

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.04.004

直接接触式换热器传热性能优化

杨波^{1,2a,3}, 黄峻伟¹, 王辉涛^{2b}, 王仕博^{2c}, 徐建新^{2c}

(1.云南农业大学机电工程学院,昆明 650000;2.昆明理工大学 a.质量发展研究院;b.冶金与能源工程学院;c.省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室,昆明 650201;
3.昆明云内动力股份有限公司,昆明 650000)

摘要:建立了以容积换热系数为目标函数,工质流率 U_0 、喷头喷孔直径 d_i 、导热油液位高度 Z 为决策变量的直接接触式换热器性能优化模型,同时进一步将液滴群行为与传热协同关系作为约束条件引入优化模型中,重点分析该约束条件对优化过程及结果的影响。运用遗传算法对原模型和补充模型进行了优化分析,结果表明:原模型优化后的容积换热系数达到了初始值的6.7倍;而补充模型最优值的迭代次数比原模型减小了约55%,同时最优值比原模型提高了0.3%。所以该约束条件不仅提高了迭代速率,还提高了寻求全局最优值的概率,使得最优解更逼近全局最优值。

关键词:直接接触换热器;性能优化;约束条件;目标函数

中图分类号:TK172

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)04-024-08

Heat transfer performance optimization of direct-contact heat exchangers

YANG Bo^{1,2a,3}, HUANG Junwei¹, WANG Huitao^{2b}, WANG Shibo^{2c}, XU Jianxin^{2c}

(1.Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000, P.R.China; 2a.Quality Development Institute; 2b.Faculty of Metallurgical and Energy Engineering; 2c.State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650201, P.R.China; 3.Kunming Yunnei Power Co., Ltd., Kunming 650000, P.R.China)

Abstract: A performance optimization model of direct-contact heat exchangers was established, in which the volumetric heat transfer coefficient was used as objective function, the refrigerant initial flow rate U_0 , the nozzle diameter d_i , and the heat transfer oil height Z were used as decision variables. The linear model of bubble swarm and heat transfer performance was used as constraint condition in the optimization model, and the influence of the constraint condition on optimization process and results were mainly analyzed. The genetic algorithm was used to analyze the original model and supplementary model. And the results show that the optimized volumetric heat transfer coefficient of the original model is promoted by 6.7 times compared with that of the original design. The number of iterations of the optimal value in the supplement model is reduced by around 55%, and the optimal value increases by 0.3% compared with those of the original model. Therefore, this constraint condition improves not only the iteration rate, but also the

收稿日期:2015-10-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51406071);云南省自然科学基金资助项目(2013FB020)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51406071) and the Natural Science Foundation of Yunnan Province(2013FB020).

作者简介:杨波(1969-),博士研究生,主要从事冶金能源方向研究,(E-mail) yangbo@yunneidongli.com。

黄峻伟(联系人),男,博士,(E-mail) hjwynau@hotmail.com。

probability of seeking the global optimum, which makes the optimal solution more approximate to the global optimal value.

Keywords: direct-contact heat exchanger; performance optimization; constraint condition; objective function

相比于间壁式换热器,直接接触式换热器省去了内部换热面,结构简单、传热面积大、传热热阻可以忽略不计、适应于在低温差下运行等优点^[1-2],因此可以广泛地应用于海水淡化、地热能回收、海洋能转换、热能储存及工业废热的回收与利用^[3-7]。在前期的研究中^[8]考察了初始换热温差、工质流率和导热油流率对容积换热系数、总换热体积、工质蒸汽发生量及工质蒸汽出口温度蒸发器主要传热性能的影响,发现直接接触换热器的传热性能受运行工况及几何结构参数的综合影响。为了获得最佳的传热性能,有必要进行系统的多参数并行优化,以便获得一组“最佳工况组合”,使直接接触换热器传热性能为最优值。

遗传算法(genetic algorithms,GA)主要采用群体搜索和个体信息交换策略,搜索不依赖梯度信息,适合于求解复杂的非线性、多模型、多目标等系统优化问题^[9-10]。杨辉著等^[11]应用遗传算法解决了锯齿型板式换热器多参数同步优化的问题,提出了利用 Kriging 响应面来分析目标函数与设计变量之间的关系,结果发现,结合 Kriging 响应面的遗传算法克服了传统优化方法对经验关联式的依赖。王斯民等^[12]以换热系数最大值、壳侧压降最小值为目标函数,运用多目标遗传优化方法得到了3组最优解,与原始结构相比,壳侧换热系数平均增加了28.3%,壳侧压降平均降低了19.37%,该结果对于螺旋折流板换热器结构参数的研究具有重要意义。Hang, Yin 和 Ryoza Ooka^[13]在针对板式换热器优化设计计算中,为了获得更精确的结果,将板和翅片的对流传热系数分别定义为独立的参数,优化模型中,采用翅片高度、翅间距、翅片厚度、翅片长度做为4个结构参数决策变量,将由压力产生的熵产、传热产生的熵产以及总熵产做为目标函数,最后用遗传算法对该优化模型进行优化,其结构参数优化结果适应于空调系统。对于换热器来说,换热效率和总成本是换热器设计的最重要指标,因此 Mohsen Amini 和 Majid Bazargan^[14]运用遗传算法以换热效率和总成本为优化目标,对管壳式换热器进行优化分析,优化决策变量一共有11个,针对决策变量的几何和运行约束条件均在实际操作范围,因此该优化运行结果可以为管壳式换热器设计提供相关建议。

参考国内外运用遗传算法对换热器优化研究的最新进展,文中拟运用遗传算法对直接接触式换热器传热性能进行优化研究,以直接接触换热器客观运行工况和几何参数结构为约束条件,获得最佳的参数“组合”使换热器传热性能达到最优值,同时将液滴群行为与传热性能协同关系作为约束条件引入优化模型中,重点分析引入该约束条件对优化结果的影响,希望通过文中的研究对换热器优化模型的完善起到一定的指导意义。

1 直接接触式换热器传热性能优化模型

1.1 优化过程目标函数

优化对象以实际运行的直接接触换热实验平台为基础,直接接触式换热器罐体运行工况变量及结构参数如图1所示。

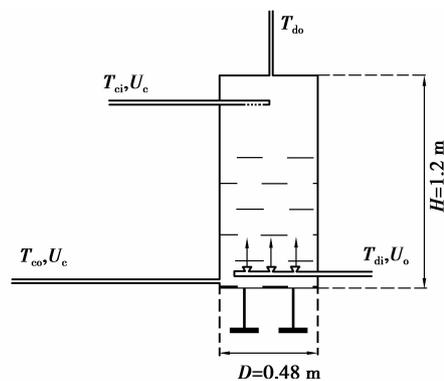


图1 直接接触式换热器罐体结构示意图

Fig.1 Structure diagram of direct contact heat exchanger

一般而言,优化设计是指在给定或系统实际运行工况下,热工及结构参数限定范围内(约束条件),对系统的某个或多个性能指标进行评价,寻找性能指标最优解的过程。也就是说,按照实际需要选择单一技术指标或经济指标作为目标函数来优化系统性能。因此,文中选用最能体现直接接触式换热器传热性能的参数——容积换热系数作为目标函数。

由于直接接触换热器没有换热壁面,所以其传热性能用容积换热系数表示:

$$h_v = \frac{2h_{b0}}{D_0 B z} \left[3\alpha_0 B z_a + \frac{\alpha_{\max}}{1 - \alpha_{\max}} \left(\left(1 + \frac{7}{2} B z_a + 21(1 - \alpha_{\max}) B(z - z_a) \right)^{1/7} - \left(1 + \frac{7}{2} B z_a \right)^{1/7} \right) \right], \quad (1)$$

其中:

$$h_{b0} = \frac{k_f R_v}{2R_d^2} \left(1 + \sin \frac{\beta}{2} \right) + 0.447 R_0^{0.78} \text{Pr}^{1/3} \frac{k_c (1 - \cos \beta)}{2D_0},$$

$$B = \frac{2h_{b0} \Delta T}{U_0 D_0 L} \frac{\rho_{dl} - \rho_{dv}}{\rho_{dl} \rho_{dv}}.$$

求解容积换热系数其他辅助方程如下。

1) 分散相流体含气率

含气率随轴向高度变化的关系式^[15]:

$$\frac{d\epsilon}{dz} = \frac{\epsilon(1 - \epsilon)}{\int_0^z (1 - \epsilon) dz}. \quad (2)$$

2) 气化分率分布模型^[16]

$$\frac{dx}{d\epsilon} = \frac{\rho_d^v}{\epsilon \rho_d} - \frac{m_c U_L A \rho_d^v \epsilon}{m_d (1 - \epsilon)^2}. \quad (3)$$

3) 分散相液滴初始直径 D_0

分散相液滴初始直径与连续相物性和喷嘴的直径有关^[17]:

当 $d_i / \left(\frac{\sigma}{g \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{2}} < 0.785$ 时,

$$\frac{d_i}{d_0} = 0.485 \left[\frac{d_i}{(\sigma/g \Delta \rho)^{\frac{1}{2}}} \right] + 1, \quad (4)$$

当 $d_i / \left(\frac{\sigma}{g \Delta \rho} \right)^{\frac{1}{2}} > 0.785$ 时,

$$\frac{d_i}{d_0} = 1.51 \left[\frac{d_i}{(\sigma/g \Delta \rho)^{\frac{1}{2}}} \right] + 0.12. \quad (5)$$

4) 分散相液滴的瞬时速度^[18]

$$U = \frac{1.91 \left[\left\{ 1 - \frac{\rho_d}{\rho_c} \left(\frac{D_0}{D} \right)^3 \right\} \left\{ \frac{\sigma}{\rho_c D} \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \bar{D}^{\left[\frac{5}{6} - \frac{\bar{D}}{TC} \right]}}{\left[\frac{T_c^2 + T_L^2}{2T_c T_L} \right]^{\bar{D}} \times \left[\frac{C_{pc} \mu_c}{k_c} \right]^{\frac{D_0}{1.6\bar{D}}}}, \quad (6)$$

其中, \bar{D} 为平均直径, $\bar{D} = \frac{D^2 + D_0^2}{2DD_0}$ 。

1.2 优化模型决策变量

直接接触式换热器传热性能由换热器的几何结构参数和换热流体(分散相、连续相)物性参数、热工状态参数、流动参数这些决策变量共同决定。而最优化设计的目的是通过数学优化算法确定 1 组特定的“决策变量”,使选定的目标函数达到最大(或最小)。其中,部分决策变量的取值由外部关联条件(如环境温度、大气压力等)或实际系统运行工况(如系统的实际结构或运行参数)所确定;其余的决策变量可以在约束条件规定的可行域范围内自由选取。

因此,直接接触式换热器的最优化即是通过最优化数学算法确定在目标函数达到最大(或最小)值时换热器的决策变量取值的过程。直接接触式换热器结构参数及运行参数如图 1 所示,综合影响换热器的传热

性能,同时由容积换热系数公式可知,当直接接触式换热器罐体几何结构、导热油的进口温度和流率,分散相和连续相流体确定后,忽略工质出口的过冷度及欠焓时,热力状态独立参数为工质流率 U_0 ,换热器导热油液位高度 Z ,结构参数独立变量确定为喷头喷孔直径 d_i 。

即容积换热系数表示为决策变量的函数:

$$h_V = f(U_0, Z, d_i)。 \quad (7)$$

1.3 不等式约束条件

为了满足理论及技术上的可行性,同时使决策变量在优化过程中的取值都在可行域范围内,直接接触式换热器的热工参数和流动参数必须满足一定的约束条件。所以根据现有实验平台的几何结构参数及工况运行条件,需要对其运行特性值加以约束,具体如表 1 所示。

表 1 直接接触换热器性能优化模型约束条件

Table 1 The constraint condition of direct contact heat exchanger performance optimization model

决策变量	约束条件	备注
热工参数的热力学约束条件	$T_{do} > T_{di}; T_{ci} > T_{co}$ $T_{ci} > T_{do}; T_{co} > T_{di}$ $1 \geq \epsilon \geq 0$	
蒸发压力约束条件	$p_{max} \geq p_{evap}$	
导热油液位高度约束条件	$Z < 1.2(\text{m})$	直接接触换热器罐体的几何结构参数为:高 1.2 m,内径 0.48 m
工质流速的约束条件	$0.2 > U_0 > 0(\text{m/s})$	根据工质离心泵的变频范围

此外,在优化搜索过程中约束所有决策变量的取值均要求大于零。

1.4 优化算法

根据数学规划理论,可采用罚函数法将具有不等式约束条件的最优化问题转化为无约束条件的最优化问题,即:

$$Pen_i = \begin{cases} |IQ_i|, & \text{当第 } i \text{ 项不等式约束不满足时;} \\ 0, & \text{当满足第 } i \text{ 项不等式约束时。} \end{cases} \quad (8)$$

式中, IQ_i 为最优化数学模型中第 i 项不等式约束条件表达式。

在以容积换热系数为目标函数时,障碍函数为

$$F = h_V + \sum_{i=1}^n C_i Pen_i。 \quad (9)$$

将具有不等式约束条件的最优化问题转化为求解障碍函数的最大值

$$\max; F = h_V + \sum_{i=1}^n C_i Pen_i, \quad (10)$$

其中, C_i 为罚函数系数,当其值足够大时,可确保优化搜索过程在不等式约束构成的可行域内进行,但会影响到计算速度,因此综合考虑文中取值为 50; n 为不等式约束条件的数目。

2 直接接触换热器性能优化结果及分析

2.1 优化结果及分析

根据实验台运行工况条件及几何结构参数条件,优化初始条件设定如下。

分散相流体:选 R245fa(五氟丙烷);

连续相流体:选用导热油;

忽略分散相工质进口的欠焓,即 $\Delta T_{app} = 0$;

环境条件:空气干球温度 $t_{ain} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$,大气压力 $p_{atm} = 101.325 \text{ kPa}$,环境温度统一取 $t_{surr} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

几何结构:蒸发器内径 $D = 0.48 \text{ m}$,高 $H = 1.2 \text{ m}$,喷孔个数为 30 个。

导热油流率 $U_c = 0.36 \text{ kg/s}$;

导热油进口温度 $T_{ci} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

泡滴边界开口角 β 取 135° ;

而决策变量热工参数及目标函数的初始值如表 2 所示。

表 2 初始热工参数及容积换热系数

Table 2 The original design thermal parameters

工质流率 $U_o /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	喷头喷孔 直径 d_i / m	连续相液位 高度 Z / m	容积换热系数 $h_v /$ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
0.218	3.45×10^{-3}	0.326	0.554

图 2 为容积换热系数随遗传代次数的变化趋势,即遗传算法优化过程中适应度函数的变化情况。从图中可以看出,容积换热系数随遗传代数的增加而逐渐增加,且在最初 150 多代的进化过程中变化幅度较快,之后变化缓慢,并在 200 代左右开始趋于稳定,这一结果可以证明本优化计算方法的正确性和有效性。当容积换热系数达到稳定时所对应的设计计算参数的值就是本次优化设计的结果。图中只表示了前 500 次遗传进化的计算结果,因为 500 次以后的数值基本上保持不变,所以选择迭代 500 次即可满足寻找最优结果的目的。图 3~图 5 分别为决策变量随遗传迭代次数的变化趋势,可以看出工质流率、喷头喷孔直径及导热油液位高度均在约束条件范围内进行迭代,该结果同样反映了约束条件设定的合理性和有效性。需要说明的是,工质流率优化前后的变化原因是在遗传算法优化过程中,为寻找容积换热系数的最优值,决策变量(工质流率)在遗传算法优化程序下不断迭代寻优而产生变化。工质流量从 0.218 m/s 变化到 0.087 m/s 寻得容积换热系数的最优值,其变化幅度较大只是因为随机选取的初始值与该决策变量最优值的数值差较大,并不表示优化过程对该决策变量敏感。同样经过优化后连续相液位高度的值变化较小,只能说明初始设计对该参数的选取已经接近或等于优化结果,并不表示优化过程对该变量不敏感。

为了进一步对比优化过程前后的换热器性能变化,通过表 3 中目标函数值及各项相关决策变量参数的优化值与表 2 中的初始值的分析。可以看出,优化后的值与初始值相比,容积换热系数达到了初始设计的 6.7 倍,表明通过以直接接触式换热器容积换热系数最大化为目标函数对初始运行条件进行优化,可以极大地提高换热器的传热性能。从优化计算过程可看出,在 473 代以后的优化结果中目标函数没有明显下降趋势,因此,可将 473 代结果作为最优化设计结果。

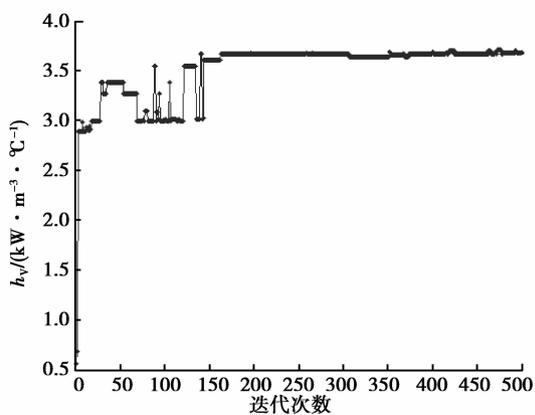


图 2 容积换热系数迭代过程

Fig.2 The iteration process volumetric heat transfer coefficient

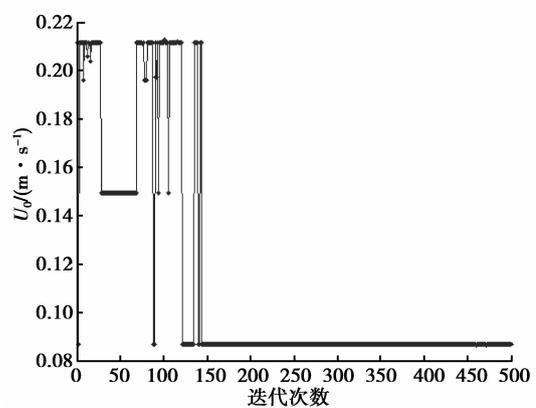


图 3 工质初始流率迭代过程

Fig.3 The iteration process of refrigerant initial flow rate

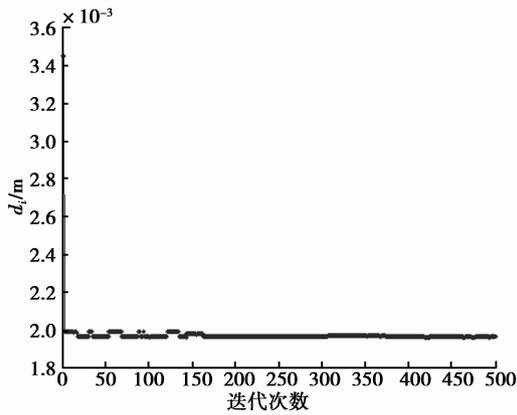


图 4 喷头喷孔直径迭代结果

Fig.4 The iteration process of nozzle diameter

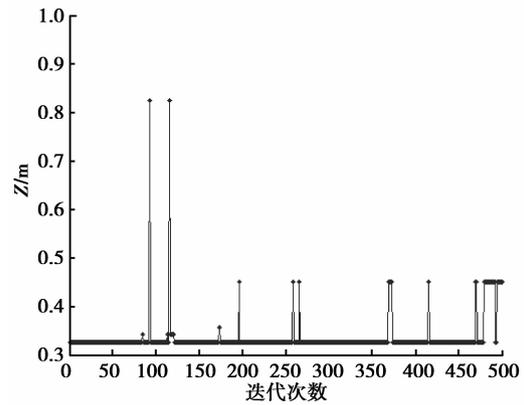


图 5 导热油液位高度迭代结果

Fig.5 The iteration process of heat transfer oil height

表 3 最优代结果

Table 3 The results of optimal generation

最优结果 迭代代数	工质流率 $U_0 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	喷头喷孔直 径 d_i / m	连续相液位 高度 Z / m	容积换热系数 $h_v /$ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{C}^{-1}$)
473	0.087	1.96×10^{-3}	0.326	3.705

2.2 将液滴群行为与换热协同关系模型作为约束条件的优化结果及分析

在遗传算法优化迭代过程中如果引入合理的约束条件,在完善优化模型的同时加速优化过程、减小迭代次数、降低最优解陷入局部最优的概率。前期的研究中,得到了直接接触传热过程中液滴群行为与传热过程协同关系^[19]:

$$h_v = a \times \beta_i + b, a = 0.4241, b = 0.454. \tag{11}$$

该模型本质上是液滴群二维有限密度演化规律与容积换热系数之间的协同关系,即是液滴群密度与传热性能之间的约束,所以文中将公式(11)作为约束条件引入优化模型中,分析增加该约束条件下,对优化过程及结果的影响。

图 6~图 9 是经过 500 代遗传后目标函数及决策变量的优化迭代过程,最优代的结果如表 4 所示。通过对表 4 中引入新约束条件的优化结果与表 3 中原优化模型的优化结果的分析,可以看出引入新约束条件下最优值的迭代次数为 260 代,比原优化模型最优值迭代次数减小了约 55%,所以将液滴群行为与传热协同关系引入优化模型的约束条件中,可以极大地减少迭代次数,降低优化过程,同时对比最优化结果发现,最优值比原优化模型的结果提高了 0.3%,所以该约束条件不仅提高了迭代速率,还提高了寻求全局最优值的概率,使得最优解更逼近全局最优值。

最优值迭代代数所对应的工质流率、喷头喷孔直径及导热油液位高度均在约束范围内,从优化计算过程可看出,引入新的约束条件后,在 260 代以后的优化结果中目标函数没有明显下降趋势,因此,可将 260 代结果作为最优化设计结果。

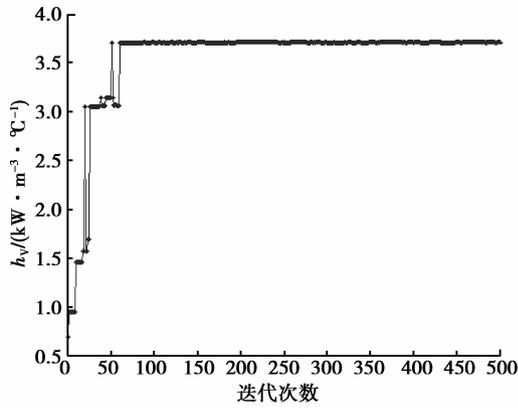


图 6 容积换热系数迭代过程

Fig.6 The iteration process volumetric heat transfer coefficient

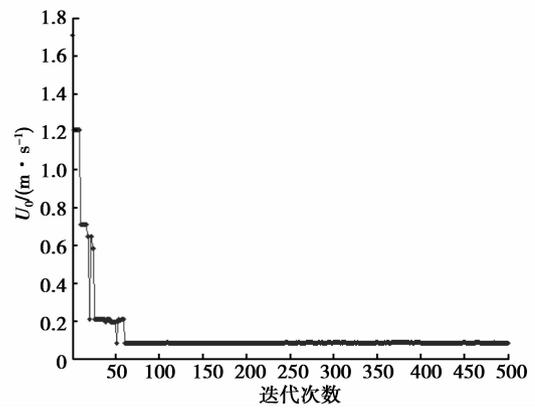


图 7 工质初始流率迭代过程

Fig.7 The iteration process of refrigerant initial flow rate

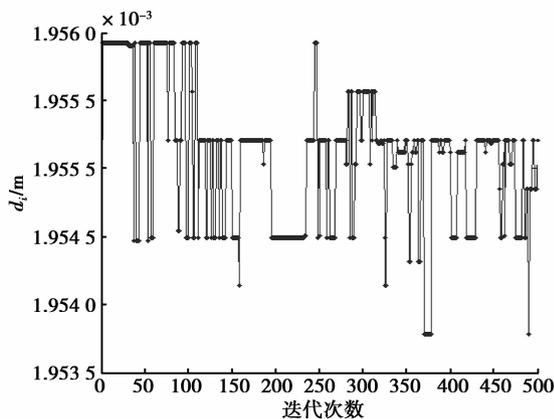


图 8 喷头喷孔半径迭代结果

Fig.8 The iteration process of nozzle diameter

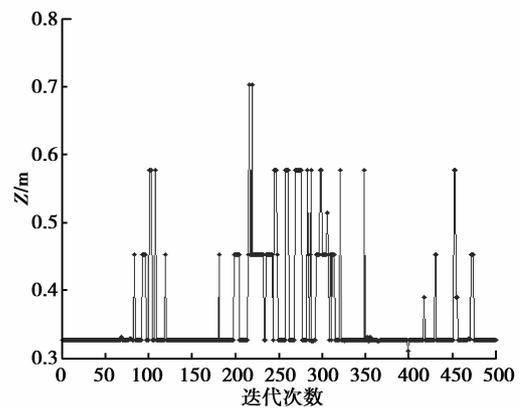


图 9 导热油液位高度迭代过程

Fig.9 The iteration process of heat transfer oil height

表 4 最优代结果

Table 4 The results of optimal generation

最优结果 迭代代数	工质流率 $U_0 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	喷头喷孔直 径 d_i / m	连续相液位 高度 Z / m	容积换热系数 $h_v /$ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$)
260	0.083	1.95×10^{-3}	0.577	3.719

3 结 论

1) 通过遗传算法优化后的直接接触式换热器传热性能得到较大提高, 优化后的容积换热系数达到了初始值的 6.7 倍。同时决策变量的数值均在约束条件范围内进行迭代, 个别决策变量参数没有发生改变(如连续相液位高度)的原因是初始设计对该参数的选取已经接近或等于优化结果, 并不表示优化过程对该变量不敏感。

2) 将前期研究中所得到的液滴群行为与传热协同关系作为补充约束条件引入优化模型后, 其最优值的迭代次数比原模型减小了约 55%, 同时最优值比原模型提高了 0.3%, 所以该约束条件不仅提高了迭代速率, 还提高了寻求全局最优值的概率, 使得最优解更逼近全局最优值, 因此该协同关系进一步完善了原优化模型, 为直接接触换热优化过程提供了一种新的研究思路。

参考文献:

- [1] Mahood H B, Sharif A O, Al-aibi S, et al. Analytical solution and experimental measurements for temperature distribution prediction of three-phase direct-contact condenser[J]. *Energy*, 2014, 67: 538-547.
- [2] Nomura T, Tsubota M, Oya T, et al. Heat storage in direct-contact heat exchanger with phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 26-34.
- [3] 胡保亭.空气-水直接接触高效传热过程及设备研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
HU Baoting. Study on high efficient air-water direct contact heat transfer process and equipment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. (in Chinese)
- [4] Hyun Y J, Hyun J H, Chun W G, et al. An experimental investigation into the operation of a direct contact heat exchanger for solar exploitation[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, 32(3/4): 425-434.
- [5] 余胜麟. 采用直接接触式换热器的蒸气压缩式热泵系统的初步研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
YU Shenglin. Pilot study on vapor compression heat pump with direct-contact heat exchanger[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [6] Nomura T, Tsubota M, Oya T, et al. Heat storage in direct-contact heat exchanger with phase change material[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 50(1): 26-34.
- [7] Hawlader M N A, Wahed M A. Analyses of ice slurry formation using direct contact heat transfer[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(7/8): 1170-1178.
- [8] 黄峻伟, 王辉涛, 王华, 等. ORC 直接接触式蒸发器传热性能研究[J]. *动力工程学报*, 2013, 33(12): 969-973.
HUANG Junwei, WANG Huitao, WANG Hua, et al. Study on heat-transfer performance of ORC direct contact evaporators[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2013, 33(12): 969-973. (in Chinese)
- [9] Guo D C, Liu M, Xie L Y, et al. Optimization in plate-fin safety structure of heat exchanger using genetic and Monte Carlo algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(1): 341-349.
- [10] 文键, 杨辉著, 王斯民, 等. 旋梯式螺旋折流板换热器优化结构的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(11): 8-14.
WEN Jian, YANG Huizhu, WANG Simin, et al. Numerical simulation for heat transfer enhancement of a heat exchanger with helical baffles[J]. *Journal of Xi' An JiaoTong University*, 2014, 48(11): 8-14. (in Chinese)
- [11] 杨辉著, 文键, 童欣, 等. 板翅式换热器锯齿型翅片参数的遗传算法优化研究[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(12): 90-96.
YANG Huizhu, WEN Jian, TONG Xin, et al. Optimization design for serrated fin in plate heat exchanger with genetic algorithm[J]. *Journal of Xi' An JiaoTong University*, 2015, 49(12): 90-96. (in Chinese)
- [12] 王斯民, 王萌萌, 顾昕, 等. 螺旋折流板换热器结构参数多目标优化的数值模拟[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(11): 14-19.
WANG Simin, WANG Mengmeng, GU Xin, et al. Multi-objective optimization on the structural parameters of shell-and-tube heat exchanger with helical baffles[J]. *Journal of Xi' An JiaoTong University*, 2015, 49(11): 14-19. (in Chinese)
- [13] Yin H, Ooka R. Shape optimization of water-to-water plate-fin heat exchanger using computational fluid dynamics and genetic algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 80: 31-318.
- [14] Amini M, Bazargan M. Two objective optimization in shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 69(1/2): 278-285.
- [15] Artur S, Michael N, Paul-Michael W. Heat Removal by Evaporation of Volatile Component[C]// 9th Int. Heat Transfer Conference Jerusalem Israel, 1990(3): 51-56.
- [16] 张鹏. 汽-液-液三相直接接触换热器传热及流动特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 1999.
ZHANG Peng. The heat transfer and flow characteristics of vapor-liquid-liquid three-phase direct contact heat exchanger[D]. Tianjin: Tianjin University, 1999. (in Chinese)
- [17] Joseph Kestin. Geothermal and geothermal power guide technology[M]. Tibetan geothermal engineering, Water Resources and Electric Power Press, 1988: 275-276.
- [18] Raina G K, Wanchoo R K, Grover P D. Direct contact heat transfer with phase change: Motion of evaporating droplets[J]. *Plos One*, 2016, 11(5): 835-837.
- [19] Huang J, Xu J, Sang X, et al. Quantifying the synergy of bubble swarm patterns and heat transfer performance using computational homology[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75(4): 497-503.