 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i8.7019

Intelligent upgrading path and development trend of DCS control system

Fengxian Yi

Hangzhou Hollysys Automation Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

Abstract

In the face of a new wave of digitalization, China's DCS control systems have transitioned from traditional closed-loop control to a deeper integration of informatization, digitization, and intelligence, gradually demonstrating the significant application advantages brought by this transformation. Based on China's actual industrial automation conditions, this paper first explains the concept and composition of DCS systems, then discusses the intelligent upgrade path for DCS control systems and forecasts future development trends, aiming to enhance the system's contribution to China's economic and social development.

Keywords

DCS control system; intelligent upgrade; path; development trend

DCS 控制系统智能化升级路径与发展趋势

易凤仙

杭州和利时自动化有限公司，中国 · 浙江 杭州 310018

摘　要

面对新一轮数字化浪潮，我国DCS控制系统已由传统的闭环控制往深度融合信息化、数字化、智能化转变，并逐渐展现出了这种转变所带来的显著应用优势。为此，本文立足于我国工业自动化实际情况出发，首先阐述DCS系统概念和构成，随后论述DCS控制系统智能化升级路径及其未来的一些发展趋势预测，以期促使该系统为我国经济社会发展作出更大的贡献。

关键词

DCS控制系统；智能化升级；路径；发展趋势

1 引言

随着工业自动化水平不断提高，DCS 控制系统作为流程工业核心控制单元，正面临智能化转型的迫切需求。有鉴于此，下文结合研究及实践就 DCS 控制系统智能化升级路径与未来发展趋势提出一些简单认识，以供参考。

2 DCS 控制系统概述

DCS 控制系统又称分布式控制系统，常用于工业生产过程。该系统综合数据通信技术、自动化控制技术。DCS 控制系统由过程控制单元、操作站、工程师站、数据通信系统、传感器和执行器、通信网络等组成。比如过程控制单元是 DCS 控制系统的核心，直接与生产现场连接，负责采集数据、执行控制命令。传感器和执行器是 DCS 控制系统的重要设备，主要用于监测、感应工业生产中的温度、压力、流量等参数，执行器将根据数据情况，控制阀门、泵、电机等进行执行操作。

与可编程逻辑控制器（PLC）相比，DCS 系统在处理复杂控制逻辑、大规模信号采集与稳定性方面具有显著优势。近年来，国内 DCS 市场逐步从国外厂商主导格局中转变，涌现出如和利时、中控、和远智能等具有自主核心技术的国产品牌，具备较强的系统集成与技术服务能力 [1]。当前我国 DCS 系统在底层控制算法、故障诊断、远程维护及冗余架构等方面已初具自主能力，但在系统开放性、智能决策、自主迭代演化等方面尚处于发展初期，迫切需要通过智能化升级实现 DCS 系统功能向多维扩展、架构向异构融合、控制向智能驱动的深度转型。

3 DCS 控制系统智能化升级路径

3.1 控制架构向异构融合系统转型

DCS 控制系统智能化升级进程中，控制架构由传统封闭式结构向异构融合型系统演进已成为关键路径之一。首先，优化现有控制器体系结构，使用多核异构计算资源模块化的控制器，包含 ARM 处理器和 DSP 处理单元，将过程控制逻辑分派到边缘控制器进行控制任务调度，而数据预处

【作者简介】易凤仙（1982–），男，中国湖南醴陵人，本科，工程师，从事机电工程自动化，DCS控制系统研究。

理逻辑分派到云端控制器实现数据预处理任务的调度，同时支持可插拔式的 I/O 接口和板载实时总线系统，以支持系统对柔性生产的快速响应；第二步，以 IEC 61499 为准则重构自动化的软件体系架构，通过基于 DFB 的体系化架构建模，服务化封装自动化逻辑，并支持自动化逻辑的动态部署及运行时管理，而开发环境要具有图形化逻辑建模、版本控制及热插拔功能，以便于提高控制逻辑的灵活性及可维护性。第三步，在系统互联方面，应用 OPC UA 的信息建模接口、MQTT 轻量级发布 / 订阅模式，以支持 DCS 控制系统与上层 MES/ERP 系统之间的语义互操作及数据驱动任务协同工作，同时还须建立统一的命名空间以及信息对象描述库，从而保证信息集成时语义一致性及信息解析的有效性。第四，在工业控制网架构中引入 TSN 时间敏感网络技术，并利用 IEEE 802.1AS、802.1Qbv 协议标准实现基于时间槽的报文调度和精确定时同步，以提高过程控制数据的传输确定性和实时性。

3.2 边缘计算与本地智能协同部署

在当前中国流程工业 DCS 控制系统智能化升级背景下，边缘计算与本地智能协同部署已成为缓解主站计算压力、提升现场决策能力的核心路径。首先，在现场控制层引入工业边缘计算网关设备，具备多协议接入能力（如 ModbusRTU/TCP、PROFINET、OPC UA 等）与实时数据采集能力，并集成边缘缓存机制与基于规则的预处理引擎，实现对高频传感器数据的滤波、去噪与时序补全，在本地完成对过程变量的有效结构化与标准化处理；其次，在边缘服务器上部署具备嵌入式 GPU 计算能力的平台（如 NVIDIAJetson 系列或国产昇腾系列），将卷积神经网络（CNN）、长短期记忆网络（LSTM）及改进型卡尔曼滤波算法本地部署，实现对关键设备（如压缩机、换热器、泵）运行状态的实时识别与故障趋势预测，同时与历史数据联动形成闭环异常检测机制；第三，采用轻量化容器虚拟化技术（如 Docker、K3s）对边缘智能模块进行微服务封装，结合 Kubernetes 或国产 EdgeXFoundry 实现边缘节点间控制策略的分布式部署与热更新，并通过运行时环境监控，根据工况变化动态切换控制逻辑、推理模型或数据处理模块，确保控制系统具备高度柔性与自适应能力；第四，构建边缘 - 云协同数据同步框架，采用双向消息队列（如 Kafka、MQTT）保障参数、模型与控制规则在边缘与上层控制系统之间的实时同步，配合版本控制机制实现模型迭代与回滚管理，并通过加密通道与设备证书体系实现通信安全性与身份可信验证，进一步构建具备模型一致性与安全可控性的分层协同控制架构 [2]。

3.3 构建全过程工业数据治理体系

构建全过程工业数据治理体系是 DCS 控制系统另一个重要智能化升级内容，需围绕数据采集完整性、模型映射精度、数据质量和标准体系建设 4 个方面开展，遵照复杂工艺过程对于数据准确性、一致性的要求来确定相应的技术路线。首先，需要统一 DCS 变量的命名规范，以形成涵盖生产单元、设备对象和工艺参数等的全量变量标识库，通过分层分级的数据元模型定义方式，并借助于工业现场控制对象 P&ID 图以及控制策略，实现物理设备、信号通道和逻辑变量间的唯一匹配关系，提高模型语义表达的精准度及复用度。其次，将数据质量监控模块嵌入到 DCS 控制层中，以融入包括数据采集频率、信号噪声比以及波动特征等指标，从而建立起多维数据质量评估体系；借助于规则引擎实时判断数据漂移、突变及丢失现象，并采用插值、平滑等方法实现异常值的识别与修复；同时建立基于时间窗与滑动聚合的动态阈值机制，适应不同工况下的质量判别标准。第三，依托本体建模技术与工业知识图谱构建多源异构数据的语义融合机制，采用基于 RDF 的三元组存储方式管理 DCS 过程变量、设备拓扑关系与报警信息间的语义链接，并结合图神经网络（GNN）算法实现对设备状态演化过程的深层推理与数据隐含关联的自动挖掘 [3]。最后，构建企业级工业数据中台，采用 ETL 流程自动化框架完成 DCS 数据从采集、清洗、结构化到落地存储的全过程处理；在数据服务层集成 ApacheFlink 或 SparkStreaming 等流处理引擎，实现对跨区域、多系统 DCS 数据的准实时处理与共享访问；同时构建数据权限分级与访问审计机制，保障工业控制数据安全与可控流通。

4 DCS 控制系统发展趋势探析

4.1 深度融合 IT 与 OT 的系统一体化演进

DCS 控制系统正处于由传统分布式架构向信息技术（IT）与操作技术（OT）深度融合的一体化系统转型阶段，以应对流程控制、业务调度与管理协同间长期存在的断层问题。在系统架构层面，应构建支持高带宽低时延的融合型网络基础设施，采用统一的工业以太网（如 TSN 技术）作为底层通信骨干，将控制总线、I/O 网络与企业 IT 网络进行物理隔离下的逻辑集成，以实现现场设备、边缘控制器与上位信息系统之间的实时双向通讯。在系统功能模块设计方面，需引入基于 Docker 容器与 Kubernetes 编排机制的微服务架构，将过程控制、数据采集、历史记录与报警管理等功能模块进行粒度细化并松耦合部署，支持各模块的按需调度、热插拔与弹性扩容，从而实现控制逻辑与 IT 服务的动态编排与快速迭代。数据建模与语义互操作层面上，以 AutomationML、OPC UA Companions 等标准作为统一信息模型体系的建设标准，建立起控制变量、过程标签到管理指标之间的语义映射关系，并支持工艺参数从 ERP、MES 以及 DCS 间的双向语义转换与事件驱动式传递 [4]。对平台运维层面上，建议通过引入 DevOps 方法的 CI/CD（持续集成 / 持续部署）、版本管理机制以及利用 PLC 程序和控制逻辑的虚拟仿真测试环境，搭建一套可实现多种控制并存的控制策略管理系统，以保证控制策略在不中断现场运行的条件下

完成验证、部署与回滚。

4.2 向自主可控国产平台全面替代演进

在国际高端自动化技术环境日趋复杂背景下，DCS 系统自主可控替代路径呈现加速态势，未来发展将沿着硬件平台、基础软件、控制算法及系统接口规范等核心维度实现深层次国产化演进。首先，在底层硬件层面，应由具备嵌入式系统研发能力的本土控制器制造企业牵头，基于飞腾、龙芯等国产高可靠性处理器，配套部署国产高实时性操作系统，并通过实时内核裁剪与中断响应优化设计，构建具备毫秒级任务调度精度的嵌入式控制平台，实现控制器在温控、电磁兼容性等工业现场关键指标下的稳定运行。其次，在工程组态软件构建方面，应开发兼容 IEC61131-3 标准、具备多语言支持（如 LD、FBD、SFC、ST）的自主组态平台，强化对复杂过程逻辑图形化建模、分布式 IO 管理及高频数据采集任务调度功能的支持，并引入可扩展控制块库以支撑多行业多工况下的控制策略配置需求。第三，在控制算法自主实现路径中，应构建基于国产数学库（如天河并行矩阵库）与具备高保真度物理建模能力的 Modelica 国产平台（如 ModSim）集成的控制算法仿真验证框架，支持模型与算法双向闭环验证、控制律时域 / 频域性能分析以及嵌入式部署优化流程，确保算法在复杂工业过程控制精度与稳定性要求下的适配性。最后，在系统接口标准体系构建方面，应基于本土工业通信场景，制定覆盖控制器间同步通信、跨厂商系统互操作性与边缘计算协同控制需求的标准协议栈（如面向工业以太网的定制 OPC UA 映射层），逐步实现自主平台间的统一通讯与控制语义一致性。

4.3 控制系统安全性防护体系纵深构建

伴随着我国工业控制系统向智能化、自主化快速发展，DCS 控制系统的安全防护体系也需要朝着结构化重组和纵深加固的方向发展，以应对新的网络威胁场景以及更复杂的攻击。结合 DCS 控制系统的整个生命周期，一方面需要在硬件层面上引入基于国家密码算法的 TPM2.0 平台，在其基础上使用基于加密散列的可信启动，对控制过程中的控制器固件加载、内核初始化和接口调用进行完整性校验及安全引导，以保证设备运行环境源头可惜；另一方面在控制网络通信架构上，通过基于工业协议特征构造细粒度访问控制规则，利用流量指纹识别技术和 DPI 深度解析技术，通过对 Modbus、OPC UA、Profinet 等工业协议数据流的语义级解析和合法性判定，阻隔非法的命令指令及跨域访问行为，同时在网络交换节点处部署具有实时响应处置能力的工业防火墙。此外，针对控制逻辑执行层搭建白名单行为建模入侵检测系统（ICS-IDS）开展在线分析，利用自学习建模的方法确定正常工作状态下控制逻辑运行模式，利用 TAX 分析算法进行状态转移异常、控制指令频率异常、控制路径偏离行为进行在线监测，并结合时序分析算法提升对低频慢性攻击的识别准确性 [5]。最后，系统平台层上搭建包括数字签名验证及哈希校验在内的版本安全认证框架，实现对每一个版本的控制逻辑发布前签名与执行前验签操作，并增加控制逻辑审计、回溯等模块，依据事件链来记录每一个策略被加载和修改的行为，进一步强化 DCS 控制系统策略追查、行为取证的能力，从而提升系统安全性。

5 结语

综上所述，DCS 控制系统是流程工业智能制造体系的关键组成部分，其智能化升级和发展路线不仅是提高我国工业自动化水平的关键一环，同时也是实施制造强国战略的技术要素之一。对此，上文提出针对控制架构、边缘协同以及数据治理等方面的升级路径，并从系统融合、国产替代和安全纵深等方面展望 DCS 其未来发展路径。面向未来，中国 DCS 系统的智能化演进将持续以工业现场需求为导向，以关键核心技术突破为支撑，形成更加自主、高效、开放与智能的控制平台体系，为流程制造业数字化转型奠定坚实基础。

参考文献

[1] 崔仁泰 王莉 孙迎春.分布式控制系统(DCS)在化工自动化中的优化与升级策略[J].今日自动化, 2024(3):121-122.

[2] 杨希民,王泽彪,李红军,等.DCS控制系统升级改造实践[J].中国水泥, 2023(1):87-89.

[3] 蒿云鹏.工业自动化运行中DCS控制系统研究[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术, 2023.

[4] 王琦.DCS自控系统运行管理现状及优化措施研究[J].中国科技期刊数据库 工业A, 2023(011):000.

[5] 章海峰,高瞳.基于深度学习的工业自动化控制DCS系统维护方法[J].自动化应用, 2025(6).