

智能化技术在电气自动化中的应用研究

邢丽娜

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 在新型工业化、能源系统数字化转型背景下, 电气自动化由单一设备控制迈向多源信息感知的新阶段。传统控制模式长期依赖固定参数与事后处置, 在负荷波动加剧、设备结构日益复杂等现实条件下, 逐渐显露出响应滞后、适应性不足等局限。智能化技术融入电气自动化后, 系统沿着数据感知、状态识别、规律挖掘、决策优化等路径重塑控制逻辑, 使电气工程运行管理从局部优化走向全局统筹。基于此, 本文围绕智能化技术的关键技术体系、应用价值及应用场景进行分析, 以期为促进我国电气工程自动化控制水平提升提供参考。

关键词 智能化技术; 电气自动化; 人工智能技术; 数据支撑技术; 机器学习

中图分类号: TM76; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.18.001

0 引言

当前, 全球智能制造发展浪潮正驱动电气控制领域加速向数字化、网络化、智能化方向升级, 然而国内企业在智能算法的工程化落地、数据价值深度挖掘与控制系统一体化整合方面仍存在一定技术断层。智能化技术与电气自动化深度融合, 将突破传统控制理论的应用边界, 完成从“被动响应”向“主动预测”的转变, 不仅为电力系统可靠性提升、工业能效优化带来变革, 也会推动新型能源互联网与柔性制造体系实现跨越式发展。

1 智能化技术的关键技术体系

1.1 人工智能技术

人工智能技术不是嵌入单一算法, 而是综合感知、识别、学习、判断与决策等流程, 使控制系统由静态响应转向面向复杂工况的动态演化。其中, 机器学习从海量运行数据中提炼隐含规律, 建立设备状态、工艺参数与控制目标之间的非线性关联; 神经网络适用于电机调速、逆变控制、负荷波动分析等时变性较强的场景, 在多因参数拟合下优势明显; 模糊逻辑则着力处理边界不清、机理不明、扰动频繁的控制对象, 使系统在不确定环境中仍能保持较高稳定性与协调性。人工智能技术提升了系统对复杂状态的认知深度, 也强化了控制策略的自适应调节能力, 为设备可靠运行、能效优化与智能运维奠定了技术基础^[1]。

1.2 数据支撑技术

电气自动化运行场景复杂, 设备种类多、工况变化快、状态参数关联度高, 如果失去高质量数据支撑,

智能诊断与故障预警就没有可靠依据。前端依托温湿度、振动、电流、电压等多类型传感器, 以及 PLC、监控系统持续汇集设备运行信息; 中间环节依靠边缘网关完成协议转换、噪声剔除与初步筛选; 后端则依托大数据平台, 汇聚异构数据, 存储时序数据, 最终把分散、杂乱、碎片化的信息转化为服务控制决策的高价值资源。

此外, 数据支撑技术并非控制系统的辅助模块, 而是决定系统感知深度与响应效率的核心。只有在数据真实性、完整性得到保障的前提下, 智能模型对设备状态演化规律的识别才更具可信度, 控制参数的动态修正才更贴近实际工况。

1.3 控制优化技术

控制优化技术是修正与提升控制过程, 与传统依赖固定参数和经验整定的控制方式相比, 更强调系统状态的实时辨识。自适应控制解决对象参数变化、工况波动与外部扰动带来的控制失稳问题, 在系统运行过程中不断修正控制律, 使控制精度、响应速度与稳定性维持在较优水平; 预测控制则以历史信息、当前状态与对象模型为依据, 对未来一段时间内的输出轨迹作出预估, 并围绕能耗、效率、质量、安全等指标展开统筹权衡, 从而形成更具前瞻性的控制决策; 遗传算法、粒子群算法、模拟退火等智能优化方法则主要服务参数整定、路径寻优、负荷分配和多目标协调等任务, 适用于非线性强、耦合度高、数学机理复杂的电气系统。

作者简介: 邢丽娜 (1981-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电气工程及其自动化。

2 智能化技术的应用价值

2.1 提高生产效率与控制响应速度

智能化技术嵌入电气自动化控制体系后，生产组织方式由经验主导转向数据驱动，在设备运行、工艺衔接与调度指令之间形成更紧密的联动关系。系统在持续采集现场状态信息的基础上，及时识别负荷波动、参数偏移与流程瓶颈，随即完成控制策略调整，缩短指令传递与执行滞后的时间差，减少人工干预造成的等待、误判与重复操作。智能化技术更适合应对复杂工况下的动态变化，使生产节拍更加稳定，设备利用率进一步提升，推动生产效率与控制响应速度同步提升^[2]。

2.2 提升控制精度、柔性性与自适应能力

面对负荷波动、设备老化、环境变化等复杂因素，系统不再停留于被动响应，而是在数据反馈、模型分析与策略迭代的共同作用下，保持较高的控制精度，减少指令偏差与调节滞后。同时，控制逻辑不局限单一场景下的刚性执行，而是体现出较强的柔性特征，既适应多设备协同运行需求，也兼顾不同生产条件下的调节要求。

2.3 降低故障率并增强系统安全性、可靠性

传统控制模式较多依赖人工巡检和经验判断，在复杂工况、负载波动以及环境变化较大的情况下，往往存在隐患发现不及时、误判漏判较多、维修响应滞后的问题；而智能化系统依托传感监测、数据分析和状态识别，连续跟踪电流、电压、温度、振动等关键参数，一旦出现异常征兆，便能迅速锁定风险源并发出预警，在早期阶段就识别和处置潜在故障^[3]。

2.4 推动预测性维护与全生命周期运维优化

在连续采集电流、电压、温度、振动等运行数据的基础上，系统识别异常波动，研判劣化趋势，并结合历史故障特征、负荷水平与寿命状态，形成风险画像，进而提前预警潜在隐患，合理安排检修时点、备件更换与人员调度。与传统依赖定期巡检和经验判断的维护方式相比，上述运维模式更贴近设备真实工况，既减少了突发停机带来的损失，也减少了过度维修、重复维修造成的资源浪费。

3 智能化技术在电气自动化中的典型应用

3.1 人工智能提升电力负荷预测精度

电力负荷序列受气温、湿度、节假日、产业开工率及峰谷电价等影响，呈现出显著的非平稳性、周期性叠加与随机波动特征。引入人工智能后，神经网络、深度学习对长时依赖信息的识别更具优势，既能刻画日内峰谷波动，也能识别季节迁移、气象骤变与节假日错峰生产带来的负荷偏移。深度学习模型基于历史负荷数据开展多层非线性特征提取，能够学习季节因素、天气因素和时间因素对负荷变化的隐含影响关系，从而提升预测结果的准确性与稳定性；LSTM 等结构适合处理时变参数与复杂映射关系，在电气自动化场景中具有较强的动态拟合优势^[4]。在模型表达上，负荷预测常写为：

$$\hat{P}_{t+1}=f(P_t, P_{t-1}, \cdots, P_{t-n}, T_t, H_t, W_t, D_t)$$
 (1)

式(1)中， $\hat{P}_{t+1}$ 为下一时刻预测负荷， P_t 为历史负荷， T_t 、 H_t 、 W_t 、 D_t 分别表示气温、湿度、风速与日期类型变量； $f(\cdot)$ 代表深度神经网络映射函数。模型训练阶段以均方误差作为目标函数：

$$MSE=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(P_i-\hat{P}_i)^2$$
 (2)

当 MSE 持续下降且验证集误差保持稳定时，说明模型已较好抓住负荷曲线的主导特征。为便于呈现不同模型的性能差异，可按表 1 展开分析。

3.2 机器学习精细诊断电力设备运行状态

在设备状态识别中，传感器、PLC 及监控系统采集原始工况数据，随后完成清洗、标准化和特征工程，再由支持向量机、随机森林、神经网络、孤立森林等模型完成状态分类、异常检出与故障定位。其中，随机森林适合处理多指标耦合判别问题，卷积神经网络有利于提取复杂波形和图频特征，长短期记忆网络更适合分析振动、温升等强时序信号，从而提升诊断结果的精细度与稳定性。机器学习诊断主要围绕电流波形、电压变化、温度曲线与振动信号建立设备健康状态模型，并据此识别异常行为、预警潜在故障。基于机器学习的电气自动化设备故障检测与维修系统采用分层式架构，自上而下依次为决策层、应用层、算法

表 1 不同负荷预测模型性能比较示意

模型类型	主要特征	适用场景	MAPE/%	RMSE/MW
ARIMA	线性拟合、参数结构清晰	趋势平稳、短期预测	4.8	21.6
BP 神经网络	非线性映射能力较强	常规日负荷预测	3.5	16.9
LSTM	擅长长时序依赖建模	峰谷波动明显、气象扰动较强场景	2.1	10.7

层和数据层，各层相互协同，实现设备故障检测、诊断和维修的智能化全流程。

3.3 物联网技术实现电气设备远程操控与在线监管

在电气自动化场景中，物联网把感知层、边缘层、平台层与执行层串联成闭环控制链路，现场侧布设温度、湿度、电压、电流、振动、功率因数等传感单元，边缘网关完成 Modbus 与 MQTT 协议转换、噪声滤除和数据整形，随后将状态量送入云平台或调控中心，形成连续在线的设备画像。此外，远程监管效果首先体现在时效性上，系统端到端控制时延：

$$T=t_s+t_n+t_p+t_a \quad (3)$$

式（3）中， t_s 为传感采样时延， t_n 为网络传输时延， t_p 为平台计算时延， t_a 为执行机构动作时延。当平台具备“每秒万级数据吞吐、毫秒级分析响应”能力时， t_p 被压缩至极低水平，配电节点故障分闸已实现 0.5 s 内动作，电机负载突变后的参数修正时间压缩至 200 ms，远高于传统人工值守模式下的响应效率。

在监管深度方面，状态评估的连续化、设备健康度可表述为：

$$H=\sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (4)$$

表 2 智能故障诊断与预警技术的关键监测指标及控制意义

监测对象	关键状态量	典型采样 / 响应数据	诊断方法	预警输出
用户侧负荷与配电节点	电流、电压、功率曲线	15 min 采集一次	异常识别、趋势分析	负荷异常告警
电机与轴承系统	振动加速度、绕组温度	10 s 采集一次	LSTM、聚类分析、健康度评估	早期劣化预警
线路保护环节	短路电流、开关状态	0.5 s 内分闸定位	故障模式识别	跳闸告警、故障定位
变压器与绝缘系统	油温、局放量、气体特征比	实时连续监测	随机森林、特征关联分析	风险等级、检修工单
执行控制系统	转速、频率、电压指令	200 ms 内参数修正	PID 协同优化、边缘决策	参数偏差预警
运维决策层	故障概率、剩余寿命 RUL	阈值触发	预测模型、强化学习调度	维护计划、资源调配

4 结束语

智能化技术是保证电气自动化控制系统平稳运行的重要环节，也是时代发展的必然产物。结合现有研究与工程实践看，人工智能、机器学习、物联网及优化控制等技术已在负荷预测、状态识别、故障预警、远程监管、能耗调度等方面显现出较强优势。因此，电气自动化的发展重心应转向技术融合深化、系统架构完善、运维模式前移与治理机制健全，以形成更高水平、更具韧性的智能控制体系，为行业转型升级提供支撑。

式（4）中， z_i 表示温升、振动、电流谐波畸变率、绝缘劣化指标等标准化特征量， w_i 表示各指标权重。当 H 超出预设阈值时，系统自动触发告警、检修工单与控制指令联动。

3.4 智能故障诊断与预警技术优化自动化控制

在电气自动化控制系统中，故障并非瞬时爆发，而是从微弱异常逐步发展到功能失稳。智能故障诊断与预警体系的价值在于把故障识别节点前移到异常征兆阶段，以传感器、PLC、SCADA 和边缘网关等连续监测振动、温度、压力、电流、电压等多维状态量，再结合随机森林、LSTM、孤立森林、聚类分析等算法，完成特征提取、异常检测、模式识别与剩余寿命评估（见表 2）。从控制机理看，上述体系改变的并不只是检修方式，更重塑了自动化控制逻辑，系统依据健康度评分和故障概率动态修正控制参数，抑制异常扩散。因此，智能故障诊断与预警技术对自动化控制的优化，本质上体现为三点：一是故障识别由经验判读转向数据驱动，诊断精度提升；二是控制策略由被动响应转向预测干预，系统稳定性同步增强；三是运维组织由粗放检修转向风险分层管理，停机损失、备件浪费与人工巡检强度均有所降低^[5]。

参考文献：

- [1] 陈小兵. 智能化技术在电气自动化控制中的应用分析[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025(S2):326-328.
- [2] 朱旭. 电气自动化技术在农机智能化领域的应用研究[J]. 南方农机, 2025,56(22):195-198.
- [3] 何清. 智能化技术在选煤厂电气自动化控制中的应用分析[J]. 智能矿山, 2025,06(12):32-35.
- [4] 苑桐滔. 智能化技术在发电厂电气自动化系统中的应用研究[J]. 质量与市场, 2025(10):57-59.
- [5] 杨凤, 杨乐. 电气自动化控制技术在工业生产中的智能化应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2025,09(04):178-180,184.