

新型双环减敏式光纤布拉格光栅应变传感器

朱星盈^{1,2}, 刘化利², 倪屹¹, 郭瑜¹

¹江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214000;

²无锡必创传感科技有限公司, 江苏 无锡 214000

摘要 设计了一种双环减敏式结构,并对 26 mm 长的减敏基片进行有限元分析,分别在减敏基片左右端面各施加 0.065 mm 的拉伸与压缩位移。由仿真结果可得减敏基片的应变减敏比约为 3.5,应变测量范围可达到 $\pm 5000 \mu\epsilon$,同时可保证减敏基片在其材料的弹性范围内运行,不影响传感器的使用寿命。通过对 500 $\mu\epsilon$ 范围内的双环减敏结构的光纤布拉格光栅传感器进行拉伸实验,实验结果表明该结构设计可使得传感器线性度达到 0.999 以上,满量程精度约为 0.1%。该传感器可实现实时准确的在线监测,系统数据采集迅速、可靠性极高,有望应用于如船舶、桥梁、飞行器等需要对关键结构进行较大应变范围测量的情况。

关键词 光纤光学; 布拉格光栅; 双环减敏结构; 应变传感器; 结构监测

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030605

New Double-Loop Desensitization FBG Strain Sensor

Zhu Xingying^{1,2}, Liu Huali², Ni Yi¹, Guo Yu¹

¹School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China;

²Wuxi Beetech Limited Company, Wuxi, Jiangsu 214000, China

Abstract A double-loop desensitization structure is designed. The finite element analysis of the 26 mm long desensitization substrate is carried out. The tensile and compressive displacements of 0.065 mm are applied to the left and right ends of the desensitization substrate, respectively. The simulation result shows that the desensitization ratio of the desensitized substrate is about 3.5 and the strain measurement range can reach $\pm 5000 \mu\epsilon$. The desensitization substrate can be operated within the elastic range of the material without affecting the service life of the sensor. The tensile test of fiber Bragg grating (FBG) with double-loop desensitization structure in the range of 500 $\mu\epsilon$ shows that the linearity of the sensor is over 0.999, and the full scale accuracy is about 0.1%. The sensor can achieve real-time accurate online monitoring, rapid system data acquisition, and high reliability. It is expected to be applied to the situations where the larger strain range of key structures is needed to be measured, such as ships, bridges, aircraft, and so on.

Key words fiber optics; Bragg grating; double-loop desensitization structure; strain sensor; structure monitoring

OCIS codes 060.3735; 060.2270; 060.3738; 060.2370

1 引言

光纤光栅传感器作为发展最快的光纤无源器件之一,凭借其高精度、现场不供电、远距离传输、不受电磁干扰和使用寿命长等优点,自 20 世纪末至今发展极为迅速,先后有 Alwis 等^[1-2]对裸光纤布拉格光

栅(FBG)的传感特性进行了研究。由于其具有波长随应变与温度变化的敏感特性,光纤光栅传感器已经开始应用在如应变点定位、光纤超声传感、液体浓度测量和倾角测量等智能监测领域^[3-5]。应力结构监测一般应用在结构复杂、应变范围大、空间狭小的地方,所以缩小传感器尺寸、增加系统的灵敏度和简

收稿日期: 2017-09-19; 收到修改稿日期: 2017-10-12

基金项目: 江苏省六大人才高峰计划(DZXX-023)

作者简介: 朱星盈(1992—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感器技术方面的研究。E-mail: 1987926171@qq.com

导师简介: 倪屹(1970—),男,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感、光电集成方面的研究。

E-mail: niy2011@163.com(通信联系人)

化封装工艺等是首要解决的问题^[6]。

光纤光栅应变传感器的结构主要有基片式和凹槽式等。2015年陈昊等^[7]研究了具有预紧力的基片式光纤光栅应变传感器,其灵敏系数为 $1.05 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度约为0.99。2017年覃荷瑛等^[8]也提出利用螺旋倾斜复合技术对光纤布拉格光栅应变传感器进行减敏。新型双环减敏式FBG应变传感器相比于目前同类光纤布拉格光栅应变传感器,具有如下优势。

1) 材料优势。传感器结构的设计在考虑其测量性能的同时,还应考虑加工、封装等工艺过程^[9]。在材料上选定TC4作为传感器基片。这种材料的弹性模量约为110 GPa,机械加工性能好,测量灵敏度高。

2) 结构优势。相比螺旋复合减敏结构传感器,新型双环减敏式FBG应变传感器在结构上采用了新的曲面减敏结构,宽度较小,长度较大,制造更简便、测量更精确、应变范围和量程更大。

3) 封装优势。由于光纤光栅本身抗剪切能力较差,所以光纤的封装也影响传感器的性能。常见的封装形式有基片式、管式和盒式等^[10-12]。传统的光纤传感器预拉伸的波长增量约为1 nm,并且回缩严重。经过设计的预拉伸装置后,光纤的预拉伸后波长增量为2 nm,回缩变化小,稳定时间缩小,封装工艺简单,提高了传感器的稳定性和寿命。

本文设计了一种新型双环减敏式FBG应变传感器,同时分析了结构的传感原理,对结构进行了有限元分析。并通过对比实验对传感器设计的可行性、线性度与系统的稳定性进行验证。

2 原理及结构分析

2.1 双环减敏结构的设计原理

双环减敏结构如图1所示。复合结构中各部分的载荷近似相等,设结构受到的力为 F ,双环减敏结构的总长度 L 为平板结构长度与两端圆弧长度的

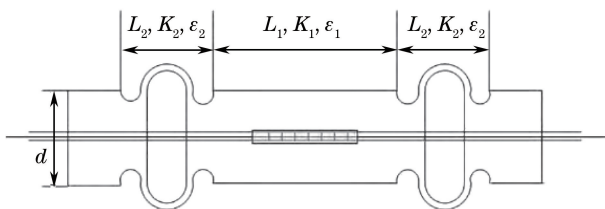


图1 双环减敏结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-loop desensitization structure

总和,总长度变化量为 ΔL ,总应变为 ϵ ,平板结构的长度为 L_1 ,材料刚度为 K ,材料弹性模量为 E ,横截面为 A_1 ,宽度为 d ,应变为 ϵ_1 ,受力后长度变化量为 ΔL_1 ,两端圆弧长度为 L_2 ,应变为 ϵ_2 ,长度变化量为 ΔL_2 ,传感光栅的应变为 ϵ_{FBG} 。假设光纤光栅与材料之间的应变为刚性传递,平板结构的应变近似于光纤的应变,根据静力学模型^[13]有

$$F = K \Delta L_1, \quad (1)$$

$$K \Delta L_2 = A_1 E \epsilon_{\text{FBG}}, \quad (2)$$

由上述关系可以推出

$$\Delta L_2 = \frac{A_1 E \epsilon_{\text{FBG}}}{K}, \quad (3)$$

$$\Delta L = \left(L_1 + \frac{2A_1 E}{K} \right) \epsilon_{\text{FBG}}, \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}. \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式可得

$$\epsilon = \left(\frac{L_1}{L} + \frac{2A_1 E_1}{KL} \right) \epsilon_{\text{FBG}}. \quad (6)$$

环形弹簧结构刚度为^[13]

$$K = \frac{2EI_2}{\pi r^3}, \quad (7)$$

式中 I_2 为环形弹簧结构的极惯性矩, r 为环形的半径。由(6)式和(7)式可得

$$\epsilon = \left(\frac{L_1}{L} + \frac{\pi r^3 A_1}{I_2 L} \right) \epsilon_{\text{FBG}}. \quad (8)$$

对于一个结构确定的传感器, L_1 、 L 、 A_1 、 I_2 、 r 为常数,(8)式表明结构的总应变 ϵ 与光栅的应变 ϵ_{FBG} 有严格的线性关系。不考虑温度对光栅的作用,光栅的中心波长变化量与光栅的应变具有线性关系,即^[14]

$$\Delta \lambda = K_\epsilon \epsilon_{\text{FBG}}, \quad (9)$$

式中 $\Delta \lambda$ 、 K_ϵ 分别为光栅中心波长漂移量和应变传感系数。由(9)式可以看出,复合结构的总应变与中心波长的变化量呈线性关系。

2.2 有限元仿真

对材料为TC4的双环减敏结构进行有限元仿真,为保证计算精度,在结构仿真计算时采用二次位移差值函数,该函数可以很好地适应曲线边界,对不规则结构具有较高的计算精度。沿结构厚度方向划分3层及3层以上网格,三维网格如图2所示。划分网格后对单元的横纵比、对边平行度、最大夹角、雅格比率和翘曲系数进行检查,检查后发现网格质量良好,满足高精度计算要求。

对结构长度为26 mm的减敏基片进行仿真,

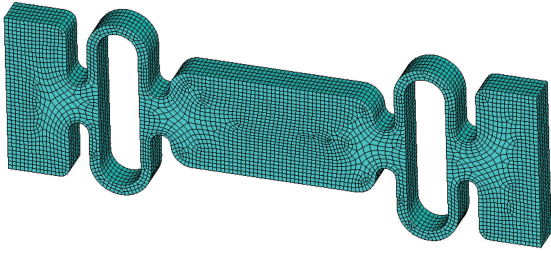


图2 三维网格图

Fig. 2 3D mesh graph

图3(a)为固定端受水平拉伸载荷时的水平位移分布图,最大拉伸位移为 0.065 mm,分布区域在固定端及固定端与圆环连接处;最小拉伸位移为 7.23×10^{-6} mm,分布区域在平板及平板与圆环连接处。光纤固连在平板水平中心轴线位置,假设光纤光栅与平板刚性固连,结构的减敏比定义为在受到载

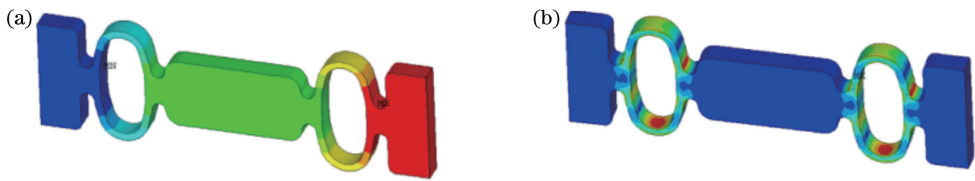


图3 拉伸载荷图。(a)水平方向的位移图;(b)等效应力图

Fig. 3 Tensile load diagram. (a) Displacement diagram in horizontal direction; (b) equivalent stress diagram

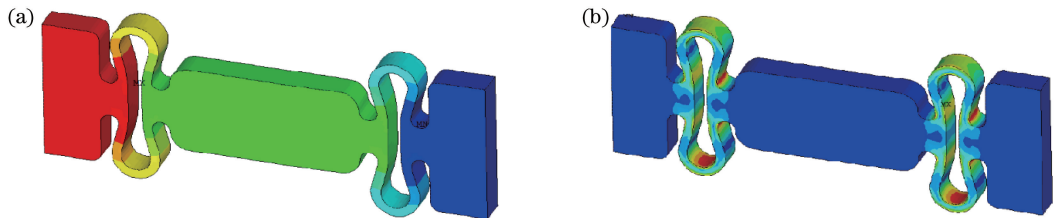


图4 压缩载荷图。(a)水平方向的位移图;(b)等效应力图

Fig. 4 Compression load diagram. (a) Displacement diagram in horizontal direction; (b) equivalent stress diagram

3 实验结果及分析

实验中对 $500 \mu\epsilon$ 范围内的双环减敏结构的传感器进行拉伸实验,测量系统的线性度和精度。在实验中保持每次外界的温度相同,在测量结构底部的两个位置分别黏贴应变片,应变片测量的值近似为实际应变值,其作用是方便与实验测量值进行对比,实验装置如图5所示。

在实验中通过控制万能拉伸机的拉伸板运动来改变传感器的应变,此时无线应变片测量结果为实际应变值,双环减敏结构的FBG应变传感器中的波长数据会通过采集箱中的BFT510-12微型化光纤传感分析仪传送到数据控制柜中,数据控制柜中的计算机再利用origin软件对采集箱中测量的波长值

荷后被测结构本身的应变值与布拉格栅区应变值的比值,光纤光栅的水平位移近似等于平板的位移量,计算出结构的减敏比约为 3.5。图3(b)为固定端受水平拉伸载荷时的等效应力分布,最大等效应力为 358 MPa,最大值位置在圆环内侧及过渡圆环的弧底。最大应力值没有超过材料的屈服极限 850 MPa,留有 2.4 左右的安全系数,工程上一般预留 1.5 左右的设计安全系数,该结构满足设计要求。

反向压缩载荷的仿真结果如图4所示,其中图4(a)为固定端受水平压缩载荷时的水平位移分布,图4(b)为固定端受水平压缩载荷时的等效应力分布。假设光纤光栅的长度为 10 mm,则计算出光纤光栅的应变为 $1446 \mu\epsilon$,处在光纤光栅长期使用范围时,结构的减敏比同样约为 3.5,即传感器可实现 $10000 \mu\epsilon (\pm 5000 \mu\epsilon)$ 的测量范围。

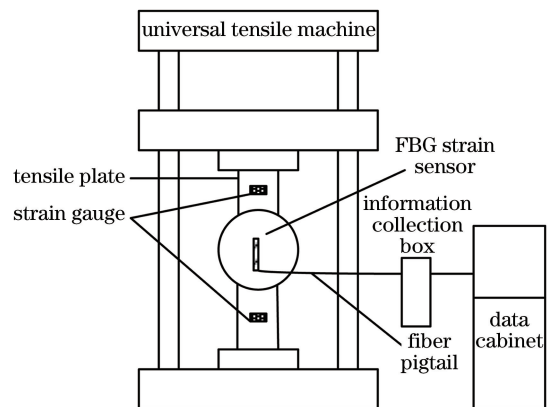


图5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental device with strain gauge measurements. The strain value measured by the strain gauge is analyzed linearly to obtain the relationship between wavelength and strain, and the wavelength value is substituted into the above relationship to obtain the

传感器的测量应变值,再与应变片的测量结果对比即可得到传感器的精度与误差。将多次实验数据取平均

值,对波长与测量应变值和实际应变值进行拟合,同时分析测量结果的残差,拟合后结果如图 6 所示。

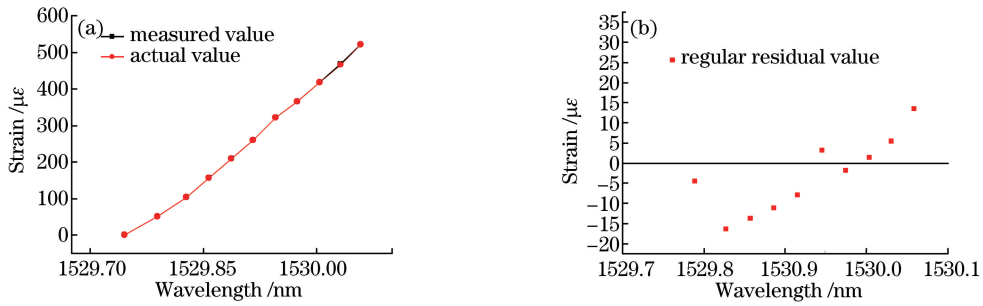


图 6 数据拟合结果。(a)应变与波长拟合结果;(b)测量应变值残差图

Fig. 6 Data fitting results. (a) Results of strain and wavelength fitting; (b) regular residual of measured strain value

从图 6(a)可以看出,应变片测量值与传感器测量的值在图中几乎重合,在 origin 软件中对波长值与传感器应变测量值拟合可知,线性度约为 0.9993。由图 6(b)可知,平均残差值约为 $10 \mu\epsilon$,在这一实验量程范围内,满量程精度约为 0.1%。由以上结果可知,装置的线性度与精度很高,有很大的应用价值。

4 结 论

研制了一种双环减敏型 FBG 应变传感器。通过仿真与实验结果可知,传感器在对应变的健康监测中测量准确性与可靠性极高,FBG 作为传感单元固定在中间平板结构的中间,使环形平面弹簧结构承担整个结构的大部分应变,对光栅和平板结构进行减敏,即可实现大应变测量。当基底材料确定时,传感器的量程与平面双环结构和传感器的长度等有关。并且采用了贴片式封装,使传感器的尺寸大大减小。传感器的缩小,意味着传感器本身对监测对象的影响变小,并且其被意外破坏的可能性减小,长期稳定性和寿命提高。光纤光栅的减少以及结构的简化,使其成本降低,便于大面积应用,可以很好地应用在结构监测等领域。

参 考 文 献

- [1] Alwis L S M, Bustamante H, Roth B, *et al.* Evaluation of the durability and performance of FBG-based sensors for monitoring moisture in an aggressive gaseous waste sewer environment [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3380-3386.
- [2] Tan H Y, Zhu W X, Zhang H L, *et al.* Manufacturing and performance analysis of intelligent steel strand embedded with prepressure large scale fiber Bragg grating sensor [J]. *Chinese Journal of*

Lasers, 2017, 44(4): 0410001.

覃荷瑛, 朱万旭, 张贺丽, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0410001.

- [3] Li Y, Feng Y, Peng X, *et al.* Simultaneous measurement of the temperature and force using a steel cantilever soldered with a partially nickel coated in-fiber Bragg grating [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(21): 4275-4279.
- [4] Li T, Tan Y, Xue H, *et al.* Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation [J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 218.
- [5] Yang Y Q, Yang Q, Ge W, *et al.* Temperature compensated GMM-FBG current sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 34(10): 2377-2383.
杨玉强, 杨群, 葛伟, 等. 温度自动补偿超磁致伸缩材料布拉格光栅光纤电流传感器 [J]. *光学精密工程*, 2016, 34(10): 2377-2383.
- [6] Zhao Y, Yu C, Liao Y. Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure (or displacement) measurement [J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, 36(1): 39-42.
- [7] Chen H, Yan G, Zhuang W, *et al.* Study on pre-packaged and sensing characteristics of fiber grating strain sensors [J]. *Laser and Infrared*, 2016, 46(9): 1128-1132.
陈昊, 闫光, 庄炜, 等. 光纤光栅应变传感器预紧封装及传感特性研究 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(9): 1128-1132.
- [8] Tan H Y, Huo T T, Zhu W X. Desensitization effect of helix-slant composite technology on fiber Bragg grating sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030601.
覃荷瑛, 霍婷婷, 朱万旭. 螺旋倾斜复合技术对光纤

- 布拉格光栅传感器的减敏作用[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030601.
- [9] Nan Q M, Wu H Y, Li S. A method for metallization encapsulation of fiber Bragg grating vibration sensors [J]. Transactions of China, 2016, 37(2): 17-20.
南秋明, 吴皓莹, 李盛. 一种光纤光栅振动传感器的金属化封装方法 [J]. 焊接学报, 2016, 37(2): 17-20.
- [10] Pang D D, Sui Q M, Jiang M S. New fiber Bragg grating high temperature sensing network based on diffraction demodulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(11): 1105005.
庞丹丹, 隋青美, 姜明顺. 基于衍射解调的新型光纤光栅高温传感网络 [J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1105005.
- [11] Shen H W, Zhu P Y, Xu P S, *et al.* Strain transfer factor analysis of basal grooving encapsulating fiber Bragg grating sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(2): 96-99.
申昊文, 朱萍玉, 许沛胜, 等. 基底刻槽封装式光纤光栅传感器应变传递影响因素分析 [J]. 仪表技术与传感器, 2015(2): 96-99.
- [12] Quan W W, Kang J, Yang L, *et al.* Young's modulus measurement of metal beams based on fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 040604.
全文文, 康娟, 阳丽, 等. 基于光纤布拉格光栅的金属梁杨氏模量的测量 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 040604.
- [13] Shu D L. Mechanical properties of engineering materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016: 60-200.
束德林. 工程材料力学性能 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 60-200.
- [14] Ansari F, Yuan L. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4): 385-394.