

## 基于刚柔耦合模型的地铁车辆-道岔动力学性能分析\*

李华伟<sup>1</sup> 许孝堂<sup>2</sup> 刘 韦<sup>1</sup> 何 俊<sup>1</sup>

(1. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 412007, 株洲; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都)

**摘 要** [目的] 为探究地铁车辆侧向和正向通过 12 号道岔时的安全性问题, 为道岔结构优化与维护提供理论依据, 需对地铁车辆-道岔耦合模型动力学性能进行研究。[方法] 基于刚柔耦合动力学理论, 构建包含车辆、轮轨、道岔等 3 个子系统的耦合动力学模型。通过模拟车辆侧向与正向通过道岔工况, 对轮轨垂向力和横向力、轮轴横向力、脱轨系数及动态轮重减载率等核心指标数据进行分析。[结果及结论] 车辆在侧向和正向两种通过道岔方式下, 轮轨垂向力最大值未超过容许阈值, 轮轨横向力与轮轴横向力均处于动态平衡范围内; 脱轨系数稳定在临界限值以下, 动态轮重减载率始终低于安全限值。研究证实, 基于刚柔耦合动力学理论构建的地铁车辆-道岔耦合模型能够有效评估车辆通过道岔的安全性。

**关键词** 地铁; 车辆-道岔动力学性能; 刚柔耦合模型

**中图分类号** U260.11<sup>+</sup>1

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.20230576

### Dynamics Performance Analysis of Metro Vehicle-Turnout System Based on Rigid-Flexible Coupled Model

LI Huawei<sup>1</sup>, XU Xiaotang<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, HE Jun<sup>1</sup>

(1. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., 412007, Zhuzhou, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] To investigate the safety of metro vehicles passing through No. 12 turnouts in both lateral and forward directions, providing a theoretical basis for the optimization and maintenance of turnout structures, it is necessary to study the dynamic performance of a metro vehicle-turnout coupling model. [Method] Based on the theory of rigid-flexible coupled dynamics, a coupled dynamic model comprising three subsystems—vehicle, wheel-rail, and turnout—is established. By simulating the operating conditions of vehicles passing through the turnout laterally and forward, key indicators such as wheel-rail vertical and lateral forces, wheelset lateral force, derailment coefficient, and dynamic wheel load reduction ratio are analyzed. [Result & Conclusion] Under both lateral and

forward passing conditions, the maximum wheel-rail vertical force will not exceed the allowable threshold, and both wheel-rail lateral force and wheelset lateral force remain within the dynamic equilibrium range. The derailment coefficient remains below the critical limit, and the dynamic wheel load reduction ratio is consistently lower than the safety threshold. This research confirms that the metro vehicle-turnout coupling model based on rigid-flexible coupled dynamics can effectively evaluate the safety of vehicle passage through turnout.

**Key words** metro; vehicle-turnout dynamics performance; rigid-flexible coupled model

道岔作为轨道交通的薄弱环节之一, 其组成部件多, 且动力不平顺远大于普通类型轨道, 以致于轮岔间发生剧烈的轮轨冲击振动。随着列车通过道岔速度进一步提高, 道岔与车辆之间的相互作用更加剧烈。近年来, 轮轨系统振动特性和安全性受到高度重视和关注<sup>[1-3]</sup>。相比普通的路段, 道岔系统更为复杂, 这不仅因为轨线分岔的几何多样性, 更重要的是因为复杂的轮轨接触关系。事实上, 轮岔间必然发生多点接触。转辙区和辙叉区钢轨的型面、轨顶宽度和高度不断变化, 不但影响轮轨接触状态, 而且会对轮岔系统的动态作用力产生重要影响。

文献[4]采用多点 Hertz 接触理论和多体耦合动力学理论, 重点分析了轮轨关系。文献[5]给出了变曲率曲线的最佳形式。文献[6]通过研究发现轮轨冲角、摩擦因数对于道岔中脱轨行为有一定的影响。文献[7]研究发现, 优化道岔打磨廓形可以有效改善车轮磨耗条件下列车的动力学特性。文献[8]在道岔导向曲线中设置超高以及将高阶曲线引入道岔线型设计, 降低了钢轨特征断面磨耗深度。文献[9]以 42 号道岔为例, 设计了加设超高的三次缓和曲线, 通过设置曲线超高以及运用高阶次的曲线形式能够起到较好的效果。文献[10]研究

\* 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA21077011-4)

了42号特殊减振单开道岔的吊装问题。文献[11]针对18号道岔,通过UM(Universal Mechanism)多体系统动力学仿真分析软件建立了该型道岔和动车模型,研究车辆的各项动力学指标。文献[12]通过耦合动力学研究了道岔辙叉垂向不平顺对轴箱内置式车辆动力学性能的影响。文献[13]自行编制DATTB程序,搭建了车辆-道岔-桥梁耦合分析模型,并对列车以200 km/h速度在桥上通过道岔时的情况进行分析,研究了车辆运行速度和改进型60 kg/m钢轨对过岔特性的影响。文献[14]建立了考虑刚柔耦合效应的车辆-道岔-桥梁系统动力学模型,通过对行车速度、道岔相对于桥梁的布置位置、结构刚度等进行参数化分析,结果表明,过渡段刚度设计应避免分级过多。文献[15]运用车辆-道岔耦合动力学模型进行仿真分析,其中正向通过道岔速度设置为350 km/h,侧向通过道岔速度设置为80 km/h。研究表明,侧向通过道岔时,尖轨处产生瞬时的高冲击力,同时当行驶到岔区时,横向冲击力较大。文献[16]研究发现,列车运行速度和摩擦因数对有轨电车侧向过岔的影响较为显著。文献[17]研究了胶轮地铁车辆侧向通过道岔特性,发现空气弹簧垂向刚度对胶轮地铁车辆道岔侧向通过性能影响最大。文献[18]运用道岔纵向力学分析模型,研究了在列车制动荷载、温度荷载作用下,线路坡度对道岔纵向力学特性的影响。

列车通过任一类道岔转辙区和心轨区时,轮轨之间必然发生多点接触,且转辙区轮轨多点接触范围大于辙叉区。辙叉区变截面钢轨长度远小于转辙区,由此辙岔区车轮走行时形成的道岔固有不平顺波长远小于转辙区不平顺波长,致使正向通过道岔时辙叉区轮轨冲击大于转辙区轮轨冲击。发生轮轨冲击后,车辆系统和道岔系统均会发生剧烈振动,对行车安全有一定的影响。本文以某地铁车辆通过道岔为研究对象,依据刚柔耦合动力学理论,搭建了地铁车辆-道岔耦合动力学模型,研究了车辆正向通过道岔(160 km/h)和侧向通过道岔(50 km/h)时的安全性问题。

## 1 车辆-道岔耦合动力学模型

### 1.1 车辆子系统

车辆子系统运用了多刚体动力学知识,搭建了三维动力学多体模型。该模型包括车体、构架、轮对及轴箱等。单节车共考虑50个自由度。该模型

考虑了车辆一系悬挂和二系悬挂的非线性特征,以及扭杆、止挡、蛇行减振器等的非线性特征。车辆各自由度的运动方程可通过D'Alembert原理得到,采用矩阵表示为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式中:

$M$ ——质量矩阵;

$C$ ——阻尼矩阵;

$K$ ——刚度矩阵;

$F$ ——作用于车辆系统上的动力荷载矩阵;

$X$ ——位移矩阵。

车辆动力学模型如图1所示。



图1 车辆动力学模型图

Fig. 1 Diagram of vehicle dynamics model

### 1.2 轮轨子系统

由于道岔区段轨道存在变截面的情况,所以导致轮轨接触关系复杂多变。在道岔区,尖轨与基本轨、心轨与翼轨共同承担荷载,因此存在横向冲击和多点接触。此外,由于护轨的存在,车轮背面也会与护轨产生剧烈冲击;当列车高速运行时,因为道岔结构存在固有的不平顺特性,车轮也可能随机跳动。通过对12号固定心轨道岔转辙区和辙叉区钢轨变截面外型进行数值离散,获得了可用于轮岔动态相互作用研究的廓形。变截面的道岔一般通过一系列的廓形截面文件构成,包括基本轨、尖轨及翼轨等。运用编制的Matlab程序,将特征廓形离散成点;将LM(磨耗)型车轮踏面与变截面钢轨进行匹配,得到在道岔不同位置处车轮踏面与变截面钢轨的轮轨接触状态。图2为道岔在某3个不同位置处的轮轨接触状态图。

通过文献[19]中的Kik-Piotrowski模型求解轮轨之间的蠕滑力。Kik-Piotrowski模型是一种多点非赫兹接触模型,该模型可以考虑轮轨的较小穿透。顺着行车方向,轮轨的法向力呈椭圆状,切向为非椭圆状。在Kik-Piotrowski模型中,利用各接触斑块的等效椭圆计算各接触斑的Kalker系数,利用FASTSIM算法<sup>[20]</sup>求解切向力。Kik-Piotrowski

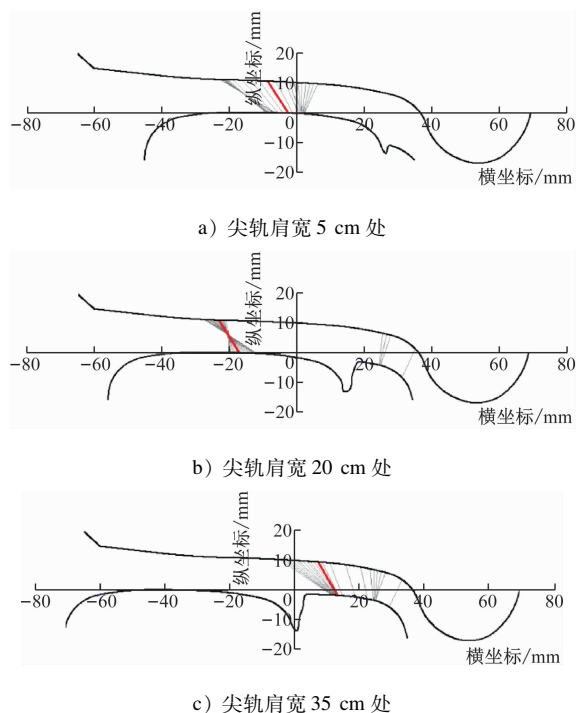
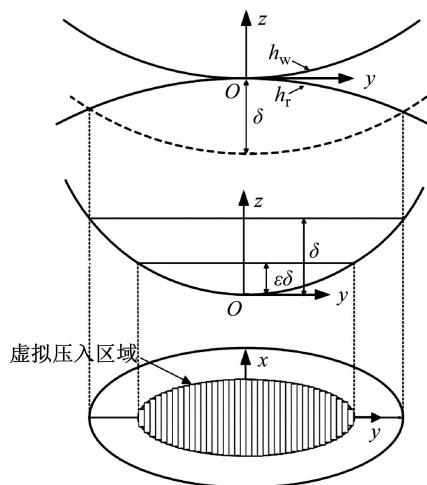


图2 道岔在不同位置处的轮轨接触状态

Fig.2 Wheel-rail contact status in different positions of turnout

方法确定的接触形貌如图3所示。椭圆的等效方法基于以下两条准则:

- 1) 等效椭圆的长宽比等于 Kik-Piotrowski 方法得到的接触斑长宽比。
- 2) 等效椭圆面积等于 Kik-Piotrowski 方法得到的接触斑面积。



注:  $h_w$ 、 $h_r$ —车轮与钢轨在接触斑坐标系下的外形函数;  $\delta$ —轮轨材料的虚拟渗透量;  $\epsilon$ —渗透系数, 取 0.55。

图3 Kik-Piotrowski 方法确定的接触形貌

Fig.3 Contact area morphology judged by Kik-Piotrowski method

### 1.3 道岔子系统

道岔轨道板采用 ANSYS 有限元软件建立, 通过固定界面模态综合法导入 UM 多体系统动力学仿真分析软件。通过下述公式表示任意子结构的无阻尼动力学方程:

$$\mathbf{M}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{K}_i \dot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{F}_i \quad (2)$$

式中:

$\mathbf{M}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$ 、 $\mathbf{F}_i$ 、 $\mathbf{u}_i$ ——每个子结构  $i$  的质量矩阵、刚度矩阵、力矩阵及位移矩阵。

通过模态综合法, 采用界面处节点位移和结构内部节点位移表示子结构的位移。通过引入模态矩阵进行模态矩阵变换; 按照质量矩阵进行正则化, 引入阻尼矩阵, 得到道岔的运动方程。

$$\mathbf{M}_{i,f} \ddot{\mathbf{q}}_{i,f} + \mathbf{C}_{i,f} \dot{\mathbf{q}}_{i,f} + \mathbf{K}_{i,f} \mathbf{q}_{i,f} = \mathbf{F}_{i,f} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{K}_{i,f} = \Phi_i^T \mathbf{K}_i \Phi_i = \text{diag}[\omega_1^2 \cdots \omega_i \cdots \omega_n]$$

$$\mathbf{M}_{i,f} = \Phi_i^T \mathbf{M}_i \Phi_i, \quad \mathbf{F}_{i,f} = \Phi_i^T \mathbf{F}_i, \quad \mathbf{q}_{i,f} = \Phi_i^T \mathbf{u}_i$$

式中:

$\mathbf{F}_{i,f}$ ——广义力矩阵;

$\mathbf{M}_{i,f}$ ——广义质量矩阵;

$\mathbf{C}_{i,f}$ ——广义阻尼矩阵;

$\mathbf{K}_{i,f}$ ——广义刚度矩阵;

$\mathbf{q}_{i,f}$ ——广义模态位移矩阵;

$\dot{\mathbf{q}}_{i,f}$ ——广义模态的一阶导矩阵;

$\ddot{\mathbf{q}}_{i,f}$ ——广义模态二阶导矩阵;

$\Phi_i$ ——转移矩阵;

$\omega_i$ ——无阻尼系统的频率。

在道岔轨道板模型中, 运用铁木辛柯梁仿真钢轨, 采用弹簧阻尼单元模拟扣件的作用, 通过 ANSYS 有限元软件建立道岔轨道板实体仿真模型。道岔轨道板仿真模型如图4所示。

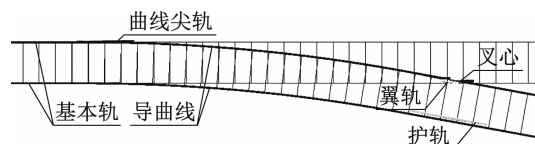


图4 道岔轨道板仿真模型

Fig.4 Turnout track plate simulation model

### 1.4 模型参数

基于某 A 型地铁车辆及道岔的动力学参数(见表1)建立图5所示的车辆-道岔耦合系统动力学模型。

表1 某A型地铁车辆及道岔的动力学参数取值

Tab.1 Dynamics parameters of an A-type metro vehicle and turnout

项目		取值或说明
12号道岔结构	钢轨规格	60 kg/m
	道床类型	钢筋混凝土整体道床、双块式轨枕
	扣件类型	DZⅢ-3型弹性分开式扣件
	扣件垂向刚度/(kN/mm)	22
	轨枕或扣件间距/mm	625
	轨底坡	1:40
	轨距/mm	1 435
最小曲线半径/m		1 200(正线), 350(配线)
车辆	车辆类型	地铁A型车
	轴重(AW3)/t	17
	列车运行速度/(km/h)	50(侧向通过), 160(正向通过)
	每个转向架轮轴数量	2

注:AW3为超超载荷。

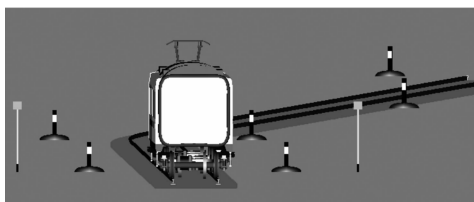


图5 车辆-道岔耦合系统动力学模型

Fig.5 Vehicle-turnout coupling system dynamics model

## 2 行车安全性评价标准

### 2.1 轮轨垂向力

德国联邦铁路公司制定的轮轨垂向力限值为170 kN。考虑到车辆通过钢轨接头的瞬态冲击行为,英国铁路公司将轮轨垂向力限值设置为250 kN。我国TB 10761—2013《高速铁路工程动态验收技术规范》中的轮轨垂向力限值为170 kN。因此,本文地铁列车轮轨垂向力限值取为170 kN。

### 2.2 轮轨横向力

轮轨横向力描述了轮轨之间的横向相互作用。较大的横向力不仅会增大钢轨的应力,加剧轮缘与钢轨之间的磨耗,还会引起轨道的横向移动和曲线轨道的横向变形,甚至引起车辆的脱轨。目前,我国在线路以及道岔的设计中大多采用弹性扣件。

对于此类轨道,日本新干线采用不超过0.4倍轴重的横向力作为标准。欧美铁路也根据实测结果采用0.4倍轴重作为轮轨间横向力的限值标准。因此,本文选取0.4倍轴重,即68 kN作为轮轨横向力。

### 2.3 轮轴横向力

通过大量的无缝轨道稳定性研究,发现轮轴横向力导致轨道横向运动、无缝轨道动态失稳和轨道膨胀。因此,除了保证线路的纵向和横向阻力外,限制作用在线路上轮对的最大横向力也是一个非常重要的方面。

在GB 5595—2019《机车动力学性能评定和试验鉴定规范》中,轮轴横向力规定如下:

$$H_{\max} \leq 0.85 \left( 1.5 + \frac{P_{st1} + P_{st2}}{2} \right) = [H] \quad (4)$$

式中:

$P_{st1}$ 、 $P_{st2}$ ——左、右车轮静载重,单位kN;

$H_{\max}$ ——轮轴横向力最大值,单位kN;

$[H]$ ——轮轴横向力限值,单位kN。

通过式(4)求得轮轴横向力限值 $[H]$ 为73.5 kN。

### 2.4 脱轨系数

在GB 5599—2019《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》中,关于脱轨系数的要求如下:

$$\begin{cases} \text{第一限度: } Q/G \leq 1.2 \\ \text{第二限度: } Q/G \leq 1.0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$Q$ ——爬轨侧车轮作用于钢轨上的横向力,单位kN;

$G$ ——爬轨侧车轮作用于钢轨上的垂向力,单位kN。

### 2.5 轮重减载率

动车组在高速运行时,经过道岔和接头等区域,可能会产生较大的轮重减载情况。当车轮轮缘与轨道接触时,产生横向载荷的轴重反而增加(如弯道外侧),而轴重减少大多发生在轮缘与轨道不接触时(如弯道内侧)。因此,日本铁路标准中动态轮重减载率的限值为0.8,其持续时间小于0.01 s;德国和美国的铁路标准中动态轮重减载率的限值均采用0.9。在很短的时间内轮轨冲击可以通过动态轮重减载率进行判断,但如果轮重减载的持续时间很短(约0.01 s或更短),则不存在脱轨风险。因此,动态轮重减载率取为0.9。



### 3 车辆-道岔耦合振动分析

#### 3.1 车辆侧向通过道岔

图 6 和图 7 分别为车辆侧向通过 12 号道岔时, 导向轮对内外侧车轮的轮轨垂向力和横向力。由于道岔区内转辙区和心轨区存在固有不平顺, 因此轮轨系统在相应位置产生了较大的轮轨冲击, 轮轨垂向力峰值达到了 136.4 kN, 横向力峰值也达到了 45.6 kN。由此可知, 轮轨垂向力和横向力峰值均满足相关标准安全限值要求。轮轨冲击特性在转辙区以及心轨区有所不同。当位于转辙区时, 轮轨横向力峰值达到 45.6 kN, 垂向力峰值约为 100.0 kN; 心轨区横向力峰值为 36.4 kN, 垂向力峰值为 136.4 kN。侧向通过道岔时, 由于存在离心力, 车轮和尖轨之间将发生剧烈的横向冲击, 造成转辙区出现较大的轮轨冲击力, 使得外侧车轮垂向载荷增加, 内侧垂向载荷有所降低。当车轮运动到心轨区时, 已经进入到直线段, 与道岔后段直线有良好的过渡, 但此轮轨依然存在冲击, 这主要是心轨区长心轨及短心轨变截面引起的轨顶外形变化和轨顶高度变化所致, 主要表现在垂向上。因此, 辙叉区轮轨冲

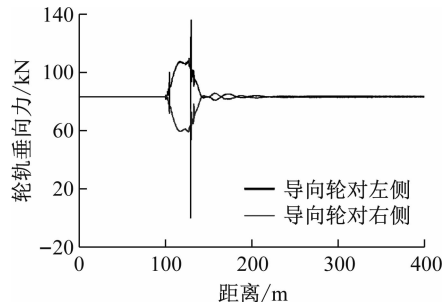


图 6 车辆侧向通过道岔时的轮轨垂向力

Fig. 6 Wheel-rail vertical force when vehicle laterally passing through turnout

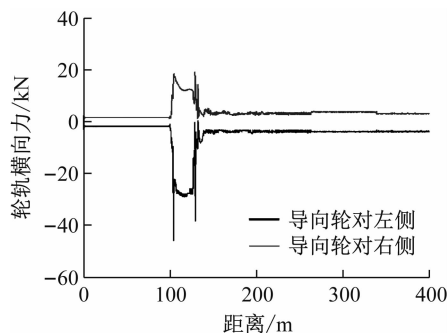


图 7 车辆侧向通过道岔时的轮轨横向力

Fig. 7 Wheel-rail lateral force when vehicle laterally passing through turnout

击与该部位的固有不平顺有关, 而这种不平顺引起的冲击主要体现在垂向上。通过上述描述可以发现, 轮轨横向冲击主要发生在侧向通过道岔时, 垂向冲击主要位于辙叉区。

图 8 为车辆侧向通过 12 号道岔时, 导向轮对的轮轴横向力。由图 8 可知: 车辆到达转辙区位置时, 左侧车轮与尖轨发生作用, 产生较大的横向冲击力, 这是由于道岔为右侧单开道岔, 此时整个轮轴横向力瞬间变大。在护轨的作用下, 车轮在进入护轨槽后, 车轮的背部与护轨之间将发生剧烈的冲击振动, 使得轮轴横向力突然增大, 最大值达到 25.33 kN。冲击完成后, 轮轴横向力会迅速降低。变截面会导致轨道不平顺激励, 进而右轮轨横向力出现波动, 直到车轮离开道岔后, 右侧轮轨横向力平稳在一个较小的数值上。从图 8 中可以看出: 轮轴横向力满足标准要求。

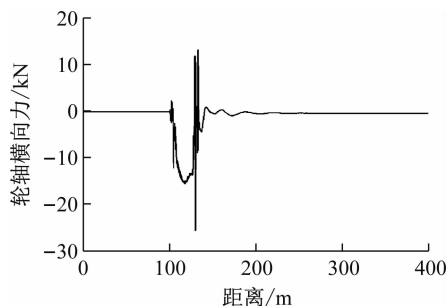


图 8 车辆侧向通过道岔时的轮轴横向力

Fig. 8 Wheelset lateral force when vehicle laterally passing through turnout

图 9 和图 10 分别为车辆导向轮对的脱轨系数和轮重减载率。由图 9 和图 10 可知: 车辆以 50 km/h 的速度侧向通过道岔区时, 脱轨系数峰值为 0.64, 最大减载率为 0.39, 两者均低于标准限值要求, 满足安全运行要求。

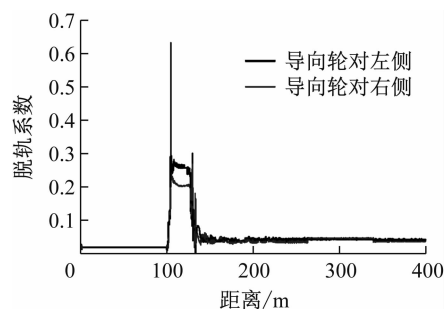


图 9 车辆侧向通过道岔时的脱轨系数

Fig. 9 Derailment coefficient when vehicle laterally passing through turnout

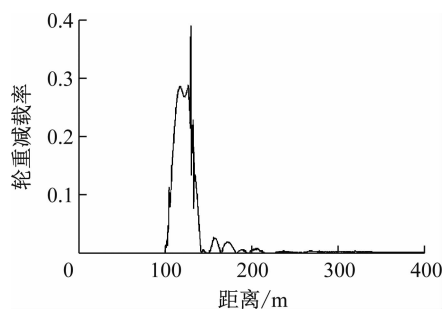


图10 车辆侧向通过道岔时的轮重减载率

Fig. 10 Wheel load reduction ratio when vehicle laterally passing through turnout

### 3.2 车辆正向通过道岔

在转辙器区和心轨区内,尖轨和基本轨之间以及心轨与翼轨之间,由于轨顶高度、宽度以及型面变化等因素,形成了钢轨轨顶垂向固有不平顺,车辆正向通过道岔以垂向轮轨冲击振动为主。其实质是车辆正向通过道岔时,尖轨或心轨一般不会对轮对产生如侧向通过时的离心力,因而轮轨横向冲击作用不明显。车辆直线通过道岔速度为160 km/h。

图11和图12分别为车辆正向通过道岔时,导向轮对的轮轨垂向力和轮轨横向力。由于心轨区变截面区段长度远小于转辙区,该部位对应的轨道固有波不平顺波深不变的前提下波长较短,因此心轨区轮轨力较转辙区大。由图11可知:转辙区和岔心区轮轨垂向力峰值约为92.4 kN和166.5 kN。由图12可知:转辙区和岔心区轮轨横向力峰值分别约为7.4 kN和27.5 kN,轮轨力满足标准限值要求。

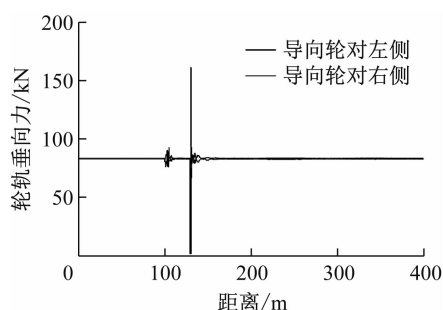


图11 车辆正向通过道岔时的轮轨垂向力

Fig. 11 Wheel-rail vertical force when vehicle forward passing through turnout

图13为车辆正向通过12号道岔时的轮轴横向力。由图13可知:车辆正向通过道岔时导向轮对的轮轴横向力在转辙区和心轨区的最大值分别为5.8 kN和18.0 kN,满足标准限值要求。

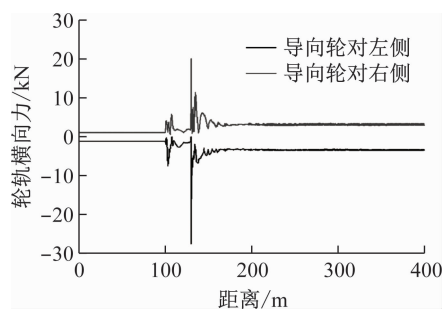


图12 车辆正向通过道岔时的轮轨横向力

Fig. 12 Wheel-rail lateral force when vehicle forward passing through turnout

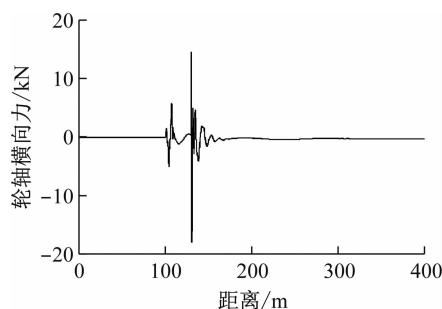


图13 车辆正向通过道岔时的轮轴横向力

Fig. 13 Wheelset lateral force when vehicle forward passing through turnout

图14和图15分别为车辆正向通过道岔时的脱轨系数和轮重减载率。由图14可知:车辆以

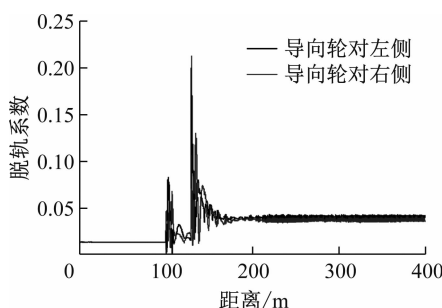


图14 车辆正向通过道岔时的脱轨系数

Fig. 14 Derailment coefficient when vehicle forward passing through turnout

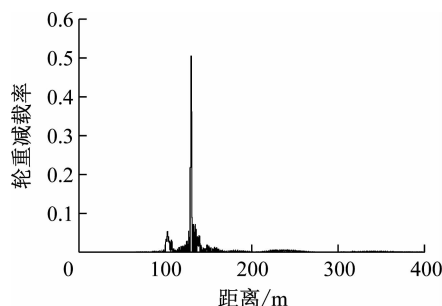


图15 车辆正向通过道岔时的轮重减载率

Fig. 15 Wheel load reduction ratio when vehicle forward passing through turnout

160 km/h 的速度正向通过道岔时,脱轨系数峰值为 0.22,最大减载率为 0.51,两者均低于标准限值,满足安全运行要求。

表 2 为车辆侧向及正向通过 12 号道岔时的各

安全性指标的最大值。从表 2 中可以看出:车辆侧向和正向通过 12 号道岔时,轮轨垂向力、轮轨横向力、轮轴横向力、脱轨系数及动态轮重减载率的最大值均满足标准限值要求。

表 2 车辆通过道岔时安全性指标最大值对比

Tab. 2 Comparison of safety index maximum values of vehicle passing through turnout

项目	轮轨垂向力最大值/ kN	轮轨横向力最大值/ kN	轮轴横向力最大值/ kN	脱轨系数 最大值	动态轮重减载率 最大值
侧向通过	136.0	45.6	25.33	0.64	0.39
正向通过	166.5	27.5	18.00	0.22	0.51
标准限值	170.0	68.0	73.50	1.00	0.90

## 4 结语

本文针对某地铁车辆通过道岔安全性问题,建立了基于刚柔耦合理论的地铁车辆-道岔动力学仿真模型,研究了车辆正向通过道岔和侧向通过道岔动力学特性。该模型重点考虑了轮轨接触非线性 and 道岔板柔性特征,通过 Kik-Piotrowski 多点非赫兹接触模型对轮轨力进行求解。采用 ANSYS 有限元软件建立道岔板仿真模型,通过固定界面模态综合法导入 UM 多体系统动力学仿真分析软件中求解。通过研究车辆正向通过道岔(160 km/h)和侧向通过道岔(50 km/h)时的安全性问题,发现车辆各项安全性指标均满足标准限值要求。本文可为车辆通过道岔振动分析和安全性研究以及道岔维护提供参考。

## 参考文献

- [1] MA X, WANG P, XU J, et al. Parameters studies on surface initiated rolling contact fatigue of turnout rails by three-level unrepeated saturated factorial design[J]. Applied Sciences, 2018, 8(3): 461.
- [2] GAO Y, XU J, LIU Y, et al. An investigation into transient frictional rolling contact behaviour in a switch panel: validation and numerical simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(1): 114.
- [3] 周宇, 张聪聪, 王树国, 等. 高速道岔曲尖轨疲劳裂纹成因分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 1770.
- ZHOU Yu, ZHANG Congcong, WANG Shuguo, et al. Cause of rolling contact fatigue cracks in curved switch rail of high-speed turnout[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(12): 1770.
- [4] SEBES M, AYASSE J B, CHOLLET H, et al. Application of a semi-Hertzian method to the simulation of vehicles in high-speed switches[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(S1): 341.
- [5] KOC W. Optimum shape of turnout diverging track with segments of variable curvature[J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2019, 145(1): 04018077.
- [6] XU J, WANG J, WANG P, et al. Study on the derailment behaviour of a railway wheelset with solid axles in a railway turnout[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(1): 123.
- [7] 赵思琪, 徐井芒, 马前涛, 等. 有轨电车侧向通过 3 号道岔的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 24.
- ZHAO Siqi, XU Jingmang, MA Qiantao, et al. Dynamics performance analysis of tram lateral passing through No. 3 turnout[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 24.
- [8] 龚继军, 赵冠闯, 李建辉, 等. 高速铁路道岔打磨对钢轨平顺性及轮轨动力学性能的影响[J]. 铁道建筑, 2023, 63(5): 39.
- GONG Jijun, ZHAO Guanchuang, LI Jianhui, et al. Influence of high speed railway turnout grinding on rail irregularity and wheel-rail dynamic performance[J]. Railway Engineering, 2023, 63(5): 39.
- [9] 周俊召, 罗雁云, 廖博. 基于多体动力学的道岔导曲线线型优化研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 15.
- ZHOU Junzhao, LUO Yanyun, LIAO Bo. Optimization of the alignments of turnout guide curves based on multi-body dynamics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 15.
- [10] 杨文民, 刘洋, 杨淦, 等. 城市轨道交通 42#特殊减振单开道岔铺设的关键技术[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 94.
- YANG Wenmin, LIU Yang, YANG Gan, et al. Urban rail transit key technology for laying No.42 special damping single-slip turnout[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 94.
- [11] 陈浩, 芦道林. 高速铁路道岔动力学分析及关键技术研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(3): 40.
- CHEN Hao, LU Daolin. Kinetic analysis of high-speed railway turnout and research of its key technologies[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3): 40.
- [12] 吕小勇. 高速列车道岔通过轮轨接触关系及动力学研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- LYU Xiaoyong. Research on the wheel rail contact relationship and dynamics of high-speed train passing through turnouts[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [13] 陈嵘. 高速铁路车辆-道岔-桥梁耦合振动理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

- CHEN Rong. Study on coupled vibration theory and application of high-speed railway vehicle-turnout-bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [14] 李苍楠. 基于刚柔耦合联合仿真的高速铁路桥上无砟道岔动力学研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- LI Cangnan. Dynamic study of ballastless turnout on high-speed railway bridge based on rigid-flexible coupling joint simulation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [15] 聂宇. 高速列车一道岔系统动力学建模与耦合作用分析 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- NIE Yu. Dynamic modeling and coupling analysis of high-speed train-turnout system [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2014.
- [16] 赵思琪, 徐井芒, 马前涛, 等. 有轨电车侧向通过3号道岔的动力学性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 24.
- SHAO Siqi, XU Jingmang, MA Qiantao, et al. Dynamics performance analysis of tram lateral passing through No. 3 turnout [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 24.
- [17] 刘泊邑, 王平, 徐井芒, 等. 侧向过岔时轮径差对高速车辆动力学性能的影响[J]. 振动与冲击, 2023, 42(7): 154.
- LIU Boyi, WANG Ping, XU Jingmang, et al. Effects of wheel diameter difference on dynamic performance of high-speed vehicle during passing through turnout laterally [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(7): 154.
- [18] 阮莹, 李平, 曾志平, 等. 地铁线路坡度对道岔纵向力学特性的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 33.
- RUAN Ying, LI Ping, ZENG Zhiping, et al. Influence of metro line slope gradient on turnout longitudinal mechanical characteristics [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 33.
- [19] PIOTROWSKI J, KIK W. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(1/2): 27.
- [20] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- JIN Xuesong, LIU Qiyue. Tribology of wheel and rail [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- 收稿日期: 2023-05-24 修回日期: 2023-07-15 出版日期: 2025-06-10  
Received: 2023-05-24 Revised: 2023-07-15 Published: 2025-06-10  
• 第一作者: 李华伟, 工程师, lihw2@cszic.com  
通信作者: 许孝堂, 工程师, sky\_xxtang@yeah.net  
• ©《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
- LI Bo. Characteristics analysis of hydraulic oil-ring spring buffers suitable for urban rail transit coupler devices [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(S1): 7.
- [6] 苏强, 王会娟, 沈旭奎, 等. 城市轨道交通列车碰撞性能研究与应用[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 125.
- SU Qiang, WANG Huijuan, SHEN Xukui, et al. Research and application of urban rail transit train collision performance [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(1): 125.
- [7] 孔琳皓, 肖守讷, 朱涛, 等. 有轨电车碰撞仿真建模技术及耐撞性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 70.
- KONG Linhao, XIAO Shoune, ZHU Tao, et al. Research on collision simulation modeling technology and crashworthiness of trams [J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 70.
- [8] 陈佳明, 朱涛, 肖守讷, 等. 新型城市轨道交通车辆切削式防爬器研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 121.
- CHEN Jiaming, ZHU Tao, XIAO Shoune, et al. Research on new cutting-type anti-climbers for urban rail transit vehicles [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1): 121.
- [9] 曹阳, 梁晓珂, 张越, 等. 基于改进正弦和代理模型的防爬器碰撞吸能可靠性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 67.
- CAO Yang, LIANG Xiaoke, ZHANG Yue, et al. Reliability analysis of collision energy absorption for anti-climber devices based on improved sum of sine surrogate model [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 67.
- [10] 钟志宏, 杨中平, 林飞, 等. 城市轨道交通列车全电制动系统及其关键技术发展综述[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(6): 17.
- ZHONG Zhihong, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. A summary of the development of pure electric braking system and key technologies for urban rail trains [J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(6): 17.
- [11] 卫亮, 连海山, 易甫清. 城市轨道交通列车脱轨碰撞事故仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(9): 208.
- WEI Liang, LIAN Haishan, YI Fuping. Simulation research on train derailment and collision accident in urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(9): 208.
- [12] 许娇, 吴启凡, 王红伟, 等. 城市轨道交通列车碰撞动力学参数对爬车行为的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 74.
- XU Jiao, WU Qifan, WANG Hongwei, et al. Effects of crash dynamic parameters of urban rail transit train on climbing behavior [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 74.
- [13] 于柯, 张选南, 张慧. 城市轨道交通列车制动性能实时优化关键问题[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(4): 52.
- YU Ke, ZHANG Xuannan, ZHANG Hui. Key issues in real-time optimization of braking performance for urban rail transit trains [J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 52.
- 收稿日期: 2025-02-24 修回日期: 2025-04-20 出版日期: 2025-06-10  
Received: 2025-02-24 Revised: 2025-04-20 Published: 2025-06-10  
• 通信作者: 董雁冰, 工程师, dongyanbing@shsd.com.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