

城市轨道交通列车轮轨垂向力测量方法^{*}陈鹏涛^{1,2} 漆泰岳^{1,2} 梁孝^{1,2} 雷波^{1,2} 覃少杰^{1,2}

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 610031, 成都; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都)

摘要 [目的]城市轨道交通运营中通常会出现大量的隧道病害,列车轮轨力是各种病害的主要成因,因此,需在不影响城市轨道交通列车正常运营的条件下,对列车轮轨垂向力的测量方法进行研究。[方法]以成都地铁7号线茶店子站——一品天下站下行区间道床剥离病害为研究对象,基于弯矩差法理论,采用ANSYS有限元软件建立了静荷载及动荷载作用下的钢轨有限元模型,并对其进行了数值模拟分析。在室内对1根长2 m、3跨布置的钢轨进行了标定试验。[结果及结论]静荷载数值模拟分析表明,钢轨测点可选择在钢轨跨中轨底上表面边缘两侧位置;当钢轨跨中位置受到垂向力作用时,该点沿钢轨方向的应变最大,且应变随垂向力线性增加。通过标定试验测得的标定系数为 $0.626\ 0 \times 10^6$ kN,而数值模拟测得的标定系数为 $0.644\ 1 \times 10^6$ kN,两者偏差仅2.8%,可通过静荷载标定试验确定标定系数。轮轨垂向力的测量方法可以更好地评估轨道结构和列车运行的安全性,及时发现安全隐患,并采取相应措施进行修复和改进。

关键词 城市轨道交通; 列车; 轮轨垂向力; 测量方法

中图分类号 U211.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.015

Research on Measurement Method of Wheel-rail Vertical Force of Urban Rail Transit

CHEN Pengtao^{1,2}, QI Taiyue^{1,2}, LIANG Xiao^{1,2}, LEI Bo^{1,2}, QIN Shaojie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] A large number of tunnel diseases usually occur during the operation of urban rail transit, and the main cause of the diseases is the wheel-rail force. Therefore, it is necessary to study the method of measuring the wheel-rail vertical force without affecting the normal train operation.

[Method] With the descending section between Chadianzi Station and Yipintianxia Station of Chengdu Metro Line 7 as the research object and based on the moment difference theory, a finite element model of steel rail under static load and dynamic

load is established by using ANSYS software, and a numerical simulation analysis is conducted on it. The calibration test on a 2-meter-long, 3-span rail is carried out in the laboratory. [Result & Conclusion] The numerical simulation analysis of the static load shows that the rail measuring points can be chosen on both sides of the upper surface edge of the rail bottom in the middle of the rail span. When the vertical load is applied to the middle of the span, the strain at the measuring points along the rail direction is the largest, and the strain increases linearly with the vertical load. The calibration coefficient measured by calibration test is $0.626\ 0 \times 10^6$ kN, while that obtained by numerical simulation is $0.644\ 1 \times 10^6$ kN. The deviation between the two is only 2.8%. Therefore, the calibration coefficient can be determined by static load calibration test. The measurement method of the wheel-rail vertical force can better evaluate the safety of track structure and train operation. The hidden hazards can be timely detected and corresponding measures be taken for repair and improvement.

Key words urban rail transit; train; wheel-rail vertical force; measurement method

城市轨道交通运营中往往会出现大量的隧道病害问题,如盾构区段的管片不均匀沉降、道床-管片剥离病害等。列车轮轨力作为各种病害的主要成因^[1-2],对其进行监测是研究隧道病害动力响应的重要环节。现有对轮轨垂向力的监测方法研究成果较多,如挠度法、加速度法、剪力法、弯矩差法、轨腰压缩法及支撑反力法等。文献[3]研究了高速铁路列车在车轮失圆和轨面波磨等条件下的轨道结构受力。文献[4]利用测力钢轨设计了连续测试轮轨力系统,并通过数值模拟方法对轮轨力计算方程和相关参数进行了研究。文献[5]利用电阻应变片分别对钢轨所受横向力和垂向力进行了测试,推荐剪力法为监测效果较好的办法。文献[6]基于剪力法对轮轨垂向力测试系统进行了设计,并对应变计输出数据的降噪办法进行了研究,提出了较准确

^{*} 国家自然科学基金面上项目(51978582)

的获得轮轨垂向力监测数据的方法。文献[7]研究了钢轨受到水平力和垂直力时的应变分布,比较分析了各种轮轨竖向力监测方法的优缺点及实用性,得到了应变片测点布置和组桥的最佳方案,并提出了基于剪力法和轨腰压缩法的轮轨垂直力连续测量方案,通过有限元仿真计算得到,当垂向电桥在钢轨两侧布点完全对称时,钢轨受到的横向力不影响垂向测试电桥的输出结果。文献[8]采用测量车轮压力的方法测得轮轨力,并通过试验台验证了该方法的可行性。文献[9]根据成都地铁9号线运营现状计算得到了列车单轮激振力函数,确定了现场监测频率应不低于振动频率的10倍。

轮轨力现场监测通常采用在施工时预埋土压力盒测定道床压力的方法。为保证城市轨道交通线路安全运营,在不破坏现有轨道结构的条件下,选择钢轨压力来反映轮轨垂向力。根据成都地铁运营现状,以弯矩差法为理论基础,通过数值模拟软件对列车动荷载下钢轨的动力响应进行计算,并与静荷载计算结果进行对比。选取钢轨测点,在室内静荷载标定试验中对其进行测试,从而确定了标定系数。该方法对现场监测的开展具有指导作用,为城市轨道交通列车正常运行下轮轨垂向力的实时监测奠定了技术基础。

1 工程背景

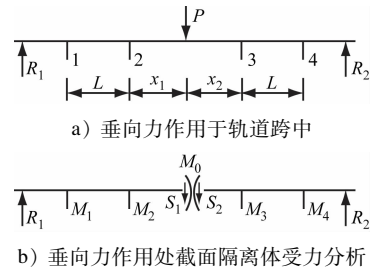
成都地铁7号线(以下简称“7号线”)在运营过程中出现了500余处盾构区段道床-管片剥离病害。本研究以7号线道床剥离病害为研究对象,监测列车运行过程中产生的轮轨垂向力。

7号线列车采用6节编组A型车,设计速度为80 km/h。根据DBJ 51/T 074—2017《成都市地铁设计规范》要求,车辆宽度为3.0 m,拖车长度为23.56 m,动车长度为21.88 m,列车总长度为176.80 m。7号线采用60 kg/m的U75V热轧钢轨。正线铺轨时,常规段扣件组数为1 600组/km,即扣件的平均间距为0.625 m;加强段扣件间距为0.6 m。本研究选择7号线茶店子站——一品天下站下行区间。经现场调查,加强段扣件铺设间距采用0.6 m,所用扣件类型为DZIII型。

2 轮轨垂向力测量原理

采用钢轨受力分析的方法对轮轨垂向力进行测量。将钢轨简化为离散弹性支撑梁模型,采用弯

矩差法对其进行受力分析。图1为基于弯矩差法的钢轨垂向力测量示意图。



注: P —垂向力; R_1 、 R_2 —支撑反力; M_0 —截取隔离体的截面力矩; S_1 、 S_2 —跨中左右截面上的剪力; M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 —截面1~4的力矩; x_1 、 x_2 —截面2、3至跨中距离; L —截面1、4分别至截面2、3距离。

图1 基于弯矩差法的钢轨垂向力测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rail vertical load measurement based on moment difference method

由平衡条件可得:

$$P = \frac{EW}{L} \varepsilon \quad (1)$$

式中:

E ——钢轨弹性模量;

W ——抗弯截面系数;

ε ——垂向力作用点沿钢轨行车方向的应变。

式(1)中,设标定系数 $K = \frac{EW}{L}$, ε 可通过电阻应

变计测出。考虑到实际测量中应变片的粘贴位置和粘贴工艺等问题,钢轨断面的 W 值与理论计算结果会存在较大误差,因此,通常采用标定试验取得 K ,进而测得 P 值。

3 轮轨垂向力数值模拟分析

在弯矩差法中,列车动荷载作用在钢轨跨中时产生的弯矩最大,且弯矩最大值发生在跨中位置。由于钢轨下表面和道床板之间的空隙狭小,难以采用应变计固定,因此,需将应变计布置在轨底上表面或轨腰的位置,且具体的布点和测量方向采用数值模拟的办法进行确定。

本文采用 ANSYS 有限元软件,以 60 kg/m 钢轨为基础,建立如图2所示的钢轨有限元模型。其中:轨枕间距为600 mm,共68 694个节点、53 704个单元。钢轨采用 SOLID185 单元,其弹性模量取206 GPa;扣件对钢轨的作用采用弹簧约束 COMBIN14 单元代替,扣件刚度为50 kN/mm,扣件阻尼为75 kN/(m/s);钢轨两端约束 x 方向和 z 方

向位移。



图2 钢轨有限元模型
Fig. 2 Rail finite element model

3.1 静荷载模拟分析

根据弯矩差法中的荷载施加方式,在钢轨跨中顶面位置分别施加 50 kN、100 kN、150 kN、200 kN 的静荷载。选取施加 200 kN 静荷载时的计算结果,提取沿钢轨方向即 z 方向的钢轨应力云图(见图 3)。从图 3 可以看出:钢轨的最大应变发生在跨中位置。图 4 为钢轨跨中截面节点编号。图 5 为静荷载为 200 kN 时钢轨跨中截面节点沿 z 方向的应变曲线。



图3 静荷载为 200 kN 时钢轨沿 z 方向的应变云图
Fig. 3 Strain cloud diagram of the rail along the z direction under 200 kN static load

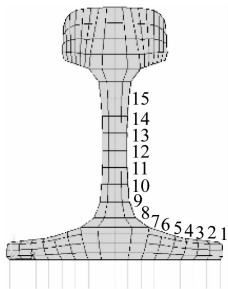


图4 钢轨跨中截面节点编号示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the section node numbering in the middle of the rail span

从图 5 中可以看出:钢轨 z 方向的应变由节点 1 到 15 依次减小。相较于节点 1 粘贴应变片困难,节点 2 位置最适合作为应变测量点布置应变计。提取静荷载分别为 50 kN、100 kN、150 kN 时的计算结果。节点 2 处钢轨沿 z 方向的应变-垂向力关系曲线,如图 6 所示。从图 6 可以看出:节点 2 处钢轨的应变随垂向力线性增加。 K 为 $0.644\ 1 \times 10^6$ kN,故

可初步选择节点 2 位置为应变测量点。

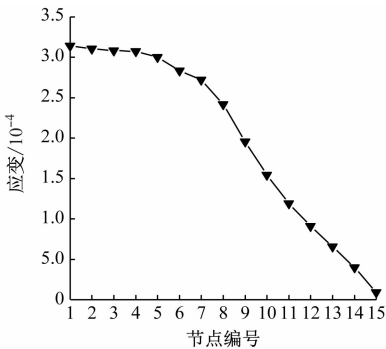


图5 静荷载为 200 kN 时钢轨跨中截面节点沿 z 方向的应变曲线
Fig. 5 Strain curve in the z direction at each section node in the middle of the rail span under 200 kN static load

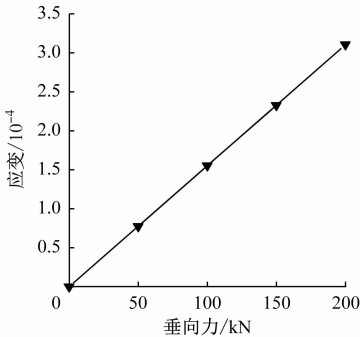


图6 节点 2 处钢轨沿 z 方向的应变-垂向力关系曲线
Fig. 6 Graph of strain-vertical load in the z direction at node 2

3.2 列车动荷载计算与模拟分析

列车行驶中产生的激振力为动荷载。在进行动荷载分析时,需考虑扣件阻尼的影响,故需对模型施加动荷载以验证静荷载分析的合理性。

3.2.1 列车动荷载计算

根据 E. Winkler 等人提出并完善的连续弹性基础梁模型,对 7 号线列车运行时钢轨所受激振力进行计算。A 型车转向架中心距为 15.7 m,车辆固定轴距为 2.5 m,转向架最短中心距即单轴动荷载作用最短间距为 6.18 m。扣件间距为 0.6 m,远小于单轴动荷载间距,故可将单轴动荷载作为钢轨跨中荷载进行计算。

采用列车轮轨激振力模拟动荷载,列车垂向激振力^[10-11]为:

$$\begin{cases} F(t) = p_0 + \sum_i m_0 g \alpha_i \omega_i^2 \sin(\omega_i t) \\ \omega_i = \frac{2\pi v}{L_i}, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

p_0 ——单轮静荷载;
 m_0 ——列车簧下质量;
 ω_i ——不平顺振动波长的圆频率;
 g ——重力加速度;
 L_i ——典型波长;
 v ——列车运行速度;
 α_i ——典型矢高;
 t ——时间。

A 型车单节车厢空载质量为 38 t,最大载客量为 3 596 人。以乘客平均质量 60 kg 计算,单节车厢满载质量约为 65 t,故单轴静荷载为 162.425 kN。选取 $p_0 = 81.2$ kN, $m_0 g = 0.75$ kN。根据英国轨道几何不平顺管理值^[9],分别取 $L_1 = 10$ m, $\alpha_1 = 5$ mm, $L_2 = 1$ m, $\alpha_2 = 0.3$ mm, $L_3 = 0.5$ m, $\alpha_3 = 0.1$ mm, $v = 80$ km/h,代入式(2)计算得到单轮垂向激励力 $F(t)$ (单位 N):

$$F(t) = 96 + 0.877\sin(13.96t) + 5.263\sin(139.62t) + 7.019\sin(279.25t) \quad (3)$$

3.2.2 列车动荷载模拟

在钢轨跨中顶面位置施加 $F(t)$,设定荷载步终止时间为 1 s,荷载子步数为 500。选择节点 2 位置输出应变时程曲线,如图 7 所示。从图 7 可以看出:在受力达到稳定后,节点 2 处钢轨沿 z 方向的应变时程变化规律和 $F(t)$ 相似。当 $t = 0.592$ s 时,应变达到最大值,此时 $F = 90.924$ kN, $\varepsilon_z = 140.633 \times 10^{-6}$;当 $t = 0.804$ s 时,应变为最小值,此时 $F = 71.398$ kN, $\varepsilon_z = 111.624 \times 10^{-6}$ 。

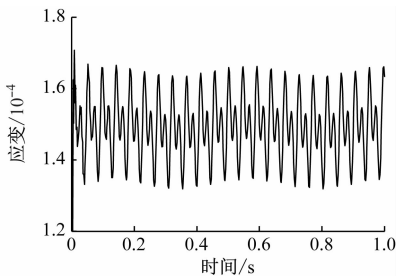


图 7 动荷载下节点 2 处钢轨沿 z 方向的应变时程曲线
 Fig. 7 Time history of strain in the z direction at node 2 under dynamic load

节点 2 处钢轨的垂向力沿 z 方向的应变散点图,如图 8 所示。从图 8 可以看出:经线性拟合后,曲线斜率为 $1.548 \times 10^{-6}/\text{kN}$,转换为 $K = 0.646 \times 10^6$ kN。受扣件阻尼影响, K 略大于静荷载作用下

的计算结果,偏差仅为 0.3%。

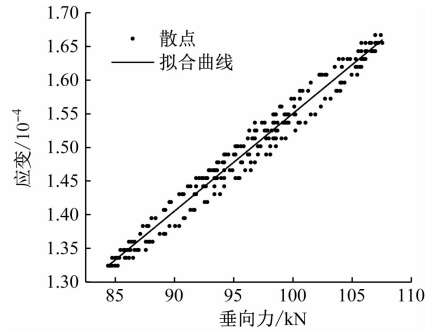


图 8 节点 2 处钢轨沿 z 方向应变-垂向力关系曲线
 Fig. 8 Graph of strain-vertical load in the z direction at node 2

综上,采用弯矩差法测量轮轨垂向力时,测点位置可选择在钢轨跨中位置的轨底上表面边缘,即图 5 所示的节点 2 位置。分别通过施加静、动荷载对钢轨进行数值模拟,得出扣件阻尼对计算结果的影响较小,求得 K 偏差仅为 0.3%。因此,可在室内进行标定试验,采用施加静荷载的方法验证并确定 K 。

4 轮轨垂向力标定试验

4.1 测量系统组成

在钢轨标定试验中,测量系统如图 9 所示。该系统主要由电阻式表面应变计、USB6005 数据采集卡及数据采集软件组成。测量所用的电阻式表面应变计采用全桥电路连接并进行封装设计,可消除温度效应和零漂影响。表 1 为测量所用两支电阻式表面应变计的主要参数。USB6005 数据采集卡连接至计算机,其可以识别到应变计传出的电信号,并将采集到的电信号数据通过自主开发的采集软件显示并保存,以此得到测点的应变情况,从而确定钢轨所受垂向力。

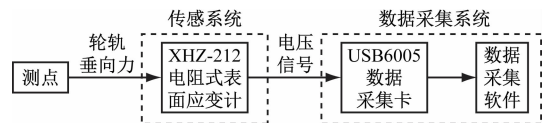


图 9 测量系统构成
 Fig. 9 Measurement system components

4.2 试验加载方案

受试验场地和加载设备等条件的限值,标定试验采用 1 根长 2 m 的钢轨进行 3 跨布置。试验用钢轨及其应变计布置方式如图 10 所示。两支应变计

采用强力胶水紧贴轨底上表面边缘对称布置。

表 1 电阻式表面应变计的主要参数

Tab.1 Main parameters of the resistive surface strain gauge

节点 编号	S	标距/ mm	应变量程	工作电 压/V
1 [#]	3.030	100	$-1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$	2 ~ 10
2 [#]	2.760	100	$-1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3}$	2 ~ 10

注:S为灵敏度。

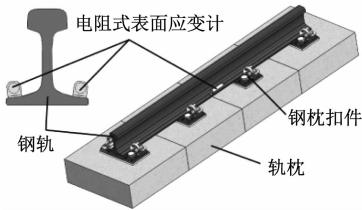


图 10 试验用钢轨及其应变计布置方式
Fig. 10 Test rail and strain gauge arrangement

本次标定试验采用多通道电液伺服疲劳加载系统(以下简称“电液伺服加载系统”)进行加载。图 11 为标定试验加载台,应变计按图 10 方式粘贴在钢轨两侧。以 0、50 kN、100 kN、150 kN、200 kN、220 kN 逐级加载,每级加载时间为 100 s,达到目标荷载后保持 50 s,加载完成后快速卸载。USB6005 数据采集卡与两支应变计直接连接,进行双通道数据采集,采集频率取 100 Hz。

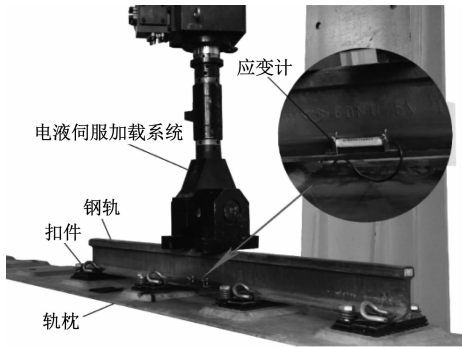


图 11 标定试验加载台
Fig. 11 Calibration test loading table

4.3 试验结果分析

卸载完成后,USB6005 数据采集卡所收集的钢轨电压变化趋势如图 12 所示。从图 12 可以看出:两支应变计的输出电压呈阶梯形上升,且卸载后快速恢复到接近初始状态;由于在加载过程中,电液伺服加载系统并不能按设定值完全平稳地保持荷载大小,因此曲线呈现一定程度的波动,但总体符合静荷载随加载时间的变化规律。

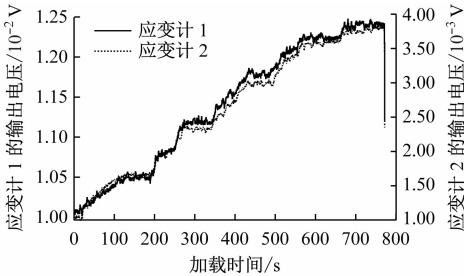


图 12 不同应变计输出的钢轨电压时程曲线
Fig. 12 Time history of output voltage from different strain gauges

根据表 1 中应变计的主要参数,计算得出不同应变计测得的钢轨应变随垂向力变化曲线,如图 13 所示。从图 13 中可以看出:应变计的输出电压和测定应变基本与施加的垂向力呈线性相关,这与式(1)相符;应变计 1 的曲线斜率为 $1.427 \times 10^{-6}/\text{kN}$,应变计 2 的曲线斜率为 $1.816 \times 10^{-6}/\text{kN}$,换算为 K 分别为 $0.7010 \times 10^6 \text{ kN}$ 和 $0.5510 \times 10^6 \text{ kN}$,将两者取平均值,则 K 为 $0.6260 \times 10^6 \text{ kN}$ 。

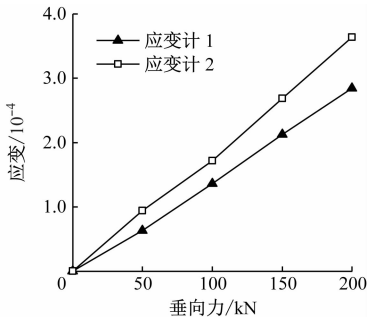


图 13 钢轨垂向力-应变曲线
Fig. 13 Graph of rail vertical load-strain

综上,通过标定试验测得的 K 为 $0.6260 \times 10^6 \text{ kN}$,而数值模拟中测得的 K 为 $0.6441 \times 10^6 \text{ kN}$,两者偏差仅 2.8%,满足工程精度要求。引起偏差的原因可能为:

- 1) 在搭建试验平台时,安装的钢轨扣件不能锁死到理想状态,使得扣件刚度相比数值模拟值偏小,导致最终测得的 K 值相比数值模拟值偏小。
- 2) 标定试验时加载的位置不能做到完全对中,且加载位置和方向均可能存在一定偏差。
- 3) 标定试验时应变计的粘贴位置不能做到绝对对称,在进行测点布置和测量时出现了偏差。

5 结语

- 1) 以弯矩差法为理论基础,通过静荷载数值模

拟计算确定了轮轨垂向力测量的测点位置,测点选择在钢轨跨中轨底上表面边缘两侧位置。当钢轨跨中位置受到垂向力作用时,该点沿钢轨方向的应变最大,且随垂向力呈线性增加。

2) 静荷载标定试验结果与静荷载数值模拟结果相比, K 值偏差较小,因此可通过静荷载标定试验确定 K 值。

3) 通过静荷载标定试验,可测得标定系数,这为列车轮轨垂向力的现场实测开展奠定了基础。

参考文献

- [1] 李艳祥,王普林,张旭. 地铁整体道床脱空破损机理及结构补强措施[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 115.
LI Yanxiang, WANG Pulin, ZHANG Xu. Mechanism of subway monolithic track bed void and damage and the structural reinforcement[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 115.
- [2] 雷华阳,张磊,许英刚,等. 快速地铁列车荷载下软土地基沉降数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 45.
LEI Huayang, ZHANG Lei, XU Yinggang, et al. Numerical simulation of settlement of soft soil foundation under fast metro train loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 45.
- [3] 罗震. 高速铁路无砟轨道结构受力及轮轨动力作用分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
LUO Zhen. Analysis of structure mechanics and wheel/rail dynamic interaction of ballastless track in high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [4] 潘周平,张立民. 轮轨力连续测试系统设计[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(1): 69.
PAN Zhouping, ZHANG Limin. Design of continuous wheel/rail force measurement system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(1): 69.
- [5] 赖建飞. 铁路轨道动力响应监测系统开发与应用[D]. 南昌: 华东交通大学, 2011.
LAI Jianfei. Development and application of railway track dynamic response monitoring system[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2011.
- [6] 黄辉. 轮轨垂向力连续测量方法研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
HUANG Hui. Research on continuous measurement method for vertical wheel-rail force[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2016.
- [7] 农汉彪. 轮轨垂向载荷连续测量与识别方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
NONG Hanbiao. Study on methods for continuous measurement and identification of the vertical interaction between wheel/rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [8] 宫雪,任尊松,范童柏,等. 轮轨力连续测试方法及1:5试验台验证[J]. 机械工程学报, 2020, 56(2): 184.
GONG Xue, REN Zunsong, FAN Tongbai, et al. Research on continuous measurement method for wheel-rail forces and validation with 1:5 scale roller rig test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(2): 184.
- [9] 冀维都. 地铁道床与管片剥离病害现场实时自动监测体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
JI Weidu. Study on real-time automatic monitoring system for stripping disease between monolithic concrete bed and shield segments[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [10] QIAN W, QI T, YI H, et al. Evaluation of structural fatigue properties of metro tunnel by model test under dynamic load of high-speed railway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103099.
- [11] YAN Q X, SONG L Y, CHEN H, et al. Dynamic response of segment lining of overlapped shield tunnels under train-induced vibration loads[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(10): 5439.
- 收稿日期:2021-09-06 修回日期:2021-09-06 出版日期:2024-03-10
Received:2021-09-06 Revised:2021-09-06 Published:2024-03-10
· 第一作者:陈鹏涛,博士研究生,271307424@qq.com
通信作者:漆泰岳,教授,qitaiyue58@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com