

新型无人驾驶地铁列车耐撞性研究

杜秋男

(上海轨道交通设备发展有限公司, 200245, 上海//高级设计师)

摘要 新型无人驾驶地铁列车为现代轨道交通智能列车的代表,对列车运行安全性,尤其是对列车的碰撞安全性具有较高的要求,是车辆设计的重点和难点。以新型无人驾驶地铁列车为研究载体,以列车耐撞性为研究目标,基于 EN 15227:2008 标准要求,采用数值仿真分析方法对新型无人驾驶地铁列车耐撞性进行研究评估。研究结论为:列车在初始速度 25 km/h 下与一列静止列车发生碰撞时,车钩缓冲器、压溃管及防爬吸能装置可以将碰撞动能全部吸收,能够较好地缓冲撞击;列车爬车指标、乘员生存空间指标及减速度指标均满足标准要求,能够保护乘客安全。

关键词 地铁;列车;无人驾驶;耐撞性

中图分类号 U270.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.02.020

Research on the Crashworthiness of New Unmanned Metro Trains

DU Qiunan

Abstract The new unmanned subway train is the representative of modern rail transit intelligent trains. The safety of train operation, especially the collision safety of trains, has high requirements. It is the focus and difficulty of vehicle design. This article takes the new unmanned subway train as an example. The research carrier takes the train crashworthiness as the research target, adopts EN 15227:2008 standard to research and evaluate the crashworthiness of new unmanned subway trains, and uses numerical simulation analysis to conduct a systematic research and evaluation of the crashworthiness of subway trains. Under the collision condition of the initial speed of 25 km/h, the coupler buffer, crush tube and anti-climbing energy absorption device can absorb the kinetic energy of the collision, the car body does not participate in energy absorption, the train climbing index, the occupant living space index and deceleration indicators meet the requirements of the standard. In the event of a collision, the crashworthiness of the train can better cushion the impact and protect the safety of the occupants.

Key words metro; driverless train control; crashworthiness

Author's address Shanghai Rail Transit Equipment Development Co., Ltd., 200245, Shanghai, China

列车碰撞事故将带来严重的经济损失和恶劣的社会影响,同时威胁着乘客的生命安全。如何避免碰撞事故的发生以及事故发生后如何最大程度地减小损失,是现代轨道车辆设计的重点和难点,即所谓的主动安全和被动安全^[1-2]。就轨道车辆本身而言,因主动安全的可靠性不是 100%,因此被动安全(耐撞性)的设计则显得更加重要。国内近年来相关研究机构、高校及车辆主机厂已经对轨道车辆耐撞性设计进行了系统研究^[3-8],取得了许多宝贵的设计经验。

新型无人驾驶地铁列车是现代城市轨道交通智能列车的代表,司机室和客室融为一体,乘客可到车头区域观光,增加了乘客的活动空间及观赏视野。列车运行安全性对新型无人驾驶地铁列车提出了更高要求,尤其是对列车碰撞安全性(耐撞性)的要求更高。本文基于 EN 15227:2008^[9] 标准,以新型无人驾驶地铁列车为研究载体,采用典型列车碰撞工况,对其碰撞吸能特性进行研究评估。

1 EN 15227:2008 标准的耐撞性要求

EN15227:2008 是目前世界范围内应用比较广泛的轨道车辆耐撞性标准,由欧盟国家共同制定且在欧盟国家内强制执行。EN 15227:2008 标准常与 EN 12663:2010^[10] 标准配合使用。EN 15227:2008 标准规定,在列车碰撞事故中,应最大程度地在以下几方面采取措施,以尽量保护乘客的安全:降低爬车的风险;碰撞能量以可控的方式进行吸收;保证生存空间和乘客区域的结构完整性;限制减速度。

1) 列车爬车要求。总体准则为:运动列车在初始碰撞界面相对于静止列车垂向抬升 40 mm,碰撞结束后需要满足减速度和生存空间的要求。

2) 乘员生存空间要求。列车在定义的碰撞工况下,车体长度方向结构变形任何 5 m 范围内不超

过 1% 或者塑性应变不超过 10%; 车端位置 5 m 长结构变形则适当可以放宽至 2%。

3) 减速度要求。平均减速度的计算时间为车辆碰撞净接触力不为零到再次回到零, 当回零时间较长时, 则取接触力回到最大力的 10% 的时间段。在碰撞场景 1 和碰撞场景 2 下, 平均减速度不应超过 5 g; 在碰撞场景 3 下, 则不应超过 7.5 g。

2 车辆有限元模型及碰撞工况

新型无人驾驶地铁列车为 6 辆编组, 4 动 2 拖; 头车司机室与客室采用完全贯通道设计, 不设置司机室侧门和司机室后部间壁门, 乘客可到车头区域观光。列车碰撞有限元模型主要包括 4 个子系统, 从下到上依次为轨道、转向架、车体、车钩。车辆有限元模型主要采用版壳单元进行模拟, 车钩前端防爬器、门角等厚度较大的结构采用实体单元进行模拟, 车辆设备采用质量单元进行模拟。采用美国 Altair 公司的 Hypermesh 网格划分软件对车辆模型进行离散, 对非承载构件和附属构件进行了简化, 处理后的列车碰撞有限元模型如图 1 所示。

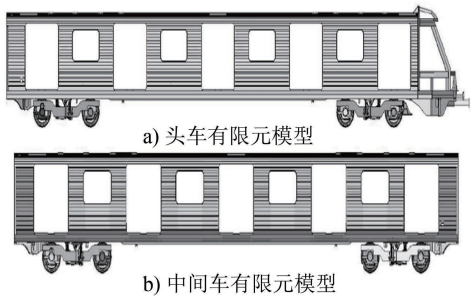


图 1 列车碰撞有限元模型

无人驾驶地铁列车在标准 EN 15227:2008 中定义为 C-II 类型, 碰撞工况为: 一列运行列车碰撞另一列静止列车, 碰撞初始速度为 25 km/h, 且两列列车都不施加制动。

3 列车关键设计参数

影响列车碰撞响应的关键因素主要有列车质量、吸能元件吸能特性等参数。2 辆拖车的质量均为 39.38 kg, 4 辆动车的质量均为 41.58 kg。表 1 为车钩特性参数。

4 列车碰撞仿真分析

本文采用通用显示动力分析程序非线性有限元分析软件 LS-DYNA 对列车的碰撞性进行仿真分析。

表 1 车钩特性参数

名称	最大压缩行程/mm		触发力/N		车钩剪切力/N
	缓冲器	压溃管	缓冲器	压溃管	
头车全自动车钩	55	250	680	1 100	1 400
中间半永久 AB 车钩	2×55	2×200	680	1 200/1 100	
中间半永久 CD 车钩	2×55	2×200	680	1 100/950	
中间半自动车钩	2×55	145	680	900	
防爬器	250	250	2×650	2×650	

注: 头钩剪切行程为 5 mm; 空行程为 50 mm(头钩剪断后至防爬器接触)

4.1 列车碰撞结构变形分析

列车碰撞结束后, 前 2 节车处于碰撞环境最严重的位置, 运行列车和静止列车前两节车碰撞界面变形图如图 2 所示。头车前端防爬器在整个碰撞过程中始终保持相互啮合, 防爬器后端切削吸能管变形吸能; 列车头车与第 2 节中间车碰撞界面车钩压溃管均未压缩完, 车体结构没有永久变形。

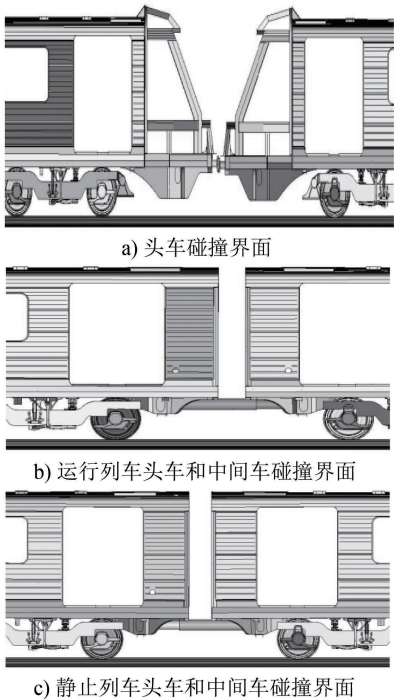


图 2 列车碰撞结束后结构变形图(碰撞时间为 0.82 s)

碰撞能量随时间变化曲线如图 3 所示。动能和内能在约 0.8 s 时趋于一致, 碰撞动能大约一半转化为内能。

4.2 列车爬车计算分析

列车正面碰撞结束后的位置示意图如图 4 所示。头车前端防爬器在碰撞过程中始终保持相互啮合, 列车没有发生爬车现象, 两列列车在轨道上仍然保持直线状态, 没有发生脱轨现象。

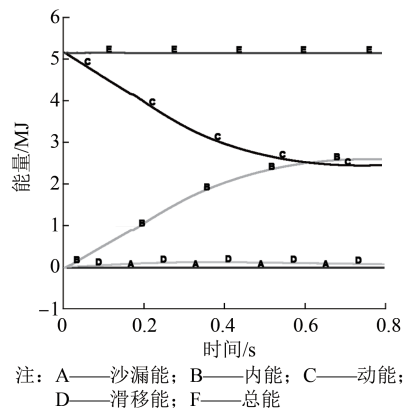
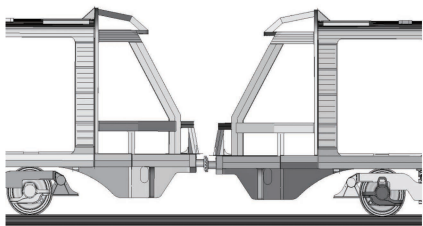
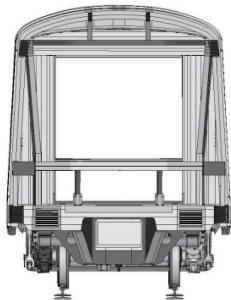


图 3 列车碰撞过程中能量-时间曲线



a) 头车防爬器局部



b) 碰撞后正视图(x轴方向)

图 4 列车正面碰撞结束后的位置示意图

列车正面碰撞过程中,运行列车头车转向架车轮的最大垂向抬升距离为 3.6 mm,第二节车转向架车轮的最大垂向抬升距离为 1.7 mm,小于轮缘名义高度的 75%,轮对和转向架可以保持有效接触;静止列车头车转向架车轮的最大抬升距离为 10.2 mm,第二节车转向架车轮的最大垂向抬升距离为 1.6 mm,均小于轮缘名义高度的 75%,轮对和转向架可以保持有效接触。

4.3 乘员生存空间计算分析

表 2-表 5 分别为碰撞结束后运行列车和静止列车头车、第 2 节中间车乘客生存空间纵向长度变化信息。运行列车、静止列车头车在碰撞过程中乘客生存空间纵向长度最大变化分别为 9.28 mm 和 9.38 mm,小于允许变化的最大长度 210 mm;运行列车和静止列车第 2 节中间车在碰撞过程中乘客生存

空间纵向长度最大变化分别为 7.46 mm 和 7.52 mm,小于允许变化的最大长度 216 mm。

表 2 碰撞结束后运行列车头车乘客生存空间变形情况

区域	长度/mm	最大变化长度/mm	允许变化长度/mm
乘客生存空间	21 000	9.28	210
前端 5 m 区域	5 000	2.34	100
后端 5 m 区域	5 000	1.72	100

表 3 碰撞结束后运动列车第 2 节中间车乘客生存空间变形情况

区域	长度/mm	最大变化长度/mm	允许变化长度/mm
乘客生存空间	21 600	7.46	216
前端 5 m 区域	5 000	1.51	100
后端 5 m 区域	5 000	1.45	100

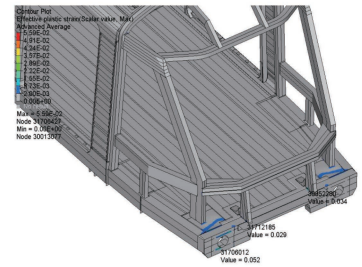
表 4 碰撞结束后静止列车头车乘客生存空间变形

区域	长度/mm	最大变化长度/mm	允许变化长度/mm
乘客生存空间	21 000	9.39	210
前端 5 m 区域	5 000	2.53	100
后端 5 m 区域	5 000	1.75	100

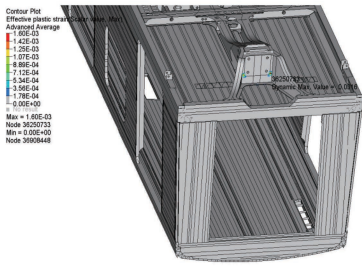
表 5 碰撞结束后静止列车第 2 节中间车乘客生存空间变形情况

区域	长度/mm	最大变化长度/mm	允许变化长度/mm
乘客生存空间	21 600	7.52	216
前端 5 m 区域	5 000	1.55	100
后端 5 m 区域	5 000	1.46	100

列车碰撞能量由车钩及防爬器等吸能装置吸收,车体结构未参与吸能,头车、中间车(选取运行列车、静止列车应变较大的)结构塑性应变分布如图 5 所示。车体结构产生最大塑性应变的位置主要



a) 头车应变分布图



b) 中间车应变分布图

图 5 列车碰撞结束后结构塑性应变分布图

集中在头车防爬器安装座、司机室骨架根部、中间车车钩座等区域,车体塑性应变均小于10%,司机室空间没有发生塑性变形。

4.4 减速度计算分析

图6为运行列车和静止列车碰撞过程中头车、第2节中间车的减速度随时间变化曲线。由图6可知,在整个碰撞过程中列车的平均减速度都小于5g。

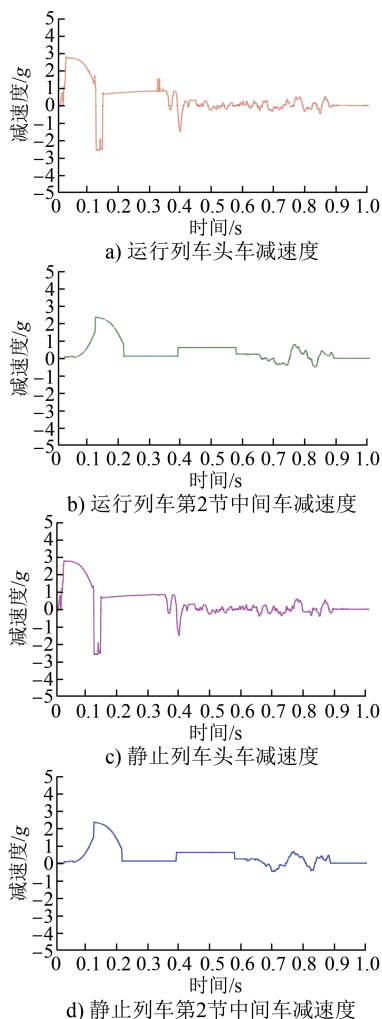


图6 列车碰撞过程中的减速度-时间变化曲线

5 结论

基于EN 15227:2008标准,对新型无人驾驶地

铁列车耐撞性进行计算分析研究,主要有如下结论:

1) 新型无人驾驶列车采用新型等断面铝合金车体结构,头车司机室与客室采用完全贯通道设计,不设置司机室侧门和司机室间壁门,乘客可到车头区域观光,增加了乘客的活动空间,乘客的观赏视野也进一步增大。

2) 新型无人驾驶地铁列车在25 km/h初始速度下与静止列车发生碰撞,碰撞能量主要由车钩、头车防爬器吸收,车体结构不参与吸能,列车爬车指标、乘客生存空间指标、减速度指标均满足标准要求。

3) 新型无人驾驶地铁列车耐撞性能良好,在列车发生碰撞事故时,能够有效缓冲碰撞冲击,保护乘员的生命安全。

参考文献

- [1] 刘艳文.轨道客车碰撞被动安全性研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [2] 张卫华,刘刚.动车组总体与转向架[M].北京:中国铁道出版社,2011:6.
- [3] 雷成,肖守讷,罗世辉,等.轨道车辆耐碰撞性研究进展[J].铁道学报,2013,35(1):31.
- [4] 刘艳文,修瑞仙,李本怀,等.基于动态J-C本构的轨道交通车辆新型切削式吸能装置耐撞性研究[J].城市轨道交通研究,2016,19(6):28.
- [5] 李本怀,陈秉智.轨道车辆材料力学性能测试[J].大连交通大学学报,2015,36(1):29.
- [6] 李本怀.轨道客车能量分配快速分析方法及应用[J].大连交通大学学报,2017,38(1):26.
- [7] 刘艳文,肖守讷,张志新,等.轨道车辆新型组合结构吸能装置耐撞性分析[J].计算机辅助工程,2012,21(5):6.
- [8] 修瑞仙,刘艳文,高允峰,等.轨道卧铺客车碰撞吸能特性研究[J].长春工业大学学报,2014,(6):723.
- [9] GB-BSI. Railway Applications—Crashworthiness Requirements for Railway Vehicle Bodies; BS EN 15227:2008+A1:2010[S]. London:GB-BSI,2008.
- [10] GB-BSI. Railway Applications—Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies; EN12663-1:2010[S]. London:GB-BSI,2010.

(收稿日期:2019-12-18)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umat1998.com