

自由编组地铁车辆钩缓装置配置特性研究

侯本虎¹ 张敬科²

(1. 烟台工程职业技术学院, 264006, 烟台; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 讲师)

摘要 为研究地铁列车在不同编组条件下各界面的能量吸收特性,以某地铁公司的车辆为平台,建立4辆、6辆、8辆3种不同列车编组的有限元碰撞模型以及钩缓装置的备选库,通过LS-DYNA碰撞仿真分析软件,结合不同碰撞速度和不同编组数量,验证列车各界面的吸能情况,分析不同编组列车在碰撞过程中的能量耗散特性。在采用不同的编组模式时,选用不同的钩缓装置搭配来完成车辆的吸能配置,既可提高自由切换编组形式列车钩缓系统的搭配效率,又可减少备品种类以节约开支。

关键词 地铁列车; 自由编组; 钩缓配置

中图分类号 U260.34

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.020

Research on Configuration Characteristics of Coupler Device of Free Formation Metro Vehicle

HOU Benhu, ZHANG Jingke

Abstract In order to study the energy absorption characteristics of metro train under different formation conditions, taking vehicle of certain metro company as platform, a collision finite element model of three different formation (4, 6, 8) and a database of coupler devices are established. Through LS-DYNA collision simulation analysis software, different collision speeds and different formation numbers are used to verify the energy absorption of each interface of the train. Energy dissipation characteristics of trains of different formation during the collision process are analyzed. When different formation formats are adopted, different coupler devices are selected to complete the energy absorption configuration of vehicles, which not only improves matching efficiency of coupler devices of train with free formation format switching, but also reduces preparation types to save expenses.

Key words metro train; free formation; coupler device

First-author's address Yantai Engineering & Technology College, 264006, Yantai, China

既可实现车辆之间的互联互通,又可满足车辆之间的低速碰撞要求,保护司乘人员安全。为实现不同编组列车之间高效率的自由切换,需要对不同编组列车各界面的吸能特性进行研究。

文献[1]分析了考虑车体加工制造产生的焊接残余应力和车体材料的应变率效应等因素,对高速列车结构在碰撞中的结构变形、能量变化的影响,材料特性对提高耐撞性分析效率和安全性预测精度具有重要意义。文献[2]针对地铁车辆的吸能结构特征,提出地铁车辆的耐冲击设计理念,并进行了结构优化。文献[3]从被动安全防护的角度出发,探讨了车辆在碰撞过程中能量的耗散和吸能规律。文献[4-5]提出了列车在碰撞过程中的钩缓装置模拟方法,并根据车辆在碰撞过程中各界面的吸能特点,总结了钩缓装置在各界面的吸能参数配置情况。文献[6]对铝合金车辆进行了大变形的碰撞仿真分析,获得了在碰撞过程中车体结构的变形模式,可为车辆编组形式在整车耐撞性设计上的应用提供一定的参考。文献[7]研究了车辆之间的连挂关系,并利用弹簧和阻尼结合的方式来模拟车辆之间的非线性关系。

综上所述,列车车辆的能量吸收特性研究主要集中于固定编组和前端的能量吸收情况,基本没有涉及到不同编组列车在各界面的能量吸收情况。对此,本文建立了4辆、6辆和8辆编组的列车碰撞有限元模型,对比不同编组形式对各界面的吸能影响,并分析列车在不同速度条件下的吸能特性。

1 碰撞模型的建立

1.1 有限元模型的建立

列车碰撞响应是一个非常复杂的非线性大变形问题,涉及到结构非线性、接触非线性、弹塑性非线性等一系列复杂问题。根据地铁车辆的碰撞特点^[8],以及考虑尽量避免破坏车体结构,设置了三级能量吸收理念。当车辆发生碰撞接触时,首先触

钩缓装置作为车辆之间连挂运行的重要部件,

发车钩缓冲器并缓解一部分能量;紧接着车钩压溃管膨胀压溃吸收更多能量,头钩钩缓装置吸能完成后,剪切螺栓触发过载保护作用;最后两端防爬吸能装置啮合,并相互挤压吸收能量。

为提高计算效率,车体在碰撞过程中的微小屈曲变形可忽略不计,并把车体和转向架等基本没有遭到破坏的结构视为刚体,建立有限元模型,钩缓

系统的特性加载利用 LS-DYNA 软件中 119 号材料进行模拟。

不同编组的列车碰撞有限元模型如图 1 所示。其中: MV1-MV8 为移动车辆; SV1-SV8 为静止车辆; S1-S15 为车辆之间的界面,根据列车编组的不同,图 1 a)~1 c) 的碰撞界面分别为 S4、S6、S8; v 为列车碰撞速度。

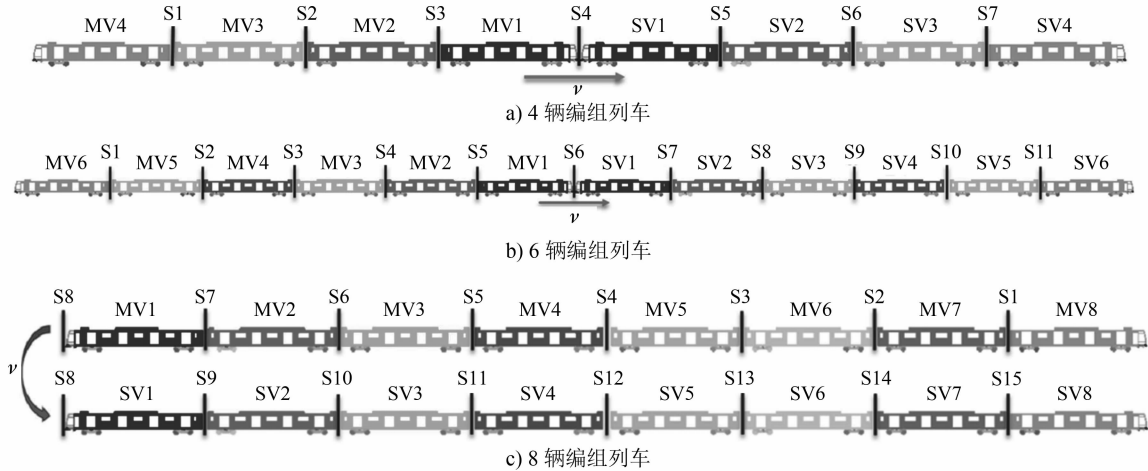


图 1 列车碰撞模型示意图

Fig. 1 Diagram of train collision model

1.2 碰撞工况的建立

为研究不同编组及不同速度条件下,列车各界面的能量吸收情况,建立 3 种速度和 3 种编组共 9 种工况,列出了列车车辆在不同速度等级时所涉及的能量吸收部件,如表 1 所示。

表 1 碰撞工况					
Tab. 1 Collision condition					
工况	编组	速度/(km/h)	总质量/t	总能/kJ	涉及吸能部件
1	4	5	136	131.17	缓冲器
2	4	15	136	1 180.56	缓冲器+压溃管
3	4	25	136	3 279.32	缓冲器+压溃管+防爬吸能装置
4	6	5	206	198.69	缓冲器
5	6	15	206	1 788.19	缓冲器+压溃管
6	6	25	206	4 967.21	缓冲器+压溃管+防爬吸能装置
7	8	5	276	266.20	缓冲器
8	8	15	276	2 395.83	缓冲器+压溃管
9	8	25	276	6 655.09	缓冲器+压溃管+防爬吸能装置

2 钩缓装置备选库

2.1 钩缓装置的输入

不同的列车编组数量,列车总能量也会有所变化,因此对于不同的编组列车需要采用不同的钩缓

装置搭配。为满足 4 辆、6 辆、8 辆 3 种不同的列车编组模式,钩缓装置采用 EFG3 橡胶缓冲器,建立 6 种钩缓装置配置参数(全自动车钩、半自动车钩、半永久牵引杆 A、半永久牵引杆 B、半永久牵引杆 C 和半永久牵引杆 D),曲线特性如图 2 和图 3 所示。

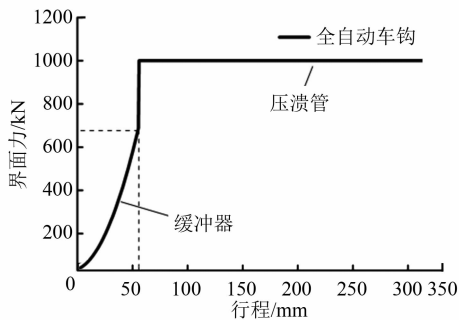


图 2 头钩车钩特性曲线

Fig. 2 Characteristics curve of head coupler

2.2 钩缓装置备选库的建立

由图 3 所示的列车各界面能量输入曲线可知,中间界面的钩缓特性从一位端至二位端(一位端和二位端分别是指列车运行的前端和后端)依次降低,各界面钩缓配置以中间半自动车钩为中心,列车编组两端界面对称设置。4 辆、6 辆、8 辆编组列车示意图如图 4 所示。钩缓系统一共分为 1 个全自

动车钩,1 个半自动车钩以及 4 个半永久牵引杆。钩缓装置备选库如表 2 所示。

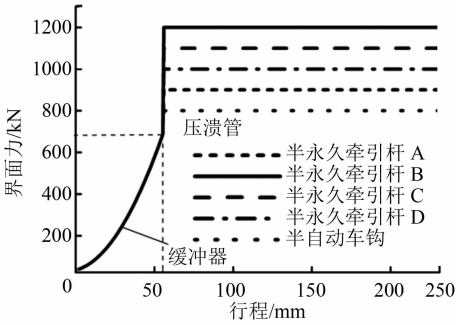
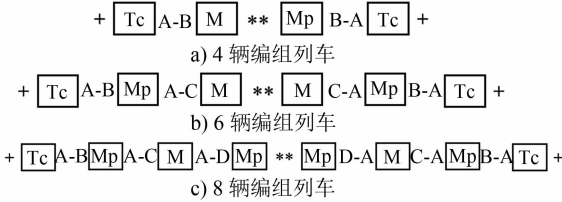


图 3 中间车钩特性曲线

Fig. 3 Characteristics curve of intermediate coupler



注: Tc——有司机室的拖车; Mp——带受电弓的动车;
M——动车; + ——全自动车钩; A-B, B-A——
半永久牵引杆 A 和 B; A-C, C-A——半永久牵引杆
A 和 C; A-D, D-A——半永久牵引杆 A 和 D;
** ——半自动车钩。

图 4 列车编组示意图

Fig. 4 Diagram of train formation

表 2 钩缓系统备选库

Tab. 2 Back-up database for coupler system selection

编组类型	全自动车钩	半永久 A	半永久 B	半永久 C	半永久 D	半自动车钩
4 辆	√	√	√			√
6 辆	√	√	√	√		√
8 辆	√	√	√	√	√	√

3 仿真分析

3.1 能量吸收的理论依据

车辆系统碰撞伴随着结构大变形的非线性吸能过程,列车主动车辆由初始速度逐步减速,而各被动车辆则由静止逐步加速,所有车辆达到相同的速度后,即认为碰撞结束。对于列车整体的吸能特性,可建立动量守恒定律和能量守恒定律^[9]。

由动量守恒定律可得:

$$m_{MV_all} v = m_{MV_all} v_{end} + m_{SV_all} v_{end} \quad (1)$$

由能量守恒定律可得:

$$\frac{1}{2} m_{MV_all} v^2 = \frac{1}{2} m_{MV_all} v_{end}^2 + \frac{1}{2} m_{SV_all} v_{end}^2 + E \quad (2)$$

若 $m_{MV_all} = m_{SV_all}$,把式(1)代入式(2)可得:

$$E = \frac{1}{4} m_{MV_all} v^2 \quad (3)$$

式中:

- m_{MV_all} ——所有运动车的总质量;
- m_{SV_all} ——所有静止车的总质量;
- v_{end} ——碰撞结束时刻的车辆速度;
- E ——碰撞过程中能量耗散的总能量。

碰撞过程中,如果将每节车辆看成一个质点,由两端车钩连挂运行,根据第二类拉格朗日定律建立列车动力学方程:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_{it}}{\partial (dx_{it}/dt)} - \frac{\partial T_{it}}{\partial x_{it}} = Q_{it} \quad (4)$$

$$Q_{it} = F_{it,f} - F_{it,r} - F_{it,re} - F_{it,b} \quad (5)$$

$$T_{it} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i v_{it}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{dx_{it}}{dt} \right)^2 \quad (6)$$

式中:

- T_{it} —— t 时刻第 i 辆车的动能;
- Q_{it} —— t 时刻第 i 辆车的广义力;
- $F_{it,f}$ —— t 时刻第 i 辆车受到的一位端车钩力;
- $F_{it,r}$ —— t 时刻第 i 辆车受到的二位端车钩力;
- $F_{it,re}$ —— t 时刻第 i 辆车受到阻力;
- $F_{it,b}$ —— t 时刻第 i 辆车受到的一位端的制动力;

- m_i ——第 i 辆车的质量;
- v_{it} —— t 时刻第 i 辆车的速度;
- x_{it} —— t 时刻第 i 辆车的位移;
- n ——列车编组数量(本文取为 4 辆、6 辆和 8 辆)。

3.2 不同编组的能量吸收结果

在不考虑破坏车体结构的情况下,把列车车辆在碰撞时的能量吸收分为三级,包括车钩缓冲器、车钩压溃管以及防爬吸能装置。当碰撞开始时,头钩钩缓装置首先发生接触,接着各界面的钩缓装置依次触发,随后各界面同时吸能。

根据列车编组的不同,从备选库里选出相应的钩缓装置搭配,计算出列车各界面的能量分配关系,对比相同速度条件下,不同编组形式的吸能结果,如图 5~7 所示。其中 S 与图 1 中各界面相对应;S3-S5 表示 S3 和 S5 界面是同一条曲线;其他同理。碰撞发生后,从列车一位端到二位端钩缓装置依次触发,吸能量依次减少,碰撞界面的能量吸收是最大的,主被动车辆各界面能量吸收对称存在。

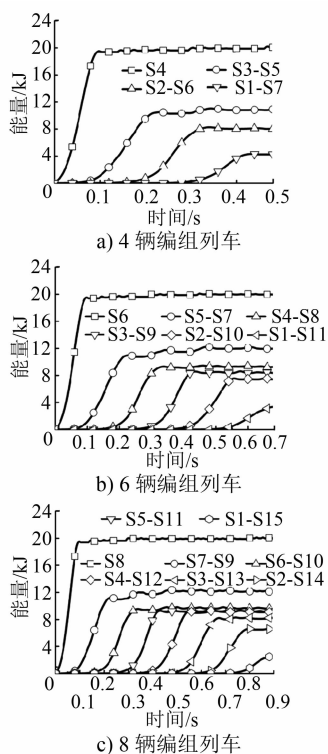


图5 5 km/h速度条件下的各界面能量-时间吸能特性曲线

Fig. 5 Energy-time energy absorption characteristics curve of each interface at the speed of 5 km/h

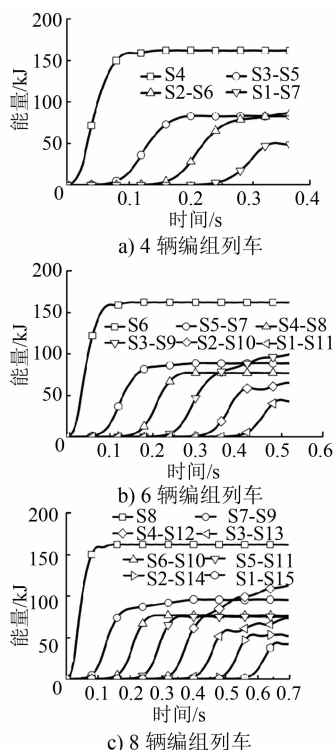


图6 15 km/h速度条件下的各界面能量-时间吸能特性曲线

Fig. 6 Energy-time energy absorption characteristics curve of each interface at the speed of 15 km/h

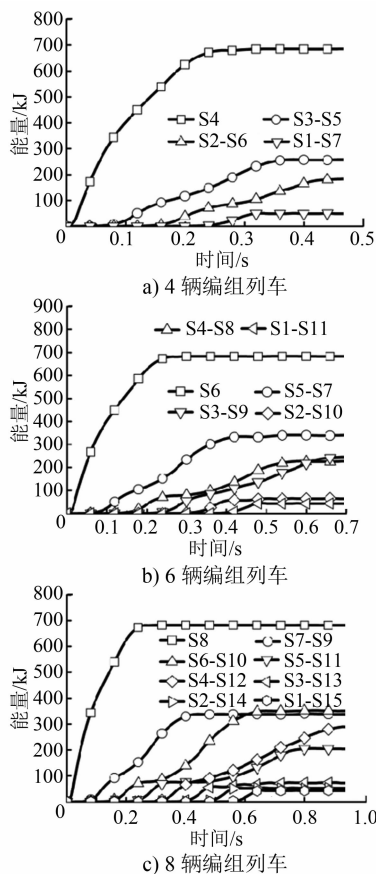


图7 25 km/h速度条件下的各界面能量-时间吸能特性曲线

Fig. 7 Energy-time energy absorption characteristics curve of each interface at the speed of 25 km/h

碰撞界面能量利用率表示碰撞界面吸能量占界面能量储备比例,碰撞界面能量吸收率表示碰撞界面吸能量占总动能的比例。由图5~7中的列车碰撞吸能对比情况可知,在相同碰撞速度下,不同编组的列车在碰撞界面能量吸收几乎相同,并且吸能量存在一个峰值。

当列车以5 km/h速度进行碰撞时,不同编组列车碰撞界面能量吸收峰值约为20 kJ,约占碰撞界面能量储备的65%;当列车以15 km/h速度进行碰撞时,不同编组列车碰撞界面能量吸收峰值约为162.1 kJ,约占碰撞界面能量储备的29.4%;当列车以25 km/h速度进行碰撞时,不同编组列车碰撞界面能量吸收峰值约为685.3 kJ,约占碰撞界面能量储备的59.3%。具体碰撞界面的能量以及能量吸收占比如表3~5所示。

4 结语

1) 为防止破坏车辆结构,本文将列车车辆的能量吸收分为三级,包括车钩缓冲器、车钩压溃管和

表 3 5 km/h 速度时的碰撞界面吸能占比

Tab.3 Proportion of collision interface energy absorption at the speed of 5 km/h

编组类型	碰撞界面吸能量/kJ	碰撞界面能量储备/kJ	碰撞界面能量利用率/%	碰撞界面能量吸收率/%	碰撞界面吸能占总吸能比例/%
4 辆	20.21	31	65.19	15.11	30.04
6 辆	20.11	31	29.43	9.90	19.80
8 辆	20.02	31	59.54	7.37	14.63

表 4 15 km/h 速度时的碰撞界面吸能占比

Tab.4 Proportion of collision interface energy absorption at the speed of 15 km/h

编组类型	碰撞界面吸能量/kJ	碰撞界面能量储备/kJ	碰撞界面能量利用率/%	碰撞界面能量吸收率/%	碰撞界面吸能占总吸能比例/%
4 辆	162.17	551	64.87	26.69	13.50
6 辆	162.18	551	29.43	17.63	8.95
8 辆	162.08	551	59.37	13.17	6.66

表 5 25 km/h 速度时的碰撞界面吸能占比

Tab.5 Proportion of collision interface energy absorption at the speed of 25 km/h

编组类型	碰撞界面吸能量/kJ	碰撞界面能量储备/kJ	碰撞界面能量利用率/%	碰撞界面能量吸收率/%	碰撞界面吸能占总吸能比例/%
4 辆	685.27	1 151	64.58	40.96	20.51
6 辆	683.35	1 151	29.42	26.99	13.55
8 辆	682.21	1 151	59.27	20.18	10.09

防爬吸能装置,可以分别适用于不同的车辆碰撞速度条件。

2) 根据列车编组的灵活变换要求,建立了包括全自动车钩、半自动车钩以及半永久牵引杆的钩缓装置备选库,可以满足不同列车编组条件,同时可以承受速度为 5 km/h、15 km/h、25 km/h 等级的碰撞要求。

3) 列车车辆碰撞过程中,主被动车辆各界面之间的吸能量是对称的,碰撞界面的吸能量最高,但当碰撞速度确定后,无论列车编组如何变化,碰撞界面的能量吸收值可以基本锁定,且有一定的峰值。本研究可为列车编组的能量配置提供参考。

参考文献

[1] 陈潇雨. 基于焊接残余应力场的高速列车车体耐撞性仿真分析[D]. 北京:北京交通大学,2020.
CHEN Xiaoyu. Crashworthiness simulation analysis of high-speed train bodies based on welding residual stress model[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2020.

[2] 冯帅. 基于 EN 15227 标准的某 B 型地铁列车耐撞性研究[D]. 大连:大连交通大学,2020.
FENG Shuai. Research on crashworthiness of a B-type subway train based on EN 15227 standard[D]. Dalian:Dalian Jiaotong University,2020.

[3] 王宝金,闫凯波,陆思思,等. 基于多体动力学的地铁列车吸能设计[J]. 铁道科学与工程学报,2018(4):1016.
WANG Baojin,YAN Kaibo,LU Sisi,et al. Energy absorption design of metro train based on multibody dynamics[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2018(4):1016.

[4] 肖守讷,张志新,阳光武,等. 列车碰撞仿真中钩缓装置模拟方法[J]. 西南交通大学学报,2014(5):831.
XIAO Shoune,ZHANG Zhixin,YANG Guangwu,et al. Simulation method for couplers and buffers in train collision calculations[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2014(5):831.

[5] 杨宝柱,肖守讷,杨超. 能量吸收方案对列车碰撞响应的影响[J]. 城市轨道交通研究,2018(3):48.
YANG Baozhu,XIAO Shoune,YANG Chao. Effect of energy absorbing schemes on train crash response[J]. Urban Mass Transit,2018(3):48.

[6] 刘鹏飞,王晋乐,朱涛. 临界碰撞速度下的编组列车耐撞性研究[J]. 铁道机车车辆,2021(3):28.
LIU Pengfei,WANG Jinle,ZHU Tao. Research on crashworthiness of marshalling trains under critical collision speed[J]. Railway Locomotive & Car,2021(3):28.

[7] VARANIS M,MERELES A. Mathematical model of a vehicle crash;a case study[J]. International Journal of Mechanical Engineering Education,2017,45(1):89.

[8] 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(1):31.
LEI Cheng,XIAO Shoune,LUO Shihui,et al. State-of-the-art research development of rail vehicles crashworthiness[J]. Journal of the China Railway Society,2013(1):31.

[9] LU G. Energy absorption requirement for crashworthy vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F:Journal of Rail and Rapid Transit,2002,216:31.

(收稿日期:2020-01-20)