

文章编号 1004-924X(2015)增-0374-07

碳纤维悬臂梁式振动检波器

林 君, 张义鑫, 张天瑜*

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林, 长春 130000)

摘要:为了预测地震所产生的地应力,设计了一种用来测量振动的光纤光栅检波器。基于光纤布拉格光栅传感技术研制了一种利用碳纤维片作为悬臂梁的振动检波器。通过设计的 3 种不同的碳纤维式的悬臂梁结构(宽悬臂梁,细悬臂梁以及梯形悬臂梁),制作了 4 个不同的振动检波器。引用 3.0486 g 的质量体,在相同温度下对振动检波器进行测试;通过对振动数据和振动曲线的分析,得到了最优的悬臂梁结构。分析了不同悬臂梁结构影响振动传感器响应结果的原因与内在激励。在此基础上,对传感器配重、光栅固定方式、配胶比例,传感器核心部分的制作工艺等进行了改进,得到了优化的光纤光栅振动传感器。实验显示悬臂梁式振动检波器的静态及动态响应性能较好,最终实现了工作波长为 1 550 nm,灵敏度可达 $200 \text{ V/m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光纤光栅振动传感器。

关键词: 光纤布拉格光栅; 振动检波器; 悬臂梁; 碳纤维; 地震测量

中图分类号: TN253; P631.436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0374

Vibration detectors with carbon fiber cantilever

JUN Lin, ZHANG Yi-xin, ZHANG Tian-yu *

(College of Instrumentation & Electrical Engineering,
Jilin University, Changchun 130000, China)

* Corresponding author, E-mail: zty@jlu.edu.cn

Abstract: Many kinds of grating vibration detectors have been developed to predict earthquakes in recent years. Based on carbon fiber cantilever, a fiber Bragg grating vibration detector was fabricated in this paper. Then, four different vibration detectors were made based on three different carbon fiber cantilever structures, involving in cantilever beam, narrow cantilever beam and the trapezoidal cantilever. By introducing a mass body in 3.0486 g, the vibration detectors were tested in the same temperature. By analysing the vibration data and curves of the four vibration detectors, the best cantilever beam structure was chosen. After analyzing the effects of different cantilever structures on the response ability of detectors, the antilever vibration detector with good static and dynamic curves of the response to the vibration detector were realized by further optimization of the bob-weight, fiber grating fixation and the proportion of rubber compound. The sensitivity of the vibration detector is $200 \text{ V/m} \cdot \text{s}^{-1}$ at work wavelength of 1 550 nm.

Key words: fiber Bragg grating; vibration sensor; cantilever; carbon fiber; seismic survey

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61306055, No. 61306054, No. 61177026); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2013M530141); 中国博士后科学基金特别资助项目(No. 2014T70290); 吉林省青年科研基金资助项目(No. 20150520096JH)

1 引 言

中国是地震多发国家,地震活动频率大,强度高,范围广,近些年来,各地更是频繁遭受地震所带来的痛苦。2008年,汶川地震不仅造成了人员伤亡,还带来了巨大的经济损失,所以,准确并及时的检测出地震信号是十分必要的。

从 1978 年加拿大 Hill K O 等人^[1]首次观察到掺锗管线中因光有道产生光栅效应以来,光纤光栅应用领域不断扩大,发现了很多传统传感方式所不具有的优势。与传统振动检波器相比,光纤光栅振动检波器具有抗电子干扰,电绝缘性好,可防水,耐腐蚀,耐久性好,耐高温,灵敏度高,可在恶劣环境中长期使用等优点^[2-5]。近年来,国内很多机构都在研究光纤光栅传感器。南开大学利用光纤光栅作为基本传感元件,设计制作了 L 型悬臂梁的振动加速度传感器,采用 65 # Mn 为材料制作悬臂梁,表现出良好的传感特性^[6];昆明理工大学设计出等强度悬臂梁的光纤布拉格低频加速度振动传感器,较好的解决了光栅的啁啾效应,且在加入硅油后,响应频率也有所提升^[7];中国科学院半导体研究所于 2012 年研制出具有双悬臂梁结构的光纤光栅振动传感器,采用悬空固定光纤的方法,克服了在粘贴过程中的影响,增加了传感器的抗干扰能力,且具有较高的共振频率^[8];武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室在悬臂梁结构下加入了板簧,在理论建模与实测验证过程中拓宽了传感器的频率范围^[9];西安石油大学也于 2013 年研制了光纤光栅的振动传感器,基于等强度悬臂梁结构进行优化,并加入了温度补偿光栅^[10]。在国外,美国 Stevens 理工学院 Zhang Y 在 2006 年报道了基于改性悬臂梁结构的光纤光栅地震波传感器^[11]。检波器的工作频率在 10 ~ 110 Hz,共振频率为 90 Hz,动态范围为 80 dB,波长调制,最小可探测的振动加速度为 40 μg 。

本文设计了一种悬臂梁型振动检波器,基于光纤光栅的传感原理,波长调制。采用碳纤维片作为悬臂梁结构,将中心波长 1 550 nm 的光栅固定在上面,并对碳纤维片进行动态和静态分析,验证其可靠性,最后应用到振动检波器中,并通过实

验验证传感器特性。

2 应变传感特性分析

2.1 光纤光栅传感原理

利用麦克斯韦经典方程,结合光纤耦合理论和光纤光栅传输模式的正交关系,当满足相位匹配条件时,可得到光栅的布拉格反射波长表达式:

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

其中: n_{eff} 表示光纤传播模式的有效折射率, Λ 是光纤光栅周期^[12]。

光纤光栅的波长是由有效折射率和光栅周期共同决定的。当外界环境(如应变、温度)发生改变时,光纤光栅会受到拉伸或者压缩,导致光栅的周期发生改变,从而改变了光栅的反射波长;温度改变时,光纤光栅因热膨胀也会导致周期发生变化,热敏效应也会使光栅的有效折射率发生改变,从而让光栅的反射波长发生改变。

2.2 光纤光栅应变传感

光纤光栅受到应变时的表达式为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon \cdot \lambda_B, \quad (2)$$

其中: P_e 为弹光系数。当光纤光栅的材料确定时,光纤光栅的应变传感特性就与材料的系数相关,确保了光纤光栅作为应变传感器具有良好的线性输出。设 $\alpha_\epsilon = \lambda_B(1 - P_e)$,将 α_ϵ 当作光纤光栅因弹光效应而引起应变的灵敏度系数,得到中心波长与应变的关系:

$$\Delta\lambda_B = \alpha_\epsilon \epsilon. \quad (3)$$

3 三分量应变传感器设计与研究

3.1 悬臂梁应变的理论说明

悬臂梁应变理论计算

图 1 所示^[13]为矩形悬臂梁结构示意图。

$$M = 3(L - X_0)EI f / L^3, \quad (4)$$

其中: f 为自由端的位移量, M 为梁上考察点 X_0 处截面的变距^[14]。其中 E 为梁的杨氏模量, I 为 X_0 处截面的惯性距,因为 f 与悬臂梁的自由端所受的侧向力 F 成正比,有:

$$f = FL^3 / (3EI), \quad (5)$$

其中: I 为 X_0 处截面的惯性距:

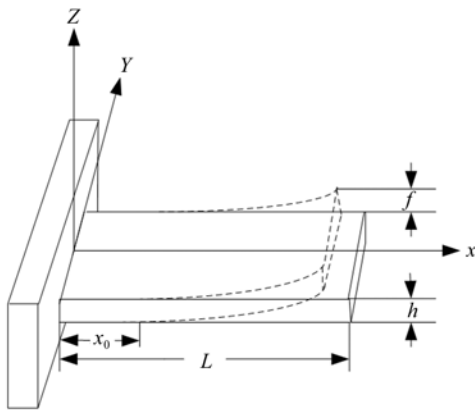


图 1 矩形悬臂梁结构图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangular cantilever

$$I = bh^3/12 \tag{6}$$

可得:

$$\epsilon_x = 6(L - X_0)F/(Ebh^2). \tag{7}$$

可得出位于悬臂梁 X_0 处的光纤布拉格光栅应变传感系统特性为:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = 6\eta(I - pe)(L - X_0)F/(Ebh^2), \tag{8}$$

其中: η 为光纤的弹光系数, 对于 SiO_2 光纤, $pe = 0.22$ 。

3.2 悬臂梁光纤布拉格光栅应变传感

碳纤维是采用有机母体纤维在惰性气体中用 $1\ 000\sim 3\ 000^\circ\text{C}$ 的高温分解制成的, 这样可以除去碳纤维除碳元素以外的其余元素。碳纤维呈黑色, 坚硬, 具有强度高、重量轻等特点, 是一种力学性能优异的新材料, 其比重不足钢的 $1/4$, 且抗拉强度在 $3\ 500\ \text{Mpa}$ 以上, 是普通碳素钢的 $7\sim 9$ 倍, 而抗拉弹性模量为 $23\ 000\sim 43\ 000\ \text{Mpa}$ 比刚

的抗拉弹性模量更大。所以碳纤维的比强度可达到 $2\ 000\ \text{Mpa/g/cm}^3$ 以上, 其比模量也比钢要高^[15]。材料的比强度越高, 构件的自重愈小, 比模量越高, 构件的刚度越大。

3.2.1 光纤布拉格光栅中碳纤维悬臂梁选取

在碳纤维悬臂梁的形状尺寸选取中, 基于设计的 3 种尺寸的碳纤维悬臂梁结构制作了 4 个振动传感器, 这 3 种悬臂梁结构分别为: 1 号宽 $5.95\ \text{mm}$, 长 $50\ \text{mm}$; 2 号细碳纤维片宽 $3.04\ \text{mm}$, $50\ \text{mm}$, 3 号梯形碳纤维片尖端 $2.95\ \text{mm}$, 尾端 $5.95\ \text{mm}$, 总长 $50\ \text{mm}$ 。质量块的质量为 $3.048\ 6\ \text{g}$ 。所制备的 4 个传感器结构分别是: a. 将质量块固定在 1 号碳纤维片尾端; b. 将质量块固定在 2 号碳纤维片尾端; c. 将质量块固定在 3 号梯形碳纤维片的宽端; d. 将质量块固定在 3 号梯形碳纤维片的细端。在相同的温度环境下, 距离支座 $25\ \text{cm}$ 处进行敲击测试。振动传感器实物如图 2, 测试结果如图 3。

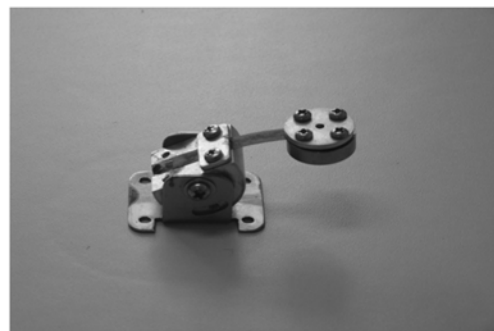
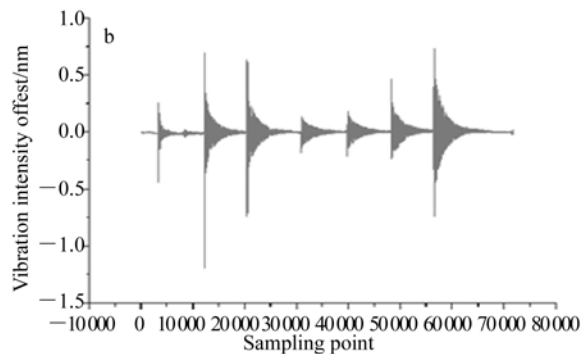
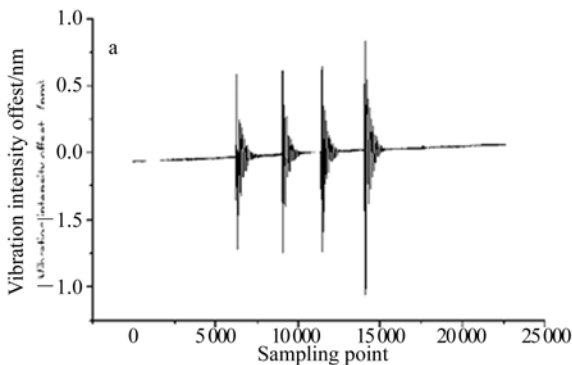


图 2 振动传感器结构图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration sensor



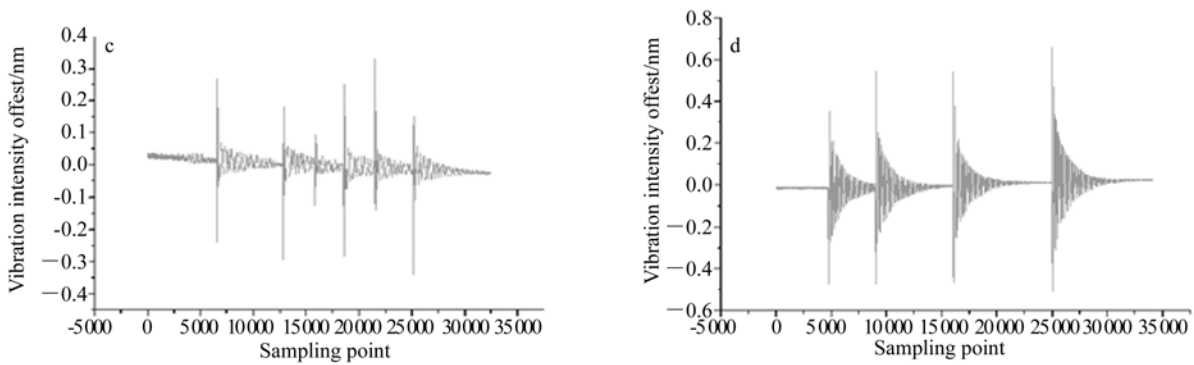


图 3 4 个悬臂梁振动传感器测试结果
Fig. 3 Four cantilever vibration sensor test results

在质量为 3.048 6 g 的重物放在尖端上可以看出不同尺寸形状的悬臂梁有不同的响应。从响应结果可知,使用细碳纤维片的传感器 b 噪声要比宽碳纤维片的传感器 a 大,振动后的振幅不均匀,响应时间也略长;因为细碳纤维片会让悬臂梁的弹性形变增大,令灵敏度增加,在无阻尼的情况下,抗干扰能力下降,使得获得的噪声加大,振动的振幅也会不均匀。将重物分别放在梯形碳纤维悬臂梁的细端(传感器 d)和宽端(传感器 c)时,响应结果存在明显差异;当梯形的细端夹在支架上时,固定端的挠度最大,截面积却最小,因此,在振动过程中,梯形碳纤维悬臂梁整体的应力力分布不均匀,所以导致应变分布不均匀,从而获得如图 3 所示的测试结果;固定端为粗端将重物放在细端时,会产生相反的结果,整体受力相对较均匀。当受力相同时,宽悬臂梁的整体响应灵敏度要比

梯形悬臂梁的灵敏度要高,响应频率更高。通过以上分析可知,传感器 a 的响应最好,故选择传感器 a。在传感器 a 上对质量块进行改变,当质量块达到 25.36g 时,碳纤维悬臂梁过载,可知,传感器 a 的最大载荷为 25.36 g。

通过光栅黏胶方式的改进,对传感器 a 进行优化,分别做了两组实验,第一组光纤光栅完全粘在碳纤维上,第二组只将光纤光栅的两端固定,中间的光栅不粘在碳纤维悬臂梁上,实验结果如图 4 所示。当光栅不粘在碳纤维上时,回零时间较长,在没完全回零时就接收到下一次振动的响应,响应时间过长,且噪声较大,在振动没有开始前就出现响应,导致在振动过程中产生误差;光栅不粘在碳纤维上也容易导致光栅受力不均,产生啁啾效应,影响解调效果,因此在粘贴光栅时一定要将光纤光栅整体粘在碳纤维悬臂梁上,且涂胶要均匀。

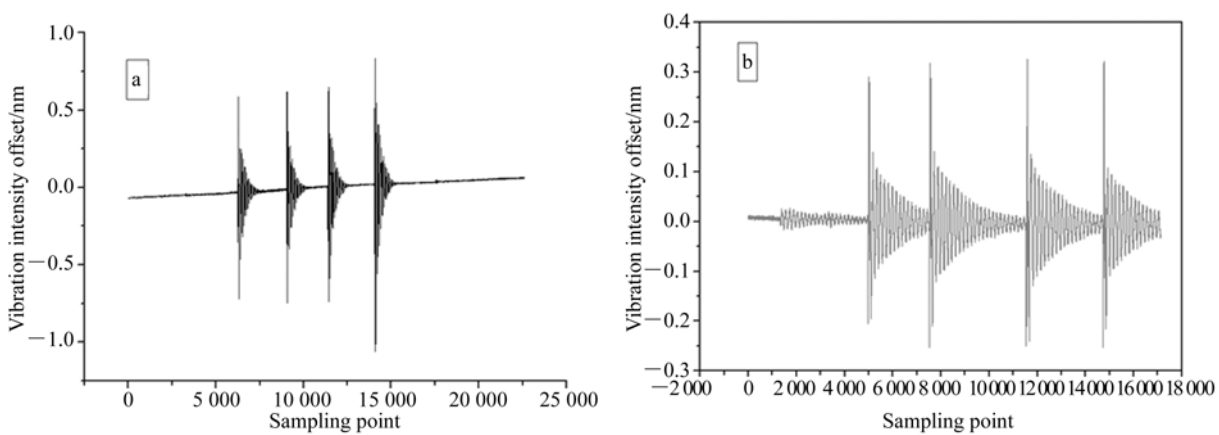


图 4 光纤光栅粘胶测试结果
Fig. 4 Results of fiber grating viscose

选择碳纤维片宽(宽 5.95 mm,长 50.11 mm,厚 0.2 mm)作为光纤光栅传感片,并选用配胶(双组分 E-ZLAM 胶配比为 2 份 A 加 1 份 B 为体积配比;按规程调胶充分搅拌后,放置约 5~10 min 使用,24 h 可进行下一步操作,7 d 后全干)。涂胶之前应在光纤轴向加一定的预应力,用牙签把胶均匀的涂在碳纤维片上。

3.2.2 光纤布拉格光栅中悬臂梁的应变传感

通过对悬臂梁自由端施加压力,使悬臂梁发生形变,光栅伸长,这样可以检测出波长的变化,通过解调系统得到应变信号,波长在 $-11\sim+9.5$ nm,如图 5 所示在受力均匀时波长线性变化,可证明本系统具有较好的静态应变传感的可靠性。

在悬臂梁的自由端加质量为 3.048 6 g 的质量块,对数据进行分析,得到动态传感,改变悬臂梁的自由端质量为 16.216 5 g 的质量块,在无阻尼的情况下,系统对振动响应对比如图 6,可证明

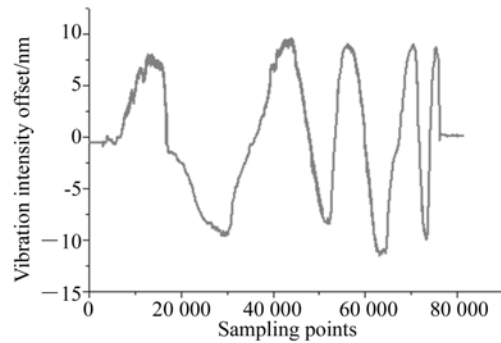


图 5 静态传感结果

Fig. 5 Static sensor results

本系统具有较好的动态应变传感的可靠性,当质量块达到 25.36 g 时,碳纤维悬臂梁过载,可知悬臂梁的最大载荷为 25.36 g。最终得到工作波长为 1 550 nm,灵敏度可达 200 v/m/s 的光纤光栅振动传感器。

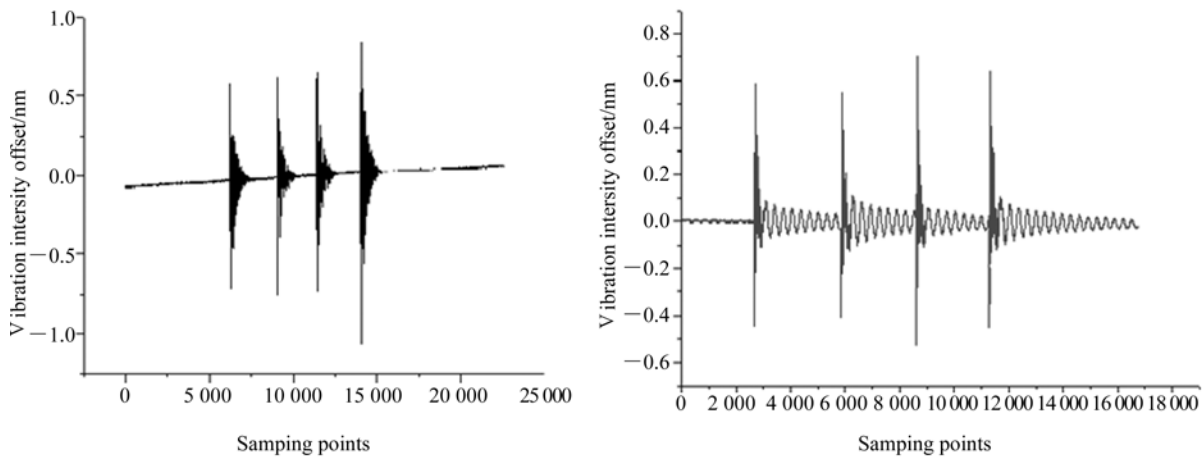


图 6 动态测试对比结果

Fig. 6 Dynamic test comparison results

4 结 论

本文设计了碳纤维悬臂梁式振动检波器,说明了光纤光栅在碳纤维片上的传感特性,并对应变信号解调,实验结果说明这种传感器结构动静

态波长漂移小,有很好的动静态稳定性,而且可以合理的反应空间内应力的变化。为使用碳纤维片材料作为振动检波器悬臂梁做了进一步的结构与工艺实验验证。经试验表明,工作波长为 1 550 nm,灵敏度可达 200 v/m/s,工作温度在 $-20\sim 70$ °C。

参考文献:

- [1] KOOPMANN G H, J B. *Designing Quiet Structures*[M]. California: Academic Press, 1997.
- [2] 马超, 乔学究, 贾振安, 等. 光纤布拉格光栅地震检波器的研究与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(2): 622-626.
MA CH, QIAO X ZH, JIA ZH A, et al.. Research and application of fiber Bragg grating geophone[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(2): 622-626. (in Chinese)
- [3] FERRARO P, NATALE G D. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37: 115-130.
- [4] 付建伟, 肖立志, 张元中, 等. 油气井永久性光纤Bragg光栅传感监测系统安装设计[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 257-262.
CHEN H F, XIAO L ZH, ZHANG Y ZH, et al.. Oil and gas well permanent FBG sensing monitoring system installation design [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(1): 257-262. (in Chinese)
- [5] 邵敏, 乔学光, 傅海威, 等. 光纤传感技术在地震勘探中的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(1): 342-348.
SHAO M, QIAO X G, FU H W, et al.. Applications of fiber optical sensing in seismic exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 28(1): 342-348. (in Chinese)
- [6] 刘波, 牛文成, 杨亦飞, 等. 新型光纤光栅加速度传感器的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 42-44.
LIU B, NIU W CH, YANG Y F, et al.. A novel fiber bragg grating accelerometer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(1): 42-44. (in Chinese)
- [7] 李川, 罗忠富, 李英, 等. 基于等强度悬臂梁的光纤Bragg光栅低频加速度传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2010, 4.
LI CH, LUO ZH F, LI Y, et al.. Fiber Bragg grating low frequency accelerometer with uniform strength cantilever beam [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010, 4. (in Chinese)
- [8] 候跃峰, 路智敏, 张文涛, 等. 基于双悬臂梁结构的
光纤加速度传感器[J]. 光电子·激光, 2012, 23(4): 644-648.
HOU Y F, LU Z M, ZHANG W T, et al.. Fiber accelerometer based on double-cantilever structure [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser* 2012, 23(4): 644-648. (in Chinese)
- [9] 杨昌, 周宏朴, 张敏, 等. 新型簧片式光纤加速度传感器研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24(2): 209-214.
YANG H C, ZHOU H P, ZHANG M, et al.. A new fiber-optic flexible reed accelerometer [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 23(2): 209-214. (in Chinese)
- [10] 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): 636-641.
WANG H L, ZHOU H Q, GAO H. Fiber grating acceleration vibration sensor with double uniform strength cantilever beams [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(4): 636-641. (in Chinese)
- [11] ZHANG Y, LI S G, YIN Z F, et al.. Fiber Bragg grating sensors for seismic wave detection[C] 17th International Conference on Optical fibre sensors, 2005.
- [12] LI M, ZENG N, SHI C Z, et al.. Fiber Bragg grating distributed strain sensing: an adaptive simulated annealing algorithm approach [J]. *Optics & Laser technology*, 2005, 37(7): 454-457.
- [13] 孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 基于特殊悬臂梁的光纤光栅应力响应特性分析[J]. 光电子·激光, 2004, 15(2): 153-155.
SUN A, QIAO X G, JIA ZH A, et al.. Strain response of a special cantilever-based fiber bragg grating [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(2): 153-155. (in Chinese)
- [14] 聂毓琴, 孟广伟. 材料力学[M]北京:机械工业出版社, 2009.
NIE Y Q, MENG G W. *Mechanics of Materials* [M]. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 贺福. 碳纤维及其复合材料[M]. 北京:科学出版社, 1995.
HE F. *Carbon fiber composite materials* [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)

导师简介:



林 君(1954—),男,吉林通化,教授,博士生导师,现任吉林大学仪器科学与电气工程学院院长,主要从事地学仪器与信息技术方向研究,E-mail: lin_jun@jlu.edu.cn

通讯作者:



张天瑜(1984—),男,吉林长春,博士,讲师,2011年于吉林大学获得博士学位,主要从事光纤传感,有机发光器件方向研究,E-mail: zty@jlu.edu.cn