

## 基于FBG的微型三轴振动传感器研究

唐翔 吴俊 黎琪慧 辛璟焘 董明利

### Research on miniature three-axis vibration sensor based on FBG

Tang Xiang, Wu Jun, Li Qihui, Xin Jingtao, Dong Mingli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230518>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大量程高灵敏度的光纤光栅低频振动传感器研究

Research on a fiber grating low frequency vibration sensor with large range and high sensitivity

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200340 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200340>

#### 光纤布拉格光栅温度传感增敏特性的实验研究

Experimental investigation on temperature sensitivity enhancement of fiber Bragg grating sensor

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1118003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1118003>

#### 柔性复合基体光纤布拉格光栅曲率传感器

Fiber Bragg grating curvature sensor based on flexible composite matrix

红外与激光工程. 2019, 48(2): 222001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0222001>

#### 基于菱形光纤布拉格光栅传感阵列的声发射定位技术

Acoustic emission location based on diamond FBG sensor array

红外与激光工程. 2017, 46(12): 1222005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.1222005>

#### 浮空器柔性复合蒙皮变形光纤布拉格光栅传感器应变传递特性

Strain transfer characteristics of fiber Bragg grating sensor in aerostat flexible composite skin deformation

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200315 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200315>

#### 基于柔性铰链结构的高灵敏度低频光纤光栅加速度传感器

High sensitivity and low-frequency FBG acceleration sensors based on flexure hinge structure

红外与激光工程. 2017, 46(3): 317004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0317004>

## 基于 FBG 的微型三轴振动传感器研究

唐翔<sup>1,2</sup>, 吴俊<sup>3</sup>, 黎琪慧<sup>1,2</sup>, 辛璟焘<sup>1,2,4</sup>, 董明利<sup>1,2,4\*</sup>

1. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 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. 北京空间机电研究所, 北京 100089;
4. 广州南沙光子感知技术研究院, 广东 广州 511462)

**摘要:** 为了研制一种微型、三轴测量的高灵敏度振动传感器, 提出一种分立元件交错组合的超紧凑光纤光栅三轴振动传感器设计方法。采用分立元件组合设计方法降低了设计加工难度, 与一体化设计对比, 分立元件组合结构的零件结构简单、易于加工、结构设计也更为灵活, 缩短了传感器结构的优化迭代周期。通过理论模型分析和有限元仿真, 优化传感器结构参数, 最终封装完成的尺寸为 15 mm×15 mm×15 mm, 质量约为 24.26 g。最后进行实验测试和传感器性能分析。实验结果表明: 该传感器的工作频段为 0~1 200 Hz, 在 X、Y、Z 轴方向的固有频率分别为 1 850 Hz、1 770 Hz 和 1 860 Hz, 三个轴向的灵敏度分别达到 77.37 pm/g、80.73 pm/g 和 75.04 pm/g, 横向抗干扰小于 5%。该传感器满足航天振动测量轻量化、工作范围和灵敏度的应用需求, 在遥感卫星微振动测量等领域具有重要应用前景。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 三轴振动传感器; 微型化; 高灵敏度

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230518

### 0 引言

光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 振动传感器有抗电磁干扰、耐高低温、耐腐蚀等各种优点<sup>[1-2]</sup>, 被广泛应用于航天航空、大型结构监测、工业生产等领域<sup>[3-5]</sup>。

目前, 许多学者对 FBG 振动传感器进行深入的研究, 张法业等人<sup>[6]</sup>提出了一种基于铰链结构的高灵敏度低频光纤光栅加速度传感器, 该传感器工作范围为 10~240 Hz, 固有频率为 380 Hz, 灵敏度为 236 pm/g, 封装后尺寸为 36 mm×17 mm×7 mm。刘文敏等人<sup>[7]</sup>提出了一种基于双光纤光栅的高灵敏度低频加速度传感器, 该传感器使用变宽度椭圆铰链结构, 采用双光栅对称分布解决温度敏感问题, 同时具有较高的加速度灵敏度, 灵敏度为 1 496 pm/g, 固有频率约为 36 Hz。黄家亮等人<sup>[8]</sup>提出了一种基于对称悬臂梁的小型化

低频 FBG 加速度传感器, 该传感器是测量单轴振动信息, 固有频率为 72 Hz、灵敏度为 681.7 pm/g, 该传感器封装后尺寸已有 20 mm×15 mm×20 mm。Lei Liang 等人<sup>[9]</sup>提出一种基于柔性铰链结构的微型抗弯曲光纤光栅加速度传感器, 该传感器使用掉弧的封装方式实现了传感器的小型化, 尺寸为 17 mm×12 mm×10 mm, 固有频率约为 900 Hz, 灵敏度为 20.4 pm/g。王红珂等人<sup>[10]</sup>提出了一种三向光纤布拉格光栅应变传感器, 该传感器采用凸台和圆环状基片结构, 实现三个方向应变的同步测量。Hui Wang 等人<sup>[11]</sup>提出了一种符合柔性铰链的新型光纤布拉格光栅三维加速度传感器, 该传感器利用到椭圆双轴和对称单边直圆形柔性铰链, 固有频率分别为 800 Hz、1125 Hz 和 1750 Hz, 灵敏度分别为 51.9 pm/g、39.5 pm/g 和 20.3 pm/g, 传感器结构尺寸为 25 mm×25 mm×30 mm。

收稿日期: 2023-09-15; 修订日期: 2023-11-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFA1003504)

作者简介: 唐翔, 男, 硕士生, 主要从事光纤传感器与光电器件方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 董明利, 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事视觉与光电检测、光纤传感与光电器件、生物医学检测技术及仪器等方面的研究。

国内外学者对光纤光栅振动传感器开展了大量的研究。但是,小型化、多维度测量、高灵敏度是仍需突破的技术难题。

设计微小型三轴振动传感器,受到空间限制,对传感器结构的精细化设计和高精度装配都提出了挑战。此外受限于体积,常规一体化成型方法,不能有效增大质量块重量,严重影响传感器灵敏度提升。针对上述技术难点,文中提出一种采用高密度钽块为质量块,高弹性镍钛合金为弹性梁,超短光纤光栅为敏感元件的超紧凑型三轴振动传感器的设计方法,通过求解力矩平衡方程,对传感器的灵敏度与特征频率进行理论分析;通过有限元仿真,得到传感器的幅频响应曲线,完成传感器结构的优化迭代;搭建显微成像封装系统,完成传感器的高精度装配与封装;搭建振动传感器测试系统,完成传感器幅频响应、灵敏度、横向抗干扰、冲击响应和重复性等性能测试。实验结果表明,传感器具宽工作频段和高灵敏度。

### 1 结构设计及理论分析

受到体积、质量条件约束,具有多轴测量的微小型传感器,相互交错的内外部结构、无法直接采用机械加工或者 3D 打印技术实现。文中采用分立元件交错组合的方法设计传感器。传感器主要由基座外壳、封装外壳、弹片、质量块和光纤光栅组成。为满足传感器的微型化,使结构更加紧凑,将一个弹片和三个质量块组成设计为一个弹性元件,再将三个两两垂直且互不干扰的弹性元件在空间上交错组合于外壳上,最后在三个弹性元件和外壳之间使用两点封装方式固定三个光栅,实现三轴振动测量。传感器结构示意图如图 1 所示。

当外界产生作用于传感器的振动时,固定在弹片上的质量块会沿着垂直于弹片的方向做往复运动,从而拉伸光纤光栅使其产生轴向应变,中心波长发生漂移,通过监测中心波长的变化即可监测振动<sup>[12]</sup>。

当受到沿着 X 轴方向的加速度时,固定在弹片上的质量块会绕着 X 轴方向做往复运动,传感器的力学分析图如图 2 所示。

传感器处于稳态时,力矩平衡方程为:

$$mad - k_f h \Delta l - K \theta = 0 \quad (1)$$

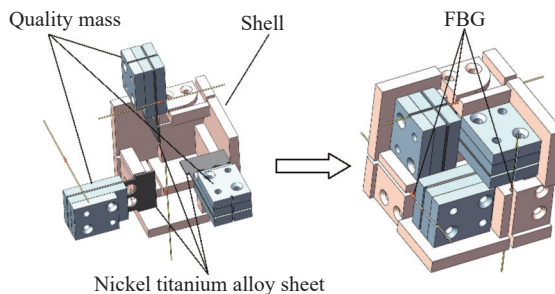


图 1 传感器的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the sensor

式中:  $m$  为质量块的总重量;  $a$  为沿着 X 轴方向的加速度;  $d$  为非接触弹片中心到质量块质心的距离;  $k_f$  为光纤的弹光系数;  $h$  为非接触弹片中心到 FBG 所处位置的高度;  $\Delta l$  为 FBG 的形变量;  $K$  为非接触弹片的转动刚度;  $\theta$  为弹片的转动角度。

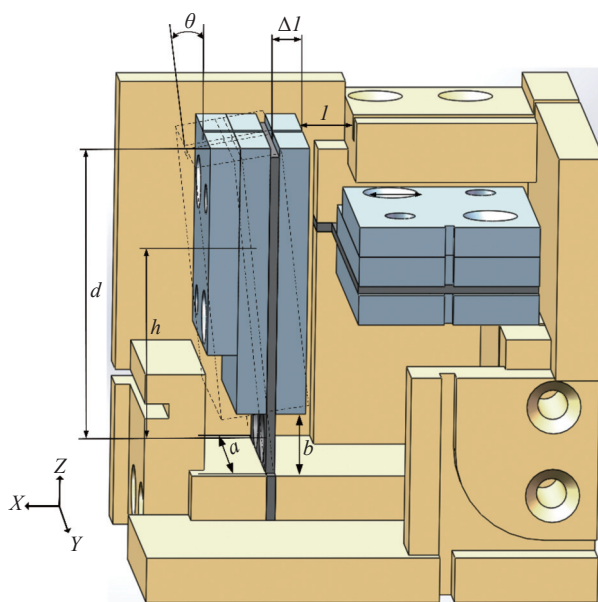


图 2 传感器的力学分析图

Fig.2 Diagram of the mechanical analysis of the sensor

光纤的弹光系数为:

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

式中:  $k_f$  为光纤的弹光系数;  $A_f$  为光纤的横截面积;  $E_f$  为 FBG 的弹性模量;  $l$  为 FBG 两个固定点之间的长度。根据几何关系可以得到:

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

根据弹性元件的刚度公式,镍钛合金弹片的刚度

为<sup>[12]</sup>:

$$K = \frac{ac^3E}{4b^3} \quad (4)$$

式中:  $K$  为钛合金弹片的刚度;  $a$  为弹片宽度;  $b$  为弹片无接触的长度;  $c$  为弹片厚度;  $E$  为镍钛合金弹片的杨氏模量。

传感器的灵敏度与 FBG 中心波长偏移量和加速度的关系可以表示为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{a} \quad (5)$$

式中:  $S$  为传感器的灵敏度;  $\Delta\lambda$  为 FBG 中心波长偏移量;  $a$  为加速度。

为了方便求解计算, 将转动惯量转化为<sup>[13]</sup>:

$$J = 2d^3m \quad (6)$$

式中:  $J$  为转动惯量。

根据系统的动力学方程得到系统的固有频率  $f$  为<sup>[14]</sup>:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_f h^2 + K}{J}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_f h^2 + K}{2d^2m}} \quad (7)$$

式中:  $f$  为转动惯量。

由上述公式可知, FBG 振动传感器的谐振频率和灵敏度两个重要性能指标存在相互制约的关系, 对传感器结构进行设计时, 需综合考虑传感器性能和尺寸, 并对结构参数进行分析。

## 2 仿真分析

由理论分析可知, 传感器的固有频率和灵敏度主要与弹片厚度  $c$ 、质量块质量  $m$  有关。由公式 (4)、(5) 和 (7) 分析可得, 弹片厚度  $c$  越大, 传感器固有频率  $f$  越大, 灵敏度越小, 因此弹片厚度  $c$  应尽量小; 由公式 (2)、(5) 和 (7) 可知, 传感器的灵敏度与 FBG 的长度  $l$  有直接关系, 但与固有频率无关, 当长度  $l$  越小, FBG 中心波长的漂移量  $\Delta\lambda$  越大, 灵敏度  $S$  则越大<sup>[13]</sup>, 故确定 FBG 的有效长度  $l$  为 1 mm。光纤与传感器的结构参数如表 1 所示。

经迭代发现传感器的质量块质量是影响传感器性能最重要的因素, 但受限于传感器的微型化特点, 因此需要采用高密度、可机械加工的材料制作质量块。金属钽具有密度大、温度稳定性好、热膨胀系数较低等性能, 满足制作质量块的要求, 最终确定的质量块质量为 3.48 g。基座外壳采用黄铜材料, 弹片采

表 1 光纤与传感器结构参数

Tab.1 Optical fiber and sensor structure parameters

Parameter	Parameter name	Value
$l$	Optical fiber span/mm	1
$E_f$	Young's modulus of optical fibers/GPa	72
$A_f$	Cross sectional area of the optical fiber/mm <sup>2</sup>	0.005 024
$d_f$	Fiber diameter/mm	0.08
$a$	Width of the sheet/mm	6
$b$	Shrapnel non-contact length/mm	2
$c$	Thickness of sheet/mm	0.3
$d$	The distance from the top of the mass to the center of the shrapnel/mm	10
$h$	The distance from the center of gravity of the mass to the center of the shrapnel/mm	5.5

用高屈服强度的镍钛合金。

确定结构参数和材料后, 使用 Solidworks 软件对传感器进行建模, 为验证传感器的性能, 将传感器模型导入 COMSOL 软件中进行有限元仿真分析。先对导入的传感器元件进行参数设置, 使用密度高的钽材料制作质量块, 钽的杨氏模量别为 186 GPa, 泊松比为 0.34。弹片的材料为镍钛合金, 镍钛合金的杨氏模量为 118.6 GPa, 泊松比为 0.33。基座外壳采用黄铜制作, 黄铜的杨氏模量为 90 GPa, 泊松比为 0.324。再添加物理场, 对传感器的外壳和弹片施加固定约束, 并沿着垂直镍钛合金弹片的方向施加 1 g 的标准地球重力, 添加特征频率研究进行仿真, 得到传感器振型图, 如图 3 所示。由仿真的振型图可知, 传感器的特征频率为 1 792.8 Hz。

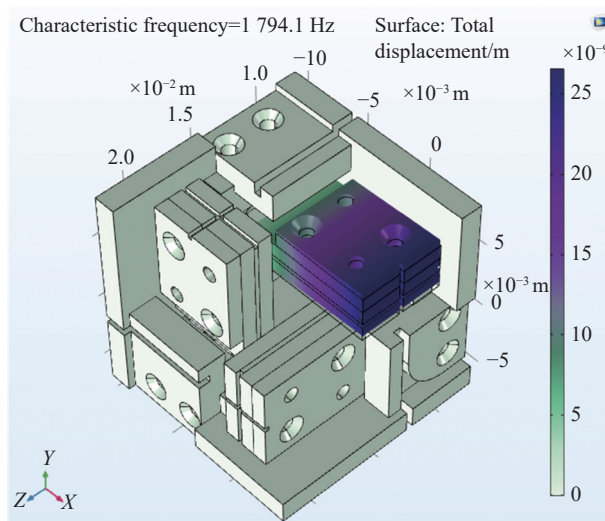


图 3 传感器振型图

Fig.3 Sensor mode diagram



接着添加频域研究, 设置频率范围为 0~2700 Hz, 步长为 50 Hz, 通过仿真先得到应力分布图, 如图 4 所示, 再得到传感器幅频响应仿真结果, 如图 5 所示。

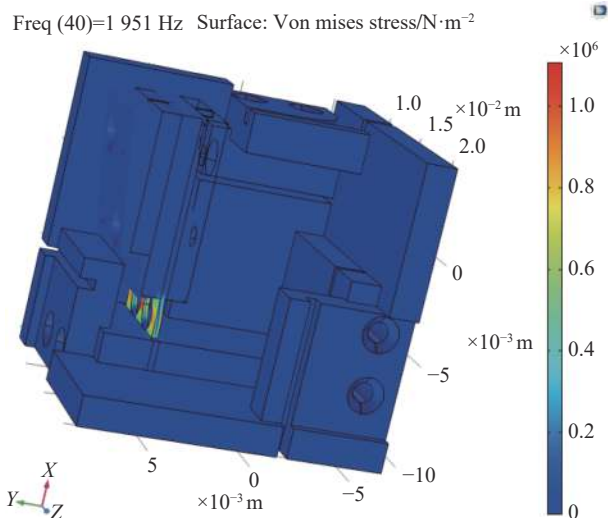


图 4 传感器应力分布图

Fig.4 Sensor stress profile plot

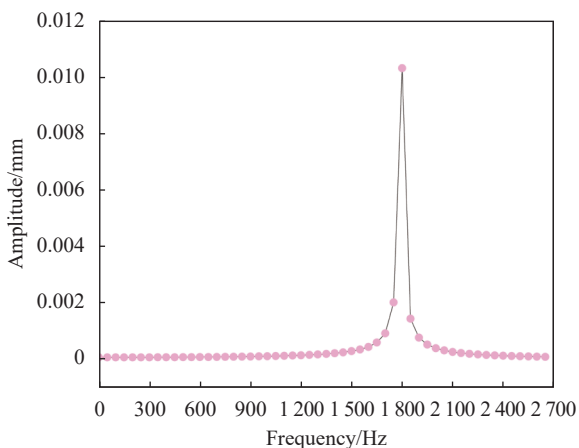


图 5 幅频响应曲线

Fig.5 Amplitude-frequency response curve

由应力分布图 4 可知传感器产生的形变主要集中于外壳和质量块之间无接触的弹片上, 满足应力集中原理。由图 5 可得, 传感器的特征频率为 1792.8 Hz, 并且传感器的平坦区间为 0~1500 Hz。

### 3 传感器封装及测试

传感器的封装直接影响传感器的性能, 搭建如图 6 所示的显微成像封装系统, 确保封装过程中光纤栅区

位置的准确性, 保证传感器的性能。该系统主要由显微镜、光纤夹具、位移平台、上位机、解调仪组成。

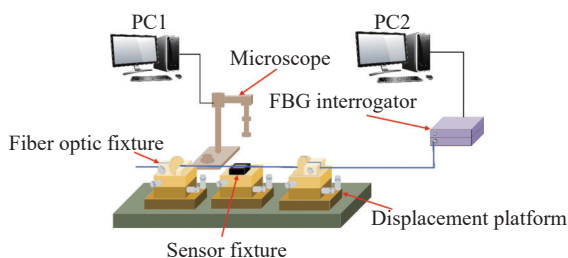


图 6 显微成像封装系统

Fig.6 Microscopic imaging packaging system

封装过程如下: 首先是组装零件, 将三种不同型号的质量块与弹片利用 AB 胶 (DG3S) 与螺钉固定, 其中 A 胶与 B 胶按照质量比 2 : 1 混合后涂敷在零件之间接触部分, 将组装完成的弹性体置于加热台上, 设置温度为 100 ℃, 加热 1 h 后静置冷却, 再利用砂纸打磨除去表面多余的胶层。完成三组弹性元件的组装后, 将其安装在基座外壳上, 利用螺钉与胶固定弹片, 对整体加热固化, 静置冷却后对基座外壳表面进行打磨, 保证传感器表面平整。接着是封装光纤, 将传感器置于三轴位移平台上, 利用光纤夹具将光纤光栅两端固定, 通过显微镜观测光纤光栅与传感器之间的位置, 利用三轴位移平台进行调整, 采用 AB 胶将光纤固定, 加热固化后完成传感器一个方向上的光纤光栅的封装, 重复上述操作完成其余两轴光纤的封装, 在封装过程中, 解调仪需要与光纤光栅相连, 实时监测光纤光栅的波长信号。最后, 利用台钳夹与 AB 胶完成传感器外壳的封装。传感器的封装流程如图 7 所示。

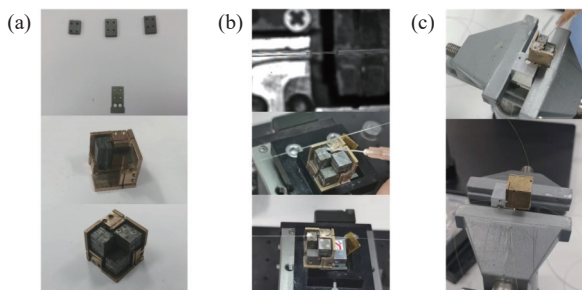


图 7 传感器封装流程示意图。(a) 组装零件; (b) 封装光纤; (c) 安装外壳

Fig.7 Sensor packaging process diagram. (a) Group assembly part; (b) Packaging optical fiber; (c) Install the shell

封装完成后,需进行测试实验分析传感器的性能。测试系统主要由信号发生器、低电荷放大器、功率放大器、数据采集卡、解调仪、振动台以及计算机组成,传感器测试系统示意图如图 8 所示。其中,信号发生器和低电荷放大器为实验提供不同的振动频率和加速度,通过功率放大器和数据采集卡将实验数据显示于计算机,使用解调仪对 FBG 中心波长进行解调与分析<sup>[15]</sup>,最后在计算机上完成数据的处理和显示。

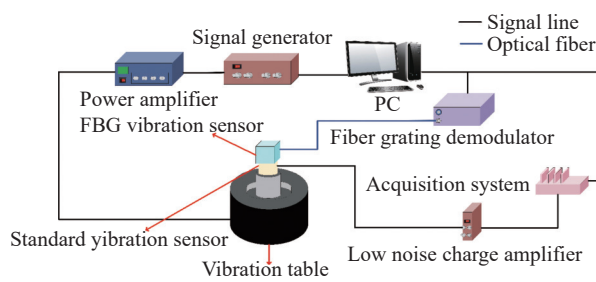


图 8 传感器测试系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of sensor testing system

### 3.1 幅频响应特性

幅频特性曲线能够反映 FBG 振动传感器工作范围及固有频率。为了得到振动传感器的幅频特性,实验时首先调整传感器的位置,使其 Y 方向与振动台激励方向平行,将激励加速度设置为 0.5 g (取  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ),在 0~2700 Hz 的频率范围内,以 50 Hz 为步长进行数据采集,为了更加精确地测得传感器在 Y 方向上的特征频率,在 1700~1800 Hz 范围内,以 10 Hz 为步长进行数据采集;绘制如图 9(a) 所示的 Y 方向上 FBG 波长漂移  $\Delta\lambda$  随激振频率变化曲线,从图 9(a) 中可以看出,传感器的特征频率为 1770 Hz,在谐振峰附近幅频响应曲线陡峭,不是理想的频率工作范围,在 0~1200 Hz 范围,幅频响应曲线较为平坦,可以作为传感器的频率工作范围。图 9(b) 为截取 0~1200 Hz 范围的幅频响应曲线及其二次拟合曲线, Y 方向上 FBG 波长漂移量表示为  $\Delta\lambda_y = 41.87 - 0.015f + 3.27e^{-5}f^2$ ,结合公式 (5) 可以求得传感器 Y 方向上的灵敏度与激励频率之间的关系。

同理,调整振动传感器的位置,绘制如图 10(a) 所示的 X 方向上 FBG 波长漂移  $\Delta\lambda$  随激振频率变化曲

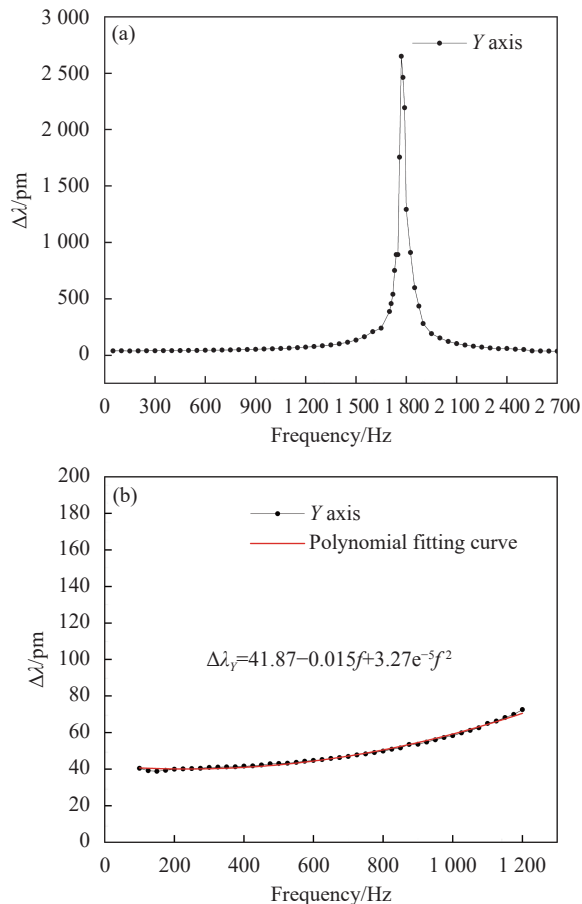
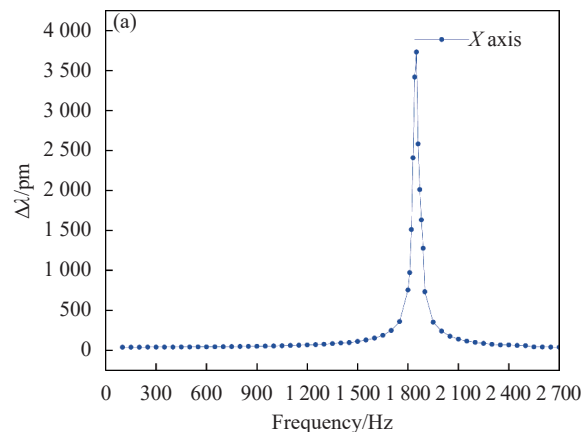


图 9 Y 方向上波长漂移随激振频率的变化曲线。(a) 整体; (b) 0~1200 Hz

Fig.9 Curve of wavelength variation with excitation frequency in the Y axis. (a) Entirety; (b) 0-1200 Hz

线以及如图 11(a) 所示的 Z 方向上 FBG 波长漂移  $\Delta\lambda$  随激振频率变化曲线,从图 10(a) 可以看出,传感器在 X 方向上的特征频率为 1850 Hz,传感器在 X 方向上的工作频段为 0~1200 Hz;从图 11(a) 可以看出,



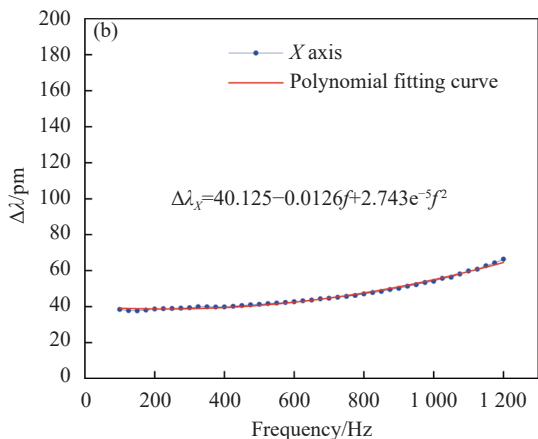


图 10 X 方向上波长漂移随激振频率的变化曲线。(a) 整体; (b) 0~1200 Hz

Fig.10 Curve of wavelength variation with excitation frequency in the X axis. (a) Entirety; (b) 0-1200 Hz

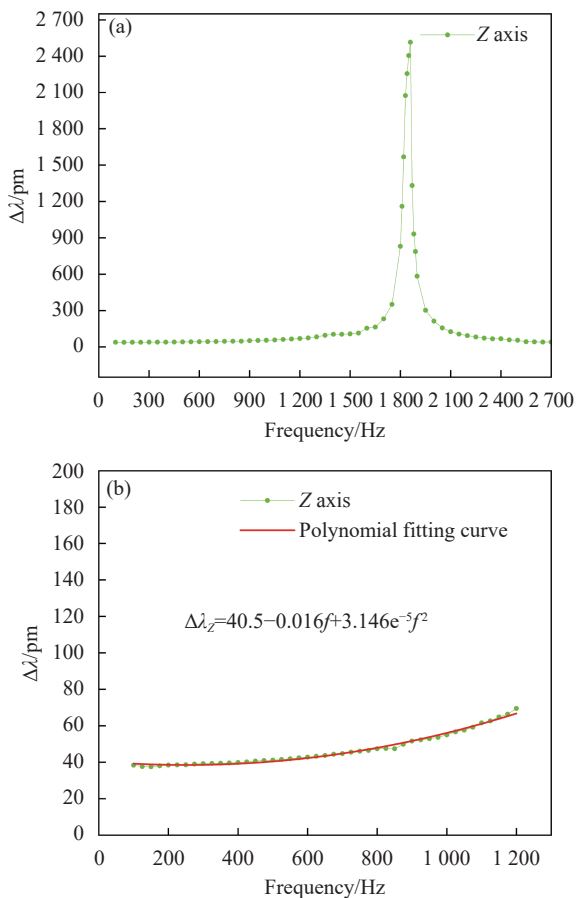


图 11 Z 方向上波长漂移随激振频率的变化曲线。(a) 整体; (b) 0~1200 Hz

Fig.11 Curve of wavelength variation with excitation frequency in the Z axis. (a) Entirety; (b) 0-1200 Hz

传感器在 Z 方向上的特征频率为 1 860 Hz, 传感器 Z 方向上的工作频段为 0~1 200 Hz。图 10(b) 与图 11(b) 分别截取 X 方向与 Z 方向上在 0~1 200 Hz 范围内的幅频响应曲线及其二次拟合曲线, X 方向与 Z 方向上的 FBG 波长变化量分别表示为  $\Delta\lambda_x = 40.125 - 0.0126f + 2.743e^{-5}f^2$  和  $\Delta\lambda_z = 40.5 - 0.016f + 3.146e^{-5}f^2$ , 结合公式 (5) 可以求得传感器 X 方向上与 Z 方向上的灵敏度与激励频率之间的关系。

经过对比分析, 传感器在 X、Y、Z 方向上的特征频率分别为 1 850 Hz、1 770 Hz 和 1 860 Hz, 并且传感器各个方向的工作频段均为 0~1 200 Hz, 因此, 传感器的三个轴向的幅频特性具有较好一致性。

### 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, 设定激励频率为 100 Hz, 激励加速度为 0.25、0.5、0.75、1、1.25、1.5、1.75、2 g, 分别采集传感器 X、Y、Z 三个方向上在不同加速度激励下的波长变化, 通过线性拟合绘制如图 12 所示的 FBG 波长漂移随激励加速度变化的变化曲线, 得到传感器在 X 轴方向上的灵敏度为 77.37 pm/g, 在 Y 轴方向上的灵敏度为 80.73 pm/g, 在 Z 轴方向上的灵敏度为 75.04 pm/g。

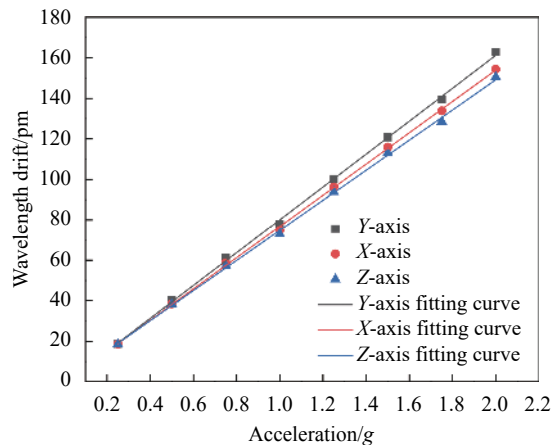


图 12 灵敏度随加速度的变化曲线

Fig.12 Variation curve of sensitivity with acceleration

### 3.3 横向抗干扰

对于多轴测量的振动传感器, 横向抗干扰能力也是衡量传感器性能优劣的重要指标。将振动台激励频率设定为 100 Hz, 激励加速度幅值设定为 0.5 g, 采集传感器各个方向上的光纤光栅波长变化量, 绘制如

图 13 所示的工作方向与非工作方向的光纤光栅的时域特性曲线。从图 13 可看出,在同等大小激励的情况下,传感器非工作轴向上的横向干扰占工作轴向上的比例小于 5%,表明该传感器具有很好的横向抗干扰能力。

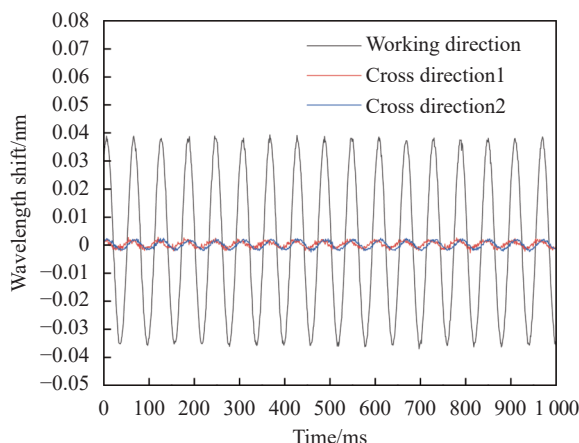


图 13 工作方向与非工作方向的时域特性曲线

Fig.13 Sensitivity linear fitting of time-domain characteristic curves in working and cross directions

### 3.4 冲击响应

为了验证实验所测量的 FBG 振动传感器的特征频率是否正确,需要进行冲击响应测试。在振动台电源关闭的情况下,用重物敲击振动台来模拟产生一个冲击信号。将冲击实验的数据处理后的结果如图 14 所示,由图 14(a)可看出,文中设计的振动传感器结构的振动信号响应良好,根据图 14(b)可以看出,通过傅里叶变换后曲线在 1780 Hz 处为最大值,因此表示文中设计的振动传感器的特征频率为 1780 Hz,与理论值比较接近。

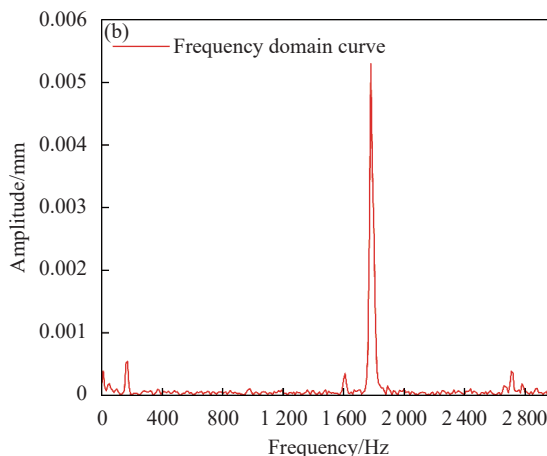
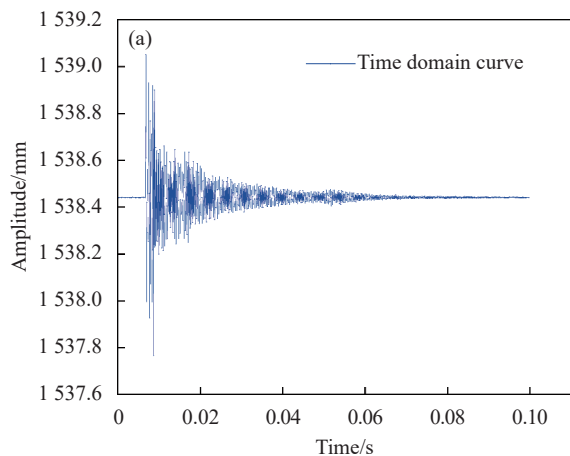


图 14 冲击响应曲线。(a) 时域曲线; (b) 频域曲线

Fig.14 Impact response curve. (a) Time domain curve; (b) Frequency domain curve

### 3.5 重复性测试

重复性是传感器的一个重要特性。设定激励频率为 100 Hz,采集传感器在不同加速度激励下的灵敏度数据,进行 10 次重复实验,结果如图 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 0.0437,表明传感器的重复性和稳定性较好。

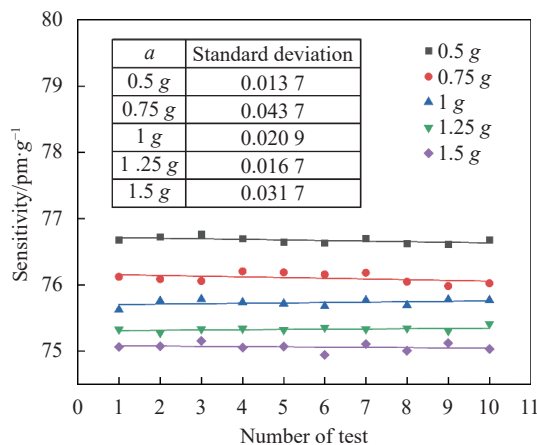


图 15 重复性测试

Fig.15 Repeatability test

## 4 结论

文中设计了一种分立元件交错组合的超紧凑型光纤光栅三轴振动传感器。通过理论分析与有限元仿真,优化传感器的结构参数。根据分析结果制作了



传感器,通过实验研究了传感器的幅频响应、灵敏度、横向抗干扰、冲击响应和重复性。实验结果表明:该传感器的工作频段为 0~1200 Hz,在 X、Y 和 Z 轴方向的固有频率分别为 1850 Hz、1770 Hz 和 1860 Hz,三个轴向的灵敏度分别达到 77.37 pm/g、80.73 pm/g 和 75.04 pm/g,横向抗干扰小于 5%,并且传感器尺寸仅有 15 mm×15 mm×15 mm,质量仅有 24.26 g,在遥感卫星微振动测量等领域具有重要应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Wei L, Yu L, Wang J, et al. An FBG-sensing two-dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(10): 3698-3710.
- [2] Zhao X, Fan W, Gao H, et al. A two-dimensional cantilever beam vibration sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61(1): 102447.
- [3] Zhang Zihao, Wang Jing, Yu Xinyu, et al. Experimental research on thermal-induced vibration based on optical fiber sensor [J]. *Aerospace Control and Application*, 2022, 48(6): 76-80. (in Chinese)
- [4] Liu Zhengyong, Lin Hten, Liu Yi, et al. Special microstructured optical fiber based vibration sensor and its application in railway monitoring [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(8): 63-70. (in Chinese)
- [5] Xu S Y, Xing F F, Wang R L, et al. Vibration sensor for the health monitoring of the large rotating machinery: Review and outlook [J]. *Sensor Review*, 2018, 38(1): 44-64.
- [6] Zhang Faye, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, et al. High sensitivity and low-frequency FBG acceleration sensors based on flexure hinge structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0317004. (in Chinese)
- [7] Liu Wenmin, Dai Yutang, Wei Yu, et al. High sensitivity and low-frequency acceleration sensors based on flexure hinge structure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0317004. (in Chinese)
- [8] Huang Jialiang, Teng Yuntian. Research on miniaturized low-frequency FBG acceleration sensor based on symmetric cantilever beam [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(5): 873-880. (in Chinese)
- [9] Liang L, Wang H, Li Z C, et al. Miniature bending-resistant fiber grating accelerometer based on a flexible hinge structure [J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 33502-33514.
- [10] Wang Hongke, Xu Decheng, Lin Lei, et al. Design and strain characteristics of trifarious fiber Bragg grating strain sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1128001. (in Chinese)
- [11] Wang H, Liang L, Zhou X B, et al. New fiber Bragg grating three-dimensional accelerometer based on composite flexure hinges [J]. *Sensors*, 2021, 21(14): 4715.
- [12] Jia Zhenan, Zhao Xianfeng, Yang Kaiqing, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on 'E' beam structure [J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2020, 31(12): 1239-1244. (in Chinese)
- [13] Zhao Huizhi, Dong Mingli, Xin Jingtao, et al. Structural design and characteristic research of micro broadband FBG vibration sensor[J/OL].[2023-01-05] <https://kns.cnki.net/kcms/detail//31.1690.TN.20230104.1353.042.html>
- [14] Su Li, Zhang Xiaotong, Lv Peitong, et al. Reaserch on a fiber grating low frequency vibraton sensor with large range and high sensitivity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200340. (in Chinese)
- [15] Li Binwen. Study on the design and demodulation method of optical fiber optic grating vibration sensor[D]. Daqing: Northwest Petroleym University, 2023. (in Chinese)

# Research on miniature three-axis vibration sensor based on FBG

Tang Xiang<sup>1,2</sup>, Wu Jun<sup>3</sup>, Li Qihui<sup>1,2</sup>, Xin Jingtao<sup>1,2,4</sup>, Dong Mingli<sup>1,2,4\*</sup>

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China;

2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;

3. Beijing Institute of Space Electromechanics, Beijing 100089, China;

4. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, China)

## Abstract:

**Objective** Vibration measurement plays an essential role in machinery fault diagnosis and structural health monitoring, and vibration sensors are the most important tool in measuring equipment. Electrical vibration sensor technology is relatively mature, with the benefits of low cost, but there are drawbacks such as poor circuit stability, poor signal noise, and easy electromagnetic interference. In contrast, fiber Bragg grating vibration sensor has numerous advantages such as anti-electromagnetic interference, high and low temperature resistance, corrosion resistance, and so on, and is widely used in aerospace, large-scale structure monitoring, industrial propulsion, etc.

**Methods** The high-density tantalum block serves as the mass block, the nickel-titanium alloy serves as the elastic beam, and the ultra-short fiber grating serves as the sensitive element in the vibration sensor. The mass block fixed to the shrapnel will reciprocate as the sensor vibrates due to external forces. This reciprocating motion will stretch the fiber grating and cause axial strain, which causes the center wavelength to wander. The shift in the center wavelength can be used to track the vibration. The vibration sensor's packaging is finished, and the amplitude-frequency and sensitivity characteristics of the sensor are carefully investigated by developing the necessary packaging platform and test equipment.

**Results and Discussions** The sensor has a broad frequency spectrum, high sensitivity and excellent lateral anti-interference performance. The frequency range for operation is 0 to 1 200 Hz. The characteristic frequencies are 1 850 Hz, 1 770 Hz and 1 860 Hz in the *X*, *Y* and *Z* directions, respectively. The sensitivities in the three directions are 77.37 pm/g, 80.73 pm/g, and 75.04 pm/g respectively, and lateral anti-interference is less than 5%.

**Conclusions** This article successfully designs an ultra-compact three-axis vibration sensor. The packaged sensor has considerable application possibilities in the satellite micro-vibration measurement due to its advantages of light weight, a wide operating frequency band, and high sensitivity.

**Key words:** fiber Bragg grating; triaxial vibration sensor; microminiaturization; high sensitivity

**Funding projects:** National Key R & D Program of China (2021YFA1003504)