

信息技术应用

# 基于隔板塔内在特性的快速设计策略

李思宽<sup>1</sup>, 刘汝佳<sup>2</sup>, 张倩倩<sup>2</sup>, 王二强<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院大学化学科学学院, 北京 100049;

2. 河南大学化学与化工学院, 河南 开封 475004)

**摘要:**使用 Aspen Plus 软件, 对隔板塔体系进行了设计优化, 开发并验证了一种隔板塔稳态优化的良好策略。通过灵敏度分析等手段分析了各个变量因素的影响, 发现固定分气比分液比, 四个塔段塔板数有多种分配方案, 调整左右两侧塔段塔板数及进料采出位置比例时, 公共精馏段和公共提馏段最优塔板数基本不变且最优分气比分液比在一定范围内波动; 固定公共精馏段和公共提馏段塔板数,  $N \times (R+1)$  随着  $N$  先减小后增大, 存在着最优的选择方案。

**关键词:**隔板塔; 模拟; 优化; 灵敏度分析; 分气比; 分液比

中图分类号: TQ018

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)09-0199-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.09.043

## Rapid design strategy based on intrinsic characteristics of dividing wall column

LI Si-kuan<sup>1</sup>, LIU Ru-jia<sup>2</sup>, ZHANG Qian-qian<sup>2</sup>, WANG Er-qiang<sup>1\*</sup>

(1. School of Chemical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** The design of dividing wall column system is optimized by using Aspen Plus software, and a good strategy for steady-state simulation optimization of dividing wall column is developed and verified. The interconnections of various variables are analyzed by means of sensitivity analysis and the results are as follows: there are many distribution schemes of the number of trays in the four column sections when both liquid and vapor split ratios are fixed; The sensitivity analysis shows that the optimal number of trays in the common rectification section and the common stripping section remains unchanged when adjusting the number of trays on the left and right sections of the dividing wall column, and the locations of the feed stream and side product stream. The liquid and vapor split ratios vary within a certain range.  $N \times (R+1)$  increases as  $N$  decreases first and increases then when fixing the number of trays in the common rectification section and the common stripping section, the best selection scheme is existed.

**Key words:** dividing wall column; simulation; optimization; sensitivity analysis; vapor split ratio; liquid split ratio

在化工行业中, 精馏技术应用于多组分混合物的分离, 一般使用传统双塔来分离三组分混合物, 但是由于内部存在流股回流返混而造成较大的热力学效率损失, Petlyuk 塔是典型的热耦合精馏塔, 这种塔型解决了传统双塔的能量效率问题<sup>[1-2]</sup>, 但是由于需要预分馏塔, 增加了占地面积和设备制造费用, 同时耦合流股之间的压力匹配也给其工业应用带来较大困难。隔板塔(DWC)将预分馏塔和主塔放在同一个精馏塔中, 中间有一块隔板将进料段和侧线采出段分隔开, 相较于传统的双塔序列和 Petlyuk 塔具有更大优势, 隔板塔只需要 1 个冷凝器和 1 个再沸器, 同时也仅需要 1 个塔体, 能够有效地

降低能耗和设备制造费用<sup>[3-4]</sup>。

与传统塔类似, DWC 也存在整型变量(塔板数)和实型变量(回流比等)的同时优化问题即 MINLP 优化。当前文献中存在此 MINLP 问题的严格优化算法<sup>[5]</sup>, 算法复杂, 不方便使用; 也有若干人工智能算法, 如遗传算法等<sup>[6]</sup>, 但掌握起来需要投入较长时间和精力; 另外也有采用响应面优化的方法<sup>[7-8]</sup>, 基于一定数理统计规律来优化参数, 但是有一定的误差存在。这些通用的算法和策略没有考虑到隔板塔自身存在的一些内在特性, 这些特性可以很大程度上帮助进行设计优化<sup>[9]</sup>。文献[3, 10]主要研究了固定塔体构型参数情况下隔板

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21376240)

作者简介: 李思宽(1994-), 男, 硕士生; 王二强(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为化工过程强化集成、绿色化工、化工过程模拟优化, 通讯联系人, wangerqiang@ucas.edu.cn。

塔优化的问题。

基于上述考虑,本文中首先开发一种隔板塔的简捷设计算法,能够提供良好的初值,尽可能地趋近最终优化值,从而降低计算量;其次,基于隔板塔的特有属性以及优化状态下参数间的关联性和分布特性,再一次缩小优化区间范围,将计算量大大压缩。基于上述策略,隔板塔的参数优化局限于一定范围内,就可以利用简单的灵敏度分析来完成,方便使用,精度可靠。最后,研究了隔板塔塔体构型的确定问题以及分气比和分液比等操作参数对隔板塔优化过程的影响。

## 1 双塔直接序列分析

正己烷( $C_6$ )-正庚烷( $C_7$ )-正辛烷( $C_8$ )三组混合物体系作为研究对象,命名为  $C_6-C_7-C_8$ , 进料参数以及目标纯度要求如表 1 所示。

表 1 进料参数以及产物纯度要求

参数	值
进料热状况	饱和液体
进料压力/(MPa)	0.12
进料流率/( $kg \cdot h^{-1}$ )	460
进料质量分数	
正己烷	0.2
正庚烷	0.6
正辛烷	0.2
产物质量分数要求	
正己烷	0.99
正庚烷	0.99
正辛烷	0.99

本文中使用了 Aspen Plus 软件构建了如图 1 所示的基于 DSTWU 模块以及基于 RADFRAC 模块的传统双塔直接序列构型,由 T1 和 T2 模块连接组成,T1 塔釜流股作为 T2 进料,T1 和 T2 塔顶和塔釜都分别设置有全凝器和再沸器。如图 1 所示,F 代表进料物流,D 代表 T1 塔体塔顶流出流股,主要包含轻组分  $C_6$ ,W1 代表塔体塔釜流出流股,其中包含微量的轻组分  $C_6$  杂质,S 和 B 分别代表 T2 塔体塔顶和塔釜流出流股,用于得到高纯度的  $C_7$  和  $C_8$ 。

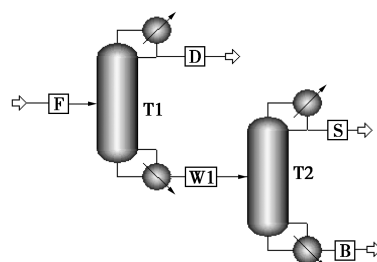


图 1 基于 DSTWU 模块以及 RADFRAC 模块的传统双塔直接序列构型

本文中首先根据基于 DSTWU 模块下的双塔直接序列进行简捷设计,该模型基于 Fenske - Underwood - Gilliland 方程进行设计计算<sup>[11]</sup>,得到的参数结果会存在一定的误差,将该结果作为严格模块的初值,构建基于 RADFRAC 模块下的双塔直接序列,进行稳态模拟分析,使用灵敏度分析功能,优化 2 个塔体的塔板数以及进料位置,确定最优的塔体构型,模拟得到满足纯度要求的结果,该结果可与之后三塔简捷设计得到的结果相结合,作为隔板塔四塔模型严格模拟的初值。

## 2 三塔模型简捷设计与严格模拟

### 2.1 三塔简捷设计

建立基于 DSTWU 模块的隔板塔简捷设计的三塔模型,如图 2 所示,该设计模型与上述双塔流程同样的进料参数以及目标纯度要求,通过稳态模拟分析得到满足纯度要求的结果,并将该结果作为三塔严格模拟的初值,使三塔严格模拟更加容易计算并且接近优化值。

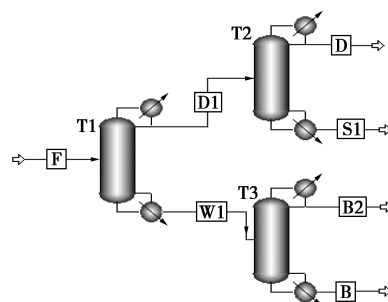


图 2 三塔模型简捷设计流程

三塔简捷设计模型中,该模块塔体输入参数需要给出轻重组分的回收率,可以通过目标产物纯度信息计算得到所需的回收率,此时可以通过加上设计规定,将目标流股纯度作为规定目标,通过变化输入的轻重组分的回收率,得到满足目标规定的简捷设计的结果。简捷设计结果如表 2 所示。

表 2 简捷设计结果

结果	T1	T2	T3
塔板数	18	22	26
进料板位置	8	12	13
塔顶质量流率/(kg·h <sup>-1</sup> )	252.862	104.509	127.286
塔釜质量流率/(kg·h <sup>-1</sup> )	207.138	148.353	79.852
回流比 RR	1.046	3.706	1.723

### 2.2 三塔严格模拟

使用 Aspen 中的 RADFRAC 模块同样构建如图 2 所示的模型,这一步骤的目的是得到三塔模型的塔板数、进料位置、回流比以及流股速率等信息,为四塔模型提供可靠的初值,包括隔板塔的结构参数以及耦合流股的信息。

代入简捷设计得到的参数值,加上纯度的设计规定,得到满足纯度要求的结果,然后进行塔结构参数的确定,使用灵敏度分析的手段,首先分析 T1 的塔板数以及进料板位置,得到对应最佳的进料位置,同样的方法得到 T2 和 T3 的塔结构参数。

## 3 隔板塔四塔模型严格模拟优化

### 3.1 隔板塔内在特性

隔板塔相较于传统的双塔,存在若干自身特有的内在性质。许多文献中提到了分液比和分气比对隔板塔优化模拟的重要性,以及两者最优值的同向变化性质,如图 3 所示,当塔体结构参数固定时,分气比的选择会随着分液比的变化而变化,当分液比增大时,所需要的分气比也随之增大。同时固定分液比以及流股速率,灵敏度分析分气比的变化对回流比的影响,如图 4 所示,发现存在多定态现象,随着分气比的增大,回流比会在一定区间内减小,然后在一定范围内存在一个接近最小回流比的最优结果,在这个范围内,同一个分气比对应着多个回流比的存在,当分气比超出这范围之后,回流比会逐渐增大。在进行隔板塔模拟优化时,根据该特性,应注

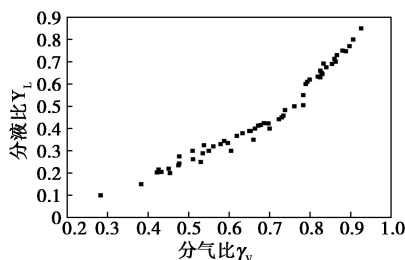


图 3 最优分液比和分气比的变化趋势图

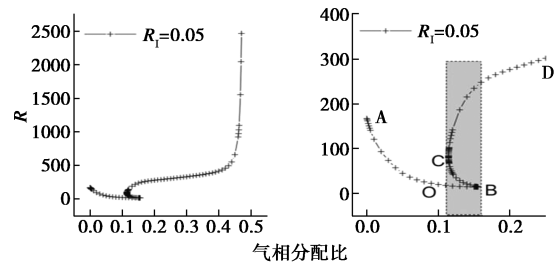


图 4 固定分液比时分气比对回流比的影响

意选择合适的分气比来确定最为合适的回流比,即最低回流比对应的定态解,可有效地减小所需的能耗。

### 3.2 四塔模型严格模拟优化

在隔板塔设计过程中,分为 2 个阶段进行设计优化,首先需要确定各个塔段的构型问题,隔板塔 4 个塔段部分的塔板数以及进料采出塔板位置的选择直接决定了隔板精馏塔分离能力的高低<sup>[12]</sup>,其次考虑回流比、分液比和分气比等操作参数的影响<sup>[13-14]</sup>,进而确定减小能耗以及设备费用等的最优化的操作参数。

构建图 5 所示的基于 RADFRAC 模块的隔板塔设计构型,该构型为隔板塔的四塔模型,其中共有 4 个塔段,左侧 T1 为预分馏塔段,主要用于轻重组分 C<sub>6</sub> 和 C<sub>8</sub> 的分离,顶端 T2 是公共精馏塔段,顶部流股 D 得到满足目标纯度的 C<sub>6</sub>,右侧 T3 为隔板塔的主塔部分,侧线采出流股 S 得到满足目标纯度的 C<sub>7</sub>,T4 塔段是四塔模型的公共提馏塔段,塔釜流出流股 B 得到满足目标纯度的 C<sub>8</sub>,该模型中 T1 塔段和 T3 塔段都不含有冷凝器和再沸器,T2 塔段顶部安装有全凝器以及回流装置,T4 塔段底部有再沸器,用于得到温度较高的上升气体。分割器 SPL 和 SPV 用来分别控制分液比和分气比。

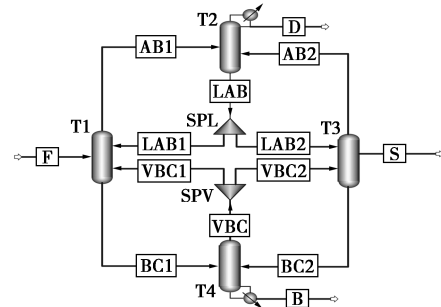


图 5 隔板塔四塔模型

首先从自由度的角度分析,隔板塔四塔模型具有 5 个操作变量,分别为公共精馏塔段 T2 的摩尔回

流比  $RR$ , 主塔部分侧线采出流股  $S$  的质量流率, 公共提馏段  $T4$  塔段的塔釜流股  $B$  的质量流率, 以及分离器  $SPL$  和  $SPV$  决定的分液比  $\gamma_L$  和分气比  $\gamma_V$ , 规定的目标要求只有流股  $D$ 、 $S$ 、 $B$  的规定组分质量分数 3 个规定目标, 因此可以灵敏度分析分液比  $\gamma_L$  和分气比  $\gamma_V$  的变化对隔板塔能耗以及年度总花费  $N \times (R+1)$  的影响。

使用 Aspen 软件构建隔板塔四塔模型, 灵敏度分析固定分液比情况下分气比的变化情况, 得到最佳的分气比分液比配对情况, 当塔板参数固定时, 得到多组最佳的分气比分液比配对结果, 由图 6 知, 当塔板构型分布固定时, 随着分气比分液比的变化, 隔板塔塔釜再沸器所需能耗也随之变化, 随着分液比的增大, 对应的最佳的分气比也随之增大, 隔板塔塔釜再沸器所需能耗先减小后增大, 存在着最优值。该结果与图 3 所示结论相符。隔板塔设计优化过程的程序框图如图 7 所示。

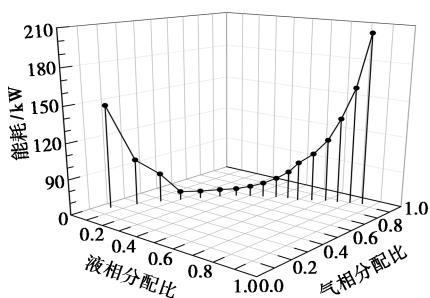


图 6 塔板构型分布固定时能耗与最佳分气比分液比关系

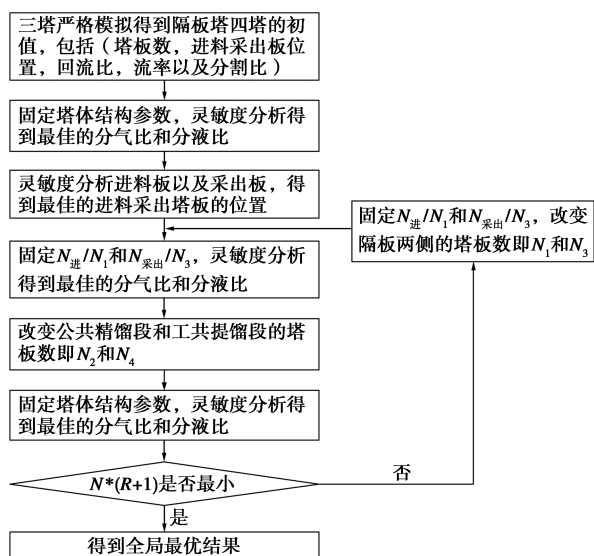


图 7 隔板塔四塔模型的设计优化的框图

四塔模型分析的第一步是确定隔板塔的塔体构

型, 本文中采用灵敏度分析模块, 首先在三塔模型初值的情况下, 确定一组最佳的分气比和分液比, 此时得到该塔型下的最优配置, 接下来将预分馏塔  $T1$  和主塔  $T3$  塔段的进料板和采出板位置作为灵敏度分析对象, 获得最佳的  $T1$  和  $T3$  进料采出位置, 再以分气比分液比作为灵敏度分析对象, 得到最佳的分气比和分液比, 固定进料板和采出板对应隔板两侧塔板的比例值, 进行各个塔段的塔板数的分析, 进而确定最佳的塔体构型以及最佳的操作参数。本文中使用  $N \times (R+1)$  来近似地表示年度总费用  $TAC^{[15]}$ 。灵敏度分析最终的结果以年度总费用  $N \times (R+1)$  为参考对象, 得到许多塔体构型情况下的结果, 采集各个总塔板数  $N$  固定情况下的最优  $N \times (R+1)$  数值, 得到如图 8 所示的塔板数的变化与年度总费用  $N \times (R+1)$  的对应关系。由图 8 可知, 年度总费用

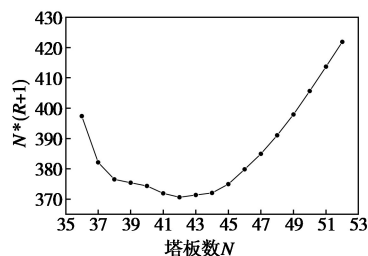
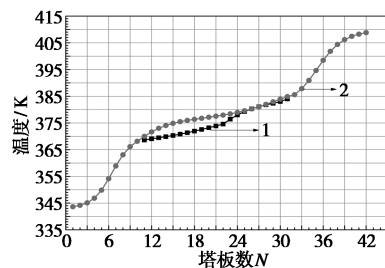
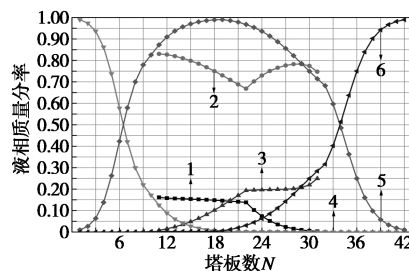


图 8 函数  $N \times (R+1)$  与塔板数  $N$  的关系



1—预分塔; 2—主塔

(a) 温度分布曲线



1— $C_6$  预分塔; 2— $C_7$  预分塔; 3— $C_8$  预分塔;

4— $C_6$ ; 5— $C_7$ ; 6— $C_8$

(b) 液相浓度分布曲线

图 9 隔板塔的温度分布曲线以及液相浓度分布曲线

$N \times (R+1)$  随着塔板数的变化先变小后增大,存在着最优的情况,此时塔体构型已经确定,塔板数为42块时年度总费用  $N \times (R+1)$  最小,此时可以得到隔板塔的各组分浓度分布曲线以及塔段的温度分布曲线,如图9所示。从图9中可以看出,预分塔和主塔之间的耦合流股浓度基本接近,符合最佳进料板的要求。四塔模型模拟优化结果如表3所示。

表3 隔板塔四塔模型模拟优化结果

参数	T1	T2	T3	T4	合计
塔板数	21	10	21	11	42
进料板/采出板	12	—	9	—	—
回流比	—	7.8205	—	—	7.8205
$N \times (R+1)$	—	370.4591	—	—	370.4591
侧线流率/( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	276.9386	—	—	—	276.9386
塔顶流率/( $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ )	91.9305	—	—	—	91.9305
分液比	0.303	—	—	—	—
分气比	0.542	—	—	—	—

#### 4 结论

首先对传统双塔直接序列进行了稳态模拟,使用灵敏度分析的手段确定了塔的构型并且得到满足纯度要求的结果,该结果可与之后三塔简捷设计得到的结果共同应用到四塔模型稳态模拟,作为初值得到精度较高的模拟结果。基于隔板塔独有的内在特性,给隔板塔参数优化提供一种策略,并应用于隔板塔四塔模型的模拟分析中,可以得知,当塔体构型固定时,存在着最优的分液比和分气比对应于能耗最低的一组值。隔板塔的年度总费用  $N \times (R+1)$  与塔体结构有着直接的关系,存在着最优的总塔板数可以得到年度总费用最低。

#### 参考文献

- [1] Wolff E A, Skogestad S. Operation of integrated three-product (Petlyuk) distillation columns [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1995, 34(6): 2094–2103.
- [2] Hernández S, Jiménez A. Design of energy-efficient Petlyuk systems [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1999, 23(8): 1005–1010.
- [3] Triantafyllou C, Smith R. The design and optimization of dividing wall distillation columns [M]. Berlin: Springer Netherlands, 1993: 2232–2239.
- [4] Dejanović I, Matijašević L J, Olujic Z. Dividing wall column—A breakthrough towards sustainable distilling [J]. *Chemical Engineering & Processing Process Intensification*, 2010, 49(6): 559–580.
- [5] Novak Z, Kravanja Z, Grossmann I E. Simultaneous synthesis of distillation sequences in overall process schemes using an improved minlp approach [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, 20(12): 1425–1440.
- [6] Sayyaadi H, Saffari A. Thermoeconomic optimization of multi effect distillation desalination systems [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(4): 1122–1133.
- [7] Khayet M, Cojocararu C, Garcia-Payo C. Application of response surface methodology and experimental design in direct contact membrane distillation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(17): 5673–5685.
- [8] Long N V D, Lee M. Dividing wall column structure design using response surface methodology [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2012, 37(1): 119–124.
- [9] Lee S H, Shamsuzzoha M, Han M, et al. Study of the structural characteristics of a divided wall column using the sloppy distillation arrangement [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, 28(2): 348–356.
- [10] Chu K T, Cadoret L, Yu C C, et al. A new shortcut design method and economic analysis of divided wall columns [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2012, 50(15): 9221–9235.
- [11] Jobson. Short-cut evaluation of distillation sequences [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1997, 21(1/2): S553–S557.
- [12] Jun L I, Sun L, Zhou X, et al. Study on the configuration of internal thermally coupled reactive distillation column [J]. *Chemical Industry & Engineering Progress*, 2012, (5): 997–1003.
- [13] Dwivedi D, Strandberg J P, Halvorsen I J, et al. Active vapor split control for dividing-wall columns [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 51(46): 15176–15183.
- [14] Ge X, Ao C, Yuan X, et al. Investigation of the effect of the vapor split ratio decision in design on operability for DWC by numerical simulation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 53(34): 140815151857001.
- [15] Emtir M, Rev E, Fonyo Z. Rigorous simulation of energy integrated and thermally coupled distillation schemes for ternary mixture [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 21(13): 1299–1317. ■