

轨道交通车辆轮轴固死故障预测模型研究

洪 旭 陈美霞 滑 瑾

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘 要 [目的] 由于轮轴组装不当、检修时操作过激使轮轴出现凹凸面或作业时电腐蚀造成擦伤缺损等情况, 均会加剧轨道交通车辆轮轴热轴、轮轴固死等异常故障的发生。如不及时处理, 可能造成严重的行车事故。因此, 有必要研究轨道交通车辆轮轴固死故障预测方法及预防措施。[方法] 以南京地铁 S7 号线列车出现轮轴固死故障为例, 通过对列车监测数据的分析和挖掘, 探究其潜在的相关性和周期性, 为列车故障诊断提供依据; 基于牵引模式, 结合实时牵引电流、各架轴速、参考速度等信号进行大数据分析, 建立轮轴固死故障预测模型; 对轴承卡滞、轴内阻力增大及轴系老化导致性能下降等原因引起的轮轴固死现象进行判断, 辨识其健康状态, 实现对轮轴内部可能出现的一些老化、卡滞现象进行故障预测。[结果及结论] 建立了轨道交通车辆轮轴固死故障预测模型; 对列车实际运行数据进行分析, 验证了该预测模型的可行性。但由于轮轴固死的样本数据很少, 后续还需采用历史值结合新增值的方法进行在线学习, 来提高模型预测的准确性。

关键词 轨道交通; 轮轴固死; 大数据分析; 预测模型; 安全运行

中图分类号 U260.33

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.035

Research on Rail Transit Vehicle Wheel Axle Locking Fault Prediction Model

HONG Xu, CHEN Meixia, HUA Jin

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Improper assembly of wheel axles, excessive operation during maintenance leading to axle surface irregularities, or abrasions and defects caused by electrical corrosion during operation exacerbate abnormal faults such as wheel axle overheating and locking in rail transit vehicles. If left unattended, these faults may result in serious accidents. Therefore, it is necessary to study predictive methods and preventive measures for wheel axle locking faults in rail transit vehicles. [Method] Taking the occurrence of wheel axle locking faults in Nanjing Metro S7 Line trains as an example, analysis and mining of train monitoring data are conducted to explore their potential correlations and periodicities, providing a basis for train fault diagnosis. Based on traction mode, big data a-

nalys is performed using real-time traction current, axle speeds, reference speed signals to establish a prediction model for wheel axle locking faults. Assessment of wheel axle locking phenomena caused by bearing seizure, increased internal resistance, and aging of the axle system is carried out to identify their health status and predict potential aging or seizure within the wheel axle. [Result & Conclusion] A prediction model for wheel axle locking faults in rail transit vehicles is established and validated through analysis of actual train operation data. However, due to limited sample data on wheel axle locking, subsequent online learning methods combining historical values with new data are required to improve the accuracy of the prediction model.

Key words rail transit; wheel axle locking; big data analysis; prediction model; safe operation

随着轨道交通列车运行工况的复杂化和多样化, 以及运营总里程的增长, 车辆的机械磨耗、部件老化等问题逐渐突出, 这给列车运行带来了安全隐患。列车轮轴作为支撑列车运行的重要部件, 其在行驶过程中, 轮轴几乎承担了列车的所有负重及由振动引起的冲击。因此, 轮轴是列车极易受损的部件之一。由于轮轴组装不当、检修时操作过激使轮轴出现凹凸面及作业时电腐蚀造成擦伤缺损等情况, 都会加剧轮轴热轴、轮轴固死等异常故障的发生。这些异常都会导致轮轴与轴承之间的活动状况变差, 摩擦磨损加重, 光滑质量下降等, 如车辆继续保持运行, 不进行应急处理, 则可能造成热切轴、燃轴、列车晚点甚至脱轨等更严重的行车故障^[1]。

近年来, 随着传感器技术的蓬勃发展^[2], 列车运行过程中产生的大量实时监测数据被收集。通过对历史监测数据的分析和挖掘, 可以探究出其潜在的相关性和周期性, 为列车故障诊断提供依据^[3]。通过列车运行过程中采集到的牵引电流、各架轴速、参考速度等监测数据进行分析, 提出列车轮轴固死异常预测模型。该模型主要针对轴承卡滞、轴内阻力增大及轴系老化性能下降等原因引起

的轮轴固死现象进行故障预测;辨识其健康状态,对保障车辆的安全运行与提高列车运行可靠性具有重要的意义。

1 模型介绍

轮轴固死故障发生时,车辆一般会出现如下故障现象^[4]:①列车启动提速时有抱闸的感觉、速度提升明显变慢;②运行过程中走行部有异响,振动较大,在轮轴卡死的瞬间列车行驶速度不平稳,会有明显波动;③出现极端轮轴固死时,速度传感器无法正常检测该轴的速度,伴随出现速度传感器故障;④故障轴电机发生类似堵转的现象,电流出现过流;⑤轮轴固死后的轮对在轨面上滑行,产生较强的尖叫声,将轨面拉伤。

轮轴固死和轮对滑行在机理上比较一致,但本文的关注点是在检测出轮轴内部可能出现的一些老化、卡滞现象,并不在于检测湿滑和极端轮轨关系下的滑行和固死现象,因此在切分工况和特征选择上需要细致考虑。

根据地铁列车牵引控制逻辑,当单根轴的轴速与对应转向架的参考速度之间的速度差达到 3 km/h 时,控制系统会报出轮轴固死或滑行故障,并相应的增大、减小牵引力能够调整轴速的变化率,使之跟上参考速度的上升或下降。因此,在进行模型方案设计时,从速度差和电流 2 个方向寻找相关特征和判据。

图 1 为逆变电流和牵引力完成值关系图。由图 1 可知:逆变电流和牵引力完成值两者几乎呈线性正相关。因此,从项点原理来看,固死、堵转现象会引起电流上升,从而影响牵引力的大小,故只需分析逆变电流的大小即可。

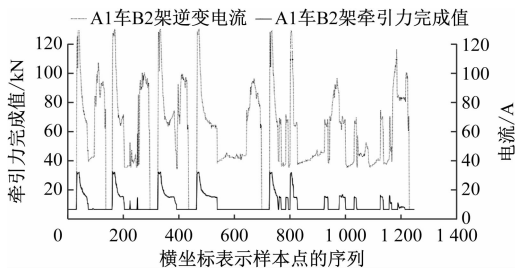
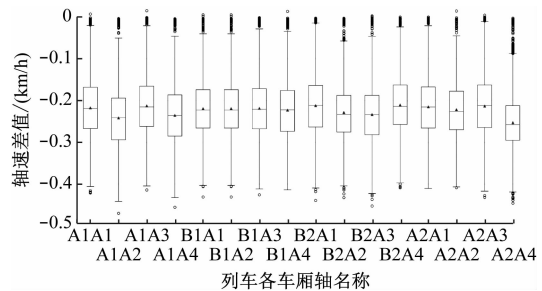


图 1 逆变电流和牵引力完成值的关系

Fig. 1 Relation between inverter current and traction force completion value

经过对速度差和逆变电流的统计分析,选定每个样本(即一次速度从 0 开始的牵引过程)的速度

差均值,以及逆变电流最大值为该项点的 2 个判据。2 项判据在每月 1 列列车上所有轴的数据表现上的箱线图如图 2 所示。



注:A1A1 为 A1 车 A1 轴;B1A1 为 B1 车 A1 轴;余类同。

图 2 轴速差均值箱线图

Fig. 2 Box plot of axis speed difference mean value

由图 2 可知:头尾 2 根拖车轴在整个月内的速度差分布显著偏低(这一方面是由于头尾 2 个转向架是拖车架,不直接接收电动力,启动时速度上升会较慢;另一方面是由于列车运行方向的第一根轴的黏着状态比较差,也会导致此现象);而中间 12 根拖车轴的箱线图分布比较均匀,这表明它们的运动状态比较一致,如有某一根轴持续出现轴速差均值较低的现象,其可能就表征了轮轴固死的前期表现。

图 3 为轴逆变电流箱线图。由图 3 可知:各个转向架的逆变电流最大值的分布比较一致。这是由于所使用的数据集列车运行状态比较稳定,没有出现过轮轴阻力增大引起的电机堵转和电流增大现象,故电流判据门限可以设得低一些;一旦超限,则综合速度差进行判别,在排除电机本身故障影响的前提下,判断该轴是否有固死的趋势。

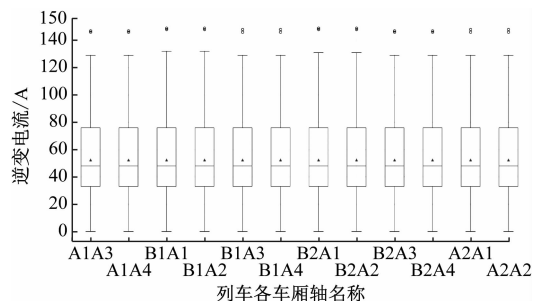


图 3 轴逆变电流箱线图

Fig. 3 Box plot of axis inverter current

2 模型建立

通过牵引状态的逻辑变化(监控牵引状态信号

并计时),切分出持续时间超过 10 s 且从 0 开始运行的列车牵引过程区间样本,计算出每个区间样本内的轴速减参考速度的平均值及逆变电流最大值。

设单个轴速为 $v_n (n = 1, 2, \dots, 12)$, 参考速度为 v_{ref} , 以表征各个轴的轴速。首先判断是否出现轴速差过大事件:

$$v_n - v_{\text{ref}} < -3 \quad (1)$$

若式(1)成立,则直接报此轴固死告警。其中, -3 是速度差故障门限。

另一方面,判断轴固死征兆事件是否出现:

$$\text{mean}(v_n(t) - v_{\text{ref}}(t)) < \text{outlier}(\text{mean}(v_n(d) - v_{\text{ref}}(d))) \quad (2)$$

式中:

$\text{mean}()$ ——均值算子;

$\text{outlier}()$ ——离群下边界算子^[5]。

其中, t 的取值范围是 1 次牵引过程的时间, d 的取值范围是过去的 30 d, 即在此判断本次牵引过程中,某轴相对参考速度的平均差距是否超出了过去 30 d 的正常范围下限值。

令 $Q_1(\cdot)$ 为下四分位数算子, $Q_3(\cdot)$ 为上四分位数算子, $I_{\text{QR}}(x) = Q_3(x) - Q_1(x)$, $\text{outlier}(\cdot)$ 算子的计算方式为:

$$\text{outlier}(x) = Q_1(x) - 1.5I_{\text{QR}}(x) \quad (3)$$

为了避免轴速差统计过于集中,造成离群边界虚警,加入虚警过滤判断:

$$\text{mean}(v_n(t) - v_{\text{ref}}(t)) < -0.5 \quad (4)$$

其中,参数 -0.5 是虚警过滤门限。

判断是否同时存在电流大的现象:

$$\max(I_n(t)) > \text{mean}(\max(I_{\text{all}}(t))) \quad (5)$$

式中:

$I_n(t)$ ——第 n 轴的电流(两轴对应同一个架的电流);

$I_{\text{all}}(t)$ ——所有轴电流的集合。

若式(2)一式(4)同时成立,则记存在一次“轴固死征兆事件”;对于 4 根拖轴,若式(2)和式(3)成立,则记一次“轴固死征兆事件”。

最后,记录每日“轴固死征兆事件”的频数为 $F_n(d)$,对过去 3 d 的 F_n 序列进行判断:

$$F_n(d-2) > 5 \text{ 且 } F_n(d-1) > 5 \text{ 且 } F_n(d) > 5 \quad (6)$$

若式(6)成立,则报第 n 轴固死预测。

3 模型标定

模型标定的目标为统计式(2) outlier 算子后的

所有样本的轴速差均值,为使 outlier 算子更能体现离群点和在群点的区别,需要样本呈现正态分布^[6],故首先要观察列车的牵引状态下轴速差概率密度分布,如图 4 所示。

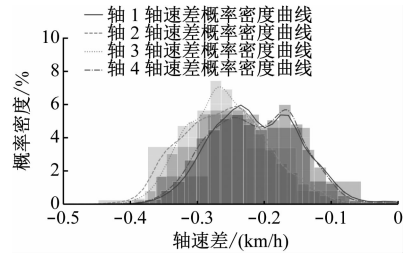


图4 牵引状态下轴速差概率密度分布图

Fig. 4 Probability density distribution diagram of axle speed difference in traction state

由图4可以看出,各样本的速度差呈正态分布,但每列车的各根轴的速度差却不太一样。这表明在实际运行过程中,各轴的运动状态也有一些差距;对于每根轴使用其各自的数据单独计算离群点即可,但从概率密度图上看,整体的分布情况依旧比较正态,故可以使用原方法进行标定。

根据上述数据样本,计算出各列车各轴的轴速差离群边界如图5所示。

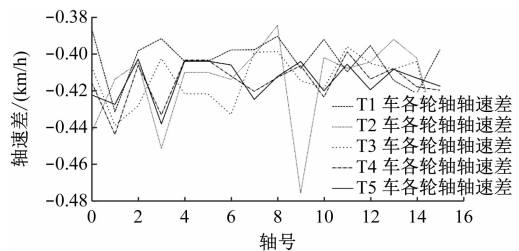


图5 各轴轴速差的离群边界示意图

Fig. 5 Outlier boundary diagram of axle speed difference for each axle

由图5可以看出:轴速差离群边界均分布在 $[-0.5, -0.3]$ 区间内,且各列车的边界值分布情况各不相同。这也符合各列车实际运营状态不同的特点,故以此方法标定,并持续根据列车实际运行过程中生成的样本进行样本更新,便能完成针对各列车、各根轴单独的轮轴固死异常预测的功能。

将上述建立的模型部署在地铁线路的地面运维平台进行验证。2022年5月21日,该地铁线路05车报出轮轴固死故障预测,分析数据显示个别轴速差连续发生异常情况,经排查可能是轮轴出现老化现象,易发生卡滞,更换后故障现象缓解。

4 结语

本文结合列车牵引控制逻辑提出了轨道交通车辆轮轴固死故障预测模型,通过监测实际列车运行数据进行分析建模,并不断根据实际数据对算子进行标定,实现对轮轴固死的预测。但由于轮轴固死的样本数据很少,后续还需采用历史值结合新增值的方法进行在线学习,来提高模型预测的准确性,对于提高列车运行安全性有着较强的指导作用。

参考文献

- [1] 李大伟,何开浒,李兰. 贵阳地铁1号线电客车轮轴卡死、闸片抱死异常情况下应急处理措施研究[J]. 科技创新与应用, 2020(22): 128.
LI Dawei, HE Kaihu, LI Lan. Study on emergency treatment measures under abnormal conditions of axle locking and brake pad locking of electric bus on Guiyang Metro Line 1[J]. Technology Innovation and Application, 2020(22): 128.
- [2] 符泰然,史聪灵,李建,等. 城市轨道交通车辆轴温在线非接触检测技术进展[J]. 劳动保护, 2019(12): 21.
FU Tairan, SHI Congling, LI Jian, et al. Development of on-line non-contact detection technology for axle temperature of urban rail transit vehicles[J]. Labour Protection, 2019(12): 21.
- [3] 蔡煊,王长林,林颖. 基于多传感器的列车空转及滑行检测与校正方法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(1): 22.

(上接第170页)

量最大偏差达到-39%,与进风口相邻的出风口存在明显倒吸现象;增加隔板后,送风均匀性和倒吸现象有较大改善,80%以上的出口预测风量与理论风量偏差在15%之内,其余在15%~20%之间。

2) 通过空调与风道配套试验测试,对比分析预测风量和试验实测风量之间的偏差值,整体变化趋势一致,偏差值在15%之内,从而验证了数值模拟计算的可靠性。对于个别出风口数值模拟数据与试验数据存在偏差较大,主要原因是模型简化造成。在后期研究中,将细化数值仿真模型,进一步提高数值模拟的准确性。

参考文献

- [1] 郭玲. 城轨车辆空调风道内颗粒物沉积规律研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
GUO Ling. Study on the deposition of particulate matter in the urban rail vehicle air conditioning duct [D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2015.
- [2] 杨晚生,张吉光,张艳梅. 新型空调均匀送风道静压均衡衰减特性研究[J]. 广东工业大学学报, 2005, 22(3): 105.
YANG Wansheng, ZHANG Jiguang, ZHANG Yanmei. Study on

CAI Xuan, WANG Changlin, LIN Ying. Train idling/sliding detection and adjust method based on multiple sensors[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(1): 22.

- [4] 王佳佳. 地铁列车空转滑行问题分析[J]. 郑州铁路职业技术学院学报, 2021, 33(3): 11.
WANG Jiajia. Analysis and countermeasures of metro idling and sliding[J]. Journal of Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, 2021, 33(3): 11.
- [5] 朱伟业成,金良琼,沈婷. 基于差分进化算法的正态分布均值变点检测[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(2): 25.
ZHU Weiyecheng, JIN Liangqiong, SHEN Ting. Detection of mean change point of normal distribution based on differential evolution algorithm [J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(2): 25.
- [6] 刘财辉,刘地金. 离群点检测的邻近性方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(21): 1.
LIU Caihui, LIU Dijin. Survey of proximity methods for outlier detection[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(21): 1.

· 收稿日期:2023-11-01 修回日期:2023-12-04 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-01 Revised:2023-12-04 Published:2024-05-10
· 通信作者:洪旭,高级工程师,496275410@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

the uniformity and delay of new static pressure supply air duct[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2005, 22(3): 105.

- [3] 张自强. 地铁车辆空调风道清洁设计优化研究[J]. 中国新技术新产品, 2018(4): 62.
ZHANG Ziqiang. Study on optimization of clean design of air conditioning duct for subway vehicles[J]. New Technology & New Products of China, 2018(4): 62.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Fuman. Computational fluid dynamics analysis: principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [5] European Committee for Standardization. Railway applications—air conditioning for urban and suburban rolling stock—Part 1: comfort parameters; EN 14750—2006 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006:14.

· 收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-02 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-12 Revised:2023-12-02 Published:2024-05-10
· 通信作者:刘林林,高级工程师,liulinlin_hvac@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