

有轨电车碰撞仿真建模技术及耐撞性研究*

孔琳皓¹ 肖守讷¹ 朱 涛¹ 张敬科¹ 丁浩谔¹ 梁朝纬²

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都; 2. 北京经纬恒润科技股份有限公司, 200235, 上海)

摘 要 [目的] 鉴于有轨电车与路面车辆共享道路使用权, 由此引发的道路乘用车与有轨电车碰撞事故频发, 故有必要对有轨电车碰撞仿真建模技术及耐撞性进行研究。

[方法] 选取某型号有轨电车作为研究样本, 利用自主研发的碰撞仿真分析前处理模块, 构建了有轨电车碰撞仿真分析模型, 并针对乘用车侧面撞击有轨电车悬浮模块的情景进行了详细研究。[结果及结论] 所开发的碰撞仿真分析前处理模块能够高效、便捷地构建有轨电车碰撞仿真分析模型, 显著提升了建模效率。随着乘用车碰撞速度的提升及撞击点位置的升高, 侧墙的横向入侵量呈现增大趋势。特别是在乘用车撞击角度介于 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 之间时, 侧墙的横向入侵量达到最大值。最终, 通过对侧墙截面进行优化设计, 即在其中空区域填充泡沫铝材料, 优化后的侧墙最大横向入侵量降低了 42%, 有效提升了有轨电车在侧面碰撞中的耐撞性能。

关键词 有轨电车; 自动化建模; 侧面碰撞; 参数分析; 耐撞性优化

中图分类号 U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.013

Research on Collision Simulation Modeling Technology and Crashworthiness of Trams

KONG Linhao¹, XIAO Shoune¹, ZHU Tao¹, ZHANG Jingke¹, DING Haoxu¹, LIANG Chaowei²

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Beijing Jingwei Hengrun Technology Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Given that trams share rights of road with ground vehicles, the frequent occurrence of collisions between ground passenger vehicles and trams necessitates research into tram collision simulation modeling technology and crashworthiness. [Method] A specific tram model is selected as the research sample. Using a self-developed pre-processing module for collision simulation analysis, a simulation model for tram collisions is constructed. A detailed study is conducted on scenarios where a passenger vehicle collides with tram suspension module on the side. [Result & Conclusion] The developed

pre-processing module for collision simulation analysis enables efficient and convenient construction of tram collision simulation analysis models, significantly improving modeling efficiency. As the collision speed of passenger vehicle increases and the impact point location elevates, the lateral intrusion amount on tram sidewall exhibits an increasing trend. Particularly when the impact angle from passenger vehicle ranges between 90° and 120° , the lateral intrusion amount on tram sidewall reaches its maximum. Finally, through optimized design of the sidewall cross-section, specifically by filling hollow areas with aluminum foam, the maximum lateral intrusion amount on tram sidewall after optimization is reduced by 42%, effectively enhancing the tram crashworthiness in side-collision scenarios.

Key words tram; automated modeling; side-collision; parametric analysis; crashworthiness optimization

有轨电车相较于其他城市轨道交通方式展现出更显著的环保性、美观度、节能效果, 以及投资成本低、建设周期短、运力超越常规公共交通等优势, 逐渐成为众多城市潜在的发展重点^[1]。然而, 由于有轨电车与路面上的道路乘用车(以下简称“乘用车”)共享道路使用权^[2], 易导致乘用车与有轨电车间的碰撞事故^[3], 引发不可逆转的人员伤亡和经济损失; 同时, 有轨电车还面临来自多方社会车辆的碰撞风险, 尤其是侧面刮蹭与撞击。在探究有轨电车耐撞性时, 除纵向碰撞外, 还需重视其侧面的耐撞性能。当前碰撞标准中尚未包含侧面碰撞要求, 因此, 对有轨电车与乘用车侧面碰撞事故的研究具有重大的现实和理论意义。

在传统轨道车辆碰撞仿真分析流程中, 涉及模型移动、曲线数据设定、单元连接、模型及接触创建等手动操作, 随着车辆数量的增加, 操作频次亦随之上升。一旦初始有限元模型发生变动, 则需重复上述工作, 耗时较长。为此, 对 HyperMesh 软件进

* 国家自然科学基金项目(52172409); 四川省杰出青年基金项目(2022JDJQ0025)

行二次开发,实现了车体与转向架的自动装配及模块化车辆的自动生成,显著提升了模型前处理的效率。通过 HyperMesh 软件的二次开发,实现了分析流程的标准化与自动化,有效提高了有限元网格划分前处理的质量与效率。目前,该方法在汽车^[4]、飞机^[5]领域应用广泛,而在轨道交通领域尚未见相关研究报道。

本文以某型有轨电车为研究对象,结合自主研发的碰撞仿真分析前处理模块,构建了有轨电车碰撞仿真分析模型,针对乘用车侧面撞击有轨电车悬浮模块进行了深入研究,并对有轨电车侧墙进行了耐撞性优化,从而提升了仿真分析的效率和有轨电

车侧墙的耐撞性能。

1 有限元模型的建立

以某型五模块有轨电车为例,整个基于二次开发技术的建模流程如图1所示。建立单个模块的有限元模型,通过车体与转向架装配界面进行模块前处理。在导入各模块有限元模型后,利用 TCL 语言调用内置函数命令,按照逻辑顺序自下而上地完成信息提取,包括节点集名称、节点编号、节点全局坐标等,最终依据不同坐标值及输入参数计算出移动距离等所需参数。

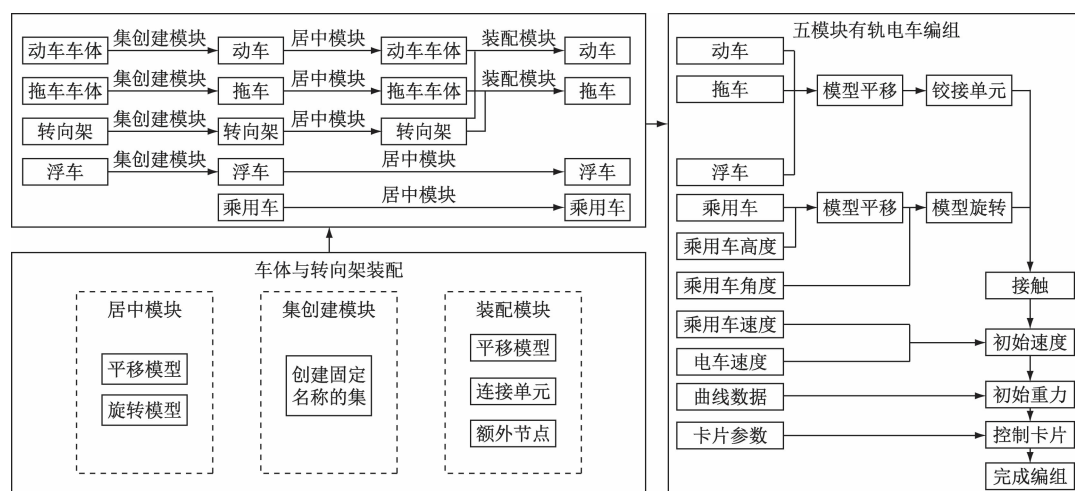


图1 基于二次开发技术的建模技术流程

Fig. 1 Modeling technology process based on secondary development technology

本程序通过预先提取特征名称并存储于相应空间内,在创建接触、铰接单元时进行了搜索优化,加速了对应集的查找速度。初始重力、初始速度、控制卡片等由输入参数直接生成,轨道有限元模型则通过代码以点、线、面、有限元网格的形式自动生成。

1.1 有轨电车及乘用车有限元模型

本文的研究聚焦于100%低地板有轨电车,该车型为五模块编组,具体模块排列形式为A1—A2—A3—A4—A5。其中,A1与A5模块为动力车,结构相同;A3模块为拖车;A2与A4模块为浮车,结构亦相同。在构建有限元模型时,采用了多种单元类型,包括Shell单元、Mass单元、Beam单元及刚性单元。针对转向架模型的建立,对转向架结构进行了适度简化处理,将构架与轮对在有限元模型中简化为刚体,而一系与二系悬挂系统则通过

Beam单元进行模拟。有轨电车各车辆间通过铰接装置实现连接,该装置在模型中同样采用Beam单元进行简化表示。乘用车模型则选用了CCSA(碰撞安全与分析中心)官方发布的Nissan_rogue模型。基于HyperMesh软件的二次开发功能,实现了对列车的模块化建模。在仿真中,有轨电车的速度被设定为恒定25 km/h。乘用车侧面撞击有轨电车仿真模型如图2所示。

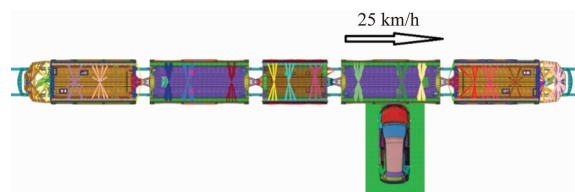


图2 乘用车侧面撞击有轨电车仿真模型

Fig. 2 Simulation model for side impact of passenger vehicles on trams

1.2 二次开发模块功能

车体与转向架装配交互界面设计包含 2 个文件导入窗口及 4 个功能按键。在装配流程开始前,需利用前 3 个按键分别对车体和转向架的有限元模型进行预处理。该界面还具备居中功能,用于模型的对中处理。此外,集创建功能利用预存的集名称技术,能够创建必要的壳单元集和节点集。对于不同车体与转向架的装配需求,需建立具有特定名称的集,并通过特定名称匹配与集内信息读取技术实现装配,这一设计在模型变更时能减少集的选择调整,提高装配效率。

五模块有轨电车交互界面则包含 4 个单文件导入窗口、1 个多文件导入窗口、7 个参数输入窗口及 1 个功能按键。用户完成参数输入后,该界面能迅速构建完整的五模块有限元模型。

2 碰撞场景

以沈阳市有轨电车为例^[6],对我国有轨电车事故进行了统计分析,共记录了 32 起各类交通事故。其中,有轨电车与道路行驶机动车辆间的碰撞事故占比最高,达到事故总数的 45.9%。分析事故原因发现,多数事故发生在交叉路口,尤其是有轨电车直行时右侧左转车道机动车抢行,以及有轨电车右转时右侧直行机动车抢行导致的道路交通事故。

鉴于乘用车在路面上行驶时面临诸多不可控因素,可能导致其以不同角度、速度撞击有轨电车。因此,本研究基于代表性的碰撞场景 2,针对乘用车以不同速度、角度及撞击点高度撞击有轨电车悬浮模块的碰撞响应进行了深入分析,并设置了如表 1 所示的碰撞场景进行仿真计算。

3 乘用车各参数下碰撞响应

3.1 乘用车速度对于碰撞响应的影响

对碰撞场景 1 至场景 3 进行了仿真计算,不同速度场景下碰撞部位的界面力变化如图 3 所示,不同速度场景下横向变形量如图 4 所示。由图 3 和图 4 的仿真结果分析得出:随着乘用车速度从 30 km/h 提升至 50 km/h,碰撞部位的最大界面力由 212 kN 增长至 438 kN,同时,碰撞部位的横向变形量也从 76 mm 增加到 182 mm。这一结果表明,乘用车的碰撞速度与碰撞界面的界面力以及横向变形量之间存在正相关关系,且碰撞速度是一个对碰撞结果具有较强敏感性的参数。

表 1 碰撞仿真场景

Tab.1 Collision simulation scenarios

碰撞场景	乘用车速度/(km/h)	乘用车撞击角度/(°)	撞击点高度
1	30	90	初始高度
2	40	90	初始高度
3	50	90	初始高度
4	40	30	初始高度
5	40	45	初始高度
6	40	60	初始高度
7	40	120	初始高度
8	40	135	初始高度
9	40	150	初始高度
10	40	90	初始高度 + 100 mm
11	40	90	初始高度 + 200 mm

注:撞击角度是指有轨电车与乘用车速度方向的夹角。

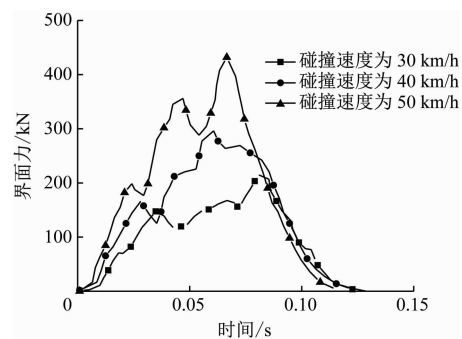


图 3 不同速度场景下碰撞部位界面力

Fig.3 Interface forces at the collision site in different speed scenarios

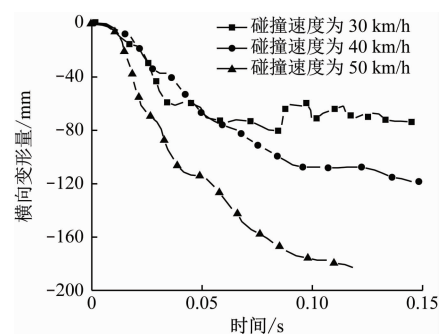


图 4 不同速度场景下横向变形量

Fig.4 Lateral deformation in different speed scenarios

3.2 乘用车撞击角度对于碰撞响应的影响

由于有轨电车具备一定的速度特性,碰撞角度为 45°与 135°时产生的碰撞响应存在显著差异,因此在设置碰撞场景时纳入了多种碰撞角度以进行全面分析。

对场景2、场景4—场景9进行了仿真计算,不同角度碰撞场景下碰撞部位的界面力如图5所示。由图5的仿真结果可知:在相同速度条件下,30°与150°的碰撞场景界面力相对较小,分别为146 kN和133 kN;而60°、90°及120°的碰撞场景界面力较大,其中120°时的界面力达到最大值309 kN,并非90°。

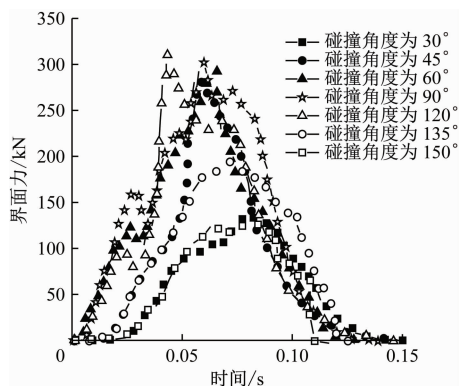


图5 不同角度碰撞场景下碰撞部位界面力

Fig. 5 Interface forces at the collision site in different angle collision scenarios

图6为不同角度碰撞场景下碰撞部位的横向变形量,其整体变化趋势与界面力相似。具体而言,30°与150°碰撞场景下的横向变形最小,而120°时的横向最大变形量达到124 mm。

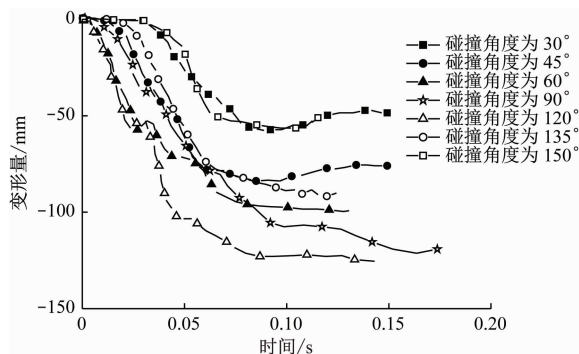


图6 不同角度碰撞场景下横向变形量

Fig. 6 Lateral deformation in different angle collision scenarios

对不同碰撞角度下的界面力及横向变形量进行分析后发现,在0°~180°的范围内,较小角度的碰撞多为刮蹭性质,对侧墙结构影响有限,且不同速度方向间的差异不显著;而较大角度的碰撞则为侵入性质,此时侧墙结构的变形受碰撞合速度的大小及方向影响较大。特别是当碰撞角度在90°~120°范围内时,形成的碰撞合速度更大,且该角度范围更易导致侧墙结构发生褶皱变形,从而使碰撞更为危险。碰撞角度的变化对碰撞响应的敏感程度

低于速度的变化。

3.3 乘用车撞击点高度对于碰撞响应的影响

撞击初始高度设定为乘用车模型与地面接触时的位置。鉴于路面上乘用车种类繁多,各类车辆的高度存在差异,特别是货车等大型车辆,其撞击点往往更高。因此,为了模拟不同高度的撞击情况,本文通过z轴正向平移乘用车模型的方式,来提高撞击点的高度。

对场景2、场景10和场景11进行仿真计算,不同撞击点高度碰撞场景下碰撞部位的界面力如图7所示,不同撞击点高度碰撞场景下碰撞部位横向变形量如图8所示。由图7和图8的仿真结果可知:初始高度+100 mm的碰撞场景在界面力以及变形量上与初始高度碰撞场景相比都明显变大;初始高度+200 mm的碰撞场景界面力与初始高度碰撞场景比较接近,但是最大变形量从118 mm增加至207 mm,变化较大。

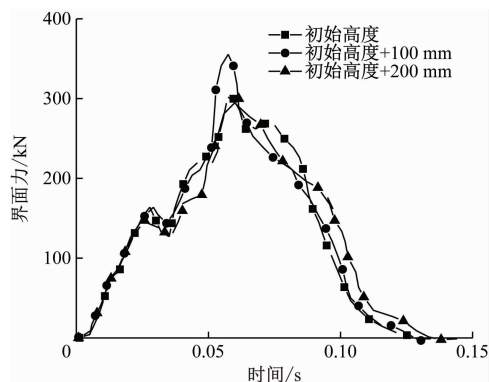


图7 不同撞击点高度场景下碰撞部位界面力

Fig. 7 Interface forces at the collision site in different impact point height scenarios

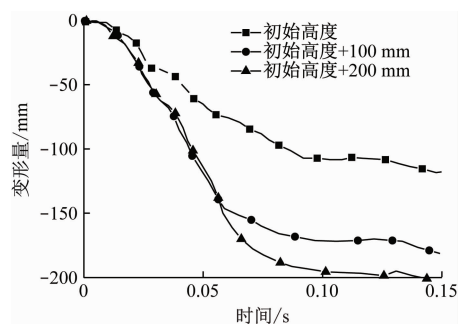


图8 不同撞击点高度场景下横向变形量

Fig. 8 Lateral deformation in different impact point height scenarios

通过对不同撞击点高度碰撞场景下的界面力和横向变形量的分析,可以得出以下结论:当撞击

点逐渐升高并越来越靠近侧墙中部时,侧墙的横向变形量会随之增大;而碰撞产生的界面力则未呈现出明显的规律性,这可能与撞击点所在侧墙的结构特性有关。

4 有轨电车侧墙结构改进

4.1 侧墙耐撞性改进方案

本文将采用泡沫铝作为吸能结构,泡沫铝^[7]是一种多孔洞材料,密度较小,并且有着高孔隙率使其可以进行比较大的塑性变形来吸能等优点,将泡沫铝填充至侧墙中部,侧墙填充泡沫铝前后截面图如图9所示。

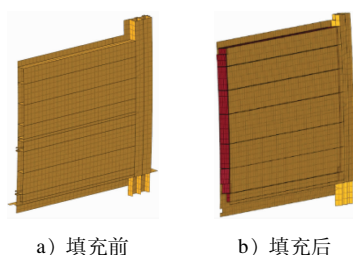


图9 侧墙截面图

Fig. 9 Profile diagram of the sidewall

泡沫铝材料有限元建模采用六面体实体单元,并采用具有永久压服的材料模型模拟其本构关系,本文所采用的是76%孔隙率的泡沫铝的应力-应变曲线^[8]。

4.2 侧墙耐撞性优化仿真结果

将上述泡沫铝结构填充至悬浮模块侧墙后,对具有代表性的碰撞场景2再次进行仿真计算,仿真结果如下。

4.2.1 侧墙变形量

图10为碰撞后侧墙变形图。

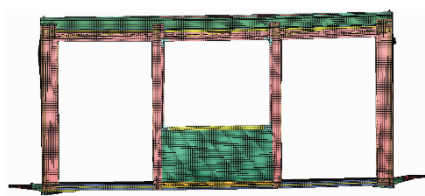


图10 碰撞后侧墙变形

Fig. 10 Deformation of sidewall after collision

由图10可知:通过侧墙优化前后的仿真计算,侧墙下部依然是受力最大的部位,并产生了一定的形变,相较于原始碰撞场景来说,优化后侧墙变形程度小了很多,泡沫铝变形相对较为严重,主要也是集中在下部。

图11是优化前后侧墙部分横向最大变形量对比图,最大变形量由优化前的118 mm降至优化后的68 mm,下降了42%,填充泡沫铝在侧墙入侵量上有非常显著的效果。

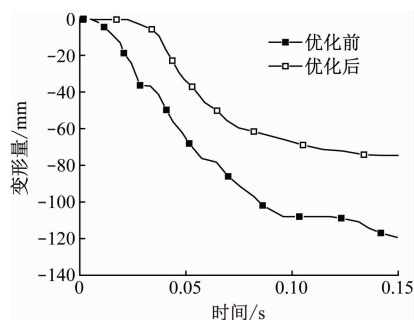


图11 优化前后侧墙横向最大变形量对比

Fig. 11 Comparison of sidewall maximum transverse deformation before and after optimization

4.2.2 界面力

图12为优化前后界面力对比图,优化前碰撞场景2的最大界面力为302 kN。由图12可知:优化后该碰撞场景界面力最大值变为311 kN,变化幅度很小,正常情况下在侧墙中部填充物质吸收碰撞产生的能量,界面力往往会变大较多,但是由于泡沫铝的特殊的多孔隙结构,从而导致在该侧墙优化方案中,界面力只增加了2.9%。

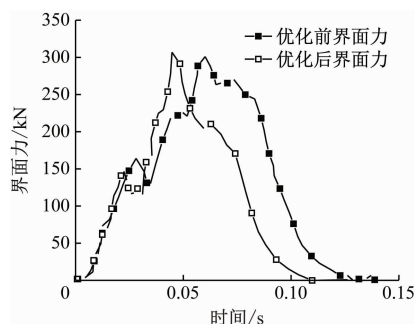


图12 优化前后界面力对比

Fig. 12 Comparison of interface forces before and after optimization

通过在侧墙中部填充泡沫铝,极大改善侧墙的入侵量从118 mm降低为68 mm,减小了42%,在填充泡沫铝的同时,碰撞时的界面力只增大了2.9%,填充泡沫铝工艺简单,可操作性强,总体优化效果较好。

5 结语

本文基于乘用车与有轨电车间的碰撞场景,建

立了乘用车侧面撞击有轨电车悬浮模块有限元模型,研究了不同碰撞场景下有轨电车碰撞响应变化趋势,得到的结论如下:

1) 通过对有限元软件的二次开发,建立使用者所需要的功能,有效简化了有轨电车装配、模块等有限元仿真模拟分析前处理的操作步骤,不仅减少了使用者的操作重复次数,还提高了建模准确性和建模效率。

2) 乘用车速度的变化与碰撞界面的界面力以及横向变形量的变化呈正相关,并且是敏感性比较强的一个参数。撞击角度从 $30^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 的范围内,碰撞角度越靠近 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 范围,碰撞就更危险。碰撞角度变化对于碰撞响应的敏感程度小于速度的变化。随着撞击点升高,撞击点越来越靠近侧墙中部时,侧墙的横向入侵量会随着撞击点的升高而变大。

3) 在侧墙中部填充了 76% 孔隙的泡沫铝,填充后侧面撞击悬浮模块造成侧墙的横向最大入侵量从 118 mm 降低为 68 mm,下降了 42%,优化效果较好。

参考文献

- [1] 秦国栋, 苗彦英, 张素燕. 有轨电车的发展历程与思考[J]. 城市交通, 2013, 11(4): 6.
QIN Guodong, MIAO Yanying, ZHANG Suyan. A review on streetcar development[J]. Urban Transport of China, 2013, 11(4): 6.
- [2] 李威. 浅析现代有轨电车路权形式及其道路横断面布置[J]. 交通科技, 2015(4): 150.
LI Wei. Analysis on the right-of-way form of modern tram and its road cross-section layout[J]. Transportation Science & Technology, 2015(4): 150.
- [3] ABDELAZIZ K, RACHID C. Analysis of the tram safety: case study of Algeria[J]. Procedia Engineering, 2017, 178: 401.
- [4] 刘乾. 基于 HyperMesh 二次开发的汽车碰撞仿真模型定位工具[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(6): 139.
LIU Qian. Optimization of low energy milling parameters based on improved genetic algorithm[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(6): 139.
- [5] 何玉军, 史治宇. 基于 HyperMesh 二次开发的短梁优化设计[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(4): 87.
HE Yujun, SHI Zhiyu. Optimization design of short beam based on hypermesh secondary development[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016, 38(4): 87.
- [6] 韩旭. 沈阳现代有轨电车运行安全性提升探讨[J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40(10): 161.
HAN Xu. A dissertation discussion on the improvement of operation safety of Shenyang modern tram[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2017, 40(10): 161.
- [7] 赵剑, 谢宗蕻, 安学峰, 等. 蜂窝芯体材料面外等效弹性模量预测与分析[J]. 航空材料学报, 2008, 28(4): 94.
ZHAO Jian, XIE Zonghong, AN Xuefeng, et al. Prediction and analysis of equivalent out-of-plane modulus of honeycomb core materials[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(4): 94.
- [8] 邹宇聰. 泡沫铝填充式薄壁结构的耐撞性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
ZOU Yucong. Study on crashworthiness of aluminum foam filled thin-walled structure[D]. Changsha: Hunan University, 2019.

· 收稿日期:2022-11-09 修回日期:2023-02-20 出版日期:2025-03-10
Received:2022-11-09 Revised:2023-02-20 Published:2025-03-10
· 第一作者:孔琳皓, 硕士研究生, 123655899@qq.com
通信作者:肖守讷, 研究员, snxiao@swjtu.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

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题, 以及新技术、新成果, 邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述, 是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

