

4 辆编组重联地铁列车车钩吸能方案研究

董雁冰

(上海申通轨道交通科技有限公司, 200233, 上海)

摘要 [目的] 地铁列车的车钩缓冲吸能系统是整体吸能系统的关键组成部分, 其性能对列车的安全性和舒适性具有重要影响。通过分析 4 辆编组重联列车采用不同配置方案的车钩在碰撞中的吸能效果, 为车钩设计提供理论依据和技术支持。[方法] 提出了不同吸能方案的车钩配置; 以 4 辆编组重联地铁列车为研究对象, 采用仿真计算方法, 模拟列车不同速度下的碰撞情形, 获得车钩的特性吸能曲线; 通过对比分析采用不同配置方案车钩的吸能曲线的变化情况, 分析各吸能方案的优缺点。[结果及结论] 不同配置车钩的吸能方案在列车碰撞中的表现存在显著差异。综合考虑吸能效果与列车运行安全性, 并结合列车的实际运行需求, 提出适用于 4 辆编组重联地铁列车的最佳车钩配置方案。

关键词 地铁; 重联列车; 车钩缓冲吸能系统

中图分类号 U260.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.20253062

Coupler Energy Absorption Schemes for 4-vehicle Formation Coupled Metro Train

DONG Yanbing

(Shanghai SDT Rail Transit Technology Co., Ltd., 200233, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The coupler buffer energy absorption system is a key part in the overall energy absorption system of metro trains, having significant influence on train safety and comfort. By analyzing the energy absorption performance of couplers in collision for different configuration schemes of 4-vehicle formation coupled trains, theoretical basis and technical support is provided for the coupler design. [Method] Different coupler energy absorption configuration schemes are proposed. Using 4-vehicle formation coupled metro train as research object, simulation calculation methods are employed to model collision scenarios at different train speeds and obtain the characteristic energy absorption curves of couplers. By comparing and analyzing the variations in these energy absorption curves across different configuration schemes, the advantages and disadvantages of each energy absorption scheme are evaluated. [Result & Conclusion] Different coupler energy absorption configuration schemes show significant differences in performance during train collisions. Considering both the energy absorption effectiveness and the train operational safety on the

basis of actual train operational requirements, the optimal coupler configuration scheme suitable for 4-vehicle formation coupled metro train is proposed.

Key words metro; coupled train; coupler buffer energy absorption system

现有运营条件(高速+高密度)对列车吸能安全性的要求越来越高, 车钩缓冲是提高吸能安全性的重要手段。车钩吸能按车钩损伤方式分为可恢复吸能和不可恢复吸能两种。可恢复吸能是指车钩吸收列车在连挂、调车等日常作业中碰撞后所产生的能量后, 能恢复到初始状态, 并且车钩及车体无任何损坏; 不可恢复吸能是指因错误操作、打滑等意外情况导致列车撞车或止挡, 车钩吸收大量能量并产生永久性变形, 此种情况下, 车钩通过不可恢复吸能最大程度确保了乘客及车体的安全^[1-2]。目前国内地铁列车主要以 4 辆编组、6 辆编组、8 辆编组方式运营。其中 8 辆编组中 4 编重联 A 型列车因编组长、车辆重, 对车钩吸能方案要求也更严苛^[3-4]。因此本文以 4 辆编组重联 A 型地铁列车为载体, 对其车钩碰撞吸能特性进行研究。

1 车钩吸能方案

车钩吸能机构由吸能装置及缓冲底座两个部分组成。表 1 为不同吸能方案的车钩配置。图 1 为 4 辆编组重联 A 型地铁列车车钩设置, 列车端部车辆采用全自动车钩, 中间车辆采用半永久车钩^[5]。

表 1 不同吸能方案的车钩配置

Tab.1 Coupler configurations in different energy absorption schemes

吸能方案	端部自动车钩配置	中间半永久车钩配置
方案一	压溃管 + EFG3 缓冲器	压溃管 + EFG3 缓冲器
方案二	气液缓冲器 + 后置压溃管球橡胶座	气液缓冲器 + 球橡胶底座 压溃管 + 球橡胶底座
方案三	气液缓冲器 + 后置压溃管球橡胶座	压溃管 + EFG3 缓冲器



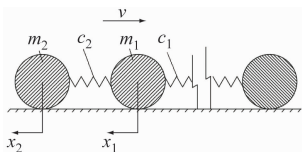
注: TMc—带动力拖车; Mp—带受电弓动车。

图1 列车车钩设置

Fig. 1 Train coupler configuration

2 车钩吸能仿真分析

仿真计算基于列车纵向动力学理论,将整列列车视为由车钩连接的若干两个自由度(纵向)质点,通过对质点系运动计算来分析整个碰撞过程各个界面的车钩力、吸能情况,仿真模型如图2所示。车辆质点通过车钩连接在一起,在碰撞过程中,车钩内部吸能单元相互作用,通过计算吸能单元的作用力,可分析车钩的吸能情况^[6-7]。本次仿真使用的是基于 LS-DYNA 软件二次开发的 DCEM 动态碰撞仿真软件。



注: v —碰撞速度; m_1 —车辆1质量; m_2 —车辆2质量; c_1 —车钩1特性参数; c_2 —车钩2特性参数; x_1 —车辆1位移; x_2 —车辆2位移。

图2 车辆碰撞仿真模型

Fig. 2 Train collision simulation model

3 车钩吸能方案分析

本文基于表1的3种车钩吸能方案进行仿真分析,在不同车钩吸能方案下模拟一列运行列车碰撞另一列静止列车,分析不同方案车钩下车体最大无损碰撞速度及速度为25 km/h的碰撞吸能表现。模拟条件如列车质量、车体刚度、停放制动力、防爬器等完全一致^[8-9]。其中速度为25 km/h的碰撞工况参照标准 EN 15227—2020《铁路设施 铁路车辆的防撞性要求》执行,即相互碰撞的列车质量为100%车重加上1/2坐席乘客质量。对静止列车不

施加停放制动^[10]。列车参数如表2所示。车钩吸能特性以界面形式表示,车钩分布界面遵循图3定义^[11]。其中界面8为列车碰撞界面。

表2 列车参数

Tab. 2 Train parameters

车型	空车质量/kg	(空车质量+1/2坐席质量)/kg
TMc	42 000	43 680
Mp	42 000	43 680

注:停放制动摩擦因数为0.15;车辆纵向刚度为 1.08×10^8 N/m(车辆纵向静强度);防爬器行程为520 mm,触发力为1 200 kN,车钩连挂面与防爬器齿根距离为400 mm。

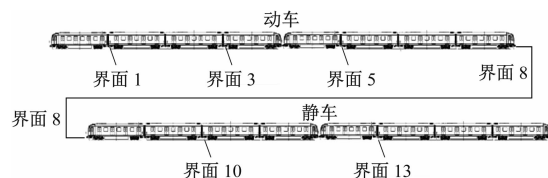


图3 车钩受力界面定义

Fig. 3 Coupler force interface definition

3.1 基于方案一仿真分析

所有车钩均使用 EFG3 缓冲器与压溃管配合。方案一的车钩参数如表3所示。

表3 方案一车钩参数

Tab. 3 Scheme 1 coupler parameters

配置	EFG3 缓冲器		压溃管	
	行程/mm	最大力/kN	行程/mm	触发力/kN
全自动车钩	55	1 500	330	1 000
半永久车钩 A	55	1 500	260	850 ~ 1 150
半永久车钩 B	55	1 500	260	850 ~ 1 150

注:半永久车钩 A 与半永久车钩 B 成对使用,吸能参数相同。

一列 AW0(空载)列车碰撞另一列施加停放制动的 AW0 列车,最大可恢复速度(无损)为6 km/h。最大压缩力及最大吸能在界面8,分别为778 kN和28.4 kJ。碰撞产生的能量由可恢复的 EFG3 缓冲器底座吸收。该工况下的车钩吸能特性曲线如图4所示。

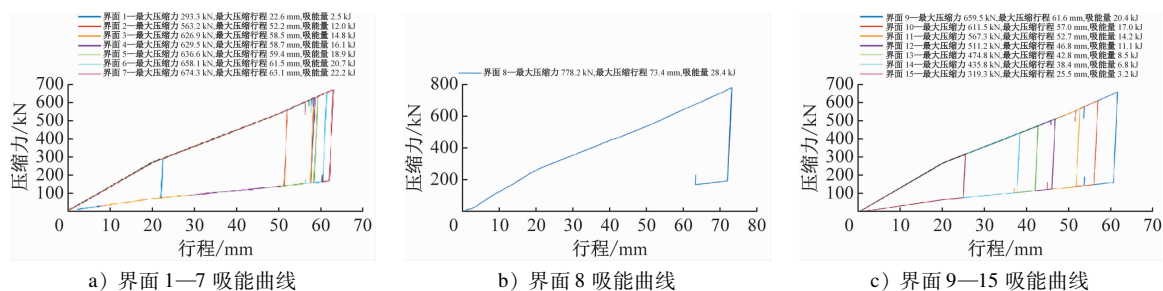


图4 6 km/h 速度碰撞车钩吸能特性曲线(方案一)

Fig. 4 Coupler energy absorption curve at 6 km/h collision (Scheme 1)

两列列车以 25 km/h 速度碰撞时,全自动车钩压溃管完全触发吸能。防爬器参与吸能,防爬器行程约为 498 mm。半永久车钩压溃管触发吸能,最大

压缩行程约为 600 mm^[12-13]。该工况下的车钩吸能特性曲线如图 5 所示。

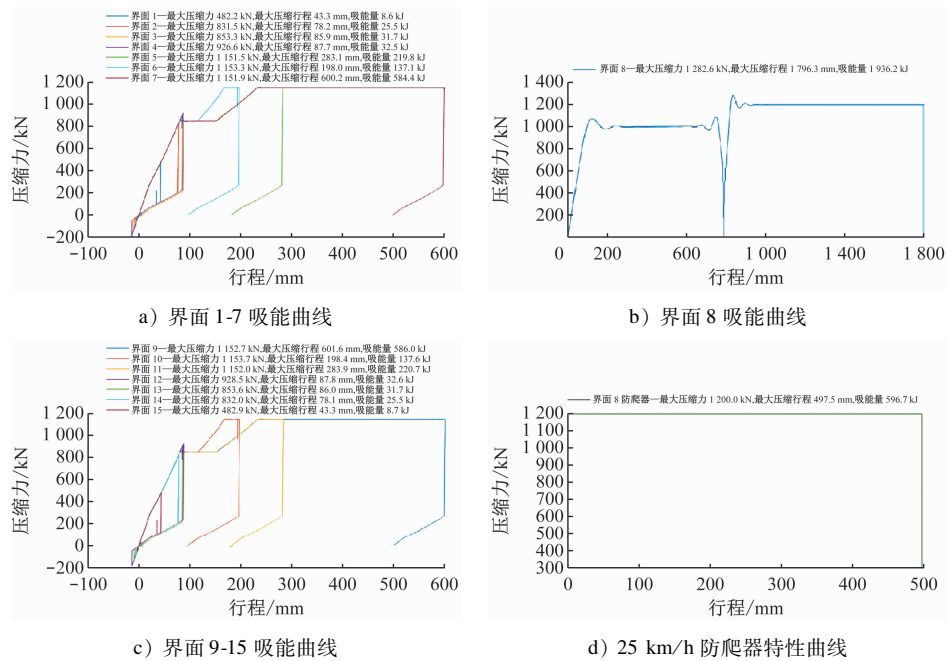


图 5 25 km/h 速度碰撞车钩吸能特性曲线(方案一)

Fig. 5 Coupler energy absorption curve at 25 km/h collision (Scheme 1)

3.2 基于方案二仿真分析

全自动车钩配置气液缓冲器与后置压溃管球橡胶底座,半永久车钩一侧配置气液缓冲器,另一侧配置压溃管。方案二的车钩参数如表 4 所示。

配置气液缓冲器后,最大可恢复速度为 10 km/h,碰撞界面 8 最大压缩力约为 898 kN,界面吸能为 123.3 kJ。能量基本由气液缓冲器吸收。该工况下的车钩吸能特性曲线如图 6 所示。

表 4 方案二车钩参数

Tab. 4 Scheme 2 coupler parameters

配置	气液缓冲器		压溃管	
	行程/mm	最大力/kN	行程/mm	触发力/kN
全自动车钩	100	1 500	200	1 150
半永久车钩 A	150	1 500	/	/
半永久车钩 B	/	/	405	1 120

注:为防止全自动车钩压溃管单侧触发剪切,后置压溃管端部设置长约 60 mm、触发力为 1 450 kN 的防穿止挡。

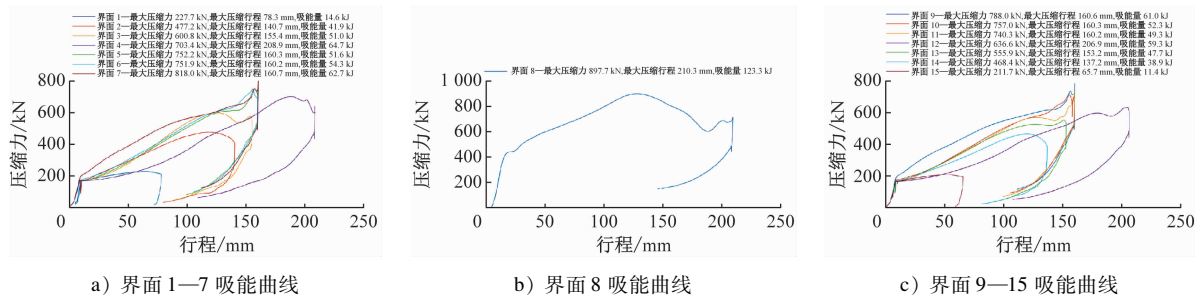


图 6 10 km/h 速度碰撞车钩吸能特性曲线(方案二)

Fig. 6 Coupler energy absorption curve at 10 km/h collision (Scheme 2)

25 km/h 速度碰撞时,气液缓冲器与后置压溃管触发力等同力值下走完 100 mm 行程。所有界面气液缓冲器行程基本用尽。半永久车钩界面最大

压缩量约为 507 mm。防爬器参与吸能,防爬器行程为 495 mm。该工况下的车钩吸能特性曲线如图 7 所示。

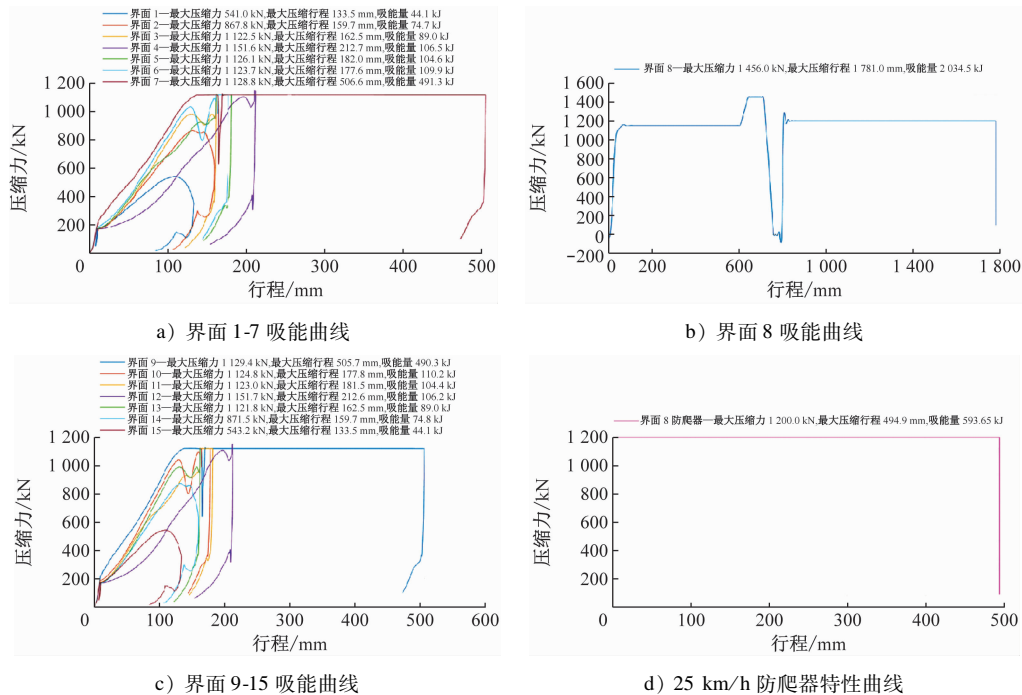


图7 25 km/h 速度碰撞车钩吸能特性曲线(方案二)

Fig. 7 Coupler energy absorption curve at 25 km/h collision (Scheme 2)

3.3 基于方案三仿真分析

气液缓冲器与 EFG3 缓冲器均为中低速可恢复吸能单元,本文创造性地将气液缓冲器与 EFG3 缓冲器配置到同一列车不同类型车钩上,并进行仿真校核。方案三的车钩参数如表 5 所示。

将气液缓冲器配置到碰撞界面的全自动车钩,将 EFG3 缓冲器配置到其余界面半永久车钩。采用此种车钩吸能方案的列车的最大可恢复速度为 9 km/h,最大压缩力出现在界面 8(碰撞界面),最大压缩力为 968.5 kN,吸能量为 130.7 kJ。该工况下的车钩吸能特性曲线如图 8 所示。

表 5 方案三车钩参数

Tab. 5 Scheme 3 coupler parameters

配置	缓冲器		压溃管	
	行程/ mm	最大力/ kN	行程/ mm	触发力/ kN
全自动车钩(气液)	100	1 500	200	1 150
半永久车钩 A(EFG3)	55	1 500	250	1 060
半永久车钩 B(EFG3)	55	1 500	290	980
半永久车钩 C(EFG3)	55	1 500	/	/

注:全自动车钩压溃管端部设置长约 60 mm、触发力为 1 450 kN 的止挡;半永久车钩 A 与半永久车钩 A 成对使用,即成对使用后半永久车钩配置双侧压溃管;半永久车钩 B 与半永久车钩 C 成对使用,即成对使用后半永久车钩配置单侧压溃管。

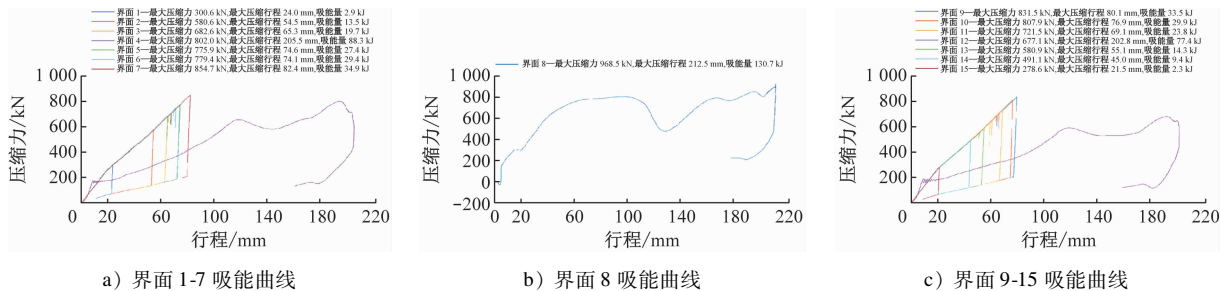


图8 9 km/h 碰撞车钩吸能特性曲线(方案三)

Fig. 8 Coupler energy absorption curve at 9 km/h collision (Scheme 3)

将列车碰撞速度提升到 25 km/h 后,因半永久车钩的气液缓冲器被 EFG3 缓冲器所替代,因此将

气液缓冲器的位置留给了压溃管,使得半永久车钩吸收了更多能量。半永久车钩界面最大压缩量为

577 mm。防爬器参与吸能,防爬器行程为 416 mm。

该工况下的车钩吸能特性曲线如图 9 所示。

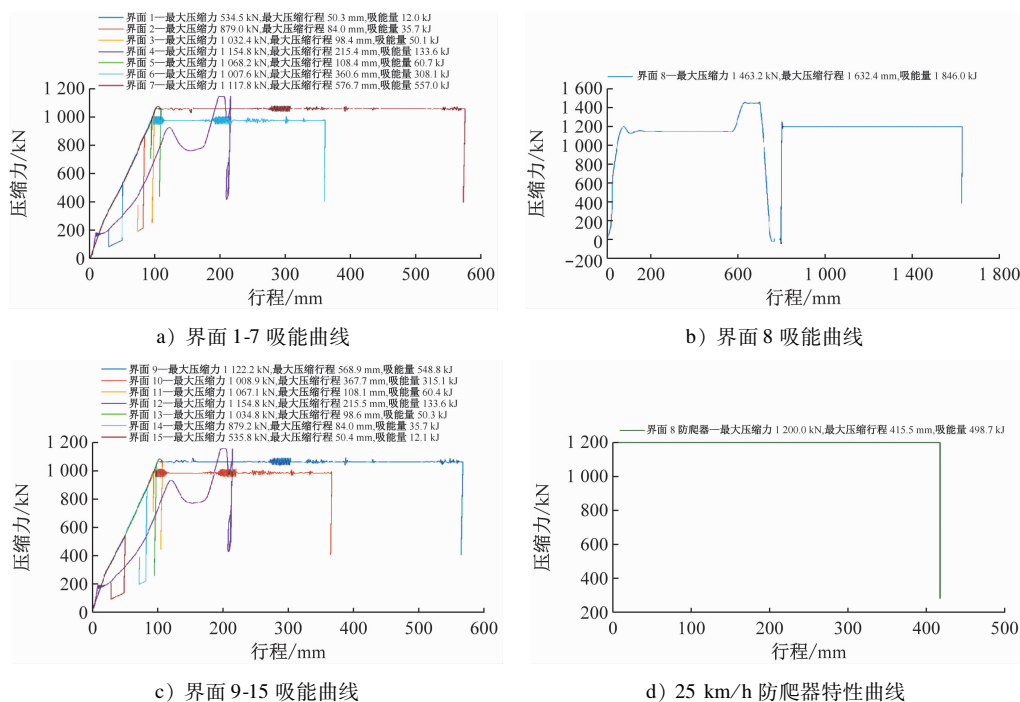


图 9 25 km/h 速度碰撞车钩吸能特性曲线(方案三)

Fig. 9 Coupler energy absorption curve at 25 km/h collision (Scheme 3)

4 结论

1) 对最大无损碰撞速度(连挂速度)要求较高的列车,应优先考虑气液缓冲器方案,即方案二或方案三。对于无损碰撞速度 ≥ 8 km/h 要求的车,可选用气液缓冲器 + EFG3 缓冲器的车钩吸能方案(方案三)。但对于无损碰撞速度 ≥ 10 km/h 要求的车,应在列车各界面均配置气液缓冲器(方案二)。本文最高无损速度讨论到 10 km/h 是因受气液缓冲器 100 mm 行程限制。如需要提高可恢复碰撞速度,设计中可增加气液缓冲器行程。

2) 整车在满足 EN 15227—2020 C II 类地铁车辆 25 km/h 速度下防撞吸能要求的情况下,其全自动车钩如配置气液缓冲器,最好为该全自动车钩同时配置压溃管。此种做法可有效消除气液缓冲器高速下的迟滞性,使气液缓冲器在等同压溃管触发力的情况下吸能。如由于列车空间问题使得全自动车钩不能同时配置气液缓冲器和压溃管,则应优先选择配置 EFG3 缓冲器方案(方案一)。

3) 如需要减少防爬器长度及吸能行程,可将气液缓冲器及 EFG3 缓冲器混合使用(方案三),可有效减少防爬器参与吸能的行程。

参考文献

- [1] 肖守讷, 张志新, 阳光武, 等. 列车碰撞仿真中钩缓装置模拟方法[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(5): 831.
XIAO Shoune, ZHANG Zhixin, YANG Guangwu, et al. Simulation method for couplers and buffers in train collision calculations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(5): 831.
- [2] 杨宝柱, 肖守讷, 杨超. 能量吸收方案对列车碰撞响应的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(3): 48.
YANG Baozhu, XIAO Shoune, YANG Chao. Effect of energy absorbing schemes on train crash response[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(3): 48.
- [3] 王宝金, 闫凯波, 陆思思, 等. 基于多体动力学的地铁列车吸能设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(4): 1016.
WANG Baojin, YAN Kaibo, LU Sisi, et al. Energy absorption design of metro train based on multibody dynamics[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(4): 1016.
- [4] 雷成, 肖守讷, 罗世辉, 等. 轨道车辆耐碰撞性研究进展[J]. 铁道学报, 2013, 35(1): 31.
LEI Cheng, XIAO Shoune, LUO Shihui, et al. State-of-the-art research development of rail vehicles crashworthiness[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(1): 31.
- [5] 李波. 适用于城市轨道交通车钩装置的液压油-环簧缓冲器特性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(增刊1): 7.

(下转第 167 页)

- CHEN Rong. Study on coupled vibration theory and application of high-speed railway vehicle-turnout-bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [14] 李苍楠. 基于刚柔耦合联合仿真的高速铁路桥上无砟道岔动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- LI Cangnan. Dynamic study of ballastless turnout on high-speed railway bridge based on rigid-flexible coupling joint simulation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [15] 聂宇. 高速列车一道岔系统动力学建模与耦合作用分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- NIE Yu. Dynamic modeling and coupling analysis of high-speed train-turnout system [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2014.
- [16] 赵思琪, 徐井芒, 马前涛, 等. 有轨电车侧向通过3号道岔的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 24.
- SHAO Siqi, XU Jingmang, MA Qiantao, et al. Dynamics performance analysis of tram lateral passing through No. 3 turnout [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 24.
- [17] 刘泊邑, 王平, 徐井芒, 等. 侧向过岔时轮径差对高速车辆动力学性能的影响[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 154.
- LIU Boyi, WANG Ping, XU Jingmang, et al. Effects of wheel diameter difference on dynamic performance of high-speed vehicle during passing through turnout laterally [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(7): 154.
- [18] 阮莹, 李平, 曾志平, 等. 地铁线路坡度对道岔纵向力学特性的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 33.
- RUAN Ying, LI Ping, ZENG Zhiping, et al. Influence of metro line slope gradient on turnout longitudinal mechanical characteristics [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 33.
- [19] PIOTROWSKI J, KIK W. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(1/2): 27.
- [20] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- JIN Xuesong, LIU Qiyue. Tribology of wheel and rail [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- 收稿日期: 2023-05-24 修回日期: 2023-07-15 出版日期: 2025-06-10
Received: 2023-05-24 Revised: 2023-07-15 Published: 2025-06-10
• 第一作者: 李华伟, 工程师, lihw2@cszic.com
通信作者: 许孝堂, 工程师, sky_xxtang@yeah.net
• ©《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
- LI Bo. Characteristics analysis of hydraulic oil-ring spring buffers suitable for urban rail transit coupler devices [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(S1): 7.
- [6] 苏强, 王会娟, 沈旭奎, 等. 城市轨道交通列车碰撞性能研究与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 125.
- SU Qiang, WANG Huijuan, SHEN Xukui, et al. Research and application of urban rail transit train collision performance [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 125.
- [7] 孔琳皓, 肖守讷, 朱涛, 等. 有轨电车碰撞仿真建模技术及耐撞性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 70.
- KONG Linhao, XIAO Shoune, ZHU Tao, et al. Research on collision simulation modeling technology and crashworthiness of trams [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 70.
- [8] 陈佳明, 朱涛, 肖守讷, 等. 新型城市轨道交通车辆切削式防爬器研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 121.
- CHEN Jiaming, ZHU Tao, XIAO Shoune, et al. Research on new cutting-type anti-climbers for urban rail transit vehicles [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1): 121.
- [9] 曹阳, 梁晓珂, 张越, 等. 基于改进正弦和代理模型的防爬器碰撞吸能可靠性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 67.
- CAO Yang, LIANG Xiaoke, ZHANG Yue, et al. Reliability analysis of collision energy absorption for anti-climber devices based on improved sum of sine surrogate model [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 67.
- [10] 钟志宏, 杨中平, 林飞, 等. 城市轨道交通列车全电制动系统及其关键技术发展综述[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(6): 17.
- ZHONG Zhihong, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. A summary of the development of pure electric braking system and key technologies for urban rail trains [J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(6): 17.
- [11] 卫亮, 连海山, 易甫清. 城市轨道交通列车脱轨碰撞事故仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 208.
- WEI Liang, LIAN Haishan, YI Fuping. Simulation research on train derailment and collision accident in urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(9): 208.
- [12] 许娇, 吴启凡, 王红伟, 等. 城市轨道交通列车碰撞动力学参数对爬车行为的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 74.
- XU Jiao, WU Qifan, WANG Hongwei, et al. Effects of crash dynamic parameters of urban rail transit train on climbing behavior [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 74.
- [13] 于柯, 张选南, 张慧. 城市轨道交通列车制动性能实时优化关键问题[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(4): 52.
- YU Ke, ZHANG Xuannan, ZHANG Hui. Key issues in real-time optimization of braking performance for urban rail transit trains [J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 52.
- 收稿日期: 2025-02-24 修回日期: 2025-04-20 出版日期: 2025-06-10
Received: 2025-02-24 Revised: 2025-04-20 Published: 2025-06-10
• 通信作者: 董雁冰, 工程师, dongyanbing@shsd.com.cn
• ©《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