

DOI:10.16136/j.joel.2022.07.0831

基于双杠杆放大的中高频 FBG 加速度传感研究

李辉栋^{1*}, 代佳和¹, 高宏¹, 傅海威¹, 乔学光²

(1. 西安石油大学 理学院, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学 物理学院, 陕西 西安 710127)

摘要:提出了一种基于双杠杆放大的中高频光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 加速度检波器, 理论分析并实验研究该检波器加速度灵敏度与幅频特性, 实验结果表明: 检波器中心波长变化与外界加速度变化具有较好的线性关系, 检波器的固有频率为 612 Hz, 平坦区范围为 20—250 Hz, 线性度为 0.995, 加速度灵敏度为 106.7 pm/g, 交叉灵敏度小于 4.9%, 有良好的横向抗干扰能力。

关键词: 光纤布拉格光栅; 加速度传感; 杠杆放大; 中高频振动

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)07-0680-06

Research on medium and high frequency FBG acceleration sensing based on double-lever amplification

LI Huidong^{1*}, DAI Jiahe¹, GAO Hong¹, FU Haiwei¹, QIAO Xueguang²

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. School of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: A medium and high frequency fiber Bragg grating (FBG) acceleration detector based on lever amplification is proposed. The acceleration sensitivity and amplitude-frequency characteristics of the detector are theoretically analyzed and experimentally studied. The experimental results show that the change of central wavelength of the detector has a good linear relationship with the change of external acceleration. The natural frequency of the detector is 612 Hz and the flat area range is 20—250 Hz. The linearity is 0.995, the acceleration sensitivity is 106.7 pm/g, and the cross sensitivity is less than 4.9%. It has good anti-interference ability.

Key words: fiber Bragg grating (FBG); acceleration sensing; lever amplification; medium and high frequency vibration

1 引言

光纤地震检波器以光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 作为地震检波器系统的核心, FBG 地震检波器通常将 FBG 粘贴在机械结构内, 利用弹性元件和质量体构成的惯性系统响应外界振动激励, 如加速度、速度、位移、频率等诸多物理量的变化, 弹性元件的形变量带动 FBG 拉伸或压缩, 从而对 FBG 中心波长进行调制, 通过对 FBG 波长信息的解调即可获得加速度信息^[1-3]。具有

灵敏度高、结构紧凑、长期稳定可靠, 及复用能力强、易组网等优点。在生产测井、长输油气管线检测、地面地震波勘探等领域得到较好的应用^[4-8]。

2017年, GUTIERREZ等^[9]利用FBG开发了一种低重量加速度计, 它由一个六边形的格子空心圆柱体组成, 共振频率在500 Hz以上, 实验测试, 传感器的灵敏度为19.65 pm/g。2017年, ZHANG等^[10]提出了一种二维FBGs加速度计, 该加速度计由柔性铰链和两个FBGs组成, 实验结果表明, 加速度计的 x/y 方向谐振频率分别为

* E-mail: lhd@xsyu.edu.cn

收稿日期: 2021-12-09 修订日期: 2022-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61735014, 61927812)、陕西省自然科学基金项目(2019GQ-810)、陕西省教育厅一般专项科研项目(22JK0502)和西安石油大学大学生创新创业训练计划项目(S202110705036)资助项目

1050/1060 Hz。加速度计的频率响应范围为 50—900 Hz, x/y 方向灵敏度为 13.1/12.0 pm/g。2021 年, ZHANG 等^[11]设计并分析了一种由双膜片和 h 型铰链组成的 FBG 加速度计, 采用 h 型铰链结构, 突破了灵敏度与谐振频率之间的限制。采用干涉解调法对 FBG 加速度计进行解调, 测试结果表明, 加速度灵敏度在 1—1 kHz 之间为 32 dB re pm/g。

可以看出, 在中高频段的检波实验中, 不仅需要优化检波器的幅频特性与灵敏度特性, 也需要对检波器的结构进行优化。近年来, 基于柔性铰链的微定位平台在微装配、超精密加工等领域得到了广泛的应用^[12-14], 本文是依据放大机构对输出位移进行放大的思想, 采用杠杆放大机构, 它具有结构简单、放大率高等特点, 文中以 FBG 加速度检波为研究对象, 设计了一种基于杠杆放大原理的加速度检波器, 其中质量块用来响应外界环境加速度的变化, 同时产生位移, 又可对杠杆进行驱动, 2 个杠杆采用对称形式, 质量块振动带动杠杆的 2 个端点产生位移, 而光栅就固定在杠杆端点, 杠杆端点发生位移从而拉伸 FBG, FBG 中心波长发生漂移, 从而根据波长的漂移量来反馈加速度的变化。

2 检波器的设计

FBG 加速度检波器结构如图 1 所示, 结构参数见表 1。检波器结构是基于杠杆放大机构进行设计的, 包含有 6 个圆型铰链, 2 个直梁型铰链。质量块

由 2 个直角梁固定, 直梁型铰链刚度小、位移大, 可以保证质量块能够很好地响应外界加速度的改变, 杠杆的驱动端用圆型铰链与质量块连接, 杠杆的支点部分采用 2 个圆型铰链, 既作为支点, 也起到位移导向的作用, 保证末端沿指定方向运动, 2 个铰链串联, 降低了支点部分的机械强度, 可以较为灵活地转动, 而圆型铰链又保证其结构的刚度。传感结构采用对称结构, 对称的结构使机构整体在振动方向不受到切向破坏力, 且在非驱动位移方向上的受力抵消, 不会产生此方向上的附加位移, 避免了多余的寄生耦合运动, 大大提高了机构的运动精度。质量块受到外界沿 z 方向激励信号的作用时, 质量块在惯性力的作用下, 上下振动, 振动会引起 2 个杠杆 C 端之间的距离扩大或缩小, 而光纤光栅就固定在 C 端, 从而将振动信号传至 FBG, 引起 FBG 中心波长变化, 根据波长的变化来反馈所检测的振动信号。

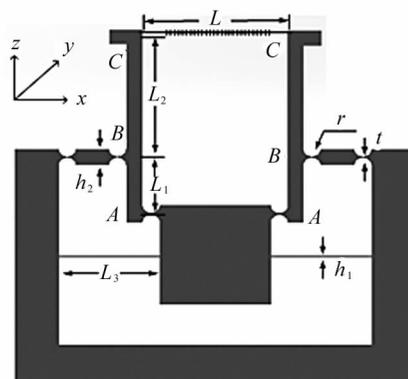


图 1 检波器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detector structure

表 1 结构参数

Tab. 1 The structural parameters

Symbol	Define	Numerical
E	Young's modulus	$1.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
P_e	Effective elastic-optic coefficient	0.22
L	Length of fiber	10 mm
L_1	Effective length of lever power arm	11.72 mm
L_2	Effective length of lever resistance arm	24.18 mm
L_3	Hinge length of straight beam	18 mm
b	Width of structure	15 mm
h_1	Thickness of beam	0.5 mm
r	Radius of circular hinge	1.5 mm
h_2	Height of circular hinge	3.5 mm
t	Minimum thickness of circular hinge	0.5 mm

3 工作原理

杠杆系统由 A、B、C 3 处组成,其中 AB 为动力臂,BC 为阻力臂。结合图 1,A 处为动力输入点,圆型铰链结构,与质量块相连;B 为支点,圆型铰链结构;C 为动力输出端,与 FBG 相连。当质量块响应外界振动时,受迫振动,带动 A 端产生位移 ΔD ,经杠杆放大后,使 C 端输出位移 Δn ,根据杠杆放大原理(图 2)和相似三角形理论可以求得 C 处位移 Δn 与 A 处输入位移的比值等于 BC(L_2)的长度与 AB(L_1)的长度比,即放大倍数:

$$\beta = \frac{L_2}{L_1} \quad (1)$$

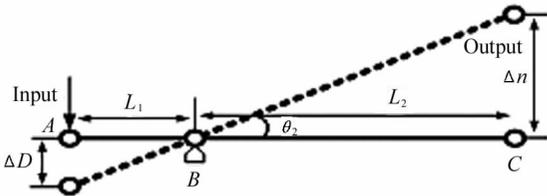


图 2 杠杆放大原理图

Fig. 2 Schematic diagram of lever amplification

质量块受迫振动,可以使直梁和正圆型柔性铰链发生转动, t, h_2, b 分别为圆型铰链的最小厚度、高度和宽度,其中 b 既是圆型铰链的宽度也是直梁型铰链的宽度,同时也是整个结构的宽度, r 为圆型铰链的半径, L_3 为直梁型铰链梁的长度,直梁与圆形铰链的刚度分别为^[14]:

$$k_{\text{Circular hinge}} = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}}, \quad (2)$$

$$k_{\text{straight beam}} = \frac{EI}{L_3}, \quad (3)$$

式中, I 为直梁铰链梁杆截面上关于 z 轴的惯性矩。

由于检波器的整体变化幅度很小,质量块的位移量 $\Delta D \ll L_3$, L_3 为直角梁的长度,所以 θ 值很小,故而:

$$\frac{\Delta D}{L_3} = \tan\theta \approx \theta, \quad (4)$$

结合杠杆原理,可知 C 端位移量为:

$$\Delta n = \beta\Delta D = \frac{L_2}{L_1}\Delta D. \quad (5)$$

传感结构整体为对称结构,先对传感结构的一侧进行分析。当传感结构响应外界振动时,结构受到外力的驱动振动做功,便会得到相应的动能与势能,机构的势能可表示为^[15]:

$$E_p = \frac{1}{2}k\Delta D^2 = \frac{1}{2}k_{\text{straight beam}}\theta_1^2 \times 2 +$$

$$\frac{1}{2}k_{\text{Circular hinge}}\theta_2^2 \times 3 =$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{2k_{\text{straight beam}}L_3^2L_1^2 + 3k_{\text{Circular hinge}}L_2^2}{L_1^2L_2^2} \right) \Delta D^2, \quad (6)$$

式中, θ_1 为直梁的偏转角度, θ_2 为杠杆偏转角。由上式可知传感结构的刚度 k 可表示为:

$$k = \frac{4k_{\text{straight beam}}L_3^2L_1^2 + 6k_{\text{Circular hinge}}L_2^2}{L_1^2L_2^2}. \quad (7)$$

该传感结构的整体质量为 m ,则其固有频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (8)$$

将式(7)代入式(8),可得:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4k_{\text{straight beam}}L_3^2L_1^2 + 6k_{\text{Circular hinge}}L_2^2}{mL_1^2L_2^2}}. \quad (9)$$

光纤光栅受到的轴向应变为:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (10)$$

由于传感结构为对称结构, ΔL 可以写成:

$$\Delta L = 2\Delta n = 2 \frac{L_2}{L_1} \Delta D, \quad (11)$$

式中, L 为封装光纤的长度, ΔL 为杠杆 C 端偏离平衡点的位移。 L_3, b, h_1 分别为梁的长度、宽度、厚度, E 为材料的弹性模量,质量块在响应外界加速度的情况下受到的力为 $F=ma$,则质量块的位移为:

$$\Delta D = \frac{4L_3ma}{Ebh_1^3}, \quad (12)$$

则 ΔL 可以进一步写成:

$$\Delta L = \frac{8L_3ma}{Ebh_1^3} \frac{L_2}{L_1}, \quad (13)$$

FBG 中心波长的相对变化量为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon, \quad (14)$$

结合式(13),式(14)可重新写成:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon = (1 - P_e) \frac{8L_3ma}{Ebh_1^3} \frac{L_2}{L_1} \frac{1}{L}. \quad (15)$$

检波器对加速度的响应灵敏度 S 为 FBG 中心波长变化量与加速度变量的比值,即:

$$S = \frac{d\lambda_B}{da} = (1 - P_e) \frac{8L_3m}{Ebh_1^3} \frac{L_2}{L_1} \frac{1}{L} \lambda_B. \quad (16)$$

4 实验测试

4.1 实验装置

将制作好的检波器垂直安装在精密振动台上,

在同一个台面上也安装有标准振动检波器,用于信号校准,将检波器一端接入光纤光栅解调仪,并且将振动台与解调仪均接入计算机,便于控制振动信号的输出以及检波器振动信号数据的采集,实验装置如图3所示。振动台型号为WS-Z30,最大加速度为±10 g,最大位移为±5 mm。解调仪为4通道,扫描频率为1 kHz,波长范围为1510—1590 nm,波长重复误差为0.05—1.00 pm。

为提高加速度的检测灵敏度,同时考虑到加速度的工作范围,质量块在振动过程中,给光纤始终附有一定的预应力,在超净恒温实验室环境下,室温24℃,实验所用的FBG中心波长为1542.36 nm,栅区长度为10 mm,图4为封装前后FBG的反射光谱的变化,实验中对光栅预拉3.5 nm,在封装后进行波长稳定性实验后,振子在平衡位置处的FBG中心波长稳定后的波长为1544.78 nm,最终拉伸2.42 nm。

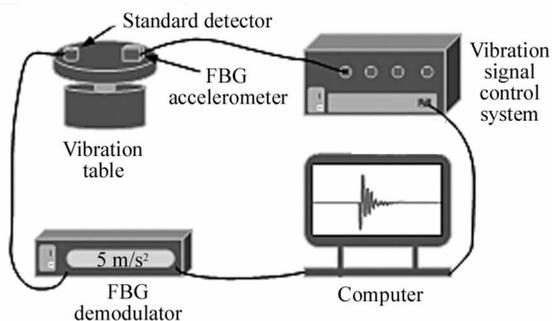


图3 实验装置图

Fig. 3 Diagram of experimental device

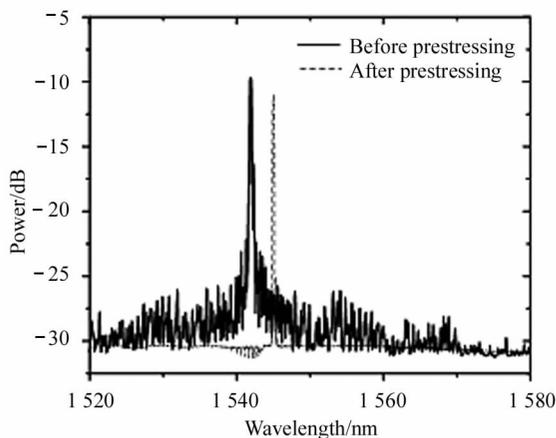


图4 封装前后FBG的反射光谱变化
 Fig. 4 Reflection spectrum changes of FBG before and after encapsulation

4.2 幅频与冲击响应

为获取检波器实际的固有频率,将检波器固定在振动台上,振动台输出正弦激励信号幅度固定在

5 m/s²。激励信号频率从20 Hz开始,到800 Hz截止;在幅频曲线平坦区,频率间隔为50 Hz,上升区,调整频率间隔为2 Hz来对检波器进行测试。该检波器的幅频响应曲线如图5所示。实验测得检波器的共振频率为612 Hz,平坦区即工作频段为20—250 Hz。

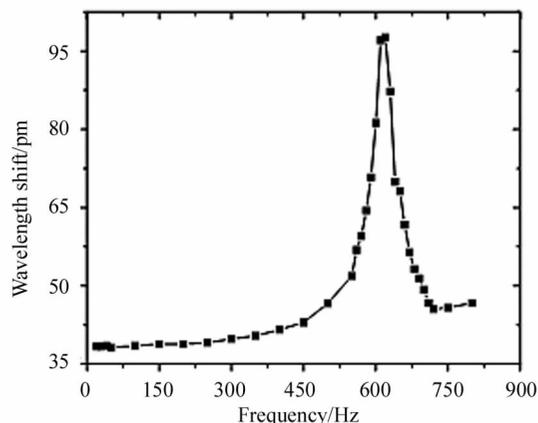


图5 检波器的幅频响应

Fig. 5 Amplitude-frequency response of detector

此外,又进行冲激响应实验,检波器的脉冲信号有详细的频谱信息,能有效地反映检波器加速度的响应特性。实验时在振动台上施加脉冲信号,解调仪及时记录每次所施加的脉冲信号,扫描频率为1 kHz,脉冲信号的时域响应如图6所示,图7为其对应的频谱。从检波器时域响应的频谱信息可以看出检波器的固有频率为612 Hz,而计算的理论值为586 Hz,实测值与理论计算的固有频率略有差别,主要原因是:传感结构中圆型铰链与直角铰链的刚度为近似计算、光栅的轴向应变也是近似计算,这是引起误差的主要原因;同时检波器的制作,尤其是铰链

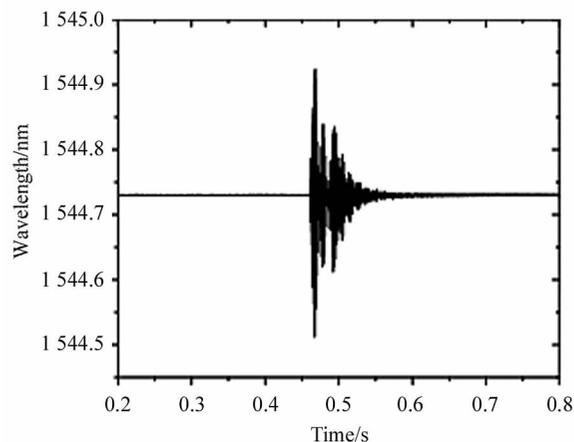


图6 脉冲信号的时域响应

Fig. 6 Time-domain response of pulse signal

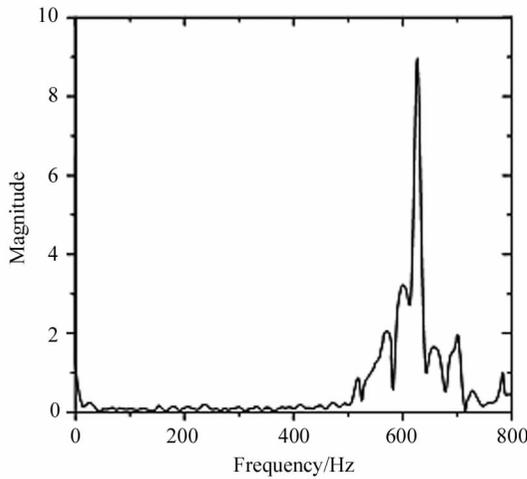


图7 脉冲信号的频谱

Fig. 7 Spectrum of pulse signal

的制作过程中存在加工精度问题,在部分精细或者超薄位置加工不精确,尤其是圆型铰链处两弧顶之间的距离以及直角梁的厚度均略微大于设计尺寸,而厚度对铰链有着较大影响,这也进一步证实了实测的固有频率大于理论频率。

4.3 工作频段的灵敏度响应

灵敏度是FBG加速度传感器的一个关键参数,灵敏度越高,其拾取信号的能力越好。线性度反映了拟合线和满标度输出之间最大偏差的百分比。实验选取50 Hz、100 Hz、150 Hz、200 Hz 4个频率进行测试。实验时分别将测试频率固定,改变各频率所对应加速度的值,加速度的变化范围为1—15 m/s²,间隔为2 m/s²。图8为检波器在工作区域不同频率下的振动幅值与加速度的相应关系,结果表明,检波器的波长漂移量与加速度有良好的线性关系,加速度响应灵敏度为106.7 pm/g,线性拟合度R² = 0.995,而根据式(16)可知,理论计算灵敏度129.8 pm/g,理论灵敏度高于实测灵敏度的原因与固频差异类似,在机械结构部分精细或者超薄位置加工不精确,导致部分关键部位的厚度均略微大于设计尺寸,这些影响会降低检波器的实际灵敏度。

为了检测检波器对加速度变化的线性响应,在实验中,保持振动台正弦激励信号频率为200 Hz,激励信号幅度取0.1 g、0.9 g、1.5 g,以FBG中心峰值波长作为检波器的输出,如图9所示,检波器的响应灵敏度为105.6 pm/g,线性拟合度为0.998,说明加速度的变化与FBG中心波长的变化具有良好的线性关系。

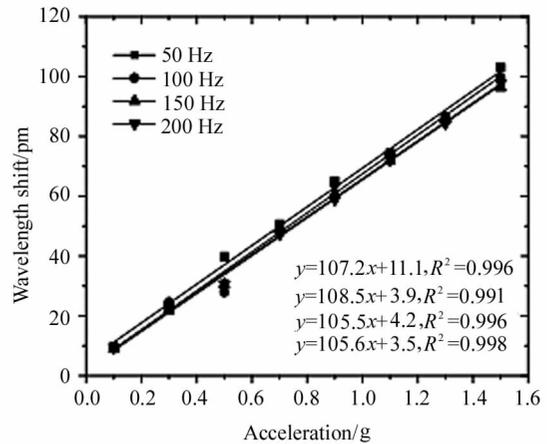


图8 灵敏度曲线

Fig. 8 Sensitivity curve

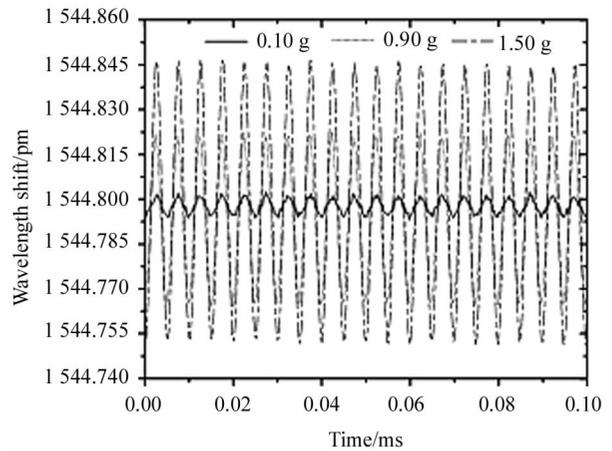


图9 200 Hz 时域中的波长响应

Fig. 9 Wavelength response in the time domain at 200 Hz

4.4 横向抗干扰能力

加速度检波器抗横向干扰能力也是检测性能的主要指标之一,可用交叉灵敏度与主轴灵敏度的比值来评价,比值越小,抗干扰能力越强。实验中激励信号值保持在5 m/s²,激励信号频率由20 Hz增加至250 Hz,该系列信号分别施加在检波器主轴和90°交叉轴上。图10为检波器敏感方向激振和非敏感方向激振的波长漂移量幅值-时间对比曲线。实验结果表明横向干扰度约为4.9%,检波器具有良好的横向抗干扰能力。

5 结论

提出了一种基于双杠杆放大且两点封装的中高频FBG加速度检波器,实验研究了检波器的加速度响应、幅频特性和抗干扰特性。实验结果表明检

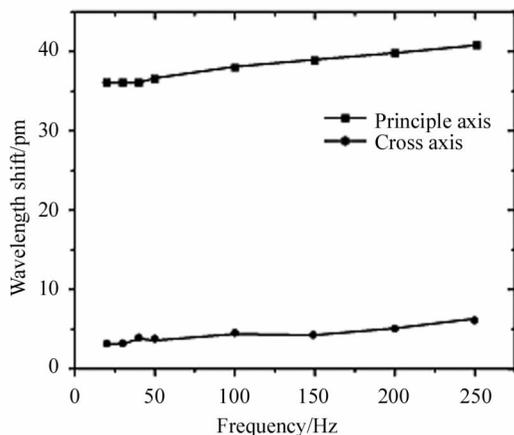


图10 加速度计的抗干扰特性

Fig. 10 The anti-interference characteristic of the accelerometer

波器波长响应良好,在 20—250 Hz 频率变化范围内,加速度变化在 1—15 m/s² 范围内,其响应灵敏度为 106.7 pm/g,线性度为 $R^2=0.995$;横向干扰度为 4.9%,表明其加速度传感性能良好,且结构简单,封装易实现,同时改变铰链半径或厚度以及质量块的大小,可进一步拓展检波器的测量范围,有望在工程领域取得实际应用。

参考文献:

- [1] LIU W M, DAI Y T, WEI Y. High sensitivity and low-frequency acceleration sensor based on double fiber Bragg gratings[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(9): 911-918.
刘文敏,戴玉堂,魏禹.基于双光纤光栅的高灵敏度低频加速度传感器[J].光电子·激光,2021,32(9):911-918.
- [2] ZHANG X C, SUN Z H, YANG Y Y, et al. Fiber Bragg grating accelerometer based on L-shaped cantilever beam[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(7): 696-702.
张绪成,孙志慧,杨元元,等.基于L型悬臂梁的光纤光栅加速度传感器[J].光电子·激光,2021,32(7):696-702.
- [3] LIANG L, CAI Y P, DAI Y T, et al. Fiber Bragg grating acceleration sensor based on single elliptical hinge[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(3): 234-240.
梁磊,蔡彦璞,戴玉堂,等.一种基于单一椭圆铰链的光纤光栅加速度传感器[J].光电子·激光,2019,30(3):234-240.
- [4] LIU Q P, LIU W F, WANG C F, et al. High figure of merit and low cross sensitivity fiber Bragg grating accelerometer based on double grid-diaphragms[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(24): 27503-27509.
- [5] LIN Q P, HE X, QIAO X G, et al. Design and modeling of a high sensitivity fiber Bragg grating-based accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(14): 5439-5445.
- [6] XIE Z C, TAN Y G, HUANG B, et al. High sensitivity fiber Bragg grating acceleration sensor based on rigid hinge[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(15): 8223-8231.
- [7] LIU Q P, JIA Z A, FU H W, et al. Double cantilever beams accelerometer using short fiber Bragg grating for eliminating chirp[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17): 6611-6616.
- [8] 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.
- [9] GUTIERREZ N, GALVIN P, LASAGNI F. Low weight additive manufacturing FBG accelerometer; design, characterization and testing[J]. Measurement, 2018, 117: 295-303.
- [10] ZHANG Y S, ZHANG W G, ZHANG Y X, et al. 2-D medium-high frequency fiber Bragg gratings accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(3): 614-618.
- [11] ZHANG F X, JIANG S 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.
- [12] GAO F T. Design optimization and control of a bridge-lever-type amplifier[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
高福天.桥式杠杆放大机构的设计、优化及控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [13] HUANG W Q, SHI X Q, WANG Y. Design of diamond piezoelectric micro displacement amplification mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 803-809.
黄卫清,史小庆,王寅.菱形压电微位移放大机构的设计[J].光学精密工程,2015,23(3):803-809.
- [14] LU Y F, FAN D P, CHEN F J, et al. Analysis and verification of the rotation stiffness of flexure hinge[J]. Machinery & Electronics, 2010(1): 3-6.
鲁亚飞,范大鹏,陈峰军,等.柔性铰链转动刚度分析与验证[J].机械与电子,2010(1):3-6.
- [15] LI X, ZHOU S W, DING B X, et al. Design and analysis of the micro-positioning platform based on the novel two-level lever amplification mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(2): 102-107.
李玄,周双武,丁冰晓,等.基于新型二级杠杆机构微定位平台的设计与分析[J].机械设计,2021,38(2):102-107.

作者简介:

李辉栋 (1988—),男,在读博士,实验师,主要从事光纤传感、光纤地震检波技术方面的研究。