文章编号:1673-0291(2026)04-0013-10 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250071

磨耗车轮作用下心轨廓形参数合理匹配研究

赵卫华[a,b],石双瑜[a],王天扬[a],郑由敏[a]
(福建理工大学 a. 土木工程学院,b. 地下工程福建省高校重点实验室,福州 350118)

摘 要:轮轨廓形匹配对固定辙叉区轮轨动力性能的影响显著,运营期轮轨廓形变化会加剧轮轨动力冲击作用,影响列车运行性能.为明确车轮踏面磨耗和心轨廓形变化对辙叉区轮轨动力特性的影响规律,对磨耗车轮作用下的心轨廓形参数开展研究.首先,基于非均匀有理B样条曲线(Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS)及车辆-轨道耦合动力学理论,提出考虑心轨廓形参数化重构的轮轨廓形动力学影响评价方法;然后,分别研究标准和磨耗车轮踏面状态下,列车通过不同心轨廓形参数辙叉时的轮轨动力特性,明确车轮廓形和心轨廓形对轮轨动力特性的影响权重,以及心轨轨顶横坡和比例系数对各轮轨动力响应的影响规律;最后,结合各方案动力响应规律完成心轨廓形参数合理选型.研究结果表明:在标准车轮踏面状态下,心轨廓形参数对轮轨相互作用力影响显著,对安全性和平稳性指标影响很小;在磨耗车轮踏面状态下,轨顶横坡对轮轨垂横向力峰值的影响较比例系数更为显著;车轮踏面廓形变化对轮轨相互作用力、脱轨系数和轮重减载率的影响权重高于心轨廓形参数,但车轮踏面廓形变化和心轨廓形参数对车体垂横向加速度影响均很小;轨顶横坡为1/20、比例系数为1/3时,各运营阶段轮轨垂横向力最大值正偏差值最小,可用于磨耗车轮踏面的心轨廓形参数设计.研究结果可为辙叉区结构设计及优化提供参考,从而进一步改善列车过岔动力性能.

关键词:辙叉;磨耗车轮;心轨廓形参数;轮轨动力特性;合理匹配
中图分类号:U213.62 **文献标志码**:A

Optimal matching of nose-rail profile parameters for worn wheel profiles

Zhao Weihua[a,b], *Shi Shuangyu*[a], *Wang Tianyang*[a], *Zheng Youmin*[a]
(a. College of Civil Engineering, b. Key Laboratory of Underground Engineering of Fujian Province, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Wheel-rail profile matching significantly affects the dynamic performance of wheel-rail interaction in fixed crossings. Changes in wheel and rail profiles during service intensify wheel-rail dynamic impacts and impair train running performance. To clarify the effects of wheel-tread wear and changes in the nose-rail profile on wheel-rail dynamic characteristics in the crossing area, this study investigates the nose-rail profile parameters under worn wheel conditions.First, a dynamic evaluation method that accounts for parametric reconstruction of the nose-rail profile is developed based on Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) and vehicle-track coupled dynamics. The wheel-rail dynamic characteristics of a train passing through crossings with different nose-rail profile parameters are then investi-

收稿日期:2025-05-20;**修回日期**:2026-01-15
基金项目:福建省自然科学基金(2025J01994,2020J01888)
Foundation items: Fujian Provincial Natural Science Foundation (2025J01994,2020J01888)
第一作者:赵卫华(1984—),女,山西朔州人,副教授,博士.研究方向为铁路轨道结构优化及轨道动力学. **e-mail**:whzhao.good@163.com.

引用格式:赵卫华,石双瑜,王天扬,等.磨耗车轮作用下心轨廓形参数合理匹配研究[J].北京交通大学学报,2026,50(4):13—22.
Zhao Weihua, Shi Shuangyu, Wang Tianyang, et al. Optimal matching of nose-rail profile parameters for worn wheel profiles[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(4): 13—22.(in Chinese)

gated for both standard and worn wheel treads. The relative effects of the wheel and nose-rail profiles are quantified, and the effects of the railhead slope and proportional coefficient on the dynamic responses are determined. Finally, appropriate nose-rail profile parameters are selected by comparing the dynamic responses of all parameter sets. The results show that, for a standard wheel tread, the nose-rail profile parameters significantly affect the wheel-rail interaction forces but have little effect on safety and ride-quality indices. For worn wheel treads, the railhead slope has a greater effect on the peak vertical and lateral wheel-rail forces than the proportional coefficient. Changes in the wheel-tread profile exert greater effects on the wheel-rail interaction forces, derailment coefficient, and wheel-load reduction rate than the nose-rail profile parameters, whereas both factors have little effect on the vertical and lateral carbody accelerations. A railhead slope of 1/20 combined with a proportional coefficient of 1/3 produces the fewest positive deviations in the maximum vertical and lateral wheel-rail forces across the operating stages; this combination is therefore selected as the nose-rail profile suitable for worn wheel treads. These findings provide a reference for the structural design and optimization of crossing areas and may further improve the dynamic performance of trains passing through crossings.

Keywords: fixed crossing; worn wheel; nose-rail profile parameters; wheel-rail dynamic characteristics; profile matching

固定辙叉作为重载和提速线路主要辙叉类型，其不规则钢轨廓形及“有害空间”使轮轨关系较区间线路更加复杂；与此同时，车轮随服役时间增长造成磨耗加剧，导致廓形演变[1]. 车轮踏面廓形演变及固定辙叉不规则钢轨廓形使辙叉区轮轨动力作用较区间线路更加剧烈[2]，严重影响行车安全性和平稳性. 在轮载过渡区，轮载在翼轨和心轨间过渡，轮轨接触点位置分布受轮轨廓形影响较大. 当轮轨廓形不匹配时，辙叉区轮轨接触几何关系不良，轮轨动力相互作用加剧，极易出现轨头裂纹、剥离掉块、肥边、磨耗等各类病害. 根据我国18个铁路局在用20多万组道岔统计结果，固定型辙叉占比达89.8%，且道岔钢轨各类病害80%以上出现在辙叉区[3]，因此，研究辙叉区轮轨廓形匹配并提出合理廓形建议对改善辙叉结构状态、提高列车过岔性能具有积极作用.

国内外学者对辙叉区轮轨廓形匹配开展了大量相关研究. 文献[4-5]采用概率统计方法对15 000组车轮踏面廓形进行分类，选取400组不同磨耗程度踏面廓形，针对心轨轨头坡度、翼轨高度等设置30组方案，研究车轮磨耗下轮轨动力特性变化，实现了固定辙叉结构动力学优化. 文献[6]探讨高速列车通过道岔时车轮踏面演变对横向运动特性的影响. 文献[7]研究车轮廓形演变对道岔区轮轨动态相互作用和滚动接触疲劳的影响，为高速道岔设计优化提供指导. 文献[8]通过3D准静态脱轨分析和动力学仿真，研究车轮磨损演变下道岔和曲线地段列车运行安全性. 文献[9]基于车轮踏面变化，对道岔区轨距加宽参数进行优化. 文献[10]提出了考虑不同磨耗车轮踏面廓形集的转辙器区钢轨打磨廓形优化方法. 文献[11]通过提取辙叉区关键廓形参数，分析辙叉廓形参数和车轮踏面变化对轮轨动力性能及磨耗特性的影响. 文献[12]基于Archard磨耗模型预测车轮踏面廓形磨耗，阐明了道岔钢轨廓形对车轮踏面廓形磨耗影响最大. 文献[13-14]提出考虑车轮踏面廓形阶段性变化规律的固定辙叉钢轨廓形设计方法. 文献[15]采用法向切割法确定轮轨接触点，研究车轮踏面廓形演变对高速铁路道岔转辙器区轮轨关系的影响. 文献[16]考虑非椭圆接触等类似非线性问题，分析了车轮踏面磨耗状态下列车过岔的动力学特性. 文献[17]基于轮轨静态接触几何和Kaller三维非赫兹接触理论，研究地铁道岔与不同车轮型面静态接触行为. 文献[18]研究高速铁路不同车轮踏面与道岔转辙器区钢轨匹配特性，并分析轨道参数对轮轨接触关系的影响. 文献[19-20]分析不同磨耗阶段车轮通过辙叉的动力学性能和磨耗特性，以及不同磨耗因数下动力学指标变化规律.

现有研究多以车轮踏面廓形演变为已知条件，开展道岔区轮轨接触、磨耗受力、动力性能及结构优化等研究，并已较为成熟完善. 但针对固定辙叉结构，同时考虑车轮踏面廓形演变和辙叉区钢轨廓形参数变化影响的研究尚需完善，且钢轨廓形提取多依赖廓形稠密数据点拟合. 鉴于此，本文深入挖掘固定辙叉几何特征参数，基于非均匀有理B样条曲线(Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS)实现心轨廓形参数化重构，进而提出钢轨廓形参数的动力学评估方法；通过分析轮轨廓形变化对轮轨动力

特性影响规律,明确车轮踏面廓形和各心轨廓形参数对辙叉区各动力学评价指标的影响权重,并完成心轨廓形参数合理选取.

1　磨耗车轮及固定辙叉结构特征

1.1　磨耗车轮踏面特征

随着列车载重增大、运营里程增加和速度提高,轮轨动力作用逐渐增强,车轮踏面缺陷问题日益凸显[21].其中车轮踏面凹型磨耗最为常见.车轮磨耗程度对轮轨型面设计和动力性能评估至关重要,合理的轮轨匹配能够改善磨耗,提高运行安全性和平稳性.某线路列车在25万km里程内,每隔5万km采集的LMA型车轮踏面变化及磨耗情况[15]如图1所示,将运营里程分为6个阶段(简称6阶段),各阶段名称记为M1,M2,…,M6.

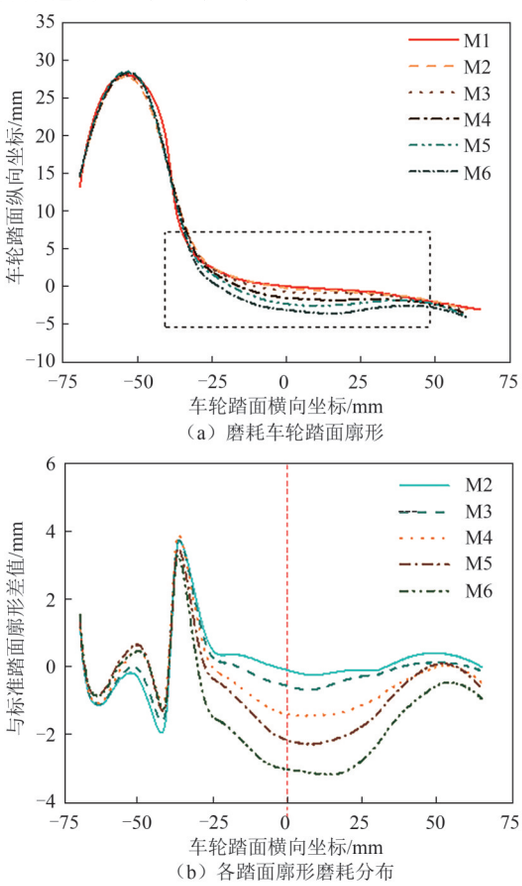


图1　LMA型车轮踏面廓形演变

Fig. 1　Evolution of LMA wheel profiles

由图1可知:①车轮磨耗主要集中在轮缘和踏面中部,踏面磨耗较轮缘剧烈;随着运营里程增加,踏面逐渐形成凹型磨耗,该磨耗主要集中在名义滚动圆附近,这说明在不同运营阶段,因磨耗深度不同,轮轨接触状态会发生变化.②在固定辙叉区,由于变截面钢轨廓形和复杂轨线布置,轮轨关系对车轮踏面廓形演变更加敏感.③运营初期,车轮踏面呈凸曲线特征,翼轨接触点高于心轨;随着磨耗加剧,踏面转为凹型,轮载在翼轨和心轨间过渡延迟,导致轮载过渡点位置变化,影响车轮垂向运动迹线及冲击角,加剧辙叉区轮轨动力相互作用[4,14].

1.2　固定辙叉结构特征

固定辙叉由两根基本轨、翼轨和心轨组成.翼轨横断面廓形在辙叉纵向变化较小,而心轨宽度沿辙叉纵向线性增大,心轨轨顶降低值则分段线性变化,因此翼轨和心轨相对位置沿辙叉纵向不断变化,轮载在辙叉区过渡、转移,轮轨动力冲击荷载加剧.因此,国内外学者针对固定辙叉钢轨廓形优化开展了大量研究,优化参数涉及翼轨轨顶加高值、心轨断面降低值、轨头圆弧半径、顶面宽度及轮缘槽等[4,13,15-16],既有研究多基于既有廓形局部调整,尚未形成通用设计方法.结合固定辙叉结构几何特征,将其钢轨廓形设计参数分为恒定和线性变化两类.恒定参数包括心轨和翼轨轨顶横坡、轨头侧坡纵坡、轮缘槽宽度及翼轨轨头宽度;线性变化参数包括心轨轨头宽度和轨顶降低值.以60 kg/m钢轨12号固定辙叉为例,心轨轨顶横坡和侧面纵坡分别为1∶20和1∶5,翼轨轨顶横坡和侧面纵坡分别为1∶20和1∶5,轮缘槽宽度为46 mm,翼轨轨头宽度为71 mm.固定辙叉几何特点如图2所示.

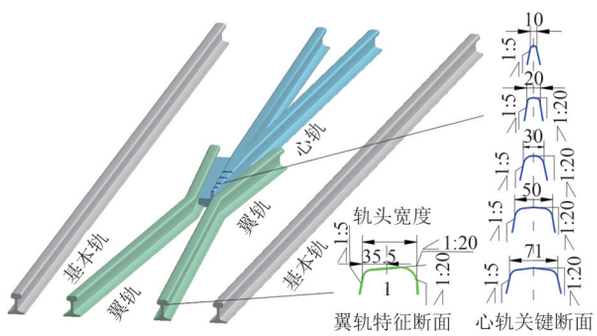


图2　固定辙叉几何特点(单位:mm)

Fig. 2　Geometric characteristics of the fixed crossing (unit: mm)

2　动力学评估方法

2.1　固定辙叉心轨廓形重构参数

NURBS通过少量特征参数实现曲线重构,具有连续性和强凸包性[22],在计算机辅助设计中具有广泛应用,能够高精度地拟合复杂曲线.相比传统多项式拟合或离散点插值方法,NURBS能够更好地通过少量控制点保持钢轨廓形的精度,减少拟合误差.因此,通过NURBS曲线拟合辙叉心轨廓形,对实现心轨参数化设计具有明显优势.同时,在结

构优化研究中，可通过调整少量控制参数，实现任意方案设计和廓形拟合，使方案设计更加高效和灵活，适用于多参数优化研究．文献[23]基于NURBS，选取16个控制点拟合辙叉钢轨廓形，并通过多目标优化可动心辙叉钢轨打磨廓形；文献[24-25]采用NURBS建立转辙器区钢轨三维廓形拟合方法，完成钢轨廓形多目标优化，降低了轮轨动力响应和钢轨磨耗．基于上述研究，结合心轨廓形特征，采用NURBS曲线重构钢轨廓形．一条p次NURBS曲线$C(t)$定义为

$$C(t)=\frac{\sum_{i=0}^{n}B_{i,p}(t)\omega_i N_i}{\sum_{i=0}^{n}B_{i,p}(t)\omega_i} \qquad t\in[0,1] \qquad (1)$$

式中：N_i为控制点，i为索引，控制点数量为$n+1$，连接后构成控制多边形；t为在区间[0,1]内变化的任意值；p为B样条曲线次数；ω_i是控制点权因子；$B_{i,p}(t)$是p次非均匀有理B样条基函数．为突出心轨廓形控制参数的影响，设权因子为1，采用3次NURBS曲线拟合心轨廓形．

由于轮轨接触主要集中在心轨和翼轨轨距测量点以上，因此仅拟合该范围内钢轨廓形．结合心轨特征参数建立控制点方程组并求解其坐标，进而基于NURBS曲线完成心轨任意断面廓形拟合，心轨特征参数及控制点分布如图3所示．其中，$\{N_i=(x_i,y_i)\}(i=1,2,\cdots,7)$表示各关键控制点集合，$x_i$、$y_i$分别为控制点横、纵坐标值．因心轨廓形对称，因此控制点只显示对称轴右侧部分．N_7为调节心轨轨头侧面复合圆弧段曲率的控制点；P为三角形$N_3N_4N_5$中线与线段N_3N_5的交点，是辅助点．在点P和点N_4连线上以一定比例布置，将该比例系数定义为λ，而N_1N_4，N_4N_6斜率分别为心轨轨顶横坡k_1和轨头侧面纵坡k_2，h和w分别为心轨任意断面高度和心轨轨头半宽．综上所述，λ、k_1、k_2、h及w为实现心轨廓形拟合的相关参数．

2.2 动力学评估流程

固定辙叉区车轮踏面廓形和心轨廓形参数动力学评估方法，是基于轮轨动力学理论建立车辆-道岔耦合动力学模型[26]，通过考虑心轨廓形参数化拟合（2.1节）及车轮踏面廓形集（1.1节），对轮轨廓形的影响进行动力学评估，最后确定合理的心轨廓形参数．评估流程如图4所示，流程共分为4个步骤．

步骤1：结合心轨廓形参数化重构方法，通过调整关键控制参数，快速实现全辙叉心轨廓形多方案设计．

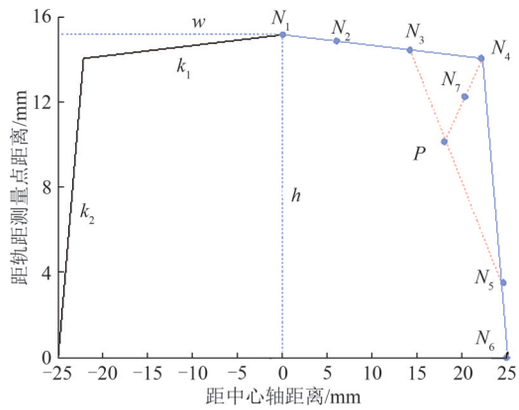


图3 心轨特征参数及控制点分布

Fig. 3 Nose-rail profile parameters and control-point distribution

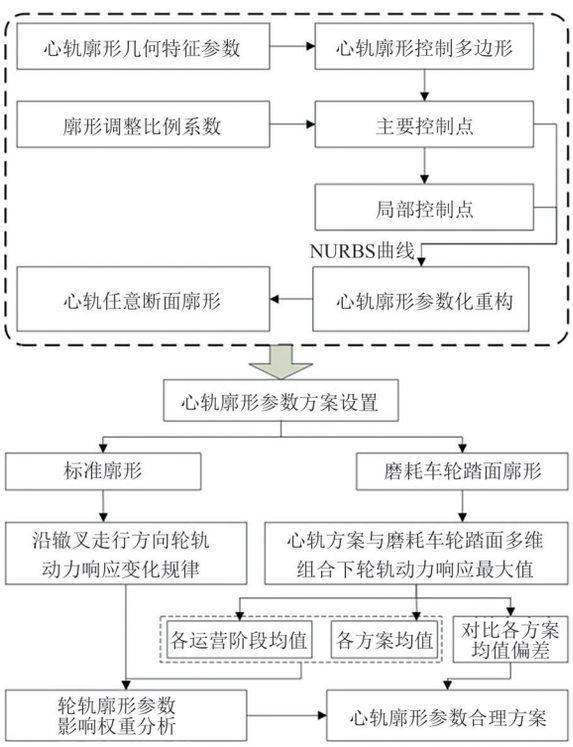


图4 心轨廓形动力学评估流程

Fig. 4 Procedure for dynamic evaluation of nose-rail profiles

步骤2：在充分考虑车辆与固定辙叉道岔结构型式、振动特性等因素基础上，通过对车辆系统和固定辙叉系统进行合理简化，建立车辆-固定辙叉耦合动力学模型，用于固定辙叉轮轨动力学评价指标的计算．各部位钢轨均视为双向可弯欧拉梁，并以岔枕连接点为节点单元化，扣件系统和枕下基础简化为弹簧阻尼；同时考虑边界效应，在辙叉前后添加各10米长度的普通轨道结构．考虑车辆系统和固定辙叉系统通过轮轨接触耦合，其中垂向耦合可以看作两个椭球状弹性体接触，简化为非线性赫兹接触问题；横向耦合受多种因素制约，使列车产生不同程度的横向振动和蛇形运动，可采用非线性蠕滑理论进行模拟[26]．

步骤 3:将车轮踏面廓形集按照运营里程分类,获得多个不同磨耗程度的车轮踏面廓形;将心轨廓形方案与各运营阶段车轮踏面廓形进行多维组合,形成动态工况模拟组,结合均值量化评定指标,分析各方案与标准车轮踏面匹配时的轮轨动力特性,评估心轨廓形关键控制参数对轮轨动力相互作用的影响权重,为心轨廓形参数合理选取提供依据.同时,分析各心轨廓形方案与不同运营阶段车轮踏面廓形匹配时各轮轨动力响应最大值变化规律,分析车轮踏面廓形和心轨廓形参数对各轮轨动力响应的影响权重.

步骤 4:选取各运营阶段轮轨动力响应最大值与标准车轮踏面廓形最大值的偏差值作为评价指标,比选获得心轨廓形合理方案.

3　实例分析

3.1　方案设置

以轴重 14 t 的普速列车以 80 km/h 直向通过 60 kg/m 钢轨 12 号固定辙叉为例,采用上述动力学评估方法开展轮轨廓形影响分析并进行心轨廓形参数合理选取.其中,车轮踏面廓形分别采用 M1～M6 各运营里程阶段踏面廓形.

心轨磨耗主要集中在轨头顶面和侧面复合圆弧部分.轨顶横坡 k_1 和比例系数 λ 分别影响轨头顶面及轨头侧面复合圆弧段廓形.已有相关研究通过参数影响权重分析证明二者对廓形影响权重较大[27],因此选取 k_1 和 λ 确定心轨廓形方案,本实例设置 8 组方案(简称 8 方案),记作 C1～C8,各方案参数设置如表 1 所示.

表 1　8 方案心轨廓形参数

Tab.1　Nose-rail profile parameter sets

方案	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
k_1	1/20	0	1/40	1/10	1/20	1/20	1/20	1/20
λ	1/3	1/3	1/3	1/3	0	1/4	1/2	3/4

由于心轨廓形变化会影响轮轨匹配关系,进而影响沿辙叉走行方向的轮轨接触点分布和轮载过渡位置.本文以列车逆向过岔为例,分析各廓形方案下辙叉侧车轮踏面接触点沿辙叉走行方向变化规律及轮载过渡情况,轮轨接触点位置如图 5 所示.图 5 中,浅黄色框图区域为心轨顶宽 20～30 mm 范围.

由图 5 可知:①沿辙叉走行方向各方案轮轨接触点变化规律一致;随着翼轨偏离轨距线,车轮上接触点仍与翼轨接触,在心轨 20 mm 断面附近,车轮接触点发生突变,由翼轨转移至心轨,即发生轮载过渡.②各方案轮载过渡断面均集中在心轨 20 mm 断面附近,满足轮载过渡断面心轨粗壮度要求,说明各方案中心轨廓形参数的变化对轮轨过渡位置影响较小,且均能够有效支撑轮载的平稳过渡,符合工程实际.

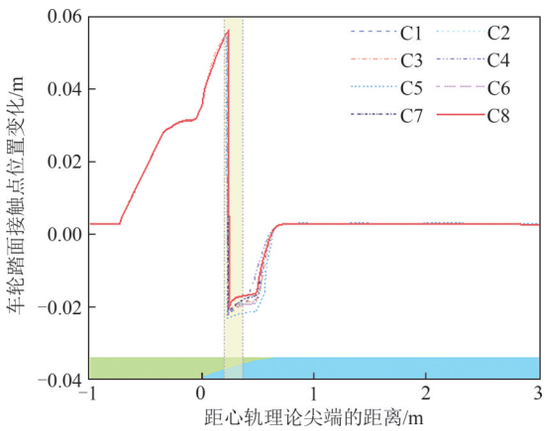


图 5　轮轨接触点位置

Fig. 5　Locations of wheel-rail contact points

3.2　轮轨廓形对轮轨动力特性影响权重分析

3.2.1　标准车轮踏面下轮轨动力特性

选取轮轨垂横向力、脱轨系数和减载率及车体垂横向加速度作为动力学评价指标,分析标准车轮踏面下心轨参数对辙叉轮轨动力特性的影响规律.列车过岔时各方案各轮轨动力响应沿辙叉走行方向的变化规律一致,各方案脱轨系数和轮重减载率及车体垂横向加速度小于安全限值,说明标准车轮踏面下 k_1 和 λ 对安全平稳性指标影响很小.在辙叉咽喉和轮载过渡区轮轨相互作用加剧,轮轨垂横向力变化规律如图 6 所示.

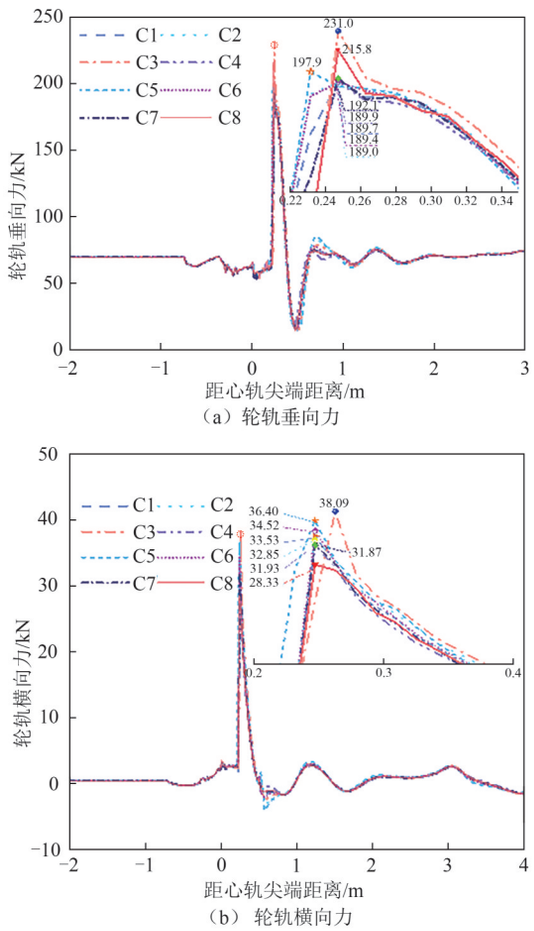
由图 6 可知:①在方案 C1～C4 中,λ 固定,k_1 为 1/40 时,轮轨垂横向力峰值均在 C3 中达到最大,分别为 231.003 kN 和 38.088 kN,较 C1 增大 21.8% 和 7.7%;其余方案轮轨垂向力数值与 C1 基本一致.②在 C1 和 C5～C8 中,随着参数 λ 增大,轮轨横向力峰值总体呈减小趋势,在 C5 和 C8 分别达到最大值 36.40 kN 和最小值 28.33 kN,是 C1 的 1.03 倍和 0.80 倍.③k_1 和 λ 对轮轨垂横向力影响显著,建议 k_1 大于 1/40,λ 不小于 1/4.

3.2.2　磨耗车轮踏面下轮轨动力特性

为探究心轨廓形参数和车轮踏面廓形对轮轨动力特性的影响权重,从 8 种心轨设计方案(8 方案)和车轮踏面不同磨耗阶段(6 阶段)两个维度,分析轮轨间各动力响应最大值变化规律.

1) 轮轨相互作用力.

8 方案和 6 阶段轮轨垂横向力最大值及平均值分布情况如图 7 和图 8 所示.

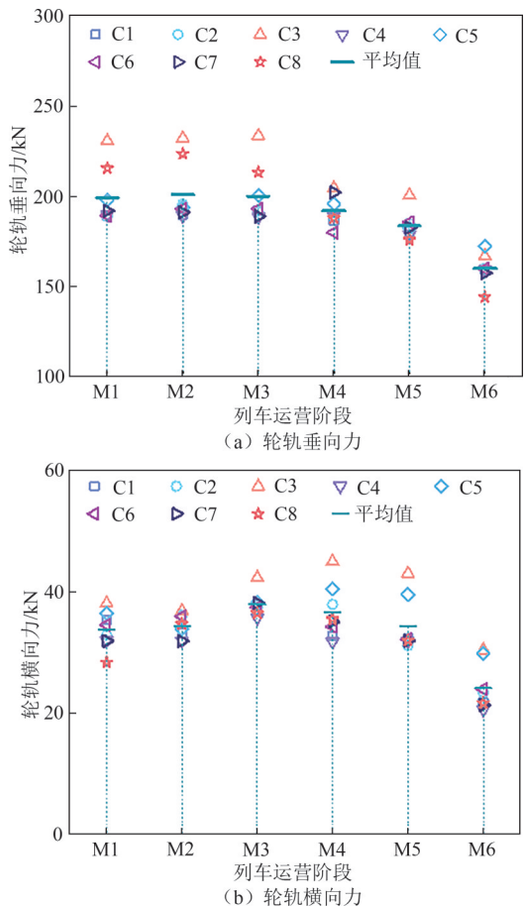


（a）轮轨垂向力

（b） 轮轨横向力

图 6 轮轨动力响应

Fig. 6 Wheel-rail dynamic responses



（a）轮轨垂向力

（b）轮轨横向力

图 7 轮轨垂横向力最大值及 8 方案均值

Fig. 7 Maximum vertical and lateral wheel-rail forces and their means across eight profile parameter sets

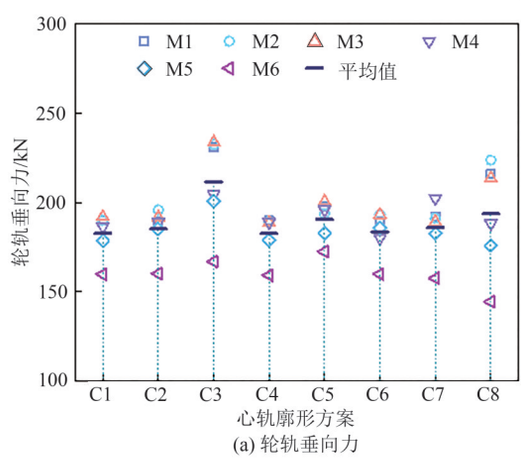
由图 7 可知：随着车轮踏面磨耗加深，轮轨垂横向力 8 方案均值呈先增大后减小趋势；垂横向力均值分别在 M2 和 M3 阶段达到最大值 201.16 kN 和 37.92 kN，为 M1 阶段 8 方案均值的 1.01 倍和 1.13 倍；在 M6 阶段达到最小值 160.03 kN 和 24.06 kN，较 M1 阶段分别降低 19.72% 和 28.54%，表明车轮踏面磨耗对轮轨垂横向力影响显著.

由图 8 可知：①同一磨耗阶段下心轨各方案轮轨垂横向力最大值变化规律与标准车轮踏面廓形时一致.②C1～C4 中，轮轨垂横向力 6 阶段均值在 C3 达到最大值，分别为 211.1 kN 和 39.27 kN，其他方案相差较小，说明 k_1 对 6 阶段均值变化影响较大；而在 C1 和 C5～C8 中，λ 递增时，轮轨垂横向力 6 阶段均值变化较小，表明 k_1 对轮轨垂横向力影响较 λ 的影响大.③8 个方案中，除了 C3 较 C1 变化较大，其他方案均变化较小，说明心轨廓形参数对轮轨垂横向力影响权重较车轮踏面廓形的影响小.

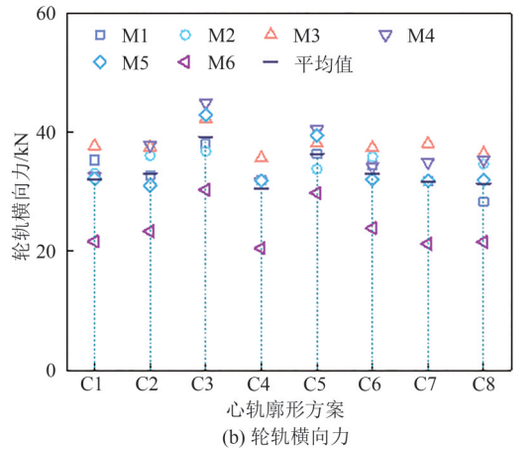
2）脱轨系数和轮重减载率.

脱轨系数和轮重减载率变化情况分别如图 9 和图 10 所示.图 9 和图 10 中，柱状图表示二者峰值的 8 方案均值和 6 阶段均值，折线图表示各工况下最大值分布.

由图 9 和图 10 可知：①针对各方案最大值与 8 方案均值，脱轨系数和轮重减载率峰值分别小于安全限值 0.8 和 0.65[28]；随运营里程增加，二者的 8 方案均值均呈现先增大后减小趋势；脱轨系数的 8 方案均值分别在 M4 和 M6 阶段达到最大值和最小值，即为 0.20 和 0.16，分别是 M1 阶段 8 方案均值的



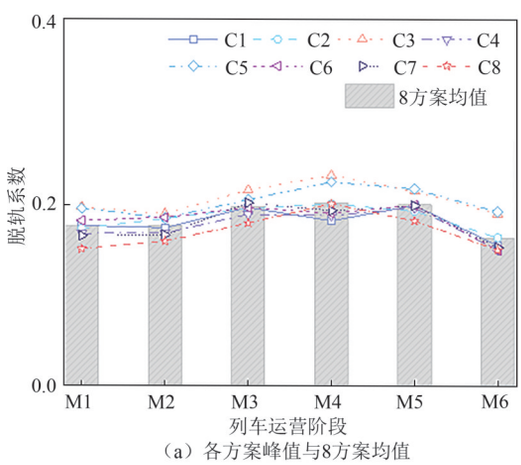
(a) 轮轨垂向力



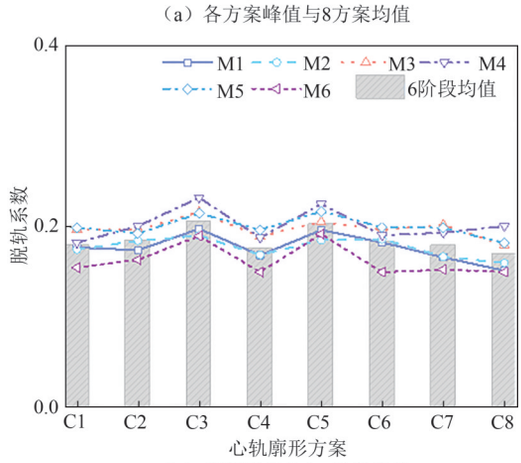
(b) 轮轨横向力

图 8　轮轨垂横向力最大值及 6 阶段均值

Fig. 8　Maximum vertical and lateral wheel-rail forces and their means across six mileage stages



（a）各方案峰值与8方案均值

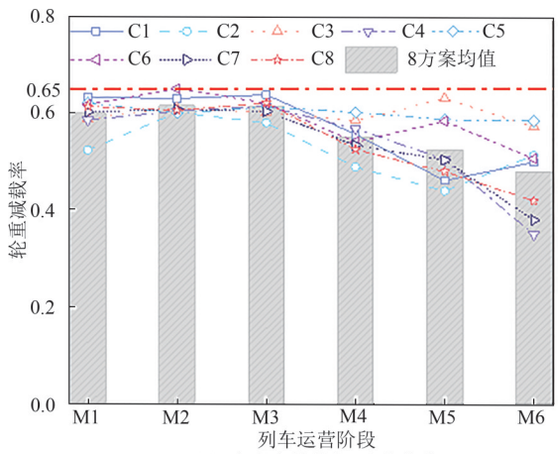


（b）各阶段峰值与6阶段均值

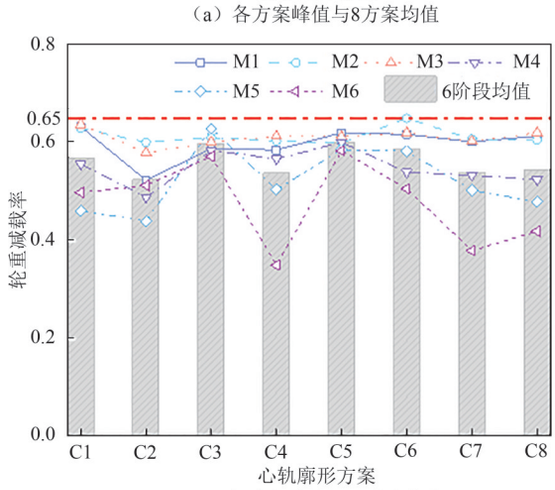
图 9　脱轨系数峰值与均值

Fig. 9　Maximum and mean derailment coefficients

1.11 倍和 0.89 倍,整体变化趋于稳定;轮重减载率 8 方案均值在 M2 阶段达到峰值 0.61,M6 阶段为最小值 0.48,较 M1 阶段 8 方案均值分别增大 1.67% 和减小 20%,表明车轮踏面磨耗加深对轮重减载率的影响比对脱轨系数影响显著.②任一运行阶段,不同心轨廓形方案脱轨系数峰值变化范围较小;脱轨系数



（a）各方案峰值与8方案均值



（b）各阶段峰值与 6 阶段均值

图 10　轮重减载率峰值与均值

Fig. 10　Maximum and mean wheel-load reduction rates

6 阶段均值在 0.17～0.21 之间,远小于 0.8;轮重减载率 6 阶段均值在 0.52～0.60 之间,说明心轨廓形参数对脱轨系数和轮重减载率影响较小.

3）车体振动加速度.

6 阶段及 8 方案车体振动加速度最大值的平均值分布及垂横向振动加速度峰值如表 2 所示.

由表 2 可知:随着踏面磨耗加深,车体垂向振动加速度 8 方案均值变化较横向加速度大,垂横向振动加速度峰值变化范围分别在 0.44～0.72 m/s^2、0.05～0.08 m/s^2,各方案峰值均接近均值;垂横向振动加速度 6 阶段均值分别集中在 0.57～0.77 m/s^2、0.06～0.1 m/s^2,波动范围较小,说明车轮踏面廓形和心轨廓形参数变化对垂横向加速度影响很小.

3.3　心轨廓形参数方案评估

基于 3.2 节中轮轨廓形对辙叉区各动力响应影响权重分析可知,心轨廓形参数变化对脱轨系数和减载率及车体垂横向加速度影响很小,而对轮轨相互作用力有一定影响.因此,以轮轨间垂横向力为评价指标,开展磨耗车轮踏面作用下心轨廓形参数

表 2　车体垂向振动加速度峰值及均值

Tab.2　Peak and mean vertical and lateral carbody accelerations　　m/s²

动力学指标	方案	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	8方案均值
垂向加速度	M1	0.61	0.61	0.88	0.62	0.72	0.61	0.69	0.76	0.69
	M2	0.62	0.70	0.88	0.61	0.70	0.70	0.68	0.85	0.72
	M3	0.67	0.68	0.89	0.61	0.73	0.70	0.61	0.74	0.70
	M4	0.58	0.61	0.74	0.61	0.71	0.52	0.73	0.60	0.64
	M5	0.52	0.60	0.73	0.52	0.54	0.60	0.54	0.53	0.57
	M6	0.43	0.44	0.49	0.43	0.51	0.44	0.43	0.34	0.44
	6阶段均值	0.57	0.61	0.77	0.57	0.65	0.60	0.61	0.64	—
横向加速度	M1	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07
	M2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
	M3	0.08	0.08	0.11	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08
	M4	0.07	0.07	0.12	0.07	0.09	0.07	0.07	0.07	0.08
	M5	0.07	0.08	0.13	0.07	0.09	0.07	0.07	0.07	0.08
	M6	0.04	0.05	0.06	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05
	6阶段均值	0.07	0.07	0.10	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	—

方案合理选取分析.各方案轮轨垂横向力最大值相对于M1阶段最大值的偏差值分布如图11所示,偏差正值表示各磨耗阶段轮轨垂横向力大于标准车轮踏面阶段相应心轨廓形方案的轮轨力.

由图11可知:①不同方案不同运营阶段轮轨垂横向力最大值较标准车轮踏面廓形时具有不同程度的离散性;各方案下不同运营阶段轮轨垂向力最大值偏差值变化范围相近,除C2、C7和C8中个别工况产生正偏差相对较大外,其余方案下偏差值均接近均值或者为负值;轮轨横向力最大值偏差值在不同方案各运营阶段均存在正偏差值,在方案C1中只有M3阶段为正偏差,且数值较小,为2.38 kN,其余运营阶段均为负偏差.②综合考虑轮轨垂横向力偏差正负离散情况,在不同运营阶段磨耗车轮踏面廓形作用下,方案C1对应的固定辙叉区轮轨动力相互作用变化最小,因此选择轨顶横坡取值1/20、比例系数取值1/3为最优心轨廓形参数.

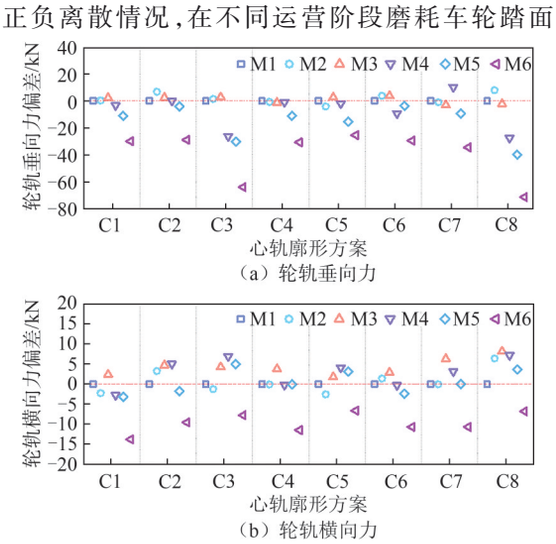


图11　各方案轮轨垂向力偏差值

Fig. 11　Deviations in vertical and lateral wheel-rail forces across the eight parameter sets

4　结论

1）标准车轮踏面情况下,辙叉咽喉和轮载过渡区轮轨作用加剧,心轨廓形参数对安全性和平稳性指标影响很小,对轮轨相互作用力影响较大,建议轨顶横坡k_1大于1/40,比例系数λ不小于1/4.

2）磨耗车轮踏面情况下,轮轨垂横向力均值分别在M2(运行5万km)和M3(运行10万km)阶段达到最大值,是M1(0 km)阶段的1.01倍和1.13倍;在M6阶段(运行25万km)达到最小值,比M1阶段分别降低19.72%和28.54%,表明车轮踏面磨耗对轮轨垂横向力影响显著.同一磨耗阶段心轨各方案轮轨垂横向力变化较小,说明心轨廓形参数对轮轨垂横向力影响权重较车轮踏面廓形小;根据各方案轮轨垂横向力6阶段均值变化规律可知,轨顶横坡k_1对轮轨垂横向力影响较比例系数λ大.

3）脱轨系数峰值的8方案均值随运营里程增加呈现先增大后减小规律,在M4和M6阶段达到最值,分别为M1阶段的1.11倍和0.89倍,波动较小;而轮重减载率8方案均值在M2和M6阶段达到最值,分别较M1阶段增大1.67%和减小20%;而脱轨系数和轮重减载率的6阶段均值在8方案中变化范围较小,说明车轮踏面廓形对脱轨系数和轮重减载率影响较大,而心轨廓形参数影响权重较小,表明车轮踏面磨耗加深导致列车过岔安全性降低.此外,车体垂向振动加速度8方案和6阶段均值及变化范

围均很小,说明车轮踏面廓形和心轨廓形参数对车体垂横向加速度影响极小.

4)经综合对比,选取轮轨垂横向力作为心轨廓形参数选取的评价指标,轨顶横坡取值1/20、比例系数取值1/3时,可有效降低轮轨相互作用力,且对安全性和平稳性指标影响较小.

本文从心轨廓形几何特征参数角度出发,通过系统分析车轮踏面磨耗与心轨廓形参数对辙叉区轮轨动力特性的影响权重,初步提出了适用于磨耗车轮踏面的心轨廓形参数建议,为固定辙叉结构优化提供了新的思路和方法.在后续研究中,需突破独立方案设定,采用先进成熟的优化算法实现多参数多目标智能迭代优化.

参考文献(References):

[1] 周骏, 刘林芽, 李纪阳. 考虑磨耗演化的高速列车车轮型面多目标优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1): 51－65.
Zhou Jun, Liu Linya, Li Jiyang. Multi-objective optimization of high-speed train wheel profile considering wear evolution[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(1): 51－65.(in Chinese)

[2] 李洪晓, 李莉, 张云飞, 等. 车轮型面磨耗耦合车轮多边形对车辆动态响应的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(10): 4240－4252.
Li Hongxiao, Li Li, Zhang Yunfei, et al. Research on the influence of wheel profile wear coupled with wheel polygon on the dynamic response of vehicles[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(10): 4240－4252.(in Chinese)

[3] 燕敬忠. 固定型辙叉轮载过渡区动力学试验研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2024: 1.
Yan Xiaozhong. Research on dynamic test of fixed frog wheel load transition zone[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2024: 1.(in Chinese)

[4] Lee J, Dersch M S, Lima A D O, et al. Probabilistic review of wheel profiles based on hollow tread in the U.S. heavy haul rail network[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2023, 237(4): 508－516.

[5] Lee J, Lima A D O, Dersch M S, et al. Optimisation of turnout frog profile geometry using revenue service wheel profiles[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(5): 1142－1159.

[6] Hao C J, Xu J M, Qian Y, et al. Impact of wheel profile evolution on the lateral motion characteristics of a high-speed vehicle navigating through turnout[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(8): 2079－2097.

[7] Chen R, Chen J, Wang P, et al. Impact of wheel profile evolution on wheel-rail dynamic interaction and surface initiated rolling contact fatigue in turnouts[J]. Wear, 2019, 438/439: 203109.

[8] Lai J, Chen Y, Liao T, et al. Study on train running safety in railway switches and sharp curves considering wheel wear evolution[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(12): 3191－3215.

[9] Nicklisch D, Kassa E, Nielsen J, et al. Geometry and stiffness optimization for switches and crossings, and simulation of material degradation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(4): 279－290.

[10] Chen D L, Sun G C, Xing L, et al. A grinding profile design method for rails in the switch area considering a representative set of wheel profiles[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(10): 4923－4933.

[11] Wan C, Markine V, Dollevoer R. Robust optimisation of railway crossing geometry[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(5): 617－637.

[12] Casanueva C, Doulgerakis E, Jonsson P A, et al. Influence of switches and crossings on wheel profile evolution in freight vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(S1): 317－337.

[13] Palsson B A. Optimisation of railway crossing geometry considering a representative set of wheel profiles[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(2): 274－301.

[14] Palsson B A. Design optimisation of switch rails in railway turnouts[J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(10): 1619－1639.

[15] 钱瑶, 王平, 赵思琪, 等. 车轮廓形的演变对道岔区轮轨接触几何的影响[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 107－115.
Qian Yao, Wang Ping, Zhao Siqi, et al. Influence of wheel profile evolution on wheel-rail contact geometry in high-speed turnout area[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 107－115.(in Chinese)

[16] 肖乾, 李超, 昌超, 等. 高速列车型面不同磨耗状态下的过岔性能研究分析[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 51－59.
Xiao Qian, Li Chao, Chang Chao, et al. Research on turnout passing performance of high-speed train with different wheel wear states[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 51－59.(in Chinese)

[17] 陈嵘, 丁晔, 陈嘉胤, 等. 不同车轮型面对地铁道岔区轮轨静态接触行为的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(9): 2624－2633.
Chen Rong, Ding Ye, Chen Jiayin, et al. Influence of different wheel tread on static wheel-rail contact behav-

ior in subway turnout area[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2020, 51(9): 2624－2633.(in Chinese)

[18] 闫正, 陈嘉胤, 徐井芒, 等. 不同车轮踏面与高速60N钢轨道岔静态接触特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(4): 1358－1370.
Yan Zheng, ChenJiayin, Xu Jingmang, et al. Study of static contact properties of diverse wheel treads and high-speed 60N rail turnout[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021,52(4): 1358－1370.(in Chinese)

[19] 林凤涛, 翁涛涛, 杨洋, 等. 道岔辙叉区磨耗车轮动力学分析及摩擦因数影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1316－1325.
Lin Fengtao, Weng Taotao, Yang Yang, et al. Dynamic analysis of wear wheel in turnout frog area and influence of friction coefficient[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1316－1325.(in Chinese)

[20] 宋烨, 祁亚运, 战立超. 考虑人字齿轮啮合的高速动车组动力学性能和车轮磨耗分析[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(2): 351－360.
Song Ye, Qi Yayun, Zhang Lichao. Analysis of dynamics performance and wheel wear on a high-speed EMUs equipped with herringbone gears[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2): 351－360.

[21] 敬霖, 刘凯. 车轮踏面缺陷引起的轮轨动态响应综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 285－315.
Jing Lin, Liu Kai. Review on wheel-rail dynamic responses caused by wheel tread defects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 285－315.(in Chinese)

[22] Les P, Wayne T. 非均匀有理B样条[M]. 赵罡, 穆国旺, 王拉柱, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010.
Les P, Wayne T. The NURBS book[M]. Zhao Gang, Mu Guowang, Wang Lazhu, et al., trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.

[23] 林凤涛, 吴涛, 杨洋, 等. 高速铁路辙叉区钢轨打磨廓形设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 124－135.
Lin Fengtao, Wu Tao, Yang Yang, et al. Design method of rail grinding profile in frog area of high-speed railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(6): 124－135.(in Chinese)

[24] Fang J S, Chen R, Chen J Y, et al. A multi-objective optimisation method of rail combination profile in high-speed turnout switch panel[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(1): 336－355.

[25] Fang J S, Chen R, Xu J M, et al. An optimised grinding target profile considering long-term service performance: A case study of No. 18 high-speed turnout[J]. An International Journal on the Science and Technology of Friction, Wear, 2024, 540/541: 205276.

[26] Cao Y G, Zhao W H, Lin Y R, et al. Dynamic optimization of the rail-crown geometry in the rigid frog area by controlling the position of the wheel-load transition[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2020, 234(9): 1017－1028.

[27] 赵卫华, 曹洋. 基于B样条曲线的心轨重构廓形参数影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(2): 264－272.
Zhao Weihua, Cao Yang. Influence of nose rail reconstruction profile parameters based on B-spline curve[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(2): 264－272.(in Chinese)

[28] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.(in Chinese)