

车轮磨耗对 CR200J 型动车的拖车及控制车 动力学性能的影响

徐 力¹ 杨 陈¹ 顾忠华²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210032, 南京; 2. 中国铁路上海局集团有限公司南京机辆段, 210032, 南京)

摘 要 [目的] CR200J 型动车组拖车及控制车在某些区段出现稳定性报警故障, 为了分析故障原因和解决故障问题, 需对影响动力学性能的因素进行深入研究。[方法] 对某组 CR200J 型动车组拖车和控制车车轮磨耗状态进行了跟踪测量, 并对该动车组开行交路的钢轨廓形进行了实际测量; 通过 SIMPACK 软件仿真, 结合实际轮轨匹配关系, 分析了车轮磨耗对车辆动力学性能的影响。[结果及结论] CR200J 型动车组的拖车和控制车的车轮磨耗主要为滚动圆处集中磨耗; 随着车轮磨耗增加, 轮轨接触关系发生改变, 车轮等效锥度线性增大, 车辆横向平稳性指标变化明显; 实测个别路段轨道廓形存在突变, 转向架出现横向谐波运动; 最后, 根据车轮磨耗规律和特点, 提出改进建议。

关键词 CR200J 型动车; 动力学性能; 车轮磨耗; 等效锥度; 平稳性

中图分类号 U266; U260.331+.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.029

Impact of Wheel Wear on Dynamics Performance of CR200J EMU Trailer and Control Cars

XU Li¹, YANG Chen¹, GU Zhonghua²

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210032, Nanjing, China; 2. Nanjing East Locomotive and Rolling Stock Depot, 210032, Nanjing, China)

Abstract [Objective] In response to stability alarm faults occurring in CR200J EMU trailer and control cars in certain sections, it is necessary to analyze the factors affecting the dynamics performance to analyze the causes and address the issues. [Method] Tracked measurements are conducted on the wheel wear status of a set of CR200J EMU trailer and control cars. The actual rail profiles along the operating routes of vehicles are measured to identify the development patterns of wheel wear. Through SIMPACK software simulation, and combined with real wheel-rail matching conditions, the impact of wheel wear on vehicle dynamics performance is analyzed. [Result & Conclusion] The wheel wear of CR200J EMU trailer and control cars mainly concentrates at the rolling circle. As wheel

wear increases, changes occur in the wheel-rail contact relationship, leading to a linear increase in wheel equivalent conicity, and noticeable changes in lateral stability indicators of the vehicles. Some sections of the measured track profiles exhibit abrupt changes, causing lateral harmonic motion in the bogies. Finally, based on the patterns and characteristics of wheel wear, improvement suggestions are proposed.

Key words CR200J EMU; dynamics performance; wheel wear; equivalent conicity; stability

轮轨关系是车辆动力学系统的核心, 其直接影响着车辆动力学性能。车辆系统与轨道系统的耦合与反馈作用均通过轮轨关系来实现^[1], 良好的轮轨接触关系是保障车辆运用安全的前提。车辆在行驶过程中, 车轮钢轨之间不仅存在相对的横向和纵向滑动, 还存在较小的自旋转动。轮轨之间的相对滑动和转动不仅与轨道的刚度密切相关, 而且与轮轨系统的柔性变形以及轮轨接触斑局部的材料弹性变形密切相关^[2]。

在车辆运行过程中, 轮轨接触关系对车辆动力学性能有决定性影响, 车轮踏面廓形的变化将改变轮轨接触关系, 从而影响车辆运行状态。CR200J 型动车组车轮镟修沿用了 25T 型客车技术体系, 但车辆编组形式、速度等级及线路条件等车辆运用环境已经发生较大改变, 现有镟修策略已不能满足其运用需求。因此, 研究 CR200J 型动车组拖车和控制车车轮磨耗规律和特征, 探索车轮磨耗与车辆动力学性能之间联系, 以便制定合理的车轮镟修策略, 在确保车辆运用安全前提下, 兼顾经济性指标, 对车辆运用与检修具有重要意义。

1 动力学性能及车轮磨耗测试

某铁路局反馈其配属的 CR200J 型动车组在沪苏通线路开行时行车安全装置报警, 现场调查发现

该组车镟后运行里程已达到 26 万 km, 车轮集中磨耗严重, 但未超出现有车轮镟修标准。为了研究车轮磨耗对车辆动力学性能的影响, 对 CR200J-2041 动车组进行了跟踪测试, 测试前该组动车组已走行 6 万 km。

1.1 动力学性能测试

动力学性能测试主要内容为构架横向运动稳定性和车辆平稳性, 运行区间为沪苏通线, 运行时速 160 km/h。车辆横向运动稳定性判定标准为: 构架横向加速度以 0.5 ~ 10.0 Hz 滤波, 当振动加速度峰值有连续 6 次以上达到或超过 0.8g (即 8 m/s²) 时, 即判定转向架失稳。平稳性指标 W 依据 GB/T 5599^[3] 进行评定, 得:

$$W = 3.57 \sqrt[10]{\frac{A^3}{f} F(f)} \quad (1)$$

式中:

W——平稳性指标;

a——振动加速度, 单位 m/s²;

f——振动频率, 单位 Hz;

F(f)——频率修正系数。

测试对象为拖车(7 车)和控制车(8 车), 测点布置见表 1 所示。

表 1 三向加速度传感器布置

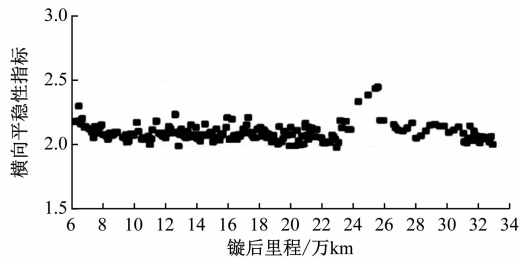
Tab. 1 Layout of triaxial acceleration sensors

序号	位置	通道数
1	构架端部 1 位左侧、2 位右侧、3 位左侧、4 位右侧	12
2	1/2 位端车体枕梁左、右侧	12
3	车体中心左、右侧	6
4	司机室下方 (仅控制车)	3

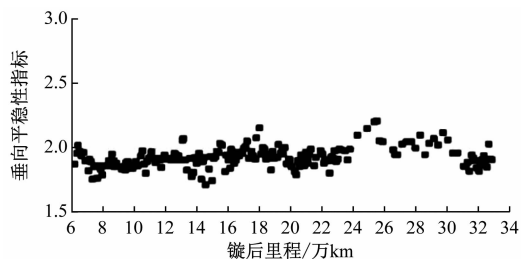
实测拖车横向平稳性指标最大值为 2.5, 垂向平稳性指标最大值为 2.3, 控制车横向平稳性指标最大值为 2.57, 垂向平稳性指标最大值为 2.41, 均发生于镟后 24 万 ~ 26 万 km, 见图 1 所示。

CR200J-2041 动车组镟后 26 万 km 后由沪苏通线调整至宁启线运行, 因线路原因其平稳性指标有所改善。

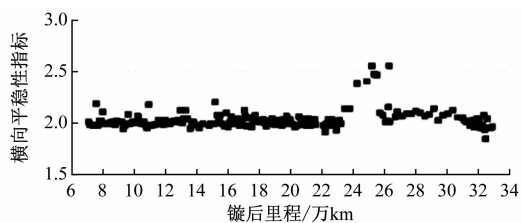
沪苏通线全程特定路段, CR200J-2041 动车组构架存在横向谐波振动, 拖车横向谐波振动幅值为 0.6g, 频率约为 9.4 Hz; 控制车横向谐波振动加速度幅值为 0.8g, 但未达到连续 6 次以上失稳标准, 频率约为 7.7 Hz, 见图 2 所示。



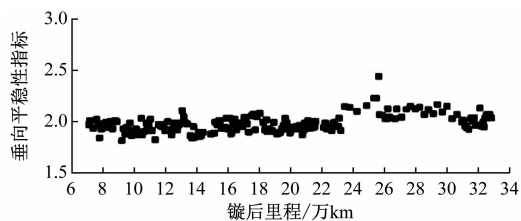
a) 拖车(7 车)横向平稳性



b) 拖车(7 车)垂向平稳性



c) 控制车(8 车)横向平稳性



d) 控制车(8 车)垂向平稳性

图 1 实测平稳性指标

Fig. 1 Field-measured stationary index

通过研究发现: 拖车和控制车平稳性指标峰值和构架横向谐波振动均出现在沪苏通固定区段, 其累计里程约为 2 km, 占沪苏通线总里程比例的 0.5%, 且车辆构架横向谐波振动区段均在站场道岔附近区段, 具体位置、公里标及通过速度如表 2 所示。

1.2 车轮磨耗测试

车轮踏面磨耗测试采用 Miniprof 型踏面轮廓测试仪进行检测 (具体测试方法见文献[4]), 并记录一个镟修周期内车轮踏面廓形变化规律, 实测车轮磨耗如表 3 所示, 实测车轮踏面廓形如图 3 所示。

由图 3 的实测结果可知: 车轮踏面随走行公里数增加, 滚动圆呈现较为集中磨耗的特征; 控制车

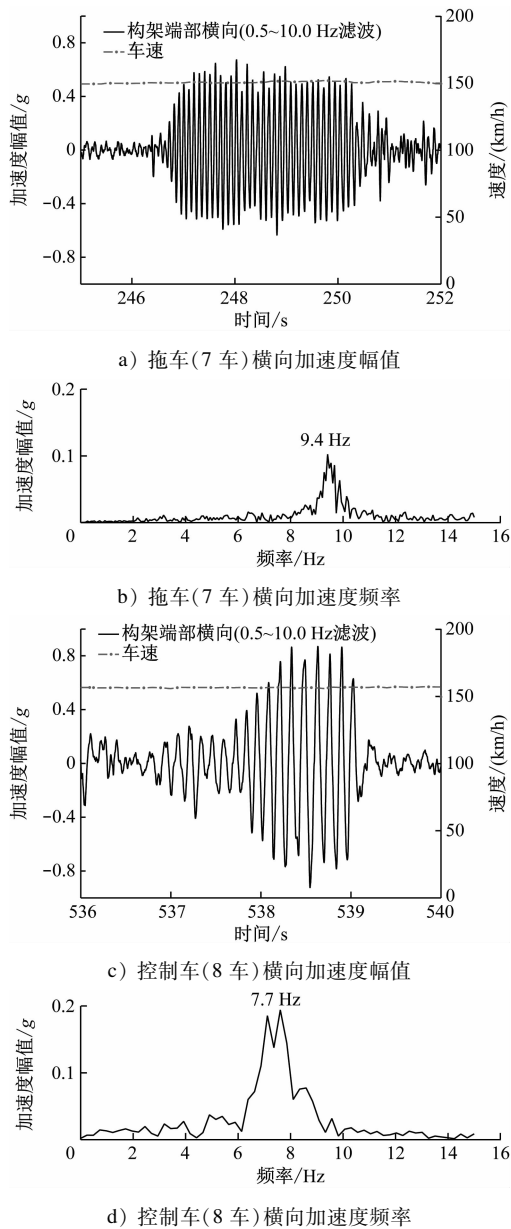


图2 构架横向加速度滤波放大图

最大磨损量为 1.63 mm, 位置在 -5 mm 附近, 拖车最大磨损量为 2.23 mm, 位置在 -4 mm 附近; 轮缘磨损量较小, 几乎未发生磨损; 等效锥度呈线性增加趋势, 控制车等效锥度最大值为 0.717, 镟修后走行 30.17 万 km, 等效锥度中位数为 $Y = 0.0120X + 0.33$, 拖车等效锥度最大值为 0.751, 镟修后走行 32.45 万 km, 等效锥度中位数为 $Y = 0.0118X + 0.25$, 如图 4 所示。

2 测试结果分析

对上述测试结果分析可知, 产生构架横向谐波

表2 车辆平稳性最大值和构架横向谐波振动区段

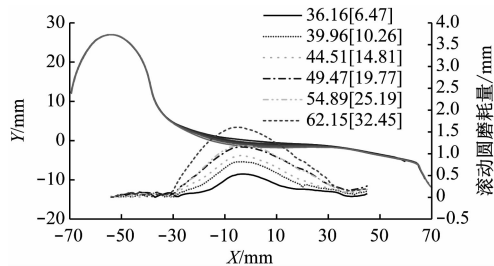
Tab.2 Maximum vehicle stability value and frame transverse harmonic vibration range

站场名称	区段公里标	通过速度/(km/h)	备注
安亭西站	K133+890 K134+460	152	岔道附近
安亭西站	K136+600 K136+800	142	岔道附近
太仓南站	K119+195 K119+370	150	岔道附近
陆渡线路所	K109+600 K109+800	155	岔道附近
太仓港站	K83+900 K84+50	160	岔道附近
南通西站—张家港站方向	K13+100 K13+350	160	岔道附近

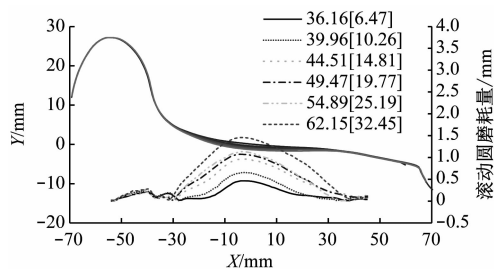
表3 实测车轮磨耗

Tab.3 Field-measured wheel wear

走行 里程/ 万 km	左轮			右轮		
	滚动圆 磨耗/mm	轮缘磨 耗/mm	等效 锥度	滚动圆 磨耗/mm	轮缘磨 耗/mm	等效 锥度
6.47	0.45	0.10	0.386	0.52	0	0.386
10.26	0.64	0.10	0.502	0.80	0.12	0.502
14.81	0.94	0.10	0.539	0.92	0.14	0.539
19.77	1.04	0.05	0.597	1.13	0.11	0.597
25.19	1.10	0.05	0.619	1.17	0.10	0.619
30.17	1.37	0.10	0.690	1.57	0.05	0.690
32.45	1.42	0.10	0.661	1.55	0.07	0.661



a) 左侧车轮踏面廓形



b) 右侧车轮踏面廓形

注: 图例中, 方括号外的数值表示实际磨耗量; 方括号内的数值表示走行里程。

图3 实测车轮踏面廓形

Fig.3 Field-measured wheel tread profile

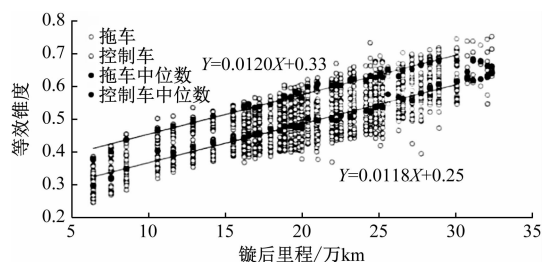


图4 实测等效锥度

Fig. 4 Field-measured equivalent conicity

振动的车辆存在3个共性现象,车辆以大于140 km/h的速度通过站场道岔附近区段,车轮踏面有集中凹磨特征,构架横向谐波振动可能与实际轮轨匹配等效锥度过大有关。

车轮集中磨耗造成轮轨接触关系发生变化,左右轮轨接触点分布逐渐由均匀分布向凹磨区域两侧扩展,接触点间隔宽度不断增大,如图5所示。在车辆高速行驶过程中,由于线路存在曲线、超高、波磨以及廓形突变等因素,轮对会出现一定幅值的横移运动,轮轨接触点将在凹磨两侧区域不断跳动,从而产生较大的轮轨冲击,出现假轮缘效应^[5]。

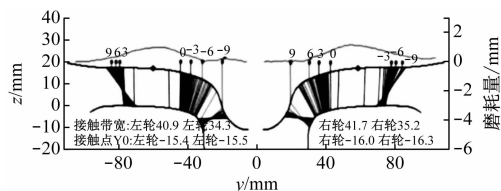


图5 轮-轨匹配关系

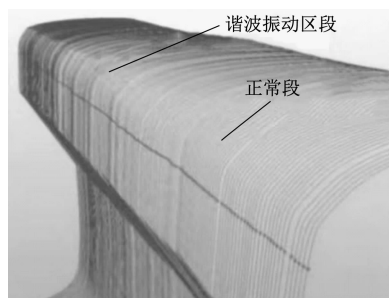
Fig. 5 Wheel-rail matching relationship

为了验证上述推断,采用车载轨检设备对表2所示区段钢轨轨廓进行扫描发现:上述区段钢轨轨廓接近标准CHN60型轨且轨肩角更大,与正常区段有明显区别,存在较大的突变,正常区段钢轨轨廓接近标准CHN60N型轨,如图6所示。

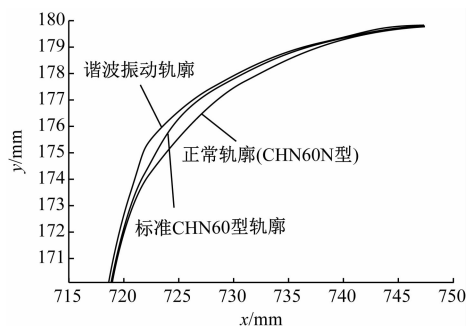
实测车轮踏面与钢轨匹配,轮对横移3 mm等效锥度如图7所示。由图7中可知:在出现平稳性峰值和构架横向谐波振动的区段,整列车实测等效锥度显著增大,最大达到0.75。

3 动力学仿真分析

为了验证车轮凹型磨耗对车辆动力学性能影响,本文采用MATLAB-SIMPACK软件联合仿真的方法,将轨道模型和车辆模型联系起来,实现了车辆-轨道耦合模型的整合^[6]。针对车辆结构和轨道结构分别采用2种不同的建模方法,车辆模型中



a) 实测轨廓



b) 实测轨廓对比

图6 实测轨廓对比

Fig. 6 Comparison of field-measured track profiles

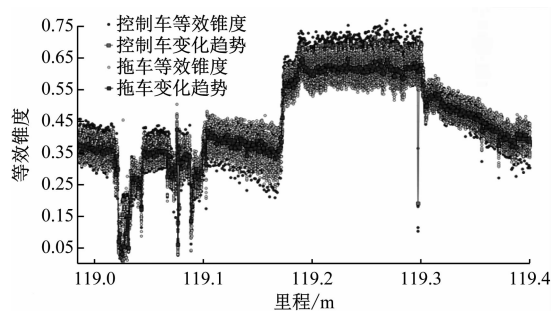


图7 实测轮对横移3 mm等效锥度

Fig. 7 Field-measured wheelset lateral displacement 3 mm equivalent conicity

包含了1个车体、2个构架、4条轮对及8个轴箱,轮对、转向架构架及车体均考虑有6个自由度;一系、二系悬挂均用无质量弹簧阻尼力元代替。对于轨道系统建模,本文利用梁理论在MATLAB软件中建立柔性模型,通过SIMPACK软件中SIMAT接口来实现轨道响应与车辆数据的交互。车轮踏面选择LM(磨耗)型踏面,轨面选择CHN60型标准轨。

将实测车轮廓形作为变量导入动力学模型进行仿真计算,磨耗轮等效锥度为0.7。新轮状态与磨耗状态动力学性能仿真对比如表4所示。其计算结果表明:相比新轮而言磨耗轮状态横向平稳性指标由1.85增大到2.17,提高了约17.2%;垂向平稳

性以及安全性指标变化不大。

上述仿真分析说明:CR200J 型动车组拖车和控制车车轮踏面凹磨会引起等效锥度增加,等效锥度增大对车辆横向平稳性指标影响显著,对垂向平稳性及安全性指标影响不大。

表 4 动力学性能仿真

Tab. 4 Dynamics performance simulation

工况	动力学 一级指标	动力学 二级指标	新轮	磨耗轮	参考标准
直线; 速度为 160 km/h	平稳性	横向	1.850	2.170	$W \leq 2.5$, 为优级
		垂向	2.100	2.150	$W \leq 2.5$, 为优级
曲线 R 为 1 600 m, 速度为 176 km/h	安全性	脱轨系数	0.261	0.256	脱轨系数 ≤ 0.8
		轮重减载率	0.463	0.465	轮重减载率 ≤ 0.65
		倾覆系数	0.368	0.344	倾覆系数 < 0.8
曲线 R 为 800 m, 速度为 132 km/h	安全性	脱轨系数	0.322	0.343	脱轨系数 ≤ 0.8
		轮重减载率	0.450	0.461	轮重减载率 ≤ 0.65
		倾覆系数	0.348	0.345	倾覆系数 < 0.8
曲线 R 为 500 m, 速度为 88 km/h	安全性	脱轨系数	0.322	0.386	脱轨系数 ≤ 0.8
		轮重减载率	0.406	0.452	轮重减载率 ≤ 0.65
		倾覆系数	0.316	0.322	倾覆系数 < 0.8
9 号 道岔, 速度为 35 km/h	安全性	脱轨系数	0.516	0.66	脱轨系数 ≤ 0.8
		轮重减载率	0.386	0.464	轮重减载率 ≤ 0.65
		倾覆系数	0.295	0.298	倾覆系数 < 0.8

注: R 为半径。

4 结语

通过实际正线动力学性能测试、车轮磨耗测试以及动力学仿真分析可知:

1) CR200J 型动力集中动车组拖车及控制车车轮磨耗特征为滚动圆集中凹磨,车轮凹磨会造成实际等效锥度线性增大,当等效锥度大于 0.7 时车辆横向平稳性指标会显著恶化。

2) CR200J-2041 动车组产生构架横向谐波振动区段均位于沪苏通线站场道岔附近特定路段,上述区段钢轨廓形与正线相比存在较大突变,造成实际轮轨匹配等效锥度突然增大,最大达到 0.75。

根据 CR200J 型动力集中动车组拖车及控制车车轮磨耗特征以及实际线路调研情况,为改善车辆动力学性能,建议完善车辆运用维护要求,具体如下:

1) 完善车轮镟修技术标准,增加等效锥度指标限值 ≤ 0.7 。特殊线路区段可适当提高要求,避免车轮不足修和过度修。

2) 根据高速铁路钢轨打磨管理办法,统一将钢轨打磨为标准 CHN60N 型轨廓形,避免出现局部钢轨廓形突变。

参考文献

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学研究的新进展[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 1.
ZHAI Wanming. New advance in vehicle-track coupling dynamics [J]. China Railway Science, 2002, 23(2): 1.
- [2] 张曙光. 高速列车设计方法研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.
ZHANG Shuguang. Research on design method of high-speed train [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.
- [3] 张淑敏, 周文祥, 张明远. 基于 L-M 算法的五连杆车轮外形测量仪参数标定[J]. 工具技术, 2016, 50(7): 103.
ZHANG Shumin, ZHOU Wenxiang, ZHANG Mingyuan. Parameter calibration of five-bar wheel profile measuring instrument based on L-M algorithm[J]. Tool Engineering, 2016, 50(7): 103.
- [4] 王晨, 罗世辉, 郭平波, 等. 动车组踏面凹型磨耗对动力学影响研究[EB/OL]. (2019-01-08) [2019-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20190425.1537.004.html>.
WANG Chen, LUO Shihui, WU Pingbo, et al. Research on Influence of EMU tread concave wear on dynamics[EB/OL]. (2019-01-08) [2019-07-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20190425.1537.004.html>.
- [5] 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 of the People's Republic of China, 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.
- [6] WU X, CHI M, GAO H. Damage tolerances of a railway axle in the presence of wheel polygonalizations[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 44.

· 收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10

Received:2023-11-12 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10

· 通信作者:徐力,高级工程师,122418823@qq.com

· ©《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