

人工智能与化工安全设计课程的融合路径探索

杨 傲¹, 米红甫¹, 张 俊¹, 杨圆鉴¹, 石 涛^{2*}, 张 浩³, 申威峰^{2*}

¹重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

²重庆大学化学化工学院, 重庆

³西南大学化学化工学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月22日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月5日

摘 要

该文将化工过程仿真模拟、多目标智能优化算法和化工安全设计专业基础知识进行了有机的融合, 并以实际工程问题丙酮和甲醇的共沸分离为研究对象。通过二元热力学相图在不同压力下的变化趋势来分析变压精馏分离的可行性, 利用启发式计算方式确定变压精馏过程的初始模拟参数(如循环流量和组成); 基于Aspen Plus搭建两塔变压精馏分离丙酮-甲醇的工艺过程, 并对启发式结果进行模拟验证; 进一步通过智能教学辅助工具DeepSeek等辅助学生学习Aspen Plus和Matlab平台的数据实时链接方式; 最终采用多目标遗传算法以经济、环境和安全性能作为目标函数对该变压精馏过程进行优化求解。该课程在已有的化工热力学、化工原理和安全系统工程专业基础知识上融合了现代流程模拟软件Aspen Plus和智能优化算法等学科前沿课程内容, 有机的将专业理论知识、前沿学科知识和工程实践应用结合, 强化了大学生专业基本功训练, 激发了大学生对解决工程问题的研究兴趣, 全面提升了大学生的创新思维能力。

关键词

化工安全, 变压精馏, 本质安全, 共沸分离, 教学设计

Exploration of the Integration Path of Artificial Intelligence-Enabled Chemical Safety Design Course

Ao Yang¹, Hongfu Mi¹, Jun Zhang¹, Yuanjian Yang¹, Tao Shi^{2*}, Hao Zhang³, Weifeng Shen^{2*}

¹College of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

²School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing

³School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest University, Chongqing

Received: October 22, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 5, 2025

*通讯作者。

文章引用: 杨傲, 米红甫, 张俊, 杨圆鉴, 石涛, 张浩, 申威峰. 人工智能与化工安全设计课程的融合路径探索[J]. 创新教育研究, 2025, 13(12): 103-112. DOI: 10.12677/ces.2025.1312939

Abstract

This article organically integrates chemical process simulation, multi-objective intelligent optimization algorithms, and fundamentals of chemical safety design, focusing on the practical engineering problem of azeotropic separation of acetone and methanol. The separation feasibility of pressure-swing distillation is analysed through the variation trend of binary thermodynamic phase diagrams at different pressures. Furthermore, the initial simulation parameters (such as flow rate and composition of recycled streams) of the pressure-swing distillation process is determined through heuristic calculations. We build up a double-column pressure-swing distillation process model for separating acetone-methanol based on Aspen Plus, and the heuristic results are verified. Furthermore, intelligent teaching aids such as DeepSeek are utilized to assist students in learning the real-time data linking methods on Aspen Plus and Matlab platforms. Then, the multi-objective genetic algorithm is used to optimize the pressure swing distillation process with economic, environmental, and safety performance as objective functions. Above all, this course integrates the cutting-edge course content such as advanced process simulation software Aspen Plus and intelligent optimization algorithms with existing knowledge of chemical thermodynamics, chemical principles, and safety systems engineering. It organically combines professional theoretical knowledge, cutting-edge disciplinary knowledge, and engineering practice applications together, which will strengthen the basic training of college students' professional skills, stimulates their interest in solving engineering problems, and comprehensively enhances their innovative thinking ability.

Keywords

Chemical Safety, Pressure-Swing Distillation, Intrinsic Safety, Azeotropic Separation, Teaching Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

化工安全设计属于化工安全工程和安全工程等专业的综合性设计实验课程,需具备较强的系统工程思维,需要学生既能掌握专业基础知识又能与工程实践相结合[1][2]。在当前化工安全设计课程教学中首先针对化工过程进行设计,基于设计结果进行安全分析,最后在安全分析结果的指导下提出安全防范措施[3][4]。然而,目前课堂教学中存在以下问题:① 教学过程中,化工设计案例常常是已有的案例,学生对其理解性较差,仅能按部就班的来完成课程内容;② 在化工过程设计前期时仅考虑经济问题,未针对环境 and 安全方面做出评价;③ 现有的教学手段单一,难以激发学生的创新能力,且仅通过安全评估来查找隐患提出防范措施,未能从根本上降低或消除安全风险。针对上述问题,化工安全设计教学模式应推陈出新,结合前沿现代工具(如 Aspen Plus 和 Matlab)和大语言模型(如 DeepSeek、Kimi 等),基于化工安全工程专业基础知识融合智能优化仿真模拟,搭建新的专业课程知识体系架构,探索“人工智能+”和“新工科”背景下的工程教育模式。进一步,基于新的教学框架对教学大纲、教学内容和教学模式进行修订,以本质安全设计为首要指标同时融入环境和经济指标,提出“夯实专业基础能力-加强仿真模拟能力-提升智能算法创新能力”的教学目标,在此基础上,培养学生对化工本质安全进行问题分析、流程建模及智能优化的能力。因此,化工安全设计课程以化工制药行业中常见二元共沸物丙酮-甲醇高效分离纯化作为教学对象,通过此课程将融合化工热力学、化工原理、化工分离工程、安全系统工程等

专业理论知识,从分离过程启发式设计、过程模拟和多目标优化等多个维度实现该工艺过程的本质安全设计。化工安全设计课程内容设计包含以下3个方面:① 基于二元热力学相图对变压精馏过程的可行性进行分析,同时对变压精馏分离丙酮-甲醇共沸物进行概念设计;② 基于化工仿真模拟软件 Aspen Plus V14 来搭建双塔变压精馏过程完成共沸物丙酮-甲醇的高纯度分离;③ 通过多目标遗传算法(NSGA-II)以经济、环境和安全性能作为目标函数对整个工艺过程的设计变量和操作变量进行优化,从源头降低过程的风险。该课程通过融入 Aspen Plus 和 Matlab 等现代工具,同时联系专业基础知识和工程实践案例,旨在提升学生运用专业知识、现代工具和智能辅助工具如 DeepSeek、Kimi 和豆包来解决实际复杂工程问题的能力,进一步,激发学生科研兴趣、培养创新能力。

2. 课程设计与实施

该课程的教学目标是能够应用安全科学原理、化工安全设计方法结合文献调研开展化工安全复杂工程问题的危险辨识、危险性评估和模拟,并确认它们的结果准确性。该课程 2 学分共计学时,先修课程为化工工艺安全技术等。在课程设计时主要通过 3~5 人划分一个小组,通过小组的合作分工实现文献查阅、启发式设计、过程模拟和多目标优化等完成项目报告。最后课程结束时以每个小组课堂表现、智能辅助工具的问答准确性、PPT 汇报和提交项目报告的形式来对其进行考核,成绩比例分别为 10%、10%、30%和 50%。

2.1. 分离过程设计

引导学生回忆在分离工程课程内的专业基础知识(如物料衡算、能量衡算和分离过程计算等),同时让学生复习有关热力学相图的相关基础知识,学会如何根据相图来判断各个区域的相态、各个曲线的含义和共沸点的概念。

2.1.1. 热力学分析

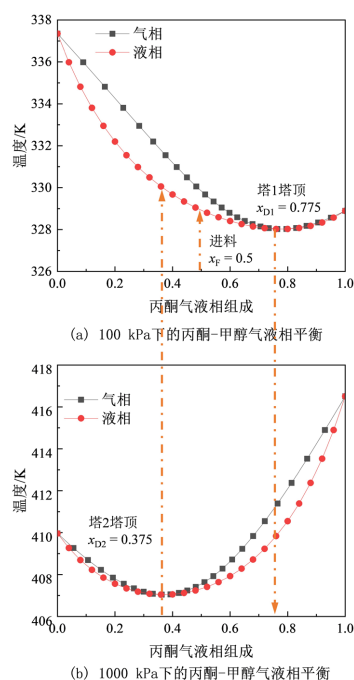


Figure 1. Binary T-xy diagram of acetone-methanol azeotropic mixture at 100 kPa and 1000 kPa
图 1. 丙酮-甲醇共沸物在 100 kPa 和 1000 kPa 下的二元气液相平衡图

在化工设计过程中,组分的热力学性质对过程设计起到了至关重要的作用。本课程以丙酮和甲醇混合物分离为例(流量 540 kmol/h、温度 320 K、甲醇和丙酮摩尔比 1:1),鼓励学生浏览国内外重要学术期刊查找丙酮和甲醇的气液相平衡实验数据,在查找文献过程中可以锻炼学生的文献归纳总结能力,同时提高专业英语能力水平。通过文献可知,可以采用非随机双液体模型(NRTL)来预测相平衡行为[5]。在课程中使用 Aspen Plus V114 化工流程模拟软件,让学生借助 Aspen Plus 内的 Analysis 工具,选择 Binary 选项,分析类型选择 TXY 即可绘制如图 1 所示的丙酮-甲醇二元相关平衡图。

从图 1 可以看出,在常压 100 kPa 时丙酮和甲醇存在共沸且共沸组成为 $x_{\text{丙酮}} = 0.78$ (摩尔基准),在高压 1000 kPa 时共沸组成为 $x_{\text{丙酮}} = 0.371$ (摩尔基准)。引导学生观察在不同压力下的共沸组成变化情况($0.78 - 0.371 = 0.409$),根据国际著名系统工程专家 Luyben 教授建议[6],当共沸组成变化大于 0.05 即可采用变压精馏来实现组分的分离提纯,因此本课程后续分离过程采用变压精馏工艺来实现丙酮和甲醇的高效分离。

2.1.2. 分离过程启发式设计

引导学生将热力学分析结果进行总结,同时根据分析结果设计如图 2 所示的变压精馏概念设计流程用于分离丙酮-甲醇共沸物。针对概念设计流程分析如下:丙酮和甲醇混合物进入塔 C1 在塔釜得到高纯度的甲醇(x_{B1}),塔顶得到接近于操作压力 P_1 下的共沸组成物料(x_{D1})并送至塔 C2 内。在 C2 的塔釜得到高纯度的丙酮(x_{B2}),塔顶得到接近于操作压力 P_2 下的共沸组成物料(x_{D2})并循环至 C1 内。

针对现有文献对变压精馏过程初始数据来源不明的问题[7],本课程设计让学生回顾化工分离技术课程中多组分精馏物料衡算章节的启发式计算过程,将常规组分启发式设计拓展应用于变压精馏过程来获取流程内各个流股的初始数据。

第一步: C1 的塔顶组成应比 P_1 压力下的共沸组成点靠左侧一点,即设计 $x_{D1} = 0.75$ 的丙酮组分,常压塔的塔釜的组成为 $x_{B1} = 0.995$ 的甲醇。

第二步: C2 的塔顶组成应比 P_2 压力下的共沸组成点靠右侧一点,即设计 $x_{D1} = 0.385$ 的丙酮组分, C2 的塔釜的组成为 $x_{B2} = 0.995$ 的丙酮。

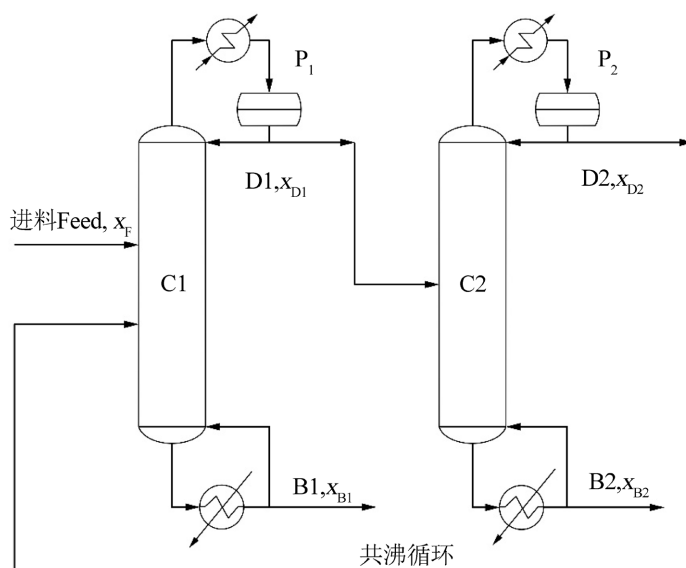


Figure 2. Conceptual design flowsheet of acetone-methanol azeotropic mixture using pressure-swing distillation
图 2. 变压精馏分离丙酮-甲醇共沸物概念设计图

第三步：C1 塔的物质衡算：

$$\begin{aligned} F + D2 &= D1 + B1 \\ D2 \times x_{D2} + F \times x_F &= B1 \times (1 - x_{B1}) + D1 \times x_{D1} \end{aligned} \quad (1)$$

第四步：C2 塔的物质衡算：

$$\begin{aligned} D1 &= D2 + B2 \\ D1 \times x_{D1} &= B2 \times x_{B2} + D2 \times x_{D2} \end{aligned} \quad (2)$$

第五步：整个流程的物质衡算：

$$\begin{aligned} F &= B1 + B2 \\ F \times x_F &= B1 \times (1 - x_{B1}) + B2 \times x_{B2} \end{aligned} \quad (3)$$

根据公式(2)和公式(3)可以得到

$$\begin{aligned} D2 &= D1 \left(\frac{x_{D1} - x_{B2}}{x_{D2} - x_{B2}} \right) \\ B1 &= F \left(\frac{x_F - x_{B2}}{1 - x_{B2} - x_{B1}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

将公式(4)代入到公式(1)可以计算出

$$D1 = F \frac{(x_F + x_{B1} - 1)}{(1 - x_{B2} - x_{B1})} \times \frac{(x_{D2} - x_{B2})}{(x_{D1} - x_{D2})} \quad (5)$$

已知 $F = 540 \text{ kmol/h}$ 和 $x_F = 0.5$ ，将第一步和第二步假设的 C1、C2 塔顶组成数据代入公式(7)、公式(8)和公式(9)可以求解出 $B1 = 270 \text{ kmol/h}$ ， $B2 = 270 \text{ kmol/h}$ ， $D1 = 451.2 \text{ kmol/h}$ ， $D2 = 181.2 \text{ kmol/h}$ 。通过此部分的启发式计算加深学生对课程的理论知识理解和计算能力的提升，同时也可以为变压精馏分离丙酮和甲醇过程的仿真模拟过程设置塔底采出和循环物流等参数提供了强有力的理论支撑。

2.2. 变压精馏过程模拟

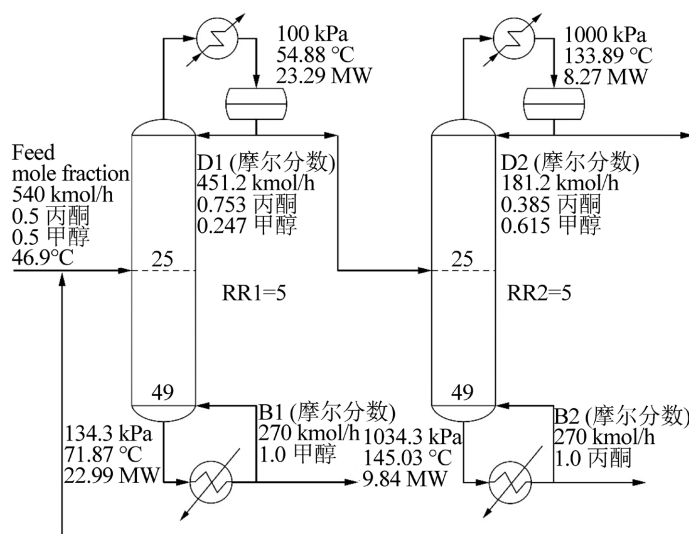


Figure 3. Initial pressure-swing distillation process for separating acetone-methanol azeotropic mixture
图 3. 初始变压精馏分离丙酮和甲醇共沸混合物工艺

基于上述的热力学分析和变压精馏启发式计算获取了变压精馏过程的初始参数。此外,针对 Aspen Plus V14 软件界面和分离模块进行详细介绍,需要学生了解到塔参数的输入方法。此处为了便于计算对塔板数假设为 50,摩尔回流比设置为 5,塔板压降设置为 0.7 kPa。让学生将启发式计算得到的参数和假设的参数输入到 Aspen Plus 内的 RadFrac 模块内运行并查看结果,如图 3 所示。从初始计算结果可以看出,C1 和 C2 塔顶物料流量与启发式计算结果较为吻合,两塔的塔釜甲醇和丙酮纯度较高说明回流比假设太高[8]。

在上述过程,通过引入实际共沸分离案例和 Aspen Plus 过程模拟来提高学生的兴趣并且加深对实际生产过程问题的了解,同时结合启发式计算来深化学生的专业基础知识。进一步,将智能优化算法与化工过程优化进行结合来实现学生科研创新实践能力的提高。

2.3. 多目标智能优化

引导学生思考在安全系统工程中关于安全评价相关的内容和知识点,分析在传统化工过程设计中常采用先设计后安全评估的方式,此类方式属于预防为主难以从根本上消除或减弱过程风险。本课程拟采用本质安全设计方法,融入智能多目标优化算法(NSGA-II),以经济、环境和安全为目标函数,在优化设计过程中通过操作变量的优化来提高经济效益、减小碳排放和过程风险。针对变压精馏过程,优化决策变量包含离散变量(塔板数)和连续变量(操作压力)属于混合非线性整数规划求解问题,如公式 6 所示[9][10]。

$$\begin{aligned} \min_{X \in R} \{ & f_1(X), f_2(X), f_3(X) \} \\ \text{subject to: } & x_i \geq 0.995, i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $f_1(X)$, $f_2(X)$ 和 $f_3(X)$ 分别是经济、环境和安全性能指标。 x_i 是优化过程中的约束变量,本文采用两个塔的塔釜产品纯度作为约束。

2.3.1. 经济指标 TAC

在工业过程设计时,常采用年度总费用(TAC)作为经济指标来评估工艺的经济效益,详细计算如公式 7 所示[11][12]。

$$\text{TAC} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{PP}} + \text{OPEX} \quad (7)$$

式中: TAC 是经济性能指标年总操作费用; CAPEX 和 OPEX 分别是设备费用和操作费用; PP 是投资回收期,一般假设为 3 年[13][14]。

2.3.2. 环境指标 CO₂ 排放

CO₂ 作为一种温室气体,可以用于环境评估[15]。引导学生查阅相关国内外重要学术期刊查找 CO₂ 排放计算公式。根据 Smith and Delaby [16],本项目基于公式 8 和 9 计算了在工艺过程中消耗蒸汽而产生的 CO₂ 排放量。

$$\text{CO}_2 \text{ emission} = \frac{Q_{\text{fuel}}}{\text{NHV}} \times \frac{C\%}{100} \times \alpha \quad (8)$$

$$Q_{\text{fuel}} = \frac{Q_{\text{total}}}{\lambda_{\text{steam}}} \times (h_{\text{steam}} - 419) \times \left(\frac{T_{\text{flame}} - T_{\text{ambient}}}{T_{\text{flame}} - T_{\text{stack}}} \right) \quad (9)$$

2.3.3. 安全指标 PRI

在工艺设计阶段其安全性主要体现在操作压力和危险物质的爆炸极限等方面,本文选择过程路径指

数(PRI)作为安全评价指标, 如公式 10 所示[17]。

$$PRI = \frac{AMHV \times AFD \times APRE \times ACOMB}{10^8 \times 101325} \quad (10)$$

式中: PRI 是安全性指标过程路径指数; AMHV、AFD、APRE 和 ACOMB 分别是物流平均质量热值(kJ/kg)、流体密度(kg/m³)、压力(Pa)和可燃性(%/%) [18]。在 Aspen Plus 中可以读取每个流股的压力、密度和热值, 针对各组分的燃烧热和爆炸极限可以通过文献查找[19]。

2.3.4. 多目标优化设计

在多目标优化过程中, 如何实现 Aspen Plus 与 MATLAB 数据同步, 这是学生首要掌握的内容。让学生采用智能辅助工具如 DeepSeek 来进行询问上述问题, 同时可以增加师生互动。根据学生咨询结果反馈, 得到具体的操作步骤: (1) 复制 Aspen Plus 内的变量数值; (2) 采用 *Variable Explorer* 工具查找变量的路径; (3) 在 MATLAB 软件定义访问查找到的变量路径函数。同时查阅了相关论文[9] [10]对 AI 工具结果的可行性进行了验证。Aspen Plus 源文件的位置可以根据各位同学文件存放位置进行修改文件访问路径[10]。在优化过程中, 进料位置根据前期研究对其进行归一化有利于过程的优化设计[19]。

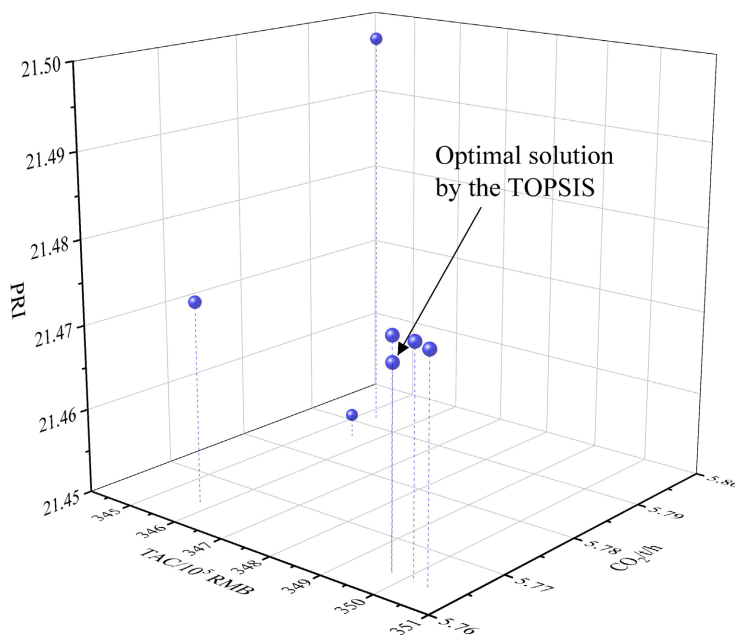


Figure 4. Pareto front solution for the pressure-swing distillation

图 4. 变压精馏帕累托前沿解

NSGA-II 优化参数给定种群数为 50, 遗传代数 500, 交叉和距离参数设置为 20, 变异概率设置为 0.5。图 4 给出了 NSGA-II 优化 500 代的变压精馏帕累托前沿解, 从图中可以看出前沿解较为分散, 有 PRI 值最大的、TAC 最大的、CO₂ 最大的, 导致学生或决策者无法直接选择最优解来进行模拟。让学生采用 DeepSeek 来进行提问(问题: 采用 TOPSIS 方法对上述三个目标进行排序计算, 编写对应的 MATLAB 代码), 智能教学辅助工具给出的代码可以直接粘贴到 MATLAB 运行, 运行结果整理如表 1 所示。

通过智能辅助教学工具 DeepSeek 的应用可以快速实现 TOPSIS 代码的编写, 可以弥补学生在编写代码方面基础较差的缺陷, 也可以更好的将专业知识与智能工具有机融合, 进一步提升学生的科研创新实践能力培养。

Table 1. Ranking results of Pareto front solutions based on TOPSIS
表 1. 基于 TOPSIS 的帕累托前沿解排序

序号	TAC/ 10^5 RMB	CO ₂ /t/h	PRI/%/%	排序
1	345.5775	5.7865	21.4528	6
2	349.7185	5.7643	21.4731	1
3	345.3549	5.7917	21.4988	3
4	350.4374	5.7639	21.4757	2
5	349.7387	5.7641	21.4761	5
6	345.7466	5.7646	21.4738	7
7	350.1643	5.7640	21.4761	4

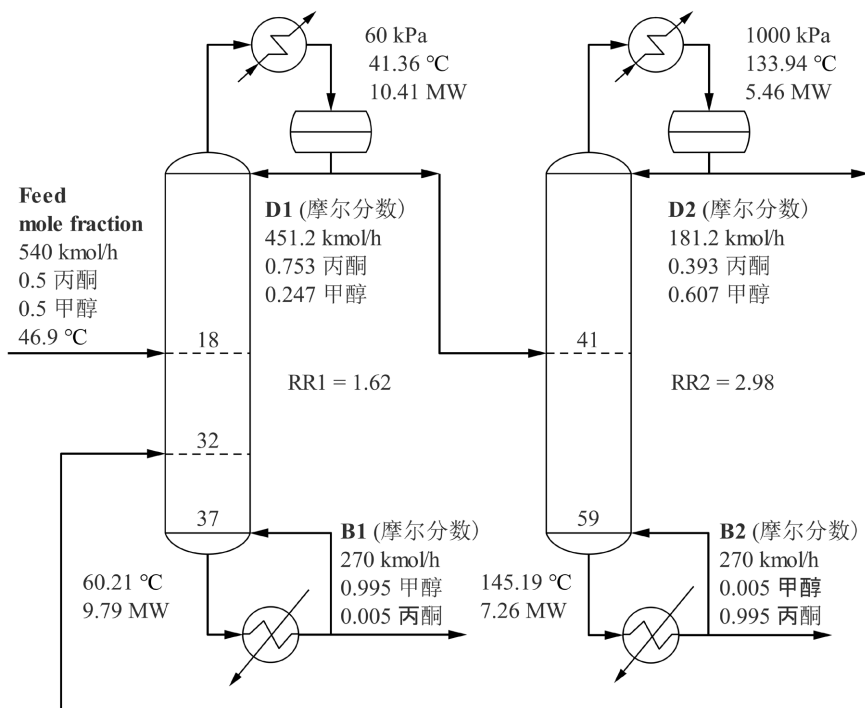


Figure 5. Optimal pressure-swing distillation process
图 5. 最优变压精馏过程

决策最优结果见图 5。相比于初始模拟过程的塔板数均为 50，优化后的 C1 和 C2 塔的塔板数分别为 38 和 60。两塔的回流比也由初始的 5 分别降低到了 1.62 和 2.98，且产品纯度保持一致。

Table 2. Comparison of economic, environmental, and safety performance before and after optimization of pressure swing distillation process
表 2. 变压精馏工艺优化前后的经济、环境和安全性能对比

工艺	TAC/ 10^5 RMB	CO ₂ /t/h	PRI/%/%
初始工艺	638.2344	11.0956	21.8409
优化后工艺	349.7185	5.7643	21.4731
降低幅度	45.2053%	48.0488%	1.6840%

表2给出了变压精馏工艺优化前后的TAC、CO₂和PRI对比。从表中可以看出,通过优化,TAC和CO₂分别降低了45.2053%和48.0488%,工艺危险性PRI降低了1.6840%。相比于传统的化工安全设计,现有的方法不仅在经济和环境方面表现了较强的优势,同时从本质上提高了工艺过程的安全性。

4. 结论

化工安全设计课程,结合了分离过程概念设计、Aspen Plus 流程模拟和过程多目标优化三方面内容。将化工热力学基础知识采用二元相图的形式让学生来进行观察分析,判断分离过程的可行性,同时将分离工程内的基础知识拓展应用到变压精馏过程启发式计算中获取初始的塔釜采出量和循环物流的流量与组成;通过引入化工流程模拟软件 Aspen Plus 搭建变压精馏过程实现共沸物的高效分离;引入前沿学科知识如多目标遗传算法,实现了化工分离过程的经济-环境-安全多准则博弈。通过课程探索,首先巩固了学生的专业基础知识能力,进一步拓展了学生的动手能力和理论联系实践能力,最后通过智能辅助教学工具和 MATLAB 的应用提高了学生的创新思维能力。实际教学效果表明,此类引入 Aspen Plus 和 MATLAB 的化工安全设计类课程可以激发学生的学习兴趣与动手能力,从工程问题出发应用所学理论知识,提升学生对知识的理解与创新能力。

此外,需要注意的是此课程的开发需要相关高校或学院配备满足课程人数的计算机设备且对设备的性能有一定要求,能够流畅运行 Aspen Plus 和 MATLAB 相关软件。为了防止学生陷入惰性完全依赖智能辅助教学工具,在 PPT 汇报时需要教师对相关启发式的内容进行提问。

基金项目

重庆科技大学本科教育教学改革研究项目融入仿真模拟的《化工安全设计》课堂教学方法改革与实践(202459),重庆市高等教育教学改革研究项目重点项目基于双标衔接的安全工程专业人才培养体系与实践研究(232132),重庆市高等教育教学改革研究项目重点项目人工智能赋能安全类创新人才培养模式研究——以安科实验班为例(252162)。

参考文献

- [1] 石建东,王百军,刘龙飞,等.《化工安全设计》课程教学探讨[J].化工设计通讯,2019,45(12):178-179.
- [2] 杨娟.新工科背景下《化工安全设计》课程教学探索[J].高教学刊,2019(9):81-83.
- [3] 周德红,李文.以学生为中心的化工安全课程思政实践[J].化工高等教育,2021,38(6):21-25.
- [4] 陈国华,张心语,李一川.新工科背景下化工过程安全人才培养模式探索[J].化工高等教育,2020(1):32-39.
- [5] Li, W., Sun, D., Zhang, T., Dai, S., Pan, F. and Zhang, Z. (2014) Separation of Acetone and Methanol Azeotropic System Using Ionic Liquid as Entrainer. *Fluid Phase Equilibria*, **383**, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2014.10.011>
- [6] Luyben, W.L. (2008) Comparison of Extractive Distillation and Pressure-Swing Distillation for Acetone-Methanol Separation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**, 2696-2707. <https://doi.org/10.1021/ie701695u>
- [7] Liu, X., Xu, Q., Ma, C., Zhang, F., Cui, P., Wang, Y., et al. (2024) Design and Multi-Objective Optimization of Reactive Pressure-Swing Distillation Process for Separating Tetrahydrofuran-Methanol-Water. *Separation and Purification Technology*, **329**, Article 125160. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125160>
- [8] Luyben, W.L. (2013) Distillation Design and Control Using Aspen Simulation. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118510193>
- [9] Sun, S., Huang, H., Shi, Z., Du, M., Kong, Z.Y., Wang, M., et al. (2025) Towards Sustainable Recovery of Tetrahydrofuran, Ethyl Acetate, and Methanol from Waste Effluent via Thermal Coupled Extractive Distillation and Multi-Objective Optimization. *Process Safety and Environmental Protection*, **194**, 619-629. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.043>
- [10] Yang, A., Sun, S., Kong, Z.Y., Zhu, S., Sunarso, J. and Shen, W. (2024) Energy-Efficient Heterogeneous Triple-Column Azeotropic Distillation Process for Recovery of Ethyl Acetate and Methanol from Wastewater. *Computers & Chemical Engineering*, **183**, Article 108618. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108618>

-
- [11] Babaie, O. and Nasr Esfahany, M. (2021) Optimum Process Configuration for ETBE Production Based on TAC Minimization. *Separation and Purification Technology*, **256**, Article 117744. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117744>
- [12] Gao, X., Yang, Y., Chen, M., Cheng, Q. and Lu, K. (2022) Novel Heat Pump Reactive Distillation and Dividing-Wall Column Reactive Distillation Processes for Synthesizing Isopropyl Acetate to Save TAC and Reduce CO₂ Emissions. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **171**, Article 108746. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108746>
- [13] 崔佳, 李知春, 肖海成, 等. 乙腈-水萃取精馏及热集成改进工艺多目标优化[J]. 石油学报(石油加工), 2022, 38(5): 1135-1147.
- [14] Alcocer-García, H., Segovia-Hernández, J.G., Prado-Rubio, O.A., Sánchez-Ramírez, E. and Quiroz-Ramírez, J.J. (2019) Multi-Objective Optimization of Intensified Processes for the Purification of Levulinic Acid Involving Economic and Environmental Objectives. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, **136**, 123-137. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.01.008>
- [15] Waheed, M.A., Oni, A.O., Adejuyigbe, S.B., Adewumi, B.A. and Fadare, D.A. (2014) Performance Enhancement of Vapor Recompression Heat Pump. *Applied Energy*, **114**, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.024>
- [16] Smith, R. and Delaby, O. (1991) Targeting Flue Gas Emissions. *Chemical Engineering Research and Design*, **69**, 492-505.
- [17] Zhu, J., Hao, L. and Wei, H. (2021) Sustainable Concept Design Including Economic, Environment and Inherent Safety Criteria: Process Intensification-Reactive Pressure Swing Distillation. *Journal of Cleaner Production*, **314**, Article 127852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127852>
- [18] Shariff, A.M., Leong, C.T. and Zaini, D. (2012) Using Process Stream Index (PSI) to Assess Inherent Safety Level during Preliminary Design Stage. *Safety Science*, **50**, 1098-1103. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.11.015>
- [19] 杨傲, 王文和, 米红甫, 等. 基于 Aspen Plus 的化工过程安全仿真实训课程设计与探索[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(9): 150-156.