

有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学性能分析*

赵思琪^{1,2} 徐井芒^{1,2} 马前涛^{1,2} 梁新缘^{1,2} 王 平^{1,2} 陈嘉胤^{1,2}

(1. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 610031, 成都; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 3 号道岔侧股的曲线半径较小, 受到的轮轨冲击力较大, 这在一定程度上降低了有轨电车侧向过岔的安全性。为研究有轨电车侧向通过 3 号道岔时的动力学性能, 选取了列车运行速度、摩擦系数、轨距和坡度 4 个参数作为影响因素。基于车辆动力学理论, 对比分析了各影响因素不同取值下有轨电车侧逆向和侧顺向通过 3 号道岔时轮轨垂向力、轮轨横向力、脱轨系数及轮重减载率的变化规律。仿真结果表明, 有轨电车侧顺向通过 3 号道岔的动力学性能总体优于侧逆向; 在不同的速度、轨距和坡度工况下, 侧顺向过岔的安全性优于侧逆向; 在不同的摩擦系数工况下, 侧逆向过岔的安全性优于侧顺向。4 种影响因素对有轨电车侧向通过 3 号道岔时的轮重减载率影响最大。4 种因素中, 列车运行速度和摩擦系数对有轨电车侧向过岔的影响较为显著。

关键词 有轨电车; 3 号道岔; 侧向过岔; 动力学性能

中图分类号 U482.10.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.005

Dynamics Performance Analysis of Tram Lateral Passing through No. 3 Turnout

ZHAO Siqi, XU Jingmang, MA Qiantao, LIANG Xinyuan, WANG Ping, CHEN Jiayin

Abstract The curve radius of No. 3 turnout side strand is small, and the received wheel/rail impact force is relatively large, which reduces the safety of tram lateral passing through turnout to a certain degree. To study the performance of tram dynamics when passing through No. 3 turnout, four tram running parameters of speed, friction coefficient, gauge and gradient are selected as influencing factors. Based on vehicle dynamics theory, the variation laws of wheel/rail vertical force, wheel/rail lateral force, derailment coefficient and wheel load reduction rate when the tram passes through No. 3 turnout in reverse and forward directions by the side with different values of each influencing factor are compared and analyzed. The simulation results show that, the dynamics performance of the tram passing through No. 3 turnout in the forward direction is

generally better than that in the reverse direction; under different working conditions of speed, gauge and gradient, the safety of lateral forward crossing turnout is better than that of lateral reverse crossing turnout; under different friction coefficient conditions, the safety of lateral reverse crossing turnout is better than that of lateral forward. These four influencing factors have the greatest impact on the wheel load reduction rate when the tram passes through No. 3 turnout laterally. Among the four factors, tram running speed and friction coefficient have a significant impact on the lateral crossing of the tram.

Key words tram; No. 3 turnout; lateral passing turnout; dynamics performance

Author's address Key Laboratory of High-speed Railway Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

道岔是轨道的薄弱环节, 需要采用尖轨及心轨组合的特殊的变截面钢轨^[1]。文献[2-6]基于轮轨接触几何的求解方法为岔区的接触几何提供了有效的数值工具。然而, 国内外关于有轨电车过岔性能的研究仍较少。有轨电车一般采用标准轨和槽形轨的钢轨形式。受运行条件的限制, 有轨电车运行的轨道大都采用小号码道岔。小号码道岔的曲线半径较小, 容易引起较大的轮轨冲击^[7], 尤其有轨电车侧向通过道岔时安全性能较低, 侧股经常会发生脱轨事故。本文在文献[8]建立的有轨电车动力学模型基础上, 对有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学性能进行研究, 以期有轨电车侧向通过小号码道岔的安全性提供理论支撑和技术支持。

1 有轨电车道岔耦合动力学模型

1.1 车辆模型

本文的有轨电车仿真模型采用浮车型五模块

* 国家自然科学基金(51778542, 51978586, U1734207)

传统 100% 轮对低地板有轨电车^[9],由 5 节车体 M + F + T + F + M 铰接而成(M 为动车、F 为浮车、T 为拖车),转向架均采用传统的轮对转向架。该有轨电动力学模型如图 1 和图 2 所示,其中图 1 为轮对和转向架结构组成车辆模型的拓扑关系,本模型考虑了纵向、横移、沉浮、侧滚、点头和摇头 6 个自由度。模型的部分参数如表 1 所示。

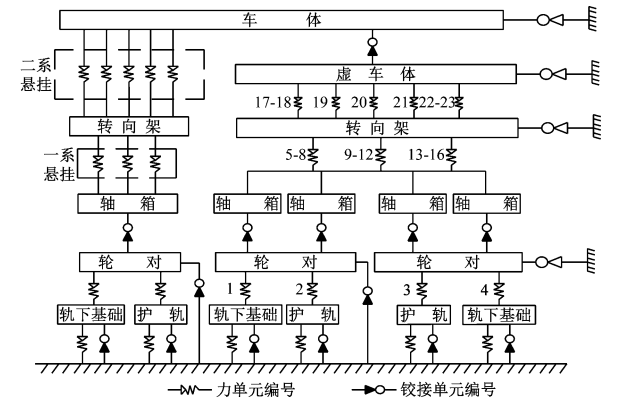


图 1 传统 100% 轮对低地板有轨电车车辆动力学拓扑模型
Fig. 1 Vehicle dynamics topology model of conventional 100% wheel-set low floor tram

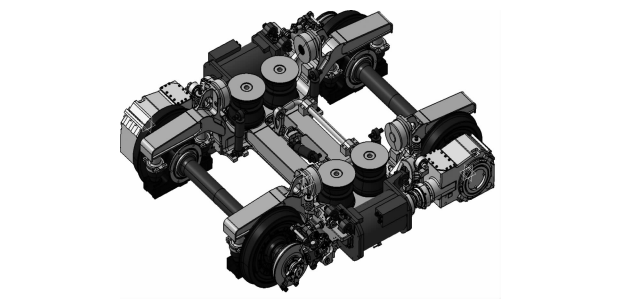


图 2 传统 100% 轮对低地板有轨电车的转向架动力学模型
Fig. 2 Bogie dynamics model of conventional 100% wheel-set low floor tram

表 1 传统 100% 轮对低地板有轨电车动力学模型的部分参数

Tab. 1 Some parameters of the dynamics model of the conventional 100% wheel-set low floor tram	
参数	参数值
轮对内侧距/m	1.381
车轮滚动圆半径/m	0.31
轮对质量/t	0.913

注:踏面外形采用 PZ 踏面。

1.2 道岔模型

本文采用传统的 50 kg/m 标准轨 3 号道岔作为道岔仿真模型。该道岔结构主要有转辙器、连接部

分、辙叉及护轨等。由于道岔模型是变截面模型,为了在 SIMPACK 软件中实现对道岔的建模,需要建立相应的轨道型面文件来描述该道岔模型。可利用轨道装配文件调出相应的型面文件,依据实际的道岔特征截面廓形构建出变截面的道岔模型^[9]。

首先确定任意截面在整体坐标系中的表达式,一般采用三次样条插值函数来拟合,以保证曲线交点处的平滑过渡,道岔模型钢轨的变截面处理方法如图 3 所示。拟合前,需借助画图软件对廓形进行离散化。对于转辙器和固定辙叉等特殊部位,还需将尖轨和心轨轨头底部与所贴靠的钢轨连结成同一个断面,以便于离散点的生成。

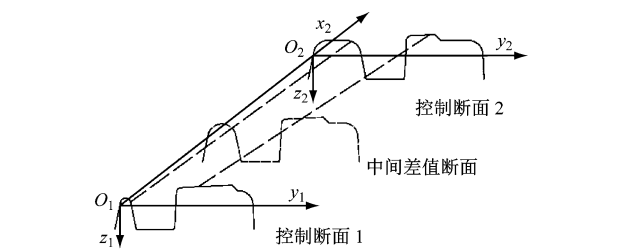


图 3 道岔模型钢轨的变截面处理方法示意图
Fig. 3 Diagram of processing method for turnout model rail variable cross-section

本文计算所采用道岔的转辙器区和辙叉区在拟合插值后得到的变截面模型轮廓如图 4 所示。

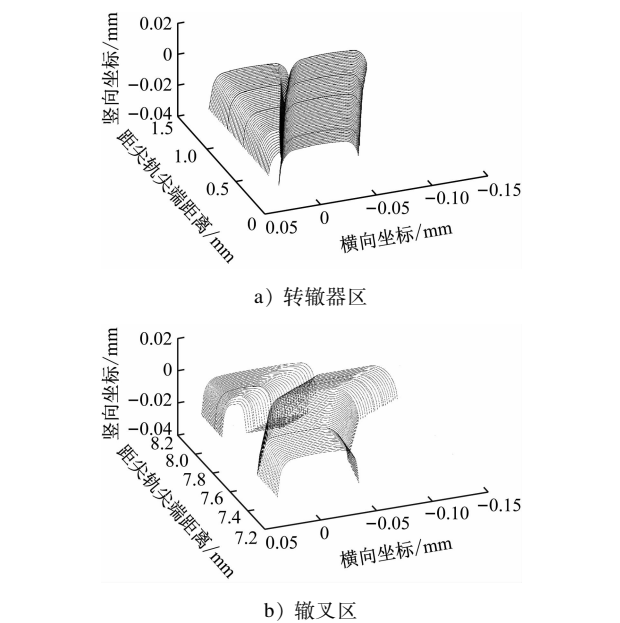


图 4 采用插值函数拟合得到的道岔变截面钢轨模型截图
Fig. 4 Screenshot of turnout variable cross-section rail model obtained by interpolation function fitting

2 轮轨接触几何情况分析

本文基于迹线法原理,利用 MATLAB 软件自行编制计算程序,用以计算有轨电车 PZ 低地板车轮踏面与 50 kg/m 钢轨的接触几何情况。

以尖轨顶宽 35 mm 的接触点横线位置为例,将基于迹线法利用 MATLAB 编程所得的钢轨上接触点横向位置及利用 SIMPACK 软件计算所得钢轨接触点横向位置进行对比,结果如图 5 所示。由图 5 可知,两种软件的计算结果基本符合。

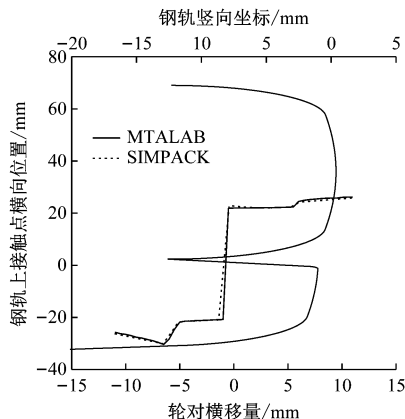


图 5 两种软件下尖轨顶宽 35 mm 处接触点的横向位置对比

Fig. 5 Transverse position comparison of contact point at switch rail top width of 35 mm under two wheel-set types

2.1 转辙器区轮轨接触分析

轮对横移量指轮对中心相对钢轨中心的偏移量。基于迹线法原理,计算转辙器区轮对横移量为 $-11 \sim 11$ mm 时基本轨和不同尖轨顶宽(分别取 10 mm、35 mm、50 mm)处钢轨断面上各轮轨接触点的分布情况,仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知,随着轮对横移量的增大,轮轨接触点从轨顶逐渐向轨距角过渡;在尖轨顶宽 10 mm 处的断面上,随着轮对横移量的增大,车轮与尖轨接触,但由于尖轨顶宽 10 mm 处的结构较为薄弱,应尽量增大尖轨前端的尖轨降低值,避免尖轨尖端薄弱结构与车轮出现过多接触;在尖轨顶宽 35 mm 处,随着轮对横移量的增大,轮轨接触点从基本轨过渡到尖轨;在尖轨顶宽 50 mm 处,随着轮对横移量的增大,轮轨接触点均位于尖轨上,说明轮载的过渡已全部完成。

2.2 辙叉区轮轨接触分析

由于辙叉区车轮受到护轨的限制,其在辙叉区

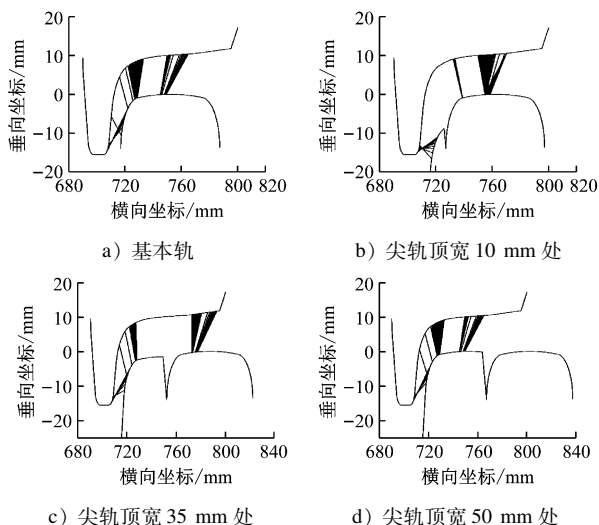


图 6 转辙器区基本轨和不同尖轨顶宽断面处各轮轨接触点的分布情况

Fig. 6 Distribution of wheel/rail contact points at the sections of stock rails and switch rails with different top widths in the switch area

的轮对横移量为 $-9 \sim 6$ mm。基于迹线法原理计算轮对横移量为 $-9 \sim 6$ mm 时心轨顶宽(分别取 20 mm、35 mm、40 mm 和 50 mm)处钢轨断面上各轮轨接触点的分布情况,仿真结果如图 7 所示。

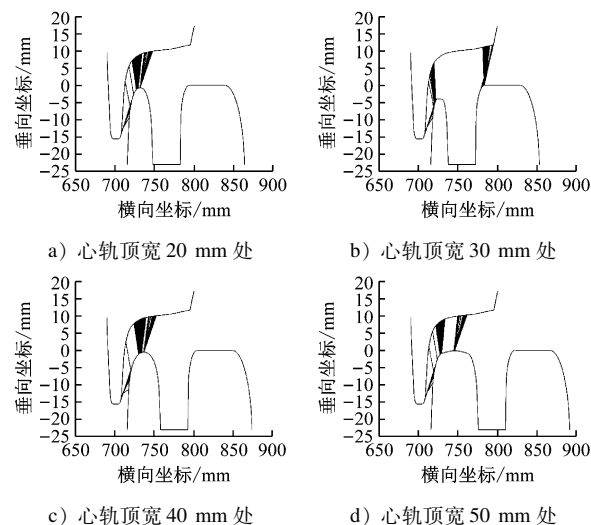


图 7 辙叉区不同心轨顶宽断面处各轮轨接触点的分布情况

Fig. 7 Distribution of wheel/rail contact points at sections of different turnout rail top widths in the frog area

由图 7 可知,辙叉区各轮轨接触点的分布较为集中。在心轨顶宽 20 mm 处的断面上,随着轮对横移量的增大,车轮从基本轨过渡到心轨,并于心轨接触;在心轨顶宽 30 mm 处的断面上,随着轮对横

移量的增大,轮轨接触点均位于心轨上,即轮载过渡已全部完成;在心轨顶宽 40 mm 处断面和心轨顶宽 50 mm 处断面上,轮轨接触点呈现的规律与心轨顶宽 30 mm 处断面一致。

3 有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学性能分析

本文对有轨电车曲线轨道设置参数如下:前后缓和曲线长度为 1.43 m;圆曲线长度为 8.30 m;曲线半径为 25 m;车轮踏面为 PZ 踏面。选取轮轨垂向力、轮轨横向力、脱轨系数及轮重减载率作为有轨电车侧向过岔动力学性能分析的 4 个指标,以有轨电车端部转向架前轮对左轮为例(此时尖轨位于左侧),计算有轨电车侧逆向、侧顺向通过 3 号道岔时各指标的动力学响应情况。

3.1 列车运行速度对有轨电车侧向过岔的影响

在其他参数不变、仅改变有轨电车运行速度情况下,分别计算 5.00 km/h、6.75 km/h、7.50 km/h、8.75 km/h 和 10.00 km/h 5 种运行速度下有轨电车侧逆向、侧顺向通过 3 号道岔时的动力学响应。计算结果如图 8 所示。

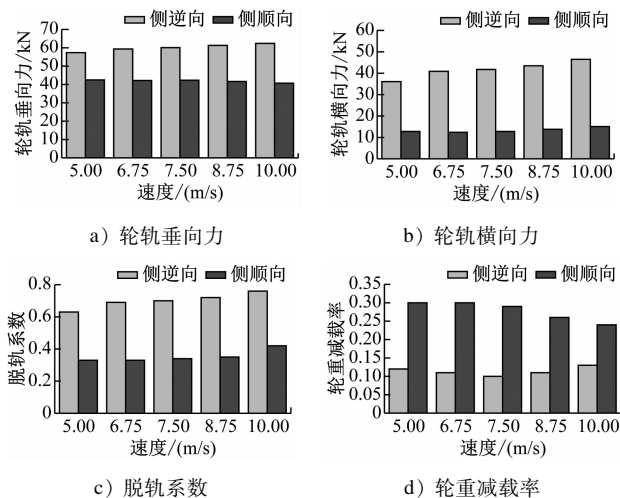


图 8 5 种速度工况下有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学响应

Fig. 8 Dynamics response of tram passing through No. 3 turnout laterally under five speed conditions

由图 8 可知,运行速度从 5.00 km/h 增大至 10.00 km/h 后:①侧逆向过岔时的轮轨垂向力增大了 8.78%,侧顺向过岔时的轮轨垂向力减小了 4.17%;②侧逆向过岔时的轮轨横向力增大了 28.73%,侧顺向过岔时的轮轨横向力增大了 17.84%;③侧逆

向过岔时的脱轨系数增大了 20.63%,侧顺向过岔时的脱轨系数增大了 27.27%;④侧逆向过岔时的轮重减载率增大了 8.33%,侧顺向过岔时的轮重减载率减小了 20.00%。由此可知,随着运行速度的增大,有轨电车侧顺向过岔的安全性优于侧逆向过岔。

3.2 摩擦系数对有轨电车侧向过岔的影响

在其他参数不变、仅改变摩擦系数的情况下,分别计算 0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 这 5 种摩擦系数下有轨电车侧逆向、侧顺向通过 3 号道岔时的动力学响应。计算结果如图 9 所示。

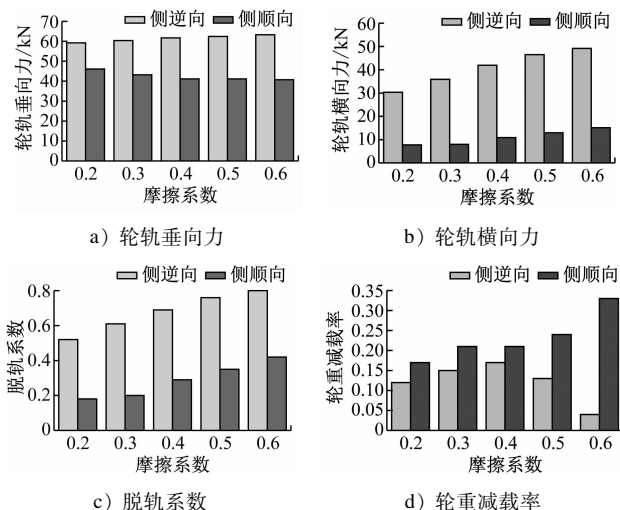


图 9 5 种摩擦系数下有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学响应

Fig. 9 Dynamics response of tram passing through No. 3 turnout laterally under 5 friction coefficients

由图 9 可知,摩擦系数从 0.2 增大至 0.6 后:①侧逆向过岔时的轮轨垂向力增大了 6.89%,侧顺向过岔时的轮轨垂向力减小了 11.69%;②侧逆向过岔时的轮轨横向力增大了 62.10%,侧顺向过岔时的轮轨横向力增大了 95.23%;③侧逆向过岔时的脱轨系数增大了 53.85%,侧顺向过岔时的脱轨系数增大了 133.33%;④侧逆向过岔时的轮重减载率减小了 66.67%,侧顺向过岔时的轮重减载率增加了 94.12%。由此可知,随着摩擦系数的增大,有轨电车侧逆向过岔的安全性优于侧顺向。

3.3 轨距对有轨电车侧向过岔的影响

在其他参数不变、仅改变轨距的情况下,分别计算 1 431 mm、1 433 mm、1 435 mm、1 437 mm 和 1 439 mm 这 5 种轨距下有轨电车侧逆向、侧顺向通过 3 号道岔时的动力学响应。计算结果如图 10 所示。

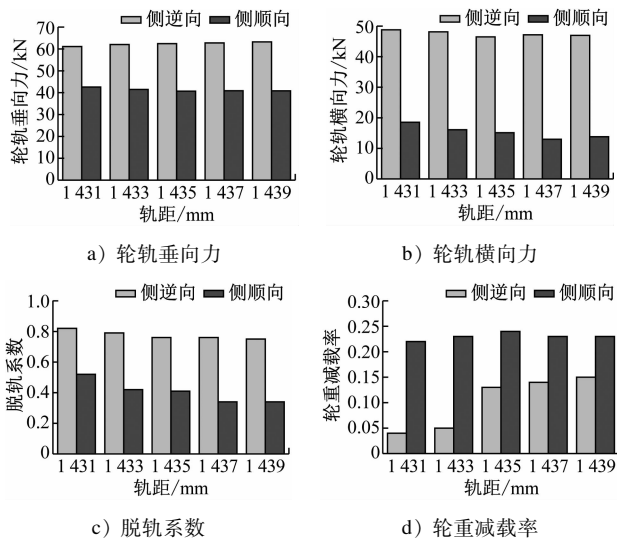


图 10 5 种轨距下有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学响应

Fig. 10 Dynamics response of tram passing through No. 3 turnout laterally under 5 gauges

由图 10 可知,轨距从 1 431 mm 增大至 1 439 mm 后:①侧逆向过岔时的轮轨垂向力增大了 3.50%,侧顺向过岔时的轮轨垂向力减小了 4.08%;②侧逆向过岔时的轮轨横向力减小了 3.81%,侧顺向过岔时的轮轨横向力减小了 8.54%;③侧逆向过岔时的脱轨系数减小了 25.57%,侧顺向过岔时的脱轨系数减小了 34.52%;④侧逆向过岔时的轮重减载率增加了 275.00%,侧顺向过岔时的轮重减载率增加了 4.54%。由此可知,随着轨距的增大,有轨电车侧顺向过岔的安全性优于侧逆向。

3.4 坡度对轨电车侧向过岔的影响

在其他参数不变、仅改变线路坡度的情况下,分别计算在平坡,以及 5‰、10‰、15‰和 20‰这 5 种坡度下有轨电车侧逆向、侧顺向通过 3 号道岔时的动力学响应。计算结果如图 11 所示。

由图 11 可知,坡度从平坡增大至 20‰后:①侧逆向过岔时的轮轨垂向力减少了 8.07%,侧顺向过岔时的轮轨垂向力减小了 9.33%;②侧逆向过岔时的轮轨横向力减少了 0.62%,侧顺向过岔时的轮轨横向力减少了 26.50%;③侧逆向过岔时的脱轨系数增加了 8.43%,侧顺向过岔时的脱轨系数减小了 45.35%;④侧逆向过岔时的轮重减载率增加了 23.08%,侧顺向过岔时的轮重减载率增加了 25.00%。由此可知,随着坡度的增大,有轨电车侧顺向过岔的安全性优于侧逆向。

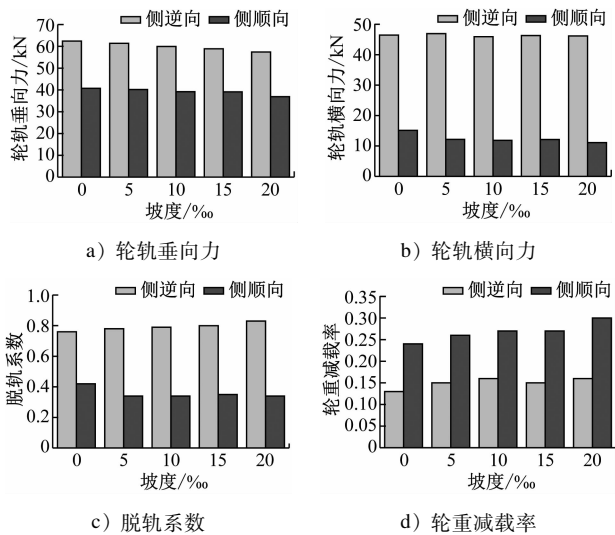


图 11 5 种坡度下有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学响应

Fig. 11 Dynamics response of tram passing through No. 3 turnout laterally under five gradients

4 结语

由仿真结果可知,从总体看,有轨电车侧顺向通过 3 号道岔的动力学性能优于侧逆向;在运行速度、摩擦系数、轨距及坡度这 4 个影响因素的不同取值中,有轨电车侧向过岔时,其侧逆向的轮轨垂向力、轮轨横向力和脱轨系数均大于侧顺向的轮轨垂向力、轮轨横向力和脱轨系数,但侧逆向的轮重减载率均小于侧顺向的轮重减载率。

列车运行速度、摩擦系数、轨距及坡度这 4 种影响因素在有轨电车侧逆向过岔时对轮重减载率影响最为显著,在侧顺向过岔时对脱轨系数影响最为显著。其中,列车运行速度对侧逆向过岔的动力学性能影响最大,摩擦系数对侧顺向过岔的动力学性能影响最大。

随着这 4 种影响因素数值的增大,有轨电车侧顺向过岔的轮轨垂向力均减小,这说明 4 种影响因素的适当增大对有轨电车侧顺向过岔的轮轨垂向力有利。其中,轨距和坡度增大,有轨电车侧顺向的动力学性能整体变好。

结合仿真结果的对比数据可得到以下结论:有轨电车侧逆向和侧顺向通过 3 号道岔时,在不同的列车运行速度、轨距及坡度工况下,有轨电车侧顺向过岔的安全性优于侧逆向;在不同的摩擦系数工况下,有轨电车侧逆向过岔的安全性优于侧顺向。

参考文献

- [1] 赵卫华, 曹洋, 王平. 用于工程设计的道岔动力参数法研究[J]. 铁道标准设计, 2011, 55(9): 9.
ZHAO Weihua, CAO Yang, WANG Ping. A method using turnout dynamic parameters to improve the turnout design[J]. Railway Standard Design, 2011, 55(9): 9.
- [2] 任尊松, 孙守光. 道岔区轮轨接触几何关系研究[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 223.
REN Zunsong, SUN Shouguang. Study on the wheel/rail contact geometry relation of the turnout zone[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 223.
- [3] 徐井芒, 王平, 徐浩, 等. 尖轨廓形对地铁道岔使用寿命的影响研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 75.
XU Jingmang, WANG Ping, XU Hao, et al. Study on impact of switch rail profile on service life of subway switches[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 75.
- [4] SHEVTSOV I Y. Optimal design of wheel profile for railway vehicles[J]. Wear, 2005, 258(7-8): 1022.
- [5] KASSA E, ANDERSSON C, NIELSEN J C O. Simulation of dynamic interaction between train and railway turnout[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(3): 247.
- [6] KASSA E, NIELSEN J C O. Dynamic train-turnout interaction in an extended frequency range using a detailed model of track dynamics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320(4-5): 893.
- [7] 周橙, 池茂儒, 梁树林, 等. 城市轻轨低地板列车通过道岔区脱轨安全性评价研究[J]. 振动工程学报, 2019, 32(1): 168.
ZHOU Cheng, CHI Maoru, LIANG Shulin, et al. An investigation into the derailment safety evaluation of the urban light rail train passing through the turnout area[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(1): 168.
- [8] 陈漫. 大坡道上四菱形辙叉有轨电车通过性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
CHEN Man. Study on the performance of tramcar through four-rhombus railway frog on steep gradient[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [9] 李刚. 高速动车组道岔通过性能及影响因素分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
LI Gang. The performance of passing through the turnout of high-speed emus and the analysis of influencing factors[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- (收稿日期:2020-10-28)
- (上接第23页)
- [4] JIANG Y, GAO Y, WU X. The nature frequency identification of tunnel lining based on the microtremor method[J]. Underground Space, 2016(12): 108.
- [5] CONNOLLY D P, KOUROUSSIS G, LAGHROUCHE O, et al. Benchmarking railway vibrations-Track, vehicle, ground and building effects[J]. Construction and Building Materials, 2015, 92: 64.
- [6] 张啟乐, 冯立力, 王建立, 等. 类矩形盾构隧道与圆形盾构隧道振动特性对比分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 41.
ZHANG Qile, FENG Lili, WANG Jianli, et al. Comparative analysis of the vibration characteristics for quasi-rectangular shield tunnel and circular shield tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 41.
- [7] ZHANG Z, ZHANG X, QIU H, et al. Dynamic characteristics of track-ballast-silty clay with irregular vibration levels generated by high-speed train based on DEM[J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 564.
- (收稿日期:2020-10-29)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题, 以及新技术、新成果, 邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述, 是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

