

研究论文

# 基于知识及遗传退火混合算法的翅片管 换热器管路优化方法

吴志刚, 丁国良, 浦 晖

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 通过在现有方法中引入专业知识及模拟退火算法, 提出了一种基于知识及遗传退火混合算法的换热器管路连接优化方法。以一个实际翅片管换热器为例, 在满足实际制造工艺的约束条件下, 以换热器换热能力最大为优化目标对提出的方法进行了验证。结果表明, 基于知识及遗传退火混合算法得到的最优管路连接中, 各支路均匀交叉分布于空气流中, 且所含换热管数目相等, 避免了流体在不同支路之间换热不平衡的问题; 优化后得到换热器的换热能力比优化前提高 22%, 比单纯基于遗传算法的优化方法得到换热器的换热能力提高 10.3%。

**关键词:** 翅片管换热器; 管路连接; 知识; 遗传退火; 优化

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 10-2444-06

## Knowledge based genetic-simulated-annealing method for optimizing tube circuit of fin-and-tube heat exchangers

WU Zhigang, DING Guoliang, PU Hui

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

**Abstract:** A knowledge based genetic-simulated-annealing method for optimizing the tube circuit of fin-and-tube heat exchangers was presented by introducing specialized knowledge and the simulated annealing method into the existing method. Case studies were performed on a practical fin-and-tube heat exchanger. The optimization target is to obtain maximum heat exchange capacity of the heat exchanger with the constraint conditions of practical manufacture. The test results showed that after optimization, all paths of the optimal tube circuit were uniformly distributed in the airflow field and contained equal number of tubes, and the imbalance of heat transfer among the paths was avoided. The heat exchange capacity of the heat exchanger was 22% larger than that before optimization, and was 10.3% larger than that obtained by the existing pure-genetic-algorithm-based optimization method.

**Key words:** fin-and-tube heat exchanger; tube circuit; knowledge; genetic-simulated-annealing; optimization

### 引 言

翅片管换热器在化工、动力及制冷空调等领域

广泛应用, 对其进行优化研究是这些领域的热门课题。管路连接方式对翅片管换热器的成本和换热能力有很大影响<sup>[1-5]</sup>, 故进行换热器管路连接的优化

2006-12-01 收到初稿, 2007-05-30 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: 2006-12-01.

Corresponding author: Prof. DING Guoliang. E-mail: glding@sytu.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).

研究具有实用意义。换热器管路连接设计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。基于符号学习的方法<sup>[6]</sup>尽管能够实现换热器管路连接的优化，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，同时实现起来非常复杂，故需要寻找一种易于操作而又有效的优化算法。单纯基于遗传算法<sup>[7-8]</sup>的换热器管路连接优化方法<sup>[9]</sup>易于操作、能够有效地解决针对换热器管路连接最短为优化目标的换热器管路优化问题，但因在遗传操作中没有综合考虑换热器内部的传热特性，导致给出的最优管路连接中的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，进而影响换热器的整体换热能力。为了获得具有最大换热能力的管路连接，需要对现有的单纯基于遗传算法的换热器管路连接优化方法进行扩展，开发针对换热器换热能力最大为优化目标的换热器管路寻优方法。

对换热能力最大的优化来说，那些适于换热器管路连接最短优化的贪婪交叉和变异方法<sup>[9]</sup>不能直接采用。这是因为换热器的换热能力受风速及制冷剂流量分布等很多因素的影响，仅通过改变某一换热管的连接关系不但不能保证获得一个换热能力更大的管路连接，而且很容易使优化程序产生“局部最优”或“过早收敛”的问题。引入模拟退火（SA）算法<sup>[10]</sup>和专业知识可以解决以上问题。SA 算法主要模拟液体结晶（金属退火）过程的机理来实现优化操作，为避免搜索过程在局部最小处受阻，其允许产生“爬山运动”，即在寻优过程中允许某些质量低的解以一定的概率存活下去，这样就有可能使搜索过程跳出局部最优。同时，根据传热学理论<sup>[11-12]</sup>，要增大换热能力，需要增大传热温差、传热系数和换热面积。对翅片管换热器来说，通过改变管路连接方式来改变换热面积的可能性非常小，但通过改变管路连接方式能够影响管路中制冷剂的流向及分布，进而改变传热温差及传热系数。故若在优化程序中引入专业知识来引导其朝着使换热器冷热流体间的换热温差增大、避免各支路上的制冷剂出口参数不均及产生复热的方向前进，就可逐步获得使换热器的换热能力增大的管路连接，进而增强优化程序的寻优能力。

本文在已开发的基于遗传算法的换热器管路优化方法中引入模拟退火算法及专业知识，开发了基

于知识及遗传退火算法的换热器管路优化方法。

## 1 优化目标及优化方法框架

### 1.1 优化对象、目标及约束条件

优化对象为与文献 [9] 所述相同的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、工况参数不变。优化目标和约束条件为

$$\begin{aligned} \max \quad & Q(\text{TC}) \\ \text{s. t.} \quad & L_b \leq L_{\text{adj}}; m_{\text{in}} \leq m_{\text{in,max}}; m_{\text{out}} \leq m_{\text{out,max}} \end{aligned}$$

其中，TC 为换热器的管路连接变量；Q 为管路连接 TC 对应的换热器的换热能力； $L_b$  为换热器背面单个连接管的长度； $L_{\text{adj}}$  为换热器背面相邻的两个换热管间连接管的最大长度； $m_{\text{in}}$  和  $m_{\text{out}}$  分别为制冷剂的入、出口支路数； $m_{\text{in,max}}$  和  $m_{\text{out,max}}$  分别为制冷剂的入、出口支路数的最大值。

### 1.2 基于知识及模拟退火算法的优化方法的框架

图 1 为在单纯采用遗传操作算子进行管路寻优的基础上引入基于 SA 和专业知识的管路寻优方法整体框架图。图中，白色背景部分为单纯采用遗传操作算子进行管路寻优的方法（IGA）；灰色背景部分为引入的基于 SA 和专业知识的管路寻优方法，其中的控制模块（control module）用来确定何时和如何引入基于 SA 和专业知识的管路寻优方法。

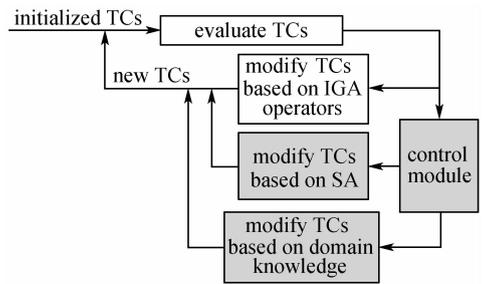


图 1 基于知识及遗传退火算法的优化方法框架

Fig. 1 Framework of knowledge based genetic-simulated-annealing method

## 2 在优化程序中引入 SA 算法

同遗传算法同时对一组个体（种群）进行操作不同，SA 每次只对一个个体进行操作，操作方式主要有两个：某一温度下的局部寻优和温度参数的变化<sup>[13]</sup>。故在现有的优化程序中引入 SA 算法时，既需要根据管路连接设计特点确定 SA 的两个操作方法，还需要确定如何在种群中选择个体进行 SA 操作。

## 2.1 适于换热器管路连接的 SA 局部寻优方法

采用 SA 进行优化时, 在任一温度层上, 需要进行相应的局部寻优操作。若对某一管路连接个体采用随机变异操作, 会很容易地出现非法个体而导致局部寻优操作的效率低下, 甚至会导致整个优化程序的崩溃, 故需要开发一个适用换热器管路连接的局部寻优方法。本文通过随机交叉某两不同支路的后半部分来实现局部寻优操作。因一个管路连接中的某两不同支路后半部分交叉后得到的新的管路连接个体仍是一个合法的管路连接个体, 可以直接参与下一步的计算, 故可以提高局部搜索效率。

## 2.2 适于换热器管路连接的 SA 操作参数设置

在有限时间条件下实现模拟退火算法需要的参数有: 起始温度  $T_0$ 、控制温度下降的函数、决定在每个温度 ( $T_i$ ) 下状态转移参数的准则、终止温度  $T^*$  及终止 SA 的准则。

考虑到换热器管路连接的特性, 对 SA 操作参数的设置如下。初始温度为

$$T_0 = \zeta N \quad (1)$$

式中  $\zeta$  为常数, 通常  $\zeta = 20 \sim 50$ ;  $N$  为换热器的总换热管数。

控制温度下降的函数为

$$T_{i+1} = \delta T_i \quad (2)$$

式中  $T_i$  为当前温度值;  $T_{i+1}$  为优化计算的下一温度值;  $\delta$  为温度下降比率, 通常  $\delta = 0.7 \sim 0.9$ 。

决定在每个温度 ( $T_i$ ) 下状态转移参数的准则为

$$P_{i1} > e^{-\frac{Q_s - Q_f}{T_i}} \quad (3)$$

式中  $P_{i1}$  为对该次局部搜索得到的新个体产生的  $0 \sim 1$  间的随机数;  $Q_s$  和  $Q_f$  分别为该次局部搜索前的管路连接个体对应的换热器的换热能力和局部搜索后得到的新的管路连接个体对应的换热器的换热能力。

SA 的终止温度  $T^*$  一般在  $0 \sim 0.5$  间取值。

采用 SA 寻优时, 在每一温度层进行一定次数的局部搜索后, 按式 (2) 的温度下降规则转入下一温度层继续进行寻优。当  $T_i \leq T^*$  时, 终止 SA 操作。

## 2.3 在优化程序中引入 SA 的方法

因 SA 和遗传算法操作个体的数目不同, 将 SA 操作应用到现有的基于遗传算法的优化程序中时, 会面临两个问题: (1) 何时采用 SA 操作; (2) 对哪些个体采取 SA 操作。对于问题 (1), 一般有两种解决方法: ①遗传算法的最优解在经过一

定代的操作后没有进展即可引入 SA 操作; ②优化程序每间隔一定代的进化后就强行引入 SA 操作。对于问题 (2), 考虑到对个体进行 SA 操作时需要多次局部搜索和评价, 若对种群中所有个体都进行 SA 操作, 则需要花费较长时间。根据作者的经验, 对种群中进行 SA 操作的个体的数目的选择可遵循如下的原则进行: ①若对某一个体评价需要的时间较长 (超过 1 min), 可仅对种群中最好的个体进行 SA 操作; ②若对某一个体评价需要的时间较短 (不足 1 s), 可对种群中所有的个体进行 SA 操作; ③若对某一个体评价需要的时间介于 1 s ~ 1 min 之间, 可采用转轮选择<sup>[14]</sup>或其他选择方法选择一定数目的个体来进行 SA 操作。

SA 的详细操作流程详见文献 [13], 本文不再赘述。在程序实现时, 将对个体进行 SA 操作的部分整合为一个 SA 优化模块 SAOM (simulated annealing optimization module), 然后将其添加到已开发的基于遗传算法的换热器管路优化程序中, 对选出的个体执行 SA 操作。

## 3 在优化程序中引入专业知识

在现有的基于遗传算法的优化程序中引入专业知识, 首先需要根据专业知识归纳出能够加速优化进度的换热器管路调整方法, 然后再将这些知识反映到优化程序中。

### 3.1 专业知识的归纳

结合传热学知识<sup>[11-12]</sup>及前人针对翅片管换热器的流程布置的相关研究成果<sup>[1-4]</sup>, 本文提出了 5 种用来尝试调整换热器管路连接的方法。

(1) 将管路中的制冷剂流向取反。管路中制冷剂的流向会影响制冷剂沿程及不同管路间的换热温差, 通过改变某些管路中的制冷剂流向, 有可能获得一个适合该类换热器的流型布置, 进而提高换热器的换热能力。

(2) 将管路的出口管放到迎风面上。换热器的出口管中多为单相流体 (过热气体或过冷液体) 若将管路的出口管放到迎风面上, 则可能提高该管内外的传热温差, 进而提高换热器的换热能力。

(3) 按照各个支路出口处制冷剂的焓值的大小调整管路中分/合点的位置。换热器中各支路的制冷剂出口焓值不同, 会导致部分支路中的制冷剂的温度过高, 而部分支路中制冷剂的温度过低。而温度过高 (或过低) 的支路的换热面积就有可能没有

充分利用，因而导致整个换热器的换热能力降低。通过尝试将制冷剂出口焓过高和过低的支路在某一个合适的位置进行分/合，将有可能避免这种制冷剂出口焓值不均的现象，从而提高换热器的换热能力。

(4) 将具有较多换热管的支路中的部分换热管转移到具有较少换热管的支路中。按照各支路中换热管的数目的多少来调整管路中的换热管分布，有可能避免因传热面积的不同引起的换热器各支路间的换热不平衡，从而提高换热器换热能力。

(5) 根据各支路中换热管在换热器中位置的高低，随机选择按从高到低或从低到高的顺序重排各支路中换热管的顺序，以引导优化程序创建一个有序线状的管路连接，便于制造。

### 3.2 在优化程序中引入专业知识的方法

本文将以上的每一个方法转换为类似遗传算法中的一个变异操作来参与寻优。依据专业知识创建的变异操作算子如下。

**变异算子 A** 改变管路中的制冷剂的流向。随机将管路中某一支路的制冷剂流向取反。

**变异算子 B** 将制冷剂出口管调整到换热器的迎风面上。

**变异算子 C** 按照各个支路出口处制冷剂的焓值的大小调整管路中分/合点的位置。具体步骤为：(1) 找出制冷剂出口焓最大和最小的支路  $P_H$  和  $P_h$ ；(2) 若是对冷凝器的管路优化，从支路  $P_h$  中选择换热管  $T^\#$ ，使  $P_h$  中  $T^\#$  管前面换热管的数目同  $P_H$  中的换热管的数目相同，然后将支路  $P_H$  插入到支路  $P_h$  中  $T^\#$  换热管的前面；(3) 若是对蒸发器的管路优化，从支路  $P_H$  中选择换热管  $T^\#$ ，使  $P_H$  中  $T^\#$  管后面换热管的数目同  $P_h$  中的换热管的数目相同，然后将支路  $P_h$  插入到支路  $P_H$  中  $T^\#$  换热管的后面。

**变异算子 D** 按照各个支路中换热管的数目的多少来调整管路中分/合点的位置。具体步骤为：(1) 找出支路中换热管的数目最多和最少的两个支路，分别记为  $P_L$  和  $P_l$ ，并记录这两个支路中的换热管数目的差值为  $\Delta L$ ；(2) 从  $P_L$  支路中选择  $\Delta L/2$  数目的换热管，并将其加入到支路  $P_l$  中。

**变异算子 E** 按各支路中换热管在换热器中高度位置的高低顺序，随机选择按从高到低或从低到高的顺序调整各支路中换热管的顺序。

为了保证每次变异操作后得到的个体是当前最好的，在以上每一个变异操作之后，程序都会计算

和比较变异操作前后产生的个体的换热能力，若变异后个体的换热能力增强，则用变异后的个体替换变异前的个体，否则保持个体不变。

将以上 5 个基于知识的变异算子按顺序连接并整合为一个基于知识的优化模块 KBOM (knowledge based optimization module)，将其放到已开发的适于换热器管路优化的遗传算法中的交叉操作与变异操作之间，对选出的变异个体执行一系列的变异操作。采用类似的方法，可方便地将其他的一些专业知识反映到优化程序中。

## 4 基于知识及遗传退火算法的换热器管路优化方法的计算流程

将得到的基于知识的优化模块 (KBOM) 和基于模拟退火的优化模块 (SAOM) 嵌入到已开发的适于换热器管路连接优化的改进遗传算法 (IGA)<sup>[9]</sup> 中，开发了基于知识和遗传退火算法的换热器管路优化方法 KGSA (knowledge based genetic-simulated-annealing method)。其计算流程如图 2 所示，其中具有灰色背景的部分为相比 IGA 新添加的部分。

为保证优化算法的顺利进行和所有的解都满足既定的约束关系，本文针对每一个约束关系都设计了一个对应的判断和修正操作算子，如对子环的判断和修正、对制冷剂流向冲突的判断和修正、对制冷剂进出口支路数的判断和修正以及对换热器背面连接管连接方式的判断和修正等，并且利用这些判断和修正算子对每一个新产生的管路连接个体进行检查和修正，以避免因非法个体的存在而导致的程序不可靠。

## 5 算例分析

采用开发的优化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为：换热器的长、宽、高分别为 900、39.9 和 266 mm；管排和管列数分别为 3 和 12；排间距和列间距分别为 13.3 和 21.0 mm；每排中最下面的换热管距换热器底端面的距离分别为 5.25、15.75 和 5.25 mm；制冷剂最大出/入口支路数均为 3；换热管为管外径为 7 mm 的强化管；管外采用条缝型翅片，翅片间距为 1.2 mm；制冷剂为 R410A，其入口的蒸发温度、干度和质量流量分别为 10℃、0.11 和 46.16 g·s<sup>-1</sup>；空气的入口干/湿球温度为 27/19℃；迎面风

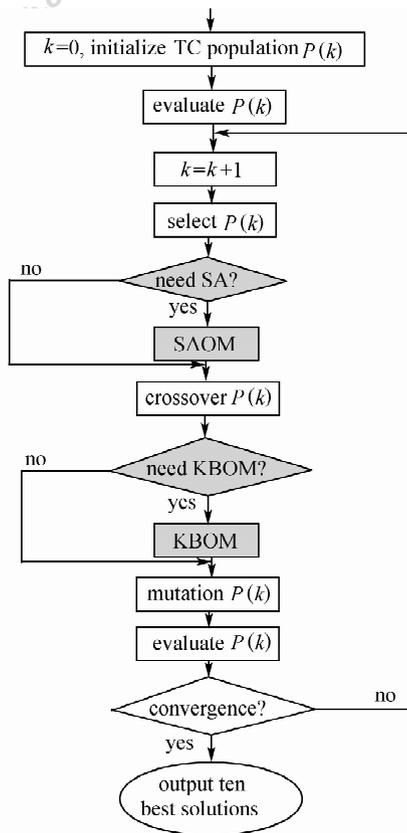


图 2 KGSA 的计算流程  
Fig. 2 Flow chart of KGSA

速自换热器的下部到上部按 1.0~2.0 线性变化分布。优化前的换热器的换热能力为 7949.9 W。

所采用的遗传算法的操作参数为：种群规模 10，进化代数 200，收敛条件为进化代数达到设定值。为了提高寻优能力的同时防止解的发散，通常来说，遗传算法中交叉概率取值较大而变异概率取值较小，取值范围分别为 0.5~0.9 和 0.0001~0.4<sup>[14]</sup>。因本文采用已开发的贪婪变异方法<sup>[9]</sup>，即使变异概率很大也不会造成种群个体性态的过度离散，而且较大的变异概率有利于产生较优个体，进而加快优化进度，所以本文的交叉概率和变异概率取值都较大，根据经验分别取为 0.6 和 0.85。采用转轮选择方法<sup>[14]</sup>来选择下一代种群中的个体。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。SA 操作的参数设为： $\zeta=20$ ， $\delta=0.8$ ， $T^*=0.1$  及每一温度层局部搜索 30 次。

为了验证本文开发的 KBOM 及 SAOM 的有效性，分别用单纯基于遗传算法的优化方法 (IGA)、添加 KBOM 后的优化方法 (IGA+KBOM) 和同时添加 KBOM 及 SAOM 后的优化方法 (KGSA)

3 个优化程序对同一算例进行了优化，其优化进程如图 3 (a) 所示。从图 3 (a) 中可以看出，IGA 过早陷入“局部寻优”中，添加 KBOM 模块后，优化程序在 10 代之内获得的解的换热能力高于未添加 KBOM 模块时的优化程序经 200 代优化获得的解的换热能力，这说明添加 KBOM 模块后，优化程序的寻优能力有了很大的提高。在此基础上添加 SAOM 后，优化程序在 30 代内获得的解的换热能力高于仅添加 KBOM 模块时的优化程序经 200 代优化获得的解的换热能力，这说明引入 SA 的操作后，优化程序的寻优能力又有很大程度的提高。因本文的优化变量仅是换热器的管路连接方式，所以优化结果对换热器的体积几乎没有影响，而对换热器的质量和管内侧压降会因连接方式及对应的连接管的总长度的不同而产生一定影响。同时，因一个具有较大换热能力的管路连接并不一定具有最长或最短的连接管总长度，故在优化过程中换热器的质量和管内侧压降的变化无规律可循。计算表明，经 200 代的优化后，采用 KGSA 得到的管路连接对应的换热器的换热能力为 9688.0 W，比优化前的 7949.9 W 高出 22%，比采用 IGA 得到的换热器的换热能力 8782.4 W 高出 10.3%；体积保持不变；质量 (34.45 kg) 和管内侧的压降 (118.8 kPa) 分别比优化前高 0.2% 和 30.3%，比采用 IGA 得到的换热器质量和管内侧的压降分别低 0.4% 和 7.7%。采用 KGSA 优化得到的换热器的换热能力比优化前及由 IGA 得到的换热器的换热能力都高，而其质量和管内侧的压降却不是最低的，原因主要在于本文的优化目标仅为换热能力最大，暂没有综合考虑换热器的质量、管内压降等其他因素。若在优化目标函数中同时考虑换热能力最大、质量和管内侧压降最小等多个目标，则可能使获得的最优解同时满足所设定的多个优化目标。

多次计算表明，IGA、IGA+KBOM 及 KGSA 均能保证优化计算的稳定性，但优化时间却有所不同。在 Pentium (R) CPU 2.66GHz，内存 1GB 的计算机上的 10 次优化测试表明，IGA、IGA+KBOM 及 KGSA 对相同算例优化 1 次所需的平均时间分别为 4.5、9 和 18.6 h。

图 3 (b) 为采用 KGSA 时输出的最优的管路连接示意图，图中换热器正面的连接管以单实线表示，背面的连接管以虚线表示，箭头代表制冷剂的流向。从中可以看出，所输出的优化后的管路连接

中的两个支路所含换热管数目相等，且均匀交叉分布于空气流中，故能够避免风速分布不均及各支路所含换热管数不等带来的流体在不同支路之间换热不平衡的问题。同时，所输出的优化后的管路连接中，换热器背面的管路连接都为相邻换热管间的连接，满足约束条件的要求。

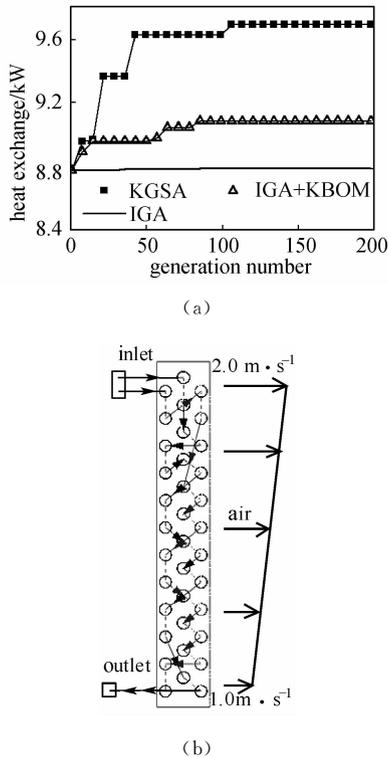


图 3 不同优化程序的优化进程 (a) 及采用 KGSA 得到的最优管路连接示意图 (b)

Fig. 3 Progress of different optimization program (a) and the optimal tube circuit with KGSA (b)

## 6 结 论

(1) 在单纯基于遗传算法的优化方法基础上引入专业知识和模拟退火操作方法后，能够增强优化程序的寻优能力，但寻优时间也会相应增加。

(2) 采用新方法优化得到的换热器的换热能力比优化前的换热器及单纯基于遗传算法的优化方法得到换热器的换热能力都高，且所输出的管路连接能够避免流体在不同支路之间换热不平衡的问题，但换热器的质量和管内侧的压降却不是三者中最低的，原因主要在于本文的优化目标仅为换热能力最大。若在优化目标函数中同时考虑换热能力最大、质量和管内侧压降最小等多个目标，则有可能使最优解同时满足所设定的多个优化目标。

(3) 本文提出的在遗传算法中引入专业知识及模拟退火算法的方法，可以方便地推广到其他领域的基于遗传算法的优化方法中，以进一步增强优化程序的寻优能力。

## 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 on the heat exchange 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] 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
- [7] Holland J H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Michigan: The University of Michigan Press, 1975
- [8] Goldberg D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley, 1989
- [9] Wu Zhigang (吴志刚), Ding Guoliang (丁国良), Pu Hui (浦晖), Long Huifang (龙慧芳). Optimization approach for tube circuit of fin-and-tube heat exchanger based on genetic algorithm. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (5): 1115-1120
- [10] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing. *Science*, 1983, **220** (4598): 671-680
- [11] Yang Shiming (杨世铭), Tao Wenquan (陶文铨). *Heat Transfer (传热学)*. Beijing: Higher Education Press, 1998
- [12] Frank P I, David P D. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons Inc, 2001
- [13] Nirwan A, Edwin H. *Computational Intelligence for Optimization*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997
- [14] 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
- [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