

曲面蜗壳对多翼离心风机气动噪声影响的 数值和实验研究

马彦鹏¹, 彭小康², 田晨晔¹, 蒋济武², 何新奎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: 针对多翼离心风机进气端气流转向造成的进气不均匀以及蜗舌间隙回流现象,以集成灶用双吸式多翼离心风机蜗壳为研究对象,提出了一种曲面蜗壳的优化方法并对其通流截面进行了参数设计。由原蜗壳型线与叶轮外径共同确定曲面蜗壳的积叠线,通过在蜗壳周向各通流截面上构建由 3 段圆弧形成的圆弧形通流截面型线,对蜗壳轴向切除部分进行几何重构,沿积叠线完成曲面蜗壳构型。采用数值模拟方法对优化的多翼离心风机的气动性能及噪声进行了研究,并结合蜗壳加工工艺要求制作了实验测试样机。考虑到集成灶用多翼离心风机实际的运行工况,在工作风量工况条件下,通过实验测量验证了曲面蜗壳对多翼离心风机气动性能及其噪声水平的改进效果。结果表明,当曲面蜗壳风机与原型风机的工作风量相同时,曲面蜗壳风机的噪声降低了 6.4 dB,功率降低了 4.6%。基于多翼离心风机内部流场数值计算结果分析,采用曲面蜗壳减小了蜗壳轴向气流交界处的速度梯度,抑制了蜗壳出口及蜗舌附近高湍动能区域的扩散,减弱了蜗壳出口气流与蜗舌的周期性相互作用,有效降低了多翼离心风机的气动噪声水平。研究为多翼离心风机内部流动控制和增效降噪设计提供了理论基础和实践经验。

关键词: 多翼离心风机; 曲面蜗壳; 工作风量; 参数设计; 气动噪声

中图分类号: TH432; TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202510010 **文章编号:** 0253-987X(2025)10-0106-11

Numerical and Experimental Study on the Effects of Curved Volute on the Aerodynamic Noise of Multi-Blade Centrifugal Fans

MA Yanpeng¹, PENG Xiaokang², TIAN Chenye¹, JIANG Jiwu², HE Xinkui², 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 address the issues of non-uniform inlet flow and volute tongue gap backflow caused by airflow redirection at the inlet side of multi-blade centrifugal fans and, this study takes the volute of a double-inlet multi-blade centrifugal fan used in integrated stoves as the research object and proposes an optimization method for a curved volute with parameterized design of its flow-passage cross-sections. The stacking line of the curved volute is determined based on the original volute profile and the impeller outer diameter. By constructing a three-arc-shaped flow-passage cross-section profile at each circumferential position of the volute, the axially cut portion of the volute is geometrically reconstructed, and the curved volute configuration is completed along the

收稿日期: 2025-01-17。 作者简介: 马彦鹏(2001—),男,硕士生;刘小民(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBGY-280)。

网络出版时间: 2025-03-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250331.1332.004>

stacking line. Numerical simulations are conducted to investigate the aerodynamic performance and noise characteristics of the optimized multi-blade centrifugal fan, and a prototype is fabricated considering manufacturing requirements for experimental validation. Under the actual operating conditions of integrated stove applications, experimental measurements are performed to verify the improvement effects of the curved volute on the aerodynamic performance and noise level of the multi-blade centrifugal fan at the working flow rate. The results show that, compared to the original fan, the curved volute fan achieves a noise reduction of 6.4 dB and a power reduction of 4.6% at the same working flow rate. Based on numerical analysis of the internal flow field, the curved volute reduces the velocity gradient at the axial airflow interface, suppresses the diffusion of high turbulent kinetic energy regions near the volute outlet and tongue, and weakens the periodic interaction between the outlet airflow and the volute tongue, effectively lowering the aerodynamic noise level of the multi-blade centrifugal fan. This study provides theoretical foundations and practical insights for internal flow control and efficiency-enhancing, noise-reducing designs of multi-blade centrifugal fans.

Keywords: multi-blade centrifugal fan; curved volute; working airflow; parametric design; aerodynamic noise

多翼离心风机具有高风压、低噪声、高效率、结构紧凑的特点,在相同压力下能达到比其他类型通风机更低的噪声水平,因此被广泛应用于集成灶等家电中。随着绿色、节能、舒适性等理念的提出,人们对生活品质的追求不断提高,对家电产品性能特别是噪声的要求也越来越高^[1-2]。多翼离心风机作为这些设备中的核心部件,对相关产品的效能、稳定性和舒适性起到关键作用。

蜗壳、叶轮和集流器是多翼离心风机的 3 个主要部件,目前针对多翼离心风机气动性能提升和噪声控制的研究大多也是围绕这 3 个部件展开的。在离心风机的噪声构成中,由涡流和离散噪声组成的气动噪声一般是风机的关键成分,且离散噪声通常起主导作用^[3]。蜗壳是多翼离心风机的关键导流部件,对其气动及噪声特性具有较大影响。这是由于风机运行过程中,叶轮出口的不均匀气流和蜗壳壁面之间有着较为显著的非定常相互作用,这种相互作用导致蜗壳表面,尤其是蜗舌附近成为多翼离心风机噪声的主要产生部分,而作用在蜗舌表面上的非定常的周期性的作用力则是多翼离心风机离散噪声产生的主要原因^[4-5]。因此,目前国内外对多翼离心风机蜗壳的降噪研究主要着眼于蜗舌形状的改进和优化,如采用倾斜蜗舌^[6-8]、内凹式蜗舌^[9-10]、仿生蜗舌^[11-12]等。然而,在风机实际运行过程中,蜗壳壁面同样受叶轮出口尾迹流的影响,对多翼离心风机气动噪声的贡献度也较大。但到目前为止,在家电领域的多翼离心风机研究中很少涉及对蜗壳通流

截面的改进。姜卫生等^[13]对多翼离心风机蜗壳的不同尺寸组合进行了响应面优化设计,结果显示,优化后风机效率和静压均得到提升。在尺寸受限的条件下,方挺等^[14]对多翼离心风机的蜗壳型线进行了优化设计,分析了蜗壳不同部位切割对风机气动性能的影响,并据此提出了合理的蜗壳型线切割方案。Xiao 等^[15]将神经网络和遗传算法相结合,对尺寸受限条件下的吸油烟机用多翼离心风机蜗壳型线进行优化设计,风机的流量和效率均得到一定程度的提升,但研究并没有改变蜗壳的通流截面形状。詹婷军等^[16]采用正交试验设计方法得到了叶轮在蜗壳内的最优安放位置,改进后风机效率得到了提升,蜗壳流道内的速度梯度和二次流旋涡也得到了改善。李佳峻等^[17]提出了一种控制周向面积分布的方法对蜗壳型线进行了优化设计,优化后的蜗壳改善了风机叶轮出口处的流场结构,风机全压和效率均得到明显提升,但其设计仅改变了蜗壳型线,并没有改变轴向方向的蜗壳流道截面形状。以上研究为多翼离心风机蜗壳的优化设计提供了新的路径,有利于蜗壳内部流动状况的改善,提升风机效率及性能,但在这些研究中很少涉及多翼离心风机气动噪声的控制。

另一方面,这些研究多是针对标准工况进行的,很少考虑到多翼离心风机实际的运行工况。在实际的应用场景中,多翼离心风机由于受烟道系统及其他阻力部件的影响,往往无法在设计工况运行,而是以较小流量运行^[18]。2024 年开始执行的 GB/T 17713—2022

《吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置》^[19]中也对工作风量以及工作噪声做出了规定,以此来反映用户在实际烹饪过程中的吸油烟效果和噪声体验。多翼离心风机的内部流动状态与其气动性能及噪声特性有着密切联系,因此研究者们针对小流量工况条件下多翼离心风机的内部流动及其相应的气动性能变化展开了数值和实验研究,结果表明小流量工况下蜗舌间隙处的叶道回流明显增强是多翼离心风机内部流动的主要特征^[20-22]。显然,仅针对最大风量工况条件开展多翼离心风机的性能优化是不够的。

基于此,本文以集成灶用多翼离心风机为研究对象,考虑集成灶实际运行工况,按照 GB/T 17713—2022《吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置》中规定的排烟阻力,在工作状态即小流量工况条件下对集成灶用多翼离心风机进行优化设计。针对现有的多翼离心风机结构,提出了一种曲面蜗壳的改型设计方案。通过将数值计算结果与实验测试结果进行对比,分析了原型风机和曲面蜗壳风机的流场特性及其噪声产生机理。通过实验验证了本文优化设计曲面蜗壳对风机气动及噪声水平改进的有效性。本文研究为变工况条件下多翼离心风机的性能优化提供了新的技术途径。

1 数值计算方法

1.1 几何模型及网格划分

本文研究对象为某型集成灶用双吸式多翼离心风机,图 1 给出了原型多翼离心风机的主要部件及结构。在风机运行时,旋转的叶轮在风机两侧形成负压区,气流经过集流器被吸入风机,在轴向进入风机内部后发生转向从而沿径向进入叶轮流道,叶轮对气流做功并将其输送至蜗壳,最终在蜗壳的引导下流出风机。原型风机叶片数为 64,叶片厚度为 0.4 mm,叶片中弧线为双圆弧型线,进口角为 55° ,出口角为 166° ,叶轮外径为 320 mm、内径为 270 mm、宽度为 120 mm,蜗壳宽度为 138 mm。原型多翼离心风机在工作状态下的转速为 $1\,110\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,实验测试风量为 $732\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。

采用商业软件 Solidworks 对多翼离心风机整机流体域进行建模。为便于网格划分以及后处理分析,对整机模型进行相应简化并分区域建模,同时为了更好地模拟整机的实际运行状态,对进出口区域分别做了延伸处理,进气箱区域则根据实际箱体模型做了部分简化得到。整机模型如图 2 所示。各区域网格划分均采用 fluent meshing 实现,考虑到网格数过少会对数值计算的准确性和可靠性产生影

响,而网格数太多又会占用过多的计算资源,因此在进行仿真模拟之前需要对整机的网格数进行无关性验证。图 3 展示了多翼离心风机在不同网格数下的风量。可以看出,当网格数达到 1 332 万时,风量趋于稳定并基本保持不变,其中蜗壳和叶轮区域的网格数分别为 286 万和 724 万。

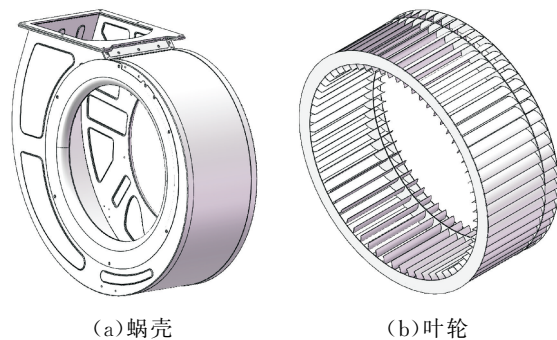


图 1 原型风机主要结构

Fig. 1 Main structures of the prototype fan

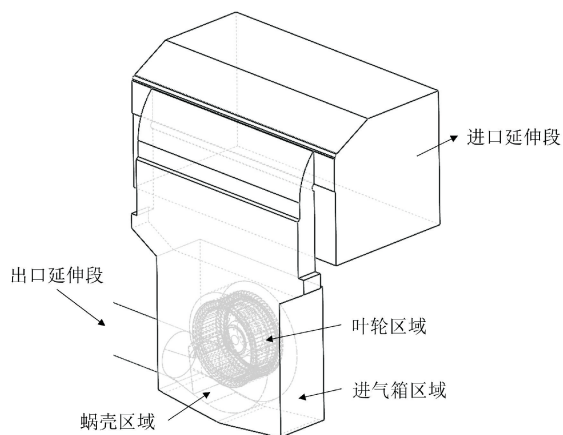


图 2 原型机整机数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model of the prototype fan

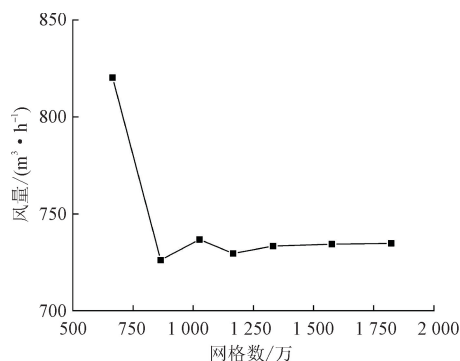


图 3 网格无关性验证结果

Fig. 3 Result of grid independency verification

1.2 数值模拟

采用 ANSYS FLUENT 软件对多翼离心风机

进行数值模拟计算,以获得风机内部流场及声场特性。多翼离心风机内流动控制方程为黏性不可压缩三维雷诺时均 Navier-Stokes 方程,湍流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型,采用 SIMPLE 算法进行压力和速度项的耦合,对流项均使用二阶迎风格式,压力离散格式采用 PRESTO!。叶轮为旋转区域,选用多参考系 MRF 模型,其他区域为静止区域,各区域之间通过 Interface 交界面进行数据传递。设置壁面边界条件为无滑移条件,进口总压边界条件,出口静压边界条件,工作状态下叶轮转速设置为 $1\,110\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

在进行多翼离心风机气动性能分析时,采用定常计算。定常计算是假设流动状态不随时间变化,能够快速提供风机流场的分布及其基本流动特征。对于气动噪声计算,需要在定常计算的基础上,进行非定常流动的数值计算,以揭示流动随时间的瞬态变化,较为详细地捕捉到多翼离心风机内部的瞬态流动细节,从而为声场特性分析打下基础。本文非定常数值计算的时间步长为

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

式中: $K=20$ 为迭代数; v 为叶轮转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; z 为叶片数。由此,计算得到的时间步长设置为 $4.2\times 10^{-5}\text{ s}$ 。

在多翼离心风机气动噪声的数值计算中,将非定常数值计算与 FW-H 声学方程的求解相结合,通过快速傅里叶变换将声源区域的时域信息转换为声压级频谱数据,从而实现声场可视化的分析。首先,将蜗壳、蜗舌和叶轮壁面定义为噪声源,以非定常计算得到的收敛结果作为声学方程求解的初始流场。然后,再次开启非定常流动计算。同时,为和实验进行对比,根据 GB/T 17713—2022《吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置》中规定的其他烹饪烟气吸排装置工作噪声实验布置方式,设置噪声接收点,如图 4 所示,实际坐标确定接收点坐标为 $(0, 1\,205.6\text{ mm}, 646.2\text{ mm})$ 。

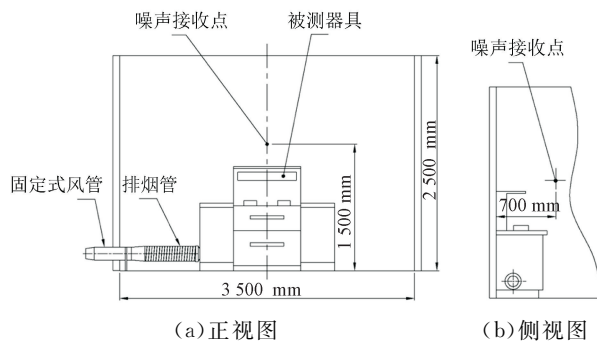


图 4 噪声测点位置^[19]

Fig. 4 Noise measurement points location^[19]

1.3 计算结果及验证

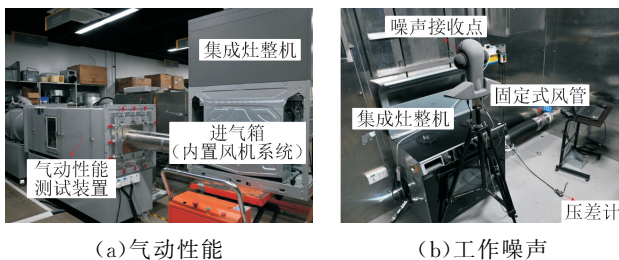
多翼离心风机的气动性能测试按照 GB/T 17713—2022《吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置》中的规定进行。图 5(a)为本文所研究的集成灶气动性能测试场景,测试装置由多个组件构成,包括被测器具、辅助调节机构、风室、均流孔板和喷嘴组合等。测试过程中,通过辅助调节装置来模拟风机的实际工作状态,使风机出风口的压力达到标准要求。风室内的均流孔板和喷嘴组合用于调节和测量风量,系统根据设定风量自动开启喷嘴组合,并通过变频器调节风机频率来控制风量。利用高精度微压计,测量在特定风量条件下的静压值,进而计算出风机的气动性能参数并绘制相应曲线。

噪声测试在专业模拟厨房实验室中进行,测试过程以集成灶整机作为测试对象,以此来模拟用户在实际使用中的场景,反映用户实际的噪声体验。工作噪声定义为器具在实际工作风量下的噪声,而工作风量则被定义为在设计工况下,单位时间内器具在一定排烟阻力下排出的风量^[19]。实际测试过程中,风机出口通过排烟管与固定式风管相连,在距出口 0.5 m 处通过高精度压差计测试该处的静压值。排烟阻力由固定式风管提供,排烟阻力曲线公式为

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

式中: R 为排烟阻力, Pa; $k=2.1$ 为拟合阻力系数; Q_v 为实验工况下的风量, m^3/min 。

工作风量即为空气性能曲线与排烟阻力曲线交点所对应的风量值。气动性能测试过程中风机的静压与风量一一对应,由式(2)可知,风机的排烟阻力与风量也存在一一对应的关系,并且由于噪声测试过程中的拟合阻力系数 k 不发生变化,故测试环境即排烟阻力曲线不发生变化。因此,通过调节优化风机的转速,使得风机出口同一位置处的静压与原型风机相同,即可保证两风机位于同一工作风量点。之后,在该转速下测试优化风机的噪声。风机工作噪声实验布置方式与图 4 相同,实验测试场景如图 5(b)所示。



(a) 气动性能 (b) 工作噪声

图 5 实验测试场景

Fig. 5 Experimental testing scenario

实验测试原型机在转速为 $1\,110\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时: 出口静压实验值为 330 Pa , 计算值为 335 Pa , 误差为 1.52% ; 噪声实验值为 71.8 dB , 计算值为 75.1 dB , 误差为 4.6% 。原型风机出口静压与噪声的相对误差均控制在 5% 以内, 这表明本文所构建的数值计算模型与采用的方法具有较高的仿真准确性。

2 曲面蜗壳的参数化设计

在多翼离心风机的运行过程中, 气流通常是先沿轴向从两侧进风口进入风机, 再沿径向进入叶轮流道, 因此气流主要集中在叶轮中部区域, 而在叶轮上、下盘侧的气流较少, 且流速较低, 进而使得蜗壳流道内速度分布不均匀。通过将原型矩形截面蜗壳改为圆弧形截面的曲面蜗壳构型, 有利于蜗壳有效收集叶轮出口气流, 减少气动损失, 进而减弱蜗壳流道内的不稳定流动。曲面蜗壳设计过程中综合考虑了产品尺寸的约束条件, 并依据加工工艺的实际要求对其进行参数设计。

曲面蜗壳构型的参数设计可以分为两个部分, 通过原型蜗壳型线与叶轮外径共同确定曲面蜗壳积叠线, 通过确定的积叠线将各通流截面型线串联最终构成曲面蜗壳。曲面蜗壳积叠线的构建示意图如图 6 所示。图中: R_2 为叶轮外径; L_1 为原蜗壳型线。考虑到蜗舌型线以及蜗舌间隙对于风机气动噪声性能的影响较大, 为保持蜗舌结构不变, 原蜗壳型线的选取从 n_0 点开始。基准线 On_0 交 R_2 于 m_0 点, 基准线 On_1 与基准线 On_0 的周向角为 θ , On_1 与原蜗壳型线

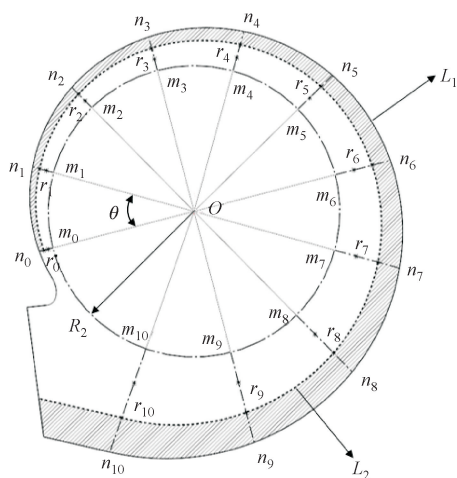


图 6 积叠线构建示意图

Fig. 6 Schematic diagram of stacking line construction

交于 n_1 点, 与 R_2 交于 m_1 点。同样地, 保持周向角 θ 不变, 沿蜗壳周向共形成 11 条基准线。在线段 nm 上取一点 r , 使得 $nr = (1/N)nm$, 本文 N 取为 3, 将各 r 点依次连接即得曲面蜗壳的积叠线 L_2 。同时, 将积叠线与原蜗壳型线所构成封闭区域沿蜗壳轴向切除, 如图 6 中阴影所示。

曲面蜗壳构型需要采用圆弧形的通流截面对蜗壳轴向切除部分进行重构, 在上述各基准线 On 方向上沿蜗壳轴向建立各通流截面, 并在各截面上构建不同设计参数的圆弧形通流截面型线来代替原始矩形型线, 如图 7 所示。图中: Z 为蜗壳宽度; $ABCD$ 为原型蜗壳矩形通流截面型线。

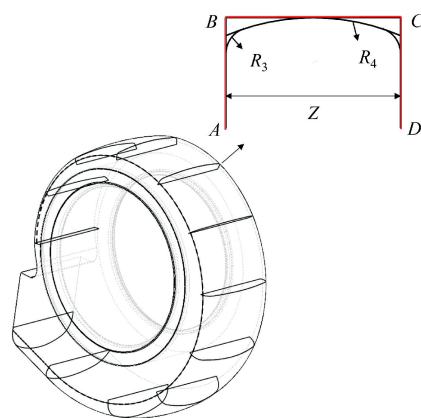


图 7 圆弧形通流截面型线

Fig. 7 Circular-arc-shaped flow passage cross-section profile

曲面蜗壳的圆弧形通流截面型线由 3 段圆弧构成, 将 BC 用半径为 R_4 的圆弧代替, 在蜗壳两侧添加半径为 R_3 的圆角形成各截面型线, 不同截面的 R_3 和 R_4 取值不同, 公式为

$$\begin{cases} R_{4-j} = aZ, & j = 1 \\ R_{3-j} = bZ, & j = 1 \\ R_{4-j} = cR_{4-(j-1)}, & 2 \leq j \leq 10 \\ R_{3-j} = dR_{3-(j-1)}, & 2 \leq j \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_{3-j} 为基准线 On_j 截面上的 R_3 ; R_{4-j} 为基准线 On_j 截面上的 R_4 ; a, b, c, d 为经验系数, 其中 $a = 3.8 \sim 4.2$, $b = 0.016 \sim 0.02$, $c = 0.82 \sim 0.86$, $d = 1.2 \sim 1.4$ 。

最终, 沿积叠线 L_2 在蜗壳轴向切除部分形成曲面蜗壳构型。图 8 为原型蜗壳与曲面蜗壳通流截面形状的对比如。可以看出, 相比于原始矩形截面蜗壳, 曲面蜗壳的圆弧形截面流道沿轴向呈现中间高两边低的特点。

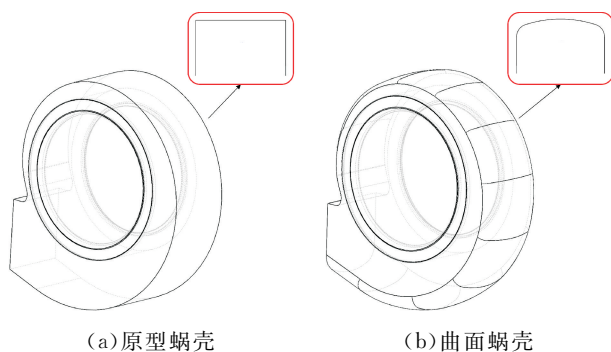


图 8 蜗壳通流截面对比

Fig. 8 Volute flow passage cross-section comparison

3 实验结果及分析

3.1 曲面蜗壳的应用及结果验证

在数值计算的基础上,采用实验测试的方法对计算结果进行比较验证。在上述参数设计的基础上,对曲面蜗壳进行手板制作,获得的原型蜗壳和曲面蜗壳实物如图 9 所示。

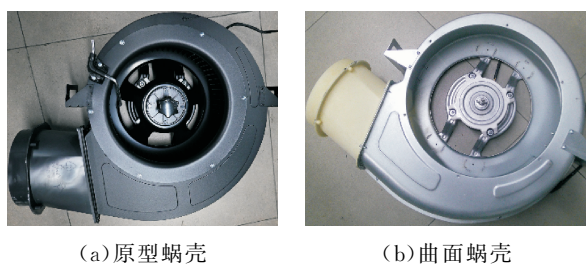


图 9 原型蜗壳与曲面蜗壳实物图

Fig. 9 Prototype volute and curved volute physical models

噪声对比测试需要保证两风机工作风量相同,根据上述工作噪声的实验测试方法,通过调节曲面蜗壳风机的转速使其出口静压与原型风机一致,计算与测试对应转速下两台风机的性能参数,结果如表 1 所示。

表 1 两台风机的性能对比

Table 1 Comparison of performance between two fans

风机	测试方法	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	静压/ Pa	功率/ W	噪声/ dB
原型风机	实验测试	1 110	330	175	71.8
	数值计算	1 110	335		75.1
曲面蜗壳 风机	实验测试	1 095	330	167	65.4
	数值计算	1 095	336		67.7

从表 1 可以看出,无论是在实验测试还是数值计算结果中,采用曲面蜗壳的风机均显示出噪声显著降

低。此时,曲面蜗壳风机的转速为 $1\,095\,r \cdot \min^{-1}$,说明采用曲面蜗壳对多翼离心风机风量的影响较小。相比于原型风机,曲面蜗壳风机功率降低了 4.6%,噪声降低了 6.4 dB。曲面蜗壳风机实验噪声为 65.4 dB,计算噪声值为 67.7 dB,误差为 3.52%,说明了本文数值计算模型与方法的准确性与可靠性。

3.2 风机内部流场分析

多翼离心风机内部流场分布与风机的气动性能密切相关,通过对定常计算得到的风机内部流场时均化特性进行分析,可以直观地反映曲面蜗壳优化设计对风机内部流动状态的控制及对风机气动性能的影响。风机内不同叶轮宽度截面的速度云图如图 10 所示。可以看出,在相同的叶轮宽度截面处,相比于原型风机蜗壳,曲面蜗壳出口区域的流速更大,速度分布更加均匀,表明风机蜗壳内的通流情况得到了改善。原型风机 50% 叶轮宽度截面的速度分布相较于 25% 和 75% 截面变化较大,而曲面蜗壳的圆弧形截面流道由于更符合气流沿叶轮轴向的流动特点,在不同截面的速度梯度变化更小,因此可以更好地与叶轮进行匹配。

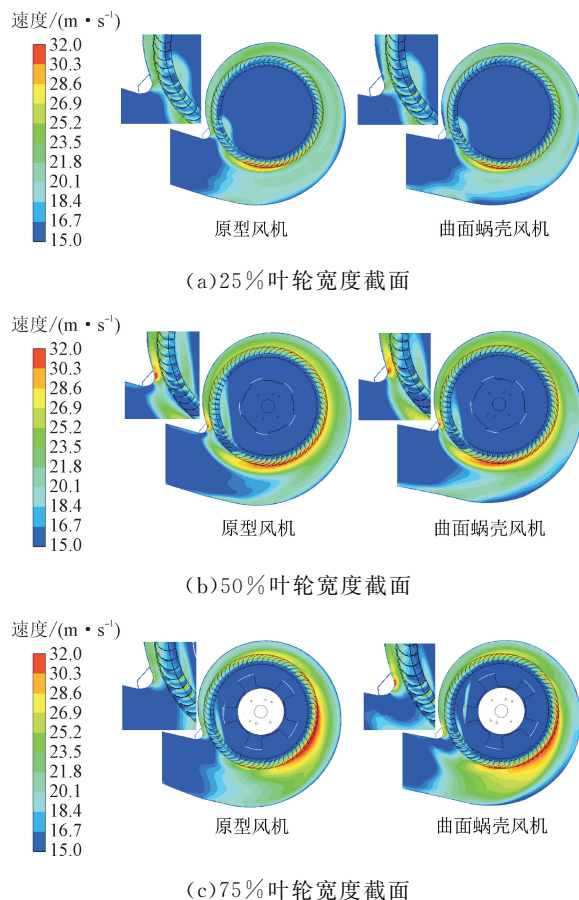


图 10 风机内部速度云图

Fig. 10 Velocity contour inside the fan

图 11 为蜗壳内轴向不同截面位置的示意图,沿叶轮旋转方向分别为截面 A~D。

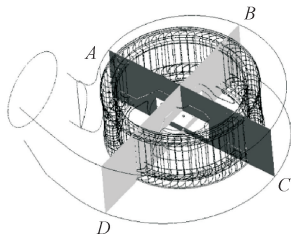


图 11 蜗壳轴向不同截面位置示意图

Fig. 11 Axial cross-section schematic diagram of the volute

图 12 为原型风机与曲面蜗壳风机截面 A~D 上的速度云图。从蜗壳流道内流动速度的演变过程可以看出,不同截面处的高速流动区域均集中在叶轮中部,低速流动区域主要位于蜗壳两侧壁面附近,这主要是由风机进气端气流转向使得叶轮轴向进气不均匀所导致的。曲面蜗壳减小了各截面的低速流动区域面积,在截面 D 处的改善效果最为明显,进一步说明了曲面蜗壳对于风机流道内通流状况的改善效果。

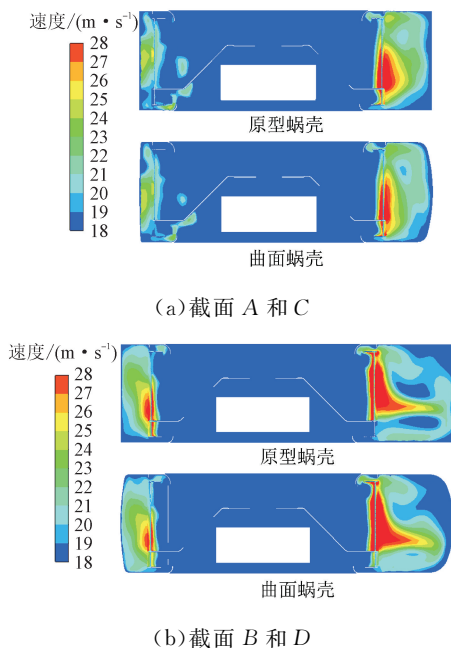


图 12 蜗壳不同截面速度云图

Fig. 12 Velocity distributions at the different axial cross-sections of the volute

通过 50% 叶轮宽度截面的速度矢量图来观察曲面蜗壳对于蜗舌间隙处叶道回流情况的抑制作用,如图 13 所示。在工作风量工况下,蜗壳出口存在较大的由排烟阻力导致的逆压梯度,蜗舌间隙处的叶道回流现象较 0 Pa 静压条件下更加剧烈。原型

风机在蜗舌附近的流动紊乱程度更大,气流对蜗舌的冲击作用更明显,部分气流受逆压梯度影响在蜗舌上游反向穿过叶道形成叶道回流现象。曲面蜗壳更好地适应了叶轮出口轴向不同截面的通流需求,气流对蜗舌的冲击更小,叶道回流情况也得到了抑制。

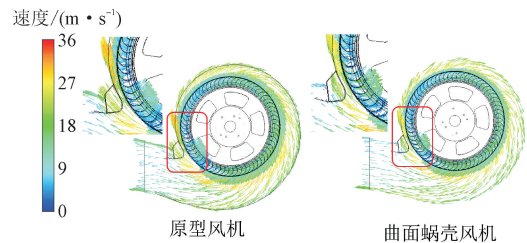


图 13 风机内部速度矢量图分布

Fig. 13 Internal velocity vector distribution of the fan

图 14 展示了风机内部流道在 50% 叶轮宽度截面的湍动能分布,图 15 给出了风机蜗壳壁面的湍动能分布状况。可以看出,相较于原型风机内部的湍流脉动情况,曲面蜗壳风机明显抑制了蜗壳出口以及蜗舌附近高湍动能区域的扩散。同时,受蜗壳出口逆压梯度的影响,蜗舌间隙处的流动更加紊乱,湍流脉动强度也更大,但曲面蜗壳的圆弧形截面流道由于对叶轮出口气流有更好的引导作用,很大程度上降低了蜗舌附近的湍动能水平,从而在宏观上降低了风机蜗舌附近的宽频噪声。

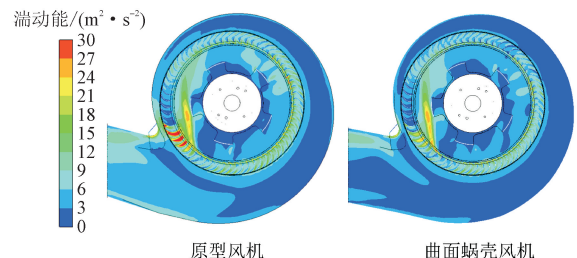


图 14 50% 叶轮宽度截面湍动能分布

Fig. 14 Turbulent kinetic energy distribution at 50% blade width cross-section

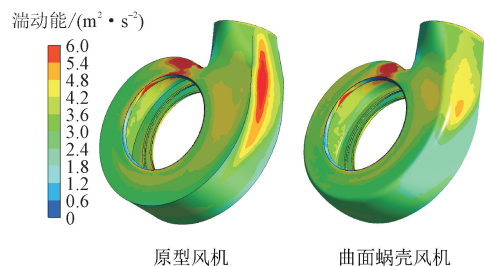


图 15 蜗壳壁面湍动能分布

Fig. 15 Turbulent kinetic energy distribution on volute wall

原型风机与曲面蜗壳风机在 Q 准则等值面 ($Q=7.2 \times 10^4 \text{ s}^{-2}$) 的涡核心区分布如图 16 示。可以看出,原型风机在蜗壳出口流道内存在明显的涡核脱落现象,结合图 12 中的流场分析,这主要是由于风机的不均匀进气使得蜗壳上下两侧壁面对应位置处存在较低速气流,高速区域与低速区域之间存在明显的速度梯度,交界处会产生强烈的剪切效应,导致流体发生失稳从而产生涡核脱落。依据气动声学理论,声波的产生与流体流动过程中的湍流水平、旋涡强度以及流体-固体之间的相互作用与有着紧密的联系^[23-24],由于风机出口流道的涡脱落位置靠近蜗壳壁面,故对风机气动噪声有着较大的影响。曲面蜗壳的圆弧形截面构型将叶轮出口的低速气流裹挟进主流区域,减小了气流交界处的速度梯度,很大程度上减少了蜗壳出口区域的涡核脱落。

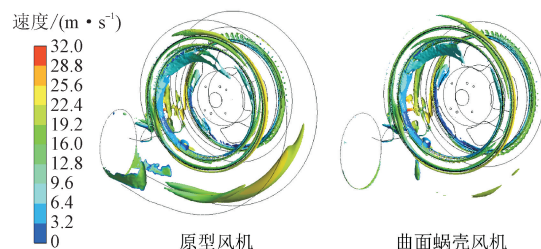


图 16 蜗壳内部涡核心区分布

Fig. 16 Internal vortex core region distribution of the volute

3.3 噪声分析

声压级频谱图是表征噪声信号频域特性的重要工具,通过傅里叶变换将时域信号转换为频域能量分布,可揭示噪声能量的离散或宽频特性。原型风机与曲面蜗壳风机在工作风量工况下的声压级频谱如图 17 所示。对风机中低频段的噪声频谱进行分析,可以看出在频率为 $0 \sim 5 \text{ kHz}$ 范围内,曲面蜗壳

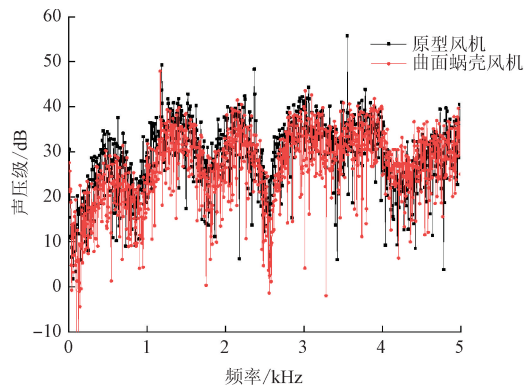


图 17 两台风机声压级频谱图

Fig. 17 Frequency spectrum of sound pressure level of two fans

风机的声压级噪声相对于原型风机有较为明显的降低,表明曲面蜗壳风机在降低宽频带噪声方面具有显著优势,其中原型风机的基频为 1184 Hz ,曲面蜗壳风机的基频为 1168 Hz 。结合上述流场分析可知,曲面蜗壳噪声降低的主要原因是通过优化气流动力学特性,抑制了气流在风机内部产生的湍流耗散和涡流损失。

通过 $1/3$ 倍频程频谱对多翼离心风机的气动噪声进行全面分析,由此可以更精确地识别和量化不同频段的噪声贡献,并得到相应频率范围内的声源强度水平^[25-26]。图 18 展示了两风机的 $1/3$ 倍频程频谱。可以看出,与原型风机相比,曲面蜗壳风机在 $0 \sim 5 \text{ kHz}$ 范围内的声压级噪声均较低,在低频段以及基频附近区间,降噪成效尤为显著,噪声降低了 $5 \sim 10 \text{ dB}$ 。这进一步说明了曲面蜗壳构型能够更有效地引导气流,较大程度上降低了因气流冲击所产生的离散噪声以及脱落涡流噪声。

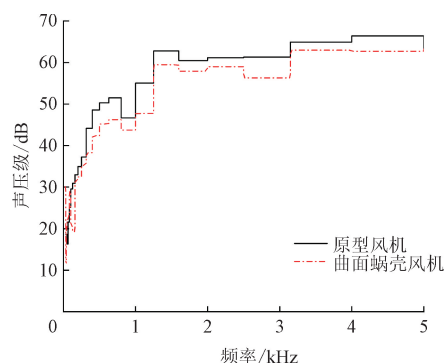


图 18 两台风机声压级 $1/3$ 倍频程频谱

Fig. 18 $1/3$ octave spectrum of SPL of two fans

多翼离心风机内部流场不仅影响风机的气动性能,还会对风机的气动噪声产生影响。为了揭示曲面蜗壳的降噪机理及气动噪声与压力分布不均匀性之间的关联,图 19 和图 20 分别给出了原型蜗壳与曲面蜗壳表面非定常流动计算获得的压力分布以及声压脉动分布。可以看出,曲面蜗壳出口处的压力分布更为均匀,高压区域减少,说明气流在蜗壳内的流动更加平稳,减少了因逆压梯度所引起的气流分离和涡流,这在一定程度上表现为风机气动噪声的降低。壁面处的声压脉动信息能够直观地揭示声源的强度分布以及噪声的具体发生位置。与原型蜗壳相比,曲面蜗壳壁面上的声压脉动强度有所降低。同时,原型风机由于受到叶片出口气流与蜗舌周期性的非定常相互作用的影响,蜗舌附近的声压脉动强度较高,因此对整机噪声有着显著影响。曲面蜗

壳风机蜗舌附近的声压脉动时均值明显降低,表明曲面蜗壳设计使得风机沿轴向方向的速度分布更加均匀,改善了气流与蜗舌之间的强相互作用,进一步说明了曲面蜗壳对原型风机噪声水平的显著改善。

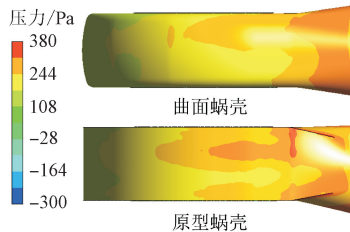


图 19 蜗壳壁面压力分布

Fig. 19 Pressure distribution on volute wall

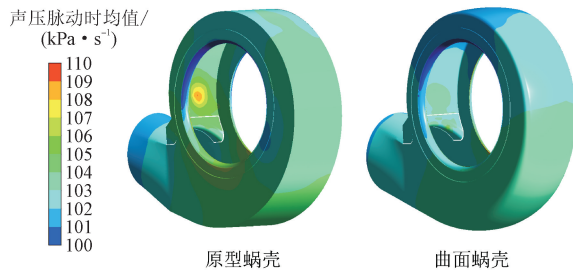


图 20 蜗壳壁面声压脉动分布

Fig. 20 Sound pressure pulsation distribution on volute wall

4 结 论

本文针对某集成灶用多翼离心风机蜗壳进行了曲面构型设计,通过数值模拟对优化后风机的气动及噪声性能进行了对比分析,并通过实验测试验证了改善效果,主要结论如下。

(1)针对原型多翼离心风机蜗壳流道内轴向速度分布不均匀以及由逆压梯度导致的蜗舌间隙回流现象,提出了曲面蜗壳的设计方法,使得蜗壳流道内的通流状况得到改善。

(2)对曲面蜗壳进行手板制作并通过实验测试性能。结果表明,无论是数值计算还是实验测试,采用曲面蜗壳的多翼离心风机的气动噪声均下降。在工作风量与原型风机基本相同时,曲面蜗壳风机的噪声降低了 6.4 dB,功率降低了 4.6%。

(3)对比分析原型风机与曲面蜗壳风机的流场及声场特征,结果表明:采用曲面蜗壳降低多翼离心风机气动噪声的原因主要是其抑制了蜗壳出口扩压段和蜗舌上游叶间流道内高湍流区域的扩散。另一方面,曲面蜗壳的圆弧形截面设计减小了气流交界

处的速度梯度,抑制了蜗壳出口区域的涡核脱落,降低了蜗舌附近的湍动能强度,有效减弱了蜗壳出口气流与蜗舌的强相互作用。

参考文献:

- [1] 雷健,秦国良,崔琴,等. 采用变弦长叶片设计的多翼离心风机叶轮改进与优化 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(8): 11-21.
LEI Jian, QIN Guoliang, CUI Qin, et al. Improvement and optimization of multi-blade centrifugal fan impeller based on variable chord length blade design [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(8): 11-21.
- [2] WANG Jiahao, LIU Xiaomin, TIAN Chenye, et al. Aerodynamic performance improvement and noise control for the multi-blade centrifugal fan by using bio-inspired blades [J]. Energy, 2023, 263(Part C): 125829.
- [3] 刘晓良,祁大同,马健峰,等. 改变蜗壳宽度对离心风机气动噪声影响的数值计算与试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1429-1434.
LIU Xiaoliang, QI Datong, MA Jianfeng, et al. Numerical and experimental study on effect of volute width on aerodynamic noise of a centrifugal fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(11): 1429-1434.
- [4] LIU Q, QI D, MAO Y. Numerical calculation of centrifugal fan noise [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(8): 1167-1177.
- [5] YOUNSI M, BAKIR F, KOUIDRI S, et al. Numerical and experimental study of unsteady flow in a centrifugal fan [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2007, 221(7): 1025-1036.
- [6] 王梦豪,吴立明,刘小民. 基于蜗舌改型的空调用离心风机流动分析及降噪研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(1): 147-153.
WANG Menghao, WU Liming, LIU Xiaomin. Study on flow analysis and noise reduction of centrifugal fan for air conditioner based on the modification of volute tongue [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(1): 147-153.
- [7] HAO Wenyue, WANG Jiajun, HE Ximing, et al. Reduction of aerodynamic noise of single-inlet centrifugal fan with inclined volute tongue [J]. Measurement and Control, 2020, 53(7/8): 1376-1387.
- [8] LUN Yuxin, LIN Limin, HE Haijiang, et al. Effects of vortex structure on performance characteristics of a multiblade fan with inclined tongue [J]. Proceedings

- of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2019, 233(8): 1007-1021.
- [9] 刘小民, 魏铭, 杨罗娜, 等. 内凹式蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声影响的研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12): 128-135.
- LIU Xiaomin, WEI Ming, YANG Luona, et al. Study on the effects of concave volute tongues on aerodynamic performance and noise of a multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 128-135.
- [10] VELARDE-SUÁREZ S, BALLESTEROS-TAJADURA R, SANTOLARIA-MORROS C, et al. Reduction of the aerodynamic tonal noise of a forward-curved centrifugal fan by modification of the volute tongue geometry [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(3): 225-232.
- [11] 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.
- [12] 王珂, 琚亚平, 张楚华. 基于分组模型及仿生蜗舌的多翼离心风机设计 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(8): 1671-1675.
- WANG Ke, JU Yaping, ZHANG Chuhua. Design of multi-blade centrifugal fan based on grouping model and bionic volute tongue [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(8): 1671-1675.
- [13] 姜卫生, 张沛, 杨仲磊, 等. 基于响应面法的离心风机蜗壳气动优化设计 [J]. 风机技术, 2019, 61(6): 23-28.
- JIANG Weisheng, ZHANG Pei, YANG Zhonglei, et al. Aerodynamic optimization of centrifugal fan for volute by response sureface methodology [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2019, 61(6): 23-28.
- [14] 方挺, 漆石球, 王宇贤, 等. 尺寸限制条件下离心风机蜗壳型线的设计研究 [J]. 风机技术, 2020, 62(1): 22-28.
- FANG Ting, QI Shiqiu, WANG Yuxian, et al. Volute profile design of centrifugal fan with space limitation [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(1): 22-28.
- [15] XIAO Qianhao, JANG B, WANG Jun. Volute profile design of the squirrel cage fan based on a B-spline curve under space limitation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2020, 234(7): 889-899.
- [16] 詹婷军, 王军, 李艺铭, 等. 叶轮与蜗壳的相对位置对离心风机性能的影响 [J]. 风机技术, 2020, 62(4): 11-15.
- ZHAN Tingjun, WANG Jun, LI Yiming, et al. Influence of the relative position of impeller and volute on the performance of centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(4): 11-15.
- [17] 李佳峻, 王军, 蒋博彦, 等. 控制周向截面积分布的风机蜗壳优化设计方法 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(12): 2665-2669.
- LI Jiajun, WANG Jun, JIANG Boyan, et al. An optimal design method for volute based on controlling the area distribution of circumferential cross section [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(12): 2665-2669.
- [18] 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.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化委员会. 吸油烟机及其他烹饪烟气吸排装置: GB/T 17713—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [20] CHO G R, KAWAHASHI M, HIRAHARA H, et al. Application of stereoscopic particle image velocimetry to experimental analysis of flow through multiblade fan [J]. JSME International Journal: Series B Fluids and Thermal Engineering, 2005, 48(1): 25-33.
- [21] 宫武旗, 吕伟领, 席光, 等. 前向多翼式离心风机蜗舌附近流场的 PIV 试验研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 166-171.
- GONG Wuqi, LÜ Weiling, XI Guang, et al. Experiment study on the velocity field near the tongue of a forward curved multi-blades centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 166-171.
- [22] 蒋博彦, 刘辉, 王军, 等. 多翼离心风机小流量工况流动特性 PIV 研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 98-103.
- JIANG Boyan, LIU Hui, WANG Jun, et al. PIV investigation of flow characteristics in multi-blade centrifugal fan under low flow-rate condition [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(5): 98-103.
- [23] 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.
- [24] LI Dian, LIU Xiaomin, HU Fujia, et al. Effect of trailing-edge serrations on noise reduction in a coupled bionic aerofoil inspired by barn owls [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2019, 15(1): 016009.
- [25] PREZELJ J, NOVAKOVIC T. Centrifugal fan with inclined blades for vacuum cleaner motor [J]. Applied Acoustics, 2018, 140: 13-23.
- [26] 王雷, 刘小民, 刘刚, 等. 轴流风机仿生耦合叶片降噪机理研究 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(11): 81-90.
- WANG Lei, LIU Xiaomin, LIU Gang, et al. Noise reduction mechanism of bionic coupled blades of axial flow fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(11): 81-90.
- (编辑 陶晴)