

基于实测踏面廓形的车辆振动特性研究

王玉玺, 王 川, 何浩远

中车成都机车车辆有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年1月29日; 录用日期: 2023年3月21日; 发布日期: 2023年3月29日

摘 要

为了研究不同踏面廓形对车辆动力学的影响, 跟踪测试了车轮在不同运行里程下的踏面廓形, 并对其等效锥度进行了分析。结合动力学仿真模型, 将实测踏面廓形导入仿真模型中进行计算。结果显示, 在一定范围的等效锥度变化对平稳性存在明显的影响, 但达到一定的限度值后, 踏面的接触位置靠近根部, 对平稳性指标的影响不大。此外, 一定范围内等效锥度的变化对轮轨力以及脱轨系数等安全性指标影响较小。

关键词

踏面廓形, 钢轨廓形, 车辆振动, 等效锥度

Research on Vehicle Vibration Characteristics Based on Measured Wheel Tread Profile

Yuxi Wang, Chuan Wang, Haoyuan He

CRCC Chengdu Co., LTD., Chengdu Sichuan

Received: Jan. 29th, 2023; accepted: Mar. 21st, 2023; published: Mar. 29th, 2023

Abstract

In order to study the influence of different wheel profile on vehicle dynamics, the wheel tread profiles were tested with different in vehicle running mileage, and the equivalent conicity of wheel was analyzed. Combined with the dynamic simulation model, the measured wheel profile is introduced into the simulation model for calculation. The results show that the change of the equivalent conicity has an obvious influence on the stability index in a certain range, the contact posi-

tion of the tread is close to the root of wheel, which has little effect on the stability index. In addition, the change of equivalent conicity has little effect on the safety indexes such as wheel-rail force and derailment coefficient.

Keywords

Wheel Tread Profile, Rail Profile, Vehicle Vibration, Equivalent Conicity

Copyright © 2023 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/>



Open Access

1. 引言

随着人们对出行需求的改变, 高速客车已成为日常的交通工具, 车辆运行速度的提升以及车辆运行频次的增加, 导致轮轨接触状态对车辆安全及舒适性的运行环境影响尤为重要。

由于轮轨间的相互作用十分复杂、接触面积小且轮轨作用点的接触应力较大, 加之轮轨接触导致的车辆系统不稳定和一系列不合适的磨耗问题对车辆运行品质的影响十分显著。因此, 轮轨间的相互作用需要满足一种最合理的匹配状态, 轮对磨耗增加、钢轨几何状态的变化以及钢轨的磨耗都会导致车辆出现晃车、抖车以及失稳等异常振动的问题, 从而引起乘坐舒适性变差, 轮轨关系恶化, 严重的时候还可能导致车辆出现爬轨脱轨的风险。国内外学者针对轮轨关系对车辆振动的影响进行了深入的研究, 从轮对镟修以及钢轨打磨的角度提出了各种解决方案和措施。李国栋[1]等针对国内高速列车在线路运行状态进行了跟踪测试, 深入研究了转向架失稳导致的报警以及车体一次蛇形失稳导致的晃车等问题, 结合车轮踏面与实测钢轨打磨前和打磨后轨面的轮轨接触特征分析, 根据接触关系的变化将车轮踏面接触区分为踏面根圆接触区、常态工作区和踏面端部接触区三部分, 由于接触位置的变化导致车辆会出现不一样的振动特征, 基于该特征对其外形行进改进, 设计减小轮缘厚度并平缓轮缘根部, 从而降低了由于高等等效锥度带来的转向架蛇形失稳报警风险。考虑车体一次蛇形问题, 增大了踏面端部斜率, 降低了由于低等效锥度带来的车体低频晃动风险, 通过这两种手段有效降低了车辆低频运动导致的一系列故障。任娟娟等[2]研究了钢轨打磨对轮轨接触关系的影响, 根据实测打磨钢轨分析轨道几何不平顺的 TQI 值, 通过轨道状态进行调整以满足标准要求, 并选择实际打磨廓形作为钢轨廓形输入进行动力学仿真分析。结果显示, 打磨后的轮轨接触点会发生偏移, 能有效降低车辆的横向异常振动报警。厉鑫波等[3]针对运营列车的晃车现象, 通过典型特征分析车辆晃动时的整体振动情况, 并基于线路运行时构架稳定性特征, 发现并验证城际列车晃车的机理。徐凯等[4]采用仿真计算研究了不同车轮踏面与不同钢轨型面的匹配关系, 分别从轮轨接触几何参数变化、轮轨静态接触行为特征、车辆稳定性以及轮对磨耗等方面进行了对比分析, 结果显示转向架在高速运行条件下接近蛇形失稳频率是导致车体晃动的主要原因。俞喆等[5]通过调研出现车辆晃车的线路, 结合动力学仿真分析, 从实测钢轨廓形变化对高速动车组异常晃动等问题的研究, 从钢轨和轮对的接触状态分析了成因, 并根据实际运行情况提出了钢轨打磨措施, 有效改善了晃车等问题。陈经纬等[6]研究了标准 $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 钢轨在轨距角处打磨量对高速列车低频异常晃动的影响, 基于动力学仿真计算模型, 分析了钢轨的不同打磨廓形与实际轮对廓形的接触关系, 进而研究了车体横向振动的特征变化, 得到了钢轨轨距角处打磨量增加会导致车辆横向平稳性指标显著增加的结论, 从而影响车辆的运行品质。周清跃等[7]分析总结了轮轨接触不良对轮对和钢轨带来的危害, 通过研究提出改善轮

轨关系的思路。本文在现有研究基础上,针对实测的踏面廓形,分析轮轨接触关系以及动力学性能的特征,为车辆的异常振动判断提供参考。

2. 实测廓形分析

车轮与轨道接触过程中不断发生磨损,轮对磨耗速率较钢轨更快,轮轨接触状态更容易呈现多样性和随机性,通过钢轨打磨和轮轨镟修可以有效改善轮轨接触关系,但如何进行维修策略的制定目前还没有一套完善的解决办法,仅仅依靠镟修手段会造成轮对的极度浪费。为了研究车辆运行过程中动力学性能的变化,本小节对不同运行里程下的踏面廓形进行了跟踪测试,采用实测踏面分析了不同磨耗周期下踏面与标注钢轨的匹配关系,从而为轮对镟修和钢轨打磨提供参考。不同磨耗周期下踏面廓形如图 1 所示,从踏面的廓形对比可知,磨耗区域集中在滚动圆接触区域内侧,出现了凹陷磨耗的情况。随着运行时间的增加,磨耗区域逐渐向轮缘根部靠近,从而使等效锥度值逐渐增加,磨耗后期会导致轮缘根部严重磨损,导致轮缘贴靠钢轨可能引起转向架失稳的情况,车辆会发生异常振动。其中,等效锥度变化是轮轨接触状态的重要评价指标,通过该指标的分析可以对车辆异常振动问题进行判断,并提出合理的解决手段。常见的等效锥度分析方法有简化法,谐波法和 UIC519 规定的线性方法。其中,简化法是一种高度近似方法,主要将踏面滚动圆处近似为一段斜率为常数的直线,通过左右轮径差和轮对横移量近似计算等效锥度值的变化,该方法计算简单,但针对严重磨耗的轮对计算结果差异较大,大多数情况下该计算结果仅作参考。常用的检测手段为 UIC519 规定的方法[8],通过考虑自用轮对在轨道上运动微分方程进行计算。

运动微分方程式为,

$$\ddot{y} + \frac{v^2}{er_0} \Delta r = 0 \quad (1)$$

其中, y 表示运行过程中轮对的横移量,单位 mm; \ddot{y} 为轮对的横移加速度,单位 m/s^2 ; e 为接触点的横向跨距,单位 m; r_0 为轮对的名义滚动圆半径,单位 mm; Δr 为两轮对的半径差,单位 mm; v 为轮对运行速度,单位 km/h。

若考虑车轮型面为 γ 角的锥形,波长 λ 为,

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{er_0}{2 \tan \gamma}} \quad (2)$$

通过给定初始幅值可以推算出接触点处 γ_e 角对应的轮对运动幅值和波长的周期运动关系,

$$\tan \gamma_e = \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^2 2er_0 \quad (3)$$

基于以上计算方法,将不同运行里程下的车轮测试踏面廓形与标准的 $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 钢轨进行匹配计算,分析轮对在各状态下接触关系变化,通过等效锥度指标来判断轮轨接触状态的好坏,不同踏面廓形对应的等效锥度曲线如图 2 为所示。根据国内的普遍共识,采用 UIC519 标准衡量轮对横移量在 3 mm 处的等效锥度值作为轮轨接触关系的评价指标,等效锥度如表 1 所示。其中 10 万公里、15 万公里、20 万公里的等效锥度曲线在 3 mm 以内出现了负斜率,表明踏面在滚动圆附近为凹陷磨耗,随着运行里程的增加,3 mm 处的等效锥度值也在不断的增加,接近镟修里程时能达到 0.6,继续运行可能导致轮缘根部产生严重磨耗,出现轮缘贴靠钢轨,影响车辆的安全运行。简化算法相对偏低,UIC519 算法更能反应真实的情况。考虑实测的钢轨廓形,轮轨接触关系会变得更加复杂,实际的等效锥度值可能会更高,在恶劣的环境下会对车辆的安全造成严重影响。

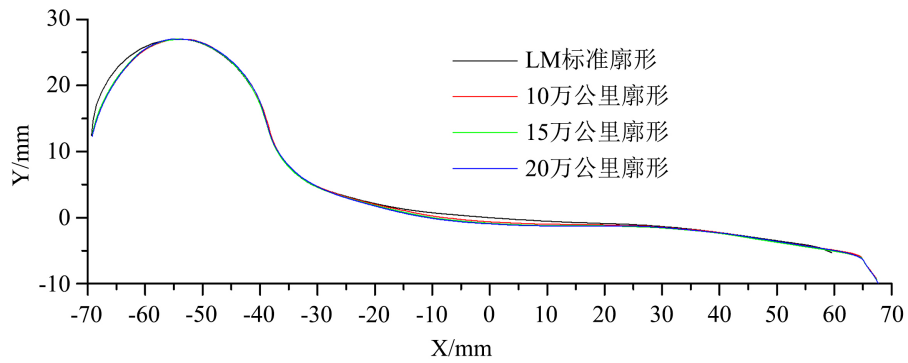


Figure 1. Compare of wheel tread profile
图 1. 踏面廓形对比

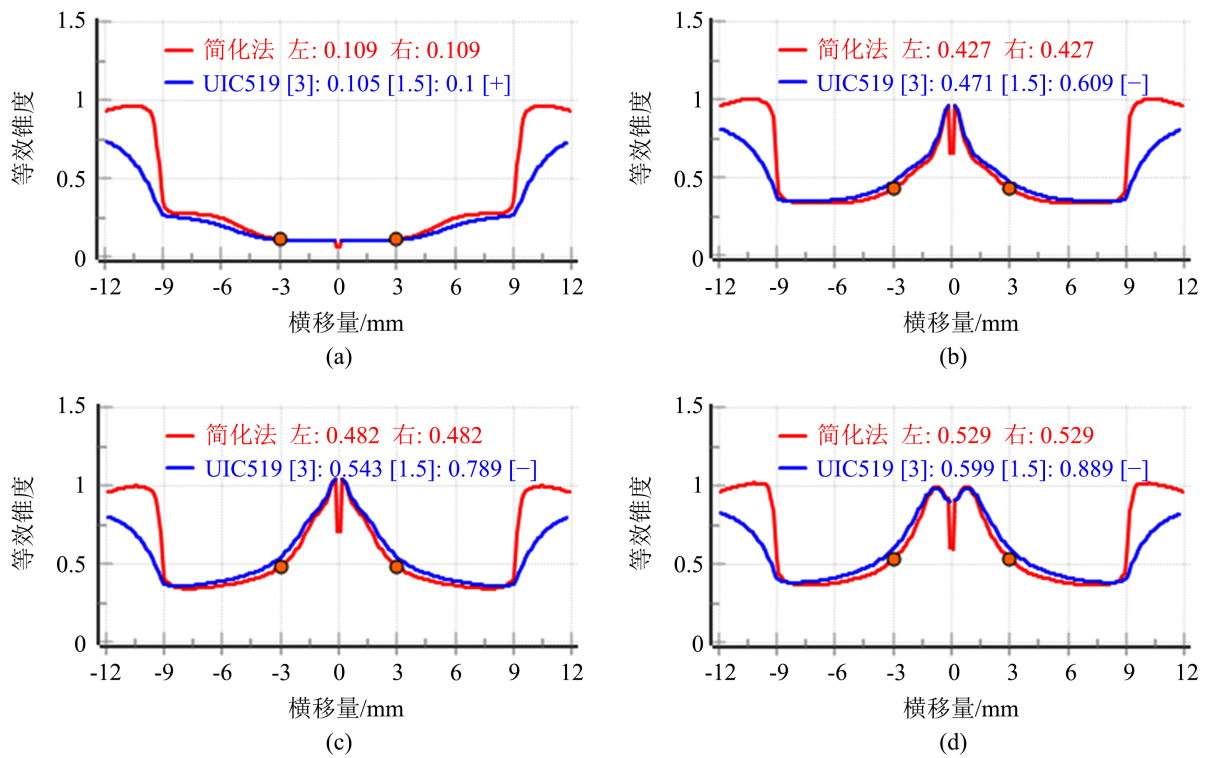


Figure 2. The curve of the equivalent conicity. (a) The equivalent conicity of standard wheel tread profile; (b) The equivalent conicity of 100,000 Kilometers wheel tread profile; (c) The equivalent conicity of 150,000 Kilometers wheel tread profile; (d) The equivalent conicity of 200,000 Kilometers wheel tread profile

图 2. 等效锥度曲线。(a) 标准踏面等效锥度；(b) 10 万公里磨损踏面等效锥度；(c) 15 万公里磨损踏面等效锥度；(d) 20 万公里磨损踏面等效锥度

Table 1. The equivalent conicity

表 1. 等效锥度表

踏面廓形	标准 LM	10 万公里廓形	15 万公里	20 万公里
等效锥度值(简化)	0.109	0.427	0.482	0.53
等效锥度值(UIC519)	0.105	0.471	0.543	0.599

3. 动力学仿真分析

3.1. 动力学建模

为了研究不同踏面廓形对车辆平稳性、稳定性等动力学性能的影响,本节建立了基于 SIMPACK 的车辆动力学模型,采用刚体模型进行动力学仿真分析,包含车体、转向架(构架、轴箱及轮对)共计 50 个刚体自由度。其中,车体、构架、轮对为 6 自由度,含 3 个位移和 3 个角度。转臂仅 1 个点头自由度。动力学模型如图 3。

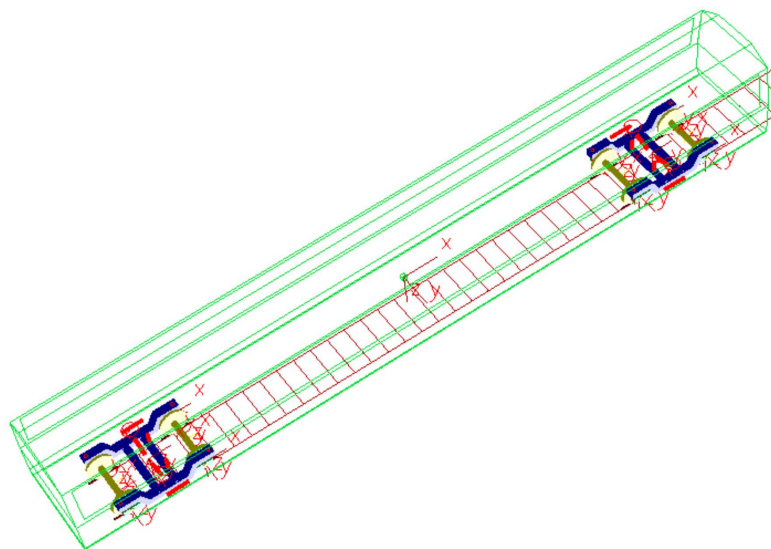


Figure 3. The model of vehicle
图 3. 车辆模型

3.2. 动力学性能分析

通过以上动力学仿真模型的建立,结合实测的踏面廓形,计算车辆在各种工况下的平稳性和安全性指标,以分析不同磨耗踏面下车辆的运行性能,为车辆故障的排查和运维提供一定的数据支撑。仿真计算中采用的踏面为实测踏面,输入激励为实测线路激励。

3.2.1. 平稳性指标分析

将上述实测踏面廓形导入动力学模型中,研究不同运行里程下踏面磨耗廓形与标准 $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 钢轨廓形之间匹配的动力学性能,掌握车轮踏面在不同运行里程下的磨耗状态对车辆动力学指标的影响。平稳性指标是反应车辆运行品质的重要参数,通过平稳性指标可以有效判断乘坐的舒适性。图 4 为不同磨耗周期下的平稳性指标,车辆线路实际运行速度为 160 km/h ,仿真计算考虑的速度范围为 100 km/h 至 200 km/h 。从仿真数据分析可知,相对于标准踏面,磨耗踏面对横向平稳性的影响较大,最大差异接近 0.8,主要是因为标准 LM 踏面对应的等效锥度较低,初始锥度约 0.1,而磨耗踏面的锥度达到了 0.5 左右,导致轮对接触点发生的变化,向轮缘根部移动,因此对横向平稳性的影响相对明显。垂向平稳性指标在低速下不同磨耗踏面差异不大,随着速度的增加,磨耗踏面与标准 LM 踏面的平稳性指标差异逐渐增加,平稳性差异更加明显。通过以上分析,车轮踏面磨耗容易引起横向平稳性指标的变化,其主要原因是轮轨的接触点发生了变化,导致车辆在运行过程中容易出现横向失稳。由于计算过程中车体考虑成刚体,车体在 10 Hz 左右的弹性振动未考虑,从而导致不同磨耗里程下平稳性指标没有明显的差异。对于不同

里程下磨损踏面，其等效锥度值差异较小，平稳性指标之间没有明显的差异。但车辆运行速度的增加会导致平稳性显著变化，车辆运行速度较高的情况下，20 万公里的磨损踏面对应的等效锥度较大，以至 200 km/h 以上的运行速度导致车辆出现了失稳，平稳性指标显著增加。

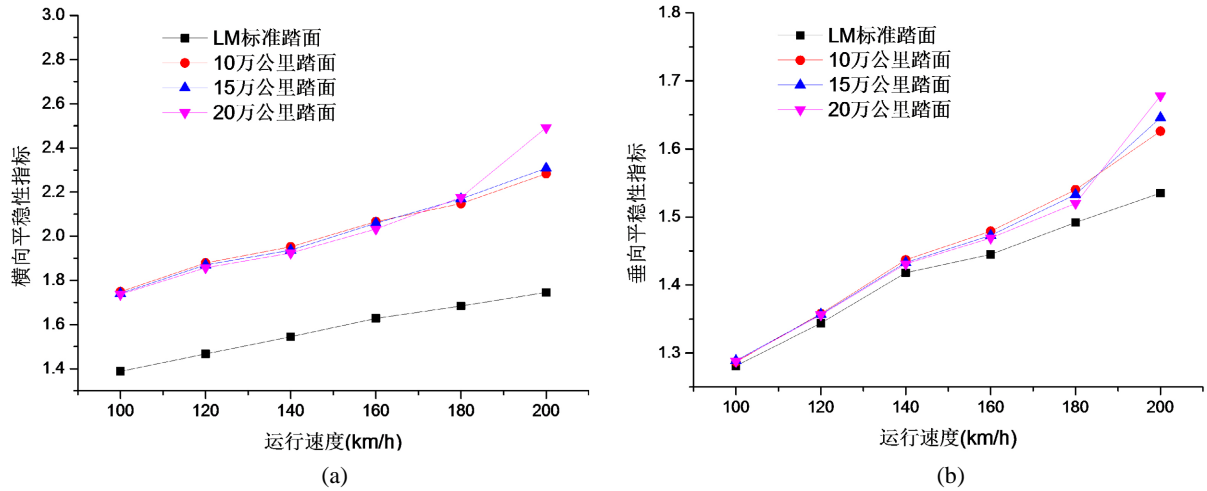


Figure 4. The vehicle stability index. (a) Lateral stability; (b) Vertical stability
图 4. 车辆平稳性指标。(a) 横向平稳性；(b) 垂向平稳性

3.2.2. 安全性分析

为了验证轮轨之间的安全性能，对不同磨损踏面对应的安全性指标进行了分析，一般需要在曲线上考虑车辆运行的安全性，为此选取半径为 2500 米，对应的超高为 60 mm 的曲线进行仿真计算，分析了脱轨系数、轮轴横向力以及轮轨力等指标。车辆运行的安全性评价指标如图 5~8 所示，从图中可以看出，低速运行时为过超高状态，离心力不足以抵消车辆横向分力的影响，轨道内侧的轮轨横向力较大，随着运行速度的提高，离心力增加，从而过渡到欠超高状态，外侧轮轨力变大。整体分析，在低速条件下各项安全性指标性对较低，随着运行速度的增加，逐步过渡到欠超高状态后导致车辆安全性指标随着速度的增加而上升。但不同的踏面磨损状态在安全范围内对车辆的安全性能没有明显的影响，反应了轮轨接触的等效锥度在一定范围内变化对安全性能没有明显的影响。

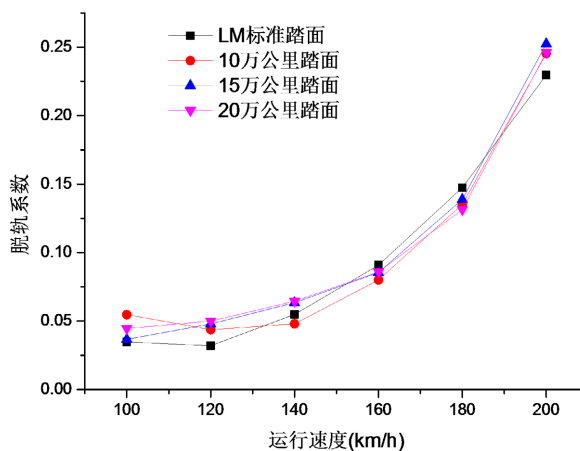


Figure 5. The derailment coefficient
图 5. 脱轨系数

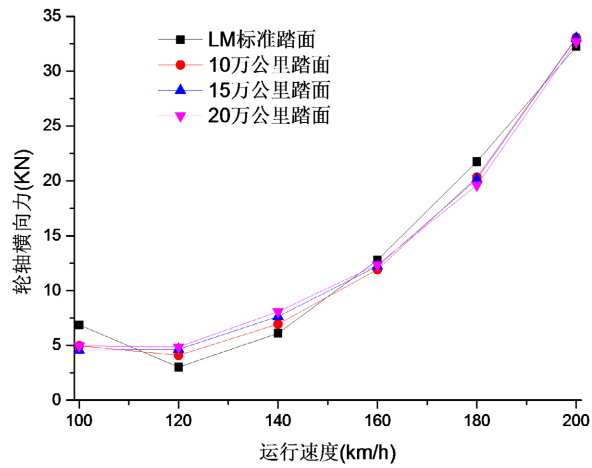


Figure 6. The wheelset lateral force
图 6. 轮轴横向力

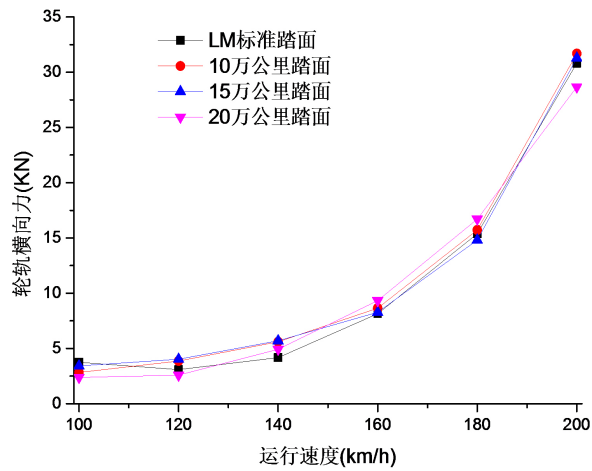


Figure 7. The wheel-rail lateral force
图 7. 轮轨横向力

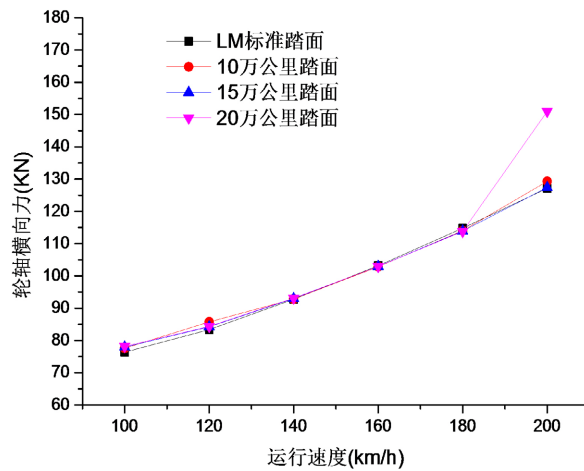


Figure 8. The wheel-rail vertical force
图 8. 轮轨垂向力

4. 结论及建议

轮轨关系研究是轨道车辆的重要环节,对车辆的安全运行起着至关重要的作用,基于此测试了不同运行里程下的踏面廓形并对等效锥度值进行了计算,并通过仿真计算分析了不同踏面对应的车辆动力学性能。基于本文的研究得到了以下结论:

1) 相对于标准踏面,不同运行里程下的踏面出现了凹陷磨耗,等效锥度值增加,并呈现出负斜率的状态,轮对接触点靠近轮缘根部,钢轨接触点靠近轨头位置,长期处于该状态下对钢轨会产生一定的影响。

2) 从平稳性角度分析,轮对低锥度时的平稳性指标较低,高锥度时的平稳性指标显著增加,当等效锥度达到一定的程度后就逐渐向轮缘根部方向移动,在发生轮对和钢轨贴靠前对平稳性没有明显的影响。

3) 安全性指标计算显示,在一定的锥度范围内,不同等效锥度值对轮轨力、轮轴力等安全指标影响不大。

以上分析均是基于刚体模型,若考虑车体弹性,在一定程度上平稳性会存在一定的差异,后期仿真分析可考虑刚柔耦合动力学模型进行分析,车辆的舒适性性能会更真实。

参考文献

- [1] 李国栋,曾京,池茂儒,等. 高速列车轮轨匹配关系改进研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 93-99.
- [2] 任娟娟,赵华卫,欧阳明. 高速列车钢轨打磨对轮轨接触关系的影响[J]. 华中科技大学学报, 2016, 44(4): 95-100.
- [3] 厉鑫波,周劲松,夏张辉,等. 城际立车晃车机理试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2019, 29(6): 123-126.
- [4] 徐凯,李芾,李东宇,等. 动车组轮轨型面匹配关系[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 390-398.
- [5] 俞喆,杨光,王有能,等. 钢轨廓形对动车组车体低频横向晃动影响研究[J]. 铁道学报, 2020, 262(7): 24-28.
- [6] 陈经纬,崔涛,孙建锋,等. 基于高速列车异常晃动的钢轨廓形打磨管理[J]. 机车电传动, 2020(5): 128-131.
- [7] 周清跃,刘丰收,田常海,等. 高速铁路轮轨型面匹配研究[J]. 中国铁路, 2012(9): 33-36.
- [8] 干锋,戴焕云,高浩. 磨耗车轮踏面精确轮轨接触关系计算方法[J]. 交通运输工程学报. 2014, 14(3): 44-50.