

城市有轨电车与乘用小汽车碰撞兼容性研究*

王林海¹ 米彩盈^{1,2} 孙树磊³

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 2. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 420001, 株洲;

3. 西华大学汽车与交通学院, 610039, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘要 为了解有轨电车与汽车碰撞兼容性特点, 进而为保护汽车乘员和改善两者的碰撞兼容性问题提供思路和依据, 采用有限元仿真分析方法对有轨电车与汽车常见的 10 种碰撞工况进行仿真分析。研究发现: 有轨电车对汽车具有很大攻击性, 两者存在严重的碰撞兼容性问题, 改善其碰撞兼容性的关键是解决两者的碰撞刚度匹配问题; 当碰撞速度大于 30 km/h 时, 汽车乘员有危险, 有轨电车应在平交道口适当降速运行。

关键词 城市有轨电车; 乘用小汽车; 碰撞兼容性

中图分类号 U482.1; U469.11; U467.1⁺4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.020

Research on Collision Compatibility between Urban Tram and Passenger Car

WANG Linhai, MI Caiying, SUN Shulei

Abstract In order to understand the compatibility characteristics of collision between tram and car, and further provide ideas and basis for the safety of vehicle occupants, improve the collision compatibility, the finite element method is used to simulate 10 common collision conditions of tram and car. The research results show that trams are very aggressive to cars, serious incompatibility exists between them. Therefore, the key of improving the collision compatibility is to solve the collision stiffness matching between tram and car. When the collision speed is greater than 30 km/h, the car occupants are bound to be in danger, so the tram should reduce the running speed properly at the grade crossing.

Key words modern tram; passenger car; collision compatibility

First-author's address School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

随着城市有轨电车的兴起, 各个城市开始兴建有轨电车, 同时城市有轨电车与乘用小汽车(本文中的乘用小汽车包括轿车、运动型多用途车和多用

途车)的碰撞事故发生得也越来越频繁^[1]。由于有轨电车与汽车在质量和结构上差异很大, 汽车在碰撞中处于弱势, 因此, 研究有轨电车与乘用小汽车的碰撞兼容性^[2-3], 对减少汽车及其乘员的损伤具有实际意义。

文献[4-7]对城市轨道交通车辆的兼容性问题研究较多, 研究内容包括轻轨车辆碰撞兼容性问题、碰撞能量管理设计在轻轨车辆碰撞兼容性的应用、轻轨车辆与汽车碰撞兼容性的研究以及轻轨车辆防爬器碰撞兼容性研究。文献[8]采用试验方法对有轨电车与乘用汽车的碰撞兼容性进行研究。而国内还没有专家学者对有轨电车的碰撞兼容性展开研究。

本文采用有限元仿真分析方法, 研究城市有轨电车与乘用小汽车在不同碰撞场景下的碰撞兼容性, 为汽车乘员保护和改善二者碰撞兼容性提供相关依据。

1 城市有轨电车与乘用小汽车碰撞模型介绍

碰撞仿真模型主要包括汽车有限元模型、有轨电车有限元模型和侧面碰撞假人模型。采用 Explorer 五门掀背运动型多功能车来建立乘用小汽车有限元模型, 其总质量为 1.77 t。乘用小汽车有限元模型如图 1 所示。采用某五模块 100% 低地板有轨电车来建立有轨电车有限元模型, 其总质量为



图 1 乘用小汽车整车有限元模型图

* 南京工程学院科研创新基金面上项目(CKJB201311)

62.43 t。有轨电车前端有防爬器,防爬器有两个压溃力为 200 kN 的压溃管。有轨电车和防爬器的有限元模型分别如图 2 和图 3 所示。侧碰假人模型采用 LSTC 公司提供的 US-SID 标准侧碰假人模型,其有限元模型如图 4 所示。

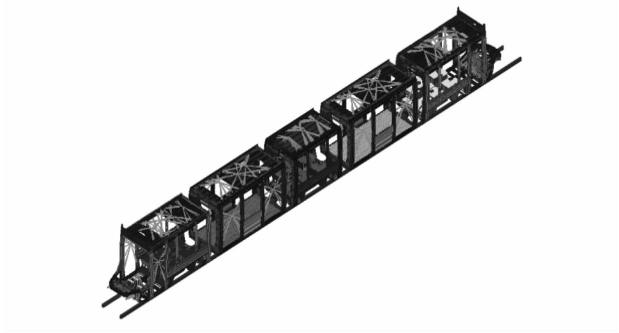


图 2 有轨电车有限元模型

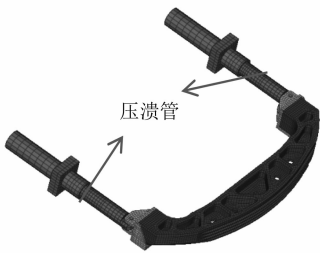


图 3 防爬器有限元模型



图 4 US-SID 标准侧碰假人有限元模型

2 碰撞工况确定

据调研,有轨电车与乘用车碰撞绝大多数发生在平交道口。选取两种具有代表性的碰撞角度,分别为 45°的侧面碰撞和 90°的侧面碰撞。在平交道口两者发生碰撞时,其碰撞速度一般不太高,碰撞速度选择 15 km/h、20 km/h、25 km/h、30 km/h、35 km/h。碰撞工况共有 10 种,如表 1 所示。两种碰撞角度的碰撞示意图分别如图 5 和图 6 所示。

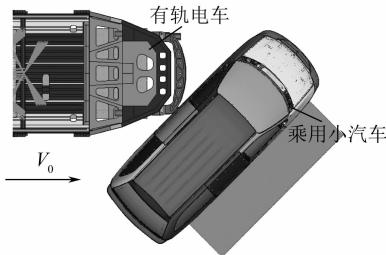
3 碰撞结果分析

3.1 车辆损伤分析

在有轨电车与乘用车的碰撞中汽车处于

表 1 有轨电车与乘用车侧面碰撞工况

工况	碰撞角度/(°)	碰撞速度/(km/h)
1	45	15
2	45	20
3	45	25
4	45	30
5	45	35
6	90	15
7	90	20
8	90	25
9	90	30
10	90	35



注: V_0 代表碰撞速度,下同

图 5 45°侧面碰撞示意图

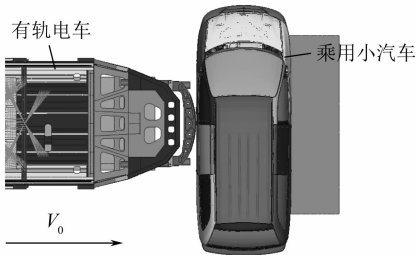


图 6 90°侧面碰撞示意图

弱势,容易受到损伤。对于乘用车而言,能够评价其损伤严重程度的指标主要有乘用车碰撞变形吸能情况、碰撞界面的相互作用力、碰撞变形入侵量和入侵速度。各碰撞工况下乘用车损伤指标如表 2 所示。分别用上述指标来分析不同碰撞工况下乘用车的碰撞损伤结果。

由表 2 分析发现,由于两者的碰撞界面力的最大值都远小于有轨电车防爬器压溃管的压溃力之和 400 kN,因此在整个碰撞过程中有轨电车不产生碰撞变形,所有碰撞内能由乘用车变形吸收,两者在变形和吸能上都存在严重的兼容性问题;在相同碰撞角度下,乘用车的碰撞内能、最大界面力、最大入侵量和入侵速度都随着碰撞速度的增加而增加;在相同碰撞速度下,45°侧面碰撞乘用车的碰撞内能和最大入侵量都略大于 90°侧面碰撞,说明 45°侧面碰撞对乘用车的损伤比 90°侧

面碰撞的略严重;由于有轨电车的质量远大于乘用小汽车,因此各个碰撞工况下乘用小汽车的入侵速度都与碰撞初速度接近,乘用小汽车速度改变量很大。

表 2 各碰撞工况下汽车的损伤指标

工况	碰撞内能/ kJ	最大界面力/ kN	最大入侵量/ mm	入侵速度/ (km/h)
1	18.10	63.30	310.84	13.74
2	25.48	85.60	452.42	18.82
3	40.05	112.76	569.07	23.35
4	61.16	162.77	653.81	28.40
5	82.71	171.39	743.30	34.44
6	14.57	62.79	323.85	14.60
7	25.69	93.99	441.71	18.81
8	41.27	119.06	543.66	23.88
9	60.50	140.83	646.99	28.93
10	79.46	150.42	735.16	33.60

3.2 假人损伤分析

采用碰撞分析中比较通用的头部伤害指标 (HIC)值、胸部伤害指标 (TTI)值以及骨盆加速度峰值来评估假人的损伤情况。美国 FMVSS 规定 HIC 的积分区间取小于 36 ms 的任意区间的头部线性加速度耐受阈值为 1 000^[11]。美国侧面碰撞法规^[12]规定 TTI 的阈值为 85~95 g (g 为重力加速度),对于双门车乘用汽车采用较高阈值 95 g,对应四门车乘用汽车采用较低阈值 85 g;骨盆加速度峰值的阈值为 130 g。

工况 10 中假人在不同时刻的碰撞状态如图 7 所示。由图 7 可以看出,假人没有与车门接触前基本保持静止,当假人侧胸和车门刚接触时,立即获得极大的碰撞加速度并产生变形;紧接着假人头部与车门窗户发生二次碰撞,产生巨大头部冲击;随后在反作用力的作用下假人速度逐渐增加,开始反弹,其相互作用力逐渐减小,直到假人与车门分离,假人与汽车的二次碰撞结束。

提取各个碰撞工况下假人的损伤指标,并对这些数据进行相关分析,研究假人在各个碰撞工况下的损伤规律和特点。各碰撞工况下假人的损伤指标如表 3 所示。由表 3 可知,工况 4、工况 5 和工况 10 的汽车乘员在碰撞事故中有受重伤乃至危及生命的危险。

由表 3 可知,假人头部 HIC 值随着碰撞速度的增加而迅速增加,当碰撞速度大于 30 km/h 时,假人头部 HIC 值超过其许用阈值,此时汽车乘员的头部有受重伤的危险;当碰撞速度大于 25 km/h 时,

相同碰撞速度下 45°侧面碰撞的头部 HIC 值大于 90°侧面碰撞的头部 HIC 值,说明碰撞速度较高时 45°侧面碰撞对头部造成的损伤比 90°侧面碰撞的更加严重,45°侧面碰撞下的汽车乘员更加危险。

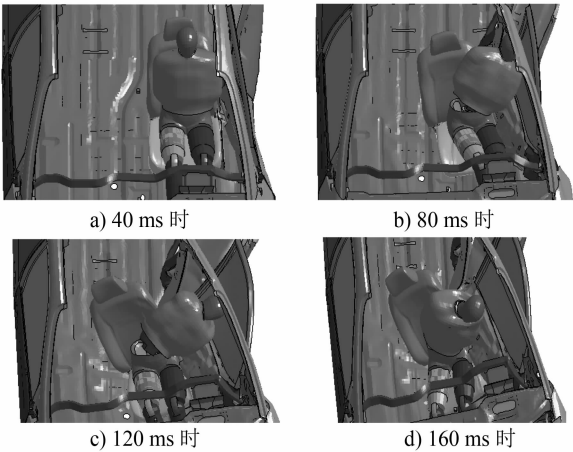


图 7 工况 10 中假人在不同时刻的碰撞状态

表 3 各碰撞工况下假人的损伤指标

序号	头部 HIC 值	胸部 TTI 值/ g	骨盆加速度 峰值/g	结论
1	12.88	12.85	6.41	安全
2	255.60	22.30	19.50	安全
3	809.40	68.35	29.60	安全
4	1 334.00	85.85	26.30	危险
5	1 687.00	92.55	31.50	危险
6	248.30	19.50	7.26	安全
7	412.10	27.10	19.90	安全
8	448.20	40.75	24.30	安全
9	864.40	60.95	29.80	安全
10	1 178.00	66.40	48.10	危险

假人胸部 TTI 值也随着碰撞速度的增加而迅速增加,当碰撞速度大于 30 km/h 时,45°侧面碰撞的假人胸部 TTI 值超过其许用阈值,此时汽车乘员的胸部有受重伤的危险;当碰撞速度大于 25 km/h 时,相同碰撞速度下 45°侧面碰撞的胸部 TTI 值大于 90°侧面碰撞的胸部 TTI 值,说明碰撞速度较高时 45°侧面碰撞对胸部造成的损伤比 90°侧面碰撞的更加严重,45°侧面碰撞下的汽车乘员更加危险。

假人骨盆加速度峰值也随着碰撞速度的增加而迅速增加,但各个碰撞工况的骨盆加速度峰值都小于其许用阈值。

综合 3 种指标来看,在有轨电车与乘车小汽车碰撞事故中,汽车乘员的头部最容易受重伤,其胸部次之,而汽车乘员的骨盆基本不会受重伤。

4 结论

1) 由于碰撞刚度不匹配,有轨电车在碰撞过程中不产生碰撞变形,所有的碰撞内能都由汽车变形吸收,有轨电车与汽车在碰撞内能和碰撞变形上严重不协调,有轨电车对汽车及其乘员有很大的攻击性,两者存在严重的碰撞兼容性问题。因此,解决有轨电车与汽车碰撞兼容性问题的关键是合理地匹配两者的碰撞刚度。

2) 当碰撞速度大于 30 km/h 时,汽车乘员的头部和胸部损伤指标将超过其损伤阈值,其乘员会有受重伤乃至危及生命的危险。因此,建议有轨电车司机在碰撞事故频繁地段(如平交道口),控制其运行速度,以小于 30 km/h 或更小的速度运行。

3) 当碰撞速度较高时(大于 25 km/h),45°侧面碰撞比 90°侧面碰撞更加危险。

参考文献

- [1] 明瑞利. 有轨电车系统安全性分析[J]. 城市交通, 2016(4): 59.
- [2] 张金换, 杜汇良, 马春生. 汽车碰撞安全性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [3] 水野辛治, 韩勇, 陈一唯. 汽车碰撞安全[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [4] KIRKPATRICK S W, SCHROEDER M P, SALAZAR J C V. Developing Guidelines for Crashworthiness of Light Rail Vehicles in Mixed Fleet Operations[C]//ASME 2002 International

Mechanical Engineering Congress and Exposition. New Orleans, Louisiana, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2002: 129-137.

- [5] KIRKPATRICK S W, MACNEILL R A, GOUGH G, et al. Development of Crash Energy Management for Light Rail Vehicles[C]//ASME/IEEE 2007 Joint Rail Conference and Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference. Pueblo, Colorado, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2007: 215-223.
- [6] BOCCHIERI R T, KIRKPATRICK S W, NAVARRO-NORTHROP C, et al. Collision safety improvements for light rail vehicles operating in shared right of way street environments[C]//ASME 2009 Rail Transportation Division fall technical conference. Fort Worth, Texas, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2009: 61-70.
- [7] MACNEILL R A, KIRKPATRICK S W, BOCCHIERI R T, et al. Development of a Prototype Retrofit Bumper for Improved Light Rail Vehicle Safety[C]//2015 Joint Rail Conference. San Jose, California, U.S.; American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [8] KOVANDOVÁ H, VÁLKA R. Experimental study of non-compatible collision of Rail and road vehicle[J]. Promet-Traffic & Transportation, 2014, 26(6): 459.
- [9] T GIBSON, B FILDES, H DEERY, et al. Improved Side Impact Protection: A Review of Injury Patterns, Injury Tolerance and Dummy Measurement Capabilities[R]. Melbourne, Australia: Monash University Accident Research Centre, 2001.
- [10] KAHANE C J. Evaluation of FMVSS 214—Side Impact Protection Dynamic[R]. Washington, D.C., U.S.: NHTSA, 2006.

(收稿日期: 2019-01-02)

(上接第 79 页)

- [3] 张一, 成建国, 吴松荣, 等. 基于超级电容的地铁列车再生制动能量利用分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016(9): 56.
- [4] FLAVIO C, DIEGO I, DAVIDE L, et al. Optimal control of stationary lithium-ion capacitor-based storage device for light electrical transportation network[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(3): 618.
- [5] XIA H, CHEN H, YANG Z P, et al. Optimal energy management, location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm[J]. Energies, 2015, 8: 11618.
- [6] 王子超, 高硕通. 地铁钛酸锂电池车载储能系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(10): 36.
- [7] 毕文骏. 基于飞轮储能的地铁再生制动能量利用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [8] 郑财晖. 轨道交通混合储能系统的研究与实现[J]. 机械与电子, 2016(11): 44.

- [9] 陈怀鑫, 王似玉. 城市轨道交通车载混合储能装置新型控制方案及策略研究[J]. 电气化铁道, 2018(1): 65.
- [10] BARRERO R, TACKOEN X, CA J V. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224: 207.
- [11] XIONG R, DUAN Y, CA J Y, et al. Battery and ultracapacitor in-the-loop approach to validate a real-time power management method for an all-climate electric vehicle[J]. Applied Energy, 2018, 217: 153.
- [12] LIN S, SONG W, LUO L, et al. Simulation research on voltage stabilization control strategy for rail transportation traction grid based on HESS[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016, 377: 65.

(收稿日期: 2018-12-18)