

环状叶轮轴流风扇的气动性能和噪声研究

吴宪鹏¹, 魏来², 罗丹², 康瑞祥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. 广东美的环境电器制造有限公司, 528425, 广东中山)

摘要: 为提高轴流风扇气动性能并降低其工作噪声,受环形螺旋桨结构启发,以风扇用轴流叶轮为研究对象,提出了一种新型的环状叶轮结构并给出其参数设计流程和方法。通过提取原型叶轮叶型基本参数,调整叶轮基元级型线,对扇叶部分进行几何重构。采用光顺曲线连接叶顶涡环结构完成环状叶轮设计。基于数值仿真计算方法研究了环状叶轮对风扇气动性能和气动噪声的影响机制。结合实验测试方法对环状叶轮轴流风扇设计的有效性进行验证。仿真结果表明,采用环状叶轮改善了叶片表面的压力分布状态及整机流场速度分布的均匀性,提高了风扇的有效送风距离;同时,涡环结构有效抑制了叶轮叶顶脱落涡的强度和扩散范围,减小了主流区域的湍动能强度。实验结果表明,相对于原型轴流风扇,同转速的3种工况下环状叶轮风扇最大风速均有提升,噪声及功率有所降低。在相同噪声工况条件下,环状叶轮风扇最大风速提升了 $20.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,功率基本不变。当最大风速保持不变时,环状叶轮风扇的噪声值最大降低了 1.5 dB,功率最大降幅约为 13.9%。

关键词: 轴流风扇;环状叶轮;气动性能;气动噪声

中图分类号: TH432.1;TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509017 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0177-10

Study on the Aerodynamic Performance and Noise of Annular Impeller Axial Fans

WU Xianpeng¹, WEI Lai², LUO Dan², KANG Ruixiang², LIU Xiaomin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Guangdong

Midea Environmental Electrical Appliance Manufacturing Co., Ltd., Guangdong, Zhongshan 528425, China)

Abstract: To enhance the aerodynamic performance of axial fans and reduce their operational noise, inspired by the structure of annular propellers, this study proposes a novel annular impeller design for axial impellers used in fans, along with its parameter design process and methodology. By extracting the basic parameters of the prototype impeller profile and adjusting the basic shape of the impeller, the blade section is geometrically reconstructed. The design of the annular impeller is completed by smoothly connecting the vortex ring structure at the blade tip. The influence mechanism of the annular impeller on the fan's aerodynamic performance and noise is studied using numerical simulation methods. The effectiveness of the design of the annular impeller axial fan is validated through experimental testing methods. Simulation results

收稿日期: 2025-03-13。 作者简介: 吴宪鹏(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: 2025-06-20

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250619.1539.004>

show that the use of the annular impeller improves the pressure distribution on the blade surface and the uniformity of the overall flow field velocity distribution, thereby enhancing the effective air delivery distance of the fan. Moreover, the vortex ring structure effectively suppresses the strength and diffusion range of the blade tip shedding vortex, reducing the turbulence intensity in the main flow area. Experimental results indicate that, compared to the prototype axial fan, under three operating conditions at the same rotational speed, the maximum airflow speed of the annular impeller fan increases while noise and power consumption decrease. Under the same noise condition, the maximum airflow speed of the annular impeller fan increases by $20.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, with power consumption remaining relatively unchanged. When maintaining the same maximum airflow speed, the noise level of the annular impeller fan is reduced by up to 1.5 dB, with a maximum reduction in power consumption of approximately 13.9%.

Keywords: axial fan; annular impeller; aerodynamic performance; aerodynamic noise

轴流风机在空调、风扇等通风换气装置中具有广泛应用。随着人们环保意识的增强以及对生活品质要求的提高,传统家用电器产品性能提升和噪声控制等问题的解决已经迫在眉睫。叶轮作为轴流风机中的核心动力部件,同时也是主要的噪声源。本文尝试开发新型的轴流风机叶片构型,以达到风机增效降噪的目的。

轴流风机叶轮优化的常规方向多是针对叶片安装角^[1]、叶片数^[2]、叶片进口角和出口角^[3]、叶片厚度^[4]、轮毂比^[5]等叶轮基本参数。在此基础上,叶片形状优化是进一步提升风机性能的关键。目前国内对于叶片形状优化的研究主要有叶片结构优化和叶片仿生优化^[6]两方面,叶片结构优化依赖于研究人员的经验和优化算法,对风机叶片型线及其结构控制参数进行优化,最终实现风机气动性能提升和降噪效果。叶片仿生优化则是基于仿生学,从自然界中具有减阻降噪的生物组织或功能结构获取灵感,如基于鱼类、鸟类、植物叶片等生物体的外形及其运动特征结构进行风机叶片重构,在风机性能得到提升的同时,还能有效控制风机噪声。

在叶片结构优化设计方面,欧阳华等^[7]通过比较具有相同几何参数的径向、周向前弯和周向后弯叶片的声学性能和气流分布,认为在相同弯曲角下,周向前弯技术远优于周向后弯技术。Chanand^[8]和Tseo^[9]采用多孔材料制作风扇叶片,成功使风扇噪声降低3~5 dB,证实了叶片穿孔降噪的可行性。宫武旗等^[10]针对特定空调外机的风机叶片尾缘锯齿进行了深入研究,证明了形状与尾迹宽度相匹配的锯齿在降噪方面更出色。Mistry等^[11]探讨了二级叶片间距与轴流风机性能之间的关系,发现当叶片间距等于叶片弦长的0.9倍时,风机的性能达到

最佳状态。李春曦等^[12]在轴流叶片尾缘处安装高度为0.5%弦长的Gurney襟翼,结果表明,襟翼的安装使设计工况下的风机全压和风机效率均有提高,但也导致噪声的增大。雋智辉^[13]重点研究了叶尖小翼的不同参数对轴流风机叶顶间隙流场的影响。认为小翼的单个参数对流场的影响较为有限,而各参数之间存在相互作用和耦合,共同影响叶轮的性能。胡小文等^[14]通过在叶片顶部开设沟槽,有效减弱了叶顶泄漏涡的强度,从而降低了噪声。

在叶片仿生优化设计方面,早在20世纪30年代,Graham^[15]就发现了鸢形目鸟类能够实现静音飞行以接近猎物,这得益于其翅膀独特的前缘“锯齿”、后缘“波浪”,以及翅膀表面的不平滑结构。吴立明等^[16]将海鸥、雀鹰、长耳鸢、水鸭4种仿生翼型的动态失速特征进行对比,给出了对应翼型的优缺点及适用环境。Tian等^[17]将燕子翅膀特征应用于NACA4412翼型,改进后的翼型在升力系数和升阻比方面相较于原始翼型实现了显著提升。黄琪琪等^[18]将仿生锯齿尾缘应用于以NACA65-010叶型为原型设计出的小型轴流风机上,发现仿生锯齿尾缘相比传统锯齿尾缘有更好的降噪效果。受长耳鸢翅膀前缘非光滑特征启发,孙少明等^[19]设计了一种具有非光滑前缘结构的仿生叶片,实验结果表明,在500~2 000 Hz的频率范围内,轴流风机最大噪声降幅约为2.52%。王雷等^[20]针对某工业用通风机,通过逆向工程提取40%截面处的长耳鸢翼型截面进行厚度方向的修型,在叶片尾缘处耦合了正弦型锯齿结构,使风机最大风量提升了4.69%,噪声下降了2 dB。

从以上研究结果可以看出,尽管叶片结构优化和叶片仿生设计在一定程度上提升了风机的气动性

能,也会降低风机的气动噪声,但是由于叶片基本构型的限制导致结构优化逐渐趋于瓶颈,仿生设计在风机优化中的潜力无法得到有效的发挥,风机性能难以实现进一步地提升。到目前为止,仍然没有提出新型的适用于轴流风机的叶片和叶轮的设计构型。

近年来,Sharrow Marine 公司^[21]针对船舶推进系统提出了一种创新的环形螺旋桨设计,通过采用这种环形螺旋桨结构,显著提升了船舶的推进效率,降低了螺旋桨的工作噪声。基于此,本文借鉴环形螺旋桨的设计理念,将涡环结构应用于轴流风扇叶轮叶顶处,设计了一种具有新颖结构的环状叶轮,以达到进一步提高轴流风扇的气动性能并降低风扇运行过程中产生的气动噪声的目的。针对设计的环状叶轮,采用数值计算方法研究了环状叶轮对轴流风扇气动性能和噪声的影响,揭示了叶轮环状结构的增风和降噪机理。最后,通过实验测量验证了环状叶轮创新设计对于提升轴流风扇气动性能和降低噪声的有效性。

1 数值计算方法

1.1 数值模型及网格划分

选取某循环扇叶轮作为研究对象,循环扇主要部件包括扇头、叶轮等,物理模型如图 1 所示。

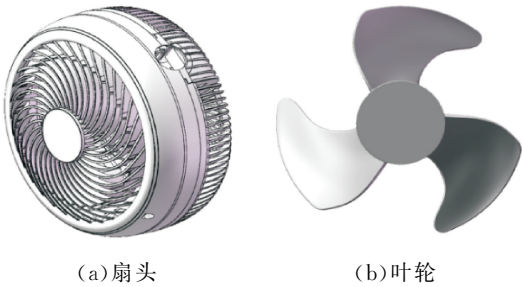


图 1 循环扇物理模型

Fig. 1 Physical model of the circulation fan

利用 Solidworks 软件根据实际尺寸对流体区域进行三维建模,如图 2 所示。数值建模过程中忽略对流动影响小的部件和结构,例如风扇支柱和底座等。保留进口网罩、出口网罩、叶轮等关键结构并进行简化处理,流体区域共包括进口区、叶轮区、出口区 3 个部分。为了更准确地模拟实际工作环境,确保模拟过程中进口及出口处流动的均匀性,以叶轮外径 D 为基准,对风扇的进、出口进行了延伸处理。进口延伸 5 倍叶轮外径,出口延伸 10 倍叶轮外径。

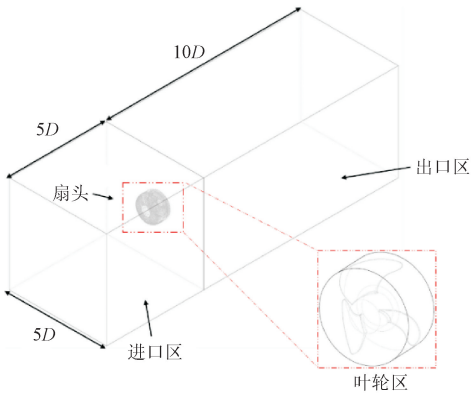


图 2 风扇计算三维模型

Fig. 2 Computation domains for the fan

采用商用软件 ANSYS Mesh 进行计算域网格划分。考虑到模型结构的复杂程度,计算域均采用了非结构化网格划分。为保证数值模拟的准确性,首先对计算模型进行网格无关性验证,如图 3 所示。当总网格数超过 3 000 万时,风扇最大风速变化量小于 1.0%,这表明如果再继续增加网格数,数值计算结果基本保持不变。因此,本文最终选定数值计算模型的总网格数约为 3 252 万,其中静止域网格数约为 2 526 万,旋转域网格数约为 726 万。

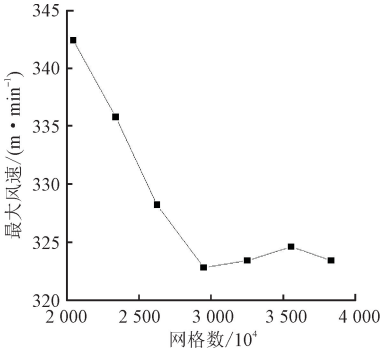


图 3 网格无关性验证

Fig. 3 Mesh independence verification

1.2 流场计算

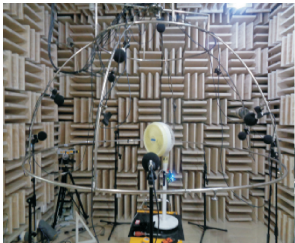
采用商用计算流体力学软件 ANSYS Fluent 对轴流风扇气动性能及其内部流场进行数值计算。轴流风扇内流动控制方程为雷诺时均三维黏性不可压缩 Navier-Stokes 方程。湍流模型的选取参考文献[22-25]推荐的 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型,该模型能够准确地模拟轴流风机内旋转流动、强逆压梯度下的边界层流动、流动分离和二次流。近壁面函数采用 Standard Wall 模型,压力速度耦合采用 Coupled 算法。梯度求解采用 Least Squares Cell Based 方法,动量方程、能量方程和湍流耗散方程中

对流项的离散均采用二阶迎风格式。相比一阶迎风格式,采用二阶迎风格式离散能够获得更高的数值计算精度。进出口均给定压力边界条件,其中进口总压设置为 101 325 Pa,出口静压也设置为 101 325 Pa。叶轮区域为旋转域,采用多参考系模型(MRF)运动参考系模型,旋转速度按工作转速设置。除叶轮区域外,其他计算区域均设置为静止域。以出口风量为监控变量,收敛残差设置为 10^{-4} 。

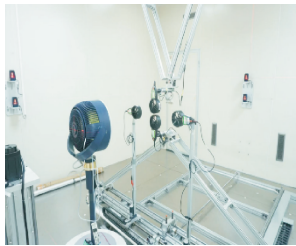
2 实验测试

风扇气动性能及噪声测试场景如图 4 所示,风扇气动性能的核心指标为最大风速,即距离风扇叶轮中心位置 3 倍叶轮直径处的风速最大值。气动性能测试依据 GB/T13380-2018《交流电风扇和调速器》规定进行实验设置。气动性能测试系统型号为 ODIN-AF-4W01,主要包括风室、4 个叶轮式风速表(测量精度为 $(6.0 \pm 1.5\%) \text{ m/min}$)、测试装置滑轨定位机构以及定位风速表的激光束等。测试系统的转速测试误差控制在 5 r/min 以内,功率测试误差小于 0.5 W。测试对象为风扇,其内部结构与数值建模保持一致,便于测试结果与数值计算结果进行对比。测试过程中,将被试风扇叶轮中心调整至距离地面 1.2 m,距离前、左、右墙面至少大于 1.8 m,距离后墙面至少大于 1.2 m 处。风扇送风一侧除风速表及其支架外,其他物品均不允许放置,风速表的叶片平面与被试风扇的叶片平面平行,这两个平行平面之间的距离为叶轮直径的 3 倍。测试结果由数据采集系统获取。

风扇噪声测试依据 GB/T13380-2018《交流电风扇和调速器》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 $\pm 0.2 \text{ dB}$,噪声测试系统包括前置放大器、声压传感器、数据采集系统及噪声分析软件等,测试过程中采用半球包络面,将被试风扇置于半消声室中间地面上或品架上,风扇电动机轴线呈水平,4 个麦克风距离风扇摇头轴心均为 1 m。噪声数据经信号软件分析处理后进行人工读取。



(a)噪声测试



(b)气动性能测试

图 4 风扇实验测试场景

Fig. 4 Fan experimental test scenario

表 1 给出了原型风扇在工作转速下最大风速的数值计算与实验测试的结果对比,从表 1 中可以看出,在风扇工作转速下,数值结果与实验结果的绝对误差随转速增大而增大。在最低转速为 $1\,670 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 工况时,原型风扇数值计算得到的最大风速为 $302.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,实验测试最大风速为 $292.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。此时两者相对误差最小,仅为 3.4%;在最高转速为 $1\,870 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 工况下,原型风扇数值计算得到的最大风速为 $346.8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,实验结果为 $325.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,相对误差增大至 6.6%。但总体来看,针对原型风扇的数值计算结果和实验测试结果均随着转速的增大而增加,变化趋势是相同的。考虑到数值计算模型的复杂性,在风扇全工况范围内,即使是相对误差的最大值也仍能满足实际工程设计的要求,因此认为本文针对原型轴流风扇和环状叶轮风扇的性能分析所采用的数值计算方法和计算模型是有效的。

表 1 原型风扇性能数值计算结果与实验结果对比
Table 1 Comparison of the numerical results on the performance of the prototype fan with the experimental results

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	计算风速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	实测风速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	风速误差/ %
1 670	302.4	292.4	3.4
1 770	323.4	311.5	3.8
1 870	346.8	325.4	6.6

3 环状叶轮设计及应用

3.1 环状叶轮设计

环形螺旋桨的外形如图 5 所示,其主体由桨叶和轮毂组成。每个桨叶均构成一个封闭的环状结构,单个桨叶可进一步细分为前段、后段和过渡段。借鉴螺旋桨环状结构特性,将螺旋桨桨叶顶部的环状几何特征扩展应用到轴流风扇环状叶轮的设计中,环状叶轮从结构上同样可分为前置叶片(前叶)、

后置叶片(后叶)以及叶顶的桥接结构(涡环)。环状叶轮设计中不能直接采用螺旋桨的结构设计方法,这主要是因为螺旋桨具有较大轴向尺寸,而轴流风扇轴向空间是受限的。这正是环状叶轮设计的难点,也是本文开展轴流风扇环状叶轮设计的原因。

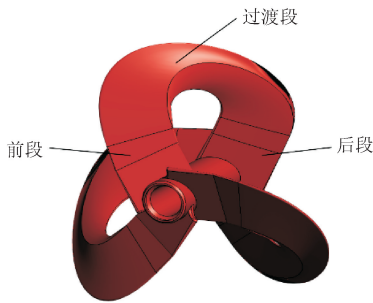


图 5 环形螺旋桨的外形
Fig. 5 Shape of Annular propeller

图 6 给出了由常规轴流叶轮到环状叶轮设计的具体流程。在设计过程中,选取具有较优气动性能的轴流叶轮作为原型叶轮,如图 6(a)所示,本文选取的原型叶轮的叶轮外径为 180 mm,轮毂比为 1/3,叶片数为 3。采用同心环面分割原型叶轮并提取各分割截面基元级叶型的弦长、安装角、厚度等叶型参数。对于环状叶轮的单个叶片,定义沿旋转方向靠前的叶片为前叶,另一叶片为后叶。结合提取的叶型参数进行前叶和后叶设计,设计过程中适当调整基元级叶型位置以保证前叶和后叶完全错开,同时

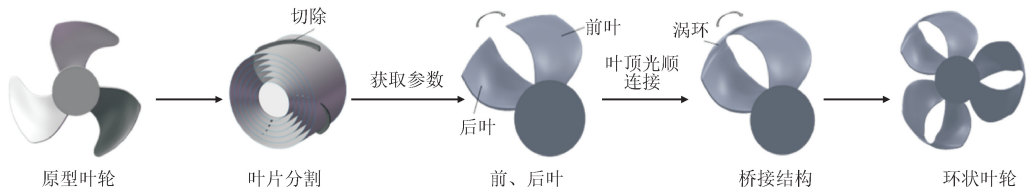


图 6 环状叶轮设计流程
Fig. 6 Annular impeller design process

如图 7(a)和 7(b)所示,将同半径的叶型截面下,叶轮中心与前、后叶基元级叶型中心连线的夹角 α 定义为周向角,周向角用来确定前、后叶沿圆周方向的相对位置。在轴向方向上,将叶型截面展开,对于展开后的叶型,以后叶叶型弦长中心所处位置为起点,与同一截面上对应的前叶叶型弦长中心之间的轴向距离定义为轴距 L 。轴距用来确定前、后叶沿轴向方向的相对位置。由于周向角和轴距均为基元级叶型衍生出的结构参数,因此每个叶型截面均对应一个周向角和一个轴距,本文设计的环状叶轮共有 6 个叶型截面,故对应 6 个相关参数,每个参数

控制前叶和后叶外径以预留足够的顶部涡环的设计空间。图 6(c)是由原型叶轮重新建模得到的环状叶轮单个叶片的前叶及后叶,组成它们的各截面基元级叶型除弦长和位置外,其余参数均与原型叶轮相同。对于单个叶片的各基元级叶型,最先接触到来流的部分为前缘,所有截面的前缘连接起来形成前缘积叠线;同理,后缘连接起来形成后缘积叠线。环状叶轮的前叶和后叶各有两条前缘积叠线和两条后缘积叠线。将前叶的前缘线与后叶的前缘线相互连接,前叶的后缘线与后叶的后缘线也相互连接。设计中确保连接线的光顺性,使得前叶的压力面能够平滑过渡到后叶区域,变成后叶的吸力面;同时使得前叶的吸力面平滑过渡到后叶的压力面。环状叶轮最终结构如图 6(e)所示,从图 6 中可以看出,叶轮的每个叶片均形成了一个封闭的环状结构。

原型叶轮的几何参数包括叶片数、轮毂比、叶型参数等。上述参数的定义和表述同样也适用于环状叶轮。由于两叶轮的外径相同且装配在相同网罩内,因此其叶顶间隙也相同,均为 10 mm。为了更精确地定义环状叶轮的外部几何特征,叶轮外径 D 被进一步细分为扇叶外径 D_1 和涡环高度 d 两部分,如图 7(a)所示。其中,叶轮外径 D 是扇叶外径与涡环高度之和。在此基础上,考虑到环状叶轮叶片独特的封闭结构,仅用常规参数无法清晰的表达出前、后叶的相对位置关系,因此在设计中引入了周向角和轴距的概念。

均是基于模拟和实验测试结果调整得到的最优值,具体参数详见表 2。

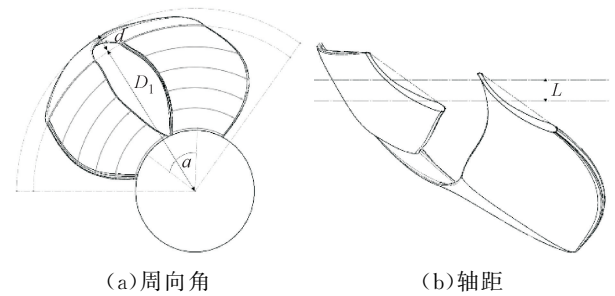


图 7 环状叶轮特殊参数

Fig. 7 Special parameters for annular impellers

表 2 环状叶轮结构参数

Table 2 Structure parameters of annular impeller

参数	数值
叶片数	3
扇叶外径 D_1 /mm	162
涡环高度 d /mm	18
叶轮外径 D /mm	180
轮毂比 J	1/3
各截面周向角 $\alpha/(^\circ)$ (半径由小到大)	56,65,66,63,54,40
各截面轴距 L /mm (半径由小到大)	2,5,10,17,27,41

3.2 数值计算结果及分析

环状叶轮和原型叶轮在 $1\,770\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况条件下的数值计算结果如表 3 所示。采用环状叶轮后风扇的最大风速有所提升,提升幅度约为 3.7%。

表 3 $1\,770\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速条件下的数值计算结果
Table 3 Numerical results when the rotating speed is $1\,770\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

叶轮类型	转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	最大风速/ $(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$
原型	1 770	323.4
环状	1 770	335.6

选取两种叶轮叶片压力面和吸力面的压力云图进行分析,两叶轮表面的压力分布如图 8 所示。轴流叶轮的压力面与吸力面之间的压差是叶轮产生做功能力的关键因素,因此叶轮高压差区域(压差大于等于 40 Pa)所占面积越大,叶轮的做功能力越强。定义高压差区域面积为有效做功面积,从图 8 中可以观察到,原型叶轮各叶片压力面与吸力面的压力分布相似,其中压力面的压力峰值区域集中于叶片上半部分,有效做功面积约占单个叶片压力面总面积的 $1/3(1\,600\text{ mm}^2)$,原型叶轮叶片表面的高压区和低压区之间的过渡区域存在较大的压力梯度,这使得气流流动时易发生大角度偏转形成涡流。涡流的存在不仅会消耗流体的动能,还会导致流场的不均匀性,从而进一步影响叶轮的整体气动性能。

相比之下,环状叶轮的压力分布更为均匀,后叶的压力峰值区域面积显著大于前叶,几乎覆盖整个后叶叶片。相比原型叶轮,环状叶轮叶片的最高压区总面积有所增大,这使得压力面与吸力面之间的压差进一步增大,其有效做功面积约占单个叶片压力面总面积的 $40\%(2\,220\text{ mm}^2)$,说明环状叶轮的做功能力更强。另一方面,环状叶轮的叶顶环状结

构通过增加叶片的环向连通性,使得高、低压过渡更加平缓。这种平缓的压力变化有助于减少流动分离和涡流的形成,降低能量损失,提高流动效率,最终达成了提升叶轮气动性能的效果。

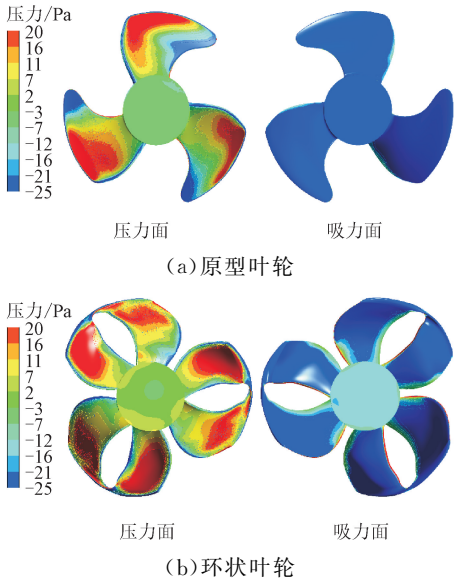


图 8 两种叶轮表面静压分布对比

Fig. 8 Comparison of the static pressure distribution on the surface of the two impellers

图 9 对比了装有两种叶轮的风扇中截面速度分布云图。由图 9 可见,原型叶轮的聚风能力较差,其出口附近(红色框体内区域)的气流难以集中,高速气流在速度场中杂乱分布,而环状叶轮出口气流被汇聚到叶轮中线位置,在红色框体内部区域形成了明显的高速气流带。另一方面,以叶轮中心所在位置为原点,环状叶轮风扇有效送风距离(风速大于 $324.0\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$)达到 910 mm ,相比原型风扇提升了 100 mm 。这主要是因为气流在流经环状叶轮的过程中分别被叶轮的前叶片和后叶片加速,从而有效提高了气流速度及送风距离。

图 10 给出了叶轮区域的速度云图,在环状叶轮叶片附近,高速气流不仅集中,而且覆盖的范围更广,这表明环状叶轮在工作时能更有效地引导并加速气流,从而提高整机的工作效率。另一方面,从结构上来看,相比于原型叶轮,环状叶轮从结构上保证了相邻叶片之间沿周向的连通性,在叶轮叶顶位置处,相邻的高速气流区之间会形成环状气流带,有效避免了流体在局部区域堆积或产生涡流分离,低速气流会受到高速气流的牵引和加速,从而使得气流分布更均匀,这对于提高叶轮流动效率和控制叶轮气动噪声是有利的。

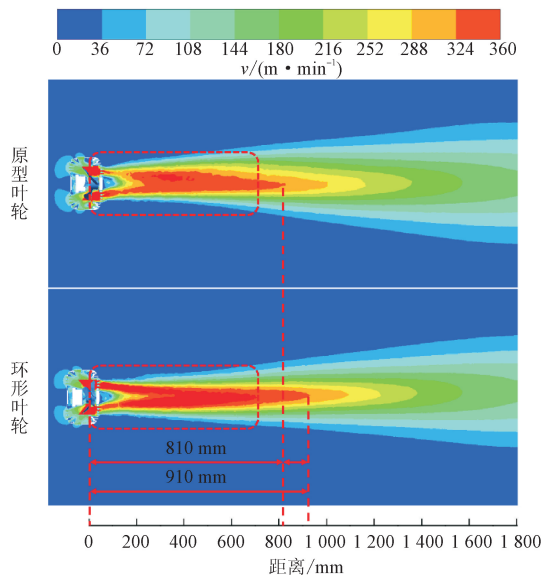


图 9 风扇中 2 种叶轮截面气流速度分布对比
Fig. 9 Comparison of cross-sectional airflow velocity distribution in a fan

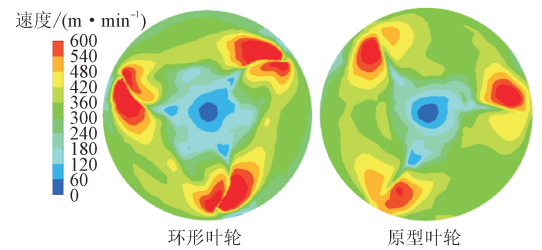


图 10 叶轮区域气流速度分布对比
Fig. 10 Comparison of airflow velocity distribution in the impeller area

图 11 展示了距离叶轮中心 0.54 m 处的气流速度分布,其进一步印证了环状叶轮所加速的气流具有更好的均匀性,从中心到外侧,环状叶轮所加速气流的风速呈现明显的梯度变化,与原型叶轮相比,环状叶轮能够提供更舒适的风感体验。此外,环状叶轮展现出更广的速度分布范围,尤其在截面中心区域,高速气流占据了更大的面积,这也表明了其优秀的聚风能力。

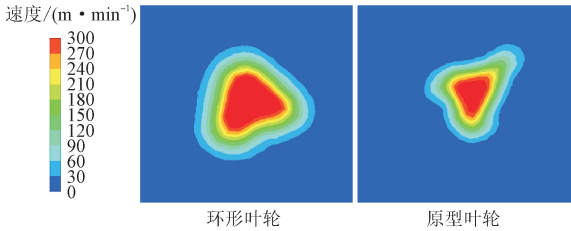


图 11 距离叶轮中心 0.54 m 处截面的气流速度分布对比
Fig. 11 Comparison of airflow velocity distribution at a cross-section 0.54 m from the center of the impeller

涡量表征流体的旋转运动强度与方向,其动态演化会产生压力脉动。涡声理论表明,这种压力脉动在流体中传播即形成声波,成为气动噪声的主要来源。采用第二不变量 $Q^{[26]}$ 的等值面来比较原型叶轮和环状叶轮流场中涡量分布及结构,如图 12、13 所示。从图 12、13 中给出的叶轮及叶顶处的涡量分布可以看出,原型叶轮在工作过程中叶顶处形成大量的脱落涡,这是由于叶轮叶尖区域吸力面和压力面存在压差,导致部分气流翻过叶顶,并与叶顶处的主流、二次流等相互作用而形成的叶顶泄漏涡。叶顶泄漏涡沿着叶片弦向吸附叶片吸力面的低能流体,其范围和强度不断发展壮大。最终脱落对主流造成阻塞及扰动,并引起较强的涡流噪声。环状叶轮叶顶处同样存在脱落涡,但叶片顶部的涡环结构将脱落涡分割成两部分,减小了脱落涡的强度和发展影响范围,从而有效降低了气流流动损失以及涡流噪声的产生。

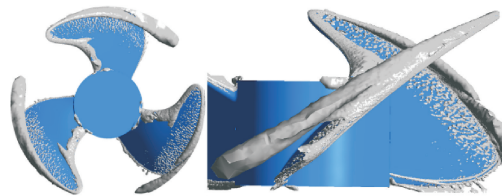


图 12 原型叶轮涡量分布
Fig. 12 Vorticity distribution of prototype impeller

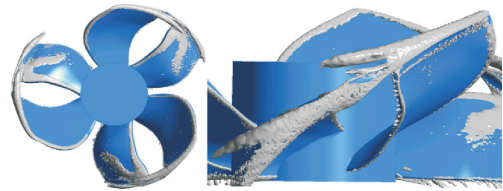


图 13 环状叶轮涡量分布
Fig. 13 Vorticity distribution of annular impeller

轴流风扇内部流场属于湍流运动,湍动能作为表征湍流脉动动能的关键物理量,反映了湍流流动中脉动能量的集中程度与湍流强度。图 14 截取了风扇中截面处的湍动能云图。从图 14 中可以看出,原型叶轮叶片附近、叶尖区域以及出口格栅附近均存在高湍动能区(湍动能大于 $4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$),这表明在原型叶轮旋转过程中,叶轮及其近场气流运动状态较为紊乱,导致大量气流能量出现耗散。对于环状叶轮,叶片近壁及叶轮出口处的湍流强度有所减弱,在叶尖处几乎观察不到高湍动能区,流动状态得到明显改善。后处理结果显示,旋转域的平均湍动能由 $3.05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 下降至 $1.84 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,下降幅度约

为 40%；从噪声产生机制看，湍流流场中的噪声本质上源于涡旋运动引发的压力脉动。基于涡声理论分析，湍动能越高，意味着湍流涡旋的生成、发展及破碎过程越剧烈，则噪声的强度越大。因此，湍动能的降低也是环状叶轮风扇气动性能提升和噪声下降的重要原因之一。

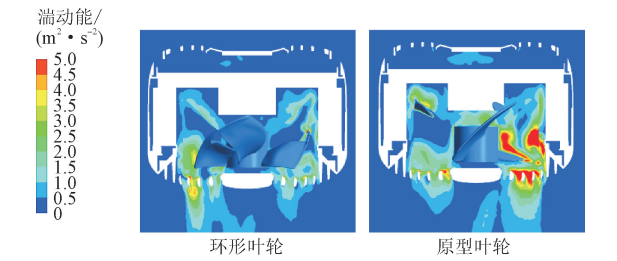


图 14 风扇中截面的湍动能分布

Fig. 14 Turbulent kinetic energy distribution in a section in a fan

3.3 带环状叶轮的风扇性能测试

将原型叶轮和设计的环状叶轮进行模型加工，通常，提升风扇的最大风速需提高转速，但这会导致功率与噪声同步升高。风扇能耗 E 与功率 P 和时间 t 呈正相关，功率提升必然导致能耗增加，能耗表达式如下

$$E = Pt \tag{1}$$

在此背景下，若能在保持相同风速的条件下实现更低的功率消耗与噪声水平，或在功率恒定的情况下达成更高的风速输出并抑制噪声，则表明风扇性能得到了显著优化。

带有两种叶轮的风扇在设计工况 ($1\,770\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)、高转速工况 ($1\,870\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 及低转速工况 ($1\,670\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 下的实验结果对比如表 4 所示，3 种工况下，相比原型叶轮风扇，带有环状叶轮的风扇最大风速均有所提高，噪声及功率均下降。

表 4 3 种工况下风扇的性能

Table 4 Performance of the fan under three operating conditions

转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	叶轮类型	噪声/ dB	最大风速/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	功率/ W
1 670	原型	54.6	292.4	12.7
	环状	53.5	302.1	11.5
1 770	原型	56.2	311.5	14.4
	环状	55.3	320.7	13.0
1 870	原型	58.0	325.4	16.4
	环状	56.8	338.0	14.9

为了更清晰地对比两种叶轮的气动性能及其降噪效果，以原型风扇设计工况工作转速下的最大风速和噪声为基准，实验时通过调节转速设定最大风速相同时和噪声相同时的两种测试工况。在最大风速相同工况条件下，采用原型叶轮与环状叶轮的风扇实验结果对比如表 5 所示。从表 5 可知，当最大风速相同时，环状叶轮风扇的转速较原型叶轮风扇下降了 $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，整机噪声降低了 1.5 dB，功率减少了 2 W。

表 5 同最大风速工况下风扇的性能

Table 5 Performance of the fan at the same maximum wind speed

叶轮类型	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	噪声/ dB	最大风速/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	功率/W
原型	1 770	56.2	312.0	14.4
环状	1 730	54.7	312.0	12.4

当保持噪声不变时，采用原型叶轮和环状叶轮的两种风扇的气动性能和噪声的实验测试结果在表 6 中列出。可以发现，在相同噪声条件下，采用环状叶轮的风扇转速较原型叶轮的风扇转速提高了 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ，整机最大风速提升了 $20\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，但风扇的功率水平基本保持不变。

表 6 同噪声工况下风扇的性能

Table 6 Performance of the fan under the same noise condition

叶轮类型	转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	噪声/ dB	最大风速/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	功率/W
原型	1 770	56.2	311.5	14.4
环状	1 830	56.2	330.1	14.2

4 结 论

本文针对设计的环状叶轮，研究了环状叶轮对风扇气动性能和噪声的影响，并进行了实验验证，旨在为新型环状轴流叶轮的设计和优化提供理论和技术支持，得到的主要结论如下。

(1) 与原型叶轮相比，环状叶轮有效改善了风叶表面的压力分布状态，提升了叶轮的做功能力；在相同工况条件下采用环状叶轮的轴流风扇内速度分布更均匀，有效增大了风扇的送风距离。

(2) 对轴流风扇叶轮采用涡环设计，环状叶轮叶顶处的脱落涡强度及其扩散范围得到了有效抑制，使得风扇流场内的湍动能强度下降，有利于降低风

扇的涡流噪声。

(3)在同转速的3种工况下,环状叶轮轴流风扇性能均有明显改善;在相同噪声工况条件下,环状叶轮轴流风扇的最大风速提升了 $20.0\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$;在相同的最大风速条件下,环状叶轮风扇的噪声降低了1.5 dB,功率降幅达13.9%。

参考文献:

- [1] 褚双磊. 用于轴流风机的轴流叶轮气动性能试验研究[J]. 流体机械, 2014, 42(4): 6-10.
CHU Shuanglei. Experimental research on the axial-flow impeller aerodynamic performance of the axial-flow fan [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(4): 6-10.
- [2] 姜晨龙, 朱兴业. 轴流风机结构优化设计及内部流动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 707-713.
JIANG Chenlong, ZHU Xingye. Structural optimization design and internal flow characteristics analysis of axial flow fan [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(7): 707-713.
- [3] 鲁芬. 轴流换气扇翼型优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [4] 姚豪. 轴流风机叶轮的三元流优化设计软件[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [5] 郑萌, 赵竞全, 朱磊. 基于BP神经网络和遗传算法对再循环风扇性能参数的确定[J]. 飞机设计, 2014, 34(5): 7-10.
ZHENG Meng, ZHAO Jingquan, ZHU Lei. The determination of performance parameters of the recirculation fan based on BP neural network and genetic arithmetic [J]. Aircraft Design, 2014, 34(5): 7-10.
- [6] 张昕. 叶片形状对轴流风机性能影响研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [7] 欧阳华, 李杨, 杜朝辉, 等. 周向弯曲方向对弯掠叶片气动-声学性能影响的实验[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 668-674.
OUYANG Hua, LI Yang, DU Zhaohui, et al. Experimental study on aerodynamic and aero-acoustic performance of low pressure axial flow fan with circumferential skewed blades [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 668-674.
- [8] CHANAUD R C. Noise reduction in propeller fans using porous blades at free-flow conditions [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 51(1A): 15-18.
- [9] TSEO G G. Noise reduction of a miniature fan by using blade treatment [J]. Journal of Sound and Vibration, 1974, 32(2): 153-158.

- [10] 宫武旗, 王芳, 田镇龙, 等. 叶片锯齿尾缘对降低空调室外机气动噪声影响的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(10): 1681-1684.
GONG Wuqi, WANG Fang, TIAN Zhenlong, et al. Experimental study of the effect of serrated blade trailing edge on axial fan noise reduction in an outdoor air conditioner [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(10): 1681-1684.
- [11] MISTRY C, PRADEEP A. Effect of variation in axial spacing and rotor speed combinations on the performance of a high aspect ratio contra-rotating axial fan stage [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2013, 227(2): 138-146.
- [12] 李春曦, 张超, 张锐星, 等. Gurney襟翼对动叶可调轴流风机性能的影响[J]. 动力工程学报, 2020, 40(5): 404-411.
LI Chunxi, ZHANG Chao, ZHANG Ruixing, et al. Effects of gurney flap on the performance of a variable pitch axial flow fan [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(5): 404-411.
- [13] 雒智辉. 叶尖小翼对轴流风机气动性能的影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] 胡小文, 李景银, 闻苏平, 等. 轴流风扇叶顶沟槽对间隙流动控制机理研究[J]. 流体机械, 2021, 49(8): 57-63.
HU Xiaowen, LI Jingyin, WEN Suping, et al. Investigation of blade tip grooving effect on tip leakage vortex control mechanism of an axial fan [J]. Fluid Machinery, 2021, 49(8): 57-63.
- [15] GRAHAM R R. The silent flight of owls [J]. The Journal of the Royal Aeronautical Society, 1934, 38(286): 837-843.
- [16] 吴立明, 王雷, 刘小民, 等. 仿海鸥翼型动静态气动特性的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 88-97.
WU Liming, WANG Lei, LIU Xiaomin, et al. Numerical simulation on the static and dynamic aerodynamic characteristics of bionic seagull airfoil [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 88-97.
- [17] TIAN Weijun, LIU Fangyuan, CONG Qian, et al. Study on aerodynamic performance of the bionic airfoil based on the swallow's wing [J]. Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 2013, 13(6): 1340022.
- [18] 黄琪琪, 陈二云, 杨爱玲, 等. 倾斜锯齿尾缘轴流风机降噪的实验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(9): 735-741.

- HUANG Qiqi, CHEN Eryun, YANG Ailing, et al. Experimental study on noise reduction of an axial flow fan with inclined serrated trailing edge [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(9): 735-741.
- [19] 孙少明, 徐成宇, 任露泉, 等. 轴流风机仿生叶片降噪试验研究及机理分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(2): 382-387.
- SUN Shaoming, XU Chengyu, REN Luquan, et al. Experimental research on noise reduction of bionic axial fan blade and mechanism analysis [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39(2): 382-387.
- [20] 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.
- [21] 叶礼裕, 王超, 孙聪, 等. 环形螺旋桨几何形状的数学表达方法 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(3): 224-233.
- YE Liyu, WANG Chao, SUN Cong, et al. Mathematical expression method for geometric shape of toroidal propeller [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(3): 224-233.
- [22] 黄友根, 刘辉, 王军, 等. 基于模糊集理论轴流风机多工况优化研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(5): 1000-1004.
- HUANG Yougen, LIU Hui, WANG Jun, et al. Analysis of multi-points optimization design of axial flow fan based on the fuzzy set theory [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(5): 1000-1004.
- [23] 唐俊, 王军, 隽智辉, 等. 正弦锯齿尾缘对轴流风机尾迹及气动性能的影响 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(10): 2145-2150.
- TANG Jun, WANG Jun, JUAN Zhihui, et al. The influence of sinusoidal serrated trailing edge on the wake and aerodynamic performance of axial fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(10): 2145-2150.
- [24] YE Xuemin, LI Pengmin, LI Chunxi, et al. Numerical investigation of blade tip grooving effect on performance and dynamics of an axial flow fan [J]. Energy, 2015, 82: 556-569.
- [25] 胡盈彬, 刘小民, 覃万翔, 等. 仿生尾缘襟翼设计及其对轴流风机气动性能的影响研究 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 143-152.
- HU Yingbin, LIU Xiaomin, QIN Wanxiang, et al. Bionic design of blade trailing edge flap and its influence on the aerodynamic performance of an axial Fans [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 143-152.
- [26] HUNT J C R, WRAY A A, MOIN P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows [C]//Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program. Palo Alto, PA, USA: Stanford University, 1988: 193-208.

(编辑 武红江)