

CR200J型动车组车轮磨耗及动力学性能分析

许 平

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年3月11日; 录用日期: 2025年4月4日; 发布日期: 2025年4月16日

摘 要

本文基于多体系统动力学软件UM, 以CR200J为研究对象, 建立了车辆动力学模型。借助UM软件对构建的车辆模型进行磨耗仿真; 轮轨接触关系采用LM型踏面与60 kg/m钢轨。将标准轮轨和仿真得到的在不同运行里程下的预测磨耗轮轨的踏面轮廓、磨耗深度以及等效锥度对比观察变化轨迹。对其磨耗前后的临界速度、Sperling平稳性指数、脱轨系数、轮重减载率等进行了分析。分析结果表明车轮踏面磨耗量的增加, 车辆稳定性、车辆横向平稳性、运行安全性能都有一定程度下降。

关键词

CR200J, UM, 车轮踏面磨耗, 动力学性能

Analysis of Wheel Wear and Dynamic Performance of CR200J EMU

Ping Xu

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Mar. 11th, 2025; accepted: Apr. 4th, 2025; published: Apr. 16th, 2025

Abstract

This article utilizes the multi-body system dynamics software UM and focuses on CR200J as the subject to establish a vehicle dynamics model. The UM software is employed to simulate the wear of the established model. The wheel-rail contact relationship is matched with LM-type treads and standard 60 kg/m steel rails. By comparing and analyzing the variation patterns of tread profile, wear depth, and equivalent taper between standard and worn wheel treads under different operating mileages, an analysis was conducted on the critical speed, Sperling stability index, derailment coefficient, and wheel load reduction rate before and after wear. The analysis results indicate that an increase in wheel tread wear leads to a certain degree of decrease in vehicle stability, lateral stability, and operational safety performance.

Keywords

CR200J, UM, Wheel Tread Wear, Dynamic Performance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

CR200J 动力集中型动车组作为我国新一代铁路客运主力车型，兼具普速列车与高速动车组的综合优势；较于传统普速列车，其运行效率高、乘坐舒适性优异、服务设施智能化程度显著提升；对比高速动车组，具有更广泛的线路适应性(兼容既有普速铁路基础设施)、运营成本集约化优势。其良好的动力学特性对于确保运行的安全性与舒适性具有重大意义[1] [2]。随着车轮磨耗持续发展，轮轨关系会出现明显变化，其直接影响着车辆动力学性能。车轮磨耗问题长期受到国内外研究者的广泛关注：Shebani [3]等构建了一种包含外源输入神经网络的新型非线性自回归模型，通过应用人工神经网络技术来预测轮轨磨耗情况。王朝涛[4]深入研究了踏面磨耗对某型高速列车动力学性能的影响规律。通过对比原型踏面与磨耗踏面的轮轨接触特性，研究表明原型踏面在接触均匀性和动力学性能方面表现更优。然而，随着磨耗程度的不断加剧，车辆的动力学性能呈现出显著的下降趋势。史新伟[5]针对高速列车轮轨接触关键参数变化特性，采用长期跟踪监测与多体动力学仿真相结合的方法，系统性地探究了车轮踏面磨耗变化规律及其关键影响因素，分析车辆动力学性能在车轮磨耗下的变化，为轮对维护策略制定提供理论支撑。

综上所述，当前对车轮磨耗规律的研究已取得一定进展，然而车轮磨耗预测模型仍需进一步完善，且其对动力学的影响也需探究。本文基于多体动力学软件 UM，建立 CR200J 车辆模型，仿真预测其车辆踏面磨耗情况，深入探讨轮轨接触几何参数随运行里程变化的规律，并通过仿真分析车轮磨耗对车辆动力学性能的具体影响。

2. 车轮磨耗预测模型

车轮磨耗预测模型包括车辆动力学模型、轮轨接触模型及车轮踏面磨耗模型。

2.1. 车辆动力学模型

通过 UM 软件建立 CR200J 动力集中动车组的车辆模型。该模型的组成部分包括一个车体、两个构架、四个轮对以及八个轴箱。车体、构架和轮对均具备横向、垂向、纵向的平动自由度，以及点头、摇头、侧滚的转动自由度(共计 6 个自由度)；而轴箱则仅保留点头方向的自由度。通过约束耦合计算，模型最终整合为 50 个自由度[6]。该车的主要参数如表 1 所示。

Table 1. Main parameters of vehicle dynamics model
表 1. 车辆动力学模型主要参数

参数名称	数值	单位
车辆定距	18,000	mm
转向架轴距	2500	mm
车轮滚动圆横向跨距	1493	mm

续表

车轮滚动圆直径	915	mm
轮对内侧距	1353	mm
车轮踏面类型	LM	
钢轨类型	60	Kg/m

建立 CR200J 动车车辆模型如图 1 所示。

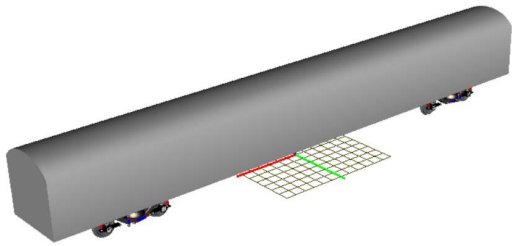


Figure 1. Vehicle model
图 1. 车辆整车模型

2.2. 轮轨接触模型

车轮磨耗预测基于所构建的轮轨接触模型进行。接触斑内的切向应力及局部蠕滑程度将直接影响车轮磨耗的计算结果。考虑到轮轨材料特性的相似性，可认为轮轨间的法向接触与切向接触无耦合关系，因此可以分别依次求解法向接触和切向接触。本文采用 Hertz 接触理论进行轮轨法向接触力的计算，并运用基于虚拟渗透的 Kik-Piotrowski 方法(该方法基于 Kalker 简化理论的 FASTSIM 算法，应用于由虚拟渗透确定的接触区域内，求解非椭圆接触区域的柔度系数)来计算轮轨切向接触力。其理论推导可参考文献 [7] [8]。

2.3. 踏面磨耗模型

Archard 模型在滚动接触和滑动接触领域得到了广泛应用，因此，大多数研究均采用 Archard 磨耗模型来深入分析轮轨磨耗问题。在 Archard 磨耗模型中，认定轮轨磨耗体积和轮轨摩擦功成线性关系，如式 1 所示：

$$W = k_v A \tag{1}$$

式中， W 是磨耗体积， k_v 是磨耗系数， A 是摩擦功。

$$A = \int_0^t P dt \tag{2}$$

式中， P 是摩擦功率。

$$P = \int_F \tau s dF \tag{3}$$

式中， τ 是接触单元内的切向应力， s 是滑动速度， F 是接触斑面积。

轮轨磨耗系数的取值与轮轨接触斑内的压应力及滑动速度密切相关，并已绘制出磨耗系数取值范围图，如图 2 所示。

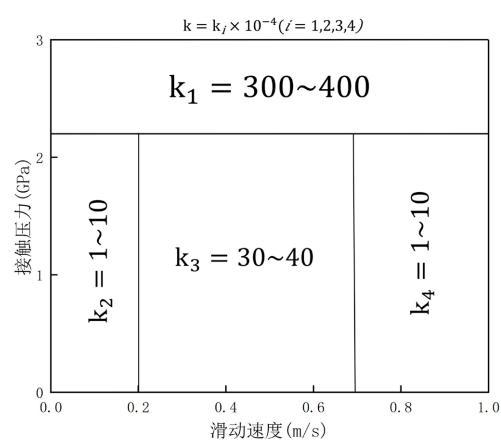


Figure 2. Wear coefficient distribution chart
图 2. 磨耗系数分布图

磨耗系数随接触压力和滑动速度变化分为四个区域：当磨耗系数值为 $1\times10^{-4} \sim 1\times10^{-3}$ 时，为轻度磨耗区域；其滑动速度介于 $0\sim0.2\text{ m/s}$ 及 $0.7\sim1.0\text{ m/s}$ 之间，轮轨接触压力小于 2.2 GPa 。当磨耗系数值为 $3\times10^{-3} \sim 4\times10^{-3}$ 时，为严重磨耗区域；其滑动速度介于 $0.2\sim0.7\text{ m/s}$ 之间，轮轨接触压力也小于 2.2 GPa 。当磨耗系数值为 $3\times10^{-2} \sim 4\times10^{-2}$ 时，为破坏性磨耗区域；其滑动速度介于 $0.0\sim1.0\text{ m/s}$ 之间，轮轨接触压力大于 2.2 GPa 不超过 3 GPa 。

本文采用 Archard 磨耗模型，对车轮磨耗进行计算时将接触斑视为同一平面，并将该平面假设为由多个矩形构成。在单个时间积分步 Δt 内，轮轨接触斑中每个平面单元的磨耗体积计算公式如式 4 所示。

$$W_{ij} = k_v \tau_{ij} v w_{ij} \Delta F_{ij} \Delta t \tag{4}$$

式中， v 是车轮速度， w_{ij} 是接触单元中心的蠕滑率， ΔF_{ij} 是接触单元的面积。

通过对接触斑内每个平面单元所对应的磨耗体积进行累加，即可计算出整个接触斑的总磨耗体积。

3. 车轮踏面磨耗仿真

3.1. 仿真方法

UM 软件包含仿真预测磨耗模块，其采用并行离散法来计算并更新车轮踏面，流程如图 3 所示。本文采用 5 万公里作为仿真迭代的基本步长进行计算，在每个计算周期的末段，将依据 Archard 磨耗理论得出的车轮磨耗踏面数据导入车辆模型，并在此基础上进行下一轮迭代。如此循环，直至累计仿真里程满足预设阈值条件。

3.2. 车轮磨耗分析

设置轨道线路工况如表 2 所示。在设置的轨道线路上进行轮轨磨耗的仿真，模拟的行驶里程为三十万公里，得到不同里程下的轮轨磨耗轮廓。在仿真实验中，车辆模型采用左右对称的结构，路线的左右曲线呈对称分布，且车辆沿固定方向行驶。这种情况下，同一轮对的左右车轮磨耗程度相同，第 1 位轮对与第 4 位轮对的磨耗情况一致，第 2 位轮对与第 3 位轮对的磨耗情况也相同。采用中国铁路无砟轨道不平顺谱进行仿真。

选取其中的 15、20、25 万公里里程的第一轮对踏面磨耗进行分析。15、20、25 万公里里程分别对应磨耗踏面如图 4 所示。仿真得到的磨耗规律及磨耗量与实测数据相似[9]。

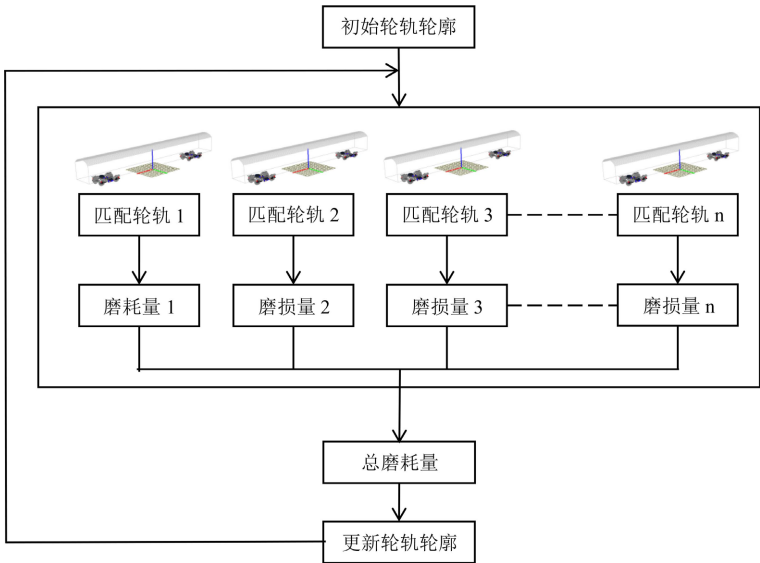


Figure 3. Wear simulation flowchart
图 3. 磨损仿真流程图

Table 2. Track working conditions
表 2. 线路工况分布

曲线半径/m	速度 km/h	超高/mm	线路比重
∞	160	-	51.0%
R600	90	110	2.8%
R800	120	120	2.2%
R1600	140	100	13.7%
R2000	160	50	18.1%
R6000	160	35	12.2%

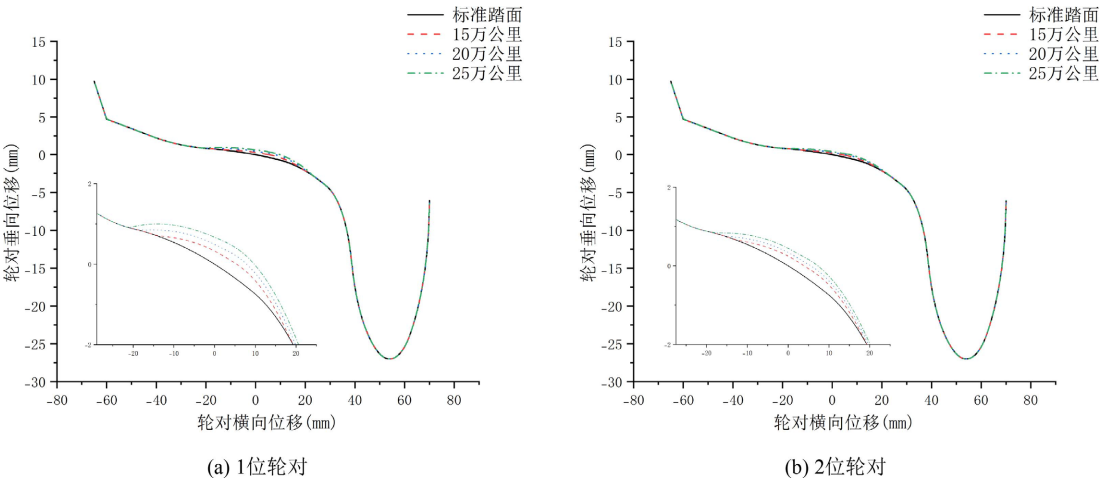


Figure 4. Wheel tread profile at different mileage
图 4. 不同里程下车轮踏面轮廓

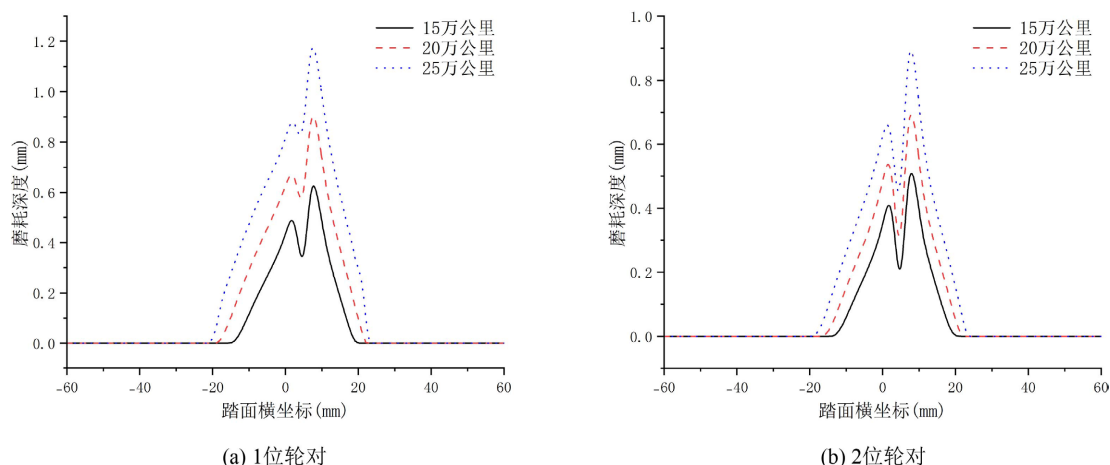


Figure 5. Wear depth of wheel tread at different mileage

图 5. 不同里程下车轮踏面磨耗深度

由图 4 可知：1、2 位轮对的磨耗分布在轮对横向位移范围 -25 mm 至 25 mm 之间，且表现出相同的磨耗规律。磨耗现象主要表现为滚动圆区域的磨损；随着运行里程的持续增加，车轮踏面的磨耗程度亦逐渐加剧。

由图 5 可知：车轮踏面具有相似的磨耗规律：踏面的磨损量明显超过轮缘的磨损量且磨耗最严重的位置出现在车轮踏面横坐标 10 mm 附近。这是因为仿真设计的 CR200J 运营路段主要为直线加大曲线半径路段；轮轨之间的接触应力在踏面处较大，所以踏面磨耗较深，而轮缘磨耗较浅。车轮磨耗量随运营里程的增加而不断增长，磨耗分布范围稍稍增加并且踏面磨耗形状相似；在运行里程达到 25 万公里时，1 位轮对最大磨耗量接近 1.2 mm ；而 2 位轮对最大磨耗量才接近 0.9 mm 。对比 1、2 位轮对的磨损程度，可见第 1 位轮对的磨损程度略高于第 2 位轮对。这是因为，在运行时，第 1 位轮对作为转向轮对，所承受的横向位移和冲角都比第 2 位轮对大，从而使得车轮磨损更为严重。

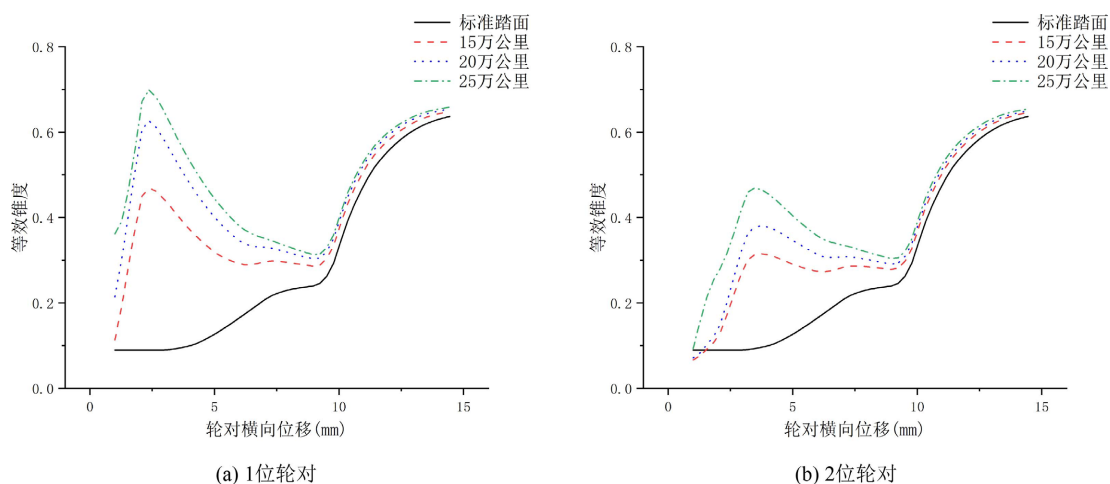


Figure 6. Equivalent conicity variation under different mileage

图 6. 不同里程下等效锥度变化

图 6 所示是 1、2 位轮对车轮踏面在不同里程下的等效锥度变化，可以看出：对于标准车轮踏面，等效锥度在横向位移 $0\sim 5\text{ mm}$ 之间状态平稳，在 $5\sim 10\text{ mm}$ 之间开始缓慢上升，当轮对位移到达 10 mm 出现

一个较大的增幅趋势。对于磨损车轮踏面, 1 位轮对等效锥度在横向位移 0~3 mm 之间急剧上升, 在 3~10 mm 之间开始下降慢慢平稳, 当轮对位移到达 10 mm 时又开始大幅上升。2 位轮对等效锥度在横向位移 0~4 mm 之间急剧上升, 在 4~10 mm 之间开始下降慢慢平稳, 当轮对位移到达 10 mm 时又开始大幅上升并且 1、2 位轮对等效锥度都会跟随车辆运行里程的增加和车轮踏面磨损加深变大。在铁路行业里, 评估轮轨接触几何关系的重要参数通常是轮对横移量处于 3 毫米位置时的等效锥度。经过 25 万公里的行驶后, 1 位轮对的等效锥度达到 0.7, 2 位轮对的等效锥度仅为 0.48。这一数据表明, 车轮踏面的不同磨损程度对轮轨间的匹配状况产生了差异化影响。等效锥度的变化关乎车辆横向稳定性能[10], 磨损后等效锥度的增大就会导致稳定性变低。

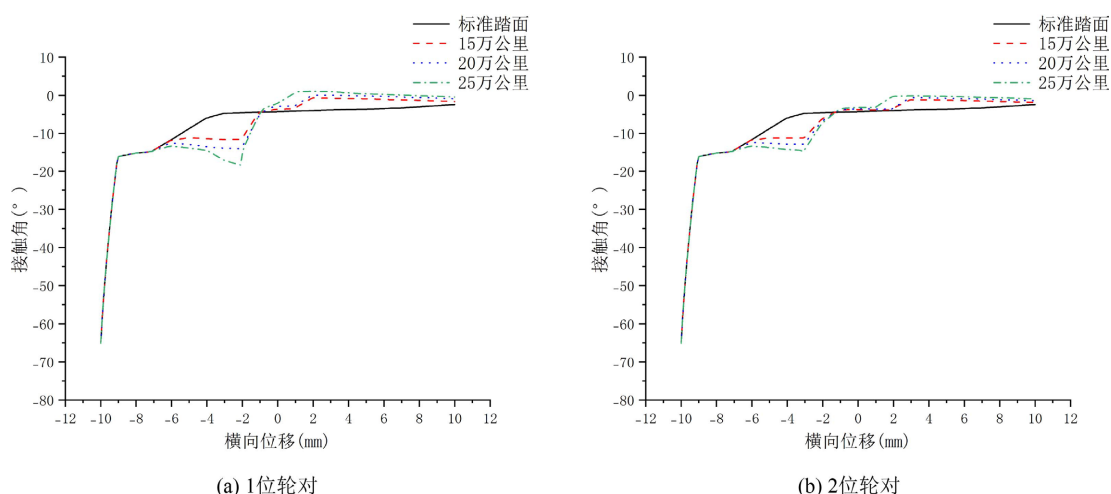


Figure 7. Contact angle variation under different mileage

图 7. 不同里程下接触角变化

车轮踏面在不同磨损程度下的接触角变化情况如图 7 所示。可以看出: 对于标准车轮踏面, 接触角在轮对横向位移-8~-3 mm 范围内平稳减小, 并在大于-3 mm 时几乎保持不变。对于磨损车轮踏面, 1 位轮对在运行 15 万和 20 万公里时, 接触角在横向位移-8~-2 mm 范围内相较于-8 mm 处略微减小, 基本保持稳定, 但仍高于标准踏面接触角; 当位移达到-2 mm 时, 接触角迅速减小, 并在-1 mm 处与标准踏面接触角相等, 之后则低于标准踏面接触角。当运行里程达到 25 万公里时, 接触角在横向位移-8~-2 mm 范围内相较于-8 mm 处有所增大, 之后的变化趋势与 15 万和 20 万公里时相似。2 位轮对在三种运行里程下, 接触角在横向位移-8~-3 mm 范围内相较于-8 mm 处略微减小, 基本保持稳定, 但仍高于标准踏面接触角; 当位移达到-3 mm 时, 接触角迅速减小, 并在-1~1 mm 范围内与标准踏面接触角相等, 之后则低于标准踏面接触角。

在 25 万公里运行里程下, 当 1 位轮对的横移量达到-2 mm 时, 其接触角接近 20°; 而当 2 位轮对的横移量处于-3 mm 时, 对应的接触角接近 15°。这种情况反映出, 随着运行里程的持续累积, 磨损车轮与轨道之间的接触匹配特性逐渐减弱, 其直接结果便是轮轨接触角呈现增大的趋势。

4. 车轮磨耗对车辆动力学性能影响

4.1. 车辆稳定性

临界速度是评估车辆在蛇形失稳情况下运行稳定性的一个重要指标。临界速度越高, 车辆蛇行运动稳定性越强。在 um 软件中使用降速法求解临界速度。首先给予车辆系统一个恒力

$$F_x = -Ma$$

(5)

式中： M 为轨道车辆质量； a 为加速度。

然后设置初始不平顺激励轻微扰动车辆，使其呈现出失稳状态。设定一个较高的速度作为车辆的初始速度，选取 0.2 m/s^2 为加速度使车辆降速，观察轮对横移情况，当轮对横移量趋于 0 时所得到的速度即为临界速度。选择运行 15 万公里磨耗踏面初始标准 LM 型面进行计算，磨耗前后临界速度结果如图 8 所示。

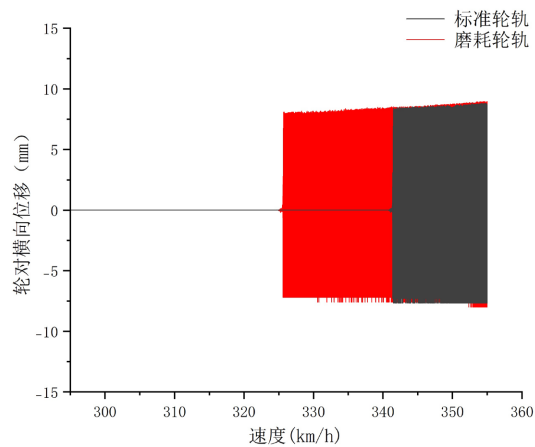


Figure 8. Critical speed before and after wear
图 8. 磨耗前后临界速度

结果显示，车辆在轮轨磨耗前后的临时速度分别为 341 km/h 和 324 km/h，均远大于其运行速度 160 km/h，能够保证动车车辆稳定运行。踏面磨耗后车辆的临界速度有所下降，这是因为随着轮轨磨耗的进一步增加，等效锥度也在逐步提升，这将使车辆的运行稳定性进一步减弱。

4.2. 车辆平稳性

我国机车车辆采用 Sperling 平稳性指标评价车辆运行平稳性。选择初始标准 LM 型面和运行 15 万公里磨耗踏面进行计算，车辆以不同速度在直线上运行，速度的变化范围为 100 km/h~160 km/h。将得到的车体振动加速度数据代入 Sperling 平稳性指标计算公式

$$W = 3.57 \sqrt[10]{\frac{A^3}{f}} F(f)$$

(6)

式中： A —— 振动加速度，单位为米每二次方秒(m/s^2)；
 f —— 振动频率，单位为赫兹(Hz)；
 $F(f)$ —— 频率修正系数，见表 3。

Table 3. Table of frequency correction factor
表 3. 频率修正系数表

垂直振动		横向振动	
f/HZ	$F(f)$	f/HZ	$F(f)$
$0.5 \leq f < 5.9$	$0.325 f^2$	$0.5 \leq f < 5.4$	$0.8 f^2$

续表

$5.9 \leq f < 20.0$	$650/f^2$	$5.4 \leq f < 26.0$	$650/f^2$
$f \geq 20.0$	1	$f \geq 26.0$	1

计算车辆运行的横向和垂向平稳性指标。
我国动车组平稳性指标等级如表 4 所示。

Table 4. Classification table of EMU ride comfort index
表 4. 动车组平稳性指标等级表

平稳性等级	平稳性指标 W	评定
1 级	$W \leq 2.50$	优
2 级	$2.50 < W \leq 2.75$	良好
3 级	$2.75 < W \leq 3.00$	合格

轮轨磨耗前后车轮踏面对车辆运行平稳性的影响如图 9、图 10 所示。

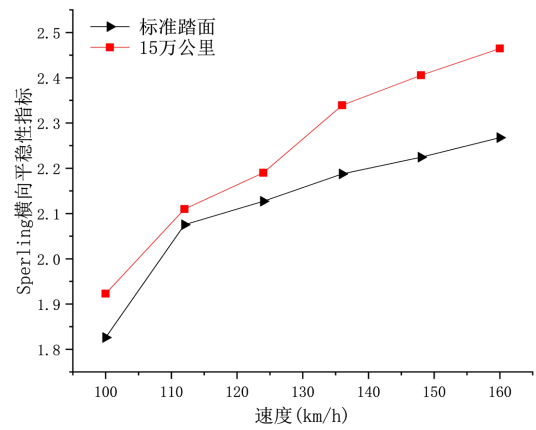


Figure 9. Sperling lateral ride index
图 9. Sperling 横向平稳性指标

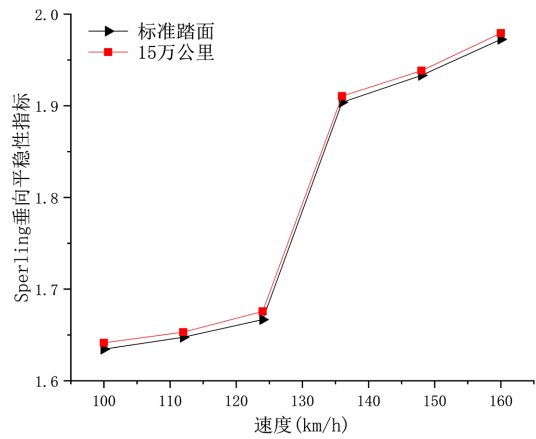


Figure 10. Sperling vertical ride index
图 10. Sperling 垂向平稳性指标

由图 9 可以看出随着运行速度的提升, 横向平稳性指标逐渐提高。而且在相同速度条件下, 轮轨磨耗后的横向平稳性指标明显高于磨耗之前的水平。随着踏面磨耗增加会导致车辆横向平稳性性能变差。

由图 10 可以看出随着运行速度的提升, 垂向平稳性指标也在逐步提高。而且在同一速度下, 轮轨磨耗后的垂向平稳性指标与轮轨磨耗前的指标基本没有变化。可以得出结论, 踏面磨耗并不会对车辆的垂向平稳性造成明显的影响。然而, 当车辆的运行速度提高时, 其垂向平稳性性能则会呈现下降的趋势。

4.3. 曲线通过性

目前我国评价车辆曲线通过性性能主要采用的指标是脱轨系数和轮重减载率。

将曲线半径设置为 1600 m, 曲线超高为 0.1 m, 选择运行 15 万公里磨耗踏面和初始标准 LM 型面进行计算, 车辆以 140 km/h 在曲线上运行 1000 m。

1) 脱轨系数

脱轨系数是评价车辆运行安全性的一个重要指标。脱轨系数 Q/P , 即轮轨横向力 Q 与垂向力 P 之比。我国车辆动力学性能标准中规定的动车组脱轨系数 $Q/P \leq 0.8$ 。

车辆 1 位轮对在车轮踏面磨耗前后的脱轨系数如图 11 所示。

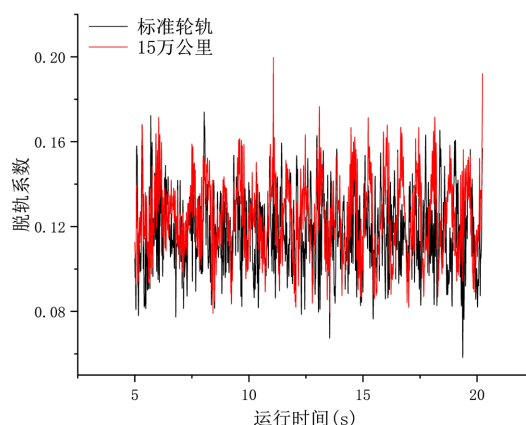


Figure 11. Derailment coefficient
图 11. 脱轨系数

可以看出, 磨耗前后的脱轨系数都小于 0.8, 符合我国车辆动力学性能指标。但是磨耗后的脱轨系数最大值是大于磨耗前的最大值, 整体有所上升, 运行安全性降低。

2) 轮重减载率

轮重减载率 $\Delta P/P$, 即增载侧和减载侧轮重值之差的一半与减载侧和增载侧的平均轮重值的比值, 是评定因轮重减载过大导致脱轨的另一种脱轨安全指标。根据 GBT5599-2019 规定可知, 轮重减载率评定按速度分类: 当运行速度小于 160 km/h 时, 轮重减载率限定值为 0.65, 高于 160 km/h 时轮重减载率限定值 0.80。

车辆 1 位轮对在车轮踏面磨耗前后的轮重减载率如图 12 所示。可以看出, 磨耗前后的轮重减载率区别不大, 且都符合我国规定指标。

上述仿真分析表明: 车轮踏面磨耗会导致等效锥度的增加, 而这种等效锥度的增大对车辆横向平稳性指标具有显著影响, 但对垂向平稳性及曲线通过性指标的影响则相对较小。

5. 结论

本文基于多体动力学软件 UM 建立 CR200J 动力集中动车车辆动力学模型。仿真预测车轮踏面的磨耗情况并进行分析。之后仿真分析了该车车轮踏面磨耗前后的临界速度、Sperling 平稳性指标、脱轨系数及轮重减载率等动力学特性，得出以下结论：

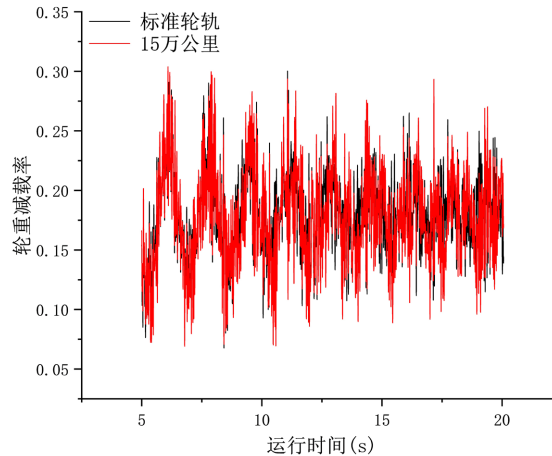


Figure 12. Wheel weight-reduction rate
图 12. 轮重减载率

1) 磨耗情况主要表现为滚动圆磨耗，随着运行里程的不断累积，车轮踏面的磨耗也在逐步加深。轮缘磨耗量明显大于踏面磨耗量，等效锥度随轮对横移量的增大先增加后减小。

2) 在直线线路行驶时，随着车轮踏面磨耗量的增加，车辆的临界速度会下降，同时横向平稳性指标则会增加，但垂向平稳性指标变化并不大，因此车辆的稳定性和平稳性会减弱。

3) 在曲线轨道行驶过程中，随着车轮踏面磨损量的增加，车辆的脱轨系数相应提升，而轮重减载率的变化则不明显，导致车辆曲线运行安全性有所下降。

通过对车轮磨耗规律的总结以及对其动力学性能影响的分析，可以确定以 25 万公里为运行里程标准对车轮踏面实施镟修管控，是合理且可行的方案。建议在车辆日常运用及维护过程中，进一步加强对车轮廓形的监测工作，尤其是对于那些磨耗发展迅速以及等效锥度过高的车轮，需要强化镟修管理措施。在一些特殊路段，适当提高镟修标准也是必要的，这样能够有效避免车轮出现不足修或者过度修的情况。

参考文献

- [1] 孟凡峰. 160 km/h 动力集中型动车组对构建完整客运产品体系作用研究[J]. 中国铁路, 2016(10): 35-38.
- [2] 赵红卫, 梁建英, 刘长青. 高速动车组技术发展特点及趋势[J]. 工程学, 2020, 6(3): 67-88.
- [3] Shebani, A. and Iwnicki, S. (2018) Prediction of Wheel and Rail Wear under Different Contact Conditions Using Artificial Neural Networks. *Wear*, **406**, 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.01.007>
- [4] 王朝涛. 踏面磨耗对 CRH2-300 型高速列车动力学性能影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [5] 史新伟. CR200J 型动车组车轮踏面磨耗及其对动力学性能影响的分析研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(12): 41-45.
- [6] 杨震寰, 戴焕云, 石俊杰, 等. 磨耗后轮轨型面接触关系及线路适应性分析[J]. 铁道学报, 2021, 43(5): 37-46.
- [7] 孙宇. 轮轨非 Hertz 接触方法及其在高速铁路轮轨动力相互作用中的应用研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.

-
- [8] Shi, H., Wang, J., Wu, P., Song, C. and Teng, W. (2017) Field Measurements of the Evolution of Wheel Wear and Vehicle Dynamics for High-Speed Trains. *Vehicle System Dynamics*, **56**, 1187-1206.
<https://doi.org/10.1080/00423114.2017.1406963>
 - [9] 徐力, 杨陈, 顾忠华. 车轮磨耗对 CR200J 型动车的拖车及控制车动力学性能的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 144-148.
 - [10] 孙效杰, 周文祥. 踏面磨耗及其对轮轨接触几何关系的影响[J]. 铁道车辆, 2010, 48(7): 1-4+14+47.