车轮磨耗深度对快速地铁线路道岔区域轮轨动力学性能的影响分析

漆小虎[1]　曾东亮[1,2]　靳　山[3]　胡晓宇[1]　王开云[1]　丁岩松[2]　黄　骏[3]

（1. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室，610031，成都；2. 成都地铁运营有限公司，610051，成都；
3. 成都中电建瑞川轨道交通有限公司，610213，成都）

摘　要　［目的］在时速 120 km 及以上的快速地铁线路中，车轮磨耗发展较快，列车通过道岔时轮轨相互作用剧烈，须探究车轮磨耗深度对列车通过辙叉时动力学性能的影响规律。［方法］以成都某快速地铁线（最高运行时速 140 km）为例，针对该线 12 号合金钢组合辙叉的损伤特征，对 6 列不同运行里程（对应不同车轮磨耗）的列车进行了车轮型面测试。基于实测车轮与辙叉数据，利用 SIMPACK 软件建立了车辆-道岔耦合动力学模型。分析了不同磨耗深度下列车逆向通过辙叉时的轮轨关系与动力学响应，揭示了车轮磨耗深度对列车通过辙叉时动力学性能的影响规律。［结果及结论］随着车辆运行里程增加，车轮踏面的磨耗逐渐加深，磨耗深度与运行里程呈正相关趋势，磨耗位置主要位于名义滚动圆±30 mm 处。随着车轮磨耗深度增加，踏面等效锥度增大，列车通过辙叉时轮轨关系恶化加剧，轮轨冲击增大，极大地影响了列车运行安全性。当车辆运行里程为 21.7 万列 km 时，相较于新轮状态，车轮磨耗深度约为 2.22 mm，轮轨横向力、轮轨垂向力、脱轨系数、车轮抬升量及构架横向加速度等动力学指标的增幅较大，且与车轮磨耗深度均呈正相关趋势。为保障地铁列车通过辙叉时的安全性，降低轮轨作用力，建议车轮磨耗深度达 2 mm 或运行里程达 20 万列 km 时，应进行车轮镟修。

关键词　快速地铁；车辆；车轮磨耗深度；轮轨动力学

中图分类号　U231;U270.11

DOI: 10.16037/j.1007-869x.20240051

Influence of Wheel Wear Depth on Wheel-rail Dynamic Performance in Fast Metro Line Turnout Zone

QI Xiaohu[1], ZENG Dongliang[1,2], JIN Shan[3], HU Xiaoyu[1], WANG Kaiyun[1], DING Yansong[2], HUANG Jun[3]

（1. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Chengdu Metro Operation Co., Ltd., 610051, Chengdu, China; 3. Chengdu China Power Construction Ruichuan Rail Transit Co., Ltd., 610213, Chengdu, China）

Abstract　［Objective］On fast metro lines with speeds of 120 km/h and above, wheel wear develops quite rapidly, and intense wheel-rail interactions occur when trains pass through turnouts, necessitating an investigation into the influence laws of wheel wear depth on the dynamic performance of trains passing through turnout. ［Method］Taking a fast metro line in Chengdu (with a maximum operating speed of 140 km/h) as the case study, and focusing on the damage characteristics of the 12# alloy steel combination turnout on the line, wheel profile measurements are conducted on six trains with different operating mileages (corresponding to different wheel wears). Based on measured wheel and turnout data, a vehicle-turnout coupled dynamics model is established using SIMPACK. The wheel-rail relationship and the dynamic response during the train reverse crossing turnout under different wear depths are analyzed, revealing the influence laws of wheel wear depth on the dynamics performance during crossing turnout. ［Result & Conclusion］As the train operating mileage increases, wheel tread wear gradually deepens, showing a positive correlation between wear depth and mileage, and the wheel wear is primarily located within ±30 mm of the nominal rolling circle. With the increased wheel wear depth, the equivalent conicity of wheel tread also rises, worsening the wheel-rail relationship and intensifying wheel-rail impact during crossing turnout, greatly affecting the running safety of the train. At an operating mileage of 217 000 train-km, the wheel wear depth is approximately 2.22 mm compared to the new wheel condition. Dynamics indicators such as lateral and vertical wheel-rail force, derailment coefficient, wheel lift-off, and bogie frame lateral

引用格式：漆小虎，曾东亮，靳山，等. 车轮磨耗深度对快速地铁线路道岔区域轮轨动力学性能的影响分析 [J]. 城市轨道交通研究，2026，29（3）：117-124.
QI Xiaohu, ZENG Dongliang, JIN Shan, et al. Influence of wheel wear depth on wheel-rail dynamic performance in fast metro line turnout zone[J]. Urban Mass Transit, 2026, 29(3): 117-124.

acceleration show relatively significant increases, all exhibiting a positive correlation with the wheel wear depth. To ensure the safety of metro trains crossing turnout and reduce wheel-rail interaction forces, it is recommended to perform wheel reprofiling when the wear depth reaches 2 mm or after approximately 200 000 train-km of operation.

Key words fast metro; vehicle; wheel wear depth; wheel-rail dynamics

道岔是地铁线路的重要组成部分，在实现地铁列车转线运行中起着关键作用，而辙叉又是道岔实现变向的重要组成部分。相较于正线轨道，辙叉区域钢轨采用非一致性型面，辙叉廓形的变化导致地铁列车通过时产生剧烈的轮轨相互作用。

国内外众多学者对车轮磨耗深度及列车通过道岔时的安全性展开了大量研究。在车轮磨耗方面，文献 [1] 提出了一种用于道岔断面轮轨两点接触几何分析的数值计算方法，分析了各断面的轮轨接触几何关系，结果表明，严重的车轮磨耗会导致轮轨法向接触异常和接触点偏移。文献 [2] 利用 SIMPACK 软件建立了车辆系统动力学仿真模型，研究了凹形磨耗车轮与 CHN60 钢轨匹配时的轮轨接触特性及车辆动力学性能，结果表明，车轮凹形磨耗使轮轨接触点对分布由连续变得分散，轮轨接触压力增大。文献 [3] 计算分析了高速列车车轮磨耗状态下的车轮-道岔作用及车辆动力学性能，结果表明，车轮磨耗会导致轮轨垂向力增大，车体、构架和轮对的垂向振动特性影响大于横向振动特征。

在列车通过辙叉时的动力学研究方面，文献 [4] 基于车辆-轨道耦合动力学理论，对货车重车和提速客车侧向通过 12 号道岔的运行安全性进行了仿真计算，结果表明，列车运行速度若大于 60 km/h，将危及行车安全。文献 [5] 考虑钢轨和轮对的柔性变形，建立了货车-轨道三维动态耦合仿真模型，揭示了道岔区域车轮跳轨和爬轨的脱轨机理。文献 [6] 对我国 12 号道岔进行了动力学测试及动力学计算，并对其轮轨接触特征进行了分析，发现磨耗后的道岔轮轨接触点向车轮踏面外侧转移，钢轨轨肩磨耗明显，列车侧向通过道岔时的脱轨系数超过了限值要求。

目前，针对时速为 120 km 及以上的快速地铁线路道岔辙叉区域的动力学研究较少，本文以成都某快速地铁线为案例，对该线的 12 号合金钢组合辙叉实测廓形和不同运行里程的实测车轮磨耗型面进行分析，研究车轮磨耗发展规律，并利用多体动力学软件 SIMPACK 建立车辆-辙叉耦合动力学模型，分析不同车轮磨耗深度下列车逆向通过辙叉时的车辆动力学响应和轮轨作用关系，探究车轮磨耗深度对列车通过辙叉时动力学性能的影响规律。

1 调研测试

1.1 辙叉损伤调研

成都地铁某线路的列车最高运行速度可达 140 km/h，通过道岔的速度可达 120 km/h。相较其他线路的地铁列车，该线列车通过辙叉时的冲击更大，轮轨相互作用关系也更加恶劣。自开通运营以来，该线采用的 12 号道岔多次出现辙叉严重伤损及磨耗现象，部分辙叉心经过修复性打磨后，短时间内再次出现裂纹、掉块等现象，个别部件伤损甚至达到了重伤级别。图 1 为该线报废下线的辙叉实物照片，伤损主要出现在距离辙叉心尖端 400 mm、580 mm 及 750 mm 处，且距离叉心越远，伤损掉块面积越大。从图 1 可以发现：右侧的翼轨上存在明显的光带，说明该道岔右侧过车十分频繁，列车在该处的通过方向为沿正线逆向通过，车轮从右侧翼轨经有害空间向心轨方向运动。心轨光带始于距离辙叉心尖端 400 mm 处，而伤损出现位置也始于该处，且该情况大多出现在车轮从翼轨过渡到心轨的辙叉薄弱区域。

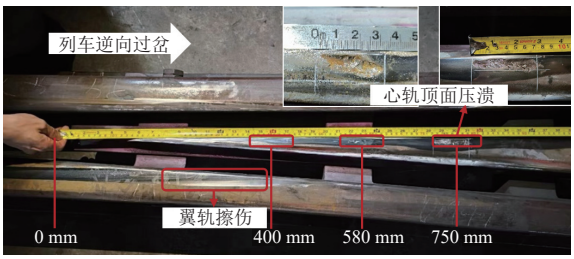


图 1 报废下线的辙叉照片

Fig. 1 Photo of a scrapped turnout removed from service

1.2 型面测试

为分析不同车轮磨耗深度下列车逆向通过辙叉时的车辆动力学响应和轮轨作用关系，探究车轮磨耗深度对列车通过辙叉时动力学指标的影响规律，本文对该线不同运行里程地铁列车的车轮型面开展了测试。选取 6 列不同运行里程的列车，

使用 Miniprof 设备测量列车所有车轮的踏面廓形，车轮型面测试现场如图 2 所示。

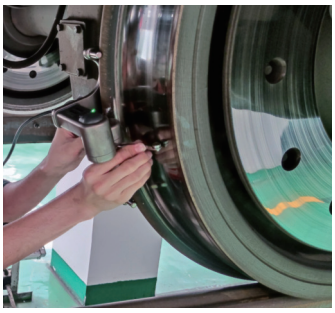


图 2　车轮型面测试现场图

Fig. 2　On-site photo of wheel profile measurement

辙叉廓形测试选取新辙叉，以辙叉心尖端为坐标原点，列车运行方向为 x 方向，轨道横向为 y 方向，轨道垂向为 z 方向。将叉心尖前 1 000 mm(x=−1 000 mm)、叉心后 2 000 mm(x=2 000 mm)作为测量范围，使用激光扫描仪对辙叉表面进行数据采集，对型面进行处理后，得到关键位置处的截面结果。辙叉廓形测量示意图及实测辙叉钢轨高度如图 3 所示。

1.3　车轮磨耗分析

进行测试的 6 列列车的运行里程从 6.3 万列 km 至 21.7 万列 km 不等，将测试列车按运行里程按由小到大的顺序命名，即：将运行里程为 6.3 万列 km 的列车命名为列车 A，运行里程为 10.5 万列 km 的列车命名为列车 B，运行里程为 13.5 万列 km 的列车命名为列车 C，运行里程为 15.5 万列 km 的列车命名为列车 D，运行里程为 17.6 万列 km 的列车命名为列车 E，运行里程为 21.7 万列 km 的列车命名为列车 F。图 4 给出了各测试列车车轮磨耗的测试结果。

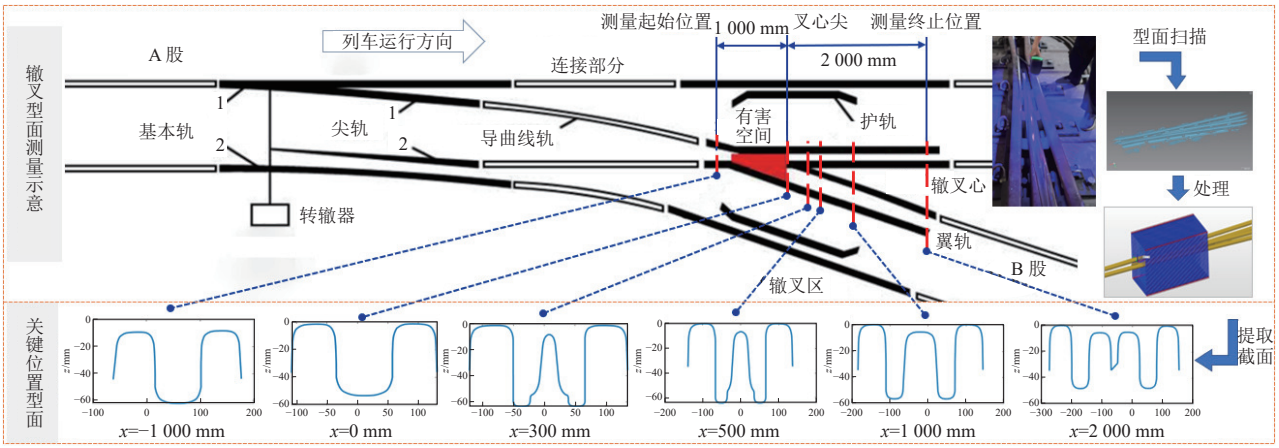
1）图 4 a)展示了运行里程为 21.7 万列 km 的列车车轮的磨耗深度分布情况，车轮磨耗位置主要在名义滚动圆±30 mm 处。

2）图 4 b)展示了各测试列车的车轮最大磨耗深度[7]。① 随着车辆运行里程的增加，车轮踏面的磨耗逐渐加深，车轮磨耗与车辆运行里程呈正相关趋势。当车辆运行里程增加到 21.7 万列 km 时，磨耗增加了 2.22 mm。② 随着车辆运行里程的增加，车轮磨耗发展加剧，且磨耗分布范围显著变大，车辆轮径差也随之逐渐增大，同时伴随着踏面径向圆跳动超标和车轮轮径超差。

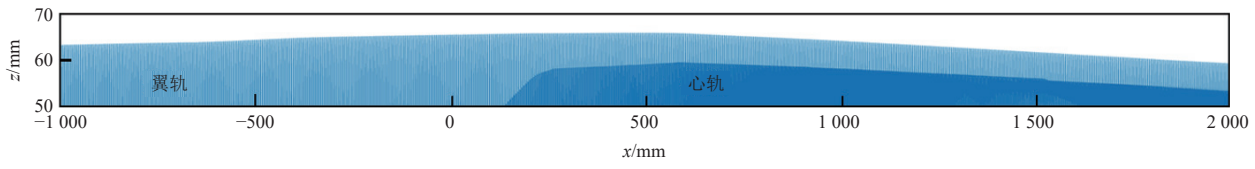
3）图 4 c)为各测试列车的最大磨耗车轮型面，本文将采用这 6 种磨耗车轮的型面与标准 LMA 车轮(无磨耗车轮)的型面进行了动力学计算。

2　车辆-道岔耦合动力学模型

为探究车轮磨耗深度对列车通过辙叉时动力



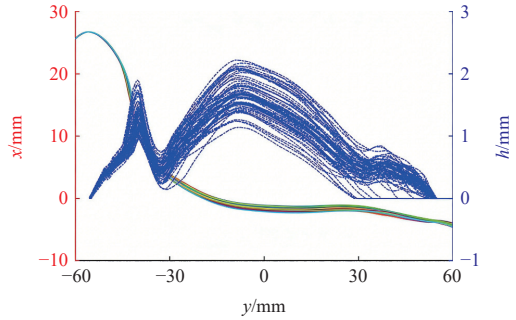
a）辙叉廓形测量示意图



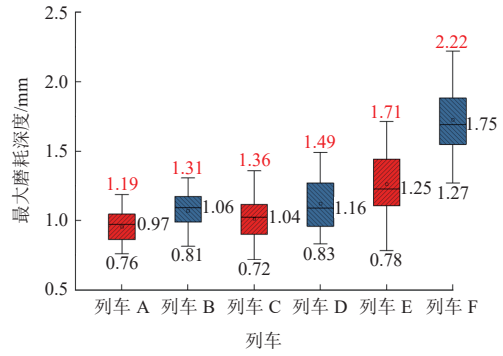
b）实测辙叉钢轨高度

图 3　辙叉廓形测量示意图及实测辙叉钢轨高度

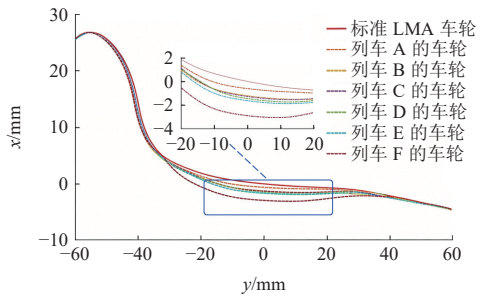
Fig. 3　Schematic of turnout profile measurement and the measured turnout rail height



a）列车 F 的车轮磨耗分布



b）各测试列车的车轮最大磨耗深度



c）各测试列车的最大磨耗型面

注：LMA—磨耗型踏面。

图 4　各测试列车的车轮磨耗测试结果

Fig. 4　Wheel wear measurement results of each test train

学指标和轮轨接触的影响规律，本文基于案例线路地铁车辆与辙叉实测数据，通过多体动力学软件 SIMPACK 建立了车辆-道岔耦合动力学模型。

车辆动力学模型的主要技术参数如表 1 所示[8]，其拓扑关系如图 5 所示。图 5 中：车体、构架和轮对均有 6 个自由度（伸缩、横移、沉浮、侧滚、点头、摇头），而轴箱仅保留 1 个自由度（点头），整个模型共计有 50 个自由度。

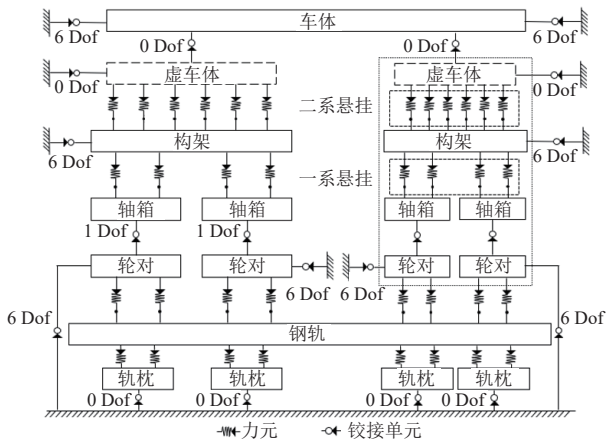
道岔辙叉建模时，将心轨与翼轨作为一个整体进行建模[9]，辙叉区段从辙叉心前端 1 000 mm 至辙叉心后端 2 000 mm，辙叉钢轨型面采用实测廓形[10]，辙叉区钢轨的起点设置在距离轨道模型起始位置 28 m 处，基本轨采用 60 kg 钢轨。车辆动力

表 1　车辆动力学模型的主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of the vehicle dynamics model

参数名称	参数值
轴重/t	17
轨距/mm	1 435
车体长度/m	22.00
车体宽度/mm	3 000
地板面距轨面高度/mm	1 130
车辆定距/mm	15 700
转向架轴距/mm	2 500
轮对内侧距/mm	1 353
车轮直径/mm	860 (标准 LMA 车轮)

注：该模型由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对和 8 个轴箱组成，共计 15 个刚体。转向架包含一系钢弹簧、一系垂向减震器、转臂式轴箱、一系垂向止挡、空气弹簧、二系垂向减震器、二系横向减震器、横向止挡、双牵引拉杆及抗侧滚扭杆。



注：前后转向架布置相同；Dof 为自由度，“6 Dof”指具有 6 个自由度。余类同。

图 5　车辆动力学模型的拓扑关系图

Fig. 5　Topology diagram of the vehicle dynamics model

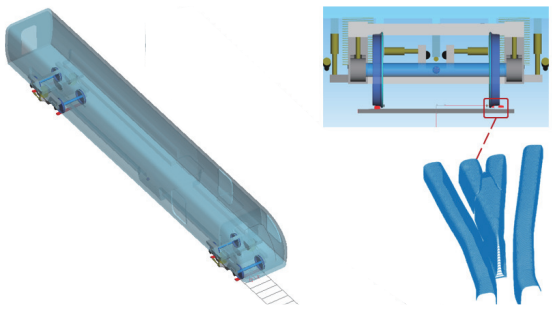
学模型及辙叉型面设置截图如图 6 所示。

3　动力学仿真分析

3.1　列车通过辙叉时的轮轨接触分析

为分析列车通过辙叉时轮轨接触的变化规律，针对新辙叉型面与标准 LMA 型面，利用迹线法[2,11]开展轮轨接触分析计算，其中：轮对横移量为−10~10 mm，轮轨接触点间隔按 0.5 mm 进行计算。对此时的车辆动力学特征进行仿真计算，列车通过辙叉过程轮轨接触点在辙叉上的分布及关键位置轮轨接触状态如图 7 所示。

从图 7 可以看出：



a）动力学模型　　b）辙叉型面设置

图 6　车辆动力学模型及辙叉型面设置截图

Fig. 6　Screenshot of the vehicle dynamics model and turnout profile setting

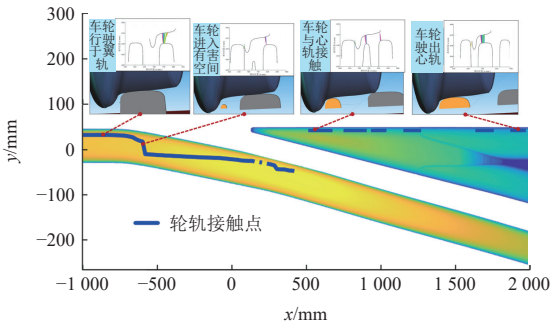


图 7　列车通过辙叉时轮轨接触点分布及关键位置轮轨接触状态

Fig. 7　Wheel-rail contact points distribution and contact status at key positions when the train crossing turnout

1）地铁列车由基本轨进入辙叉时，首先是右侧车轮与翼轨单独接触，轮轨接触点主要位于踏面中部。

2）随后车轮驶入有害空间，轮轨接触点向外移动，名义滚动圆半径减小，此时心轨尚未与车轮接触。

3）随着车轮往前运行，心轨型面逐渐扩大，直至与车轮接触，且车轮尚未完全驶离翼轨，此时车轮处于两点接触的过渡阶段。此外，该阶段由于车轮与心轨突然接触，不同横移量下接触点较为集中，在主要接触点位置处不仅会产生较大应力，且承受载荷也较为频繁，易导致车轮与辙叉的损伤。

4）随后车轮完全由心轨承载，心轨型面逐渐扩大，直至和基本轨一致，接触点逐渐恢复至正常状态，并在距离辙叉心后方 2 000 mm 处，车轮驶出辙叉区。

依据 UIC（国际铁路联盟）发布的 UIC 519: 2004《等效锥度的确定方法》，进一步计算各测试列车车轮横移量与等效锥度的关系曲线[12]，并与标准 LMA 车轮进行对比，其结果如图 8 所示。由图 8 可知，随着车轮横移量的增加，踏面等效锥度明显增大。等效锥度根据车辆运行里程大致分为 3 个等级：① 车辆运行里程低于 10 万列 km 时，等效锥度不超过 0.3。② 车辆运行里程为 10 万列 km~20 万列 km 时，等效锥度为 0.3~0.4。③ 车辆运行里程超过 20 万列 km 时，等效锥度大于 0.4，部分车轮的等效锥度达到了 0.5。

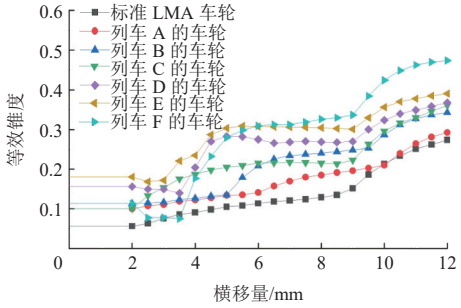


图 8　各测试列车车轮横移量与等效锥度的关系曲线

Fig. 8　Relationship curves between wheel lateral displacement and equivalent conicity for each test train

3.2　不同磨耗车轮通过辙叉时的动力学分析

3.2.1　非线性临界速度

计算列车 A–列车 F 最大磨耗车轮的列车非线性临界速度，并与标准 LMA 车轮的列车非线性临界速度进行对比，其结果如图 9 所示。随着车轮磨耗深度的增加，车辆非线性临界速度不断下降；当磨耗深度达到列车 F 的 2.22 mm 时，列车的非线性临界速度为 165 km/h，相比标准 LMA 车轮，该指标下降了约 49%。由此可见：随着车轮磨耗深度的增加，列车运行稳定性逐渐降低。

3.2.2　动力学仿真结果

为研究不同车轮磨耗深度对列车通过辙叉时的动力学性能影响，分析不同车轮磨耗深度下的

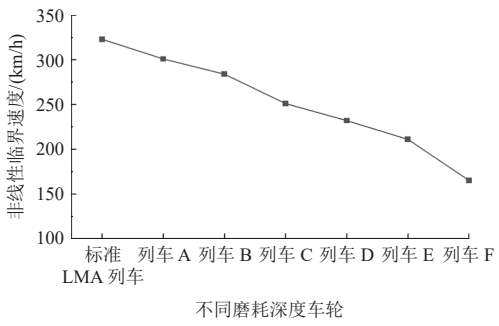


图 9　不同车轮磨耗深度下的列车非线性临界速度对比

Fig. 9　Comparison of train nonlinear critical speeds under different wheel wear depths

车辆安全性，本文利用已建立的车辆-道岔耦合动力学模型，设置了以下仿真工况：列车以 120 km/h 的速度在心轨前方 1 m 处逆向驶入辙叉区，计算列车通过辙叉区域时右侧车轮与辙叉的轮轨横向力、轮轨垂向力、脱轨系数及车轮抬升量，并将不同磨耗车轮、标准 LMA 车轮的轮轨相互作用指标值进行对比分析。不同车轮磨耗深度下列车通过辙叉时的动力学计算结果如图 10 所示。由图 10 可知：车轮在通过辙叉区时，轮轨相互作用非常剧烈。

1）如图 10 a)所示：由于辙叉区翼轨和心轨特殊型面对车轮的横向强制作用，轮轨横向力在辙叉前端及中部区域变化较为剧烈，随后迅速衰减，且车轮磨耗深度对轮轨横向力的影响显著。列车 F 的车轮最大轮轨横向力达到 22.23 kN，相比标准 LMA 车轮增大了 5.31 kN，增幅为 31.36%。

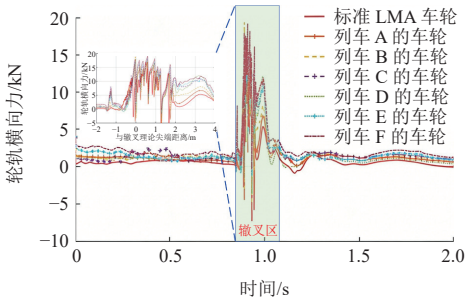
2）如图 10 b)所示：固定辙叉有害空间的存在，使得车轮的滚动迹线并不连续，由此产生了剧烈的轮轨垂向冲击现象[13]，该现象在辙叉前端、辙叉心轮轨过渡位置及辙叉后端区域尤为显著。车轮由翼轨过渡到心轨时，轮轨垂向力陡然降低。此外，车轮的凹型磨耗也会加重轮轨冲击，列车 F 的车轮轮轨垂向力为 87.12 kN，相比标准 LMA 车轮增大了 25.07 kN，增幅为 40.40%。

3）如图 10 c)所示：较大的脱轨系数主要集中在辙叉前端。列车 F 的脱轨系数达到 0.39，相比标准 LMA 车轮增大了 0.11。当列车运行里程超过 10 万列 km 时，脱轨系数最大值高于 0.30，并随着运行里程的增加而逐渐增大。

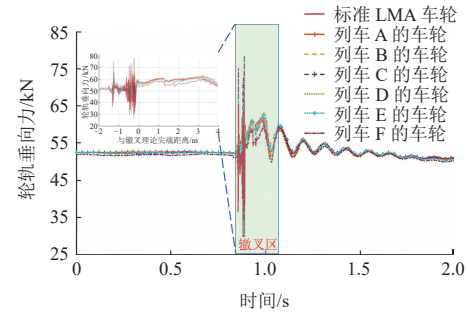
4）如图 10 d)所示：受辙叉区钢轨高度变化的影响，车轮进入有害空间时，车轮抬升量有轻微增大。车轮由翼轨过渡至心轨时，车轮抬升量迅速降低，之后车轮抬升量再次出现轻微增大。在辙叉后端区域，车轮抬升量均大幅降低。列车驶出辙叉区后，车轮抬升量先降低后升高，随后基本稳定。列车 F 的车轮抬升量相比标准 LMA 车轮增加了 1.49 mm，可见车轮抬升量除了与辙叉心有害空间附近翼轨和心轨的型面有关，受车轮磨耗深度的影响也较大。

3.2.3 振动加速度对比

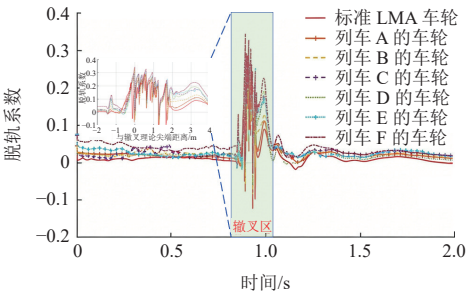
不同磨耗车轮下列车通过道岔时的加速度计算结果如图 11 所示。列车通过辙叉时，车体横向加速度、垂向加速度的波动均不超过 ±0.3 m/s^2，这主要是受到了地铁车辆一系悬挂和二系悬挂减振



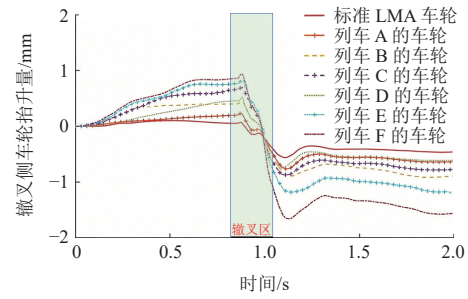
a）辙叉侧车轮轮轨横向力对比



b）辙叉侧车轮轮轨垂向力对比



c）辙叉侧车轮脱轨系数对比



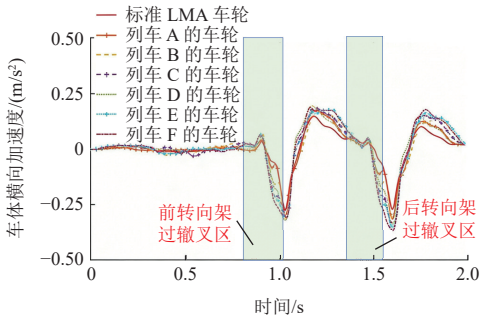
d）辙叉侧车轮抬升量对比

图 10 不同车轮磨耗深度下列车通过辙叉时的动力学计算结果

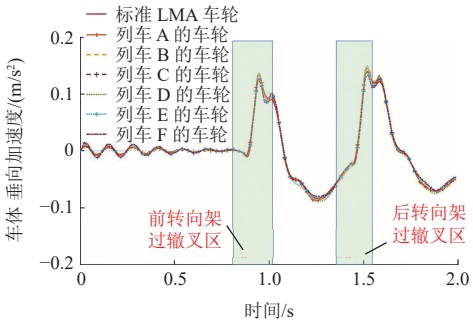
Fig. 10 Dynamic calculation results of trains crossing turnout under different wheel wear depths

作用的影响[14]。相比之下，构架的横向振动较为剧烈，其横向加速度的波动范围达到 ±2.0 m/s^2。

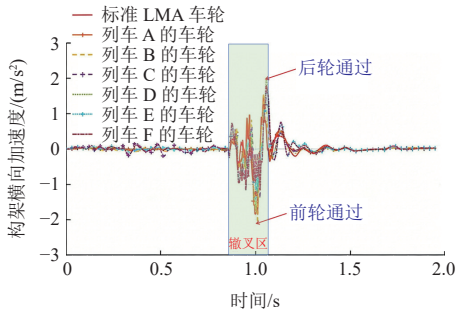
如图 11 所示：列车经过辙叉时，车体的横向加速度、垂向加速度均在前后转向架经过辙叉区域时发生了明显波动。列车 F 的车体最大横向加速



a）车体横向加速度对比



b）车体垂向加速度对比



c）构架横向加速度对比

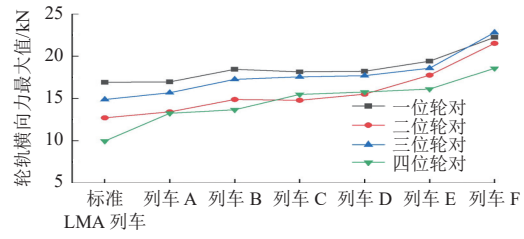
图 11　不同车轮磨耗深度下列车通过道岔时的加速度计算结果

Fig. 11　Acceleration calculation results of trains crossing turnout under different wheel wear depths

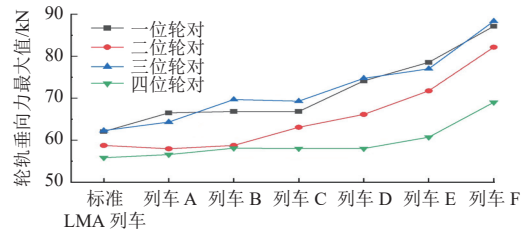
度为 0.37 m/s^2, 最大垂向加速度为 0.15 m/s^2, 相比标准 LMA 车轮分别增大了 0.11 m/s^2 和 0.01 m/s^2。构架的横向振动受有害空间的影响较大, 列车 F 的构架最大横向加速度为 2.37 m/s^2, 相比标准 LMA 车轮增大了 0.91 m/s^2, 增幅为 61.3%, 可见车轮磨耗深度对车辆走行部的横向振动影响显著[15], 车辆运行平稳性由此降低。同时, 列车通过辙叉时噪声加剧, 乘客的乘坐舒适度降低。

3.2.4　动力学指标对比

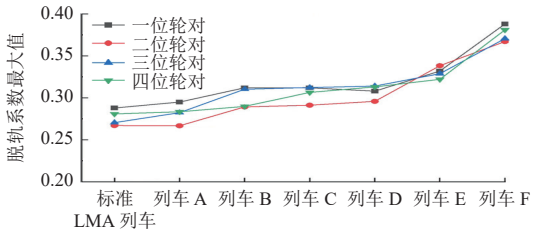
图 12 为不同车轮磨耗深度下的动力学指标最大值对比。相比标准 LMA 车轮, 列车 F 的车轮磨耗深度增加到 2.22 mm 时: ① 辙叉侧轮轨横向力最大值增加了 8.79 kN, 增幅为 69.1%; ② 轮轨垂向



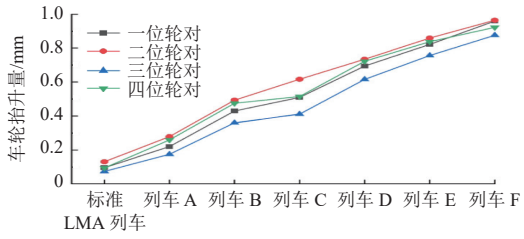
a）辙叉侧车轮轮轨横向力最大值对比



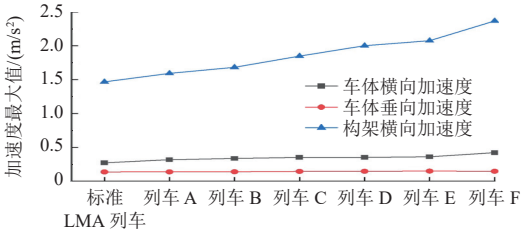
b）辙叉侧车轮轮轨垂向力最大值对比



c）辙叉侧车轮脱轨系数最大值对比



d）辙叉侧车轮抬升量最大值对比



e）车体及构架加速度最大值对比

图 12　不同车轮磨耗深度下的动力学指标最大值对比

Fig. 12　Comparison of the maximum dymanics indicators under different wheel wear depths

力最大值增加了 26.03 kN, 增幅为 41.8%; ③ 脱轨系数最大值增加了 0.11, 增幅为 35.4%; ④ 车轮抬升量最大值增加了 0.83 mm, 增幅为 881.6%; ⑤ 车

体横向加速度最大值增加了 0.06 m/s^2，增幅为 19.8%；⑥ 车体垂向加速度最大值增加了 0.01m/s^2，增幅为 7.1%；⑦ 构架最大横向加速度最大值增加了 0.91m/s^2，增幅为 61.3%。由此可知：各轮对辙叉侧车轮的轮轨横向力、轮轨垂向力、脱轨系数、车轮抬升量及构架横向加速度均与车轮磨耗深度呈正相关趋势；车体的横向加速度、垂向加速度基本不随车轮磨耗深度变化而变化。

如图 12 所示：当车辆运行到 21.7 万 km 后，车轮磨耗深度由 1.71 mm（列车 E）增至 2.22 mm（列车 F），增幅为 0.51 mm。相比列车 E，列车 F 的轮轨横向力、轮轨垂向力均有显著增大，脱轨系数和构架横向加速度也明显增加。这表明车轮磨耗深度增加到 2.22 mm 时，轮轨关系显著恶化，轮轨间相互作用力明显增大，列车通过辙叉时的横向稳定性有所降低。因此，为保障地铁列车通过辙叉的安全性并降低轮轨作用力，建议车轮磨耗深度达到 2 mm 或运行里程达 20 万列 km 时，应结合地铁车辆的修程修制，综合考虑车轮使用寿命、列车振动噪声等因素，对车轮进行镟修。

4 结语

本研究通过动力学仿真分析，分析了车轮磨耗深度对快速地铁线路道岔的区轮轨动态行为的影响。结果表明：随着车轮磨耗加深，轮轨接触关系显著恶化，等效锥度增大，列车通过辙叉时轮轨力与振动响应明显加剧，对车辆运行安全性构成了威胁。同时基于分析结果，本研究提出了针对该线路车轮镟修阈值的具体建议。

为进一步深化该领域研究，后续工作可从以下几方面展开：

1）开展不同线路条件、列车运行速度与载荷工况下车轮磨耗演变对道岔区动力响应的综合影响分析。

2）开展轮轨型面匹配优化研究，从主动设计层面延缓车轮磨耗并改善列车通过性能。

3）结合长期跟踪监测数据，构建车轮磨耗与动力学性能映射关系的预测模型，为状态修与预防性维护提供理论依据。

参考文献

[1] SUGIYAMA H, TANII Y, MATSUMURA R. Analysis of wheel/rail contact geometry on railroad turnout using longitudinal interpolation of rail profiles[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2011, 6(2): 024501.

[2] 宦冬，陶功权，谢清林，等. 地铁车轮凹形磨耗对轮轨接触及动力学性能的影响 [J]. 机械，2021，48(7)：26-34.
HUAN Dong, TAO Gongquan, XIE Qinglin, et al. Influence of hollow-worn wheels on wheel-rail contact and dynamic performance of metro vehicle[J]. Machinery, 2021, 48(7): 26-34.

[3] 肖乾，李超，昌超，等. 高速列车型面不同磨耗状态下的过岔性能研究分析 [J]. 铁道学报，2020，42(8)：51-59.
XIAO Qian, LI Chao, CHANG Chao, et al. Research on turnout passing performance of high-speed train with different wheel wear states[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(8): 51-59.

[4] 翟婉明，王开云. 机车车辆侧向通过道岔时的运行安全性评估 [J]. 同济大学学报(自然科学版)，2004，32(3)：382-386.
ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Safety assessment of trains passing through branch lines of turnouts[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(3): 382-386.

[5] NIJMAN E, BUCHEGGER B, PICKL W, et al. The influence of the lateral contact point trajectory and the rotation of the monoblock on the impact loads in railway turnouts[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 536: 117118.

[6] 李伟，司道林，王树国，等. 我国主型 12 号道岔动力学特性分析 [J]. 铁道建筑，2019，49(3)：123-127.
LI Wei, SI Daolin, WANG Shuguo, et al. Analysis of dynamic characteristics of No. 12 turnout in China[J]. Railway Engineering, 2019, 49(3): 123-127.

[7] 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，2022，58(4)：191-201.
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, 58(4): 191-201.

[8] 张志良，史海欧，袁泉，等. 地铁道岔侧向速度提升和低磨耗结构设计研究 [J]. 铁道建筑，2021，51(6)：129-134.
ZHANG Zhiliang, SHI Haiou, YUAN Quan, et al. Research on structure design of increasing passing speed and low wear in the diverging route of metro turnouts[J]. Railway Engineering, 2021, 51(6): 129-134.

[9] 樊美娟. 直线电机列车侧向通过道岔安全性研究 [D]. 成都：西南交通大学，2020.
FAN Meijuan. Safety study of linear motor trains passing through turnouts in the lateral direction. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[10] 朱黄石. 重载列车对固定辙叉的磨耗及动力学性能研究 [D]. 北京：北京建筑大学，2019.
ZHU Huangshi. Research on wear and dynamic performance of heavy-haul trains on rigid frogs. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.

（下转第 133 页）

Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(2): 104-107.
[9] 邓翔飞. 市域(郊)铁路跨线运行至城际铁路信号系统方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(4): 200-205.
DENG Xiangfei. Research on signaling system of city(suburban) railway cross-line operation to inter-city railway[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(4): 200-205.
[10] 朱松巍. 基于运行等级的列车节能运行图优化 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZHU Songwei. Energy-efficient train schedule optimization based on operation levels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
[11] 吴大武. 城轨线路 ATO 系统控车策略优化 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(12): 60-63.
WU Dawu. Optimization of train control strategy of ATO system for urban rail line[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(12): 60-63.
[12] 高豪, 柴娟, 凌小雀, 等. 基于列车节能运行的惰行-巡航组合控制策略 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(11): 13-17.
GAO Hao, CHAI Juan, LING Xiaoque, et al. Coasting-cruising combined control strategy based on train energy-efficient operation[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(11): 13-17.
[13] 卢田. 基于深度强化学习的城轨列车自动驾驶多目标控制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
LU Tian. Research on multi-objective control for urban rail train automatic operation based on deep reinforcement learning[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2024.
[14] 彭云龙, 康元磊, 于逸尘, 等. 基于精准停车及节能优化的列车速度跟随控制 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(6): 215-220.
PENG Yunlong, KANG Yuanlei, YU Yichen, et al. Train speed following control based on precise parking and energy saving optimization[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(6): 215-220.
[15] 伍成城, 纪学斌, 石红国, 等. 基于离散-连续动态规划的城市轨道交通列车速度曲线优化研究 [J]. 铁道标准设计, 2025, 69(9): 9-15.
WU Chengcheng, JI Xuebin, SHI Hongguo, et al. Study on optimization of train speed profiles of urban rail transit based on discrete-continuous dynamic programming[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(9): 9-15.

· 收稿日期: 2024-12-26 修回日期: 2025-10-28 出版日期: 2026-03-10
Received: 2024-12-26 Revised: 2025-10-28 Published: 2026-03-10
· 第一作者: 林静, 高级工程师, 525843309@qq.com
通信作者: 邓志翔, 正高级工程师, 1082626@qq.com
· ⓒ《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
ⓒ Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 124 页)

[11] 王开文. 车轮接触点迹线及轮轨接触几何参数的计算 [J]. 西南交通大学学报, 1984, 19(1): 89-99.
WANG Kaiwen. The track of wheel contact points and the calculation of wheel/rail geometric contact parameters[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1984, 19(1): 89-99.
[12] 李浩, 戴焕云, 汪群生, 等. 等效锥度对 120 km/h 地铁车辆横向稳定性影响研究 [J]. 机车电传动, 2020(3): 68-72.
LI Hao, DAI Huanyun, WANG Qunsheng, et al. Research on influence of equivalent conicity on lateral stability of 120 km/h metro vehicles[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 68-72.
[13] 王伟平, 王健, 徐井芒, 等. 列车通过 12 号无砟道岔及配套交叉渡线时的安全性和舒适性评价 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59(1): 6-10.
WANG Weiping, WANG Jian, XU Jingmang, et al. Evaluation of safety and comfort when train passing through No. 12 ballastless turnout and supporting scissors crossing[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(1): 6-10.
[14] 李金城, 丁军君, 李芾, 等. 高速道岔车辆动力学指标研究与过岔计算 [J]. 铁道标准设计, 2020, 63(10): 157-162.
LI Jincheng, DING Junjun, LI Fu, et al. High-speed turnout vehicle dynamics index research and vehicle dynamics calculation[J]. Railway Standard Design, 2020, 63(10): 157-162.
[15] 田春雨, 赵天运. 地铁 7 号可动心轨道岔动力学仿真研究 [J]. 铁道勘察, 2022, 48(2): 114-119.
TIAN Chunyu, ZHAO Tianyun. Dynamic simulation of metro No. 7 turnout with movable-point frog[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(2): 114-119.
[16] 许娇, 吴启凡, 王红伟, 等. 城市轨道交通列车碰撞动力学参数对爬车行为的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(3): 74-80.
XU Jiao, WU Qifan, WANG Hongwei, et al. Effects of crash dynamic parameters of urban rail transit train on climbing behavior[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(3): 74-80.
[17] 门永林, 张运航, 许旭. 基于动力学仿真计算的 AH 型车限界研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(5): 40-44.
MEN Yonglin, ZHANG Yunhang, XU Xu. Research on AH-model vehicle clearance based on dynamics simulation calculation[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(5): 40-44.

· 收稿日期: 2024-01-09 修回日期: 2024-06-15 出版日期: 2026-03-10
Received: 2024-01-09 Revised: 2024-06-15 Published: 2026-03-10
· 第一作者: 漆小虎, 硕士研究生, qixiaohu_af@163.com
通信作者: 曾东亮,高级工程师,793930777@qq.com
· ⓒ《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
ⓒ Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license