

基于温位区间的换热网络非结构模型

沈昊, 崔国民*

上海理工大学新能源科学与工程研究所, 上海

Email: *cgm1226@163.com

收稿日期: 2021年4月13日; 录用日期: 2021年5月24日; 发布日期: 2021年5月31日

摘要

分析了换热网络节点非结构模型在优化换热网络问题上的局限性, 建立了一种改进的基于温位区间的换热网络非结构模型。该模型将模型空间基于各流股进出口温度划分为高温位区间, 中温位区间和低温位区间, 各流股上节点按温位区间进行分配, 并对节点匹配方式做出规定, 禁止热流股低温位节点和冷流股高温位节点跨区间匹配。算例验证表明, 该换热网络模型大大减少不可行匹配结构出现的可能性, 简化求解空间, 有效提高优化效率。

关键词

换热网络, 优化, 计算机模拟, 数学模型

Unstructured Model of Heat Exchanger Network Based on Temperature Level Range

Hao Shen, Guomin Cui*

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

Email: *cgm1226@163.com

Received: Apr. 13th, 2021; accepted: May 24th, 2021; published: May 31st, 2021

Abstract

This paper analyzes the limitations of the node unstructured model of heat exchanger network in the optimization of heat exchanger network, so an improved unstructured model of heat exchanger

*通讯作者。

network based on temperature level interval is established. In this model, the model space is divided into high temperature zone, medium temperature zone and low temperature zone based on the inlet and outlet temperature of each stream. The nodes on each stream are allocated according to the temperature zone, and the node matching method is specified. Cross range matching of low temperature node and high temperature node of hot stream is prohibited. The results show that the heat exchanger network model can greatly reduce the possibility of non feasible matching structure, simplify the solution space and effectively improve the optimization efficiency.

Keywords

Heat Exchange Network, Optimization, Computer Simulation, Mathematical Model

Copyright © 2021 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

换热网络综合作为过程系统工程的重要领域, 在实现能量综合利用的过程起到重要的作用[1]。对换热网络的节能减耗, 主要针对众多换热器热集成的换热网络综合技术[2]。通过优化冷热流股间的匹配换热结构, 实现最大的能量内部回收和最小的换热网络年综合运行费用, 从系统角度实现换热器热集成, 提高系统整体的能量回收率和能量利用水平。

对换热网络建立更合理的数学模型表述, 需要在尽可能的提高模型的求解空间的基础上, 简化模型复杂度[3]。换热网络模型主要分为分步优化模型和同步优化模型[4]。其中同步优化模型将公用工程用量, 换热器数目和换热面积三个变量参数同时兼顾, 纳入一个混合整数非线性规划的数学模型中, 再应用优化算法对模型优化求解[5]。1990年, Yee 和 Grossmann [6]等首次建立了换热网络分级超结构模型, 是至今为止应用最为广泛的换热网络同步优化模型。该模型通过预设级数, 将换热网络模型空间划分成若干级, 每一级中每股热流股均可与每股冷流股形成匹配换热, 由此每一级包含了所有的匹配结构。Xiao 等[7]通过分析分级超结构的不足, 提出了换热网络节点非结构模型。该模型放弃了分级超结构模型级数的限制, 以在流股上布置节点作为换热单元的产生位置, 以冷热节点的自由匹配, 生成非结构化的换热网络, 打破了固定匹配方式的约束, 极大的提高模型的求解域, 在优化换热网络问题上, 具有极高的优化效率和研究价值。

节点非结构模型在优化进程中容易出现温度交叉的换热单元, 造成了节点数的浪费, 具有一定的局限性。鉴于此, 本文建立了一种改进后的基于温位区间的换热网络非结构模型, 可以有效减少求解空间内不可行匹配结构的产生, 提高模型的优化效率。

2. 换热网络节点非结构模型局限性分析

2.1. 节点非结构模型介绍

换热网络节点非结构模型与传统的分级超结构模型不同, 不预设一个固定的框架, 也不存在模型级数的限制[8], 其具体的建立的过程如下:

1) 换热单元位置: 以 H_1, H_2, \dots, H_{NH} 表示每股热流股, 以 C_1, C_2, \dots, C_{NC} , 表示每股冷流股。每股热流股和每股冷流股上都预设 $NGDH$ 和 $NGDC$ 个节点作为产生换热单元的位置, 每个节点的编号用 $1, 2, \dots, N_{GDH}$ 和 $1, 2, \dots, N_{GDC}$ 来表示。

2) 连接关系生成: 通过选取热流股上一节点 PH 和冷流股上一节点 PC 连接, 便确定一个换热单元生成, 生成的换热单元换热量为 Q 。换热单元 k 可以用 s 所在热流股 H_k , 所在冷流股 C_k , 热流股上节点编号 $NGDH_k$, 冷流股上节点编号 $NGDC_k$ 和换热热量 Q_k , 则换热单元数为 n 个的节点非结构模型可以矩阵 M 表示, 如式(1)所示

$$M = \begin{bmatrix} H_1 & \cdots & H_k & \cdots & H_n \\ C_1 & \cdots & C_k & \cdots & C_n \\ NGDH_1 & \cdots & NGDH_k & \cdots & NGDH_n \\ NGDC_1 & \cdots & NGDC_k & \cdots & NGDC_n \\ Q_1 & \cdots & Q_k & \cdots & Q_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

以 2 股热流股和 2 股冷流股为例, 将节点非结构模型以直观图示表示, 如图 1 所示。该非结构模型产生 4 个换热单元, 公用工程在流股末端生成。

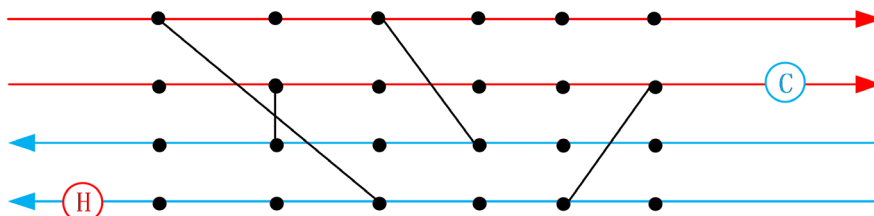


Figure 1. Schematic diagram of node unstructured model
图 1. 节点非结构模型示意图

2.1.1. 目标函数

节点非结构模型以换热网络年综合费用 TAC 最小为优化目标。年综合费用主要包括换热器的设备投资费用和冷热公用工程的运行费用, 目标函数的数学描述如式(2)所示

$$\begin{aligned} \min TAC = \min & \sum_{i=1}^{NC} C_{CU} Q_{CU,i} + \sum_{i=1}^{NH} C_{HU} Q_{HU,i} + \sum_{i=1}^{NE} (C_0 + C'_0 A_i^\beta) \\ & + \sum_{i=1}^{NC} (C_1 + C'_1 A_{CU,i}^\beta) + \sum_{i=1}^{NH} (C_2 + C'_2 A_{HU,i}^\beta) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, TAC —换热网络年综合费用, USA/A;

C_{CU} 、 C_{HU} ——分别是冷公用工程和热公用工程运行费用系数, USA/J;

C_0 、 C'_0 、 C_2 ——分别是流股换热器, 冷公用工程换热器和热公用工程换热器固定费用, USA;

C'_0 、 C'_1 、 C'_2 ——分别是流股换热器, 冷公用工程换热器和热公用工程换热器固定费用系数, USA/m²;

A^β 、 C_{CU}^β 、 C_{HU}^β ——分别是流股换热器, 冷公用工程换热器和热公用工程换热器面积, m²。

目标函数右侧, 前两项计算的是冷热公用工程运行费用, 后三项计算的是流股换热器, 冷公用工程换热器和热公用工程换热器的投资费用。换热器换热热量及换热面积计算依据换热器热平衡公式, 如式(3), 式(4)所示。

$$Q_{i,j,k} = GC_{p_i} (T_{i,k}^{in} - T_{i,k}^{out}) = GC_{p_j} (T_{j,k}^{out} - T_{j,k}^{in}) \quad (3)$$

$$A_{i,j,k} = \frac{Q_{i,j,k}}{U_{i,j} \Delta t_{i,j,k}} \quad (4)$$

2.1.2. 约束条件

节点非结构需要满足如下约束条件

1) 单股流股上的热平衡

冷流股和热流股经过加热和冷却后, 需要确保达到各自的目标温度。

$$(T_{IN,i} - T_{OUT,i}) \cdot GC_{p_i} = \sum_{m \in BH(i)} Q_{i,m} + Q_{CU,i} \quad (5)$$

$$(T_{OUT,j} - T_{IN,j}) \cdot GC_{p_j} = \sum_{n \in BC(j)} Q_{j,n} + Q_{HU,j} \quad (6)$$

2) 换热器可行出入口温度

$$te_{IN,i,m} - te_{OUT,j,n} \geq \Delta T_{\min} \quad (7)$$

$$te_{OUT,i,m} - te_{IN,j,n} \geq \Delta T_{\min} \quad (8)$$

3) 冷热公用工程热平衡

冷热流股换热完毕后, 剩余的热负荷在流股末端由公用工程加热或冷却

$$(te_{OUT,i,BH(i)} - T_{OUT,i}) F_i = Q_{CU,i} \quad (9)$$

$$(T_{OUT,j} - te_{OUT,j,BC(j)}) F_j = Q_{HU,j} \quad (10)$$

2.2. 局限性分析

2.2.1. 换热单元温度交叉

在优化节点非结构模型时, 换热单元由随机在热流股和冷流股选取一个节点匹配产生, 这种随机性地选取, 可能会产生一个换热单元的的热流股入口温度低于冷流股的出口温度或一个换热单元的热流股的出口温度低于冷流股的入口温度的现象, 称为换热单元温度交叉, 以数学描述如式(11)和式(12)所示。

$$d_{tl} = t_{in,h} - t_{out,c} < 0 \quad (11)$$

$$d_{tr} = t_{out,h} - t_{in,c} < 0 \quad (12)$$

出现温度交叉现象的换热单元, 明显不符合热力学原理, 在换热过程中就会因热流股的温度低于冷流股的温度而停止传热。出现此种情况时, 一般采用内部公用工程和外罚函数法处理。在传热因温度交叉而停止时, 在冷热流股上使用公用工程代替换热单元, 继续将冷热流股加热或冷却到目标温度, 这种公用工程称为内部公用工程, 并对该换热单元费用加入一个基于换热温差和内部公用工程量的较大的惩罚值。

由于内部公用工程和惩罚值对费用的增加, 包含温度交叉换热单元的换热网络结构不是最优的结构, 目前最终优化所得的换热网络结构都是不包含温度交叉换热单元。但在优化进程中, 节点非结构模型会产生很多温度交叉的换热单元, 并且想要消去这些不合理的换热单元需要较多的迭代步数, 花费大量的计算时间, 大大降低了模型的优化效率。

2.2.2. 节点数浪费

节点非结构模型在分配节点时, 对于每股流股均采用平均分配的方式。但对于一些温度区间跨度较小的流股, 其所能匹配的流股较少, 平均分配的节点分配方式必然造成节点数的浪费, 最终形成的整型变量求解空间包含众多不可行匹配换热单元。以一个 3 股热流股和 4 股冷流股的 7sp 算例为例, 算例数据如表 1 所示, 建立的不包含换热单元, 每股流股上设置 10 个节点的节点非结构模型如图 2 所示。

Table 1. 7sp example data
表 1. 7sp 算例数据

流体	T_{IN} (°C)	T_{OUT} (°C)	F (kW/°C)	h (kW/(m ² ·°C))
H1	260	100	100	0.50
H2	120	30	160	0.40
H3	60	40	60	0.14
C1	20	120	100	0.35
C2	70	140	70	0.70
C3	10	30	350	0.50
C4	120	160	60	0.14
HU	330	250	-	0.50
CU	15	30	-	0.50

换热单元面积费用公式: $2000 + 70A$ \$/year (A in m²); 热公用工程单位费用: 60 \$/(kW·year); 冷公用工程单位费用: 6 \$/(kW·year)。

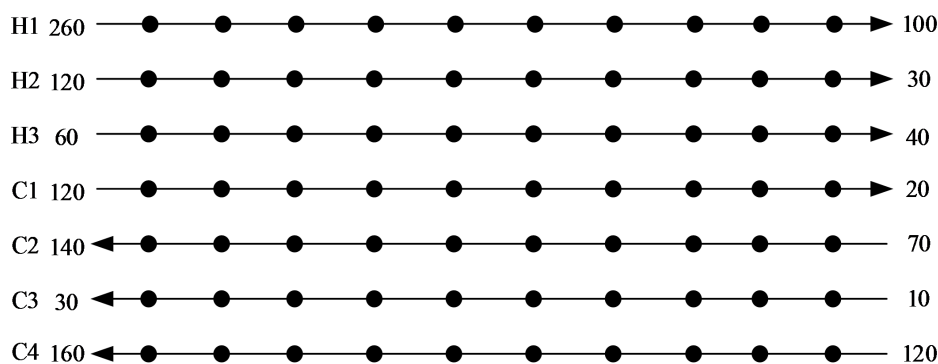


Figure 2. 7sp node unstructured model
图 2. 7sp 节点非结构模型

在 7sp 算例中, 热流股 H3 和冷流股 C4 较为特殊, H3 的入口温度为 60°C, 入口温度较低, 能与其形成有效匹配结构的只有冷流股 C1 和 C3, 但在实际优化进程中, H3 与冷流股 C2 和 C4 仍会形成温度交叉的换热单元, 造成 $[10 * 10 + 10 * 10]$ 的求解空间的浪费。同样的, 对于冷流股 C4, 其入口温度为 120°C, 能与其形成有效匹配结构的只有热流股 H1, 与热流股 H2 和 H3 匹配形成的换热单元均为不可行结构。对于这样包含热流股入口温度较低, 冷流股入口温度较高, 流股温度区间跨度较小的节点非结构模型, 节点在每股流股上平均分配的分配方式, 就会造成求解空间包含大量的不可行匹配结构, 虽然这些不可行匹配结构在优化之后均会被消去, 但会浪费大量的计算时间。另外, 这样的不可行匹配结构所占用的节点也会造成节点的浪费, 阻碍好的匹配结构的产生, 如 H2 与 C4 匹配形成换热单元后, 会使用内部公用工程达成流股热平衡, 造成 H2 温度降低与 C4 温度升高, 其后续形成好的匹配结构难度进一步增加, 降低模型的优化的效率。

3. 基于温位区间的换热网络模型建立

针对上述对节点非结构模型局限性的分析可以看出, 节点非结构模型对于流股温位匹配没有规定, 流股自由匹配造成求解空间包含大量不可行匹配结构, 模型的优化效率降低。由此, 对节点非结构模型进行改进, 提出了一种基于温位区间的换热网络模型。

3.1. 模型表述

改进后的基于温位区间的换热网络模型将模型空间基于各流股进出口温度划分为高温位区间, 中温位区间和低温位区间, 各流股上节点按温位区间进行分配, 并对节点匹配方式做出规定, 禁止热流股低温位节点和冷流股高温位节点跨区间匹配。其建立的具体过程如下:

1) 温位区间界限温度确定: 将各个流股的进出口温度汇总并按从小到大的顺序排序。如总计有 NK 个流股参与换热, 其进出口温度排序形成的数组为 $\{t_1, t_2, \dots, t_{NK}\}$, 则将 $t_{int(NK/3)+1}$ 作为低温位区间和中温位区间的界限温度 t_{l-m} , 将 $t_{int(2NK/3)+1}$ 作为中温位区间和高温位区间的界限温度 t_{m-h} 。

2) 流股节点分配: 确定各个流股的区间跨度。对于热流股, 其入口温度 $t_{in,h}$ 高于 t_{m-h} , 出口温度 $t_{out,h}$ 高于 t_{m-h} , 则判断其只位于高温位区间; 其 $t_{in,h}$ 高于 t_{m-h} , $t_{out,h}$ 低于 t_{m-h} , 高于 t_{l-m} , 则判断其跨越高温位区间和中温位区间; 其 $t_{in,h}$ 高于 t_{m-h} , $t_{out,h}$ 低于 t_{l-m} , 则判断其跨越三个区间; 其 $t_{in,h}$ 低于 t_{m-h} , $t_{out,h}$ 低于 t_{m-h} , 高于 t_{l-m} , 则判断其跨越中温位区间和低温位区间; 其 $t_{in,h}$ 低于 t_{l-m} , $t_{out,h}$ 低于 t_{l-m} , 则判断其只位于低温位区间。对于冷流股采用同理的区间跨度确定方式。将节点按照流股区间跨度分配到流股上, 对于不位于某温位区间上的流股该区间的节点则不分配。

3) 节点匹配: 冷热流股的节点匹配方式基本遵循节点非结构模型。特别的, 对于热流股低温位节点和冷流股高温位节点, 禁止它们跨区间进行匹配, 只可与位于自区间的节点匹配, 而其余温位区间的节点仍可以自由匹配。

仍以上节的 7sp 算例为例, 建立的基于温位区间的换热网络模型以直观图示, 如图 3 所示。

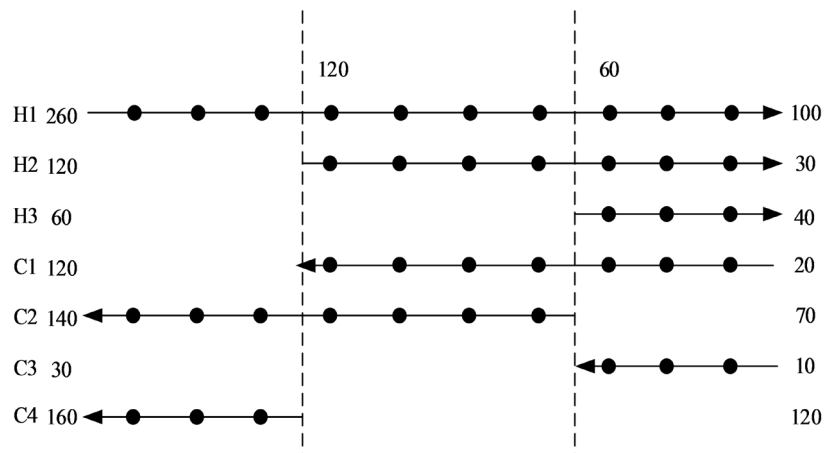


Figure 3. 7sp heat exchanger network model based on temperature level range

图 3. 7sp 基于温位区间的换热网络模型

该算例模型确定的低温位区间和中温位区间的界限温度 t_{l-m} 为 60°C , 中温位区间和高温位区间的界限温度 t_{m-h} 为 120°C , 热流股 H1 跨越三个温位区间, H2 跨越中温位区间和低温位区间, H3 只位于低温位区间, 冷流股 C1 跨越中温位区间和低温位区间, C2 跨越中温位区间和高温位区间, C3 只位于低温位区间, C4 只位于高温位区间。对于节点的匹配方式, 热流股 H1, H2 和 H3 的低温位区间节点只可与冷流股 C1 和 C3 的低温位区间节点匹配, 冷流股 C2 和 C4 的高温位区间节点只可与 H1 的高温位区间节点匹配。可以看出, 对于热流股 H3, 只有冷流股 C1 和 C3 可以与之匹配, 对于冷流股 C4, 只有热流股 H1 可以与之匹配, 符合上述分析时, 符合热力学原理的可行匹配结构。同时, 其余的节点仍可遵循节点非结构模型节点自由匹配的方式, 在减少求解空间内不可行匹配的基础上, 保证了足够大的求解空间。

3.2. 基于温位区间的换热网络模型优化效果分析

为了验证基于温位区间的换热网络模型的有效性, 采用 RWCE 算法优化 2 个算例, 与节点非结构模型的优化效率进行对比。

1) 算例 1 算例 H6C4

算例 1 采用 6 股热流股和 4 股冷流股的 10sp 算例, 算例具体参数见表 2 [9]。

Table 2. 10sp example data

表 2. 10sp 算例数据

流体	T_{IN} (°C)	T_{OUT} (°C)	F (kW/°C)
H1	85	45	156.3
H2	120	40	50.0
H3	125	35	23.9
H4	56	46	1250
H5	90	86	1500
H6	225	75	50.0
C1	40	55	466.7
C2	55	65	600
C3	65	165	180
C4	10	170	81.3
HU	200	198	–
CU	15	20	–

换热单元面积费用公式: $60A$ \$/year (A in m^2); 热公用工程单位费用: 100 \$/(kW·year); 冷公用工程单位费用: 15 \$/(kW·year); 每个换热单元的总传热系数: 0.025 kW/($m^2 \cdot ^\circ C$)。

对 10sp 算例建立模型, 基于各流股的进出口温度, 确定高温位区间与中温位区间的界限温度为 $120^\circ C$, 中温位区间与低温位区间的界限温度为 $56^\circ C$, 对于流股位于中温位区间上的分段分配 10 个节点, 高温位区间和低温位区间的分段各分配 5 个节点, 最终形成的模型图示如图 4 所示。

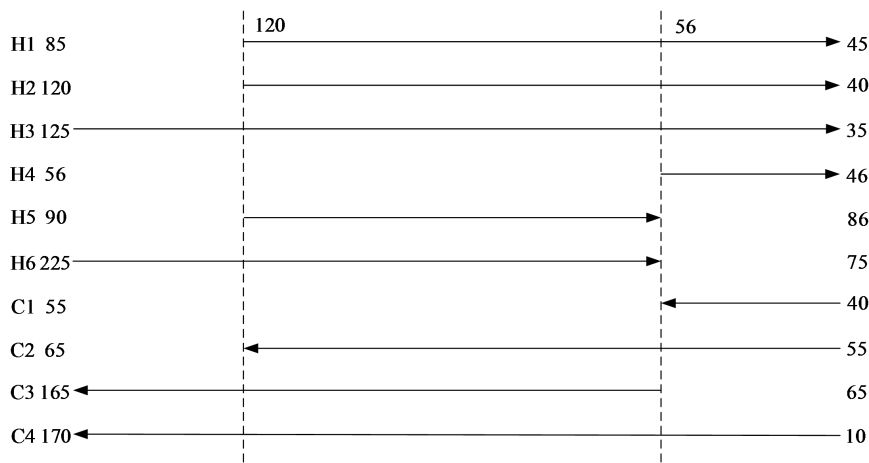


Figure 4. 10sp heat exchanger network model based on temperature level range

图 4. 10sp 算例基于温位区间模型

对于 10sp 算例, 只有热流股 H4 较为特殊, 其只位于低温位区间, 与冷流股 C3 无法形成可行匹配结构, 与 C2 的换热温差也较小难以形成可行匹配, 能与之有效换热的只有冷流股 C1 和 C4。基于节点非结构模型优化该算例时, 热流股 H4 往往由于在优化进程中生成大量温度交叉的换热单元, 难以形成可行匹配关系的换热单元, 援引文献[11]中采用节点非结构模型优化后所得的两个结果, 其结构如图 5 所示, 结果图 5(a)中 H4 没有与冷股匹配换热, 只在流股末端以冷公用工程的方式冷却到目标温度, 结果图 5(b)中 H4 与 C4 生成了一个小换热量的换热单元, 仍然需要加以大换热量的冷公用工程。

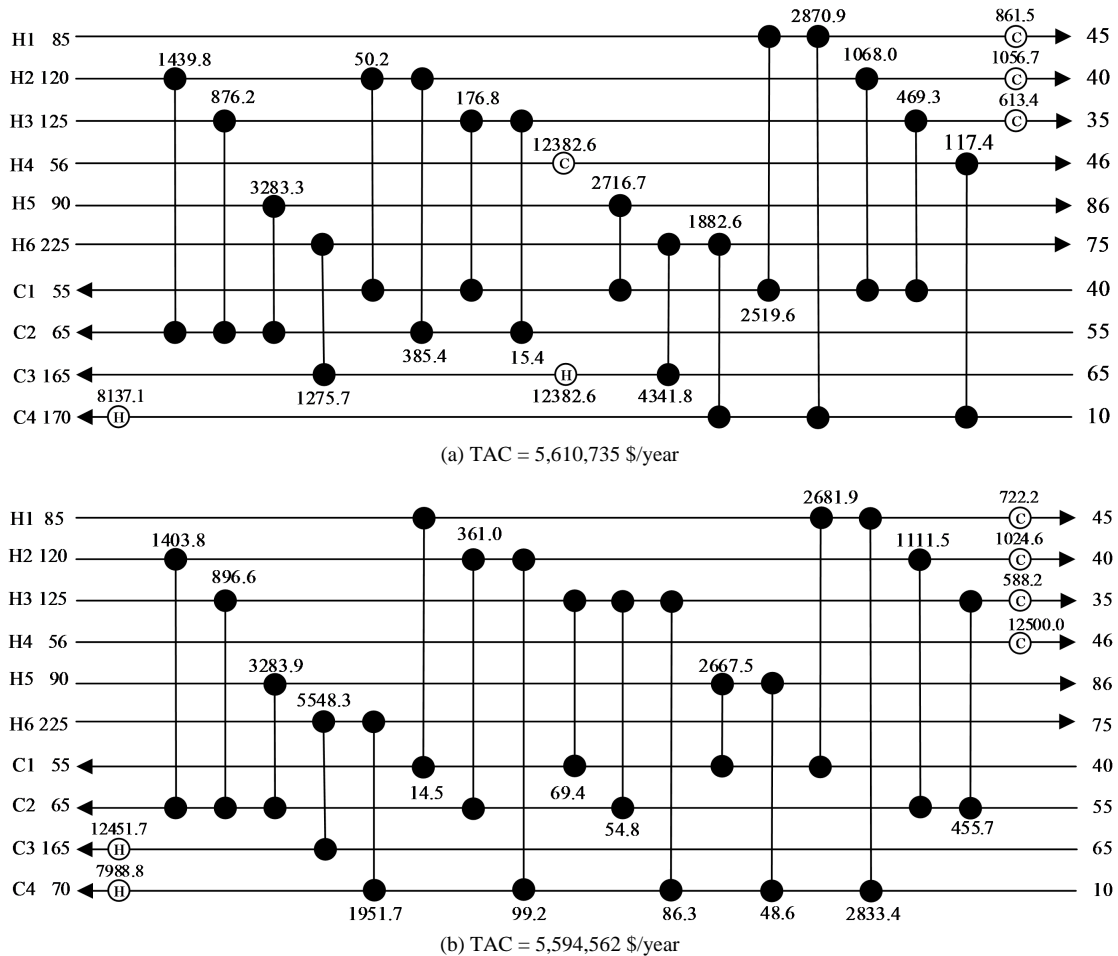


Figure 5. 10sp results of node unstructured model optimization

图 5. 节点非结构模型优化 10sp 结果

采用基于温位区间的换热网络模型优化该算例所得结果, 其换热网络结构如图 6 所示, 年综合费用为 5587396 \$/year, 相比节点非结构模型优化所得结果降低了 7166 \$/year。该结构在 H4-C4 匹配生成了一个换热量为 4727.8 J 的换热单元, 有效增加热流股 H4 的换热效率, 降低整体换热网络结构的年综合费用。

图 7 为节点非结构和基于温位区间的换热网络模型优化 10sp 算例的个体费用迭代曲线, 可以看出, 采用基于温位区间的换热网络模型优化 10sp 算例, 费用下降更快, 在相同的迭代步数下得到的结果更优。

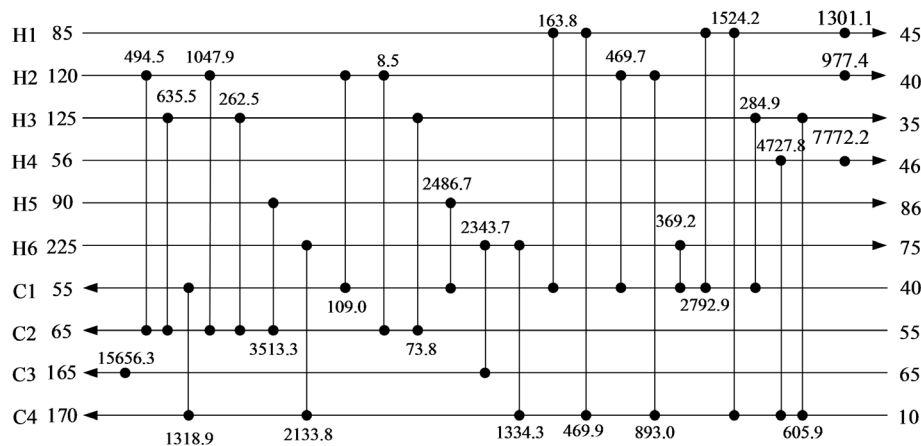


Figure 6. Optimization of 10sp results based on temperature potential interval model
 图 6. 基于温位区间模型优化 10sp 结果

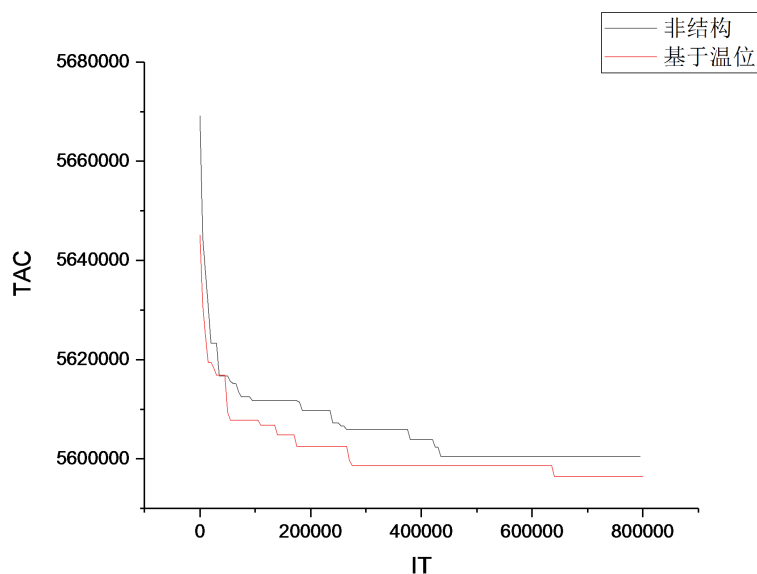


Figure 7. Cost iteration curve of unstructured model and improved model
 图 7. 非结构模型与改进模型费用迭代曲线

2) 算例 2 算例 H13C7

算例 2 采用 13 股热流股 7 股冷流股的 20sp 算例, 算例具体参数见表 3 [10]。

Table 3. 20sp example data
 表 3. 20sp 算例参数

流体	T_{IN} (°C)	T_{OUT} (°C)	F (kW/°C)
H1	576	437	23.1
H2	599	399	15.22
H3	530	382	15.15
H4	449	237	14.76
H5	368	177	10.7
H6	121	114	149.6

Continued

H7	202	185	258.2
H8	185	113	8.38
H9	140	120	59.89
H10	69	66	165.79
H11	120	68	8.74
H12	67	35	7.62
H13	1034.5	376	21.3
C1	123	343	10.61
C2	20	156	6.65
C3	156	157	3291
C4	20	182	26.63
C5	182	318	31.19
C6	318	320	4011.83
C7	322	923.78	17.6
HU	927	927	-
CU	9	17	-

换热单元面积费用公式: $4000 + 500A$ \$/year (A in m^2); 热公用工程单位费用: 250 \$/(kW·year); 冷公用工程单位费用: 25 \$/(kW·year); 每个换热单元的总传热系数: $0.06 \text{ kW}/(m^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

对 20sp 算例建立模型, 确定的高温位区间与中温位区间的界限温度为 117°C , 中温位区间与低温位区间的界限温度为 318°C , 建立的基于温位的模型图示如图 8 所示。

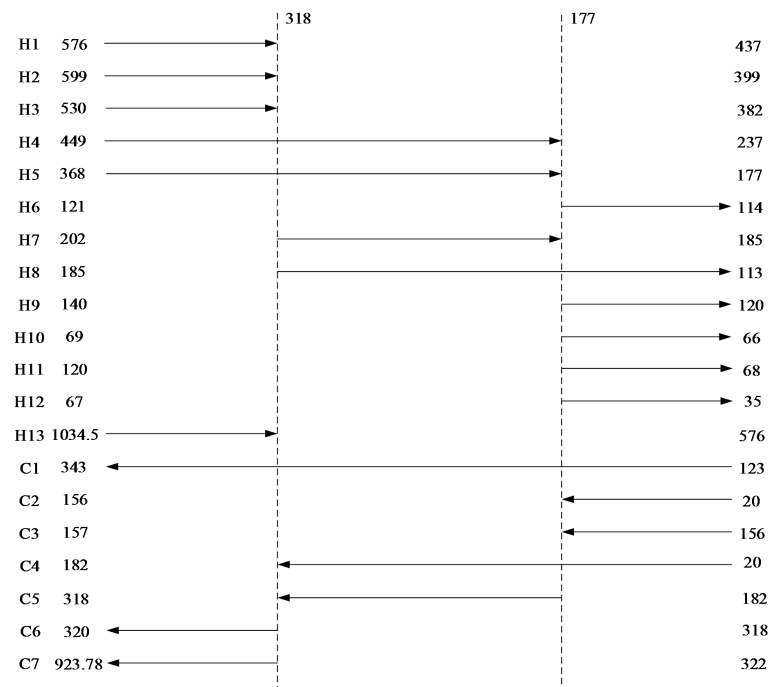


Figure 8. 20sp based on temperature level interval model
图 8. 20sp 基于温位区间的模型

由于 20sp 算例较大, 各个流股的温度跨度区间差别较大, 较多流股只位于单个温位区间, 只有少数几个流股跨越多个区间。为保证求解区域足够, 对于流股位于各个区间的分段上都分配 10 个节点。对比节点非结构, 对每股流股均布置 10 个节点, 单步迭代的计算时间有稍许增加。但 20sp 算例中, 被限制节点匹配方式的流股有热流股 H6, H9, H10, H11, H12 和冷流股 C6, C7, 这些流股在节点非结构模型中会生成大量的不可行匹配结构, 基于温位区间的换热网络模型的优化效率仍大大优于节点非结构模型。改进后的模型在算例越大, 包含的温位区间跨度小的流股越多, 其对比节点非结构模型的优势就越大。采用基于温位区间的换热网络模型优化 20sp 算例所得的最终结果为 1,400,019 \$/year, 其换热网络结构示意图如图 9 所示, 相比节点非结构模型优化后结果 1,418,981 \$/year, 减少了 18,962 \$/year。基于温位区间的换热网络模型优化结果明显更优。

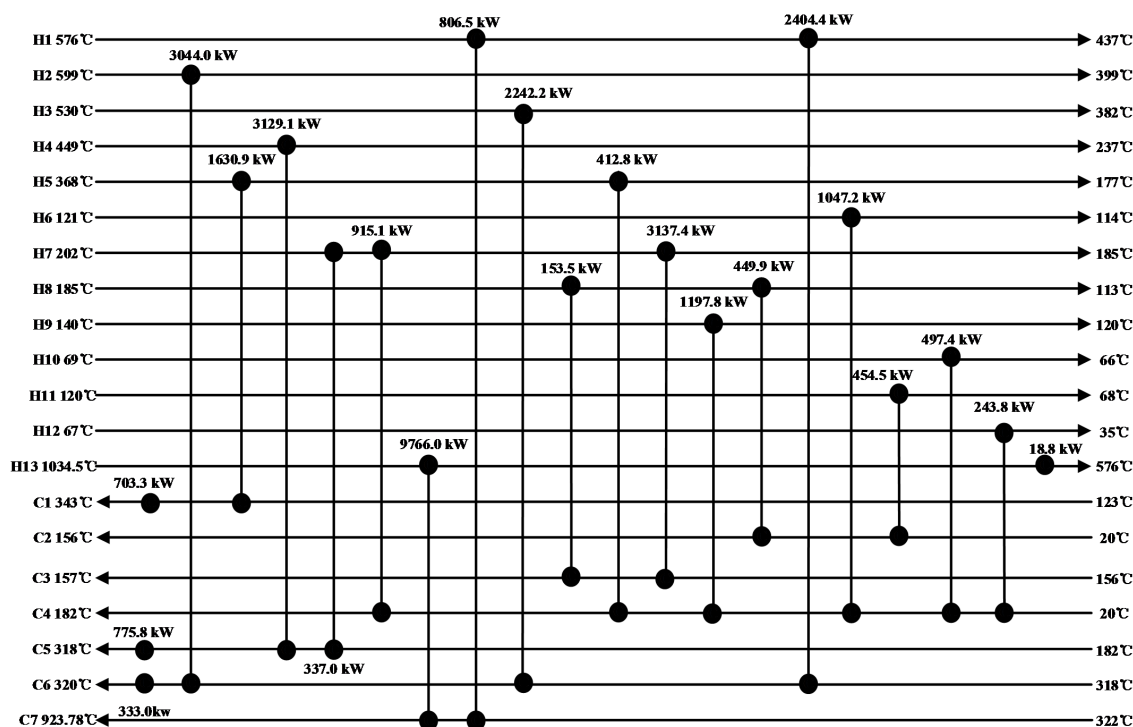


Figure 9. The optimized result of 20sp example

图 9. 20sp 算例优化后结果

4. 结论

1) 节点非结构模型以流股节点自由匹配的方式, 使得其求解空间相比分级超结构模型更大, 但也因此会出现生成的换热单元温度交叉, 低温度的热流股向高温度的冷流股传热这样不符合热力学原理的换热单元使得求解空间也包含了大量的不可行匹配结构, 并造成流股节点的浪费, 降低了模型的优化效率。

2) 改进的基于温位区间的换热网络模型, 将模型空间分为高温位, 中温位和低温位区间, 基于流股的进出口温度确定三个温位区间的界限温度, 流股节点数按照各流股基于温位区间分段分配, 并禁止热流股低温位节点和冷流股高温位节点跨区间进行匹配。

3) 采用 RWCE 算法优化改进后的模型, 用 10sp 算例和 20sp 算例验证, 基于温位区间的换热网络模型大大减少了温度交叉换热单元出现可能, 相比与节点非结构模型, 其优化后结果更优, 优化的效率更高, 并且在算例越大, 包含的温位区间跨度小的流股越多时, 其对比节点非结构模型的优势就越大。

基金项目

国家自然科学基金(21978171)。

参考文献

- [1] Furman, K.C. and Sahinidis, N.V. (2002) A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **41**, 2335-2370.
<https://doi.org/10.1021/ie010389e>
- [2] Linnhoff, B. and Hindmarsh, E. (1983) The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks. *Chemical Engineering Science*, **38**, 745-763. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(83\)80185-7](https://doi.org/10.1016/0009-2509(83)80185-7)
- [3] Shethna, H.K., Jezowski, J.M. and Castillo, F.L. (2000) A New Methodology for Simultaneous Optimization of Capital and Operating Cost Targets in Heat Exchanger Network Design. *Applied Thermal Engineering*, **20**, 1577-1587.
[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(00\)00024-7](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(00)00024-7)
- [4] 胡向柏, 崔国民, 涂惟民, 等. 复杂换热网络 MINLP 中的非线性特性分析. *工程热物理学报*, 2012, 33(2): 285-287.
- [5] 朱玉双, 崔国民. 采用单元进化限制策略的 RWCE 算法优化换热网络[J]. *计算物理*, 2017, 34(5): 593-602.
- [6] Yee, T.F. and Grossmann, I.E. (1990) Simultaneous Optimization Models for Heat Integration (II): Heat Exchanger Network Synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, **14**, 1165-1184.
[https://doi.org/10.1016/0098-1354\(90\)85010-8](https://doi.org/10.1016/0098-1354(90)85010-8)
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 何巧乐, 崔国民, 许海珠, 等. 文化基因粒子群算法在换热网络连续变量全局优化中的应用[J]. *石油化工*, 2014, 43(1): 37-45.
- [10] Xiao, Y., Cui, G.M., Peng, F.Y., *et al.* (2015) An Improved Particle Swarm Optimization for Precocious Phenomenon in Nonlinear System Engineering. *Chinese Journal Computational Physics*, **32**, 693-700.
- [11] 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.