

空冷中冷器百叶窗翅片结构参数优化

李 胜¹, 朱 佳², 黄德惠¹, 陈存福¹, 费洪庆¹, 丰 伟¹, 胡兴军²

(1. 一汽解放青岛汽车有限公司, 山东 青岛 266043; 2. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022)

摘 要: 基于中心复合设计对空冷中冷器百叶窗翅片的 3 个几何参数开窗角度、翅片间距和百叶间距, 进行三因素五水平的试验设计, 然后建立以传热特性 Nu 和流动阻力特性 f 为目标函数的完全二阶回归模型, 并采用响应曲面法分析各结构参数的影响重要性, 最后根据多目标遗传算法进行寻优计算。结果表明: 传热特性主要受翅片间距影响, 而阻力特性受开窗角度影响最大, 多目标优化得到一组 Pareto 解集, 决策者可以根据实际需求在 Pareto 解集中进行选取。

关键词: 机械工程; 空冷中冷器; 百叶窗翅片; 中心复合设计; 响应面法

中图分类号: U461.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)04-0998-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20210797

Structural parameters optimization of louver fins of air-cooled charge air cooler

LI Sheng¹, ZHU Jia², HUANG De-hui¹, CHEN Cun-fu¹, FEI Hong-qing¹, FENG Wei¹, HU Xing-jun²

(1. China FAW Jiefang Automotive Co., Ltd. (Qingdao), Qingdao 266043, China; 2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the central composite design, the three geometric parameters of the air-cooled intercooler shutter fins, the opening angle, the fin spacing, and the louver spacing, are tested with three factors and five levels. Then a complete second-order regression model with the heat transfer characteristics Nu and the flow resistance characteristics f as the objective function is established, and the response surface analysis is carried out to analyze the importance of the influence of each structural parameter, and finally the optimization calculation is carried out according to the multi-objective genetic algorithm. The results show that the heat transfer characteristics are mainly affected by the fin spacing, while the resistance characteristics are most affected by the opening angle. Multi-objective optimization can obtain a set of Pareto solutions, which can be selected by the decision maker according to actual needs.

Key words: mechanical engineering; air-cooled charge air cooler; louver fin; central composite design; response surface method

收稿日期: 2021-08-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875238).

作者简介: 李胜(1976-), 男, 高级工程师, 博士. 研究方向: 汽车系统动力学. E-mail: 18863900@163.com

通信作者: 胡兴军(1976-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 汽车空气动力学. E-mail: hxj@jlu.edu.cn

0 引言

紧凑式换热器(Compact heat exchanger, CHE)由于其传热效率高、安装成本低、安全可靠性好,被广泛应用于汽车、航空航天、动力机械等领域。基于沙拉和塞库利克^[1]的观点,紧凑式换热器可分为两类,分别是管翅式热交换器和板翅式热交换器。增加翅片是提高换热器传热效果的有效手段,紧凑式换热器翅片主要有这几种类型^[2]:平直翅片、波纹翅片、锯齿翅片、打孔翅片、百叶窗翅片、钉状翅片和片流翅片等。其中百叶窗翅片结构是一种典型的间断式结构,被认为是最高效的传热表面之一,翅片的几何结构对换热器的传热性能有很大影响。国内外学者对百叶窗翅片结构对换热器性能的影响展开了大量研究。

Ferrero等^[3]针对40种不同结构参数组合的百叶窗翅片进行数值模拟,结果表明没有一种最佳百叶窗翅片结构参数组合适用于所有换热器。Kwon等^[4]利用实验研究了翅片间距对百叶窗翅片管式换热器的影响,结果表明对于两排换热器,换热效率随翅片间距的减小而下降;对于三排换热器,翅片间距对传热性能的影响可以忽略不计。Javaherdeh等^[5]采用实验研究和数值方法对不同翅片高度、百叶窗长度、翅片厚度等结构参数的百叶窗翅片管式换热器展开了研究。王任远、李建雄等^[6]建立了百叶窗翅片三维流固耦合模型,分别探究了翅片间距、翅窗高度、翅片厚度和翅片节距等结构参数对空气侧压降和换热的影响规律。

百叶窗翅片结构影响参数较多,多数文献都是采用控制变量法进行单因素研究,没有考虑到不同参数间的交互作用。本文基于中心复合设计方法和响应面方法,对空冷中冷器百叶窗翅片的几何结构参数进行试验设计与优化研究。以开窗角度、百叶间距、翅片间距这三个结构参数为变量,努赛尔数和摩擦因子作为优化目标,探究结构参数变化对中冷器性能的影响。

1 物理模型与边界条件

1.1 物理模型

本文的研究对象是一铝制商用车空冷中冷器中的百叶窗翅片结构,中冷器结构复杂,若直接对其进行仿真将花费大量时间,考虑到百叶窗翅片是一个周期性结构,因此只对翅片的一个周期结构进行研究,如图1所示。图1中, φ 为开窗角度,

L_p 为百叶间距, l_h 为开窗高度, L_{LF} 为翅片长度, P_{LF} 为翅片间距, h_{LF} 为翅片高度, L_h 为百叶长度。本文主要研究开窗角度 φ 、百叶间距 L_p 、翅片间距 P_{LF} 这三个主要的结构因素。为使来流充分发展及避免回流出现,将进出口段分别进行延伸, D_h 为水力直径,得到的仿真计算域如图2所示。

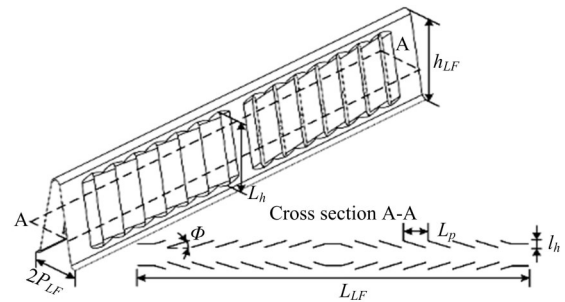


图1 百叶窗翅片几何结构

Fig. 1 Geometry of louver fin

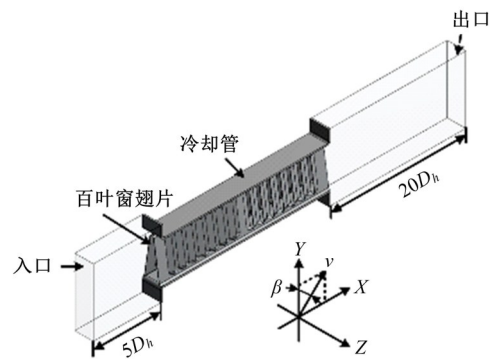


图2 计算域

Fig. 2 Computational domain

1.2 边界条件

本文采用ANSYS FLUENT进行仿真计算,湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型, $k-\epsilon$ 模型为高雷诺数模型, Y^+ 取30最佳。工质为空气,温度为 25°C ,密度为 1.149 kg/m^3 ,定压比热容为 $1006.5\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,动力粘度为 $1.84895\times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,导热系数为 $0.0259\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;而冷却管和百叶窗翅片材料分别为ZL104铝合金和3003-H16铝合金,因二者物性参数差异不大,仿真过程中使用了相同的铝材物性参数:密度为 2719 kg/m^3 ,定压比热容为 $871\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$,导热系数为 $202.4\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

计算域入口为速度入口,出口为压力出口,上下侧为周期性边界,左右侧为对称边界,翅片表面和冷却管表面均为无滑移壁面,冷却管固定温度为 160.5°C ,操作压力为 98330 Pa ,流体和固体间采用共轭传热。压力速度耦合方式为SIM-

PLEC,动量、湍动能、湍流耗散率及能量采用二阶迎风格式进行空间离散;质量、动量和湍流方程收敛残差阈值均为 10^{-3} ,能量方程则为 10^{-7} 。

1.3 网格无关性验证

本文在 ANSYS Meshing 中进行网格划分,采用四面体和六面体的混合网格,如图 3 所示。

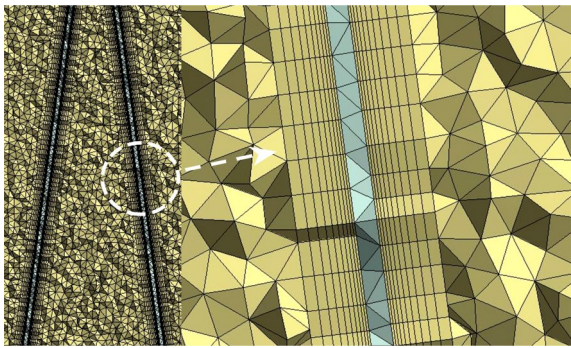


图 3 计算域网格

Fig. 3 Computational domain grid

为保证仿真结果的准确性和可靠性,进行网格无关性验证,如表 1 所示。共生成 3 套不同数量的网格,以第三套为基准,可以发现第二套网格偏差最

小,因此将其用于后续仿真。

表 1 网格无关性验证

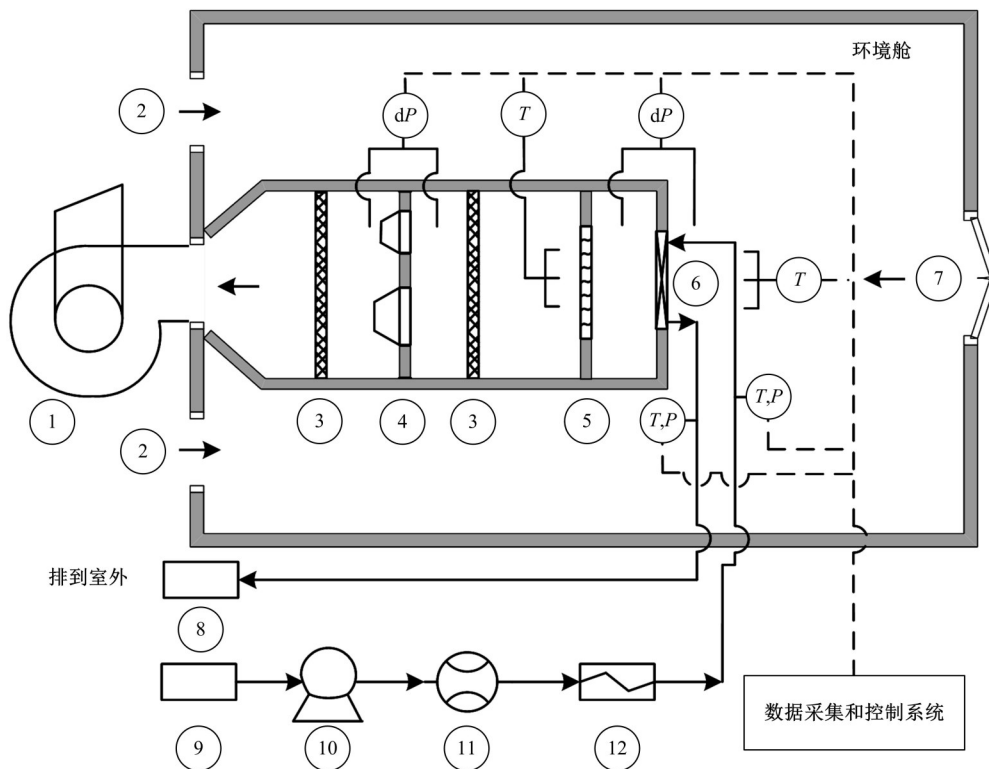
Table 1 Grid number independence test

序号	网格数量	$h/[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	$\Delta P/Pa$	偏差 $h/\%$	偏差 $\Delta P/\%$
1	21 346 758	152.3	477.6	2.4	0.5
2	32 298 984	149.1	475.9	0.3	0.1
3	43 585 629	148.7	475.4	—	—

2 试验设备与模型验证

2.1 试验设备

本文中所涉及到的试验在如图 4 所示热交换器风洞中进行,其包括环境舱、风洞、流体循环控制系统和数据采集系统等部分,热平衡误差 $\leq 5\%$ 。综合试验对象几何精度,工质物性不确定性及设备误差,最终所获得的传热系数不确定性为 10.1% ,压降的不确定性为 8.7% ^[7]。试验过程中,当地大气压为 $98.33 kPa$,冷、热侧空气入口温度为分别为 $25、160.5\text{ }^\circ\text{C}$,入口表压分别为 $0、160.5 kPa$ 。详细试验测试设备可参考文献[8]。



1-离心风机;2-鼓风机;3-整流器;4-喷嘴;5-混流器;6-被测热交换器;7-门;8-排气消声器;9-进气过滤器;10-水冷空气压缩机;11-质量流量计;12-电加热器

(a)实验设备简图

2.2 模型验证

图 5 所示为百叶窗翅片模型在入口速度分别为 $3、4、5、6、7、8、9、10\text{ m/s}$ 下,压降与传热系数试

验值和仿真值的对比曲线图。试验数据的处理可参考文献[9]。从图 5 中可以看出,仿真值与试验值吻合性较好,各工况最大偏差均不超过 10% ,

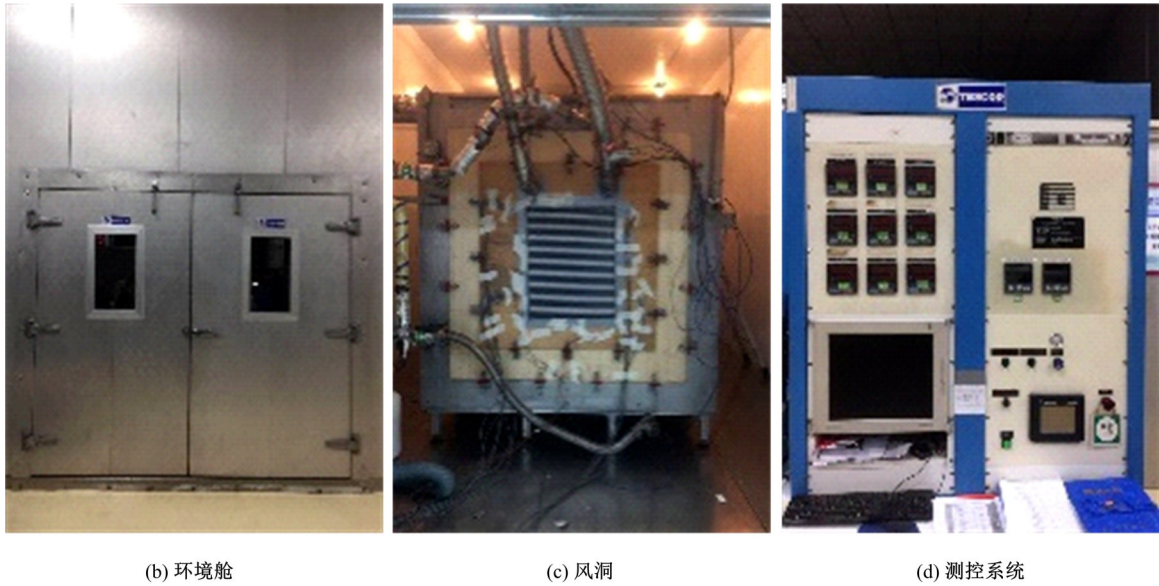


图 4 实验设备

Fig. 4 Test facility

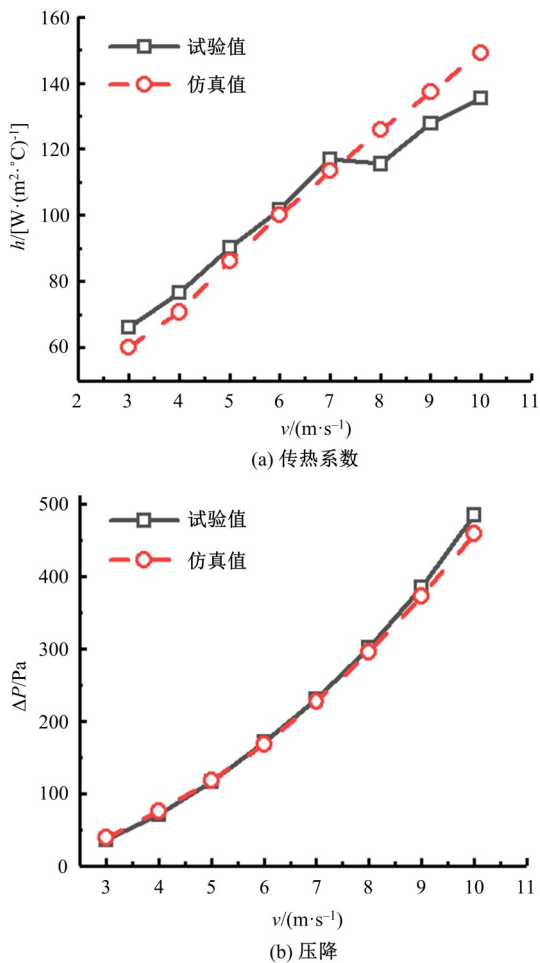


图 5 试验结果与仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental results and simulation results

说明此仿真方法准确度较高,因此选用此仿真策略进行后续研究。

3 试验设计

试验设计是产品开发、过程优化等环节中重要的一步,能大幅度减少试验次数,辨识关键的试验因子,且有助于构建经验公式和回归模型。

中心复合设计是一种常用的试验设计方法,通常该方法为三水平(-1,0,+1)的试验设计方案^[10]。为更全面地反映结构参数变化对目标函数的影响,本文将方案设计为三因素五水平,选取中心复合设计中的外切中心复合设计,每个因子的5个水平为:±α、0、±1^[11]。三因素五水平取值方案如表2所示。

百叶窗翅片的换热性能用努塞尔数 Nu 来表示,其流动阻力性能用范宁摩擦因子 f 来表示,如式(1)(2)所示^[12]。

$$Nu = h \cdot D_h / \lambda \quad (1)$$

$$f = \Delta P \cdot D_h / (2L' \rho u^2) \quad (2)$$

$$D_h = 4L_{LF} A_{min} / A_s \quad (3)$$

式中: h 为传热系数; D_h 为水力直径; λ 为导热系数; ΔP 为计算域进出口的压降; L' 为流动方向的长度; ρ 为流体密度; u 为流体速度; L_{LF} 为百叶窗翅片长度; A_{min} 为最小自由流面积; A_s 为总传热面积。

对于换热性能 Nu , 希望其越高越好,而阻力性能则希望 f 越小越好。在试验设计软件 Minitab 中生成的 20 个试验方案及其仿真结果,如表 3 所示。

表 2 三因素五水平取值方案

Table 2 Value scheme of three factors and five levels

序号	因子	取值水平				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
1	开窗角度 $\varphi/(^\circ)$	10	12.5	15	17.5	20
2	翅片间距 P_{LF}/mm	2	2.25	2.5	2.75	3
3	百叶间距 L_p/mm	2.5	2.75	3	3.25	3.5

表 3 实验方案及数值仿真结果

Table 3 Experimental and numerical simulation results

序号	φ	P_{LF}	L_p	Nu	f
1	$-\alpha$	0	0	8.296	0.176
2	-1	1	-1	8.936	0.177
3	-1	-1	-1	8.543	0.213
4	-1	-1	1	8.237	0.285
5	-1	1	1	9.396	0.224
6	0	0	0	8.843	0.279
7	0	0	0	8.834	0.280
8	0	0	0	8.836	0.280
9	0	0	0	8.828	0.280
10	0	0	0	8.950	0.279
11	0	0	0	8.836	0.280
12	0	$+\alpha$	0	9.998	0.225
13	0	$-\alpha$	0	7.736	0.389
14	0	0	$+\alpha$	9.138	0.376
15	0	0	$-\alpha$	8.671	0.204
16	1	-1	1	8.473	0.497
17	1	-1	-1	8.170	0.352
18	1	1	1	9.878	0.371
19	1	1	-1	9.432	0.264
20	$+\alpha$	0	0	8.974	0.459

4 回归模型

根据试验设计得到的样本点和数值仿真后得到的对应的响应值来拟合回归模型,从而代替耗时的数值仿真过程,以提高优化效率。

根据表 3 中仿真得到的响应值 Nu 和 f , 在 Minitab 软件中建立回归模型, 由于完全二阶回归模型对本文响应函数的拟合精度最高, 故建立完全二阶回归模型并进行方差分析。方差分析中的 P 值可以代表各项对回归模型的显著程度, 通常将 $P > 0.05$ 的项判定为不显著项, 将其从回归模型中剔除。方差分析表中的 Adj SS 为调整的平方和, Adj MS 为调整的均方和。用 R^2 值表示回归模型的拟合优度, R^2 值越大, 模型拟合数据的优度越高, 调整的 R^2 值包含模型中的预测变量数, 可以更准确地反映模型的好坏。一般当拟合优度 R^2 值大于 80% 时, 认为该回归模型能够有效

预测试验值^[13], 且 R^2 值和调整的 R^2 值越接近时, 也表明此回归模型越好。

该回归模型基于试验设计数值仿真结果得到, 参数范围也是基于试验设计的水平值, 即开窗角度 $\varphi: 10^\circ \sim 20^\circ$ 、翅片间距 $P_{LF}: 2 \sim 3 \text{ mm}$ 、百叶间距 $L_p: 2.5 \sim 3.5 \text{ mm}$ 。

表 4 为百叶翅片 Nu 回归模型的方差分析, 其中 $P_{LF} * P_{LF}$ 和 $L_p * L_p$ 这两个平方项的 P 值均大于 0.05, 作为不显著项从回归模型中剔除, 最终得到的 Nu 回归模型如下式所示:

$$Nu = 26.65 - 0.603\varphi - 6.61P_{LF} - 5.87L_p - 0.00857\varphi * \varphi + 0.223\varphi * P_{LF} + 0.0092\varphi * L_p + 1.818P_{LF} * L_p \quad (4)$$

Nu 回归模型的 $R^2 = 98.07\%$, R^2 (调整) = 96.95%, 认为此模型具有较高的精度。从表中的 F 值可以得到 Nu 回归模型中各项的显著性大小排序: $P_{LF} > \varphi > L_p > (\varphi * P_{LF}) > (P_{LF} * L_p) > (\varphi * \varphi) > (\varphi * L_p)$, 可以看出 P_{LF} 对 Nu 影响最显著, 即翅片间距对翅片的换热性能影响最显著。

表 5 为百叶翅片 f 回归模型的方差分析, 该回归模型中无不显著项, 得到的 f 回归模型如下式所示:

$$f = 0.456 - 0.03720\varphi + 0.0298P_{LF} - 0.1454L_p + 0.0015\varphi * \varphi + 0.10736P_{LF} * P_{LF} + 0.0397L_p * L_p - 0.023436\varphi * P_{LF} + 0.02651\varphi * L_p - 0.1248P_{LF} * L_p \quad (5)$$

表 4 百叶翅片 Nu 回归模型的方差分析

Table 4 Analysis of variance in Nu regression model of louver fin

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
模型	7	5.672 02	0.810 29	87.21	0.000
线性	3	5.291 01	1.763 67	189.81	0.000
φ	1	0.301 53	0.301 53	32.45	0.000
P_{LF}	1	4.778 10	4.778 10	514.24	0.000
L_p	1	0.211 38	0.211 38	22.75	0.000
平方项	1	0.078 11	0.078 11	8.41	0.013
$\varphi * \varphi$	1	0.078 11	0.078 11	8.41	0.013
交互项	3	0.302 90	0.100 97	10.87	0.001
$\varphi * P_{LF}$	1	0.155 27	0.155 27	16.71	0.002
$\varphi * L_p$	1	0.044 38	0.044 38	4.78	0.049
$P_{LF} * L_p$	1	0.103 25	0.103 25	11.11	0.006
误差	12	0.111 50	0.009 29		
失拟	8	0.100 90	0.012 61	4.76	0.074
纯误差	4	0.010 59	0.002 65		
合计	19	5.783 52			

f 回归模型的 $R^2=99.93\%$, R^2 (调整) = 99.86%, 认为此模型具有较高的精度。从表中的 F 值可以得到 f 回归模型中各项的显著性大小排序: $\varphi > L_p > P_{LF} > (\varphi * \varphi) > (\varphi * L_p) > (\varphi * P_{LF}) > (P_{LF} * P_{LF}) > (P_{LF} * L_p) > (L_p * L_p)$, 可以看出 φ 对 f 影响最显著, 即开窗角度对翅片的流动阻力性能影响最显著。

表 5 百叶窗翅片 f 回归模型的方差分析

Table 5 Analysis of variance in f regression model of louver fin

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
模型	9	0.147 078	0.016 342	1536.69	0.000
线性	3	0.139 884	0.046 628	4384.56	0.000
φ	1	0.082 530	0.082 530	7760.54	0.000
P_{LF}	1	0.025 435	0.025 435	2391.74	0.000
L_p	1	0.031 919	0.031 919	3001.41	0.000
平方项	3	0.002 794	0.000 931	87.59	0.000
$\varphi * \varphi$	1	0.002 209	0.002 209	207.68	0.000
$P_{LF} * P_{LF}$	1	0.001 132	0.001 132	106.42	0.000
$L_p * L_p$	1	0.000 155	0.000 155	14.58	0.003
交互项	3	0.004 400	0.001 467	137.91	0.000
$\varphi * P_{LF}$	1	0.001 717	0.001 717	161.41	0.000
$\varphi * L_p$	1	0.002 197	0.002 197	206.55	0.000
$P_{LF} * L_p$	1	0.000 487	0.000 487	45.77	0.000
误差	10	0.000 106	0.000 011		
失拟	6	0.000 105	0.000 017	41.73	0.001
纯误差	4	0.000 002	0.000 000		
合计	19	0.147 184			

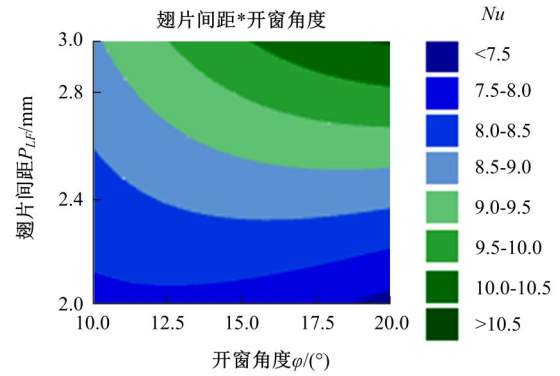
5 响应曲面分析

在得到的回归模型基础上进行响应曲面分析, 分析 3 个影响因子对两个目标函数的影响程度。

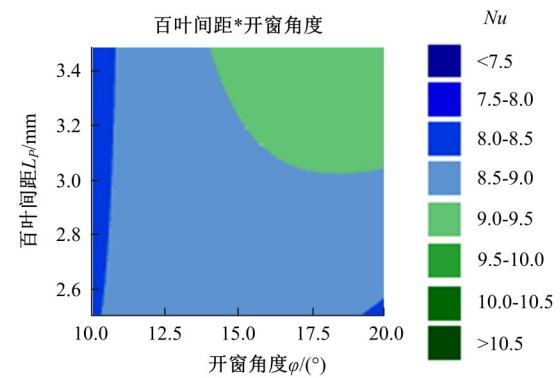
百叶窗翅片换热的两个目标函数 (Nu, f) 与 3 个影响因子 (φ, L_p, P_{LF}) 之间交叉敏感性的响应曲面图^[14,15]如图 6 和图 7 所示。每个目标函数随两因子交互作用时, 第三个因子保持表 2 中的 0 水平值^[16]。

图 6(a) 是翅片间距和开窗角度对 Nu 的交叉敏感性图, 从图中可以看出, 在开窗角度一定时, Nu 随翅片间距的增大而增大, 且开窗角度越大, Nu 增加的速率越快, 翅片间距对 Nu 的敏感性也越大; 而在翅片间距一定时, 低翅片间距下, 开窗角度对 Nu 的敏感性较低, 大翅片间距下, 开窗角度对 Nu 的敏感性较高。

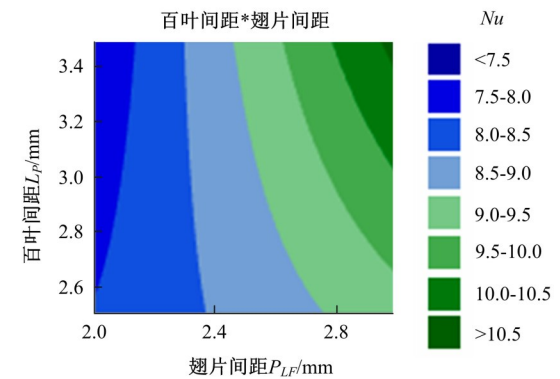
图 6(b) 是百叶间距和开窗角度对 Nu 的交叉



(a) 翅片间距和开窗角度对 Nu 的交叉敏感性



(b) 百叶间距和开窗角度对 Nu 的交叉敏感性



(c) 百叶间距和翅片间距对 Nu 的交叉敏感性

图 6 百叶窗翅片 Nu 的响应曲面分析

Fig. 6 Response surface analysis of Nu of louver fin

敏感性图, 从图中可以看出, 百叶间距和开窗角度对 Nu 的敏感性都不太高, 特别是在低百叶间距和低开窗角度情况下。

图 6(c) 是百叶间距和翅片间距对 Nu 的交叉敏感性图, 从图中可以看出, 在百叶间距一定时, Nu 随翅片间距的增大而增大, 且百叶间距越大, Nu 增大速率越快; 百叶间距对 Nu 敏感性较低, 随着翅片间距的增加, 敏感性略有增加。

综上所述, Nu 受翅片间距影响最大, 百叶间距和开窗角度对 Nu 影响较小, 其中开窗角度比

百叶间距对 Nu 影响略大一些。

图 7(a) 是翅片间距和开窗角度对 f 的交叉敏感性图, 从图中可以看出, 在翅片间距一定时, 随着开窗角度的增大, f 也增大, 且在低翅片间距下, f 随开窗角度的变化更显著; 在开窗角度一定时, f 随着翅片间距的增大而减小, f 随翅片间距的变化速率小于其随开窗角度的变化速率, 但是在大开窗角度下, f 随翅片间距的变化速率有一定提升。

图 7(b) 是百叶间距和开窗角度对 f 的交叉敏感性图, 从图中可以看出, 在百叶间距一定时, 随

着开窗角度的增大, f 也增大, 与图 7(a) 中翅片间距变化规律相反, 在大百叶间距下, f 随开窗角度的变化更显著; 在开窗角度一定时, f 随着百叶间距的增大而增大, 且在大开窗角度下敏感性更高。

图 7(c) 是百叶间距和翅片间距对 f 的交叉敏感性图, 从图中可以看出, 在百叶间距一定时, f 随着翅片间距的增大而减小, 在大百叶间距下敏感性更高; 百叶间距与之相反, 在翅片间距一定时, f 随着百叶间距的增大而增大, 在大百叶间距下敏感性更高。

综上所述, f 受开窗角度影响最大, 百叶间距和翅片间距对 f 影响较小, 且百叶间距和翅片间距对 f 的影响规律相反。

6 多目标优化

当前的工程优化问题大多属于多目标优化问题, 为提高多目标优化的计算效率, 引入了回归模型, 用回归模型来代替耗时繁琐的仿真过程。由于优化目标之间通常会相互冲突, 故决策者需要根据实际情况对优化结果进行选择。

6.1 问题描述

遗传算法是一种基于生物遗传和进化机制的搜索算法, 借助遗传学的原理, 经过自然选择、遗传、变异等作用机制进而筛选出具有适应性更高的个体^[17,18]。带精英策略的快速非支配排序遗传算法 (Nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 是应用非常广泛的一种多目标优化进化算法, “gamultiobj” 函数是基于 NSGA-II 的改进型多目标优化遗传算法^[19]。该算法通过引入分布函数来控制 NSGA-II 中精英个体被选择的数量, 从而避免精英个体选择压力过大而早熟收敛和陷入局部最优, 这样能更好地保持种群的多样性^[20]。

本文基于 Matlab 平台中的 “gamultiobj” 函数, 解决以百叶窗翅片的换热特性 Nu 和范宁摩擦因子 f 为目标函数的多目标优化问题, 问题描述如下所示:

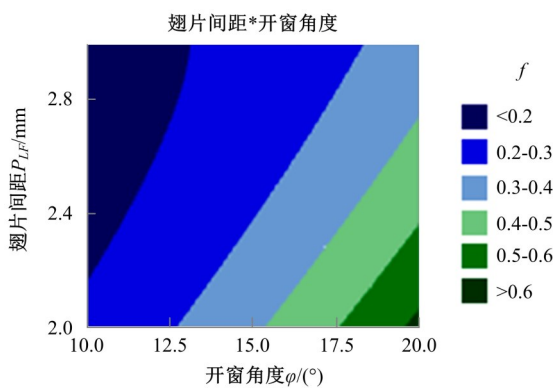
$$\text{望大函数: } Nu = f_1(\varphi, L_P, P_{LF})$$

$$\text{望小函数: } f = f_2(\varphi, L_P, P_{LF})$$

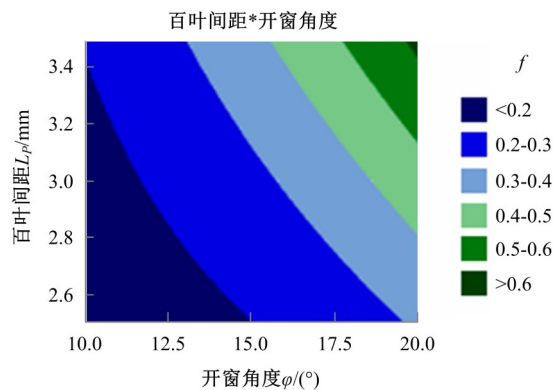
$$\text{变量范围: } 10 \leq \varphi \leq 20, 2 \leq P_{LF} \leq 3, 2.5 \leq L_P \leq 3.5。$$

6.2 gamultiobj 函数代码实现

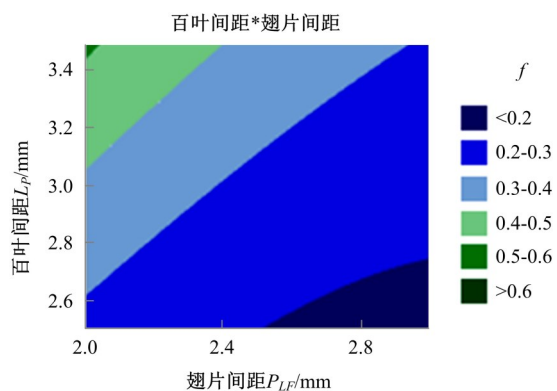
fitnessfcn=@budingc;% 适应度函数



(a) 翅片间距和开窗角度对 f 的交叉敏感性



(b) 百叶间距和开窗角度对 f 的交叉敏感性



(c) 百叶间距和翅片间距对 f 的交叉敏感性

图 7 百叶窗翅片 f 的响应曲面分析

Fig. 7 Response surface analysis of f of louver fin

```

nvars=3;%变量数
lb=[10 2 2.5];%下限
ub=[20 3 3.5];%上限
A=[];%非线性不等式约束
b=[];%非线性不等式约束
Aeq=[];%非线性等式约束
beq=[];%非线性等式约束
options=gaoptimset('paretoFraction', 0.3,
'populationsize', 200, 'generations', 200, 'stallGen-
Limit', 200, 'ToIFun', 1e-100, 'PlotFcns',
@gaplotpareto);
[x, fval]=gamultiobj(fitnessfcn, nvars, A, b,
Aeq, beq, lb, ub, options);
    
```

6.3 优化结果

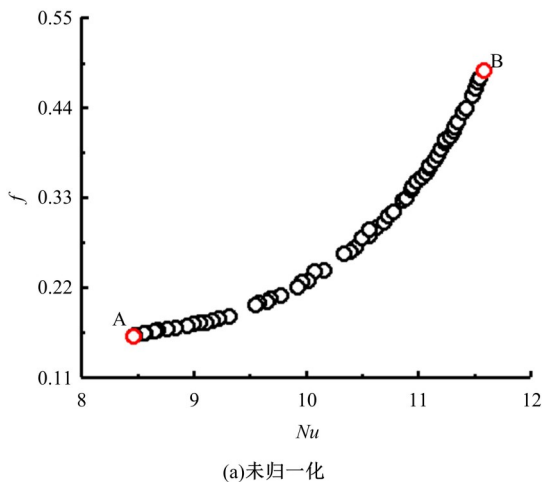
求解上述以百叶窗翅片的换热特性 Nu 和范宁摩擦因子 f 为目标函数的多目标优化问题,最终得到一组 Pareto 解集,构成的 Pareto 前沿如图 8 (a)所示。决策者需要在 Pareto 解集中进行选择,而理想点法^[21]可以帮助决策者选出一个 Pareto 最优解。理想点是两个目标同时达到最佳的点, Pareto 解集中和理想点欧式距离最近的点被认为是 Pareto 最优解。理想点法的数学表达式如下式所示:

$$\min D = \sqrt{\sum_{i=1}^M (f_i - f_{i\text{best}})^2} \quad (6)$$

式中: f_i 和 $f_{i\text{best}}$ 分别为第 i 个目标函数值和第 i 个目标函数的最佳值。

为了避免数量级差异,将数值归一化,如图 8 (b)所示。

图 8 中 C 点为理想点法求得的 Pareto 最优解,也可认为是一个平衡解,决策者可以根据对换热性能和摩擦阻力的实际需求,从 C 点出发向边



(a)未归一化

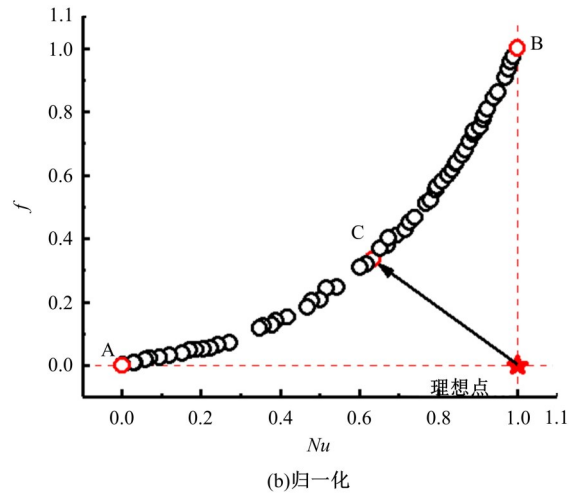


图 8 Pareto 前沿

Fig. 8 Pareto front

缘(A点或B点)靠近,越靠近一侧边界,说明越重视该侧所代表的性能。

7 结 论

(1)对百叶窗翅片的传热特性 Nu 、流动阻力特性 f 建立了以开窗角度、翅片间距和百叶间距为影响因子的完全二阶回归模型,回归模型的 R^2 值和 R^2 (调整)值均大于 96%,且两个回归模型的 R^2 值和 R^2 (调整)值都十分接近,说明回归模型拟合效果较好。

(2) Nu 受翅片间距影响最大,百叶间距和开窗角度对 Nu 影响较小,其中开窗角度比百叶间距对 Nu 影响略大一些; f 受开窗角度影响最大,百叶间距和翅片间距对 f 影响较小,且百叶间距和翅片间距对 f 的影响规律相反。

(3)基于改进 NSGA-II 的多目标优化遗传算法 gamultiobj,得到百叶窗翅片以 Nu 和 f 为目标函数的 Pareto 解集,决策者可以根据实际对目标函数的需求在 Pareto 解集中进行选取。

参考文献:

[1] 沙拉·塞库利克. 换热器设计技术[M]. 程林,译. 北京:机械工业出版社, 2010.
 [2] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
 [3] Ferrero M, Scattina A, Chiavazzo E, et al. Louver finned heat exchangers for automotive sector: numerical simulations of heat transfer and flow resistance coping with industrial constraints[J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(12):1-12.

- [4] Kwon Young Chul, Chang Keun Sun. Heat transfer and friction characteristics of louver fin and tube heat exchangers under wet conditions[J]. *Applied Chemistry for Engineering*, 2008, 19(1): 73-79.
- [5] Javaherdeh K, Vaisi A, Moosavi R. The effects of fin height, fin-tube contact thickness and louver length on the performance of a compact fin-and-tube heat exchanger[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2018, 36(3): 825-834.
- [6] 王任远, 李建雄, 吴金星. 散热器空气侧百叶窗翅片结构参数优化[J]. *流体机械*, 2013, 41(6): 74-78.
Wang Ren-yuan, Li Jian-xiong, Wu Jin-xing. Structure parameters optimized for louvered fin in air side of radiator[J]. *Fluid Machinery*, 2013, 41(6): 74-78.
- [7] Taylor J R. 误差分析导论-物理测量中的不确定度[M]. 王中宇, 译. 北京: 高等教育出版社, 2015: 43-105.
- [8] 胡兴军, 张靖龙, 辛俐, 等. 冷却管结构及风速对空冷中冷器性能的影响[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2021, 51(5): 1557-1564.
Hu Xing-jun, Zhang Jing-long, Xin Li, et al. Investigation on influence of cooling tube structure and air flow speed on cold side performance of air-cooled charge air cooler[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(5): 1557-1564.
- [9] 胡兴军, 张靖龙, 罗雨霏, 等. 冷却管结构及进气方向对空冷中冷器性能的影响[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2021, 51(6): 1933-1942.
Hu Xing-jun, Zhang Jing-long, Luo Yu-fei, et al. Influence investigation of cooling tube structure and airflow direction on the thermal-hydraulic performance of air-cooled charge air cooler[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(6): 1933-1942.
- [10] Han H Z, Li B X, Shao W. Multi-objective optimization of outward convex corrugated tubes using response surface methodology[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70 (1): 250-262.
- [11] 张志红, 何桢, 郭伟. 在响应曲面方法中三类中心复合设计的比较研究[J]. *沈阳航空工业学院学报*, 2007, 23(1): 87-91.
Zhang Zhi-hong, He Zhen, Guo Wei. A comparative study of three central composite designs in response surface methodology[J]. *Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*, 2007, 23(1): 87-91.
- [12] Qian Zuo-qin, Wang Qiang, Cheng Jun-lin, et al. Simulation investigation on inlet velocity profile and configuration parameters of louver fin[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 138: 173-182.
- [13] 王维. 外胀式螺旋波纹管强化传热机理及换热器优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 2019.
Wang Wei. Study on the heat transfer mechanism and heat exchanger optimization of outward helically corrugated tube[D]. Harbin: School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2019.
- [14] Kamel M S, Mojtaba M, Soroush M, et al. Numerical investigation of heat exchanger effectiveness in a double pipe heat exchanger filled with nanofluid: a sensitivity analysis by response surface methodology[J]. *Powder Technology*, 2017, 313: 99-111.
- [15] Liu Y W, Liu L, Liang L L, et al. Thermodynamic optimization of the recuperative heat exchanger for Joule-Thomson cryocoolers using response surface methodology[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2015, 60: 155-165.
- [16] Han H Z, Yu R T, Li B X, et al. Multi-objective optimization of corrugated tube with loose-fit twisted tape using RSM and NSGA-II[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131: 781-794.
- [17] Whitley D. A genetic algorithm tutorial[J]. *Statistics and Computing*, 1994, 4(2): 65-85.
- [18] 陈凯, 汪双凤. 基于遗传算法的风冷式动力电池热管理系统优化[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(2): 384-388.
Chen Kai, Wang Shuang-feng. Optimization of air-cooled battery thermal management system based on genetic algorithm[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(2): 384-388.
- [19] Hemmat E M, Hajmohammad H, Moradi R, et al. Multi-objective optimization of cost and thermal performance of double walled carbon nanotubes/water nanofluids by NSGA-II using response surface method[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1648-1657.
- [20] 易凯. “三条红线”约束下的钦州市水资源优化配置研究[D]. 南宁: 广西大学土木建筑工程学院, 2017.
Yi Kai. The research on water resources optimal allocation of qinzhou city under constraint of three red lines[D]. Nanning: College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University, 2017.
- [21] 孙靖明, 梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.