

车轮踏面常规磨耗对高速列车动力学性能的影响

郭涛¹, 王宁², 刘永强³

(1. 中车唐山轨道车辆有限公司, 河北 唐山 063035; 2. 中国铁路北京局集团公司 石家庄车辆段, 河北 石家庄 050000;
3. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:利用线路跟踪试验采得的车轮常规磨耗数据,通过动力学仿真分析了高速列车在不同磨耗阶段时的横向稳定性、运行平稳性和曲线通过性能。以国内某型高速列车为研究对象,利用多体动力学软件 VI-rail 建立了高速列车动力学模型,并验证了模型的有效性。根据线路跟踪实测数据,获得了车轮镟修后4种不同磨耗阶段下的踏面形状数据。研究不同磨耗程度下车辆运行速度对模型动力学性能的影响,分析车轮动力学性能参数随速度及磨耗量的变化规律。仿真结果发现,车轮踏面磨耗对临界速度、脱轨系数、轮轨横向力及横向平稳性的影响较大,而对轮重减载率、垂向平稳性指标影响较小。研究结果对高速列车踏面外形的优化及踏面检修具有一定的指导意义。

关键词:高速列车;车轮磨耗;动力学性能;VI-rail

中图分类号:U271.91 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2020)04-0044-06

随着我国高速列车运营里程的不断增长和运行速度的逐渐提高,车辆系统所受轨道激励频率增大,轮轨间作用日渐剧烈,结构振动强度不断提高,车轮与钢轨不断磨损,轮轨之间的匹配关系发生变化。车轮磨耗存在于列车运行的各个阶段。即使是车轮踏面的正常磨耗也会改变轮轨接触关系,导致车辆的稳定性、平稳性和安全性受到极大的挑战,会使列车在实际运行中产生大量的动力学问题,如蛇行失稳、车体异常晃动、转向架异常振动等^[1-2]。目前解决此类问题的有效办法是镟修车轮,但是这样会带来维修成本的提高,制约其发展。

针对踏面磨耗,国外学者开展了系列研究。Ignesti et al^[3]提出了一种铁道车辆车轮轮廓优化磨损模型,用于改善标准 S1002 车轮轮廓的磨损和稳定性;Kevin et al^[4]研究了踏面下凹磨损的影响;Markov^[5]采用试验方法研究了钢轨和轮钢的磨损与硬度之间的关系;Shebani et al^[6]采用人工神经网络的方法来预测不同接触条件下轮轨的磨损;Yoshioka et al^[7]通过将磨损计算程序结合到 SIMPACK 中来构建初始磨损轮廓预测模型;Telliskivi et al^[8]分析了低半径曲线中轮轨接触的变化,模拟轮轨接触的变化形状。国外很多学者将研究重心放在了磨耗机理及磨耗预测上,研究踏面磨耗对动力学性能影响的较少,另外研究主要针对重载货车,研究结果并不适用于高速列车。

国内学者针对踏面磨耗的影响因素进行了研究。刘新元^[9]分析了行车速度、曲线半径等因素对轮轨磨耗的影响规律;黄彩虹等^[10]研究了钢轨型面、车轮型面、运行速度、轨道不平顺、线路条件、转向架结构和悬挂参数对高速列车车轮踏面磨耗规律的影响;孙效杰等^[11]从统计学角度研究了踏面磨耗规律,分析了踏面磨耗对轮轨接触几何关系和等效锥度的影响。还有一些学者针对踏面磨耗对动力学性能的影响进行了分析。黄照伟^[12]通过对高速列车长期跟踪实验,分析了车轮踏面偏磨、凹磨及车轮非圆化的原因及影响;王朝涛^[13]分析了踏面磨耗对某型高速列车动力学性能的影响。我国学者对轮轨关系及踏面磨耗的机理做了大量的研究,但是关于车轮磨耗对车轮动力学性能影响的研究较少。

本文在线路实测踏面磨耗数据的基础上,通过车辆动力学模型的建立、仿真和分析,研究踏面磨耗量对车辆

收稿日期:2020-02-06 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20200014

基金项目:国家自然科学基金(11790282)

作者简介:郭涛(1983—),男,高级工程师,研究方向为轮轨关系与车辆振动控制。E-mail: sjc-guotao@tangche.com

郭涛,王宁,刘永强. 车轮踏面常规磨耗对高速列车动力学性能的影响[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(4):44-49.

运动稳定性、运行平稳性和曲线通过性的影响,以期对车轮踏面磨耗状态下的车辆动力学性能进行综合评价。

1 列车跟踪试验数据分析

在武广线上对国内某型高速列车的车轮磨耗情况开展跟踪试验,实际测量了该车的某一固定位置轮对的磨耗量变化情况。测得该列车在镟修后的 4 个不同运行里程下车轮 LMA 踏面外形数据:(1)镟后运行 0 km;(2)镟后运行 79 039 km;(3)镟后运行 114 606 km;(4)镟后运行 157 690 km。

从图 1(a)和图 1(b)中 2 个踏面的外形变化中可以看出,踏面磨耗主要集中在滚动圆中心左右两侧,并且随着运营里程增加,踏面磨耗量增大,导致磨耗不断向两侧延伸,磨耗越来越深,磨耗面积由小变大。最终会导致磨耗后的踏面外形与原型踏面轮廓产生较大的变化,势必会影响轮轨接触几何关系。

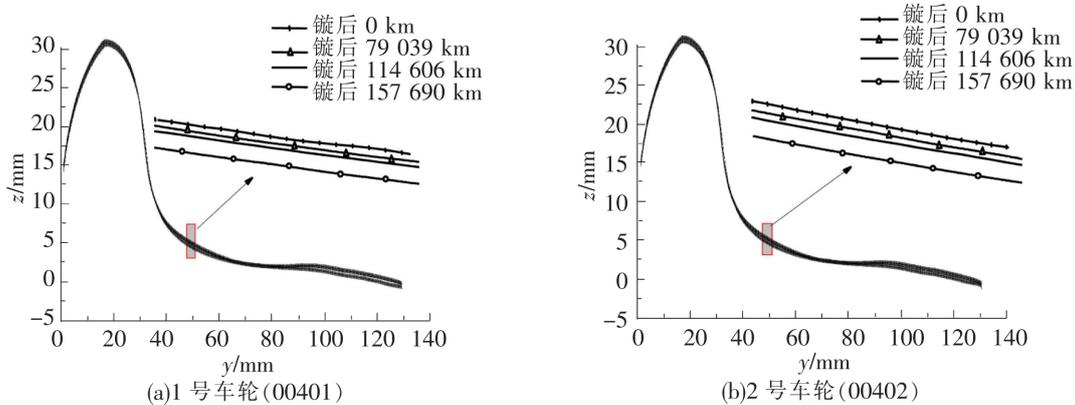


图 1 轮对车轮踏面磨耗外形对比图

2 高速列车模型的建立

2.1 模型简化假设与动力学参数

以国内某型 300 km/h 高速列车为研究对象,建立高速列车动力学模型,其模型结构如图 2 所示。为了方便后续建模和仿真,对模型进行必要的简化,包括将二系空气弹簧简化为 3 个笛卡尔坐标方向上的线性刚度系数,忽略车下设备的分布位置对车体惯性的影响,将一系悬挂和二系悬挂部分元件的力学特性进行线性化处理等。

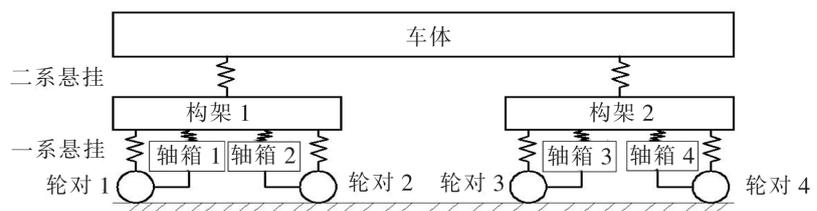


图 2 高速列车动力学模型结构

模型主要惯性参数和动力学参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 模型主要惯性参数

车体				构架			
质量/t	侧滚转动 惯量/(t·m ²)	点头转动 惯量/(t·m ²)	摇头转动 惯量/(t·m ²)	质量/t	侧滚转动 惯量/(t·m ²)	点头转动 惯量/(t·m ²)	摇头转动 惯量/(t·m ²)
34.934	112.1	1 695.4	1 599.9	3.120	2.527	1.709	3.120
轮对				轴箱转臂			
质量/t	侧滚转动 惯量/(t·m ²)	点头转动 惯量/(t·m ²)	摇头转动 惯量/(t·m ²)	质量/t	侧滚转动 惯量/(t·m ²)	点头转动 惯量/(t·m ²)	摇头转动 惯量/(t·m ²)
1.751 8	0.631	0.070	0.631	0.048 2	0.000 71	0.002 76	0.002 62

表 2 模型悬挂系统主要参数

一系悬挂(每轴箱)						
纵向刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	横向刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	垂向刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	垂向减振器接头 刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	减振器垂向 阻尼/($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)		
980	980	1 176	4 900	19.6		
二系悬挂						
空簧纵向刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	空簧横向刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	空簧垂向刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	横向阻尼/ ($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	横向减振器节点 刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	牵引拉杆纵向 刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	抗蛇行减振器节点 刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
167.4	167.4	278.2	58.8	17 150	7 882	8 820

2.2 车辆模型的建立

采用车辆动力学仿真软件 VI-rail 建立该高速列车模型,选择拖车车辆空载状态进行建模,该模型包括车体、构架、轮对、轴箱等部件,共包括 50 个自由度。建立的模型如图 3 所示。初始的车轮踏面采用 LMA 型,钢轨型面采用 CHN60 型。抗蛇行减振器非线性阻尼特性如图 4 所示。

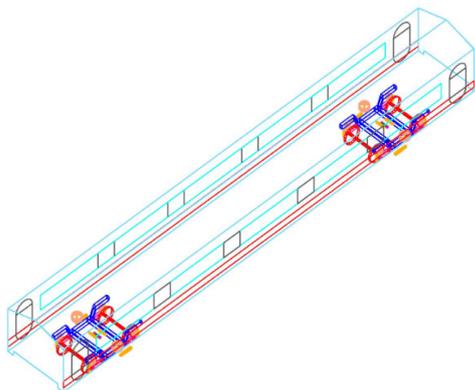


图 3 高速列车动力学模型

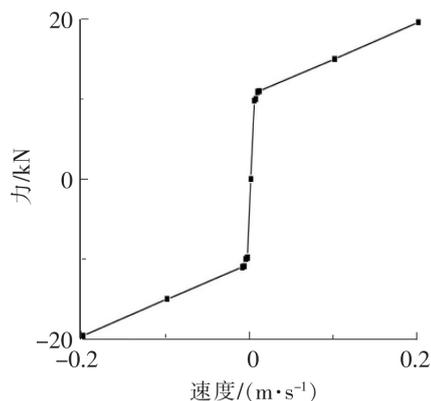


图 4 抗蛇行减振器阻尼特性

2.3 轨道激励

采用德国低干扰和高干扰轨道谱作为轨道激励,这 2 种轨道谱分别适用于时速高于 300 km 和 250~300 km 的高速列车仿真,其轨道不平顺数值模拟时域曲线如图 5 所示。

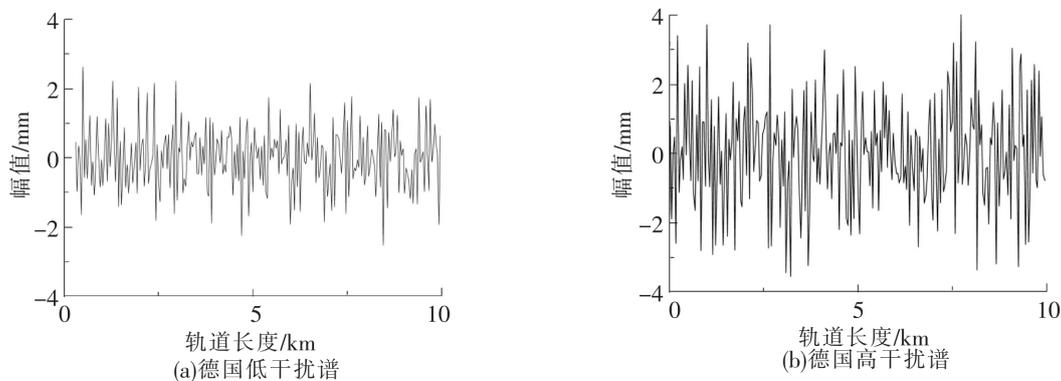


图 5 高速轨道不平顺曲线

2.4 模型有效性检验

在一条光滑的直线轨道上设置一个振幅为 15 mm 的冲击激励,让列车以不同的速度行驶,测量轮对质心的横向移动量随时间的变化曲线,可以测得该模型的线性临界速度。仿真结果如图 6 所示。

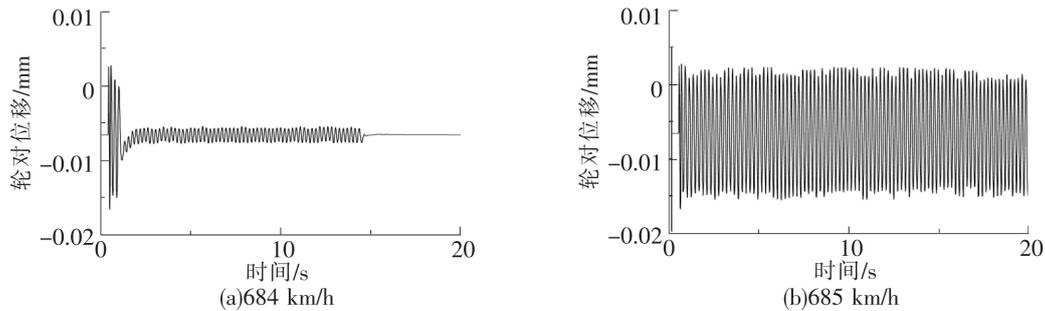


图 6 车辆模型蛇行运动曲线

从图 6 所示的仿真结果可以发现, 所建车辆模型的线性失稳临界速度为 684 km/h, 对于运营速度为 300 km/h 的高速列车而言, 该结果比较符合实际情况。

3 车轮磨耗对动力学性能的影响

3.1 车轮磨耗对车辆运动稳定性的影响

依据临界速度的计算方法, 计算出 2 个车轮踏面不同运营里程下踏面车辆的临界速度, 如表 3 所示。绘制了临界速度随踏面磨耗量的变化趋势, 如图 7 所示。

表 3 临界速度测量表

踏面磨耗量/mm	临界速度/(km·h ⁻¹)	
	1 号轮(00401)	2 号轮(00402)
0	515	525
0.199 1	490	500
0.302 9	479	482
0.462 9	432	456

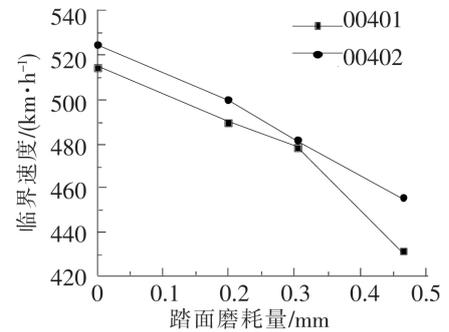


图 7 临界速度趋势图

由表 3 和图 7 可以看出, 在踏面磨耗初期, 车辆临界速度下降比较缓慢; 在踏面磨耗中期, 临界速度下降也相对缓慢; 而随着运行里程的增加, 踏面磨耗达到一定程度后, 车辆的临界速度继续下降。总体来看, 随着踏面磨耗量的增加, 车辆的临界速度呈现出不断下降的趋势。因此, 踏面磨耗对车辆临界速度影响较大。

3.2 车轮磨耗对车辆运行平稳性的影响

平稳性评价指标选择 Sperling 指标。仿真过程选取 4 种磨耗工况, 分别以 200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h 4 种不同速度通过直线线路, 线路长度 10 km, 仿真计算时间 10 s, 仿真步数 5 120, 轨道激励选择德国低干扰谱。分别绘制横向和垂向 Sperling 指标随踏面磨耗量的变化趋势, 如图 8 所示。

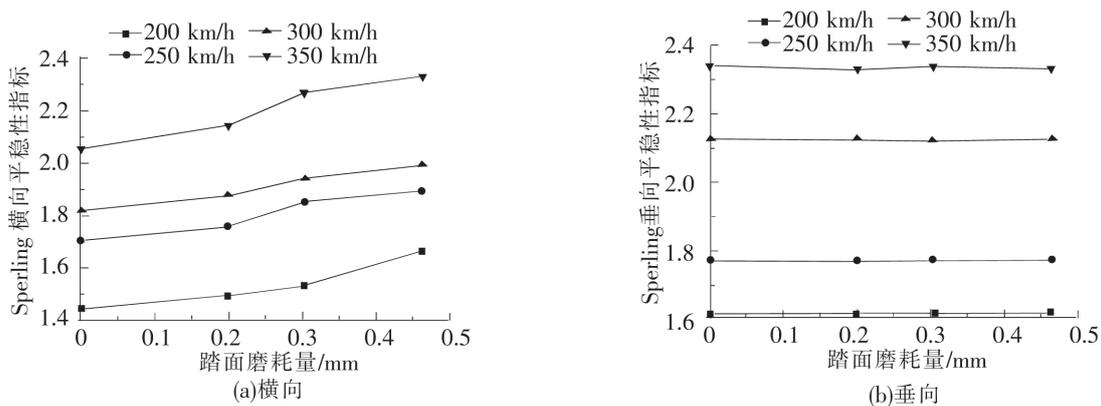


图 8 车轮磨耗对车轮平稳性能的影响

由图 8(a)可以看出,踏面磨耗量对横向平稳性影响较大。同一速度下,随着踏面磨耗量的增加,横向平稳性指标逐渐增大。以 200 km/h 为例,当踏面磨耗量为 0 mm 增加到 0.462 9 mm 时,横向平稳性指标增加了 15%,会导致车体横向平稳性降低。同时也可以看出,横向平稳性指标随着车辆运行速度的增大而增大,以踏面磨耗量 0.199 1 mm 为例,当车辆速度从 200 km/h 增加到 350 km/h 时,横向平稳性指标增加了 43%。

由图 8(b)可以看出,车辆在同一速度不同磨耗量的状况下,垂向平稳性指标基本保持不变,但同一磨耗量下,随着运行速度增大,垂向平稳性也在增大。例如,踏面磨耗量为 0.199 1 mm 时,车辆垂向平稳性指标由 200 km/h 时的 1.611 2 增长到 350 km/h 的 2.324 7,增长了 44%。因此,踏面磨耗量对垂向平稳性影响不大,但车辆运行速度的增加会导致垂向平稳性能劣化。

3.3 车轮磨耗对车辆曲线通过性能的影响

选择曲线半径为 12 km 的曲线线路,仿真计算时间为 20 s,轨道不平顺选用德国高干扰轨道谱。通过仿真分析不同磨耗工况下的 4 种踏面外形车辆分别以 260 km/h、270 km/h、280 km/h、290 km/h、300 km/h 5 种不同速度通过上述曲线线路,得到脱轨系数的数值大小。

从图 9(a)中可以看出,相同速度级下,脱轨系数随着踏面磨耗量的增加而逐渐增大,踏面磨耗量由 0 增加到 0.462 9 mm 时,脱轨系数平均增长了 20%左右;而在同一踏面磨耗量下,随着运行速度的增加,脱轨系数也呈现一个增长的趋势,相同磨耗量下车辆速度由 260 km/h 增加到 300 km/h 时,脱轨系数平均增长了 30%左右。在运行速度不变的情况下,脱轨系数大小与踏面磨耗量的大小成正相关,在相同踏面磨耗量下,脱轨系数随着运行速度的增加而增大。

从图 9(b)中可以发现,在同一运行速度下,随着踏面磨耗量的增加,轮重减载率变化不大,上下平均浮动在 4.3%;而在同一踏面磨耗量下,随着运行速度的增加,轮重减载率呈现出一种增长的趋势,相同磨耗量下车辆速度由 260 km/h 增长到 300 km/h 时,轮重减载率平均增长了 25%左右。由此可见,踏面磨耗对轮重减载率影响不大,但是速度对轮重减载率影响较大,随着速度的提高,轮重减载率在增大。

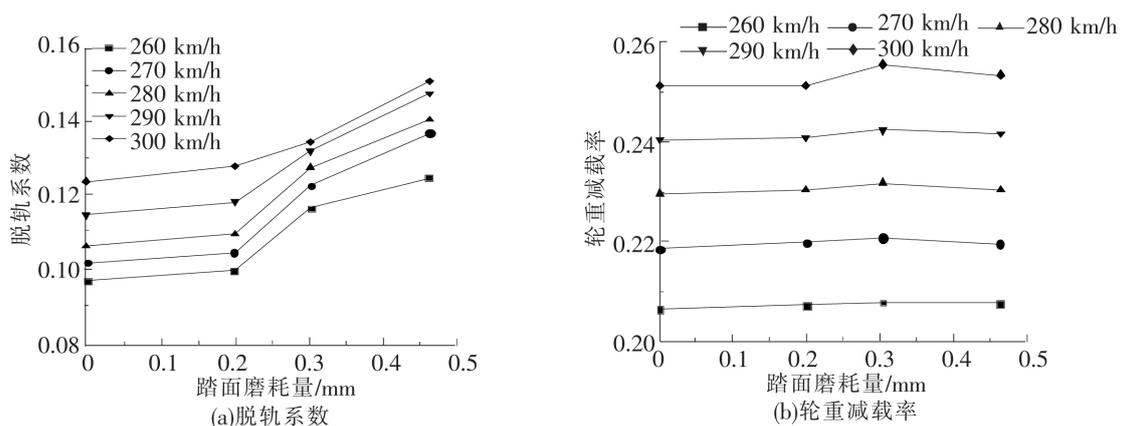


图 9 车轮磨耗对车辆曲线通过性能的影响

4 结论

通过利用列车的线路跟踪试验获得的实际车轮磨耗结果,开展高速列车的动力学仿真分析,研究车轮磨耗量对车辆动力学性能的影响。主要结论如下:

- (1) 踏面磨耗量对车轮运动稳定性的影响较大,且随着踏面磨耗量的增加,车辆的临界速度不断降低。
- (2) 车轮踏面磨耗量对车辆横向平稳性指标影响明显,对车辆垂向平稳性指标影响不大。随着车轮踏面磨耗量的增大,车辆横向平稳性不断恶化。
- (3) 车轮踏面磨耗量对脱轨系数有一定的影响,但对轮重减载率的影响较小。
- (4) 研究结果对高速列车车轮镟修标准的修订有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1]刘永强, 廖英英, 杨绍普, 等. 一种抗蛇行减振器控制系统在高速动车组中的仿真应用[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015, 28(2): 68-72.
- [2]赵义伟, 刘永强, 廖英英. 高速列车刚柔耦合动力学仿真分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2017, 30(3): 43-47.
- [3]Ignesti M, Innocenti A, Marini L, et al. Development of a wear model for the wheel profile optimization on railway vehicles[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(9): 1363-1402.
- [4]Kevin S, Curtis U, Russell W. The effect of hollow-worn wheels on vehicle stability[J]. *Wear*, 2005, 258(7): 1100-1108.
- [5]Markov D. Laboratory tests for wear of rail and wheel steels[J]. *Wear*, 1995, 183(2): 678-686.
- [6]Shebani A, Iwnicki S. Prediction of wheel and rail wear under different contact conditions using artificial neural networks [J]. *Wear*, 2018, 31(5): 173-184.
- [7]Yoshioka A, Terumichi Y, Tsujie M, et al. Study on modeling and numerical analysis for prediction of wheel wear development[J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2017, 4(4): 1-11.
- [8]Telliskivi T, Olofsson U. Wheel-rail wear simulation[J]. *Wear*, 2004, 257(11): 1145-1153.
- [9]刘新元. 基于 ADAMS-Rail 的高速铁路轮轨磨耗影响因素研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [10]黄彩虹, 罗仁, 曾京, 等. 系统参数对高速列车车轮踏面凹陷磨耗的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(3): 55-62.
- [11]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.
- [12]黄照伟. 车轮磨耗及其对车辆动力学性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [13]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]. 北京: 北京交通大学, 2014.

Influence of Wheel Wear on Dynamic Performance of High-speed Train

Guo Tao¹, Wang Ning², Liu Yongqiang³

(1. CRCC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, China;

2. Shijiazhuang Depot of China Railway Beijing Bureau Group Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, China;

3. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: With the help of wheel wear data of track test, the lateral stability, ride comfort and curve passing performance of high-speed train in different wear stages were analyzed by using dynamic simulation method. Taking a domestic high-speed train as the research object, a high-speed train dynamics model was built by using multi-body dynamics software VI-rail, and the validity of the model was verified. According to the measured data of track, the profile data of wheel tread in four different wearing stages were obtained. The influence of vehicle running speed on the dynamic performance of the model under different wear degree was studied, and the change rule of wheel dynamic performance parameters with speed and wear amount was analyzed. The simulation results show that the wheel tread wear has great influence on the critical speed, derailment coefficient, lateral force and lateral ride index, but has little influence on the wheel load reduction rate and vertical ride index. The research results have certain guiding significance for the optimization of high-speed train tread shape and tread maintenance.

Key words: high-speed train; wheel wear; dynamic performance; VI-rail