

某型有轨电车弹性车轮迟缓试验研究^{*}王日艺¹ 朱程¹ 解建坤¹ 赵紫亮¹ 吴昊¹ 贾小平^{1,2}

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司技术中心, 210031, 南京;

2. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都)

摘 要 [目的] 某型有轨电车在服役过程中出现弹性车轮迟缓线错位, 对车辆的安全运维存在较大影响, 故有必要开展相关研究。[方法] 利用弹性车轮的质量检测、列车正线测试和仿真计算等方法开展试验研究, 深入分析车轮迟缓线错位的原因。[结果及结论] 弹性车轮的自身产品性能满足标准和服役要求, 其稳定性和可靠性较高; 列车在小曲线区段的振动水平高于直线区段, 其中垂向振动加速度均方根值达 2.77g; 且在曲线区段存在 300.00 ~ 450.00 Hz 的振动主频, 与弹性车轮的固有模态频率 340.37 Hz 相匹配, 导致车轮与钢轨在该区段的耦合共振。因此, 建议该线路在运维中一方面加强轮轨的润滑作业, 另一方面提高小曲线区段钢轨波磨的勘察频次, 以实现轮轨摩擦因数的降低和车轮运维环境的提升。

关键词 有轨电车; 弹性车轮; 迟缓线; 振动; 润滑

中图分类号 U270.16

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.05.028

Study on Delayed Lateral Displacement of Elastic Wheels in a Certain Type of Tram

WANG Ri-yi¹, ZHU Cheng¹, XIE Jian-kun¹, ZHAO Ziliang¹, WU Hao¹, JIA Xiaoping^{1,2}

(1. Technology Center of CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The delayed lateral displacement of elastic wheels occurs in a certain type of tram during serve, significantly affecting the safe operation and maintenance of the vehicle. [Method] Experimental research is conducted using methods such as quality inspection of elastic wheels, train mainline testing, and simulation calculations to analyze the causes of delayed lateral displacement of wheels in depth. [Result & Conclusion] The analysis results indicate that the inherent product performance of elastic wheels meets the standards and service requirements, with high stability and reliability. The vibration level of trains in small curve sections is higher than

that in straight sections, with a root mean square value of vertical vibration reaching 2.77g. Moreover, there is a vibration dominant frequency of 300 to 450 Hz in curve sections, matching the natural modal frequency of the elastic wheels at 340.37 Hz, resulting in coupling resonance between the wheels and the rail in this section. Therefore, it is recommended that in the operation and maintenance of the wheel-rail railway lubrication operations should be strengthened on one hand and the inspection frequency of rail corrugation in small curve sections be increased on the other hand to reduce the wheel-rail friction coefficient and improve the operating environment for wheel maintenance.

Key words tram; elastic wheel; delay line; vibration; lubrication

0 引言

现代有轨电车具有节能环保、安全舒适及建设运维费用低等特点, 其在解决景区观光、市郊通勤及核心区换乘等方面发挥了重要作用。与此同时, 有轨电车在市区运营过程中产生的噪声污染也不容忽视, 因此弹性轮对的大规模应用成为必然趋势。

付加平等通过分析弹性车轮踏面裂纹形貌、力学性能、化学成分等内容, 探讨了踏面裂纹产生机理, 制定了撒砂系统动作不延时、非必要不采取紧急制动进行减速或停车等措施, 有效解决此类车轮踏面裂纹的产生^[1]。王星欢等利用有限元-边界元法建立频域轮轨及桥梁振动声辐射模型, 分析发现弹性车轮橡胶弹性模量的变化对桥梁结构噪声辐射总声压级影响较大, 弹性车轮橡胶结构阻尼比、泊松比的变化对桥梁结构噪声总声压级影响很小^[2]。王佳诺等对比分析弹性轮对车辆和普通轮对车辆在随机谱和冲击条件下的动力学和减振特性, 分析发现弹性轮对的动力学和减振性能均优于

^{*} 国家自然科学基金高铁联合基金项目 (U2268211)

普通轮对;轮轨力、轴箱加速度与橡胶层等效刚度呈现明显的非线性^[3]。刘智等针对地铁用弹性车轮,分析不同磨损程度下车轮踏面制动热应力对车轮应力的影响及变化特征;结果表明轮辋部分最危险点位置与仅考虑力学应力时不同,最危险点位置从轮辋内侧转移到了轮辋最外侧^[4]。吴坤等通过研究弹性车轮地铁车辆曲线的通过性能,发现弹性车轮地铁车辆模型的安全性和稳定性指标均有降低,而横向平稳性较标准柔性车轮均有上升^[5]。侯传伦等针对轮箍在运用过程中的疲劳失效问题,基于有限元理论研究发现应适当增大车轮刚度及轮箍厚度,以确保轮箍的安全性能^[6]。邬奇睿等结合试验与仿真方法,针对正常与极端工况下弹性车轮减振特性进行研究,发现弹性车轮对正常工况下的直线轨道系统的振动有一定的抑制作用,其减振效果随着车辆速度的增加更加显著^[7]。

目前,有关弹性轮对的研究主要集中在仿真分析方面,而对于服役测试的研究工作开展得相对较少,故无法全面地、深入地了解弹性车轮的结构可靠性。本文基于实际运营线路,针对弹性车轮发生迟缓的现场开展振动测试,并提出解决方案,为弹性车轮的后续研究提供一定参考。

1 车轮基本结构

某型有轨电车的弹性车轮属于分块式压剪复合弹性车轮,其由轮心、减振式橡胶块、压环及轮箍等主要部件组成(见图1);其中,轮心和轮箍的弹性连接主要靠橡胶块将其均匀安装在轮心、压环和轮箍组合后形成的V型腔内;轮心与轮箍间的载荷通过橡胶块与金属界面的弹性变形和摩擦力进行传递。

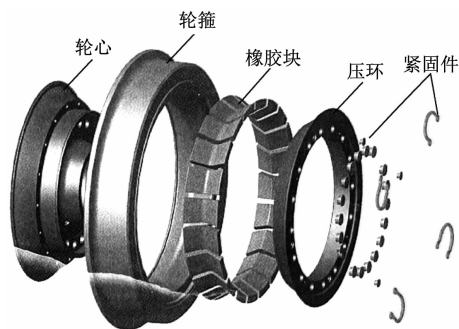


图1 弹性车轮结构图

Fig. 1 Diagram of elastic wheel structure

2 迟缓线错位原理

弹性车轮的迟缓线错位的原因^[8]大致分为两

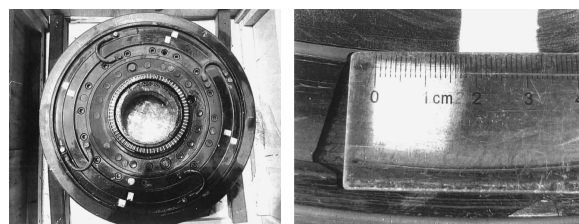
类:一类是车轮服役过程中轮轨作用力过大,使得橡胶块在长期的交变载荷作用下可靠性下降,其结构出现疲劳,导致车轮的承载能力衰减,从而引发轮心和轮箍产生迟缓线错位;另一类是轮轨间异常冲击扭曲载荷的频繁出现,导致轮箍、橡胶块及轮心在周向产生相对变形,引发迟缓性错位。

某型有轨电车的弹性车轮目前已服役近一个架修期,根据运维经验发现,当车轮迟缓线错位量较小(≤ 10 mm)时,橡胶块与金属件的接触面处于静摩擦状态,其错位主要是由于橡胶元件的残余变形引起,但车轮仍具备正常的承载性能;当车轮迟缓线错位量较大(> 10 mm)时,橡胶块与金属件的接触面会出现缓慢滑移的现象;当车轮迟缓线错位量超过20 mm后,橡胶和金属件的接触面会出现明显滑移,这对列车的安全运营有较大影响。

3 错位车轮的结构分析

3.1 现场调查

对某线有轨列车开展跟踪测量,结果发现迟缓线错位的弹性车轮主要集中在1车2轴左端(靠近齿轮箱处),在迟缓线错位的车轮中错位量超过10 mm的占比11%,其中最大迟缓错位量为16 mm,如图2所示。



a) 迟缓线错位车轮 b) 最大迟缓错位量(16 mm)

图2 迟缓线错位车轮实物图

Fig. 2 Photos of delayed line misaligned wheels

选取迟缓线错位量最大的车轮进行外观检测,发现迟缓车轮外观状态良好,无零件缺失和松动现象,紧固件防松标记完好,且车轮踏面没有明显的硬点、擦伤等痕迹。通过对内孔区域锥度、轮心内孔圆度和直线度等重点参数进行测量,其结果均在产品要求范围内。

3.2 性能测试

在外观检测合格的前提下,利用车轮扭转性能试验台(见图3)对某型弹性车轮进行性能测试。通过对弹性车轮径向刚度、轴向刚度及抗扭转性能进行测试,评估其服役性能的可靠性。

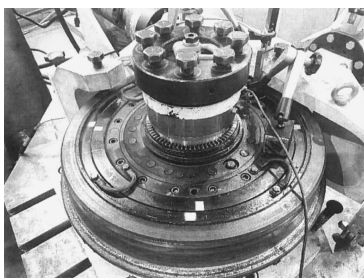


图3 车轮扭转性能试验台实物图

Fig. 3 Photo of the wheel torsion performance test bench

依据 TB/T 2843—2015《机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件》中规定的弹性节点静态特性变化率公差限度值,对比该弹性车轮的整体刚度测量值发现,该车轮的刚度变化率均在标准要求范围($\leq 20\%$)内,即迟缓线错位与车轮的整体刚度值的相关性较小,具体结果如表1所示。

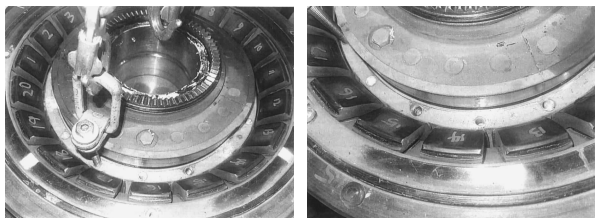
表1 刚度检测结果对比

Tab. 1 Comparison of stiffness testing results

项目	径向刚度/ (kN/mm)	轴向刚度/(kN/mm)	
		轮缘侧	轮背侧
新轮数据	224.14	45.45	45.0
当前数据	255.20	50.10	47.5
变化率/%	13.85	10.23	5.55

3.3 拆解测试

考虑到迟缓线错位车轮的整体刚度与新轮相比,其变化幅值较小,因此将该弹性车轮进行拆解分析。由图4可知,橡胶块无明显的变形和异常损伤,基本上均匀排布在车轮内。而图5显示虽然橡胶块与轮箍的接触面表明两者发生了轻微的相对滑移,但主要接触面状态良好。



a) 橡胶块整体排布图

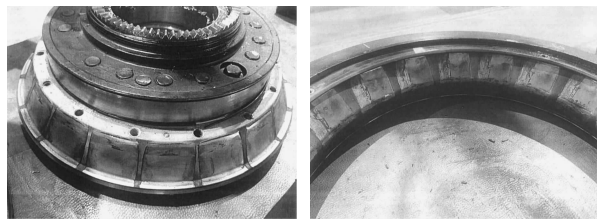
b) 橡胶块局部排布图

图4 橡胶块分布实物图

Fig. 4 Photos of rubber block distribution

对该车轮的20块橡胶块拆解后进行外观、尺寸及硬度检测。由图6和图7可知:所有橡胶块厚度均在18~22 mm的许用范围内,其邵氏(A)硬度均在80~85 HA的要求范围内,因此橡胶块的产品性

能符合技术要求,不存在破损、异常变形等情况。

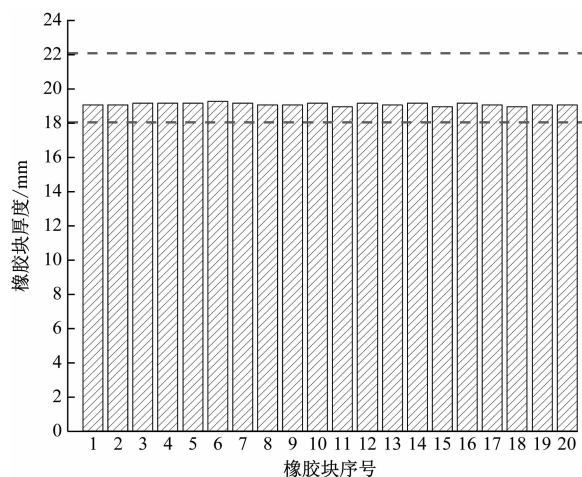


a) 轮心与橡胶块接触面外观

b) 轮箍与橡胶块接触面外观

图5 V型腔接触面实物图

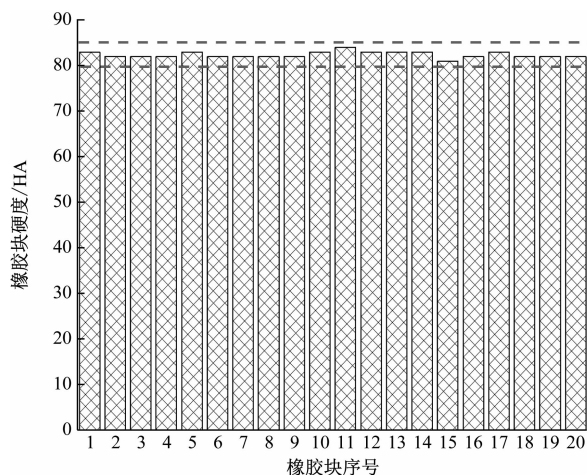
Fig. 5 Photos of V-shaped cavity contact surface



注:红虚线之间的区域为厚度的要求范围。

图6 橡胶块厚度测量值

Fig. 6 Rubber block thickness measurement value



注:红虚线之间的区域为硬度的要求范围。

图7 橡胶块硬度测量值

Fig. 7 Rubber block hardness measurement value

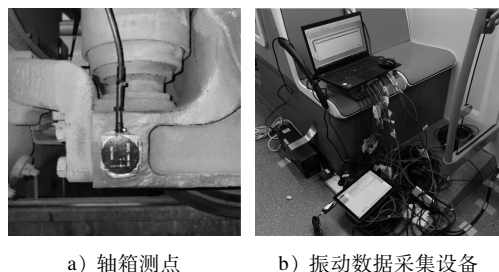
4 列车运维环境测试

基于上述对车轮各参数的评估,初步判定某型列车弹性车轮的服役性能未出现明显问题。因此,

需针对某型列车的服役环境进行测试,以评估列车运营过程中是否存在异常冲击。

4.1 测试条件

选取该线出现迟缓线错位的一列车,对其所有车轮进行镟修作业,在其 BM1 转向架的 2 轴左侧布置轴箱区域的测点,评估该车在正线运营过程中的振动特性,传感器安装位置和数据采集设备如图 8 所示。



a) 轴箱测点 b) 振动数据采集设备

图 8 振动测点和数据采集设备图

Fig. 8 Photos of vibration measuring points and data acquisition equipment

4.2 测试结果

考虑到该线存在较多小曲线区段(最小曲线半径为 40 m),因此将线路特征(直线/小曲线)作为重点评估因子,开展列车的运维环境分析。

4.2.1 振动量级对比

图 9 为不同区段的轴箱振动均方根值。由图 9 可知:通过对列车在不同区段线路的振动量级进行对比,发现列车轴箱区域在小曲线区段 3 个方向的振动加速度均方根值均比直线区段大;其中,小曲线区段的垂向振动加速度量级为 $2.77g$,相比直线区段的高达 37%。而小曲线区段的纵向振动加速度量级为 $1.41g$,是直线区段的 2 倍,因此列车在小曲线区段的整体振动水平较高。

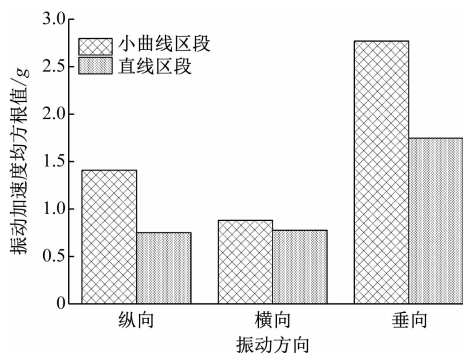
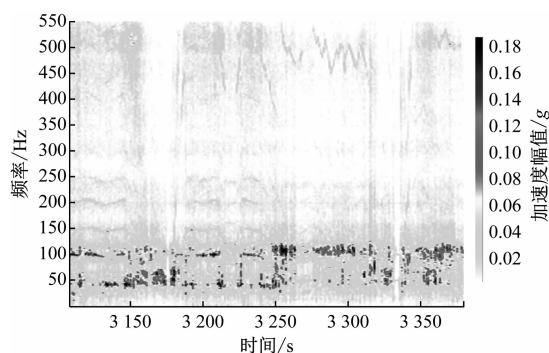


图 9 不同区段的轴箱振动加速度均方根值

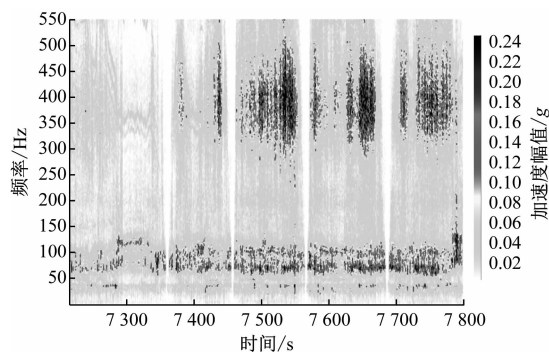
Fig. 9 RMS root mean square values of axle box vibration in different sections

4.2.2 振动时频分析

图 10 为不同区段的轴箱垂向振动时频图。由图 10 可知,列车轴箱在直线区段振动的能量主要集中在 $50 \sim 100$ Hz 的低频段,而在高频段则不明显;在曲线区段时,低频段的能量分布范围与直线段保持一致,但在高频段的能量主要分布在 $300 \sim 420$ Hz 的范围内;而在小曲线区段的振动分布不连续,结合线路勘察(见图 11)发现,高频成分与轨面的波磨存在一定相关性。



a) 直线区段



b) 小曲线区段(S型曲线段)

图 10 不同区段的轴箱垂向振动时频图

Fig. 10 Time frequency diagram of axle box vertical vibration in different sections

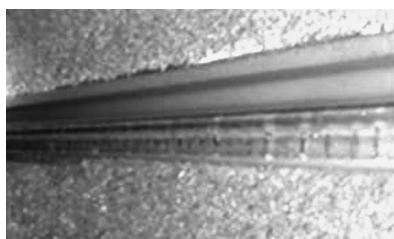


图 11 小曲线区段钢轨波磨

Fig. 11 Rail corrugation in small curve sections

4.3 车轮模态计算与测试

利用有限元方法^[9]对某型列车的弹性车轮进行离散化建模,计算其约束状态下的弹性车轮模

态,前 4 阶的模态和振型计算值如表 2 所示,振型示意图如图 12 所示。

为了进一步确认弹性车轮的模态参数,采用锤击法^[10]对车轮进行模态测试(见图 13)。由图 13 可知:在弹性车轮的高频段存在 343.59 Hz 的主频

成分,其振型表现为一方面 2 个车轮呈反向旋转,另一方面轮箍与轮心在车轴方向呈反向变形(见图 14),这和计算的 3 阶模态振型基本一致,即该振型下橡胶块受到较大的轴向载荷与扭转载荷。

表 2 前 4 阶的模态和振型计算值

Tab. 2 Modal and mode calculation values for the first 4 orders

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	85.77	2	182.53	3	340.27	4	561.60



a) 1 阶



b) 2 阶



c) 3 阶



d) 4 阶

图 12 前 4 阶振型示意图

Fig. 12 Diagram of the first 4 vibration modes

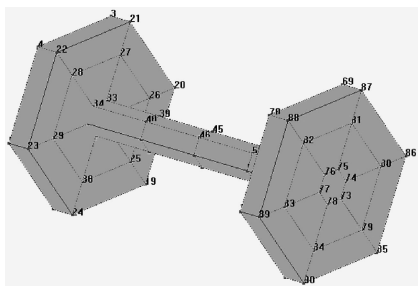
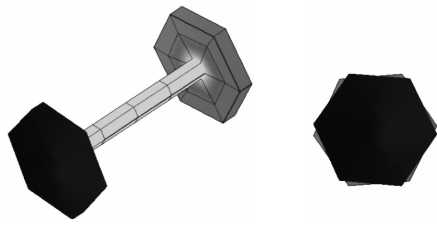


图 13 模态测点布置

Fig. 13 Layout of modal measuring points



a) 全局图

b) 侧视图

图 14 模态测试结果

Fig. 14 Modal test results

4.4 车轮迟缓的相关性分析

根据上节的内容,列车在小曲线区段运行时,轴箱存在 300.00 ~ 450.00 Hz 的振动主频区段,而该车型的弹性车轮模态频率为 340.27 Hz,结合列车在小曲线区段的振动量级在 3 个方向均比直线区段大的情况,由此可知弹性车轮在曲线区段存在共振现象。同时,结合振型可推断出:共振对迟缓性错位具有较大的影响。

5 改善措施

根据该线路的运营规范,目前只在列车构架端部配备了轮缘润滑装置,而轨道上暂无润滑装置。考虑到该线路主要为高架线路,故一方面,在曲线区段的钢轨处安装固态润滑装置(见图 15),以降低轮轨的摩擦系数,从而有助于减小轮轨耦合振动的能量,改善弹性车轮的运维环境,避免迟缓线错位情况的发生;另一方面,根据列车的振动测试数据,对高频段能量较大的线路区段进行轨道勘察,有助于指导钢轨波磨的精准打磨。



图 15 钢轨喷油装置实景图

Fig. 15 Photo of rail oil spray device

6 结语

针对某型有轨电车的弹性车轮出现迟缓线错位的现象,本文从弹性车轮的质量检测、列车正线测试和仿真计算等方面进行分析,具体结论如下:

1) 弹性车轮的各项检测表明迟缓线错位的车轮自身产品性能满足标准和服役要求,橡胶件的参数变化较小,产品性能的稳定性和可靠性较高。

2) 列车在小曲线区段的振动水平高于直线区段,存在 300 ~ 450 Hz 的振动主频,而直线区段的振动主频集中在 50 ~ 100 Hz 的低频段。

3) 该型列车的弹性车轮存在 340.37 Hz 的模态频率,列车在小曲线区段时该频率成分显现,导致车轮与钢轨的耦合共振。

4) 建议该线在运维中配备轨道的固态润滑装置,并对曲线区段的波磨进行打磨处理,以实现轮轨摩擦系数的降低和车轮运维环境的提升。

参考文献

- [1] 付加平,崔玉辉,李稳,等. 弹性车轮踏面裂纹产生机理研究及解决措施探讨[J]. 铁道车辆, 2023, 61(3): 143.
FU Jiaping, CUI Yuhui, LI Wen, et al. Study on mechanism of elastic wheel tread crack generation and discussion on solution measures[J]. Rolling Stock, 2023, 61(3): 143.
- [2] 王星欢,何远鹏,张皓迪,等. 压剪复合型弹性车轮对市域桥梁结构噪声的影响[J]. 铁道学报, 2023, 45(5): 128.
WANG Xinghuan, HE Yuanpeng, ZHANG Haodi, et al. Effect of press-shear resilient wheels on noise radiated from suburban box-girder bridges[J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(5): 128.
- [3] 王佳诺,王奇,韩健,等. 考虑弹性轮对的车辆-轨道耦合动力学建模及减振特性研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 235.
WANG Jianuo, WANG Qi, HAN Jian, et al. Study on dynamic modeling and damping characteristics of vehicle-track coupling considering resilient wheelset[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8): 235.
- [4] 刘智,陈刚,朱逸伦,等. 考虑踏面制动热应力的不同磨耗弹性车轮强度校核[J]. 润滑与密封, 2023, 48(4): 163.
LIU Zhi, CHEN Gang, ZHU Yilun, et al. Elastic wheel strength assessment considering the thermal stress of tread braking[J]. Lubrication Engineering, 2023, 48(4): 163.
- [5] 吴坤,周信,钟硕乔,等. 弹性车轮地铁车辆过曲线性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 190.
WU Kun, ZHOU Xin, ZHONG Shuoqiao, et al. Performance analysis of metro vehicle with resilient wheels passing through curved track[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 190.
- [6] 侯传伦,杨新文,戚援,等. 轨道交通弹性车轮轮箍承载特性研究[J]. 机车电传动, 2023(2): 71.
HOU Chuanlun, YANG Xinwen, QI Yuan, et al. Study on tyre load-bearing characteristics of resilient wheel for rail transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(2): 71.
- [7] 郭奇睿,祁孟孟,周信,等. 弹性车轮对地铁直线段轨道减振特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 395.
GUO Qirui, QI Mengyu, ZHOU Xin, et al. Research on vibration reduction characteristics of straight section of metro track with damping wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 395.
- [8] 施璐,胡活力,李稳,等. 弹性车轮迟滞机理研究与解决方案探讨[J]. 机车电传动, 2022(4): 111.
SHI Lu, HU Huoli, LI Wen, et al. Research on mechanism of resilient wheel sluggish movement and discussion on relevant solution[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(4): 111.
- [9] 武清玺. 结构可靠性分析及随机有限元法: 理论、方法、工程应用及程序设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
WU Qingxi. Structural reliability analysis and stochastic finite element method: theory, method, engineering application and program design[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [10] 姜东,钱慧,朱锐,等. 基于整体式初始位移的柔性结构低频模态试验方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(5): 313.
JIANG Dong, QIAN Hui, ZHU Rui, et al. Low frequency modal test method for flexible structure based on integral initial displacement[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(5): 313.

• 收稿日期:2023-12-01 修回日期:2024-01-26 出版日期:2024-05-10
Received:2023-12-01 Revised:2024-01-26 Published:2024-05-10
• 通信作者:王日艺,正高级工程师,19825025229@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 137 页)

- ZHAO Xinhua, FENG Jianfeng, LIU Liang, et al. Singularity evaluation and synthesis of isomeric grinding robot[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(5): 58.
- [8] 罗羽泉. 面向 6R 工业机器人等离子加工轨迹规划[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
LUO Yuxiao. Track planning for 6R industrial robot in plasma machining[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology,

2019.

• 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10
• 通信作者:张凤丽,高级工程师,angelfengli@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