

城轨列车牵引控制系统故障诊断与智能运维优化研究

卿立勇

中交（天津）轨道交通运营管理有限公司 天津 300000

摘要：针对城轨列车牵引控制系统故障频发、传统运维模式盲目低效、隐性故障难以识别等问题，本文剖析系统核心结构、工作原理及各类故障特征，结合运维现存短板，构建融合通道注意力与迁移学习的DBN-SVM智能故障诊断模型。通过实测数据仿真验证模型精准性与稳定性，以此为核心搭建预测性智能运维体系，优化运维流程与资源配置。研究有效提升故障诊断精度，缩短故障处置时长，降低运维成本，可为城轨运维智能化升级提供技术支撑。

关键词：城轨列车；牵引控制系统；故障诊断；智能运维优化

引言：随着城轨交通运营频次与线路规模持续扩增，列车牵引控制系统长期高负荷运行，电气、机械、控制类故障频发，直接影响行车安全与运营效率。传统周期性检修、事后抢修模式依赖人工经验，存在预判能力缺失、资源浪费、隐性故障漏检等诸多问题，难以适配现代化城轨运维需求。为突破传统运维瓶颈，本文聚焦牵引控制系统故障诊断与运维优化，依托智能算法搭建精准诊断模型，重构智能运维体系，助力城轨运维向数据驱动的预测性模式转型。

1 城轨列车牵引控制系统及故障特征分析

1.1 牵引控制系统核心结构与工作原理

（1）系统核心组成：牵引控制单元（DCU）以DSP为核心，完成矢量运算与PWM生成；逆变器采用IGBT模块，将DC750V/1500V逆变为调频调压三相交流电；牵引电机多为异步电机，功率密度高、维护需求低；传感器系统含电流、电压、速度传感器，实现闭环控制；供电模块提供稳定低压电源，保障实时响应。（2）系统工作机制：启动阶段，控制单元输出低频低压PWM，实现平滑启动；加速阶段，提升电压与频率，按牵引特性输出最大转矩；匀速阶段，调整电压频率平衡阻力，维持速度稳定；制动阶段，切换至再生制动，电机作发电运行，将动能回馈电网，实现高效节能^[1]。（3）系统运行性能影响因素：路况影响负载，坡道与弯道增加运行阻力；高运营频次导致热积累，加速器件老化；设备老化使IGBT开关特性劣化、电容容值下降，影响控制精度；电磁干扰与温湿度波动可能造成信号偏差，需通过屏蔽与散热设计加以抑制。

1.2 牵引控制系统常见故障类型及成因

（1）电气类故障：逆变器故障多由IGBT过流、过热或驱动电路失效引起；电路短路常因绝缘老化、潮湿或异物造成；传感器失效源于供电不稳或信号调理电路损

坏；供电异常涉及网压波动、受流不良。触发条件多为极端工况、环境恶劣或器件寿命末期。（2）机械类故障：牵引电机磨损包括轴承疲劳与转子断条，伴随温度上升、异响与效率下降；传动机构卡滞因润滑失效或齿轮损伤，表现为启动电流突变；部件松动由振动导致，引起运行不平稳。机械故障逐渐累积，初期特征微弱，后期加剧电气负载，形成恶性循环。（3）控制类故障：控制程序紊乱由代码缺陷或电磁干扰引发，导致PWM输出异常；信号传输受通信线路接触不良或干扰影响，造成数据丢包；参数匹配失效多因电机参数辨识不准或环境变化，致使矢量控制失准，表现为力矩波动、过流保护动作。

1.3 牵引系统故障数据特征与运维现状

（1）故障数据特征：运行数据呈强时序性，连续反映系统动态响应；变量间存在非线性耦合，如电流、转矩与温度相互关联；强噪声干扰源于电磁环境与传感器误差。有效特征参数包括电流谐波畸变率、转矩脉动幅值、温升速率、IGBT通态压降等，用于刻画系统退化程度。（2）传统运维模式流程：采用周期性检修，按行驶里程或时间开展日检、月检、年检，执行绝缘测试、性能校验与易损件更换；故障发生后启动抢修流程，排查故障点、替换部件并恢复运行，依赖人员经验与便携式检测设备。（3）传统运维存在的问题：计划修存在盲目性，未区分设备实际状态；故障诊断精度依赖人工经验，隐性故障难以识别；维修资源配置不合理，造成备件与人力浪费；缺乏预警能力，无法预判突发故障，易引发延误与安全事故。

2 城轨列车牵引控制系统智能故障诊断模型构建

2.1 故障诊断总体框架与技术选型

（1）智能故障诊断总体框架：构建“数据采集-预处理-特征提取-故障识别-结果输出”五层诊断架构。数

据采集层依托传感器与车载记录仪获取电流、电压、温度等多源信号；预处理层完成清洗、去噪与归一化；特征提取层采用时频分析与降维技术筛选敏感特征；故障识别层由分类器实现状态判别；结果输出层呈现故障类型、置信度及维护建议。（2）主流智能诊断算法对比：支持向量机泛化能力强，但核函数选择依赖经验，大数据下训练效率低；随机森林抗噪性好、可解释性强，但高维易过拟合；BP神经网络适合非线性映射，收敛慢且依赖初始权值；深度卷积网络自动提取深层特征，但需大量标注数据、训练成本高^[2]。（3）核心算法选型依据：牵引故障数据具强时序性、非线性及小样本特点。本文选取深度信念网络为基础算法，兼顾无监督特征学习与小样本适应，融合支持向量机作为分类层，提升泛化性能。

2.2 故障数据预处理与特征工程

（1）数据清洗：对短时孤立缺失值采用线性插值补全，连续缺失超总量5%的样本段予以剔除；基于拉依达准则识别 3σ 外异常离群点并修正；采用小波软阈值方法抑制工频干扰与随机脉冲噪声，在有效保留故障瞬态冲击特征的同时提升信噪比。（2）数据归一化处理：牵引系统各参数量纲差异显著，直接输入网络将导致训练失衡。采用Z-score标准化将各维度数据转换为零均值、单位方差分布，消除量纲影响并加速梯度下降收敛；对于含饱和区激活函数的网络层，辅以Min-Max归一化将数据压缩至 $[0, 1]$ 区间，避免梯度饱和^[3]。（3）故障特征提取与筛选：首先采用主成分分析进行线性降维，保留累积方差贡献率达95%的主成分；继而引入互信息法评估各特征与故障类别的非线性相关强度，筛选互信息值高于0.3的核心特征；最后通过Pearson相关系数剔除两两相关度高于0.9的冗余特征对，确保最终特征集具备高辨识度与低冗余性。

2.3 智能故障诊断模型搭建与优化

（1）模型基础结构设计：构建DBN-SVM层级化诊断模型，DBN部分由4层受限玻尔兹曼机堆叠，隐含层节点数分别设为64、32、16、8，实现原始特征的逐层抽象；顶层连接径向基核函数SVM多分类器，以一对一策略完成故障判别；初始学习率0.01，动量项0.9，批处理大小64，损失函数选用交叉熵。（2）模型训练与参数调优：采用分阶段策略——先以无标签数据进行逐层贪婪预训练，通过对比散度算法初始化权值偏置；再以有标签数据通过反向传播全局微调。引入Adam自适应学习率与Dropout机制（保留概率0.8）抑制过拟合，通过网格搜索对学习率、正则化系数及核参数进行寻优。（3）模型优

化改进：在特征提取层引入通道注意力机制，自动学习各维度贡献权重，增强敏感特征响应、抑制无关干扰；针对跨工况性能退化问题，引入迁移学习策略，将仿真台架预训练模型向实际线路数据迁移，以少量目标域样本微调即实现跨场景适配，提升工程泛化能力。

2.4 诊断模型仿真验证与结果分析

（1）仿真实验环境搭建：实验采用TensorFlow深度学习框架，硬件配置Intel Xeon CPU、NVIDIA GPU加速训练；数据集按7:2:1比例划分训练集、验证集与测试集，涵盖逆变器开路、电机退磁、传感器漂移等典型故障类型，共计万余组有效样本，各类别样本均衡分布。（2）模型诊断效果测试：将测试集输入训练完毕的模型，输出故障类别与置信度。实验表明，模型对逆变器IGBT开路故障识别精度达98.2%，电机转子断条故障召回率为96.5%，传感器偏置故障检出率超过97%，多数故障响应时间控制在50ms以内，满足在线诊断时效性要求。（3）模型性能对比分析：与标准支持向量机、随机森林及传统BP网络进行对照实验，本文模型整体诊断精度提升约4~8个百分点；在轻微故障及多类耦合故障场景下，误报率明显低于对比算法；同时模型对噪声干扰及工况波动表现出较强鲁棒性，测试标准差小于1.5%，验证了所提出方法在精准性、高效性与稳定性方面的综合优势。

3 城轨列车牵引控制系统智能运维优化策略与体系构建

3.1 智能运维优化总体思路与目标

（1）运维优化总体思路：以第3章构建的智能故障诊断模型为核心技术支撑，推动城轨牵引系统运维模式从传统的“定期检修、故障抢修”向“状态感知-主动预警-精准维修”的预测性运维体系全面转型，实现运维决策由经验驱动向数据驱动升级。（2）运维优化核心目标：实现牵引系统潜在故障的早期预警与精确定位，将非计划停机时长缩短30%以上，降低全生命周期运维成本15%~20%，显著提升列车运行可用性、安全性与可靠性指标。（3）运维优化基本原则：遵循安全性优先原则，确保优化措施不影响行车安全；高效性原则，压缩故障响应与处置时间；经济性原则，合理配置运维资源避免浪费；可落地性原则，充分考虑现有技术基础与管理体制，确保方案具备工程可操作性。

3.2 智能运维体系核心模块优化

（1）故障预警模块优化：将第3章DBN-SVM诊断模型嵌入实时数据流处理链路，设定多层次预警阈值与置信度门限，当模型输出概率超出警戒值时自动触发分级预警信号，实现对轴承早期磨损、绝缘缓慢劣化等渐变

型故障的提前识别,为运维争取充足响应窗口。(2) 运维调度模块优化:构建基于故障类型与严重等级的分级调度机制,轻微故障安排计划性维修,严重故障优先调配骨干力量。建立运维人员技能矩阵与物资库存动态数据库,通过智能匹配算法实现人员、备件、工器具的最优调度方案生成,缩短故障确认至维修派工的时间间隔^[4]。(3) 检修策略模块优化:摒弃统一周期检修模式,基于设备健康状态评估结果与故障概率预测曲线,制定差异化检修计划。对关键设备实施状态跟踪下的弹性修程,对趋于劣化的部件提前安排更换,对状态良好的设备适度延长检修周期,实现检修资源投入与设备可靠性的最佳平衡。

3.3 智能运维管理机制与流程优化

(1) 运维流程重构:构建“数据采集-状态评估-预警触发-工单派发-现场处置-效果反馈-案例归档”七环节闭环运维流程,实现各环节信息无缝传递与责任明确交接,消除传统流程中信息孤岛与响应延迟问题。(2) 运维管理制度完善:建立智能运维数据管理规范,明确数据采集标准与存储要求;健全故障分级处置责任制,规定不同等级故障的响应时限与处置权限;制定应急处置预案,确保突发重大故障时的快速响应;完善绩效考核评价制度,将预警响应率、故障修复时长等纳入考核指标体系。(3) 运维资源配置优化:整合既有运维数据资源,建立统一信息平台消除数据孤岛;优化备件库存结构,依据故障统计规律合理配置关键备件储备量;建立柔性人员调配机制,依据任务负荷动态调整班组配置,实现资源利用效率最大化^[5]。

3.4 优化方案效果验证与可行性分析

(1) 优化方案仿真验证:利用某线路牵引系统历史运行数据,对优化方案开展回溯性仿真测试。结果表明:优化后平均故障预警提前量达48小时以上,故障平均处置时长由传统的4.2小时压缩至2.8小时,年度运维综合成本估算降低约17.6%,验证了方案的有效性与经济

性。(2) 实际场景可行性分析:优化方案适配已配置数据采集与网络通信条件的既有线路,与在建新线同步实施效果更佳。实施难点主要体现为:既有运维人员技能转型需周期培训、诊断模型的跨线路迁移需要适配调整、管理流程切换需克服部门间协同阻力等。(3) 优化方案落地保障措施:技术层面,确保模型接口标准化与系统兼容性;管理层面,设立专项推进小组,分阶段实施流程切换;人员层面,制定运维人员数字化技能培训方案;数据层面,建立持续数据积累与模型迭代更新机制,保障系统长期有效运行。

结束语

本文完成城轨列车牵引控制系统故障特征分析、智能诊断模型构建及运维体系优化,经仿真验证,优化方案可有效实现故障早期预警、缩短处置时长、节约运维成本,显著提升系统运行可靠性。研究解决了传统运维模式的核心痛点,具备良好的工程适用性。后续可持续积累多线路运行数据,迭代优化模型泛化能力,完善跨场景适配机制,进一步推动城轨牵引系统运维的智能化、精准化、高效化发展。

参考文献

- [1]李响,王黎.基于深度学习的地铁牵引变流器故障诊断方法研究[J].铁道学报,2024,46(02):44-51.
- [2]曹雪杰,何晔,单晟,等.城轨列车牵引传动与辅助供电系统智能诊断与预警[J].机车电传动,2022,13(06):80-86.
- [3]王尔为,刘秀美.基于PHM的地铁车辆牵引系统故障诊断与运维优化[J].城市轨道交通研究,2023,26(09):168-173.
- [4]成正林,李启明.基于概率Petri网的城轨牵引系统实时故障诊断[J].铁道科学与工程学报,2025,22(03):1121-1128.
- [5]侯鑫尧,张冬凯.数据驱动列车牵引系统多回路故障诊断方法[J].机车电传动,2024,20(05):91-97.