

# 变电运维中智能化技术运用分析

李营彪 李鹏宁 姚自阳

国网新疆电力有限公司哈密供电公司 新疆 哈密 839000

**摘要：**本文旨在系统性地剖析变电运维中智能化技术的内涵、体系架构、核心应用场景及其带来的深刻变革。文章首先阐述了变电运维智能化转型的背景与必要性，继而构建了一个涵盖感知层、网络层、平台层和应用层的智能化技术体系框架。在此基础上，深入分析了智能巡视、智能监测、智能诊断、智能操作及智能决策等核心应用领域的技术原理与功能价值。最后，文章探讨了智能化运维所带来的管理模式变革，并前瞻性地指出了其在数据安全、标准统一、人才结构等方面面临的挑战与未来发展趋势。本研究期望为深化对变电运维智能化的理解、科学规划其技术路径与管理体系提供理论参考。

**关键词：**变电运维；智能化技术；物联网；人工智能；状态检修

## 引言

变电站作为电网关键节点，其安全、稳定、高效运行关乎整个电力系统及社会经济的正常运转。传统运维依赖定期巡检与事后检修，具有被动性、周期性和经验依赖等局限，在当前电网日益复杂、可再生能源大量接入、设备应力多变的背景下，已难以精准评估设备真实状态。同时，社会对供电可靠性要求不断提升，“零停电”“少人化”“无人化”成为行业目标，亟需向主动预警、精准决策、高效执行的新型运维模式转型。在此背景下，以数字化、网络化、智能化为特征的新技术为变电运维升级提供了强大支撑。通过深度融合传感、通信、计算与智能算法，可构建具备全面感知、实时分析、自主决策和精准执行能力的智能化运维体系，不仅解放人力、降低风险，更显著提升设备风险防控与精益管理水平。因此，系统研究智能化技术在变电运维中的应用，对推动电网高质量发展和保障国家能源安全具有重要意义。

## 1 变电运维智能化转型的内涵与驱动力

### 1.1 智能化运维的基本内涵

变电运维的智能化并非简单“机器换人”，而是依托先进信息技术，对变电站设备、环境与人员活动等要素实现全方位、全时段、全过程的数字化建模与感知，并通过数据处理、分析与智能决策，达成运行状态实时监控、风险精准预判、故障快速定位、检修策略优化及操作自动执行。其本质是从“以人为主、被动响应”的经验驱动模式，转向“人机协同、主动防御”的数据与知识驱动模式。核心特征包括四方面：一是全面感知，通过传感器和智能终端无死角采集设备状态、环境参数与人员行为；二是泛在连接，依托高速通信网络整合所

有感知节点，消除信息孤岛；三是深度认知，运用大数据与人工智能从多源异构数据中挖掘规律，精准评估设备健康与风险；四是自主协同，系统可自动生成最优运维策略，并调度机器人、智能操作机构等自动协同执行任务，全面提升运维效率与可靠性。

### 1.2 智能化转型的核心驱动力

变电运维智能化转型由多重驱动力共同推动：一是保障电网安全的刚性需求，面对特高压与高比例新能源带来的复杂性，智能化通过实时监测与早期预警提升本质安全；二是降本增效的经济动因，智能巡检（如机器人、无人机）替代人工，减少漏检误检，状态检修（CBM）取代定期检修（TBM），降低全生命周期成本；三是人力资源结构变化的现实压力，传统高危高强度作业难吸引新生代员工，智能化改善工作环境、提升技术含量，助力人才优化；四是国家战略引导，《“十四五”现代能源体系规划》等政策明确要求加快能源系统数字化、智能化，为转型提供宏观支撑。这些因素共同构成变电运维迈向智能化的坚实基础。

## 2 变电运维智能化技术体系架构

一个完整的变电运维智能化技术体系，通常遵循“云-管-边-端”的协同架构，可分为四个逻辑层次：感知层、网络层、平台层和应用层。

### 2.1 感知层（端）

感知层是整个智能化体系的“感官”，负责采集变电站内外部各种物理量和状态信息。其主要构成包括：（1）智能传感器：用于采集变压器油温、绕组温度、局部放电量、铁芯接地电流、断路器机械特性（分合闸时间、速度、行程）、GIS气体压力与微水含量、避雷器泄漏电流等关键设备的状态参量。（2）视频与图像

采集设备：高清摄像头、红外热像仪、紫外成像仪等，用于对设备外观、表计读数、接头温度、电晕放电等进行可视化监控<sup>[1]</sup>。（3）环境监测单元：温湿度、SF6气体浓度、水浸、烟雾、门禁、周界安防等传感器，用于监控站内运行环境的安全状况。（4）智能终端与机器人：智能巡检机器人、无人机、可穿戴式AR/VR设备等，作为移动的感知平台，能够按预设路线或远程指令，对特定区域或设备进行抵近、多角度的精细化检查。

## 2.2 网络层（管）

网络层是连接感知层与上层平台的“神经”，负责将海量的感知数据高速、可靠、安全地传输到数据中心。其关键技术包括：（1）有线通信网络：如工业以太网、光纤通信，用于站内主干数据的稳定传输。（2）无线通信网络：如5G/4G、Wi-Fi 6、LoRa、Zigbee等，为移动终端、机器人和大量低功耗传感器提供灵活的接入方式。其中，5G网络凭借其大带宽、低时延、高可靠和海量连接的特性，尤其适用于高清视频回传、机器人远程精准操控等场景。（3）网络安全防护：部署防火墙、入侵检测、数据加密、身份认证等安全措施，确保数据在传输过程中的完整性、保密性和可用性，防止网络攻击对电网安全造成威胁。

## 2.3 平台层（云+边）

平台层是智能化体系的“大脑”，负责数据的汇聚、存储、处理、分析和智能模型的训练与部署。它通常采用“云边协同”的模式：（1）边缘计算节点：部署在变电站本地，负责对感知层采集的原始数据进行初步的清洗、过滤、压缩和实时分析。例如，对视频流进行AI推理，实时识别表计读数或设备外观异常；对传感器数据进行阈值判断，触发本地告警。边缘计算的优势在于能够就近处理数据，降低云端负担，满足低时延业务的需求<sup>[2]</sup>。（2）云端大数据平台：作为区域乃至全网的数据中心，负责汇聚来自多个变电站的边缘数据，构建统一的数据湖。在此基础上，利用分布式存储和计算框架（如Hadoop, Spark），进行更深层次的数据挖掘、关联分析和长期趋势预测。同时，云端也是训练和迭代复杂AI模型（如深度学习模型）的主要场所。

## 2.4 应用层

应用层是面向最终用户的“交互界面”，将平台层产生的智能分析结果转化为具体的业务功能和服务。这是智能化价值的直接体现，主要包括智能巡视、智能监测、智能诊断、智能操作和智能决策等核心应用模块。

## 3 智能化技术在变电运维中的核心应用分析

基于上述技术体系，智能化技术在变电运维的具体

业务场景中展现出强大的赋能作用。

### 3.1 智能巡视

智能巡视是替代或辅助人工例行巡视的核心应用。通过预设巡视路径和任务，智能巡检机器人或无人机可以自主完成对站内设备的巡检工作。其核心技术在于多模态融合感知与AI视觉识别。机器人搭载可见光、红外、超声波等多种传感器，能够同步获取设备的外观图像、温度分布、局放信号等信息。后台的AI算法模型（如卷积神经网络CNN）能够自动识别表计读数是否正常、设备外壳是否有破损、接头是否存在过热、绝缘子是否有污秽或破损等缺陷。相比人工巡视，智能巡视具有覆盖范围广、巡检频次高、数据客观准确、不受恶劣天气影响等显著优势，实现了巡视工作的标准化和无人化。

### 3.2 智能监测

智能监测是对设备运行状态进行连续、在线、全方位的“体检”。它打破了传统离线试验的局限性，能够实时捕捉设备在真实运行负荷下的动态性能。通过对变压器油色谱、局放、套管介损，断路器机械特性，GIS气室压力与成分等关键状态量的长期在线监测，可以构建设备的“健康档案”<sup>[3]</sup>。结合大数据分析技术，如时序数据分析、相关性分析，可以发现单个参量的微小劣化趋势，或多个参量之间的异常耦合关系，从而对设备的健康状态进行量化评估，为状态检修提供坚实的数据基础。

### 3.3 智能诊断

智能诊断是在监测数据的基础上，进一步回答“设备哪里出了问题”和“问题有多严重”的问题。它融合了专家系统、机器学习和深度学习等多种AI技术。专家系统将领域专家的经验规则编码成知识库，用于处理典型的、规则明确的故障。机器学习模型（如支持向量机SVM、随机森林）则擅长从历史故障案例中学习特征与故障模式之间的映射关系，对未知故障进行分类。深度学习模型（如循环神经网络RNN、图神经网络GNN）能够处理更为复杂的非线性关系和时空序列数据，对故障进行更精准的定位和定性。智能诊断的目标是实现从“现象”到“病因”的精准推断，大幅缩短故障排查时间。

### 3.4 智能操作

智能操作旨在实现倒闸操作等高风险、高精度任务的自动化和远程化。通过在开关柜、隔离开关等设备上加装电动操作机构和位置传感器，并与站内的五防系统、监控系统深度集成，可以构建一个闭环的智能操作系统。运维人员在远方主站或移动终端上发出操作指令后，系统会自动校核五防逻辑，确认无误后，由电动机构精确执行分合闸动作，并通过视频和位置传感器双重

确认操作结果<sup>[4]</sup>。这不仅彻底杜绝了误操作的风险,还将运维人员从高压危险区域完全隔离,极大地保障了人身安全。

### 3.5 智能决策

智能决策是智能化运维的最高阶应用,旨在为管理者提供全局性、前瞻性的运维策略建议。它利用数字孪生(Digital Twin)技术,在虚拟空间中构建一个与物理变电站完全同步的数字镜像。通过将实时运行数据、设备台账、检修记录、环境信息等全部注入数字孪生体,可以在虚拟环境中对不同的运维方案(如检修计划、负荷调整、应急预案)进行模拟推演和效果评估。基于推演结果,系统可以自动生成最优的、个性化的运维决策建议,实现从“治已病”到“治未病”,从“局部优化”到“全局最优”的跨越。

## 4 智能化运维带来的管理模式变革与挑战

### 4.1 管理模式的深刻变革

智能化技术的深度应用,正在重塑变电运维的组织形态和业务流程。(1)组织架构扁平化:随着“集中监控、分区运维”模式的普及,传统的按变电站配置运维班组的模式被打破,形成了更大范围的运维集控中心,管理链条得以缩短。(2)业务流程精益化:运维工作从以“计划”为中心转向以“状态”和“风险”为中心。工作任务的生成、派发、执行、验收全过程实现线上闭环管理,流程更加透明、高效。(3)岗位能力复合化:运维人员的角色从“操作者”转变为“监控者”、“分析者”和“决策者”。他们需要掌握数据分析、系统运维、应急指挥等复合型技能,对专业素养提出了更高要求。(4)绩效考核数据化:设备的健康指数、缺陷发现率、故障预警准确率、任务完成效率等量化指标,成为衡量运维质量和人员绩效的核心依据,考核更加客观公正。

### 4.2 面临的挑战

变电运维的智能化转型仍面临诸多挑战:(1)数据质量与安全挑战:海量数据的准确性、一致性、完整性是智能化应用的前提。同时,高度网络化的系统也面临着前所未有的网络安全威胁,如何构建坚固的“安全底

座”是重中之重。(2)技术标准与互操作性挑战:不同厂商的设备、系统往往采用私有协议,导致“数据烟囱”和“系统孤岛”现象依然存在。亟需建立统一、开放的技术标准体系,实现跨厂商、跨系统的互联互通。

(3)模型泛化与可靠性挑战:AI模型的性能高度依赖于训练数据的质量和数量。对于罕见故障或新投运设备,模型可能出现“水土不服”或误判。如何提升模型的鲁棒性和可解释性,是赢得现场信任的关键。(4)人才结构与文化适配挑战:现有人才队伍的知识结构与智能化运维的需求存在差距。同时,根深蒂固的传统运维思维和习惯也可能成为变革的阻力。需要通过系统性的培训和文化建设,促进新旧模式的平稳过渡。

## 5 结语

变电运维智能化转型是应对新时代电网挑战、提升核心竞争力的必然路径。本文构建了其技术体系架构,并深入分析了在智能巡视、监测、诊断、操作与决策等场景的应用价值。研究表明,依托“全面感知—泛在连接—深度认知—自主协同”的闭环,智能化正推动运维模式从被动响应转向主动防御、从经验驱动迈向数据驱动。然而,全面智能化仍面临数据安全、标准不统一、模型可靠性及人才适配等挑战。未来成功不仅依赖技术突破,更需在顶层设计、标准规范、人才培养和企业文化等方面系统布局。唯有如此,才能充分释放智能化潜能,推动变电运维迈向更安全、高效、精益的新阶段,为国家能源安全和能源革命提供坚实支撑。

## 参考文献

- [1] 闫俊,刘永成,刘建宇,等.变电运维中智能化技术应用分析[J].石河子科技,2025,(05):25-26.
- [2] 牛玉洁.智能化技术在变电运维中的运用分析[J].技术与市场,2025,32(07):76-79.
- [3] 陆游.变电运维技术中的智能化技术分析[J].集成电路应用,2024,41(12):334-335.
- [4] 马立凡,陈燕,史宇伟.变电运维中的智能化技术分析[J].集成电路应用,2024,41(04):158-159.