

采用仿秋沙鸭翼型叶片贯流风机的气动性能数值研究

田晨晔¹, 张宇航¹, 刘小民¹, 覃万翔², 席光¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 广东顺威精密塑料有限公司, 528305, 广东佛山)

摘要: 为提高空调性能, 满足产品节能要求, 本文基于叶片仿生设计及叶轮交错角改良开展贯流风机的优化研究。首先, 通过逆向工程方法提取了秋沙鸭翅膀40%翼展截面处的型线特征, 结合产品的工艺要求设计了贯流风机仿生叶片; 然后, 采用三维数值计算模型对带有仿秋沙鸭翼型叶片的贯流风机内部流场进行了数值模拟, 研究了具有不同叶轮交错角的仿秋沙鸭翼型叶轮对贯流风机气动性能的影响; 最后, 选取气动性能最优的叶轮交错角为5°的仿秋沙鸭翼型叶轮进行加工测试。研究表明: 三维数值计算结果能够有效地揭示贯流风机内轴向流动特性, 叶轮交错角对叶轮中盘附近流场影响显著; 采用仿秋沙鸭翼型叶轮能够改善贯流风机叶轮进出口流动状态, 增大叶轮偏心涡强度, 提升叶轮做功效率。根据实验结果, 与原型机相比, 采用仿秋沙鸭翼型叶片的贯流风机在相同转速下风量基本不变。在送风工况条件下, 功率最大降幅为3.3%; 在制冷工况条件下, 功率最大降幅为2.7%, 噪声最大降幅为0.3 dB。

关键词: 贯流风机; 仿生叶片; 叶轮交错角; 气动性能; 数值模拟

中图分类号: TH432 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209005 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0037-09



OSID 码

Numerical Study on Aerodynamic Performance of Cross Flow Fan with Bionic Blades Inspired by the Merganser Wings

TIAN Chenye¹, ZHANG Yuhang¹, LIU Xiaomin¹, QIN Wanxiang², XI Guang¹

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

2. Guangdong Sunwill Precision Plastics Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528305, China)

Abstract: To improve the performance of the air conditioner and meet the energy-saving needs, this paper studies the optimization of the cross flow fan based on the bionic design of blades and the improvement of the impeller stagger angle. Firstly, the profile features at the 40% span of the merganser wing are extracted by the reverse engineering, and the bionic blade of the cross flow fan is designed according to the product process requirements. Then, a 3D numerical calculation model is applied to numerically simulate the internal flow field of the cross flow fan with bionic blades inspired by the merganser wing. The effect on the aerodynamic performance of the cross flow fan with the bionic impellers which have different stagger angles is studied. Finally, the bionic impeller with a stagger angle of 5°, which has the best aerodynamic performance, is selected for the processing test. It is shown that the 3D numerical calculation results can effectively reveal the axial flow characteristics in the cross flow fan, the impeller stagger angle

has a significant influence on the flow field near the middle plates of the impeller, and that using the bionic impeller inspired by the merganser wing can improve the flow state of the airflow near the inlet and outlet of the impeller and increase the strength of the eccentric vortex and the power efficiency of the impeller. It can be seen from the experimental results that the proposed fan remains substantially the same in air volume at the same rotation speed and shows a maximum power reduction of 3.3% and 2.7% under the air supply and cooling conditions respectively and a maximum noise reduction of 0.3 dB compared with the prototype.

Keywords: cross flow fan; bionic blade; impeller stagger angle; aerodynamic performance; numerical simulation

秋沙鸭作为自然界中飞行速度较快的鸟类之一,在数万年进化过程的自然竞争中逐渐演化出符合空气动力学特征的流线型身躯及羽翼,帮助其在长距离迁徙中保持高效飞行状态以节省体力,也使其能够快速靠近并抓捕鱼类和昆虫。研究表明,秋沙鸭翅膀翼型具有下表面弯度较大、弦向厚度较大的特点^[1],在运动过程中能够在翼型上下两侧产生较大压力差,从而获得较高升阻比,提升飞行效率,降低能耗损失。因此,研究秋沙鸭翼型特征并将其应用于叶轮机械设计,对于改善设备气动性能,提升运行效率具有重要价值。

贯流风机因其送风距离较长、出风状态均匀等特点被广泛应用于空调领域。由于其内部流场具有独特的偏心涡特征,并且气流两次横贯穿过叶轮叶道,使贯流风机的内部流场研究和叶轮结构设计具有较大难度。早期贯流风机主要通过理论分析、实验测试和可视化技术进行研究^[2-3]。随着计算流体力学的发展,CFD数值分析技术逐渐在流场模拟及仿真计算领域被广泛应用,也为风机内部流场研究及相关结构设计提供了新的方法。由于贯流风机通常具有较大轴向长度,研究者出于简化计算目的,常使用二维模型^[4-6]或三维简化模型^[7]代替三维整体模型进行贯流风机流场分析。然而,二维数值计算仅能模拟贯流风机某一截面流场特征,对于由导风板、叶轮中盘、叶轮交错角等轴向不均匀特征引起的轴向流动变化无法进行仿真分析,在实际产品设计中会产生一定偏差。刘敏^[8]对无叶轮交错角的直叶片贯流风机分别进行了二维、三维计算,结果显示两种物理模型计算风量误差超过11%。伍礼兵^[9]采用二维模型模拟某款空调室内机,计算风量与实测结果误差为10%,计算噪声与实测结果误差为8.3%。Wu等^[10]分别将直叶片、带拔模角的直叶片和带叶轮交错角的直叶片应用于贯流风机并进行了二维、三维计算,结果显示采用直叶片的贯流风机的

二维、三维计算结果相差最小,具有叶轮交错角的贯流风机二维、三维计算结果相差最大。因此,针对具有导风板、叶轮中盘、叶轮交错角等轴向不均匀特征的贯流风机,采用三维模型进行数值分析是十分必要的。

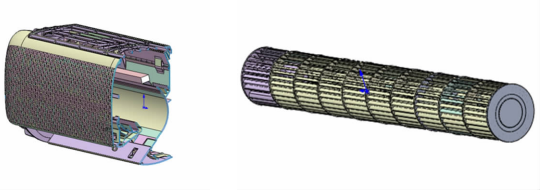
叶轮作为贯流风机内部主要做功部件,其结构特征对于风机性能具有直接影响。贯流风机叶轮优化的常规方向主要是针对叶轮吸气角^[11]、叶片数^[12]、叶轮内外径比^[13]、叶片内外周角^[14-15]、叶片扭曲角^[16]等叶片特征参数进行优化,在叶片结构方面也有针对叶片中弧线分布^[17]、叶片斜度^[18]、尾缘结构^[19-20]的设计研究。近年来,部分研究者对自然界中鸟类、鱼类外形及运动特征进行提取,并为叶轮机械的叶片型线设计提供了经验和指导。华欣^[21]将海鸥翼型应用于风力机叶片设计,减少了叶片旋转过程中的附面层分离,提高了叶片效率。王梦豪等^[22]将长耳鸮翼型应用于离心风机叶片仿生设计,有效改善了叶片表面流动分离现象。熊仲营等^[23]采用仿鱼形叶片使多翼离心风机风量增大12.5%,效率提升5.65%。Zhu等^[24]将鸮、海鸥、秋沙鸭、水鸭等4种鸟类翼型应用于船用螺旋桨叶片设计,数值结果显示:仿生螺旋桨提高了船舶螺旋桨效率,并减弱了叶尖涡强度。上述研究表明叶片仿生设计对改善叶轮机械性能具有显著效果,但在贯流风机方面,关于仿生应用的研究目前相对较少。

针对改善空调室内机用贯流风机气动性能、降低风机功耗的目标,本文通过逆向工程方法提取了秋沙鸭翅膀展向40%截面翼型特征,基于加工条件及强度需求进行叶片改型后应用于贯流风机叶片设计。随后采用三维模型进行数值计算,研究了仿秋沙鸭翼型叶片对贯流风机内部流场的影响,并对比了具有不同叶轮交错角的仿秋沙鸭翼型叶轮的性能差异。最后,结合实验测试验证了仿秋沙鸭翼型叶轮对贯流风机功耗损失的控制。

1 数值计算方法

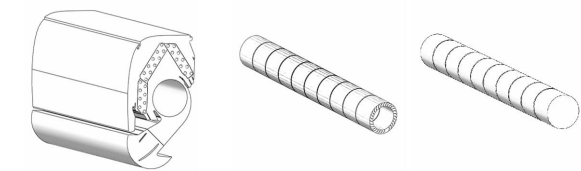
1.1 物理模型及网格划分

本文选取某空调室内机用贯流风机作为研究对象,其主要部件包括空调壳体、蜗舌、换热器、叶轮、出口导风板等,如图 1 所示。其中,叶轮沿轴向分为 10 节,各节间叶轮交错角为 3.7° ,叶片呈不等距分布。



(a) 壳体模型 (b) 叶轮模型
图 1 室内机壳体模型及叶轮模型
Fig. 1 Shell and impeller of the indoor unit

根据空调室外机风道系统结构对贯流风机流体区域进行三维建模,如图 2 所示。数值建模过程中对除尘网等结构进行简化处理,保留换热器、导风板及叶轮中盘。流体区域共包括进口区、换热器区、蜗壳区、叶轮区、叶轮内部区、出口区等 6 个部分。

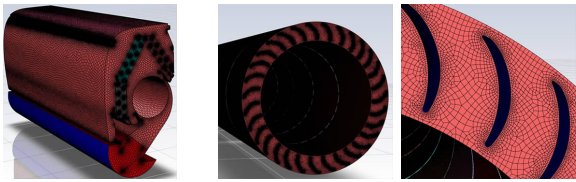


(a) 蜗壳区和换热器区 (b) 叶轮区 (c) 叶轮内部区
图 2 贯流风机计算模型
Fig. 2 Computational domains for the cross flow fan

采用商用软件 Fluent meshing 进行计算域网格划分。由于贯流风机叶轮轴向尺寸较大,且各节间具有叶轮交错角,常规网格划分方法会使总网格数过大。因此,本文对蜗壳区、换热器区、叶轮内部区、进出口区等静止域采用六面体和八面体混合网格处理以控制网格数量,对静止域与叶轮区的交界面进行局部网格加密。叶轮区作为贯流风机内部主要做功区域,采用六面体网格进行划分,网格划分如图 3 所示,并对叶片表面进行局部加密。

为保证数值模拟准确性,本文首先对计算域进行网格无关性验证,结果如图 4 所示。当总网格数超过 4 400 万时,贯流风机的计算风量变化量小于 1%,认为网格数对数值计算结果的影响可忽略,最终选定计算模型总网格数为 4 448 万,其中静止域

网格数为 2 035 万,叶轮区网格数为 2 413 万。



(a) 蜗壳区和换热器区 (b) 叶轮区 (c) 叶片局部
图 3 贯流风机计算网格划分
Fig. 3 Computational meshes for the cross flow fan

Fig. 3 Computational meshes for the cross flow fan

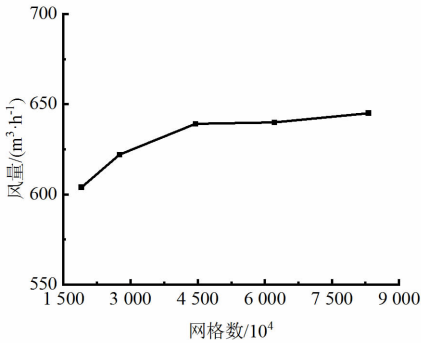


图 4 网格无关性验证
Fig. 4 Mesh independence verification

1.2 场场计算

采用商用软件 ANSYS Fluent 对贯流风机内部流域进行数值计算。控制方程为 Navier-Stokes 方程,湍流模型选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型,近壁面函数采用 Standard Wall 模型,压力速度耦合采用 SIMPLIEC 格式。对流项使用二阶迎风格式,压力和扩散项为中心差分格式。进出口均给定压力边界条件,进口总压设置为 101 325 Pa,出口静压设置为 101 325 Pa。叶轮区设置为旋转区域,采用 Frame Motion 模型,其他区域为静止区域,动静交界面设置为 interface。设定计算收敛残差为 10^{-4} 。

由于换热器结构包含多组翅片,直接模拟难度较大,数值计算中通常采用多孔介质模型模拟换热器对流场的影响^[9]。不同流速下的换热器阻力可通过换热器两侧的压力变化表示,具体表达式如下^[9]

$$\Delta p = au^2 + bu \tag{1}$$

式中: Δp 为换热器两侧压降; u 为流过换热器气流流速; a 、 b 为方程系数。

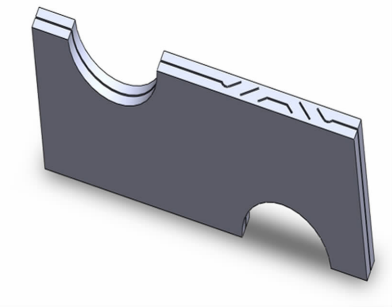
多孔介质模型的黏性系数 α 和惯性系数 β 满足如下关系式

$$\alpha = \frac{b}{\mu L} \tag{2}$$

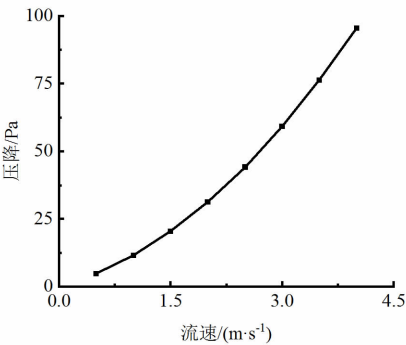
$$\beta = \frac{2a}{\rho L} \tag{3}$$

式中： ρ 为空气密度； μ 为空气动力黏度； L 为翅片宽度。

通过建立换热器单翅片模型，采用数值计算获得换热器两侧流速和压降关系，如图 5 所示。结合上述公式及换热器的流速-压降曲线，计算得出换热器的黏性系数为 $1.6 \times 10^7 \text{ m}^{-2}$ ，惯性系数为 270 m^{-1} 。



(a)单翅片模型



(b)换热器流速-压降曲线

图 5 换热器阻力系数模拟

Fig. 5 Resistance coefficient simulation of the heat exchanger

2 实验测试

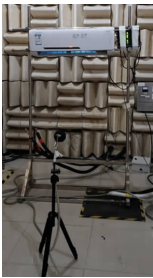
空调室内机气动性能及噪声测试如图 6 所示。气动性能测试依据 GB/T 1236—2017《工业通风机用标准化风道性能试验》规定进行实验设置。气动性能测试系统型号为 FL-2 ISO，主要包括风室、喷嘴、辅助风机、差压变送器、温度传感器、数据采集装置等。测试对象为带有贯流风机的空调室内机，其内部结构与数值建模保持一致，便于测试结果与数值结果进行对比。测试过程中，将空调室内机放置于风室入口并密封连接段以保证室内机出口为风室唯一进气端。针对不同转速工况，利用测试软件监测喷嘴流速并通过电控系统更换喷嘴数量及喷嘴

大小以调节风室内压差，由数据采集系统获取各工况下的气动实验数据。

噪声测试依据 GB/T 7725—2004《房间空气调节器》规定进行实验设置。测试环境为专业半消音室，实验室本底噪声为 17.0 dB，噪声测试精度为 $\pm 0.2 \text{ dB}$ 。噪声测试系统包括声压传感器、前置放大器、数据采集系统及噪声分析软件等。测试过程中将空调室外机进行悬挂放置以模拟其使用环境特征，噪声测试点布置在距离空调前面板水平方向 1 m，距离空调出口垂直方向 1 m 的位置。噪声数据经分析软件处理后进行读取。



(a)气动性能测试



(b)噪声测试

图 6 实验测试装置

Fig. 6 Experimental test system

空调原型机不同转速工况的数值计算风量与实验测试结果对比如图 7 所示。从图中可以看出，数值计算所得空调原型机转速-风量曲线与实验测试结果具有相同变化趋势，二者绝对误差随转速增大而增大。在最低转速 $800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 工况，原型机数值计算风量为 $358 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，实验测试风量为 $348 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，此时二者相对误差最小，为 2.9%；在最高转速 $1\,240 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 工况，原型机数值计算风量为 $614 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，相比于实验测试结果增大了 $27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。相对误差最大值出现在转速 $940 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 工

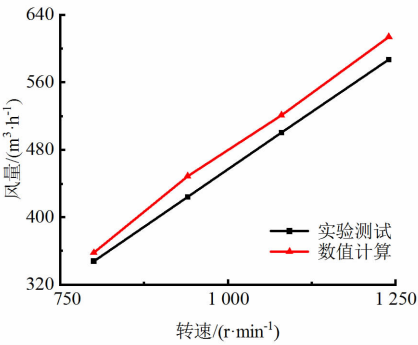


图 7 原型机数值计算结果与实验测试结果对比

Fig. 7 Comparison of numerical simulation results and experimental test results for the prototype fan

况,此时原型机实验测试风量为 $424 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,数值计算结果增大了 4.7% 。总体而言,针对该空调原型机的数值计算和实验测试结果的绝对误差随转速增大而增大,相对误差基本呈现随转速增大而增大趋势。多孔介质模型的应用、数值建模的准确性等都是影响计算误差的原因。在空调原型机全工况范围内,数值计算的相对误差最大值 4.7% 小于工程要求的 5% ,认为本文的数值计算方法能够有效模拟贯流风机气动性能。

3 仿秋沙鸭翼型叶片设计及应用

3.1 仿生叶片设计

选取具有较优空气动力学特性的秋沙鸭作为仿生对象,根据 Liu 等^[25]采用激光扫描方法得到的秋沙鸭翅膀数据,通过 Birnbaum-Glauert 方程得到翼型中弧线特征及厚度分布。

根据文献[25],秋沙鸭翅膀沿展向截取的任一位置处的翼型中弧线坐标最大值 $z_{c,\max}$ 及翼型最大厚度 $z_{t,\max}$ 分布的关系式如下

$$\frac{z_{c,\max}}{c} = \frac{0.14}{1 + 1.333\xi^{1.4}} \quad (4)$$

$$\frac{z_{t,\max}}{c} = \frac{0.05}{1 + 4\xi^{1.4}} \quad (5)$$

式中: c 为秋沙鸭某展向截面位置的翼型弦长; ξ 为选取的秋沙鸭翅膀展向截面位置。廖根华^[26]分析了多种鸟类翅膀翼型的气动性能,发现在各展向截面位置中,约 40% 截面位置处鸟类翅膀翼型的升阻比特性较好,故本文选取翅膀展向位置 $\xi=0.4$ 。

根据关系式(4)和(5)给出的翼型中弧线坐标最大值 $z_{c,\max}$ 及最大厚度 $z_{t,\max}$,计算得到秋沙鸭翅膀 40% 展向截面位置的翼型中弧线的分布坐标 z_c 和翼型沿中弧线的厚度 z_t 分布如下^[25]

$$\frac{z_c}{c} = \frac{z_{c,\max}}{c} \eta (1 - \eta) \sum_{n=1}^3 S_n (2\eta - 1)^{n-1} \quad (6)$$

$$\frac{z_t}{c} = \frac{z_{t,\max}}{c} \sum_{n=1}^4 A_n (\eta^{n+1} - \sqrt{\eta}) \quad (7)$$

式中: $\eta=x/c$ 表示该展向截面位置的翼型弦长相对位置; S_n 、 A_n 为约束该展向截面翼型的多项式系数。对于秋沙鸭翼型, S_n 取值分别为 $S_1=3.9385$, $S_2=0.7466$, $S_3=1.840$; A_n 取值分别为 $A_1=-23.1743$, $A_2=58.3057$, $A_3=-64.3674$, $A_4=25.7629$ 。

秋沙鸭翅膀该展向截面位置的翼型上、下侧型线坐标 z_u 、 z_l 计算方程如下^[25]

$$z_u = z_c + z_t \quad (8)$$

$$z_l = z_c - z_t \quad (9)$$

根据上述各式,提取并重构秋沙鸭翅膀展向 40% 截面位置处的仿生翼型,翼型型线及厚度分布特征如图 8 所示。从图中可以看出,秋沙鸭翼型型线在 90% 弦长位置附近发生交叉,使靠近尾缘附近翼型厚度较小。如果直接应用于贯流风机叶片设计,容易在风机运行过程中引起叶片晃动及破损。此外,研究发现秋沙鸭翼型尾缘附近脱落涡较强,表明该翼型尾缘段气动性能较差^[1]。因此,在贯流风机叶片设计过程中需对秋沙鸭翼型尾缘进行改型。本文基于叶片加工要求,选择弯度较大的秋沙鸭翼型前 80% 弦长范围内的型线,对尾缘位置进行圆角处理后应用于贯流风机叶片设计。

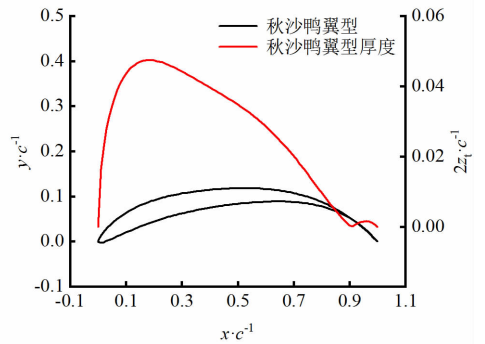


图 8 展向 40% 截面位置秋沙鸭翼型及厚度分布

Fig. 8 The airfoil and the thickness distribution at the 40% span of the merganser

尾缘改型后的仿秋沙鸭翼型叶片型线和原型叶片型线对比如图 9 所示。从图中可以看出,仿秋沙鸭翼型叶片上表面型线和下表面型线较原型叶片均弯度增大,能够提升叶片做功能力。仿秋沙鸭翼型叶片前缘附近厚度增大,尾缘附近厚度减小。与原型

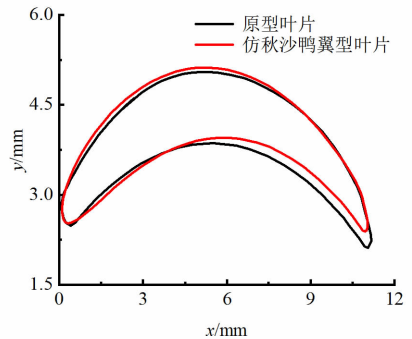


图 9 秋沙鸭仿生叶片与原型叶片型线对比

Fig. 9 Comparison of the profiles of the bionic blade inspired by merganser and the prototype

型叶轮相比,仿秋沙鸭翼型叶片从叶片中部到叶片尾缘的厚度变化更加剧烈。

3.2 数值结果及分析

依据秋沙鸭翼型型线设计贯流风机叶片,分别选取 2.5°、3.7°、5° 叶轮交错角设置 3 个仿秋沙鸭翼型叶轮,叶片圆周分布角与原型一致。在 1 240 r·min⁻¹ 条件工况下各方案数值计算结果如表 1 所示。采用仿秋沙鸭翼型叶片后,各方案风量较原型风机均提升,其中采用 5° 叶轮交错角的仿秋沙鸭翼型叶轮风量最大,较原型提升 4.5%。

表 1 1 240 r·min⁻¹ 转速条件工况下数值
计算结果

Table 1 Numerical results at 1 240 r·min ⁻¹			
叶轮类型	叶轮交错角 /(°)	计算风量 /(m ³ ·h ⁻¹)	风量变化 /%
原型	3.7	639	
仿秋沙鸭翼型	2.5	659	3.1
仿秋沙鸭翼型	3.7	653	2.2
仿秋沙鸭翼型	5.0	668	4.5

为了对比采用不同叶轮的贯流风机的轴向流场差异,沿风机旋转轴选取叶轮中盘外径位置($R=0.046\text{ m}$)的环截面,按图 10 所示的进气侧进行观察。

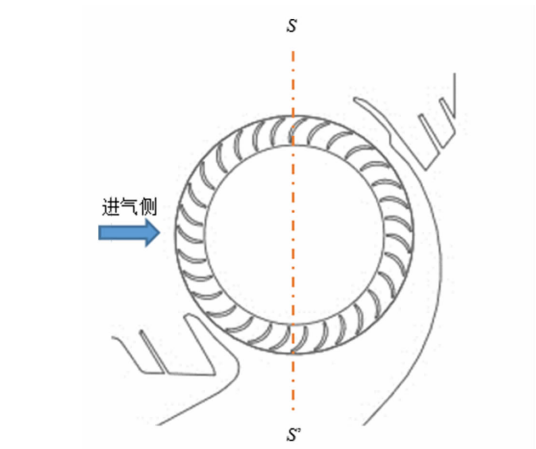


图 10 观察方向示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the viewing direction

采用不同叶轮的贯流风机在 $R=0.046\text{ m}$ 位置环截面的速度分布如图 11 所示。从图中可以看出,贯流风机流场具有明显的轴向差异,叶轮上侧中盘附近存在局部低速区。这是由于进口气流在中盘对应位置受到阻挡后向中盘两侧分流,与附近的叶道位置进口气流发生交叉,形成局部旋涡阻塞该区域

叶道。与原型风机相比,采用仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机叶轮中盘附近低速区面积减小,即仿生叶片改善了进气侧流动状态,使叶轮进气流速增大,在叶轮下侧流速提升更为明显。与 3.7° 仿秋沙鸭翼型叶轮相比,采用 5° 仿秋沙鸭翼型叶轮的低速区分布集中在靠近叶轮中段区域的位置,但速度的轴向分布更加均匀,有利于减弱各节叶轮内气流的相互影响,抑制风机噪声。因此,对于仿秋沙鸭翼型叶轮设计,5° 叶轮交错角性能更好。

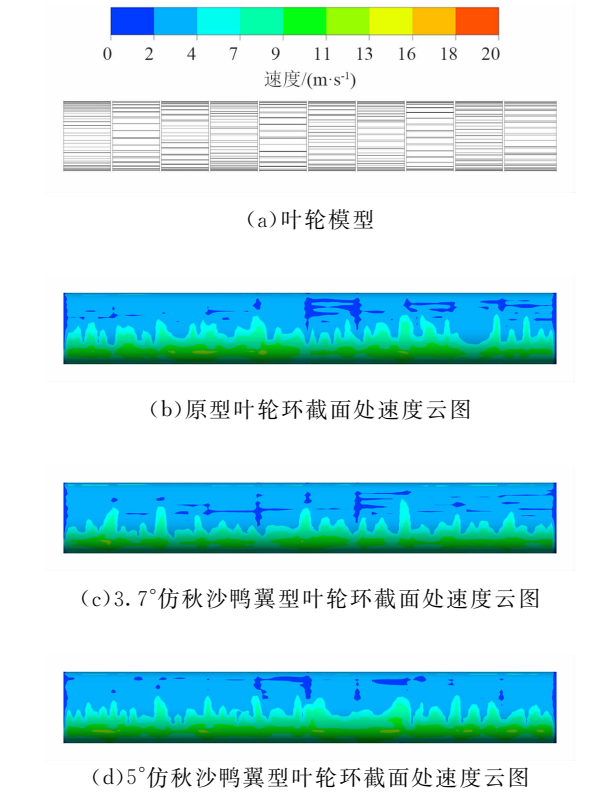


图 11 采用不同叶轮的贯流风机在 $R=0.046\text{ m}$ 位置环截面处速度云图
Fig. 11 Velocity distributions of the cross flow fan with different impellers on the circumscision at the position of $R=0.046\text{ m}$

为便于观察仿秋沙鸭翼型叶轮对风机内部流场影响,在叶轮旋转域外侧边界上设置采样点,即采样点到圆心距离为 46 mm。取流动状态相对稳定的第 6 节叶轮区中截面 $z=-0.0328\text{ m}$ 位置,5° 仿秋沙鸭翼型叶轮和原型叶轮外圆周径向速度分布如图 12 所示,其中正值表示速度方向远离圆心,负值表示速度方向指向圆心。原型风机的叶轮主要出口范围为 $[127^\circ, 273^\circ]$,采用仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机叶轮主要出口范围为 $[166^\circ, 270^\circ]$ 。采用仿秋沙鸭翼型叶轮后出口范围缩小,但气流流出速度增大,在 $[222^\circ, 256^\circ]$ 范围表现明显。在靠近蜗舌附近,采

用仿秋沙鸭翼型叶轮后低速区范围由 270° 扩大至 273° ,即该区域的偏心涡范围扩大,偏心涡强度增大,偏心涡外围流速增大,使靠近叶轮进口侧局部 $[300^{\circ}, 320^{\circ}]$ 的偏心涡外围气流与进气相互干涉增强,加剧了该区域的阻塞。在叶轮主要进气侧,采用仿秋沙鸭翼型叶轮后 $[340^{\circ}, 40^{\circ}]$ 附近区域进气流速增大,这是由于仿秋沙鸭翼型叶轮能够改善进口侧由于负攻角作用导致的附面层堆积及二次流,从而缓解叶道进口侧阻塞状况。仿秋沙鸭翼型叶轮 45° 附近存在明显回流区,这是由于采用仿秋沙鸭翼型叶轮使风机内部气流流速增大后,不同方向的入口气流在叶轮外侧的交汇作用增强,使局部进气流速降低。采用仿秋沙鸭翼型叶轮后,蜗壳间隙 $[120^{\circ}, 180^{\circ}]$ 附近部分气流流出区转为流入区,这是由于偏心涡范围增大后外围裹挟气体范围扩大,使蜗壳间隙附近进出气流相互碰撞作用增强,形成局部旋涡。

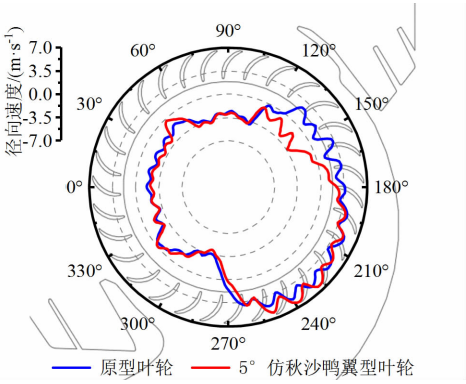


图 12 $z = -0.032\ 8\ \text{m}$ 位置的两种叶轮外圆周径向速度分布

Fig. 12 Radial velocity distribution on the outer circumference of the two kinds of impellers at the position of $z = -0.032\ 8\ \text{m}$

考虑轴向不均匀特征影响,监测采用两种叶轮的贯流风机的轴向平均外圆周径向速度分布,如图 13 所示。基于轴向平均值的两种叶轮进气范围基本相同,但仍可观察到仿秋沙鸭翼型叶轮 270° 附近低速区较原型叶轮扩大,即偏心涡范围扩大。同时,原本在 $z = -0.032\ 8\ \text{m}$ 位置监测到的蜗壳间隙 $[120^{\circ}, 180^{\circ}]$ 附近的气流方向变化已不明显。叶轮进气侧 $[340^{\circ}, 40^{\circ}]$ 范围内,仿秋沙鸭翼型叶轮进气流速大于原型叶轮。在叶轮出口侧 240° 附近,仿秋沙鸭翼型叶轮出口流速也呈现增大特点。值得一提的是,采用 5° 仿秋沙鸭翼型叶轮的轴向平均外圆周径向速度分布曲线在出气侧 $[120^{\circ}, 270^{\circ}]$ 相对原型叶轮呈现明显的波动形状,即对于仿秋沙鸭翼型叶

轮该交错角不能够完全消除叶轮流气流的周期特性,可以进行进一步优化以减弱该波动状态使出口气流与蜗壳壁面的接触碰撞更为均匀,进一步控制风机噪声。

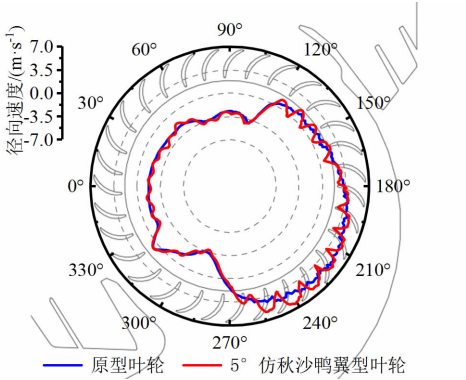


图 13 两种叶轮的轴向平均外圆周径向速度分布
Fig. 13 Radial velocity distribution on the outer circumference of the two kinds of impellers

3.3 带仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机性能测试

选取气动性能最优的 5° 叶轮交错角仿秋沙鸭翼型叶轮进行模型加工,送风工况条件下,采用仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机与原型的实验结果对比如图 14 所示。由图可知,采用仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机在全风量范围功率均低于原型风机,即仿秋沙鸭翼型叶轮能够改善贯流风机的气动性能,有效降低风机功耗。在 $500\ \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,采用仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机的功率降幅达到最大,为 3.3% ;在最大风量时,采用仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机功率降低 $1\ \text{W}$,较原型风机降低 2.6% 。

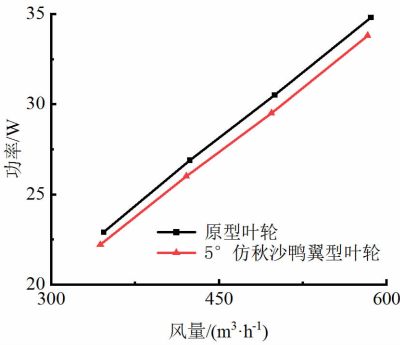


图 14 送风工况条件下采用两种不同叶轮的贯流风机气动性能对比

Fig. 14 Comparison of the aerodynamic performance of the cross flow fan with two different impellers at the supply air condition

制冷工况条件下,采用两种不同叶轮的贯流风

机的气动性能及噪声的实验测试结果在表 2 中列出。从表中可以看到,在不同风档条件下,采用仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机的风量与原型风机的风量基本相同。但是,当采用仿秋沙鸭翼型叶轮时,贯流风机功率降低,且随着档位降低功率降幅增大,低风档时功率减小 0.6 W,相比原型降低 2.7%。除中风档外,当贯流风机处于其他 3 个档位时,采用仿秋沙鸭翼型叶轮后噪声均有一定降低,静音档时噪声降低 0.3 dB。

表 2 制冷工况条件下两种叶轮的贯流风机的气动性能及噪声

Table 2 Comparison of the aerodynamic performance and noise of the cross flow fan with two different impellers at the cooling condition

档位	原型			仿生		
	风量 /(m ³ ·h ⁻¹)	功率 /W	噪声 /dB	风量 /(m ³ ·h ⁻¹)	功率 /W	噪声 /dB
高风	475	28.8	36.9	481	28.6	36.7
中风	403	25.7	32.6	406	25.2	32.8
低风	335	22.3	27.7	336	21.7	27.5
静音			23.4			23.1

4 结 论

本文以具有较高飞行效率的秋沙鸭作为仿生对象,针对空调器用贯流风机叶片进行仿生设计,采用三维数值计算方法研究了具有不同叶轮交错角的仿秋沙鸭翼型叶轮对贯流风机气动性能和噪声的影响,并结合实验测量结果验证了采用仿秋沙鸭翼型叶片提升贯流风机气动性能的效果,得到的主要结论如下。

(1)三维数值仿真能够有效反映贯流风机内部轴向流动对风机气动性能的影响。叶轮中盘附近受气流碰撞影响存在局部低速区,通过叶片仿生设计和叶轮交错角优化能够改善该区域流场。对于本文的设计,当叶轮交错角为 5°时,仿秋沙鸭翼型叶轮的贯流风机的气动性能最优。

(2)采用仿秋沙鸭翼型叶片能够改善贯流风机内部流动状态,增大偏心涡强度,提升叶轮做功能力。在叶轮进口侧,仿秋沙鸭翼型叶片减少了进口侧内圆周位置二次流,提高了叶轮进气速度,缓解了局部阻塞;在叶轮出口侧,仿秋沙鸭翼型叶片增大了出口流速,提高了风机送风效率。

(3)与原型机相比,采用仿秋沙鸭翼型叶片的贯

流风机在相同转速下的实验测试风量基本不变。在送风工况条件下,功率最大降低 1 W,降幅为 3.3%;在制冷工况条件下,功率最大降幅为 2.7%,噪声最大降幅为 0.3 dB。

参考文献:

[1] 李典, 刘小民. 几种仿生翼型气动性能及噪声特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(12): 2629-2632.
LI Dian, LIU Xiaomin. Numerical study on aerodynamic performance and noise characteristic of several bionic airfoils [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(12): 2629-2632.

[2] YAMAFUJI K. Studies on the flow of the cross-flow impellers: part 1 Experimental study [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1975, 41(341): 189-199.

[3] TAKUSHIMA A, SHINOBU Y, TANAKA S, et al. Flow measurements by laser Doppler velocimeter in a cross flow fan for air-conditioning use [J]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(1): 497-501.

[4] SHIH Y C, HOU H C, CHIANG H. On similitude of the cross flow fan in a split-type air-conditioner [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14/15): 1853-1864.

[5] 舒朝晖, 张强, 段亚雄. 贯流风机叶轮参数的模拟研究 [J]. 流体机械, 2017, 45(11): 22-28.
SHU Zhaohui, ZHANG Qiang, DUAN Yaxiong. Numerical investigations on the impeller parameters of the cross flow fan [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(11): 22-28.

[6] CIOCĂNEA A, MARIN A, BUREȚEA D L. The influence of housing on the internal flow of a cross flow fan impeller [C] // 2019 International Conference on Energy and Environment (CIEM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 464-468.

[7] ZHANG Weijie, YUAN Jianping, SI Qiaorui, et al. Investigating the in-flow characteristics of multi-operation conditions of cross-flow fan in air conditioning systems [J]. Processes, 2019, 7(12): 959.

[8] 刘敏. 基于数值模拟及实验的贯流风扇气动噪声特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[9] 伍礼兵. 空调室内机风道流场数值模拟优化及实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[10] WU C J, LIU D P, PAN J. A study of the aerodynamic and acoustic performance of an indoor unit of a DC-inverter split air-conditioner [J]. Applied Acoustics, 2012, 73(4): 415-422.

[11] 李树云, 吴俊鸿, 高旭. 基于 CFD 的空调室内机的数

- 值模拟 [J]. 流体机械, 2018, 46(11): 79-83.
- LI Shuyun, WU Junhong, GAO Xu. Numerical simulation of indoor unit of air conditioner based on CFD [J]. Fluid Machinery, 2018, 46(11): 79-83.
- [12] LAZZARETTO A. A criterion to define cross-flow fan design parameters [J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(4): 680-683.
- [13] 庞佑霞, 唐勇, 梁亮, 等. 贯流风机结构参数优化组合研究 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 102-107.
- PANG Youxia, TANG Yong, LIANG Liang, et al. Optimum combination of structure parameters of cross flow fans [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 102-107.
- [14] 张强. 空调用贯流风机流场及叶片参数模拟研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [15] 张师帅, 罗亮. 内周叶片角对空调用贯流风机性能及噪声的影响 [J]. 风机技术, 2008(1): 16-18, 22.
- ZHANG Shishuai, LUO Liang. Influence of internal blade angle on cross-flow fan performance and noise for air-conditioning [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2008(1): 16-18, 22.
- [16] 朱宗铭, 邬烈锋, 谭华兵, 等. 贯流风机性能参数实验与扭曲角优化 [J]. 机械设计与制造, 2012(1): 203-205.
- ZHU Zongming, WU Liefeng, TAN Huabing, et al. Performance parameter experiment of cross flow fans and twisted angle optimization [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(1): 203-205.
- [17] 丁炎炎, 王军, 王威, 等. 基于 Bezier 曲线的贯流风机叶型多工况优化研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 58-62.
- DING Yanyan, WANG Jun, WANG Wei, et al. Multi-condition optimization of cross-flow fan based on Bezier curve [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 58-62.
- [18] 王银姣, 卢剑伟, 江斌, 等. 利用 CFD 技术研究叶片斜度对贯流风机性能的影响 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(7): 882-887.
- WANG Yinjiao, LU Jianwei, JIANG Bin, et al. Study of the effect of blade slope on cross-flow fan performance using CFD technology [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2012, 35(7): 882-887.
- [19] YAMAKAWA H. Development of high efficiency and low noise cross-flow fans for room air conditioner indoor unit [C] // ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting Collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. New York, NY, USA: ASME, 2014: V01BT10A024.
- [20] 杨彤, 钟志尧. 贯流风轮尾缘厚度对空调器性能的影响 [J]. 家电科技, 2017(12): 64-66.
- YANG Tong, ZHONG Zhiyao. Effect of trailing edge thickness of cross fan on air-condition performance [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2017(12): 64-66.
- [21] 华欣. 海鸥翅翼气动性能研究及其在风力机仿生叶片设计中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [22] 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.
- [23] 熊仲营, 王梦豪, 刘小民, 等. 采用仿鱼形叶片的多翼离心风机性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 22-29.
- XIONG Zhongying, WANG Menghao, LIU Xiaomin, et al. Study on the aerodynamic performance of multi-blade centrifugal fan with bionic blades inspired by carangiform fish [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 22-29.
- [24] ZHU Wencai, GAO Hongtao. Hydrodynamic characteristics of bio-inspired marine propeller with various blade sections [J]. Ships and Offshore Structures, 2021, 16(2): 156-171.
- [25] LIU Tianshu, KUYKENDOLL K, RHEW R, et al. Avian wing geometry and kinematics [J]. AIAA Journal, 2006, 44(5): 954-963.
- [26] 廖庚华. 长耳鸮翅膀气动与声学特性及其仿生应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)