

单车级初始运行状态对地铁列车碰撞响应影响的仿真分析*

吕锐娟¹ 雷 成² 朱 涛^{1**} 肖守讷¹ 阳光武¹ 杨 冰¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;

2. 郑州铁路职业技术学院机车车辆学院, 451460, 郑州//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 以某市域地铁列车为研究对象,研究单车级初始运行状态对列车碰撞响应的影响。建立了动力学仿真模型,提取列车运行过程中4种典型的几何姿态,分析了不同单车级初始状态对列车碰撞响应的影响规律及发生机理;提出了一种抑制列车碰撞过程中爬车和侧翻的车间防爬防偏吸能装置。研究表明:单车级状态差异通过钩缓装置的正反馈机制和传递机制的作用影响列车的碰撞响应,但对列车纵向响应基本无影响,对横向响应的影响大于垂向响应;单车垂向初始状态仅影响邻近车辆的响应,而横向初始状态对列车整体响应的影响都比较显著;评价列车脱轨风险时应同时考虑车体的姿态响应和轮对抬升量;通过设置车间防爬防偏吸能装置,可以有效改善列车碰撞稳定性。

关键词 地铁列车; 初始运行状态; 碰撞响应

中图分类号 U270.1⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.025

Simulation Analysis of Single-vehicle-level Initial Operating States on Metro Train Collision Responses

LYU Ruijuan, LEI Cheng, ZHU Tao, XIAO Shoune, YANG Guangwu, YANG Bing

Abstract Taking certain suburban metro train as research object, the influence of single-vehicle-level initial operating states on train collision responses is studied. A dynamics simulation model is established, and four typical geometric poses during train operation are analyzed and extracted. The influencing pattern and mechanism of different single-vehicle-level initial states on the train collision responses are analyzed. An anti-climbing and anti-biasing energy-absorbing device between vehicles is proposed to restrain climbing and rolling upon train collision. Study shows that the collision responses in different initial states are dominated by the positive feedback mechanism

and transmission mechanism of the coupler-buffer device, which has practically no effect on the longitudinal responses and the impact on the lateral responses is greater than on the vertical ones. Only adjacent vehicles are affected by the vertical initial states, while the entire vehicle responses are significantly affected by the lateral initial states. The vehicle body geometric poses and lifting amount of wheelsets should be both considered to evaluate the train derailment risk. The collision stability can be effectively improved by the anti-climbing and anti-biasing energy-absorbing device between vehicles.

Key words metro train; initial operating state; collision responses

First-author's address State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

地铁列车发生碰撞前的瞬时动态响应是诱导列车碰撞失稳的重要因素之一。开展车辆初始运行状态对列车碰撞响应的影响是非常必要的。

文献[1-2]研究表明,正面碰撞会导致列车爬车、拱起和褶曲等行为,并造成一系列的连锁反应。国内外学者对列车的碰撞行为响应进行了大量研究。文献[3]提出刚-柔混合车辆动力学模型,仿真计算了单节车以30 km/h和50 km/h的速度撞击刚性墙;文献[4-5]为碰撞动力学模型,分别在ADAMS和DYNA3D软件中仿真再现了曲线碰撞时出现的褶曲和脱轨行为;文献[6]在ABAQUS软件中建立的货车有限元模型能够准确评价车辆结构参数变化对碰撞响应的影响;文献[7]应用SIMPACK软件分析得出,碰撞质量、浮沉运动频率以及车辆重心高度等会对列车碰撞时的爬车行为造成一定

* 四川省科技计划资助项目(2019YJ0216);牵引动力国家重点实验室自主课题(2017TPL_Z1,2019TPL_T13)

** 通信作者

的影响;文献[8]基于6节编组列车二维碰撞仿真程序,研究了列车碰撞竖向响应;文献[9]建立列车三维动力学模型,研究了车辆参数对列车爬车指标的影响;文献[10]运用非线性有限元和多刚体动力学结合的方法,提出车辆在纵向碰撞力的作用下始终伴随着点头运动,并对爬车起决定性作用。

目前,对列车碰撞响应的研究多为基于事故复原和标准工况下的爬车、脱轨和姿态行为等分析,关于列车运行中初始状态对碰撞响应影响的研究还较少。因此,本文开展单车级初始状态对列车碰撞响应影响的研究,并提出一种改进列车稳定性的方案,对研究列车碰撞响应的影响规律和进一步提高列车耐撞性有一定的理论意义和实用价值。

1 列车受力的正反馈机制与量纲一化

1.1 列车受力的正反馈机制

列车运行中的点头、摇头运动示意图如图1所示。文献[11]中提到之字形车钩在列车纵向力和横向力的相互作用下处于正反馈状态。以A2车运动为例,由图1分析可得:在车钩力 $F_{D_{A1}}$ 和 $F_{D_{A2}}$ 的共同作用,促进车辆点头、摇头运动;随着钩缓角度的增大, $F_{D_{A1}}$ 和 $F_{D_{A2}}$ 产生的合力矩不断增大,进一步促进点头、摇头运动,形成正向反馈;并且在各个界面车钩的作用下,形成传递机制。由于在列车运行过程中,始终存在纵向力、横向激扰或横向不对称,因此列车在运行中始终伴随着点头、摇头运动,车间钩缓装置是列车点头、摇头运动正反馈和传递机制的主导因素。

1.2 量纲一化处理

列车碰撞过程中的分析目标多、随机性大,因此对横向响应和整体响应分析采用量纲一化处理,使不同单位量纲的响应具有可比性。量纲一化变换公式为:

$$X_n = \begin{cases} \frac{|x_n|}{|x_0|} - 1 & |x_n| \geq |x_0|, x_n \cdot x_0 \neq 0 \\ 1 - \frac{|x_0|}{|x_n|} & |x_n| < |x_0|, x_n \cdot x_0 \neq 0 \end{cases}$$

$$X_n \in (-\infty, +\infty) \quad (1)$$

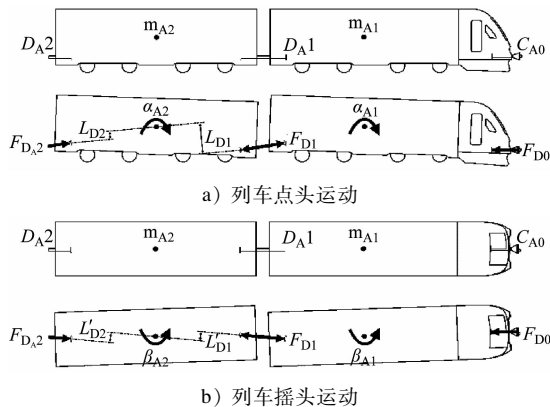
式中:

X_n ——工况 n 响应的无量纲值;

x_0 ——基准工况响应的原始值;

x_n ——工况 n 响应的原始值。

为进一步分析相关响应的概率分布情况,利用



注: D_{A1} 、 D_{A2} ——分别为A1车和A2车两端钩缓装置; m_{A1} 、 m_{A2} ——分别为A1车和A2车的质心; C_{A0} ——头车车钩; α_{A1} 、 α_{A2} ——分别为A1车和A2车的点头角; L_{D1} 、 L_{D2} ——分别为 D_{A1} 和 D_{A2} 所受作用力至车辆质心的力臂; β_{A1} 、 β_{A2} ——分别为A1车和A2车的摇头角。

图1 列车点头、摇头运动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of train nodding and shaking movement

式(2)对式(1)进行量纲一化处理后,得式(3)。

$$y_n = \frac{2}{\pi} \arctan X_n \quad y_n \in (-1, +1) \quad (2)$$

$$y_n = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \arctan \left(\frac{|x_n|}{|x_0|} - 1 \right) & |x_n| \geq |x_0|, x_n x_0 \neq 0 \\ \frac{2}{\pi} \arctan \left(1 - \frac{|x_0|}{|x_n|} \right) & |x_n| < |x_0|, x_n x_0 \neq 0 \end{cases}$$

$$y_n \in (-1, +1) \quad (3)$$

y_n 值越接近-1则响应越微弱,越接近+1则响应越剧烈,越接近0则响应与基准工况响应越接近。

2 列车碰撞响应分析模型

列车编组形式为: + A1-A2-A3-A4 +。其中:A1、A4代表带司机室的拖车,质量各为44.892 t; A2、A3代表不带司机室的动车,质量各为46.17 t; +代表全自动钩缓装置;-代表半永久牵引杆。列车碰撞响应分析有限元模型见图2。主动列车以36 km/h的速度撞击另一列相同类型的、静止、无制动的被动列车,且主、被动列车存在40 mm的高度差。

车体采用壳单元进行离散,且对司机室和列车端部进行细化。为提高计算效率,其他部位采用刚化处理,如图2c)所示。转向架车轮踏面与轨面接触的局部以实体单元模拟,如图2d)所示。

钩缓装置模型中的压溃管和缓冲器采用具有非线性特性的梁单元,二者之间的运动关系和转动

角度分别通过铰和离散梁实现。钩缓装置有限元模型如图 3 所示,具体参数如表 1 所示。

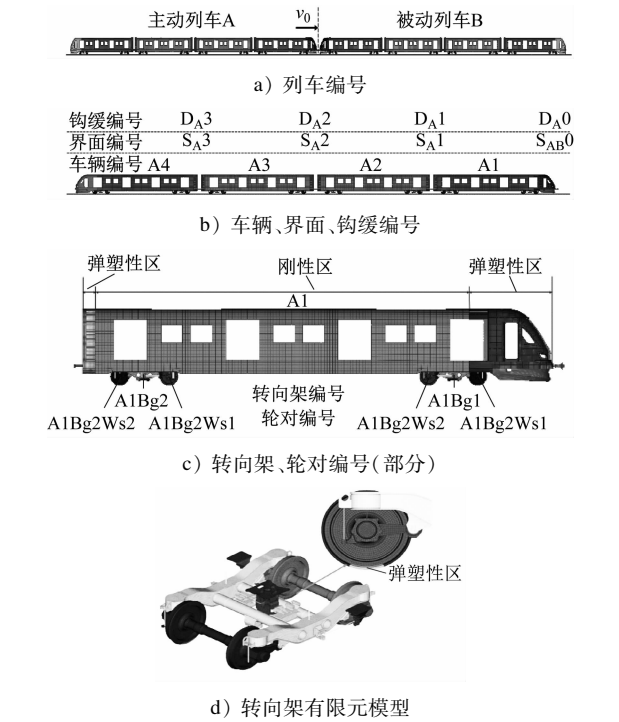


图 2 列车碰撞响应分析有限元模型

Fig. 2 Finite element model for train collision response analysis

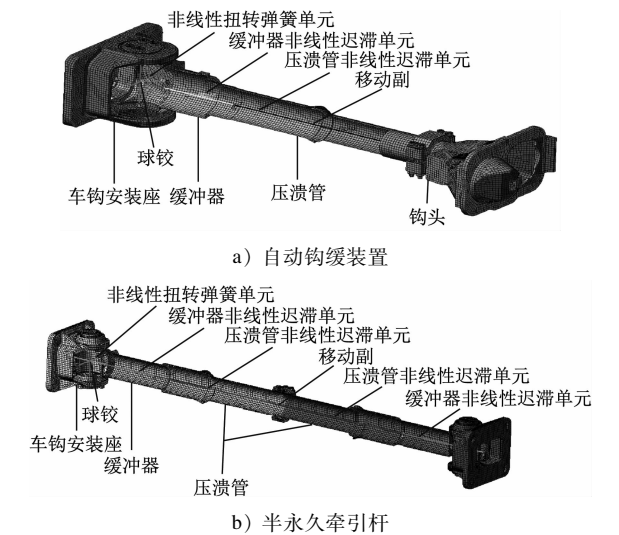


图 3 钩缓装置有限元模型

Fig. 3 Finite element model of coupler-buffer device

3 单车级状态差异对列车碰撞响应的影响

3.1 工况的选取及标准化

在 SIMPACK 软件中建立 4 节编组列车动力学仿真模型。A2 车位于编组列车中间,且靠近碰撞界

面处,可以表征列车在运行过程中车间的状态差异,因此选择 A2 车作为单车级初始状态输入。以美国五级轨道谱为输入,提取了 A2 车运行时的点头角、摇头角、沉浮量和横摆量,分别为 0.003 5 rad、0.003 rad、25 mm 和 20 mm。采用控制变量法,通过调整 A2 车的初始状态,研究单车级状态差异对列车碰撞响应的影响。单车级状态参数如表 2 所示。后续研究 2 列 4 节编组列车在 36 km/h 碰撞速度和单车级状态参数下对列车碰撞响应的影响。

表 1 钩缓装置参数配置

Tab. 1 Coupler-buffer device parameter configuration					
部件名称	压溃管参数		缓冲器参数		
	行程/mm	稳态力/kN	行程/mm	初始压力/kN	容量/kJ
全自动钩缓装置	350	1 100 ⁺⁴ ₋₁₀ %	≤73	65 (1 ± 5%)	≥18
半永久牵引杆	350	1 000 (1 ± 10%)	≤55		≥14

表 2 单车级状态参数

Tab. 2 Parameters of single-vehicle-level status			
状态参数	初始状态参数值	状态参数	初始状态参数值
α /rad	-0.003 5 ^①	z /mm	-25 ^②
	0		0
	+0.003 5 ^①		+25 ^②
β	0	y /mm	0
	+0.003 ^①		+20 ^②

注:① α 以顺时针为正, β 以逆时针为正(由右手定则确定);② 单车坐标系定义:前进方向为 +x 向,重力反方向为 +z 向;前进方向左侧为 +y 向;③ 列车正负摇头为对称响应,视为同一因素水平,因此仅设置两因素水平;④ z 为单车沉浮值, y 为单车横摆值。

3.2 初始点头的影响

A2 车存在初始点头时碰撞界面处各个方向的界面力,如图 4 所示。

由图 4 可见:A2 车初始点头对纵向界面力几乎无影响,会使垂向界面力增大;当初始点头角 $\alpha_0 = +0.003 5$ rad、A2 车为初始俯角时,横向界面力较大。提取典型响应如图 5 a)—图 5 d)所示,横向响应量纲一化分布(主动列车各车体摇头和横摆、钩缓摇头、车端横向错动等指标按递增顺序排列)如图 5 e)所示。

当 A2 车初始点头时,对 A1 车及 S_A1 界面影响较大。由图 5 a)—图 5 c)可见:当 $\alpha_0 = +0.003 5$ rad,A2 车为初始俯角时,A1 车点头幅值变化不大,

沉浮量下降了 27.3% ; S_{A1} 界面车端高度差幅值增大了 21.8% ,达 -219.713 mm,爬车风险增大。由图 5 e)可见,横向响应剧烈。由图 5 d)可见,摇头运动较大。当 $\alpha_0 = -0.0035$ rad, A2 车为初始仰角时, A1 车虽沉浮运动变化不大,但点头、爬升及各横向响应都得到了抑制。

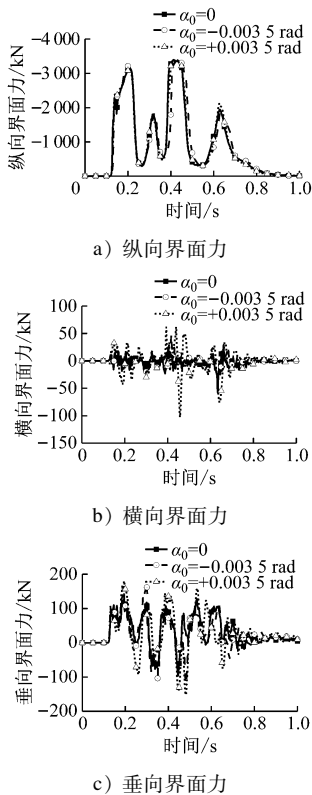


图 4 A2 车初始点头时碰撞界面力

Fig. 4 Collision interface force at initial nod of A2 vehicle

3.3 初始沉浮的影响

A2 车存在初始沉浮时碰撞界面处各个方向的界面力,如图 6 所示。

由图 6 可见:A2 车初始沉浮对纵向界面力影响不大;当初始沉浮值 $z_0 = -25$ mm 时(A2 车处于低位),碰撞界面处的横向力峰值很大。提取典型响应如图 7 a)~图 7 d)所示,横向响应量纲一化分布如图 7 e)所示。

由图 7 a)~图 7 c)可见:当 A2 车初始沉浮时,对 A1 车及 S_{A1} 界面影响较大;当 $z_0 = -25$ mm 时,钩缓装置 D_{A1} 为仰角,促进 A1 车的点头和抬升,因此 A1Bg2Ws2 轮对抬升量增大到 11 mm。由图 7 e)可见,横向响应剧烈。由图 7 d)可见,A1 车摇头角明显增加。当 $z_0 = +25$ mm 时,除 A1 车沉浮幅值有所增大外,点头运动、A1Bg2Ws2 轮对抬升量及

横向响应均有所抑制。

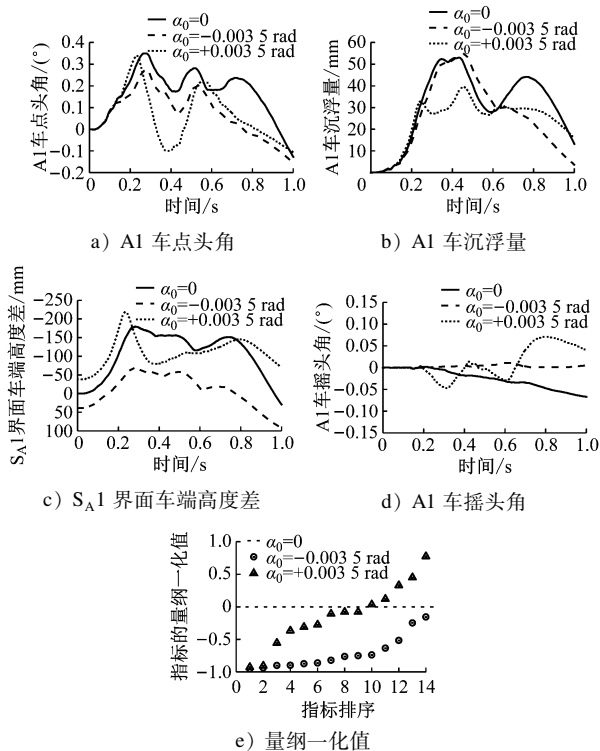


图 5 A2 车初始点头时典型响应及横向响应量纲一化分布
Fig. 5 Typical response and transverse normalized distribution at initial nod of A2 vehicle

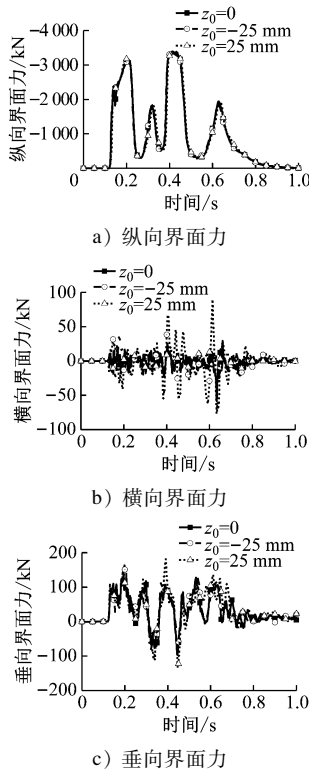


图 6 A2 车初始沉浮时碰撞界面力

Fig. 6 Collision interface force at initial bouncing vibration of A2 vehicle

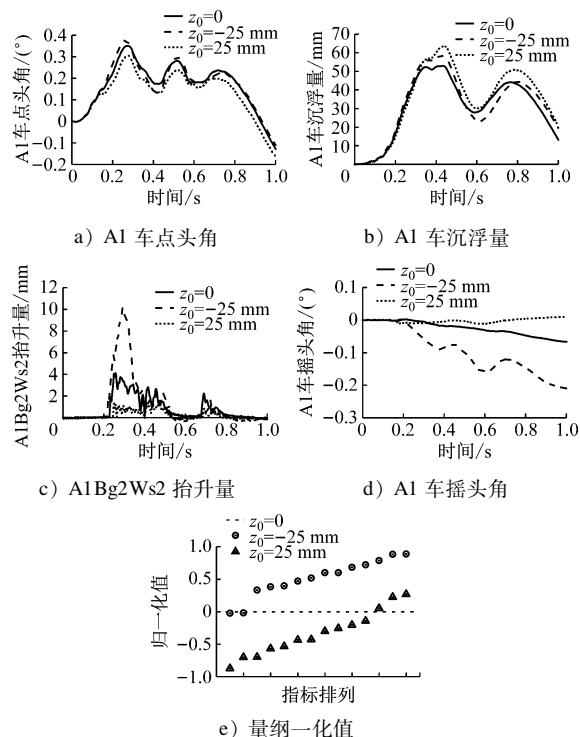


图7 A2车初始沉浮时典型响应及横向量纲一化分布

Fig. 7 The typical response and transverse normalized distribution at initial bouncing vibration of A2 vehicle

3.4 初始摇头的影响

A2车存在初始摇头时碰撞界面处各个方向的界面力如图8所示。

由图8可见,A2车初始摇头对纵向、垂向界面力影响不大,而横向界面力变化显著,典型垂向响应如图9 a)——图9 b)所示。主动列车各车最大摇头角及最大横摆量、各钩缓最大摇头角、各界面最大横向错动量的量纲一化值如图9 c)所示。

由图9 a)——图9 b)可见,当A2车初始摇头时,A1车沉浮量有所增大,A1Bg2Ws2轮对抬升量达22.3 mm,脱轨风险大。由图9 c)可见,在正反馈机制和传递机制作用下,整车横向响应剧烈,A1车最大横摆量量纲一化值达0.84。A1车过大的横移量是A1Bg2Ws2轮对抬升量显著增大的主要原因。

3.5 初始横摆的影响

A2车存在初始横摆时碰撞界面处各个方向的界面力如图10所示。

由图10可见,A2车初始横摆对纵向、垂向界面力影响不大,而对横向界面力变化显著,典型垂向响应如图11 a)所示。主动列车各车最大摇头角及最大横摆量、各钩缓最大摇头角、各界面最大横向错动量的量纲一化值如图11 b)所示。

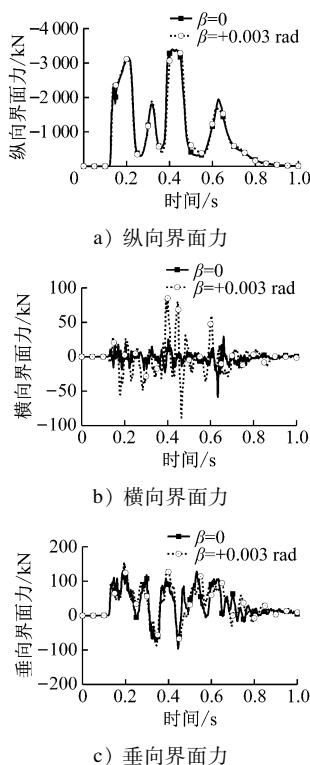


图8 A2车初始摇头时碰撞界面力

Fig. 8 Collision interface force at initial shaking movement of A2 vehicle

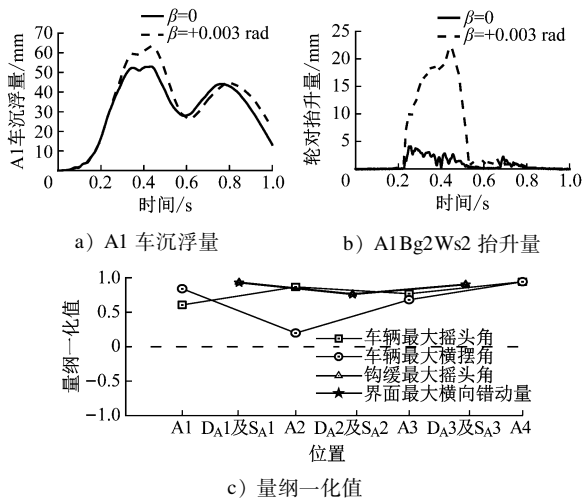


图9 A2车初始摇头时典型响应及横向量纲一化分布

Fig. 9 The typical response and transverse normalized distribution at initial shaking movement of A2 vehicle

由图11 a)中可见,垂向响应仅A1Bg2Ws2轮对的抬升量明显增大,达11.1 mm;由图11 b)可见,同初始摇头相类似,受正反馈机制和传递机制影响,A2车初始横摆对列车横向响应影响较大。

3.6 综合分析

列车各几何响应受单车初始状态影响程度如

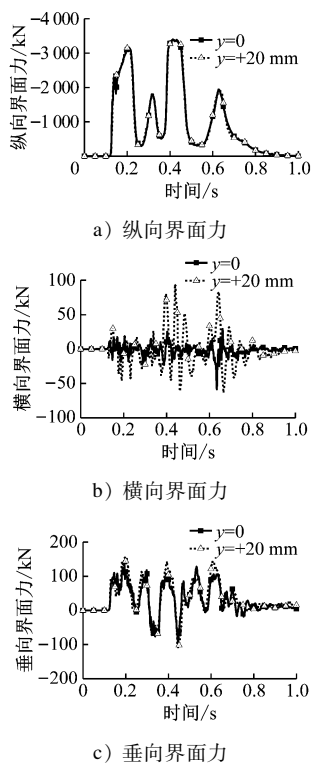


图 10 A2 车初始横摆时碰撞界面力

Fig. 10 Collision interface force at initial shaking movement of A2 vehicle

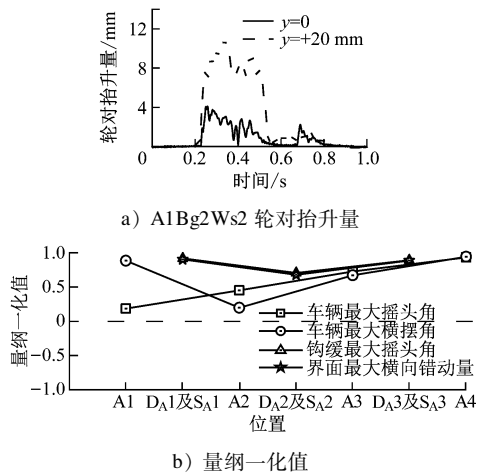


图 11 A2 车初始横摆时典型响应及横向量纲一化分布
Fig. 11 The typical response and transverse normalized distribution at initial shaking movement of A2 vehicle

图 12 a) 所示,列车整体响应受单车初始状态影响程度如图 12 b) 所示。

由图 12 可见:列车点头、沉浮、摇头和横摆运动分别受初始点头、初始沉浮、初始摇头和初始横摆的影响最大;单车级初始状态对列车横向响应影响大于垂向响应,列车横向响应的稳定性较差,特别

是摇头运动;单车初始点头、沉浮等垂向初始状态对整车的碰撞响应影响较小,仅对邻近车辆有一定的影响,而初始摇头、横摆等初始横向状态对列车整体几何响应的影响较大。

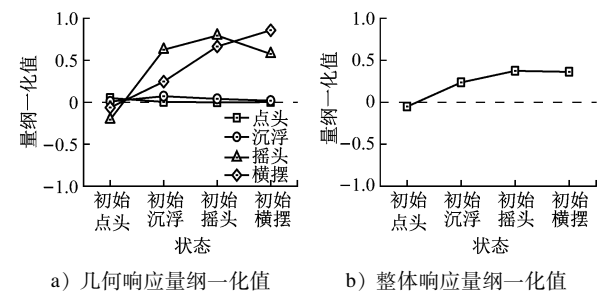


图 12 单车初始状态的综合影响分析

Fig. 12 Comprehensive influence analysis of single-vehicle initial state

4 列车碰撞稳定性改进方案

通过对上述碰撞响应的分析发现,在单车级初始状态下,由于正反馈机制和传递机制的作用,列车横向稳定性较差,已成为影响列车碰撞安全性的重要因素。文献[12]提到,中间钩缓对列车碰撞稳定性的影响最为关键。因此,本文在车辆端部,距钩缓装置 2 730 mm 的高度处,安装一种防爬防偏结构的吸能装置,如图 13 所示。该吸能装置和中间钩缓压溃管的参数如表 3 所示。

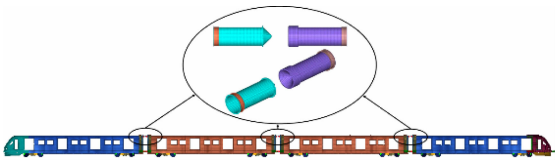


图 13 增加车间防爬防偏吸能装置的列车
Fig. 13 Trains with anti-climbing and anti-bias energy absorption device between vehicles

表 3 钩缓装置改进方案参数配置

Tab. 3 Parameter configuration of coupler-buffer device improvement scheme

部件	稳态力/kN	行程/mm	触发力/kN
车间吸能结构	530	2 × 310	
中间车压溃管	530	2 × 350	1 100

采用改进方案,在 A2 车不存在初始点头角、沉浮量、摇头角和横摆量时,对列车进行仿真计算,提取典型响应并与原方案进行对比,如图 14 所示。

由图 14 可见,SA2 界面车端垂向高度差和横向错动量分别减小了 41% 和 78.5%,A2 车点头幅度

减小了 50.9%, A1Bg2Ws2 轮对抬升量减小了 10.3%。因此,爬车风险明显降低,点头运动得到有效抑制,脱轨风险也有所下降,改善了列车的碰撞稳定性。

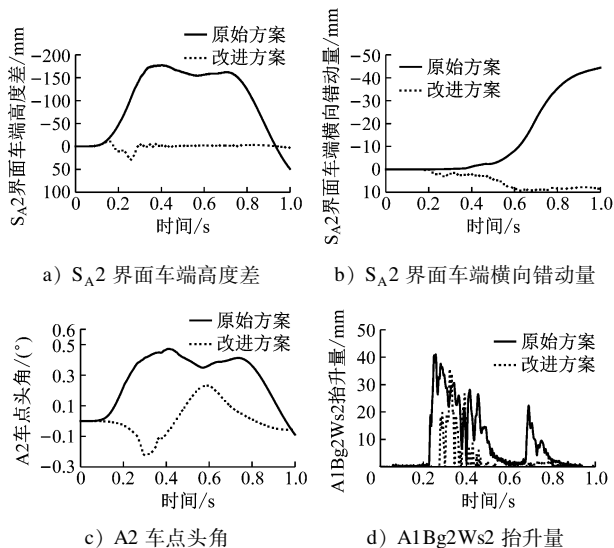


图 14 采用钩缓装置改进方案后的典型响应对比

Fig. 14 Comparison of typical responses before and after adopting coupler-buffer device improvement scheme

5 结论

1) 单车级状态差异对列车纵向响应基本无影响,对横向响应的影响大于垂向响应,列车横向稳定性较差,特别是摇头运动。

2) 单车级状态差异通过钩缓装置的正反馈机制和传递机制的作用,影响列车的碰撞响应;单车垂向初始状态仅影响邻近车辆的碰撞响应,而横向初始状态对列车整体响应的影响都比较显著。

3) 横向运动过大易引起轮对爬轨,是增大脱轨风险的主要原因。在单车初始摇头的影响下,轮对爬升高度达 22.3 mm,临近脱轨。评价列车脱轨风险时应同时考虑车体的姿态响应和轮对抬升量。

4) 通过设置车间防爬防偏吸能装置,能有效地抑制列车的点头运动和横向响应,降低列车的脱轨和爬车风险,可显著改善列车碰撞稳定性。

参考文献

[1] SCHOLLES A. Railway passenger vehicle design loads and structural crashworthiness[C] // IMechE. Proceedings of the IMechE

Conference on Railway Vehicle Body Structures. Derby: IMechE, 1985.

- [2] SUTTON A. The development of rail vehicle crashworthiness[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2002, 216(2): 97-108.
- [3] PEREIRA M S, AMBROSIO J A C, DIAS J P. Crashworthiness analysis and design using rigid-flexible multibody dynamics with application to train vehicles[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(4): 655-687.
- [4] MAYVILLE R, RANCATORE R, TEGELER L. Investigation and simulation of lateral buckling in trains[C] // IEEE. Proceedings of the 1999 IEEE/ASME Joint Railroad Conference. New York: IEEE, 1999.
- [5] KIRKPATRICK S W, SCHROEDER M, SIMONS J W. Evaluation of passenger rail vehicle crashworthiness[J]. International Journal of Crashworthiness, 2001, 6(1): 95-106.
- [6] U. S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration. Development of a detailed nonlinear finite element analysis model of colliding trains[J]. Research Results, 2005:1.
- [7] ZHOU H, WANG W, HECHT M. Three-dimensional override analysis of crashed railway multiple units[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(4): 663-674.
- [8] 陈国瑞. 列车撞击垂向响应及其控制研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.
- CHEN Guorui. Research on vertical response and vertical inhibition in train to train collision[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [9] 杨超. 列车碰撞动力学关键问题研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- YANG Chao. Research on key issues of train collision dynamics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [10] 周和超, 徐世洲, 詹军, 等. 基于有限元和多刚体动力学联合仿真技术的列车碰撞爬车现象研究[J]. 机械工程学报, 2017(12): 166.
- ZHOU Hechao, XU Shizhou, ZHAN Jun, et al. Research on the overriding phenomenon during train collision based on FEM and MBS joint simulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017(12): 166.
- [11] CHEN D. Derailment risk due to coupler jack-knifing under longitudinal buff force[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(5): 483-490.
- [12] STUART B, 阎锋. 整列车碰撞动态特性与提高列车防碰撞性总结报告[J]. 国外铁道车辆, 2017(5): 1.
- STUART B, YAN Feng. Summary report on dynamic behavior of the whole train in collisions and the improvement of the crashworthiness[J]. Foreign Rolling Stock, 2017(5): 1.

(收稿日期:2020-01-16)