

城市轨道交通列车碰撞性能研究与应用

苏 强 王会娟 沈旭奎 计梦男 刘 洋

(北京轨道交通技术装备集团有限公司, 100070, 北京)

摘 要 [目的] 为了有效降低城市轨道交通列车发生碰撞时的危害, 从而提高列车运行的安全性, 有必要对列车运行过程中的碰撞性能进行研究。[方法] 基于城市轨道交通列车碰撞场景及标准, 提出列车碰撞能量管理方案。利用有限元软件进行列车碰撞场景仿真计算, 对列车碰撞时的速度、车辆界面力、车钩力、车辆变形量及应力、应变等进行分析。[结果及结论] 在列车车速为 25 km/h 的碰撞过程中, 车辆乘客区最大变形量发生在车 6, 最大变形量为 12.2 mm, 且为弹性变形, 远小于 EN 15227:2008 + A1:2010《轨道交通车体的耐撞性要求》要求; 车辆最大塑性应变发生在车 6 端部, 为 4.7% (小于 EN 15227:2008 + A1:2010 规定的 10%), 车辆在碰撞过程中满足 EN 15227:2008 + A1:2010 对生存空间的要求; 轮对最大抬起高度发生在车 5 后转向架, 最大抬起高度达到 10.5 mm, 但未超过轮缘高度的 75%, 不存在爬车的风险。所提列车碰撞能量管理方案满足 EN 15227:2008 + A1:2010 对车辆耐撞性的要求。

关键词 城市轨道交通; 列车; 碰撞性能

中图分类号 U270.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.022

Research and Application of Urban Rail Transit Train Collision Performance

SU Qiang, WANG Huijuan, SHEN Xukui, JI Mengnan, LIU Yang

(Beijing Rail Transit Technology Equipment Group Co., Ltd., 100070, Beijing, China)

Abstract [Objective] In order to effectively reduce the hazards from the collision of urban rail transit trains and thereby improve the safety of train operation, it is necessary to conduct research on the collision performance of urban rail transit trains during the operation process. [Method] Based on urban rail transit train collision scenarios and standards, a train collision energy management scheme is proposed. The finite element software is utilized to conduct simulation calculation of train collision scenarios, the speed, vehicle interface force, coupler force, vehicle deformation amount, stress and strain in trains collision are analyzed. [Result & Conclusion] During the collision with the train speed of 25 km/h, the maximum deformation in the passenger area of the vehicle would occur in

Car 6. This elastic deformation could reach 12.2 mm, far less than that specified in EN 15227:2008 + A1:2010 Railway applications-Crashworthiness requirements for urban rail transit vehicle bodies. The maximum plastic strain of the vehicle occurring at the ends of Car 6 is 4.7%, less than 10% as specified in EN 15227:2008 + A1:2010. Therefore, the vehicle meets the requirements for the survival space specified in EN 15227:2008 + A1:2010 during the collision. The maximum lifting height of the wheelset at the rear bogie of Car 5 reaches 10.5 mm, not exceeding 75% of the flange height, thereby without the risk of vehicle climbing. The proposed collision energy management scheme satisfies the requirements for vehicle crashworthiness in EN 15227:2008 + A1:2010.

Key words urban rail transit; train; collision performance

城市轨道交通列车大多运行在人口密集的城市, 目前发生撞击事故的情况也屡见不鲜, 甚至威胁到了乘客的生命安全, 造成极大的经济损失, 因此运营商对轨道交通车辆碰撞吸能特性的要求越来越高^[1]。

本文以某城市地铁 6 辆编组 B 型车辆列车为研究对象, 以 EN 15227:2008 + A1:2010《轨道交通车体的耐撞性要求》为依据, 通过合理设计车辆的吸能结构, 模拟列车在 25 km/h 下的碰撞性能变化, 分析列车在碰撞过程中速度、加速度、受力、应变、吸能等方面的变化, 通过仿真计算结果, 验证此吸能结构的设计能否满足车辆整车碰撞的要求。

1 列车碰撞场景与验收标准

列车碰撞场景与验收标准如下:

1) 碰撞场景。本研究中地铁车辆属于 C-II 类型车辆, 碰撞场景需满足 EN 15227:2008 + A1:2010 要求。本项目 1 列 6 辆编组的地铁列车以 25 km/h 的初始速度撞击另一列处于静止无制动状态的同类型列车。

2) 验收标准。在碰撞点(固定列车单元所在的水平面低于运行列车单元)的初始垂直偏移为 40

mm 的情况下,满足减速标准和生存空间的要求,且列车不能发生爬车现象。

2 列车碰撞能量管理方案

列车碰撞能量管理方案如下:

1) 列车信息。列车编组: + Tc A-B Mp A-B M + M B-A Mp B-A Tc +, 其中: Tc 为带司机室的拖车, Mp 为有受电弓的动力车, M 为无受电弓的动力车, + 为全自动车钩, A-B 为半永久车钩 A 和半

永久车钩 B。

2) 吸能方案。在列车速度为 25 km/h 的碰撞场景下,车钩缓冲器和压溃管均参与列车吸能,在碰撞过程中,车钩缓冲器最先发生变形从而吸能,但由于吸能较小,紧接着车钩压溃管发生变形从而吸能。当压溃管压缩至设计行程后,仍然无法吸收全部的碰撞能量,剩余能量由车端吸能装置参与吸能。吸能部件性能参数如表 1 所示。

表 1 吸能部件性能参数取值

Tab.1 Performance parameters of energy absorption components

名称	压缩吸能行程/mm			最小触发力/kN		
	车钩缓冲器	压溃管	防爬器	车钩缓冲器	压溃管	防爬器
头车全自动车钩	55	240		680	700	
车端吸能装置			190、320			720、815
半永久车钩 A	55	200		680	600 ~ 800	
半永久车钩 B	55	200		680	600 ~ 800	
中间半自动车钩	55	100		680	600	

3) 列车配置。列车车辆及其界面编号示意图见图 1。



图 1 列车车辆及其界面编号示意图

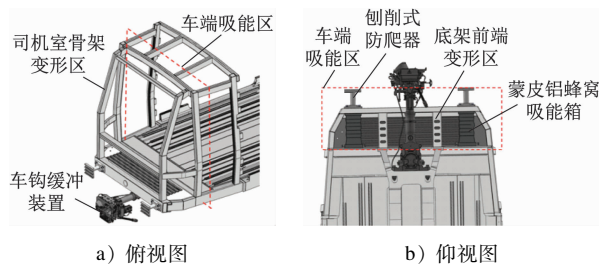
Fig.1 Schematic diagram of train vehicles and their interface numbering

3 列车碰撞场景有限元仿真分析

3.1 司机室车端吸能装置

车端吸能装置主要包括防爬器、铝蜂窝吸能箱及车辆变形吸能区^[2]。其中:防爬器采用刨削式防

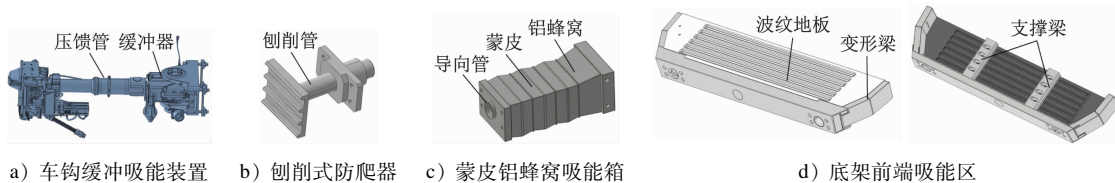
爬器;蒙皮铝蜂窝吸能箱采用蒙皮铝蜂窝结构;车辆前端变形区主要包括司机室骨架变形区和底架前端变形区,底架前端变形区采用变形梁拼焊,并装有波纹地板,司机室骨架变形区由矩形梁拼焊,在变形位置做削弱孔,便于变形吸能^[3]。图 2 和图 3 为车端吸能装置布置图及吸能元件示意图。



a) 俯视图 b) 仰视图

图 2 车端吸能装置布置图

Fig.2 Layout of energy absorption devices at vehicle end



a) 车钩缓冲吸能装置 b) 刨削式防爬器 c) 蒙皮铝蜂窝吸能箱 d) 底架前端吸能区

图 3 车端吸能元件示意图

Fig.3 Schematic diagram of energy-absorbing components at vehicle end

3.2 有限元模型的建立

采用 Hypermesh 软件建立头车和中间车有限元

模型,对该模型进行网格划分。在碰撞模型中引入离散梁单元,该单元可以很好地模拟车钩缓冲装置

在碰撞过程中的特性^[4]。头车车钩及中间车车钩连接有限元模型如图4和图5所示。

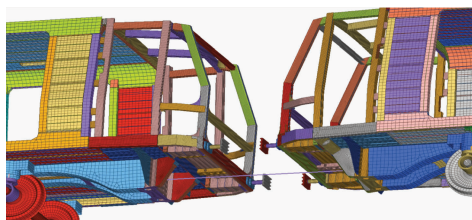


图4 头车车钩连接有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the coupler connection for the head cars

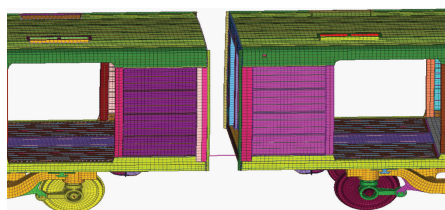


图5 中间车车钩连接有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the coupler connection for the intermediate cars

3.3 整车模型

运动和静止列车属于同类型、同配置的列车,且碰撞发生在直线轨道上,碰撞过程中两列列车均未采取任何制动措施。在碰撞过程中,运动列车中的前3辆车辆(见图1中的车4、车5、车6)以及静止列车中的前3辆车辆(见图1中的车7、车8、车9)受力较大,为了提高计算效率,将运动列车远离碰撞点的3辆车辆(见图1中的车1、车2、车3)以及静止列车远离碰撞点的3辆车辆(见图1中的车10、车11、车12)均视为刚体^[5]。为了便于描述,定义列车车辆及其界面编号如图1所示,即从运动列车最左侧车辆至静止列车最右侧车辆分别为车1—车12,其界面依次为界面1—界面11。

4 计算结果与分析

4.1 车辆界面力

经计算,在碰撞过程中,车6和车7之间碰撞力最大,变形最严重。车6和车7之间即两个司机室碰撞界面始终处于紧密接触状态。在0~0.16 s时,车辆界面力约为700 kN,该力为车钩压缩时传递至车辆的力;当0.16 s时,防爬齿发生啮合,刨削式吸能防爬器开始变形吸能,平均缓冲力为720 kN;在0.32 s时,刨削式吸能防爬器压缩至底,此时

蒙皮蜂窝式吸能器和车辆开始变形;在0.324 s时,产生的界面力较大,超过了1 000 kN,但其持续时间较短且小于5 ms,可认为不会对车辆产生损害;在0.98 s时,由于碰撞能量逐渐被吸收完毕,蒙皮蜂窝式吸能器和车辆压缩至最大量;在1 s后,碰撞完成,车辆界面力开始下降。图6为界面6的力时程曲线。

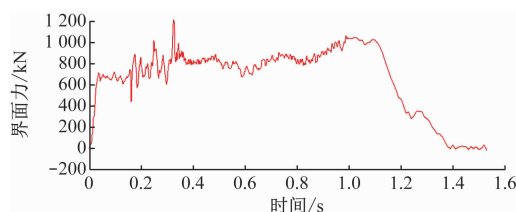


图6 车辆界面6力时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of 6 force on vehicle interface

4.2 车钩力

当界面6的两个车钩共同变形达到590 mm后,头钩的剪切螺栓被剪断,车钩回退,两列列车的防爬器接触,防爬齿顺利啮合。其余界面车钩未设置剪断机制。表2为缓冲吸能装置(压馈管和弹性缓冲器)的最大压缩量。由表2可知:除头车车钩被剪断外,其余车钩均未达到最大压缩量。图7为各车辆界面车钩力时程曲线。

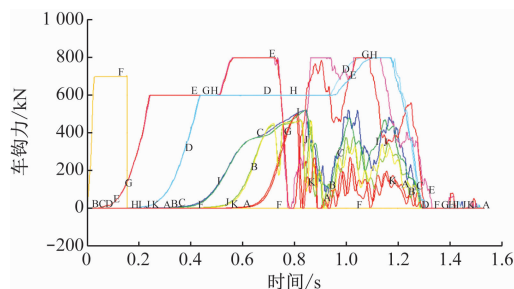
表2 缓冲吸能装置的最大压缩量

Tab. 2 Maximum compression amount of the buffering and energy-absorbing device

界面编号	最大压缩量/mm	设计值/mm	界面编号	最大压缩量/mm	设计值/mm
界面1	102.0	510	界面7	459.0	510
界面2	98.6	510	界面8	364.0	510
界面3	105.0	310	界面9	105.0	310
界面4	353.0	510	界面10	99.7	510
界面5	449.0	510	界面11	103.0	510
界面6	590.0	590			

4.3 车辆变形

通过计算结果分析:车4—车9的变形量均在碰撞结束后趋于0;车辆乘客区最大变形量发生在车6,最大变形量为12.2 mm;车6前端的未变形生存空间远大于EN 15227:2008 + A1:2010的要求。由此可见,车6满足EN 15227:2008 + A1:2010对生存空间的要求。车6乘客区变形量时程曲线如图8所示。



注:A—K 分别为界面 1—界面 11 车钩力时程曲线。

图 7 各车辆界面车钩力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of the coupler force on vehicle interfaces

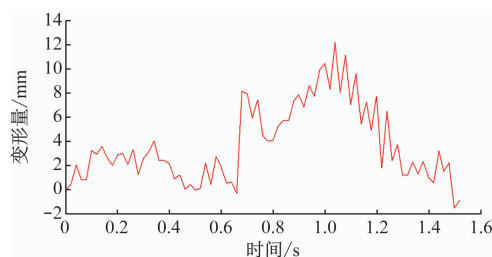
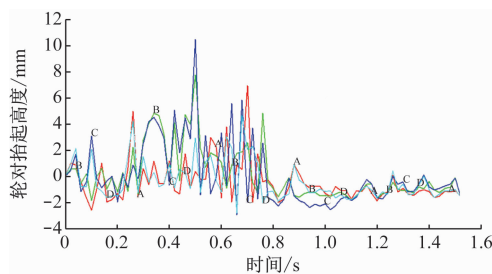


图 8 车 6 乘客区变形量时程曲线

Fig. 8 Time-history of the deformation amount at passenger area of Car 6

4.4 轮对抬起高度

轮对最大抬起高度发生在车 5 后转向架。车 5 后转向架轮对抬起高度时程曲线如图 9 所示。由图 9 可见:车 5 后转向架最大抬起高度达到 10.5 mm,但未超过轮缘高度的 75%,因此不存在爬车的风险。



注:A—D 分别为轮对 1—轮对 4 抬起高度时程曲线。

图 9 车 5 后转向架轮对抬起高度时程曲线

Fig. 9 Time-history curves of the wheelset lifting height of Car 5 rear bogie

5 结语

在列车速度为 25 km/h 的碰撞过程中,车辆乘客区最大变形量发生在车 6,其长度方向每 5 m 的变形量约为 3 mm(车辆最大总变形量为 12.2 mm,

且为弹性变形),远小于 EN 15227:2008 + A1:2010 要求的每 5 m 不大于 50 mm。车辆最大塑性应变发生在车 6 端部,为 4.7%,小于 EN 15227:2008 + A1:2010 规定的 10%。由此可见,车辆在碰撞过程中满足 EN 15227:2008 + A1:2010 对生存空间的要求。轮对最大抬起高度发生在车 5 后转向架,最大抬起高度达到 10.5 mm,但未超过轮缘高度的 75%,因此不存在爬车的风险。本项目的碰撞能量管理方案满足 EN 15227:2008 + A1:2010 对于车辆耐撞性的要求。

参考文献

- [1] 张志新,田爱琴,车全伟,等. 高速列车车体端部吸能结构研究[J]. 机车电传动, 2013(1): 43.
ZHANG Zhixin, TIAN Aiqin, CHE Quanwei, et al. Research on energy-absorbing structures for two ends of high-speed train car body[J]. Electric Drive for Locomotives, 2013(1): 43.
- [2] 邹翔,高广军,董海鹏,等. 高速列车多边形多胞吸能管耐撞性分析与优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1386.
ZOU Xiang, GAO Guangjun, DONG Haipeng, et al. Crashworthiness analysis and multi-objective optimization of multi-cell tube for high-speed train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1386.
- [3] 朱涛,张敬科,吴启凡,等. 车钩缓冲装置对轨道列车碰撞安全性的影响综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 233.
ZHU Tao, ZHANG Jingke, WU Qifan, et al. Review on influence of coupler and draft gear on safety of railway train collision[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 233.
- [4] 甘宁. 基于耐撞性和刚度车辆端部底架的拓扑概念设计[D]. 长沙:中南大学, 2014.
GAN Ning. Topological conceptual design on the chassis of vehicle ends based on crashworthiness and stiffness [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [5] 张秧聪,许平,姚曙光,等. 高速列车前端吸能结构理论预测与数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(12): 2327.
ZHANG Yangcong, XU Ping, YAO Shuguang, et al. Theoretical prediction and numerical simulation of the high-speed train front-end energy-absorbing structure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(12): 2327.

· 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2023-07-30 出版日期:2025-01-10

Received:2022-09-02 Revised:2023-07-30 Published:2025-01-10

· 通信作者:苏强,高级工程师,suqiang2383103@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