

地铁列车脱轨防护装置方案*

刘艳文^{1,2} 肖海健¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;

2. 中车长客股份公司国家轨道客车工程研究中心, 130022, 长春)

摘要 [目的]在自然灾害、车辆或轨道关键部件失效、外部冲击等不可预知的复杂状态下,地铁列车仍有可能会发生脱轨。因此,对列车被动脱轨防护装置方案的研究十分必要。[方法]建立地铁列车多体系统动力学非线性仿真模型,采用典型的车轮踏面外形和典型钢轨外形匹配,根据地铁列车运行的线路特点,提出地铁列车脱轨防护装置的三种方案,对其进行了低速运行条件下的脱轨工况仿真。针对仿真结果,综合考虑防二次爬轨脱轨的效果、安装部位的强度,以及脱轨后铁轨与脱轨防护装置发生碰撞而对车辆造成的损害,提出了在构架下端安装防脱轨横向止挡作为脱轨防护装置的方案。针对该地铁列车脱轨防护装置,进行了动力学仿真分析,并与无防护装置工况进行对比。[结果及结论]地铁列车脱轨防护装置具有明显的防脱轨效果,且具有一定的可行性。地铁列车脱轨防护装置动态包络线符合某地铁线路的限界要求,不会影响列车正常行驶,可以进行工程应用。

关键词 地铁列车; 脱轨防护装置; 动力学仿真; 车辆限界

中图分类号 U270.38*9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.021

Metro Train Derailment Protection Device Scheme

LIU Yanwen^{1,2}, XIAO Haijian¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130022, Changchun, China)

Abstract [Objective] Under unpredictable complex conditions such as natural disasters, failures of vehicle/track key components, or external impacts, metro train derailment is still highly prone to occurrence. Therefore, research on train passive derailment protection device schemes is essential. [Method] A dynamics nonlinear simulation model of metro train multi-body system is established. The typical shapes of both the wheel tread and the steel rail are matched. Based on the characteristics of metro train operating routes, three schemes

for metro train derailment protection devices are proposed, and the derailment condition for each scheme is simulated under low-speed operating conditions. Regarding the simulation results, the effectiveness of preventing secondary rail climbing/derailment, the strength of the installation position, and the damage to vehicle caused by collision between rail and derailment protection device after derailment are taking into consideration comprehensively, a scheme of installing lateral anti-derailment stops at framework lower end as the derailment protection device is proposed. A dynamics simulation analysis is conducted on the metro train derailment protection device and the result is compared with the non-protection device working condition. [Result & Conclusion] The metro train derailment protection device exhibits a significant anti-derailment effect with certain feasibility. The dynamic envelope of the above device meets the clearance requirements of the metro line and does not affect train normal operation, making it suitable for engineering applications.

Key words metro train; derailment protection device; dynamics simulation; vehicle clearance

列车脱轨事故会造成严重的经济损失甚至车毁人亡等严重的后果。在我国铁路重特大事故中,列车脱轨事故的占比高达70%^[1]。随着地铁的大面积普及,地铁列车脱轨事故也时常发生。国内外近期发生的部分地铁脱轨事故有:南京地铁1号线空载检查列车脱轨事故、北京地铁亦庄线列车脱轨事故、美国纽约地铁车厢脱轨事故等。

国内外学者对于轨道交通车辆脱轨方面已展开了大量的研究工作。文献[2-3]最早提出了至今仍具有重要价值的Nadal公式。此后国内外学者在列车脱轨的原因、评判标准、试验方法等方面取得了许多很好的成果^[4-5]。上述研究从脱轨机理出发,在预防列车脱轨方面做出了巨大贡献。然而,在自然灾害、车辆或轨道关键部件失效、外部冲击等不可预知的复杂状态下,列车仍可能会发生脱轨^[6]。可

* 国家重点研发计划项目(2016YFB1200400)

见,对列车的被动脱轨防护装置进行研究十分必要。

国内对于脱轨防护装置方面的研究较少。文献[7]介绍首次研制的一种接触式障碍物与脱轨检测装置,并通过仿真与加工产品样机验证了装置的可靠性与实用性。文献[8]在小半径曲线线路上加装脱轨防护装置,大大减少了列车在小半径曲线线路上的脱轨事故。

本文将建立列车系统的非线性动力学仿真模型(以下简称“非线性模型”),提出地铁列车脱轨防护装置的3种方案,并进行动力学仿真,根据相应动力学仿真评定标准^[9]对比仿真结果,选择最优方案。对脱轨防护装置的结构与具体安装位置进行设计,并进行动力学仿真对比验证防脱轨效果,对安装有脱轨防护装置的车辆限界进行检验计算验证其可行性。

1 列车的非线性模型

地铁列车是一个复杂的多体系统,不但有各部件之间的相互作用力和相对运动,而且还有轮轨的相互作用关系。因此,理论计算模型只能根据研究的主要目的和要求,对一些次要因素进行相应的假

定或简化,而在对动力学性能影响较大的主要因素上尽可能做出符合实际情况的模拟。

在建立列车非线性模型时,假定轮对、构架和车体等部件的弹性比悬挂系统的弹性要小得多,均视为刚体,即忽略各部件的弹性变形。

参照 GB 5599—2019《机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》等相应标准建立的模型包含3种非线性环节:非线性轮轨接触几何关系、非线性悬挂力及碰撞吸能结构。

由于在脱轨工况下,车辆各零部件自身、车辆各部件之间,以及车辆各部件与轨道之间会发生结构变化,因此有必要根据实际情况,对仿真模型进行预处理:建立三维接触碰撞模型、车辆吸能等效模型及车钩缓冲模型,模拟部件失效、特性突变与轮轨接触拓扑变化。

基于多体系统动力学理论、车辆系统动力学理论及接触碰撞模型,建立列车碰撞脱轨非线性动力学仿真模型。考虑到地铁列车的对称性,为确保仿真分析的时效性和准确性,按1节拖车+2节动车的3节编组建立地铁列车模型。所建立的列车非线性模型如图1所示。

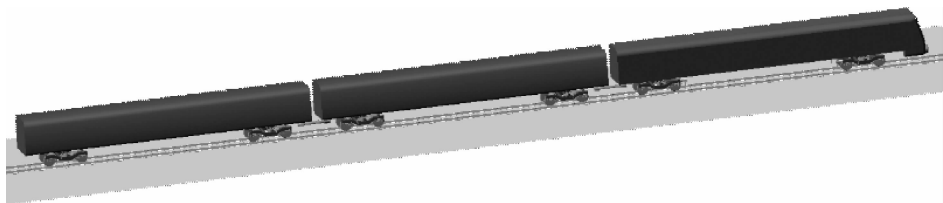


图1 列车非线性模型

Fig. 1 Train nonlinear model

2 车辆脱轨防护装置的初步方案

车辆脱轨防护装置的最核心功能是在列车脱轨后,保证列车继续沿线路运行。为了实现这个功能,在车辆脱轨后,脱轨防护装置须能控制转向架摇头运动,减小横向分速度,进而阻止车辆横向运动。

为此,在所建立的非线性模型的基础上增加脱轨防护装置,并增加其与钢轨、扣件等轨道结构之间的接触副,即可进行脱轨防护装置被动安全防护的动力学仿真,从而分析不同脱轨工况下、不同运行速度车辆脱轨后的动态行为,以及脱轨防护装置发挥作用的条件。进一步对比有脱轨防护装置和无脱轨防护装置车辆的运动姿态,加速度等动态行

为,分析被动安全防护的效果。

2.1 脱轨防护装置

由于脱轨行为是由轮对横向位移过大引起的,因此,脱轨防护装置须能限制轮对的过大横向位移,一般采用防脱轨止挡。当轮对开始爬轨,轮对横向位移增大且具有脱轨趋势时,借助防脱轨止挡与轨道间的横向作用,可限制轮轨的过大横移量,达到防脱轨目标。

基于前期调研结果,提出可行的脱轨防护装置初步方案:方案一,在轴箱下方增加脱轨防护止挡;方案二,在构架下端增加脱轨防护止挡;方案三,在车体下方增加脱轨防护止挡。

在仿真模型中:通过在轨道上设置脱轨器来实现列车脱轨;将未安装脱轨防护装置方案作为3个

初步方案的对照组;将脱轨防护止挡分别添加在轴箱、构架和车体上,来构建不同脱轨防护装置方案的仿真模型,见图 2—图 4。设置行车速度为 10 km/h,进行仿真分析。

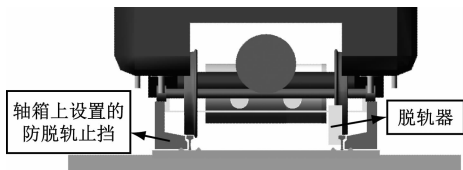


图 2 脱轨防护装置方案一模型图

Fig. 2 Model diagram of derailment protection device in scheme I

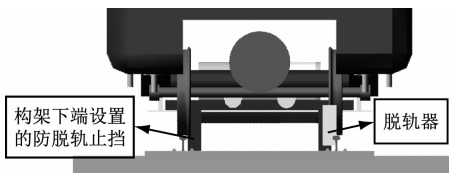


图 3 脱轨防护装置方案二模型图

Fig. 3 Model diagram of derailment protection device in scheme II

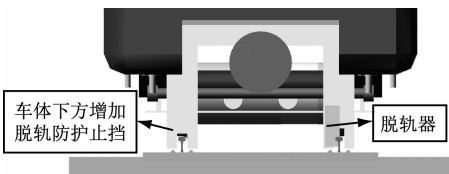


图 4 脱轨防护装置方案三模型图

Fig. 4 Model diagram of derailment protection device in scheme III

2.2 仿真结果与方案选定

对各脱轨防护装置方案进行仿真,并与无脱轨防护的情况进行对比,其中 T1 车 1 号轮对对横向位移如图 5 所示。分析仿真结果可以看出:方案一具有很好的防脱轨效果,车辆在运行过程中未发生脱轨;方案二和方案三虽未能防止列车脱轨,但能显著减少轮对的横向位移,二者位移量约为无脱轨防

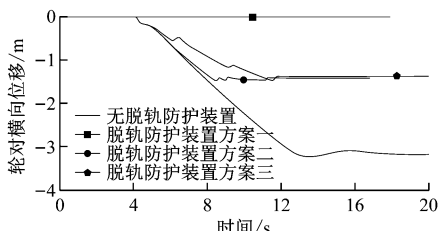


图 5 T1 车 1 号轮对对横向位移对比

Fig. 5 Comparison of lateral displacement of T1 vehicle No. 1 wheelset

护装置的一半,说明能有效地防止轮对第二次爬轨脱轨驶离轨道方向。综合考虑防二次爬轨脱轨的效果、安装部位的强度,以及脱轨后因铁轨与脱轨防护装置发生碰撞而对车辆造成的损害,本文选择方案二作为最优初步方案,并进行后续的完善和验证。

3 脱轨防护装置方案的完善与验证

3.1 脱轨防护装置的结构细化设计

脱轨防护装置的结构设计方向主要为限制车轮横向移动及减小车辆横向作用力。此外,当与脱轨装置同时发生作用时,脱轨防护装置应该具有较高的时效性,并能为车辆提供巨大的横向作用力。因此,选择以钢轨作为脱轨防护装置的横向作用对象,选择横向止挡作为脱轨防护装置,最终确定脱轨防护装置结构如图 6 所示。由车辆限界确定挡板长度,最终得到合适的结构尺寸。

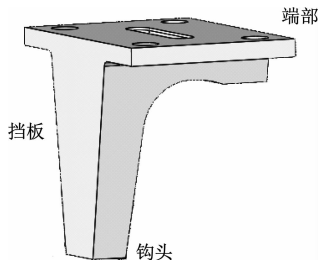


图 6 防脱轨止挡结构

Fig. 6 Anti-derailment stop structure

脱轨防护装置下端钩头设计与钢轨轨头外形互补,增大了与钢轨的接触面,可以在脱轨时与钢轨接触进而产生横向和垂向的位移限制,更好地起到防脱轨作用。在尺寸上,考虑车辆满载及车轮磨损极限时的垂向限界,在满足结构强度的同时,尽可能使挡板增长,以增大脱轨防护装置与钢轨接触的可能性,并延长接触时间,以保证脱轨防护装置的性能。

3.2 脱轨防护装置安装位置的确定

当车辆发生脱轨时,车轮与轨道板碰撞会产生很大的冲击。碰撞冲击时车辆各处的挠度最大,因此尽早对车辆进行防脱轨处理能有效地减小冲击对车辆的影响,并能及时地将车辆限制在钢轨上,防止车辆横向分力过大而偏离轨道。因此脱轨防护装置在横向安装位置上应尽量靠近钢轨,同时也需考虑横向限界,防止车轮掉道时与钢轨干涉。考虑车辆的实际结构情况,转向架结构精密、部件繁

杂,且确定脱轨防护装置接口在构架侧梁下端,故安装时应使脱轨防护装置纵向靠近侧梁与横梁焊缝,以增加结构强度,防止在防脱轨时影响构架的正常结构性能。图 7 为脱轨防护装置安装位置。

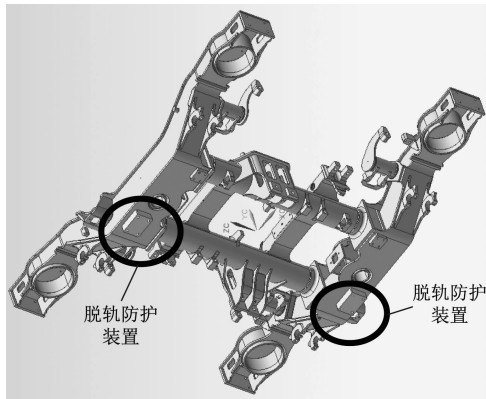


图 7 脱轨防护装置安装位置

Fig. 7 Installation position of derailment protection device

3.3 脱轨防护装置仿真分析

在仿真分析过程中,先将脱轨防护装置结构导入到 ADAMS/Rail 模型中,固定在构架确定接口处;添加脱轨器后,按脱轨防护装置同钢轨及轨道板等可能发生的接触,在相同工况条件下进行脱轨仿真,观察分析车辆脱轨后的运行姿态,以确定脱轨防护装置的效果。图 8 为脱轨仿真后的车辆运行姿态。

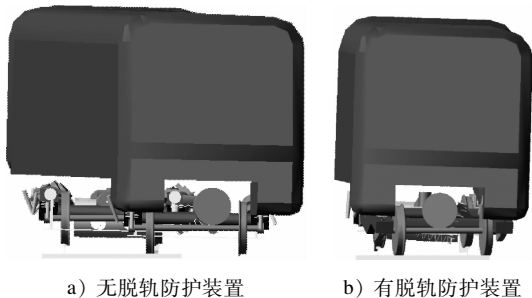


图 8 车辆脱轨仿真后车辆的运行姿态

Fig. 8 Simulated operating posture of vehicle after derailment

由有脱轨防护装置列车的脱轨仿真分析所得车辆运行姿态可知:当列车一位轮对掉道脱轨时,一位构架在竖向上随着轮对产生了较大的挠动,构架下端的脱轨防护装置也随之下移,钩头位置下降到轨头水平面以下;当一位轮对脱轨后偏离钢轨横向运动时,装置又随之横向移动,但很快与右侧钢轨发生接触,横向移动被限制;该过程中由于一系悬挂和轮对掉道冲击的原因,构架和脱轨防护装置

也产生竖向的移动;在横向上由于钩头与轨头廓形的接触而被限制,最终只有一位轮对掉道,二位轮对未掉道。可见,车辆横向位移被脱轨防护装置限制,不会发生较大幅度的脱轨。

对比无脱轨防护装置时列车脱轨仿真分析所得的车辆运行姿态可以看出:有脱轨防护装置时,车辆在脱轨后不仅横向位移被有效限制,在竖向上也防止了二位轮对的掉道,从而有效地减小车辆掉道后的横向分力,达到了脱轨防护装置的预定目标。

3.4 脱轨防护装置限界计算

在实际线路运用时,脱轨防护装置应不影响车辆正常行驶,满足线路的限界要求。本文针对某型列车,采用我国相关地铁限界标准计算动态包络线,校核脱轨防护装置是否满足某市地铁线路的限界要求。给出了脱轨防护装置各种状态下的最大包络线。本文限界计算方法按照 CJJ 96—2003《地铁限界标准》所给公式计算。

按悬挂系统正常时、地面与隧道、空车和重车等条件,选择典型工况进行限界计算,其中隧道内不考虑侧风作用。由于篇幅原因,本文仅列出列车在地面直线行驶时空车(AW0)工况下的限界计算结果,如图 9 所示。其中横坐标 x 以车辆中心为原点,表示为车辆的横向空间位置,纵坐标 y 以轨道面为原点,表示为列车在竖向上的空间位置。从计算结果可知,在各种工况下,脱轨防护装置动态包络线满足限界要求。因此车辆安装脱轨防护装置后能正常行驶,不会对线路产生干涉。

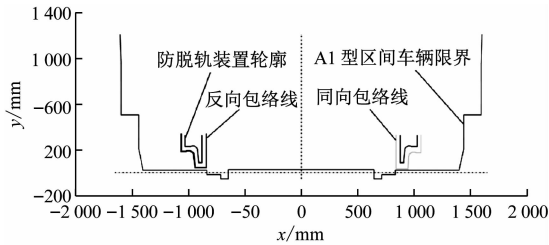


图 9 列车直线行驶时空车工况下的限界计算结果

Fig. 9 Clearance calculation results under the working condition of train operating in straight line without passenger load

4 结语

本文结合动力学与强度仿真软件,通过比较分析 3 个防脱轨方案仿真结果,综合考虑防二次爬轨脱轨的效果、安装部位的强度以及脱轨后由于铁轨

与脱轨防护装置发生碰撞对车辆造成的损害,提出了在构架下端安装防脱轨横向止挡作为脱轨防护装置的方案。

根据实际工况,对车辆按有、无脱轨防护装置的情况分别进行动力学仿真。对比仿真结果可以看出,安装有构架横向止挡脱轨防护装置的车辆能有效地实现车辆防脱轨目的,说明所提方案具有较好的预期效果和可行性。

采用相应标准,对安装有脱轨防护装置的某型列车进行了动态包络线计算。从计算结果可知,在各种计算工况下,脱轨防护装置动态包络线满足限界要求,不会影响车辆正常行驶。

参考文献

- [1] 肖新标. 复杂环境状态下高速列车脱轨机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
XIAO Xinbiao. Study on high-speed train derailment mechanism in severe environment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [2] NADAL M J. Theorie de stabilite des locomotives, Part II: mouvement de lacet[J]. Annales des Mines, 1896(10): 232.
- [3] WILSON N, FRIES R, WITTE M, et al. Assessment of safety against derailment using simulations and vehicle acceptance tests; a worldwide comparison of state-of-the-art assessment methods[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(7): 1113.
- [4] 曾京, 关庆华. 铁道车辆运行安全评判的轮对爬轨脱轨准则[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 1.
ZENG Jing, GUAN Qinghua. Wheelset climb derailment criteria for evaluation of railway vehicle running safety[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 1.
- [5] 翟婉明, 陈果. 根据车轮抬升量评判车辆脱轨的方法与准则[J]. 铁道学报, 2001, 23(2): 17.
ZHAI Wanming, CHEN Guo. Method and criteria for evaluation of

wheel derailment based on wheel vertical rise[J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(2): 17.

- [6] 向俊, 周智辉, 曾庆元. 列车脱轨研究最新进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(5): 1.
XIANG Jun, ZHOU Zhihui, ZENG Qingyuan. Recent developments in train derailment research[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(5): 1.
- [7] 梁少喆. 地铁障碍物与脱轨检测装置的设计与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
LIANG Shaozhe. Design and analysis of metro obstacle and derailment detection device [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [8] 黄伯洋, 周恕, 刘建基, 等. 小半径曲线安设防脱轨对防止列车脱轨事故的作用[C]// 中国铁道学会. 2004 年度学术活动优秀论文评奖论文集. 北京: 中国铁道学会, 2005: 5.
HUANG Boyang, ZHOU Shu, LIU Jianji, et al. The role of installing anti-derailment guard rails on small radius curves in preventing train derailment accidents [C] // Chinese Railway Society. Collection of Outstanding Papers for Academic Activities in 2004. Beijing: China Railway Society, 2005: 5
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范: GB 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB 5599—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

· 收稿日期: 2021-08-02 修回日期: 2021-08-16 出版日期: 2024-01-10
Received: 2021-08-02 Revised: 2021-08-16 Published: 2024-01-10
· 第一作者: 刘艳文, 高级工程师, 172555807@qq.com
通信作者: 肖海健, 硕士研究生, 172555807@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 115 页)

- [8] 石蕊, 张晓芸, 石广田, 等. 钢弹簧浮置板中低频振动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 131.
SHI Rui, ZHANG Xiaoyun, SHI Guangtian, et al. Analysis of vibration characteristics of steel spring floating slabs in low and middle frequency ranges[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(1): 131.
- [9] 张臻. 地铁轮轨型面匹配研究与钢轨型面优化[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
ZHANG Lin. Study on the profiles matching of metro wheel and rail and the optimization of rail profile[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [10] 刘春阳. 一系悬挂和扣件参数对钢轨波磨影响的仿真分析

[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

LIU Chunyang. A numerical simulation of influence of primary suspension and rail fastener parameters on rail corrugation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

· 收稿日期: 2021-07-06 修回日期: 2021-09-23 出版日期: 2024-01-10
Received: 2021-07-06 Revised: 2021-09-23 Published: 2024-01-10
· 第一作者: 张劲明, 硕士研究生, jinming0322@foxmail.com
通信作者: 马贺, 高级实验师, mahe@bucea.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license