纤布拉格光栅振动传感器的设计

刘强 李文静 马超 魏淑辉 付天舒 于波 刘超

Design of two-dimensional low-frequency fiber Bragg grating vibration sensor

LIU Qiang, LI Wen-jing, MA Chao, WEI Shu-hui, FU Tian-shu, YU Bo, LIU Chao

引用本文:

刘强, 李文静, 马超, 魏淑辉, 付天舒, 于波, 刘超. 二维低频光纤布拉格光栅振动传感器的设计[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1450–1457. doi: 10.37188/CO.2024-0069

LIU Qiang, LI Wen-jing, MA Chao, WEI Shu-hui, FU Tian-shu, YU Bo, LIU Chao. Design of two-dimensional low-frequency fiber Bragg grating vibration sensor[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1450-1457. doi: 10.37188/CO.2024-0069

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于轴承和柔性铰链的布拉格光纤光栅加速度计

Fiber bragg grating accelerometer based on flexure hinge and bearing

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1109 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0252>

油气井下光纤光栅温度压力传感器

Fiber bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1224 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0008>

基于微波光子学的准分布式光纤传感解调技术

Interrogation technology for quasi-distributed optical fiber sensing systems based on microwave photonics

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 245 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0121>

光纤法珀传感器光楔式解调系统设计

Design of optical wedge demodulation system for fiber Fabry-Perot sensor

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1259 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0204>

基于希尔伯特-黄变换的双马赫-曾德分布式光纤传感振动定位方法

A Hilbert-Huang transform method for vibration localization based on a dual Mach-Zehnder distributed optical fiber sensor

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1410 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0065>

光纤光栅外腔激光器光学薄膜的研制

Design and fabrication of an optical film for fiber bragg grating external cavity diode lasers

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 447 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0010>

文章编号 2097-1842(2024)06-1450-08

二维低频光纤布拉格光栅振动传感器的设计

刘 强, 李文静, 马 超, 魏淑辉, 付天舒, 于 波, 刘 超*
(东北石油大学 物理与电子工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 本文设计了一种可在 x 轴和 z 轴方向工作的对称圆形柔性铰链式二维振动传感器, 以对低频振动信号进行获取和监测。从理论上分析了传感结构的力学特性, 在 Comsol 中建立模型进行仿真分析, 并采用有限元法对结构进行优化设计, 将铰链谐振频率设计为 420 Hz。采用光纤布拉格光栅(FBG)作为应变检测器件粘贴在铰链结构表面, 利用边沿滤波器法实现 FBG 的动态解调, 采用标准振动台对传感器性能进行测试。实验结果表明该传感器在 x 轴和 z 轴的谐振频率为 420 Hz, 工作频率为 20~300 Hz。在平坦区的平均灵敏度为 1847.32 mV/g, 加速度分辨率达 5.41×10^{-4} g。该传感器在所有二维方向上的横向干扰水平平均小于 5%。本文设计的传感器为二维振动传感器, 可适用于低频振动信号的高灵敏检测。

关键词: 加速度传感器; 振动检测; 光纤布拉格光栅; 铰链结构

中图分类号: TP212.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0069

CSTR: 32171.14.CO.2024-0069

Design of two-dimensional low-frequency fiber Bragg grating vibration sensor

LIU Qiang, LI Wen-jing, MA Chao, WEI Shu-hui, FU Tian-shu, YU Bo, LIU Chao*

(School of Physics and Electronic Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

* Corresponding author, E-mail: msm-liu@126.com

Abstract: In order to acquire and monitor the low-frequency vibration signal, a two-dimensional vibration sensor with a symmetrical circular flexure hinge is designed, which can work in the x and z axes. The mechanical characteristics of the sensing structure are analyzed theoretically. The model is established in Comsol for simulation analysis, and the structure is optimized by finite element method. The hinge resonant frequency is designed to be 420 Hz. The fiber Bragg grating is pasted on the surface of the hinge structure as a strain detection device, and the dynamic demodulation of FBG is realized by the edge filter method. The performance of the sensor is tested with a standard shaking table. The experimental results show that the natural frequencies of the sensor in the x and z axes both are 420 Hz, the operating frequency range is 20–300 Hz, the average sensitivity in the flat region is 1847.32 mV/g, and the acceleration resolution is 5.41×10^{-4} g. The sensor demonstrates a less than 5% lateral interference level in all two-dimensional orientations. The sensor

收稿日期: 2024-04-12; 修订日期: 2024-04-30

基金项目: 黑龙江省省属本科高校“优秀青年教师基础研究支持计划”(No. YQJH2023077)

Supported by The Basic Research Support Project for the Excellent Youth Scholars of Heilongjiang Province (No. YQJH2023077)

designed in this paper is a two-dimensional vibration sensor, which is suitable for highly sensitive detection of low-frequency vibration signals.

Key words: acceleration sensor; vibration test; Fiber Bragg Grating; hinged construction

1 引 言

振动检测作为一种重要的监测手段广泛用于桥梁隧道结构健康监测^[1-2]、地震监测^[3]、页岩压裂裂缝检测^[4]、铁路监测^[5]、航空航天机械结构的故障诊断^[6-7]等工业领域。为满足不同应用领域的技术需求,不同类型的振动传感器被相继开发并投入使用,其中低频振动传感器主要适用于低速机械设备的振动监测和故障诊断,如水泵、风机、变速箱等设备。然而传统电学加速度传感器的核心敏感器件易受电磁干扰,无法在恶劣环境中工作。因此,考虑到光纤传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀及可远距离传输的优势,研究人员开始尝试设计光纤振动传感器^[8-10]。由于光纤布拉格光栅(FBG)的传感和解调技术更成熟,因此受到广泛关注^[11-12]。

根据不同弹性元件,从结构上光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)振动传感器可以分为梁式振动传感器^[13-14]、柱体式振动传感器^[15]、膜片振动传感器^[16-17]及铰链式振动传感器^[18-19]。通过对比发现铰链式振动传感结构具有设计灵活、易于加工、结构简单和易于提升灵敏度等优点。针对一维振动传感器, Yan 等人提出了一种直圆形弯曲铰链的 FBG 加速度计,该传感器谐振频率为 800 Hz,在 30~200 Hz 范围内的灵敏度为 54 pm/g^[20]。Shao 等人设计了一种基于单轴单弧铰链结构的中低频光纤布拉格光栅加速度传感器,实验结果显示该传感器的谐振频率为 630 Hz,平坦范围为 30~300 Hz,加速度灵敏度为 57.77 pm/g,加速度的分辨率为 0.017 g^[21]。Zhang 等人提出了一种采用单凹口圆形弯曲铰链的光纤布拉格光栅加速度计,可用于测量中频垂直振动,该 FBG 加速度计的工作频率为 50~450 Hz,100 Hz 时的灵敏度约为 65 pm/g^[22]。为提高传感器的灵敏度, Luo 等人在一维结构的基础上设计了一种基于对称双柔性铰链结构的紧凑型 FBG 加速度计,能够测量 50~600 Hz 范围内的振动加速度,灵

敏度约为 41 pm/g^[23]。上述研究仅能实现一维振动信号的检测,为实现二维测量, Le 等人设计了一种对称的圆形弯曲铰链结构的二维加速度传感器,其 x 方向和 y 方向的共振频率分别为 440 Hz 和 500 Hz,平均灵敏度分别为 124 pm/g 和 83 pm/g,该工作采用的解调仪的波长分辨率为 0.5 pm,最大加速度分辨率为 0.004 g^[24]。尽管该传感器具有较好的灵敏度,但两个维度的测量范围和灵敏度一致性不理想。

本文设计了一种基于光纤光栅的对称双铰链结构二维低频振动传感器,采用有限元软件详细优化了铰链结构并明确了传感器的工作频率范围,将两支具有相同参数的 FBG 粘贴在铰链结构表面,并利用边沿滤波法解调 FBG 光谱。该传感器获得了较好的实验结果,可对低频振动信号进行有效检测。

2 传感结构设计

所设计的对称双铰链振动传感结构如图 1 所示,左右两侧铰链方向垂直,铰链厚度均为 t ,半径为 R ,两侧质量块的长度为 d ,高度和宽度相等,均为 h ,中间打两个用于固定的圆孔。在质量块表面铣出凹槽,并分别粘贴有效长度 $l=10$ mm 的 FBG。为分析该结构的振动传感特性,首先建立其力学模型,由于两侧结构对称,且以中间为固定端,因此仅需讨论单侧的力学模型。

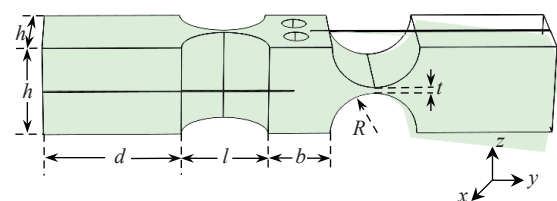


图 1 传感器结构模型

Fig. 1 The sensing structure model

假设在 z 方向上施加一个加速度 a , 质量块受到加速度的影响将绕着铰链旋转。设旋转角度为 θ , 由力矩平衡方程可以得到该系统在惯性作

用下满足以下关系^[20]:

$$ma\left(R + \frac{d}{2}\right) = K_f \Delta l \frac{h}{2} + K\theta, \quad (1)$$

式中: m 为质量块的质量, Δl 表示光纤长度的变化量, 将 FBG 看作一个弹性刚度为 K_f 的弹簧:

$$K_f = \frac{A_f E_f}{l}, \quad (2)$$

式中: A_f 为 FBG 的横截面积, E_f 为 FBG 的弹性模量, l 为 FBG 的有效长度。铰链的旋转刚度 K 为^[23]:

$$K = \frac{EtR^2}{12 \left[\frac{2s^3(6s^2 + 4s + 1)}{(2s + 1)(4s + 1)^2} + \frac{12s^4(2s + 1)}{(4s + 1)^{5/2}} \arctan \sqrt{4s + 1} \right]}, \quad (3)$$

其中 $s = R/t$, E 为材料的弹性模量, θ 代表加速度作用下质量块绕铰链的旋转角度, 近似为:

$$\theta = \frac{2\Delta l}{h}. \quad (4)$$

光纤光栅的波长漂移量为:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (1 - P_e) \Delta \varepsilon = (1 - P_e) \frac{\Delta l}{l}, \quad (5)$$

其中 P_e 表示光弹系数, FBG 的加速度灵敏度定义为 FBG 的中心波长漂移量 $\Delta \lambda$ 与加速度 a 的商, 可推得灵敏度 S 为:

$$S = \frac{\Delta \lambda}{a} = \frac{m(1 - P_e) \left(\frac{d}{2} + R \right) \lambda}{l \left(K_f \frac{h}{2} + K \frac{2}{h} \right)}. \quad (6)$$

由振动传感器的动力学方程^[20]:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \left[K + K_f \left(\frac{h}{2} \right)^2 \right] \theta = 0, \quad (7)$$

可推得振动传感器的谐振频率为:

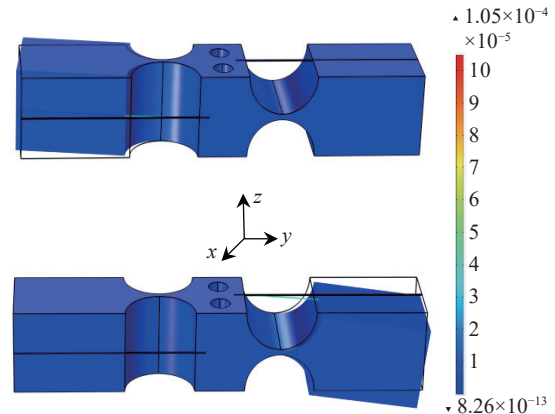
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_f \left(\frac{h}{2} \right)^2 + K}{J}}, \quad (8)$$

其中, J 代表质量块的惯性矩:

$$J = m \frac{h^2 + d^2}{12} + m \left(\frac{d}{2} + R \right)^2. \quad (9)$$

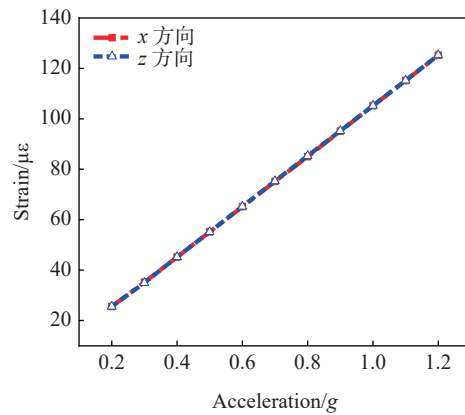
3 传感器优化

设传感器结构的初始值为 $R=7$ mm, $t=1$ mm, $d=22$ mm, $h=15$ mm。采用有限元软件建立传感器模型。该传感器材料选用 304 不锈钢, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 密度为 7850 kg/m³, 光纤的弹性模量设置为 73 GPa, 有效弹光系数为 0.3, 密度为 2.5 kg/m³。分析结构参数对传感器性能的影响, 当在 x 和 z 方向分别施加 1 g 的加速度时, 传感器的响应如图 2(a) 所示。粘贴在质量块上的光纤随着质量块上的摆动而伸长或压缩, 此时光纤受到的轴向最大应变可达到 105 $\mu\epsilon$ 。图 2(b) 给出了不同加速度下 x 方向和 z 方向 FBG 的轴向应变与加速度的变化关系。可见, 随着加速度的增大, FBG 的轴向应变线性增加。



(a) 传感器结构应变模拟器

(a) Strain simulation diagram of the sensor structure



(b) 不同加速度下光纤轴向应变曲线

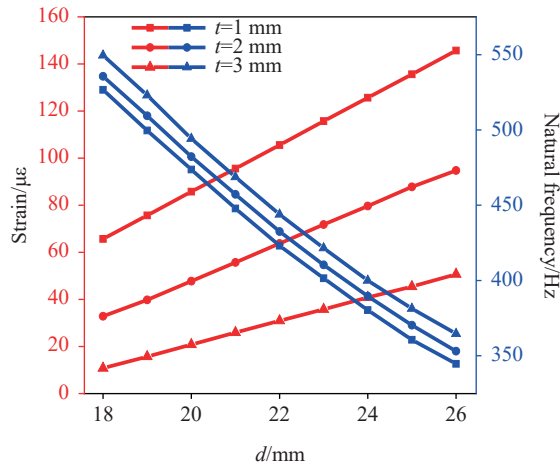
(b) Axial strain curves of FBG under different accelerations

图 2 传感结构仿真分析结果

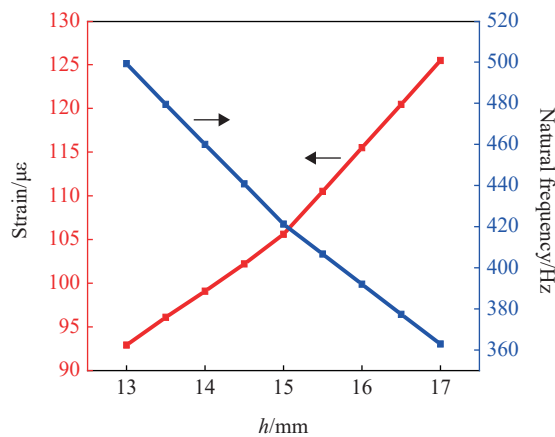
Fig. 2 Simulation analysis results of sensing structure

由于铰链型加速度传感器的工作频率和灵敏

度主要取决于铰链厚度 t 和质量块参数 d 和 h , 为此图 3(a) 给出不同 t 和 d 时 FBG 的轴向应变和共振频率。



(a) 应变和固有频率随质量块长度 d 和铰链厚度 t 的变化情况
(a) Strain and natural frequency versus the parameter d at different t



(b) 应变和固有频率随质量块高度的变化情况
(b) Strain and natural frequency of the structure versus the parameter h

图 3 不同结构参数对应变和固有频率的影响

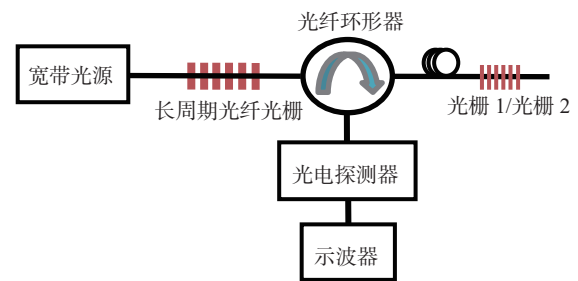
Fig. 3 The influence of different structural parameters on strain and natural frequency

可见, 随着 t 的增加传感结构的谐振频率增加, 但变化量较小, 即其对测量振动频率范围的影响较小, 但 FBG 的轴向应变却显著减小, 说明灵敏度大幅降低。为了使传感器获得较高的灵敏度, 选择 $t=1$ mm。同时, 选择 $d=22$ mm, 将谐振频率固定为 420 Hz, 以满足工作频率的要求。同理, 图 3(b) 分析了不同 h 时的谐振频率和轴向应变。可见, 随着质量块 h 的增加, 谐振频率单调减小, FBG 的轴向应变单调增加, 综合考虑灵敏度和测量频率范围的需要, 选择 $h=15$ mm 作

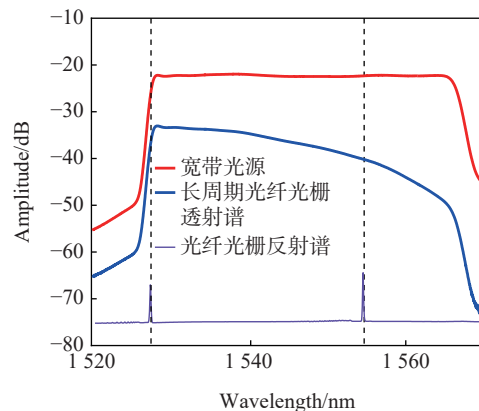
为最优值。将确定后的参数 $t=1, d=22, h=15, R=7$ 代入方程 (8) 得到该传感器的理论谐振频率为 431.52 Hz。

4 实验与讨论

为实现传感器 FBG 光谱信号的快速动态解调, 本文采用低成本的边缘滤波解调法进行处理, 分别利用 ASE 光源输出光谱的上升沿和 LP-FG 透射谱的下降沿进行对比分析。所采用的解调光路如图 4(a) 所示, ASE 光源输出宽带光谱, 经长周期光纤光栅进行调制, 其光谱如图 4(b) (彩图见期刊电子版) 所示, 之后进入光纤环形器连接 FBG。为使 FBG 光谱恰好位于斜坡位置, 分别选择中心波长为 1526.5 nm 和 1555.0 nm 的 FBG 进行测试, 经 FBG 反射后采用光电探测器进行光电转换放大后送入示波器进行数据采集分析。图 5 为依据光路搭建的实验装置, 将表面粘贴 FBG 的传感结构置于标准振动台上进行性能测试。



(a) 光纤光栅解调光路图
(a) Demodulation optical path of FBG



(b) ASE 光源和 FBG 光谱
(b) ASE source and FBG spectra

图 4 光纤光栅边缘解调方法

Fig. 4 The edge demodulation method of FBG

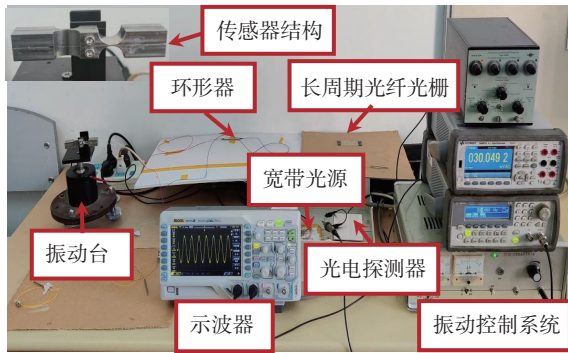
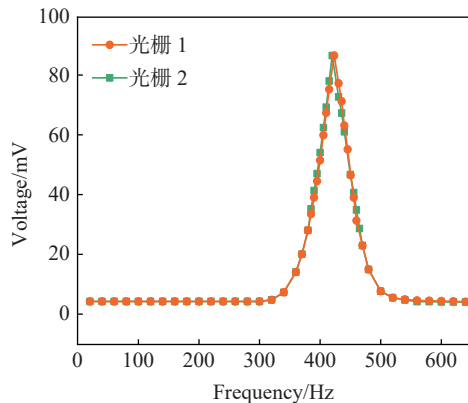


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup

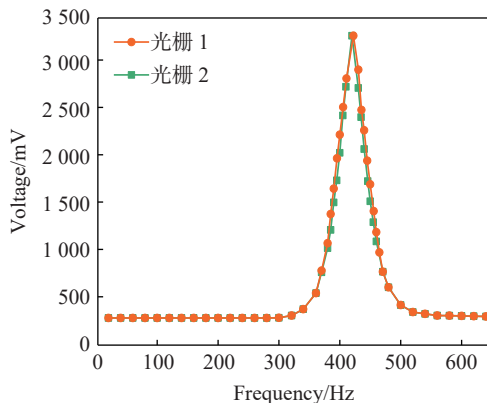
4.1 幅频特性实验

实验首先测试了传感器的幅频特性,在双铰链传感结构表面分别粘贴中心波长为 1555.0 nm 的 FBG,设置振动台的加速度为 1 g 的正弦信号,测试 FBG 解调信号的峰值随振动频率的变化情况,如图 6(a)(彩图见期刊电子版)中的橙色线所示。



(a) 1555.0 nm 解调幅频响应

(a) Amplitude-frequency response at 1555.0 nm



(b) 1526.5 nm 解调幅频响应

(b) Amplitude-frequency response at 1526.5 nm

图 6 不同波长解调的幅频响应实验

Fig. 6 Amplitude-frequency response at different wavelengths

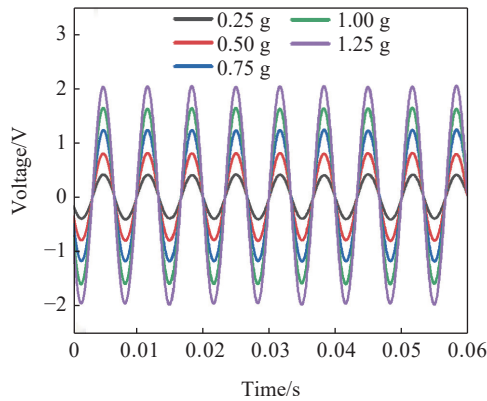
可见,随着振动台施加频率的增加,在 20~300 Hz 范围内解调信号的幅度变化比较缓慢,处于平坦区。当振动频率大于 300 Hz,解调信号的峰值迅速增加,在 420 Hz 处达到峰值,随后下降,这表明传感结构的谐振频率为 420 Hz,与理论值接近。由于振动台只能施加垂直于桌面的振动,因此将传感结构旋转 90°后,测试对称铰链另一侧的幅频特性。如图 6(a)中绿色线所示,谐振频率为 422.4 Hz,对称铰链两侧的幅频响应特性几乎一致。由于 1555.0 nm 光谱处的边沿平缓,导致信号变化幅度较小,这将影响传感器的灵敏度,因此,将传感结构表面换成中心波长为 1526.5 nm 的 FBG,利用 ASE 光源光谱自身的上升沿进行 FBG 光谱解调。采用同样方法测试了对称双铰链结构两侧结构的幅频特性,如图 6(b)(彩图见期刊电子版)所示。可见,其幅频特性曲线的变化趋势与图 6(a)完全一致,但信号幅度显著变大,说明利用斜率较大的边缘进行 FBG 解调能获得更好的灵敏度。后面的讨论中均采用该解调波段。同时,该传感结构的工作频率设置为 20~300 Hz 的幅频特性平坦区,能够满足低频振动信号检测的需求。

4.2 线性响应实验

为评价该传感器的性能,实验测试了不同加速度情况下的解调信号,如图 7(a)(彩图见期刊电子版)所示。当振动台频率为 150 Hz 时,随着加速度的增加,解调信号幅度单调增加,可以看出传感器具有很好的响应特性,能够准确捕捉加速度的变化。通过 3 次重复测量得到信号峰值随加速度的变化情况,并分别采用线性函数进行拟合,得到 3 次重复测量的斜率,如图 7(b)所示。可见 3 次测量的结果基本一致,表明传感器具有较好的重复性。取 3 次测量的平均斜率作为该传感器在 150 Hz 振动频率下的灵敏度,其值为 1824.00 mV/g。若解调装置测量的电压分辨率为 1 mV,可得该传感器的加速度分辨率为 5.48×10^{-4} g,表现出极好的性能。

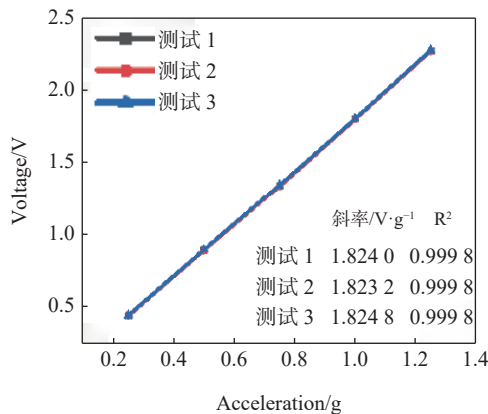
为测试传感器在不同振动频率时的响应特性,在工作频率范围内,分别选择 50 Hz、100 Hz、150 Hz、200 Hz、250 Hz 和 300 Hz 测试传感器的灵敏度。测试结果如图 8(彩图见期刊电子版)所示,同样采用线性函数进行拟合,可得到传感器在

不同振动频率下的灵敏度。可见随着振动频率的增加,斜率发生缓慢增加,但相差较小,可视为工作在平坦区,平均斜率为 1847.32 mV/g。由此可知,在平坦区内传感器具有较高的平均灵敏度,且加速度分辨率为 5.41×10^{-4} g。



(a) 传感器时域特性

(a) Time-domain characteristic of the sensor



(b) 加速度传感器的重复性测试结果

(b) Repeatability response results of acceleration sensor

图 7 传感器响应实验

Fig. 7 Response experiment of the sensor

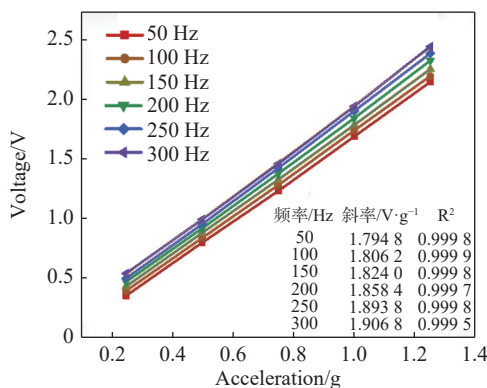


图 8 不同振动频率下的传感器灵敏度

Fig. 8 The sensitivity of the sensor at different vibration frequencies

4.3 抗横向干扰实验

对于二维振动传感器,两个传感方向间的干扰是不可避免的。为测试该二维传感结构的横向抗干扰能力,在 z 方向施加频率为 200 Hz,加速度为 1 g 的振动信号,同时采集两个方向的 FBG 解调信号。测试结果如图 9(彩图见期刊电子版)所示。可见 z 方向传感器可获得较大的输出信号幅度,同时 x 方向的传感结构也采集到微弱的信号,其信号幅度为 46.40 mV,当频率为 200 Hz 时,传感器的灵敏度为 1858.40 mV/g,则引入的耦合误差为 0.02496 g,灵敏度误差为 46.40 mV/g。该现象可能是由于传感结构的放置方向与振动台的振动方向并不完全一致导致的,并不代表传感结构本身的误差,若采用更精密的振动检测装置,该误差可进一步降低。

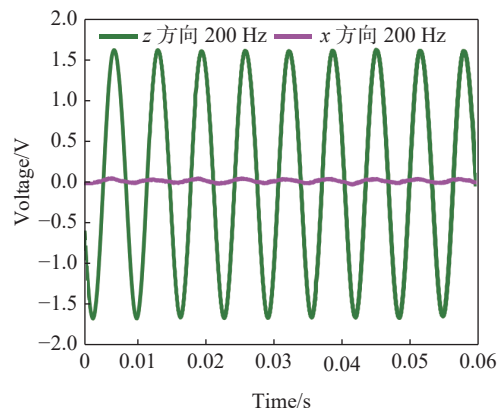


图 9 传感器的交叉干扰特性

Fig. 9 The cross-interference characteristics of the sensor

5 结 论

本文研究了一种二维铰链式振动传感器,该传感器设计了两个彼此正交的铰链方向,可实现二维振动信号的检测。分析了该传感器的理论模型,使用有限元软件对该传感结构进行仿真优化,确定其工作频率范围和性能最佳的结构参数。实验利用光纤布拉格光栅作为应变传感器,粘贴在铰链结构表面,采用边缘滤波法解调 FBG 光谱。实验结果表明,该传感器在 20~300 Hz 的频率范围内,加速度测量平均灵敏度为 1847.32 mV/g,加速度分辨率达 5.41×10^{-4} g。该振动传感器为低频振动检测领域提供了高灵敏、低成本的检测方案,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] DU C, DUTTA S, KURUP P, *et al.*. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 303: 111728.
- [2] AZHAR A S, KUDUS S A, JAMADIN A, *et al.*. Recent vibration-based structural health monitoring on steel bridges: systematic literature review[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, 15(3): 102501.
- [3] SONG G D, WANG J Y, LIU T Y, *et al.*. Optical fiber grating strain acceleration sensors ground vibration experimental research[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 784-793.
- [4] JOHNSON SINGH M, CHOUDHARY S, CHEN W B, *et al.*. Applications of fibre Bragg grating sensors for monitoring geotechnical structures: a comprehensive review[J]. *Measurement*, 2023, 218: 113171.
- [5] YÜKSEL K, KINET D, MOEYAERT V, *et al.*. Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(10): 105033.
- [6] ZHU L Q, SUN G K, BAO W M, *et al.*. Structural deformation monitoring of flight vehicles based on optical fiber sensing technology: a review and future perspectives[J]. *Engineering*, 2022, 16: 39-55.
- [7] GAO ZH Y, ZHU X J, FANG Y B, *et al.*. Active monitoring and vibration control of smart structure aircraft based on FBG sensors and PZT actuators[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 63: 101-109.
- [8] WANG R H, LI Y Z, QIAO X G. Recent advances in multidimensional fiber Bragg grating accelerometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(13): 4238-4247.
- [9] WEI L, JIANG D ZH, YU L L, *et al.*. A novel miniaturized fiber Bragg grating vibration sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(24): 11932-11940.
- [10] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3): 306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese).
- [11] LI T L, GUO J X, TAN Y G, *et al.*. Recent advances and tendency in fiber Bragg grating-based vibration sensor: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(20): 12074-12087.
- [12] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 519-531.
WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519-531. (in Chinese).
- [13] FAN X Y, GE L, GE CH, *et al.*. A dual oblique wing-based low-frequency FBG accelerometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 81: 103526.
- [14] ZHAO X F, JIA ZH A, FAN W, *et al.*. A fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation[J]. *Optik*, 2021, 241: 166993.
- [15] YAO H ZH, LI Y Q, YANG Z. A novel fiber Bragg grating acceleration sensor for measurement of vibration[J]. *Optik*, 2016, 127(20): 8874-8882.
- [16] ZHANG F X, JIANG SH D, WANG C, *et al.*. Broadband and high sensitivity FBG accelerometer based on double diaphragms and h-shaped hinges[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1): 353-359.
- [17] FAN W, WEN J, GAO H, *et al.*. Low-frequency fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm-type cantilever[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 70: 102888.
- [18] 宋颖, 张浩然, 李剑芝, 等. 基于轴承和柔性铰链的布拉格光纤光栅加速度计[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(5): 1109-1120.
SONG Y, ZHANG H R, LI J ZH, *et al.*. Fiber Bragg grating accelerometer based on flexure hinge and bearing[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1109-1120. (in Chinese).
- [19] SONG H, SONG E ZH, PENG W, *et al.*. Miniature structure optimization of small-diameter FBG-based one-dimensional optical fiber vibration sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(23): 26763-26771.
- [20] YAN B, LIANG L. A novel fiber Bragg grating accelerometer based on parallel double flexible hinges[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(9): 4713-4718.
- [21] SHAO M, LIANG J J, GAO H, *et al.*. Medium and low frequency fiber Bragg grating acceleration sensor based on single-sided single-arc hinge[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 69: 102814.
- [22] ZHANG L, LIU M Y, HONG L, *et al.*. Design and optimization of an FBG accelerometer based on single-notch circular

- flexure hinge for medium-frequency vibration measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(21): 20303-20311.
- [23] LUO X D, LI Y F, FENG D Q, *et al.*. Fiber Bragg grating accelerometer based on symmetrical double flexure hinges[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102795.
- [24] LE H D, CHIANG C C, NGUYEN C N, *et al.*. A 2-D Fiber Bragg grating acceleration sensor based on circular flexure hinges structure[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 7004411.

作者简介:



刘 强(1980—), 男, 黑龙江泰来人, 博士, 教授, 2012年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 主要从事光纤传感技术研究。E-mail: nepulq@126.com



刘 超(1978—), 男, 黑龙江木兰人, 博士, 教授, 博士生导师, 2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 主要从事微结构光学器件研究。E-mail: msm-liu@126.com

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 100元, 全年1200元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

<http://www.fgxb.org>