

研究论文

基于遗传算法的翅片管换热器管路优化方法

吴志刚, 丁国良, 浦 晖, 龙慧芳

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 通过设计有针对性的遗传编码方法和遗传操作算子, 提出了一种实用有效的换热器管路连接优化方法。在满足换热器的换热能力和实际制造工艺的约束条件下, 以换热器管路连接最短为优化目标对一个实际翅片管换热器进行了优化研究。结果表明, 所设计的优化算法能够在 5 h 内收敛, 优化后的连接管长度缩短 25%。

关键词: 翅片管换热器; 管路连接; 遗传算法; 优化

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 05-1115-06

Optimization approach for tube circuit of fin-and-tube heat exchanger based on genetic algorithm

WU Zhigang, DING Guoliang, PU Hui, LONG Huifang

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A novel tube circuit optimization approach for fin-and-tube heat exchanger was presented by developing a particular genetic coding method and genetic operators. A case study was performed on a practical heat exchanger. The optimization objective of the case was to obtain the shortest joint tube length of the tube circuit with the constraint conditions of satisfying the designed heat exchange capacity and the convenience of manufacture. Optimization result showed that the designed algorithm could converge within 5 h and the total joint tube length decreased by 25% after optimization.

Key words: fin-and-tube heat exchanger; tube circuit; genetic algorithm; optimization

引 言

翅片管换热器广泛应用于化工、动力及制冷空调领域, 其优化研究是该领域的热门研究课题。目前换热器优化的研究目标多集中在成本最低和换热能力最大两个方面。翅片管换热器的成本和换热能力受很多因素影响, 如换热管和翅片的类型、管间距、翅片间距、管路连接方式和迎面风速的分布等^[1-6]。通过合理设计换热器管路连接可以使相同

换热能力的换热器的传热面积减少 5%^[4], 使相同传热面积下的换热器的换热能力提高 26%^[5]。因而开展换热器管路连接的优化研究具有实用意义。

换热器管路间的连接除了受制造工艺的限制外, 还受管路分(合)及管内工质流向等因素的限制, 因此换热器管路优化是个强约束组合优化问题。基于符号学的方法尽管能够实现对换热器管路连接的优化^[7], 但因该方法没有充分考虑研究对象的工作特性, 导致优化进度比较慢, 同时实现起来

2006-06-13 收到初稿, 2006-08-28 收到修改稿。

联系人: 丁国良。第一作者: 吴志刚 (1976—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50576053); 高等学校博士点基金项目 (20050248019)。

Received date: 2006-06-13.

Corresponding author: Prof. DING Guoliang. E-mail: glding@sjtu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50576053) and the Doctoral Program Foundation of Institutions of Higher Education of China (20050248019).

非常复杂,因而需要寻找一种易于操作而又有效的优化算法。基于达尔文进化理论的遗传算法因具有全局搜索特性、对梯度信息的不依赖性和易于操作性,近年来被广泛应用于解决多类组合优化问题^[8-14],故可以考虑将该算法引用到换热器管路连接的优化研究中。但若直接采用现有的遗传编码方法,不但很难正确地表述换热器的管路连接关系,而且在交叉和变异操作中,易产生非法的管路连接,导致程序不能正常运行,同时由于随机性太大,进化速度非常慢,不能满足实用需要,故需开发针对于换热器管路连接的遗传编码、交叉及变异操作方法。此外,在换热器的管路连接中存在许多管与管间的连接,其中的某一个或几个管与管间的连接出现非法情况的概率比较大,若将这些非法的管路连接形式都采取抛弃策略,将会严重缩小搜索空间,故应当尽量对非法的管路连接进行修正,就需要开发具体的修正操作方法。

通过综合考虑换热器的管路连接及换热特性,本文提出了适合换热器管路连接优化的遗传编码方法及对应于换热器管路连接最短为优化目标的交叉、变异和修正操作方法,并对其作了实例验证。

1 优化对象、优化目标及约束条件

优化对象为有任意多个分支且管路内部可有分合的翅片管换热器,换热器的结构、工况参数及入口支流路数 $n_{p,in}$ 和出口支流路数 $n_{p,out}$ 已知。优化目标和约束条件为:

$$\begin{aligned} \min \quad & L(M), M \text{ 为不同类型的管路连接} \\ \text{s. t.} \quad & \textcircled{1} Q \geq Q_0; \\ & \textcircled{2} \text{ 换热器背面的管路连接只能限制在相邻换热管间的连接。} \end{aligned}$$

其中, L 为管路连接; M 为对应的连接管的长度; Q 为管路连接 M 对应的换热器的换热量; Q_0 为换热器的设计换热量。

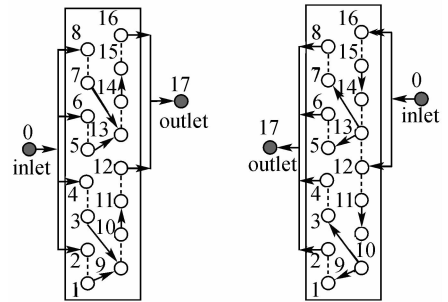
2 遗传算法设计

遗传算法主要由编码/解码、种群初始化、评价、选择、交叉和变异 5 部分组成。将该算法应用到换热器管路连接优化中时,除了需对其中的编码/解码方法、种群初始化、交叉操作方法和变异操作方法及评价时采用的适应度函数的确定进行改进之外,还需要开发相应的修正操作方法来防止因

非法路径的出现而导致的搜索空间的缩小。

2.1 编码和解码方法

为了能正确地反映换热器中各个换热管间的连接关系,需要对换热器中的换热管进行编号。自迎风面第一排的最低列开始自下而上逐排进行编号,编号从 1 开始逐渐累加到换热器的换热管总数 N 。换热器的入口集管和出口集管分别被编号为 0 和 $N+1$ 。如图 1 所示。



(a) has inner confluence (b) has inner divergence

图 1 换热器管路连接示意图

Fig. 1 Schematic of heat exchanger tube circuit

2.1.1 编码方法 为了保证编码格式的统一及操作的简便,采用如下的整数串 Z 来表示换热器的管路连接。

$$\text{整数串 } Z: x_1 \ x_2 \ \dots \ x_j \ x_{j+1} \ x_{j+2} \ \dots \ x_{j+N}$$

其中, x_1, x_2, \dots, x_{j+N} 为 $j+N$ 个换热管编号,它们的含义随管路内部存在汇合或分岔的不同而不同。

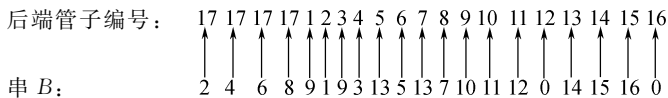
对具有内部汇合的换热器的一个管路连接来说, $j=n_{p,in}$, 整数串中前 j 个整数“ x_1, x_2, \dots, x_j ”代表 $n_{p,in}$ 个入口管的编号,后 N 个整数“ $x_{j+1}, x_{j+2}, \dots, x_{j+N}$ ”代表分别同 1[#]管, 2[#]管, \dots , N [#]管后端相连的换热管的编号。

对具有内部分岔的换热器的一个管路连接来说, $j=n_{p,out}$, 整数串中前 j 个整数“ x_1, x_2, \dots, x_j ”代表 $n_{p,out}$ 个出口管的编号,后 N 个整数“ $x_{j+1}, x_{j+2}, \dots, x_{j+N}$ ”代表分别同 1[#]管, 2[#]管, \dots , N [#]管前端相连的换热管的编号。

例如,对图 1 (a) 所示的具有内部汇合的换热器的管路连接,可采用如下整数串 A 表示:

$$\begin{array}{cccccccccccccccc} \text{前端管子编号:} & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 \\ \text{串 } A: & \downarrow \\ & 2 & 4 & 6 & 8 & 9 & 1 & 9 & 3 & 13 & 5 & 13 & 7 & 10 & 11 & 12 & 17 & 14 & 15 & 16 & 17 \end{array}$$

对图 1 (b) 所示的具有内部分岔的换热器的管路连接,采用如下整数串 B 表示:



2.1.2 解码方法 依据整数串 Z 中各位置上的整数的含义将整数串 Z 反演（解码）就可以获得相应的管路连接关系，以供换热器仿真程序评价时使用。解码时可从 0[#]管 [或 (N+1)[#]管] 开始，依次从整数串中遍历出每一支流路中的换热管，直到遇到 (N+1)[#]管（或 0[#]管）。例如，对具有内部汇合的换热器的管路连接 A 来说，可采取图 2 的方法获得第 1 支流路的连接关系为：0-2-1-9-10-11-12-17。采用类似方法可获得其他支流路的管路连接关系。

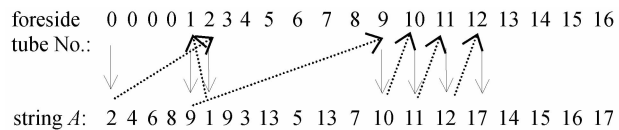


图 2 整数串解码方法

Fig. 2 Method for decoding integer string

在实际编程时，该整数串可以用 C++ 中的 vector 数据结构存储，并可根据 N 和 n_{p,in}（或 n_{p,out}）的大小随意改变整数串的长度。这样，该编码方式对每个换热器管路连接的表示和存储仅需要 N + n_{p,in}（或 N + n_{p,out}）个整数空间，对其解码也仅需要 N + n_{p,in}（或 N + n_{p,out}）次遍历，对计算机内存和解码的时间需求都很少。

2.2 初始种群的创建

因优化目标为管路连接最短，所以在最优管路连接中每个换热管应最大限度地同与自身相邻的换热管相连。为了在初始创建管路连接时不失随机性，又能同时创建同最优目标比较接近的管路连接，特在优化前首先为每个换热管创建邻管数据库。图 3 表示了不同相对位置下的换热管（图中以黑色填充）及其对应的邻管组（图中以灰色填充）。因邻管数据库为每个换热管的连接管创建了一个较优的解区域，可避免或减少连接管太长的解的出现，故有利于加快收敛速度。但由于没有规定所有的连接管都必须包含在相应的邻管数据库中，故邻管数据库的引入不会使搜索空间受到限制。

当换热器内部存在汇合/分岔时，若不加引导地完全依靠随机的方法创建，则产生的整数串必将对许多非法的管路连接。为此，采用先确定入口管、出口管和汇合/分岔管，然后再按“连接管最

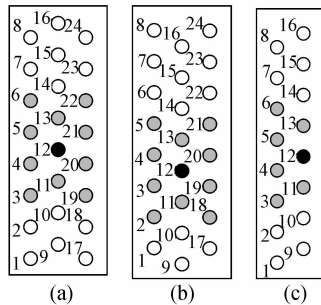


图 3 邻管组示意图

Fig. 3 Schematic of neighbor tube group

短原则”随机确定各换热管间的连接关系来创建初始种群。下面的 Step1~Step6 给出了对具有内部汇合的管路的具体创建步骤。

Step1: 确定入口管。随机选择 n_{p,i} 个换热管，将其分别与 0[#]管相连，同时为其选择一个满足约束条件②的后续连接管。

Step2: 确定出口管。随机选择 n_{p,out} 个无后续连接管的换热管，将其分别与 (N+1)[#]管相连。

Step3: 确定汇合管。随机选择 (n_{p,in} - n_{p,out}) 个无前端连接管或前端连接管数小于汇合数上限的换热管，再次为其寻找一个前端连接管。

Step4: 为每个换热管确定合适的前端连接管。遍历所有的换热管，若发现某一换热管无前端连接管，则依次从换热管的邻管组中、无后端连接管的换热管组中及所有的换热管中为其选前端连接管。

Step5: 对产生的管路连接进行合法性评价与修正。若该管路连接形式合法或修正成功，转 Step6；否则，转 Step1。

Step6: 保存新创建的管路连接整数串，并转 Step1，直到产生的整数串的数目满足种群规模的需求。

对具有内部分岔的管路的创建时，可先按创建内部具有汇合的管路的方法来创建管路连接，然后再将工质流向取反，则入/出口管变为出/入口管、分岔管变为汇合管。

2.3 适应度函数设计

在进化过程中，需要对每一个体的适应性进行评价，采用式 (1) 来计算个体的适应度值：

$$P(j) = 1.0 / \left(0.6 \frac{L}{L_r} + 0.4 \frac{Q_0}{Q} \right) \quad (1)$$

式中 $P(j)$ 为第 j 个个体的适应度值; L 为第 j 个个体的总连接管长度, m ; L_r 为参考长度, 一般取第一代种群中的最短管路连接长度, m 。

因在实际的换热器管路连接中, 一个分岔 (汇合) 点处的总支路数不会超过 3, 故换热器中连接管的类型不会超过 3 种, 如图 4 所示。

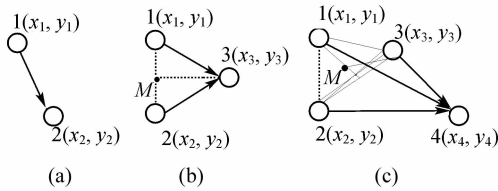


图 4 连接管的 3 种类型
Fig. 4 Three types of joint tube

对于 3 种类型的连接管长度的计算方法如下。

(1) 无分岔

$$L_{12} = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中 L_{12} 代表 1# 管和 2# 管间连接管的长度, m 。

(2) 2 合 1 (或 1 分 2)

$$\begin{aligned} L_{13} &= L_{1M} + L_{M3} \\ L_{23} &= L_{2M} + L_{M3} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 M 为 1# 管和 2# 管端面中心连线的中点。 L_{ab} ($a, b = 1, 2, 3, M$) 为 a, b 两点间的连接管长度, m 。

(3) 3 合 1 (或 1 分 3)

$$\begin{aligned} L_{14} &= L_{1M} + L_{M4} \\ L_{24} &= L_{2M} + L_{M4} \\ L_{34} &= L_{3M} + L_{M4} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 M 为 1# 管、2# 管和 3# 管端面中心连线所组成的三角形的重心。

2.4 遗传操作设计

2.4.1 交叉 采用贪婪交叉的方法对随机选出的两个父代个体进行交叉来加速遗传算法的收敛速度。先交叉两父代个体的入口管的位置以获得子代个体的入口管位置, 然后再从子代个体的每一入口管开始, 从两个父代中选择与其对应的较短的后端连接管作为其后端连接管, 直到遇到管路连接冲突或出口管为止, 之后再按照“连接管最短”的原则将未连接的换热管进行连接, 并对得到的子代个体进行合法性与否的判断和修正。这样, 交叉后得到的子代个体既继承父代的优良特征, 又防止随机交叉而产生的非法管路连接, 并在一定程度上扩展了

搜索空间, 加速了优化进程。具体的, 若以 FA 和 FB 分别代表两个用来交叉的父代个体; SA 代表由 FA 和 FB 交叉产生的子代个体; $L_{X^{\#}Y^{\#}}$ 代表 $X^{\#}$ 管和 $Y^{\#}$ 管间的连接管的长度。对内部具有汇合的管路的交叉的具体步骤如 Step1~Step12 所示。

Step1: 交叉选择 FA、FB 的入口管作为 SA 的入口管。

Step2: 令 $j=1$, 设 $X_1 = SA [j]$, $X = SA [X_1 + n_{p,in}]$ 。

Step3: 设 $Y = FA [X + n_{p,in}]$, $Z = FB [X + n_{p,in}]$ 。

Step4: 若 $Y \neq N+1$, $Z \neq N+1$, 转 Step5; 若 $Y = N+1$, $Z \neq N+1$, 转 Step6; 否则, 转 Step7。

Step5: 若 $L_{X^{\#}Y^{\#}} \leq L_{X^{\#}Z^{\#}}$ 且 $Y^{\#}$ 管未出现在 SA 中, 转 Step8; 若 $Z^{\#}$ 管未出现在 SA 中, 转 Step9。

Step6: 若 $Z^{\#}$ 管未出现在 SA 中, 令 $SA [X + n_{p,in}] = Z$, 寻找 $Z^{\#}$ 管的合法后端连接管, 并记为 $L^{\#}$ 管, 令 $X=L$, 转 Step3; 否则, 令 $SA [X + n_{p,in}] = N+1$, 转 Step10。

Step7: 若 $Y^{\#}$ 管未出现在 SA 中, 令 $SA [X + n_{p,in}] = Y$, 寻找 $Y^{\#}$ 管的合法后端连接管, 并记为 $L^{\#}$ 管, 令 $X=L$, 转 Step 3; 否则, 令 $SA [X + n_{p,in}] = N+1$, 转 Step10。

Step8: 若 $Y^{\#}$ 管前端换热管的数目没有超过最大的汇合管数极限, 令 $SA [X + n_{p,in}] = Y$, 寻找 $Y^{\#}$ 管的合法后端连接管, 并记为 $L^{\#}$ 管, 令 $X=L$, 转 Step 3; 否则, 令 $SA [X + n_{p,in}] = N+1$, 转 Step 10。

Step9: 若 $Z^{\#}$ 管前端换热管的数目没有超过汇合管数上限, 令 $SA [X + n_{p,in}] = Z$, 寻找 $Z^{\#}$ 管的合法后端连接管, 并记为 $L^{\#}$ 管, 令 $X=L$, 转 Step3; 否则, 令 $SA [X + n_{p,in}] = N+1$, 转 Step10。

Step10: 若 $j+1 < n_{p,in}$, 令 $j = j+1$, $X = SA [j + n_{p,in}]$, 转 Step3; 否则, 转 Step11。

Step11: 遍历整数串 SA, 为没有后端连接管的换热管选后端连接管。

Step12: 检查并校正所得到的管路连接个体 SA。

对内部具有分岔的管路的交叉方法, 只要将上面步骤中的 $n_{p,in}$ 改为 $n_{p,out}$, 及后端连接管改为前端连接管即可, 不再赘述。

2.4.2 变异算子 当对某一个体产生的 0~1 间的随机数超过设定的变异率时，则该个体将被实施变异操作。采用随机贪婪变异的方法，即通过对该个体某一支流路上的换热管的排列顺序进行随机调整，直到产生一个更短的管路连接或达到最大调整次数为止。因对换热管的连接顺序进行随机排列的操作仅发生在某一支流路上，故不会产生子环、工质流向冲突等非法管路连接，同时因采用随机贪婪的调整法则，所以这种变异方法既具有传统的遗传操作的扩展搜索空间的作用，又能够加速收敛速度。

2.4.3 修正算子 为了尽量对非法的管路连接进行修正，创建了如下的修正算子对每一个新的管路连接进行判断和修正：①对子环的判断和修正；②对出口支路数目的判断和修正；③对汇合点处工质流向的判断和修正。因文章篇幅原因，不再展开陈述。因在修正过程中各个管路连接又会经过一系列的调整，因而修正算子在一定程度上也起到了变异的作用。

3 算例分析

采用遗传算法对某实际换热器的管路连接寻优，换热器的结构和工况参数如表 1 所示。种群规模取为 10，进化代数取为 300，交叉率 0.6，变异率 0.85，收敛条件为进化代数达到设定值。

表 1 测试用换热器的结构和工况参数

Table 1 Structural parameters and work conditions

Item	Value
structural parameters	
length/width/height /mm	900/26.6/266
row number/column number	2/12
row space/mm	13.3
column space/mm	21.0
bottom boundary space of each row/mm	5.25, 15.75
path number	4 inlet, 2 outlet
tube diameter/mm/type	7.0/enhanced
fin type/fin pitch/mm	slit /1.3
work conditions	
refrigerant type	R410A
refrigerant condensation temperature/°C	50
refrigerant inlet superheat/°C	11
mean flow rate/g · s ⁻¹	22.14
air inlet temperature T _{db} /T _{wb} /°C	35/24
air velocity/m · s ⁻¹	1.5
heat capacity target/W	3500×0.95

采用文献 [15] 所提供的仿真软件对每一管路连接的换热能力进行评价；采用精英选择的方法来选择下一代种群中的个体。图 5 为采用传统的随机交叉和变异操作时的优化进程；图 6 (a) 和图 6 (b) 分别为采用本文开发的遗传操作方法时的优化进程及输出的最优的管路连接示意图。

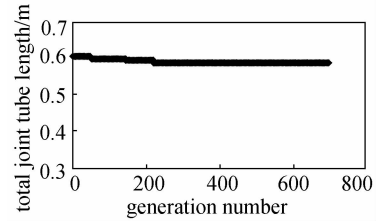
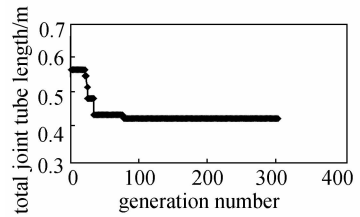
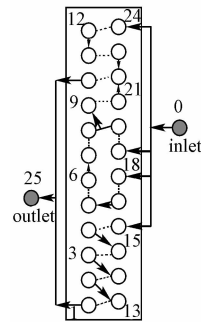


图 5 传统随机交叉和变异操作的优化进程
Fig. 5 Optimization progress chart with pure random crossover and mutation operator



(a)



(b)

图 6 本文开发的遗传操作的优化进程及最优管路连接示意图

Fig. 6 Optimization progress chart and optimal tube circuit with presented genetic operators

从图 5 及图 6 (a) 可以看出，若采用传统的遗传操作方法，则进化速度非常慢，即使经过 700 代优化后获得的解的效果也仅仅同采用本文开发的遗传操作经过 20~30 代优化后获得的解的效果相当。采用本文开发的遗传操作的优化算法在 80 代左右就可获得收敛值，得到的解的连接管总长度的缩短幅度达 25%，对应的换热器的换热量为 3469 W，满足设计要求；在 Pentium (R) CPU

2.66 GHz, 内存 1 GB 的计算机上的优化时间小于 5 h, 可以满足实际设计的需要。从图 6 (b) 可以看出, 所输出的优化后的管路连接中, 换热器背面的管路连接 (图中虚线所示) 都为相邻换热管间的连接, 便于实际制造。

4 结 论

针对换热器管路连接的特性提出了适合管路连接最短优化的编码方法和遗传操作算子, 并利用一个实例对其作了验证。从中可以得出如下结论:

(1) 所提出的编码方法能同时描述蒸发器及冷凝器中的任意管路连接、节省计算机的内存需求及遍历时间。

(2) 改进遗传操作算子后, 可以将遗传算法应用于换热器管路连接优化的研究中。利用改进的遗传操作算子, 可以使遗传算法在数小时内给出较好的满足实际设计需要的优化结果 (如连接管总长度的缩短幅度达 25%)。

本文所得优化结果中, 各支路所含换热管数目相差较多, 会带来流体在不同支路之间换热不平衡问题, 该问题可通过设定“换热能力最大”为优化目标来解决。该项工作正在进行中。

References

- [1] Wang C C, Jang J Y, Lai C C, Chang Y J. Effect of circuit arrangement on the performance of air-cooled condenser. *Int. J. Refrig.*, 1999, **22**: 275-282
- [2] Zhang Zhi (张智), Jin Peigeng (金培耕), Tu Wangrong (涂旺荣), Cheng Zhiming (程志明), Mei Xinxing (梅新兴), Liu Zhigang (刘志刚). Effect of circuit arrangement performance of air-cooled condensers. *HV&AC (暖通空调)*, 2002, **32**: 61-63
- [3] Liang S Y, Wong T N, Nathan G K. Study on refrigerant circuitry of condenser coils with exergy destruction analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2000, **20**: 559-577
- [4] Liang S Y, Wong T N, Nathan G K. Numerical and

- experimental studies of refrigerant circuitry of evaporator coils. *Int. J. Refrig.*, 2001, **24**: 823-833
- [5] Domanski P A. Finned-tube evaporator model with a visual interface//International Congress of Refrigeration, 20th. Sydney, Australia, 1999: 1447-1454
- [6] Yun J Y, Lee K S. Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat exchanger with slit fins. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2000, **43** (14): 2529-2539
- [7] Domanski P A, Yashar D, Kaufman K A, Michalski R S. An optimized design of finned-tube evaporators using the learnable evolution model. *HVAC and R Research*, 2004, **10** (2): 201-211
- [8] Holland J H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Michigan: The University of Michigan Press, 1975
- [9] Pan Zhengjun (潘正君), Kang Lishan (康立山), Chen Yuping (陈毓屏). *Evolutionary Calculation (演化计算)*. Beijing: Tsinghua University Press, 1998
- [10] Cao Naicheng (曹乃承). *Optimization of plate-fin heat exchangers based on genetic algorithm [D]*. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001
- [11] Liu Yun (刘云), Xu Weifu (徐伟福), Zhao Wei (赵伟), Zhou Kunying (周昆颖). Application of genetic algorithm to optimal design of a fin tube heat exchanger. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (北京化工大学学报)*, 2003, **30** (6): 87-90
- [12] Zhang Lina (张丽娜), Yang Chunxin (杨春信), Wang Anliang (王安良). Optimum design of plate-fin heat exchanger with genetic algorithm. *Journal of Aerospace Power (航空动力学报)*, 2004, **19** (4): 530-535
- [13] Loomans M, Visser H. Application of the genetic algorithm for optimization of large solar hot water systems. *Solar Energy*, 2002, **72** (5): 427-439
- [14] Wang Ling (王凌). *Shop Scheduling with Genetic Algorithms (车间调度及其遗传算法)*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
- [15] Liu J, Wei W J, Ding G L, Zhang C L, Fukaya M, Wang K J, Inagaki T. A general steady state mathematical model for fin-and-tube heat exchanger based on graph theory. *Int. J. Refrig.*, 2004, **27** (8): 965-973