光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022060702

基于对称悬臂梁的小型化低频 FBG 加速度传感器研究

黄家亮，滕云田*

（中国地震局地球物理研究所，北京 100081）

摘　要： 提出了一种基于对称悬臂梁的小型化低频光纤布拉格光栅（FBG）加速度传感器。首先根据传感器结构的力学模型，推导出传感器的灵敏度和固有频率表达式；然后对传感器进行结构参数优化，采用 ANSYS Workbench 对传感器进行静应力与模态分析；最后根据分析结果制作传感器，并实验研究了传感器的幅频响应、灵敏度特性、横向抗干扰能力和冲击响应。结果表明，该传感器固有频率为 72 Hz，灵敏度为 681.7 pm/g，抗横向干扰度小于 4.9%，且体积仅为 6.48 cm^3，可用于 50 Hz 以下的低频微弱振动信号的实时监测。

关键词： 加速度传感器；光纤布拉格光栅；对称悬臂梁；低频振动

中图分类号： TP212.2；TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0873－08

Research on Miniaturized Low-frequency FBG Acceleration Sensor Based on Symmetric Cantilever Beam

HUANG Jialiang，TENG Yuntian

（Institute of Geophysics，China Earthquake Administration，Beijing 100081，CHN）

Abstract： A miniaturized low-frequency FBG acceleration sensor based on symmetric cantilever beam was proposed. Firstly，the sensitivity and natural frequency expressions of the sensor were derived according to the mechanical model of the sensor structure. Then，the structural parameters of the sensor were optimized，and the static stress and modal analysis of the sensor were carried out by ANSYS Workbench. Finally，the sensor was made according to the analysis results，and its amplitude-frequency response，sensitivity characteristics，transverse anti-interference ability and impact response were studied through experiments. The experimental results show that the natural frequency of the sensor is 72 Hz，the sensitivity is 681.7 pm/g，the lateral interference resistance is less than 4.9%，and the volume is only 6.48 cm^3，which can be used for real-time monitoring of low frequency weak vibration signals below 50 Hz.

Key words： accelerometer；FBG；symmetrical cantilever beam；low-frequency vibration

0　引言

低频振动信号采集对开展工程地震、桥梁大坝监测和油气勘探等具有重要意义[1-2]。近年来，加速度传感器作为动态采集振动信号的关键设备之一，已经广泛应用于大型结构和环境安全的监测中[3-4]。而传统的电子加速度计因其容易受到电磁干扰，应用范围有限。光纤布拉格光栅是一种光学传感元件，具有体积小、稳定性强、抗电磁干扰和测量精度高等优点，使其能够在地震波检测、大型结构健康监测、油气勘探等领域替代电子加速度计，提高恶劣环境中远程在线监测的能力[5-7]。

近年来，国内外对低频光纤布拉格光栅（FBG）加速度传感器进行了广泛深入的研究[8-9]，如柔性铰

收稿日期：2022－06－07.

基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFC1509504).

* **通信作者：**滕云田　**E-mail：** tengyt_cidp@163.com

链式[9-10]、膜片式[11]和悬臂梁式[12-13]。Khan 等[14]基于改进型悬臂梁设计了一种温度自补偿 FBG 加速度计，质量块和悬臂梁结构采用一体化设计，其体积小至约 25 cm^3，两光纤光栅粘贴在梁的应变敏感区域，有效提高了传感器的灵敏度。Lim 等[15]设计了一种带有磁阻尼器的水平悬臂梁光纤光栅加速度传感器，该传感器采用磁铁作为质量块，并和 U 型槽构成磁阻尼器，FBG 粘贴在悬臂梁表面，整体结构体积约为 70 cm^3。Li 等[16]提出一种基于转动支承梁的 FBG 低频加速度传感器，该传感器主体结构紧凑且简单，易于安装并具有较好的低频特性。实验表明该传感器的工作频率范围为 0.5～20 Hz，灵敏度高达 1 495.2 pm/g，但质量块较重。Liu 等[17]提出一种双弯曲悬臂梁的 FBG 加速度传感器，该传感器结构主要由两个弯曲悬臂梁和惯性质量块组成。经实验发现，该传感器灵敏度为 651.0～850.5 pm/g，在 1～70 Hz 内相应的波动小于 2.2 dB，但该传感器仅质量块质量便达到 57.6 g，使得整体尺寸偏大。尽管近年来低频 FBG 加速度传感器已经取得了一系列丰硕成果，然而，灵敏度低且体积较大一直是阻碍低频 FBG 加速度传感器实际工程应用的瓶颈。

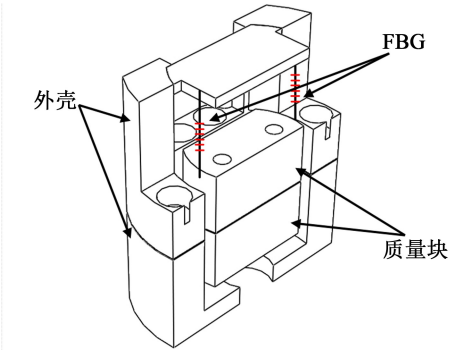
针对现有低频 FBG 加速度传感器灵敏度低且体积较大的问题，本文提出一种基于对称悬臂梁的小型化低频 FBG 加速度传感器。根据传感器结构的力学模型，推导出传感器的灵敏度和固有频率表达式，对传感器进行结构参数优化，采用 ANSYS Workbench 对传感器进行静应力与模态分析。根据分析结果制作传感器，通过实验研究了传感器的性能。

1 传感器结构设计及理论分析

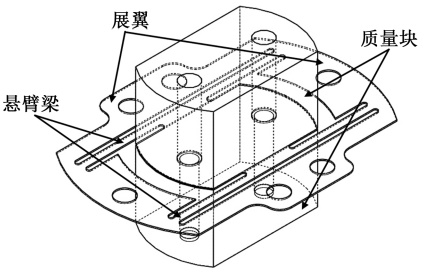
1.1 传感器结构设计

本文设计的加速度传感器结构如图 1 所示，其由基座、对称式悬臂梁、质量块、短 FBG 构成。两质量块对称放置在悬臂梁的上下表面，构成弹簧-质量惯性振动系统，并由悬臂梁的四个展翼内嵌在传感器中心，FBG 采用两点粘贴法对称粘贴在质量块和外壳的表面，并施加一定的预应力，避免栅区产生非均匀应变带来的啁啾效应。

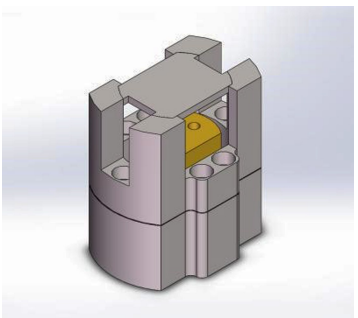
如图 1 所示，传感器两侧悬臂梁严格对称，将质量块钳制在传感器中心，以提高其轴向敏感度。低频振动时传感器自由端质量块会随惯性力发生垂直方向振动，将振动的位移幅值转换成 FBG 轴向的应变值，从而改变 FBG 中反射光谱的中心波长。由此可以建立反射光谱的中心波长漂移量与加速度之间的数学关系，通过测量反射光谱中心波长的漂移量即可获得加速度大小，实现低频振动测量。



(a) 剖视图



(b) 敏感元件图

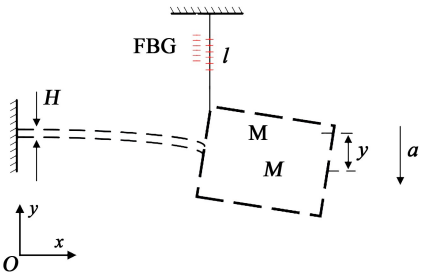


(c) 三维图

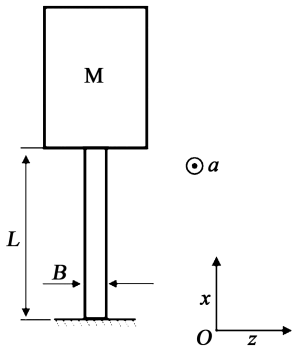
图 1 传感器结构图

1.2 传感器理论分析

由于传感器为对称结构，悬臂梁在质量块 M 的外侧，可将传感器等效成悬臂梁和质量块组成的二阶单自由度受迫振动模型，如图 2 所示。



(a) 正视图



(b)　俯视图

图 2　传感器结构等效模型

由图 2 可知，H，L，B 依次为悬臂梁的厚度、长度和宽度，M 为传感器质量块的质量，y 为振动产生的微位移。其中，悬臂梁的等效弹性刚度 K 的值主要取决于加工悬臂梁的材料和尺寸，且在确定传感器的灵敏度和固有频率方面起着重要作用。在图 2(a)所示坐标系中，质量块的运动方程为

$$M\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2}+\gamma\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}+Ky=-Ma \tag{1}$$

式中，M 为质量块质量，y 为质量块绝对位移，γ 为振动系统阻尼常数，K 为振动系统等效弹性系数，a 为传感器所受振动信号的加速度。

悬臂梁因质量块受迫振动而产生的应变 ε 为

$$\varepsilon=\frac{3FL}{2EBH^2} \tag{2}$$

式中，F 为质量块受到的惯性力，E 为悬臂梁材料的弹性模量。

由于 FBG 的拉伸或压缩会改变纤芯折射率的周期，进而使反射峰发生偏移。因此，粘贴在固定支座和质量块之间的光纤布拉格光栅会受到纵向形变，进而引起中心波长的变化，其变化量为

$$\Delta\lambda=\lambda(1-P_e)\varepsilon \tag{3}$$

式中，λ 为 FBG 的中心波长，$P_e\approx0.22$ 为弹光系数，ε 为 FBG 产生的应变，$\Delta\lambda$ 为应变引起的 FBG 的波长漂移量。

由于悬臂梁和 FBG 处在同一平面内，因此悬臂梁产生的形变可以近似看作是 FBG 的形变，将式(2)代入到式(3)中可得

$$\Delta\lambda=\lambda(1-P_e)\frac{3FL}{2EBH^2} \tag{4}$$

式(4)表明了被测加速度 a 与 FBG 反射光谱波长漂移量 $\Delta\lambda$ 之间的数学模型，因而悬臂梁的应变可以表征加速度的大小，且加速度 a 与 FBG 反射光谱波长漂移量 $\Delta\lambda$ 呈线性关系，因此，通过测量 FBG 反射光谱波长漂移量就可得被测加速度。

为了更好地测量低频振动信号，传感器需要在频带的平坦区内具有较好的灵敏度。将式(4)与 $F=Ma$，$S=\Delta\lambda/a$ 联立可得加速度传感器的灵敏度：

$$S=\lambda(1-P_e)\frac{3ML}{2EBH^2} \tag{5}$$

由式(5)可知，传感器灵敏度大小和传感器敏感元件受迫振动时产生的应变大小相关，本文中所指的灵敏度为峰-峰值，即 $2S$。

待测振动信号的可测量频带范围由 FBG 加速度传感器的固有频率决定。传感器的固有频率为

$$F_0=\frac{\omega_0}{2\pi}=\sqrt{\frac{2EBH^3}{3ML^3}}/2\pi \tag{6}$$

由式(5)和(6)可知，悬臂梁结构参数一旦确定，其固有频率和灵敏度均被确定，且封装光纤的长度也受到限制。因此，有必要对悬臂梁结构参数进行优化设计，以平衡固有频率、灵敏度和传感器体积。

2　结构参数分析与仿真

2.1　结构参数对传感器性能的影响

工程振动因其频率较低、持续时间长、影响范围大且很难避免，对大型建筑产生的直接和间接的危害比较大。为了使小体积 FBG 加速度传感器有效地捕捉低频振动信号，需要对悬臂梁结构进行优化设计，尽可能地在缩小体积，增大灵敏度 S 和减小固有频率 F_0 之间取到合适的值，确保在较小体积的传感器条件下获得较高的低频响应特性。从理论分析的结果可以看出，悬臂梁长度 L、宽度 B 和厚度 H 是影响传感器灵敏度 S 和固有频率 F_0 的关键参数。因此，在其他参量已定的情况下，采用 Solidworks 对不同尺寸的悬臂梁进行建模，利用 ANSYS Workbench 进行静应力与模态仿真分析，分别研究这 3 个关键参量对传感器灵敏度和固有频率的影响。

首先，考虑探头的体积敏感元件的大小，通过采用减小单个悬臂梁尺寸增加悬臂梁数量的方式改变敏感元件的大小。由于传感器结构中心对称，因此以单根悬臂梁为例，讨论悬臂梁长度 L 在 5～8 mm 内变化对传感器灵敏度 S 和固有频率 F_0 的影响，得到仿真结果及其拟合曲线如图 3 所示。

由图 3 可知，当悬臂梁 L 在较小的范围内变化

时，传感器灵敏度与悬臂梁长度成正相关的关系，而固有频率则与悬臂梁长度成负相关的关系。考虑到该传感器的设计目标是减小传感器体积并采集工程振动信号，所以选择传感器固有频率 F_0 大于 60 Hz。而且传感器灵敏度 S 不宜过低，因此，悬臂梁长度可选取 6 mm$<L<$7 mm。

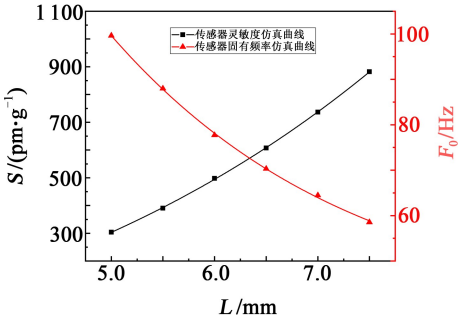


图 3 S 和 F_0 随 L 变化的关系曲线

其次，分析悬臂梁宽度 B 在 0.5～1.0 mm 变化对传感器灵敏度 S 和固有频率 F_0 的影响。得到仿真结果及其拟合曲线如图 4 所示。

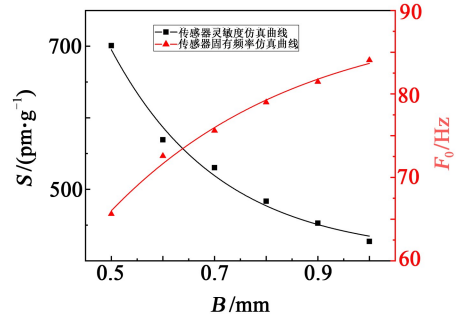


图 4 S 和 F_0 随 B 变化的关系曲线

由图 4 可知，传感器灵敏度 S 随着悬臂梁宽度 B 的增大而降低，固有频率 F_0 随悬臂梁宽度 B 的增大而增大。为取得较高灵敏度，悬臂梁宽度 B 要尽可能小，考虑到悬臂梁的选材和实际加工条件的限制，可取 $B=0.6$ mm。

最后，考虑悬臂梁厚度 H 在 0.1～1.0 mm 变化对传感器灵敏度 S 和固有频率 F_0 的影响。得到仿真结果及其拟合曲线如图 5 所示。

由图 5 可知，传感器灵敏度 S 随着悬臂梁厚度 H 的增大而降低，固有频率 F_0 随悬臂梁悬悬臂梁厚度 H 的增大而增大。当 $H\leqslant$0.2 mm 时，随着 H 增大，灵敏度 S 曲线的下降趋势明显；当 0.2 mm$<H<$0.5 mm 时，下降趋势趋于平稳。为满足传感器对灵敏度和固有频率的要求，且利于传感器制作与实验操作，取 $H=0.1$ mm。

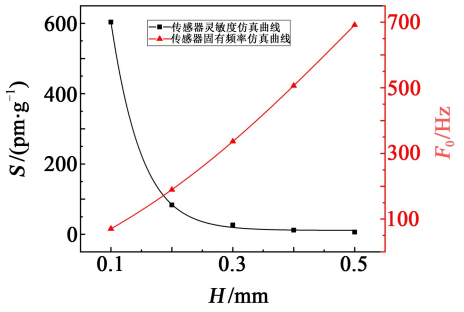


图 5 S 和 F_0 随 H 变化的关系曲线

通过分析 3 个关键参量对传感器灵敏度和固有频率的影响，考虑材料选取和加工条件，本文优化所得传感器结构参数如表 1 所示。

表 1 传感器结构参数

结构参数	数值
单个质量块质量/g	0.7
悬臂梁长度 L/mm	6.5
悬臂梁宽度 B/mm	0.6
悬臂梁厚度 H/mm	0.1
光纤杨氏模量 E/Pa	72.9×10^9
光纤有效长度 l/mm	5
光纤的外径 D/mm	0.125
FBG 中心波长 λ_B/nm	1 560
光纤横截面积 A_f/m^2	1.23×10^{-8}
光纤有效弹光系数 P_e	0.22

在传感器制作中选用的悬臂梁材料为 65Mn 弹簧钢，其杨氏模量 $E=201$ GPa，泊松比 $\mu=0.28$，受传感器体积和加工成本所限，要求质量块为小体积大质量，因此选用密度较大的 H62 黄铜作为质量块的材料，计算得单个质量块质量仅为 0.7 g。

2.2 传感器结构仿真分析

为了进一步研究对称悬臂梁小型化低频 FBG 加速度传感器的动态响应特性，使用有限元仿真软件 ANSYS Workbench 对传感器进行静应力与模态仿真。质量块、悬臂梁与 FBG 构成传感器的测量元件，是影响其动态特性的主要部件。根据表 1 提供的的尺寸参数，采用 Solidworks 软件对传感器进行实体建模，并将建模结果导入 ANSYS Workbench 软件进行仿真分析。

对传感器模型的底部施加固定约束，设定各个零部件之间的连接为完全绑定支撑约束，对传感器整体施加标准地球重力加速度的外部载荷，通过六面体网格划分对模型进行静应力仿真分析得到传感器模型的应变云图，如图 6 所示。

由图 6 可知，传感器自由端产生的形变最大，并

且向固定端逐渐减小，自由端的最大形变量约为 0.047 mm。

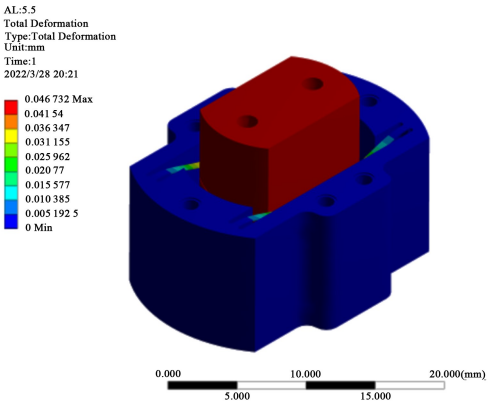
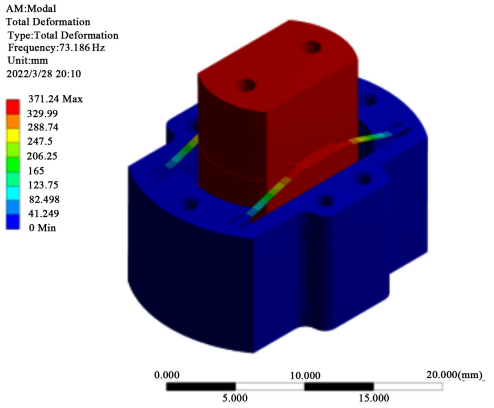
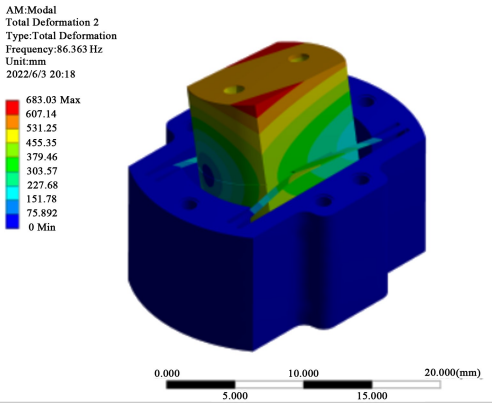


图 6　静应力仿真分析结果

依据静应力分析结果对传感器模型进行模态分析。得到前二阶模态固有频率分别为 73.19 和 86.36 Hz，提取前二阶模态的主振型图如图 7 所示。



（a）　一阶模态



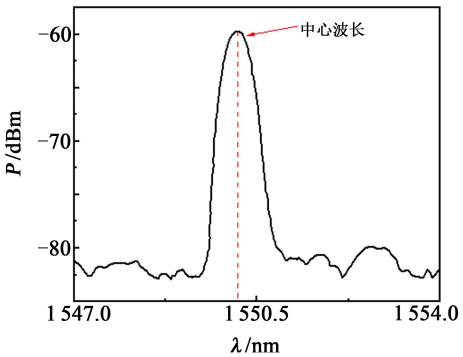
（b）　二阶模态

图 7　模态仿真分析结果

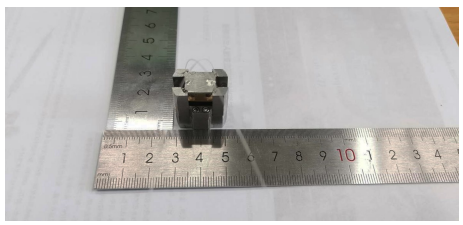
如图 7(a)所示，传感器一阶模态皆为简谐振动，表明传感器模型在外界激励作用下沿 y 轴产生振动。如图 7(b)所示，传感器二阶模态皆为摆动振型，表明传感器模型在外界激励作用下沿 z 轴产生摆动。由 ANSYS 仿真结果可知，该传感器一、二阶固有频率相差较小，表明该结构抵抗交叉干扰的能力较弱，尤其是 x 轴向的振动激励可能对传感器造成交叉干扰的风险。

3　传感器实验测试

传感器所用 FBG 为两根同批次的光纤布拉格光栅，其中心波长为 1 550.2 nm，反射率大于等于 90%，栅区长度为 5 mm。在传感器封装时对其施加一定的预应力，使其中心波长产生漂移，封装后的反射光谱及两传感器的实物图，如图 8 所示。



（a）　FBG 反射光谱

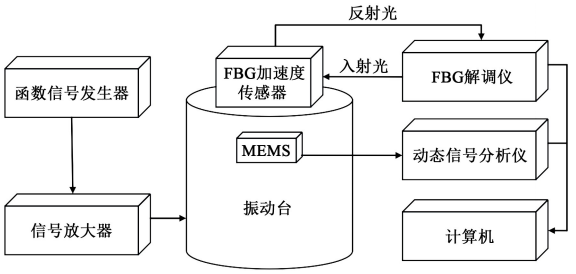


（b）　传感器实物图

图 8　FBG 反射光谱及传感器实物图

搭建的低频振动实验测试平台如图 9 所示，其中信号函数发生器采用普源精电公司的 DG1000Z 型号，其内置 160 种任意波形，采样率为 200 MSa/a；信号放大器采用扬州振中测试技术有限公司的 ZT-5702 型号，其频响范围为 0～10 kHz，信噪比大于 80 dB，搭配信号函数发生器可以将函数信号进行放大。振动台同样选用扬州振中测试技术有限公司的 ZT-JZ-200T 标准振动台，其激振频率范围为 DC-5 kHz，满足低频振动测试的需要。该振动台内置一标准加速度计，用于标定 FBG 加速度传感器。标准加速度计输出信号的采集与分析选用扬州振中测试技术有限公司的 ZT-U8204I 型动态信号分析仪，其具有 4 通道高精度 A/D，采样频率

为 128 kHz。光纤布拉格光栅解调仪采用北京为韵科技有限公司 MWY-FBG-CS800 型号，其采样频率最高可达 1 kHz，而且内置了激光光源，其发射的光波通过光纤输送至振动台系统上的双倾斜悬臂梁低频加速度传感器，同时，光纤布拉格光栅解调仪接收 FBG 的反射光，并在其内部完成光谱分析和数据采集。由于 FBG 具有应变和温度交叉敏感的特性，因此整个实验在 27 ℃的室温下进行。在实验过程中，温度变化缓慢，可以忽略环境温度波动对测量结果的影响。利用该平台对传感器的幅频响应特性、线性响应特性、抗横向干扰特性以及冲激响应特性等性能进行研究，得到传感器的实际性能参数。



(a) 低频振动实验测试平台示意图



(b) 低频振动实验测试平台实物照片

图 9 FBG 加速度传感器测试系统

3.1 幅频响应特性分析

在实验中，调节信号发生器使振动台输出加速度幅值为 0.1 g($g=10\ m/s^2$)的正弦激振信号，对传感器进行扫频测试。根据结果，扫频范围选取为 1～100 Hz，步长为 10 Hz。确定出传感器固有频率的大致范围后，再取步长为 2 Hz 进行重复试验。在实验过程中，实时记录 FBG 在不同频率下的中心波长偏移量，经实验数据处理得到传感器的幅频特性曲线，如图 10 所示。

由图 10 可知，传感器的固有频率约为 72 Hz，在 8～52 Hz 频率范围内响应较为平缓，固有频率的实验测量值与仿真计算值相近，其微小误差可能是由于实验过程中振动的时间过长，部分固化后的紫外胶产生了蠕变现象所导致。

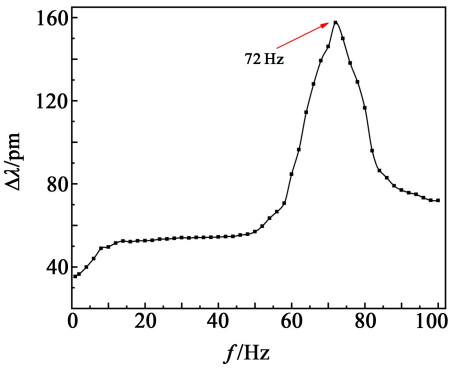
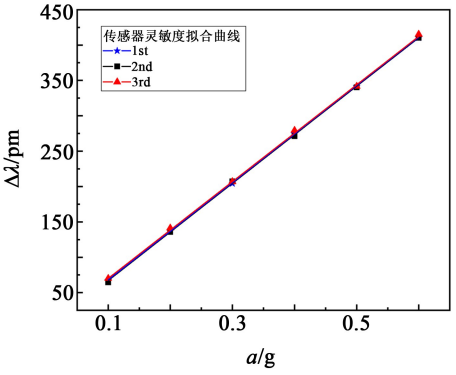


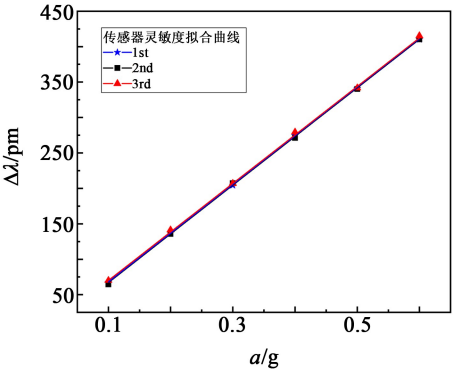
图 10 FBG 加速度计幅频响应

3.2 线性响应测试

为获得传感器在不同频率激励下的灵敏度特性，当振动频率分别为 20 和 40 Hz 时，调节信号发生器，使激励信号的加速度幅值从 0.1 g 增加到 0.6 g，步长为 0.1 g。记录传感器的波长漂移，每组实验重复三次，得出不同频率下的波长漂移随加速度变化的曲线，如图 11 所示。



(a) 20 Hz 线性度



(b) 40 Hz 线性度

图 11 FBG 加速度传感器线性响应

由图 11 可知，当激励信号的频率分别为 20 和 40 Hz 时，传感器的加速度测量灵敏度分别为 678.8 和 684.7 pm/g，且传感器的重复性误差分别是 1.58%和 2.31%，可以看出 2 种频率下的灵敏度相

差不大，个别点出现偏离，可能与解调系统的稳定性有关或者是受到外界信号的干扰所致。

产生工程振动的源头多为点振动源和线振动源，其振动信号赋值较小，衰减较快，因此有必要讨论传感器可测最小加速度幅值的大小。通过实验发现，传感器在隔震平台上保持静态时，其反射光谱的中心波长漂移量约为 2.4 pm，如图 12 所示。综合考虑上述传感器灵敏度和可能存在的误差，换算出传感器可测最小加速度幅值约为 0.03 g。

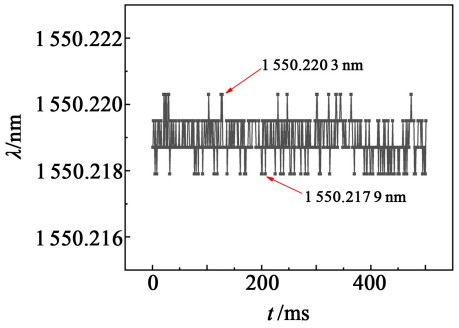


图 12　FBG 加速度传感器线性响应

动态范围是传感器重要参数指标，对于 FBG 加速度传感器来说，动态范围 D_R 与传感器所能检测的最大波长漂移量 λ_{max} 和最小波长漂移量 λ_{min} 有关，其关系表达式为

$$D_R = 20\lg\left(\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}\right) \tag{7}$$

而最大波长漂移值 λ_{max} 主要受传感器弹性元件弹性形变范围及光栅预应力的制约，最小波长漂移值 λ_{min} 主要由 FBG 解调系统分辨率决定。在该传感器的灵敏度测试实验中，传感器输出的最大波长漂移量为 415 pm，而实验所用 FBG 解调仪分辨率为 0.1 pm，计算可得传感器的动态范围可达 72 dB，基本满足美国国家地震监测台网系统 ANSS (Advanced National Seismic System) 中 C 类加速度传感器动态范围的要求。

3.3　横向干扰实验

抗横向干扰特性对单自由度的加速度传感器也是一项重要性能指标。在本传感器的结构设计中已经尽可能地提高传感器的抗干扰能力，比如悬臂梁采用小而多的设计方案，将质量块钳制在传感器中心，以确保减小 FBG 的形变，达到减弱横向串扰的目的。在实验测试中，传感器分别旋转 90°沿传感器纵向安装，使得传感器的主振方向垂直于振动台的振动方向，进行灵敏度测试，如图 13 所示。

由图 13 可知，在相同激振频率和幅值的作用下，传感器 y 轴向的波长漂移量约为 3.2 pm，z 轴向的波长漂移量约为 7 pm，x 轴向的波长漂移量约为 16 pm。表明该传感器 z 轴向的横向干扰度小于 2.2%，而 x 轴向的横向干扰度小于 4.9%，与模态仿真结果相同，这表明传感器具有较好的抗横向干扰能力。

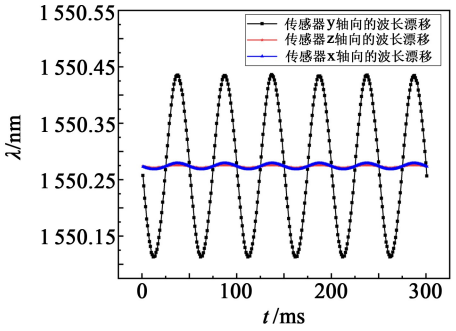


图 13　传感器横向抗干扰特性

3.4　冲击响应实验

相较于激振信号，冲击信号是一个非稳态的瞬时信号且包含比较丰富的振动信息，能够充分反映加速度传感器的响应特性。实验中采用瞬时敲击振动台台面模拟冲击信号，测试结果如图 14 所示。

由图 14 可知，对称悬臂梁小型化低频 FBG 加速度传感器能够有效识别出冲击信号，并产生一个较大的波长漂移。同时，该传感器在受到冲击作用时可以较快地恢复稳定状态。

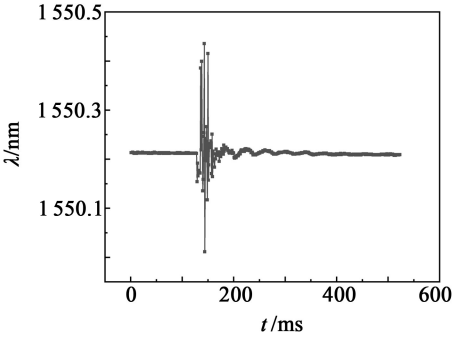


图 14　传感器冲击响应特性

4　结论

针对现有低频 FBG 加速度传感器灵敏度低且体积较大的问题，提出一种基于对称悬臂梁的小型化低频 FBG 加速度传感器。首先根据传感器结构的力学模型，推导出传感器的灵敏度和固有频率表达式；然后对传感器进行结构参数优化，采用 ANSYS Workbench 对传感器进行静应力与模态分

析;最后根据分析结果制作传感器,通过实验研究了传感器的幅频响应、灵敏度特性、横向抗干扰能力和冲击响应。实验结果表明,该传感器固有频率为72 Hz,灵敏度为 681.7 pm/g,抗横向干扰度小于4.9%,且体积仅为 6.48 cm^3,可用于 50 Hz 以下的低频微弱振动信号的实时监测。

参考文献:

[1] Xie Q, Zhou Z, Zhang L. Influence of the rubber end plate on the hysteretic performance of SC-BRBs and structural seismic design[J]. Engineering Structures, 2021, 242: 112475. 1-112475. 12.

[2] 张文涛, 黄稳柱, 罗英波, 等. 高精度光纤光栅地震计[J]. 传感技术学报, 2017, 30(4): 491-495.
Zhang Wentao, Huang Wenzhu, Luo Yingbo, et al. High-precision fiber grating seismometer[J]. J. of Sensor Technol., 2017, 30(4): 491-495.

[3] Lim K S, Zaini M K A, Ong Z C, et al. Vibration mode analysis for a suspension bridge by using low-frequency cantilever-based FBG accelerometer array[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 1-8.

[4] Shimoi F N, Cuadra C. Comparison of vibration analysis for a bridge using accelerometers and a piezoelectric cable sensor [C]// IEEE Conf. on Control Applications, 2015: 595-600.

[5] Elhattab A, Uddin N, OBrien E. Extraction of bridge fundamental frequencies utilizing a smartphone MEMS accelerometer[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3143.

[6] Chen J, Liu B, Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology[J]. Frontiers of Optoelectronics in China, 2011, 4(2): 204-212.

[7] Hong C Y, Zhang Y F, Zhang M X, et al. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 244: 184-197.

[8] Li T, Guo J, Tan Y, et al. Recent advances and tendency in fiber Bragg grating-based vibration sensor: A review[J]. IEEE Sensors J., 2020, 20(20): 12074-12087.

[9] Wei L, Yu L, Wang J, et al. An FBG-sensing two-dimensional vibration sensor based on multi-axis flexure hinge [J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(10): 3698-3710.

[10] Wei L, Jiang D, Yu L, et al. A novel miniaturized fiber Bragg grating vibration sensor[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(24): 11932-11940.

[11] Li T, Tan Y, Han X, et al. Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation [J]. Sensors, 2017, 17(1): 2-12.

[12] Wu X, Wang X, Li S, et al. Cantilever fiber-optic accelerometer based on modal interferometer[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(15): 1632-1635.

[13] Hong L, Sun R, Qiu Z, et al. A multi-cantilever beam low-frequency FBG acceleration sensor[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1-11.

[14] Khan M M, Panwar N, Dhawan R. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation[J]. Sensors and actuators A: Physical, 2014, 205: 79-85.

[15] Udos W, Lee Y S, Lim K S, et al. Signal enhancement of FBG-based cantilever accelerometer by resonance suppression using magnetic damper[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 304: 111895.

[16] Li J, Shen B, Zhao D, et al. A high-sensitivity FBG accelerometer based on a bearing[J]. J. of Lightwave Technol., 2021, 40(1): 228-236.

[17] Liu W, Liu Q, Wang C, et al. Modelling and design of high quality factor fiber Bragg grating-based geophone[J]. Optical Fiber Technol., 2022, 68: 102799.

作者简介:

黄家亮(1995—),男,河南省信阳市人,硕士研究生,研究方向为光纤振动传感技术;

滕云田(1966—),男,浙江省金华市人,研究员,研究方向为地震观测技术与仪器、光纤传感技术。