

doi: 10.3788/gzxb20124111.1261

光纤布喇格光栅应变传感器结构优化研究

袁子琳¹, 龚元¹, 马耀远¹, 杜磊¹, 吴宇¹, 饶云江¹, 吴慧娟¹, 王浚璞², 万夫²

(1 电子科技大学 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2 川庆钻探工程有限公司 安全环保质量监督检测研究院, 四川 广汉 618300)

摘 要:提出了一种改进的光纤光栅应变传感器结构,用有限元分析软件对其进行建模和静力仿真,得到其应力分布和光栅区域的应变情况.在整体宽度与厚度相等的情况下,此结构的灵敏度约为传统“工”字型结构的 600 倍.进一步分析了其关键区域的 6 个结构参量对应变灵敏度及量程的影响.筛选、设计并加工出不同尺寸的两种应变片,分别用 UV 胶与玻璃焊料对光栅进行封装,得到灵敏度分别为:249 pm/N、330 pm/N 和 1.1 pm/N.比较分析表明,本文提供的分析方法与数据,可为不同工程应用场合的最优结构设计提供依据.

关键词:光纤布喇格光栅; 光纤应变传感器; 灵敏度; 结构优化

中图分类号: TP212; TB125

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)11-1261-6

0 引言

光纤光栅传感器属于一种波长调制型光纤传感器.由于光纤光栅所固有的波长编码特性,与光强调制型光纤传感器相比,光纤光栅传感器的准确度不受光能波动的影响,同时也弥补了光纤干涉型传感系统只能进行相对测量、对工作环境要求高等方面的不足.由于光纤传感器的可复用性优点,光纤光栅传感器被广泛应用于航空航天、智能交通、石油化工、电力、结构健康监测等领域,进行温度、应变、位移、压力等物理参量的测量.

近年来发展起来的光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)应变传感器,具有应变灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰、体积小、易于安装、可靠性高、使用寿命长等特点.而光纤光栅应变传感器除了具有光纤传感器的上述优点之外,还可以组成准分布式传感器网络,更适用于大型工程结构的监测,是一种极具发展潜力和应用价值的应变传感器.

关于光纤光栅应变传感器的研究较多,如哈尔滨工业大学^[1]、大连理工大学^[2]、北京工业大学^[3]、昆明理工大学^[4]制作了各种结构封装的光纤布喇格光栅应变传感器;于秀娟等人^[5]对片式封装的光纤

布喇格光栅传感器进行了改进,将铜、钛合金或钢基片做成“工”字型;李惠等^[6]将纤维增强聚合物封装的光纤布喇格光栅传感器用于山东滨州黄河公路大桥斜拉索的长期健康监测^[7];孙丽等^[8]将光纤光栅传感器夹持在地下管道外壁用来检测管道腐蚀;杜磊等^[9]将光纤光栅传感器与悬臂梁结合用来对桥梁、铁路地基等的沉降进行检测.

本文将一种改进的应变片与传统“工”字型结构进行应力分布对比,并对改进型传感器机械结构进行了数值模拟与分析,为不同工程应用场合的应变传感器设计与制作提供了通用的分析方法和数据,对本领域研究具有普遍的借鉴意义.

1 研究理论与方法

当光纤光栅发生应变时,其中心波长 λ_B 会发生漂移,漂移的幅度与应变可用式(1)的线性关系表示为^[10]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon_z \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 表示应变引起的 λ_B 的漂移幅度; p_e 为光弹性常量; ϵ_z 为应变幅度.典型的石英单模光纤的光弹性常量 $p_e = 0.22$ ^[11],因此,对于 λ_B 为 1 550 nm 的光栅,由式(1)计算的光栅的应变灵敏度为

基金项目:国家自然科学基金(No. 61107073, No. 61107072, No. 61106045)、中央高校基本科研业务费专项资金(No. ZYGX2011J002)、高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20110185120020)和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放基金(No. SKLST201005)资助

第一作者:袁子琳(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email:hyaline.yuan@gmail.com

通讯作者:龚元(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤传感与器件. Email:yong@uestc.edu.cn

导 师:饶云江(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术. Email:yjrao@uestc.edu.cn

收稿日期:2012-05-24;**修回日期:**2012-07-30

1.2 pm/ $\mu\epsilon$.

图 1(b)给出了一种改进的光纤光栅应变传感器结构模型,相比传统的“工”字型结构(图 1(a))有更高的灵敏度.图中,1 为光纤固定位置;2 为光纤;3 为光纤布喇格光栅;4 为应变片与被测物连接的位置;图 1(b)中 5 区域结构的作用是在应变片两端施加载荷时放大光栅部分的应变,提高应变片的灵敏度.

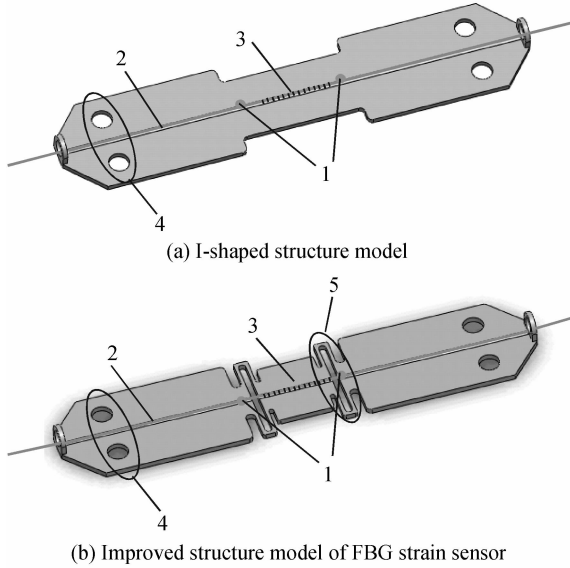


图 1 光纤传感器结构模型

Fig.1 Structure model of FBG strain sensor

本文使用 ANSYS 有限元分析软件,对“工”字型结构和改进后的应变片结构分别建模,两种结构的整体宽度和厚度一致.设置材料的杨氏模量为 200 GPa,泊松比为 0.29.在应变片两端固定部位分别施加全自由度约束和载荷(如图 2(a)中所示),得到两种结构应力分布等值线图(图 2(b)、图 2(c)).可以看出,“工”字型结构的应变几乎平均分布在整个应变片上,而改进后的结构应变主要集中在中间的镂空区域(图 1(b)中的 5 区域),即光栅所在位置.对上图两种结构模型进行静力分析,施加相同载荷的情况下,改进后结构光栅所在部位的应变约为“工”字型结构的 600 倍左右.

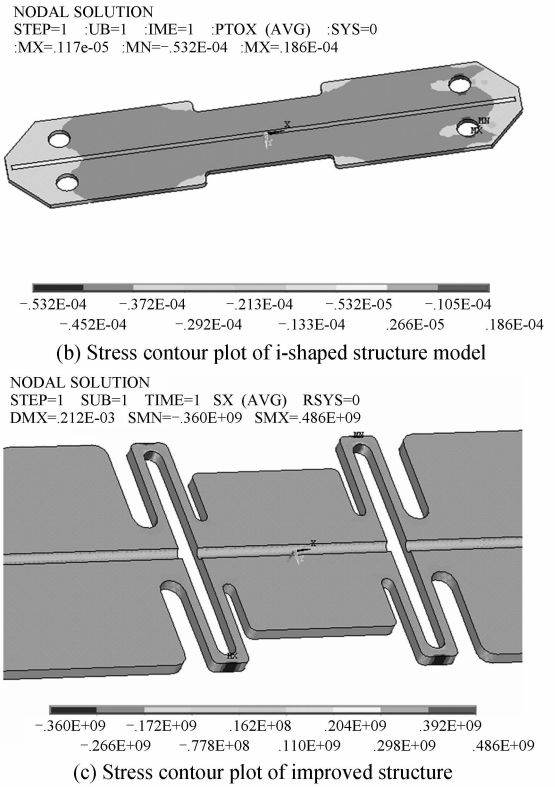
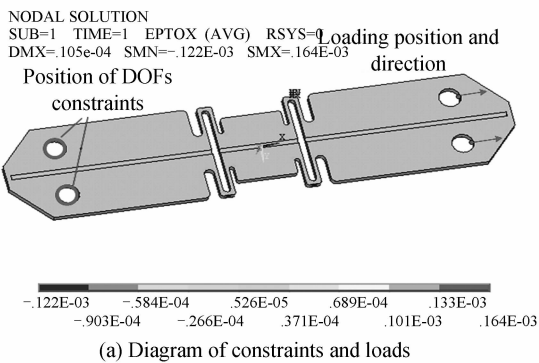


图 2 光纤光栅应变传感器的载荷示意及应力分布等值图
Fig.2 Loadsdiagram and stress contour plots of FBG strain sensor

根据上述结果,初步选定图 3 中 a、b、c、d、e、f 的尺寸作为 6 个参量,通过软件仿真、参量分析及筛选、结构设计、加工样品、实际检测等一系列方法和步骤,详细地研究了应变片结构参量与传感器灵敏度及量程的关系.

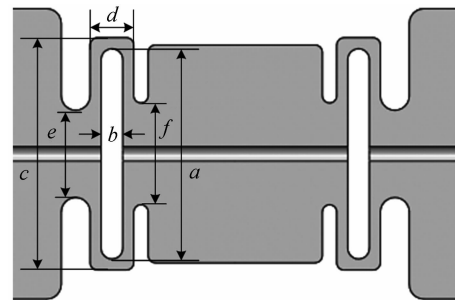


图 3 应变放大区域结构分解图
Fig.3 Structure details of strain amplification area

仿真时,针对上述 6 个参量,以某一值为基准,从增加和减小两个方向做适当变化,同时考虑实际加工难度,并为尺寸设定极限.然后通过对分析应变随载荷变化曲线,得到参量对应变灵敏度及量程的影响结果,进一步归纳出相应的结论.

2 仿真结果与分析

通过分别改变(增大和缩小)6 个参量的值,得到各参量对传感器灵敏度的影响结果.

2.1 参量 a 对应变的影响

参量 a 分别取值:13 mm、13.7 mm、12 mm,应变片两端施加 1~20 N 的连续载荷,得到相应图 1 (b)中区域 1 的应变变化趋势如图 4.

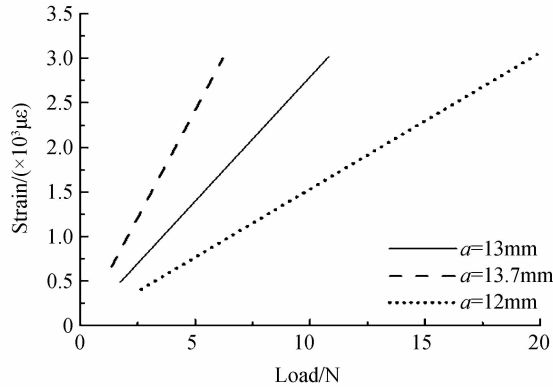


图 4 参量 a 对应变的影响

Fig. 4 Influence of parameter 'a' to strain

由图 4 可知,增大 a 的尺寸可令应变灵敏度增大.图中三条曲线对应的斜率分别是:279、484、153 ($\mu\epsilon/N$).当达到 3 000 $\mu\epsilon$ 时,承受的载荷分别为:10.8 N、6.2 N、19.6 N. a 尺寸增加 5.4%,灵敏度增加了 73.5%; a 尺寸减小 7.7%,灵敏度减小 45.2%.可见, a 处尺寸对应变灵敏度影响很大,在 a 处尺寸越大,灵敏度越高,对灵敏度的影响越明显.

2.2 参量 b 对应变的影响

参量 b 分别取值:1.5 mm、0.4 mm、2 mm,应变片两端施加 1~25 N 的连续载荷,得到应变变化趋势如图 5 所示.

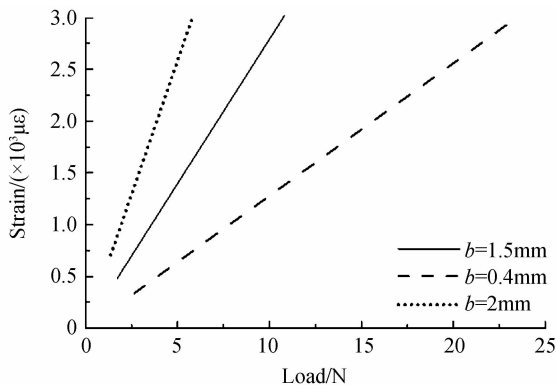


图 5 参量 b 对应变的影响

Fig. 5 Influence of parameter 'b' to strain

由图 5 可知,增大 b 的尺寸可令应变灵敏度增大.图中三条曲线对应的斜率分别是:279、128、516 ($\mu\epsilon/N$).当达到 3 000 $\mu\epsilon$ 时,承受的载荷分别为:10.8 N、23.5 N、5.8 N. b 尺寸增加 33.3%,灵敏度增加了 84.9%; b 尺寸减小 73.3%,灵敏度减小 54.1%.可见, b 处尺寸对应变灵敏度同样影响很大,在 b 处尺寸越大,应变灵敏度越高,同时对灵敏度的影响越明显.

2.3 参量 c 对应变的影响

参量 c 分别取值:16 mm、20 mm、13 mm 应变片两端施加 1~32 N 的连续载荷,得到相应应变变化趋势如图 6 所示.

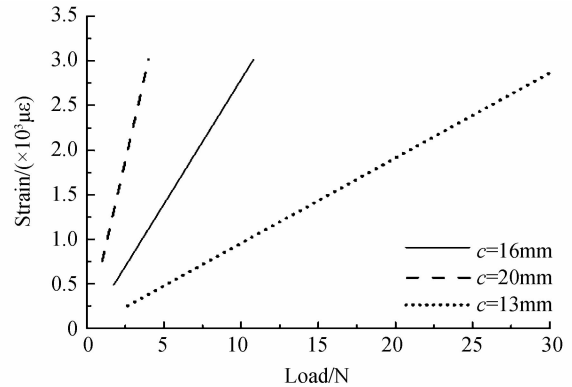


图 6 参量 c 对应变的影响

Fig. 6 Influence of parameter 'c' to strain

由图 6 可知,增大 c 的尺寸可令应变灵敏度增大.图中三条曲线对应的斜率分别是:279、754、96 ($\mu\epsilon/N$).当达到 3 000 $\mu\epsilon$ 时,承受的载荷分别为:10.8 N、4 N、31 N. c 尺寸增加 25%,灵敏度增加了 170.3%; c 尺寸减小 18.8%,灵敏度减小 65.6%.与上述改变 a 、 b 参量的仿真结果类似,在 c 尺寸越大,灵敏度越高,对灵敏度的影响也越明显.

2.4 参量 d 对应变的影响

参量 d 分别取值:3 mm、1.9 mm、5 mm,应变片两端施加 1~13 N 的载荷,得到应变变化趋势如图 7 所示.

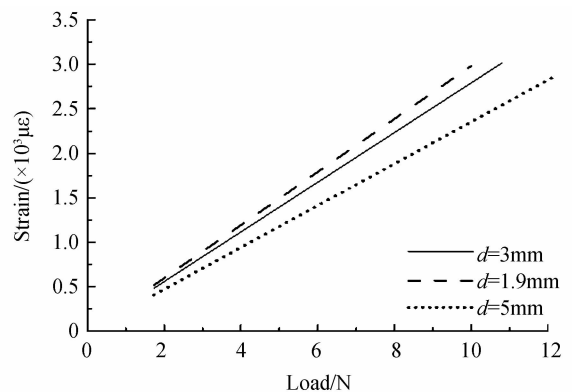


图 7 参量 d 对应变的影响

Fig. 7 Influence of parameter 'd' to strain

由图 7 可知,增大 d 的尺寸可令应变灵敏度有所减小.图中三条曲线对应的斜率分别是:279、298、235 ($\mu\epsilon/N$).当达到 3 000 $\mu\epsilon$ 时,承受的载荷分别为:10.8 N、10 N、12.7 N. d 尺寸增大 66.7%,灵敏度减小 15.8%; d 尺寸减小 36.7%,灵敏度增加了 6.8%.在保证 b 、 d 两处的间隔不变的前提下,单一改变 d 的大小,对灵敏度影响不明显.

2.5 参量 e 对应变的影响

参量 e 分别取值:6 mm、12 mm、2 mm,应变片两端施加 1~22 N 的连续载荷,得到应变变化趋势如图 8 所示.

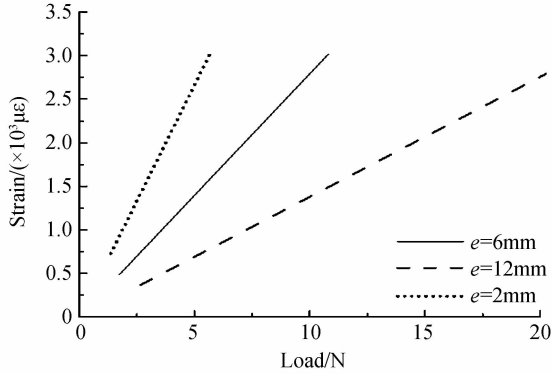


图 8 参量 e 对应变的影响
Fig. 8 Influence of parameter 'e' to strain

由图 8 可知,增大 e 的尺寸可使应变灵敏度减小.图中三条曲线对应的斜率分别是:279、138、532 ($\mu\epsilon/N$).当达到 3 000 $\mu\epsilon$ 时,承受的载荷分别为:10.8 N、21.8 N、5.7 N. e 尺寸增大 100%,灵敏度减小 50.5%; e 尺寸减小 66.7%,灵敏度增加了 90.7%.易得到, e 处尺寸越小对灵敏度影响越大.

2.6 参量 f 对应变的影响

参量 f 分别取值:7 mm、12 mm、3 mm,应变片两端施加 1~20 N 的连续载荷,得到应变变化趋势如图 9 所示.

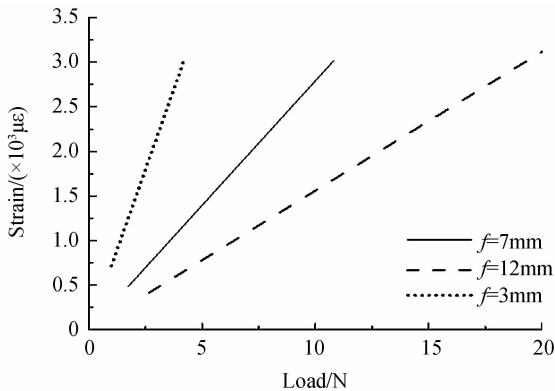


图 9 参量 f 对应变的影响
Fig. 9 Influence of parameter 'f' to strain

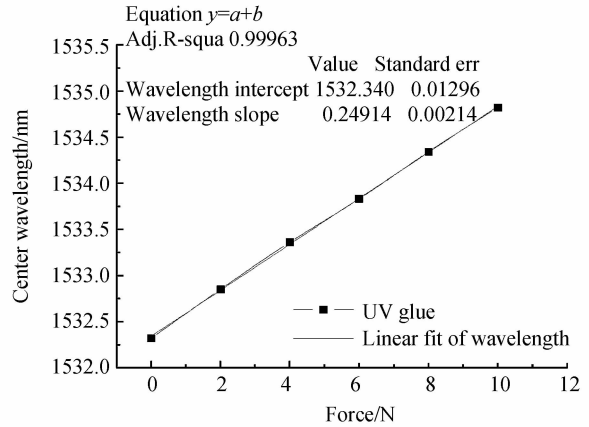
由图 9 可知,增大 f 的尺寸可令应变灵敏度减小.图中三条曲线对应的斜率分别是:279、156、719 ($\mu\epsilon/N$).当达到 3 000 $\mu\epsilon$ 时,承受的载荷分别为:10.8 N、20 N、4.2 N. f 尺寸增大 71.4%,灵敏度减小 44.1%; f 尺寸减小 57.1%,灵敏度增加了 157.7%.与 e 处类似, f 处尺寸越小对灵敏度影响越大.

3 实验结果与分析

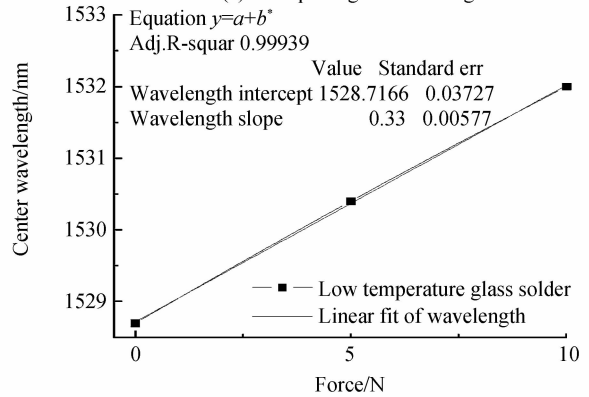
根据以上仿真结果,通过认真分析和筛选,选用杨氏模量约为 200 GPa、泊松比为 0.29 的不锈钢材料加工了两种不同尺寸的应变片来封装光纤光栅.利用拉力计与光学解调仪测量应变片所受拉力与光栅波长漂移情况.其中应变片 1 的尺寸参量为: $a=19.3$ mm, $b=1.5$ mm, $c=21$ mm, $d=2.9$ mm, $e=8$ mm, $f=8$ mm;应变片 2 的尺寸参量为 $a=9$ mm, $b=1$ mm, $c=14$ mm, $d=3$ mm, $e=11$ mm, $f=9$ mm.用 ANSYS 对此材料的两种尺寸应变片进行仿真,得到的灵敏度分别为:340 $\mu\epsilon/N$ 和 2 $\mu\epsilon/N$,再根据式(1)中得到的光栅的应变灵敏度 1.2 pm/ $\mu\epsilon$,计算得到两种应变片的理论灵敏度为 408 pm/N 和 2.4 pm/N.

考虑到固定光栅使用的粘接剂对应力传递的影响,实验中采用了 UV 胶和低温玻璃焊料分别对光栅进行固定.两种应变片拉力与波长关系曲线如图 10 所示.

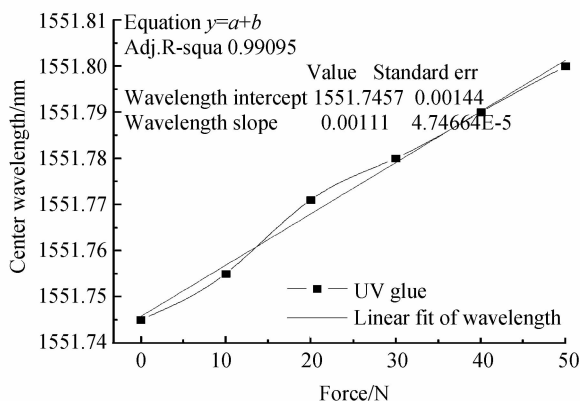
由图 10 得到应变片 1 用 UV 胶和低温玻璃焊料封装时的灵敏度分别为 249 pm/N 与 330 pm/N;应变片 2 用 UV 胶封装时的灵敏度为 1.1 pm/N.



(a) No.1 packaged with UV glue



(b) No.1 packaged with low temperature glass solder



(c) No.2 packaged with UV glue

图 10 UV 胶封装和低温玻璃焊料封装的应力片拉力与波长的关系曲线

Fig. 10 Relation curves of force and wavelength of FBG sensor

实验得到的灵敏度结果与仿真结果相比偏小,而用低温玻璃焊料封装得到的应变灵敏度相比 UV 胶封装更接近理论值.

周广东等提出了影响光纤光栅传感器的平均应变传递率的因素主要有光纤光栅传感器的长度,中间层的厚度,中间层的弹性模量和中间层的泊松比^[12].对于此结构,由于光栅与应变片间通过两点固定,且实验中采用拉力计直接为传感器提供载荷,相当于应变传感器与被测结构之间由中间层造成的应变传递损耗可以被忽略.因而影响光纤光栅传感器的平均应变传递率的因素主要在于粘结剂的弹性模量.随着粘结剂弹性模量的增加,平均应变传递率增大.该实验中,低温玻璃焊料的杨氏模量大于 UV 胶,因此可将应变更多地传递到光栅,从而得到更高的应变灵敏度.此外,粘结剂固化前在光栅上施加的预应力大小也将对传感器的应变灵敏度产生一定影响.

4 结论

通过数值模拟和实验研究发现,改进的光纤光栅应变传感器结构与传统“工”字型结构相比有更高的应变灵敏度.光纤光栅应变片结构参量(形状、大小、尺寸)显著影响应变计的灵敏度和量程.此外,固定光栅使用的粘结剂的选取也会对应变灵敏度产生一定的影响.在实际的工程应用场合中可以根据对灵敏度和量程的具体要求在关键参量上进行修改以得到最优化结构,并可以通过选取适当的粘结剂和改变粘结长度、厚度等要素来提高灵敏度.

参考文献

[1] ZHOU Zhi, ZHAO Xue-feng, WU Zhan-jun, *et al.* Study on FBG sensor's steel capillary encapsulating technique and sensing properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(12): 1089-1092.

周智,赵雪峰,武湛君,等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(12): 1089-1092.

[2] REN Liang. The application of fiber bragg grating technology in structure health monitoring[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.

任亮. 光纤光栅传感技术在结构健康监测中的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[3] HU Shu-yang, ZHAO Qi-da, HE Shi-ya, *et al.* Strain measurement in construction steel bar using a FBG sensor coated by a thin metal tube[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(6): 688-690.

胡曙阳,赵启大,何士雅,等. 金属管封装光纤光栅用于建筑钢筋应变的测量[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(6): 688-690.

[4] LI Chuan, LI Xin, SIN Yu. Research of fiber Bragg grating sensors in dead load test of RC girder [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, **38**(2): 64-67.

李川,李欣,孙宇. 光纤 Bragg 光栅传感器在钢筋混凝土梁静荷载试验中的研究[J]. *土木工程学报*, 2005, **38**(2): 64-67.

[5] YU Xiu-juan, YU You-long, ZHANG Min, *et al.* Study on the strain and temperature sensing characteristics of FBG packaged by the copper slice [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1325-1328.

于秀娟,余有龙,张敏,等. 铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 1325-1328.

[6] LI Hui, OU Jin-ping. Design and implementation of health monitoring systems for cable-stayed bridges (II): implementations[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, **39**(4): 45-53.

李惠,欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(II): 系统实现[J]. *土木工程学报*, 2006, **39**(4): 45-53.

[7] LI Ai-qun, ZHOU Guang-dong. Progress and prospect of fiber Bragg grating sensors measurement technology (I): strain and temperature measurement [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2009, **39**(6): 1299-1301.

李爱群,周广东. 光纤 Bragg 光栅传感器测试技术研究进展与展望 (I): 应变、温度测试[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2009, **39**(6): 1299-1301.

[8] SUN Li, SUN Qian-qian, REN Liang, *et al.* A new method for underground pipeline corrosion monitoring applied FBG [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 6-10.

孙丽,孙茜茜,任亮,等. 应用光纤布喇格光栅传感器监测地下管道腐蚀的新方法研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 6-10.

[9] DU Lei, GONG Yuan, WU Yu, *et al.* Fiber bragg grating settlement sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1878-1880.

杜磊,龚元,吴宇,等. 光纤布喇格光栅沉降传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1878-1880.

[10] 饶云江. 光纤光栅原理及应用[M]. 王义平,朱涛. 科学出版社, 2006: 139.

[11] DU Yan-liang, LIU Chenxi, LI Jian-zhi. Study on fiber Bragg grating attached strain sensor[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2008, **5**(6): 11.

杜彦良,刘晨曦,李剑芝. 光纤 Bragg 光栅粘贴式应变传感器的研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2008, **5**(6): 11.

[12] ZHOU Guang-dong, LI Hong-nan, REN Liang, *et al.* Study on influencing parameters of strain transfer of optic fiber Bragg grating sensors[J]. *Engineering Mechanics*, 2007, **24**(6): 171-173.

周广东,李宏男,任亮,等. 光纤光栅传感器应变传递影响参量研究[J]. *工程力学*, 2007, **24**(6): 171-173.

Structure Optimization of Fiber Bragg Grating Strain Sensors

YUAN Zi-lin¹, GONG Yuan¹, MA Yao-yuan¹, DU Lei¹, WU Yu¹,

RAO Yun-jiang¹, WU Hui-juan¹, WANG Jun-pu², WAN Fu²

(1 *Key Lab of Optical Fiber Sensing & Communications (Ministry of Education), University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China*)

(2 *Safety Environment Quality Surveillance & Inspection Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling & Exploration Corporation, Guanghan, Sichuan 618300, China*)

Abstract: The dependence of a fiber Bragg grating strain sensor on the improved structure parameters was investigated both numerically and experimentally. The stress distribution and the strain of the grating region was obtained. In the case of the overall width and thickness are equal, the sensitivity of this structure is about 600 times higher than the traditional I-shaped structure. The influence of the 6 key structure parameters on the strain sensitivity and the measurement range was analyzed in detail. Experimental results were also given compared with the numerical simulated results. The gratings were packaged respectively with UV glue and glass solder to get the sensitivities were: 249 pm/N, 330 pm/N and 1.1 pm/N. The analysis method and data provided a basis for structural optimum design of fiber Bragg grating strain sensors in different applications.

Key words: Fiber Bragg grating; Optical fiber strain sensor; Sensitivity; Structural optimization