

基于轴承和柔性铰链的布拉格光纤光栅加速度计

宋颖 张浩然 李剑芝 申博豪 刘占剑

Fiber bragg grating accelerometer based on flexure hinge and bearing

SONG Ying, ZHANG Hao-ran, LI Jian-zhi, SHEN Bo-hao, LIU Zhan-jian

引用本文:

宋颖, 张浩然, 李剑芝, 申博豪, 刘占剑. 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*, 2023, 16(5): 1109–1120. doi: 10.37188/CO.2022–0252

SONG Ying, ZHANG Hao-ran, LI Jian-zhi, SHEN Bo-hao, LIU Zhan-jian. Fiber bragg grating accelerometer based on flexure hinge and bearing[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1109–1120. doi: 10.37188/CO.2022–0252

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0252>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性

Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 449 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0449>

光纤光栅与受激布里渊信号的耦合特性

Coupling characteristics between fiber grating and stimulated Brillouin signal

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 484 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0484>

长周期光栅生物传感器研究进展

Research progress of biosensors based on long period fiber grating

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 475 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0475>

20~1 250 Hz 光纤激光加速度传感系统设计

20–1 250 Hz fiber laser acceleration sensing system

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 469 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0469>

光纤生物传感器在HER3抗体药物定量检测中的应用

Application of optical fiber biosensor in quantitative detection of HER3 antibody

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 503 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0503>

星上剩磁对惯性传感器的影响

Effect of the on-board residual magnetism on inertial sensors

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 515 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0515>

文章编号 2097-1842(2023)05-1109-12

基于轴承和柔性铰链的布拉格光纤光栅加速度计

宋颖^{1,2}, 张浩然^{1,2}, 李剑芝^{3*}, 申博豪^{3,4}, 刘占剑^{3,5}

1. 石家庄铁道大学 河北省交通安全与控制重点实验室, 河北 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学 河北省大型结构健康诊断与控制实验室, 河北 石家庄 050043;
4. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043;
5. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为实现中高频振动信号的测量,本文设计了一种基于轴承和柔性铰链结构的光纤布拉格光栅加速度传感器。首先,基于理论力学模型推导出其固有频率、灵敏度与结构参数的数学模型,然后进行结构优化设计,并制作了传感器实物。在此基础上,对所设计传感器动态特性进行有限元仿真和实验测试。研究表明:传感器工作频率为10~1200 Hz,加速度灵敏度达17.25 pm/g,测量误差小于0.3 g,线性度大于0.99,重复性误差为2.33%,且能实现温度补偿。

关键词:传感器;加速度传感器;光纤布拉格光栅;中高频;轴承;柔性铰链

中图分类号:TN253 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2022-0252

Fiber bragg grating accelerometer based on flexure hinge and bearing

SONG Ying^{1,2}, ZHANG Hao-ran^{1,2}, LI Jian-zhi^{3*}, SHEN Bo-hao^{3,4}, LIU Zhan-jian^{3,5}

1. Key Laboratory of Traffic Safety and Control of Hebei Province, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 2. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 3. Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 4. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
 5. School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)
- * Corresponding author, E-mail: lijianzhigang@163.com

Abstract: We develop a fiber Bragg grating accelerometer based on a bearing and flexure hinge for the measurement of medium-high frequency vibration signals. The mathematical model between its natural frequency and sensitivity and structural parameters is derived based on a mechanical model, and the structural design is optimized based on the theoretical analysis results. With these prerequisites, the sensor was fabricated. Ulti-

收稿日期:2022-12-07; 修订日期:2022-12-23

基金项目:国家重点研发计划(No. 2021YFB2601000);中央引导地方科技发展基金(No. 226Z0801G, No. 216Z3901G)
Supported by National Key Research and Development Program (No. 2021YFB2601000); Central Leading Local Science and Technology Development Fund (No. 226Z0801G, No. 216Z3901G)

mately, its dynamic characteristics are validated using a finite element simulation and vibration experiment. The results show that both its operating frequency range and acceleration sensitivity are 10–1 200 Hz and 17.25 pm/g. In addition, this proposed sensor has some advantages such as an error of less than 0.3 g, a good linearity of greater than 0.99, a repeatability error of 2.33%, and it is free of temperature.

Key words: sensor; accelerometer; fiber Bragg grating; mid-high frequency; bearing; flexure hinge

1 引言

中高频振动信号的精确测量已成为国内外的研究热点^[1-2]。其对如高速动车组轴箱振动、微地震等许多工程监测具有重要意义^[3-4]。传统电类传感器易受电磁干扰,而且导线过长等会造成信号衰减,特殊环境应用困难^[5]。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)加速度传感器采用无源传感元件,光信号传输不受电磁和距离等因素影响,而且耐腐蚀、可组网、易于实现分布式传感^[6],适用于恶劣环境下的振动监测,引起了科研人员的广泛关注。

FBG 加速度传感器为波长调制型光纤传感器,主要有悬臂梁式、圆形膜片式、柔性铰链式以及其它一些特殊结构。它们的传感原理是通过质量块带动光纤光栅使之产生轴向应变,导致波长发生变化,然后通过 FBG 波长变化来获得加速度。其中悬臂梁式结构^[7-10]研究较早,理论推导简便,具有结构简单的显著优势;圆形膜片结构^[11-13]由于质量块横向位移被限制,具有横向干扰小的显著特点。但上述两种结构受本身刚度限制,测量中高频振动时灵敏度过低。例如,LI T L^[11]设计了一种圆形膜片结构的传感器,固有频率为 600 Hz,灵敏度为 20.189 pm/g; WU H^[14]设计了一种基于变厚度双悬臂梁结构的 FBG 传感器,固有频率达 8 658 Hz,灵敏度仅 0.44 pm/g。此外,其他特殊结构的 FBG 加速度传感器的灵敏度也较低,例如 WANG^[15]设计的基于钢管和双 FBG 的 FBG 加速度传感器,固有频率达到 3 806 Hz,但其灵敏度仅为 4.01 pm/g。柔性铰链结构^[16-18]具有较宽的测量频率范围,采用柔性铰链结构后,灵敏度可得到一定的提高,但提升效果有限。例如,LI-ANG L^[17]等人设计了一种单铰链结构传感器,固有频率为 900 Hz,灵敏度为 26.962 pm/g。为了进一步提高灵敏度,LUO X D^[19]、QIU ZH CH^[20]等采用对称柔性铰链结构和双质量块增大 FBG 轴

向应变,固有频率分别为 890 Hz 和 1 300 Hz,灵敏度分别可达到 41 pm/g 和 20 pm/g。LIZ CH^[21]等人设计了一种三柔性铰链结构,固有频率为 2 800 Hz,灵敏度达 21.8 pm/g。多柔性铰链结构会引起回转精度误差叠加^[22],导致传感器线性度下降。

综上所述,目前采用单质量块和单柔性铰链结构的 FBG 加速度传感器,灵敏度偏低。而采用双质量块和多铰链结构虽可增加灵敏度,但将导致线性度下降。针对上述问题,本文提出一种中间为单柔性铰链、两侧为轴承支撑结构的对称式 FBG 加速度传感器。该结构不仅能提高测量频率范围,还具有较高灵敏度,可实现中高频振动信号的精确测量。

2 传感器设计

根据工程结构中高频振动信号的测量需求,设计了一种柔性铰链连接、两侧轴承支承的对称式双质量块 FBG 加速度传感器,如图 1 所示,包括 2 个质量块、2 个轴承、1 个柔性铰链、2 根光纤光栅(FBG₁ 和 FBG₂)以及基座。两轴承和两质量块呈对称布置,中间仅用一个柔性铰链连接。轴承外圈固定在两质量块外侧突起的连接臂上,质量块可绕轴承中心轴微转动。采用两点封装方

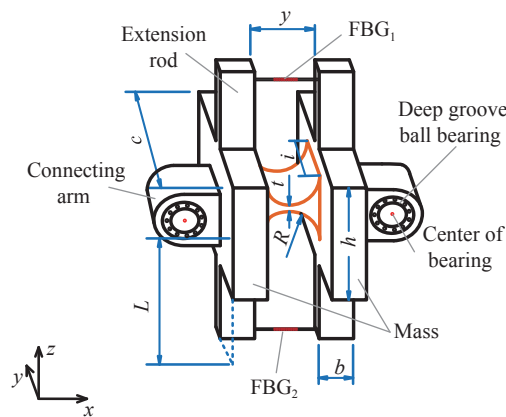


图 1 FBG 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the FBG structure

式将两根光纤光栅分别粘贴在质量块上下延伸杆末端并施加一定预应力, 避免产生啁啾效应。通过改变柔性铰链的最小厚度, 还可以调整频率测量范围和传感器灵敏度, 以适应不同的应用环境。当 FBG 加速度传感器受到外界振动激励时, 两质量块同时绕轴承中心转动, 两根光纤光栅产生轴向应变进而引起光栅波长变化, 根据振动加速度与光栅波长之间的数学关系即可获得待测加速度信息。

设计的传感器采用单柔性铰链连接两质量块, 并增加了轴承结构, 既可提高传感器灵敏度, 又可避免多铰链结构产生的传感器线性度和量程减小的问题, 同时质量块在低阶模态不会产生同向转动, 保证传感器具有较宽的频率测量范围。另一方面, 采用双光栅结构, 两根光栅轴向应变方向相反, 这种既提高了灵敏度又消除了温度影响。

3 理论分析

所设计的 FBG 加速度传感器采用对称双光栅结构, 其中心波长同时受轴向应变和温度影响

$$\Delta\lambda_1 = (1 - P_e)\varepsilon_1\lambda_1 + (\alpha_f + \xi)\Delta T\lambda_1 \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_2 = (1 - P_e)\varepsilon_2\lambda_2 + (\alpha_f + \xi)\Delta T\lambda_2 \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 分别为 FBG₁ 和 FBG₂ 的波长变化量; P_e 为有效弹光系数; ε_1 、 ε_2 分别为 FBG₁ 和 FBG₂ 应变; λ_1 、 λ_2 分别为 FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长; α_f 为光纤热膨胀系数; ξ 为光纤材料热光系数; ΔT 为温度变化量。

当质量块受到外界振动导致两根光栅 FBG₁ 和 FBG₂ 出现变形时, 其中一个受拉, 另一个受压, 其波长变化量大小相等, 方向相反, 即 $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon$ 。两光栅中心波长值相近, 即 $\lambda_1 \approx \lambda_2 = \lambda$, 总波长变化量可以表示为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 2(1 - P_e)\lambda\varepsilon \quad (3)$$

利用公式 (3) 既可以消除公式 (1) 和公式 (2) 中的温度项, 实现温度补偿, 又可以使波长变化量提高一倍。

理论公式推导时忽略阻尼, 当质量块受到垂直振动加速度 a 激励时, 根据牛顿第二定律和胡克定律有

$$F = Kx_m = M_e a \quad (4)$$

式中, K 为系统刚度, x_m 为质量块位移, M_e 为系统等效质量。

当加速度方向向上时, 由于惯性, 质量块相对于轴承向下转动, 根据力矩平衡, 质量块转动角度为 θ 时, 质量块受到柔性铰链竖直方向的弹力 F_h 和光纤传递到质心竖直方向的拉力 F_f 而发生转动, 如图 2 所示。由于转动角度很小, 将 F_h 和 F_f 视为竖直方向的力, 其合力为 F 。

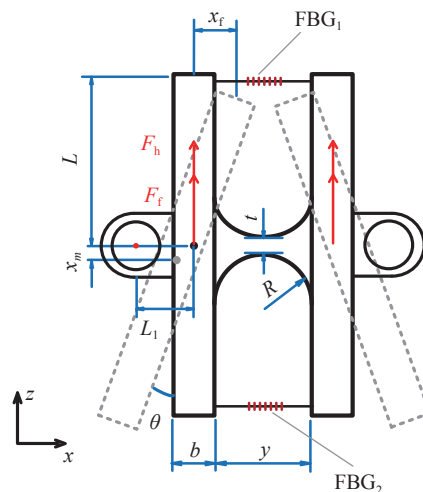


图 2 工作原理示意图

Fig. 2 Diagram of the working principle

两质量块对称布置, 以图 2 左侧质量块为例, 其位移与 FBG₁ 拉伸长度分别近似为

$$x_m = L_1\theta \quad (5)$$

$$x_f = L\theta \quad (6)$$

式中, x_m 和 x_f 分别为质量块中心在 z 方向的位移和左侧光纤固定点在 x 方向的位移; L_1 为轴承中心到左侧质量块质心的水平距离; L 为左侧质量块质心到光纤粘贴点之间的垂直距离。

柔性铰链转动刚度和光纤刚度分别为^[23]

$$k_h = \frac{EiR^2}{12} \left/ \frac{12s^4(2s+1)}{(4s+1)^{5/2}} \arctan \sqrt{4s+1} + \frac{2s^3(6s^2+4s+1)}{(4s+1)^2(2s+1)} \right. \quad (7)$$

$$k_f = \frac{E_f A_f}{y} \quad (8)$$

式中, $s = R/t$; E 为材料弹性模量; R 为直圆型柔性铰链切割半径; t 为最小厚度; i 为柔性铰链深度; E_f 为光纤弹性模量; A_f 为光纤横截面积; y 为光纤

长度,即两质量块间距。

根据力矩平衡,有

$$F_h \frac{y+b}{2} = k_h \theta, \quad (9)$$

$$F_f L_1 = 2k_f x_f L. \quad (10)$$

系统等效总刚度为

$$K = \frac{F}{x_m} = \frac{2k_h L_1 + 2k_f L^2 (y+b)}{(y+b)L_1^2}. \quad (11)$$

质量块和上下延伸杆的总转动惯量为

$$J = \frac{1}{12} [m(b^2 + h^2) + mL_1^2 + m_b(b^2 + 4L^2) + m_b L_1^2]. \quad (12)$$

式中, m 和 m_b 分别为质量块及其延伸杆的质量; h 为质量块高。

由机械能守恒得

$$\frac{1}{2} M_e (L_1 \dot{\theta})^2 = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2. \quad (13)$$

由式 (11) 和式 (13) 可知, FBG 加速度传感器的无阻尼固有频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_e}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2k_h L_1 + 2k_f L^2 (y+b)}{(y+b)J}}. \quad (14)$$

当外界振动加速度作用在质量块上时, 质量块和柔性铰链的力矩平衡方程为

$$maL_1 = \frac{k_h \theta}{(y+b)/2} L_1 + 2k_f L^2 \theta. \quad (15)$$

由式 (6) 和式 (15) 可知单光纤布拉格光栅应变为

$$\varepsilon = \frac{2x_f}{y} = \frac{maL_1 L}{y \left(\frac{k_h}{y+b} L_1 + k_f L^2 \right)}. \quad (16)$$

由式 (16) 可知 FBG 加速度传感器单栅灵敏度为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{a} = \frac{\lambda_B (1-P_e) \varepsilon}{a} = \lambda_B (1-P_e) \frac{mL_1 L}{y \left(\frac{k_h}{y+b} L_1 + k_f L^2 \right)}. \quad (17)$$

所设计 FBG 加速度传感器总灵敏度为 FBG₁ 和 FBG₂ 的叠加, 即 $2S$ 。由式 (14) 和式 (17) 可以看出, FBG 加速传感器固有频率 f 和灵敏度 S 互

相限制, 即提高 f 或 S 将导致另一参量降低。

4 优化设计与仿真分析

4.1 结构优化设计

通过理论分析发现, 对传感器固有频率和灵敏度影响较大的结构参数有: 光纤有效长度 y , 柔性铰链半径 R 、最小厚度 t 、深度 i , 质量块长 b 、宽 c 、高 h , 以及左侧质量块质心到光纤粘贴点之间的垂直距离 L 。上述参数对 FBG 加速度传感器固有频率和灵敏度的影响如图 3 所示。可以看出除了光纤有效长度 y 之外, 固有频率和灵敏度均随各结构参数值增大呈反方向变化, 即固有频率与灵敏度互相限制。

为了满足中高频振动测试需求, 所设计 FBG 加速度传感器应同时具有较宽工作频率范围和较高灵敏度。由图 3(a) 可知, 固有频率和灵敏度随着光纤有效长度 y 的增加而减小, 由于光纤光栅长度限制, 选择 $y = 5 \text{ mm}$ 。对于柔性铰链, 其参数取值主要影响系统刚度和固有频率。由于两质量块之间的宽度与光纤光栅的有效长度相等, 柔性铰链半径 R 即为两质量块之间宽度的一半, $R = 2.5 \text{ mm}$ 。由图 3(b) 可知, 传感器固有频率随柔性铰链厚度 t 的增大而增大, 但当 $t/R > 0.85$ 时, 柔性铰链刚度模型误差较大, 当 $0.25 < t/R < 0.85$ 时, 误差为 $10\% \sim 20\%$ ^[23-24]。因此, 选择 $t/R = 0.8$, 此时 $t = 2 \text{ mm}$ 。由图 3(c) 可知, 传感器固有频率随柔性铰链深度 i 增大而增大。但 i 增大, 加工难度增大, i 较小时固有频率小, 无法满足设计要求, 所以取 $i = 6 \text{ mm}$ 。由图 3(d) ~ 3(e) 可知, 质量块的宽度 c 和高度 h 对灵敏度的影响大于固有频率, 故应尽可能增大 c 、 h 以增加灵敏度, 但 c 、 h 值过大又会影响整体尺寸。由图 3(f) 可知, 质量块长度 b 取值应兼顾灵敏度和固有频率, 取值应尽量小以增加固有频率, 但不能小于 4 mm , 否则封装不牢固。综合考虑, 取 $b = 4 \text{ mm}$, $c = 35 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$ 。对于左侧质量块上质心到光纤粘贴点之间的垂直距离 L , 由图 3(g) 可知, 当 $L < 20 \text{ mm}$ 时, 固有频率随 L 变化不大, 但灵敏度快速增加; 当 $20 \text{ mm} < L < 35 \text{ mm}$ 时, 随着 L 下降, 灵敏度缓慢增加; 当 $L > 35 \text{ mm}$ 时, 固有频率随着 L 的增加, 快速减小, 灵敏度也开始缓慢减小。为

了保证传感器兼具较高的频率测量范围和较高灵敏度, 取 $L = 20 \text{ mm}$ 。综上所述, 中高频 FBG 加

速度传感器结构参数如表 1 所示, 理论固有频率为 3667.7 Hz , 单栅灵敏度为 16.10 pm/g 。

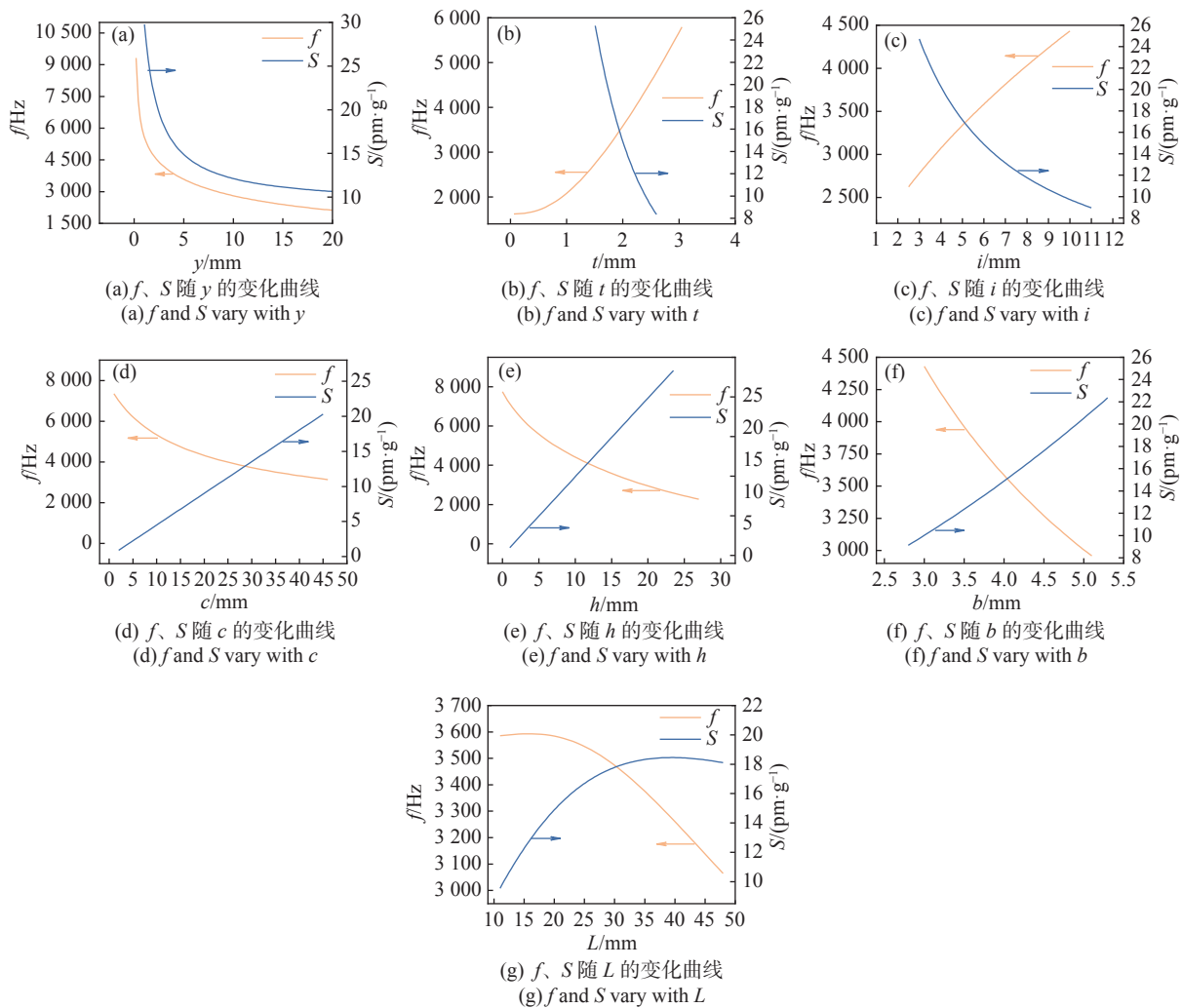


图 3 FBG 加速度传感器结构参数对固有频率和灵敏度的影响

Fig. 3 The influence of structural parameters of FBG accelerometer on natural frequency and sensitivity

表 1 加速度传感器尺寸参数

Tab. 1 Dimensional parameters of FBG accelerometer

参数	含义	值
P_e	有效弹光系数	0.22
λ_1	FBG ₁ 中心波长/nm	1540
λ_2	FBG ₂ 中心波长/nm	1550
R	柔性铰链切割半径/mm	2.5
t	柔性铰链最小厚度/mm	2
i	柔性铰链宽度(y方向长度)/mm	6
b	质量块长/mm	4
c	质量块宽/mm	35
h	质量块高/mm	15
L	质量块质心到延伸杆端部距离/mm	20
E	304不锈钢弹性模量/GPa	210
A_f	光纤横截面积/m ²	1.23×10^{-8}
E_f	光纤弹性模量/GPa	72

4.2 数值仿真分析

为了验证所设计 FBG 加速度传感器的动态特性, 建立基于 COMSOL 的传感器有限元仿真模型。将质量块、连接臂、延伸杆、柔性铰链视为一体结构, 材料为 304 不锈钢, 密度为 $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量为 210 GPa 。光纤光栅材料为二氧化硅, 采用二氧化硅圆柱体模拟光纤光栅, 密度为 $2500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量为 72 GPa 。然后, 基于该模型进行 FBG 加速度传感器频响特性和瞬态特性分析, 得到传感器固有频率仿真值为 3810.7 Hz , 如图 4 所示。工作频率平坦区为 $0 \sim 1200 \text{ Hz}$, 如图 5 所示。施加频率为 500 Hz , 幅值分别为 10 g 、 20 g 、 30 g 的正弦激励, 得到 FBG 加速度传感器

在 500 Hz 激振频率下的光纤光栅波长变化量随振动加速度的变化, 如图 6 (彩图见期刊电子版) 所示。根据灵敏度计算公式得出传感器灵敏度为 11.89 pm/g, 与理论计算值 16.1 pm/g 之间存在一定误差。其原因在于当柔性铰链取值确定且 $t/R=0.8$ 时, 柔性铰链刚度模型存在误差^[23-24], 因此仿真灵敏度比理论灵敏度小, 出现了约 20% 的误差。

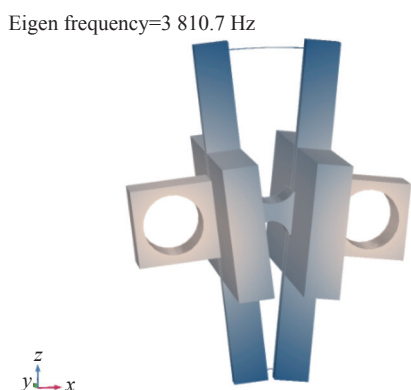


图 4 传感器一阶振型图

Fig. 4 Characteristic frequency of sensor

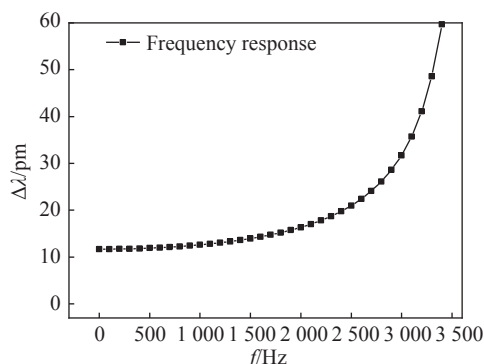


图 5 频响特性曲线仿真结果

Fig. 5 Simulation results of frequency response characteristics

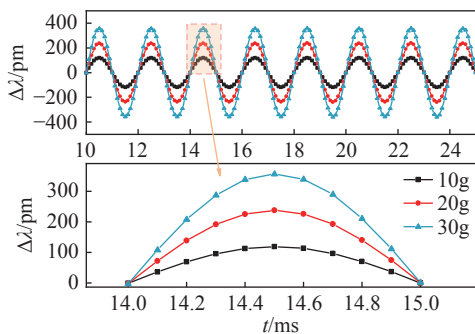


图 6 正弦激励下光纤光栅波长变化量 (500 Hz)

Fig. 6 Wavelength shift of FBG under different sinusoidal excitations (500 Hz)

5 实验研究

为了获得该传感器的工作频率范围和灵敏度, 在理论推导和数值仿真的基础上, 进行了 FBG 加速度传感器动态特性实验, 包括幅频特性实验、幅值特性实验、重复性实验、抗横向干扰实验等。

FBG 加速度传感器动态测试实验系统原理图如图 7 所示, 将 FBG 加速度传感器固定在振动台上, 然后连接至光纤光栅解调仪, 通过笔记本电脑记录 FBG 波长。其中, 振动台采用 IPA60H/M544A 电动振动试验系统; 额定频率为 2 ~ 2700 Hz, 额定加速度为 981 m/s²; 采用 Gator 高速光纤光栅解调仪, 波长为 1516 ~ 1584 nm, 波长稳定性为 5 pm, 采样频率为 10 kHz。实验中采用标准压电式加速度计获取振动加速度信号, 试验现场如图 8 所示。

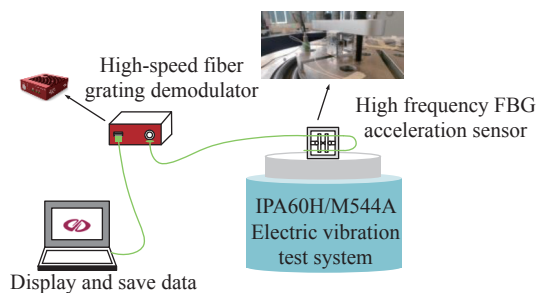


图 7 FBG 加速度传感器动态测试原理图

Fig. 7 Schematic diagram of dynamic test for FBG accelerometer

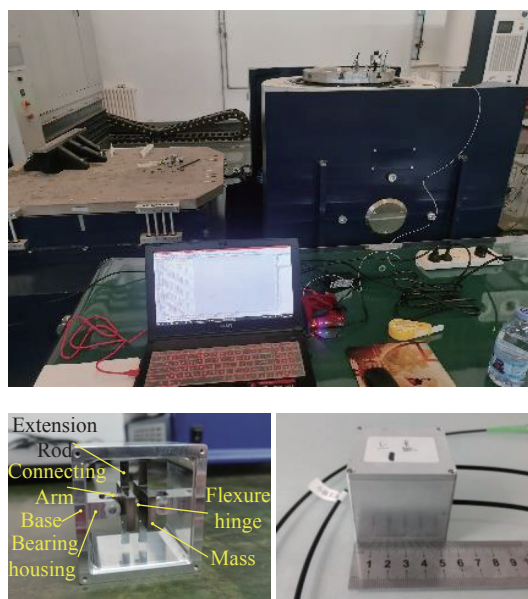


图 8 试验现场及传感器实物图

Fig. 8 Physical sensor and experimental site

5.1 幅频特性分析

为了确定所设计的 FBG 加速度传感器的工作频率范围,进行了幅频特性实验。实验中,先将振动台加速度大小固定为 10 g,采用标准压电加速度计测试加速度值作为参考;然后对 FBG 加速度传感器进行扫频测试,激振频率分别为 10 Hz、150~1 800 Hz(步长 150 Hz)、2000~2 300 Hz(步长 100 Hz)及 2 500、3 000、4 000、5 000 Hz,每次振动持续时间 30 s,通过 Gator 光纤光栅解调仪记录波长变化,最后获得传感器的幅频响应曲线,如图 9 所示。从图中可以看到频率响应范围平坦区为 10~1 200 Hz,共振频率为 2 200 Hz,与无阻尼固有频率 3 667.7 Hz 之间的差距主要是振动系统阻尼所致,所设计传感器阻尼比约为 0.8,满足传感器阻尼比的设计要求^[25-26]。

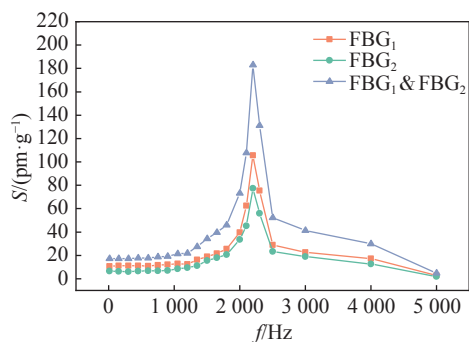


图 9 幅频特性曲线

Fig. 9 Amplitude frequency characteristic curve

5.2 幅值特性分析

FBG 加速度传感器灵敏度用于描述被测振动加速度与 FBG 总波长变化之间的数学关系。实验中,分别对振动台施加频率为 100、300、600 和 1 000 Hz 的振动加速度信号,加速度变化范围为 2~40 g,步长增加间隔为 4 g,受振动台功率限制,1 000 Hz 激振频率下的加速度最大为 30 g。得到的 FBG 加速度传感器单栅灵敏度和总灵敏度响应曲线分别如图 10~图 11 所示。可见:FBG 波长漂移量与加速度大小具有良好的线性关系,波长随着振动加速度的增大而线性增大;振动频率分别为 100、300、600、1 000 Hz 时,FBG₁ 灵敏度标定曲线斜率分别为 10.42、10.17、10.33、13.12,平均值为 11.01;FBG₂ 的灵敏度标定曲线斜率分别为 5.89、5.15、6.29、7.65,平均值为 6.25。如图 11 所示,FBG 加速度传感器的总灵敏度标定曲线斜率分别为 16.31、15.31、16.61、20.77,平均值为

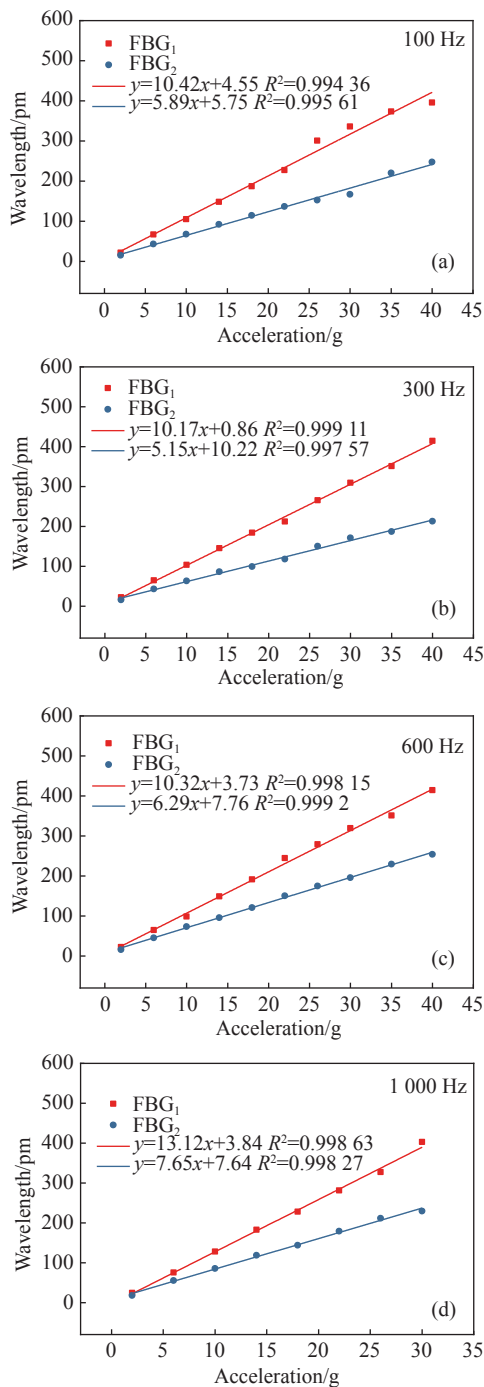


图 10 不同振动加速度信号下 FBG₁、FBG₂ 灵敏度标定曲线。(a)100 Hz; (b)300 Hz; (c)600 Hz; (d)1 000 Hz

Fig. 10 Sensitivity calibration curves at different vibration acceleration signals. (a) 100 Hz; (b) 300 Hz; (c) 600 Hz; (d) 1 000 Hz

17.25。各灵敏度标定曲线线性拟合度均大于 0.99,线性度良好。综上所述,FBG₁ 的标定灵敏度为 11.01 pm/g,FBG₂ 的标定灵敏度为 6.25 pm/g,传感器总灵敏度为 17.25 pm/g。由于柔性铰链刚度模型存在误差,FBG₁ 单栅实测灵敏度较理论值略低,但与有限元仿真分析灵敏度(11.89 pm/g)

基本一致。同时,由于手工封装存在误差,改变了FBG₂的有效光纤长度 y 。根据图3(a)中灵敏度 S 随有效光纤长度 y 的变化规律,FBG₂的有效光纤长度 y 增大导致其灵敏度与理论值相比偏小。

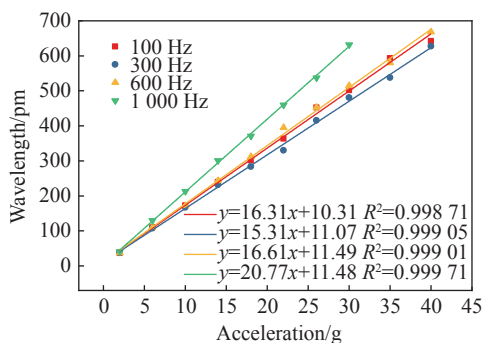


图 11 FBG 加速度传感器总灵敏度标定曲线

Fig. 11 Total sensitivity calibration curves of FBG acceleration sensor

对振动台施加 1000 Hz, 2~30 g 的振动激励,重复测量 3 次,获得的光纤光栅波长变化量数据如表 2 所示,计算得到的重复性误差为 2.33%,重复性良好。

图 12(彩图见期刊电子版)为不同激励频率下 FBG 加速度传感器的波长变化时程图,其中

图 12(a)~12(b) 振动频率分别为 100、300 Hz,加速度大小为 40 g,图 12(c)~(d) 振动频率分别为 600 Hz、1200 Hz,加速度大小为 10 g。由图 12 可知,FBG 加速度传感器能够很好获取外界输入的正弦激励,正弦波形完好表明 FBG 受力均匀,无啁啾与多峰现象。此外,同一时刻光栅 FBG₁ 输出波长曲线的波峰对应 FBG₂ 输出波长曲线的波谷,输出正弦波长相位差为 180°,可提高传感器测试灵敏度。

表 2 不同加速度下光栅波长变化量

Tab. 2 Wavelength shifts of FBG at different accelerations

加速度/g	波长变化量/pm				标准差/pm
	第一次	第二次	第三次	平均值	
2	42.01	42.37	44.73	43.04	1.48
6	130.60	130.36	134.71	131.89	2.45
10	213.68	217.52	217.53	216.25	2.22
14	301.16	295.53	300.51	299.07	3.08
18	371.33	378.76	385.35	378.48	7.01
22	460.05	457.72	462.66	460.14	2.47
26	538.20	538.20	527.20	534.53	6.35
30	632.40	640.91	626.22	633.18	7.38

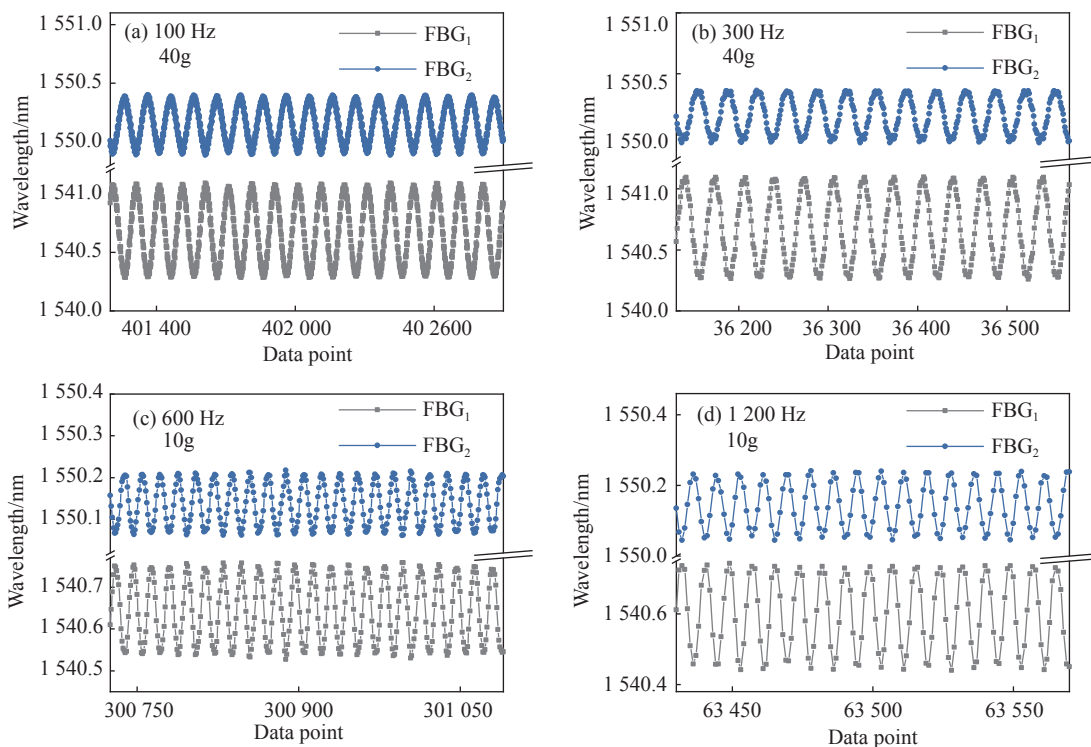


图 12 不同频率、加速度下 FBG 波长时程图。(a)100 Hz, 40 g; (b)300 Hz, 40 g; (c)600 Hz, 10 g; (d)1200 Hz, 10 g

Fig. 12 Time history curves of FBG wavelength caused by different vibration acceleration signals. (a) 100 Hz, 40 g; (b) 300 Hz, 40 g; (c) 600 Hz, 10 g; (d) 1200 Hz, 10 g

图 13 为各频率振动激励下的 FBG 加速度传感器光栅波长频谱分析图。图 13(a)、13(b) 为 100 Hz 和 300 Hz 激励频率下的光栅波长频谱分析图。从图中可看出: 除了振动台激励频率外, 还有一个振幅较大, 频率约为 2000 Hz 的振动信号。通过与未施加振动激励时 FBG 加速度传感

器光栅波长频谱图(图 13(c))进行对比, 发现也存在频率约为 2000 Hz 的振动信号。此外, 与传感器未安装在振动台上时的光栅波长频谱图(图 13(d))进行对比, 发现未出现此频率的振动信号。因此推断 2000 Hz 振动信号为振动台自身的振动。

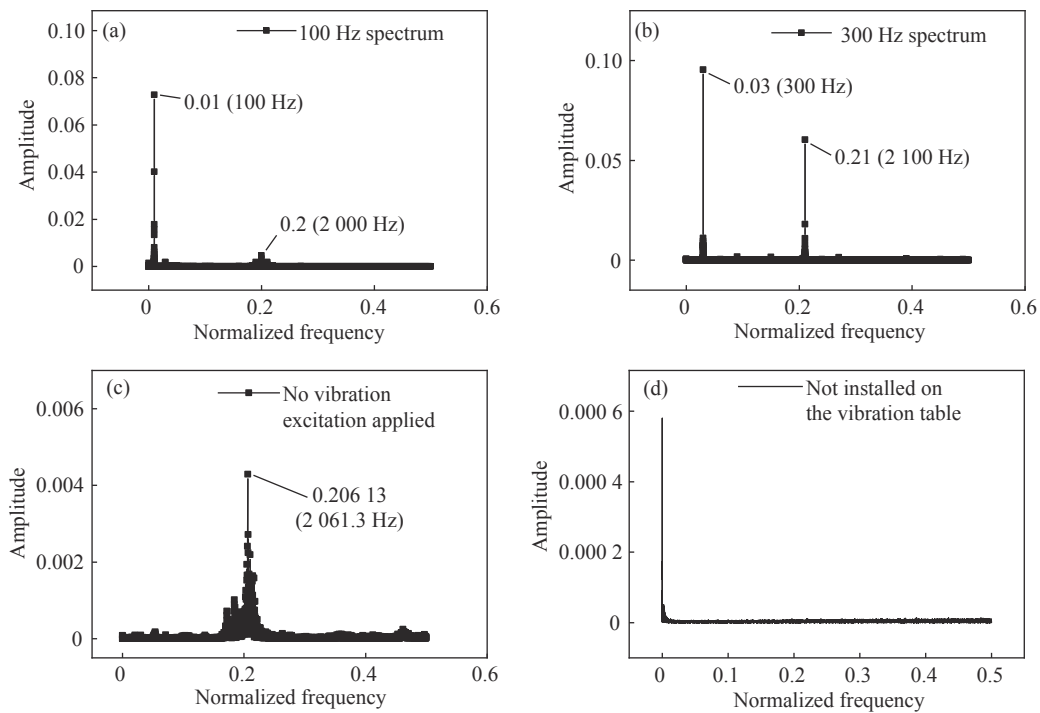


图 13 不同频率振动激励下 FBG 波长变化频谱图

Fig. 13 FBG wavelength spectrogram under different frequency vibration excitations

5.3 横向灵敏度分析

横向灵敏度比值是衡量加速度传感器质量优劣的重要指标, 通常以轴向灵敏度的百分数来表示, 如式 (19) 所示。实际应用环境中, 振动可能来自多个方向, 信号成分复杂。为了提高测量精度, 需要保证传感器不受其他方向振动信号的干扰。横向灵敏度比值一般表示为

$$S_r = \frac{S_t}{S_l} \times 100\% \quad (18)$$

式中, S_r 为横向灵敏度比值; S_t 为横向灵敏度; S_l 为轴向灵敏度。

在横向抗干扰实验中, 设置振动台振动方向垂直于其测振主轴方向, 激励信号为 22 g, 频率为 1000 Hz, 同时记录 FBG 波长。图 14 是振动方向为横轴与主轴方向时 FBG 加速度传感器输出波长时程对比图。由图 14 可知, 横向放置 FBG

加速度传感器时 FBG_1 波长变化量为 40.51 pm; 竖向放置 FBG 加速度传感器时 FBG_1 波长变化量为 283.45 pm, 横向灵敏度比值为 14.29%。产生横向干扰的原因主要是质量块绕 z 轴转动引起光纤光栅 x 方向的轴向变形。这是由于轴承存在

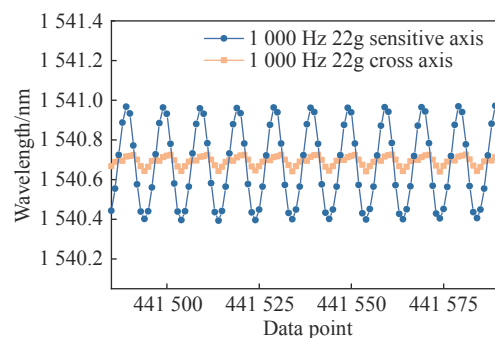


图 14 FBG 加速度传感器横向灵敏度

Fig. 14 Transverse sensitivity curves of FBG acceleration sensor

间隙,无法提供足够的横向刚度,使质量块在受到横向振动时产生横向位移。为了减小横向干扰,应在保证 z 轴方向刚度不改变的前提下,尽量增大 y 轴方向的刚度。

本文设计的传感器与现有 FBG 加速度传感器的结构与性能对比如表 3 所示。从表中可以看出,现有中高频加速度传感器多采用钢管、双质

量块和双铰链或多铰链等弹性元件,而本文采用轴承、双质量块和单柔性铰链结构,避免了多铰链回转精度低而导致的传感器线性度下降的问题。同时,本文所设计的结构,与 WANG^[15] 提出的结构相比,在固有频率和频响平坦区相近的情况下灵敏度更高;与 LI^[21] 提出结构相比,虽灵敏度略低,但固有频率高,且频响平坦区更宽。

表 3 FBG 加速度传感器的结构性能对比

Tab. 3 Performance comparison of FBG accelerometer designed in this paper and reported in other Refs.

文献	结构	固有频率/Hz	平坦区	灵敏度/($\text{pm}\cdot\text{g}^{-1}$)	温度补偿
WU ^[14]	双悬臂梁	8658	5000 Hz以下	0.44	是
WANG ^[15]	钢管-质量块弹性结构	3806	1200 Hz以下	4.01	是
LUO ^[19]	对称双柔性铰链	890	50 ~ 600 Hz	41	否
LI ^[21]	三柔性铰链	2800	50 ~ 1000 Hz	21.8	是
本文提出的结构	轴承和柔性铰链	3810.7	10 ~ 1200 Hz	17.25	是

6 结 论

本文提出了一种基于轴承、柔性铰链以及对称质量块结构的中高频 FBG 加速度传感器,理论分析了它的灵敏度与谐振频率,在此基础上进行了传感器结构的优化设计,制作了可扩展成为轴承铰链复合结构的双光栅加速度传感器实物。传感器封装尺寸为 $55\times 40\times 55$ mm,体积较小,便于实际安装使用。实验研究了传感器幅频响应特

性、线性响应特性、重复性及横向抗干扰特性。研究表明:传感器无阻尼固有频率为 3810.7 Hz,共振频率为 2200 Hz,阻尼比为 0.8,稳定工作频带为 10 ~ 1200 Hz,加速度灵敏度高达 17.25 pm/g,可实现中高频振动信号的测试,线性度大于 0.99,重复性误差为 2.33%。由于铰链刚度模型误差及封装原因,实测灵敏度与理论计算值有一定差距。后续需改进封装工艺、减小误差,同时改进轴承和铰链结构减小横向干扰。

参考文献:

- [1] 顾宏灿,黄俊斌,程玲,等. 20~1250 Hz 光纤激光加速度传感系统设计[J]. *中国光学 (中英文)*, 2017, 10(4): 469-476. GU H C, HUANG J B, CHENG L, *et al.*. 20-1250 Hz fiber laser acceleration sensing system[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 469-476. (in Chinese)
- [2] LI J H, MA H, YANG CH Y, *et al.*. Research progress of the laser vibration measurement techniques for acoustic-to-seismic coupling landmine detection[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 487-502.
- [3] BAASCH B, HEUSEL J, ROTH M, *et al.*. Train wheel condition monitoring via cepstral analysis of axle box accelerations[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1432.
- [4] GOTO H, KANEKO Y, YOUNG J, *et al.*. Extreme accelerations during earthquakes caused by elastic flapping effect[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1117.
- [5] 朱峰,唐毓涛,高晨轩. 弓网离线电弧对 CRH380BL 型动车组速度传感器的电磁干扰机理及抑制[J]. *中国铁道科学*, 2016, 37(6): 69-74. ZHU F, TANG Y T, GAO CH X. Mechanism and suppression of electromagnetic interference of pantograph-catenary arc to speed sensor of CRH380BL electric multiple unit[J]. *China Railway Science*, 2016, 37(6): 69-74. (in Chinese)
- [6] 吴虎,孔勇,王振伟,等. 基于端点检测与信号重组的光纤分布式传感信号识别[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1106005.

- WU H, KONG Y, WANG ZH W, *et al.*. Fiber distributed sensing signal recognition based on endpoint detection and signal recombination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1106005. (in Chinese)
- [7] JIANG SH D, WANG Y Y, ZHANG F X, *et al.*. A high-sensitivity FBG accelerometer and application for flow monitoring in oil wells[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 74: 103128.
- [8] QIU ZH CH, SUN R, TENG Y T, *et al.*. Design and test of a low frequency fiber Bragg grating acceleration sensor with double tilted cantilevers[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127663.
- [9] 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.
WEI L, LIU ZH, LI H CH, *et al.*. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for "Shi"-shaped beam[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106004. (in Chinese)
- [10] ZHAO X F, JIA ZH A, FAN W, *et al.*. A fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation[J]. *Optik*, 2021, 241: 166993.
- [11] 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.
- [12] 魏莉, 余玲玲, 姜达州, 等. 基于膜片与菱形结构的光纤布拉格光栅加速度传感器[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0910003.
WEI L, YU L L, JIANG D ZH, *et al.*. Fiber Bragg grating accelerometer based on diaphragm and diamond structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0910003. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] WU H, LIN Q J, ZHAO N, *et al.*. A high-frequency acceleration sensor based on fiber grating[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 7003808.
- [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] LI Y ZH, MA Q Q, CHEN F Y, *et al.*. A flexible hinge accelerometer based on dual short fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2022, 344: 113695.
- [17] LIANG L, WANG H, LI Z CH, *et al.*. Miniature bending-resistant fiber grating accelerometer based on a flexible hinge structure[J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 33502-33514.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] QIU ZH CH, ZHANG J Q, TENG Y T, *et al.*. Hinge-type FBG acceleration sensor based on double elastic plate[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 24319.
- [21] LI Z CH, LIANG L, WANG H, *et al.*. A medium-frequency fiber Bragg grating accelerometer based on flexible hinges[J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 6968.
- [22] FRIEDRICH R, LAMMERING R, HEURICH T. Nonlinear modeling of compliant mechanisms incorporating circular flexure hinges with finite beam elements[J]. *Precision Engineering*, 2015, 42: 73-79.
- [23] 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 ZH Y. Deduction of design equation of flexure hinge[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(1): 125-128,137. (in Chinese)
- [24] 周晓林, 崔长彩, 范伟, 等. 柔性铰链的3种模型计算和分析[J]. *机械设计*, 2011, 28(5): 5-9.
ZHOU X L, CUI CH C, FAN W, *et al.*. Computation and analysis of the three models of flexure hinge[J]. *Journal of Machine Design*, 2011, 28(5): 5-9. (in Chinese)
- [25] 谢官模. 振动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
XIE G M. *Vibration Mechanical*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [26] 何道清, 张禾, 石明江. 传感器与传感器技术[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2020.
HE D Q, ZHANG H, SHI M J. *Sensors and Sensor Technology*[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)

作者简介:



宋颖(1981—),女,河北衡水人,教授,博士生导师,2010年于北京交通大学获得博士学位,现为石家庄铁道大学教授,主要从事交通工程结构健康监测、智能传感测试技术等方面的研究工作。E-mail: songy@stdu.edu.cn



李剑芝(1978—),女,河北定州人,教授,博士生导师,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,主要从事光纤传感技术和结构健康监测等研究工作。E-mail: lijianzhigang@163.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:40元,全年480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