

轨距精改联合钢轨打磨作用下车辆动力学特性分析

杜磊¹, 林凤涛², 李青原¹, 张紫龙¹, 孙琛¹

(1. 中铁物总运维科技有限公司, 北京 100073; 2. 华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 3300132;)

摘要: 为研究轨距精改联合钢轨打磨作业对某客货混运铁路干线线路状态和车辆动力学性能的影响。对试验区段作业前后钢轨状态、轨道几何参数以及车辆动力学性能进行对比分析。研究表明: 钢轨状态提升, 个性化打磨消除了钢轨表面病害, 打磨后6个月内未再次出现病害, 轮轨接触状态和等效锥度更符合理想状态; 轨道几何参数减小, 轨距精改使轨距动态TQI从0.76降至0.31、精改3个月后至0.42, 轨距静态TQI从0.7降至0.15; 车辆动力学性能提升, 动车组构架横向和垂向振动加速度最大值分别下降30.58%和34.04%, 轨检车横向和垂向振动加速度最大值分别下降28.57%和21.62%。轨距精改联合钢轨打磨能够显著提升轨道质量和动车组动力学性能, 确保列车运行的安全性和舒适性。

关键词: 普速铁路; 钢轨打磨; 轨距精改; 轮轨动力学; 车辆动力学

中图分类号: U216.42

文献标志码: A

Analysis on Vehicle Dynamic Characteristics Under the Combined Action of Rail Gauge Fine Adjustment and Rail Grinding

Du Lei¹, Lin Fengtao², Li Qingyuan¹, Zhang Zilong¹, Sun Chen¹

(1. China Railway Materials Operation and Maintenance Technology Co., Ltd., Beijing 100036; 2. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This study investigated the effects of superimposed operations of precise track gauge modification and combined rail grinding on track conditions and vehicle dynamic performance for a trunk railway line with mixed passenger and freight traffic. Comparative tests were carried out to analyze the variations in rail conditions, track geometric parameters and vehicle dynamic indicators before and after the maintenance work on the test section. The results showed that the rail conditions were significantly improved. Customized grinding eliminated all rail surface defects, and no recurrent defects were detected within six months after grinding. The wheel-rail contact relationship and equivalent conicity were optimized substantially and conformed better to the ideal matching state. Track geometric parameters achieved limited overall improvement, while precise track gauge modification yielded prominent rectification effects. The dynamic track quality index (TQI) of track gauge decreased from 0.76 to 0.31 after construction and rebounded slightly to 0.42 three months later, and the static track gauge TQI dropped from 0.70 to 0.15. Furthermore, the vehicle dynamic performance was enhanced obviously. The maximum lateral and vertical vibration accelerations of EMU bogie frames decreased by 30.58% and 34.04%, respectively, and both the derailment coefficient and wheel unloading ratio were reduced remarkably. The maximum lateral and vertical vibration accelerations measured by the track inspection vehicle declined by 28.57% and 21.62%, respectively. The synchronous implementation of precise track gauge modification and combined rail grinding remarkably improved track quality and EMU dynamic performance, and guaranteed the operational safety and ride comfort of trains.

Key words: ordinary speed railway; rail grinding; gauge re-profiling; wheel-rail dynamics; vehicle dynamics

普速线路钢轨打磨和轨距精改都是轨道运维的重要组成, 共同构成了普速线路养护的基石, 对于二者的研究, 不仅直接关系到铁路运输的“安全、效率、成本”三大核心目标, 也是推动普速铁路高质量发

收稿日期: 2026-06-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52065021); 江西省领军人才项目(S2021GDKX1442); 江西省基金项目(20242BAB26086), 国铁集团科技研究开发计划课题(N2024G028, P2023J054)

展、实现“降本增效”的重要技术途径。

为保障铁路运输的三大核心目标，推动铁路高质量发展，国内外专家与学者对钢轨打磨和轨距精改做了大量研究^[1-7]。在钢轨打磨与轨道精调综合作业方面：刘攀^[8]等根据杭温高铁联调联试工程实践，提出了基于动静态检测数据制定的轨道精调和钢轨打磨作业方案，并研究了轨道几何质量变化情况；木东升等^[9]通过某高速铁路有砟轨道大机捣固、人工精调和钢轨打磨综合作业前后轨道状态，分析综合作业对高速铁路有砟轨道几何不平顺的影响。轨距精改与轨道精调均为铁路轨道几何参数优化的核心手段，是铁路安全的保障之一，轨距精改与轨道精调的研究具有重要意义^[10-12]，丁有康^[13]等根据京九线施工前后轨道几何变化情况研究了轨距精改、大机精捣及二者组合作业分别对轨道不平顺 7 项指标的影响，胡伟豪^[14]等基于车辆-轨道耦合动力学模型研究了无砟轨道线路未实施轨道精调与精调达标两种工况下车辆动力学性能关键参数的变化规律。在轮轨关系中钢轨廓形是几何匹配与力学响应的核心载体，轮轨关系直接影响列车行车安全，因此对钢轨廓形打磨有深入研究^[15-18]，Zhou J 等^[16]利用多种算法提出了一种地铁曲线钢轨打磨廓形优化设计方法，李贵宁^[19]等通过动力学仿真研究可使高速动车组能够稳定运行的钢轨打磨限值廓形，杨逸航^[20]等通过动力学仿真和动检车测量数据研究了个性化钢轨廓形打磨对动车组轮轨接触等效锥度、横向振动加速度等动力学特性的影响，Andrej I^[7]等针对俄罗斯铁路钢轨状态研究提出了一种新的钢轨个性化打磨方法。如上述，现有相关研究中国内外以钢轨打磨为主要研究对象，且以研究高铁线路或重载铁路为主，而对于轨道精调或与其与钢轨打磨组合作业相关方面的研究较非常少，有关普速线路的相关研究则几乎没有。轨道精调或钢轨打磨对轨道状态、列车动力学性能均有积极作用，但因对轨道线路轨距精改与钢轨打磨叠加作业研究极少，其是否对轨道状态、列车动力学性能有积极影响无有力依据。

为验证轨距精改与钢轨打磨叠加作业对轨道状态和列车动力学性能是否有积极影响，本文依据实际测量钢轨廓形和轨道几何参数，通过轨道-车辆耦合系统动力学仿真获得动力学性能指标，结合轮轨接触关系变化、动检车实测数据等进行综合分析。根据先轨距精改后钢轨打磨施工顺序的前后各阶段仿真数据和实测数据，对比线路几何状态与列车动力学性能的变化趋势，研究分析两项作业叠加作业的影响。

1 线路概况及维护技术

1.1 线路概况

某客货混运铁路干线（设计最高时速 160km/h）于 2024 年对 K95+600-K285+000 区间实施线路强化维护工程，采用轨距精改技术对线路轨距偏差实施修正，并运用个性化钢轨廓形打磨技术对钢轨轨头工作面进行廓形重塑，其中轨距精改作业后轨道几何参数有显著改善、钢轨打磨作业后钢轨轨面状态及钢轨廓形均有较大提升。

此铁路干线轨距精改与钢轨廓形打磨存在同期实施情况，其中为直线区段的上行 K124+000-K127+000 区段完成轨距精改后一个月内完成钢轨廓形打磨，两项作业施工时间间隔较短，其他因素对轨道参数影响较小。

1.2 个性化钢轨打磨技术

个性化钢轨打磨技术是一种针对特定线路条件、车型参数及钢轨病害，摒弃传统统一标准打磨模式，通过对某线路钢轨廓形及其通过列车车轮数据进行采集，以优化轮轨关系为目的，利用动力学仿真定制设计最优钢轨打磨目标廓形，并精准实施打磨的精细化养护技术；通过对比实测廓形与目标廓形的差异，

分析轨头廓形特征角各角度偏差值，据此排布钢轨打磨大机作业角度，消除差异使钢轨廓形与目标廓形尽可能贴合。个性化打磨技术兼顾钢轨廓形修复与预防性养护，能优化轮轨接触关系、均匀分布应力，从根源上抑制侧磨、波磨、疲劳裂纹等病害，延长钢轨使用寿命，提升行车安全性与平稳性，是铁路智能化、精准化运维的关键技术。

对该线路实际钢轨状态以及该线路运行列车实际车轮踏面调查测量，根据所测得数据利用个性化钢轨打磨技术设计专用的钢轨打磨目标廓形，目标廓形按照直曲线分别设计，其中曲线又按照半径大于1000m 和小于等于 1000m 以及曲线上下股分别进行设计，另外曲线上股廓形依照有无侧磨分别设计。钢轨打磨个性化方案依据以上分类方法对比目标廓形与实测廓形，计算两者的偏差值以此作为钢轨打磨车作业角度排布以及打磨遍数，进而完成该线个性化钢轨打磨作业。

1.3 轨道精调技术

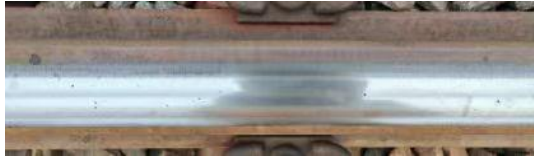
轨道精调是在 CP III精密控制网下，利用高精度测量设备获取轨道几何状态，通过扣件微调、高程与平面线形修正等手段，对轨距、水平、高低、轨向、平顺性等核心参数进行亚毫米级精准控制的轨道养护技术。其目的是消除施工与运营带来的几何偏差、沉降与不平顺病害，保障列车运行安全性、平稳性与舒适性，减小轮轨冲击。轨道精调分为静态精调与动态精调，遵循“先基准轨、后另一轨”、“先平面、后高程、再平顺”的闭环作业流程，是轨道交通实现高平顺、高稳定、长寿命的关键技术。轨距精改是将轨距精准恢复至 1435mm 的专项精调技术，通过高精度测量与扣件微调消除轨距偏差，可优化轮对居中状态、改善轮轨接触、降低轮缘与钢轨侧磨。该技术严格控制轨距精度，能有效提升车辆运行平稳性和曲线通过性能，是保障列车安全舒适运营的关键养护手段。根据该线路前期调查的轨道几何参数状态，制定以轨距恢复为主的轨道精调策略，即轨距精改，通过调整轨距降低轨道横向激励，减小列车横向振动，以提高客运列车乘客乘车舒适度。

2 线路状态变化对比分析

2.1 钢轨状态变化

2.1.1 轨面状态变化

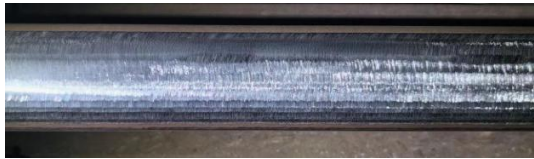
某铁路干线上行钢轨存在多种病害，包括：轨面存在侧磨、肥边、疲劳麻点、鱼鳞纹和掉块等病害，轨面光带普遍较宽、存在双光带现象；其中 K124+000-K127+000 区段主要存在鱼鳞伤、疲劳麻点、擦伤等病害，且轨面光带较宽、有双光带。如图 1 所示为上行 K126+000 处打磨前后左右股钢轨表面状态，打磨前有钢轨有疲劳麻点和擦伤病害、且轨面存在双光带，个性化打磨后病害消除，打磨后 6 个月轨面状态保持良好，未再次出现表面病害，接触光带均匀^[21]。



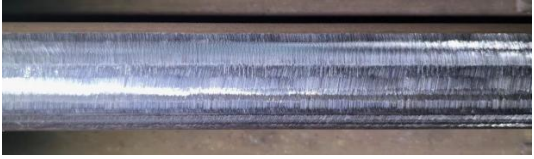
(a) 左股打磨前



(b) 右股打磨前



(c) 左股打磨后



(d) 右股打磨后



(e) 左股打磨后 6 个月



(f) 右股打磨后 6 个月

图 1 上行 K126+000 处左右股个性化打磨前后轨面状态

Fig.1 Rail surface state before and after personalized grinding of left and right tracks at uplink K126+000

2.1.2 轮轨接触关系变化

利用标准 JM3 型车轮踏面与打磨前后实测钢轨廓形进行轮轨接触状态分析, 上行 K126+000 处左右股钢轨个性化打磨前后轮轨接触状态发生较明显变化, 如图 2 所示, 打磨前轮轨接触区域较宽, 且轮轨接触点略集中, 打磨后轮轨接触区域缩小、但因左股打磨后棱角较突出使接触区域较集中, 个性化打磨后 6 个月左右股轮轨接触点较打磨前更均匀。从轮轨接触状态可看出个性化打磨对轮轨接触状态有改善, 个性化廓形打磨使轮轨接触区域更合理。

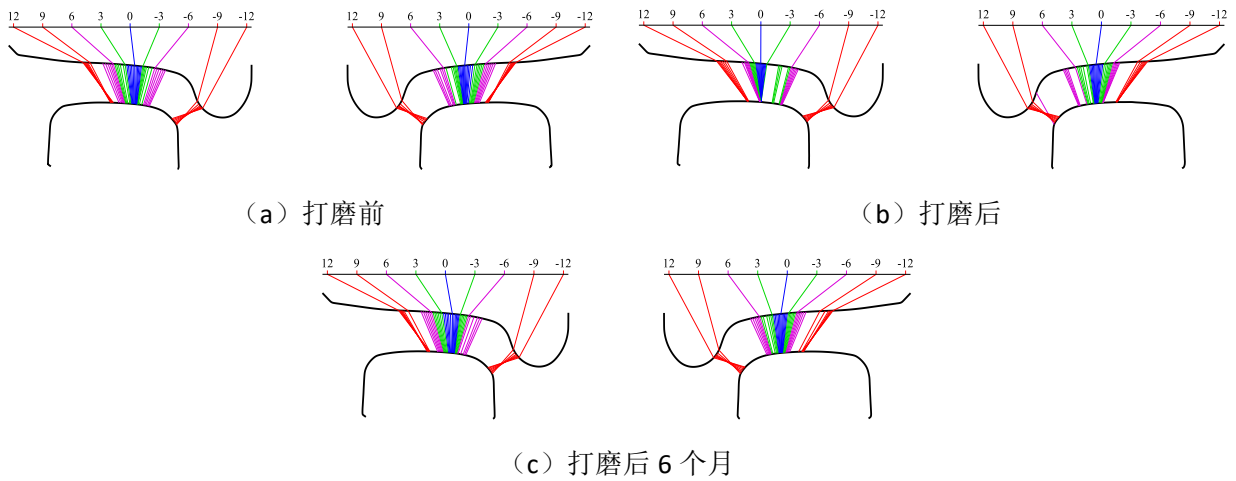
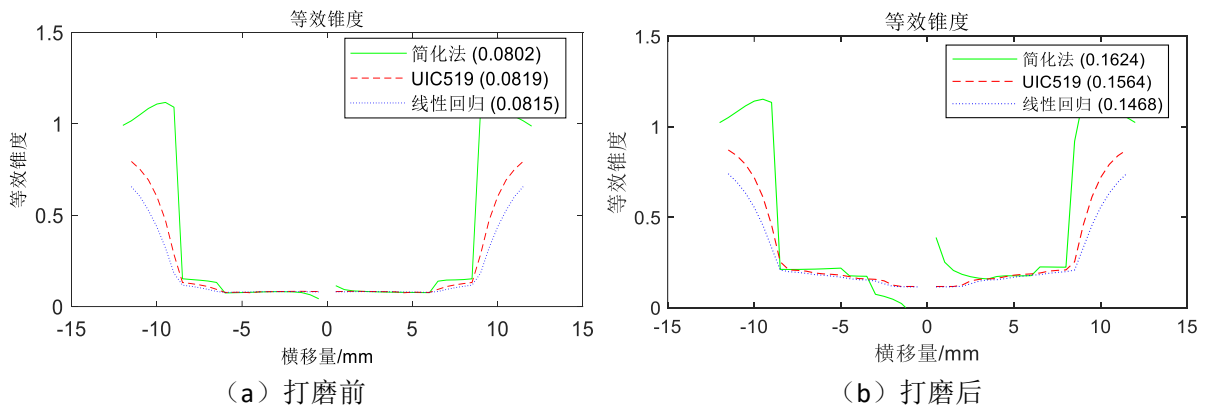


图 2 上行 K126+000 处个性化钢轨打磨前后轮轨接触状态

Fig.2 Wheel-rail contact state before and after personalized rail grinding at the uplink K126+000

2.1.3 轮轨接触等效锥度变化

钢轨打磨前轮轨接触等效锥度低于 0.1, 列车存在晃车风险, 打磨后及打磨后 6 个月等效锥度均超过 0.16 列车运行过程中更不易出现抖晃车, 可见钢轨个性化打磨后轮轨匹配关系更佳、等效锥度更接近理想状态, 列车运行横向平稳性提高, 同时降低列车滚动噪声和振动, 有效提高乘坐舒适性。如图 3 所示为打磨前后实测钢轨廓形与标准 JM3 型车轮踏面的轮轨接触等效锥度。



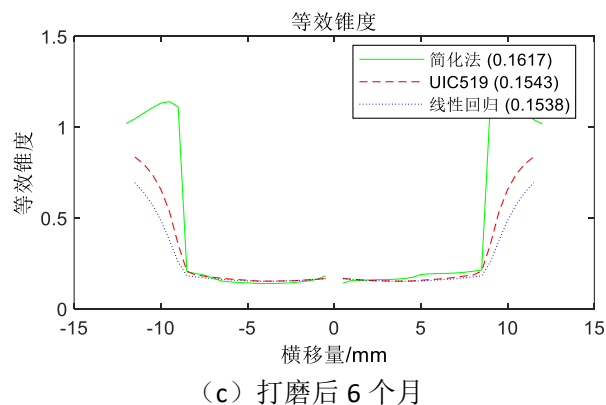


图 3 上行 K126+000 处钢轨打磨前后轮轨接触等效锥度

Fig.3 Equivalent conicity of wheel-rail contact before and after rail grinding at the uplink K126+000

2.2 轨道几何参数变化

2.2.1 轨道质量变化

上行 K124+000-K127+000 区段轨距精改前后质量如表 1 所示，作业前后轨距动态 TQI 从 0.76 下降至 0.31，下降约 59.2%；作业 3 个月后 TQI 上升至 0.42，较作业前下降约 44.7%。作业区段精改前后轨距静态 TQI 变化曲线见图 4，从图中可明显看出轨距精改后轨距静态 TQI 显著减小，轨距静态 TQI 从 0.7 左右下降至 0.15 左右，且波动性更低。

表 1 上行 K124+000-K127+000 轨距精改前后轨距动态 TQI 变化

Tab.1 Dynamic TQI Changes of Track Gauge Before and After Fine Adjustment from K124+000 to K127+000 in the Upward Direction

	作业前	作业后	作业后 3 个月
轨距动态 TQI	0.76	0.31	0.42
TQI 提升率	/	59.2%	44.7%

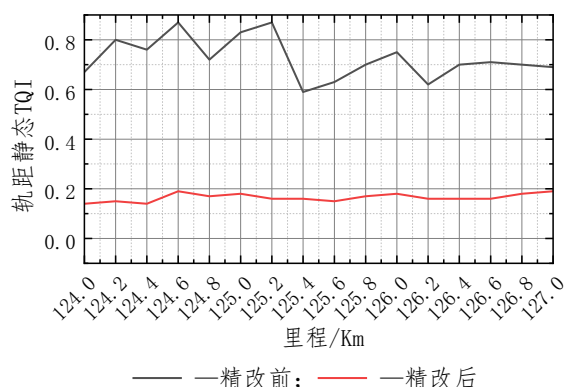


图 4 上行 K124+000-K127+000 区段轨距精改前后轨距静态 TQI 变化曲线

Fig.4 Static TQI change curve of track gauge before and after gauge precision modification in the uplink section K124+000-K127+000

2.2.2 轨道不平顺

上行 K124+000-K127+000 区段左、右轨轨向不平顺如图 5、图 6 所示，分析数据得知精改打磨作业后左轨轨向不平顺平均值由 0.38mm 下降至 0.34mm，平均值下降 10.53%，标准差由 0.49mm 下降至 0.45mm，标准差下降 8.16%；右轨轨向不平顺平均值由 0.49mm 下降至 0.34mm，平均值下降 30.61%，标准差由 0.63mm 下降至 0.44mm，标准差下降 30.16%。精改打磨作业后轨距不平顺平均值由 0.773mm

下降至 0.381mm，减小约 50.71%，标准差由 0.876 下降至 0.466，下降约 46.80%，精改打磨作业前后轨距不平顺如图 7 所示。

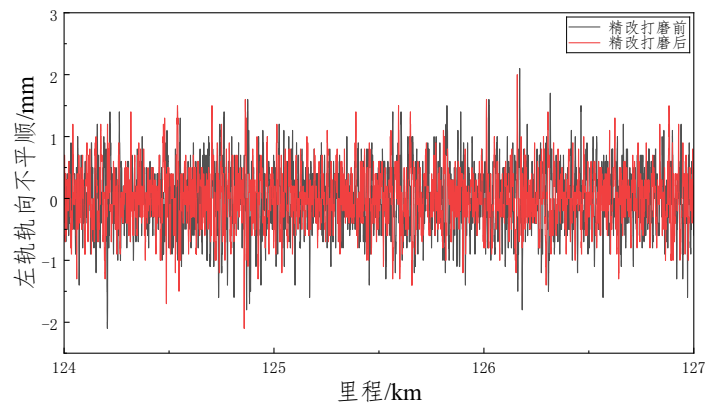


图 5 上行 K124+000-K127+000 区段精改打磨前后左轨轨向不平顺

Fig.5 The left rail irregularity before and after gauge precision modification and rail grinding in the uplink section K124+000-K127+000

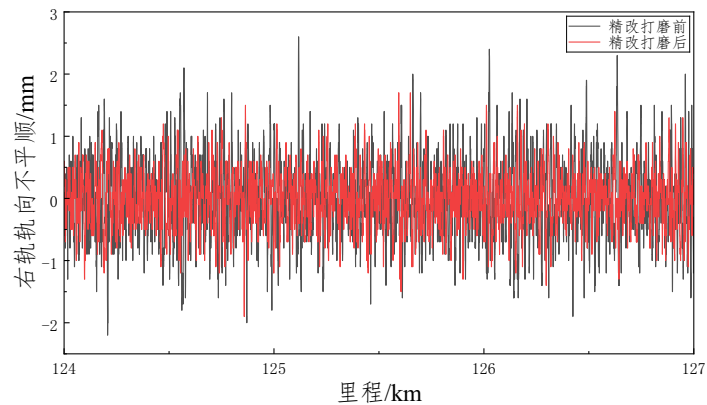


图 6 上行 K124+000-K127+000 区段精改打磨前后右轨轨向不平顺

Fig.6 The right rail irregularity before and after gauge precision modification and rail grinding in the uplink section K124+000-K127+000

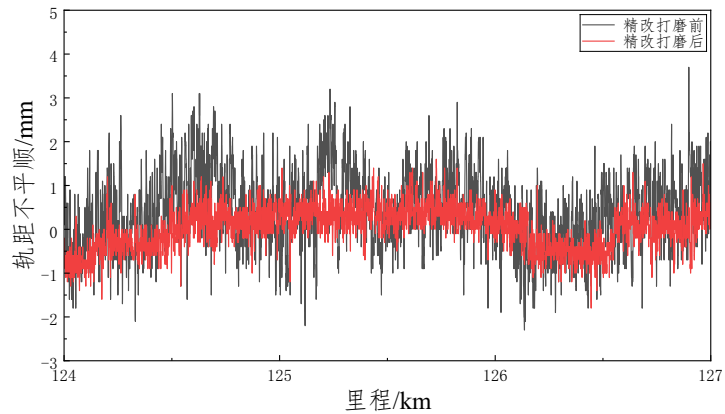


图 7 上行 K124+000-K127+000 区段精改打磨前后轨距不平顺

Fig.7 Rail gauge irregularity before and after gauge precision modification and rail grinding in the uplink section K124+000-K127+000

综上所述，轨距精改和钢轨打磨使轨道质量和钢轨状态均得到了有效改善；钢轨个性化打磨技术将钢轨廓形修理后与车轮廓形适配，使轮轨接触关系改善，同时消除了轨面病害；轨距精改修复轨距，使轨距 TQI、轨距不平顺和轨向不平顺均获得较大改善。

3 车辆动力学性能分析

以 CR200J 作为动力学仿真对象, 利用列车动力学仿真软件进行动力学仿真, 仿真所用轨道激励谱采用实测轨道不平顺数据, 钢轨廓形采用实测线路钢轨廓形^[22], 动车组速度设置为 160km/h。

3.1 动车组动力学性能仿真

3.1.1 车体振动加速度

根据《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》GB/T5599—2019^[23]的规定, 对付仿真计算得出的构架横向振动加速度、垂向振动加速度数据做带通滤波处理, 频带为 0.4Hz~40Hz。经计算所得构架横向振动加速度和垂向振动加速度仿真结果分别如图 8、图 9 所示。

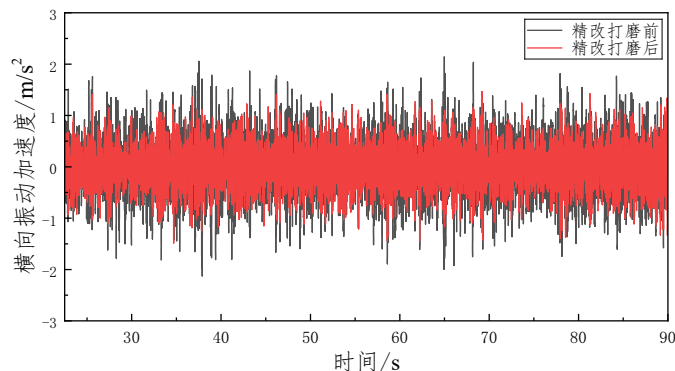


图 8 精改打磨前后构架横向振动加速度仿真计算结果

Fig.8 Simulation calculation results of lateral vibration acceleration of the frame before and after gauge precision modification and rail grinding

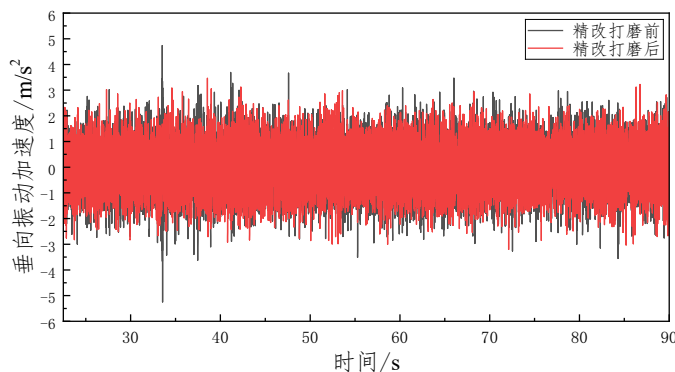


图 9 精改打磨前后构架垂向振动加速度仿真计算结果

Fig.9 Simulation calculation results of vertical vibration acceleration of the frame before and after gauge precision modification and rail grinding

仿真计算结果图为时序图, 图中 22.5s~90s 对应里程 K124+000~K127+000。仿真计算得出构架横向振动加速度精改打磨前后最大值分别为 2.139 m/s^2 、 1.485 m/s^2 , 下降约 30.58%, 均方根由 0.543 下降至 0.395, 降低约 27.26%; 垂向振动加速度精改打磨前后最大值分别为 5.244 m/s^2 、 3.459 m/s^2 , 下降约 34.04%, 均方根由 0.876 降至 0.822, 降低约 6.16%; 可知, 轮轨关系优化及轨道激励改善使车体振动显著降低, 列车动力学性能得到有效改善。

3.1.2 脱轨系数及轮重减载率

轮轨关系优化及轨道激励改善后仿真计算得出, 在区间 K124+000~K127+000 中 CR200J 脱轨系数均小于 0.6, 满足技术标准要求。精改打磨前后脱轨系数峰值分别为 0.0200、0.0188, 轮重减载率最大值由 0.0665 减小至 0.0635, 图 10 和图 11 分别为精改打磨前后脱轨系数和轮重减载率的仿真计算结果, 由图可知, 精改打磨后脱轨系数和轮重减载率均有明显减小。

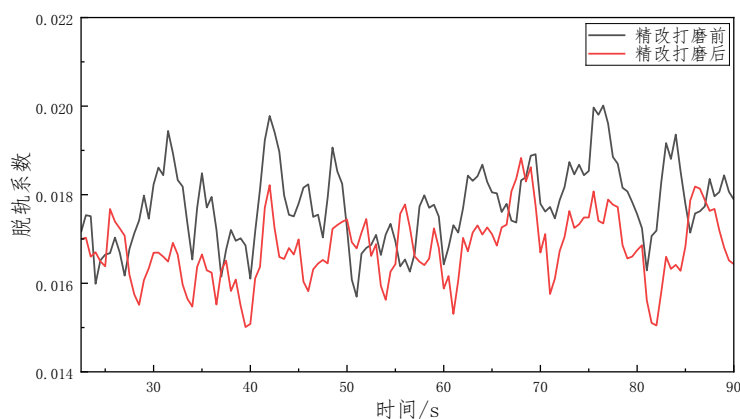


图 10 精改打磨前后脱轨系数仿真计算结果

Fig.10 Simulation calculation results of derailment coefficient before and after gauge precision modification and rail grinding

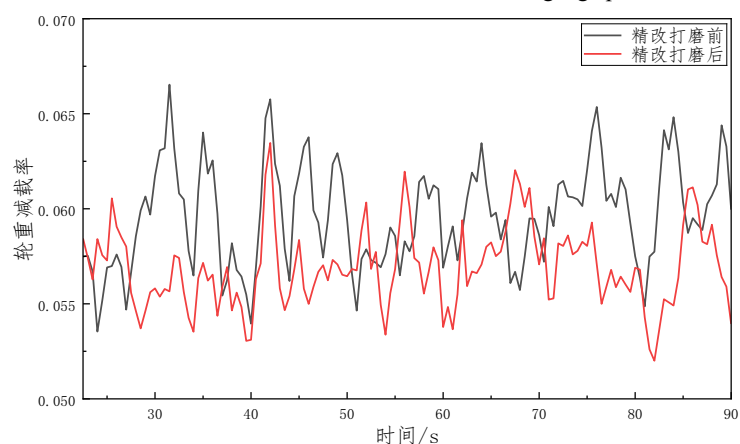


图 11 精改打磨前后轮重减载率仿真计算结果

Fig.11 Simulation calculation results of wheel load reduction rate before and after gauge precision modification and rail grinding

3.2 轨检车车体加速度变化

通过轨检车实际测量结果得知，横向振动加速度精改打磨前最大值为 0.028m/s^2 ，精改打磨后最大值为 0.020m/s^2 ，横向加速度最大值降低 28.57%，均方根由 0.0079 下降至 0.0055，降低约 30.40%；垂向振动加速度精改打磨前最大值为 0.037m/s^2 ，精改打磨后最大值为 0.029m/s^2 ，垂向振动加速度最大值降低 21.62%，均方根由 0.0080 下降至 0.0061，降低约 23.75%。轨检车横向、垂向振动加速度精改打磨前后对比如图 12、图 13 所示。通过实测的轨检车振动加速度对比可得出，精改打磨对列车振动加速度有较大的改善。

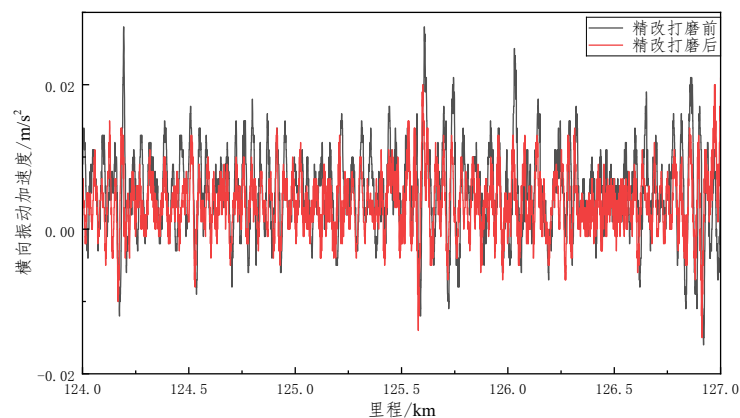


图 12 轨检车横向振动加速度精改打磨前后对比

Fig.12 Comparison of lateral vibration acceleration before and after gauge precision modification and rail grinding of the track inspection vehicle

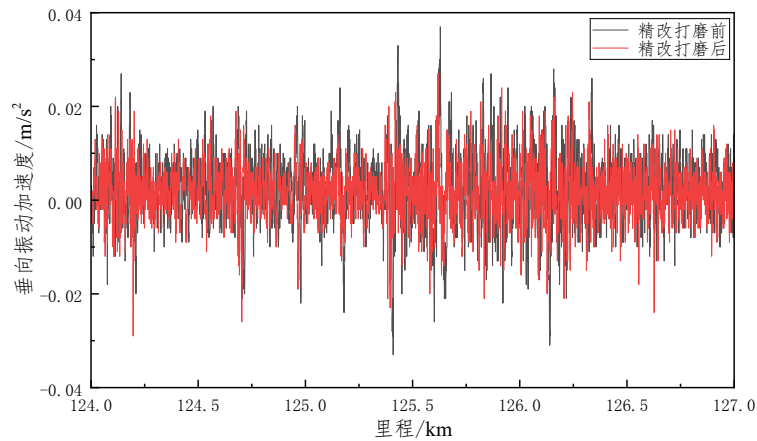


图 13 轨检车垂向振动加速度精改打磨前后对比

Fig.13 Comparison of vertical vibration acceleration before and after gauge precision modification and rail grinding of the track inspection vehicle

综上，个性化打磨优化钢轨廓形使轮轨关系改善，轨距精改修复钢轨轨距提升轨道几何参数使轨道激励改善，轮轨关系改善和轨道激励改善均使列车受到的外部激励减弱，列车构架、车体的横向振动和垂向振动均减小，列车动力学性能及舒适度均有提升，故同期实施钢轨个性化打磨和轨距精改对车体振动改变有积极作用。

4 结论

本文结合某铁路干线实际线路条件以及实际运维情况，建立动车组动力学仿真模型计算动力学性能并结合轨检车实测数据分析线路先实施轨距精改后钢轨打磨的联合作业对线路状态和列车动力学性能的影响。主要结论如下：

1) 个性化打磨后，钢轨轨面病害消除，接触光带收窄并保持良好，打磨后 6 个月接触区域仍比打磨前小，轮轨接触关系有效改善。

2) 轨距精改后，轨道几何参数改善效果显著，轨距动态 TQI 较精改前提升 59.2%，作业后 3 个月仍有 44.7% 的改善，轨道左、右轨轨向不平顺和轨距不平顺均有较大的改善，轨距不平顺改善率约为 50.71%，其波动性下降 46.8%。

3) 轨距精改和钢轨打磨后，动车组动力学性能提升，构架横向、垂向振动加速度最大值下降均超 30%，且加速度幅值变化率均有减小，脱轨系数和轮重减载率也均有改善；轨检车横向、垂向振动加速度最大值下降均超 20%，均方根降低也均超过 20%。

研究表明：钢轨个性化打磨有效改善了轮轨接触状态，等效锥度保持在合理范围内；轨距精改改善了轨道几何参数，使列车所受轨道激励改善，横向和垂向振动均有较大下降。个性化打磨和轨距精改同期实施对线路质量改善均有积极作用，轨距精改和钢轨打磨同期实施，能够提升轨道质量，使动车组动力学性能改善。

参考文献：

[1] 徐万华, 折成林. 钢轨打磨对重载铁路小半径曲线轮轨接触区域分布概率和轮轨动力学特性的影响 [J]. 铁道技术监督, 2021, 49 (9) : 42-46, 51.

Xu Wanhua, Zhe Chenglin. Influence of rail grinding on distribution probability of wheel-rail contact area and wheel-rail dynamics features of small radius curve in heavy haul railway [J]. Railway Quality Control, 2021, 49 (9) : 42-46, 51.

- [2] 马德礼, 王军平. 钢轨打磨对铁路运营物资管理的影响 [J]. 铁路采购与物流, 2021, 16 (3): 78-80.
Ma Deli, Wang Junping. Influence of rail grinding on material management of railway operation [J]. Railway Purchasing and Logistics, 2021, 16 (3): 78-80.
- [3] 林凤涛, 胡伟豪. 磨耗钢轨经济性打磨型面研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (10): 2493-2502.
Lin Fengtao, Hu Weihao. Study on the economical grinding surface of wear rail [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17 (10): 2493-2502.
- [4] You Jinhong, Zhang Wulin, Cheng Yu, et al. Probing the self-adaptive grinding behaviours of high-speed rail grinding under the sliding-rolling composite motions [J]. Tribology International, 2025, 205: 110473.
- [5] Seo J, Kwon S, Park Y. A study on the effect analysis of rail grinding in highspeed railway considering dynamic wheel-rail force [J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2019, 22 (6): 494-503.
- [6] 吴凡, 徐立中. 轨道精测精调技术对地铁振动源强影响试验研究 [J]. 铁道勘察, 2024, 50 (4): 125-131.
Wu Fan, Xu Lizhong. Experimental study on influence of track precise measurement and adjustment technology on subway vibration source intensity [J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50 (4): 125-131.
- [7] Ilinykh A, Jurkova E. Methodology for the formation of rail repair profiles by grinding [J]. E3S Web of Conferences, 2023, 402: 06018.
- [8] 刘攀, 王志波, 曹红伟, 等. 杭温高铁联调联试中轨道精调与钢轨打磨作业效果 [J]. 铁路技术创新, 2024 (5): 47-55.
Liu Pan, Wang Zhibo, Cao Hongwei, et al. Effects analysis of track fine adjustment and rail grinding in integrated commissioning & test of Hangzhou-Wenzhou HSR [J]. Railway Technical Innovation, 2024 (5): 47-55.
- [9] 木东升, 周宇, 韩延彬, 等. 轨道综合作业对高速铁路有砟轨道几何不平顺改善效果 [J]. 交通运输工程学报, 2018, 18 (5): 90-99.
Mu Dongsheng, Zhou Yu, Han Yanbin, et al. Effect of track comprehensive maintenance on geometry irregularity improvement of ballast track in high-speed railway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18 (5): 90-99.
- [10] 孙宪夫, 支洋, 杨飞, 等. 基于动检数据的轨道精调方法与应用 [J]. 中国铁道科学, 2025, 46 (3): 62-71.
Sun Xianfu, Zhi Yang, Yang Fei, et al. Method and application of track fine adjustment based on dynamic inspection data [J]. China Railway Science, 2025, 46 (3): 62-71.
- [11] 陈杰亮. 有砟轨道精调技术 [J]. 科学技术创新, 2022 (15): 139-143.
Chen Jieliang. Fine adjustment technology of ballasted track [J]. Scientific and Technological Innovation, 2022 (15): 139-143.
- [12] Zhang Q, Li Y, Cen M. A method of integer programming for track fine adjustment [J]. 2015, 9794:97940D. DOI:10.1117/12.2203468.
- [13] 丁有康, 张阳, 王晓凯, 等. 京九线轨距精改与大机精捣组合作业效果分析 [J]. 铁道建筑, 2023, 63(9): 23-27.
- Ding Y K, Zhang Y, Wang X K, et al. Analysis of the Effect of Cooperative Operation of Gauge Precision Improvement and Large Precision Tamping on Beijing-Kowloon Railway [J]. Railway Building, 2023, 63(9): 23-27.
- [14] 胡伟豪, 林凤涛, 李昊. 精调高速铁路无砟轨道几何状态对车辆动力学性能影响分析 [J]. 铁道技术监督, 2023, 51 (7): 48-52.
Hu Weihao, Lin Fengtao, Li Hao. Analysis of the influence of track geometry of high speed ballastless track line precise-adjusted on vehicle dynamics performance [J]. Railway Quality Control, 2023, 51 (7): 48-52.
- [15] 杨逸航, 肖乾, 蔡林珊, 等. 个性化道岔廓形打磨对动车组动力学性能影响 [J]. 华东交通大学学报, 2021, 38 (2): 82-87.
Yang Yihang, Xiao Qian, Cai Linshan, et al. Research on the influence of personalized turnout rail grinding on the dynamic characteristic of high-speed trains [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38 (2): 82-87.
- [16] Zhou Jun, Liu Linya, Li Jiyang. Multi-objective optimization design of rail grinding profile in Curve Section of Subway based on wear Evolution and representative worn profile [J]. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability,

2024, 26 (4) .

- [17] Lin Fengtao, Wang Songtao, Zhang Hai, et al. Design method of rail grinding target profile based on non-uniform rational B-spline [J] . Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235 (8) : 946-956.
- [18] 孙琛, 李涛, 侯永胜. 廓形设计打磨对延缓重载铁路小半径曲线钢轨疲劳伤损的影响[J]. 铁道工务, 2025, 3 (1): 36-40.
- Sun Chen, Li Tao, Hou Yongsheng. Influence of profile design and grinding on delaying fatigue damage of rails in small radius curves of heavy haul railways [J] . Railway Engineering, 2025, 3 (1) : 36-40.
- [19] 李贵宇, 张志波, 梁海啸, 等. 钢轨打磨对高速动车组运行性能的影响 [J] . 中国铁路, 2021 (11) : 51-56.
- Li Guiyu, Zhang Zhibo, Liang Haixiao, et al. Influence of rail grinding on operation performance of high speed EMU [J] . China Railway, 2021 (11) : 51-56.
- [20] 杨逸航, 肖乾. 个性化钢轨廓形打磨对动车组动力学特性的影响研究 [J] . 铁道建筑, 2021, 61 (10) : 120-125.
- Yang Yihang, Xiao Qian. Research on influence of personalized rail profile grinding on EMU dynamic characteristics [J] . Railway Engineering, 2021, 61 (10) : 120-125.
- [21] 龚继军, 李泽选, 王可刚, 等. 普速线路道岔常见病害及廓形打磨效果分析[J]. 铁路采购与物流, 2021, 16 (12) : 63-68.
- Gong Jijun, Li Zexuan, Wang Kegang, et al. Analysis on common diseases and profile grinding effect of turnout on general-speed railway [J] . Railway Purchasing and Logistics, 2021, 16 (12) : 63-68.
- [22] 刘永乾, 任尊松, 侯银庆, 等. 小半径曲线上 P75 钢轨打磨廓形设计及应用研究 [J] . 中国机械工程, 2024, 35 (6) : 1112-1119.
- Liu Yongqian, Ren Zunsong, Hou Yinqing, et al. Research on design and applications of grinding profiles of P75 rail on sharp curve [J] . China Mechanical Engineering, 2024, 35 (6) : 1112-1119.
- [23] GB/T 5599—2019 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范 [S] .
- GB/T 5599—2019 Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock [S] .