

引用本文: 张媛媛, 李瑞亚, 黄俊, 等. 基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器. 光通信技术, 2025, 49(2): 1-6.

基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器

张媛媛¹, 李瑞亚^{1*}, 黄俊², 魏莉¹, 谭跃刚¹

(1. 武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 信息工程学院, 武汉 430070)

摘要: 为了满足不同场合的应变测量需求, 提出了一种基于圆环结构的灵敏度系数可调光纤光栅(FBG)应变传感器。通过调节弹性基片上圆环的几何参数来实现灵敏度的灵活调控, 同时利用温度补偿 FBG 消除环境温度变化对测量结果的干扰。建立了传感器的理论模型, 并研制出一种减敏型 FBG 应变传感器, 通过有限元仿真和实验验证了该传感器的测量性能。实验结果表明: 该传感器在 $\pm 3\ 000\ \mu\epsilon$ 量程范围内的灵敏度为 $0.49\ \text{pm}/\mu\epsilon$, 线性相关系数达到 0.99 以上; 同时, 其重复性误差为 0.68%, 迟滞误差为 2.96%, 显示出良好的稳定性和可靠性。

关键词: 光纤传感; 光纤光栅; 应变传感器; 灵敏度; 温度补偿

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)02-0001-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Sensitivity adjustable fiber Bragg grating strain sensor based on circular ring structure

ZHANG Yuanyuan¹, LI Ruiya^{1*}, HUANG Jun², WEI Li¹, TAN Yuegang¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to meet the strain measurement needs of different occasions, a sensitivity coefficient adjustable fiber Bragg grating (FBG) strain sensor based on circular ring structure is proposed. By adjusting the geometric parameters of the annulus on an elastic substrate, flexible regulation of sensitivity is achieved. At the same time, temperature-compensated FBG is utilized to eliminate the interference of environmental temperature changes on the measurement results. A theoretical model of the sensor has been established, and a desensitized FBG strain sensor is developed. The measurement performance of this sensor is verified through finite element simulation and experiments. The experimental results show that the sensitivity of the sensor within the range of $\pm 3\ 000\ \mu\epsilon$ is $0.49\ \text{pm}/\mu\epsilon$, and the linear correlation coefficient is above 0.99. Meanwhile, its repeatability error is 0.68% and hysteresis error is 2.96%, demonstrating good stability and reliability.

Key words: optical fiber sensing, fiber Bragg grating, strain sensor, sensitivity, temperature compensation

0 引言

应变测量在结构健康监测领域具有重要意义, 它

能够反映机械装备的健康状态, 评估结构的安全性与可靠性, 在航空航天、建筑结构、生物医学等领域有着较为广泛的应用^[1-3]。

光纤光栅传感器以其抗电磁干扰、远距离数据传输能力强、便于安装、长期稳定等优越特性, 在应变传感领域备受青睐^[4-5]。然而, 光纤光栅本身所能承受的长期应变测量量程有限, 在一些大型结构构件的测量中, 其量程不能满足要求^[6]; 而在一些高精度测量中, 其灵敏度又不足以检测这种小幅度应变。基于上述问题, 何俊等人^[7]提出了一种灵敏度系数可调的光纤光栅应变传感器设计方法, 并研制出 2 种封装结构的灵

收稿日期: 2024-07-17。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51475343)资助。

作者简介: 张媛媛(2001—), 女, 硕士研究生, 现就读于武汉理工大学机电工程学院机械工程专业, 主要研究方向为光纤传感、机械装备状态监测与故障诊断等, 参与了国家自然科学基金项目, 负责光纤光栅应变传感器的研制工作。

*** 通信作者:** 李瑞亚(1988—), 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为光纤传感、机械装备状态监测与故障诊断。



张媛媛, 李瑞亚, 黄俊, 等: 基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器

敏度系数可调应变传感器,通过实验验证了该传感器的良好性能。此外,还有一些学者通过改进光纤光栅的封装工艺、设计光纤光栅传感器的机械结构等方式对光栅段进行增敏或减敏处理,从而调节光纤光栅应变传感器的灵敏度^[8-9]。LIU M Y 等人^[10]采用柔性铰桥位移放大结构,设计了一种高灵敏度的光纤布喇格光栅(FBG)应变传感器,该传感器的应变灵敏度约为裸光纤光栅的 10 倍左右,可用于精确测量机械结构表面的应变,但该结构加工复杂,不适合批量生产。李忠玉等人^[11]设计了一种具有新型增敏结构的基片式封装结构,其应变灵敏度是一般封装结构的 3.4 倍。为提高基片式封装的光纤光栅应变灵敏度提供了一种新思路,但该传感器仍具有一定的局限性,无法灵活应对不同的工程需求。GUO Y 等人^[12]提出了一种三维双环应变传感器的设计方法,通过设计 3 个不同方向的单臂双环减敏型 FBG 应变传感器,不仅能够实现减敏,还可以精确确定二维应变的最大应变值和方向,但该结构安装困难,不适用于工程实际。覃荷瑛等人^[13-14]以钢绞线中心丝为载体,研究螺旋倾斜式复合技术,有效解决了 FBG 应变传感器量程较小的问题,但这种方法对待测界面的结构形式要求较高,且其线性度和精度仍有待提高。

针对现有光纤光栅应变传感器存在的问题,本文提出一种基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器。

1 基本传感原理

光纤光栅本质上对应变和温度的变化都很敏感,其波长的漂移 $\Delta\lambda_B$ 与温度变化量 ΔT 和应变变化量 $\Delta\varepsilon_{\text{FBG}}$ 的关系如式(1)所示。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1-p_e)\Delta\varepsilon_{\text{FBG}} + (\alpha_t + \xi)\Delta T \quad (1)$$

其中, λ_B 为光纤光栅中心波长; p_e 为光纤芯的有效弹光系数, $p_e = n_{\text{eff}}^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] / 2$, n_{eff} 为纤芯有效折射率, p_{11} 和 p_{12} 为弹光系数, ν 为光纤纤芯材料泊松比; α_t 和 ξ 分别为光纤芯的热膨胀系数和热光系数。

由于裸光纤光栅对温度和应变都表现出交叉敏感性,因此在应变和温度同时变化的情况下,难以区分由这 2 个变量各自引起的波长位移,在测量一个物理量时,往往会受到另一个物理量的干扰。因此,在进行纯应变测量时,必须对 FBG 波长上的温度变化进行适当的补偿,以确保测量结果的准确性。

1.1 传感器结构

基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器的结构如图 1 所示。该传感器主要由 2 根 FBG 和 1 个总长为 108.5 mm 的圆环式弹性基片所组成。FBG₁ 的两端通过粘合剂固定在中间的大圆环上,而 FBG₂ 则直接粘贴在左侧的固定端平板上。为了进一步保证应变传递的效果,在粘贴前,栅区及其两侧的涂覆层均被去除。该传感器的两侧分别设有 2 个 M3 规格的螺纹通孔,间距为 85.5 mm,便于固定安装。

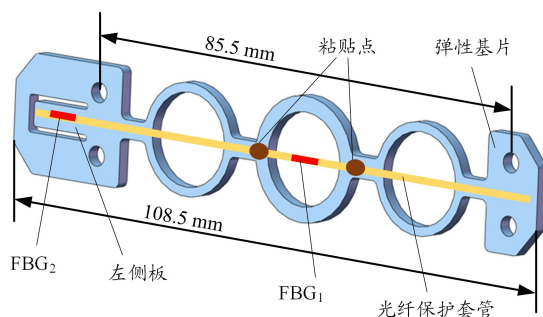


图 1 基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器结构图

由于 FBG₁ 悬空粘贴于中间的大圆环上,避免了直接粘贴时可能带来的应变传递损失。因此,它测量到的应变即为 2 个粘贴点之间的实际应变。当该传感器的两端通过螺丝固定在待测物体上时,物体的形变会通过固定端传递给圆环结构,导致中间的圆环产生形变,并进而引起 FBG₁ 的波长变化。相反,左侧板未发生形变,因此不会受到应变的影响。这意味着此处粘贴的 FBG₂ 仅受温度变化的影响,可用于温度补偿。为了有效区分承担不同功能的光纤光栅,在封装过程中,本文选用具有一定波长间隔的 2 根 FBG。

1.2 增减敏原理

传感器的灵敏度主要由圆环结构和传感器的长度比例关系所决定。图 2 为传感器结构的减敏原理图。假设光纤光栅与弹性基片之间的应变传递为刚性连接,当该传感器结构受到外力 F 作用时,其中间大圆环结构具有刚度 K_1 和长度 L_1 ,在受力后其长度变化量为 ΔL_1 ;两侧结构的刚度为 K_2 ,长度为 L_2 ,受力后长

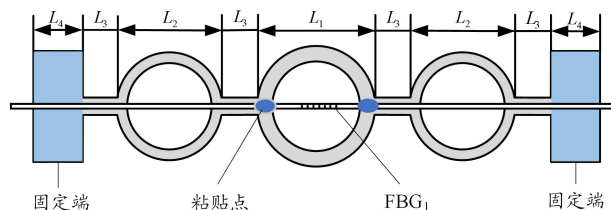


图 2 传感器结构的减敏原理图

度变化量为 ΔL_2 ; 而连接段处刚度为 K_3 , 长度为 L_3 , 受力后长度变化量为 ΔL_3 ; 两端平板结构的刚度为 K_4 , 受力后长度变化量为 ΔL_4 。由材料力学可得

$$F = K_1 \Delta L_1 = K_2 \Delta L_2 = K_3 \Delta L_3 = K_4 \Delta L_4 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta L_2}{\Delta L_1} = \frac{K_1}{K_2} \\ \frac{\Delta L_3}{\Delta L_1} = \frac{K_1}{K_3} \\ \frac{\Delta L_4}{\Delta L_1} = \frac{K_1}{K_4} \end{cases} \quad (3)$$

ε_{FBG} 为 FBG 的轴向应变, ε_e 为整个基底的应变, 则

$$\varepsilon_{\text{FBG}} = \frac{\Delta L_1}{L_1} \quad (4)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta L_1 + 2\Delta L_2 + 4\Delta L_3 + 2\Delta L_4}{L_1 + 2L_2 + 4L_3 + 2L_4} \quad (5)$$

定义灵敏度系数 K , 联立式(4)、式(5)可得

$$\begin{aligned} K = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{\text{FBG}}} &= \frac{\Delta L_1 + 2\Delta L_2 + 4\Delta L_3 + 2\Delta L_4}{L_1 + 2L_2 + 4L_3 + 2L_4} \times \frac{L_1}{\Delta L_1} \\ &= \frac{1 + 2\frac{K_1}{K_2} + 4\frac{K_1}{K_3} + 2\frac{K_1}{K_4}}{1 + 2\frac{L_2}{L_1} + 4\frac{L_3}{L_1} + 2\frac{L_4}{L_1}} \end{aligned} \quad (6)$$

当 $K > 1$ 时, 可实现光纤光栅应变测量的减敏, K 越大则减敏效果越好; 当 $K < 1$ 时, 可实现光纤光栅应变测量的增敏, K 越小则增敏效果越好。

为了更精准地控制传感器的灵敏度, 对灵敏度系数公式进一步化简。

由材料力学可知, 圆环结构的刚度和两侧结构的刚度^[15]可表示为

$$K_1 = \frac{2E(R_1 - R_2)^3 d}{\left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi}\right) 3(R_1 + R_2)^3} \quad (7)$$

$$K_2 = \frac{2E(r_1 - r_2)^3 d}{\left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi}\right) 3(r_1 + r_2)^3} \quad (8)$$

其中, E 为材料的弹性刚度, R_1 和 R_2 分别为中间圆环的外径和内径, r_1 和 r_2 分别为两侧圆环的外径和内径, d 为传感器厚度 ($d=1$ mm)。

由于连接段与固定端的刚度对该传感器的灵敏度影响不大, 可预设连接段长度 L_3 为 5 mm, 宽度为 2 mm; 固定端长度为 L_4 为 4.75 mm, 宽度为 19 mm; A 为横截面积, 连接段的刚度 K_3 与首尾固定端的刚度

K_4 为

$$K_3 = \frac{EA}{L_3} = 8 \times 10^7 \quad (9)$$

$$K_4 = \frac{EA}{L_4} = 8 \times 10^8 \quad (10)$$

灵敏度系数 K 可最终化简为

$$\begin{aligned} K = & \frac{1 + 2\frac{(R_1 - R_2)^3 (r_1 + r_2)^3}{(R_1 + R_2)^3 (r_1 - r_2)^3}}{(R_1 + 2r_1 + 2L_3 + L_4)/R_1} + \\ & \frac{(16\pi E(R_1 - R_2)^3 d)}{3(\pi^2 - 8)(R_1 + R_2)^3 K_3} \frac{d}{(R_1 + 2r_1 + 2L_3 + L_4)/R_1} + \\ & \frac{8\pi E(R_1 - R_2)^3 d}{3(\pi^2 - 8)(R_1 + R_2)^3 K_4} \frac{d}{(R_1 + 2r_1 + 2L_3 + L_4)/R_1} \end{aligned} \quad (11)$$

灵敏度 K 与 R_1 、 R_2 、 r_1 、 r_2 的关系如图 3 所示。可以看出, 灵敏度 K 随着 R_1 和 r_2 的增大而增大, 随着 R_2 和 r_1 的减小而减小。因此, 当弹性基片的材料确定后, 传感器的灵敏度系数仅与圆环结构的尺寸参数有关, 通过调节圆环结构的尺寸参数, 可以精确调整传感器的灵敏度, 以适应不同场合的应变测量需求。

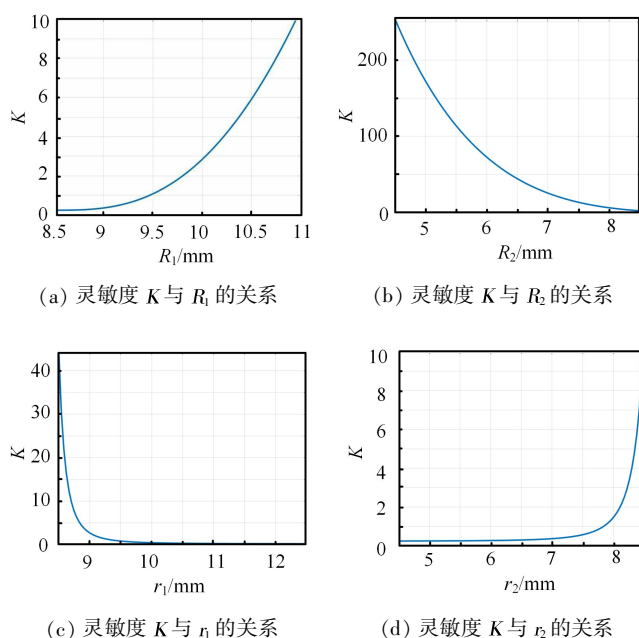


图 3 灵敏度 K 与 R_1 、 R_2 、 r_1 、 r_2 的关系

2 有限元仿真分析

基于上述分析, 本文设计了一种基于圆环结构的

张媛媛,李瑞亚,黄俊,等:基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器

减敏型光纤光栅应变传感器,并通过理论计算得出该传感器的灵敏度系数 K 为 2.61。为了验证这一结果的准确性,本文建立了该传感器的三维模型,并使用有限元软件对结构进行了仿真分析。

在进行网格划分时,考虑到该基片的厚度为 1 mm,因此将单元尺寸设置为 0.3 mm,以确保在厚度方向上有超过 3 层的网格,这有助于提升仿真结果的精度。为了模拟基片在外部应变作用下的性能,本文将结构左侧的螺纹孔固定,并向右侧螺纹孔的侧壁施加沿轴向的力。在相同的受力条件下,可以通过仿真软件检测由此产生的位移变化量,从而计算出不同结构的具体应变值。由仿真结果可知,传感器的变形情况是均匀稳定的,其中弹性基片产生的最大应力集中在圆环与连接段的过渡区域。由于光栅段的位移近似等于中间大圆环处的位移,因此可以通过仿真数据确定光栅处的应变 ε_{FBG} 和传感器产生的总应变 ε ,从而计算出传感器的灵敏度系数 K 为 2.48。仿真分析的结果与理论计算高度吻合,误差仅为 4.98%。

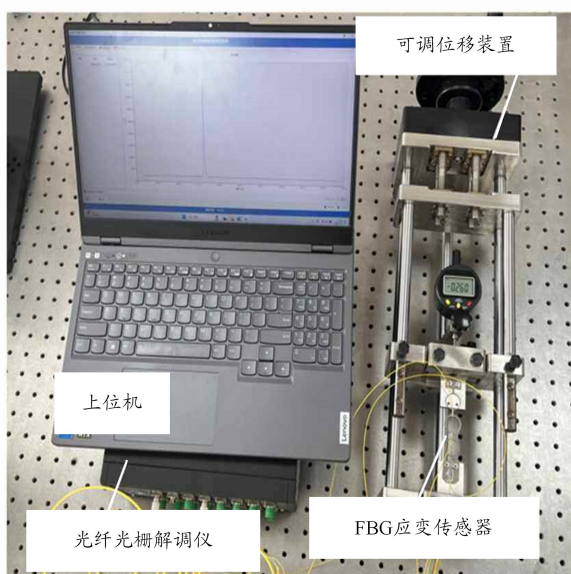
3 实验测试

3.1 应变灵敏度标定

在实验过程中,本文通过旋转调节旋钮来控制传感器发生轴向形变。当光纤光栅被拉伸时产生正应变,而被压缩时则产生负应变,所有这些变化均呈现线性关系。由于实验持续时间较短,可以假设室温保持恒定。施加于光纤光栅应变传感器上的应变从 $-3\ 000\ \mu\varepsilon$ 变化至 $3\ 000\ \mu\varepsilon$, 选定 $500\ \mu\varepsilon$ 作为标定间隔。在每一个加载或卸载步骤中,都记录了光纤光栅解调仪的测试数据,并进行了 3 组正反行程实验,以验证所设计的光纤光栅应变传感器的可重复性和稳定性。

实验装置实物图和传感器实物图如图 4 和图 5 所示。实验开始前,将减敏型 FBG 应变传感器的两端通过 M3 内六角螺钉固定在可调位移装置上。通过调节两侧的拉伸力来改变传感器结构的应变,并同时利用光纤光栅解调仪监测光纤光栅的波长变化。施加于 FBG 应变传感器上的位移值通过高精度数显千分表实时显示,并记录下来转换成应变值。光纤光栅解调仪输出的波长数据经由网线传输到上位机进行存储。最后,对采集到的光纤光栅波长值与相应的应变值进行线性分析,从而得到波长与应变之间的函数关系式。

2 根 FBG 波长与应变的关系图如图 6 所示。可以看出,在 3 次反复实验中,应变传感器中的 FBG_1 的波



(a) 实验台实物图



(b) 数显千分表实物图

图 4 实验装置实物示意图

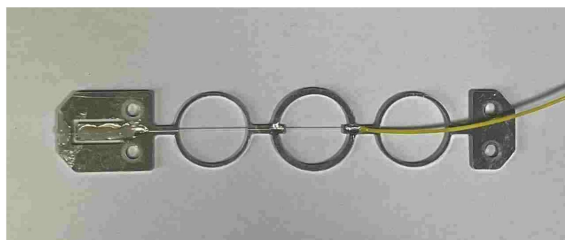


图 5 光纤光栅应变传感器实物图

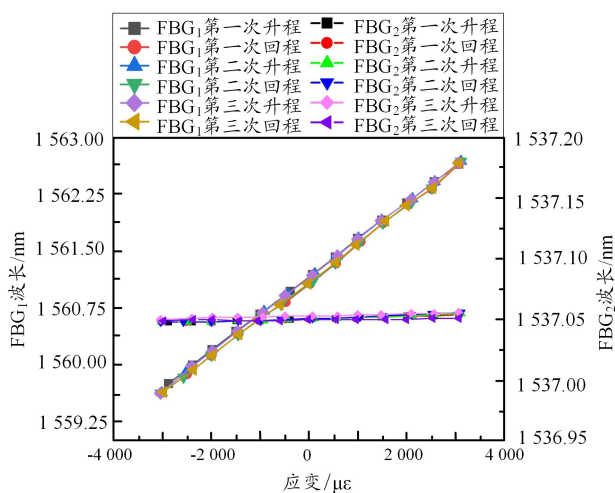


图6 2根FBG波长与应变的关系图

长值随应变呈线性变化。经计算可得, FBG_1 的线性相关系数为 0.99, 重复性误差为 0.68%, 迟滞误差为 2.96%, 表明其线性度和重复性良好。而 FBG_2 在实验过程中不受应变影响, 波长值基本保持不变。

2 根 FBG 波长与应变的线性拟合曲线如图 7 所示。通过计算可知, FBG_1 的应变灵敏度 $K_{\varepsilon_1} = 0.49 \text{ pm}/\mu\varepsilon$, 而 FBG_2 并未受到应变的影响, 其应变灵敏度 K_{ε_2} 近似为 $0 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ 。因此, 该传感器的整体应变灵敏度为 $0.49 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ 。与裸光纤光栅相比, 该传感器的灵敏度降低了约 2.44 倍。实验结果与理论计算的误差为 6.51%, 与仿真分析的误差为 1.61%。在封装过程中, 由于使用了粘合剂, 可能会造成一定的应变损失, 这也会导致实验结果出现一定的误差。尽管如此, 通过标定实验测量得到的灵敏度与理论计算及仿真分析的结果仍然较为吻合, 表明该传感器具有较高的可靠性和准确性。

为了评估传感器的稳定性, 需要了解其在实际应用中的性能变化。在稳定性测试中, 传感器被施加

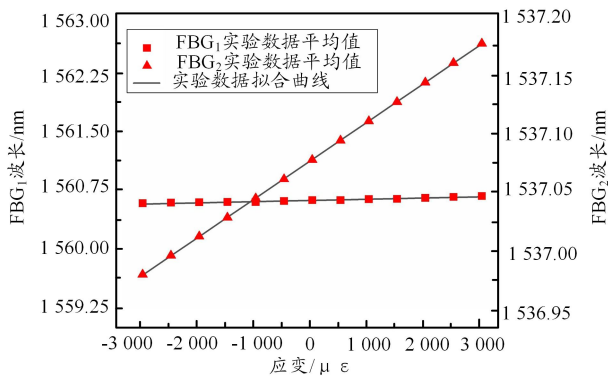


图7 2根FBG波长与应变的线性拟合曲线

$2500 \mu\varepsilon$ 的应变并保持 30 min, 同时对 FBG_1 的波长进行连续采集。位移变化情况如图 8 所示。可以看出, 在 30 min 内, 传感器的波长波动较小, 表明其具有良好的稳定性。

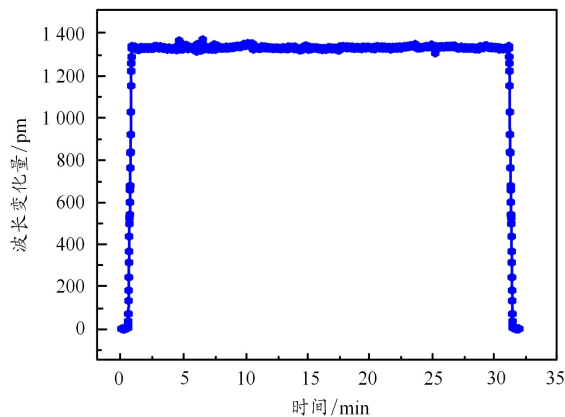


图8 位移变化测试结果

3.2 温度标定实验

为了研究新研制的传感器在不同温度环境下检测应变时的温度传感性能, 本文将该应变传感器置于温控箱中, 并测试其波长随温度升高而产生的变化。实验装置如图 9 所示。

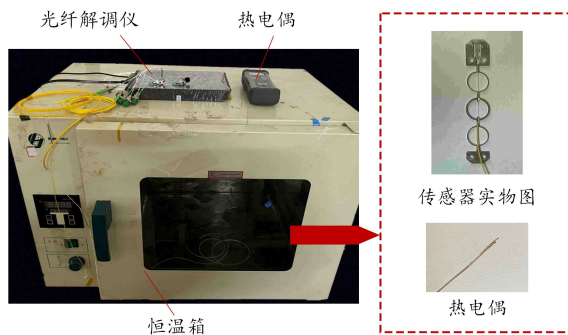


图9 温度补偿实验图

由于温控箱内部空间较大, 为了更准确地检测应变传感器附近的温度, 并避免因内部温度场不均匀而导致的测量误差, 本文同时将热电偶与应变传感器置于温控箱内。实验中, 以 20°C 为一个梯度, 将温控箱的温度分别设定为 25°C 、 45°C 、 65°C 、 85°C 、 105°C 、 125°C , 并在每个设定温度下保温 30 min。在每个温度点, 记录热电偶测得的温度值以及解调仪上的波长值, 并使用数据处理软件对实验数据进行分析。实验过程中, 热电偶检测到的 FBG 应变传感器附近的实际温度分别为 20.5°C 、 39.8°C 、 58.6°C 、 76.0°C 、 99.1°C 、 116.6°C 。由于温控箱内部空间较大, 热电偶检测到的温度可能与温控箱设定的温度存在差异。为了更准确地监测应变传感器附近的温度,

张媛媛, 李瑞亚, 黄俊, 等: 基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器

避免因内部温度场不均匀导致的测量误差, 在实验中本文依据热电偶测量得到的温度数据进行分析。

所设计的应变传感器中 2 根 FBG 的波长随温度的变化曲线如图 10 所示。可以看出, 当周围温度升高时, 应变传感器上的 2 根 FBG 将同时受到温度和应变的影响, 其波长会随着温度和应变的变化而发生漂移, FBG₁ 和 FBG₂ 的位移由式(12)可得。

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_1} \\ \Delta\lambda_{B_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{B_1} \\ \lambda_{B_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_{T_1}} \\ \Delta\lambda_{B_{T_2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon_1} & K_{T_1} \\ K_{\varepsilon_2} & K_{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, $\Delta\lambda_{B_1}$ 、 $\Delta\lambda_{B_2}$ 分别为 FBG₁ 和 FBG₂ 波长的位移, K_{T_1} 、 K_{T_2} 分别为 FBG₁ 和 FBG₂ 的温度灵敏度。根据上述标定实验计算可知, $K_{T_1}=16.41 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $K_{T_2}=17 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

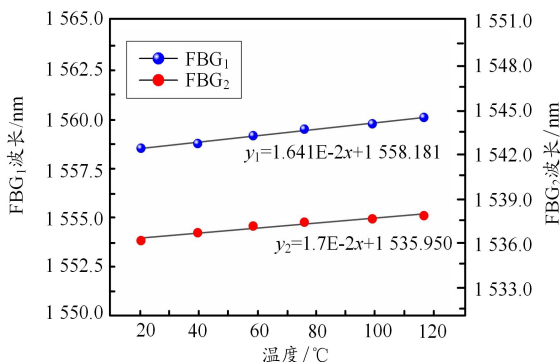


图 10 温度补偿实验结果图

由此可得, 通过检测 2 根 FBG 波长的差值就能得到被测物体的应变和温度, 具体结果由式(13)可得

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{\varepsilon_1}K_{T_2} - K_{\varepsilon_2}K_{T_1}} \begin{bmatrix} K_{T_2} & -K_{T_1} \\ -K_{\varepsilon_2} & K_{\varepsilon_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B_1} \\ \Delta\lambda_{B_2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $K_{\varepsilon_1}K_{T_2} \neq K_{\varepsilon_2}K_{T_1}$ 。

因此, 该传感器可以利用温度补偿 FBG 消除环境温度变化对测量结果的干扰, 实现更高精度和更为稳定的测量。

4 结束语

本文提出了一种基于圆环结构的灵敏度可调光纤光栅应变传感器。通过改变圆环结构的几何参数, 实现了灵敏度系数的有效调节, 并研制了一种减敏型 FBG 应变传感器。通过有限元法仿真分析和标定实验, 验证了其良好的工作性能与测量精度。实验结果表明: 该传感器的应变灵敏度为 $0.49 \text{ pm}/\mu\varepsilon$, 与裸光纤光栅相比降低了约 2.44 倍, 从而有效提高了传感器的监测量程。实验结果与理论计算及仿真结果均较为吻

合。该传感器具有体积小、抗电磁干扰、能消除环境温度变化对测量结果干扰等优点, 在多个领域具有广泛的应用前景。此外, 它还具有很高的稳定性和重复性, 保证了重复监测和长期监测的可靠性。这种传感器结构简单、便于安装且自带温补, 能有效应用于工程实际中, 满足不同场合的应变测量需求。在未来, 该传感器的性能还有一定的提升空间。例如, 可通过选择弹性模量更大的胶水、改用焊接式安装等方法, 进一步提升应变传递效率; 通过调整圆环结构的尺寸比例, 进一步扩展应变传感器的量程。因此, 该传感器的出现有望为结构健康监测和大应变测量提供新的技术路径和解决方案。

参考文献:

- [1] 宋庭新, 黎晶丽. 基于光纤光栅应变监测的风机叶片损伤识别及预警[J]. 机床与液压, 2024, 52(2): 209-215.
- [2] 谢帅, 张海涛, 霍幸莉, 等. 基于连杆应变测量的起落架舱门结构健康监测[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 50-54.
- [3] 梁晨, 刘爱春, 范良龙, 等. 基于 FBG 的钻孔应变传感器研制[J]. 光子. 激光, 2017, 28(10): 1055-1060.
- [4] CAI L, TAN Y G, LI T L. Application of interpolation algorithm in plate structure detection based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. IEICE Electron Express, 2015, 12(8): 0271-0271.
- [5] MIHAILOV S J. Fiber Bragg grating sensors for Harsh environments[J]. Sensors, 2012, 12(2): 1898-1918.
- [6] 徐潇宇, 朱星盈, 肖少庆. 应用低温等离子体技术的多环减敏型 FBG 应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070602-1-070602-6.
- [7] 何俊, 周智, 董惠娟, 等. 灵敏度系数可调布拉格光栅应变传感器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2339-2346.
- [8] LI L T, ZHANG D S, LIU H, et al. Design of an enhanced sensitivity FBG strain sensor and application in highway bridge engineering[J]. 光子传感器(英文版), 2014, 4(2): 162-167.
- [9] GUO Y X, KONG J Y, LIU H H, et al. Design and investigation of a reusable surface-mounted optical fiber Bragg grating strain sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8456-8462.
- [10] LIU M Y, WANG W Z, SONG H, et al. A high sensitivity FBG strain sensor based on flexible hinge[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1931-1-1931-11.
- [11] 李忠玉, 张志勇, 张信普, 等. 基片式光纤光栅应变传感器增敏结构研究[J]. 光通信技术, 2018, 42(6): 21-24.
- [12] GUO Y, ZHU X Y, NI Y, et al. Design of three-direction strain sensor with big measurement range for structural health monitoring[J]. Optical Engineering, 2018, 57(6): 067104-1-067104-7.
- [13] 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): 216-223.
- [14] 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): 83-87.
- [15] 刘鸿文. 材料力学 II [M]. 6 版, 北京: 高等教育出版社, 2004.