

研究简报

含非清晰塔的精馏系统综合

李玉刚, 王晓红, 郑世清, 韩方煜

(青岛科技大学计算机与化工研究所, 山东 青岛 266042)

关键词: 非清晰塔; 精馏; 热集成; 综合

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 02-0415-05

Synthesis of distillation system considering no-sharp separation

LI Yugang, WANG Xiaohong, ZHENG Shiqing, HAN Fangyu

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, Shandong, China)

Abstract: The synthesis of a distillation system including no-sharp separations was studied with emphasis on the coding and flowsheet multiformity caused by no-sharp separation. The same streams composed of the same components appeared in the flowsheet, and had three kinds of relationships, *i. e.*, independent, united, and thermally-coupled. In the genetic programming coding, an integer array was used to denote the relationships for these same streams so as to describe the distillation flowsheet with no-sharp separations. There was an equivalent simple column flowsheet for a complex flowsheet and the maximum number of simple columns (MNSC) in one flowsheet was used to describe the scale of problem. The relationship between MNSC and middle component number (MCN) that was between two key components was presented. As MCN was 2, MNSC was $4N-9$, and it meant that the best result would be searched in the space that could include $4N-9$ columns instead of $N-1$. The searching scope was enlarged and better results could be obtained in comparison with only considering sharp separations.

Key words: no-sharp separation; distillation; heat integration; synthesis

引 言

随着资源的紧张和控制技术的进步, 过程强化与集成已经成为化工发展的重要方向。在精馏技术上, 含有侧线、热耦合、热集成等复杂精馏流程的研究越来越受到人们的重视, 取得了许多研究与应用成果^[1-5]。其中, 由清晰分割塔(清晰塔)构成的复杂精馏流程研究得比较充分^[4-10], 而对含有非清晰分割塔(非清晰塔)的复杂精馏流程研究得

较少。

非清晰塔中存在中间分配组分, 出料能以更大的自由度去匹配相邻塔的进料流率和组成, 另外, 非清晰塔的存在明显增加了流程中各类物流的数量, 精馏塔数量也远远超出了传统值 $N-1$ (N 为组分数), 为能量集成提供更多的机会与自由度。如 Petlyuk 塔就是含有非清晰塔的典型结构, 它只是非清晰塔的一种结构形式, 还有更多的结构需要同时考虑, 获得最优的流程结构^[7]。

2007-06-26 收到初稿, 2007-11-07 收到修改稿。

联系人及第一作者: 李玉刚 (1966—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (20000263)。

Received date: 2007-06-26.

Corresponding author: LI Yugang. E-mail: lyg@putech.com.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (20000263).

目前对非清晰塔流程的研究，一般只考虑预分离塔或 Petlyuk 塔结构，并且只考虑一个中间组分，都局限在 $N-1$ (N 为组分数) 个塔的常规研究范围内。对含有多个中间组分，并且同时考虑清晰塔与非清晰塔的各种结构的综合研究未见报道。

本文首先研究了含非清晰塔结构的各种形式，从理论上给出了求解问题的规模与组分数、中间组分数之间的关系。采用基于遗传规划的综合方法^[1]实现了问题的编码与系统综合，分割中可存在 2 个中间组分，最大简单塔数可达到 $4N-9$ 个 (超出 $N-1$ 的范围)。最后对实例进行求解，最优流程的目标值 (年费用) 比不考虑非清晰塔时下降 36%。

1 流程多样性描述

非清晰塔的上下出料中均含有中间组分，它们在后续流程中处理方式不同，可得到数量众多的各类不同流程。以最简单的三组分 (ABC) 分离为例，当 A、C 分别为轻重关键组分时，要得到 A、B、C 三种产品，不考虑热集成，就有 11 种不同的流程 (图 1 给出其中 6 种)。

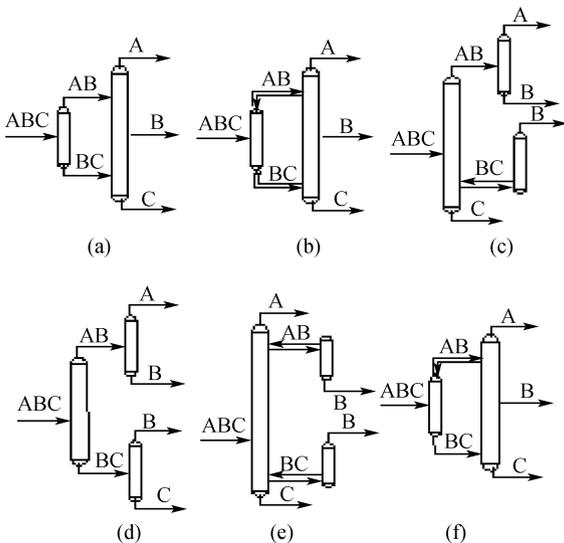


图 1 非清晰塔结构引起的流程多样性
Fig. 1 Multiformity of flowsheet caused by no-sharp separation

研究发现，非清晰塔的存在使流程中产生了许多相同组分的物流，正是对它们的处理方式不同引起了各种流程的变化。对两股相同组分物流处理方式归结为 3 种：独立 [图 2 (a)]; 合并 [图 2 (b)]; 热耦合 [图 2 (c)]。可以发现，如果相同物

流为单组分流，图 2 (a)、(b) 结果相同，因此只有两种处理方式：独立 [图 2 (a)]; 热耦合 [图 2 (c)]。

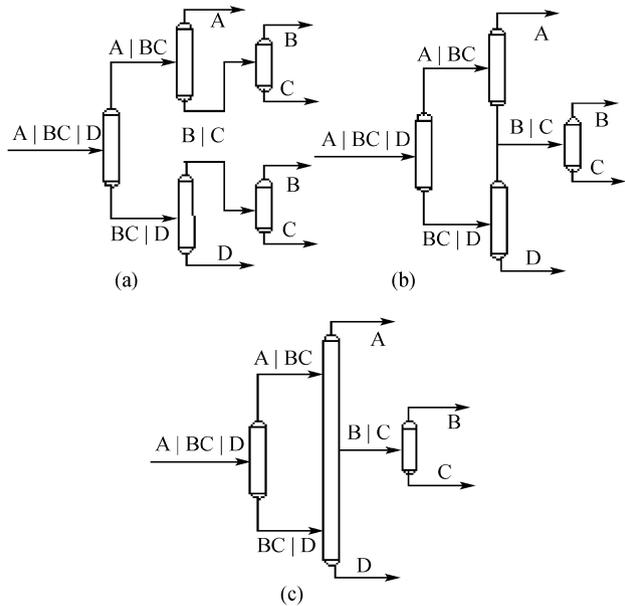


图 2 相同物流的 3 种处理方式
Fig. 2 Three handle types of streams with same components

2 最大简单塔数

对复杂精馏流程的综合一般要借助于等价的简单塔流程^[3]来实现，所以需要首先确定最大简单塔数。最大简单塔数就是指流程中只采用简单塔，均采用非清晰分割，没有物流的合并 [如图 2 (a)], 完成分离任务所需要的塔的数量，其数值越大，意味着问题的求解规模就越大。

当仅考虑清晰塔时， N 组分分离最多需要 $N-1$ 个简单塔，而考虑非清晰塔时，简单塔数将远远超过这个限制，不同组分数 N 和允许的最大中间组分数 M 所对应的最大简单塔数 ST 之间的关系为

$$ST = 2^{N-1} - 1 \quad (N \leq M)$$

$$ST = 2^M (N - M) - 1 \quad (N > M)$$

下面证明 $M=1$ 的情况 (归纳法):

$N=2$ 时, $ST=1$ 成立;

假设组分数为 $N-1$ 时, $ST=2^M (N-1-1) - 1$ 成立;

那么组分数为 N 时, $C_1 C_2 C_3 \dots C_N$ 经过一个塔后可分为

$$C_1, C_2, \dots, C_{N-2} | C_{N-1} | C_N \longrightarrow \begin{cases} C_1, C_2, \dots, C_{N-2}, C_{N-1} \\ C_{N-1}, C_N \end{cases}$$

塔顶 $N-1$ 个组分，根据假设有 $2^M (N-1-M) - 1$ 个塔，塔底 2 组分最多需要 1 个塔，于是

$$ST = 2^M (N-1-M) - 1 + 1 + 1 \\ = 2^M (N-M) - 1$$

同样可以证明 M 等于 2 时公式成立，从而证得任意 M 、 N 时公式成立。如 $N=5$ ， $M=2$ 时， $ST=11$ 。

3 结构分析与代码表示

本文采用基于遗传规划 (GP) 的综合算法^[1]进行求解，它是一种具有自动搜索功能的结构优化方法，求解时需要提供组成各种结构的单元特征，算法自动合成各种可行结构并进行寻优。对含非清晰塔的情况，需要给出描述非清晰塔流程的特征。

3.1 含非清晰塔流程的结构分析

如图 2 所示，两股相同物流的处理方式有 3 种，但是对多股相同物流的匹配方式以及相同物流的数量需要进一步确定。

(1) 最大中间组分数取 1 时，经过非清晰塔后，中间组分在塔顶为最重组分，在塔底为最轻组分，随后的分离中，该中间组分必然有一股从某塔的顶部采出，而另一股从其他塔的底部采出，流程中必然存在两股只含中间组分的物流。以 ABCDE 五组分分离为例，其中，B、C、D 可以分别作为中间组分，则流程中最多可以含有 3 对相同组分的物流，即 B、C、D。对 N 个组分，最多有 $N-2$ 对相同的中间组分物流。

(2) 最大中间组分数取 2 时，流程中可能存在两股由两个中间组分构成的物流，另外必然存在多股相同的单组分物流。在 N 个组分的分离流程中，最多有 $N-3$ 对相同的双组分物流， $N-4$ 个组分具有 4 股相同物流，另外有两个组分（第二个和倒数第二个）最多具有 3 股单组分物流。以五组分 ABCDE 分离为例，最多可以含有 2 对相同组分的物流，即 BC、CD。分别有 3 股 B 和 D 物流，4 股 C 物流。

本文仅讨论最大中间组分数为 2 的情况，这时，两个组分的相同物流最多有两股，处理方式最多有 3 种，如图 2 所示。但是对单组分的相同物流最多可有 4 股，分别来自不同的塔，有两股塔顶物

流 (用 G_1 、 G_2 表示) 及两股塔底物流 (用 L_1 、 L_2 表示)。对于以上 4 股物流，将有 7 种组合关系，如表 1 所示。

表 1 单组分相同物流的组合方式

Table 1 Combination for same streams of one component

No.	Combination
1	no coupling
2	G_1 -① L_1 G_2 ② L_2
3	G_1 - L_2 G_2 , L_1
4	G_1 - L_1 G_2 - L_2
5	G_1 - L_2 G_2 - L_1
6	G_1 L_1 G_2 - L_2
7	G_1 L_2 G_2 - L_1

① Streams are coupled; ② Streams are not coupled.

3.2 代码表示

基于遗传规划的综合算法^[1]中共设计了 3 种节点，即代表简单塔节点 C、代表换热器的节点 H 和代表侧线塔结构的节点 P。图 3 给出了四组分分离的 GP 代码与简单塔流程的对应关系，流程中双箭头线代表热耦合节点 P，单箭头线对应换热器节点 H。可以看出仅靠不同的节点只能给出对应的流程，不能表示相同物流的处理方式。

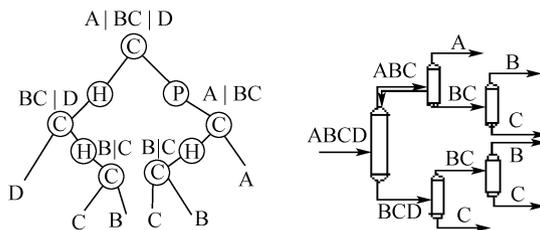


图 3 GP 代码与对应的简单流程

Fig. 3 GP code and corresponding simple flowsheet

为了表达相同物流的处理方式，在每个 GP 代码的根节点上设置一个整数数组，数组是根据组分数设定的，前 $N-3$ 个元素表示双组分物流情况，后 $N-2$ 个元素表示单组分物流情况。数组的每一位对应一种相同物流，数值是该种物流的各种匹配形式。对双组分物流取值是 1~3 (对应以上 3 种处理方式)，单组分物流取值是 1~7 (表 1)。初始代码生成时，这个数组是随机产生的，并在进化时参与进化操作。

塔节点 C 的属性中，采用轻、重关键组分序号来表示分割位置，它们是在代码生成时随机选取的。如果两个信息相邻，表示清晰分割，否则为非清晰分割。

4 简化流程

考虑非清晰塔结构时，得到的最优流程往往过于复杂，它可以作为理想值（最小年费用），为其他流程提供参考。通过增加约束或惩罚可以得到目标值稍大的实用流程。

4.1 增加约束

在算法中增加约束限制，不让过于复杂的结构产生。影响流程复杂性的因素主要包括：塔的数量、热偶合数量以及热集成数量，通过限制它们的数量可以降低流程复杂度。

4.2 惩罚函数法

惩罚函数法是对塔、热偶合以及热集成在超过一定数量时进行惩罚。这种方法应用比较复杂，需要知道合适的数量和惩罚的力度，如何有效地应用本方法还需要做进一步的研究。

5 应用举例

以 Rathore 等^[11]五组分分离为例，采用本文提出的算法，求解含非清晰塔的精馏流程。最大中间组分数为 2，计算采用文献 [12] 的公用工程等

级及价格。物流流率为 $907.20 \text{ kmol} \cdot \text{h}^{-1}$ ，组成 (mol) 为：A, propane (0.05)；B, isobutane (0.15)；C, *n*-butane (0.25)；D, isopentane (0.2)；E, *n*-pentane (0.35)。

初始种群规模取 80，复制率取 10%，交换率取 60%，变异率取 5%。使用 Pentium 4/3.0 G 计算机计算，于第 28 代搜索到最优解，所需 CPU 时间约为 500 s。

图 4 (a) 给出了包括 10 个简单塔（最大简单塔数是 11 个）的最优简单塔流程，按照热力学等价原则，塔 1 与塔 2、3、4 的提馏段合并为塔 I；相同物流 BC 热偶合，塔 8 代替塔 10，这样，塔 9 与塔 6、2 的精馏段合并为塔 II；相同物流 CD 热偶合，塔 7 代替塔 5，塔 3 精馏段与塔 6 提馏段合并为塔 III；最后，相同物流 C、D 热偶合，塔 8 与塔 7 以及塔 4 的精馏段合并为塔 IV，最终得到如图 4 (b) 所示的对应复杂塔流程，其年费用（目标值）是 1.9×10^6 \$。

当流程中只考虑清晰塔时，获得最优流程如图 5 (a) 所示，年费用为 2.6×10^6 \$。可以看出若不考虑非清晰塔，年费用增加 36%。

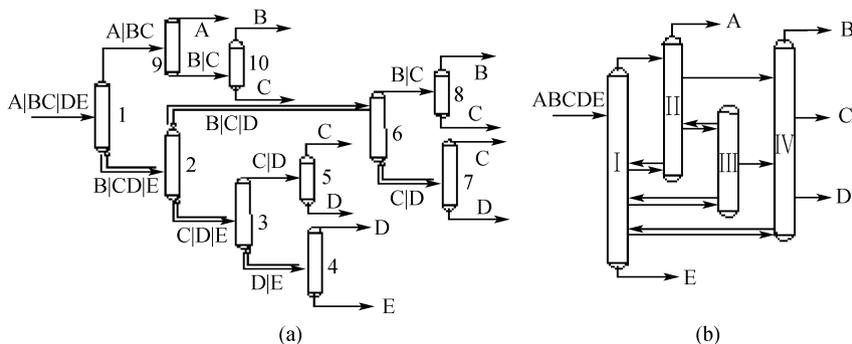


图 4 例子的优化的精馏流程

Fig. 4 Optimal distillation flowsheet of example

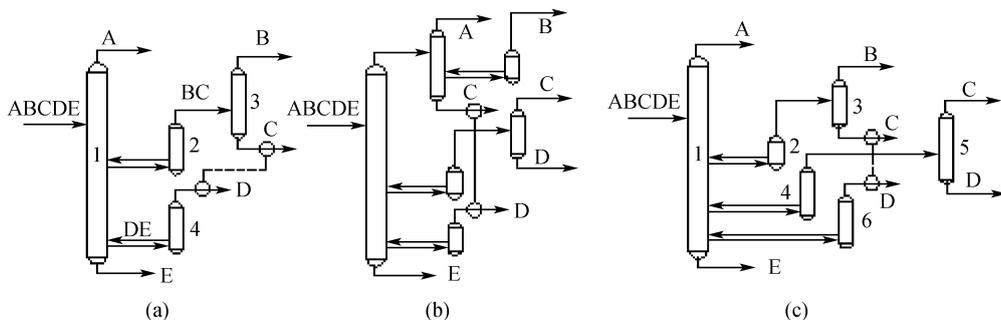


图 5 例子简化后的结果

Fig. 5 Example results after being simplified

表2 例子的优化结果

Table 2 Optimal results for example

Parameter	Column													
	Fig. 4(b)				Fig. 5(a)				Fig. 5(c)					
	I	II	III	IV	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
p/MPa	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.2	1.7	1.67	1.67	1.08	1.67	1.02	1.67
R	1.93	19	0	37.4	12.2	3.1	15.1	13.2	11.9	2.02	13.9	0.95	3.77	14.7
N'	121	47	16	125	109	20	94	52	142	16	98	98	40	52
$Q_c \times 10^{-3}/\text{kW}$	2.28	3.17	0	8.39	2.2	5.8	9.25	1.09	2.16	3.98	8.6	0.54	0.68	0.84
$Q_r \times 10^{-3}/\text{kW}$	16.3	0	0	0	20.5	0	0	0	18.1	0	0	0	0.74	0

图4(b)的流程中,集成度高,整个流程只有一个再沸器,因此设备费用和操作费用都低。但是由于该流程过于复杂,目前工程化水平难于实现。若规定从热耦合得到的热量不能通过热耦合传给另一个塔,再规定一个塔只允许有一个进料,采用同样的方法与参数,得到图5(b)、(c)所示流程。年费用分别为 2.22×10^6 \$、 2.24×10^6 \$,虽然年费用增加16%,但是可操作性大大加强,因为侧线结构目前应用已比较广泛。表2给出了以上部分流程中各个塔的操作参数:压力(p)、回流比(R)、理论模数(N')、塔顶及塔底热负荷(Q_c 、 Q_r)。

6 结论

本文对含非清晰塔的精馏系统进行了深入研究,突破了只考虑预分离塔或Petlyuk塔结构的局限,并给出了该类问题的求解规模与求解范围。另外对含非清晰塔的流程结构进行抽象,得到其主要特征,即相同物流的处理方式。通过对该特征的描述,实现了含非清晰塔结构的GP编码。

虽然本文采用的是遗传规划方法,但是文中给出的编码方法与策略也适用于其他方法。在考虑非清晰塔的情况下,问题规模突破 $N-1$ 范围,在最大中间组分数为2的情况下,最大简单塔数可达到 $4N-9$,搜索范围更大,可能获得更优秀的流程。

References

[1] Wang Xiaohong (王晓红), Li Yugang (李玉刚), Hu Yangdong (胡仰栋). Synthesis of complex distillation systems via genetic programming. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2006, **57** (12): 506-510

[2] Ben-Guang Rong, Andrzej Kraslawski, Ilkka Turunen. Synthesis of heat-integrated thermally coupled distillation systems for multicomponent separations. *J. Ind. Eng.*

Chem. Res., 2003, **42** (19): 4329-4339

[3] Ben-Guang Rong, Andrzej Kraslawski, Ilkka Turunen. Synthesis and optimal design of thermodynamically equivalent thermally coupled distillation systems. *J. Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, **43** (18): 5904-5915

[4] An Weizhong (安维中), Yuan Xigang (袁希钢). Improved simulated annealing algorithm for synthesis of heat integrated distillation sequences. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2005, **56** (3): 506-510

[5] Yuan Xigang, An Weizhong. Synthesis of heat integrated complex distillation systems via stochastic optimization approaches. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2002, **10** (5): 495-507

[6] Wu Yizhun (吴以准), Zhang Ruisheng (张瑞生). A fuzzy synthesis method for multicomponent distillation sequences. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 1993, **44** (1): 117-121

[7] Rev E, Emtir M Szitkai, Fonyo Z. Energy savings of integrated and coupled distillation systems. *Comput. Chem. Engng.*, 2001, **25**: 119-140

[8] José A Caballero, Daniel Milan-Yanez, Ignacio E Grossmann. Rigorous design of distillation columns: integration of disjunctive programming and process simulators. *J. Ind. Eng. Chem. Res.*, 2005, **44** (17): 6760-6775

[9] Shi Wenjun (施文俊), He Xiaorong (何小荣), Chen Bingzhen (陈丙珍), Qiu Tong (邱彤). Improved TS method for optimization of chemical processes. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2004, **55** (10): 1665-1668

[10] Dong Hongguang (董宏光), Qin Limin (秦立民), Wang Tao (王涛), Fan Shuanshi (樊栓狮), Yao Pingjing (姚平经). Distillation separation sequence optimization synthesis based on adaptive and parallel tabu search. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2004, **55** (10): 1669-1673

[11] Rathore R N S, van Wormer K A, Powers G J. Synthesis strategies for multicomponent separation systems with energy integration. *AIChE J.*, 1974, **20**: 491

[12] Douglas J M. Conceptual Design of Chemical Processes (化工过程的概念设计). Jiang Chusheng (蒋楚生), et al. trans. Beijing: Chemical Industry Press, 1994: 345