

重庆轨道交通 1 号线低频晃车原因分析及整治措施*

张雁珍¹ 王文斌² 周 潇³ 戴源廷² 朱 彬²

(1. 重庆城市交通开发投资(集团)有限公司, 400013, 重庆; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 100081, 北京;

3. 重庆市轨道交通(集团)有限公司, 401120, 重庆)

摘 要 [目的]为解决重庆轨道交通 1 号线(以下简称“1 号线”)低频晃车问题,需对晃车原因进行分析,并制定相应的整治措施。[方法]从晃车特征、轨道几何状态、桥梁振动及钢轨廓形变化等方面对 1 号线低频晃车原因进行了分析,制定了钢轨打磨措施。从线路和车辆两方面探讨了钢轨周期性磨耗的产生原因,提出解决钢轨周期性磨耗导致晃车问题的措施。[结果及结论]1 号线低频晃车原因为:轨道几何不平顺和桥梁振动未直接导致车辆异常晃动;钢轨廓形存在波长约为 12 m 的周期性变化,车速较高时,在钢轨廓形周期性变化作用下,车辆频率为 2 Hz 的横向固有模态被激发,导致车体剧烈晃动。通过钢轨打磨方案,打磨后车辆运行平稳性指标相对打磨前降低了 0.5 左右,打磨区段内车辆运行平稳性指标均在限值 2.5 以内,晃车问题得到缓解。轨道几何不平顺较大,以及车辆的抗扰动性能较低是钢轨产生周期性磨耗的原因。通过钢轨铣磨配合轨道精调的措施可彻底解决钢轨周期性磨耗导致的晃车问题。

关键词 城市轨道交通; 低频晃车; 晃车原因; 整治措施

中图分类号 U213.4⁺2; U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.006

Cause Analysis and Rectification Measures of Chongqing Rail Transit Line 1 Low-frequency Train Oscillation

ZHANG Yanzhen¹, WANG Wenbin², ZHOU Xiao³, DAI Yuanting², ZHU Bin²

(1. Chongqing City Transportation Development & Investment Group Co., Ltd., 400013, Chongqing, China; 2. China Academy of Railway Sciences Group Co., Ltd., 100081, Beijing, China; 3. Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd., 401120, Chongqing, China)

Abstract [Objective] To address the issue of low-frequency train oscillation on Chongqing Rail Transit Line 1 (hereinafter as 'Line 1'), it is necessary to analyze the causes of the oscillation and formulate appropriate rectification measures.

[Method] The causes of low-frequency train oscillation on Line 1 are analyzed by examining oscillation characteristics,

track geometry, bridge vibration, and rail profile changes, rail grinding measures are formulated. The causes of periodic rail wear from both track and vehicle perspectives are explored, and measures to address train oscillation caused by periodic rail wear are proposed. [Result & Conclusion] The causes of low-frequency train oscillation on Line 1 include: track geometry irregularities and bridge vibrations that do not directly cause abnormal vehicle oscillation; since the rail profile exhibiting periodic changes with a wavelength of approximately 12 meters, at higher train speeds and under rail profile periodic variation action, the lateral natural mode with a vehicle frequency of 2 Hz will be activated, leading to severe carbody oscillation. Through the rail grinding plan, the vehicle operation stability index after grinding decreases by about 0.5 compared to before grinding, with all the stability indices within the grinding section remaining below the limit of 2.5, thus alleviating the oscillation problem. The significant track geometry irregularities and the vehicle poor disturbance-resistant performance are identified as causes of periodic rail wear. The combination of rail milling and track fine adjustment measures can completely resolve the train oscillation issue caused by periodic rail wear.

Key words urban rail transit; low-frequency train oscillation; train oscillation cause; rectification measure

近年来,基于钢轮-钢轨的城市轨道交通系统凭借运能大、效率高等优点在我国得到了迅猛发展,为构建现代化城市交通网络做出了巨大贡献^[1]。但随着城市轨道交通线路运营时间的增加,一系列具有挑战性的工程问题随之突显^[2-3],其中,城市轨道交通老旧线路的低频晃车问题越来越突出^[4-5]。

晃车发生时,乘客乘坐舒适性大大降低,严重时会增加城市轨道交通系统的安全风险。因此,该问题正逐步得到各大城市轨道交通运营公司的重视,但目前相关研究依然较少,鲜有针对性的机理研究和成功整治案例。目前,低频晃车问题的研究

* 中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2021 YJ198)

主要集中在高速铁路上,通常认为晃车与轮轨匹配不良以及等效锥度过低相关^[6-7]。文献[8-10]指出车辆悬挂参数不佳、轨道几何状态不良、轨枕空吊等因素也可能导致晃车。晃车问题较为复杂,可能的原因多种多样,难以找到普适性的方法来对晃车问题进行治理,因此需要对特定情况进行深入分析。本文以重庆轨道交通1号线(以下简称“1号线”)晃车问题为研究对象,分析轨道几何、车桥共振及钢轨廓形等因素对车辆晃动的影响,寻求导致该线路车辆低频横向晃动的原因,并提供了治理方案,可为城市轨道交通行业解决晃车相关问题提供参考。

1 晃车原因分析

1.1 晃车特征

对车辆进行了动力学响应测试。测试车辆均设置为AW0(空车)工况,以ATO(列车自动运行)方式运行通过各站,测试车辆到站降速通过。最高车速为90 km/h。晃车时车体横向加速度时域和频域特征如图1所示。

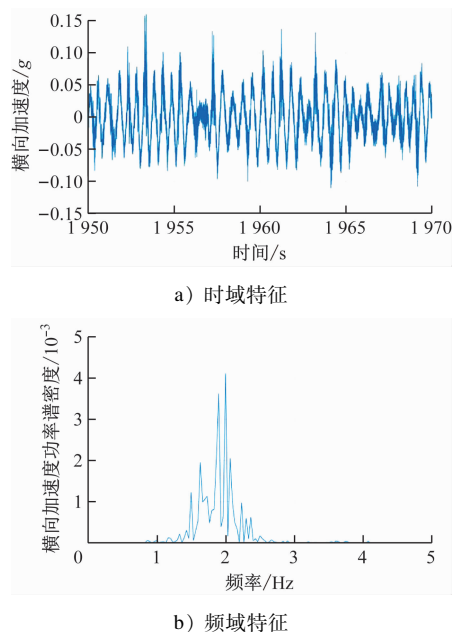


图1 晃车时车体横向加速度时域和频域特征

Fig. 1 Characteristics of carbody lateral acceleration in time and frequency domains during train oscillation

由图1可见:晃车时,车体做以2 Hz频率为主的横向简谐摆动;横向加速度最大值超过了0.1g,此时由加速度计算得到的平稳性指标达到3.15,不符合GB/T 5599—2019的要求。

1.2 轨道几何状态

对全线轨道动态几何状态进行测试,结果发现晃车问题严重的高架区段对应的高低不平顺较为突出,该不平顺波长为30 m,由桥跨结构导致。为了排除较大的轨道几何不平顺对晃车研究的干扰,选取长度为1 km的试验段对轨道进行全面精调,使得轨道几何状态得到了较大改善。轨道精调前后右轨高低不平顺波形对比曲线如图2所示。

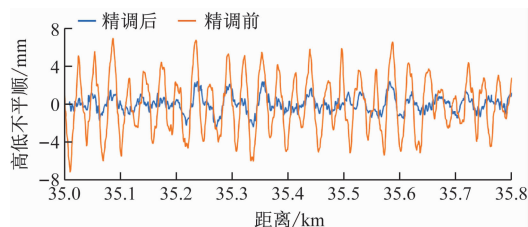


图2 轨道精调前后右轨高低不平顺波形对比曲线

Fig. 2 Comparison curves of right-rail vertical irregularity waveforms before and after track fine adjustment

由图2可以看出:轨道精调后其周期性的高低不平顺基本被消除,试验段的轨向、水平、三角坑、轨距及轨距变化率等不平顺也得到了进一步优化,试验段TQI(轨道质量指数)均降低至3.88 mm以内,远低于交办运[2023]56号《城市轨道交通初期运营前安全评估规范》中9.00 mm的标准限值)。通过精调将轨道不平顺的干扰基本消除后,在相同速度工况下,对车辆动力学响应进行复测。轨道精调前后车体横向加速度波形对比如图3所示。

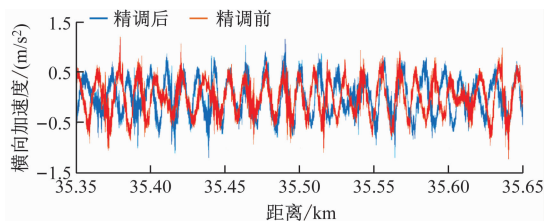


图3 轨道精调前后车体横向加速度波形对比

Fig. 3 Comparison of carbody lateral acceleration waveforms before and after track fine adjustment

由图3可以发现:精调前后相同里程处,车体横向加速度幅值基本未变化,晃车问题未得到有效改善。

1.3 桥梁振动

车辆动力学响应结果显示,严重的晃车问题多发生于车速较高、直线较长的桥梁区段,因此,需对桥梁振动进行分析,研究车桥共振导致车辆异常晃动的可能性。

对桥梁梁体横向振幅、竖向振幅、横向加速度及竖向加速度,梁体跨中挠度,墩顶横向振幅,支座横向、纵向位移,梁端转角等指标进行了全方位测

试,以掌握列车运行通过时的桥梁动态响应情况。桥梁动态响应测试结果如表 1 所示。

表 1 桥梁动态响应测试结果

Tab.1 Bridge dynamic response test results

项目	跨中横向 振幅/mm	跨中竖向 振幅/mm	跨中横向 加速度/ (m/s^2)	跨中竖向 加速度/ (m/s^2)	墩顶横向 振幅/mm	支座横向 位移/mm	支座纵向 位移/mm	梁体跨中 挠度/mm	梁体梁端 转角/($^\circ$)	梁体横向自 振频率/Hz	梁体竖向自 振频率/Hz
测量值	1.24	0.97	0.81	0.63	1.09	0.12	0.59	6.02	0.033	1.43	4.64
安全值	3.33		1.40	5.00				15.00			

由表 1 可见:桥梁各项动态测试结果均在铁运函[2004]120 号《铁路桥梁检定规范》规定的安全值范围之内,满足运营要求。为研究车桥耦合振动对晃车的影响,对比分析了车辆通过桥梁测点时车体和梁体的横向加速度频谱特征。K35+600 处桥梁梁体和列车车体横向加速度频谱对比曲线如图 4 所示。

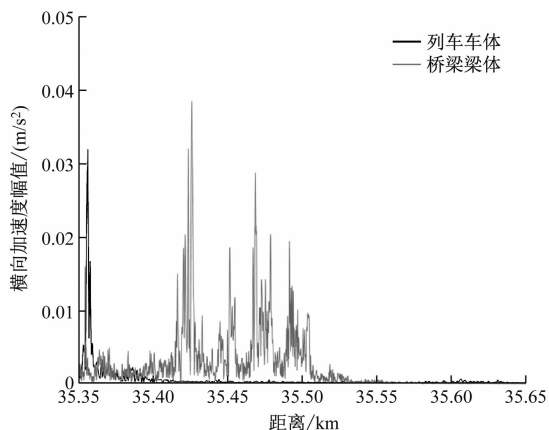


图 4 K35+600 处桥梁梁体和列车车体横向加速度频谱对比曲线

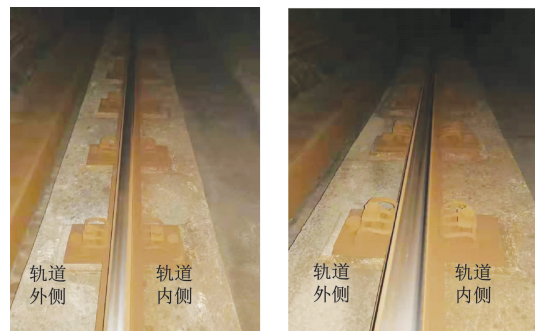
Fig. 4 Comparison curves of lateral acceleration spectrum between K35+600 bridge beam body and train carbody

由图 4 可见:桥梁梁体横向加速度主要集中在频率为 20.0~50.0 Hz 范围内,列车车体横向加速度主要集中在频率为 2.0 Hz 左右;桥梁梁体在低频范围内出现幅值较小的横向加速度分量,且其频率为 1.4 Hz,该频率与晃车主频 2.0 Hz 不吻合。因此,桥梁振动与 1 号线晃车问题未明显关联。

1.4 钢轨廓形变化

经现场踏勘发现,晃车严重区段钢轨普遍存在明显的周期性磨耗问题,具体表现为:左、右钢轨光带在轨顶和内侧交替变化,特征波长约为 12 m,与晃车波长相对应。K35+500 处光带左轨周期性变

化照片如图 5 所示。



a) 光带位于钢轨轨顶

b) 光带位于钢轨内侧

注:图 5 b) 中照片为沿列车行进方向距离图 5 a) 钢轨所在位置 6 m 处的钢轨照片。

图 5 左轨光带周期性变化照片

Fig. 5 Photos of left-rail light band periodic variation

图 5 a) 中左轨光带位于轨顶,图 5 b) 中左轨光带移动到了钢轨内侧。右轨光带分布情况与左轨相反,即相同里程处左轨光带位于轨顶时,右轨光带则出现在钢轨内侧。选取长度为 62 m (100 根轨枕) 的典型晃车区段,对每根轨枕上方的钢轨廓形进行连续测试,发现不同位置处的钢轨廓形外侧基本相同,但钢轨廓形内侧呈现周期性变化。将钢轨廓形内侧竖向最高处定义为其廓形波动的波峰,钢轨廓形内侧竖向最低处定义为波谷。其波峰和波谷处的钢轨廓形最大高差约为 1.8 mm。波峰和波谷处的钢轨廓形对比如图 6 所示。

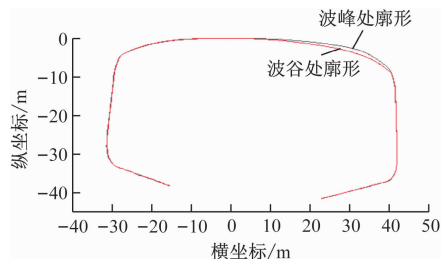
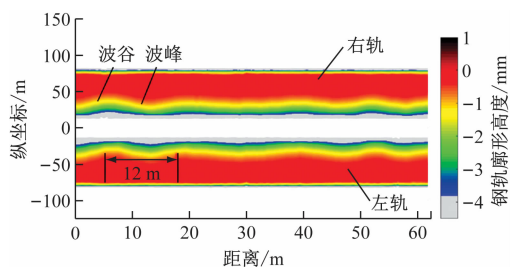


图 6 波峰和波谷处的钢轨廓形对比

Fig. 6 Comparison of rail profiles at peaks and troughs

将 K35 + 500—K35 + 562 区段 100 根轨枕范围内的钢轨廓形沿纵向排列,形成钢轨廓形的三维俯视云图,如图 7 所示。



注:为方便对比左、右轨的三维廓形,将左轨横坐标以钢轨中心线为基准向横轴负方向平移 50 mm,将右轨横坐标以钢轨中心线为基准向横轴正方向平移 50 mm。钢轨因内侧磨耗导致其廓形高度较低而形成波谷(见图 5 b)中光带内侧),反之内侧无磨耗时其廓形高度较高而形成波峰(见图 5 a)中光带轨顶)。

图 7 钢轨廓形三维俯视云图

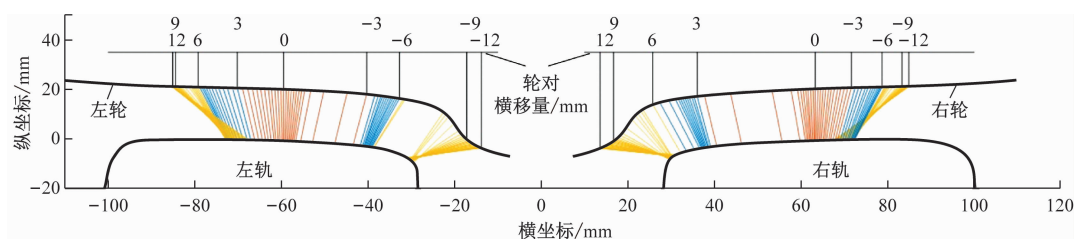
Fig. 7 Nephogram of rail profile 3D top view

将列车通过 K35 + 500—K35 + 562 时车体横向加速度波形与图 7 中钢轨廓形三维俯视云图对照,可以发现二者波形基本吻合。引起钢轨廓形变化的波长约为 12 m,列车运行速度为 90 km/h 时,其对车辆的作用频率为 2 Hz,正好与晃车频率吻合。因此,1 号线车辆异常晃动与钢轨廓形的周期性变化密切相关。

2 整治措施

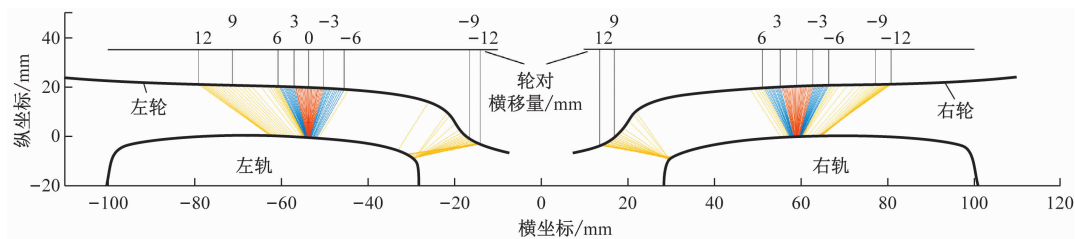
2.1 钢轨打磨

根据本文晃车原因的研究成果,制定钢轨打磨方案来缓解晃车问题。由于打磨车工作原理的限制,钢轨通过打磨无法消除其波长为 12 m 的廓形变化,但可对其廓形优化,通过收窄轮轨接触带宽度,可减小晃车幅度。钢轨打磨前后的轮轨接触关系示意如图 8 所示。



注:左、右轮接触带宽度分别为 29.9 mm 和 35.6 mm;左、右轨接触带宽度分别为 23.64 mm 和 29.34 mm。

a) 钢轨打磨前



注:左、右轮接触带宽度分别为 6.8 mm 和 7.5 mm;左、右轨接触带宽度分别为 0.57 mm 和 1.25 mm。

b) 钢轨打磨后

注:轮对横移量为负值时光带向左移,为正值时光带向右移。

图 8 钢轨打磨前后的轮轨接触关系

Fig. 8 Wheel-rail contact relationship before and after rail grinding

由图 8 可以发现:打磨前轮轨接触带宽度较大,即使车轮受到了较小的横向扰动,也会造成较大的轮轨接触点跳动,不利于车辆的稳定运行;打磨后轮轨接触带宽度得到了明显收窄,钢轨内侧廓形变化较大的区域难以和车轮接触,因此无法对车轮运动产生作用,无法导致车辆晃动。打磨区段为 K35 + 550—K36 + 000。打磨后,对车辆平稳性进行了测

试。钢轨打磨前后车辆运行横向平稳性指标对比,如图 9 所示。

图 9 中:钢轨打磨前后两次测试速度保持一致,钢轨打磨后车辆运行平稳性指标相对打磨前降低了 0.5 左右,打磨区段内车辆运行平稳性指标均在限值 2.5 以内。由此可见,通过钢轨打磨,晃车问题得到了有效缓解。但钢轨打磨存在一定局限性,不

能完全消除钢轨踏面周期性磨耗。测试结果表明,钢轨打磨后车辆依然存在小幅度的周期性晃动,长期运行后可能会造成钢轨周期性磨耗的加剧和车辆晃动问题的反复。因此,若要彻底解决该条线路的晃车问题,还需采取措施防止钢轨周期性磨耗的产生。

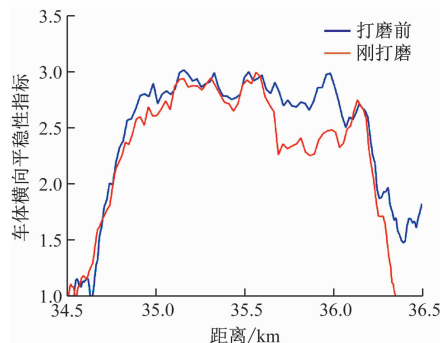


图9 钢轨打磨前后车辆运行横向平稳性指标对比

Fig.9 Comparison of vehicle operation lateral stability index before and after rail grinding

2.2 钢轨周期性磨耗成因及长效防治措施

本文所述的城市轨道交通晃车问题演化过程如下:城市轨道交通线路开通时钢轨廓形处于正常状态,但轨道几何存在较大的初始不平顺,在较快的列车运行速度(90 km/h)下诱发车辆小幅蛇行运动,长期运行后在钢轨踏面上形成波长为12 m左右的周期性磨耗,钢轨廓形的周期性变化与车辆蛇行运动相互作用,造成了较为严重的车辆异常晃动问题。

钢轨周期性磨耗成因主要从线路和车辆两方面考虑:

1) 较大的轨道几何不平顺起到了初始激励和相位整合的作用。车辆经过轨道某一不平顺处时受到激励,从该位置处开始做等波长的蛇行运动,车轮每次对钢轨造成的磨耗都从该位置处开始叠加,因而发展形成稳定的周期性钢轨廓形变化。若无此位置处轨道不平顺的相位整合作用,车辆蛇行导致的磨耗随机叠加,使得钢轨不能形成稳定的周期性磨耗。

2) 车辆的抗激励性能对钢轨周期性磨耗的产生至关重要。轨道不可能做到完全平顺,在受到激励后,即使车辆蛇行运动能快速衰减而恢复至稳定状态,也难以对钢轨产生周期性磨耗。

因此,为了避免钢轨产生周期性磨耗,应对轨道几何状态进行精调,以消除较大的轨道几何不平顺的局部峰值,并将TQI控制到合理范围内。在已产生周期性磨耗的前提下,应对钢轨进行铣磨,消

除钢轨廓形周期性变化,避免钢轨廓形变化对车辆造成激励而加剧车轮对钢轨的周期性磨耗。同时,车辆部门也应积极配合,提升车辆的抗激励性能,抑制车辆的蛇行运动。

3 结语

本文对重庆轨道交通1号线晃车问题进行了深入研究,分析了轨道几何状态、桥梁振动及钢轨廓形等因素对晃车的影响。结果表明:列车运行速度较高时,在波长为12 m的钢轨廓形周期性变化激励下,车体产生频率为2 Hz的横向固有模态共振,造成体感较强的车辆异常晃动问题。通过钢轨打磨优化轮轨接触关系,可以暂时缓解晃车问题,但打磨后车辆仍存在小幅晃动趋势,可能会造成钢轨周期性磨耗问题的复发。因此,需对全线进行轨道精调以改善轨道几何状态,减少轨道对车辆的横向激励,防止车辆蛇行运动造成的磨耗相互叠加,进而发展成周期性磨耗。此外,还应对重点区段钢轨进行铣磨来避免钢轨周期性磨耗在原先的基础上继续发展。车辆专业也应采取相应措施来提高车辆的抗激励能力,如车辆选型时应尽可能选择临界速度较高的车型,运营阶段应及时对车轮进行镟修,避免因车轮出现严重凹磨影响车辆的稳定性。

参考文献

- [1] 施俊君. 基于智能运维的城市轨道交通轨道专业数据中台[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊1): 105.
SHI Junjun. Urban rail transit professional data center based on intelligent operation and maintenance framework[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 105.
- [2] 王进, 李克飞, 吴宗臻, 等. 基于轮轨动态测试的地铁列车运行平稳性异常问题分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 149.
WANG Jin, LI Kefei, WU Zongzhen, et al. Analysis of metro train abnormal running stability based on wheel/rail dynamic test[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12): 149.
- [3] 吴宗臻, 王文斌. 城市轨道交通钢轨波磨评价指标及打磨验收标准探讨[J]. 铁道建筑, 2018, 58(1): 141.
WU Zongzhen, WANG Wenbin. Discussion on assessment indexes for rail corrugation and acceptance standard of grinding in urban rail transit[J]. Railway Engineering, 2018, 58(1): 141.
- [4] 冯永华, 张振先, 梁海啸, 等. 动车组低频晃车原因分析及应对措施[J]. 铁道机车车辆, 2021, 41(5): 11.

(下转第44页)

- of urban rail transit lines [J]. Tunnel Construction, 2012, 32 (2): 184.
- [3] 王学贵. 重庆地铁6号线长大坡道列车运行能力研究[J]. 中国铁路, 2013(10): 61.
WANG Xuegui. Study on train running capacity on long-large ramps in Chongqing Metro Line 6 [J]. Chinese Railway, 2013 (10): 61.
- [4] 李涛, 王维, 王代富. 山地城市轨道交通长大坡道路方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(11): 73.
LI Tao, WANG Wei, WANG Daifu. Selection of route with long-steep ramp for urban rail transit in mountainous cities [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(11): 73.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [6] 国家铁路局. 市域(郊)铁路设计规范: TB 10624—2020 [S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2020.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of suburban railway: TB 10624—2020 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2020.
- [7] 重庆市住房和城乡建设委员会. 城轨快线设计标准: 渝建标 [2020]17 号 [A]. 重庆: 重庆市住房和城乡建设委员会, 2020.
Chongqing Municipal Committee of Housing and Urban-Rural Development. Design standard for urban rail transit: YJB [2020] No. 17 [A]. Chongqing: Chongqing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, 2020.
- [8] 重庆市发展和改革委员会. 关于市郊铁路重庆中心城区至南川线工程可行性研究报告的批复 [R]. 重庆: 重庆市发展和改革委员会, 2022.
Chongqing Municipal Development and Reform Commission. Reply to the feasibility study report on the suburban railway project from Chongqing Central City to Nanchuan Line [R]. Chongqing: Chongqing Municipal Development and Reform Commission, 2022.
- [9] 重庆市勘测院. 市郊铁路重庆中心城区至南川线工程岩土工程勘察报告 [R]. 重庆: 重庆市勘测院, 2022.
Chongqing Survey Institute. Geotechnical investigation report of suburban railway project from Chongqing Central City to Nanchuan Line [R]. Chongqing: Chongqing Survey Institute, 2022.
- 收稿日期: 2024-01-04 修回日期: 2024-01-28 出版日期: 2024-08-10
Received: 2024-01-04 Revised: 2024-01-28 Published: 2024-08-10
• 通信作者: 张文正, 高级工程师, 460210270@qq.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 38 页)

- FENG Yonghua, ZHANG Zhenxian, LIANG Haixiao, et al. Research on the causes and improvement measures for low-frequency shaking of EMU [J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(5): 11.
- [5] 王月. 论述铁路线路晃车原因与整治 [J]. 科技与创新, 2017 (19): 51.
WANG Yue. Discussion on causes and treatment of train oscillation on railway line [J]. Science and Technology & Innovation, 2017(19): 51.
- [6] 戴焕云, 杨震寰, 干锋. 轨道车辆轮轨等效锥度管理措施研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(12): 12.
DAI Huanyun, YANG Zhenhuan, GAN Feng. Research on management measures of wheel-rail equivalent slope of rail vehicles [J]. Modern Urban Transit, 2021(12): 12.
- [7] 曾京, 干锋, 罗光兵. 轨道车辆轮轨关系检测及等效锥度管理 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(6): 29.
ZENG Jing, GAN Feng, LUO Guangbing. Inspection on wheel and rail interface of rail vehicles and management of equivalent conicity [J]. Modern Urban Transit, 2021(6): 29.
- [8] 练兴平, 杨晓刚, 汪杰, 等. 成灌线某晃车地段 CRTS III 型板式无砟轨道层间离缝整治研究 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62 (11): 34.
LIAN Xingping, YANG Xiaogang, WANG Jie, et al. Research on the connection damage remediation of CRTS III ballastless track in train shaking area of Chengdu to Dujiangyan high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 34.
- [9] 高雅, 时瑾, 李克飞. 轨底坡对运营地铁轮轨接触特性的影响分析 [J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 25.
GAO Ya, SHI Jin, LI Kefei. Influence of rail cant on wheel-rail contact characteristics of operating metro [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(6): 25.
- [10] 孙善超, 王卫东, 刘今朝, 等. 基于车辆系统稳定性分析的晃车现象研究 [J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 82.
SUN Shanchao, WANG Weidong, LIU Jinzhao, et al. Study of carbody's severe vibration based on stability analysis of vehicle system [J]. China Railway Science, 2012, 33(2): 82.
- 收稿日期: 2022-03-02 修回日期: 2022-04-07 出版日期: 2024-08-10
Received: 2022-03-02 Revised: 2022-04-07 Published: 2024-08-10
• 第一作者: 张雁珍, 高级工程师, 1003733674@qq.com
通信作者: 王文斌, 研究员, 15682538713@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