

PLC在电气自动化设计中的应用与优化研究

王艳雯

宝钛集团有限公司 陕西 宝鸡 721014

摘要：随着工业自动化进程的加速，PLC（可编程逻辑控制器）已成为电气自动化设计的核心组件。本文从PLC的技术特性出发，系统分析其在开关量控制、模拟量控制、运动控制、数据采集与监控等领域的具体应用，并结合工业生产、智能制造等场景提出优化策略。通过案例研究揭示，PLC的模块化设计、实时响应能力及网络通信功能可显著提升系统效率，而算法优化、硬件升级与标准化编程是突破性能瓶颈的关键路径。研究表明，PLC的智能化、网络化演进正推动电气自动化向柔性制造与数字孪生方向迈进。

关键词：PLC；电气自动化设计；应用领域；优化策略；案例分析

引言

电气自动化是现代工业的基石，其核心在于通过电子技术与计算机控制实现生产过程的智能化与高效化。作为工业控制领域的“数字大脑”，PLC凭借高可靠性、强抗干扰能力及灵活的编程特性，已成为电气自动化设计的核心组件。据统计，全球工业控制器市场中PLC占比超过40%，在汽车制造、电力能源、轨道交通等领域的应用渗透率持续攀升。然而，随着智能制造对实时性、协同性与自适应性的更高要求，传统PLC系统在数据处理速度、网络通信带宽及算法复杂度等方面面临挑战。本文通过解析PLC的技术特性与应用场景，结合工业实践提出优化策略，为电气自动化设计的创新提供理论支撑。

1 PLC的技术特性与核心优势

1.1 模块化架构与可扩展性

PLC采用“CPU+I/O模块+功能单元”积木式设计，用户可按需灵活配置数字量和模拟量输入输出模块。如西门子S7-1500系列，单台控制器可扩展至300个I/O点，支持热插拔技术。在汽车焊装生产线，故障时可不停机更换模块，减少生产中断。软件层面，通过功能块与组织块标准化封装，可调用预置算法库，缩短项目开发周期，提高效率和质量。

1.2 实时响应与确定性控制

PLC的循环扫描机制，在1ms扫描周期内按顺序完成输入采样、程序执行与输出刷新，确保控制稳定可靠。在高速包装机械领域优势明显，如欧姆龙NJ系列PLC控制枕式包装机，将切刀动作与色标检测同步误差控制在 $\pm 0.1\text{ms}$ 以内，产品合格率提升至99.7%。

1.3 工业协议兼容性与网络化

现代PLC兼容多种主流工业以太网协议，可与不同设备无缝通信，构建多层级控制网络。如施耐德M580 PLC

通过OPC UA协议与MES系统互联，实现数据实时上传和工艺参数动态下发。TSN技术引入，使PLC具备纳秒级时间同步能力^[1]，为5G+工业互联网场景下的远程操控提供保障，推动工业生产远程化和智能化发展。

2 PLC在电气自动化中的典型应用

2.1 开关量控制：从逻辑组合到安全集成

PLC的开关量控制能力经历了从简单的继电器逻辑向复杂安全功能的深刻转变。在化工反应釜控制系统中，安全是至关重要的考量因素。罗克韦尔ControlLogix PLC凭借其通过安全完整性等级（SIL3）认证的功能块，为系统提供了可靠的安全保障。当传感器检测到温度、压力等参数超限时，系统能够在10ms内迅速做出反应。首先，切断加热电源，防止反应釜内温度和压力进一步升高，避免发生危险事故。同时，启动应急冷却系统，快速降低反应釜内的温度，确保系统处于安全状态^[2]。此外，系统还会及时向DCS系统发送报警信号，通知操作人员采取相应的措施。这种分层安全架构通过多层次的保护机制，有效地减少了非计划停机时间，提高了生产的安全性和可靠性，降低了企业的生产风险和损失。

2.2 模拟量控制：从PID调节到模型预测

传统PLC主要依靠A/D模块实现对温度、流量等模拟量的闭环控制，其中PID调节是最常用的控制方法。然而，随着工业生产对控制精度和响应速度要求的不断提高，新一代PLC产品开始集成更高级的控制算法，模型预测控制（MPC）就是其中之一。在某光伏电池片生产线上，倍福CX5100系列PLC搭载了模型预测控制（MPC）软件包。通过对扩散炉温度场的动态建模，该系统能够提前预测温度的变化趋势，并根据预测结果调整控制参数，从而实现温度的精确控制。在实际应用中，该系统成功地将硅片厚度均匀性误差从 $\pm 3\mu\text{m}$ 降至 $\pm 0.8\mu\text{m}$ ，大

大提高了光伏电池片的质量。同时,该系统每50ms执行一次模型迭代,比传统PID控制的响应速度提升了8倍,能够更快地适应生产过程中的变化,提高了生产效率和稳定性。

2.3 运动控制:从点位运动到多轴协同

中高档PLC集成的运动控制单元为工业生产中的复杂运动控制提供了强大的支持。电子凸轮、齿轮同步等复杂功能的实现,使得设备能够实现更加精确、高效的运动控制。在某数控机床改造项目中,三菱M800W PLC发挥了重要作用。通过其NC轴功能,实现了主轴与进给轴的动态耦合。在加工复杂曲面时,这种动态耦合能够确保主轴和进给轴按照预定的轨迹精确运动,将轮廓误差控制在5 μ m以内,从而保证了加工零件的精度和质量。更先进的系统还支持CNC代码直接解析,这意味着工程师无需再编写复杂的梯形图,只需直接使用CNC代码即可完成五轴联动编程,大大简化了编程流程,提高了编程效率,降低了对工程师编程技能的要求。

2.4 数据采集与数字孪生

PLC存储区的扩展和边缘计算能力的提升,为数字孪生技术在工业领域的应用提供了有力支持。数字孪生技术通过创建物理设备的虚拟模型,实现对设备运行状态的实时监测和预测。在某汽车总装车间,西门子S7-1518 PLC每100ms采集2000个工艺参数,涵盖了生产过程中的各个环节。通过内置的SQL数据库功能,这些数据能够实时存储至本地服务器,为后续的数据分析和处理提供了丰富的数据源。结合机器学习算法,系统可以对设备运行数据进行深度分析,预测设备可能出现的故障,并提前生成维护工单。这种预测性维护模式使得设备能够得到及时的维护和保养,减少了设备故障的发生,提高了设备的综合效率(OEE)15%,降低了企业的维护成本和生产损失。

3 PLC系统的优化策略与实践

3.1 算法优化:从经验调参到智能自整定

传统PID控制参数的整定往往依赖于工程师的经验,这一过程不仅耗时费力,而且难以保证参数的最优性。针对这一问题,某电子制造企业采用了基于粒子群优化(PSO)的自动调参算法。该算法通过PLC的ST语言实现,在SMT贴片机温度控制系统中得到了成功应用。在传统的参数整定方法下,工程师需要花费4小时的时间进行反复试验和调整,才能得到一组相对合适的参数。而采用基于PSO的自动调参算法后,参数整定时间大幅缩短至20分钟。同时,超调量降低至2%以内,系统的控制性得到了显著提升。更前沿的研究正积极探索将强化学

习算法移植至PLC,通过让PLC在与环境的交互中不断学习和优化控制策略,实现控制策略的动态自适应,进一步提高系统的控制精度和鲁棒性。

3.2 硬件升级:从集中式到分布式架构

分布式PLC系统通过现场总线将控制功能下放至智能从站,这种架构的转变带来了诸多优势。在某水泥厂窑尾控制系统改造中,采用菲尼克斯ILC系列分布式PLC替代传统集中式架构,取得了显著的效果。传统集中式架构下,I/O信号需要集中传输到主站进行处理,这限制了信号传输距离,增加了电缆成本。而分布式架构将控制功能分散到各个智能从站,使得I/O信号传输距离从500米延长至3公里,大大减少了电缆的使用量,降低了电缆成本40%。同时,由于从站承担了部分控制任务,主站的负担显著减轻,CPU负载率从85%降至35%,系统稳定性得到了大幅提升,减少了因主站过载导致的系统故障和停机时间。

3.3 标准化编程:从个人经验到团队协作

IEC 61131-3标准定义的五种编程语言(LD、FBD、ST、IL、SFC)为PLC编程提供了统一的标准和规范,为团队协作提供了坚实的框架。在某轨道交通信号系统开发中,团队采用了基于模型的设计(MBD)方法。通过MathWorks Simulink工具,工程师可以创建系统的模型,并生成ST代码。这些代码能够自动导入CODESYS开发环境,实现了从模型设计到代码实现的无缝衔接。这种流程使得程序具有更高的可读性和可维护性,提高了程序的复用率60%。同时,由于模型的创建和验证可以在早期进行,减少了后期测试和调试的工作量,测试周期缩短了35%,大大提高了项目的开发效率和质量^[3]。

3.4 案例分析:钛合金板材热轧生产线自动化升级

某大型钛合金加工企业为提升高端钛材产能,对其热轧生产线实施自动化改造。传统生产线存在三大核心问题:(1)温度控制滞后性:钛合金热轧需在700-950℃范围内进行,但分段式PID控制的加热炉温度波动达 $\pm 15^{\circ}\text{C}$,导致材料晶粒度不均,力学性能波动超过标准值的20%。(2)板形动态响应不足:人工调整轧辊间隙依赖经验,响应时间超过3秒,导致板材边缘出现波浪形缺陷,废品率高达12%,且不同批次产品厚度公差波动达 $\pm 0.15\text{mm}$ 。(3)能耗与效率矛盾:加热炉为维持温度频繁启停,单位能耗达450kWh/吨,而行业平均水平为380kWh/吨,高能耗直接压缩了利润空间。

3.4.1 PLC系统设计:从硬件架构到控制策略

(1) 硬件架构的适应性选择

针对钛合金加工的高精度需求,系统采用西门子S7-

1500系列PLC作为核心控制器，其PROFINET实时通信能力可支持128个分布式I/O点（ET 200SP模块）的无延迟数据交互。在关键监测环节，部署高精度温度模块（支持PT1000传感器，分辨率 0.1°C ）和高速计数模块（响应频率100kHz），确保轧辊编码器信号与板材厚度数据的毫秒级采集。执行机构方面，伺服液压系统实现轧辊间隙的 $\pm 0.01\text{mm}$ 级调整，脉冲燃烧控制阀则通过0.5秒内的快速开闭，解决加热炉分区控制的滞后问题。

（2）控制策略的创新性突破

一是温度前馈补偿算法：传统PID控制仅能被动响应温度变化，而PLC通过集成钛合金热传导模型，可主动预测轧制过程中的理论温降。例如，当轧制速度提升至设定值的120%时，系统会基于模型计算板材与轧辊接触瞬间的热损失，并提前将加热炉功率提升8%，使实际温度波动范围压缩至 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

二是板形自适应闭环控制：采用“激光测厚仪+PLC模糊PID”方案，以50ms为周期采集板材厚度数据。当检测到边缘厚度偏差超过0.05mm时，系统会在0.8秒内完成轧辊间隙的反向调整，并通过动态加权算法平衡厚度均匀性与轧制力稳定性。改造后，波浪形缺陷率降至2.3%，且不同批次产品的厚度公差稳定在 $\pm 0.03\text{mm}$ 以内。

（3）能耗优化逻辑

PLC根据生产计划预判加热需求，在非连续生产时段启动余热保温模式：通过调节燃烧阀开度维持炉温在 650°C （低于轧制下限但高于钛合金相变温度），避免完全冷却后的重复加热。实测数据显示，该策略使单位能耗降低至380kWh/吨，同时单班次产量从12吨提升至18吨。

4 未来发展趋势与挑战

4.1 智能化演进

AI芯片与PLC的融合将催生新一代智能控制器。研华科技推出的UNO-2484G PLC已集成边缘计算模块，可

本地运行轻量化神经网络模型，实现设备故障的早期预警。预计到2027年，具备自学习能力的PLC市场份额将突破25%。

4.2 时间敏感网络（TSN）应用

TSN技术通过时间同步、流量调度等机制，为PLC提供确定性网络支持。ODVA组织发布的CIP Security over TSN规范，使PLC在100 μs 级周期内完成1000个节点的数据交互，为运动控制与安全系统的深度融合创造条件。

4.3 开放自动化挑战

面对OPC UA、MQTT等异构协议的共存，PLC厂商需解决互操作性问题。PLCopen组织推出的XML设备描述文件标准，已实现不同品牌PLC的工艺对象（POU）互换。未来，基于数字孪生的虚拟调试技术将进一步缩短系统集成周期。

结束语

PLC作为电气自动化的核心控制器，其技术演进始终与工业需求同频共振。从模块化设计到网络化通信，从确定性控制到智能化决策，PLC正突破传统边界，向“控制+计算+连接”的融合方向迈进。面对智能制造的复杂场景，工程师需综合运用算法优化、架构升级与标准化方法，持续挖掘PLC的性能潜力。可以预见，随着5G、TSN、数字孪生等技术的深度融合，PLC将在构建柔性、高效、安全的工业生态系统中发挥不可替代的作用。

参考文献

- [1]童晓凡.优化PLC自动化控制系统设计分析[J].信息记录材料,2020,21(11):122-123.
- [2]马剑.PLC自动化控制系统的优化设计研究[J].山东工业技术,2019(05):144.
- [3]杨卫星,戚成浩,薛峰.基于PLC技术的电气自动化控制优化系统设计[J].电脑迷,2018(11):236.