

基于智能化控制的硝酸生产安全管理与效率提升探索

杜冬琛

唐山中浩化工有限公司, 河北 唐山 063000

[摘要]硝酸生产属于高危化工过程, 安全和效率问题一直备受关注, 智能化控制把传感器监测、自动化系统、人工智能和大数据技术集成应用起来, 实现工艺动态调节、风险预警以及能效优化, 有助于安全生产的保障以及运行效能的提升, 应根据硝酸生产的特征来探讨智能化控制在安全管理和效率提升方面的作用以及发展路径, 以促使行业绿色高效发展。

[关键词]硝酸生产; 智能化控制; 安全管理; 效率提升; 绿色发展

DOI: 10.33142/ect.v3i8.17513

中图分类号: X703

文献标识码: A

Exploration on Safety Management and Efficiency Improvement in Nitric Acid Production Based on Intelligent Control

DU Dongchen

Tangshan Zhonghao Chemical Co., Ltd, Tangshan, Hebei, 063000, China

Abstract: Nitric acid production belongs to high-risk chemical processes, and safety and efficiency issues have always been a concern. Intelligent control integrates sensor monitoring, automation systems, artificial intelligence, and big data technology to achieve dynamic process adjustment, risk warning, and energy efficiency optimization, which helps to ensure safety production and improve operational efficiency. The role and development path of intelligent control in safety management and efficiency improvement should be explored based on the characteristics of nitric acid production to promote the green and efficient development of the industry.

Keywords: nitric acid production; intelligent control; safety management; efficiency improvement; green development

引言

硝酸生产由于存在高温、高压和强氧化性介质而被看作高危化工环节, 行业发展长期受安全事故与能效不足的制约, “双碳”战略和高质量发展要求提出后, 传统管理模式难以达到安全与效率并重的目标, 而智能化控制靠实时监测、预测分析和自动调节能在保障安全时优化能耗、提升效能, 探索智能化控制在硝酸生产中的应用路径对推动产业绿色转型和持续发展意义重大。

1 智能化控制的理论基础与技术框架

1.1 智能化控制的基本概念与发展历程

在工业生产过程中, 把自动化、信息化和智能化手段引入进来形成智能化控制, 用它能精准调节与优化工艺、设备及运行状态, 不但可实现参数的实时采集与反馈, 而且能借助算法模型进行预测和优化以保持系统稳定与高效。其发展历程大致有三个阶段: 早期靠人工操作, 之后是以 DCS (分布式控制系统)、PLC (可编程逻辑控制器) 为代表的自动化阶段, 近年, 随着人工智能、物联网和大数据发展, 智能化控制进入新阶段, 该阶段强调自适应调节与多目标优化, 给硝酸生产等高危行业带来新机遇。

1.2 传感器网络、DCS/PLC 系统与工业互联网的融合

智能化控制以传感器网络为基础, 用于采集温度、压力、流量、浓度等关键参数, 硝酸生产时传感器需具备高精度、耐腐蚀、抗干扰等特性才能保证监测数据可靠,

DCS 擅长整体协调且 PLC 响应灵活, 二者结合为自动化奠定坚实基础, 在此基础上工业互联网通过边缘计算和云平台使数据互联互通, 从而让生产过程跨区域协同、远程优化成为可能, 推动硝酸生产从自动化走向智慧化。

1.3 化工过程里, 人工智能、大数据、机器学习有哪些应用价值?

化工生产复杂多变, 传统控制方法应对起来较难, 而人工智能在预测和优化方面有价值, 神经网络、模糊控制和强化学习都是常用算法, 依靠这些能让工艺自适应调节, 大数据技术可揭示运行规律和潜在风险, 能识别设备异常的早期信号以提前维护, 机器学习在数据积累过程中能不断更新模型使控制效果更佳, 硝酸生产中原料波动和工况变化频繁特别适合使用它, 将这三者结合起来不但能提高安全性和稳定性, 还能保障节能降耗和效率提升。

1.4 面向硝酸生产的智能控制总体架构

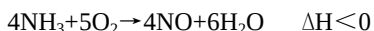
硝酸生产智能控制总体架构可概括为“感知—传输—分析—决策—执行”这样一个闭环, 其中多维感知靠传感器实现且高效传输由工业互联网负责, 分析与预测由大数据与人工智能平台完成之后控制策略得以生成并由 DCS/PLC 执行且形成反馈, 该架构让数据流、信息流和控制流融合起来, 能对温度和压力进行动态调节、及时排除隐患并通过能耗分析与工艺优化来提高经济效益, 以后要是引入数字孪生技术就能进一步把全过程虚拟映射出

来进行可预测管理以推动硝酸生产朝着安全化和绿色化发展。

2 硝酸生产过程的安全风险特征与控制需求

2.1 硝酸生产的工艺流程与典型安全隐患

氨氧化法常被用于硝酸生产,主要有氨气和空气混合、催化氧化、氮氧化物生成、吸收以及尾气处理等环节,这一过程里,高温下的铂—铈催化剂上氨气(NH_3)会发生氧化反应:



反应生成的一氧化氮(NO)进一步被氧化成二氧化氮(NO_2)后在吸收塔中溶入水中生成硝酸(HNO_3),整个反应过程大量放热且在高压条件下进行,有着典型的温度、压力和化学反应风险。

其主要隐患包括:氨气泄漏与爆炸:氨气属于可燃且有毒的气体,其体积分数在 15.5%~28%之间时处于爆炸极限,一旦泄漏与空气混合极易引发爆炸事故,并且高温催化存在风险,催化床层温度能达到 800~900℃,要是温度失控就可能发生催化剂烧结和系统损毁,氨氧化反应多在 0.6~1.0MPa 的压力下进行,高压设备疲劳或者被腐蚀极易产生破裂事故,尾气排放有隐患,未被完全吸收的氮氧化物排放出去会污染环境, NO_2 有强氧化性和刺激性,对操作人员和设备都有害。

2.2 高温高压、氧化性介质与副产物风险分析

硝酸生产工艺危险性的体现不只在于反应条件苛刻,还和介质特性以及副产物有关。

高温高压:在高温环境下反应速率会加快,若稍有控制不周就可能出现“热失控”的情况进而致使温度急剧上升,依据 Arrhenius 公式:

$$k = Ae^{\frac{E_a}{RT}}$$

反应速率常数 k 跟温度成指数关系,温度每升高 10℃ 反应速率就可能提高 1.5~2 倍,硝酸生产催化阶段任何温度不正常都可能快速演变成安全事故。硝酸及其前驱物 NO_2 是强氧化剂属于氧化性介质,能和有机物或者可燃物剧烈反应, NO_2 跟烃类接触也许会自燃,设备管道长期接触氧化性介质腐蚀会加快且泄漏风险会增大。硝酸生产时常会产生 N_2O (一氧化二氮) 这个副产物,其温室效应潜能大概是 CO_2 的 310 倍,这既是环境风险也意味着能源损耗,尾气要是含有高浓度 NO_x 不但大气质量受影响而且操作人员呼吸系统也会遭到严重危害。

2.3 传统安全管理手段的局限性

传统安全管理主要靠人工巡检、常规报警与被动应对,这种模式有明显局限,人工巡检有间隔性,不能连续实时监控,易错过事故早期信号,且阈值触发的报警系统识别不了趋势性异常,像温度在正常区间却持续上升时,常没法及时警示,再者各环节数据分散于子系统,缺乏统一平台,无法做到全流程风险研判,而且应急措施多是事故发

生后的处置,缺乏基于预测模型的主动干预,由于这些不足,传统安全防护有效性有限,适应不了硝酸生产复杂多变的工况环境。

2.4 智能化安全管理的切入点与目标

传统安全管理模式存在不足,引入智能化安全管理,其切入点主要有四个方面:其一,传感器网络能进行多维度参数的实时监测,依托大数据平台综合分析,从而可识别潜在风险模式;其二,利用机器学习等方法建立预测模型,能够提前预警设备异常和工艺偏差,用时间序列分析预测压力变化趋势,提前触发调节;其三,存在智能联锁与自动干预机制,异常信号一出现便可马上执行像关闭进料阀、降低温度或者切换备用装置等措施,减少人为滞后反应;其四,确立系统性目标,在保障安全时注重生产效率与能源利用的优化,使安全、经济与环保有机统一,硝酸生产中主要风险参数及其典型数值区间为智能化管理提供定量参考,如表 1 所示。

表 1 硝酸生产中主要风险参数及其典型数值区间

风险因素	控制参数	典型数值范围	风险表现
反应温度	T/℃	800~900	超温导致催化剂烧结、热失控
反应压力	P/MPa	0.6~1.0	超压导致设备爆裂
氨气浓度	% (体积分数)	15.5~28 爆炸极限	泄漏与空气混合易爆炸
NO_2 浓度	ppm	≤300	超标导致环境与人员中毒
N_2O 副产物排放	体积分数%	0.5~1.5	环境温室效应、能效损耗

从表格能看出来硝酸生产过程不少参数都处于高风险区间,要是超出控制范围特别容易出事故,而智能化安全管理的目标就是靠多参数协同监测和动态调节让生产过程一直在安全边界里头运行。

3 智能化控制在硝酸生产安全管理中的应用路径

3.1 实时监测与多参数联动预警机制

硝酸生产时,安全直接与温度、压力、流量、浓度等的波动相关,单一监测难以满足复杂需求,得建立实时监测和多参数联动预警机制,靠传感器网络与在线系统,关键工艺点能被动态监控,信息流通过接入工业互联网形成,核心是综合分析,温度接近上限时,不仅报警被触发,还结合压力和流量交叉判断以避免误报或漏报,就像温度持续升高且压力上升时,系统判定为“热失控”趋势并提前响应,这比传统阈值控制可靠高效。

3.2 智能化联锁保护与应急控制系统设计

高危工艺的屏障是联锁保护,传统联锁以硬件逻辑为基础很僵化且难以适应复杂工况,而智能化联锁系统能凭借软件逻辑、动态阈值和多级响应机制快速进行干预,它分为三层,一是快速隔离如关闭进料阀,二是工艺调整切换备用冷却回路,三是应急处置好比停机、尾气分流,应

急控制系统还可按照风险等级分级响应,低等级提示人工,高等级自动控制,这样既能减少误动作带来的损失又能保证危险情况下快速进行处置。

3.3 风险预测与动态调控算法的构建

硝酸生产复杂多变,仅靠被动报警与联锁难以避免事故,于是得引入风险预测与动态调控,智能算法学习历史与实时数据建立预测模型推演运行趋势,就像预测到吸收塔温度缓慢升高时系统能提前调节进料或者冷却防止隐患扩大,其优势是提前介入主动修正工艺参数让系统处于安全区间,算法还能兼顾安全、能耗和产量达成多目标平衡。

3.4 安全生产数据平台与可视化决策支持

智能化安全管理以实现透明化与科学化决策为目标,通过数据平台对工艺参数、设备记录和环境数据进行集中采集、存储与分析以形成全方位信息体系,可视化决策系统用三维流程图、动态曲线和风险分布图直观呈现生产状态,异常出现时自动标记且生成处置建议来辅助管理层快速决策。

4 智能化控制促进硝酸生产效率提升的机理

4.1 工艺参数优化与自动调节的作用机理

硝酸生产效率要提升的关键在于精准控制工艺参数,传统模式下多靠人工经验调节而响应滞后且有偏差,智能化控制能实时采集温度、压力、浓度和流量并结合算法动态优化且调节在毫秒级就能完成,氨氧化反应温度在 $880^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 时催化剂活性和产率最好而要是偏离超 10°C 转化率会下降 $2\%\sim 3\%$,闭环控制可让条件稳定于最优区间从而提升收率。

4.2 能耗监控与节能降耗策略

硝酸生产能耗挺高的,尤其是压缩空气与冷却系统,可通过智能化控制构建能耗监测平台,实时统计电力、蒸汽和冷却水的情况并自动调整策略。空压机满负荷时每小时电耗约 350kWh ,若负荷降低 10% ,一年可省电 30万kWh 且二氧化碳排放减少 260t ,动态阀门调节、余热回收、冷却水优化配置等可进一步降低消耗并延长设备寿命,实现经济和环保效益双赢。

4.3 生产过程全生命周期的优化与调度

传统调度依靠固定计划难以应对原料波动和市场变化,而智能化控制重视全生命周期的优化,借助预测性分析和多目标算法对原料利用、装置运行和检修周期进行统筹管理,提前 30天 进行预防性检修能使非计划停机率从 12% 降到 5% ,且产能高峰期时智能调度也可合理分配负荷,减少瓶颈,提升资源利用率与设备完好率。

4.4 智能化控制对产品质量稳定性的保障

硝酸在市场上有没有竞争力和它的浓度与纯度稳定性直接相关,智能化控制能精准调节吸收塔温度、塔压还有循环水流量以使硝酸浓度稳定在 $55\%\sim 68\%$ 这个范围里,要是波动超过 $\pm 1\%$ 则下游能耗和成本会增加不少,靠质量追踪和 SPC 方法系统可以实时监测且有问题能快速

调整,用了这个之后合格率从 96% 提到了 99% 、不合格率降了一半,市场稳定性和经济收益都有保证了,智能化控制在硝酸生产效率提升中的关键指标如表2所示。

表2 智能化控制在硝酸生产效率提升中的关键指标

控制环节	优化前数值	优化后数值	提升效果
反应温度波动范围	$\pm 15^{\circ}\text{C}$	$\pm 5^{\circ}\text{C}$	转化率提高约 $2\%\sim 3\%$
空压机能耗 (kWh/h)	350	315	每年节约约 30万kWh
非计划停机率	12%	5%	装置运行稳定性显著增强
硝酸产品合格率	96%	99%	产品稳定性提升

5 基于智能化控制的硝酸生产优化对策与发展方向

5.1 构建多层级智能控制体系

硝酸生产时全流程复杂,单一层级控制搞不定,得建个涵盖装置级、车间级和企业级的多层级智能控制体系,装置级着重对温度、压力、流量这些核心工艺参数实时控制以让反应稳定,车间级要整合不同装置数据达成整体工艺优化如吸收塔和冷却系统之间自动协调,企业级需引入大数据与云计算平台综合管理能耗、排放、产能等宏观指标,实践显示多层级控制模式能让装置综合利用率提高 $3\%\sim 5\%$ 且生产过程更灵活、适应性更强。

5.2 推进安全管理与效率提升的融合策略

高危行业里,人们常把安全和效率当成对立目标,但在智能化控制框架下这两者能融合,引入风险预测模型后,安全控制不只是防范事故还能靠动态调节来减少能耗与损失,就像系统预测到吸收塔温度有上升趋势时会自动提前启动冷却措施,这既能避免安全事故又能稳定反应速率提升效率。

5.3 建立行业标准与智能化平台

硝酸生产里智能化控制的应用当下还存在标准缺和平台散的状况,由于各企业设备接口、数据格式、安全规程不统一,智能化改造的成本高且兼容性差,建立包括传感器性能要求、数据通信协议、控制系统接口、应急连锁逻辑这些内容的统一行业标准相当关键,要推动建设跨企业、跨区域的智能化平台以实现数据共享和经验交流。

5.4 未来发展趋势:绿色化、智能化与自主化的深度结合

未来,“三化融合”会成为硝酸生产发展的趋势,在绿色化方面,“双碳”战略下,硝酸生产需进一步削减能源消耗和氮氧化物排放,借助智能化控制,如余热回收、氮氧化物分级吸收等手段,碳排放强度能降低 20% ;在智能化方面,人工智能、数字孪生、边缘计算将更多融入硝酸生产,构建起虚实结合的管控模式,用数字孪生对生产装置进行全周期仿真,把故障预测准确率提高到 90% ;

在自主化方面,核心传感器、控制器和工业软件自主可控是这一行业长远发展的关键,当下部分关键部件进口依赖度超 60%,以后要加快自主研发,确保供应链安全与产业稳定。

6 结束语

硝酸生产安全和效率的双重提升方面,智能化控制给出了系统化解决方案,通过多参数监测、智能联锁、风险预测、全生命周期优化等手段的运用,不仅有效降低了事故风险,还提升了能源利用率和产品质量。以后随着标准化平台建设、绿色低碳目标不断推进,硝酸生产会逐渐走向数字化、智能化、自主化深度融合,从而促使行业高质量可持续发展。

【参考文献】

- [1]张建飞.稀硝酸生产设备动力运行机组油封气系统的优化研究[J].河南化工,2025,42(5):49-51.
- [2]邢睿渊.工业硝酸尾气中的 NO_x 特性分析及控制研究[J].山西化工,2024,44(12):247-248.
- [3]尹连伟,李德军.硝酸铵生产、储存过程的安全技术探讨[J].氮肥技术,2023,44(3):34-38.
- [4]戴晓恒.固体硝酸铵储存安全设计要点探讨[J].硫磷设计与粉体工程,2023(6):34-37.

作者简介:杜冬琛(1993.7—),男,河北省唐山市人,汉族,本科学历,化工助理工程师,就职于唐山中浩化工有限公司,从事化工生产(硝酸生产和罐区储运)相关工作。