仪表控制系统可靠性提升措施与工程实践

秦　昊　刘耀辉
惠生工程（中国）有限公司郑州分公司　河南　郑州　450000

摘　要：在工业自动化领域，仪表控制系统可靠性至关重要，其稳定运行直接决定工业生产的安全性与效率。本文基于仪表控制系统的现场层、控制层、监控层、通信层四级架构，深入剖析各层级核心设备及信号传输的可靠性影响因素，针对性提出各层级可靠性提升措施，阐述从设计、施工、调试到运维全阶段的工程实践路径，为工业现场仪表控制系统可靠性提升提供实操性参考。

关键词：仪表控制系统；现场层；控制层；监控层；通信层；可靠性提升；工程实践

引言：工业生产中，仪表控制系统肩负数据采集、过程监测与指令执行重任，其可靠性关乎生产连续性、产品质量及人员设备安全。随着工业自动化朝着智能化、集成化发展，系统层级划分愈发清晰，四级架构协同运行成为系统稳定的核心支撑。然而，实际工业场景中，各层级设备老化、信号干扰等问题频发，导致系统故障率高，影响生产。因此，研究各层级可靠性提升措施及工程实践十分必要。

1 仪表控制系统四级架构及可靠性核心影响因素

1.1 现场层可靠性影响因素

现场层是仪表控制系统的数据采集与指令执行终端，核心设备包括检测仪表、变送器、传感器、调节阀、控制阀、安全栅、隔离栅等，是系统可靠性的基础环节，其故障直接导致数据失真或指令无法落地[1]。检测仪表、变送器、传感器作为数据采集核心，其精度、稳定性直接影响系统控制效果。传感器量程漂移、非线性误差、灵敏度下降，变送器零点偏移、信号失真，会导致采集数据与现场实际值偏差，引发控制决策失误；调节阀、控制阀的执行机构卡涩、密封损坏、响应滞后，会导致控制指令无法准确执行，影响生产工艺稳定性；安全栅、隔离栅作为现场层与控制层的安全隔离部件，若选型不当、接地不良或老化损坏，会导致信号传输中断，甚至引发电气安全事故，同时无法有效隔离现场危险信号，威胁控制层设备安全。此外，现场层设备多处于高温、高湿、强腐蚀、强振动的工业环境，粉尘、腐蚀性气体、温度波动会加速设备老化，进一步降低可靠性。

1.2 控制层可靠性影响因素

控制层是仪表控制系统的核心指挥中枢，承担着数据处理、逻辑运算、指令下发的关键任务，核心设备包括DCS系统、SIS系统、FGS系统、PLC系统等，其可靠性直接决定系统的整体控制性能。DCS系统（分布式控制系统）作为工业生产主流控制设备，若控制器运算能力不足、冗余配置不合理，会导致复杂逻辑运算延迟、故障时无法无缝切换，引发系统停机；SIS系统（安全仪表系统）、FGS系统（火灾报警系统）作为安全保障核心，若逻辑配置错误、联锁响应滞后，会无法及时识别危险工况，失去安全防护作用；PLC系统（可编程逻辑控制器）多用于局部控制，若程序编写存在漏洞、内存泄漏，会导致控制逻辑混乱、程序卡死。此外，控制层设备的电源模块、I/O模块老化，散热不良，以及设备间兼容性差，都会降低控制层运行可靠性，影响系统整体稳定性。

1.3 监控层可靠性影响因素

监控层是仪表控制系统的人机交互核心，核心设备包括操作员站、工程师站等，负责系统运行状态监测、参数设置、故障报警及程序调试，其可靠性影响操作人员对系统的管控能力。操作员站若出现软件崩溃、显示异常、操作延迟，会导致操作人员无法及时掌握现场运行状态，无法下达正确控制指令；工程师站作为系统调试、维护的核心终端，若程序备份缺失、调试工具异常、权限管理混乱，会导致系统调试失误、故障无法及时排查，甚至引发误操作。此外，监控层设备的硬件老化、操作系统兼容性差、网络连接不稳定，会导致人机交互中断，影响系统运维与管控效率，间接降低整个仪表控制系统的可靠性。

1.4 通信层可靠性影响因素

通信层是仪表控制系统各层级联动的桥梁，负责现场层、控制层、监控层之间的信号传输，核心包括模拟信号（4–20mA）、数字信号，以及FoundationFieldbus、Profibus、Modbus、工业以太网等通信协议，其可靠性直接决定各层级数据交互的准确性与实时性[2]。模拟信号（4–20mA）传输过程中，若电缆敷设不合理、屏蔽层接地不良，会受到电磁干扰，导致信号衰减、失真；数字

信号传输若协议不兼容、数据编码错误，会导致数据丢失、传输延迟；FoundationFieldbus、Profibus、Modbus等通信协议若配置不当、协议转换异常，会导致不同层级、不同设备间无法正常通信；工业以太网若网络拓扑不合理、带宽不足、存在网络风暴，会导致信号传输拥堵，影响控制指令与监测数据的实时交互，甚至引发系统瘫痪。

2 各层级仪表控制系统可靠性提升措施

2.1 现场层可靠性提升措施

现场层可靠性提升核心是优化设备选型、强化安装防护、规范运维管理，确保数据采集准确、指令执行到位、安全隔离有效。一是优化核心设备选型。检测仪表、变送器、传感器优先选用量程裕度充足、线性度误差小、抗干扰能力强的型号，适配现场高温、强腐蚀等恶劣环境；调节阀、控制阀选用密封性能好、响应速度快、耐磨耐用的产品，重点关注执行机构的可靠性；安全栅、隔离栅必须选用符合防爆标准、隔离精度高、抗干扰能力强的型号，确保与现场危险等级匹配，实现信号隔离与安全防护。二是强化安装与防护工艺。传感器、变送器安装位置避开强振动、强电磁干扰区域，确保安装牢固；调节阀、控制阀安装时保证阀门开度与执行机构匹配，做好密封处理，防止介质泄漏；安全栅、隔离栅安装时确保接地良好，接线规范，避免接线松动导致信号中断；所有现场设备做好防腐、防尘、防潮处理，根据现场环境等级选用对应防护等级的设备外壳。三是规范设备运维。建立现场设备全生命周期管理机制，定期对传感器、变送器进行校准，及时更换老化部件；对调节阀、控制阀定期润滑、调试，排查卡涩、泄漏等问题；对安全栅、隔离栅定期检测，确保隔离性能正常，及时处理故障隐患。

2.2 控制层可靠性提升措施

控制层可靠性提升核心是优化设备配置、强化软件管控、提升容错能力，确保数据处理高效、逻辑运算准确、故障快速响应。一是优化设备配置与冗余设计。DCS系统、SIS系统、FGS系统、PLC系统选型时，优先选用运算能力强、兼容性好、稳定性高的产品，匹配工业生产控制需求；关键控制回路采用冗余配置，如DCS系统控制器双热备、I/O模块冗余，SIS系统采用三取二表决机制，电源模块并联运行，确保故障发生时无缝切换，避免系统停机。二是强化软件管控。优化控制程序编写，遵循标准化编程规范，减少内存泄漏、逻辑漏洞等问题；定期对控制软件进行升级、补丁更新，完善异常处理机制；对SIS系统、FGS系统的联锁逻辑进行定期校验，确保联锁响应准确、及时，避免误联锁或联锁失效。三是加强设备维护。定期对控制层设备进行清洁、散热维护，避免高温导致设备老化；定期检测电源模块、I/O模块运行状态，及时更换故障模块；建立控制程序备份机制，防止程序丢失或损坏，确保系统故障后可快速恢复。

2.3 监控层可靠性提升措施

监控层可靠性提升核心是保障设备稳定、优化软件运行、规范操作管理，确保人机交互顺畅、管控高效。一是保障硬件设备稳定[3]。操作员站、工程师站选用性能稳定、兼容性好的工业级计算机，配备冗余硬盘、UPS电源，防止突然断电导致数据丢失或设备损坏；定期对硬件设备进行检测、维护，及时更换老化的硬盘、显卡等部件，确保设备正常运行。二是优化软件运行环境。安装稳定的工业操作系统，定期进行系统更新、病毒查杀，避免软件崩溃或被病毒入侵；优化监控软件配置，减少软件冗余功能，提升运行速度，避免显示异常、操作延迟等问题；建立监控软件备份机制，及时备份配置参数、操作记录，便于故障后快速恢复。三是规范操作与权限管理。制定标准化操作流程，严禁操作人员误操作；建立分级权限管理机制，明确操作员、工程师的操作权限，防止非法操作修改控制参数、程序；定期对操作人员进行培训，提升操作规范性，减少人为失误导致的系统故障。

2.4 通信层可靠性提升措施

通信层可靠性提升核心是优化传输线路、规范协议配置、强化干扰防护，确保信号传输准确、实时、稳定。一是优化传输线路设计与敷设。模拟信号（4–20mA）传输采用屏蔽双绞线或同轴电缆，减少电磁干扰；电缆敷设避开变频器、大功率电机等强干扰设备，避免与动力电缆并行敷设，若必须并行，保持安全间距并做好屏蔽处理；数字信号传输采用专用通信电缆，确保线路完好、接线牢固。二是规范通信协议配置。统一各层级、各设备的通信协议，优先选用FoundationFieldbus、Profibus、Modbus等通用、稳定的协议；合理配置协议参数，优化数据传输速率，避免协议不兼容、参数不匹配导致的通信故障；对于异构设备，采用协议转换网关，确保数据正常交互，减少中间环节的故障风险。三是强化干扰防护与网络管控。对通信线路做好屏蔽、接地处理，减少电磁干扰、静电干扰；工业以太网优化网络拓扑结构，合理分配带宽，设置网络隔离设备，防止网络风暴；定期检测通信线路、协议运行状态，及时排查信号衰减、数据丢失等问题，确保各层级数据交互顺畅。

3 仪表控制系统可靠性提升的工程实践路径

3.1 工程设计阶段：融入层级化可靠性理念

设计阶段是可靠性提升的基础，核心是结合四级架构，明确各层级可靠性设计目标，优化设计方案[4]。一是

明确各层级可靠性指标，结合生产需求，设定现场层设备故障率、控制层响应速度、监控层运行稳定性、通信层传输准确率等指标；二是优化各层级设计，现场层合理规划设备安装位置，避开恶劣环境与强干扰区域，预留维护空间；控制层优化设备布局与冗余配置，确保逻辑运算高效；监控层合理配置操作员站、工程师站数量，优化人机交互设计；通信层优化线路路由与协议选择，确保信号传输稳定；三是进行可靠性仿真分析，模拟各层级可能出现的故障场景，提前优化设计方案，规避潜在隐患。

3.2 工程施工阶段：强化层级化质量管控

施工阶段重点落实各层级设备安装、线路敷设的标准化，确保施工质量。一是制定层级化施工规范，明确现场层设备安装、控制层设备调试、监控层设备部署、通信层线路敷设的操作标准；二是加强施工过程管控，现场层严格按照设计要求安装设备，做好防护与接地处理；控制层规范设备接线、冗余配置，确保设备正常联动；监控层做好设备调试，确保人机交互顺畅；通信层规范线路敷设与屏蔽处理，避免信号干扰；三是建立施工质量检查机制，对各层级施工工序进行全程检测，及时整改质量问题，确保施工质量符合设计要求。

3.3 工程调试阶段：排查层级化潜在故障

调试阶段是发现并解决潜在故障的关键，重点对各层级设备、信号传输进行全面调试。一是分层级调试，先调试现场层设备，确保数据采集准确、指令执行到位；再调试控制层设备，验证逻辑运算、冗余切换功能正常；然后调试监控层，确保人机交互、故障报警功能正常；最后调试通信层，验证信号传输准确、实时；二是模拟故障场景，针对各层级常见故障，如现场层设备故障、控制层冗余切换异常、通信层信号中断等，进行模拟测试，检验系统容错能力与恢复能力；三是建立调试记录，对调试过程中发现的问题及时整改，确保系统调试合格后投入运行。

3.4 工程运维阶段：落实层级化运维管理

运维阶段是维持系统长期可靠运行的关键，建立层级化运维体系，实现全生命周期管控。一是分层级制定运维计划，现场层定期校准、维护设备，及时更换易损件；控制层定期检测设备运行状态，优化控制程序；监控层定期维护硬件、更新软件；通信层定期排查线路与协议故障；二是建立故障应急处置机制，针对各层级常见故障，制定应急方案，确保故障发生后快速响应、及时处置；三是建立运维档案，记录各层级设备运行状态、维护记录、故障处理情况，为后续运维优化提供数据支撑[5]。

结束语

仪表控制系统可靠性提升是一项系统性工程，需立足现场层、控制层、监控层、通信层四级架构，精准识别各层级可靠性影响因素，针对性采取设备选型优化、安装防护强化、软件管控完善、通信优化等措施，并贯穿工程设计、施工、调试、运维全生命周期。通过标准化工程实践与持续优化，可有效降低系统故障率，提升系统运行稳定性，为工业生产安全、高效、连续运行提供坚实保障，推动工业自动化向更高水平发展。

参考文献

[1]王文然.仪表自动化控制系统故障及其维护[J].大众标准化,2026(4):43-45.

[2]陈颐,陈丽黄.电工仪表可靠性技术之研究[J].仪表技术,2021(1):57-59.

[3]滕保健.电气自动化仪表设备在工业控制过程中的应用研究[J].中国设备工程,2025(18):229-231.

[4]程鼐,姜爱华,崔舒怡,等.化工仪表及控制系统接地技术分析[J].仪器仪表用户,2024,31(8):85-87,91.

[5]王化祥.仪器仪表可靠性设计及应用[J].自动化仪表,2021,42(11):1-7.