

DCS控制系统中现场总线技术的应用研究

吕耀宏

新疆东方希望新能源有限公司 新疆 昌吉 831100

摘要：集散控制系统（DCS）是工业生产过程控制的核心装备，传统模拟信号传输存在布线繁杂、数据单一、抗干扰能力弱等短板。现场总线技术具备数字化、网络化、多节点、高可靠性等优势，可有效弥补传统DCS的缺陷。本文阐述DCS与现场总线的基本原理，对比主流总线协议，研究软硬件集成方案及混合架构，分析过程控制、设备运维、远程操作、SIS联动等应用场景，并结合工业以太网、无线总线、数字孪生技术研判发展趋势。研究可为DCS系统升级改造提供参考，助力工业控制系统向数字化、智能化转型。

关键词：DCS；控制系统；现场总线技术；应用场景

引言：随着工业自动化水平提升，电力、化工、冶金等流程工业对控制系统的实时性、稳定性要求不断提高。传统DCS长期采用4-20mA模拟信号传输，布线工作量大，仅能实现单变量传输，难以满足海量数据交互、设备远程管理的需求。现场总线技术以全数字化双向通讯为核心，成为DCS升级的主流方向。本文围绕现场总线在DCS中的集成架构与应用场景展开研究，探索技术优化路径与发展方向，推动两类技术深度融合，提升工业控制系统整体运行效能。

1 DCS控制系统与现场总线技术概述

1.1 DCS系统架构与工作原理

DCS集散控制系统采用分散控制、集中管理的分层结构，分为操作管理层、控制层、现场设备层。操作层配备操作员站、工程师站与服务器，实现人机交互、参数监控和系统组态；控制层依靠控制器完成运算、调节及连锁保护；现场设备层由各类传感器、执行器组成。传统DCS依托一对一模拟电缆传输4-20mA信号，布线繁杂、故障排查难度大，且仅能传输基础测量数据，无法采集设备状态、故障诊断等信息，智能化运维能力不足，亟需引入数字化通讯技术完成升级改造。

1.2 现场总线技术基本原理

现场总线是部署于工业现场的全数字化串行通讯网络，可串联多台自动化仪表与控制设备。它摒弃传统一对一信号传输模式，单条总线链路可挂载多个智能设备，设备将采集的物理量转为数字信号，按既定协议双向传输数据、控制指令与设备诊断信息。该技术通讯速率高、抗干扰性强，大幅简化现场布线，除基础测量控制外，还支持在线诊断、远程参数修改，是工业现场数字化、网络化改造的核心技术，也为DCS系统智能化升级提供有力支撑^[1]。

1.3 主流现场总线协议对比

DCS系统常用Profibus、FF、Modbus、CANopen等协议，各具特点。Profibus-DP通信速率12Mbps，适用于逻辑控制；Profibus-PA速率31.25kbps，支持本安防爆，适用于流程工业。FF H1与Profibus-PA参数相近，支持控制功能下放。Modbus TCP基于以太网，结构简单、成本低，适用于中小型系统。CANopen抗干扰能力强，多用于设备级控制。

表1 主流现场总线协议对比

协议	速率	距离	节点数	本安	典型应用
Profibus-DP	12Mbps	1200m	126	否	制造业、电厂辅控
Profibus-PA	31.25kbps	1900m	32	是	石化、化工流程
FF H1	31.25kbps	1900m	32	是	石化、化工流程
Modbus TCP	10/100Mbps	100m	247	否	水处理、制药
CANopen	1Mbps	1000m	110	否	设备级控制

选型时，大型流程企业优先选用Profibus-PA或FF，中小型工厂多用Modbus降本。

2 现场总线在DCS中的系统集成方案

2.1 集成架构设计

现场总线与DCS采用分层融合式集成架构，保留DCS原有分层体系，将总线部署在现场设备层。架构分三级：上层维持操作员站、工程师站与网络架构；中间控制层增设总线网关与协议转换模块，实现DCS与总线网络的数据交互；底层以总线链路连接智能仪表与执行机构。该架构充分利用DCS成熟的控制逻辑，发挥总线数字化传输优势，实现新旧系统无缝衔接。设计遵循安全分区原则，将总线网络与控制网络物理隔离，避免故障向上蔓延，保障DCS安全稳定运行。

2.2 硬件集成方案

硬件集成以网关、通讯卡件、智能现场设备为核心。在DCS机柜内配置总线通讯卡与协议网关,实现不同通讯格式的解析。新增智能总线仪表部署在现场,总线电缆按规范组网,替代部分模拟电缆。布线采用专用屏蔽电缆并统一接地,提升抗干扰能力。老旧DCS选用模块化紧凑型网关,减少柜体改造量。硬件改造分步实施,按工段、分区域逐步替换,同时配套网络状态监测硬件,实时监控通讯质量与链路负载,及时发现断线等故障,保障系统长期可靠运行^[2]。

2.3 软件集成方案

软件集成主要包含驱动适配、组态配置、数据交互、人机界面四部分。首先在DCS工程师站安装对应现场总线设备的设备描述文件与驱动程序,让DCS系统识别总线设备型号、参数与功能。其次完成总线网络组态、设备地址分配、通讯参数设置,规划数据读写区域,明确测量信号、控制指令、诊断数据的传输规则。在控制逻辑层面,原有DCS控制程序基本沿用,仅将模拟量测点替换为总线数据测点,无需大规模修改控制算法。人机界面保持原有操作风格,在监控画面中增加总线设备状态、故障报警、诊断信息等显示窗口。软件调试阶段先进行离线仿真,再开展在线联调,排查数据卡顿、信号跳变、指令延迟等问题,确保软件层面数据交互精准、指令执行同步。

2.4 混合架构处理(传统仪表+总线仪表共存)

国内多数在役DCS系统无法一次性完成全总线改造,长期处于传统模拟仪表与总线仪表混用的混合架构状态。针对该模式,采用“分区组网、分链路传输”方式处理,模拟信号依旧使用原有电缆接入DCS模拟量卡件,总线设备单独组网接入通讯网关,两类信号在控制器内部完成数据汇总。系统设置信号区分标识,在上位画面明确标注仪表类型,方便运维人员识别。制定差异化巡检与维护标准,传统仪表侧重线路与零点检查,总线仪表侧重通讯状态与在线诊断。同时优化控制器任务周期,合理分配模拟信号、总线数据的扫描时间,避免数据拥堵。混合架构改造投入低、风险小,可分阶段完成系统升级,是老旧DCS改造最务实的过渡方案,能够在不停机或少停机的前提下逐步实现数字化转型。

3 现场总线在DCS中的关键应用场景

3.1 过程测量与控制

过程测量与闭环控制是现场总线在DCS中最基础的应用场景。温度、压力、液位、流量等常规测点采用总线智能变送器,采集的数字信号通过总线上传至DCS控制器,完成数据显示、超限报警。控制器输出的调节指

令,通过总线下发至智能执行器、调节阀,实现液位、压力、流量的自动闭环调节。相较于传统模拟信号,总线通讯可同步传输多个测点数据,一条链路挂载多台仪表,大幅减少电缆数量与施工成本。数字信号传输无信号衰减、无模拟漂移,测量与控制精度显著提升。在锅炉、汽机、化工反应装置等连续生产工况中,总线控制的实时性完全满足工艺要求,有效提升流程控制的稳定性,降低因信号异常引发的工艺波动问题^[3]。

3.2 预测性维护与设备管理

依托现场总线的多数据传输能力,DCS可实现现场仪表与执行机构的预测性维护与全生命周期设备管理。总线智能设备可主动上传自身工作电压、内部温度、电路状态、磨损程度、故障代码等诊断信息,DCS系统对海量设备数据进行集中存储、分析与统计。运维人员无需到现场逐台排查,通过上位机即可查看设备健康状态,提前预判仪表老化、阀芯卡涩、线路故障等隐患,将传统“事后抢修、定期检修”转变为预测性维护。系统自动生成设备台账、检修记录、备件提醒,简化设备管理流程。该应用大幅减少现场巡检工作量,降低设备突发故障概率,延长仪表使用寿命,尤其适用于大型厂区、高危区域、高空等人员不易抵达的作业点位。

3.3 远程校准与参数下装

现场总线技术实现了DCS系统对现场智能仪表的远程校准、参数修改与程序下装,颠覆了传统现场作业模式。传统仪表校准、量程修改、参数整定需要运维人员到达现场就地操作,高空、防爆、有毒区域作业风险高。集成现场总线后,工作人员在DCS工程师站即可远程完成变送器零点校准、量程更改、滤波参数设置,也可对智能执行器进行行程标定、动作参数优化。当仪表需要升级固件、更新配置时,可通过总线网络远程批量下装程序。该功能大幅减少现场高危作业频次,缩短设备维护时长,提升工作效率。同时所有远程操作均留有日志记录,便于追溯管理,在化工、电力等高危流程工业中,安全价值与实用价值尤为突出。

3.4 安全仪表系统(SIS)中的应用

现场总线可实现DCS与安全仪表系统(SIS)的安全联动,构建一体化管控平台。DCS负责正常工况调节,SIS专注紧急联锁、停机保护,两套系统通过安全总线链路实现数据双向交互。现场安全类智能仪表、联锁执行器采用本安型现场总线设备,实时将工艺参数、设备状态同时上传至DCS与SIS。当工况出现异常时,SIS触发联锁动作,动作信号、设备状态通过总线快速反馈至DCS,在上位机完整展示联锁全过程。总线通讯具备高

安全性与实时性,满足SIS系统故障安全、快速响应的要求。同时总线设备的诊断数据可同步至两套系统,实现安全设备状态联合监测,提升整套机组的安全防护能力,目前该模式已广泛应用于火电、化工高危生产装置。

4 发展趋势与优化建议

4.1 工业以太网融合(TSN时间敏感网络)

传统现场总线存在协议林立、互通性差等问题,TSN(时间敏感网络)成为DCS与现场总线融合升级的主流方向。TSN基于标准以太网改造,具备纳秒级时间同步、低延迟、高确定性的特点,可兼容各类传统现场总线协议,实现控制数据、音视频、运维数据共网传输。将TSN融入DCS架构,可统一底层通信标准,打破不同总线与设备的通信壁垒,简化网络结构。在流程工业中,TSN既能满足闭环控制与联锁保护的实时性要求,又可承载海量诊断与视频数据。推动DCS向工业以太网+TSN架构演进,是提升网络性能的核心路径。

4.2 无线现场总线在DCS中的应用前景(Wireless HART、WIA-PA)

有线现场总线仍存在布线困难、线路易受损、改造灵活性不足等问题,WirelessHART、WIA-PA两类工业无线总线技术逐步在DCS中试点应用。WirelessHART基于HART协议无线化改造,兼容性强、功耗低,适合现场大量存量仪表无线升级;WIA-PA是国内自主工业无线标准,抗干扰、低时延,适配复杂工业现场。无线总线无需敷设电缆,针对旋转设备、移动装置、远距离测点、布线困难区域优势明显。无线总线网关接入DCS控制系统,实现无线仪表数据接入、指令下发。目前受电磁干扰、通讯安全限制,无线总线暂多用于非核心监测测点,随着抗干扰技术与加密方案完善,未来将逐步拓展至辅助控制回路,成为有线总线的重要补充。

4.3 数字化双胞胎与现场总线数据的深度利用

数字化双胞胎技术依托现场总线提供的全维度实时数据,构建与物理现场对应的虚拟模型。总线采集的工艺参数、设备状态、故障信息等实时同步至数据平台,支撑模型模拟设备运行趋势、预判工艺扰动、仿真联锁动作,实现虚拟调试与工况优化。操作人员可在虚拟模型中完成参数预调与逻辑验证,再下发至真实系统,降低现场调试风险^[4]。结合大数据分析,可优化控制策略、制定最优运维方案。现场总线作为数据采集的“神经末梢”,与数字孪生深度融合,推动DCS从基础控制向智能优化升级。

结束语

现场总线技术凭借全数字化通讯优势,有效弥补了传统DCS模拟传输的短板,二者融合已成为工业控制系统升级的必然趋势。本文研究了DCS与现场总线的原理、主流协议,设计了完整的软硬件集成方案与混合架构改造方式,梳理了测控、设备管理、远程操作、SIS联动四大核心应用场景。在老旧DCS改造与新建项目中,应结合现场工况合理选择总线方案,分步完成升级。持续推进技术融合与数据深挖,能够进一步提升控制系统精度、安全性与智能化水平,助力流程工业实现高质量发展。

参考文献

- [1]孙怀海.基于现场总线冗余技术的DCS控制系统设计研究[J].建筑技术研究,2022,5(3):158-160.
- [2]常进刚.现场总线技术在数字化电厂DCS控制系统设计中运用分析[J].电力设备管理,2024(6):152-154.
- [3]张佳伟,吴有伟.国产化替代下西门子燃机DCS的现场总线改造策略探讨[J].科技资讯,2025,23(8):99-101.
- [4]翁晓.现场总线技术的DCS控制系统设计[J].电力设备管理,2021(15):226-228.