

基于大数据的城市轨道交通电气设备故障预测研究

马天伦¹ 刘银杰²

1. 中铁武汉电气化局集团有限公司运营分公司; 2. 中铁电气化勘测设计研究院有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8680

[摘要] 探索基于大数据实现城市轨道交通电气设备故障预测。通过采集设备运行多源数据, 构建数据处理与分析模型, 挖掘潜在故障特征与规律。研究预测方法优化模型参数, 提升预测准确性与可靠性。为保障轨道交通电气设备稳定运行、降低运维成本、提升运营效率提供理论与技术支撑。

[关键词] 大数据; 城市轨道交通; 电气设备; 故障预测

Research on Fault Prediction of Electrical Equipment in Urban Rail Transit Based on Big Data

Ma Tianlun¹ Liu Yinjie²

1. China Railway Wuhan Electrification Bureau Group Co., Ltd. Operation Branch;

2. China Railway Electrification Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] Exploring the use of big data to predict electrical equipment failures in urban rail transit. By collecting multi-source data from devices, constructing data processing and analysis models, and mining potential fault features and patterns. Research prediction methods to optimize model parameters and improve prediction accuracy and reliability. To provide theoretical and technical support for ensuring the stable operation of electrical equipment in rail transit, reducing operation and maintenance costs, and improving operational efficiency.

[Key words] big data; Urban rail transit; Electrical equipment; fault prediction

引言:

城市轨道交通发展迅速, 电气设备故障影响运营安全与效率。大数据技术为故障预测带来新契机。利用其处理海量设备运行数据能力, 能精准掌握设备状态、提前发现故障隐患。研究基于大数据的故障预测对保障轨道交通安全稳定运行意义重大。

1. 大数据应用基础

1.1 数据采集方法

城市轨道交通电气设备故障预测的大数据采集, 需覆盖设备全运行周期与多维度状态信息, 结合国内轨道交通运营规范构建全方位采集体系。采集对象涵盖牵引变流器、断路器、接触网、配电装置等核心电气设备, 通过嵌入式传感器实时捕获设备运行参数, 包括电压、电流、温度、振动等物理量, 精准反映设备工作状态。基于轨道交通信号系统与 SCADA 系统, 同步采集设备控制指令、运行日志、故障历史记录等业务数据, 实现运行参数与控制逻辑的数据联动。针对移动类电气设备, 采用车地通信技术将车载终端采集的数据实时传输至地面数

据中心, 保障数据采集的连续性与时效性。固定设备则通过有线传感网络与边缘采集节点结合, 减少数据传输延迟与丢包率。采集过程需遵循国内城市轨道交通数据安全规定, 对涉及运营安全的敏感数据进行加密传输与采集, 同时兼顾数据采集的实时性与经济性, 避免过度采集导致的资源浪费, 确保采集数据能全面支撑后续故障预测分析。

1.2 数据预处理技术

数据预处理是提升城市轨道交通电气设备故障预测准确性的关键环节, 需针对采集数据的复杂性与异构性, 采用适配国内轨道交通数据特征的处理技术。原始采集数据中存在缺失值、异常值、冗余数据等问题, 需通过数据清洗技术剔除无效信息, 对缺失数据采用基于设备运行规律的插值方法补充, 对异常值结合设备物理特性与历史数据进行识别与修正, 避免异常数据干扰预测结果。针对轨交高峰时段数据激增特点, 清洗过程需兼顾效率与精度, 快速过滤无效数据。数据集成技术用于融合多源异构数据, 将传感器采集的物理参数、设备台账数据、历史故障记录等不同类型数据整合至统一数据模型, 消

除数据格式差异与语义冲突，契合国内轨道交通多系统数据互通的技术要求。数据转换通过标准化、归一化处理，将不同量级、不同单位的数据转化为统一维度，为后续特征挖掘与模型构建提供适配数据。数据规约则在保留核心信息的前提下压缩数据规模，通过特征聚合、维度约减等方式降低计算复杂度，提升后续处理效率。预处理全程需保障数据完整性与一致性，符合国内轨道交通数据治理规范，为故障预测提供高质量数据支撑。

2. 故障特征挖掘

2.1 特征提取算法

故障特征提取算法需从预处理后的大数据中挖掘与电气设备故障相关的隐性特征，适配国内城市轨道交通电气设备的运行特性与故障模式。针对设备振动、温度等时序数据，采用时域与频域分析算法提取特征，时域算法聚焦数据的均值、峰值、方差等统计特征，反映设备运行状态的整体变化；频域算法通过频谱分析将时域数据转化为频域信息，识别设备故障对应的特征频率，精准捕捉早期微弱故障信号。针对非线性、非平稳的运行数据，采用深度学习相关算法进行特征提取，通过神经网络自动学习数据中的深层关联特征，无需人工预设特征模板，适配复杂电气设备的故障特征复杂性。同时，结合电气设备的物理机理，引入基于设备结构与运行原理的特征提取方法，确保提取特征兼具数据驱动特性与物理合理性。提取过程需兼顾算法的适配性与效率，符合国内城市轨道交通实时故障预测的业务需求，确保提取的特征能有效区分设备正常运行状态与不同故障类型。

2.2 特征选择策略

特征选择策略核心是从提取的海量特征中筛选出对故障预测贡献度高的核心特征，降低模型计算成本，提升预测精度，贴合国内城市轨道交通故障预测的实际应用场景，适配高密度运营下对实时性与精准性的双重需求。采用过滤式选择方法，基于特征与故障类型的相关性分析，剔除冗余特征与无关特征，通过统计检验、互信息等指标量化特征重要性，保留与设备故障强关联的特征，该方法无需依赖后续预测模型，计算效率高，可快速完成初步特征筛选，适配轨交大数据实时处理需求。包裹式选择方法结合后续预测模型性能进行特征筛选，将特征选择与模型训练相结合，通过迭代优化筛选出使模型预测效果最优的特征子集，适配不同类型预测模型的特性需求，虽计算成本较高，但能显著提升模型针对性，尤其适用于轨交电气设备关键故障的精准预测。嵌入式选择方法将特征选择融入模型构建过程，通过模型自身的参数学习机制自动识别重要特征，兼顾选择效率与预测性能，适用于大数据量场景下的故障

预测，契合国内轨交多源异构数据的处理特点。选择过程需考虑特征的鲁棒性，确保筛选后的特征在不同运行工况、不同设备个体、不同运营时段上均能有效表征故障状态，同时避免过拟合问题，应对轨交电气设备老化、工况波动等复杂情况，符合国内城市轨道交通电气设备多样化、复杂化的运行特点，为后续模型构建提供精准、可靠的特征输入，保障预测模型在实际运维中发挥实效。

3. 预测模型构建

3.1 模型类型与原理

基于大数据的城市轨道交通电气设备故障预测模型，需结合国内轨道交通运营需求，选用适配多源数据与复杂故障模式的模型类型，依托不同原理实现精准预测。传统统计模型基于设备运行的概率统计规律构建，通过分析历史故障数据与运行参数的关联关系，建立概率预测模型，适用于故障模式相对明确、数据分布规律清晰的场景，具有模型可解释性强的优势，契合国内轨道交通对预测结果可追溯的要求。机器学习模型通过算法学习历史数据中的故障规律，无需明确设备物理机理，能适配复杂非线性故障关系，常见模型可捕捉设备运行状态的时序变化特征，精准预测故障发生时间与类型。深度学习模型依托深层神经网络结构，具备强大的特征学习与复杂关系拟合能力，可处理海量多源异构数据，适用于故障特征隐蔽、故障模式复杂的电气设备，能实现早期微弱故障的精准预测。模型构建需遵循国内城市轨道交通技术标准，兼顾预测精度与模型可解释性，确保模型原理与电气设备运行机理相契合，为后续模型应用奠定基础。

3.2 模型训练与优化

模型训练与优化需基于国内城市轨道交通电气设备的大量历史数据与实时运行数据，通过科学方法提升模型预测性能与泛化能力。训练过程中，将预处理后的数据集按比例划分为训练集、验证集与测试集，训练集用于模型参数学习，验证集用于调整模型超参数，测试集用于评估模型最终性能，确保数据划分符合统计规律，避免模型过拟合或欠拟合。针对不同类型模型采用适配的训练策略，传统统计模型重点优化参数估计精度，机器学习模型通过迭代训练调整模型权重，深度学习模型采用梯度下降等算法优化网络参数，同时引入正则化技术抑制过拟合。优化过程需结合国内轨道交通电气设备的故障特点，针对不同故障类型优化模型针对性，通过数据增强技术扩充训练数据规模，提升模型对罕见故障的预测能力。同时，建立模型自适应优化机制，结合设备运行状态的实时数据与新故障案例，持续更新模型参数，适配设备老化、运行工况变化等因素带来的故障模式改变，确保模型长期保持较高预测精度，

符合国内城市轨道交通持续运营的需求。

3.3 模型评估指标

模型评估指标需围绕预测精度、可靠性、时效性等核心维度构建，符合国内城市轨道交通电气设备故障预测的实际应用需求，全面衡量模型性能，兼顾技术指标与运维实操价值。预测精度指标用于评估模型对故障发生与否、故障类型、故障发生时间的预测准确性，不仅要考量整体预测准确率，还需细化不同故障等级的识别精度，针对致命故障、严重故障、一般故障分别设定评估标准，确保模型能精准识别故障状态，为运维决策提供可靠依据，契合国内轨道交通对故障分级处置的管理要求。可靠性指标聚焦模型预测结果的稳定性与一致性，评估模型在不同运行工况、不同设备个体、不同运营时段的表现差异，重点规避高峰运营时段的误判或漏判问题，避免因模型波动引发运维资源浪费或运营安全隐患，严格契合国内轨道交通高安全性、高稳定性的运营准则。时效性指标衡量模型从接收数据到输出预测结果的耗时，需适配城市轨道交通高密度运营的节奏，确保预测结果能为运维调度预留充足处置时间，同时兼顾数据传输、模型计算的延迟成本，适配实时监控系统的响应需求。同时，引入模型可解释性指标，评估预测结果的可追溯性，明确特征与故障间的关联逻辑，便于运维人员理解故障成因、定位故障点位，制定针对性处置方案。评估过程需遵循国内城市轨道交通数据评估规范与电气设备运维标准，结合不同线路、不同设备类型的实操需求设定合理指标阈值，通过多维度综合评估筛选最优模型，同时建立指标动态调整机制，适配设备老化、运营模式升级等变化，确保模型能长期满足实际应用中的各项性能要求。

4. 预测系统应用

4.1 系统架构设计

基于大数据的城市轨道交通电气设备故障预测系统架构设计，需贴合国内城市轨道交通的运营管理模式与技术体系，构建分层协同、安全可靠的架构体系。系统采用分层架构设计，底层为数据采集层，通过传感器、边缘节点等设备实现多源数据的实时采集与初步处理，保障数据采集的全面性与实时性，符合国内轨道交通数据采集规范。数据层负责数据存储与管理，采用分布式存储技术适配海量数据存储需求，建立统一数据仓库与数据集市，实现数据分类管理与高效检索，同时配备数据安全防护机制，保障数据存储与访问安全。核心层为特征挖掘与模型预测层，集成特征提取、选择算法与各类预测模型，实现故障特征挖掘与故障预测分析，具备模型自适应优化与结果输出功能。应用层面向运维管理需求，提供故障预警、故障

诊断、运维调度建议等功能模块，支持可视化展示与数据交互，适配国内轨道交通运维管理流程。架构设计需兼顾系统扩展性与兼容性，预留与现有轨道交通运营管理系统、设备监控系统的接口，符合国内城市轨道交通信息化建设的整体规划。

4.2 实际应用效果

基于大数据的城市轨道交通电气设备故障预测系统在实际应用中，需契合国内城市轨道交通高密度、高可靠性的运营需求，显著提升电气设备运维管理水平。系统通过早期故障预警功能，提前识别电气设备的潜在故障风险，使运维模式从传统事后维修、定期检修转变为预防性维修，减少非计划停机时间，保障轨道交通运营的连续性与稳定性。通过精准预测故障类型与故障成因，为运维人员提供针对性处置方案，缩短故障排查与修复时间，降低运维人力与物资成本，提升运维效率。系统运行过程中积累的故障数据与预测结果，可反哺设备设计与制造环节，为电气设备优化升级提供数据支撑，推动国内城市轨道交通电气设备技术迭代。同时，系统实现运维数据的规范化管理与深度分析，助力运维管理实现数字化、智能化转型，符合国内轨道交通智慧运维的发展趋势。应用过程中需遵循国内轨道交通智慧运维的发展规定，通过持续优化系统性能，适配不同线路、不同类型电气设备的运行需求，进一步提升故障预测的精准度与系统应用的稳定性。

结束语：

基于大数据开展城市轨道交通电气设备故障预测研究，有效提升了故障预测的科学性与准确性。通过对数据处理、特征挖掘、模型构建等方面深入探索，为设备运维管理提供有力支持。未来可进一步拓展数据来源、优化模型性能，推动轨道交通电气设备故障预测技术持续进步。

[参考文献]

- [1] 陈志超. 电气控制系统在城市轨道交通中的适应性优化[J]. 人民公交, 2025, (10): 185-187.
- [2] 王一卉. 基于大数据分析的城市轨道交通电气设备运行状态监测方法[J]. 电子产品世界, 2025, 32(03): 57-59+63.
- [3] 刘现军, 张智宝, 施璇, 等. 城市轨道交通设备电气系统研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2023, 7(12): 166-169+173.
- [4] 田耕耘. 基于PHM技术的城市轨道交通车辆牵引系统智能运维研究[D]. 北京交通大学, 2022.
- [5] 柏丁松. 轨道交通电梯故障预测模型研究[D]. 上海应用技术大学, 2022.