

文章编号 1004-924X(2026)15-2389-09

高灵敏度双向测量光纤光栅位移传感器及其在 隧道变形监测中的应用

周泽林¹, 郑 勇^{1,2*}, 姜兴良^{3,4,5}, 吴 澎^{3,5}, 梁俊松¹

(1. 中国十九冶集团有限公司, 四川 成都 610031;

2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

4. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100;

5. 中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007)

摘要:为准确识别结构位移动态变化的幅值与方向, 本文提出一种基于凸台-凹槽结构增强等强度梁应变响应的高灵敏度光纤光栅位移传感器, 并系统完成了测量原理、结构设计、温度补偿及样机性能验证。实验结果表明, 该传感器具备双向位移感知能力, 在 ± 60 mm 量程内, 传感器灵敏度为 63.446 pm/mm, 综合测量精度为 0.145 9 mm, 且在稳定性、重复性、迟滞、温度适应性及抗蠕变性能方面表现良好。现场应用结果表明, 3 个传感器在某市地铁隧道支护管片变形监测中运行稳定, 可有效获取结构变形信息, 适用于土木与机械工程领域的双向位移精确监测。

关键词: 光纤光栅; 位移传感器; 增敏型等强度梁; 双向测量; 高灵敏度

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263415.2389

CSTR: 32169.14.OPE.20263415.2389

High-sensitivity bidirectional measurement FBG displacement sensor and its application in tunnel deformation monitoring

ZHOU Zelin¹, ZHENG Yong^{1,2*}, JIANG Xingliang^{3,4,5}, WU Peng^{3,5}, LIANG Junsong¹

(1. China 19th Metallurgical Corporation, Chengdu 610031, China;

2. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

4. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

5. CCCC Group Inland Waterway Transportation Construction Technology R&D Center,
Beijing 100007, China)

* Corresponding author, E-mail: zhengyong@cqjtu.edu.cn

Abstract: To accurately capture the amplitude and direction of dynamic structural displacement variations, a high-sensitivity fiber Bragg grating (FBG) displacement sensor based on a boss - groove structure

收稿日期: 2026-04-10; **修订日期:** 2026-05-15.

基金项目: 2024 年中国中冶重大研发资助项目 (No. ZGZY-ZDYF-SJY-2024-01); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2023YFB2604700)

is proposed to enhance the strain response of a uniform-strength beam. The sensor provides bidirectional displacement sensing capability. Its measurement principle, structural design, temperature compensation method, and prototype performance evaluation were systematically investigated. Experimental results show that, over a measurement range of ± 60 mm, the sensor achieves a sensitivity of 63.446 pm/mm and a comprehensive measurement accuracy of 0.145 9 mm, while exhibiting favorable stability, repeatability, hysteresis performance, temperature adaptability, and creep resistance. Field application results further indicate that three deployed sensors operated stably and effectively captured structural deformation information for support segments in a subway tunnel in a certain city. The proposed sensor is therefore suitable for precise bidirectional displacement monitoring in civil and mechanical engineering applications.

Key words: fiber Bragg grating (FBG); displacement sensor; sensitized equal strength beam; bidirectional measurement; high-sensitivity

1 引言

位移是工程结构健康监测的关键参数,广泛应用于桥梁、隧道、边坡等大型土木基础设施^[1]及机械设备^[2]的形变、沉降与稳定性评估。传统位移传感器(如电阻式、电容式、电磁感应式)虽具有一定实用性,但存在测量范围有限、灵敏度较低、在潮湿、强电磁、腐蚀性等复杂环境中易老化、长期可靠性与耐久性差与自动化程度低等问题,极大制约了其在智能监测领域的应用前景。

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器具有高灵敏度、抗电磁干扰、无源、环境要求低、可远距离及长期在线监测和复用能力强等优势,在位移/倾斜监测中广泛应用^[3-4]。Sanada等^[5]利用FBG技术开发多点位移传感器,用于岩体行为监测。Zhang等^[6]基于悬臂梁提出可测量程FBG位移传感器,利用对称FBG波长变化测位移,结构简单且温度自补偿,但外加驱动电压引入非线性误差,需优化解调精度。Guo等^[7]设计楔形滑块与等强度梁结合的FBG位移传感器,减小滑动摩擦,将梁的挠度转换为波长漂移,量程为100 mm,灵敏度为20.11 pm/mm,精度为0.995 0% F. S.,抗蠕变性和重复性好。Tan等^[8]制作弓形FBG微位移传感器,粘贴于弓形结构上下表面,实现微位移测量与温度解耦,灵敏度达2.02 pm/ μ m,重复性误差为4.08%,但结构稳定性差、易损坏且不适用于动态测量。Lyu等^[9]提出基于三角形放大原理的椭圆形FBG位移传感器,位移放大两倍,量程为0~100 mm,

线性度好,灵敏度为6.10 pm/mm,但灵敏度偏低、尺寸较大。Li等^[10]开发弹簧式高精度位移传感器,灵敏度为18.14 pm/mm,量程较大但不可双向测量且精度低。以上FBG位移传感器多限于单方向测量且灵敏度不高,而对于双向位移测量的研究较少。Guo等^[11]基于双等强度梁与双FBG,开发可测正负位移且温度补偿的传感器,量程为 ± 50 mm,灵敏度为29.37 pm/mm,结构稳定,但量程短、灵敏度低。Wu等^[12]设计差分式双向FBG微位移传感器,采用滑块对平行双FBG施加预应力,量程为0~0.5 mm,灵敏度高达1 518.60 pm/mm且温度自补偿,但量程过小,限制工程应用。Li等^[13]为监测地铁浮置板,设计垂直布设双FBG的双向温度自补偿位移传感器,量程为0~20 mm,灵敏度为164.20 pm/mm,静态性能良好并验证了应用有效性。前述双向测量研究虽可实现正、负向位移探测,但仍难以兼顾灵敏度与量程,尚未突破“大量程下保持高灵敏度”的结构设计瓶颈。因此,研发面向工程结构的大量程、高灵敏度、双向测量FBG位移传感器具有重要意义。

针对上述不足,本文研发了一种基于凸台-凹槽增强等强度梁的高灵敏度双向测量FBG位移传感器。该传感器结合双悬臂等强度梁与楔形体结构,实现双向位移感知与温度补偿。建立了光信号与位移的理论模型,并系统测试其灵敏度、重复性、迟滞性、温度稳定性、长期蠕变可靠性和测量精度。地铁隧道管片收敛变形监测应用表明,该传感器性能稳定,具有良好的工程应用前景。

基于上述 SESM, 本文研发了一种高灵敏度双向测量 FBG 位移传感器, 如图 2 所示。传感器由保护单元和传感单元组成: 保护单元采用轻质耐腐蚀铝合金外壳与顶盖; 传感单元包括 SESM、滑块、导轨、位移探杆、弹簧和 FBG。SESM 等强度梁采用铍铜材料, 弹性模量为 125 GPa, 泊松比为 0.3; FBG 直径为 125 μm , 弹性模量为 72 GPa, 经预拉伸后粘贴, 并通过光固化胶精确控制固化过程, 以避免附加应力。前期数值仿真表明, 凸台增高可增大 FBG 至中性轴距离, 但高度超过 0.8 mm 后增敏效果趋于饱和; 开槽加深可显著提高 FBG 应变, 其中槽深 0.2 mm 时应变较未开槽结构提高 778.34%, 但过深易引发应力集中。综合增敏效果、结构可靠性与加工可行性, 确定 SESM 参数为: 开槽深度 $d=0.2\text{ mm}$ 。

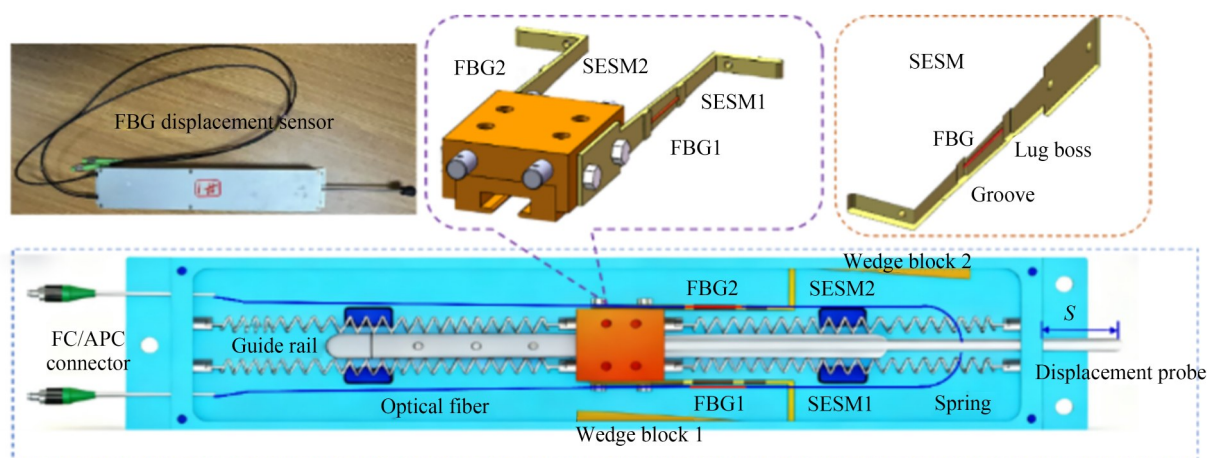


图 2 光纤光栅位移传感器结构

Fig. 2 Structure of FBG displacement sensor

凸台高度 $c=0.4\text{ mm}$ 、厚度 $2b=1.0\text{ mm}$ 。两个 SESM 分别固定于滑块两侧,凸台间粘贴预拉伸 FBG,形成相互独立、互为参照的双测量单元,实现温度自补偿并提高测量可靠性。传感器量程设计为 $\pm 60\text{ mm}$,外壳尺寸为 $324\text{ mm}\times 61\text{ mm}\times 21.5\text{ mm}$,整体体积在双向位移传感器中较小。为优化机械传动性能,SESM 自由端接头采用光滑弧面设计,以保证其与楔形体顺畅接触;滑块与导轨间设置导槽,确保滑块稳定自由滑动;滑块两端配置弹簧,用于复位、限位并提升结构稳定性。

本文研发的 FBG 位移传感器可实现拉、压双向位移测量,两方向原理相同。零点位置时,SESM1 与 SESM2 均未变形。压缩位移时,SESM1 与 FBG1 变形(应变由温度和形变引起),SESM2 与 FBG2 不变形(仅温度影响);拉伸位移时则相反。以两根 FBG 的中心波长漂移量之差作为输出信号,可消除温度误差,实现温度自补偿。SESM 由等强度梁和等截面梁两部分组成,长度分别记为 L_1 和 L_2 ,对应挠度记为 w_1 和 w_2 ,等强度梁段转角为 θ_1 。FBG 布置于凸台两侧,需建立 FBG 感知应变与 SESM 总挠度 w 的关系。根据几何关系,当自由端受集中荷载 F 产生挠度时,等强度梁段产生的转角记为 θ_1 会导致等截面梁段产生挠度位移 w_{2-1} 。如图 3 所示。

SESM 的等强度梁部分虽存在凸台和凹槽导致截面高度不均,但对应变和挠度计算影响不

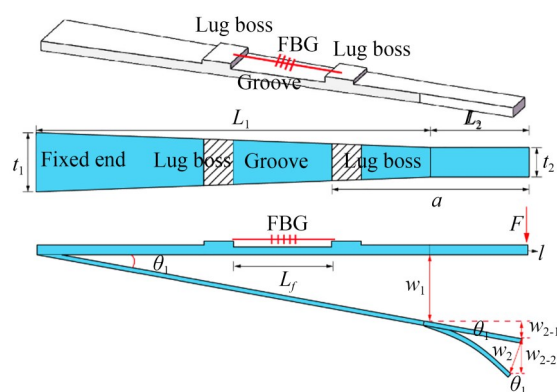


图 3 基于 FBG 的 SESM 悬臂弯曲变形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bending deformation of FBG-based SESM

大,为简化计算统一以高度 l 处理。设固定端宽度为 t_1 ,自由端宽度为 t_2 。根据材料力学,等强度梁部分的挠度 w_1 、转角 θ_1 与自由端作用力 F 的关系如下:

$$\begin{cases} w_1 = \frac{6FL_1^3}{Et_1l^3} + \frac{6FL_2L_1^2}{Et_1l^3} \\ \theta_1 = \frac{12FL_1^2}{Et_1l^3} + \frac{12FL_2L_1}{Et_1l^3} \end{cases} \quad (8)$$

其中: E 为 SESM 的弹性模量。

根据材料力学,等截面梁部分的挠度 w_2 与 SESM 自由端作用力 F 的关系如下:

$$w_2 = \frac{4FL_2^3}{Et_2l^3} \quad (9)$$

结合公式(8)和公式(9),SESM 的总挠

度 w 为:

$$w = w_1 + L_2 \times \sin \theta_1 + w_2 \times \cos \theta_1 = \frac{6FL_1^3}{Et_1l^3} + \frac{6FL_2L_1^2}{Et_1l^3} + L_2 \times \sin \left(\frac{12FL_1^2}{Et_1l^3} + \frac{12FL_2L_1}{Et_1l^3} \right) + \frac{4FL_2^3}{Et_2l^3} \times \cos \left(\frac{12FL_1^2}{Et_1l^3} + \frac{12FL_2L_1}{Et_1l^3} \right). \quad (10)$$

在本设计中, θ_1 较小, 因此 $\sin \theta_1 = \theta_1$, $\cos \theta_1 = 1$, 故公式(10)简化为:

$$w = \frac{6FL_1^3}{Et_1l^3} + \frac{6FL_2L_1^2}{Et_1l^3} + \frac{12FL_2L_1^2}{Et_1l^3} + \frac{12FL_2^2L_1}{Et_1l^3} + \frac{4FL_2^3}{Et_2l^3}. \quad (11)$$

当 SESM 自由端被施加集中力 F 后, FBG 受拉, 根据力矩平衡可得:

$$F(a + L_f) = TL_f + F_f l_f, \quad (12)$$

其中: a 是自由端到凸台之间的距离, L_f 为 FBG 长度, 也同是 SESM 凹槽段长度, F_f 为 FBG 所受的拉力, l_f 是 FBG 到梁中性轴的距离, $l_f = b + c$, T 为 SESM 凹槽段自由端等效集中力。

根据材料力学可知, SESM 凹槽段表面应变为:

$$\epsilon = \frac{6TL_f}{Et_f l_0^2}, \quad (13)$$

其中: t_f 为 SESM 凹槽段宽度, l_0 为 SESM 凹槽厚

$$S = \frac{\left(\frac{6L_1^3}{Et_1l^3} + \frac{6L_2L_1^2}{Et_1l^3} + \frac{12L_2L_1^2}{Et_1l^3} + \frac{12L_2^2L_1}{Et_1l^3} + \frac{4L_2^3}{Et_2l^3} \right) \times (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) \times \left(\frac{Et_f l_0^3}{12l_f} + 12A_f E_f l_f \right)}{K_\epsilon (a + L_f) \tan \beta}. \quad (17)$$

在实际设计中, 根据设计需求及机床加工的可行性和方便性, SESM 中的参数设计为: $L_1 = 40$ mm, $L_2 = 10$ mm, $L_f = 10$ mm, $t_1 = 6$ mm, $t_2 = 3$ mm, $t_f = 4.5$ mm, $l = 1.0$ mm, $l_f = 0.9$ mm, $l_0 = 0.8$ mm, $a = 20$ mm, $E = 125$ GPa, $E_f = 72$ GPa, 代入公式(17)中, 可得到:

$$S = \frac{\frac{364\,000}{3E} \times (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) \times \left(\frac{16E}{75} + 0.9A_f E_f \right)}{30K_\epsilon \tan \beta}. \quad (18)$$

3 传感器性能测试与分析

3.1 标定测试及结果分析

为验证传感器量程、灵敏度等性能, 开展了

度, $l_0 = 2b - d$ 。

FBG 受力大小 F_f 为:

$$F_f = \epsilon_f A_f E_f, \quad (14)$$

其中: A_f 为 FBG 截面积, E_f 为 FBG 的弹性模量。

根据 FBG 传感原理, FBG1、FBG2 中心波长漂移量 $\Delta\lambda$ 与应变变化值 ϵ_f 、温度变化量 ΔT 的关系为:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = K_\epsilon \epsilon_f + K_T \Delta T \\ \Delta\lambda_2 = K_T \Delta T \end{cases}, \quad (15)$$

其中: $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别为 FBG1 和 FBG2 的波长变化, λ_1 和 λ_2 为 FBG1 和 FBG2 的初始中心波长。 K_ϵ 为 FBG 应变传感的灵敏度系数, 计算时均取 1.2 pm/ $\mu\epsilon$, K_T 为 FBG 温度传感的灵敏度系数。

根据公式(7)和公式(11)~(15), FBG1 和 FBG2 的中心波长漂移量 $\Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1$ 与集中力 F 之间的关系, 两式相减可消除温度影响, 具体表示为:

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = K_\epsilon \epsilon_f = \frac{K_\epsilon F(a + L_f)}{\frac{Et_f l_0^3}{12l_f} + A_f E_f l_f}. \quad (16)$$

最后, 根据楔形滑块的几何结构, 被测对象的位移 S 、斜面倾角 β 与滑块所引起的总挠度 w 之间的关系为 $w = S \times \tan \beta$ ($\tan \beta = 0.048\,39$)。结合公式(11)和公式(16), 通过测量 FBG1 和 FBG2 中心波长偏移量, 计算出温度变化量 ΔT , 并求得探头运动距离 S 的变化量:

性能测试实验, 如图 4 所示。实验装置包括微距云台、3D 打印夹具、FBG 位移传感器、FBG 解调仪 (ZX-SL-C16-100, 解调精度为 ± 2 pm, 分辨率为 1 pm, 采样频率为 100 Hz) 及计算机。标定实验在室内常温下进行: 将传感器与微距云台固定于夹具中, 调零后使位移探杆与固定质量块紧密接触, 并连接光纤与解调仪完成系统调试。随后以 5 mm 为步长, 在 ± 60 mm 量程内进行 3 次循环加卸载测试, 采集并处理数据, 结果如图 5 所示。

由图 5(a) 可知, 两个 FBG 中心波长的最大漂移量分别为 $4\,020$ pm 和 $3\,663$ pm。在压缩位移测量中, 仅受温度影响的 FBG2 波长变化基本稳定于 0 pm 附近 (存在微小波动), 可为 FBG1 提

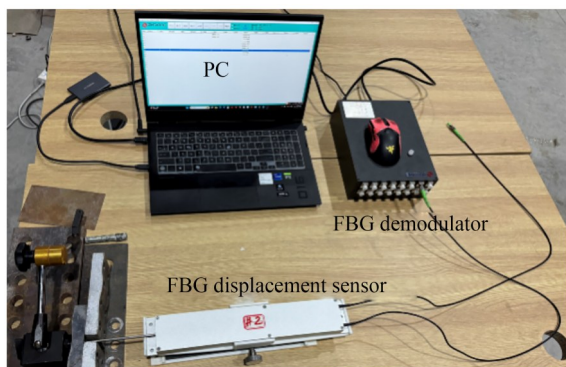
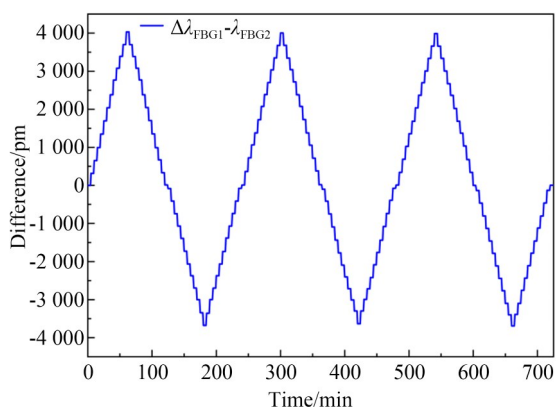
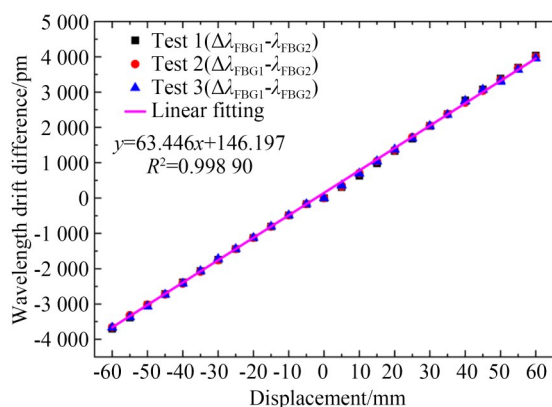


图4 实验装置和仪器

Fig. 4 Experimental apparatus and instruments

(a) $\lambda_{\text{FBG1}} - \lambda_{\text{FBG2}}$ 波长偏移差异趋势(a) Trend of Wavelength shift difference $\lambda_{\text{FBG1}} - \lambda_{\text{FBG2}}$ 

(b) 三次标定拟合曲线

(b) Triple calibration fitting relationship

图5 标定实验结果

Fig. 5 Results of calibration experiments

供温度补偿;拉伸时反之。以中心波长差 $\Delta\lambda = \lambda_{\text{FBG1}} - \lambda_{\text{FBG2}}$ 作为输出信号,与位移 S 构成图 5(b) 所示关系曲线。在 ± 60 mm 量程内,传感器实验标

定灵敏度为 63.446 pm/mm,线性相关系数为 0.998 9,非线性误差为 1.643%,重复性误差和迟滞误差分别为 0.088% 和 0.322%。基于实际加工尺寸(见 2.2 节)及公式(18)计算的理论灵敏度为 65.347 pm/mm,与实验值相对误差为 3.00%。误差主要来自加工精度、FBG 粘贴工艺及理论模型假设,但整体偏差较小,验证了传感器设计的合理性与可靠性。

3.2 温度补偿特性测试

为评估传感器在温度波动下的性能,采用可控温度箱(调控温度: $-20 \sim 120$ °C)开展温度稳定性测试,测试温度为 $-5 \sim 70$ °C。将传感器置于温度箱内,尾纤经箱口胶质隔层引出并连接外部 FBG 解调仪。测试时,传感器由室温(约 22 °C)升温至 70 °C,随后降温至 -5 °C 并保温 20 min,全程记录两根 FBG 的中心波长变化,结果如图 6 所示。

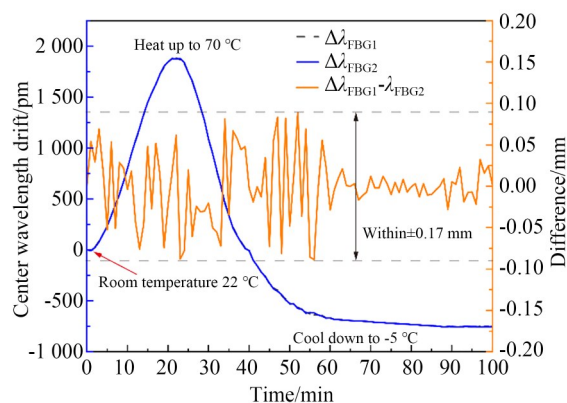


图6 温度补偿性能实验结果

Fig. 6 Test results of temperature compensation performance

如图 6 所示,两根 FBG 的中心波长漂移随温度变化基本一致,最大漂移差不超过 11 pm,对应位移误差约为 0.17 mm。理想情况下两者漂移差应为零,但全封装结构使温度变化引起悬臂梁热应变,同时黏接层长度、厚度等工艺差异会影响应变传递效率,导致两根 FBG 温度响应速率存在差异。环境温度稳定于 -5 °C 后,漂移差约为 7 pm。考虑 FBG 解调仪波长测量误差为 ± 2 pm,表明该传感器具有良好的温度补偿性能。

3.3 蠕变性能测试

蠕变性能是衡量其长期监测稳定性与精度的

关键参数。实验将位移传感器探杆拉伸至50 mm刻度,保持240 min后恢复零点,采样频率为10 Hz。如图7所示,压缩状态下 SESM1 处于形变, SESM2 自由。SESM2 上 FBG2 的中心波长漂移量基本保持在零点位置, SESM1 上 FBG1 的中心波长漂移量稳定在3 210 pm(波动范围为 ± 5 pm)。通过标定灵敏度为63.446 pm/mm来反演位移,选取并放大25~225 min的时间段,现波动不大于0.15 mm,表明传感器具有良好的抗蠕变性能。

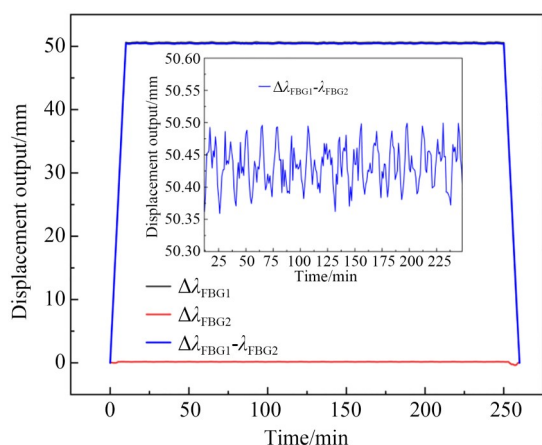


图7 光纤光栅位移传感器蠕变测试曲线

Fig. 7 Creep test curve of FBG displacement sensor

3.4 测量精度测试

随机位移测试采用与标定实验相同的装置。通过微距云台在-50~50 mm内施加50组随机位移,并以微距云台读数作为参考值,与传感器测量结果进行对比,结果如图8所示。红色曲线

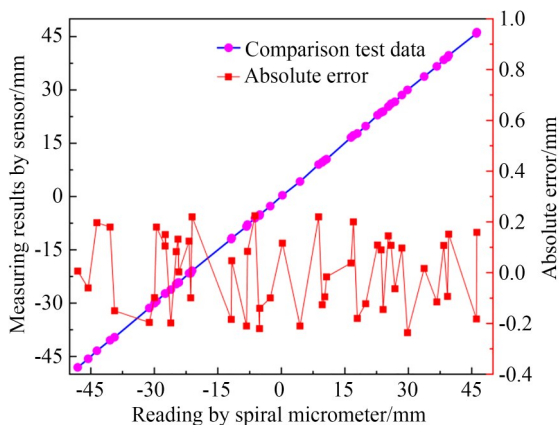


图8 测量精度对比试验结果

Fig. 8 Results of comparative test for accuracy analysis

表示参考位移与测量位移的绝对误差(彩图见期刊电子版)。结果表明,50组样本的绝对误差基本控制在0.21 mm以内;经标准差分析,传感器综合测量精度为0.145 9 mm,表明其具有较高的测量精度和良好的工程适用性。

4 工程应用

4.1 光纤光栅位移传感器布设

为保障某市地铁线路安全运营,对隧道施工后某断面支护管片间的相对变形进行监测。在同一环管片接缝处安装FBG位移计,实时获取环向位移参数,如图9所示。位移计两端支座分别固定于相邻管片,3个传感器通过单芯单模光纤首尾串联,光纤两端引至FBG解调器并连接FC/APC跳线,外部采用PVC套管防护。FBG解调器及便携计算机置于专用机柜内,机柜挂架通过膨胀螺栓固定于隧道侧壁,并采用卡扣连接,以避免影响列车运行并消除坠落风险。

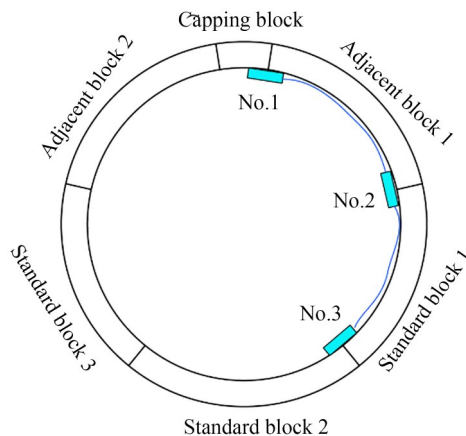


图9 光纤光栅位移传感器安装布置图

Fig. 9 Installation layout of FBG displacement sensors

4.2 测试结果分析

根据2025年5月20日至7月19日现场监测数据,得到隧道断面两个月内的变形规律,如图10所示。

No. 1传感器位于隧道顶部附近,60 d内位移由0增至约1.0 mm,变形量最大,并呈阶段性突增特征。第10,30和45天附近变形速率加快,第30和48天左右出现短时回落,可能与设备调整、结构回弹或现场干预有关。40 d后变形速率进

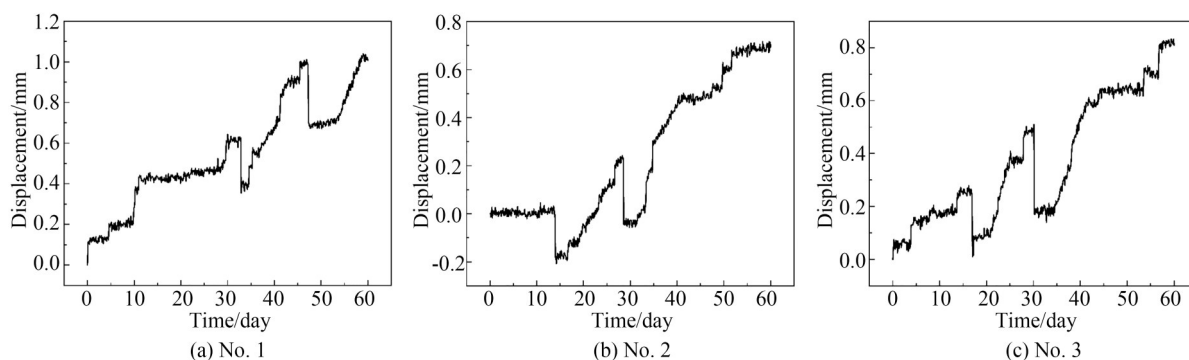


图 10 隧道断面光纤光栅位移传感器数据

Fig. 10 Data from FBG displacement sensors in tunnel cross-section

一步增大,表明顶部封顶块区域受力较为显著,应重点关注。

No. 2 传感器位于隧道右侧腰部。第 12~15 天出现负向位移,最大约 -0.2 mm,随后转为正向增长并最终增至约 0.7 mm;第 30 和 48 天附近同样出现短时回落。整体表现为“收敛—外扩—持续增长”的变形过程,反映该部位可能经历应力重分布。

No. 3 传感器位于隧道右下侧,初始存在约 0.05 mm 微小位移,可能与施工残余变形有关。第 15 和 30 天附近出现两次明显的突降—恢复过程,整体增长较 No. 1 平缓,但后期呈加速趋势,并在第 55 天左右出现阶跃增长,表明该区域受基底反力与侧向土压力共同作用,变形较为活跃。

综合来看,隧道顶部变形最大,符合拱顶竖向土压力较大及封顶块受力薄弱的力学特征。3 处测点位移均呈非线性增长并在后期加速,第 30 和 48 天附近的同步回落可能与设备维护、重新标定或临时加固措施有关,但变形抑制效果有限。建议后续提高监测频率或开展实时监测,重点检查 No. 1 测点所在区域,并结合第 30 天和 48 天现场处置记录,评估加固效果及二次加固必要性,

同时排查持续降水、地面堆载等外部影响因素。

5 结 论

为满足工程结构中对位移大小与方向同步精确识别的技术需求,本研究在传统悬臂式等强度梁结构基础上进行创新,引入凸台与凹槽组合设计,以增强等强度梁的应变响应。进一步基于双“悬臂式增敏型等强度梁+楔形体”结构,研发了一种高灵敏度双向测量 FBG 位移传感器。该传感器具备结构简单、温度自补偿、双向位移感知及实用性强等优点。性能测试实验和工程应用结果表明,所设计传感器在线性度、灵敏度、重复性、迟滞特性、精度、抗蠕变性及温度稳定性方面均表现优异,适用于土木工程与机械工程中的双向位移精确监测,展现出广泛的应用前景。

作者贡献声明:

周泽林:论文写作,传感器研发与现场测试;
郑勇:论文写作,方法实现与实验数据分析;
姜兴良:论文方法与实验指导,实验资源提供;
吴 澎:现场测试指导;
梁俊松:现场测试指导与资料提供。

参考文献:

- [1] ZHENG Y, LI Z, YU J, *et al.* Experimental research on a novel spring-shaped fiber-optic displacement sensor for settlement monitoring[J]. *Measurement*, 2022, 191: 110754.

- [2] XIA J, TANG Q F, WANG Y, *et al.* A small-size inductive absolute angular displacement sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24 (16): 25493-25500.
- [3] ZHENG Y, ZHU Z W, XIAO W, *et al.* Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring

- [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 54: 102127.
- [4] 郑勇, 余洁, 陈洪凯, 等. 基于光纤光栅的矢量位移测量传感装置与试验研究[J]. 光子学报, 2024, 53(2): 0206005.
- ZHENG Y, YU J, CHEN H K, *et al.* A vector displacement measurement sensing device based on fiber Bragg grating and its experimental study[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(2): 0206005. (in Chinese)
- [5] SANADA H, SUGITA Y, KASHIWAI Y. Development of a multi-interval displacement sensor using Fiber Bragg Grating technology[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 54: 27-36.
- [6] 张燕君, 田永胜, 付兴虎, 等. 可调量程拉绳式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光电工程, 2017, 44(6): 626-632.
- ZHANG Y J, TIAN Y SH, FU X H, *et al.* Adjustable range draw-wire type fiber Bragg grating displacement sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(6): 626-632. (in Chinese)
- [7] 郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 50-58.
- GUO Y X, XIONG L, KONG J Y, *et al.* Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 50-58. (in Chinese)
- [8] 谭跃刚, 陈宇佳, 李瑞亚, 等. 高精度弓型光纤光栅微位移传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 556-564.
- TAN Y G, CHEN Y J, LI R Y, *et al.* High-precision bow-shaped fiber Bragg grating micro-displacement sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(3): 556-564. (in Chinese)
- [9] 吕国辉, 周泊宁, 王朝钲, 等. 基于椭圆位移放大结构的光纤光栅位移传感器[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 1106002.
- LYU G H, ZHOU B N, WANG CH ZH, *et al.* Fiber grating displacement sensor based on elliptical mechanical amplification structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11): 1106002. (in Chinese)
- [10] LI C, SUN L, XU Z Q, *et al.* Experimental investigation and error analysis of high precision FBG displacement sensor for structural health monitoring [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(6): 2040011.
- [11] GUO Y X, ZHOU W H, XIONG L, *et al.* A fiber Bragg grating sensor for positive and negative displacement measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(19): 21564-21571.
- [12] WU D J, LI T L, KHYAM M O, *et al.* A temperature self-compensation submicron displacement fbg sensor with tilt parallel-suspended dual-optical fibers [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 332: 113200.
- [13] LI H L, XU G, GUI X, *et al.* A double FBGs temperature self-compensating displacement sensor and its application in subway monitoring[J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6831.

作者简介:



周泽林(1986—),男,四川雅安人,博士,高级工程师,主要从事隧道与地下工程技术、工程结构智能监测等方面的研究。Email: zhouzelin2023@163.com

通讯作者:



郑勇(1990—),男,湖南麻城人,博士,副教授,博士生导师,2020年于重庆大学获得博士学位,主要从事光纤传感器开发与测试、地质工程与岩土工程多场智能感知与灾害防控相关的研究。E-mail: zhengyong@cqjtu.edu.cn