

基于车轮廓形磨耗分析的地铁经济镟修策略

许承焯 沈 钢

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 目的:为协助地铁部门制定车辆轮对镟修策略,选择更优的车轮镟修公里数节点及制定每次镟修时的模板选用方案,在保证经济性的前提下延长车轮使用寿命。方法:从轮缘磨耗面积、镟修轮径损失值和车轮轮径3个指标出发,搭建了一种考虑整列车磨耗规律的经济镟修模型。基于所建模型,对某地铁的一个案例进行了研究。找出该地铁列车车轮的轮缘磨耗面积、镟修轮径损失值和车轮轮径3个指标的磨耗变化规律后,将其输入到所建模型中进行迭代计算。根据计算结果中的不同镟修公里数节点下的车轮寿命、单位成本里程数和最后一次镟修后可运行里程数等指标,制定选择镟修公里数节点所应遵循的原则,最后根据计算结果和所提原则给出优选的经济镟修公里数节点和镟修模板选用方案。结果及结论:研究结果表明,若该地铁列车的新轮首次镟修采用轮缘厚度为30 mm的模板,后续的镟修采用轮缘厚度为28 mm的模板,则相较该地铁部门以往在列车运行里程为31.2万 km左右时镟轮,采用模型计算给出的21.7万 km优选的镟修公里数节点,在保证镟修经济性的情况下,最多能延长车轮总寿命里程为11.7万 km,车轮寿命延长了8.3%。

关键词 地铁车辆; 轮对镟修策略; 实测车轮廓形; 磨耗分析; 轮对寿命

中图分类号 U270:331⁺1:U231.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.003

Metro Economic Re-profiling Strategy Based on Wheel Profile Wear Analysis

XU Chengzhuo, SHEN Gang

Abstract **Objective:** To assist metro department in formulating vehicle wheelset re-profiling strategy, a better wheel re-profiling mileage node is selected and the template schemes for each re-profiling operation are formulated, with the goal of prolonging wheel service life while ensuring economic efficiency. **Method:** Starting from the three indexes: flange wear area, diameter loss of re-profiled wheel and wheel diameter, an economic re-profiling model studying the wear law of the entire train is established. Based on the model, a metro case is studied. After obtaining the wear change law of the above three indexes for metro train wheels, the data is input into the estab-

lished model for iterative calculation. Based on different indicators at different re-profiling mileage nodes in calculation results such as wheel lifespan, mileage per unit cost, and available mileage after the final re-profiling operation, the principles for selecting the optimal re-profiling mileage nodes are formulated. Finally, based on the calculation results and the proposed principles, the optimal economic re-profiling mileage nodes and template selection schemes are given. **Result & Conclusion:** Research results show that if the new wheels of a metro train are initially re-profiled using the template with flange thickness of 30 mm, and the template with flange thickness of 28 mm for the subsequent re-profiling, then compared to the metro department past practice of re-profiling wheels at around 312 000 km of train operation mileage, the model calculation recommends an optimal re-profiling mileage node of 217 000 km, which can extend the wheel lifespan total mileage by a maximum of 117 000 km and the wheel lifespan itself by 8.3% while ensuring the economic efficiency of re-profiling.

Key words metro vehicle; wheelset re-profiling strategy; field-measured wheel profile; wear analysis; wheelset lifespan

Author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

0 引言

车辆轮对经济镟修策略的制定是地铁部门关注的重点问题,对延长车轮使用寿命和减少运营成本有重要意义。国内外学者对车辆轮对经济镟修策略进行过不同的研究。文献[1]对历史数据曲线进行分析,找到成本较低的轮缘厚度镟修范围。文献[2]对车轮磨耗进行仿真研究时,计算出一定公里数下镟修时可以延长车轮寿命。文献[3-4]结合实测轮缘厚度和轮径值数据,分别搭建了单轮镟修模型和结合列车换向以及多廓形模板交替使用的镟修模型,来制定车轮镟修里程节点。文献[5-7]从轮缘厚度镟修控制限值优化角度出发,制定新的轮缘厚度镟修控制限值。文献[8-9]从车辆镟修切

削角度出发,寻找镟修时车轮切削量最小的优化方案。

在已有的车辆轮对经济镟修策略研究中,少数学者是从车轮磨耗机理模型中对车轮使用寿命进行计算从而找到镟修节点,而多数学者是从对轮缘厚度和轮径值两类指标统计数据出发,从统计学角度针对轮缘厚度限值制定镟修策略。已有研究中在对经济镟修策略制定时,未细化考虑实测轮缘磨耗廓形几何形状对不同轮缘厚度模板选择的影响及镟修环节时轮径差导致的轮径损失差异,所建模型也未细化考虑现场部门实际镟修操作流程。

本文结合某地铁自动化采集设备采集的整列车大量实测轮缘廓形数据,对整列车轮缘廓形实际磨耗情况进行分析计算。根据模板镟修的实际操作流程,搭建基于整列车轮缘磨耗规律的镟修计算模型,计算得到列车在不同镟修公里数节点下的车轮服役总寿命里程和单位成本运行里程数,并根据计算结果给出可供参考的车辆轮对经济镟修策略。

1 镟修模型指标选择

1.1 镟轮情况统计

对某地铁的 113 份历史镟修工作单进行调研,其结果如表 1 所示。

表 1 某地铁镟修情况历史统计

Tab. 1 Historical statistics of a metro re-profiling conditions			
镟修原因	出现次数/次	统计总数/次	占比/%
S_w 超限或即将超限	103	113	91.15
S_h 超限	0	113	0
Q_r 超限	0	113	0
同轴轮径差超限	9	113	7.96
踏面故障(剥离)	1	113	0.89

注: S_w 为轮缘厚度; S_h 为轮缘高度; Q_r 为轮缘综合值。

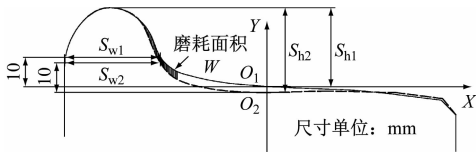
由表 1 可知,该线路列车轮缘镟修的主要原因是防止轮缘磨耗超限后影响列车安全运行而进行镟修。因此,本文在搭建镟修策略模型时,作出以下 2 点假设:①从廓形磨耗角度制定镟修策略;②暂不考虑踏面故障和其他因素导致的镟修。

1.2 镟修模型指标选择

对地铁运维部门而言,制定镟修策略的目标是要尽可能延长列车车轮服役寿命,同时镟修策略应尽可能具有经济性。这主要围绕 2 个问题展开:①如何选择合适的列车运行公里数节点对车轮进行

镟修;②镟修时该如何选择合适的镟修模板。

对问题①的求解需要考虑车轮轮缘具体的磨耗程度。现阶段,地铁公司将 S_w 作为轮缘侧磨衡量指标。在进行 S_w 测量时,需以名义滚动圆接触点作为基准。当踏面名义滚动圆处存在磨耗时,可能会出现图 1 所示的情况,即磨耗廓形轮缘厚度 S_{w2} 与新廓形轮缘厚度 S_{w1} 相等,此时轮缘厚度值不能很好地表达出轮缘磨耗程度。此外,当名义滚动圆处磨耗速率在某种程度上大于轮缘侧磨速率时,由于踏面名义滚动圆基准点因磨耗下移过快,轮缘厚度测量值可能随运行里程增加呈现增长趋势,表现出轮缘“假增厚”现象。因此,本文在搭建镟修模型时,为了更好地获得轮缘磨耗规律,直接根据实测踏面廓形选用磨耗面积 W 这个指标来衡量轮缘侧磨(见图 1 阴影)。通过将踏面磨耗廓形与参考廓形做对比,其数值能直接表示轮缘的侧磨量。



注: O_1 和 O_2 分别表示新踏面和磨耗后踏面上名义滚动圆所在点; X 轴以 O_1 为原点,背离轮缘垂直车轮径向指向踏面外侧; Y 轴以 O_1 为原点,与 X 轴垂直沿车轮径向并指向车轮外侧; S_{h1} 和 S_{h2} 分别表示新踏面和磨耗后踏面的轮缘高度。

图 1 轮缘厚度测量与磨耗面积

Fig. 1 Flange thickness measurement and wear area

对问题②的求解需要考虑车轮在按照选定模板进行镟修时的轮径损失值。计算最小镟修半径损失值(直径损失为其 2 倍值)时,镟修模板应恰好能被磨耗廓形所包络。镟修轮径损失计算如图 2 所示。当前,地铁公司可选择不同轮缘厚度等级的模板廓形进行等级镟修,目的在于减少镟修轮径损失量。因此,需要把镟修轮径损失值作为本文镟修模

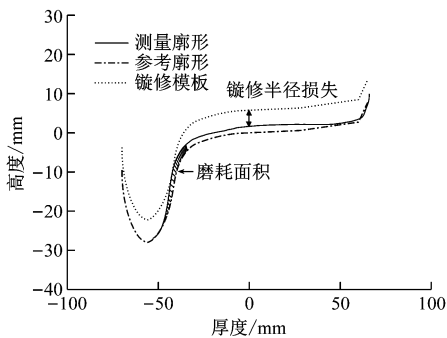


图 2 镟修轮径损失计算

Fig. 2 Calculation of re-profiled wheel diameter loss

型的指标之一。

此外,地铁部门对车轮直径 D 的限值规定为 $770 \text{ mm} \leq D \leq 840 \text{ mm}$, 车轮直径指标则是本文镟修模型中衡量车轮是否服役到限的指标。

2 镟修模型制定与求解

2.1 镟修模型

表1结果表明,该地铁车辆轮对镟修时存在同轴轮径差超限现象。这表明在建立镟修模型时要考虑列车左、右轮磨耗可能存在的差异性。本文经综合考虑,建立了一个基于整列车车轮磨耗规律的镟修计算模型。该模型考虑列车左、右轮整体磨耗差异规律,可计算出不同镟修公里数节点下列车车轮的服役总寿命里程和经济性指标,描述如下。

假设车轮服役总寿命里程 L 受规律 G_L 决定:

$$L = G_L(f_{DL}, f_{DR}, g_{WL}, g_{WR}, h_{re}, W_{th}) \quad (1)$$

式中:

f_{DL}, f_{DR} ——整列车左、右轮平均轮径值的磨耗变化规律;

g_{WL}, g_{WR} ——整列车左、右轮缘平均磨耗程度的磨耗规律;

h_{re} ——每次镟修时,按当次所选模板镟修的轮径损失值 ΔD_{loss} 与车轮磨耗面积 W 之间的相关规律;

W_{th} ——磨耗面积阈值。

当整列车轮缘平均磨耗面积 W_M 大于 W_{th} , 列车进行镟修。同时,假设列车车轮服役运行期间总镟修次数 n 受规律 G_n 决定:

$$n = G_n(f_{DL}, f_{DR}, g_{WL}, g_{WR}, h_{re}, W_{th}) \quad (2)$$

L 和 n 的求解受到轮径限值和整体同轴轮径差指标约束如下:

$$\begin{cases} 770 \leq D_{ML,i}, D_{MR,i} \leq 840 \\ |(D_{ML,i} - \Delta D_{ML,i}) - (D_{MR,i} - \Delta D_{MR,i})| \leq 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

i ——第 i 次镟修, $i = 1, 2, \dots, n$;

$D_{ML,i}$ 和 $D_{MR,i}$ ——第 i 次镟修时整列车左、右轮径均值,单位 mm ;

$\Delta D_{ML,i}$ 和 $\Delta D_{MR,i}$ ——第 i 次镟修时整列车左、右车轮的平均镟修轮径损失值,单位 mm 。

至此,镟修策略制定问题即可理解为求解在多种磨耗规律约束下的优化问题,优化目标是 L , 求解

决策变量为 W_{th} 。由于轮缘磨耗面积与车辆运行里程之间存在相关磨耗规律,上述问题亦可等价:运行多少里程后,整列车轮缘平均磨耗面积将超出阈值,在此公里数节点进行镟修能使结果优化。

在镟修模型中,列车车轮服役寿命过程描述为:列车从初始状态出发,运行至轮缘侧磨 $W_M \geq W_{th}$ 状态时,镟修使得车轮廓形恢复至当次镟修所选模板,轮径同时因磨耗和镟修而损失相应数值;之后列车继续运行,轮缘再磨耗至 $W_M \geq W_{th}$ 状态时,再镟修至当次镟修所选模板,轮径继续因磨耗和镟修而损失相应数值;以此类推,共 n 次镟修后,轮径磨耗到限。

当考虑镟修策略的经济指标时,可采用下面算式计算单位成本可运行里程数 M_{cost} , 其单位为 $\text{km}/\text{元}^{[6]}$ 。

$$M_{cost} = \frac{L}{nn_{wheels} C_s + n_{wheels} C_r} \quad (4)$$

式中:

n_{wheels} ——整列车包含的车轮数;

C_s ——单个车轮单次镟修花费成本;

C_r ——单个车轮寿命到限的换轮成本。

2.2 模型求解流程

一次完整的模型求解流程步骤如下:

1) 统计整列车的左、右车轮轮径磨耗规律和轮缘磨耗规律,分别得到 f_{DL}, f_{DR}, g_{WL} 和 g_{WR} 。

2) 初始化 W_{th} (如 10 mm^2), 并设定迭代计算里程精度 Δm (如 5 000 km)。

3) 列车运行里程数 m 叠加 Δm , 并根据磨耗规律计算在当前里程下磨耗后的左、右轮平均轮径 $D_{ML,m}, D_{MR,m}$, 以及左、右轮缘平均磨耗面积 $W_{ML,m}, W_{MR,m}$ 。

4) 判断所分析的一整列车的轮径均值 $D_{M,m} = (D_{ML,m} + D_{MR,m})/2$ 是否小于规定轮径值 770 mm 。若满足条件,则对当前 W_{th} , 根据里程叠加总数输出对应的 L , 根据式(4)计算输出对应的 M_{cost} , 根据磨耗规律计算输出磨耗超出阈值时对应的公里数节点(即镟修公里数节点), 模型计算结束;若不满足 $D_{M,m}$ 小于规定轮径值 770 mm 的条件,则对 W_M 是否大于等于 W_{th} 进行判定。若 $W_M < W_{th}$, 则重新转至步骤3), 让列车继续运行叠加里程;若 $W_M \geq W_{th}$, 转至步骤5)。

5) 根据当前磨耗廓形, 逐个计算选用各个不同轮缘厚度等级模板镟修时的平均轮径损失, 从中选

择平均轮径损失最小的模板,若存在多个模板镟修轮径损失量相同且均为最小,再从中选择轮缘厚度最大者。之后根据对应的镟修轮径损失规律 h_{te} 和约束条件公式(3)计算左、右轮镟修轮径平均损失值 ΔD_{MLi} 、 ΔD_{MRi} 及整列车的镟修轮径平均损失值 $\Delta D_{Mi} = (\Delta D_{MLi} + \Delta D_{MRi})/2$,并转至步骤6)。

6) 判断 $D_{M,m} + \Delta D_{Mi} \geq 770$ mm 是否成立,若不成立,为了避免列车车轮镟修后轮径直接超限报废,则不做镟修处理并重新转至步骤3),让列车继续运行并叠加里程;若成立,则更新镟修导致的轮径损失和对镟修次数进行累加。之后转至步骤3)。

通过循环计算上述步骤1)至步骤6),则可求解出选择不同 W_{th} 对应的 L 和对应的 M_{cost} ,以及相应的镟修公里数节点,完成模型的求解。上述步骤的对应流程图如图3所示。

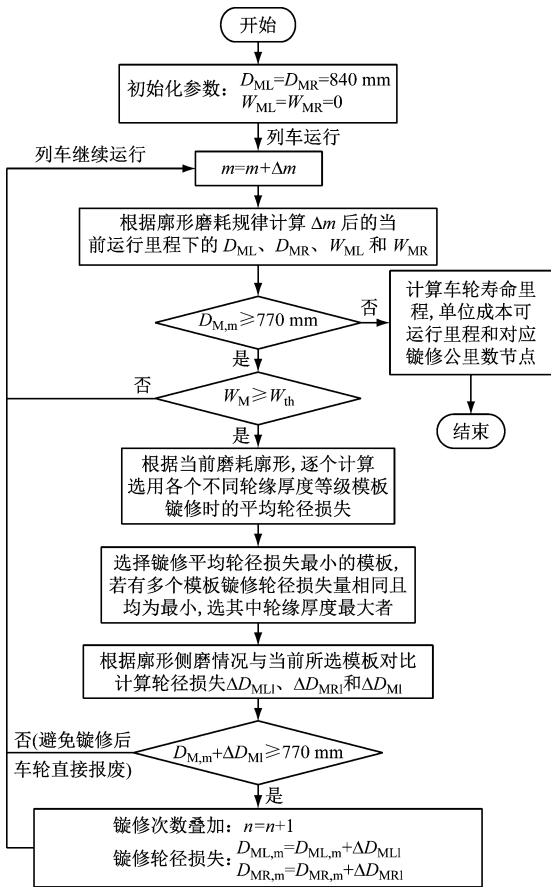


图3 镟修模型求解流程图

Fig. 3 Flow chart of re-profiling model solution

3 案例分析

某地铁新轮廓形为 DIN5573-32 (轮缘厚度为 32 mm 的模板,以下简称为“32 mm 模板”),此外还

有 DIN5573-30 (同上,简称为“30 mm 模板”)和 DIN5573-28 (同上,简称为“28 mm 模板”)两个可选镟修模板。以往,该地铁选择 31.2 万 km 左右作为镟修公里数节点,并选择轮径损失量小的模板进行等级镟修。现结合大量实测廓形数据,对该地铁列车车轮磨耗规律进行分析,并结合镟修模型求解结果,给出新的优选经济镟修公里数节点和对应镟修模板选用顺序。

3.1 磨耗规律计算

对该地铁某列车轮径和轮缘磨耗变化规律进行了统计分析,结果分别如图4和图5所示。

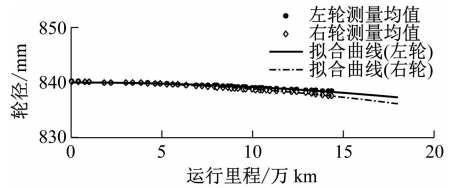


图4 轮径磨耗曲线

Fig. 4 Wheel diameter wear curve

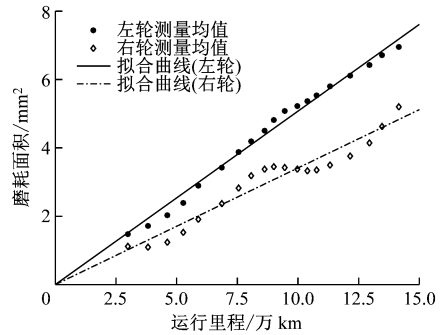


图5 距轮背横向 27~29 mm 范围内轮缘磨耗面积

Fig. 5 Flange wear area within a lateral range of 27-29 mm from the wheel back

由图4可知,随着列车运行里程增长,列车左、右侧车轮轮径逐渐减小,且呈现出近似一元二次曲线关系。采用一元二次多项式回归拟合计算得:

$$D_{ML,m} = -0.0084m^2 + 840 \quad (5)$$

$$D_{MR,m} = -0.0120m^2 + 840 \quad (6)$$

由图5可知,随着列车运行里程增长,列车左、右侧车轮轮缘磨耗面积逐渐增大,且呈现出近似线性关系。采用一元线性回归拟合计算得:

$$W_{ML,m} = 0.5077m \quad (7)$$

$$W_{MR,m} = 0.3414m \quad (8)$$

本文所分析地铁在最近一次轮对镟修时镟修成 30 mm 模板,按图2的方法,本文结合数据举例分析 30 mm 模板磨耗后的廓形假设在下次镟修继

续选择 30 mm 模板时,轮缘磨耗面积与镟修轮径损失值之间的关系(选用其他模板时分析方法相同),如图 6 所示。

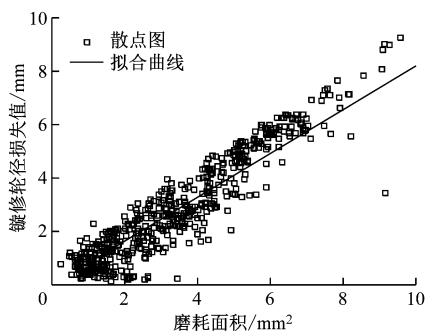


图 6 镟修轮径损失与轮缘磨耗面积(距轮背横向 27~29 mm)关系

Fig. 6 Relation between re-profiled wheel diameter loss and flange wear area (27-29 mm laterally from wheel back)

由图 6 可知,镟修轮径损失值与磨耗面积之间近似呈现出线性关系,采用一元线性回归对上述的关系进行拟合计算得:

$$\Delta D_{\text{loss}} = 0.8200W \quad (9)$$

3.2 经济镟修策略制定

根据地铁公司相关资料,本案例设定地铁更换单个精加工轮饼的价格 C_r 为 5 373 元,设定单个车轮单次镟修加工费用 C_s 为 200 元,列车 6 节编组,车轮数为 48 个。结合前文所述方法和模型,本文求解了列车在选择不同镟修磨耗面积阈值,并根据磨耗规律换算成在将超出阈值的运行公里数下镟修时,车轮的服役总寿命里程和单位成本里程数,其结果分别如图 7 和图 8 所示。其中,求解时设定该地铁新轮采用 32 mm 模板,在运营服役到限前可选择采用 32 mm、30 mm 或 28 mm 模板作为可选等级镟修模板。

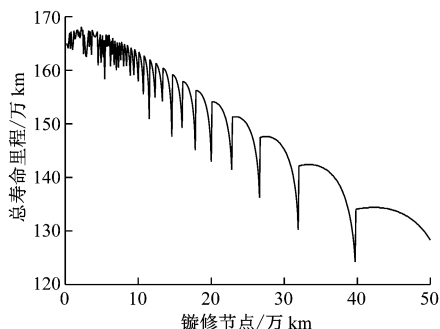


图 7 不同镟修公里数节点下车轮总寿命里程

Fig. 7 Total wheel lifespan at different re-profiling mileages nodes

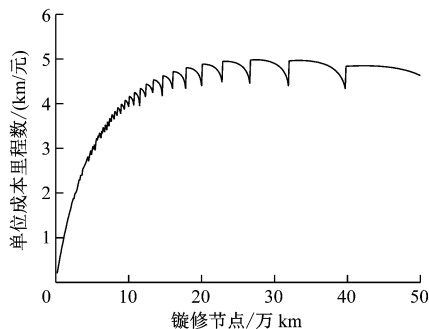


图 8 不同镟修公里数节点下单位成本里程数

Fig. 8 Mileage per unit cost at different re-profiling mileages nodes

由图 7 可知,取较小的镟修公里数节点时,车轮总寿命里程相对较大。随着镟修公里数节点变大,车轮的总寿命里程呈减小趋势,并有周期性地来回波动和局部极大极小值,这与总镟修次数变动临界点有关。由图 8 可知,随着所选择的镟修公里数节点不断增大,单位成本可运行里程数总体趋势不断增长,也同时存在局部极大极小值。

图 9 绘制了不同镟修公里数节点下的总镟修次数。根据模型计算结果,现进一步分析选择不同镟修公里数节点时,最后一次镟修后的剩余寿命里程(见图 10)。

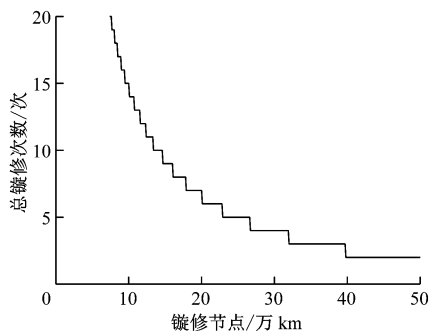


图 9 不同镟修公里数节点下的总镟修次数

Fig. 9 Total re-profiling times at different re-profiling mileages nodes

由图 9 可知,随着所选择的镟修公里数节点不断增大,车轮服役寿命期内的总镟修次数呈现出阶梯形下降趋势。

由图 10 可知,最后一次镟修后可运行里程随镟修公里数节点增长总体呈现增长趋势,且在该过程中来回波动。等值线与最后一次镟修后可运行里程曲线的交点表示:选择交点对应的镟修公里数节点时,能使最后一次镟修后车轮再运行和镟修公里数节点等长的里程后轮径恰好磨耗到限,此时能保证车轮各段镟修间隔里程均匀等长。

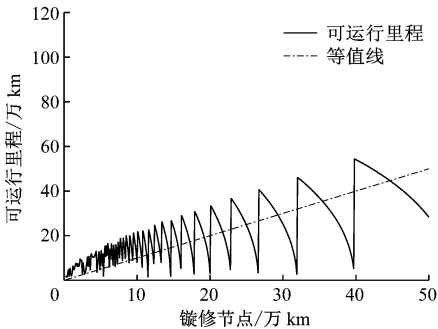


图 10 最后一次镟修后可运行里程

Fig. 10 Available mileage after the final re-profiling operation

选择此镟修节点可避免下述 2 种情况出现:①镟修后车轮运行一段较短的里程距离就磨耗到限;②最后一次镟修后,车轮运行到下一次镟修节点时轮径过小,则镟修后轮径小于规定限值而报废,因此无法按可选模板廓形镟修而应该继续运行直至磨耗到限。这将导致最后一次镟修后到报废前的运行里程过长,车轮踏面磨耗严重,会影响车辆运行舒适性和平稳性,甚至威胁行车安全。

因此,在综合考虑不同镟修节点下的车轮寿命、单位成本里程数和最后一次镟修后可运行里程数等几个指标后,镟修节点选择应遵循如下原则:①要保证单位成本可运行里程尽可能高,使得镟修策略更具经济性;②该镟修公里数节点下的车轮总服役寿命里程尽可能长;③尽可能保证车轮各段镟修间隔里程均匀等长,不使得最后一次镟修后可运行里程过长或过短;④不选择可能会导致结果产生突变的镟修节点。

通常情况下,地铁部门选择运行里程为 31.2 万 km 作为镟修公里数节点,选择该节点时车轮的总寿命里程和单位成本里程数计算结果分别为 140.4 万 km 和 4.74 km/元,镟修磨耗面积阈值为 13.25 mm²,镟修次数为 4 次。在本文案例的经济镟修策略制定中,根据上述 4 个镟修节点选择原则,以图 10 中等值线和最后一次镟修后可运行里程曲线的交点为备选镟修公里数节点,并结合图 7 和图 8 从这些备选镟修公里数节点中找出寿命里程和单位成本里程数均高于运行里程为 31.2 万 km 的节点,得到符合上述所有条件的 3 个优选节点:运行里程分别为 21.7 万 km、25.0 万 km 和 29.3 万 km。对选择上述不同镟修公里数节点的结果对比如表 2 所示。

表 2 不同镟修公里数节点的结果对比
Tab. 2 Result comparison at different re-profiling mileage nodes

方案	镟修节点/ 万 km	磨耗面积 阈值/ mm ²	单位成本 里程数/ (km/元)	总寿命 里程/ 万 km	总镟修 次数/次
1	21.7	9.21	4.82	152.1	6
2	25.0	10.61	4.89	149.6	5
3	29.3	12.44	4.94	146.5	4

表 3 给出了按表 2 中镟修公里数节点镟修,每次镟修时轮径损失量最小的镟修模板选择方案。对以运行里程为 21.7 万 km 作为镟修公里数节点的模板选用方案为例进行说明。当新轮从 32 mm 模板第一次运行至镟修公里数节点时,选用 30 mm 模板镟修轮径损失量最小;之后第二次运行至镟修公里数节点时,选用 28 mm 模板镟修轮径损失量最小;之后以此类推得到镟修模板的选用顺序方案。表 3 中,“无”表示该方案无此次镟修,无需选择模板。对于地铁部门以往选择运行里程为 31.2 万 km 作为镟修公里数节点,则 4 次镟修模板的选择方案依次为 30 mm 模板,28 mm 模板,28 mm 模板,28 mm 模板。

表 3 镟修时模板选用方案

Tab. 3 Template schemes selected for each re-profiling operation

镟修节点/ 万 km	第 1 次 镟修的 模板/ mm	第 2 次 镟修的 模板/ mm	第 3 次 镟修的 模板/ mm	第 4 次 镟修的 模板/ mm	第 5 次 镟修的 模板/ mm	第 6 次 镟修的 模板/ mm
21.7	30	28	28	28	28	28
25.0	30	28	28	28	28	无
29.3	30	28	28	28	无	无

由表 2 和表 3 可知,在每次镟修时尽可能减少镟修轮径损失的情况下,相较于地铁部门以往选择的运行里程为 31.2 万 km 作为镟修公里数节点,若以本文模型计算给出的运行里程为 21.7 万 km、25.0 万 km 和 29.3 万 km 作为可选的镟修公里数节点,仿真计算表明,在保证经济性的情况下,能延长车轮总寿命里程分别为 11.7 万 km、9.2 万 km 和 6.1 万 km,其车轮寿命可分别提高 8.3%、6.6% 和 4.3%。

4 结论

1) 结合轮缘磨耗面积,镟修轮径损失值和车轮

轮径3个指标,搭建一种考虑整列车车轮磨耗规律的经济镟修模型,该模型能求解不同镟修公里数节点下的车轮使用寿命和对应的镟修经济性指标。

2) 基于所搭建模型并结合某地铁实测车轮廓形数据计算了一个具体案例,根据模型计算结果能给出优选的经济镟修公里数节点和相应镟修模板选择方案。参照本文研究所制定的镟修策略,在保证镟修经济性的情况下能够延长车轮的使用寿命。

3) 本文模型可推广至有轨电车、高速动车组等采用其他车轮廓形以及多种轮缘厚度模板的车辆经济镟修策略研究。

参考文献

- [1] PASCUAL F, MARCOS J A. Wheel wear management on high-speed passenger rail: a common playground for design and maintenance engineering in the Talgo engineering cycle[C]// Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint Rail Conference. Baltimore, MD: IEEE, 2004: 193.
- [2] 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.
- [3] ZHU W, YANG D, GUO Z, et al. Data-driven wheel wear modeling and reprofiling strategy optimization for metro systems[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2476(1): 67.
- [4] ZHU W, YANG D, HUANG J. A hybrid optimization strategy for the maintenance of the wheels of metro vehicles: vehicle turning, wheel re-profiling, and multi-template use[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and

Rapid Transit, 2018, 232(3): 832.

- [5] 许宏, 员华, 王凌, 等. 基于高斯过程的地铁车辆轮对磨耗建模及其镟修策略优化[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 88. XU Hong, YUAN Hua, WANG Ling, et al. Modeling of metro wheel wear and optimization of the wheel re-profiling strategy based on Gaussian processes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 88.
- [6] 王凌, 员华, 那文波, 等. 基于磨耗数据驱动模型的轮对镟修策略优化和剩余寿命预报[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1143. WANG Ling, YUAN Hua, NA Wenbo, et al. Optimization of the re-profiling strategy and remaining useful life prediction of wheels based on a data-driven wear model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(6): 1143.
- [7] 杨志, 邢宗义, 王露, 等. 基于磨耗数据统计模型的镟轮决策优化[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(1): 142. YANG Zhi, XING Zongyi, WANG Lu, et al. Optimization of wheel re-profiling strategy based on statistical wear model[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(1): 142.
- [8] 廖贵玲. 城轨列车轮对安全状态分析预测与镟修策略优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. LIAO Guiling. Research on the security state prediction and lathing strategy optimization for the wheelset of urban rail train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [9] 王珍. 动车组整车轮对镟修优化决策模型的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013. WANG Zhen. Study on the model of the re-profiling strategy optimization about the whole wheelset wearing electric multiple unit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

(收稿日期:2021-01-22)

(上接第12页)

- [10] LIU Q, GUO Q, WANG W, et al. An automatic detection algorithm of metro passenger boarding and alighting based on deep learning and optical flow[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1.
- [11] DOSOVITSKIY A, FISCHER P, ILG E, et al. FlowNet: learning optical flow with convolutional networks[C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Santiago: IEEE, 2016: 2758.
- [12] SUN D, YANG X, LIU M Y, et al. PWC-net: CNNs for optical flow using pyramid, warping, and cost volume[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.

Salt Lake City, UT: IEEE, 2018: 8934.

- [13] GUNJAL P R, GUNJAL B R, SHINDE H A, et al. Moving object tracking using Kalman filter[C]//2018 International Conference on Advances in Communication and Computing Technology (ICACCT). Sangamner: IEEE, 2018: 544.
- [14] SAHBANI B, ADIPRAWITA W. Kalman filter and iterative-hungarian algorithm implementation for low complexity point tracking as part of fast multiple object tracking system[C]//2016 6th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET). Bandung: IEEE, 2017: 109.

(收稿日期:2023-02-22)