

考虑等效锥度离散度的 JM_3 车轮型面优化

孟凡愚¹, 沈龙江², 邓小星^{1,2}, 姚 远¹

(1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 株洲电力机车有限公司大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 轮轨匹配对轨道车辆动力学性能有着重要影响, 针对现行标准 JM_3 车轮型面与国内不同类型钢轨廓形匹配时等效锥度差异过大, 以及在大轨底坡条件下匹配打磨钢轨时因等效锥度过低而引发机车晃车的问题, 本文以减小车轮型面在不同轨底坡条件下与 CN60 型和 CN60N 型 2 种钢轨匹配对应的等效锥度离散度为优化目标, 采用圆弧、直线组合的车轮型面描述方法, 应用 NSGA-II 遗传算法优化滚动圆附近两段圆弧圆心横向位置参数, 对 JM_3 型面进行优化, 并对优化前后的车轮型面进行轮轨接触特性和机车动力学性能仿真对比分析. 结果表明: 优化型面在与上述钢轨匹配时, 轮对 3 mm 横移量处的名义等效锥度均在 0.1 左右, 显著降低原 JM_3 踏面等效锥度离散度, 提高了车轮型面对不同钢轨廓形和线路条件的适应性; 同时, 优化后的型面对应机车蛇行稳定性、横向平稳性、曲线通过性能和磨耗性能指标较原型面均得到提升, 消除了特定线路机车的低频晃车现象.

关键词: JM_3 型面; 等效锥度; 轮轨匹配; 多目标优化; 动力学性能

中图分类号: U211.5 **文献标志码:** A

Optimization of JM_3 Wheel Profile Considering Equivalent Conicity Dispersion

MENG Fanyu¹, SHEN Longjiang², DENG Xiaoxing^{1,2}, YAO Yuan¹

(1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. State Key Laboratory of System Integration of High Power AC Drive Electric Locomotive, CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Wheel-rail profile compatibility has an important influence on the dynamic performance of rail vehicles. The present standard JM_3 wheel profile has a large difference in equivalent conicity when it is matched with different types of rail profiles in China. It has the problem of locomotive swaying caused by too low equivalent conicity when the profile is matched with the grinding rail with large rail cant. To address these issues, the optimization objective of reducing the equivalent conicity dispersion of the wheel profile matched with CN60 and CN60N rail profiles under different rail cants was set. The wheel profile was described by a method combining arcs and straight lines. The JM_3 wheel profile was optimized by utilizing NSGA-II genetic algorithm to improve the lateral position parameters of the two arc centers near the rolling circle. The wheel-rail contact characteristics and the locomotive dynamic simulation of the wheel profile before and after optimization were compared. The results show that when the optimized wheel profile is matched with the rails above, the nominal equivalent conicities at the 3 mm transverse displacement of the wheelset are all about 0.1, which reduces the equivalent conicity dispersion of the original JM_3 wheel profile and improves the adaptability of the wheel profile

收稿日期: 2023-04-19 修回日期: 2023-11-24 网络首发日期: 2023-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52372403, U2268211); 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0034, 2022NSFSC1901); 国铁集团科研开发计划课题(N2023J071)

第一作者: 孟凡愚(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为车辆系统动力学, E-mail: fymeng@my.swjtu.edu.cn

通信作者: 姚远(1983—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为机车车辆设计理论和车辆系统动力学, E-mail: yyuan8848@163.com

引文格式: 孟凡愚, 沈龙江, 邓小星, 等. 考虑等效锥度离散度的 JM_3 车轮型面优化[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(2): 346-355.

MENG Fanyu, SHEN Longjiang, DENG Xiaoxing, et al. Optimization of JM_3 wheel profile considering equivalent conicity dispersion[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(2): 346-355.

to different rail profiles and line conditions. At the same time, the locomotive hunting stability, lateral stability, curving performance, and wear performance index of the optimized profile are all improved compared with the original wheel profile. In addition, the phenomenon of low-frequency swaying of locomotives on specific lines is eliminated.

Key words: JM₃ wheel profile; equivalent conicity; wheel-rail profile compatibility; multi-objective optimization; dynamic performance

轮轨关系对轨道车辆的动力学性能有着重要影响,如蛇行运动稳定性、运行平稳性与舒适性以及运行安全性^[1]。近年来,随着我国铁路运输的快速发展,轨道车辆的运营速度不断提高,轮轨动态作用加剧,对于轮轨匹配提出了更高的要求。车轮型面优化^[2]和钢轨廓形优化^[3]是改善轮轨匹配状态、提高车辆动力学性能的重要措施。由于既有铁路线路大规模更换钢轨廓形成本高,车辆车轮型面种类繁多,各种类型的车辆存在跨线运行的情况,所以车轮型面优化相较于钢轨廓形优化有着更好的经济性与可行性。

对于车轮型面的生成方法有离散点曲线样条拟合方法^[4]、车轮型面圆弧和直线特征参数表述法^[5]以及旋转压缩微调法(rotary-scaling fine-tuning, RSFT)等^[6]。国内外学者在这些方法的基础上,为解决各种车辆动力学问题开展了大量车轮型面优化研究:Shen等^[7]在忽略轮对侧滚角的前提下,基于轮轨接触角曲线反演车轮型面,并应用于独立轮对的开发;Jahed等^[8]以滚动圆半径差(RRD)为目标,通过离散点和3次样条曲线表征优化区域,对车轮型面进行优化,并通过动力学软件仿真验证新踏面的优势;Polach^[9]通过给定目标等效锥度以生成新的车轮型面,提高轮轨共形接触,减少了踏面的集中磨耗;Cui等^[10]提出一种基于轮轨法向间隙的车轮型面正向优化方法,通过该方法得到的新踏面改善了接触点分布,降低接触应力,减少轮轨磨耗与滚动接触疲劳;Santamaria等^[11]根据目标等效锥度曲线优化车轮型面,保证了车辆在不同的轨道配置下具有良好的动力学性能;干锋等^[12]提出一种基于轮径差为目标反求车轮型面的方法,并通过S1002CN和LM_A型面进行了验证;成棣等^[13]以圆弧参数为设计变量,通过Isight软件对车轮型面进行多目标优化,改善了CRH3型动车组低锥度晃车问题;祁亚运等^[14]采用旋转压缩微调法,以减小车轮磨耗和提高舒适度为目标对S1002CN型面进行多目标优化,通过动力学软件仿真得到良好的验证。

JM₃车轮型面是基于中国标准60 kg/m钢轨(CN60型)匹配设计开发的,该型面与打磨钢轨廓形(CN60N型)匹配时,直线段因轮轨接触点集中于轨顶导致轮轨接触等效锥度较低,容易引发低频晃车;曲线段则因轮缘和钢轨内侧接触,导致曲线通过性能变差。加之钢轨打磨偏差、实际线路轨底坡离散性^[15]以及轨距离散性等因素,部分高速机车容易出现因轮轨匹配不良而导致车辆动力学性能恶化等问题,特别是在线路部分区段,钢轨轨底坡过大导致轮轨接触等效锥度过低,使机车出现晃车现象,降低了乘坐舒适性^[16]。针对传统车轮型面优化过程,很少考虑钢轨轨底坡的变化对轮轨接触等效锥度的影响,本文采用圆弧、直线等几何元素相组合的车轮型面描述方法^[17],优化滚动圆附近两段圆弧圆心横向位置参数,针对现有JM₃型面^[18]进行优化,以减小在不同轨底坡条件下与CN60型和CN60N型钢轨廓形匹配时轮轨接触等效锥度离散度,降低钢轨廓形和轨底坡对等效锥度的影响,提高机车横向动力学性能,并对优化后的车轮型面进行车辆动力学性能仿真对比验证。

1 车轮型面描述方法

常见的车轮型面如图1所示,图中: x 、 y 分别为横、纵坐标, $g\hat{g}$ 表示直线, A 、 B 、 $\cdots$ 、 N 为节点。该车轮型面由多个线段与圆弧组合而成,其中 EI 段为优化区域,由4段圆弧组成,分别是 $\widehat{EG}$ 、 $\widehat{GH}$ 、 $\widehat{HI_A}$ 和 $\widehat{I_AI}$ 。在凹凸性方面,4段圆弧要满足从左到右依次为凹—凹—凹—凸。令4段圆弧圆心及其坐标分别为 $O_5(x_{O_5}, y_{O_5})$ 、 $O_6(x_{O_6}, y_{O_6})$ 、 $O_7(x_{O_7}, y_{O_7})$ 、 $O_8(x_{O_8}, y_{O_8})$,对应半径为 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 。

依据以下几何约束条件使用圆弧参数描述车轮型面^[19]:

- 1) 车轮的轮缘角为70°;
- 2) EI 段中相邻的两段圆弧相切,即 $\widehat{EG}$ 与 $\widehat{GH}$ 内切, $\widehat{GH}$ 与 $\widehat{HI_A}$ 内切, $\widehat{HI_A}$ 与 $\widehat{I_AI}$ 外切;
- 3) 点 E 为 $\widehat{EG}$ 与直线 $g\hat{g}$ 的切点,点 I 为 $\widehat{I_AI}$ 与直线 IM 的切点。其中,点 D 与点 M 固定不动,点 E

集的同时可以加快算法收敛速度,提高计算效率^[20],本文采用该算法对4个目标函数同时进行寻优,得到图2所示的Pareto优化前沿,其中,水平坐标轴分别表示函数 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 的值,垂向坐标轴表示函数 $f_3(\mathbf{x})$ 的值,颜色深浅表示函数 $f_4(\mathbf{x})$ 的值。根据计算结果,在解集中折中选取图2所示位置为最优解,此时对应的设计变量 $\mathbf{x}=(-0.51, 26.85)$ 。

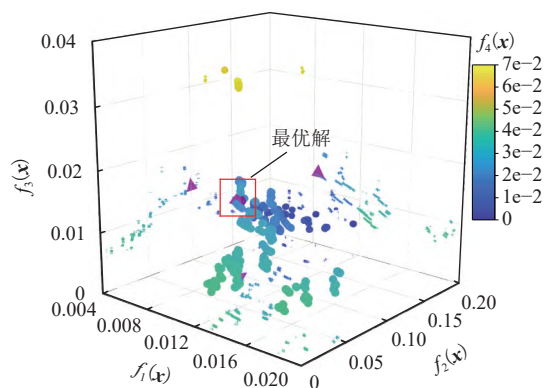


图2 4个目标函数对应 Pareto 优化前沿
Fig. 2 Four objective functions corresponding to Pareto optimization frontier

由此可得优化前后的车轮型面外形对比,如图3所示。优化后的车轮型面记作JM₃-opt,相比原标准JM₃车轮型面,轮缘厚度保持不变,轮缘根部喉根圆曲线变化相对平缓,在横向位置-10~10 mm内,曲线变化趋势相对较陡,10~40 mm曲线变化趋势相对缓和。

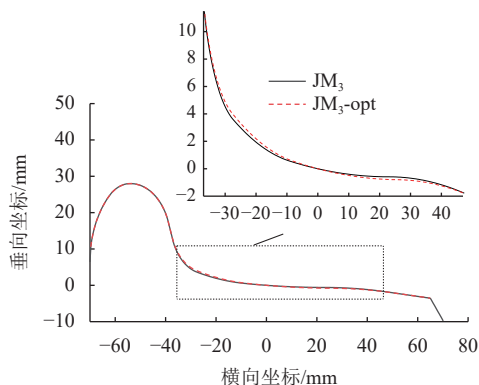


图3 优化前后车轮型面轮廓对比
Fig. 3 Comparison of wheel profiles before and after optimization

3 优化结果分析

3.1 轮轨接触几何分析

图4和图5分别为原标准JM₃型面和优化后的车轮型面JM₃-opt在不同匹配条件下对应的轮轨接触点分布。通过对比:在轮对横移量 y_w 范围-9~

9 mm内,匹配CN60钢轨,当轨底坡为1/40时,优化后的车轮型面轮轨接触点分布与原型面相比,出现向钢轨内侧偏移,总体接触区域优化前后相差较小;当轨底坡为1/20时,优化后的车轮型面轮轨接触点分布与原型面相比范围更广,分布更加均匀。匹配CN60N钢轨,当轨底坡为1/40时,优化前后的轮轨接触点分布差别较小;当轨底坡为1/20时,优化后的车轮型面轮轨接触点分布与原型面相比范围有所扩大,避免了接触点过于集中在轨顶区域。

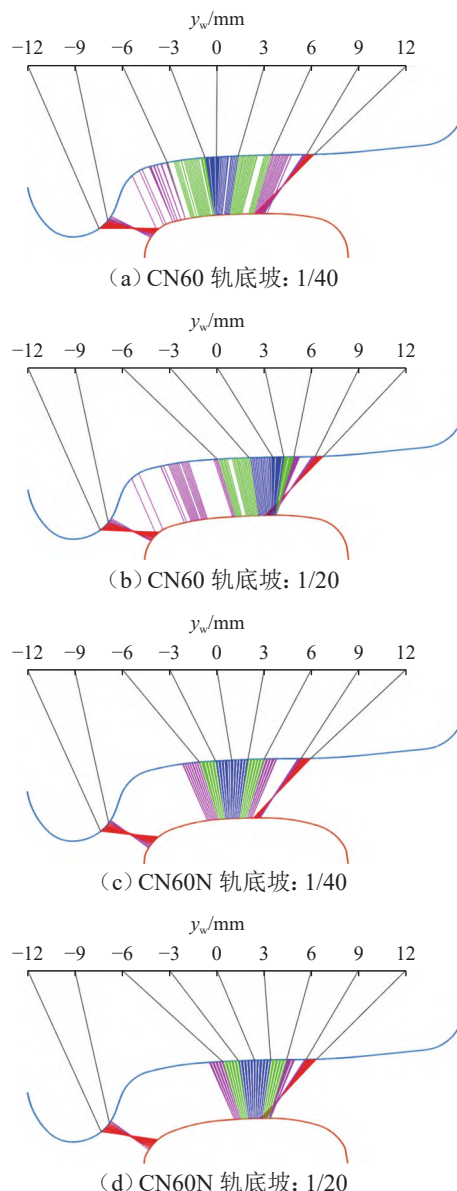


图4 JM₃不同匹配条件的轮轨接触点分布
Fig. 4 Distribution of wheel-rail contact points under different matching conditions of JM₃

图6为车轮型面优化前、后的等效锥度曲线对比;图7为优化前、后车轮型面在不同匹配条件下对应的名义等效锥度值。通过图6(a)和图6(b)对比

可以看出,优化后的车轮型面与原型面相比等效锥度整体有所增大,同时对钢轨类型和轨底坡的敏感度有所降低。从图7可以看出:优化后的车轮型面 JM_3 -opt 与原标准 JM_3 车轮型面相比,在轨底坡为 1/40 条件下,与上述 2 种钢轨廓形匹配对应的名义等效锥度相差都很小;在轨底坡为 1/20 条件下,与 CN60 钢轨匹配,名义等效锥度由 0.04 增大到 0.13;与 CN60N 钢轨匹配,名义等效锥度由 0.05 增大到 0.08。优化后的车轮型面在不同匹配条件下,其名义等效锥度保持在 0.1 左右,减小了等效锥度的离散程度,同时有效解决了原 JM_3 车轮型面在轨底坡为 1/20 时容易出现等效锥度过低的问题。

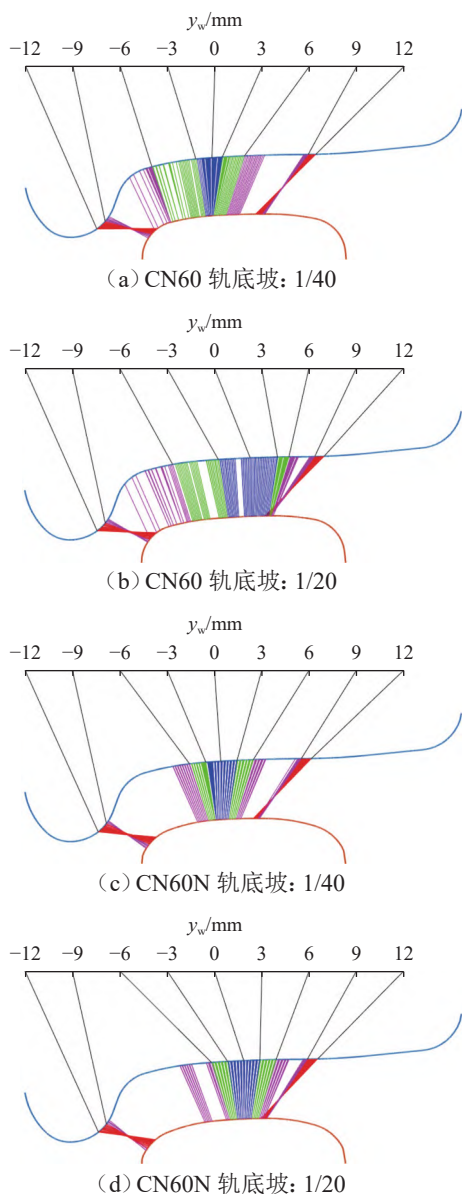
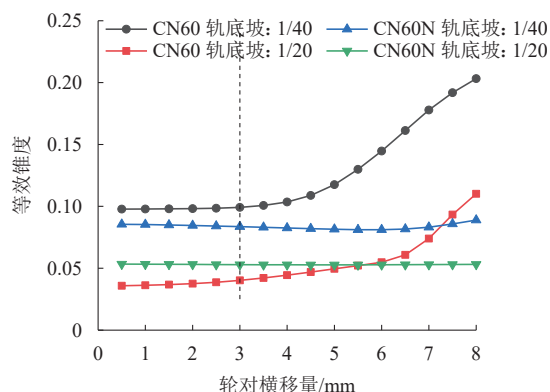
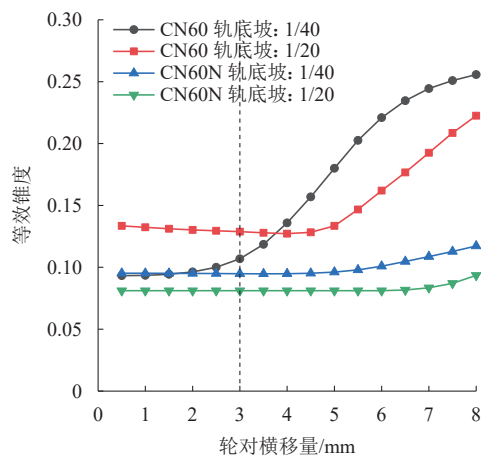


图5 JM_3 -opt 不同匹配条件的轮轨接触点分布
Fig. 5 Distribution of wheel-rail contact points under different matching conditions of JM_3 -opt



(a) JM_3 型面



(b) JM_3 -opt 型面

图6 车轮型面优化前后等效锥度对比

Fig. 6 Comparison of equivalent conicities before and after wheel profile optimization

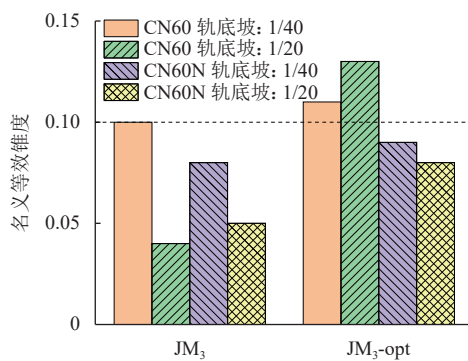


图7 不同匹配条件对应的名义等效锥度值

Fig. 7 Nominal equivalent conicity values corresponding to different matching conditions

3.2 稳定性分析

为检验优化车轮型面 JM_3 -opt 的动力学性能,采用动力学仿真分析的方法对 JM_3 车轮型面优化前后的动力学性能进行对比分析。使用多体动力学商用软件 SIMPACK 建立某型动力集中动车组高速动力车动力学模型,整车模型包括轮对、轴箱、构架、空心轴、电机和牵引杆,车体共计 25 个刚体,90 个

自由度.采用两系悬挂,同时考虑轮轨非线性接触关系,一、二系横向止挡的非线性以及各个减振器的非线性特性,其动力学模型如图8所示.

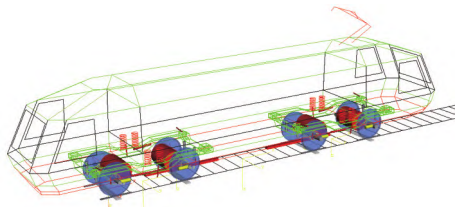


图8 高速动车动力学模型
Fig. 8 Dynamic model of high-speed power vehicle

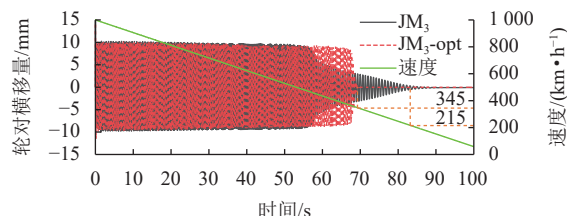
稳定性利用减速法^[21]进行求解非线性临界速度,动车初始速度为1000 km/h,给轮对以初始扰动使其失稳,对机车施加恒定外力使其进行匀减速运动,考察运行时轮对横移的收敛情况来判断动车的稳定性.表3给出车轮型面优化前后在不同匹配条件下对应的非线性临界速度对比.可以看出:优化后的车轮型面JM₃-opt与原标准JM₃车轮型面相比,在轨底坡为1/40条件下,分别与上述2种钢轨廓形匹配对应的非线性临界速度都很接近;在轨底坡为1/20条件下,与CN60钢轨匹配,非线性临界速度由215 km/h提升到345 km/h,如图9(a)所示;与CN60N钢轨匹配,非线性临界速度由200 km/h提升到530 km/h,如图9(b)所示.

表3 不同匹配条件的非线性临界速度
Tab. 3 Nonlinear critical speeds under different matching conditions km/h

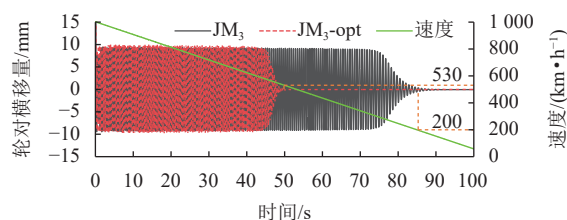
钢轨	轨底坡	JM ₃	JM ₃ -opt
CN60	1/40	395	390
	1/20	215	345
CN60N	1/40	660	670
	1/20	200	530

由上述分析可以看出:优化后的车轮型面JM₃-opt在与轨底坡为1/40的钢轨匹配时,非线性临界速度较原JM₃车轮型面,差别不大;在与轨底坡为1/20的钢轨匹配时,JM₃-opt车轮型面相较于原JM₃车轮型面,非线性临界速度得到大幅提升,其中与CN60钢轨匹配时,非线性临界速度提升了60.5%;与CN60N钢轨匹配时,非线性临界速度提升了115.0%.结果与前文的轮轨接触分析相契合:JM₃-opt车轮型面在匹配轨底坡为1/40的钢轨时,名义等效锥度与原JM₃车轮型面相差较小,故非线性临界速度差别也较小.而与轨底坡为1/20的钢轨匹配时,原JM₃车

轮型面的名义等效锥度过小,导致其对应非线性临界速度过小.而JM₃-opt车轮型面对比原JM₃车轮型面,名义等效锥度有所增加,非线性临界速度得到提升.同时也可以看出名义等效锥度过大(或过小)都会使非线性临界速度降低.



(a) CN60



(b) CN60N

图9 轨底坡1/20对应的非线性临界速度对比
Fig. 9 Comparison of nonlinear critical speeds corresponding to 1/20 rail cant

3.3 平稳性分析

车辆平稳性计算采用武广线实测轨道谱作为轨道激励,速度区间设置为80~200 km/h.车轮型面优化前后对应的横向平稳性指标对比如图10所示.在该速度区间内,车轮型面优化前后对应的横向平稳性指标均在2.75以内,满足机车运行平稳性指标为优的标准.

由图10(a)可以看出:当轨底坡为1/40,与CN60钢轨匹配时,JM₃-opt车轮型面对应的横向平稳性指标较优于原JM₃车轮型面,在80~200 km/h的速度区间内,JM₃-opt车轮型面的横向平稳性指标最大下降为2.8%,差异很小;与CN60N钢轨匹配时,JM₃-opt车轮型面与原JM₃车轮型面相比,横向平稳性指标基本一致,差异很小.由图10(b)可以看出:当轨底坡为1/20,与CN60钢轨匹配时,当速度小于120 km/h,优化前后的车轮型面对应的横向平稳性指标差异很小;当速度大于120 km/h,JM₃-opt车轮型面对应的横向平稳性指标要优于原JM₃车轮型面.对比原JM₃车轮型面,在80~200 km/h的速度区间内,JM₃-opt车轮型面的横向平稳性指标最大下降为7.9%;与CN60N钢轨匹配时,当速度小于160 km/h,优化前后的车轮型面对应的横向平稳性指标差异很小,当速度大于160 km/h,JM₃-opt车轮

型面对应的横向平稳性指标要优于原 JM_3 车轮型面. 对比原 JM_3 车轮型面, 在 $80 \sim 200 \text{ km/h}$ 的速度区间里, $JM_3\text{-opt}$ 车轮型面的横向平稳性指标最大下降为 8.4%.

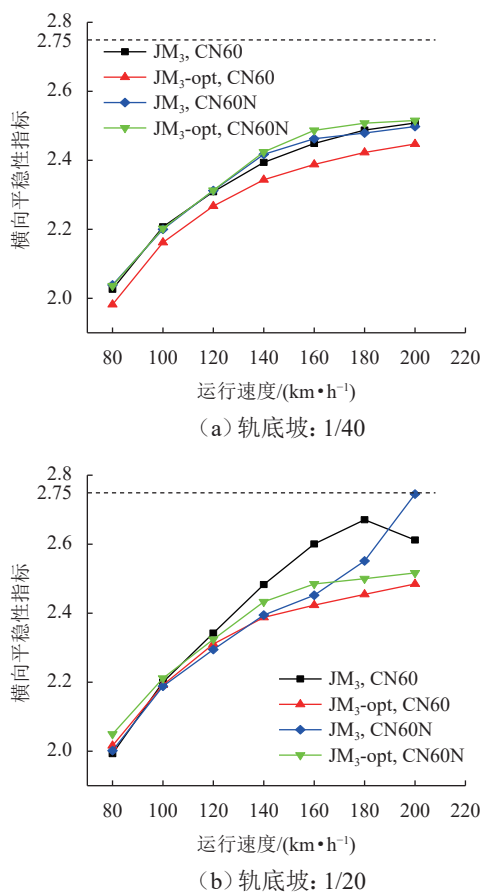


图 10 车轮型面优化前后横向平稳性指标对比
Fig. 10 Comparison of lateral stability indexes before and after wheel profile optimization

通过分析图 10 中 $JM_3\text{-opt}$ 车轮型面匹配不同类型钢轨廓形和轨底坡对应的横向平稳性指标差异很小, 可以说明优化后的车轮型面对不同钢轨和轨底坡的适应程度有所改善.

当钢轨轨底坡条件为 $1/20$ 时, 车轮型面优化前后在速度 200 km/h 时对应的车体横向振动加速度对比, 如图 11 所示. 与 CN60 钢轨匹配时, $JM_3\text{-opt}$ 车轮型面对应的车体横向振动加速度对比原 JM_3 车轮型面, 振动主频由 1.32 Hz 增大到 1.60 Hz , 同时振动加速度幅值下降 13.3%; 与 CN60N 钢轨匹配时, $JM_3\text{-opt}$ 车轮型面对应的车体横向振动加速度对比原 JM_3 车轮型面, 振动主频由 1.18 Hz 增大到 1.39 Hz , 同时振动加速度幅值下降 35.2%, 有效缓解了机车在特定线路发生低频晃车的现象.

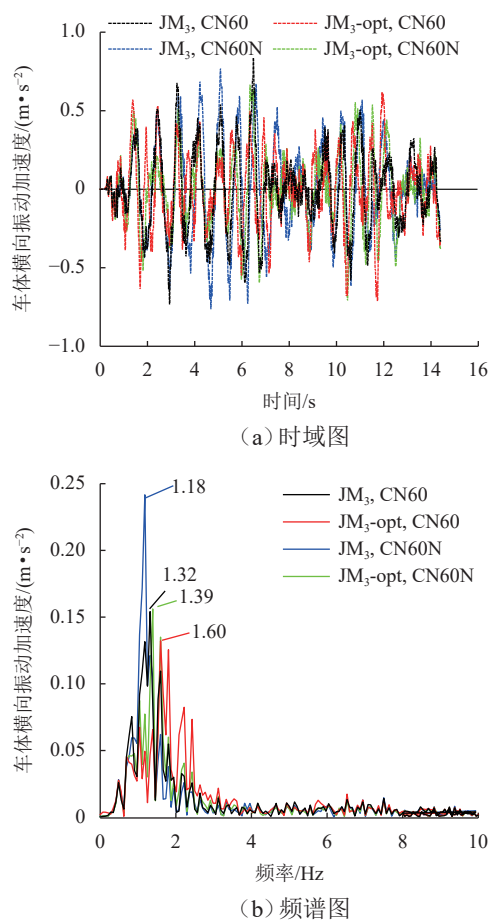
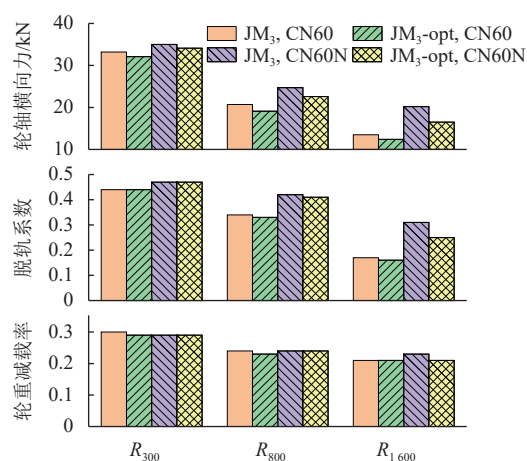


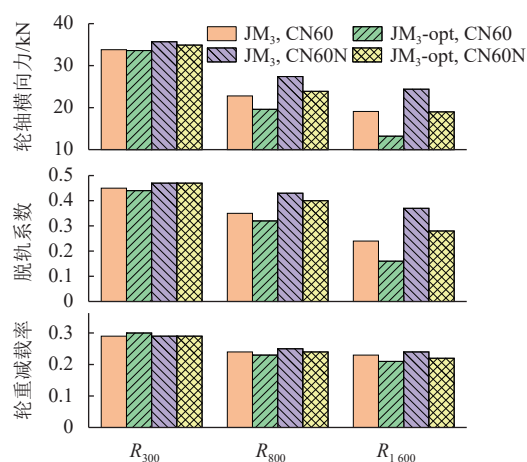
图 11 车体横向振动加速度对比
Fig. 11 Comparison of lateral vibration acceleration of vehicle body

3.4 曲线通过性能分析

车轮型面优化前、后对应的曲线通过性能指标如图 12 所示: 优化前、后车轮型面对应的曲线通过性能指标均小于安全限值; 对于小半径曲线, $JM_3\text{-opt}$ 车轮型面对应的曲线通过性能指标略优于原 JM_3 车轮型面, 但相差较小; 随着曲线半径增大, $JM_3\text{-opt}$ 车轮型面对应的曲线通过性能指标对比原 JM_3 车轮型面, 改善效果增大, 其中, 轮轴横向力和脱轨系数改善最明显. 根据图 12, 在 R_{1600} 曲线工况中, 优化后的车型面相较于原 JM_3 车轮型面. 与 CN60 钢轨匹配, 当轨底坡为 $1/40$ 时, 轮轴横向力下降 1.1 kN , 脱轨系数下降 0.01 , 优化前后差异很小; 当轨底坡为 $1/20$ 时, 轮轴横向力下降 5.9 kN , 降低 30.9%, 脱轨系数下降 0.08 , 降低 33.3%. 与 CN60N 钢轨匹配, 当轨底坡为 $1/40$ 时, 轮轴横向力下降 3.7 kN , 降低 18.3%, 脱轨系数下降 0.06 , 降低 19.4%; 当轨底坡为 $1/20$ 时, 轮轴横向力下降 5.4 kN , 降低 22.1%, 脱轨系数下降 0.09 , 降低 24.3%.



(a) 轨底坡: 1/40



(b) 轨底坡: 1/20

图 12 车轮型面优化前后曲线通过性能指标对比

Fig. 12 Comparison of curving performance indexes before and after wheel profile optimization

3.5 磨损性能分析

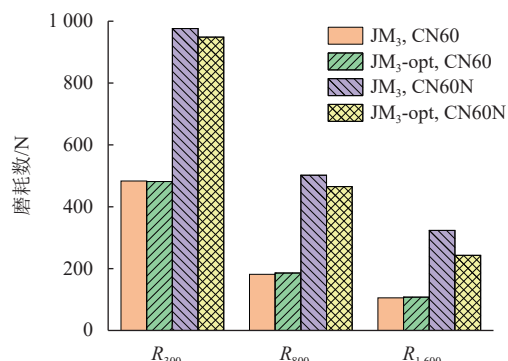
磨损数 W 是评判车轮磨损的重要指标^[22], 与车轮的实际磨损量呈接近正比关系, 如式(7)所示。

$$W = T_x \gamma_x + T_y \gamma_y, \quad (7)$$

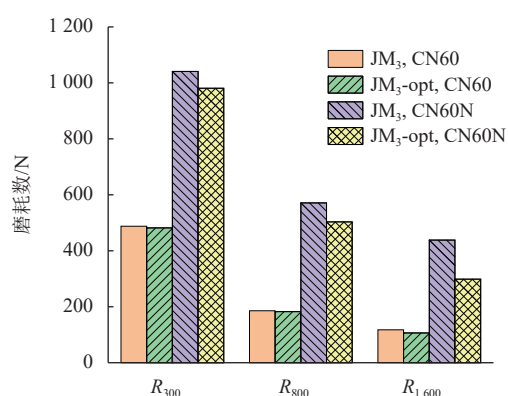
式中: T_x 、 T_y 分别为纵向和横向蠕滑力, γ_x 、 γ_y 分别为纵向和横向蠕滑率。

优化前后车轮型面在不同曲线工况下磨损数对比如图 13 所示, 在与 CN60 钢轨匹配时, 车轮型面优化前后对应的磨损数大致相当; 在与 CN60N 钢轨匹配时, JM₃-opt 车轮型面对应的磨损数小于原 JM₃ 车轮型面, 表明优化后的车轮型面抗磨损性能优于原型面, 随着曲线半径增大, 抗磨损性能得到进一步提升, 且对于轨底坡为 1/20 时提升更为显著, 在 R1600 曲线工况下磨损数下降 31.9%。如图 14 所示, 在 R1600 曲线工况, 在轨底坡为 1/20 条件下与 CN60N 钢轨匹配, JM₃-opt 车轮型面在曲线段的磨

耗数明显低于原 JM₃ 车轮型面, 利用仿真手段证明了 JM₃-opt 车轮型面相比原 JM₃ 车轮型面有更好的抗磨损性能。



(a) 轨底坡: 1/40



(b) 轨底坡: 1/20

图 13 车轮型面优化前后不同曲线工况磨损数对比

Fig. 13 Comparison of wear number under different curve conditions before and after wheel profile optimization

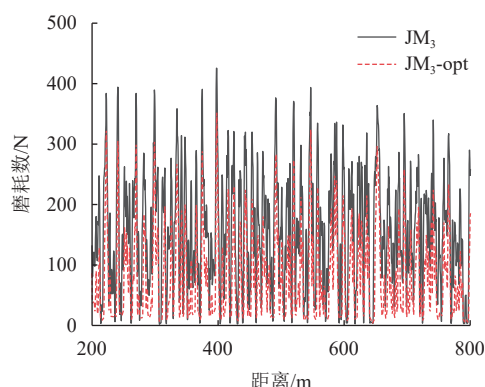


图 14 车轮型面优化前后 R1600 曲线工况磨损数对比

Fig. 14 Comparison of wear number of R1600 curve before and after wheel profile optimization

4 结 论

1) 本文基于 NSGA-II 遗传算法, 利用圆弧、直线组合描述车轮型面的方法, 以中间滚动圆附近的 2 段圆弧圆心横向位置参数 x_{o_6} 、 x_{o_7} 为设计变量, 针对 CN60 和 CN60N 型钢轨廓形, 以及 1/20 和 1/40

2种轨底坡,通过给定目标等效锥度,对 JM_3 型面进行多目标优化,以减小车轮型面在不同钢轨廓形和轨底坡条件下的等效锥度离散度.该方法通过引入2个优化变量,在大大提高计算效率的同时也能满足各段曲线连接的光滑性以及凹凸性.

2) JM_3 -opt 车轮型面在不同轨底坡条件下,与CN60和CN60N钢轨匹配时的名义等效锥度均在0.10左右,较原 JM_3 车轮型面减小了等效锥度的离散程度,改善了车轮型面对不同钢轨和轨底坡的适应性,同时有效解决了原 JM_3 车轮型面在轨底坡为1/20时容易出现等效锥度过低的问题.

3) 建立某型动力集中动车组动力车模型,对车轮型面优化前后的动力学性能进行仿真对比分析.当轨底坡为1/40时,采用优化型面 JM_3 -opt后动力车稳定性、平稳性、曲线通过性能较 JM_3 型面差异很小;当轨底坡为1/20时,优化型面 JM_3 -opt对应车辆动力学性能较原型面得到显著提升;优化型面 JM_3 -opt在与CN60钢轨匹配时抗磨耗性能较 JM_3 型面差异很小;与CN60N钢轨匹配时抗磨耗性能较 JM_3 型面提升明显,曲线半径越大,改善效果越明显.

致谢:牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2022TPL-T02)资助.

参考文献:

- [1] PERSSON I, IWNICKI S. Optimisation of railway wheel profiles using a genetic algorithm[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2004, 41: 517-526.
- [2] 李立,崔大宾,金学松. 车轮型面优化的研究进展[J]. *西南交通大学学报*, 2009, 44(1): 13-19.
LI Li, CUI Dabin, JIN Xuesong. State of arts of research on railway wheel profile optimization[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2009, 44(1): 13-19.
- [3] 吴磊,康彦兵,董勇,等. 考虑打磨量的重载钢轨打磨廓形优化设计[J]. *西南交通大学学报*, 2022, 57(4): 805-812.
WU Lei, KANG Yanbing, DONG Yong, et al. Optimal design of heavy-haul rail grinding profile considering grinding amount[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57(4): 805-812.
- [4] SHEVTSOV I Y, MARKINE V L, ESVELD C. Optimal design of wheel profile for railway vehicles[J]. *Wear*, 2005, 258(7/8): 1022-1030.
- [5] 成棣,王成国,刘金朝,等. 以圆弧参数为设计变量的车轮型面优化数学模型研究[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(6): 107-113.
CHENG Di, WANG Chengguo, LIU Jinzhao, et al. Research on the mathematical model for wheel profile optimization with arc parameters as design variables[J]. *China Railway Science*, 2011, 32(6): 107-113.
- [6] YE Y G, QI Y Y, SHI D C, et al. Rotary-scaling fine-tuning (RSFT) method for optimizing railway wheel profiles and its application to a locomotive[J]. *Railway Engineering Science*, 2020, 28(2): 160-183.
- [7] SHEN G, AYASSE J B, CHOLLET H, et al. A unique design method for wheel profiles by considering the contact angle function[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2003, 217(1): 25-30.
- [8] JAHED H, FARSHI B, ESHRAGHI M A, et al. A numerical optimization technique for design of wheel profiles[J]. *Wear*, 2008, 264(1/2): 1-10.
- [9] POLACH O. Wheel profile design for target conicity and wide tread wear spreading[J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 195-202.
- [10] CUI D B, LI L, JIN X S, et al. Optimal design of wheel profiles based on weighed wheel/rail gap[J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 218-226.
- [11] SANTAMARIA J, HERREROS J, VADILLO E G, et al. Design of an optimised wheel profile for rail vehicles operating on two-track gauges[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(1): 54-73.
- [12] 干锋,戴焕云,池茂儒,等. 铁道车辆车轮踏面反向优化设计方法[J]. *铁道学报*, 2015, 37(9): 17-24.
GAN Feng, DAI Huanyun, CHI Maoru, et al. A reverse optimal design method for wheel tread of railway vehicle[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(9): 17-24.
- [13] 成棣,孙琛,胡晓依,等. 面向低锥度晃车的CRH3平台动车组车轮型面优化[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(6): 135-144.
CHENG Di, SUN Chen, HU Xiaoyi, et al. Wheel profile optimization of CRH3 EMU oriented to carbody shaking caused by low equivalent conicity[J]. *China Railway Science*, 2020, 41(6): 135-144.
- [14] 祁亚运,戴焕云,干锋,等. 基于车轮磨耗和舒适度的CRH3型动车组型面优化研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(18): 148-155.
QI Yayun, DAI Huanyun, GAN Feng, et al. Wheel profile optimization of CRH3 type of EMU based on wheel wear and passenger comfort[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(18): 148-155.

- [15] 杜星,陶功权,杨城,等. 轨底坡变化对高速车辆运行行为的影响[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(2): 286-294.
- DU Xing, TAO Gongquan, YANG Cheng, et al. Influence of different rail cant on dynamical characteristics of high-speed railway vehicles[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(2): 286-294.
- [16] SUN J F, CHI M R, JIN X S, et al. Experimental and numerical study on carbody hunting of electric locomotive induced by low wheel-rail contact conicity[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2021, 59(2): 203-223.
- [17] 宋志坤,孙琛,成棣,等. 车轮型面圆弧参数及其对轮轨接触和车辆动力学影响研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(6): 104-113.
- SONG Zhikun, SUN Chen, CHENG Di, et al. Research on arc parameters of wheel profile and its influence on wheel-rail contact and vehicle dynamics[J]. China Railway Science, 2019, 40(6): 104-113.
- [18] 国家铁路局. 机车车辆车轮轮缘踏面外形: TB/T 449—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [19] 孙琛. CRH3 型平台高速动车组车轮型面多目标优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [20] 张维煜,李凯,杨鑫. 基于参数优先级划分的飞轮电机多目标优化[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 922-932.
- ZHANG Weiyu, LI Kai, YANG Xin. Multi-objective optimization for flywheel motors based on parameter priority division[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(4): 922-932.
- [21] 石怀龙,罗仁,曾京. 国内外高速列车动力学评价标准综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 36-58.
- SHI Huailong, LUO Ren, ZENG Jing. Review on domestic and foreign dynamics evaluation criteria of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 36-58.
- [22] BRACCIALI A, MEGNA G. Contact mechanics issues of a vehicle equipped with partially independently rotating wheelsets[J]. *Wear*, 2016, 366/367: 233-240.

(中文编辑: 蒋栋辉)

(上接第 325 页)

- [20] 李航,胡小兵. 一种改进的民用航空网络空间脆弱性模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(4): 202-208.
- LI Hang, HU Xiaobing. An improved spatial vulnerability model for civil aviation network[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(4): 202-208.
- [21] JANIĆ M. Modelling the resilience, friability and costs of an air transport network affected by a large-scale disruptive event[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 71: 1-16.
- [22] VOLTES-DORTA A, RODRÍGUEZ-DÉNIZ H, SUAÚ-SANCHEZ P. Vulnerability of the European air transport network to major airport closures from the perspective of passenger delays: ranking the most critical airports[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2017, 96: 119-145.
- [23] LORDAN O, KLOPHAU R. Measuring the vulnerability of global airline alliances to member exits[J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 25: 7-16.
- [24] Roy S, Xue M, Sridhar B. Vulnerability metrics for the airspace system[C]//Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017). Seattle: Curran Associates, 2017: 1-26.
- [25] TAMIMI A, HAHN A, ROY S. Cyber threat impact analysis to air traffic flows through dynamic queue networks[J]. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2020, 4(3): 1-22.
- [26] 田文,方琴,周雪芳,宋津津. 航路网络关键节点识别方法研究[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(1): 233-242.
- TIAN Wen, ZHOU Xuefang, FANG Qin, et al. Research on identification method of key nodes in en-route network[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(1): 233-242.
- [27] 种鹏云. 基于复杂网络的危险品运输网络拓扑特性、级联失效机制及抗毁性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [28] 欧阳敏,费奇,余明辉,等. 复杂网络的功效性与脆弱性研究综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(6): 1-4.
- OUYANG Min, FEI Qi, YU Minghui, et al. Survey on efficiency and vulnerability of complex network[J]. Computer Science, 2008, 35(6): 1-4.

(中文编辑: 蒋栋辉)