

引用本文:王璐,李辉栋,乔学光.基于轴承式杠杆机构的光纤光栅高频地震检波器设计[J].光通信技术,2024,48(2):78-83.

基于轴承式杠杆机构的光纤光栅高频地震检波器设计

王璐¹,李辉栋^{1,2},乔学光^{2*}

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

摘要:针对目前高频段信号波的研究相对薄弱的问题,设计了一种基于轴承式杠杆机构的光纤光栅高频地震检波器。该检波器以杠杆机构和其中的轴承支点为创新点,使用仿真软件对检波器模型进行了静态结构分析、模态分析和谐波响应分析。仿真结果表明:该地震检波器的仿真灵敏度为 64.588 pm/g,仿真固有频率为 1 638.5 Hz;调整杠杆放大机构动力臂与阻力臂长度比例和摆线铰链的切割半径,得到检波器的仿真固有频率为 1 204.4 Hz,仿真灵敏度为 75.56 pm/g。

关键词:杠杆放大机构;轴承;有限元仿真;摆线铰链;光纤光栅;地震检波器

中图分类号:TN256;TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2024)02-0078-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of fiber grating high-frequency seismometer based on bearing lever mechanism

WANG Lu¹, LI Huidong^{1,2}, QIAO Xueguang^{2*}

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

Abstract: A fiber optic grating high-frequency seismic detector based on a bearing type lever mechanism is designed to address the relatively weak research on high-frequency signal waves at present. With the lever mechanism and bearing fulcrum as the innovation point, the static structure analysis, modal analysis and harmonic response analysis of the detector model are carried out by using simulation software. The simulation results show that the simulation sensitivity of the geophone is 64.588 pm/g, and the simulation natural frequency is 1 638.5 Hz. By adjusting the length ratio between the power arm and the resistance arm of the lever amplification mechanism and the cutting radius of the cycloidal hinge, the simulation natural frequency of the detector is 1 204.4 Hz and the simulation sensitivity is 75.56 pm/g.

Key words: lever amplification mechanism, bearing, finite element simulation, cycloidal hinge, fiber grating, seismometer

0 引言

高铁、高架桥等基础设施建设正在逐步推进,但是高频振动会对铁路、桥梁的结构造成严重影响。通过使用光学传感器获取物体振动频率是监测大型结构健康安全的重要手段。因此,用于测量振动信号的

传感技术在监测高铁、高架桥等结构的健康状态,以及避免事故或经济损失方面发挥着重要作用。

振动传感对于监测和保持工程系统的健康状态至关重要。这些具有大型结构的系统通常工作在一些恶劣的环境中,包括强磁场。然而,传统的电磁类传感器难以准确测量恶劣环境下的振动信号。光纤布喇格光栅(FBG)传感器具有体积小、无源传感、抗电磁干扰、分布式传感、复用性好、在恶劣环境下也能保持长期稳定性能的独特优势,成为振动传感的优秀候选器件和光纤传感器(OFS)领域的研究热点。

FBG 地震检波器可以检测震源速度、加速度、位移、频率等物理参数的变化,其核心敏感元件是FBG。目前,已有一些关于 FBG 地震检波器的研究,如邵敏等人^[1]设计了一种 FBG 地震检波器,该检波器的传感

收稿日期:2023-09-16。

基金项目:国家重大重点项目(61927812)资助。

作者简介:王璐(1997—),女,山东潍坊人,硕士生,2020 年于青岛农业大学获得工学学士学位,研究方向为光纤地震检波器,参与了陕西省教育厅专项科研项目计划和西安石油大学研究生创新与实践项目,以第二发明人的身份获得 1 项中国发明专利。

***通信作者:**乔学光(1955—),男,历任西安石油大学党委书记、西北大学校长、西北大学党委书记,主要从事光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、物探、油气管线检测等领域的教学与研究工作。



器头由敏感元件平面弹簧片、质量块、FBG 构成,实验测试的传感器灵敏度为 25.9 pm/g ,共振频率为 167 Hz ,可检测 32 g 的加速度值,适用于地震勘探的实际测量。LIANG L 等人^[2]针对振动监测对加速度计尺寸和质量要求,设计了一种单铰链结构传感器,其固有频率为 900 Hz ,灵敏度为 26.962 pm/g ,适用于航空、航天等领域狭小空间的中低频振动监测。徐佳凯等人^[3]针对桥梁加速度传感器原位校准时标准传感器的选取问题,设计了一种基于圆弧摆线铰链的双光纤光栅加速度传感器,其传感器的谐振频率为 460 Hz ,灵敏度约为 43 pm/g ,横向干扰能力程度为 5.7% ,可用于桥梁上加速度监测。宋颖等人^[4]根据工程结构对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的 FBG 加速度传感器,其灵敏度达到了 17.25 pm/g ,共振频率为 $2\ 200 \text{ Hz}$,可实现中高频振动信号的精确测量。但是,上述研究均存在共振频率不高、灵敏度偏低的问题。

为了提高系统的固有频率和灵敏度,本文设计一种基于轴承式杠杆机构的光纤光栅高频地震检波器,可用于高铁、高架桥、铁路、桥梁、隧道等大型结构工程的健康状态监测及井中地震波的勘探。

1 地震检波器的设计

1.1 地震检波器的结构装配

地震检波器的结构如图 1 所示。该结构一共包括 4 个部分:U 型底座、摆线柔性铰链、惯性质量块和轴承式杠杆机构。其中,U 型底座与摆线柔性铰链左端连接,摆线柔性铰链的右端连接一个惯性质量块。

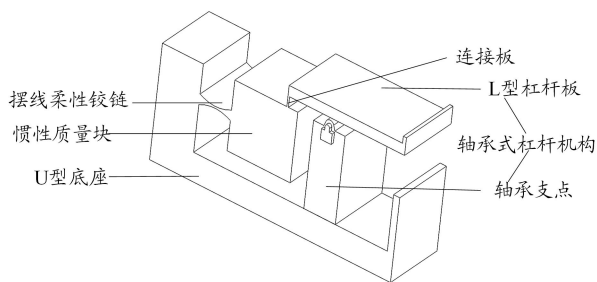


图 1 地震检波器的结构设计示意图

本文设计的地震检波器结构的创新点是轴承式杠杆机构,该设计使本来高频低灵敏的机械系统可以获得高频、高灵敏的测量结果。轴承式杠杆机构由 L 型杠杆板和轴承支点组成,依据杠杆平衡条件对惯性质量块的振动位移进行放大。其中,轴承支点结构如图 2 所示。该结构由 1 个圆形空心中部转轴、2 个圆形

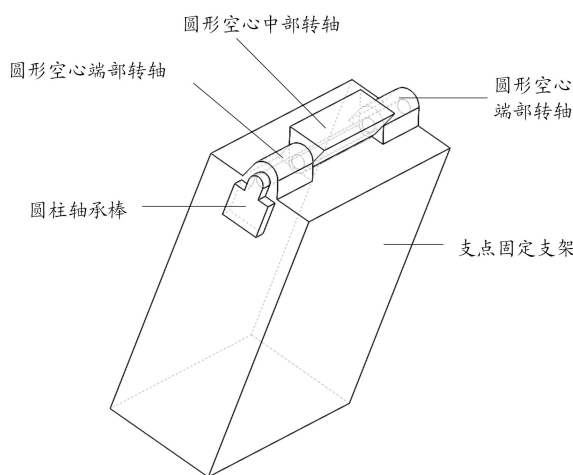


图 2 轴承支点结构示意图

空心端部转轴、1 个圆柱轴承棒构成。圆形空心中部转轴绕圆柱轴承棒转动,构成杠杆的支点转动条件,从而起到杠杆放大作用。轴承支点绕圆柱轴承棒转动,不会在任何方向上产生附加位移,从而提升了杠杆放大的效果。轴承支点将杠杆机构固定,使其只能在竖直方向上下运动,避免产生杠杆横向交叉方向位移量。由于轴承支点绕圆柱轴承棒转动,仅作为一个转动条件,形变量为零,故不考虑对固有频率的影响。

1.2 地震检波器的工作原理

当给系统施加外部加速度时,摆线柔性铰链会产生形变,使惯性质量块绕其上下振动。这种振动通过杠杆机构进一步放大惯性质量块的位移变化量,使粘贴在杠杆机构右侧的 FBG 产生伸缩形变。通过电脑解调,可以测量出 FBG 的伸缩形变量,从而得知该地震检波器灵敏度。由于使用摆线柔性铰链对铰链的最小厚度的变化最敏感,对载荷的敏感程度也十分显著,因此将转动轴承作为杠杆机构的轴承支点,不仅可以降低轴承支点的刚度,增强杠杆机构的抗横向干扰能力,又能提高地震检波器的灵敏度。此外,通过设计杠杆机构,还可以降低地震检波器沿 x 方向的振动位移,并且能加强沿 y 方向的微位移的放大作用。

地震检波器受外界加速度的影响产生的惯性微位移的大小可以按照常规方法来确定。当惯性质量块发生垂直振动时,会引起摆线柔性铰链最小厚度处的任意微元段产生绕中性面的角度变形量。这通过杠杆机构转化成杠杆位移放大比。将 FBG 粘贴在杠杆机构右端放大侧,用以测量应变。FBG 经过杠杆放大作用,其轴向应变也会相应地发生变化。因此,摆线柔性铰链的角变形量和杠杆机构的微位移放大量可以用 FBG 的轴向应变的变化来表示,使得该结构能够对加速度

进行精确测量。

杠杆机构可以对惯性质量块振动引起的摆线柔性铰链的微变形进行位移放大,显著提高高频下地震检波器的灵敏度。转动轴承的设计减小了转动刚度,增加了杠杆机构的放大效果,同时杠杆机构本身作为刚性悬臂梁自身具有自振效果,最大限度地提高了地震检波器的灵敏度,并且使检波器拥有很好的抗横向干扰性能。

2 理论分析

2.1 杠杆放大的理论分析

FBG 的中心波长的变化量 $\Delta\lambda_B$ 定义为

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

其中, λ_B 为 FBG 的中心波长, P_e 为光纤的有效弹光系数(一般取值 0.22), Δl 为原长为 L 的光纤光栅的轴向伸长量, L 为光纤光栅的栅区长度。

杠杆机构放大原理图如图 3 所示。其中, A 为杠杆机构驱动力输入端, C 为杠杆机构输出力的输出端, B 为杠杆机构的杠杆支点, L_1 为动力臂的臂长, L_2 为阻力臂的臂长。对于地震检波器实体模型系统, 质量块受惯性力产生位移变化, 并通过连接板使其作为杠杆机构的驱动力输入端 A。当输入位移 ΔL 时, 经由杠杆机构的放大作用, 输出放大位移 ΔX , 根据杠杆平衡条件公式(动力 $\times$ 动力臂=阻力 $\times$ 阻力臂), 可以得到输出位移的放大倍数 β 为

$$\beta = \frac{L_2}{L_1} \quad (2)$$

由式(2)可得, 输出放大位移与输入位移的关系、输出放大的转动角度 ϑ 与摆线铰链的转动角度 θ 的关系分别为

$$\Delta X = \beta \Delta L \quad (3)$$

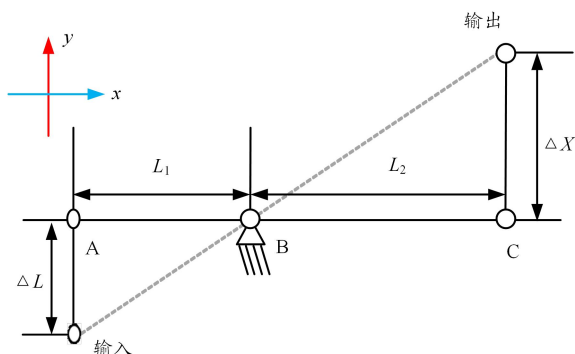


图3 杠杆机构的放大原理图

$$\vartheta = \beta \theta \quad (4)$$

由式(1)、式(2)、式(3)可求得最终波长漂移量为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1-P_e) \frac{\Delta X}{L} = \lambda_B (1-P_e) \frac{L_2 \Delta L}{L_1 L} \quad (5)$$

2.2 地震检波器结构的理论分析

本文首先通过构建由摆线柔性铰链与惯性质量块组成的铰链机构力矩方程, 求得初始加速度。然后, 采用杠杆机构终端加速度的计算方法得出在添加了杠杆放大机构后的地震检波器的最终加速度值, 进而确定检波器的最终灵敏度。

2.2.1 铰链机构的理论分析

质量为 m 的惯性质量块以摆线柔性铰链为中心振动, 对于铰链和质量块组成的系统, 可得力矩平衡方程为

$$ma_0 d - k_f \Delta L \frac{h}{2} - k_t \theta = 0 \quad (6)$$

其中, a_0 为初始加速度, d 为铰链中心与惯性质量块中心之间的距离, h 为惯性质量块的高度, k_f 为光纤的轴向刚度常量, k_t 为摆线柔性铰链的转动刚度。

摆线柔性铰链的转动角度 θ 为

$$\theta = \frac{\Delta L}{h} \quad (7)$$

摆线柔性铰链的转动刚度^[5] k_t 为

$$k_t = \frac{Ebr^2}{3} \frac{2 \left(1 + \frac{4r}{t}\right)^{\frac{3}{2}}}{\pi \left(\frac{2r}{t}\right)^3 \left(2 + \frac{6r}{t}\right)} \quad (8)$$

其中, E 为材料的弹性模量, r 为切割半径, t 为摆线柔性铰链的最小厚度, b 为摆线柔性铰链的宽度。

由式(6)、式(7)、式(8)可得到初始加速度 a_0 为

$$a_0 = \frac{k_f \Delta L \frac{h}{2} + k_t \frac{\Delta L}{h}}{md} \quad (9)$$

2.2.2 理论灵敏度分析

杠杆机构所产生的终端加速度 a_1 表示为

$$a_1 = \frac{\tau}{m_1 n_1} \quad (10)$$

其中, τ 为惯性质量块的惯性振动通过连接板施加在杠杆机构左端的力矩, m_1 为杠杆机构的质量, n_1 为杠杆机构的质心到杠杆支点之间的距离。

根据能量守恒定律, 可以得到

$$\tau \Delta L = m_1 a_0 \Delta L \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可得

$$a_1 = \frac{a_0}{n_1} \quad (12)$$

由式(5)、式(9)、式(12)可得检波器的灵敏度 S 为

$$S = \frac{\Delta \lambda_B}{a_1} = \frac{1 - \lambda_B(P_e) \frac{L_2 \Delta L}{L_1 L}}{a_1} = \frac{\lambda_B(1 - P_e) \frac{L_2 \Delta L}{L_1 L} n_1}{\frac{k_f \Delta L \frac{h}{2} + k_1 \frac{\Delta L}{h}}{md}} = \frac{\lambda_B(1 - P_e) n_1 md \beta}{L \left(k_f \frac{h}{2} + k_1 \frac{1}{h} \right)} \quad (13)$$

3 仿真分析

3.1 静态结构分析

为了验证理论分析结果,以及杠杆机构的位移放大理论和地震检波器结构的理论灵敏度的正确性,本文应用有限分析软件 ANSYS workbench 对地震检波器实体模型进行静态结构分析。地震检波器的轴承支点采用的材料为铝合金 1060 合金,其弹性模量为 $6.9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,质量密度为 $2\,700 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.33。地震检波器的其余部分材料为钢 AISI304,其弹性模量为 $1.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,质量密度为 $8\,000 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.29。同时,对地震检波器实体模型进行网格划分,在其 U 型底座的下表面施加固定约束,同时给质量块沿 y 方向施加大小为 1 N 的力。

首先,对地震检波器实体模型进行杠杆机构位移放大部分的理论分析验证^[6]。在静态结构分析中,本文对惯性质量块沿主轴方向施加了 10 个线性增加的力,这些力的大小从 1 N 开始,每次增加 1 N ,直至达到 10 N 。检波器动态响应测试仿真图如图 4 所示。可以看出,杠杆机构的输入端位移节点和输出端位移节

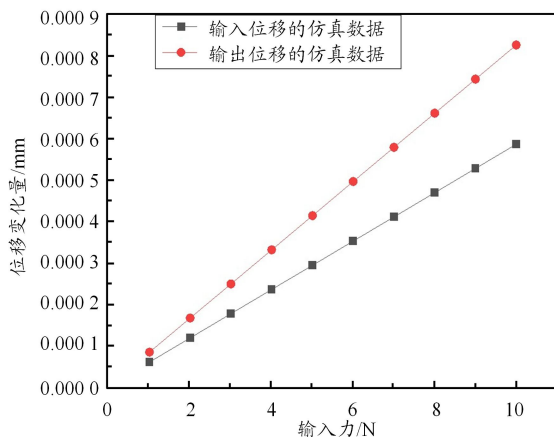


图4 检波器动态响应测试仿真图

点均与输入力呈线性相关,2条直线各自斜率的比值(杠杆机构的放大倍数)为 $1.410\,2$,由式(2)计算得出的理论放大倍数为 $21.74/15.26=1.425$ 。理论计算值与仿真值十分接近,因此该模型具有良好的线性响应特性且结构设计合理。

然后,对地震检波器实体模型进行理论灵敏度部分的理论分析验证,输出位移仿真数据如图 5 所示。根据 ΔX 的数据值,并依据式(5)计算得到中心波长变化漂移量;同时,基于牛顿第二定律对力与加速度进行关系换算,以及地球上的重力加速度 $1\text{ g}=9.8 \text{ m/s}^2$,完成单位 N 与单位 g 的换算关系。

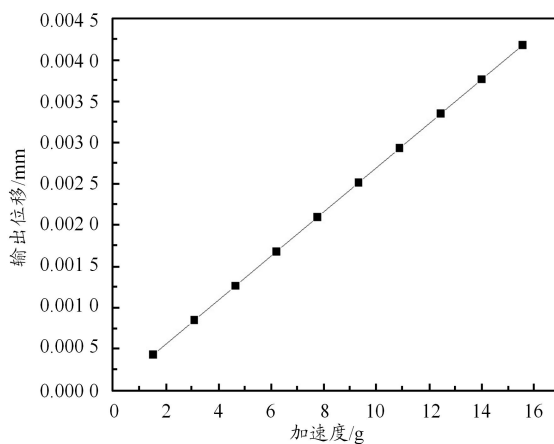


图5 输出位移仿真数据

依据式(13)得到仿真灵敏度曲线图如图 6 所示。通过计算可知,该地震检波器实体模型的理论灵敏度仿真值为 64.588 pm/g 。因此,该地震检波器具有较高的线性灵敏特性和很好的实用性。

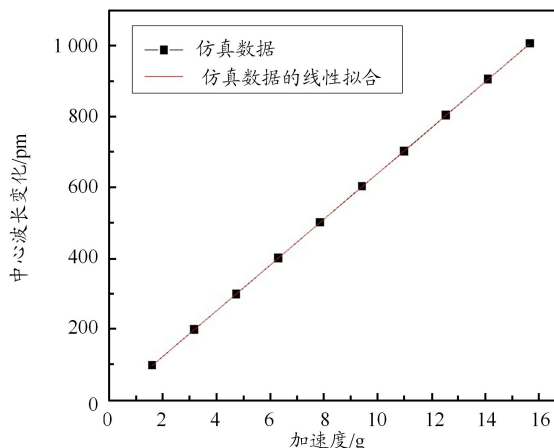


图6 仿真灵敏度曲线图

3.2 模态分析

模态分析的目的^[7]是了解结构的共振区域,为结构设计提供一定的指导。经模态分析^[8]得到模型的各

王璐,李辉栋,乔学光:基于轴承式杠杆机构的光纤光栅高频地震检波器设计

阶模态如下:一阶、三阶、六阶模态为简谐振动,表明模型在外界激励的作用下沿 y 轴产生振动;二阶、四阶、五阶模态为转动振型,表明模型在外界激励作用下沿 x 轴产生振动。地震检波器实体模型的固有频率如表 1 所示。可以看出,该模型的一阶模态的固有频率为 1 638.5 Hz,各阶模态的固有频率相差较大,尤其是一阶与二阶的固有频率差距较大,不会产生振型叠加,因此该模型具有良好的抗干扰性能。

3.3 谐波响应分析

频率响应分析的目的是确定模型的固有频率。在 ANSYS workbench 中,完成模态分析^[8]之后添加谐波响应分析。在分析设置中,找到选项模块设置扫描频率的动态范围,频率最小范围设定为 20 Hz,频率最大范围为 2 000 Hz,频率间隔为 100;在 y 方向对地震检波器的实体模型整体添加荷载加速度,荷载大小为 1 g。在求解选项中添加探针选项,选取杠杆机构位移放大输出端位置的中心点为探针点,分析探针点在荷载一定的情况下随频率变化的位移变化关系,观察探针点最大位移时对应的频率值。最后,对地震检波器的实体模型进行谐波响应仿真求解,得到仿真频率响应曲线图如图 7 所示。该模型在位移峰值为 686.32 nm 时的频率值为 1 643.6 Hz,与模态分析得到的固有频率相互关联,互相验证。

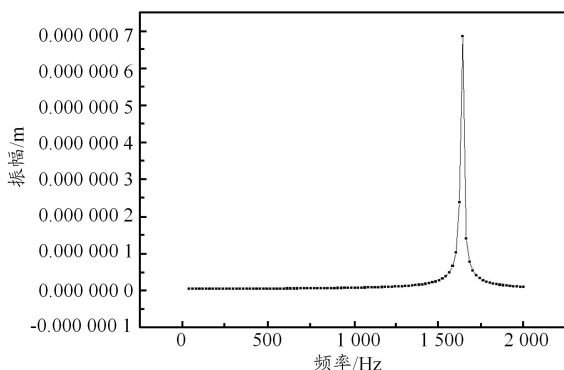


图 7 仿真频率响应曲线图

3.4 调整杠杆机构比例的结构仿真

通过调整杠杆机构动力臂与阻力臂的长度比例和摆线铰链的切割半径,调整后的检波器正视图如图 8 所示。

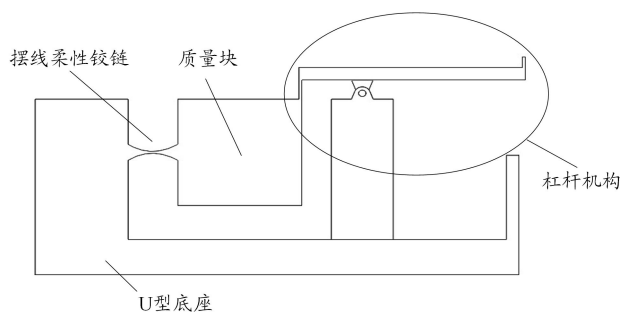
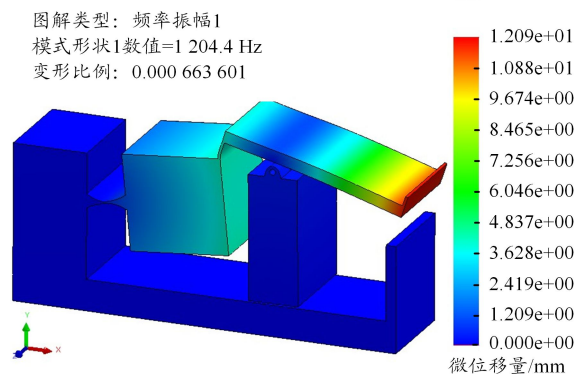
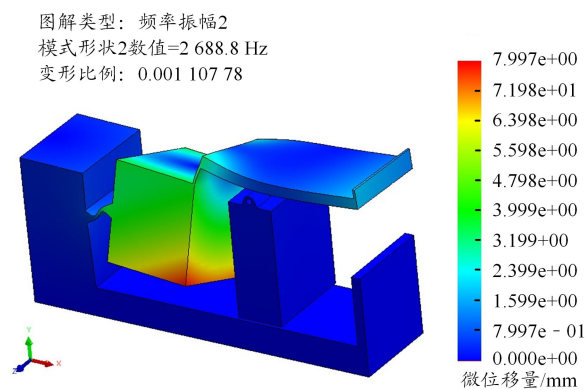


图 8 调整后的检波器正视图

通过仿真软件对调整后的检波器再次进行模态分析和静态结构分析。调整后检波器的模态分析图如图 9 所示。由图可知,检波器的一阶固频为 1 204.4 Hz,二阶固频为 2 688.8 Hz,2 个固频相差很大,说明该检波器具有很好的抗横向干扰性能。



(a) 一阶模态图



(b) 二阶模态图

图 9 调整后检波器的模态分析图

调整后的检波器结构通过静态结构分析得到的仿真灵敏度数据图如图 10 所示。通过计算得到检波器的灵敏度为 75.56 pm/g。由此可知,通过调整杠杆机构的动力臂与阻力臂的长度比例,可以提高检波器的灵敏度。

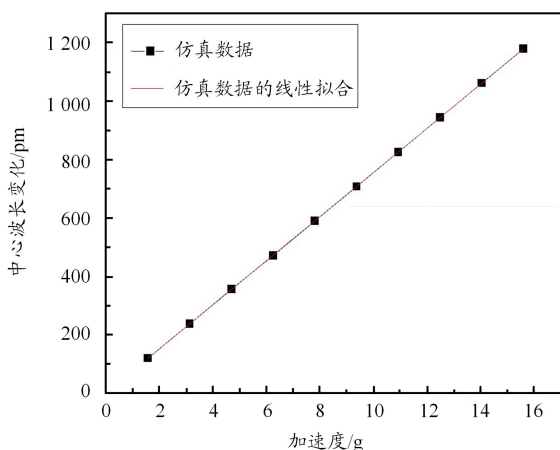


图 10 调整后检波器的仿真灵敏度数据图

4 结束语

本文设计了一种基于轴承式杠杆机构的光纤光栅高频地震检波器,并建立了数学模型,使用 Ansys workbench 有限元仿真软件对该模型进行了有限元分析。通过静态结构分析验证了设计的地震检波器模型结构设计的合理性和正确性、杠杆放大机构的放大比例正确动态响应性,得到了模型探针输出端输出位移的仿真数据,对比理论公式计算得出理论计算值,验证了该实体模型具有很好的灵敏性和实用性;最后,通过模态分析可知模型的固有频率很高且各阶的固有频率相差较大,因此该地震检波器具有良好的抗干

扰性能。仿真结果表明:该地震检波器在理论上可以同时兼顾高固有频率和高灵敏度 2 项评估指标,其灵敏度为 64.588 pm/g,固有频率为 1 638.5 Hz,具有很好的应用价值和参考意义。此外,通过调整杠杆放大机构动力臂与阻力臂长度比例和摆线铰链的切割半径,得到调整后地震检波器的固有频率为 1 204.4 Hz,灵敏度为 75.56 pm/g。

参考文献:

- [1] 邵敏,乔学光,冯德全,等. 基于光纤 Bragg 光栅的地震检波器的理论与实验研究[J]. 光电子·激光,2012,23(3):418-424.
- [2] 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.
- [3] 徐佳凯,倪凯,龚华平,等. 基于圆弧摆线铰链的双光纤光栅加速度传感器[J]. 光子报,2023,52(6):182-191.
- [4] 宋颖,张浩然,李剑芝,等. 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(中英文),2023,16(5):1109-1120.
- [5] 李成,何涛,陈明亮,等. 摆线柔性铰链的设计计算与性能分析[J]. 机械设计与研究,2020,36(2):12-15.
- [6] 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.
- [7] 冷岳峰,郑春生,张倩. 新型可变振幅机械式低频振动磨料磨损试验台设计及模态仿真[J]. 机械设计,2023,40(1):72-76.
- [8] 杜明旭,赵文辉,王峻峰. 基于有限元的座舱罩自动铆接力学分析[J]. 机械设计,2022,39(S2):1-5.