

# 地铁车辆以磨损车轮通过钢弹簧浮置板轨道时的较好平稳性速度<sup>\*</sup>

张劲明 于蔚丹 马 贺 张 军 王 稳

(北京建筑大学城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 100040, 北京)

**摘 要** [目的] 为使地铁乘客获得较好的乘车体验, 探究轨道线路铺设浮置板时车体平稳性较好的通过速度区间。

[方法] 利用仿真软件建立了地铁车辆-浮置板轨道-路基的动力学模型, 分析了标准车轮及磨损车轮通过地铁有无钢弹簧浮置板轨道时的车体振动状况。对比了不同速度条件下, 增设浮置板前后车体垂向平稳性指标时域及频域的变化; 对比了车体在浮置板轨道系统下, 车体以磨损车轮与标准车轮通过时, 车体的垂向振动加速度等参数时域及频域的变化规律。[结果及结论] 不同速度时, 浮置板会使列车的平稳性指标增大, 相比无浮置板时平均增长了 5.8%; 横向平稳性指标在速度低于 60 km/h 时, 其对平稳性指标有减小作用。浮置板系统中, 磨损车轮的存在会加剧车体垂向振动, 这种现象在列车高速行驶时表现更突出。地铁车辆通过轨道时的垂向振动加速度频率主要集中在低频区段的 0~10 Hz, 横向振动加速度频率区段主要集中在 0~30 Hz。地铁车辆通过存在浮置板路段且速度在 48~60 km/h 区间时, 磨损车轮的车体垂向平稳性指标在 1.8 左右, 横向平稳性指标在 1.1 左右, 数值均较低, 即车体振动及横向运动较小, 平稳性较好。

**关键词** 地铁; 磨损; 钢板弹簧浮置板; 振动

**中图分类号** U270.1<sup>+</sup>1

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.01.020

## Preferable Stability Speed of Metro Vehicles Passing Steel Spring Floating Slab Tracks with Worn Wheels

ZHANG Jinming, YU Ruodan, MA He, ZHANG Jun, WANG Wen

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Key Laboratory for Service Performance of Urban Rail Transit Vehicles, 100040, Beijing, China)

**Abstract** [Objective] To enhance metro passenger riding experience, the speed range at which the carbody exhibits optimal stability while passing through tracks laid with floating slabs is explored. [Method] Using simulation software, a dy-

namics model of metro vehicle-floating slab track-subgrade is established to analyze the carbody vibration conditions when standard and worn wheels pass through tracks with or without steel spring floating slabs. Comparative analysis is conducted on the changes in carbody vertical stability index in time and frequency domains under different speed conditions, both before and after the installation of floating slabs. Additionally, under the floating slab track system, the change law of time and frequency domains of parameters such as carbody vertical vibration acceleration is compared between the worn and standard wheels passing through the floating slab track system. [Result & Conclusion] The presence of floating slabs at different speeds increases train stability index, showing an average increase of 5.8% compared to scenarios without floating slabs. The lateral stability index has a reducing effect on stability index when the speed is below 60 km/h. In the floating slab system, the presence of worn wheels exacerbates carbody vertical vibration, particularly noticeable when trains are running at high-speed. The vertical acceleration frequencies during metro vehicle passing tracks concentrate in the low-frequency range of 0-10 Hz, while the lateral ones concentrate in the 0-30 Hz range. When metro vehicles pass through sections with floating slabs at the speed in 48-60 km/h range, the carbody vertical stability index with worn wheels is approximately 1.8, and the lateral one is around 1.1, both of which are relatively low, indicating less carbody vibration and lateral movement, thus better stability.

**Key words** metro; worn; steel spring floating slab; vibration

钢弹簧浮置板轨道具有减振性能好、成本低及维修方便等优点, 被广泛应用在城市轨道交通中。

国内外研究浮置板的方法主要分为理论研究、试验研究及仿真研究。在理论研究方面, 建立二维力学模型, 将钢轨视为长梁, 浮置板分别视为质量

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51775031); 北京市博士后科研活动经费项目; 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金项目(X20048)

块、短梁及长梁,通过振型叠加得出离散支承的振动方程,计算求解浮置板的减振效果<sup>[1-4]</sup>。其中,文献[4]发现:适当减少支承刚度可减少钢轨挠度,从而提高列车舒适性。

在试验研究方面,利用数据采集器在实验室或现场收集振动数据,从时域及频域的角度分析了浮置板轨道的减振特性<sup>[5-6]</sup>。

在仿真研究方面,基于有限元及多体动力学计算理论,建立浮置板轨道-桥梁有限元模型或车辆-浮置板-基础/桥梁耦合模型,通过仿真计算得出浮置板的固有频率等数据,以评价浮置板的减振效果并进行参数优化<sup>[7]</sup>。

目前,浮置板轨道对车体振动影响的分析模型大多是基于标准车轮建立的。由于地铁车轮在服役期间会发生磨损。为进一步分析车辆通过减振轨道时车轮磨耗对车体振动状况的影响,本文基于有限元及多体动力学理论,建立车辆-浮置板轨道-路基耦合动力学模型,对比分析标准车轮及磨耗车轮,在有无浮置板轨道时的车体振动状况。

## 1 地铁车辆浮置板轨道动力学模型

### 1.1 地铁车辆动力学模型

本文以我国某四轴地铁车辆为研究对象,建立车辆动力学模型。车辆动力学模型由车体、构架、轮对和悬挂系统组成。车辆车轮型面分别采用 S1002 标准型面及典型磨耗型面,如图 1 所示。其中,磨耗型面的设置参照文献[8]:磨损主要位于轮缘和踏面的交界处,形状呈梭型;侧磨量为 3.10 mm,中心滚动圆的垂直磨耗量为 0.43 mm;整个车轮踏面磨耗比较均匀。

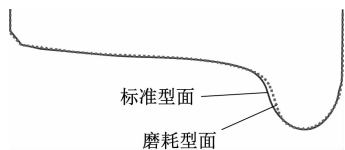


图 1 S1002 标准型面与典型磨耗型面对比图

Fig. 1 Comparison diagram of S1002 standard tread and typical abrasion tread

### 1.2 钢弹簧浮置板轨道系统动力学模型

基于有限元计算理论,建立柔性钢轨及钢弹簧浮置板轨道系统动力学模型(以下简称“轨道系统模型”),如图 2 所示。按轨道形式不同,轨道系统模型分为柔性钢轨段及钢弹簧浮置板段。其中钢弹簧浮置板包括浮置板及钢弹簧隔振器两部分,钢

轨与钢弹簧浮置板间通过线性扣件力元进行连接。

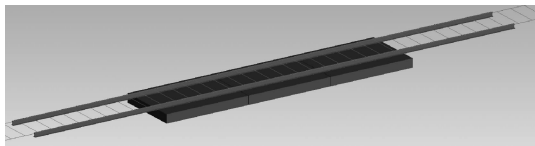


图 2 轨道系统模型

Fig. 2 Track system model

在轨道系统模型中,轨道全长 200 m。柔性钢轨段的纵向坐标  $x = 100 \sim 121$  m,其余均为刚性钢轨。在  $x = 103 \sim 114$  m 处铺设了 3 块相同的浮置板,浮置板与浮置板之间的距离为 0.024 m。每块浮置板上设置 6 组扣件,扣件距浮置板中心线 0.753 m;每隔 0.600 m 设置 1 组钢弹簧,钢弹簧距浮置板中心线 0.900 m。

### 1.3 建立耦合动力学模型

为充分探究标准车轮通过浮置板轨道时车体的振动特性,需针对钢弹簧浮置板段和柔性钢轨段分别建立车辆-浮置板轨道-路基耦合动力学模型(以下称为“耦合模型一”)和车辆-柔性钢轨-路基(无浮置板)耦合动力学模型(以下称为“耦合模型二”),并在仿真分析后对结果进行对比。

耦合模型一的拓扑图如图 3 所示。车轮与浮置板轨道系统间为轮轨接触,浮置板轨道系统与路基间为线性钢弹簧耦合。耦合模型二与耦合模型一的实现方法基本一致。耦合模型二中,柔性钢轨直接与路基进行固定连接。

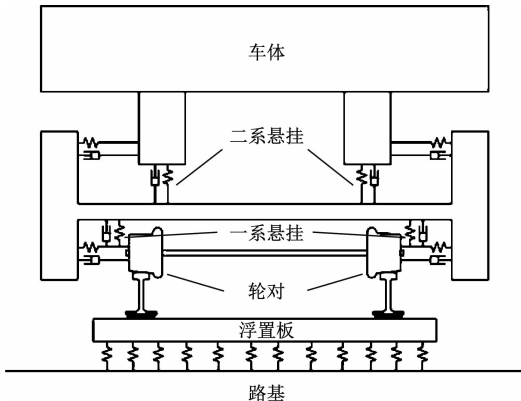


图 3 耦合模型一的拓扑图

Fig. 3 Topological diagram of coupling model I

## 2 动力学响应结果分析

地铁列车运行速度  $v$  一般为 60 km/h。考虑  $v$  对列车平稳性的影响,本文研究不同车轮和不同轨

道系统工况下,不同  $v$  时的车辆动力学响应<sup>[9]</sup>。其中  $v$  分别取 30 km/h、48 km/h、60 km/h、72 km/h 及 90 km/h。车辆动力学响应的研究工况如表 1 所示。

表 1 车辆动力学响应的研究工况

Tab.1 Research working conditions of vehicle dynamics response

工况	车轮	轨道系统的浮置板情况	耦合模型
工况 1	标准车轮	有浮置板	耦合模型一
工况 2	标准车轮	无浮置板	耦合模型二
工况 3	磨耗车轮	有浮置板	耦合模型一
工况 4	磨耗车轮	无浮置板	耦合模型二

2.1 工况 2 下的车体振动情况

工况 2 下不同  $v$  时的车体垂向振动加速度历程曲线如图 4 所示。

由图 4 可见,不同  $v$  对应的每条历程曲线会出现 4 个正向峰值(以  $v=90$  km/h 曲线为例,为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ )和 4 个负向峰值(以  $v=90$  km/h 曲线为例,为  $A_5$ 、 $A_6$ 、 $A_7$ 、 $A_8$ )。其中 4 个正向峰值代表车辆前后转向架的 2 个轮对在  $x=90$  m 及  $x=110$  m 处附近驶入柔性钢轨(以车辆定距中点标记车体位置),4 个负向峰值代表车辆前后转向架的 2 个轮对驶出柔性轨道系统。

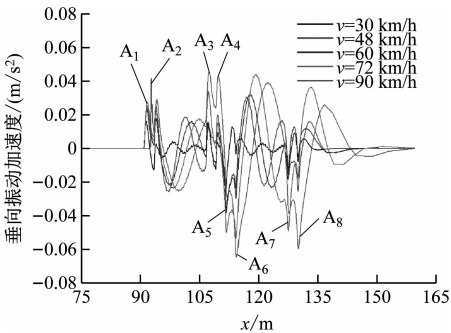


图 4 无浮置板时的车体垂向振动加速度历程曲线  
Fig.4 Time-history curve of carbody vertical vibration acceleration without floating slab

由图 4 还可看出,在耦合模型二中,随着  $v$  的增大,车体的垂向振动加速度峰值也相应增大,说明  $v$  越大,车体垂向振动就越剧烈。

2.2 工况 1 和工况 2 的车辆平稳性指标

为了更直观地比较有无浮置板轨道系统下车体的横向及垂向平稳性,使用车辆平稳性指标  $W$  对车体振动进行对比研究。根据 GB 5599—2019 规定,  $W$  为:

$$W=7.08\left[\frac{a^3}{f}F(f)\right]^{0.1}\tag{1}$$

式中:

$a$ ——车体振动加速度,单位  $g$  ( $g$  为重力加速度);

$f$ ——振动频率,单位 Hz;

$F(f)$ ——频率修正系数。

$F(f)$  的计算取值如表 2 所示。

表 2  $F(f)$  的计算取值

Tab.2 Calculation values of  $F(f)$

振动类型	$f/\text{Hz}$	$F(f)$ 取值
垂向振动	$0.5\sim<5.9$	$0.325f^2$
	$5.9\sim<20.0$	$400/f^2$
	$\geq 20.0$	1
横向振动	$0.5\sim<5.4$	$0.8f^2$
	$5.4\sim<26.0$	$650/f^2$
	$\geq 26.0$	1

由式(1)可知,  $a$  越大,则  $W$  越大,对应的车体平稳性越差。工况 1 和工况 2 的  $W$ - $v$  曲线如图 5 所示。

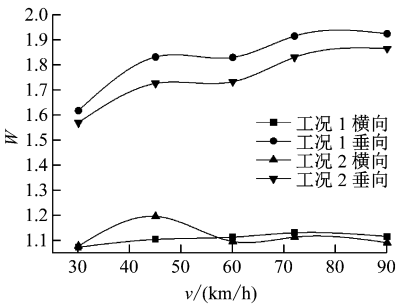


图 5 工况 1 和工况 2 的  $W$ - $v$  曲线  
Fig.5  $W$ - $v$  curve of working conditions 1 and 2

由图 5 可见:在工况 1 和工况 2 下,垂向  $W$  均随着  $v$  的增大逐步增大;且设置浮置板会降低车体的垂向平稳性;工况 2 的横向  $W$  在  $v=48$  km/h 时达到峰值;工况 1 的横向  $W$  变化比较平稳,在  $v=72$  km/h 时达到峰值;在  $v>60$  km/h 时工况一的  $W$  较大,说明车体的平稳性较差。

对时域加速度的信号进行 STFT(短时傅里叶变换)处理,可得到工况 1 和工况 2 的垂向振动加速度频谱特性图,如图 6 所示。两种不同轨道下的车体较大垂向振动加速度对应的振动频率主要为低频,且集中在  $f=0\sim 5$  Hz 范围内。与图 6 b)对比可知,图 6 a)中浮置板轨道下可减少 20~40 Hz 频段

的振动。据分析,浮置板的存在,减少了轮轨接触高频振动传向周边结构,从而减少周边结构振动对车体的二次振动传递。

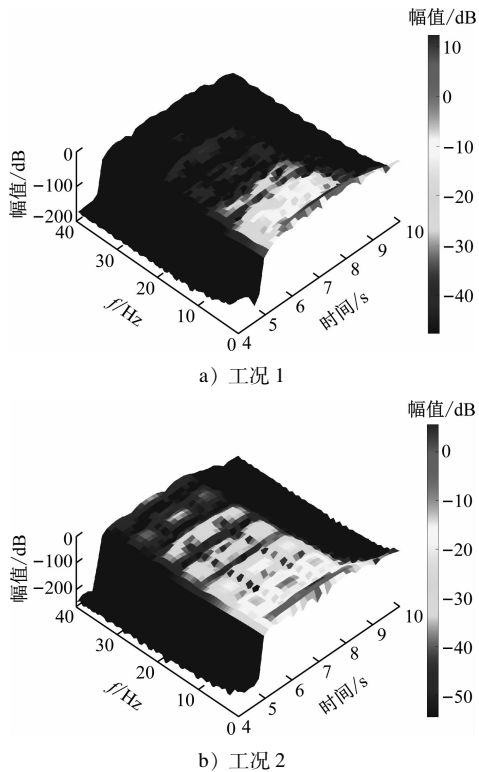


图6 工况1和工况2的车体垂向振动加速度频谱特性图  
Fig. 6 Spectral characteristics diagram of carbody vertical vibration acceleration under working conditions 1 and 2

### 2.3 工况3的车辆动力学响应

工况3下 $v$ 不同时车体的振动加速度峰值变化曲线,如图7所示。

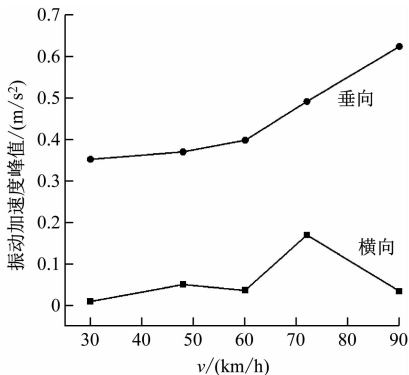


图7 工况3下 $v$ 不同时车体的振动加速度峰值变化曲线  
Fig. 7 Change curve of carbody vibration acceleration peak values with different  $v$  under working condition 3

由图7可见,在工况3下, $v=72$  km/h时的车体横向振动加速度峰值达到最大,说明此时的车体

横向振动较明显。

### 2.4 车轮磨耗的影响

图8为工况1与工况3的车体垂向振动加速度峰值曲线。由图8可见,车体垂向振动加速度曲线变化以 $v=60$  km/h为分界点:当 $v<60$  km/h时,车轮的磨耗对车体垂向振动加速度的影响很小;当 $v>60$  km/h时,随着 $v$ 增加,工况3的车体垂向振动加速度峰值大幅上升,说明磨耗车轮对车体垂向振动加速度的影响凸显。

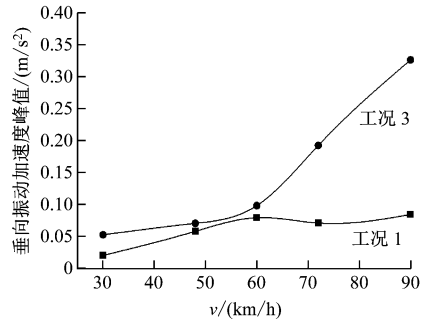


图8 工况1与工况3的车体垂向振动加速度峰值曲线  
Fig. 8 Curve of carbody vertical vibration acceleration peak values under working conditions 1 and 3

工况1和工况3的 $W-v$ 曲线如图9所示。由图9可见,在 $v=30\sim 90$  km/h区间内,无论横向及垂向,工况3的 $W$ 恒大于工况1的 $W$ ,说明车轮的磨耗会使车体的平稳性降低。图9中工况3的垂向 $W$ 变化情况为: $v=30\sim 60$  km/h时,工况3的垂向 $W$ 有一定增长;在 $v>60$  km/h时,工况3的垂向 $W$ 增幅加剧;在 $v=48$  km/h附近,工况3的垂向 $W$ 仅比工况1的垂向 $W$ 大5.3%,二者差值最小。

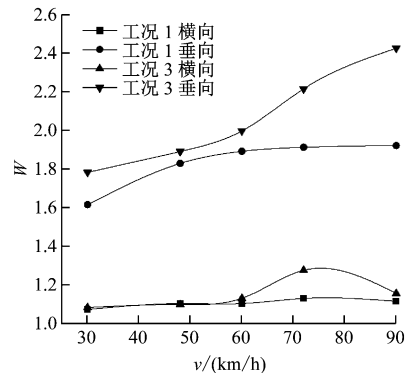


图9 工况1与工况2的 $W-v$ 曲线  
Fig. 9  $W-v$  curve under working conditions 1 and 3

在 $v=30\sim 60$  km/h时,工况3的横向 $W$ 增长较小;在 $v=72$  km/h处增幅较大;在 $v=48\sim 60$  km/h区间,与工况1相比,工况3的横向 $W$ 更小,



说明车体横向平稳性更好。与工况 1 相比,工况 3 的车轮横向  $W$  平均大了 4.5%。

工况 3 下的车体垂向振动加速度时频图如图 10 所示。由图 10 可见,工况 3 下的垂向振动加速度主要分布频率也为低频,且集中在  $f=0 \sim 5$  Hz 范围内。振动幅值的衰减速度快,在  $f=30$  Hz 处,振动幅值已基本恢复到  $-40$  dB。

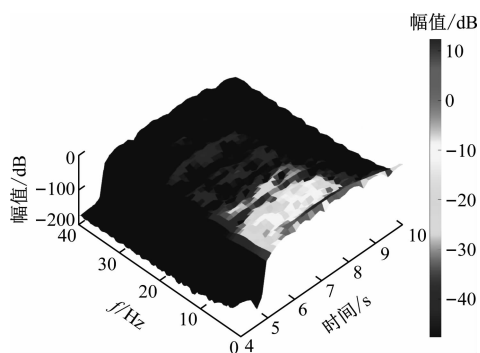


图 10 工况 3 下的车体垂向振动加速度频谱特性图

Fig. 10 Spectral characteristics diagram of carbody vertical acceleration under working condition 3

图 11 为工况 3 下的车体横向振动加速度频谱特性图。在刚进入浮置板轨道段时,横向振动加速度幅值较大,且较大横向振动加速度对应的振动频率主要分布在  $0 \sim 30$  Hz 低频区段。

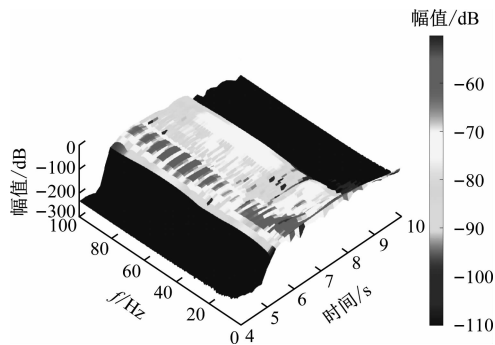


图 11 工况 3 下的车体横向振动加速度频谱特性图

Fig. 11 Spectral characteristics diagram of carbody lateral vibration acceleration under working condition 3

### 3 结论

1)  $v$  不同时,相比无浮置板情况,设置钢弹簧浮置板会增大列车的  $W$ ,且平均增幅为 5.8%;横向  $W$  在  $v$  低于 60 km/h 时,其对平稳性指标有减小作用。

2) 采用钢弹簧浮置板轨道时,使用磨耗车轮会加剧车体的垂向振动。这一现象在列车高速行驶

时会更突出。无论横向及垂向,工况 3 的  $W$  恒大于工况 1 的  $W$ ,说明车轮的磨耗会使车体的平稳性降低。

3) 地铁车辆的较大垂向振动加速度对应频率主要集中在  $0 \sim 10$  Hz 低频区段,较大横向振动加速度对应频率主要集中在  $0 \sim 30$  Hz 低频区段。

4) 工况 3 下,当  $v$  为 48 ~ 60 km/h 时,垂向  $W$  为 1.8 左右,横向  $W$  为 1.1 左右,均较低,说明此时的车体振动及横向运动较小,平稳性较好。

### 参考文献

- [1] LING L, JIANG P, WANG K, et al. Dynamic interaction between rail vehicles and vibration-attenuating slab tracks[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119545.
- [2] 李林峰, 马蒙, 刘维宁, 等. 不同激励作用下钢弹簧浮置板轨道减振效果研究[J]. 工程力学, 2018, 35(增刊 1): 253. LI Linfeng, MA Meng, LIU Weining, et al. Analysis for the vibration reduction characteristics of steel spring floating slab tracks under different types of excitation[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(S1): 253.
- [3] 韦凯, 豆银玲, 杨麒陆, 等. 钢弹簧浮置板轨道的随机振动分析及参数优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(8): 115. WEI Kai, DOU Yinling, YANG Qilu, et al. Random vibration analysis and parameter optimization of steel-spring floating-slab track[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(8): 115.
- [4] 石培泽. 钢轨嵌入式钢弹簧浮置板轨道减振性能分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(10): 114. SHI Peize. Analysis of vibration reduction performance of rail embedded steel spring floating slab track[J]. Railway Engineering, 2019, 59(10): 114.
- [5] 黄强, 黄宏伟, 张冬梅. 移动荷载作用下离散支承浮置板轨道振动响应研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(19): 190. HUANG Qiang, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei. Vibration response of discretely supported floating slab track under a moving load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(19): 190.
- [6] 韩艺翠, 贺玉龙, 李怀龙. 成都地铁钢弹簧浮置板道床减振性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 136. HAN Yihui, HE Yulong, LI Huailong. Analysis of the vibration reduction performance of steel spring floating slab track bed of Chengdu Metro[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(1): 136.
- [7] ALABBASI S, HUSSEIN M, ABDELJABER O, et al. A numerical and experimental investigation of a special type of floating-slab tracks[J]. Engineering Structures, 2020, 215: 110734.

(下转第 120 页)

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