

轨道交通车辆轮对寿命预测及镟修优化策略

叶正君 张健雨 邢宗义 刘英舜

(南京理工大学自动化学院, 210094, 南京//第一作者, 硕士研究生)

摘要 围绕建立轮对全生命周期寿命预测模型和镟修优化策略研究两方面, 基于轮径值预测模型与轮缘厚预测模型, 实现轮对全生命周期的寿命预测, 为轮对低成本运用优化策略研究建立基础。介绍轨道交通车辆轮对低成本运用的方法, 提出轮对换向策略与多模板选择镟轮维修策略, 给出基于多模板选择的混合镟轮维修优化策略, 并结合实例与传统镟轮维修策略进行对比分析。

关键词 轨道交通; 轮对磨耗; 镟修策略; 多模板选择

中图分类号 U269

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.09.024

Life Span Prediction and Lathing Optimization Strategy of Rail Transit Vehicle Wheel Set

YE Zhengjun, ZHANG Jianyu, XING Zongyi, LIU Yingshun

Abstract Two aspects of research around the establishment of wheelset full life cycle prediction model and the lathing optimization strategy are introduced. Based on the prediction models of wheel diameter parameters and wheel rim thickness, the wheelset full life cycle prediction is achieved, laying a foundation for the optimization strategy of wheelset low-cost utilization. According to methods of rail transit vehicle wheelset low-cost utilization, wheelset reverse strategy and multi-template choice lathing strategy are proposed. Then, a mixed lathing optimization strategy based on multi-template choice is presented, analyzed and compared with the conventional lathing strategy taking real cases into account.

Key words rail transit; wheelset abrasion; lathe strategy; multi-template choice

Author's address School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, 210094, Nanjing, China

在城市轨道交通列车运行过程中, 车辆轮对与钢轨发生持续性接触摩擦, 造成轮对尺寸参数变化明显, 严重时将危及列车运行安全^[1]。针对这种情况, 车辆段会定期对轮对尺寸参数进行测量, 对参

数超出阈值的轮对进行镟修, 对出现磨耗超限的轮对及时给予更换。然而在轮对镟修过程中, 容易出现因镟修不当等问题造成轮对使用寿命缩短。因此, 研究如何优化镟修策略以延长轮对寿命, 降低轮对全生命周期运营成本具有重要意义。

本文主要工作围绕降低轮对全生命周期运营成本, 针对轮对寿命预测、镟修优化策略两方面进行深入研究。首先针对大量的现场实测数据进行规律统计和数据分析, 在此基础上建立基于数据驱动的轮对寿命预测模型; 其次在大量历史数据分析的基础上得到轮对磨耗规律, 提出混合镟修策略以延长轮对的寿命; 最后结合实例对所提出的优化策略进行分析。

1 轮对尺寸参数寿命预测模型

1.1 建立预测模型

基于大量历史数据分析可得, 轮径值参数是车辆段列车指导地铁列车进行镟修作业最重要的参数之一。因此, 需建立相应的轮径寿命预测模型。本文采用高阶多项式拟合曲线进行数学建模, 对轮径值参数进行趋势估计^[2], 多项式模型表达式为:

$$f = \sum_{i=0}^n a_i x^i \quad (1)$$

式中:

a_i ——每一项的系数;

x^i ——一个上升的整数幂不定项;

f ——多项式拟合表达式。

考虑到高阶多项式是震荡的, 而低阶多项式曲线能表现出一个封闭区间内数据点的变化趋势^[3], 故本文采用4阶多项式函数。

1.2 预测模型的修正

为提高预测模型的预测精度, 本文采用卡尔曼滤波算法对预测模型进行修正^[4]。在获得预测值的基础上, 结合现场实测的观测值计算出预测值与观测值之间的权重, 实现对预测值的数据修正。

* 国家重点研发计划(2017YFB1201102)

基于特定轮对的现场测量数据建立的多项式函数预测模型,能较好地预测相对应的轮对磨损趋势,但未必适合不同的轮对。因此,典型的多项式函数应该进一步从轮径值参数中提取出来,聚类分析方法则可以从大量的历史数据中提取具有代表性的多项式函数。

本文提出一种优化 K -均值聚类算法,在 K -均值算法的基础上进行优化。令 $D(x)$ 表示一个数据点到已经确定的聚类中心最近的距离,优化 K -均值算法步骤如下:

步骤1 任意选择一个初始的 K 中心 $C=(c_1, c_2, \cdots, c_k)$,从 X 中随机选取一个聚类中心 c_1 ,接着选取一个新的聚类中心 c_i ,同时以概率 $D(x)^2 / \sum_{x \in X} D(x)^2$ 从 X 中选取参数 x ,重复提取,直

到所有的 K 聚类中心都被选取。

步骤2 对于每一个 $i \in \{1, 2, \cdots, k\}$,将 C_i 设置为 X 中的点集,使得它们到 c_i 的距离比到 c_j 的距离更近,其中 $i \neq j$ 。

步骤3 更新聚类中心,对于 $i \in \{1, 2, \cdots, k\}$,令聚类中心 c_i 成为 C_i 的质心,表达式为:

$$c_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x$$

(2)

步骤4 判断目标函数和聚类中心是否发生改变,若不变,则输出求解结果;若仍然改变,则跳转步骤2,直到输出结果即可。

2 预测结果分析

通过对预测模型的建立与修正后,在单个镟修周期中轮径的磨耗曲线如图1所示。

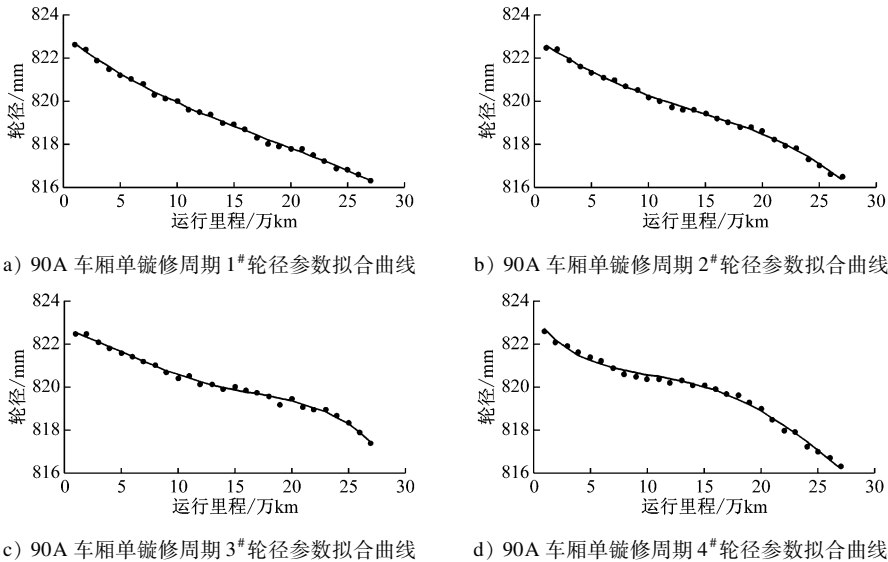


图1 单镟修周期各轮径值参数拟合曲线

通过计算单镟修周期内轮径值的磨耗率,可得到单镟修周期内轮径的自然磨耗情况。对现场数据进行分析(见表1),得到89/90次列车各节车厢第一转向架各轮对单镟修周期的磨耗率为0.15~

表1 第一转向架各轮对单镟修周期轮径磨耗率
mm/万 km

车厢	轮径磨耗率			
	1#轮对	2#轮对	3#轮对	4#轮对
89A	-0.231 1	-0.215 0	-0.172 0	-0.207 7
89B	-0.174 4	-0.222 6	-0.214 4	-0.196 5
89C	-0.200 1	-0.235 4	-0.192 6	-0.207 7
90C	-0.208 0	-0.168 2	-0.198 5	-0.179 6
90B	-0.199 0	-0.1677	-0.195 3	-0.205 8
90A	-0.219 8	-0.207 7	-0.179 4	-0.216 0

0.25 mm/万 km。

在列车运行过程中,随着运行里程的增加,轮对尺寸参数会发生轮径值、轮缘厚等参数超限情况,一旦参数超限,地铁系统就需要对轮对尺寸进行镟修处理。轮对镟修的实质是通过切削轮对踏面,使其恢复到标准型面,这一过程中实际上是一个切削轮径的过程。因此,为建立基于轮径值参数的轮对寿命预测,还需要对每个轮对的镟修情况进行相应统计。

以90A车厢各轮对为例,其中轮对全生命周期中轮径值有效范围是770~840 mm,设定轮径值参数变化超过4 mm即认定为轮对被镟修一次。将轮

对镟修前后轮径值的差值作为镟修切削量,当轮径低于 770 mm 或者轮对参数再次达到 840 mm,说明轮对全生命周期到限,轮对将会被强制退役。镟修切削量如表 2 所示。

镟修记录	镟修切削量				mm
	1 [#] 轮对	2 [#] 轮对	3 [#] 轮对	4 [#] 轮对	
1	9.89	8.8	8.43	7.21	
2	4.71	6.48	7.40	5.90	
3	5.96	6.76	6.57	5.70	
4	5.27	6.96	5.86	6.07	
5	8.83	9.86	10.17	10.80	
镟修总量	34.66	38.86	38.43	35.68	

通过观察镟修总量可以发现,轮径值参数的范围为 770 ~ 840 mm,有效直径为 70 mm,而镟修切削量则为 34 ~ 40 mm,有约 1/2 的有效轮径是在镟修过程中被消耗的。针对这一情况,可以减少镟修切削量,延长轮对全生命周期寿命,从而降低轮对运营成本。

3 镟修优化策略

根据上述分析,通过减少镟修切削量或延长单镟修周期寿命,可以延长轮对全生命周期寿命^[5]。

3.1 左右换向策略

左右轮对的磨损趋势并不相同,其中,某个轮对的轮缘厚磨损情况如图 2 所示。

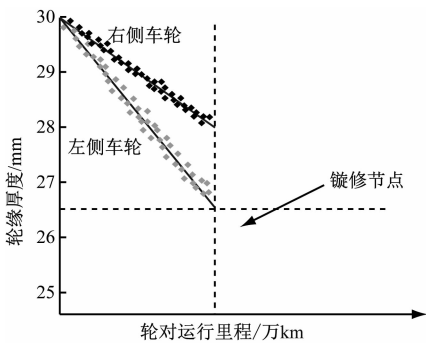


图2 左右轮对差异化分析图

图中可见,左轮磨损趋势明显大于右轮,左轮首先超出轮缘厚参数安全限度,整个轮对需要进行镟修,右轮并没有超出安全范围。根据上述分析,提出轮对左右换向策略,如图 3 所示。作为对比,采用轮对换向策略以后,可以延缓左轮的快速磨损,从而能在一定程度上延缓轮对镟修周期,延长轮对

在一个镟修周期中的运行里程。

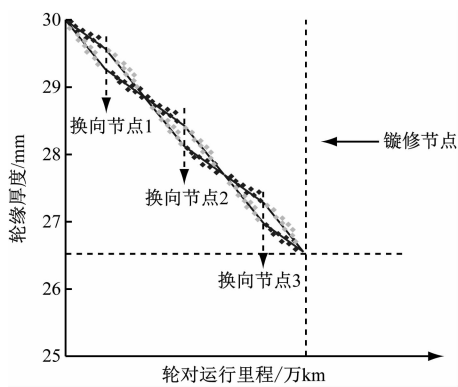


图3 轮对换向运行后的效果图

3.2 多模板选择分析

即使采用轮对左右换向策略,轮对磨损仍会一直发生,直到超出规格。此时,需采用镟修将轮对的踏面恢复到标准规格。通常情况下,镟修规格有多个可选择的模板。以广州地铁 8 号线为例,有 3 种镟修模板可供选择,具体参数如表 3 所示。

表3 轮对镟修模板参数

参数	模板 A	模板 B	模板 C
轮缘厚度/mm	28	30	32

表中可见,广州地铁 8 号线车辆段很少采用模板 C,大量轮对都是按照模板 B 进行镟修辅以模板 A 进行镟修。采用不同模板对镟修轮缘厚参数进行相应分析,如图 4 所示。

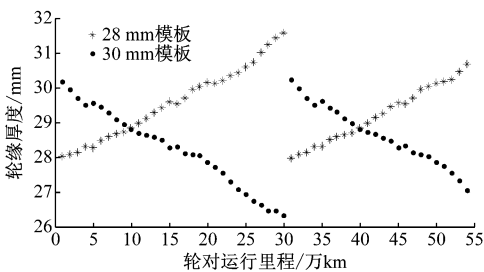


图4 30 mm 模板与 28 mm 模板镟修后磨损对比

图中可见,若轮对以模板 A 进行镟修,那么轮对的轮缘厚度参数会随着轮对的运行里程增大,而以模板 B 进行镟修后,轮缘厚度参数会随着列车运行里程的增加而减小。

根据上述规律,本文提出多模板选择镟修策略:① 如果轮对第一次镟修时使用模板 A,那么当轮对轮缘厚度参数增加到 30 mm 时,再次进行镟修时就需要使用模板 B;② 如果轮对第一次镟修时使

用模板 B,那么当轮对轮缘厚度参数减少到 28 mm 时,再次进行镟修时就需要使用模板 A;③ 每次进行镟修时,应针对每个轮对磨损情况单独分析,分别确定。

3.3 混合镟修优化策略

本文提出一种混合镟修优化策略,即将多模板混合策略与轮对换向策略进行混合,操作流如图 5 所示。

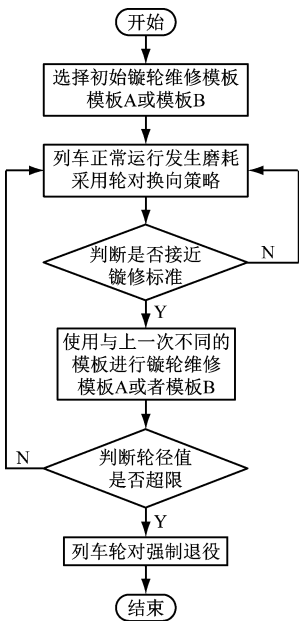


图 5 混合镟修策略流程

具体操作步骤如下：

- 步骤 1 选择模板 A 和模板 B 中的一个作为轮对镟轮维修的初始模板；
- 步骤 2 列车运行,轮对左右两个车轮的发生磨损,采用换向策略,平衡左右车轮磨损,尽可能使得两侧的车轮在到达下次镟修之前,磨损相近；
- 步骤 3 测量轮对参数,判断是否达到多模板选择策略的镟轮维修标准,若仍未达到,继续步骤 2,若达到标准则进行步骤 4；
- 步骤 4 在模板 A 与模板 B 中选择与上次不同的模板进行镟轮维修；
- 步骤 5 判断轮径值参数是否超限,若是低于 770 mm,对轮对进行强制退役,否则进行步骤 2。

3.4 镟修优化策略结果分析

分别对广州地铁 8 号线 135/136 次列车和 137/138 次列车采用以上的优化策略进行镟修。其中,135/136 次列车采用多模板镟修优化策略,137/138 次列车采用混合镟修优化策略。选取常规镟修策

略的 95/96 次列车作为参照。为验证优化情况,选取三节车厢的同一位置进行相应大参数统计,对 95A、135A、137A 三节车厢的轮对进行参数分析。

根据列车轮对尺寸参数进行轮对全生命周期镟修切削量的统计,统计如表 4 ~ 表 6 所示。

表 4 95A 车厢全生命周期镟修切削量 mm

镟修记录	镟修切削量			
	1#轮对	2#轮对	3#轮对	4#轮对
1	8.64	8.74	8.62	7.95
2	8.25	7.9	8.79	7.92
3	7.67	8.03	7.42	6.57
4	7.95	8.11	6.99	8.18
镟修总量	32.51	32.78	31.82	30.62

表 5 135A 车厢全生命周期镟修切削量 mm

镟修记录	镟修切削量			
	1#轮对	2#轮对	3#轮对	4#轮对
1	8.33	9.25	8.27	9.00
2	5.19	4.86	6.04	5.17
3	5.01	4.69	6.17	5.77
4	6.01	5.99	5.75	5.33
5	5.75	5.26	4.70	5.56
镟修总量	30.29	30.05	30.93	30.83

表 6 137A 车厢全生命周期镟修切削量 mm

镟修记录	镟修切削量			
	1#轮对	2#轮对	3#轮对	4#轮对
1	8.02	7.63	8.13	7.91
2	5.05	4.14	4.56	5.13
3	4.64	5.34	5.07	4.11
4	5.18	4.63	4.27	4.55
5	4.80	5.38	4.60	4.26
6	5.22	4.75	4.62	4.71
镟修总量	32.91	31.87	31.25	30.67

由表 4 ~ 6 可知,三节车厢 95A、135A、137A 按照既定策略进行运行时,分别经过了 4、5、6 次镟修。通过比较发现,镟修切削总量 125A < 137A < 95A,虽然车厢 95A 的各轮对镟修次数最少,但镟修总量最高,车厢 137A 的镟修总量略高于车厢 135A 的镟修总量。

由于新轮的轮缘厚为 32 mm,在磨损过后进行相应镟修时,造成第一次镟修时轮径切削量较大。

除了第一次以外,采用后面两种策略,则会明显减少轮径切削量。如图 6 所示,混合镟修优化策略的平均切削量最小,其次是多模板选择镟修优化策略,而常规镟修策略的平均切削量最大。

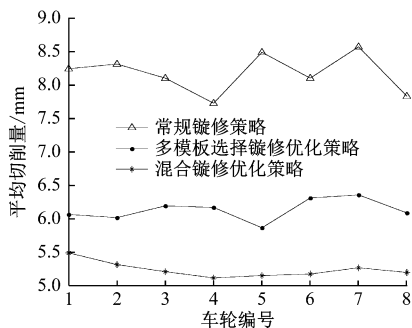


图 6 3 种策略下车轮平均镟修切削量对比

初步的测试采用的是两列列车,其不同镟修策略的轮对寿命为:按照常规策略进行镟修,列车轮对寿命为 138 万 km 左右;作为参照策略,列车轮对采用多模板选择镟修优化策略后,轮对寿命达到 162 万 km;而采用基于多目标选择混合镟修优化策略后,轮对寿命达到了 228 万 km,延长了近 90 万 km,延长轮对使用寿命达 65.2%,极大地降低了轮对的使用成本。

4 结语

本文首先建立单镟修周期内的轮对轮径值寿命预测模型,列车轮对由于轮径值限制,结合镟修周期数预测目前轮对全生命周期的寿命也即轮对运行公里数。对车辆轮对低成本运用优化策略进

行研究,针对轮对的低成本运用进行阐述,分析出轮对左右磨耗并不相同,从而提出轮对左右换向策略,可以实现延长单个镟修周期中轮对的使用寿命。根据采用不同的模板进行镟轮维修,轮对磨耗情况并不相同。基于此,本文提出基于多模板选择的混合镟轮维修优化策略,将轮对换向策略与多模板选择策略相结合。最后,对比分析基于多模板选择的混合镟轮维修优化策略与常规镟修策略,该策略可以在一定程度上延长轮对的寿命。

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]// IEEE. Rail Conference, Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint. Baltimore; IEEE, 2004:193.
- [2] HONG X U. 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] ZHU W, YANG D, GUO Z, et al. Data-driven wheel wear modeling and reprofiling strategy optimization for metro systems [C]//Transportation Research Board (TRB). TRB 94th Annual Meeting. Washington; TRB, 2015:67.
- [4] WANG W, CHENG M, HUA W, et al. Hybrid modeling and applications of virtual metro systems [C]//IEEE. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Lille; IEEE, 2010:1.
- [5] 牛牧笛,冯其波,陈士谦. 列车轮对在线动态测量方法的评述[J]. 铁道机车车辆,2006(2):32.

(收稿日期:2019-06-23)

(上接第 107 页)

- [7] 刘恩朋,杨占才,靳小波. 国外故障预测与健康管理系统开发平台综述[J]. 测控技术,2014,33(9):1.
- [8] 宋宇博,董博. 城市轨道交通企业资产管理系统设计与应用[J]. 铁道运输与经济,2013(12):72.
- [9] 杜子学,金波,薛胜超. 基于模糊层次分析法的跨站式单轨交通设备模式安全评估研究[J]. 城市轨道交通研究,2015(4):19.
- [10] 虞翔. 城市轨道交通运营设备的寿命与安全评价方法[J]. 城市轨道交通研究,2014(2):148.
- [11] 李章杨,陆国政,虞翔,等. 高铁信号关键设备使用寿命评估

方法[J]. 铁道通信信号,2017(10):1.

- [12] 于湛麟,李仲秋,任永昌. SSH 框架实现 MVC 架构的电子商务软件平台[J]. 计算机技术与发展,2012,22(10):169.
- [13] 湛湘情,狄文辉,孙冬. 基于 SSH 框架与 AJAX 技术的 JavaWeb 应用开发[J]. 计算机工程与设计,2009,30(10):2590.
- [14] LI D, MEI H, SHEN Y, et al. ECharts: a declarative framework for rapid construction of web-based visualization [J]. Visual Informatics, 2018, 2(2):136.

(收稿日期:2019-01-31)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt1998.com