

# 换热网络优化的换热单元拆分策略

汪豪, 崔国民, 徐玥, 肖媛, 张冠华

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年3月28日; 录用日期: 2022年5月13日; 发布日期: 2022年5月19日

## 摘要

固定投资费用和换热单元负荷制约关系的影响随着换热网络优化进程的推进逐步加深, 致使优化易陷入局部极值。基于上述原因, 本文提出一种可提升个体结构整型变量和连续型变量优化能力的单元拆分策略, 该策略将已存单元的部分负荷拆分到与之相关联流股的新生单元, 利用结构竞争作用促使换热连接和热负荷配置形成更优选择。采用两种大规模算例验证本文提出的策略, 结构进化过程和量化结果表明: 策略可有效促进大规模换热网络全局优化的换热关系优选进程, 具备良好的跳出局部极值能力, 取得了优于已有文献的结果。

## 关键词

整型变量, 连续型变量, 拆分策略, 竞争关系

# Heat Exchanger Unit Division Strategy of Heat Exchanger Network Optimization

Hao Wang, Guomin Cui, Yue Xu, Yuan Xiao, Guanhua Zhang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 13<sup>th</sup>, 2022; published: May 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the advance of heat exchanger network optimization, the influence of fixed investment cost and heat exchanger load constraint relationship gradually deepens, making the optimization easily fall into the local extremum. Based on the above reasons, this paper proposes a heat exchanger division strategy that can improve the optimization ability of integral and continuous variables of the individual structure. By dividing the heat load of existing heat exchangers, the strategy forces the generation of new heat exchangers associated with their location and makes use of the competitive relationship between heat exchangers to form a better choice of network structure and heat load configuration. Two large-scale examples were used to verify the performance of the

strategy, and the structural evolution process and quantitative results show that the strategy can effectively promote the optimal selection of the heat transfer relationship in the global optimization of large-scale heat transfer network, and has a good ability to jump out of the local extremum, and finally get better results of previous literature.

## Keywords

Integer Variable, Continuous Variable, Division Strategy, Competitive Relationship

Copyright © 2022 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

换热网络作为过程系统的重要组成, 对网络结构的优化设计可有效增加工艺过程的能源回收量, 提高企业经济效益。启发式方法[1] [2] [3]因具有对目标函数要求宽松、全局寻优能力强的特点而被广泛应用于换热网络优化, 然而随着网络规模的增大, 求解域内存在的大量局部极值致使启发式方法的搜索容易出现过早收敛。

为提升网络结构的进化能力, 相关研究主要围绕提高连续型变量搜索精度和增强整型变量变异能力。文献[4] [5]将遗传算法结合粒子群算法, 采用双层优化方法搜索既定结构的连续型变量最佳配置, 使优势结构得到深度优化; 文献[6] [7]通过对换热网络拓扑结构增设分流条件, 从提高结构复杂度着手拓宽求解空间; 文献[8]采用公用工程内置的方法增加流通股温位的使用率, 实现整型变量进化的摄动作用; 文献[9]通过提取相似结构并组合成新的优化个体, 利用结构进化的换热单元优胜劣汰过程获取更优整型变量分布。上述方法的成功应用说明针对连续型变量和整型变量的处理可有效促进网络结构的进化, 然而增加算法流程提高优化质量的方式却难以避免降低全局寻优效率, 面对日趋增大的算例规模, 亟需建立更高效的优化算法。

本文基于换热单元之间的竞争关系提出强制进化随机游走算法[10] (RWCE)的换热单元拆分策略, 通过在结构优化过程中拆分换热单元的热负荷并在关联流通股生成新换热单元, 利用换热单元之间的竞争作用促进结构优选进程, 进一步优化连续型变量和整型变量的分布, 增强算法跳出局部极值的能力。

## 2. 换热网络优化模型

### 2.1. 节点非结构模型

节点非结构模型(Node-based Non-structure Model, NNM) [11]采用流通股上量化的节点之间相互连接的形式构成网络结构, 相较于结构化模型具有更高的匹配灵活性和自由性。以两股热流体和两股冷流体( $N_H = N_C = 2$ )的小规模网络为例, 图 1 所示模型的流通股上均设置了 5 个主节点( $NGD_H = NGD_C = 5$ ), 各主节点可产生 2 股分流( $NF_H = NF_C = 2$ )和对应的分流节点, 互连的实心节点即代表一项换热连接, 其中  $H$  表示热流体,  $C$  表示冷流体。

### 2.2. 目标函数及约束条件

换热网络优化的目标函数为年综合费用(Total Annual Cost,  $TAC$ ), 由换热单元的投资费用以及运行费用组成。式中  $F_C$  与  $\beta$  分别为换热单元面积的费用系数与费用指数,  $A$  表示换热单元面积;  $C_{CU}$  与  $C_{HU}$  为冷、热公用工程的运行费用系数;  $C_E$  为固定投资费用;  $Z$  为换热单元存在与否的 1/0 变量。

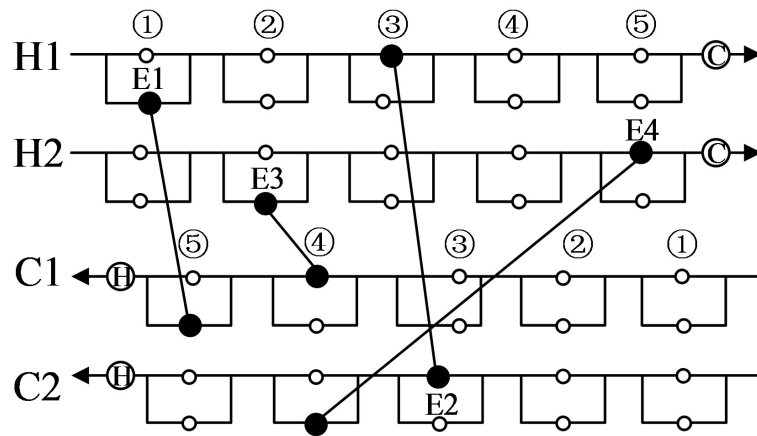


Figure 1. Schematic diagram of node-based non-structural model (with stream splitting)  
图 1. 节点非结构模型示意图(有分流)

$$\begin{aligned}
 TAC = & \sum_{i=1}^{N_H} (F_C \times A_{CU,i}^\beta + Q_{CU,i} \times C_{CU} + C_E \times Z_{CU,i}) \\
 & + \sum_{j=1}^{N_C} (F_C \times A_{HU,j}^\beta + Q_{HU,j} \times C_{HU} + C_E \times Z_{HU,j}) \\
 & + \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{k=1}^{NGD_H} \sum_{n=1}^{NF_H} (F_C \times A_{i,k,m}^\beta + C_E \times Z_{i,k,m})
 \end{aligned} \quad (1)$$

换热网络优化过程包含大量等式和不等式约束，在结构进化中主要涉及以下条件：

1) 换热器热平衡约束。以热、冷流体的节点为基准，每个换热器的负荷  $Q_{i,k,m-j,l,n}$  需满足热平衡条件。 $MCP$  为流股热容流率， $T_{H,i,k,m}^{in}$ 、 $T_{H,i,k,m}^{out}$  与  $T_{C,j,l,n}^{in}$ 、 $T_{C,j,l,n}^{out}$  分别表示换热器在热流股节点与冷流股节点的进口温度与出口温度。

$$Q_{i,k,m-j,l,n} = (T_{H,i,k,m}^{in} - T_{H,i,k,m}^{out}) \cdot MCP_i = (T_{C,j,l,n}^{out} - T_{C,j,l,n}^{in}) \cdot MCP_j \quad (2)$$

换热器的换热面积满足传热平衡和能量守恒约束。 $U$  为换热器总传热系数， $LMTD$  为对数平均温差。

$$A_{i,k,m} \cdot U_{i,j} \cdot LMTD_{i,k,m} = (T_{H,i,k,m}^{in} - T_{H,i,k,m}^{out}) \cdot MCP_i \quad (3)$$

2) 流股热平衡约束。 $T^{in}$  和  $T^{target}$  表示流股入口温度和目标温度。

$$(T_{H,i}^{in} - T_{H,i}^{target}) \cdot MCP_i = \sum_{k=1}^{NGD_H} \sum_{m=1}^{NF_H} Q_{i,k,m} + Q_{CU,i} \quad (4)$$

$$(T_{C,j}^{target} - T_{C,j}^{in}) \cdot MCP_j = \sum_{l=1}^{NGD_C} \sum_{n=1}^{NF_C} Q_{j,l,n} + Q_{HU,j} \quad (5)$$

3) 公用工程热平衡约束。

$$(T_{H,i}^{out} - T_{H,i}^{target}) \cdot MCP_i = Q_{CU,i} \quad (6)$$

$$(T_{C,j}^{target} - T_{C,j}^{out}) \cdot MCP_j = Q_{HU,j} \quad (7)$$

4) 最小传热温差约束。式中最小传热温差  $\Delta T_{min}$  取值为  $0^\circ\text{C}$ ，满足温度约束条件的同时约束换热量和换热面积为非负值。

$$\begin{aligned}
 T_{H,i,k,m}^{in} - T_{C,j,l,n}^{out} &\geq \Delta T_{min} \\
 T_{H,i,k,m}^{out} - T_{C,j,l,n}^{in} &\geq \Delta T_{min} \\
 T_{H,i}^{target} - T_{CU}^{in} &\geq \Delta T_{min} \\
 T_{H,i}^{out} - T_{CU}^{out} &\geq \Delta T_{min} \\
 T_{HU}^{in} - T_{C,j}^{target} &\geq \Delta T_{min} \\
 T_{HU}^{out} - T_{C,j}^{out} &\geq \Delta T_{min}
 \end{aligned} \tag{8}$$

### 2.3. 强制进化随机游走算法

本文采用强制进化随机游走算法优化换热网络结构，该算法通过新换热单元的生成、换热单元负荷的随机放缩和换热单元的消去过程进行换热关系的更新和整型变量、连续型变量的同步优化，并在结构选择阶段以一定概率  $\delta$  接受费用较高的差解，具备一定全局搜索能力，图 2 为算法流程。

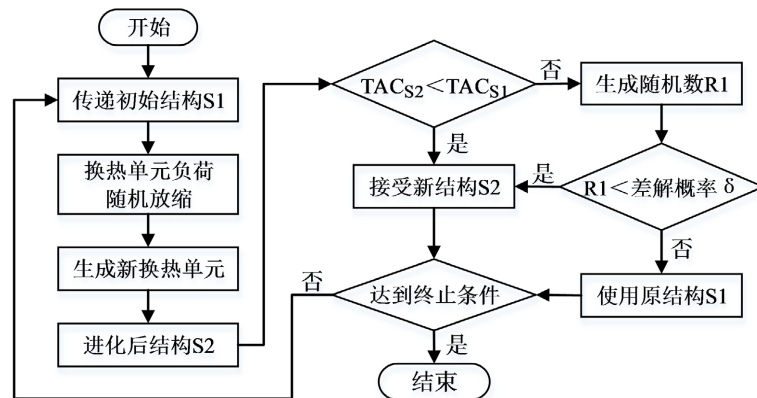


Figure 2. Flow chat of RWCE algorithm  
图 2. 强制进化随机游走(RWCE)算法流程图

## 3. 换热单元竞争作用的影响分析及强化策略研究

### 3.1. 换热单元竞争作用影响分析

RWCE 算法优化 NNM 模型的网络结构时，位于同一流股上的换热单元的换热量变化过程呈现为换热单元之间针对该股热负荷的竞争现象，根据换热单元存在的相对位置，竞争关系和竞争作用的影响存在多样性。图 3 和图 4 列举了 NNM 模型的换热单元之间存在的两种竞争关系，图中实线表示结构内已存在的换热单元 E1，虚线表示连接 H1 的后续新生单元 E2。

a) 相邻竞争关系

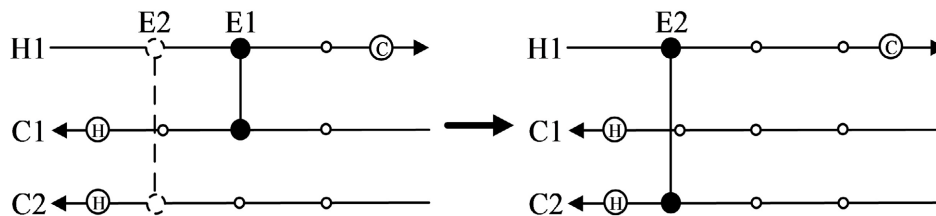
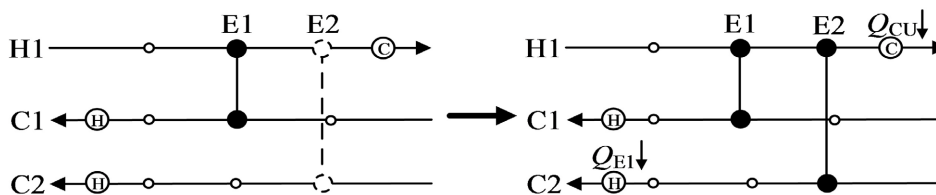


Figure 3. Newly added heat exchanger unit E2 located at the advanced node of existing heat exchanger unit E1  
图 3. 新生成换热单元 E2 位于已存单元 E1 的前方节点

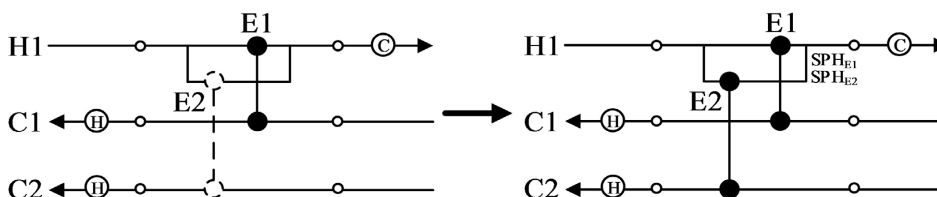
当多个换热单元连接了同一条流股但位于该流股上不同的主节点时, 换热单元间的相对位置表现为相邻布置, 当 E2 生成在 E1 的上游主节点时, E2 的换热量变化直接影响 E1 的进口温度和换热空间, 并且流股流向的进口温位优势有助于 E2 形成较大的传热温差, 使 E2 的单位换热面积和面积费用增长幅度较小, 在以费用最小化为目标函数的结构优化过程中具备较强的换热能力和竞争能力, 可在优化中促使原结构单元 E1 消去, 促进整型变量分布和连续型变量配置的更新。



**Figure 4.** Newly added heat exchanger unit E2 located at the node behind existing heat exchanger unit E1  
**图 4.** 新生成换热单元 E2 位于已存单元 E1 的后方节点

图 4 为 E2 生成在 E1 下游节点的情况, 此时 E2 的进出口温度和换热空间均受到 E1 的制约, 相较 E1 的竞争能力较弱, 但由于节点匹配的随机性, 当 E2 连接的冷节点入口温度较低且流股换热潜能仍较为充足时, E2 也可形成较大的传热温差, 使 E2 换热量增长产生的投资费用增加量小于 H1 与 C2 的公用工程运行费用减小量, 通过减少网络运行费用而被保留, 实现结构更新。

#### b) 并列竞争关系



**Figure 5.** Newly added heat exchanger unit E2 located at the node on the stream branch of existing heat exchanger unit E1  
**图 5.** 新生成换热单元 E2 位于已存单元 E1 的分流节点

图 5 表示 E2 与 E1 并列于同一组分流节点, 此时分流比  $SPH_{E1}$  和  $SPH_{E2}$  的存在将影响换热单元的出口温度, 当单元所在分流的分流比减小时, 热容流率的降低将同时增大单元换热温差范围并增加换热面积费用, 不利于换热单元维持较大的负荷, 反之分流比越大的单元将因换热温差变化范围较小而具备更强的竞争能力。

从上述分析可知, 换热单元间的多样化竞争关系和竞争作用是保持个体结构不断形成换热关系更优选择、维持结构优化活性的关键要素。但随着结构优化的深入, 个体结构内已有的换热单元将趋于充分进化, 各流股的换热潜能逐渐减小, 部分流股接近或实现完全换热, 使结构进化空间减小, 当新生单元连接至完全换热的流股时易直接造成过度换热情形(图 6), 使结构因出现反向公用工程而被认定为不可行解, 导致新生单元无法有效生成并发挥竞争作用。

对于通过接受差解保留的新生单元而言, 由于优化后期结构内的换热关系趋于稳定, 换热单元之间的耦合性较强, 使得新单元的生成将很难直接打破已有结构的换热平衡, 而为了保证优化的连续性, RWCE 算法的新生单元初始换热量往往设置为较小值, 这造成后期结构内单元生成对结构进化的扰动作用下降, 导致新生换热单元的存活能力不足[12], 难以与已存换热单元形成有力竞争, 限制了通过单元竞争作用促进结构进一步优化的可行性, 导致结构进化陷入局部极值。



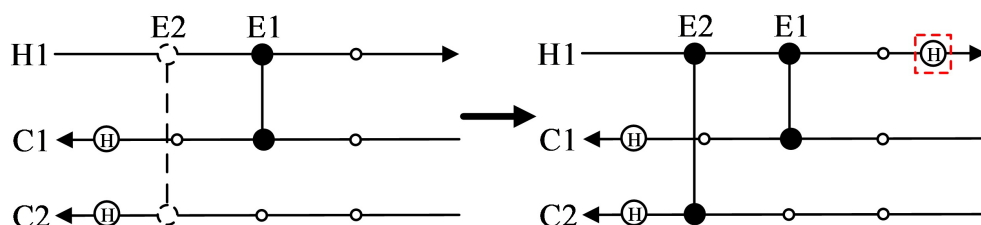


Figure 6. The phenomenon of excessive heat transfer of stream  
图 6. 流股的过度换热现象

为此，若要在优化后期的结构中增强新生单元与已存单元的竞争作用，促进整型变量分布或连续型变量配置的进一步优化，首先需要弱化结构内已存换热关系的优势换热地位，使个体结构产生新的优化空间，争取新换热单元的生成与进化空间；其次需要强化新生单元的竞争能力，避免新生单元因初始换热量过小而被直接消去，或因触发不可行解而无法有效生成的情况，然而现有 RWCE 算法难以同步实现上述结构进化需求，造成优化后期的单元竞争作用较弱。

### 3.2. 换热单元拆分策略

鉴于上述分析，需建立一种可行处理方法同步实现弱化已有结构换热关系以及增强新生单元存活能力。降低既有换热单元的热负荷是弱化结构换热平衡的可行操作，主要途径是通过换热单元负荷的下降降低单元存活能力，借由优化促使换热单元被消去，在此过程中，换热单元连接流股的换热潜能也将得到释放，有助于争取新换热单元的生成机会和结构进化空间。在强化新生单元存活能力方面，增加单元初始换热量可促使新生单元直接具备较大的换热空间，避免因初始换热量过小而在游走阶段被快速消去，其作用在于延长换热单元存活时间，为新生单元争取参与结构进化的机会。

综合上述需求，本文提出一种换热单元拆分操作，操作步骤为：① 随机抽取结构内的若干换热单元作为拆分对象，抽取与之相连的任一流股作为基准流通股，设置一定比例  $R_{div}$  ( $R_{div} \in (0,1)$ ) 用于拆分换热单元负荷。② 增设一个新生换热单元，该新生单元的一端连接至步骤①内基准流通股上的任意空余节点，另一端不做限制，根据拆分比例  $R_{div}$  对新生单元的负荷进行配置。③ 依次对抽取的所有拆分对象换热单元实施上述操作。

图 7 为拆分操作示意图，将图 7(a)中占据热流股 H1 所有换热潜能的换热单元 E1 作为拆分对象， $Q_{E1}$  表示换热单元 E1 的热负荷，箭头指向的图 7(b)、图 7(c)分别为拆分操作形成的新优化结构，其中，图 7(b)表示 E1 与由拆分操作产生的新生单元 E2 构成相邻竞争关系，①和②分别代表 E2 生成在 E1 的上游节点和下游节点情形，图 7(c)表示 E2 与 E1 的并列竞争关系， $SPH_{E1}$ 、 $SPH_{E2}$  为单元对应的分流比， $Q_{E1} \cdot R_{div}$  表示已存单元 E1 经过拆分后的换热量， $Q_{E1} \cdot (1 - R_{div})$  为新生单元 E2 的初始换热量。

综合来看，单元拆分操作通过将原结构单元的部分热负荷直接转移至同流通股上的新生单元，可同步实现原结构单元换热量的降低与新生单元初始换热量的提升，改变既定结构的流通股负荷配置，对已有结构的换热平衡具有直接扰动作用，在弱化原结构单元换热地位的同时强化了新生单元的存活能力；操作保留了新生单元匹配的自由性与随机性，可充分实现 NNM 模型的单元竞争关系多样性并发挥相应竞争能力；由于拆分—生成的结构变异过程维持了基准流通股的热量平衡，可在一定程度上规避过度换热情形，提高结构优化效率；由于热负荷配置的调整和新换热单元的生成均在一次结构变异中形成，使连续型变量和整型变量构成了结构摄动的组合效应[13]，有助于算法通过非线性项优化的多峰、多极值特点促进优化结构跳出局部极值，寻找新的结构进化方向。

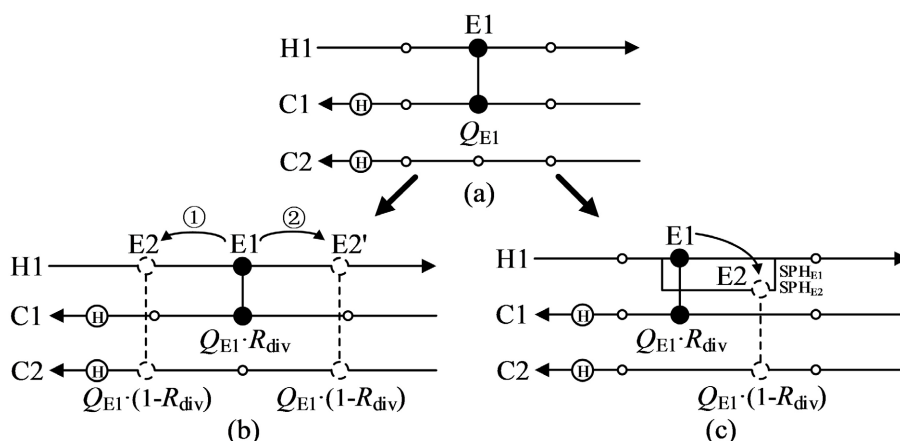


Figure 7. The sketch of heat exchanger division operation  
图 7. 拆分换热单元操作示意图

综合上述分析，单元拆分操作可从理论上打破已有结构先入为主对换热单元竞争作用的限制，是促进结构进化的可行方法，将拆分单元操作融入 RWCE 算法优化流程，形成图 8 所示优化策略。根据迭代时长  $IT$  引入策略实施周期  $IT_{per}$ ，确保拆分操作和结构摄动有效实施，该参数可根据实际优化情况设置；仅在实施拆分操作的迭代中将差解概率  $\delta$  调至 1，保证拆分结构有效传递。

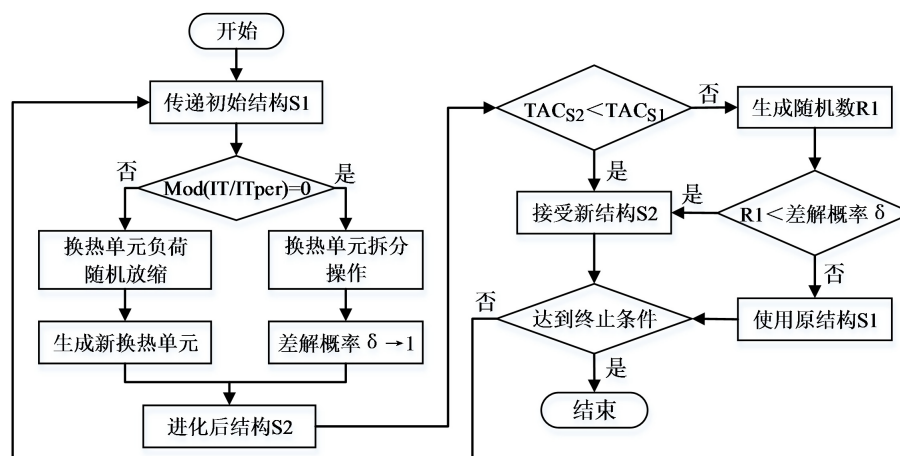


Figure 8. The flow chat of RWCE algorithm with heat exchanger division strategy  
图 8. 拆分换热单元摄动策略 RWCE 算法流程图

### 3.3. 优化效果验证

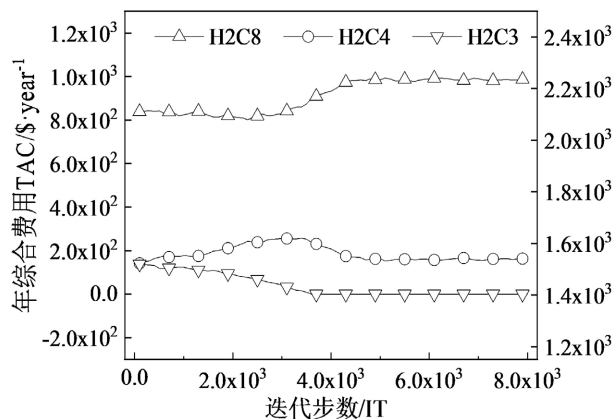
采用 20SP [14]算例验证拆分换热单元的优化效果。该算例的流股参数相对平均，匹配关系易呈现多样性，因此存在较多局部最优结构，考验优化算法的全局搜索能力。基础 RWCE 算法迭代至 940 万步时得到了图 9 所示  $TAC = 1,724,773$  \$/year 的优化结构，然而该  $TAC$  直至 2000 万步迭代周期结束未能继续降低，可认定优化陷入局部极值。换热单元上方的数字代表该单元的负荷，单位 kW。

为了快速打破优化停滞状态，在保持算例参数不变的基础上将拆分单元策略高频次地引入该结构处理，此处将换热单元负荷拆分比例  $R_{div}$  设置为 0.5，通过给予新生单元与被拆分单元相同的换热量并追踪热负荷分布的实时变化，考察换热单元之间的竞争作用，图 10 为经过拆分处理后的初始结构。





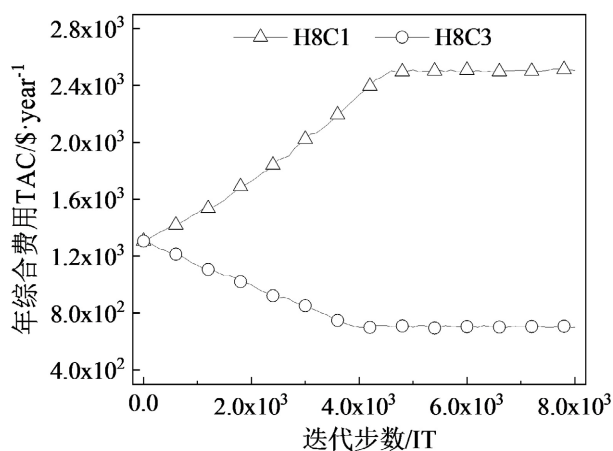
H2C4 出现过度换热, 维持了该流股的换热平衡, H2C4 位于 H2C8 与 H2C3 之间的主节点, 三者形成图 3、图 4 的相邻竞争关系, H8C3 与 H8C1 连接了 H8 的同一组分流节点, 形成图 5 的并列竞争关系。图 11、图 12 分别记录了热流股 H2、H8 的换热单元热负荷变化。



**Figure 11.** The change curve of the heat load of heat changers at steam H2

**图 11.** 热流股 H2 的换热单元热负荷变化曲线

从图 11 可以看到, 由于原结构单元 H2C8 的负荷较大, 结合流股流向的温位优势使该单元相较 H2C4、H2C3 具备更强的竞争能力, 其换热量随结构优化进一步增加。H2C3 则相反, 新生单元 H2C4 相对其形成进口温位优势的同时其自身较少的换热量导致竞争能力相对较弱, 并且 H2C3 与单元 H8C3、H10C1 共同连接了 C3 的一组分流节点, 流股分流造成的热容流率减小导致 H2C3 的冷节点出口温度较高, 传热温差较小, 使 H2C3 的换热面积增加幅度大于 H2C4, 因而在后续优化中 H2C3 的热负荷竞争能力逐渐减弱, 最终被消去。



**Figure 12.** The change curve of the heat load of heat changers at steam H8

**图 12.** 热流股 H8 换热单元热负荷变化曲线

新生单元 H8C3 与原结构单元 H8C1 的并列竞争(图 12)中, H8C1 表现出更强的竞争力, 其负荷经过拆分后回升至 2500 kW 左右, H8C3 的换热量则降低至 700 kW。从连接关系可以看到, H8C3 与 H8C1

形成并列竞争的同时也与 H2C3、H10C3 在冷流 C3 上存在分流关系，由热容流率降低导致的冷节点出口温度升高减小了 H8C3 的传热温差，使 H8C3 维持较大换热量时需要更多的换热面积，造成其竞争能力弱于 H8C1。然而值得注意的是，H8C3 在后续优化中持续存在，H8C1 的热负荷则相较拆分前减少了 100 kW，该现象说明换热连接之间存在热负荷的有效转移，通过换热单元间的竞争作用使热负荷配置方式得到更新。

最终所得图 13 的优化结果相较基础 RWCE 算法优化结果(图 9) TAC 降低了 3152 \$/year，新生换热单元在改变了原结构整型变量分布的同时优化了连续型变量的配置，验证了利用换热单元的竞争作用推动结构进化的可行性。

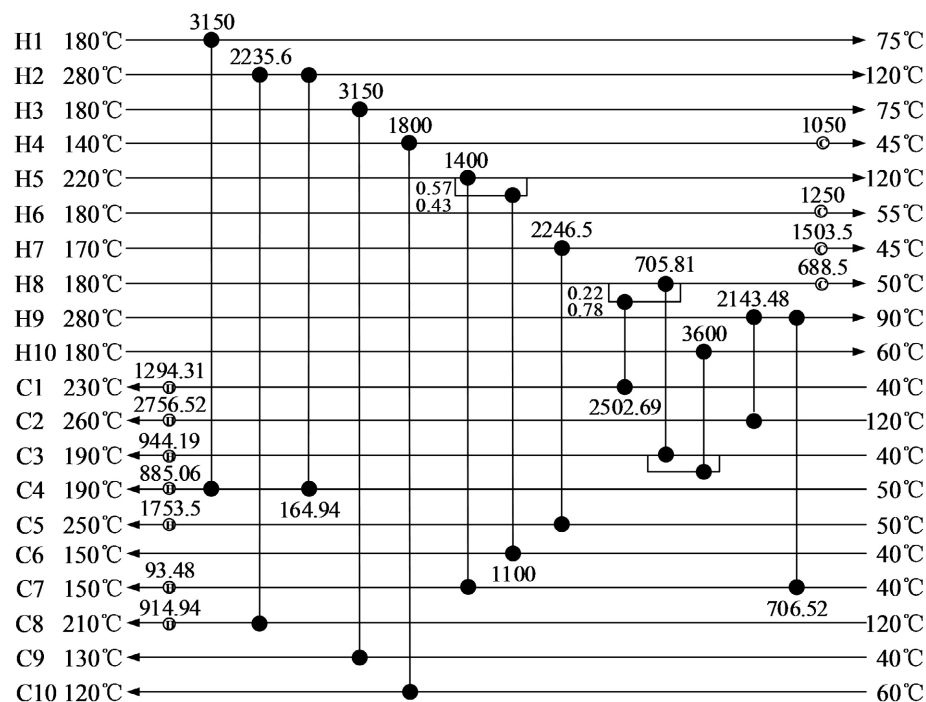


Figure 13. The network structure diagram of 20SP (TAC = 1,721,621 \$/year)

图 13. 20SP 的网络结构图(TAC = 1,721,621 \$/year)

### 3.4. 换热单元拆分参数设置

为进一步提高单元拆分策略作用效果，使策略在应对大规模算例的不同换热单元总数时能保证充足的结构进化活性，本文在 2.2 节拆分策略基础上提出以换热单元负荷作为拆分对象选取依据。具体操作为：满足策略实施周期  $IT_{per}$  时遍历个体结构所有换热单元，将换热单元负荷  $Q_{i,k,m-j,l,n}$  与单元所连接的冷、热流股总负荷内较少一方的比值作为该单元接受拆分的概率  $\mu$ ，以式 9 表示。式中  $c$  作为待调参数控制概率  $\mu$ ，当  $c$  取值为 2 且  $\mu$  大于 1 时代表当前单元换取了所在流股一半以上的热负荷，认定该单元必须执行拆分操作，反之  $\mu$  小于 1 时将  $\mu$  直接作为单元参与拆分的概率。

$$\mu = c \cdot \frac{Q_{i,k,m-j,l,n}}{\min[Q_i, Q_j]} \quad (9)$$

上述设置取代完全随机抽取拆分对象，使结构内所有换热单元均参与拆分操作，进一步扩大策略作用范围；当换热单元负荷越多则相应被拆分概率越大，有利于促进流股负荷再分配，增强结构扰动能力；

负荷较少的单元被拆分的概率较小，保证部分小负荷单元可得到充分优化，推进换热关系更优选择，改善整型变量的分布。根据结构换热关系分布可灵活设置参数  $c$  增加拆分操作频次，提高策略跳出局部极值能力。本文将基准流股选取概率设置为冷、热流股各 0.5，换热量拆分比例  $R_{div}$  设置为 0~1 的随机数，通过契合 RWCE 算法的随机性增加拆分关系多样性，强化全局搜索能力。

## 4. 算例分析

将单元拆分策略 RWCE 算法应用于两个大规模算例的全程优化，验证策略的全局优化能力，本文将年综合费用作为评价优化质量的指标考察算法优化性能。

### 4.1. 20SP 算例

图 14 对比了相同迭代期内基础 RWCE 算法和单元拆分策略优化 20SP 算例的 TAC 变化，选取三种较为典型的概率参数  $c$  作为对照，设置算法优化参数：个体数量 70，换热量游走步长 50 kW，新换热单元初始换热量 100 kW，接受差解概率 0.01，策略实施周期  $IT_{per}$  取 40 万。

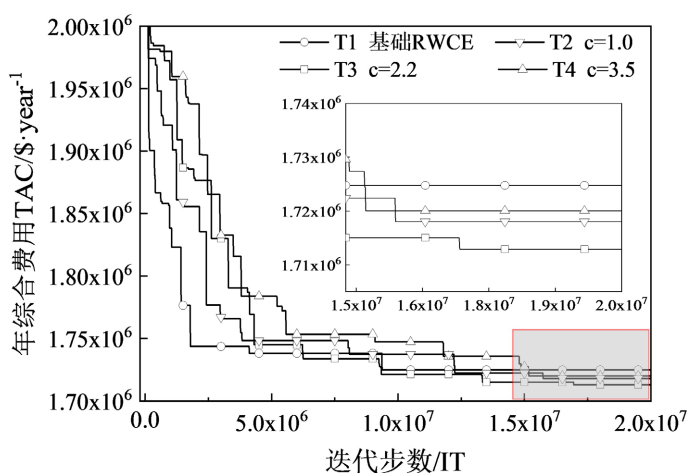


Figure 14. TAC curves of RWCE algorithm optimization for case 20SP

图 14. RWCE 算法优化 20SP 的年综合费用曲线

图中，基础 RWCE 算法的费用在优化前期下降较快，但后续优化陷入停滞；单元拆分策略的费用则在前期下降较慢，分析原因在于前期结构优化空间较大，策略需要消耗必要的计算时间选择结构进化方向，进行搜索范围的扩展。后续优化中， $c = 2.2$  的拆分策略在约 930 万步率先获得优于基础算法的结果，并且 TAC 呈现持续降低态势，优化效率明显高于基础算法，证明拆分策略构建换热单元竞争关系能有效维持结构优化活性，引导结构进化跳出局部极值，最终费用降至 1,712,894 \$/year； $c = 1$  和  $c = 3.5$  的拆分策略分别于 1200 万步、1500 万步获得优于基础算法的结果，费用分别降至 1,718,028 \$/year、1,720,054 \$/year，分析优化效率偏低的原因在于  $c$  取值较小时对应拆分选取概率  $\mu$  偏低，使部分换热单元拆分频次较低，形成的结构摄动不足以推动结构进化，难以跳离局部极值；当  $c$  取 3 或更大值时换热单元拆分概率  $\mu$  偏大，易造成部分单元未能充分优化即被再次拆分，影响结构优化的收敛能力；与以上几组比较具有代表性的费用下降曲线相比，其他概率参数对应的费用整体表现介于这些曲线之间。

$c = 2.2$  的拆分策略最佳结构如图 15 所示，相较表 1 所示文献最优结果，本文结构的换热单元数量与公用工程用量进一步减少，TAC 降低了 1838 \$/year，充分发挥了策略良好的换热关系优选能力与全局搜索能力。

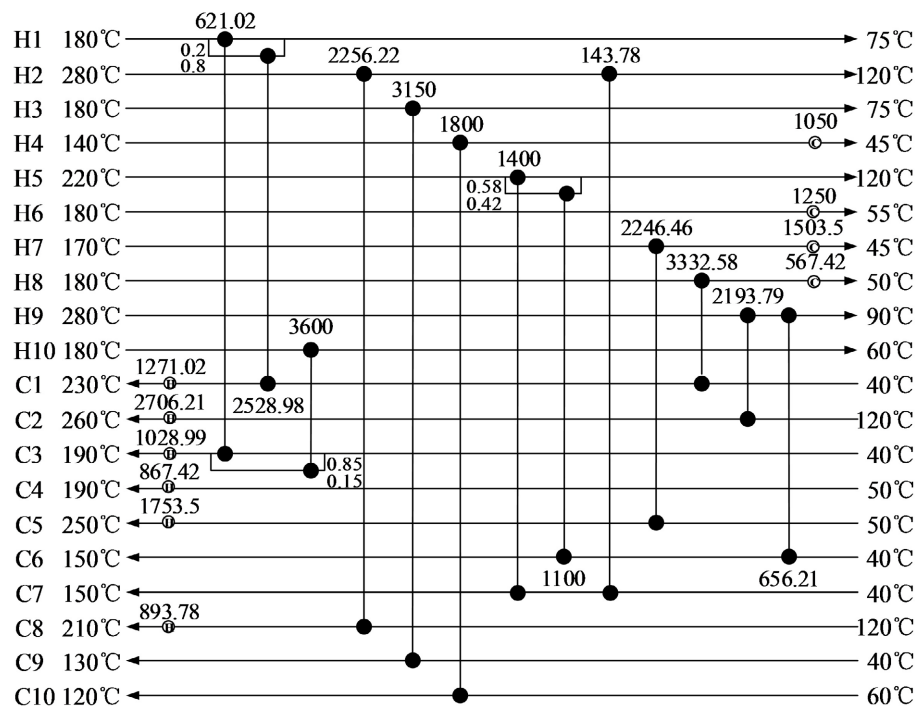


Figure 15. The network structure diagram of 20SP ( $TAC = 1,712,894$  \$/year)

图 15. 20SP 的网络结构图( $TAC = 1,712,894$  \$/year)

Table 1. Comparison results of 20SP

表 1. 20SP 的结果对比

文献	换热器数量	热公用工程(kW)	冷公用工程(kW)	年综合费用(\$/year)
[15]	13	9372	5222	1,731,679
[16]	13	9156	5006	1,726,399
[17]	14	8115	4540	1,725,295
[14]	14	8528	4378	1,715,088
图 9	12	9242	5092	1,724,773
图 15	13	8521	4371	1,712,894

## 4.2. 16SP 算例

16SP 算例[13]的特点在于部分热流股具备较大的热容流率和进出口温差，热流股的总负荷高于冷流股，对于流股负荷的充分利用考验优化算法的换热关系优选能力。文献[17] [18]采用公用工程内置和分流交叉混合增加分级超结构模型对温位和热容流率的利用可能性，得到 6,801,261 \$/year、6,712,551 \$/year 的结果；文献[19]将 RWCE 算法结合大步长搜索，针对连续型变量实施摄动，获得了更优整型变量分布，优化结果降至 6,692,513 \$/year；文献[13]基于遗传算法，通过识别换热关联单元，采用局部结构分离 - 单独优化 - 合并的方法减小大规模算例的计算复杂度，得到 6,657,080 \$/year 的文献最优结果。

本文设置单元拆分策略优化参数：个体数量 100，换热量游走步长 450 kW，新换热单元初始换热量 900 kW，接受差解概率 0.005，策略实施周期  $IT_{per}$  取 30 万，参照多组拆分概率参数设置的优化结果，当  $c$  取 3.5 时的优化性能最佳，所得  $TAC = 6,655,242$  \$/year 的结构(图 16)相较表 2 文献最优结果降低 1838 \$/year，

部分单元匹配方式的改变进一步优化了公用工程用量，再次验证拆分策略可引导整型变量和连续型变量得到深度优化。

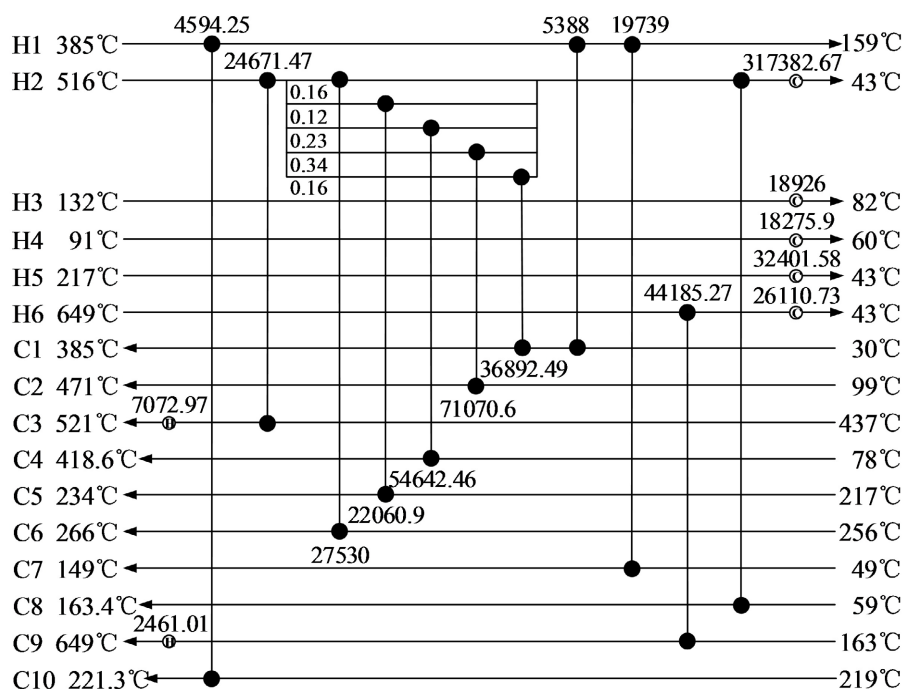


Figure 16. The network structure diagram of 16SP ( $TAC = 6,655,242$  \$/year)

图 16. 16SP 的网络结构图( $TAC = 6,655,242$  \$/year)

Table 2. Results comparison of 16SP

表 2. 16SP 结果对比

文献	换热器数量	热公用工程(kW)	冷公用工程(kW)	年综合费用(\$/year)
[18]	11	10,444	414,014	6,692,513
[19]	12	10,472	408,647	6,801,261
[20]	11	9498	413,075	6,712,551
[14]	11	9710	413,272	6,657,080
图 16	11	9534	413,097	6,655,242

## 5. 结论

本文基于 RWCE 算法，结合节点非结构模型换热单元竞争关系，提出了换热网络优化的单元拆分策略，旨在维持流通股换热平衡的基础上构建换热单元竞争作用，利用换热连接的优胜劣汰过程提高网络结构进化能力与优化效率，研究结论如下：

1) 将单元拆分策略作用于 20SP 算例局部极值解，发现通过拆分已存换热单元能够有效打破原有结构的换热平衡，在新生单元在与被拆分单元的竞争过程中出现了热负荷的有效转移和整型变量更新，局部极值解产生了进一步优化，验证了单元拆分策略的可行性。

2) 建立了换热单元拆分概率参数用于扩大策略的适用面，应用于算例优化中发现概率参数取值较小



时拆分作用对结构的摄动能力不足,难以改变后期结构的优化方向,而概率参数取值过大时会限制换热单元的持续进化能力,影响结构优化的收敛能力,因此需根据具体算例进化需求合理调节概率参数设置,才能充分发挥拆分策略的作用效果。

3) 应用策略优化 20SP、16SP 算例验证全局优化性能,当拆分概率参数取 2.2 时,20SP 算例可获得最佳年综合费用 1,712,894 \$/year,较文献最优结果降低了 2194 \$/year;针对 16SP 算例,在大量测试结果中发现概率参数取 3.5 时可得到 6,655,242 \$/year 的最佳年综合费用,较文献最优结果降低了 1838 \$/year,验证了换热单元拆分策略可有效提升 RWCE 算法的优化质量和全局寻优效率。

## 参考文献

- [1] Aguitoni, C.M., Pavão, L.V. and Ravagnani, M.A.S.S. (2019) Heat Exchanger Network Synthesis Combining Simulated Annealing and Differential Evolution. *Energy*, **181**, 654-664. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.211>
- [2] Aguitoni, C.M., Pavão, L.V., Siqueira, P.H., et al. (2018) Heat Exchanger Network Synthesis Using Genetic Algorithm and Differential Evolution. *Computers & Chemical Engineering*, **117**, 82-96. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.06.005>
- [3] Silva, G.P., Miranda, C.B., Carvalho, E.P. and Ravagnani, M.A.S.S. (2018) A Simultaneous Approach for the Synthesis of Multiperiod Heat Exchanger Network Using Particle Swarm Optimization. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **96**, 1142-1155. <https://doi.org/10.1002/cjce.23065>
- [4] 霍兆义, 赵亮, 尹洪超. 基于分级超结构的换热网络改造优化[J]. 热科学与技术, 2016, 15(1): 19-25.
- [5] 赵亮, 霍兆义, 李栋斌, 等. 无分流换热网络同步优化综合[J]. 热科学与技术, 2013(1): 68-73.
- [6] Kayange, H.A., Cui, G., Xu, Y., et al. (2020) Non-Structural Model for Heat Exchanger Network Synthesis Allowing for Stream Splitting. *Energy*, **201**, Article ID: 117461. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117461>
- [7] 霍兆义, 尹洪超, 赵亮. 有分流换热网络同步综合[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(1): 45-50.
- [8] 鲍中凯, 崔国民, 曹冲, 等. 基于公用工程内置策略的换热网络优化[J]. 计算物理, 2019, 36(6): 707-718.
- [9] 韩正恒, 崔国民, 肖媛. 采用结构融合策略优化换热网络[J]. 化工学报, 2019, 70(12): 4730-4740.
- [10] Xiao, Y. and Cui, G. (2017) A Novel Random Walk Algorithm with Compulsive Evolution for Heat Exchanger Network Synthesis. *Applied Thermal Engineering*, **115**, 1118-1127. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.051>
- [11] Xu, Y., Kayange, H.A. and Cui, G. (2020) A Nodes-Based Non-Structural Model Considering a Series Structure for Heat Exchanger Network Synthesis. *Processes*, **8**, Article No. 695. <https://doi.org/10.3390/pr8060695>
- [12] 邓炜栋, 崔国民, 朱玉双. 应用固定投资费用松弛策略的换热网络优化[J]. 计算物理, 2019, 36(5): 610-620.
- [13] 陈家星. 换热网络同步综合的超结构模型及全局最优化[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海理工大学, 2018.
- [14] Rathjens, M. and Fieg, G. (2019) A Novel Hybrid Strategy for Cost-Optimal Heat Exchanger Network Synthesis Suited for Large-Scale Problems. *Applied Thermal Engineering*, **167**, Article ID: 114771. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114771>
- [15] 张春伟, 崔国民, 陈上. 一种适用换热网络同步综合的改进混沌蚁群算法[J]. 计算物理, 2017, 34(2): 193-204.
- [16] Xu, Y., Cui, G., Deng, W., et al. (2019) Relaxation Strategy for Heat Exchanger Network Synthesis with Fixed Capital Cost. *Applied Thermal Engineering*, **152**, 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.054>
- [17] Pavão, L.V., Costa, C.B.B. and Ravagnani, M.A.S.S. (2017) Large-Scale Heat Exchanger Networks Synthesis Using Simulated Annealing and the Novel Rocket Fireworks Optimization. *AIChE Journal*, **63**, 1582-1601. <https://doi.org/10.1002/aic.15524>
- [18] Pavão, L.V., Costa, C.B.B. and Ravagnani, M.A.S.S. (2018) An Enhanced Stage-wise Superstructure for Heat Exchanger Networks Synthesis with New Options for Heaters and Coolers Placement. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **57**, 2560-2573. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03336>
- [19] Pavão, L.V., Costa, C.B.B. and Ravagnani, M.A.S.S. (2018) A New Stage-Wise Superstructure for Heat Exchanger Network Synthesis Considering Substages, Sub-Splits and Cross Flows. *Applied Thermal Engineering*, **143**, 719-735. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.075>
- [20] Xiao, Y., Sun, T. and Cui, G. (2020) Enhancing Strategy Promoted by Large Step Length for the Structure Optimization of Heat Exchanger Networks. *Applied Thermal Engineering*, **173**, Article ID: 115199. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115199>