

引用格式: FAN Wei, FENG Dequan, QIAO Xueguang. Low-frequency Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Diaphragm-type Cantilever beam (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(10):1006004

樊伟,冯德全,乔学光. 基于膜片式悬臂梁的低频光纤光栅加速度计(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(10):1006004

# 基于膜片式悬臂梁的低频光纤光栅加速度计 (特邀)

樊伟<sup>1,2</sup>,冯德全<sup>1,2</sup>,乔学光<sup>1</sup>

(1 西北大学 物理学院, 西安 710127)

(2 西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 西安 710065)

**摘要:**为满足低频勘探的要求,设计了一种基于膜片式悬臂梁结构的光纤光栅加速度计。对该传感器的结构进行了理论分析,建立有限元模型,对传感器的加速度传感特性进行了仿真分析。在振动台上对传感器的特性进行了测试。实验结果表明,该系统对低频加速度激励信号具有良好的响应,其谐振频率为 48 Hz,频率响应范围为 1~35 Hz,加速度计工作方向的灵敏度为 452.6 pm/g,而其横向灵敏度仅为工作方向的灵敏度的 2.16%,因此该加速度计具有较强的横向抗扰能力。

**关键词:**光纤布拉格光栅;加速度计;膜片式悬臂;振动;横向抗干扰

中图分类号: TN253; TP212

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225110.1006004

## 0 引言

随着地震勘探的不断发展,陆地勘探已从浅层向深层油气藏发展,这对地震勘探技术提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。低频勘探是将低频信号传输到目标区域,通过低频加速度计接收到信息后进行全场波反演<sup>[2]</sup>。与常规地震勘探相比,对于深部地层的地震波高频信号衰减严重,低频信号相对完整。同时,低频信号的波长比高频信号的波长长,因此它对深部地层的油气勘探比高频信号更具有优势<sup>[3-4]</sup>。因此,低频勘探是石油天然气资源开发和高效利用的前沿勘探方法和关键技术<sup>[5]</sup>。

与电类加速度计相比,光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)加速度计具有抗电磁干扰、体积小、耐高温、分辨率高等特点<sup>[6-7]</sup>。光纤光栅加速度计在石油勘探、生产测井、边界安全等方面具有潜在的应用前景<sup>[8-9]</sup>。

近年来,研究人员提出了各式各样的光纤光栅加速度计结构,其中悬臂梁和圆膜片这两种典型结构得到了广泛的研究<sup>[10-12]</sup>。早期的单悬臂梁光纤光栅传感器具有灵敏度高、抗横向干扰能力弱的特点。相比之下,普通圆膜片结构抗横向干扰能力强、灵敏度低。在此基础上,研究人员提出了各种方案对结构进行优化,以平衡传感器抗横向干扰能力和灵敏度两个指标。例如,2015年,曾宇杰等设计了一种基于L形刚性梁与弹性膜片结合的光纤光栅加速度传感器。该结构有效增强了结构稳定性,消除了传统悬臂梁结构抗横向干扰能力弱的现象。加速度传感器在 20~70 Hz 的低频段具有平坦的灵敏度响应,灵敏度约为 220 pm/g,  $g$  为重力加速度,线性响应的相关度为 99.98%,横向干扰度为 2.31%<sup>[13]</sup>。2016年,LIU Qinpeng 等开发了一种基于双悬臂梁的光纤光栅加速度计。实验结果表明,该加速度计具有良好的响应特性,其平坦频率范围为 4~30 Hz,相应的灵敏度范围为 77.6~108 pm/g,当平坦度小于 3 dB 时,横轴灵敏度小于主轴灵敏度的

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61927812, 61735014, 62005214)

第一作者:樊伟(1979—),男,讲师,硕士,主要研究方向为光纤光栅传感、光纤油气田勘探、光纤油气田测井等。Email: fanwei@xsyu.edu.cn

通讯作者:乔学光(1955—),男,教授,博士,主要研究方向为光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、物探、油气管线检测等。

Email: xgqiao@nwu.edu.cn

收稿日期:2022-03-31;录用日期:2022-06-13

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

3.89%, 对称结构可以有效地消除温度敏感性<sup>[14]</sup>。2018年, 贾振安等提出了一种基于悬臂梁和滑动杆结合的光纤光栅加速度计。此传感器频率响应曲线的平坦区域在10~38 Hz之间, 传感器的谐振频率为62 Hz, 灵敏度为52.8 pm/g。与光纤光栅仅沿光纤轴向受力的实验相比较, 加速度灵敏度提高了70.8%<sup>[15]</sup>。2019年, 魏莉等设计了一种“土”字形梁式结构, 通过实验得到传感器的稳定工作频带为20~80 Hz, 加速度灵敏度为120.3 pm/g, 谐振频率为237.5 Hz, 横向干扰度小于5%<sup>[16]</sup>。此外, 2021年, ZHANG Faxiang等开发了一种基于双膜片和H形铰链组合结构的光纤光栅加速度计。采用H形铰链结构, 突破了灵敏度与谐振频率之间的限制。在平坦频率范围内, 交叉灵敏度小于-26 dB<sup>[17]</sup>。

本文报道了一种新型膜片式悬臂梁加速度计的设计和实验。它将平面圆膜片和等强度悬臂梁结合在一起, 减少了横向干扰, 提高了灵敏度。实验结果表明, 该传感器具有1~35 Hz的平坦频率范围。相应的灵敏度为452.6 pm/g, 线性度为99.9%。与其它加速度计相比, 该加速度计不仅具有较高的主轴灵敏度, 而且还具有降低横轴灵敏度的功能。此外, 该传感器结构简单、易于封装, 能够满足低频地震勘探技术的检测要求。

## 1 加速度计设计

### 1.1 结构与工作原理

如图1(a), 膜片式悬臂梁是由铍青铜薄板加工成圆形膜片, 然后在圆形膜片上等间隔90°切割出四根对称分布的等强度悬臂梁。四根等强度悬臂梁分别沿 $x$ 、 $y$ 方向, 四梁共同支撑位于膜片中心的铜质惯性质量块。组装好的加速计结构如图1(b), 膜片和底座粘接后, 其边缘通过螺丝固定在底座和垫片之间, 垫片起到二次固定膜片边缘的作用。然后, 选用反射率大于等于90%, 光栅的栅区长度为10 mm的光纤光栅, 施加预应力后的中心波长为1 539.15 nm。将该光纤光栅采用两点粘贴的方式, 用302胶水固定在膜片式悬臂梁的其中一条悬臂的中心线上, 其一端的尾纤穿过膜片式悬臂梁和垫片的间隙和外部的光学解调设备相连。

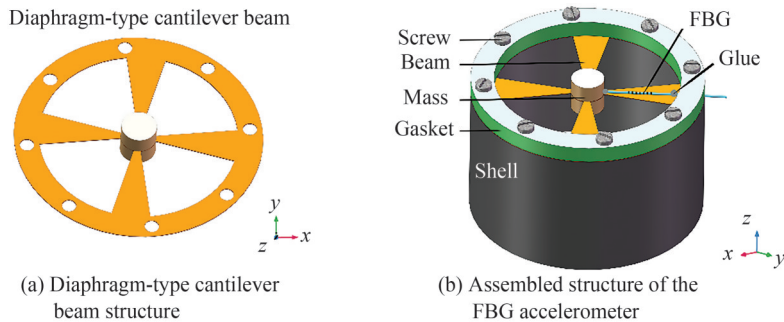


图1 结构示意图  
Fig. 1 Structural diagram

当光纤光栅加速度计底座在垂直于悬臂表面的 $z$ 方向上振动时, 光纤光栅感应到惯性力, 从而改变中心波长, 实现加速度测量。

### 1.2 理论分析

由于膜片式悬臂梁结构的边缘固定约束在了底座和垫片之间, 其自由端近似等效为四个尺寸相同的等强度悬臂梁共同支撑中心的质量块。根据材料力学的相关知识<sup>[18]</sup>, 膜片式悬臂梁刚度为

$$K = 4 \frac{bh^3 E}{4l^3} = \frac{bh^3 E}{l^3} \quad (1)$$

式中,  $b$ 为梁的宽度,  $h$ 为梁的厚度,  $l$ 为梁的长度,  $E$ 为梁的弹性模量。

光纤的弹性刚度可以表示为

$$K_f = \frac{E_f A_f}{L} \quad (2)$$

式中,  $E_f$ 为光纤的杨氏模量,  $A_f$ 为光纤的横截面积,  $L$ 为光纤的有效长度。

传感结构的应力分析如图2。在静止状态下,光纤与水平方向的夹角为 $\theta$ ,悬臂梁在重力作用下的最大应变位移为 $z$ ,传感结构的等效质量为 $M$ 。

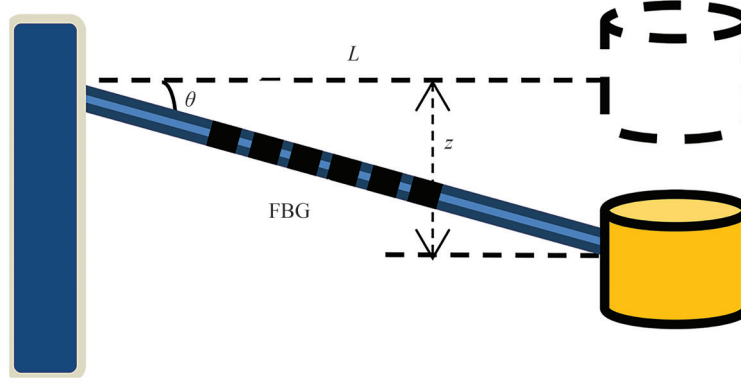


图2 光纤光栅和质量块振动模型  
Fig.2 FBG and mass block vibration model

传感结构的应力分析表明

$$K_l L_1 \sin \theta + Kz - Mg = 0 \quad (3)$$

式中, $L_1$ 为水平静止状态下光纤的长度改变量。

悬臂梁位移驱动光纤光栅应变,光纤光栅的初始应变可表示为

$$\epsilon_0 = \frac{L_1}{L} = \frac{\sqrt{L^2 + z^2} - L}{L} \quad (4)$$

根据式(1)~(4),传感结构的等效刚度为

$$K_{\text{eff}} = \frac{Mg}{z} = \frac{E_f A_f l^3 \epsilon_0 + bh^3 EL(\epsilon_0 + 1)}{L(\epsilon_0 + 1)l^3} \quad (5)$$

因此,加速度计的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_f A_f l^3 \epsilon_0 + bh^3 EL(\epsilon_0 + 1)}{L(\epsilon_0 + 1)l^3 M}} \quad (6)$$

根据振动传感理论,当振动频率远小于谐振频率时,悬臂的位移可表示为

$$\Delta z = \frac{a}{(2\pi f)^2} = \left( \sqrt{\epsilon_1^2 + 2\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_0^2 + 2\epsilon_0} \right) L \quad (7)$$

由于低频振动幅度较小,将式(7)进行泰勒展开,可得

$$\Delta z = \frac{(\epsilon_0 + 1)L}{\sqrt{\epsilon_0^2 + 2\epsilon_0}} \epsilon \quad (8)$$

光纤光栅中心波长的变化为

$$\Delta \lambda = \lambda(1 - p_e) \epsilon \quad (9)$$

式中, $\lambda$ 为光纤光栅的中心波长, $p_e$ 为光纤的有效弹性光学系数。

根据式(7)~(9),光纤光栅加速度计的主振 $z$ 方向灵敏度为

$$S = \frac{\Delta \lambda}{a} = \frac{\lambda(1 - p_e)l^3 M \sqrt{\epsilon_0^2 + 2\epsilon_0}}{E_f A_f l^3 \epsilon_0 + bh^3 EL(\epsilon_0 + 1)} \quad (10)$$

## 2 仿真结果

### 2.1 加速度计的优化仿真

根据上述理论分析,影响光纤光栅加速度计谐振频率和灵敏度的主要因素是膜片式悬臂梁的结构各

个参数和光纤的有效长度。这些因素可以通过MATLAB数值模拟来进一步分析。

图3是膜片式悬臂结构中悬臂长度 $l$ 、悬臂宽度 $b$ 、质量块质量 $M$ 和光纤有效长度 $L$ 的模拟分析。从图3可以看出:1)随着光纤有效长度、质量块质量、悬臂长度的增加和悬臂宽度的减小,传感器的谐振频率逐渐降低,但当光纤有效长度大于5 mm时,它对谐振频率几乎没有影响;2)传感器的灵敏度将随着悬臂长度、质量块质量的增加、悬臂宽度和光纤有效长度的减小而增加。

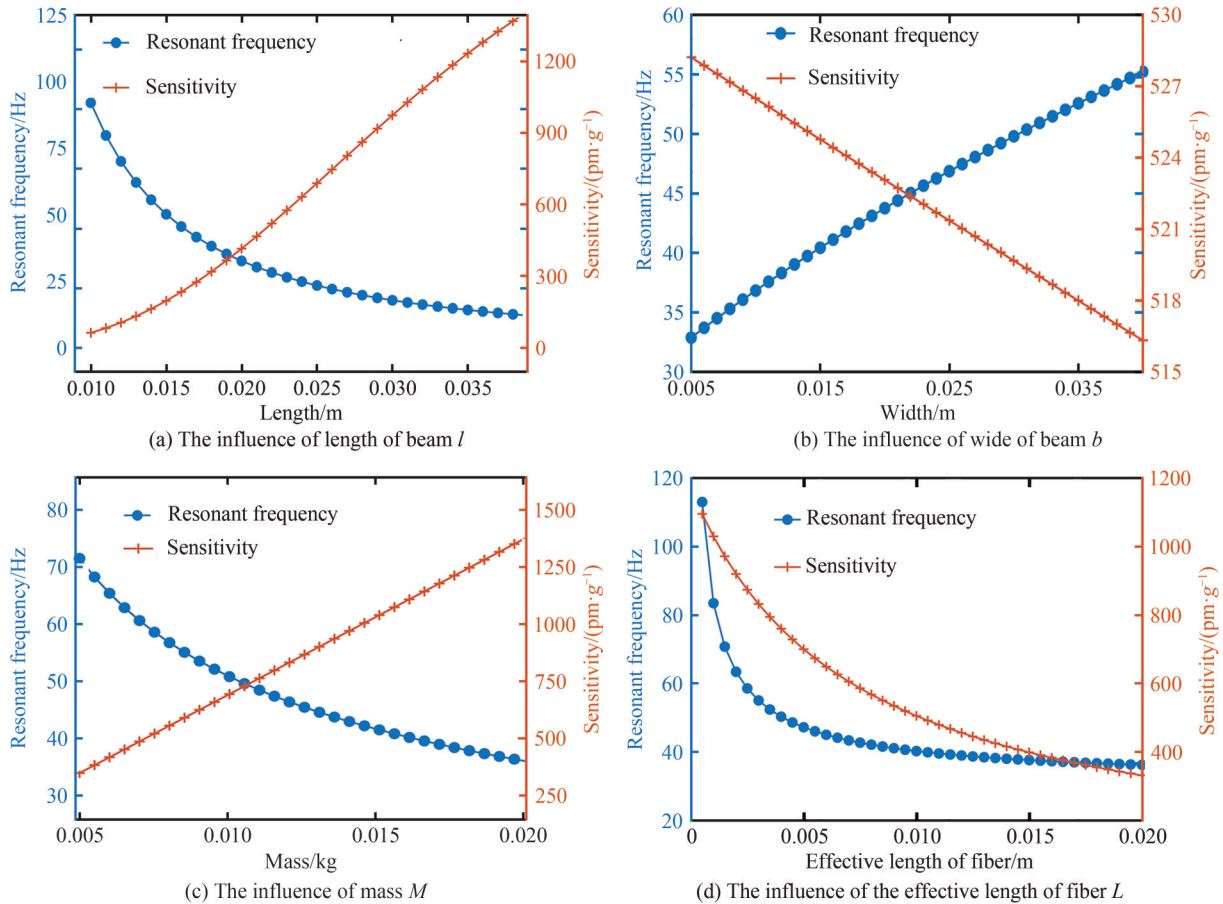


图3 主要参数对谐振频率和灵敏度的影响

Fig. 3 The influence of major parameters on the resonant frequency and sensitivity

根据数值模拟结果、所选光纤光栅的规格和实际测量环境的要求,最终选定加工的参数值如表1。

表1 光纤光栅加速度计参数  
Table 1 Parameters of the FBG accelerometer

Symbol	Quantity	Value
$l$	Length of beam	20.1 mm
$b$	Width of beam	10.5 mm
$h$	Thickness of beam	0.1 mm
$L$	Effective length of fiber	10 mm
$\lambda$	Center wavelength of FBG	1 539. 15 nm
$M$	Mass	$7.5 \times 10^{-3}$ kg
$E$	Young's modulus of beam	130 GPa
$E_f$	Young's modulus of fiber	72 GPa
$A_f$	Cross-sectional area of fiber	$1.227 \times 10^{-8}$ m <sup>2</sup>
$P_e$	Effective elastic-optical coefficient of fiber	0.22

## 2.2 有限元模态分析

根据表1提供的参数,通过COMSOL仿真软件建立有限元模型,在分析时建立了相关约束条件,在膜片边缘施加固定支撑约束,设置膜片材料为铍青铜、质量块材料为黄铜。通过网格划分计算求解提取其前二阶模态的谐振频率,并进一步分析结构的振动形式。模拟结果如图4。一阶模态振型的谐振频率为49.5 Hz,振动形式为四个悬臂支撑的中心质量块沿z轴上下振动,该振型符合设计初衷。二阶模态振型的谐振频率为182.9 Hz,振动形式对应于横向的弯曲形状的模态,二阶模态振型的谐振频率是一阶模态振型谐振频率的3.69倍,传感器的二阶模态的谐振频率远大于一阶模态谐振频率,可以避免检测时发生交叉耦合,有利于减小横向灵敏度,提高传感器在z轴方向上输出的准确度,满足低频振动信号的监测需求。

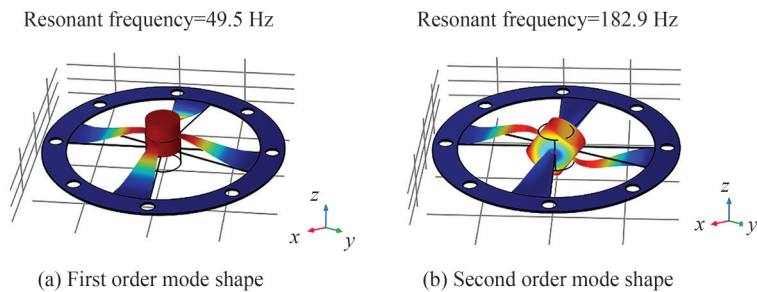


图4 COMSOL 仿真图  
Fig.4 COMSOL simulation diagram

## 3 实验研究

传感器实验原理图和仪器配置如图5。在传感器振动实验过程中,采用LabGenius-IM1208C信号发生器将不同频率和振幅的信号输出到LFD-1功率放大器,功率放大器将信号放大后直接输出到LFC型低频振动台(苏州东菱),以便产生相应频率和幅值的周期性振动。用于校准光纤光栅传感器的MSA1000A美泰MEMS传感器的灵敏度为1 000 mV/g,分辨率为0.1 mg。

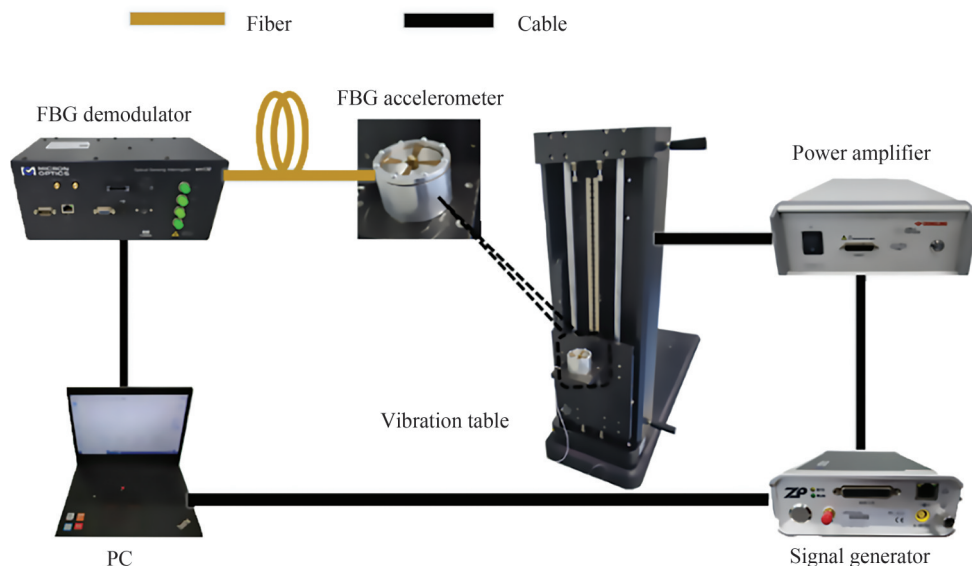


图5 实验原理图和硬件配置  
Fig.5 The experimental schematic diagram and hardware layout

光纤光栅传感器的中心波长偏移由光纤光栅解调器(Micron Optics, USA)获得,扫描频率为4 000 Hz,测量精度为 $\pm 3$  pm。实验在22.5℃的实验室环境下进行。由于环境温度变化缓慢,温度波动对测量结果的影响可以忽略。

### 3.1 加速度计灵敏度测试

打开低频振动台,控制信号发生器来产生标准的正弦信号,1 Hz单独测量完成后,频率从5 Hz开始,以5 Hz间隔频率逐步递增。当频率到达45 Hz附近时,间隔缩短至1 Hz,以便随后能通过实验来进一步得到谐振频率。

实验过程中,在同一频率下,通过改变不同的加速度来得到该频率下光纤光栅的波长改变情况,从而得到该频率下的传感器灵敏度。图6是其中传感器的时域响应波形,图6(a)选择的信号频率为1 Hz,加速度为0.1 g ( $1 g = 10 \text{ m/s}^2$ ),图6(b)选择的信号频率为20 Hz,加速度为0.1 g,二者波形响应良好,接近正弦。图7是选择了实验中的部分频率,横坐标设置为所加载的加速度,纵坐标设置为光纤光栅中心波长的偏移量。同一频率下加速度从0.05 g~0.9 g之间变化,通过线性拟合,得到拟合直线的斜率,由斜率可知各个频率的灵敏度。从图7中可看出:不同频率的线性度均大于99.9%,灵敏度均大于430 pm/g。

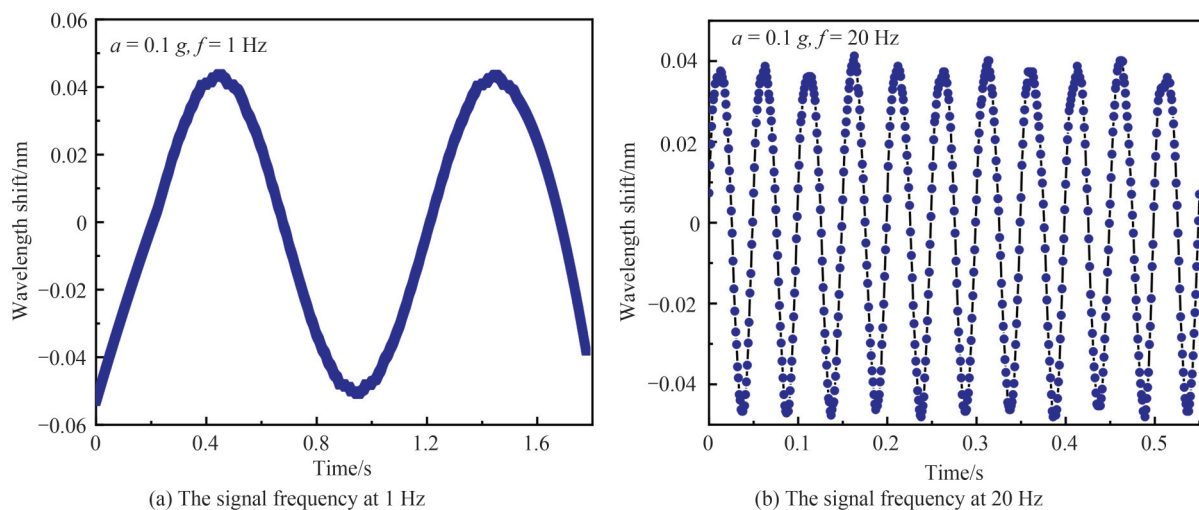


图6 加速度计输出响应

Fig. 6 Accelerometer output response

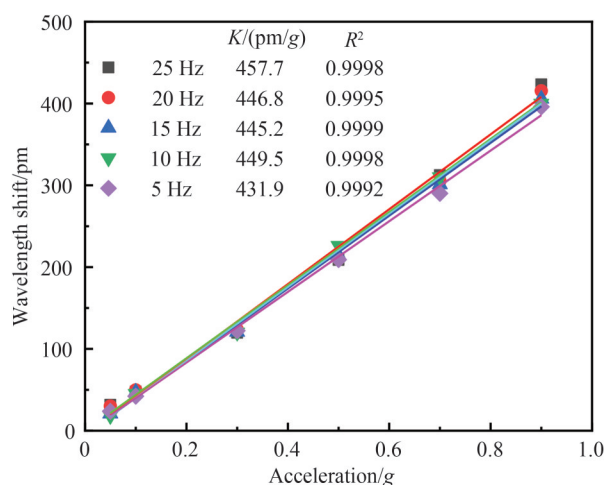


图7 不同频率下加速度的波长响应

Fig. 7 The wavelength response to acceleration at different frequencies

### 3.2 幅频响应试验

如图8所示,通过前一步测量到的每个频率下的灵敏度,将横轴设置为频率,纵轴设置为灵敏度,可以绘制出幅频特性曲线。由图可知:1)谐振频率为48 Hz,这和仿真模拟中得到谐振频率49.5 Hz的结果基本一致;2)平坦区为1~35 Hz,即本文所设计制造的加速度计的工作范围为1~35 Hz;3)工作区的所有测量点灵敏度取平均值可得,工作区的平均灵敏度为452.6 pm/g。

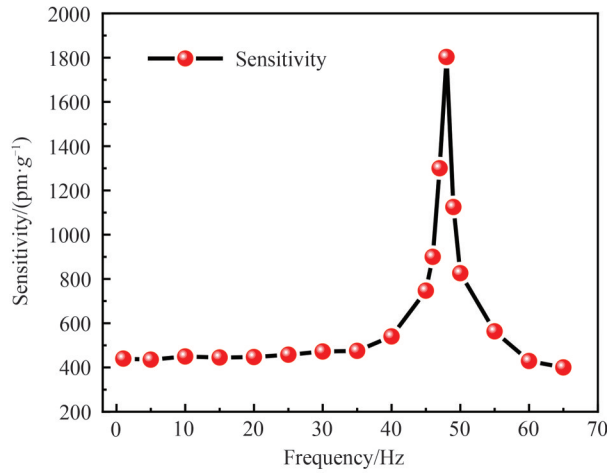


图8 加速度计幅频响应测试曲线

Fig. 8 Test curve of the amplitude-frequency response of accelerometer

加速度计的方向抗干扰特性是其实际应用的一个重要指标。该传感器为单自由度加速度计,为了验证其抗干扰能力,将振动台水平放置,即光纤光栅加速度计的工作方向旋转 $\pi/2$ ,使振动方向垂直于工作方向,测量得到两个方向的灵敏度曲线如图9。交叉轴方向( $y$ 方向)在 $1\sim 35$  Hz范围内灵敏度的平均值为 $9.77$  pm/g,交叉灵敏度为主轴灵敏度的 $2.16\%$ 。

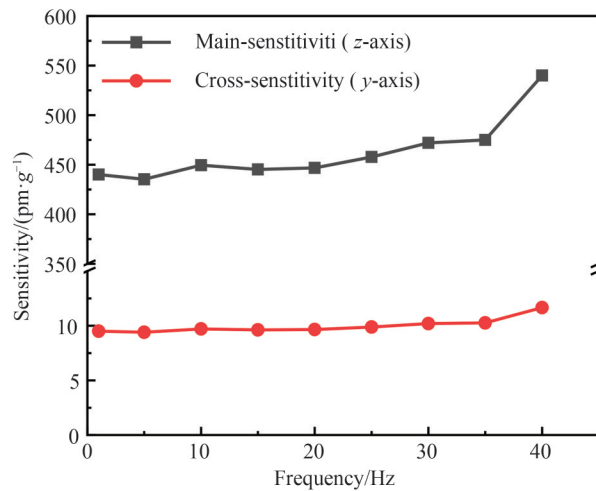


图9 加速度计的抗干扰特性

Fig. 9 The anti-interference characteristic of the accelerometer

### 3.3 冲击响应试验

为从实验中再一次验证传感器的谐振频率,进行了冲击响应测试。选用橡皮锤作为振动源,敲击放置传感器的平台,产生冲击振动信号。由于冲击信号包含大量的振动信息,冲击响应完全由传感器系统本身决定,对冲击响应测试结果应用快速傅立叶变换(FFT),所得到的结果中最大响应值之一是加速度计的谐振频率。

时域冲击响应的傅里叶谱如图10,从图中可知最大频率响应为 $48.0$  Hz。由此得到的测量结果与幅频特性实验中的测量结果一致。图10中插图是加速度计时域冲击响应,可以看到加速度计具有良好的冲击响应。

如表2,将参考文献中的光纤光栅加速度计和本文所提出的结构对比,可知在满足实际地震勘探中的低频振动范围的前提下,本文所提出结构的灵敏度和横向抗干扰能力均优于其它加速度计,这也间接反映出本文所提出的结构具有较强的优势。

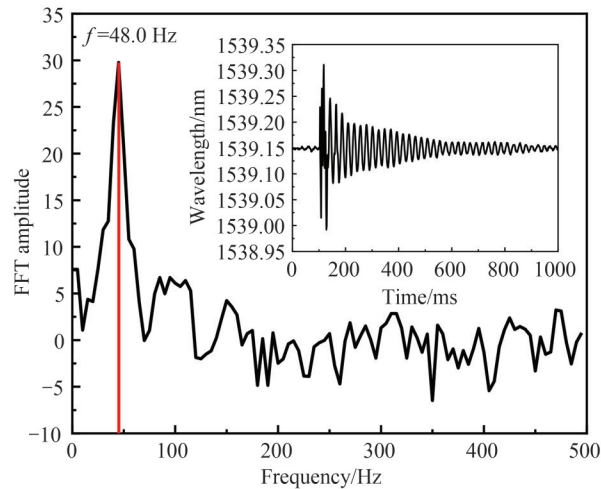


图10 时域冲击响应的傅里叶谱

Fig. 10 Fourier spectrum of the impact response in the time domain

表2 不同文献中的光纤光栅加速度计对比

Table 2 Comparison of FBG accelerometers in different literatures

Ref.	Sensitivity/( $\text{pm}\cdot\text{g}^{-1}$ )	Resonant frequency/Hz	Measuring range/Hz	Lateral immunity /%
[13]	220	115	20~70	2.31
[14]	77.6	41	4~30	3.89
[15]	52.8	62	10~38	4.30
[16]	120.3	237.5	20~80	5
[17]	40.3	1 600	1~1 000	15
This study	452.6	48	1~35	2.16

## 4 结论

提出了一种基于膜片式悬臂梁结构的新型光纤光栅加速度计。光纤光栅加速度计采用四个边缘固定、中心对称分布的等强度悬臂梁作为弯曲敏感元件。实验结果表明,加速度计的工作范围为1~35 Hz,谐振频率为48 Hz,加速度灵敏度为452.6  $\text{pm}/\text{g}$ 。由于横向灵敏度仅为工作方向灵敏度的2.16%,因此加速度计具有很强的横向抗扰能力。最后,通过与其它文献中的加速度计对比,本文所提出结构在灵敏度和横向抗干扰能力等方面具有一定的优势。综上,本文所设计的光纤光栅加速度计为单分量光纤光栅加速度计在低频地震勘探中的实际应用提供了一种新的方法。

### 参考文献

- [1] YUE Yonggao, JIANG Tao, ZHOU Qi. The application of variable-frequency directional seismic wave technology under complex geological conditions [J]. *Near Surface Geophysics*, 2018, 16(5): 545-556.
- [2] LAYTON C, GREENAN B J W, HEBERT D, et al. Low-frequency oceanographic variability near Flemish cap and Sackville spur [J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2018, 123(3): 1814-1826.
- [3] LIU Chengming, WANG Deli, SUN Jialin, et al. Stratigraphic absorption compensation based on multiscale shearlet transform [J]. *Acta Geophysica*, 2018, 66(4): 575-584.
- [4] JAKOBSEN M, WU R S. Accelerating the T-matrix approach to seismic full-waveform inversion by domain decomposition [J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66(6): 1039-1059.
- [5] SUN Miaomiao, LI Zhenchun, LIU Yanli, et al. Low-frequency expansion approach for seismic data based on compressed sensing in low SNR [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2021, 11(11): 21-30.
- [6] FUJIHASHI K, AOKI T, OKUTSU M, et al. Development of seafloor seismic and tsunami observation system [C]. *Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, 2007.
- [7] TODD M D, JOHNSON G A, ALTHOUSE B A, et al. Flexural beam-based fiber bragg grating accelerometers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(11): 1605-1607.



- [8] RONG Qiangzhou, QIAO Xueguang. FBG for oil and gas exploration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2502-2515.
- [9] HAN Heming, SHI Bin, ZHANG Lei, et al. Deep displacement monitoring and foundation base boundary reconstruction analysis of diaphragm wall based on ultra-weak FBG [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 117(12): 215-223.
- [10] GUO Yongxing, ZHANG Dongsheng, ZHOU Zhude, et al. Cantilever based FBG vibration transducer with sensitization structure [J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, 9(6): 410-413.
- [11] GUO Yongxing, ZHANG Dongsheng, ZHOU Zhude, et al. Research progress in fiber-bragg-grating accelerometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060001.
- [12] MULLER M S, BUCK T C, KOCH A W, et al. Fiber bragg grating-based acceleration sensor [C]. 2009 - International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2009.
- [13] ZENG Yujie, WANG Jun, YANG Huayong, et al. Fiber bragg grating accelerometer based on L-shaped rigid beam and elastic diaphragm for low-frequency vibration measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 98-106.  
曾宇杰,王俊,杨华勇,等.基于L形刚性梁与弹性膜片结构的低频光纤光栅加速度传感器[J].*光学学报*,2015,35(12): 98-106.
- [14] LIU Qinpeng, JIA Zhenan, FU Haiwei, et al. Double cantilever beams accelerometer using short fiber bragg grating for eliminating chirp [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(17): 6611-6616.
- [15] JIA Zhenan, ZHANG Xing, LI Kang, et al. Study of a novel sliding rod FBG vibration sensor [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2018, 29(10): 1053-1057.  
贾振安,张星,李康,等.一种新型滑动杆式光纤光栅振动传感器研究[J].*光电子·激光*,2018,29(10):1053-1057.
- [16] WEI Li, LIU Zhuang, LI Hengchun, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for “土”-shaped beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019,39(11):90-98.  
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):90-98.
- [17] ZHANG Faxiang, JIANG Shaodong, WANG Chang, 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.
- [18] FAN Qinshan, YIN Junya, TANG Jinglin. *Mechanics of materials*. 3th ed. [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 171-191.  
范钦珊,殷雅俊,唐靖林.材料力学.第3版[M].北京:清华大学出版社,2014:171-191.

## Low-frequency Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on Diaphragm-type Cantilever beam (Invited)

FAN Wei<sup>1,2</sup>, FENG Dequan<sup>1,2</sup>, QIAO Xueguang<sup>1</sup>

(1 School of Physics, Northwest University, Xi'an 710127, China)

(2 Key Laboratory of Photoelectricity Gas-oil Logging and Detecting, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In the process of deep oil and gas exploration, low-frequency signal plays a key role. Therefore, accelerometers that can receive low-frequency signals are particularly important in low-frequency exploration. Compared with electric accelerometers, the Fiber Bragg Grating (FBG) accelerometer has the characteristics of anti-electromagnetic interference, small size, high-temperature resistance, and high resolution. Researchers have proposed various FBG vibration sensor structures, in which cantilever beam and circular diaphragm are two typical structures and have been widely studied. The early single cantilever fiber grating sensor has the characteristics of high sensitivity and weak lateral interference resistance. In contrast, the ordinary circular diaphragm structure has strong lateral interference resistance and low sensitivity. In this paper, we propose a low-frequency FBG accelerometer based on a diaphragm-type cantilever structure. It combines a plane circular diaphragm and an equal strength cantilever beam into one, which reduces the lateral interference and enhances the sensitivity coefficient. The diaphragm-type cantilever is made of a beryllium bronze sheet into a circular diaphragm. Then four symmetrically distributed equal strength cantilever beams are cut into the diaphragm. The four suspension beams jointly support a copper inertial mass block located in the diaphragm center. The edge of the diaphragm is fixed between the base and the gasket through screws. An FBG with a central wavelength of 1 539.15 nm, a

reflectivity of 90% and a grating area length of 10 mm is selected. The FBG is pasted at two points and fixed on the centerline of one cantilever of the diaphragm-type cantilever with 302 glue. The tail fiber at one end passes through the gap between the diaphragm-type cantilever and the gasket and is connected with the external optical demodulation equipment. According to the theoretical analysis, the optimal size of structural parameters of the diaphragm cantilever beam is obtained by MATLAB numerical simulation. According to the optimal size, a finite element model is established by COMSOL simulation software to further analyze the vibration form of the structure. The simulation results show that when the edge of the diaphragm cantilever is set as a fixed constraint, the resonance frequency of the first mode is 49.5 Hz. The vibration form is that the central mass of four cantilever supports vibrates up and down along the z-axis, and the vibration mode conforms to the original design intention. Simultaneously, the tested results of sensing characteristics from the shaking table indicate that the system has an excellent response to low-frequency acceleration excitation signals when the natural frequency of the system is 48 Hz. The frequency response range of the system is 1~35 Hz, in which the acceleration sensitivity is 452.6 pm/g. The acceleration sensor is designed with strong lateral immunity since the sensitivity in the transverse sensitivity is only 2.16% of the sensitivity in the working direction. Therefore, the designed FBG accelerometer provides a new method for the single component FBG accelerometer in the practical application of seismic exploration.

**Key words:** Fiber Bragg grating; Accelerometer; Diaphragm-type cantilever; Vibration; Lateral anti-interference

**OCIS Codes:** 060.3735; 060.3738; 280.4788; 120.7280