

Analysis of Pathways for Electrical Automation Control Technology and Intelligent Transformation of Electromechanical Equipment

Bo Chen

Shanghai Nanhualanling Electric Co., Ltd., Shanghai, 201111, China

Abstract

Against the backdrop of manufacturing's ongoing transformation toward intelligentization, electrical automation control technology—serving as the core foundation for electromechanical equipment upgrades—has garnered increasing attention. This paper systematically analyzes the key control technologies supporting intelligentization and proposes an actionable phased implementation roadmap. The research focuses on the evolution of core technologies including programmable logic controllers, smart sensors, and industrial networks. It presents a systematic approach starting with quantitative equipment status assessment, progressing through hierarchical architecture design, and culminating in incremental deployment of functional modules. Additionally, it explores practical challenges such as multi-source data integration and cybersecurity mitigation strategies. The conclusion indicates that adopting automation technology as the cornerstone and implementing a step-by-step transformation path can effectively drive electromechanical equipment toward intelligent development with adaptive and predictive capabilities. The convergence of artificial intelligence and digital twin technologies will emerge as a pivotal factor in future technological evolution.

Keywords

Electrical automation control technology; Mechanical and electrical equipment; Intelligent transformation; Implementation path; Industrial network

电气自动化控制技术与机电设备智能化改造路径分析

陈波

上海南华兰陵电气有限公司, 中国·上海 201111

摘要

在制造业朝着智能化方向不断深入转型这一背景之下, 作为机电设备升级核心基础的电气自动化控制技术愈发受到关注, 本文的目的在于对支撑智能化的关键控制技术构成进行系统分析, 并且构建一套具备可操作性的阶梯式改造实施路径, 研究将重点聚焦于可编程逻辑控制器、智能传感与工业网络等核心技术的演进情况, 提出从设备状态量化评估开始, 经过分层架构设计, 再到功能模块增量部署的系统方法, 同时对多源数据融合、网络安全等实践挑战的应对策略展开探讨。结论表明, 以自动化技术作为基石, 采用循序渐进的改造路径能够有效地推动机电设备向具有自适应、可预测特点的智能化方向发展, 而人工智能与数字孪生技术的融合将会成为未来演进过程中的关键所在。

关键词

电气自动化控制技术; 机电设备; 智能化改造; 实施路径; 工业网络

1 引言

在当前全球制造业从数字化、网络化朝着智能化方向深入演进的这一关键阶段, 此转型浪潮对生产体系的核心要素进行了深刻重塑, 而作为工业生产物理基础的机电设备, 其能力边界会对制造系统的效率、柔性以及可靠性产生直接决定作用, 传统的电气自动化控制虽然已经能够实现基本的顺序与过程控制, 但在面对小批量定制生产、复杂工艺自适

应需求以及全生命周期运维优化等新时代的要求时, 却暴露出存在信息孤岛、决策存在滞后性以及维护过度依赖经验等方面的局限性。因此, 明确电气自动化控制技术的智能化演进方向, 并且规划出一条逻辑清晰、能够循序渐进推进的技术落地路径, 这对于企业务实推进改造工作、充分释放设备潜能而言, 具有紧迫的现实意义, 同时这也成为了本研究的出发点。

2 电气自动化控制核心技术构成分析

2.1 可编程逻辑控制器控制策略演进

现代可编程逻辑控制器的内核已从单一逻辑运算单元

【作者简介】陈波(1978-), 男, 中国江苏人, 本科, 工程师, 一级建造师, 从事工业电气自动化技术方向研究。

进化为集成高性能多核处理器的计算平台，其控制策略的核心在于硬实时操作系统，该系统为运动控制、过程调节与逻辑处理任务分配确定的微秒级时间片与中断优先级，确保多轴伺服驱动器能够实现纳秒级同步精度^[1]。例如，在数控机床的智能化改造中，新一代 PLC 直接集成 CAM 预处理功能，将 G 代码在线转化为针对直线电机与力矩电机的精准位置、速度及电流三环控制指令，绕过了传统数控系统的中间环节，将轮廓加工误差降低至 5 μm 以内。模块化架构允许工程师根据设备需求灵活配置高速数字量输入模块、模拟量采

集模块与专用温度控制模块。

2.2 智能传感与机器视觉集成应用

智能传感系统为机电设备构建了精准的神经末梢，高动态响应传感器将物理量转化为可供控制器直接处理的高保真数字信号。以六维力矩传感器为例，它直接安装在工业机器人末端法兰与执行器之间，实时测量 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 六个方向的力与力矩，分辨率达到 0.1 N 与 0.01 N·m，使得机器人能够实现主动顺应控制，完成精密装配与柔性抛光作业，关键智能传感器技术参数与应用示例如表 1 所示。

表 1 关键智能传感器技术参数与应用示例

传感器类型	核心测量参数	典型精度 / 分辨率	主要适用场景
激光位移传感器	距离、厚度	± 0.05% F.S.	轧材厚度在线检测、振动频谱分析
六维力矩传感器	力 (F_x, y, z)、力矩 (M_x, y, z)	0.1 N / 0.01 N·m	机器人精密装配、打磨力控
光谱共焦传感器	高度、二维轮廓	0.2 μm	半导体晶圆表面形貌、透明材质测厚
MEMS 惯性测量单元	角速度、加速度	0.01° /s	工程机械姿态稳定、AGV 导航

2.3 工业网络与通信协议融合

工业以太网协议解决了控制层至现场层数据高速确定性传输的根本问题，EtherCAT 协议采用主从站结构和“飞速”帧处理机制，数据帧在穿过每个从站时被实时读取和写入，一个包含 100 个轴控制数据的帧遍历所有节点的总延迟低于 100 μs，实现了真正的分布式时钟同步^[2]。这种机制使得一台高性能 IPC 或 PLC 能够直接控制数百个伺服驱动器和数千个数字量 IO 点，构成一个高度集中的运动控制系统。Profinet 协议则定义了 IRT 等实时通道，其基于硬件的时钟同步精度优于 1 μs，保障了多轴插补运动与视觉触发信号的严格同步。

kHz 以满足频谱分析要求。边缘层是智能化的关键，需在车间部署工业边缘计算网关。该网关需内置容器运行时，能够运行基于 Python 的轻量级算法模型，例如对振动信号实时执行快速傅里叶变换，提取特征频率幅值，并与预训练的轴承故障阈值模型比对，在 5 s 内完成本地推理与预警。边缘层与云端通过 MQTT 协议连接，仅上传特征值、报警事件及模型性能反馈数据，而非原始波形数据，将上行带宽需求降低 90% 以上。

3.3 核心智能化功能模块的增量式部署

改造实施必须遵循增量式原则，以验证技术可行性并管理风险。第一阶段部署预测性维护模块。在设备关键部位，如主轴电机驱动端与非驱动端，安装两个互相垂直的 IEPE 振动传感器，在润滑油路安装温度与颗粒物传感器。边缘网关运行动态阈值算法与简易轴承故障诊断模型，初期目标并非精准预测剩余寿命，而是有效识别严重异常。例如，当振动速度有效值连续 3 个采样周期超过基线值的 2.5 倍时，立即向运维系统推送报警，将非计划停机转化为计划维修^[3]。此阶段验证了从数据采集、传输到边缘分析的全链路稳定性。第二阶段集成自适应加工模块。在机床上加装非接触式激光测头与机床主轴功率传感器。加工首个工件后，测头自动测量关键尺寸，边缘控制器将测量值与 CAD 模型理论值进行比对，计算出刀具磨损补偿量并自动更新 CNC 系统的刀具偏置表。

3 机电设备智能化改造的阶梯式实施路径

3.1 设备状态评估与改造需求量化

设备智能化改造的初始步骤是建立客观的量化基准，其核心在于对设备历史与实时运行数据的系统性采集与分析。设备综合效率 OEE 是评估设备资产效能的国际通用标准，其计算公式为：

$$OEE=A \times P \times Q \quad (1)$$

式 (1) 中， A (时间开动率) 是实际运行时间与计划生产时间的比值，反映设备停机损失； P (性能开动率) 是 (理论周期时间 × 生产数量) 与实际运行时间的比值，揭示速度损失与微停顿； Q (合格品率) 是合格品数量与总生产数量的比值，体现质量损失。

3.2 分层控制架构设计与技术选型

基于量化需求，需设计一个职责分明的“云-边-端”三层控制架构以实现数据闭环。在设备端层，核心任务是实现精准执行与原始数据采集。技术选型聚焦于将传统 PLC 升级为支持 EtherCAT 或 Profinet IRT 的中央控制器，其循环周期需低于 2 ms，并配备高速模拟量输入模块直接接入振动加速度传感器与声发射传感器，采样频率需不低于 25.6

4 改造实践中的关键挑战与技术对策

4.1 多源异构数据的集成与处理

在智能化改造现场，数据集成面临的根本挑战是语义与时间的双重异构。一台九十年代产的老式加工中心，其数控系统通过专用的串口协议每秒输出一包含 G 代码段号、主轴转速与报警状态的文本数据；新加装的振动传感器通过 4-20 mA 模拟信号接入 PLC，以 5 kHz 频率采样；而车间的

MES系统要求通过 OPC DA 以 1 秒周期读取设备状态。这种差异导致数据流在时间戳上无法对齐，数据含义依赖于各自独立的文档。务实的技术对策是在车间网络内部署一个基于 OPC UA 架构的边缘服务器。该服务器扮演协议转换器与数据清洗中心的角色，配置专用驱动模块解析老式数控系统的串口数据，利用 PLC 的硬件时钟对模拟量采样数据进行毫秒级时间戳标记。核心步骤是构建一个统一的 OPC UA 信息模型，将“主轴振动有效值”、“进给轴负载率”等概念定义为具有明确工程单位、数据类型的节点，所有原始数据在被采集后立即映射并发布到此统一地址空间中。边缘服务器内置的轻量级计算引擎可执行初步数据融合，例如将振动频谱的峰值频率与主轴实时转速关联计算阶次谱，直接输出表征轴承健康状态的指标值，供给上层分析系统，从而将原始数据吞吐量降低 70%，并提供了时间同步的高质量数据源。

4.2 控制系统网络安全加固

工业网络在实现互联互通后，其攻击面显著扩大，一个典型的风险是来自 IT 网络的勒索软件通过未加防护的 OPC UA 端口横向移动至 PLC，导致生产线停摆。纵深防御策略要求对改造后的网络进行严格的逻辑与物理分区。最核心的生产控制层，即 PLC、驱动器、HMI 组成的实时闭环，必须置于独立的 VLAN 中，仅通过具备深度包检测功能的工业防火墙与上层的监控层进行通信。防火墙策略必须设置为白名单模式，例如只允许监控层的 SCADA 服务器 IP 地址，在特定端口上，通过 Modbus TCP 协议读取 PLC 的保持寄存器，阻断所有其他访问请求^[4]。对于使用 OPC UA 等现代协议的通信，必须强制启用端到端加密与身份认证，采用 X.509 证书替代简单的用户名密码。所有控制器与服务器的固件、软件升级必须通过经哈希校验的安全通道进行。在操作层面，实施基于角色的最小权限访问控制，维护工程师的账户权限仅限于程序上传下载，而工艺工程师的账户仅能修改工艺参数数据库。部署工业安全审计平台，对网络中的异常流量进行建模与分析，例如检测到某个 PLC 在 2 ms 内向外部 IP 发送大量数据包，应立即产生高级别告警并自动隔离该异常节点。

4.3 复合型技术人才的培养与团队构建

智能化改造项目的成败往往取决于是否拥有能将机械原理、控制逻辑、软件算法与安全策略融会贯通的复合型团队，传统电气工程师熟悉梯形图编程与继电器回路，但对 Python 数据分析和网络协议栈缺乏经验；IT 工程师精通数据库与云服务，却不理解运动控制的硬实时要求。解决方案是组建一个融合了 OT 与 IT 专家的跨职能核心项目组，并建立系统性的知识转移机制。在项目初期，组织由自动化供

应商主导的实战工作坊，内容聚焦于如何使用 Python 脚本通过 OPC UA 客户端库从 PLC 实时读取数据，并进行简单的时域与频域分析。企业内部需要建立标准化的技术栈与开发规范，例如统一使用 Docker 容器封装边缘分析应用，利用 Git 进行版本控制，这为 OT 背景的工程师提供了可遵循的 IT 化工作流程。企业应有计划地选拔骨干人员参加工业网络安全、数据工程师等外部认证培训。一个有效的团队模型是：由资深设备工程师担任产品负责人，定义功能需求与技术指标^[5]；控制系统工程师与数据分析师结对工作，前者负责确保数据采集的可靠性与实时性，后者负责特征工程与模型开发；网络安全专家则从项目设计阶段即介入，评审架构并提出安全需求，而非在部署后期进行补救。

5 结语

本文所系统构建的从涵盖核心技术细致解析环节到包含实施路径规划环节的机电设备智能化改造的完整且全面的框架，明确了以先进的高级 PLC、精密的智能传感装置与高效的工业以太网为核心构成的自动化技术，此技术作为实现设备能够进行感知与决策智能化的重要基础；所提出的呈阶梯式的改造路径，该路径从开展量化评估工作起步，历经分层架构设计阶段，直至进行功能模块的增量部署环节，为实际的工程实践提供了清晰明了且具备可操作性的方法论；针对在数据集成过程中、网络安全保障方面以及人才供给短缺等现实存在的挑战，所提供的具体且具有针对性的技术对策，能够有效起到降低改造过程中的风险与成本的作用，而该研究的重要意义在于能够将处于前沿领域的技术概念，转化成为切实可行的工程步骤以及具体的解决方案，从而为企业制定符合实际情况的改造蓝图、规避在改造过程中常见的陷阱、实现设备效能提升与生产柔性增强的协同发展，提供了直接可用的技术指南，对于推动制造业朝着高质量发展以及高适应性转型的方向前进，具有明确且显著的实践价值。

参考文献

- [1] 马骏. 基于单片机的电气自动化控制技术研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(03): 122-125.
- [2] 彭龙顺, 孙建, 姜申. 煤矿井下电气设备自动化控制技术分析[J]. 冶金管理, 2023, (21): 25-27.
- [3] 赵英豪, 胡佳. 医院电气设备自动化控制中 PLC 技术的运用[J]. 中国设备工程, 2023, (09): 240-242.
- [4] 毛晓娟. 自动化控制技术在矿山生产中的应用策略[J]. 世界有色金属, 2022, (21): 31-33.
- [5] 刘艳东. 电气自动化控制技术应用于煤矿开采的研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022, (19): 34-36.