

# 基于改进遗传算法的双层优化方法在化工换热网络设计中的应用

徐文艳<sup>1</sup>, 王豪<sup>2</sup>

(1. 上海师范大学 生命与环境科学学院, 上海 200234; 上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

**摘要:** 换热网络是化学工业过程中最常用的能量交换系统, 其设计的优劣直接影响到系统能耗的大小以及企业效益的好坏. 作者对换热网络设计优化问题, 提出了一种改进遗传算法与传统数学规划相结合的双层优化方法, 并用 Matlab 仿真研究验证了此方法的有效性.

**关键词:** 换热网络; 优化设计; 遗传算法; 双层优化; 局部搜索

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5137(2005)03-0093-07

## 0 引言

换热网络系统(Heat Exchange Networks, HEN)是化工生产过程中大量使用的热量交换系统, 其设计的优劣直接影响到生产中的能耗高低以及企业效益的好坏. 目前在换热网络设计研究中采用的方法主要有基于热力学分析的夹点设计法<sup>[1,2]</sup>、数学规划法<sup>[3]</sup>和基于遗传算法的随机优化法<sup>[4]</sup>.

换热网络的优化设计在数学上是一个较复杂的混合整型线性规划(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)或混合整型非线性规划(Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP)问题. HEN的设计本质上是一个匹配优化问题, 即要求在给定冷热流数量、网络层数以及目标函数的前提下, 在不同的层和不同的冷流、热流之间建立匹配. 这相当于在某一定义域内, 寻找问题解的组合, 使目标函数最优, 是典型离散量的组合优化问题.

本文以最大热能回收(Max Energy Recovery, MER)为优化设计目标, 采用双层优化策略, 对换热网络进行了优化设计.

## 1 换热网络优化设计的数学模型

### 1.1 算法结构

本文以 MER 为优化设计目标, 采用双层优化策略, 在上层算法中, 对换热网络利用改进遗传算法进行结构优化; 在下层算法中, 利用线性规划对上层传送过来的候选结构进行最优热负荷分配, 并把最大热回收值作为相应结构的适应值反馈到上层遗传算法中. 算法的逻辑结构如图 1 所示.

算法的具体步骤如下:

(1) 初始化: 随机生成特定数量的染色体构成初始种群. 种群大小可以根据具体问题设置, 也可以在仿真过程中参考结果优劣进行动态的调整.

收稿日期: 2005-02-19

作者简介: 徐文艳(1967 - ), 女, 上海师范大学生命与环境科学学院讲师; 王豪(1965 - ), 男, 博士, 上海交通大学自动化系副教授.

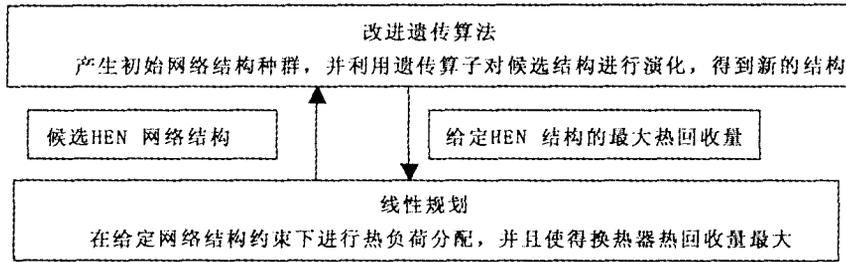


图1 算法逻辑结构图

(2) 利用改进后的遗传算法对换热网络结构进行演化:采用整形数据描述网络结构,使遗传算法所操作的染色体具有比较明确的物理意义;对遗传算子稍加修改(如下限取整等)以便对染色体进行操作;加入了适合匹配组合优化的局部搜索策略以提高算法的收敛速度。

(3) 对给定的 HEN 进行参数优化:上层算法产生一个 HEN 网络结构的种群,并把这些候选结构提供给下层算法,下层算法对各候选结构进行最优热负荷分配,即确定每个匹配换热器和辅助加热或者冷却设备的换热量,同时保证换热器换热量总和最大,并把这个结果作为这个结构的遗传适应值返回到上层算法中参与整个演化过程。

无分流 MER 问题的数学模型如下:

$$\max f(x, y) \quad x \in \Omega_1, y \in \text{Arg max} \left\{ \sum_{i=1}^n y_i \mid y \in \Omega_2(x) \right\}. \quad (1)$$

式中,  $f(x, y)$  是系统优化目标函数,是一个满足 MER 的网络结构,它有两个输入变量,即可演化网络结构  $x$  与相应的热负荷分布变量  $y$ ;  $x$  是上层变量,它是遗传算法的操作对象,可行域为  $\Omega_1$ ,代表给定原始参数及优化参数后的 HEN 所有匹配的集合;  $y$  是下层变量,这是一个向量,其各分量代表网络上匹配换热器和辅助热交换器的热负荷值,其中  $n$  代表匹配热交换器总数,意即  $y$  须满足匹配换热器热负荷最大;  $y \in \Omega_2(x)$  表示下层算法的操作变量必须满足上层算法给定的约束条件,如热平衡方程,最小传热温差等。

改进后的遗传算法流程图如图 2。

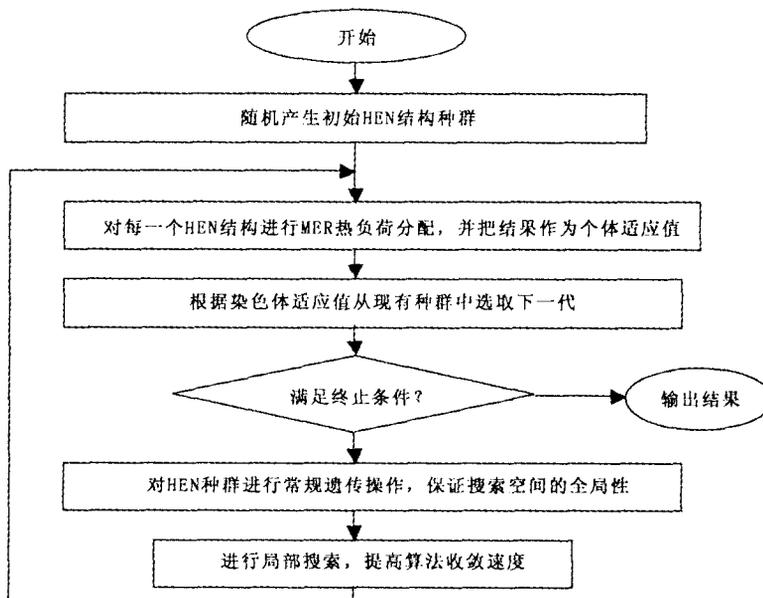


图2 改进后的遗传算法流程图

## 1.2 HEN 染色体描述

换热网络优化设计中, 染色体的描述需考虑以下几方面的因素.

- ① 能良好适应常规遗传算子的操作, 并使这种操作具有比较明显的物理意义.
- ② 可以较方便地转化为下层算法可以识别的候选结构, 适合网络参数的优化.
- ③ 网络结构的描述应该具有较好的物理含义, 且易于理解.

无分流的换热网络设计问题本质上是一个匹配优化问题, 即在冷流 a 和热流 b 之间设置一个换热器. 本文采用关联矩阵表示换热网络的结构, 相应引入“层”(level)的概念.

不失一般性, 以冷流作为参照, 则冷流上不同的换热器只会出现在不同的层中, 这便是层式网络结构带来的一个直接约束. 以图 3(a) 为例, 介绍 HEN 结构的描述, 用箭头表示冷热流方向. 为增大传热效率, 这里只考虑逆流换热.

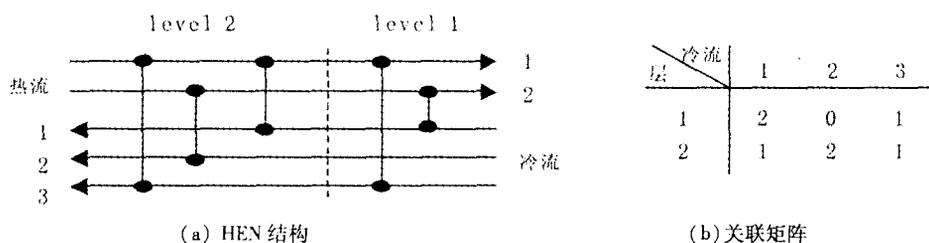


图3 HEN 的关联矩阵表示

上层遗传算法产生的每一个 HEN 结构可用关联矩阵 A 来表示, 关联矩阵具有  $l$  行 (代表  $l$  层) 和  $n_k$  列 (代表  $n_k$  个冷流), 关联矩阵的  $(i, j)$  元素为第  $i$  个冷流在第  $j$  层所匹配的热流. 若  $A(i, j) = k$ , 则表示第  $j$  层第  $i$  个冷流与第  $k$  个热流进行匹配换热. 若  $k = 0$ , 则意味着此处没有任何匹配. 用  $n_j$  表示热流个数. 在每一层中, 每一个热流允许和多个冷流进行匹配换热. 在一层内, 热交换器的排列顺序 (从右到左) 和它们在关联矩阵相应行中出现的顺序 (从左到右) 是相同的. 图 3(a) 和 (b) 表明了这种变换关系. (a) 中的 HEN 结构包括 2 个热流, 3 个冷流, 因此  $n_k = 3$ . 层数设定为 2, 这在一定程度上限制了网络的复杂度. (a) 所代表的网络实际顺序结构是  $\{2\ 1 \mid 1\ 2\ 1\}$ , 其中“|”代表分层.

遗传算法中一般使用一维的染色体, 因此我们把  $l \times n_k$  二维矩阵的  $l \times n_k$  个元素一行排开表示成一维串码, 每个元素都变成了染色体中的“基因”. 例如, 图 3(b) 的染色体描述为  $\{2, 0, 1, 1, 2, 1\}$ .

## 1.3 算法结构的下层线性规划

对上层遗传算法产生的每一个 HEN 结构, 下层优化器对热负荷进行分配, 且使换热器的换热总和最大. 下层算法是一个具有等式和不等式约束的线性规划问题. 等式约束表示每个物流的热平衡; 不等式约束表示每个逆流换热器两侧的冷热流体的传热温差必须满足最小传热温差 ( $\Delta T_{\min}$ ).

在关联矩阵中, 没有考虑辅助换热设备, 在生成等式及不等式约束时, 每条物流的出口处会自动添加一个辅助换热设备, 它和别的换热器一起参与热负荷分配. 如果最后优化器给它分配的换热量为零, 则它将会被去除.

下层算法中每个 HEN 的等式约束的个数为  $n_k + n_j$  (其中  $n_k, n_j$  表示冷、热流的个数). 以图 3 为例, 它所表示的 HEN 结构有以下等式约束:

$$C_{ph1}(T_{h1}^S - T_{h1}^T) - (X_2 + X_3 + X_5 + C_1) = 0, \quad (2)$$

$$C_{ph2}(T_{h2}^S - T_{h2}^T) - (X_1 + X_4 + C_2) = 0, \quad (3)$$

$$C_{pc1}(T_{c1}^S - T_{c1}^T) - (X_1 + X_3 + H_1) = 0, \quad (4)$$

$$C_{pc2}(T_{c2}^S - T_{c2}^T) - (X_4 + H_2) = 0, \quad (5)$$

$$C_{pc3}(T_{c3}^S - T_{c3}^T) - (X_2 + X_5 + H_3) = 0, \quad (6)$$

式中,  $T_{ck}^s$  和  $T_{ck}^t$  是冷流  $k$  的源温度和目标温度;  $T_{hj}^s$  和  $T_{hj}^t$  表示热流  $j$  的源温度和目标温度;  $X_i$  是第  $i$  个换热器的热负荷;  $C_j$  是热流  $j$  的辅助冷却负荷;  $H_k$  是冷流  $k$  的辅助加热负荷;  $C_{phj}$  和  $C_{pck}$  分别热流  $j$  和冷流  $k$  的热容。

下层算法中每个 HEN 中的不等式约束的个数  $2 \times N$  (其中  $N$  是网络中换热器的总数), 即:

$$T_{hot\_in} - T_{cold\_out} \geq \Delta T_{min}, \quad T_{hot\_out} - T_{cold\_in} \geq \Delta T_{min} \quad (7)$$

式中,  $\Delta T_{min}$  是最小传热温差, 它是一个设计参数, 需根据具体问题进行选取.  $T_{hot\_in}$  与  $T_{hot\_out}$  分别表示每个换热器热流体的进出口温度;  $T_{cold\_in}$  与  $T_{cold\_out}$  分别表示每个换热器冷流体的进出口温度. 以图 3 为例, 它所表示的 HEN 结构共有  $10(5 \times 2)$  个不等式约束. 以图 3 中第一个换热器为例, 其冷流进、出口温度分别为  $T_{c1}^s, [T_{c1}^s + X_1/C_{pc1}]$ , 热流出、进口温度分别为  $[T_{h2}^t + C_2/C_{ph2}], [T_{h2}^t + (C_2 + X_1)/C_{ph2}]$ , 故第一个换热器有以下不等式约束:

$$[T_{h2}^t + C_2/C_{ph2}] - T_{c1}^s - \Delta T_{min} \geq 0, \quad (8)$$

$$[T_{h2}^t + (C_2 + X_1)/C_{ph2}] - [T_{c1}^s + X_1/C_{pc1}] - \Delta T_{min} \geq 0. \quad (9)$$

下层线性规划算法的目标函数为:

$$J = \max \sum_{i=1}^5 X_i. \quad (10)$$

以图 3 所示 HEN 结构为例, 该目标函数的约束条件为: 等式约束: 式(2) ~ (6); 不等式约束: 式(8) ~ (9) 及图 3 中其余 4 个换热器的相应 8 个不等式约束.

### 1.4 遗传算子

遗传算子包括杂交和变异, 通过具体例子说明如下.

#### 1.4.1 杂交(crossover)

设有两个父代 HEN 结构个体 a, b, 如图 4.

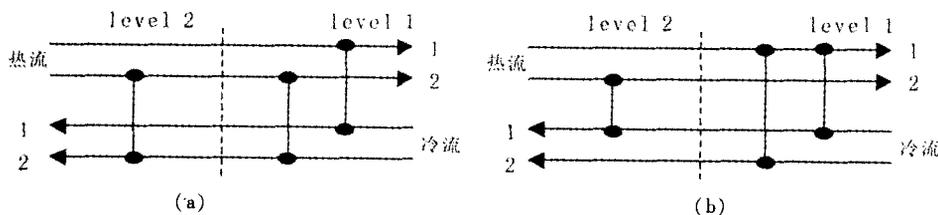


图 4 两个父代网络结构

它们对应的染色体分别为  $\{1, 2, 0, 2\}$ ,  $\{1, 1, 2, 0\}$ . 杂交算子随机地在染色体的各个基因中选取一位作为交叉位, 然后在交叉点两侧对两个父代基因进行交换. 例如, 此例的交叉位随机地选第二位和第三位之间, 则得到的两个子代个体为  $\{1, 2, 2, 0\}$  和  $\{1, 1, 0, 2\}$ , 对应的网络结构如图 5:

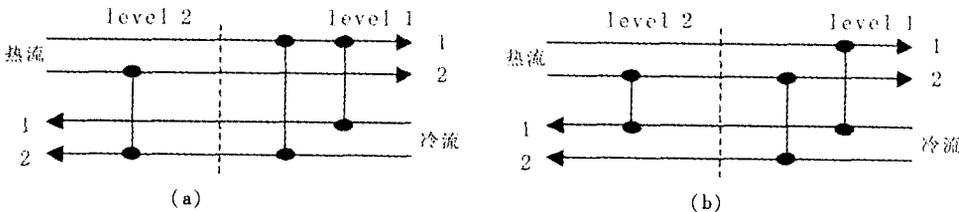


图 5 杂交产生的子代网络结构

#### 1.4.2 变异(mutation)

变异操作是在种群中随机挑选一个父代染色体按照概率随机选择某一些基因进行可行域范围内(此处指热流数目)的随机取值, 如果和原来父代个体的同位基因相同, 则重复进行, 直到发生改变. 例如对图 5 的两个父代染色体的第二位基因进行变异操作, 可以得到如下子代染色体  $\{1, 1, 0, 2\}$ ,  $\{1, 2, 2, 0\}$ , 对应的网络结构如图 6.

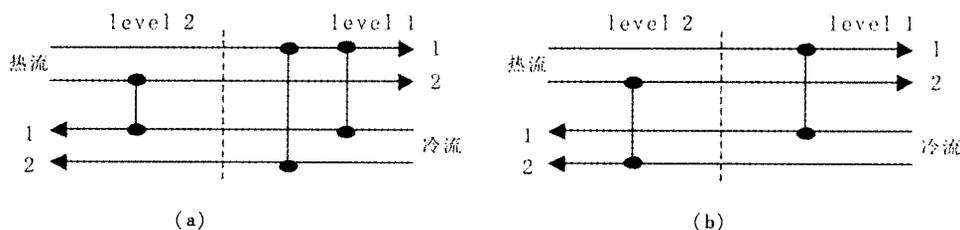


图6 变异产生的子代网络结构

### 1.5 遗传算法的改进——局部搜索策略

传统的遗传算法只进行个体的优化而忽略了对基因的优化,变异算子也只是在基因的一位或某几位上进行随机的变异,这使得变异算子的效率不高,搜索缺乏很好的导向性. HEN 匹配优化问题中,一个染色体中必然会有良好的基因,也会有较差的基因,若不加区别地进行变异和杂交,则很容易在下一代中丢失原本良好的匹配,增大搜索到局部最优解的难度;另一方面,一种精密的局部搜索策略虽然具有增大整体算法发现更好解的能力,但这是以增加算法运行时间为代价的. 为最大限度解决上述矛盾,本文提出一种针对匹配优化问题的受控变异(controlled mutation)方法进行局部寻优,即在算法流程中自动识别优良染色体中的优良基因片断并加以保护,以消除原始变异操作的破坏作用,增大局部搜索的方向性. 具体方法如下.

(1) 在当前种群中按一定比例挑选适应值较好的一部分个体染色体组成亚种群(sub population),作为实施局部搜索的对象群体. 本文所取的比例为 20%.

(2) 进行基因比对,即在这个亚种群中再挑选若干适应值最好的染色体,对他们的基因排列进行比对,从中发现元素相同的基因位,并进行记录.

(3) 对亚种群所有染色体的较好的基因位进行屏蔽,然后对亚种群实施随机的变异操作.

(4) 对变异后的染色体进行适应值评价,从中发现新的较好的解,代替当前的最好解.

除屏蔽优良基因位以外,以上步骤中所使用的变异操作与普通遗传算法的策略是一样的,即随机挑选染色体的一个基因位,然后在其定义域内随机取值,如果如原值相同,则重复取,直到发生改变.

例如,在一个热交换网合成问题中,层数  $l = 3$ ,冷流数  $n_k = 3$ ,热流数  $n_j = 4$ ,由前面的模型介绍,可知其染色体的位数为 9,取优良种群中两个最优染色体进行基因比对. 如图 7 所示:

图中,箭头所指是染色体比对后发现的优良基因. 这种变异策略和外层遗传算法的变异策略是一致的,可以调用相应的函数,但需给出种群大小和变异概率两个参数.

0	1	2	0	4	0	2	1	4
0	2	3	0	4	0	3	1	1
↑			↑	↑	↑			↑

图7 染色体中的优良基因

由于设计算法时,受控变异只局限于局部搜索过程,参加局部搜索的染色体最终还要回到大的遗传算法运算中进行演化,所以这种局部寻优不会使整体种群丧失多样性而导致过早收敛.

## 2 应用实例及结论

采用基于 Windows 2000 的 Matlab6.1 作为算法仿真环境,编写了遗传算法工具箱和优化工具箱的接口(.m)文件,并对原工具箱中的函数进行修改以加入局部搜索过程. 以著名的芳香烃工厂换热网络问题<sup>[5]</sup>为例,用本文方法进行设计. 问题的原始参数如表 1 所示.

本文采用的最小传热温差  $\Delta T_{\min} = 26^\circ\text{C}$ . 初始种群大小为 20,演化代数设定为 100. 改进后的遗传算法中,整体变异概率  $P_m = 0.2$ ,局部搜索概率  $P_s = 0.6$ .

取优化层数  $l = 2$ ,得到网络结构如图 8.

表 1 芳香烃工厂热网问题参数

(kW/K)

Stream	$T_{in}$ (°C)	$T_{out}$ (°C)	$C_p$
H1	327	40	100
H2	220	160	160
H3	220	60	60
H4	160	45	400
C1	100	300	100
C2	35	164	70
C3	85	138	350
C4	60	170	60
C5	140	300	200

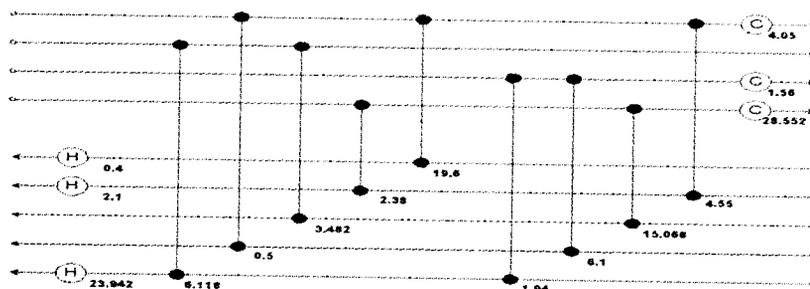


图 8 演化出的最优网络结构 ( $l = 2$ )

上面网络结构的 MER 为 59.74 MW, 优于文献[5]的结果, 且网络结构差异较大. 可见, 结合局部搜索策略的改进遗传算法能够搜索到更广泛的解空间. 算法的运行过程如图 9 所示.

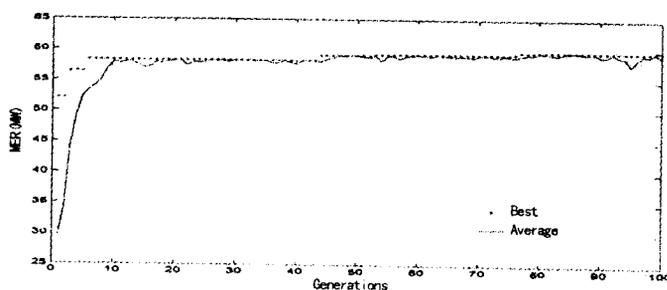


图 9 改进遗传算法的运行 ( $l = 2$ )

图 9 表明, 本文方法具有很强的收敛性能. 最优解曲线一共跳变了 7 次, 其中有 4 个解是在局部搜索过程中发现的.

如果增加优化层数, 网络复杂度会相应增加, 所提供的搜索空间也会进一步增大. 现在取优化层数  $l = 3$ , 运行算法后可以得到最优网络结构(图 10).

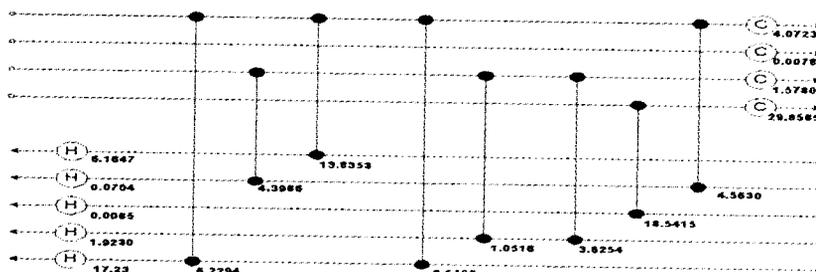


图 10 演化出的最优网络结构 ( $l = 3$ )

图 10 的 MER 可以达到 60.78 MW, 且只使用了 8 个换热器, 在结构和最大热回收量上都优于使用一般简单遗传算法的结果, 算法运行过程如图 11 所示。

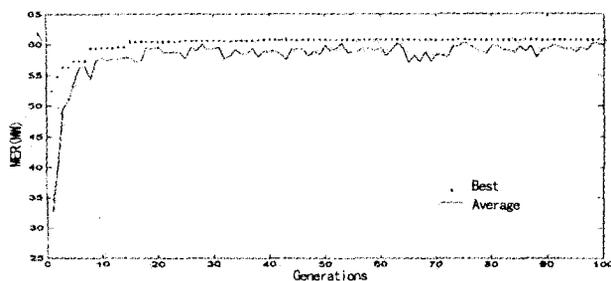


图 11 改进遗传算法的运行 ( $l = 3$ )

需要指出的是, 本文提出的局部搜索策略在算法运行过程中, 起到明显的局部寻优作用. 从以上结果可以看出, 遗传算法作为一种鲁棒性很强的算法, 非常适合于复杂系统的优化问题, 而且具有较强的全局收敛能力. 另外, 本文方法可通过改变算法的一些可调参数得到一组而非一个最优解, 这样在选择最终方案时, 可进一步考虑其他一些实际因素, 如可操作性、可控性等.

## 参考文献:

- [1] LINNHOFF B, HINDMARSH E. Pinch design method for heat exchanger networks[J]. Chem Engng Sci, 1983, 38(5): 745 - 763.
- [2] FLOWER J R, LINNHOFF B. A thermodynamic - combinatorial approach to the design of optimum heat exchanger networks[J]. AIChE J, 1980, 26(1): 1 - 9.
- [3] PAPOULIAS S A, CROSSMANN I E. A structural optimization approach in process synthesis - II heat recovery networks [J]. Comput Chem Engng, 1983, 7(6): 707 - 721.
- [4] ANDROULAKIS I P, VENKATASUBRAMANIAN V. A genetic algorithmic framework for process design and optimization [J]. Comput Chem Engng, 1991, 15(4): 217 - 228.
- [5] LINNHOFF B, AHMAD S. Cost optimum exchanger networks - I. Minimum energy and capital using simple models for capital[J]. Comput Chem Engng, 1990, 14(7): 729 - 750.

## Optimal design for chemical heat exchange networks based on two - level combinatorial optimization using improved genetic algorithms

XU Wen-yan<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>2</sup>

(1. College of Life and Environment Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2. Department of Automation, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Heat exchanger networks (HEN) are most popular utilities to exchange the energy in chemical industrial processes. The design of HEN is important to the minimum cost and maximum profit of the enterprises. This paper proposes a two-level optimization strategy based on improved CA and mathematical programming to deal with the optimal design of HEN. The validity of this strategy is demonstrated by the results obtained in Matlab environment.

**Key words:** heat exchanger networks; optimal design; genetic algorithms; two - level combinatorial optimization; local search