

# 地铁电力系统智能监测与保护的一体化方案应用研究

衡 赛

徐州地铁运营有限公司 江苏 徐州 221000

**摘要:** 地铁电力系统智能监测与保护一体化方案通过多源状态参数实时采集、高精度故障特征提取、动态负载特性分析及多维数据融合技术构建智能监测体系;结合快速响应保护机制、多层次协同策略、监测数据驱动参数调整及冗余容错设计形成保护方案。研究聚焦提升系统可靠性、响应速度与自适应能力,为地铁安全高效运行提供坚实技术支持,推动智慧交通技术升级。

**关键词:** 地铁电力系统;智能监测;保护一体化;故障诊断

## 引言

地铁电力系统作为城市轨道交通核心,其智能监测与保护对运营安全至关重要。设备老化、负载波动及环境复杂度增加使传统方案难以满足高可靠性需求。本文提出智能监测技术体系与保护一体化方案,通过多源数据融合、自适应算法及冗余设计实现故障精准识别、快速隔离与持续运行,为地铁智慧化升级提供清晰技术路径,引领轨道交通智能化发展方向。

### 1 地铁电力系统智能监测与保护的重要性

地铁电力系统作为城市轨道交通的“神经中枢”,其智能监测与保护是保障运营安全与效率的核心环节。通过实时采集电流、电压、温度等关键参数,智能系统可快速识别异常波动,提前预警潜在故障,避免因设备老化、线路过载或环境因素引发的停电、火灾等事故,确保乘客与设备安全。智能监测还能优化能源分配,动态调整供电策略,减少电能浪费,提升系统运行效率,实时数据反馈与自适应保护机制可缩短故障响应时间,降低人工巡检成本,延长设备使用寿命,形成“监测-预警-处理”的闭环管理,为地铁系统的高效、稳定、绿色运行提供坚实支撑,是现代城市智慧交通建设的重要技术基石<sup>[1]</sup>。

### 2 地铁电力系统智能监测技术体系构建

#### 2.1 多源状态参数实时采集与同步技术

多源状态参数实时采集与同步技术通过先进传感网络与高精度时频同步体系实现多物理场动态感知与跨域数据融合。光纤光栅传感器与无线传感节点协同部署于设备关键部位,实时捕获电流畸变、局部放电、绝缘老化等隐性故障特征;时频同步采用北斗授时与IEEE 1588协议联合校准,达成亚微秒级时间精度,保障多节点数据时空对齐。针对电磁环境复杂、噪声干扰强的问题,集成自适应噪声抵消算法与小波变换信号处理模块,提

升信号信噪比与特征提取精度。数据传输层采用双模冗余通信架构,结合5G低时延切片与电力载波通信,确保数据传输可靠性与实时性;边缘计算节点部署轻量级故障诊断模型实现本地快速响应,云端大数据平台运用深度学习算法进行趋势预测与健康评估,形成“端-边-云”协同智能监测网络。该技术通过动态采样率调节与能量优化策略,平衡数据精度与系统能耗,推动监测体系向高精度、低功耗、自适应方向演进。

#### 2.2 高精度故障特征提取与模式识别算法

高精度故障特征提取依托时频分析与信号处理技术,通过小波包变换、经验模态分解等算法对电流、电压信号进行多尺度分解,精准捕捉瞬态故障的时频域特征;结合自适应阈值设定与动态滤波技术,抑制背景噪声干扰,增强微弱故障信号的可识别性。模式识别算法采用深度卷积神经网络架构,通过多层次卷积核提取故障特征的空间-频率关联特性,结合注意力机制强化关键特征权重,实现故障类型的精准分类与定位。算法集成迁移学习策略,利用预训练模型快速适配不同地铁线路的故障模式差异,减少现场训练数据需求,针对复杂故障场景,引入集成学习框架融合多模型预测结果,提升识别鲁棒性。实时处理模块采用流式计算架构,实现故障特征的在线提取与模式识别,缩短从特征捕获到故障判定的时间延迟;该算法通过特征工程优化与模型轻量化设计,平衡识别精度与计算效率,为地铁电力系统故障预警、定位与智能决策提供高置信度数据支撑,推动监测体系向智能化、自适应化方向的演进<sup>[2]</sup>。

#### 2.3 动态负载特性分析与自适应监测策略

动态负载特性分析通过实时采集负载电流、电压、功率因数等参数,结合傅里叶变换与短时能量分析,揭示负载波动的周期性、突发性及非线性特征。采用滑动窗口统计与聚类算法识别高峰、低谷及过渡时段的负载

模式差异,为自适应监测提供数据支撑;自适应监测策略基于负载特性动态调整采样频率、滤波参数与预警阈值;高负载时段启用高频采样与强化滤波,提升故障检测灵敏度;低负载时段降低采样率以节约能耗,同时保持关键参数持续监测。策略集成负载预测模块,利用长短时记忆网络建模短期负载趋势,提前预判变化方向,优化监测资源分配。实时反馈机制通过边缘计算节点快速响应负载异常,调整监测参数;云端平台基于历史数据与趋势分析持续优化策略参数,形成“分析-预测-调整-优化”闭环控制;该策略通过动态资源分配与智能决策,提升监测效率与鲁棒性,适应复杂负载环境,推动智能监测向精准化、节能化方向演进。

#### 2.4 多维监测数据融合与智能诊断方法

多维监测数据融合通过电流、电压、温度、振动等传感器数据时空关联与语义整合,实现跨域信息互补。采用证据理论与加权融合算法,结合专家知识库校验数据可信度,提升融合鲁棒性;引入知识图谱构建设备故障关联网络,实现故障原因快速追溯与多维特征关联分析。智能诊断基于融合数据,运用深度信念网络与支持向量机组合模型,实现故障类型精准识别与健康状态量化评估;自注意力机制强化关键特征权重,提升微弱异常信号识别灵敏度;实时诊断采用流式计算架构,支持在线数据处理与快速结果输出,缩短故障响应延迟。闭环反馈机制将诊断结果反馈至监测策略模块,动态优化采样频率、滤波参数与预警阈值,形成“融合-诊断-反馈-优化”闭环控制。该方法通过多源数据协同与智能算法集成,提升故障诊断精准度与决策支持能力,适应地铁电力系统复杂运行场景,推动智能监测向高精度、自适应化方向演进,为系统安全运行提供坚实技术保障<sup>[3]</sup>。

### 3 地铁电力系统保护的一体化方案应用研究

#### 3.1 快速响应保护机制与逻辑优化方法

快速响应保护机制聚焦故障发生后的毫秒级响应需求,通过高速通信协议与实时数据处理架构实现故障信号的快速捕获与传递。采用低延迟光纤通信网络,结合5G切片技术构建专用传输通道,确保故障信息在微秒级时间内完成跨节点传递;保护逻辑优化基于故障特征匹配与动态阈值调整,通过模糊逻辑控制器实现保护动作的自适应触发,当检测到电流突变、电压骤降等故障特征时,逻辑模块自动匹配预设故障模式库,结合当前系统运行状态动态调整保护阈值,避免误动作与拒动。冗余设计采用双通道保护逻辑并行计算架构,关键节点部署热备份保护单元,实现故障发生时无缝切换,保障保护动作的连续性,实时校验机制通过数字孪生模型对保

护逻辑进行在线仿真验证,结合历史故障数据持续优化逻辑参数。该机制通过高速通信、自适应逻辑与冗余设计,实现故障隔离时间从传统百毫秒级压缩至毫秒级,提升系统抗干扰能力与运行可靠性,适应地铁电力系统高负载、高动态的运行特性,为电力系统安全运行提供毫秒级快速保护屏障,推动保护方案向高精度、高可靠性方向演进。

#### 3.2 多层次协同保护策略配置与联动控制

多层次协同保护策略以设备级、区域级、系统级三层架构为基础,实现故障防护的纵向贯通与横向联动。设备级保护聚焦单一设备故障的快速隔离,通过差动保护、过流保护等算法实现设备内部故障的精准识别与瞬时切除;区域级保护统筹相邻设备的关联性,采用广域电流差动与方向保护技术,实现跨设备故障路径的快速锁定与区域隔离;系统级保护关注全局运行状态,通过潮流计算与稳定性分析,动态调整保护策略以维持系统平衡。联动控制依托高速通信网络与智能决策平台,实现三层保护信息的实时共享与动作协同,设备级故障触发区域级保护联动,区域级隔离触发系统级策略调整,形成“故障-定位-隔离-恢复”的闭环控制。策略配置采用自适应阈值与动态权重机制,结合实时负载与故障特征调整保护参数,避免误动与拒动;联动控制引入优先级排序与冲突消解算法,确保多层次动作的有序执行,该策略通过分层设计实现故障防护的精准性与系统性,通过联动控制提升故障响应速度与系统恢复能力,适应地铁电力系统复杂运行场景,推动保护方案向智能化、协同化方向演进,为系统安全运行提供多层次、立体化的保护屏障,提升整体运行可靠性<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 监测数据驱动的保护参数动态调整技术

监测数据驱动的保护参数动态调整技术以实时监测数据为核心,通过数据融合与智能算法实现保护参数的自适应优化。该技术依托多源传感器采集的电流、电压、温度、振动等实时数据,结合故障特征提取与模式识别结果,动态调整保护阈值、动作时间及逻辑判断规则。具体而言,采用自适应滤波算法抑制噪声干扰,提升数据纯净度;基于负载特性分析模块,识别高峰、低谷及过渡时段的负载模式差异,调整采样频率与滤波参数以平衡精度与能耗。保护逻辑优化引入机器学习模型,通过历史故障数据训练预测参数变化趋势,结合实时运行状态动态调整保护策略,避免传统固定阈值导致的误动或拒动。反馈控制模块将保护动作结果与预期目标对比,通过闭环校正机制持续优化参数设置,该技术通过数据-算法-动作的闭环控制,实现保护参数与系统运

行状态的实时匹配,提升故障响应速度与决策精准度,适应地铁电力系统高动态、多工况的运行特性。其优势在于减少人工干预需求,提升保护系统的自适应能力与鲁棒性,为地铁电力系统安全运行提供智能化、精准化的参数调整支撑,推动保护方案向数据驱动、智能决策方向演进,增强系统整体抗干扰能力与运行可靠性。

### 3.4 自适应保护与故障隔离协同设计

自适应保护与故障隔离协同设计以实时运行状态感知与动态响应为核心,通过数据融合与智能算法实现保护动作与故障隔离的精准协同。该设计依托高精度传感器网络实时采集设备状态参数,结合故障特征提取算法精准识别故障类型与位置,动态调整保护阈值与动作逻辑。采用自适应滤波技术抑制电磁环境噪声干扰,提升信号纯净度;基于负载特性分析模块识别运行工况变化,动态调节采样频率与滤波参数,平衡数据精度与系统能耗;故障隔离策略引入多路径冗余设计,结合广域差动保护与方向保护技术,实现故障路径的快速锁定与精准隔离。协同控制模块通过高速通信网络实现保护单元与隔离装置的实时联动,确保故障发生时保护动作与隔离操作同步执行,反馈优化机制将隔离效果与预期目标对比,通过闭环校正持续优化协同策略参数。该设计通过数据驱动与智能算法集成,提升故障响应速度与决策精准度,适应地铁电力系统高动态、多工况的运行特性,减少人工干预需求,增强系统自适应能力与鲁棒性,形成从故障感知到隔离恢复的全链路智能控制体系,为地铁电力系统安全运行提供智能化、精准化的协同保护支撑<sup>[4]</sup>。

### 3.5 冗余保护模块与容错运行保障体系

冗余保护模块与容错运行保障体系以提升系统可靠性为核心,通过多层次冗余设计与智能容错机制实现故障场景下的持续运行能力。冗余保护模块采用硬件冗余、软件冗余与通信冗余三维架构,硬件冗余通过双通道传感器、冗余控制器与备用电源实现关键设备双重保

障;软件冗余引入热备份算法与动态任务分配机制,确保主程序故障时备用程序无缝接管;通信冗余采用双环网架构与自愈路由算法,保障数据传输链路在单点故障时自动切换。容错运行保障体系集成故障预测、快速隔离与动态恢复功能,故障预测模块基于历史数据与实时状态分析,提前识别潜在故障风险并预警;快速隔离通过智能断路器与分区控制实现故障区域精准隔离,避免故障扩散;动态恢复结合负载优先级与资源分配算法,在隔离后快速调整系统运行模式,恢复关键负载供电。该体系通过冗余设计提升系统抗故障能力,通过容错机制保障故障场景下的持续运行,适应地铁电力系统高可靠性需求。其优势在于减少非计划停运时间,提升系统可用性,为地铁电力系统安全运行提供多维度、立体化的冗余容错支撑,推动保护方案向高可靠、自恢复方向演进,形成从故障预防到持续运行的完整技术闭环<sup>[5]</sup>。

结束语:本研究构建的地铁电力系统智能监测与保护一体化方案通过多技术融合与协同设计,显著提升系统可靠性、响应速度及自适应能力。方案在徐州地铁等实际场景验证中表现优异,有效降低故障率与非计划停运时间。未来可进一步拓展至多线路协同控制与能源优化分配,推动城市轨道交通向智能化、绿色化方向持续演进,助力智慧城市高质量发展。

### 参考文献

- [1]李更或.地铁电力系统智能监测与保护的一体化方案应用研究[J].电子设计工程,2023,31(24):29-32+37.
- [2]张奇,陈雪,王卓然,等.电力系统电气工程自动化智能监测技术的应用[J].数字通信世界,2025,(07):122-124.
- [3]张一清.电力系统中配网自动化智能模式应用[J].中国科技信息,2025,(14):58-60.
- [4]陈堃.智能技术在电力系统自动化中的应用研究[J].仪器仪表用户,2025,32(07):104-106.
- [5]李建林.电力系统关键设备故障诊断技术研究进展[J].电力自动化设备,2024,44(3):1-8.