

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108473

# 基于转动支承梁式的光纤光栅低频加速度传感器\*

李剑芝<sup>1</sup>, 申博豪<sup>2</sup>, 张婉洁<sup>2</sup>, 孙宝臣<sup>1</sup>

(1. 石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制重点实验室 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学机械工程学院 石家庄 050043)

**摘要:**为了实现低频振动的高灵敏度测量,设计了一种基于转动支撑梁的新型光纤布拉格光栅加速度计。通过分析其振动模型和 MATLAB 数值计算,优化了传感器的结构参数,设计传感器理论灵敏度为 1 725 pm/g,固有频率为 68.4 Hz。同时通过 COMSOL 模拟分析传感器的动态特性,其模拟结果与理论分析吻合。频响特性和幅值特性实验结果表明光纤光栅加速度计在加速度 0~2 g、工作频率 0.5~20 Hz 的范围内,传感器加速度特性曲线呈现良好线性关系,灵敏度高达 1 495.2 pm/g,重复性良好。该传感器结构简单紧凑,轴承结构有效减少悬臂梁振动过程中的弹性能耗,可显著提高其灵敏度,能够实现低频振动信号的探测。

**关键词:** 传感器;振动测量;速度传感器;光纤布拉格光栅;低频;旋转梁;高灵敏度

**中图分类号:** TN253 TH825 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

## Fiber Bragg grating accelerometer based on rotating beam for low-frequency vibration

Li Jianzhi<sup>1</sup>, Shen Bohao<sup>2</sup>, Zhang Wanjie<sup>2</sup>, Sun Baochen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Structure Health Monitoring and Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** A fiber Bragg grating accelerometer based on the rotating beam is designed to attain high accelerated sensitivity in low-frequency vibration. By analyzing its vibration model and MATLAB numerical calculation, the optimized structural parameters of the sensor are achieved. Its theoretical sensitivity and natural frequency are 1 725 pm/g and 68.4 Hz, respectively. Meanwhile, its sensitivity response characteristics are simulated by COMSOL, and the simulation results are closely consistent with the theoretical analysis. Experimental results of frequency response and amplitude characteristics indicate that when the acceleration changes from 0~2 g and working frequency in a range from 0.5~20 Hz, their central wavelength of FBGs is linearly related to the vibration acceleration. In addition, a high sensitivity up to 1 495.2 pm/g and a good repeatability is achieved. The sensor has a simple and compact structure, in which the elastic energy consumption is decreased by bearing during the vibration of the cantilever beam. Therefore, its sensitivity is significantly improved. And the low-frequency vibration signals are detectable.

**Keywords:** bearing sensors; accelerometer; vibration measurement; fiber Bragg grating; low frequency; rotating beam; high sensitivity

## 0 引 言

近年来,低频振动传感器在 earthquake 海啸预警、大型工程结构健康监测、航空航天工程等领域中得到了广泛地应用<sup>[1-3]</sup>。光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)由于其抗电磁干扰、耐高温、耐腐蚀、体积小、可复用等优点受到了人

们的广泛关注。目前,根据弹性体类型,FBG 加速度计主要分为基于悬臂梁式的加速度计和基于弹性结构的加速度计。由于悬臂梁结构简单且易于封装,大多数 FBG 加速度计均采用悬臂梁结构。它的测量原理是质量块振动引起悬臂梁变形,导致光栅波长漂移来实现加速度测量。这种结构会产生两个问题,一是悬臂梁刚性固定限制了加速度的测量精度<sup>[4-5]</sup>;二是光纤光栅完全粘贴在悬臂梁

收稿日期:2021-08-25 Received Date: 2021-08-25

\* 基金项目:国家自然科学基金(51778379)、河北自然科学基金(E2019210201)项目资助

上<sup>[6-7]</sup>,悬臂梁产生的不均匀应变导致光谱分裂和光谱展宽。为了消除啁啾现象,Liu 等<sup>[8]</sup>提出了一种光纤全粘贴式的双悬臂梁结构,Wang 等<sup>[9]</sup>提出了光纤两点粘贴的悬臂梁结构。基于梁结构的 FBG 加速度传感器固有频率不高,因此一些 FBG 加速度计使用了弹性元件以提高固有频率<sup>[10-14]</sup>。如王赟等<sup>[10]</sup>设计了一种基于柔性铰链的二维加速度计,张继军等<sup>[11]</sup>设计了一种对称推挽式结构,Guo 等<sup>[12]</sup>用多边形弹性结构进行了封装。上述研究提高了传感器的固有频率,但是传感器结构更为复杂,且易受各种环境因素干扰。同时,低频振动测量时,加速度数值一般很小,环境温度改变引起 FBG 波长漂移,带来测量误差<sup>[15]</sup>。因此一些学者<sup>[16-18]</sup>则在悬臂梁结构或弹性结构的基础上采用双 FBG,实现光栅温度自补偿功能,以减小测量误差。

为了提高 FBG 加速度计的灵敏度,减小测量误差,实现低频振动的测量,本文设计了基于“旋转支承梁-弹簧质量块”结构的 FBG 加速度传感器,通过 MATLAB 数值分析并优化传感器的结构参数。同时,通过 COMSOL 进行了有限元模拟,并对传感器线性响应和幅频特性进行了实验验证。

## 1 传感器设计与理论分析

传统悬臂梁式 FBG 加速度计依据弹性体的连续性原理,其悬臂梁产生弯曲变形会减小应变转换效率,降低传感器的灵敏度,为解决上述问题,设计了基于转动支承梁的高灵敏度 FBG 加速度传感器。其结构主要包括支承梁、轴承、两个光纤光栅、质量块和弹簧,支承梁和质量块是一体式的,弹簧固定在质量块上,光纤光栅分别位于支承梁的上下两侧,如图 1 所示。这种结构紧凑、简单且易于封装。相比于传统悬臂梁式结构,该传感器基于轴承制作了可旋转的支承梁结构,振动过程中可自由转动,使光纤光栅发生形变的应变转换效率提高,从而增大传感器的灵敏度。同时,使用弹簧保持支承梁的平衡位置,同时可提高传感器的固有频率,也易于更换弹簧进行调节。两个光纤光栅位于支承梁上下两侧,产生相反变形,传感器灵敏度可增大两倍,并且 FBG 受到轴向形变,还可消除传统悬臂梁 FBG 加速度计的多峰和啁啾效应。因此,在传感器随被测对象运动时,其加速度  $a$  在质量块上产生相反的惯性力  $F$ ,质量块受迫振动,支承梁围绕轴承转动,带动光栅轴向均匀变形,测量光栅波长即可获得加速度,工作原理如图 2 所示。

此外,需对光纤施加合适的预应力。预张力大小要根据加速度的测量范围和光纤应变极限两个方面来考虑。本文设计的传感器理论灵敏度为 1 725 pm/g ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ),加速度测量范围 0~20  $\text{m/s}^2$ ,单 FBG 的波长

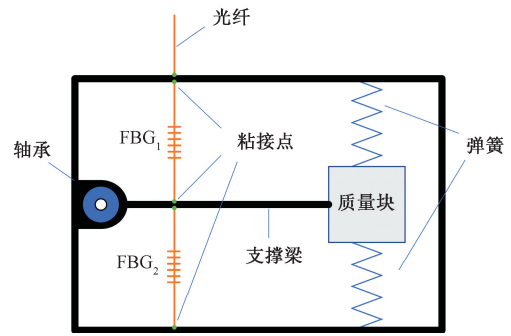


图 1 传感器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the sensor

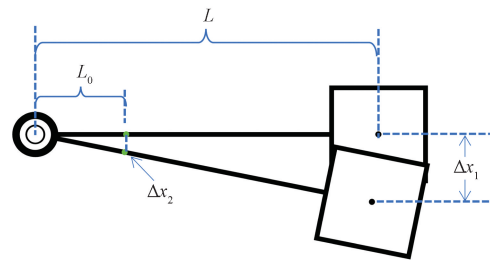


图 2 传感器的振动模型

Fig. 2 Vibration model of the sensor

变化最大值约为 1 725 pm,初始预应力应保证光栅波长改变量为 2 nm。

光纤应变  $\varepsilon$  可表示为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_2}{L_f} = \frac{(L_0/L) \Delta x_1}{L_f} \quad (1)$$

其中,  $L_f$  为光纤有效工作长度,质量块在垂直方向上的位移为  $\Delta x_1$ ; 光纤在支撑梁上粘接点位置的纵向位移设为  $\Delta x_2$ ; 光纤和质量块中心距轴承中心的长度分别为  $L_0$  和  $L$ 。

不计重力影响,质量块主要受到光纤与弹簧的弹性力。由于振幅非常小,“支承梁-弹簧质量块”的倾斜角度可忽略不计,并且该系统质量可近似为质量块的质量,可简化为等效的“弹簧-质量块”模型如图 3 所示,将光纤和弹簧视为一个总弹性单元,则系统的刚度系数  $K$  为:

$$K = 2k_1 + 2\left(\frac{L_0}{L}\right)^2 k_2 \quad (2)$$

式中:  $k_1$  为弹簧的刚度系数;  $k_2$  为光纤的刚度系数  $k_2 = \frac{A_f E_f}{L_f}$ , 其中  $A_f$  和  $E_f$  分别为光纤的横截面积和杨氏模量。

将振动看作为余弦激励,质量块的动力学微分方程可表示为:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + \left[2k_1 + 2\left(\frac{L_0}{L}\right)^2 k_2\right] y = -m\ddot{x} = \hat{F}_{exc} \cos(\omega t) \quad (3)$$

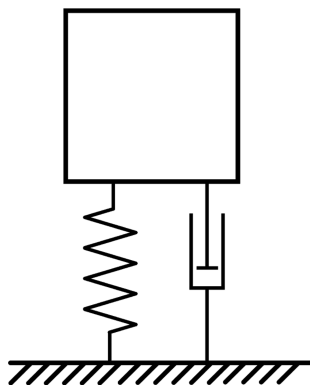


图3 FBG加速度计的简化振动模型

Fig. 3 Simplified vibration model of the FBG accelerometer

其中,  $x$  为传感器相对地面的位移;  $y$  为质量块相对于传感器底座的位移;  $\hat{F}_{exc}$  为激励力的最大值;  $\omega$  为振动角频率。

可由式(3)得到系统的固有频率:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2L_f k_1 + 2(L_0/L)^2 E_f A_f}{L_f m}} \quad (4)$$

质量块位移  $\Delta x_1$  所产生的弹性力, 与加速度  $a$  之间的关系为:

$$K\Delta x_1 = ma \quad (5)$$

将其代入式(1), 光纤应变  $\varepsilon$  可表示为:

$$\varepsilon = \frac{(L_0/L)ma}{2L_f k_1 + 2(L_0/L)^2 E_f A_f} \quad (6)$$

根据耦合模理论, FBG 中心波长  $\lambda_B$  满足:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon \quad (7)$$

对于掺锗光纤, 有效弹光系数  $P_e = 0.22$ 。那么加速度传感器的理论灵敏度为:

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \lambda_B(1 - P_e) \frac{(L_0/L)m}{2L_f k_1 + 2(L_0/L)^2 E_f A_f} \quad (8)$$

实际应用中, 温度改变会引起 FBG 波长偏漂移。假定传感器中 FBG1 和 FBG2 的原始波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 温度对其产生的应变极性同向, 振动对其产生的应变极性相反, FBG1 和 FBG2 受到应变和温度影响后的波长变为:

$$\begin{cases} \lambda'_1 = \lambda_1 + \Delta T k_1 + \varepsilon k_2 \\ \lambda'_2 = \lambda_2 + \Delta T k_1 - \varepsilon k_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $k_1$  和  $k_2$  分别为 FBG 的温度灵敏度和应变灵敏度系数;  $\Delta T$  为变化的温度。

设 FBG1 和 FBG2 的波长改变量分别为  $\Delta\lambda_1 = \lambda'_1 - \lambda_1$  和  $\Delta\lambda_2 = \lambda'_2 - \lambda_2$ , 代入上式可得:

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 2\varepsilon k_2 \quad (10)$$

FBG1 和 FBG2 波长改变是相反的。因此, 双 FBG 加

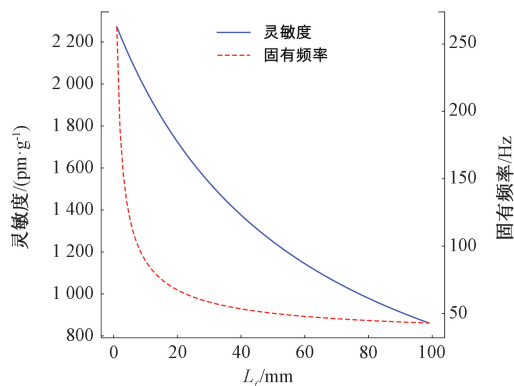
速度计的灵敏度为:

$$S' = 2\lambda_B(1 - P_e) \frac{(L_0/L)m}{2L_f k_1 + 2(L_0/L)^2 E_f A_f} \quad (11)$$

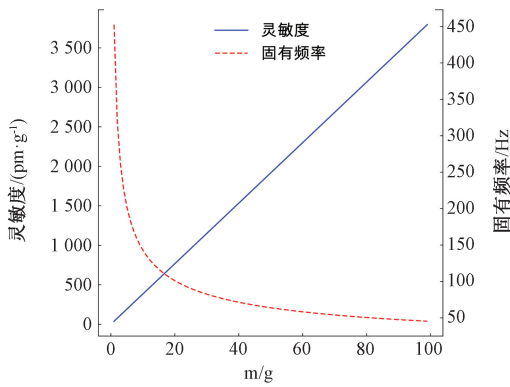
基于上述分析, 发现双 FBG 结构不仅可以消除温度对 FBG 应变的影响, 减小测量误差, 也可使灵敏度提高两倍。

## 2 结构参数优化与数值分析

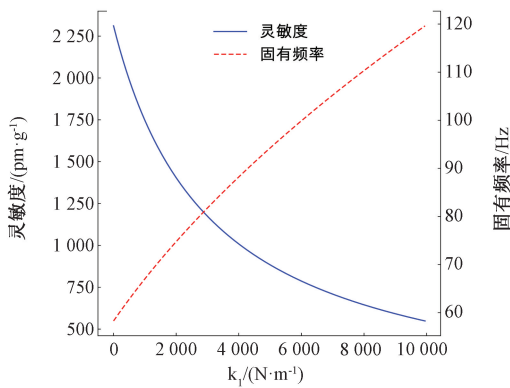
通过式(4)和(11)发现, 传感器的固有频率和灵敏度主要受  $k_1$ 、 $L_f$ 、 $m$  和  $L_0/L$  的影响。针对低频微弱振动信号的测量, 需要通过优化设计来尽可能地增大灵敏度, 并兼顾固有频率, 保证在宽频率范围下获得高灵敏度指标。  $k_1$ 、 $L_f$ 、 $m$  和  $L_0/L$  结构参数对传感器灵敏度和固有频率影响如图4所示。从图中可以看出: 固有频率和灵敏度随着光纤有效工作长度  $L_f$  的增加而降低; 随着质量块质量  $m$  的增加, 固有频率和灵敏度分别呈现下降和上升趋势; 但考虑质量块尺寸因素, 需选用密度较大的金属铜作为质量块的材料, 其中  $m$  为 45 g。随着弹簧刚度系数  $k_1$  的增加, 固有频率和灵敏度分别呈上升和下降趋势; 随着  $L_0/L$  的增加, 固有频率逐渐提高, 但灵敏度先增大后减小, 并在  $L_0/L = 0.2$  左右处出现峰值, 但当  $L_0/L$  略大于 0.2 时, 固有频率会提高, 同时灵敏度下降的较慢。以上分析给出了 4 个关键参量对传感器灵敏度与谐振频率的影响, 并且考虑到支撑梁过大的振幅会导致光纤产生过大的横向剪切力, 因此  $L_0/L$  不宜过大。为了获得更高的灵敏度和更宽的工作频率范围, 综合传感器性能需求、制作工艺、传感器尺寸和选材等因素, FBG 加速度计结构参数如表 1 所示。根据式(4)和(11), 固有频率和灵敏度分别为 68.4 Hz 和 1 725 pm/g。



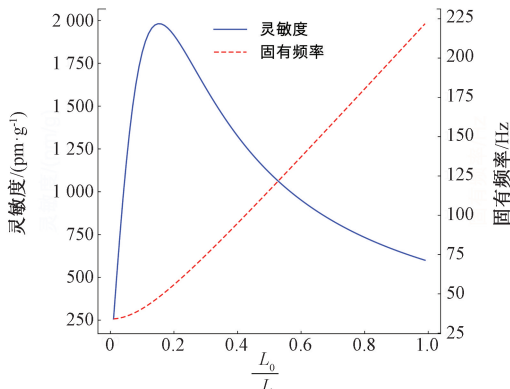
(a) 光纤有效工作长度与传感器性能的关系  
(a) Relationship between effective working length of optical fiber and sensor performance



(b) 质量块质量与传感器性能的关系  
(b) Relationship between Weight of mass and sensor performance



(c) 弹簧刚度系数与传感器性能的关系  
(c) Relationship between stiffness of the spring and sensor performance



(d) 光纤粘贴位置比 $L_0/L$ 与传感器性能的关系  
(d) Relationship between fiber paste position ratio  $L_0/L$  and sensor performance

图 4 FBG 不同参数对灵敏度和固有频率的影响  
Fig. 4 Influence of resonant frequency and sensitivity in various parameters FBG

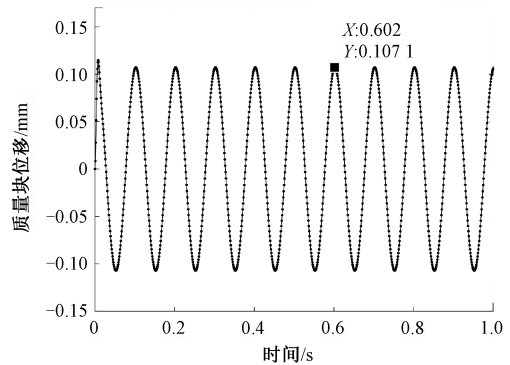
求解式(3),可得到质量块位移  $\Delta x_1$  和时间的关系,假定振动频率和振动加速度分别为 10 Hz 和 20  $m/s^2$ ,同时根据表 1 中的参数,可得到质量块运动的时程曲线,如

表 1 FBG 加速度计的尺寸参数

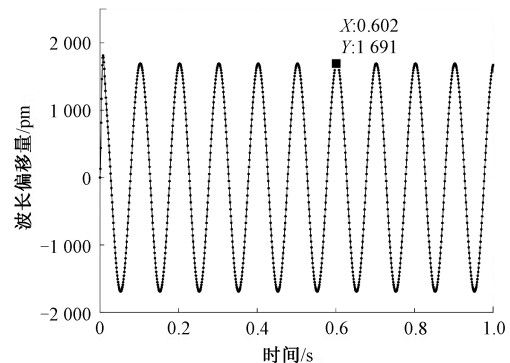
Table 1 Parameters of the FBG accelerometer

符号	含义	数值
$P_e$	有效光弹系数	0.22
$E_f$	光纤的杨氏模量/Pa	$72.9 \times 10^9$
$A_f$	光纤的横截面积/ $m^2$	$1.227 \times 10^{-8}$
$L_0$	光纤与轴承的水平距离/mm	10
$L$	质量块与轴承的水平距离/mm	38
$L_f$	光纤的有效工作长度/mm	20
$m$	质量块的质量/g	45
$k_1$	弹簧的刚度系数/ $(N \cdot m^{-1})$	1 053
$\lambda_{B1}$	FBG1 的中心波长/nm	1 552.4
$\lambda_{B2}$	FBG2 的中心波长/nm	1 532.2

图 5(a)所示。再由式(1)可得  $\Delta x_2$  随时间的变化,进而由式(1)和(7)得到 FBG 波长改变量随时间的变化情况如图 5(b)所示。从图中可以看到 FBG 波长改变量与质量块振幅变化是一致的,因此 FBG 波长能很好地反映质量块振幅的大小。



(a) 质量块位移量的时间历程图  
(a) Time history diagram of mass displacement



(b) FBG 波长变化量的时间历程图  
(b) Time history diagram of FBG wavelength change

图 5 动力学模型的数值分析结果

Fig. 5 Numerical analysis results of the dynamic model

### 3 有限元模拟

为了验证传感器特性,使用 COMSOL 软件进行有限元仿真分析。参照表 1 进行参数设置,构建传感器的等效模型如图 6 所示。其中质量块为边长 17.2 mm 的正方体,支撑梁宽度为 10 mm,厚度为 1 mm,轴承半径为 3 mm,材料均为铜。外壳厚度为 2.5 mm,材料为结构钢。在质量块上下表面中心位置与弹簧连接,弹簧固定在外壳上,COMSOL 弹簧单元在建模过程和结果中均不显示。由于光纤上的应变需要高精度计算,划分微小网格,网格最大单元为 0.062 5 mm,最小单元为 0.015 mm,最大单元增长率为 1.35,有限元模型如图 7 所示。同时,对光纤施加预应力,保证振动过程中可以实现轴向压缩和拉伸。

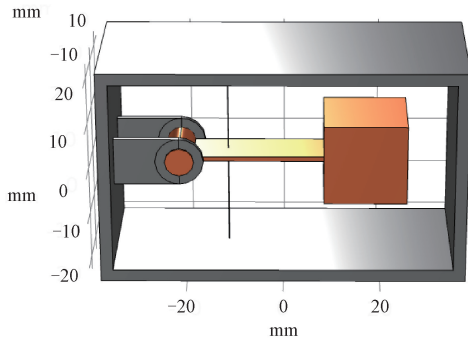


图 6 传感器等效模型

Fig. 6 Equivalent model of the sensor

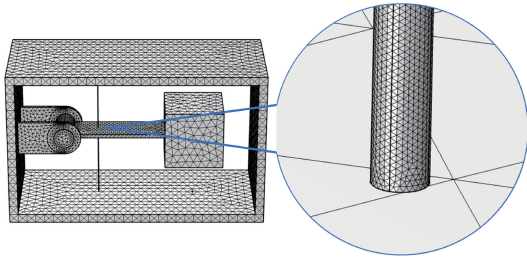
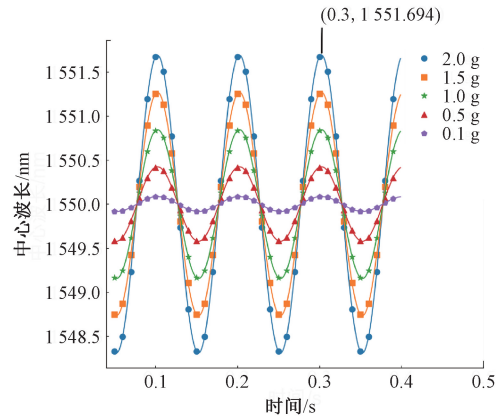


图 7 传感器的有限元网格模型

Fig. 7 Finite element mesh model of the sensor

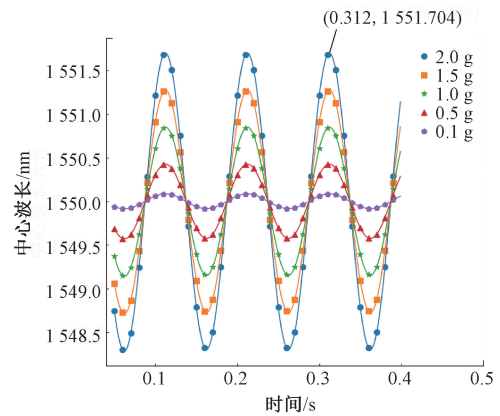
当振动频率为 10 Hz,加速度分别为 1、5、10、15、20  $m/s^2$  时,由 MATLAB 和 COMSOL 分析的波长为 1 550 nm 的 FBG 波长变化如图 8 所示,FBG 波长漂移量随着加速度的增加而呈线性增长。图 9 是频率为 10 Hz、加速度为 10  $m/s^2$  的振动时的光纤应变分布,选取时间 0.012~0.362 s。从图 9 中可以看出,由于施加了稳定的周期性振动,周期为 0.1 s,梁上下两侧光纤应变随时间周期性地变化,并且应变极性相反。0.05 s 后(即振动过了半个周期)振动逐渐稳定,光纤应变最大值约为 690  $\mu\epsilon$ ,双 FBG 结构的总应变相比单 FBG 提高了两倍。

此外,MATLAB 数值分析与 COMSOL 模拟结果表明光栅波长吻合较好。



(a) MATLAB 数值计算结果

(a) Analysis results by MATLAB



(b) COMSOL 有限元分析结果

(b) Analysis results by COMSOL

图 8 FBG 中心波长的时间历程图

Fig. 8 Time history diagram of FBG wavelength shift

在频率不变的情况下,通过波长变化计算灵敏度。图 10 给出了 MATLAB 与 COMSOL 的波长漂移和加速度的关系,其中振动频率为 10 Hz,加速度从 1  $m/s^2$  不均匀变化到 20  $m/s^2$ 。可以看出:1) 波长漂移量随着加速度的增加而增加;2) 波长漂移量与加速度近似成线性关系;3) FBG 加速度计在 10 Hz 时 MATLAB 与 COMSOL 分析的灵敏度分别为 1 691.2 pm/g 和 1 699.8 pm/g,与理论灵敏度 1 725 pm/g 吻合度较高。

### 4 实验结果与讨论

为了获得 FBG 加速度传感器的实际灵敏度和谐振频率,进行了频响特性和幅值特性实验。首先,将 FBG 加速器固定在振动仪上,同时也将一个用于校准的压电加速度计固定在振动台上,参照 1/3 倍频程确定扫频范围为 0.5~42 Hz。由于振动台的振动加速度也受振动

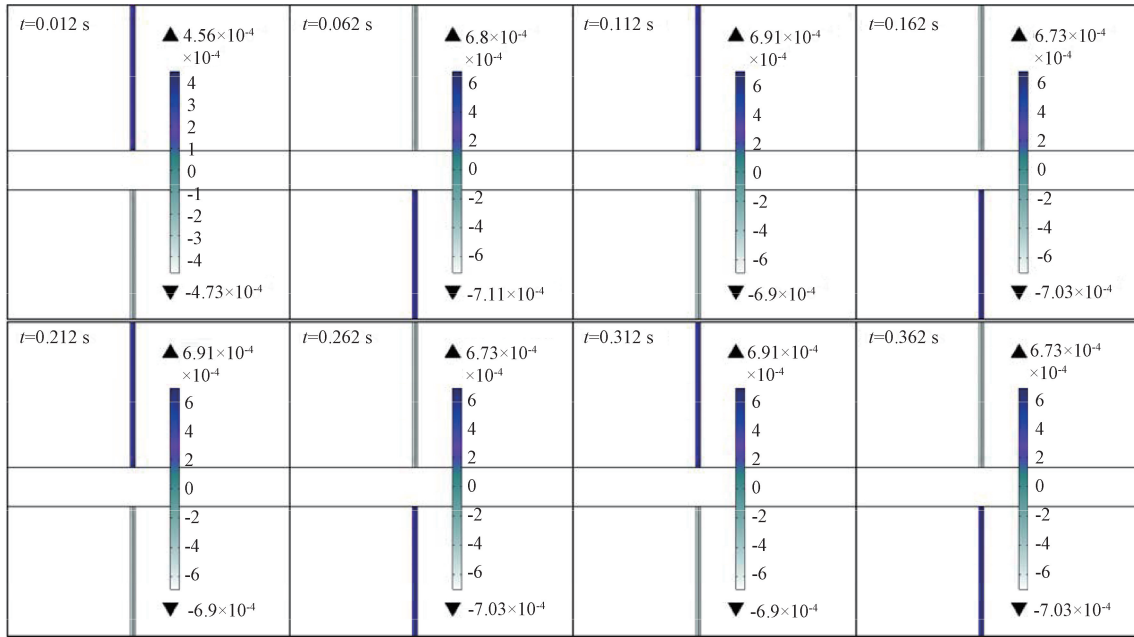


图 9 频率和加速度分别为 10 Hz 和  $10\text{ m/s}^2$  的振动中的光纤应变变化图(单位:应变)

Fig. 9 Fiber strain response during vibration ( $10\text{ Hz}$  and  $10\text{ m/s}^2$ ) (Unit: strain)

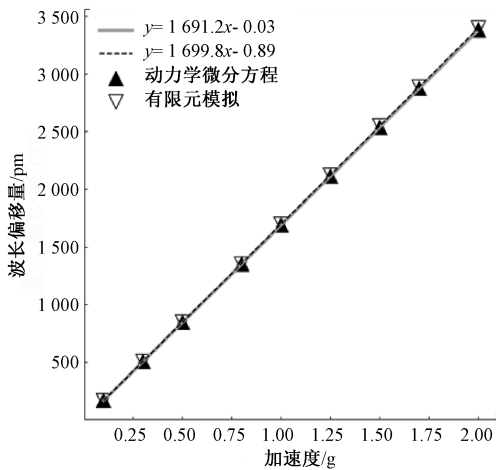


图 10 振动频率为 10 Hz 的波长漂移-加速度图

Fig. 10 Acceleration sensitivity curve with 10 Hz frequency.

频率影响,振动台以 0.5 Hz 振动时的加速度约为  $0.15\text{ m/s}^2$ , 4 Hz 的加速度约为  $2\text{ m/s}^2$ , 8 Hz 及以上频率时加速度约为  $5\text{ m/s}^2$ 。压电加速度计和 FBG 加速度计的输出端连接到压电传感器和 FBG 传感器解调仪(SM130, USA, 波长重复性为  $1\text{ pm}$ , 扫描频率为  $1\text{ kHz}$ , 波长范围为  $80\text{ nm}$ ), 实验系统如图 11 所示。室温为  $20^\circ\text{C}$ , 温度变化忽略不计。

幅值特性实验保持振动频率不变( $16\text{ Hz}$ ), 改变振动台加速度的大小(依次改变为  $1, 2, 3.1, 4.1, 5.1, 8.2, 10.3, 12.3, 14.3, 16.4, 18.4, 20.5\text{ m/s}^2$ ), 测量不同加速度下的 FBG 波长改变量。

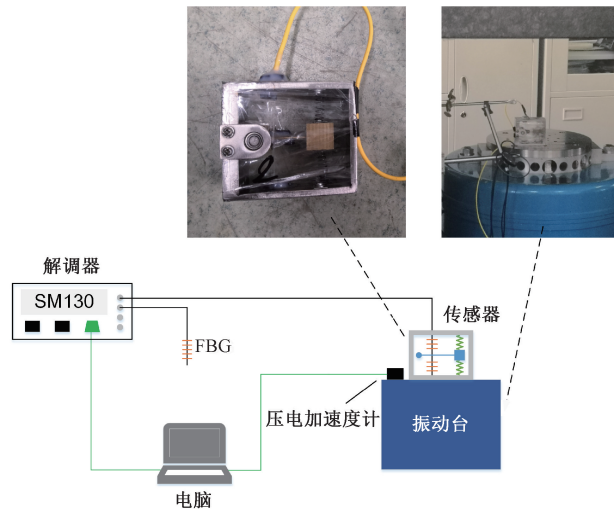


图 11 加速度传感系统的实验示意图

Fig. 11 Experiment diagram of the acceleration sensing system

图 12 是在 0.1、0.5、16、35 Hz 振动条件下的时域波形图和各个频率的功率谱图, 图中从上到下分别是 FBG1 (中心波长  $1552.4\text{ nm}$ )、FBG2 (中心波长  $1532.2\text{ nm}$ ) 和功率谱图。由于在  $0.1\text{ Hz}$  的低频振动下波长变化不稳定, 使用了低通滤波进行数据处理。从图中可以看出: 1) 从  $0.1\sim 35\text{ Hz}$ , 单光栅波长的漂移量大约为  $2\sim 1000\text{ pm}$ , 相应的加速度约从  $0.01\text{ m/s}^2$  增加到  $5\text{ m/s}^2$ 。当激励频率接近谐振频率或小于  $0.5\text{ Hz}$  时, 波形失真, 导致测试误差。2) 整体波形良好, 无杂波, 传感器能够很好地反映

外界的正弦激励,说明传感器除 0.1 Hz 外,响应特性良好,抗干扰能力强。3)快速傅里叶变换的功率谱结果表

明测量频率与振动台的实际频率一致,该传感器具有良好的低频探测性能。

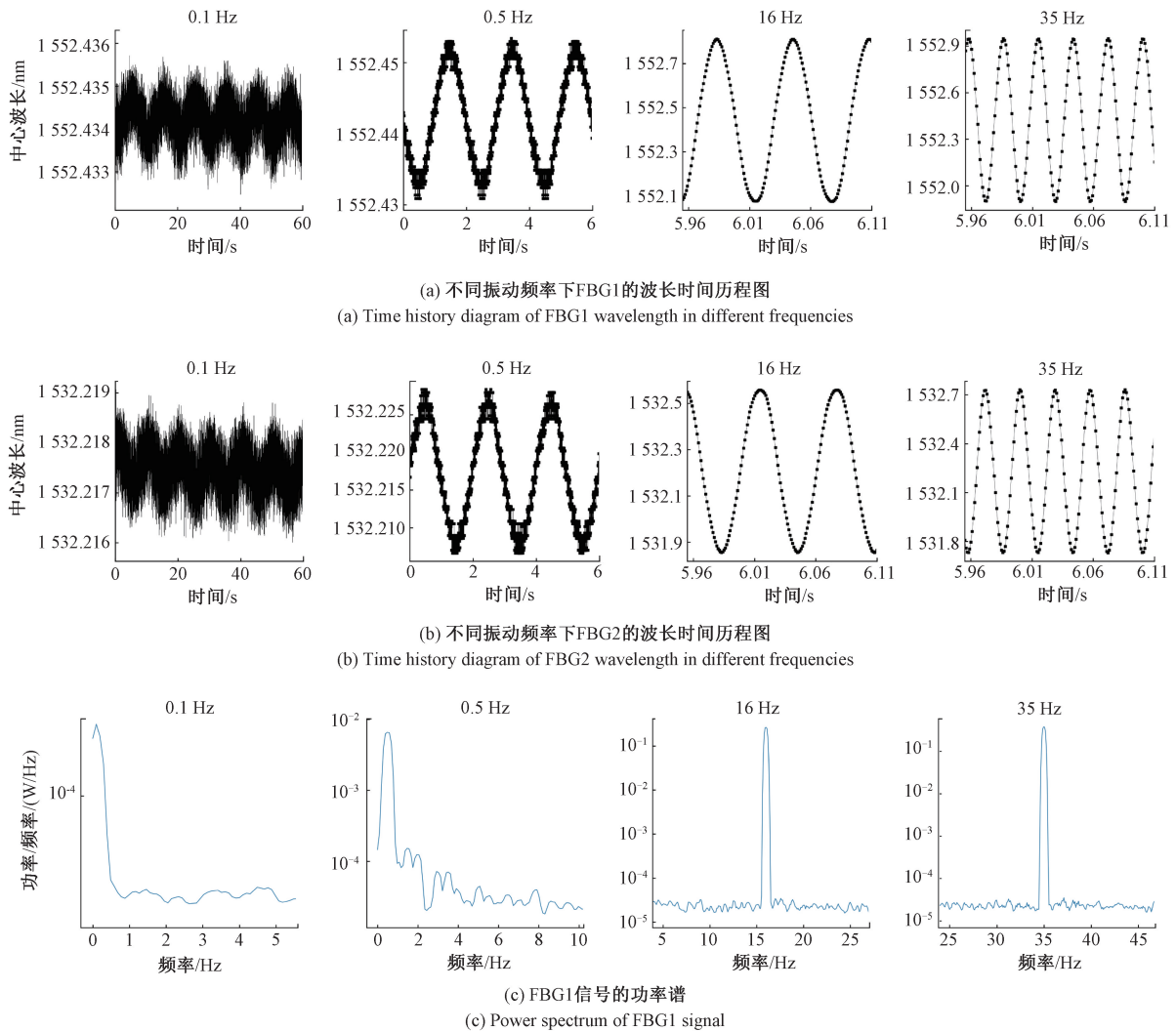


图 12 当激励频率为 0.1、0.5、16、35 时的 FBG 波长时域图和功率谱

Fig. 12 Time-domain/Power-domain signal curve of FBG wavelength (0.1, 0.5, 16, and 35 Hz)

在实际应用中,FBG 加速器在相对较宽的工作频率范围内具有平坦的响应是极其重要的,为了确定传感器的工作频带,需要进行频率动态响应实验。对 FBG 加速度计进行了 3 组实验,改变振动台的振动频率(第 1 组为 1.6~40 Hz,第 2 组为 0.5~42 Hz,第 3 组为 0.5~40 Hz),再根据实验数据计算不同频率下的灵敏度,得到如图 13 所示的幅频特性曲线。从图中可以看出:1)0.5~20 Hz 是波长变化的平稳期;2)20~80 Hz 是波长变化的快速上升段。因此该传感器的工作频率范围为 0.5~20 Hz。

最后分析了加速器的灵敏度线性响应。当激励信号

的频率保持在 16 Hz,激励信号的幅度从  $1 \text{ m/s}^2$  增加到  $20 \text{ m/s}^2$  时,使用上下两个 FBG 的波长漂移相加作为传感器输出如图 14 所示。实验结果表明波长漂移幅值与输入加速度幅值具有良好的线性关系,FBG 加速器表现出良好的线性特性,测试误差为 10.87 pm,传感器的波长误差为 0.7%,线性度良好。实测灵敏度约为  $1495.2 \text{ pm/g}$ ,与理论灵敏度  $1725 \text{ pm/g}$  相比略有下降,原因是封装过程中一些参数(如光纤刚度系数、光纤固定点位置等)误差造成实测灵敏度和理论灵敏度的差异。同时,由于实际轴承摩擦引起 FBG 应变减小,降低了传感器灵敏度,也可能有光纤的预张力调整不佳等原因。

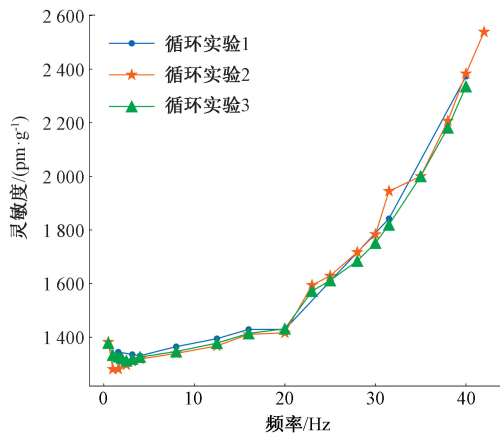


图 13 传感器的幅频特性曲线

Fig. 13 Amplitude frequency curve of the FBG accelerometer

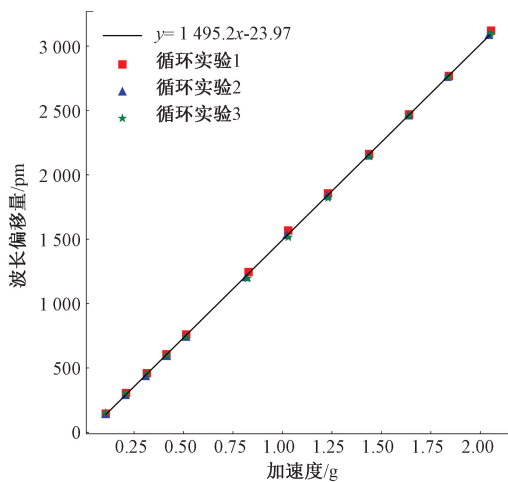


图 14 传感器的输出与加速度的线性响应

Fig. 14 Linear response diagram of sensor output and acceleration

## 5 结 论

本文设计并制作了一种基于旋转支承梁的新型 FBG 加速度传感器。通过 MATLAB 理论分析了传感器的加速度灵敏度与谐振频率,并进行了结构优化设计,通过 COMSOL 模拟分析了传感器的动态特性,数值结果与理论分析吻合较好。实验标定了双光栅旋转支承梁式传感器的传感特性,结果表明工作频带为 0.5~20 Hz,加速度灵敏度高达 1 495.2 pm/g,与理论灵敏度 1 725 pm/g 基本吻合,该 FBG 加速度传感器能探测 0.5 Hz 甚至 0.1 Hz 微弱振动信号。同时,还采用了双 FBG 两点式封装,减小了测量误差,避免了光栅多峰和啁啾效应。后续工作可以结合匹配光栅解调方法进行研究,兼顾灵敏度和频响范围,进一步提高低频振动信号的探测性能乃至实现对超低频振动的测量。

## 参考文献

- [1] GAGLIARDI G, SALZA M, FERRARO P, et al. Design and test of a laser-based optical-fiber Bragg-grating accelerometer for seismic applications[J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19(8): 085306.
- [2] DI S R. Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2015, 15(8): 18666-18713.
- [3] 邓昌建, 陈东义, 张衡, 等. 核电设备无线振动测量冗余滤波算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5): 429-435.  
DENG CH J, CHEN D Y, ZHANG H, et al. Research on wireless vibration measurement redundancy filter arithmetic for equipment of NPPs [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(5): 429-435.
- [4] 郭永兴, 张东生, 李杰燕, 等. 光纤光栅二维加速度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 198-204.  
GUO Y X, ZHANG D SH, LI J Y, et al. Two dimensional fiber Bragg grating accelerometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 198-204.
- [5] WANG C, LU Q, CHENG L. Novel type of temperature self-compensating acceleration transducer based on OFBG[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(8): 3012-3013.
- [6] 叶婷, 梁大开, 曾捷, 等. 基于弓形梁增敏结构的 FBG 振动传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 139-145.  
YE T, LIANG D K, ZENG J, et al. Study on optical fiber grating vibration sensor based on bow beam sensitive characteristic [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1): 139-145.
- [7] 何凯, 曾捷, 林秋红, 等. 空间伸展结构变形与振动分布式光纤监测研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 56-65.  
HE K, ZENG J, LIN Q H, et al. Research on spatial deployable structure deformation and vibration monitoring with distributed optical fiber [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 56-65.
- [8] LIU Q, JIA Z, FU H, et al. Double cantilever beams accelerometer using short fiber Bragg grating for eliminating chirp [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17): 6611-6616.
- [9] WANG J, HU B, 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.



- [10] 王赞,戴玉堂,刘文敏,等. 基于柔性铰链的光纤光栅二维加速度传感器的优化设计[J]. 光子学报, 2019, 48(8): 82-88.  
WANG Y, DAI Y T, LIU W M, et al. Optimization design of fiber bragg grating two-dimensional accelerometer based on flexure hinge[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 82-88.
- [11] 张继军,吴祖堂,潘国锋,等. 低频高灵敏度光纤 Bragg 光栅振动传感器设计[J]. 光子学报, 2014, 43 (S1): 249-253.  
ZHANG J J, WU Z T, PAN G F, et al. Design of optical fiber grating-based high-precision and low-frequency vibration sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43 (S1): 249-253.
- [12] GUO T, ZHANG T, LI Y, et al. Highly sensitive FBG seismometer with a 3D-printed hexagonal configuration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(16): 4588-4595.
- [13] ZHANG J, QIAO X, HU M, et al. Proposal of metal bellows-based fiber Bragg grating accelerometer [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(9): 090606.
- [14] 鲁文高,孙琪真,沃江海,等. 基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 291-296.  
LU W G, SUN Q ZH, WO J H, et al. High sensitivity micro-vibration sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34 (7): 291-296.
- [15] ZHANG X, RONG Q, SUN H, et al. Low-frequency fiber Bragg grating accelerometer based on a double-semicircle cantilever [J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(3): 190-193.
- [16] LI T, TAN Y, HAN X, et al. Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation [J]. Sensors, 2017, DOI: 10. 3990/S17010. 218.
- [17] WANG J, PENG G, HU Z, et al. Design and analysis of a high sensitivity FBG accelerometer based on local strain amplification [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(10): 5442-5449.
- [18] XU H, LI F, GAO Y, et al. Simultaneous measurement of tilt and acceleration based on FBG sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(24): 14857-14864.

### 作者简介



李剑芝(通信作者),2001年于桂林理工大学获得学士学位,2004年于武汉理工大学获得硕士学位,2009年于北京交通大学获得博士学位,现为石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制研究所教授,主要研究方向为光纤传感技术和结构健康监测。

E-mail: lijianzhigang@163.com

**Li Jianzhi** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Guilin University of Technology in 2001, received her M. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2004, and received her Ph. D. degree from Beijing Jiaotong University in 2009. She is currently a professor in the Key Laboratory of Structure Health Monitoring and Control at Shijiazhuang Tiedao University. Her main research interests include optical fiber sensing technology and structural health monitoring.