

文章编号:1000-582X(2011)08-97-06

应用遗传算法优化设计壳管式换热器

李夔宁,张继广,李进,郭军峰

(重庆大学 a. 动力工程学院 b. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要:针对壳管式换热器传统设计方法繁杂且结果又不能满足最佳经济费用的缺点,引入遗传算法对壳管式换热器进行设计。建立了相应的数学模型并以设备总费用为目标函数,对换热器进行优化设计。利用遗传算法智能及多点搜索等特性,不断地迭代优化变量,在优化变量值和约束条件范围内,得到最小目标函数的设计结果。采用了 2 个实际算例进行测试,结果显示在满足换热性能的前提下,优化后总费用都有降低,降幅分别为 18.2%,7.98%。

关键词:遗传算法;优化;费用;壳管式换热器

中图分类号:TK172.5

文献标志码:A

Optimization design of shell-and-tube heat exchangers based on genetic algorithm

LI Kui-ning, ZHANG Ji-guang, LI Jin, GUO Jun-feng

(a. College of Power Engineering; b. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Genetic algorithm (GA) is used for the optimal design of shell-and-tube heat exchangers due to the fact that traditional designs for shell-and-tube heat exchangers are complicated and uneconomical. To optimize the design of heat exchangers, mathematical models are established and the total costs are used as the objective function. Taking advantage of GA's intelligent and multi-searching characteristics, researchers continuously iterate optimization variables and then obtain the minimum objective function of the design results within the optimal variable values and constraints. Two practical heat exchangers are used to test the research results. The Optimization results show that the optimized total costs have decreased by 18.2% and 7.98% respectively, which can also satisfy the heat transfer performance. Moreover, the results show that the design based on GA for shell-and-tube heat exchangers can significantly improve the economic efficiency of heat exchangers and thus can be applied to engineering practice.

Key words: genetic algorithms; optimization; costs; shell-and-tube heat exchangers

壳管式换热器作为热力系统或者热力装备中的一个重要部件,对其进行优化是目前的研究热点。其中,在满足换热性能条件下尽量降低换热器成本

是目前研究换热器的一个重要方向。基于遗传算法具有智能及多点搜索等特性,可以解决多类组合优化问题,故很多研究者将遗传算法引入到换热器的

收稿日期:2011-02-09

基金项目:重庆市建委科技计划项目(城科字 2009 第 28 号);重庆大学“211 工程”三期创新人才培养建设计划研究生开放实验室项目

作者简介:李夔宁(1970-),男,重庆大学副教授,主要从事热能高效利用与节能技术研究,(E-mail)leekn@cqu.edu.cn。

优化研究中来^[1-4]。其中文献[4]采用遗传算法对翅片管换热器制冷剂管路连接进行优化设计,以换热器管路连接最短为目标,优化后总管长最大可以减少40%,以最大换热量为目标,优化后换热量最大可以增加7.4%。可见引入遗传算法可以使换热器设计参数在满足变量约束的前提下找到最佳值。

针对壳管式换热器传统设计方法繁杂且结果又不能满足最佳经济费用的缺点,文中提出了基于遗传算法以总费用为目标函数的壳管式换热器优化设计方法。首先确定换热器的设计规格、基本结构形式和换热器设计的一些工艺参数;建立换热器的管、壳程换热及压降数学模型,找出各结构参数之间的联系;然后找出一个能计算出换热器总费用的模型公式,并设为目标函数;选择出一组优化变量,并确定其值范围及各约束条件范围;最后通过遗传算法,不断迭代优化变量,在优化变量值和约束条件范围内,得出最小目标函数的设计结果。

1 优化设计数学模型

优化设计前,要知道的换热器设计规格参数和工艺参数。设计规格参数有:壳管程流体分布,壳管程结构材料参数,折流板类型,管心距与管外径比值等。工艺参数有:换热器热负荷 Q ,壳程流体进出口温度 $T_{s,i}$ 、 $T_{s,o}$,管程流体进出口温度 $T_{t,i}$ 、 $T_{t,o}$,还有2种流体的质量流量 m_s 、 m_t 。后面6项数据中知道其中5个,可以根据能量平衡方程推出剩下那个。另外还有流体的污垢系数 R_t 、 R_s 及物理性质等其他参数可以通过查表获得。

壳管式换热器的设计计算主要包括管、壳程的传热计算和压降计算。

1.1 换热计算模型

通过平均对数温差来计算换热面积 A :

$$A = \frac{Q}{K \cdot F \cdot \text{LMTD}}, \quad (1)$$

式中:LMTD为对数平均温差; F 为对数平均温差修正系数; K 为换热系数。

$$K = (1/h_s + R_s + d_o/d_i(R_t + 1/h_t))^{-1}, \quad (2)$$

式中: d_o 、 d_i 分别为换热管外径和内径,m。

管程换热系数 h_t 通过以下关联式来计算:

$$h_t = \frac{\lambda}{d_i} \left[3.657 + \frac{0.0677 \cdot (Re_t \cdot Pr_t \cdot \frac{d_i}{L})^{1.33}}{1 + 0.1 \cdot Pr_t \cdot (Re_t \cdot \frac{d_i}{L})^{0.3}} \right] \quad (Re_t < 2.300; \text{Stephan and Preuper}^{[5]}), \quad (3)$$

$$h_t = \frac{\lambda}{d_i} \left\{ \frac{\frac{f_t}{8} (Re_t - 1000) \cdot Pr_t}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f_t}{8}} \cdot (Pr_t^{0.67} - 1)} \right\}$$

$$\left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{0.67} \right]$$

$$(2.300 < Re_t < 10,000; \text{Gnielinski}^{[5]}), \quad (4)$$

$$h_t = \frac{\lambda}{d_o} \cdot 0.027 \cdot Re_t^{0.8} \cdot Pr_t^{1/3} \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{0.14} \quad (5)$$

$$(Re_t > 10,000; \text{Sieder and Tate}^{[6]}).$$

式(4)中 f_t 为达西摩擦系数:

$$f_t = (1.82 \log_{10} Re_t - 1.64)^{-2}. \quad (6)$$

壳程换热系数 h_s 通过下面关联式^[7]来计算:

$$h_s = \frac{\lambda_s}{D_e} \cdot 0.36 \cdot Re_s^{0.55} \cdot Pr_s^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{0.14}. \quad (7)$$

壳程当量直径 D_e 因换热管的排列方式不同而不同,换热管正方形排列时: $D_e = \frac{1.27}{d_o} (Pt^2 - 0.785 d_o^2)$;换热管三角形排列: $D_e = \frac{1.10}{d_o} (Pt^2 - 0.917 d_o^2)$ 。 Pt 为横向管距,m。

1.2 压降计算模型

换热器压降分为管程压降和壳程压降,分别计算如下。

1.2.1 管程压降计算

管程压降 ΔP_t 分为4部分:一是流体流过直管因摩擦阻力引起的压力降 Δp_L ;二是流体流经管箱进出口的压力降 Δp_n ;三是流体因局部阻力引起的压力降 Δp_r ;四是流体流经转向区的压力降 Δp_z 。

换热器管程压降计算如下^[7]:

$$\Delta P_t = \Delta p_L + \Delta p_n + \Delta p_r + \Delta p_z, \quad (8)$$

$$\Delta P_t = f_t \frac{L}{d_i} N_t \left(\frac{\rho_t v_t^2}{2} \right) + (f_1 + f_2) \left(\frac{\rho_t v_t^2}{2} \right) + 1.5 \times N \left(\frac{\rho_t v_t^2}{2} \right) + f_3 \left(\frac{\rho_t v_t^2}{2} \right), \quad (9)$$

式中: ρ 为流体密度,kg/m³; N_t 为换热管数;摩擦系数 f_t 和管内流体流速 v_t 分别由下式计算得出:换热管直管部分管内流速 v_t 为

$$v_t = \frac{m_t}{\frac{\pi d_o^2}{4} \rho_t} \cdot \frac{N}{N_t}, \quad (10)$$

换热管直管部分摩擦系数 f_t 为

$$f_t = \frac{0.3164}{Re_t^{0.25}}. \quad (11)$$

流体流经管箱进口系数 f_1 ,根据入水管面积 S_{11} 与其对应水室截面面积 S_1 之比 $\frac{S_{11}}{S_1}$ 值不同,取不同的公式计算:当 $0 \leq \frac{S_{11}}{S_1} < 0.1$ 时, $f_1 = 1 - 1.9 \times \left(\frac{S_{11}}{S_1} \right)$;当 $0.1 \leq \frac{S_{11}}{S_1} < 0.2$ 时, $f_1 = 0.81 - 1.7 \times$

$\left(\frac{S_{11}}{S_1}-0.1\right)$, 当 $0.2 \leq \frac{S_{11}}{S_1} < 1$ 时, $f_1 = 0.64 - 1.5 \times \left(\frac{S_{11}}{S_1}-0.2\right)$ 。

流体流经管箱出口系数 f_2 , 根据出水管面积 S_{22} 与其对应水室截面面积 S_2 之比 $\frac{S_{22}}{S_2}$ 值不同, 取不同的公式计算: $0 \leq \frac{S_{22}}{S_2} < 0.1$, $f_2 = 0.5 - 0.3 \times \left(\frac{S_{22}}{S_2}\right)$; 当 $0.1 \leq \frac{S_{22}}{S_2} < 0.2$ 时, $f_2 = 0.47 - 0.2 \times \left(\frac{S_{22}}{S_2}-0.1\right)$; 当 $0.2 \leq \frac{S_{22}}{S_2} < 1$ 时, $f_2 = 0.45 - 0.7 \times \left(\frac{S_{22}}{S_2}-0.2\right)$ 。

流体流经转向区摩擦系数 f_3 , 取为 9。

1.2.2 壳程压降计算

根据换热器壳程区域的流动特征可以分成 4 个区域, 每个区域可以分别计算。4 个区域分别为入口管及出口管区、错流区、缺口区和壳体两端的区域, 求得各个区域的压降后相加即得到总的壳程压降。计算公式如下:

$$\Delta p_s = \Delta P_n + (N_b - 1)\Delta P_c + N_b \Delta P_{wz} + \Delta P_{ec}, \quad (12)$$

式中: Δp_s 为总壳程的压降; ΔP_n 为出、入口管的压降; ΔP_c 为一个错流区的压降; ΔP_{wz} 为一个折流板缺口处的压降; ΔP_{ec} 为换热器两管板和换热器里最两边的折流板之间区域的压降; N_b 为折流板数。各部分压降区域具体数学公式描述详见文献[8]。

1.3 目标函数

目标函数根据优化设计的需求而定。采用换热器总费用作为目标函数, 总费用等于投资费用与运行费用之和。使用遗传算法, 通过不断迭代优化变量, 找出在满足换热性能条件下总费用最小的换热器。

目标函数总费用 C_{tot} 计算^[9]如下:

$$C_{tot} = C_i + C_{od}, \quad (13)$$

式中: C_i 为投资费用, 它的计算与换热面积有关, 采用霍尔关联式^[10]:

$$C_i = a_1 + a_2 A^{a_3}, \quad (14)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 为常系数, 当壳管程材料为不锈钢时, $a_1 = 70\,000$, $a_2 = 2\,268$, $a_3 = 0.91$ 。

C_{od} 为运行费用, 它与抽水泵克服摩擦阻力而产生的损失有关。计算方法如下:

$$C_{od} = \sum_{k=1}^{ny} \frac{C_o}{(1+i)^k}, \quad (15)$$

年运行费用 C_o 的计算式:

$$C_o = P \cdot C_E \cdot H, \quad (16)$$

其中: i 为年折旧率; ny 为运行总年数; H 为年运行时间, h; C_E 为能耗, 元/kw · h; P 为泵功率, kW;

$$P = \frac{1}{\eta} \left(\frac{m_t}{\rho_t} \Delta P_t + \frac{m_s}{\rho_s} \Delta P_s \right), \quad (17)$$

式中: η 为泵效率, 目标函数中的参数因换热器工作运行的时间和地点不同而不同, 取年折旧率 $i = 10\%$, 每年的工作时间 $H = 7\,000$ h, 能耗 $C_E = 0.52$ 元/kw · h, 泵效率 $\eta = 0.7$, 运行总年数 $ny = 10$ 用于计算。

2 优化变量及约束条件

优化变量的选取对优化设计过程是非常重要的。若优化变量选择不当, 会使优化设计变得极其复杂, 也可能使优化设计难以进行。根据优化变量对总费用灵敏度的影响、模型公式包含及必须为独立变量 3 项要求, 依次要求顺序选取优化变量。

选取 5 个优化变量: 管外径 d_o 、壳体内径 D_s 、管程 N 、折流板间距 B_s 、管布置角度 θ , 折流板缺口率 B_c 。各个优化变量的取值范围^[7]为: 管径 $d_o \sim [0.025\ 0.051]$; 壳体内径 $D_s \sim [0.1\ 1.5]$; 管程 $N \sim [1, 2, 4]$; 折流板间距 $B_s \sim [0.05\ 0.5]$; 管布置角度 $\theta \sim [30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ]$; 折流板缺口率 $B_c \sim [0.25\ 0.4]$ 。

设计出的换热器应满足性能的需求, 设计结果应满足设计标准的要求。优化变量的取值除了应有具体的范围外, 还应满足一些约束条件的要求, 如几何约束、速度约束、压降约束的要求。

几何约束包括以下规律^[7]: 管长 L 和壳体直径 D_s 之间的比例必须在 3~5 之间, $3 \leq L/D_s \leq 5$; 折流板间距 B_s 与壳体直径 D_s 之间的比例必须在 0.2~1.0 之间, $0.2 \leq B_s/D_s \leq 1.0$ 。

为了减少污垢和侵蚀这些约束可表示速度约束。参考文献[11], 管程速度必须服从下列范围: $0.5\text{ m/s} \leq v_t \leq 2.5\text{ m/s}$; 相应的壳程流动速度约束: $0.3\text{ m/s} \leq v_s \leq 1.5\text{ m/s}$ 。

压降约束可由双方的流动压降上限值表示: 管程压降 $\Delta P_t \leq 20\text{ kPa}$, 壳程压降 $\Delta P_s \leq 0.1\text{ MPa}$ 。

3 遗传算法程序的实施

3.1 遗传算法操作

遗传算法^[12]相比于其他优化算法有智能性、灵

活的个体编码、多点搜索能力、并行性等优点。随机初始群体产生以后,在此基础上经过选择、交叉和变异等遗传操作将产生新一代群体,如此反复进行该过程,群体不断得到优化,最终将收敛于最优解。遗传算法通过计算以换热器换热及压降数学模型为基础的设计程序,以目标函数为评价指标,不断更新优化变量,然后再传递给设计程序,上述步骤重复进行,直到找到最小目标函数,最后确定新的换热器结构。整个流程见图 1。使用 Matlab7.1 的遗传算法工具箱求解换热器的优化问题。

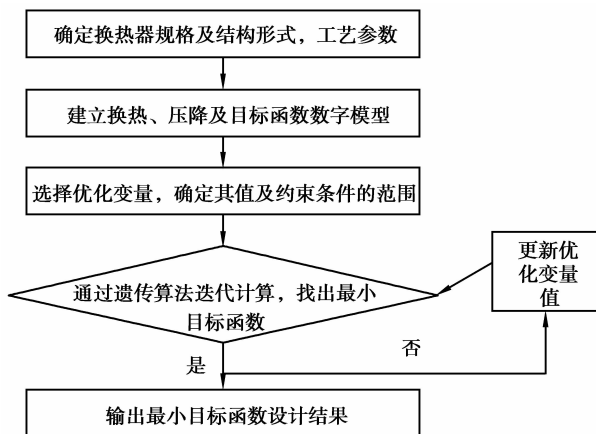


图 1 遗传算法设计换热器流程图

3.2 遗传算法运行参数的设定

遗传算法的运行参数^[13]:种群数取 80;交叉概率取 0.8;变异概率取 0.01;算法最大重复执行次数,取 100 代;随机初始种群采用均匀分布;采用 Rank 函数按适应度比例进行排序,消除原始适应度值的影响;挑选父辈时使用一个模拟的轮盘赌,个体在轮子上所占的区域与个体的期望值成正比,算法使用一个随机数选择一个概率与其相等的区域;在 2 个子种群间有个体迁移率取为 0.2;在 2 次迁移间要经过的代数,其值取为 20;如果适应度值在 50 代没有改进,则算法停止;如果最好适应度值 20 s 时间间隔内没有改进,则算法终止。

4 优化算例分析

4.1 算例分析

举出 2 个研究算例来验证优化方案的有效性。2 个换热器算例壳管程流体都为单相换热,壳管程结构采用不锈钢材料,折流板采用单弓形结构,管心距与管外径比值根据经验取为 1.25。它们的工艺参数值由表 1 给出。通过遗传算法得到的最优换热器参数与文献上的设计值的对比在表 2 中给出,图

2 列出了算例优化前后总费用的比较。

表 1 换热器的工艺参数值

参数	例 1		例 2	
	壳程	管程	壳程	管程
	甲醇	海水	油	水
$m/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	27.80	68.90	43.60	45.37
$T_i/^\circ\text{C}$	95.00	25.00	114.10	26.15
$T_o/^\circ\text{C}$	40.00	40.00	66.15	50.15
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	750.00	995.00	820.00	993.00
$C_p/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{k})$	2.84	4.20	2.17	4.17
$\mu \times 10^5/(\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	34.00	80.00	245.00	68.00
$\lambda/(\text{W}/\text{m} \cdot \text{k})$	0.19	0.59	0.128	0.63
$R \times 10^5/(\text{m}^2 \text{k}/\text{W})$	33.00	20.00	70.00	15.00

表 2 算例优化结果的对比

参数	例 1		例 2	
	文献[14]设计值	优化结果	文献[15]设计值	优化结果
D_s/mm	894	641	334	603
B_s/mm	356	241	181	310
do/mm	20	16	19	15
N	2	2	4	2
$\theta/^\circ$	60	60	90	60
N_t	918	829	838	732
$v_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.75	0.89	1.00	0.67
$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.58	1.20	1.32	1.44
$h_t/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k})$	3 812	2 621.4	5 567.9	2 413.8
$h_s/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k})$	1 573	2 493.4	1 009.2	1 363
$\Delta P_t/\text{kPa}$	6.3	12.5	15.8	7.5
$\Delta P_s/\text{kPa}$	35.8	32.3	61.4	55.9
L/mm	4 830	4 091	4 156	529
A/m^2	278.6	197.9	200.02	187
$C_t/\text{万元}$	45.1	34.9	35.2	33.5
$C_{\text{Ob}}/\text{万元}$	5.6	6.6	12.7	10.6
$C_{\text{tot}}/\text{万元}$	50.7	41.5	47.9	44.1

例 1, 甲醇-海水换热器^[14], 设计成一壳程两管程结构, 热负荷为 4.34 MW。表 2 中可以看到, 在优化后仍为此结构。换热管数和管径的减少使管内流体的速度增大, 从而使管程压降大幅增加, 虽然壳程压降略有降低, 但无法改变运行费用增加 17% 的事实。同时, 由于换热面积减少, 投资费用减少了 22.6%。总体来看, 两者相抵, 总费用减少 18.2%。

例 2, 油-水换热器^[15], 设计成一壳程四管程结构, 热负荷为 4.5 MW。从表 2 中可以看到, 优化后, 改成一壳程两管程的结构。虽然换热管数的减少和管长的增加会造成管程流速一定程度的增加, 但是由于四管程改成两管程, 导致管程进口流通截面面积大幅增大, 管内流速大幅减低, 从而管程压降也降低, 同时, 折流板间距 B_s 与壳体直径 D_s 的增大又使壳程压降减少, 运行费用下降。另外, 换热面积的减少导致投资费用减小, 两者相加, 总费用减少 7.98%。

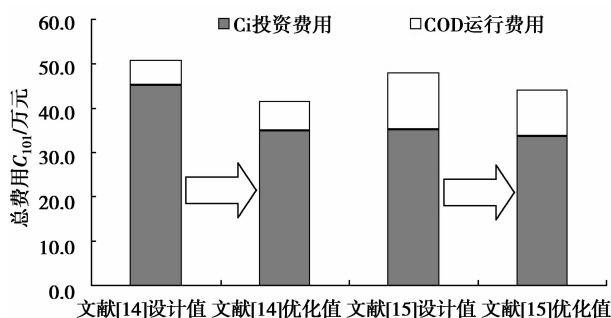


图 2 算例优化前后总费用的比较

4.2 个别参数对目标函数的影响

为验证遗传算法优化的完整性, 也考虑了泵效率和折旧率的变化对总成本带来的影响, 评估遗传算法对选取参数变化的敏感性。

以例 1 作为研究对象, 泵效率 ±0.1 变化, 其结果在表 3 中作出了对比。当泵效率增大时, 管内流速逐渐增大, 遗传算法通过减少换热管管数来减少换热面积, 从而减少投资费用。因为泵效率的提高, 运行费用减少 5%, 总费用减少 2.05%。反之, 泵效率降低时, 总费用提高 2.41%。可见, 提高泵效率对换热器设计有很重要的意义。

表 4 为遗传算法对折旧率的敏感度。折旧率为 ±50% 变化, 当折旧率逐渐提高时, 投资费用平均以 2.68% 的幅度降低, 运行费用平均以 6.92% 的幅度降低, 总费用平均以 3.35% 的幅度下降, 反之亦然。说明折旧率的选取对换热器设计有重要的意义。

表 3 不同泵效率遗传算法计算结果

	$\eta=0.6$	$\eta=0.7$	$\eta=0.8$
D_s/mm	659	641	620
B_s/mm	240	241	248
do/mm	15	15	15
N_t	928	829	786
$v_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.829	0.89	0.955
$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.173	1.20	1.20
$h_t/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k})$	2 489.4	2 621.4	2 780.1
$h_s/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k})$	2 485.4	2 493.4	2 507.7
$\Delta P_t/\text{kPa}$	10.7	12.5	14.6
$\Delta P_s/\text{kPa}$	31.4	32.3	33.1
L/mm	4 571	4 091	513
A/m^2	201.7	197.9	194.1
$C_i/\text{万元}$	35.4	34.9	34.4
$C_{OD}/\text{万元}$	7.1	6.6	6.2
$C_{tot}/\text{万元}$	42.5	41.5	40.6

表 4 不同折旧率遗传算法计算结果

	$i=0.05$	$i=0.1$	$i=0.15$
D_s/mm	677	641	623
B_s/mm	235	241	219
do/mm	15	15	15
N_t	1 004	829	832
$v_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.776	0.89	0.94
$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.165	1.20	1.361
$h_t/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k})$	2 363.7	2 621.4	2 759.7
$h_s/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{k})$	2 483.4	2 493.4	2 708
$\Delta P_t/\text{kPa}$	9.3	12.5	14
$\Delta P_s/\text{kPa}$	29.9	32.3	36.9
L/mm	4 330	4 090	4 864
A/m^2	205.3	197.9	190.7
$C_i/\text{万元}$	35.8	34.9	34
$C_{OD}/\text{万元}$	7.0	6.6	6.1
$C_{tot}/\text{万元}$	42.9	41.5	40.1

4.3 分析讨论

在满足换热性能的前提下, 上述 2 个算例优化后总费用都有所降低, 降幅分别为 18.2%, 7.98%。第 1 个算例通过大幅降低投资费用抵消增加的运行

费用达到总费用降低的效果,第2个算例通过换热器结构的改变,投资费用和运行费用都有所降低达到总费用下降的目的。验证了优化方案的可行性和有效性。在换热器设计中,增大流速可以提高换热器的换热系数,从而减小换热器的面积,减少投资费用;但同时也增大了换热器的压降,亦即增大了其运行费用。提高换热系数及降低压降是减少换热器总费用提高其经济效益的关键所在。通过遗传算法,在满足性能的前提下,以总费用为目标函数,把投资费用和运行费用综合起来考虑,可以达到设计需求。从提高换热器经济效益途径上看,减少换热器的运行费用是提高其经济效益的主要途径。

5 结 论

利用遗传算法的全局搜索特性和对梯度信息的不依赖性,以设备总费用为目标函数,实现了壳管式换热器的最经济优化设计。通过2个实例计算表明,同传统设计方法相比,采用遗传算法设计的设备总经济费用可以有较大的降低。从而使设备在满足性能要求的前提下具有更好的经济性。遗传算法克服了传统方法的缺陷,使结果更符合工程应用要求,在换热器设计中具有广泛的应用前景。需要说明的是,由于换热器制造运行的复杂性,文中的总费用计算公式经过一定简化,在下一步的工作中需详细分析换热器结构制造运行费用(包括人力、物力等),以便使费用估算更符合实际。

参考文献:

- [1] WU Z G, DING G L, WANG K J, et al. Knowledge-based evolution method for optimizing refrigerant circuitry of fin-and-tube heat exchangers[J]. HVAC&R Research, 2008, 14(3): 435-452.
- [2] APUTO A C, PELAGAGGE P M, SALINI P. Heat exchangers design based on economic optimisation[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(10): 1151-1159.
- [3] OZCELIK Y. Exergetic optimization of shell and tube heat exchangers using a genetic based algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11/12): 1849-1856.
- [4] WU Z G, DING G L, WANG K J, et al. Application of a genetic algorithm to optimize the refrigerant circuit of fin-and-tube heat exchangers for maximum heat transfer or shortest tube[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47: 985-997.
- [5] LEE P S, GARIMELLA S V, LIU D. Investigation of heat transfer in rectangular microchannel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(9): 1688-1704.
- [6] KEM D Q. Process heat transfer[M]. New York: McGraw-Hill, 1950.
- [7] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 55-105.
- [8] KAPALE U, CHAND S. Modeling for shell-side pressure drop for liquid flow in shell-and-tube heat exchanger[J]. Heat and Mass Transfer, 2006, 49(3/4): 601-610.
- [9] COSTA A L H, QUEIROZ E M. Design optimization of shell-and-tube heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14/15): 1798-1805.
- [10] TAAL M, BULATOV I, KLEMES J, et al. Cost estimation and energy price forecast for economic evaluation of retrofit projects[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(14): 1819-1835.
- [11] CHAUDURI P D, DIWEKAR U, LOGSDON J. An automated approach for the optimal design of heat exchangers[J]. Industrial Engineering Chemical research, 1997, 36(9): 3685-3693.
- [12] MILES J. Genetic algorithms for design[J]. Advances of soft computing in engineering, 2010, 512: 1-56.
- [13] GUO J F, XU M T, LIN C. The application of field synergy number in shell-and-tube heat exchanger optimization design[J]. Applied Energy, 2009, 86(10): 2079-2087.
- [14] SINNOTT R K. Coulson and richardson's chemical engineering-chemical engineering design[M]. Oxford: Butter Worth-Heinemann, 2005.
- [15] PONCE-ORTEGA J M, SERNA-GONZALEZ M, JIMENEZ-GUTIERREZ A, et al. Use of genetic algorithms for the optimal design of shell-and-tube heat exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2/3): 203-209.

(编辑 陈移峰)