

基于温度补偿的光纤光栅传感器制作及性能研究

顾佳祺, 田石柱

(苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215000)

摘要: 考虑到光纤光栅在测量时存在的应变与温度交叉敏感问题, 分别研制了基于光纤光栅应变、温度两种传感器, 在剔除温度产生的波长漂移后, 可得到光纤光栅应变的单独变化, 解决了传统光纤布拉格光栅传感器设计结构复杂、无法温度补偿等问题。通过应力拉伸测试与水浴试验, 探究了传感器的应变传感能力以及温度传感特性。实验结果表明: 光纤光栅应变传感器的灵敏系数为 $0.95 \text{ pm}/\mu\text{e}$, 与理论应变灵敏度系数偏差仅为 2.05% ; 在 $20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内, 温度传感器的灵敏度达到 $20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 左右, 相较于未封装的裸光纤光栅, 提高了 2.2 倍之多。与温度补偿前的灵敏度系数比较, 补偿后的系数明显提高, 有效实现了温度补偿的目标, 为土木工程领域的应变监测提供了更可靠依据。

关键词: 光纤光栅传感器; 交叉敏感; 温度补偿

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)06-0080-05

光纤布拉格光栅具备抵御电磁干扰的能力、优秀的耐腐蚀性、体积小、重量轻, 以及支持多路信号复用的特点, 这些特质使其成为在严苛环境下进行持续监测的理想选择^[1-3]。

光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG) 中心波长发生漂移时, 光纤光栅传感器既受到应变响应也会受到温度的影响, 使在解析光栅耦合波长位移时, 难以单独辨识出应变与温度的独立效应^[4-6]。因此, 有必要解决温度与应变交叉敏感带来的影响从而减少光纤光栅应变传感器使用时的误差。

自光纤光栅技术首次亮相以来, 交叉敏感性问题已引起全球研究者的广泛关注, 激发了一系列深入探讨。针对这一挑战, 研究界普遍采取了两种策略: 一是在测量过程中实施即时温度补偿, 旨在实时校正温度变化对测量结果的干扰; 二是在测量后进行数据分析, 通过后处理手段对温度影响进行修正, 从而恢复应变的准确读数。尚秋峰和刘峰^[7]提出粒子群优化结合滑动窗口极限学习机的在线预测法对光纤光栅传感器受环境温度影响引起的波长漂移进行温度补偿, 预测精度平均提升了 11.04% , 具有良好的温度补偿效果; 王霞等^[8]依据电缆与附件的界面压力和电缆附件安全运行的相关性, 基于光纤光栅传感机理、纯弯曲数学模型、厚

壁圆筒模型制备了光纤光栅温度补偿曲率传感器; 李宏涛等^[9]利用飞秒激光直写技术制备了微纳光纤布拉格传感器与微纳小长周期光纤光栅级联的温度补偿高灵敏度光纤光栅传感器; 陈振威等^[10]设计并制作了一种基于弹簧与滑块相结合的结构简单且高精度光纤布拉格光栅位移传感器, 结果表明, 采用石英玻璃作为衬底制成的传感器温度灵敏度为 $6.34 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 有望用于机械装备和土木工程高精度结构位移的在线监测。

总体而言, 在研制光纤光栅传感器时融入测量过程中的即时温度补偿方法会使制作流程变得更为烦琐。相比之下, 测量后的结果补偿即在数据采集后通过特定算法对测量值进行后处理, 以此剔除温度影响, 这种方法在操作层面显得更为简便, 也更利于广泛普及与应用。比如, 参考光栅法将在光纤光栅应变传感器所处的环境中放置一个光纤光栅温度传感器来剔除温度产生的效应影响^[11]。因此, 本文针对 FBG 传感器存在的应变与温度交叉敏感问题, 研制了两种传感器分别测量构件的应变与温度以剔除温度产生的波长漂移的影响, 并通过应变计标定架的应力拉伸测试与水浴试验, 分别探究了光纤光栅应变传感器的应变传感能力以及温度传感器的温度传感特性。

收稿日期: 2024-10-07

作者简介: 顾佳祺(1999—), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向为桥梁健康监测; 田石柱(1962—), 男, 河北黄骅人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为桥梁健康监测。

1 光纤光栅的应变与温度测量原理

当一束光照射到具有周期结构的材料上(光栅)时,由于周期结构对光的发射具有波长选择性,当光波波长满足布拉格条件时则成为布拉格波长,可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ_B 为光纤布拉格光栅的波长; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期。 λ_B 发生的漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与应变和温度的关系为

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon\Delta\epsilon + K_T\Delta T \quad (2)$$

式中: K_ϵ 为轴向应力作用下的应变灵敏度; K_T 为温度灵敏系数; $\Delta\epsilon$ 为光纤光栅的应变变化量; ΔT 为温度所产生的变化量。

实际的工程测量中,只要将温度产生的波长漂移剔除就能得到光纤光栅的应变变化,因此本文基于光栅法,制作了只对温度敏感的光纤光栅温度传感器。此传感器与对应变、温度都敏感的光纤光栅应变传感器形成对照组,通过对比分析剔除温度因素,有效实现了温度补偿的目标,确保了应变测量的准确性与可靠性。

2 光纤光栅传感器封装工艺

选用直径 2 mm,长 101 mm 的不锈钢管作为保护套管,将光纤光栅两端尾纤切割擦拭后放置备用。封装时将环氧树脂 A、B 胶按 1:1 的比例混合均匀。

封装后的光纤光栅温度传感器主体如图 1 所示,为了确保传感器的稳固安装,首先将两端与钢绞线内护套熔接的尾纤小心地引入预先准备的钢管套管内,以防光纤熔接点断裂,并在钢管的末端紧密固定。随后,采用粗规格的热缩管包裹住钢管与钢绞线的结合部位,通过加热处理促使热缩管紧密贴合钢管表面,形成牢固的黏结界面。此外,位于不锈钢管内的光纤光栅不受外界应力的作用,确保其始终处于自由状态。

应变传感器的封装主体与温度传感器工艺类似,先将光纤光栅两端与内护套熔接的尾纤穿入钢管,在钢管的一端点涂 AB 胶并固定在钢管上,与温度传感器不同,另一端需施加一定应力使光纤处于受力状态并涂 A、B 胶固定。封装后的传感器如图 2 所示。

3 不锈钢管封装光纤光栅的应变与温度传感特性

3.1 不锈钢管封装光纤光栅的应变传感特性

针对光纤光栅传感器的应变标定,实验室通常

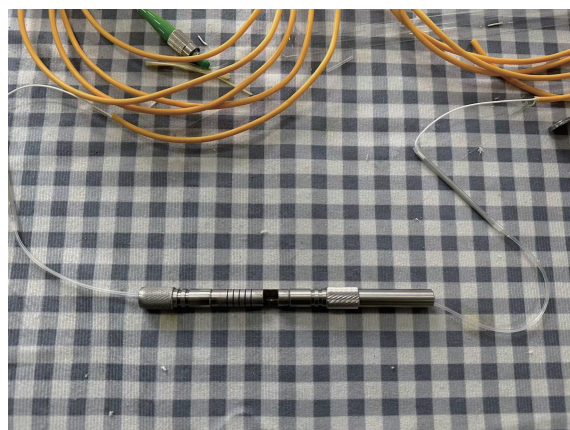


图 1 光纤光栅温度传感器封装主体



图 2 光纤光栅应变传感器封装实物图

会使用等强度梁或者拉伸试验机。当钢管发生弯曲变形时,由于不锈钢管封装的传感器钢管直径较厚,会对等强度梁标定结果产生影响;拉伸试验机应力较大,容易将钢管直接拉断。考虑到以上因素,针对光纤光栅的标定采用测试钢管只处于受拉状态没有弯曲变形的应变计标定架。如图 3 所示,将传感器放置标定架凹槽处,用夹具将传感器两端压紧后使用膨胀螺丝固定锁死,在标定架上配置百分表读数。标定前先将传感器放置在标定架上,测量两个锚固端的距离 L 。轻轻转动标定架的轮盘使丝杠移动,不锈钢管应变传感器发生形变,此时记录百分表读数即移动距离 ΔL ,并通过式 $\Delta L/L$ 求出相应的应变。通过不断读取光纤光栅解调仪测得的光纤光栅中心波长的数据,并用 MATLAB 拟合中心波长随拉力变化的数据曲线,实现对该传感器的标定。

光纤光栅传感器的应变灵敏度系数 K_ϵ 的计算公式为

$$K_\epsilon = (1 - P_\epsilon)\lambda_B \quad (4)$$

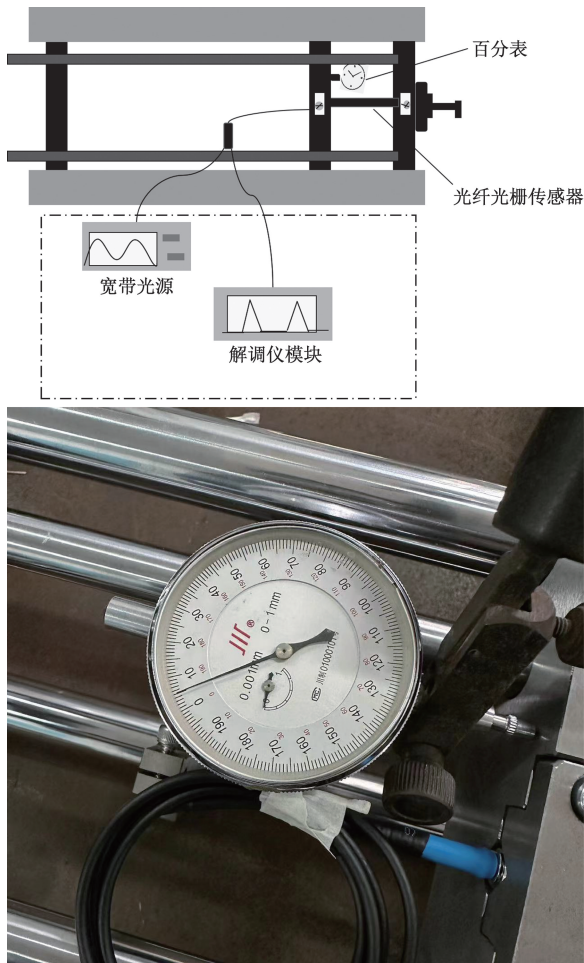


图 3 光纤光栅应变传感器的标定与实物读数

对于一般的石英硅光栅,有效光弹系数 P_e 为 0.216,已经实际测得光纤光栅应变传感器 FBG1 和 FBG2 的初始波长分别为 1 541.014、1 562.016 nm (表 1),由式(4)可得光纤光栅传感器的理论应变灵敏度系数。

图 4 为封装的光纤光栅应变传感器的应变响应拟合曲线,封装后 FBG 传感器的灵敏度系数分别为 0.95 pm/ε 和 0.96 pm/ε,与理论应变灵敏度系数偏差分别为 2.05% 和 2.24%。同时封装后光纤光栅传感器所呈现出良好的线性拟合度保证了实际测量中应变数据的高精度采集,提高了工程应用的可靠性与准确性。

表 1 光纤光栅应变灵敏度对比

应变传感器编号	FBG1	FBG2
初始波长/nm	1 541.014	1 562.016
理论应变灵敏度系数/(pm·ε ⁻¹)	1.208	1.225
实测应变灵敏度系数/(pm·ε ⁻¹)	0.96	0.95
误差/%	2.05	2.24

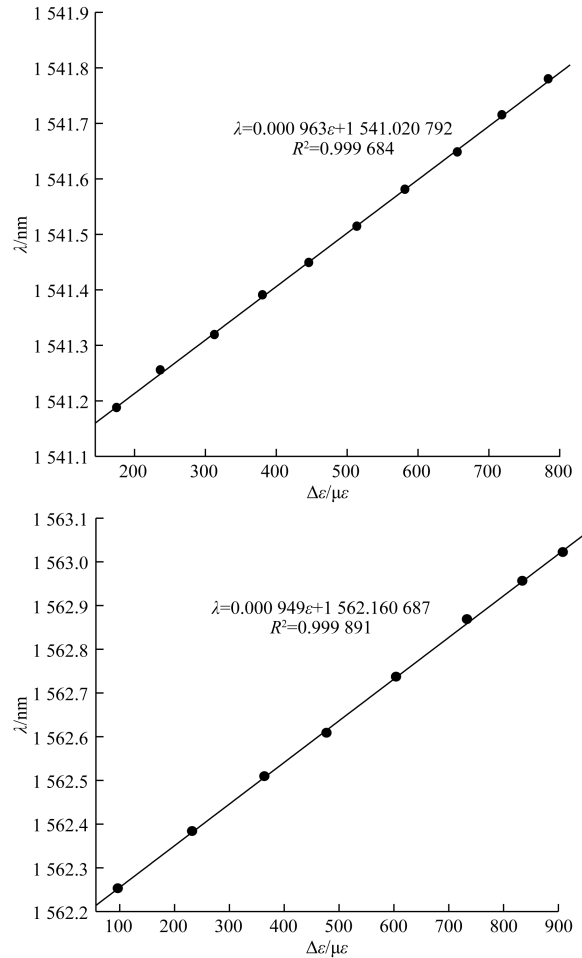


图 4 光纤 Bragg 光栅应变传感器的响应拟合曲线

3.2 不锈钢管封装光纤光栅的温度传感特性

水浴法能使封装后的光纤光栅均匀地响应温度变化,因此采用水浴法对光纤光栅传感器进行温度传感特性研究。将封装后的光纤光栅温度传感器 FBG3、FBG4 及 FBG5 (其中心波长分别为 1 546.527 nm、1 540.383 nm 及 1 561.012 nm)与光纤光栅应变传感器 FBG1 (其中心波长为 1 541.014 nm)置于大容量沸水烧杯的中心区域,以确保光纤光栅不与烧杯壁发生接触。标定时,在紧邻光纤光栅的水域内放置一支高精度的水银温度计,随着容器内初始温度约为 70 °C 的热水缓慢而持续地降温至 20 °C,将降低 2~3 °C 作为一个温度分段,到达预定的温度点时,快速地记录当下 FBG 中心波长的变化。最后取采集数据的平均值,从而提高数据的准确性和可靠性。

以光纤光栅中心波长变化值作为 y 轴,光纤光栅温度变化值为 x 轴,通过 MATLAB 将 FBG3、FBG4 和 FBG5 试验数据进行线性拟合,其拟合直线的斜率为 FBG 的温度灵敏度 K_T ,从而得到封装

后光纤光栅温度传感器的温度响应拟合曲线。

图 5 为光纤光栅温度传感器在降温过程中温度与波长变化的响应拟合曲线,由 FBG3、FBG4 与 FBG5 的波长和温度的线性拟合方程 $y = 0.022832x + 1540.577563$ 、 $y = 0.019405x + 1546.743672$ 、 $y = 0.020500x + 1561.061763$ 可知,封装后的传感器平均温度灵敏度为 $0.0209 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,较裸光纤光栅的温度灵敏度系数 $0.0095 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 增长了 $0.0103 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,约为封装前的 2.2 倍。并且封装后的 FBG 线性相关系数均达到了 99.9% 以上,具有很好的重复性,这表明封装后传感器温度与波长均保持着相当高的线性相关度,确保了光纤光栅传感器在高温环境的长期监测中能够保持稳定的温度监控能力,预示着其在实际应用领域中具备广阔的前景与显著的潜力。

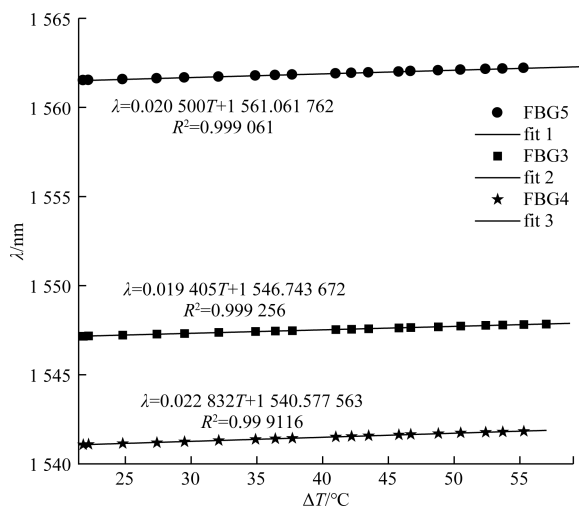


图 5 光纤 Bragg 光栅温度传感器的响应拟合曲线

3.3 不锈钢管封装光纤光栅温度补偿

进行光纤光栅的应变及温度传感器特性实验后,将 FBG1(中心波长为 1541.014 nm 的光纤光栅应变传感器)作为测量光栅,FBG3(中心波长为 1546.527 nm 的光纤光栅温度传感器)作为温度补偿光栅。图 4 为根据实验结果绘出的 FBG1 中心波长与应变的响应拟合曲线。图 6 为 FBG1 经过温度传感特性实验后中心波长与温度的响应拟合曲线与 FBG3 的温度响应拟合曲线。

从图 6 可以看出,实验中所用的两个传感器在材料构成与制造工艺上均保持了高度的一致性,这一特性在温度响应曲线上得到了直观的体现,具体表现为两条直线斜率几乎一致,说明两个传感器的温度灵敏度系数几乎相同。因此在实际的工程测量中,光纤光栅应变传感器不受应力作用时,可以

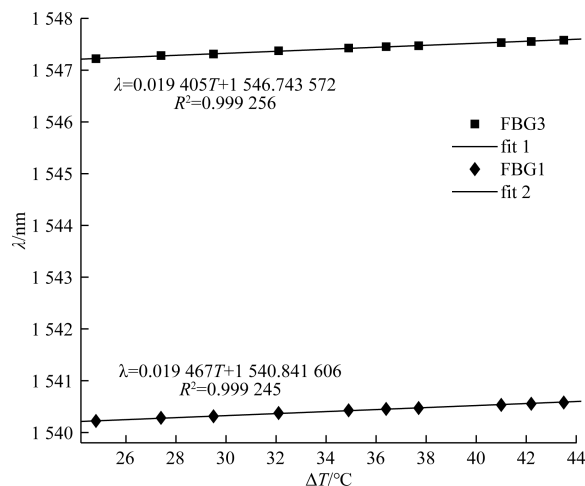


图 6 光纤 Bragg 光栅温度响应曲线

将光纤光栅应变传感器替代温度传感器进行测量。基于此,本文通过 FBG3(光纤光栅温度传感器)对 FBG1(光纤光栅应变传感器)进行温度补偿。

设在相同的温度变化下,测量点温度与应变共同产生变化时,可用式(5)表示:

$$\Delta\lambda_{B_1} = \epsilon K_\epsilon + K_T \Delta T \quad (5)$$

从式(5)可以看出,应变和温度分别对中心波长产生漂移,光纤光栅的波长变化分别为

$$\Delta\lambda_{B_1} = \alpha_{\epsilon_1} \epsilon + \alpha_{T_1} \Delta T \quad (6)$$

$$\Delta\lambda_{B_2} = \alpha_{T_2} \Delta T \quad (7)$$

由式(6)和式(7)推导出

$$\epsilon = \frac{\Delta\lambda_{B_1} - \psi \Delta\lambda_{B_2}}{\alpha_{\epsilon_1}} \quad (8)$$

式中: $\psi = \frac{\alpha_{T_1}}{\alpha_{T_2}}$ 。

如式(8)所示,同样的温度条件下,只要剔除应变传感器由温度引起的波长漂移,就能单独得到受轴向力引起的波长漂移。因此可以使用一个光纤光栅温度传感器对同一温度场的其他光纤光栅应变传感器进行温度补偿。

当温度和应力同时变化时,测量 FBG1(中心波长为 1541.014 nm)和 FBG3(中心波长为 1546.527 nm)的波长漂移,绘出曲线(图 7)。由图 7 可知,补偿前的传感器应变灵敏度系数为 $0.95 \text{ pm}/\mu\epsilon$,补偿后的为 $2.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$,较补偿前提高了 2.3 倍。因此可以看出,光纤光栅传感器分别测出应变和温度之后再行温度补偿,基本上可以消除环境温度变化对布拉格波长漂移量的影响,且能提高传感器的灵敏度系数。

4 结论

本文基于光栅温度补偿问题分别制作了不锈钢管封装的光纤光栅应变与温度传感器,通过应力

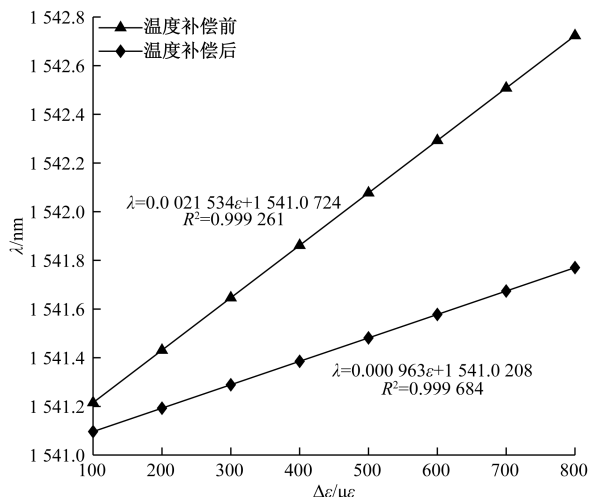


图 7 光纤 Bragg 光栅温度补偿曲线

拉伸测试得到温度补偿前的光纤光栅应变传感器的灵敏系数为 $0.95 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，与理论应变灵敏度系数偏差仅为 2.05% ，分析试验数据得到回归曲线的拟合程度良好；在 $20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 进行水浴试验，温度传感器的灵敏度达到 $20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 左右，相较于未封装的裸光纤光栅，提高了 2.2 倍之多；通过计算得到补偿后的为 $2.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，较补偿前提高了 2.3 倍。结果表明，传感器具有良好的实用性和线性度、低成本、结构简单等优点，且该温度补偿方法可行，有望在桥梁的健康监测应变精准测量中发挥重要的作用。

参考文献

- [1] AZHARI A, LIANG R, TOYSERKANI E. A novel fibre bragg grating sensor packaging design for ultra-high temperaturesensing in harsh environments[J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(7): 075104.
- [2] 薛渊泽, 王学锋, 唐才杰, 等. 高温再生光纤光栅温度传感器封装技术[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(5): 49-51.

- [3] QU Y, WANG W, PENG J, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on metalized optical fiber grating for marine temperature monitoring[C]//International Conference on Optical Communications & Networks. Wuzhen, Zhejiang, China: IEEE, 2017: 1-3.
- [4] AN J, WANG Y J, LI F, et al. Highly sensitive LPG temperature sensor employing polyamic acid-coating[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8): 0822002.
- [5] 戎丹丹, 张钰民, 杨润涛, 等. 全金属化应变不敏 FBG 温度传感器特性研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(9): 1133-1138.
- [6] REDDY P S, SHANKAR M S, KISHORE P, et al. Encapsulated fiber bragg grating sensor for high temperature measurements[J]. Optical Engineering, 2011, 50(11): 114401.
- [7] 尚秋峰, 刘峰. 基于 PSO-SWELM 的应变传感器在线温度补偿方法[J]. 半导体光电, 2022, 43(6): 1168-1172.
- [8] 王霞, 樊卓杨, 吴超, 等. 双光纤温度补偿法测量高温下电缆与附件界面压力的方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3072-3081.
- [9] 李宏韬, 刘雨轩, 王伟胜, 等. 基于飞秒激光微加工的温度补偿型高灵敏度光纤光栅传感器的实验教学研究[J]. 大学物理实验, 2024, 37(4): 58-62.
- [10] 陈振威, 陈焕权, 史雯慧, 等. 具有温度补偿的高精度 FBG 微位移传感器的设计、制作及性能研究[J]. 光子学报, 2021, 50(9): 124-132.
- [11] 王雅莉, 徒芸, 涂善东, 等. 基于光纤光栅传感器温度补偿的低温应变测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2023(6): 26-33.
- [12] 贾俊峰, 侯智献, 王蕾, 等. 光纤光栅传感器研发及其在土木工程中的应用进展[J]. 防灾科技学院学报, 2024, 26(3): 9-21.
- [13] 甘望, 王华强, 谢忱, 等. 光纤光栅管式封装工艺研究[J]. 光学仪器, 2016, 38(6): 544-548.
- [14] 任越, 张钰民, 钟国舜, 等. 管式光纤光栅高温传感器封装及温度特性[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 598-601.

Research on the Fabrication and Performance of Fiber Bragg Grating Sensors Based on Temperature Compensation

GU Jiaqi, TIAN Shizhu

(Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, Jiangsu, China)

Abstract: Considering the cross sensitivity of strain and temperature in fiber Bragg grating measurement, two types of sensors based on fiber Bragg grating strain and temperature were developed. After removing wavelength drift caused by temperature, the individual changes in fiber Bragg grating strain can be obtained, which solves the problems of complex design structure and inability to compensate for temperature in traditional fiber Bragg grating sensors. The strain sensing capability and temperature sensing characteristics of the sensor were investigated through stress tensile testing and water bath testing. The experimental results show that the sensitivity coefficient of the fiber Bragg grating strain sensor is $0.95 \text{ pm}/\mu\epsilon$, with a deviation of only 2.05% from the theoretical strain sensitivity coefficient; In the range of $20\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$, the sensitivity of the temperature sensor reaches around $20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, which is 2.2 times higher than that of unpackaged bare fiber Bragg gratings. Compared with the sensitivity coefficient before temperature compensation, the coefficient after compensation is significantly improved, effectively achieving the goal of temperature compensation and providing a more reliable basis for strain monitoring in the field of civil engineering.

Keywords: grating sensor; cross sensitivity; temperature compensation