

基于 PLC 与工业机器人的自动化生产线集成设计与调试研究

王泽华

华海清科(北京)科技有限公司 北京 100000

摘要: 随着工业4.0和智能制造战略的深入推进,自动化生产线作为现代制造业的核心载体,其智能化、柔性化与高可靠性需求日益凸显。可编程逻辑控制器(PLC)与工业机器人作为自动化系统的关键组成部分,在提升生产效率、保障产品质量、降低人工成本方面发挥着不可替代的作用。本文围绕PLC与机器人在自动化生产线中的集成设计与调试展开系统性研究。首先,分析了当前自动化生产线的发展趋势及PLC与机器人协同控制的技术基础;其次,提出了一种模块化、标准化的集成架构,并详细阐述了硬件选型、通信协议配置、控制逻辑设计等关键技术环节;最后,通过介绍了分阶段调试策略与故障诊断方法。研究表明,合理的系统架构设计与规范的调试流程能够显著提升自动化生产线的运行效率与可靠性,为同类工程实践提供理论参考与技术支持。

关键词: PLC; 工业机器人; 自动化生产线; 系统集成; 通信协议; 调试策略

引言

在全球制造业向智能化、数字化转型的大背景下,传统依赖人工操作的生产模式已难以满足市场对产品个性化、小批量、高质量的快速响应需求。自动化生产线通过将机械、电气、控制与信息技术深度融合,实现了生产过程的连续化、标准化与高效化。其中,PLC以其高可靠性、强抗干扰能力及灵活的逻辑控制功能,成为工业控制系统的核心;而工业机器人则凭借高精度、高速度与可编程性,在物料搬运、装配、焊接、喷涂等工序中广泛应用。然而,PLC与工业机器人的独立应用虽已成熟,但如何实现二者在复杂生产环境下的高效协同与无缝集成,仍是工程实践中面临的关键挑战。集成不当易导致通信延迟、控制逻辑冲突、系统稳定性差等问题,严重制约生产线的整体性能。因此,开展PLC与机器人在自动化生产线中的集成设计与调试研究,不仅具有重要的理论价值,更对提升我国制造业自动化水平具有现实意义。

1 系统总体架构设计

1.1 集成架构原则

为实现PLC与工业机器人的高效协同,系统集成需遵循若干核心原则。首先,模块化设计是提升系统可维护性与扩展性的基础。通过将整条生产线划分为若干功能相对独立的单元,如上料站、加工站、装配站、检测站和下料站,每个单元均可在不影响其他部分的前提下进行单独调试或升级,极大降低了系统复杂度。其次,标准化接口的引入有助于确保不同品牌、不同类型的设备

之间能够顺畅交互。这不仅包括物理层面的接线标准,更涵盖通信协议、信号命名规则及数据格式的统一,从而减少因兼容性问题导致的集成障碍。此外,主从控制模式被广泛采用,即以PLC作为主控制器负责全局调度与安全联锁,而工业机器人作为执行终端专注于具体工艺动作的精准完成。这种分工明确的控制策略既发挥了PLC在逻辑控制与多设备协调方面的优势,又充分利用了机器人在空间运动与重复作业中的灵活性。最后,高可靠性与安全性是任何工业自动化系统不可逾越的底线。系统必须设置多重保护机制,如急停回路、安全光栅、防护门联锁等,并确保这些安全信号能被PLC实时监控并作出快速响应,从而在异常情况下及时切断动力源,保障人员与设备安全。

1.2 系统拓扑结构

本系统采用“PLC中心控制+分布式I/O+工业机器人”的三层架构。在管理层,人机界面(HMI)作为操作员与系统交互的窗口,承担参数设定、状态可视化、报警提示及历史数据查询等功能,提升了系统的可操作性与透明度。控制层以PLC为核心,不仅处理来自各传感器的输入信号,还负责生成控制指令并协调机器人与其他执行机构的动作时序,确保整个生产流程按预设节拍有序运行。执行层则由各类末端设备构成,包括伺服驱动器、气动执行元件、光电/接近传感器以及六轴工业机器人等,它们直接作用于工件,完成具体的物理操作^[1]。在通信层面,PLC通过工业以太网(如Profinet)与机器人控制器建立高速、实时的数据通道,同时借助数字量I/O或现场

总线（如Profibus）连接其他外围设备，形成一个层次分明、信息流通高效的控制系统网络。该拓扑结构兼顾了集中控制的统一性与分布式执行的灵活性，为复杂自动化任务的可靠实施提供了坚实基础。

2 关键技术实现

2.1 硬件选型与配置

硬件平台的选择直接决定了系统的性能上限与长期运行的稳定性。在本研究中，PLC选用西门子S7-1200系列中的CPU1215CDC/DC/DC型号，该控制器具备14点数字量输入和10点数字量输出，内置Profinet接口，支持高速通信与紧凑型安装，非常适合中小型自动化产线的应用场景。工业机器人则采用ABB公司的IRB120六轴关节型机器人，其最大负载为3kg，重复定位精度高达 $\pm 0.01\text{mm}$ ，结构紧凑且运动灵活，特别适用于精密装配与轻型搬运任务。与之配套的IRC5Compact控制器不仅支持多种通信协议，还具备强大的运动规划与路径优化能力。为满足外围设备的接入需求，系统额外扩展了SM1223数字量输入/输出模块，用于连接振动盘、气缸、光电开关等元件。网络基础设施方面，选用SCALANCEXB005工业级交换机，其宽温设计与抗电磁干扰能力确保了在恶劣工业环境下的通信可靠性。整套硬件配置在性能、成本与兼容性之间取得了良好平衡，为后续软件集成与系统调试奠定了坚实基础。

2.2 通信协议选择与配置

PLC与工业机器人之间的信息交互是系统集成的核心环节，其通信方式的选择直接影响控制的实时性与数据的完整性。传统的硬接线I/O方式虽然实现简单、响应迅速，但仅能传递有限的布尔信号，难以支持复杂的状态反馈与参数调整。相比之下，基于工业以太网的通信协议（如Profinet、EtherNet/IP或ModbusTCP）能够实现高速、大容量的数据交换，支持双向读写、诊断信息上传及远程配置等功能，更适合现代柔性生产线的需求。鉴于本系统采用西门子PLC与ABB机器人，Profinet协议因其在西门子生态中的原生支持、良好的实时性能以及ABB官方提供的GSD设备描述文件而被选定为通信方案^[2]。具体实施时，首先在TIAPortal工程软件中导入ABB提供的GSD文件，将IRC5控制器识别为标准的ProfinetIO设备；随后在网络视图中完成设备组态，分配IP地址与设备名称；最后定义输入/输出数据区，明确PLC向机器人发送的控制指令（如启动信号、目标工位号）以及机器人向PLC反馈的状态信息（如运行中、动作完成、错误代码）。在机器人侧，通过示教器进入通信设置菜单，配置相同的网络参数，确保双方在同一网络域内正常通信。这种基于标准协议的

软连接方式，不仅简化了布线，还显著提升了系统的可维护性与扩展潜力。

2.3 控制逻辑设计

控制逻辑的设计是实现PLC与机器人协同工作的关键所在。本系统采用结构化编程思想，在TIAPortal中使用梯形图（LAD）与功能块图（FBD）相结合的方式编写PLC程序，确保逻辑清晰、易于调试与后期维护。程序主体划分为多个功能模块：主控逻辑模块负责根据生产节拍依次触发各工作站动作，形成流水线式的作业流程；机器人交互模块专门处理与机器人之间的握手信号，采用“请求-执行-确认”机制确保动作同步，避免因信号竞争导致的误操作；安全联锁模块实时监控急停按钮、安全门开关、光幕等安全设备的状态，一旦检测到异常立即切断相关输出并触发报警；故障诊断模块则记录各类异常事件的时间戳与代码，便于事后分析与快速恢复^[3]。与此同时，机器人端的RAPID程序在RobotStudio中开发，包含多个功能化的例行程序，如取料（PickPart）、放料（PlacePart）和装配（Assemble）等。这些程序通过Profinet接收PLC传来的指令参数，并据此调用相应的动作序列。整个控制流程强调状态驱动与时序配合，例如当PLC检测到上料到位后，会置位启动信号并向机器人发送目标工位信息；机器人执行完毕后主动反馈完成信号，PLC据此进入下一工序。这种闭环交互机制有效保障了系统运行的鲁棒性与可靠性。

3 系统调试与优化

3.1 调试策略

3.1.1 单机调试

首先开展单机调试，即对各独立设备进行功能验证。在PLC侧，通过强制输入信号或模拟现场条件，逐一测试所有数字量与模拟量I/O点的状态响应，同时验证定时器、计数器及内部逻辑块的功能正确性，确保控制核心具备准确的感知与决策能力。对于工业机器人，则在示教器或离线仿真环境中执行预设动作序列，重点检查各关节运动轨迹的平滑性、末端执行器定位的重复精度以及运行速度是否符合工艺要求。此外，还需对各类传感器（如光电开关、接近开关）和执行器（如气缸、电磁阀）进行单独通电测试，确认其在实际工况下的响应灵敏度与动作可靠性，为后续协同控制奠定硬件基础。

3.1.2 站内联调

在单机功能确认无误后，进入站内联调阶段。此阶段聚焦于单一工作站内部PLC与机器人的协同逻辑，例如在上料工位，需验证当振动盘供料到位且传感器触发后，PLC能否正确发出启动指令，机器人是否能及时响应并完成取料

动作；动作结束后，机器人是否准确反馈“完成”信号，PLC又是否据此释放资源并准备下一循环^[4]。同时，必须测试系统的容错机制，如人为延迟零件到位时间，观察PLC是否能在设定时限内识别“超时未完成”状态并触发报警，防止因信号丢失或机构卡滞导致系统死锁。

3.1.3 全线联调

最后进行全线联调，即将所有工位置于自动连续运行模式下，模拟真实生产节拍，全面评估整线运行的稳定性、流畅性与节拍一致性。在此过程中，还需主动注入典型异常场景，如临时切断供料、人为制造卡料或遮挡传感器，以检验系统是否具备故障识别、安全停机及异常恢复能力。通过这一层层递进的调试流程，不仅能够快速定位问题根源，还能显著提升系统的鲁棒性与工程交付质量。

3.2 常见问题与对策

在实际调试过程中，不可避免地会遇到各类技术问题。通信中断是最常见的故障之一，通常由网线接触不良、交换机过载或IP地址冲突引起，解决方法包括更换工业级屏蔽网线、检查网络拓扑负载，并启用Profinet的看门狗功能以实现自动重连。机器人动作延迟则可能源于RAPID程序中存在冗余等待或PLC扫描周期过长，对此可通过Robot Studio优化路径轨迹、减少不必要的MoveJ指令，并在PLC中提高机器人交互逻辑的优先级。信号抖动问题多由传感器受电磁干扰或机械振动导致，可在软件层面增加延时滤波（如TON定时器），或在硬件层面加装RC滤波电路予以抑制。若系统节拍无法达到设计要求，则需综合分析瓶颈工位，通过并行处理、路径优化或逻辑重构等方式进行整体提速。这些问题的识别与解决过程，体

现了工程实践中理论与经验的紧密结合。

4 结语

本文系统研究了基于PLC与工业机器人的自动化生产线集成设计与调试方法。通过构建模块化系统架构、采用Profinet高速通信、设计严谨的控制逻辑，并介绍了分阶段调试策略，及调试过程中常见问题与对策。PLC作为主控制器与工业机器人协同工作具有可行性与优越性，为类似项目提供了可借鉴的技术路径。未来研究可从以下方向拓展：一是引入数字孪生技术，在虚拟环境中完成全流程仿真与优化，大幅缩短现场调试周期；二是融合人工智能算法，利用机器学习对生产数据进行深度分析，实现预测性维护与工艺参数的自适应优化；三是推动OPCUA统一架构的应用，打通PLC、机器人、MES乃至ERP系统之间的语义壁垒，实现全厂级的数据贯通与智能决策。随着工业互联网与边缘计算技术的持续演进，PLC与工业机器人的集成将迈向更高层次的智能化、开放化与柔性化，为制造业高质量发展注入源源不断的创新动力。

参考文献

- [1]崔宇.工业机器人在机械加工自动化生产线中的路径优化研究[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.鞍山市燃气集团有限公司,2025:953-957.
- [2]张进年.工业机器人在自动化生产线中的应用案例分析[J].石河子科技,2025,(03):43-44.
- [3]郭焱.工业4.0背景下AI与机器人协同的柔性生产线优化[J].百科知识,2025,(30):14-15.
- [4]朱新华.多工业机器人工作站集成的柔性生产线应用研究[J].内燃机与配件,2025,(15):54-56.