

石油化工装置中的自动控制系统优化与安全性分析

彭 钊

克拉玛依市三达有限责任公司，新疆 克拉玛依 834000

[摘要] 石油化工装置的自动控制系统是保障生产安全与效率的核心技术载体。随着工业智能化进程加速，控制系统逐步从单一参数调节转向全流程协同优化，但其在高温、高压、多相流等复杂工况下面临的失效风险日益凸显。文章系统研究控制算法的适应性优化策略与安全防护体系的构建路径，提出融合机理建模与数据驱动的动态风险管控框架，旨在通过增强系统的容错能力与自愈功能，实现生产过程的本质安全。

[关键词] 石油化工装置；石油化工装置；自动控制系统；系统优化；安全性

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16294

中图分类号: TE687

文献标识码: A

Optimization and Safety Analysis of Automatic Control Systems in Petrochemical Plants

PENG Dian

Xinjiang Karamay Sanda Co., Ltd., Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract: The automatic control system of petrochemical plants is the core technical carrier to ensure production safety and efficiency. With the acceleration of industrial intelligence, control systems are gradually shifting from single parameter adjustment to full process collaborative optimization. However, the failure risks they face in complex working conditions such as high temperature, high pressure, and multiphase flow are becoming increasingly prominent. The article systematically studies the adaptive optimization strategy of control algorithms and the construction path of security protection system, proposes a dynamic risk management framework that integrates mechanism modeling and data-driven, so as to enhance the system's fault tolerance and self-healing function, and achieve intrinsic safety in the production process.

Keywords: petrochemical equipment; petrochemical plant; automatic control system; system optimization; safety

引言

现代石油化工生产在全球化能源转型与碳中和目标的驱动下，正加速向高效集约化方向演进。装置大型化突破了传统规模限制，单套千万吨级炼油联合装置已成为行业主流；工艺连续化通过物料流与能量流的无缝衔接，实现了资源利用效率的飞跃；控制智能化则依托工业互联网与边缘计算技术，推动生产管理从经验驱动向数据驱动跨越。自动控制系统作为工艺安全的核心屏障，其功能边界已从基础参数调节延伸至设备健康监测、能效优化、碳足迹追踪等全生命周期管理领域。在催化裂化装置中，再生器与反应器的压力平衡控制需以毫秒级精度响应催化剂循环波动；加氢精制单元则通过多变量协调控制维持反应床层温度场均匀性，避免局部过热导致的催化剂烧结。然而，复杂工艺系统中广泛存在的多变量强耦合效应，使得单一控制回路的调节动作常引发不可预见的交互干扰；非线性时变特性导致传统 PID 控制在处理原料组分波动、催化剂活性衰减等渐变因素时难以维持鲁棒性；设备老化引发的仪表漂移、阀门滞回等问题更可能使控制系统陷入“误判-误调-失控”的恶性循环。与此同时，工业物联网的深度应用在提升互联互通能力的同时，也使得控制系统暴露于 APT 攻击、勒索软件、中间人攻击等新型网络威胁

之下，恶意指令注入可能导致调节阀异常启闭、联锁逻辑篡改等重大安全隐患。破解安全与效率的深层矛盾，亟需构建兼具动态优化能力与纵深防御特性的智能控制系统——其核心在于通过机理与数据融合的算法体系实现复杂扰动的快速抑制，借助分层递阶的防护架构抵御多维度风险渗透，最终形成“感知-决策-执行-验证”的自主闭环管控能力。本文从控制算法革新、系统架构优化、安全防护强化三个维度展开研究：在算法层面探索深度学习与模型预测控制的协同优化路径，架构层面设计“云-边-端”协同的弹性控制网络，安全层面构建覆盖物理域、信息域、认知域的多层防护体系，为石油化工装置控制系统的可靠性跃升提供理论支撑与实践范式。

1 控制器应遵循故障安全原则

石油化工装置中的仪表自动控制设计旨在确保装置（单元）平稳、安全地运行，但当仪表或控制器发生故障时，可能会导致事故的发生。故障安全原则要求在仪表、控制器或控制回路中的输出元件或电路发生故障时，系统应自动恢复到预定的安全状态。例如，调节阀的风开/风关方式选择就是一个典型的案例。当调节阀的信号或气源中断时，调节阀的开关状态应根据生产安全要求进行选择。以加热炉为例，当燃料调节阀在加热炉系统出现故障时，

应立即停止燃料供给,避免引发“火上加油”的危险,因此必须选用风开阀(即故障关 FC)调节阀。而对于容器压力控制系统,如果通过排放物料来调节压力,物料出口的调节阀应选用事故开(FO)调节阀,以确保物料顺畅排出,防止系统内产生过大压力。

2 石油化工装置中的自动控制系统优化方法研究

2.1 控制算法优化(PID、模糊控制、神经网络等)

在复杂工业场景中,控制算法的优化是提升系统性能的关键路径。传统PID控制虽具备结构简单、参数整定直观等优势,但其线性调节机制难以适应时变非线性系统的动态特性,尤其在原料组分波动、设备老化等渐变因素影响下易出现调节滞后与稳定性下降。模糊PID控制通过构建隶属度函数与模糊规则库,将操作经验转化为自适应逻辑,在延迟焦化装置温度控制中有效抑制超调现象,实现平稳过渡;模型预测控制(MPC)采用滚动时域优化策略,通过动态求解多变量约束下的最优控制序列,在精馏塔多组分协同调节中突破传统单回路控制的局限性,显著提升分离效率。深度强化学习算法通过构建价值函数网络,赋予控制系统动态环境下的自主决策能力。在催化裂化反应深度控制中,其通过实时反馈调整剂油比与反应温度,应对原料性质突变与催化剂活性衰减,实现产物分布的精准调控^[1]。迁移学习技术则通过知识迁移机制,将历史装置的控制模型参数与特征快速适配至新建系统,大幅缩短调试周期并降低试错成本。算法优化需与工艺机理深度融合:基于反应动力学方程的物理模型为数据驱动算法提供理论约束,避免控制策略偏离热力学规律;而实时数据驱动的补偿机制可修正机理模型未涵盖的扰动因素,形成混合建模体系。

2.2 控制系统建模与仿真技术

控制系统建模与仿真技术的突破为石油化工装置优化提供了底层支撑。高精度建模需融合第一性原理与数据驱动方法:基于热力学定律构建的加氢反应器动力学模型,可精确刻画催化剂活性衰减对反应速率分布的影响规律,为控制参数动态调整提供理论依据;结合卡尔曼滤波设计的状态观测器,通过实时校正传感器噪声与过程扰动,重构裂解炉内不可直接测量的关键参数,显著提升出口温度控制精度。数字孪生技术通过建立物理装置的虚拟镜像,在乙烯压缩机组优化中实现控制逻辑的离线验证与参数预整定,例如通过模拟喘振边界条件预判调节阀动作阈值,有效规避现场试车风险。蒙特卡洛仿真则通过随机变量注入模拟极端工况,暴露出控制系统中潜藏的时序冲突与逻辑漏洞,如紧急停车信号与联锁保护的動作优先级矛盾。

2.3 控制系统集成与自动化水平提升

控制系统集成与自动化水平的跃升正推动石化工业生产向全流程智能化转型。现代控制架构通过“云-边-端”协同机制重构功能层级:边缘计算节点依托实时操作系统(RTOS)执行毫秒级关键控制指令,确保反应器压力

调节、压缩机防喘振等高速响应的可靠性;云端平台集成数字孪生与机器学习模块,对全厂能效数据深度挖掘生成全局优化策略。OPC UA 统一架构的应用打破异构系统壁垒,在芳烃联合装置中实现DCS与PLC的语义级互联,构建跨重整、歧化、烷基化单元的物料平衡控制链,使芳烃收率提升与能耗降低形成动态耦合。自适应自动化系统通过在线辨识工艺动态特性,自主重构控制拓扑。硫磺回收单元基于H₂S浓度频谱分析,动态切换比例控制与串级控制模式,在酸性气负荷突变时维持Claus反应器的最佳硫转化率;催化裂化装置则根据催化剂循环速率实时调整滑阀控制回路结构,避免床层料位剧烈波动。自主诊断功能融合机理模型与数据驱动算法,实现隐性故障的早期预警:通过分析调节阀定位器电流波形识别阀杆卡涩趋势,利用泵振动频谱特征检测轴承磨损状态,并自动触发冗余设备切换或控制参数补偿。

2.4 控制系统与信息化技术融合(DCS、PLC、SCADA)

工业互联网与信息技术的深度融合正重构石油化工控制系统的底层架构。基于云原生理念构建的分布式控制系统(DCS)突破传统层级限制,通过5G网络切片技术实现确定性通信保障,在延迟焦化装置中构建端到端低时延控制链路,使急冷油流量调节的实时响应能力跨越式提升;可编程逻辑控制器(PLC)与智能SCADA系统的协同优化,将设备健康管理(PHM)模块嵌入数据采集层,于常减压装置中实现腐蚀速率预测模型与控制参数的动态耦合,形成“监测-预警-调控”闭环管理^[2]。区块链技术的引入为控制指令的完整性与可追溯性提供底层支撑,其分布式账本特性确保联锁动作记录不可篡改,在事故回溯中可精准定位异常指令来源;知识图谱技术通过语义关联工艺知识库与控制逻辑,在催化重整反应器优化中自动推导温度、压力与空速的协同策略,突破人工经验调参的局限性。

3 自动控制系统的安全性分析

3.1 自动控制系统安全风险类型

石油化工自动控制系统的安全风险呈现多层次渗透特征。硬件层面面临电磁兼容性挑战,强电磁脉冲可能导致信号传输畸变,如雷击引发的DCS卡件击穿会直接瘫痪关键控制回路;极端温湿度环境加速电子元件老化,致使传感器漂移或控制器运算异常。软件层风险集中于实时操作系统(RTOS)的时序可靠性,优先级反转缺陷可能延误紧急停车指令执行,而内存溢出漏洞则会导致控制逻辑紊乱,例如分馏塔液位控制算法因堆栈溢出陷入死循环。网络层安全威胁随工业物联网扩展持续升级,Modbus/TCP、OPC UA等协议若未加密易遭中间人攻击,攻击者可篡改调节阀开度指令引发反应器超压;无线传输场景下面临伪基站信号劫持风险,可能导致压缩机防喘振控制信号被恶意屏蔽。功能安全与信息安全的交叉风险构成更高维威胁:针对安全仪表系统(SIS)的APT攻击可能伪造安全联锁条件,在非必要工况下触发误停车;勒索软件入侵基础过程

控制系统 (BPCS) 后, 通过加密控制参数文件实施生产胁迫。此外, 系统集成风险不容忽视, 异构控制系统间的协议转换漏洞可能被利用进行横向渗透, 例如通过 DCS 与 PLC 的通信接口植入恶意代码。

3.2 故障模式与影响分析 (FMEA)

故障模式与影响分析 (FMEA) 在控制系统的安全性评估中需突破传统框架, 向全生命周期与多维度协同方向深化。针对智能变送器等新型设备, 失效模式分析需兼顾硬件失效与算法缺陷: 除传感器膜片污染导致的测量偏差、通讯总线中断引发的信号丢失等传统故障外, 还需评估 AI 芯片在边缘计算场景下的算力瓶颈, 例如特征提取延迟或数据降维失真可能引发控制误判。在安全生命周期视角下, FMEA 需贯穿设计、调试、运维全流程: 设计阶段的电磁兼容测试不足可能埋下信号串扰隐患; 调试阶段的接地环路设计缺陷易在雷暴天气诱发共模干扰, 导致 DCS 卡件误报警; 运维阶段的组态逻辑误修改可能打破联锁保护时序, 例如误删急冷阀优先级设置引发反应器超温连锁失控。动态 FMEA 技术通过数字孪生平台构建虚拟测试环境, 量化人机交互失误对系统安全的影响。例如, 操作员在紧急工况下误触 HMI 界面“旁路联锁”按钮的行为, 可通过仿真模拟其触发非计划停车的概率分布; 维修人员未按规程校准流量变送器的操作偏差, 可映射为控制回路振荡幅值的敏感性参数。

3.3 安全仪表系统 (SIS) 配置与设计原则

安全仪表系统 (SIS) 的配置与设计需以风险降低为根本目标, 遵循“独立性、冗余性、多样性”原则。系统架构需依据安全完整性等级 (SIL) 认证要求, 采用“一选二” (1oo2) 或“三取二” (2oo3) 冗余表决机制, 例如乙烯裂解急冷单元中, 三重冗余温度传感器与安全 PLC 构成的逻辑解算单元, 可在单点失效时维持超温联锁功能完整性。诊断覆盖率 (DC) 的优化需融合智能诊断技术: 通过解析阀门定位器电流波形的时频特征, 识别阀杆卡涩、膜片破裂等渐进性故障; 结合振动频谱分析预判泵轴承磨损趋势, 实现故障前兆捕捉与冗余切换^[3]。定期功能测试 (PFT) 通过部分行程测试 (PST) 技术, 在不停工条件下验证紧急切断阀的动态性能, 例如模拟 5%~20% 开度动作检测阀芯黏滞与密封失效; 同时采用在线校验模块对安全 PLC 进行周期性自检, 确保逻辑运算单元与通信接口的可靠性。

3.4 系统冗余设计与网络安全防护

系统冗余设计与网络安全防护的协同实施构筑了控制系统的纵深防御体系。冗余架构需实现物理隔离与逻辑解耦的立体化防护: 主备控制器不仅采用独立电源与通讯链路, 更通过异构硬件设计 (如 ARM 与 FPGA 芯片混搭) 规避共因失效风险; 关键控制回路部署三模冗余 (TMR) 结构, 在加氢反应器压力调节中实现“一故障运行、两故障安全”的容错目标。量子密钥分发 (QKD) 技术为控制指令传输构建物理层信任基, 通过光子偏振态加密抵御量

子计算破译威胁, 确保 DCS 与 SIS 间安全联锁信号的不可窃听与篡改。零信任架构 (ZTA) 重构了控制网络的访问范式: 每个终端设备需通过硬件指纹认证与可信平台模块 (TPM) 验证确立身份, 操作人员的权限动态调整为“最小必需”模式, 例如工程师站仅允许在特定时间窗内访问组态参数; 工业防火墙内置协议深度解析引擎, 可识别 Modbus/TCP 帧中的异常功能码并阻断横向渗透。

3.5 控制系统安全性评估方法

控制系统安全性评估需融合多维度分析方法, 构建从静态到动态的全景风险画像。故障树分析 (FTA) 与贝叶斯网络的耦合应用, 将人误操作、设备劣化等不确定性因素转化为概率节点, 量化其对安全完整性等级 (SIL) 的边际效应, 例如操作员误触旁路开关的行为可通过因果链追溯至联锁失效概率的增量。HAZOP-LOPA 联合分析法通过系统解构工艺偏差路径, 辨识独立保护层 (IPL) 的覆盖盲区: 在加氢反应器超压场景中, 验证压力传感器冗余度是否足以对冲安全阀卡涩风险, 确保防护层叠加效应满足风险降低因子 (RRF) 要求。安全仪表功能 (SIF) 的验证采用马尔可夫模型, 通过状态转移概率矩阵计算平均失效概率 (PFDavg), 例如对紧急泄放阀的“需求-失效”场景建模时, 需涵盖机械卡滞、电磁干扰、供电中断等共因失效模式, 确保计算结果满足 SIL2 及以上等级要求。数字孪生驱动的动态风险评估突破传统静态分析的局限, 通过实时映射设备老化速率与催化剂失活动力学, 预测控制系统的安全裕度衰减曲线, 如模拟重整反应器管壁减薄对温度控制回路的长期影响, 提前触发预防性维护策略。

4 结语

石油化工装置自动控制系统的安全优化是涉及多学科交叉的复杂系统工程。通过构建“算法智能迭代-系统自主容错-风险动态管控”的三层防御体系, 能够显著提升控制系统在复杂扰动下的稳定性和安全性。未来, 随着数字线程、认知计算等技术的发展, 控制系统将实现从被动防护到主动免疫的范式跃迁, 为石油化工行业的高质量发展构筑坚实的技术底座。

【参考文献】

- [1] 房健. 浅析石油化工装置自动控制系统网络设计[J]. 石化技术, 2024, 31 (6): 326-328.
 - [2] 孙明阳, 闫希旺, 任帅. 自动控制系统在石化工程中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53 (6): 214-215.
 - [3] 聂辛丽, 刘霞, 叶雯, 等. 自动化控制在石油化工安全生产中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44 (18): 25-27.
- 作者简介: 彭钿 (1986.4—), 毕业院校: 西南石油大学, 所学专业: 生产过程自动化, 当前就职单位名称: 克拉玛依市三达有限责任公司, 就职单位职务: 物资供应站, 职称级别: 工程师。