激光写光电子学进展

回形结构光纤布拉格光栅应变传感器的优化与测试

但丁谊1,丁克勤2*,舒安庆1

¹武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205; ²中国特种设备检测研究院,北京 100029

摘要 光纤布拉格光栅应变传感器在封装时往往需要引入基体层,基体层的结构会影响传感器对待测结构应变监测的 准确性。为了得到更优的基体层结构,通过有限元仿真计算,以回形结构基体层传感器的四个尺寸参量(回形结构到中 截面的距离、中截面宽度、槽宽、槽深)为变量,探究了各尺寸参量对应变敏感的影响。对结构优化后的传感器进行制作 和测试,并对未知参数进行标定,得到传感器的灵敏度、精度和有效测量范围。将该传感器与标准的电阻应变传感器进 行对比,并给出了后续的优化方案。

关键词 传感器;光纤光学;传感器优化;有限元仿真 中图分类号 TN253 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1728002

Optimization and Test of Fiber Bragg Grating Strain Sensor with Loop Structure

Dan Dingyi¹, Ding Keqin^{2*}, Shu Anqing¹

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China; ²China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China

Abstract A matrix layer is often used in the packaging of fiber Bragg grating strain sensors, and the matrix layer' structure influences the accuracy of the sensor's strain monitoring of the structure to be measured. In this study, to obtain a better base layer structure, four-dimension parameters (distance from the loop structure to the middle section, middle section's width, and depth of the groove) are taken as the sensor variables to investigate the effect of dimension parameters on strain sensitivity using finite element simulation. The structure-optimized sensor is built, tested, and the unknown parameters are calibrated to determine the sensor's sensitivity, precision, and effective measurement range. The sensor is compared with a standard resistance strain sensor, and the subsequent optimization scheme is given.

Key words sensors; fiber optics; sensor optimization; finite element simulation

1引言

光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器具有体积 小、质量轻、耐腐蚀、灵敏度高等特点^[1-3],但裸光纤的 抗剪能力较差,易脆断,应用于结构健康监测时,往 往需对其进行封装处理。基体封装式FBG传感器常 见的基体层形状有矩形^[4]、工字形^[5]、改良工字形^[6]、 回形^[7]等,基体层的结构会影响传感器对待测结构应 变监测的准确性,因此,需对传感器基体层进行结构 设计。

传感器结构设计的目的是使传感器对被测物理

量敏感^[8]。FBG应变传感器用于结构健康监测时, 被测物理量是应变,即需尽可能使FBG应变传感器 对待测结构产生的应变敏感。基体封装式FBG传感 器测量应变时,传感器的FBG通过粘接或焊接方式 与基体层连接。其中:粘接是通过环氧树脂、改性丙 烯酸酯等黏接剂将二者相连;焊接是将光纤表面通 过电镀或化学镀使其金属化,再通过加热钎或锡金 属焊料后将二者相连。FBG传感器安装到待测结构 上时,基体层通过点焊和封装与待测结构连接。具 体连接方式:在传感器背面用功率为50~100 W/s的 电容放电点焊机将FBG点焊到待测结构上,并通过

研究论文

收稿日期: 2021-07-22; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-09-24

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0805103)、国家自然科学基金(11772115)

通信作者: *m17611606831@163.com

涂覆层封装。待测结构产生的应变先传递到基体层 再传递到FBG,与FBG相连的解调仪可通过波长变 化反映应变状况,因此,要探究不同传感器对应变的 敏感程度,就需对比FBG段产生应变和待测结构实 际应变的关系。张煜熔等^[9-12]提出了菱形、"士"字 形、双锥形基体层结构,相较于传统传感器具有增 敏、温补性能以及抗干扰能力强等特性。张双全^[13] 对FBG传感器的封装结构进行了设计。袁子琳^[14]探 究了回形基体层结构传感器部分尺寸参量对应变敏 感的影响。

本文探究了回形基体层形状 FBG 传感器多个结构参数对传感器性能的影响。首先,对该结构进行了 优化设计,使其具有更好的应变敏感性。然后,对优化 后的传感器进行了制作,并通过实验测试,标定了位置 参数,得到了其灵敏度、精度和有效测量范围。最后, 将该传感器与标准的电阻应变传感器进行比较,分析 了其优缺点。

2 基体封装式光纤布拉格光栅传感器

FBG传感器在光纤段刻入光栅,待测结构有应 变产生时,应变会传递到FBG段,进而引起栅区变 形以及各条栅的相对位置发生变化,导致光纤中的 光信号发生变化。在FBG传感器中引入基体层,可 在恶劣环境中起到对FBG的保护作用。同时,通过 改变基体层结构,放大FBG段的局部变形,使其对 微小应变更敏感,从而提高传感器的灵敏度。回形 基体层结构的基体封装式FBG传感器包括基体层、 粘接层、FBG,其结构如图1所示。其中,FBG和金 属基体层通过黏接剂连接、固定后作为中间层,力与 应变通过待测结构先后传到基体层、粘接层和 FBG层。





第 59 卷 第 17 期/2022 年 9 月/激光与光电子学进展

3 光纤布拉格光栅应变传感器的尺寸 优化

对FBG传感器的结构尺寸进行优化,优化的结构 尺寸如图2所示。其中:L为回形结构到传感器中截面 的距离;D为中截面宽度;d为槽宽;h为槽深。采用有 限元仿真计算的方法,通过改变参量L、D、d、h的大 小,对比FBG段的平均应变和基体层的平均应变。按 照平均应变的定义^[15],提取FBG的伸长量和基体层的 伸长量,并得到二者的平均应变。采用的有限元仿真 软件为ANSYS WORKBENCH 19.2。



图2 FBG应变传感器的尺寸参量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dimension parameters of the FBG strain sensor

传感器的尺寸为36mm×8mm×1mm。粘接 层固定点之间的距离为17mm,两段黏接剂(材料为环 氧树脂)的尺寸为4.0mm×1.0mm×0.5mm,基体层 材料为304不锈钢,传感器的物理参数如表1所示。

对传感器进行建模和网格划分,传感器受到的载荷约束如图3所示。考虑到传感器在工作时的受力情况,对其基体层和光纤段施加位移约束,即限制x方向

表1 传感器的物理参数 Table 1 Physical parameters of the sensor

| Physical parameter | Value | | | |
|--|---------------------|--|--|--|
| Elastic modulus of FBG $E_{\rm f}$ /Pa | $7.2 	imes 10^{10}$ | | | |
| Poisson's ratio of FBG $\lambda_{\rm f}$ | 0.17 | | | |
| Radius of FBG $r_{\rm f}/{ m mm}$ | 0.0625 | | | |
| Height of bonding layer h_1 /mm | 0.5 | | | |
| Width of bonding layer D_1 /mm | 1 | | | |
| Length of bare FBG $L_{\rm f}/{ m mm}$ | 17 | | | |
| Elastic modulus of bonding layer $E_{\rm a}$ /Pa | $4 	imes 10^9$ | | | |
| Poisson's ratio of bonding layer λ_a | 0.34 | | | |
| Elastic modulus of matrix $E_{\rm m}$ /Pa | $1.94	imes10^{11}$ | | | |
| Poisson's ratio of matrix λ_m | 0.3 | | | |



图 3 传感器的网格划分及载荷分布 Fig. 3 Mesh division and load distribution of the senser

第 59卷 第 17 期/2022 年 9 月/激光与光电子学进展

和对应y方向的位移(使传感器仅能在光纤轴向产生 变形)。考虑到传感器的实际工作状况,对传感器基体 层施加沿FBG轴向拉伸的位移,大小随步长线性增 加。保持载荷约束方向不变,将位移大小变为3.6×10⁻⁵m,即基体层的平均应变为1000με,则FBG段和 基体层的变形分布如图4所示。





保持基体层平均应变为10με不变,改变参量L、 D、d、h,得到FBG段的平均应变变化如图5所示。可 以发现:当传感器回形结构到中截面距离L在3mm到 8mm之间以0.5mm的步长变化时,FBG段的平均应 变呈先增加后减小的趋势,从20.07με增加到20.28με 后再减小到19.77με,斜率逐渐减小,当L取5mm左右 时达到最大值,如图5(a)所示;当传感器基体层中截 面宽度在4mm到6mm以0.2mm的步长变化时,FBG 段的平均应变随基体层中截面宽度的增加而减小,从 19.76με减小到18με,近似呈线性减小,如图5(b)所 示;当传感器槽宽d在1mm到2mm之间以0.1mm的 步长变化时,FBG段的平均应变从19.77με增加到 20.23 με, 近似为线性增加, 如图 5(c) 所示; 当传感器的 槽深 h 在 0.2 mm 到 0.8 mm 之间以 0.1 mm 的步长变化 时, FBG 段的平均应变呈增加趋势, 从 19.45 με 增加到 19.88 με, 且增长率逐渐减小, 如图 5(d) 所示。

综上所述,FBG段的平均应变大于基体层的平均 应变:一方面是基体层中截面宽度尺寸减小,槽宽、槽 深尺寸增加时,FBG段附近的金属基体层截面积减 小,相较于基体层两端较为空洞,截面面积较小的 FBG受载荷作用的局部变形相对于整个基体层的平 均变形增大;另一方面,槽宽增加时,会使槽中粘接层 的宽和高增大,导致基体层到FBG的传递距离变长, 且各层材料弹性模量的不同也会导致传感器的应变传



图 5 不同参量对传感器应变灵敏度的影响。(a) *L*;(b) *D*;(c) *d*;(d) *h* Fig. 5 Influence of different parameters on the strain sensitivity of the sensor. (a) *L*; (b) *D*; (c) *d*; (d) *h*

第 59 卷 第 17 期/2022 年 9 月/激光与光电子学进展

研究论文

递有所损耗。传感器对应变的敏感受这两种作用效果 相反因素的影响,且前者的影响效果更大。

4 光纤布拉格光栅传感器的制作

根据优化传感器基体层的结构尺寸制作传感器。 使用的器件包括FBG、黏接剂、基体层、光纤加工工作 台、点胶机、空压机、黏接剂固化设备、光纤保护套、光 纤熔接机、FC/APC接头等。传感器的基体层如 图 6(a)所示。以基体层四个尺寸的有限元仿真结果 为依据,确定制作的传感器基体层尺寸,将回形结构到 中截面的距离L确定为5mm,中截面宽度D确定为 4mm,槽深h确定为0.8mm,传感器的长确定为 36 mm,宽确定为8 mm,高确定为1 mm。此外,槽宽 d 越宽,传感器的应变敏感性越好,但随着槽宽的增加, 光纤在槽中的位置偏差逐渐变大,因此,将槽宽 d 确定 为1 mm。基体层的材料为304不锈钢,通过光纤夹持 机构夹持 FBG,通过调节螺旋测微计调节光纤预应 力,如图 6(b)所示。调节升降台使 FBG 置于基体层槽 中央,用点胶系统将 FBG 和基体层通过黏接剂连接, 黏接剂为环氧树脂胶,如图 6(c)所示。固化后在基体 层两端的光纤外套上外径为0.9 mm的保护套,避免光 纤脆断。在两端纤尾处加工 FC/APC 接头,使光纤与 开发的 FBG 解调仪相连接,制作完成的 FBG 传感器 如图 6(d)所示。



图 6 FBG 传感器的制作。(a) 传感器的基体层;(b)加工光纤的工作台;(c)点胶系统;(d)制作完成的FBG 传感器 Fig. 6 Fabrication of the FBG sensor. (a) Matrix of the sensor; (b) workbench for processing optical fibers; (c) dispensing system; (d) fabricated fiber Bragg grating sensor

5 光纤布拉格光栅传感器的测试

对于制作完成的传感器,还需标定应变与波长变 化的关系,由于光纤存在温变效应,包含载荷变化引起 的应变和温度变化引起的应变。载荷变化引起的应变 可表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\left(\Delta \lambda / \lambda_0\right) \cdot 1 \times 10^6}{F_{\rm G}} - \boldsymbol{\varepsilon}_{\rm TO}, \qquad (1)$$

温度变化引起的应变可表示为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{TO}} = \Delta T \big(C_1 / F_{\mathrm{G}} + X_{\mathrm{CTE}} - C_2 \big), \qquad (2)$$

式中: F_{G} 为考虑传感器结构、材料的修正系数; C_{1} 为基体层材料热膨胀系数; C_{2} 为考虑待测结构热膨胀对传感器热膨胀影响的修正系数; ΔT 为温度变化量; X_{CTE} 为待测结构材料的热膨胀系数; $\Delta\lambda$ 为波长漂移量; λ_{0} 为初始中心波长。

材料的热膨胀系数 $C_1 = 1.5 \times 10^{-5}$ /°C, $X_{CTE} = 1.2 \times 10^{-5}$ /°C,将传感器安装到拉伸试样上并与标准的电阻应变片进行对比,结果如图7所示。将传感器与对应的应变采集仪和计算机软件系统相连接,分别对安装后的待测结构施加温度载荷和拉伸载荷,如图8所

第 59卷 第 17 期/2022 年 9 月/激光与光电子学进展



图 7 传感器的安装示意图 Fig. 7 Schematic diagram of the installation of the sensor



图 8 施加温度载荷与施加拉伸载荷的测试系统 Fig. 8 Test system with applied temperature load and applied tensile load

示。传感器 1~传感器 4 在温控实验和拉伸实验前的 初始波长 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 如表 2 所示。

| 表 | ŧ2 | 各传感器的初始波长 | |
|---------|-----|---------------------------------|----------|
| Table 2 | Ini | tial wavelengths of each sensor | unit: nm |

| λ_1 | λ_2 | λ_{3} | λ_4 |
|-------------|-------------|---------------|-------------|
| 1537.8838 | 1537.9940 | 1537.8546 | 1537.9982 |

无外力作用下,传感器波长随温度的变化如图9(a) 所示。无温度变化时,施加拉伸载荷下,波长随拉力的 变化如图9(b)所示。

拉伸实验材料为碳钢,中截面的宽D_s=20 mm,

厚度 $H_s = 5 \text{ mm}, E_s = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 。拉伸试样的中截 面应力 σ_s 和应变 ε_s 可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{s} = F/(D_{s}H_{s}) \\ \varepsilon_{s} = \sigma_{s}/E_{s} \end{cases}$$

$$(3)$$

由式(3)可计算拉伸试样中间段应变的理论解,结 合图 9(a)、图 9(b)的实验数据平均值计算的标定修正 系数 $F_{\rm G} = 1.02577$, $C_2 = 1.12767 \times 10^{-5}/\mathbb{C}$ 。继续增 大试样上的拉伸载荷,将传感器测试的应变和计算的 理论解以及标准电阻应变片测出的结果进行对比,得 到的载荷-应变曲线如图 10 所示。

由实验数据计算传感器的温度灵敏度系数 k1 和应 变灵敏度系数 k2,可表示为

$$\begin{cases} k_1 = \Delta \lambda / \Delta T \\ k_2 = \Delta \lambda / \Delta \varepsilon \end{cases}$$
(4)

计算得到, k_1 = 22.855 pm/C, k_2 = 1.5726 pm/με。 从图 10可以发现:制作的 FBG 传感器的有效应变范 围约为0~1125 με,该范围内待测结构所受的拉伸载 荷与 FBG 传感器测量的应变近似成线性,与电阻应变 传感器相比更贴合理论解;当应变在 1125~1500 με 之间时,传感器测得的应变值与理论解产生小幅偏差, 但该段的载荷-应变曲线依然近似成线性;当应变大于 1500 με后,曲线出现明显失真,不再成线性。相比标 准的电阻应变传感器,该FBG 传感器在较小应变范围 内,应变测量精度更高,且采样频率高,最大采样频率 可达1~3 Hz,而用电阻应变传感器测量应变时,最大



图 9 温控实验和拉伸实验的结果。(a)传感器波长随温度的变化;(b)传感器波长漂移随拉伸载荷的变化 Fig. 9 Results of temperature-controlled experiments and tensile experiments. (a) Sensor wavelength as a function of temperature; (b) sensor wavelength drift as a function of tensile load

第 59 卷 第 17 期/2022 年 9 月/激光与光电子学进展

2011, 30(8): 5-7, 11.





采样频率在0.2~0.3 Hz之间,有效应变测量范围小。 该传感器后续的优化中,可采用强度更高的粘接层材 料和封装方式提升其有效应变范围或采用高温胶作为 黏接剂提高其正常工作的环境温度范围。

6 结 论

研究论文

探究了回形基体层结构FBG应变传感器槽深、槽 宽、回形结构到中截面的距离、中截面宽度对应变敏感 性的影响。仿真结果表明:传感器对应变的敏感性随 槽深的增加而增加,且增幅逐渐减小;随槽宽的增加近 似成线性增加;随中截面宽度的增加近似成线性减小; 随回形结构到中截面距离的增加呈先增加后减小的趋 势。其中,影响效果最显著的参数是中截面宽度,其他 尺寸参量的影响相对较小。对结构优化后的传感器进 行了制作和实验测试,标定得到考虑传感器结构、材料 的修正系数F_G为1.02577,考虑待测结构热膨胀对传 感器热膨胀影响的修正系数 C_2 为 1.12767 × 10⁻⁵/°C, 传感器的温度灵敏度系数k1和应变灵敏度系数k2分别 为 22.855 pm/℃和1.5726 pm/με,传感器的有效应变测 量范围为0~1125με,相比标准的电阻应变传感器,其 监测采样频率较高,但可测试范围较小。之后还需继 续优化传感器的各层材料和封装方式及其可监测的应 变范围和工作环境温度范围。

参考文献

- [1] Huang H M, Yuan S F. Study on the spectral response of fiber Bragg grating sensor under non-uniform strain distribution in structural health monitoring[J]. Optoelectronics Letters, 2011, 7(2): 109-112.
- [2] Cusano A, Cutolo A, Nasser J, et al. Dynamic strain measurements by fibre Bragg grating sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2004, 110(1/2/3): 276-281.
- [3] 刘鹏飞,刘国军,王永杰,等.光纤光栅压力传感器增敏 技术发展评述[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(8): 5-7, 11.
 Liu P F, Liu G J, Wang Y J, et al. Review on development of fiber grating pressure sensor sensibilization technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies,

[4] 詹亚歌,蔡海文,耿建新,等.铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究[J].光子学报,2004,33(8):952-955.
Zhan Y G, Cai H W, Geng J X, et al. Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8): 952-955.

- [5] 申吴文,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.
 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.
- [6] 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.
 Yu X J, Yu Y L, Zhang M, et al. Study on the strain

and temperature densing characteristics of FBG packaged by the copper slice[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35 (9): 1325-1328.

- [7] 袁子琳,龚元,马耀远,等.光纤布喇格光栅应变传感器 结构优化研究[J].光子学报,2012,41(11):1261-1266.
 Yuan Z L, Gong Y, Ma Y Y, et al. Structure optimization of fiber Bragg grating strain sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1261-1266.
- [8] 孙丽,张春巍.结构健康监测光纤光栅传感系统理论与应用[M].北京:科学出版社,2020.
 Sun L, Zhang C W. Theory and application of fiber Bragg grating sensing system for structural health monitoring[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [9] 张煜熔,廖秋雨,董昭达,等.光纤布喇格光栅菱形结构应变传感器[J].激光技术,2021,45(6):799-805.
 Zhang Y R, Liao Q Y, Dong Z D, et al. Fiber Bragg grating rhombic strain sensor[J]. Laser Technology, 2021, 45(6):799-805.
- [10] 魏莉,余玲玲,姜达州,等.基于膜片与菱形结构的光 纤布拉格光栅加速度传感器[J].中国激光,2019,46(9): 0910003.
 Wei L, Yu L L, Jiang D Z, et al. Fiber Bragg grating

accelerometer based on diaphragm and diamond structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0910003.

[11] 赵洪霞,程培红,丁志群,等.双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量[J].中国激光,2016,43(10): 1010005.

Zhao H X, Cheng P H, Ding Z Q, et al. Simultaneous measurement of temperature, refractive index and liquid level based on biconical fiber gratings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010005.

[12] 魏莉,刘壮,李恒春,等.基于"士"字形梁增敏结构的 光纤光栅振动传感器[J].光学学报,2019,39(11): 1106004.

WeiL, LiuZ, LiH C, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on sensitive structure for "±"-shaped beam [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106004.

[13] 张双全.高温光纤光栅传感器封装结构设计与试验验证[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018:45-49.

Zhang S Q. Packaging structure design and experimental verification of high temperature fiber grating sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 45-49.

[14] 袁子琳.高灵敏度光纤布拉格光栅应变传感器研究[D]. 成都:电子科技大学,2013:22-29.

Yuan Z L. Study on high sensitivity fiber Bragg grating

第 59 卷 第 17 期/2022 年 9 月/激光与光电子学进展

strain sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 22-29.

[15] 刘鸿文. 材料力学-I[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2004.

Liu H W. Mechanics of materials-I[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2004.