

# 基于光纤布拉格光栅的金属梁杨氏模量的测量

全文文 康娟 阳丽 胡君辉

广西师范大学物理与科学技术学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 提出基于光纤布拉格光栅(FBG)传感器和三点弯曲测试法测量金属梁杨氏模量的新方法。将FBG粘贴在待测金属梁上,采用三点弯曲测试法对待测金属梁进行负荷,推导出了一个具有普适性的,可以测量任意片状刚性固体材料的杨氏模量的公式,利用该公式分别对铁梁和铜梁的杨氏模量测量进行了实验研究。结果表明,采用FBG传感器测得的结果与标称值的误差分别为0.5%和0.6%,并且FBG的反射中心波长与负荷具有良好的线性关系。另外,FBG粘贴位置对测量结果影响不大。该方法在刚性固体材料杨氏模量的测量中有着潜在的应用前景。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 杨氏模量; 三点弯曲测试法; 金属梁

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.040604

## Young's Modulus Measurement of Metal Beams Based on Fiber Bragg Grating

Quan Wenwen Kang Juan Yang Li Hu Junhui

College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** A novel technique for measuring Young's modulus of metal beams based on fiber Bragg gratings (FBGs) and three-point bend test is proposed. The FBG is stucked on the target metal beam and the three-point bend test method is used to load the force on the sheet. A universal formula for measuring Young's modulus of various sheet-shaped solid materials is derived, which is used for the experimental measurement of the Young's modulus of iron and copper sheets. Experimental results show that the measurement errors of the two metal beams are 0.5% and 0.6% comparing to the nominal Young's modulus, and the relationship between the reflected central wavelength and the loaded force is a good linearity. Moreover, the stick location of FBG has a negligible impact on the measurement precision. The proposed method has a potential application prospect in the field of Young's modulus measurement of solid materials.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; Young's modulus; three-point bend test method; metal beam

**OCIS codes** 060.3735; 060.2370; 280.4788

## 1 引言

杨氏模量是描述固体材料弹性性质和抗形变能力的重要物理量,反映了材料形变与内应力之间的关系,是衡量材料受力之后形变大小的参数之一,也是工程技术中机械构件选材时的重要依据。测量常用固体材料(如:金属、陶瓷、橡胶、聚合物等)的杨氏模量对大型土木工程具有十分重要的作用。测量杨氏模量的方法很多,如静态拉伸法<sup>[1]</sup>,梁弯曲法和动力共振法<sup>[2]</sup>等,前两种测量杨氏模量方法是最常用的测量方法,这两种方法测量的关键在于如何精确测量微小形变量和微位移量,为此人们提出了用电耦合器件(CCD)成像系统测杨氏模量<sup>[3]</sup>,用霍尔位置传感器测杨氏模量<sup>[4]</sup>和拉伸光杠杆法<sup>[5]</sup>等。在实际实验测量中,这些方法测量的精度有限或实验条件难以完全满足测量原理的要求,因此研究测量简单、精度高及适用范围广的方法具

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-11-18; 网络出版日期: 2016-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(61307096)、广西省自然科学基金(2014GXNSFBA118282)、广西省高校科学技术重点项目(ZD20140213)

作者简介: 全文文(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术及其应用方面的研究。E-mail: wszsdo@gmail.com

导师简介: 胡君辉(1980—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感技术及其应用、分布式布里渊光纤传感技术等方面的研究。E-mail: hujh@mailbox.gxnu.edu.cn

有重要意义。

光纤布拉格光栅(FBG)传感器从1978年问世以来,因其结构简单,体积小,成本低,抗干扰能力强,耐腐蚀,测量准确度高,易于粘贴附着等优点,在智能传感技术研究中倍受关注<sup>[6]</sup>。在土木工程监测中,可以将它嵌入安装在混凝土,钢,木材和其他结构材料的内部或者表面<sup>[7]</sup>。目前FBG传感器广泛用于对应变<sup>[8]</sup>、应力<sup>[9]</sup>、温度<sup>[10]</sup>、频率<sup>[11]</sup>、横向压力<sup>[12]</sup>、折射率<sup>[13]</sup>、加速度<sup>[14]</sup>、曲率<sup>[15]</sup>和电流<sup>[16]</sup>等参数进行静态或动态的精确测量方面,其最大的特点就是微位移测量具有很高的灵敏度和测量精度<sup>[17]</sup>。

针对现有的利用光纤传感器来测量梁的微位移的方法<sup>[18]</sup>,本文提出了一种基于FBG传感器测量金属梁杨氏模量的新方法。该方法通过将FBG粘贴在待测金属梁上,采用三点弯曲法对待测金属梁进行施力,推导出了一个具有普适性的,可以测量任意片状刚性固体材料的杨氏模量的公式,并分别对铁梁和铜梁的杨氏模量测量进行了实验研究,研究发现FBG的反射中心波长与负荷具有良好的线性关系,所测得的铁梁和铜梁杨氏模量与标称值的误差分别为0.5%和0.6%,实验还研究了FBG粘贴位置对测量结果的影响。

## 2 原理

### 2.1 光纤光栅传感原理

FBG是纤芯折射率沿光纤轴向呈周期变化的光栅。FBG用作传感时,其工作原理可以归结为布拉格中心反射峰波长 $\lambda_B$ 与光纤纤芯有效折射率 $n_{eff}$ 以及光纤光栅周期 $\Lambda$ 相关,它们的关系为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda. \quad (1)$$

当环境参数发生改变时,纤芯有效折射率会发生相应的改变,从而引起布拉格波长的红移或蓝移,通过信号解调就可以感知环境参数的变化量。应变和温度是引起 $\lambda_B$ 产生漂移的最常见环境参数。当FBG所处环境的温度和应变发生变化时,布拉格波长 $\lambda_B$ 漂移量可表示为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1-p_e)\varepsilon + \lambda_B(\alpha_f + \xi_f)\Delta T], \quad (2)$$

式中 $\alpha_f$ 和 $\xi_f$ 分别是光纤的热膨胀系数和热光系数, $\varepsilon$ 是轴向应变, $\Delta T$ 是温度变化量, $p_e$ 是有效弹光系数。

当FBG所处环境温度不变或变化很小时,只考虑应变对FBG的作用,此时布拉格波长 $\lambda_B$ 的漂移量与应变之间的关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1-p_e)\varepsilon = k\lambda_B\varepsilon, \quad (3)$$

式中 $k$ 为光栅的应力灵敏度系数。当光纤光栅置于恒温环境下时,由反射波长的漂移量可以测量对应的应变的变化量<sup>[19]</sup>。

### 2.2 实验装置

为了使FBG测量微位移的精度高,实现对金属梁杨氏模量测量的目的,采用如图1所示的实验装置。图1中,待测金属梁A、B两端分别固定在两个刀口支架上,采用三点弯曲法对待测金属梁进行施力让其发生弯曲形变,施力点为O点,用胶水将应变传感FBG粘贴在待测金属梁的下表面上,FBG的粘贴位置距离A点距离为 $s$ 。宽带自发辐射放大(ASE)光源(浩源光电, HY-ASE-C-G-13-B-FA)输出的连续光通过环形器后注入到传感FBG,携带弯曲形变信息的FBG反射光经环形器3端口输出,由光谱分析仪(OSA, AQ6375)记录下经过FBG的反射谱。

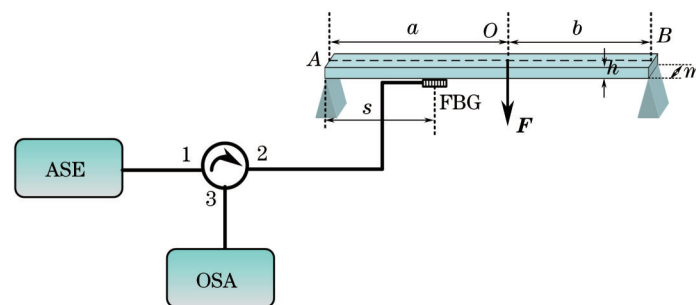


图1 实验原理图

Fig.1 Schematic diagram of experiment

### 2.3 光纤光栅测量横梁杨氏模量的模型

假设图 1 中待测金属梁的厚度和宽度分别为  $h$  和  $m$ , 施力点  $O$  距待测金属梁  $A$  端和  $B$  端的距离分别为  $a$  和  $b$ , 所施力大小为  $F$ , 则传感 FBG 处对应的弯矩大小为

$$M(s) = \frac{Fb}{a+b} s. \quad (4)$$

当待测金属梁发生横力弯曲时, 待测金属横梁下表面 FBG 粘贴位置处的正应力大小为

$$\sigma = \frac{M(s)}{W} = \frac{6Fs}{mh^2} \frac{b}{a+b}, \quad (5)$$

式中  $W$  为待测金属横梁的抗弯截面系数。根据胡克定律知, 正应力  $\sigma$  与杨氏模量  $E$  和应变大小  $\varepsilon$  的关系为

$$\sigma = E\varepsilon. \quad (6)$$

综合 (3)、(5) 和 (6) 式则有

$$E = \frac{6ks\lambda_B}{mh^2} \frac{b}{a+b} \frac{F}{\Delta\lambda_B} \quad (7)$$

由 (7) 式可知, 实验中只要测得当施力大小为  $F$  时 FBG 反射中心波长的变化量, 就可以实现对待测金属梁杨氏模量的测量。由于  $a$  和  $b$  可取任意值, 所以 (7) 式具有普适性, 可以测量任意片状刚性固体材料的杨氏模量。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 FBG 反射中心波长与负荷的关系

实验首先研究 FBG 反射中心波长与待测金属梁所受不同负荷的关系, 实验装置如图 1 所示。待测金属梁为长方体铁梁, 长  $L$ 、宽  $m$  和厚度  $h$  分别为 300、23.3、0.94 mm。外力  $F$  加载位置为两个支点的中心, 此时  $a=b$ 。将反射中心波长为 1549.934 nm 的 FBG 传感器粘贴在距离  $A$  端 100 mm 处, 施加压力通过分级加载砝码实现, 每级加载步长为 1 N, 一直加载至 8 N 时, 卸载至零。每次加载砝码待梁稳定后由 OSA 记录 FBG 反射谱, 实验室温度约为 25 °C 且由空调控制, 整个实验过程时间较短, 这期间的环境温度变化非常小, 因此实验中温度对 FBG 反射中心波长的影响可以忽略。根据实验条件, (7) 式可以化简为

$$\Delta\lambda_B = \frac{3ks\lambda_B}{mh^2 E} F = K \cdot F. \quad (8)$$

实验通过测量 FBG 的反射谱, 经洛伦兹拟合得到 FBG 中心波长漂移量与所加压力的关系, 由其斜率  $K$ , 可求出铁梁的杨氏模量<sup>[20]</sup>

$$E = \frac{3ks\lambda_B}{mh^2 K}. \quad (9)$$

图 2(a) 为了在不同负荷下 FBG 的反射谱, 图 2(b) 为 FBG 中心波长漂移量与所加压力的关系。对图 2(b) 进行最小二乘法直线拟合得到直线方程为  $y = 0.0923x + 0.0228$ , 拟合度为 0.99295, 将拟合得到的斜率值代入 (9) 式, 计算可得该点的基于 FBG 测得的铁梁杨氏模量  $E_{Fe-m} = 190.860$  GPa, 与标称值  $E_{Fe-n} = 190$  GPa<sup>[21]</sup> 的

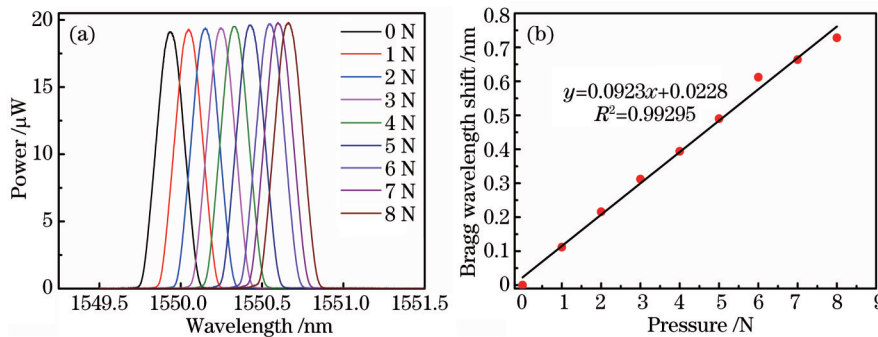


图 2 (a) FBG 反射谱随所加压力的变化; (b) FBG 中心波长漂移量与所加压力的关系

Fig.2 (a) Variation of FBG reflective spectrum with loaded pressure; (b) relationship between central wavelength shift of FBG and loaded pressure

测量误差约为0.5%，测量结果比一般霍尔位置传感器的方法精确。

### 3.2 FBG 粘贴位置的影响

为了研究FBG粘贴位置对测量结果的影响,在铁梁下表面距离A端支点长度分别为50、80、100 mm时贴上三根FBG,这三根FBG的参数如表1所示。依据3.1节的实验方法分别测量铁梁的杨氏模量,测量结果如图3所示。由图3可知,三根FBG的中心波长漂移量与外加压力的响应曲线具有较好的线性度,经最小二乘法直线拟合得到直线方程及其拟合度分别为  $y=0.04677x+0.0423$ 、拟合度为0.99275,  $y=0.0784x-0.01612$ 、拟合度为0.99517和  $y=0.0923x+0.0228$ 、拟合度为0.99295。将拟合得到的斜率值  $K=\Delta\lambda_B/F$  代入(9)式计算可得三个位置上的FBG测得的铁梁的杨氏模量分别为  $E_{50}=188.328$  GPa,  $E_{80}=188.337$  GPa,  $E_{100}=190.860$  GPa,由此可见,FBG粘贴位置对测量结果影响不大,在任意位置均可实现对铁梁杨氏模量的测量,这说明所推导出的测量公式,即(7)式具有普适性。

表1 光纤光栅传感器的基本参数

Table 1 Basic parameters of FBG sensor

Measuring point /mm	Wavelength /nm	Reflectivity	Strain sensitivity factor
50	1549.915	0.9437	0.78
80	1550.156	0.9678	0.78
100	1549.934	0.9445	0.78

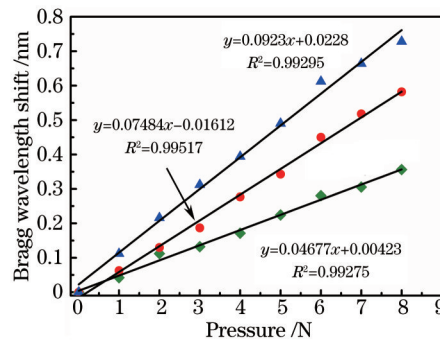


图3 不同位置的FBG中心波长漂移量与所加压力的关系

Fig.3 Relationship between central wavelength shifts for FBG located at different points and loaded pressure

### 3.3 铜梁的测量结果

为了验证所述方法适用于其他刚性固体材料杨氏模量的测量,取一长、宽和厚度分别为300、23.2、0.97 mm的长方体铜梁代替铁梁进行实验,反射中心波长为1550.047 nm的FBG传感器粘贴在距离A支点100 mm处,利用FBG分别对横梁的杨氏模量进行测量。由于铜材料的刚性较小,因此实验中所加砝码每级步长为0.5 N,一直加载至3 N。测量结果如图4所示,由图4可知,FBG的中心波长漂移量与外加压力的响应曲线具有较好的线性度,拟合直线方程为  $y=0.15001x+0.00659$ ,拟合度为0.99531。将拟合得到的斜率值代入(9)式计算可得铜梁的杨氏模量为  $E_{Cu-m}=110.676$  GPa,与标称值  $E_{Cu-n}=110$  GPa<sup>[21]</sup>的测量误差约为0.6%,符合得很好。

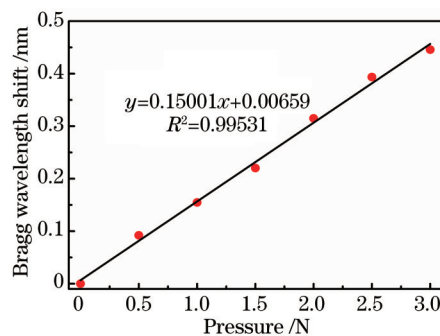


图4 FBG中心波长漂移量与所加压力的关系

Fig.4 Relationship between central wavelength shift for FBG and loaded pressure

## 4 结 论

基于光纤布拉格光栅传感器和三点弯曲测试法,推导了一个具有普适性的、可以测量任意刚性固体材料的杨氏模量的公式,并分别对铁梁和铜梁的杨氏模量测量进行了实验研究,实验结果表明,FBG的反射中心波长与负荷具有良好的线性关系且FBG粘贴位置对测量结果影响不大,实验测得铁梁和铜梁的杨氏模量与标称值的误差分别为0.5%和0.6%。虽然本测量方法只对金属梁的杨氏模量进行了测量,但是由于FBG具有较高的微应变灵敏度,因此该方法也适用于形变较小的其他刚性固体材料的杨氏模量测量,并且依据此方法还可以对一些大型土木结构的弹性模量进行测量,实现重要部位结构的健康状况监测<sup>[22]</sup>。上述对FBG的所有测量结果中,并未考虑与横梁试件粘贴质量,若在实验中尽量提高光栅的粘贴质量,并加入温度补偿的装置<sup>[23]</sup>,则系统测量的精确度将进一步提高<sup>[24]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Shuwu, General physics experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.  
杨述武. 普通物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 2 Wang Yuqing. Measurement for solid Young's modulus[J]. Physical Test, 2007, 25(5): 47-48.  
王玉清. 固体杨氏模量的测量[J]. 物理测试, 2007, 25(5): 47-48.
- 3 Wang Guangxue, Zhu Ziqiang, Li Yurong. A study for the young modulus with CCD[J]. Optical Technique, 1994(4): 31-34.  
王光学, 朱自强, 李玉蓉. CCD测量杨氏模量的研究[J]. 光学技术, 1994(4): 31-34.
- 4 You Haiyang, Zhao Zaizhong, Lu Shenlong. The young's modulus of hall position sensor for measuring solid material[J]. Physics Experiment, 2000, 20(8): 47-48.  
游海洋, 赵在忠, 陆申龙. 霍尔位置传感器测量固体材料的杨氏模量[J]. 物理实验, 2000, 20(8): 47-48.
- 5 Gao Hailin. Improvement on the experiment of measuring Young's module by stretching[J]. Experimental Science and Technology, 2006, 4(4): 65-68.  
高海林. 拉伸法测金属杨氏模量实验的改进[J]. 实验科学与技术, 2006, 4(4): 65-68.
- 6 Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- 7 Inaudi D, Casanova N, Kronenberg P, *et al.*. Embedded and surface-mounted fiber optic sensors for civil structural monitoring[C]. SPIE, 1997: 236-243.
- 8 Yu Lewen, Zhang Da, Yu Bin, *et al.*. A pole-rod type of fiber grating strain sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(9): 1655-1658.  
余乐文, 张 达, 余 斌, 等. 一种拉杆式的光纤光栅应变传感器[J]. 光电子·激光, 2012, 23(9): 1655-1658.
- 9 Pi Haoyang, Liu Qiong, Ye Qing, *et al.*. Analysis and experimental study of inner stress for metallized fiber Bragg gratings [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305008.  
皮浩洋, 刘 琼, 叶 青, 等. 金属化光纤光栅内应力的分析和实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305008.
- 10 Pang Dandan, Sui Qingmei, Jiang Mingshun, *et al.*. Fiber Bragg grating high-temperature sensing system based on improved support degree matrix model[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(11): 2045-2051.  
庞丹丹, 隋青美, 姜明顺, 等. 应用改进支持度矩阵模型的光纤光栅高温传感系统[J]. 光电子·激光, 2012, 23(11): 2045-2051.
- 11 Liu Chunxiao, Yu Youlong, Hong Jun, *et al.*. Measurement of the natural frequency of bench drill based on fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress 2013, 50(2): 020601.  
刘春晓, 余有龙, 洪 俊, 等. 光纤布拉格光栅用于台钻固有频率测量[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(2): 020601.
- 12 Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. Transverse pressure sensor based on the polarization properties of fiber grating [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38 (4): 0405004.  
汪弋平, 王 鸣, 黄晓琴. 基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405004.
- 13 Ou Qibiao, Zeng Qingke, Qin Zixiong, *et al.*. Application of coated long period fiber grating to measure the change of micro-refractive index[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(2): 323-328.  
欧启标, 曾庆科, 秦子雄, 等. 应用镀膜长周期光纤光栅实现微折射率变化的测量[J]. 光电子·激光, 2013, 24(2): 323-328.
- 14 Guo Yongxing, Zhang Dongsheng, Zhou Zude, *et al.*. Research progress in fiber-Bragg-grating accelerometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress 2013, 50(6): 060001.  
郭永兴, 张东生, 周祖德, 等. 光纤布拉格光栅加速度传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060001.
- 15 Chen Bo, Yang Jing, Li Xinyang, *et al.*. Phase grating wavefront curvature sensor based on liquid crystal spatial light modulator

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* 2015, 52(8): 082301.
- 陈波, 杨靖, 李新阳, 等. 基于液晶空间光调制器的光栅型波前曲率传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 082301.
- 16 Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian, *et al.*. Research on optical current transformer based on fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 949–953.
- 熊燕玲, 赵洪, 张剑, 等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 949–953.
- 17 Su Juan, Dong Xiaopeng, Shi Zhidong. Design of the sensitivity enhanced strain sensor based on fine transmission spectrum of FBG[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0805002.
- 苏娟, 董小鹏, 石志东. 基于FBG精细谱的应变增敏型传感器的设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0805002.
- 18 Liang Longbing, Zhang Weigang, Zhao Qida, *et al.*. Analyses and measurement of strain based on fiber grating[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2001, 12(11): 1152–1155.
- 梁龙彬, 张伟刚, 赵启大, 等. 基于光纤光栅的标准梁应变分析与测量[J]. *光电子·激光*, 2001, 12(11): 1152–1155.
- 19 Kang H K, Park J S, Kang D H, *et al.*. Strain monitoring of a filament wound composite tank using fiber Bragg grating sensors [J]. *Smart Materials and Structures*, 2002, 11(6): 848–853.
- 20 Tse M L V, Chung K M, Dong L, *et al.*. Observation of symmetrical reflection sidebands in a silica suspended-core fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17373–17381.
- 21 Beiser A. *Modern technical physics*[M]. New Jersey: Addison-Wesley, 1987.
- 22 Sun Baoguang, Chen Hengjie, Dong Xiaolong. Measurement Young's modulus with hall position sensor[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2011, 13(1): 181–183.
- 孙宝光, 陈恒杰, 董晓龙. 用霍尔位置传感器测量杨氏模量[J]. *重庆科技学院学报: 自然科学版*, 2011, 13(1): 181–183.
- 23 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei, *et al.*. High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0605003.
- 何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞, 等. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605003.
- 24 Chen Shaohua, Zhao Qida, Zhao Luming, *et al.*. Experimental measurements of the strain and Young's modulus of elasticity of the standard reinforcing steel bar based on fiber Bragg gratings[J]. *Applied Laser*, 2004, 24(2): 66–68.
- 陈少华, 赵启大, 赵路明, 等. 布拉格光纤光栅用于标准钢筋试件应变传感和弹性模量测量的实验研究[J]. *应用激光*, 2004, 24(2): 66–68.

栏目编辑: 张雁