

# 光纤光栅二维加速度传感器

郭永兴 张东生 李杰燕 朱方东

(武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要** 提出了一种基于“钢管-质量块”弹性结构体的光纤光栅(FBG)加速度传感器,4 个光纤光栅粘贴在质量块一侧的钢管表面应变的最大处,光栅分布在沿钢管圆周呈  $90^\circ$  方位角的位置上,粘贴方向沿钢管的轴向。通过两两组合的光栅对的波长变化量的差值感测弹性结构体不同方向的振动加速度,实现二维测量及温度补偿。使用有限元软件进一步分析说明了传感器的测量原理及谐振频率。传感器性能参数测试结果表明,该传感器谐振频率为 515 Hz,与有限元分析结果基本吻合,灵敏度为  $0.88 \text{ pm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ ,加速度测量范围为  $15 \sim 75 \text{ m/s}^2$ ;传感器二维振动测试结果良好,具备较好的抗干扰振动能力。

**关键词** 传感器;二维加速度传感器;光纤光栅;有限元分析;温度补偿

**中图分类号** TN253;TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1214001

## Two Dimensional Fiber Bragg Grating Accelerometer

Guo Yongxing Zhang Dongsheng Li Jieyan Zhu Fangdong

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract** A novel fiber Bragg grating (FBG) accelerometer based on an elastic structure which consists of a stainless steel tube and a mass block is proposed. Four FBGs are fixed axially on the tube surface where produce the most large strain along the circumference of the tube with a  $90^\circ$  angle. Two-dimensional measurement and temperature compensation are realized through the change of two pairs of FBGs' wavelength shift caused by vibration. Finite element analysis is used to explain the two-dimensional measurement principle and the resonant frequency of the accelerometer further. Vibration test results demonstrate that the accelerometer possess of a resonant frequency of 515 Hz, a wide linear measurement range from  $15 \text{ m/s}^2$  to  $75 \text{ m/s}^2$  and a sensitivity of  $0.88 \text{ pm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ , which is consistent with the finite element analysis results. The two-dimensional vibration test results show that the accelerometer has a good anti-interference ability.

**Key words** sensors; two dimensional accelerometer; fiber Bragg grating; finite element analysis; temperature compensation

**OCIS codes** 060.2280; 060.2340; 060.2370

## 1 引 言

光纤传感器因其抗电磁干扰、体积小、质量轻以及信号可远距离传输等优势而备受重视。光纤传感技术在军事、大型结构工程等领域的应用发展迅速<sup>[1~3]</sup>。光纤光栅(FBG)传感技术作为光纤传感的重要组成部分,近年来对该领域研究的不断升温,其中光纤光栅加速度传感器的研究发展尤为迅速<sup>[4~10]</sup>。悬臂梁因其结构简单且性能稳定等特点,

成为光纤光栅加速度传感器常用的弹性元件,国内外学者根据悬臂梁的基本原理设计了多种形式的加速度传感器<sup>[11~15]</sup>。为满足实际振动测试的需求,实现多维测量的光纤加速度传感器也得到研究开发<sup>[16,17]</sup>,如曾楠等<sup>[18~20]</sup>通过使用 3 个单方向传感单元分别测量各个方向的加速度,提出了一种用于油藏监测的三分量加速度传感器。但是由于传感器是由 3 个单方向测量传感器的叠加,传感器体积较大;

**收稿日期**: 2012-05-25; **收到修改稿日期**: 2012-08-09

**基金项目**: 国家重点自然科学基金(50935005)资助课题。

**作者简介**: 郭永兴(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: gyxing2000@163.com

**导师简介**: 张东生(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: zhangdsem@sina.com

文献[21]将3根刻有光栅的等长光纤一端相隔 $120^\circ$ 固定于圆盘边缘上,另一端固定于质量块上,悬空的质量块在受到加速度作用时会拉伸光纤,通过测量3个光栅的不同波长变化可获得加速度的方向及大小。

本文根据实际加速度多维测量的需求,使用一根钢管和质量块构成弹性结构体,通过处于钢管表面圆周方向呈 $90^\circ$ 分布的4个光栅的波长变化情况来检测外界的振动/加速度情况,传感器结构设计简单,且具备温度补偿功能。理论分析及测试结果表明,该一体化结构的传感器具备二维测量的能力,有望在工程测量领域得到推广应用。

## 2 原 理

### 2.1 传感器结构及光栅布置

光纤光栅二维加速度传感器由不锈钢管、铜质质量块、4个光纤光栅构成,其结构及光栅布置情况如图1所示。钢管两端固定,质量块固定于钢管中央形成弹性结构体。三维直角坐标系建立如下:钢管轴线为Z轴,其方向与光纤光栅所在方向一致,X轴,Y轴与Z轴垂直。FBG1和FBG2位于圆周方向相隔 $180^\circ$ 的钢管上下两表面,两个光栅位于Y轴和Z轴组成的平面上。FBG3和FBG4同样圆周方向相隔 $180^\circ$ 粘贴于钢管前后两个侧表面上,两个光栅位于X轴和Z轴组成的平面上。

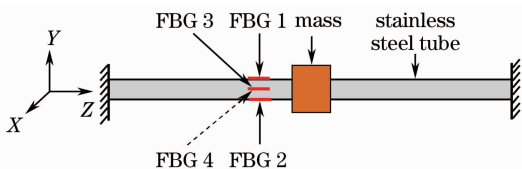


图1 加速度传感器结构

Fig.1 Configuration of the FBG accelerometer

加速度传感器可以测量X和Y这两个方向上的加速度,测量原理如下:当弹性结构体沿X(或Y)轴方向振动时,在钢管的圆周表面上处在XZ(或YZ)平面上相应的两个光纤光栅FBG3和FBG4(或FBG1和FBG2)分别同时受到正负应变作用,用二者波长变化量的差值来衡量这一方向的振动加速度,而处在YZ(或XZ)平面上的两个光纤光栅的波长变化量的差值没有变化;如果弹性结构体沿X-Y平面内任意方向振动,可以将这种振动分解为X和Y两个方向振动的矢量和,并分别加以检测。温度变化引起光栅波长的漂移方向一致,因此,以两个光纤光栅的波长变化量的差值作为检测信号,可

以消除温度变化的影响。

### 2.2 测量原理的有限元分析

为了进一步说明和验证二维加速度传感器的工作原理,使用有限元分析软件对传感器做出应变分布及频率分析。传感器在受迫振动时,质量块给予钢管一个惯性作用力,使钢管发生弯曲变形,钢管表面产生交替应变。模拟分析“钢管-质量块”组成的弹性结构在受到一个沿Y轴负方向的作用力F时,4个光纤光栅所处的质量块左侧钢管4个边线上的应变分布情况如图2所示。取FBG1~FBG4所在的左侧钢管边线分别为side line 1~side line 4。模拟过程中,取加载压力 $F=0.8\text{ N}$ ,不锈钢管(201退火不锈钢)的内孔直径、外径、杨氏模量和泊松比 $\mu$ 分别为1.6 mm、2 mm、207 GPa和0.27,位于质量块两侧的两端钢管长度均为27 mm;黄铜质量块的内径、外径、长度、杨氏模量和泊松比 $\mu$ 分别为2 mm、12 mm、10 mm、1 GPa和0.33;质量块与钢管为刚性固定连接。图3为有限元分析得出的应变分布云图,图4给出了4个边线上的应变大小及走势。

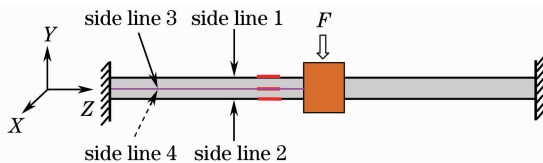


图2 加速度传感器的边线位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the position of side lines

由图4可知,在沿Y轴负方向力F作用下,以FBG1所在的边线1为例,应变分布在距离钢管左固定端13.5 mm(即左段钢管长度中点)处为分界点,呈现反向对称,钢管左侧固定端和质量块与钢管固定处应变最大且方向相反,而13.5 mm处的应变为0;边线2与边线1应变分布趋势反向,大小等同,而边线3和边线4上应变很小且数值相等,即有限元分析结果与测量原理一致。4个光纤光栅实际布置时,光栅的右边缘距离钢管与质量块固定处约3 mm,即图4中横轴24 mm处,这样既可保证光栅位于应变发生较大处,又可避免当光栅处于应力分布集中区域。

在弹性体不受外力作用的情况下,同样使用该有限元分析软件对其做出频率分析,构成传感器弹性体的不锈钢管、质量块的性能参数与应变分析时相同。图5为传感器的一阶模态振型,表1为传感器前5阶谐振频率值。

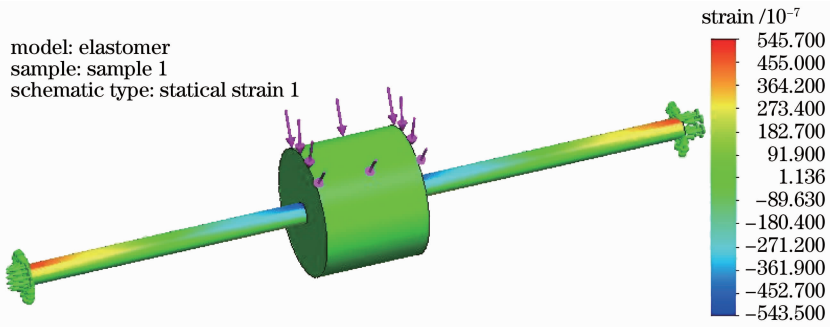


图 3 有限元分析应变分布云图

Fig. 3 Distribution of strain of the accelerometer

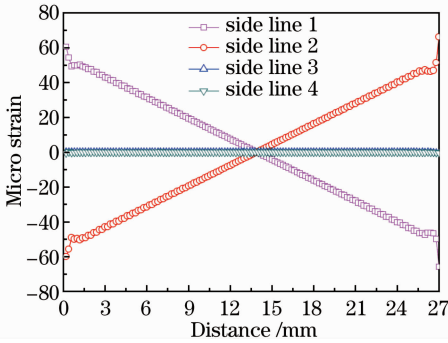


图 4 光栅所在的 4 个边线应变分布情况

Fig. 4 Strain trends of the four side lines

表 1 列出的前两阶频率的振动即是传感器在图 1 中所示的 X 和 Y 两个工作方向上的振动,有限元分析得出的谐振频率为 531 Hz。

表 1 前 5 阶谐振频率值

Table 1 Resonant frequency values of the first five orders

Vibration mode	Frequency /Hz
1	531.04
2	531.40
3	899.78
4	2450.30
5	2452.80

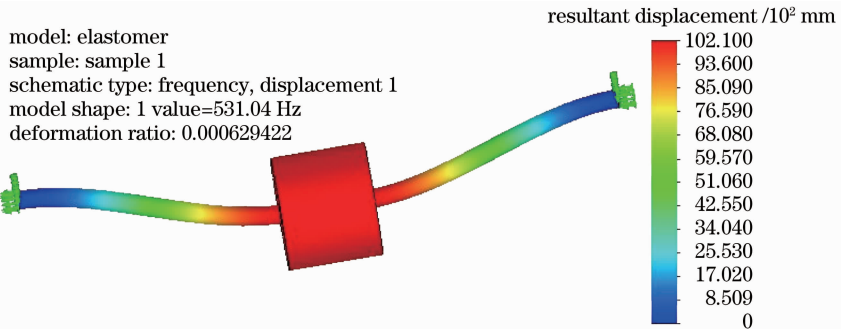


图 5 一阶模态振型图

Fig. 5 First-order model shape diagram

同样使用理论公式推导的方法来计算该传感器的一阶谐振频率。传感器弹性体结构可视为两端固定梁,受迫振动时质量块的惯性力可视为中央加载,则弹性体弹性系数<sup>[22]</sup>为

$$k = \frac{192EJ}{L^3}, \quad (1)$$

式中  $E$  为钢管的杨氏模量,  $J$  为钢管的惯性矩,  $L$  为钢管的长度。

传感器的一阶谐振频率计算公式为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192EJ}{mL^3}}. \quad (2)$$

将杨氏模量  $E = 2.06 \times 10^{11}$ , 钢管长度  $L = 64$  mm, 质量块质量  $m = 9.228$  g, 钢管惯性矩  $J =$

$\pi D^4 (1 - \lambda^4) / 64$  (其中  $\lambda = d/D$ , 钢管内径  $d = 1.6$  mm, 钢管外径  $D = 2$  mm), 代入(2)式可得谐振频率为 466 Hz。

理论计算得出的频率 466 Hz 低于有限元分析得出的频率 531 Hz, 这主要是由于理论计算过程中, 弹性体的弹性系数  $k$  选取的是不锈钢管的弹性系数, 而有限元分析过程中, 质量块与钢管设定的刚性固定连接, 整个弹性体的弹性系数会大于钢管的弹性系数, 从而使分析得出的频率值更高。由(2)式可知, 传感器的谐振频率取决于钢管的杨氏模量  $E$ 、惯性矩  $J$  和长度  $L$  以及质量块质量  $m$ , 通过调节它们的大小即可设计不同参数的传感器。

### 3 实 验

#### 3.1 幅值-频率特性与加速度特性测试

制作的光纤光栅二维加速度传感器如图 6(a)所示。钢管两端的固定以及钢管和质量块的固定均是通过高强度环氧胶黏剂粘贴实现的。4 个光纤光栅沿钢管圆周方向呈 90°分布,同样是通过胶黏剂粘贴于钢管表面,FBG1~FBG4 的中心波长分别为 1307.703、1308.189、1314.411、1313.881 nm。采用丹麦 B&K 公司生产的振动测试系统对传感器进

行性能测试,测试系统中激振器型号为 vibration exciter type 4808,功率放大器为 power amplifier type 2719,标准参考加速度传感器为 type 4371。光纤光栅分析仪采用的是美国 MOI 公司生产的 SM130 型解调仪,解调频率为 2000 Hz。振动测试实验情况如图 6(b),(c)所示。由于传感器在 X 和 Y 二维方向上均有振动响应,选取激振方向沿 Y 轴方向,则 FBG1 和 FBG2 就作为传感器的输出信息光栅。

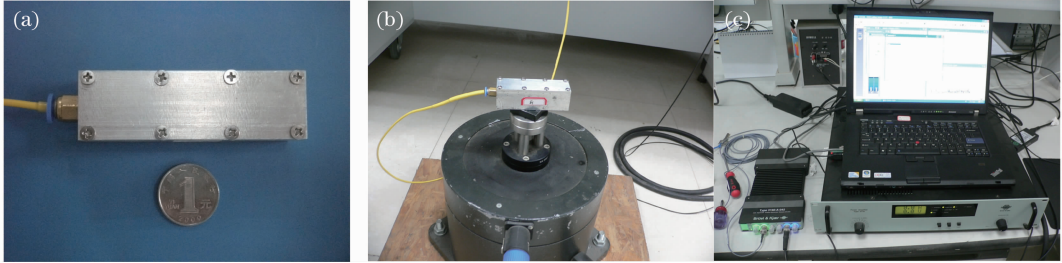


图 6 (a)加速度传感器照片及其(b), (c)振动测试情况

Fig. 6 (a) Photo of accelerometer sensor and (b), (c) its vibration tests

在幅值-频率特性测试中,激振频率从 10 Hz 变化到 800 Hz,而激振加速度固定在 10 m/s<sup>2</sup>(约为一个重力加速度  $g$ ),得出的传感器的幅值-频率特性曲线如图 7 所示。在加速度特性测试实验过程中,加速度从 5 m/s<sup>2</sup>变化到 75 m/s<sup>2</sup>,激振频率分别保持在 100 Hz 和 200 Hz,图 8 为测试得出的传感器加速度特性曲线。由图 7 可知,该传感器的谐振频率  $f_0$  为 515 Hz,与有限元分析结果 531 Hz 基本一致; 300 Hz 以下时,传感器输出幅值基本保持在 10 pm,是该传感器的幅值-频率特性平坦区域,因此该传感器可用工作频带为 0~300 Hz。由图 8 传感器的加速度特性曲线及其线性拟合结果可知,该传感器灵敏度为 0.88 pm·m<sup>-1</sup>·s<sup>2</sup>,在所测试的 5~75 m/s<sup>2</sup> 加速度范围内,具备良好的线性测量能力。

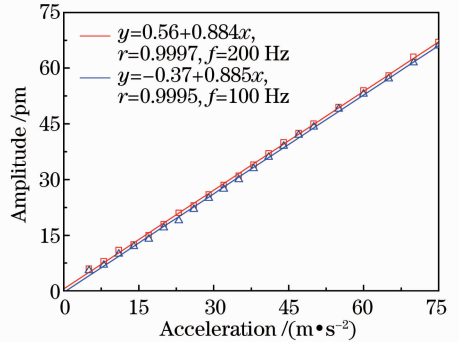


图 8 传感器的加速度特性曲线

Fig. 8 Acceleration characteristic curve

#### 3.2 二维振动测试

为了测试传感器的二维测量性能,进行了振动实验:首先给予传感器沿 Y 轴方向的正弦振动信号,频率为 100 Hz,加速度固定在 35 m/s<sup>2</sup>,研究在 Y 方向振动激励下,传感器的输出信息。图 9 为用于 Y 轴方向振动测量的两个光栅 FBG1 和 FBG2 以及用于 X 轴方向振动的两个光栅 FBG3 和 FBG4 的输出波形对比情况。分析实验数据后得知,Y 轴方向的测量光栅幅值为 30 pm。X 轴方向的测量光栅输出幅值约为 5 pm,而 5 pm 的变化是在光栅处于自然状态时的波长波动范围之内,可以认为此两个光栅对于 Y 轴方向上的振动无响应。因此实验结果与传感器测量原理符合。

随后将沿 Z 轴方向转动固定在激振器上的传感器,使激振方向与传感器 Y 轴的夹角为 30°,激振

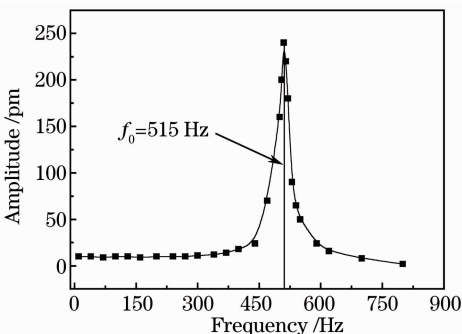


图 7 加速度传感器的幅值-频率特性曲线

Fig. 7 Frequency response of the accelerometer

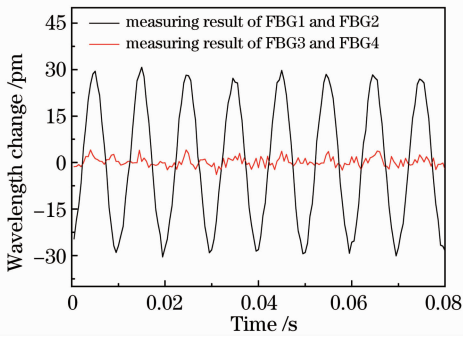


图9 沿Y轴方向振动测试传感器输出波形  
Fig.9 Response waveform of vibration along Y axis direction

频率和加速度不变。图10为用于Y轴方向振动测量的两个光栅FBG1和FBG2以及用于X轴方向振动测量的两个光栅FBG3和FBG4的输出波形对比情况。

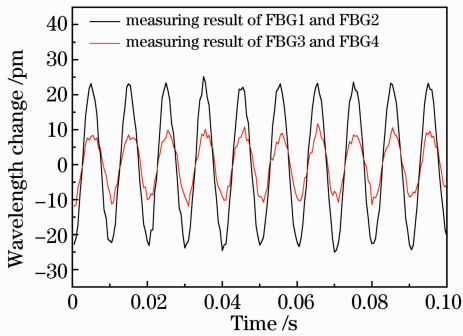


图10 偏方向振动测试传感器输出波形  
Fig.10 Response waveform of vibration along deviation direction

由实验数据可得,Y轴方向的测量光栅幅值约

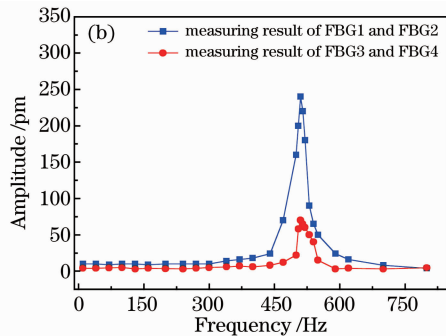
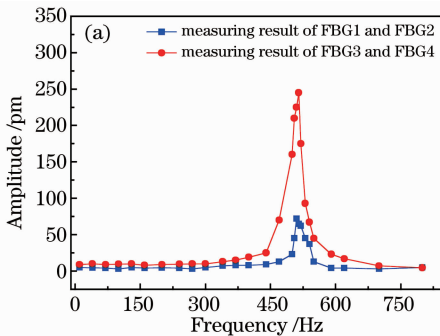


图11 沿(a) X和(b) Y轴方向激振,传感器二维响应结果

Fig.11 Responses of vibration along (a) X and (b) Y axis direction

同时,由测试结果可知,非测量方向的光栅波长输出波动在5 pm以内,传感器灵敏度为 $0.88 \text{ pm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ ,因此当所测加速度在 $12 \text{ m/s}^2$ 之内时,传感器测量光栅波长变化值将小于 $(12 \text{ m/s}^2) \times (0.88 \text{ pm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2) = 10.56 \text{ pm}$ ,二维测量串扰将小于

为23 pm。X轴方向的测量光栅输出幅值约为12 pm,根据加速度分解原理,反推叠加后的加速度值为 $\sqrt{23^2 + 12^2} = 25.9 \text{ pm}$ ,相同的激振条件下,与图9得出的加速度幅值30 pm相比,振幅有所减小。分析认为这主要是由于4个光纤光栅的粘贴布置存在偏差,未能保证两对光栅正交,导致测量结果出现误差。根据加速度矢量叠加原理,当激振角度为 $30^\circ$ 时, $\tan 30^\circ$ 的值应等于X轴加速度分量/Y轴加速度分量的值, $\tan 30^\circ \approx 0.577$ ,X轴加速度分量/Y轴加速度分量为 $12/23 \approx 0.522$ ,两者结果基本一致。

为了进一步得到传感器的二维测量能力和其对非测量方向上的串扰情况,分别以X轴和Y轴以及Z轴为激振方向,保持加速度为 $10 \text{ m/s}^2$ ,在 $10 \sim 800 \text{ Hz}$ 的频率范围内对传感器两个测量方向的光栅响应做出测试。图11(a)和(b)分别给出的是沿X轴和Y轴方向激振,两个测量方向的光栅输出响应的幅值-频率曲线。由测试结果可知,传感器二维测量效果明显,在工作频带( $0 \sim 300 \text{ Hz}$ )内,非测量方向上的光栅波长基本处于自然波动范围(5 pm)以内,在谐振频率区域内,由于整个弹性体的共振,非测量方向上的光栅也出现较大的波长变化。图12为沿Z轴方向激振,X和Y方向测量光栅输出响应的幅值-频率曲线。由图12可知,除频率515 Hz附近传感器共振引起的响应幅值较大外,光栅波长输出值基本保持在其自然波动范围5 pm内,可以认为传感器对于Z轴方向上的振动无响应,与理论结果一致。

$20 \lg(10.56/5) = 6.49 \text{ dB}$ ,二维测量结果准确性无法保证。只有当测量加速度高于 $12 \text{ m/s}^2$ 时,传感器的二维测量矢量结果才能得到保障。因此,为了更好地保证传感器的测量二维矢量性,将该二维加速度传感器的工作加速度范围设置为 $15 \sim 75 \text{ m/s}^2$ 。

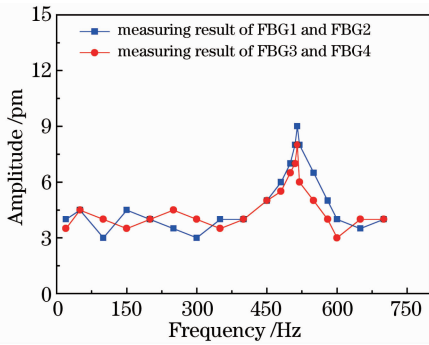


图 12 沿 Z 轴方向激振, 传感器响应幅值-频率曲线  
Fig. 12 Response of vibration along Z axis direction

## 4 结 论

研制了一种新型加速度传感器, 基于“钢管-质量块”组成的简单弹性结构体, 通过 4 个光纤光栅的合理布置, 一体化结构的传感器实现加速度的二维测量, 并具备温度自补偿功能。通过各项振动测试, 得出传感器的谐振频率为 515 Hz, 加速度测量范围为  $15 \sim 75 \text{ m/s}^2$ , 灵敏度为  $0.88 \text{ pm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ 。传感器的理论分析结果与实验测试结果基本吻合。实验结果表明, 传感器 4 个光纤光栅精确的位置固定对传感器的输出结果有较大影响, 因此在传感器的实际制作过程中应准确标记出光栅的粘贴位置, 并保证钢管表面的清洁和胶黏剂的均匀涂覆。

## 参 考 文 献

- Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(4): 420~430  
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 420~430
- Zhang Dongsheng, Li Wei, Guo Dan *et al.*. Real-time monitor system of bridge-cable force based on FBG vibration sensors and its application[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(12): 2720~2723  
张东生, 李微, 郭丹等. 基于光纤光栅振动传感器的桥梁索力实时监测[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(12): 2720~2723
- Xie Zuosheng, Li Weiwen, Lin Weipeng *et al.*. Implementation of low-frequency periodic vibration sensor based on frequency-swept fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1205006  
谢作生, 李伟文, 林伟鹏等. 利用扫频光纤激光器实现低频周期振动传感[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1205006
- Yang Guang, Huang Junbin, Gu Hongcan *et al.*. Research progress of fiber Bragg grating acceleration sensor[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, **31**(7): 76~80  
杨光, 黄俊斌, 顾洪灿等. 光纤 Bragg 光栅加速度传感器研究进展[J]. *舰船电子工程*, 2011, **31**(7): 76~80
- H. Zhang, X. G. Qiao, M. L. Hu *et al.*. Flexensional fiber Bragg grating-based accelerometer for low frequency vibration measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(9): 090607
- Li Min, Xie Fang, Chen Zhimin. Vibration measurement system based on a highly stabilized fiber  $3 \times 3$  coupler interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 549~553

- 李敏, 谢芳, 陈志敏. 高稳定的光纤  $3 \times 3$  耦合器干涉振动测量系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 549~553
- Zhou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805005  
邹红波, 梁大开, 曾捷等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅振动传感器的动态解调[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805005
- Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006  
张乐, 吴波, 叶雯等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406006
- Zhang Dongsheng, Yao Kaifang, Luo Pei *et al.*. Novel fiber Bragg grating accelerometer with high resonant frequency[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(7): 1400~1403  
张东生, 姚开方, 罗裴等. 一种新型的光纤光栅高频加速度传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(7): 1400~1403
- Wang Guanglong, Feng Lishang, Liu Huilan *et al.*. Study of novel accelerometer based on fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, **21**(3): 450~453  
王广龙, 冯丽爽, 刘慧兰等. 基于 FBG 的新型加速度计研究[J]. *传感技术学报*, 2008, **21**(3): 450~453
- M. D. Todd, G. A. Johnson, B. A. Althouse *et al.*. Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1605~1607
- Sun Rujiao, Sun Limin, Sun Zhi *et al.*. Design research of fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 64~67  
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): 64~67
- 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, 何满利等. 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
- N. Basumallick, I. Chatterjee, P. Biswas *et al.*. Fiber Bragg grating accelerometer with enhanced sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, **173**(1): 108~115
- Y. N. Zhu, P. Shum, C. Lu *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating accelerometer[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2003, **10**(15): 1437~1439
- S. R. K. Morikawa, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi *et al.*. Triaxial Bragg grating accelerometer[C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, **1**: 95~98
- A. Fender, W. N. MacPherson, R. Maier *et al.*. Two-axis temperature-insensitive accelerometer based on multicore fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1292~1298
- N. Zeng, C. Z. Shi, M. Zhang *et al.*. A 3-component fiber-optic accelerometer for well logging[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **234**(1-6): 153~162
- Zeng Nan. Research on the Key Technology of Fiber Optic Accelerometers[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005  
曾楠. 光纤加速度传感器若干关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2005
- Zeng Nan, Shi Chunzheng, Zhang Min *et al.*. A 3-component fiber optic accelerometer for well logging[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(8): 901~905  
曾楠, 施纯峥, 张敏等. 一种可用于油藏监测的 3 分量光纤加速度传感器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(8): 901~905
- S. L. He, X. Y. Dong, S. Q. Zhang *et al.*. Temperature-

insensitive 2-D fiber Bragg grating accelerometer[C]. 2010 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing, 2010, **2**: 52~55  
22 Zhang Hongrun, Fu Jinxin, Lü Quan *et al.*. The Sensor

Technology Summa [M]. Beijing: Beihang University Press, 2007. 216~218

张洪润, 傅瑾新, 吕 泉 等. 传感器技术大全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007. 216~218

栏目编辑: 王晓球