

仿鸮翼前网罩对环状叶轮循环扇性能的影响

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: 为提高循环扇气动性能并降低其工作噪声,对循环扇前网罩进行了仿长耳鸮翼型设计。通过逆向工程方法提取了长耳鸮翅膀 40% 翼展截面处的翼型型线,结合加工工艺要求设计了循环扇的仿生前网罩。采用数值计算方法研究了仿长耳鸮翼型前网罩对循环扇气动性能和噪声的影响机制,并通过实验测试方法验证了带有仿长耳鸮翼型设计前网罩的循环扇性能。仿真结果表明:相比原型风扇,采用仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇有效吹风距离更远,吹出的气流更集中,且能够提供更为均匀的风场分布;前网罩结构的仿生设计更符合经环状叶轮加速后气流的流动特性,减小了叶顶间隙及气流在格栅流道间的流动分离,从而有效抑制了涡的形成与脱落,循环扇内流动的湍动能强度大幅降低。实验结果表明:采用仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇相比于原型循环扇在工作转速下噪声降低了 1.6 dB,最大风速提升了 11.6%,功率基本保持不变;在同噪声工况下,带仿鸮翼前网罩的循环扇的最大风速提升了 18.1%,功率略有增大;在同风速工况下,带仿鸮翼前网罩的循环扇的噪声降低了 4.2 dB,功率降幅达到 24.6%。

关键词: 循环扇;仿生设计;前网罩;环状叶轮;气动性能;噪声

中图分类号: TH432.1;TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202601013 **文章编号:** 0253-987X(2026)01-0127-10

Influence of Bionic Front Grille Inspired by Long-Eared Owl Wing on Performance of Circulation Fan with Annular Impeller

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

Abstract: To improve the aerodynamic performance and reduce the operating noise of circulating fans, a bionic front grille inspired by the wing profile of the long-eared owl is designed. The airfoil profile at the 40% wingspan cross-section of the long-eared owl's wing is extracted using reverse engineering methods, and a bionic front grille for the circulating fan is designed considering manufacturing requirements. The influence mechanism of the bionic long-eared owl-inspired front grille on the aerodynamic performance and noise of the circulating fan is investigated using numerical simulation methods. The performance of the circulating fan equipped with the bionic grille is validated through experimental testing. Simulation results indicate that, compared to the prototype fan, the circulating fan with the bionic long-eared owl-inspired front grille achieves a

收稿日期: 2025-02-15。 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: 2025-07-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250709.1823.005>

longer effective airflow distance, more concentrated airflow, and a more uniform wind field distribution. The bionic design of the front grille structure better aligns with the flow characteristics of the airflow accelerated by the annular impeller, reducing tip clearance and flow separation between grille channels, thereby effectively suppressing vortex formation and shedding. The turbulent kinetic energy intensity within the circulating fan is significantly reduced. Experimental results show that, compared to the prototype fan, the circulating fan with the bionic long-eared owl wing-inspired front grille reduces noise by 1.6 dB at operating speed, increases maximum wind speed by 11.6%, and maintains nearly unchanged power consumption. Under identical noise conditions, the maximum wind speed increases by 18.1% with a slight rise in power consumption. Under identical wind speed conditions, noise is reduced by 4.2 dB and power consumption decreases by 24.6%.

Keywords: circulation fan; bionic design; front mesh cover; annular impeller; aerodynamic performance; noise

循环扇作为促进室内空气循环、改善居住环境舒适度的家用电器设备已得到广泛应用,其关键部件叶轮和网罩的结构设计对整机气动性能、流场状态及噪声水平均有重要影响。早期受技术和工艺限制,循环扇的叶轮多为传统的直叶片结构,性能提升已至瓶颈,无法满足人们对室内环境舒适性和低噪声的要求。对此,作者研究团队提出了一种新型环状叶轮结构^[1],显著改善了循环扇的气动性能,并为结构创新设计注入新活力。然而,文献[1]仅聚焦于环状叶轮的结构设计和性能优化,未充分考虑网罩的匹配设计。

循环扇的网罩由前、后两部分构成,主要承担气流整流与叶轮防护功能。后网罩侧重防护及固定,对风扇性能的影响有限;前网罩因直接与叶轮出口气流接触,对循环扇的气动性能、噪声控制及出风气流分布等均具有显著影响。传统设计中,前网罩与环状叶轮的配合存在明显缺陷。比如:前网流道间易出现流动分离,引发异音并导致流道局部阻塞;风扇聚风、送风能力过于依赖环状叶轮本身,网罩的贡献较小等。基于此,本文聚焦于循环扇的前网罩与环状叶轮的匹配设计与优化研究,以进一步提高整机气动性能并降低噪声。

前网罩的导风结构主要包括导风圈和导风格栅。对于导风圈结构的优化,Sasaki等^[2]对比了叶顶有无环状导风圈对轴流风扇气动性能和噪声的影响,发现有环风扇的气动性能优于无环风扇的气动性能,但有环风扇在200 Hz以内的声压级也有所提高。陆志伟^[3]通过研究导风圈结构的宽度、安装位置对风扇性能的影响,提出了一种弧形锯齿进口的导风圈结构,成功降低风扇噪声3 dB以上。Canepa

等^[4-5]实验考察了导风圈的存在对风扇叶轮叶尖泄漏噪声的影响,采用粒子图像测速法(PIV)技术实测得到了较为详细的泄漏流和子午速度场数据。张啸天等^[6]通过调整轴流风扇导风圈的安装位置和出口形状使得风扇噪声得到有效控制。对于导风格栅结构的优化则相对较少,且研究多集中在汽车和空调的格栅设计中。张震等^[7]根据轴流风扇叶片尾缘出风角对格栅的进风角度进行了优化,同时研究了格栅进风角变化对风扇气动性能的影响,发现采用最佳进风角的格栅能够有效提高风扇的送风能力,也能提升风扇的气动性能。周伟峰等^[8]借鉴轴流风机后导叶的设计原理完成一款空调室外机出口格栅的设计,新设计的出口格栅显著降低了风机的能量损失和噪声水平,同时也提高了风机的静压效率。冯英等^[9]对某车型搭建了基于吹脸风口格栅角度的多目标优化流程,以优化汽车空调格栅的送风角度,使乘务舱的吹脸速度得到明显提升。

在自然界漫长的演化历程中,生物体逐渐进化出了适应其所处环境的特殊的生理结构^[10]。鸮翼作为轴流风叶常用的仿生翼型,仿长耳鸮翼型的设计能够有效减少叶片在中低频范围内的宽频噪声和离散噪声。通过优化叶片结构,气流对叶片前缘的冲击力被显著削弱,同时叶顶间隙处的泄漏涡强度也得到降低,有效提升了降噪效果^[11-13]。受此启发,Li等^[14]将猫头鹰翅膀翼型和羽毛的不对称锯齿结构应用于风力涡轮机叶轮中,设计出仿生耦合叶片并通过正交实验优化锯齿参数,发现优化后的仿生耦合叶片使噪声下降达8.42 dB。王雷等^[15-16]同样将长耳鸮翼型分别应用于叶片型线及尾缘锯齿处,优化后的风机气动性能和噪声均得到明显改善。

除基于鸮翼进行仿生设计外,吴立明等^[17-18]将海鸥翼型与常规美国国家航空咨询委员会(NACA)翼型性能进行对比,并比较了海鸥、雀鹰、长耳鸮、水鸭 4 种仿生翼型的动态失速特征,发现海鸥翼型的升力系数和升阻比远优于常规 NACA 翼型,且不同仿生翼型各有优缺点及适用环境。胡盈彬等^[19]将秋沙鸭翼型厚度分布应用于叶片尾缘襟翼的仿生设计中,通过优化仿生襟翼的安装角度,在设计工况条件下风机的全压提升了 8.51%。黄琪琪等^[20]在 NACA65-010 叶型尾缘处添加仿生锯齿结构,使翼型叶片噪声大幅下降。以上仿生设计多是应用在风机的叶片上,而网罩格栅等静止部件中采用仿生设计的相关研究仍然停滞不前。

本文针对已开发的带有环状叶轮的循环扇,采用数值模拟方法和实验测试方法研究前网罩仿长耳鸮翼型设计对循环扇气动性能和噪声的影响。基于循环扇的流场分析,揭示匹配有仿长耳鸮翼型前网罩循环扇的增风效果和降噪机理。通过实验验证了仿长耳鸮翼型前网罩设计对提高环状叶轮循环扇性能的有效性。

1 数值模型与计算方法

1.1 数值模型及网格划分

本文以某家用循环扇为研究对象,主要结构包括前网罩、后网罩和叶轮,如图 1 所示。

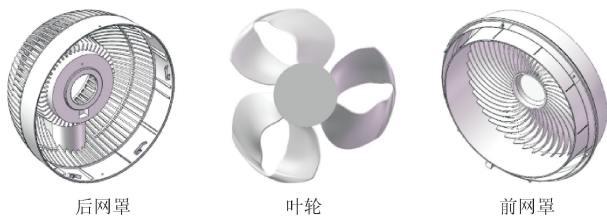
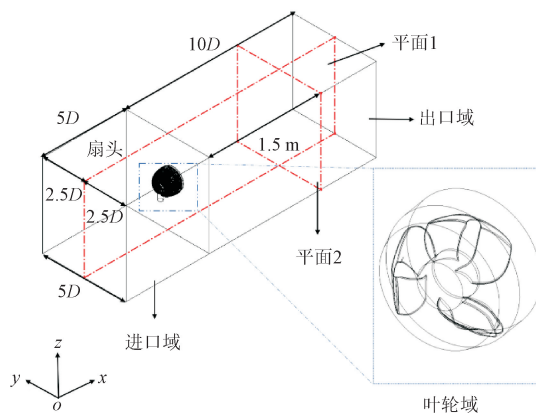


图 1 循环扇物理模型

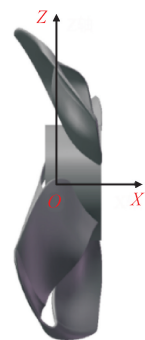
Fig. 1 Physical model of the circulation fan

根据循环扇原型结构特征,采用 Solidworks 软件对循环扇流体区域进行三维建模,如图 2(a)所示,图中 D 为叶轮外径。数值建模过程中,忽略了底部支架和底座等对流动影响较小的部件。保留前网罩、后网罩、叶轮等关键部件并进行必要的简化,整机流体区域被划分为 3 个部分,分别为进口域、叶轮域和出口域。为准确反映循环扇真实的工作环境,保证数值仿真过程中循环扇进、出口气流流动的均匀性,选择对进口段和出口段进行适当的延长处理。进口段的延长长度为叶轮外径的 5 倍,出口段的延长长度为 10 倍叶轮外径。为便于后续分析,在

计算流体域中给出了监测平面 1 和平面 2,如图 2(a)所示。图 2(b)则定义了 XOZ 坐标系以量化速度场中高速气流的吹风距离等性能参数,其中坐标原点 O 为叶轮轴向中心平面与叶轮中轴线的交点。



(a) 计算流体域

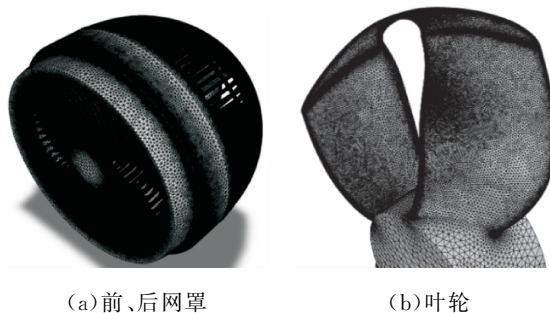


(b) 坐标原点及坐标轴

图 2 循环扇计算模型

Fig. 2 Computational model of the circulation fan

计算域的网格划分过程采用商用软件 ANSYS Mesh 进行。鉴于计算模型结构的复杂程度,各区域均采用非结构化网格划分方法,关键结构的网格划分如图 3 所示。



(a) 前、后网罩

(b) 叶轮

图 3 循环扇计算网格划分

Fig. 3 Computational meshes distribution of the circulation fan

为了保证数值模拟的精确性并控制计算资源的消耗,需首先对流体域的网格总数进行网格无关性

验证。图 4 给出了网格无关性的验证结果,其中以最大风速为监控变量。可以看出,当网格数达到 3 200 万以上时,计算得到的循环扇的最大风速几乎不再随网格数发生变化。这说明在此网格数量级下,网格数对数值计算结果的影响可以忽略。基于此,在这里以及下面的数值计算中采用的网格数控制在 3 300 万左右,其中叶轮域的网格数约 830 万,其他区域网格数约 2 470 万。

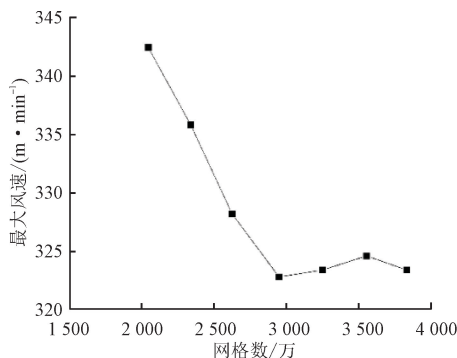


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Mesh independence verification

1.2 计算方法

流体运动均遵循三大基本方程:质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。由于本文研究的轴流风扇模拟计算不涉及热交换,因此只需求解质量守恒方程和动量守恒方程。

质量守恒方程即连续性方程,其微分形式表达式在直角坐标系中为

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; t 为时间; $\mathbf{u}$ 为流体速度,循环扇吹风速度一般不超过 30 m/s,因此可以视为黏性不可压缩流动,无需考虑密度变化产生的影响。

动量守恒方程的微分表达式在直角坐标系下为

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\Omega} + \rho \mathbf{f} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\Omega}$ 为应力张量; $\mathbf{f}$ 为流体微元所受体积力。

将式(2)代入到流体力学本构方程即可导出 Navier-Stokes 方程得

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p - \frac{2}{3} \nabla (\mu \nabla \cdot \mathbf{u}) + 2 \nabla \cdot (\mu \mathbf{S}) + \rho \mathbf{f} \quad (3)$$

式中: p 为流体微元上的压力; μ 为动力黏度; $\mathbf{S}$ 为应变率张量。

对连续方程和动量方程进行时间平均,可得雷诺时均 Navier-Stokes 方程,由于进行了时均化处

理,原有方程组不再封闭,需要引入湍流模型来进行求解。对于稳态计算,本文参考文献 [21-24] 选择能够准确模拟轴流风机内旋转流动、强逆压梯度下的边界层流动、流动分离和二次流的 Realizable k - ϵ 湍流模型。相应的湍动能 k 和湍动耗散率 ϵ 的方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \rho C_1 \mathbf{S} \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (5)$$

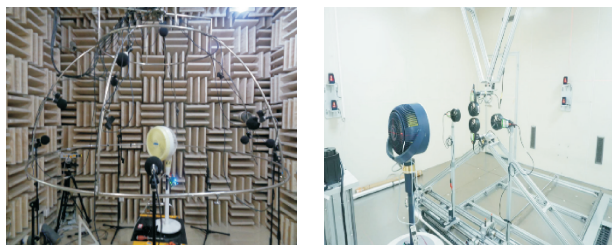
式中: μ_t 为湍流运动的黏性系数; σ_k 和 σ_ϵ 分别为 k 和 ϵ 基于湍流流动的普朗特准则数; G_k 为 k - ϵ 模型生成项; C_1 、 C_2 为经验常数; ν 为运动黏度。

针对近壁面区域,采用标准壁面函数处理,求解算法采用压力-速度耦合算法,梯度求解选择基于单元体的最小二乘法,动量、能量以及湍流耗散方程均选择具有小截断误差的二阶迎风差分格式。进出口均给定压力边界条件,其中进口总压设置为 101 325 Pa,出口静压设置为 0 Pa。叶轮所在区域为旋转域,采用多参考系模型来模拟叶轮的旋转运动,转速则根据循环扇的不同工况进行调整。除叶轮区域外,其余区域均为静止域。数值计算过程中,以循环扇出口风量和叶轮扭矩为监控变量,残差设定为 10^{-4} 。

2 实验测试

循环扇气动性能及噪声测试如图 5 所示,其中气动性能测试依据国标 [25] 的规定进行布置。风扇气动性能的核心指标为最大风速,最大风速定义为:在水平方向上距离原点 O 的 3 倍叶轮直径处,由 4 个风速表测得的风速取算术平均值。测试系统型号为 ODIN-AF-4W01,系统包括风室、4 个叶轮式风速表(直径小于等于 100 mm)、测试装置滑轨定位机构以及定位风速表的激光束等。测试对象为循环扇,其内部构造与仿真模型相匹配。测试过程中,将被试循环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。循环扇送风一侧除风速表及其支架外,不放置其他物品,风速表的叶片平面与被试循环扇的叶片平面平行,这两个平行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。

循环扇噪声的测试依据国标^[25]的规定布置并进行测量。测试过程在半消音室中进行,该环境下的基础噪声水平为 17.0 dB,噪声测量精度控制在 ± 0.2 dB。实验所使用的噪声测试装置包括前置放大器、声压传感器、数据采集设备等。测试方法选择半球包围法,待测循环扇置于半消声室中央地面或测试架上,保持循环扇电机轴线处于水平状态,4 个麦克风距离循环扇摇头轴心均为 1 m。噪声数据经软件分析处理后进行读取。



(a) 噪声测试

(b) 气动性能测试

图 5 实验测试装置

Fig. 5 Experimental test system

原型循环扇在工作转速下最大风速的数值计算与实验测试结果对比如表 1 所示。可以看出,随叶轮转速增大,原型循环扇的数值模拟结果与实验测试数据呈现出一致的变化趋势,即气动性能指标随着转速的提升而增加。在 3 种工作转速下,数值结果与实验结果的相对误差均在 5% 以内。误差可能来源于模拟时模型的合理简化、模拟环境与实验环境的差异、模型的加工误差、实验测试误差等。在循环扇的工作转速下,计算的相对误差最大值控制在工程设计允许的误差范围内。因此,本文采用的数值计算方法及计算模型具有参考价值。

表 1 原型循环扇仿真结果与测试结果对比

Table 1 Comparison of numerical results and experimental results on the prototype circulation fan

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	仿真风速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	实测风速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	误差/%
1 390	301.0	313.8	-4.1
1 490	322.6	336.2	-4.0
1 590	346.0	359.1	-3.6

3 仿长耳鸮翼型前网罩设计及应用

3.1 长耳鸮翼型的提取

在自然界约 9 000 种鸟类中,长耳鸮以其卓越的静音飞行能力脱颖而出。独特的翅膀结构使其在

8 m/s 的飞行速度下能够悄无声息地捕食猎物。这一速度与大部分循环扇出口气流速度相当。因此,本文选取空气动力学性能较优的长耳鸮作为仿生对象对循环扇前网罩进行仿生设计。长耳鸮翼型的具体数据可以参考 Liu 等^[26]通过激光扫描技术获得的测量结果,在此基础上通过 Birnbaum-Glauert 方程拟合即可精确地复现该翼型的中弧线特征及厚度分布。

对于长耳鸮翅膀在任意展向截面上的翼型,定义其中弧线的最大弧度为 $\theta_{\max}$,翼型的最大厚度为 $\lambda_{\max}$,它们与翼型弦长的关系可以表示为

$$\frac{\theta_{\max}}{c} = \frac{0.18}{1 + 7.31\xi^{2.77}} \quad (6)$$

$$\frac{\lambda_{\max}}{c} = \frac{0.1}{1 + 14.86\xi^{3.52}} \quad (7)$$

式中: c 为长耳鸮特定展向截面的翼型弦长; ξ 表示所选择的长耳鸮翅膀特定展向截面。参考廖庚华^[27]的研究结论,本文也选取翅膀展向 40% 截面进行仿生设计,即 $\xi = 0.4$ 。

根据式(6)和(7)得到的结果计算长耳鸮翅膀展向 40% 截面处的翼型中弧线分布坐标 θ 和翼型沿中弧线的厚度分布 λ ,公式分别如下

$$\frac{\theta}{c} = \frac{\theta_{\max}}{c} \eta (1 - \eta) \sum_{n=1}^3 S_n (2\eta - 1)^{n-1} \quad (8)$$

$$\frac{\lambda}{c} = \frac{\lambda_{\max}}{c} \sum_{n=1}^4 A_n (\eta^{n+1} - \sqrt{\eta}) \quad (9)$$

式中: $\eta = x/c$ 为无量纲化的翼型弦长坐标; S_n 、 A_n 为通过最小二乘法拟合得到的多项式系数,其中 $S_1 = 3.936\ 2$, $S_2 = -0.770\ 5$, $S_3 = -0.770\ 5$, $A_1 = -29.486\ 1$, $A_2 = 66.456\ 5$, $A_3 = -59.806\ 0$, $A_4 = 19.043\ 9$ 。

规定长耳鸮翅膀 40% 截面处翼型上、下表面坐标分别为 z_{up} 和 z_{low} ,相关的计算公式为

$$z_{\text{up}} = \theta + \lambda \quad (10)$$

$$z_{\text{low}} = \theta - \lambda \quad (11)$$

根据以上计算过程,即可提取并构建长耳鸮翅膀在展向 40% 截面位置的仿生翼型。仿生翼型轮廓线和厚度分布曲线如图 6 所示。

3.2 仿长耳鸮翼型前网罩设计

原型前网罩的单个导风格栅由一系列格栅截面型线构成,如图 7(a)所示,其截面形状为简单的梯形。在优化过程中,以该梯形型线的两侧边线为弦长,用长耳鸮翼型上、下表面的厚度分布曲线替换原梯形两侧直线,替换过程中确保导风格栅各截面最大厚度保持一致,从而生成厚度均匀的仿长耳鸮翼型导风格栅,如图 7(b)所示。

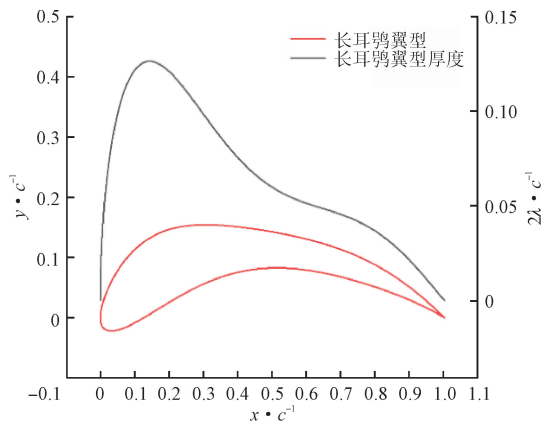


图6 展向40%截面位置长耳鸮翼型及厚度分布

Fig. 6 Airfoil profile and the thickness distributions at the 40% spanwise cross-section of the long-eared owl

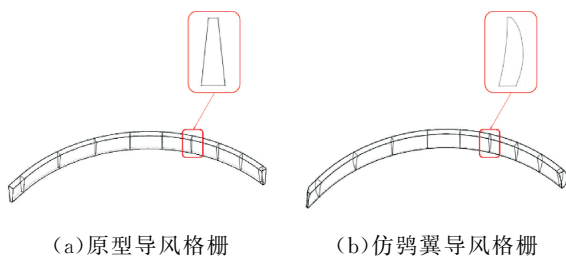


图7 导风格栅仿生设计

Fig. 7 Bionic design of the guide grille

如图8所示,原型前网罩的导风圈结构由导风圈截面型线绕中心轴旋转生成,其截面的内侧型线为简单直线。考虑到鸟类飞行过程中,翅膀上表面的气流流动与循环扇工作时气流流经导风圈的过程类似。因此,以原导风圈截面型线的简单直线为弦长,将长耳鸮翼型吸力面型线的厚度分布曲线应用于导风圈内侧,从而得到仿长耳鸮翼型导风圈。

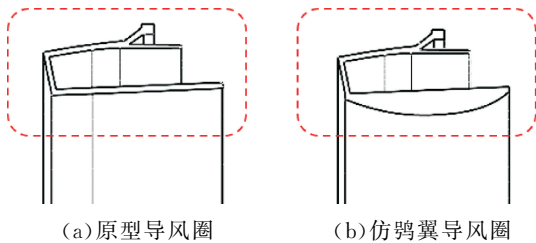


图8 导风圈仿生设计

Fig. 8 Bionic design of the inlet guide

通过结合仿长耳鸮翼型导风格栅和仿长耳鸮翼型导风圈,本文在原型前网罩的基础上设计了仿生前网罩,如图9所示。与原型相比,仿长耳鸮翼型前网罩除导风圈截面型线和导风格栅截面型线有所变化以外,其余结构均保持不变。

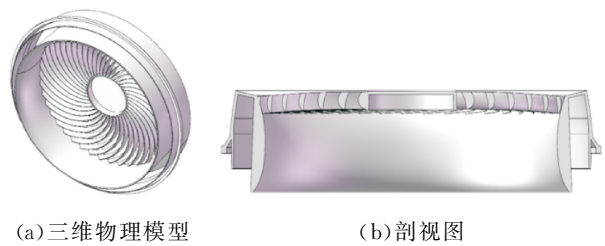


图9 仿长耳鸮翼型前网罩

Fig. 9 Bionic front cover inspired by the long-eared owl wing

3.3 数值结果及流场分析

带有两种前网罩的循环扇在监测平面1上的速度分布如图10所示。由图可知,气流通过环状叶轮后得到明显的加速,加速后的气流经过前网罩,前网罩将气流汇聚,并促使其二次加速。最终,经过两次加速的气流被排入周围环境。

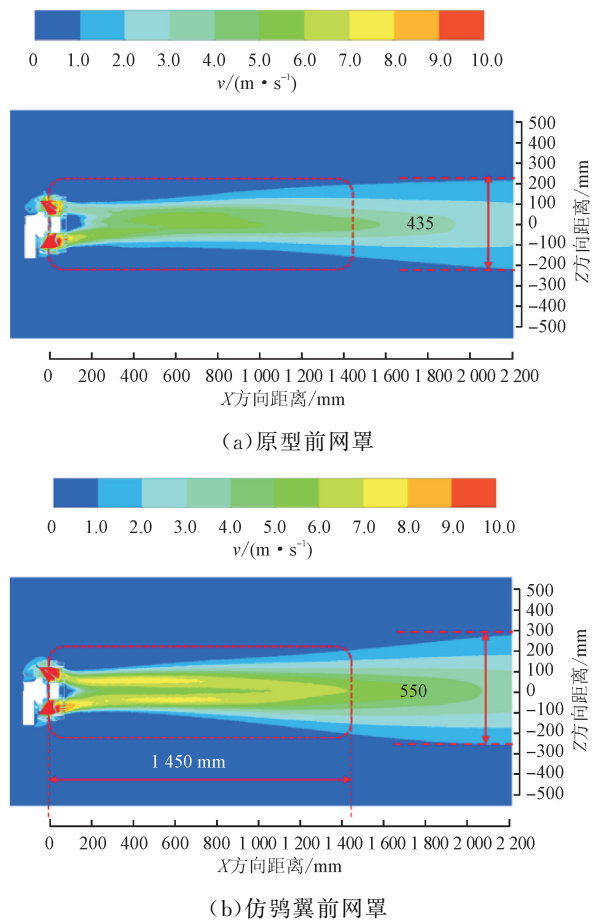


图10 监测平面1上的速度分布

Fig. 10 Velocity distributions on plane 1

由图10可见,经过原型前网罩的气流被二次加速的效果不明显,吹出的气流速度仍然偏低,网罩的聚气能力较差导致气流难以集中,速度场中未能形成明显的高速气流带(风速 $v > 420 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$),即高速

气流的输送距离为 0 mm。整机的送风能力较差导致气流在距离原点较远处 (2.2 m) 吹风范围仅有 435 mm。而仿长耳鸮翼型前网罩二次加速气流的能力大幅度增强,红框内部的主流区域出现明显的高速气流带,这部分高速气流能够被输送到距离原点约 1 450 mm 处。经过仿长耳鸮翼型前网罩的气流向中心靠拢,整体速度场从中心向两侧存在明显的速度梯度,上、下两侧速度分布的均匀性得到改善。远场处气流的吹风范围明显提升,由原型的 435 mm 提升至 550 mm,提升幅度约 26%。

在 X 轴上每隔 100 mm 取一监测点。图 11 给出了带有两种前网罩的风扇在 X 轴上的风速分布情况。由图可知,两种风扇在 X 轴上的风速变化趋势相同,均为先上升后下降;其中,带有仿长耳鸮翼型前网罩的风扇在全位置上的风速均优于原型,且前者在 X 轴上的风速极值点位于距离原点约 1 200 mm 处,而原型风扇的风速极值点则出现在距离原点约 700 mm 处,这进一步印证仿了长耳鸮翼型前网罩具有更强的送风能力。

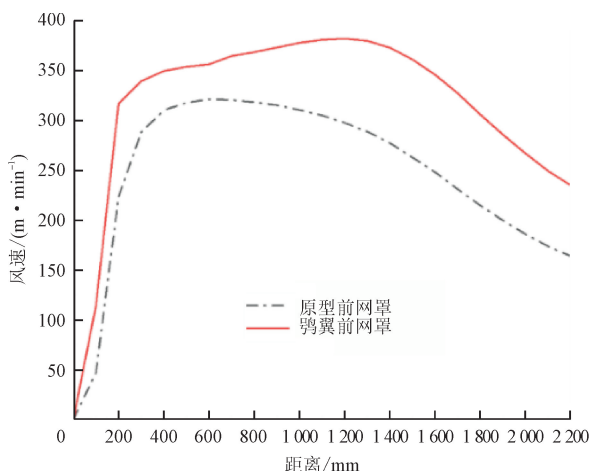


图 11 2 种前网罩的风扇在 X 轴上的风速分布

Fig. 11 Wind speed distribution of two types of front mesh cover fans on the X-axis

图 12 展示了两种网罩设计在格栅中截面位置处的流线。可以发现,气流经过环状叶轮加速后到达前网罩时方向发生偏转,且偏转程度随着半径的增大而增大。对于原型前网罩,其格栅型线与气流进气方向存在较大偏角,气流在流入格栅通道时产生流动分离并在通道内部出现低速区,低速区的形成往往与涡团相关,涡团的存在导致格栅空间无法被有效利用并造成气流损失和循环扇气动性能的降低。

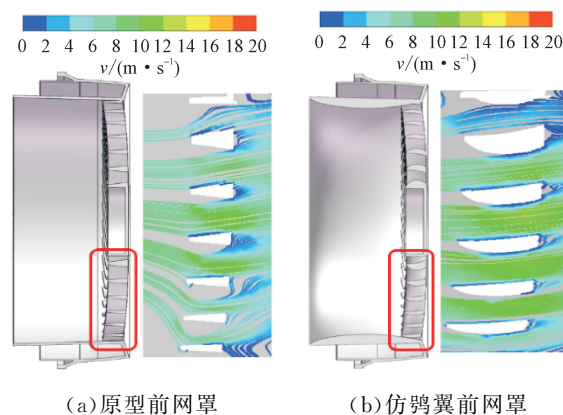


图 12 循环扇出口格栅处流线分布

Fig. 12 Streamline distributions at the outlet grille of the circulation fan

仿长耳鸮翼型前网罩的格栅截面采用了翼型设计,形成了一侧内凹、一侧外凸的格栅结构。翼型的厚度分布曲线优化了格栅进气侧的流动情况,外凸侧流动分离现象基本被消除,格栅通道内部的涡团得到有效控制,这种结构设计更加匹配环状叶轮所加速气流的流动特性,使更多的气流被有效利用,从而提高了循环扇的气动性能。

图 13 给出了装配两种前网罩的循环扇在监测平面 2 上的气流速度分布情况。可以看出,原型循环扇送风能力较差,在距离原点较远的截面上风速分布范围有限,且中心区域的最高风速偏低。相比之下,仿长耳鸮翼型前网罩显著提升了循环扇的送风性能,不仅吹风范围有所增加,最高速区域占据面积也有明显提升,这说明高速流能够被输送到更远的距离。此外,从风速分布情况来看,带有仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇所形成的速度场呈现出较为规则的圆形分布,从中心向外缘随着半径的增加,风速呈现出明显的梯度变化。风场较为均匀。

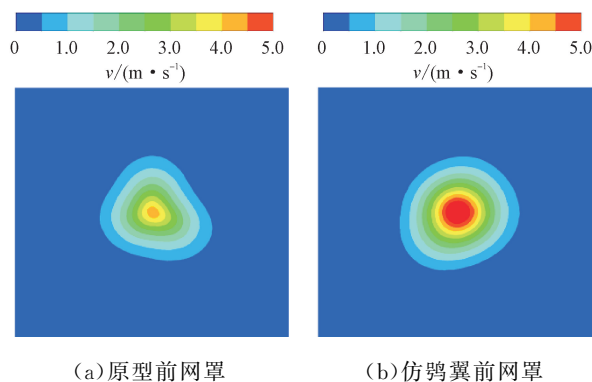


图 13 监测平面 2 上的平均速度分布

Fig. 13 Average velocity distribution on plane 2

以 X 轴与监测平面 2 的交点为圆心,建立半径 50~500 mm 的同心圆截面。图 14 给出了带有两种前网罩的风扇在各圆截面上的平均风速。由图可知,带有仿长耳鸮翼型前网罩的风扇在 50~500 mm 半径圆截面上的平均风速均高于原型风扇,且圆截面半径越小,两风扇平均风速相差越大。这进一步印证了,相比原型前网罩,仿长耳鸮翼型前网罩的聚风能力更强,相同位置高速气流的分布范围更广。

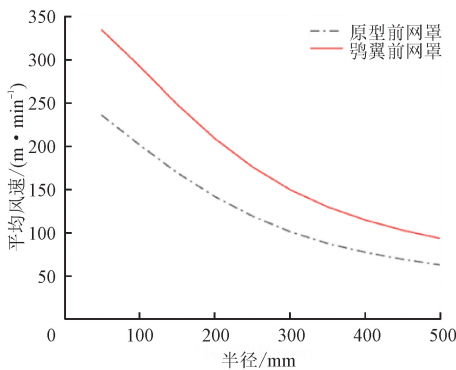


图 14 不同半径同心圆截面上的平均风速对比
Fig. 14 Comparison of average wind speed on concentric circle sections of different radii

图 15 和图 16 分别给出了带有两种前网罩的循环扇在监测平面 1 以及前网罩结构表面的湍动能分布。图 15 中,原型循环扇叶轮叶片附近、叶尖区域以及出口格栅附近均存在高湍动能区,这些区域导致循环扇的气动噪声增大。带有仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇基本消除了叶轮附近的高湍动能区,格栅处的湍动能分布范围也有所减小。图 16 则更直观地给出了前网罩结构表面的湍动能分布,在原型前网罩结构中存在局部高湍动能区,该区域同样是叶轮叶顶处。而仿长耳鸮翼型前网罩不仅将叶顶处对应的局部高湍动能区完全消除,而且格栅处湍动能也有明显下降,最终实现整机气动噪声的降低。

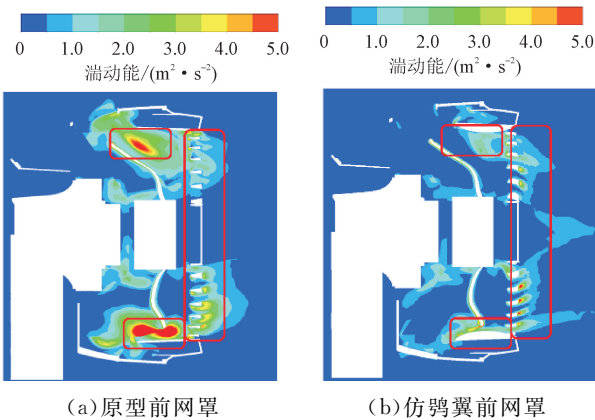


图 15 监测平面 1 上的湍动能分布
Fig. 15 Turbulent kinetic energy distributions on plane 1

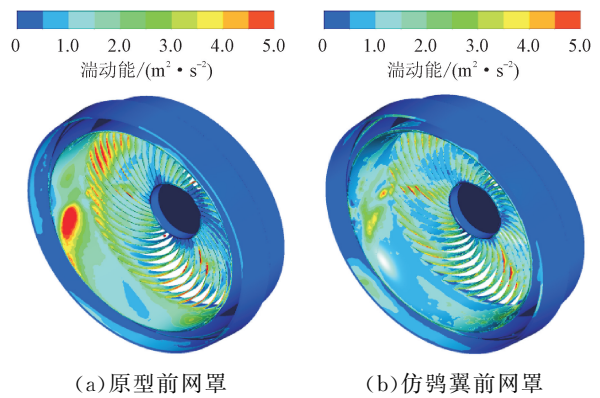


图 16 前网罩表面的湍动能分布
Fig. 16 Turbulent kinetic energy distributions on the surface of the front cover

3.4 带有仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇性能测试

将两种前网罩的模型进行加工,通过调节转速分别测试了工作转速、同风速以及同噪声 3 种工况下两循环扇的气动性能及噪声水平,实验结果如表 2 所示。由表 2 可知,采用仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇相比原型噪声降低 1.6 dB,最大风速提升 39.1 m·min⁻¹,功率基本保持不变。

表 2 工作转速下测试结果对比

Table 2 Comparison of experimental results under the operating speed conditions

前网罩 类型	数据 类型	转速/ (r·min ⁻¹)	噪声/dB	最大风速/ (m·min ⁻¹)	功率/ W
原型	实验	1 490	58.8	336.2	19.5
	模拟	1 490		322.6	
鸮翼	实验	1 490	57.2	375.3	19.4
	模拟	1 490		360.0	

通过降低转速,使优化后的循环扇风速与原型相同,同风速工况下的实验结果如表 3 所示。由表 3 可知,两种循环扇风速相同时,采用仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇转速相比原型降低 144 r·min⁻¹,噪声降低 4.2 dB;功率降低 4.8 W,降幅约 24.6%。

表 3 相同风速工况下测试结果对比

Table 3 Comparison of the experimental results under the same wind speed condition

前网罩 类型	数据 类型	转速/ (r·min ⁻¹)	噪声/dB	最大风速/ (m·min ⁻¹)	功率/ W
原型	实验	1 490	58.8	336.2	19.5
	模拟	1 490		322.6	
鸮翼	实验	1 346	54.6	336.2	14.7
	模拟	1 346		324.0	

同噪声工况下的实验数据如表 4 所示。经对比可以发现,当两台循环扇的噪声相同时,采用仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇的转速增加了 $90\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,最大风速提升了 $60.9\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。与原型相比,尽管转速的增加直接导致了功率的增大,但通过风量与功率的关系换算,循环扇的能效依然符合相关标准,整机性能表现良好。

表 4 相同噪声工况下测试结果对比
Table 4 Comparison of experimental results under the same noise condition

前网罩 类型	数据 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	实验	1 490	58.8	336.2	19.5
	模拟	1 490		322.6	
鸮翼	实验	1 580	58.8	397.1	23.1
	模拟	1 580		382.0	

4 结 论

(1)带有仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇相比原型具有更强的送风和聚风能力,流场中出现明显的高速气流带,且这部分高速气流能够被输送到更远的距离。同时,仿长耳鸮翼型前网罩也能够提供更均匀的风场。

(2)仿长耳鸮翼型前网罩降低了循环扇主流区域的湍动能强度。与原型相比,优化后的导风圈有效抑制了叶顶脱落涡的产生,格栅型线被设计为一侧外凸、一侧内凹的形式更加符合环状叶轮加速后的气流的流动特性,减少了格栅流道间的流动分离和涡的生成。基于流场分析,本文研究揭示了循环扇中仿长耳鸮翼型前网罩的降噪机理。

(3)相比于原型机,带有仿长耳鸮翼型前网罩的循环扇在工作转速下,噪声降低了 1.6 dB,最大风速提升了 $39.1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。同时,在相同噪声工况下,实测最大风速提升了 $60.9\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$;当监测风速相同时,实测循环扇噪声下降了 4.2 dB,功率降幅达 24.6%。

参考文献:

[1] 吴宪鹏,魏来,罗丹,等. 环状叶轮轴流风扇的气动性能和噪声研究 [J]. 西安交通大学学报, 2025, 59 (9): 177-186.
WU Xianpeng, WEI Lai, LUO Dan, et al. Study on the aerodynamic performance and noise of annular im-

PELLER axial fans [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(9): 177-186.
[2] SASAKI S, FUKUDA M, TSUJINO M, et al. Prediction of aerodynamic noise in a ring fan based on wake characteristics [J]. Journal of Thermal Science, 2011, 20(2): 144-149.
[3] 陆志伟. 导流罩对轴流风扇性能的影响 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
[4] CANEPA E, CATTANEI A, MAZZOCUT ZECCHIN F, et al. An experimental investigation on the tip leakage noise in axial-flow fans with rotating shroud [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 375: 115-131.
[5] CANEPA E, CATTANEI A, ZECCHIN F M, et al. Instantaneous PIV data related to the leakage flow of a low-speed axial-flow fan with rotating shroud [J]. Data in Brief, 2019, 24: 103895.
[6] 张啸天,王陶,王伟利,等. 某轴流风机噪声特性与降噪研究 [J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(5): 604-610.
ZHANG Xiaotian, WANG Tao, WANG Weili, et al. Research on noise characteristics and noise reduction of axial fan [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2023, 47(5): 604-610.
[7] 张震,刘敏,颜鲁华,等. 空调室外机送风能力提升和性能优化的研究 [J]. 制冷与空调, 2019, 19(6): 33-37.
ZHANG Zhen, LIU Min, YAN Luhua, et al. Research on air supply capability enhancement and performance optimization of air conditioner outdoor unit [J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2019, 19(6): 33-37.
[8] 周伟峰,陈绍林,熊军,等. 基于后导叶原理的空调室外机出风格栅研究与应用 [J]. 流体机械, 2018, 46 (10): 85-88.
ZHOU Weifeng, CHEN Shaolin, XIONG Jun, et al. Research and application of air outlet grille of outdoor unit for air conditioner based on the outlet guide vanes [J]. Fluid Machinery, 2018, 46(10): 85-88.
[9] 冯英,祁祺,李小华,等. 基于神经网络的汽车空调送风格栅角度优化与乘员舱降温性能改进 [J]. 汽车工程学报, 2025, 15(2): 177-186.
FENG Ying, QI Qi, LI Xiaohua, et al. Neural network-based optimization of air conditioning supply grille and cabin cooling performance in vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15 (2): 177-186.
[10] 章甘. 轴流风机仿生流动控制降噪试验及数值模拟 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.

- [11] GAO Ruibiao, CHEN Kun, LI Yixiao, et al. Investigation on aerodynamic performance of wind turbine blades coupled with airfoil and herringbone groove structure [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2021, 13(5): 053301.
- [12] CHEN Kun, YAO Weiwei, WEI Jianhui, et al. Bionic coupling design and aerodynamic analysis of horizontal axis wind turbine blades [J]. *Energy Science & Engineering*, 2021, 9(10): 1826-1838.
- [13] LI Dian, LIU Xiaomin, WANG Lei, et al. Numerical study on the airfoil self-noise of three owl-based wings with the trailing-edge serrations [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part G Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 235(14): 2003-2016.
- [14] LI Yixiao, CHEN Kun, GAO Ruibiao, et al. Noise reduction of bionic coupling blades of horizontal axis wind turbine [J]. *Noise Control Engineering Journal*, 2022, 70(2): 169-187.
- [15] 王雷, 李金波, 黄榆太, 等. 仿鸮翼叶片对轴流风机气动噪声特性的影响研究 [J]. *风机技术*, 2020, 62(2): 19-26.
- WANG Lei, LI Jinbo, HUANG Yutai, et al. Study on effects of bionic blade inspired by owl wing on aerodynamic noise of axial fan [J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2020, 62(2): 19-26.
- [16] WANG Lei, LIU Xiaomin, WU Liming, et al. Effect of the asymmetric bio-inspired trailing-edge serrations on sound suppression in a coupled owl-based airfoil [J]. *Applied Acoustics*, 2022, 191: 108667.
- [17] 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.
- [18] 吴立明, 姜怡欣, 刘小民, 等. 几种仿生翼型动态失速特性的数值分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(9): 1-9.
- WU Liming, JIANG Yixin, LIU Xiaomin, et al. Numerical analysis of dynamic stall characteristics of several bionic airfoils [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(9): 1-9.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 唐俊, 王军, 隗智辉, 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] DIAO Lei, GE Fahua, LIU Yong, et al. Effect of tip winglet position on tip flow and noise of axial flow fan [J]. *Heliyon*, 2023, 9(8): e18483.
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 交流电风扇和调速器: GB/T 13380—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 10-14.
- [26] LIU Tianshu, KUYKENDOLL K, RHEW R. Avian wing geometry and kinematics [J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(5): 954-963.
- [27] 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 亢列梅)