

# 一种流股分流动态调节的换热网络优化策略

汪豪, 崔国民, 徐玥

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 现有的节点非结构模型(Node-wise non-structural superstructure, NW-NSS)在优化换热网络时需要预设固定的节点分流数量,难以满足结构进化过程对于求解空间和计算效率的需求,易造成换热单元生成空间受限,影响算法全局优化性能。本文提出一种流股分流动态调节策略,该策略基于实时结构的整型变量分布信息,动态增加结构进化所需的必要分流并减少无效结构对优化的阻碍,辅助算法以更高的效率跳出局部极值,提升优化质量。将策略应用于16SP、20SP算例,分别得到年综合费用为6 653 940和1 711 886 \$/a的最优换热网络结构,较文献最优结果降低了3 140和3 202 \$/a。

**关键词:** 换热网络优化;节点非结构模型;分流数量;优化质量;动态调节

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.03.010

[引用本文格式]汪豪,崔国民,徐玥.一种流股分流动态调节的换热网络优化策略[J].热能动力工程,2023,38(3):74-81.  
WANG Hao, CUI Guo-min, XU Yue. A heat exchanger network optimization strategy for dynamically adjusting the number of split flow[J].  
Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3):74-81.

## A Heat Exchanger Network Optimization Strategy for Dynamically Adjusting the Number of Split Flow

WANG Hao, CUI Guo-min, XU Yue

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,  
Shanghai, China, Post Code:200093)

**Abstract:** The existing node-wise non-structural superstructure (NW-NSS) needs to set fixed number of split flow for all nodes in advance when optimizing heat exchanger networks, which is difficult to meet the needs of solving space and computational efficiency in the process of structural evolution, tending to limit the generation space of heat exchanger unit and reduce the global optimization quality of algorithm. Therefore, this paper proposes an optimal strategy to dynamically adjust the number of split flow for each node. Based on the distribution information of integral variables of real-time structure, this strategy dynamically increases the necessary split flow required by structural evolution and reduces the obstacle of ineffective structural evolution to optimization, improves the efficiency of the algorithm to jump out of the local search scope, and enhances the quality of optimization results. The strategy is applied to 16SP and 20SP cases, and the optimal heat exchanger network structures with the overall annual costs of 6 653 940 \$/a and 1 711 886 \$/a are obtained respectively. Compared with the optimal results in the literature, the results of this paper are reduced by 3 140 \$/a and 3 202 \$/a.

收稿日期:2022-03-04; 修订日期:2022-06-11

基金项目:国家自然科学基金(21978171)

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

作者简介:汪豪(1996-),男,上海理工大学硕士研究生.

通讯作者:崔国民(1969-),男,上海理工大学教授.

**Key words:** heat exchanger network optimization, node-wise non-structural superstructure (NW-NSS), number of split flow, quality of optimization results, dynamic adjustment

## 引言

换热网络是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能源回收量,有利于提高企业经济效益。换热网络优化属于混合整数非线性规划问题<sup>[1]</sup>。以遗传算法(GA)<sup>[2]</sup>、粒子群算法(PSO)<sup>[3]</sup>、微分进化算法(DE)<sup>[4]</sup>和强制进化随机游走算法(RWCE)<sup>[5]</sup>等为代表的启发式方法,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。随着网络规模的增大以及模型复杂程度的提升,启发式方法的搜索易出现过早收敛。

对于有分流换热网络优化问题,分流结构产生的变量维数增加是阻碍算法优化效能提升的主要原因,如何提高有分流换热网络的优化质量一直是学者们的研究热点。文献[6]采用双层优化算法优化网络,外层借由GA算法对于相异个体结构的高交互性获取较优整型变量分布,内层则采用PSO算法优化分流比等连续型变量,使结构得到深度优化。文献[7]通过限制分级超结构模型的最大分流级数和分流股数降低网络模型复杂程度,有效提升了寻优效率。文献[8]在个体优化过程中强制生成分流结构的换热单元,利用结构摄动以及换热单元竞争作用促进结构变异,增强算法在优化后期的寻优能力。文献[9]分析节点非结构模型对于节点数量和分流数量的定式设置难以满足流股对于分流的需求,提出一种基于流股热容流率的节点参数个性化配置方案,使模型空间进行自适应调节,提高了RWCE算法的优化效率。上述方法采用的参数个性化配置,在应对不同规模的网络问题时具有一定普适性,但仍需要预设模型空间,属于参数定式设置范畴,而换热网络结构进化呈现为动态变化过程。目前,从结构实时进化角度考虑模型参数更新的研究仍较为缺乏。

本文探究节点分流数量对NW-NSS模型优化质量和优化效率的影响,提出节点分流数量的动态调节策略,策略通过周期性识别个体结构进化过程中的整型变量分布,针对各节点的分流数量上限进行

适应性增减,在满足结构进化所需求解空间的同时提高模型计算效率,实现结构变异能力与优化质量的提升。

## 1 换热网络数学模型和优化算法

分流节点非结构模型<sup>[8]</sup>采用节点之间相互连接的方式形成换热连接,具有更好的匹配自由度和灵活性。其中,流股节点数量 $NGD$ ,节点分流数量 $NF$ 直接影响模型的变量维数,需根据算例优化需求进行设置。

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所示节点非结构模型的流股设置了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,两个互连的实心节点代表一项换热连接,H,C分别代表热流股和冷流股。

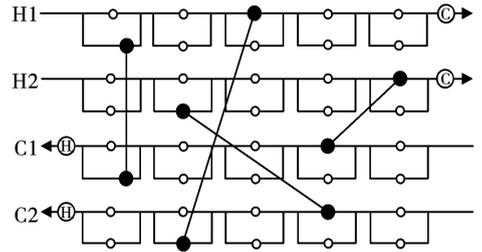


图1 分流节点非结构模型

Fig. 1 Node-wise non-structural model with stream split

换热网络优化以年综合费用(Total Annual Cost, TAC)最小为目标函数,由换热单元的投资费用以及运行费用组成。

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

式中: $F_C$ —换热单元面积费用系数; $A$ —换热单元面积,  $m^2$ ;  $\beta$ —面积费用指数; $Q$ —换热单元的换热量, kW;  $C$ —公用工程运行费用系数;  $C_E$ —固定投资费

用; $Z$ —换热单元存在与否的 1/0 变量;下标 CU, HU—冷公用工程、热公用工程; $i, j$ —热流体序号、冷流体序号; $k, m$ —节点序号、分流序号。

本文采用强制进化随机游走算法<sup>[5]</sup>(RWCE)优化换热网络,该算法通过新换热单元的随机生成、换热单元负荷的随机放缩和低于最小换热量阈值时的换热单元消去过程,进行网络结构的更新和整型变量以及连续型变量的同步优化,在结果选择阶段可按照一定概率  $\delta$  强制接受费用较高的差解,进而获得全局搜索能力。

## 2 节点分流数量的影响分析

在使用 RWCE 算法优化 NW-NSS 模型的换热网络前,需要分别对热、冷流股预设固定的节点分流数量  $NF_H, NF_C$ ,这种定式设置方法可根据算例实际优化情况提前进行参数调整,具有操作便捷的优点。通过增加  $NF_H$  与  $NF_C$  的预设值可获得充足的节点匹配空间,但当分流数量设置过多时难免产生无效分流结构,制约结构变异能力,对搜索全局最优解造成阻碍。

16SP 算例<sup>[10]</sup>可较好地分析上述问题,该算例根据提取的冷热流股数据及采用的公用工程组成换热网络。设置 RWCE 算法单次迭代时的换热量最大游走步长 500 kW,分流比最大游走步长 0.03,接受差解概率  $\delta = 0.01, NGD_H = NGD_C = 6$ 。图 2 为 3 种  $NF$  取值下的 TAC 变化曲线。

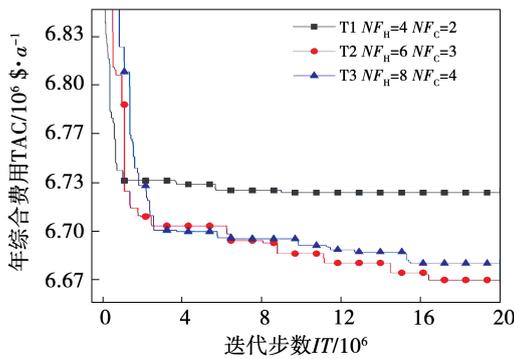


图 2 不同  $NF$  取值时 16SP 算例 TAC 变化曲线  
Fig. 2 TAC change curves of 16SP with different values of  $NF_H$  and  $NF_C$

图中, T1 曲线代表的模型求解空间相对较小,算法在优化前期快速搜索到了较为稳定的结构,然

而该曲线后续费用下降幅度较小,在迭代至 900 万步时费用下降停滞,且最终未能跳出该局部极值。T2 曲线增设节点分流上限扩展了换热单元连接空间,使算法可搜索到更多的结构进化方向,该曲线费用呈现连续下降态势,最终获得 3 组  $NF$  取值中最好的优化结果。T3 较 T2 曲线具备更大的模型求解空间,但该曲线在优化前期费用下降速度较慢,并且截至迭代周期结束时也未能获得优于 T2 曲线的结果,优化质量与寻优效率均低于 T2。图 3、图 4 和图 5 分别为上述曲线对应的最终优化结果。

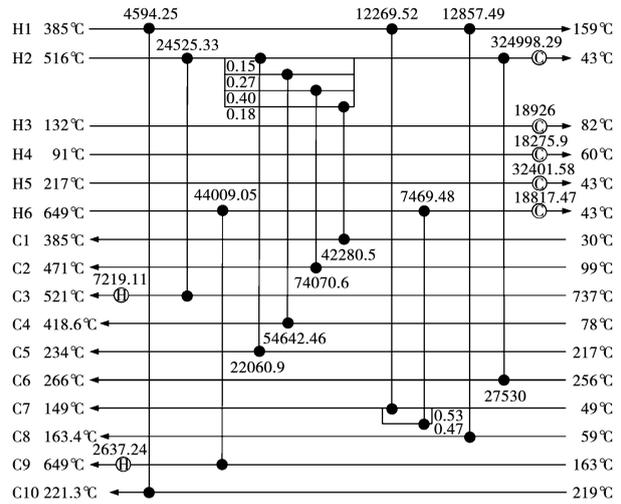


图 3 T1 曲线优化结构, TAC = 6 724 985 \$/a  
Fig. 3 The optimal structure of T1,  
TAC = 6 724 985 \$/a

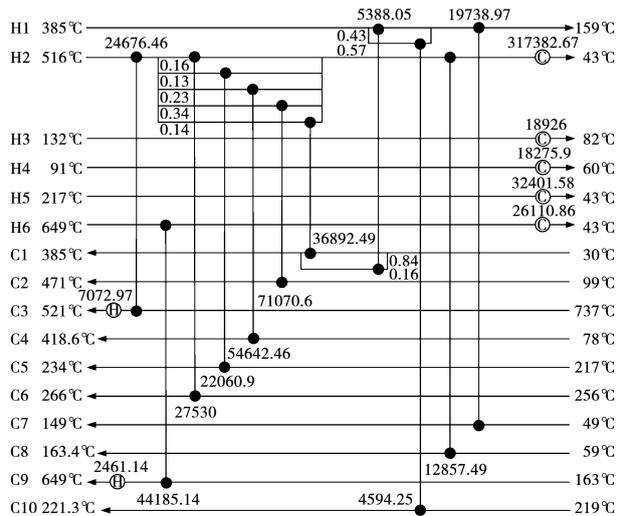


图 4 T2 曲线优化结构, TAC = 6 665 818 \$/a  
Fig. 4 The optimal structure of T2,  
TAC = 6 665 818 \$/a

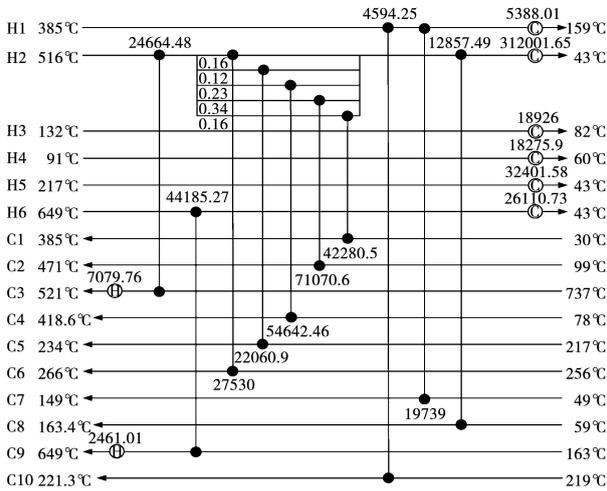


图5 T3 曲线优化结构, TAC = 6 677 070 \$/a

Fig. 5 The optimal structure of T3,

TAC = 6 677 070 \$/a

结合优化结构以及 16SP 算例的大量测试结果可知,该算例在热流股 H2 上形成分支数为 5 的分流结构时, H2 流股的高温位可得到较为充分的利用,有利于网络结构通过减少换热面积降低投资费用。在该结构特性下,当  $NF_H = 4$  时 T1 曲线显然无法满足形成上述分流结构的模型空间,各节点分支设置的不充足造成模型求解域无法满足结构进化需求,同时也导致后续新生单元无法与已存单元在分流结构上进行优胜劣汰的竞争,制约了结构变异能力,使算法难以跳出局部极值。

对于 T3 曲线,尽管节点分流数量大幅增加,但最终优化结构内却未能产生分支数更多的分流结构。这是由于结构特性取决于具体流股的物性参数,并非所有节点在优化中都对分流数量有较大的需求。 $NF_H$  的增加是所有节点分流数量的统一增加,不仅造成了模型变量维数呈指数型增长<sup>[11]</sup>,增加算法计算负担,而且过于充足的分流数量也易造成换热单元在相同节点区间内产生大量重复生成-消去的无效进化过程,降低算法在优化前期获取初始优质结构的速度,并影响后期寻优效率和优化质量。

在统计的迭代时期内, T2 曲线的优化结果最佳,然而该曲线也存在不必要分流降低优化效率和费用变化的长期停滞现象。

从上述分析可知,节点分流数量  $NF$  的设置应当既能满足节点在优化过程中对分流的生成需要,又要保障算法不会因网络中分流数量过多而降低寻

优效率。采用定式设置参数的方法仍存在一定弊端,难以较好地协调求解空间和计算效率的需求。RWCE 算法的优化结果取决于多参数组合后的共同作用,只有根据具体结构进化需求,实时调整节点分流数量才能更好地发挥算法优化效能。

### 3 节点分流动态调节策略

本文在定式设置  $NF$  取值的基础上,在结构优化过程中对所有主节点的分流数量逐个进行动态调节,操作方式为:按照一定周期遍历并记录所有主节点的预设分流数量与连接的换热单元数量,当节点预设分流数量与换热单元数量相同时,判断当前节点分流已经充分匹配,需增设分流结构补足求解空间;当节点预设分流数量多于换热单元数量时,判断节点存在闲置分流,适当减少预设分流数量,降低无效分流对优化的阻碍。

节点分流调节过程如图 6 所示。假设节点预设分流数量  $NF$  取值为 4,此时优化结构存在图 6(a) 的 3 种情况:①号主节点:主节点连接换热单元数量等于  $NF$ ;②号主节点:主节点存在的换热单元数量少于  $NF$ ;③号主节点:主节点未连接换热单元。

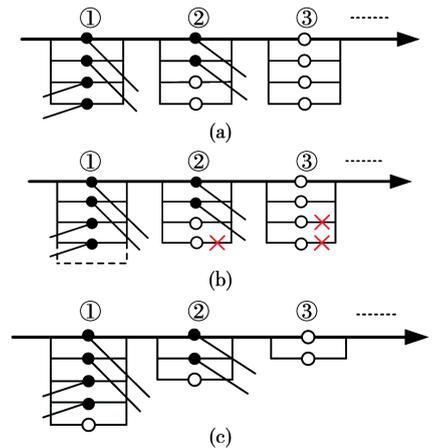


图6 分流调节操作过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of stream split adjusting and operating process

图 6(b) 中 × 表示消去分流,虚线表示待增加分流。对于情况①,分流的充分连接造成该节点无法继续连接换热单元,为补充必要模型空间,该主节点需增设分流结构,考虑到结构进化伴随换热单元在分流结构上的消去,因此新增分流不必过多,仅增设一股保障后续单元生成空间;情况②的主节点可进

一步连接换热单元进行换热关系的更优选择,为保证在求解空间充足的同时避免分流过多阻碍优选进程,该节点的预设分流数量调整至较换热单元数量多一股;对于情况③,由于整型变量分布的转移需要换热单元在主节点间的竞争作用推动,为此这类节点也应当最低限度保留分流空间,将 NF 取值调整为 2 较为适宜。最终结构调整如图 6(c)。

为保证节点分流随实时结构进化动态更新,根据迭代步数  $IT$  按照一定周期  $IT_{per}$  在 RWCE 算法的换热单元负荷游走阶段与新单元生成阶段之间实施上述操作。操作期间记录所有热流主节点和冷流主节点的预设分流数量  $PreNF_{H,i,NGDH}$  和  $PreNF_{C,j,NGDC}$  以及节点连接换热单元数量  $NEX_{H,i,NGDH}$  和  $NEX_{C,j,NGDC}$ , 分别以式(2)、式(3)形式储存,通过式(4)、式(5)更新节点预设分流上限,当调节操作初次使用时,  $PreNF_{H,i,NGDH}, PreNF_{C,j,NGDC}$  分别等于优化前定式预设的  $NF_H, NF_C$ 。图 7 为节点分流动态调节策略 (AS-RWCE) 的优化流程。

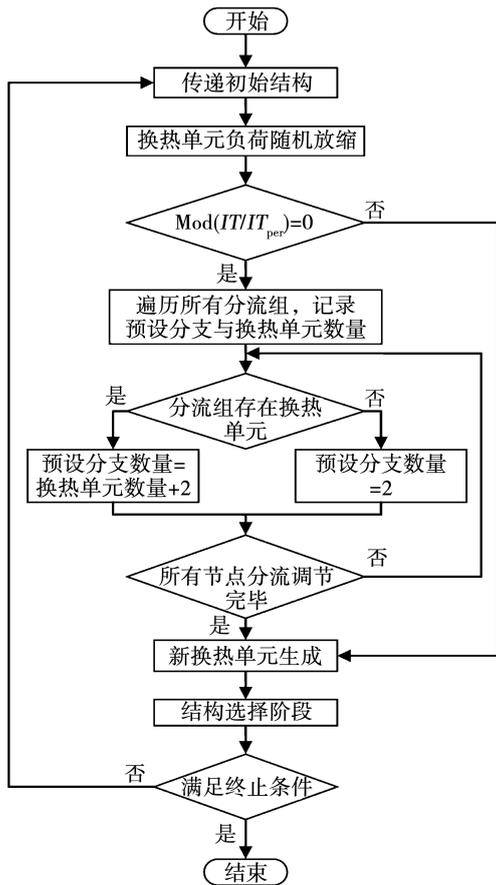


图 7 分流调节策略流程图

Fig. 7 Flow chart of AS-RWCE

$$PreNF = \begin{pmatrix} PreNF_{H,i,NGDH} \\ PreNF_{C,j,NGDC} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$NEX = \begin{pmatrix} NEX_{H,i,NGDH} \\ NEX_{C,j,NGDC} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$PreNF_{H,i,NGDH} = \begin{cases} 2, NEX_{H,i,NGDH} = 0 \\ NEX_{H,i,NGDH} + 1, \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$PreNF_{C,j,NGDC} = \begin{cases} 2, \text{if } NEX_{C,j,NGDC} = 0 \\ NEX_{C,j,NGDC} + 1, \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

## 4 优化性能分析

### 4.1 算例 1

算例 1 采用 16SP 算例,保持优化参数与第 2 节相同。首先将分流调节策略高频次的引入 T1 曲线 900 万步开始的优化停滞期,验证策略跳出局部极值的能力。从图 8 记录的 TAC 变化曲线可以看到,应用策略 100 万步计算后原本处于停滞状态的结构费用再次降低,表明优化结构成功跳出局部极值,结构变异能力明显提升。该曲线后续保持连续下降态势,在迭代期内得到 TAC 为 6 660 843 \$/a 的优化结果。

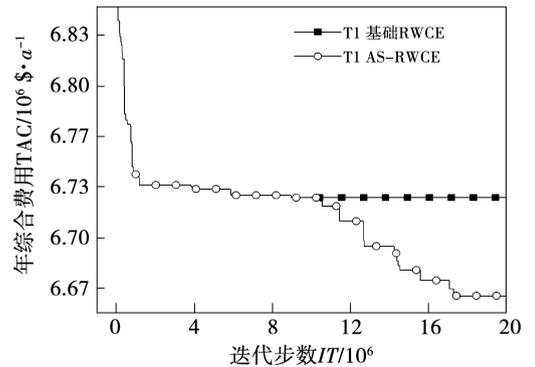


图 8 TAC 变化曲线对比

Fig. 8 Comparison of TAC decline curve

相较于图 3 进化前的结构,图 9 结构内热流 H1 和 H6 的部分换热连接匹配关系更新使得流股负荷配置和连续型变量分布得到进一步优化,原本位于 H2 流股末端负荷为 27 530 kW 的换热连接也被转移至前端的分流结构,使该分流结构的分支数量增加至 5 股,进化为 16SP 算例的优势结构。该结构进化表明,AS-RWCE 通过补充进化所需的模型空间可

促进结构有效进化,获取更优整型变量分布。费用的连续降低验证了 AS-RWCE 可持续发掘结构进化潜力,具备较好的跳出局部极值能力。

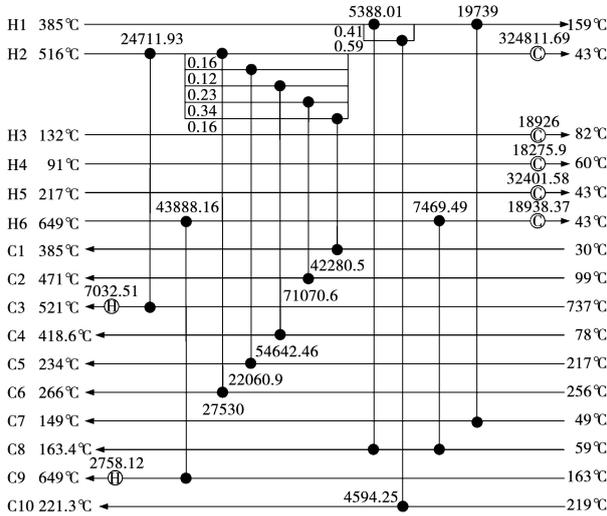


图 9 16SP 优化结果, TAC = 6 660 843 \$/a

Fig. 9 The optimal structure of 16SP,

TAC = 6 660 843 \$/a

为考察 AS-RWCE 的全局寻优质量,将分流动态调节策略应用于 16SP 算例的全程优化。 $IT_{per}$  为影响分流调节频次的关键参数,图 10 列举了 3 组较为典型的  $IT_{per}$  对应 TAC 变化曲线进行分析。其余参数设置为:节点数量  $NGD_H = NGD_C = 6$ ,节点预设分流数量  $NF_H = 6, NF_C = 3$ ,算法单次迭代时的换热量最大游走步长 500 kW,分流比最大游走步长 0.03,接受差解概率  $\delta = 0.01$ 。

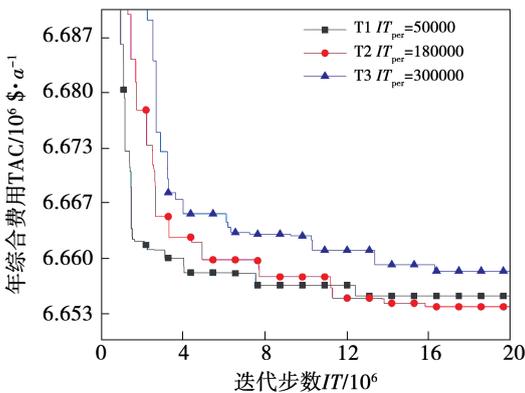


图 10 不同  $IT_{per}$  取值时 16SP 算例 TAC 变化曲线

Fig. 10 TAC change curves of 16 SP with different values of  $IT_{per}$

图 10 中, T1 为  $IT_{per}$  取 5 万步时的费用曲线,该曲线前期费用下降较快,迭代结束费用为 6 655 241 \$/a; T2 为  $IT_{per}$  取 18 万步的费用曲线,相较 T1,该曲线前期费用下降相对较慢,但中后期的进化能力更强,费用降至 6 653 940 \$/a。 $IT_{per}$  取 30 万步时的 T3 曲线在优化全程的寻优效率相对降低,尽管保持了持续下降趋势,但最终费用 6 658 271 \$/a 低于 T1, T2 曲线优化结果。

$IT_{per}$  取值越小,个体结构在前期的寻优速度越快。由于优化前期是结构进化方向最为丰富的时期,此时调整节点分流数量有助于减少无效进化过程,促使算法快速获取较优整型变量分布。但节点分流调节过于频繁也存在不利影响,可以看到 T1 曲线在后期的优化质量不及 T2,原因在于结构费用降低也需要连续型变量配置优化,当结构调节过于频繁时,部分换热单元尚未充分优化,即在与后续新生单元的竞争中取代,造成连续型变量无法得到深度优化,进而错失更优解。

算例 1 最合适的  $IT_{per}$  取值为 18 万,可较为高效地获取前期优质结构,并保持良好的结构持续进化能力,充分协调 RWCE 算法优化的主导作用与改进策略的辅助作用,提升算法全局搜索能力。最终优化结构如图 11 所示。与目前文献记录的最低年综合费用对比如表 1 和表 2 所示。

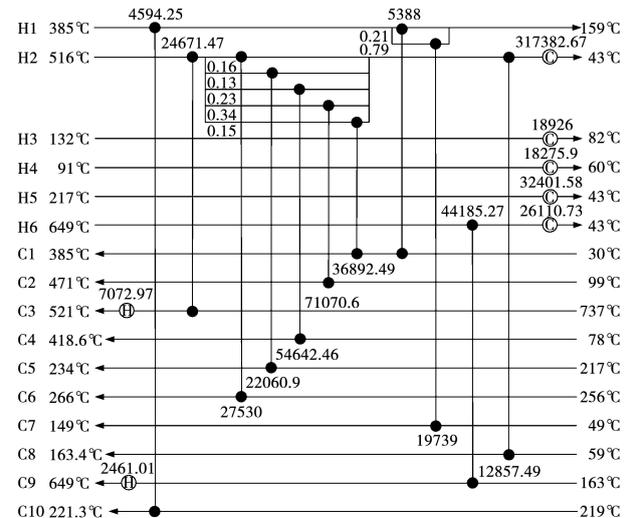


图 11 16SP 优化结果, TAC = 6 653 940 \$/a

Fig. 11 The optimal structure of 16SP,

TAC = 6 653 940 \$/a

表 1 16SP 结果对比

Tab.1 Comparison results of 16SP

文献	换热器数量	热公用工程/ kW	冷公用工程/ kW	年综合费用/ \$/a
[12]	11	9 498	413 075	6 712 551
[13]	11	10 444	414 014	6 692 513
[10]	11	9 710	413 272	6 657 080
本文	11	9 534	413 097	6 653 940

表 2 20SP 相关文献结果

Tab.2 Comparison results of 20SP

文献	换热器数量	热公用工程/ kW	冷公用工程/ kW	年综合费用/ \$/a
[15]	13	9 156	5 006	1 726 399
[16]	14	8 115	4 540	1 725 295
[10]	14	8 528	4 378	1 715 088
本文	13	8 635	4 485	1 711 886

4.2 算例 2

20SP 算例由 XIAO Wu 等人<sup>[14]</sup>提出,作为大规模换热网络算例,后续得到了广泛的研究。由于算例规模较大,若采用定式设置节点分流数量难以避免大量无效分流,降低求解效率。文献[15]采用松弛操作缓解固定投资费用对换热单元生成的限制作用,灵活调度非结构模型的换热单元优选作用扩展结构进化方向,得到 1 726 399 \$/a 的优化结果;文献[16]采用基于分级超结构模型的双层算法优化换热网络,通过个体解的变异保证种群多样性,费用降低至 1 725 295 \$/a;文献[10]基于遗传算法,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 1 715 088 \$/a 的最优结果。

设置 AS-RWCE 参数:  $NGD_H = NGD_C = 10$ ,  $NF_H = NF_C = 3$ , 换热量游走步长 100 kW, 分流比游走步长 0.02, 接受差解概率  $\delta = 0.01$ 。在多组策略实施周期  $IT_{per}$  的优化结果中,  $IT_{per}$  取 10 万步时得到了  $TAC = 1 711 886$  \$/a 的结构(图 12), 较文献[10]最优结果降低 3 202 \$/a, 进一步验证了改进算法的全局寻优能力。

5 结 论

(1) RWCE 算法采用定式设置节点分流数量  $NF$ , 易造成  $NF$  取值过小时限制模型求解空间, 过大则易降低计算效率, 影响优化质量。

(2) 建立节点分流的动态调节策略, 通过周期性识别节点连接的换热单元数量并逐个调整节点分流上限, 减少不必要分流结构的同时补充结构变异所需的模型空间。将上述操作引入算例优化停滞期, 验证了策略可引导优势结构的产生, 具备良好的跳出局部极值能力, 且减少了获取优质结果所需迭代计算。

(3) 根据算例实际优化情况选择合适的策略实施周期  $IT_{per}$  可充分发挥策略全局寻优效能。将 AS-RWCE 应用于 16SP, 20SP 算例, 所得最终结构费用均优于目前文献最优结果, 优化质量和优化效率均优于基础 RWCE 算法。

参考文献:

[1] FLOUDAS C A, GROSSMANN I E. Automatic generation of multi-period heat exchanger network configuration [J]. Computers & Chemical Engineering, 1987, 11(2): 123 - 142.

[2] GHANIZADEH S, FAZLI M S. Application of genetic algorithm on heat exchanger network optimization [J]. Research Journal of Applied Science, Engineering & Technology, 2013, 6(18): 3378 - 3383.

[3] 李帅龙, 崔国民, 肖媛. 一种多子群协同进化的粒子群算法同步综合换热网络简[J]. 热能动力工程, 2017, 32(4): 9.

LI Shuai-long, CUI Guo-min, XIAO Yuan. A multi-subpopulation co-evolutionary particle swarm optimization algorithm for simultaneous synthesis of heat exchanger networks [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(4): 9.

[4] 陈上, 崔国民, 彭富裕, 等. 采用动态更新策略的微分进化算法优化换热网络[J]. 热能动力工程, 2015, 30(4): 6.

CHEN Shang, CUI Guo-min, PENG Fu-yu, et al. Optimization of

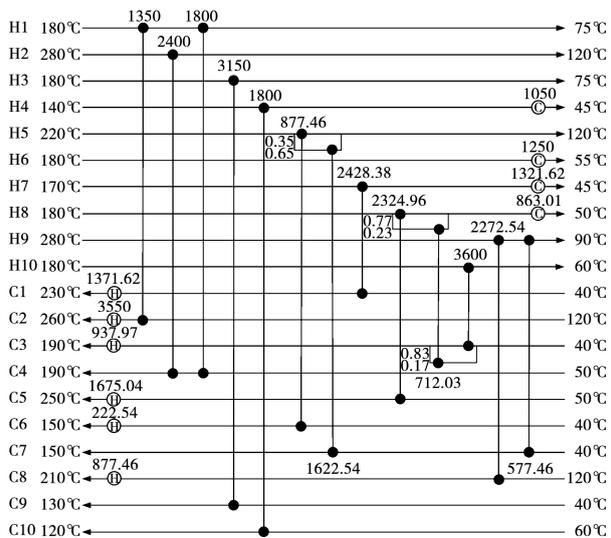


图 12 20SP 优化结果,  $TAC = 1 711 886$  \$/a

Fig. 12 The optimal structure of 20SP,

$TAC = 1 711 886$  \$/a

- the heat exchanger network by differential evolution algorithm based on dynamic update strategy [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2015, 30(4):6.
- [5] 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.
- [6] ZHAO Liang, YIN Hong-chao, HUO Zhao-yi. Simultaneous synthesis of heat exchanger network with the non-isothermal mixing [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2013(2):9548 – 9557.
- [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):6.  
HUO Zhao-yi, YIN Hong-chao, ZHAO liang. Simultaneous synthesis of heat exchanger network with stream splits [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2013, 53(1):6.
- [8] 徐 玥,崔国民. 应用结构摄动策略的有分流换热网络优化 [J]. *计算物理*, 2020, 37(6):11.  
XU Yue, CUI Guo-min. Heat exchanger network optimization using structural perturbation strategy [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2020, 37(6):11.
- [9] 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):9.  
XU Yue, CUI Guo-min. Analyzing the optimization performance of heat exchanger network synthesis based on the nodes' adjustment strategy [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(7):9.
- [10] RATHJENS M, FIEG G. A novel hybrid strategy for cost-optimal heat exchanger network synthesis suited for large-scale problems [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 167:114771.
- [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]. 上海:上海理工大学, 2018.  
CHEN Jia-xing. Superstructure model and global optimization for simultaneous synthesis of heat exchanger networks [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2018.
- [12] XIAO Y, SUN T, CUI G M. Enhancing strategy promoted by large step length for the structure optimization of heat exchanger networks [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020:115199.
- [13] PAVAO L V, COSTA C, RAVAGNANI M A S S. An enhanced stage-wise superstructure for heat exchanger networks synthesis with new options for heaters and coolers placement [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(7):2560 – 2573.
- [14] XIAO Wu, DONG Hong-guang, LI Xin-qiang, et al. Synthesis of large-scale multistream heat exchanger networks based on stream pseudo temperature [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2006, 14(5):10.
- [15] XU Yue, CUI Guo-min, DENG Wei-dong, et al. Relaxation strategy for heat exchanger network synthesis with fixed capital cost [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 152:184 – 195.
- [16] PAVAO L V, COSTA C, 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.

(姜雪梅 编辑)