

# 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

曾宇杰<sup>1</sup> 王 俊<sup>2</sup> 杨华勇<sup>1</sup> 马丽娜<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

<sup>2</sup>国防科学技术大学 海洋科学与工程研究院, 湖南 长沙 410073

**摘要** 为满足低频振动信号精确测量的实际需要,设计了一种基于L形刚性梁与弹性膜片结构的光纤布拉格光栅加速度传感器。进行了结构理论分析,并通过Matlab仿真讨论了各结构参量对传感器灵敏度和谐振频率的影响,进行了参量优化设计。根据理论分析结果制作了加速度传感器并对其加速度灵敏度的幅频特性、线性响应和抗横向干扰特性进行了测试。实验结果表明,L形刚性梁的传动结构有效增强了结构稳定性,消除了传统悬臂梁结构带来的光纤光栅啁啾或反射谱多峰现象。加速度传感器在20~70 Hz的低频段具有平坦的灵敏度响应,加速度灵敏度可达220 pm/g,线性响应的相关度为99.98%;金属膜片使得该传感器具有较强的抗横向干扰能力,在工作频段内横向串扰为-32.73 dB。

**关键词** 传感器;加速度传感器;光纤布拉格光栅;低频;弹性膜片

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1206005

## Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on L-Shaped Rigid Beam and Elastic Diaphragm for Low-Frequency Vibration Measurement

Zeng Yujie<sup>1</sup> Wang Jun<sup>2</sup> Yang Huayong<sup>1</sup> Ma Lina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

<sup>2</sup>Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A fiber Bragg grating accelerometer based on L-shaped rigid beam and elastic diaphragm is designed for high-precision detection of low-frequency vibration signals. The structure of accelerometer is analyzed theoretically, and the influence of each parameter on the sensitivity and resonant frequency is discussed by simulation with Matlab. Optimization design is made on the basis of simulation. According to the analysis result, the accelerometer is made. The sensing performances that include amplitude-frequency characteristic, linear response and ability of resisting transverse interference in the cross-axis are tested experimentally. Experimental results show that the structure of accelerometer is stable by using L-shaped rigid beam. Also the chirp effect of grating and the multi-peak of reflective spectrum are avoided. The sensor has good performances in detection of low-frequency vibration signals because it has flat response from 20 Hz to 70 Hz and the sensitivity is about 220 pm/g with a linear coefficient of 99.98%. Elastic diaphragm used as elastic element efficiently eliminate transverse interference while the interference degree can be less than -32.73 dB.

**Key words** sensors; accelerometer; fiber Bragg grating; low-frequency; elastic diaphragm

**OCIS codes** 060.2370; 060.3735; 280.4788

收稿日期: 2015-05-26; 收到修改稿日期: 2015-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(11304388)

作者简介: 曾宇杰(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: 15574944101@163.com

导师简介: 杨华勇(1974—),男,博士,教授,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: yanghuayong@21cn.com

# 1 引 言

基于光纤布拉格光栅(FBG)传感技术的振动传感器以其灵敏度高、精度高、功耗低、抗干扰能力强、易于成阵复用等优点,在振动测量领域占据着重要的地位,吸引国内外研究人员开展了广泛而深入的研究。对FBG加速度传感器的研究,主要集中在加速度传感器结构设计和弹性材料选择方面。目前已有的FBG加速度传感器大体可分为嵌入式结构<sup>[1]</sup>、梁式结构<sup>[2-6]</sup>和芯轴式结构<sup>[7-8]</sup>三种。

近年来,FBG加速度传感器越来越多地应用在军事反潜、大型工程结构健康监测<sup>[9-10]</sup>、地质勘探和新能源开发<sup>[11-12]</sup>、地震及海啸预警<sup>[13-14]</sup>等方面。在这些应用领域中,频率在100 Hz以下且幅值较小的振动信号往往十分关键,精确测量具有一定的难度。嵌入式结构自然频率过高,交叉串扰大,不适合用于低频振动的探测。芯轴式结构的性能则受弹性体选择的影响较大:弹性体刚度小的灵敏度高、谐振频率低,但横向串扰也随之增大;弹性体刚度大的结构稳定,但往往谐振频率较高而灵敏度过低。传统梁式结构则大多因光栅的粘贴封装方式而易受啁啾或多峰现象的影响,致使测量结果不准确。针对这一情况,本文设计了一种基于弹性膜片和L形刚性梁的FBG加速度传感器,并制作了可以灵活扩展成为双光纤光栅对称推挽式结构的探头,能够放大振动信号,有效抑制横向干扰的影响。该加速度传感器在低于100 Hz的频段具有高灵敏度和平坦的幅频响应特性,可以实现对低频微弱振动信号的实时准确测量。

# 2 传感器设计

FBG振动传感器是利用FBG的波长调制原理,将振动的加速度量转化为FBG的应变变量,进而实现布拉格波长调制,通过跟踪布拉格波长变化即可获得振动信号的振幅和频率信息。当外界应力变化作用在FBG上时,由于材料的弹性应变导致光栅周期 $\Lambda$ 发生变化,同时由于光纤本身所具有的弹光效应和波导效应等因素,有效折射率 $n_{eff}$ 也会发生变化。轴向应变 $\epsilon_x$ 引起的布拉格波长漂移可表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon_x, \tag{1}$$

式中 $\lambda_B$ 为FBG的初始布拉格波长, $\Delta\lambda_B$ 为波长漂移量, $P_e$ 为光纤有效弹光系数,对于刻写光栅所使用的掺锗石英光纤,通常可取 $P_e=0.22$ 。根据上述FBG加速度传感器的基本设计原理,设计了一种基于L形刚性梁和弹性膜片结构的加速度传感器探头,设计结构原理图如图1所示(1:L型刚性梁;2:弹性膜片;3:探头底座;4:质量块;5:底盘;6:顶盖;7:FBG;8:轴承座;9:轴承;10:连接螺栓)。该传感器采取了一种L形刚性梁结构,主要由L形刚性梁、质量块、弹性膜片、轴承系统和FBG组成。L形刚性梁及底座上对应位置开有直径为1 mm的通孔,封装时光纤穿过通孔,施加预应力后,使用诺泰胶将光纤光栅两端分别粘接固定于A、B两点,可避免栅区粘贴带来的光纤光栅啁啾或反射波多峰现象。L形梁端面设计成矩形,宽度远大于厚度,这样可以通过提高抗弯刚度减少横向干扰的影响。弹性膜片作为弹性元件通过螺栓与质量块、L形梁固定连接,构成“块-簧式”系统,可减小横向串扰,扩大频率响应范围并提高灵敏度。在传感器随被测对象运动时,其加速度 $a$ 在质量块上产生相反的惯性力 $F$ ,质量块受迫振动,驱动L形梁绕轴承转动,将振动转化为光栅的均匀应变。质量块线性位移量的大小与光栅应变成比例,同时也与 $F$ 成正比,即与 $a$ 成正比,因此测量光栅应变即

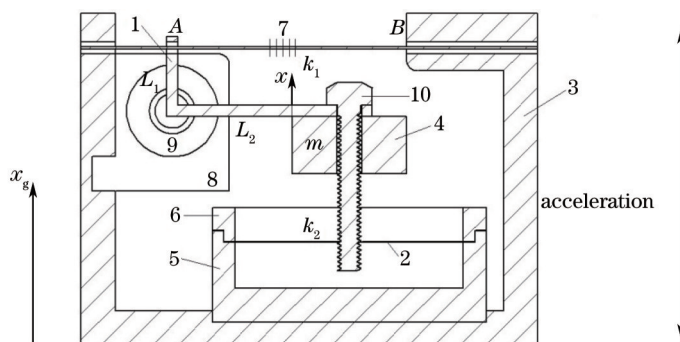


图1 FBG加速度传感器结构图  
Fig.1 Structure diagram of FBG accelerometer

可获得加速度,从而实现对外界振动的传感。采用转动轴能使传感器结构更加稳定,消除几何非线性的影响。底座上开有光纤出口,便于引出光纤并与解调系统相连<sup>[15-16]</sup>。

### 3 理论分析

如图1中所示, $x$ 为质量块和探头外壳的相对位移,而 $x_g$ 为被测物相对于地面振动的位移。考虑待测振动信号是角频率为 $\omega$ 的简谐振动情况,则有:加速度 $a = \ddot{x}_g = A \exp(i\omega\tau)$ ,  $x = \exp(i\omega\tau)$ ,其中 $A$ 为加速度幅值,而该结构动力稳态响应的振幅 $X$ 可表示为<sup>[10]</sup>:

$$X = Q \frac{1}{\omega_0^2} A, \quad (2)$$

式中 $\omega_0$ 为系统的固有角频率: $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , $m$ 为质量块的质量, $k$ 为系统总刚度。动力放大系数 $Q$ 为:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (3)$$

由加速度传感器的幅频特性可知,当针对低频振动信号探测的FBG加速度传感器在其工作频带内工作时,可近似为零频的情况,即 $Q=1$ 。则待测加速度 $a$ 引起的弹性膜片的中心偏移可表示为:

$$\rho = \frac{a}{\omega_0^2} = \frac{ma}{k}. \quad (4)$$

在该探头结构中,可认为质量块的质量远大于其他部件,将L形梁看作刚体,只考虑光纤和弹性膜片的弹性系数。在这一条件下,对系统的谐振频率和灵敏度进行分析:设光纤的杨氏模量为 $E_t$ ,横截面积为 $A_t$ , $A$ 、 $B$ 两点间的长度为 $L$ ,弹性系数为 $k_1$ ,根据杨氏模量的定义及胡克定律可知 $k_1 = E_t A_t / L$ 。设弹性膜片的杨氏模量为 $E$ ,弹性系数为 $k_2$ ,根据材料力学知识,弹性膜片的弯曲刚度可表示为:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}, \quad (5)$$

式中 $\mu$ 是弹性膜片材料的泊松比, $t$ 是弹性膜片的厚度。定义无量纲系数:

$$A = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 - \frac{4 \ln^2\left(\frac{R}{r}\right)}{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1}, \quad (6)$$

式中 $R$ 和 $r$ 分别为弹性膜片的半径和与连接螺栓中心接触的半径。根据小挠度理论,由作用于膜片中心处垂直方向的外力 $F$ 引起的弹性膜片中心的偏移可表示为:

$$\rho_F = \frac{AR^2}{16\pi D} F, \quad (7)$$

因此,弹性膜片的等效弹性系数 $k_2$ 可表示为:

$$k_2 = \frac{16\pi D}{AR^2}. \quad (8)$$

如图2所示,设在方向垂直向上的合力 $F$ 的作用下,质量块(即 $A$ 点)产生向上大小为 $\Delta x_1$ 的位移,则系统的总刚度 $k$ 为: $k = F/\Delta x_1$ 。而此时合力 $F$ 对整个系统的作用应分为两部分,设其中 $F_1$ 使弹性膜片中心产生相同的 $\Delta x_1$ 的偏移,有 $F_1 = k_2 \cdot \Delta x_1$ ;而另一部分力 $F_2$ 则通过L形刚性梁传动结构作用在光纤上,使光纤产生向左的拉伸量 $\Delta x_2$ ,有 $T = k_1 \cdot \Delta x_2$ ;设L形悬臂梁短臂长为 $L_1$ ,长臂长为 $L_2$ ,根据L形悬臂梁结构的几何特性与杠杆原理可知: $T = F_2 \cdot L_2 / L_1$ ,  $\Delta x_2 = \Delta x_1 \cdot L_1 / L_2$ 。可见L形悬臂梁能够放大振动信号。由 $F = F_1 + F_2$ ,可得方程:

$$(k \cdot \Delta x_1 - k_2 \cdot \Delta x_1) \cdot \frac{L_2}{L_1} = k_1 \cdot \Delta x_1 \cdot \frac{L_1}{L_2}, \quad (9)$$

化简可推导得出系统总刚度 $k$ 与 $k_1$ 、 $k_2$ 的关系为:

$$k = (L_1/L_2)^2 k_1 + k_2 = \frac{16\pi D L_2^2 L + L_1^2 E_t A_t A R^2}{L_2^2 L A R^2}. \quad (10)$$

由以上推导过程,结合(4)式,得到加速度传感器工作时,FBG的应变变量 $\varepsilon$ 与弹性膜片的中心偏移量 $\rho$ 之间的关系<sup>[9]</sup>:

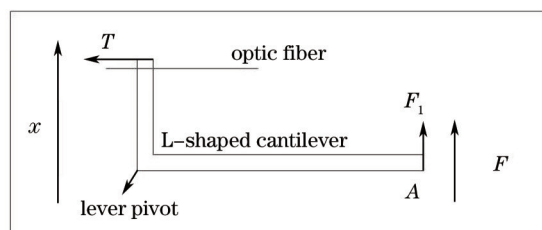


图2 L形刚性梁受力分析图

Fig.2 Analysis of the force and motion of L-shaped rigid beam

$$\varepsilon = \frac{L_1/L_2}{L} \rho = \frac{L_1/L_2}{L} \frac{ma}{k}, \quad (11)$$

根据加速度传感器灵敏度的定义及(1)式,加速度灵敏度  $S$  可表示为:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{a} = \lambda_B(1-p_c) \frac{\varepsilon}{a} = \lambda_B(1-p_c) \frac{L_1/L_2}{L} \frac{m}{k}, \quad (12)$$

代入各参量,可得灵敏度  $S$  与谐振频率  $f_0$  为:

$$S = 0.78\lambda \frac{mL_1L_2AR^2}{16\pi DL_2^2L + E_rA_rAL_1^2R^2}, \quad (13)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(L_1/L_2)^2 k_1 + k_2}{m}}. \quad (14)$$

## 4 仿真分析

由理论分析结果可以看出L形刚性梁长短臂  $L_1$  与  $L_2$  的比值、弹性膜片参数  $E$ 、 $t$  与质量块  $m$  等是影响加速度传感器灵敏度  $S$  和谐振频率  $f_0$  的几个关键参数。而针对低频微弱振动信号的测量,需要通过优化设计来尽可能地增大  $S$ , 并使  $f_0$  取到合适的值,以保证在良好的频率响应范围内获得高灵敏度指标。综合考虑传感器性能需求、制作工艺、探头尺寸和选材等因素,根据(13)式和(14)式,在给定其他参量的情况下,分别考虑探头结构中能够灵活调整的参量对传感器灵敏度和谐振频率的影响,以确定优化的方案。在传感器制作中选用的弹性膜片材料为普通不锈钢,杨氏模量  $E=200$  GPa,泊松比  $\mu=0.28$ 。

首先,由于探头的轴向尺寸应尽可能小以便于实际安装使用,取  $L_1=5.5$  mm,通过改变  $L_2$  的长度,来考察L形梁长短臂的长度比值的影响。图3是  $S$  与  $f_0$  随  $L_2$  变化的关系曲线,从中可以看出,在所取变化范围内,当  $L_2$  增大,  $S$  随之增大,而  $f_0$  迅速降低,并且当  $L_2$  大于 20 mm 时,变化基本趋于平稳。针对低频振动信号的测量,希望得到高的灵敏度与较小的谐振频率,于是可取  $L_2$  大于 20 mm,并满足整体结构尺寸要求。

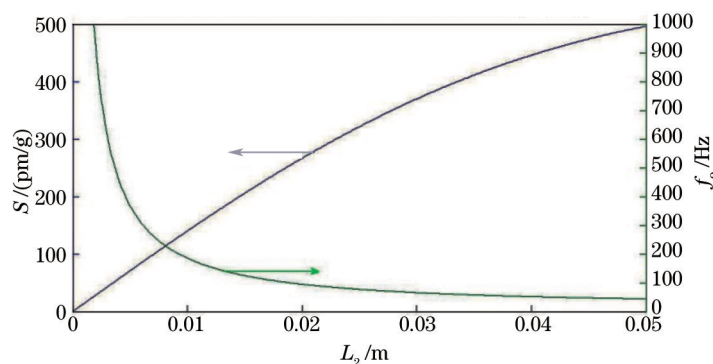


图3  $S$  与  $f_0$  随  $L_2$  变化的关系曲线 ( $L=34$  mm,  $L_1=5.5$  mm,  $\lambda=1532.6$  mm,  $m=6$  g,  $E=200$  GPa,  $t=0.02$  mm)

Fig.3 Relation curves of  $S$  and  $f_0$  changing with  $L_2$  ( $L=34$  mm,  $L_1=5.5$  mm,  $\lambda=1532.6$  mm,  $m=6$  g,  $E=200$  GPa,  $t=0.02$  mm)

考虑弹性膜片的影响,由于传感器装配结构及尺寸的限制,其半径  $R$  及中心接触半径  $r$  比较难改变,最方便的是对厚度  $t$  进行调整。如图4所示,随着弹性膜片厚度  $t$  的增大,  $S$  迅速降低而  $f_0$  增大,所以膜片要尽量薄一些。考虑到实际的选材及加工条件,可选取厚度分别为 0.02 mm 和 0.05 mm 两种规格的膜片进行测试。

最后考虑质量块质量  $m$  的影响,由图5可知,增大  $m$  会提高灵敏度并降低  $f_0$ 。但考虑尺寸因素,  $m$  无法做

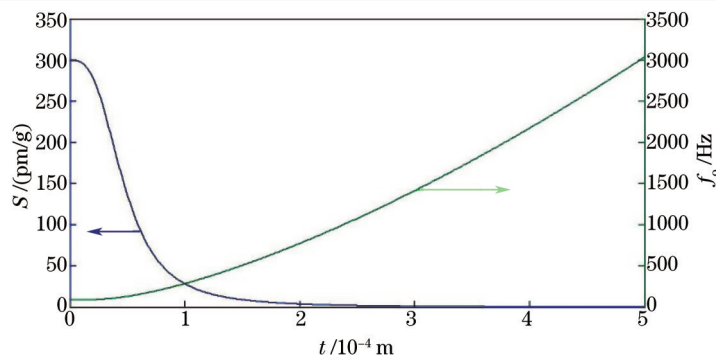


图 4  $S$  与  $f_0$  随  $t$  变化的关系曲线 ( $L=34$  mm,  $L_1=5.5$  mm,  $L_2=21$  mm,  $\lambda=1532.6$  nm,  $m=6$  g,  $E=200$  GPa)

Fig.4 Relation curves of  $S$  and  $f_0$  changing with  $t$  ( $L=34$  mm,  $L_1=5.5$  mm,  $L_2=21$  mm,  $\lambda=1532.6$  nm,  $m=6$  g,  $E=200$  GPa)

得太大,因此要选用密度较大的金属,可选取纯铜作为质量块的材料,由体积及密度计算得  $m$  约为 0.005 kg。

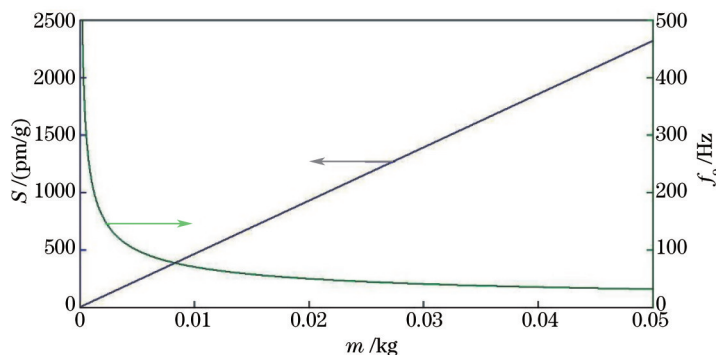


图 5  $S$  与  $f_0$  随  $m$  变化的关系曲线 ( $L=34$  mm,  $L_1=5.5$  mm,  $L_2=21$  mm,  $\lambda=1532.6$  nm,  $E=200$  GPa,  $t=0.02$  mm)

Fig.5 Relation curves of  $S$  and  $f_0$  changing with  $m$  ( $L=34$  mm,  $L_1=5.5$  mm,  $L_2=21$  mm,  $\lambda=1532.6$  nm,  $E=200$  GPa,  $t=0.02$  mm)

以上分析给出了三个关键的参量对传感器灵敏度与谐振频率的影响,综上所述,设定加速度传感器的结构参数及材料特性参数,如表 1 所示。

表 1 FBG 加速度传感器结构及材料参数

Table 1 Parameters of FBG accelerometer

Parameter	Value
$L_1$ /mm	5.5
$L_2$ /mm	21
$L$ /mm	34
$R$ /mm	10
$r$ /mm	2
$t$ /mm	0.02(0.05)
$E$ /GPa	200
$m$ /kg	0.005
$\lambda$ /nm	1532.6
$E_t$ /GPa	73
$A_t$ /m <sup>2</sup>	$1.227 \times 10^{-8}$
$\mu$	0.28

最后得到的仿真结果显示,当  $t=0.02$  mm 时,传感器灵敏度可达 231.9 pm/g,谐振频率为 99.3 Hz;当  $t=0.05$  mm 时,该传感器灵敏度可达 113.9 pm/g,谐振频率为 141.6 Hz。其中  $g$  为地球表面重力加速度,  $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>。

## 5 实验研究

根据理论和仿真分析结果,制作的加速度传感器实物如图 6 所示。该探头不仅可以实现如图 1 所示的单光栅传感结构,也能够扩展成为双光栅对称推挽式结构并对其传感性能展开实际的研究。实验主要针对单光栅传感结构。

基于振动信号动态测量的特点,搭建的振动传感测试实验系统如图 7 所示。采用基于非平衡迈克尔孙干

涉仪的相位产生载波(PGC)调制解调方法进行信号处理,干涉仪臂差为2.08 mm。外加调制通过干涉仪一臂上所缠绕的的压电陶瓷环(PZT)来实现。宽谱光源(ASE)发出的宽带光经FBG反射后通过环形器进入干涉仪,由法拉第旋镜(FRM)反射后,输出的干涉信号被光电探测器(PD)接收并由数据采集卡(DAQ card)采集进入计算机以进行处理。以振动平台(型号为Denmark BK 400)为振动源,由信号发生器产生一定频率的正弦波,通过功放驱动振动平台产生垂直方向的振动作为传感器的激励。实验中采用标准压电式加速度计获取加速度信号。

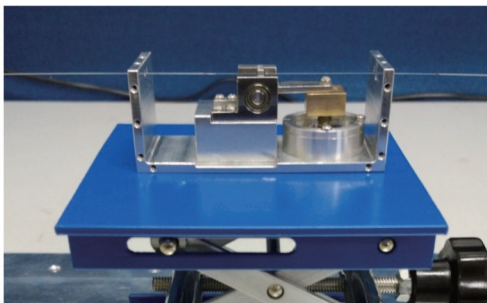


图6 FBG加速度传感器实物

Fig. 6 Prototype of FBG accelerometer

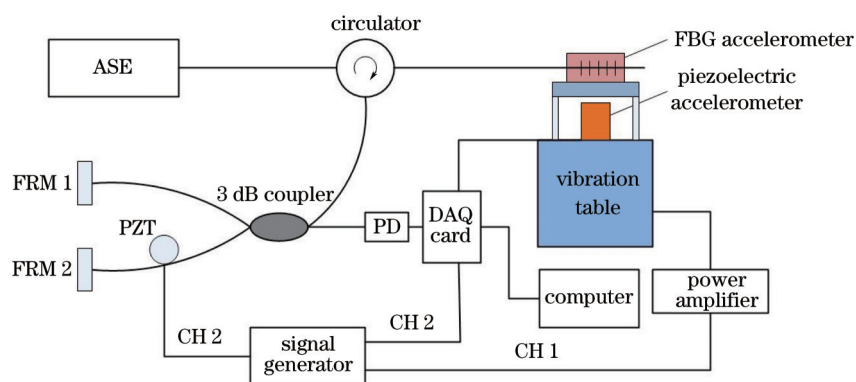


图7 实验系统示意图

Fig.7 Diagram of experimental system

### 5.1 加速度灵敏度幅频响应特性测试

在实验中,首先固定振动信号的振幅,对加速度传感器进行扫频测试。扫频范围为20~200 Hz,步长为5 Hz。经标准压电加速度计标定得到光纤光栅加速度传感器的灵敏度幅频响应曲线,如图8所示。可以看出传感器的谐振频率约为115 Hz,平坦响应范围为20~70 Hz,灵敏度可达200 pm/g,其中 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。实验结果表明该传感器工作在低频段时具有较高的灵敏度与较好的稳定性。

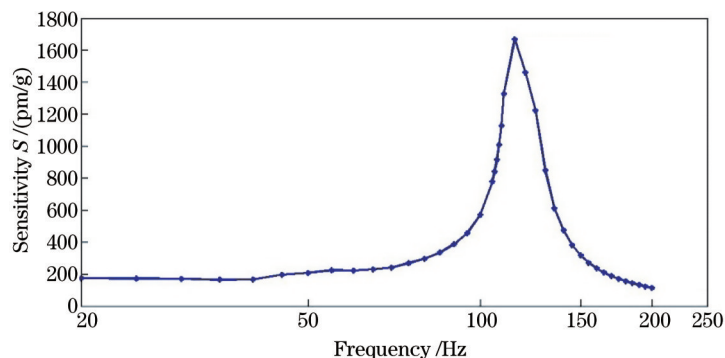


图8 加速度传感器灵敏度幅频响应曲线

Fig.8 Amplitude-frequency response of accelerometer sensitivity

### 5.2 线性响应测试

加速度传感器的线性响应是指在可测的加速度范围内传感器的加速度灵敏度随不同加速度呈线性变化。在

实验中,分别设定振动台所施加的振动信号频率为 50、60 和 70 Hz,加速度变化幅值为 0.5  $g$ ~1.5  $g$ ,步长为 0.1  $g$ ,得到的加速度响应曲线如图 9 所示。可以看出波长漂移幅值与输入加速度幅值具有良好的线性关系,线性相关度均为 99.98%。实验结果表明,在 50、60 和 70 Hz 的频率下,传感器的加速度灵敏度分别为 224、221 和 226  $\text{pm}/g$ 。

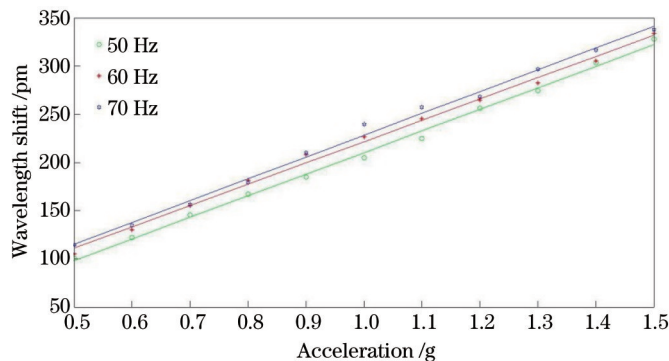


图 9 FBG 中心波长漂移与加速度的线性响应

Fig.9 Linear response of peak central wavelength shifts versus acceleration at 50, 60 and 70 Hz

### 5.3 振动信号传感性能测试

设定输入振动信号的加速度幅值为 1  $g$ ,当振动频率分别为 30 Hz 和 50 Hz 时,加速度传感器测量所得的时域信号与相应的频域信号如图 10 和图 11 所示。从图中可以看到,测量得到的信号质量非常好,传感器能够很好地获得外界输入的正弦激励。完好的正弦波形显示 FBG 的所受应力均匀,无啁啾与多峰现象。在相同加速度输入下的三个不同频点所测得的时域曲线幅值相近,证明传感器在工作频段响应平坦。实验结果表明该加速度传感器具有极好的低频探测性能。

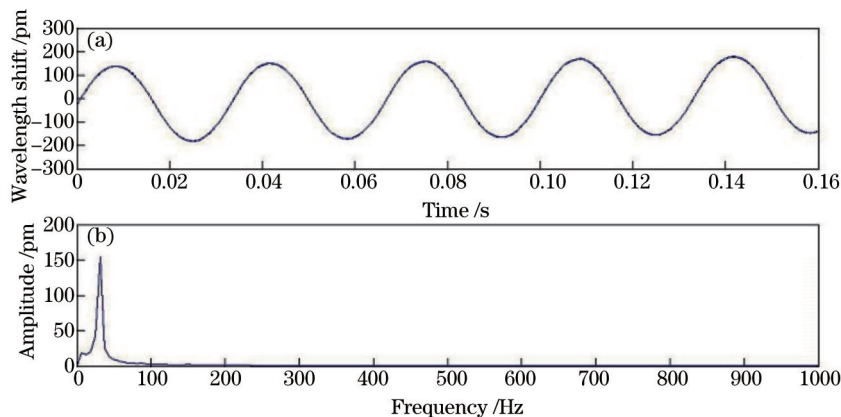


图 10 FBG 加速度传感器测量加速度幅值为 1  $g$ 、频率为 30 Hz 的振动信号所得的曲线。(a) 时域;(b) 频域

Fig.10 FBG accelerometer output response with the signal frequency at 30 Hz and acceleration at 1  $g$ . (a) Time domain; (b) frequency domain

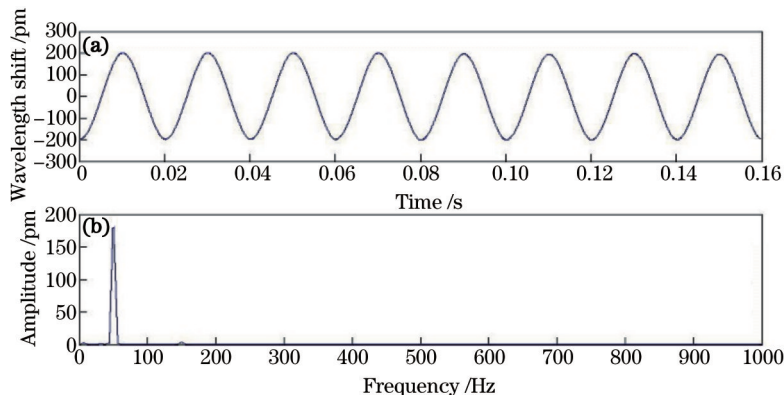


图 11 FBG 加速度传感器测量加速度幅值为 1  $g$ 、频率为 50 Hz 的振动信号所得的曲线。(a) 时域;(b) 频域

Fig.11 FBG accelerometer output response with the signal frequency at 50 Hz and acceleration at 1  $g$ . (a) Time-domain; (b) frequency-domain

#### 5.4 抗横向干扰特性测试

抗横向干扰特性对单自由度的加速度传感器来说也是需要考虑的一项重要性能指标。该传感器已从探头结构上尽可能地提高了抗横向干扰能力,包括L形刚性梁轴承传动的设计与弹性膜片的使用。为了对加速度传感器的横向抗干扰特性进行研究,在实验中将探头底部粘接固定在水平振动台的侧面,使振动的方向垂直于传感器的测振主轴方向。同样令输入信号的加速度幅值为1 g,设定振动频率为30 Hz,观察传感器输出波长的变化,并与30 Hz频率下主轴方向的测量结果进行对比,如图12所示。两条时域曲线分别显示了测振方向与横轴方向的加速度传感性能,可得在相同大小的外界加速度激励下,该FBG加速度传感器受到的横向干扰程度为2.31%,说明传感器能够有效地消除横向干扰的影响。

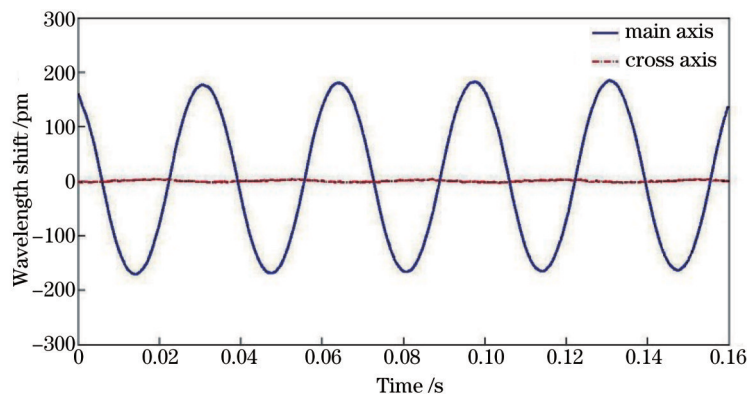


图12 加速度传感器的横向抗干扰特性

Fig.12 Characteristic of cross-axis anti-interference

## 6 结 论

提出了一种基于弹性膜片与L形刚性梁结构的FBG加速度传感器,理论分析了传感器的加速度灵敏度与谐振频率,并在此基础上进行了结构优化设计,最终制作了可扩展成为双光栅推挽式结构的传感器实物。探头封装后的尺寸大小为76 mm×30 mm×30 mm,体积较小,便于实际安装使用。实验研究了传感器的灵敏度幅频响应特性、线性度及横向抗干扰特性。研究表明:传感器的稳定工作频带为20~70 Hz,加速度灵敏度高达220 pm/g,谐振频率为115 Hz。与灵敏度为231.9 pm/g,谐振频率为99.3 Hz的理论值比较接近,误差可能是由于探头组装时结构上的损耗、轴承摩擦损耗及膜片预张力调整不佳等因素导致的。该FBG加速度传感器对低频微弱振动信号的传感达到了非常好的效果,并且具备良好的抗横向干扰能力。后续工作可以将探头封装为双光栅结构并结合匹配光栅解调方法进行研究,从而进一步提高对低频振动信号的探测性能乃至实现对甚低频振动的测量。

### 参 考 文 献

- 1 T A Berkoff, A D Kersey. Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(12): 1677-1679.
- 2 M D Todd, G A Johnson, B A Althouse, *et al.*. Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(12): 1799-1799.
- 3 Gong Xianfeng, Yi Honggang, Zhou Xiaomin, *et al.*. Low frequency fiber Bragg grating acceleration sensors[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(1): 75-77.  
巩宪锋, 衣红钢, 周晓敏, 等. 低频光纤光栅加速度传感器[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(1): 75-77.
- 4 Yan Zhang, Sanguo Li, Zhifan Yin, *et al.*. Unattended ground sensor based on fiber Bragg grating technology[C]. SPIE, 2005, 5796: 133-140.
- 5 Jinghua Zhang, Xueguang Qiao, ManLi Hu, *et al.*. Flexensional fiber Bragg grating based accelerometer for low frequency vibration measurement[J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(9): 090607.
- 6 Limin Sun, Yang Shen, Chungeng Cao. A novel FBG-based accelerometer with high sensitivity and temperature self-compensation[C]. SPIE, 2009, 7292: 729214.



- 7 Wentao Zhang, Xuecheng Li, Faxiang Zhang, *et al.*. Underwater fiber laser geophone: theory and experiment[C]. SPIE, 2009, 7634: 76340L.
- 8 Yu Yang, Meng Zhou, Luo Hong. Study on fiber Bragg grating vibrating sensors with symmetry push-pull configuration[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32(1): 118-121.  
于 洋, 孟 洲, 罗 洪. 对称推挽式光纤光栅振动传感器设计研究[J]. 半导体光电, 2011, 32(1): 118-121.
- 9 Sun Rujiao, Sun Limin, Sun Zhi, *et al.*. Design research of fiber Bragg grating accelerometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(1): 63-67.  
孙汝蛟, 孙利民, 孙 智, 等. 一种新型光纤布喇格光栅振动传感器研究[J]. 光子学报, 2007, 36(1): 63-67.
- 10 Akira Mita, Isamu Yokoi. Fiber Bragg grating accelerometer for buildings and civil infrastructures[C]. SPIE, 2001, 4330: 479-486.
- 11 Wang Shanli, Xiang Guanghua, Hu Manli, *et al.*. Design of a novel FBG vibration sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(4): 515-519.  
王善鲤, 向光华, 忽满利, 等. 一种新型光纤 Bragg 光栅振动传感器的设计[J]. 光电子·激光, 2011, 22(4): 515-519.
- 12 Bai Long, Yang Huayong, Luo Hong. Study on fiber Bragg grating-based geophone[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 110601.  
白 龙, 杨华勇, 罗 洪. 光纤布拉格光栅地听器设计研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 110601.
- 13 Wentao Zhang, Wenzhu Huang, Fang Li. Earthquake monitoring using fiber laser borehole seismometer[C]. SPIE, 2012, 8421: 8421B5.
- 14 Li Xuecheng, Liu Su, Zhang Wentao, *et al.*. Study on low-frequency characteristic of double-diaphragm fiber Bragg grating geophone [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(4): 529-532.  
李学成, 刘 肃, 张文涛, 等. 双膜片结构光纤光栅地震检波器低频特性的研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(4): 529-532.
- 15 Michael Willsch, Peter Kraemmer, Nils M Theune, *et al.*. Highly sensitive micro mechanical fiber Bragg grating acceleration sensor combined with a new multiplexable interrogation principle[C]. SPIE, 2000, 4074: 46-53.
- 16 P F da Costa Antunes, H F T Lima, N J Alberto, *et al.*. Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1347-1354.

栏目编辑: 刘丰瑞