光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021102101

双光纤-悬臂梁 FBG 加速度传感器研究

李立新[1,2]，王业伟[1,2*]，左浩宙[1,2]，邱忠超[1,2]，洪　利[1,2]

（1. 防灾科技学院 电子科学与控制工程学院，河北 三河 065201；
2. 河北省地震灾害仪器与监测技术重点实验室，河北 三河 065201）

摘　要： 针对现有悬臂梁 FBG 加速度传感器光纤表面粘贴会造成 FBG 受力不均匀，并且无法在温度变化和振动等复杂的环境中工作的问题，提出一种双光纤-悬臂梁结构的 FBG 加速度传感器。理论分析了结构参数对传感器灵敏度和固有频率的影响，并采用 ANSYS 有限元分析软件进行了静应力和模态仿真分析，最后搭建了测试系统对传感器进行性能测试。结果表明，加速度传感器的固有频率为 84.86 Hz，在 15～60 Hz 的低频段具有平坦的灵敏度响应，双光纤在增加传感器的灵敏度的同时有效消除了温度变化的影响，加速度灵敏度为 156.70 pm/g，线性度为 99.38%，刚性梁有效增加了结构的稳定性，在工作频段内的横向串扰为－26.97 dB。

关键词： 光纤布拉格光栅；加速度传感器；悬臂梁；有限元分析

中图分类号： TP212.2　**文章编号：** 1001－5868(2022)01－0126－06

Research on Double Fiber-cantilever Beam FBG Acceleration Sensor

LI Lixin[1,2], WANG Yewei[1,2], ZUO Haozhou[1,2], QIU Zhongchao[1,2], HONG Li[1,2]

（1. School of Electronic Science and Control Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, CHN;
2. Hebei Key Laboratory of Seismic Disaster Instrument and Monitoring Technology, Sanhe 065201, CHN）

Abstract: The existing cantilever FBG acceleration sensor can be subjected to uneven force due to the optical fiber surface adhesion, and can not work in the complex environment of temperature change and vibration. In order to solve such problems, a dual fiber-cantilever structure FBG acceleration sensor is proposed. The influence of structural parameters on the sensitivity and natural frequency of the sensor was analyzed theoretically, and the static stress and modal simulation analysis was carried out by ANSYS finite element analysis software. Finally, a test system was built to test the performance of the sensor. The results show that the natural frequency of the acceleration sensor is 84.86 Hz, and it has a flat sensitivity response in the low frequency range of 15～60 Hz. The dual optical fiber can effectively eliminate the influence of temperature changes while increasing the sensitivity of the sensor, obtaining the acceleration sensitivity of 156.70 pm/g and the linearity of 99.38%. The rigid beam effectively increases the stability of the structure, and the lateral crosstalk within the working frequency band is －26.97 dB.

Key words: fiber Bragg grating (FBG); acceleration sensor; cantilever beam; finite element analysis

收稿日期：2021－10－21.

基金项目：廊坊市科学技术研究与发展计划自筹经费项目(2021011033)；中央高校基本科研业务费资助计划项目(2021011033)；中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金项目(ZY20210304).

* **通信作者：**王业伟

E-mail: w_emu_cidp@163.com

0　引言

振动和加速度测量在灾害监测、大中型工程结构健康监测以及资源勘探等领域占据重要地位[1-2]。而传统的电学传感器在振动和加速度测量领域有着广泛的应用，具有成本低、精度高、技术较成熟等优点[3-5]，但其容易受电磁干扰，布线繁琐，且在长距离传输环境下信号衰减很快，严重制约其在工程实践中的应用[6]。FBG 加速度传感器以其重量轻、分布式传感能力强、抗电磁干扰等独特优势，很好地弥补了电学传感器的不足，并且信号传输的波长编码特性拥有更好的抗噪声能力[7-8]。

悬臂梁结构 FBG 加速度传感器因其谐振频率低、灵敏度高的特点，成为国内外学者研究的热点[9]。Liu 等[10]提出一种双梁式 FBG 振动加速度传感器，增加了一根参考光纤，传感器灵敏度为 78.1 pm/g，可在 27.5～67.5 ℃内进行温度补偿。Casas-Ramos 等[11]提出一种新型悬臂式 FBG 振动传感器，光纤两端固定在传感器外壳框架和悬臂梁尖端上，固有频率为 227.3 Hz，工作带宽为 10～210 Hz。Zhang 等[12]在主梁与质量块的连接端加入辅助梁，整体结构呈三角形，增加了主梁的稳定性。Lee 等[13-14]通过测量光栅板在高温环境下的变化，研究温度对 FBG 加速度传感器探头的影响。然而，普通悬臂梁结构 FBG 加速度传感器是将光纤固定于悬臂梁表面来检测振动，会造成 FBG 受力不均匀，易产生啁啾现象，并且无法在温度变化和振动环境复杂的灾害现场或野外勘探中正常工作，这已成为制约 FBG 加速度传感器在工程实际中推广应用的瓶颈。

本文提出一种采用双光纤-悬臂梁结构的 FBG 加速度传感器，对其结构进行了理论分析，并采用计算机辅助设计(Solidworks)建模和 ANSYS 有限元数值模拟，研制实物并搭建测试系统对传感器进行温度和振动性能测试。

1　传感器结构设计与理论分析

1.1　传感器结构建模

基于双光纤-悬臂梁结构的 FBG 加速度传感器结构如图 1 所示，悬臂梁一端通过压块与左侧板的结合固定，另一端通过刚性梁与质量块连接。刚性梁设计为左端凸起，有效放大振动的加速度信号，提高灵敏度。悬臂梁的宽度设计远大于厚度，有效减小横向干扰，增加结构的稳定性。在左侧板以及刚性梁左端凸起对应位置开有直径为 1 mm 的通孔和槽孔，用于粘贴光纤，采用两点式粘贴法，避免栅区粘贴带来的啁啾现象。

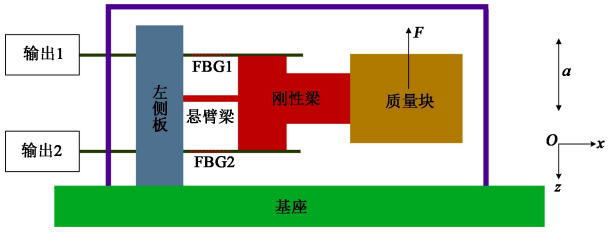


图 1　传感器结构示意图

1.2　理论分析

图 2 为双光纤-悬臂梁结构的 FBG 加速度传感器机械模型，当加速度 a 垂直向下时，质量块向上移动，则在 FBG1 中引起拉伸应变，在 FBG2 中引起等量的压缩应变，向上的加速度则与向下的相反。FBG 将这些应变转换成等效的中心波长变化量 $\Delta\lambda_{B1}$ 和 $\Delta\lambda_{B2}$，$\Delta\lambda_{B1}-\Delta\lambda_{B2}$ 与施加的加速度成正比。

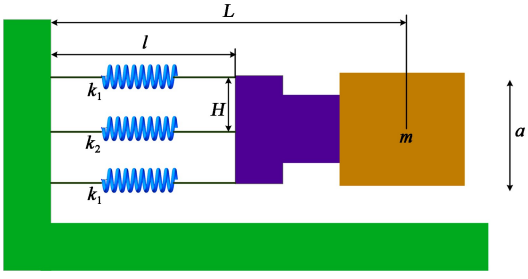


图 2　传感器机械模型

设每根光纤的刚度为 k_1，悬臂梁的刚度为 k_2，则系统等效刚度为 $K=2\left(\frac{H}{L}\right)^2 k_1+\left(\frac{l}{L}\right)^2 k_2$，进而计算固有频率 f 为

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{m}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2(H/L)^2 k_1+(l/L)^2 k_2}{m}} \tag{1}$$

式中，m 为质量块的质量，H 为光纤到悬臂梁的距离，L 为左侧板到质量块中心的距离，l 为悬臂梁和光纤的有效长度。

当加速度 a 施加到传感器上时，在方向垂直向上的合力 F 的作用下，设质量块相对于底座的位移为 Δx，光纤产生的拉伸量为 Δx_1，则

$$\Delta x_1=\frac{H}{L}\Delta x=\frac{H}{L}\cdot\frac{ma}{K} \tag{2}$$

光纤发生的应变 $\Delta\varepsilon$ 为

$$\Delta\varepsilon=\frac{\Delta x_1}{l}=\frac{(H/L)ma}{2l(H/L)^2k_1+(l^3/L^2)k_2} \tag{3}$$

得到传感器单根光纤的灵敏度 $S_{单}$ 为

$$S_{单}=\left|\frac{\Delta\varepsilon}{a}\right|=\frac{(H/L)m}{2l(H/L)^2k_1+(l^3/L^2)k_2} \tag{4}$$

FBG1 和 FBG2 的波长变化量与温度变化 ΔT 和应变变化 $\Delta\varepsilon$ 的关系分别为

$$\Delta\lambda_{B1}=\lambda_{B1}((a_\Lambda+a_n)\Delta T+(1-p_e)\Delta\varepsilon) \tag{5}$$

$$\Delta\lambda_{B2}=\lambda_{B2}((a_\Lambda+a_n)\Delta T-(1-p_e)\Delta\varepsilon) \tag{6}$$

式中，λ_{B1} 为 FBG1 中心波长，λ_{B2} 为 FBG2 中心波长，a_Λ，a_n 分别为光纤热膨胀系数和热光系数，p_e 为光纤有效弹光系数。考虑两根中心波长相同的 FBG，取式(5)和(6)之差得

$$\Delta\lambda_{B1}-\Delta\lambda_{B2}=2\lambda_B(1-p_e)\Delta\varepsilon \tag{7}$$

综合式(4)和(7)，可得双光纤加速度传感器的总灵敏度 $S_{双}$ 为

$$S_{双}=\left|\frac{\Delta\lambda_{B1}-\Delta\lambda_{B2}}{a}\right|=\frac{2\lambda_B(1-p_e)(H/L)m}{2l(H/L)^2k_1+(l^3/L^2)k_2} \tag{8}$$

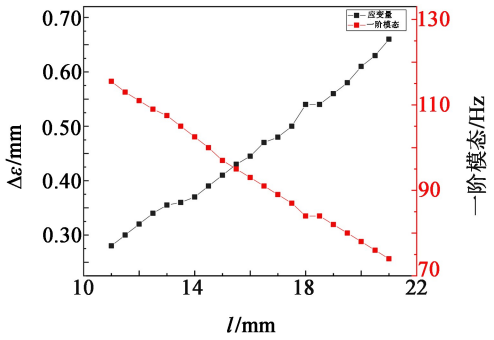
2 有限元仿真分析

采用 Solidworks 软件对传感器弹性模块进行建模，其中悬臂梁采用弹性模量较高的弹簧钢，质量块选用密度较大的黄铜合金，其余材料为钢合金，导入 ANSYS 软件进行仿真。

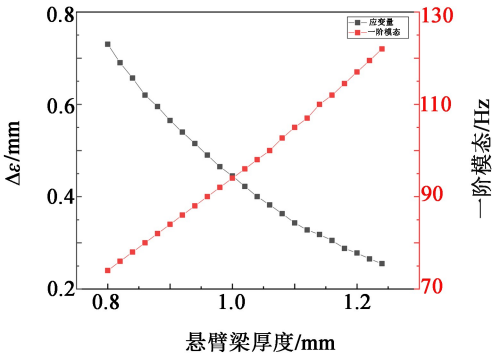
2.1 静应力分析

使用 ANSYS 软件对弹性模块模型进行静应力分析，臂长变化范围为 10.00～21.00 mm，步长为 0.50 mm；厚度变化范围为 0.80～1.24 mm，以步长 0.02 mm 改变，得到悬臂梁臂长和厚度对传感器应变量和一阶模态的影响，结果如图 3 所示。

由图 3 可知，在臂长为 15.50 mm、厚度为 1.00 mm 时，应变量适中，不影响FBG的物理性质。此时，传感器的一阶模态频率约为 95 Hz，既不会因固有频率太高，影响低频信号响应的灵敏度，又不会导致低频响应带宽太窄，降低传感器实用性能。同时考虑传感器的结构特性，悬臂梁需有 1.50 mm 的伸进量。综上，选择悬臂梁臂长为 17.00 mm，厚度为 1.00 mm。



(a) 臂长变化分析



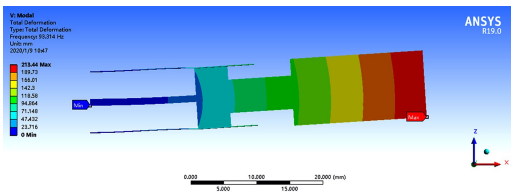
(b) 厚度变化分析

图 3 传感器结构建模

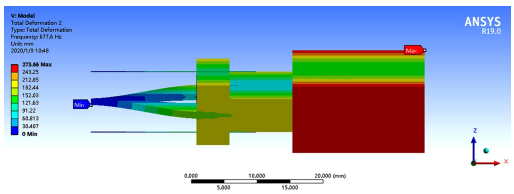
2.2 模态分析

将模型放入模态分析模块(Modal)中，对两根光纤的左端面、悬臂梁的左端面同时施加固定约束，模型整体建立网格划分，对模型的前四阶进行模态分析，得到一阶、二阶模态频率分别为 93.31 和 667.60 Hz，各阶振型如图 4 所示。

由模态分析可知，该结构固有频率为 93.31 Hz，且一阶工作频率与二阶工作频率相差较大，表明该传感器结构能够有效降低交叉干扰，交叉耦合小，传感器稳定性好。



(a) 一阶振型



(b) 二阶振型

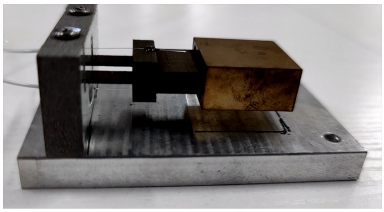
图 4 模态振型图

3 传感器性能测试

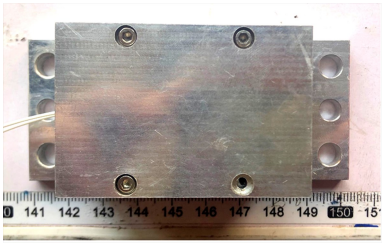
3.1 传感器研制与测试系统搭建

研制的 FBG 加速度传感器实物如图 5 所示。

测试前，将光纤一端放置在刚性梁左端凸起对应的槽孔内，通过 UV 胶粘贴。末端用一个质量为 20 g 的砝码对光纤施加预应力，再使用 UV 胶和紫外灯将光纤固定在左侧板的通孔上。



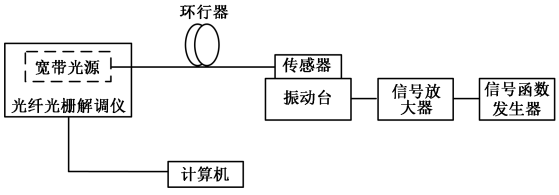
（a）　传感器装配图



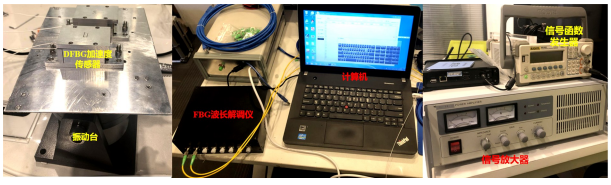
（b）　传感器实物

图 5　模态振型图

振动测试系统由 FBG 加速度传感器、振动台、信号发生器、信号放大器、光纤光栅解调仪（内置光源）以及计算机组成，如图 6 所示。环行器在其中作为连接部件，将宽带光源的光波输送至加速度传感器，经过 FBG 后一定波长范围的光被反射回来，再经环行器输送至解调仪解调出光波随振动时刻变化的中心波长，最后将采集到的数据传输到计算机。



（a）　振动测试系统构成框图



（b）　振动测试系统实物图

图 6　传感器振动测试系统

3.2　温度特性

将 FBG 加速度传感器固定于温控箱内，改变温度环境进行温度实验。设置温度变化初始点为 −20 ℃，终点为 60 ℃，变化步长为 10 ℃。在每一节点温度达到平衡时，保持 2 min 后分别测量两根 FBG 中心波长的变化量，记录数据并分析，进行归一化处理后，结果如图 7 所示。

由图 7 可知，温度的变化会严重影响 FBG 加速度传感器的测量精度和准确度，温度变化对单根 FBG 的影响为 11.12 pm/℃。而温度对双 FBG 加速度传感器的影响为 0.10 pm/℃，表明双光纤结构显著改善了测量环境温度对 FBG 加速度传感器的影响，可以实现对环境温度变化的自补偿功能。

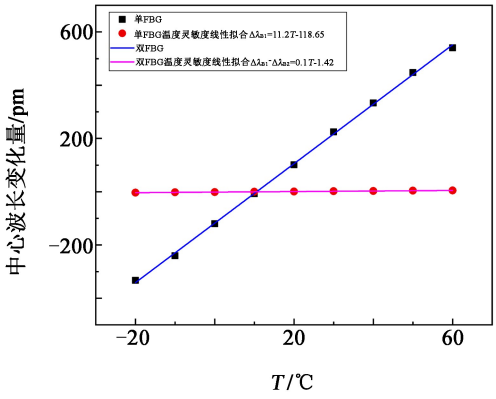


图 7　温度对中心波长的影响

3.3　幅频特性

设置振动台加速度为 5 m/s^2，由信号发生器产生 5～140 Hz 的激励，以步长为 5 Hz 改变振动台输出频率，在接近传感器固有频率时，步长降为 2 Hz，得到加速度传感器的幅频响应曲线，如图 8 所示。可知，传感器在 15～60 Hz 具有良好的平坦区，固有频率为 84.86 Hz，与仿真分析的理论值 93.31 Hz 相近，误差可能是由传感器加工与安装时的误差以及光纤粘贴时施加的预应力造成的。

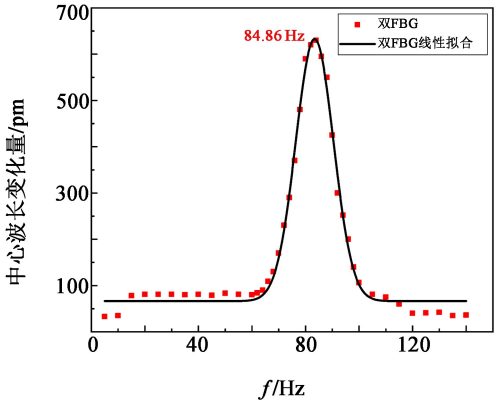


图 8　传感器幅频特性

3.4　灵敏度与线性度测试

为了确定传感器灵敏度，设定振动台输出频率分别为 30 Hz，加速度变化范围为 0～2 g，记录两个

不同频率下 FBG1 和 FBG2 中心波长 λ_B 的变化，得到其线性度拟合曲线，如图 9 所示。

采集数据后分析处理得到，振动台输出频率在 30 Hz 时加速度传感器单光纤的灵敏度为 111.87 pm/g，双光纤的灵敏度为 156.70 pm/g，单光纤和双光纤对应的线性度 R 分别为 0.996 1 和 0.993 8。结果表明，FBG 加速度传感器的中心波长变化量与输入加速度幅值具有良好的线性关系，且双光纤能达到增加灵敏度的作用，测试中传感器最小可探测的加速度为 0.05 m/s^2。

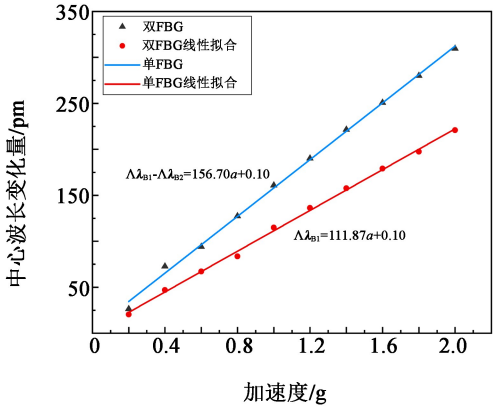


图 9 线性度拟合图

3.5 横向抗干扰测试

将传感器固定于振动台上，设置加速度幅值最大为 0.3 mm，振动频率为 30 Hz，测量横向振动对光纤光栅中心波长的变化量，并将其与同振动环境下的纵向变化量对比，结果如图 10 所示。计算得到传感器横向串扰为 −23.68 dB，说明传感器在振动条件下可以看作是单自由度振动，具有较强的横向抗干扰能力。

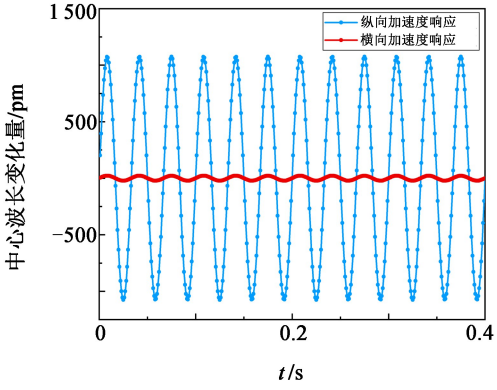


图 10 横向抗干扰测试结果

4 结论

针对现有悬臂梁 FBG 加速度传感器光纤表面粘贴会造成 FBG 受力不均匀，并且无法在温度变化和振动等复杂的环境中工作的问题，本文提出了一种双光纤-悬臂梁结构的 FBG 加速度传感器，通过双光纤两点粘贴的方式增加传感器灵敏度。结果表明，传感器固有频率为 84.86 Hz，在 15～60 Hz 的低频段具有平坦的灵敏度响应。单根光纤灵敏度为 111.87 pm/g，双光纤灵敏度为 156.70 pm/g，采用双光纤灵敏度没有简单的增加一倍的原因是：1）增加一根光纤会增加系统刚度，从而降低传感器的灵敏度；2）传感器加工和安装误差、粘合剂的用量、FBG 预应力以及实验振动设备的精度等都会对传感器灵敏度产生影响。本文还研究了温度对传感器测量的影响，采用双光纤结构实现了温度的差分补偿，温度影响因数为 0.10 pm/℃，为 FBG 加速度传感器在复杂温度环境中的工程应用提供了一定基础。

参考文献：

[1] Hiroyuki Goto, Yoshihiro Kaneko, John Young, et al. Extreme accelerations during earthquakes caused by elastic flapping effect[J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 1117-1125.

[2] 邱忠超，王业伟，滕云田，等. 基于柔性铰链的低频 FBG 加速度传感器[J]. 自然灾害学报，2021，30(3)：35-42.
Qiu Zhongchao, Wang Yewei, Teng Yuntian, et al. Low-frequency FBG acceleration sensor based on flexible hinge[J]. J. of Natural Disasters, 2021, 30(3): 35-42.

[3] 王 玺. 光纤光栅加速度传感器的研究进展[J]. 科技资讯，2015，13(2)：98-103.
Wang Xi. Research progress of fiber Bragg grating acceleration sensor[J]. Technology Information, 2015, 13(2): 98-103.

[4] Guo Yongxing, Fu Jianjun, Longqi, et al. Fiber Bragg grating sensor-based monitoring strategy for slope deformation in centrifugal model test[J]. Sensor Review, 2019, 39(1): 71-77.

[5] 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.

[6] 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.

[7] Gutiérrez N, Galvin P, Lasagni F. Low weight additive manufacturing FBG accelerometer: Design, characterization and testing[J]. Measurement, 2018, 117: 295-303.

[8] Dai Yutang, Yin Guanglin, Liu Bin, et al. Medium-high frequency FBG accelerometer with integrative matrix structure

[J]. Appl. Optics, 2015, 54(11): 3115-3121.

[9] 左浩宙. 地震监测光纤加速度传感器研究[D]. 三河：防灾科技学院，2020.
Zuo Haozhou. Design of fiber optic acceleration sensor for seismic monitoring [D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention, 2020.

[10] Liu Qinpeng, He Xue, Qiao Xueguang, et al. Design and modeling of a high sensitivity fiber Bragg grating-based accelerometer[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(14): 5439-5445.

[11] Casas-Ramos, Miguel A, Sandoval-Romero, et al. Fiber optic mechanical vibration sensor [J]. Vibroengineering Procedia, 2017, 12: 84-87.

[12] Zhang Yan, Li Sanguo, Yin Zhifan, et al. Unattended ground sensor based on fiber Bragg grating technology[J]. Proc. SPIE, 2005, 5796: 133-140.

[13] Lee Y G, Kim J H, Kim C G. High temperature endurable fiber optic[J]. Shock and Vibration, 2014(1): 1-8.

[14] Lee Y G, Kim Y H, Park K S. Interferometric fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(3): 2467-2486.

作者简介：

李立新(1979—)，女，河北省承德市人，硕士，副教授，研究方向为光纤传感技术；

王业伟(1995—)，男，山东省枣庄市人，硕士研究生，研究方向为灾害监测技术与仪器。