

地铁车辆段小号码道岔区域车辆脱轨仿真分析*

何志平¹ 李春阳² 戴源廷² 陈佟越¹ 朱彬²

(1. 广州地铁集团有限公司, 510030, 广州;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 100081, 北京)

摘要 [目的] 小号码道岔在城市轨道交通尤其是地铁车辆段内有着较为广泛的应用,但其转辙角偏大的特征使车辆在通过道岔时存在脱轨的风险。研究地铁车辆段道岔心轨位置处车辆脱轨的原因很有必要。[方法] 逐步建立轮对、转向架子模型和单节车厢模型,然后用铰接的方式将所有车厢连接形成整车模型。在道岔前方设置直线段以消除车辆起动的影响。通过线性内插得到整个道岔区域的相应轨道截面,然后导入到软件中计算。选取轮对横移量、脱轨系数和轮重减载率作为评价指标,分析了车速、车轮踏面型式、钢轨竖向刚度等因素对列车脱轨风险的影响规律。[结果及结论] 由仿真分析得出如下结论:当车速过大时,轮重减载率会大幅超标,因此建议列车通过道岔时车速控制在5 km/h以内;当车轮采用LMX型踏面时,车辆会相对平稳地通过辙叉区的有害空间,有利于降低列车的脱轨风险;列车在通过钢轨竖向刚度为200 MN/m的道岔时更易发生脱轨。

关键词 地铁; 车辆段; 小号码道岔; 车辆脱轨仿真分析

中图分类号 U213.6; U231; U279.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.014

Simulation Analysis of Vehicle Derailment in Metro Depot Small Numbered Turnout Area

HE Zhiping¹, LI Chunyang², DAI Yuanting², CHEN Tongyue¹, ZHU Bin²

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510030, Guangzhou, China; 2. Urban Rail Transit Center of China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 100081, Beijing, China)

Abstract [Objective] Small numbered turnouts are widely used in urban rail transit, especially in metro depots, but their large switch angles pose a derailment risk when vehicles pass through them. It is necessary to investigate the reasons for vehicle derailment at the turnout frog positions in metro depot.

[Method] A step-by-step approach is taken to establish wheelset model, bogie frame sub-model, and single compartment model, which are then articulated to link all compartments into a whole-vehicle model. A straight section is set up in front of

the turnout to eliminate the impact of vehicle startup. The corresponding track sections of the entire turnout area are obtained through linear interpolation and are imported into the software for calculation. Wheelset lateral displacement, derailment coefficient, wheel load reduction rate are selected as evaluation indicators to analyze the influence law of factors such as vehicle speed, wheel tread type and rail vertical stiffness on train derailment risks. [Result & Conclusion] The simulation analysis yields the following conclusions: When the vehicle speed is too high, the wheel load reduction rate significantly exceeds the standard, hence it is recommended to control the vehicle speed within 5 km/h while passing through the turnout. When using LMX-type wheel tread, vehicles pass relatively smoothly through the dangerous areas of the frog zone, which helps to reduce train derailment risks. Vehicles are more prone to derailment when passing through turnouts with a vertical rail stiffness of 200 MN/m.

Key words metro; depot; small numbered turnout; vehicle derailment simulation analysis

城市轨道交通的道岔设计需要考虑车辆轴重较轻、车速较低以及养护维修条件差等特点。小号码道岔凭借场地利用率高、建设成本低等优点在城市轨道交通领域具有广泛的应用前景。

随着土地资源的日益稀缺,广州地铁在某车辆段内采用了5号单开道岔^[1]。自投入使用以来发生数起脱轨事故,主要是列车在辙叉心轨位置处爬轨导致车轮从非工作边一侧掉下钢轨。

国内针对小号码道岔脱轨事故的发生机理和预防措施已有较多研究。其中典型的研究方法是建立车辆-道岔耦合动力学模型对道岔区的脱轨机理进行分析^[2-4]。除此之外,建立故障树模型以及分析钢轨磨耗等方法也可有助于分析车辆在道岔区脱轨的机理^[5-6]。在明晰脱轨原因之后,提升车

* 中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2021YJ198);广花城际铁路竣工验收标准研究项目(HT230243);铁科院(北京)工程咨询有限公司科研开发基金项目(2023ZXJ002)

辆通过安全性的方法包括优化岔前平面线型和尖轨降低值、改进道岔结构及增加防护轨等^[7]。

针对地铁车辆段内设计的 5 号单开道岔和运营的 L 型电客车,建立车辆-道岔多体动力学仿真模型,选取 3 个评价指标,探究车速、车轮踏面型式、钢轨竖向刚度等 3 个因素对脱轨风险的影响规律并提出了防治建议。

1 车辆-道岔仿真模型

1.1 车辆模型

采用多体动力学仿真软件 SIMPACK 建立车辆和道岔模型进行分析。每一节车厢由 1 个车体,2 个转向架和 4 个轮对组成。每个刚体都有纵向、横向和竖向 3 个方向的平动和转动自由度。

逐步建立轮对、转向架子模型和单节车厢模型。车辆的一二系悬挂弹簧采用 5 号力元进行模拟,赋予三向刚度和阻尼的参数;用铰接模拟车钩,将所有车厢连接成整列车模型。车辆的各个部分的物理力学参数见表 1。

根据上述建模方法,建立的转向架子模型和车厢模型如图 1 所示。

1.2 轨道模型

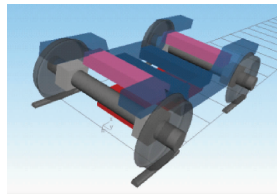
根据设计资料,5 号单开道岔设计尺寸见图 2。

在建立道岔模型时,首先在道岔前方设置一段 20 m 长的直线段以消除车辆起动的的影响,后续设置曲线半径为 65 m,长度为 16.269 m 的曲线段,最后再连接直线段。考虑 5 号道岔可动心轨变截面的特

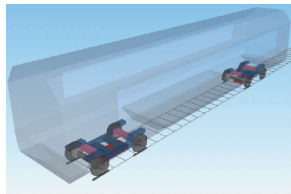
表 1 车辆物理力学参数表

Tab.1 Vehicle physical and mechanical parameters

参数	数值
车体质量/kg	17 529
车体纵向转动惯量/(kg·m ²)	21 312
车体横向转动惯量/(kg·m ²)	399 416
车体竖向转动惯量/(kg·m ²)	402 890
轮对质量/kg	1 111
轮对纵向转动惯量/(kg·m ²)	550
轮对横向转动惯量/(kg·m ²)	90
轮对竖向转动惯量/(kg·m ²)	550
转向架质量/kg	2 876
转向架纵向转动惯量/(kg·m ²)	1 495
转向架横向转动惯量/(kg·m ²)	1 259
转向架竖向转动惯量/(kg·m ²)	2 281
一系纵向悬挂刚度/(N/m)	2.73×10^6
一系横向悬挂刚度/(N/m)	2.73×10^6
一系竖向悬挂刚度/(N/m)	6.15×10^5
二系纵向悬挂刚度/(N/m)	1.625×10^5
二系横向悬挂刚度/(N/m)	1.625×10^5
二系竖向悬挂刚度/(N/m)	4×10^5



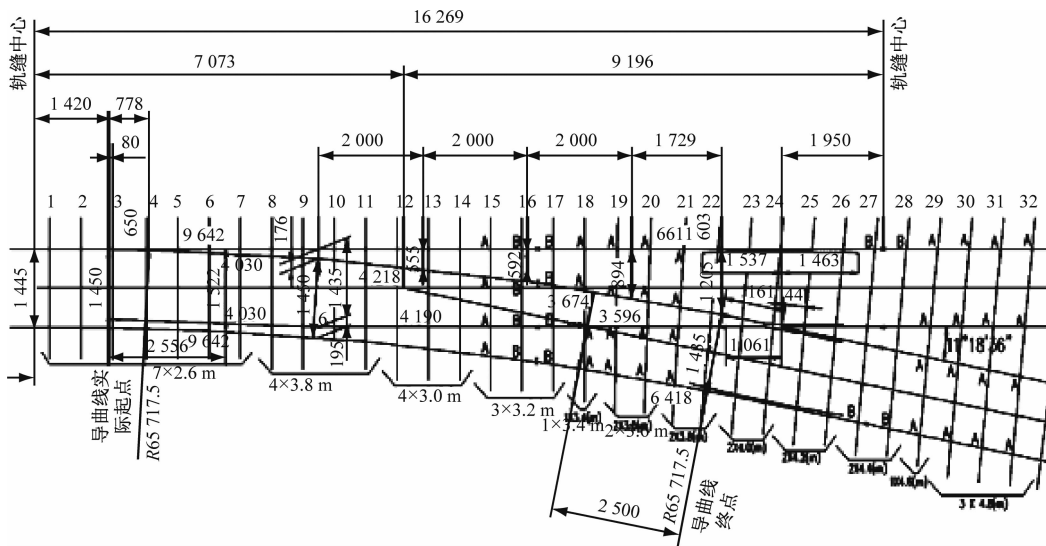
a) 转向架子模型



b) 车厢模型

图 1 车厢和转向架仿真模型

Fig.1 Compartment and bogie simulation model



注:尺寸单位 mm。

图 2 5 号道岔设计图

Fig.2 Drawing of No.5 turnout design

征,选取若干特征断面进行线性内插得到整个道岔区域的有关轨道截面导入软件中计算。

2 仿真结果分析

2.1 评价指标和工况设计

车辆发生脱轨时,轮轨接触点会发生移动。考虑车辆运营安全性指标,选取轮对横移量、脱轨系数和轮重减载率来评价车辆的脱轨风险。

设置车速、车轮踏面型式、钢轨竖向刚度 3 个变量,各个变量在常见的范围内选取。仿真计算工况共计 6 种,具体见表 2。

表 2 仿真工况种类表

Tab. 2 Simulation working condition types

序号	车速/(km/h)	车轮踏面型式	钢轨竖向刚度/(MN/m)
1	3	LM	200
2	5	LM	200
3	10	LM	200
4	10	LMX	200
5	10	LM	150
6	10	LM	250

2.2 车速对脱轨风险的影响

当车辆以 3 种速度通过道岔时,轮对横移量、脱轨系数及轮重减载率随里程的变化情况见图 3。

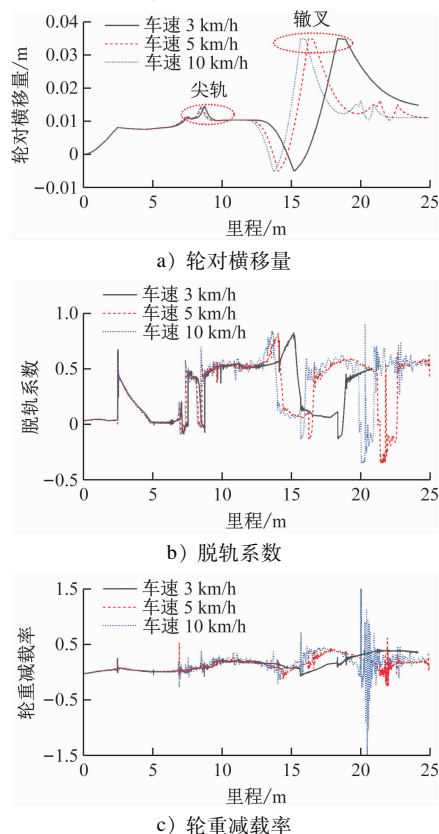


图 3 列车以不同车速通过道岔的动力学指标

Fig. 3 Dynamics indicators for train passing through turnout at different speeds

由图 3 可以看出:轮对横移量的两个峰值分别对应列车通过尖轨区和辙叉有害空间处,在这两个位置,列车动力响应剧烈,易发生脱轨;车速对轮对横移量几乎没有影响,不同工况下的最大横移量均在 35 mm 左右,没有超过 45 mm 的限值;列车脱轨系数均超过了 0.8,处于接近脱轨的状态;车速对轮重减载率的影响较为显著,车速越高则轮重减载率峰值越大,在车速为 10 km/h 时轮重减载率在辙叉区有害空间附近出现了超标情况。因此建议车辆过岔时尽量将车速控制在 5 km/h 以内。

2.3 车轮踏面型式对脱轨风险的影响

为研究不同车轮踏面型式对列车脱轨风险的影响,计算采用 LM 型踏面和 LMX 型踏面的车轮通过 5 号道岔时 3 个评价指标的变化情况,结果见图 4。

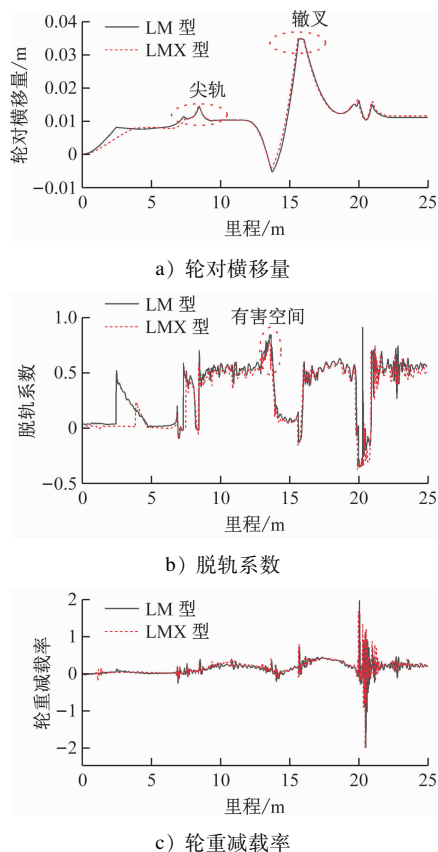


图 4 不同踏面型式下列车过岔的动力学指标

Fig. 4 Dynamics indicators for train passing through turnout with different wheel tread types

由图 4 可以看出,除脱轨系数外,不同车轮踏面型式对列车各项动力学指标影响很小;相比 LMX 型踏面,车轮采用 LM 型踏面时过岔的整体脱轨系数更大。

2.4 钢轨竖向刚度对脱轨风险的影响

为研究不同钢轨竖向刚度对列车脱轨风险的影响,计算了钢轨竖向刚度取不同数值时列车通过5号道岔的3个评价指标变化情况,见图5所示。

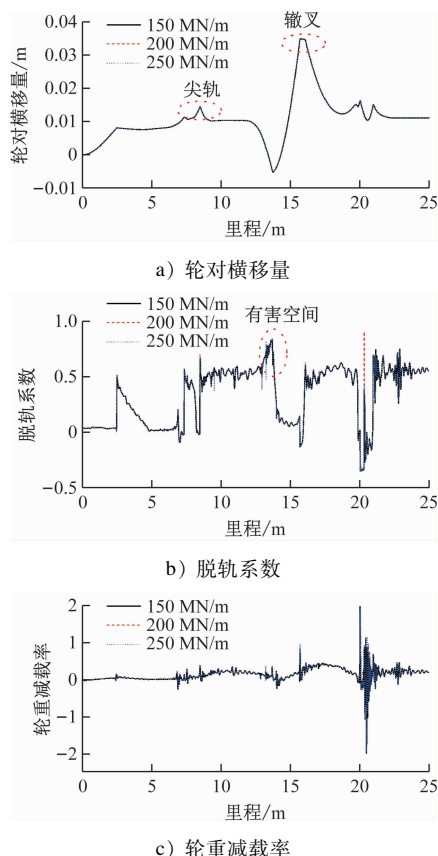


图5 不同钢轨竖向刚度下列车过岔的动力学指标

Fig.5 Dynamics indicators for train passing through turnout with different rail vertical stiffness

由图5可见:钢轨竖向刚度对除脱轨系数外的列车动力学指标均无影响;列车在通过钢轨竖向刚度为200 MN/m的5号道岔时,有害空间导致的脱轨系数增加至接近1.0的水平,易导致列车脱轨。

3 结语

通过车辆-道岔耦合动力学模型对5号单开道岔区域车辆的脱轨风险进行分析,得出如下结论:

1) 车速对轮重减载率有显著影响。当车速过大时,轮重减载率会大幅超标。因此建议过岔时尽量将车速控制在5 km/h以内。

2) 相较于LM型踏面,采用LMX型踏面的列车会相对平稳地通过辙叉区有害空间区域。

3) 列车在通过钢轨竖向刚度为200 MN/m的道岔时,有害空间导致的脱轨系数接近1.0,易导致列车脱轨。

参考文献

- [1] 张震远. 城市轨道交通中小号码道岔的设计和应用[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(6): 63.
ZHANG Zhenyuan. Design and application of small-sized turnout for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2008, 11(6): 63.
- [2] 王猛. 编组站驼峰下6号对称道岔脱轨机理及应对措施研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020.
WANG Meng. The study on derailment mechanism and countermeasures of No. 6 symmetrical turnout under hump of marshaling station[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [3] 司道林, 王树国, 王猛, 等. 6号对称道岔脱轨机理及影响因素[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(2): 300.
SI Daolin, WANG Shuguo, WANG Meng, et al. Derailment mechanism and influence factors on number 6 symmetric switches[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(2): 300.
- [4] 费维周. 50 kg/m钢轨6号对称道岔脱轨原因分析及优化改进研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
FEI Weizhou. Derailment analysis and optimizing for 50 kg/m rail No. 6 turnout [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [5] 李龙兴, 余峰. 地铁非授权列车从段/场进入正线的故障树风险分析[J]. 现代城市轨道交通, 2020(6): 78.
LI Longxing, YU Feng. Fault tree risk analysis of unauthorized train entering main line from depot/yard[J]. Modern Urban Transit, 2020(6): 78.
- [6] 赖军, 徐井芒, 王平, 等. 钢轨磨耗对道岔区车辆动态脱轨行为影响分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 87.
LAI Jun, XU Jingmang, WANG Ping, et al. A study on influence of rail wear on dynamic derailment behavior in railway turnout area [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(9): 87.
- [7] 王健. 基于轮轨关系的小号码道岔转辙器区脱轨机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WANG Jian. Study on derailment theory of switch area in small number turnouts based on wheel-rail relationship [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

· 收稿日期:2023-09-07 修回日期:2023-11-18 出版日期:2024-10-10

Received:2023-09-07 Revised:2023-11-18 Published:2024-10-10

· 第一作者:何志平,高级工程师,hezhiping@gzmttr.com

通信作者:李春阳,助理研究员,lcycars@163.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