

文章编号:1671-1637(2016)03-0055-08

系统参数对高速列车车轮踏面凹陷磨耗的影响

黄彩虹¹, 罗 仁¹, 曾 京¹, 宋春元^{1,2}

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)

摘 要:为了探明高速列车车轮踏面凹陷的原因,建立了以车辆-轨道系统动力学模型与磨耗模型为一体的磨耗预测模型,在轮轨法向接触中采用 Herz 接触理论进行接触斑形状和法向力分布的计算,在轮轨切向接触中采用 Kalker 简化理论计算切向力,采用 Achard 磨耗模型计算磨耗量。为了修正磨耗预测模型,仿真分析了 CRH₃ 型高速列车在武广线上运行时的车轮踏面磨耗形状,并与实测车轮踏面磨耗形状进行了对比。为了得到与实测结果比较接近的磨耗规律,考虑磨耗系数的不确定性,在磨耗预测时初始的磨耗系数应除以 10。利用修正的理论模型,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。研究表明:车轮型面和钢轨型面影响车轮踏面磨耗位置、磨耗深度与磨耗宽度,运行速度影响车轮踏面磨耗深度,轨道不平顺影响车轮踏面磨耗深度和宽度,线路曲线半径影响车轮踏面磨耗深度和宽度,过高的运行速度、不合理的轮轨匹配关系和过高的轨道平直度容易引起车轮集中磨耗,导致车轮踏面出现凹陷,转向架悬挂和结构参数对踏面凹磨产生的影响较小。

关键词:高速列车;车轮;踏面凹磨;磨耗预测;动力学模型;轮轨接触

中图分类号:U211.5

文献标志码:A

Effect of system parameters on tread-hollow wear of high-speed train wheels

HUANG Cai-hong¹, LUO Ren¹, ZENG Jing¹, SONG Chun-yuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, Jilin, China)

Abstract: In order to investigate the reasons of tread-hollow wear of high-speed train wheel, a wear prediction model was set up by coupling a vehicle-track system dynamics model to a wear model. In the wheel-rail normal contact, the shape of contact patch and the distribution of normal force were calculated by using Herz's contact theory. In the wheel-rail tangential contact, the tangential force was calculated by using Kalker's simplified theory. The wear loss was calculated by using Achard's wear model. To revise the wear prediction model, the wheel tread wear shape of CRH₃ high-speed train running on Wuhan-Guangzhou Line was simulated, and compared with the wear shape collected from field test. In order to get the wear law close to field test result, the uncertainty of wear coefficient was considered, and the initial wear coefficient should be divided by 10 in wear prediction. Based on the modified theory model, the effects of rail profile, wheel

收稿日期:2015-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51475388);牵引动力国家重点实验室开放课题(TPL1307);中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2014J008-B)

作者简介:黄彩虹(1985-),男,四川乐山人,西南交通大学助理研究员,工学博士,从事车辆系统动力学仿真与测试研究

profile, vehicle speed, track irregularity, line condition, the structure and suspension parameters of bogie on the tread wear law of high-speed train wheel were studied. Analysis result indicates that wheel and rail profiles affect the location, depth, and the width of wheel tread wear, vehicle speed affects the depth of wheel tread wear, track irregularity affects the depth and width of wheel tread wear, and line curve radius affects the depth and width of wheel tread wear. Too high vehicle speed, unreasonable wheel-rail matching relation, and too high track straightness will cause a centered wheel wear, and lead to tread-hollow wear. The suspension and structure parameters of bogie have little impact on tread-hollow wear. 1 tab, 17 figs, 23 refs.

Key words: high-speed train; wheel; tread-hollow wear; wear prediction; dynamics model; wheel-rail contact

Author resume: HUANG Cai-hong(1985-), male, assistant researcher, PhD, +86-28-86466221, c_h_huang@126.com.

0 引 言

车轮踏面凹陷磨耗会严重恶化轮轨接触几何关系,增加踏面等效锥度,降低蛇行运动稳定性,影响旅客乘坐舒适度,引起噪声或异常振动,甚至威胁到行车安全^[1]。在国外,Sawley 等通过试验和仿真分析技术,研究了北美货车车轮凹陷磨耗对轮轨接触几何关系、稳定性、冲角、轮轨横向力、导向能力、滚动阻力、能耗的影响^[2-3];Fröhling 等讨论了货车车轮踏面凹陷磨耗对曲线通过和轨道损伤的影响,分析了由此导致的滚动接触疲劳问题^[4];Li 等利用多体动力学仿真软件 SIMPACK 研究了凹陷磨耗车轮对货车运行安全性的影响^[5];Mace 等研究了车轮踏面凹陷磨耗引起的钢轨外翻问题^[6];芳贺昭弘等对 2 794 个地铁车轮磨耗形态进行了调查,推测凹陷磨耗是由于使用了对车轮踏面磨损量影响大的烧结系闸瓦以及经常使用踏面制动的结果^[7];齐藤宪司等研究了地铁车轮踏面轻微的凹陷磨耗对车辆振动特性的影响^[8]。国内对车轮踏面凹陷磨耗的研究较少。乔青峰研究了踏面制动方式与热负荷对车轮踏面凹陷磨耗的影响规律,探讨了造成地铁车辆踏面沟槽状磨耗与凹陷磨耗的原因^[9];李晓龙等研究了踏面凹陷磨耗对地铁车辆动力学性能的影响^[10];黄照伟等研究了高速列车车轮踏面凹陷磨耗对轮轨接触几何特性的影响,通过车辆系统动力学建模计算了凹陷磨耗对车辆系统动力学的不利影响^[11-12];黄彩虹研究了高速动车组出现车轮踏面凹陷磨耗后产生的构架横向加速度报警问题,为了降低报警风险优化了抗蛇行减振器动态特性^[13]。

目前,国内外对车轮踏面凹陷磨耗问题的研究主要局限于其不利影响行为的分析,还没有涉及到

其形成机理,而且大部分研究成果针对的是低速货车,不能直接适用于中国高速列车。为此,本文在建立高速列车-轨道系统动力学和材料摩擦磨损为一体的计算模型的基础上,开展了车轮踏面凹陷磨耗的参数影响研究,以期探明中国高速列车车轮踏面凹陷磨耗的主要影响因素。

1 车轮踏面磨耗预测方法

车轮踏面磨耗预测流程见图 1,具体步骤如下。

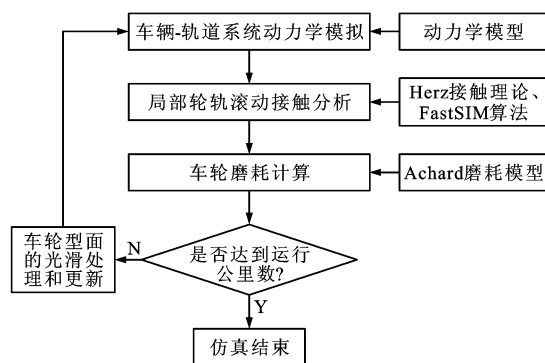


图 1 磨耗预测流程

Fig. 1 Prediction process of wear

Step 1:通过多体动力学理论,建立车辆-轨道系统动力学模型,采用时域仿真方法,计算轮轨接触点位置、接触斑大小、轮轨接触蠕滑率和法向力等。

Step 2:利用上述动力学仿真结果作为输入条件,采用 Herz 接触理论和 FastSIM 算法进行局部轮轨滚动接触分析,计算接触斑内局部切向应力分布、法向应力分布、滑动速度等。

Step 3:利用局部轮轨滚动接触分析所获得的数据,查找每个积分步所对应的车轮磨耗系数,利用 Achard 磨耗模型计算每个积分步下接触斑的磨耗量,并进行磨耗量的累加。

Step 4:判断是否满足车轮型面的更新条件,如果满足更新条件,则在原始踏面对应位置减去磨耗量,获得磨耗之后的车轮型面,对磨耗后的外形进行光滑处理和更新,进入下一个磨耗计算循环。

1.1 车辆-轨道系统动力学模型

选取 CRH₃ 型高速列车作为研究对象,假设车辆结构左右对称,建立图 2 的车辆-轨道系统动力学模型。车辆系统由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对与 8 个转臂通过悬挂元件连接而成。轨道系统采用集总参数模型,钢轨被视为一个集中质量块,轨下基础被视为具有一定垂向刚度、横向刚度、侧滚刚度的弹簧和阻尼元件。车体、构架与轮对选取 6 个自由度,即纵向、横向、垂向、侧滚、点头和摇头,其中轮对的垂向和侧滚运动为非独立自由度;转臂选取 1 个自由度,即点头;轨道考虑 3 个方向的自由度,即横向、垂向和侧滚。本文以车体中心在轨道平面上的投影点为原点 O ,车辆的前进方向为 x 轴,轨道平面指向右侧为 y 轴,垂直轨道平面向下为 z 轴建立坐标系。

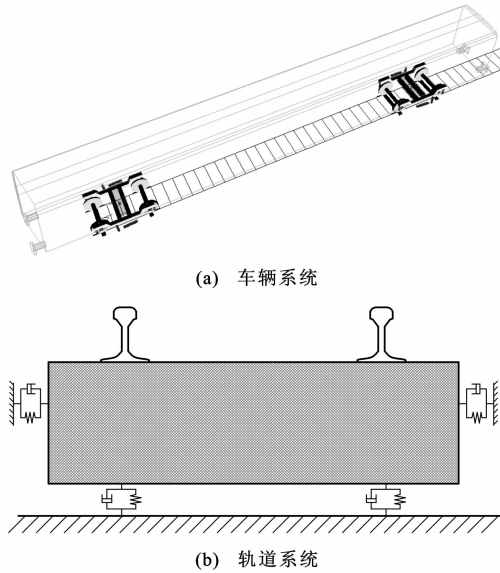


图2 车辆-轨道系统动力学模型

Fig. 2 Vehicle-track system dynamics model

在模型中考虑了非线性的轮轨接触几何关系、非线性悬挂力和轮轨力,采用 FastSIM 算法生成数表进行蠕滑力计算。为了进行车轮磨耗预测,动力学仿真输出结果必须包括轮轨接触点位置、接触斑尺寸、蠕滑率、接触力等与车轮磨耗量计算有关的物理量。

1.2 轮轨滚动接触模型

轮轨滚动接触问题包括法向接触与切向接触。法向接触采用 Herz 接触理论进行求解^[15],在半空间假设条件下,轮轨接触斑形状为椭圆,法向应力分布呈椭球状。值得注意的是,半空间假设并不是在

所有接触条件下都能得到满足。然而,考虑到车轮磨耗预测所需的计算时间与高速列车的服役环境(大半径曲线通过,低车轮磨耗),采用 Herz 接触理论不失为一种快速而且精度能够接受的方法。

切向接触采用 Kalker 发展的 FastSIM 算法进行求解^[16],其假设条件为切向变形与切向面力线性相关,且满足

$$u(x, y) = L p_1(x, y) \quad (1)$$

式中: $u(x, y)$ 为接触斑内任一点 (x, y) 的切向变形; $p_1(x, y)$ 为切向面力; L 为柔度系数。

考虑接触斑前导区域无滑动的特点,利用 Kalker 理论中蠕滑力与蠕滑率之间的关系,可以得到柔度系数 L 。将接触斑(长轴长度为 $2a$,短轴长度为 $2b$)划分为单元网格,在 x, y 轴方向上的单元网格个数分别为 n_x, n_y ,每个单元网格沿 x, y 轴方向的长度分别为 $\Delta x, \Delta y$,见图 3。任意单元内,滑动速度与刚性滑动量和切向变形有关,即

$$\frac{s(x, y)}{v} = \frac{u(x, y) - u(x - \Delta x, y)}{\Delta x} + w(x, y) \quad (2)$$

式中: $s(x, y)$ 为滑动速度; $w(x, y)$ 为刚性滑动量; v 为列车运行速度。

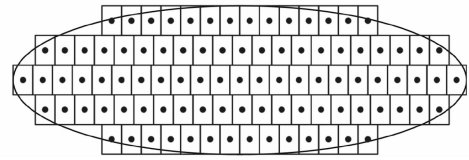


图3 接触斑椭圆

Fig. 3 Ellipse of contact patch

将式(1)代入式(2),可得

$$\frac{s(x, y)}{v} = \frac{L[p_1(x, y) - p_1(x - \Delta x, y)]}{\Delta x} + w(x, y) \quad (3)$$

如果当前点 (x, y) 处于接触斑的黏着区,必然有 $s(x, y) = 0$,根据式(3)可以推得其切向面力为

$$p_1(x, y) = p_1(x - \Delta x, y) - \frac{w(x, y) \Delta x}{L} \quad (4)$$

如果当前点 (x, y) 处于接触斑的滑动区,必然有 $s(x, y) \neq 0$,此时当前切向面力由库伦定律定义的极限值 $p_1^{\max}(x, y)$ 决定

$$p_1(x, y) = \frac{p_1(x, y)}{|p_1(x, y)|} p_1^{\max}(x, y) \quad (5)$$

1.3 车轮磨耗模型

采用 Achard 磨耗模型^[17-20]进行车轮踏面的磨耗预测,表示为

$$V = k \frac{Nd}{H} \quad (6)$$

式中: V 为材料磨损体积; k 为磨损系数; N 为法向力; d 为滑动距离; H 为两相接触物体中较软的材料硬度。

根据 Achard 磨损模型的假定, 接触斑内的黏着区不存在磨损, 而滑动区才存在材料磨损。在 FastSIM 算法中进行黏着区和滑动区的判定。对于接触斑内的任一单元, 其磨损深度 $\delta(x, y)$ 可以表示为

$$\delta(x, y) = \begin{cases} k(x, y) \frac{p_2(x, y) \Delta d(x, y)}{H} & \text{滑动区} \\ 0 & \text{黏着区} \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta d(x, y) = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \frac{\Delta x}{v} \quad (8)$$

式中: $p_2(x, y)$ 为法向压力分布; $k(x, y)$ 为点 (x, y) 的磨损系数; $\Delta d(x, y)$ 为一个积分步内单元坐标在点 (x, y) 处的滑动距离; s_x 、 s_y 分别为滑动速度 $s(x, y)$ 在 x 、 y 轴方向上的分量, 由 FastSIM 算法计算得到。

根据 Herz 接触理论, 椭球状的法向压力分布可以表示为

$$p_2(x, y) = \frac{3N}{2\pi ab} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(7), 得到每个单元的磨损深度。将每个沿着 x 轴方向条带内的单元磨损深度累加, 得到当前积分步下车轮踏面沿着 y 轴方向的磨损量分布。假设一个积分步对应车轮转动一圈, 将所有积分步下获得的磨损量分布在对应车轮接触点位置进行累加, 就可以得到车轮在运行一定里程之后的踏面磨损量分布。实际上, 由于车轮沿圆周方向的磨损基本上是一致的, 所以一个积分步不一定非要对应车轮转动一圈, 需要将每个积分步得到的磨损分布乘以分布系数 α

$$\alpha = v\Delta t / 2\pi R \quad (10)$$

式中: Δt 为采样时间; R 为车轮半径。

在进行车轮磨损预测时, 磨损系数的取值是十分关键的, 因为它决定了磨损的快慢。De Arizon 等给出了磨损系数随接触压应力和滑动速度的变化关系^[19], 见图 4: 区域 1、3 为轻微磨损区域, 对应磨损系数为 $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$; 区域 2 为严重磨损区域, 对应磨损系数为 $(3.0 \sim 4.0) \times 10^{-3}$; 区域 4 为毁灭性磨损区域, 对应磨损系数为 $(3.0 \sim 4.0) \times 10^{-2}$ 。由于所有的试验都是在干燥条件下完成的, 因此, 磨损系数的使用范围具有一定的局限性。本文首先选取磨损系数的中间值进行代替, 在对比了车轮磨

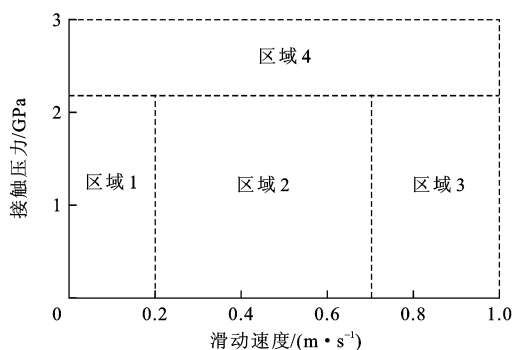


图 4 磨损系数分布

Fig. 4 Distribution of wear coefficient

耗的仿真结果和实测结果后, 对磨损系数进行修正。

1.4 车轮型面的光滑处理和更新

车辆在实际线路上运行时, 车轮型面的磨损是连续变化的, 数值计算不可能满足型面的实时变化, 所以只能在车轮型面磨损到一定程度后再进行更新。也就是说, 在进行一个车辆-轨道系统动力学仿真过程中, 假定车轮型面是不变的, 而在下一个仿真过程开始时依据上一个仿真结束后的磨损量对车辆型面进行更新。由于车轮磨损会影响车辆的动力学行为, 而车辆运行状态又会反过来影响车轮磨损, 所以如果车轮型面更新周期过长就会与实际产生较大的偏离, 更新周期过短则会增加计算时间, 因此, 应综合考虑计算精度和速度, 确定合理的车轮型面更新周期。常用的 2 种踏面更新策略为控制最大运行里程和控制最大磨损深度, 本文采用广泛接受的 0.1 mm 磨损深度更新车轮型面^[21]。

在车轮踏面更新之前, 需要对磨损后的车轮型面进行光滑处理, 这是因为在动力学仿真中车轮的运动是不连续的, 而且没有考虑轮轨的随机因素, 这使计算获得的磨损深度出现锯齿型, 与实际不符, 所以需要对磨损后的车轮型面进行平滑处理。本文选取移动平均平滑方法进行车轮型面的平滑处理^[22]。

1.5 磨损系数的修正

模拟 CRH₃ 高速列车在武广线上的运行条件, 进行了车轮踏面磨损的初步预测。将仿真中得到的车轮磨损外形与实测结果进行对比, 对现有磨损系数进行修正。由于不能完全掌握武广线上直线与曲线的分布情况, 仅给出了典型的运行工况。直线与曲线所占比例分别为 60%、40%, 其中曲线半径、超高、缓和曲线长度均按照《高速铁路设计规范》(TB 10621—2009) 设置, 见表 1。仿真过程中假设线路上左曲线和右曲线对称布置, 并且列车不调头往返运行, 则 1、4 位轮对各车轮的磨损相同, 2、3 位轮对

表 1 典型曲线分布
Tab. 1 Distribution of typical curves

曲线半径/ km	超高/ mm	缓和曲线 长度/m	圆曲线 长度/m	速度/ (km · h ⁻¹)	运行里 程/km	所占比 例/%
12.0	80	220	480	300	1	1
9.0	100	300	320	300	1	7
8.0	120	340	250	300	1	8
7.0	145	360	210	300	1	10
5.5	165	360	210	300	1	7
5.0	120	360	210	300	1	7

各车轮的磨耗也相同,从而只需要在一条线路上计算一趟,然后将以上 2 组车轮的磨耗量分别相加,得到每组车轮总的磨耗量。这样相当于车辆以不同运行方向 2 次通过该线路,可以减少 4 倍计算量^[22-23]。车轮采用标准 S1002CN 型面,轨道采用国内标准 60 轨,轨距为 1 435 mm,轨底坡为 1 : 40,采用武广线实测轨道不平顺。

图 5 给出了列车运行 7.5×10^4 km 后车轮的实测磨耗型面曲线,以及仿真运行 7.5×10^3 km 得到的与实测磨耗型面曲线比较接近的曲线。可见,由于武广线大多为直线和大半径曲线,轮轨接触主要发生在踏面区域,车轮踏面出现了轻微凹陷。由于磨耗系数初始值选取图 4 中的中间值,在此情况下达到实测磨耗量时的运行里程为 7.5×10^3 km。为了得到与测试比较接近的运行里程,建议在进行高速列车车轮磨耗预测时初始磨耗系数应除以 10。这一修正主要是考虑磨耗系数的不确定性,与接触斑的周围环境如温度、湿度、润滑情况等有关。

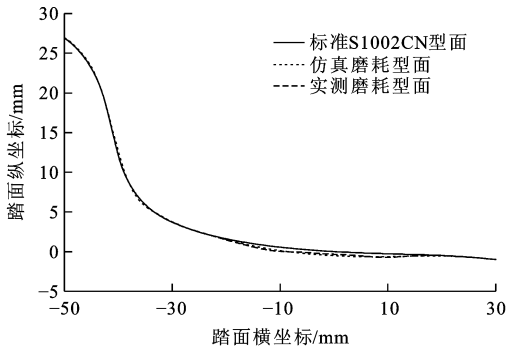


图 5 磨耗型面曲线的仿真和实测结果对比
Fig. 5 Comparison of worn profile curves between simulation and field test results

2 参数研究

为了明确车轮踏面凹陷磨耗的关键因素,探明车轮踏面凹陷磨耗的形成原因,研究了关键参数对

车轮踏面磨耗的影响。在参数研究中,当讨论某个参数的影响时,只对该参数进行改变,其他参数保持不变。为了便于研究,统一以 1.0×10^4 km 为基准进行磨耗量的比较。

2.1 钢轨型面

采用 3 种钢轨型面进行磨耗预测,分别为国内标准 60 轨 (CN60)、打磨后的钢轨廓形 (CN60_Grinding)、钢轨优化廓形 (CN60_N),钢轨型面见图 6。在运行 1.0×10^4 km 后,车轮踏面上的磨耗分布见图 7,其中横坐标的 0 点对应名义滚动圆位置,负方向表示靠近轮缘侧,正方向表示远离轮缘侧。由图 7 可见:在采用国内标准 60 轨时,车轮磨耗更靠近轮缘侧,磨耗量较大,磨耗范围较宽;采用其他 2 种钢轨廓形时,车轮磨耗位置居中,磨耗量较小,磨耗范围较窄。这是因为相对于打磨后廓形和优化廓形而言,国内标准 60 轨的轨距角微微隆起,导致轮轨接触点往轨距角和轮缘的方向移动。由于打磨后廓形和优化廓形轨距角较低,轮轨接触点会集中在钢轨顶部。一般而言,轮轨接触点在钢轨顶部的接触应力较小,所以车轮磨耗量相对较小。

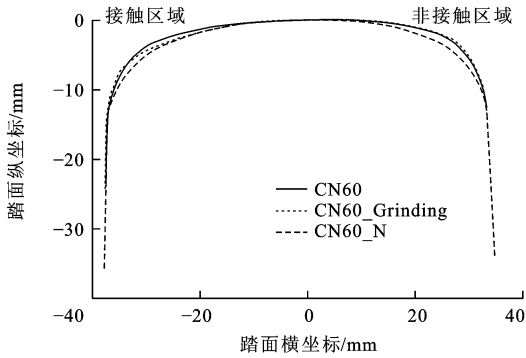


图 6 钢轨型面
Fig. 6 Rail profiles

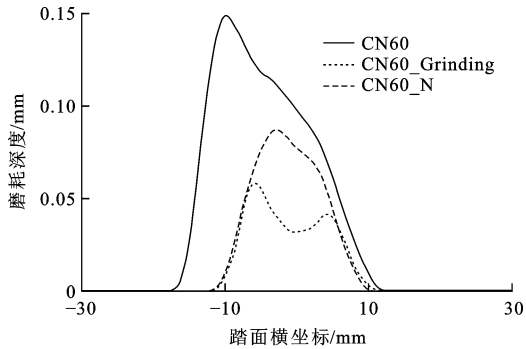


图 7 不同钢轨型面的磨耗深度
Fig. 7 Wear depths of different rail profiles

2.2 车轮型面

分别采用 4 种等效锥度(横移 3 mm 处的锥度)

均为 0.17 的车轮型面进行磨损预测, 车轮型面见图 8, 4 种车轮型面分别为标准 S1002CN 与正在设计的薄轮缘踏面 LME17、LME17G、LME17N。磨损预测结果见图 9, 可见: S1002CN 与 LME17N 的磨损位置、大小基本一致, 这与 LME17N 踏面设计初衷(只减小轮缘厚度, 不改变踏面工作区域)是一致的; 由于 LME17 与 LME17G 踏面在 $0 \sim 60$ mm 处的斜度较大, 与钢轨型面的共形程度降低, 导致轮轨接触点向轮缘根部靠近, 往轮缘方向移动往往导致接触应力升高, 因此, 车轮踏面的磨损量会增大; 相对于 S1002CN 与 LME17N 踏面而言, LME17 与 LME17G 踏面的磨损范围较窄。

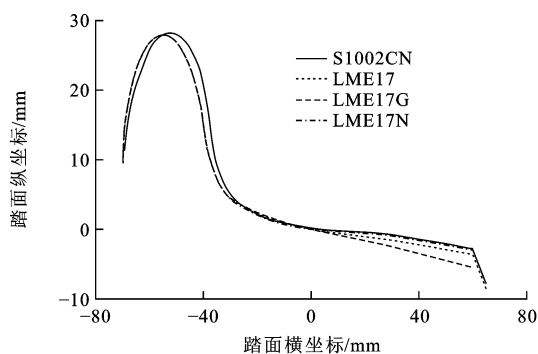


图 8 车轮型面
Fig. 8 Wheel profiles

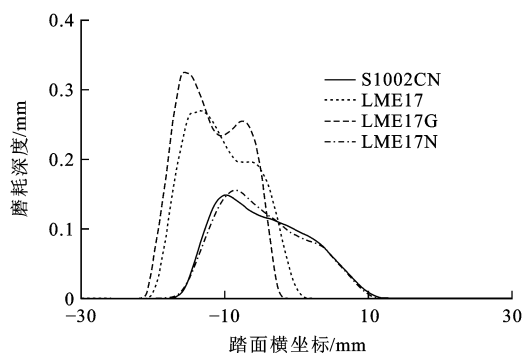


图 9 不同车轮型面的磨损深度
Fig. 9 Wear depths of different wheel profiles

2.3 运行速度

车辆运行速度对车轮磨损的影响规律见图 10, 可见: 运行速度越高, 车轮磨损深度越大, 磨损范围越宽。这是因为, 车辆运行速度越高, 轮轨动力作用越明显, 轮轨间法向力、切向力与滑动速度都会增大, 这无疑加剧了车轮的磨损; 车辆运行速度越高, 转向架蛇行运动幅值越大, 磨损范围就会越广。值得注意的是, 运行速度提高带来的磨损深度增加量远远大于磨损范围的增加量, 这对于踏面凹陷是很不利的。

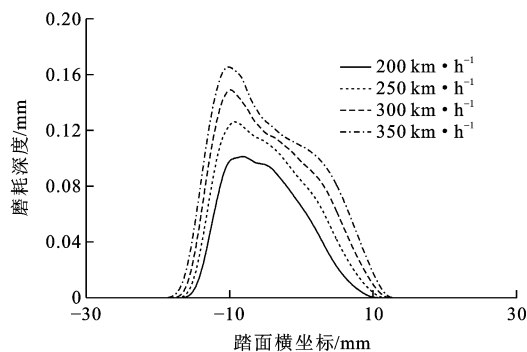


图 10 运行速度对车轮磨损的影响
Fig. 10 Effect of vehicle speed on wheel wear

2.4 轨道不平顺

选取不同置信度的轨道谱进行研究, 见图 11, 这 3 种轨道谱生成的轨道不平顺对车轮磨损的影响规律见图 12, 可见: 轨道谱选取的置信度越高, 也就是轨道不平顺幅值越大, 车轮磨损深度越大, 磨损范围越宽。这是由于轨道不平顺幅值越大, 轮轨作用力越大, 转向架运动幅值也越大。

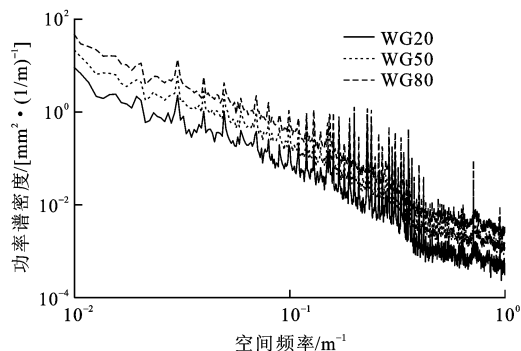


图 11 轨道谱
Fig. 11 Track spectra

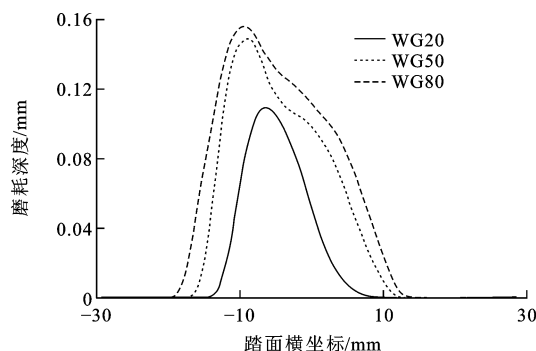


图 12 轨道不平顺对车轮磨损的影响
Fig. 12 Effect of track irregularity on wheel wear

2.5 线路条件

分别选取直线段与半径分别为 7、5、3、2、1 km 的曲线段进行研究。除了 1 km 半径曲线以 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行, 2 km 与 3 km 半径曲线以 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行之外, 其他线路条件均以 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 运行。为了

进行对比,直线运行与曲线运行的处理方法一致,即假设线路上左曲线和右曲线对称布置,列车不调头往返运行。计算结果见图 13,可见:直线运行工况与大半径曲线运行工况(曲线半径大于 5 km)下的车轮磨耗规律接近;曲线半径小于 5 km 后,磨耗量和磨耗范围增大;曲线半径小于 2 km 后,轮缘处的磨耗量则会急剧增加;相对于磨耗量而言,中等半径曲线(曲线半径为 2~3 km)带来的磨耗范围的增加是非常显著的,这对于减轻踏面凹陷是有利的。实际上,在所开展的高速列车动力学长期服役跟踪中也发现,当某条线路存在较多中小半径曲线时,高速列车车轮经常出现均匀磨耗,而当线路以直线和大半径曲线为主时,经常出现凹陷磨耗。

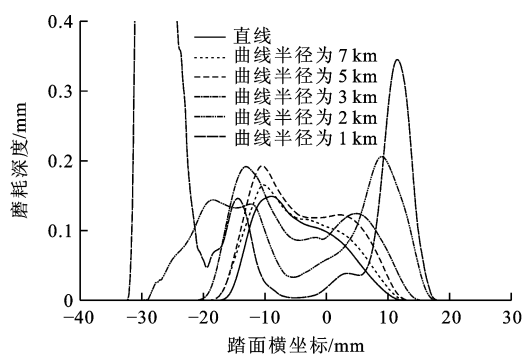


图 13 线路条件对车轮磨耗的影响

Fig. 13 Effect of line condition on wheel wear

2.6 转向架结构和悬挂参数

转向架一系纵向定位刚度、一系横向定位刚度、抗蛇行减振器动态刚度与轴距对车轮磨耗的影响分别见图 14~17,可见:转向架关键悬挂参数和结构参数在研究范围内的变动对车轮磨耗的影响很小。

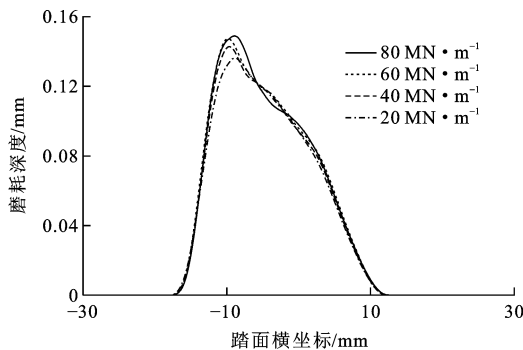


图 14 一系纵向定位刚度对车轮磨耗的影响

Fig. 14 Effect of primary longitudinal stiffness on wheel wear

3 结 语

(1)为了得到与测试结果较为接近的磨耗规律,建议在进行高速列车车轮磨耗预测时初始磨耗系数应除以 10,这一修正主要是考虑磨耗系数的不确定

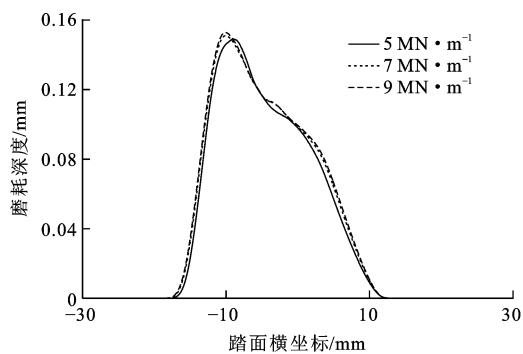


图 15 一系横向定位刚度对车轮磨耗的影响

Fig. 15 Effect of primary lateral stiffness on wheel wear

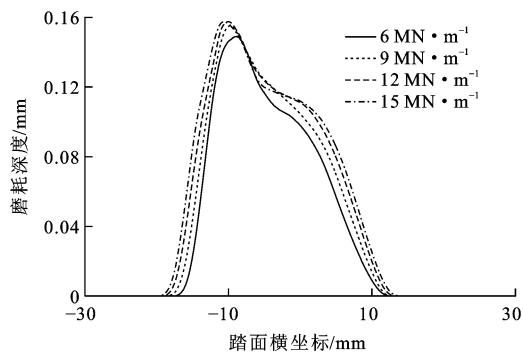


图 16 抗蛇行减振器动态刚度对车轮磨耗的影响

Fig. 16 Effect of dynamic stiffness of anti-yaw

damper on wheel wear

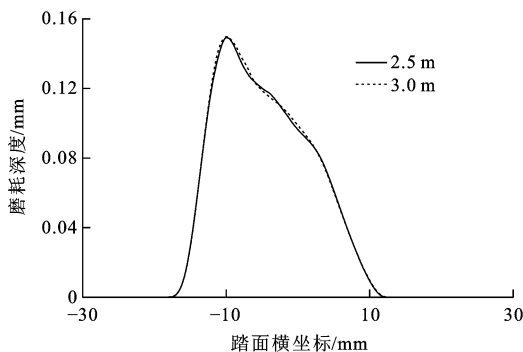


图 17 轴距对车轮磨耗的影响

Fig. 17 Effect of wheel base on wheel wear

性,与接触斑的周围环境如温度、湿度、润滑情况等有关;车轮型面、钢轨型面、运行速度与线路条件对高速列车车轮磨耗有至关重要的影响,转向架结构参数和悬挂参数对高速列车车轮磨耗的影响较小;过高的运行速度、不合理的轮轨匹配关系与过高的轨道平直度很容易引起车轮集中磨耗,导致踏面出现凹陷。

(2)当车轮踏面形成凹陷磨耗后,轮轨接触状态会产生很大变化,轮轨接触几何关系呈现出强非线性特征。在这种情况下,有别于新轮、新轨状态,轮轨接触不再是简单的单点接触,可能产生两点接触

甚至是多点接触,因此,考虑轮轨间多点接触进行轮轨磨耗预测是进一步的研究工作。

参考文献:

References:

- [1] SAWLEY K, 铁海燕. 车轮踏面下凹磨耗危害大应旋修[J]. 国外铁道车辆, 2000, 37(3): 44-46.
SAWLEY K, TIE Hai-yan. Harmful concave worn wheel tread needing turning[J]. Foreign Rolling Stock, 2000, 37(3): 44-46. (in Chinese)
- [2] SAWLEY K, URBAN C, WALKER R. The effect of hollow-worn wheels on vehicle stability in straight track[J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1100-1108.
- [3] SAWLEY K, WU Hui-min. The formation of hollow-worn wheels and their effect on wheel/rail interaction[J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1179-1186.
- [4] FRÖHLING R, EKBERG A, KABO E. The detrimental effects of hollow wear-field experiences and numerical simulations[J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1283-1291.
- [5] LI Heng-li, LI Fu, HUANG Yun-hua. Research on wheel hollow wear and dynamic performance of freight radial bogies[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(4): 1-7.
- [6] MACE S, PENA R, WILSON N, et al. Effects of wheel-rail contact geometry on wheelset steering forces[J]. Wear, 1996, 191(1/2): 204-209.
- [7] 芳贺昭弘, 蔡千华, 彭惠民. 铁道车辆用车轮的磨耗倾向和寿命预测[J]. 国外机车车辆工艺, 2011(1): 31-32.
HAGA A, CAI Qian-hua, PENG Hui-min. Trend of wheel wear and wheel life time estimation[J]. Foreign Locomotive and Rolling Stock Technology, 2011(1): 31-32. (in Chinese)
- [8] 齐藤志司, 李伟平. 新型通勤电动车的车轮磨耗趋势及车辆运动特性[J]. 国外铁道车辆, 2008, 45(4): 39-45.
SAITO K, LI Wei-ping. The wheel wear tread and vehicle movement features of the new commuter EMUs[J]. Foreign Rolling Stock, 2008, 45(4): 39-45. (in Chinese)
- [9] 乔青峰. 地铁车辆车轮踏面异常磨耗原因初探[J]. 铁道车辆, 2011, 49(6): 28-32.
QIAO Qing-feng. Initial analysis of causes to abnormal wear of wheel treads of metro vehicles[J]. Rolling Stock, 2011, 49(6): 28-32. (in Chinese)
- [10] 李晓龙, 马卫华, 罗世辉. 踏面下凹磨耗对地铁车辆动力学性能的影响[J]. 内燃机车, 2013(1): 17-20.
LI Xiao-long, MA Wei-hua, LUO Shi-hui. Effect of concave wear on the dynamic performance of metro vehicles[J]. Diesel Locomotives, 2013(1): 17-20. (in Chinese)
- [11] 黄照伟, 崔大宾, 杜星, 等. 车轮偏磨对高速列车直线运行性能的影响[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 14-20.
HUANG Zhao-wei, CUI Da-bin, DU Xing, et al. Influence of deviated wear of wheel on performance of high-speed train running on straight tracks[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 14-20. (in Chinese)
- [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, 2010.
HUANG Zhao-wei. Wheel tread wear and its influence on dynamic performance of vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [13] 黄彩虹. 高速车辆减振技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
HUANG Cai-hong. Study on vibration reduction technologies for high speed cars[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [14] BRAGHIN F, LEWIS R, DWYER-JOYCE R S, et al. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear[J]. Wear, 2006, 261(11/12): 1253-1264.
- [15] SICHANIM S, ENBLÖM R, BERG M. Comparison of non-elliptic contact models: towards fast and accurate modelling of wheel-rail contact[J]. Wear, 2014, 314(1/2): 111-117.
- [16] KALKER J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact[J]. Vehicle System Dynamics, 1982, 11(1): 1-13.
- [17] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements[J]. Wear, 2002, 253(1/2): 89-99.
- [18] ENBLÖM R, BERG M. Simulation of railway wheel profile development due to wear-influence of disc braking and contact environment[J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1055-1063.
- [19] DE ARIZON J, VERLINDEN O, DEHOMBREUX P. Prediction of wheel wear in urban railway transport: comparison of existing models[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(9): 849-866.
- [20] JENDEL T, BERG M. Prediction of wheel profile wear: methodology and verification[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 37(5): 502-513.
- [21] 丁军君. 基于蠕滑机理的重载货车车轮磨耗研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
DING Jun-jun. Research on wheel wear of heavy haul freight car based on the creep mechanism[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [22] 罗仁, 曾京, 戴焕云, 等. 高速列车车轮磨耗预测仿真[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(6): 551-558.
LUO Ren, ZENG Jing, DAI Huan-yun, et al. Simulation on wheel wear prediction of high-speed train[J]. Tribology, 2009, 29(6): 551-558. (in Chinese)
- [23] 罗仁, 曾京, 郭平波, 等. 高速列车轮轨参数对车轮踏面磨耗的影响[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(6): 47-53, 63.
LUO Ren, ZENG Jing, WU Ping-bo, et al. Influence of wheel/rail parameters on wheel profile wear of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 47-53, 63. (in Chinese)