

基于PHM技术的地铁车辆车门系统预测性维修方案研究

杨军, 陈怀远

南京地铁运营有限责任公司, 江苏南京

DOI:10.62836/gse.v3i3.1478

摘要: 地铁车辆车门是保障乘客乘降安全与运营效率的关键部件, 传统事后维修和定期预防性维修模式常存在维修不足或过度维修的问题, 难以适配当前城市轨道交通高密度运营的需求。预测与健康管理 (PHM) 技术可通过采集分析设备运行数据, 提前识别故障隐患并精准安排维修。本文围绕地铁车门系统开展研究, 梳理了车门典型故障模式与诱因, 完成多源运行数据采集与特征提取, 构建了基于机器学习的故障预警与剩余使用寿命预测模型, 最终设计出适配地铁运营场景的分级预测性维修方案。

关键词: PHM技术; 地铁车辆车门; 故障预测; 预测性维修

Research on Predictive Maintenance Solutions for Subway Vehicle Door Systems Based on Predictive Health Management (PHM) Technology

Jun Yang, Huaiyuan Chen

Nanjing Metro Operation Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

Abstract: Subway vehicle doors are critical components ensuring passenger safety and operational efficiency. Traditional post-event maintenance and periodic preventive maintenance approaches often suffer from insufficient or excessive repairs, failing to meet the demands of high-density urban rail transit operations. Predictive Health Management (PHM) technology enables early identification of potential failures and precise maintenance scheduling through the collection and analysis of operational data. This study focuses on subway door systems, identifies typical failure modes and their causes, conducts multi-source operational data acquisition and feature extraction, develops a machine learning-based fault prediction and remaining service life estimation model, and ultimately proposes a tiered predictive maintenance framework tailored to subway operational environments.

Keywords: PHM technology; subway vehicle doors; fault prediction; predictive maintenance

1 地铁车辆车门系统故障特征分析与数据采集

1.1 地铁车门系统结构组成与关键功能部件拆解

地铁车门是保障乘客上下车安全与列车正常运营的核心部件，当前城市地铁列车多采用电动塞拉门结构，主要由机械结构、驱动控制、传感检测三大模块组成。其中机械模块包含门体、丝杠螺母传动机构、上下导轨、携门架、锁闭装置等部件，是实现车门开关动作的基础载体；驱动控制模块包含门控单元、驱动电机、传动皮带等核心部件，负责接收列车指令输出动力，调控车门开关的速度与行程；传感检测模块则包含位置传感器、障碍物检测传感器、关门力监测传感器等部件，用于实时反馈车门位置状态，触发防夹保护等安全功能。从故障发生的统计规律来看，绝大多数车门故障都集中在运动频繁、易受磨损疲劳的关键功能部件上，对这些核心部件进行结构和功能梳理，是后续分析故障特征、开展故障预测的基础。

1.2 车门系统典型故障模式与故障诱因梳理

结合现有结构组成与日常运营统计，可将车门常见典型故障分为四类：第一类是机械卡滞类故障，主要表现为车门开关过程中受阻、开关门速度异常或无法完全到位，这类故障多源于上下导轨积尘积垢、丝杠螺母传动机构长期磨损导致配合间隙异常，或是锁闭机构部件老化卡滞，车门频繁开关带来的持续疲劳应力也会加剧部件变形，进一步诱发卡滞问题。第二类是驱动控制类故障，主要表现为车门无法接收开关门指令、动力输出异常，诱因多为门控单元线路老化松动、驱动电机碳刷过度磨损，或是控制程序受电磁干扰出现信号紊乱。第三类是传感检测类故障，主要表现为防夹功能误触发或失效，诱因多为传感器表面被异物遮挡、安装位置偏移，或是传感器元件老化导致检测精度下降，使得车门无法正确识别位置与障碍物信息，进而引发运营异常。第四类是密封与结构损伤类故障，主要表现为门体密封胶条老化开裂、门体变形，这类

故障多由乘客外力碰撞、温湿度环境长期侵蚀引发，会导致列车运行时车门漏风、异响，严重时还会影响车门正常开关。梳理不同故障对应的典型表现与核心诱因，能够为后续针对性提取故障特征、筛选监测数据提供明确方向[1]。

1.3 多源运行数据的采集方案：传感器布置与数据类型

针对车门系统不同位置的故障特征，需要布置多类型传感器完成不同维度运行数据的采集。在驱动电机位置布置电流传感器与振动传感器，采集电机工作电流信号与振动信号，用于捕捉碳刷磨损、转轴偏心等驱动部件异常；在门控单元的通讯线路处布置电压信号传感器，监测线路电压波动与通讯信号传输状态，识别线路松动、电磁干扰类故障；在车门防夹检测区域保留原有检测传感器输出的位置信号，额外新增图像传感器采集传感器表面与门体边缘状态，识别异物遮挡、门体变形类问题；同时在车门密封结构处布置声传感器，采集车门运行过程中的噪声信号，辅助识别胶条老化、结构间隙异常类故障[2]。

采集的数据可分为状态类数据、事件类数据与环境类数据三类，其中状态类数据包括电机电流、振动幅值、门位置信号、电压值等连续型监测参数，事件类数据包括历史开关门次数、故障记录、维修记录等离散信息，环境类数据涵盖车门运行区域的温湿度、通行客流量等外部影响参数，为后续故障特征提取与健康状态评估提供完整的数据支撑。如下图1所示：

1.4 数据预处理与故障特征提取方法

受传感器采集噪声、传输链路信号干扰以及设备启停状态切换影响，原始采集数据中会存在异常值、缺失值与数据不同步问题，需先通过预处理完成数据清洗与标准化转换。首先采用拉依达准则识别并剔除原始信号中的异常峰值数据，针对局部短序列数据缺失问题，采用线性插值法补全缺失段，再通过同步时间戳对齐不同传感器的采集数据，最后基于Z-score方法完成各维度数据的标准化处理，

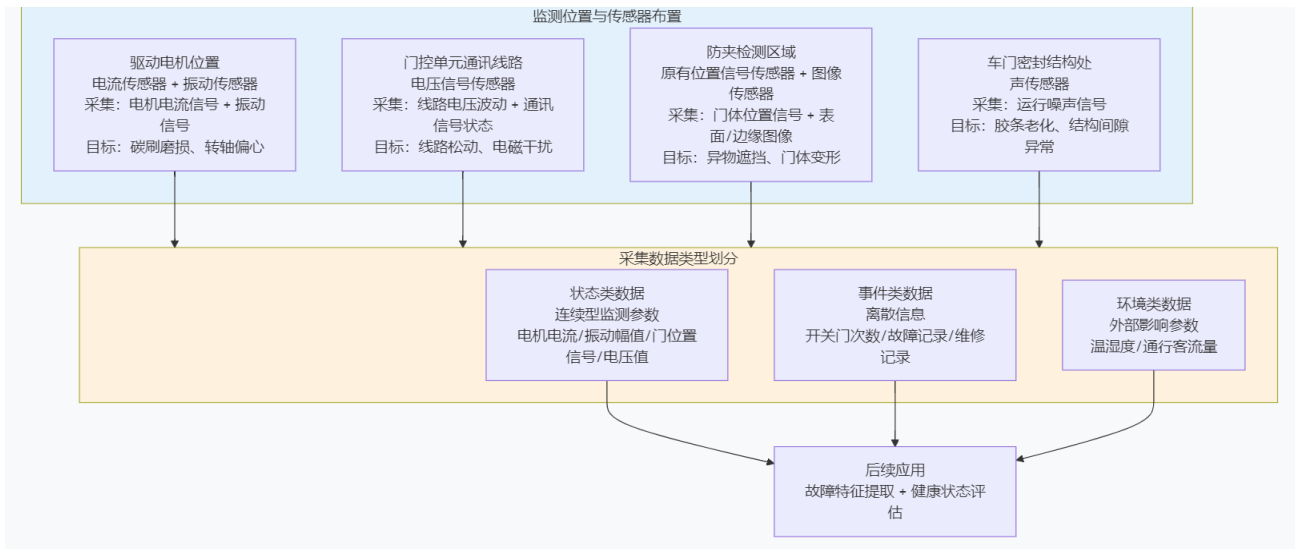


图1. 车门系统多源运行数据采集方案架构

消除不同量纲对后续特征分析的影响。

完成数据预处理后，针对不同类型数据分别提取故障特征：对于电流、振动、噪声这类连续型时序信号，分别从时域、频域维度提取均值、方差、均方根、峰值因子，以及不同频段能量占比等特征；对于离散型状态信息，采用独热编码完成特征数字化转换；最后结合故障模式与诱因的先验知识，对提取的初始特征进行相关性分析，剔除冗余无关特征，保留对故障状态区分度高的敏感特征集，为后续健康评估与故障预测提供高质量输入[3]。

2 基于PHM的车门系统故障预测模型构建

2.1 车门系统健康状态评估指标体系建立

结合前文提取的敏感故障特征，从功能状态、性能退化两个层级构建多维度评估指标：功能状态指标聚焦车门开关动作能否正常完成，涵盖门控系统反馈电压异常占比、开关门到位超时率两类可直接反映功能可用性的指标；性能退化指标则围绕部件老化过程的渐变特征，设置包括电机电流波动系数、锁闭机构振动均方根、门扇运行噪声平均幅值三个量化指标，每个指标按照退化程度划分为健康、亚健康、异常、故障四个状态等级，通过层次分析法确定各指标的权重，最终得到可综合表征车

门系统整体健康水平的量化评估值，为后续故障预警提供状态判定基础。

2.2 基于机器学习的车门故障预警模型设计

结合已构建的健康状态评估指标体系，选择轻量型梯度提升树算法完成预警模型搭建，该算法对表格型健康指标数据适配性强，且能兼顾预测精度与运算效率，满足地铁车辆基地现场实时预警的算力需求。模型以历史车门运行健康指标数据为输入，以对应状态等级标注为输出，通过划分训练集与测试集完成模型参数迭代训练，最终可根据实时采集计算的健康评估值，自动输出车门当前状态等级，当判定为异常状态时触发分级预警信号。

2.3 剩余使用寿命预测方法选择与参数优化

针对地铁车门剩余使用寿命预测需求，结合健康评估指标体系得到的历史状态退化数据，选择融合注意力机制的长短期记忆网络进行预测建模，该网络能够有效挖掘时序状态数据中的长期依赖关系，准确捕捉车门健康状态随时间退化的渐变规律，避免传统时序预测方法容易出现的梯度消失问题，更适配车门部件缓慢老化的寿命预测场景。确定预测网络结构后，采用网格搜索法对网络的隐藏层节点数、学习率、训练批次大小等超参数进行遍历寻优，以预测值与实际寿命的平均绝对误差作为

寻优目标函数，筛选得到误差最低的参数组合，保障剩余使用寿命预测结果的准确性。

2.4 模型训练与精度验证

基于预处理完成的全量地铁车门状态退化数据集，按照比例随机划分训练集与测试集，将划分好的数据输入优化后参数组合的剩余使用寿命预测模型，通过反向传播算法迭代更新模型权重，完成模型训练。在完成模型训练后，选取平均绝对误差、均方根误差以及决定系数三个指标对模型预测精度进行验证评估，对比不同预测方法在相同测试集上的性能表现，检验本模型针对地铁车门剩余使用寿命的预测准确性与泛化能力，确认模型是否满足现场工程应用的精度要求，为后续预测性维修决策提供可靠的技术支撑[4]。

3 基于PHM技术的车门系统预测性维修方案设计

3.1 传统车门维修流程与预测性维修流程对比

传统地铁车门维修主要采用计划预防修与事后故障修结合的模式：计划预防修按照固定的周期对车门系统进行强制拆解保养、部件更换，无需结合车门实际运行状态调整维修内容；事后故障修则是在车门发生故障影响运营后才开展故障排查与抢修作业。两种维修模式均存在明显弊端：计划修容易出现过度维修，造成维修人力、备件资源的浪费，还可能因不必要的拆解装配引入新的故障隐患；事后修则会打乱运营计划，甚至引发运营安全事故，影响线路服务可靠性[5]。

而基于PHM技术的预测性维修流程，是以本研究构建的故障预警与剩余使用寿命预测结果为核

心驱动，依托实时采集的车门运行数据，动态掌握车门系统健康状态，仅在车门性能退化达到预设阈值、预测即将发生故障时，才安排针对性的维修作业。对比两种流程不难发现，预测性维修打破了传统维修模式“按周期定作业”的固定逻辑，能够有效平衡维修不足与过度维修的问题，在降低维修成本的同时，提升车门系统运行可靠性。核心对比如下表1。

3.2 基于故障预测结果的维修决策分级机制

根据车门系统当前的健康状态和预测得到的故障发展趋势，结合故障发生后对运营安全、行车服务的影响程度划分不同维修决策等级。当车门健康状况良好，退化程度远低于预设预警阈值时，维持现有日常巡检策略，不安排额外针对性维修作业，持续跟踪监测状态变化即可。当车门性能出现轻度退化，退化程度达到预警阈值但预测故障仍会在一段时间后才发生，不会影响近期运营安全时，调整监测频率，增加状态数据采集次数，密切跟踪退化发展速度，将该车门列入待修计划，结合线路运营的非高峰天窗期统筹安排维修。当车门退化程度已经接近危险阈值，预测短期内就会发生故障时，立即安排专项维修，结合运营调度调整计划开展抢修，避免故障正式发生影响正常运营。这种分级机制可以让维修安排完全匹配车门实际健康需求，避免维修计划的盲目性，进一步提升维修资源的利用效率。

3.3 预测性维修的资源调度与作业安排优化

基于分级维修决策结果，可对维修资源进行动态统筹调度，避免传统固定排班模式下资源闲置或

表1. 传统维修模式和PHM预测性维修模式对比

对比维度	传统维修模式	PHM预测性维修模式
维修触发逻辑	固定周期/故障发生后	实时健康状态评估结果
数据依据	无（周期强制）/故障现象	实时运行数据+剩余寿命预测
维修时机	定期拆解或故障抢修	性能退化达阈值、即将故障前
资源消耗	高（过度维修/抢修）	低（按需精准维修）
运营影响	计划中断、安全风险	最小化运营干扰
核心风险	资源浪费、拆解隐患、运营事故	模型准确度依赖（可优化）
总体效果	维修不足与过度维修并存	成本降低+可靠性提升

抢修时资源短缺的问题。首先依托地铁既有运营线路的维修资源分布，建立统一的资源调度台账，整合不同车辆段的维修人力、工具备件、维修场地等资源，当某一线路出现抢修需求时，可第一时间从邻近车辆段调配闲置资源支援，缩短维修准备的准备时间。其次需要结合线路运营的天窗窗口规律优化作业安排，对于列入待修计划的车门维修任务，可提前将备件、维修人员提前调配至对应车辆段，在非运营的集中天窗期批量完成多辆待修车门的维修作业，减少零散作业对运营计划的干扰，同时降低维修准备的重复成本。此外，还可以建立维修任务优先级动态调整机制，根据车门退化状态的实时变化、线路近期的客流预测调整任务排序，优先保障大客流线路重点车辆的维修需求，在不影响运营安全和服务质量的前提下，灵活调整维修作业时间，最终实现维修资源利用率和作业效率的同步提升。

3.4 维修效果评估指标体系构建

需要围绕维修效率、运营影响、成本管控、安全质量四个核心维度搭建分层评估指标体系。第一维度是维修作业效率指标，具体包含单扇车门维修平均响应时长、天窗期维修完成率、跨资源调配支援时长三个细分项，直接反映资源调度与作业安排优化的实际成效。第二维度是运营服务影响指标，主要统计因车门故障导致的列车晚点次数、正线清客次数、运营准点率变化，直观体现预测性维修对运营服务质量的提升作用。第三维度是全周期维修成本指标，涵盖单扇车门年均维修备件消耗成本、故障抢修额外支出占比、闲置资源周转利用率三个分项，可清晰核算预测性维修相比传统维修模式的成本节约效果。第四维度是安全可靠指标，包括维修后车门重复故障发生率、关键部件剩余使用寿命

符合率、车门系统年均故障停时，用来验证PHM故障预测结果的准确性与维修决策的合理性。后续可通过对各指标赋予差异化权重，实现对预测性维修方案整体效果的量化评分，为方案的持续迭代优化提供数据支撑。

4 结语

随着城市轨道交通运营里程不断增加，客流压力持续提升，车辆车门作为高频动作部件，其可靠性直接关乎线路运营效率与乘客出行体验。本文围绕地铁车门系统的故障特征分析、PHM故障预测模型构建、预测性维修方案设计展开研究，搭建了涵盖多维度的维修效果评估指标体系，为车门系统从传统事后维修、计划维修向预测性维修转型提供了清晰的思路框架。预测性维修的落地应用，依赖于持续的运行数据积累与模型迭代优化，后续还需要结合实际运营场景的故障数据，对预测模型的精度与预警灵敏度做进一步验证调整，不断完善维修决策分级机制与资源调度规则，推动PHM技术在地铁车辆运维领域的实际落地，助力城市轨道交通运维向智能化、精益化方向升级。

参考文献

- [1] 张飞. 影响地铁车辆维修的因素分析及对策[J]. 人民公交, 2025(02): 172-174.
- [2] 韩南南. 城市轨道交通车辆维修模式的优化与改进研究[J]. 技术与市场, 2022(04): 175-178.
- [3] 王磊磊, 王如阳, 庞玺贺, 等. 城市轨道交通的车辆维修管理要点分析[J]. 设备管理与维修, 2023(06): 14-16.
- [4] 黄晓明. 基于状态检测的城市轨道交通车辆全生命周期系统性维修研究[J]. 科技创新导报, 2022(17): 26+28.
- [5] 高扬, 罗庆, 林东升. 车辆健康管理 with 日常维修业务结合的应用实践[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023(04): 128-131.

