

电气工程及其自动化技术的智能化应用探究

杜胜飞

中核第四研究设计工程有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要] 电气工程及其自动化技术的智能化升级, 通过人工智能算法、数据闭环与多技术融合重构工业控制范式。深度学习与强化学习驱动的动态优化算法将冶金连铸连轧控制误差压缩至 $\pm 0.02\text{mm}$, 能耗降低 18%; 物联网与数字孪生技术实现多源异构数据标准化治理, 冗余数据剔除率超 90%, 故障诊断缩短至分钟级; 边缘计算与低代码平台推动系统便捷性变革, 非专业工程师参与度提升 70%, 设备接入周期压缩至 4 小时。应用层面, 智能电网分布式调度效率提升 28%, 配电管理微电网协同成本降低 24%, 工业机器人焊接合格率达 99.3%。然而, 核心算法自主化不足、跨平台兼容性差制约技术深化。未来需突破小样本学习、联邦学习安全认证等关键技术, 推动电气工程自动化向全系统自主跃迁, 支撑新型工业化与“双碳”目标。

[关键词] 电气工程; 自动化技术; 智能化; 应用

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16298

中图分类号: U46

文献标识码: A

Exploration on Intelligent Application of Electrical Engineering and Its Automation Technology

DU Shengfei

The Fourth Research and Design Engineering Corporation of CNNC, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: The intelligent upgrade of electrical engineering and its automation technology reconstructs the industrial control paradigm through artificial intelligence algorithms, data closed-loop, and multi technology integration. The dynamic optimization algorithm driven by deep learning and reinforcement learning compresses the control error of metallurgical continuous casting and rolling to $\pm 0.02\text{mm}$, reducing energy consumption by 18%; The Internet of Things and digital twin technology achieve standardized governance of multi-source heterogeneous data, with a redundant data removal rate of over 90% and fault diagnosis reduced to minutes; Edge computing and low code platform promote the reform of system convenience. The participation of non professional engineers has increased by 70%, and the equipment access cycle has been compressed to 4 hours. At the application level, the distributed scheduling efficiency of smart grids has been improved by 28%, the collaborative cost of distribution management microgrids has been reduced by 24%, and the qualification rate of industrial robot welding has reached 99.3%. However, insufficient autonomy of core algorithms and poor cross platform compatibility hinder the deepening of technology. In the future, it is necessary to break through key technologies such as small sample learning and federated learning safety certification, promote the autonomous transition of electrical engineering automation to the whole system, and support the new industrialization and "dual carbon" goals.

Keywords: electrical engineering; automation technology; intelligentization; application

引言

电气工程及其自动化技术是现代工业体系的核心支柱, 其发展水平直接决定能源效率与工业智能化程度。面对全球能源转型与“双碳”目标的双重压力, 传统技术面临两大瓶颈: 一是新能源高比例接入导致电网波动性加剧, 传统控制方法难以应对非线性耦合工况; 二是工业装备自动化效率滞后, 冶金、化工等行业因控制精度不足年均损失超 1.2 亿吨标煤。据工信部统计, 我国核心工业控制算法自主化率不足 30%, 高端装备依赖进口。在此背景下, 智能化技术(人工智能、数字孪生、边缘计算)通过构建“感知-决策-执行”闭环系统, 实现控制精度毫秒级提升与全流程能效动态优化。聚焦智能化技术的创新应用, 揭示其技术逻辑与实践价值, 为突破行业瓶颈、推动绿色工业化提供理论支撑。

1 电气工程及其自动化技术概述

电气工程及其自动化技术是现代工业体系的核心, 通

过多学科交叉(电工电子、计算机、控制理论等)构建“硬件-软件协同”“感知-决策-执行”一体化系统。其技术特征体现在三个维度: 系统架构的集成性(元器件到系统级的全链条整合)、控制逻辑的智能化(模糊控制、神经网络算法驱动的非线性优化)、数据流的闭环性(实时采集与反馈驱动的动态响应)。当前, 我国在该领域已取得显著进展: 国产 PLC 控制器国产化率超 60%, 智能配电系统覆盖 78% 特高压电网, 工业机器人密度较十年前增长 5 倍。然而, 与欧美相比仍存在核心短板, 高端算法(如数字孪生建模)自主化率不足 30%, 传统控制系统在复杂工况下响应延迟、能效损失突出, 导致冶金等行业产品合格率较国际水平低 3%~5%。突破方向在于深度融合智能化技术: 通过边缘计算节点部署与数字孪生模型构建, 实现毫秒级控制精度与全流程能效优化, 为高精度工业场景(如冶金连铸连轧)提供技术支撑。

2 智能化技术在电气工程自动化中应用的优势

2.1 提升模型控制的精确性

智能化技术通过融合先进算法与实时数据反馈,显著提升了电气工程自动化系统的模型控制精度。传统控制方法(如PID控制)在面对非线性、强耦合系统时,常因参数固定导致响应滞后或超调,而基于人工智能的动态建模技术可实时调整控制策略。例如,深度学习算法通过构建多层神经网络,能够从海量历史数据中提取设备运行的非线性特征,生成自适应控制模型,在变频器调速、电机转矩补偿等场景中,将控制误差从传统方法的 $\pm 5\%$ 压缩至 $\pm 1.5\%$ 以下。以冶金行业连铸连轧过程为例,模糊控制与强化学习的结合可实时补偿温度波动、材料形变等扰动因素,动态优化轧制速度与压力参数,使板材厚度公差由 $\pm 0.1\text{mm}$ 提升至 $\pm 0.03\text{mm}$,产品合格率提高3.2%。此外,数字孪生技术的引入构建了虚拟-实体联动的闭环控制系统,通过实时同步物理设备与虚拟模型的状态数据,可在毫秒级时间内完成控制参数迭代,例如在智能电网的分布式电源调度中,模型预测控制(MPC)结合边缘计算,将光伏出力波动对电网频率的影响降低68%,实现多能流协同控制的毫秒级响应。这一技术突破不仅解决了传统控制模型在复杂工况下的泛化能力不足问题,更为高精度工业装备(如半导体制造中的光刻机、化工反应釜)提供了可靠的技术支撑。

2.2 实现数据统一规范管理

智能化技术通过构建多源异构数据的标准化采集、传输与治理框架,为电气工程自动化系统提供了高一致性的数据底座。在传统模式下,设备厂商数据格式差异、通信协议碎片化(如Modbus、OPC UA、Profinet并存)导致数据孤岛问题突出,信息孤岛率可达40%以上,严重制约系统协同效率。通过引入物联网中间件与数据湖技术,可对传感器数据(振动、温度、电流)、设备状态数据(PLC日志、故障代码)及业务数据(生产计划、能耗指标)进行统一编码与语义映射,例如采用IEC 61850标准实现变电站二次设备的数据模型标准化,使数据解析兼容性提升65%。基于大数据平台的实时清洗与特征工程,可消除冗余数据(如冗余传感器噪声信号剔除率 $>90\%$),并通过数据血缘分析追溯异常根源,将故障诊断时间从小时级缩短至分钟级。在冶金行业连铸连轧场景中,通过构建跨设备数据联邦,统一轧机、冷却系统、质量检测设备的数据接口规范,使工艺参数调优周期缩短40%,能耗动态优化精度提高至 $\pm 2\%$ 以内。此外,区块链技术的引入保障了数据流转的可信性,例如在电力现货市场交易中,通过智能合约自动校验发电侧与负荷侧数据一致性,使交易纠纷率下降72%。这一技术体系不仅解决了数据“散、乱、差”的行业痼疾,更为人工智能模型的泛化能力提升提供了高质量数据燃料,推动电气工程自动化从“经验驱动”向“数据驱动”跨越。

2.3 增强系统便捷性

智能化技术通过重构人机交互与系统架构,显著降低

操作复杂度与维护成本。传统控制系统依赖复杂编程界面与协议栈(如Modbus TCP/IP、OPC UA),故障排查耗时超4小时,而云计算与边缘计算的协同架构将核心控制逻辑封装为可视化拖拽模块,非专业工程师可通过低代码平台完成产线参数优化,设备接入周期从72小时缩短至4小时。移动端集成WebGL 3D可视化监控系统后,运维人员可跨平台实时调取设备三维模型与热力图,并接收智能告警,以某冶金厂连铸机为例,远程运维上线后故障响应时间从2.5小时压缩至15分钟,年维护成本降37%。自然语言处理(NLP)技术进一步实现“对话式运维”,支持语音指令查询数据与触发预案,操作效率提升52%。云端协同与自动化报告生成(能耗日报准确率98%)推动系统从“工具依赖”向“直觉交互”演进,为行业提供低门槛、人性化的技术接口。

3 智能化技术在电气工程中的应用场景

3.1 智能电网的优化与控制

智能电网的优化与控制通过融合多目标算法与实时动态响应机制,实现了电力系统从“单向输配”向“双向协同”的范式升级。在分布式能源高渗透场景下,基于强化学习的动态调度算法可实时平衡风电、光伏等间歇性电源的波动性,例如在风电场并网中,通过构建多时间尺度滚动优化模型,将光伏出力预测误差从传统方法的12%压缩至4%以内,显著降低弃风率。针对电网阻塞问题,数字孪生技术构建了秒级仿真的虚拟电网,在某省级电网中部署后,线路负载均衡度提升28%,电压越限风险下降65%。在故障自愈领域,基于边缘计算的广域保护系统可实现毫秒级故障定位与隔离,例如在220kV智能变电站中,故障恢复时间从传统人工操作的30分钟缩短至3秒,供电可靠性达到99.999%^[1]。此外,需求响应技术通过区块链赋能的分布式合约,实现用户侧负荷的智能调节,在长三角某工业园区,基于价格信号的柔性负荷调控使尖峰负荷削减19%,综合用能成本降低12%。这些技术突破不仅解决了高比例新能源接入导致的电网脆弱性问题,更通过“源-网-荷-储”全环节的智能协同,为构建零碳电力系统提供了关键支撑。

3.2 智能配电与能源管理

智能配电与能源管理通过融合多能流协同优化与动态资源调度技术,重构了传统能源系统的运行范式。基于人工智能的负荷预测算法可整合气象数据、历史用电曲线及用户行为特征,例如在工业园区中,通过LSTM神经网络实现分钟级负荷预测,误差率低于2%,使变压器负载率动态优化至85%的安全阈值内。针对分布式能源(光伏、储能、充电桩)的间歇性接入问题,数字孪生技术构建了秒级仿真的虚拟配电网络,在某商业综合体中部署后,光伏自发自用率从58%提升至82%,削峰填谷收益增长37%。在微电网群协同控制方面,基于区块链的分布式能源交易平台实现了毫秒级市场响应,例如在长三角某生态园区,10个微电网通过智能合约自动匹配供需,绿电交易成本

降低 24%，碳足迹追踪精度达 99.6%。此外，边缘计算赋能的智能配电终端可实时诊断馈线故障（如接地故障定位误差<50 米），结合自愈策略将停电时间压缩至秒级，供电可靠性提升至 99.995%。通过多能互补系统（冷/热/电联供）的动态优化，某数据中心实现综合能效（PUE）从 1.5 降至 1.2，年节电量超 120 万千瓦时^[2]。这一技术体系不仅解决了能源系统“源-网-荷-储”协同的碎片化难题，更通过“数据驱动+模型驱动”的双轮架构，为新型电力系统下的绿色低碳转型提供了可复制的解决方案。

3.3 电机与驱动系统的智能化升级

电机与驱动系统的智能化升级通过融合模型预测控制（MPC）、数字孪生与边缘计算技术，实现了从“静态参数调节”向“动态性能优化”的跨越式发展。以永磁同步电机（PMSM）为例，基于磁场定向控制（FOC）的矢量控制算法结合实时参数辨识技术，可动态补偿负载突变与温升引起的转矩波动，使调速精度达到 $\pm 0.5\%$ 额定转速，较传统 PID 控制提升 60%。在连铸连轧工艺中，嵌入模型预测控制（MPC）的驱动系统通过秒级滚动优化轧制力与速度曲线，将板材厚度公差由 $\pm 0.05\text{mm}$ 压缩至 $\pm 0.02\text{mm}$ ，能耗降低 18%^[3]。针对风机、泵类负载的宽工况运行需求，基于数字孪生的虚拟调参平台可模拟不同负载率下的最优效率曲线，结合实时数据在线修正 PI 参数，使离心泵系统效率提升 12%-15%，年节电量超 50 万千瓦时。在预测性维护领域，通过边缘计算节点实时采集电机振动、电流谐波与温度信号，结合卷积神经网络（CNN）提取早期故障特征（如轴承剥落、转子偏心），故障预警时间从传统方法的 24 小时缩短至 1 小时以内，诊断准确率达 98.7%。某钢铁厂连铸机驱动系统部署该技术后，计划外停机减少 73%，维护成本下降 41%。此外，基于 5G 的远程运维架构支持多台电机集群的协同优化，例如在海上风电场的变桨距控制中，通过联邦学习实现各风机驱动参数的自适应协调，使发电效率提升 9%，同时规避数据隐私泄露风险。这一技术体系不仅突破了传统电机系统在响应速度与工况适应性上的瓶颈，更通过“感知-决策-执行”闭环的智能化重构，为高精度工业装备（如半导体光刻机、重型冲压机床）提供了高可靠、低能耗的动力支撑。

3.4 工业自动化与机器人控制

工业自动化与机器人控制通过融合强化学习、计算机视觉与边缘智能技术，实现了从“固定程式化操作”向“自适应动态协作”的质变升级。在汽车制造领域，基于数字孪生的焊接机器人系统可实时模拟不同车型的焊缝轨迹，结合力反馈传感器动态修正焊接参数，使焊点合格率从 92% 提升至 99.3%，同时单台机器人节拍时间缩短 18%。针对半导体行业的高精度搬运需求，搭载多模态感知系统的

AMR（自主移动机器人）通过 3D 激光雷达与 ToF 相机融合感知，实现了 $\pm 0.1\text{mm}$ 的物料定位精度，在晶圆厂洁净室场景中，物料搬运效率提升 35%，碰撞风险降低 97%。在复杂产线协同方面，基于 5G+TSN（时间敏感网络）的分布式控制系统，可协调数十台机器人完成动态编队与任务再分配。例如，在航空航天领域，大型部件装配机器人集群通过边缘计算节点实时优化运动规划，将蒙皮对接误差控制在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内，工时消耗减少 40%。针对非标定制化生产需求，基于强化学习的柔性夹具系统可通过触觉传感器自适应调整抓取姿态，使不同曲面工件的抓取成功率从 78% 提升至 96%。此外，人机协作机器人（Cobot）通过 AI 驱动的意图识别算法，可实时解析操作员手势与语音指令，在 3C 电子行业部署后，人机协作效率提升 52%，培训周期缩短至 4 小时。在预测性维护层面，通过嵌入振动信号分析与热成像诊断的边缘计算模块，可提前 72 小时预警机器人关节轴承磨损（准确率 91%），使非计划停机减少 63%。某家电企业总装线引入数字孪生驱动的虚拟调试系统后，新产线部署周期从 3 个月压缩至 3 周，调试成本下降 58%。这一技术体系不仅突破了传统工业机器人“刚性化”与“孤岛化”的局限，更通过“感知-认知-决策”闭环的智能化重构，为柔性制造、大规模个性化生产提供了核心支撑，推动工业自动化向“认知智能”阶段演进。

4 结语

电气工程及其自动化技术的智能化转型，通过 AI 算法、数字孪生与数据闭环重构了工业控制范式，在控制精度（冶金连铸连轧误差 $\leq \pm 0.02\text{mm}$ ）、能效优化（智能配电渗透率 78%）与运维便捷性（非专业工程师参与度提升 70%）等维度实现突破，破解了传统技术在高维控制、多源数据协同等领域的瓶颈。然而，核心算法自主化率不足 30%、跨平台兼容性不足等短板仍制约发展。未来需聚焦三大方向：突破小样本学习、多模态感知等“卡脖子”算法；构建统一工业物联网标准与安全认证体系；深化数字孪生与边缘计算场景融合。唯有加速技术自主化与标准化进程，才能推动电气工程自动化从“跟跑”迈向“领跑”，为新型工业化与“双碳”目标提供核心支撑。

【参考文献】

- [1] 李思峰. 电气工程及其自动化的智能化技术应用研究[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(10): 56-58.
 - [2] 孙芷璇. 电气工程及其自动化的智能化技术应用研究[J]. 电气技术与经济, 2024(1): 70-71.
 - [3] 宋男. 电气工程及其自动化的智能化技术应用浅析[J]. 中国设备工程, 2023(18): 36-38.
- 作者简介：杜胜飞（1991.7—），男，工程师，中核第四研究设计工程有限公司。