

DOI:10.16136/j.joel.2023.08.0380

一种双梁互补式光纤光栅位移传感器及在地铁隧道变形监测中的应用

郭永兴^{1,2*}, 杨慧^{1,3}, 朱家静², 胡钊², 张航²

(1. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北武汉 430081; 2. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北武汉 430081; 3. 武汉科技大学精密制造研究院, 湖北武汉 430081)

摘要: 本文提出了一种双梁互补式光纤光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 位移传感器, 实现了正负双向位移的测量。采用双“悬臂梁+楔形滑块”的结构, 当一个悬臂梁受位移作用处于变形状态时, 另一个悬臂梁不变形并提供温度补偿功能。传感器处于零值测点状态时, 两个悬臂梁处于零弯曲状态, 且双梁互为温度补偿, 消除了温度影响。通过性能测试实验证明, 该传感器在 ± 50 的量程内, 灵敏度为 29.369 pm/mm, 测量重复性好。制备出 8 个传感器应用于某市地铁的变形安全监测, 从道床沉降、道床环缝、管片环缝 3 个方面开展了变形测量。在长期监测期间, 传感器工作稳定, 被测结构变形状态稳定, 表明该传感器具有良好的测量性能, 适用于长期的结构健康监测。

关键词: 光纤光栅 (FBG); 悬臂梁; 位移传感器; 结构健康监测

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2023)08-0851-10

A double-beam complementary fiber Bragg grating displacement sensor and its application in underpass tunnel deformation monitoring

GUO Yongxing^{1,2*}, YANG Hui^{1,3}, ZHU Jiajing², HU Zhao², ZHANG Hang²

(1. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China; 2. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China; 3. Precision Manufacturing Institute, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract: This paper proposes a double-beam complementary fiber Bragg grating (FBG) displacement sensor to achieve the measurement of positive and negative bidirectional displacement. The double "cantilever beam + wedge-shaped slider" structure is adopted, when one cantilever beam is deformed by displacement, the other cantilever beam is not deformed and provides temperature compensation function. The two cantilever beams are in zero bend when the sensor is in zero value measurement point state, and the twin beams are temperature compensated for each other, eliminating temperature effects. The performance test experiments prove that the sensitivity of the sensor is 29.369 pm/mm within a range of ± 50 and the measurement repeatability is good. Eight sensors are manufactured for deformation safety monitoring of a city metro, and deformation measurements are carried out in three areas: track bed settlement, track bed annulus and segment annulus. During the long-term monitoring period, the sensor works stably and the deformation state of the monitored structure is stable, indicating that the sensor has good measurement performance and it is applicable to long-term structural health monitoring.

* E-mail: yongxing_gou@wust.edu.cn

收稿日期: 2022-05-22 修订日期: 2022-08-10

基金项目: 国家自然科学基金 (52075397, 52105558)、山东省重大科技创新工程 (2019JZZY020314) 和广西重点研发计划 (2020AB44003) 资助项目

Key words: fiber Bragg grating (FBG); a cantilever beam; displacement sensor; structural health monitoring

0 引言

随着社会的不断进步,城市地铁迅速发展,但在地铁运营过程中,由于受到地面沉降、周围工程施工、土地扰动等外部因素以及隧道自身结构和地铁运行震动等自身因素的影响^[1],可能会导致隧道产生形变,如道床产生沉降、管片间裂缝增大等,最终会影响地铁安全运行,造成经济和人员的巨大损失^[2]。因此,对地铁隧道进行长期实时健康监测十分必要。

目前,许多研究人员已经提出多种远程自动监测系统^[3],来实现对地铁隧道的监测。现有的自动监测系统大多采用基于电磁效应和电容效应原理的传感器^[4],具有较高的精度和分辨率,但弱电传感器的输出信号容易受到电磁信号的干扰且不能远距离传输,无法应用于恶劣场合。光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)具有耐腐蚀、抗电磁干扰、可远距离传输等优点^[5],故基于 FBG 的传感器可以解决传统传感器存在的问题,有效地应用于机械设备^[6]、土木工程^[7]、航空航天^[8]等结构健康监测中。

近年来,随着 FBG 传感技术的快速发展,FBG 位移传感技术得到广泛的应用。弹性元件是传感器最重要的部分,其分类也多种多样。首先 FBG 本身可直接作为弹性元件进行轴向拉伸。陈振威^[9]提出了一种具有温度补偿的高精度 FBG 微位移传感器,通过弹簧作为传力介质,拉伸光栅产生轴向应变,由此反应外部位移的变化。但 FBG 一直处于绷紧状态,容易损坏。其次,悬臂梁也是传感器常用的弹性元件。郭永兴^[10]提出一种滑动式 FBG 位移传感器,主要的传感部分为悬臂梁和楔形滑块,通过悬臂梁的形变反应外部位移的变化,并将双光栅分别粘贴于悬臂梁对称位置的上下表面,消除了温度的影响,适用于单向位移测量的场合。LI 等^[11]采用楔形滑块和 t 型悬臂梁组合结构,将外部位移施加到经过预拉伸固定在两端的 FBG 上,可实现 2 086 pm/mm 高灵敏度测量。邢心魁等^[12]提出一种受拉型悬臂梁 FBG 位移传感器,采用内外套管式结构,检测外部位移的变化。孙丽^[13]提出一种基于楔形腔结构的 FBG 位移传感器,采用“锰钢梁+楔形块”的结构,将外部位移的变化转化为锰钢梁的形变,但灵敏度较低。WANG 等^[14]通过构建微结构弹性体,实现了测量范围大但尺寸小的位移传感器的制

作。环形结构同样可作为弹性元件。KIM^[15]提出了一种环形结构的位移传感器,采用双光栅解决了温度补偿问题,测量精度较高。郭振等^[16]也提出一种基于圆环结构的传感器,采用非胶装工艺解决了光栅的稳定性问题且测量精度较高。JINEESH 等^[17]提出了一种带有温度补偿的 FBG 位移传感器,通过螺母的左右移动带动传感臂的形变,测量范围较大。但由于以上传感器只能进行正向行程位移的测量,不适用于双向位移变化的场合,因此并不适用于地铁隧道变形的监测。

本文提出了一种双梁互补式 FBG 位移传感器。采用双“悬臂梁+楔形滑块”的结构,将两个光栅分别粘贴在两个悬臂梁的上表面,巧妙地实现了温度补偿,且在零位移处,两个悬臂梁处于无变形状态,可保证弹性元件具有良好的弹性,并提高测量结果的准确性。随后进行了传感器的性能测试实验,并在某市地铁二号线进行应用,从道床沉降量和裂缝等方面对隧道进行监测,进一步表明传感器具有较好的测量能力。

1 传感器结构设计及测量原理

1.1 传感器结构设计

本文提出的双梁互补式位移传感器如图 1 所示,主要由一个基座、两个粘贴 FBG 的悬臂梁、两个楔形滑块、一个导轨、一个运动杆和一根光纤跳线组成。

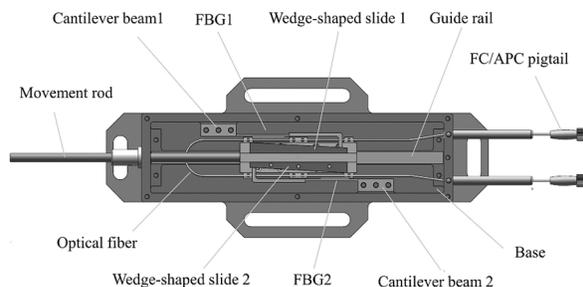


图 1 双梁互补式传感器

Fig. 1 Double-beam complementary sensor

采用光学胶粘剂将 FBG1 和 FBG2 分别全封装在悬臂梁 1 和悬臂梁 2 等强度部分的上表面,以保证 FBG 受到均匀应变。其中,通过相位掩膜法将 FBG1 和 FBG2 刻写在同一根光栅光纤中。两个梁的自由端分别和两个楔形滑块表面接触,两个楔形滑块高

低端交错固定在导轨上,由运动杆带动导轨上的楔形滑块左右移动。

粘贴 FBG2 的悬臂梁 2 和楔形滑块 2 为测量正向行程位移的机械结构。若运动杆向左运动,则进行正向位移测量,带有 FBG1 的悬臂梁 1 无变形,而带有 FBG2 的悬臂梁 2 处于变形状态。由于两个 FBG 处于同一环境下,温度对两者的影响基本相同,故 FBG1 可为 FBG2 提供温度补偿。将两者的中心波长漂移量的差值作为传感器的输出信号,由此获得外部位移的实时变化。反之,粘贴 FBG1 的悬臂梁 1 和楔形滑块 1 为测量负向行程位移的机械结构,若运动杆向右移动,则进行负向位移测量,两个悬臂梁的变形状况与正向行程的相反。若传感器在零位移处,两个悬臂梁均处于未变形状态,避免了现有传感器在测量正负位移过程中弹性元件一直处于变形状态导致易蠕变的状况,很大程度上提高测量结果的准确度。

1.2 传感器测量原理

对于中心波长为 λ 的 FBG,其中心波长的漂移量与所处环境的温度变化 ΔT 和它所受到的轴向应变 $\Delta \epsilon$ 的关系如下:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = (1 - P_e) + (\alpha_f + \xi) \times \Delta T, \quad (1)$$

式中, P_e 为光纤的弹光系数,常温时 $P_e \approx 0.22$, α_f 为光纤的热膨胀系数, ξ 为光纤的热光系数。

为获得高的灵敏度,设计悬臂梁由等强度部分和等截面部分组成,将 FBG 粘贴在等强度部分,可检测到悬臂梁表面的最大应变。两部分的长度相等,即 $L_1 = L_2$ 。等截面部分厚度是等强度部分厚度的两倍,即 $h_2 = 2h_1$ 。

根据等强度梁的力学特性,可知悬臂梁等强度部分的应变 ϵ 、挠度 w_1 与自由端作用力 F 的关系如下:

$$\epsilon = \frac{6L_1}{Eb_1h_1^2} \times F, \quad (2)$$

$$w_1 = \frac{6L_1^3}{Eb_1h_1^3} \times F, \quad (3)$$

式中, E 为梁的杨氏模量, L_1 、 h_1 、 b_1 分别为悬臂梁等强度部分的长度、厚度、宽度。

结合式(2)和式(3),可得应变 ϵ 和挠度 w_1 的关系如下:

$$\epsilon = \frac{h_1}{L_1^2} \times w_1. \quad (4)$$

对于等截面部分,挠度 w_2 与自由端受力 F 之间

的关系如下:

$$w_2 = \frac{4L_2^3}{Eb_2h_2^3} \times F. \quad (5)$$

在楔形滑块作用下,总体挠度变形 W 由等强度部分的 w_1 和等截面部分 w_2 的组成。由于 FBG 粘贴在等强度部分,因此需要得到挠度 w_1 和总挠度 W 之间的理论关系。悬臂梁的挠度变形分布如图 2 所示。等强度部分的挠度为 w_1 ,并产生转角 θ_1 ,等截面部分挠度为 w_2 ,但由于转角 θ_1 的存在,一方面等截面部分也在该转角的作用下产生挠度 w_{2-1} ,其中 $w_{2-1} = L_2 \times \sin\theta_1$ 。另一方面, w_2 的方向与 W 的方向存在夹角 θ_1 ,其在总挠度 W 方向的投影为有效挠度,则 $w_{2-2} = w_2 \times \cos\theta_1$ 。因此,挠度 w_1 和总挠度 W 之间的关系^[18]如下:

$$w_1 = W - L_2 \times \sin\theta_1 - w_2 \times \cos\theta_1. \quad (6)$$

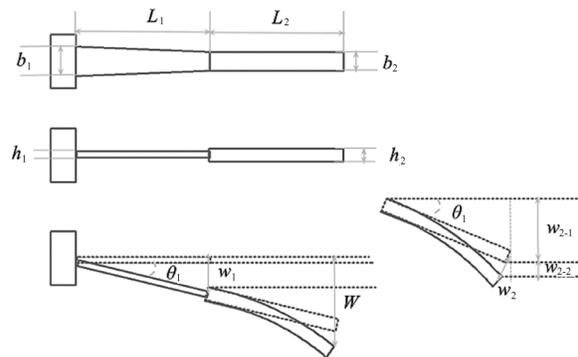


图2 悬臂梁的挠度传递原理

Fig. 2 Deflection transfer principle of cantilever

等强度部分顶端转角 θ_1 的推导式如下:

$$\theta_x = \frac{dw}{dx} = \int \frac{F(L_1 - x)}{EI_x} dx + C, \quad (7)$$

式中, x 为等强度部分到固定端的距离, I_x 为 x 处对应的惯性矩:

$$I_x = \frac{h_1^3}{12} \left(\frac{L_1 - x}{L_1} \right) b_1. \quad (8)$$

结合式(7)和式(8),可得:

$$\theta_x = \frac{12FL_1}{Eh_1^3b_1} x + C. \quad (9)$$

当 $x=0$ 时,距固定端的距离为 0,转角 $\theta_x = 0$,故 $C=0$ 。当 $x=L_1$ 时,可得转角 θ_1 为:

$$\theta_1 = \frac{12FL_1^2}{Eh_1^3b_1}. \quad (10)$$

结合式(6)和式(10),可知总的挠度 W 为:

$$W = \frac{6L_1^3F}{Eb_1h_1^3} + L_2 \times \sin \frac{12FL_1^2L_2}{Eh_1^3b_1} + \frac{4L_2^3F}{Eb_2h_2^3} \cos \frac{12FL_1^2}{Eh_1^3b_1}. \quad (11)$$

由于悬臂梁的转角较小,所以 $\sin\theta_1 \approx \theta_1$, $\cos\theta_1 \approx 1$,故将式(11)化简可得:

$$W = \frac{6L_1^3 F}{Eb_1 h_1^3} + \frac{12FL_1^2 L_2}{Eh_1^3 b_1} + \frac{4L_2^3 F}{Eb_2 h_2^3} \quad (12)$$

在实际设计中,根据设计需求及机床加工的可行性与方便性,将悬臂梁的参数设计为: $b_1 = 6 \text{ mm}$, $b_2 = 3 \text{ mm}$, $L_1 = L_2 = 30 \text{ mm}$, $h_1 = 1 \text{ mm}$, $h_2 = 2 \text{ mm}$,代入得其右侧3项的比值为6:12:1,因此 w_1 与总挠度 W 的关系为 $w_1 = 6W/19$ 。

最后,由楔形滑块的几何结构可得被测对象的位移 D 、斜面倾角 θ 以及滑块所引起的总挠度 W 之间的关系为 $W = D \times \tan\theta$,结合式(4)可得被测对象的位移 D 和粘贴 FBG 的悬臂梁表面应变关系为:

$$D = \epsilon \times \frac{19L_1^2}{6h_1 \tan\theta} \quad (13)$$

由于 FBG1 和 FBG2 可互相提供温度补偿,结合式(1)和式(13),可得两个 FBG 中心波长漂移量的差值 $\Delta\lambda_{\text{FBG2}} - \Delta\lambda_{\text{FBG1}}$ 与被测对象的位移 D 之间的关系如下:

$$D = \frac{19L_1^2}{6h_1 \tan\theta(1 - P_e)} \left(\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG2}}}{\lambda_{\text{FBG2}}} - \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG1}}}{\lambda_{\text{FBG1}}} \right) \quad (14)$$

由此可以发现被测位移 D 与两个 FBG 中心波长漂移量的差值 $\Delta\lambda_{\text{FBG2}} - \Delta\lambda_{\text{FBG1}}$ 呈线性关系。

2 传感器性能测试

为保证传感器精度、灵敏度等性能指标满足工程要求,开展相关测试实验。在实验中使用的实验装置和仪器如图3所示。采用自行研制的FBG解调仪(采集频率0—5000 Hz可调,精度5 pm,分辨率1 pm)采集两个FBG的波长数据。传感器的运动杆与精密螺旋位移计(精度为0.01 mm)相连,由其产生位移输入。下面给出传感器位移标定实验。

位移标定实验在室温恒定的实验室中进行,标定实验的操作步骤如下:首先将传感器调至零点位置,通过螺旋位移计将运动杆平稳地从0 mm推至10 mm,以10 mm为步长,拉伸至+50 mm,在每个位移节点保持1 min。其次,以相同的间隔将运动杆推回至0 mm。随后,将运动杆继续以相同间隔从0 mm推至-50 mm,同理再退回至0 mm处。将上述实验过程重复4次,并通过FBG解调器以10 Hz的采样频率记录。对采集的数据进行处理,得到在4次位移测试中FBG1和FBG2中心波长漂移量的实时变化趋势,如图4所示。

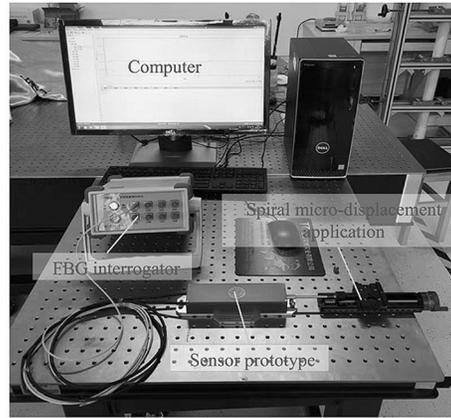


图3 实验装置和仪器

Fig. 3 Experimental apparatus and instruments

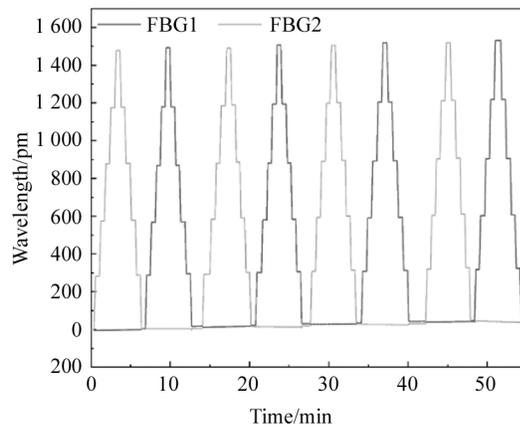


图4 FBG1和FBG2波长实时变化图

Fig. 4 Real-time wavelength changes diagram of FBG1 and FBG2

从图中可看出,两个FBG中心波长的最大漂移量为1493.09 pm,在正行程测量中,FBG1只受温度的影响,其波长变化量稳定在0 pm左右,由于两者所处环境相同,FBG1可为FBG2提供温度补偿,反之,情况与之相反。

将FBG1和FBG2中心波长漂移量的差值作为传感器的输出信号,其变化如图5所示。不难发现在第4次位移测试在-10 mm处,正程和回程的偏差最大,偏差值为13 pm,迟滞性误差式如下:

$$E_i = \frac{\Delta_{\text{max}}}{Y_{\text{FS}}} \quad (15)$$

式中, E_i 为反映传感器迟滞现象的标准, Δ_{max} 为传感器在满量程内最大的迟滞差值, Y_{FS} 为满量程输出值。

可得4次位移循环测试的迟滞性误差为0.872%,误差值较小,其产生原因可能是由传感器装配的机械结构和安装工艺引起的。

读取图每个位移节点加载和卸载处的波长漂移

量,得到 8 条位移循环测试图,如图 6 所示。可见 8 条直线在 +30 mm 处的偏差最大,偏差值为 19.12 μm。重复性误差式如下:

$$E_r = \frac{\Delta_{\max}}{Y_{FS}} \quad (16)$$

式中, E_r 为反映传感器重复性的标准。

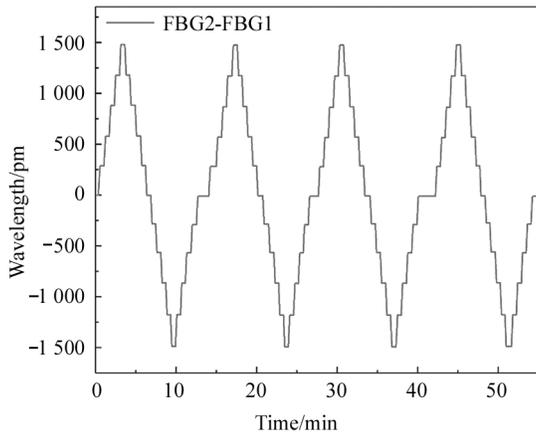


图 5 FBG1 和 FBG2 波长漂移差输出图

Fig. 5 Output diagram of wavelength drift difference between FBG1 and FBG2

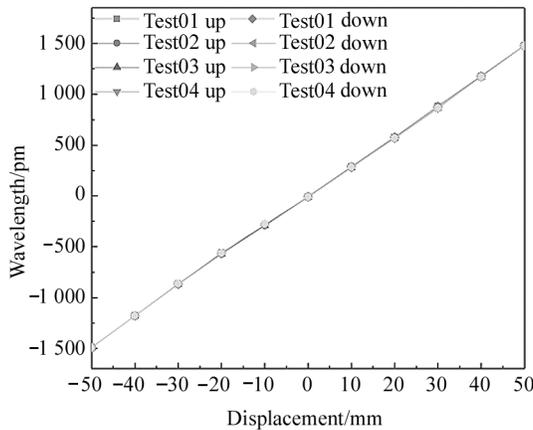


图 6 8 条循环位移测试图

Fig. 6 8 cyclic displacement test charts

可得 4 次位移循环测试的重复性误差为 1.28%, 误差值较小, 故所设计的传感器具有良好的重复性。

对读取的每个位移节点对应的加载卸载数据进行算术平均, 再进行线性拟合得到位移和波长漂移量之间的理论关系, 如图 7 所示。根据 4 次循环测试的均值拟合情况, 得到两 FBG 波长漂移量的差值和外界位移变化量之间的关系, 可知传感器的灵敏度为 29.369 pm/mm, 线性度为 0.9998, 表明该传感器具有良好的线性度。

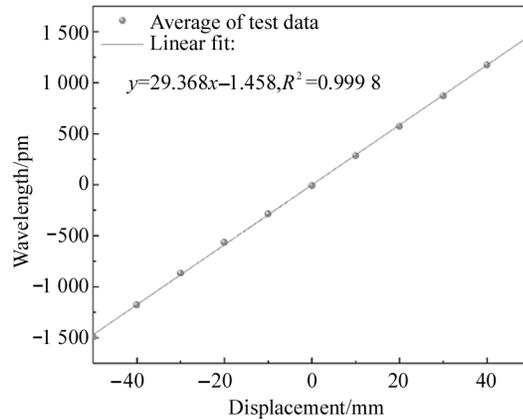


图 7 位移与平均波长输出数据的线性拟合图

Fig. 7 Linear fitting diagram of displacement and average wavelength output data

3 工程应用

3.1 工程概况

为保证某市地铁的安全运行, 对该地铁线路某站处进行地铁隧道脱空变形实时监测。主要从道床与衬砌之间的相对变形(道床脱空变形)、道床的差异沉降、道床伸缩缝监测、隧道管片接头环缝监测 4 个方面进行监测。

3.2 位移传感器的现场安装

监测总体安装示意图如图 8 所示。首先对 8 个传感器依次进行 1—8 号编排, 对应地放置在 1—8 号监测点, 通过固定夹具进行安装。

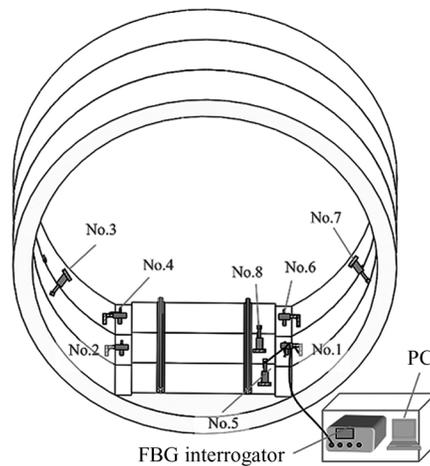


图 8 监测总体安装示意图

Fig. 8 Monitoring the overall installation diagram

在道床与衬砌的相对变形监测中, 选取两个截面, 在同一截面的两侧分别布置监测点, 故有 1、2、4、6 四个监测点监测其变形状况。如图 9 所示, 是在道

床和衬砌相对变形监测中传感器的安装方式,将传感器布置在衬砌的周向位置,钢丝布置在拉杆的延长线上,一端与拉杆头部固定,另一端与道床固定,导致传感器及钢丝与道床水平面保持一定夹角 θ 。根据现场安装情况,得到传感器与道床的夹角约为 32° ,可得沿拉杆滑动方向发生相对位移 D 与道床与衬砌的垂直位移 H 的关系为 $H = S \times \cos 32^\circ$ 。

可根据同一截面两侧监测点的差异变形得到道床的沉降量。

在道床伸缩缝监测中,选取 5、8 两个监测点监测道床伸缩缝的变化量。在两个监测点分别进行传感器安装,将拉杆固定夹具和传感器分别固定在裂缝的两侧,现场安装后保证传感器位于零点位置。

在隧道管片接头环缝监测中,选取一个截面,在左右两侧分别设置 3、7 两个监测点监测环缝的变化量。其测量及安装方式同道床裂缝监测中的安装方式相同。

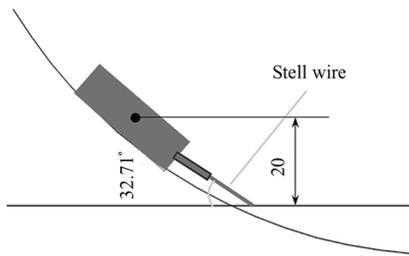


图 9 道床和衬砌相对变形监测中传感器的安装方式
Fig. 9 Installation method of sensor in monitoring relative deformation of track bed and lining

其次,将 1—4 号传感器通过单芯单模光纤首尾串接,首、尾两个光纤均引至 FBG 解调器附近,接上 FC/APC 跳线。5—8 号传感器采取同样串接方式。其中 1—4 号传感器连接光缆线路置于机柜对侧管道的线架上,5—8 号传感器连接光缆线路置于机柜的线架上,由于 1 号传感器和 2 号传感器的光缆线路穿过道床,需用 PVC 套管对其进行包装,防止损坏光缆。FBG 解调器和便携式计算机,放于专用的机柜中,挂架采用膨胀螺栓牢固地固定在隧道侧壁上,再通过卡扣的方式与机柜连接在一起,保证不影响列车运行以及出现坠落等问题。

最后将两根跳线接入解调仪的 CH1 和 CH2 端口,解调仪输出信号接入计算机,记录各个传感器的波长漂移量数据,通过专用软件进行数据处理,再由实验室标定实验得到的位移—波长漂移量的关系式

反推出位移的变化量。

3.3 测试结果分析

本工程于 2021 年 3 月 27 日至 2021 年 6 月 3 日进行,根据所采集的现场实时数据,得到了地铁隧道这两个多月的变形状况。

3.3.1 道床与衬砌的相对变形与差异沉降监测分析

如图 10(a)所示,为 1 号监测点对道床与衬砌的相对变形监测,可看出右侧 1 号监测点道床与衬砌的相对沉降变形的变化范围为 $-0.69 \sim 0.34$ mm,整体变形成上升趋势,总的相对上升量为 0.46 mm。图中选取第 10 天道床与衬砌的相对沉降变形监测

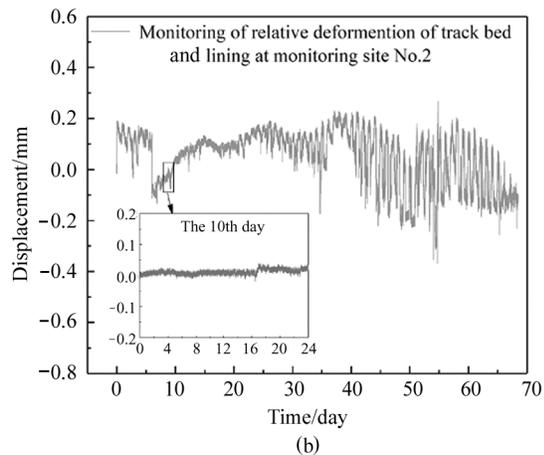
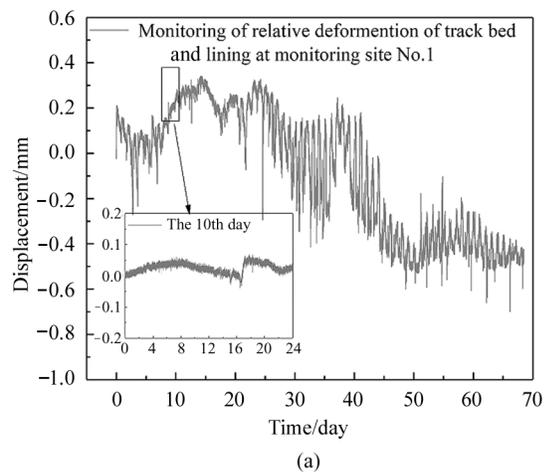


图 10 第一截面处监测点对道床与衬砌的相对变形监测:

- (a) 1 号监测点道床与衬砌相对变形监测;
- (b) 2 号监测点道床与衬砌相对变形监测

Fig. 10 The first section of the monitoring site to track bed and lining relative deformation monitoring:

- (a) Monitoring of relative deformation of track bed and lining at monitoring site No. 1;
- (b) Monitoring of relative deformation of track bed and lining at monitoring site No. 2

数据,发现在列车运营阶段,道床与衬砌的最大相对下沉量为 0.057 mm,最大相对上升量为 0.036 mm,在列车停止运营阶段,道床与衬砌的相对沉降变形基本保持稳定。如图 10(b)所示,为 2 号监测点对道床与衬砌的相对变形监测,发现左侧 2 号监测点道床与衬砌的相对沉降变形的变化范围为 -0.37—0.27 mm,整体变形呈上升趋势,总的相对上升量为 0.12 mm。图中选取第 10 天道床与衬砌的相对沉降变形监测数据,发现道床与衬砌的相对沉降变形基本保持稳定。

由于 1 号监测点和 2 号监测点位移在同一截面处,通过对比两侧的变形情况可得到道床的差异沉降,如图 11 所示,可看出左右两侧道床与衬砌的相对变化趋势基本相同,从 68 天监测来看,右侧相对左侧的上升量为 0.34 mm。

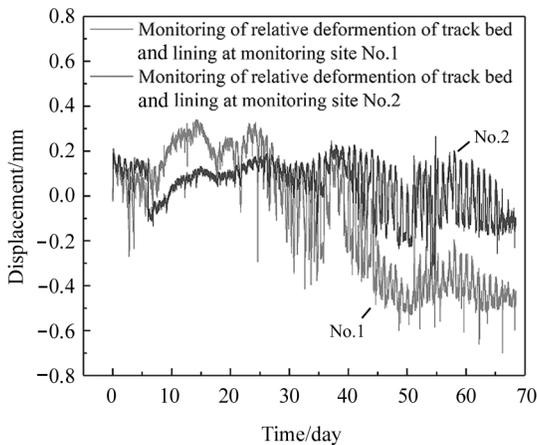


图 11 1 号监测点和 2 号监测点的对比图
Fig. 11 Comparison of monitoring site No. 1 and monitoring site No. 2

在第二截面处选取的 4 号监测点和 6 号监测点的监测状况如图 12 所示,可看出 4 号监测点道床与衬砌的相对沉降变形的变化范围为 -0.3—0.45 mm,在初始状态附近上下波动,总的相对上升量为 0.084 mm。图中选取第 10 天道床与衬砌的相对沉降变形监测数据,道床与衬砌在无列车运营时相对沉降变形基本保持稳定,列车运营阶段最大下沉量为 0.25 mm。6 号监测点道床与衬砌的相对沉降变形的变化范围为 -0.59—0.17 mm,整体变形呈上升趋势,总的相对上升量为 0.3 mm。图中选取第 10 天道床与衬砌的相对沉降变形监测数据,发现在列车运营阶段,道床与衬砌的相对沉降变形在

0.1 mm 以内,列车停运阶段基本比较稳定。

左右两侧监测点的监测状况对比如图 13 所示,同一截面处两侧形变的变化趋势基本相同,左侧道床与衬砌的相对沉降变形波动较大,左侧相对于右侧的上升量约为 0.216 mm。由此可知,道床与衬砌的相对变形的最大值为 0.59 mm,变形较小,结构比较稳定。

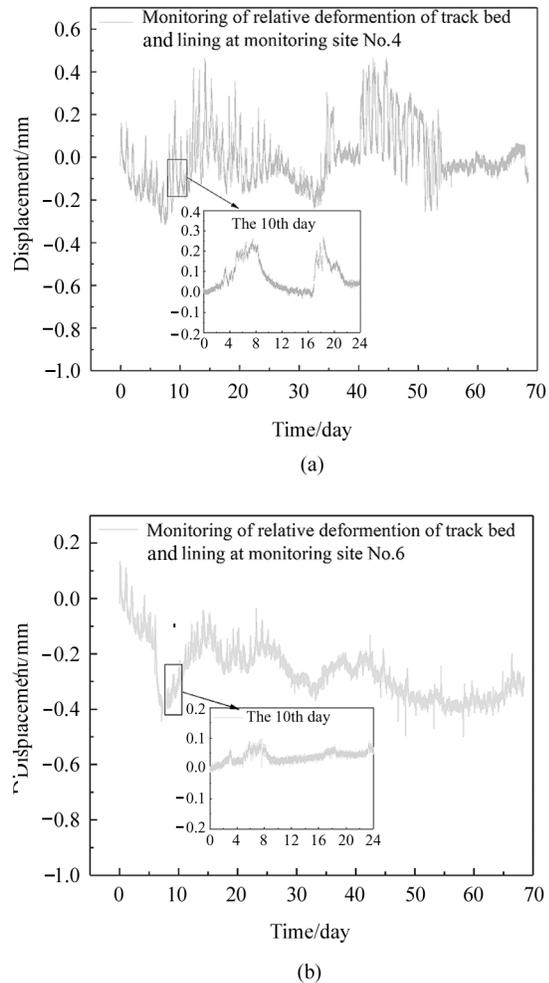


图 12 第二截面处监测点对道床与衬砌的相对变形监测:
(a) 4 号监测点道床与衬砌相对变形监测;
(b) 6 号监测点道床与衬砌相对变形监测
Fig. 12 The second section of the monitoring site to track bed and lining relative deformation monitoring:
(a) Monitoring of relative deformation of track bed and lining at monitoring site No. 4; (b) Monitoring of relative deformation of track bed and lining at monitoring site No. 6

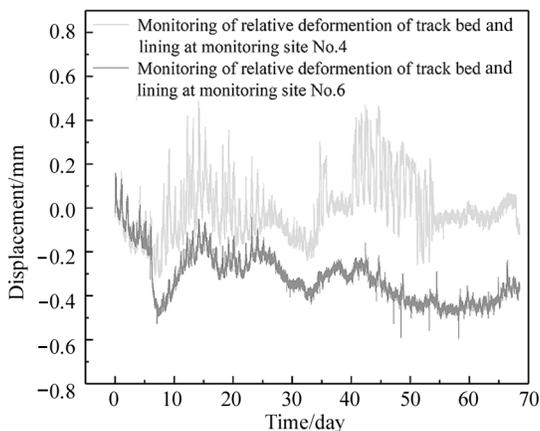


图 13 4号监测点和6号监测点的对比图
 Fig. 13 Comparison of monitoring site No. 4 and monitoring site No. 6

3.3.2 道床伸缩缝的监测分析

如图 14(a)所示,为 5 号监测点伸缩缝的变化,

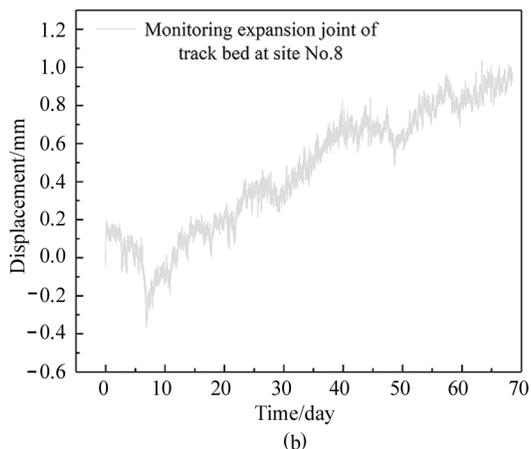
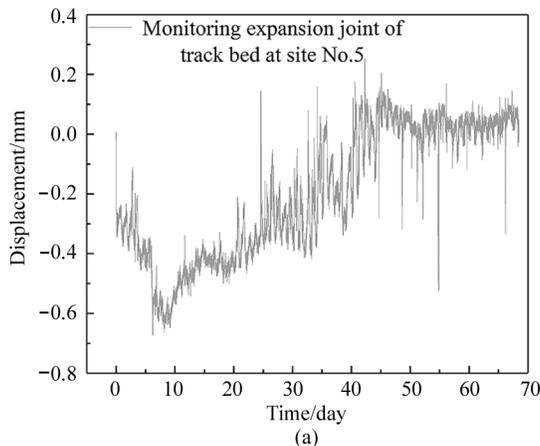


图 14 对道床伸缩缝的监测:
 (a) 5号监测点道床伸缩缝监测;
 (b) 8号监测点道床伸缩缝监测

Fig. 14 Monitoring expansion joint of track bed:

- (a) Monitoring expansion joint of track bed at site No. 5;
- (b) Monitoring expansion joint of track bed at site No. 8

可看出在 0—7 天内伸缩缝长度逐渐减小,减小了 0.62 mm,总体处于减小的状态,最终保持在初始状态附近波动。如图 14(b)所示,为 8 号监测点伸缩缝的变化,可知在 0—5 天内,伸缩缝逐渐减小,减小了 0.36 mm,随后伸缩缝的长度逐渐增加,增加了 1.31 mm。

通过对比两侧监测点位置的变形状况,如图 15 所示,发现两者的变化趋势基本相同,8 号监测点的伸缩缝逐渐增大,5 号监测点伸缩缝最终在初始状态附近波动。

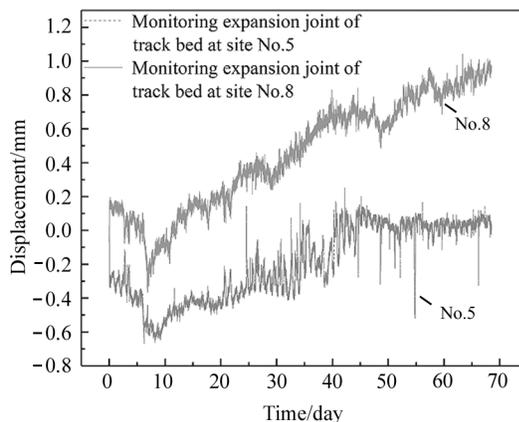
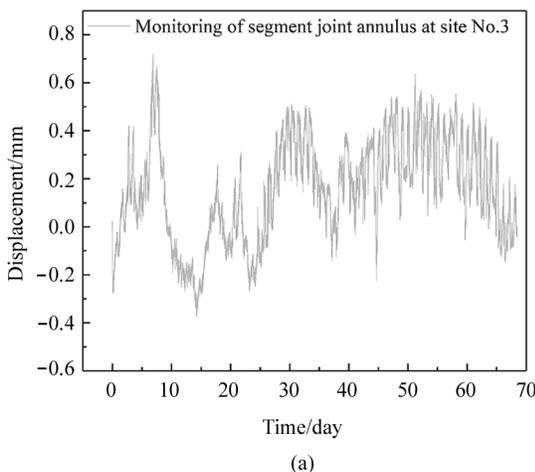


图 15 5号监测点和8号监测点的对比图
 Fig. 15 Comparison of monitoring site No. 5 and monitoring site No. 8

3.3.3 隧道管片接头环缝的监测分析

在隧道管片接头环缝的监测中,选取 3 号和 7 号两个监测点,两者位于同一截面处。如图 16(a)所示,为 3 号监测点管片接头环缝的监测,可以看出接头环缝长度的变化范围为 -0.37—0.71 mm,波动较大。如图 16(b)所示,为 7 号监测点管片接头环缝的监测,可知接头环缝的变化范围为 -0.26—0.7 mm。



(a)

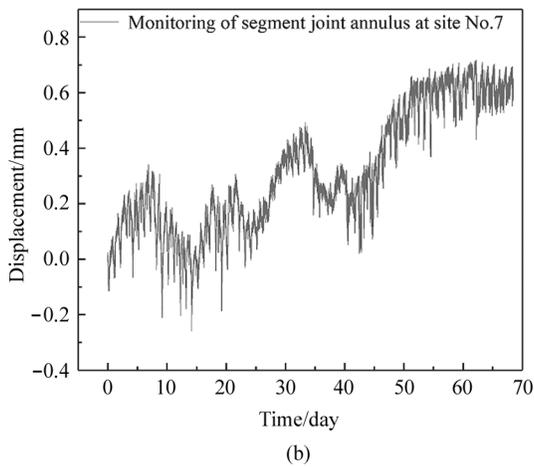


图 16 对隧道管片接头环缝的监测:
(a) 3 号监测点管片接头环缝监测;
(b) 7 号监测点管片接头环缝监测

Fig. 16 Monitoring the annulus of tunnel segment joint:
(a) Monitoring of segment joint annulus at site No. 3;
(b) Monitoring of segment joint annulus at site No. 7

随后对两侧监测点的数据进行对比,如图 17 所示,发现两侧环缝变化趋势基本相同,7号监测点管片接头的环缝更大,但相较于 3 号监测点管片接头环缝的波动更小。可见环缝伸长的最大值为 0.7 mm,形变较小,地铁隧道结构比较稳定。

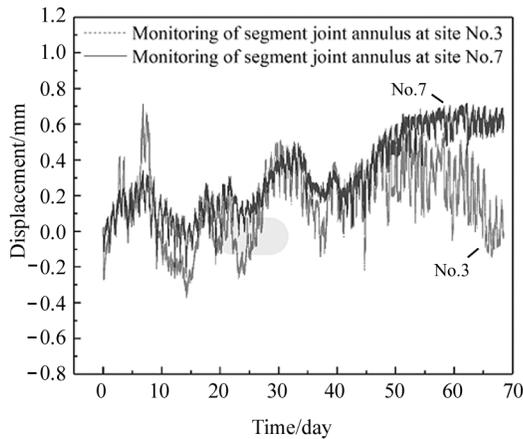


图 17 3 号监测点和 7 号监测点的对比图
Fig. 17 Comparison of monitoring site No. 3
and monitoring site No. 7

4 结 论

本文制作了一种双梁互补式 FBG 位移传感器。设计了两对“FBG-悬臂梁-楔形滑块”结构,实现了对正负位移的独立测量。该传感器在零位移处,两对悬臂梁处于未变形状态,解决了现有传感器处于变

形状态导致弹性元件易发生蠕变的问题。综合性能测试实验表明,新型传感器的测量范围为 ± 50 mm,灵敏度为 29.369 pm/mm,重复性误差和迟滞性误差均较小,具有很好的往复能力,在重复性使用和正负位移测量方面具有很强的优势。

在工程应用中,新型位移传感器已经成功完成某市地铁线路的隧道脱空实施变形监测,获得了各个监测点的位移监测数据,反映了监测点的位移变化状况。通过分析发现,这段期间地铁的变形较小,结构比较稳定。因此,表明该传感器可以有效地测量正负双向位移,在实时结构健康监测中有更好的应用前景。

参考文献:

- [1] LU H L. Analysis of current situation of deformation monitoring of subway tunnel[J]. *Mine Surveying*, 2019, 47(5): 67-71.
卢会龙. 地铁隧道变形监测现状分析[J]. *矿山测量*, 2019, 47(5): 67-71.
- [2] TAO M Z. Monitoring and analysis of structural settlement of subway tunnel[J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2022(1): 156-159.
陶茂枕. 地铁隧道结构沉降监测分析[J]. *城市勘测*, 2022(1): 156-159.
- [3] LIANG L, HU C H, DAI S, et al. Experimental research on pipeline curvature monitoring based on FBG sensing technology[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2021, 32(5): 499-504.
梁磊, 胡程辉, 戴澍, 等. 基于 FBG 传感技术的管道曲率监测试验研究[J]. *光电子 • 激光*, 2021, 32(5): 499-504.
- [4] TIAN X F, DONG Q L, GUO J H. Study on electromagnetic effect of new electromagnetic induction displacement sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(11): 156-161.
田旭峰, 董全林, 郭景昊. 新型电磁感应位移传感器电磁效应研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(11): 156-161.
- [5] ZHOU Z, YANG C Q, QU F, et al. FBG high temperature sensor and its measurement performance research[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2021, 32(8): 806-811.
周正, 杨才千, 瞿冯, 等. FBG 高温传感器及其测量性能研究[J]. *光电子 • 激光*, 2021, 32(8): 806-811.
- [6] KAUR G, KALER R S. Investigate the optical FBG sensor to monitor displacement and vibration in civil structure [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(2): 1-8.
- [7] CHEN C. Application of FBG sensing technology in pres-

- sure monitoring of civil[J]. Study of Science and Engineering at RTVU, 2017(3):75-77.
- 陈晨. FBG 传感技术在土木工程压力监测中的应用[J]. 电大理工, 2017(3):75-77.
- [8] LV J, HU Z, REN G, et al. Research on new FBG displacement sensor and its application in Beijing Daxing airport project[J]. Optik, 2019, 178:146-155.
- [9] CHEN Z W, CHEN H Q, SHI W H, et al. Design, fabrication and performance research of a high precision FBG micro-displacement sensor with temperature compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0906006.
- 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):0906006.
- [10] GOU 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.
- 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.
- [11] LI T, SHI C, REN H. A novel fiber Bragg grating displacement sensor with a sub-micrometer resolution[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(14):1199-1202.
- [12] XING X K, LIU F F, LIN L R, et al. Research on fiber Bragg grating displacement sensor with tension cantilever beam [J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(12):1-4.
- 邢心魁, 刘凡凡, 林揽日, 等. 受拉型悬臂梁光纤布拉格光栅位移传感器研究[J]. 光通信技术, 2021, 45(12):1-4.
- [13] SUN L, SU Z X, ZHANG C W, et al. A fiber Bragg grating displacement sensor based on wedge cavity structure[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2017, 28(6):573-578.
- 孙丽, 苏中新, 张春巍, 等. 基于楔形腔结构的光纤光栅位移传感器[J]. 光电子·激光, 2017, 28(06):573-578.
- [14] WANG S, ZHU L, XIN L, et al. Fiber grating displacement sensor of tape measure structure[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54:102-107.
- [15] KIM K T, KIM D G. Temperature-compensative displacement sensor based on a pair of fiber Bragg gratings attached to a metal band[J]. Journal of Sensor Science and Technology, 2018, 27(2):82-85.
- [16] GOU Z, ZHANG W H, YANG H, et al. Research of high sensitivity displacement sensor based on fiber bragg grating[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2019(4):17-19+40.
- 郭振, 张文华, 杨辉, 等. 基于光纤光栅的高灵敏度位移研制[J]. 光线与电缆及其应用技术, 2019(4):17-19+40.
- [17] JINEESH T, RAJANNA T R, SUDARRAJAN A. Temperature compensated FBG displacement sensor for long-range applications[J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 4(1):1-4.
- [18] GUO Y, ZHOU W, XIONG L, et al. A fiber Bragg grating sensor for positive and negative displacement measurement[J]. IEEE Sensors, 2021, 21(19):2156421571.

作者简介:

郭永兴 (1986—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术方面的研究.