

激光与光电子学进展

微型宽频光纤布拉格光栅振动传感器设计及特性研究

赵慧枝¹, 董明利^{1,2}, 辛璟焱^{1,2*}, 宋言明^{1,2}, 张旭³, 吴俊⁴¹北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;²北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016;³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;⁴北京空间机电研究所, 北京 100089

摘要 提出了一种小型化、宽频段、高灵敏度的光纤布拉格光栅(FBG)振动传感器,利用毫米级FBG进行传感器结构的微型化设计。采用“杠杆铰链”结构作为应变传递梁,通过质量块尾端镂空的方法,调整整体质量块重心位置,提高了传感器的固有频率,此结构可以在灵敏度小幅度降低的情况下提升传感器的固有频率。为了满足空间相机上传感器小型化的要求,设计了体积为 15 mm×15 mm×15 mm 的振动传感器,并对其进行了结构设计和有限元仿真分析,完成了传感器的结构优化,兼顾工作频段和灵敏度。通过毫米级FBG刻写、传感器封装完成了传感器的制作。搭建了振动测试系统对传感器的特性进行测试和分析,结果表明:传感器的固有频率约为 1250 Hz,激振频率为 750 Hz 时,传感器的灵敏度大于 83.3 pm·g⁻¹,横向抗干扰能力较强,交叉灵敏度小于 4%。

关键词 传感器; 宽频段; 振动分析; 杠杆铰链结构; 光纤布拉格光栅; 光纤传感器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223149

Structural Design and Investigation of Micro-Broadband Fiber Bragg Grating Vibration Sensor

Zhao Huizhi¹, Dong Mingli^{1,2}, Xin Jingtao^{1,2*}, Song Yanming^{1,2}, Zhang Xu³, Wu Jun⁴¹School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;²Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and Systems, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;³School of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;⁴Beijing Institute of Space Electromechanics, Beijing 100089, China

Abstract A miniaturized, wide-band, high-sensitivity fiber Bragg grating (FBG) vibration sensor is proposed. The millimeter-scale FBG is used to design the sensor structure. The “lever hinge” structure is used as the strain transfer beam, and the center of gravity of the entire mass block is adjusted by hollowing out the end of the mass block, which improved the natural frequency of the sensor. This structure increases the natural frequency of the sensor with a slight decrease in sensitivity. In this study, a vibration sensor with a volume of 15 mm × 15 mm × 15 mm is designed to satisfy the miniaturization requirements of sensors on space cameras, and structural design and finite element simulation analysis were performed. The structural optimization of the sensor is completed, considering the working frequency band and sensitivity. The sensor is fabricated by millimeter FBG writing and sensor packaging. A vibration test system is built to test and analyze the characteristics of the sensor. The results show that the natural frequency of the sensor is approximately 1250 Hz, the sensitivity exceeds 83.3 pm·g⁻¹ when the excitation frequency is 750 Hz, the lateral anti-interference ability of the sensor is excellent, and the cross-sensitivity is lower than 4%.

Key words sensor; wide frequency band; vibration analysis; lever hinge structure; fiber Bragg grating; fiber optic sensor

收稿日期: 2023-01-11; 修回日期: 2023-02-21; 录用日期: 2023-03-11; 网络首发日期: 2023-03-19

基金项目: 北京市自然科学基金-市教委联合基金项(KZ201911232044)

通信作者: *xinjingtao@bistu.edu.cn

1 引言

光纤光栅振动传感器因其具有光纤光栅的多参数测量、传感网络密集化、系统轻量化和抗电磁干扰等特点^[1-5],在航空航天、军事武器、道路桥梁、石油电力等领域都具有广泛的应用^[6-8]。在航空航天领域,对卫星的振动监测具有重要意义。卫星在轨运行时运动部件会产生带宽上千赫兹的 $10^{-3}g$ 量级微振动,造成空间相机上高分子影像的模糊扭曲,同时相机内部安装空间有限,这对光纤光栅振动传感器提出了宽频段和小型化的应用需求。

近年来,国内外学者对光纤光栅振动传感器展开了深入的研究^[9-10]。周海阳等^[11]提出了一种扭转梁式的加速度传感器,其封装尺寸大于 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 21\text{ mm}$,谐振频率为 1180 Hz ,灵敏度为 $6.290\text{ pm}\cdot g^{-1}$ 。Berkoff等^[12]提出了一种基于顺变材料的光纤布拉格光栅(FBG)振动传感器,其体积为 $25.4\text{ mm}\times 25.4\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,谐振频率大于 2 kHz ,制作工艺相对复杂。Stefani等^[13]提出了一种聚合物光纤光栅加速度计,灵敏度为 $19\text{ pm}\cdot g^{-1}$,共振频率为 3000 Hz 。Liu等^[14]提出了一种基于双膜片式的FBG加速度计,在 $50\sim 800\text{ Hz}$ 的频率范围内,传感器的灵敏度范围为 $23.8\sim 45.9\text{ pm}\cdot g^{-1}$,固有频率约为 1240 Hz ,膜片直径为 24 mm 。Wei等^[15]提出了一种采用铰链和弹性板作为弹性体的微型振动传感器,该传感器体积为 $27\text{ mm}\times 11\text{ mm}\times 22\text{ mm}$,固有频率为 1525 Hz ,在 $0\sim 800\text{ Hz}$ 频率范围内,传感器的灵敏度为 $12\text{ pm}\cdot g^{-1}$ 。Qiu等^[16]提出了一种基于3个质量块和4个柔性铰链的FBG加速度计,加速度计的弹性体尺寸为 $30\text{ mm}\times 14\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,固有频率为 2300 Hz ,工作范围为 $50\sim 800\text{ Hz}$,灵敏度为 $29\text{ pm}\cdot g^{-1}$ 。Li等^[17]提出了一种膜片式加速度传感器,可以实现温度补偿,传感器在 $10\sim 200\text{ Hz}$ 工作范围内灵敏度为 $20.189\text{ pm}\cdot g^{-1}$ 。Zhang等^[18]提出了一种基于顺变柱体结构的振动传感器,在 $30\sim 300\text{ Hz}$ 内加速度传感器的灵敏度为 $42.7\text{ pm}\cdot g^{-1}$ 。上述传感器均不能同时满足小型化、宽频段、高灵敏度的应用需求,因此,设计一种小型化、宽工作范围、高灵敏度的光纤光栅振动传感器具有重要意义。

本文设计了一种小体积、宽频段、高灵敏度的“铰链杠杆”结构的FBG振动传感器,通过质量块尾端镂空的方法,调节整体质量块重心位置,提高了传感器的固有频率。首先,对传感器进行理论分析和有限元仿真分析,得到传感器的最优结构参数。其次,按照优化结构对传感器进行加工制作与封装。最后,搭建测试系统对传感器的性能进行测试。所设计的传感器体积仅为 $15\text{ mm}\times 15\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 、固有频率为 1250 Hz ,灵敏度大于 $79.7\text{ pm}\cdot g^{-1}$,横向抗干扰能力优于 4% ,该传感器具有和压电振动传感器比拟的尺寸,兼顾高工作频段的同时还具有较高的灵敏度,为航空航天领

域的振动监测提供了技术支持。

2 传感器的设计与仿真分析

2.1 传感器的设计

一种基于“杠杆铰链”结构的FBG振动传感器如图1所示,其主要由固定外框、质量块和一个毫米级FBG组成,FBG通过两点式封装粘贴于质量块与固定外框之间。传感器受到外界信号激励时,带动质量块发生惯性振动,使FBG产生轴向应变,中心波长发生漂移。通过对FBG的中心波长进行解调与分析,可以实现对振动信号的监测。在本设计中,通过质量块尾端镂空的方法,实现了整体质量块重心的前移,提高了传感器的固有频率。

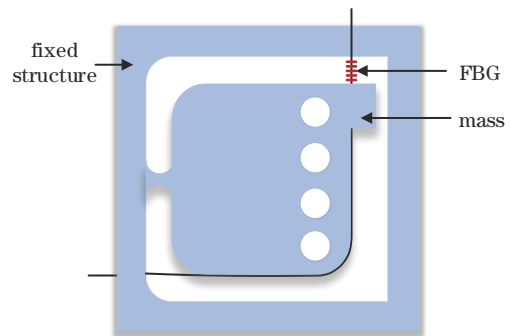


图1 加速度传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of acceleration sensor structure

传感器受到外界振动激励时,质量块在平衡位置附近不断做往复运动。选择传感器在 z 轴正向的受力情况建立力学模型,对传感器的传感特性进行理论分析,传感器的力学模型如图2所示。

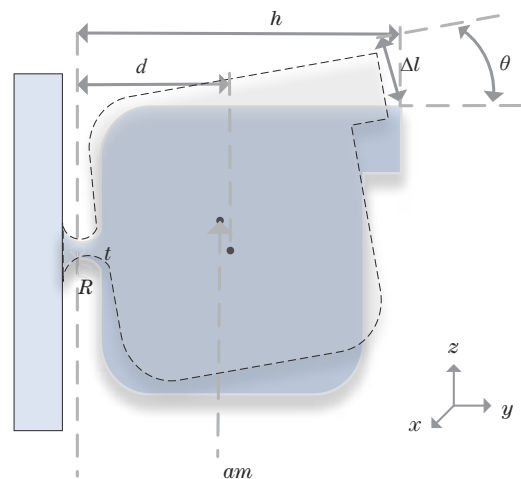


图2 加速度传感器力学分析图

Fig. 2 Mechanical analysis diagram of acceleration sensor

根据力矩平衡方程

$$mad = kh\Delta l + K\theta, \quad (1)$$

式中: m 为质量块的质量; a 为物体受到的外界加速度; d 为铰链中心到质量块质心的高度; k 为光纤的弹

性系数; h 为铰链中心到 FBG 所处位置的高度; Δl 为 FBG 的形变量; K 为铰链的转动刚度; θ 为铰链的转动角度。

光纤的弹性系数 k 为

$$k = \frac{A_l E_l}{l}, \quad (2)$$

式中: A_l 为光纤的横截面积; E_l 为 FBG 的弹性模量; l 为 FBG 两固定点之间的长度。根据几何关系可以得到

$$\Delta l = h\theta. \quad (3)$$

铰链的转动刚度 $K^{[19]}$ 可表示为

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

式中: E 为质量块材料的弹性模量; ω 为铰链的厚度; $s = R/b$, R 为铰链的切割半径, b 为铰链最细处的厚度。

传感器的灵敏度 S 与 FBG 中心波长的偏移量 $\Delta\lambda$ 和加速度 a 的关系, 可表示为

$$S = \Delta\lambda/a. \quad (5)$$

FBG 的中心波长变化量 $\Delta\lambda$ 与 FBG 的轴向应变 ϵ_z 的关系为

$$\Delta\lambda = (1 - P_e)\epsilon_z\lambda, \quad (6)$$

式中: P_e 为 FBG 的弹光系数; ϵ_z 为 FBG 的轴向应变; λ 为 FBG 的中心波长。FBG 的应变 ϵ_z 为

$$\epsilon_z = \Delta l/l. \quad (7)$$

将式(6)、式(7)代入式(5), 可以得到铰链结构振动传感器的灵敏度公式为

$$S = \frac{(1 - P_e)\lambda\epsilon_z}{a} = \frac{(1 - P_e)\lambda}{l} \cdot \frac{md}{kh + K/h}. \quad (8)$$

为了方便求解, 将质量块铰链结构的转动惯量 J 转化为

$$J = d^2 m. \quad (9)$$

根据系统的动力学方程能够得到系统的固有频率 $f^{[20]}$ 为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kh^2 + K}{J}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kh^2 + K}{d^2 m}}. \quad (10)$$

2.2 数值仿真分析

传感器的振动特性与传感器的固有频率关系密切, 为了兼顾传感器的灵敏度和工作范围, 需要对传感器的结构参数进行优化。根据理论分析能够看出, 影响传感器的灵敏度和固有频率的主要参数有 FBG 的封装长度 l 、铰链中心到 FBG 的高度 h 、质量块的质量 m 、以及铰链中心到质量块质心之间的距离 d 。传感结构的制作采用黄铜, 黄铜的杨氏模量 $E = 90$ GPa, 由于光纤弹性系数远小于黄铜的刚度, 因此忽略了光纤弹

性系数的影响。由灵敏度公式可知, l 越小, 传感器的灵敏度 S 越大, 因此采用毫米级 FBG 进行传感器的封装, $l = 1.5$ mm, $\lambda = 1556.69$ nm; h 越大, 等效杠杆铰链结构的长度越长, 传感器的灵敏度 S 越大。由于传感器的尺寸限定为 15 mm \times 15 mm \times 15 mm, 为了尽可能使得质量块等效杠杆结构较长, 选定 $h = 9$ mm。接下来, 主要对 m 、 d 与频率 f 以及灵敏度 S 之间的关系进行讨论。采用质量块尾端打孔的方法(默认质量块的打孔方式为平行于传感器工作方向“一”字排开的 4 个孔, 并将其看作一个整体)来调节传感器的固有频率和灵敏度, 因此, 可以从以下 2 种角度进行分析: 1) 在质量块尾端同一距离处打不同直径 q 的孔; 2) 在质量块尾端不同距离 p 处进行打孔。上述 2 种情况与 d 的关系曲线如图 3 所示, 由图 3 可知, 打孔直径 q 越大, d 越小; 打孔位置距离质量块尾端越远, d 越大。首先, 在质量块的尾端同一距离处打不同直径大小的孔, 得到多组对应的 m 、 d 并进行二次拟合, 可得 $d = -60253m^2 + 1003.3m + 0.9471$ 。分别代入式(8)、式(10)可以得到 d 、 f 和 d 、 S 之间的关系如图 4(a) 所示, f 随 d 的增大而减小, S 随 d 的增大而增大。换言之, 质量块的重心越靠前, 传感器的固有频率越大, 灵敏度越小。其次, 在到质量块尾端不同距离处进行打孔, 得到多组打孔位置 p 与质心高度 d , 此时 m 不变, 代入式(8)、式(10)可以得到 d 、 f 和 d 、 S 之间的关系如图 4(b) 所示。根据数值仿真结果, 综合考虑结构的刚度、固有频率、灵敏度以及尽可能使得镂空位置靠近质量块的尾端等因素, 得到该结构的设计参数如表 1 所示, 代入式(10)求得固有频率的理论值为 1230.89 Hz。

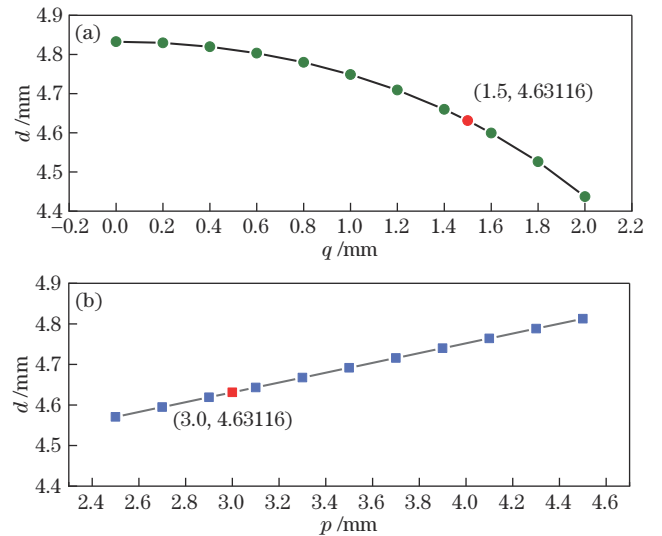


图 3 d 随 q 与 p 的变化曲线。(a) d 随 q 的变化曲线; (b) d 随 p 的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of d with q and p . (a) Variation curve of d with q ; (b) variation curve of d with p

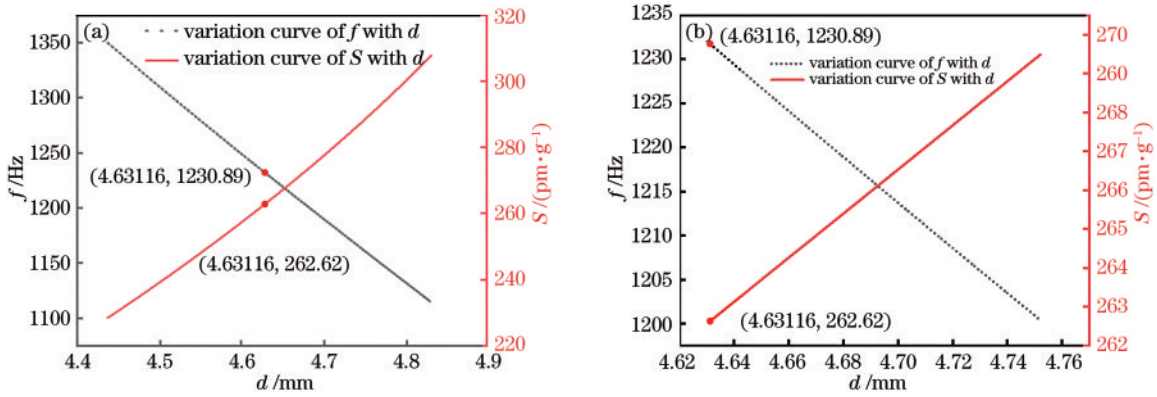


图 4 S 与 f 随 d 的变化曲线。(a)不同打孔直径;(b)不同打孔位置

Fig. 4 Variation curves of S and f with d. (a) Different hole diameters; (b) different hole positions

表 1 传感器的设计参数

Table 1 Design parameters of the sensor

Parameter	Value
A_t / mm^2	0.005024
E_t / GPa	72
l / mm	1.5
R / mm	1
p / mm	3
q / mm	1.5
m / g	5.465
d / mm	4.63116
h / mm	9
ω / mm	11
b / mm	0.36
E / GPa	90
λ / nm	1556.69

2.3 有限元仿真分析

使用 COMSOL Multiphysics 5.5 软件,对传感器

的性能进行有限元仿真分析。为了同时验证质量块的重心位置对传感器的谐振频率和灵敏度的影响,设计了质量块不镂空和质量块镂空 2 种结构进行对比仿真分析。通过模态分析,得到了 2 种结构的传感器应力分布图,都满足应力集中原理,如图 5 所示。其中,质量块不镂空结构的传感器固有频率为 1141 Hz,质量块镂空结构的传感器固有频率为 1231 Hz。通过对质量块距离光纤较近一端的边的中点上的位移均方根与灵敏度进行公式换算(取 $1g=10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$),得到了 2 种结构的灵敏度分别为 $129.53 \text{ pm}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $128.64 \text{ pm}\cdot\text{g}^{-1}$,如表 2 所示。后者与前者相比固有频率提升了 7%,但灵敏度仅下降了 0.7%。结果表明,通过质量块尾端镂空的方法,实现了整体质量块的重心位置前移,在提高传感器固有频率的同时灵敏度大致保持相同水平。质量块尾端镂空结构固有频率与理论值(1230.89 Hz)基本一致,在 0~1500 Hz 范围内的幅频响应仿真曲线如图 6 所示。

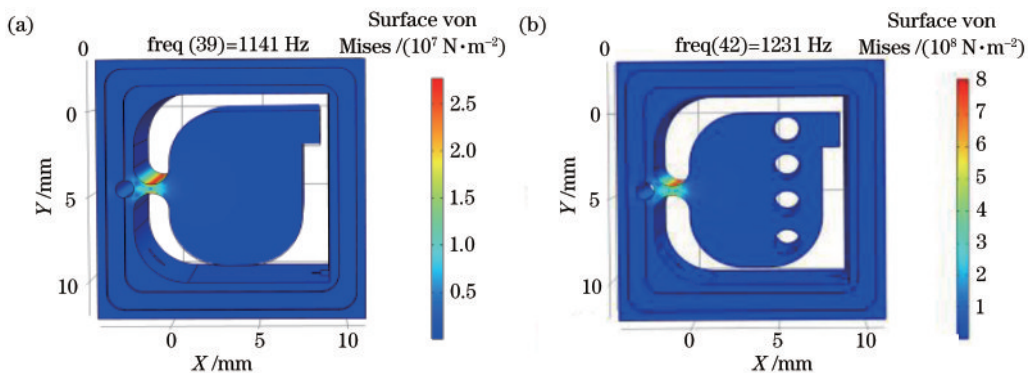


图 5 传感器应力图。(a)质量块不镂空;(b)质量块镂空

Fig. 5 Sensor stress profile. (a) Mass block not hollow; (b) mass block hollow

表 2 不同结构的传感器参数

Table 2 Sensor parameters of different structures

Sensor structure	Natural frequency f / Hz	$S / (\text{pm}\cdot\text{g}^{-1})$
Mass block not hollow	1141	129.53
Mass block hollow	1231	128.64

3 实验分析与研究

采用准分子激光器结合相位掩模板刻写毫米级 FBG,在相位掩模板前放置可调光阑,通过调整光阑大小实现对不同长度 FBG 的刻写^[21]。实验中使用的光纤为 Fibercore 公司生产的 SM 1500 光纤,刻写的

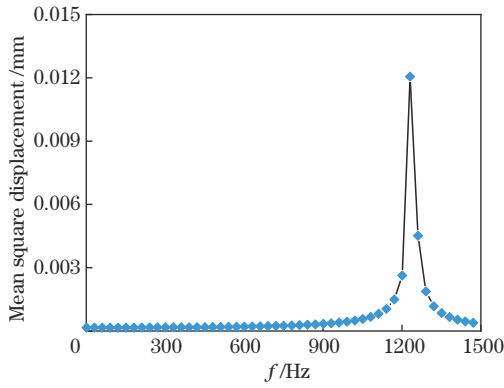


图6 幅频响应仿真曲线

Fig. 6 Amplitude-frequency response simulation curve

FBG 长度为 1 mm, 中心波长为 1556.69 nm, 3 dB 带宽为 1.76 nm, 光功率为 2.61 nW。经过 24 h、80 °C 的退火, FBG 中心波长发生蓝移, 光功率降低为 1.22 nW, 中心波长为 1555.68 nm, 3 dB 带宽为 1.74 nm。使用退火后的 FBG 进行传感器封装, 封装时施加预紧力使其波长漂移约 4 nm, 使用 DP 420 环氧胶进行两点式 FBG 封装, 将 FBG 固定在质量块与固定端之间, 室温 25 °C 静置 24 h 完成固化。封装完成后的 FBG 拉伸量约为 3 nm, 中心波长为 1558.27 nm, FBG 的光谱如图 7 所示, 封装完成后的传感器实物图, 如图 8 所示。

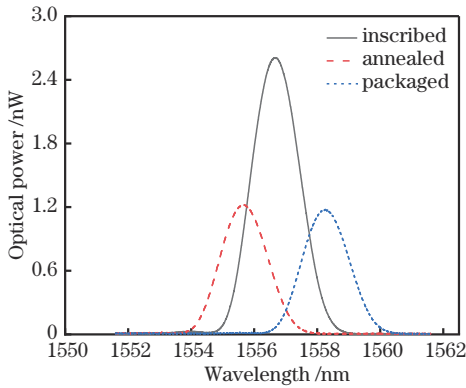


图7 FBG 的光谱图

Fig. 7 Spectra of FBG

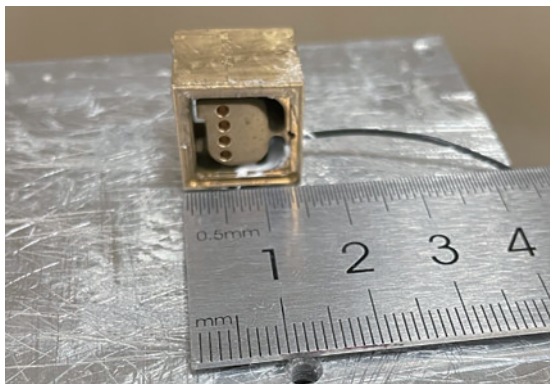


图8 传感器实物图

Fig. 8 Pictorial diagram of the sensor

搭建振动特性标定系统, 如图 9 所示, 对封装后的传感器的性能进行标定。该系统主要由扬州英迈克公司生产的 YMC VT-500 振动台、YMC LA-800 功率放大器、YMC 9204H 信号发生器、NI 9234 数据采集卡、实验室自主研发的 CCD 光纤光栅解调仪以及上位机软件系统组成。光纤光栅解调仪的解调波段为 1510~1590 nm, 解调精度为 2 pm, 解调速度为 6 kHz。信号发生器产生稳态正弦激励信号, 通过功率放大器搭配振动台, 提供不同的振动频率以及加速度, 光纤光栅波长解调仪对 FBG 中心波长进行解调与分析 (响应时间约为 0.167 ms), 上位机软件对数据进行采集与处理。

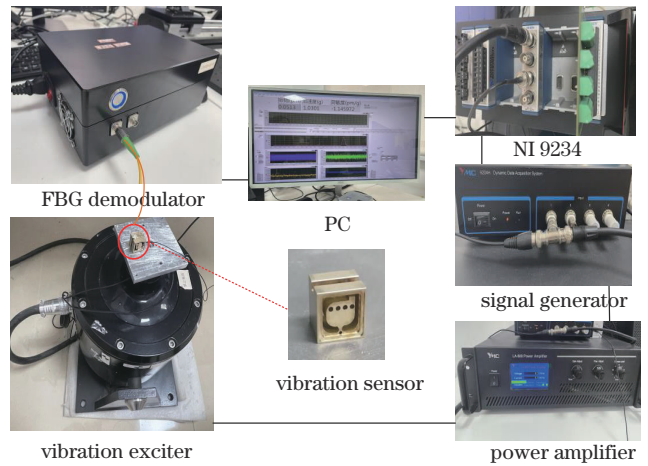


图9 振动信号标定系统

Fig. 9 Vibration signal calibration system

3.1 幅频响应特性

为了验证传感器的幅频响应特性, 将激励加速度设置为 1g, 在 0~1200 Hz、1300~1700 Hz 内, 设定起始频率为 50 Hz, 步长为 50 Hz; 在 1200~1300 Hz 内, 将步长设置为 10 Hz, 绘制了 FBG 的波长漂移 $\Delta\lambda$ 随激励频率 f 的变化曲线如图 10 所示。结果表明, 传感器的谐振频率约为 1250 Hz, 传感器在 0~750 Hz 具有较好的线性响应。传感器在激励加速度幅值为 1g、激励频率为 100 Hz 的时域与频域特性曲线, 如图 11 所示。

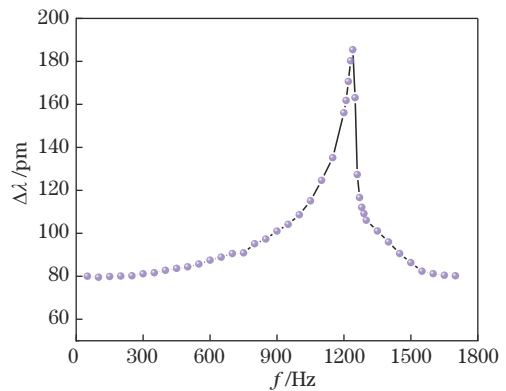


图10 波长漂移随激励频率的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of wavelength change with excitation frequency

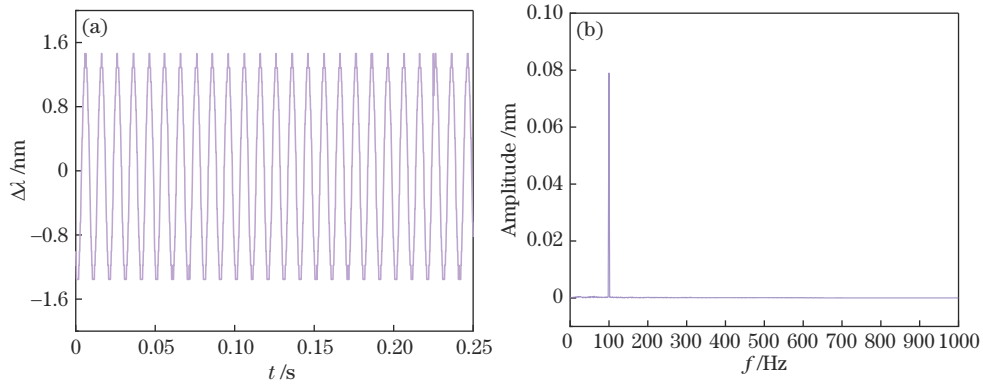


图 11 传感器在 1g、100 Hz 激励下的时域/频域特性。(a) 时域响应特性; (b) 频域响应特性

Fig. 11 Time-domain/frequency-domain characteristics of the sensor under 1g and 100 Hz excitation. (a) Time-domain response characteristics; (b) frequency-domain response characteristics

3.2 灵敏度响应特性

灵敏度是衡量传感器性能的重要指标,采集了不同激励频率下 FBG 的波长漂移与激励加速度值,通过线性拟合绘制了 FBG 波长漂移随加速度的变化曲线,

如图 12 所示。由图 12 可知,当激振加速度幅值一定时,波长漂移随激振频率的增大而增大。当激振频率为 750 Hz 时,传感器的灵敏度为 83.3 pm/g。

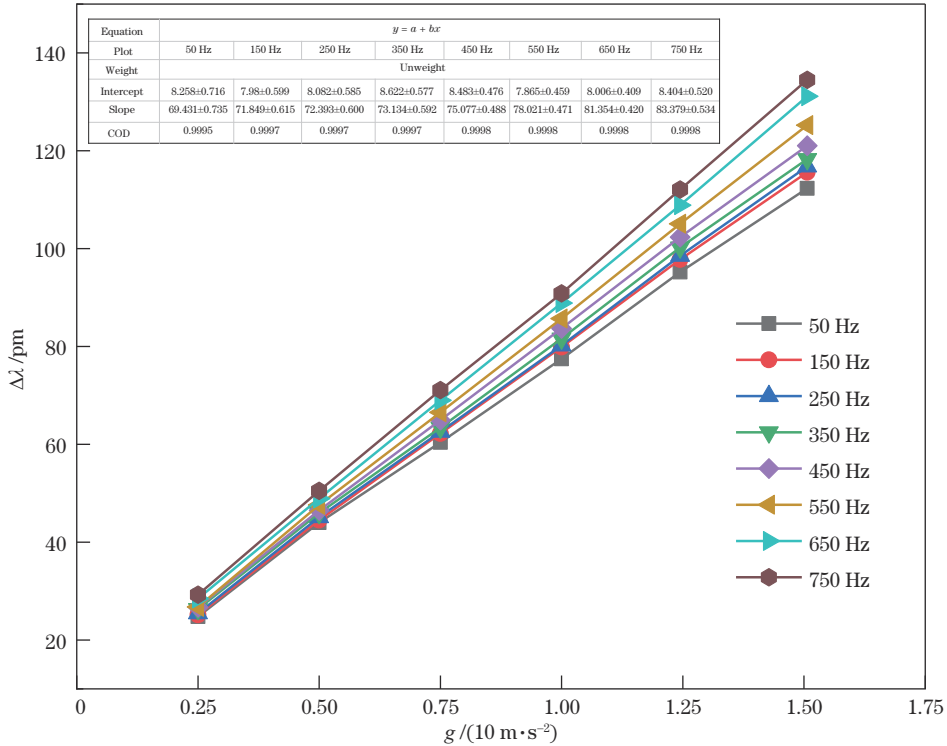


图 12 灵敏度变化曲线

Fig. 12 Variation curve of Sensitivity

实际应用中传感器能够测量的最小加速度幅值变化也十分重要,因此对传感器的分辨率进行了测量。将振动台的振动频率设定为 200 Hz,上升阶梯的方式调节振动台的加速度幅值,绘制了传感器加速度幅值随时间的变化曲线,如图 13 所示。结果表明,传感器可以分辨出的最小幅值变化为 $2.5 \times 10^{-3} g$ 。

3.3 横向抗干扰能力测试

横向干扰又称为加速度传感器的交叉灵敏度,等

于加速度传感器非工作方向灵敏度与工作方向灵敏度的比值。由于设计的加速度传感器是一维的,因此有必要对其进行横向抗干扰能力测试。将传感器翻转 90° 作为交叉方向,设定激励加速度幅值为 1g、激振频率为 300 Hz,传感器主轴方向与交叉轴方向的时域特性曲线如图 14 所示,传感器在主轴方向的波长变化约为 73 pm,在交叉方向的波长漂移小于 3 pm,结果表明,传感器横向干扰小于 4%,具有很好的横向抗干扰能力。

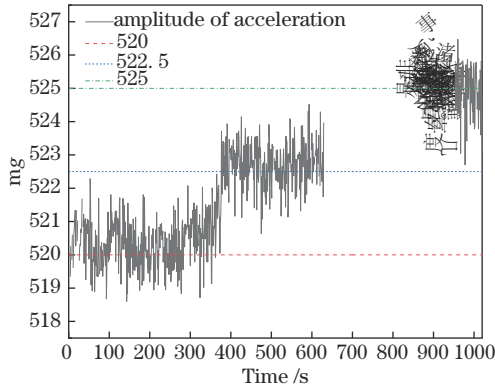


图 13 传感器加速度幅值随时间的变化曲线
Fig. 13 Variation curve of acceleration amplitude with time of sensor

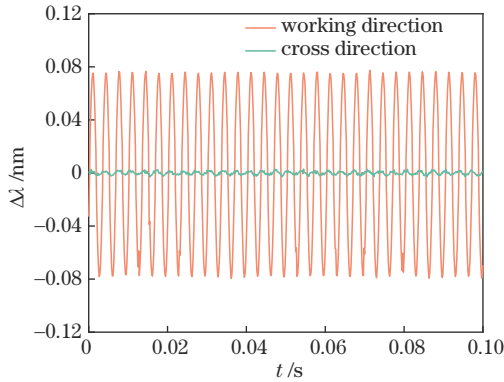


图 14 主轴方向与交叉轴方向的时域特性曲线
Fig. 14 Time-domain characteristic curve of main axis direction and cross axis direction

3.4 重复性测试

重复性是传感器的一个重要特性。设定激振频率为 200 Hz,采集传感器在不同加速度激励下的灵敏度数据,进行 10 次重复试验,如图 15 所示。由图 15 可知,传感器在相同加速度激励下,灵敏度变化很小,拟合曲线均方根误差小于 0.085,系统的重复性和稳定性较好。

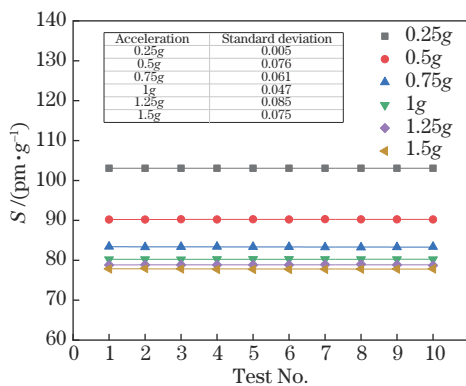


图 15 重复性测试
Fig. 15 Repeatability test

表 3 将设计的传感器与部分国内外学者研究的振动传感器从传感结构、固有频率以及灵敏度特性进行对比分析,结果表明,设计的传感器具有较高的固有频率和灵敏度。此外,设计的传感器还具备小型化、宽工作频段的特性,同时,FBG 采用两点式封装,栅区受力均匀,不易啾啾。

表 3 光纤光栅振动传感器研究现状
Table 3 Research status of fiber grating vibration sensor

Reference	Sensor structure	f/Hz	$S/(\text{pm}\cdot\text{g}^{-1})$
[11]	Torsion beam	1180	6.290
[12]	Accelerometer	>2000	
[13]	Accelerometer	3000	19
[14]	Diaphragm	1240	45.9
[15]	Hinge	1525	12
[16]	Hinge	2300	29
[17]	Diaphragm	600	20.189
[18]	Compliant cylinder	400	42.7
Our method	Hinge	1250	69.4

4 结 论

设计了一种“杠杆铰链”结构的 FBG 振动传感器,通过理论分析优化了传感器的尺寸参数,同时采用有限元仿真分析了传感器的传感特性。搭建了测试系统对传感器进行标定,结果表明,传感器的固有频率约为 1250 Hz,理论值和仿真值基本一致,且在 0~750 Hz 的频率范围内具有平坦的响应,当激振频率为 750 Hz 时灵敏度大于 $83.3 \text{ pm}\cdot\text{g}^{-1}$,横向干扰小于 4%。设计的传感器具备小型化、宽频段、高灵敏度的特点,同时具有较强的横向抗干扰能力,能够为振动监测项目提供一定的技术支持,但传感器的尺寸很小,封装比较困难,为了便于点胶,后续工作中会考虑对传感器结构进行进一步改进与完善。

参 考 文 献

- [1] 刘钦朋,刘望飞,王春芳,等. 光纤光栅加速度传感器高灵敏理论模型研究[J]. 光电子·激光, 2022, 33(3): 225-229.
Liu Q P, Liu W F, Wang C F, et al. Research on high sensitivity theoretical model of fiber Bragg grating acceleration sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2022, 33(3): 225-229.
- [2] 郭永兴,陈敏,熊丽,等. 一体式光纤光栅三维加速度传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2106007.
Guo Y X, Chen M, Xiong L, et al. Integrated fiber grating three-dimensional acceleration sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21): 2106007.
- [3] 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.
- [4] 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.
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.
- [5] 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.
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.
- [6] 南颖刚. 倾斜光纤光栅振动传感器及其在电力监测中的应用研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019: 1-2.
Nan Y G. Tilted fiber Bragg grating vibration sensor and its application in power monitoring[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019: 1-2.
- [7] 王文娟, 薛景锋, 张梦杰. 光纤传感在飞机结构健康监测中的应用进展和展望[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 95-101.
Wang W J, Xue J F, Zhang M J. Application progress and prospect of optical fiber sensor in aircraft structural health monitoring[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 95-101.
- [8] 吴昊, 张洋, 王帅, 等. 超短 FBG 的高灵敏度温度传感器[J]. 激光与红外, 2021, 51(8): 1057-1064.
Wu H, Zhang Y, Wang S, et al. High sensitivity temperature sensor of ultra-short FBG[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(8): 1057-1064.
- [9] Li T L, Tan Y G, Xia P, et al. Paralleled structure-based string-type fiber Bragg grating acceleration sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(5): 1325-1332.
- [10] 李婧怡, 朱振华. 光纤光栅传感技术在航空航天领域中的应用与发展[J]. 中国新通信, 2018, 20(4): 67-69.
Li J Y, Zhu Z H. Application and development of fiber grating sensing technology in aerospace field[J]. China New Telecommunications, 2018, 20(4): 67-69.
- [11] 周海阳, 赵振刚, 于虹, 等. 扭转梁式光纤光栅加速度传感器分析与设计[J]. 化工自动化及仪表, 2020, 47(3): 205-210, 219.
Zhou H Y, Zhao Z G, Yu H, et al. Analysis and design of torsional beam fiber Bragg grating acceleration sensor[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2020, 47(3): 205-210, 219.
- [12] Berkoff T A, Kersey A D. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1677-1679.
- [13] Stefani A, Andresen S, Yuan W, et al. High sensitivity polymer optical fiber-Bragg-grating-based accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(9): 763-765.
- [14] Liu Q P, Qiao X G, Jia Z A, et al. Large frequency range and high sensitivity fiber Bragg grating accelerometer based on double diaphragms[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(5): 1499-1504.
- [15] Wei L, Jiang D Z, Yu L L, et al. A novel miniaturized fiber Bragg grating vibration sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(24): 11932-11940.
- [16] Qiu L, Liang L, Li D, et al. Theoretical and experimental study on FBG accelerometer based on multi-flexible hinge mechanism[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 38: 142-146.
- [17] Li T L, Tan Y G, Han X, et al. Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation[J]. Sensors, 2017, 17(1): 218.
- [18] Zhang Y S, Qiao X G, Liu Q P, et al. Study on a fiber Bragg grating accelerometer based on compliant cylinder[J]. Optical Fiber Technology, 2015, 26: 229-233.
- [19] 吴鹰飞, 周兆英. 柔性铰链转动刚度计算公式的推导[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(1): 125-128, 137.
Wu Y F, Zhou Z Y. Deduction of design equation of flexure hinge[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(1): 125-128, 137.
- [20] 张发祥, 张晓磊, 王路杰, 等. 高灵敏度大带宽光纤光栅微地震检波器研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(6): 1086-1091.
Zhang F X, Zhang X L, Wang L J, et al. Study on FBG micro-seismic geophone with high sensitivity and broad bandwidth[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(6): 1086-1091.
- [21] 李江, 辛璟焘, 吴昊, 等. 超短光纤光栅刻写及其切趾方法研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(3): 316-320.
Li J, Xin J T, Wu H, et al. Research on the inscription and apodization method of ultra short fiber Bragg grating[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(3): 316-320.