

基于柔性铰链结构的高灵敏度低频光纤光栅加速度传感器

张法业¹, 姜明顺¹, 隋青美^{1*}, 张雷¹, 曹玉强¹, 马国文², 魏钧涛¹

- (1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;
2. 国网山东安丘市供电公司, 山东 潍坊 262100)

摘要: 设计了一种基于柔性铰链结构的光纤光栅加速度传感器, 进行了结构理论分析, 并构建有限元模型仿真分析了传感器的加速度传感特性。基于 F-P 滤波器构建了具有温度自补偿功能的光纤光栅加速度检测系统, 并通过增加反馈控制电路, 对 F-P 滤波器进行反馈控制, 实现了系统的零点自温度补偿。对系统的特性进行了实验测试, 结果表明: 系统对加速度的连续激励信号和冲击激励信号均有良好的动态响应, 系统的固有频率为 380.0 Hz, 动态响应范围可达 65.6 dB, 频率响应范围为 10.0 ~ 240.0 Hz, 灵敏度为 236 pm/g, 所设计的加速度传感器具有较强的横向抗扰能力, 干扰方向灵敏度仅为工作方向灵敏度的 3.5%。

关键词: 光纤 Bragg 光栅; 柔性铰链; 加速度传感器; 可调谐 F-P 滤波器; 冲击响应
中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0317004

High sensitivity and low-frequency FBG acceleration sensors based on flexure hinge structure

Zhang Faye¹, Jiang Mingshun¹, Sui Qingmei^{1*}, Zhang Lei¹, Cao Yuqiang¹, Ma Guowen², Wei Juntao¹

- (1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. State Grid Shandong Anqiu Power Supply Company, Weifang 262100, China)

Abstract: A fiber grating acceleration sensor based on flexure hinge structure was designed. The structure theory analysis was carried out and the finite element model was built to simulate and analyze the acceleration sensing characteristic of the sensor. A fiber Bragg grating (FBG) acceleration detection system with temperature self-compensation was designed based on F-P filter, which achieved zero temperature self-compensation by adding a feedback circuit to control F-P filter. The characteristics of the system were tested on the built system. The results indicate that the system has excellent response to impulse excitation signal and continuous acceleration excitation signal. Natural frequency of the system is 380.0 Hz, while the dynamic range reaching 65.6 dB. The frequency response range of the system is 10.0–240.0 Hz, in which the acceleration sensitivity is 236 pm/g. Since the sensitivity in the interference direction is only 3.5% of the sensitivity in the working direction, the acceleration sensor is designed with strong lateral immunity.

Key words: fiber Bragg grating; flexure hinge; accelerometer; tunable F-P filter; impact response

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61074163); 山东省自然科学基金(ZR2014FM025); 山东大学基本科研业务费资助(2016JC012)

作者简介: 张法业(1984-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事光纤传感技术、光电子技术和信号处理方面的研究。Email: zhangfaye@sdu.edu.cn

导师简介: 隋青美(1963-), 女, 教授, 博士, 主要从事检测理论及应用、光纤传感技术方面的研究。Email: sdujiangmingshun@163.com

0 引言

加速度检测是地震监测、结构健康检测和机械抗冲击测试等领域的重要技术手段^[1-3]。现有加速度检测系统中使用的加速度传感器大多结构复杂、安装要求严格、寿命较短,在工程应用中越来越受限制^[9]。光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)加速度传感器因其能够抗电磁干扰、体积小、易组网等优点在加速度检测工程应用中前景广阔^[10-12]。近年来,国内外学者根据 FBG 应变传感原理设计了多种形式的加速度传感器。Mohd. Mansoor Khan 等、Feng Dingyi 等、Wang Hongliang 等、Ye Ting 等和 Li Lang 等使用悬臂梁、弓形梁和简支梁设计了 FBG 加速度传感器。Mohd. Mansoor Khan 等^[13]和 Wang Hongliang 等^[14]使用单悬臂梁和双悬臂梁结构设计的加速度传感器的灵敏度不高于 50 pm/g;Feng Dingyi 等^[15]使用三悬臂梁结构实现了加速度的高灵敏度测量,灵敏度可达 218.4 pm/g,但传感器的频率响应平坦区只有 150 Hz,且体积较大、结构复杂、制作困难;Ye Ting 等^[16]基于弓形梁结构设计了光纤光栅加速度传感器,加速度灵敏度高达 458.1pm/g,但传感器的频率响应平坦区仅 10 Hz;Li Lan 等^[17]基于简支梁结构实现了低成本加速度检测。Zhang Yunshan 等^[18]基于筒形结构设计的光纤光栅加速度传感器改进了传感器的频率响应平坦区,使最大可检测频率达到了 300 Hz,但灵敏度没有明显提高,仅有 42.7 pm/g。在这些加速度传感器制作过程中,FBG 封装均采用胶体全封装方式,极易导致啾啾,引起非线性失真。因此,设计一种灵敏度高、频率响应平坦区宽、体积小、结构简单的加速度传感器,对于光纤光栅加速度检测系统的进一步工程应用具有重要意义。

文中设计了一种基于柔性铰链结构 FBG 加速度传感器,并基于 F-P 滤波器和边缘滤波解调原理的 FBG 加速度检测系统。首先,理论分析了柔性铰链结构的加速度检测原理,改进了制作工艺,设计并封装了 FBG 加速度传感器。其次,通过增加反馈控制电路,对 F-P 滤波器进行反馈控制,实现了系统对温度影响的自补偿。最后,搭建了实验验证平台,对系统的线性响应、幅频特性、动态范围、横向抗干扰特性、冲击响应特性和重复性进行了实验研究。

1 传感器设计

1.1 传感器结构响应机理分析

根据 FBG 应变传感理论^[19],光纤在仅受轴向应力的作用下,中心波长的相对变化量可表示为:

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

式中: ΔL 为轴向长度变化量; L 为封装长度; P_e 为有效弹光系数; ε_{ZZ} 为轴向应变。

基于柔性铰链结构的加速度传感器结构示意图如图 1 所示。传感器结构的左端使用两个固定螺钉固定,右端可上下自由振动,为惯性质量部分,FBG 粘贴于结构上侧。

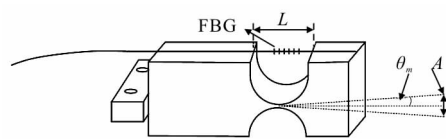


图 1 柔性铰链结构的加速度传感器结构示意图
Fig.1 Structure diagram of the acceleration sensor based on flexure hinge

由弹性力学原理可知,右端惯性质量部分振动的振幅为:

$$A = \frac{\alpha}{\omega_0^2 \sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} = \frac{\alpha}{(2\pi f_0)^2 \sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} \quad (2)$$

式中: f_0 为固有频率; ω 为振动源的角频率; ω_0 为固有角频率; $\gamma = \omega/\omega_0$ 为频率比; ξ 为阻尼比; α 为振动加速度。

根据结构的几何关系,当惯性质量部分在外部加速度激励的作用下发生最大转角为 θ_m 的振动时,结构上粘贴的 FBG 的轴向长度变化量为:

$$\Delta L = A \cdot \sin\theta_m = \frac{\alpha}{(2\pi f_0)^2 \sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} \sin\theta_m \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(1)可得,相对波长变化量为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{(1-P_e)\sin\theta_m}{(2\pi f_0)^2 L \sqrt{(1-\gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} \alpha \quad (4)$$

定义中心波长对加速度的响应灵敏度 S 为波长变化量与加速度的比值,即:

$$S = \Delta\lambda_B / \alpha \quad (5)$$

则在外界激励信号作用下,传感器的灵敏度为:

$$S = \frac{\lambda_B(1-P_e)\sin\theta_m}{(2\pi f_0)^2 L} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\gamma)^2 + (2\xi\gamma)^2}} \quad (6)$$

当激励信号频率 $f \ll f_0$ 时,理想平坦区加速度响应灵敏度为:

$$S = \frac{\lambda_B(1-P_e)\sin\theta_m}{(2\pi f_0)^2 L} \quad (7)$$

由公式(7)可知:可以通过改变结构的长度、宽度、高度、圆孔半径和 FBG 封装长度,设定结构的固有频率 f_0 、阻尼比 ξ 和最大转角 θ_m ,从而实现传感器加速度响应灵敏度的选择。

1.2 传感器设计

为满足传感器响应灵敏度大于 200 pm/g,固有频率大于 300.0 Hz,频率响应平坦区大于 200.0 Hz 的检测需求,所设计的柔性铰链结构如图 2 所示,其参数如表 1 所示。在传感器制作过程中,选用的传感器材料为 304 不锈钢;光纤光栅粘贴时,将栅区 10 mm、间距 12 mm、中心波长 1 536.903 nm 的 FBG 施加预应力后,通过胶体固定在结构的中轴线上的 A 和 B 两点上。采用这种封装方式,FBG 的栅区处于悬空状态,有效解决了采用胶体全封装方式极易导致啁啾的问题。

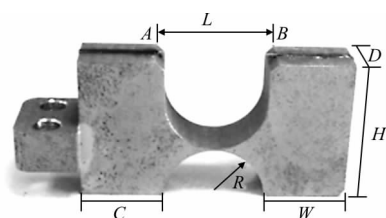


图 2 柔性铰链结构实物图

Fig.2 Pictorial diagram of the flexure hinge

表 1 FBG 加速度传感器参数

Tab.1 Parameters of FBG acceleration sensor

Serial number	Parameters	Value/mm
1	Distance between points A and B	14
2	Width D	7
3	Height H	17
4	Mass length W	10
5	Beam length C	10
6	Pore radius R	6

根据上表中的数据,使用 ANSYS 构建传感器结构有限元模型如图 3 所示,传感器 B 点的位移与谐响应频率的关系如图 4 所示。由此可知,所设计的传感器的固有频率为 345.4 Hz。

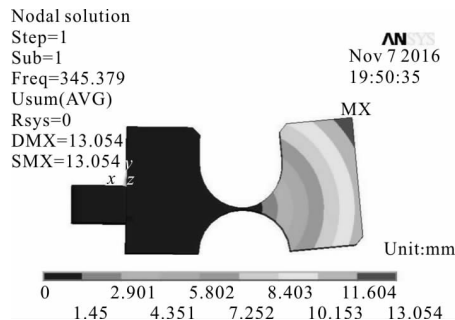


图 3 有限元模型

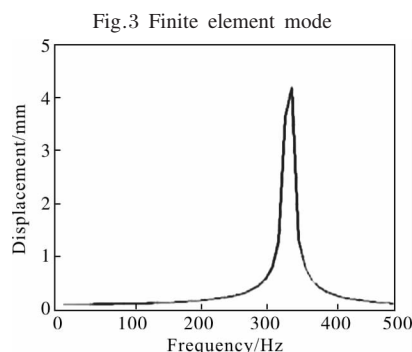


图 4 位移与谐响应频率关系

Fig.4 Relationship between displacement and resonant frequency

所设计的加速度传感器实物如图 5 所示。



图 5 光纤光栅加速度传感器实物图

Fig.5 Pictorial diagram of the FBG acceleration sensor

2 解调系统方案

基于 F-P 滤波器边缘滤波解调原理的光纤光栅解调系统原理框图如图 6 所示。系统主要由 ASE 宽带光源、光纤环行器、FBG 加速度传感器、光纤分路器、F-P 滤波器、光电转换电路、同步采集和数据处理单元、温度补偿装置和 F-P 滤波器驱动电路组成。宽带光源发出的光经过光纤环行器进入 FBG 加速度传感器,为了有效减小光源波动和光路损耗对系统的影响,反射回来的光通过光纤分路器分为两

路，一路光信号直接通过光电转换电路转化成参考光强 I_R ，另一路光信号经过 F-P 滤波器后再通过光电转换电路转化成测量光强 I_M ，定义光强比值：

$$\bar{I}(t) = \frac{I_M(t)}{I_R(t)} \quad (8)$$

当 FBG 加速度传感器的中心波长受外界振动影响发生漂移 $\Delta\lambda$ 时，测量光强 I_M 和光强比值 $\bar{I}(t)$ 均发生相应的变化，因此，通过测量光强比值 $\bar{I}(t)$ 的大小可以得到波长偏移量 $\Delta\lambda$ ，从而检测振动加速度的大小。

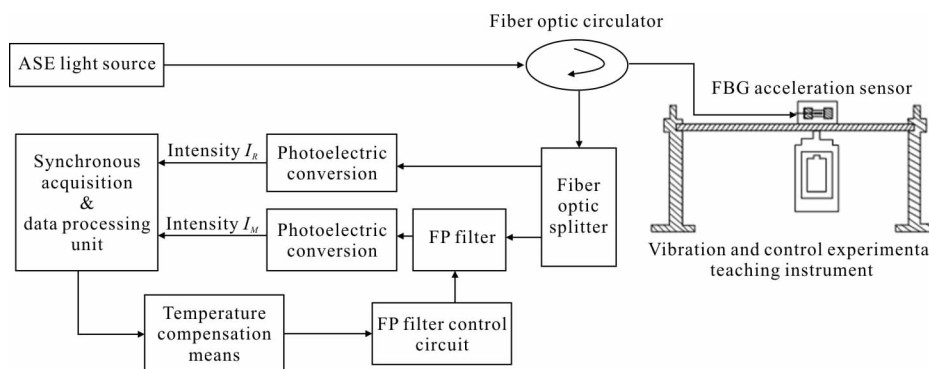


图 6 解调系统原理框图

Fig.6 Block diagram of the demodulation system

为了减小环境温度对系统的影响，引入温度补偿控制通路。在静态下，当外界温度发生变化时，温度补偿装置运行补偿算法并通过控制电路调整 F-P 滤波器，使得系统的零点输出稳定在一个固定光强比率 I_0 上，补偿温度对系统测量结果的影响。

教学仪的加速度设定为 1.0 g，频率分别设定为 40.0 Hz 和 280.0 Hz，得到系统的时域和频域响应曲线如图 8 所示。可见，系统具有良好的频率时域响应。

3 实验结果与分析

为测试设计的检测系统性能，搭建测试平台如图 7 所示。把 FBG 加速度传感器固定到振动与控制实验教学仪的振动梁上，并保证传感器粘贴方向与振动方向垂直，将其输出接入自制的解调仪，其解调精度为 1 pm。

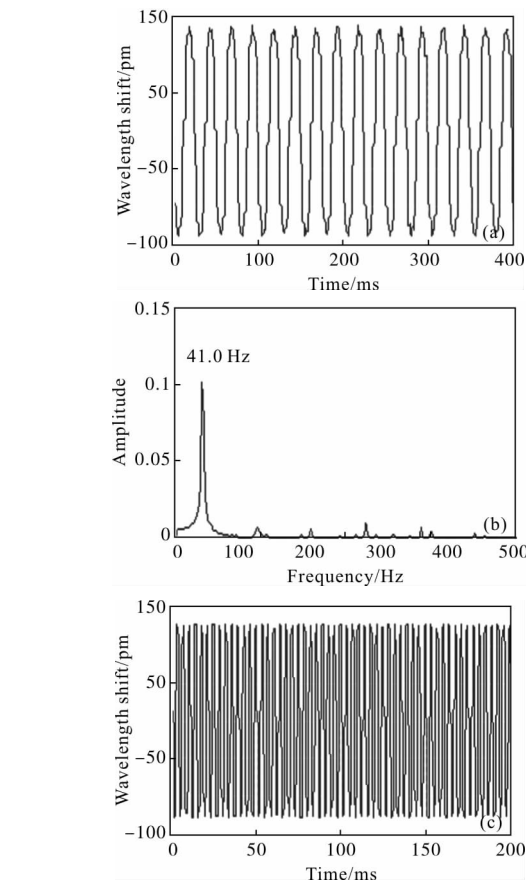


图 7 光纤光栅加速度检测系统性能指标测试平台

Fig.7 Test platform for FBG acceleration detection system specifications

3.1 响应特性

为测试系统的响应特性，将振动与控制实验

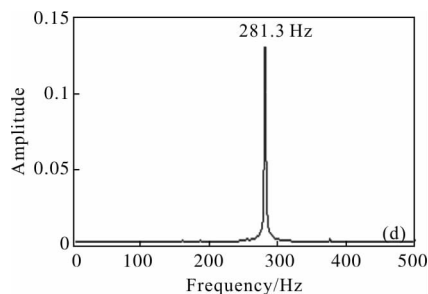


图 8 系统响应曲线

Fig.8 Curve of system response

3.2 幅频特性和动态响应范围

为测试系统的幅频特性和动态响应范围,设定振动与控制实验教学仪的幅度为 0.5 g。在 10.0 ~ 500.0Hz 范围内改变教学仪的频率,在 10.0~100.0Hz 范围内,步长为 10.0Hz,在 100.0~500.0Hz 范围内,步长为 20.0 Hz,记录系统输出的波长变化值,其幅频特性曲线如图 9 所示。可以看出,该系统在 10.0 ~ 240.0Hz 具有良好的平坦响应区,灵敏度可达 236 pm/g,固有频率约为 380.0 Hz。与固有频率 345.4 Hz 的理论值比较接近,误差可能是由传感器组装时结构上的损耗、光纤预应力调整不佳等因素导致的。

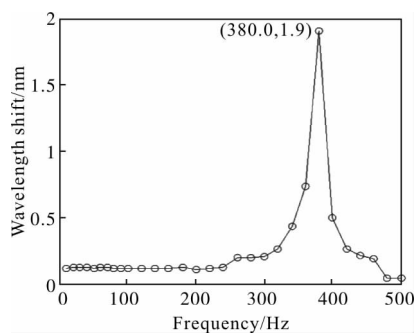


图 9 系统幅频特性曲线

Fig.9 Curve of system amplitude-frequency characteristics

动态范围可表示为传感器的 FBG 中心波长最大偏移量与系统 FBG 中心波长解调精度的对数比值,即:

$$DR=20\log\frac{\Delta\lambda_{\max}}{\Delta\lambda_{\min}}$$

因此,所设计加速度检测系统的动态范围为:

$$DR=20\log\frac{\Delta\lambda_{\max}}{\Delta\lambda_{\min}}=20\log\frac{1900}{1}=65.6\text{ dB}$$

3.3 加速度响应特性

为测试系统加速度响应特性,将振动与控制实

验教学仪的激励固定在一个频率上,在 0~1.0 g 范围内改变振动与控制实验教学仪的加速度输出,记录加速度传感器输出的波长变化值。分别在 50.0、100.0、150.0 和 200.0 Hz 下进行了加速度响应实验,系统加速度响应曲线如图 10 所示。可以看出:在不同频率下,系统对加速度的响应均有比较好的线性。

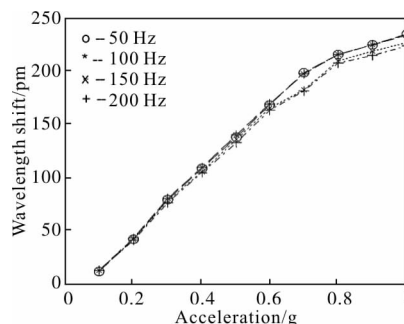


图 10 系统加速度响应曲线

Fig.10 Curve of system acceleration response

3.4 加速度响应重复性

为测试系统加速度响应的重复性,将振动与控制实验教学仪的激励固定在 150.0 Hz 上,在 0~1.0 g 范围内改变振动与控制实验教学仪的加速度输出,重复 3 次,记录加速度传感器输出的波长变化值。系统加速度响应重复性曲线如图 11 所示。可以看出,在不同频率下,系统加速度响应重复性较好。

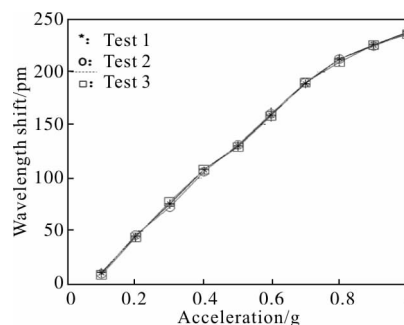


图 11 系统加速度响应重复性曲线

Fig.11 Repeatability curve of system acceleration response

3.5 横向抗干扰特性

在加速度检测工程应用中,加速度的横向抗干扰特性是一个重要指标。为测试传感器的横向抗干扰能力,分别在纵向和横向方向上施加频率为 100.0 Hz、幅度为 0.7 g 的正弦激励信号,传感器的响应如图 12 所示。可见,传感器的纵向响应和横向

响应分别为 127 pm 和 4 pm, 横向灵敏度为纵向灵敏度的 3.5%。这表明, 设计传感器能够在载荷作用下产生近似单一自由度的振动, 具有较强的横向抗干扰能力。

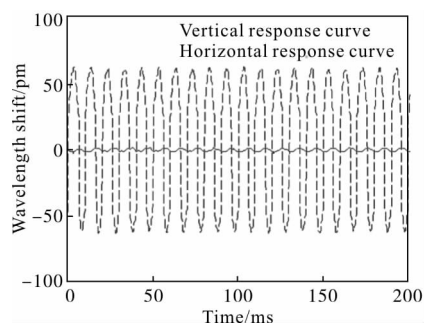


图 12 横向抗干扰特性曲线

Fig.12 Curve of horizontal anti-interference characteristics

3.6 冲击响应特性

测定加速度检测系统的冲击响应特性时, 加速度传感器布置如图 13 所示。把传感器固定到一块 400 mm×500 mm×2 mm 的铝平板上, 并保证梁平面与铝板平面平行, 将其输出接入光纤光栅解调仪。实验时, 铝平板固定在实验台上, 分别在传感器 20 cm 处的 0°、45°、90°、135°、180°方向上施加冲击信号。冲击信号由一个 30 g、直径为 20 mm 的钢球, 从 20 cm 处自由落体产生。

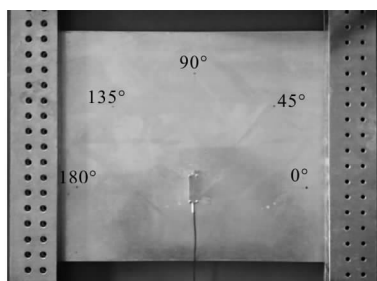


图 13 冲击信号激励实验系统

Fig.13 Experimental system for impact signal excitation

冲击响应曲线如图 14 所示。由图 14(a)~(e)可知, 系统对 0°~180°范围内的冲击信号均具有良好的响应, 在 0°~90°和 90°~180°范围内的响应具有对称性。冲击位置角度与传感器 FBG 波长偏移量之间的关系如图 14(f)所示。可以看出, 在 90°方向上, 系统响应最大; 在 0°和 180°方向上, 系统响应最小, 这与光纤光栅的信号响应方向敏感性是相吻合的^[20]。

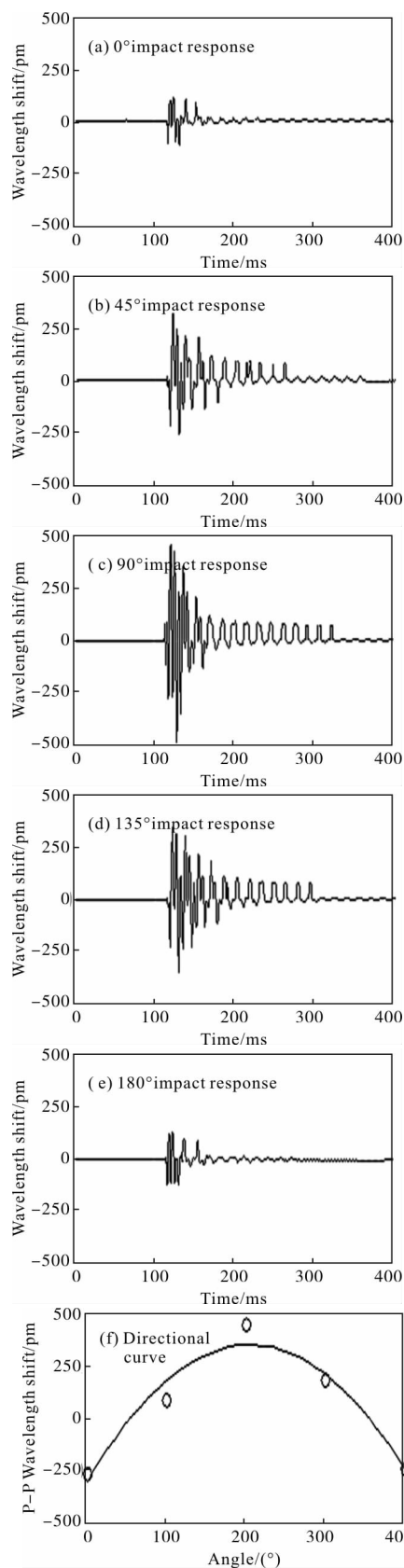


图 14 系统冲击响应曲线(a)~(e)和方向性曲线(f)

Fig.14 Curve (a)~(e) of system impact response and directionality curve (f)

4 结 论

文中设计了一种基于柔性铰链结构的 FBG 加速度传感器, 理论分析了柔性铰链结构的加速度检测机理, 构建有限元模型仿真分析了传感器的加速度传感特性, 并基于 F-P 滤波器和边缘滤波解调原理设计了 FBG 加速度检测系统, 实现了加速度检测系统的零点自温度补偿。所设计的加速度检测系统既有较高的固有频率, 又兼顾了高灵敏度、宽动态响应范围和较强的横向干扰能力, 为光纤光栅加速度检测系统的工程应用提供了一种新的可靠方案。

参考文献:

- [1] Zhong Shaolong, Long Liang, Li Ming, et al. Torsion-sensitive micro-electro mechanical systems accelerometer sensor based on optic fiber detection technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 105-115. (in Chinese)
钟少龙, 龙亮, 李明, 等. 基于光纤检测技术的扭转敏感微机电系统加速度传感器[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 105-115.
- [2] Majumder M, Ganggopadhyay T K, Chakraborty A K, et al. Fiber Bragg Gratings in structural health monitoring - Preaent status and applications [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2008, 147(1): 150-164.
- [3] Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Li Jieyan, et al. Two dimensional fiber Bragg grating accelerometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 198-204. (in Chinese)
郭永兴, 张东生, 李杰燕, 等. 光纤光栅二维加速度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 198-204.
- [4] Lu Wengao, Sun Qizhen, Wo Jianghai, et al. High sensitivity micro-vibration sensor based on distributed bragg reflector fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728006. (in Chinese)
鲁文高, 孙琪真, 沃江海, 等. 基于分布布拉格反射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728006.
- [5] Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang, et al. Accelerometer based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1): 171-175. (in Chinese)
柯涛, 朱涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的全光纤法布里-珀罗干涉式加速度传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 171-175.
- [6] 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): 1206005. (in Chinese)
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): 1206005.
- [7] Catalano A, Bruno F A, Pisco M, et al. An intrusion detection system for the protection of railway assets using fiber Bragg grating sensors [J]. *Sensors*, 2014, 14 (10): 18268-18285.
- [8] Ma Lin, Guo Xinchun, Qi Yanhui, et al. Investigation on the vibration characteristic of fiber vibration sensor based on a Core-offset structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34 (12): 1206007. (in Chinese)
马林, 郭新春, 齐艳辉, 等. 基于偏芯结构的光纤传感器的振动传感特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1206007.
- [9] Robert Kuells, Siegfried Nau, Manfred Salk, et al. Novel piezoresistive high-g accelerometer geometry with very high sensitivity-bandwidth product [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 182(8): 41-48.
- [10] Guru Prasad A S, Omkar S N, Vikranth H N, et al. Design and development of fiber Bragg grating sensing plate for plantar strain measurement and postural stability analysis [J]. *Measurement*, 2014, 47(1):7 89-793.
- [11] Paulo Antunes, Hugo Lima, Humberto Varum, et al. Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: abode wall case study [J]. *Measurement*, 2012, 45(7): 1695-1705.
- [12] Xu Dongsheng, Yin Jianhua, Cao Zhenzhong, et al. A new flexible FBG sensing beam for measuring dynamic lateral displacements of soil in a shaking table test [J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 200-209.
- [13] 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(1): 79-85.
- [14] Wang Hongliang, Zhou Haoqiang, Gao Hong, et al. Fiber grating acceleration vibration sensor with double uniform strength cantilever beams [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(4): 635-641. (in Chinese)
王宏亮, 周浩强, 高宏, 等. 基于双等强度悬臂梁的光纤

- 光栅加速度振动传感器 [J]. 光电子·激光, 2013, 24(4): 635-641.
- [15] Feng Dingyi, Qiao Xueguang, Yang Hangzhou, et al. A fiber Bragg grating accelerometer based on a hybridization of cantilever beam [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2015, 15(3): 1532-1537.
- [16] Ye Ting, Liang Dakai, Zeng Jie, et al. Study on optical fiber grating vibration sensor based on bow beam sensitive characteristic [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(1): 139-145. (in Chinese)
叶婷, 梁大开, 曾婕, 等. 基于弓形梁增敏结构的 FBG 振动传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 139-145.
- [17] Li Lan, Dong Xinyong, Zhao Chunliu, et al. Simply - supported beam -based fiber Bragg grating vibration sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2497-2500. (in Chinese)
- 李岚, 董新永, 赵春柳, 等. 简支梁结构的光纤光栅振动传感器[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2497-2500.
- [18] Zhang Yunshan, Qiao Xueguang, Liu Qinpeng, et al. Study on a fiber Bragg grating accelerometer based on compliant cylinder [J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26(12): 229-233.
- [19] Shi Weiwei. Research on response characteristics of FBG sensing subject to ultrasonic stimulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 16-21.
史巍巍. 超声激励下的光纤光栅传感响应特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 16-21.
- [20] Takedaa N, Okabeb Y, Kuwahara J, et al. Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing [J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65 (15-16): 2575-2587.