

# PSO 用于优化换热网络时对全局搜索能力的研究

肖 媛, 崔国民, 彭富裕, 周 静

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 将 PSO( 粒子群算法) 应用于优化换热网络时, 能够快速找到一个全局搜索的最优区域, 但同时也会出现局部极值问题。这些问题是由于全局搜索能力的退化和算法的早熟收敛所致。本研究针对该退化现象的机理进行了深入分析, 找到了粒子群算法早熟收敛的本质, 提出了一种强制跳出的改进策略, 通过激活陷入局部极值的粒子, 恢复种群多样性并继续搜索全局最优解。算例证明, 改进后的粒子群算法的搜索策略适用于换热网络连续变量优化, 应用于文献 [16]10SP2 算例, 得到的年综合费用较文献 [14] 下降了 205 \$ /a; 应用于文献 [18]8SP1 算例, 得到了目前最小的费用 30 793 \$ /a。改进的 PSO 较标准 PSO 和文化基因 PSO 优化后的费用均有所下降。

**关 键 词:** 换热网络优化; 粒子群算法; 局部退化; 强制跳出

中图分类号: TP301. 6 文献标识码: A

DOI: 10. 16146/j. cnki. rndlge. 2016. 01. 003

符号说明

- C——冷流体
- $c_1, c_2$ ——粒子群算法学习因子
- $d$ ——向量维度( 换热器总个数)
- $GCp_i$ ——流股热容流率  $kW/K$
- H——热流体
- $p$ ——换热网络自身最优结构
- $Q$ ——换热器换热量  $kW$
- $T$ ——流体温度,  $^{\circ}C$
- $\gamma$ ——取值介于( 0, 1) 的伪随机数
- $v$ ——粒子速度向量
- 下角标
- $i$ ——热流体股数
- $j$ ——冷流体股数
- $k$ ——换热器个数
- $it$ ——算法迭代次数
- 上角标
- $i$ ——粒子

## 引 言

HENS( 换热网络优化) 作为过程系统工程的重

要部分, 对系统内能量的有效利用起着至关重要的作用。换热网络综合就是要使热回收目标最大或者费用目标最小, 该问题本质上属于 MINLP( 混合整数非线性规划) 的范畴, 其非线性主要源于对数平均温差及费用计算时的非线性项; 而表示换热器有无的整型变量又极大地增加了非线性的复杂程度<sup>[1]</sup>, 因此即使小规模换热网络也无法证实能够找到其全局最优解<sup>[2]</sup>。目前, 针对换热网络综合的方法主要可分为夹点法和数学规划法<sup>[3-4]</sup>。数学规划法是以文献 [4] 提出的 MINLP 的分级超结构模型为代表的一种同步优化方法, 又可分为确定性方法和随机性方法。启发式方法与确定性方法比较, 前者对目标函数要求较低, 具有可操作性及全局搜索能力强的特点, 适用于大规模的 MINLP 问题求解, 因而得到了广泛应用<sup>[5-8]</sup>。

文献 [9] 首次提出了 PSO( 粒子群算法), 该方法具有结构简单、参数较少、易于实现以及寻优能力强的优点; 文献 [10] 提出了一种同步综合换热网络的群智优化方法, 利用 PSO 优化换热量, 为换热网络求解提供了新的思路; 文献 [11] 完善了 PSO 求解无分流换热网络的思路, 更加合理地分配了冷热公用工程的冷热负荷; 文献 [12] 实现了 PSO 对有分流换热网络的优化; 文献 [13] 提出了外层用混合群体智能算法优化换热网络结构, 内层在固定结构下利用 PSO 优化连续变量的混合算法, 实现了换热网络中离散变量和连续变量的分层优化; 文献 [14] 提出了文化基因粒子群算法解决 PSO 局部搜索能力不强和精度不高的问题, 能更有利于接近全局最优。然而 PSO 应用到换热网络优化过程中, 还是经常出现飞行速度退化而使算法陷入早熟收敛的问题。

鉴于此, 本研究对 PSO 优化换热网络过程中出

收稿日期: 2014 - 11 - 25; 修订日期: 2015 - 03 - 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 51176125); 沪江基金研究基地专项( D14001)

作者简介: 肖 媛( 1991 - ), 女, 江苏常州人, 上海理工大学博士研究生。

现的早熟收敛现象进行机理分析,在此基础上提出强制跳出策略,使粒子飞行获得“重生”,结合换热网络优化算例,实现局部极小值的跳出,完善 PSO 的全局搜索能力。

### 1 换热网络优化模型及 PSO 优化方法

#### 1.1 换热网络模型

以 2 股热流体,2 股冷流体为例,无分流的 Grossmann 分级超结构模型如图 1 所示<sup>[4]</sup>。其中每条水平线代表一股流体,箭头代表流体的流动方向, $H_i(i = 1, \dots, N_H)$  表示热流体, $C_j(j = 1, \dots, N_C)$  表示冷流体,两个“○”以及它们之间的纵向连线表示一个换热器,即与该换热器相连的热流体和冷流体在该位置进行换热。公用工程加在每一流股的末端,换热网络的级数为  $N_K, N_K$  取  $\max(N_H, N_C)$  这样不同流股间最多的匹配次数为  $N_K$ ,最大的换热器个数为  $N_{HE} = N_H \times N_C \times N_K$  个。

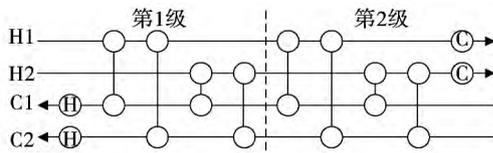


图 1 换热网络无分流的分级超结构

Fig. 1 The stage - wise superstructure for HENS without splitting streams

##### 1.1.1 优化的目标函数

换热网络优化问题的目标是实现能量最大回收或获得最小经济费用。本研究以经济费用最小为目标,数学描述为:

$$\begin{aligned} \min F = & \min \sum_{i \in N_H} C_{CU} \cdot Q_{CU i} + \sum_{j \in N_C} C_{HU} \cdot Q_{HU j} \\ & + \sum_{k \in \langle N_H N_C N_K \rangle} (C_0 + C'_0 \cdot A_k^\beta) + \sum_{i \in N_H} (C_1 + C'_1 \cdot A_{CU i}^\beta) \\ & + \sum_{j \in N_C} (C_2 + C'_2 \cdot A_{HU j}^\beta) \end{aligned} \quad (1)$$

等式右边前两项为公用工程运行费用。

式中:  $C_{CU}, C_{HU}$  一冷、热公用工程费用系数;  $Q_{CU i}$  一第  $i$  股热流体与冷公用工程换热量;  $Q_{HU j}$  一第  $j$  股冷流体与热公用工程换热量。后 3 项分别是换热器、冷公用工程、热公用工程的面积费用,其中  $C_0, C_1$  和  $C_2$  一换热器、冷热公用工程固定投资费

用;  $C'_0, C'_1$  和  $C'_2$  一换热器、冷热公用工程面积费用系数;  $\beta$  一面积费用指数;  $A_k, A_{CU i}$  和  $A_{HU j}$  一换热器、冷热公用工程面积。在实际优化过程中,以单个换热器的换热量  $Q_{i j k}$  (可简化为  $Q_k$ ) 为优化变量,依据模型中的假设,冷热流股逆流布置。依据换热器换热平衡:

$$Q_{i j k} = GCp_i \cdot (T_{i k}^{in} - T_{i k}^{out}) = GCp_j \cdot (T_{j k}^{out} - T_{j k}^{in}) \quad (2)$$

$$A_{i j k} = Q_{i j k} / (U_{i j} LMTD_{i j k}), \quad i \in N_H, j \in N_C, k \in N_K \quad (3)$$

式中:  $Q_{i j k}$  一第  $i$  股热流体与第  $j$  股冷流体匹配的换热器  $k$  的换热量,该换热器对应的冷、热流有着相应的进出口温度  $T_{j k}^{in}, T_{j k}^{out}, T_{i k}^{in}, T_{i k}^{out}$ ;  $U_{i j}$  一对流换热系数。

对数平均温差  $LMTD_{i j k}$  计算式为:

$$LMTD_{i j k} = \frac{(T_{i k}^{in} - T_{j k}^{out}) - (T_{i k}^{out} - T_{j k}^{in})}{\ln [(T_{i k}^{in} - T_{j k}^{out}) / (T_{i k}^{out} - T_{j k}^{in})]} \quad (4)$$

当  $GCp_i = GCp_j$  时,可采用算术平均温差,即

$$AMTD_{i j k} = \frac{1}{2} [(T_{i k}^{in} - T_{j k}^{out}) + (T_{i k}^{out} - T_{j k}^{in})] \quad (5)$$

##### 1.1.2 主要约束

单股流体热平衡:

$$(T_{in i} - T_{out i}) \cdot GCp_i = \sum_{k=1}^{N_K} \sum_{j=1}^{N_C} Q_{i j k} + Q_{CU i}, \quad i \in N_H \quad (6)$$

$$(T_{out j} - T_{in j}) \cdot GCp_j = \sum_{k=1}^{N_K} \sum_{i=1}^{N_H} Q_{i j k} + Q_{HU j}, \quad j \in N_C \quad (7)$$

式中:  $T_{in i}, T_{out i}$  一第  $i$  股热流体的入口温度及目标温度;  $T_{in j}, T_{out j}$  一第  $j$  股冷流体的入口温度及目标温度。

冷热流股出口温度:

$$T_{i k} \geq T_{i k+1}, \quad i \in N_H, k \in N_K \quad (8)$$

$$T_{j k} \geq T_{j k+1}, \quad j \in N_C, k \in N_K \quad (9)$$

$$T_{out i} \leq T_{i N_K}^{out}, \quad i \in N_H \quad (10)$$

$$T_{out j} \geq T_{j 1}^{out}, \quad j \in N_C \quad (11)$$

式中:  $T_{i k}$  一第  $i$  股流体第  $k$  级的入口温度;  $T_{i N_K}^{out}$  一第  $i$  股热流体上末级的换热器的出口温度;  $T_{j 1}^{out}$  一第  $j$  股冷流体上第 1 级的换热器的出口温度。

冷热公用工程热平衡:

$$(T_{i,N_K}^{out} - T_{out,i}) \cdot GCp_i = Q_{CU,i}, i \in N_H \quad (12)$$

$$(T_{out,j} - T_{j,1}^{out}) \cdot GCp_j = Q_{HU,j}, j \in N_C \quad (13)$$

1.2 PSO 算法优化换热网络

换热网络优化的关键是合理分布换热器(包括公用工程)的位置及其热负荷。PSO 应用于换热网络优化时,主要包括以下两个关键步骤:

(1) 初始化。确定种群规模  $N$  和最大迭代步数,随机初始化  $N$  个粒子,每个粒子对应不同的  $d$  维换热网络结构,  $d$  表示换热器的个数,其初始换热量表示为  $Q_{it}^i (Q_{it}^{i1}, Q_{it}^{i2}, \dots, Q_{it}^{id})$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 初始速度表示为  $v_{it}^i (v_{it}^{i1}, v_{it}^{i2}, \dots, v_{it}^{id})$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

(2) 产生新的进化参数。计算各个换热网络结构的年总费用。对每个换热网络结构采用坐标轮换法进行邻域搜索<sup>[14]</sup>,并记录其最优结构参数,即换热量  $Q_{op}^i (Q_{op}^{i1}, Q_{op}^{i2}, \dots, Q_{op}^{id})$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。统计当前第  $it$  次迭代中的群体最优结构参数  $Q_{op}^g (Q_{op}^{g1}, Q_{op}^{g2}, \dots, Q_{op}^{gd})$ 。根据第  $it$  次迭代中的自身惯性即当前飞行速度  $v_{it}^i$ 、自身最优结构参数  $Q_{op}^i$  和群体最优结构参数  $Q_{op}^g$  调整第  $it+1$  次迭代的飞行方向并更新各个换热网络的结构参数:

$$v_{it+1}^i = \omega v_{it}^i + c_1 \gamma_1 (Q_{op}^i - Q_{it}^i) + c_2 \gamma_2 (Q_{op}^g - Q_{it}^i) \quad (14)$$

$$Q_{it+1}^i = Q_{it}^i + v_{it+1}^i \quad (15)$$

式中:惯性因子  $\omega$  是非负常数,学习因子  $c_1$  和  $c_2$  是非负常数,  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  是取值介于(0,1)的伪随机数,  $it$  是迭代次数。

其中,根据自身惯性的调整可认为是 PSO 优化过程中的“遗传项”,而根据自身最优和群体最优的调整则可认为是 PSO 优化过程中的“进化项”。

PSO 优化换热网络的粒子更新模式如图 2 所示。进化初期,每个换热网络结构的换热量和速度是随机初始化的,种群中的最优结构  $p^g$  吸引其它结构,使种群中的大部分结构在“进化项”的作用下快速聚集到全局最优区域<sup>[15]</sup>。因此,粒子群算法具有较强的全局搜索能力,且在进化初期收敛速度较快。

然而在进化后期,经常出现粒子飞行易陷入停滞、满足收敛条件时却仍是局部最优解的现象,即早熟收敛现象,这就是 PSO 在进化后期全局搜索能力的局部“退化”。

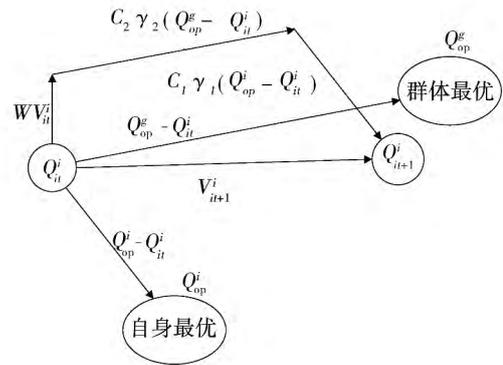


图 2 PSO 优化换热网络的粒子更新模式

Fig2 The particles update mode of optimal HEN structure for PSO

2 局部退化现象的原因和机理分析

PSO 应用到换热网络优化时,同样存在进化后期全局搜索能力的局部退化问题,本研究通过 10SP2 算例揭示了该现象,并进一步分析了其原理及本质。10SP2 算例的流股参数数据取自文献[16],换热器、冷却器和加热器的传热系数均为  $0.025 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ,换热器面积计算公式为  $60 \text{ A } \$ / \text{a}$ ,热公用工程费用为  $100 \text{ } \$ /(\text{kW} \cdot \text{a})$ ,冷公用工程费用为  $15 \text{ } \$ /(\text{kW} \cdot \text{a})$ ,其它流股参数如表 1 所示。

表 1 10SP2 流股参数表

Tab. 1 Fluid parameter table for case 10SP2

| 流股  | $T_{in} / \text{C}$ | $T_{out} / \text{C}$ | $GC_p / \text{kW} \cdot \text{C}^{-1}$ |
|-----|---------------------|----------------------|--|
| 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                                   |
| 蒸汽  | 200                 | 198                  | -                                      |
| 冷却水 | 15                  | 20                   | -                                      |

对文献[17]中的结构采用粒子群算法优化,结

束条件为最大迭代次数, 设为 12 000, 得到优化后费用为 5 632 308 \$ /a, 其费用—迭代次数折线图如图 3 所示。PSO 在进化初期收敛速度快, 费用急速下降, 但在迭代 1 000 次之后, 费用趋于平稳, 保持在 5 632 308 \$ /a, 对比文献 [17] 中采用局部优化方法得到的 5 631 380 \$ /a 可知, 当前 PSO 的优化费用是局部极小值而非全局最优解, 即此时的收敛属于早熟现象。这就是 PSO 进化后期的局部“退化”现象。

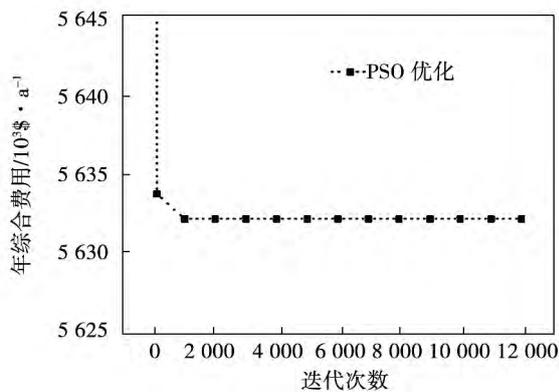


图 3 PSO 优化后的费用下降曲线  
Fig. 3 The decline curve of the charge after the optimization of PSO

针对 PSO 的这种局部退化现象的原理及本质进行分析, 本研究以二维粒子为例, 将粒子飞行表示在二维直角坐标系, 其更新速度示意图如图 4 所示。由图可知, 进化初期粒子在“进化项”的作用下快速聚集到全局最优区域, 而进入该区域进行搜索时, 粒子的个体最优  $Q_{op}^i$  逐渐接近  $Q_{op}^g$ 。当存在一个粒子, 其个体最优位置距离趋近于  $Q_{op}^g$  时, “进化项”随之趋近于零, 即  $c_1\gamma_1(Q_{op}^g - Q_{op}^i) + c_2\gamma_2(Q_{op}^g - Q_{op}^i)$  项趋近于零, 这是进化后期出现局部退化现象的本质。随着“进化项”趋近于零, 粒子的速度则主要由“遗传项”  $\omega v_{it}^i$  决定, 即粒子将按先前的寻优方向继续飞行。没有进化的遗传必将导致搜索能力的退化, 即粒子的速度越来越小, 最终趋近于零, 导致粒子陷入早熟停滞而无法寻找到全局最优解。

PSO 应用于换热网络综合时, 每个粒子对应  $d$  维的换热网络结构, 其复杂非线性使得 PSO 更易陷入局部退化。如 10SP2 算例, PSO 进化后期, “加速项”趋近于零, 粒子将以先前的寻优方向飞行, 而换热

量的能量分布又必须满足换热网络的约束, 使得换热网络的优化进程异常艰难, 最终陷入局部极小费用 5 632 308 \$ /a。

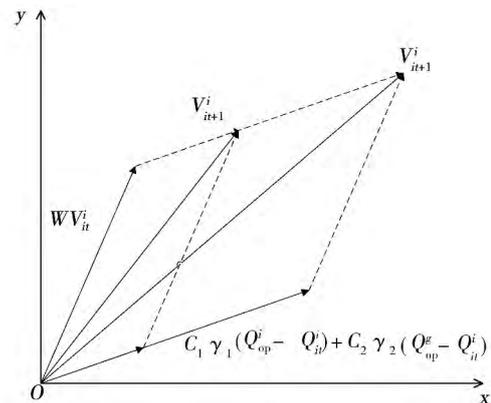


图 4 二维粒子速度更新示意图  
Fig. 4 The schematic diagram of velocity update of particles when  $d = 2$

### 3 强制跳出的改进策略

由第 2 节分析可知, PSO 局部“退化”现象的本质是进化后期“加速项”  $c_1\gamma_1(Q_{op}^g - Q_{op}^i) + c_2\gamma_2(Q_{op}^g - Q_{op}^i)$  趋近于零, 该项中的学习因子  $c_1$  和  $c_2$  决定了粒子向全局最优区域移动或远离的速度, 在惯性因子  $\omega$  不变的情况下调整这两个控制参数能保证粒子在进化初期搜索到全局最优区域, 但不能阻止进化后期加速项趋近于零, 从而无法在根本上解决或改善粒子的早熟收敛现象。为了改进 PSO 的局部“退化”现象, 必须激活进化后期停滞的粒子, 使粒子获得“重生”, 恢复种群的多样性, 因此本研究提出强制跳出策略, 当 PSO 陷入停滞时, 对式 (15) 中的换热量  $Q_{it+1}^i$  在当前局部极值点对应的  $Q_{it}^*$  的邻域范围内给予一个新的随机量, 而不再按照先前的寻优方向搜索, 进而随机搜索到更优解。当粒子搜索到更优解, 以该解作为 PSO 下一轮搜索的初始点, 强制跳出极小值点, 并继续搜索全局最优解。

当换热网络优化中 PSO 陷入停滞时, 对式 (15) 中的换热量  $Q_{it+1}^i$  在当前局部极值点对应的  $Q_{it}^*$  的邻域范围内给予一个新的随机量。若 PSO 优化得到的局部极小值点对应的换热量为  $Q_{it}^* (Q_{it}^{1*}, Q_{it}^{2*}, \dots$

$Q_{it}^{d*}$ ) 则可搜索的邻域范围为  $(Q_{it}^* - \alpha Q_{it}^*, Q_{it}^* + \alpha Q_{it}^*)$ ,  $\alpha$  取值为 0 到 1 的数, 借助  $[0, 1]$  的均匀随机数  $\beta$  得到均匀分布的新的换热量:

$$Q_{it+1}^* = (Q_{it}^* - \alpha Q_{it}^*) + \beta(i) \times (2\alpha Q_{it}^*) \quad (16)$$

$$v_{it+1} = (-\alpha) Q_{it}^* + \beta(i) \times (2\alpha Q_{it}^*) \quad (17)$$

那么  $Q_{it+1}^*$  相对于  $Q_{it}^*$  可能增加可能减小, 即此时每一个换热器的速度增量  $v_{it+1}$  也被重新赋予。PSO 应用到换热网络综合时, 每个粒子对应的换热网络结构有  $d$  个换热器, 因此随机搜索时速度增量  $v_{it+1}$  的方向共有  $2^d$  种可能性。鉴于此, 设定  $Q_{it}^*$  的邻域搜索的次数  $N_y = 2^d$ 。

若在邻域搜索次数  $N_y$  内随机找到了换热网络综合费用更小的结构, 将该结构对应的  $Q_{it+1}^*$  ( $Q_{it+1}^{*1}, Q_{it+1}^{*2}, \dots, Q_{it+1}^{*d}$ ) 作为 PSO 下一轮的初始换热量, 强制跳出算法陷入的局部极小值, 继续搜索全局最优解。

### 4 算例结果和分析

#### 4.1 10SP2 算例

对于第 2 节的 10SP2 算例, 当 PSO 优化陷入早熟收敛, 采用强制跳出策略, 在局部极小值的邻域范围搜索, 此时换热器个数固定为 9 个, 随机搜索的次数则为  $2^9$ , 收敛条件即最大迭代次数仍是 12 000, 最终多次跳出了局部极值点, 如图 5 所示。强制跳出局部极值点得到的换热网络结构如图 6 所示, 其年综合费用为 5 629 748 \$/a。

对比改进前后的费用下降曲线能更明显地看到粒子跳出局部极小值的“重生”过程, 该算例验证了强制跳出策略的有效性。优化费用与文献对比结果如表 2 所示。

表 2 10SP2 算例优化结果对比( \$/a)

Tab. 2 Results comparison of 10SP2( \$/a)

| 文献[16]    | 文献[17]    | 标准 PSO    | 文献[14]    | 本研究       |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 5 666 755 | 5 631 380 | 5 632 308 | 5 629 953 | 5 629 748 |

#### 4.2 8SP1 算例

8SP1 算例流体数据取自 Grossmann 和 Sargant<sup>[18]</sup>。

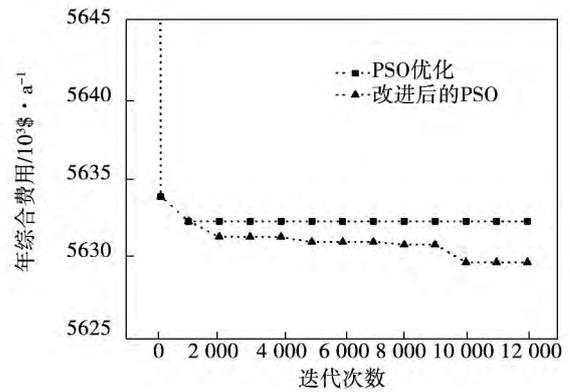


图 5 改进前后的 PSO 优化后费用下降对比图

Fig. 5 The contrast decline curves of PSO before and after improvement

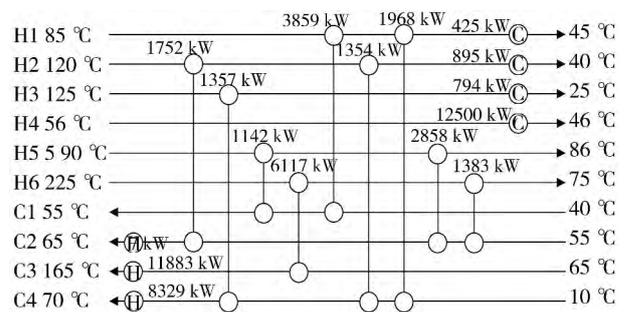


图 6 对文献 [17] 的算例采用结合强制搜索策略的 PSO 优化后的换热网络结构

Fig. 6 The HEN structure of PSO with compulsive strategy for which in literature [17]

表 3 8SP1 算例流股参数表

Tab. 3 Stream parameter table for case 8SP1

| 流股  | $T_{in} / ^\circ\text{C}$ | $T_{out} / ^\circ\text{C}$ | $GC_p / \text{kW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ |
|-----|---------------------------|----------------------------|--|
| H1  | 470                       | 320                        | 22.4   |
| H2  | 450                       | 240                        | 17.5   |
| H3  | 370                       | 150                        | 28.5   |
| H4  | 310                       | 200                        | 20.1   |
| C1  | 200                       | 420                        | 16.8   |
| C2  | 150                       | 400                        | 23.2   |
| C3  | 185                       | 330                        | 35.1   |
| C4  | 140                       | 300                        | 17.25  |
| 蒸汽  | 200                       | 198                        | -  |
| 冷却水 | 15                        | 20                         | -  |

换热器、冷却器的传热系数均为  $0.15 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 加热器的传热系数为  $0.2 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 换

热器面积计算公式为  $35 A^{0.6} \$/a$  ,热公用工程费用为  $11.05 \$/(kW \cdot a)$  ,冷公用工程费用为  $5.31 \$/(kW \cdot a)$  ,其它股参数如表 3 所示。

文献 [19] 采用确定性方法以面积为优化变量得到在无分流网络中的好于其它文献的换热网络结构 ,作为优化验证的固定结构 ,具体结构、面积及温度如图 7 所示。

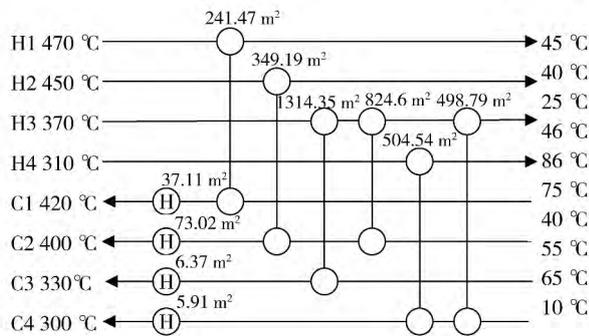


图 7 对文献 [19] 中的算例采用确定性方法获得最优换热网络结构

Fig. 7 The HEN structure of determinate optimization in literature [19]

用 PSO 对以上结构进行固定结构下的连续变量(换热量)优化 ,收敛条件为最大迭代次数 ,设为 10 000 ,最终得到的年综合费用为 30 809 \$/a ,其费用—迭代次数折线图如图 8 所示。由图可知 ,粒子群算法优化在迭代 2 000 次之后 ,粒子飞行陷入停滞 ,费用陷入局部极小值 ,即 PSO 的全局搜索能力退化。

在 PSO 进化后期陷入早熟收敛之后 ,采用本研究提出的强制跳出策略 ,在局部极小值点的邻域内搜索到了更优值 ,从图 7 可知 ,换热器个数固定为 6 个 ,随机搜索次数即为  $2^6$  ,最大迭代次数保持不变。由图 8 的费用下降对比曲线可知 ,改进后的 PSO 实现了局部极值点的跳出 ,最终得到的最小年综合费用为 30 793 \$/a ,其换热网络结构如图 9 所示。本研究的优化费用与文献对比结果如表 4 所示。

表 4 10SP2 算例优化结果对比( \$/a)

Tab. 4 Results comparison for case 10SP2( \$/a)

| 标准 PSO | 文献 [14] | 文献 [19] | 本研究    |
|--------|---------|---------|--------|
| 30 809 | 30 805  | 30 793  | 30 793 |

本研究的优化结果与确定性方法的优化结果一致 ,说明强制跳出策略的粒子群算法能够提高算法的收敛精度 ,克服了标准 PSO 的早熟收敛现象 ,具有更强的全局搜索能力。

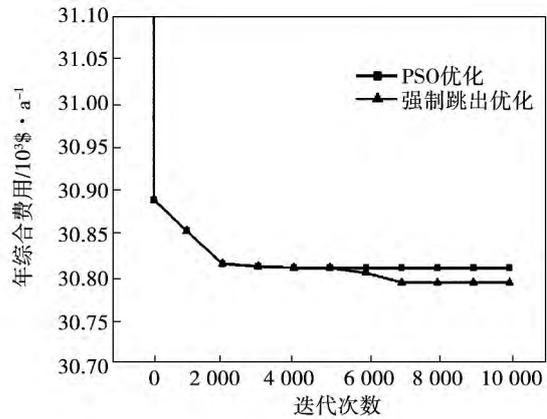


图 8 改进前后的 PSO 优化费用下降对比图

Fig. 8 The contrast decline curves of PSO before and after improvement

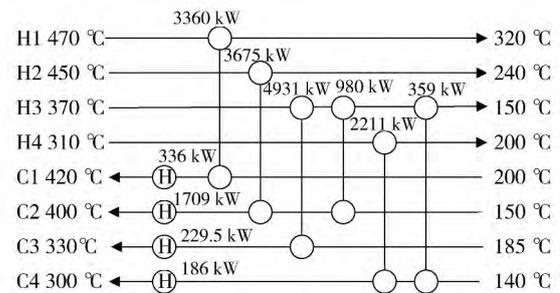


图 9 对文献 [19] 的算例采用结合强制搜索策略后的 PSO 算法优化后的换热网络结构

Fig. 9 The HEN structure of improved PSO in literature [19]

### 5 结 论

本研究提出的强制跳出策略能够解决 PSO 在换热网络优化进程后期全局搜索能力退化的问题 ,通过生成局部极值点邻域内的随机变量来更新其最优搜索方向 ,恢复了种群多样性 ,最终跳出了局部极值点并继续搜索换热网络全局最优解。经算例验证 ,改进后的粒子群算法适用于换热网络连续变量优化 ,应用于文献 [16]10SP2 算例 ,得到的年综合费

用较文献 [14] 下降了 205 \$ /a; 应用于文献 [18] 8SP1 算例, 得到了目前最小的费用 30 793 \$ /a。改进后的 PSO 较标准 PSO 和文化基因 PSO 的优化费用均有下降。

#### 参考文献:

- [1] 胡向柏, 崔国民, 涂惟民. 复杂换热网络 MINLP 中的非线性特性分析[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(2): 285-287.  
HU Xiang-bai, CUI Guo-min, TU Wei-min. The non-linear characteristics analyze of the minlp in the complex heat exchanger networks[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(2): 285-287.
- [2] Yerram setty K M, Murty C V S. Synthesis of cost-optimal heat exchanger networks using differential evolution[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(8): 1861-1876.
- [3] Linnhoff B, Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks[J]. Chem. Eng. Sci., 1983, 38: 745-763.
- [4] Yee T F, Grossmann I E. Simultaneous optimization models for heat integration (II): Heat exchanger network synthesis [J]. Compute. Chem. Eng., 1990, 14(10): 1165-1184.
- [5] Chakraborty S, Ghosh P. Heat exchanger network synthesis: The Possibility of Randomization[J]. Chem Eng J, 1999, 72(3): 209-216.
- [6] Pariyani A, Gupta A, Ghosh P. Design of heat exchanger networks using randomized algorithm[J]. Comput Chem Eng, 2006, 30(6/7): 1046-1053.
- [7] Gupta A, Ghosh P. A randomized algorithm for the efficient synthesis of heat exchanger networks[J]. Comput Chem Eng, 2010, 34(10): 1632-1639.
- [8] Lin B, Miller D C. Solving heat exchanger network synthesis problems with tabu search [J]. Comput Chem Eng, 2004, 28(8): 1451-1464.
- [9] Kennedy J. Particle swarm optimization [M]. Encyclopedia of Machine Learning. Springer US, 2010: 760-766.
- [10] 夏涛, 贾涛, 程杰. 群智优化算法同步综合换热网络[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 97-101.  
XIA Tao, JIA Tao, CHENG Jie. A novel approach for simultaneous synthesis of a heat exchanger network via swarm intelligent optimization[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science) 2009, 36(1): 97-101.
- [11] 严丽娣, 霍兆义, 尹洪超. 粒子群算法最优同步综合换热网络[J]. 化工进展, 2009, 28(1): 439-442.  
YAN Li-di, HUO Zhao-yi, YIN Hong-chao. Particle swarm optimization for simultaneous synthesis of heat exchanger networks [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28(1): 439-442.
- [12] Silva A P, Ravagnani M A S S, Biscia Jr E C, et al. Optimal heat exchanger network synthesis using particle swarm optimization [J]. Optimization and Engineering, 2010, 11(3): 459-470.
- [13] 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.  
HUO Zhao-yi, ZHAO Liang, YIN Hong-chao, et al. A hybrid swarm intelligence algorithm for simultaneous synthesis of heat exchanger network [J]. CIESC Journal, 2012, 63(4): 1116-1123.
- [14] 何巧乐, 崔国民, 许海珠. 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, 4(1): 37-45.  
HE Qiao-le, CUI Guo-min, XU Hai-zhu. Application of memetic particle swarm optimization to continuous variable global optimization of cost-optimal heat exchanger networks [J]. Petrochemical Technology, 2014, 4(1): 37-45.
- [15] Kennedy J. Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance [C]//IEEE Evolutionary Computation, Washington DC, 1999, 9: 7803-7809.
- [16] Ravagnani M, Silva A P, Arroyo P A, et al. Heat exchanger network synthesis and optimisation using genetic algorithm [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(7): 1003-1017.
- [17] 胡向柏. 换热网络全局优化[D]. 上海: 上海理工大学学报, 2013.  
HU Xiang-bai. The global optimization of heat exchanger networks [D]. Shanghai: Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2013.
- [18] Grossmann I E, Sargent R W H. Optimum design of heat exchanger networks [J]. Computers & Chemical Engineering, 1978, 2(1): 1-7.
- [19] He Qiaole, Cui Guoming. A principle of stream arrangement based on uniformity factor for heat exchanger networks synthesis [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 93-100.

(丛敏编辑)

presence of a longitudinal vortex generator ,the return flow zone behind the tube and the turbulent kinetic energy close to the longitudinal vortex generator will become bigger ,thus leading to an increase of the temperature in the zones around the tube ,the turbulent kinetic energy approximately assuming a M-shaped distribution and the temperature roughly taking on a W-shaped distribution along the radial direction. **Key words:** H-shaped fin ,longitudinal vortex generator ,convective heat exchange flow characteristics

PSO 用于优化换热网络时对全局搜索能力的研究 = **Study of the Overall Searching Ability of the Particle Swarm Optimization Algorithm When It Is Being Applied in Optimizing a Heat Exchange Network** [刊 汉]

XIAO Yuan ,CUI Guo-min ,PENG Fu-yu ,ZHOU Jing ,CHEN Shang ( College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 1) . -20 -26

When the particle swarm optimization algorithm is used to optimize a heat exchange network ,it can quickly find out the optimum zone in all zones ,however ,in the meantime ,it may produce a local extremum value problem ,which arises from its premature convergence and deterioration in its overall searching ability. The mechanism governing such a deterioration phenomenon was analyzed in depth and the essence of the premature convergence happened when using the particle swarm optimization algorithm was found. To solve this problem ,a forced jump-out strategy was proposed. Through activating the particles involved in the local extremum value problem ,the population diversity was restored and the overall optimum solution was continuously searched. The case calculation results show that the improved searching strategy for the particle swarm optimization algorithm can be suited for a continuous variable optimization of a heat exchange network. When the improved searching strategy for the particle swarm optimization algorithm was applied to the calculation example 10SP2 in the literature No. 16 ,the annual comprehensive expenses thus obtained decreased by 205 \$ /a as compared with that in the literature No. 14. When the improved searching strategy for the particle swarm optimization algorithm was applied to the calculation example 8SP1 in the literature No. 18 ,a currently smallest annual comprehensive expense of 30793 \$ /a was obtained. The annual comprehensive expense calculated by using the improved particle swarm optimization algorithm invariably decreased as compared with those calculated by using the standard particle swarm optimization algorithm and the cultural genetic particle swarm optimization algorithm. **Key words:** optimization of a heat exchange network ,particle swarm optimization algorithm ,local deterioration ,forced jump-out