

doi:10.3788/gzxb20174610.1006001

灵敏度可调的光纤布喇格光栅称量传感单元

冯艳,张劲,张震,张华,李玉龙

(南昌大学 机电工程学院 江西省机器人与焊接自动化重点实验室,南昌 330031)

摘 要:以杠杆悬臂传感梁为基础,设计了支点可调式称量传感单元,通过调节支点位置实现不同量程的称量传感灵敏度可控制,并且可以实现温度误差补偿.理论分析表明,结构一定的传感单元,支点与支座间距离存在临界阈值,当支座间距离等于该阈值时,称量传感灵敏度等于零;随着支座间距离的增大灵敏度逐渐减小并趋向于稳定.实验表明,在0~200 g的范围内,称量传感的平均线性度大于0.998,理论灵敏度与实验灵敏度之间的平均相对误差为6.46%,可满足不同量程的不同灵敏度的称量应用.

关键词:光纤布喇格光栅;称量传感;杠杆式悬臂;灵敏度可调;量程可调

中图分类号:TN253;TP212.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1006001-6

Fiber Bragg Grating Weighing Unit with Adjustable Sensitivity

FENG Yan, ZHANG Jin, ZHANG Zhen, ZHANG Hua¹, LI Yu-long¹

(Key Lab for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, School of Mechatronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 310031, China)

Abstract: An innovative weighing sensing unit using optical fiber Bragg grating sensors was developed. Based on lever cantilever with an adjustable fulcrum, the weighing range and sensitivity can be adjusted. During the differential operation of the shifts of Bragg wavelength, the shifts of Bragg wavelengths caused by the temperature fluctuation can be compensated. As a result of theoretical analysis, there is a threshold for the value of the distance between the fulcrum and the brace. When this distance equals the threshold, weighing sensitivity will be zero. Experimental results show that the average linearity is larger than 0.998 and the average relative error between the theoretical weighing sensitivity and the experimental weighing sensitivity is 6.46% within the range of 0~200 grams of force.

Key words: Optical fiber Bragg grating; Weighing sensing; Lever cantilever; Adjustable sensitivity; Adjustable range

OCIS Codes: 060.3735; 060.3738; 060.2370; 000.2658

0 引言

随着信息社会的发展,精密称重仪器的应用越来越广泛^[1,2].传统的称重传感元件多是电阻应变片、电容、压电传感器等,结合单片机控制技术,可以实现精确测量和智能称重.另一方面,这些称重传感器大多采用电桥电路来补偿温度误差,需要增加额外的电子元器件和传输电缆,由此将会带来可靠性、电磁干扰和稳定性等问题^[3-5].

光纤布喇格光栅(Optical Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有波长编码、波分复用、抗电磁干扰、传感线性度优良等优点,集信息传输与传感于一体,在智能材料与结构领域有着广阔的应用前景.在实际应用中,结合不同的传感单元,可实现压力、应变、温度、腐蚀速率等多种物理量的实时监测^[6-9].在要求抗电磁干扰、线性传感特性和精密称量范围等称量传感领域,FBG 称量传感器的研究和应用方兴未艾.

基金项目:国家自然科学基金(No.51665039)和江西省自然科学基金(No. 20151BAB206031)资助

第一作者:冯艳(1976—),女,副教授,博士,主要研究方向为光纤光栅传感及其智能结构. Email:fengyan76@neu.edu.cn

收稿日期:2017-05-05; **录用日期:**2017-06-20

<http://www.photon.ac.cn>

李川团队^[10]研制了基于双平行孔梁的 FBG 称重传感器,可实现温度补偿和偏转载荷补偿.意大利的研究人员^[11]将 FBG 传感器应用于交通道路动态称重系统,获得了 2% 的称重精度.华北电力大学的研究团队^[12]将 FBG 称重传感器应用于监测输电线路覆冰状态,有效克服了其他传感器的电磁干扰问题,在 0~40 kN 的载荷范围内,FBG 称重传感器的线性度达到 0.999 8,灵敏度为 43.4 N/pm.葡萄牙的研究人员^[13]将 FBG 传感器埋置在硅橡胶托盘底部制作了称量单元,在 0.5~500 g 称量范围内获得良好的实验结果.美国的研究人员^[14]研发了三维 FBG 称重传感器并应用于 1.83 m 的公路车辆动态称量系统,表现出优良的长期稳定性,其轴向测量精度达到 90%.无论在精密的小称量范围,还是重如公路车辆这样的大称量领域,FBG 称重传感器在静态称重和动态称重两方面都大有可为,但对于不同量程要求不同称量灵敏度这方面的研究报道还很少.

本文以悬臂结构为基础,设计了一种新颖的灵敏度可控制并且具有温度误差补偿功能的 FBG 称量传感单元.该传感单元操作方便灵活,对应于不同量程范围可实现不同的称量灵敏度.

1 传感原理

当宽带光在 FBG 中进行传播,适合于布喇格条件的光波将在栅区发生反射,如图 1 所示,反射波长被称为 FBG 的中心波长 λ_B , λ_B 与折射率和光栅周期之间的关系可表示为^[15]

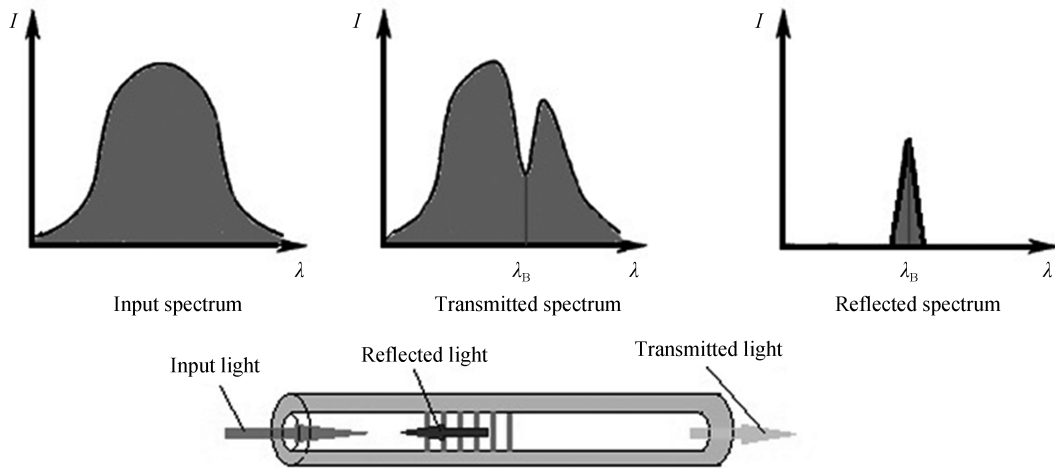


图 1 FBG 的光传输特性
Fig.1 Schematic of FBG transmission characteristics

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

式(1)中, n_{eff} 为光纤的有效折射率; Λ 为光栅调制周期.在应力与应变的作用之下,弹光效应将会使得折射率产生变化,而材料的变形则会令光栅周期发生改变.因温度而产生的热光效应使折射率发生改变,并同时产生热膨胀效应使光栅的周期发生变化.当应力应变、环境温度等都发生改变,忽略波导效应,FBG 光栅反射波的波长变化量可表示为^[15-16]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_{\epsilon_z}\epsilon_z + K_T\Delta T \quad (2)$$

式(2)中, $K_{\epsilon_z} = 0.784/\epsilon$, 表示轴向应变灵敏系数; $K_T = 6.85 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 表示温度灵敏系数.通过监测 FBG 传感器的中心波长偏移量,可获得外界信息参数.

2 传感单元设计与实验

传感单元起着外界信号传递的作用,结构合理的传感单元可以对光纤光栅传感性能起到结构化调节的作用.

2.1 结构设计原理

称量传感单元结构如图 2,当称量物品时,支点

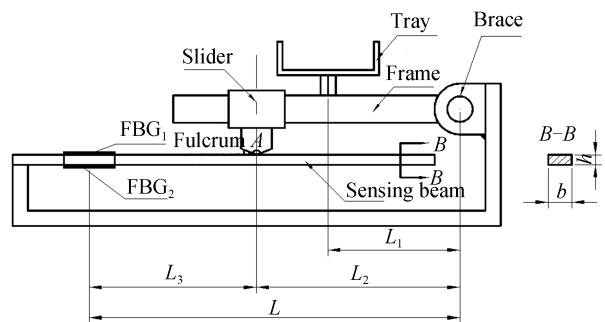


图 2 杠杆悬臂式称量传感单元
Fig.2 Schematic of lever cantilever weighing unit

A 向传感梁施加压力,A 可在悬臂梁上表面滑动,调节 L_2 与 L_3 的比值,从而改变称量灵敏度.传感梁的上下表面同一位置处安置有两支相同 FBG 传感器构成差动式传感,以消除环境温度变化影响,同时可提高称量灵敏度.

传感梁的弹性模量为 E ,惯性矩 $I_z = \frac{bh^3}{12}$, b 为梁宽, h 为梁厚,所测力为 F ,则 FBG 安置位置处轴向应变为

$$\epsilon_z = \pm 6FL_1L_3/Ebh^2L_2 \quad (3)$$

由式(2)可得

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_B = K_{\epsilon_z}\epsilon_z + K_T\Delta T \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_B = -K_{\epsilon_z}\epsilon_z + K_T\Delta T \end{cases} \quad (4)$$

进一步可得

$$\frac{\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}}{\lambda_B} = 2K_{\epsilon_z}\epsilon_z = 12K_{\epsilon_z} \frac{FL_1L_3}{Ebh^2L_2} \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = K_F F = 12K_{\epsilon_z} \frac{L_1L_3}{Ebh^2L_2} F \quad (6)$$

调节 A 的位置,改变 L_2 和 L_3 的比值,从而调节灵敏度系数 K_F .通过两支 FBG 传感器中心波长的差动漂移,避免了环境温度波动引起的误差,同时其称量灵敏度系数 K_F 提高了一倍,灵敏度系数 K_F 为

$$K_F = \frac{12K_{\epsilon_z}L_1L_3}{Ebh^2L_2} \quad (7)$$

2.2 传感实验装置

进行称量传感性能测量时,采用砝码来实现重物称量,实验装置见图 3.采用杭州聚华光电科技有限公司的 JH-FBG-A3 光纤光栅解调仪作为称量传感测试设备.该解调仪基于波长可调谐扫描激光器的工作原理,由可调谐激光器产生波长连续变化的扫描窄带光,经多路光纤分路器阵列的输出端同步发射到各个传感通道,再由多路光纤分路器阵列的接收端将各路光纤传感通道原路反射回的光谱信号送到光电转换阵列,然后由多片 FPGA 级联构成的实时处理阵列对各个传感通道的光谱信号进行实时采集和运算.数据处理能力最高可达到 10 Gbit/s,可用于最多 32 个测量通道并行同时工作,波长分辨率为 0.1 pm,波长测量精度为 ± 1 pm.

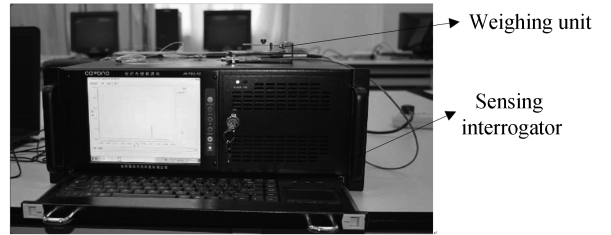
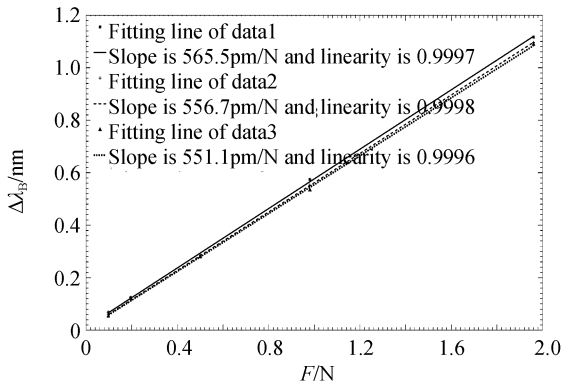


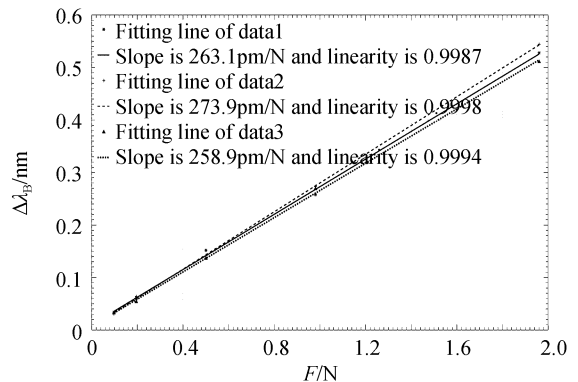
图 3 称量传感实验系统
Fig.3 Weighing test system

2.3 实验结果

悬臂传感梁和调节支点材料为 45# 钢,其弹性模量 $E = 200$ GPa, $L_1 = 34$ mm, $L = L_2 + L_3 = 85$ mm, $b = 16$ mm, $h = 1.18$ mm.传感性能实验中,在传感梁上下表面相同位置处分别粘贴相同 FBG,上表面的 FBG 标记为 FBG_1 ,下表面的 FBG 标记为 FBG_2 ,它们在室温时的初始中心波长分别为 $\lambda_{B1} = 1549.635$ nm,



(a) $L_2=14$ mm



(b) $L_2=24$ mm

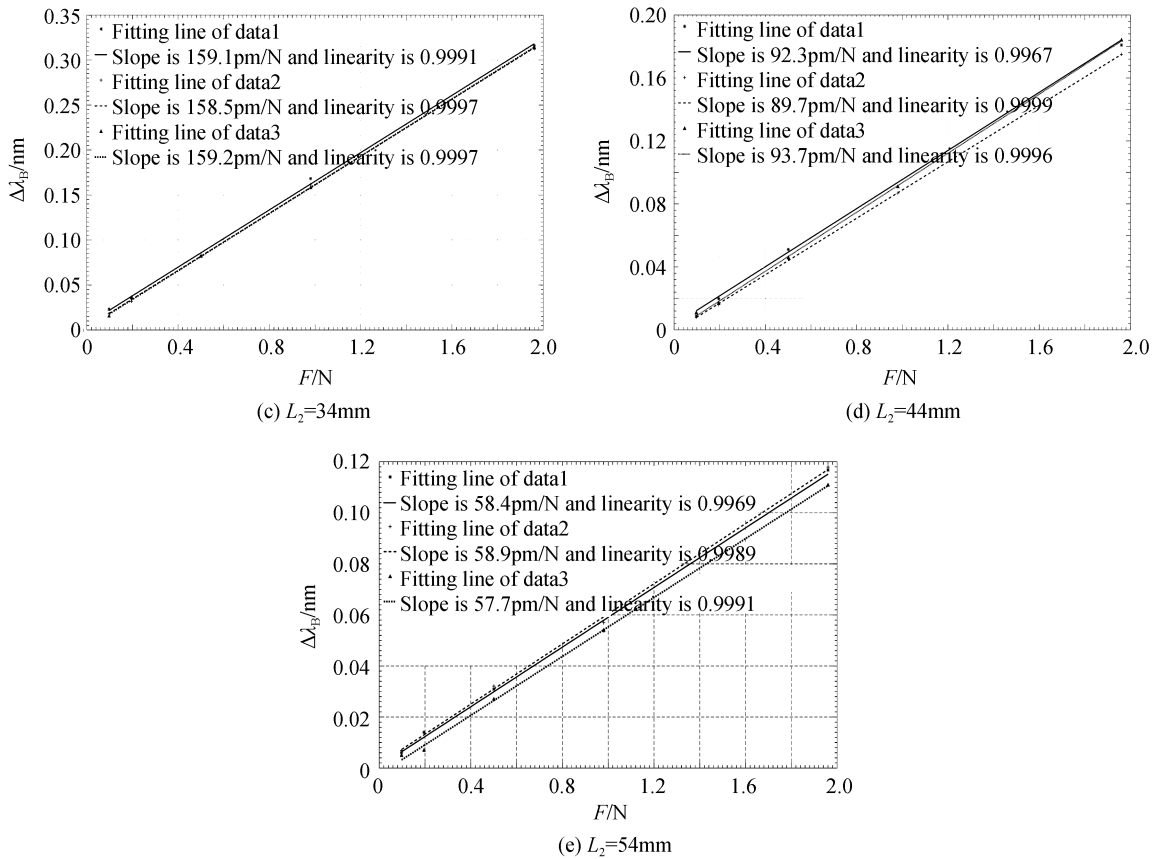


图4 称重传感性能

Fig.4 Weight sensing when A is at different location

$\lambda_{B2} = 1\,549.680\text{ nm}$. 在每一个 A 点位置处,重物质量分别取 0 g, 10 g, 20 g, 50 g, 100 g, 200 g 进行称量传感实验,反复进行三次,传感单元的称量传感性能如图 4 所示,其传感性能线性度 S 保持优良的线性,实验灵敏度 K' 随着 L_2 的增大而减小.

3 传感单元灵敏度分析

3.1 理论灵敏度可调分析

传感单元的灵敏度系数可通过调节 A 点位置实现结构化可控制.在传感梁的材料、横截面和外形结构尺寸一定的情况下,该传感单元结构参数 L_3 的可调范围为 21~65 mm, L_2 可调范围为 8~54 mm,灵敏度系数 K_F 由参数 L_2 和 L_3 调节

$$K_F = \frac{12 \times 0.784 \times 34}{200 \times 10^3 \times 16 \times 1.18^2} \times \frac{L_3}{L_2} = 71.79 \times 10^{-6} \frac{L_3}{L_2} \cdot N^{-1} \quad (8)$$

令 FBG 中心波长 $\lambda_B = 1\,550\text{ nm}$, 该传感单元的理论灵敏度 $K = K_F \cdot \lambda_B$ 随 A 点位置变化情况如图 5 所示.由分析可知, $L_3 = L - L_2$, 对于相同的 L_2 , 随着 L 的增加,灵敏度增加;对于 L 一定的传感单元,灵敏度随 L_2 的增大而减小;对于 L 一定的传感单元,相应存在支点 A 临界阈值,当 L_2 等于此临界阈值, $L_3 = 0$, 传感单元的灵敏度将下降为零,失去使用意义.因此,在设计传感单元时,应注意设计合理的支架,以避免出现 A 点的临界阈值位置.

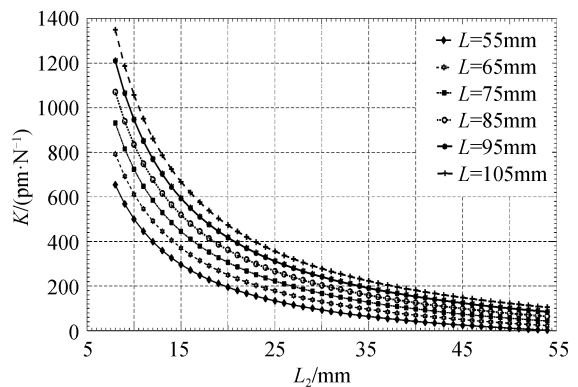


图5 理论灵敏度 K 随结构参数 L 变化分析

Fig.5 Theoretical weight sensitivity at the different value of L

同时,在 L 和传感梁横截面一定的情况下,随着支点 A 的位置变化,该传感单元可称量的量程 M 也随之变化,与传感梁的最大许用应力 $[\sigma]$ 和传感单元灵敏度 K 相关

$$M \leq \frac{\Delta \lambda_B}{K} = \frac{2K_{\varepsilon z} \cdot \lambda_B \cdot [\sigma]}{E \cdot K} \quad (9)$$

3.2 实验灵敏度分析

称量传感单元在 $L = 85 \text{ mm}$ 时,实验中选取的五个 A 点位置,其对应的理论灵敏度 K 和实验灵敏度 K' ,如图 6 所示.由于应变传递系数的影响, $K' < K$.传感单元在实验中的五个支点 A 位置处的灵敏度、量程 M 和平均线性度 S ,如表 1 所示. L 一定时,随着 L_2 的增大, M 增大但称量灵敏度减小.

表 1 传感单元在不同支点位置的灵敏度和线性度

Table 1 Sensitivity and linearity of the weighing unit at different fulcrum locations

Location of L_2/mm	14	24	34	44	54
Theoretical sensitivity $k/(\text{pm} \cdot \text{N}^{-1})$	564.3	282.8	166.9	103.7	63.9
Sensing range $M(\text{N})$	2.5	5.1	8.7	14.1	22.8
Average sensitivity $k'/(\text{pm} \cdot \text{N}^{-1})$	557.8	265.3	158.9	91.9	58.3
Relative error of sensitivity/%	1.15	6.19	4.79	11.4	8.76
Average linearity S	0.999 7	0.999 3	0.999 5	0.998 7	0.998 3

4 结论

本文所设计的称量传感单元应用差动 FBG 传感器的波长漂移消除温度误差,结合可调式杠杆悬臂结构实现了称量灵敏度的可控制.在实际应用时,应注意避免出现临界传感阈值的支点位置.实验研究表明,称量传感单元在 $0 \sim 200 \text{ g}$ 的加载范围内,称量传感线性度不低于 0.998,理论灵敏度与实验灵敏度之间的平均相对误差为 6.46%.

相比于传统的称量传感器,FBG 称量传感器小巧轻便,传感线性度优良,特别适用于抗电磁干扰场合,结合结构合理的传感单元,可以满足不同量程的不同灵敏度称量应用场合.随着光纤光栅解调技术的成熟与发展,FBG 称量传感器应用前景广阔.

参考文献

- [1] ZHANG Hong-tao. A high speed, portable, multi-function, optical fiber weigh-in-motion (WIM) sensing system[D]. Stevens Institute of Technology, Hoboken, New Jersey, United States, 2009.
- [2] JACOB B, COTTINEAU L M. Weigh-in-motion for direct enforcement of overloaded commercial vehicles [C]. Transportation Research Procedia, 2016, **14**(4): 1413-1422.
- [3] ZHANG Zheng-gang, XIONG Gang. Design of the multi-function electronic scale based on single-chip microcomputer[J]. Machinery & Electronics, 2016, **34**(11): 58-61.
张争刚, 熊刚. 基于单片机的多功能电子秤设计[J]. 机械与电子, 2016, **34**(11): 58-61.
- [4] TANG Li-jun, TENG Zhao-sheng, CHEN Liang-zhu, et al. Research on automatic inclination detection and weighting error compensation methods of electronic scale[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, **25**(1): 61-66.
唐立军, 滕召胜, 陈良柱, 等. 电子秤倾角自动检测与称量误差补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, **25**(1): 61-66.
- [5] LYDON M, TAYLOR S E, ROBINSON D, et al. Development of a bridge weigh-in-motion sensor: Performance comparison using fiber optic and electric resistance strain sensor systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, **14**(12): 4284-4296.
- [6] HANDAWI K A, VAHDATI N, ROSTRON P, et al. Strain based FBG sensor for real-time corrosion rate monitoring in pre-stressed structures[J]. Sensors and Actuators B, 2016, **236**(2): 276-285.
- [7] LI Guo-wei, PEI Hua-fu, YIN Jian-hua, et al. Monitoring and analysis of PHC pipe piles under hydraulic jacking using FBG sensing technology[J]. Measurement, 2014, **49**(3): 358-367.

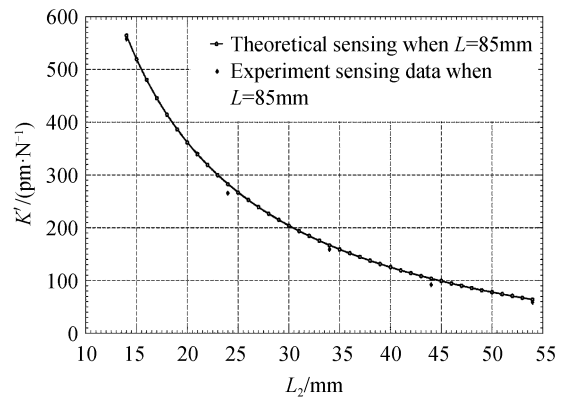


图 6 实验灵敏度 K' 与理论灵敏度 K 对比

Fig.6 Comparison between the theoretical sensitivity and experiment sensing when $L = 85 \text{ mm}$

- [8] FENG De-quan, QIAO Xue-guang, WANG Hong-liang, *et al.* Experimental study of large range enhanced pressure sensitivity concerning fiber Bragg grating pressure sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1273-1276.
冯德全, 乔学光, 王宏亮, 等. 大范围光纤 Bragg 光栅压力传感器增敏实验研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(7): 1273-1276.
- [9] XU Ran, YURKEWICH A, PATEL R. Curvature, torsion, and force sensing in continuum robots using helically wrapped FBG sensors[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, **1**(2): 1052-1059.
- [10] LI Chuan, WANG Yu, WAN Zhou, *et al.* Fiber Bragg grating weighing sensor of beam with two parallel holes[J]. *Sensors and Actuators A, Physical*, 2009, **154**(1):12-15.
- [11] TOSI D, OLIVERO M, VALLAN A, *et al.* Weigh-in-motion through fibre Bragg grating optical sensors [J]. *Electronics Letters*, 2010, **46**(17): 1223-1225.
- [12] MA Guo-ming, QUAN Jiang-tao, LI Cheng-rong, *et al.* Design of the fiber Bragg grating load cell applied to icing monitoring of transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, **36**(9): 2225-2229.
马国明, 全江涛, 李成榕, 等. 输电线路覆冰荷载监测用光纤光栅称重传感器的设计[J]. 高电压技术, 2010, **36**(9): 2225-2229.
- [13] VIEIRA J C, MORAIS O M F, VASQUES C M A, *et al.* A laboratorial prototype of a weight measuring system using optical fiber Bragg grating sensor embedded in silicone rubber[J]. *Measurement*, 2015, **61**(2): 58-66.
- [14] TARAWNEH M, HUANG Ying. Glass fiber-reinforced polymer packaged fiber Bragg grating sensors for low-speed weigh-in-motion measurements rubber[J]. *Optical Engineering*, 2016, **55**(8): 086107.
- [15] XU Jian, YANG De-xing, JIANG Ya-jun, *et al.* Measurement of strain coefficient of unequal cross-section FBG sensor based on double optical levers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(2): 245-250.
徐健, 杨德兴, 姜亚军, 等. 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[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(2): 245-250.
- [16] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.