

Exploration on Reliability Design and Optimization of Industrial Automatic Control Systems

Weimin Hou

Shaanxi Guoneng Yulin Chemical Co., Ltd., Yulin, Shaanxi, 719000, China

Abstract

With the in-depth advancement of Industry 4.0 and intelligent manufacturing, industrial automatic control systems have become the core support for modern production. Their reliability directly impacts production efficiency, product quality, and safety and stability. Especially in industries such as chemicals, pharmaceuticals, and automobile manufacturing, which have high precision and high continuity requirements, system failures can lead to significant economic losses and even safety accidents. However, factors such as complex electromagnetic environments, equipment aging, software vulnerabilities, and human operational errors pose severe challenges to system reliability. This paper explores key strategies for enhancing the reliability of industrial automatic control systems from five dimensions: hardware redundancy design, software fault-tolerance mechanisms, anti-interference technologies, intelligent operation and maintenance management, and system integration optimization. It also verifies their effectiveness through typical industry practices, providing theoretical references and practical guidance for improving reliability in the field of industrial automation.

Keywords

Industrial automatic control system; Reliability design; Redundancy technology; Anti-interference; Intelligent operation and maintenance

工业自控系统可靠性设计与优化探索

侯卫民

陕西省国能榆林化工有限公司，中国·陕西 榆林 719000

摘要

随着工业4.0与智能制造的深入推进，工业自动化控制系统已成为现代生产的核心支撑。其可靠性直接影响生产效率、产品质量及安全稳定性，尤其在化工、制药、汽车制造等高精度、高连续性要求的领域，系统故障可能导致重大经济损失甚至安全事故。然而，复杂电磁环境、设备老化、软件漏洞及人为操作失误等因素，导致系统可靠性面临严峻挑战。本文从硬件冗余设计、软件容错机制、抗干扰技术、智能运维管理及系统集成优化五个维度，探讨提升工业自控系统可靠性的关键策略，并结合典型行业实践验证其有效性，为工业自动化领域的可靠性提升提供理论参考与实践指导。

关键词

工业自控系统；可靠性设计；冗余技术；抗干扰；智能运维

1 引言

工业自动化控制系统通过传感器、控制器与执行机构的协同，实现生产过程的精准控制与高效运行。其可靠性不仅关乎设备寿命，更决定着生产连续性与产品一致性。然而，现代工业环境日益复杂，系统规模扩大、设备互联需求增加，导致故障概率上升。例如，电磁干扰可能引发信号失真，硬件老化可能导致控制失灵，软件漏洞可能引发系统崩溃。因此，如何通过系统性设计优化提升系统可靠性，成为工业自动化领域的关键课题。

2 硬件冗余设计：构建多重安全保障

硬件冗余是提升系统可靠性的基础手段，通过增加备用设备或模块，确保单一故障不导致系统瘫痪。

2.1 硬件冗余

硬件冗余作为提升工业自控系统可靠性的核心手段，其本质是通过增加备用设备或模块，构建多重安全屏障，确保单一故障不会引发系统整体瘫痪。在工业生产中，关键设备如控制器、电源模块的稳定性直接决定生产连续性。^[1]

硬件冗余通过双机热备或并行冗余设计，使备用设备在主设备故障时自动接管任务，实现零中断切换。这种设计不仅提升了系统可用性，更通过冗余资源的预留，为故障修复争取时间，避免因单点故障导致的连锁反应。

【作者简介】侯卫民(1982-)，男，中国河南许昌人，本科，工程师，从事仪表自动化研究。

2.2 模块化设计

模块化设计是硬件冗余的重要延伸，其核心在于将系统划分为独立功能模块，如过程控制、数据采集、人机界面等，每个模块具备独立运行能力且通过标准化接口连接。这种设计显著提升了故障隔离效率——当某一模块出现故障时，系统可快速定位问题源头，仅需对故障模块进行维修或更换，无需停机整体系统。同时，模块化设计降低了维护复杂度，不同模块可由专业团队独立维护，减少对整体系统知识的依赖。

2.3 标准化接口

标准化接口是硬件冗余设计的关键支撑，其通过统一硬件接口协议，消除不同供应商设备间的兼容性障碍，确保多品牌设备无缝集成。在工业自动化领域，设备来源多样、协议差异大是普遍问题，若接口不统一，可能导致信号传输错误、数据丢失或设备无法协同工作，进而引发系统故障。标准化接口通过强制规范通信协议、电气参数与机械尺寸，使不同设备能够“即插即用”，降低集成难度与故障风险。

3 软件容错机制：增强系统自适应能力

3.1 自适应控制算法

自适应控制算法通过引入机器学习技术，使工业自控系统能够基于实时数据动态调整控制参数，从而提升对复杂工况的适应能力。传统控制算法如 PID 控制，其参数固定且依赖人工调试，在面对负载变化、环境干扰或设备老化时，易出现响应滞后或超调现象。而自适应算法通过持续监测系统输入输出数据，利用机器学习模型识别工况特征，并自动优化控制参数。^[2] 例如，在机械臂运动控制中，系统可根据当前速度与位置偏差，实时调整比例、积分、微分系数，使运动轨迹更平滑、定位更精准。这种动态调整能力不仅解决了传统算法在非线性系统中的局限性，更通过减少人工干预降低了操作风险。

3.2 程序容错设计

程序容错设计通过嵌入自诊断与错误恢复逻辑，使软件在遭遇异常时能够主动识别问题并采取补救措施，从而避免系统崩溃或数据丢失。传统软件设计往往缺乏异常处理机制，一旦出现输入信号抖动、数据越界或硬件故障，可能导致程序中断或错误传播。程序容错设计通过多层次防护构建安全屏障：在输入层，数字滤波模块可消除高频噪声干扰，确保信号稳定性；在逻辑层，自诊断模块能实时监测程序运行状态；在输出层，错误恢复逻辑可根据故障类型触发报警、切换备用通道或回滚操作。

3.3 信息冗余存储

信息冗余存储通过多副本存储与定期备份策略，确保关键数据在硬件故障、网络攻击或人为误操作时仍可恢复，从而避免生产中断或决策失误。工业自控系统中，生产数据、配置参数与运行日志等关键信息是系统运行的核心资产，其

丢失或损坏可能导致不可逆损失。信息冗余存储采用“分散存储 + 同步更新”机制，将数据同时保存至多个物理介质，如本地服务器、云端存储或分布式节点，确保单一存储设备故障时数据仍可访问。定期备份策略则通过设定时间间隔或触发条件，将数据保存至离线介质，如磁带或光盘，防范网络攻击或病毒破坏。信息冗余存储的设计需兼顾可用性与一致性：可用性要求数据在任何时刻均可快速读取，一致性要求多副本数据保持同步更新。为平衡两者，系统可采用分布式存储技术，通过数据分片与冗余编码，在保证数据可靠性的同时提升访问效率。

4 抗干扰技术：保障信号传输稳定性

工业环境中的电磁干扰、温度波动等因素易导致信号失真，需通过硬件隔离与软件滤波综合应对。

4.1 硬件隔离技术

硬件隔离是抗干扰技术的物理基础，其核心是通过物理手段切断电磁干扰、温度波动等外部因素对信号传输的影响路径。在工业环境中，设备密集、线路复杂，电磁干扰易通过空间辐射或导线耦合进入信号传输通道，导致信号失真或设备误动作。硬件隔离技术通过屏蔽电缆、隔离变压器、光电耦合器等组件，构建多层次防护屏障。屏蔽电缆利用金属外壳对电磁场形成反射与吸收，将干扰信号隔离在传输介质外部；隔离变压器通过电磁感应原理，在初级与次级线圈间形成电气隔离，阻断共模干扰传导；光电耦合器则利用光信号传输特性，彻底切断电气连接，避免地环路干扰。^[3] 硬件隔离技术的优势在于其直接性与可靠性——通过物理隔离，干扰信号无法直接作用于敏感元件，从而从源头消除风险。

4.2 软件滤波算法

软件滤波是抗干扰技术的逻辑延伸，其通过在控制程序中嵌入数字滤波算法，对采集到的原始信号进行预处理，消除高频噪声与异常波动，提升信号质量。工业信号传输中，传感器采集的原始数据常包含因环境干扰或设备振动产生的高频噪声，若直接用于控制决策，可能导致系统误动作或调节过度。软件滤波算法通过数学运算对信号进行平滑处理，例如均值滤波通过计算一定时间窗口内数据的平均值，削弱随机噪声影响；中值滤波则选取窗口内数据的中位数作为输出，有效抑制脉冲干扰；卡尔曼滤波则结合系统模型与观测数据，对信号状态进行最优估计，适用于动态系统。软件滤波的核心优势在于其灵活性与适应性——算法参数可根据实际工况动态调整，例如在温度控制系统中，可根据温度变化速率选择滤波窗口大小，平衡响应速度与滤波效果。

4.3 接地与屏蔽设计

接地与屏蔽设计是抗干扰技术的系统级解决方案，其通过规范系统接地方式与屏蔽布局，减少地环路干扰与电磁耦合效应，提升整体信号传输稳定性。地环路干扰是工业环

境中常见的干扰形式，当多个设备共用接地线时，电流流经接地电阻产生的压降会形成环路，导致信号线上出现共模干扰电压，影响设备正常工作。接地设计通过单点接地、多点接地或混合接地策略，打破地环路路径——单点接地将所有设备接地线连接至同一物理点，避免电流环流；多点接地则通过低阻抗接地网络，将干扰电流快速导入大地；混合接地则根据设备频率特性选择接地方式，兼顾高频与低频干扰抑制。屏蔽设计则通过金属外壳或屏蔽层对设备或线路进行包裹，阻断电磁场耦合——例如控制柜采用金属外壳并可靠接地，可屏蔽外部电磁干扰；信号线采用双绞线或同轴电缆，通过线对扭绞或同轴结构抵消电磁感应。接地与屏蔽设计的关键在于系统性——接地电阻需控制在毫欧级以降低压降，屏蔽层需360度无缝隙覆盖以避免泄漏，同时需确保屏蔽层单端接地以防止形成新环路。

5 智能运维管理：实现预防性维护与快速响应

运维管理是系统可靠性保障的关键环节，需通过智能化手段提升故障预测与处理效率。

5.1 实时监测与预警

实时监测与预警是智能运维管理的核心基础，其通过部署传感器网络与边缘计算设备，构建覆盖设备状态、环境参数的全方位感知体系，为故障预测提供数据支撑。工业设备运行中，振动、温度、压力等物理参数的变化往往早于功能失效，传统定期巡检模式难以捕捉这些早期征兆，导致故障发现滞后。实时监测系统通过高精度传感器持续采集关键参数，例如在旋转设备中安装振动传感器，可捕捉轴承磨损引发的频率特征变化；在电气系统中部署温度传感器，能监测接触器触点过热风险。边缘计算设备则对原始数据进行预处理，通过特征提取与异常检测算法，识别参数偏离正常范围的趋势。

5.2 远程故障诊断

远程故障诊断是智能运维管理的效率突破点，其通过物联网技术实现设备状态数据的远程传输与集中分析，打破地域限制，缩短故障定位与修复时间。传统运维模式下，技

术人员需到现场查看设备日志、连接调试工具，对于复杂故障，排查过程可能耗时数小时甚至数天。远程故障诊断系统通过物联网网关将设备运行数据、报警信息实时上传至云端平台，技术人员可通过终端设备远程访问数据，结合设备历史记录与知识库，快速分析故障原因。

远程故障诊断的核心优势在于“即时性”与“协同性”——数据实时传输使技术人员能在故障发生第一时间介入，避免问题扩大；多专家协同分析则能整合不同领域经验，提升诊断准确性。

5.3 预防性维护计划

预防性维护计划是智能运维管理的策略核心，其基于设备历史数据与故障模型，动态调整维护周期与内容，从“固定时间维护”转向“按需维护”，延长设备使用寿命并降低维护成本。传统维护计划通常采用固定周期策略，这种模式未考虑设备实际负载、环境差异与个体磨损特性，可能导致过度维护或维护不足。预防性维护计划通过采集设备运行参数，例如振动频谱、温度变化、电流波动等，结合机器学习模型分析设备健康状态，预测剩余使用寿命。

6 结语

工业自控系统可靠性设计需从硬件、软件、抗干扰、运维及集成等多维度综合施策。硬件冗余与模块化设计构建物理层安全屏障，软件容错与自适应算法提升逻辑层稳定性，抗干扰技术保障信号传输可靠性，智能运维管理实现故障预防与快速响应，系统集成优化则确保各环节协同高效。随着人工智能、物联网与边缘计算技术的深度融合，工业自控系统将向智能化、自愈化方向发展，进一步推动制造业向高效、安全、可持续方向迈进。

参考文献

- [1] 侍洪波,孙自强,何衍庆.工业生产过程自控工程设计[M].化学工业出版社:202307:393.
- [2] 曹锋.工业机器人控制系统的应用[J].办公自动化,2021,26(20):62-64.
- [3] 邱志顺.工业自控系统现场安装与调试措施解析[J].中国金属通报,2019,(12):58-59.