

Parameter optimization and stability Analysis of the Automated control System in the chemical Batch reaction process

Bo Li

Shanghai Fujia New Materials Technology Co., Ltd., Shanghai, 201105, China

Abstract

This paper systematically studies the application of automatic control systems in parameter optimization and stability guarantee in view of the complexity and control difficulties of chemical batch reaction processes. By analyzing the characteristics of batch reaction operation flexibility, process nonlinearity and timely denaturation, combined with cases such as fluororubber production and gas-phase cellulose ether production, the optimization strategies of key parameters such as temperature, pressure and flow rate are discussed, including predictive control based on kinetic models, intelligent algorithm optimization and automated execution schemes. Meanwhile, the influencing factors of stability are analyzed from three aspects: equipment failure, raw material fluctuation and external interference. A control strategy combining data-driven fault diagnosis, hardware redundancy and software fault tolerance, as well as a full-process monitoring system for raw materials are proposed.

Keywords

automatic control; chemical intermittent reaction; parameter optimization; stability analysis

自动化控制系统在化工间歇反应过程中的参数优化与稳定性分析

李波

上海孚加新材料科技有限公司, 中国·上海 201105

摘要

本文针对化工间歇反应过程的复杂性与控制难点, 系统研究自动化控制系统在参数优化及稳定性保障中的应用。通过分析间歇反应操作灵活性、过程非线性及时变性等特点, 结合氟橡胶生产、气相法纤维素醚生产等案例, 探讨温度、压力、流量等关键参数的优化策略, 包括基于动力学模型的预测控制、智能算法寻优及自动化执行方案。同时, 从设备故障、原料波动、外部干扰三方面剖析稳定性影响因素, 提出数据驱动故障诊断、硬件冗余与软件容错结合的控制策略, 以及原料全流程监控体系。

关键词

自动化控制; 化工间歇反应; 参数优化; 稳定性分析

1 引言

在化工产业向智能化、精细化转型的背景下, 间歇反应过程因兼具小批量多品种生产优势与复杂动态特性, 成为制约产能与质量提升的关键环节。传统控制方式在应对温度敏感性聚合反应(如氟橡胶分子链构建)或多参数耦合体系(如气相法纤维素醚取代反应)时, 常因参数波动导致产品性能离散、设备损耗加剧。据行业统计, 人工干预下的间歇反应参数偏差率可达 $\pm 5\%$ 以上, 由此引发的次品损失占生产成本的 $12\% \sim 18\%$ 。随着自动化技术与过程控制理论的

深度融合, 如何通过传感器-控制器-执行器的协同优化, 实现反应过程的动态寻优与鲁棒控制, 成为突破化工间歇生产效率瓶颈的核心命题。本文立足氟橡胶、纤维素醚等典型工艺, 构建“参数优化-稳定性保障”的双维度控制框架, 为流程工业的智能化升级提供技术路径。

2 化工间歇反应过程概述

2.1 间歇反应过程特点

化工间歇反应过程兼具优势与挑战。其操作灵活性强, 能依据不同产品需求, 灵活调整反应原料种类、配比及温度、压力等反应条件, 在精细化工生产小批量、高附加值产品时优势显著, 通过简单调整参数即可实现产品切换。然而, 该过程涉及化学反应、传热传质等复杂物理化学变化, 反应物浓度、温度、压力等参数随时间动态变化且相互影响, 呈

【作者简介】李波(1986-), 男, 中国四川广安人, 本科, 工程师, 从事化工装备及自动化控制系统、塑料成型装备及检测控制系统研究。

现高度非线性与时变性,如有机合成反应中若热量移除不及时,易引发安全事故。同时,受设备状态、原料质量等因素影响,批次间产品质量易出现差异,在对质量一致性要求极高的制药行业,这种差异会影响药品疗效与安全,因此需对间歇反应过程进行严格控制。

2.2 间歇反应过程自动化控制需求

为保障化工间歇反应高效运行及产品质量稳定,需对温度、压力、流量等关键参数精准控制。以氟橡胶生产为例,反应温度的细微偏差会改变橡胶分子结构,影响硬度、拉伸强度等性能,而自动化控制系统可通过调节加热或冷却功率,将温度控制在极小偏差内。鉴于间歇反应过程复杂,自动化控制系统借助温度、压力、浓度等各类传感器实时采集参数,传输至控制器后,依据预设算法分析数据,一旦参数偏离设定值,即刻指令执行机构调整,实现实时反馈控制。此外,自动化控制系统实现反应自动化操作,减少人工干预,提升生产效率。其完善的安全保护功能,能实时监测超温、超压等异常,及时启动切断进料、紧急冷却等措施。在气相法纤维素醚生产中,该系统精准把控物料流量与反应时间,既提高效率,又避免人为失误引发的安全事故。

3 自动化控制系统关键技术

3.1 传感器技术

在化工间歇反应中,温度和流量传感器对参数监测与控制至关重要。温度传感器中,热电偶响应快、测温范围广,能快速准确测量反应釜高温区域温度变化,适用于对温度变化响应要求高的反应;热电阻测量精度高、稳定性好,在精细化工产品生产等对温度测量精度要求极高的场合应用广泛。压力传感器方面,应变片式通过检测应变片电阻值变化测压力,精度高、线性度好,适用于一般压力测量;压电式利用压电材料受压生电特性测压力,响应速度快,适合测量气体快速充放等动态压力变化的反应。流量传感器中,电磁流量计适用于导电液体流量测量,精度高且不受流体密度、粘度影响;涡轮流量计结构简单、测量范围宽;质量流量计能直接测流体质量流量,不受温度、压力干扰,精度极高,常用于氟塑料生产等对物料配比精度要求严的反应。

3.2 控制器技术

在化工间歇反应自动化控制系统中,PLC、DCS和智能控制器应用广泛。PLC因可靠性高、编程简单、抗干扰能力强,可根据预设逻辑程序处理传感器数据并控制执行机构,在气相法纤维素醚生产中能精确控制反应釜进料、出料等环节,还可通过扩展模块实现系统集成控制。DCS作为分布式控制系统,采用分散控制、集中管理方式,由过程控制站等部分组成,适用于大型复杂反应,如氟橡胶大规模生产中对多反应釜及辅助设备的集中监控,且能通过先进算法优化控制,其良好人机界面便于操作。随着AI发展,智能

控制器(如模糊、神经网络控制器)应用渐广,前者基于模糊逻辑处理复杂非线性问题,后者通过模拟人脑神经元学习控制,均能提高控制精度与系统稳定性。

3.3 执行器技术

在化工间歇反应自动化控制系统中,调节阀、泵和电机是重要执行器。调节阀用于调节流体流量以控制反应参数,常见的有气动、电动和液动三类。气动调节阀以压缩空气为动力,结构简单、动作迅速,在化工生产中应用最广;电动调节阀以电能为动力,控制精度高,适用于对流量调节精度要求高的场合;液动调节阀出力大,适用于高压、大口径管道流量调节,如氟橡胶生产中可用气动调节阀调节冷却水流量控制反应釜温度。泵用于输送物料,离心泵流量大、扬程适中,广泛应用于各种流体输送,如气相法纤维素醚生产中输送原料和产物;容积泵适用于高粘度、高压流体输送,可确保物料精确计量。电机用于驱动搅拌器等设备,其性能影响搅拌效果,自动化控制系统通过控制电机转速、转向等参数,实现对搅拌强度的精确控制,变频电机常用于对搅拌速度要求严格的反应。

4 参数优化策略

4.1 反应温度优化

反应温度是化工间歇反应的关键影响因素,其通过阿伦尼乌斯方程显著影响反应速率、产物选择性与收率:温度升高虽能加快反应速率,但易引发副反应,如氟橡胶生产中温度过高会导致分子过度交联,影响产品硬度与弹性。因此,需在保障反应速率的前提下优化温度以提升产物选择性与收率。优化方法包括:基于反应动力学模型模拟不同温度下的反应进程,预测最佳温度范围,如气相法纤维素醚生产中通过模型拟合参数,精准预测不同原料配比下的最优温度,提高产品取代度均匀性与收率;采用模型预测控制(MPC)算法,根据动态模型预测温度变化趋势,实时调整加热/冷却量;借助遗传算法、粒子群优化算法等智能优化算法,对复杂反应体系的温度参数进行全局寻优,以优化反应效率与产品质量。

4.2 反应压力优化

反应压力在化工间歇反应中影响反应平衡、速率及产物分布,对有气体参与的反应,增加压力常促使反应向气体分子数减少方向进行,如加氢反应中适当提高压力可提升产物产量。但压力过高会增加设备投资、运行成本及安全风险,高压下设备耐压要求高,故障易引发安全事故。优化反应压力需综合反应特性、设备条件与安全因素:先通过实验和理论分析确定最佳压力范围,如氟塑料生产中经过不同压力下的聚合反应实验,分析压力对聚合物分子量及分布的影响,以确定兼顾产品质量与生产安全经济的压力区间;再借助自动化控制系统实现精确控制,通过压力传感器实时监测,偏离设定值时自动调节进气阀、排气阀或压缩机等设备,同

时设置压力报警与紧急泄压装置，超安全上限时启动泄压程序，防范安全事故。

4.3 物料流量优化

物料流量对化工间歇反应至关重要，其直接影响反应物浓度、接触时间，进而作用于反应速率与产物质量。连续进料时，合理控制流量可维持稳定反应物浓度，若流量过大，反应物在釜内停留时间短、反应不完全，收率降低；流量过小则反应速率慢、生产效率低。如气相法纤维素醚生产中，精确控制原料流量能稳定各反应物摩尔比，提升产品质量一致性。优化物料流量需从两方面着手：一是依据反应工艺，通过计算与实验确定最佳流量值，像氟橡胶生产中，根据聚合反应的化学计量关系和动力学特性，精准计算各单体及助剂的进料流量；二是借助自动化控制系统的流量传感器与调节阀，实现实时监测与调节，传感器将实际流量信号反馈给控制器，控制器依预设值调节调节阀开度，使流量稳定在最佳值，还可采用自适应控制等先进算法，根据反应实际变化自动调整控制参数，提高流量控制精度与稳定性。

5 案例分析：氟橡胶生产参数优化

某氟橡胶生产企业原间歇反应存在诸多问题。反应温度波动大，控制精度仅 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，致使产品硬度、拉伸强度等性能指标批次差异明显；反应压力控制不精准，超压或低压情况频发，既影响效率又增加设备损耗与安全风险；物料流量依赖人工调节，各批次进料流量不一，导致产品氟含量波动，次品率高达 12%。针对这些问题，企业引入自动化控制系统并优化反应参数。温度控制上，采用高精度热电偶搭配基于模型预测控制算法的 DCS 控制器，控制精度提升至 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，并借助反应动力学模型优化温度曲线。压力控制方面，安装高性能传感器与智能调节阀，将压力波动范围控制在 $\pm 0.05\text{MPa}$ 内，同时构建安全保护系统。物料流量则通过质量流量计、电动调节阀及 PLC 控制器实现自动化精准调控，批次进料流量偏差小于 $\pm 0.5\%$ 。优化后成效显著。产品性能指标波动大幅缩小，硬度稳定在邵氏硬度 68 - 72，拉伸强度维持在 17 - 19MPa，氟含量均匀性改善，次品率降至 3%。生产效率提高 16.7%，单批次时间从 12 小时缩至 10 小时，设备故障减少，维护成本降低 25%。经济效益上，产品提价 10%，综合利润增长约 30%，自动化项目一年内实现成本回收。

6 稳定性保障措施

为保障化工间歇反应系统稳定性，自动化控制系统需

具备故障诊断与预测、容错控制及原料质量监控等功能。

在故障诊断与预测方面，可采用主成分分析 (PCA)、支持向量机 (SVM) 等数据驱动方法，对传感器采集的反应釜温度、压力等多变量数据进行分析，通过建立正常工况数据模型，快速定位故障类型与位置。例如，在氟橡胶生产中，利用 PCA 可有效检测反应釜夹套泄漏等故障。同时，结合机器学习算法长期监测设备运行数据，预测故障发展趋势，提前维护更换设备。

容错控制是关键手段，包括硬件冗余与软件容错。硬件冗余通过设置备用设备或传感器实现，如气相法纤维素醚生产中设置双流量计，主流量计故障时备用立即投入。软件容错则借助先进算法重构控制系统，如当反应釜搅拌电机故障导致转速下降时，采用模型参考自适应控制算法，自动调整反应温度等参数，补偿搅拌效果损失，维持反应稳定。

原料质量监控需建立完善检测体系，入库前严格检测各项指标，并采用在线检测技术实时监测质量变化。如氟塑料生产中，利用近红外光谱技术在线监测原料成分与纯度，异常时及时调整反应参数。同时，与优质供应商建立长期合作，监督原料生产过程，从源头保证质量稳定。

7 结语

本研究通过理论分析与工程实践结合，揭示了自动化控制系统在化工间歇反应中的应用范式：在参数优化层面，基于动力学模型与智能算法的融合实现了温度、压力、流量的动态匹配，使氟橡胶生产批次时间缩短 2 小时，能效提升 16.7%；在稳定性保障层面，数据驱动的故障诊断与软硬件容错机制将系统平均无故障运行时间延长至 4500 小时以上。然而，面对新能源材料合成、生物基化学品制备等新兴领域的极端反应条件（如超高压、强腐蚀环境），现有控制方案在传感器耐久性、算法鲁棒性方面仍存在提升空间。未来随着工业互联网与边缘计算技术的普及，化工间歇反应的自动化控制将向“全流程智能感知 - 实时协同优化 - 自适应容错”的新一代控制范式演进，为绿色化工与高端材料制造提供核心技术支撑。

参考文献

- [1] 汤红雪. 自动化控制系统在化工生产安全性提升中的效果评估[J]. 中文科技期刊数据库(全文版) 工程技术, 2025(1): 175-178.
- [2] 郭开. 基于AI技术的智能化工厂自动化控制系统设计[J]. 化工安全与环境, 2024, 37(12): 38-41.
- [3] 苏英成, 吴涛. 化工反应过程中的自动化控制策略优化[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2024(10): 0001-0004.