

文章编号:1001-5078(2023)06-0912-07

· 光纤传感及光通讯技术 ·

面向铁路轨道的光纤物联网安全状态监测系统

方园, 张小燕, 孙洪迪

(北京工业职业技术学院 信息工程学院, 北京 100042)

摘要:为了准确地获取铁路轨道结构状态,提高测试点位灵敏度和抑制干扰,搭建了基于光纤物联网的状态监测系统,设计了一种可抑制非测试位置应力干扰的FBG传感器封装。系统通过多路光开关和波分复用技术实现在长距离上大范围监测轨道结构状态。采用三角形封装设计使非传感器对测试位置的应力响应不敏感。仿真分析了车轮挤压轨道后的应力场分布特性。分析了不同时刻测试位置处三个坐标轴方向上的应力变化,其中 x 轴向最大可达 $-186.2\ \mu\epsilon$ 。实验对本文设计的优化FBG封装结构的增敏效果进行定量分析,灵敏度达 $20.1\ \text{pm/kN}$,比未优化前提高了近8倍。在温漂补偿实验中,验证了无应力与有应力状态下,温度补偿都可以有效抑制测试环境温度变化造成的波长偏移。从动态测试曲线中,可以准确的提取测试位置的应变响应,最大波长偏移为 $253.2\ \text{pm}$,符合设计要求。

关键词: 光纤传感; 物联网; 轨道检测; 状态分析

中图分类号: TP273; TN929.11 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.016

Optical fiber internet of things safety condition monitoring system for railway tracks

FANG Yuan, ZHANG Xiao-yan, SUN Hong-di

(School of Information Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: In order to accurately obtain the structural state of the railway track, improve the sensitivity of the test point and suppress the interference, a condition monitoring system based on the optical fiber Internet of Things is built, and a FBG sensor package is designed that can suppress stress interference at the non-test position. The system enables wide range monitoring of track structure status over long distances through multi-channel optical switches and wavelength division multiplexing technology. The non-sensor insensitive to stress response at the test location is made by the delta package design. The stress field distribution after wheel crush on the track is simulated and analyzed. The stress changes in the directions of the three coordinate axes at the test positions at different times are analyzed, with a maximum of $-186.2\ \mu\epsilon$ in the x -axis. The quantitative analysis of the sensitization effect of the optimized FBG packaging structure designed in this paper shows a sensitivity of $20.1\ \text{pm/kN}$, which is nearly 8 times higher than that before the optimization. In the temperature drift compensation experiment, it is verified that the temperature compensation can effectively suppress the wavelength shift caused by the temperature change of the test environment in both unstressed and stressed states. From the dynamic test curve, the strain response of the test position can be accurately extracted, and the maximum wavelength shift is $253.2\ \text{pm}$, which meets the design requirements.

Keywords: optical fiber sensing; internet of things; track detection; state analysis

基金项目: 北京工业职业技术学院重点项目 (No. BGY2022KY-18Z) 资助。

作者简介: 方园 (1977-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为数据通信、物联网、信息安全。E-mail: bgyfangyuan@sina.com

收稿日期: 2022-08-09; 修订日期: 2022-09-08

1 引言

中国铁路总里程数远超他国,为国家发展和改善民生提供了重要保障^[1]。而不断增加的铁路数量也为铁路运营管理与安全监控带来了巨大压力。传统轨道检测技术采用分段巡线等手段,工作效率低、检测精度差,并且巡检周期长。光纤传感技术由于其测量距离远、抗干扰性强,非常适用于铁路轨道状态的监测^[2]。

由于分布式光纤虽然在轨道交通测试中具有大范围监测的优势,但由于其回波信号弱,信号容易被噪声淹没,为了提高对轨道状态监测的精度,获取更多有效信息,采用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感技术具有更好的测试效果。Chen X. 等人^[3]将光纤光栅网络应用于交通动态测重领域,验证了载荷与轴向应变存在函数关系。韩国的铁道研究院将光纤压力传感器分布设置于高速铁路的隧道中,完成了隧道结构状态的安全监测,为铁路运营提供了保障^[4]。Massimo 等人^[5]将光纤光栅组网布设于铁路钢轨,获取了列车运行时的速度与载荷实时数据,为分析轨道运行状态提供了基础信息。在我国,轨道交通状态的监测也颇为受到重视。刘云^[6]提出基于 FBG 的磁悬浮列车实时定位系统,位置精度可达 5 m。方文珊^[7]提出在固定钢轨上铺设应力敏感型 FBG,在对比不同封装形式传感器的基础上,验证了 FBG 测试稳定性更好。高亮^[8]设计了一种长期轮轨力监测系统,FBG 测试精度优于 230 pm/N。蔡小培^[9]在铁路高架轨道上设置了光纤物联网,获取其变形分布,实现了特殊结构应力场的采集。香港理工大学使用光纤传感器对青马大桥上的轨道振动进行测试,分析了振动参量对轨道工作状态的影响^[10]。张颜等人^[11]采用粘贴式 FBG 对高铁进行应力场状态监测,监测精度可达 35.6 pm/N;董雷等人^[12]研究了应变和温度的解耦问题,从而可以对测试过程中温度漂移有效抑制。

综上所述,以解调振动信号获取列车位置和速度等状态信息的光纤传感网络监控技术文献居多,在动态测试过程中,侧重通过振动信号分析列车与轨道状态。例如朱东飞^[13]采用光栅阵列获取轨道列车位置与速度,测速误差约 ± 2 km/h。朱汪友^[14]等人将 BP-SVM 算法应用于振源位置解算,使信号数据融合率超过 80%。对于本文而言,研究内容更

侧重列车对轨道本身的应力场作用,从而分析预测轨道状态。对比文献^[15]而言,在温度补偿的基础上扩展了动静态应力场作用效果的分析,相比位移监测对轨道状态的反演更具说服力。

2 光纤物联网传感系统

2.1 光纤物联网模型

光纤物联网主要由感知层、网络层和应用层组成^[16]。其中,感知层是铺设在铁路轨道上的光纤传感网络。网络层是包含数据采集模块、数据流控制模块及光开关等用于测试信号传输的部分。应用层是终端控制端,包括监控平台,交通指挥中心等。其模型架构如图 1 所示。

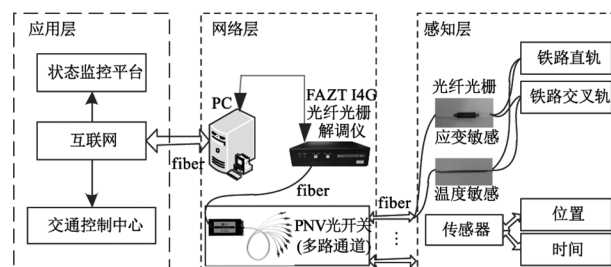


图 1 光纤物联网铁路轨道监控模型

Fig. 1 Optical fiber IoT railway track monitoring model

本模型中,应用层直接面向监控用户,为交通运行提供最终分析数据提供判断依据。。状态监控平台与交通控制中心是有互联网数据进行传输的,互联网的接口与 PC 进行交互。网络层完成数据采集、分析与控制,实现不同测试区间段的选控,完成对数据的滤波抑噪等预处理。PC 端通过 USB 与 FAZT-I4G 光纤光栅解调仪相连接。解调仪长时监测的波长分辨精度为 1 pm,系统测试过程中采样为 4 kHz,实验中采用 4 通道分时切换。感知层为铺设在铁路轨道上的光纤传感器及一些环境参数传感器,用于获取计算铁路轨道状态的原始测试数据。应变传感器采用深圳中科传感的 SA-1 应变型光纤光栅传感器,其最小分辨率为 0.5 pm,外部采用钢片封装结构,与测试表面紧贴获取应变数据。温度传感器采用深圳中科传感的 SA-3 温度型光纤光栅传感器,其最小分辨率为 0.5 pm,外部采用圆柱形钢制套筒封装,避免应变温度测试的干扰。两种传感延铁路轨道铺设,应力 FBG 传感器采用螺钉固定待测位置的方式,温度 FBG 传感器采用悬空,最后将两个 FBG 封装至一个独立采集盒中。

2.2 感知系统设计

在物联网框架下,搭建了光纤传感网络系统并设计了面向铁路轨道的光纤传感模块。系统由扫频激光器、光隔离器、耦合器、解调模块及 FBG 传感器等构成,由于铁路轨道距离长,需要的监测点数多,所以采用光开关分时复用和激光扫频的波分复用技术,如图 2 所示。

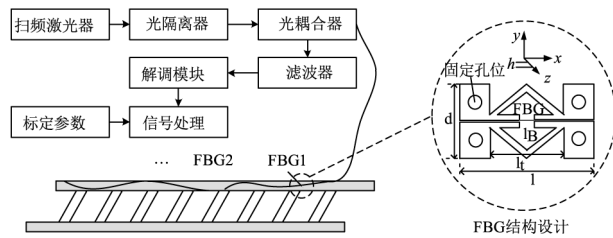


图 2 感知系统及 FBG 结构设计

Fig. 2 Perception system and FBG structure design

感知系统采用扫频激光器完成对所有 FBG 波长范围进行扫频分析,光隔离器用于阻断回波信号的光源的干扰,光耦合器实现回波信号进入滤波电路的单向性。滤波器对初始信号杂散噪声进行抑制。解调模块完成对回波信号的光谱分析,从而根据波长偏移情况分析测试位置的应力场变化。同时,通过标定参数对温度变化进行漂移补偿。虽然应力在三个轴向的分量存在一定耦合,但实际测试过程中,裂纹与拉伤等问题均出现在 x 轴方向,故强化获取 x 轴向应变,弱化 y 轴与 z 轴应变响应有利于获取信号。FBG 传感器的封装结构如虚线框中所示,该设计区别于传统封装的重要两个特征,一是红色 FBG 敏感区位置下测的钢制结构是分离的,这样可以有效保证传感器的响应灵敏度,降低因孔位固定造成的敏感度降低;二是等腰三角形的结构设计,该结构可以最大程度地保留 y 轴方向上的应力敏感,而 x 轴向传导的应力变化被削弱。结构体总长 l 为 25 mm,三角区底边 l_i 为 15 mm,宽度 d 为 10 mm,厚 h 为 2 mm。

由于系统选用的解调仪带宽 40 nm,从单个测试点位 FBG 的带宽仅需 1.5 nm,在预留一定冗余的条件下,单纤可携带 20 个 FBG 传感器。而在连接位置会增加一段额外的光纤,该段额外光纤目的是可以使系统根据时钟差知道连接点的对应位置,由此实现分时复用。每根光纤上的 FBG 错峰 0.5 nm,即可得到 3 组分时测试点集,共 60 个测试点,再采用 16 路光开关就能由一台解调仪分时控制 960 个

点,对于 25 m 长的铁轨,即可实现 2.4 km 上每一根铁轨的实时监测。

3 工作原理

3.1 应力场与 FBG 波长响应

设温度保持不变,FBG 在收到应力后,其中心波长与轴向应变之间的函数^[17]关系有:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [v(P_{11} + P_{12})] \right\} \varepsilon \quad (1)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 为波长偏移量; λ_B 为中心波长值; n_{eff} 为有效折射率; v 为光纤泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为单模光纤弹光系数; ε 为应变值。对 FBG 而言,当其尺寸参数固定后,其弹光系数可表示为:

$$P_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - v(P_{11} + P_{12})] \quad (2)$$

则波长偏移量简化为:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e) \lambda_B \varepsilon \quad (3)$$

本文 FBG 的增敏结构可以看作是两个固定点夹持后提供预应力的结果。两点之间的距离等于三角区的底边长度 l_i 。则由材料力学可知,应变有:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_i}{l_i} = \frac{l_B}{l_i} \varepsilon_f \quad (4)$$

由上式可以看出,当结构尺寸选定后,结构应力与测试应力值为线性关系,而增大 l_b 和 l_i 之间的差异可以调节应力转化的放大倍数。

3.2 温漂补偿

因为系统应用于户外铁路轨道的监测,室外温差大,温度与应变的交叉敏感必须有效分离,否则应力测试结果会严重失真。故采用对应位置上铺设温度敏感型 FBG 传感器的方式同时获取温度补偿信号。温度与应变波长耦合函数有:

$$\Delta\lambda_B = k_T \Delta T + k_\varepsilon \varepsilon \quad (5)$$

其中, k_T 为温度响应系数; k_ε 为应变响应系数。则温漂解耦矩阵方程有:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\varepsilon_1} & k_{T_1} \\ k_{\varepsilon_2} & k_{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 分别表示两个不同封装 FBG 传感器采集的回波波长,4 个 k 值参数分别是对应两组 FBG 的温度与应变响应系数(该系数可以在实验室测试标定,视为常数),则经过温漂补偿的应变为:

$$\varepsilon = \frac{k_{\varepsilon_2}}{k_{\varepsilon_1}} [\Delta\lambda_1 - (k_{T_1}/k_{T_2}) \Delta\lambda_2] \quad (7)$$

4 仿真分析

4.1 轨道应力场分布

为了对轨道应力场进行分析,需要对车轮与铁轨的挤压过程进行有限元分析,构建轨道单元节点的载荷矩阵,通过最小势能分析轨道应变分布特性。仿真分析过程中参数设置:弹性模量为 2.11×10^5 MPa、密度为 $7\ 840\text{ kg/m}^3$ 、泊松比为 0.298,截面积 57 cm^2 ,三坐标轴方向上的截面系数 217.3、208.3 和 45 代入仿真模型中,其仿真结果如图 3 所示。

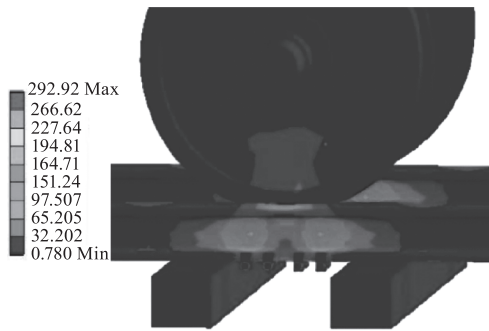


图3 轨道应力场分布

Fig. 3 Orbital stress field distribution

由图 3 可知,铁轨钢型材料的应变分布以施力点为中心呈放射性扩散状,中心位置延铁轨两侧变形逐渐加大然后逐渐减小。两侧的应力场区域会在不同位置显现出差异,车轮施力位置越靠近下方枕木时,其变形区延伸范围越小,反之,当其越接近两个枕木中心位置时,其变形延伸范围越大。分析认为,仿真过程中,枕木位置被设置成支撑点,仿真环境默认为钢型支撑,所以施力位置与其越接近时,对应位置可变形度越低。故认为在实际测试中该应力响应分布会略大于仿真分析结果,但其总体分布趋势是一致的。

4.2 动态响应分析

为了更客观地反应铁轨应力状态,对铁轨随时间变化的动态应力场分布变化进行了分析,设置施力点移动速度为 150 km/h ,然后对 50.0 cm 范围轨道上的应变变化量进行采样,采样频率为 4.0 kHz ,则三个轴向上的应力与不同载荷下动态响应曲线如图 4 所示。

如图 4(a) 所示,在长度为 500 mm 的结构体位置上,当施加 5 T 重的移动应力,此为 0 时刻三个轴向上的应力响应值。可以看出由于 x 轴具有明显的延展性,从而其应力变化最明显,最大值可达

$-186.2\ \mu\epsilon$ 。两侧的应力分布区重要在施力位置 100 mm 处,然后产生 1 个子波峰,波峰极值为 $-100.6\ \mu\epsilon$,然后应力逐渐减小直至消失。对比而言, y 轴与 x 轴的响应位置虽然相同,但是其振幅明显偏小,并且与 x 轴的形变方向正好相反。而 z 轴几乎不能看出应变差异。说明系统测试过程中主要采集 x 轴方向上的应力场变化。如图 4(b) 所示,经过 2.5 ms 后,随着施力位置的偏移,应力响应曲线也随之偏移,偏移量约 100 mm 。可以看出波形几乎一致,说明动态条件下系统同样可以获取对应的应变响应信号。

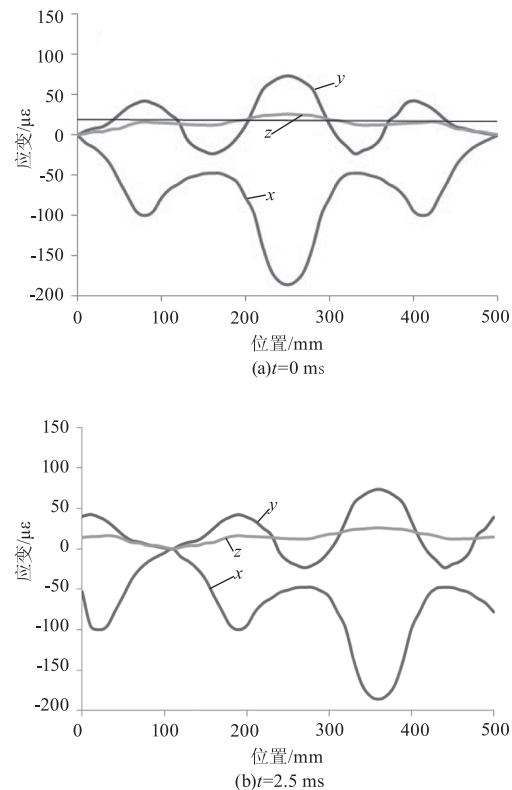


图4 不同时刻下相同位置的应变响应值

Fig. 4 Strain response values of the same position at different times

5 实验

5.1 FBG 增敏结构测试

首先对本文设计的 FBG 封装结构增敏效果进行测试,测试时施力施加位置分别位于测试点正上方和正上方偏移 20.0 cm 的位置,采用这两个施力位置的目的是对比分析正位置施力与侧向干扰施力之间的差异,因为火车车轮采用并排设计,测试时通过封装形式减小应力相互干扰可以更有效地反演轨道状态。

测试采用递增施力的方式完成,施力范围为

[1.0 kN, 20.0 kN], 每改变 1.0 kN 记录一次波长偏移量, 并将本系统中优化后固定 (OF, Optimized Fixed) 与未优化固定式封装 FBG 传感器 (NF, Non-optimized Fixed) 和传统贴片式 FBG 传感器 (PF, Patch Form) 作对比, 测试结果如图 5 所示。

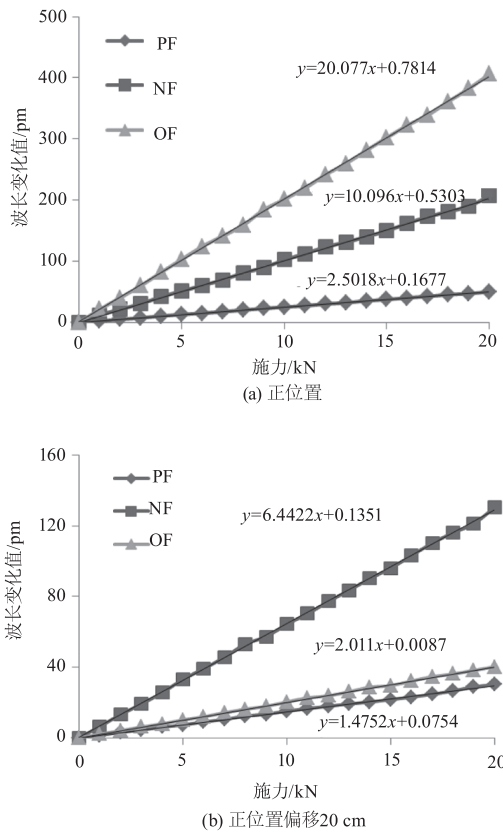


图 5 三种封装 FBG 传感器在不同位置上的响应曲线
Fig. 5 Response curves of three packaged FBG sensors at different positions

如图 5(a) 所示, 在正位置上, 三种封装方式的应力-波长偏移函数均为直线, 说明 FBG 具有很好的线性度, 可以通过波长变化准确计算测试点应变程度。而三条直线的斜率具有明显差异, 未优化的普通固定式封装斜率最小, 等效灵敏度为 2.5 pm/kN。贴片式封装的灵敏度为 10.1 pm/kN, 优于普通封装, 但由于铁路轨道为户外检测, 贴片封装的粘胶容易受到日晒、温变等老化。采用本文优化后的 FBG 传感器其等效灵敏度为 20.1 pm/kN, 相比优化前得到了很大提升。如图 5(b) 所示, 在偏离正位置 20.0 cm 处, 三种封装方式的应力-波长偏移函数仍满足线性关系, 但可以看出, 由于距离增加, 相同施力条件下, 波长偏移大幅降低。贴片式封装的灵敏度最大, 为 6.4 pm/kN, 普通封装型为 1.48 pm/kN, 而优

化后 FBG 传感器的灵敏度为 2.0 pm/kN, 这是三角形结构设计改变了不同方向应力对响应波长的影响权重, 抑制了其他位置对正位置的干扰, 即此位置上敏感性越低越好。

5.2 温度补偿测试

由于测试系统将应用于户外铁路轨道检测, 所以大范围温度变化的影响是不可避免的。温度测试范围设定为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测试过程采用 STH-225-20A 型可调恒温箱实现, 在恒温箱中同时放置优化后 FBG 传感器和温漂补偿 FBG 传感器, 每 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 记录一组数据, 分别对无应力和受到 10.0 kN 应力时的应变-波长曲线函数进行数据重建, 则校正前后应变 FBG (BC, Before Calibration; AC, After Correction) 与温度补偿 FBG (TC, Temperature Compensation) 的测试结果如图 6 所示。

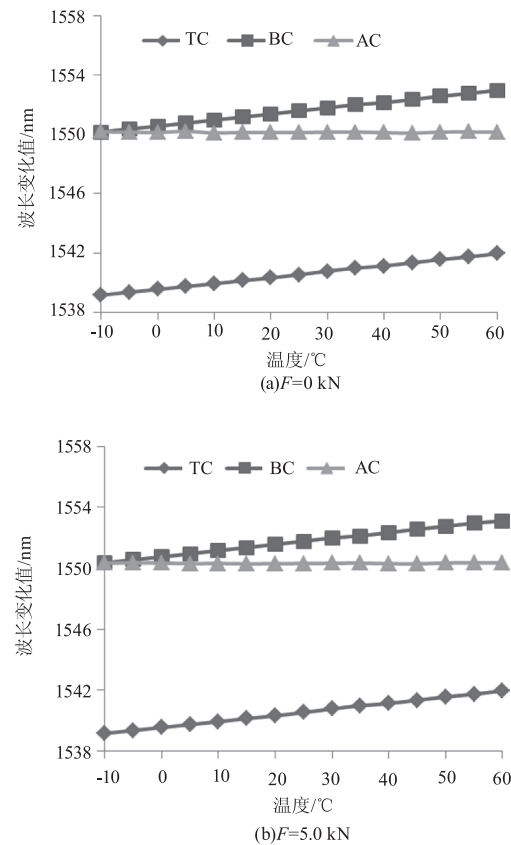


图 6 不同应力条件下的温漂补偿结果
Fig. 6 Compensation results of temperature drift under different stress conditions

如图 6(a) 所示, 当无施力状态下, 由于温度升高, FBG 应变传感器的波长 BC 发生持续漂移, 总漂移量达 2.8 nm 左右, 变动幅度非常大, 而温度补偿 FBG 的测试数据 TC 变化规律及幅度与其几乎一

致,故当两者进行差分补偿时,可以获得优化后的 AC 曲线,在整个温变范围内波长平均偏移仅有 12.3 pm,可以认为在无施力状态下几乎不发生改变,达到了消除温漂影响的目的。如图 6(b) 所示,在存在 10.0 kN 施力状态下,无补偿的应变 FBG 波长变化达到约 3.2 nm,反演的应力值严重失真,温漂造成的波长变化完全覆盖了应力响应。而采用温度补偿校正后,AC 曲线的波长变化总量大约 0.4 nm,反演得到的施力值 10.4 kN 与真实值 10 kN 基本一致。采用的温漂补偿可以有效解决温度和应变的交叉敏感问题。

5.3 动态应力测试分析

对某段内部传送铁轨进行测量,应力载荷采用独立的单节矿车模拟轨道被挤压的过程,速度设置 10 m/s,通过在小车中填装沙土使其达到等效应力为 10 kN 的状态。对测试点范围 100 m 内应力变化响应进行测试,采样频率为 1.0 kHz,则波长变化曲线如图 7 所示。

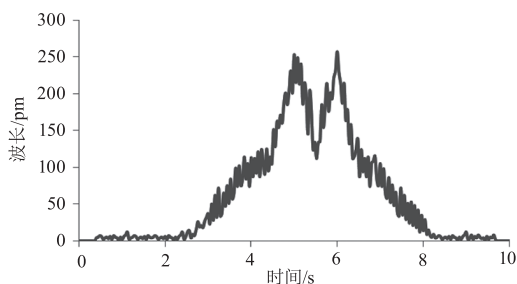


图 7 10 s 范围内正位置的动态应力响应曲线

Fig. 7 Dynamic stress response curve of positive position in the range of 10 s

如图 7 所示,在时间的增加过程中,随着负载小车的逼近,应变 FBG 传感器的波长振幅波动逐渐增大。当车轮穿过正位置时,波长偏移达到最大值 253.2 pm,两个车轮测试获得的应力响应变化相近。随着小车远离正位置,波长逐渐恢复至初始状态值。由于两次测试中时间较短,温度变化可以不计,故静态温漂补偿即可满足设计需要。正位置响应值比静态时增大了 30% 左右,分析认为是负载运动产生振动使 FBG 的测试波长发生震荡导致的,该问题可以通过两组以上的测试数据差分解调实现对振动干扰的抑制。

6 结论

针对光纤传感在铁路轨道状态监测过程中易受温度、相邻车轮之间的干扰,优化了固定式 FBG 传

感器的封装设计。通过仿真计算了其应力场分布趋势,并根据仿真结果完成了 FBG 传感器的布局设计。通过实验验证了优化封装结构的增敏特性,完成了温漂补偿的标定,在动态测试中验证了系统的可行性。

参考文献:

- [1] Mulle M, Yudhanto A, Lubineau G, et al. Internal strain assessment using FBGs in a thermoplastic composite subjected to quasi-static indentation and low-velocity impact [J]. *Composite Structures*, 2019, 215(32): 305–316.
- [2] Wang Yingyong. A new type of FBG sensor for condition monitoring of electrical equipment [J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(1): 51–56. (in Chinese)
王英永. 一种用于电气设备状态监测的新式 FBG 传感器 [J]. *激光与红外*, 2022, 52(1): 51–56.
- [3] Chen Xuemin, Guo Lianhe, Yu Jingyan, et al. Evaluative innovative sensors and techniques for measuring traffic loads [C]//IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Sanya, China, 2008.
- [4] Choi Il-Yoon, Lee Hee-UP, Bang Choon-Suk. Tunnel measurement system and its application to Korea high-speed rail tunnels [J]. *China Railway Science*, 2004, 25(3): 22–27. (in Chinese)
Choi Il-Yoon, Lee Hee-UP, Bang Choon-Suk. 隧道检测系统及其在韩国高速铁路隧道的应用 [J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(3): 22–27.
- [5] Massimo L F, Pedro C G, Alberto R, et al. Real-time monitoring of railway traffic using fiber Bragg grating sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(1): 85–92.
- [6] Liu Yun, Jian Shuisheng, Pei Li, et al. Research on the novel maglev train locating method based on fiber grating pressure sensor [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2005, 27(5): 72–76. (in Chinese)
刘云, 简水生, 裴丽, 等. 基于光纤光栅传感的新型磁悬浮列车定位方法的研究 [J]. *铁道学报*, 2005, 27(5): 72–76.
- [7] Fang Wenshan. Research on state monitoring of high-speed railway track based on optical fiber sensing technology [J]. *Railway Engineering Cost Management*, 2020, 35(4): 7–10. (in Chinese)
方文珊. 基于光纤传感技术的高速铁路轨道状态监测研究 [J]. *铁路工程技术与经济*, 2020, 35(4): 7–10.
- [8] Gao Liang, Zhou Chenyi, Zhang Dongfeng, et al. Research on the application of wheel-rail contact forces monitoring

- using fiber Bragg grating[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 88 - 95. (in Chinese)
- 高亮, 周陈一, 张东风, 等. 光纤光栅在轮轨作用力监测中的应用研究[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 88 - 95.
- [9] Cai Xiaopei, Gao Liang, Lin Chao, et al. Long-term monitoring technology of Beijing-Shanghai high-speed railway elevated station track system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(5): 35 - 41. (in Chinese)
- 蔡小培, 高亮, 林超, 等. 京沪高速铁路高架站轨道系统长期监测技术[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(5): 35 - 41.
- [10] Chan T, Yu L, Tam H Y, et al. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge; background and experimental observation [J]. Engineering Structures, 2006, 28(5): 648 - 659.
- [11] Zhang Yanli, Su zhen, Zhang Chi, et al. High-precision deformation monitoring for track girders in rapid rail transit[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2018, 52(2): 325 - 332. (in Chinese)
- 张颜, 李素贞, 张弛, 等. 高速交通轨道梁高精度光纤变形监测[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2018, 52(2): 325 - 332.
- [12] Dong Lei, Lin Huguang. Fiber bragg grating difference strain axle-counting technology applied to railway signal system[J]. Transportation Science & Technology, 2017, 1(3): 114 - 116. (in Chinese)
- 董雷, 林和光. 光纤光栅差分应变计轴技术在轨道信号系统的应用[J]. 交通科技, 2017, 1(3): 114 - 116.
- [13] Zhu Dongfei, Wang Yongjiao, Yang Ye, et al. Urban rail train positioning and speed measuring method based on grating array[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(11): 159 - 166. (in Chinese)
- 朱东飞, 王永皎, 杨烨, 等. 基于光栅阵列的城市轨道列车定位与测速方法[J]. 光子学报, 2019, 48(11): 159 - 166.
- [14] Zhu Wangyou, Zhou Ying. Vibration source recognition method of optical fiber pre-warning based on BP-SVM fusion algorithm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(5): 527 - 532. (in Chinese)
- 朱汪友, 周莹. 基于BP-SVM融合器算法的光纤预警振源识别方法[J]. 油气储运, 2021, 40(5): 527 - 532.
- [15] Shi Jiabin, Chai Xuesong, Wang Zhichao, et al. Design and application of track deformation monitoring system [J]. Railway Engineering, 2022, 62(4): 14 - 17. (in Chinese)
- 时佳斌, 柴雪松, 王智超, 等. 轨道变形监测系统设计与应用[J]. 铁道建筑, 2022, 62(4): 14 - 17.
- [16] Huang Qiang, Sun Junqiang, Bao Yuben, et al. Advances of technologies in long-range Brillouin optical time-domain reflective optical fiber sensing [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(4): 395 - 403. (in Chinese)
- 黄强, 孙军强, 包宇奔, 等. 长距离布里渊光时域反射光纤传感技术进展[J]. 激光与红外, 2021, 51(4): 395 - 403.
- [17] Wang Xiaoli, Dong Bo, Chen Enqing, et al. Intensity demodulation technology of FBG time division multiplexing based on Sagnac ring[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 506003.