

基于PLC的工业电气自动化控制系统优化设计

洪 浩

大唐陕西发电有限公司水电事业部石泉厂站 陕西 安康 725200

摘要: 随着工业4.0和智能制造的深入推进,工业电气自动化控制系统在现代制造业中的地位日益凸显。可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)作为该系统的核心控制单元,其性能、可靠性与智能化水平直接决定了整个生产线的运行效率与稳定性。本文围绕基于PLC的工业电气自动化控制系统展开研究,首先分析了传统PLC控制系统存在的问题,如响应延迟、扩展性差、人机交互不足等;其次,从硬件选型、软件架构、通信协议、安全机制及能效管理五个维度提出系统性优化设计方案。优化后的系统在响应速度提升、故障率降低、能耗下降的同时,可显著增强系统的柔性可维护性,为工业自动化系统的智能化升级提供了可行路径。

关键词: PLC; 工业电气自动化; 控制系统; 优化设计; 智能制造; 工业通信

引言

在全球制造业向数字化、网络化、智能化转型的大背景下,工业电气自动化控制系统已成为实现高效、精准、柔性生产的关键支撑技术。PLC自20世纪60年代问世以来,凭借其高可靠性、强抗干扰能力、模块化结构和易于编程等优势,迅速取代了传统的继电器-接触器控制系统,成为工业自动化领域的主流控制设备。然而,随着生产节奏加快、产品个性化需求增加以及对绿色制造的要求提升,传统PLC控制系统逐渐暴露出响应滞后、信息孤岛、维护困难、能效低下等问题。特别是在多设备协同、实时数据采集与边缘计算等新兴需求面前,传统设计方法已难以满足现代智能工厂的要求。因此,对基于PLC的工业电气自动化控制系统进行系统性优化设计,具有重要的理论价值与工程实践意义。

1 PLC 控制系统的基本结构与工作原理

1.1 系统组成

典型的基于PLC的工业电气自动化控制系统由多个关键部分协同构成。其中,PLC主机作为核心处理单元,包含中央处理单元(CPU)、电源模块以及输入/输出(I/O)模块,负责逻辑运算与信号调度。外围设备则包括各类传感器(如光电开关、接近开关)和执行器(如电磁阀、变频器、伺服电机),用于感知现场状态并驱动机械动作。人机界面(HMI)为操作人员提供可视化监控与参数配置通道,而通信网络(如PROFINET、Modbus TCP、EtherNet/IP等工业以太网协议)则实现各子系统之间的高速数据交互。此外,上位监控系统(如SCADA或MES)进一步整合来自PLC的数据,支持生产调度、质量追溯与决策分析,形成完整的“感知-控制-管理”闭环体系。

1.2 工作流程

PLC采用循环扫描的工作方式,确保控制逻辑的连续性和实时性。在一个扫描周期内,PLC首先读取所有物理输入端口的状态,并将其暂存于输入映像寄存器中;随后,依据用户编写的控制程序(通常以梯形图或结构化文本形式存在),逐条执行逻辑运算,更新内部变量与输出映像寄存器;接着,在输出刷新阶段,将最终的控制指令写入物理输出端口,驱动执行机构动作;最后,PLC处理通信任务、执行自检程序并复位看门狗定时器,防止程序跑飞。这一完整周期通常在毫秒级别完成,保障了工业过程的稳定运行。然而,当控制逻辑过于复杂或I/O点数量激增时,扫描周期可能显著延长,进而影响系统的动态响应能力,这在高速装配或精密定位场景中尤为敏感。

2 传统 PLC 控制系统存在的主要问题

2.1 实时性与响应能力不足

传统PLC控制系统在面对高动态性生产任务时,其固有的循环扫描机制可能成为性能瓶颈。尤其是一些早期型号的PLC,受限于处理器主频低、内存容量小以及背板总线带宽有限,导致扫描周期普遍较长。例如,在需要多轴伺服同步或高速视觉引导的装配线上,若PLC无法在10毫秒内完成传感信号采集、逻辑判断与执行指令输出,将直接造成动作错位或节拍失衡^[1]。这种响应延迟不仅降低了生产效率,还可能引发产品质量缺陷甚至设备碰撞风险。尽管部分系统通过优化程序结构可略微缩短周期,但硬件平台的根本限制使其难以适应现代智能制造对微秒级控制精度的需求。

2.2 系统扩展性与互操作性受限

传统PLC系统在架构设计上普遍存在封闭性问题,

尤其体现在通信协议的私有化倾向。不同厂商往往采用各自专属的现场总线或网络协议（如西门子的MPI、三菱的CC-Link早期版本），导致设备之间难以实现即插即用或数据互通。当企业需要引入第三方机器人、视觉系统或新型传感器时，常需额外配置协议转换网关，不仅增加成本，还引入新的故障点。此外，集中式I/O架构使得新增控制点必须返回主站布线，施工复杂且灵活性差。这种“烟囱式”系统结构严重制约了产线的柔性扩展能力，使企业在应对小批量、多品种生产模式时显得力不从心，难以快速响应市场变化。

2.3 人机交互与运维体验薄弱

在传统自动化系统中，人机界面（HMI）的功能长期停留在基础启停、状态指示和简单参数设置层面，缺乏对运行数据的深度挖掘与可视化呈现。操作人员无法直观了解设备的历史趋势、能效表现或潜在故障征兆，导致运维决策高度依赖个人经验。同时，多数系统未集成远程访问功能，一旦发生异常，维护人员必须亲临现场排查，延长了平均修复时间（MTTR）。更严重的是，程序注释缺失、逻辑混乱、版本管理缺失等问题普遍存在，使得系统交接或二次开发变得异常困难。这种“黑箱式”运维模式不仅降低了生产连续性，也增加了企业对特定技术人员的依赖风险。

2.4 功能安全与网络安全防护缺失

许多中小型制造企业出于成本考虑，在PLC系统设计阶段忽视了功能安全与网络安全的双重保障。在功能安全方面，紧急停止、安全门连锁等关键回路常由普通继电器或非安全型PLC模块实现，无法满足IEC 61508或ISO 13849等国际标准对安全完整性等级（SIL/PL）的要求，存在人身伤害或设备损毁的隐患。在网络层面，随着工业控制系统逐步接入企业内网甚至互联网，PLC暴露在更大的攻击面之下。然而，大量现场设备仍使用默认密码、开放高危端口（如Telnet、FTP），且未部署工业防火墙或网络分段策略，极易成为勒索软件或APT攻击的突破口。一旦控制系统被入侵，轻则数据泄露，重则导致全线瘫痪，后果不堪设想。

2.5 能效管理机制缺位

传统PLC控制系统的设计目标集中于“可靠运行”，而对“高效运行”的关注明显不足。大量电机、空压机、冷却泵等高能耗设备长期以恒定转速或全功率运行，即使在无负载或低负载工况下也无法自动调节，造成显著的能源浪费。PLC本身虽具备逻辑控制能力，但因缺乏与智能电表、变频器或能源管理系统的深度集成，无法实现基于工艺需求的动态能效优化^[2]。同时，系统

通常不记录或分析能耗数据，使得管理者难以识别高耗能环节，也无法制定科学的节能改造计划。在国家“双碳”战略和企业降本增效双重压力下，这种粗放式的能源管理模式已难以为继。

3 基于PLC的控制系统优化设计方案

3.1 硬件选型与模块化设计优化

为提升系统整体性能，硬件层面的优化应从高性能PLC选型入手。新一代PLC如西门子S7-1500或罗克韦尔ControlLogix 5580系列，具备多核处理器、大容量内存和高速背板总线，其扫描周期可缩短至0.05毫秒，并原生支持运动控制、PID调节及OPC UA等高级功能，能够有效应对复杂控制任务。在I/O配置方面，采用分布式I/O架构（如ET200SP）可大幅减少主站至现场设备的布线长度，不仅降低了信号衰减与电磁干扰风险，还提高了安装灵活性。同时，系统设计应预留约20%的I/O余量，为未来功能扩展预留空间。对于连续化生产或高可靠性要求的场景，还需引入冗余设计策略，例如配置双PLC热备系统或冗余电源模块。当主控单元发生故障时，备用单元可在100毫秒内无缝接管控制权，确保生产过程不中断，极大提升了系统的可用性与鲁棒性。

3.2 软件架构与编程规范优化

软件层面的优化核心在于提升程序的结构性、可读性与可维护性。应摒弃传统的线性梯形图编程方式，转而采用IEC 61131-3国际标准支持的结构化文本（ST）或功能块图（FBD）等高级语言，将整体控制逻辑划分为初始化、主循环、故障处理、通信管理等独立模块，实现高内聚低耦合的设计目标。在此基础上，引入有限状态机（FSM）模型对设备运行状态进行规范化管理，例如定义“待机→启动→运行→暂停→急停”等状态及其转换条件，可有效避免逻辑冲突与误动作，增强系统行为的不确定性^[3]。此外，开发过程中应充分利用TIA Portal、RSLogix等集成开发环境提供的离线仿真功能，在虚拟环境中验证控制逻辑的正确性，减少现场调试时间。同时，结合Git等版本控制工具对程序代码进行管理，确保每次修改均可追溯，为后续的系统迭代与故障回溯提供坚实基础。

3.3 工业通信网络优化

通信网络的优化是打破信息孤岛、实现系统集成的关键。应全面采用基于TCP/IP的工业以太网协议，如PROFINET、EtherCAT或Modbus TCP，这些协议不仅传输速率高（可达100Mbps以上），且通信延迟低于1毫秒，能够满足PLC与伺服驱动器、机器人、视觉系统等设备间的高速同步需求。为进一步实现与上层信息系统的

无缝对接,应在PLC中集成OPC UA服务器,将底层设备数据以标准化、平台无关的方式发布,便于MES、ERP等系统直接调用,从而打通“设备-车间-企业”三级数据链路。在特定场景下,如移动设备(AGV)或布线受限区域,可辅以Wi-Fi 6或5G工业模组实现无线连接。同时,探索在PLC边缘侧部署轻量级AI推理引擎,使系统具备本地异常检测与预测性维护能力,减少对云端计算的依赖,提升响应速度与数据安全性。

3.4 安全与可靠性增强机制

安全与可靠性是工业控制系统的生命线。在功能安全方面,应严格遵循IEC 61508或IEC 62061标准,在PLC中集成安全逻辑功能,如安全转矩关断(Safe Torque Off)、安全门连锁等,并通过专用的安全PLC(如S7-1500F)或安全继电器实现SIL2甚至SIL3等级的保护,确保在紧急情况下设备能可靠停止。在网络安全部分,需部署工业防火墙,实施VLAN隔离与MAC地址绑定策略,关闭非必要服务端口(如Telnet、FTP),并定期更新固件以修补已知漏洞,防范未授权访问与恶意攻击^[4]。此外,充分利用PLC内置的诊断缓冲区功能,持续记录I/O通信错误、程序异常、电源波动等事件,并通过HMI界面或短信/邮件平台实时推送告警信息,使维护人员能够第一时间响应,缩短平均修复时间(MTTR),提升系统整体可用性。

3.5 能效管理与绿色控制策略

面向绿色制造目标,能效管理应成为PLC控制系统设计的重要组成部分。对于风机、水泵等变负载设备,可采用PLC与变频器组成的闭环控制系统,根据实际工艺需求动态调节电机转速,避免长期处于额定功率运行造成的能源浪费。在产线非生产时段,PLC可自动识别空闲状态,并按预设策略关闭非关键设备(如局部照明、

辅助空压机)的电源,进入低功耗待机模式。为进一步量化能效表现,可在关键工位安装智能电表或电流互感器,由PLC实时采集能耗数据并上传至能源管理系统(EMS)。通过对历史能耗数据的分析,可生成能效KPI报表,识别高耗能环节,为工艺优化与设备选型提供数据支撑,最终实现节能降碳与降本增效的双重目标。

4 结语

本文系统分析了传统PLC控制系统在响应性、扩展性、安全性及能效等方面的不足,并从硬件、软件、通信、安全与能效五个维度提出了综合优化设计方案。优化后的系统在性能、可靠性与绿色制造方面均可取得显著成效。未来,随着人工智能、数字孪生、5G等新技术的融合,PLC控制系统将进一步向“智能边缘控制器”演进。建议后续研究聚焦于PLC与AI协同控制、数字孪生驱动的虚拟调试以及跨平台云边协同架构等方向,持续推动工业自动化系统向更高水平的智能化、柔性化与可持续发展。

参考文献

- [1]邓基毅.PLC在工业电气自动化控制中的应用[J].现代工业经济和信息化,2024,14(03):157-158+161.
- [2]苗文旭.工业PLC控制系统在电气自动化生产中的应用优化[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题(第二册).天津长荣科技集团股份有限公司,2025:895-899.
- [3]王鸿科.基于PLC控制的工业电气设备自动化系统设计[J].自动化应用,2025,66(11):19-21.
- [4]仇锦龙,周凯,韦统革,等.PLC在工业电气自动化中的应用[J].数字通信世界,2024,(04):119-121.