

控制与决策

Control and Decision

宽通道换热板片结构的多目标头脑风暴优化设计

郭一楠, 蒋东章, 王瑞茹, 巩敦卫

引用本文:

郭一楠, 蒋东章, 王瑞茹, 巩敦卫. 宽通道换热板片结构的多目标头脑风暴优化设计[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2314–2322.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0329>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于不确定度采样准则的费时问题优化算法](#)

An optimization algorithm with uncertainty-based sampling strategy for expensive problems

控制与决策. 2022, 37(6): 1541–1549 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1798>

[计及混合潮流约束的热-电互联综合能源系统多目标优化调度](#)

Multi-objective optimization scheduling for integrated electricity and heating system including hybrid power flow constraints

控制与决策. 2022, 37(1): 97–107 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0913>

[基于小波变换与差分变异BSO-BP算法的大坝变形预测](#)

Dam deformation prediction based on wavelet transform and differential mutation BSO-BP algorithm

控制与决策. 2021, 36(7): 1611–1618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1431>

[基于复杂昂贵仿真的体系效能多目标优化](#)

Complex and expensive simulation based multi-objective optimization to system-of-system effectiveness

控制与决策. 2021, 36(3): 589–598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0844>

[基于树形结构无界存档的多目标粒子群算法](#)

Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on tree-structured unbounded archive

控制与决策. 2020, 35(11): 2675–2686 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0276>

宽通道换热板片结构的多目标头脑风暴优化设计

郭一楠^{1,2}, 蒋东章², 王瑞茹², 巩敦卫^{2†}

(1. 中国矿业大学(北京) 机电工程学院, 北京 100084;
2. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 换热板片作为构成宽通道板式换热器的核心部件,对其换热效果具有直接影响. 为有效提升换热器性能,减少能量损耗,提出一种宽通道换热板片结构的多目标头脑风暴优化设计方法. 首先,根据换热板片的形状和布局特点,提取梯形凸台尺寸及其分布间隔构成结构参数,采用正交法,基于 Fluent 数值模拟软件获得 25 组换热板片结构样本;然后,采用回归构建换热努塞尔数和压力损失的代理模型,以最大换热效果和最小能量损耗作为优化目标,采用基于网格的多目标头脑风暴优化算法,寻优获得最佳换热板片的结构设计方案. 统计实验结果表明,换热性能代理模型可以有效降低评价代价,所提出优化设计方法可以更加高效地获得具有最佳换热效果和能量损耗的换热板片结构.

关键词: 宽通道换热板片; 代理模型; 多目标头脑风暴优化; 换热努塞尔数; 压力损失

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0329

引用格式: 郭一楠,蒋东章,王瑞茹,等. 宽通道换热板片结构的多目标头脑风暴优化设计[J]. 控制与决策, 2022, 37(9): 2314-2322.

Structural design of heat exchanger plate with wide-channel based on multi-objective brain storm optimization

GUO Yi-nan^{1,2}, JIANG Dong-zhang², WANG Rui-ru², GONG Dun-wei^{2†}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100084, China; 2. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: A heat exchanger plate is the core component of a heat exchanger with wide channel, which has a direct impact on heat exchange effect. In order to improve its efficiency and decrease energy loss, an improved multi-objective brain storm optimization algorithm is introduced to seek the optimal structure of a heat exchange plate. According to its shape and layout, six structural parameters about size and distribution of trapezoidal convex units are defined as decision variables. Following that, 25 groups of samples are obtained using the orthogonal method and numerical simulation based on Fluent. Two surrogate models for evaluating Nusselt index and pressure loss are constructed by regression. Taking maximum heat exchange efficiency and minimum energy loss as optimization objectives, the algorithm of grid-based multi-objective brain storm optimization is employed to find the optimal structure of a heat exchange plate. Statistical experimental results indicate that surrogate model of heat exchange performance can effectively reduce the cost of evaluation, and the proposed optimization method can obtain the optimal structure with the highest heat exchange efficiency and least energy loss.

Keywords: heat exchanger plate with wide channel; surrogate model; multi-objective brain storm optimization; Nusselt index; pressure loss

0 引言

换热器在工业生产中是极其重要的能量转换设备,目前已被广泛地应用于石油、机械、能源、电力、制冷、交通等工程领域. 据不完全统计,大型石油

炼制企业中,对换热器投资约占所有工程建设总投资的 30%~40%;其在合成氨厂中的设备拥有量占比也达到 40% 以上^[1]. 板式换热器具有结构紧凑、体积小、经济性好且换热效率高等优点. 它通常采用宽通

收稿日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61973305, 61573361, 52121003, 61773384); 江苏省六大高峰人才项目 (2017-DZXX-046).

责任编辑: 陈家伟.

†通讯作者. E-mail: dwgong@vip.163.com.

道和可拆卸两种构成方式.其中,宽通道板式换热器可以有效提高使用温度和压力,因此具有更广泛的适用范围.然而,构成换热板片的波纹管虽然能强化传热效果^[2],但是,为了改善换热效果和阻力特性,必须对波纹管的波纹类型、结构尺寸以及内部流动特性进行优化设计.

为提高板式换热器的板片换热性能,同时降低压力损失,研究人员针对板片形状和尺寸进行了一系列数值模拟和实验研究. Durmuş等^[3]通过实验对比了人字形板片与星号形板片的能量与传热损失,发现星号形板片虽然能量损失较小,但是传热能力也较弱. Jeong等^[4]针对传热板片上的凹凸纹压花形状为圆形、椭圆形和V形的3种板式换热器,模拟分析了其压降、传热效率和质量流率之间的关系,发现椭圆形换热器板片具有最高传热效率和最低压降.黄少君等^[5]深入研究了具有半圆型、半椭圆I型和半椭圆II型3种纵截面的波纹板片换热情况,结果表明,半圆型波纹板片具有最大压力损失和最佳换热性能.这是因为,在该结构下流体由凸面流向凹面时,产生的漩涡增强了换热效果.任承钦等^[6]和杜文静等^[7]则先后设计了具有准逆流换热效果的六边形板式换热器和正六边形球面板式换热器.近年来,越来越多的学者关注于交叉三角形波纹板片的特性研究.郭春生等^[8]在不同波纹比例下,对波纹板片的换热特性进行了深入对比分析.赵伟杰等^[9]和张立志^[10]针对全焊接板式换热器,研究了不同雷诺数、高宽比和边界条件下的流动与换热特性,建立了交叉三角形波纹板片的换热准则,并在理想壁面和耦合壁面下,分别研究了耦合传热对板片的传热阻力的影响.通过上述研究可见,换热板片形状对板间流动方式存在显著影响,是宽通道板式换热器的设计关键.

受到流动条件和介质特性的影响,各类换热板片要具有更小压力损失和更佳换热综合性能,必须充分考虑流动条件等对板间换热性能的影响,对板型参数进行最优设计.传统的换热器结构优化通常采用枚举法,对板式换热器的流程和通道的所有组合,通过耗时的数值模拟计算实现性能寻优.显然,当换热器流程和通道的组合形式较多时,计算量会急剧增加,优化耗时也将成倍增长.基于此,启发式算法被引入到该问题的求解中,但是,所获得的近似解可能不具有最优换热性能.此外,由于没有考虑换热器板片结构参数的取值范围及相应约束,所得结构参数可能不满足实际换热器需求,导致无效设计.受生物启发的智能优化方法,因其在求解复杂优化问题中所具

有的优良性能而被研究人员引入到换热器结构设计中.严巴杰等^[11]以板式换热器的质量作为目标函数,采用粒子群优化算法寻优获得换热器芯体外形尺寸和翅片参数^[12-13],获得的最优换热器结构不仅具有较轻质量,而且体积较小.齐清^[14]提出了一种多模型切换的粒子群优化算法,用于优化神经网络权值,实现板式换热器的换热特性分析,降低了实验研究成本.何巧东等^[15]提出两种不同机理的局部搜索策略,与粒子群优化算法相结合,实现了换热网络综合优化.夏涛等^[16]结合遗传算法和粒子群优化算法实现了换热器的换热量优化,从而解决了换热量受到换热条件约束且相互制约的设计难题.

板型结构优化设计主要集中在可拆卸板式换热器,而对于宽通道板式换热器的流动条件、综合性能、板型结构参数的研究还比较欠缺.特别是,对于该类换热器的梯形凸台板片在不同工况下的换热性能,与介质在板间的流动特性及其形状参数的关联研究还较为有限.张来来^[17]针对极地环境下的宽通道优化板式换热器结构,以换热强度为优化目标,仿真分析了海水-冰晶两相流换热机制. Hassanzadeh等^[18]研究了波浪倾角对并联宽通道换热器性能的影响,通过有限体积法在不同雷诺数的层流中计算波倾角的展向,以寻找其最佳值.但是,采用传统的热能数值模拟方法设计大型宽通道板片时,建模困难且运算耗时.此外,现有文献仅考虑了不同类型换热器板片结构的单一性能,而在工程实际中,通常要兼顾换热器板片的换热效率、压力损失以及成本等多方面性能.

头脑风暴优化算法(brain storm optimization, BSO)由Shi^[19]于2011年首次提出,源于人类解决问题时进行的头脑风暴过程.对于人类无法独立解决的难题,往往可以通过汇集具有不同知识背景的人员进行头脑风暴^[20]加以解决.该算法通过聚类/分类方法分析解集合构成,基于解的分布生成新解,经过迭代求解,使探索与开发达到一种平衡状态.由于其在解决难以求解的大规模高维多峰函数问题中所具有的优势,已被成功地应用于许多实际生产生活中的优化问题求解.针对由热力和风力发电机组成的新能源系统经济负荷调度问题, Jadhav等^[21]采用头脑风暴优化算法,实现了所需电力生产成本的最小化.在无线传感器网络中,通过头脑风暴优化算法很好地解决了无线传感器网络的全覆盖问题^[22]. Niu等^[23]给出了一种用于解决金融领域决策投资组合的头脑风暴优化算法.然而,采用头脑风暴优化算法解决板式换热器等机械结构设计的相关研究还比较缺乏.

鉴于此,本文针对宽通道换热板片结构,提出一种基于代理模型的多目标头脑风暴优化设计方法.该算法以其关键结构设计要素为决策变量,采用代理模型拟合换热性能和能量损耗综合准则与其结构参数之间的关联影响,建立包含最佳换热效果和最低能量损耗为目标函数的多目标结构优化模型;采用多目标头脑风暴优化方法,寻优获得兼顾换热性能和能量损耗的最优换热板片形状参数集.

本文的主要贡献在于:1)构建宽通道换热板片的换热努塞尔数和压力损失代理模型,用于替代耗时的数值模拟方法,实现板片结构的换热效果和能量损耗的评价,从而显著降低优化过程中的评价代价;2)提出一种换热板片结构的改进多目标头脑风暴优化设计方法,高效获得最优板片结构;3)通过对比实验验证了多目标头脑风暴优化算法应用于求解宽通道换热板片结构设计问题的有效性.

1 换热板片的换热性能和能量损耗代理模型构建

宽通道换热板片通常采用诸多梯形凸台构成其换热表面,以换热效果和能量损耗来度量其结构设计的合理性.针对不同板片结构,其换热效果和能量损耗通常基于Fluent数值模拟软件获得.但是,采用数值模拟方法评价每种板片结构参数的合理性十分耗时.为此,引入代理模型^[24]拟合换热板片的换热效果和能量损耗综合准则关系模型,并在进化寻优过程中,采用代理模型替代数值模拟方法,对每种板片结构的性能加以评价.

1.1 换热板片结构形状参数

宽通道板式换热器是将管壳式换热器的管间流道与板式换热器的板间流道相结合而构成,从而增加了板间流道的扰流作用,同时提高了换热器的承压范围.如图1所示,宽通道换热板片为薄金属波纹状的传热板片.每两片传热板片的上、下波峰对称连接,构成管壳式换热器的流通管道.每个传热板片的上、下波峰外壁上均匀分布众多梯形凸台^[25],实现更高效的换热.宽通道换热板片的每一列管道上排列有梯形凸台,通过合理规划凸台长度,可以很好地控制每列管道上梯形凸台的分布数量.所有梯形凸台大小相同,内部为中空结构.两个梯形凸台之间的纵向距离能够调整,横向距离为流通管道的管径.

决定换热板片热交换效率的关键因素是梯形凸台的尺寸及其布局.其具体结构参数包括每个凸台的高度、上底长度、截面内角和凸台(自身)长度、每一列凸台之间的间距以及介质流动速度.由此,确定宽

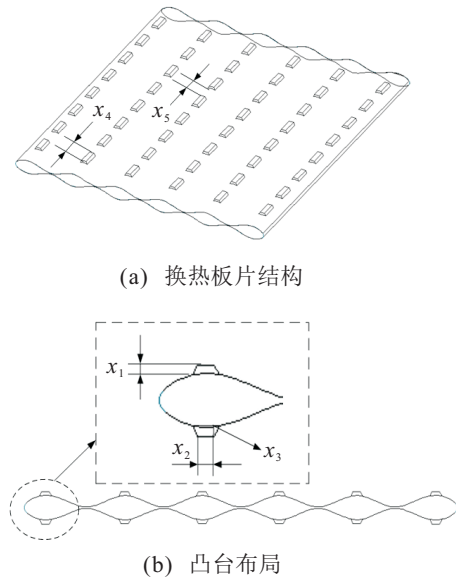


图1 宽通道换热板片结构形状参数

通道换热板片结构优化设计的决策变量为 $x = \{x_k | k = 1, 2, \dots, 6\}$.各个决策变量的含义及其单位如表1所示.

表1 决策变量含义

决策变量	变量符号	单位
凸台高度	x_1	mm
凸台上底长度	x_2	cm
凸台截面内角	x_3	(°)
凸台长度	x_4	cm
凸台间距	x_5	cm
介质流速	x_6	m/s

为了尽可能减少模拟次数,同时全面反映上述宽通道换热板片的关键因素对其换热性能和能耗的影响,本文选取上述6个参数作为因子,采用正交实验法^[26]选取代表样本.以每组模拟结果中换热努塞尔数作为考察目标,根据极差分析方法,确定各个关键因素对宽通道换热板片性能的影响程度.

1.2 建立换热板片换热性能代理模型

宽通道换热板片的换热效果和能量损耗通常采用换热努塞尔数和压力损失分别加以度量^[27-28].为准确分析每种宽通道换热板片结构的换热性能,选用ANSYS数值模拟软件中的Fluent模块,得到该结构流体湍流换热条件下的换热努塞尔数和压力损失^[29-30].根据相关流体力学理论,建立宽通道换热板片的换热努塞尔数Nu和压降 f 模型如下:

$$\text{Nu} = c\text{Re}^m\text{Pr}^n, \quad (1)$$

$$f = c\text{Re}^d. \quad (2)$$

其中:Re为雷诺数,Pr为普朗特数; c 、 m 、 n 、 d 需要根据换热板片的结构、板间流体介质和流体流动情况

来确定.由正交实验法获得的典型换热板片结构,通过Solidworks建立其相应的梯形凸台板式换热器模型,并通过Fluent软件中的ICEM模块构建网格.宽通道板式换热器的换热板片存在梯形凸台,导致其流道结构多变,所以采用非结构网格.对于具有相同波型和外形尺寸的宽通道板式换热器,当板片上的梯形凸台结构变化时,会产生不同的换热性能.由此,根据典型换热板片结构及其对应的模拟换热效果和阻力特性,拟合上述4个模型参数,从而建立宽通道换热板片结构与其性能之间的关联影响代理模型.根据上述换热器板片换热效果和能量损耗代理模型,建立其结构设计的多目标优化模型^[31]如下:

$$\min F = \{f_1(x), f_2(x)\}. \quad (3)$$

其中: $f_1(x) = 1/\text{Nu}$ 为宽通道换热板片换热努塞尔数的倒数, $f_2(x) = f$ 为压力损失.换热努塞尔数越大,该换热板片的换热效率越高,相应的压力损失也越大.因此,上述两个目标之间存在冲突.

2 宽通道换热板片结构多目标头脑风暴优化设计

面向多目标优化问题,头脑风暴优化算法通常先将种群划分为若干个簇,每个簇中心作为问题的较好解.但是,传统的簇生成都是采用K-means或者基于组的聚类方法,计算复杂度较高.本文采用作者在文献[32]中给出的一种基于网格的聚类方法实现簇的划分,如算法1所示.

算法1 基于网格的聚类方法.

输入: 个体的目标值和分区粒度 c ;

输出: 簇中心和簇标签.

- 1) 计算理想点 z^{\min} 和最差点 z^{\max} ;
- 2) 将目标空间划分为 c^M 个网格;
- 3) 计算每个个体的网格标签;
- 4) 确定簇中心;
- 5) 确定簇标签.

理想点 $z^{\min} = \{z_1^{\min}, \dots, z_M^{\min}\}^T$ 和最差点 $z^{\max} = \{z_1^{\max}, \dots, z_M^{\max}\}^T$ 用来确定目标空间中存在Pareto前沿的最小子空间.其中: $z_i^{\min} = \min_{x \in \Omega} f_i(x)$, $z_i^{\max} = \max_{x \in \Omega} f_i(x)$.这里,Pareto前沿是指Pareto最优解集 $\text{PS} = \{x \in S | \neg \exists x^* \in S, F(x^*) < F(x)\}$ 在目标空间的映射 $\text{PF} = \{y = F(x) | x \in \text{PS}\}$.在该子空间上,根据分区粒度 c 对每个目标轴进行均匀划分,划分宽度满足

$$l_i = \frac{z_i^{\max} - z_i^{\min}}{c}. \quad (4)$$

沿该目标分割后的目标子空间坐标为

$$o_i(x) = \left\lfloor \frac{f_j(x) - z_i^{\min}}{l_i} \right\rfloor + 1, \quad (5)$$

由此,得到个体 x 的网格标签为

$$g(x) = o_1(x) + \sum_{i=2}^M (c^{i-1}(o_i(x) - 1)). \quad (6)$$

位于同一个网格中的个体被归为一簇,并从每一簇中,选择一个非支配解作为簇中心.根据簇中的个体特征,确定簇标签类型.定义含有至少一个非支配解的网格为精英簇,不满足上述特性的为普通簇.基于此,基于网格划分的多目标头脑风暴优化算法(grid-based multi-objective brain storm optimization, MOBSO),如算法2所示.

算法2 多目标头脑风暴优化算法.

输入: 种群规模 N , 进化终止代数 T , 变异概率,

阈值 p_1, p_2, p_3, p_4 ;

输出: Pareto最优解.

1) $t = 0$, 初始化种群.

2) 评价个体适应度值.

3) 对个体进行簇划分,参见算法1.

4) 生成随机数 $\alpha \in (0,1)$,若 $\alpha \geq p_1$,则转步骤6).

5) 生成随机数 $\beta \in (0,1)$,若 $\beta \geq p_2$,则转步骤7).

6) 随机选择一个精英簇,若随机数 $\gamma \in (0,1)$ 小于 p_3 ,则直接选该簇中心作为被选个体;否则,选择该簇中的任一个体作为被选个体,并跳转到步骤8).

7) 随机选择一个精英簇和一个普通簇,若随机数 $\delta \in (0,1)$ 小于 p_4 ,则将两个簇中心作为被选个体;否则,从两个簇中分别随机选择一个个体,采用线性加权方式将二者组合成为一个被选个体.

8) 对被选个体进行变异操作,生成新个体.

9) 将新生成个体与被选个体进行比较,较优个体被保留到下一代.

10) 采用非支配排序和拥挤度,更新储备集.

11) 如果达到进化终止代数,则输出Pareto最优解集;否则, $t = t + 1$,并跳转步骤3).

12) 根据具有最大换热努塞尔数或最小压力损失的两个边界点,确定目标空间的理想点.

13) 从Pareto最优解集中找出与理想点具有最小相对距离的解,作为最佳折衷解;采用Fluent仿真获得相应换热板片的流动与换热性能.

3 实验结果与分析

为验证所提出结构优化设计方法的有效性,本文采用3组实验分别对代理模型构建和结构优化设计方法进行性能分析.实验平台的硬件配置如下: Inter Core i7-8750H CPU、8 G内存和512 G固态硬盘;软件

配置为: Windows 10操作系统、ANSYS 18.0软件及 Matlab R2017a.

3.1 换热效果模型构建

宽通道换热板片采用 1 000 mm×900 mm×5 mm 的矩形结构. 采用水作为多层换热板片之间的流通通道和换热板片内流通管道中的流动介质. 由此, 得到各个结构参数的取值范围如表2所示.

表2 各个结构参数的取值范围

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
上限	3	0.8	30	3.6	6	0.1
下限	7	1.6	70	7.2	10	1.3

综合考虑 Fluent 数值模拟^[33] 的评价代价和各个结构参数的取值范围, 为每个结构参数选取5个因素

水平, 如表3所示. 由于选取因素水平太少, 构成的换热板片结构不具有代表性; 反之, 因素水平太多, 虽然能确保结构的典型性, 但是生成的换热板片结构数量过多, 会导致数值模拟评价的耗时过大. 根据 L_5^{25} 正交表, 生成25组具有不同结构和操作条件的典型宽通道换热板片结构, 如表4所示.

表3 换热板片因素水平表

水平	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	3	0.8	30	3.6	6	0.1
2	4	1.0	40	4.5	7	0.4
3	5	1.2	50	5.4	8	0.7
4	6	1.4	60	6.3	9	1.0
5	7	1.6	70	7.2	10	1.3

表4 换热板片数值模拟实验结果

样本	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	换热努塞尔数	压力损失
1	3	0.8	30	3.6	6	0.1	151.20	95.33
2	3	1.0	40	4.5	7	0.4	383.80	156.47
3	3	1.2	50	5.4	8	0.7	595.89	238.05
4	3	1.4	60	6.3	9	1.0	808.58	471.64
5	3	1.6	70	7.2	10	1.3	997.82	826.33
6	4	0.8	40	5.4	10	1.0	803.08	461.27
7	4	1.0	50	6.3	6	1.3	1 015.05	833.84
8	4	1.2	60	7.2	7	0.1	167.28	96.13
9	4	1.4	70	3.6	8	0.4	379.85	159.41
10	4	1.6	30	4.5	9	0.7	612.37	255.76
11	5	0.8	50	7.2	9	0.4	376.04	161.05
12	5	1.0	60	3.6	10	0.7	598.45	276.75
13	5	1.2	70	4.5	6	1.0	820.94	481.47
14	5	1.4	30	5.4	7	1.3	1 048.86	848.50
15	5	1.6	40	6.3	8	0.1	165.56	99.26
16	6	0.8	60	4.5	8	1.3	1 020.69	432.96
17	6	1.0	70	5.4	9	0.1	166.85	106.25
18	6	1.2	30	6.3	10	0.4	383.73	168.46
19	6	1.4	40	7.2	6	0.7	612.22	260.54
20	6	1.6	50	3.6	7	1.0	844.70	504.58
21	7	0.8	70	6.3	7	0.7	598.32	239.31
22	7	1.0	30	7.2	8	1.0	848.23	494.96
23	7	1.2	40	3.6	9	1.3	1 057.04	852.02
24	7	1.4	50	4.5	10	0.1	165.55	102.37
25	7	1.6	60	5.4	6	0.4	383.87	171.04
均值1	587.458	589.866	608.878	606.248	596.656	163.288	—	—
均值2	595.526	602.476	604.340	600.670	608.592	381.458	—	—
均值3	601.970	602.976	597.446	597.710	600.044	601.450	—	—
均值4	605.638	603.012	595.774	594.248	604.176	825.106	—	—
均值5	610.602	600.864	592.756	600.318	589.726	1 027.892	—	—
极差	23.144	13.146	16.122	12.000	18.866	864.604	—	—

在非结构网格选取为900 000条件下, 基于 Fluent 数值模拟软件, 获得上述25组典型换热板片结构的换热效果. 表4中的均值代表所有结构参数在同一因素水平上的换热努塞尔数平均值. 通过对比6个结构

参数在5个因素水平下的平均值, 得到具有最佳换热努塞尔数的6个结构参数所对应的最佳因素水平, 分别为: 凸台高度5级、凸台上底长度4级、凸台截面内角1级、凸台长度1级、介质流速5级、凸台间距

2级. 综合比较各因素对单层换热板片结构换热努塞尔数的影响, 得到 $R_6 > R_1 > R_5 > R_3 > R_2 > R_4$, 即水的流速、凸台高度、凸台间距、凸台截面内角对换热努塞尔数的影响最大, 凸台上底长度、凸台长度对换热努塞尔数影响最小。

由于凸台高度、截面内角和间距对于换热板片的换热努塞尔数和压降具有显著影响, 将凸台截面内角以 $x_3\pi/180$ 的指数形式添加到上述换热努塞尔数和压降模型中; 并对凸台高度和间距采用无量纲化处理, 即 x_1/d 、 x_5/d 。其中: d 为换热管道的直径, $Re = 10000v$ 。根据表3所列出的典型换热板片结构参数及其换热努塞尔数和压力损失, 拟合所获得换热努塞尔数和压降模型参数, 得到换热板片换热效率的努塞尔数和压降代理模型如下:

$$Nu = 0.823Re^{0.0039} \left(\frac{x_1}{d}\right)^{0.03} \left(\frac{x_3\pi}{d}\right)^{0.04} \left(\frac{x_5}{d}\right)^{0.09}, \tag{7}$$

$$f = 0.12Re^{0.769}Pr^{0.33} \left(\frac{x_1}{d}\right)^{0.072} \left(\frac{x_3\pi}{d}\right)^{0.09} \left(\frac{x_5}{d}\right)^{0.088}. \tag{8}$$

3.2 本文所提出方法获得的最优换热板片结构换热性能分析

根据宽通道换热器板片的实际性能要求, 确定具有最小压力损失或最大换热努塞尔数的两个边界点, 如图2中的A点和C点. 基于上述边界点, 确定目标空间中的理想点 z^{\min} 。进而, 从Pareto最优解集中, 筛选与理想点具有最小相对距离的解作为最佳折衷解, 如图2中的B点, 其目标值即为最优换热板片结构的流动与换热性能。

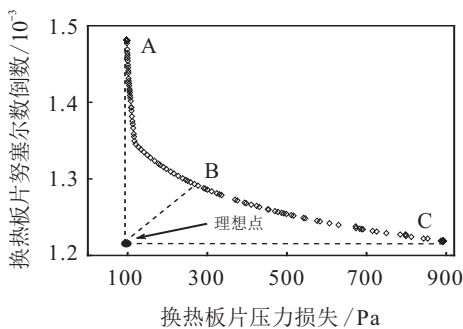


图2 宽通道换热板片理想点

上述3个非占优解所对应的宽通道换热器板片结构参数如表5所示. 采用有限元仿真分析获得其换热流场和压力流场如图3和图4所示。

由表5可见, 相比于25组样本, 采用MOBSO寻优获得的换热板片结构具有更好的换热性能和更小的压力损耗. 对比图3和图4中不同方案的换热流场和

表5 宽通道换热板片设计方案对比

结构参数	方案1	方案2	方案3
凸台的高度/mm	3.72	5.31	6.49
凸台上底长度/cm	1.40	1.56	1.12
凸台截面内角/(°)	64.3	58.1	39.2
凸台长度/cm	5.39	6.46	3.71
凸台间距/cm	7.48	9.84	6.35
介质的流速/(m/s)	0.17	0.91	1.32
换热效果	675.68	769.23	819.21
能量损失/Pa	87.35	243.82	884.92

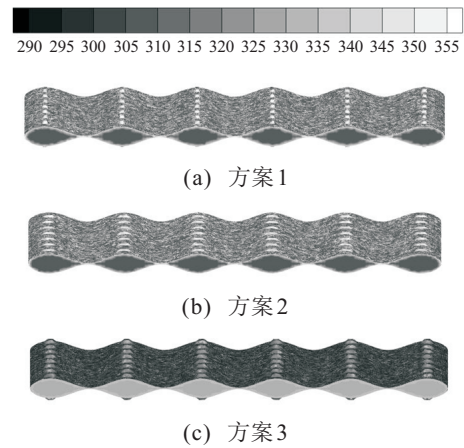


图3 宽通道换热板片换热流场

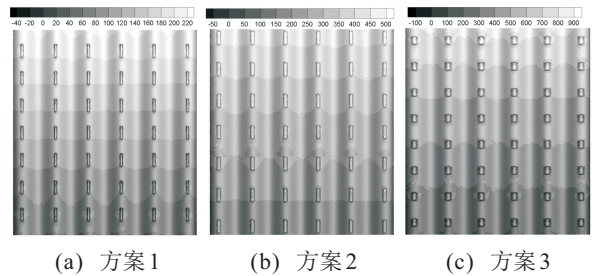


图4 宽通道换热板片压力流场

压力流场有限元仿真结果表明, 3种方案的压力流场变化显著. 但是, 不同结构参数对换热流场的影响相对较弱. 因此, 设计人员可以根据实际工程需求, 选取符合设计目标的任一点作为最优结构设计方案。

3.3 不同优化方法下获得的最优换热板片结构换热性能分析

为验证所提出方法的有效性, 将本文方法与文献[34]采用的NSGA-II算法、文献[35]采用的MOPSO方法进行优化性能对比分析. 值得注意的是, 上述两种对比算法都已在板翅换热器的结构优化设计中加以应用. 为公平比较, 所有算法采用相同的种群规模 $N = 200$ 和进化终止代数 $T = 100$. 各个算法中关键参数的取值如表6所示。

表6 算法参数设置

算法	参数设置
MOBSO	$c = 3, p_1 = p_2 = 0.8, p_3 = p_4 = 0.2$
MOPSO	$D = 4, c_1 = c_2 = 2, w = [0.4, 0.9]$
NSGA-II	交叉概率为0.7, 变异概率为0.4

为综合评价算法所得 Pareto 最优解集的分布性和收敛性, 本文采用超体积 (HV) 测度^[36] 和 SP 测度^[36] 加以分析, 如下式所示:

$$HV = \delta \left(\bigcup_{i=1}^{|S|} v_i \right). \quad (9)$$

其中: δ 为勒贝格测度, $|S|$ 为非支配解的数量, v_i 为参考点与第 i 个解组成的超体积. HV 测度是 Pareto 最优解集与参考点所围成的超体区域面积. HV 值越大, 表明所得 Pareto 最优解集的分布性和 (或) 收敛性越好. 显然, 与 IGD 测度不同, 该测度无需事先知道问题的真实最优解集.

SP 用来描述非劣解在 Pareto 前沿上的分布范围, 有

$$SP = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{d}_i - d_i)^2 d_i} = \min_j \left\{ \sum_{m=1}^n |f_m(a_i) - f_m(a_j)| \right\}. \quad (10)$$

其中: d_i 表示两个非劣解之间的距离, \bar{d}_i 是 d_i 的均值. SP 度量每个解到其他解的最小距离的标准差, 能评估解集在目标空间上的分布均匀程度, 其值越小, 说明解的分布越均匀, 算法的分布性越好. 此外, 采用 C 测度^[36] 对比分析两种算法的收敛性. 该测度主要用来计算 Pareto 最优解 B 中最优个体被 Pareto 最优解 A 中最优个体占优的比例, 记为

$$C(A, B) = \frac{|b \in B : \exists a \in A, a \prec b|}{|B|}. \quad (11)$$

将本文所提出 dMOBSO 和对比算法 MOPSO 和 NSGA-II 算法分别运行 30 次, 基于上述算法获得的宽通道换热板片最优结构所对应的 HV 和 SP 值如表 7 和表 8 所示. 对比分析上述统计结果和图 5 所示 Pareto 前沿可以看出, 相比于 MOPSO 和 NSGA-II, 所提出的 MOBSO 算法获得的 Pareto 前沿具有最优 HV 和 SP 值, 即 Pareto 最优解集的收敛性和分布性最佳.

表7 不同算法的优化性能比较

算法	MOBSO	MOPSO	NSGA-II
HV	289.3	262.7	216.5
SP	3.71e-3	9.46e-3	4.28e-3
时间/s	167.6	153.5	174.2

表8 不同算法之间 C 测度比较

算法	MOBSO	MOPSO	NSGA-II
MOBSO	—	0.0317/0.9433	0/1
MOPSO	0.9433/0.0317	—	0/1
NSGA-II	1/0	1/0	—

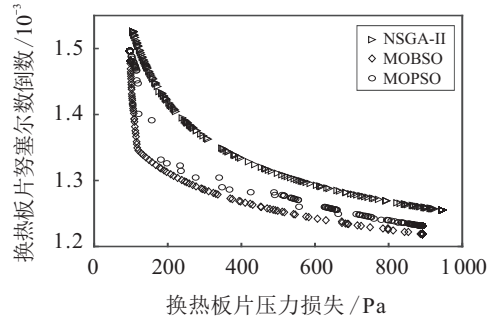


图5 3种算法所得 Pareto 前沿对比

由不同算法下的理想点分布可见, 所提出方法可以获得具有最高换热效果和最小压力损耗的宽通道换热板片结构.

4 结论

为有效提高宽通道板式换热器的性能, 针对换热板片这一核心部件, 本文提出了一种多目标头脑风暴结构优化设计方法. 根据换热板片结构特点, 提取梯形凸台形状和布局作为其结构参数. 为降低换热效果数值模拟评价的高昂代价, 基于正交法获得的典型结构参数及其真实换热性能, 回归生成其换热努塞尔数和压力损失的代理模型. 以最大换热效果和最小能量损耗作为优化目标, 采用多目标头脑风暴优化方法, 寻优获得最佳换热板片性能的结构参数. 实验结果表明, 代理模型可以有效降低评价代价, 所提出方法获得的宽通道换热板片形状参数具有更佳的换热效果和更小的能量损耗. 一个宽通道板式换热器通常由多个换热板片组成, 设计一类具有更小体积、更高换热效果且适用于介质特性动态变化的宽通道板式换热器将是未来的研究工作.

参考文献 (References)

[1] 李飞, 张平, 苑玮琦. 板式换热器波纹板深度在线检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 115-125. (Li F, Zhang P, Yuan W Q. Research on online measurement method of corrugated plate depth of plate heat exchanger[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 115-125.)

[2] 姚君磊. 适用于液固两相流的宽通道板式换热器的性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012. (Yao J L. The heat transfer and flow characteristics analysis in wide plate heat exchanger for solid-liquid two phase flow[D]. Nanjing: Nanjing University of

- Aeronautics and Astronautics, 2012.)
- [3] Durmuş A, Benli H, Kurtbaş İ, et al. Investigation of heat transfer and pressure drop in plate heat exchangers having different surface profiles[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(5/6): 1451-1457.
- [4] Jeong J Y, Hong H K, Kim S K, et al. Impact of plate design on the performance of welded type plate heat exchangers for sorption cycles[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32(4): 705-711.
- [5] 黄少君, 卢玫, 李凌, 等. 混合板式换热器板通道的数值模拟研究[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(11): 1925-1928.
(Huang S J, Lu M, Li L, et al. Numerical simulation of hybrid plate heat exchanger's plate channel[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(11): 1925-1928.)
- [6] 任承钦, 汤广发, 张国强, 等. 一种新型板式换热器的设计及其传热特性的模拟研究[J]. *暖通空调*, 2003, 33(5): 106-109.
(Ren C Q, Tang G F, Zhang G Q, et al. Design of a new plate heat exchanger and simulation study on its heat transfer property[J]. *Hv & Ac*, 2003, 33(5): 106-109.)
- [7] 杜文静, 王飞, 王坤, 等. 正六边形球面肋板式换热器优化设计[J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(11): 1940-1943.
(Du W J, Wang F, Wang K, et al. Optimization design of the novel regular hexagon plate heat exchanger with spherical ribs[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(11): 1940-1943.)
- [8] 郭春生, 程林, 杜文静. 不同波纹比例新型板式换热器的传热、阻力特性及火用分析[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 36(2): 163-167.
(Guo C S, Cheng L, Du W J. Heat transfer and resistance characteristics and exergy analysis of new-type plate heat exchanges with different corrugation ratios[J]. *Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science*, 2012, 36(2): 163-167.)
- [9] 赵伟杰, 陈作义, 张立志, 等. 交叉三角形波纹板流道的流动与换热特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(6): 1016-1018.
(Zhao W J, Chen Z Y, Zhang L Z, et al. Flow and convective heat transfer in cross-corrugated triangular ducts[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(6): 1016-1018.)
- [10] 张立志. 交叉三角形波纹板流道在过渡流状态下的传热与阻力特性[J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(5): 859-861.
(Zhang L Z. Transitional heat transfer and resistance properties of cross-corrugated triangular ducts[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(5): 859-861.)
- [11] 严巳杰, 胡建华, 黄炳琼, 等. 基于粒子群优化算法的板翅式换热器优化设计[J]. *化工机械*, 2012, 39(1): 55-57.
(Yan S J, Hu J H, Huang B Q, et al. Optimal design of plate-fin heat exchangers based on particle swarm optimization[J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2012, 39(1): 55-57.)
- [12] Qin Q D, Cheng S, Zhang Q Y, et al. Biomimicry of parasitic behavior in a coevolutionary particle swarm optimization algorithm for global optimization[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 32: 224-240.
- [13] 王竹荣, 薛伟, 黑新宏, 等. 多阶段粒子群优化算法求解容量约束p-中位问题[J]. *计算机学报*, 2020, 43(6): 1139-1160.
(Wang Z R, Xue W, Hei X H, et al. The multi-phase particle swarm optimization for solving the capacitated p-Median problem[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2020, 43(6): 1139-1160.)
- [14] 齐清. 基于改进粒子群算法优化的换热器设计及换热工程实验研究[D]. 沈阳: 东北大学机械工程与自动化学院, 2015.
(Qi Q. Design of heat exchanger based on improved particle swarm optimization and experimental study of heat transfer engineering[D]. Shenyang: School of Mechanical Engineering, Northeastern University, 2015.)
- [15] 何巧乐, 崔国民, 许海珠. 基于新策略粒子群算法优化换热网络[J]. *化工学报*, 2014, 65(S1): 391-397.
(He Q L, Cui G M, Xu H Z. Particle swarm optimization with two new strategies for heat exchangers network synthesis[J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(S1): 391-397.)
- [16] 夏涛, 贾涛, 程杰. 群智优化算法同步综合换热网络[J]. *北京化工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(1): 97-101.
(Xia T, Jia T, Cheng J. A novel approach for simultaneous synthesis of a heat exchanger network via swarm intelligent optimization[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition*, 2009, 36(1): 97-101.)
- [17] 张来来. 极地运输船冷却系统中板式换热器两相流数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学能源与动力工程学院, 2017.
(Zhang L L. Numerical simulation of two phase flow in plate heat exchanger of polar carrier cooling system[D]. Wuhan: School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, 2017.)
- [18] Hassanzadeh R, Abadtalab M, Bayat A. Optimization of wave inclination angle in parallel wavy-channel heat exchangers[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45(2): 817-832.
- [19] Shi Y. Brain storm optimization algorithm[J]. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 2011, 6728: 1-14.
- [20] Cheng S, Qin Q D, Chen J F, et al. Brain storm optimization algorithm: A review[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2016, 46(4): 445-458.
- [21] Jadhav H T, Sharma U, Patel J, et al. Brain storm optimization algorithm based economic dispatch considering wind power[C]. *IEEE International Conference on Power and Energy*. Kota Kinabalu, 2012:

- 588-593.
- [22] Chen J, Shi C, Yang C, et al. Enhanced brain storm optimization algorithm for wireless sensor networks deployment[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, 9140: 373-381.
- [23] Niu B, Liu J, Liu J, et al. Brain storm optimization for portfolio optimization[C]. *Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 416-423.
- [24] Guo Y N, Zhang X, Gong D W, et al. Novel interactive preference-based multiobjective evolutionary optimization for bolt supporting networks[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2020, 24(4): 750-764.
- [25] 王传伟, 贾文广, 梁晓明, 等. 基于正交试验的凸台型全焊接板式换热器优化[J]. *机械制造*, 2020, 58(3): 85-89.
(Wang C W, Jia W G, Liang X M, et al. Optimization of boss-type fully-welded heat exchanger based on orthogonal test[J]. *Machinery*, 2020, 58(3): 85-89.)
- [26] Qin Q D, Cheng S, Zhang Q Y, et al. Multiple strategies based orthogonal design particle swarm optimizer for numerical optimization[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 60: 91-110.
- [27] 李健武, 符阳春, 张志伟, 等. 进口雷诺数和湿空气含湿量对冲击冷却流动和传热特性的影响[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(5): 170-178.
(Li J W, Fu Y C, Zhang Z W, et al. Influences of inlet Reynolds number and humidity ratio of moist air on flow and heat transfer characteristics of impingement cooling[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(5): 170-178.)
- [28] 贺鹏程, 庄莉, 胡亮, 等. 板翅式换热器压力特性工程计算方法[J]. *化工学报*, 2020, 71(S1): 172-178.
(He P C, Zhuang L, Hu L, et al. Discussion on method of engineering computation of plate-fin heat exchanger pressure characteristic[J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(S1): 172-178.)
- [29] Yuan L, Feng T Z, Bai J C, et al. Research on transformation design of nuclear support easy to disassemble based on ANSYS Workbench[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1732(1): 012157.
- [30] Brianza Gordillo G, Zamarripa Muñoz M Á, Rodríguez González C I E. Speed, torque and mathematical power relationship ratios, using SolidWorks parametric designed spur gear[C]. *Mechanisms and Machine Science*. Cham: Springer International Publishing, 2020: 571-579.
- [31] 郭一楠, 王春, 刘海媛, 等. 基于区间多目标量子文化算法的无线传感器网络覆盖能效优化[J]. *控制与决策*, 2015, 30(3): 425-432.
(Guo Y N, Wang C, Liu H Y, et al. Energy-efficient coverage optimization of wireless sensor networks based on interval multi-objective quantum-inspired cultural algorithm[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(3): 425-432.)
- [32] Guo Y N, Yang H, Chen M R, et al. Grid-based dynamic robust multi-objective brain storm optimization algorithm[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(10): 7395-7415.
- [33] 王哲, 厉彦忠. 板翅式换热器传热、阻力多目标权衡优化[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(2): 399-404.
(Wang Z, Li Y Z. Multi-object tradeoff optimization of heat transfer and fluid friction for plate-fin heat exchanger[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(2): 399-404.)
- [34] 藏明君, 张树有, 郑维强, 等. 基于领地行为的多目标粒子群算法及在板翅换热器设计中的应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(1): 76-87.
(Zang M J, Zhang S Y, Jia W Q, et al. Multi-objective particle swarm optimization based on territorial behavior and its application in optimum design of plate-fin heat exchanger[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(1): 76-87.)
- [35] Sengupta S, Das S, Nasir M, et al. An evolutionary multiobjective sleep-scheduling scheme for differentiated coverage in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews*, 2012, 42(6): 1093-1102.
- [36] 陈美蓉, 郭一楠, 巩敦卫, 等. 一类新型动态多目标鲁棒进化优化方法[J]. *自动化学报*, 2017, 43(11): 2014-2032.
(Chen M R, Guo Y N, Gong D W, et al. A novel dynamic multi-objective robust evolutionary optimization method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(11): 2014-2032.)

作者简介

郭一楠(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 从事调度优化理论与方法、数据流分析等研究, E-mail: nanfly@126.com;

蒋东章(1995—), 男, 硕士生, 从事智能优化的研究, E-mail: 1356381874@qq.com;

王瑞茹(1997—), 女, 硕士生, 从事智能优化的研究, E-mail: 1390999528@qq.com;

巩敦卫(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能优化理论与方法、基于搜索的软件工程等研究, E-mail: dwgong@vip.163.com.

(责任编辑: 李君玲)