

化工生产工艺参数精细化智能优化的成本效益

成一飞 (金光集团 - 江苏海力化工有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要: 针对环氧氯丙烷生产中多参数耦合优化难题, 提出基于自适应粒子群算法的精细化智能优化方法。通过主成分分析筛选关键参数, 构建多目标约束模型, 引入动态权重机制提升寻优效率。在环氧氯丙烷装置应用中, 原材料单耗降低 3.2%, 能耗下降 5.8%, 产品合格率提升至 99.5%, 设备平均故障间隔时间延长 3.1%。成本效益评估表明, 该方法有效实现安全约束下的经济效益最大化, 年节约能源成本 810 万元。

关键词: 工艺参数优化; 自适应粒子群算法; 成本效益评估; 多参数耦合; 环氧氯丙烷

中图分类号: TQ018; TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0094-03

Cost-Benefit Analysis of Refined Intelligent Optimization for Chemical Production Process Parameters

Cheng Yifei (Sinar Mas Group - Jiangsu Haili Chemical Co., Ltd., Yancheng Jiangsu 224000, China)

Abstract: To address the challenge of multi-parameter coupling optimization in epichlorohydrin production, this paper proposes a refined intelligent optimization method based on the adaptive particle swarm optimization algorithm. Key process parameters were screened via principal component analysis, a multi-objective constrained optimization model was constructed, and a dynamic weight mechanism was introduced to improve optimization efficiency. The application of this method on an epichlorohydrin production unit resulted in a 3.2% reduction in raw material unit consumption, a 5.8% decrease in energy consumption, an increase in product qualification rate to 99.5%, and a 3.1% extension of the mean time between failures (MTBF) of equipment. Cost-benefit evaluation shows that this method effectively maximizes economic benefits under safety constraints, achieving an annual energy cost saving of 8.1 million yuan.

Keywords: Process parameter optimization; Adaptive particle swarm optimization algorithm; Cost-benefit evaluation; Multi-parameter coupling; Epichlorohydrin

环氧氯丙烷生产过程的能效提升与成本控制是行业核心挑战, 传统单参数优化模式难以应对多变量强耦合的复杂工况。当前智能优化技术存在参数关联性挖掘不足、约束条件处理僵化等局限, 导致实际应用效果受限。本研究聚焦环氧氯丙烷工艺参数的动态耦合特性, 提出融合数据驱动与机理分析的精细化智能优化框架, 旨在建立可量化评估的安全高效优化路径, 为化工智能制造提供理论支撑与方法论创新。

1 化工工艺参数精细化智能优化的理论基础

环氧氯丙烷工艺参数优化是通过调控反应温度、压力、物料配比等关键变量以实现生产目标的技术手段, 精细化优化则进一步聚焦参数的动态变化与耦合关系, 旨在提升调控精度与生产效益。传统单参数静态优化常忽略参数间的非线性关联, 导致生产潜力挖掘不足, 而精细化优化能有效破解这一问题, 对提高生产效率、降低资源消耗具有重要意义。机器学习中的神经网络模型已用于预测参数变化对产品质量的影响, 进化算法如粒子群优化在多参数寻优中表现出全局搜索优势, 但现有应用多局限于单一工艺环节的局部优化, 缺乏对全流程多参数动态耦合的系统分析, 因此本文将围绕环氧氯丙烷多参数动态耦合为核心方向, 结合数据驱动与机理分析构建精细化智能优化框

架, 为后续模型的落地应用提供理论支撑。

2 精细化智能优化模型的构建

2.1 工艺参数特征提取方法

环氧氯丙烷工艺参数特征提取是实现智能优化的关键环节, 需要全面分析生产过程中氯丙烯进料量、反应温度、碱液浓度、精馏塔压力等多参数间复杂的动态耦合关系, 这些参数往往存在强非线性相互作用, 单一参数调整可能引发系统性波动, 因此需采用科学方法识别关键特征变量; 主成分分析法通过标准化处理原始数据消除量纲差异, 构建参数的协方差矩阵揭示内在关联, 计算特征值与特征向量确定主成分贡献率, 依据累积方差贡献率阈值筛选核心参数集, 显著降低数据维度同时保留主要过程信息, 该方法有效解决了传统经验筛选的主观性缺陷, 确保特征提取的客观性与科学性。在工业落地流程中, 首先需建立覆盖全工艺周期的实时数据采集系统, 获取关键设备的温度传感器、压力变送器、质量流量计等高频监测数据, 经数据清洗与标准化预处理后输入主成分分析模型, 计算各参数在特征空间的投影坐标, 选取累积贡献率超过 85% 的主成分对应参数作为核心特征集, 最终输出与生产目标关联度最高的优化控制变量, 为后续智能优化算法提供精准输入。

2.2 智能优化算法的适配改进

在环氧氯丙烷多参数优化场景中，粒子群算法（PSO）凭借参数少、收敛快的特点适用于快速寻优，但对复杂非线性问题的全局搜索能力不足，易陷入局部最优；差分进化算法（DE）通过变异与交叉操作具备更强的全局探索性能，但计算成本较高且收敛速度不稳定。针对上述局限，本文提出自适应权重粒子群优化算法（AWPSO），引入非线性惯性权重衰减机制，其核心改进在于权重系数随迭代次数动态调整，初期赋予较大权重增强全局探索能力，后期减小权重提升局部开发精度，该机制有效平衡了算法探索与开发阶段的矛盾。算法迭代流程如图1所示：初始化阶段随机生成粒子群位置向量，每个粒子代表一组工艺参数组合；评估阶段计算各粒子适应度值（见公式1），依据适应度排序更新个体与群体历史最优解；权重更新阶段根据当前迭代次数动态调整惯性权重；位置更新阶段结合个体最优与群体最优引导粒子移动；收敛判断阶段依据预设阈值或最大迭代次数终止计算，输出全局最优参数解集。该算法设置粒子规模为50，最大迭代次数200次，学习因子均取2.0，初始权重0.9，收敛阈值 $1e-6$ ，通过权重自适应机制保障了环氧氯丙烷复杂耦合参数空间的搜索效率与收敛稳定性。

$$f = w_1 \cdot \frac{Y_{actual}}{Y_{target}} + w_2 \cdot \frac{E_{min}}{E_{actual}} + w_3 \cdot Q_{score}$$

其中， f 表示适应度函数值（无量纲）， Y_{actual} 为实际产品收率（单位：%）， Y_{target} 是目标收率（单位：%）， E_{actual} 表示实际能耗（单位：kWh/t）， E_{min} 为理论最小能耗（单位：kWh/t）， Q_{score} 是质量评分（范围0-1）， w_1 、 w_2 、 w_3 分别为收率、能耗、质量的权重系数（满足 $w_1+w_2+w_3=1$ ）。

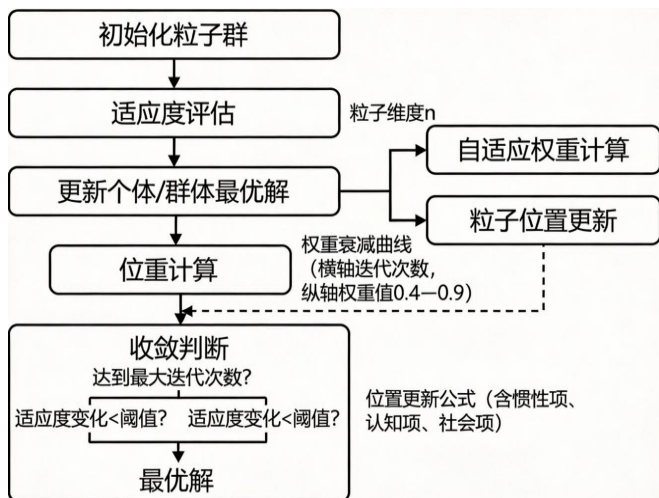


图1 自适应粒子群优化算法架构图

2.3 模型约束条件设定

环氧氯丙烷工艺参数优化需严格遵循两类约束条件以确保模型实用性与安全性，硬约束来源于设备物理极限与工艺安全边界，如反应器温度需控制在120–180℃（搪瓷反应釜耐受上限）、环氧氯丙烷精馏塔压力维持在0.08–0.12MPa、丙烯进料流量受计量泵额定容量限制；软约束则关联产品质量与环保要求，包括产品纯度（环氧氯丙烷纯度 $\geq 99.8\%$ ）、副产物浓度（二氯丙醇含量 ≤ 100 ppm）、能耗阈值（单位产品能耗 ≤ 1.2 tce/t）。约束条件的量化采用机理建模与数据驱动相结合的方法，硬约束通过设备参数手册直接设定不等式边界（如），软约束则构建参数与质量指标的回归模型（如纯度），将质量目标转化为工艺参数可行域。为验证约束体系合理性，需基于历史数据执行可行性分析，检查约束交集非空性并测试边界条件敏感性，最终确保优化解同时满足安全运行与生产标准。

3 成本效益量化评估体系

3.1 成本指标选取与量化

成本效益评估需建立科学的成本指标体系，重点选取原材料消耗、能源消耗、催化剂损耗、设备折旧与维护费用四类核心指标，这些指标直接反映工艺优化对生产成本的影响；原材料消耗量化采用单位产品原料消耗量（如环氧氯丙烷生产中的丙烯单耗，单位为kg/t），能源消耗涵盖电力、蒸汽、冷却水等介质，通过单位产品能耗（单位为kWh/t）综合表征；催化剂损耗按单位时间失活率折算成本，设备折旧则依据年度均摊原则计算。量化方法需结合工艺特性设计，以单位产品能耗为例，其计算需统计生产周期内各能源介质的输入总量（电力表读数、蒸汽流量计累计值等），乘以对应折标系数统一转化为标准煤当量（tce），再除以同期合格品产量获得可比数据。指标权重分配采用层次分析法与熵值法组合策略，首先通过专家打分构建判断矩阵确定主观权重，再基于历史数据离散程度计算客观权重，最终组合权重经一致性检验后确定，确保权重分配既反映管理导向又尊重数据客观性。

3.2 效益指标映射与计算

工艺优化效益评估需区分直接与间接效益，直接效益体现为产品质量合格率提升、单位产品原料消耗降低等可量化经济收益；间接效益则涵盖设备使用寿命延长、操作安全性增强等长期价值。以合格率为例，其提升直接减少废料处理成本并增加有效产量，计算模型为优化后合格品增量乘以产品单价；设备寿命延长效益需结合设备关键参数（如反应温度波动方差）与疲劳损伤的关联模型，当温度标准差降低时，基于

Arrhenius 方程推算设备材料蠕变速率减缓, 进而延长平均故障间隔时间 (MTBF), 其效益转化为年均维修成本节约额与事故风险降低值。指标映射需建立工艺参数优化值与效益的显式函数关系, 如温度控制精度提升 $\Delta\sigma_T$ 映射至合格率增量 ΔY 采用多元线性回归模型 $\Delta Y = k \cdot \Delta\sigma_T$, 设备寿命增益则通过应力-寿命曲线 (S-N 曲线) 关联参数稳定性改善幅度, 最终实现效益的定量表征。实际应用中, 优化后环氧氯丙烷装置产品质量达标率提升至 99.5%, 关键设备非计划停机率降低 3%, 年节约能源成本 810 万元。

3.3 成本效益综合评估模型

成本效益综合评估模型通过统一量纲将多维指标整合为单一评价价值, 采用成本效益比率 (CBR) 模型将成本降低率与效益提升率线性组合, 其中成本指标取负向值 (成本降低为正向贡献), 效益指标取正值, 利用极差标准化消除量纲差异后加权求和, 计算方法如公式 1 所示, 该模型能够客观反映工艺优化的综合收益水平。指标权重依据层次分析法确定的组合权重赋值 (原材料成本权重 0.35、能耗权重 0.30、质量效益权重 0.25、设备寿命效益权重 0.10), 优化前后指标对比如表 1 所示, 通过对比可量化各维度改善幅度。

$$S = \sum_{i=1}^4 w_i \cdot \frac{X_i - X_i^{\min}}{X_i^{\max} - X_i^{\min}}$$

其中, S 表示综合得分 (范围 0-1), w_i 为第 i 项指标权重 ($\sum w_i = 1$), X_i 是当前指标值 (单位依指标类型而定), X_i^{\min} 、 X_i^{\max} 分别为该指标历史最小值和最大值 (用于标准化处理)。

该评估模型将异构指标转化为可比较的综合得分, 为工艺优化决策提供量化依据。

4 模型应用与落地效果验证

4.1 案例场景选取与落地策略

环氧氯丙烷装置因其工艺复杂性与能耗敏感性成为验证精细化智能优化模型的理想场景, 其关键控制参数包括氯丙烯进料流量、反应温度 (120-180℃)、碱液浓度 (30-35%) 及精馏塔压力 (0.08-0.12MPa) 等, 这些参数直接影响环氧氯丙烷收率与装置能效。模型部署采用三阶段渐进式策略: 数据层通过分布式控制

系统采集反应温度、产物组分浓度等过程变量及质量流量计、热电偶的实时监测数据; 模型层基于历史数据训练特征提取与优化算法, 建立多目标优化函数; 应用层将优化参数输出至实时控制系统实现闭环调节, 调试阶段设置参数调整幅度阈值以保障运行稳定性。落地过程中主要面临实时数据时滞导致模型响应滞后、多参数耦合引发震荡风险等关键问题, 解决方案包括引入滑动窗口补偿机制校准数据时间戳, 以及添加约束平滑算法抑制参数突变, 最终实现操作参数动态寻优的平稳过渡。实际应用中, 通过该优化方法实现环氧氯丙烷装置满产运行, 产能利用率达 100% 以上, 工艺连锁投用率 100%。

5 结语

本研究构建的环氧氯丙烷工艺参数精细化智能优化体系, 通过特征提取、算法改进与约束建模的协同创新, 有效解决了多参数动态耦合的优化难题。自适应粒子群算法与成本效益量化模型的结合, 在保障生产安全的前提下显著提升经济效益, 实现年节约能源成本 810 万元。该框架具备较强的行业普适性, 其方法论可为环氧氯丙烷及相关化工装置的智能优化升级提供重要参考, 未来将进一步探索多目标协同优化的实时决策机制。

参考文献:

- [1] 焦晓峰. 化工企业的精细化成本管理 [J]. 化工管理, 2021(15):123-124.
- [2] 黄凯. 芳烃分离装置生产工艺参数优化 [J]. 中国化工贸易, 2019(08):78-79.
- [3] 姜雪. 石油化工生产工艺技术优化 [J]. 科学与财富, 2019(12):98-99.
- [4] 杨倩容. 精细化工生产企业成本控制探讨 [J]. 财讯, 2020(18):112-113.
- [5] 白晓慧. 探讨化工企业成本管理精细化管理 [J]. 财会学习, 2019(20):45-47.

作者简介:

成一飞 (1982-) 男, 汉族, 河北张家口人, 本科, 生产技术经理, 项目负责人, 研究方向: 化工生产精细化智能管理。

表 1 优化前后成本效益指标对比表

评估指标	优化前基准值	优化后值	变化幅度
原材料单耗 (kg/t)	1150	1113	-3.2%
单位产品能耗 (kWh/t)	1250	1175	-5.8%
产品合格率 (%)	96.4	99.5	+3.22%
设备 MTBF (h)	12,800	13,197	+3.1%