

带鳍通道性能的遗传算法优化^{*}

S·S·穆沙维¹, K·霍曼², S·J·穆沙维³

- (1. SAIPA 公司 生产部, 德黑兰, 伊朗;
2. 昆士兰大学 工程学院, 布里斯本, 澳大利亚;
3. 航天工业协会 知识工程研究中心, 德黑兰, 伊朗)

(周哲玮推荐)

摘要: 与光滑通道相比, 带鳍通道有更高的传热系数, 附加的鳍, 极大地增强了通道的传热。然而, 传热的增强又与压降的升高相关联, 这又导致泵动力需求的增加, 因此应该寻求对该系统的优化设计。该文的主要目的是, 通过如下方式来精确地确定鳍的位置和尺寸: 利用遗传算法实现最小压降时达到最优传热。鳍的每种布局作为问题(遗传算法中的一个个体)的一个解。通常, 首先随机地产生一个初始种群, 然后该算法在所有这些解中搜索, 利用布局函数迭代出新解, 最后得到鳍的优化设计。

关键词: Nusselt 数; 压降; 遗传算法; 优化设计; 挡板

中图分类号: TB126 **文献标识码:** A

引 言

在光滑通道中增强对流传热的常规方法是, 在通道壁上平行或交错地设置鳍(fins)。鳍隔断了流体动力边界层和热边界层, 并在两个相邻鳍之间形成回流区域。Wang 等人^[1]注意到, 重附着点(reattachment point)引起通道壁的冲刷, 使通道壁传热增强。该增强传热的方法在接触热交换、气体式太阳能收集器和电子封装等问题中也适用, 这方面已发表了非常丰富的研究文献(见文献[2-20])。Patankar 等人^[2]针对层流情况, 提出了“周期性充分发展流”的概念。根据 Berner 等人^[3]的研究, 尽管由于通道中出现了挡板, 流体会出现分离和重附着, 但在 Reynolds 数小于 600 时, 仍可能呈现层流状态。Webb 和 Ramadhyani^[4]研究了, 带交错挡板的平板通道内流体的流动和热传递。Patankar 和 Kelkar^[5]建立了基于周期性充分发展流条件的计算模型。Cheng 和 Huang^[6]分析了挡板不对称设置的问题, 并给出了流场中确定挡板相对排列位置的有效因子, 特别是对高挡板情况。此外, Cheng 和 Huang^[6]还分析了, 水平半无限通道入口段层流强迫对流问题, 通道壁上对称地排列 1 到 2 对挡板。Guo 和 Anand^[7]研究了, 带有单个挡板通道入口段的三维传热。Habib 等人^[8]报道了矩形通道中, 分段交错排列的挡板形成的周期性变化的腔室内, 湍流和传热特性的研究。文献[9]报道了带直线排列挡板的通道内, 流体流动和热传递的数值解, 作者同时指出, 此类挡板的传热性能, 在大阻滞值时, 不太有效。然

* 收稿日期: 2006-09-25; 修订日期: 2007-11-08

作者简介: K. Hooman(联系人 k.hooman@uq.edu.au)。

本文原文为英文, 吴承平译, 张禄坤校。

而,正如上文所述,对于交错挡板,其反问题亦成立。Yang 和 Hwang^[10]就二维通道内湍流状态、固体和多孔介质挡板两种情况,进行了有趣的研究。

众所周知,增加挡板的高度,将使总体传热增大,在层流(见 Patankar 和 Kelkar 的文献[5])和湍流(见 Habib 等人的文献[8])两种情况下,都将引起压降增加,导致泵的动力需求增大。事实表明,和最小压降相关的、最大传热为基础的优化设计是必要的。许多作者应用了各种不同的优化方法讨论过这一问题。其中的一种方法是,利用热力学第二定律通过减小熵产,得到热和流体流动的结果(参见文献[11-14])。另外一种方法是,利用热力学第一定律求解与最大传热对应的最小压降(参见文献[15-20])。在上述研究中,作者的目的是,探求挡板的位置和高度,或者挡板的设置方式(平行或交错),以及新近采用的多孔介质挡板。但是在上述文献中,均没有应用遗传算法来精确确定挡板尺寸和位置的报道。根据文献[21-22]的观点,本文旨在填补这一文献的空白。虽然在某些文章中,应用了神经网络^[12]或遗传算法^[16],但都不是在与本文相同的基础上进行的研究。

1 问题的表述

图1给出了一段期望达到的流动时的几何关系,在入口段区域,流动满足周期性充分发展条件后,从一个单元到另一个单元,流动的速度场是相同的。文献[2]提出了,周期性充分发展流动的概念,并给出了求解方法。假设通道壁两面的温度是常数,设流动是定常的层流,并且流体的物理性质保持为常数。流体在入口处的温度/速度比为 T_{in}/U_{in} ; h 为鳍的高度, H 为通道宽度, h/H 为已知的阻滞比(blockage ratio)。

无量纲形式的连续方程和动量方程为^[23-24]

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{u^* \partial u^*}{\partial x^*} + \frac{v^* \partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{2}{Re_D} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \right) + \frac{2}{Re_D} \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) + \frac{2}{Re_D} \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right), \quad (2)$$

$$\frac{u^* \partial v^*}{\partial x^*} + \frac{v^* \partial v^*}{\partial y^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \frac{2}{Re_D} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) + \frac{2}{Re_D} \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) + \frac{2}{Re_D} \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right), \quad (3)$$

其中 $Re_D = U_{in} D_H / \mu$ 为 Reynolds 数; H 为通道宽; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的速度分量; 此外,对 x 和 y 轴即横截坐标系作变换, $x^* = x/H$, $y^* = y/H$ 为无量纲的直角坐标系; $u^* = u/U_{in}$ 和 $v^* = v/U_{in}$ 为无量纲速度分量; $p^* = 2P/(\rho U_{in}^2)$ 为无量纲压力; $D_H = 2H$ 为水力学直径; μ 为动力粘度; ρ 为流体密度。Fanning 摩擦因数 f 定义为

$$f = \frac{\Delta P}{\rho U_{in}^2} \frac{D_H}{2L}, \quad (4)$$

其中 ΔP 定义为压降。

无量纲形式的能量方程可写为

$$u^* \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} = \frac{2}{Re_D Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial y^{*2}} \right), \quad (5)$$

其中 $\theta = (T - T_{wall})/(T_{in} - T_{wall})$ 为无量纲温度, $Pr = \mu c_p/k$ 为 Prandtl 数, T 为温度, T_{wall} 为

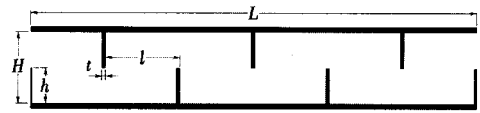


图1 物理坐标系

壁温。

局部传热系数 $h(x)$ 的近似表达式为

$$h(x) = k \frac{\partial T / \partial y|_{\text{wall}}}{T_w - T_b(x)}, \quad (6a)$$

其中 k 为流体导热系数, $T_b(x)$ 为体积平均温度, 即

$$T_b(x) = \int_A uT dA / U_{\text{in}}, \quad (6b)$$

其中 A 为横截面积。

平均传热系数 h 为

$$h = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) dx, \quad (7)$$

可以求得局部 Nusselt 数 $Nu(x)$ 和平均 Nusselt 数 \overline{Nu} 为

$$Nu(x) = \frac{h(x) D_H}{k}, \quad \overline{Nu} = \frac{h D_H}{k}. \quad (8a, b)$$

由于在 $h(x)$ 的定义中, 并没有计及由于挡板存在反射而增加的面积, 因此本文中的 Nusselt 数可与光滑通道情况作直接比较。方程(1)~(5)的数值解将在下节给出。应用的数值格式由文献[23]给出, 这里就不重复叙述了。

2 应用的遗传算法

本文按以下路径应用遗传算法:

```

Generate(Pc);
Repeat noOfGeneration times:
Pn:= 0;
Repeat noOfOffspring times:
p1, p2:= SelectToCrossOver(Pc+ Pn);
Pn:= Pn+ Crossover(p1, p2);
End;
Pc:= Select(Pc+ Pn);
For each p in Pc with probability Pmut
Mutate(p);
End;
Q:= SelectBest;

```

一旦一个新的 person 被繁殖, 或一个 person 的遗传结构发生改变, 其适应度就被检测到, 并且其遗传因子表的值也将被更新。种群 P_c 通常首先是由随机产生的。每次循环重复模拟迭代。每一代中的“人”数保持为常数, 每一代是由 Crossover 函数通过选择的 2 个“人”产生, 并复制一个子代群体, 在获得的收敛的子代群体中, 后代继承了父母最好的遗传因子。重复选择和复制这样一个过程, 得到“人”数 P_n 便是 P_c 的子代群体。复制中个体的选择由 SelectToCrossOver 函数进行。选择的基础是适宜生存的个体有更多的机会。一些 P_c 的个体被它们的子代群体后代 P_n 所替换, 这样一个新的代便产生。对剩余个体的选择由 Select 函数进行, 在剩余的下一个迭代中, 适宜的个体有更多的选择机会。变异由 Mutation 函数在种群中进行。起因是, 在 1 个 person 中可以有一次或更多次的改变, 同时可以防止该解变成局部最小。

2.1 编码

本文中, 鳍的每一种布局作为该问题的一个解。本算法可以在所有这些解中搜索, 并利用该函数迭代出新解, 直到收敛于最优设计。在遗传算法中, 综合考虑表现型结构和基因型结构。基因型结构是对一个 person 的信息的编码方法, 而表现型结构是对该 person 的物理表征 (例如, 人眼的颜色属于其物理表征, 在其遗传结构中, 它是基于一个或多个遗传基因的不同)。复制和变异根据基因型结构定义的, 而适应度是对表现型结构起作用。这些相关概念, 解码中也将要用到。

2.2 表现型结构

我们的主要目的是, 在最优传热的条件下最小压降时, 精确地确定鳍的位置和尺寸。在该方法中, 表现型结构就是精确地确定鳍的位置和尺寸。有 7 个鳍, 因此有 7 个鳍的高度要选择, 同时 (中间的) 5 个鳍需要安排鳍与鳍之间的距离。本问题的任意解, 包括 12 种状况, 其中每一种状况描述了一个 person。

2.3 基因型结构

每个 person 考虑为一个染色体, 每个染色体由一个基因数构成 (本问题基因数为 12)。

2.4 编码过程

每个基因型结构对应一个 person 的一个表现型结构。要确定基因型结构, 就需要有一个编码机制。图 2 示出本文问题前述的应用编码过程。

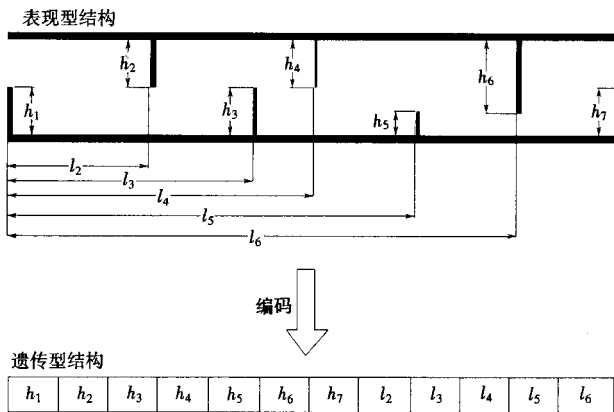


图 2 遗传算法问题的编码

2.5 解码过程

解码的目的就是给出遗传结果的物理解释。

2.6 差异适应度函数

对环境有更强适应性的 person, 自然有更多生存和繁殖的机会。所谓的适应性和成本 (cost) 正相反, 即较高成本的 person, 其适应性较差, 反之亦然。

确定可适应性是遗传算法的重要任务。适应度函数作用于 person 的表现型结构 (而其它函数作用于基因型结构), 则染色体将是 person 的表现型结构的译码。本问题的主要目标是, 使最小化压降和最佳传热相对应。因此, 将一个 person 的成本定义为壁热通量的压降。这一成本函数应该被最小化, 我们建议的差异适应度函数为

$$f(i) = (\text{cost}_{\max} - \text{cost}_{\min}) + (j - 1)(\text{cost}_{\max} - \text{cost}(i)), \quad (9)$$

其中 j 为一常数, cost_{\max} 和 cost_{\min} 分别是 person 的极大成本和极小成本。这一函数与社会中最好的 person 相关联, 其适应性比最差的 person 高出 j 倍。值得注意的是, 适应性按相同比例分布在其他 person 中。该函数有非常灵敏的性能, 即使对于非常小的成本变化也能反映出来, 尤其在较晚的后代中也能得到反映。

2.7 轮盘赌选择

个体的选择(下一代中繁殖的个体和剩余的个体)可以有多种方法。本文应用轮盘赌法, 该方法的最重要的特征是, 每个 person 都有被选择的机会(这是一个和它的贡献相关的特征)。在轮盘赌法中, 适应度越高的个体越有可能被选中。另一方面, 其它适应度较差的个体也有机会被选中。

2.8 交叉选择

每当繁殖发生, 两个“人”(如果两个“人”一样, 其他 person 将被选中)被轮盘赌选中时, 具有更强适应性的那些个体更有可能被选中。

2.9 交叉

交叉是遗传算法最有意义的算子之一, 是优化过程中的关键角色。该算子将选中的两个“人”的基因结构混合, 产生一个新的子代群体。加入了双亲的基因并一分为二, 繁殖出一个新的子代群体。本文用这个方法处置鳍, 包括鳍的高度和鳍-鳍间的距离, 从而逐步导出最好的子代群体。

2.10 变异

变异是一个作用于某些个体的算子, 并产生一个随机的改变。变异并不检查新的随机形态, 但保留了局部优化解。由变异导出最终的解答, 而不是逐步收敛。该算子随机地选择某些个体。由变异产生的变化, 可以是随机地选择的任意两个鳍-鳍间的距离或者鳍的高度。它也可以用来设置一个鳍的新高度。

2.11 剩余的选择

由于交叉, 个体的总数将增加, 这意味着一些个体将被淘汰。这些被淘汰的个体, 是根据他们的适应度选择的, 选择的方法是, 适应力越强的个体, 生存的机会越大。我们应用“half-best, half-random”算法, 即最好的个体和随机选择剩余个体各占一半, $N/2$ 。

3 结果和讨论

在 $Re = 100$, $Pr = 0.7$ 时, 对每代 32 个个体进行了求解。计算到 1 000 世代后, 得到了最好的结果, 见表 1。平均 Nusselt 数为 2.061, 平均 Fanning 摩擦因数除以光滑通道时的摩擦因数值为 3.084。速度矢量、压力分布和等温度线分别示于图 3 到图 5。我们观察到两个不同的区域, 核心流动区和回流区。通道中鳍交错排列, 流动呈“Z”字型, 撞击壁面, 流体逆壁面回流集中, 在挡板后面形成一个回流区。根据这一现象, 使我们确信每个腔室内的传热增大了。

表 1 1 000 世代后获得的最优结果

鳍编号	1	2	3	4	5	6	7
h/H	0.667	0.125	0.292	0.167	0.458	0.542	0.667
l/H	0	1.458	2.292	4.333	5.000	5.750	6.000

本研究表明, 尽管简单的制造有不少优点, 但将所有鳍高度取为同一值的传统设计, 并不是最佳的。可以得出如下结论: 不仅鳍的高度沿通道长度应该有变化, 而且鳍-鳍间的距离, 即

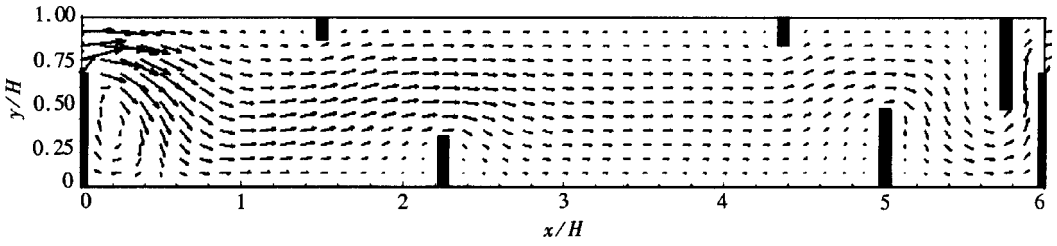


图3 新设计的速度矢量图

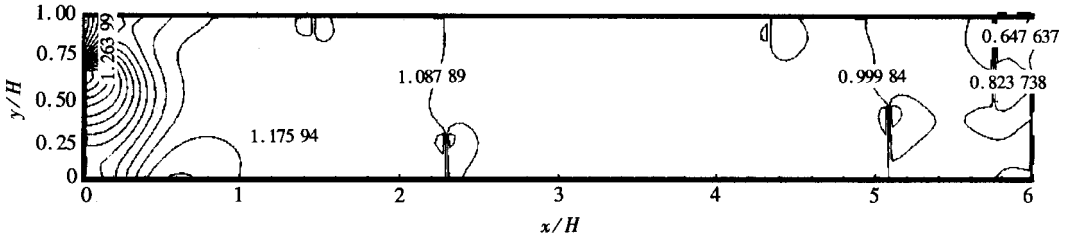


图4 新设计的压力分布图

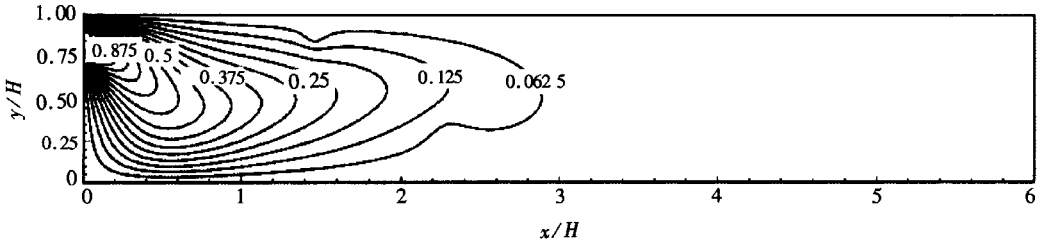


图5 新设计的等温线图

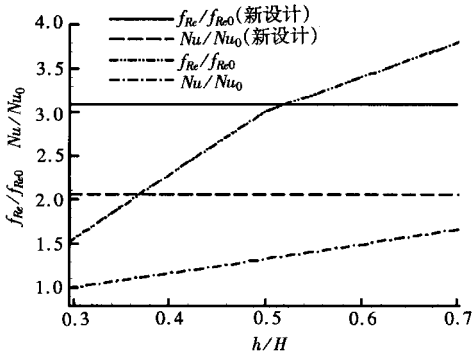


图6 新设计与传统设计摩擦因数和传热的比较

从每个鳍到另一鳍之间的距离也应不同。观察发现，鳍的高度有两种不同的性态：从第1鳍到第4鳍间，鳍的高度交错降低和增高；第4鳍后面的鳍高沿通道长度而增高。鳍-鳍之间的距离用如下方式设置：不产生边界层。在第3鳍和第4鳍之间的间距最大。由于第1鳍（鳍最高）朝向壁面，改善了壁面的冲刷并引起流动的撞击。值得注意的是，第2鳍和第4鳍比较其它鳍要矮，产生的流动阻力最小。第1鳍引起最大阻滞之后，压降随

着减小。显然，第4鳍可以作为流动性态改变的临界点。正如图5所示，在流体到达第4鳍前，流体和壁面间的热交换最大。因此，此时流体和壁面间的温差最小。从入口到该点，应致力于压降最小化，而此点后，则应致力于流体的传热的增长（通过较小的核心流动区域，减小撞击面积，改变中心区域的取向）。注意，在某温度附近的壁面的流体，鳍的高度增大，会引起重附着和对壁面的冲刷，随后压降相应地增大。还要注意到，第4鳍处在顺流位置0.6L附近，它将通道分为两个不同的区域。在通道的前0.6L段，主要目标是减小压降（测得压降为总压降的0.2），并有一个比较满意的传热率。在通道剩下的0.4L段，流体温度与壁面温度相一致。结果，壁热通量减弱，以致必须通过重附着来增

强。如前文所述, 此段压降增大到总压降的 0.8。

图 6 示出阻滞比从 0.25 到 0.75 时, 新设计和传统设计的比较。可以看出, 对任意 h/H , 应用遗传算法的新设计通道比传统方法设计的通道传热率更好。同时, 在最高阻滞比为 $h/H = 0.75$ 时, 新设计的通道压降更小(约为 $h/H = 0.5$ 时的压降)。

4 结 论

本文研究了带鳍通道(性能)的遗传算法优化, 求得了与最小压降对应的最大传热率。说明传统鳍交错排列没有本文建议的新方法有效。因此, 重要的是, 在工程应用中, 必须仔细考虑通道中鳍设置的细节。

致谢 本文第二作者, 奖学金受益人, 非常感谢昆士兰大学按照 UQILAS, Endeavor IPRS 和学院奖学金提供的资助。

[参 考 文 献]

- [1] Wang G, Stone K, Vanka S P. Unsteady heat transfer in baffled channels[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1996, **118**(3): 585-591.
- [2] Patankar S V, Liu C H, Sparrow E M. Fully developed flow and heat transfer in ducts having stream-wise periodic variations of cross sectional area[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1977, **99**(2): 180-186.
- [3] Bemer C, Durst F, McEligot D M. Flow around baffles[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1984, **106**(4): 743-749.
- [4] Webb G W, Ramadhyani S. Conjugate heat transfer in a channel with staggered ribs[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1985, **28**(9): 1679-1687.
- [5] Patankar S V, Kelkar K M. Numerical prediction of flow and heat transfer in a parallel plane channel with staggered fins[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1987, **109**(1): 25-30.
- [6] Cheng C H, Huang W H. Numerical prediction for laminar forced convection in parallel plate channels with transverse fin arrays[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1991, **34**(11): 2739-2749.
- [7] Guo Z, Anand N K. Three dimensional heat transfer in a channel with a baffle in the entrance region[J]. Numerical Heat Transfer A, 1997, **31**(1): 21-35.
- [8] Habib M A, Mobarak A M, Sallak M A, et al. Experimental investigation of heat transfer and flow over baffles of different heights[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1994, **116**(2): 363-368.
- [9] Bazdidi-Tehrani F, Naderi-Abadi M. Numerical analysis of laminar heat transfer in entrance region of a horizontal channel with transverse fins[J]. International Com m Heat Mass Transfer, 2004, **31**(2): 211-220.
- [10] Yang Y, Hwang C. Calculation of turbulent flow and heat transfer in a porous-baffled channel[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2003, **46**(5): 771-780.
- [11] Bejan A, Pfister P A. Evaluation of heat transfer augmentation techniques based on their impact on entropy generation[J]. Letters Heat Mass Transfer, 1980, **7**(2): 97-106.
- [12] Ayhan T, Karlik B, Tandiroglu A. Flow geometry optimization of channels with baffles using neural networks and second law of thermodynamics[J]. Computational Mechanics, 2004, **33**(2): 139-143.
- [13] Bejan A, Morega A M. Optimal arrays of pin fins and plate fins in laminar forced-convection[J]. AMSE Journal of Heat Transfer, 1993, **115**(1): 75-81.

- [14] Abu-Nada E. Numerical prediction of entropy generation in separated flows[J]. *Entropy*, 2005, 7(4): 234-252.
- [15] Al-Sarkhi A. Comparison between variable and constant height shrouded fin array subjected to forced convection heat transfer[J]. *International Comm Heat Mass Transfer*, 2005, 32(3/4): 548-556.
- [16] Rakshit D, Balaji C. Thermodynamic optimization of conjugate convection from a finned channel using genetic algorithms[J]. *Heat Mass Transfer*, 1992, 41(6): 535-554.
- [17] Knight R W, Goodling J S, Gross B E. Optimal thermal design of air cooled forced convection finned heat sinks: experimental verification[J]. *IEEE Trans Comp Hybrids Manufacturing Tech*, 1992, 15(5): 754-760.
- [18] Campo A. Heat removal of in-tube viscous flows to air with the assistance of arrays of plate fins Part I : theoretical aspects involving 3-D, 2-D and 1-D models[J]. *International Journal of Numerical Methods Heat Fluid Flow*, 2000, 10(2/3): 334-354.
- [19] Campo A, Rodriguez F. Approximate analytic temperature solution for uniform annular fins by adapting the power series method[J]. *International Comm Heat Mass Transfer*, 1998, 25(6): 809-818.
- [20] Santos N B, de Lemos M J S. Flow and heat transfer in a parallel-plate channel with porous and solid baffles[J]. *Numerical Heat Transfer A*, 2006, 49(5): 471-494.
- [21] Blazej Z. Finding the winning strategy for a poker playing program an application of genetic algorithm in a poker game[J/OL]. <http://ib.poland.virtulave.net/ee/genetic/3-genetic-algorithm.htm>. 2007-03-31.
- [22] Holland J H. Genetic Algorithms[J]. *Scientific American*, 1992, 267(1): 66-72.
- [23] Mousavi S S, Hooman K. Heat and fluid flow in entrance region of a channel with staggered baffles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15/16): 2011-2019.

Genetic Algorithm Optimization for a Finned Channel Performance

S. S. Mousavi¹, K. Hooman², S. J. Mousavi³

(1. Production Department, SAIPA Company, Tehran, Iran;

2. School of Engineering, The University of Queensland,
Brisbane, Australia;

3. Knowledge Engineering Research Center, Aerospace Industrial Organization,
Tehran, Iran)

Abstract: Compared to a smooth channel, a finned channel provides higher heat transfer coefficient and increasing the fin height enhances the heat transfer. However, this heat transfer enhancement is associated with an increase in the pressure drop. This leads to an increased pumping power requirement so that one may seek an optimum design for such systems. The main goal of this paper is to define the exact location and size of fins in such a way that a minimal pressure drop coincides with an optimal heat transfer based on the genetic algorithm. Each arrangement of fins was considered as a solution of the problem (an individual for genetic algorithm). An initial population was generated randomly at the first step. Then the algorithm had searched among these solutions and made new solutions iteratively by its functions to find an optimum design as reported.

Key words: Nusselt number; pressure drop; genetic algorithm; optimum design; baffle