

化工企业 DCS 系统与现场仪表的集成优化策略研究

董振华

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041606

摘要: 在现代化工生产中, 分布式控制系统 (Distributed Control System, DCS) 作为自动化控制的核心, 其性能直接关系到生产的效率、安全与产品质量。现场仪表作为 DCS 系统的“感官”, 负责采集过程变量并执行控制指令, 是连接物理世界与数字世界的桥梁。然而, 随着化工装置日益复杂化和智能化, DCS 系统与现场仪表之间的集成问题愈发凸显, 如数据不一致、通信延迟、信号干扰及维护困难等, 严重制约了系统整体效能的发挥。本文旨在系统性地探讨化工企业 DCS 系统与现场仪表的集成优化策略。文章首先阐述了 DCS 系统与现场仪表的基本架构及其集成的重要性, 继而深入剖析了当前集成过程中面临的主要挑战, 包括通信协议异构、网络架构瓶颈、信号完整性问题以及数据一致性难题。在此基础上, 本文从通信协议标准化、网络架构冗余化、硬件安装与接地规范化、数据管理与诊断智能化四个维度, 提出了一套全面的集成优化策略。最后, 文章展望了在工业 4.0 背景下, DCS 与现场仪表集成向更高层次智能化、开放化发展的未来趋势, 为化工企业的自动化升级与数字化转型提供理论参考与实践指导。

关键词: 化工企业; DCS 系统; 现场仪表; 系统集成; 优化策略

引言

化工生产具有高温、高压、易燃易爆、有毒有害等高风险特征, 高度自动化的控制系统至关重要。自 20 世纪 70 年代起, 分布式控制系统 (DCS) 凭借“分散控制、集中管理”优势, 成为流程工业主流。DCS 通过现场控制站降低单点故障风险, 并依托高速网络实现全局监控与优化。在此架构中, 现场仪表作为“感官”与“执行终端”, 实时采集温度、压力、流量等关键参数并驱动执行机构, 其与 DCS 的可靠集成是高性能控制的基础。然而, 当前集成仍面临多重挑战: 仪表品牌与通信协议 (如 HART、FF、Profibus PA) 多样, 导致系统复杂、成本高; 大型化装置对 DCS 网络带宽、实时性提出更高要求; 工业电磁干扰威胁信号完整性; 缺乏统一数据管理与校准机制, 易引发 DCS 与现场读数不一致, 误导操作。为此, 本文从系统工程视角出发, 构建涵盖通信、网络、硬件、软件的综合集成优化策略, 结合技术发展趋势, 提出可落地、可扩展的解决方案, 以充分释放 DCS 与仪表协同效能, 夯实化工自动化基础。

1 DCS 系统与现场仪表集成概述

1.1 DCS 系统的基本架构与功能

DCS 是一种专为大型、复杂的连续过程控制而设计的自动化系统。其基本架构通常分为三个层级。现场控制层由分布在各工艺区域的现场控制站 (FCS) 或过程控制单元 (PCU) 组成, 每个控制站内含冗余的中央处理器 (CPU)、电源模块以及大量的输入/输出 (I/O) 卡件, 这些 I/O 卡件直接与现场仪表相连, 负责采集模拟量 (AI)、

数字量 (DI) 信号, 并输出控制信号 (AO、DO), 该层的核心任务是执行本地的 PID 控制、逻辑联锁等基础控制算法, 确保控制回路的快速响应。监控操作层则由操作员站 (OPS) 和工程师站 (ENS) 构成, 其中操作员站为人机交互界面 (HMI), 通过图形化的方式向操作人员展示全厂的工艺流程、实时数据、报警信息和历史趋势, 并允许其进行远程操作, 而工程师站则用于系统的组态、编程、调试和维护^[1]。信息管理层通过与制造执行系统 (MES)、企业资源计划 (ERP) 等上层信息系统的接口, 实现生产数据的上传和管理指令的下达, 从而打通 OT (运营技术) 与 IT (信息技术) 的壁垒。

1.2 现场仪表的类型与作用

现场仪表主要分为检测仪表和执行仪表两大类。检测仪表包括温度变送器、压力变送器、流量计、液位计、在线分析仪等, 现代智能仪表不仅能够提供高精度的 4-20mA 模拟信号, 还普遍支持 HART、FF、Profibus 等数字通信协议, 可以传输设备状态、诊断信息、多变量数据等丰富内容。执行仪表主要是各类调节阀、开关阀、电机等, 它们接收 DCS 发出的控制信号, 改变阀门开度或设备状态, 从而调节工艺过程。

1.3 集成的意义与目标

DCS 与现场仪表的集成, 其根本目的在于构建一个信息流畅通、控制指令精准、状态反馈及时的闭环系统。成功的集成应达成高可靠性、高实时性、高兼容性、高可维护性和高安全性等多重目标。具体而言, 高可靠性要求确保在任何工况下, 信号的采集与传输都准确无误,

控制指令能被正确执行；高实时性需要满足工艺过程对控制周期和响应时间的严格要求；高兼容性意味着系统能够灵活接入不同厂商、不同协议的智能仪表，保护用户既有投资；高可维护性体现在提供便捷的设备诊断、参数配置和故障定位功能，以降低运维成本；而高安全性则要求系统符合功能安全标准（如IEC 61511），在危险工况下能可靠地触发安全联锁。

2 DCS与现场仪表集成面临的主要挑战

2.1 通信协议的多样性与异构性

目前工业现场并存着多种通信协议，形成了事实上的“协议孤岛”。传统的4-20mA+HART协议因其与现有模拟系统的兼容性，仍是市场主流，但其数字通信部分带宽低、速率慢。而基金会现场总线（FF）和Profibus PA等全数字化协议虽然功能强大，支持设备互操作和高级诊断，但其组网复杂、成本较高，且不同协议之间无法直接互通^[2]。这种异构性迫使DCS系统必须配备多种类型的I/O卡件和通信网关，极大地增加了系统复杂度和工程实施难度，使得项目集成周期延长，调试工作变得异常繁琐。

2.2 网络架构的瓶颈与安全风险

DCS的系统网络是其生命线。随着智能仪表数量的激增和高级应用（如先进过程控制APC）的部署，网络承载的数据量呈指数级增长，使得传统的基于同轴电缆或早期以太网的DCS网络在带宽、确定性和扩展性方面已显不足。同时，为了实现与MES/ERP等系统的数据共享，DCS网络越来越多地需要与企业信息网互联，这极大地增加了遭受外部网络攻击的风险。如何在保证毫秒级控制所需的高实时性的同时，构建一个既能抵御网络威胁又具备良好扩展能力的、安全、可靠网络架构，已成为当前自动化系统设计中的一个核心挑战。

2.3 信号完整性与电磁兼容性问题

从现场仪表到DCS I/O卡件的信号传输路径往往长达数百米，并且需要穿越充满强电、强磁干扰源的复杂工业环境。在此过程中，微弱的仪表信号极易受到电磁干扰（EMI）、射频干扰（RFI）以及地电位差的影响，导致信号失真、衰减甚至完全丢失。不良的接地系统是造成此类问题的罪魁祸首之一，如果工作接地、保护接地和屏蔽接地处理不当，会形成地环路，引入共模干扰，这不仅会严重影响测量精度，甚至可能引发控制系统的误动作或不稳定，对安全生产构成直接威胁。

2.4 数据一致性与校准管理难题

在实际运行中，“DCS显示值与现场表头显示值不一致”是一个常见且棘手的问题。其根源在于数据链路上

任何一个环节的偏差都会被累积放大，这些环节包括传感器本身的长期漂移、变送器固有的非线性特性、长距离信号传输过程中的损耗、I/O卡件自身的精度误差以及DCS内部标定系数设置错误等。由于缺乏一套贯穿设备全生命周期的、标准化的校准管理和数据验证机制，当出现不一致时，问题排查往往需要耗费大量人力物力逐一检查各个环节，这不仅影响了操作人员对自动化系统的信任度，也可能因误判而导致不必要的生产波动或停车。

3 DCS与现场仪表集成的优化策略

3.1 推进通信协议的标准化与融合

为应对协议异构的挑战，应采取分步走的策略。对于存量装置，可充分利用HART协议的普及性，通过HART多路转换器（Multiplexer）将多个HART设备的数字信号汇聚后，经由OPC服务器接入DCS，从而在保留4-20mA主信号用于实时控制的同时，获取宝贵的设备诊断信息用于预测性维护。对于新建或重大改造项目，则应优先考虑采用基于以太网的开放式工业通信协议，如PROFINET IO、EtherNet/IP或OPC UA over TSN（时间敏感网络），因为这些协议不仅带宽高、实时性好，而且天然具备IT友好性，能更好地支持未来的智能化应用^[3]。与此同时，积极推动FDI（Field Device Integration）技术的应用也至关重要，通过利用统一的设备描述文件（DD/EDD）来实现不同厂商设备的即插即用和在DCS画面上的统一操作体验，可以从根本上简化系统集成和后期维护工作。

3.2 构建高可靠、高安全的网络架构

DCS网络应采用分层、分区的设计思想以确保其健壮性。核心的控制网络必须与办公网络进行物理隔离，并在其边界部署工业防火墙进行严格的逻辑隔离，以防范来自企业网侧的安全威胁。在控制网络内部，应采用冗余的星型或环形拓扑结构，使用专为工业环境设计的交换机，并启用诸如PRP（并行冗余协议）或HSR（高可用性无缝环网）等零丢包冗余技术，确保在任何单点链路发生故障时，通信都能在毫秒级内无缝切换，完全不影响底层的控制功能。此外，对于独立的安全仪表系统（SIS），必须严格遵循功能安全标准中的独立原则，建立与BPCS（基本过程控制系统，即DCS）在物理和逻辑上都完全分离的专用网络，以保证在极端情况下安全功能的绝对可靠。

3.3 强化硬件安装规范与接地系统设计

这是保障信号完整性的物理基础，必须严格执行相关的工程设计与施工规范。信号电缆应选用高质量的双绞屏蔽电缆，并在敷设时与动力电缆分开走线，保持足

够的安全间距,以最大限度地减少电磁耦合。所有电缆的屏蔽层应在DCS机柜侧进行单点接地,这是为了避免在长距离传输中因接地点电位不同而形成地环路电流,从而引入干扰^[4]。整个DCS系统应建立一个统一、低阻抗的接地网,将工作接地(包括逻辑地、信号地、屏蔽地)和保护接地分别汇流后,最终接至同一接地极,确保整个系统拥有一个干净、稳定的参考电位,为所有电子设备提供一个可靠的“零”基准。

3.4 实施智能化的数据管理与设备诊断

应充分利用DCS平台强大的数据处理能力,建立一个覆盖所有现场仪表的资产管理和校准数据库。通过定期的在线比对(例如,将DCS读数与便携式校验仪读数进行自动比对)和规范的离线校验流程,系统可以自动识别和预警潜在的测量偏差。同时,必须深度挖掘智能仪表内置的自诊断功能,如传感器健康状态、电子部件温度、阻尼时间异常、存储器错误等,并将这些丰富的诊断信息通过数字通信通道集成到DCS的报警和事件管理系统中,从而实现从被动维修向主动预测性维护的转变。例如,当一个压力变送器通过HART协议持续报告其内部温度高于正常阈值时,系统可自动生成一个低优先级的维护工单,提示维护人员在下次计划停车窗口期内进行检查,从而有效避免因仪表突发故障导致的非计划停车,保障生产的连续性和稳定性。

4 未来发展趋势展望

随着工业4.0和智能制造的深入推进,DCS与现场仪表的集成将迈向一个全新的阶段。未来的DCS将不仅仅是控制平台,更是工厂的数字孪生体,而现场仪表作为物理世界数据的源头,其高保真、高频率的数据流将实时驱动数字孪生模型的运行,通过在虚拟空间中对生产过程进行仿真、优化和预测,可以实现更高级别的自主

决策和闭环优化。人工智能(AI)算法将被深度嵌入到DCS中,用于分析海量的仪表数据,自动发现异常模式、优化控制参数、甚至重构控制逻辑,例如,利用机器学习模型可以动态补偿因催化剂老化、设备结垢等因素引起的工艺模型失配,始终保持最优控制性能。此外,云边协同架构将成为主流,部分非实时的、计算密集型的分析任务(如大数据挖掘、长期趋势预测)将被卸载到云端或边缘计算节点进行处理,而DCS则专注于毫秒级的实时控制,这种架构将进一步提升系统的灵活性和智能化水平。

5 结语

DCS系统与现场仪表的集成优化是一项系统工程,它贯穿于项目的设计、实施、运维全生命周期。面对通信、网络、硬件、数据等多方面的挑战,化工企业不能寄希望于单一技术的突破,而应采取一套组合拳式的综合策略。通过推进协议标准化、构建健壮网络、规范硬件安装、深化数据应用,并积极拥抱数字孪生、人工智能等前沿技术,方能真正打通自动化系统的“任督二脉”,构建起一个更加智能、高效、安全的现代化生产体系。这不仅是提升企业核心竞争力的关键路径,也是实现化工行业绿色、可持续发展的必然要求。

参考文献

- [1]陈鹏.石油化工中DCS系统的应用分析[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(24):139-141.
- [2]白梅.石油化工仪表DCS系统研究[J].中国仪器仪表,2022,(12):45-48.
- [3]韩洁.基于DCS系统的溴素生产线仪器仪表智能化升级方案设计[J].石化技术,2026,33(02):404-405.
- [4]马劲松,张亚平,王刚,等.新型DCS系统控制站硬件架构设计[J].东方电气评论,2024,38(05):79-81.