

城市轨道交通列车防倾覆装置研究*

李本怀¹ 王 康²

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都)

摘 要 [目的]城市轨道交通列车在其运行过程中可能会出现碰撞、脱轨及倾覆等状况,需对此时列车的动态行为以及防倾覆技术进行研究。[方法]结合车辆实际风挡结构以及车辆运行的动态包络,提出了在车间安装安全带绳索作为防倾覆装置的方案,同时详细说明了该装置的结构及其接口位置。根据城市轨道交通列车动力学参数建立相应的动力学仿真模型,考虑车辆倾覆工况的实际条件,分别对列车进行有、无防倾覆装置的动力学仿真分析,并在合理的位置设置了防倾覆装置。通过动力学仿真软件对该装置的防倾覆效果进行验证,并对防倾覆装置安装座的静强度进行检算。[结果及结论]车间安装安全带绳索防倾覆装置的列车在倾覆力作用下能有效地减小车辆侧滚角,防止车体因侧滚角过大而发生倾覆,满足设计要求。在最大拉力作用下,安全带绳索防倾覆装置安装座的静强度未超出许用应力,其结构强度满足相关标准要求。

关键词 城市轨道交通; 列车; 防倾覆装置

中图分类号 U270.34

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.053

Research on Anti-overturning Device of Urban Rail Transit Trains

LI Benhuai¹, WANG Kang²

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] During the operation of urban rail transit trains, incidents such as collisions, derailments and overturning may occur. It is essential to study the dynamic behavior of trains and the technology to prevent overturning under these conditions. [Method] Combining the actual vehicle windshield structure and vehicle dynamic envelope during operation, a scheme is proposed to install safety belt ropes as an inter-vehicle anti-overturning device, and the structure and interface position of the device are explained elaborately. A corre-

sponding dynamics simulation model is established based on the dynamics parameters of urban rail transit trains. Considering the actual conditions of vehicle overturning scenarios, dynamics simulation analysis is conducted for trains with and without anti-overturning device, and the anti-overturning device is set up at appropriate positions. The effectiveness of the anti-overturning device is verified through dynamics simulation software, and the static strength of the anti-overturning device mounting seat is checked by calculation. [Result & Conclusion] The safety belt rope anti-overturning device installed between vehicles can effectively reduce vehicle rolling angle under overturning forces, preventing the carbody from overturning due to the excessive rolling angles, thereby meeting design requirements. Under maximum tensile force action, the static strength of the safety belt rope anti-overturning device mounting seat does not exceed allowable stress, and its structural strength meets the requirements specified in relevant standards.

Key words urban rail transit; train; anti-overturning device

0 引言

列车运行过程中会因为诸多原因发生倾覆,严重影响列车运行安全。车辆倾覆是指车辆在运行中受到各种侧向力和垂向力的作用,在最不利组合情况下使整个车辆向一侧倾倒^[1]。因此,列车防倾覆装置的设置十分必要^[2]。列车防倾覆装置可通过合理设计车辆与车辆之间的约束,使得相邻车辆之间存在一定的约束作用^[3]。若这种约束作用为车辆的侧滚方向,可以对车辆起到防倾覆作用。在相邻车辆之间设置侧滚止挡或安全带绳索,当某一节车辆发生大幅侧滚而出现倾覆危险时,通过在车辆与车辆之间设置防倾覆装置阻止车辆进一步倾覆,从而达到防倾覆的目的。

本文所研究的车辆采用 CW6000 型无摇枕转

* 国家重点研发计划项目(2016YFB1200400)

向架。结合车辆实际风挡结构以及车辆运行的动态包络,设计合理可行的防倾覆装置结构,通过列车动力学仿真模型研究在合理的位置设置防倾覆装置,以此确定防倾覆装置的性能参数^[4]。在此基础上设置可能导致车辆倾覆的动力学仿真工况,如脱轨倾覆、大风倾覆或曲线倾覆等,采用 ADAMS/Rail 软件进行车辆倾覆动力学仿真分析,以研究防倾覆装置的防倾覆效果^[5]。

1 列车动力学仿真模型的建立

城市轨道交通列车是一个复杂的多体系统,该系统涉及到各部件之间的相互作用力和相对运动,以及轮轨之间的相互作用关系。因此,在列车动力学仿真模型中需考虑诸多非线性因素,包括非线性轮轨接触关系、非线性车辆悬挂参数和非线性轮轨作用力^[6]。建立列车系统动力学仿真模型时,假定轮对、构架及车体等部件的弹性比悬挂系统的弹性要小得多,将各部件均视为刚体,即忽略其弹性变形。

列车最高试验速度为 110 km/h,最高运行速度为 100 km/h。基于多体系统动力学理论、车辆系统动力学理论及接触碰撞模型,建立列车动力学仿真模型^[7]。由于城市轨道交通车辆的对称性,考虑到动力学仿真分析的时效性和准确性,仿真分析中建立的列车模型选用 1 节拖车 + 2 节动车共 3 节车辆。每节车辆由 1 个车体、2 个构架、4 条轮对及 8 个轴箱组成。每个车体、构架及轮对均取 6 个自由度,即纵向、横向、垂向、侧滚、点头及摇头。转臂取 1 个自由度,即点头。城市轨道交通列车动力学仿真模型如图 1 所示。

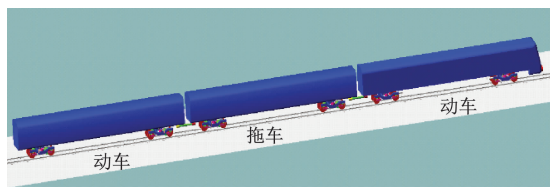


图1 城市轨道交通列车动力学仿真模型

Fig.1 Urban rail transit train dynamics simulation model

2 未安装列车防倾覆装置条件下列车动力学倾覆仿真分析

根据城市轨道交通列车动力学参数建立相应的动力学仿真模型,考虑车辆倾覆工况的实际条件,仿真速度选取 60 km/h。车辆脱轨后车辆系统

的接触关系以及各零部件的工作状态,按仿真模型预处理下的实际情况进行。

在列车运行方向的左侧添加倾覆体,以模拟头车受到倾覆力作用的情况。当列车运行到该位置时,头车车体与倾覆体接触产生横向倾覆力,迫使车体产生倾覆,以此完成车辆动力学倾覆仿真。车辆脱轨仿真结构如图 2 所示。

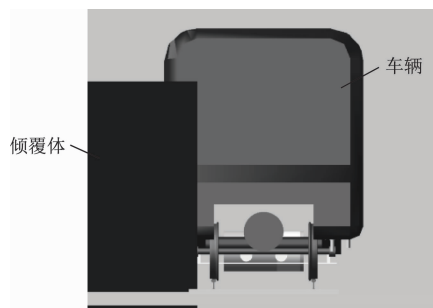


图2 车辆脱轨仿真结构

Fig.2 Simulation structure of vehicle derailment

通过车辆动力学倾覆仿真过程可以看出:在倾覆体的作用下,头车车体发生了较大的横向侧滚;在倾覆力的持续作用下,车体带动转向架发生了整体倾覆,部分轮轨接触关系随着倾覆的发生终止,导致仿真过程终止。列车动力学倾覆仿真的最终姿态如图 3 所示。

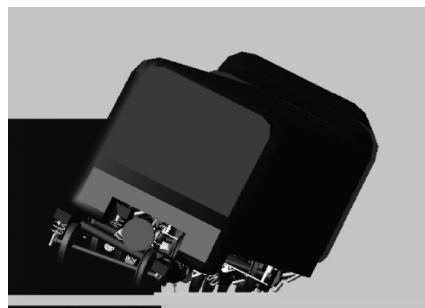


图3 列车动力学倾覆仿真的最终姿态

Fig.3 Final posture of train dynamics overturning simulation

3 安装列车防倾覆装置的条件下列车防倾覆动力学仿真分析

3.1 列车防倾覆装置的设计

车辆倾覆主要是车体受到了横向力的作用而发生侧滚,导致车体侧滚角过大,从而发生倾覆^[8]。因此,防倾覆装置的设计应主要考虑限制车体侧滚角,同时还要考虑不能影响到列车正常运行状态下所产生的侧滚角,结合实际车辆的车间条件及工程

结构,本文选择在车间安装安全带绳索作为防倾覆装置。

当列车正常运行产生侧滚角时,由于速度较慢,侧滚角较小,此时车间安全带绳索所受拉力较小,速度较慢,因而会被缓慢拉伸,由于产生的拉力较小,不会影响列车正常运行。当车辆受到倾覆力作用发生侧滚时,由于速度较快,侧滚角较大,此时车间安全带绳索所受拉力较大,速度较快,因而会被快速拉伸,由于产生的拉力较大,限制了两车体之间的相对侧滚,达到了防倾覆的效果。

车间防倾覆安全带绳索的工作状态有 4 种:

1) 当相邻车辆整车运行发生相对运动时,安全带绳索可以自由伸缩。

2) 当相邻车辆之间发生相对运动,且运动速度超过卡死阈值 V_0 时,安全带绳索卡死,并能提供基本不变的拉伸载荷 F_0 。

3) 当安全带绳索卡死并继续对其进行拉伸,且达到最大位移后,载荷会进一步增大。

4) 当载荷增大并超过最大载荷 F_{\max} 时,安全带绳索会拉断且载荷降至 0。

车间防倾覆安全带绳索特性曲线如图 4 所示。

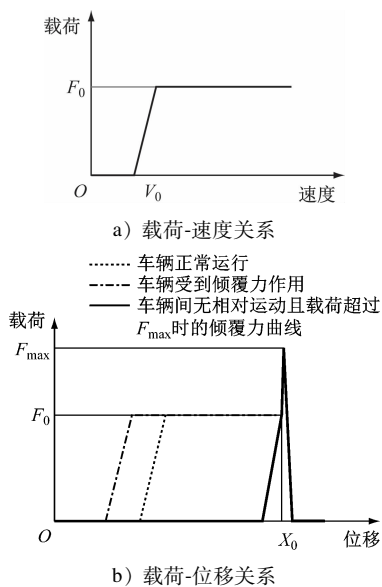


图 4 车间防倾覆安全带绳索特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of inter-vehicle anti-overturning safety belt rope

安全带绳索防倾覆装置安装在前后两车体之间,通过限制约束车体之间的相对侧滚角从而达到防倾覆的目的。安全带绳索的安装接口位于前后

两节车体之间的端墙上,如图 5 所示。

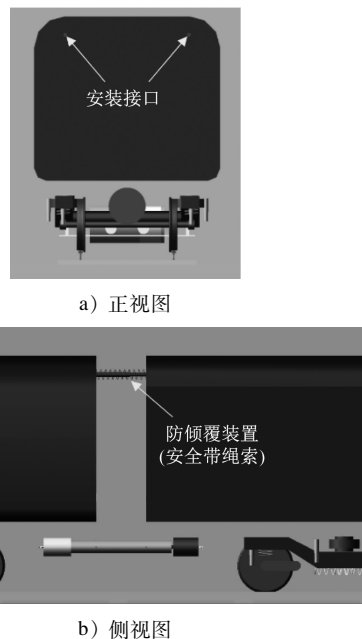


图 5 车间安全带绳索防倾覆装置安装位置

Fig. 5 Installation position of inter-vehicle safety belt rope anti-overturning device

3.2 列车防倾覆动力学仿真分析

车间安全带绳索防倾覆装置在车辆正常运行状态下被拉伸时不会产生较大的拉力,在车辆发生倾覆时会及时产生巨大的拉力防止车辆发生倾覆。在进行车辆防倾覆动力学仿真分析时,根据相关接触参数建立防倾覆装置动力学仿真模型,同时考虑不影响车辆正常运行工况以及车辆车间限界,确定合适的接口位置和结构参数^[9]。

仿真分析的过程中,在 ADAMS/Rail 动力学仿真模型中确定接口位置,在前后车体端墙的接口位置建立安全带力元,添加倾覆体后车辆各部件发生接触,在相同工况条件下进行防倾覆仿真,观察分析车辆在防倾覆装置作用下的运行姿态、轮对横向位移,以及轮轨接触横向力和垂向力,确定防倾覆装置的效果。图 6 为安装有防倾覆装置时,在倾覆力作用下的车辆运行姿态。

通过分析安装有车间安全带绳索防倾覆装置的列车在倾覆力作用下车辆的运行姿态可知,当头车突然受到倾覆力作用时,头车车体产生了较大的侧滚,而后车车体未产生侧滚,此时车间安全带由于突然的拉伸作用产生较大的拉力,在该力的作用下头车侧滚角逐渐减小。当倾覆力作用结束后,安全带绳索拉力减小,车体侧滚角恢复到正常状态。

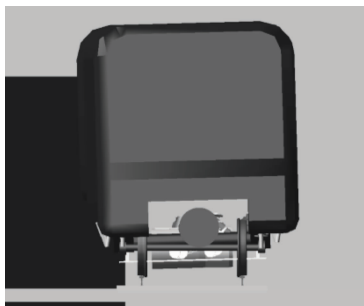


图6 安装有防倾覆装置时倾覆力作用下的车辆运行姿态
Fig. 6 Vehicle running posture under overturning force action equipped with anti-overturning device

车辆的轮对横向位移以及轮轨横向力和垂向力在无防倾覆装置和有防倾覆装置两种情况下的对比结果,如图7—图9所示。

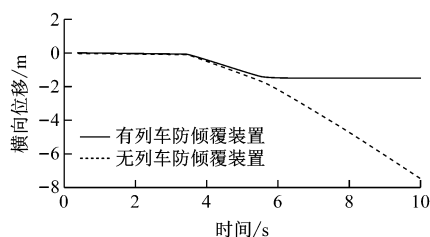


图7 拖车1号轮对横向位移-时间关系曲线
Fig. 7 Relationship curve of lateral displacement and time of trailing vehicle No. 1 wheelset

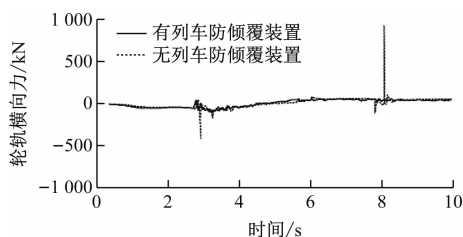


图8 拖车1号轮对轮轨横向力-时间关系曲线
Fig. 8 Relationship curve of wheel-rail lateral force and time of trailing vehicle No. 1 wheelset

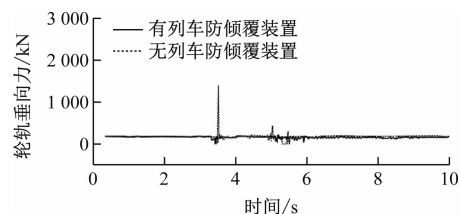


图9 拖车1号轮对轮轨垂向力-时间关系曲线
Fig. 9 Relationship curve of wheel-rail vertical force and time of trailing vehicle No. 1 wheelset

由图7—图9可知:相较于未安装防倾覆装置的车辆,安装有防倾覆装置车辆的轮对横移量大幅减小,极大地降低了车体侧滚的风险,同时轮轨横

向力和垂向力也相对降低且变化更加平稳,车辆动力学运行性能得到提高,证明了此列车防倾覆装置的有效性。

综上,安装车间安全带绳索防倾覆装置的车辆在倾覆力作用下能有效减小车辆侧滚角,防止车体因侧滚角过大而发生倾覆,因此该防倾覆方案达到了预定目标。

4 列车防倾覆装置安装座静强度检算

在列车防倾覆方案满足预定目标后,还需要对安全带绳索防倾覆安装座的静强度进行仿真分析和评估。

安全带绳索防倾覆安装座及部分车体有限元模型采用壳单元、实体单元及刚性单元进行网格划分。其中,平面壳单元的基本尺寸为10 mm。模型共划分295 943个单元,258 900个节点。安全带绳索防倾覆装置安装座主体结构采用四节点四边形壳单元进行划分,单元类型选用shell181。安全带绳索防倾覆装置安装座有限元模型如图10所示。

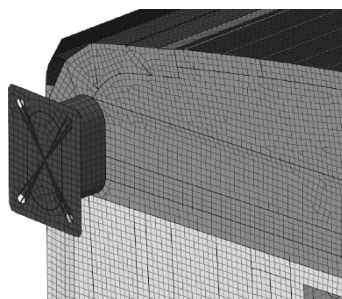


图10 安全带绳索防倾覆装置安装座有限元模型
Fig. 10 Finite element model of safety belt rope anti-overturning device mounting seat

安全带绳索防倾覆装置安装座在静荷载各工况下,最大 von Mises 应力不得超过其屈服极限^[10]。对于焊缝,其许用应力为115 MPa。

安全带绳索防倾覆装置的安装座静强度通过对连接到螺栓孔刚性元方向的主节点施加静载荷产生。安全带绳索防倾覆装置安装座静强度计算工况如表1所示。

安全带绳索防倾覆装置安装座在以上两种工况下的应力云图,如图11所示。由图11可以看出:安全带绳索防倾覆装置安装座在各工况下的静强度均未超出许用应力,满足相关标准的要求;在工况1下安装座的静强度达到最大应力,为113.5 MPa,位于安装座根部。

表 1 安全带绳索防倾覆装置安装座静强度计算工况

Tab.1 Static strength calculation operating conditions of safety belt rope anti-overturning device mounting seat

工况	安装座静载荷/kN		
	X 方向	Y 方向	合计
工况 1	20.0	16.5	26.0
工况 2	20.0	-16.5	26.0

注: X 方向为车辆前进方向; Y 方向为车辆横向。

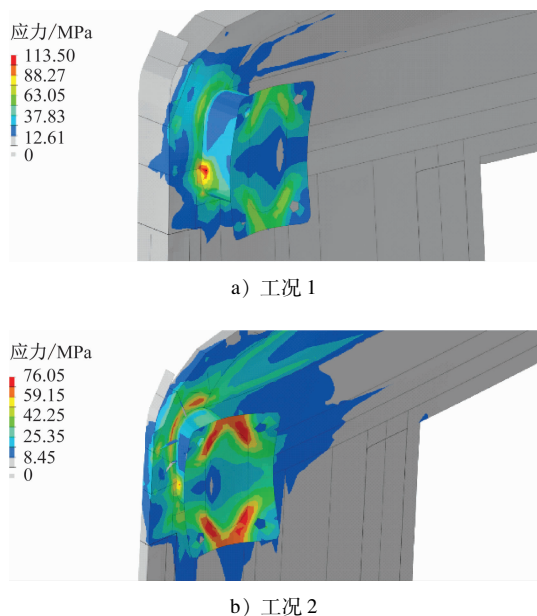


图 11 安全带绳索防倾覆装置安装座应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of safety belt rope anti-overturning device mounting seat

5 结语

本文对城市轨道交通列车运行过程中可能出现的车辆倾覆现象进行了研究,提出了在车间安装安全带绳索作为防倾覆装置的方案,并且确定了该装置的结构和接口位置。根据实际工况,对列车分别进行有、无防倾覆装置的动力学仿真,对比仿真结果可以发现安装有车间安全带绳索防倾覆装置的车辆能有效实现车辆防倾覆目的,表明所提方案具有较好的预期效果和可行性。同时对安全带绳索防倾覆装置安装座的静强度进行了校核,结果表明,在最大拉力作用下,安全带绳索防倾覆装置安装座的静强度计算结果未超出许用应力,结构强度满足标准要求。因此,该方案对城市轨道交通列车防倾覆装置的研究和设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 罗禄林, 楚琦星, 贾永兴, 等. 基于静态法高速列车抗横风倾覆影响因素研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(1): 19.
LUO Lulin, CHU Qixing, JIA Yongxing, et al. Influencing factors on overturning resistance on high-speed railway vehicles against crosswind based on static method[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(1): 19.
- [2] 徐照新, 高海军. 地铁高空作业车整车防倾覆性能设计及计算研究[J]. 机械工程师, 2020(11): 109.
XU Zhaoxin, GAO Haijun. Design and calculation of anti-overturning performance of metro aerial working vehicle[J]. Mechanical Engineer, 2020(11): 109.
- [3] 毛冉成, 曾京. 高速列车抗侧风倾覆稳定性研究[J]. 铁道车辆, 2019, 57(8): 1.
MAO Rancheng, ZENG Jing. Research on overturning stability of high speed trains under crosswind[J]. Rolling Stock, 2019, 57(8): 1.
- [4] 牛军. 大风下高速列车临界倾覆特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
NIU Jun. Study on critical capsizing characteristics of high-speed train under strong crosswind[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2015.
- [5] 肖绪明. 铁路施工养护车辆防倾覆装置的研究[J]. 铁道机车与动车, 2014(12): 40.
XIAO Xuming. Research on anti-overturning device for railway construction and maintenance vehicles[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2014(12): 40.
- [6] 汪群生, 曾京, 董浩. 基于 SIMPACK 铰接式列车的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(1): 32.
WANG Qunsheng, ZENG Jing, DONG Hao. Analysis of articulated train dynamics performance based on SIMPACK software[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(1): 32.
- [7] 崔晓飞. 车轮损伤下地铁车辆曲线脱轨动态特性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
CUI Xiaofei. Study on dynamic characteristics of curve derailment of metro vehicles under wheel damage[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.
- [8] RAEBER V, 郭志学. 铁路车辆倾覆稳定性[J]. 国外铁道车辆, 1986, 23(4): 18.
RAEBER V, GUO Zhixue. Overturning stability of railway vehicles[J]. Foreign Rolling Stock, 1986, 23(4): 18.
- [9] 周明生. 铁路营业线施工便梁限位和防倾覆装置设计与应用[J]. 上海铁道科技, 2014(3): 30.
ZHOU Mingsheng. Design and application of limiting and anti-overturning device for convenient beam in railway business line construction[J]. Shanghai Railway Science & Technology, 2014(3): 30.

(下转第 313 页)

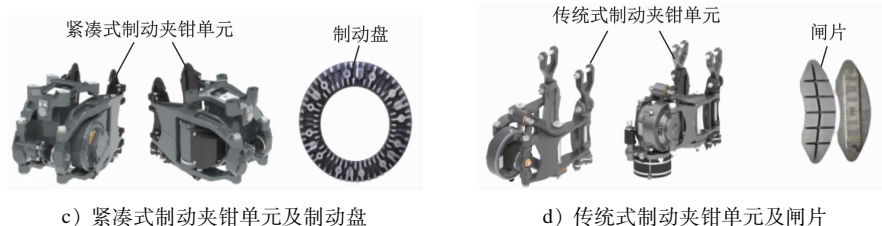


图3 简统化的中国标准城市轨道交通车辆基础制动装置外形结构示意图

Fig.3 Simplified and unified shape structure diagram of Chinese standard urban rail transit vehicle basic braking devices

6 结语

针对我国城市轨道交通车辆基础制动装置种类众多,规格接口不同,以及通用化程度低的特点,合理的装置选型能减少设计和制造成本,降低全寿命周期运维费用。系列化中国标准城市轨道交通车辆的统型,为基础制动装置选型提供了参考。

参考文献

- [1] 韩晓辉,李继山,李业明,等.和谐号动车组基础制动装置[J].铁道机车车辆,2011,31(5):52.
HAN Xiaohui, LI Jishan, LI Yeming, et al. Foundation braking equipment of Hexie EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2011, 31(5): 52.
- [2] 中国中车股份有限公司.城市轨道交通车辆制动夹钳单元:Q/CRRCJ 1058—2020 [A].北京:中国中车股份有限公司,2020.
CRRC Co. Ltd. Brake caliper unit of urban rail transit vehicles: Q/CRRCJ 1058—2020 [A]. Beijing: CRRC Co. Ltd., 2020.
- [3] 孔德鹏,张维坤,张昕,等.标准城市轨道交通车辆单元制动器统型浅析[J].铁道车辆,2021,59(3):82.
KONG Depeng, ZHANG Weikun, ZHANG Xin, et al. Analysis of unified type unit brakes for standard metro vehicles[J]. Rolling Stock, 2021, 59(3): 82.
- [4] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通车辆制动系统第2部分:电空制动系统装车后的试验规则:T/CAMET 04004.2—2018[S].北京:中国铁道出版社,2018.
China Association of Metros. Brake systems of urban rail vehicles Part 2: Test methods for electro-pneumatic brake system after com-

pletion of construction; T/CAMET 04004.2—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing, 2018.

- [5] 李继山,李和平,严霄惠.盘形制动是城市轨道交通车辆基础制动装置的发展趋势[J].铁道机车车辆,2011,31(4):69.
LI Jishan, LI Heping, YAN Xiaohui. Disc brake is development trend of the foundation brake rigging for urban railway cars[J]. Railway Locomotive & Car, 2011, 31(4): 69.
- [6] 曹建行,梁洪,薛江,等.基于提高列车运行品质的制动盘轻量化技术研究[J].现代城市轨道交通,2019(11):47.
CAO Jianhang, LIANG Hong, XUE Jiang, et al. Research on brake disc lightweight technology based on improving train running quality[J]. Modern Urban Transit, 2019(11): 47.
- [7] 王新海,韩晓辉,宫明兴,等.城市轨道交通制动系统技术发展趋势[J].铁路技术创新,2015(4):33.
WANG Xinhai, HAN Xiaohui, GONG Mingxing, et al. Development trend of urban rail transit braking system technology [J]. Railway Technical Innovation, 2015(4): 33.
- [8] 杜建华,李卫强,杨智勇.140~160 km/h城市快速轨道交通车辆基础制动模式及其选材[J].城市轨道交通研究,2019,22(6):174.
DU Jianhua, LI Weiqiang, YANG Zhiyong. Basic brake mode of 140~160 km/h urban rail express vehicle and material selection [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 174.

· 收稿日期:2022-04-21 修回日期:2022-09-09 出版日期:2024-08-10
Received:2022-04-21 Revised:2022-09-09 Published:2024-08-10
· 通信作者:王震,高级工程师,qdsfwz@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

(上接第308页)

- [10] 李幸人,邹涛,张江田,等.钢制车体疲劳强度校核方法[J].铁道车辆,2012,50(4):21.
LI Xingren, ZOU Tao, ZHANG Jiangtian, et al. The checking method for the fatigue strength of steel carbodies[J]. Rolling Stock, 2012, 50(4): 21.

· 收稿日期:2021-09-26 修回日期:2022-01-24 出版日期:2024-08-10
Received:2021-09-26 Revised:2022-01-24 Published:2024-08-10
· 第一作者:李本怀,正高级工程师,lbh1008@163.com
通信作者:王康,硕士研究生,1458824214@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