

车辆碰撞动力学分析及城市轨道交通车辆被动安全防护技术研究

徐满洲 任 斌

济南轨道交通集团运营有限公司 山东 济南 250014

【摘要】：车辆碰撞动力学分析是保障城市轨道交通车辆运行安全的重要环节。研究车辆在不同碰撞场景下的动力学响应规律，有助于揭示车体结构受力特点与失效模式，从而为被动安全防护技术的优化提供科学依据。本文以城市轨道交通车辆为研究对象，分析典型碰撞工况下车体动力学响应特征，探讨结构吸能、变形机理及关键部件的防护作用。在此基础上，提出被动安全防护技术的设计思路，包括吸能结构优化、车体耦合设计与缓冲装置改进等，并结合实际案例进行效果评价。合理的动力学分析与防护设计能够显著提升车辆碰撞安全性能，降低乘客伤害风险，对提升城市轨道交通系统的整体安全性具有现实意义和应用价值。

【关键词】：车辆碰撞动力学；城市轨道交通；被动安全；吸能结构；缓冲装置

DOI:10.12417/2811-0528.25.23.026

引言

城市轨道交通作为现代化城市的重要交通方式，其安全性直接关系到社会运行效率与公共出行信任度。车辆在运行过程中不可避免地存在突发碰撞风险，而碰撞事故往往会对车辆结构与乘员安全造成严重影响。车辆碰撞动力学研究不仅能够揭示事故中力学传递与结构破坏的规律，还为被动安全防护技术的创新提供了理论支撑。通过对动力学响应规律的深入分析，可以为车辆设计提供可靠的参数依据，并推动吸能结构、缓冲系统等防护措施优化。本文以城市轨道交通车辆为核心研究对象，立足实际运行环境，围绕动力学分析与被动防护的结合展开探讨，旨在为车辆安全性能提升提供系统化的技术思路和实践路径。

1 城市轨道交通车辆碰撞风险与动力学响应特征

城市轨道交通在复杂环境下运行，存在追尾、侧向刮蹭及道口障碍物碰撞等多重风险，极易造成车体损伤与乘员伤害。轨道车辆因车体长、编组密度高，动力学环境远比公路车辆复杂，碰撞能量传递路径更长，作用过程瞬时且高度非线性。分析表明，碰撞瞬间高速冲击载荷集中于车头及关键节点，易引起局部屈曲、焊缝开裂及车厢连接受力集中。若设计不合理，能量将直接传至乘员舱，严重威胁安全。碰撞风险不仅是运行管理的挑战，更是车辆结构设计与动力学研究亟待突破的核心问题。

车辆碰撞的动力学响应主要体现在能量吸收与结构变形规律。纵向碰撞中，车头吸能装置和缓冲结构承担主要能量消耗，其效率决定车体受力与乘员舱减速度，若不足易致严重伤害。侧向碰撞时，车体抗弯刚度及车门区域强度至关重要，薄弱环节一旦塑性变形将显著降低安全性。动力学仿真与全尺寸

试验表明，合理的结构分区与材料性能分布能够实现能量分级消散并优化响应路径。研究还发现，毫秒级内的载荷峰值会引发车体剧烈加速度响应，甚至在编组追尾时产生链式效应，导致能量依次传递和放大，引发系统失稳。建立科学模型并结合仿真、试验与事故数据，是实现可靠碰撞防护设计的关键。

2 车辆被动安全防护技术的关键设计与优化路径

车辆被动安全防护技术的设计核心在于如何通过结构优化与材料应用来有效吸收碰撞能量，避免冲击直接作用于乘员舱。城市轨道交通车辆在设计阶段就需考虑碰撞场景，通过在车头区域布置吸能单元、变形管、缓冲器等装置，使车辆在碰撞时能够形成可控的塑性变形区。这种“可控破坏”机制能够使能量在结构变形中消耗，从而降低车体纵向加速度和乘员舱的冲击强度。吸能结构的优化不仅依赖于几何形状和壁厚设计，还与材料的屈服强度和断裂韧性密切相关。采用高强度钢与铝合金复合结构，可以在保证刚度的同时实现质量控制，为被动防护提供更佳的能量管理能力。

在车体耦合设计中，连接装置与车钩缓冲系统的防护作用尤为突出。城市轨道交通车辆多为编组运行，一旦发生追尾碰撞，车钩区域将承受巨大纵向冲击力。通过在车钩缓冲器内设置可变刚度装置和吸能元件，可有效实现多阶段能量吸收，避免车钩失效引发的车体脱节。车体之间的过渡区设计需要兼顾结构强度与柔性吸能的协调，使碰撞载荷能够分级消散而不是集中传递至某一薄弱环节。车辆门区、底架等乘员易受冲击的位置，需要通过加强筋、抗冲击梁等措施提升局部结构强度。整体设计思路强调防护与舒适性的平衡，既要确保车体具备足够的抗冲击能力，又要控制乘员所感受到的加速度水平。

缓冲装置的改进为车辆被动安全技术的发展提供了新的

路径。传统的缓冲装置多依赖机械弹簧和摩擦元件,其能量吸收效率有限,响应速度难以满足高速冲击需求。近年来,液压缓冲器、磁流变阻尼器等新型缓冲技术逐渐应用于轨道交通车辆,这些装置能够根据冲击强度实现阻尼特性的自适应调节,从而提高能量消散效率。部分研究还提出引入蜂窝铝结构、可折叠管束等轻量化吸能元件,实现一次性耗能与整体结构保护的结合。通过多种缓冲技术的组合优化,可以形成层级化的被动防护体系,使车辆在面对不同工况下的碰撞时均能展现出较高的安全性与可靠性。这种系统化的设计路径已逐渐成为轨道交通车辆被动安全技术的发展趋势。

3 动力学分析支撑下的防护效果验证与应用价值

车辆被动安全防护技术的实际效果需要通过动力学分析与实验验证来加以支撑。有限元仿真方法为复杂工况下的车辆碰撞研究提供了重要手段,通过建立精细化车体模型,可以模拟碰撞过程中的应力分布、结构变形与能量消散路径。数值分析不仅能够预测车体关键部位的受力模式,还能通过参数敏感性研究,评估不同材料、几何参数和连接方式对防护效果的影响。这种基于动力学的分析方法,有助于在设计阶段就提前发现潜在薄弱环节,并通过迭代优化提升整体防护水平。仿真结果与实际碰撞试验的对比校核,也为模型的可信度提供了坚实依据,使研究结论具备了工程实施价值。

在防护效果的验证中,全尺寸车辆碰撞试验是最具说服力的手段。通过在试验场环境下模拟真实工况,研究人员能够获取车辆在碰撞瞬间的速度衰减曲线、加速度响应和结构破坏模式。这些数据不仅为动力学模型提供了标定参数,也为防护装置的实际应用提供了直接评价依据。试验结果表明,优化后的

吸能装置能够有效降低碰撞过程中的峰值加速度,减少乘员舱内的二次冲击效应。车钩缓冲系统的多级吸能机制也展现出良好的防护性能,能够在多车追尾事故中维持车体结构的整体性。实验数据还显示,经过合理设计的防护体系能显著降低乘员伤害指数,体现了被动安全技术的实际应用价值。

从应用角度来看,动力学分析与防护技术的结合不仅提升了城市轨道交通车辆的本质安全性,也为行业标准和法规的制定提供了科学支撑。随着交通需求的不断增长,车辆运行速度与编组规模逐渐扩大,碰撞风险的复杂性进一步提升。通过在新车型设计中应用先进的动力学分析方法,可以实现防护方案的前置化与标准化,避免事后被动改进带来的高成本。已有车辆的改造与升级也能够借助动力学研究成果,实施结构加固与防护装置优化,提升既有系统的安全水平。这种基于动力学支撑的防护策略,不仅提高了轨道交通系统的运行韧性,还增强了公众对城市交通安全的信任度,体现了显著的社会与经济效益。

4 结语

本文围绕城市轨道交通车辆的碰撞动力学分析与被动安全防护技术展开系统研究,阐明了碰撞风险的复杂性、车体动力学响应特征,明确了吸能结构、车钩缓冲与材料优化在防护设计中的关键作用。通过动力学仿真与试验验证相结合,提出了行之有效的防护优化路径,并强调了实际事故数据对研究结论的校核意义。研究结果不仅为车辆设计提供理论支撑,也为轨道交通安全标准的制定与应用提供了科学依据,具有重要的工程应用价值与现实意义。

参考文献:

- [1] 刘志宏,陈伟东.城市轨道交通车辆碰撞动力学建模与安全性能评价[J].交通运输工程学报,2022,22(4):112-121.
- [2] 周立群,孙海龙.基于吸能结构优化的轨道交通车辆被动安全设计研究[J].铁道车辆,2023,61(6):45-52.
- [3] 高明辉,韩雪峰.城市轨道车辆碰撞仿真与防护技术应用分析[J].中国安全科学学报,2021,31(11):128-136.