

地铁车辆车轮磨耗和镟修策略研究^{*}贾小平^{1,2} 朱程¹ 戴焕云² 杨陈¹

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司技术中心, 210031, 南京;

2. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都)

摘要 [目的] 车轮磨耗对地铁车辆的振动环境有直接影响, 异常磨耗严重时引发车辆结构疲劳超限, 降低列车运行的安全性, 故有必要研究地铁车辆车轮磨耗和镟修策略, 以提高地铁车辆车轮运维的水平。[方法] 以国内某型地铁车辆作为研究对象, 分析了地铁车辆车轮磨耗规律; 根据地铁车辆车轮磨耗模型和车轮剩余寿命预测, 分析了车轮关键参数在不同运营阶段的变化特征; 综合仿真模型和实测数据的结果, 提出了运维策略的优化方案。[结果及结论] 运营前期车轮损耗量中镟修占比较高, 随着轮轨匹配性的改善, 轮轨磨耗取代镟修损耗成为轮轨的主要磨耗方式; 适当降低轮轨摩擦因数和运营速度有利于降低轮轨磨耗功率; 采用小等级镟修方法和灵活进刀量有效降低了车轮径向损耗量, 延迟了车轮服役寿命。研究结果可为地铁线路轮轨磨耗的减缓和车轮镟修技术的优化提供应对措施。

关键词 地铁; 车轮磨耗; 镟修策略; 损耗率; 寿命

中图分类号 U264.8:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.026

Research on Metro Vehicle Wheel Wear and Reprofilng Strategy

JIA Xiaoping^{1,2}, ZHU Cheng¹, DAI Huanyun², YANG Chen¹

(1. Techology Center of CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Wheel wear directly affects the vibration environment of metro vehicles. Severe abnormal wear can lead to structural fatigue exceeding the limit, reducing the safety of train operation. Therefore, it is necessary to study the wear and reprofiling strategy of metro vehicle wheels to improve the maintenance level. [Method] Taking a certain type of metro vehicle in China as the research object, the wear law of metro vehicle wheels is analyzed. Based on the wear model of metro vehicle wheels and the prediction of wheel remaining service life, the variation characteristics of wheel key param-

eters in different operating stages are analyzed. Based on the comprehensive results of simulation models and field-measured data, an optimization plan for the operation and maintenance strategy is proposed. [Result & Conclusion] The results indicate that in the early stage of operation, the proportion of wheel loss from reprofiling is relatively high, and with the improvement of wheel-rail matching, wheel-rail wear replaces reprofiling loss as the main wear mode. Properly reducing the wheel-rail friction coefficient and the operating speed is beneficial for reducing the wheel-rail wear power. The use of small-scale reprofiling methods and flexible feed amount effectively reduces wheel radial wear and prolongs their service life. The research results can provide corresponding measures for reducing wheel-rail wear on metro lines and optimizing wheel reprofiling technology.

Key words metro; wheel wear; reprofiling strategy; wear rate; service life

0 引言

地铁车辆在服役过程中, 受轮轨长期滚动摩擦的影响, 车轮踏面与钢轨表面均出现不同程度的磨耗, 而轮轨接触面的动态变化将直接影响其相互作用力, 从而对车辆和轨道零部件的服役可靠性具有较大的影响。因此, 开展车轮磨耗和镟修策略研究对车轮的健康运维管理具有重要意义。

针对车轮的磨耗和镟修策略研究, 文献[1]结合车轮微观组织性能, 对地铁车轮的偏磨问题进行了探究, 并得出通过提高轮辋硬度和缩小轮辋断面径向硬度差可以有效延缓车轮异常磨耗的结论。文献[2]利用传统方法和数据拟合方法分别对车轮磨耗量进行计算, 对比发现传统方法的预测寿命偏差较大, 采用数值拟合方法预测的车轮寿命更可靠。文献[3]基于测试和仿真对比发现轨底坡较大

^{*} 国家自然科学基金高铁联合基金项目(U2268211)

时,不合理的轮轨匹配关系容易引起车轮异常磨损,通过更换车轮踏面廓形可以有效改善轮轨匹配关系。文献[4]根据车轮非圆化磨损形成原因的不同,将其分成三大类:由车轮初始缺陷引起的非圆化、由车辆-轨道固有振动引起的非圆化和由踏面制动时闸瓦与车轮间热弹性失稳引起的非圆化;针对车轮非圆化磨损的控制措施和镟修质量进行分析,可为车轮非圆化磨损机理的研究和控制措施的选用与实施提供参考。文献[5]基于车辆/轨道耦合动力学建立长期磨损迭代模型,通过对比分析车轮粗糙度对车轮多边形的影响,发现提高镟修质量可以减缓多边形的增长速度。文献[6]针对车轮轮缘异常磨损问题,从线路因素、车辆因素及轮轨匹配方面进行分析,结合主要影响因素提出了减缓轮缘异常磨损的措施,并通过长期服役跟踪进一步优化。文献[7]基于轮缘增厚的原理,发现测量标准的改变和机车运行线路条件的改善是轮缘增厚超限的主要因素,通过构建轮缘减薄模型,实现车轮镟修的定制化方案,拓展了经济化镟修模型应用范围,具备推广应用价值。文献[8]基于 Hertz(赫兹)理论和 FASTSIM 算法建立轮轨局部接触模型,对比分析等效轨道线路法与真实轨道线路法在建模复杂度、车轮磨损预测结果及计算效率方面的差异,结果表明真实轨道线路法虽然建模复杂,但是模拟实际轨道线路的误差值更小,有助于车轮磨损的精确化预测。

以上研究主要对轮轨关系和车轮磨损开展了仿真研究,但是对于实测数据和仿真分析的对比工作开展得相对较少。因此,本文基于车轮服役数据,建立了车轮磨损计算模型;对地铁车辆的车轮磨损和镟修策略开展分析,并利用长期服役跟踪下的数据监控,实现了测试与分析的系统统计;这可为后续研究提供一定参考。

1 地铁车辆车轮磨损规律统计分析

1.1 列车运营里程

某线列车的架修周期为 5~6 年,考虑到运营实际情况,规定列车运营到 75 万~80 万 km 时需进行架修。截止到 2023 年初,该线 29 列电客车的运营里程主要分布在 70 万~80 万 km,其中部分车辆的最大运营里程已突破 90 万 km,具体公里数如图 1 所示。

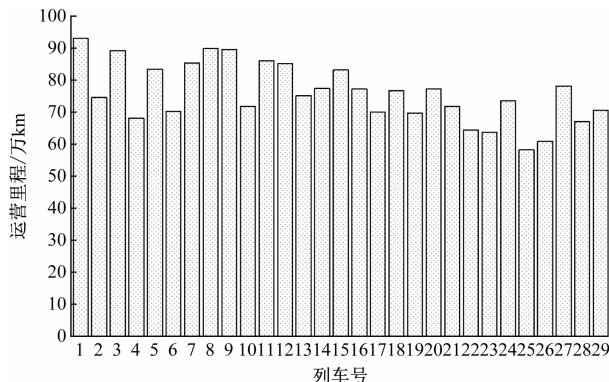


图1 列车的运营公里数

Fig. 1 Train operating mileage

1.2 径跳发展规律

根据该线的车轮运用规范,车轮径跳达到 0.4 mm 时,要求进行镟轮作业。对该线车辆服役 6 年的车轮跟踪数据进行分析,以 3 年为一个阶段,统计运营第一阶段(2017—2018 年)和第二阶段(2019—2022 年)的车轮径跳超差次数,其对比结果如图 2 所示。

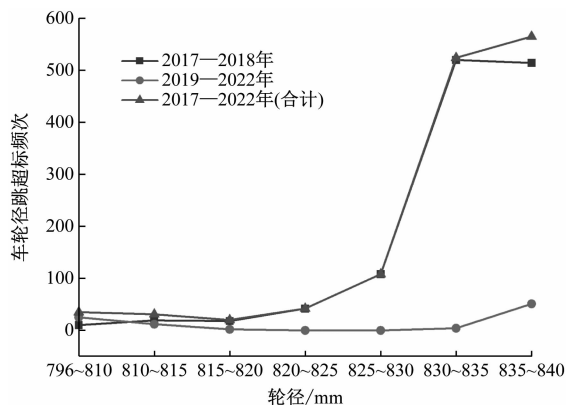


图2 不同运营阶段的径跳超标频次图

Fig. 2 Frequency diagram of exceeding radial jump in different operation stages

第一阶段的径跳超差总体水平较高,主要集中在 830~840 mm 范围内,超差达到 917 次;出现在 800~825 mm 范围内次数很少,超差只有 129 次。而第二阶段的径跳超差水平较低,在 800~840 mm 范围内分布均衡,其中在 830~840 mm 范围内的径跳超差次数相对第一阶段大幅降低,降幅达 80%。

经过现场勘查发现,造成这种现象的主要原因是:第一阶段涉及到车轮和钢轨处于磨损初期,正线钢轨打磨不足,且钢轨润滑装置安装较少,轮轨磨合明显,导致车轮出现异常磨损,径跳值出现超标的频次较高,而在轮轨磨损后期情况得到显著

改善。

2 地铁车辆车轮磨耗模型

2.1 磨耗计算方法

基于计算多系统动力学理论,依据车辆动力学性能指标^[9-10],建立多刚体车辆模型:将车辆质量占比较大、变形较小的部件简化为刚体,质量较小而变形较大的部件简化为力元;其中,车体、构架、轮对、轴箱、电机和齿轮箱等简化为刚体,一系悬挂、二系悬挂、牵引拉杆和横向止挡等简化为力元。根据各刚体之间的运动关系,主要刚体中车体、构架、轮对、电机、齿轮箱均考虑伸缩、横移、浮沉、侧滚、点头、摇头自由度,轴箱仅考虑为点头自由度,多刚体模型中共计98个自由度,定义车辆的前进方向为 x 轴; y 轴平行于轨道平面指向右方; z 轴垂直轨道平面向下,车辆前进方向的第一个轮对为一位轮对,如图3所示。

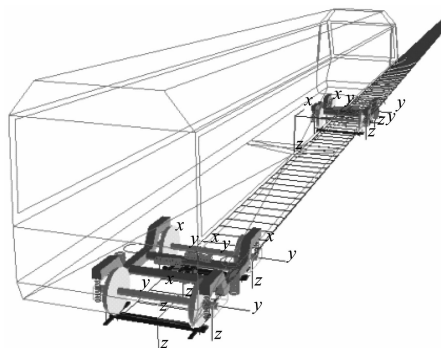


图3 车辆系统动力学模型

Fig.3 Vehicle system dynamics model

针对该线路的实际工况,进行小曲线区段的参数模拟,具体如下:轨底坡为1/40,缓和曲线与圆曲线的长度分别为100 m和200 m,最大超高120 mm,暂不考虑轨道不平顺。选取轮轨摩擦系数和运营速度作为参数系统的单一变量,其他参数保持不变,分析对象为右侧导向轮。

2.2 车轮磨耗计算分析

考虑到轮轨之间的蠕滑现象,设车轮名义滚动圆半径为 r_0 ,车轮滚动时的角速度为 ω , δ 为蠕滑系数, v 为车轮实际前进速度,则纵向蠕滑力 F_x 为:

$$F_x = -\delta \frac{v - \omega r_0}{v} \quad (1)$$

当轮子的滚动方向与实际运行方向不一致时,一方面存在偏角 θ ,另一方面接触斑的法向线不与 xOy 平面垂直,存在角 δ ,产生回旋蠕滑率和回旋蠕

滑力矩。横向蠕滑率 E_y 和回旋蠕滑率 E_{sp} 分别为:

$$E_y = \frac{-r_0 \omega \theta}{v \cos \delta} \quad (2)$$

$$E_{sp} = \frac{\omega \delta}{v} \quad (3)$$

动力学 SIMPACK 软件针对轮轨接触的蠕滑现象,提供了磨耗指数作为衡量指标,即轮轨接触斑处所消耗的功,并磨耗功率即轮轨接触斑处所消耗的功率 $P^{[11]}$,具体为:

$$P = |v| \sum (|F_x E_x| + |F_y E_y| + |M_z E_{sp}|) \quad (4)$$

式中:
 F_y ——纵向蠕滑力;
 E_x ——纵向蠕滑率;
 M_z ——回旋蠕滑力矩。

图4为轮轨摩擦系数与磨耗功率的相关性。由图4可知:当轮轨的摩擦系数每增大0.1时,磨耗功率的增幅范围为34%~55%。图5为列车运营速度与磨耗功率的相关性。由图5可知:当轮轨摩擦系数为0.3时,列车运营速度每增大10 km/h,磨耗功率增长19%~46%,并且随着轮轨摩擦系数和运营速度的增长,车轮的磨耗功率与之成正相关,且增长速率呈先快后慢的趋势。

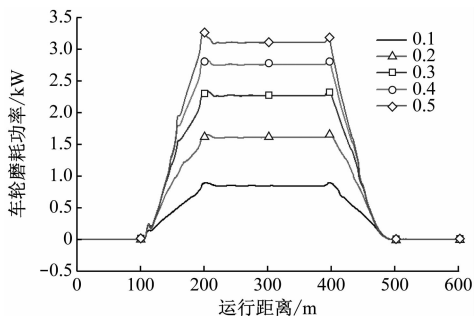


图4 轮轨摩擦系数与磨耗功率的相关性

Fig.4 Correlation between wheel-rail friction coefficient and wear power

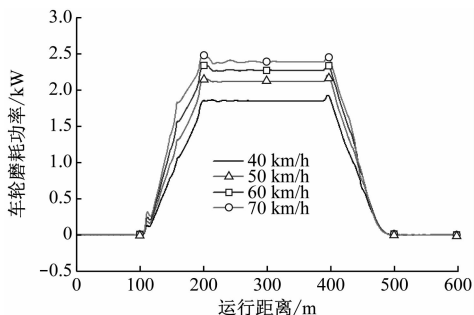


图5 列车运营速度与磨耗功率的相关性

Fig.5 Correlation between train operating speed and wear power

3 地铁车辆车轮剩余寿命预测

3.1 车轮寿命预测方法

传统方法根据专项检修时测得的轮径数据和检修经验,计算车轮年度平均磨耗 x ,计算公式为:

$$x = \Delta D / \Delta S \quad (5)$$

式中:

ΔD ——相隔 1 年 2 次专项修测得的轮径差;

ΔS ——车轮在 2 次专项修之间的运行里程差。

车轮剩余寿命计算公式为:

$$T_{\text{rest}} = (D_{\text{now}} - D_1) / xs \quad (6)$$

式中:

T_{rest} ——车轮剩余寿命;

D_{now} ——目前轮径值;

D_1 ——车轮直径运用极限 (770 mm) 与余量 (25 mm) 之和,即 795 mm;

s ——每列车年平均运行里程。

3.2 车轮寿命预测结果

3.2.1 损耗量对比

基于上文内容显示径跳超差次数与车轮直径存在一定关系。考虑到列车运营的不同阶段受到镟修、轮轨匹配等因素的影响,因此对 6 年的车轮跟踪数据重新界定,按照 2 年为一个周期,分别对 3 个阶段的列车车轮损耗量 (镟修量 + 轮轨磨耗量) 进行统计。其结果发现:

车轮每万公里的镟修量 (见图 6) 在第一、第二阶段相差较小,主要分布在 0.20 ~ 0.35 mm 范围内,而在第三阶段的水平较低,分布在 0.10 ~ 0.22 mm 范围内;车轮每万公里的磨耗量 (见图 7) 水平在第二阶段较大,而在第一阶段最小,这与轮轨匹配存在紧密关系;从车轮每万公里的损耗量 (见图 8) 来看,部分列车 (第 4、26 列) 的损耗水平较高,经调查发现由于制动原因车轮踏面出现了不同程度的擦伤导致;其余车辆总体呈现损耗与运营时间呈负相关的趋势。

3.2.2 损耗速率对比

该线列车的每月平均运营里程 1.2 万 km,传统算法中不考虑磨耗的前期和后期区别,基于公里数对 6 年的统计参数进行直接换算,镟轮切削量为 3.48 mm/次 (每年 1 次) 或 0.242 mm/万 km,正常运营时轮轨磨耗量为 0.364 mm/万 km,损耗量 (镟修量 + 轮轨磨耗量) 为 0.61 mm/万 km。

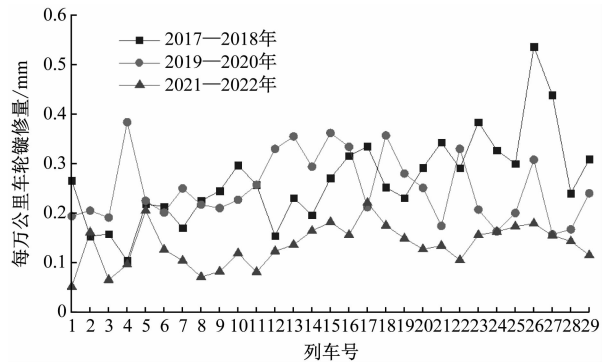


图 6 车轮的每万公里镟修量

Fig. 6 Wheel reprofiling amount per 10 000 kilometers

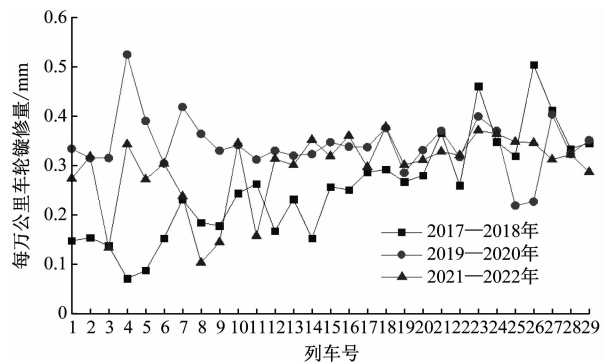


图 7 车轮的每万公里磨耗量

Fig. 7 Wheel wear amount per 10 000 kilometers

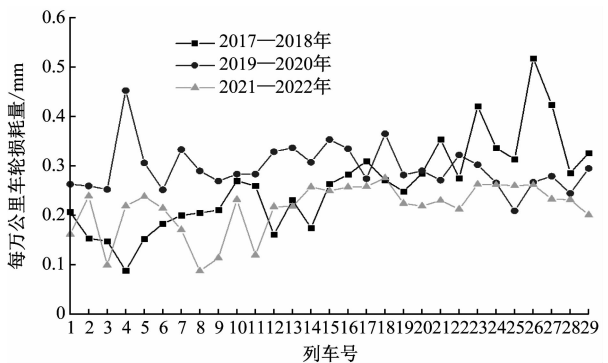


图 8 车轮的每万公里损耗量

Fig. 8 Wheel loss amount per 10 000 kilometers

由表 1 可知:创新法计算发现列车服役初期 (第一阶段) 确实存在损耗量较快的现象,每万公里的损耗量达 0.52 mm,但在磨耗后期 (第二、三阶段) 呈持续下降趋势;而传统算法的损耗量过于偏大,无法体现磨耗速率的阶段变化,不具备代表性。其中,车轮每万公里的镟修量在 3 个阶段依次下降近 15% 和 43.5%,即车轮的镟修量和磨耗量在损耗量中的占比呈负相关。

3.2.3 车轮剩余寿命预测

根据架修的维保规程,列车运营里程达到 75 万

表1 车轮每万公里损耗值

Tab.1 Wheel loss value per 10 000 kilometers

单位:mm				
方法	阶段	镟修量	磨耗量	损耗量
传统法	整个架修期	0.24	0.36	0.61
	第一阶段 (2017—2018年)	0.27	0.25	0.52
创新法	第二阶段 (2019—2020年)	0.23	0.27	0.50
	第三阶段 (2021—2022年)	0.13	0.30	0.43

km时计划安排架修,车轮轮径低于795 mm要求换轮。该线预计1年后列车陆续进入架修期,90%的列车车轮剩余平均损耗量在5~15 mm范围内,部分运营初期上线较少的列车轮径损耗余量很大,达到20 mm以上。

利用截止2023年初的列车运营里程和第三阶段的车轮损耗速率,对该线服役列车运营至架修时车轮径向损耗量进行预测(见图9)。截止架修时,预估轮径低于795 mm的车轮涉及到4列车(T13、T15、T23和T25),其轮饼数量共计为192个。说明该线在第一个架修期运营结束后,占服役总轮饼数13.7%的车轮面临报废处理,剩余寿命不足1年,其余车轮(约86%)则可以服役满第二个架修期,剩余寿命5年左右。

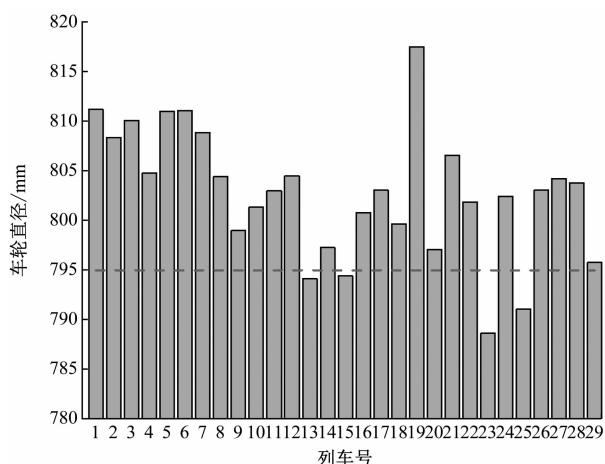


图9 截止架修时车轮直径

Fig.9 Wheel diameter up to the time of overhaul

4 运维策略优化

4.1 磨耗方法分析

结合上文的仿真模型和实测数据的分析,车轮

的磨耗与运营速度和轮轨摩擦因数有较高相关性。根据早期现场勘察和阶段性打磨记录发现,该线在运营初期确实存在轨道润滑不足,钢轨打磨不彻底的现象,因此在第一阶段车轮对损耗量造成了较大的影响。在确保列车安全运营的前提下,对列车在小曲线区段的运营速度和轮轨摩擦因数进行调整,这有助于有效减缓轮轨间的磨耗。

4.2 车轮镟修方法分析

根据该线的水轮镟修数据,对每次镟修后的轮缘厚度值进行统计,如图10所示。由图10可知:考虑到不落轮镟床测量轮缘厚度存在误差,镟修后的轮缘厚度值主要集中在30.0~30.5 mm和31.8~32.3 mm,即实现的是等级镟修中的LM(磨耗)-30和LM-32两镟修等级,最小加工间隔为2 mm。该镟修方法镟修间隔值过大,导致该线运营前4年车轮踏面损耗过快,存在较大的资源浪费。

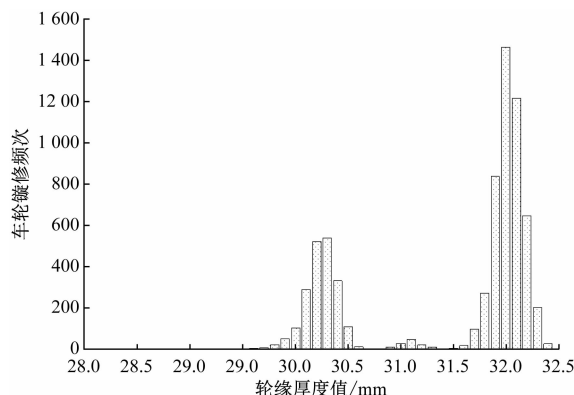


图10 镟修后的轮缘厚度值

Fig.10 Thickness value of wheel flange after reprofiling

4.3 车轮镟修优化提升

目前轨道车辆的轮对镟修方法^[12]主要涉及两类:经济镟修和等级镟修。经济镟修是指确保轮对轮缘高度和轮廓曲线满足标准要求的前提下,轮缘厚度在25.7~32.5 mm范围内可连续取值的镟修方法,其最小加工间隔为0.1 mm。等级镟修是指严格按照TB/T 449—2016《机车车辆车轮轮缘踏面外形标准》中薄LM型踏面中的9种类型^[13]的LM-31.5、LM-31.0、LM-30.0、LM-29.5、LM-29.0、LM-28.0、LM-27.5、LM-27.0和LM-26.0轮廓尺寸进行镟修,轮缘厚度只能按规定值取值的轮对镟修方式,最小加工间隔为0.5 mm。

根据深圳地铁一期罗宝线^[14-15]的镟轮实际数据统计(2004—2012年),考虑到轮轨摩擦因数和运

行速度的变化对轮轨磨耗会产生较大影响。根据计算结果和现场勘察情况,在 2020 年底开始采取相关措施,在日常运营中一方面定期对钢轨人工涂抹润滑油,缩短自动喷油装置的喷油间隔时间,并在小曲线区段采用适当降速;另一方面进行镟修技术的优化,基于镟修数据,将按硬性指标安排的单辆车“恢复性镟修”,改为按走行公里数(12 万 km)进行整列车“改善性镟修”,降低了总体镟修量,同时采用等级镟修能避免车轮集中到限;并且以每辆车最小轮径值为基准,采用“两刀镟”进行镟修,控制径向进刀量累加不能大于不落轮镟床第一次测量的跳动量,同车其他车轴轮径只需保证在超差范围内即可。

镟修技术优化后进行 4 个月的跟踪统计,轮对踏面镟轮切削值可从原来的 0.19 mm/万 km 降至 0.1 mm/万 km。在轮轨磨耗速率不变的前提下,车轮的损耗率下降 20%,截止架修时,预估轮径低于 795 mm 的车轮主要分布在 2 列车(T13 和 T23),轮饼数量共计为 96 个,占服役总轮饼数的 6.9%,相比镟修技术优化前,更换率降低 50%,如图 11 所示。

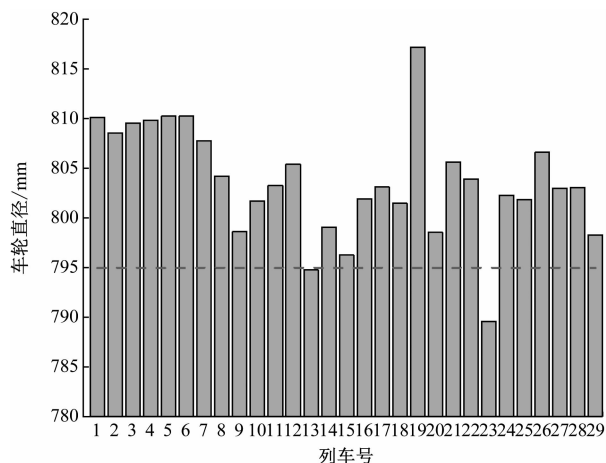


图 11 镟修技术优化后车轮直径

Fig. 11 Wheel diameter after reprofiling technology optimization

5 结语

本文基于仿真分析和车轮长期跟踪数据,对该线车辆的磨耗特征进行了深入研究,具体结论如下:

1) 该线路在运营初期时,车轮镟修量占比高于轮轨磨耗量,随着运营年限变长和轮轨匹配性提高,镟修的车轮数量不断减少,车轮损耗以轮轨磨

耗为主,车轮各关键参数的变化率也呈稳定趋势。

2) 适当调整列车过曲线区段的运营速度和轮轨摩擦因数,有利于减缓轮轨之间的磨耗。

3) 对不落轮镟床实行多廓形的小等级镟修方法和灵活的进刀方法,优化镟修方法后的轮缘和踏面区域的每万公里镟修率相对运营前期降幅达 48%,车轮的服役寿命得到显著延长。

4) 针对即将面临车轮报废率较高的情况,进行“改善性镟修”和“两刀镟”的技术优化,预计架修时车轮更换率相比之前降低 50%,有效降低了运营成本,提高了架修效率,为其他线路的车轮运维提供了思路和经验。

参考文献

- [1] 宫彦华,赵海,刘兴华,等.城市轨道交通车轮异常磨耗研究概述[J].现代城市轨道交通,2022(9):28.
GONG Yanhua, ZHAO Hai, LIU Xuehua, et al. Study on abnormal wear of wheels for urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(9): 28.
- [2] 田丽,刘森.基于数据拟合的地铁车辆车轮磨耗分析与寿命预测[J].铁道技术监督,2022,50(2):65.
TIAN Li, LIU Sen. Wheel wear analysis and life prediction of metro vehicles based on data fitting[J]. Railway Quality Control, 2022, 50(2): 65.
- [3] 任德祥,陶功权,李伟,等.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[J].机械工程学报,2022,58(10):191.
REN Dexiang, TAO Gongquan, LI Wei, et al. Investigation on abnormal wear of metro wheels through simulations of wheel/rail profile matching[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10): 191.
- [4] 陶功权,温泽峰,金学松.铁道车辆车轮非圆化磨耗形成机理及控制措施研究进展[J].机械工程学报,2021,57(6):106.
TAO Gongquan, WEN Zefeng, JIN Xuesong. Advances in formation mechanism and mitigation measures of out-of-round railway vehicle wheels[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 106.
- [5] 宋志坤,任海星,胡晓依,等.动车组车轮多边形磨耗发展历程模拟及车轮粗糙度的影响[J].铁道学报,2021,43(6):23.
SONG Zhikun, REN Haixing, HU Xiaoyi, et al. Research on development process simulation and influencing factors of polygonal wear of high-speed train wheels[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(6): 23.
- [6] 戴勇平.上海轨道交通4号线列车轮对轮缘异常磨耗分析与对策[J].城市轨道交通研究,2021,24(增刊1):95.
DAI Yongping. Analysis and countermeasures of abnormal wear

- on wheel rims of trains on Shanghai Metro Line 4 [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S1): 95.
- [7] 刘通, 温世湖, 徐华伟, 等. 适用于轮缘增厚现象的机车车轮镟修模型研究与应用[J]. 机车电传动, 2022(5): 17.
LIU Tong, WEN Shihu, XU Huawei, et al. Research and application of locomotive wheel reprofiling model targeting flange thickening[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(5): 17.
- [8] 黎嘉欣, 陶功权, 刘希政, 等. 基于两种轨道线路建模方法的地铁车轮磨耗预测对比分析[J]. 工程力学, 2022, 39(6): 226.
LI Jiaxin, TAO Gongquan, LIU Xizheng, et al. Comparative analysis of metro wheel wear prediction based on two track modeling methods[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(6): 226.
- [9] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
The State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [10] German Standards Institute. Railway applications-testing and simulation of acceptance of railway vehicle operating characteristics-Operating performance and static testing: DIN EN 14363: 2019[S]. German: German Society for Standardization, 2019.
- [11] 周素霞, 薛蕊. 地铁线路超高对轮轨磨耗的影响[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(1): 101.
ZHOU Suxia, XUE Rui. Influence of superelevation of subway line act on wheel-rail wear[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(1): 101.
- [12] 孙小康. 地铁轮对踏面镟修经济性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 91.
SUN Xiaokang. Economic analysis of wheel lathing in metro vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5): 91.
- [13] 国家铁路局. 机车车辆车轮轮缘踏面外形: TB/T 449—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
National Railway Administration. Profile of locomotive and vehicle wheel flange tread: TB/T 449—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [14] 曾全君. 地铁车辆车轮寿命分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2005(2): 47.
ZENG Quanjun. Analysis of the service life of subway vehicle wheels[J]. Electric Locomotives and Urban Rail Vehicles, 2005(2): 47.
- [15] 戴文华. 通过镟轮管理技术创新提高地铁列车轮对使用寿命[J]. 中国标准化, 2019(增刊2): 207.
DAI Wenhua. Improving the service life of subway train wheelsets through technical innovation of wheel management[J]. China Standardization, 2019(S2): 207.
- 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-19 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-19 Published:2024-05-10
• 通信作者: 贾小平, 正高级工程师, zka_2020@163.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126页)

- [3] 石好文. Q235B/301L 与 09CuPCrNi/301L 异质钢电阻点焊接头力学性能对比研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
SHI Haowen. Comparative study on mechanical properties of resistance spot welded joints of Q235B/301L and 09CuPCrNi/301L dissimilar steels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [4] SHEPPARD S, STRANGE M. Fatigue life estimation in resistance spot welds: initiation and early growth phase[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1992, 15: 531.
- [5] 余海松, 余闪闪, 李婷, 等. 18Ni 不锈钢电阻点焊接头力学性能有限元仿真[J]. 焊接, 2023(5): 24.
YU Haisong, YU Shanshan, LI Ting, et al. Finite element simulation of mechanical property of 18Ni stainless steel resistance spot-welded joint[J]. Welding & Joining, 2023(5): 24.
- [6] 国家质量技术监督局. 点焊接头剪切拉伸疲劳试验方法: GB/T 15111—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Test method for shear tensile fatigue of spot welded joints: GB/T 15111—1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [7] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法: GB/T 24176—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 4.
Technical Committee on Steel of Standardization Committee of China. Metallic materials-fatigue testing-statistical planning and analysis of data: GB/T 24176—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009: 4.
- 收稿日期:2023-12-25 修回日期:2024-02-20 出版日期:2024-05-10
Received:2023-12-25 Revised:2024-02-20 Published:2024-05-10
• 通信作者: 梁炬星, 正高级工程师, juxxi741@126.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