DOI: 10.3901/JME.2019.16.170

铁道车辆吸能式防爬器垂向屈曲研究*

周和超¹ 包泽宇¹ 徐世洲¹ 张济民¹ 涂昊昀²

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804;

2. 同济大学航空航天与力学学院 上海 200092)

摘要: 为抑制列车碰撞时的相互爬车程度, 列车端部均安装吸能与防爬功能一体的吸能式防爬器。然而, 列车碰撞事故调查发现吸能式防爬器有时会出现明显的垂向屈曲, 导致其碰撞吸能和防爬能力大幅度降低。为此, 提出多刚体动力学和有限元理论相结合的仿真分析方法, 再现吸能式防爬器垂向屈曲失效的动态过程。此外, 仿真计算表明随着碰撞列车之间差异加大, 相邻车辆爬车速度明显增加, 其最大爬车速度可以达到 1.5 m/s。与此同时, 吸能式防爬器发生明显的垂向屈曲, 导致相互啮合的防爬齿发生脱离、失去防爬约束能力。不仅如此, 相比于理想条件下的纵向压溃, 发生垂向屈曲后的吸能式防爬器吸能能力大幅度降低, 其平均压溃力由 566.3 kN 降低至 348.1 kN, 减少了 38.5%, 碰撞吸能量也由 367 kJ 降低至 169 kJ, 减少了 53.9%。

关键词: 列车碰撞; 吸能式防爬器; 爬车; 垂向屈曲

中图分类号: U260

Study on the Vertical Buckling of Railway Vehicle's Anti-climber

ZHOU Hechao¹ BAO Zeyu¹ XU Shizhou¹ ZHANG Jimin¹ TU Haoyun²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804;

2. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: In order to prevent the train overriding during a collision accident, the anti-climbers are usually equipped at the end of a train. However, from the investigations of some train collision accidents it is found that under some unknown conditions the energy absorbing capacity and anti-overriding function of anti-climber are greatly reduced due to the serious vertical buckling. A simulation strategy combining multi-body dynamics and finite element theory is proposed. With this strategy the dynamic buckling process of energy-absorbed anti-climber is reproduced. Besides that, the simulation results indicate that as the differences between the collided trains increase, the overriding speed between the adjacent vehicles increases significantly. When the overriding speed between two adjacent vehicles reaches 1.5 m/s, the energy-absorbed anti-climber has obvious vertical buckling during the train collision. Due to this reason, the collided anti-climbers will detach each other and lose its vertical constraint function. Moreover, compared with the stable crush under ideal conditions, the energy-absorbing capacity of vertical buckled anti-climber is greatly reduced, for example the average crushing force and absorbed collision energy are significantly reduced from 566.3 kN to 348.1 kN and 367 kJ to 169 kJ respectively.

Key words: train collision; energy-absorbed anti-climber; overriding; vertical buckling

0 前言

近年来, 我国的高速铁路网络迅速发展, 列车运行密度进一步增加。随着列车运行速度的不断提升, 列车运行时所携带的动能也明显增大, 一旦发生碰撞事故将会造成车毁人亡的后果。在过去的 20 多年里, 世界各国学者为了提高列车碰撞时乘客的安全, 对轨道车辆的耐碰撞性能进行了广泛的研究,

并形成了 GM/RT2100、S580、EN15227 等标准和设计准则^[1-4]。部分学者通过分析现有的列车碰撞事故, 明确指出列车在碰撞过程中相邻车辆之间容易出现相互爬升的现象, 而车辆之间爬车程度直接关系到整个碰撞事故中人员的伤亡程度^[5-6]。因此, 控制列车碰撞时的爬车程度至关重要。

吸能式防爬器作为碰撞过程中抑制列车爬车的重要部件, 很多学者对此进行了深入研究。刘亚妮^[7]对城市轨道车辆防爬器开展了碰撞试验和数值模拟计算。杨超^[8]建立了三维碰撞车辆碰撞模型, 研究了车辆中低速撞击刚性墙的动态响应。赵洪伦等^[9-10]

* 国家自然科学基金(51805374)和中央高校基本科研业务费专项资金(22120180531)资助项目。20181211 收到初稿, 20190420 收到修改稿

对列车防爬吸能装置进行了优化, 并将多刚体与有限元相结合, 寻求一种高效、准确的仿真计算方法。STARLINGER 等^[11]对某型吸能式防爬器进行了对心和 40 mm 垂向偏差的碰撞试验。然而, 上述研究主要侧重于吸能式防爬器纵向压溃的吸能性能, 对于其垂向防爬约束能力并未进行较为深入的分析, 从而导致设计、优化的防爬器在实际列车碰撞事故中容易引发垂向屈曲, 进而防爬、吸能功能失效, 如图 1 所示。为此, 本文利用多刚体动力学和有限元理论相结合的方法仿真分析铁道车辆碰撞过程中吸能式防爬器垂向屈曲的动态过程, 进而揭示防爬器发生垂向屈曲后对其防爬、吸能性能的影响。

图 1 吸能式防爬器垂向屈曲

1 研究方法

如图 2 所示, 本文主要采用多刚体动力学和有限元理论相结合的仿真分析方法。首先, 建立两列车直线碰撞动力学模型, 并结合现实中列车碰撞的可能边界条件仿真分析相邻车辆之间的相互爬升趋势。然后, 将获取的相邻车辆垂向相对速度(爬车速度)输入到吸能式防爬器的有限元碰撞模型, 进一步探究吸能式防爬器垂向屈曲的动态过程。

2 列车碰撞仿真分析

2.1 列车碰撞动力学模型

利用多刚体动力学软件 Simpack 建立两列车直线正面碰撞模型(图 3)。每列车均由 3 节车辆编组而成, 每个车辆模型(图 4)均包含车体、转向架、轮对和连接部件, 其中一系悬挂包含三个方向的线性弹簧和减振器, 二系悬挂主要包括弹簧、抗侧滚扭杆、横向止挡以及垂向和横向减振器。整个车辆系统的计算参数^[12]见表 1。

图 2 仿真计算流程

图 3 列车碰撞动力学模型

图 4 车辆动力学模型

表 1 车辆模型计算参数

参数	数值
车体质量/kg	50 000
转向架质量/kg	2 615
轮对质量/kg	1 813
一系垂向刚度/(N/m)	1.8×10^6
一系横向刚度/(N/m)	3.9×10^6
一系纵向刚度/(N/m)	3.1×10^7
二系垂向刚度/(N/m)	4.6×10^5
二系横向刚度/(N/m)	1.6×10^5
二系纵向刚度/(N/m)	1.6×10^5
滚动圆半径/m	0.46
车钩距轨面高度/m	1.05

为了模拟碰撞过程中列车与列车以及相邻车辆之间的纵向碰撞力,模型中采用弹塑性弹簧来进行模拟,其碰撞力-变形关系曲线如图5所示。

图5 车辆吸能特性曲线

列车碰撞过程中,车辆端部的吸能特性(图5)主要包括以下三个部分。

(1) 车钩缓冲装置:当碰撞发生时,车钩缓冲装置首先接触,并且当碰撞速度低于 15 km/h 时,可以有效地保护车辆端部的其他部件。

(2) 吸能式防爬器:当碰撞速度大于 15 km/h 时,车钩缓冲器压溃失效,而吸能式防爬器开始相互接触并通过材料的塑性变形来吸收碰撞能量。

(3) 司机室:当车钩缓冲器和防爬器都压溃失效后,列车司机室发生相互碰撞,碰撞力也大幅上升。

2.2 相邻车辆垂向爬车程度

根据标准 EN15227 中定义的碰撞场景,模拟两列车之间的直线碰撞,其中运动列车以 36 km/h 的速度撞击直线上处于静止状态的列车(图4)。从图6可以清楚地看出,在 0.47 s 时撞击列车与静止列车发生碰撞,从而将自身携带的动能传递给前方的静止列车,最终两者具有相同的运行速度 18 km/h。整个碰撞过程中,系统所减少的动能被各车辆端部的弹塑性弹簧所吸收。

图6 列车碰撞各车辆速度历程

分别选取撞击列车和静止列车的车钩作为各自列车的碰撞作用点(点A位于撞击列车,点B位

于静止列车),并根据碰撞点A和B之间的垂向位移来评估列车之间(车辆1与车辆4)的相互爬车程度。如图7所示,由于整个系统的参考坐标系被设定在钢轨表面,其中Z轴竖直朝下,因此,两列车碰撞作用点A和B的初始位置均为-1.05 m。碰撞过程中,两列车在碰撞力作用下发生向下的点头运动,导致碰撞点A和B均向下运动。由于碰撞列车完全相同,其点头运动也完全同步,在 0.97 s 两列车的最大垂向间距达到 27 mm。图8显示的是碰撞点A和B的垂向速度,在 1.22 s 时碰撞列车A与B点的最大垂向相对速度(爬车速度)达到 0.15 m/s。

图7 列车撞击点垂向位移

图8 列车撞击点垂向速度

不仅如此,前期研究表明^[12]在实际的列车碰撞事故中,碰撞列车之间将难以避免的存在各种差异,例如具有不同的载客重量、质心高度、点头频率等。上述因素的影响将导致相邻车辆在碰撞过程中呈现出不同步的运动姿态,进而加剧车辆的爬车程度。图9总结了碰撞列车之间各类差异对爬车速度的影响,从中可以清楚地看出随着碰撞列车差异的加大,爬车速度明显增加。此外,当相互撞击列车的质量、质心高度以及点头频率均出现 30% 左右的较大差异时,如图10所示,撞击点处的最大垂向相对速度(爬车速度)在 1.07 s 达到 1.5 m/s。由此可见,列车碰撞

过程中较大的爬车速度势必导致防爬器承受较大的垂向防爬约束力, 从而加剧吸能式防爬器垂向屈曲的风险。

图 9 碰撞列车差异对爬车速度的影响

图 10 列车撞击点垂向速度

此外, 整车质量的一半作为配重附加在防爬器后端的连接座上。

图 11 地铁车辆吸能式防爬器

图 12 防爬器有限元模型

3 吸能式防爬器垂向屈曲分析

3.1 吸能式防爬器有限元模型

选取如图 11 所示的某型地铁列车吸能式防爬器作为研究对象, 具体计算参数见表 2。该吸能式防爬器主要包括 3 个组成部分(图 12)。

(1) 前端防爬齿。

(2) 筒形壳体, 壳体中间由隔板隔开并分为前后两级吸能结构, 其第一级吸能结构由四个大小一样的薄壁铝合金圆管组成, 第二级吸能结构为单个薄壁铝合金圆管。壳体外壁开设有一定间距的双排双孔诱导槽。

(3) 后端连接座, 通过 6 个螺栓将吸能式防爬器固定在车辆端部的相应位置。

本文采用非线性有限元软件 LS-DYNA 建立吸能式防爬器的计算模型, 其前端防爬齿和后端连接座选用实体单元, 而中间的筒形壳体以及薄壁圆管均采用壳单元进行网格划分。整个吸能式防爬器的有限元模型共有节点 51 891 个, 单元 107 504 个。

表 2 防爬器主要结构参数 mm

参数	数值
第一级外壁厚度	4.5
第二级外壁厚度	4.5
第一级圆管厚度	2.5
第一级圆管直径	80
第二级圆管厚度	6.0
第二级圆管直径	100
第一级圆管长度	255
第二级圆管长度	315
连接板厚度	3.5
防爬器总长	625

3.2 吸能式防爬器垂向屈曲

如图 13 所示, 仿真计算理想条件下两个完全相同的吸能式防爬器正面对心碰撞, 其中右侧防爬器以 36 km/h 的速度撞击左侧固定的防爬器。从图 13 的仿真历程可以看出, 当发生碰撞的防爬器相互之间没有垂向爬升运动时, 吸能式防爬器不会产

生垂向屈曲,并能够按照设计要求逐级压溃吸收碰撞能量。

图13 理想状态下防爬器对心碰撞

此外,根据前文列车碰撞分析结果,在实际碰撞事故中,由于碰撞车辆之间的差异性导致相邻车辆的最大爬车速度能够达到 1.5 m/s。为此,设置右侧防爬器不仅以 36 km/h 的速度纵向撞击左侧固定的防爬器,同时还具有 1.5 m/s 竖直向上的爬车速度。从图 14 可以清楚地看出,在初始爬车速度的影响下,相互碰撞的吸能式防爬器通过前端防爬齿的啮合来抑制两者的垂向爬车运动,导致吸能式防爬器在纵向压溃的同时承受较大的垂向约束力,进而逐步产生垂向屈曲,碰撞界面也随之发生倾斜,并在 0.04 s 达到 70° 的倾斜角度,从而最终导致防爬齿之间发生脱离、失去防爬约束能力。不仅如此,如图 15 和图 16 所示,相比于理想的对心碰撞,当吸能式防爬器发生较为明显的垂向屈曲后,其平均压溃力由 566.3 kN 降低至 348.1 kN,减少了 38.5%,碰撞吸能量也由 367 kJ 降低至 169 kJ,减少了 53.9%。

图14 防爬器碰撞历程(爬车速度 1.5 m/s)

图15 碰撞界面纵向力-时间历程

图16 单个防爬器吸能量

4 结论

(1) 针对铁道车辆在实际碰撞事故中出现吸能式防爬器垂向屈曲的问题,本文提出多刚体动力学和有限元理论相结合的仿真分析方法,通过多次仿真计算获取列车碰撞过程中吸能式防爬器的主要边界条件,进而再现吸能式防爬器垂向屈曲的动态过程。

(2) 仿真计算表明,随着碰撞列车之间差异的加大,相邻车辆爬车速度明显增加,其最大爬车速

度可以达到 1.5 m/s。与此同时, 较大的爬车速度势必导致防爬器承受更大的垂向防爬约束力, 从而加剧吸能式防爬器垂向屈曲的风险。

(3) 当相邻车辆爬车速度达到 1.5 m/s 时, 吸能式防爬器发生明显的垂向屈曲, 导致防爬齿之间发生脱离、失去防爬约束能力。不仅如此, 相比于理想条件下的纵向压溃, 发生垂向屈曲的吸能式防爬器其平均压溃力由 566.3 kN 降低至 348.1 kN, 减少了 38.5%, 碰撞吸能量也由 367 kJ 降低至 169 kJ, 减少了 53.9%。

参 考 文 献

- [1] Railway Group Standard, GM/RT2100: Requirements for rail vehicle structure[s]. London: British Standard Institution, 2010.
- [2] European Committee for Standardization, EN15227: Railway applications: Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2010.
- [3] Federal Railroad Administration, 49 CFR Part 239: Passenger Equipment Safety Standard[S]. Washington DC: National Technical Information Service, 1999.
- [4] American Public Transportation Association. Manual of standards and recommended practices for passenger rail equipment[S]. Washington DC: American Public Transportation Association, 1999.
- [5] LEWIS J H. Review of crashworthiness work undertaken by BR research 1984-1996[R]. British Rail Research Report RRSTR-96-039, 1996.
- [6] 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.
- [7] 刘亚妮, 陈晶晶, 袁文辉. 轨道车辆吸能装置碰撞试验与数字仿真研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2017, 40(6): 46-51.
LIU Yani, CHEN Jingjing, YUAN Wenhui. Study on crash test and numerical simulation of energy absorbing device for railway vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2017, 40(6): 46-51.
- [8] 杨超, 李强, 肖守讷. 三维碰撞车辆移动轨道建模与研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 55-61.
YANG Chao, LI Qiang, XIAO Shoune. Modelling and Investigations of 3D Colliding Vehicles and Moving Tracks[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6): 55-61.
- [9] 赵洪伦, 王文斌, 廖彦芳. 城市轨道车辆防爬器开发研究[J]. 机电产品开发与创新, 2003, (6): 33-35.
ZHAO Honglun, WANG Wenbin, LIAO Yanfang. The research and development of urban anti-climbing device[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2003, (6): 33-35.
- [10] 王文斌, 康康, 赵洪伦. 列车耐碰撞系统有限元和多体动力学联合仿真[J]. 同济大学学报, 2011, 39(10): 1552-1556.
WANG Wenbin, KANG Kang, ZHAO Honglun. Joint simulation of crashworthy train set based on finite element and multi-body dynamic[J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(10): 1552-1556.
- [11] STARLINGER A, CASTELLI B, GOOD T. The impact of the new FRA waiver regulations on the design requirements of European trains: A case study based on the Stadler GTW DMU[C/CD]// Proceedings of the 8th International Symposium on Passive Safety of Rail Vehicles, Berlin, 2011.
- [12] 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, 53(12): 166-171.
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, 53(12): 166-171.

作者简介: 周和超, 男, 1985 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为轨道车辆被动安全设计。

E-mail: zhouhechao@tongji.edu.cn

张济民(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轨道车辆动力学与结构设计。

E-mail: zjm397a@163.com