

工业 4.0 自动化与电气协同控制系统开发

赵丰卓

内蒙古鄂尔多斯应用技术学院

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8664

[摘要] 在工业 4.0 浪潮的驱动下，制造业正加速向数字化、智能化转型，自动化与电气技术的深度融合协同已成为重塑生产格局、增强核心竞争力的核心要素。本文以工业 4.0 技术环境为依托，结合自动化与电气自动化领域的共性应用诉求，剖析自动化与电气协同控制系统的核心框架、关键技术及设计准则，探究系统在感知、调控、通信及决策环节的协同机理，借助典型应用场景验证系统的适用性与稳定性，剖析当前技术落地过程中的瓶颈难题及改进路径，为工业领域协同控制系统的研发与实践提供理论依据和应用参考。研究结果显示，构建多维度协同体系可有效提高生产效能、削减运营成本，为制造业智能化升级提供有力支撑。

[关键词] 工业 4.0；自动化技术；电气自动化；协同控制系统；智能制造

Development of Industry 4.0 Automation and Electrical Collaborative Control System

Zhao Fengzhuo

Ordos Institute of Applied Technology, Inner Mongolia

[Abstract] Driven by the wave of Industry 4.0, the manufacturing industry is accelerating its transformation towards digitization and intelligence. The deep integration and synergy of automation and electrical technology have become core elements in reshaping the production pattern and enhancing core competitiveness. This article is based on the Industry 4.0 technology environment and combines the common application demands in the fields of automation and electrical automation. It analyzes the core framework, key technologies, and design criteria of the automation and electrical collaborative control system, explores the collaborative mechanism of the system in perception, regulation, communication, and decision-making, verifies the applicability and stability of the system with typical application scenarios, analyzes the bottlenecks and improvement paths in the current technology implementation process, and provides theoretical basis and application reference for the research and practice of collaborative control systems in the industrial field. The research results show that building a multi-dimensional collaborative system can effectively improve production efficiency, reduce operating costs, and provide strong support for the intelligent upgrading of the manufacturing industry.

[Key words] Industry 4.0; Automation technology; Electrical automation; Collaborative control system; Smart Manufacturing

一、引言

随着物联网、大数据、人工智能等新兴技术的广泛渗透，工业 4.0 已从理论概念转化为推动制造业转型升级的核心动力，传统孤立的自动化控制或电气调控模式，已难以契合现代生产对柔性化、高效化、精准化的多元需求。自动化技术聚焦于生产流程的无人化执行与机械动作的精准管控，电气自动化则以电气设备为核心载体，实现能量转换、信号传输及智能调

节，二者的深度融合能够打破技术壁垒，构建“机械执行-电气调控-智能决策”的完整闭环系统。

当前，制造业面临多品种小批量生产需求攀升、生产要素成本上涨、质量管控标准提高等多重挑战，自动化与电气协同控制系统凭借资源优化配置、实时动态调节、全流程可追溯等优势，成为破解上述难题的重要路径。国内外学者围绕协同控制技术开展了大量研究，在分布式架构设计、协同算法优化等

方面取得了阶段性成果，但在异构系统兼容性、极端工况适应性、低成本落地推广等方面仍存在明显短板。基于此，本文结合工业 4.0 技术特性，开展自动化与电气协同控制系统的研发研究，兼顾两大技术领域的应用场景，拓宽系统适用范围，为工业生产智能化升级提供可行的技术方案。

二、工业 4.0 自动化与电气协同控制系统核心架构

结合工业生产的实际需求，自动化与电气协同控制系统采用分层分布式架构，自上而下分为决策层、控制层、感知层及执行层，各层级通过标准化通信协议实现数据交互与指令传递，保障系统整体协同高效运行，同时兼顾自动化设备与电气装置的适配性。

2.1 决策层

作为系统的核心中枢，决策层承担全局统筹、策略优化及异常处置功能，采用工业计算机与边缘服务器协同架构，兼顾自动化生产计划与电气能耗调控需求。通过采集控制层上传的实时生产数据、设备运行参数及能耗信息，结合预设算法与生产任务目标，生成最优控制策略，包括自动化设备运行节奏、电气参数调节阈值、资源调度方案等。同时，决策层具备数据可视化分析、历史数据回溯及故障预警能力，助力管理人员实时掌握系统运行状态，为生产决策提供坚实的数据支撑。

2.2 控制层

控制层是连接决策层与执行层的关键枢纽，采用 PLC（可编程逻辑控制器）作为核心控制单元，集成变频器、继电器、传感器控制器等电气元件，实现自动化与电气控制的协同联动。PLC 通过接收决策层指令，精准调控执行层设备动作，同时实时采集执行层反馈信号，动态调整控制参数，保障生产流程的稳定性。针对多设备协同场景，控制层采用分布式控制策略，通过总线通信实现各 PLC 之间的同步协调，避免单一控制节点故障导致系统瘫痪，提升系统容错能力。

2.3 感知层

感知层负责各类数据的采集与预处理，为系统协同控制提供基础数据支撑，涵盖自动化生产与电气运行两大维度的感知设备。自动化感知方面，配置视觉传感器、位移传感器、压力传感器，实时采集工件位置、尺寸、加工精度等参数；电气感知方面，部署电流传感器、电压传感器、温度传感器，监测电气设备的运行电流、电压、温升等指标。感知设备采用标准化接口设计，支持数据实时传输与格式转换，通过滤波、降噪等预处理技术提升数据准确性，为后续控制决策提供可靠依据。

2.4 执行层

执行层负责指令的最终落地执行，由自动化执行设备与电气执行元件构成，实现机械动作与电气调控的协同运作。自动化设备包括工业机器人、传送带、数控机床等，按照控制层指

令完成工件搬运、加工、装配等操作；电气执行元件包括伺服电机、电磁阀、接触器等，配合自动化设备实现速度调节、精准定位、启停控制等功能。执行层采用模块化设计，支持设备的灵活增减与替换，适配不同行业的生产需求，同时具备故障自诊断能力，便于设备维护与检修。

三、系统关键技术与设计要点

3.1 协同控制算法设计

协同控制算法是保障系统高效运行的核心支撑，结合自动化与电气控制的特性，采用一致性算法与 PID 控制算法相结合的复合算法模型。针对多设备协同场景，通过一致性算法实现各自动化设备运行节奏、电气参数的同步协调，确保生产流程连贯有序；针对单一设备的精准控制，采用 PID 算法优化控制参数，实现自动化设备位置、速度与电气设备电压、电流的精准调控，提升系统控制精度。同时，引入模糊控制理论，对复杂工况下的控制参数进行动态优化，增强系统对工况变化的适应能力。

3.2 通信协同技术

为实现各层级、各设备之间的高效数据交互，系统采用工业以太网与现场总线协同的通信架构。工业以太网用于决策层与控制层之间的大数据传输，保障生产计划、控制策略等指令的快速下达；现场总线（如 PROFINET、Modbus）用于控制层、感知层与执行层之间的实时通信，降低通信延迟，满足自动化设备与电气元件的实时控制需求。同时，采用数据加密与校验技术，保障通信数据的安全性与完整性，避免数据传输过程中出现丢失、篡改等问题。

3.3 异构系统兼容设计

考虑到工业现场自动化设备与电气装置的品牌、型号繁杂，系统在设计过程中重点强化异构系统兼容性。通过采用标准化通信协议与接口，实现不同品牌 PLC、传感器、执行设备的互联互通；在软件层面，开发通用化驱动程序与数据转换模块，支持不同格式数据的统一处理与解析。同时，采用模块化软件架构，便于根据实际需求增减功能模块，拓宽系统的适用范围，兼顾离散制造业与流程制造业的应用需求。

3.4 安全与可靠性设计

系统从硬件与软件两方面强化安全与可靠性保障。硬件层面，电气回路设置过载保护、短路保护、漏电保护装置，防范电气故障引发安全事故；自动化设备配置紧急停止按钮、安全防护栏，保障操作人员人身安全。软件层面，采用冗余设计，关键控制节点设置备份单元，避免单一节点故障导致系统停机；建立故障诊断与自恢复机制，实时监测设备运行状态，发现故障后及时报警并启动备用方案，最大限度降低故障造成的损失。

四、应用场景与效果分析

为验证自动化与电气协同控制系统的实际应用效果,选取某汽车零部件加工厂作为试点对象,搭建基于本文设计方案的协同控制系统,替换原有孤立控制模式,覆盖零部件加工、搬运、装配全流程,兼顾自动化生产与电气能耗调控需求。

试点应用前,工厂采用自动化设备与电气设备独立控制模式,存在设备协同性差、生产节拍不一致、能耗偏高、故障处理滞后等问题,生产效率偏低,产品合格率仅为 92.3%,单位产品能耗达 12.5kWh。应用本协同控制系统后,通过各层级协同联动与算法优化,实现自动化加工设备与电气调控系统的精准配合,生产节拍同步率提升至 98.7%,设备故障率降低 42%,故障处理时间缩短 60%。

经过三个月的稳定运行,试点工厂生产效率提升 23.5%,产品合格率提升至 97.8%,单位产品能耗降至 9.8kWh,能耗降低 21.6%,显著降低了生产成本,提升了产品市场竞争力。应用结果表明,该协同控制系统能够有效适配工业生产场景,兼顾自动化与电气自动化的应用需求,具备良好的实用性与推广价值。

五、问题与优化方向

5.1 现存问题

尽管本研究设计的自动化与电气协同控制系统在汽车零部件加工厂的试点应用中,在生产效率、产品质量及能耗控制等方面取得了预期成效,验证了系统的核心实用性,但结合工业现场复杂多变的实际工况及不同规模企业的应用需求,深入分析后发现系统仍存在三方面亟待解决的问题。其一,极端工况环境下,系统感知层的数据采集精度易受影响。工业生产中的高温、高湿度环境会加速传感器元器件老化,强电磁干扰则会干扰信号传输,二者共同导致感知层采集的工件参数、电气设备运行指标等数据出现偏差,降低协同控制算法的输入准确性,间接影响控制层指令下达的精准度,最终导致协同控制效果衰减,难以满足高精度生产场景需求。其二,系统初期建设及部署成本偏高,制约技术规模化普及。协同控制系统搭建需配套工业级 PLC、高精度传感器、边缘服务器及专用通信模块等硬件设备,同时需投入专项研发成本开发适配性软件及驱动程序,整体初期投入较大。对于资金实力有限、生产规模较小的中小制造企业而言,较高的投入成本超出其承受范围,导致该技术多集中于大型制造企业应用,难以在全行业推广落地。其三,复杂生产任务切换时的参数优化效率不足,影响系统柔性生产能力。当前制造业多呈现多品种、小批量生产特点,生产任务切换频繁,而不同生产任务对应的设备运行参数、电气调控阈值差异显著。现有系统在任务切换时,需依赖预设程序

逐步优化调整控制参数,优化过程耗时较长,不仅延长生产准备周期,还降低生产线动态响应能力,无法充分适配柔性化生产核心需求。

5.2 优化方向

针对上述问题,未来将从三方面推进优化工作:一是优化感知层设备配置,选用抗干扰能力强的高精度传感器,增强系统对极端工况的适应性;二是开展低成本化设计,简化非核心功能模块,选用性价比更高的硬件设备,降低系统建设成本,满足中小制造企业应用需求;三是引入人工智能算法,优化参数调节模型,实现复杂任务切换时控制参数的快速自适应优化,提升系统柔性生产能力。同时,结合数字孪生技术,构建虚拟协同控制模型,实现系统运行状态的虚拟仿真与预判,进一步提升系统整体性能。

六、结论

工业 4.0 背景下,自动化与电气协同控制是制造业智能化升级的必然趋势。本文设计的分层分布式协同控制系统,兼顾自动化与电气自动化的应用需求,通过核心架构优化、关键技术突破及多维度协同设计,实现生产流程的高效协同与精准调控。试点应用结果表明,该系统能够有效提升生产效率、产品质量,降低能耗与故障损失,具备良好的应用效果。

当前,自动化与电气协同控制技术仍处于持续发展阶段,未来需针对极端工况适应性、低成本化、柔性化等问题持续优化,结合人工智能、数字孪生等新技术,进一步提升系统的智能化水平与应用范围。相信随着技术的不断突破与落地,自动化与电气协同控制系统将为制造业高质量发展提供更强有力的支撑。

[参考文献]

- [1]段丽云. 浅谈电气自动化在工业生产中的应用的重要性[J]. 中国设备工程, 2021(13): 214-215.
- [2]高文博. 论电气自动化工程在工业生产中的应用[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(5): 96-97.
- [3]丛丽丽, 刘志党. 论电气自动化工程在工业生产中的应用[J]. 电气开关, 2021, 59(2): 82-83.
- [4]黄伟斌. 浅谈电气自动化技术在煤炭工业生产中的实践应用[J]. 矿业装备, 2020(3): 180-181.
- [5]张礼崇, 郜祥, 王焱. 电气自动化工程控制系统的现状及其发展趋势[J]. 技术与市场, 2012, 19(1): 127-128.
- [6]陈彦河. 基于人工智能技术在电气自动化控制中的应用分析[J]. 今日自动化, 2020(11): 10-12.
- [7]祁大鹏. 工业电气自动化技术在焦化厂节能工程中的应用研究[J]. 山西冶金, 2021, 44(1): 185-187.