

一种适用于质量交换网络优化的节点非结构模型

韩新宇¹, 段欢欢^{1,2}, 崔国民¹, 周志强¹, 马秀宝¹, 肖媛¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 河南牧业经济学院 能源与智能工程学院, 郑州 450000)

摘要: 质量交换网络(MEN)作为过程集成系统的新兴分支方向, 具有提高资源利用效率和降低环境污染的双重效益。目前典型的超结构模型在 MEN 优化中已经取得了很好的应用, 但超结构固定排列方式限制了模型中换热器匹配的灵活性和求解域的扩大。基于此, 提出了一种新的有分流节点非结构模型, 以节点的形式量化传质单元的匹配方式, 实现传质单元在流股上的自由匹配, 从而增强了单元匹配的灵活性。同时考虑到实际工程中有分流情况的出现, 以分组数和分支数表示传质单元的有分流形式, 进一步扩大了模型的求解范围。最后, 通过 2 个实际 MEN 算例分析计算, 验证了有分流节点非结构模型的有效性。

关键词: 质量交换网络; 节点非结构模型; 同步优化; 传质单元

中图分类号: TQ 021.8 **文献标志码:** A

A node unstructured model for mass exchange network optimization

HAN Xinyu¹, DUAN Huanhuan^{1,2}, CUI Guomin¹, ZHOU Zhiqiang¹, MA Xiubao¹, XIAO Yuan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Energy and Intelligence Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: As a new branch of process integration system, mass exchange network (MEN) has the dual benefits of improving resource utilization efficiency and reducing environmental pollution. At present, the typical superstructure model has been well applied in MEN optimization, but the fixed arrangement of superstructure limits the flexibility of heat exchanger matching and the expansion of solution domain in the model. A new unstructured model with shunting nodes was proposed. The matching mode of mass transfer unit was quantified in the form of nodes, the free matching of mass transfer unit on the stream strand was realized and the flexibility of unit matching was enhanced. At the same time, considering the appearance of diversion in practical engineering, the diversion form of mass transfer unit was expressed by the number of groups and branches, which further expanded the solution range of the model. Finally, through the analysis and calculation of two actual MEN examples, the effectiveness of the unstructured model with split nodes was verified.

收稿日期: 2022-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21978171, 51976126); 中国博士后科学基金资助项目(2020M671171)

第一作者: 韩新宇(1997-), 男, 硕士研究生。研究方向: 强化换热及系统过程优化。E-mail: xinyuhan1997@163.com

通信作者: 崔国民(1969-), 男, 教授。研究方向: 强化换热及系统过程优化。E-mail: cgm@usst.edu.cn

Keywords: mass exchange network; node unstructured model; synchronization optimization; mass transfer unit

质量交换网络 (mass exchange network, MEN) 因其能够减少资源使用和降低污染物对环境的影响被广泛应用在化工生产中, 是化工系统集成中的重要组成部分, 其通过将已有的废物流股(富流通股)和能接受该物质的该股(贫流通股)直接逆流接触, 在满足质量平衡、环境限制、费用最小等约束的情况下, 选择性地将杂质从富流通股中除去。由于该股匹配及传质单元分配的多样性、制约性, 使得该问题的综合求解较为困难^[1]。

Eli-Halwagi 等^[2]最早将热夹点类比成质量夹点, 提出两步夹点法优化 MEN, 首先求解最小质量分离剂用量, 其次构造最少传质单元数的质量网络。Gadalla^[3]提出了一种新的通过图形化确定大规模集成的方法, 结合夹点技术原理, 将 MEN 设计中的关键信息显示在图表中, 更加有利于对大规模集成问题的求解。Bagajewicz 等^[4]将状态空间法应用于 MEN, 通过将网络分解为分配网络和过程算子两部分来确定匹配结构, 能够综合考虑操作费用和投资费用, 对于复杂的 MEN 也能有效解决, 但该方法只考虑了有限次的分割和混合, 只能优化有限的匹配结构, 全局寻优能力有待加强。Yee 等^[5]建立了换热网络的超结构模型, 推动了换热网络同步优化的发展。鉴于 MEN 和换热网络之间的相似性, Chen 等^[6]将超结构方法引入到质量网络优化中, 建立了混合整数非线性规划模型, 该方法不依赖于夹点技术, 能够实现操作费用和投资费用的同步优化, 同时超结构中级数的设定一定程度上保证了优化过程中结构匹配的多样性, 因此能够得到年综合费用更优的质量交换网络结构。但结构化模型由于固定结构的排列方式, 无法表达所有可能的最优结构。同时, 由于固定了初始匹配结构, 限制了后期网络进行的优化方向^[7]。Azeez 等^[8]提出了新的优化换热网络和质量网络的超结构模型, 分别使用不同的工艺参数组合定义, 虽然同属于混合整数非线性规划问题, 但是该模型有利于减少非线性因素, 目标函数均是实现年综合目标最小化。为进一步改善此问题, 众多学者构建了新的模型^[9-11]。陆贞等^[9]根据换热网络迭代计算的过程提出了棋盘模型, 提高了计算效率。陈家星^[10]提出了非结构模型,

允许换热单元在该股任意位置灵活匹配, 提高了模型的灵活性。在此基础上, Xiao 等^[11]提出了节点非结构模型, 以节点的形式量化换热单元的匹配位置, 更加有利于表示换热单元的生成和消去, 提高了非结构模型的适用性。从对换热网络实际优化效果来看, 即使是大规模的换热网络算例, 节点非结构模型也能展现良好的全局搜索能力^[12-14]。

鉴于换热网络和 MEN 的相似性, 本文借鉴换热网络节点非结构模型的构建方式, 建立考虑分流的 MEN 的节点非结构模型, 并结合强制进化随机游走算法^[15](random walk algorithm with compulsive evolution, RWCE)对该模型进行求解。最后, 通过对 2 个实际工程算例: 氨水去除硫化氢 2×2 规模网络和萃取苯酚 2×3 规模网络进行优化计算, 分别得到年综合费用为 411 619, 331 627 \$/y 的结果, 相比于文献中的最优结果, 分别降低了 4 501, 1 452 \$/y, 验证了本文模型及方法的有效性。

1 质量网络节点非结构模型

1.1 问题描述

MEN 综合问题可描述为: 给定一系列富含杂质的富流通股(过程该股)及不含或只有少量杂质的贫流通股(质量交换剂), 贫富流通股之间逆流匹配传质单元进行传质, 通常传质平衡关系可近似表示为线性关系。同时为了保证富流通股和贫流通股之间存在浓度梯度进行传质操作, Eli-Halwagi 等^[2]在实际计算中对浓度差进行了假定, 对于任何贫富流通股之间的相平衡关系, 浓度差都取 0.000 1, 这有利于模型的简化计算。富流通股进口浓度、流量已知, 贫流通股进口浓度、目标浓度已知。网络设计需要满足富流通股出口浓度达到目标浓度, 同时贫流通股流量不能超过流量上限的要求。在此基础上, 确定每条贫流通股实际所需流量、贫富流通股之间的匹配方式、传质单元数目及每个传质单元所需要的塔板数或填料高度。

1.2 模型表示

随着计算能力和优化算法的发展, 对优化模型也提出了更高的要求。本文建立的节点非结构

模型能提供传质单元自由匹配的空间, 具有灵活性强、便于操作且搜索域大的特点。在结构构建初期, 网络为不包含任何传质单元以及贫流通股流量的空结构, 在每条贫富流通股上, 预设有一定的分组数 nd_S, nd_R , 每个分组内包含有一定的分支数 nf_S, nf_R 用以分流。以2条富流通股 $R1, R2(N_R=2)$ 和2条贫流通股 $S1, S2(N_S=2)$ 的MEN问题为例, 如图1所示, 分组数 $nd_S=nd_R=5$, 分支数 $nf_S=nf_R=3$ 。

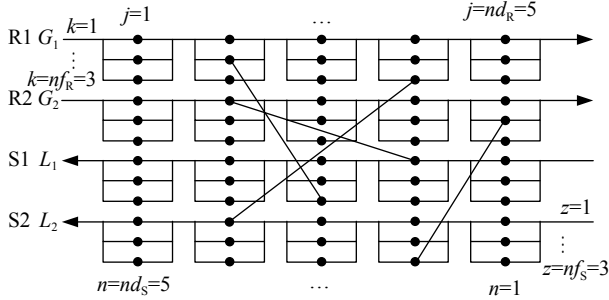


图1 节点非结构模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of node unstructured model

确定节点编号是节点非结构模型实现传质单元匹配的重要环节。贫富流通股上的节点编号分别使用三维数组 $NDS(c, n, z)$, $c \in N_S, n \in nd_S, z \in nf_S$ 和 $NDR(i, j, k)$, $i \in N_R, j \in nd_R, k \in nf_R$ 表示。以流通股流动方向顺序排列, 如 $NDS(1, 2, 2)$ 表示节点在第1条富流通股上的第2个分组数中的第2条分支上。编号确定后, 由计算机随机在贫富流通股上抽取1个节点, 并将其对应关系连接, 形成传质单元。在富贫流通股上的随机抽取节点的过程表示如下:

$$\begin{cases} i = N_R \text{rand}(0, 1) \\ j = nd_R \text{rand}(0, 1) \\ k = nf_R \text{rand}(0, 1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} c = N_S \text{rand}(0, 1) \\ n = nd_S \text{rand}(0, 1) \\ z = nf_S \text{rand}(0, 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\text{rand}(0, 1)$ 为均匀分布在 $0 \sim 1$ 之间的随机数。

将富贫流通股上抽取的节点关系进行连接, 形成如下传质单元:

$$\begin{cases} NDR(i, j, k, 1) = c \\ NDR(i, j, k, 2) = n \\ NDR(i, j, k, 3) = z \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} NDS(c, n, z, 1) = i \\ NDS(c, n, z, 2) = j \\ NDS(c, n, z, 3) = k \end{cases} \quad (4)$$

式中: $NDR(i, j, k, 1)$ 表示富流通股编号; $NDR(i, j, k, 2)$

表示富流通股上的分组数编号; $NDR(i, j, k, 3)$ 表示分组上的分支编号。贫流通股上的表示方式和其相似。

富贫流通股的连接关系在图1中以连线方式表示, 表示存在4个传质单元。为了更方便在后续模型建立过程中表达连接关系, 建立如下形式对连接进行表达:

$$CNDS(si, sj, sk) = NDR(i, j, k) \quad (5)$$

式中, $CNDS(si, sj, sk)$ 表示在第 i 条富流通股上、第 j 个分组上、第 k 个分支上的节点存在的传质单元对应的贫流通股编号。

1.3 目标函数

MEN节点非结构模型以最小年综合费用 f 为目标, 包含操作费用 f_o 和投资费用 f_v 两部分, 计算式为

$$\min f = \min(f_o + f_v) \quad (6)$$

$$f_o = \sum_{c=1}^{N_S} (L_c e_c) \quad (7)$$

$$f_v = E'' \sum_i^{N_R} \sum_j^{nd_R} \sum_k^{nf_R} (N_{i,j,k}) \quad (8)$$

式中: f_o 主要由贫流通股流量 L 和贫流通股单位费用 e 构成; f_v 由购买传质单元设备的费用组成, 主要包括吸收塔、萃取塔、蒸馏塔^[16]等, 其计算费用由塔板内所需塔板数 N 的年度化费用和年度化费用 E'' 组成。

传统计算塔板数的方法基本都由Kremser模型^[17]方程式(9)~(11)确定, 但其带来的问题在于当吸收因子 A 为1时, 会出现奇异性的问题, 即方程的不连续性, 这会在模型计算过程中引入额外的变量, 导致问题维数增加。因此在本文中, 采用Duncan提出的修正后的Kremser方程^[18], 可以避免奇点问题的存在, 如式(12)所示。

$$A = L_c / (m_c G_i) \quad (9)$$

$$N_{i,j,k} (A \neq 1) = \frac{\ln \left[\frac{y_{i,j,k}^{\text{in}} - m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{in}} - b_{si}}{y_{i,j,k}^{\text{out}} - m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{in}} - b_{si}} \left(1 - \frac{1}{A} \right) + \frac{1}{A} \right]}{\ln A} \quad (10)$$

$$N_{i,j,k} (A = 1) = \frac{y_{i,j,k}^{\text{in}} - y_{i,j,k}^{\text{out}}}{y_{i,j,k}^{\text{out}} - m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{in}} - b_{si}} \quad (11)$$

$$N_{i,j,k} = \left(\frac{(y_{i,j,k}^{\text{in}} - y_{i,j,k}^{\text{out}})^p + (m_c x_{si,sj,sk}^{\text{out}} - m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{in}})^p}{(y_{i,j,k}^{\text{in}} - m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{out}})^p + (y_{i,j,k}^{\text{out}} - m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{in}})^p} \right)^{1/p} \quad (12)$$

式中: y 为富流通股上的节点浓度; 上角标 in 和 out 分

别表示进口和出口；下角标 i, j, k 表示节点编号； x 为贫流股上的浓度； m_c 为传质单元所匹配流股之间的相平衡常数； p 为经验常数，文献[18]进行了说明，取 $p = 1/3$ 。

由于模型中涉及到分流的应用，因此在节点浓度计算时还要考虑到分流的混合和分开。分流时的节点浓度表达式为

$$CCR_{i,j,k}^{\text{in}} = CR_{i,j}^{\text{in}} \quad (13)$$

$$CCS_{si,sj,sk}^{\text{in}} = CS_{si,sj}^{\text{in}} \quad (14)$$

式中： CCR ， CCS 分别表示富、贫流股支流节点上的浓度； CR ， CS 表示富、贫流股分流组上的浓度。当分流时，进入支流的流量发生变化，而浓度不发生变化。

合流时，浓度需要根据分流比进一步计算，从而算出整个分组的出口浓度，即下一个分组的进口浓度。

$$CR_{i,j+1}^{\text{in}} = \sum_k^{n_{fR}} (CCR_{i,j,k}^{\text{out}} SPR_{i,j,k}) \quad (15)$$

$$CS_{si,sj+1}^{\text{in}} = \sum_{sk}^{n_{fS}} (CCS_{si,sj,sk}^{\text{out}} SPS_{si,sj,sk}) \quad (16)$$

式中， SPR ， SPS 分别代表富、贫流股上每个支流的分流比。观察式(15)和式(16)注意到，在富流股和贫流股上的节点，进出口浓度之间还缺一部分的计算，该部分浓度计算是由网络结构中的传质单元决定的。当不存在传质单元时，富流股或贫流股上节点的进出口浓度分别相等。而当存在传质单元时，计算式为

$$CCR_{i,j,k}^{\text{out}} = CCR_{i,j,k}^{\text{in}} - \frac{ME_{i,j,k}}{G_i SPR_{i,j,k}} \quad (17)$$

$$CCS_{si,sj,sk}^{\text{out}} = CCS_{si,sj,sk}^{\text{in}} - \frac{ME_{si,sj,sk}}{L_{si} SPS_{si,sj,sk}} \quad (18)$$

式中： ME 表示在传质单元中发生的质量交换量，即富流股向贫流股传递的物质质量； G 为富流股流量。

1.4 约束条件

流股总质量守恒

$$G_i(y_i^{\text{in}} - y_i^{\text{out}}) = \sum_i^{N_R} \sum_j^{nd_R} \sum_k^{n_{fR}} ME_{i,j,k} \quad (19)$$

$$L_{si}(x_{si}^{\text{in}} - x_{si}^{\text{out}}) = \sum_{si}^{N_S} \sum_{sj}^{nd_S} \sum_{sk}^{n_{fS}} ME_{si,sj,sk} \quad (20)$$

传质单元处质量守恒

$$G_{i,j,k}(y_{i,j,k}^{\text{in}} - y_{i,j,k}^{\text{out}}) = L_{si,sj,sk}(x_{si,sj,sk}^{\text{out}} - x_{si,sj,sk}^{\text{in}}) \quad (21)$$

相平衡约束

$$y_{i,j,k}^{\text{in}} \geq m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{out}} + b_{si} \quad (22)$$

$$y_{i,j,k}^{\text{out}} \geq m_{si} x_{si,sj,sk}^{\text{in}} + b_{si} \quad (23)$$

浓度约束

$$y_{i,j}^{\text{in}} \geq y_{i,j+1}^{\text{in}}, x_{si,sj+1}^{\text{in}} \geq x_{si,sj}^{\text{in}} \quad (24)$$

贫流股流量约束

$$0 \leq L_{si} \leq L_{si}^{\text{max}} \quad (25)$$

富流股出口浓度限制

$$y_i^{\text{out}} \leq y_i^{\text{max}} \quad (26)$$

2 优化方法

有分流节点非结构模型构建后，还需借助合适的优化算法才能实现求解域内的全局寻优。强制进化随机游走算法^[14]因其拥有较强的突破局部极值的能力，在换热网络优化中得到了广泛的应用，并取得了很好的结果。因此，本文引入该算法，并结合模型特点对MEN综合问题进行优化，具体操作如图2所示。

在图2中： α 为均匀分布在0~1之间的随机数； θ_1 为游走进化概率，目的在于对存在传质单元的节点进行分流比和质量交换量的更新，如式(27)和式(28)所示，实现连续变量的优化； θ_2 为贫流股流量更新概率，为了维持优化的稳定性，流量不可能在每一步都发生变化，因此设定一个较小概率对流量更新进行控制，有利于结构优化的深度，更新过程如式(29)所示； θ_3 为生成阶段的概率，要注意的是，除了生成传质单元，贫流股流量也要生成，在流量更新过程中，容易出现流量小于最小阈值时归0的情况，此时不重新对流量生成，会导致计算无法进行； θ_4 为接受差解概率，该步骤主要目的在于让一部分较差的解重新进行优化，挖掘进化潜力，有利于跳出局部极值。

$$ME_{i,j,k,it+1} = ME_{i,j,k,it} + (1 - 2\gamma_1)\gamma_2\Delta W \quad (27)$$

$$SPR_{i,j,k,it+1} = SPR_{i,j,k,it} + (1 - 2\gamma_3)\gamma_4\Delta W_1 \quad (28)$$

$$L_{si,it+1} = L_{si,it} + (1 - 2\gamma_5)\gamma_6\Delta W_2 \quad (29)$$

式中： γ 为均匀分布在0~1之间的随机数； ΔW 为质量交换量最大游走步长； ΔW_1 为分流比最大游走步长； ΔW_2 为贫流股流量最大游走步长。

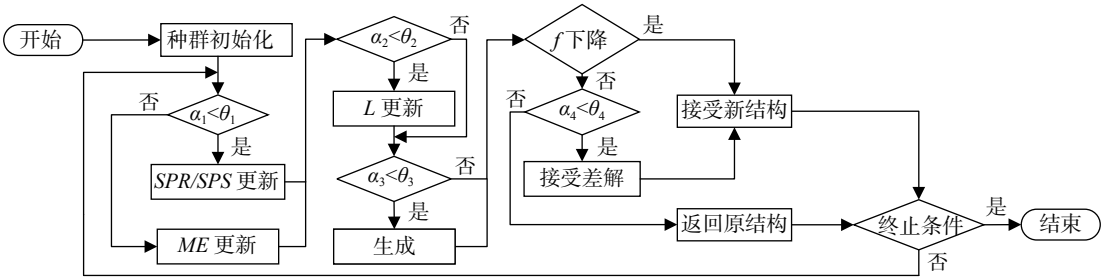


图 2 算法流程图

Fig.2 Algorithm flowchart

3 算例验证

为了验证构建的节点非结构模型应用于 MEN 的效果, 结合 RWCE 算法对 2 个实际工程算例进行优化, 并将求解后的最优结果和现有文献进行对比。本文中所涉及的计算采用 Fortran90 编程, 计算机参数为: CPU Intel(R) Xeon(R) Gold 6226R, 主频 2.9, 2.89 GHz, 内存 RAM: 64 GB。

3.1 算例 1

算例 1 采用的是由两条富流通股和两条贫流通股组成的 MEN。该算例来源于文献 [19], 网络建立目的是为了从富流通股中除去硫化氢, 其中两条富流通股分别是焦炉气流 R1 和经过“Claus”工艺处理后的硫化氢尾气 R2。两条贫流通股分别是氨水 S1, 其可由煤炉气中的氨气形成, 因此成本较低^[20], 但由于贫流通股也存有排出浓度限制, 仅使用氨水难以保证富流通股中的硫化氢含量达到排放标准, 因此还需引入外加质量分离剂过冷甲醇 S2。表 1~2 列出了该网络相关的初始数据。

表 1 富流通股数据(算例 1)

Tab.1 Rich stream data (case 1)

流通股	流量 $G_i/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	入口浓度 y_i	目标浓度 y_i^t
R1	0.9	0.070	0.0003
R2	0.1	0.051	0.0001

表 2 贫流通股数据(算例 1)

Tab.2 Poor stream data (case 1)

流通股	流量 $L_c/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	入口浓度 x_c	目标浓度 x_c^t	费用 $/(\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1})$
S1	2.3	0.0006	0.0310	117 360
S2	—	0.0002	0.0035	176 040

传质过程中相平衡关系主要取决于组分和贫流通股之间形成的二元体系的性质, 在该网络中, 涉及的是硫化氢和氨水、硫化氢和过冷甲醇之间

的相平衡, 其数据可由下式进行关联:

$$\begin{cases} y = 1.45(x_1 + \varepsilon) + b_1 \\ y = 0.26(x_2 + \varepsilon) + b_2 \end{cases} \quad (30)$$

式中: $b_1 = b_2 = 0$; 浓度差 ε 取固定值 0.000 1。

图 3 为质量网络经过拉直简化后得到的最优结构, 其最优费用为 411 619 $\text{\$/y}$, 圆圈内表示传质单元包含的塔板数。模型中节点数据设置为: $nd_S = nd_R = 10$, $nf_S = nf_R = 3$ 。节点数的设定并不是统一的, 一般根据不同算例实际优化结果进行调节。表 3 表示在不同的节点参数设置下, 迭代至 3 250 万步时得到的最优结果及花费时间。

从优化结果对比可以看出:

a. 虽然节点参数设置不同, 但在结果优化来看, 结合表 4 中算例文献结果对比可知, 本文得到的结果均优于表中文献结果, 这在一定程度上说明了本文构建的有分流节点非结构模型的搜索域更广, 结合 RWCE 算法能够充分在搜索域内寻找到质量更高的解。

b. 从节点数的设置与优化结果对比来看, 目前并不能明确找到节点设置和优化结果的必然联系, 但也存在一定的规律: 当节点数设置较大时, 由于每个节点都需要对进出口浓度、塔板数、流量等进行计算, 会降低计算速度, 影响优化效率; 当节点数设置较小时, 一定程度上限制了传质单元的匹配方式, 影响优化精度的提高。

c. 节点数目的增多可以拓展求解空间, 当节点设置数较大时, 虽然计算时间增多, 但是如果给予其足够的时间进行优化, 能够提高得到最优解的概率。

Hallale 等^[19] 基于夹点使用作图法在最小浓度差固定的情况下, 求出了该网络的最优年度费用 526 035 $\text{\$/y}$ 。都健等^[21] 将最小浓度差作为优化变量引入对该网络优化, 从最优结构对比来看, 和本文优化出结构相同, 不同的是, 本文塔板数相

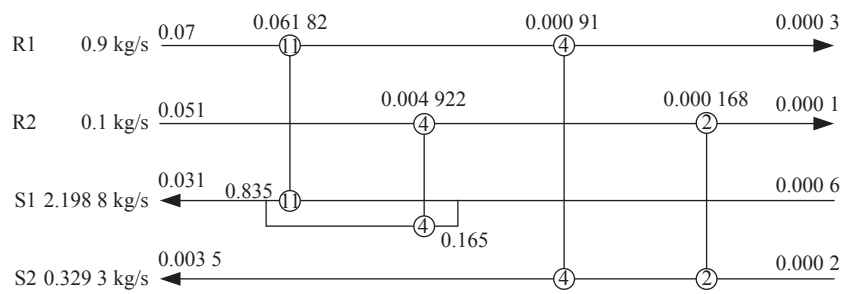


图3 简化后的最优结构图(算例1)

Fig.3 Simplified optimal structure diagram (case 1)

表3 不同节点设置下的优化结果

Tab.3 Optimization results under different node settings

nd_R/nd_S	nf_R/nf_S	$f/(\text{\$}\cdot\text{y}^{-1})$	时间/s
5	2	412 887	50 058
5	3	413 352	63 735
10	2	412 958	82 468
10	3	411 619	131 472
20	2	414 277	137 952
20	3	412 987	189 321

表4 算例1结果对比

Tab.4 Results comparison in case 1

文献	塔板数	操作费用/(\text{\\$}\cdot\text{y}^{-1})	投资费用/(\text{\\$}\cdot\text{y}^{-1})	总费用/(\text{\\$}\cdot\text{y}^{-1})
[19]	50	298 435	227 600	526 035
[21]	24	311 297	109 248	420 545
[22]	20	315 976	100 144	416 120
本文	21	316 027	95 592	411 619

比于文献从 24 下降到了 21，但带来的是贫流通股流量使用的升高，从最终优化结果来看，其费用要高于本文的 8 926 \$/y，由此可以看出增加一定的流量来减少塔板的使用是值得的。候创等^[22]在超结构模型中引入取整函数对塔板数进行取整，计算出了更优的年综合费用 411 166 \$/y，但该最优结果是根据修改后的目标函数计算得出，和本文所用目标函数有所不同，作者在文中也提到在使用公认目标函数计算时，其得到的最优结果为 416 120 \$/yr，高于本文使用节点非结构模型优化得到的结果。对比结构来看，在塔板数上，本文在富流通股进口处传质单元上的塔板数比文献中多出 1 个，这就使得富流通股上剩余的传质量降低，直接导致外部贫流通股 S2 的使用量下降，同时由于 S2 的操作费用较高，抵消了增加塔板数带来的费用，使得年综合费用下降。

3.2 算例2

算例 2 采用的是由两条富流通股和 3 条贫流通股组成的 MEN。该算例来源于文献 [19]，网络建立目的是为了从两种水溶液中萃取苯酚，3 条贫流通股分别是柴油 S1、润滑油 S2 和外部贫流通股轻油 S3。由于在贫流通股柴油 S1 和润滑油 S2 中加入苯酚有利于提炼，因此规定 S1，S2 流通股免费提供，并且需要全部使用。表 5 和表 6 列出了该网络相关的初始数据。

表5 富流通股数据(算例2)

Tab.5 Rich stream data (case 2)

流通股	流量 $G_i/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	入口浓度 y_i	目标浓度 y_i^t
R1	2	0.05	0.010
R2	1	0.03	0.006

表6 贫流通股数据(算例2)

Tab.6 Poor stream data (case 2)

流通股	流量 $L_c/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	入口浓度 x_c	目标浓度 x_c^t	费用/(\text{\\$}\cdot\text{kg}^{-1})
S1	5	0.005 0	0.015	0
S2	3	0.010 0	0.030	0
S3	∞	0.001 3	0.015	309 600

其传质过程中涉及的相平衡关系如下：

$$\begin{cases} y = 2(x_1 + \varepsilon) + b_1 \\ y = 1.53(x_2 + \varepsilon) + b_2 \\ y = 1.53(x_3 + \varepsilon) + b_3 \end{cases} \quad (31)$$

式中： $b_1 = b_2 = 0$ ； $b_3 = 0.01$ ； ε 取固定值 0.000 1。

图 4 为质量网络经过拉直简化后得到的最优结构，其最优年综合费用为 331 627 \$/y，模型中节点数据设置为： $nd_S = nd_R = 8$ ， $nf_S = nf_R = 3$ 。虽然算例 2 比算例 1 仅增加了 1 条贫流通股，但从传质单元匹配多样性来看，网络复杂性明显增加。

文献对比如表 7 所示。Hallale 等^[19]使用夹点技术设计该网络，得到最优年综合费用为 345 416 \$/y。

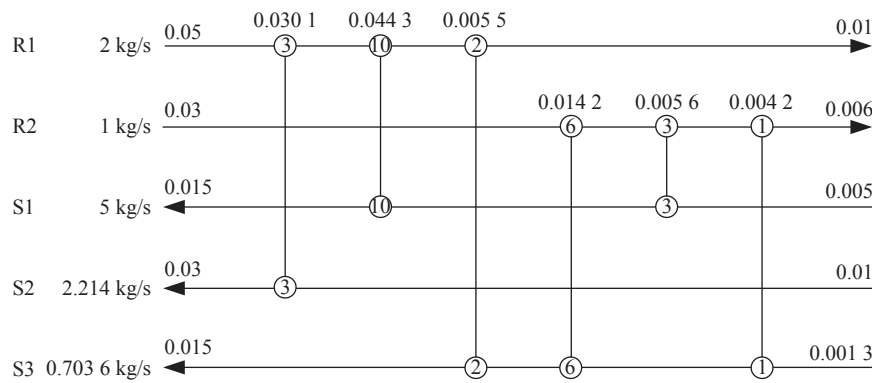


图 4 简化后的最优结构图(算例 2)

Fig.4 Simplified optimal structure diagram (case 2)

李绍军等^[23]将改进后的遗传算法引入优化该网络, 优化的最优年综合费用为 333 079 \$/y, 从最优结构对比来看, 和本文优化出来的最优结果有很大不同, 但从投资费用和操作费用来看, 虽然文献中操作费用要低于本文, 但其带来的投资费用的增多远远大于操作费用的减少, 可见本文的最优结构要优于文献中的最优结构, 这离不开节点非结构模型中传质单元匹配的灵活性。谢会等^[24]基于超结构模型使用列队竞争算法对该算例进行优化, 得最优解为 337 422 \$/y, 观察最优结果发现, 其传质单元匹配结构和本文相同, 不同的是每个传质单元里的塔板数不同, 这主要涉及本文中质量交换量的优化, 质量交换量匹配合适, 能够得到更为适合的塔板数及流量分配, 使得年综合费用进一步下降。

表 7 算例 2 结果对比
Tab.7 Results comparison in case 2

文献	塔板数	操作费/(\$·y ⁻¹)	投资费/(\$·y ⁻¹)	总费用/(\$·y ⁻¹)
[19]	28	217 960	127 456	345 416
[23]	28	205 623	127 456	333 079
[24]	23	232 726	104 696	337 422
本文	25	217 827	113 800	331 627

4 结 论

构建了适用于 MEN 优化的有分流节点非结构模型, 并对其优化过程进行了研究, 得到如下结论:

a. 模型以节点的形式量化传质单元的位置, 随机选取贫富流股上节点生成质量交换器, 拥有较强的灵活性和自由性, 在实现投资费用和操作

费用同步优化的同时, 保证了传质单元匹配的多样性;

b. 节点参数设置的灵活性有利于优化质量和优化效率的双重提升;

c. 利用该模型对吸收硫化氢和萃取苯酚的实际 MEN 优化, 分别取得了 411 619, 331 627 \$/yr 的年综合费用, 同文献获得的最优结果相比分别下降了 4 501, 1 452 \$/y, 验证了本文模型的有效性。

参考文献:

[1] 许乐, 莫愿斌, 卢彦越. 化工动态优化问题的混合海鸥优化算法研究[J]. 化学工程, 2021, 49(2): 74–78.

[2] ELI-HALWAGI M M, SRINIVAS B K, DUNN R F. Synthesis of optimal heat-induced separation networks[J]. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50(1): 81–97.

[3] GADALLA M A. A new graphical-based approach for mass integration and exchange network design[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 127(4): 239–252.

[4] BAGAJEWICZ M J, MANOUSIOUTHAKIS V. Mass/heat-exchange network representation of distillation networks[J]. *AIChE Journal*, 1992, 38(11): 1769–1800.

[5] YEE T F, GROSSMANN I E, KRAVANJA Z. Simultaneous optimization models for heat integration —III. Process and heat exchanger network optimization[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1990, 14(11): 1185–1200.

[6] CHEN C L, HUNG P S. Simultaneous synthesis of mass exchange networks for waste minimization[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2005, 29(7): 1561–1576.

[7] 徐玥, 崔国民. 基于节点配置策略的有分流换热网络优化性能探析[J]. 化工进展, 2021, 40(7): 3608–3616.

[8] AZEEZ O S, ISAFIADE A J, FRASER D M. Supply and target based superstructure synthesis of heat and mass exchanger networks-ScienceDirect[J]. *Chemical*

Engineering Research and Design, 2012, 90(2): 266–287.

[9] 陆贞, 崔国民, 张勤, 等. 棋盘模型在换热网络优化中的应用 [J]. 化学工程, 2007, 35(6): 16–19+, 28.

[10] 陈家星. 换热网络同步综合的超结构模型及全局最优化 [D]. 上海: 上海理工大学, 2018.

[11] XIAO Y, CUI G M. A novel Random Walk algorithm with Compulsive Evolution for heat exchanger network synthesis[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115(Complete): 1118–1127.

[12] 张璐, 崔国民, 刘薇薇, 等. 基于小负荷换热单元保护的松弛策略优化换热网络 [J]. 计算物理, 2022, 39(3): 352–360.

[13] 苏戈曼, 崔国民, 肖媛, 等. 换热网络优化中换热单元生成频次的影响分析及策略改进 [J]. 化工进展, 2020, 39(10): 3879–3891.

[14] 刘薇薇, 崔国民, 肖媛, 等. 一种采用优势个体多方向强制搜索策略的换热网络优化方法 [J]. 计算物理, 2022, 39(1): 60–70.

[15] 肖媛, 崔国民, 李帅龙. 一种新的用于换热网络全局优化的强制进化随机游走算法 [J]. 化工学报, 2016, 67(12): 5140–5147.

[16] 王树楹, 高长宝, 兰仁水. 板式塔研究进展 [J]. 化学工程, 2003, 31(3): 20–26+2.

[17] CHEN L, GAO Z H, DU J, et al. A simultaneous optimization method for the structure and composition differences of a mass exchange network[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, 15(2): 254–261.

[18] FRASER D M, SHENOY U V. A new method for sizing mass exchange units without the singularity of the Kremser equation[J]. Computers & Chemical Engineering, 2004, 28(11): 2331–2335.

[19] HALLALE N, FRASER D M. Capital and total cost targets for mass exchange networks: - Part 1: . Simple capital cost models[J]. Computers & Chemical Engineering, 2000, 23(11–/12): 1661–1679.

[20] 周理明, 史永永, 李海洋, 等. 氨法烟气脱硫过程的工艺优化 [J]. 化学工程, 2014, 42(4): 7–12.

[21] 都健, 高志辉, 陈理, 等. 采用浓度差同步优化的质量交换网络设计 [J]. 化工学报, 2007, 58(7): 1768–1775.

[22] 侯创, 罗明生, 徐文星. 取整函数优化基于超结构模型的质量交换网络 [J]. 化学反应工程与工艺, 2020, 36(2): 108–116.

[23] 李绍军, 阳永荣. 利用改进的遗传算法进行质量交换网络的最优综合 [J]. 化工学报, 2002, 53(1): 60–65.

[24] 谢会, 史彬, 鄢烈祥, 等. 列队竞争算法综合质量交换网络 [J]. 计算机与应用化学, 2010, 27(12): 1617–1620.

(编辑: 董 伟)