

引用格式: YU Dakuan, WANG Xiangyu, GAO Hong, et al. High-Frequency Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Symmetric Flexible Hinges (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1006003

禹大宽,王向宇,高宏,等. 基于对称铰链的光纤布拉格光栅高频加速度检波器(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10):1006003

基于对称铰链的光纤布拉格光栅高频加速度 检波器(特邀)

禹大宽¹,王向宇¹,高宏²,刘钦朋²,樊伟²,乔学光³

(1 西北工业大学 物理科学与技术学院 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710129)

(2 西安石油大学 理学院 陕西省油气资源光纤探测工程技术中心, 西安 710065)

(3 西北大学 物理学院, 西安 710069)

摘 要:针对油气开采微地震监测高频检波器的要求,提出了一种基于对称铰链的光纤布拉格光栅高频加速度检波器结构,分析了该检波器的振动传感原理,利用仿真软件分析了该结构模型的谐振频率,同时对检波器的幅频特性、加速度响应灵敏度、横向抗干扰性能、冲击响应等性能进行了实验研究。实验结果表明:基于对称铰链结构的光纤布拉格光栅检波器谐振频率为 1 200 Hz,与利用软件仿真的谐振频率 1 191 Hz 结果一致;在工作频率 20~800 Hz,加速度灵敏度约为 10.2 pm/g,线性系数为 0.999 8;交叉轴灵敏度约为主轴的 5%;在谐振频率附近有很好的冲击响应特性。该检波器加工工艺简单、可靠性高、工作频带宽、灵敏度高、横向抗干扰性好,在石油开采等领域有很好的应用前景。

关键词:光纤布拉格光栅;应变传感;加速度检波器;铰链;幅频响应

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225110.1006003

0 引言

光纤传感器自 20 世纪 70 年代出现以来,引起了众多研究者的持续关注和不断深入研究。而光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器是其中最突出的代表。由于 FBG 具有耐腐蚀、重量轻、体积小、灵敏度高、可准分布式测量等独特优势,且对温度和应变灵敏,科研工作者对其应用进行了广泛深入的研究,已经制作了温度、应变、压力、湿度、流量、振动等众多物理量的传感器^[1-4]。特别是在振动测试技术领域如桥梁隧道、航空航天、油气勘探开发等领域光纤光栅振动传感技术取得较广泛的应用。而在油气田二次开发过程中,常常需要采用水力压裂方法对压裂效果进行评价进而提高采收率,微地震裂缝监测^[5]是大型压裂重要的技术手段,微地震信号频率高(200~1 500 Hz),实现压裂过程中高频微地震信号检测的关键就是高频高灵敏度的三分量检波器。传统的电磁类三分量检波器常采用 X、Y、Z 垂直安装的方式进行检波,但电磁类检波器存在不耐高温、易受电磁干扰、不耐腐蚀等固有缺陷,不能长期进行监测。光纤 F-P 腔干涉型传感器是一种测量加速度的重点考虑方案之一。它不但具有抗电磁干扰、重量轻、体积小、耐高温、耐腐蚀等性能,还具有单个传感器灵敏度高的优点。2019 年 MA W Y 等^[6]提出基于微梁非本征型 F-P 干涉振动传感器,其在 0.5 g~5 g(g 为重力加速度)范围,300 Hz 时加速度灵敏度为 11.1 mV/g。2014 年 CERVANTES F G 等^[7]提出一种改进的基于 F-P 腔的加速度计,它将单片熔融石英振荡器和光纤微腔结合在一起,该加速度的灵敏度达到 $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。2018 年, ZHAO Z H 等^[8]提出基于高速白光干涉解调的光纤 F-P 加速度,得到该传感器的谐振频率为 270 Hz,在 10~120 Hz 频率范围轴向灵敏度为 3.86 $\mu\text{m/g}$,在 $\pm 30 \text{ g}$ 测量范围其分辨率为 $8.5 \times 10^{-6} \text{ g}$ 。但由于光纤 F-P 信号解调主要是相位,信号解调比较复杂,且传感器需要较高的微加工精度,

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61735014,61927812),陕西省教育厅项目(Nos.18JS093,20JS122)

第一作者:禹大宽(1980—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为光纤振动传感技术。Email: yudakuan04@163.com

导师(通讯作者):乔学光(1955—),男,教授,博导,主要研究方向为光纤传感及光纤测井技术。Email: xgqiao@nwu.edu.cn

收稿日期:2022-05-15;录用日期:2022-06-27

<http://www.photon.ac.cn>

重复性较差,且F-P腔腔长有限其动态范围较窄,不适用于油气井中微地震多点同时监测。而FBG检波器具有耐高温、耐腐蚀、不受电磁干扰、易于准分布式测量等独有优势。研究人员对FBG振动传感器进行了广泛和深入的研究,提出了不同的传感器结构。2017年LI T L等^[9]设计了膜片式FBG振动传感器,FBG采用两点封装,得到的传感器灵敏度为31.25 pm/g,谐振频率为300 Hz,由于谐振频率较低不能满足高频检波的要求;2019年LIU Q P等^[10]提出双膜片结构封装的FBG振动传感器结构,对传感器结构进行了优化分析,传感器灵敏度达到152 pm/g,固有频率提高到441 Hz,谐振频率比较低,且膜片结构封装工艺复杂;2020年YAN B等^[11]设计了两个柔性铰链构成的FBG加速度传感器结构,其固有频率为800 Hz,灵敏度为54 pm/g,但未对传感器的横向抗干扰性进行讨论;2020年GUO T等^[12]提出利用3D打印技术六边形结构的高灵敏度FBG地震检波器,灵敏度达到了421.4 pm/g,但其谐振频率只有124.9 Hz,不能实现高频检波。

基于油气田压裂过程微地震监测高频检波的需求,本文设计了基于对称柔性铰链的FBG高频加速度检波器结构,分析了检波器的传感原理,利用有限元软件对该结构模型进行了模态分析,确定了加工的结构参数。并在实验室对其幅频特性、加速度响应灵敏度、横向抗干扰性等进行了实验研究,该检波器加工工艺简单、可靠性高、工作频带宽、灵敏度高、横向抗干扰性好,在石油开采等领域有很好的应用前景。

1 检波器结构设计及传感理论分析

1.1 检波器结构

设计的对称柔性铰链FBG加速度检波器如图1。检波器由基座、双孔铰链、FBG和质量块组成。基座上有螺纹孔便于检波器安装在振动测试台和三分量检波器壳体上。考虑到实际应用中耐高温耐腐蚀等环境的要求,选择奥氏体不锈钢棒材作为加工材料。双孔铰链是利用线切割的方法在圆柱形不锈钢棒上沿横向对称切割出两个小的半圆,基座和质量块上下部沿轴向均刻有0.5 mm槽,FBG放置在基座和质量块上部的槽内,通过环氧胶将FBG和基座和质量块进行固化粘贴,在固化过程中给FBG施加一定的预应力,利用光纤光栅解调仪(SM125)监测FBG的波长,使FBG初始波长由1 548.205 nm经固化后变为1 550.805 nm。当有外界振动信号时,检波器基座随着被测物体一起振动,质量块在惯性力作用下绕铰链中心相对于基座做微幅振动,带动FBG进行拉伸和压缩,引起FBG波长漂移。FBG的中心波长的变化与温度和应变^[13]有关,可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (1)$$

式中, P_e 是光纤光栅的弹光系数, λ_B 是光纤光栅的中心波长, ϵ 和 ΔT 分别为光纤光栅的轴向应变和温度变化, α 是光纤光栅的热膨胀系数, ξ 为光纤光栅的热光系数。通常,由于在振动测量过程中,加速度信号变化较快,温度的影响可以忽略不计。

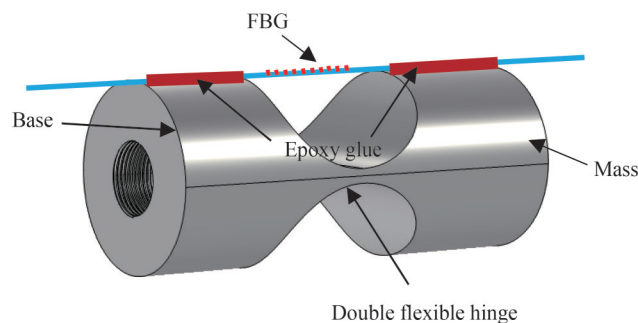


图1 FBG加速度检波器结构示意图
Fig.1 Schematic of the acceleration geophone structure

1.2 检波器灵敏度分析

检波器正视图结构如图2。在检波器敏感的竖直方向施加加速度为 a 的信号,作为自由端的质量块在惯性力矩的作用下绕铰链中心 o 做微幅振动。由力矩平衡方程^[14],可得

$$mad - k_t\Delta lR - K\theta = 0 \quad (2)$$

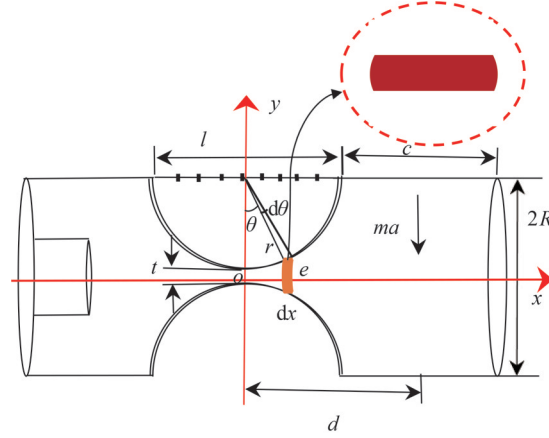


图2 检波器正视图结构

Fig.2 Structure of the geophone elevation view

式中, m 是质量块的质量, d 为质量块质心到铰链中心 o 的距离, k_f 为光纤光栅的弹光系数, Δl 为原长为 l 的光纤光栅的伸长量, R 为质量块圆形截面的半径, K 为铰链的转动刚度^[15], θ 为质量块绕铰链中心的转动角度。在 x 轴上取微元, 在受力作用前截面微元垂直于 x 轴, 则此微元截面是半径为 R 的圆的一部分, 如图2中红色虚线部分, 设微元高度为 e , 厚度为 dx , 此微元的惯性矩^[16]为 I_z , 则

$$I_z = \int_A y^2 dA = 2 \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} y^2 \sqrt{R^2 - y^2} dy = \left[\frac{R^4}{4} \arcsin \frac{y}{R} - \frac{y}{4} \sqrt{R^2 - y^2} (R^2 - 2y^2) \right]_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} = \frac{R^4}{2} \arcsin \frac{e}{2R} - \frac{e}{2} \sqrt{R^2 - \frac{e^2}{4}} \left(R^2 - \frac{e^2}{2} \right) \quad (3)$$

由几何关系得

$$dx = dr \sin \theta = r \cos \theta d\theta \quad (4)$$

$$e = t + 2r(1 - \cos \theta) \quad (5)$$

式中, r 是横向对称切割出的两个小半圆的半径, t 是铰链厚度。根据材料力学^[17]基本公式, 在力矩 M_z 作用下铰链的角变形 α_z 可表示为

$$\alpha_z = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{M_z r \cos \theta}{EI_z} d\theta = \frac{M_z r}{E} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta}{I_z} d\theta \quad (6)$$

铰链的转动刚度 K 表示为

$$K = \frac{M_z}{\alpha_z} = \frac{E}{r \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta}{I_z} d\theta} = \frac{E}{r \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \theta}{\frac{R^4}{2} \arcsin \frac{e}{2R} - \frac{e}{2} \sqrt{R^2 - \frac{e^2}{4}} \left(R^2 - \frac{e^2}{2} \right)} d\theta} \quad (7)$$

当FBG受到外界轴向拉伸产生应变变化时, 式(1)可改为

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \epsilon = (1 - P_e) \frac{\Delta l}{l} \quad (8)$$

光纤在轴向应力作用下, 光纤的弹性系数 k_f 可表示为

$$k_f = \frac{A_f E_f}{l} \quad (9)$$

式中, A_f 、 E_f 分别为光纤光栅的横截面积和弹性模量。由于铰链旋转角度很小, 由几何关系得

$$d = r + \frac{c}{2} \quad (10)$$

$$R = \frac{t}{2} + r \quad (11)$$

$$\theta = \frac{\Delta l}{R} \quad (12)$$

式中, c 为质量块的长度, 光纤光栅加速度检波器灵敏度 S 定义为光纤光栅波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 与加速度 a 的比值^[18], 由式(2)~(12)可得

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{a} = \frac{(1 - P_c)\lambda_B}{l} \frac{m \left(r + \frac{c}{2} \right) \left(\frac{t}{2} + r \right)}{\frac{A_i E_i}{l} \left(\frac{t}{2} + r \right)^2 + K} \quad (13)$$

1.3 检波器谐振频率分析

谐振频率是加速度检波器的一个重要参数, 它决定检波器的工作频带。通常谐振频率越高, 工作频带越宽。设质量块绕铰链中心的转动惯量为 J , 根据文献[17]线弹性体的应变能公式, 可得光纤的应变能为

$$V_i = \frac{1}{2} k_i (\theta R)^2 \quad (14)$$

根据文献[11]得到铰链的弹性势能 V_j 为

$$V_j = \frac{1}{2} K \theta^2 \quad (15)$$

根据文献[11]得到质量块的动能 T_m 为

$$T_m = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (16)$$

将式(14)~(16)代入保守力的拉格朗日方程^[19]得

$$J\ddot{\theta} + (k_i R^2 + K)\theta = 0 \quad (17)$$

质量块绕铰链中心转动的转动惯量 J 为

$$J = \frac{mR^2}{4} + \frac{mc^2}{12} + md^2 \quad (18)$$

求解式(17)并将式(18)代入, 得到检波器的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_i R^2 + K}{m \left(\frac{R^2}{4} + \frac{c^2}{12} + d^2 \right)}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\frac{A_i E_i}{l} \left(r + \frac{t}{2} \right)^2 + K}{m \left[\frac{\left(r + \frac{t}{2} \right)^2}{4} + \frac{c^2}{12} + \left(r + \frac{c}{2} \right)^2 \right]}} \quad (19)$$

由式(13)和式(19)可知, 检波器灵敏度和谐振频率与FBG参数(E_i , A_i 和 l)、质量块质量 m 及铰链结构参数(t , r , c)等密切相关。FBG选用193 nm准分子激光器在载氢单模光纤上刻写, 栅区长度10 mm, 其 k_i 恒定。 m 与其密度及参数 R 和 c 有关, 当铰链厚度 t 越小, r 越大, m 越大时, 铰链刚度越小, 此时检波器灵敏度越高, 而谐振频率越低。为了满足井下高频检波频率的要求以及三分量检波中小尺寸圆柱体安装的要求(检波器整个长度 ≤ 30 mm, 直径 ≤ 20 mm,), 选定奥氏体不锈钢并采用线切割制作检波器结构体, 把谐振频率1 200 Hz作为目标函数, 相应的尺寸参数设为约束条件, 同时考虑加工难易及封装问题, 利用COMSOL软件对每个参数进行参数化扫描得到其与谐振频率的关系曲线如图3。图3(a)是在 $r=5.5$ mm, $t=1$ mm时质量块长度 c 与谐振频率 f_0 的变化曲线。图3(b)是 $R=6$ mm且满足式(11)时铰链厚度 t 与谐振频率的变化曲线。根据这些参数对频率的影响确定实际加工的尺寸大小。

表1是优化后的检波器的结构参数, 图4是利用该结构参数利用仿真软件进行的模态分析。得到该结构体的一阶特征频率为1 191 Hz, 振动方向是X方向, 二阶特征频率为7 039.4 Hz, 二阶特征频率的振动方向是Y方向, 两个特征频率相差很大, 横向振动对竖直工作方向的振动影响很小, 该检波器有很好的横向抗

干扰性能。利用COMSOL软件在结构体上施加重力,分析其频域特征,得到粘贴FBG的右侧一点的位移随频率的变化,该位移也就是FBG在1g加速度作用下伸长量,绘制的位移随频率的变化曲线如图5。选取150 Hz时的位移 1.3027×10^{-4} mm代入式(8),得到其灵敏度为15.7 pm/g。

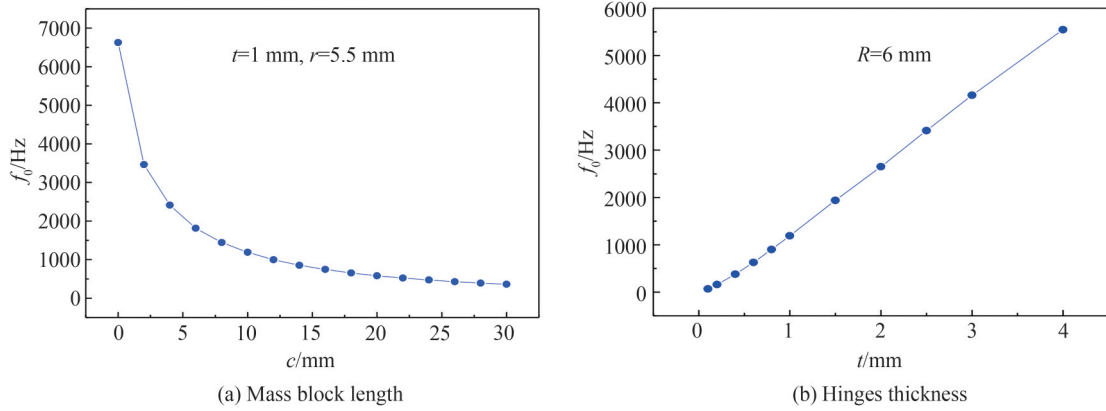


图3 结构参数对频率的影响
Fig.3 The effects of the structural parameters on the resonant frequency

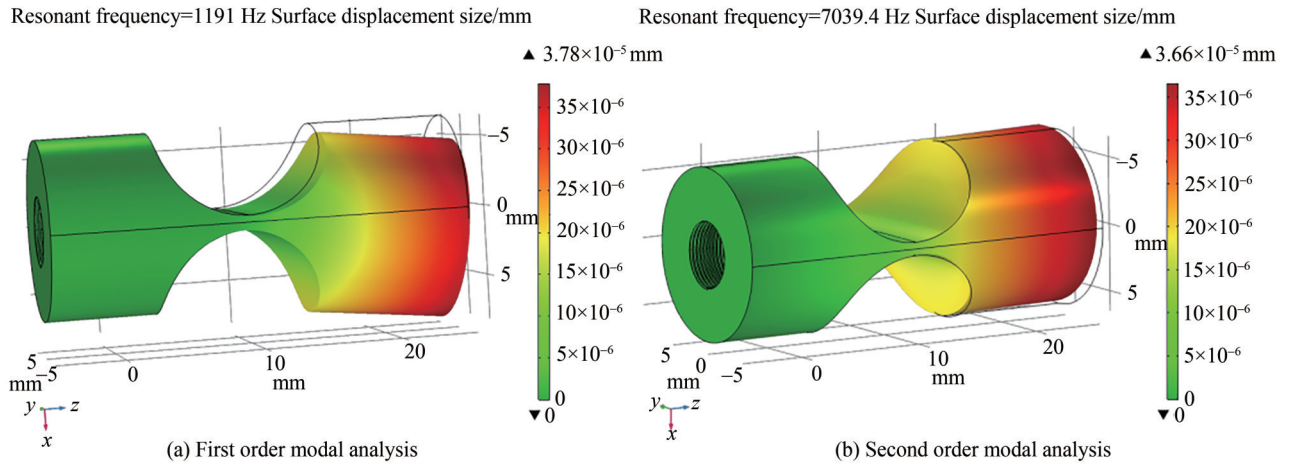


图4 加速度检波器结构的模态分析
Fig.4 The modal analysis of the geophone

表1 检波器优化后的参数

Table 1 Structure parameters of the optimized geophone

Symbol	Physical quantity	Value
l	Distance between two bonding points of the FBG	10.0 mm
t	Thickness of hinge	1.0 mm
r	Radius of hinge	5.5 mm
R	Radius of mass block	6 mm
c	Length of mass block	10.0 mm
E	The young's modulus of backing material	193 GPa
μ	Poisson's ratio of backing material	0.28
ρ	Density of backing material	7 930 kg/m ³
E_f	The young's modulus of fiber	73 GPa
A_f	The cross-sectional area of fiber	1.227×10^{-8} m ²
P_e	The effective elastic coefficient of fiber	0.22

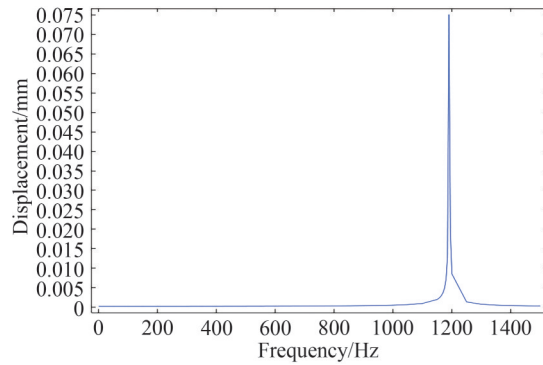


图5 加速度检波器频率响应仿真分析

Fig.5 Frequency response simulation analysis of geophone

2 实验及结果分析

为了获得检波器的传感性能,需要对检波器的幅频响应、灵敏度和横向抗干扰性进行实验测试。检波器的振动实验测试系统如图6所示。该实验系统包括小型精密振动台(JZ-40)、振动台控制仪(WS5921)、加速度传感器放大器(WS-ICP-8)、电荷放大器(WS-2401)、功率放大器(GF-500W)、标准加速度传感器(CK-8305)、实验室自研的四通道光纤光栅解调仪(扫描频率5 000 Hz,波长范围1 508~1 588 nm,分辨率0.1 pm)、计算机。实验中,将封装好的FBG检波器和标准加速度传感器分别固定在振动台上,通过计算机振动台控制软件控制振动台的输出信号,使振动台产生激震,标准加速度传感器对FBG加速度传感器的灵敏度和频响曲线等进行标定,光纤光栅解调仪和FBG检波器连接,完成信号的解调,并将解调后的信号传输到计算机中,完成信号的采集和保存。

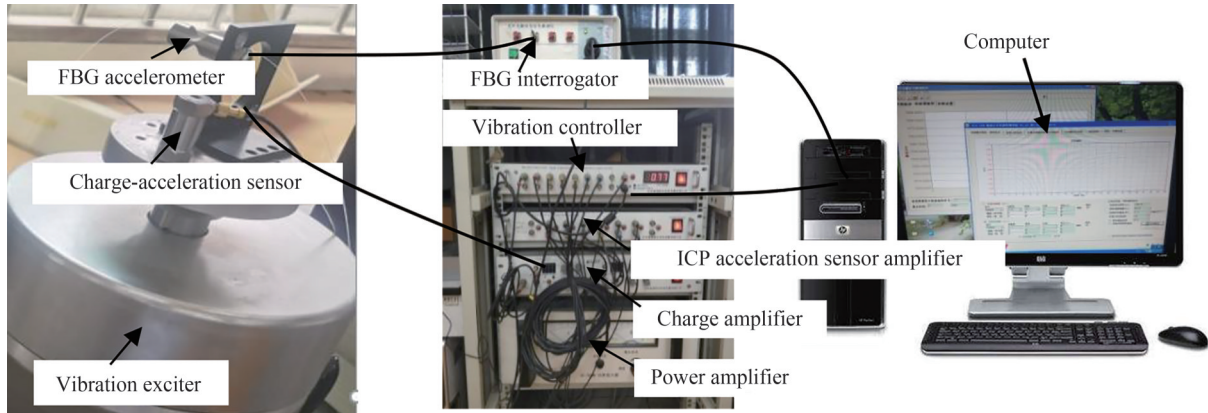


图6 振动实验系统

Fig.6 Vibration experimental system

传感器的幅频特性决定传感器的频率响应范围。对设计的光纤光栅加速度检波器的幅频特性进行了实验测试。将振动台加速度设置为 10 m/s^2 , 振动频率从20 Hz开始,以20 Hz为间隔递增。当接近固有频率时,间隔改为10 Hz进行实验,将测量的数据记录并进行处理。得到检波器的幅频响应曲线如图5,从图7可知,检波器的谐振频率为1 200 Hz,与利用软件仿真出的谐振频率1 191 Hz基本一致。差异的原因可能由于传感器的加工误差等造成。检波器的工作频带为20~800 Hz。实验灵敏度与仿真灵敏度有差异的原因可能是结构体与FBG应变传递耦合^[20]不是100%以及加工尺寸的误差影响等。

传感器的灵敏度是衡量传感器性能的另一重要指标。对设计的光纤光栅加速度检波器的灵敏度特性进行了实验测试。振动台正弦激励的频率保持在600 Hz,加速度的幅值由0.5g增加到6g,以0.5g作为间隔递增。得到检波器的灵敏度响应曲线如图8,结果表明该工作频率下的灵敏度为10.2 pm/g,光纤光栅波长漂移量与加速度有良好的线性关系,线性灵敏度为0.999 8。

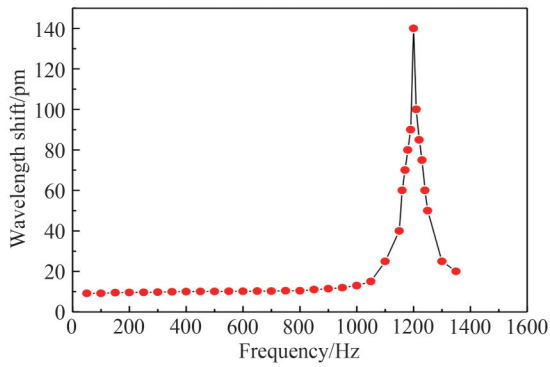


图 7 检波器的幅频特性曲线

Fig.7 Amplitude-frequency curve of the geophone

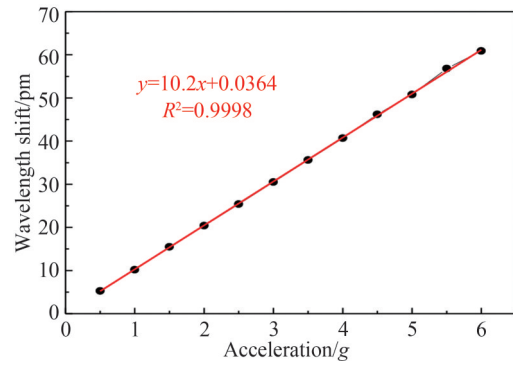


图 8 检波器的加速度响应曲线

Fig.8 Acceleration response curve of the geophone

将检波器旋转 90° 进行横向抗干扰能力的测试,设置振动台加速度为 $2g$,频率设置为 600 Hz ,测量检波器在该状态下光纤光栅的波长漂移量,将该数据与工作方向加速度等于 $2g$ 的振动数据绘制在一起,得到横向抗干扰曲线,如图 9。从图 9 中可知,检波器的交叉轴灵敏度约为主轴的 5% ,检波器有很好的抗干扰能力。

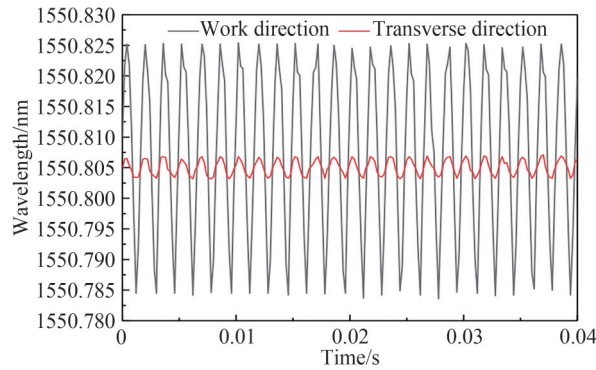


图 9 检波器的横向抗干扰特性

Fig.9 The transverse anti-interference characteristics of geophone

冲击响应反映了加速度检波器本身对外界瞬时信号的响应特性。实验过程中静置振动台,给振动台施加一个垂直于振动台平面的瞬时敲击,得到光纤光栅检波器在此冲击下的时域响应谱,如图 10(a)所示,并将此时域响应谱进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),得到该检波器的频率响应谱。如图 10(b)所示,由图分析可知,该检波器在固有频率附近有较好的冲击响应特性,冲击响应的固有频率与理论分析的谐振频率基本一致。

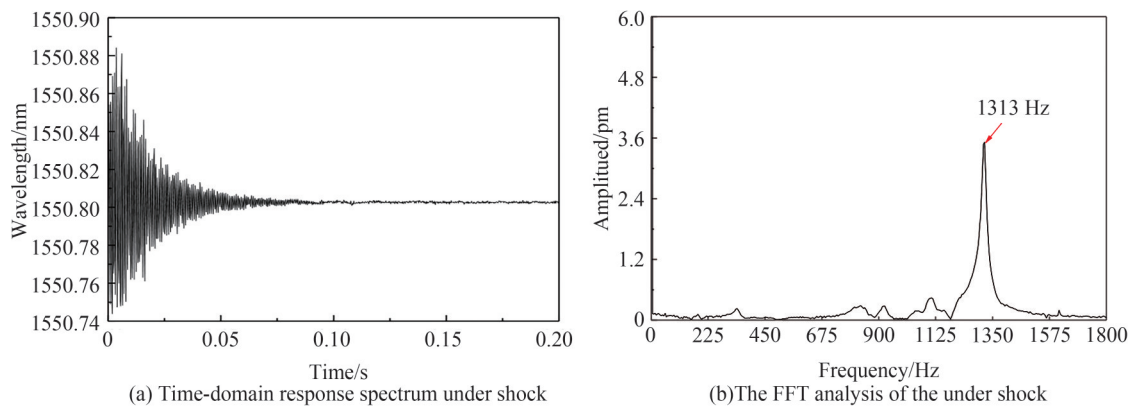


图 10 冲击响应的时域和频域曲线

Fig.10 Time-domain and frequency-domain curve of the impulse response

3 结论

本文提出了一种基于对称铰链结构的光纤光栅加速度检波器结构,并对其灵敏度和谐振频率进行了理论分析,采用有限元软件对影响灵敏度和谐振频率相关参数如铰链厚度、铰链半径、质量块大小、光纤粘贴长度等进行合理选择,利用有限元仿真软件得到优化的参数的检波器的谐振频率为 1 191 Hz,灵敏度为 15.7 pm/g。将该结构进行封装后对其传感特性进行了实验测试,实验结果表明:该检波器的谐振频率为 1 200 Hz,在 20~800 Hz 频带具有很好的线性响应灵敏度,灵敏度为 10.2 pm/g,光纤光栅波长漂移与加速度有很好的线性关系,线性度为 0.999 8,横向干扰度约为 5%。该检波器在石油开采等振动监测领域有很好的应用前景。

参考文献

- [1] DU Y, HAN Q, HU H F, et al. High-sensitivity refractive index and temperature sensor based on cascading FBGs and droplet-like fiber interferometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 299(11):1-7.
- [2] WANG Yun, DAI Yutang, LIU Wenmin, et al. Optimization design of fiber Bragg grating two-dimensional accelerometer based on flexure hinge[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 48(8): 0806003.
王贇,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, 50(2): 0806003.
- [3] JIA Zhenan, YANG Kaiqing, ZHAO Xianfeng, et al. A new FBG thermal liquid flow sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 48(8): 0206002.
贾振安,杨凯庆,赵显锋,等. 一种新型FBG热式液体流量传感器[J]. *光子学报*, 2021, 48(8): 0206002.
- [4] FENG Dequan, LUO Xiaodong, FAN Wei, et al. Strain sensing performance of material packaged fiber Bragg grating in wide temperature rang[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(13): 1306002.
冯德全,罗小东,樊伟,等. 材料封装型光纤布拉格光栅宽温域应变传感性能研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2106004.
- [5] ZHANG Yilun, YU Zhichao, HU Tianyue, et al. Multi-trace joint downhole microseismic phase and arrival picking method based on U-Net[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(6):2073-2085.
张逸伦,喻志超,胡天跃,等. 基于U-Net的井中多道联合微地震震相识别和初至拾取方法[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(6):2073-2085.
- [6] MA W Y, ZHANG H, ZHANG L C, et al. Miniature on-fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric vibration sensors based on micro-cantilever beam[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2019, 8(1):293-298.
- [7] CERVANTES F G, KUMANCHIK L, PRATT J T, et al. High sensitivity optomechanical reference accelerometer over 10 kHz[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(22):221111.
- [8] ZHAO Z H, YU Z H, CHEN K, et al. A fiber-optic fabry-perot accelerometer based on high-speed white light interferometry demodulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(9):1562-1567.
- [9] LI T L, SHI C Y, TAN Y G, et al. A diaphragm type fiber Bragg grating vibration sensor based on transverse property of optical fiber with wemperature compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(4):1021-1029.
- [10] LIU Q P, HE X, QIAO X G, et al. Design and modeling of a high sensitivtiy fiber Bragg grating-based accelerometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5439-5445.
- [11] 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.
- [12] GUO T, ZHANG T X, LI Y Z, et al. Highly sensitive FBG seimometer with a 3D-printed hexagonal configuration[J]. *Journal of Lightwave Technolog*, 2020, 38(16):4588-4595.
- [13] WANG Xiangyu, QIAO Xueguang, YU Dakuan. Refractive index insensitive two parameter sensor based on dual mode LPFG[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2021, 48(3):200247.
王向宇,乔学光,禹大宽. 基于双模LPFG折射率不敏感双参量传感器[J]. *光电工程*, 2021, 48(3):200247.
- [14] 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.
- [15] YONG Y K, LU T F, HANDLEY D C. Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations[J]. *Precision Engineering*, 2008, 32(2):63-70.
- [16] 刘鸿文,林建兴,曹曼玲. 材料力学I(第6版) [M]. 北京:高等教育出版社,2017.
- [17] 张小晴,张红,杨怡. 材料力学[M]. 北京:机械工业出版社,2021.
- [18] 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.
- [19] LI W, 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.

- [20] 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.

High-Frequency Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Symmetric Flexible Hinges (Invited)

YU Dakuan¹, WANG Xiangyu¹, GAO Hong², LIU Qinpeng², FAN Wei², QIAO Xueguang³

(1 Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(2 Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

(3 School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of existing optical sensors to meet the requirements of high-frequency vibration of micro-seismic monitoring in oil and gas production field, a high frequency FBG accelerometer based on symmetrical flexible hinges is proposed. The accelerometer is based on a compact structure consisting of a base, double hole hinge, a fiber Bragg grating and a mass block. There are threaded holes in the base to install the geophone on the vibration test table. Two small semi-circular rings are cut out on a cylindrical stainless steel material along the transverse symmetry using a line cutting technology. The upper and lower parts of the base and the mass block are engraved with 0.5 mm grooves along the axis. FBG is placed in the the upper part of the base and the mass block of the fiber trench. Both ends of FBG are glued to the mass block and base by epoxy adhesive. The FBG certain is applied to some prestress during packaging. When there is an external vibration signal, the base of the detector vibrates with the measured object. The mass block vibration around the center of the hinge relative to the base under the action of inertial force, driving FBG to stretch and compress, leading to a wavelength drift of FBG. The principle of vibration sensing is analyzed. The sensitivity and the resonant frequency formula of the accelerometer are given theoretically and the influence of structural parameter on the sensitivity and resonant frequency of the accelerometer is discussed. The modal analysis of the geophone is carried out using simulation software. The first order characteristic frequency of the structure is 1 191 Hz, the vibration direction is x direction, and the second order characteristic frequency is 7 039.4 Hz. The vibration direction of the second order characteristic frequency is y direction. As the two characteristic frequencies are very different, the geophone has good transverse anti-interference performance. To obtain the sensing performance of the detector, the amplitude-frequency response, sensitivity and lateral anti-interference of the detector are tested. The packaged fiber grating geophone and standard acceleration sensor are fixed on the vibration table, PC control software controls the output signal of the vibration table, fiber grating demodulator and fiber grating geophone is connected, completing the signal demodulation. The demodulation signal is transmitted to the computer to complete the signal acquisition. The analysis of the experimental results shows: the resonance frequency of accelerometer based on the symmetrical hinge structure is 1 200 Hz, basically consistent with the resonance frequency results using the simulation software. The reason of the difference may be caused by the processing error of the sensor. The operating frequency band of the detector is 20~800 Hz. The sensitivity of the sensor is about 10.2 pm/ g , and the linear sensitivity is 0.999 8. The cross axis sensitivity of the detector is about 5% of the main axis. The geophone has good application prospects in oil and gas exploitation field.

Key words: Fiber Bragg grating; Strain sensing; Accelerometer; Hinge; Amplitude-frequency response

OCIS Codes: 060.3735; 060.2310; 060.2370; 120.7280