

基于导曲线空间线型优化的道岔 钢轨特征断面磨损分析*

龙建兵¹ 徐 鸿² 张 斌³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都;

3. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 330013, 南昌)

摘 要 [目的] 为了探究道岔导曲线空间线型的优化方法及优化之后的不同线型表现, 以及不同线型对道岔岔区钢轨特征断面磨损的影响, 需对不同线型工况下道岔钢轨各特征断面的磨损规律进行研究。[方法] 提出了道岔平面线型的计算方法, 在道岔导向曲线中设置超高, 并将高阶曲线引入道岔线型设计和计算中; 以我国 42 号高速道岔为例, 设计计算了 4 条不同于现有线型的优化道岔线型; 建立了车辆-道岔耦合动力学模型, 结合轮轨接触有限元模型计算了道岔钢轨特征断面的磨损深度; 对不同线型工况下的道岔钢轨特征断面磨损深度进行了对比分析。[结果及结论] 在设置超高条件下, 4 种新线型的 3 个特征断面钢轨磨损深度均小于既有线路; 将前曲线由圆曲线改为缓和曲线后, 该区段的钢轨特征断面磨损深度也大大减小; 高阶曲线在道岔导曲线位置的应用, 也有利于减少所选取导曲线钢轨特征断面的磨损。

关键词 轨道交通; 道岔; 导曲线; 钢轨磨损; 线型优化

中图分类号 U213.4⁺2:U213.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.035

Analysis of Turnout Rails Characteristic Section Wear Based on Spatial Alignments Optimization of Guide Curves

LONG Jianbing¹, XU Hong², ZHANG Bin³

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China; 3. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, 330013, Nanchang, China)

Abstract [Objective] In order to explore the optimization method of the spatial alignment for the turnout guide curve and the performance of different alignments after optimization, as well as the influence of different alignments on the rail wear characteristic section in the turnout area, it is necessary to study the wear laws of each characteristic section of the turnout rail

under different alignment conditions. [Method] A calculation method for the turnout plane alignment is proposed. Superelevation is set in the turnout guide curve, and high-order curves are introduced into the design and calculation of turnout alignment. Taking No. 42 high-speed turnout in China as an example, four optimized turnout alignments different from the existing ones are designed and calculated; a vehicle-turnout coupling dynamic model is established, and the wear depth of the characteristic sections of the turnout rail is calculated in combination with the wheel-rail contact finite element model. A comparative analysis is made on the wear depth of the characteristic sections of the turnout rail under different line shape conditions. [Result & Conclusion] Under the condition of setting superelevation, wear depths at three characteristic sections of the four new alignments are all smaller than that of the existing ones; after changing the lead curve from a circular curve to a transition one, wear depths of the rail characteristic section in this guide curve are also greatly reduced; the application of high-order curves at the position of the turnout guide curve is also conducive to reducing the wear of the characteristic section in the selected guide curve rail.

Key words rail transit; turnout; guide curve; rail wear; alignment optimization

0 引言

道岔是轨道系统的重要组成部分, 一直也是轨道系统中的薄弱环节。关于道岔线型优化的研究基本上仍然停留在平面线型优化的层面, 鲜有关于道岔空间线型优化及优化条件下道岔钢轨特征断面磨损的相关研究。

许多学者对高速道岔及道岔钢轨磨损的研究进行了系统探索^[1]。文献[2]建立了道岔平面线型

* 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBE51009)

计算方法,文献[3]验证了轮轨力、速度和超高之间的预期关系,文献[4]提出半切线型切削方式对42号道岔具有较强的适用性,文献[5]建立了道岔区轮轨耦合模型,文献[6-10]对道岔的线型进行了相关研究。国内外许多学者也对道岔磨耗进行了一系列的研究,文献[11]提出了磨损体积的计算方法;文献[12]对不同的道岔材料进行了试验研究;文献[13-14]针对岔区磨耗问题进行了系统研究,并通过试验、数值分析等方法提出了有关岔区磨耗的预测模型。

经过研究发现,在道岔导曲线中设置超高,可以明显改善列车侧向通过道岔动态性能,同时导曲线的平面线型与超高线型之间存在一定关联性。本文基于42号普通单开道岔,通过优化42号道岔导曲线的空间线型,探讨优化之后的道岔钢轨特征断面磨耗情况,得到磨耗情况较优的空间线型组合形式,进一步验证了优化道岔导曲线的空间线型在明显改善列车侧向通过道岔动态性能的同时,还有助于改善列车通过特征断面钢轨的磨耗情况,从而为后续有关道岔空间线型的优化研究提供理论基础。

1 道岔导曲线线型优化

目前三次抛物线在缓和曲线的设置中被广泛应用。我国现有的42号客运专线道岔导曲线即为圆曲线与缓和曲线的组合,而缓和曲线采用的线型即为三次抛物线。道岔制造工艺的进步以及无砟轨道的广泛应用,使得道岔能够准确保持设计几何形位,这也为更高次曲线在道岔设计中的应用提供了便利。因此,除了广泛应用的三次抛物线,本文还对七次抛物线的相关计算与应用进行了研究。

三次抛物线的方程为:

$$y = \frac{x^3}{6C} \left(1 + \frac{3x^3}{40C^2} + \dots \right) \quad (1)$$

式中:

x ——直角坐标系中的横坐标;

y ——直角坐标系中的纵坐标;

C ——对于确定的缓和曲线是常数。

$$C = Rl_0 \quad (2)$$

式中:

R ——圆曲线的曲线半径,单位 m;

l_0 ——计算点处缓和曲线长度,单位 m。

七次抛物线的基本方程为:

$$\frac{d^2k}{dl^2} = \frac{120}{Rl_0^5} l \left(l - \frac{l_0}{2} \right) (l - l_0) \quad (3)$$

式中:

k ——计算点处缓和曲线的曲率,单位 m^{-1} ;

l ——缓和曲线总长度,单位 m。

目前在实际应用中,道岔尖轨在顶面宽 50 mm 以后才完全受力,通过降低侧股内轨的方式来设置超高,会影响列车直向过岔时直尖轨的受力情况。本文将超高起点设置于距离尖轨起点 19 m 的位置处,道岔平面线型设计主要采用基于平面几何的平面参数法^[2],分别选取与现有42号道岔线型相同形式的“圆-缓”型以及两条缓和曲线相连接的“缓-缓”型进行道岔平面线型计算,计算过程参考文献[2]。

结合相关的设计规范,为满足多用途需求,将道岔置于单渡线,线间距取 4.6 m,轨距均为标准轨距 1 435 mm。通过计算,分别得到缓和曲线为三次抛物线、缓和曲线为七次抛物线的“圆-缓”型以及“缓-缓”型 4 种线型参数,如图 1—图 4 所示,图中, L_i 表示第 i 段曲线长度; α_i 表示第 i 段曲线偏转角。

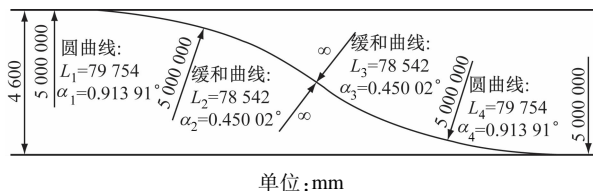


图 1 缓和曲线为三次抛物线的 42 号“圆-缓”型曲线道岔置于单渡线平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of No. 42 "circular-transition" curved turnout with a cubic parabolic transition curve placed on a single crossover plane

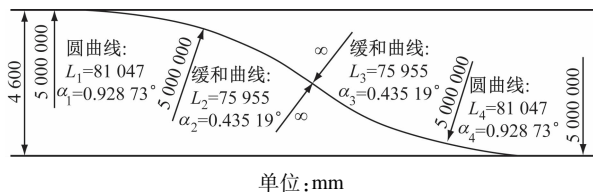


图 2 缓和曲线为七次抛物线的 42 号“圆-缓”型曲线道岔置于单渡线平面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of No. 42 "circular-transition" curved turnout with a seventh-order parabolic transition curve placed on a single crossover plane

由于超高起点设置于距离尖轨起点 19 m 的位置处,为了满足相关的安全性规范要求,本文设定目标超高量为全超高量的 1/2;同时,为了体现出与

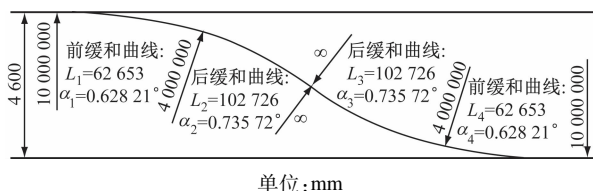


图3 缓和曲线为三次抛物线的42号“缓-缓”型曲线道岔置于单渡线平面示意图

Fig. 3 Schematic diagram of No. 42 "transition-transition" curved turnout with a cubic parabolic transition curve placed on a single crossover plane

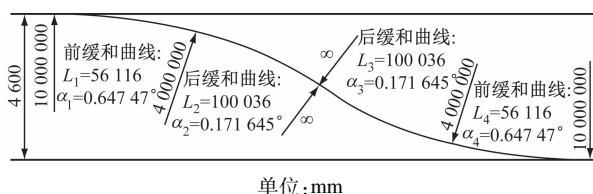


图4 缓和曲线为七次抛物线的42号“缓-缓”型曲线道岔置于单渡线平面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of No. 42 "transition-transition" curved turnout with a seventh-order parabolic transition curve placed on a single crossover plane

现有42号道岔线型的区别,在设计超高时将列车侧向通过道岔的速度定为200 km/h。根据设计条件计算可得,曲线半径为5 000 m时超高量为47.2 mm,曲线半径为4 000 m时超高量为59.0 mm。

2 模型建立及求解

2.1 车辆-道岔耦合动力学模型

综合考虑各项因素,并结合已有相关研究成果,确定车辆子模型采用单节车辆空间模型,模型及其求解均在多体动力学软件中完成。建立模型时充分考虑系统的非线性特征,因此模型包含1个车体、2个转向架和4个轮对,采用弹簧阻尼原件代替车辆的一系与二系悬挂系统。车辆的基本运动方程为:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = Q \quad (4)$$

式中:

M ——车辆质量矩阵;

C ——车辆阻尼矩阵;

K ——车辆刚度矩阵;

δ ——车辆系统相应自由度的位移矢量;

$\dot{\delta}$ 、 $\ddot{\delta}$ —— δ 的一阶导数和二阶导数;

Q ——车辆系统相应自由度的荷载列向量矩阵。

由于道岔存在变截面特征,因此道岔模型的建立不同于区间线路模型。轮轨接触主要包含法向力和切向力,将车轮和钢轨之间的垂向作用关系简化为非线性赫兹接触问题,即轮轨法向力采用赫兹接触理论计算,轮轨接触处理方法采用等效弹性法,轮轨切向力采用FASTSIM算法进行计算。

2.2 磨耗计算模型

道岔作为连接不同股道的线路设备,存在变截面特征,磨耗情况也更为复杂,因此引入磨耗计算模型进行钢轨特征断面磨耗情况计算。本文采用Archard轮轨磨耗模型,其计算磨损量时与接触法向力及滑动距离有关。

根据文献[11]的Archard轮轨磨耗模型计算材料磨耗的公式为:

$$\Delta z(x, y) = \frac{3Nk_w\Delta x}{2\pi abH} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot \sqrt{(\xi - \phi y)^2 + (\eta + \phi x)^2} \quad (5)$$

式中:

$\Delta z(x, y)$ ——接触斑内坐标 (x, y) 点所对应的磨耗深度,单位 m;

Δx ——所划分单元的边长,单位 m;

ξ 、 ϕ 、 η ——车轮在接触斑内的纵向、横向和自旋蠕滑率;

N ——轮轨滚动接触面的法向接触力,单位 N;

H ——材料硬度,单位 N/m^2 ;

k_w ——磨耗系数;

a 、 b ——接触斑内长、短轴长度,单位 m。

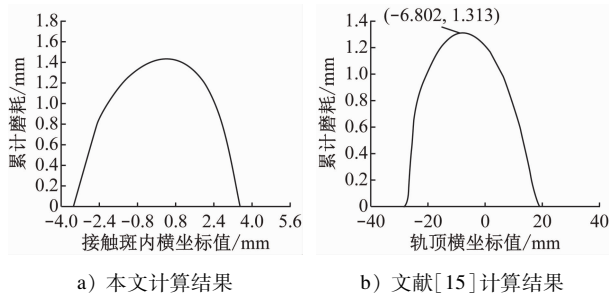
式中轮轨法向力、轮轨蠕滑率等参数通过多体动力学计算分析得到,而涉及接触斑信息的参数通过有限元仿真计算得到。

2.3 模型验证

磨耗计算的最终结果与文献[15]进行对比验证。经过有限元和多体动力学仿真,列车在以与文献[15]相同的30 km/h速度通过半径350 m圆曲线中点时,曲线内侧的磨耗量计算结果如图5 a)所示,文献[15]的计算结果如图5 b)所示。

由图5可知,本文的计算结果与文献[15]的计算结果基本一致。文献[15]计算100万辆车的累计磨耗深度最大值为1.313 mm,而根据本文所采用的方法计算得到的100万辆车的累计磨耗深度最大值为1.431 mm,两者偏差约为8%,本文的计算结果值稍大。文献[15]在圆曲线段设置了少量的轨

距加宽,这有助于减缓磨耗,因此本文计算的磨耗深度略大于文献[15]的,但两者的数量级一致。可以认为本文所采用的有限元结合多体动力学进行磨耗计算的方法是合理的,计算结果较为准确。



注:计算工况为 100 万辆车轮载。

图 5 本文计算的累计磨耗深度与文献[15]中的累计磨耗深度对比

Fig. 5 Comparison between the cumulative wear depth calculated in this paper and the cumulative wear depth in reference[15]

3 计算结果分析

针对钢轨特征断面进行磨耗对比和分析。钢轨的特征断面示意图如图 6 所示。

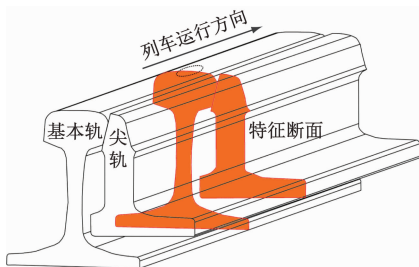


图 6 磨耗计算钢轨特征断面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of rail characteristic section for wear calculation

分别选取“圆-缓”型曲线道岔前圆曲线的曲中点断面、圆缓点断面以及后缓和曲线的中点断面,“缓-缓”型曲线道岔前缓和曲线的曲中点断面、前后缓和曲线的衔接点断面以及后缓和曲线的曲中点断面进行研究。

当列车以 200 km/h 的速度侧向通过 42 号道岔时,分别将现有线型以及 4 种新计算设计的线型共 5 种线型工况代入式(5)中进行计算,结果如图 7—图 9 所示。

由图 7 可知:加设了超高的 4 种新线型在前曲线曲中点处钢轨的磨耗情况均优于现有线型;两种

前曲线为缓和曲线型式的线型在此断面处产生的磨耗相比前曲线为圆曲线线型的要小得多,说明在导曲线位置设置超高有助于改善列车侧向过岔时通过此断面的磨耗情况;同时,将前曲线由圆曲线改为缓和曲线后大大改善了列车通过此断面的磨耗情况。

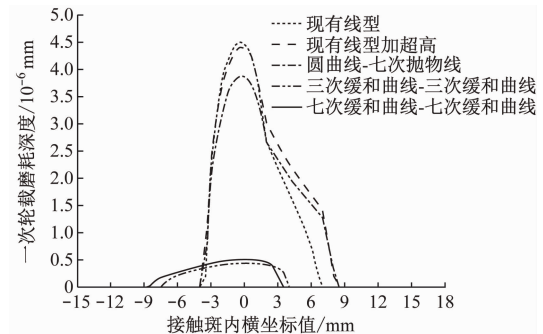


图 7 前曲线曲中点断面钢轨磨耗情况

Fig. 7 Rail wear situation at the midpoint section of the front curves

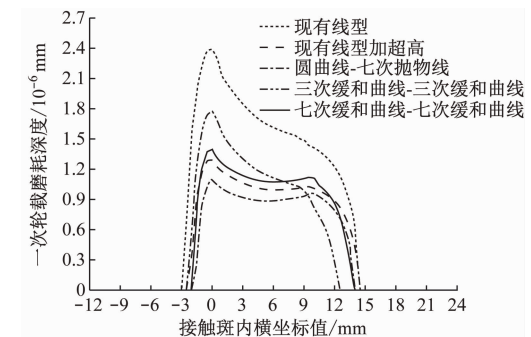


图 8 前后曲线衔接点断面钢轨磨耗情况

Fig. 8 Rail wear situation at the connection point section of the front and rear curves

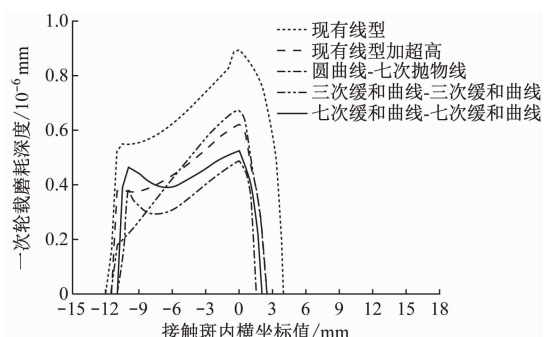


图 9 后曲线曲中点断面钢轨磨耗情况

Fig. 9 Rail wear situation at the midpoint section of the rear curves

由图 8、图 9 可知,加设了超高的 4 种新线型在前后曲线衔接点处及后曲线曲中点处钢轨的磨耗

情况均优于现有线型,说明在导曲线位置设置超高有助于改善列车侧向过岔时通过此断面的磨耗情况。

将列车通过5种线型的3个特征断面的钢轨磨耗深度最大值进行汇总,结果如表1所示。

表1 各线型各特征断面钢轨磨耗深度(一次轮载)最大值

Tab.1 Maximum value of rail wear depth (single wheel load) for each characteristic section of each alignment

特征断面	钢轨磨耗深度/ 10^{-6} mm				
	现有线型	现有线型加超高	圆曲线-七次抛物线	三次缓和曲线-三次缓和曲线	七次缓和曲线-七次缓和曲线
前曲线中点断面	4.467 37	4.393 37	3.869 77	0.449 68	0.518 11
前后曲线衔接点断面	2.386 38	1.291 49	1.099 42	1.777 74	1.394 87
后曲线中点断面	0.895 44	0.620 40	0.486 90	0.675 96	0.527 38

4 结语

本文建立了道岔平面线型计算方法,计算生成42号道岔的5种平面线型,结合所建立的车辆-道岔耦合动力学模型以及道岔钢轨特征断面的磨耗计算模型,计算列车侧向通过不同空间线型工况下的42号道岔钢轨特征断面磨耗并进行对比分析,结论如下:

1) 加设超高的4种新线型在3种特征断面处钢轨的磨耗情况均优于现有线型。结合已有研究成果分析表明,在42号道岔导曲线位置设置超高,不仅有利于提升列车侧向通过的安全性,还有利于改善列车侧向通过道岔时所选取导曲线特征断面的磨耗情况。

2) 在42号道岔导曲线位置设置超高是有效的,将前曲线由圆曲线改为缓和曲线后也改善了列车通过道岔时所选取导曲线钢轨特征断面的磨耗情况。

3) 高次曲线在道岔导曲线位置的应用也有助于改善列车通过道岔时所选取导曲线钢轨特征断面的磨耗情况。

参考文献

- [1] 王璞. 42号高速道岔转辙器区钢轨磨耗规律的预测分析[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(2): 289.
WANG Pu. Prediction analysis of rail wear in switch panel for No.42 high-speed turnout[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(2): 289.
- [2] 曹洋. 道岔平面线型动力分析及其设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
CAO Yang. Study on dynamic analysis and design methods of the turnout layout geometry[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

- [3] POWELL A, GRÄBE P. Exploring the relationship between vertical and lateral forces, speed and superelevation in railway curves[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2017, 59(3): 25.
- [4] 曹洋, 王平, 邓涛. 基于轮轨动力学的道岔尖轨切削方式选型研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(11): 73.
CAO Yang, WANG Ping, DENG Tao. Analysis on cutting mode selection for switch blade based on wheel-rail system dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(11): 73.
- [5] SCHUPP G, WEIDEMANN C, MAUER L. Modelling the contact between wheel and rail within multibody system simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(5): 349.
- [6] 曹洋, 王平, 杨生. 道岔平面选型的动力学研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 35.
CAO Yang, WANG Ping, YANG Sheng. Dynamics study on turnout plane alignment selection[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(11): 35.
- [7] KOC W. Shaping of the turnout diverging track with variable curvature sections[J]. International Journal of Rail Transportation, 2017, 5(4): 229.
- [8] HASAN N, PORKESS H. Switch angle design: formulation, inferences, and uses[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(2): 161.
- [9] KOC W. Optimum shape of turnout diverging track with segments of variable curvature[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019, 145(1): 04018077.
- [10] KOC W. Analytical method of connecting parallel tracks located in a circular arc using curved turnouts[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2020, 146(3): 04019081.
- [11] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981.
- [12] LUO Q, KITCHEN M, LI J, et al. Experimental investigation on the spalling failure of a railway turnout made from Hadfield steel[J]. Wear, 2023, 523: 204779.

(下转第200页)

梁轨相对位移均随 f 的增大而减小。当 f 增大至0.05时,连续梁桥上最大制动力和最大梁轨相对位移分别减小13.74%和17.65%,连续梁固定支座处桥墩纵向力减小了37.73%。

3) 断轨工况下,随着 f 的增大,钢轨断缝值和连续梁固定支座处桥墩纵向力均减小,当 f 增大至0.05时,钢轨断缝值减小9.01%,连续梁固定支座处桥墩纵向力减小56.90%。

由上述结论可见,考虑活动支座摩擦阻力后,连续梁及无缝线路的纵向约束增强, f 对连续梁桥上无缝线路受力和变形影响显著。由此建议地铁大跨度连续梁桥上无缝线路及桥梁墩台设计时应考虑活动支座摩擦阻力的影响。

参考文献

- [1] 王平,肖杰灵,陈嵘,等.高速铁路桥上无缝线路技术[M].北京:中国铁道出版社,2016.
WANG Ping, XIAO Jieling, CHEN Rong, et al. Technology of continuous welded rail on bridges for high-speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [2] ALI MUBARACK C K, UPADHYAY A. Stability of continuous welded rail on steel bridge subjected to thermal loading[J]. Structures, 2021, 34: 4524.
- [3] 王嘉,李莉.基于Revit和ANSYS软件的城市轨道交通连续箱梁桥无缝线路模型转换方法[J].城市轨道交通研究,2023,26(11):162.
WANG Jia, LI Li. Model conversion method for CWR on urban rail transit continuous box girder bridge based on Revit and ANSYS software[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): 162.
- [4] 戴佳程,李朋,刘浩,等.城市轨道交通简支梁桥桥墩纵向水平刚度限值研究[J].铁道建筑,2020,60(7):18.
DAI Jiacheng, LI Peng, LIU Hao, et al. Research on stiffness limit of bridge piers for simply supported girder bridges in urban rail transit[J]. Railway Engineering, 2020, 60(7): 18.
- [5] 赫腾飞,赵文娟.城市轨道交通简支梁桥墩顶纵向刚度限值研究[J].铁道建筑,2018,58(2):28.
HE Tengfei, ZHAO Wenjuan. Research on longitudinal rigidity limit of pier-top of simply supported bridge for urban rail transit[J]. Railway Engineering, 2018, 58(2): 28.
- [6] 谢鹏,刘万里,冯雁,等.考虑活动支座摩擦阻力的大跨度连续梁桥上梁轨相互作用研究[J].铁道标准设计,2023,67(6):53.
XIE Peng, LIU Wanli, FENG Yan, et al. Study on interaction between long span continuous beam bridge and track considering friction of movable bearing[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(6): 53.
- [7] 徐浩,谢铠泽,周双喜,等.考虑活动支座摩擦阻力的山区铁路连续梁桥墩纵向水平刚度限值研究[J].北京交通大学学报,2023,47(6):138.
XU Hao, XIE Kaize, ZHOU Shuangxi, et al. Research on the limit of longitudinal horizontal stiffness of continuous beam bridge piers in mountain railway considering movable bearing friction force[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2023, 47(6): 138.
- [8] 于向东,陈卓,敬海泉.支座摩擦阻力对高速铁路大跨度悬索桥梁轨相互作用的影响[J].中国铁道科学,2023,44(1):114.
YU Xiangdong, CHEN Zhuo, JING Haiquan. Influence of bearing friction on track-bridge interaction of long-span suspension bridge of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2023, 44(1): 114.
- [9] YAN B, DAI G L, GUO W H, et al. Longitudinal force in continuously welded rail on long-span tied arch continuous bridge carrying multiple tracks[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 2001.
- 收稿日期:2023-03-28 修回日期:2023-04-12 出版日期:2025-04-10
Received:2023-03-28 Revised:2023-04-12 Published:2025-04-10
• 通信作者:徐浩,高级工程师,xhao0@163.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
- (上接第195页)
- [13] INNOCENTI A, MARINI L, MELI E, et al. Prediction of wheel and rail profile wear on complex railway networks[J]. International Journal of Rail Transportation, 2014, 2(2): 111.
- [14] NIELSEN J C O, PÅLSSON B A, TORSTENSSON P T. Switch panel design based on simulation of accumulated rail damage in a railway turnout[J]. Wear, 2016, 366: 241.
- [15] 李浩,孙加林,赵国堂.动车所小半径曲线钢轨磨耗研究[J].中国铁道科学,2020,41(6):39.
LI Hao, SUN Jialin, ZHAO Guotang. Research on rail wear of small radius curve in EMU depot[J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 39.
- 收稿日期:2024-07-27 修回日期:2024-09-30 出版日期:2025-04-10
Received:2024-07-27 Revised:2024-09-30 Published:2025-04-10
• 第一作者:龙建兵,高级工程师,taller@88.com
通信作者:张斌,副教授,zjzdwyx@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