

# 铁路供电网络智能化监控系统建设与应用研究

张鑫

陕西华电榆横煤电有限责任公司 陕西 榆林 719000

**摘要:** 随着高铁网扩张与运营密度提升,传统供电监控面临信息孤岛、响应滞后等问题。构建集全面感知、数据融合、智能分析与协同控制于一体的智能化监控系统,已成为保障铁路供电安全高效运行的必然趋势。本文系统阐述了该系统的总体架构设计,深入剖析了其赖以实现的核心技术体系,包括基于物联网(IoT)的全域状态感知技术、多源异构数据的融合处理技术、面向设备全生命周期的健康状态评估与故障预测技术,以及基于人工智能(AI)的智能调度与优化决策技术。研究表明,通过上述技术的有机集成,智能化监控系统能够实现对供电网络从“被动响应”到“主动预警”、从“经验驱动”到“数据驱动”的根本性转变,不仅显著提升了供电系统的安全性与可靠性,也为实现绿色低碳、降本增效的智慧铁路运营目标提供了坚实的技术支撑。

**关键词:** 铁路供电;智能化监控;物联网;大数据分析;人工智能

## 引言

我国电气化铁路营业里程超12万公里,年用电量逾千亿千瓦时,建成世界规模最大、技术最先进的高铁网。其核心——铁路供电网络(含牵引变电所、接触网、贯通线等)须在高速、重载、高密度条件下,为动车组提供稳定高质量电能,直接关乎运输安全与效率。传统SCADA系统以“四遥”为主,存在数据维度单一、分析能力弱、智能化不足等问题,难以支撑精细化管理和前瞻性运维。当前面临三大挑战:一是对百万级监控点实现高效、精准、实时感知;二是融合海量多源异构数据(电气量、环境量、视频、台账等)并挖掘决策价值;三是从“故障后处理”转向“故障前预警、状态中评估”的主动运维模式。为此,亟需将物联网、云计算、大数据、人工智能等新一代信息技术深度融合,构建智能化监控系统。这既是技术演进的必然,更是保障国家重大交通基础设施安全的战略需求。本文旨在系统探讨该系统的建设路径、关键技术与应用价值。

### 1 铁路供电网络智能化监控系统的总体架构

一个先进的铁路供电网络智能化监控系统,应摒弃以往各专业(如牵引供电、接触网、电力配电)独立建设、信息割裂的烟囱式架构,转而采用“云-边-端”协同的分层分布式体系,以实现资源的统一调度、数据的无缝流转和业务的智能联动。

#### 1.1 感知层(端)

感知层是整个系统的神经末梢,负责对供电网络内所有关键设备和环境进行全方位、全天候的数据采集。这包括在牵引变压器、断路器、隔离开关等一次设备上部署的高精度电流/电压互感器、局部放电传感器、油

色谱在线监测装置;在接触网上安装的张力、温度、振动、覆冰厚度传感器;在变电所内布置的温湿度、烟雾、水浸、SF<sub>6</sub>气体浓度等环境传感器;以及用于设备外观巡检的高清视频摄像头和红外热像仪<sup>[1]</sup>。此外,移动检测平台(如综合检测列车、巡检机器人、无人机)搭载的弓网动态性能检测装置(1C)、接触网安全巡检装置(2C)、车载接触网运行状态检测装置(3C)等,共同构成了“6C”体系,实现了对固定与移动相结合的立体化感知。所有这些终端设备均通过工业物联网(IIoT)协议(如MQTT、OPC UA)或5G专网,将采集到的原始数据加密上传至边缘计算节点或云端数据中心。

#### 1.2 网络与边缘计算层(边)

网络层承担着数据传输的重任,需构建一张高带宽、低时延、高可靠的通信网络。通常采用有线(光纤环网)与无线(5G、Wi-Fi 6)相结合的方式,确保数据在任何环境下都能稳定回传。边缘计算层则部署在靠近数据源的变电所或区域中心,其核心作用是对感知层上传的海量原始数据进行初步的清洗、过滤、压缩和特征提取。例如,边缘节点可以实时分析局部放电信号,识别出异常放电模式,并仅将告警事件和关键特征值上传至云端,从而极大地减轻了核心网络的带宽压力和云端的计算负担。同时,边缘计算还能支持一些对时延要求极高的本地闭环控制,如快速保护动作、无功补偿投切等,确保了系统在极端情况下的快速响应能力。

#### 1.3 平台与应用层(云)

平台层是整个系统的智慧大脑,通常基于微服务架构和容器化技术构建在私有云或混合云平台上。它集成了数据湖、大数据处理引擎(如Spark、Flink)、AI模

型训练与推理平台、数字孪生引擎等核心组件。数据湖负责存储来自各层级的结构化、半结构化和非结构化数据，形成统一的数据资产。大数据处理引擎对这些数据进行批处理和流处理，为上层应用提供实时和历史的数据服务。AI平台则承载着各类机器学习和深度学习模型的训练、部署与管理。应用层则面向不同用户角色（调度员、运维人员、管理人员）提供丰富的业务功能，包括全景可视化监控、智能告警与故障诊断、设备健康状态评估、负荷预测与能效优化、应急指挥调度等。整个系统通过开放的API接口，可与铁路其他信息系统（如运输调度指挥系统、工务、电务系统）实现数据共享和业务协同。

## 2 智能化监控系统的核心技术体系

### 2.1 全域状态感知与数据采集技术

实现智能化监控的前提是获取全面、准确、实时的数据。这要求突破传统“四遥”信息的局限，构建一个多维度、多物理量的感知体系。在电气量方面，除了常规的电压、电流、功率因数外，还需引入电能质量分析（谐波、闪变、电压暂降等）和行波测距技术，以精确定位接触网短路故障点。在状态量方面，利用光纤光栅（FBG）传感器嵌入关键承力部件，可实现对接触网腕臂、吊弦等的应力、应变进行长期在线监测<sup>[2]</sup>。在环境量方面，结合气象预报数据和本地微气象站信息，可建立覆冰、雷击、大风等自然灾害的风险预警模型。在视觉感知方面，采用基于深度学习的目标检测（如YOLO系列算法）和图像分割（如U-Net）技术，可自动识别接触网零部件的缺失、松动、烧蚀等缺陷，替代或辅助人工巡检。

### 2.2 多源异构数据融合与处理技术

来自不同源头、不同格式、不同时间尺度的数据，必须经过有效的融合才能发挥其最大价值。首先，需要建立统一的数据模型和元数据标准，对设备进行全生命周期的唯一身份标识（ID），打通从设计、制造、安装到运维各阶段的数据壁垒。其次，采用流批一体的数据处理架构，对实时流数据（如SCADA遥测）进行即时处理以支持快速告警，对历史批量数据进行深度挖掘以发现潜在规律。数据融合的核心在于关联分析，例如，将某区段接触网温度异常升高与该时段列车通过的弓网离线率、环境温度、风速等数据进行时空关联，可以更准确地判断故障原因。此外，利用知识图谱技术，将设备、部件、故障模式、检修规程等实体及其关系进行结构化表示，可以为故障诊断和决策支持提供强大的语义推理能力。

### 2.3 设备健康状态评估与故障预测技术

这是智能化监控系统区别于传统系统的核心标志。其目标是从海量运行数据中提炼出设备的“健康指数”，并预测其剩余使用寿命（RUL）。对于变压器等充油设备，通过在线监测油中溶解气体（DGA）的组分和含量变化，结合改进的三比值法和深度置信网络（DBN），可以早期预警内部潜伏性故障。对于接触网，通过分析其几何参数（导高、拉出值）的历史变化趋势、动态弓网作用力、以及零部件的视觉检测结果，可以构建其健康度评估模型<sup>[3]</sup>。普遍采用的方法包括基于物理模型的方法、基于数据驱动的方法（如支持向量机SVM、长短期记忆网络LSTM）以及二者结合的混合方法。通过持续学习和模型迭代，系统能够越来越精准地预判设备劣化趋势，在故障发生前自动生成检修工单，实现从“计划修”、“故障修”向“状态修”、“预测修”的转变。

### 2.4 智能调度与优化决策技术

在掌握全局态势的基础上，系统应具备自主优化和辅助决策的能力。在正常运行状态下，利用强化学习（RL）算法，系统可以动态优化牵引变电所的无功补偿策略、主变运行方式，以最小化网损、改善电能质量、平衡负荷。在应急处置场景下，当发生接触网跳闸等故障时，系统不仅能快速定位故障区段，还能基于电网拓扑、备用容量、列车运行计划等信息，自动生成最优的供电调整方案（如越区供电、迂回供电），并通过人机协同界面推送给调度员确认执行，将故障影响降至最低。此外，结合列车运行图和历史负荷数据，利用时间序列预测模型（如Prophet、Transformer）对牵引负荷进行精准预测，可为电力市场交易和能源管理提供决策依据，助力铁路实现绿色低碳运营。

## 3 智能化监控系统的应用价值与效益分析

### 3.1 全面提升供电安全与可靠性

安全是铁路运输的生命线，而供电安全是其核心保障。智能化监控系统通过构建全域覆盖、毫秒级响应的感知网络，实现对数百万监控点的7×24小时实时监测。任何微小异常——如变压器油中溶解气体的微量变化、接触网零部件的松动或局部过热——均可在萌芽阶段被精准识别，并通过主动预警机制及时干预，真正实现“治未病”，避免小隐患演变为重大事故。故障发生后，系统融合行波测距、电气量突变与视频联动分析，可在数秒内精确定位接触网短路等故障的具体位置，将传统需数小时甚至数天的人工排查压缩至几分钟。更重要的是，系统能基于电网实时拓扑、备用容量及列车运行计划，自动生成多套最优应急方案（如越区供电、迂

回供电),并通过人机协同界面辅助调度决策,使平均故障修复时间(MTTR)缩短50%以上,最大限度减少对运输秩序的影响。此外,数字孪生技术构建高度逼真的虚拟环境,支持对极端工况和应急预案反复推演,显著提升运维人员的应急处置能力和心理素质,构筑坚实的安全最后一道防线。

### 3.2 推动运维模式变革与降本增效

传统依赖周期性检修和故障抢修的模式存在“过修”与“失修”风险,资源浪费且难以保障设备最佳状态。智能化系统推动运维向“状态修”和“预测修”转型。通过对设备全生命周期数据的持续采集与深度学习,系统为每台关键设备(如主变、断路器)建立专属“健康档案”,动态计算健康指数并预测剩余使用寿命(RUL)。当设备出现劣化趋势时,系统自动生成精准检修工单,明确故障部件、原因及处理建议,大幅提升维修针对性与有效性,延长设备寿命,同时优化备品备件库存,降低资金占用<sup>[4]</sup>。在巡检方面,集成无人机、轨道巡检机器人等智能装备,可自主完成接触网、变电所设备的精细化巡检,并利用AI图像识别自动分析缺陷,效率与精度远超人工,不仅大幅降低人力成本,更从根本上保障高危作业人员安全。系统积累的全生命周期数据资产,还为资产全寿命周期成本(LCC)分析、技改优先级排序等高级管理决策提供科学、量化依据。

### 3.3 支撑绿色低碳与智慧铁路发展

在全球绿色低碳转型背景下,铁路自身能耗管理日益重要。智能化系统通过对全网电能质量、负荷分布、设备损耗等数据的精细计量与分析,精准识别高耗能环节。在此基础上,运用人工智能算法(如强化学习)动态优化牵引变电所运行策略——例如智能投切无功补偿装置以改善功率因数、调整主变档位降低网损、均衡馈线负荷——实现全网能效最大化。系统还具备高精度负荷预测能力,结合列车运行图、历史数据及天气等因

素,对未来数小时至数天的牵引负荷进行精准预判,有助于优化电力采购、参与电力市场需求侧响应以降低用电成本,并为未来大规模接入沿线分布式光伏、储能等可再生能源创造条件,助力构建清洁低碳的铁路能源体系。作为智慧铁路生态的关键一环,该系统产生的高质量数据可与运输调度、车辆、工务、电务等专业系统深度融合:供电负荷信息反用于优化列车运行图,接触网状态数据共享评估受电弓磨损。这种跨专业协同,最终服务于构建更加安全、高效、绿色、智能的现代化综合交通运输体系。

## 4 结语

铁路供电网络智能化监控系统的建设,是一场深刻的数字化、网络化、智能化变革。它不仅仅是监控技术的简单升级,更是对整个供电运维理念、管理模式和业务流程的重构。通过构建“云-边-端”协同的总体架构,并深度融合物联网、大数据、人工智能等前沿技术,该系统成功实现了对供电网络的全面感知、深度认知和智能决策。其应用价值体现在安全、效率、经济、环保等多个维度,是保障我国庞大高速铁路网安全高效运行的基石,也是引领世界铁路技术发展方向的关键所在。未来,随着技术的不断迭代和应用场景的持续拓展,智能化监控系统将朝着更加自主、更加协同、更加绿色的方向演进,为交通强国建设贡献不可替代的力量。

## 参考文献

- [1]曾书豪,孙长乾,张林,等.铁路供电设备智能管理系统研发与应用[J].现代制造技术与装备,2025,61(09):38-40.
- [2]陶艳,曹源.基于大数据平台的铁路牵引供电智能运维系统构建[J].控制与信息技术,2025,(06):26-33.
- [3]李铁.铁路供电调度发展及智能供电调度系统[J].电气化铁道,2025,36(03):29-32.
- [4]李忠文,陶凯,卓建洪,等.铁路供电设备智能运维管理系统设计与实现[J].中国铁路,2024,(12):55-61.