

基于实测数据的车辆轮对磨耗模型研究*

丁亚琦¹ 吕 晟¹ 王子晗² 张枝森¹ 刘伟渭³ 沈 钢⁴

(1. 上海地铁维护保障有限公司车辆分公司, 200235, 上海; 2. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛;

3. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 4. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 基于上海轨道交通 17 号线列车轮对实测数据, 研究轮对磨耗规律, 建立轮对轮缘厚度和轮径磨耗模型, 以提高城市轨道交通车辆的安全性和维护效率。[方法] 对轮对实测数据进行预处理, 消除数据误差; 采用曲线拟合和误差分析方法建立轮缘厚度和轮径的磨耗模型, 并以磨耗速率拟合标准差, 以及真实值与误差拟合曲线之间误差值的拟合标准差作为该模型的评价指标, 评估轮缘厚度及轮径磨耗模型的准确性; 分别针对 1701 次和 1721 次列车进行轮对磨耗模型验证。[结果及结论] 1701 次和 1721 次列车轮对轮缘厚度磨耗速率 4 次拟合曲线的拟合标准差, 以及真实值与误差拟合曲线之间误差值的 6 次拟合曲线的拟合标准差均接近于零, 验证了该车辆轮对磨耗模型的准确性, 能够精确预测上海轨道交通 17 号线同一车型不同列车及同一列车不同位置的轮对磨耗情况。

关键词 城市轨道交通; 轮对; 磨耗模型; 拟合标准差中图分类号 U260.331⁺.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.012

Research on Vehicle Wheelset Wear Model Based on Measured DataDING Yaqi¹, LYU Sheng¹, WANG Zihan², ZHANG Zhisen¹, LIU Weiwei³, SHEN Gang⁴

(1. Vehicle Branch of Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China; 2. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China; 3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 4. Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Based on the measured data of the train wheelsets on Shanghai Metro Line 17, the wheelset wear pattern is studied, and a wear model of wheel rim thickness and wheel diameter is established to improve the safety and maintenance efficiency of urban rail transit vehicles. [Method] The measured wheelset data are pre-processed to eliminate data errors. Curve fitting and error analysis method are used to es-

tablish the wear model of wheel rim thickness and wheel diameter. The fitting standard deviation of wear rate and that of the error value between the true value and the error fitting curve are used as evaluation indexes to evaluate the accuracy of the wear model. The wheelset wear model is verified with Train 1701 and Train 1721 respectively. [Result & Conclusion] Both the fitting standard deviation of 4th power fitting curve of wear rate for Train 1701 and Train 1721 wheelset rim thickness and wheel diameter, and that of 6th power fitting curve of the error value between the true value and the error fitting curve are close to zero, verifying that the vehicle wheelset wear model can accurately predict the wheelset wear of different types of trains and different vehicle positions of the same train on Shanghai Metro Line 17.

Key words urban rail transit; wheel set; wear model; fitting standard deviation

随着轨道交通车辆服役时间增加, 轮对不断磨耗, 为了保持其合理的踏面廓形, 需要对轮对进行适时维保。精准地预测轮对的尺寸变化, 及时地进行镟修作业, 对城市轨道交通列车安全运行具有重要意义。

目前, 国内外研究车辆轮对磨耗模型有基于动力学仿真的磨耗模型研究^[1]和基于磨耗数据的磨耗模型研究^[2-3]两类。文献[4]基于 SIMPACK 软件建立机车及轨道多体动力学模型, 结合接触斑分析算法与 Archard 磨耗模型, 实现轮对型面磨耗的分析。文献[5]利用二次拟合和数理统计方式提出一种优化分布拟合模型。

由于同一线路同一车型的不同列车甚至同一列车的不同车辆的磨耗情况均不同, 如采用运动学仿真方法, 会导致轮对磨耗模型不精确。因此, 本文基于上海轨道交通 17 号线 22 列列车的实测数据, 利用曲线拟合与误差分析方法建立车辆轮对磨

* 国家自然科学基金(51875481, 51705432); 博士后科学基金(2020M682506); 中国国家铁路集团有限公司重点课题(N2022G043)

耗模型。

1 轮对数据预处理

轮对历史尺寸数据由轮对在线检测系统自动检测获取,该检测系统示意图如图1所示。通过安装在轨旁的8个激光位移传感器,同步检测轮对不同角度踏面廓形曲线,对各曲线数据进行提取、拼接、矫正后得到完整的廓型,以达到对轮对外形尺寸检测的目的。

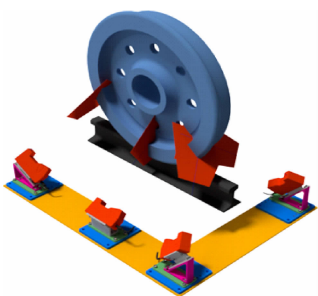


图1 轮对外形尺寸检测系统示意图

Fig. 1 Schematic view of wheelset external dimension inspection system

轮径值与轮缘厚度常被用来分析车轮的磨损情况,其测定原理如图2所示。将水平方向与轮缘内侧基准线相距70 mm处的踏面上的点标注为基准点,轮径值为基准点绕车轴旋转一周所形成圆的直径,轮缘厚度为基准点垂直向上12 mm处轮缘的水平厚度。

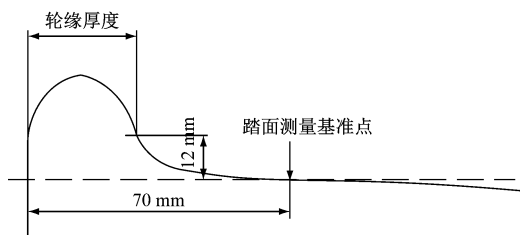


图2 轮对尺寸参数测定原理

Fig. 2 Determination principle of wheelset dimension parameters

为尽量减少测量误差和误差积累,采用基于距离的KNN离群点检测算法对轮对尺寸数据进行清洗。处理过程为:首先,依次计算轮对数据集中的各个点之间距离,对每个点的距离集按照大小递增排列;其次,选取每个距离集与当前点距离最小的 k 个点,求取目标点与 k 个近邻点间距离的均值,即为 k -均值距离;然后,根据各点的 k -均值距离制作箱线图,将 k -均值距离过大的点进行标记并删除;最后,

采用线性回归方程和时间推移准则填补缺失值,得到清洗后的全日期轮对尺寸数据。

2 轮对磨损模型

2.1 计算磨损速率

本文对上海轨道交通17号线17A01型列车2018—2021年这4年期间的全日期数据进行分析研究。记录数据时,为减少数据误差,提高数据利用率,选择以6 d为单位记录时间。轮缘厚度磨损速率 v_{sd} 和轮径磨损速率 v_D 计算公式为:

$$v_{sd} = \frac{6(\delta_{d,i+1} - \delta_{d,i})}{t_{i+1} - t_i} \quad (1)$$

$$v_D = \frac{6(D_{i+1} - D_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (2)$$

式中:

$\delta_{d,i+1}$ ——第 $i+1$ 次检测的轮缘厚度;

$\delta_{d,i}$ ——第 i 次检测的轮缘厚度;

D_{i+1} ——第 $i+1$ 次检测的轮径值;

D_i ——第 i 次检测的轮径值;

t_i ——第1次检测与第 i 次检测相隔的天数。

近似认为, v_{sd} 为 $(\delta_{d,i+1} + \delta_{d,i})/2$ 对应的轮缘厚度磨损速率, v_D 为 $(D_{i+1} + D_i)/2$ 对应的轮径磨损速率。

2.2 建立磨损模型

上海轨道交通17号线17A01型列车共有48个车轮,可得到30 624组有效数据。轮缘厚度与轮径的磨损速率散点图分别如图3和图4所示。

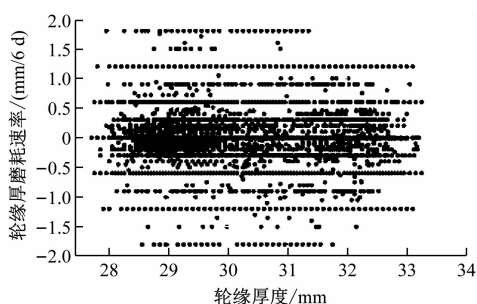


图3 轮缘厚度磨损速率散点图

Fig. 3 Scattergraph of flange thickness wear rate

为进一步探明轮缘厚度磨损速率、轮径磨损速率与轮缘厚度的相关性,将轮缘厚度变动幅度(以下简称“区间”)分别设定为0.05、0.10和0.15 mm,区间0.10 mm下的轮缘厚度磨损速率均值计算结果如图5所示。

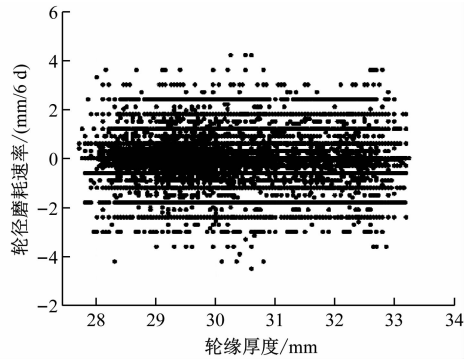


图4 轮径磨损速率散点图

Fig. 4 Scattergraph of wheel diameter wear rate

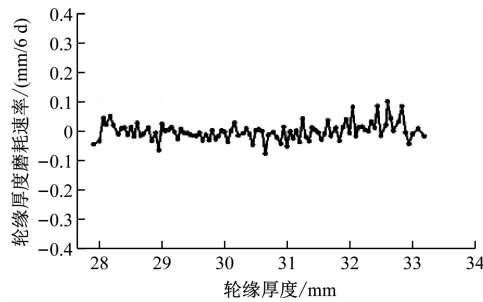


图5 区间0.10 mm下的轮缘厚度磨损速率均值曲线
Fig. 5 Mean wear rate curve of wheel flange value within 0.10 mm

区间取0.05 mm时,区间均值曲线波动较大;区间取0.15 mm时,区间均值曲线过于平缓,可能把实际的磨损速率特性削弱了;区间取0.10 mm时,既消减了区间太小数据的波动性又有效保留了其原本的磨损特性。故选择区间为0.10 mm进行后续分析。

观察图5发现,轮缘厚度磨损速率既有负值也有正值,说明轮缘厚度在不同阶段其值可能增大也可能减小,与实际情况相符。若轮径处磨损比轮缘厚度磨损更快,轮缘厚度会增大;而当轮径处磨损较慢时,轮缘厚度则会减小。为了更准确地研究轮对的磨损规律,选用拟合曲线来表达轮缘厚度磨损速率 v_{sd} 与轮缘厚度 δ_d 之间的关系。对比发现,4次拟合效果较好。轮缘厚度磨损速率4次拟合曲线如图6所示。

为了提高拟合的准确性,将所有实测数据与拟合值相减得到对应的误差值。采用区间均值来进行处理,并根据均值曲线的特性选择6次拟合曲线来表达轮缘厚度 δ_d 与误差值的关系。拟合曲线如图7所示。

由图7可知,对任意一个轮缘厚度区间,所有真实值与拟合曲线之间的真实误差满足正态分布。轮缘厚度为区间均值时,对应的轮缘厚度磨损速

率为:

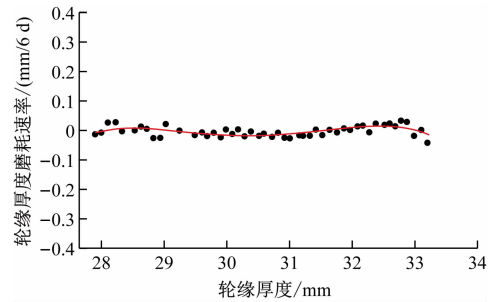


图6 轮缘厚度磨损速率4次拟合曲线

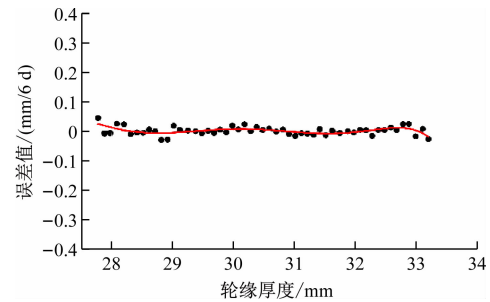
Fig. 6 4th power fitting curve of wheel flange thickness wear rate

图7 轮缘厚度磨损速率6次拟合曲线

Fig. 7 6th power fitting curve of wheel flange thickness wear rate

$$v_{sd} = \mu + E_{\text{error}} + \sigma_1 N(0,1) \quad (3)$$

式中:

μ ——区间磨损速率拟合值;

E_{error} ——区间误差均值;

σ_1 ——区间误差值的标准差;

$N(0,1)$ ——标准正态分布。

计算发现,每个区间误差值的标准差,与所有真实误差值与误差拟合曲线之间的标准差基本相同,因此将所有真实误差值与误差拟合曲线之间的标准差近似为每个区间误差值的标准差。故轮缘厚度的磨损速率计算公式为:

$$v_{sd} = \text{磨损速率拟合值} + \text{误差拟合值} + \sigma_2 B_1(t) \quad (4)$$

式中:

σ_2 ——所有真实误差值与误差拟合曲线之间的标准差;

$B_1(t)$ ——标准的高斯过程。

计算得到,4次磨损速率拟合曲线加6次误差拟合曲线的拟合标准差为0.011 82,接近于零,故可以整车轮对轮缘厚度的磨损速率得到轮缘厚度的磨损模型 $\delta_d(m)$ 为:

$$\delta_d(m) = \begin{cases} \delta_d(0) + v_{sd}(0), & m = 1 \\ \delta_d(m-1) + v_{sd}(m-1), & m = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (5)$$

式中:

m ——检测月;

$v_{sd}(0)$ 、 $v_{sd}(m-1)$ ——当前轮缘厚度磨耗速率、第 m 月的轮缘厚度磨耗速率;

$\delta_d(0)$ 、 $\delta_d(m-1)$ ——当前轮缘厚度或者镟修后的轮缘厚度、第 m 月的轮缘厚度。

同理,轮径磨耗速率也符合正态分布,且区间均值拟合曲线为一条平行于 x 轴的直线。计算所有轮径磨耗速率与区间均值拟合曲线的标准差为 0.395 67,故轮径磨耗速率为:

$$v_D = -0.062\ 201 + 0.395\ 97B_1(m) \quad (6)$$

第 m 个月后的轮径 $D(m)$ 为:

$$D(t) = \begin{cases} D(0) + v_D(0), & m = 1 \\ D(m-1) + v_D(m-1), & m = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$v_D(0)$ 、 $v_D(m-1)$ ——当前轮径磨耗速率、第 m 月的轮径磨耗速率;

$D(0)$ 、 $D(m-1)$ ——当前轮径值、第 m 月的轮径值。

2.3 磨耗模型验证

验证轮对磨耗模型拟合效果的评判标准有和方差(SEE)、均方差(MSE)、均方根或拟合标准差(RMSE)及确定系数(R-square)等。其中,SEE、MSE、RMSE 值越接近 0,或者 R-square 值越接近 1,模型拟合效果越好。本文选择拟合标准差 RMSE 作为验证轮对磨耗模型拟合效果的评判标准。

分别针对 1701 次及 1721 次列车对轮对磨耗模型进行验证,这两列列车轮对轮缘厚度磨耗速率 4 次拟合曲线的拟合标准差,真实值与误差拟合曲线之间误差值的 6 次拟合曲线的拟合标准差如表 1 所示。

表 1 不同列车轮对轮缘厚度磨耗速率拟合标准差

Tab.1 Fitted standard deviation of wheel flange wear rate for different train wheelsets

列车	轮缘厚度磨耗速率 4 次拟合标准差	误差值的 6 次 拟合标准差
1701 次	0.012 88	0.011 82
1721 次	0.016 88	0.018 31

由表 1 可见,结果均接近零。由此验证了磨耗模型是较为准确的。

3 结语

本文基于上海轨道交通 17 号线列车轮对实测

数据进行轮对磨耗特性研究,利用曲线拟合和误差分析方法建立了两种不同的轮对磨耗模型,并对其进行比较分析,得出更优的磨耗模型。基于实测数据进行轮对磨耗分析的优势在于,能够充分考虑同一车型不同列车及同一列车不同位置的车轮磨耗情况。在后期研究中,可以加入对轮缘高度及轮缘综合值的分析,进一步提高轮对磨耗模型的精确性。

本文仅从全列所有 48 个轮对角度出发介绍了轮对磨耗模型的建立,后续可根据实际要求,从不同角度出发建立轮对磨耗模型。例如,如果某条线路运行车辆左右两侧车轮磨耗情况差异较大,可针对车辆的左右两侧分别建立进行磨耗模型。

参考文献

- [1] BRAGHIN F, BRUNI S, RESTA F. Wear of railway wheel profiles: a comparison between experimental results and a mathematical model[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37(S1): 478.
- [2] 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.
- [3] 赵文杰, 王凌, 员华, 等. 基于马尔可夫过程的地铁车辆轮对磨耗建模及其镟修策略优化[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(36): 116. ZHAO Wenjie, WANG Ling, YUAN Hua, et al. Modeling of metro wheel wear and optimization of the wheel re-profiling strategy based on Markov processes[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(36): 116.
- [4] 吴健, 叶正君, 邢宗义. 城市轨道交通列车轮对磨耗模型研究[J]. 铁路计算机应用, 2020, 29(2): 62. WU Jian, YE Zhengjun, XING Zongyi. Research on wheel set wear model of urban rail transit train[J]. Railway Computer Application, 2020, 29(2): 62.
- [5] 张渝, 王松, 邱春蓉. 基于轮对磨耗数据的 CRH2A 型动车经济镟修策略研究[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(4): 6. ZHANG Yu, WANG Song, QIU Chunrong. Economic reprofiling strategy of CRH2A EMU based on wheelset wear data[J]. Railway Computer Application, 2021, 30(4): 6.

· 收稿日期:2023-01-26 修回日期:2023-04-25 出版日期:2024-06-10

Received:2023-01-26 Revised:2023-04-25 Published:2024-06-10

· 第一作者:丁亚琦,高级工程师,dingyaqi123@163.com

通信作者:王子晗,工程师,15063902608@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