

铁路牵引供电变配电系统的智能运维技术研究与实践

龚 慧

国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司 河北 沧州 062350

摘要：铁路牵引供电系统通过多能协同优化、智能监测预警及高效运维模式，保障了轨道交通安全稳定运行，同时推动绿色低碳转型。当前智能运维技术聚焦于策略优化、设备升级、架构创新及数据赋能，通过“规则+优化”协同、云边端协同等模式，显著提升了牵引供电系统的经济性、可靠性与安全性。未来需进一步融合AI、数字孪生等技术，深化全生命周期智能化管理能力。保证供电设备安全高效运行是现阶段运营管理部门需重点研究的课题。

关键词：牵引供电；运行维修；智能化；实践

供电检测监测技术的广泛应用和供电生产管理信息化的发展推动了供电专业安全和技术管理的进步，同时检测装备采集及生产过程信息化形成的数据量急剧增加，如何适时从海量原始数据中找出有效信息，为维修决策提供技术支撑。

1 铁路牵引供电变配电系统智能运维技术概述

1.1 核心架构与关键技术。多源数据融合与智能分析。基于物联网技术，系统集成高精度电气量传感器、分布式录波装置和环境监测设备，实现牵引变电所、接触网等关键设备的全息感知。^[1]通过AI算法对电压暂降、谐波畸变等异常数据进行深度挖掘，形成设备健康度评估和故障预测模型。典型如安科瑞AcrelCloud-1000云平台，支持跨站点数据集中管理，动态生成电能质量分析报告和用能优化建议。协同优化与动态管控。采用“规则+优化”混合控制策略，在“网-源-储-车”多能耦合场景下实现再生制动能量回馈与新能源消纳的协同优化，典型场景中可降低日运行成本42.51%，同时维持三相不平衡度 $\leq 1.81\%$ 。通过云网边端协同架构，结合BIM/GIS技术构建三维可视化管控界面，消除传统无人值守变电所的监测盲区。

1.2 智能化运维功能体系。故障快速响应机制。部署超高速智能直流开关（如PCS-8353）实现2ms级故障电流截断，结合智能化监测模块完成开断次数统计与寿命预测。运维平台依托专家知识库和历史故障数据库，自动生成诊断建议并派发工单，推动“计划修”向“状态修”转型。智能巡检与主动防御。引入轨道机器人、红外热成像仪等设备替代人工巡检，通过AI视觉识别技术实现电容补偿装置过热、绝缘子污闪等典型缺陷的自动识别。联动视频监控与电气参数分析系统，建立设备异常放电、环境入侵等风险的主动预警机制。

1.3 应用成效与发展方向。经济与安全效益。某大

学方案显示智能运维系统全寿命周期可节省运维费用超 2.55×10^4 万元，投资回收期仅2.1年。通过实时监测电缆接头温度、环境温湿度等参数，显著降低供电中断导致的列车停运风险。技术演进趋势。重点推进数字孪生技术在供电系统仿真中的应用，构建虚实映射模型以支持故障预演和处置方案验证。加快标准化数据接口建设，打通6C数据中心、调度指挥系统间的数据壁垒，形成全路网级智能运维生态。该技术体系通过数据驱动决策、装备智能化升级和运维模式创新，全面提升了铁路牵引供电系统的可靠性、经济性和环境适应性，为轨道交通绿色低碳转型提供核心支撑。

2 铁路牵引供电系统介绍

2.1 系统组成与原理。核心架构。铁路牵引供电系统由牵引变电所和牵引网构成，负责将电力系统的高压电能转换为适用于电力机车的单相交流电（额定电压27.5kV/50Hz）。牵引变电所：通过牵引变压器将110kV/220kV高压电降压至27.5kV，并配备电容补偿装置改善电能质量。牵引网：包括接触网、馈电线、轨道及回流线，形成闭合回路为电力机车供电。供电方式。高铁普遍采用AT（自耦变压器）供电方式，通过降低线路阻抗和电能损耗提升供电效率，支持长距离、大功率的列车运行需求。

2.2 技术特性与挑战。多电压等级复杂网络。系统涵盖220kV/110kV、35kV、27.5kV、10kV等多个电压等级，供电回路复杂，需应对牵引负荷剧烈波动、新能源并网协调等难题。电能质量优化。通过串联/并联电容补偿装置抑制谐波、降低三相电压不平衡度，确保牵引变压器高压侧不平衡度 $\leq 1.81\%$ （国标要求）。

2.3 智能运维技术应用。实时能量管控。大学提出“规则+优化”混合策略，在“网-源-储-车”协同供电系统中动态协调再生制动能量回馈与新能源消纳，单日运

行成本降低42.51%，全寿命周期可节省费用超 2.55×10^4 万元。智能巡检与故障预警。部署无人机、轨道机器人及红外热成像仪实现接触网毫米级缺陷检测，替代40%人工巡检；结合AI算法预测电缆过热、绝缘子污闪等隐患，主动预警响应时间缩短60%。

2.4 经济性与标准化发展。成本效益。智能运维系统投资回收期缩短至2.1年，牵引变压器低压侧电压波动范围缩减93.44%，显著降低列车停运风险。标准化建设。统一数据接口标准，打通6C数据中心与调度指挥系统间的数据壁垒，构建全路网级智能运维生态。

3 智能运维在铁路牵引供电系统中的应用

3.1 智能监测与数据分析。全息感知与数据融合。通过物联网技术集成高精度传感器、分布式录波装置等设备，实时采集牵引变电所、接触网等关键设备的运行数据（如电压、谐波、温度等），并依托统一的数据标准实现多源信息整合，消除信息孤岛。结合AI算法对异常数据（如电压暂降、谐波畸变）进行深度挖掘，构建设备健康度评估模型，精准预测潜在故障。数字孪生与仿真优化。采用3D数字孪生技术构建虚实映射的供电系统模型，支持设备状态仿真、故障预演及处置方案验证，提升运维决策的科学性。通过云平台（如AcrelCloud-1000）动态分析电能质量、负荷率等参数，生成优化建议报告，降低系统能耗。

3.2 智能巡检与主动防御。机器人替代人工巡检。部署接触网智能检修机器人集群，利用高精度视觉传感器与AI算法实现螺栓松动、导高偏差等缺陷的毫米级定位，典型缺陷识别准确率达90%以上，替代40%人工工作量。引入无人机、轨道机器人及红外热成像仪，完成接触网、电缆隧道等区域的自动化巡检，规避传统人工检修的视觉盲区，安全事故风险降低90%。实时预警与联动控制。建立视频监控与电气参数联动分析机制，实时识别设备过热、异常放电等风险，触发主动预警。配置超高速智能直流开关（如PCS-8353），可在2ms内无弧截断故障电流，减少供电中断影响。^[2]

3.3 协同管控与运维优化。多能协同与能效提升。在“网-源-储-车”系统中应用“规则+优化”混合策略，动态协调再生制动能量回馈与新能源消纳，降低日运行成本42.51%，并维持三相不平衡度 $\leq 1.81\%$ 。通过智能运维平台实现跨站点数据集中管理，优化设备维护周期，推动“计划修”向“状态修”转型。应急响应与资源调度。依托GIS系统和卫星定位技术，实时监控作业过程并远程指挥应急抢修，提升故障处置效率。基于历史故障数据库和专家知识库，自动生成诊断建议并派发工单，

缩短故障修复时间。

3.4 经济效益与安全提升。成本节约：智能运维系统全寿命周期可节省运维费用超 2.55×10^4 万元，投资回收期缩短至2.1年。可靠性增强：通过实时监测电缆接头温度、环境参数等，显著降低供电中断导致的列车停运风险。标准化建设：统一数据接口与运维标准，打通6C数据中心、调度指挥系统间的数据壁垒，构建全路网级智能运维生态。智能运维技术通过数据驱动决策、装备智能化升级和运维模式创新，全面提升了铁路牵引供电系统的可靠性、经济性和环境适应性，为轨道交通绿色低碳转型提供核心支撑。

4 铁路牵引供电变配电系统智能运维关键技术

4.1 智能感知与数据融合技术。多源数据协同采集。通过高精度传感器（1024点/周波采样）实时捕捉电压、谐波、温度等关键参数，结合物联网技术实现牵引变电所与接触网的全息感知，消除人工检测盲区。部署分布式录波装置，支持跨区域、跨电压等级的电气异常联合分析，提升故障定位精度。数字孪生与仿真建模。采用3D数字孪生技术构建供电系统虚实映射模型，支持设备状态仿真与故障预演，优化检修策略生成效率。

4.2 智能巡检与故障处置技术。机器人替代人工。接触网智能检修机器人集群通过AI视觉识别技术实现螺栓松动、导高偏差等缺陷的毫米级定位，典型缺陷识别准确率达90%，替代40%人工运维量。无人机与轨道机器人协同巡检，覆盖电缆隧道等高风险区域，安全事故风险降低90%。超高速故障隔离。采用超高速智能直流开关，可在2ms内无弧截断故障电流，减少对供电系统的冲击。基于阻抗符号法、功率潮流法融合算法精确定位扰动源，缩短故障处置时间。

4.3 协同优化与能效管理技术。多能协同控制。在“网-源-储-车”系统中应用混合优化策略，动态协调再生制动能量回馈与新能源消纳，降低日运行成本42.51%。通过智能电表与边缘计算优化变压器负荷分配，综合能耗下降15%-20%。云边端协同架构。构建云网边端协同平台，整合6C检测数据与辅助监控系统，实现无人值守变电所的远程运维与三维可视化管控。

4.4 标准化与安全保障技术。数据接口统一化。打通6C数据中心、调度指挥系统间的数据壁垒，形成全路网级智能运维生态。采用IEC 61850 GOOSE协议实现跨站点数据同步，提升异常事件响应速度。主动安全防御。部署智能监测终端实时分析环境温湿度、烟雾浸水等参数，触发多终端联动报警，缩短60%应急响应时间。结合AI算法构建供电异常预警模型，降低三相电压不平衡度

至 $\leq 1.81\%$ ，满足国标要求。

5 铁路牵引供电变配电系统智能运维技术研究进展

随着铁路供电系统复杂性和安全性要求的提升，智能运维技术正逐步成为牵引供电变配电系统优化管理的核心方向。以下是当前技术研究的主要方向及成果：

5.1 智能化架构设计与协同运维。云网边端协同架构：通过云计算、边缘计算与终端设备的协同，构建多层次智能运维体系，实现数据实时采集、本地化处理及云端智能分析，提升无人值守变电所的管理效率。分层运行模式：采用“总调度所-调度台-操作队-巡检队”四级管理模式，结合智能巡检机器人、远程监控等技术，减少人工依赖并保障24小时运维响应能力。

5.2 感知与实时监控技术。多维度感知网络：部署智能传感器网络（如接触网在线监测、变电所全景感知终端），实时采集设备温度、电流、电压等参数，构建数字孪生模型实现状态可视化。超高速故障处理：采用真空直流开断技术（如南瑞继保PCS-8353断路器），可在2ms内截断故障电流，显著降低系统冲击并提升供电可靠性。

5.3 数据分析与智能决策。故障诊断与预测：利用大数据和AI算法对设备运行数据进行深度挖掘，实现异常预警、寿命评估及健康管理。例如，通过装置自诊断信息预测剩余寿命并触发维护预警。多目标优化管控：结合规则与优化算法（如某大学“规则+优化”策略），动态平衡新能源消纳、能耗经济性和电网三相平衡，降低日运行成本超40%。

5.4 设备全生命周期管理。智能巡检与维护：集成智

能视频识别、3D可视化技术，支持自动巡检和远程机巡检，减少人工干预并提升运维精准度。资产数字化管理：建立设备全生命周期数据库，覆盖采购、安装、运行至报废阶段，优化检修计划并降低运维成本。

5.5 典型应用与成效。某大学协同供电管控：通过优化模型与实时切换策略，实现新能源高效利用和电压质量提升，单日本成本降低42.51%，投资回本周期缩短至2.1年。朔黄铁路智能运维系统：集成6C检测监测体系与智能传感网络，构建数据驱动的运维闭环，显著减少人力投入和安全隐患。

5.6 技术挑战与发展趋势。当前研究仍需突破异构数据融合标准、边缘计算实时性优化及复杂场景适应性等瓶颈。未来将向自主决策、多系统联动及绿色低碳运维方向深化，推动铁路供电系统向更高安全性与经济性迈进。

总之，智能运维关键技术通过全息感知、快速处置、协同优化及标准化管控，全面提升了铁路牵引供电系统的安全性与经济性，推动运维模式向智能化、低碳化转型。电力系统变电站的发展经验表明，牵引变电所从综合自动化模式过渡到智能化模式是技术发展的必然方向，应合理利用技术手段实现全所信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化、高压设备智能化、运行状态可视化、支持所亭实时在线分析和控制决策，进而构建智能牵引变电所一体化监控系统。

参考文献

- [1]张瑞.牵引变电所智能化应用研究.2022.
- [2]董斯萍.铁路牵引供电变配电系统的智能运维技术研究与实践.2023.