

文章编号 1004-924X(2016)02-0245-06

## 利用双光杠杆测量非等截面 光纤布拉格光栅传感器的应变系数

徐 健, 杨德兴\*, 姜亚军, 杜波波

(西北工业大学 理学院 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710129)

**摘要:** 使用单个光杠杆监测传感器应变时, 传感器两端的被夹持部位受力后易与电子万能试验机的夹持器产生滑移。为了消除滑移影响以提高测试精度, 本文使用两套光杠杆建立了测量弹性受力部位呈非等截面的光纤布拉格光栅 (FBG) 传感器等效应变系数  $\eta_{\text{eff}}$  的实验测量系统。测试时, 将两套光杠杆的平面反射镜分别安放在传感器弹性受力部位两侧的固定端端面上, 测量出两个固定端在受力变形后的相对位移和相应的 FBG 中心波长变化量。然后, 使用曲线拟合法和累加均值法对实验测得的数据进行处理来获得  $\eta_{\text{eff}}$ 。建立了仿真模型, 得到了  $\eta_{\text{eff}}$  预估值并与实测值进行了对比。结果显示: 实验测得的  $\eta_{\text{eff}}$  为  $0.6817 \mu\epsilon/\text{pm}$ , 精度为  $0.91\%$ , 与仿真获得的预估值  $0.6720 \mu\epsilon/\text{pm}$  相差仅为  $1.42\%$ 。该方法满足了准确测量非等截面结构 FBG 传感器应变系数的要求。

**关键词:** 双光杠杆; 应变系数测量; 光纤布拉格光栅传感器; 复杂结构

**中图分类号:** TN253; TB931 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0245

## Measurement of strain coefficient of unequal cross-section FBG sensor based on double optical levers

XU Jian, YANG De-xing\*, JIANG Ya-jun, DU Bo-bo

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Science,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

\* Corresponding author, E-mail: dxxyang@nwpu.edu.com

**Abstract:** When a single optical lever is used to test the strain coefficients of Fiber Bragg Gratings (FBGs), slip effects may take place in the clamping part between the testing machine and the sensor. To effectively eliminate the slip effects and improve the test accuracy, a measurement system based on double optical levers was established to measure the strain coefficient of a FBG sensor with an elastic stress element by unequal cross sections. In the measurement, two optical lever mirrors were put respectively on the end faces of two fixed ends beside the sensor's elastic stress element. By measuring the relative displacement of two fixed ends, the equivalent strain coefficient of the sensor was obtained by data processing with the curve fitting method and cumulative average method. A simulation model was established, and the experiment and simulation were performed and compared. The results indicate that the equivalent strain coefficient of the sensor  $n_{\text{eff}}$  is  $0.6817 \mu\epsilon/\text{pm}$  obtained by the experiment and the precision is  $0.91\%$ . Compared to the coefficient  $0.6720 \mu\epsilon/\text{pm}$  from the software simula-

收稿日期: 2015-11-04; 修订日期: 2015-12-09.

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No. 2011ZX05026-001-06)

tion, the difference is 1.42%. It is shown that the measurement method satisfies with the requirements for accurately measuring the strain coefficients of complex-structure sensors.

**Key words:** double optical levers; strain coefficient measurement; Fiber Bragg Grating(FBG) sensor; complex structure

## 1 引言

在应力应变监测中,传感器应变系数的测量标定直接关系到检测结果的有效性和准确性。光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器作为新型传感技术的代表之一,已在众多领域得到应用<sup>[1-2]</sup>。在极端环境中,为了保护脆弱的裸光栅不被破坏,FBG 传感器往往需要特殊的封装结构<sup>[3-5]</sup>,其应变系数也随之变化。本课题组为了实现深水油气开发中钻井隔水管的安全监测,研制了一种基于 FBG 的应力应变传感器<sup>[6]</sup>。为了减少水压、腐蚀和渗漏等因素给 FBG 传感器带来的影响,并保证它具有合适的应变灵敏度和测量范围,传感器的封装设计成细长的多段圆形杆状结构,其弹性受力部分为非等截面结构。由于传感器结构复杂,器件上任何一点的应变系数都不足以代表整体的应变系数,因此无法用应变片等传统方式测量其应变系数。

光杠杆测量是一种简便有效的微小形变高精度测量方法。早在 1894 年,光杠杆便应用于检测金属的微小形变<sup>[7]</sup>。随着该技术的发展<sup>[8]</sup>,在 1979 年 Cook 等人研制了基于光杠杆技术的位移传感器<sup>[9]</sup>。2003 年, Yao 等人将相关的位移检测技术用于龙虾神经节的研究<sup>[10]</sup>。1995 年, Kato 等人结合光杠杆技术研制了力学传感器<sup>[11]</sup>,并于 2006 年由 Evans 等人将该技术延伸到表面张力的研究中<sup>[12]</sup>。时至今日,结合光杠杆的显微技术更加成熟<sup>[13-14]</sup>,并能够在微结构中进行角度检测<sup>[15-16]</sup>。

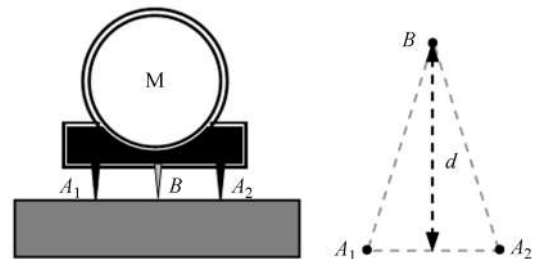
本课题组研究了基于光杠杆的传感应变检测技术。然而,光杠杆技术要求待测物一端必须固定不滑动。在实际情况中,待测传感器两端的被夹持部位在受力时都会与电子万能试验机的夹持器产生滑移,单个光杠杆无法满足监测传感器应变的要求。为消除滑移的影响,实现高精度测量,本文将两个光杠杆反射镜分别安放在传感器弹性受力部位两侧的固定端端面上,通过测量两个固

定端的相对位移来获得非等截面传感器的等效应变系数。

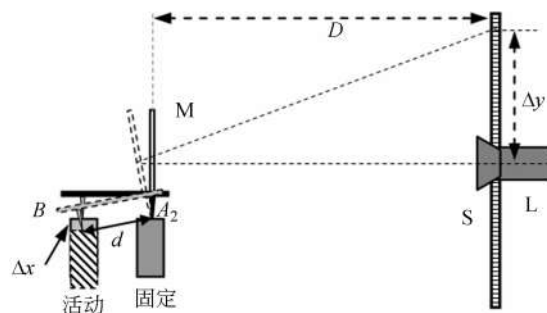
## 2 双杠杆测量系统的工作原理和构成

### 2.1 光杠杆的工作原理

如图 1 所示,光杠杆由一块安装在 3 个支点上的平面反射镜 M、一支外标尺 S 和一具内调焦望远镜 L 组成。其中,  $A_1$  和  $A_2$  为 M 的两个前支点,放置在基座上,测量过程中保持固定; B 为后支点,放置于待测物的测量基准面上,测量过程中随待测物同步上下移动,使 M 以连线  $A_1 A_2$  为轴转动。光线经 M 反射后,可通过 L 观测 S 上的刻度。当全反射镜 M 的后支点 B,即待测物发生位



(a)反射镜正面 (b)反射镜底面支点的位置关系  
(a)Front view of mirror (b)Geometric position of fulcrums under mirror



(c)光杠杆侧视图  
(c)Side view of optical lever

图 1 光杠杆的工作原理图

Fig. 1 Working principle of optical lever

移  $\Delta x$  时,根据光杠杆的比例关系, $S$  的读数位移  $\Delta y$  为  $\Delta x$  的  $2D/d$  倍。其中, $d$  为平面反射镜  $M$  的后支点  $B$  到两前支点连线  $A_1 A_2$  的距离。

2.2 传感器的工作原理

传感器由弹性元件和两侧的固定端组成,如图 2(a)所示。弹性受力部位由 2 支固定端内端面下的  $\alpha$  材料管和 3 支  $\beta$  材料管组成,各管截面不完全相等。工作时,传感器固定于隔水管金属扎带上,其固定端的内端面与扎带受力面贴合,如图 2(b)所示。

居中的  $\beta$  材料管封装了裸 FBG 成为检测信号的敏感元件。封装时,裸光栅经预拉伸后粘贴到  $\beta$  材料管的孔壁上。因为粘贴均匀、无脱落,敏感元件的应变系数  $\eta_e$  与裸光栅相同,为  $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。裸 FBG 的中心波长  $\lambda$  与温度  $T$ ,应变  $\epsilon$  均呈线性正比关系。当隔水管产生应变时,扎带间距改变,传感器弹性受力部分会产生相应的形变  $\Delta x$ ,敏感元件产生应变  $\epsilon$ ,并引起 FBG 中心波长变化  $\Delta\lambda$ 。在温度不变的情况下, $\Delta\lambda = \eta_e \epsilon$ 。由于弹性受力部分的横截面并非均匀分布,传感器整体的等效应变  $\epsilon_{\text{eff}}$  并不等于  $\epsilon$ 。设传感器的等效应变系数为  $\eta_{\text{eff}}$ ,则有  $\Delta\lambda = \eta_{\text{eff}} \epsilon_{\text{eff}}$ ,该系数  $\eta_{\text{eff}}$  需要通过实验测量标定。

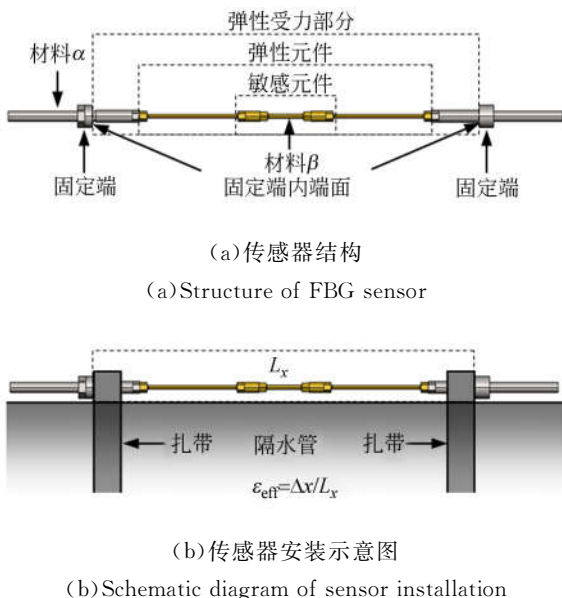


图 2 传感器的工作原理图

Fig. 2 Principle of proposed FBG sensor

2.3 双杠杆应变测量系统的构成

双光杠杆应变测量系统由电子万能试验机和

两套光杠杆组成。电子万能试验机通过夹持器  $J_1$  和  $J_2$  固定传感器并对其施力。传感器定标所需拉力较大,而传感器末端的金属杆比较光滑,在施力过程中, $J_1, J_2$  与传感器之间有滑移,使得电子万能试验机无法直接测量传感器的应变系数。由图 3 可知,两套光杠杆反射镜的后支点  $B_1$  和  $B_2$  分别安放在传感器固定端的两个端面上。虽然  $B_1$  在固定端外侧端面,但固定端的直径远大于弹性受力部位的直径,其变形量可以忽略不计。数据处理时,弹性受力部位的总长仍然为两固定端内侧端面间的距离  $L_x$ 。实验中, $J_1$  固定,通过向下移动  $J_2$  向传感器施力。当传感器被拉伸时, $B_1$  和  $B_2$  会分别产生一定的位移  $\Delta x^{(1)}$  和  $\Delta x^{(2)}$ ,位移差  $\Delta x^{(1)} - \Delta x^{(2)}$  便是弹性受力部位的形变量  $\Delta x$ ,由光杠杆放大的位移量  $\Delta y = \Delta y_1 - \Delta y_2$  则由上望远镜  $L_1$  和下望远镜  $L_2$  的数据获得。

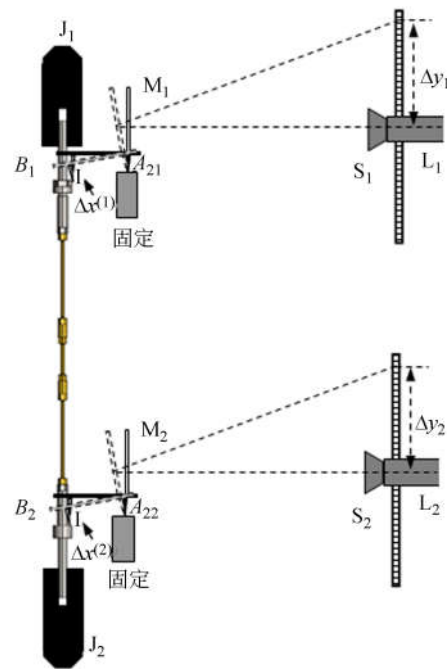


图 3 双光杠杆应变测量原理

Fig. 3 Principle of double-optical-lever strain measurement system

3 测量实验

根据图 3 所示原理搭建测量系统。实验中,当电子万能试验机对传感器施力时,记录 FBG 传感器的中心波长和上下望远镜的读数。该实验共

进行了 3 次上下行测量,施力大小以 FBG 的中心波长变化为基准,每当波长变化约 50 pm 时,暂停加力并记录数据。实验中,波长变化的总量约为 3 nm。

## 4 测量结果及分析

### 4.1 数据处理方法

实验获得的数据有:两组反射镜前支点连线  $A_{11}A_{21}$ 、 $A_{12}A_{22}$  分别到后支点  $B_1$ 、 $B_2$  的距离  $d_1$ 、 $d_2$ ,上下望远镜到光杠杆镜面的距离  $D_1$ 、 $D_2$ ,上下望远镜观察得到的刻度变化值  $\Delta y_{1i}$ 、 $\Delta y_{2i}$ ,相对应的波长变化值  $\Delta \lambda_i$ ,  $i=1\sim 60$ 。

本文采用了曲线拟合法和累加均值法分别计算出传感器的等效应变系数  $\eta_{\text{eff}}$ 。

#### 4.1.1 曲线拟合法

在同一上下行实验中,将加力后记录的数据与初始值相减,获得波长变化与应变的关系曲线,并通过线性拟合来获得  $\eta_{\text{eff}}$ 。其中,形变量为  $\Delta x_i = (\Delta y_{1i}d_1/D_1 - \Delta y_{2i}d_2/D_2)/2$ ,其等效应变为  $\epsilon_{\text{eff}i} = \Delta x_i/L_x$ ,  $i=1\sim 60$ 。各应变产生的波长变化量即为记录的  $\Delta \lambda_i$ 。

#### 4.1.2 累加均值法

在同一上下行实验中,将各组数据与前一组数据相减,获得单次加力应变  $\Delta \epsilon_{di}$  和波长变化量  $\Delta \lambda_{di}$ ,其中  $\Delta \epsilon_{di} = (\Delta x_{i+1} - \Delta x_i)/L_x$ ,  $\Delta \lambda_{di} = \Delta \lambda_{i+1} - \Delta \lambda_i$ ,  $i=1\sim 59$ 。为了减少误差,依次对连续的 30 组数据求和,获得相应的 30 组累加数据并做比值,其均值为  $\eta_{\text{eff}}$ ,即:

$$\eta_{\text{eff}} = \left[ \sum_{n=1}^{30} \left( \frac{\sum_{i=n}^{n+29} \Delta \epsilon_{di}}{\sum_{i=n}^{n+29} \Delta \lambda_{di}} \right) \right] / 30. \quad (1)$$

### 4.2 测量结果

将等效应变  $\epsilon_{\text{eff}}$  与 FBG 的中心波长变化量  $\Delta \lambda$  进行曲线拟合,结果如图 4 所示。其中,Up 代表上行曲线,Down 代表下行曲线,标识的数字代表试验次数。由图 4 可知,  $\epsilon_{\text{eff}}$  与  $\Delta \lambda$  呈较好的线性关系,各次加载结果的线性度都高于 0.999 86。相对于拟合值,最大测量误差为 17.75  $\mu\epsilon$ ,仅为最大值(量程)的 0.91%,即精度为 0.91%。由表 1 可知,两种方法获得的等效应变系数  $\eta_{\text{eff}}$  只相差 0.000 1  $\mu\epsilon/\text{pm}$ 。两种方法的标准差都较小且接近,这里取标准差较小的结果 0.681 7  $\mu\epsilon/\text{pm}$  为标定值。

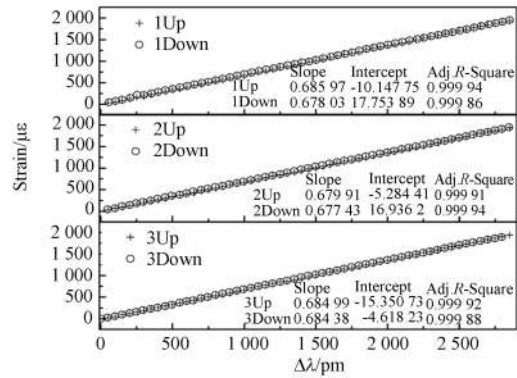


图 4 应变测量实验数据的曲线拟合结果

Fig. 4 Fitting curves of strain measurement data

表 1 数据处理结果

Tab. 1 Data processing results ( $\mu\epsilon/\text{pm}$ )

	曲线拟合	累加均值
1Up	0.686 0	0.685 4
1Down	0.678 0	0.677 5
2Up	0.679 9	0.679 3
2Down	0.677 4	0.678 8
3Up	0.685 0	0.684 3
3Down	0.684 4	0.684 8
平均值	0.681 8	0.681 7
标准差	$3.5 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^{-3}$

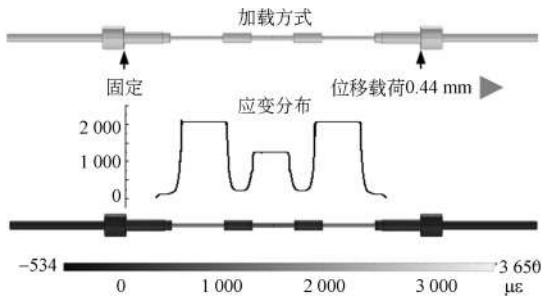
### 4.3 仿真实验对比

COMSOL Multiphysics 是一款基于有限元计算的多物理场耦合分析软件,广泛应用于传感器设计和应力分析<sup>[17-18]</sup>。在传感器最初设计优化时,便使用该软件的固体力学模块对传感器进行仿真模拟,以估算其应变系数。

仿真模拟中,各参数设定与实际实验基本一致。其中,传感器固定端为  $\alpha$  材料,其弹性模量和泊松比分别为 205 GPa 和 0.33。弹性元件为  $\beta$  材料,其弹性模量和泊松比分别为 133 GPa 和 0.35。传感器在软件模型中的加载方式为两侧拉伸,其环境温度设定为 25  $^{\circ}\text{C}$ 。传感器设定的拉伸量为 0.44 mm,为隔水管产生 1 000  $\mu\epsilon$  时传感器的应变。该应变由传感器设计需求决定。但在实际实验中,为了解传感器在更大应变范围内的线性响应特性,增大了拉伸量,使传感器产生了接近 2 000  $\mu\epsilon$  的等效应变。

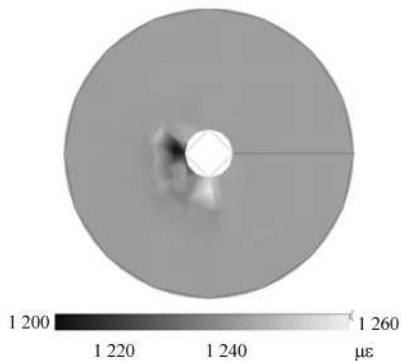
仿真结果的应变分布如图 5 所示。由图 5(a) 可知,弹性元件各部位的轴向应变大小并不一致,

不能使用应变片测量的单测点应变系数作为传感器整体的等效应变系数  $\eta_{\text{eff}}$ , 说明传统的应变测量方法确实存在局限性。由图5(b)中敏感元件



(a) 仿真模型及结果

(a) Simulation model and results



(b) 传感器中心截面应变分析

(b) Strain distribution of sensor center section

图5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

截面的应变分布图可知,当传感器整体等效应变  $\epsilon_{\text{eff}}$  为  $1\ 000\ \mu\epsilon$  时,敏感元件应变  $\epsilon$  为  $1\ 240\ \mu\epsilon$ , 即有  $\epsilon_{\text{eff}} : \epsilon = 1 : 1.240$ 。由于  $\eta_e = 1.2\ \text{pm}/\mu\epsilon$ , 且  $\eta_{\text{eff}} \epsilon_{\text{eff}} = \eta_e \epsilon$ , 可得  $\eta_{\text{eff}}$  的预估值为  $1.488\ \text{pm}/\mu\epsilon$ , 即  $0.672\ 0\ \mu\epsilon/\text{pm}$ 。该传感器的预估值与测量值  $\eta_{\text{eff}}$  相差  $0.009\ 7\ \mu\epsilon/\text{pm}$ , 相对误差仅为  $1.42\%$ 。由此表明,传感器成品符合设计要求,也验证了双光杠杆应变系数测量方法的可靠性。

## 5 结 论

本文为了测量弹性受力部位为非等截面的复杂结构 FBG 传感器的应变系数,使用两套光杠杆建立了相应的传感器应变系数测量系统。实验中,将两个光杠杆平面反射镜安放在传感器弹性受力部位两侧的固定端,通过测量两个固定端的相对位移来获得传感器弹性受力部位的等效应变系数  $\eta_{\text{eff}}$ 。数据处理时,采用曲线拟合法和累加均值法分别计算了等效应变系数。结果表明,两种方法皆合理有效,差别较小。最后,使用软件 COMSOL Multiphysics,通过建模仿真获得了传感器等效应变系数的预估值。实验测得传感器的等效应变系数  $\eta_{\text{eff}}$  为  $0.681\ 7\ \mu\epsilon/\text{pm}$ , 精度达  $0.91\%$ 。测量值与预估值  $0.672\ 0\ \mu\epsilon/\text{pm}$  相比,仅相差  $1.42\%$ 。结果表明,基于双光杠杆的测量系统能够对非等截面传感器的等效应变系数进行准确测量。

## 参考文献:

- [1] 唐炜,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学精密工程,2002,10(1):79-83.  
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 79-83. (in Chinese)
- [2] 姜德生,何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光,2002,13(4):420-430.  
JIANG D SH, HE W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*. 2002,13(4):420-430. (in Chinese)
- [3] 乔学光,冯飞,贾振安,等. 光纤光栅高压传感器封装技术实验研究[J]. 光电子·激光,2009,20(1):9-11.  
QIAO X G, FENG F, JIA ZH A, et al.. Study on pressure sensing technology of a compensable fiber grating [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009,20(1): 9-11. (in Chinese)
- [4] 吴入军,郑百林,付昆昆,等. 表面粘贴式光纤布拉格光栅传感器层状结构对测量应变的影响[J]. 光学精密工程,2014,22(12):3183-3190.  
WU R J, ZHENG B L, FU K K, et al.. Influence of layered structure for surface-bonded FBG sensor on measured strain [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3183-3190. (in Chinese)
- [5] 吴俊,陈伟民,章鹏,等. 粘接层弹性模量对光纤布拉格光栅传感器应变传递性能的影响[J]. 光学精密工程,2011,19(12):2941-2946.  
WU J, CHEN W M, ZHANG P, et al.. Influence of bond layer characteristics on strain sensing properties of FBG sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2941-2946. (in Chinese)

- [6] XU J, YANG D X, JIANG Y J, *et al.*. Packaged FBG sensors for real-time stress monitoring on deep-water riser [C]. *Proceedings of the 2014 International Society for Optical Engineering, Beijing: SPIE/COS Photonics Asia*, 2014: 92740F-92740F-6.
- [7] NAGAOKA H. Hysteresis attending the change of length by magnetization in nickel and iron [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1894, 37(224): 131-140.
- [8] JONES R. Some developments and applications of the optical lever [J]. *Journal of Scientific Instruments*, 1961, 38(2): 37.
- [9] COOK R, HAMM C. Fiber optic lever displacement transducer [J]. *Applied Optics*, 1979, 18(19): 3230-3241.
- [10] YAO X C, RECTOR D M, GEORGE J S. Optical lever recording of displacements from activated lobster nerve bundles and *Nitella* internodes [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(16): 2972-2978.
- [11] KATO N, SUZUKI I, KIKUTA H, *et al.*. Force-balancing force sensor with an optical lever [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(12): 5532-5536.
- [12] EVANS D R, CRAIG V S. Sensing cantilever beam bending by the optical lever technique and its application to surface stress [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(11): 5450-5461.
- [13] ALEXANDER S, HELLEMANS L, MARTI O, *et al.*. An atomic-resolution atomic-force microscope implemented using an optical lever [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 65(1): 164-167.
- [14] SADER J E, LU J, MULVANEY P. Effect of cantilever geometry on the optical lever sensitivities and thermal noise method of the atomic force microscope [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(113702): 1-6.
- [15] HOGAN J, HAMMER J, CHIOU S W, *et al.*. Precision angle sensor using an optical lever inside a Sagnac interferometer [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1698-1700.
- [16] 刘璐, 李艳宁, 吴森, 等. 基于显微光杠杆技术的微结构偏转角测量系统 [J]. *光学技术*, 2014, 40(3): 219-224.
- LIU L, LI Y N, WU S, *et al.*. Deflection angle measurement system for microstructure based on microscope optical lever [J]. *Optical Technique*, 2014, 40(3): 219-224. (in Chinese)
- [17] RAJAVELU M, SIVAKUMAR D, DANIEL R J, *et al.*. Perforated diaphragms employed piezoresistive MEMS pressure sensor for sensitivity enhancement in gas flow measurement [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 35(17): 63-75.
- [18] ANADKAT N, RANGACHAR M. Simulation based analysis of capacitive pressure sensor with COMSOL multiphysics [J]. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2015, 4(4): 848-852.

#### 作者简介:



徐 健 (1989—), 男, 浙江金华人, 博士研究生, 2010 年, 2013 年于西北工业大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: xujian1989@hotmail.com



杨德兴 (1970—), 男, 四川绵竹人, 博士生导师, 教授, 主要从事光纤传感及光电系统、激光超声物理及应用、光波场调控及应用等方面的研究。E-mail: dxyang@nwpu.edu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)