

双圆弧非等厚叶片对多翼离心风机内部流动控制及气动性能的影响

彭小康^{1,2}, 马彦鹏¹, 田晨晔¹, 蒋济武², 刘小民¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 美的集团厨房和热水事业部, 528311, 广东佛山)

摘要: 为提升集成灶气动性能并有效降低其气动噪声, 提出一种具有较高流道设计自由度且设计变量较少的多翼离心风机叶片改型设计方法。以原型风机性能较优的双圆弧等厚叶片为对象, 通过计算流体力学(CFD)与响应面方法对叶片吸力面双圆弧型线进行优化设计, 将等厚度叶片重构为非等厚叶片, 实现多翼离心风机内部流动控制。在工作工况下, 以集成灶风量和轴功率为优化目标, 采用 Box-Behnken 响应面方法对叶片吸力面型线的进口角、出口角、拱点圆直径以及叶片数进行优化, 基于设计参数和样本结果的二次回归拟合, 得到最优参数组合。实验结果表明: 采用优化方案的集成灶较原型机风量增加了 2.53%, 噪声降低了 1.8 dB; CFD 流场和噪声计算的可视化分析表明: 优化得到的非等厚叶片的吸力面更加符合气流的流线型设计, 有效抑制了叶间流道的流动分离, 减弱了叶片表面的声压脉动; 非等厚叶片的进、出口角与气流的进、出口气流角匹配得更好, 有效降低了叶片前缘的压力脉动及叶片尾缘的尾迹流对蜗舌的非定常相互作用, 从而达到了增风和降噪的目的。

关键词: 集成灶; 多翼离心风机; 非等厚叶片; 气动性能; 流动控制

中图分类号: TH432; TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202609017 **文章编号:** 0253-987X(2026)09-0177-10

Effects of Double-Arc Non-Uniform-Thickness Blades on Internal Flow Control and Aerodynamic Performance of a Multi-Blade Centrifugal Fan

PENG Xiaokang^{1,2}, MA Yanpeng¹, TIAN Chenye¹, JIANG Jiwu², LIU Xiaomin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Midea Group Kitchen and Hot Water Division, Foshan, Guangdong 528311, China)

Abstract: To improve the aerodynamic performance of an integrated cooking appliance and effectively reduce its aerodynamic noise, a blade modification method with greater freedom in flow-passage design and fewer design variables is proposed for its multi-blade centrifugal fan. The double-arc uniform-thickness blades with superior performance in the prototype fan are selected, and the double-arc profile of the blade suction surface is optimized using computational fluid dynamics (CFD) and response surface methodology. The uniform-thickness blades are reconstructed as non-uniform-thickness blades to achieve internal flow control of the multi-blade centrifugal fan. At the operating condition, the inlet angle, outlet angle, arch-point circle diameter of the blade suction-surface profile, and the number of blades are optimized using the

Box-Behnken response surface method, with the airflow rate and shaft power of the integrated cooking appliance taken as the optimization objectives. The optimal parameter combination is obtained through quadratic regression fitting based on the design parameters and sample results. It is shown by the experimental results that, compared with the prototype, an increase of 2.53% in airflow rate and a reduction of 1.8 dB in noise are achieved by the integrated cooking appliance employing the optimized design. It is shown by visual analyses of the CFD flow field and aerodynamic noise calculations that the suction surface of the optimized non-uniform-thickness blades better conforms to the airflow streamlines, flow separation in the inter-blade passages is effectively suppressed, and sound pressure fluctuations on the blade surfaces are reduced. Meanwhile, the inlet and outlet angles of the non-uniform-thickness blades are better matched with the inlet and outlet flow angles. Pressure fluctuations at the blade leading edges and the unsteady interaction between the blade trailing-edge wakes and the volute tongue are effectively reduced, thereby increasing airflow and reducing noise.

Keywords: integrated cooking appliance; multi-blade centrifugal fan; non-uniform-thickness blade; aerodynamic performance; flow control

多翼离心风机因其结构紧凑、噪声低、流量和压力系数高等特点,被广泛应用于集成灶、吸油烟机、厨房油烟吸排装置中^[1]。由于厨房排烟环境复杂,管道形式多样,拓宽油烟吸排装置的稳定运行区间,使其在高背压工况下高效、安静运行成为近年来多翼离心风机设计优化的热点问题^[2-3]。

叶轮是影响多翼离心风机性能的关键部件,其目前叶轮的优化设计研究主要着眼于对叶片形状以及型线的改进。叶片形状的优化主要有斜切叶片^[4-6]、锯齿叶片^[7-8]、倾斜叶片^[9]、扭转叶片^[10]等,这些改进方法均在一定程度上提升了风机的气动性能。在叶片型线的优化设计方面,李云龙等^[11]对单圆弧叶轮的进出口角和轮径比进行了响应面优化设计,结果表明优化后的风机在不改变噪声的基础上显著提升了风机的气动性能。肖千豪等^[12]采用基于B样条曲线的叶型参数化方法,通过结合最优拉丁超立方实验设计方法,对带有单圆弧叶片的多翼离心风机进行了多目标优化设计,相比于原型风机,优化设计风机的效率和风量在多个工况下均有所提高。谢金泉^[13]对某微型多翼离心风机双圆弧叶片进行了参数化设计,实验结果表明采用双圆弧叶片的风机在全工况范围内的气动性能均得到提升。王加浩等^[14]采用响应面方法对多翼离心风机的双圆弧叶片进行了优化设计,在增大风机风量的同时也有效降低了风机的气动噪声。

以上研究表明,通过叶片型线优化控制叶轮通道内的流动状态,能够提升多翼离心风机气动性能,这为多翼离心风机优化设计提供了新的技术途径和

设计方案。Lin等^[15]基于NACA4412翼型的气动特性对多翼离心风机的叶型轮廓型线进行了非等厚重构,改型后的叶片不仅对叶片吸力面的流动分离有明显的抑制作用,还进一步提高了风机静压效率。王梦豪等^[16]在多翼离心风机的叶型仿生设计中,通过耦合长耳鸮翅膀沿展向40%截面处的仿生翼型,降低了蜗舌与叶轮前缘处的压力脉动以及叶轮流道内的旋涡强度,达到了增效和降噪的目的。Yan等^[17]以鲟鱼为仿生对象,采用三维逆向工程和B样条曲线拟合技术设计得到了非对称和对称仿生翼型,数值研究表明非对称仿生翼型的升阻特性和效率优于对称翼型。马列等^[18]对多翼离心风机单圆弧叶片的吸力面进行了仿鱼形设计,并分别与原有的单圆弧等厚叶片和传统的仿鱼形叶片进行了对比,结果表明吸力面仿鱼形叶片能够在保持原有叶片压力面流动特性的基础上,提高多翼离心风机的风量和气动效率。Yin等^[19]比较了4种翼型叶片对多翼离心风机气动性能的影响,发现翼型叶片的升阻比与风机效率呈正相关,采用高升阻比的翼型叶片在低流量和高流量条件下风机内部均表现出均匀的速度分布和较少的涡旋现象。Liu等^[20]提出NSGA-II算法与仿生优化设计相结合的翼型优化方法,采用贝塞尔曲线拟合叶片中弧线,构建了非对称仿生叶片,在最大体积流量工况下显著提升了风机的气动性能。Kim等^[21]研究发现,降低叶片流道间的湍流黏度和湍动能可以降低风机的噪声水平,因此提出了分流叶片优化方法,其中分流叶片形状为主叶片的0.6倍缩放版,布置于主叶片之间的中间位置,分

流叶片增加了叶片尾缘的流动速度,降低了流道间的湍流黏度和湍动能,有效抑制了风机气动噪声。

Wu 等^[22]研究了不同径向位置、短叶片周向位置和分流叶片数对吸油烟机用多翼离心风机噪声的影响。发现相同风量下,优化设计的分流叶片在抑制叶片通道内分离涡的同时,将油烟机的噪声降低了 0.9 dB。本文针对高背压工况下的集成灶用多翼离心风机,在性能较优的双圆弧等厚叶片基础上,提出一种基于 Box-Behnken 响应面设计的非等厚叶型改型设计方法,以有效控制多翼离心风机内流动状态,提升多翼离心风机的气动性能,同时降低非等厚叶型的设计复杂度。借助计算流体力学(CFD)计算与实验测试对优化方案进行进一步研究,通过流场和噪声计算结果的可视化分析揭示了非等厚双圆弧叶片的流动控制及降噪机理,验证了优化方法的有效性。本文研究为进一步提高油烟吸排装置性能提供了新的理论基础和技术方案。

1 数值计算方法

1.1 计算模型及网格划分

本文研究对象为工作工况下的某型集成灶,如图 1 所示,包含进气风道(气流进口)、进风箱、多翼离心风机、排气管和固定管道。工作工况为国标 GB/T 17713—2022《吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置》中定义的一种运行工况,用于模拟用户真实使用场景下油烟吸排装置的运行工况。该工况下的管道背压由图 1 中的固定管道体现,该固定管道的尺寸详见 GB/T 17713—2022 中的附录 C。工作工况下,集成灶的风量和噪声分别定义为工作风量和工作噪声。本文研究目标是针对设计的曲面蜗壳(图 2),通过优化该风道系统中的双吸式多翼离心风机叶轮(图 3),提升集成灶的工作风量,降低工作噪声。表 1 列出了原型多翼离心风机叶轮的主要结构参数,其中叶片型线为经实验验证性能较优的双圆弧等厚叶片。

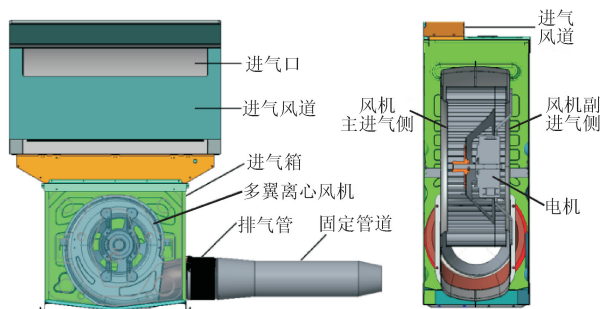


图 1 集成灶风道结构及主要部件

Fig. 1 Structures of the integrated cooking appliance



图 2 多翼离心风机蜗壳

Fig. 2 Volute of the multi-blade centrifugal fan



图 3 多翼离心风机叶轮

Fig. 3 Impeller of the multi-blade centrifugal fan

表 1 多翼离心风机叶轮主要结构参数

Table 1 Main parameters of the prototype impeller

参数	数值
叶片数 Z	64
叶片厚度 δ/mm	0.4
拱点圆直径 D_c/mm	300
叶轮外径 D_2/mm	320
叶轮内径 D_1/mm	270
出口角 $\beta_2/(\circ)$	166
进口角 $\beta_1/(\circ)$	55
中心角 $\theta/(\circ)$	4.5

采用 SolidWorks 软件对集成灶风道进行三维数值建模。为提升模拟精度,对风道内部结构进行合理简化,并对进出口进行延伸处理,出口延伸段长度为 3 倍叶轮直径。集成灶风道数值计算模型如图 4 所示。

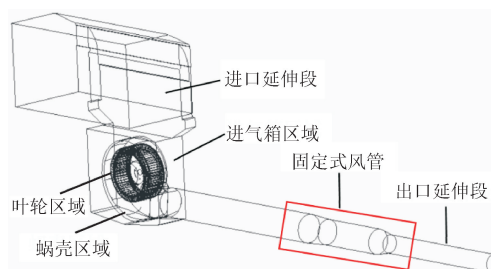


图 4 原型集成灶整机风道数值计算模型

Fig. 4 Numerical model of the integrated air-duct system

采用 Fluent Meshing 软件划分数值计算域网格并进行网格无关性验证,以集成灶工作风量 Q 为监测参数。本研究共划分了 7 套网格数计算工作风量,结果如图 5 所示,可以看出当网格数达到 1 332 万时 Q 不再随网格数的增加而发生明显的变化,此时蜗壳和叶轮区域的网格数分别为 286 万和 724 万。基于此,本文后续数值计算划分的网格数基本保持在 1 300 万左右。

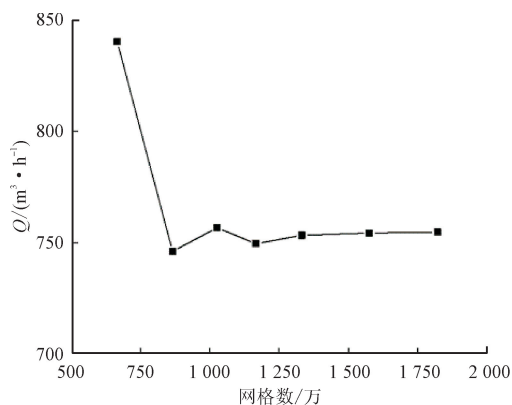


图 5 网格无关性验证

Fig. 5 Mesh independence validation

1.2 数值模拟方法

采用计算流体力学软件 ANSYS Fluent 求解黏性不可压缩非定常流动控制 Navier-Stokes 方程,数值模拟集成灶风道的气动性能及多翼离心风机内流特性。对于湍流计算,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。方程中对流项离散均使用二阶迎风格式,动量方程和湍流方程离散均使用二阶中心差分格式。叶轮为旋转区域,选用多参考系 MRF 模型,各区域之间通过 Interface 交界面进行数据传递。设置风道固体壁面条件为绝热无滑移边界条件,进口给定总压边界条件,总压为 0;出口给定静压边界条件,由于采用固定式风管提供阻力,静压设置为 0。根据实际情况设置叶轮转速为 1 095 r/min。当稳态计算完成后,以收敛的稳态流场作为非定常数值计算的初始场,非定常计算中采用的时间步长 Δt 计算式如下

$$\Delta t = \frac{60}{KnZ} \quad (1)$$

式中: K 为每个时间步内的最大迭代次数,取 20; n 为叶轮转速,取 $1\,095 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; Z 为叶片数,取 64。

通过数值求解 FW-H 声学方程获得集成灶整机的气动噪声。在此过程中,首先将蜗壳、蜗舌和叶

轮壁面定义为噪声源,以瞬态计算得到的收敛结果作为数值求解声学方程的初始流场,再次开启非定常流动数值计算。噪声接收点依据 GB/T 17713—2022 附录 C 中对集成灶工作噪声的测试点要求进行布置,如图 6 所示。计算模型中以叶轮中心为坐标原点,噪声接收点的坐标为 (0.0 mm, 1 205.6 mm, 646.2 mm)。

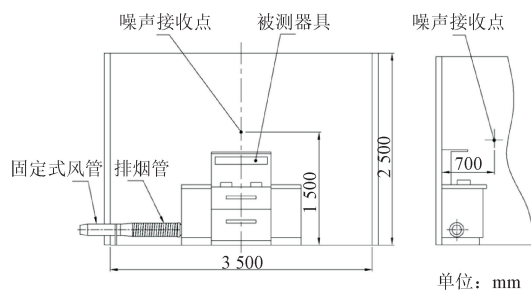


图 6 集成灶噪声测点位置

Fig. 6 Distribution of noise measurement points for the integrated stove

1.3 实验测试及数值结果验证

根据气动性能测试台得到集成灶从管道背压为 0 到全堵塞工况的 $P-Q$ 曲线,其与工作工况管道阻力曲线的交点即为工作工况下集成灶的风量和静压。工作工况的排烟阻力 R 为

$$R = kQ^2 \quad (2)$$

式中: k 为排烟系统拟合阻力系数,取 2.1。

集成灶工作风量测试按照 GB/T 17713—2022 进行,实验室测试平台如图 7 所示。

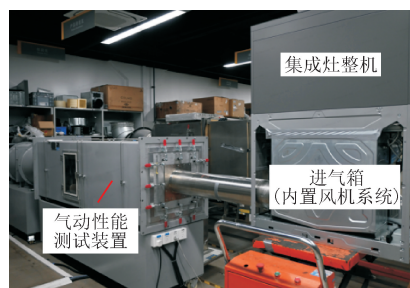


图 7 集成灶气动性能测试台

Fig. 7 Testing platform of aerodynamic performance of integrated stove

集成灶工作噪声测试在模拟厨房实验室中进行,厨房各壁面为光滑硬反射面,被测器具和噪声接收点的位置根据图 6 布置,具体的实验测试场景如图 8 所示。

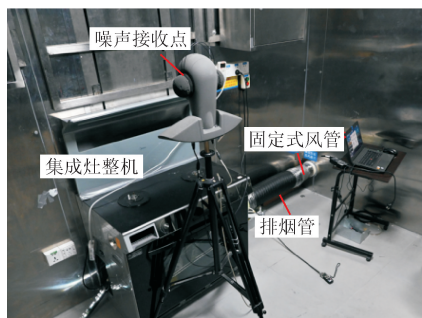


图8 集成灶工作噪声测试台

Fig. 8 Testing platform of aerodynamic noise of integrated stove at the working condition

在工作工况下,当风机转速为 $1\,095\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,原型集成灶工作风量和工作噪声的实验值与计算值对比如表2所示。可以看出, Q 的实验值为 $740.2\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,此时风机出口的排烟阻力为 319.6 Pa ,处于高背压状态,流动状态紊乱; Q 的计算值为 $752.4\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,相对误差为 1.6% ;工作噪声实验测试值为 65.4 dB ,计算值为 67.1 dB ,相对误差为 2.6% 。原型集成灶工作风量与工作噪声的仿真误差均在误差要求的范围内,表明本文采用的数值计算模型和计算方法对高背压工况下集成灶气动性能和噪声具有较高的数值预测精度,可以用来研究多翼离心风机优化设计方案对集成灶性能的改进效果。

表2 数值计算结果验证

Table 2 Validation of numerical results

项目	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	工作噪声/ dB
实验值	740.2	65.4
计算值	752.4	67.1
绝对误差	12.2	1.7

2 双圆弧非等厚叶片优化设计

响应面优化方法是一种通过建立数学模型来分析和优化系统响应的的设计方法^[23]。在响应面方法中,Box-Behnken 响应面设计具有试验次数少、效率高和非极端点的优点,因此本文对于多翼离心风机叶轮叶片吸力面双圆弧型线的设计和优化采用 Box-Behnken 响应面设计方法。

2.1 基于响应面的非等厚双圆弧叶型设计

等厚度双圆弧叶片是指其中弧型线由两段圆弧组成,由拱点圆直径 D_c 、中心角 θ 、进口角 β_1 、出口角 β_2 和内外径比 5 个参数进行型线控制。当保持等厚度双圆弧叶片的压力面型线不变,而重构吸力面

的双圆弧型线时,即得到了非等厚度的双圆弧叶片,如图9所示。由于叶片压力面型线保持不变,因此重构的吸力面型线与原吸力面型线的端点重合,非等厚双圆弧叶片的设计参数就简化为 β_1 、 β_2 和 D_c 。本文提出的非等厚双圆弧改型设计,不仅可以通过调整设计参数自主控制叶间流道的通流截面形状,控制叶间流动,同时也减少了双圆弧叶片的设计参数,最大程度地保留了叶片压力面特性,降低了非等厚叶片设计的复杂度。响应面优化采用 Design Expert 软件,由于非等厚叶型会对叶轮的叶栅稠密度产生影响,因此将叶片数也作为一个影响因子进行试验设计,对各影响因子进行编码处理,其中因子A为叶片进口角、因子B为叶片出口角、因子C为叶片拱点圆直径、因子D为叶轮叶片数。由式(2)可知,工作工况下风机静压与风量的平方成正比。相同转速下,风量越大,风机轴功率越小,风机的气动效率越高,即气动性能更优,因此本文研究以集成灶风量和风机轴功率作为响应,即以提升风量和降低轴功率作为优化目标。根据多翼离心风机叶片特征及叶片吸力面型线的设计要求,确定叶片各影响因子及水平,如表3所示。

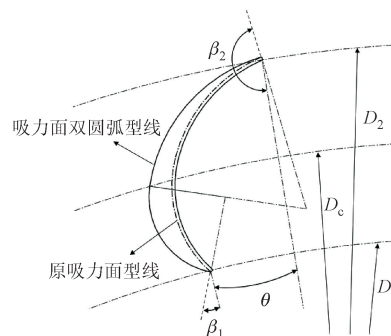


图9 叶片吸力面型线控制参数

Fig. 9 Schematic diagram of blade suction surface profile

表3 叶片影响因子取值范围

Table 3 Range of values for each influencing factor

影响因子	数值		
	水平为-1	水平为0	水平为1
$A/(\circ)$	5	25	45
$B/(\circ)$	168	173	178
C/mm	285	295	305
D	56	60	64

2.2 试验设计及结果

由 Box-Behnken 响应面设计共得到 29 组试验方案,通过与前述相同的数值计算方法得到了各方案的响应结果,如表4所示,其中 N 为轴功率。

表4 试验设计方案及结果

Table 4 Experimental design schemes and results

方案	A/ (°)	B/ (°)	C/ mm	D	Q/ (m ³ ·h ⁻¹)	N/W
1	45	173	305	60	748.3	149.1
2	5	173	305	60	778.5	160.2
3	45	168	295	60	746.7	146.5
4	25	178	305	60	761.5	158.0
5	25	173	305	56	745.2	149.1
6	45	173	295	64	751.2	150.0
7	5	173	295	64	766.5	158.7
8	5	178	295	60	775.2	157.8
9	25	178	285	60	747.3	151.3
10	45	173	285	60	748.3	148.5
11	25	168	295	56	734.7	144.1
12	5	168	295	60	748	150.4
13	25	178	295	64	757.9	157.0
14	25	178	295	56	743.3	145.8
15	25	168	305	60	745.4	149.8
16	25	173	285	56	739.1	145.8
17	25	173	285	64	750.2	150.8
18	5	173	295	56	747.6	152.5
19	5	173	285	60	745.1	149.8
20	25	173	295	60	742.1	149.3
21	25	173	295	60	742.1	149.3
22	45	178	295	60	752.2	151.5
23	25	173	295	60	742.1	149.3
24	25	173	295	60	742.1	149.3
25	25	168	295	64	748.4	149.6
26	25	173	305	64	760.2	157.3
27	45	173	295	56	744.1	147.2
28	25	173	295	60	742.1	149.3
29	25	168	285	60	735.3	144.3

对试验方案的计算结果进行方差分析,各设计因素及组合对 Q 和 N 的有效响应度见表5。其中, F 表征响应强度, P 判断显著性。可以看出,吸力面双圆弧型线3个单因子设计参数及叶片数对风量和轴功率的影响程度基本趋同,其中叶片数对风量和轴功率的影响最为显著,吸力面出口角的影响次之;对于两因子的交互效应, A 和 C 的交互效应对 Q 和 N 的影响最为显著。根据数值计算结果,通过二次多项式拟合得到的 Q 与 N 的回归方程分别为

$$Q = 742.1 - 5.84A + 6.57B + 6.15C + 6.7D - 5.42AB - 8.35AC - 2.95AD + 1.03BC + 0.225BD + 0.975CD + 9.57A^2 + 2.6B^2 + 3.66C^2 + 1.66D^2 \quad (3)$$

$$N = 149.27 - 3.05A + 3.05B + 2.75C + 3.25D - 0.625AB - 2.45AC - 0.857AD + 0.327BC + 1.39BD + 0.801CD + 2.1A^2 + 0.072B^2 + 1.08C^2 + 0.302D^2 \quad (4)$$

式(3)、(4)为编码公式,在实际分析应用中基于该公式求解得到的最优参数组合可由编码值转化为实际值。

表5 设计参数对风量和功率的响应

Table 5 Responsiveness of design parameters to flow rate and power of multi-blade centrifugal fan

响应 来源	风量 Q		功率 N	
	F	P	F	P
模型	31.10	<0.000 1	28.22	<0.000 1
A	59.82	<0.000 1	85.88	<0.000 1
B	75.78	<0.000 1	86.18	<0.000 1
C	66.30	<0.000 1	69.83	<0.000 1
D	78.69	<0.000 1	97.44	<0.000 1
AB	17.20	0.001 0	1.21	0.290 8
AC	40.74	<0.000 1	18.47	0.000 7
AD	5.08	0.040 7	2.27	0.154 5
BC	0.61	0.446 4	0.33	0.574 8
BD	0.03	0.865 9	5.98	0.028 3
CD	0.56	0.468 4	1.98	0.181 4

采用决定系数 R^2 进行回归方程的拟合精度检测,其数值介于0~1之间,越接近于1方程的拟合精度越高。 Q 与 N 的决定系数 R^2 分别为0.969和0.966,说明方程的拟合精度高,可以进行响应面优化。根据加工工艺对叶片厚度的要求,并结合各因子对响应影响的显著性,对叶片进口角和出口角的取值范围进行限定,其中 $A=18^\circ\sim 45^\circ$, $B=168^\circ\sim 176^\circ$;设计风量要求不低于原型机风量,因此设定响应风量 $Q\geq 760\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$;将风量与轴功率置于同等重要程度,通过求解回归方程得到的最优参数组合为 $A=18^\circ$, $B=176^\circ$, $C=305\text{ mm}$, $D=60$ 。

2.3 优化设计结果验证

根据响应面最优参数得到的优化方案叶轮与原型叶轮参数对比如表6所示。图10为两种叶型的差异。非等厚叶型吸力面的出口角明显变大且叶间流道面积大幅缩小,进口叶片角及拱点圆直径的变化,使叶间流道形状从首先略微扩张再逐渐收缩转变为从进口到出口的逐渐收缩。

表6 原型叶轮和优化叶轮参数对比

Table 6 Main parameters of the optimized and prototype impeller

参数	原型叶轮	优化叶轮
叶片数 Z	64	60
叶片厚度 δ/mm	0.4	非等厚
拱点圆直径 D_c/mm	300	305
出口角 $\beta_2/(\circ)$	166	176
进口角 $\beta_1/(\circ)$	55	18

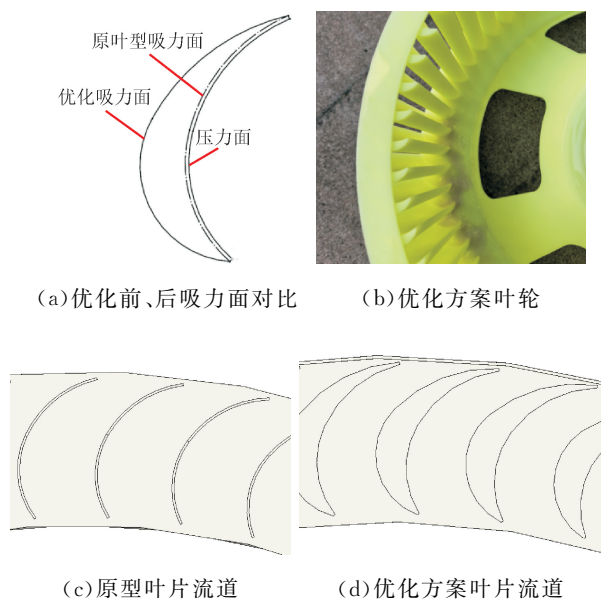


图10 原型叶轮和优化叶轮

Fig. 10 Prototype impeller and optimized impeller

对多翼离心风机的优化方案进行数值计算,并将打样实物装配到集成灶中进行实验测试。在相同转速 $1\,095\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,原型集成灶与优化方案集成灶工作风量和噪声的对比如表7所示,其中优化方案集成灶工作风量实验值较原型集成灶提升2.53%,噪声实验值较原型集成灶降低了1.8 dB。

表7 优化前、后集成灶气动性能和噪声的比较

Table 7 Comparisons of aerodynamic performance and noise between integrated cooking appliances with the optimized and prototype fan

方案	项目	工作风量/ $(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	工作噪声/dB
原型集成灶	实验值	740.2	65.4
	计算值	752.4	67.1
	绝对误差	12.2	1.7
优化集成灶	实验值	758.9	63.6
	计算值	768.8	65.2
	绝对误差	9.9	1.6

关注的是,由于工作风量提升,风机轴功率也有所提升。优化方案集成灶的数值计算得到的工

作风量和工作噪声均能与实验结果有较好的吻合,其相对误差分别为1.3%和2.5%,进一步说明本文所采用的数值计算模型和计算方法的有效性。

3 结果及分析

3.1 风机内部流场分析

为揭示非等厚双圆弧叶片对多翼离心风机内部流动状态的影响,沿叶轮高度方向由风机主进气侧至副进气侧依次选择25%、50%和75%叶高截面进行分析,风机主进气侧远离电机,副进气侧靠近电机。图11为优化前、后不同叶高截面叶轮流道内的流线图。可以看出,原型风机各截面的叶间流道内均存在不同程度的流动分离现象,而优化风机由于叶片吸力面型线的调整,叶片厚度填充了部分分离区,吸力面更加符合气流的流线型设计,使得叶道内的低速流动区域和分离涡数量减少,尤其在50%叶高截面处的改善效果最为明显。

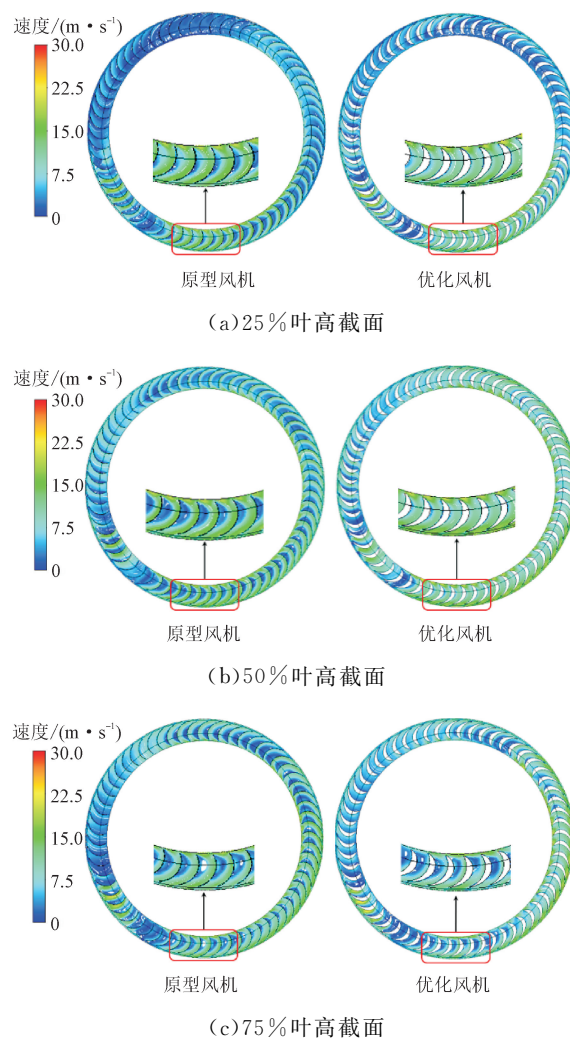


图11 风机内部流线分布

Fig. 11 Streamline distributions in the fan

湍动能是定量表征风机内部流动紊乱程度的关键指标。风机气动噪声主要源于流场中的湍流及其与叶片的相互作用,因此更高的湍动能水平通常预示着更强的气动噪声。图 12 为优化前、后风机内部 50% 叶高截面的湍动能分布对比,可见优化风机流动状态改善效果主要体现在蜗舌附近区域,其湍动能最大值由 $30 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 降低到 $22.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,表明优化后叶片出口角与蜗舌更加匹配,叶片出口气流对蜗舌的冲击作用减小,从而降低了叶片与蜗舌之间的非定常相互作用力。

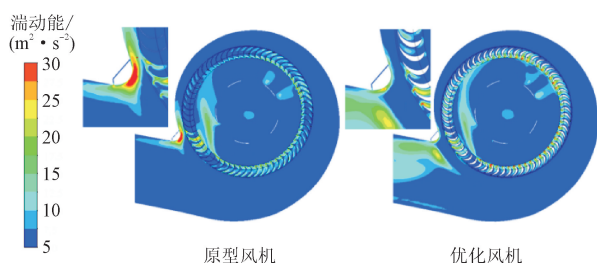


图 12 50% 叶高截面湍动能分布

Fig. 12 Turbulent kinetic energy distribution at 50% blade height cross-section

图 13 为优化前、后两风机叶轮区域在 Q 准则 $5.6 \times 10^6 \text{ s}^{-2}$ 等值面的涡核心区速度分布。可以看出,优化叶轮的涡核脱落现象较原型叶轮得到了明显改善:优化叶轮吸力面的分离涡强度低且扩展区域小,贴近叶片壁面,在蜗舌下游位置处的涡脱落明显减少。表明优化后的非等厚叶片在吸力面涡脱落得到改善,流动分离减弱,蜗舌脱落涡、尾迹涡的强度和不确定性都得到了有效控制。

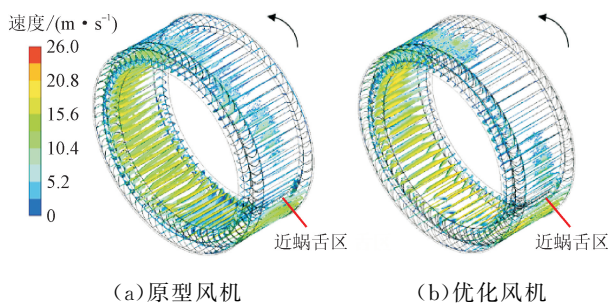


图 13 多翼离心风机叶轮内涡核心区速度分布

Fig. 13 Velocity distributions of vortex core regions in the multi-blade centrifugal impeller

3.2 非等厚双圆弧叶片噪声机理分析

通过 1/3 倍频程频谱图可以直观识别和量化不同频率段的噪声贡献,从而得到相应频率范围内的噪声能量水平^[24]。采用 1/3 倍频程频谱对优化方

案和原型机的噪声进行分析,如图 14。从图中可以发现,优化方案集成灶相较于原型集成灶在 $500 \sim 5000 \text{ Hz}$ 的中高频段范围内,声压级噪声呈现较为明显的下降趋势。这一分布特征印证了优化方案集成灶内流动的改善。结合流场分析,对叶片吸力面局部曲率的优化及渐缩流道设计,增强了流动附体性,削弱了叶片吸力面湍流边界层的发展与涡旋的非稳态演化,抑制了多翼离心风机叶轮叶间流道内的流动分离以及大尺度涡脱落。

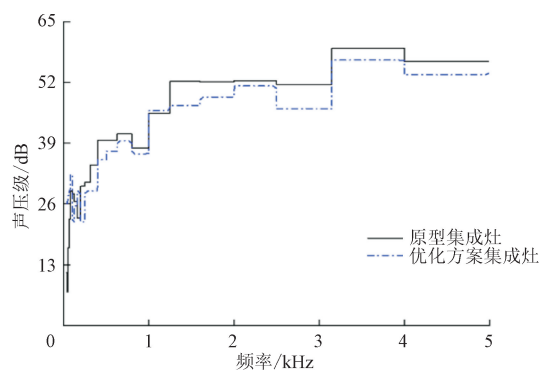


图 14 优化前、后集成灶声压级 1/3 倍频程频谱图

Fig. 14 Comparison of 1/3 octave spectrum of sound pressure level between the integrated cooking appliances with the optimized and prototype fan

图 15 为叶轮优化前、后叶片表面的声压脉动分布情况。声压脉动时均值直接表征叶片表面非定常压力波动的平均强度,其幅值与噪声水平密切相关,通过叶轮表面的声压脉动信息能够直观地揭示声源的强度以及噪声产生的具体位置^[25]。从图 15 可以看到,原型叶轮在叶片前缘进口处以及叶片吸力面上的声压脉动强度较高,说明当前叶片的进口角度与气流进入叶轮时的流动角并不吻合,叶轮流道内气流与壁面之间的非定常作用也较强,因此其整体噪声水平较高。相比之下,优化叶轮在叶片吸力面的声压脉动强度降低明显,其原因是优化叶轮的渐缩叶间流道及整体流道面积的减少使得叶轮内的气流更加顺畅,减少了高倍压下的分离和不稳定性,从而展现出更为均匀的声压脉动分布。优化叶轮叶片前缘处声压脉动强度的改善,表明其进口角与气流进口冲角更匹配,有效减小了叶片前缘气流冲击产生的压力脉动。从声学机理来看,声压脉动时均值的降低表明叶轮对中高频宽频噪声有明显的抑制作用,进一步说明了非等厚双圆弧叶片对多翼离心风机噪声水平具有显著的改善作用。

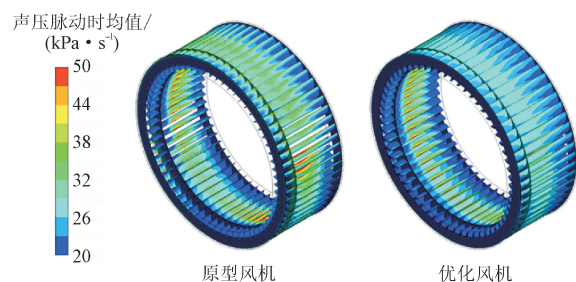


图15 叶片表面声压脉动分布

Fig.15 Sound pressure pulsation distribution on blade surface

4 结 论

(1)在气动性能较好的双圆弧等厚叶片基础上,通过响应面优化重构其吸力面双圆弧叶型,可以用更少的设计参数控制叶间流道的通流截面形状,同时保留了叶片压力面良好的流动特性,降低了非等厚叶片设计的复杂度。实验与数值计算结果验证了该方法的有效性,优化的非等厚双圆弧叶片使得集成灶的工作风量较原型机提升了2.53%,工作噪声较原型机降低了1.8 dB。

(2)基于响应面设计和数值计算得出:吸力面双圆弧型线各参数及叶片数对多翼离心风机风量和轴功率的影响程度基本趋同,其中叶片数对风量和轴功率的影响最为显著,吸力面出口角的影响次之。进口角与拱点圆直径的交互效应对风量和功率的影响最为显著。

(3)流场及噪声的数值计算结果表明,优化后的非等厚叶片相对于等厚叶片,其叶间流道通流面积更小,渐缩的流道形状在高背压工况下有效抑制了叶道内的流动分离,降低了叶道内气流与壁面的非定常作用,从而减弱了叶片表面的声压脉动;非等厚叶片的进、出口角与气流的进、出口气流冲角更加匹配,有效降低了叶片前缘的压力脉动及尾迹流对蜗舌冲击和涡脱落;吸力面双圆弧型线的优化重构设计实现了对多翼离心风机内部流动的控制并降低了噪声。

本文发展的非等厚双圆弧叶片优化设计方法对于高背压工况下多翼离心风机内流动控制是有效的,能够达成提升集成灶气动性能并降低噪声的目的。但在低背压工况及变转速运行工况下,本文方法对于集成灶用多翼离心风机性能提升和噪声控制的适用性还需要开展进一步的数值和实验研究。

参考文献:

- [1] 王镇,李震,吴兰勇,等. 基于敏感性分析降维的多翼离心风机叶轮优化设计[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(2): 397-405.
Wang Zhen, Li Zhen, Wu Lanyong, et al. Optimal design of squirrel-cage fan impeller based on sensitivity analysis and dimension reduction[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(2): 397-405.
- [2] 蒋博彦,王军,黄友根,等. 多翼离心风机跨叶轮流动数值模拟研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 1-5.
Jiang Boyan, Wang Jun, Huang Yougen, et al. Investigation on numerical simulation of impeller-across flow structure in multi-blade centrifugal fan[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2018, 46(4): 1-5.
- [3] GB/T 17713—2022 吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置[S].
- [4] 段鹏. 多翼离心风机叶轮轴向非均匀优化设计研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [5] Wang Ke, Ju Yaping, Zhang Chuhua. Experimental and numerical investigations on effect of blade trimming on aerodynamic performance of squirrel cage fan[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 177: 105579.
- [6] Jin Wenyang, Wang Jiaxuan, Li Junyu, et al. Optimization design of multi-blade centrifugal fan based on variable weight PSO-BP prediction model and multi-objective beluga optimization algorithm[J]. Applied Sciences, 2025, 15: 5950.
- [7] 刘小民,汤虎,王星,等. 苍鹰翼尾缘结构的单元仿生叶片降噪机理研究[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(1): 35-41.
Liu Xiaomin, Tang Hu, Wang Xing, et al. Noise-reduction mechanism of bionic coupling blade based on the trailing edge of goshawk wing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 35-41.
- [8] Zhang Hao, Yang Jinwen, Li Bin, et al. Noise reduction and aerodynamic performance improvement of a multiblade centrifugal fan[J]. Physics of Fluids, 2024, 36: 125168.
- [9] 焦硕博,李晓芳,谢军龙,等. 倾斜叶片对多翼离心风机性能影响的研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(11): 2362-2365.
Jiao Shuobo, Li Xiaofang, Xie Junlong, et al. Research on the effect of inclined blade on performance of multi-blade centrifugal fan[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(11): 2362-2365.

- [10] 籍日添,付锐朋,王尚峰,等. 基于三维扭转叶型设计的多翼离心风机噪声的数值仿真与分析[J]. 风机技术, 2023, 65(3): 49-53.
Ji Ritian, Fu Ruipeng, Wang Shangfeng, et al. Numerical simulation and analysis of multi-blade centrifugal fan noise based on three-dimensional twist blade profile design [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2023, 65(3): 49-53.
- [11] 李云龙,郭朋华,何立博,等. 油烟机内多翼离心风机的响应面优化设计[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(5): 1056-1062.
Li Yunlong, Guo Penghua, He Libo, et al. Optimization of squirrel-cage fan in range hood based on response surface methodology [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(5): 1056-1062.
- [12] 肖千豪,王军,蒋博彦,等. 多翼离心风机叶片参数化及多目标优化研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(12): 2977-2981.
Xiao Qianhao, Wang Jun, Jiang Boyan, et al. Parametric and multi-objective optimization of the squirrel cage fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(12): 2977-2981.
- [13] 谢金泉. 微型离心风机双圆弧叶片优化与进口匹配特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [14] 王加浩,刘小民,田晨晔,等. 多翼离心风机双圆弧叶片的参数优化设计及气动性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3): 94-104.
Wang Jiahao, Liu Xiaomin, Tian Chenye, et al. Parametric optimization design of double-circular arc blade used in multi-blade centrifugal fan and its aerodynamic analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3): 94-104.
- [15] Lin S C, Huang C L. An integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(5): 421-434.
- [16] 王梦豪,吴立明,刘小民,等. 采用仿鸮翼叶片降低空调用离心风机气动噪声的研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(6): 55-61.
Wang Menghao, Wu Liming, Liu Xiaomin, et al. A study on noise reduction of centrifugal fan in air conditioner by using the bionic blade inspired by the owl wing [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(6): 55-61.
- [17] Yan Hao, Su Xiaozhen, Zhang Haozhou, et al. Design approach and hydrodynamic characteristics of a novel bionic airfoil [J]. Ocean Engineering, 2020, 216: 108076.
- [18] 马列,刘阳,刘小民. 采用吸力面仿鱼形叶片的多翼离心风机气动性能研究[J]. 风机技术, 2022, 64(2): 9-16.
Ma Lie, Liu Yang, Liu Xiaomin. Study on the aerodynamic performance of multi-blade centrifugal fan with the suction surface bionic fish blades [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2022, 64(2): 9-16.
- [19] Yin Haonan, Zhao Hanqing, Li Yiping, et al. Airfoil design and flow analysis of a multi-blade centrifugal fan: an experimental and simulation study [J]. Applied Sciences, 2024, 14(23): 11229.
- [20] Liu Y, Yuan Q. Optimizing bionic blades for multi-blade centrifugal fans: asymmetric thickness inspired by carangiform fish [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2024, 17(11): 2333-2348.
- [21] Kim J T, Yang J S, Park S, et al. Optimization of a centrifugal fan with splitters considering aerodynamics and aeroacoustics performances [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2025, 39(6): 3175-3189.
- [22] Wu Jinxin, Li Yeqiang, Hu Xiaowen. Research on noise reduction of a multi-blade centrifugal fan based on splitter blades technology [J]. Physics of Fluids, 2025, 37: 084102.
- [23] Gallagher E, O'Brien C M, Scannell A G M, et al. Use of response surface methodology to produce functional short dough biscuits [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 56(2/3): 269-271.
- [24] Prezelj J, Novaković T. Centrifugal fan with inclined blades for vacuum cleaner motor [J]. Applied Acoustics, 2018, 140: 13-23.
- [25] Wu Liming, Liu Xiaomin, Wang Menghao. Effects of bionic volute tongue on aerodynamic performance and noise characteristics of centrifugal fan used in the air-conditioner [J]. Journal of Bionic Engineering, 2020, 17(4): 780-792.

(编辑 亢列梅)