

# 基于菱形敏化结构的膜片式FBG土压力传感器

李美丽,崔卫星,牛亮,冯元

(重庆移通学院,重庆 401520)

**摘要:**针对传统土压力传感器在长期监测中易受温度、电磁干扰等影响导致精度下降的问题,设计了一种基于菱形敏化结构的膜片式光纤布喇格光栅(FBG)土压力传感器。该传感器采用圆形膜片作为感压元件,利用菱形敏化结构传导压力,通过应变梁与温补梁上串联的2个FBG实现压力测量与温度补偿。结合理论分析与Ansys有限元仿真验证了结构的可行性,并搭建实验系统对传感器性能进行测试。实验结果表明:传感器在0~2 MPa时具有良好的线性度,灵敏度达981.87 pm/MPa;在-10~50 °C时内温度补偿效果良好,3 h抗蠕变实验中波长波动控制在±5 pm内,满足工程实际中土压力长期准确监测的需求。

**关键词:**光纤布喇格光栅;土压力传感器;菱形敏化结构;温度补偿;有限元分析

**中图分类号:**TP212 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)02-0048-06

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.02.008

## Diaphragm-type FBG earth pressure sensor based on rhombic sensitized structure

LI Meili, CUI Weixing, NIU Liang, FENG Yuan

(Chongqing College of Mobile Communication, Chongqing 401520, China)

**Abstract:** To address the accuracy degradation of traditional earth pressure sensors caused by temperature and electromagnetic interference in long-term monitoring, a diaphragm-type fiber Bragg grating (FBG) earth pressure sensor based on a rhombic sensitized structure is designed. The sensor uses a circular diaphragm for pressure sensing, transmits pressure through the rhombic structure, and employs two FBGs in series on the strain beam and temperature compensation beam to achieve pressure measurement and temperature compensation. The design is validated by theoretical analysis and Ansys finite element simulation, followed by experimental testing. Results show good linearity from 0 to 2 MPa with a sensitivity of 981.87 pm/MPa, effective temperature compensation from -10 °C to 50 °C, and wavelength fluctuation within ±5 pm during a 3-hour creep test, meeting the requirements for long-term accurate earth pressure monitoring.

**Key words:** fiber Bragg grating, earth pressure sensor, rhombic sensitized structure, temperature compensation, finite element analysis

### 0 引言

土压力监测是对岩土工程和土木工程领域进行健康监测的重要环节<sup>[1-3]</sup>,对于评估边坡稳定、地基沉

降、隧道围岩应力及地下结构的安全性具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。土压力传感器可获取土体与结构之间压力变化的精确信息,这些信息对工程设计和施工优化有重要指导意义<sup>[6]</sup>,也为后期运行中的风险预警提供了可靠的依据。

随着工程规模的不断扩大和地质条件的复杂化,对土压力传感器的精度、稳定性和抗干扰性提出了更高的要求。传统的土压力传感器主要基于气压式<sup>[7]</sup>、电阻式<sup>[8]</sup>、柔性传感器<sup>[9]</sup>等,在长期监测中容易受到电磁干扰、温度变化及环境湿度等外界因素的影响,其灵敏度和长期监测能力难以满足现代工程的监测需求。光纤布喇格光栅(FBG)技术因其具有抗电磁干

收稿日期:2025-02-14。

基金项目:重庆教育委员会科学研究项目基金(KJZD-K202202401)资助;教育部供需对接就业育人项目基金(20230104156)资助。

作者简介:李美丽(1982—),女,重庆人,硕士研究生,副教授。主要研究方向为光纤传感技术研究。在核心期刊发表论文十余篇。



扰<sup>[10]</sup>、高灵敏度<sup>[11]</sup>、体积小<sup>[12]</sup>、可串联多个光栅使用等优点,在健康监测领域得到迅速发展<sup>[13-15]</sup>。因此,本文设计一种基于菱形敏化结构的膜片式FBG土压力传感器。

## 1 传感器结构与理论分析

### 1.1 传感器结构设计

图1为土压力传感器的结构设计图,由感压和应变测量两部分结构组成,感压结构主要由圆膜片组成;应变测量结构由菱形敏化结构、壳体组成。对于菱形敏化结构式传感器,采用支撑轴将菱形敏化结构和底座壳体进行连接,顶盖膜片和底座壳体采用螺纹连接,圆膜片与菱形敏化结构顶部弧面相切。当外部压力作用在膜片上,引起圆膜片的弯曲变形,变形转化为集中的力传递给菱形敏化结构。通过在菱形敏化结构的梁表面用环氧胶粘剂粘接FBG传感器来测量梁表面的应变。

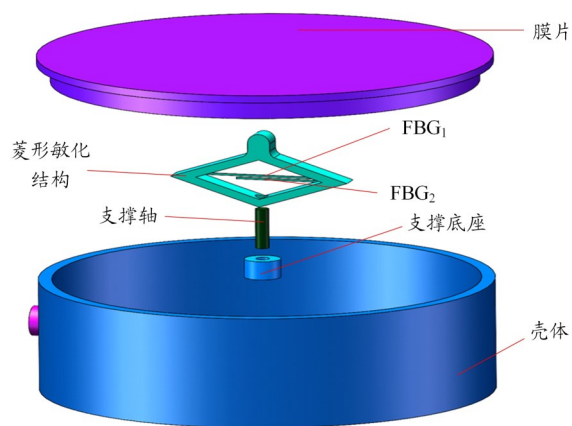


图1 土压力传感器的结构设计图

FBG的中心波长变化受到轴向应变和温度的影响,在恒定温度下应变与FBG中心波长的位移呈线性关系。因此,在实际应用中,要消除温度对波长变化的影响。本文设计的传感器应变梁两端与菱形结构两端连接,以检测来自膜片的应力载荷。传感器的温补梁一端与菱形结构连接,另一端保持悬空,确保其在测量应变时能够独立感知温度的影响,2个光栅串联在一起,尾纤通过底座壳体开孔处引出。

### 1.2 测量原理

FBG的测量原理涉及在光纤芯内创建一个窄带反射器。当宽带光谱光在光纤中传播时,满足FBG条件的光波将被FBG反射。反射光的中心波长<sup>[16]</sup>表示为

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

式中: $\lambda_B$ 为FBG的中心波长; $n_{\text{eff}}$ 为光纤芯的折射率, $\Lambda$ 为光栅周期。FBG波长变化与温度或应变的关系可以<sup>[17]</sup>表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi) \times \Delta T + (1 - P_e) \times \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\Delta T$ 为温度变化, $\Delta\varepsilon$ 为应变变化, $\Delta\lambda_B$ 为FBG中心波长变化, $\alpha_f$ 为热膨胀系数, $\xi$ 为热光学系数, $P_e$ 为有效的光弹性系数(室温下约为0.22)。

假设压力均匀地作用在隔膜上,根据小变形理论,膜片表面的切向应变 $\varepsilon_t$ 、径向应变 $\varepsilon_r$ 以及膜片中心产生的最大挠度 $w_{\text{max}}$ 分别为

$$\varepsilon_t = \frac{3(1 - \mu_1^2)(R^2 - r^2)}{8E_1 h_1^2} P \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{3(1 - \mu_1^2)(R^2 - 3r^2)}{8E_1 h_1^2} P \quad (4)$$

$$w_{\text{max}} = \frac{3P(1 - \mu_1^2)R^4}{16E_1 h_1^3} \quad (5)$$

式中: $P$ 为被测压力, $E_1$ 为膜片的杨氏模量, $\mu_1$ 为材料泊松比, $h_1$ 为膜片厚度, $R$ 为膜片半径, $r$ 为测点到膜片中心的距离。

将菱形敏化结构进行简化,取四分之一模型进行分析,其示意图如图2所示。菱形结构边长 $L$ 在压力施加前后不变,则应变梁上产生的位移 $\Delta x$ 对应的公式为

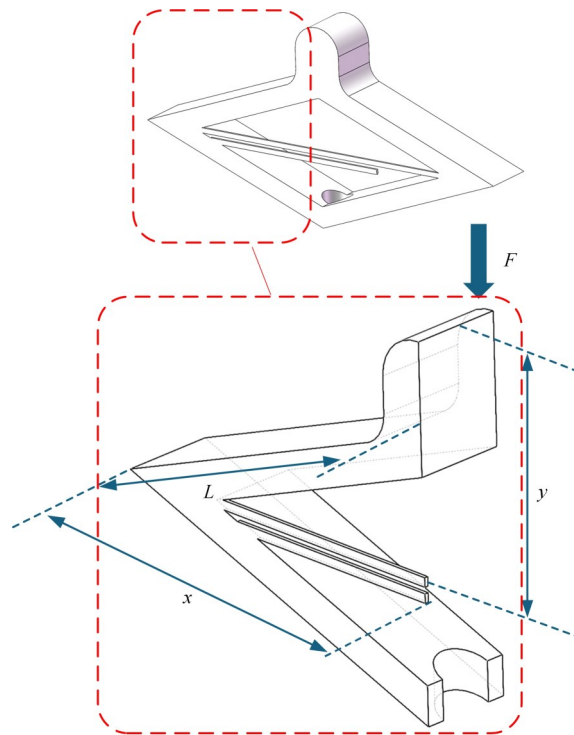


图2 菱形敏化结构简化示意图

李美丽, 崔卫星, 牛亮, 等: 基于菱形敏化结构的膜片式FBG土压力传感器

$$(x + \Delta x)^2 = L^2 - (y - \Delta \omega)^2 \quad (6)$$

式中:  $x$  为菱形敏化结构长对角线长度,  $y$  为菱形敏化结构短对角线长度,  $\Delta \omega$  为膜片挠度。  $x$  和  $\Delta x$  的比值为

$$\Delta \varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{3(1 - \mu_1^2)R^4}{16E_1h_1^3} \times \sqrt{\frac{256E_1^2h_1^6x^2}{9(1 - \mu_1^2)^2R^8\Delta P^2} + \frac{32E_1h_1^3y}{3(1 - \mu_1^2)R^4\Delta P}} - 1 \times \Delta P - 1 \quad (7)$$

2个FBG分别连接在应变梁和温补梁的菱形结构上。其中, 布置在应变梁上的FBG的中心波长位移  $\Delta \lambda_1$  为

$$\frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_B} = (1 - P_e) \times \Delta \varepsilon_x + (\alpha_f + \xi) \times \Delta T \quad (8)$$

温补梁与应变梁相互靠近, 认为温度对2个梁上的FBG的影响是相同的。由于温补梁的一端与基座断开, 因此温补梁不会产生应变。附在温补梁上的FBG的波长位移  $\Delta \lambda_2$  为

$$\frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi) \times \Delta T \quad (9)$$

用式(8)和式(9)相减消去温度的影响, 得到式(10)。

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_B} - \frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_B} = (1 - P_e) \times \Delta \varepsilon_x \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 2个FBG的波长之差仅与应变变化有关, 从而解决了传感器的交叉灵敏度问题, 则FBG的中心波长变化与土压力的数学模型如下:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \frac{3(1 - \mu_1^2)(1 - P_e)R^4}{16E_1h_1^3} \times \sqrt{\frac{256E_1^2h_1^6x^2}{9(1 - \mu_1^2)^2R^8\Delta P^2} + \frac{32E_1h_1^3y}{3(1 - \mu_1^2)R^4\Delta P}} - 1 \times \Delta P - (1 - P_e) \quad (11)$$

## 2 仿真分析

本文利用 Ansys 有限元分析软件的静力结构模块对压力传感器进行仿真分析。在仿真过程中, 传感器膜片使用的材料为 304 不锈钢, 杨氏模量为  $1.93 \times 10^{11}$  Pa, 泊松比为 0.31, 厚度为 2 mm; 菱形结构使用的材料为 7075 铝合金, 杨氏模量为  $7.1 \times 10^{10}$  Pa, 泊松比为 0.33; 光纤的杨氏模量设置为  $7.3 \times 10^{10}$  Pa, 泊松比为 0.22。光纤、传感器外壳、菱形结构的网格划分尺寸分别为 0.1、1、0.5 mm, 传感器结构网格划分由 960 986 个节点和 611 491 个单元组成。

为了验证压力传感器结构设计和理论方法的可行性, 对膜片表面变形进行了有限元分析。图3为对膜片表面施加 1.5 MPa 压力时, 膜片沿一个直径方向的变形情况。可以看出, 在施加均匀的压力时, 膜片的变形呈抛物线分布, 中心位置应变达到最大。此时, 传感器有限元分析云图如图4所示。从图4(a)和图4(b)可以

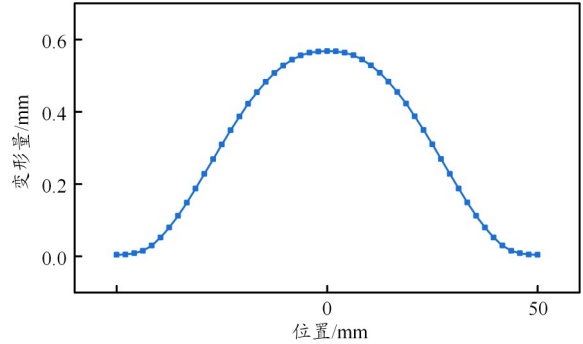
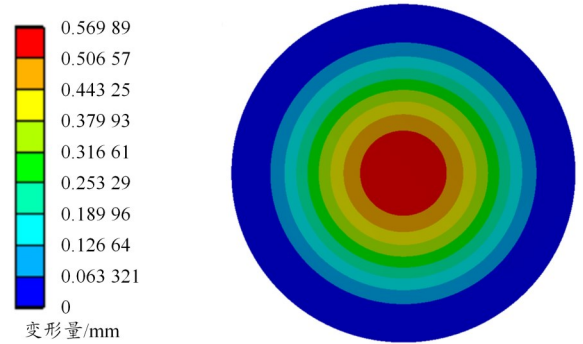
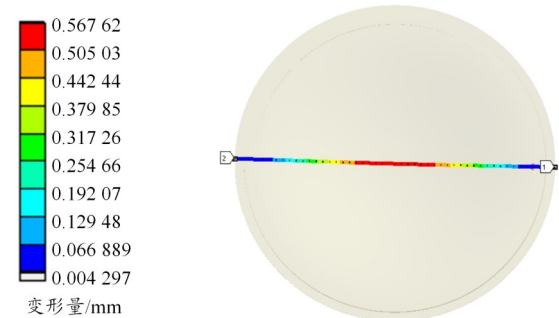


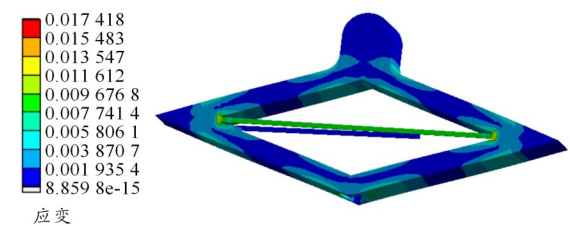
图3 膜片表面路径变形曲线



(a) 膜片变形云图



(b) 膜片表面路径变形云图



(c) 菱形敏化结构应变分布图

图4 传感器有限元分析云图

看出,膜片表面变形呈现阶梯状,最大变形发生在膜片的中心处,最大变形量为0.569 89 mm。当膜片承受均匀的压力时,压动菱形敏化结构发生变形,此时菱形敏化结构梁表面的应变分布图如图4(c)所示。可以看出,菱形敏化结构梁上的应变分布均匀,应变集中于中间梁位置,与理论结果一致。仿真结果说明设计的土压力传感器可以对膜片上侧压力进行有效监测。

在0~1.5 MPa的范围,以步长为0.3 MPa对传感器进行不同压力下的仿真分析,探究FBG产生的应变与施加压力之间的关系,结果如图5所示。可以看出,FBG产生的应变随着施加压力的增大而增大,二者之间存在线性关系,与上述理论计算分析基本吻合。

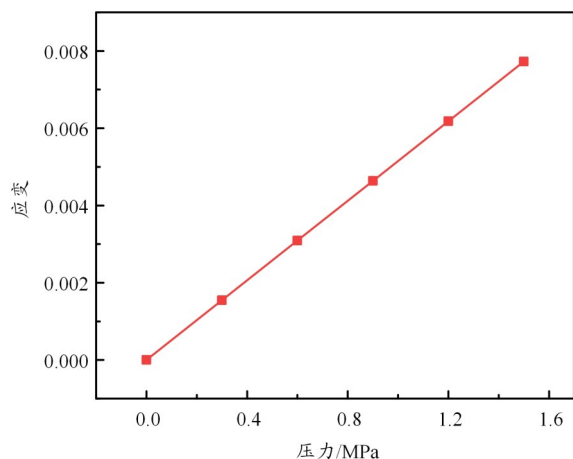


图5 光纤应变随压力变化图

### 3 实验测试

本文搭建实验装置对土压力传感的性能进行测试,实验装置实物图如图6所示。土压力传感器由专

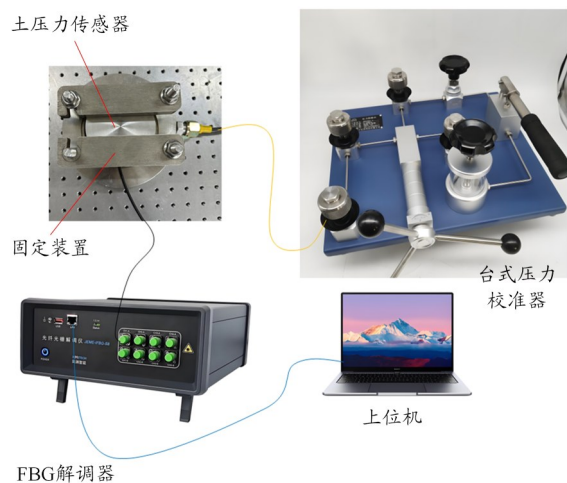


图6 土压力传感器实验装置实物图

用夹具固定,台式压力校准器用于精确控制施加到压力传感器的压力负载的大小,范围为60 MPa,精度为1 kPa。由于土壤介质的不稳定性,压力不能很好地传递,无法在土壤介质中进行校准实验。因此,选择纯水作为压力介质,用水压等效模拟土压力。压力施加在传感器隔膜上,通过手泵和手轮调节压力。同时,使用精密数字压力表(范围为0~40 MPa,精度为0.05% FS,分辨率为0.1 pa)读取台式压力校准器施加的压力。FBG解调器(精度为5 pm,分辨率为0.1 pm)在不同压力下实时记录每个FBG的波长数据。解调器连接上位机对数据进行实时分析。

#### 3.1 压力量程测试

在实验过程中,传感器膜片被施加载荷时产生形变,菱形结构传递应变,进行应变感知的FBG<sub>1</sub>中心波长发生漂移,FBG<sub>2</sub>实时进行温度耦合。施加在膜片上的压力由0增加到1.5 MPa,步长设置为0.3 MPa。压力增大到1.5 MPa后,将步长调整为0.2 MPa。观察FBG是否啁啾,以及波长偏移与压力之间的线性关系。传感器的量程可以根据FBG啁啾的临界点和波长随压力的变化曲线的线性与非线性临界点来确定。

图7为土压力传感器中FBG<sub>1</sub>的波长随压力的变化曲线图。可以看出,在压力为2.1 MPa时FBG<sub>1</sub>没有啁啾,但压力大于2.1 MPa后,波长偏移差与压力之间没有良好的线性关系。因此,土压力传感器的量程为2 MPa。

#### 3.2 压力灵敏度标定

在土压力传感器压力灵敏度的校准实验中,本文将台式压力校准器施加在传感器上的压力从0增加到2 MPa,步长为0.2 MPa,每个压力点保持20 s。然后,以相同步长降至0 MPa。在相同的环境温度下,对传

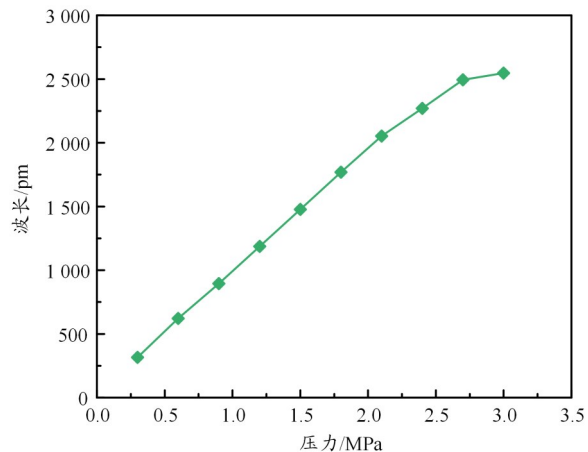


图7 FBG<sub>1</sub>的波长随压力的变化曲线

李美丽,崔卫星,牛亮,等:基于菱形敏化结构的膜片式FBG土压力传感器

感器进行了3次升压和降压测试,以确保测试数据的准确性和可靠性。图8显示了传感器波长随时间的变化关系。图9显示了传感器波长与压力之间的关系。从图8可以看出,压力测试中,传感器中心波长呈阶梯状变化,3次测量得到的曲线基本相同,表明传感器具有良好的可重复性。图9中,对3个测试周期的平均值进行线性拟合,得到拟合曲线  $y=981.871\ 52x+34.421\ 33$ ,拟合曲线线性相关系数  $R^2=99.95\%$ ,表明传感器具有良好的线性度,且灵敏度达  $981.87\text{ pm/MPa}$ 。

### 3.3 抗蠕变实验

在工程实践中,土压力传感器需要执行长期监测

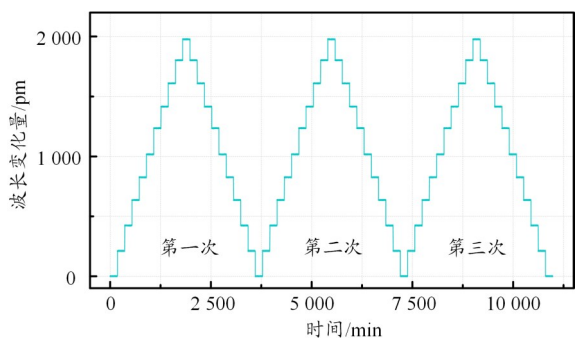


图8 传感器波长随时间的变化关系图

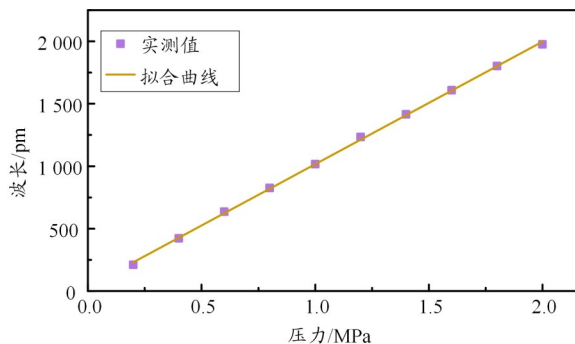


图9 传感器波长与压力的变化关系及线性拟合曲线图

任务,并具有抗蠕变性能,传感器的好坏对土压力的长期准确测量有重要影响。在抗蠕变实验中,传感器由夹具固定,保持静止约3 min。然后,用台式压力校准器在隔膜表面施加1.2 MPa的恒定压力3 h。最后,打开泄压阀返回初始状态。在整个实验过程中应避免外部干扰,以减轻对传感器蠕变电阻测试结果的影响。FBG询问器以5 Hz的频率实时收集2个FBG的波长数据。图10(a)显示了传感器在蠕变电阻实验期间2个FBG波长变化的实时过程。放大2个FBG在106~111 min间隔内的波长偏移曲线,分别如图10(b)和图10(c)所示。可以看出,2条曲线在 $\pm 5\text{ pm}$ 内有轻微的抖动,这是由于FBG解调器采集精度为 $\pm 5\text{ pm}$ 。放大图像中的数据波动在FBG询问器的误差范围内。以上结果表明,土压力传感器具有良好的抗蠕变性。

### 3.4 温度补偿实验

温度补偿性能是保证长期土压力监测任务中高测量精度的重要指标。为了评估土压力传感器的温度补偿性能,将土压力传感器放置于电动恒温器(AP-HX-150D6,温度范围为 $-60\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ ,精度为 $0.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,分辨率为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ )中,温度值设置为 $-10\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,采样间隔

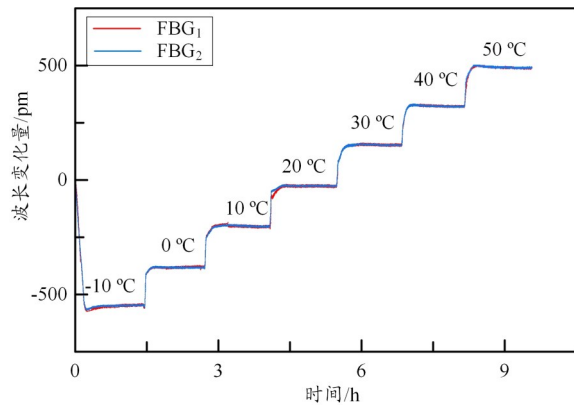
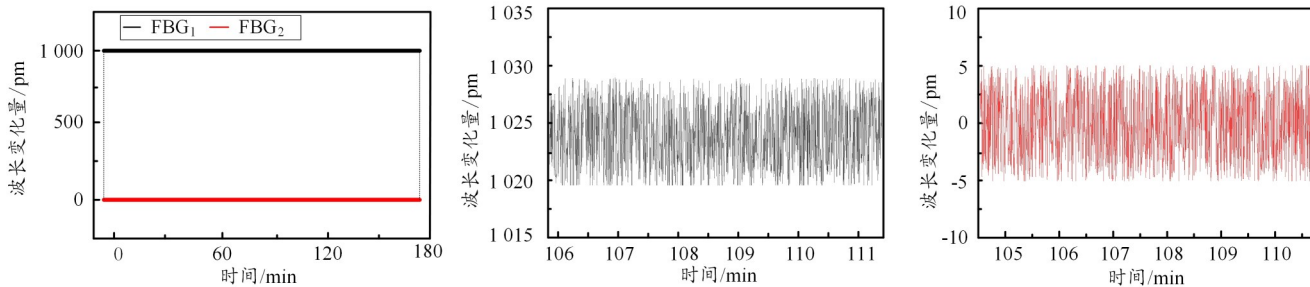


图11 土压力传感器温度补偿性能测试结果



(a) 2个FBG的波长变化实时过程

(b)  $\text{FBG}_1$ 的波长偏移放大曲线

(c)  $\text{FBG}_2$ 的波长偏移放大曲线

图10 土压力传感器抗蠕变测试结果

为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。只有当 2 个 FBG 具有相同的温度灵敏度时,才能通过在 FBG<sub>1</sub> 的波长偏移中减去 FBG<sub>2</sub> 的波长偏移来区分温度引起的波长偏移。在实验过程中,环境温度约为  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实验从室温开始,每个温度点保持 60 min,实时记录数据,结果如图 11 所示。可以看出,FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的波长响应基本吻合,说明土压力传感器具有良好的温度补偿能力。

#### 4 结束语

本文提出并设计了一种基于菱形敏化结构的膜片式 FBG 土压力传感器,通过使用环氧胶粘剂将 FBG 粘接在菱形敏化结构的应变梁和温补梁上,用于测量敏化结构梁表面应变,并且有效地避免了温度交叉对灵敏度的影响。通过理论分析和有限元仿真,对感压膜片和菱形敏化结构的受力原理及状态进行了详细的分析,通过一系列实验对传感器的性能进行了测试。得出的具体结论如下:

1) 设计的菱形敏化传感结构能实现土压力到应变监测的高效转化,灵敏度高达  $981.87\text{ pm/MPa}$ ,且线性相关系数达到  $99.95\%$ ;

2) 通过在菱形敏化传感结构内同步布置应变 FBG 与悬空温补 FBG,实现了高精度的波长差动补偿。在  $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的大跨度温度实验中,传感器表现出良好的解耦性能;同时,长达 3 h 的抗蠕变实验显示波长波动控制在  $\pm 5\text{ pm}$  范围内,证明了其长期监测的稳定性。

#### 参考文献

- [1] 马晓文,梁庆国,赵涛,等. 土动力学研究综述及思考[J]. 世界地震工程, 2021, 37(4): 217-230.
- [2] 雷华阳,刘敏. 盾构隧道开挖面失稳破坏机理及土拱效应研究综述[J]. 太原理工大学学报, 2022, 53(1): 98-117.
- [3] 赖丰文,刘松玉,邓永锋,等. 巨型深埋式沉井施工过程力学特性及

李美丽,崔卫星,牛亮,等: 基于菱形敏化结构的膜片式 FBG 土压力传感器

环境效应研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022, 30(3): 657-672.

[4] 李晓旭,叶海林,金俊喜,等. 高速黄土路基涵洞土压力分布特征研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8): 37-43.

[5] Chong Shi, Gu Haizhen, et al. Research on stability of the accumulated rock-soil body of reservoir bank under rainfall condition[J]. Science in China, 2009(9): 8.

[6] Zhang R, Lan T, Zheng J L, et al. Field performance of a geogrid-reinforced expansive soil slope: a case study[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2024, 83(1): 7.

[7] 朱潇钰,邹浩南,谢昕,等. 基于 MEMS 压力传感器的土应力分布模型实验研究[J]. 矿产勘查, 2024, 15(S2): 140-148.

[8] 翁福娟,张勇,叶武,等. 电阻点焊应变式压力传感器弹性体的设计及应用[J]. 电焊机, 2017, 47(9): 1-5.

[9] Arkiewicz K, Qatrameez W. Assessment of stress in the soil surrounding the axially loaded model pile by thin, flexible sensors[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2021, 21(21): 7214.

[10] Hu Bin, Zhang Xiangyu, Meng Yongdong, et al. Research on application of fiber bragg grating seepage pressure sensor in soil test[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(15): 16840-16850.

[11] Rani S, Haider S, Bukhari S H R, et al. Performance optimization of apodized fbg biomedical sensor for variation in temperature and presence of noise[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022(6): 17.

[12] Guo J, Sun M, Fang J, et al. High-sensitivity seawater salinity sensing with cladding etched fiber bragg grating technology[J]. in IEEE Sensors Journal, 2023, 23(13): 14182-14192.

[13] Cai Yin, Zhang Bingbing, Wang Jingyuan, et al. Research on a bimetallic-sensitized FBG temperature sensor[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(3): 035010.

[14] 朱万旭,宋天明,刘丰荣,等. 压杆式光纤光栅位移传感器的研制[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(4): 83-87.

[15] 高峰,鲁洁,周若零,等. FBG 传感器在沥青路面中的应用研究进展[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(11): 164-168.

[16] Torres B, Payá-Zaforteza I, Calderón P A, et al. Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for structural health monitoring[J]. Eng. Struct., 2011, 33(2): 539-548.