

化工 DCS 系统与现场仪表通信故障的诊断与处理技术研究

申安心

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(DCS)与现场智能仪表间的可靠通信是保障安全、连续、高效运行的关键。然而,受复杂工况、多层次架构及设备多样性影响,通信链路易受干扰或故障,轻则数据失真,重则导致非计划停车甚至安全事故。本文构建了覆盖“预防—诊断—处理”全链条的技术框架:首先解析DCS典型架构及主流协议(如HART、FF、Profibus PA、MODBUS),将通信故障根源归为物理层、数据链路层和应用层三类;继而提出逐级排查的诊断方法论,从网络整体状态到设备级信号,结合协议分析仪、回路校验仪等工具实现精准定位;最后,针对不同故障类型,总结标准化处理流程。本研究旨在为化工企业提供理论扎实、操作性强的通信故障应对体系,提升自动化系统的本质安全与运维智能化水平。

关键词:化工DCS;现场仪表;通信故障;故障诊断;HART;预测性维护

引言

化学工业流程长、物料危险、控制精度高,DCS系统依赖通信网络与大量现场仪表实时交互。一旦通信出现中断、延迟或数据错误,将引发参数失监、控制失效,危及安全与质量。随着FF、Profibus PA等现场总线普及,通信由4-20mA+HART混合模式转向全数字化,在提升信息量的同时,也引入信号衰减、协议冲突、电磁干扰、终端电阻失配、地址冲突等隐性故障。此类问题常具偶发性、间歇性和多因性,难以快速定位。目前多数企业仍靠工程师经验“试错”排查,缺乏系统化、标准化诊断流程,导致响应慢、损失大、门槛高。因此,亟需深入研究故障机理,构建科学高效的诊断与处理体系,提升自动化运维能力,保障装置长周期安稳运行。

1 化工DCS通信系统架构与协议基础

1.1 分层网络架构

现代化工DCS的通信体系是一个典型的分层结构,各层之间通过标准接口协同工作,共同构成了从控制室到现场设备的信息高速公路。最顶层是操作管理层,由工程师站、操作员站、历史数据库服务器等组成,负责人机交互、数据存储、报表生成等高级功能,通常运行在基于TCP/IP的工业以太网上。中间层是控制网络层,它连接操作管理层与底层的控制器(或I/O处理单元),负责高速传输控制指令、实时数据和报警信息,同样普遍采用高可靠性的工业以太网技术^[1]。最底层,也是本文关注的核心,是现场总线层。这一层直接与现场智能仪表相连,是整个通信链条中最易受恶劣工业环境影响的部

分。它通过专用的通信电缆,将来自成百上千台仪表的微弱信号汇聚至DCS的I/O卡件或通信接口模块。

1.2 主流现场通信协议

在现场总线层,根据技术路线和应用场景的不同,主要有以下几种通信协议:

1.2.1 HART协议

作为一种混合通信技术,HART在保留了传统4-20mA模拟信号用于主变量传输的同时,通过频移键控(FSK)技术在其上叠加了一个低速的数字通信信道。这种设计使其具备了无与伦比的兼容性和平滑升级能力,成为目前化工领域存量最大的智能仪表通信标准。

1.2.2 基金会现场总线(FoundationFieldbus,FF)

这是一种真正意义上的全数字化、双向、多点串行通信协议。FF不仅传输测量值,还能传输设备状态、诊断信息,并支持在仪表内部执行复杂的控制功能块(Function Block),实现了控制功能的下移和分散。其物理层采用曼彻斯特编码,通过一根双绞线同时完成数据通信和为现场设备供电(总线供电)。

1.2.3 Profibus PA

由Profibus国际组织推出的专用于过程自动化的现场总线标准。Profibus PA在应用层与Profibus DP保持一致,但在物理层采用了IEC 61158-2标准,同样支持总线供电和本质安全,适用于危险区域。

1.2.4 MODBUS协议

MODBUS是一种开放的主从式串行协议,广泛用于化工DCS系统中连接PLC、RTU、变频器等设备。物理

层多采用抗干扰强、传输距离达1200米的RS-485。支持ASCII（可读性好、效率低）和RTU（效率高、容错要求高）两种模式。主站通过功能码（如03读寄存器、06写寄存器）轮询唯一地址（1-247）的从站。因其简单、开放、易集成，已成为工业自动化事实标准，尤其适用于异构设备互联。

2 DCS与现场仪表通信故障的分类与机理

2.1 物理层故障

这类故障主要包括：通信电缆因机械损伤、老化或化学腐蚀导致的断路、短路或绝缘性能下降；接线端子因振动、氧化或安装不牢造成的接触电阻增大或虚接；对于FF和Profibus PA等总线系统，终端电阻的缺失、损坏或阻值不匹配会引发严重的信号反射，导致波形畸变；屏蔽电缆的屏蔽层未按规定进行单点接地，或者接地不良，使得外部电磁干扰（如变频器、大功率电机产生的高频噪声）耦合进通信线路；此外，为总线供电设备提供能量的电源模块若输出电压不稳、纹波过大或功率不足，也会直接导致现场仪表工作异常，进而引发通信故障。对于采用RS-485物理层的MODBUS网络，还需特别注意A/B信号线的极性是否正确，以及总线上所有设备的A、B端是否分别并联在一起，任何接反或混接都会导致通信完全失败。

2.2 数据链路层故障

这一层的故障主要源于通信协议的执行出现了偏差^[2]。例如，总线上两台或多台仪表被错误地配置了相同的设备地址，导致DCS发出的命令被多个设备同时响应，造成总线冲突；DCS系统组态中的通信速率（波特率）与现场仪表的实际设置不一致，使得双方无法同步解读数据帧；总线上的设备数量过多或通信负载过重，超出了协议规定的带宽限制，导致数据包丢失或延迟；现场仪表内部的通信固件存在缺陷，或与DCS系统所用的设备描述（DD）文件版本不兼容，也可能引发持续性的通信错误，如循环冗余校验（CRC）失败^[1]。在MODBUS网络中，数据链路层故障尤为常见，除了地址冲突和波特率不匹配外，还包括奇偶校验位、停止位等串口参数设置不一致，以及因传输距离过长或节点过多导致信号衰减过大，使得从站无法正确识别主站的请求或主站无法识别从站的响应。

2.3 应用层故障

这类故障通常表现为数据显示错误、控制指令无响应或高级诊断功能失效。其根源在于DCS系统数据库与现场仪表之间的“语义”不一致。例如，DCS中为某个I/O通道配置的量程范围、工程单位或线性化参数与现场仪

表内部的实际设定不符，导致操作员看到的数据是错误的；DCS组态软件未能正确加载或解析现场仪表的设备描述（DD）文件，从而无法读取或写入仪表的特定参数；在使用FF等支持功能块的系统中，功能块的执行顺序、输入输出连接或算法组态存在逻辑错误，使得仪表无法按预期与DCS进行数据交换。这类故障的排查需要对系统组态和设备内部逻辑有深入的理解。对于MODBUS设备，应用层故障通常体现为寄存器地址映射错误。DCS工程师必须严格参照设备厂商提供的寄存器地址表（Map Table），确保在DCS组态中读写的寄存器地址（如40001）与设备内部实际存储所需数据的地址完全对应，否则将读取到无关数据或写入错误位置，造成控制逻辑混乱。

3 通信故障的系统化诊断方法

3.1 自上而下的宏观诊断

面对通信故障，首要任务是快速评估其影响范围，避免陷入细节而迷失方向。应遵循“先全局，后局部”的原则。首先，在DCS操作员站上查看系统报警总览，判断是孤立的单点故障、某个I/O卡件或分支总线的区域性故障，还是涉及整个控制站乃至更广范围的系统性故障。这一初步判断能迅速将排查范围缩小到特定的网络层级。其次，利用DCS系统自带的网络管理工具或第三方网络分析软件，检查相关网络交换机的端口状态、流量统计、错误包计数（如FCS错误、超长帧、碎片帧等）。如果发现某端口的错误计数异常激增，则可基本锁定该端口所连网段存在严重的物理层或数据链路层问题。

3.2 自下而上的微观诊断

在宏观定位后，需深入现场进行精细化的微观诊断。对于采用HART协议的回路，应使用专业的HART手操器或多功能过程校验仪。首先，确认4-20mA回路电流正常，排除一次表或电源故障。然后，尝试用手操器与仪表建立数字通信。若失败，应重点测量回路的等效电阻（通常需保证在230-600Ω范围内以提供足够的HART信号压降），并仔细检查电缆的屏蔽和接地情况。可以采用“分割法”，即从回路中间断开，分别测试前后两段，以快速隔离故障点^[3]。对于全数字化现场总线（如FF、Profibus PA），诊断必须依赖专用的现场总线分析仪。这类仪器能够在线捕获并解码总线上的所有通信报文，实时显示每个设备的通信状态、信号质量（如波形、幅值、上升/下降时间）和健康度指标。通过分析仪，可以直观地识别出信号畸变、冲突帧、无响应设备等具体问题。诊断时，应首先核对实际的物理接线与系统组态中的总线拓扑图是否一致，特别是终端电阻的安装位置（仅在总线物理两端）和电源接入点。接着，可以通过分析仪强制轮询

疑似故障设备,或临时将其从总线上物理断开,观察总线整体通信是否恢复稳定,从而实现故障设备的精准隔离。整个过程必须严格遵守化工现场的安全规程,尤其是在防爆区域,所用工具必须具备相应的防爆认证。

4 通信故障的标准化处理技术

4.1 物理层故障的修复

处理物理层故障的核心目标是恢复通信链路的电气完整性。对于受损的通信电缆,必须更换为符合规格(如特定阻抗、屏蔽类型)的新电缆,并确保其敷设路径远离强电磁干扰源。所有接线端子都应使用力矩扳手按照制造商推荐的力矩值进行紧固,并定期进行红外热成像检测,以发现潜在的接触不良热点。针对终端电阻问题,必须严格按照总线协议规范,在物理拓扑的始末端各安装一个精确匹配的终端电阻(如FF/PA通常为 100Ω),并确保其连接牢固可靠。解决电磁干扰的关键在于建立完善的接地系统,即构建一个独立的、低阻抗的仪表参考地(IGS),并将所有通信电缆的屏蔽层在控制室侧进行单点汇集接地,彻底消除地环路。此外,为总线供电设备提供高质量、低纹波、具备冗余能力的专用电源,是保障物理层长期稳定的重要措施。

4.2 数据链路层处置

处置数据链路层故障,重点在于确保通信参数的一致性和总线负载的合理性。必须逐一核对DCS系统组态数据库与现场每一台仪表的内部配置,确保设备地址、通信速率等关键参数完全匹配。对于因设备数量过多导致的总线过载,应考虑对大型网段进行合理的拆分,或优化DCS的通信调度策略,减少不必要的轮询请求^[4]。当怀疑是设备固件或DD文件兼容性问题时,应在充分评估风险、做好完整备份的前提下,按照制造商提供的指南谨慎地进行固件或DD文件的升级。

4.3 应用层故障的处置

应用层故障的处置则更多地依赖于对系统组态的精细化管理。必须建立并严格执行变更管理流程(Management

of Change, MOC),任何对DCS数据库或现场仪表内部参数的修改都必须经过审批、在测试环境中验证、并详细记录。当出现数据显示异常时,应首先系统性地比对DCS中的I/O通道组态(包括量程上下限、工程单位、线性化方式、小信号切除等)与现场仪表的实际设置,修正任何不一致之处。对于复杂的FF功能块应用,需要利用DCS提供的功能块调试工具,对功能块的执行状态、输入输出数据流进行在线监测和逻辑验证,以找出并修正组态错误的根源。无论处理何种故障,在修复完成后,都必须进行完整的回路测试和功能验证,确保通信恢复正常且数据准确无误,并及时更新相关的技术文档和设备台账。

5 结语

DCS系统与现场仪表通信的稳定性是化工自动化与智能化的基础。本文通过剖析通信架构、系统分类故障,提出“宏观-微观”结合的诊断方法论,并详述各层级故障的标准化处理技术。研究指出,高效故障应对不仅需先进诊断工具,更依赖规范操作流程与扎实的系统知识。当前,行业正处于从经验驱动向数据智能驱动转型的关键阶段。未来应聚焦大数据、人工智能与数字孪生等技术,构建具备自感知、自诊断、自预测能力的智能通信运维体系,推动故障处理由被动抢修转向主动预防,从而保障化工装置安全、稳定、长周期、高负荷、高质量运行,为行业高质量发展提供坚实自动化支撑。

参考文献

- [1]洪哲龙.基于DCS系统的化工装置运行稳定性诊断与优化控制研究[J].化工管理,2026,(08):100-103.
- [2]宋波.基于DCS系统的石油化工仪表自动化维护关键技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2026,46(04):19-21.
- [3]符国谊.DCS系统架构设计与实时性能分析——以某化工单位DCS为例[J].数字通信世界,2024,(11):68-70.
- [4]张超.化工生产过程控制中无线通讯DCS系统的研究[J].山东工业技术,2018,(20):148.