

# 带有分流结构匹配策略的换热网络优化分析

陈家星<sup>1,2</sup>, 徐玥<sup>1,2</sup>, 崔国民<sup>1,2</sup>, 胡恩锴<sup>3</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市多相流动与传热重点实验室, 上海 200093;  
3. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 采用节点非结构模型(NNM)优化换热网络时, 节点位置的合理配置对网络拓扑结构和优化结果有重要影响。在分析NNM的优化性能时发现, 优化结果中分流结构主要出现在具有较大换热潜能的流股上。因此, 提出了分流结构匹配策略, 该策略可根据各流股的分流结构对分流结构进行调整, 使换热潜能较大的流股保留更多的分流结构, 促进潜在优势结构的生成。将该策略改进后的算法用于优化9SP和15SP算例, 所获优化结果比公开文献最优年综合费用低17 046 \$/a和4 418 \$/a, 且改进后的模型与算例的适配度较高。

**关键词:** 换热网络优化; 节点非结构模型; 分流结构; 节点配置; 优化质量

中图分类号: TK124 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.05.001

[引用本文格式] 陈家星, 徐玥, 崔国民, 等. 带有分流结构匹配策略的换热网络优化分析[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 1-8. CHEN Jia-xing, XU Yue, CUI Guo-min, et al. Analysis of heat exchanger network synthesis with splitting structures matching strategy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 1-8.

## Analysis of Heat Exchanger Network Synthesis with Splitting Structures Matching Strategy

CHEN Jia-xing<sup>1,2</sup>, XU Yue<sup>1,2</sup>, CUI Guo-min<sup>1,2</sup>, HU En-kai<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093;  
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093;  
3. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

**Abstract:** When using nodes-based non-structural model(NNM) to optimize the heat exchanger network, the reasonable configuration of the nodes' positions in the network has a guiding effect on network topological structure and optimization results. When analyzing the optimization performance of the NNM, it is found that the splitting structures mainly appear on the processing streams which have larger heat exchange potential. Therefore, the splitting structure matching strategy is proposed for retrofitting the NNM. This strategy can adjust the splitting structures according to each processing stream's heat exchange potential, resulting in retaining more splitting structures for some processing streams which having larger heat exchange potential, so as to promote the generation of potential optimization structure. Applying the improved algorithm of proposed strategy to optimize 9SP and 15SP, the obtained results are respectively 17 046 \$/a and 4 418 \$/a lower than the best annual comprehensive costs in open literatures. Moreover, the improved model fits well with the calculation example.

**Key words:** heat exchanger network synthesis, nodes-based non-structural model, splitting structure,

收稿日期: 2021-10-25; 修订日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(21978171, 51976126)

Fund-supported Project: National Natural Science Fund of China(21978171, 51976126)

作者简介: 崔国民(1969-), 男, 吉林双辽人, 上海理工大学教授。

通讯作者: 陈家星(1986-), 男, 贵州毕节人, 上海理工大学讲师。

nodes' distribution, optimization quality

## 引言

换热网络优化作为过程系统集成的重要组成部分,可在实现能源最大回收的同时降低成本。随着计算机技术的高速发展,在换热网络的设计阶段,构建求解域更广、寻优效率更高的模型是推进换热网络优化研究的必然手段。

分级超结构模型(SWS)<sup>[1]</sup>是典型的结构化模型,被广泛应用于换热网络优化,其通过分级实现流股多次匹配,结构清晰,易于实现。但早期对该模型的相关研究为简化模型难度,禁止分流、旁流等结构,大多限制了求解域。基于此,为扩宽问题的求解域,获取更优结果,提出一些针对SWS模型的改进策略,如增加子网络结构<sup>[2-3]</sup>、融合多个模型特点建立混合模型<sup>[4]</sup>、引入多种公用工程等以增加匹配的可行性<sup>[5-7]</sup>。这些改进措施的优势在于打破了原始模型在某些结构上的搜索禁忌,有效扩大了求解范围。不足之处在于,在结构化模型的搜索模式下,优化过程中均引入大量的优化变量,增加了优化的难度。很多文献介绍了相关的算法改进研究,得到了较优的结果<sup>[8-11]</sup>,但依然无法完全克服因模型的局限性导致优化效率低的问题。

针对分级超结构模型的改进,陈家星<sup>[12]</sup>提出了一种非结构模型,允许在流股的任意位置上生成换热器,提高模型的灵活性,但是由于模型中级数的限定,导致换热器生成自由度较小。Kayange 等人<sup>[13]</sup>将该非结构模型拓宽应用于有分流网络中,并实现了优化结果的进一步提升。XU 等人<sup>[14]</sup>在文献<sup>[12]</sup>的基础上提出了节点非结构模型(NNM),采用量化的节点位置定位换热器的布置,通过任意连接冷、热流股上的节点生成换热器。

在分析有分流 NNM 模型优化的过程中发现,在不同算例中,节点参数的预设往往依据计算经验和试算,如设置不当,则会影响寻优空间或浪费计算资源。因此,本文从模型配置特点的角度出发,提出了一种分流结构匹配策略改进优化算法。改进后的 NNM 模型可通过不同流股的参数对网络中的计算节点进行合理分配,对网络中分流结构的生成起引导作用,促进全局最优解的产生。

## 1 节点非结构模型及优化方法

### 1.1 模型概述

节点非结构模型(NNM)<sup>[14]</sup>已经被证明比SWS求解域更广,结构参数配置更为灵活。该模型可灵活分布在冷热流体间的节点位置,定位换热器的布置,获得更多的可行结构。在允许分流的情况下,流股的分流次数可根据算例的规模或计算经验设定,有效控制参与求解的变量维度,在获得更优结果的前提下,提升问题的求解效率。

图1为一个小规模算例的NNM模型结构示意图。其中,网络中每股流体上的分流次数预设2,每个流股上有5组分流结构。图中数字表示节点编号,流股间的线表示网络中生成的换热器。流股换热不完全时,采用在流股端外接的热、冷公用工程来满足流股对目标温度的要求。

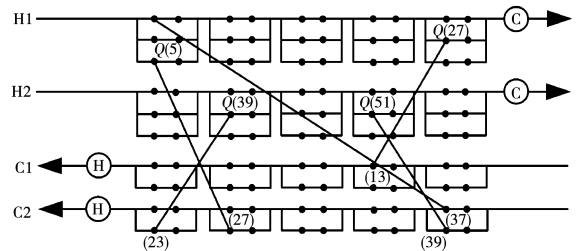


图1 NNM模型的结构图

Fig. 1 Structure diagram of NNM model

模型参数间计算方式如式(1)~(4)所示。

$$N_e^H = N_f^H \cdot N_d^H \cdot N_b^H \quad (1)$$

$$N_e^C = N_f^C \cdot N_d^C \cdot N_b^C \quad (2)$$

$$N_t^H = N_e^H \cdot N_H \quad (3)$$

$$N_t^C = N_e^C \cdot N_C \quad (4)$$

式中: $N_H$ —热流股的股数; $N_C$ —冷流股的股数; $N_f^H$ 、 $N_f^C$ —热、冷分流数; $N_d^H$ 和 $N_d^C$ —热、冷分流组数; $N_b^H$ 和 $N_b^C$ —热、冷分支上的节点数; $N_e^H$ 、 $N_e^C$ —单个热、冷流体上的节点数; $N_t^H$ 和 $N_t^C$ —热、冷流股上的总节点数;角标H和C—热流体和冷流体。

### 1.2 目标函数

将年综合费用(TAC)定义为目标函数。由设备投资和运行折算到每年的费用组成,表示为:

$$TAC = \sum_{i=1}^{N_H} (F_{fix} + C_A \cdot A_{CU,i}^\beta) \cdot Z_{CU,i} +$$

$$\sum_{j=1}^{N_C} (F_{\text{fix}} + C_A \cdot A_{\text{HU},j}^\beta) \cdot Z_{\text{HU},j} + \sum_{k \in N_{\text{EX}}} (F_{\text{fix}} + C_A \cdot A_k^\beta) \cdot Z_k + \sum_{i=1}^{N_H} C_{\text{CU}} \cdot Q_{\text{CU},i} + \sum_{j=1}^{N_C} C_{\text{HU}} \cdot Q_{\text{HU},j} \quad (5)$$

式中:  $F_{\text{fix}}$ —固定投资费用;  $C_A$  和  $\beta$ —换热器面积费用系数和指数;  $A$ —换热单元的面积; 下角标  $k$ —换热器编号;  $N_{\text{EX}}$ —网络中换热器最大值;  $Z$ —换热单元是否存在的二元变量; 角标 CU—冷公用工程; 角标 HU—热公用工程; 角标  $i, j$ —热、冷流股的序号。

### 1.3 约束条件

单股流股热平衡约束:

$$(t_{\text{H},i}^{\text{in}} - t_{\text{H},i}^{\text{target}}) \cdot \text{CF}_i = \sum_{k=1}^{N_i^{\text{H}}} Q_{k,i} + Q_{\text{CU},i}, i \in N_H \quad (6)$$

$$(t_{\text{C},j}^{\text{target}} - t_{\text{C},j}^{\text{in}}) \cdot \text{CF}_j = \sum_{k=1}^{N_j^{\text{C}}} Q_{k,i} + Q_{\text{HU},j}, j \in N_C \quad (7)$$

式中:  $\text{CF}$ —流股热容流率,  $\text{kW}/^\circ\text{C}$ ;  $Q$ —换热器的热负荷,  $\text{kW}$ ;  $t$ —流股温度,  $^\circ\text{C}$ ; 角标 in, target—流股的入口和目标。

换热器内热平衡约束:

$$Q_{k,i} = (t_{\text{H},k}^{\text{in}} - t_{\text{H},k}^{\text{out}}) \cdot (\text{CF}_i \cdot \text{SPH}_k), k \in N_i^{\text{H}} \quad (8)$$

$$Q_{k,i} = (t_{\text{C},j}^{\text{out}} - t_{\text{C},j}^{\text{in}}) \cdot (\text{CF}_j \cdot \text{SPC}_k), k \in N_i^{\text{C}} \quad (9)$$

式中:  $\text{SPH}, \text{SPC}$ —换热器所在位置的热、冷分流比; 角标 out—流股的出口。

分流比约束:

$$\sum_{k=1}^{N_f^{\text{H}}} \text{SPH}_k = 1.0 \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^{N_f^{\text{C}}} \text{SPC}_k = 1.0 \quad (11)$$

### 1.4 强制进化随机游走算法

强制进化随机游走算法 (RWCE)<sup>[15]</sup> 在优化换热网络时,通过随机增大或减小换热负荷生成试探解,并与初始解对比选择其中的较优解。以一定概率接受更差的解,可实现整型变量和连续变量的同步优化,算法流程如图 2 所示。其中  $\delta$  为设置的接受差解概率,增大  $\delta$  的取值,算法可接受更多比当前解更差的试探解,拥有更强的全局搜索能力;减小  $\delta$  的取值,算法局部搜索能力增强,但会影响全局搜索能力。

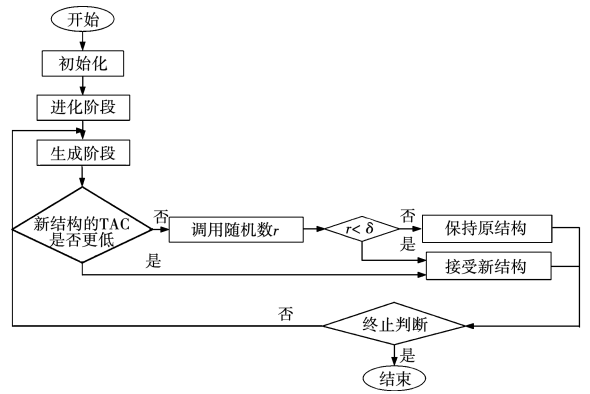


图 2 RWCE 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of RWCE algorithm

## 2 NNM 模型中节点参数对优化性能的影响分析

由于换热网络优化存在严重的非凸、非线性问题,使得求解域内的局部极值数目随问题规模的增大呈指数型增加,进而增大了问题的优化难度。在 NNM 模型中,设置可行的分流次数和分流组数可对优化结果产生导向性影响。以 9SP 算例为例,探究网络中节点参数设置对计算结果及网络配置的影响,其中算例来源为文献[16],具体参数如表 1 所示。其中,换热单元的投资费用计算公式为  $(2\ 000 + 70A)$   $\$/a$  ( $A$  单位为  $\text{m}^2$ );热公用工程的运行费用为  $60 \text{ } \$/(\text{kW} \cdot \text{a})$ ;冷公用的运行费用为  $6 \text{ } \$/(\text{kW} \cdot \text{a})$ 。

表 1 9SP 算例参数表

Tab. 1 Parameter list of 9SP

流股	$t_{\text{in}}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{out}}/^\circ\text{C}$	$\text{CF}/\text{kW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	换热系数/ $\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	换热潜能/ $\text{kW}$
H1	327	40	100	0.5	28 700
H2	220	160	160	0.4	9 600
H3	220	60	60	0.14	9 600
H4	160	45	400	0.3	46 000
C1	100	300	100	0.35	20 000
C2	35	164	70	0.7	9 030
C3	85	138	350	0.5	18 550
C4	60	170	60	0.14	6 600
C5	140	300	200	0.6	32 000
HU	330	250	-	0.5	-
CU	15	30	-	0.5	-

在设定模型节点参数时,设定每股热流股上总

节点数为30,每股冷流股上总节点数为30。在此基础上,给出了4种不同节点配置下,在相同计算时间内,NNM模型计算得到的9SP算例的结果及其网络图。具体参数如表2所示,其中 $N_{EX}$ 表示网络中换热单元的数目, $N_{SPH}$ 和 $N_{SPC}$ 表示在网络中热、冷流股

上分流的数目。

表2中4种不同节点配置参数的TAC分别为2 896 213,2 893 248,2 893 551和2 894 847 \$/a。其对应的结构如图3所示,图中左右侧数据分别为流股的入口和目标出口温度。

表2 不同节点配置下9SP算例结果及相关数据

Tab.2 Results and related data of 9SP under different nodes' distribution

节点	$N_d^H$	$N_d^C$	$N_f^H$	$N_f^C$	TAC/\$ \cdot a^{-1}	$Q_{HU}/kW$	$Q_{CU}/kW$	$N_{EX}$	$N_{SPH}$	$N_{SPC}$
1	15	10	2	3	2 896 213	24 127.4	31 847.9	17	2	1
2	6	6	5	5	2 893 248	24 177.3	31 897.9	17	2	3
3	10	6	3	5	2 893 551	24 499.3	32 219.8	16	1	1
4	10	10	3	3	2 894 847	24 270.3	31 990.9	18	1	1

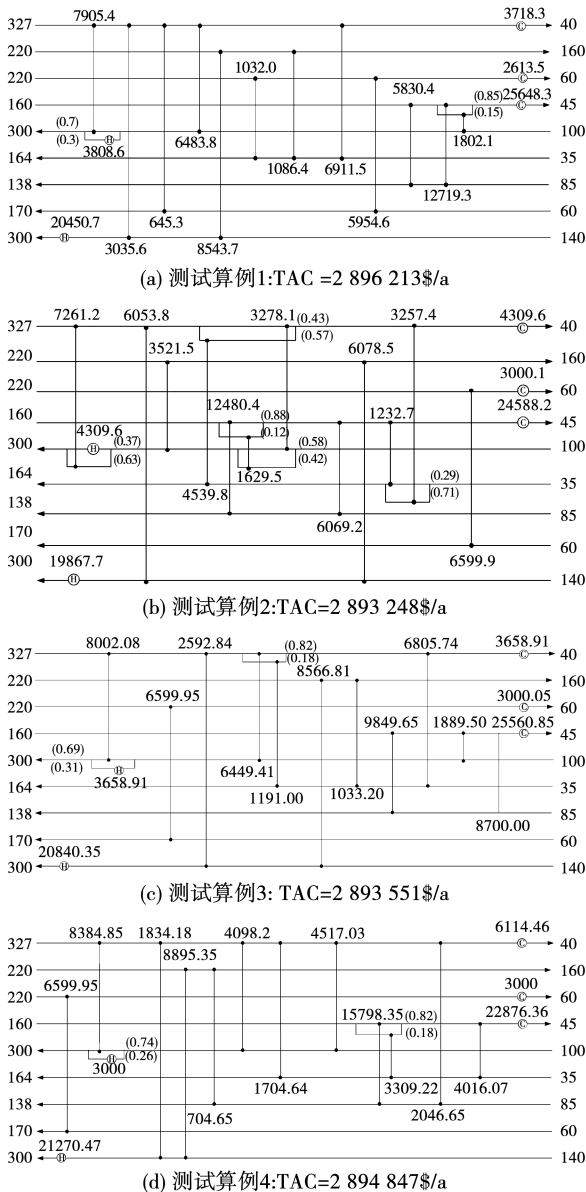


图3 网络中不同节点配置下9SP算例结果及网络配置图

Fig.3 Results and network configuration of 9SP under different nodes' distribution

由图3可知,算例9SP在流股上总节点数目固定时,流股上分流组数设置较多导致流股分支数较少。在此参数配置下,生成分流的概率较小;在流股上设置较多的分流数目,可促进分流结构的生成。但网络中分流结构过多时,分流比的优化使得问题中的优化变量数目增多,使得优化结果陷入局部极值难以跳出。因此,针对不同流股设定合适的节点配置参数,可辅助算法寻得更优结果;分流结构主要出现在进出口温度相差较高的流股上(第1股冷流股和第1股热流股),或热容流率较大的流股上(如第4股热流股)。主要是因为当流股的进出口温度相差较大时,可增加流股匹配机会,提升能量回收水平。而热容流率比较大的流股,其降温幅度较小。可通过分流结构,促进与其他流股形成有效匹配;在不考虑初始预设分流数目的情况下,第3股热流股和第4,5股冷流股上均无分流生成。因此,应减少此类流股上的分流数目,减少计算节点以提升计算效率。

### 3 分流结构匹配策略

为满足算例中不同流股对分流结构的需求,提出分流结构匹配策略改进RWCE算法(RWCE-SM),在加入模型后的算法中热、冷流股上的分流次数可根据该流股的换热潜能进行调节。该策略需要满足各流股的分流数目与流股换热潜能呈正相关;在换热潜能最小的流股上保留一定的分流概率。基于此,建立各流股上分流数目与换热潜能的关系式:

$$N_{f_i}^i = \left[ \text{atan} \left( B_1 \cdot \frac{QH_i}{QH_{\max}} \right) \cdot N_{f_i, \max}^H + B_2 \right] \quad (12)$$

$$N_{f,i}^j = \left[ \text{atan} \left( B_1 \cdot \frac{QC_j}{QC_{\max}} \right) \cdot N_{f,\max}^C + B_2 \right] \quad (13)$$

式中:QH<sub>i</sub>和QH<sub>j</sub>—第*i*股热流股上和第*j*股冷流股上的换热潜能;QH<sub>max</sub>—所有热流股上最大的换热潜能;QC<sub>max</sub>—所有冷流股上的最大换热潜能;N<sub>f,max</sub><sup>H</sup>, N<sub>f,max</sub><sup>C</sup>—热冷流股上最大的分布数;B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>—调节各流股上分流数目取值。

该策略的优势在于:在减少换热潜能较小的流股分流可能性的同时,又给予了其一定的分流概率,保证换热潜能较小的流股上分流结构的自由度;在流股上节点数相同时,通过调节各流股上的分流数目,对流股上换热器的匹配位置进行了定制化不均等分布,促进优势结构的生成,实现了优化结果和优化效率的双重提升。

### 4 算例分析

通过两个算例的计算结果及优化时间对RWCE-SM的优化性能进行分析。

#### 4.1 9SP算例

在RWCE-SM中设置初始运行参数为N<sub>d</sub><sup>H</sup> = 6, N<sub>d</sub><sup>C</sup> = 6, N<sub>f,max</sub><sup>H</sup> = 4, N<sub>f,max</sub><sup>C</sup> = 4。网络中实际参与运行的节点参数如表3所示。

表3 RWCE-SM优化9SP算例实际参数设置

Tab.3 Actual parameter setting of optimizing 9SP by RWCE-SM

热流股 <i>i</i>	热分支数	冷流股 <i>j</i>	冷分支数
1	2	1	2
2	2	2	1
3	1	3	4
4	4	4	1
-	-	5	-

采用RWCE-SM算法计算9SP算例结果如图4所示。实际参与计算的节点数目为130,比图3(b)中节点数目减少了168个,费用降低了389 \$/a。从结果的结构配置看,图4与图3(b)中换热单元数目相同,图4中通过更合理的节点配置关系,进一步

获得了更优质的优化结果。

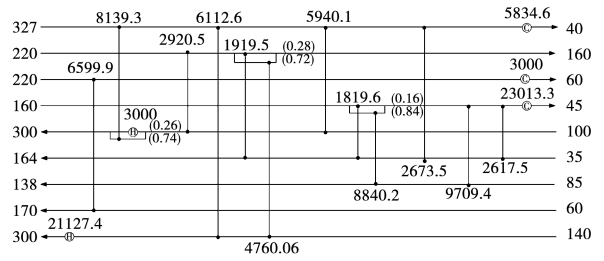


图4 9SP算例结果, TAC = 2 892 860 \$/a

Fig.4 Result of 9SP, TAC = 2 892 860 \$/a

在相同初始节点配置参数设置下,分别采用RWCE与RWCE-SM算法优化9SP算例,在相同计算时间内,比较一定迭代期内二者的优化效率和优化结果,如图5所示。

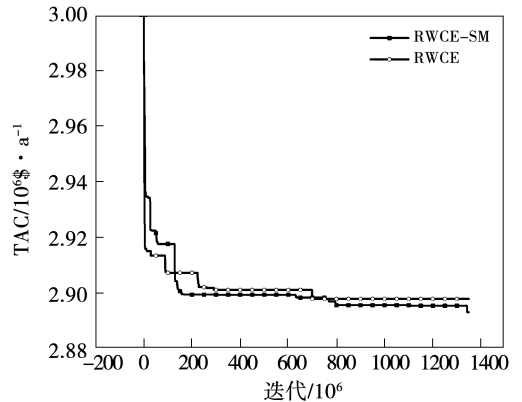


图5 采用RWCE与RWCE-SM优化结果比较

Fig.5 Comparison of optimization results by RWCE and RWCE-SM

采用原RWCE算法优化算例时,TAC在6.8 × 10<sup>8</sup>迭代次数时寻得较优的结果,因9SP算例固定投资费用的影响,TAC比2 900 917 \$/a低3 255 \$/a,为2 897 662 \$/a。后期连续性变量的优化占主导地位,只对网络中换热器的负荷进行了微调,得到TAC为2 897 652 \$/a。

采用RWCE-SM算法,对初始结构的分流参数进行调整,前期优化效率较高,在8 × 10<sup>8</sup>迭代次数时获得新的结构配置。继续优化后TAC为2 892 860 \$/a,相较原算法得到的优化结果低4 792 \$/a,比目前已有文献结果低17 046 \$/a,结果对比如表4所示。

表4 9SP算例结果对比

Tab.4 Comparison of results of 9SP

文献	年综合费用/ $10^6 \text{ \$} \cdot \text{a}^{-1}$	换热器数	热公用工程/MW	冷公用工程/MW
[16]	2.96	13	25.31	33.02
[17]	2.94	12	25.09	32.81
[18]	2.92	14	23.60	31.40
[19]	2.92	14	23.61	31.33
[20]	2.92	13	24.22	31.94
[21]	2.94	15	24.50	32.22
[22]	2.92	12	23.85	31.57
[3]	2.91	14	24.76	32.48
本文	2.89	17	20.45	31.98

根据NNM模型的特征及RWCE算法特点,通过一定时间的计算能得到与RWCE-SM相近的结果。但提出的改进策略通过调节网络中各流股上的分流结构,促进有效结果的生成,在获取较优结果的前提下缩短了优化时间。

4.2 15SP算例

15SP文献最早来源为文献[23],其具体参数如表5所示。

表5 15SP算例参数表

Tab.5 Parameter list of 15SP

流股	$t_{in}/\text{°C}$	$t_{out}/\text{°C}$	CF/ $\text{kW} \cdot \text{°C}^{-1}$	换热系数/ $\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{°C})^{-1}$	换热潜能/kW
H1	180	75	30	2	3 150
H2	280	120	60	1	9 600
H3	180	75	30	2	3 150
H4	140	40	30	1	3 000
H5	220	120	50	1	5 000
H6	180	55	35	2	4 375
H7	200	60	30	0.4	4 200
H8	120	40	100	0.5	8 000
C1	40	230	20	1	3 800
C2	100	220	60	1	7 200
C3	40	190	35	2	5 250
C4	50	190	30	2	4 200
C5	50	250	60	2	12 000
C6	90	190	50	1	5 000
C7	160	250	60	3	5 400
HU	325	325	-	2	-
CU	25	40	-	1	-

在表5中,各流股的换热潜能相差较大,易导致最优网络的分流结构分布不均等问题。因此,若均匀配置网络中分流结构,会造成部分流股上节点过剩,阻碍优化进程。其中,换热单元的投资费用计算公式为 $300 \times A \text{ \$}/\text{a}$ (A单位为 $\text{m}^2$ );热公用工程的运行费用为 $60 \text{ \$}/(\text{kW} \cdot \text{a})$ ;冷公用的运行费用为 $5 \text{ \$}/(\text{kW} \cdot \text{a})$ 。

RWCE-SM算法中初始参数设置为 $N_d^H = 7, N_d^C = 7, N_{f,max}^H = 3, N_{f,max}^C = 3, N_b^H = 2, N_b^C = 2$ 时,实际参与优化的分流数目如表6所示。由于热流股上换热潜能相差不大,经策略调整后的流股上实际分流数目相近。在C3流股上的换热潜能较小,因此C3流股上实际的分流数目较少。根据计算,实际参与优化的节点总数目为392。

表6 RWCE-SM算法优化15SP算例实际节点参数设置  
Tab.6 Actual nodes' parameter setting of 15SP by RWCE-SM

热流股 i	热分支数	冷流股 j	冷分支数
1	1	1	1
2	3	2	2
3	1	3	2
4	1	4	2
5	2	5	2
6	2	6	2
7	2	7	2
8	3	-	-

在NNM模型中设置 $N_d^H = 7, N_d^C = 4, N_{f,max}^H = 2, N_{f,max}^C = 3, N_b^H = 2, N_b^C = 2$ 时,网络中结算节点的总数目亦为133。NNM模型中C2流股上设置的节点数目为21个,而在网络中节点总数目一定时,RWCE-SM算法调整后,C2上的节点数目为28。C2上多设置的节点使得采用RWCE-SM算法更易获取具有优化潜力的网络结构。优化结果如图6所示。优化结果的对比表如表7所示。

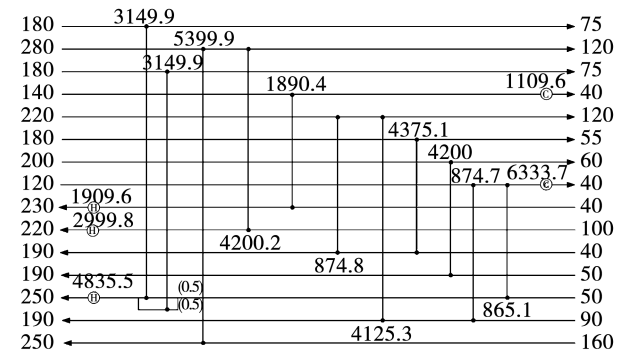


图6 15SP算例结果, TAC = 1 492 907 \$/a

Fig.6 Result of 15SP, TAC = 1 492 907 \$/a

表7 15SP算例对比

Tab.7 Comparison of results of 15SP

文献	年综合费用/ $\$/\text{a}$	换热器数	热公用工程/kW	冷公用工程/kW
[23]	1 513 854	-	-	-
[24]	1 530 063	-	-	-
[25]	1 527 240	19	10.11	7.73
[26]	1 525 394	19	-	-
[27]	1 510 891	15	10.61	8.24
[28]	1 507 290	19	-	-
[29]	1 510 070	18	10.28	7.9
[30]	1 497 325	17	-	-
本文	1 492 907	16	9.74	7.37

## 5 结论

通过分析节点非结构模型(NNM)的优化性能发现,优化结果中的分流结构主要出现在换热潜能较大的流股上。根据这一特点,提出了分流结构匹配策略。改进后的算法可根据各流股的换热潜能配置流股上的分流数目,使得换热潜能较大的流股上的分流数目较多。将RWCE-SM用于两个换热网络优化算例,最优TAC均比文献结果更优。通过算例的数据分析可得到结论:

(1) 模型中节点的初始设置参数相同时,RWCE-SM算法实际参与优化节点数目较少,在较短的计算时间内获得更优的结果。

(2) 模型中实际参与优化的节点数目相同时,RWCE-SM算法可通过网络中各流股节点数的灵活配置,提升网络结构变异能力,改变进化方向,改善优化质量。

## 参考文献:

[1] YEE T F, GROSSMANN I E. Simultaneous optimization models for heat integration, II: heat exchanger network synthesis[J]. Computers & Chemical Engineering, 1990, 14(10): 1165 - 1184.

[2] PAVÃO L V, COSTA C, RAVAGNANI M. A new stage-wise superstructure for heat exchanger network synthesis considering substages, sub-splits and cross flows[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 719 - 735.

[3] PAVÃO L V, COSTA C, RAVAGNANI M. An enhanced stage-wise superstructure for heat exchanger networks synthesis with new op-

tions for heaters and coolers placement[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(7): 2560 - 2573.

- [4] HUANG K F, KARIMI I A. Simultaneous synthesis approaches for cost-effective heat exchanger networks[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 98: 231 - 245.
- [5] PONCE-ORTEGA J M, SERNA-GONZÁLEZ M, JIMÉNEZ-GUTIÉRREZ A. Synthesis of heat exchanger networks with optimal placement of multiple utilities[J]. Industrial Engineering Chemical Research, 2010, 49, 2849 - 2856.
- [6] NA J, JUNG J, PARK C, et al. Simultaneous synthesis of a heat exchanger network with multiple utilities using utility substages[J]. Computers and Chemical Engineering, 2015, 79: 70 - 79.
- [7] HASAN M M F, JAYARAMAN G, KARIMI I A, et al. Synthesis of heat exchanger networks with non-isothermal phase changes[J]. AIChE Journal, 2009, 56: 930 - 945.
- [8] 杨岭, 崔国民, 徐玥, 等. 换热网络中大步长与接受差解的关联分析及改进策略[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 9 - 15.
- YANG Ling, CUI Guo-min, XU Yue, et al. Correlation analysis and improvement strategy of large step length and accepting imperfect solution in heat exchanger network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6): 9 - 15.
- [9] 鲍中凯, 崔国民, 陈家星. 采用结构保护策略的强制进化随机游走算法优化换热网络[J]. 化工学报, 2017, 68(9): 3522 - 3531.
- BAO Zhong-Kai, CUI Guo-min, CHEN Jia-xing. Optimization of heat exchanger network by random walk algorithm with compulsive evolution with structure-protection strategy[J]. CIESC Journal, 2017, 68(9): 3522 - 3531.
- [10] 孙涛, 崔国民, 肖媛. 采用结构进化增强策略的RWCE算法优化换热网络[J]. 热能动力工程, 2019, 34(8): 16 - 24.
- SUN Tao, CUI Guo-min, XIAO Yuan. Optimization of heat exchanger network by RWCE algorithm with enhanced structure evolution strategy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(8): 16 - 24.
- [11] PAVÃO L V, COSTA C, RAVAGNANI M. Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization[J]. AIChE Journal, 2017, 65(5): 1582 - 1601.
- [12] 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.
- CHEN Jia-xing. The superstructure model and global optimization for simultaneous synthesis of heat exchanger networks[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2018.
- [13] KAYANGE H, CUI Guo-min, XU Yue, et al. Non-structural model for heat exchanger network synthesis allowing for stream splitting[J]. Energy, 2020, 201: 117461 - 117477.

- [14] XU Yue, KAYANGE H, XIAO Yuan, et al. A new nodes-based model for optimization of heat exchanger network synthesis[J]. *Journal of Thermal Science*, 2020, 4: 451 – 464.
- [15] XIAO Yuan, CUI Guo-min. A novel random walk algorithm with compulsive evolution for heat exchanger network synthesis[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 115: 1118 – 1127.
- [16] LINNHOFF B, AHMAD S. Cost optimum heat exchanger networks, I: minimum energy and capital using simple models for capital cost[J]. *Computer Chemical Engineering*, 1990, 14(7): 729 – 750.
- [17] LEWIN D R. A generalized method for heat exchanger synthesis using stochastic optimization, II: the synthesis of cost-optimal networks[J]. *Computer Chemical Engineering*, 1998, 22(10): 1387 – 1405.
- [18] TOFFOLO A. The synthesis of cost optimal heat exchanger networks with unconstrained topology[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(17/18): 3518 – 3528.
- [19] FIEG G, LUO Xing, JEZOWSKI J. A monogenetic algorithm for optimal design of large-scale heat exchanger networks[J]. *Chemical Engineering Process*, 2009, 48(11 – 12): 1506 – 1516.
- [20] HUO Zhao-yi, ZHAO Liang, YIN Hong-chao, et al. Simultaneous synthesis of structural-constrained heat exchanger networks with and without stream splits[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2013, 91(5): 830 – 842.
- [21] PENG Fu-yu, CUI Guo-min. Efficient simultaneous synthesis for heat exchanger network with simulated annealing algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 136 – 149.
- [22] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S, et al. Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization[J]. *AIChE Journal*, 2017, 63(5): 1582 – 1601.
- [23] BJÖRK K M, PETTERSSON F. Optimization of large-scale heat exchanger network synthesis problems [C]//Proceedings of the ISATED International Conference on Modelling and Simulation, Palm Springs, CA, USA, 2003.
- [24] BJÖRK K M, NORDMAN R. Solving large-scale retrofit heat exchanger network synthesis problems with mathematical optimization methods [J]. *Chemical Engineering Process*, 2005, 44: 869 – 876.
- [25] PENG Fu-yu, CUI Guo-min. Efficient simultaneous synthesis for heat exchanger network with simulated annealing algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 136 – 149.
- [26] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S. Heat exchanger network synthesis without stream splits using parallelized and simplified simulated annealing and particle swarm optimization[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 158: 96 – 107.
- [27] FIEG G, LUO Xing, JEZOWSKI J. A monogenetic algorithm for optimal design of largescale heat exchanger networks[J]. *Chemical Engineering Process*, 2009, 48(11 – 12): 1506 – 1516.
- [28] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S. Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization[J]. *AIChE Journal*, 2017, 63: 1582 – 1601.
- [29] RATHJES M, FIEG G. A novel hybrid strategy for cost-optimal heat exchanger network synthesis suited for large-scale problems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 16: 167 – 186.
- [30] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S, et al. Costs and environmental impacts multi-objective heat exchanger networks synthesis using a meta-heuristic approach[J]. *Applied Energy*, 2017(203): 304 – 320.

(刘颖编辑)