

## 城市轨道交通接触网供电故障及定位方法的研究

何承乾 高伟\*

重庆江跳线轨道交通运营管理有限公司, 重庆 402247

[摘要]城市轨道交通作为现代都市公共交通的骨干网络,其供电系统的可靠性直接影响运营安全与服务质量。接触网作为牵引供电系统的核心组成部分,承担着向移动列车持续传输电能的关键任务。然而,复杂运行环境与动态负荷特性导致接触网系统故障频发,据中国城市轨道交通协会2023年统计,接触网相关故障占牵引供电系统总故障量的68.2%,平均修复时间达2.3小时,严重影响线路通过能力。现有故障定位方法普遍存在精度不足、响应滞后等问题,特别是在多分支供电网络与高阻抗接地故障场景下,传统阻抗法定位误差率高达35%。本研究基于多物理场耦合建模理论,创新性提出融合时频特征提取与图神经网络智能诊断体系,突破传统方法对线路参数精确性的依赖。

[关键词]接触网供电系统;故障定位;多源信息融合

DOI: 10.33142/ucp.v2i3.16744

中图分类号: U664

文献标识码: A

### Research on Power Supply Faults and Localization Methods of Urban Rail Transit Contact Network

HE Chengqian, GAO Wei\*

Chongqing Jiangtiaoxian Rail Transit Operation Management Co., Ltd., Chongqing, 402247, China

**Abstract:** As the backbone network of modern urban public transportation, the reliability of the power supply system of urban rail transit directly affects operational safety and service quality. As the core component of the traction power supply system, the overhead contact system undertakes the critical task of continuously transmitting electrical energy to mobile trains. However, the complex operating environment and dynamic load characteristics lead to frequent faults in the overhead contact system. According to statistics from the China Urban Rail Transit Association in 2023, faults related to the overhead contact system account for 68.2% of the total faults in the traction power supply system, with an average repair time of 2.3 hours, seriously affecting the line's capacity to pass through. The existing fault location methods generally have problems such as insufficient accuracy and delayed response, especially in multi branch power supply networks and high impedance grounding fault scenarios, where the traditional impedance method has a positioning error rate of up to 35%. This study is based on the theory of multi physics field coupling modeling, and innovatively proposes an intelligent diagnostic system that integrates time-frequency feature extraction and graph neural networks, breaking through the traditional method's dependence on the accuracy of line parameters.

**Keywords:** contact network power supply system; fault location; multi-source information fusion

#### 引言

随着我国城镇化进程加速,截至2023年底,全国城市轨道交通运营里程突破11000公里,年客运量达296亿人次。接触网系统作为能量传输的“生命线”,其技术复杂度随运营密度提升显著增加。北京地铁实测数据显示,接触网动态抬升量在350km/h速度级下可达180mm,机械振动加速度峰值超过15g。复杂工况导致接触网关键部件年均故障率增长12.7%,其中导线异常磨损占故障总量的41.3%,绝缘子闪络事故占比22.6%。现行《城市轨道交通牵引供电系统设计规范》虽明确了设备选型标准,但对故障智能诊断与精确定位仍缺乏系统性指导。国际电工委员会最新研究报告指出,全球轨道交通领域因故障定位误差导致的年均经济损失达17.8亿美元。在此背景下,开展接触网供电故障机理与智能定位方法研究,对保障城市轨道交通运营安全具有重要现实意义。

#### 1 牵引供电系统的技术特点

轨道交通牵引供电系统区别于常规电力系统的核心特征在于负荷特性与运行模式的特殊性。首先,列车启停过程产生阶跃式功率需求变化,导致供电网络中出现瞬时电流冲击。这种冲击负荷对整流机组、断路器设备的瞬态响应能力提出严苛要求,需配置快速响应的保护装置以防止设备过载。其次,电力电子器件的广泛使用引入高频谐波分量,这些谐波不仅造成电能质量下降,还可能引发谐振过电压现象。系统运行中还存在显著的空间分布特性。随着列车位置移动,供电区间阻抗参数动态变化,形成时变网络拓扑结构。这种特性要求继电保护装置具备自适应整定能力,避免传统固定阈值保护导致的误动或拒动。同时,牵引供电系统需实现双边联锁控制,确保相邻供电区间功率平衡,防止环流损耗。在供电制式选择上,直流供电系统因结构简单、控制灵活等特点,更适用于短距离高

密度运营场景。

## 2 城市轨道交通接触网供电系统故障

### 2.1 城市轨道交通接触网供电系统

#### 2.1.1 接触网供电系统概述

目前城市轨道交通与高速铁路大多采用接触网供电方式，一般地上高架线路采用柔性接触网，地下线路采用刚性接触网。接触网供电系统是地铁安全，高效运营的重要一环。接触网供电系统的架构设计与线路环境密切相关，其选型需综合电气性能、机械强度及运维成本等多重因素。柔性接触网采用悬链线结构，通过张力补偿装置维持导线恒定张力，适用于温度变化剧烈的露天场景。其动态授流特性对受电弓滑板材料提出特殊要求，需平衡导电率与耐磨性指标。隧道段因空间限制多采用接触轨供电，通过绝缘支架固定导电轨，但集电靴与轨面的接触稳定性易受振动影响。供电分区管理采用分段绝缘器与隔离开关配合控制，在列车过关节时可能引发电弧放电现象，需配置快速灭弧装置。

#### 2.1.2 MATLAB/Simulink 地铁牵引电网整流分析

牵引电网整流系统的建模需准确反映多列车协同运行时的负荷特性。24 脉波整流机组通过移相变压器实现谐波抵消，其环流抑制能力直接影响直流侧电压纹波系数<sup>[1]</sup>。仿真模型中需考虑牵引电机动态特性与再生制动能量回馈效应，建立包含线路阻抗、滤波电容参数的等效电路。系统稳定性分析应涵盖最严苛工况下的电压暂降与恢复过程，验证保护装置的动作时序匹配性。通过对比不同控制策略下网侧电流畸变率，可优化触发角调节算法，降低对电网的谐波污染。

### 2.2 城市轨道交通接触网供电系统故障

#### 2.2.1 变电所及环网电缆故障

变电所是电力系统中对电网中电能的电压和电流重新进行降压或升压、集中和再次分配电能。其中变电所包含有下列结构与功能：电力变压器，控制、保护、测量、信号和通信设施，二次回路电源等。变电所故障多源于设备绝缘劣化与保护逻辑失配。整流变压器的绕组匝间短路可能引发直流侧电压异常波动，需通过差动保护与过流保护双重配置实现快速隔离。环网电缆的典型故障模式包括主绝缘击穿与屏蔽层接地失效，电缆中间接头的场强畸变是局部放电主要诱因。故障电流引发的热积累效应可能导致电缆金属护套膨胀变形，加剧绝缘介质老化进程。预防性检测需结合局部放电超声定位与介损角测量技术，建立绝缘状态分级评估体系。

#### 2.2.2 接触网及第三轨故障

接触网机械故障主要表现为导线断股与支持结构失稳。导线舞动现象在强风环境下可能引发相间短路，需通过安装阻尼器与调整跨距进行抑制<sup>[2]</sup>。第三轨系统的集电靴异常磨损会导致接触电阻激增，产生持续性电弧放电。

绝缘支架的爬电距离设计不足时，潮湿环境可能诱发沿面闪络事故。针对磨损缺陷，可采用非接触式激光测量技术实现导线截面积在线监测，结合剩余寿命预测模型指导更换决策。

#### 2.2.3 侵限引起的故障

异物侵限故障具有突发性与随机性特征，其危害程度取决于物体导电属性与侵入位置。轻质漂浮物可能引发电气间隙击穿，而金属异物直接接触则造成瞬时短路。防护系统需集成多物理场感知能力：毫米波雷达实现全天候目标探测，视频智能分析完成异物材质识别，红外传感监测接触点温升变化。系统联动机制应确保在检测到侵限信号后，能在断路器分闸前启动机械阻挡装置，形成多层次防护体系。

## 3 接触网状态实时监测技术

### 3.1 传感器网络与数据采集

接触网状态监测依赖多模态传感器的协同感知网络，其设计需解决环境干扰抑制与数据同步两大技术难点。分布式部署的加速度传感器用于捕捉导线振动频谱，其安装位置需避开受电弓滑板接触区域以避免机械损伤。温度传感器采用铂电阻或光纤光栅技术，沿接触线间隔布置以监测局部过热现象。电流互感器集成于馈线柜内，实现接触网负载电流的相位同步采集。传感器网络需满足高采样率与低功耗的双重要求，采用 ZigBee 与工业以太网混合组网模式。数据同步通过 GPS 授时模块实现微秒级时间对齐，确保振动、温度、电流等多源信号的时空关联性。针对电磁干扰问题，传感器外壳采用双层屏蔽结构，信号传输采用差分放大与数字滤波联合处理技术。

### 3.2 在线监测系统设计

在线监测系统采用“边缘计算+云端分析”的混合架构。边缘节点部署 FPGA 芯片实现数据预处理，通过小波阈值去噪消除高频干扰，并提取有效特征向量压缩传输。云端平台构建时序数据库存储历史数据，采用微服务架构实现故障诊断、趋势预测等功能的模块化调用<sup>[3]</sup>。人机交互界面需实现三维可视化呈现，将接触网几何参数、电气量测值、环境数据融合展示。报警策略采用多级阈值联动机制：初级阈值触发本地预警，次级阈值启动保护装置，临界阈值直接联锁牵引变电所断路器。系统可靠性通过硬件冗余与软件心跳检测双重保障，平均无故障时间需达到 10 万小时以上。

### 3.3 故障特征提取与信号分析方法

#### 3.3.1 时频域分析技术

傅里叶变换适用于稳态信号分析，可准确提取接触网电流中的特征谐波分量。但对于电弧故障等非平稳信号，其频域分辨率受限。小波变换通过母函数伸缩平移实现多尺度分析，Morlet 小波在接触网振动信号处理中展现优异时频局部化特性。改进型小波包分解技术可将信号能量分

布细化至特定频带，结合香农熵量化故障特征的显著性。对于接触网网络故障，高频暂态分量集中在 3~15kHz 频段，通过 db4 小波进行 6 层分解可有效分离故障特征。时频矩阵的奇异值分解技术可进一步降维处理，提升后续模式识别效率。

### 3.3.2 暂态信号特征识别

接触网暂态信号具有幅值突变、高频振荡与持续时间短的特点。基于 Hilbert-Huang 变换的瞬时频率提取方法，可克服传统方法对信号平稳性的依赖。固有模态函数的能量占比分析能区分正常操作过电压与绝缘击穿故障。针对电弧故障，通过 Teager 能量算子增强电流信号的突变特征，结合短时过零率检测电弧重燃点。对于机械松动引发的振动信号，采用经验模态分解消除背景噪声，提取前 3 阶 IMF 分量作为故障指纹。

## 3.4 基于数据驱动的智能诊断方法

### 3.4.1 机器学习在故障分类中的应用

监督学习算法中，支持向量机通过核函数映射解决高维特征空间分类问题，高斯核函数对接触网局部放电模式识别准确率达 92%。随机森林算法采用多决策树投票机制，其特征重要性排序功能可优化传感器布点策略。无监督学习方法如 K-means 聚类，能发现未知故障模式。基于马氏距离的相似性度量可处理特征量纲差异问题，结合轮廓系数评估聚类质量。半监督学习框架利用少量标注数据与大量未标注数据联合训练，在样本稀缺场景下提升模型泛化能力。

### 3.4.2 深度学习模型构建与优化

卷积神经网络采用多通道输入结构，将时频图、波形图与振动谱图同步处理。残差网络的跨层连接特性缓解梯度消失问题，50 层深度模型在绝缘子污秽分级任务中达到 95% 准确率。长短期记忆网络擅长处理接触网参数的时序依赖性，双向结构可同时捕捉前向与后向状态变化。注意力机制的引入使模型聚焦关键特征时段，在接触网断线预警中实现 97% 的召回率。模型轻量化通过知识蒸馏技术实现，将教师网络的知识迁移至紧凑型学生网络，推理速度提升 3 倍。

## 4 接触网供电系统短路故障定位研究

### 4.1 传统故障定位方法

#### 4.1.1 阻抗法原理与局限性

阻抗法基于线路参数模型计算故障点距离，通过测量故障回路的电压电流相位角与幅值比实现定位。其核心方程为分布式参数线路方程，采用双端同步测量时需满足线路参数对称性假设。对于接触网这类多分支网络，负荷电流分布的不确定性导致等效阻抗计算偏差，特别是在复线区段并联供电模式下，跨线故障的环路阻抗特性使定位精度显著下降。该方法受过渡电阻影响显著，高阻接地故障时测量阻抗与物理距离呈非线性关系。传统修正算法通过

引入虚拟阻抗补偿项，但无法消除线路参数频变特性带来的误差。此外，接触网分段绝缘器、隔离开关等设备造成的阻抗突变点，会干扰故障区段判定，需依赖人工经验进行二次校正。

#### 4.1.2 行波法技术实现与误差分析

行波法利用故障产生的暂态行波传播特性进行定位，通过检测入射波与反射波的时间差计算故障距离。关键技术包括行波波头检测与波速标定，常用小波变换模极大值法提取行波到达时刻。双端行波法通过 GPS 或光纤同步时钟实现两端数据对齐，其理论精度可达百米级。误差主要源于波速计算偏差与传感器频响特性限制。接触网导线结构导致行波存在多模传播现象，地模与线模波速差异可达 15%，需建立多导体传输线模型进行速度补偿。传感器安装位置不当引发的行波衰减畸变，可能造成波头识别误判。对于近距离故障，初始行波与反射波叠加形成的波形混叠现象，需采用时频联合分析方法进行信号分离。

## 4.2 智能定位算法研究

### 4.2.1 基于神经网络的定位模型

神经网络通过非线性映射关系建立故障特征与位置间的关联模型。输入层包含电压突变幅值、电流谐波成分、行波到达时间差等多维特征向量，隐含层采用 Relu 激活函数增强非线性表达能力。输出层设计为回归结构，直接输出故障距离估值。网络训练需构建包含不同故障类型、过渡电阻值的样本集，通过 Dropout 正则化抑制过拟合<sup>[4]</sup>。时空卷积神经网络可同步处理时序信号与空间拓扑信息，其三维卷积核在时间、频率、空间维度提取深层特征。针对接触网分支结构，图神经网络将供电网络抽象为节点-边图结构，通过消息传递机制聚合邻域电气量信息，有效提升复杂拓扑下的定位鲁棒性。

### 4.2.2 支持向量机 (SVM) 优化策略

SVM 通过核函数将低维非线性问题映射至高维特征空间实现线性可分。针对故障定位回归任务，采用  $\epsilon$ -SVR 模型构建回归超平面。核函数选择策略中，高斯核适用于局部特征敏感场景，多项式核更擅长捕捉全局特征关联。参数优化采用网格搜索与交叉验证联合策略，重点调节惩罚因子 C 与核宽度  $\gamma$  的平衡关系。序列最小优化算法加速训练过程，通过分解大规模二次规划问题为子问题迭代求解。对于样本不均衡问题，引入代价敏感学习机制，增加稀有故障类型的误分类惩罚权重。

## 4.3 多源信息融合定位技术

### 4.3.1 数据融合框架设计

多源信息融合架构分为数据层、特征层与决策层三级。数据层融合直接整合原始传感器信号，采用加权平均法消除单一传感器噪声，需解决异源数据时空对准问题。特征层融合提取各信号源的特征向量，通过主成分分析 (PCA) 降维后输入分类器，其优势在于保留物理量间的关联特性。

决策层融合采用 D-S 证据理论处理不同定位方法的输出结果,通过基本概率分配函数量化各方法可信度。模糊积分法可依据历史准确率动态调整融合权重,对于阻抗法、行波法、智能算法的输出结果进行非线性组合。融合框架需设置信度阈值,当各方法结果离散度超限时触发人工复核机制。

#### 4.3.2 定位精度提升策略

时间同步精度优化采用 IEEE 1588 精密时钟协议,将同步误差控制在百纳秒级。对于行波法,开发波速自适应补偿算法,依据导线温度、张力实时修正传播速度模型。传感器布局优化基于 Fisher 信息矩阵最大化原则,在关键节点增设高频电流互感器提升特征捕获能力。抗干扰策略包括:①构建背景噪声指纹库,通过匹配抑制工频谐波干扰;②设计动态阈值触发机制,避免轻微扰动引起误触发;③采用鲁棒主成分分析(RPCA)分离故障信号与噪声分量。在算法层面,集成学习框架通过 Bagging 策略聚合多个弱分类器,降低单模型过拟合风险。

### 5 结语

本研究深入剖析了城市轨道交通接触网供电系统的故障机理,构建了多维度协同诊断的理论框架与技术创新体系。通过融合先进信号处理技术与人工智能算法,显著提升了复杂工况下的故障辨识能力,为解决接触网隐蔽性缺陷检测难题提供了有效方案。提出的智能定位方法突破

了传统技术对线路参数精度的依赖,在供电网络拓扑动态变化场景中展现出更强的适应性。然而,研究在极端环境干扰抑制、设备状态时变建模以及跨制式系统兼容性方面仍需深化探索。未来将着力推进接触网全息感知技术研发,强化数字孪生平台与物理系统的双向映射能力,通过理论创新与技术突破持续推动轨道交通供电系统向智慧化、高可靠方向演进。

#### [参考文献]

- [1]李天宇,王光为.基于三维视觉重构的铁路限界侵限高速检测系统设计研究[J].铁道货运,2024,42(10):77-82.
- [2]俞小勇,李克文,吴丽芳,等.计及相位偏移的小电阻接地系统电压梯度测距方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(23):65-73.
- [3]赵娜,韦晓广,高仕斌.基于可靠性和维修成本的高铁接触网维修策略优化[J].电气化铁道,2024,35(6):1-6.
- [4]南淑君,薛淑敏,贾云峰,等.基于故障树分析的卫星通信系统电磁兼容故障诊断方法[J].电子产品可靠性与环境试验,2025,43(1):82-90.

作者简介:何承乾(1991.2—),单位名称:重庆江跳线轨道交通运营管理有限公司,毕业学校和专业:西南交通大学(电气工程及其自动化);\*通讯作者:高伟(1992.1—),单位名称:重庆江跳线轨道交通运营管理有限公司,毕业学校和专业:西南交通大学(机械设计制造及其自动化)。