

基于 PLC 与 DCS 融合的化工生产过程自动化控制系统设计

刘 航

山西阳光卓越工程有限公司 山西 太原 030032

摘要：随着现代化工产业向大型化、连续化、智能化方向快速发展，对生产过程自动化控制系统的可靠性、灵活性和集成度提出了更高要求。传统的单一可编程逻辑控制器（PLC）或分布式控制系统（DCS）在应对复杂多变的化工生产场景时，逐渐显现出功能局限性。本文针对这一问题，提出一种基于PLC与DCS深度融合的化工生产过程自动化控制系统设计方案。该方案充分发挥PLC在逻辑控制、高速响应和设备级控制方面的优势，以及DCS在过程监控、数据管理、高级算法和全局协调方面的特长，通过标准化通信协议（如OPCUA、ModbusTCP）实现两者高效协同。文章详细阐述了系统总体架构、硬件选型、软件平台集成、网络拓扑设计、安全策略及工程实施要点。研究结果表明，该融合系统显著提升了控制精度、运行稳定性与运维效率，为化工企业数字化转型提供了可行的技术路径。

关键词：PLC；DCS；融合控制；化工自动化；OPCUA；过程控制；智能制造

引言

化工生产具有高温、高压、易燃、易爆、有毒有害等典型高危特征，其工艺流程复杂、变量耦合性强、安全要求极高。自动化控制系统作为保障化工装置安全、稳定、高效运行的核心基础设施，其技术演进始终与工业发展同步。早期，继电器-接触器控制系统因可靠性差、维护困难已被淘汰；随后，PLC凭借其高可靠性、强抗干扰能力和灵活的编程特性，在离散制造和简单连续过程中广泛应用；而DCS则因其分层分布式架构、强大的过程数据处理能力和人机交互界面，在大型连续流程工业（如石化、化肥、制药）中占据主导地位。

然而，随着“工业4.0”和“中国制造2025”战略的深入推进，化工企业对自动化系统提出了新的挑战：（1）控制粒度精细化：需要同时处理高速离散事件（如阀门开关、泵启停）和连续过程变量（如温度、压力、流量）。

（2）系统开放性与互操作性：需打破信息孤岛，实现与MES、ERP等上层系统的无缝集成^[1]。（3）安全性与可靠性冗余：对关键回路要求“故障安全”设计，系统需具备高可用性。（4）智能化升级需求：需支持先进过程控制（APC）、预测性维护等智能算法部署。单一PLC系统在大规模模拟量处理、历史数据存储和全局优化方面能力不足；而传统DCS在处理高速逻辑控制、与第三方设备（如机器人、专用仪表）集成时灵活性受限。因此，探索PLC与DCS的有机融合，构建优势互补的混合控制系统，成为当前化工自动化领域的研究热点与工程实践方向。本文旨在设计并实现一套基于PLC与DCS深度融合的化工生产过程自动化控制系统，通过理论分析与工程案例相结合，验证其在提升系统综合性能方面的有效性。

1 PLC与DCS技术特性对比与融合必要性分析

1.1 技术特性对比

表1：PLC与DCS技术特性对比

特性维度	PLC (ProgrammableLogicController)	DCS (DistributedControlSystem)
核心定位	设备级/单元级逻辑控制与顺序控制	工厂级/全流程连续过程监控与优化控制
控制对象	离散量为主，兼顾简单模拟量	连续过程变量（温度、压力、流量、液位等）
响应速度	极快（毫秒级），适合高速逻辑与运动控制	较快（百毫秒级），满足一般过程控制需求
I/O扩展性	模块化设计，本地I/O扩展灵活	分布式I/O，远程站部署方便，适合大范围覆盖
编程语言	IEC61131-3标准（LD,FBD,SFC,ST,IL）	功能块图（FBD）为主，部分支持ST
人机界面(HMI)	专用HMI	集成强大图形化操作站（OperatorStation）
数据管理	实时数据为主，历史存储能力弱	内置实时/历史数据库，支持趋势、报表、审计追踪
网络架构	工业以太网（Profinet,EtherNet/IP）或现场总线	专用冗余高速控制网+操作网
冗余机制	CPU、电源、通信模块可冗余	全系统冗余（控制器、网络、电源、操作站）

特性维度	PLC (ProgrammableLogicController)	DCS (DistributedControlSystem)
成本结构	初始投资较低, 适合中小规模	初始投资高, 但全生命周期成本(TCO)在大型项目有优势

1.2 融合的必要性及优势

单纯依赖任一系统均难以满足现代化工生产的综合需求。融合PLC与DCS可带来以下核心优势：(1) 功能互补, 各司其职: 将高速、复杂的设备级逻辑控制(如连锁保护、顺序启停)交由PLC处理, 确保快速响应; 将全局过程监控、回路调节、批次管理、能效优化等任务交由DCS执行, 发挥其过程控制专长。(2) 提升系统可靠性与安全性: 关键安全连锁可独立部署在经过SIL认证的PLC(或安全PLC)中, 与DCS过程控制解耦, 形成“纵深防御”安全架构, 符合IEC61511功能安全标准^[2]。(3) 增强系统灵活性与可扩展性: 面对工艺改造或新增单元, 可灵活选用最适合的控制器(PLC或DCS控制器), 并通过标准协议接入现有系统, 降低集成难度与成本。(4) 优化投资与运维: 避免“大马拉小车”或“小马拉大车”的资源浪费。利用现有PLC资产(如老旧装置改造), 通过融合接入新DCS平台, 保护既有投资。(5) 促进信息纵向贯通: 融合系统作为统一数据源, 更易于向上层MES/ERP提供结构化生产数据, 支撑数字化车间建设。

2 融合控制系统总体架构设计

本文提出的融合系统采用“三层两网”架构:

2.1 现场设备层

包含各类传感器(温度、压力、流量、液位、成分分析仪等)、执行器(调节阀、开关阀、变频器、电机等)。通过标准信号(4-20mA, HART, ProfibusPA, FoundationFieldbus)或工业以太网(如ProfinetIO, EtherCAT)接入下层控制器。

2.2 控制执行层(融合核心层)

(1) DCS控制器节点: 负责连续过程回路控制(PID)、复杂计算、批次配方管理、与操作员站通信。通常部署在中央控制室或靠近主工艺区域。(2) PLC控制器节点: 负责高速逻辑控制、设备连锁保护、顺序控制(SFC)、与专用设备(如包装机、码垛机器人)通信。可分布式部署在各个工艺单元现场。(3) 关键设计: DCS与PLC之间通过高速工业以太网互联, 采用OPCUA(UnifiedArchitecture)作为核心通信协议^[3]。OPCUA具有平台无关、面向对象、内建安全(加密、签名、认证)、信息模型丰富等优势, 是实现异构系统无缝集成的理想选择。对于不支持OPCUA的老旧PLC, 可通过OPCClassic到OPCUA网关或ModbusTCP等协议桥接。

2.3 监控与管理层

(1) DCS操作员站(OS): 提供统一的人机界面(HMI), 操作员可在此监控所有DCS和PLC管辖的工艺参数、设备状态、报警信息, 并进行操作。画面开发工具应能直接引用PLC数据点。(2) 工程师站(ES): 用于系统组态、程序下载、诊断维护。(3) 历史数据库/实时数据库: 集中存储来自DCS和PLC的所有过程数据、事件、报警, 支持历史趋势查询、报表生成。(4) 与上层系统接口: 通过OPCUAServer或专用接口(如PISystem, WonderwareHistorian)将生产数据推送至MES、能源管理系统(EMS)或企业云平台。

3 关键技术实现

3.1 硬件平台选型与配置

硬件选型是融合系统成功实施的基础。对于DCS平台, 应优先选择主流厂商的最新一代产品, 如霍尼韦尔Experion、艾默生DeltaV或横河CENTUMVP, 这些系统普遍支持OPCUA、具备完善的冗余机制和网络安全特性, 能够满足大型化工装置对可靠性的严苛要求。PLC平台的选择则需根据具体控制任务而定: 对于一般逻辑控制, 西门子S7-1500、罗克韦尔ControlLogix等高性能PLC足以胜任; 而对于涉及人身或环境安全的关键连锁, 则必须采用经过SIL2或SIL3认证的安全PLC, 如西门子S7-1500F系列。在网络设备方面, 应选用支持VLAN、QoS和环网冗余协议(如MRP)的工业级交换机, 确保控制网络的实时性与高可用性。尤为重要的是, DCS控制网与PLC接入网应通过物理隔离或严格的VLAN划分实现逻辑分离, 防止广播风暴或异常流量相互干扰。

3.2 软件集成与数据交互

要实现DCS与PLC在控制执行层的深度融合, 关键在于推动两者在控制器层级通过统一协议实现毫秒级双向数据交互。传统方案如Modbus-RTU虽可实现点对点通信, 但受限于带宽、实时性与安全性, 难以支撑大规模融合控制需求。为此, 应使DCS不仅作为OPCUA客户端, 也具备OPCUA服务器功能, 与PLC在控制器层面以对等身份直接通信。双方可直接读写对方内部变量(如I/O区、过程数据块), 无需依赖上位HMI或中间件, 显著降低延迟、提升控制一致性。支撑该架构的核心是建立统一的工程变量数据库。在组态阶段, DCS与PLC工具协同定义变量命名、类型与地址映射; 在编程阶段, 工程师可在各自环境中直接调用统一数据库中的变量, 如同本地变

量一样参与逻辑编写与编译,真正实现控制逻辑的融合。对于关键回路,可结合OPCUAPub/Sub模型与时间敏感网络(TSN)保障确定性传输;对设定值下发等双向操作,需辅以轻量级状态机或握手协议,避免通信异常引发控制冲突。最终,HMI基于统一变量库构建,实现“全域可视、统一操作”,消除系统割裂带来的信息孤岛与操作盲区。

3.3 网络安全设计

融合系统扩大了网络攻击面,必须将网络安全贯穿于设计、实施与运维全过程。首先,在控制网与企业办公网之间部署工业防火墙,仅开放OPCUA等必要端口,并实施深度包检测。其次,通过VLAN技术对网络进行逻辑分段,将DCS控制网、PLC接入网、操作网和设备网隔离,限制潜在威胁的横向移动。在设备层面,应启用控制器的访问控制列表(ACL),实施最小权限原则,并定期更新固件。OPCUA通信必须强制启用加密与双向证书认证,防止数据窃听与篡改。最后,部署工业入侵检测系统(IDS),对关键操作行为进行审计与告警,形成覆盖边界、网络、主机和应用的纵深防御体系。

3.4 功能安全考量

在化工领域,功能安全是不可逾越的红线。融合系统设计必须严格区分基本过程控制系统(BPCS)与安全仪表系统(SIS)。最高风险等级的安全功能(如反应釜超压紧急泄放)应由独立的SIS实现,该系统通常基于安全PLC,与BPCS物理隔离,仅通过经认证的安全栅或硬接线交互。对于BPCS内部的低风险联锁(如泵干转保护、搅拌过载停机),可在普通PLC中实现,但需确保逻辑清晰、测试充分,并纳入定期的功能安全验证计划。通过这种分层防护策略,既能满足法规要求,又能保障生产连续性。

4 工程实施要点与挑战

融合系统的成功落地依赖于周密的工程规划与执行。首先,必须在项目初期明确DCS与PLC的功能边界,制定详尽的I/O清单与数据交互点表,避免后期职责不清。其

次,应强制推行通信协议标准化,要求所有新购设备至少支持ModbusTCP,优选支持OPCUA,为未来扩展奠定基础。网络安全必须同步设计,而非事后补救,从网络分段到设备加固均需纳入整体方案。项目团队需具备跨领域的技术能力,或通过培训弥合DCS与PLC工程师之间的知识鸿沟。在测试阶段,应搭建完整的FAT环境,重点验证交互逻辑、通信容错与安全策略。最后,规范的文档管理不可或缺,包括网络拓扑、IP地址分配、OPCUA信息模型及安全配置手册,这些是系统长期稳定运行的保障。

结语

本文设计并论证了一种基于PLC与DCS深度融合的化工生产过程自动化控制系统^[4]。该方案通过合理的功能划分、以OPCUA为核心的标准化通信、以及多层次的安全防护,有效整合了PLC的灵活性、高速性与DCS的全局性、稳健性优势。未来,随着TSN(时间敏感网络)、5G工业专网、边缘计算等新技术的发展,PLC与DCS的融合将向更深层次演进。控制功能可能进一步解耦并以微服务形式部署在边缘节点,硬件形态趋于模糊;AI算法将深度集成于融合系统,利用其高质量数据实现软测量、故障预测与自主优化;该系统亦将成为工厂数字孪生体的核心数据驱动引擎。因此,持续探索和优化PLC与DCS的融合模式,不仅是解决当前工程痛点的有效手段,更是迈向未来化工智能制造的关键一步。

参考文献

- [1]梁敏涛.PLC自动化控制系统在化工行业生产过程中的应用[J].广西物理,2023,44(01):68-70.
- [2]孙海鹏,蒲永太,贾增慧.DCS与PLC在化工领域的应用研究[J].化工管理,2018,(11):147-148.
- [3]申圣强,黄国新,于英杰.化工安全生产中DCS自动化控制的应用[J].石油化工安全环保技术,2024,40(02):4-6+35+75.
- [4]孙慧博.化工生产中DCS控制系统的应用研究[J].当代化工研究,2022,(07):87-89.