

# 动车组车轮踏面凹形磨耗发展规律及其对车辆稳定性的影响

杨 陈 贾小平 李龙涛 许 旭 苏文静

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京//第一作者, 工程师)

**摘 要** 分析了某型动车组运行过程中发生的异常抖车现象。掌握了镟修周期内车轮型面磨耗特征和轮轨接触关系的演变规律。提出了车轮等效斜度与踏面凹形磨耗之间的估算关系式。通过建立刚柔耦合车辆动力学模型研究了车轮踏面凹形磨耗发展对车辆稳定性的影响。结果表明,随着列车车轮踏面凹形磨耗的增加,使得车轮与钢轨接触的范围变窄,容易发生接触点跳跃现象;同时,车轮踏面等效斜度也会增大,车辆的临界速度会显著下降,使列车运行的稳定性降低。因此,当线路存在较大的激扰时,较大等效斜度工况下的车辆就可能发生车体的异常振动。通过对车轮踏面进行镟修来改善轮轨匹配关系,可解决动车组异常振动的问题。

**关键词** 动车组; 车轮踏面凹形磨耗; 车辆稳定性

**中图分类号** U270.1<sup>+</sup>1; U213.4<sup>+</sup>2

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.12.050

## Development Law of EMU Wheel Tread Concave Wear and Its Influence on Vehicle Stability

YANG Chen, JIA Xiaoping, LI Longtao, XU Xu, SU Wenjing

**Abstract** The phenomenon of abnormal carbody jitter during operation of a type of EMU is analyzed. The evolution law of wheel tread wear characteristics and wheel/rail contact relationship in reprofiling cycle is grasped. The evaluation relation of wheel equivalent taper and tread concave wear is proposed. The influence of wheel tread concave wear development on vehicle stability is studied by establishing a rigid-flexible coupling vehicle dynamics model. Results show that with the increase of train wheel tread concave wear, the contact range between wheel and rail becomes narrower, and the contact point jump phenomenon is easily occurring. Meanwhile, the wheel tread equivalent taper also increases, and the critical speed of vehicle will decrease significantly, lowering train operation stability. Therefore, when there is a relatively large excitation on the line, the abnormal vibration of the carbody may occur in the

condition of a large equivalent taper. The wheel-rail matching relationship can be improved through wheel tread reprofiling, which solves the problem of abnormal vibration of EMU.

**Key words** EMU; wheel tread concave wear; vehicle stability

**Author's address** CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China

## 0 引言

根据调查发现,我国新建高速铁路上运营的动车组车轮主要以踏面凹形磨耗为主。车轮踏面凹形磨耗的产生和发展会逐步恶化轮轨接触关系,进而影响转向架和车辆的振动特性。文献[1-3]研究了动车组车轮踏面凹形磨耗对高速动车组轮轨相互作用的影响,结果表明:踏面凹形磨耗会增加轮轨间高频垂向振动,使轮轨横向力的幅值显著增加。文献[4]对比研究了不同线路、相同平台动车组车轮磨耗的演变规律,以及踏面凹形磨耗对动车组动力学性能的影响。文献[5]通过对武广线上运行的某高速动车组开展跟踪测试,发现随着车轮踏面凹形磨耗发展,会使转向架和轮对的横向振动加速度快速增大,车辆的稳定性和平稳性有所降低,并认为车轮凹形磨耗是引发转向架横向报警的直接原因。文献[6]系统地总结了我国高速铁路车轮断面横向磨耗情况,并提出了7个方面的措施来抑制车轮踏面的凹形磨耗。随着车轮踏面凹形磨耗的发展往往还会引发车辆的异常振动;随着车辆运营里程的增加,发现部分列车在经过特定区段时会出现抖车现象<sup>[7]</sup>。在问题列车的车轮型面测量中均发现车轮踏面出现凹形磨耗的情况,如图1所示。镟轮后异常抖车现象消失。为了研究车辆异常抖车与车轮踏面凹形磨耗的关系,本文首先对某高速动车组运行过程中所采集的试验数据进行分析,然后对镟修周期内该型动车组车轮踏面廓形进行长

期跟踪测量,以掌握车轮踏面的磨耗特征和轮轨接触关系的演变规律。通过建立刚柔耦合车辆动力学模型来研究车轮踏面凹形磨耗发展对车辆稳定性的影响。

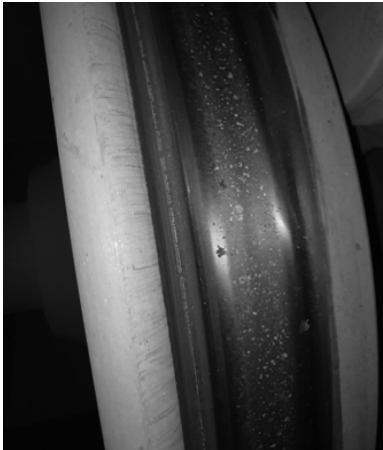
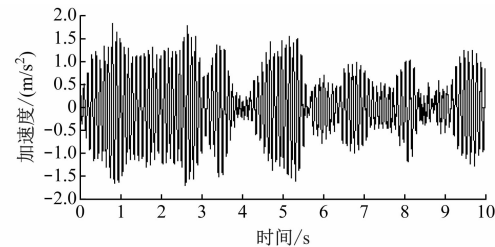
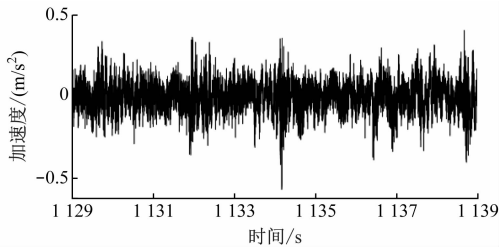


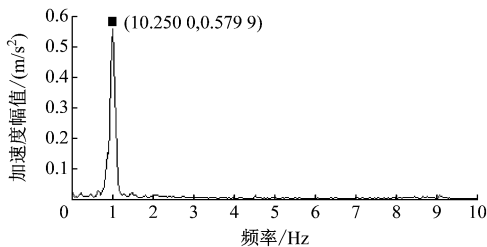
图 1 车轮凹形磨耗  
Fig. 1 Wheel concave wear



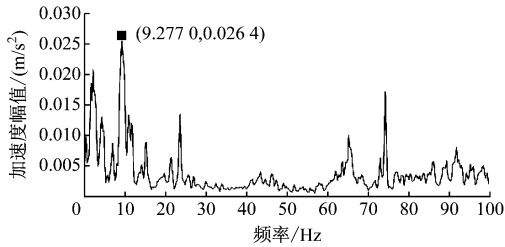
a) 抖车段振动加速度时域曲线



c) 非抖车段振动加速度时域曲线



b) 抖车段振动加速度幅值频域曲线



d) 非抖车段振动加速度幅值频域曲线

图 2 车体地板面横向振动加速度实测数据

Fig. 2 Field-measured data of lateral vibration acceleration of carbody floor

## 2 车轮踏面特征分析

为验证引起列车运营中车体异常抖动的原因,对发生抖车的列车进行长期车轮型面跟踪测量。使用 RIFTEK 激光轮廓测量仪设备对车轮踏面进行扫描,按照车辆运行 5 万 km 为 1 个节点,测试一次车轮型面数据。跟踪周期为 1 个镟修周期。对所测车轮的型面进行分析,建立轮对磨耗数据库,得到每次测量时轮对的踏面等效斜度、踏面凹形磨耗及

## 1 抖车试验分析

该型动车组车轮的常规镟修周期为 30 万 km,但在实际运营中发现,部分列车在运营 17 万 km 时,经过固定区段时会出现车辆异常振动现象。通过添乘试验的反馈,判断该车辆的异常振动为车体抖动(即抖车),每次持续约 2~3 s。图 2 为抖车段和非抖车段的车体地板面横向振动加速度时域和频域数据。分析可知,发生抖车时,车体横向振动加速度时域信号会迅速增加并呈现明显的谐波特性,振动能量主要集中在 10 Hz 左右,相较于非抖车段的主频幅值增大了 20 倍。利用试验数据对车体和构架进行工作变形分析(ODS),发现车辆经过抖振段时,车体振动幅度加强,抖振主频可辨,呈现车体随构架蛇行运动而抖动现象。因此,推测引起车体异常抖动的原因是车轮踏面凹形磨耗导致车辆稳定性下降。

轮轨匹配关系图等。对上述变量在同一列车中的变化趋势进行研究,统计等效斜度及车轮磨耗随车辆运营的发展规律和内在联系。

图 3 为不同运营里程下标准 LM 型(磨耗型)车轮踏面廓形分布图。图 4 为不同运营里程下标准 LM 型车轮与 60 N 钢轨匹配的轮轨接触关系。由图 4 可知,不同运营里程下车轮均出现不同程度的凹形磨耗,车轮初始外形下轮轨接触状态良好,接触线连续均布;运行 5 万 km 后,接触线开始集中,

接触范围变窄,且接触点位置出现跳跃;随着运行里程的增加,轮轨接触点由轨头踏面中心逐步偏向轨距角,接触范围进一步变窄,同时存在较大跳跃。因此在车辆实际运行中,较大程度凹形磨耗的车轮在一定横移量激励下会使轮轨接触位置突变,进而引发车体的异常振动。

图5为不同运营里程下车轮等效斜度的分布图,图6为不同运营里程下踏面凹形磨耗量与等效斜度的关系散点图。经分析可知,镟轮后5万km

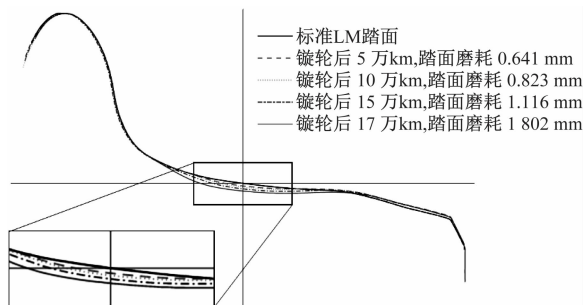


图3 标准LM型车轮踏面廓形演变

Fig. 3 Evolution of tread profile of standard LM-model wheel

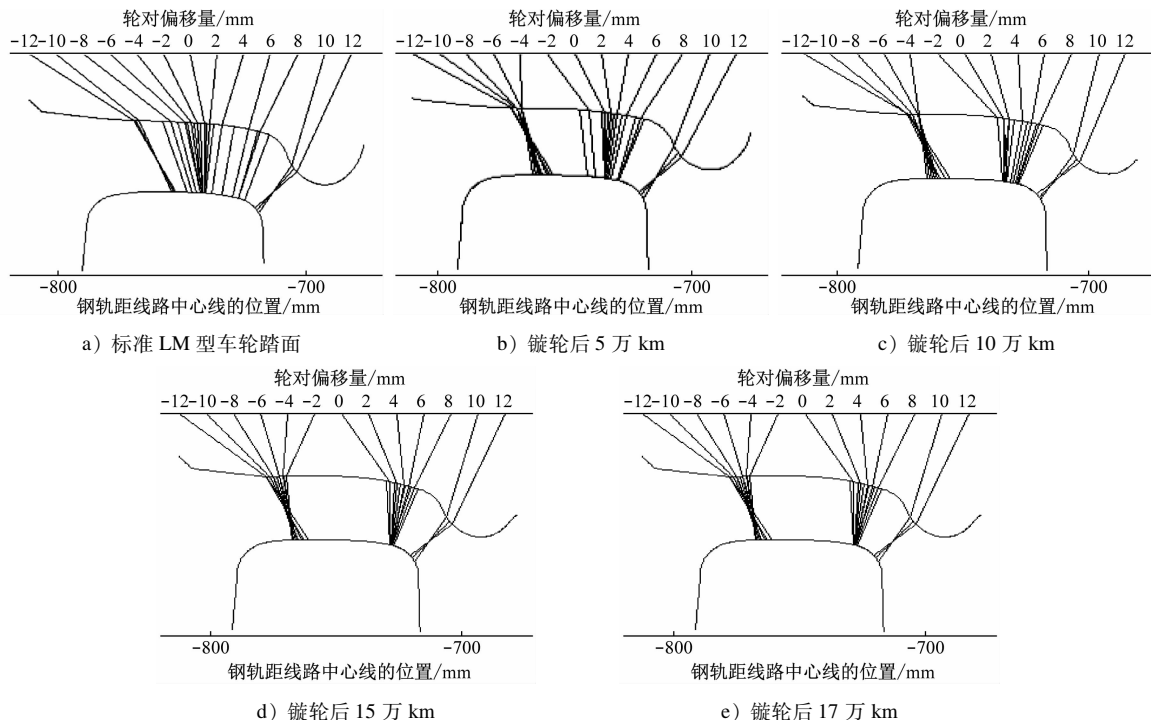


图4 不同运营里程下轮轨接触关系演变

Fig. 4 Evolution of wheel-rail contact relationship under different operation mileages

的车轮等效斜度主要分布在0.4~0.6,且此时踏面凹形磨耗量对等效斜度影响不明显;镟轮后10万km的车轮等效斜度主要分布在0.50~0.66,等效斜度开始呈现随着踏面凹形磨耗量的增大而增大的趋势;镟轮后15万km的车轮等效斜度主要分布在0.60~0.73,等效斜度呈现随着踏面凹形磨耗量的增大而增大的趋势;镟轮后17万km的车轮等效斜度主要分布在0.65~0.80,等效斜度呈现随着踏面凹形磨耗量的增大而增大的趋势明显。

将上述数据作均值处理并汇总至图7,进而推导出等效斜度与车轮踏面凹形磨耗量之间的估算式为:

$$Y = 0.3197X + 0.1201 \quad (1)$$

式中:

Y——轮对等效斜度;

X——轮对踏面凹形磨耗量, mm。

式(1)可为车轮等效斜度与踏面凹形磨耗量的估计提供理论参考。

### 3 凹形磨耗发展对车辆稳定性的影响

为了得到车轮踏面凹形磨耗发展对该型动车组车辆稳定性<sup>[8]</sup>的影响规律,依据动力学参数建立了考虑车体和构架弹性的刚柔耦合车辆动力学模型<sup>[9]</sup>,如图8所示。该模型包括1个车体,2个构架,4个轮对,8个轴箱以及一系、二系悬挂元件。车辆系统考虑了车体、构架和轮对的纵向、横向、垂

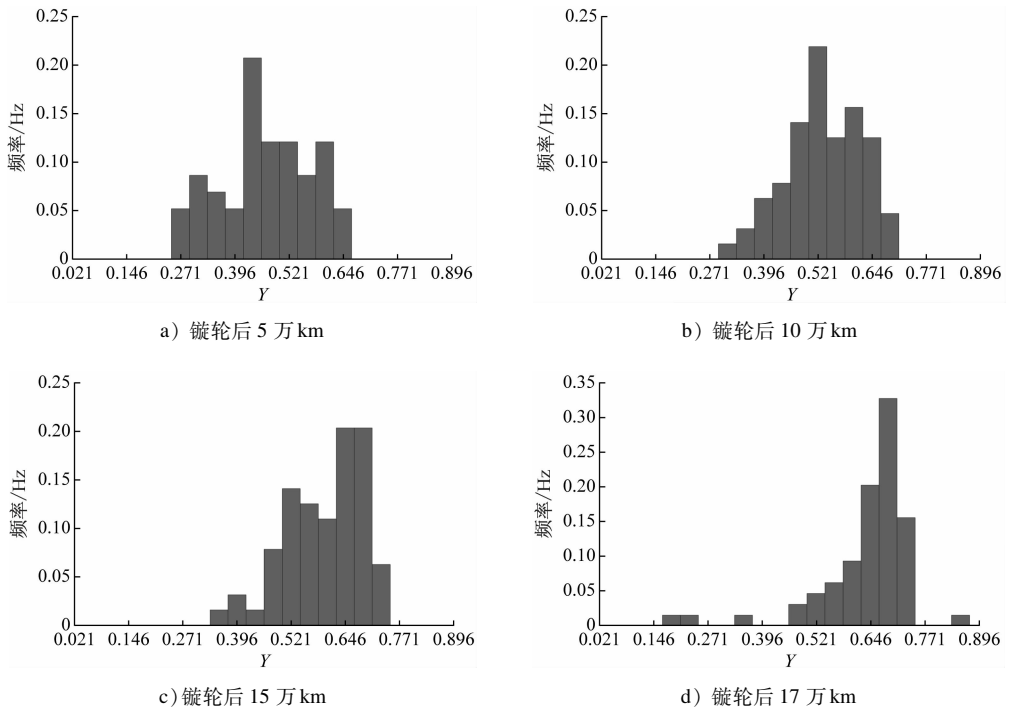


图5 不同运行里程下车轮等效斜度分布图 (LM 型车轮与 60 N 钢轨)

Fig.5 Distribution diagram of wheel equivalent taper under different operation mileages (LM model wheels and 60 N model rail)

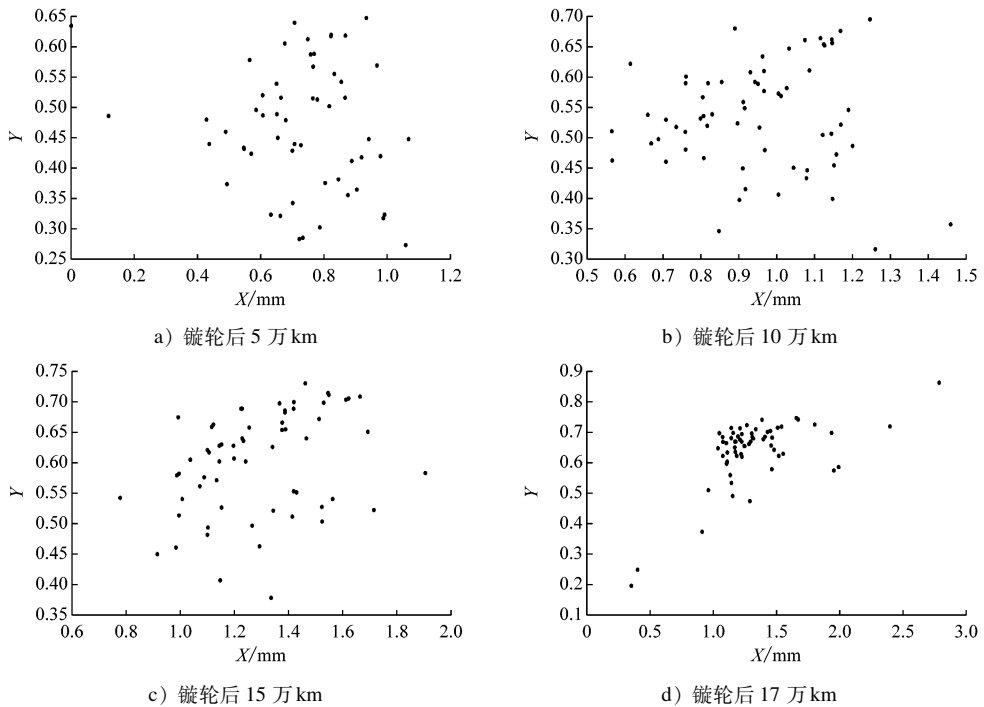


图6 不同运行里程下踏面凹形磨耗量与等效斜度关系散点图

Fig.6 Scatter plot of the relationship between tread concave wear and equivalent taper of different operation mileages

向、侧滚、点头和摇头等 6 个方向的自由度,以及轴箱的点头自由度,共计 50 个自由度<sup>[10-11]</sup>。仿真计算中采用线路实测轨道不平顺激励。

基于车轮踏面实测数据开展车辆稳定性仿真计算<sup>[12-13]</sup>,不同磨耗阶段的凹形磨耗踏面对车辆稳定性的仿真影响结果如表 1 所示。车辆的蛇行临界

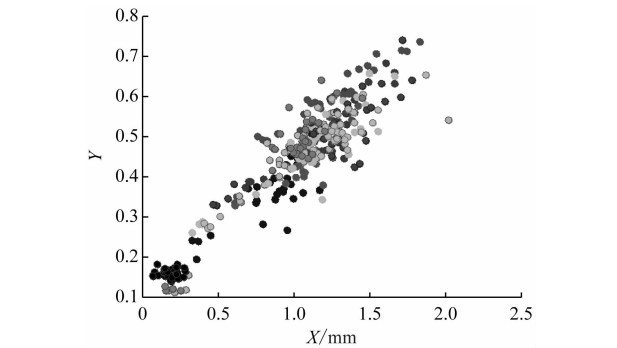


图 7 踏面凹形磨耗量与车轮踏面等效斜度的关系分析  
Fig.7 Analysis of the relationship between tread concave wear and wheel tread equivalent taper

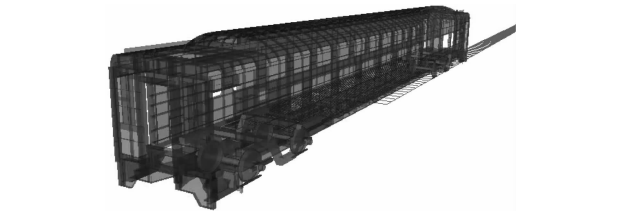


图 8 动车组单节车辆动力学模型  
Fig.8 Dynamics model of single-segment vehicle of EMU

速度(以下简称为“临界速度”)与镟轮后运行里程的关系如图 9 所示。构架横向振动加速度最大值与镟轮后运行里程的关系如图 10 所示。由分析结果可知,该型动车组车辆的临界速度随车轮踏面凹形磨耗的增加呈现下降趋势,镟轮后 17 万 km 踏面工况下临界速度最小,其值为 194 km/h,相较于初始踏面工况的临界速度下降了 40%;该型动车组车辆的构架横向振动加速度最大值随车轮踏面凹形磨耗的增加呈现上升趋势,镟后 17 万 km 踏面工况下构架横向振动加速度最大值为 5.26 m/s<sup>2</sup>,相较于

表 1 不同磨耗阶段的凹形磨耗踏面对车辆稳定性仿真结果  
Tab.1 Simulation results of concave wear tread affecting vehicle stability at different stages of wear

磨耗阶段(镟轮后运营里程)	稳定性指标			
	临界速度/(km/h)	构架横向振动加速度最大值/(m/s <sup>2</sup> )		
		一位	二位	平均
镟轮后 0 万 km	322	3.62	3.82	3.72
镟轮后 5 万 km	328	3.74	3.85	3.8
镟轮后 10 万 km	272	4.13	3.88	4.01
镟轮后 15 万 km	227	4.43	4.47	4.45
镟轮后 17 万 km	194	5.07	5.26	5.17

注:一位、二位分别是指一节车的前、后转向架的构架。

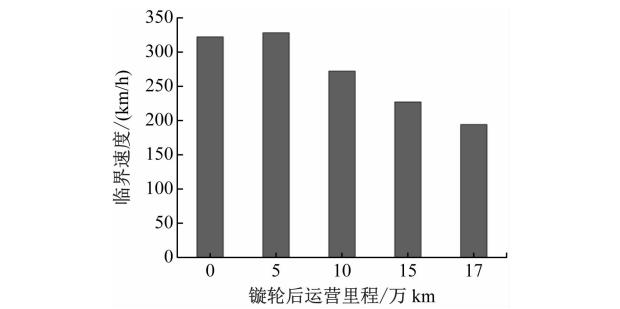


图 9 车辆的临界速度与镟轮后运行里程的关系  
Fig.9 Relationship of vehicle critical speed and operation mileage after reprofiling

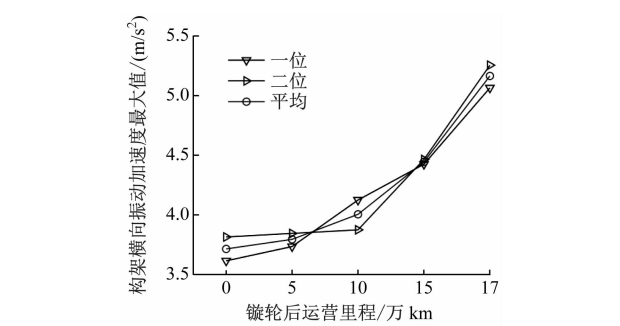


图 10 构架横向振动加速度最大值与镟轮后运行里程的关系  
Fig.10 Relationship of frame maximum lateral vibration acceleration and operation mileage after reprofiling

初始踏面工况的构架横向振动加速度增大了 37%。因此,车辆稳定性会随车轮踏面凹形磨耗的发展而显著下降,进而使具有较大车轮凹形磨耗工况的车辆在一定线路激励作用下发生车体的异常抖动。

## 4 结语

本文分析了某型动车组运行中发生的异常抖车现象。跟踪了镟修周期内车轮踏面特征的演变。建立刚-柔耦合车辆动力学模型来研究车轮踏面凹形磨耗量发展对车辆稳定性的影响规律。其研究结果表明,随着列车车轮踏面凹形磨耗量的增加,轮轨接触范围变窄,易发生接触点跳跃现象,且车轮等效斜度会增大,车辆的临界速度会显著下降,从而使列车运行的稳定性降低。因此,当车轮踏面凹形磨耗发展到一定程度时,一旦线路存在较大的激扰,会使转向架产生蛇行运动,引发动车组抖车现象。通过对车轮踏面进行镟修,恢复到初始廓形,可以大幅度降低等效斜度,改善轮轨匹配关系,以最终解决动车组的车体异常振动问题。

## 参考文献

- [1] 孙宇,朱胜阳,翟婉明. 车轮踏面凹形磨耗对轮轨相互作用的影响研究[J]. 机械工程学报,2018(4):109.  
SUN Yu,ZHU Shengyang,ZHAI Wanning. Influence of tread hollow-worn wheel on wheel/rail interaction[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(4):109.
- [2] 陆文教,陶功权,王鹏,等. 地铁车轮磨耗对轮轨接触特性及动力学性能的影响[J]. 工程力学,2017(8):222.  
LU Wenjiao,TAO Gongquan,WANG Peng, et al. Influence of wheel wear on wheel-rail contact behavior and dynamic performance of metro vehicle [J]. Engineering Mechanics, 2017(8):222.
- [3] SAWLEY K, WU H. The formation of hollow-worn wheels and their effect on wheel/rail interaction[J]. Wear, 2005, 258(7-8):1179.
- [4] 侯茂锐,陈秉智,成棣,等. 两种典型动车组车轮磨耗演变规律及其动力学影响研究[J]. 机械工程学报,2022(4):191.  
HOU Maorui,CHEN Bingzhi,CHENG Di,et al. Two typical wheel wear evolution characteristics and its influence on dynamic performance of high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering,2022(4):191.
- [5] 殷俊,雷鹏程,崔浩蕾,等. 车轮踏面凹形磨耗对动车组车辆运行性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2020(2):297.  
YIN Jun,LEI Pengcheng,CUI HaoLei, et al. Influence of hollow-worn wheels tread on running performance of EMU[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2020(2):297.
- [6] 金学松,赵国堂,梁树林,等. 高速铁路轮轨磨损特征、机理、影响和对策——车轮踏面横向磨耗[J]. 机械工程学报,2018(4):3.  
JIN Xuesong,ZHAO Guotang,LIANG Shulin, et al. Characteristics, mechanisms, influences and counter measures of high speed wheel/rail wear: transverse wear of wheel tread[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(4):3.
- [7] 宫岛,刘广宇,周劲松,等. 动车组车体异常振动问题分析及治理研究[J]. 机械工程学报,2021(10):95.  
GONG Dao,LIU Guangyu,ZHOU Jinsong,et al. Research on abnormal vibration issue of car bodies of EMU trains and its treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021(10):95.
- [8] 李龙. 高速车辆运动稳定性的研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.  
LI Long. Research on the motion stability of high-speed vehicles [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2011.
- [9] 周劲松. 铁道车辆振动与控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.  
ZHOU Jinsong. Railway vehicle vibration and control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- [10] 宫岛,周劲松,孙文静,等. 高速列车弹性车体与转向架耦合振动分析[J]. 交通运输工程学报,2011(4):41.  
GONG Dao,ZHOU Jinsong,SUN Wenjing, et al. Coupled vibration analysis of flexible car body and bogie for high-speed train [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011(4):41.
- [11] 宫岛,周劲松,孙文静,等. 铁道车辆弹性车体垂向运行平稳性最优控制[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011(3):416.  
GONG Dao,ZHOU Jinsong,SUN Wenjing, et al. Vertical ride quality of flexible car body railway vehicles with optimal control [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011(3):416.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 高速动车组整车试验规范[S/OL]. (2021-08-17)[2022-04-12]. <https://wenku.baidu.com/view/cafb46b383567ec102de2bd960590c69ec3d8b9.html>.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Testing of high-speed Electric Multiple Unit on completion of construction [S/OL]. (2021-08-17)[2022-04-12]. <https://wenku.baidu.com/view/cafb46b383567ec102de2bd960590c69ec3d8b9.html>.
- [13] 国家市场监督管理总局,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 of Market Regulation, National Standardization Administration. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019 [S]. Beijing: China Standards Press, 2019.

(收稿日期:2022-06-29)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com