

文章编号: 1674—8247(2021)05—0079—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.015

基于光纤光栅的高速铁路钢轨损伤识别技术

曾楚琦¹ 潘自立² 莫宏愿² 何 庆¹ 王启航¹

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:对 400 km/h 及以上超高速铁路重点地段的钢轨伤损情况展开实时、长期、准确的监测对保障列车安全运行至关重要。传统高速铁路传感仪器因现场部署困难及抗电磁干扰能力差等问题,难以直接运用于 400 km/h 及以上超高速铁路的高频振动特性检测。目前,光纤光栅(FBG)传感技术因单根光纤可交叉构造光纤光栅网格,能实现多点分布测量,同时其特有的波长解调技术有利于提高传感灵敏度及信号抗干扰性,十分适用于超高速铁路钢轨伤损高频振动特性监测。基于此,本文采用 FBG 传感器对钢轨伤损监测展开研究。首先,将钢轨进行室内动态加载试验,利用 FBG 传感器分别采集钢轨正常与伤损处的应变与加速度数据;然后,基于卷积神经网络对采集得到的数据进行钢轨伤损检测训练,并验证了其准确率。结果表明,FBG 传感器技术能为 400 km/h 及以上超高速铁路的钢轨伤损监测及部署提供有效的解决办法。

关键词:光纤光栅; 高速铁路; 传感器; 钢轨; 损伤识别

中图分类号:U213.4⁺2 **文献标志码:**A

Technologies of Damage Identification for High-speed Rail based on Fiber Grating

ZENG Chuqi¹ PAN Zili² MO Hongyuan² HE Qing¹ WANG Qihang¹

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: Real-time, long-term, and accurate monitoring of rail damage in key sections of 400 km/h and above ultra-high-speed railway is critical to ensure the safe operation of trains. Traditional high-speed railway sensing instruments are difficult to be directly applied to the detection of high-frequency vibration characteristics of ultra-high-speed railways of 400 km/h and above due to difficulties in field deployment and poor anti-electromagnetic interference ability. At present, the fiber Bragg grating (FBG) sensing technology can realize multi-point distribution measurement because a single fiber can cross-construct the fiber grating grid. At the same time, its unique wavelength demodulation is conducive to improving the sensing sensitivity and signal anti-interference, which is very suitable for monitoring the high-frequency vibration characteristics of rail damage in ultra-high-speed railways. Based on this, the FBG sensor is used to monitor rail damage in this paper. Firstly, the rail is subjected to an indoor dynamic loading test, and FBG sensors are used to collect strain and acceleration data of normal and damaged parts of the rail respectively. Then, based on the convolution neural network, the rail damage detection training is carried out on the collected data, and its accuracy is verified. The results show that the technology of FBG sensor can provide an effective solution for rail damage monitoring and

收稿日期:2021-03-01

作者简介:曾楚琦(1998-),男,硕士研究生。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KNSQ202054)

引文格式:曾楚琦,潘自立,莫宏愿,等.基于光纤光栅的高速铁路钢轨损伤识别技术[J].高速铁路技术,2021,12(5):79-83.

ZENG Chuqi, PAN Zili, MO Hongyuan, et al. Technologies of Damage Identification for High-speed Rail based on Fiber Grating[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):79-83.

deployment for 400 km/h and above the ultra-high-speed railway.

Key words: fiber Bragg grating; high-speed railway; sensor; rail; damage identification

列车运行速度的不断提高对整个铁路系统尤其是轨道工程提出了更高的要求,钢轨作为轨道的重要部件^[1],是列车直接的受力单位,列车速度提升带来的轮轨作用加剧,不可避免地会使钢轨出伤的频率加快,钢轨伤损如不及时处理,会出现断轨等事故,将严重威胁行车安全。因此,实时、长期、准确的钢轨智能化监测装置对列车的运行安全至关重要^[2]。

相比于一般高速铁路,400 km/h 及以上超高速铁路的轮轨作用关系及高频特性更为剧烈,对传感器的要求也更高。而传统压电式传感监测仪器无法适应恶劣的环境,且易产生零点漂移及电磁干扰,很难保证监测结果的有效性。此外,电信号长距离传输损耗严重导致其无法大规模布置传感网络^[3],加之安装时需钢轨上打孔等弊端,使得其在高速铁路系统中的应用越来越受限。相对于传统传感监测技术,光纤光栅传感器具有抗电磁干扰能力强、光信号远程信号传输能力优越、灵敏度高、体积小、成本低、重复稳定性好且可实现大规模分布式测量等优点^[6-11],十分适用于超高速铁路的钢轨伤损高频特性监测。

目前,已有学者利用光纤光栅传感器对钢轨进行监测。叶肖伟等^[12]利用 FBG 反射谱在正常及裂纹处的精细变化实现对道岔裂纹的识别;张兆亭等^[13]研究发现光纤光栅中心反射波长漂移量与载荷和应变具有良好的数学模型,得出了光纤光栅应变传感器适用于钢轨应变监测的结论。但对于光纤光栅传感器具体放置于钢轨何处才能使钢轨伤损监测效果最好的研究较少。

为此,本文根据光纤光栅传感器在不同位置处采集到的钢轨表面裂纹的应变和加速度数据,提出了基于卷积神经网络(CNN)的钢轨表面裂纹识别方法。加速度的测量位置分外侧轨底、外侧轨腰、内侧轨腰和内侧轨底4处,应变的测量位置分内侧轨颞、外侧轨颞、外侧轨底、外侧轨腰、内侧轨腰和内侧轨底6处。将应变和加速度序列数据分为有损与无损两种标签,形成训练库,通过 CNN 进行训练,得出 CNN 分类器,再将测试集放入 CNN 分类器进行分类测试,判定钢轨损伤情况,找出最佳监测位置。

1 测量原理

光纤光栅传感器原理如图1所示。宽谱光源(如 SLED 或 ASE)将有一定带宽的光通过环形器入射到

光纤光栅中,受光纤光栅的波长选择性作用,符合条件的光被反射回来(波长即 λ_B),再通过环形器送入解调装置,测出光纤光栅的反射波长变化。当光纤光栅做探头测量外界温度、压力或应力时,光栅栅距的变化引起反射波长的变化,解调装置即通过检测波长的变化推导出外界温度、压力或应力。

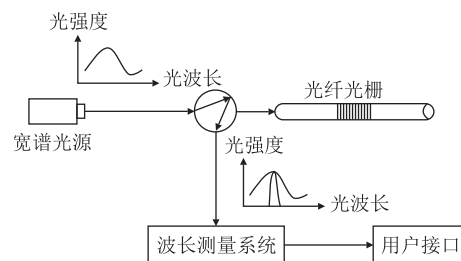


图1 光纤光栅传感器原理图

被反射回来的光波长 λ_B 为^[14]:

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

式中: λ_B ——光纤光栅反射中心波长;

n_{eff} ——光纤光栅纤芯有效折射率;

Λ ——光纤光栅周期。

温度、压力或应力发生变化时引起光纤光栅中心波长的变化量公式为:

$$\Delta\lambda_B = k_e\Delta\epsilon + k_T\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ ——光纤光栅反射中心波长的变换量;

k_e, k_T ——光纤光栅应变与温度灵敏度常数,常数由人为进行测量标定^[15]。

2 实验设置与过程

在钢轨上安装光纤光栅应变和加速度传感器,如图2所示。

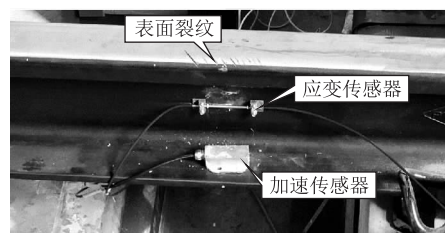


图2 传感器布置方式图

安装光纤光栅传感器前,先在安装位置处用酒精清洗并打磨一个面积适中的区域,并在该区域均匀涂抹混合后的 AB 胶,然后将光纤光栅传感器贴在该区

域并保证其与钢轨轴向平行,待传感器与钢轨粘结达到一定强度后松开。因光纤光栅应变传感器所用材料为低温敏电阻,且光纤光栅加速度传感器已将温度补偿装置封装于传感器内,故实验过程无需考虑温度变化对采集数据造成干扰。

实验装置如图3所示。加载仪器所用疲劳加载试验机的最高加载频率可达6 Hz,最高载荷可达160 kN(相当于16 t的自重),可有效模拟列车运行时钢轨所受的载荷。加载方式为简支梁加载,集中荷载作用于支撑梁中点处,再由支撑梁分摊至两根钢轨上。



图3 实验装置图

实验所用两根钢轨均为标准60 kg/m钢轨,其中一根表面无裂纹,另外一根有人为切割的表面裂纹,裂纹具体尺寸如表1所示。

表1 裂纹具体尺寸表

| 裂纹尺寸 | 10×1 /mm | 11×1 /mm | 12×1 /mm | 13×1 /mm | 15×1 /mm | 30×1 /mm |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 裂纹个数 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |

实验测量位置横断面如图4所示。6处测量位置(标号1~6)与钢轨裂纹处在同一横断面。



图4 测量位置图

实验共采用4个传感器(2个光纤光栅应变传感器和2个光纤光栅加速度传感器),加速度和应变试验配置方案如表2所示。实验过程中,先把2个光纤光栅应变传感器粘结于正常钢轨和有表面裂纹钢轨的内侧轨颞处(1位置),然后由疲劳试验机输入频率为4 Hz的正弦波振动,最大值为16 t的加载谱(加载谱可保证每次加载方式一致),测量15 min后终止,拆下传感器,再将2个光纤光栅应变传感器粘结于正常钢轨和有表面裂纹钢轨的外侧轨颞处(2位置),再进行

同样加载,直到6个位置测量完毕。加速度传感器的测量方法与应变传感器类似,但因加速度传感器不便放置于轨颞位置处,故只进行了4个位置(标号3~6)的测量。多次重复加载后,得到6处位置有表面裂纹伤损与无表面裂纹伤损的应变数据和4处位置有表面裂纹伤损与无表面裂纹伤损的加速度数据。

表2 加速度和应变试验配置方案表

| 测量位置 数据类型 | 1-内侧 轨颞 | 2-外侧 轨颞 | 3-内侧 轨腰 | 4-外侧 轨腰 | 5-内侧 轨底 | 6-外侧 轨底 |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 加速度 | × | × | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 应变 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

3 数据标签及数据预处理

实验所用光纤光栅解调仪为JEME-IFBG-S系列光纤光栅解调仪,采集频率为1 000 Hz,共采集15 min,每一次加载共采集3 600 000个应变和加速度数据,包括有裂纹处应变数据、无裂纹处应变数据、有裂纹处加速度数据和无裂纹处加速度数据各900 000个。疲劳试验机加载频率为4 Hz,相当于每加载1次,每个光纤光栅传感器采集250个数据。计算机处理数据使用二进制算法,因此将每一个数据长度定为256个,将900 000个数据以256个为标准进行切片,故输入进神经网络的每一个样本为256个数据。

为消除每一次测量对采集数据误差及量纲的影响,按式(3)对数据进行标准化处理。

$$x^* = \frac{x - \bar{x}}{\sigma(x)}$$

81

式中: x^* ——标准化之后的传感器数据;

x ——原始传感器数据;

$\sigma(x)$ ——原始传感器数据的标准差。

4 基于卷积神经网络的钢轨外侧表面裂纹识别

4.1 卷积神经网络结构

卷积神经网络(CNN)为目前深度学习领域的代表算法之一,可理解为普通深度神经网络的优化版。普通神经网络不同网络层之间采用全连接方式,处理图像时需将图像展开为向量,从而损失了图像的空间信息,且图像数据过大,需要的全连接参数量也过大,很容易过拟合。再者,其在处理一维时间数据时,会损失数据包含的时间信息。相比于普通深度神经网络,CNN在此方面拥有独特的改进机制和局部感知机制,CNN可模拟人眼看世界的方式(人的眼睛视野有限,每次只能看一部分),并找出局部视野中的主要特征,

再将大量局部特征组合起来做出判断。因此十分适合处理一维时间序列数据,且在计算机视觉领域有较好的表现。

通常而言,卷积神经网络一般包含输入层、卷积层、池化层及全连接层四个网络层。卷积层为卷积神经网络的核心层,它产生了网络中大部分的计算量。为提高计算效率及网络性能,本文在每一池化层之后都加入了非线性激活函数 Relu 函数,引入非线性因素,解决线性模型不能解决的问题。

- 卷积神经网络架构如图 5 所示。具体步骤如下:
- (1) 首先将批量归一化之后的数据输入输入层,输入格式为 $1 \times 1 \times 256$ (1 代表 1 个通道, 1×256 代表尺寸)。
 - (2) 接入卷积层,卷积层将数据的长宽填充一层,此时数据格式为 $1 \times 3 \times 258$,再连接尺寸为 5 个通道的 3×3 卷积核进行卷积。
 - (3) 接入池化层,同样对数据长宽填充一层,采用尺寸 3×3 、步长为 3 的池化层进行池化。
 - (4) 使用非线性激活对数据进行处理。
 - (5) 重复 2~4 步骤一次。
 - (6) 将输出结果展开为一维数据。
 - (7) 再使用 4 个全连接层进行过渡,每一个全连接层之间加入一个 Relu 函数。
 - (8) 输出尺寸为 2 的输出层。

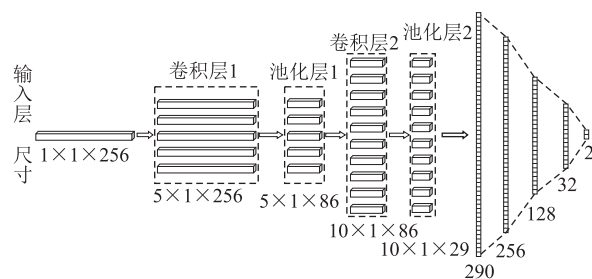


图 5 卷积神经网络结构图

4.2 钢轨裂纹损伤识别卷积神经网络训练

CNN 训练主要训练的是各层神经网络的参数大小,参数大小的选择借助于反向传播算法进行更新,更新方式采用梯度下降算法。每 15 min 采集 900 000 个数据,按 256 个分为一个样本,共有 3 515 个样本,15 min 内同时采集的有表面裂纹与无表面裂纹数据共有 7 030 个样本,每个样本根据采集钢轨是否有裂纹打上 1 或 0 的标签。将数据随机打乱,选取 50% 的样本作为训练集,50% 的样本作为测试集,保证数据的一般性,使神经网络更好收敛。

网络训练过程中,为提高神经网络的计算效率,采用小批量样本训练的方法。每次将选择批量大小为 32 的样本(每个样本包含 256 个传感器数据)输入图 5 所示的神经网络进行训练,得到输出层,输出层即为神经网络给出的预测值。再用 softmax 函数对预测值进行计算,softmax 函数为:

S_i = \frac{e^{y_i}}{\sum_{j=1}^2 e^{y_j}} \tag{4}

式中: i, j ——输出层神经元的序号,最大为 2;
 S_i ——softmax 函数的输出结果;
 e^{y_i} ——输出层神经元序号所对应的值的大小。
softmax 函数可将预测值进行归一化,更好地表示预测概率。经过 softmax 函数处理后的值,再利用交叉熵损失函数计算总损失量,输出层的结果与事先制定的标签越相似,则损失量越小。交叉熵损失函数为:

H(p, q) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log(q(x_i)) \tag{5}

式中: $H(p, q)$ ——神经网络预测值与真实标签值的误差,即总损失量;
 $p(x_i)$ ——真实值的标签,采用 one-hot 编码格式;
 $q(x_i)$ ——神经网络经过 softmax 处理后的预测值;
 n ——小批量样本大小,取 32。

采用交叉熵损失函数计算总损失量之后,对损失采用基于冲量的随机梯度下降算法(SGD 方法)为优化算法进行反向传播,仅采用一个样本进行迭代,可加速神经网络的训练,冲量可避免训练陷入局部最优解,以此调整每个网络层的参数大小,直到卷积神经网络最终完成收敛。

4.3 钢轨裂纹损伤识别卷积神经网络训练

将 6 个位置的应变数据和 4 个位置的加速度数据输入神经网络进行训练。在卷积神经网络训练前,提前对数据打上标签,将提前标签与经过卷积神经网络训练后得出的标签进行对比,计算准确率。

最终获取的识别效果如图 6、图 7 所示。从图 6 可以看出,将传感器布置于外侧轨颞的应变损伤识别效果最好。表面裂纹靠近外侧,表对钢轨周围影响很大,外侧轨颞处与外侧表面裂纹距离相对较近,影响较为明显,识别准确率可达到 99.109%;此外,钢轨外侧应变损伤识别准确率普遍高于内侧应变损伤识别准确率 80%。

从图 7 可以看出,加速度伤损识别的准确率普遍

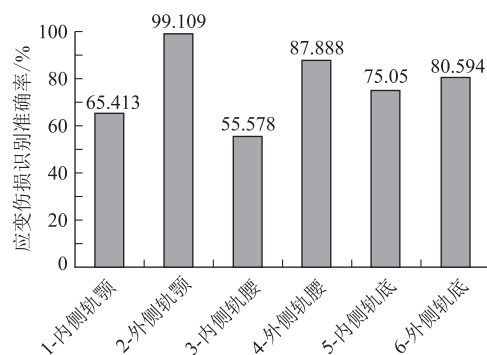


图6 应变损伤识别准确率图

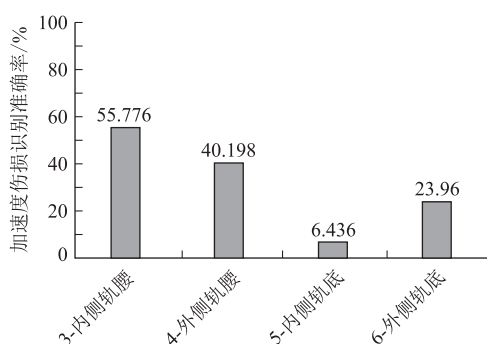


图7 加速度损伤识别准确率图

较低,最高为 55.776%,为内侧轨腰位置。其可能原因在于,光纤光栅加速度量程较高,为 100 g,而疲劳加载系统的加载频率较低,为 4 Hz,从而导致实验监测的加速度为 1 g 左右,造成识别准确率较低。

5 结论

本文利用基于卷积神经网络的铁路钢轨外侧表面裂纹伤损识别方法,对有裂纹钢轨与无裂纹钢轨同时进行疲劳加载实验,探究加速度和应变传感器在不同位置处时,卷积神经网络识别外侧表面裂纹的准确率,得出主要结论如下:

(1) 外侧轨颚处应变传感器数据的伤损识别准确率达 99.109%,可据此推测,外侧表面裂纹对外侧轨颚应变有一定的影响,所以导致两根钢轨下颚处应变有明显区别。并且本试验所用光纤光栅应变传感器测量精度高,能测量出钢轨外侧轨颚细微的应变变化,表明基于光纤光栅的高速铁路钢轨外侧表面裂纹伤损识别技术可行。

(2) 识别钢轨外侧表面裂纹时,将应变传感器布置于外侧效果普遍优于内侧。

(3) 光纤光栅加速度传感器数据在 4 个位置处的伤损识别准确率均不高,加速度数据能否采用本文所

提方法识别钢轨外侧表面裂纹需进一步测试。

(4) 本文所提方法只基于已知伤损进行探测识别,对未知伤损进行自适应识别尚待深入研究与实验。

参考文献:

- [1] 李成辉. 铁路轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 1-3.
LI Chenghui. Railway Track[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 1-3.
- [2] 刘晓光, 蔡超勋, 卢春房. 中国高速铁路线路工程技术创新与发展[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 1-6.
LIU Xiaoguang, CAI Chaoxun, LU Chunfang. Technical Innovation and Development of High-speed Railway Line Engineering, 2020, 11(2): 1-6.
- [3] 朱军, 范典. 光纤光栅技术在智能交通领域中的应用[J]. 交通企业管理, 2007, 22(12): 46-47.
ZHU Jun, FAN Dian. Application of Fiber Bragg Grating Technology in Intelligent Transportation [J]. Transportation Enterprise Management, 2007, 22(12): 46-47.
- [4] 张戎锋. 光纤光栅技术在高速铁路防灾系统中的应用研究[J]. 铁道通信信号, 2009, 45(6): 48-50.
ZHANG Yufeng. Application Study of Fiber Bragg Grating Technology in Disaster Prevention of High-speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2009, 45(6): 48-50.
- [5] 林斌, 范典. 光纤光栅传感铁路安全监测技术[J]. 交通科技, 2008(5): 93-95.
LIN Bin, FAN Dian. Fiber Grating Sensing Technology for Railway Security Monitoring [J]. Transportation Science & Technology, 2008(5): 93-95.
- [6] 代鑫. 基于光纤光栅的高速铁路轨道结构监测方法及关键技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
DAI Xin. Research on Methods and Key Technologies on High-speed Track Structure Monitoring Based on Fiber Grating [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [7] 王涛, 孙庆, 高岩, 等. 光纤光栅应变特性及其在槽形梁试验量测中的应用[J]. 铁道建筑, 2014, 54(11): 37-40.
WANG Tao, SUN Qing, GAO Yan, et al. Strain Characteristics of Fiber Bragg Grating and Its Application in the Experimental Measurement of Channel Beam [J]. Railway Engineering, 2014, 54(11): 37-40.
- [8] 陈继宣, 龚华平, 张在宣. 光纤传感器的工程应用及发展趋势[J]. 光通信技术, 2009, 33(10): 38-40.
CHEN Jixuan, GONG Huaping, ZHANG Zaixuan. Development and Engineering Applications of Optical Fiber Sensor [J]. Optical Communication Technology, 2009, 33(10): 38-40.
- [9] 张丹丹. 土木工程及模型试验中的光纤光栅传感技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
ZHANG Dandan. Studies on Fiber Bragg Grating Sensors in Civil Engineering and Model Tests [D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2009.

架纵向张拉梁挠度最大值为 0.01 mm,最大拉应力为 36.6 MPa,最大压应力为 19.3 MPa,满足强度和刚度要求。

(2)原有的 CRTSⅢ型轨道板制造台架无法保证轨道板板面制造的平整度,建议在 CRTSⅢ型轨道板制造台架底部增设 4 根体外预应力拉杆,每根拉杆施加 20 t 张拉力,可显著提高平整度,降低翘曲变形。

(3)对比试验前、后 CRTSⅢ型轨道板制造台架的平面度和线性度,发现无明显变化,测试得到实验前后的数值误差均保持在 $-0.3 \sim 0.3$ 之间。

(4)混凝土与 CRTSⅢ型轨道板制造台架直接接触使得在初期强度较低的情况下,轨道板随模型的徐变而不断变化,在预应力筋放松时,巨大的张拉力极易造成混凝土(特别是端部锐角部位)开裂。为改善上述问题,本文提出底模板设置反向预拱度、设置自导向柔性橡胶套和设置柔性内衬垫层三项结构优化措施。

参考文献:

- [1] 陈婕妤. 时速 350 km CRTSⅢ型板式无砟轨道板预制技术[J]. 国防交通工程与技术, 2011, 9(S1): 36-39.
CHEN Jieyu. Prefabrication Technology of CRTSⅢ Slab Ballastless Track Slab at 350 km/h [J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2011, 9(S1): 36-39.
- [2] 王红亮. 郑徐客运专线 CRTSⅢ型先张无砟轨道板创新技术及生产工艺[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(3): 41-45.
WANG Hongliang. Innovative Technology and Manufacturing Technique of CRTSⅢ Type Pre-Tensioning Ballastless Track Slab for Zhengzhou-Xuzhou Passenger Dedicated Line [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(3): 41-45.
- [3] 苏雅拉图. 郑徐客专 CRTSⅢ型先张法轨道板预制施工工艺研究[J]. 山西建筑, 2016, 42(3): 133-136.
SUYALATU. On CRTSⅢ-Type Pre-Tensioning Method in Track Plate Forecasting along Zhengzhou-Xuzhou Special Passenger Railway[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(3): 133-136.
- [4] 陈福现. 先张法预制 CRTSⅢ型轨道板技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(1): 102-106.
CHEN Fuxian. Study on Prefabricating CRTSⅢ Track Slab Technology with Pretensioned Method [J]. Railway Construction Technology, 2017(1): 102-106.
- [5] 王成晓. CRTSⅢ型板式无砟轨道力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WANG Chengxiao. Study on Mechanical Characteristics of CRTSⅢ Type Slab Ballastless Track [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [6] 钱振地, 王其昌. 桥上板式无砟轨道施工成套设备的研制与开发[J]. 铁道工程学报, 2004, 21(4): 47-49.
QIAN Zhendi, WANG Qichang. Manufactory and Development of a Complete Set of Equipment for Construction of Ballastless Slab Track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, 21(4): 47-49.
- [7] 中国铁道科学研究院. 盘锦至营口客运专线 CRTSⅢ型板式无砟轨道系统动力性能试验研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.
China Academy of Railway Sciences. Dynamic Performance Test Research on the CRTSⅢ Type Slab Ballastless Track of Panjin-Yingkou Passenger Dedicated Line[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2013.
- [10] 张家坤, 弓俊青, 岳清瑞, 等. 光纤光栅传感技术在土木工程结构监测中的应用[J]. 北方交通大学学报, 2003, 27(5): 94-97.
ZHANG Jiakun, GONG Junqing, YUE Qingrui, et al. Application for Inspecting Technology of Fiber Bragg Grating in Civil Engineering Structure[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2003, 27(5): 94-97.
- [11] FILOGRANO M L, CORREDERA GUILLEN P, RODRIGUEZ-BARRIOS A, et al. Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 85-92.
- [12] 叶肖伟, 姜洋, 倪一清, 等. 基于 FBG 反射谱特征的铁路道岔损伤识别试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 71-76.
YE Xiaowei, JIANG Yang, NI Yiqing, et al. Experimental Study on Damage Detection of Railway Turnouts Based on Characteristics of FBG Reflective Spectra[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 71-76.
- [13] 张兆亭, 闫连山, 王平, 等. 基于光纤光栅的钢轨应变测量关键技术研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(5): 65-69.
ZHANG Zhaoting, YAN Lianshan, WANG Ping, et al. Key Techniques for Rail Strain Measurements Based on Fiber Bragg Grating Sensor [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(5): 65-69.
- [14] OTHONOS A. Fiber Bragg Gratings [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(12): 4309-4341.
- [15] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
ZHANG Zijia. Theoretical Basis and Sensing Technology of Fiber Bragg Grating[M]. Beijing: Science Press, 2009.