

文章编号 1004-924X(2012)09-2110-06

两点封装的光纤布拉格加速度传感器设计

刘钦朋^{1*}, 乔学光^{1,3}, 傅海威², 高宏³

- (1. 西北工业大学 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072;
2. 西安石油大学, 陕西 西安 710065; 3. 西北大学, 陕西 西安 710069)

摘要:提出了一种双半孔梁光纤布拉格光栅(FBG)加速度传感器实现加速度信号测量的方法。首先,建立了两点封装FBG的加速度传感模型,理论分析了加速度与位移敏感点的线性响应。其次,从理论上分析了两点封装方案中FBG的自振特性,讨论了封装光纤的长度和预应力对光纤自振频率的影响。最后,依据FBG的自振特性设计了FBG加速度传感器,并通过实验研究了FBG加速度传感器的线性响应和幅频响应特性。实验结果表明:提出的传感器在10~250 Hz具有较好的平坦区,加速度响应灵敏度为41.2 pm/G;加速度与波长具有较好的线性关系,线性度为99.8%。同时,该加速度传感器具有较强的方向抗干扰性,轴向交叉灵敏度小于4.8%。

关键词:光纤光学;光纤布拉格光栅;两点封装;自振特性;加速度传感

中图分类号: TN253; TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.2110

Design of FBG acceleration sensor based on two-dot coating

LIU Qin-peng^{1*}, QIAO Xue-guang^{1,3}, FU Hai-wei², GAO Hong³

- (1. Shanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
 2. Xi'an Shiyou University Xi'an 710065, China;
 3. Northwest University, Xi'an 710069, China)
- * Corresponding author, E-mail: lqp1977@163.com

Abstract: A Double-semicircle Cantilever Beam(DSCB) accelerometer based on a fiber Bragg grating (FBG) was proposed to measure the acceleration signals. Firstly, the model of FBG accelerometer based on the two-dot coating was established, and the linear response between acceleration and displacements of sensitive elements was analyzed theoretically. Then, the natural vibration of the FBG based two-dot coating was described, and the effects of the length and prestress of the coated fiber on natural vibration frequency were discussed. Finally, according to the natural vibration of FBG, the FBG accelerometer was designed, and the linear response, amplitude-frequency characteristics, and direction anti-interference of the FBG accelerometer were researched experimentally. Experimental re-

收稿日期: 2012-04-01; **修订日期:** 2012-05-14.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA06Z203); 教育部科技创新工程重大项目(No. Z08119); 科技部国际科技合作项目(No. 2008D-5006-03-08); 陕西重大科技创新项目(No. 2009ZKC01-19 / 2008ZDGC-14); 教育部科技创新工程重大项目培育资金资助项目(No. 708087)

sults indicate that the sensor has good flat response from 10—250 Hz, and the sensitivity of the accelerometer is 41.2 pm/G. Furthermore, the sensor can offer a good linear response in a linear fitting of 99.8% and a good cross-axis anti-interference ability in the cross-axis sensitivity less than 4.8%.

Key words: fiber optics; fiber Bragg grating; two-dot coating; natural vibration; acceleration sensing

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)作为一种传感单元在光纤传感技术中起着非常重要的作用,用其对温度、压力和应变等物理量进行测量,在准静态领域已取得极大的进展和应用。然而,如何应用FBG在地震勘探、结构健康检测等领域测量加速度等动态信号是研究者们一直非常感兴趣的问题。对于加速度传感器,低非线性失真、宽平坦响应范围、高灵敏度和强方向抗干扰等指标是设计者追求的目标,对基于FBG的加速度传感器而言,传感器结构的设计和FBG的封装工艺是高性能加速度传感器的关键。A. Mita等、M. D. Todd等和J. H. Zhang等^[1-3]分别提出基于单梁、双梁和多梁结构的FBG加速度传感器。FBG封装工艺采用全粘式封装方案,基于单梁和多梁结构的加速度计的灵敏度分别为498 $\mu\text{e}/\text{G}$ 和410.7 pm/G,但频带较窄,基于双梁的加速度传感器,频带有所提高。但封装工艺都容易导致光栅啾啾,引起非线性失真。T. A. Berkoff等人^[4]提出将FBG嵌入聚合物材料实现加速度的测量,以提高响应频带,但由于聚合物的特性不稳定,也会导致非线性失真。为了消除FBG啾啾引起的非线性失真,研究者们提出基于不同结构的FBG两点式封装加速度传感器^[5-12],但都没有涉及光栅区域光纤自振特性的研究。由于FBG具有一定的几何尺度,常用的FBG长度为10 mm左右,采用两点封装FBG的加速度传感器必须考虑到FBG区域光纤自振特性的影响,特别是宽频带两点封装FBG加速度传感器的设计,FBG区域光纤的自振特性的影响是不可回避的问题。

本文提出了一种结构紧凑、简单的双半孔两点封装FBG加速度传感模型,与以前的FBG加速度传感技术进行了研究对比,理论分析了FBG的自振特性,并设计封装了基于双半空梁FBG的加速度传感器,实验研究了FBG加速度传感器的线性响应、幅频特性和横向抗干扰特性。

2 传感器设计及理论模型

2.1 传感器设计

传感器结构如图1所示,传感器由对称性结构的半孔梁构成,梁的左端固定,右端可上下自由振动,该结构集惯性质量与弹性系统为一体,半孔部分为应力敏感区域,为质量-弹簧系统的弹簧部分,右端为质量-弹簧系统的惯性质量部分,由此构成一个单自由度无阻尼加速度传感系统。FBG施加预应力后,采用两点封装工艺封装于中轴线上的两点a和b。当该结构受到y方向的加速度激励时,右端惯性质量块上下振动,引起b点的水平位移变化,导致布拉格波长变化,实现加速度检测。设计的加速度传感器样品参数如表1所示,采用ANSYS理论分析其谐频响应,等效加速度激励为正弦信号,幅值为1 G($10 \text{ m}/\text{s}^2$),谐频响应如图2所示。为了分析加速度与b点位移的关系,在频率一定时(160 Hz),简谐加速度信号幅值与b点沿x方向位移变化幅值的关系,如图3所示。由理论模拟分析知,加速度与b点位移成线性关系,响应灵敏度为 $4.2 \times 10^{-7} \text{ m}/\text{G}$,在1550波段,裸光栅的应变灵敏度为1.2 pm/ μe ,可得到加速度灵敏度为38.8 pm/G,从理论上保证了加速度与布拉格波长的线性关系,且为施加FBG预应力提供了理论参考。

表1 加速度传感器的参数
Tab.1 Parameters of FBG accelerometer

物理量	数值
宽度 D	7 mm
高度 H	13 mm
孔的半径 R	6 mm
梁长 L	28 mm
固定端长度 W	10 mm
梁的密度 ρ	7 850 kg/ m^3
梁的杨氏模量 E	200 GPa
a、b 两点之间的距离 l_{ab}	13 mm

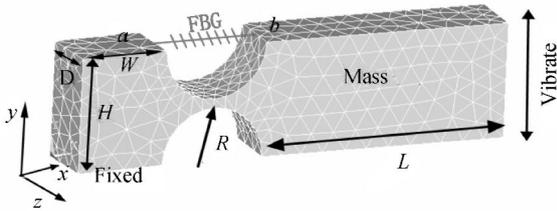


图 1 双半孔梁加速度传感器结构原理图

Fig. 1 Structural schematic of Double-semicircle Cantilever Beam(DSCB) accelerometer

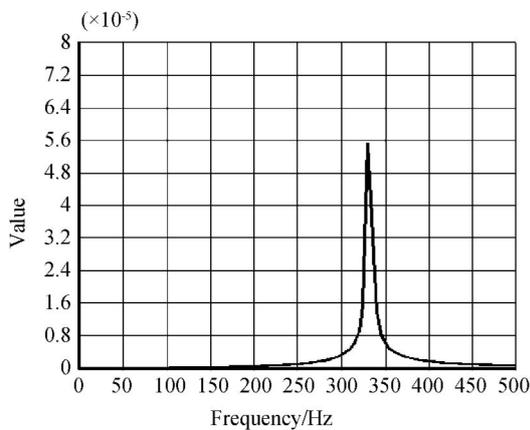
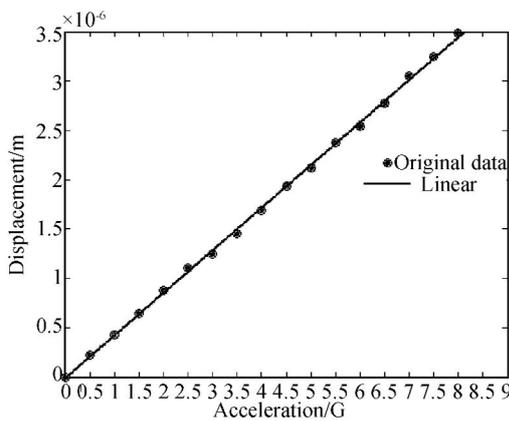


图 2 谐频响应

Fig. 2 Response of harmonic frequency

图 3 加速度与 b 点位移的理论响应Fig. 3 Theoretical response of acceleration versus displacement of point b

2.2 两点封装光纤自振特性

由于 FBG 自身具有一定的几何尺度,基于结构力学理论^[13]设计基于两点封装的加速度结构时,必须考虑光栅区域光纤的自振特性。当 FBG 的自身共振频率 f_{FBG} 与加速度传感器结构的共振频率 $f_{\text{Accelerometer}}$ 比较接近时,则严重影响加速度传

感器的响应特性,当 f_{FBG} 远大于 $f_{\text{Accelerometer}}$ 时,可忽略 FBG 自振特性的影响。所以 FBG 区域光纤自身的共振频率 f_{FBG} 与加速度传感器结构的频率 $f_{\text{Accelerometer}}$ 的关系是设计加速度传感器前必须考虑的问题。下面首先建立两点封装的理论模型,然后采用有限元理论分析 FBG 的自振特性,为传感器的设计提供理论指导。

对于该加速度传感器,FBG 两点封装的理论力学模型如图 4 所示,FBG 施加预应力 F 后封装于 a 、 b 两点,对于单模光纤,在 1 550 nm 波段应力灵敏度约为 1.356 nm/N,具体施加的预应力由加速度的工作范围确定。左端固定点 a 的 3 个自由度全部限定,不能自由移动, b 点的 y 方向和 z 方向的自由度被限定,仅能沿 x 方向移动, a 和 b 点的距离为 l_{ab} 。基于结构动力学软件 ANSYS 分析光栅区域光纤的几何刚度对其自振特性的影响,光纤的直径 $d=125 \mu\text{m}$,杨氏模量 $E=7.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$,密度 $\rho=2\,500 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\gamma=0.18$, l_{ab} 为包括光栅在内的光纤的长度,图 5 为不同长度不同预应力下光纤的自振频率响应曲线。

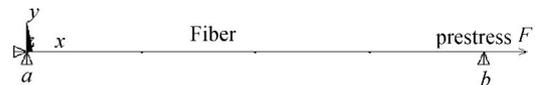


图 4 FBG 两点封装模型

Fig. 4 Model of two-dot coating for FBG

由图 5 知,预应力一定的情况下,光纤的长度越大,光纤的一阶自振频率越小;光纤长度一定的情况下,预应力越大,光纤的一阶自振频率越大。如光纤长度为 18 mm,预应力为 0.2 N 时,一阶自振频约为 2 382 Hz。所以,加速度传感器的设计,必须考虑光纤的自振特性的影响,让光栅加速度传感器的谐振频率远小于光纤的一阶自振频率,防止光纤的自振影响加速度传感器的幅频响应特性。基于此理论,该加速度传感器的设计参数如表 1 所示。预应力为 0.5 N(封装完成后,由于质量块的作用,光栅的中心波长漂移大于 1 000 pm),则光纤的一阶自振频 f_{FBG} 约为 4 400 Hz,通过 ANSYS 对该结构动力学分析可得到一阶振动模态,如图 6 所示,可知远大于加速度传感器结构的频率 $f_{\text{Accelerometer}}=337.79 \text{ Hz}$,则从理论上消除了光纤自振对加速度传感器响应特性的影响。

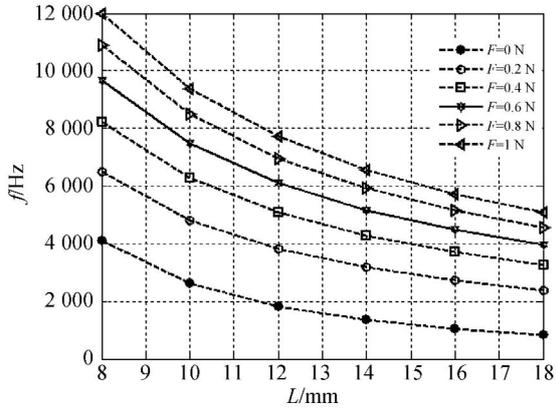


图 5 不同长度在不同预应力作用下光纤自振频率响应
Fig. 5 Natural vibration frequency response of fiber with different lengths and prestresses

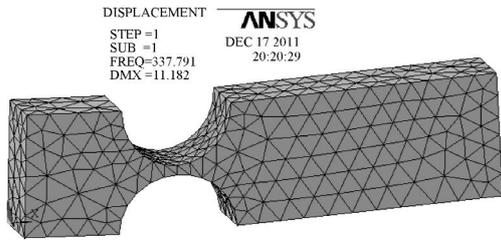


图 6 自振模态
Fig. 6 Natural vibration model

3 实验及结果分析

该加速度传感系统实验装置如图 7 所示, FBG 加速度传感器安装在振动台上,同时配有电类电荷标准传感器,用于校准 FBG 加速度传感器,光栅加速度传感器的动态信号送入光栅解调仪(SM130),光栅解调仪的波长精度为 1 pm,扫描频率为 1 kHz,扫描范围 1 510~1 590 nm,实验室环境下,温度相对加速度的动态信号为一个缓变量,忽略温度对动态信号的影响。

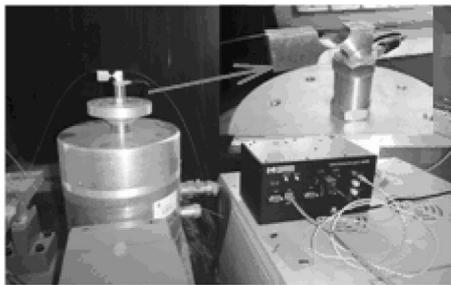


图 7 振动系统实验装置
Fig. 7 Experimental setup of vibration system

3.1 光栅加速度的静态响应

对于该光栅两点封装的加速度传感器而言,图 1 中 *b* 点沿 *x* 方向的位移与 *y* 方向加速度的线性关系是该加速度传感器非失真检测动态信号的前提,由此,采用有限元方法和实验对比分析 *b* 点沿 *x* 方向的位移与外力的响应关系,如图 8 所示。图 9 为模拟结果与实验对比响应曲线,模拟结果与实验均说明具有较好的线性响应关系,且实验和模拟结果吻合较好。

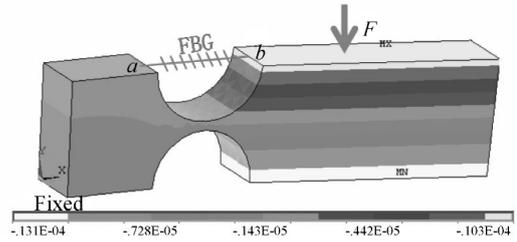


图 8 双半孔梁的静态响应模型
Fig. 8 Static response of DSCB model

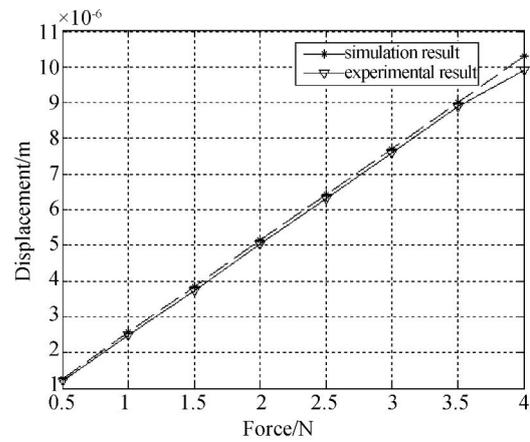


图 9 静态响应的模拟和实验结果
Fig. 9 Results of simulation and experiment for static response

3.2 线性响应

首先在频率一定的情况下研究加速度的线性响应,用 FBG 加速度的峰值波长作为信号输出,外界的激励信号从 0.5 G 到 6.5 G,步长为 0.5 G,加速度的峰值与光栅的峰值波长响应关系如图 10 所示,从该图知当激励信号的频率为 160 Hz 时,加速度与光栅波长具有较好的线性响应关系,加速度的灵敏度为 41.2 pm/G,与理论值 38.8 pm/G 吻合较好,线性度为 99.85%。

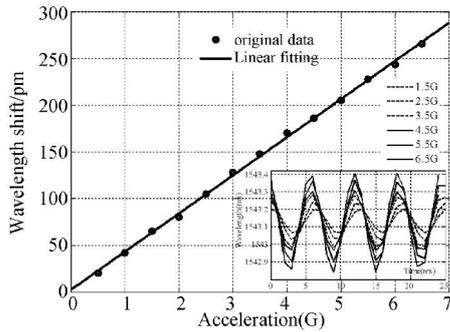


图 10 施加加速度时传感器输出的线性响应, 插图 为 160 Hz 时不同加速度的时域响应

Fig. 10 Linear response of sensor output versus applied acceleration. The inset shows different acceleration responses in time-domain with 160 Hz

3.3 加速度的幅频特性

从幅频特性的角度, 谐振频率一定时, 加速度传感器具有较宽的平坦响应区是非常重要的。实验中, 外界激励信号为正弦信号, 幅度保持 1 G, 频率从 10 Hz 到 400 Hz, 加速度的峰值波长输出作为灵敏度响应, 即幅频响应, 如图 11 为 1 G 时, 不同对应的灵敏度响应。由幅频响应关系知, 该加速度传感器在 10~250 Hz 具有较好的平坦响应区, 在 250~340 Hz 其灵敏度急剧放大, 并在 340 Hz 达到最大, 即共振频率为 340 Hz, 与图 5 的理论分析结果 337.7 Hz 吻合得较好。

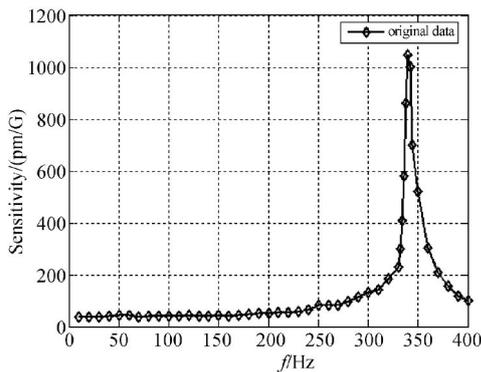


图 11 幅频响应曲线

Fig. 11 Amplitude-frequency curve

3.4 抗干扰特性

从实用的观点, 加速度的方向抗干扰特性是不可回避的问题。为了测试该光栅加速度传感器的抗干扰能力, 分别 y 和 z 方向施加频率为 160 Hz、幅度为 1 G 的正弦激励信号, 加速度传感器的响应如图 12 所示, y 方向的峰值波长变化量约为 41.2 pm, z 方向的峰值波长变化量约为 2 pm, 交叉轴灵敏度小于主轴灵敏度的 4.8%, 具有较强的横向抗干扰能力。

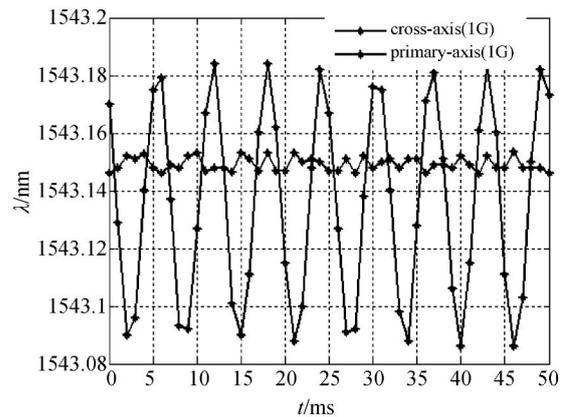


图 12 抗干扰特性

Fig. 12 Anti-interference characteristics

4 结 论

本文提出了一种基于双半孔梁光栅加速度传感结构, 建立了两点封装模型, 并理论分析了光纤自振特性与预应力、光纤长度的关系, 预应力越大、光纤长度越短, 光纤一阶自振频率越大, 对两点封装的光栅加速度传感器的频带、加速度的工作范围等参数的设计具有重要的指导意义。并依据光栅区域光纤的自振理论, 设计了基于两点封装的双半孔梁 FBG 加速度传感器, 实验结果表明: 在 10~250 Hz 的范围内具有较好的平坦响应区, 线性灵敏度为 41.2 pm/G, 与理论分析吻合较好, 且具有较强的横向抗干扰能力, 交叉轴灵敏度小于主轴灵敏度的 4.8%。

参考文献:

[1] MITA A, YOKOI I. Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring[C]. *Fifth International Conference on Motion and Vibration*

Control (MOVIC 2000), Sydney, 2000.

[2] TODD M D, JOHNSON G A, ALTHOUSE B A, et al. Flexural beam-Based fiber Bragg grating accelerometer [J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1998, 10(11):1605-1607.

- [3] ZHANG J H, QIAO X G, HU M L, *et al.*. Flex-tensional fiber Bragg grating-based accelerometer for low frequency vibration measurement [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(9): 090607.
- [4] BERKOFF T A, KERSEY A D. Experimental demonstration of a Fiber Bragg grating accelerometer [J]. *IEE Photo. Technol. Lett.*, 1996, 8(12): 1677-1679.
- [5] 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.
- LI X CH, LIU S, ZHANG W T, *et al.*. Study on low frequency characteristic of double diaphragm fiber Bragg grating geophone [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(4): 529-532. (in Chinese)
- [6] 沈洋, 孙利民. 高灵敏度温度自补偿型光纤光栅加速度传感器设计[J]. *结构工程师*, 2009, 25(2): 141-146.
- SHEN Y, SUN L M. Design of FBG-based accelerometer with high sensitivity and temperature self-compensation [J]. *Structural Engineers*, 2009, 25(2): 141-146. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 李国利, 赵彦涛, 李志全. 基于双光纤光栅的加速度传感探头结构的设计[J]. *压电与声光*, 2006, 28(4): 387-389.
- LI G L, ZHAO Y T, LI ZH Q. Design of acceleration sensing probe structure based on dual fiber Bragg grating [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2006, 27(6): 299-301. (in Chinese)
- [9] 赵彦涛, 李志全. 基于 Bragg 光纤光栅的三维加速度传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(6): 299-301.
- ZHAO Y T, LI ZH Q. Study on triaxial accelerometer based on FBG [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 299-301. (in Chinese)
- [10] WENG Y Y, QIAO X G, FENG ZH Y, *et al.*. Compact FBG diaphragm accelerometer based on L-shaped rigid cantilever beam [J]. 2011, 9(10): 100604.
- [11] MULLER M S, BUCK T C, KOCH A W. Fiber bragg grating-based acceleration sensor[C]. *Optomechanronic Technologies, International Symposium*, 2009: 127-123.
- [12] OUSAMA M A, MUSTAFA A A, KARTHIK N. Novel three-axes fiber Bragg grating accelerometer[J]. *SPIE*, 2009: 58770Z.
- [13] 王焕定, 章梓茂, 景瑞. *结构力学*[M], 北京: 高等教育出版社, 2009.
- WANG H D, ZHANG X M, JING R. *Structural mechanics*[M], Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



刘钦朋(1977-),男,安徽萧县人,博士研究生,讲师,2004年、2007年于西安石油大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤传感理论及应用研究。E-mail: lqp1977@163.com

导师简介:



乔学光(1955-),男,陕西佳县人,博士,教授,1982年于西安交通大学获学士学位,1998年于中国科学院西安光学精密机械研究所获博士学位,主要从事光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、物探、油气管线检测等领域的教学与研究。E-mail: qiaoxueguang@xsyu.edu.cn



傅海威(1966-),男,陕西祁山人,博士,教授,1989年于西北大学获得学士学位,2006年于西安交通大学获博士学位,2010年获国家留学基金委资助赴美国弗吉尼亚理工大学(Virginia Tech)作访问学者,主要从事光纤及光子晶体传感技术的研究。E-mail: hfwfu@xsyu.edu.cn



高宏(1979-),男,陕西佳县人,博士研究生,讲师,2001年、2007年于西安石油大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤传感及解调技术的研究。E-mail: gaohong@xsyu.edu.cn

(本栏目编辑:李自乐)