

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20160581

基于自适应竞争群优化算法的无分流换热网络综合

陈帅, 罗娜

(华东理工大学化工过程先进控制与优化技术教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 换热网络模型具有非凸和非线性的特性, 对于大规模超结构优化问题, 采用经典的智能算法优化效率低, 容易陷入局部最优值。以年综合费用为目标函数, 基于自适应竞争群优化算法对无分流分级超结构换热网络模型进行优化。该方法采用对粒子平均位置的递减学习, 通过自适应调节速度权重提高换热网络结构的全局优化能力和局部优化能力。通过两个典型算例分析表明, 该方法相比量子粒子群算法大幅减少了模型调用次数, 缩短了运行时间, 并且找到了更好的优化结果。

关键词: 换热网络; 优化; 自适应; 竞争群优化算法; 混合整数非线性

中图分类号: TQ 021.8

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 11—4716—08

Adaptive competitive swarm optimization for heat exchanger networks without split streams

CHEN Shuai, LUO Na

(Key Laboratory of Advanced Control and Optimization for Chemical Processes, Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: For large-scale super-structure optimization on non-convex and non-linear heat exchanger network, conventional intelligent optimization algorithms have poor efficiency and easily fall into local optima. Adaptive competitive swarm optimization algorithm was proposed to optimize no-split stream heat exchanger networks with targeted total annual cost. This method improved abilities of both global and local optimization by attenuated learning of average particle positions and self-adaptive adjusting on weight average of speed. Simulation on two typical cases showed that the proposed algorithm sharply reduced cycles of model being used, shortened optimization time and achieved better optimization results in comparison with quantum particle swarm algorithm.

Key words: heat exchanger network; optimization; adaptive; competitive swarm optimization; MINLP

引 言

换热网络作为过程工业的重要部分, 实现换热网络流股间的最佳换热匹配, 能有效回收热量, 减少能量的浪费。Linnhoff 等^[1]于 1978 年通过夹点分析法求解换热网络。经过多年的发展, 1990 年 Yee 等^[2]提出了分级超结构概念, 该概念的提出使得换

热网络优化有了新的突破。

近年来, 如何有效求解换热网络综合, 减少能量的消耗, 一直都是研究的重点。换热网络存在连续和离散变量, Athier 等^[3]采用分层求解的方式来解决。以二次规划法求解 NLP 问题, 再通过模拟退火算法对温度及热负荷等连续变量进行优化, 解决了连续变量和离散变量同时存在的难题。Zamora

2016-05-03 收到初稿, 2016-08-03 收到修改稿。

联系人: 罗娜。第一作者: 陈帅(1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403140, 21406064); 上海市自然科学基金项目(13ZR1411500, 14ZR1410500)。

Received date: 2016-05-03.

Corresponding author: LUO Na, naluo@ecust.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (61403140, 21406064) and the Natural Science Foundation of Shanghai(13ZR1411500, 14ZR1410500).

等^[4]采用分支界定法分析无分流换热网络变量边界关系改进估计函数, 通过外围逼近法优化换热网络结构, 该方法计算简单易行。Dipama 等^[5]提出设置无分流换热网络匹配矩阵, 减少了优化变量个数, 通过遗传算法对无分流换热网络综合进行优化, 提高了优化效率。Bjork 等^[6]提出设定热容流率和传热系数为定值时, 换热网络进行等温混合的超结构模型, 该方法解决了大规模换热网络优化问题。Khorasany 等^[7]将和声算法应用于换热网络流股匹配选择, 通过二次规划法换热量和分流比进行连续优化, 为双层算法求解问题提供了新方法。夏涛等^[8]采用粒子群算法求解速度快的特点, 将约束条件和投资费用同时考虑在无分流换热网络模型中进行求解, 有效处理了换热约束问题。Soltani 等^[9]采用带压力降的遗传算法结合线性规划法优化无分流换热网络, 减少了模型的复杂度。霍兆义等^[10]提出遗传算法进行流股二进制编码优化换热网络结构, 通过改进的粒子群算法优化热负荷和分流比等连续变量的双层算法。赵亮等^[11]以遗传算法的优化特点对换热网络流股进行二进制编码处理, 通过双层粒子群算法对无分流换热网络进行优化。无分流换热网络结构相比有分流换热网络结构简单, 对于求解变量大规模换热网络, 双层算法解决有分流换热网络所需的成本较高。

无分流换热网络结构相比于有分流换热网络结构不考虑流股的分流比, 减少了需要优化的变量数目, 使优化的换热网络模型简化。双层算法优化时, 使目标函数调用次数大大增加, 对于大规模优化问题, 计算效率不高。本文以无分流换热网络年综合费用评价算法的优化效果, 采用单层自适应竞争群优化算法 (adaptive competitive swarm optimization, ACSO) 对无分流换热网络进行求解, 以期提高换热网络问题求解的优化效率, 得到更好的优化结果。

1 无分流换热网络数学模型

1.1 分级超结构模型

无分流超结构换热网络模型, 如图1所示。该模型被划分为两级, 每一级中有 $N_H \times N_C$ 种可能匹配, 其中 N_H 代表模型热流股个数, N_C 代表模型冷流股个数。通过冷热流股间的匹配, 回收流股间的热量, 对于未达到目标温度的冷热流股采用公用工程对流股进行加热或冷却以达到目标值。

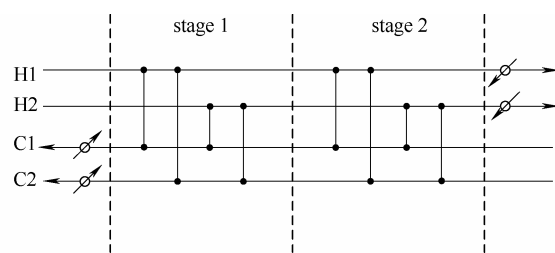


图1 无分流换热网络超结构模型

Fig.1 Large-scale heat exchanger network no split streams

本文以无分流超结构换热网络的最小年综合费用作为优化目标。换热网络的年综合费用由流股末端加热冷却时产生的公用工程的费用和设备的固定投资费用及流股换热时换热面积的费用组成, 如式(1)所示。

$$\min \left[\sum_i \sum_j \sum_k c_1 z(i, j, k) + \sum_i c_1 z_{cu}(i) + \sum_j c_1 z_{hu}(j) \right] + \left[\sum_i c_2 q_{cu}(i) + \sum_j c_3 q_{hu}(j) \right] + \left\{ \sum_i \sum_j \sum_k c_4 \left[\frac{q(i, j, k)}{U(i, j) LMTD(i, j, k)} \right]^\beta + \sum_i c_4 \left[\frac{q_{cu}(i)}{U_{cu}(i) LMTD_{cu}(i)} \right]^\beta + \sum_j c_4 \left[\frac{q_{hu}(j)}{U_{hu}(j) LMTD_{hu}(j)} \right]^\beta \right\} \quad (1)$$

$$q_{cu}(i) = F(i) [t_{NOK+1}(i) - T_{out}(i)] \quad (2)$$

$$q_{hu}(j) = F(j) [T_{out}(j) - t_1(j)] \quad (3)$$

$$q(i, j, k) = F(i) [t_k(i) - t_{k+1}(i)] \quad (4)$$

式(1)中, 第1部分为换热网络固定投资的费用, c_1 代表换热网络设备固定投资的费用系数, z 代表换热器存在与否的数值; 第2部分为流股末端公用工程产生的费用, c_2 和 c_3 分别为冷热公用工程产生的费用系数; 第3部分为换热网络的换热面积所需费用, c_4 代表换热面积所需的费用系数, i, j, k 分别代表冷热流股的位置和换热网络级数的位置; cu 和 hu 代表冷热公用工程; q 代表换热时的换热量; U 代表换热网络的总传热系数, $LMTD$ 代表流股的对数平均温差, β 代表设备的换热面积指数。式(2)~式(4)分别代表冷公用工程负荷、热公用工程负荷和换热器热负荷。 F 代表流股的热容流率, NOK 代表换热网络的总级数, t 代表换热器的进出口温度。

约束条件

(1) 每条流股的总热平衡

$$[T_{in}(i) - T_{out}(i)]G(i) = \sum_k \sum_j q(i, j, k) + q_{cu}(i) \quad (5)$$

$$[T_{out}(j) - T_{in}(j)]G(j) = \sum_k \sum_i q(i, j, k) + q_{hu}(j) \quad (6)$$

式(5)~式(6)中, $T_{in}(i)$ 、 $T_{in}(j)$ 分别代表热流股及

冷流股的换热网络入口温度； $T_{\text{out}}(i)$ 、 $T_{\text{out}}(j)$ 分别代表热流股及冷流股的换热网络出口温度； $G(i)$ 、 $G(j)$ 分别代表热流股及冷流股的热容流率。

(2) 每级的热平衡

$$G(i)[T(i,k) - T(i,k+1)] = \sum_j q(i,j,k) \quad (7)$$

$$G(j)[T(j,k) - T(j,k+1)] = \sum_i q(i,j,k) \quad (8)$$

式(7)~式(8)中， $T(i,k)$ 、 $T(j,k)$ 分别代表每级冷热流股的入口温度。

(3) 流股温度约束

$$T(i,k) \geq T(i,k+1), T(j,k) \geq T(j,k+1) \quad (9)$$

$$T_{\text{out}}(i) \leq T(i,k) \leq T_{\text{in}}(i), T_{\text{in}}(j) \leq T(j,k) \leq T_{\text{out}}(j) \quad (10)$$

(4) 温差约束

$$\Delta t_{ijk} \geq \Delta T_{\min}, \Delta t_{cui} \geq \Delta T_{\min}, \Delta t_{huj} \geq \Delta T_{\min} \quad (11)$$

$$q(i,j,k) > 0, q_{hu}(j) > 0, q_{cu}(i) > 0 \quad (12)$$

式(11)~式(12)中， Δt_{ijk} 、 Δt_{cui} 、 Δt_{huj} 分别代表换热网络的换热器、冷却器及加热器的换热温差， $\Delta T_{\min}$ 代表换热网络的最小传热温差。 $q(i,j,k)$ 、 $q_{cu}(i)$ 、 $q_{hu}(j)$ 分别代表冷热流股进行匹配换热时的换热量及冷热公用工程负荷。

2 换热网络求解方法

2.1 智能群优化算法

2.1.1 粒子群算法 粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是 Kennedy 等^[12]在 1995 年提出的，通过粒子对当前最优值信息和全局最优值信息进行学习的智能算法。算法对于简单模型求解，具有收敛速度快、结果好的特点。对于速度权重线性递减的粒子，具有更强的局部搜索能力。但对于复杂模型优化，粒子群算法容易过早收敛，陷入局部最优值较难跳出。速度权重递减的粒子群算法 (improved particle swarm optimization, IPSO) 的速度权重如式(13)所示。

$$w = w_{\max} - \frac{k}{\text{iter}_{\max}} \times (w_{\max} - w_{\min}) \quad (13)$$

2.1.2 竞争群优化算法 Jin 等^[13]根据粒子群算法的学习机制于 2015 年提出不带记忆信息学习的竞争群优化算法 (competitive swarm optimization, CSO)。算法在群体间引入竞争机制，将粒子随机等分成两组采用两组间的粒子随机选择竞争，通过目标函数评价使获胜的粒子保留至下一代，失败的粒子通过学习获胜的粒子进行更新传递到下一代。每个粒子等机率的选择竞争方式及不带信息的学习方式，使得陷入局部最优的可能性降低。CSO 的更新

策略如下

$$V_{l,k}(t+1) = R_1(k,t)V_{l,k}(t) + R_2(k,t)[X_{w,k}(t) - X_{l,k}(t)] + \phi R_3(k,t)[\bar{X}(t) - X_{l,k}(t)] \quad (14)$$

$$X_{l,k}(t+1) = X_{l,k}(t) + V_{l,k}(t+1) \quad (15)$$

其中， $X_{w,k}(t)$ 、 $X_{l,k}(t)$ 和 $V_{w,k}(t)$ 、 $V_{l,k}(t)$ 代表第 k 次竞争获胜粒子和失败粒子的位置信息和速度信息。 $R_1(k,t)$ 、 $R_2(k,t)$ 、 $R_3(k,t)$ 是范围 $[0, 1]^n$ 的 3 个随机数。 $\bar{X}(t)$ 是第 k 次竞争粒子的平均值。 ϕ 是控制 $\bar{X}(t)$ 对粒子更新的影响大小的参数。

2.2 自适应竞争群优化算法

PSO 算法和 CSO 算法都通过粒子与粒子间相互学习进化，从而不断接近全局最优值的方式进行更新。对于大规模复杂模型优化，基于速度权重线性递减的 PSO 算法依赖最优值的信息，容易陷入局部最优。而 ACSO 算法不带记忆信息学习，通过对粒子平均位置的递减学习，随着搜索能力的变化，当达到设置的搜索能力临界时，自适应调节速度权重 W 以加强局部搜索能力，调节后的速度权重随着迭代次数的增加线性递减。

$$W = \begin{cases} R(k) & f_k < \bar{f} \\ w_{\max} - \frac{k}{\text{iter}_{\max}} \times (w_{\max} - w_{\min}) & \text{other} \end{cases} \quad (16)$$

其中， $R(k)$ 为 $[0,1]^n$ 的随机数， $w_{\max}$ 为最大惯性值取 0.9， $w_{\min}$ 为最小惯性值取 0.4， k 为进化代数， f_k 为当前最优目标函数值， $\bar{f}$ 为连续 20 代平均年综合费用。搜索初期粒子处于随机较分散的空间，竞争粒子的平均值提供更多的学习信息，加强对粒子间平均位置 $\bar{X}(t)$ 的学习，对平均位置权重 ϕ 值进行递减学习，有效提高了算法的收敛性。 a 的取值在算例中给出，改进后的公式为

$$V_{l,k}(t+1) = WV_{l,k}(t) + R_2(k,t)[X_{w,k}(t) - X_{l,k}(t)] + \phi R_3(k,t)[\bar{X}(t) - X_{l,k}(t)] \quad (17)$$

$$\phi = \frac{1}{0.2k + 8.5} + a \quad (18)$$

ACSO 流程图如图 2 所示。

自适应竞争群优化算法对无分流换热网络的求解步骤如下。

(1) 初始化 ACSO 算法种群规模 N ，最大迭代次数，换热网络流股参数和 $2D$ 个变量。

(2) 前 D 个变量代表换热网络模型的结构变量，以 0~1 之间的连续变量判断是否存在换热网络匹配情况，最大的变量值判断换热器存在。后 D 个变量代表计算热负荷的中间变量。

(3) 将变量代入模型进行结构调整，根据式(19)

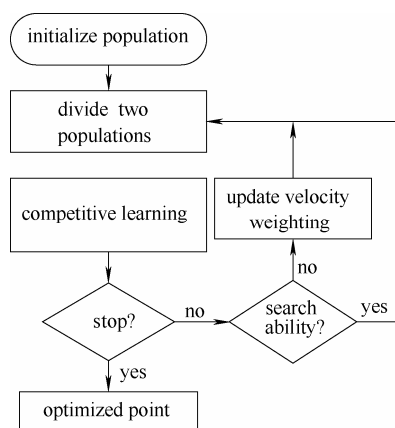


图 2 ACSO 算法流程

Fig.2 ACSO algorithm procedure

计算热负荷。热负荷及冷热流股温度从左往右进行计算，当冷流股的温度不符合给定的入口温度将温度进行向右平移调整，保证换热负荷的值不变，计算年综合费用。

if $F(i) \geq F(j)$

$$q(i, j, k) = \min \left(\frac{F(i)[t_k(i) - T_{out}(i)]}{F(j)[t_c - T_{in}(j)]} \right)$$

else

$$q(i, j, k) = \min \left(\frac{F(i)[t_k(i) - T_{out}(i)]}{F(j)[t_c - T_{in}(j)]}, \frac{t_k(i) - \Delta T_{min} - t_c}{\frac{1}{F(i)} - \frac{1}{F(j)}} \right)$$

end

(4) 采用算法的竞争机制，以年综合费用较小的粒子为获胜粒子，保留至下一代不参与调用模型。失败的 $N/2$ 个粒子进行学习更新。

(5) 算法更新时，粒子对平均位置进行递减学习，当学习能力降低，根据式(16)调节速度权重 W ，提高算法的局部搜索能力。

(6) 输出最优的粒子及最小年综合费用。

3 算例分析

文中此部分工作均通过 Matlab2014a 进行编程，在 Windows7 系统下开展。采用的计算机配置为 Inter Core i5 CPU@2.67GHz，4GB 内存。

算例 1 取自文献[14-17]。分析的算例中包含 10 条热流股、10 条冷流股、1 条热公用工程流股和 1 条冷公用工程流股，最小传热温差取 10 K。流股参数如表 1 所示。优化算法中 a 取 0.25，ACSO 对换热网络进行优化后的结果如表 2 所示。

表 1 算例 1 的物流数据

Table 1 Fluid data of case 1

Stream	T_{in}/K	T_{out}/K	$F/kW \cdot K^{-1}$	$h/kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
H1	453.2	348.2	30	2.0
H2	553.2	393.2	15	0.6
H3	453.2	348.2	30	0.3
H4	413.2	318.2	30	2.0
H5	493.2	393.2	25	0.08
H6	453.2	328.2	10	0.02
H7	443.2	318.2	30	2.0
H8	453.2	323.2	30	1.5
H9	553.2	363.2	15	1.0
H10	453.2	333.2	30	2.0
C1	313.2	503.2	20	1.5
C2	393.2	533.2	35	2.0
C3	313.2	463.2	35	1.5
C4	323.2	463.2	30	2.0
C5	323.2	523.2	20	2.0
C6	313.2	423.2	10	0.06
C7	313.2	423.2	20	0.4
C8	393.2	483.2	35	1.5
C9	313.2	403.2	35	1.0
C10	333.2	393.2	30	0.7
HU	598.2	598.2	—	1.0
CU	298.2	313.2	—	2.0

Note: cost of heat exchanger=(8000+800 $A^{0.8}$)USD; hot utility cost= 70 USD $\cdot kW^{-1} \cdot a^{-1}$; cold utility cost=10 USD $\cdot kW^{-1} \cdot a^{-1}$.

表 2 算例 1 优化结果比较

Table 2 Comparison of optimization results of case 1

Ref.	Total cost/USD	Number of heat exchanger
[14]	1753271	26
[15]	1765307	22
[16]	1827772	29
[17]	1751100	24
this paper	1744200	23

由表 2 可知，文献[14]采用混合遗传算法结合局部优化和结构控制策略优化换热网络，优化后的年综合费用为 1753271 USD。文献[15]采用遗传算法进行流股二进制编码优化换热网络结构，通过粒子群算法优化热负荷和分流比等连续变量的双层算法，优化后的年综合费用为 1765307 USD。文献[16]采用遗传算法对换热网络结构进行编码优化，通过模拟退火算法对有分流换热网络的热负荷及分流比等连续变量进行求解，优化后的年综合费用为 1827772 USD。文献[17]采用狼群算法和量子粒子群算法(quantum particle swarm optimization, QPSO)结合的改进算法对无分流换热网络进行优化，优化后的年综合费用为 1751100 USD。

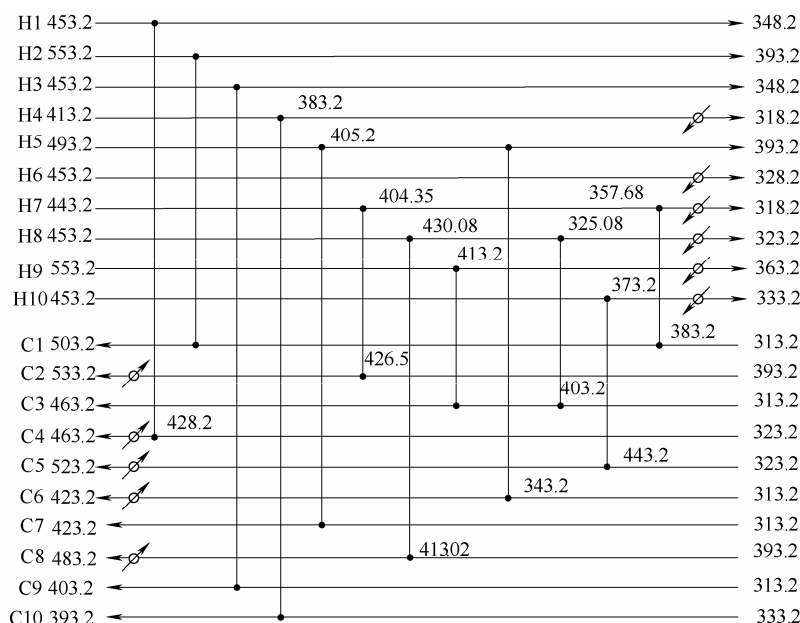


图 3 算例 1 优化网络结构

Fig.3 Optimized heat exchange network structure of case 1

通过文献[14-17]可知,有分流换热网络模型优化相比无分流换热网络模型优化,计算更加复杂。从优化后的结果可知换热网络设备单元相差 0~4 个,存在有分流的结构并不多,无分流换热网络结构简单,对规模越大的换热网络进行结构优化,所需的计算成本更低。

算例 1 通过自适应竞争群优化算法优化无分流换热网络结构如图 3 所示,图 4 为自适应竞争群优化算法、竞争群优化算法和速度权重递减的粒子群算法对算例 1 的优化后得到的无分流换热网络年综合费用的收敛曲线。由图 4 可知,ACSO 算法相比 CSO 算法提高了收敛速度和优化值,ACSO 算法相比 IPSO 有更好的优化值。

算例 2 取自文献[18-21],分析的算例中包含 8

条热流股、7 条冷流股、1 条热公用工程流股和 1 条冷公用工程流股,最小传热温差取 10 K。流股参数如表 3 所示。优化算法的 α 值取 0.14,ACSO 对换热网络进行优化后的结果如表 4 所示。

由表 4 可知,文献[18]采用填充函数法构造辅助函数,通过不断地迭代,使目标函数容易跳出局部最优解,优化后的年综合费用为 1590007 USD。

表 3 算例 2 的物流数据

Table 3 Fluid data of case 2

Stream	$T_{in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	$F/\text{kW} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$h/\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
H1	180	75	30	2.0
H2	280	120	60	1.0
H3	180	75	30	2.0
H4	140	40	30	1.0
H5	220	120	50	1.0
H6	180	55	35	2.0
H7	200	60	30	0.4
H8	120	40	100	0.5
C1	40	230	20	1.0
C2	100	220	60	1.0
C3	40	190	35	2.0
C4	50	190	30	2.0
C5	50	250	60	2.0
C6	90	190	50	1.0
C7	160	250	60	3.0
HU	325	325	—	1.0
CU	25	40	—	2.0

Note: cost of heat exchanger= $(8000+500A^{0.75})\text{USD}$; hot utility cost= $80 \text{ USD} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; cold utility cost= $10 \text{ USD} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

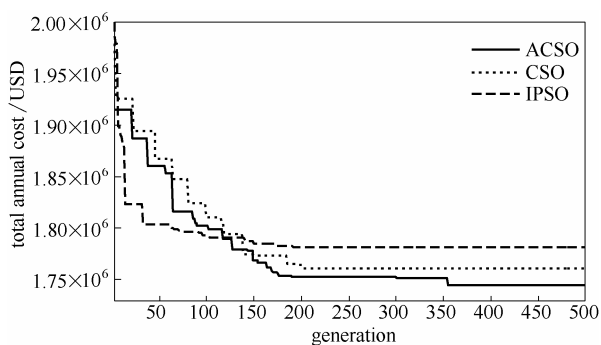


图 4 算例 1 收敛曲线

Fig.4 Convergence curve of case 1

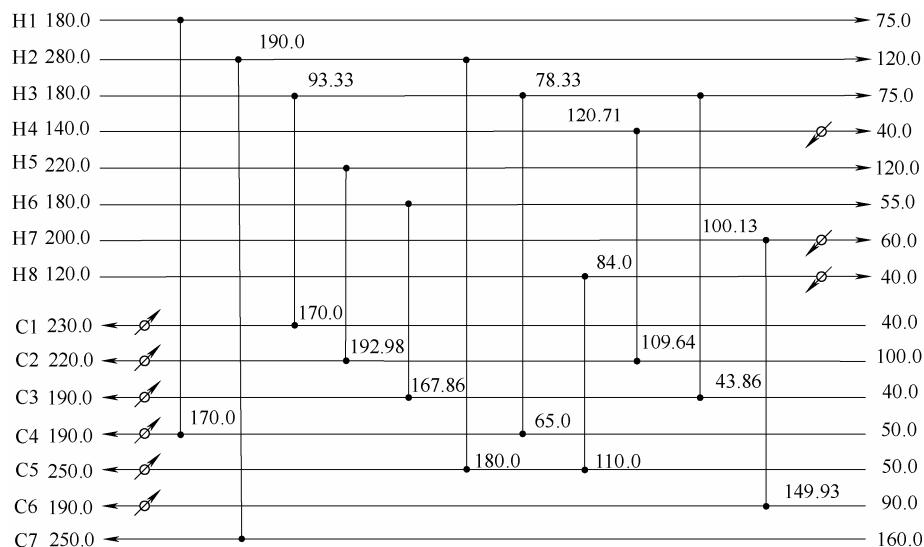


图 5 算例 2 优化网络结构

Fig.5 Optimized heat exchange network structure of case 2

表 4 算例 2 优化结果比较

Table 4 Comparison of optimization results of case 2

Ref.	Total cost/USD	Number of heat exchanger
[18]	1590007	22
[19]	1599229	—
[20]	1569649	19
[21]	1548087	20
this paper	1540100	20

文献[19]采用遗传算法结合确定性算法改进换热网络结构,优化后获得的年综合费用为 1599229 USD。文献[20]通过蒙特卡罗方法对无分流换热网络结构进行流股匹配优化,然后采用遗传算法对换热网络的换热量等连续变量进行优化,最终得到优化后的年综合费用为 1569649 USD。文献[21]采用蚁群算法对无分流换热网络进行优化,最终得到的网络结构由 20 个换热单元组成,年综合费用为 1548087 USD。

算例 2 通过自适应竞争群优化算法优化后的无分流换热网络结构如图 5 所示,图 6 为自适应竞争群优化算法、竞争群优化算法和速度权重递减的粒子群算法对算例 2 的优化后的无分流换热网络年综合费用的收敛曲线。由图 6 可知,ACSO 算法相比 CSO 算法和 IPSO 算法具有更好收敛速度和优化值。

本文采用基于自适应竞争群优化算法,通过对粒子平均位置递减学习的竞争群优化算法进行换热网络结构全局寻优,随着迭代学习对模型搜索能力下降达到临界值,自适应调节为线性递减速度。该

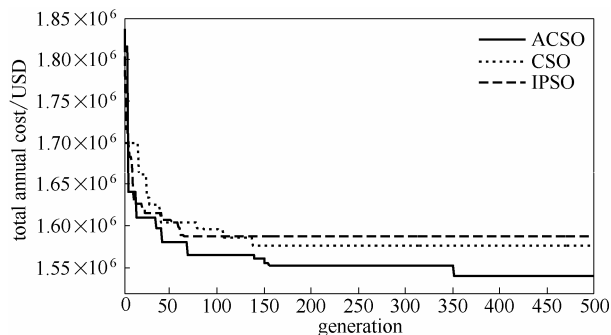


图 6 算例 2 收敛曲线

Fig.6 Convergence curve of case 2

方法提升了算法的寻优能力。相比双层算法,优化效率更高,相比于单层换热网络优化,调用目标函数次数也更少,在优化效率上有较好的表现。对比文献中的年综合费用,算例 1 和算例 2 的优化结果更优。

效率分析:以文献[17]的单层 QPSO 为例。图 7 表示在算例 1 中,粒子种群取 400,最大迭代次数 500 次的条件下,QPSO 算法和 ACSO 算法运行 10 次取平均值进行的效率比较。图中 ACSO 算法调用模型次数 10 万次,平均运行时间 634s,相比 QPSO 算法调用次数减少了 50%及程序的运行时间减少了 52%。

图 8 中表示在算例 2 中,粒子种群取 400,最大迭代次数 500 次的条件下 QPSO 算法和 ACSO 算法进行效率比较,图中 ACSO 算法调用模型次数 10 万次,平均运行时间 383 s,相比 QPSO 算法模型调

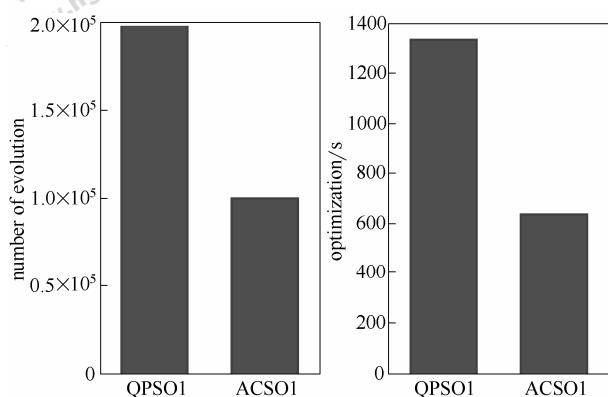


图 7 算例 1 的 QPSO 和 ACSO 优化效率比较

Fig.7 Comparison of optimization efficiency for case 1

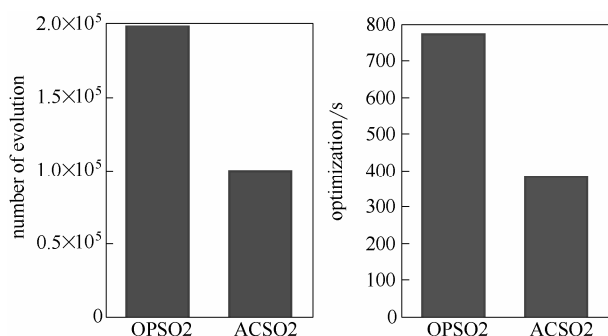


图 8 算例 2 的 QPSO 和 ACSO 优化效率比较

Fig.8 Comparison of optimization efficiency for case 2

用次数减少了 50%及程序运行时间减少了 50%。

4 结 论

本文对大规模的超结构无分流换热网络优化进行研究,针对优化复杂模型调用模型次数较多,算法过早收敛,求解效率较低,提出了 ACSO 算法。CSO 算法的竞争学习机制降低了粒子更新次数,对于平均位置的递减学习提高了优化效率,自适应调节速度权重有助于局部深度优化。在以上两个无分流典型算例中,减少了 50%模型调用次数,缩短了 50%左右的运行时间,取得了更好的优化结果,对于求解大规模换热网络有较好的效果。验证了本文所提出算法的有效性。

References

- [1] LINNHOFF B, FLOWER J R. Synthesis of heat exchanger networks (I): Systematic generation of energy optimal networks[J]. *AIChE Journal*, 1978, **24**(4): 633-642.
- [2] 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.
- [3] ATHIER G, FLOQUET P, PIBOULEAU L, *et al.* Synthesis of heat-exchanger network by simulated annealing and NLP procedures[J]. *AIChE Journal*, 1997, **43**(11): 3007-3020.
- [4] ZAMORA J M, GROSSMANN I E. A global MINLP optimization algorithm for the synthesis of heat exchanger networks with no stream splits[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1998, **22**(3): 367-384.
- [5] DIPAMA J, TEYSSEDOU A, SORIN M. Synthesis of heat exchanger networks using genetic algorithms[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**(14/15): 1763-1773.
- [6] BJORK K M, WESTERLUND T. Global optimization of heat exchanger network synthesis problems with and without the isothermal mixing assumption[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2002, **26**(11): 1581-1593.
- [7] KHORASANY R M, FESANGHARY M. A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, **33**(8): 1363-1370.
- [8] 贾涛, 夏涛. 常减压蒸馏过程换热网络的粒子群优化设计方法[J]. *计算机与应用化学*, 2009, **26**(11): 1509-1514.
- [9] JIA T, XIA T. An intelligent approach for designing heat exchanger network in atmospheric and vacuum distillation via particle swarm optimization[J]. *Computers & Applied Chemistry*, 2009, **26**(11): 1509-1514.
- [10] SOLTANI H, SHAFIEI S. Heat exchanger networks retrofit with considering pressure drop by coupling genetic algorithm with lp (linear programming) and ILP (integer linear programming) methods[J]. *Fuel & Energy Abstracts*, 2011, **36**(36): 2381-2391.
- [11] 霍兆义, 赵亮, 尹洪超, 等. 基于群体智能算法的换热网络同步最优综合[J]. *化工学报*, 2012, **63**(4): 1116-1123.
- [12] HUO Z Y, ZHAO L, YIN H C, *et al.* A hybrid swarm intelligence algorithm for simultaneous synthesis of heat exchanger network[J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(4): 1116-1123.
- [13] 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, **12**(1): 68-73.
- [14] ZHAO L, HUO Z Y, LI D B, *et al.* Simultaneous synthesis of heat exchanger network with no split streams[J]. *Journal of Thermal Science & Technology*, 2013, **12**(1): 68-73.
- [15] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization//1995 IEEE International Conference on Neural Networks Proceedings[C]. Perth: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [16] RAN C, JIN Y C. A competitive swarm optimizer for large scale optimization[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2015, **45**(2): 191-204.
- [17] LUO X, WEN Q Y, FIEG G. A hybrid genetic algorithm for synthesis of heat exchanger networks[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, **33**(6): 1169-1181.
- [18] 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.
- [19] HUO Z Y, YIN H C, ZHAO L. Simultaneous synthesis of heat exchanger network with stream splits[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2013, **53**(1): 45-50.
- [20] 肖武. 基于流股有效温位的大规模多流股换热器网络综合[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [21] XIAO W. Large scale multi-stream heat exchanger network synthesis based on the stream effective temperature level[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [22] 叶贞成, 钱智媛, 罗娜. 基于改进量子粒子群算法的无分流换热网络综合[J]. *华东理工大学学报*, 2015, **41**(2): 166-172.

- YE Z C, QIAN Z Y, LUO N. Simultaneous synthesis of heat exchanger network with no split streams based on improved quantum particle swarm algorithm[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2015, **41**(2): 166-172.
- [18] 胡向柏, 崔国民, 涂惟民, 等. 换热网络填充函数法的全局优化[J]. 化学工程, 2011, **39**(1): 28-31.
- HU X B, CUI G M, TU W M, *et al.* Global optimization of filled function method for heat exchanger networks[J]. Chemical Engineering (China), 2011, **39**(1): 28-31.
- [19] BJORK K M, NORDMAN R. Solving large-scale retrofit heat exchanger network synthesis problems with mathematical optimization methods[J]. Chemical Engineering & Processing, 2005, **44**(8): 869-876.
- [20] 张勤, 崔国民, 关欣. 基于蒙特卡罗遗传算法的换热网络优化问题[J]. 石油机械, 2007, **35**(05): 19-22.
- ZHANG Q, CUI G M, GUAN X. Optimization of heat exchanger network based on Monte Carlo genetic algorithm[J]. CPM, 2007, **35**(5): 19-22.
- [21] 万义群, 崔国民. 蚁群算法在换热网络优化中的应用[J]. 能源研究与信息, 2013, **29**(4): 234-238.
- WAN Y Q, CUI G M. Application of ant colony algorithm in optimization of heat exchanger networks[J]. Energy Research & Information, 2013, **29**(4): 234-238.