智能化机械设备电气自动化技术及其应用研究

彭 松
湖南高速养护工程有限公司 湖南 长沙 410203

摘 要：为顺应智能制造转型升级趋势，本文聚焦智能化机械设备电气自动化技术，系统梳理智能传感、PLC智能控制、AI算法、物联网等核心技术体系，阐释技术运行架构与闭环工作原理。结合工业生产、故障诊断、节能运维等场景开展应用实践分析，总结行业落地成效，剖析技术适配不足、设备改造成本高、复合型人才短缺等现存问题，并针对性提出优化策略与行业保障措施，展望技术集成化、智慧化、绿色化发展趋势，为制造业电气智能化升级提供参考。

关键词：智能化机械设备；电气自动化技术；应用

引言：随着人工智能、大数据与工业物联网技术的飞速迭代，传统机械设备电气自动化模式弊端凸显，固定化控制逻辑、人工依赖度高、能耗管控薄弱等问题制约工业生产提质增效。智能化电气自动化技术打破传统技术局限，凭借自主感知、智能决策、故障自诊等优势，成为制造业转型升级的核心支撑。基于此，本文深入探究其核心技术、应用场景与现存短板，探索优化发展路径，助力工业设备自动化、数字化、绿色化高质量发展。

1 智能化机械设备电气自动化核心技术概述

1.1 智能化电气自动化技术核心内涵

（1）智能化机械设备电气自动化的定义与核心特征：指综合运用现代信息技术、智能控制理论与电力电子技术，赋予机械设备电气系统自主感知、分析、决策与执行能力。核心特征体现为系统自感知、控制自决策、运行自优化。（2）技术核心优势：表现为五大能力——智能感知（多源数据实时获取）、自主调控（无需人工干预的动态参数修正）、故障自诊（基于模型与数据驱动的异常识别）、数据联动（跨设备信息融合互通）、无人化作业（全流程自动化运行）。（3）与传统电气自动化的核心区别与升级亮点：传统自动化依赖固定逻辑与人工设定，缺乏适应性与自学习能力；智能化则引入AI算法与实时数据分析，使系统能够自适应工况变化，从“执行预设指令”升级为“主动优化运行策略”。

1.2 核心基础技术

（1）智能传感与信息采集技术：传感器集成微处理器与通信模块，实现自校准、自补偿与数字输出；多维采集电压、电流、温度、振动、转速等运行参数，采样精度与频率显著提升。（2）PLC智能控制技术：现代PLC嵌入AI推理模块与工业以太网接口，支持边缘计算；自适应控制逻辑可根据负载变化动态调整PID参数，实现更精准的过程控制。（3）变频调速与电气节能控制技术：基于实时负载反馈智能调节电机运行频率，使输出功率与机械需求精确匹配；能耗优化通过动态调整电压/频率曲线、再生能量回馈等手段，降低系统无效功耗。

1.3 关键智能化核心技术

（1）人工智能控制技术：机器学习用于建立设备运行预测模型，模糊控制解决非线性不确定性系统的规则推理，神经网络实现复杂输入输出间的非线性映射，三者协同提升控制系统的自适应与自学习能力。（2）大数据与云计算技术：云端平台对海量历史运行数据进行分布式存储与深度挖掘，建立设备退化模型与健康基准；远程调度支持跨地域设备群的统一监控与指挥。（3）物联网联动技术：通过工业物联网实现设备电气系统互联互通，采用边缘网关与统一通信协议，完成多设备间协同调度与联锁控制，提升产线整体运行效率[1]。

1.4 技术运行基本原理与架构

（1）智能化电气自动化系统整体架构：分为四层——感知层（各类智能传感器、RFID、视觉模块）、传输层（工业以太网、5G、WirelessHART等通信网络）、控制层（PLC、工控机、边缘控制器及AI推理引擎）、应用层（人机交互界面、云管理平台、决策支持系统）。（2）设备智能控制完整运行流程：形成闭环递进链路——数据采集（实时获取工况参数与状态信息）→分析决策（边缘端或云端算法模型进行数据处理与策略生成）→自动调控（控制器输出指令驱动执行机构动作）→反馈优化（监测调控效果并回馈至模型，持续迭代改进控制策略）。

2 智能化机械设备电气自动化技术的应用场景与实践

2.1 工业生产设备自动化控制应用

（1）流水线生产设备智能启停、工序自动化衔接控制应用：在流水线各工位部署光电传感器、接近开关与视觉识别系统，实时采集工件位置及状态信号。PLC依据预设工艺流程和节拍参数，自动触发上游设备延时停机、下游设备提前启动，实现物料输送、加工、检测等环节的准确衔接，有效减少空转等待，提升整线运行流畅度。（2）机床加工设备精准电气调控、误差智能修正技术应用：采用高分辨率编码器与全闭环伺服驱动，实现位置、速度、转矩的多环精确控制。系统实时比对理论轨迹与实际反馈，结合热变形补偿和刀具磨损估计模型，自动生成修正量并叠加至驱动指令，将关键尺寸偏差稳定控制在微米级，显著提高加工一致性[2]。（3）自动化生产线多设备协同联动控制实践：基于工业以太网构建统一通信平台，将工业机器人、数控机床、自动导引车等异构设备集成至协同调度系统。主控制器动态分配动作时序，当某设备出现节拍滞后或短暂异常时，系统自动调节相邻设备速度并重新规划协同顺序，保障整线连续均衡生产，避免物料堆积或断流。

2.2 设备智能监测与故障诊断应用

（1）电气系统运行状态实时智能监测、异常数据预警应用：在配电柜、电机端子等关键节点安装智能传感器，连续采集电压、电流、温度、振动等多维参数。边缘计算终端实时处理信号并提取特征，依据动态阈值判定运行状态，当参数偏离正常区间时，立即通过无线网络向中控平台及移动终端推送分级预警信息，实现异常早发现、早提醒。（2）设备电气故障自动定位、溯源与智能诊断技术应用：构建融合故障树与贝叶斯网络的诊断知识库，将短路、断相、绝缘劣化等典型故障的特征波形与逻辑关系进行编码。系统检测到异常后，自动匹配实时波形与知识库模板，结合多源信息融合推理，快速定位故障回路与具体元件，反向追溯诱发原因，输出含位置、成因及处置建议的结构化诊断报告[3]。（3）故障预判与预防性维护的智能化落地实践：利用循环神经网络对关键部件历史运行数据进行退化趋势训练，建立剩余寿命预测模型。系统持续外推健康状态变化，当预测值低于维护阈值时自动生成维护工单并推荐备件更换，实现非计划停机向计划维修的转化，延长设备平均无故障周期。

2.3 电气节能与智能运维应用

（1）机械设备电气能耗动态监测与智能优化调控应用：部署电能质量分析仪，以毫秒级周期采集功率因数、谐波等参数。系统将实时数据输入能耗优化模型，结合生产计划与负载特性动态计算最优电压频率设定，并通过变频器自动执行调整，使能耗曲线逼近理论最低边界，实现全工况动态节能。（2）设备空载、过载状态智能识别与节能管控技术应用：基于电流频谱及功率因数角特征，采用模式识别算法实时判别运行状态。判定为空载时自动切换至低频休眠模式，功率降至额定值20%以下；判定为过载时启动限流保护并联动前级供能设备降低输出，防止电能浪费与设备损坏。（3）无人值守智能运维、远程操控技术实践应用：整合视频监控、红外热像、自动巡检机器人与远程I/O站，构建一体化运维平台。中控室操作员通过三维数字孪生界面实时查看现场状态，远程完成启停机、参数修改等操作，巡检机器人按预设路径定时巡查关键点位，实现全天候少人甚至无人值守[4]。

2.4 典型行业应用案例分析

（1）机械制造行业智能电气自动化技术应用案例与成效：某汽车零部件生产线引入自适应变频与AI误差修正后，综合效率提升约23%，单位产品电耗下降16.5%，一次合格率由87%升至95.2%，年节约电费超百万元，投资回收期约14个月。（2）重工设备智能化电气控制系统应用案例分析：某矿用破碎站集群部署多源监测与云诊断系统，提前预测轴承磨损和绝缘老化，非计划停机减少70%以上，年维修成本降低约110万元，设备大修周期延长近三分之一。（3）案例应用总结：技术落地优势与实操经验：技术优势集中于提质、降耗、减故、少人。实操中应重视传感器防护与抗干扰设计，确保通信链路冗余；算法模型需结合现场工况持续迭代；同时加强运维人员数字化技能培训并完善应急响应机制，保障系统长效稳定运行。

3 技术应用现存问题与发展优化策略

3.1 技术应用现存核心问题

（1）技术层面：核心智能技术适配性不足、系统兼容性差、精准度有待提升。当前AI算法多源于通用领域，对特定机械工况（如重载冲击、宽温域变化）缺乏针对性优化，模型泛化能力有限；不同厂商的PLC、变频器、传感器之间通信协议异构严重，系统集成时数据对接困难；智能诊断在复杂耦合故障下的准确率尚不足85%，误报与漏报并存。（2）设备层面：老旧设备智能化改造成本高、软硬件配套不完善。大量在役传统机械设备缺乏智能接口与数字通信能力，改造需更换控制器、加装传感器及布线施工，单台改造成本普遍在5～20万元区间；且配套的驱动软件、数据采集模块与原有机械结构兼容性差，常出现信号干扰、响应延迟等衍生问题。（3）人才与管理层面：专业复合型技术人才短缺、

行业应用标准不统一。既懂机械电气原理又掌握AI算法与数据分析的复合人才供给严重不足，企业招聘困难；同时，电气自动化智能化在感知精度等级、通信规约、安全冗余等方面的行业标准尚未健全，导致不同项目间方案复用率低，重复开发浪费严重。

3.2 技术优化改进策略

（1）优化智能控制算法，提升设备电气系统自适应与精准调控能力。针对典型工况采集专属数据集，对机器学习模型进行迁移学习与微调，增强算法对特定机械特性的适配性；引入在线增量学习机制，使系统在运行中持续优化参数，提高控制精度和抗扰动能力。（2）完善软硬件配套体系，提升系统兼容性与运行稳定性。推动采用统一工业通信协议（如OPCUA、MQTT），开发标准化数据接口中间件，实现异构设备互连互通；强化硬件抗干扰设计与冗余供电方案，降低现场恶劣环境对系统稳定性的影响。（3）轻量化智能化改造方案，降低中小企业设备升级成本。开发模块化、即插即用的智能控制单元（集边缘计算、通信、驱动于一体），支持快速安装与参数自整定；推广基于云平台的轻量级监控系统，减少本地服务器投入，使改造成本压缩至传统方案的40%～60%[5]。

3.3 行业发展保障措施

（1）建立统一的行业技术应用标准与规范。由行业协会牵头，制定智能化电气设备的感知精度、通信接口、数据格式、安全防护等统一标准，规范设备选型与系统集成流程，提升不同厂商产品的互操作性。（2）加强校企合作，培育机电一体化复合型专业人才。高校增设智能电气控制与AI融合课程，企业提供实训基地与联合培养项目，推行“理论+项目实践”双轨制，加速培养具备跨学科知识体系的实用型人才。（3）加大技术研发投入，推动核心技术自主化创新。设立专项科研基金，鼓励企业、高校与科研院所联合攻关智能传感芯片、实时工业以太网协议栈、AI推理引擎等关键环节，降低对外依赖，形成自主可控的技术体系。

3.4 未来发展趋势

（1）高度集成化、一体化的智能电气控制系统发展趋势。未来控制系统将把传感、逻辑控制、驱动、通信、AI推理集成于单一芯片或紧凑模块，减少层级间转换损耗，提升响应速度与可靠性，实现“一芯控全局”的紧凑架构。（2）无人化、数字化、绿色节能化技术发展方向。依托5G低延时通信与自主决策算法，全流程无人车间将加速普及；数字孪生贯穿设备全生命周期，实现虚拟调试与远程运维；新能源驱动与能量回收技术深度融合，推动电气系统能效持续提升。（3）人工智能、元宇宙、数字孪生与电气自动化技术深度融合趋势。大语言模型将用于生成控制策略代码与故障处置预案，元宇宙提供沉浸式运维培训与远程协作环境，数字孪生结合实时数据实现设备高精度映射与预测仿真，三者协同驱动电气自动化迈向高度智慧化新阶段。

结束语

本文全面探究了智能化机械设备电气自动化的核心技术、应用场景与发展瓶颈，明确了该技术在提质降耗、故障防控、无人运维等方面的核心价值。当前行业仍存在技术适配性不足、系统兼容性差、人才标准体系不完善等问题。未来需通过算法优化、软硬件升级、轻量化改造及人才培育等举措突破发展壁垒，推动AI、数字孪生与电气自动化深度融合，助力工业领域实现高效、智能、绿色的现代化转型。

参考文献

[1]刘宝峰.电气自动化技术在智能制造机械设备中的应用研究[J].长江信息通信,2025,38(02):211-213.

[2]赵冲.自动化技术在智能机械设备中的应用与优化[J].电子技术,2024,53(10):312-317.

[3]白筱君.电气自动化控制的智能化技术在机械设备中的落地应用[J].智能城市,2023,9(18):168-170.

[4]杨跃.基于PLC电气控制智能协作机械装备系统设计与应用[J].智能制造,2023,13(05):78-81.

[5]张丽,周航.智能化机械设备电气一体化自动控制系统研究[J].农机化研究,2022,44(12):216-220.