

DOI: 10.3901/JME.2022.10.191

基于轮轨型面匹配数值模拟的地铁车轮异常磨耗原因分析^{*}

任德祥¹ 陶功权¹ 李伟¹ 陆文教² 温泽峰¹ 金学松¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;
2. 广州地铁集团有限公司 广州 510330)

摘要: 通过线路测试和数值仿真对某B型地铁列车车轮异常磨耗现象进行深入分析。结合轮轨接触几何关系和轮轨滚动接触理论进行轮轨静态接触分析;基于UM软件建立该地铁车辆动力学仿真模型和磨耗预测模型,计算轮对运动状态和车轮磨耗水平。通过对比不同轮轨匹配的仿真结果来分析该地铁车辆发生轮缘和踏面异常磨耗的原因,进而提出相应的控制措施。结果表明,该地铁线路小半径曲线占比较大且钢轨轨底坡异常。地铁车辆轮缘和踏面异常磨耗是由较大轨底坡线路条件下轮轨型面匹配关系不合理所导致。将全线轨底坡修正成1/40对车轮异常磨耗现象的减缓效果有限。为有效减轻该地铁车辆车轮异常磨耗,可考虑将车轮踏面外形由S1002镟修为LM。

关键词: 地铁车轮;异常磨耗;轮轨滚动接触;车辆动力学;轨底坡

中图分类号: U211

Investigation on Abnormal Wear of Metro Wheels through Simulations of Wheel/Rail Profile Matching

REN Dexiang¹ TAO Gongquan¹ LI Wei¹ LU Wenjiao² WEN Zefeng¹ JIN Xuesong¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
2. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510330)

Abstract: The wheel abnormal wear of a certain B-type metro train is analyzed in detail by means of field experiments and numerical simulation. The wheel/rail static contact is analyzed based on wheel/rail contact geometry relationship and wheel/rail rolling contact theory. The vehicle dynamics simulation model and wheel wear prediction model of the metro are built with UM, moreover the wheelset motion and wheel wear are calculated. The cause of abnormal wear on wheel flange and tread is analyzed by comparing the simulation results of different wheel/rail matching. Furthermore, the corresponding control measures are put forward. The results show that the investigated metro line has a large proportion of small-radius curve as well as an abnormal rail cant. The main cause of abnormal wear is the improper matching of wheel and rail profile at the large rail cant. It has a limited effect on improving wheel abnormal wear to modify the rail cant of the whole line to 1/40. In order to effectively mitigate wheel abnormal wear of the metro vehicle, changing the wheel profile from S1002 to LM when turning wheels should be considered.

Key words: metro wheels; abnormal wear; wheel/rail rolling contact; vehicle dynamics; rail cant

0 前言

由于地铁具有曲线线路占比高、曲线半径小、

站间距离较短和车辆启动制动频繁等特点,其轮轨滚动接触疲劳和磨耗问题尤为突出。车轮异常磨耗更是广泛存在于地铁运营现场,我国北京、上海、广州、深圳等城市的地铁车辆车轮均发生了不同程度的异常磨耗。车轮异常磨耗会恶化轮轨关系,影响车辆的动力学性能,还会因频繁镟修提高车辆的运营维护成本。

^{*} 国家自然科学基金(51605395)、四川省区域创新合作(2020YFQ0024)和四川省科技计划(2020YJ0311)资助项目。20210925 收到初稿,20220125 收到修改稿

文献[1]以现场轮轨磨耗测试为基础,通过对某地铁车辆的动力学仿真指出,车轮磨耗后车辆的动力学性能有所降低,且车轮出现滚动接触疲劳的可能性增大。文献[2-6]以现场测试为依据对我国地铁车辆的车轮异常磨耗现象进行分析,并结合地铁部门运营经验提出相应的控制措施。杨斌等^[7]通过实验室试验获得 CL60 车轮材料的 $T\gamma/A$ -磨损率曲线,结合 SIMPACK 软件建立的货车动力学模型来预测车轮踏面的磨耗,仿真结果表明相同工况下该模型比采用 Archard 磨损系数得到的结果有更好的精度。李霞等^[8]通过数值方法对比了标准车轮和磨耗车轮与新轨的相互作用,分析了地铁车轮轮缘磨耗和踏面 W 形磨耗的原因,指出轮缘处磨耗主要是由轮轨相互作用引起的,而踏面 W 形磨耗主要源于闸瓦制动。陶功权等^[9-10]从静态接触分析和动力学分析两方面系统地研究了我国地铁常用的 LM、S1002 和 DIN5573 型面在不同轨底坡下的匹配性能,为地铁线路轨底坡设计和车轮踏面外形选型提供了参考。张剑等^[11]在不同轮轨匹配下对某 B 型地铁车辆进行轮轨接触几何、接触应力与磨耗功分析,利用 SIMPACK 软件建立车辆动力学模型并计算其动力学性能,通过对比说明 LM 踏面的曲线通过性能略好于 S1002 踏面,指出 LM 踏面与 CHN60 轨匹配时接触状态较好。国外方面对车轮磨耗的研究起步较早,成果也比较丰富。SAWLEY 等^[12]通过研究北美货运车辆车轮的凹形磨耗指出,该形式车轮异常磨耗会使车辆更容易发生蛇行失稳,虽然凹形磨耗车轮不会直接促使蛇行运动,但却能产生与蛇行运动加速度相近的横向加速度,对车辆运行稳定性产生极大影响。MACE 等^[13]也表示车轮的凹形磨耗会影响轮对通过曲线时的滚动圆半径差,进而降低车辆的曲线通过性能。文献[14-15]针对荷兰鹿特丹市 RET 地铁的车轮严重磨耗和车辆横向振动问题,提出一种基于滚动圆半径差(Rolling radius difference, RRD)函数的车轮型面优化方法,实际运用结果表明,优化型面的车轮服役寿命可提高 4~5 倍。

目前国内较多文献的研究都是针对我国地铁主型踏面 LM 磨耗型踏面,且对异常磨耗的原因缺乏深入的理论研究。然而随着国外车辆的引进, S1002 踏面也在不少地铁车辆上有所应用。本文对某地铁线路的轮轨磨耗和线路情况进行了现场调查,从轮轨静态接触和车辆动力学仿真的角度分析了 S1002 踏面车轮异常磨耗的原因,并针对其异常磨耗现象

提出了相应的控制措施。

1 现场试验分析

我国某地铁线路全长约 25.9 km,该地铁线路所调查列车装配轮缘厚度为 32 mm 的 S1002 车轮型面^[16]。在运营初期,车辆轮对出现了轮缘磨耗较快的问题。在轮对镟修时为了恢复轮缘,车轮需要进行大幅度镟修。一般情况下轮缘每恢复 1 mm,需对踏面镟修 4~5 mm,这使车轮的服役寿命显著缩短。为分析车轮异常磨耗原因,对该线路部分列车的车轮外形、曲线线路钢轨外形、曲线分布和轨底坡分布等进行了调查。

对该地铁线路上运行里程为 5.18×10^4 km、 10.15×10^4 km 和 14.93×10^4 km 的三列车进行了车轮廓形测试。车轮平均廓形与磨耗分布如图 1a 所示,其中磨耗分布是指实测外形与标准型面之间的法向距离差。由测试结果可知,车轮异常磨耗主要体现在两个方面:① 轮缘磨耗较为严重,其磨耗量大于踏面磨耗量。运行里程为 5.18×10^4 km、 10.15×10^4 km 和 14.93×10^4 km 的三列车平均轮缘厚度损失量分别为 0.18 mm、2.07 mm 和 1.78 mm;② 踏面磨耗不均匀,主要集中于名义滚动圆外 10~40 mm(最大磨耗位于名义滚动圆外 20 mm 处),并不是在名义滚动圆附近,磨耗区域随运行里程增加有扩大趋势。

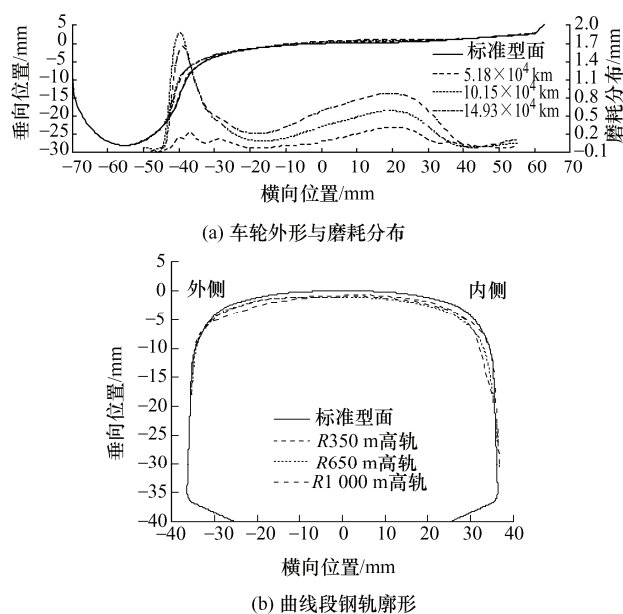


图1 轮轨磨耗现场调查

轮轨外形对轮轨匹配关系和车辆动力学性能影响较大。为了深入分析车轮异常磨耗原因,需

要得到该线路的真实钢轨外形。用钢轨型面测量仪对该线路实际钢轨外形进行了大量的测量。图 1b 给出了 R350 m、R650 m 和 R1 000 m 圆曲线的高轨外形。从图中可看出, 小半径曲线高轨轨距角处存在较明显的轨侧磨耗即侧磨, 这与上述严重的轮缘磨耗现象相吻合。随着曲线半径减小, 高轨轨距角处的磨耗变大, 这是因为曲线半径越小, 轮对通过曲线时越容易贴靠高轨, 对轮缘与轨侧间磨耗的贡献就越大。此外, 钢轨外侧有打磨的痕迹, 因此实测钢轨磨耗包括了钢轨的自然磨耗量和打磨量。

轨底坡作为一种重要的轨道几何参数, 对轮轨接触位置、接触应力、车辆动态性能、轮轨磨耗和疲劳有很大影响^[9-10]。为深入分析车轮异常磨耗原因, 对该线路 9 个区间随机选取不同位置进行了大量的轨底坡测量。将轨底坡测试结果进行统计, 如图 2 所示。不同测点上轨底坡差异较大, 约有 50% 测点处的轨底坡数值分布在 1/23~1/13 范围。根据地铁部门提供的资料显示, 该地铁线路轨底坡设计值为 1/40。而实际线路轨底坡与设计值偏差较大且普遍高于设计值, 偏大的轨底坡对轮轨接触状态、车辆动力学特性和车轮磨耗的影响值得深入研究。

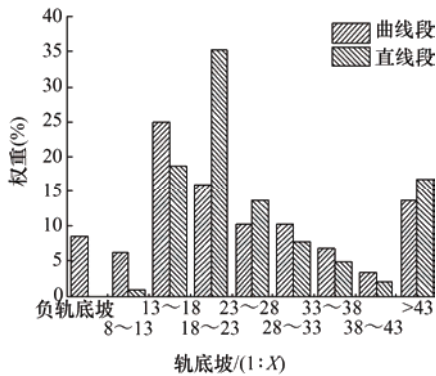


图2 地铁线路轨底坡分布

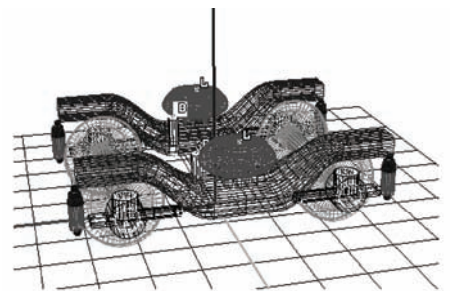
对该地铁线路的直线分布和曲线半径进行调查统计。发现该地铁线路小半径曲线占比较大, 正线上最小曲线半径为 350 m, 半径小于等于 650 m 的曲线线路长度占线路总长约 29.3%, 半径大于等于 800 m 的曲线线路和直线线路分别占比 10.7% 和 60%。

2 数值计算模型

2.1 车辆动力学仿真模型

采用动力学分析软件 UM 建立该地铁车辆的动

力学模型(AW3 状态), 模型由 15 个刚体组成, 包括 1 个车体、2 个构架、4 个轮对和 8 个轴箱。图 3a 为转向架模型, 其中一系悬挂采用钢弹簧和垂向减振器来连接轮对与构架, 并采用转臂式轴箱定位来提供较大的水平定位刚度; 二系悬挂采用两个空气弹簧、两个垂向减振器、两个横向减振器和横向止挡将构架与车体连接起来。由于车辆前后转向架的结构和参数具有对称性, 利用 UM 软件的子结构建模技术可方便地建立整车模型, 见图 3b。建模过程中对某些悬挂参数(如一、二系垂向减振器阻尼和横向止挡刚度)进行了分段线性简化, 以确保计算方便且结果符合实际, 如图 4 所示。



(a) 转向架模型



(b) 车辆动力学模型

图3 地铁车辆动力学模型

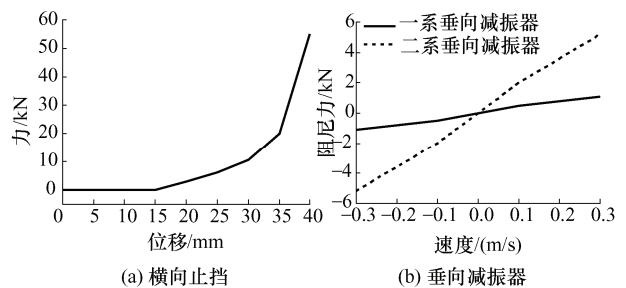


图4 横向止挡和减振器的动力学特性

2.2 车轮磨耗预测模型及验证

2.2.1 车轮磨耗预测模型

采用非椭圆轮轨接触算法^[17]求解轮轨法向接触问题, 采用适用于非椭圆接触斑的 FASTSIM 修正算法求解轮轨切向接触问题。通过车辆动力学模型仿真得到轮对运动状态、法向力和蠕滑率等接触参数, 结合轮轨接触算法计算接触斑内各计

算单元上的正压力密度和滑动量, 然后根据 Archard 材料摩擦磨损模型求得车轮的磨损量, 将磨损量沿法向方向叠加到车轮型面上即获得磨损后的车轮外形。

Archard 材料摩擦磨损模型在车轮磨损计算中应用广泛^[18-20]。该模型假设材料磨损量与法向力和相对滑动量的乘积成正比, 与接触副中较软材料的硬度成反比, 如式(1)所示

$$V_{\text{wear}} = k \frac{F_n s}{H} \quad (1)$$

式中, V_{wear} 为材料磨损体积, F_n 为轮轨法向接触力, s 为相对滑动量, H 为材料硬度, k 为磨损系数。

将轮轨接触斑划分为多个计算单元, 各计算单元的磨损深度是通过将式(1)除以计算单元面积得到的^[21], 如式(2)所示

$$\Delta z(x, y) = k \frac{p_z s}{H} \quad (2)$$

式中, p_z 表示计算单元上的正压力密度, 通过非椭圆轮轨接触算法得到。磨损系数 k 由计算单元上正压力和滑动速度决定, 如图 5 所示。图中磨损系数的数值是在干燥、洁净的室温环境下通过试验获得的, 通常情况下各磨损区的磨损系数可取均值, 甚至可根据实际接触情况稍作修正, 例如, 轮轨界面处施加的润滑剂、存在的污垢和雨雪等天气因素都会使磨损系数降低^[21]。

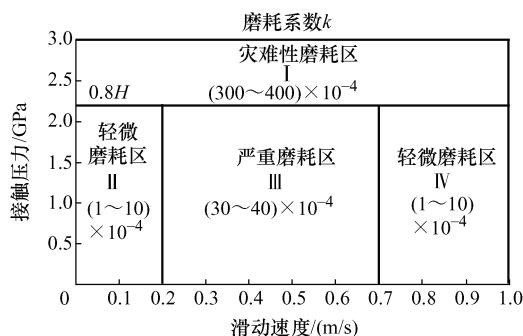


图 5 Archard 磨损系数

在车轮磨损预测中, 运行里程和磨损深度是型面更新的两个常用依据。本文选用磨损深度为 0.1 mm 对车轮型面进行更新。当磨损深度最大值每达到 0.1 mm 时, 就对车轮型面去除一次材料。为保证磨损后新型面的平滑性, 采用通过控制点的 B 样条曲线来生成新型面。车轮磨损仿真中假定钢轨外形不发生变化, 仅对车轮型面进行更新, 直到获得最终的车轮磨损外形。

2.2.2 模型验证

为验证模型准确性, 采用上述模型模拟该地铁

车辆的车轮磨损情况。为尽可能准确模拟实际线路的轨底坡分布特征, 用 1/10 轨底坡代表 1/8~1/13 的轨底坡工况, 1/15 轨底坡代表 1/13~1/18 的轨底坡工况, 依此类推。此外, 用占比较大的 1/50 和 -1/30 轨底坡分别代表小于 1/43 的轨底坡工况和负轨底坡工况, 由此设置包括 -1/30、1/10、1/15、1/20、1/25、1/30、1/35、1/40 和 1/50 在内的 9 种轨底坡工况。按照线路调查情况设置 11 种线路工况(包括直线和 10 种曲线), 如表 1 所示。每种线路工况的线路长度设为 500 m, 车辆以均衡速度通过曲线, 各工况的权重系数根据实测轨底坡和曲线线路分布占比来设置。仿真线路采用实测钢轨外形和美国六级谱不平顺。将半径 650 m 以下曲线高轨侧的轮轨摩擦因数设为 0.2, 以模拟实际线路中小半径曲线的轨侧润滑效果, 其余工况的摩擦因数均设为 0.4。车轮磨损仿真过程中不考虑车辆牵引、制动和道岔等因素的影响。

表 1 线路工况设置

| 线路类型 | 缓和曲线长度/m | 圆曲线长度/m | 超高/mm | 车速/(km/h) | 占比(%) |
|--------|----------|---------|-------|-----------|-------|
| R350 | 50 | 400 | 120 | 60 | 7.3 |
| R450 | 50 | 400 | 110 | 65 | 13.9 |
| R500 | 45 | 410 | 100 | 65 | 1.8 |
| R650 | 35 | 430 | 75 | 65 | 6.3 |
| R800 | 30 | 440 | 60 | 65 | 3.6 |
| R1 000 | 30 | 440 | 60 | 70 | 1.3 |
| R1 200 | 25 | 450 | 50 | 70 | 1.0 |
| R1 500 | 20 | 460 | 40 | 70 | 0.8 |
| R2 000 | 20 | 460 | 35 | 75 | 0.4 |
| R3 000 | 20 | 460 | 25 | 80 | 3.6 |
| 直线 | — | 500 | — | 80 | 60 |

图 6 对比了车轮磨损预测结果和现场实测结果。图中深色实线表示标准型面, 浅色实线表示运行里程为 10.15×10^4 km 时的现场实测结果, 虚线、短虚线和点划线表示所建模型在上述线路条件下不同里程的车轮磨损预测结果。从图中可看出, 运行里程约 10×10^4 km 时预测结果和实测结果基本一致, 在磨损深度和磨损范围上吻合性较高。在 5.09×10^4 km、 10.34×10^4 km 和 14.83×10^4 km 下仿真结果均明显体现出了轮缘严重磨损和踏面非均匀磨损, 且踏面磨损区域随运行里程增加而扩大。这表明该磨损预测模型较为准确可靠。

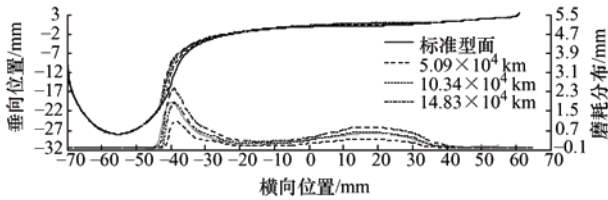


图6 车轮磨耗预测结果和实测结果对比

3 数值结果与分析

3.1 轮轨静态接触分析

为研究轮轨匹配对轮轨接触状态以及车轮磨耗状况的影响,计算 S1002 和 LM 型面在 1/40 和 1/20 轨底坡下的轮轨接触几何关系。计算中钢轨型面选取标准的 CHN60 轨,轨距为 1 435 mm,车轮名义滚动圆半径为 0.42 m,轮对内侧距为 1 353 mm,令轮对从 -12 mm 至 12 mm 横移,每隔 0.5 mm 计算一个轮轨接触点,且不考虑轮对的摇头运动。

图 7 为 S1002 和 LM 型面在 1/40 和 1/20 轨底坡下的轮轨接触点对分布。图中坐标原点在车轮名义半径处,纵坐标 Z 垂直于轨道的水平面向上,横坐标 Y 表示在轨道水平面上垂直于钢轨指向轨道外侧。为了便于表示轮对发生横移运动时轮轨型面接触点位置,将车轮型面的 Z 坐标抬高了 10 mm。图中从左至右,12、8 和 4 对应的轮轨型面连线表示轮对向右移动 12 mm、8 mm 和 4 mm 时车轮与钢轨的接触点连线(即轮轨接触点对);0 表示轮对处于对中位置时的轮轨接触点对;-4、-8 和 -12 表示轮对向左移动 4 mm、8 mm、和 12 mm 时轮轨接触点对,其他轮轨型面连线同理。

从图 7a 和 7b 可看出,当轮对横移为零时,S1002 型面在 1/40 和 1/20 轨底坡下的轮轨接触点分别位于车轮名义滚动圆外约 11 mm 处和 16 mm 处。随着轮对横移,S1002 型面出现明显的接触点跳跃现象。特别对于 1/20 轨底坡下,当轮对向右移动 9~9.5 mm 时,右轮侧接触点发生了较大的跳跃。1/20 轨底坡下名义滚动圆外侧(特别是 20 mm 附近)的轮轨接触点分布过于集中,将引起踏面的非均匀磨耗,这与现场车轮磨耗状况和轨底坡测试结果相符。从图 7c 和 7d 可看出,当轮对横移为零时,LM 型面在 1/40 和 1/20 轨底坡下的轮轨接触点分别位于车轮名义滚动圆内侧约 5 mm 处和名义滚动圆外约 2 mm 处。随着轮对横移,两种轨底坡下 LM 型面的轮轨接触点分布比较均匀,将使车轮表面产生较为均匀的磨耗。此外,这一定程度上反映出相比于 LM 型面,S1002 型面对轨底坡变化更为敏感。

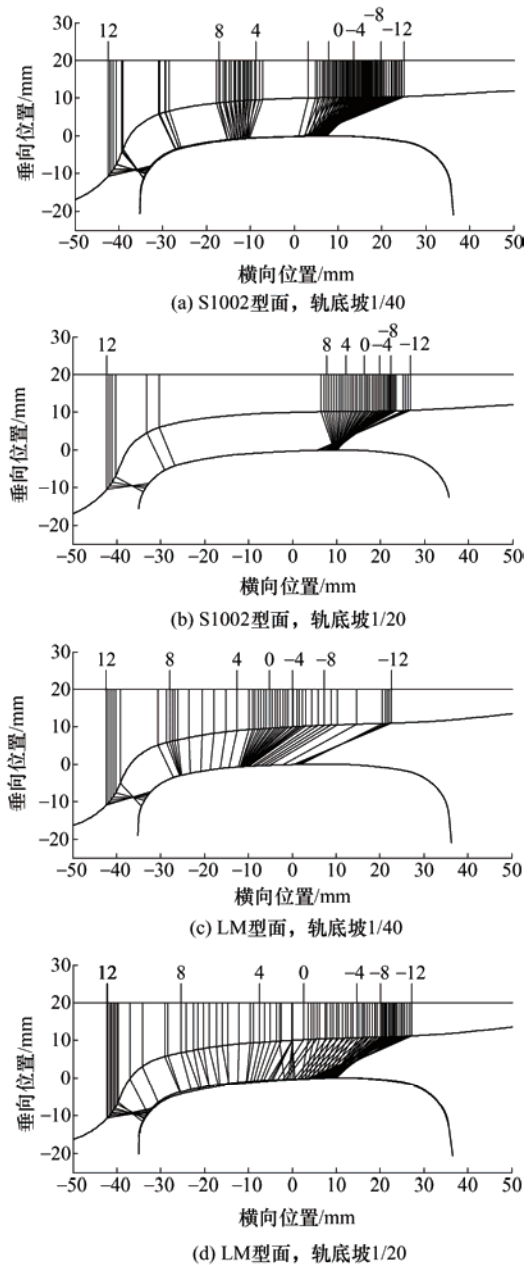


图7 轮轨接触点对分布情况

图 8 为 1/40 和 1/20 轨底坡下 S1002 和 LM 型面与标准 CHN60 轨匹配时的滚动圆半径差(RRD)曲线。从图中可看出,在 1/20 轨底坡下,轮对横移量小于 9 mm 时 S1002 型面的 RRD 曲线比较平缓,横移量大于 9 mm 时突然增加,这与轮轨接触点对的变化有关,即接触点的跳移引起了 RRD 曲线的骤升。这同时表明在 9 mm 轮对横移范围内,S1002 型面无法提供足够的滚动圆半径差,导致轮对的曲线导向能力不足,常常需要依赖轮缘贴靠的方式通过曲线。相比之下,LM 型面在两种轨底坡下都能提供较大的滚动圆半径差,使得轮对在通过曲线时可以一定程度上依靠轮轨蠕滑力导向,从而降低轮缘导向的概率,避免轮缘和曲线高轨侧的接触。

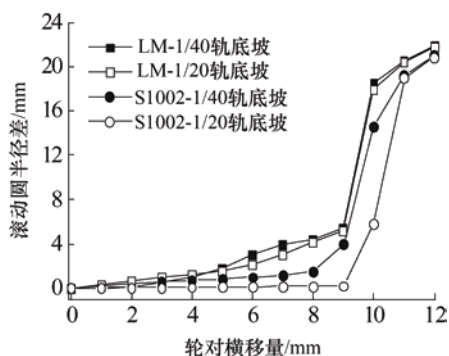


图 8 滚动圆半径差曲线

采用 Kalker 三维弹性体非 Hertz 滚动接触理论分析四种轮轨匹配的接触力学特性，计算中轴重取为 14 t，轮轨材料剪切弹性模量取为 82 GPa，泊松比为 0.28，动、静摩擦因数分别取为 0.29 和 0.3。图 9 显示了不同轮对横移量下的轮轨接触斑面积和最大接触压力。接触斑面积可在一定程度上反映轮轨型面匹配关系，当轮轨型面匹配的共形度较高时，具有较小的接触点法向间隙和较大的接触斑面积；当过曲线轮缘贴靠钢轨时，会导致接触斑面积急剧减小，轮轨表面应力增大。由于 S1002 型面在名义滚动圆附近采用数值设计理念(即高次曲线外形)，当车轮滚动圆接触 CHN60 轨顶部的 R300 圆弧时，轮轨共形度较高，型面匹配关系良好，因此 1/40 轨底坡下随轮对横移量增大，接触点从车轮滚动圆外侧移向滚动圆最终移向轮缘的过程中，接触斑面积呈现先增大后减小的趋势，并在发生轮缘贴靠后急剧减小。最大接触斑面积出现在轮对横移量 2~3 mm 处，即图 7a 中车轮名义滚动圆附近。在 1/20 轨底坡下，S1002 型面的最大接触斑面积发生在横移量 8.5 mm 处，接触斑面积随横移量的变化趋势仍是先增大后减小，但普遍偏小，大多情况下小于 85 mm^2 ，表明轮轨型面共形度较低。LM 型面在 1/40 轨底坡下，接触斑面积随轮对的横移先略减小，再增大，后又减小。在 1/20 轨底坡下，接触斑面积普遍较大，轮对横移量 8 mm 范围内均大于 90 mm^2 ，在轮缘发生贴靠后逐渐减小，轮轨共形度良好。

最大接触压力随轮对横移的变化趋势和接触斑面积的变化趋势基本相反，且都在轮缘发生贴靠后逐渐增大。从图中可看出，S1002 型面在 1/20 轨底坡下的接触压力普遍高于 1 500 MPa，整体水平偏大；在 1/40 轨底坡下接触压力较低。LM 型面在 1/20

轨底坡下的接触压力普遍偏低；在 1/40 轨底坡下，接触压力随轮对的横移先略增大，再减小，后又增大，且在轮对横移量 7~8 mm 范围内增加迅速，最大值约 3 250 MPa。这是因为此时处于轮缘根部接触的状态(图 7c 中横移 8 mm 左右的集中接触区)，接触斑面积较小(图 9a 中横移 7~8 mm 处)。横移 9 mm 时接触斑面积有所增大，所以法向压力又降低到 1 725 MPa 左右。

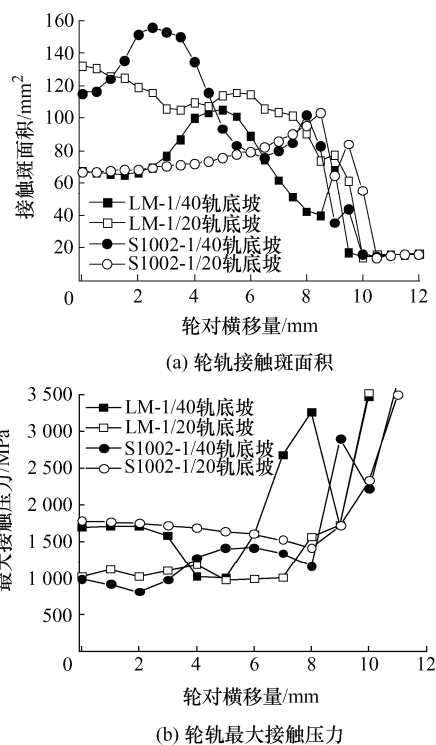


图 9 不同轮对横移量下的接触力学特性

3.2 车辆动力学分析

上述分析只对 1/40 和 1/20 轨底坡条件下的四种轮轨匹配做了静态接触分析，为反映实际线路中轨底坡变化和曲线线路对车辆动态运行状态的影响，进一步阐述车轮异常磨损的原因并提出相应的控制措施，在第 2.2.2 节所述线路工况下进行车辆动力学仿真分析。

3.2.1 轮对运动状态对比分析

钢轨廓形采用标准 CHN60 轨，令该地铁车辆装配不同车轮型面通过 1/40 和 1/20 轨底坡的 R350 曲线，其导向轮对横移量如图 10a 所示。由图可知，1/20 轨底坡下 S1002 型面车轮的轮对横移量最大。且在两种轨底坡的 R350 m 曲线上，S1002 型面车轮的轮对横移量均大于 LM 型面车轮。图 10b 为不同半径曲线上导向轮对横移量的统计值，实线代表轮对横移量的最大值，虚线代表轮对横移量的平均值。

由此可见, 半径越小的曲线, 轮对横移量越大, 轮缘和曲线高轨轨距角处的接触频次就越高, 这也揭示了小半径曲线高轨侧磨严重的原因(图 1b)。在两种轨底坡线路上, S1002 型面车轮的轮对横移量最大值和平均值均大于 LM 型面车轮, 上一节中已对其原因进行了说明, 即提供相同的滚动圆半径差以通过曲线时, S1002 型面需要更大的轮对横移量。在 1/20 轨底坡线路上, 随着曲线半径增大 S1002 型面轮对横移量的衰减趋势相对较小, 这意味着 1/20 轨底坡条件下车辆通过中等半径和大半径曲线时, S1002 型面一定程度上会增大轮缘和钢轨的接触频次, 从而加剧轮缘磨耗。两种轨底坡下 S1002 型面轮对横移量的差异比 LM 型面的大, 进一步表明了 S1002 型面对线路轨底坡变化的敏感性。

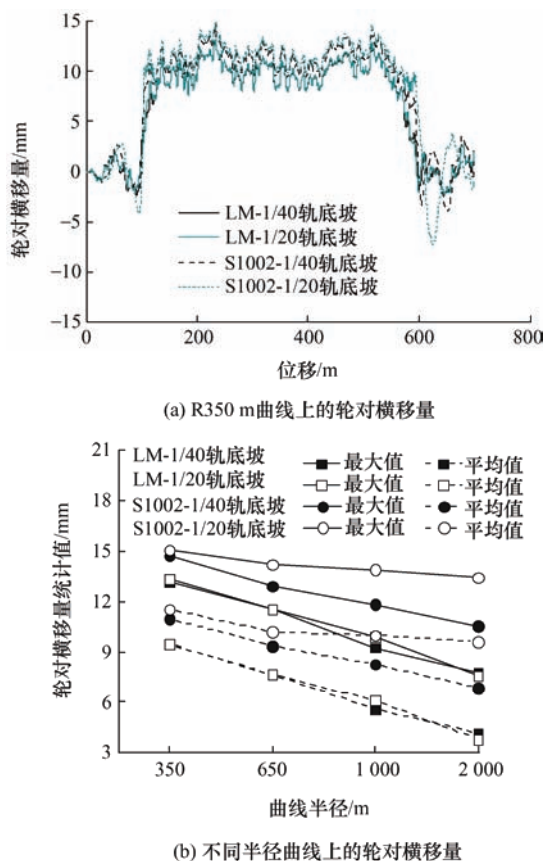


图 10 车辆过曲线时轮对横移量对比

同理, 图 11 为不同半径曲线上导向轮对摇头角的统计值, 实线代表轮对摇头角的最大值, 虚线代表轮对摇头角的平均值。两种轨底坡下, S1002 型面的摇头角平均值仍略大于 LM 型面, 但差别并不显著; 摇头角最大值的变化规律基本上类似于上述轮对横移量的变化规律。由此可见, 线路中小半径曲线占比较大和轨底坡偏大是轮缘严重磨耗的外因, 两者综合作用使 S1002 型面车轮在曲线通过过

程中产生较大的轮对横移量和摇头角, 频繁地依赖于轮缘进行导向, 从而加剧轮缘和轨侧之间的磨耗。

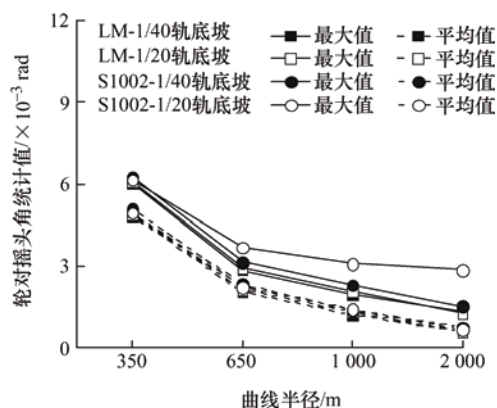


图 11 车辆过曲线时轮对摇头角对比

3.2.2 车轮磨耗水平对比分析

采用第 2.2 节的车轮磨耗预测模型仿真分析不同轮轨匹配下的车轮磨耗水平, 仿真中钢轨廓形采用不同半径曲线的实测廓形。S1002 型面和 LM 型面在真实线路与 1/40 轨底坡线路下运行约 10×10^4 km 的车轮磨耗预测结果如图 12 所示。S1002 型面车轮运行在真实线路时, 磨耗主要发生在轮缘根部-40 mm 附近和名义滚动圆外侧 20 mm 处, 与现场实测的车轮异常磨耗现象较为吻合。当 S1002 型面在 1/40 轨底坡线路上运行时, 车轮磨耗状况与其在真实线路上差别不大。这是由于 1/40 轨底坡下的滚动圆半径差提升并不显著(图 8), 所以轮缘磨耗只是稍有降低, 轮缘和踏面的磨耗位置稍偏向名义滚动圆位置。由此可见, 如果将全线轨底坡修正成 1/40, 仍会存在较为严重的车轮异常磨耗问题。LM 型面车轮运行在真实线路上时, 轮缘磨耗量明显减小, 磨耗主要分布于轮缘根部-35 mm 附近, 踏面磨耗相对较为均匀, 且磨耗位置更偏向名义滚动圆处, 这得益于 LM 型面在 1/20 轨底坡下轮轨接触点对的均匀分布(图 7d)。当 LM 型面车轮在 1/40 轨底坡线路上运行时, 磨耗状况与真实线路上基本一致, 只是轮缘处的磨耗量更小, 踏面磨耗分布也更为集中。为了综合考虑轮缘减磨效果和踏面磨耗均匀性, 认为 LM 型面车轮在真实线路上的磨耗状态好于其他三种情况。

综上可知, 该地铁车辆轮缘和踏面异常磨耗现象的主要原因是: 在当前轨底坡偏大的线路条件下轮轨型面匹配关系不合理。即使将全线轨底坡修正成 1/40, 对车轮异常磨耗现象的减缓效果仍然有限。而当 LM 型面车轮运行在真实线路上时, 轮缘磨耗相对较低, 轮缘厚度损失量相比于 S1002 型面可降

低 58.5%；且踏面磨耗较为均匀，磨耗位置更偏向于名义滚动圆附近。因此为减缓该地铁车辆车轮的异常磨耗，可考虑将车轮外形镟修为 LM 型。

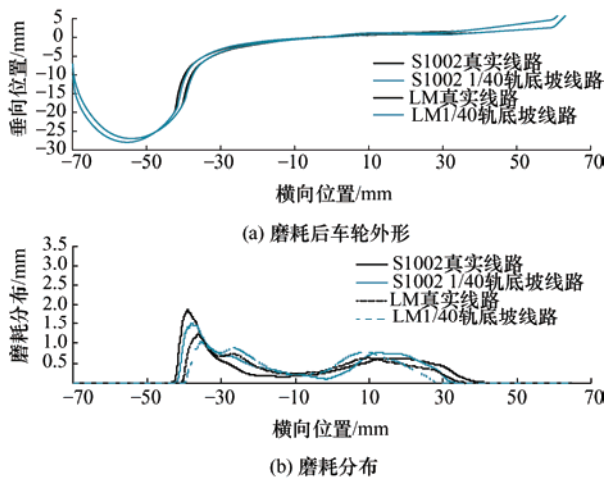


图 12 不同轮轨匹配 10×10^4 km 下的车轮磨耗预测结果

4 结论

本文对我国某地铁线路的轮轨磨耗和线路情况进行了现场调研，从轮轨静态接触和车辆动力学仿真两方面进行考虑，通过对比分析不同轮轨型面匹配的轮轨静态接触、轮对运动状态和车轮磨耗情况，探明地铁线路上 S1002 型面车轮异常磨耗的原因，并提出相应的控制措施。研究结果如下。

(1) 该地铁线路小半径曲线占比较高和轨底坡偏大是轮缘处严重磨耗的外因，两者综合作用会加剧 S1002 型面车轮的轮缘磨耗。

(2) S1002 型面对线路轨底坡变化较为敏感。轮轨型面匹配关系不合理是该地铁车辆轮缘和踏面异常磨耗的主要原因。较大轮对横移量下 S1002 型面不能提供足够的滚动圆半径差，使得轮对曲线通过能力变差，是轮缘处严重磨耗的主要原因；车轮名义滚动圆外 20 mm 附近的轮轨接触点分布过于集中，是踏面处非均匀磨耗的主要原因。

(3) 从轮轨接触几何与力学特性、轮对运动状态和车轮磨耗角度出发，将车轮外形镟修为 LM 型面可有效减缓该地铁车辆车轮异常磨耗。

参 考 文 献

- [1] 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, 34(8): 222-231.
- 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, 34(8): 222-231.

- [2] 郭春晖. 北京地铁 1 号线车轮异常磨耗分析及解决措施[J]. 铁道车辆, 2013, 51(1): 40-43.

WU Chunhui. Analysis of the abnormal wear of wheels for Beijing metro No.1 line and the measures[J]. Rolling Stock, 2013, 51(1): 40-43.

- [3] 王生华. 上海地铁 4 号线车轮轮缘异常磨耗原因分析及解决措施[J]. 铁道车辆, 2007, 45(6): 32-35.

WANG Shenghua. Analysis of causes of abnormal wear of wheel flanges for Shanghai metro No.4 line and measures for solution[J]. Rolling Stock, 2007, 45(6): 32-35.

- [4] 黄幸. 广州地铁八号线轮对磨耗分析及轮缘偏磨优化方案[J]. 机电工程技术, 2017, 46(4): 110-113.

HUANG Xing. Analysis on locomotive wheel wear and optimization schemes to wheel flange partial wear of Guangzhou metro line 8[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(4): 110-113.

- [5] 尚小菲, 孟繁辉, 曲志及. 深圳地铁 2 号线车轮踏面异常磨耗问题的原因分析及解决措施[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(2): 87-90.

SHANG Xiaofei, MENG Fanhui, QU Zhiji. Cause analysis and solutions for abnormal wear of wheel tread on Shenzhen metro line 2[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(2): 87-90.

- [6] 齐万明, 慕光远, 胡建成. 哈尔滨地铁 1 号线车轮踏面异常磨耗原因分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(11): 14-16, 89.

QI Wanming, MU Guangyuan, HU Jiancheng. Analysis on abnormal wear of wheel tread on Harbin metro line 1[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(11): 14-16, 89.

- [7] 杨斌, 郭立昌, 郭俊, 等. 基于 Ty/A -磨损率模型的车轮磨耗仿真分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 101-108.

YANG Bin, GUO Lichang, GUO Jun, et al. Simulation analysis of wheel wear based on the model of Ty/A -wear rate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 101-108.

- [8] 李霞, 温泽峰, 金学松. 地铁车轮踏面异常磨耗原因分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 60-66.

LI Xia, WEN Zefeng, JIN Xuesong. Analysis of abnormal wear on metro wheel tread[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 60-66.

- [9] 陶功权, 温泽峰, 陆文教, 等. 不同轨底坡下地铁车辆

- 轮轨型面匹配的静态接触分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(9): 82-89.
- TAO Gongquan, WEN Zefeng, LU Wenjiao, et al. Static contact analysis of matching relationship of metro vehicle wheel and rail profiles under different rail cant conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(9): 82-89.
- [10] 陶功权, 温泽峰, 陆文教, 等. 不同轨底坡下地铁车辆轮轨型面匹配的动力学分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(5): 16-22.
- TAO Gongquan, WEN Zefeng, LU Wenjiao, et al. Dynamic analysis of wheel and rail profile matching relationship for metro vehicle under different rail cant conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(5): 16-22.
- [11] 张剑, 宋慧玲, 王生武, 等. 地铁车辆轮轨型面匹配分析[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(5): 1-6.
- ZHANG Jian, SONG Huiling, WANG Shengwu, et al. Analysis of matching relationship of metro vehicle wheel and rail profiles[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012, 33(5): 1-6.
- [12] SAWLEY K, URBAN C, WALKER R. The effect of hollow-worn wheels on vehicle stability in straight track[J]. Wear, 2005, 258(7): 1100-1108.
- [13] MACE S, PENA R, WILSON N, et al. Effects of wheel-rail contact geometry on wheel set steering forces[J]. Wear, 1996, 191(1-2): 204-209.
- [14] MARKINE V L, SHEVTSOV I Y, ESVELD C. An inverse shape design method for railway wheel profiles[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007, 33(3): 243-253.
- [15] ESVELD C, MARKINE V L, SHEVTSOV I Y. Shape optimization of a railway wheel profile[J]. Eur. Rail Rev., 2006, 12: 81-86.
- [16] Technical Committee CEN/TC 256. EN 13715: 2006, Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Wheels tread[S]. London: British Standards Institution Publications, 2006.
- [17] PIOTROWSKI J, KIK W. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(1-2): 27-48.
- [18] 李霞, 金学松, 胡东. 车轮磨耗计算模型及其数值方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 193-200.
- LI Xia, JIN Xuesong, HU Dong. Theoretical model and numerical method of wheel profile wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 193-200.
- [19] 丁军君, 杨阳, 李芾, 等. 基于槽型轨的低地板有轨电车车轮磨耗及优化研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(7): 54-59.
- DING Junjun, YANG Yang, LI Fu, et al. Research on wheel wear and optimization of low-floor trams based on groove track[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 54-59.
- [20] 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.
- HUANG Caihong, LUO Ren, ZENG Jing, et al. Effect of system parameters on tread-hollow wear of high-speed train wheels[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(3): 55-62.
- [21] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements[J]. Wear, 2002, 253(1): 89-99.

作者简介: 任德祥, 男, 1993 年出生。主要研究方向为轮轨接触动力学。
E-mail: dxren2016201514@163.com
温泽峰(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。
主要研究方向为轮轨关系。
E-mail: zfwen@home.swjtu.edu.cn