

# 浅谈电气自动化现状及其与人工智能融合的展望

云霄

内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司 内蒙古自治区呼和浩特市 010010

DOI:10.32629/ems.v8i6.20575

**[摘 要]** 在工业数字化转型与新型电力系统建设背景下,传统电气自动化基于经典控制理论形成的固定控制逻辑、静态参数整定、浅层数据利用模式,难以适配现代电气系统时变、非线性、多扰动耦合的复杂工况,存在鲁棒性弱、故障预判能力缺失、多目标优化精度不足等固有短板。人工智能凭借数据驱动建模、非线性精准拟合与自主迭代优化的核心优势,从控制范式、运算逻辑与系统架构维度重构电气自动化技术体系。本文聚焦二者融合的核心技术创新,系统剖析轻量化智能推理、多源数据融合、可解释智能控制、端边协实时控制等关键技术,梳理技术融合的底层壁垒,结合行业前沿趋势预判技术架构、算法体系与安全生态的迭代方向,为电气自动化智能化升级与工业电气系统提质增效提供理论依据与技术参考。

**[关键词]** 电气自动化;人工智能;智能控制;数据融合;边缘智能;技术创新

## 引言

电气自动化是智能制造、新型电力系统与工业运维的核心底层技术,其控制精度与协同性能直接影响工业生产稳定性和能源利用效率。目前,国内电气自动化已完成数字化普及,PLC、DCS、SCADA 等控制系统全面落地,但核心控制仍依托经典理论与预设程序,属于静态被动控制模式。在新能源并网波动、高端精密控制、多设备耦合运行等复杂工况下,传统系统非线性适配、自主决策与故障自愈能力不足的短板日益凸显。人工智能产业化发展,为电气自动化突破经典控制理论瓶颈提供了关键路径。二者融合并非简单功能叠加,而是控制范式、运算逻辑与系统架构的底层革新。基于此,本文聚焦二者融合的关键技术与底层机理,深入剖析技术创新点、融合壁垒与迭代趋势,为电气自动化智能化升级提供理论支撑与技术思路。

## 1 电气自动化核心技术现状与底层技术短板

### 1.1 主流电气自动化核心技术架构

现阶段工业主流电气自动化体系采用现场执行、控制运算、监控管理三级分层固定架构,依托标准化、模块化逻辑实现数字化控制。其中,现场执行层由传感器、变频驱动器、断路器等终端设备构成,以固定频率和维度采集数据、执行控制指令,仅支持预设参数反馈,缺乏自主感知与特征甄别能力。控制运算层以 PLC、DCS 控制器为核心,依托 PID、模糊控制等线性算法与固定参数整定完成闭环运算,是传统控制体系的技术基础。监控管理层基于 SCADA 平台与组态软件,实现数据可视化、超限报警、数据存储及人工调控,仅具备

被动管控功能,无主动优化与智能决策能力。当前电气自动化正从数字化成熟阶段向智能化阶段过渡,硬件已实现高度国产化与集成化,高精度传感器、高集成 SoC 控制器、高速网络模块大幅提升了系统采集、运算与传输性能;软件层面依托 OPC UA、Profinet、TSN 等通用协议,解决了设备通信碎片化问题,搭建了统一数据传输体系。但现有系统始终未突破预设逻辑、线性运算、人工整定的底层框架,硬件性能升级无法弥补控制算法与运行范式的固有缺陷,成为电气自动化向高阶智能控制迭代的核心瓶颈。

### 1.2 传统电气自动化核心技术缺陷

传统电气自动化的核心缺陷集中于底层算法、控制范式与数据运算机制,属于无法依靠硬件升级、参数微调修复的结构性短板,也是人工智能技术融合革新的关键切入点。首先,传统 PID 类控制算法基于线性定常模型构建,仅适配稳态、低扰动工况。面对现代工业电气系统非线性、时变、多干扰耦合的运行特征,如新能源并网波动、设备负载突变、高频启停等场景,固定整定参数极易失配,引发系统震荡、响应滞后、稳态误差超标等问题,且算法无自主迭代能力,动态工况下控制精度大幅下降。其次,传统系统仅具备数据存储与阈值比对功能,无法挖掘时序数据的隐性特征与性能衰减规律,难以预判潜伏性故障,只能采用事后报警、定期检修的被动运维模式。同时,传统单目标闭环控制模式,无法适配现代电气系统多变量、多约束的优化需求,难以兼顾控制精度、能耗、设备寿命与运行稳定性,易造成系统综合性能失衡。此外,传统控制策略与参数均为静态预设,无法

适配设备老化、工况波动、环境干扰等动态变化，缺乏自适应、自迭代能力，高度依赖人工运维，底层智能化严重不足。

目前电气自动化正从数字化成熟阶段向智能化转型，软硬件基础条件已持续完善。硬件端高集成控制器、高精度传感设备与高速工业网络全面普及，设备采集、运算与传输性能大幅提升；软件端标准化通信协议落地，解决了设备通信碎片化问题，搭建了统一的数据交互体系。但行业始终未能突破预设逻辑、线性运算、人工整定的传统控制框架，软硬件性能优化无法弥补底层控制范式与算法的固有缺陷，这也是制约电气自动化实现高阶智能控制的核心技术瓶颈。

## 2 电气自动化与人工智能融合的核心创新机理

### 2.1 控制范式革新：从线性预设控制到非线性自适应智能控制

传统电气控制的根本矛盾，是线性建模方法与工业非线性、时变工况的适配冲突。人工智能依托机器学习强大的非线性拟合能力，突破经典控制的线性建模局限，实现控制范式的根本性升级。深度学习与强化学习无需依赖精准的物理机理模型，可通过海量运行数据自主拟合电气系统非线性特征，以数据驱动模型取代传统线性机理建模模式。相较于传统 PID 固定参数闭环控制，AI 控制可实时识别工况变化、动态迭代控制参数与策略，有效解决负载波动、电压畸变、多扰动耦合场景下的系统超调、响应滞后、稳态误差偏大等问题。其中，深度强化学习为核心创新手段，通过智能体与运行环境持续交互，以控制精度、能耗、设备损耗构建综合优化目标，自主迭代最优控制策略，实现无人干预的多目标协同优化，突破了传统单目标控制瓶颈，可实现电气系统全局最优运行，形成经典控制理论难以达成的智能控制优势。

### 2.2 数据价值革新：从阈值比对运算到高维特征智能挖掘

传统电气数据仅用于基础监测与超限预警，海量时序数据价值闲置。融合 AI 算法后，系统可通过卷积网络、长短期记忆网络、自编码器完成电气数据高维特征提取、时序关联分析与隐性规律挖掘，精准捕捉振动、谐波、电压波动中的细微特征变化，建立数据特征与设备状态、工况类型、故障隐患的精准映射关系，实现从“被动监测报警”向“主动预判优化”的模式转型，完成工业数据向控制效能与运维价值的转化。

### 2.3 系统架构革新：从分层碎片化到端边云协同智能架构

传统电气自动化三级分层架构存在数据孤岛、协同性差、

决策滞后的结构性问题，人工智能与边缘计算、数字孪生的融合，推动系统架构实现创新性重构，形成端侧实时控制、边缘局部优化、云端全局迭代的三层智能协同架构，是当前电气系统架构最核心的技术创新。端侧集成轻量化 AI 推理模块，替代传统固定逻辑控制器，实现毫秒级实时智能控制；边缘节点完成多源数据融合、局部特征训练与区域协同决策，解决云端传输延迟、带宽不足的问题；云端依托大算力完成全局模型训练、多场景策略迭代、跨设备协同优化，实现系统全局性能升级。同时数字孪生虚实映射技术的融入，构建了可仿真、可预判、可迭代的虚拟电气系统，实现物理设备与虚拟模型的实时同步、仿真推演与预控优化，彻底解决传统架构静态、孤立、被动的技术缺陷。

## 3 二者融合的关键性核心技术突破

### 3.1 电气场景适配的模型轻量化蒸馏量化技术

高精度 AI 大模型算力需求高、推理延迟大，无法部署于 PLC、边缘控制器等算力受限终端。针对电气控制高精度、低延迟的刚需，行业形成知识蒸馏+混合量化+结构化剪枝复合轻量化技术体系。通过云端大模型完成电气控制特征与故障特征知识迁移，结合 8 位整型量化与冗余参数剪枝，在保留 98%以上控制精度的前提下，实现模型体积压缩 80%、推理延迟控制在 10ms 以内。该技术解决了 AI 精度与电气实时控制的核心矛盾，实现智能算法端侧本地化部署，突破了传统 AI 仅能云端分析、无法参与核心控制的局限。

### 3.2 电气多源异构数据降噪与层级融合技术

工业电气数据存在多源异构、强电磁噪声、时序离散、部分缺失等问题，直接建模易导致模型拟合失真、决策失准。多源数据层级融合技术构建数据层、特征层、决策层三级处理体系：数据层依托自适应小波降噪与时序插值完成数据清洗与修复；特征层通过双通道神经网络提取结构化电气参数与非结构化波形、图像数据的深层特征并完成维度融合；决策层通过加权算法整合多源特征输出统一决策结果。该技术有效解决工业数据质量差、融合难度高的痛点，大幅提升智能控制与故障诊断模型的泛化能力与精准度。

### 3.3 电气专用可解释性智能控制 (XAI) 技术

深度神经网络的黑箱特性是制约智能电气系统规模化落地的核心壁垒。电气专用 XAI 技术结合 Grad-CAM 特征可视化与电气领域知识图谱，实现 AI 决策全溯源、可解释、可量化。通过特征可视化定位故障判定与参数优化的核心依据，依托

知识图谱梳理故障传播路径与控制优化机理,将数据驱动高精度决策与电气机理知识深度耦合,既保留 AI 模型的拟合优势,又具备传统机理控制的可追溯性,解决了 AI 决策不可信、不可落地的行业难题,提升智能系统工业可靠性。

### 3.4 端边协同实时智能推理控制技术

电力电子变换、伺服精密控制等场景需微秒级响应,传统云端推理延迟无法满足控制需求。端边协同实时推理技术通过算力分层调度、控制推理耦合优化实现关键突破:端侧承载轻量化模型实时推理与基础闭环控制;边缘节点处理复杂工况识别与区域协同优化;云端仅负责离线训练与全局迭代。通过推理流程与控制流程深度耦合,消除冗余数据交互延迟,将智能控制响应速度提升至微秒级,完全适配高端精密电气控制场景,补齐 AI 实时性短板。

## 4 技术融合的核心技术壁垒与现存关键问题

当前电气自动化与人工智能融合仍处于试点阶段,各类底层结构性技术壁垒,严重制约了技术规模化落地应用。其一,模型泛化能力薄弱。电气系统极端故障、设备老化及特殊工况的高质量标注数据稀缺,传统 AI 模型依赖海量样本训练,小样本场景易出现过拟合、误判问题,且通用学习算法无法适配电气时序数据特征,跨设备、跨场景通用性差。其二,工业鲁棒性不足。AI 模型对数据质量与工况边界高度敏感,在电磁干扰、数据缺失、工况突变场景下推理精度波动明显,且缺乏容错机制与机理兜底逻辑,稳定性难以满足工业连续生产的高可靠要求。其三,国产化适配能力不足。工业级 NPU 芯片、智能控制器、实时推理引擎等核心硬件依赖进口,国产设备在算力精度、实时性、抗干扰性方面存在短板;国产工业操作系统缺少专用 AI 推理模块,电控与智能算法协同性弱,自主可控技术体系尚未完善。其四,AI 安全体系缺失。智能电气系统面临对抗样本攻击、参数篡改、推理劫持等新型风险,传统防护仅覆盖设备与数据传输层,未针对模型与推理环节建立防护机制,易引发控制失效、电网波动等安全隐患。

## 5 技术融合的前沿发展展望

电气自动化与人工智能的深度融合,将围绕算法迭代、架构升级、安全完善三大方向推进,助力行业从单点试点智能迈向全域自主智能。算法领域将重点打磨电气专用大模型与小样本学习技术,依托行业海量数据构建通用模型,弥补

传统模型泛化能力短板;结合元学习算法,可凭借少量工况数据快速适配多元应用场景。云端训练、端侧部署的运行模式得到普及,在保障控制精度的同时,提升技术落地的实用性。系统架构方面,机理与数据双驱动容错控制成为主流,AI 算法负责常规工况的精准调控,机理模型应对异常与极端工况,有效增强系统运行稳定性。传统端边云架构逐步升级为全分布式协同架构,终端可独立完成智能决策,借助工业以太网实现设备联动,搭配数字孪生技术完成工况模拟、故障预警,打造全流程智能闭环。安全领域将加快工业 AI 芯片、操作系统等核心软硬件国产化进程,搭建自主可控的技术体系。同时运用模型对抗训练、参数加密等技术,构建全维度安全防护网络,消除系统风险,守护工业关键基础设施平稳运行。

## 结语

人工智能与电气自动化深度融合,可突破经典控制理论瓶颈、重塑工业电气技术体系,实现控制逻辑、运算机制与系统架构的底层革新。针对传统线性控制难以适配复杂电气工况的问题,本文阐述了轻量化智能推理、多源数据融合、可解释智能控制、端边协同实时控制四项关键技术的创新机理,总结了当前模型泛化能力弱、系统鲁棒性不足、国产化适配度低、智能控制安全体系缺失等技术难题。目前两类技术正由单点试点向全域智能自主控制转型。伴随电气专用大模型、机理数据双驱动控制及国产化安全体系的不断完善,电气自动化将突破传统固定控制局限,具备自适应、自决策、自迭代的高阶智能能力,显著提升电气系统控制精度与运行稳定性,为新型电力系统建设、智能制造升级及双碳目标落地提供技术保障,推动电气产业向高端化、自主化、智能化方向发展。

## [参考文献]

- [1] 魏培莉;刘万晓;任婷;李浩晓. 机械设计制造及其自动化中人工智能技术的应用[J]. 中国科技信息, 2024(14)
- [2] 台畅. 人工智能背景下电气自动化的升级改造探究[J]. 工程抗震与加固改造, 2024(03)
- [3] 吕爱英. 人工智能在机械设计制造及自动化中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2024(08)
- [4] 张绍龙. 基于人工智能技术的高光谱人脸自动化识别系统设计[J]. 自动化与仪表, 2024(01)