

拱梁组合式光纤光栅压力传感器设计与试验研究

孙 丽¹, 李 闯¹, 张春巍², 张 嫚¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 针对目前地下工程和道路桥梁领域土压力监测的需求, 提出了一种基于拱梁组合体系的光纤光栅压力传感器设计新方法, 进行了拱梁组合式光纤光栅压力传感器理论分析, 通过降低系梁材料的弹性模量和截面尺寸能够有效增加传感器灵敏度. 推导了压力灵敏度系数理论公式, 灵敏度系数理论值为 $1.21 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$. 当作用力在 0~500 N 变化时, 拱形结构和铜片协同变形引起光纤光栅波长漂移, 试验结果显示: 传感器灵敏度系数试验值为 $1.40 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$, 静态误差为 2.3%. 设计的光纤光栅压力传感器传力机理明确、静态特性稳定, 具有良好的工程应用前景.

关键词: 光纤光栅; 灵敏度系数; 拱梁组合体系; 静态误差

中图分类号: TN253

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0187-05

Design and experiment of arch-beam combined FBG pressure sensor

SUN Li¹, LI Chuang¹, ZHANG Chunwei², ZHANG Man¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

Abstract: This paper aims to achieve the monitoring of soil pressure. Arch-beam combined FBG pressure sensor is designed, whose model is analyzed in theory. Reducing the elastic modulus and section size of the beam can effectively increase the sensitivity of the sensor. The theoretical value is $1.21 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$ by the formula of pressure sensitivity coefficient. When the force changes from 0N to 500N, the wavelength shift of FBG sensor caused by arch and copper coordination deformation appears. The test value of sensitivity coefficient is $1.40 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$. Static error of the sensor is 2.3%, which shows that the sensor has clear transfer mechanism and stable static characteristics. It has a good prospect of engineering application.

Key words: fiber Bragg grating; sensitivity coefficient; arch-beam combined system; static error

光纤光栅传感器作为多物理量监测传感元件能够实现压力监测, 如何设计灵敏度高、封装形式有效及传力机理明确的光纤光栅压力传感器是解决其工程化应用的前提. 兰春光^[1]设计了一种液体压力监测传感装置, 采用平膜片和等强度悬臂梁组合结构形式, 通过“双栅”实现压力传感器温度自补偿, 传感器压力灵敏度系数达到 17.3 pm/MPa, 液体压力测量范围 0~2.5 MPa, 具有良好的应用前景. 黄俊^[2]研制了具有温度补偿功能的膜片式光纤光栅压力传感器, 仿真分析了金属圆膜片在被测压力作用下表面的应变分布情况, 实现了钢管输水管线内的压力变化监测. 罗建花^[3]设计了基于轮辐式压力盒装置的光纤光栅压力传感器, 采用直角相交双端剪切梁式结构形式, 通过

测量轮辐截面的剪应力间接测量荷载, 传感器压力灵敏度系数为 0.045 nm/kN. 张智禹^[4]采用杠杆结构和聚合物封装方法制备新型高灵敏度 FBG 传感器, 装置将作用力在光栅端放大, 实现了灵敏度的大幅提高. 孙立晔^[5]应用杠杆原理实现光纤光栅传感器的增敏效果, 设计了高灵敏度光纤光栅压力传感器. 潘洪亮^[6]研发了级联式的光纤光栅压力传感器, 解决了压力测量范围和灵敏度之间的矛盾, 并应用于井下油压力的监测. 依据土压力传感器与土介质的匹配原则, 孙搏^[7]设计了一种微型布拉格光栅土压力传感器, 具有灵敏度高、稳定性高和低啁啾的特点. 上述研究集中在新型光纤光栅压力传感器的研发, 主要涉及传感器的温度补偿、灵敏度和量程等问题. 而传力机理明确、

收稿日期: 2016-06-25

修改稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578347); 辽宁省高等学校创新团队基金资助项目(LT2015023); 辽宁省“百千万人才工程”基金资助项目(2014921045); 沈阳市科技局科技创新专项基金资助项目(F14-192-4-00)

作者简介: 孙丽(1974—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为结构健康监测. E-mail: Sunli2009@163.com

静态特性稳定的新型光纤光栅压力传感器设计与试验研究较少报道。

本文提出了拱梁组合式光纤光栅压力传感器设计方法,该装置通过拱梁组合体系将竖向压力转变为系梁截面的水平拉力,进而引起光纤光栅波长漂移,通过监测光纤光栅波长变化实现压力测量。进行了光纤光栅压力传感器压力灵敏度系数的验证性试验,分析了传感器静态特性。

1 工作原理

设计时采用如下假定:

(1)材料均为线弹性,不考虑材料的塑性性质;在压力作用下,拱脚夹角不发生变化;

(2)该组合体系近似为拱梁组合体系,弓形结构区段为拱肋,金属薄片区段为系梁,在螺栓作用下,两者纵向变形一致;

(3)光纤光栅与铜片应变变化一致,不考虑胶层对光纤光栅应变传递率的影响。

在外部竖向荷载的作用下,拱肋截面产生压力,由于螺栓约束,拱肋和系梁协同变形,系梁截面产生拉力,系梁纵向变形引起光纤光栅波长漂移。

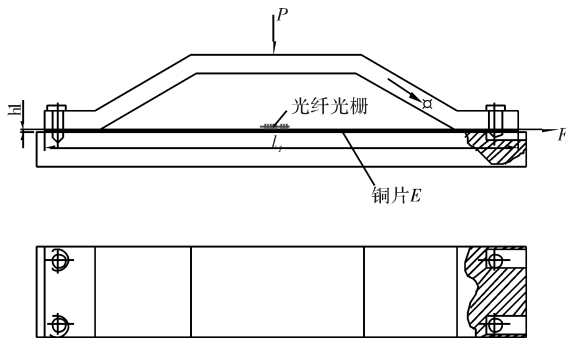


图1 传感器结构图

Fig. 1 Structure schematic of the sensor

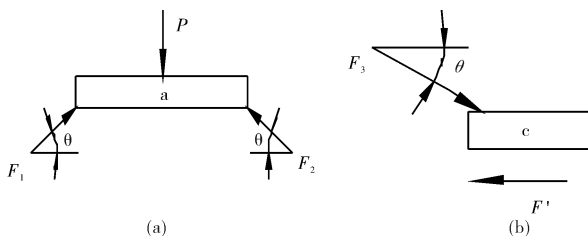


图2 传感器受力分析图

Fig. 2 Stress analysis diagram of the sensor

图1为拱梁组合式光纤光栅压力传感器结构图。图2为传感器受力分析图,其中,图(a)为拱肋上水平区段受力分析图,图(b)为拱肋下水平区段受力分析图。

F_1 、 F_2 和 F_3 为外荷载 P 作用下拱肋结构产

生的内力, θ 为拱脚夹角。对拱肋受力分析得到

$$F_1 \cos \theta = F_2 \cos \theta \quad (1)$$

$$F_1 \sin \theta + F_2 \sin \theta = P \quad (2)$$

$$F' = F_3 \cos \theta = \frac{P \cot \theta}{2} \quad (3)$$

F 为系梁截面内力,系梁截面承受水平拉力为

$$F = F' = \frac{P \cot \theta}{2} \quad (4)$$

$$F = \frac{P \cot \theta}{2} \quad (5)$$

b 为铜片材料宽度, h 为厚度, E 为弹性模量。基于耦合模理论^[8-9], FBG 波长漂移为

$$\Delta \lambda_B = (1 - P_e) \epsilon_r \lambda_B = (1 - P_e) \frac{F \lambda_B}{S E} = (1 - P_e) \frac{P \cot \theta \lambda_B}{2bh E} \quad (6)$$

压力灵敏度系数为

$$k = \frac{\Delta \lambda_B}{P} = (1 - P_e) \frac{\cot \theta \lambda_B}{2bh E} \quad (7)$$

由公式(7)分析得到:拱梁组合式光纤光栅压力传感器压力灵敏度系数与拱脚夹角、材料截面尺寸和弹性模量有关,通过减小系梁材料的弹性模量和截面尺寸,能够显著提高压力传感器的灵敏度,拱梁组合式光纤光栅压力传感器传力机理明确。

2 试验验证

图3为拱梁组合式光纤光栅压力传感器实物图,传感器由弓形结构、金属薄片和螺栓连接制成,上部弓形结构材料为12 mm厚Q235钢,金属薄片材料为1 mm厚锡磷青铜片。采用微机控制电子万能试验机加载,进行拱梁组合式光纤光栅压力传感器标定试验,加载步骤为:



图3 传感器实物图

Fig. 3 Object picture

(1)压力传感器水平放置,下端转轮逆时针旋转,上端转轮顺时针旋转,保证支座夹紧传感器,光纤光栅传感器粘贴于金属铜片中间位置;

(2)试验机采用力控制的方式,加载速度为10 N/min,首先施加预荷载,归零调示,传感器处于

受压状态。逐级正行程加载 50 N，其间暂停 10 s，试验机加载力分别为 50 N、100 N、150 N…直至 500 N，然后逐级逆行程减载 50 N，试验机加载力从 500 N 减至 0 N；

(3)从预加荷载开始，试验机间歇 10 s，光纤光栅解调仪即时保存，记录采集波长数据；

(4)根据国家压力传感器性能测试标准，反复进行 3 组试验。

表 1 试验数据

Tab. 1 Test data

加载值/N	中心波长/nm					
	第 1 组试验		第 2 组试验		第 3 组试验	
	正行程	逆行程	正行程	逆行程	正行程	逆行程
0	1 552.185	1 552.185	1 552.185	1 552.185	1 552.185	1 552.185
50	1 552.256	1 552.256	1 552.256	1 552.256	1 552.255	1 552.259
100	1 552.328	1 552.324	1 552.330	1 552.322	1 552.332	1 552.328
150	1 552.397	1 552.394	1 552.399	1 552.391	1 552.403	1 552.394
200	1 552.468	1 552.462	1 552.470	1 552.46	1 552.468	1 552.462
250	1 552.539	1 552.536	1 552.543	1 552.532	1 552.541	1 552.533
300	1 552.608	1 552.605	1 552.609	1 552.600	1 552.601	1 552.596
350	1 552.675	1 552.681	1 552.677	1 552.684	1 552.673	1 552.680
400	1 552.746	1 552.743	1 552.749	1 552.740	1 552.742	1 552.736
450	1 552.814	1 552.821	1 552.819	1 552.821	1 552.823	1 552.821
500	1 552.884	1 552.884	1 552.887	1 552.887	1 552.891	1 552.891

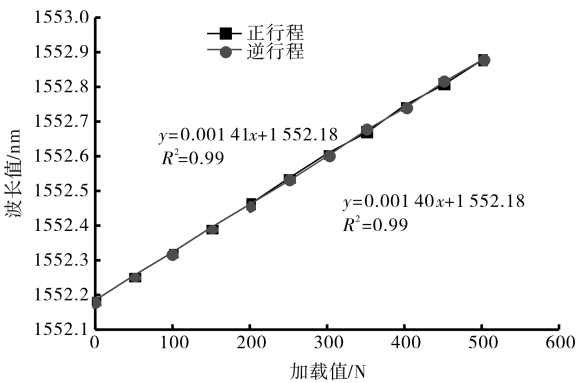


图 4 第 1 次试验标定曲线
Fig. 4 The first experimental calibration curve

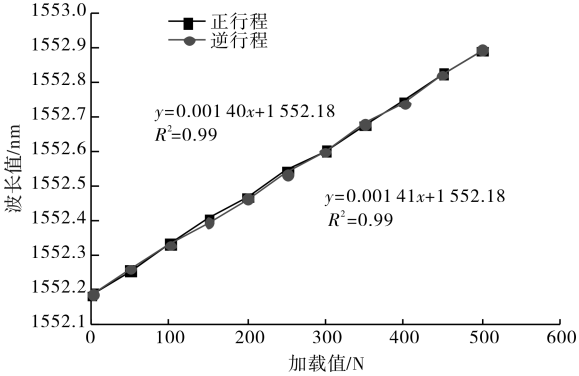


图 6 第 3 次试验标定曲线
Fig. 6 The third experimental calibration curve

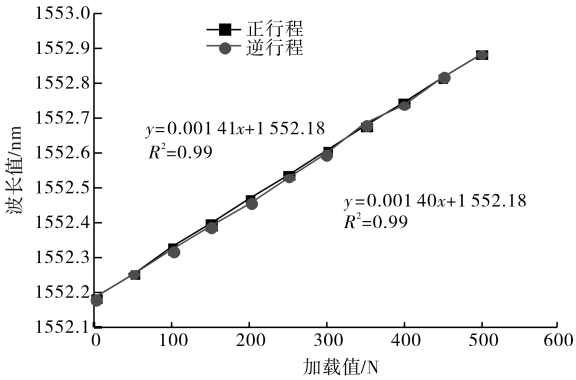


图 5 第 2 次试验标定曲线
Fig. 5 The second experimental calibration curve

图 4—图 6 为拱梁组合式光纤光栅压力传感器 3 次正逆行程标定试验曲线，由试验数据得到 3 组正行程试验拟合方程分别为

$$\begin{cases} y = 0.001\ 41x + 1\ 552.18 \\ y = 0.001\ 41x + 1\ 552.18 \\ y = 0.001\ 40x + 1\ 552.18 \end{cases}$$

$R^2 = 0.99$ ，压力灵敏度系数分别为 1.41×10^{-3} nm/N、 1.41×10^{-3} nm/N、 1.40×10^{-3} nm/N.

3 组逆行程试验拟合方程为

$$\begin{cases} y = 0.001\ 40x + 1\ 552.18 \\ y = 0.001\ 40x + 1\ 552.18 \\ y = 0.001\ 41x + 1\ 552.18 \end{cases}$$

$R^2 = 0.99$, 压力灵敏度系数分别为 1.40×10^{-3} nm/N、 1.40×10^{-3} nm/N、 1.41×10^{-3} nm/N. 经过三次标定试验, 压力灵敏度系数为 1.40×10^{-3} nm/N.

依据公式(7), 代入如下材料物理参数, 得到压力灵敏度系数理论值. 各项参数如下: $P_e = 0.22$, $\lambda_B = 1\,552$ nm, $\text{ctg}\theta = 2$, 截面尺寸 $b \times h = 15$ mm \times 1 mm, 代入公式(7), 得到压力传感器的灵敏度系数理论值:

$$k = \frac{\Delta\lambda_B}{P} = (1 - P_e) \frac{\text{ctg}\theta \lambda_B}{2bhE} = 0.001\,21 \text{ nm/N}$$

光纤光栅压力传感器压力灵敏度系数试验值为 1.40×10^{-3} nm/N, 理论值为 1.21×10^{-3} nm/N, 两者的偏差为 13.5%. 引起试验值和理论值的偏差原因:

(1) 拱形结构通过轧钢加工得到的实际尺寸与理论模型尺寸存在差异, 当截面尺寸偏小, 系梁截面拉应力偏大, 灵敏度系数则偏大;

(2) 传感器在组装的过程中, 当结构安装过紧, 在加载的过程中截面进入塑性状态, 系梁产生较大变形, 灵敏度系数偏大;

(3) 杆件在外部荷载作用下产生弯曲变形, 角度发生改变, 引起试验值与理论值产生偏差.

3 静态特性分析

为了确保拱梁组合式光纤光栅压力传感器工程化和实用化的可行性, 需对其进行静态性能测试. 传感器静态特性分析指标包括: 线性度、重复性、迟滞性. 表2是拱梁组合式光纤光栅压力传感器静态性能评估指标表, 通过标

定试验, 当作用力在 0~500 N 变化时, 记录传感器正行程和逆行程波长值, 统计并做如下误差分析.

(1) 线性度误差

线性度误差是指传感器实际校准曲线与拟合直线之间的最大偏差值 Δy_{\max}^* 与满量程输出值 Δy 之比, 线性度误差用 e_L 表示.

$$e_L = \frac{\Delta y_{\max}^*}{\Delta y} = 0.57\% \quad (8)$$

(2) 迟滞性误差

迟滞性误差是反映传感器正逆行程过程中输入与输出曲线不重合程度, 是正逆行程中输出的最大偏差量 ΔH_{\max} 与满量程输出 Δy 之比, 迟滞性误差用 e_H 表示.

$$e_H = \frac{\Delta H_{\max}}{\Delta y} = 1\% \quad (9)$$

(3) 重复性误差

重复性误差是传感器输入量按同一方向作全量程连续工作多次变动时, 所得特性曲线间一致的程度, 重复性误差用 e_R 表示.

$$e_R = \frac{\alpha \sigma_{\max}}{y} = 2\% \quad (10)$$

(4) 静态误差

静态误差是指传感器测量值不随时间变化的误差, 是传感器静态性能指标评判标准, 静态误差用 e_s 表示.

$$e_s = \sqrt{e_L^2 + e_R^2 + e_H^2} = 2.3\% \quad (11)$$

拱梁组合式光纤光栅压力传感器的静态误差为 2.3%, 传感器测量精度高, 具有良好的工程应用前景.

表2 传感器静态性能评估

Tab. 2 Estimation of static performance

加载方案	传感器波长值/nm				线性度	迟滞性	重复性	
加载值/N	正行程波长值	逆行程波长值	平均值	校准值	偏差量 / 10^{-3} nm	偏差量 / 10^{-3} nm	正行程标准差 / 10^{-3} nm	逆行程标准差 / 10^{-3} nm
0	1 552.185	1 552.185	1 552.185	1 552.185	0	0	0	0
50	1 552.256	1 552.257	1 552.256	1 552.255	1	1	0.7	1.7
100	1 552.330	1 552.325	1 552.327	1 552.325	2	-5	2	3.1
150	1 552.400	1 552.393	1 552.396	1 552.396	0	-7	3.1	1.7
200	1 552.469	1 552.461	1 552.465	1 552.466	-1	-8	1.2	1.2
250	1 552.541	1 552.534	1 552.537	1 552.536	1	-7	2	2.1
300	1 552.606	1 552.600	1 552.603	1 552.606	-3	-6	7	4.5
350	1 552.675	1 552.682	1 552.678	1 552.676	2	7	2	2.1
400	1 552.746	1 552.740	1 552.743	1 552.747	-4	-6	3.5	4.7
450	1 552.819	1 552.821	1 552.820	1 552.817	3	2	4.5	0
500	1 552.887	1 552.887	1 552.887	1 552.887	0	0	3.5	3.5

4 结语

提出了新型传感机理-拱梁组合体系的光纤光栅压力传感器设计方法,拱梁组合式光纤光栅压力传感器压力灵敏度系数试验值为 $1.40 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$,理论值为 $1.21 \times 10^{-3} \text{ nm/N}$,两者偏差 13.5%。通过对压力传感器进行静态性能分析,传感器线性度误差为 0.57%,迟滞性误差为 1%,重复性误差为 2%,综上,静态误差为 2.3%。研究结果表明:拱梁组合式光纤光栅压力传感器测量精度高、线性度好,在土压力测量方面具有良好的工程应用前景。

参考文献 References

- [1] 兰春光,刘航.工程化光纤光栅液体压力传感器的研制[J].仪器仪表学报,2013,34(9):2154-2159.
LAN Chunguang, LIU Hang. Development of FBG-based liquid pressure sensor for engineering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 2154-2159.
- [2] 黄俊.光纤光栅压力传感的研制与应用[D].武汉理工大学,2013.
HUANG Jun. Development and application of fiber Bragg grating pressure sensors [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [3] 罗建花,开桂云.轮辐式光纤光栅压力传感器的设计与实现[J].光子学报,2006,35(1):106-108.
LUO Jianhua, KAI Guiyun. The design and realization of spoke FBG pressure sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(1): 106-108.
- [4] 张智禹,于文革.一种新型FBG微力传感器[J].传感器与微系统,2014,33(3):70-75.
ZHANG Zhiyu, YU Wenge. A novel FBG micro-force sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(3): 70-75.
- [5] 孙立晔,张嫚,李闯,孙丽.基于杠杆原理的高灵敏度光纤光栅压力传感器试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(1):80-85.
SUN Liye, ZHANG Man, LI Chuang, SUN Li. High sensitivity fiber Bragg grating pressure sensor experiment based on the principle of leverage [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2016, 32(1): 80-85.
- [6] 潘洪亮,董惠娟,何俊,张广玉.井下油套环空级联式光纤光栅压力传感器的研制[J].光电子·激光,2012,23(10):1842-1846.
PAN Hongliang, Dong Huijuan, He Jun, ZHANG Guangyu. Fabrication of cascaded fiber grating pressure sensor for annulus of rod pumping wells [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(10): 1842-1846.
- [7] 孙搏,隋青美,王静.微型布拉格光栅土压力传感器的设计与试验[J].仪表技术与传感器,2016,10:21-27.
SUN Bo, SUI Qingmei, WANG Jing. Design and test of micro bragg grating soil pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(10): 21-27.
- [8] Alexis Bimis, Dimitris Karalekas. Experimental evaluation of hardening strains in a bioceramic material using an embedded optical sensor [J]. Meccanica, 2015, 50(2): 541-547.
- [9] SUN Li, LI Chuang, LI Jun, ZHANG Chunwei, DING Xiaosu. Strain Transfer Analysis of a Clamped Fiber Bragg Grating Sensor [J]. Applied Science, 2017, 7(2): 1-11.

(编辑 沈波)

(上接第178页)

- [9] 黄海荣,朱玉华.基础隔震结构反应谱研究[J].结构工程师,2010,26(3):123-129.
HUANG Hairong, ZHU Yuhua. Studies on design response spectrum for base-isolated structures [J]. Structural Engineers, 2010, 26(3): 123-129.
- [10] 薛定宇,陈阳泉.基于Matlab/Simulink的系统仿真技术和应用[M].北京:清华大学出版社,2012.
XUE Dingyu, CHEN Yangquan. Technology and application of Matlab/Simulink system simulation [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2012.
- [11] 刘伟庆,章征涛.结构抗震控制的动态仿真分析方法研究[J].防灾减灾工程学报,2004,20(4):382-388.
LIU Weiqing, ZHANG Zhengtao. Research on the Method of Dynamic Simulation for Seismic controlled Structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 20(4): 382-388.
- [12] 王曙光,杜东升,刘伟庆,等.隔震结构不同阻尼比地震影响系数曲线的改进研究[J].建筑结构学报,2009,30(3):112-119.
WANG Shuguang, DU Dongsheng, LIU Weiqing, et al. Research on seismic influence coefficient of seismic isolated structure with different damping ratio [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(3): 112-119.
- [13] 熊仲明,霍晓鹏,苏妮娜.一种新型滑移隔震体系的理论分析和研究[J].振动与冲击,2008,29(10):135-139.
XIONG Zhongming, HUO Xiaopeng, SU Nina. Theoretical analysis and study on a new kind of sliding base isolation system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 29(10): 135-139.
- [14] 翟长海,公茂盛,谢礼立.工程结构等延性地震抗力谱研究.地震工程与工程振动,2004,24(1):22-29.
ZHAI Changhai, GONG Maosheng, XIE Lili. On seismic resistance spectra of constant ductility of structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 22-29.

(编辑 沈波)