

轴流风机仿生耦合叶片降噪机理研究

王雷, 刘小民, 刘刚, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为降低传统叶型轴流风机的气动噪声,受鸮类翅膀翼型和非光滑边缘结构的启发,以原型轴流风机的中弧线分布为基准,提取具有静音飞行特性的长耳鸮40%翼展截面处的厚度分布,结合长耳鸮翅膀边缘的非光滑结构特征,在仿鸮翼叶片尾缘耦合了正弦型锯齿结构对轴流风机叶片进行仿生重构,并将其应用于降低轴流风机噪声叶片改型设计中。基于轴流风机内部流场的数值计算结果,采用大涡模拟(LES)结合Ffowcs Williams和Hawkings发展的FW-H声类比方法对轴流风机的声场特性进行了数值模拟。研究表明:与原型风机相比,仿生耦合叶片风机的整体降噪幅度为2 dB,风量提升4.69%。风机内部流场及声场显示:仿生耦合叶片使气流从吸力面向压力面的过渡更为平缓,不仅改善了气流对叶片前缘局部的冲击性,且能减弱叶顶间隙处的泄漏涡强度。此外,仿生耦合叶片产生的紊流边界层及尾迹涡脱落引起的气流脉动和气流不均匀性程度减弱,宽频噪声和离散噪声在中低频范围内均有所降低,因此仿生耦合叶片不仅改善了叶片前缘的局部压力脉动,且能够减小尾缘锯齿处的声源强度,改善叶片尾缘的尾迹涡分布。

关键词: 长耳鸮翅膀;非光滑结构;气动噪声;轴流风机;数值模拟

中图分类号: TH432;TB535 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202011010 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0081-10



OSID 码

Noise Reduction Mechanism of Bionic Coupled Blades of Axial Flow Fan

WANG Lei, LIU Xiaomin, LIU Gang, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to reduce the aerodynamic noise of the traditional blade-type axial fan and inspired by the owl wing profile and non-smooth edge structure, the thickness distribution at the 40% span of the long-eared owl with silent flight characteristics was extracted based on the medial camber line distribution of the prototype axial fan as a benchmark. Combined with the non-smooth structural features of the long-eared owl wing edges and coupled with a sinusoidal sawtooth structure at the trailing edge of the imitated owl blade, bionic reconstruction of the axial fan blade was performed and used in the modified blade design to reduce the noise of axial fans. Based on the numerical calculation results of the internal flow field of axial fan, the large eddy simulation (LES) combined with the FW-H sound analogy method developed by Ffowcs Williams and Hawkings was used to numerically simulate the sound field characteristics of the axial fan. The research results show that the overall noise reduction of the bionic coupled blade fan is 2 dB and the air volume is increased by 4.69% compared with the prototype fan. The internal flow field and sound field of the fan show that the bionic coupled blade makes the air flow transition

from the suction surface to the pressure surface more smoothly, which not only improves the local impact of the air flow on the leading edge of the blade, but also reduces the leakage vortex strength at the tip clearance. In addition, the turbulence boundary layer generated by the bionic coupled blades and the degree of airflow pulsation and airflow unevenness caused by the wake vortex shedding are weakened, and both broadband noise and discrete noise are reduced in the low-mid frequency range. Therefore, the bionic coupled blade not only improves the local pressure pulsation at the leading edge of the blade, but also reduces the intensity of the sound source at the trailing edge serration and improves the trailing vortex distribution at the trailing edge of the blade.

Keywords: long-eared owl wing; non-smooth structure; aerodynamic noise; axial fan; numerical simulation

轴流风机通常在家用电器、工厂及矿井等多个国民经济领域的应用中必不可少。随着人们环保意识的增强和对生活品质的追求,这些设备在日常的运转过程中产生的噪声污染已经引起了足够的重视。因此,有必要在风机的设计中考虑噪声的影响,保障人们对听觉的基本保护,在提高设备使用舒适性的同时进一步提升生活品质。

游斌等对空调室外机的叶片采用尾缘凹陷、前缘局部加厚处理及其他部分进行整体减薄,这样不仅能够减轻风轮的整体质量,减弱转子尾迹,还可以减小叶尖颤振,在降低叶片旋转频率峰值噪声的同时改善音质。此外,对空调室外机的叶片尾缘加锯齿进行改型设计,发现尾缘进行锯齿化处理对风机流量和压力的影响很小,不仅能减弱轴流风轮叶片下游的尾迹,同时能够降低噪音和改善音质^[1-2]。宫武旗等对某空调室外机的风机叶片的尾缘锯齿进行了研究,根据风机叶片的尾迹宽度设计了不同形状和尺寸的尾缘锯齿,发现与叶片尾迹相近的锯齿降噪效果更为显著,且正弦型锯齿的降噪效果比正三角形锯齿的更好^[3]。唐俊等通过增加转速的方式补偿轴流风机正弦型尾缘锯齿所引起的压损后,结果显示低频段噪声比原型机有明显改善^[4]。贺艳文等对基准叶片、短锯齿叶片及长锯齿叶片的数值模拟研究表明,长锯齿尾缘叶片更显著降低了尾迹附近的湍流强度,表现为在降低噪声和减小流动损失方面的效果更佳^[5]。Howe 等从理论上研究了低马赫数下正弦型尾缘锯齿和三角型尾缘锯齿型的翼型,表明两者均有降噪效果与降噪潜力,并给出了与锯齿的跨度、振幅有关的噪声预测公式,为相关研究奠定了相应的理论基础^[6-7]。轴流风机的噪声一部分来源于内部各器件之间的振动及摩擦产生的机械噪声,另一部分来源于叶片旋转带动气体与部件及气

体本身的相互作用产生的气动噪声^[8]。Sharlan 等通过实验研究了风扇的噪声特性,分为宽频噪声与离散噪声且偶极子噪声源占主导成分,叶片尾缘脱落涡引起宽频噪声,动静干涉产生的叶片压力脉动引起离散噪声^[9]。传统降噪方法有叶片穿孔法、倾斜整流片法、前掠叶片法以及不相等叶片间距等方式^[10],考虑到传统降噪方法往往对于气动性能和噪声特性无法兼顾的局限性,有必要为轴流风机的降噪提供新的设计理念。与此同时,自然界中的一些生物在亿万年的不断进化中,逐渐形成了适应自身生存环境的躯体特征^[11]。仿生学的应用给科研人员提供了源源不断的设计灵感,且很多成果均进行了工程应用。作为静音飞行的代表,长耳鸮在飞行中不仅动作敏捷,而且产生的噪声很小。这不仅与其独特的翅膀翼型结构有关,且其体表覆盖的羽毛及非光滑边缘结构可以明显降低飞行过程中产生的涡流噪声。

因此,本研究通过逆向工程提取 40% 截面处的长耳鸮翼型截面进行厚度方向的修型,并将其应用于某直径为 710 mm 的工业用轴流通风机中,此外在叶片尾缘施加正弦型锯齿结构进行仿生重构,利用数值模拟对其降噪机理及效果进行理论分析及研究,可为低噪环保型轴流风机的设计提供理论参考及依据。

1 仿生翼型重构

根据廖庚华等对长耳鸮翅膀提取得到的结果^[12],获取长耳鸮 40% 截面处翼型的中弧线、翼型厚度等典型几何特征。

翼型该截面处的轮廓线如下

$$Z_{\text{upp}} = Z_c + Z_t \quad (1)$$

$$Z_{\text{low}} = Z_c - Z_t \quad (2)$$

式中: Z_c 为翼型截面的中弧线坐标分布; Z_t 为翼型截面的厚度分布; Z_{upp} 和 Z_{low} 分别为翼型截面上下表面的坐标分布。

翼型的中弧线分布方程为

$$\frac{Z_c}{c} = \frac{Z_{\text{cmax}}}{c} \eta (1 - \eta) \sum_{n=1}^3 S_n (2\eta - 1)^{n-1} \tag{3}$$

厚度分布方程为

$$\frac{Z_t}{c} = \frac{Z_{\text{tmax}}}{c} \sum_{n=1}^4 A_n (\eta^{n+1} - \eta^{1/2}) \tag{4}$$

最大厚度分布公式为

$$\frac{Z_{\text{cmax}}}{c} = \frac{0.18}{1 + 7.31\xi^{2.77}} \tag{5}$$

$$\frac{Z_{\text{tmax}}}{c} = \frac{0.1}{1 + 14.86\xi^{3.52}} \tag{6}$$

式中: Z_{cmax} 是翼型截面中弧线最大弧度分布坐标; Z_{tmax} 是中弧线分布的最大厚度分布坐标; c 为翼型弦长; η 为翼型弦长的相对位置坐标; S_n 与 A_n 均为描述鸮翼翼型的多项式系数, S_1 、 S_2 、 S_3 分别为 3.936 2、−0.770 5 和 0.848 5, A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 分别为 −29.486 1、66.456 5、−59.806 和 19.043 9; ξ 为翼型的展向比。

由于翼型截面的中弧线直接影响到轴流风机的弯掠特性,改变风机叶片的弯掠往往对风机的气动性能影响很大,因此针对已经做过弯掠优化的风机暂时采用原型风机的弯掠设计。针对原型风机 5~7 个典型的翼型截面,其中弧线分别采用不同半径的单圆弧进行拟合,重构后仿生翼型的中弧线如图 1 所示,具体分布规律如下

$$y = \frac{Z_t}{c} = \sqrt{(r^2 - (x - 0.5)^2)} - \sqrt{r^2 - 0.5^2} \tag{7}$$

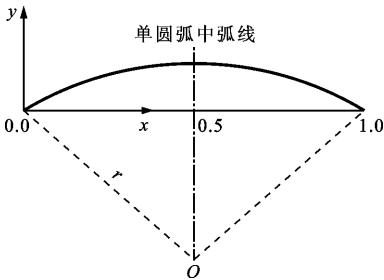


图 1 仿生翼型中弧线构建

翼型厚度可根据各个截面的厚度比例系数进行设定,则 50% 叶高处的翼型截面如图 2 所示。考虑到叶片尾缘的加工厚度,在此基础上提取仿鸮翼翼型弦长的前 80% 并将其应用在翼型回转面的投影平面上。

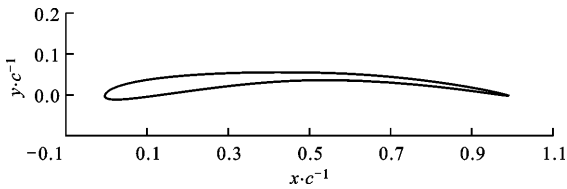


图 2 50% 叶高处的翼型截面图

长耳鸮飞行过程中的静音飞行功能还与其独特的翼羽非光滑结构有关,因此本文采用正弦型尾缘锯齿进行抑制叶片的湍流边界层噪声。文献[13]利用 3D Scanner 激光扫描仪提取长耳鸮前缘非光滑形态特征信息,测量得到翼前缘凸起高度与凸起中线间距之比约为 0.12~0.19。结合上述取值范围,同时考虑到尾缘锯齿的尺寸太大对风压和风量造成的不利影响,因此将波高设定为 5 mm,非光滑单元设定为 15 个,使锯齿结构尽可能分布在叶片尾缘起到良好的降噪效果。分别对波长为 25、12.5 mm 的仿生耦合轴流风机进行了研究,发现当波长为 12.5 mm 时降噪效果更好,因此最终确定正弦型锯齿的波长为 12.5 mm,波高与波长之比为 0.4。

2 数值分析

轴流风机叶轮外径为 710 mm,轮毂比为 0.21,叶片数为 5,三维模型如图 3 所示。对出口网罩及安装凸台等复杂结构进行了简化处理,在保证计算模型准确性的条件下有效提高计算精度和减少计算工作量。保持原始风机叶片的中弧线分布不变,叶片厚度分布按照鸮翼 40% 翼展位置处的翼型厚度进行设计,获得仿鸮翼叶片如图 4 所示。基于鸮翼尾缘的非光滑结构,在仿鸮翼叶片的尾缘施加不同的正弦型锯齿结构,图 5 为最终确定的仿生耦合叶片模型。

采用商业软件 ANSYS Fluent 对轴流风机的流场和声场进行数值模拟,整个计算流体域的计算模型如图 6 所示,分别为进出口延长区域、电机区域、叶轮区域以及叶顶间隙区域,各个计算域之间采用

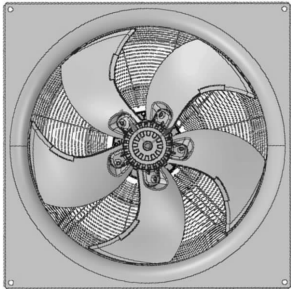


图 3 轴流风机模型图

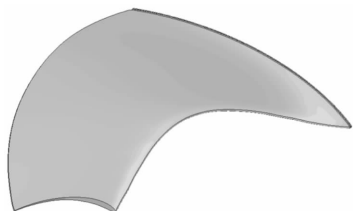


图4 仿鸮翼叶片

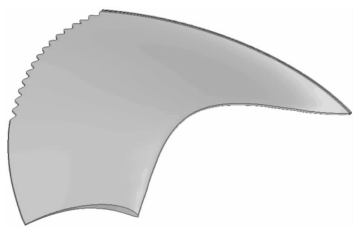


图5 仿生耦合叶片

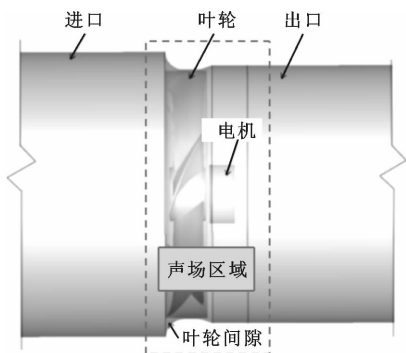


图6 轴流风机数值计算模型

interface 交界面进行连接,其中进口延伸段与出口延伸段的长度分别取3倍叶轮直径和4倍叶轮直径。进出口延长区域等几何规则区域采用结构化网格,同时叶轮区域、叶顶间隙区域等复杂几何模型区域采用适应性较好的非结构化网格。声源区域主要包括叶轮区域、电机区域及叶顶间隙区域,根据10 kHz计算频段下的紧凑声源条件,得出声源区的最大网格尺寸为3.4 mm,对叶轮表面、导风圈表面以及电机表面的声源区进行适当加密后的近壁面最大表面网格尺寸取3 mm。根据大涡模拟对近壁面 y^+ 小于1的要求,第一层网格高度取0.02 mm,同时声源区共设定10层边界层以保证近壁面声压脉动计算的准确性。经过网格无关性验证后,叶轮区的网格数约为560万,总体流域的网格数约为800万,网格细节图如图7所示。所有边界条件设置为wall的壁面均采用无滑移边界条件,旋转区域即叶轮区域,转速设定为969 r/min。进口总压设置为101 325 Pa,出口静压设置为101 325 Pa,控制方程为Navier-Stocks (N-S) 方程,定常计算采用SIM-

PLEC 算法,湍流模型为 Realizable $k-\epsilon$,梯度求解选择 Green-Gauss Cell Based 算法,动量方程、湍流耗散方程等均使用二阶迎风离散格式,数值求解中的收敛残差设定为 10^{-4} 。

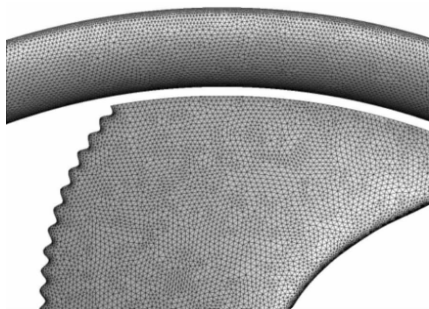


图7 仿生耦合叶片表面的网格示意图

3 数值模拟计算及分析

3.1 非定常流场计算

本研究采用大涡模拟^[14]获得声源表面的压力脉动等非稳态流场参数,再结合 Ffowcs Williams 和 Hawkings 在莱特希尔提出的声比拟理论基础上发展的 FW-H 声类比理论获得声源区域的远场噪声的声压级及时均声压脉动等声场信息。由于声波的波长远大于风机的特征尺寸,因此在噪声计算中忽略导风圈和叶轮之间噪声的反射、衍射和散射^[15]。

气动性能测试以《GB/T 1236—2010 工业通风机用标准化风道性能试验》与《AMCA210—2007 通风机额定性能实验的实验室方法》为依据,噪声测量接收点测量根据《GB/T 2888—2008 风机和罗茨风机噪声测量方法》中规定的噪声接收点进行布置,噪声接收点距离风机水平入口前1 m处,接收点的三维坐标为(0 mm, -1 092.31 mm, 0 mm)。

时间步长的计算公式为

$$\Delta t = \frac{1}{2f} \quad (8)$$

式中: Δt 为时间步长; f 为傅里叶变换可捕获的最高频率。结合实验测量结果,鉴于10 kHz后的频段对整体声压级贡献较小,为了节省计算资源和成本,同时考虑到计算效率等问题,将研究频段设定为0~10 kHz,计算时间步长为 5×10^{-5} s。

3.2 稳态流场分析

图8给出了仿鸮翼翼型风机和仿生耦合风机的静压曲线,可以看出在大部分工况范围内仿鸮翼翼型风机和仿生耦合风机的静压均有所提升,则说明与原型风机相比,经过仿生重构设计的风机做功能力在大范围工况内提升程度明显。

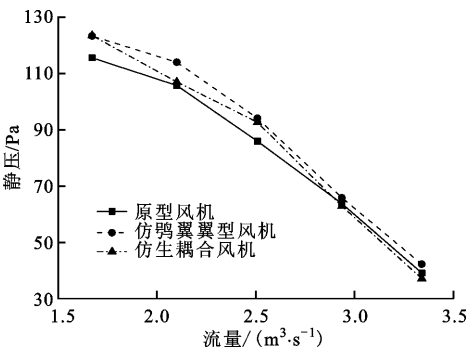


图 8 原型风机与仿生重构风机的静压比较

图 9 给出了仿鸭翼翼型风机和仿生耦合风机的效率曲线,可以看出仿鸭翼翼型风机和仿生耦合风机在高效点处效率下降幅度较小,都能满足在额定工况下对风机的性能要求,但在其余工况下效率呈现小幅下降趋势。这是由于风机静压增大使电机负载增加,从而导致扭矩增大,因此整体的效率曲线相比原型风机呈现小幅下降。

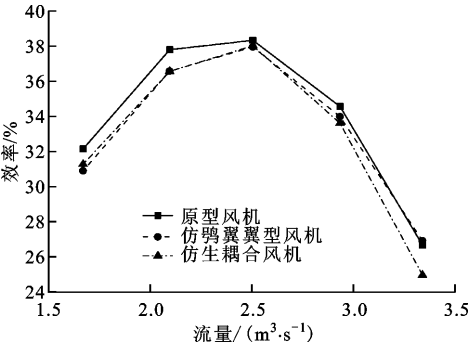


图 9 原型风机与仿生重构风机的效率比较

此外,仿生耦合风机在仿鸭翼翼型风机的基础上施加尾缘锯齿结构造成了叶片轴向垂直迎风投影面减小,从而使叶片整体的做功能力稍差,因此静压提升程度相比仿鸭翼翼型风机略有降低。同时,尾缘锯齿的施加减轻了叶片整体的质量,使电机的负载减小而导致大部分工况范围内的效率与仿鸭翼翼型风机相比并没有明显下降。

图 10 给出了原型风机 50% 叶高截面处的静压分布,可以看出原型风机的静压梯度过渡范围较窄,而较窄的压力梯度过渡容易引发二次流和表面涡流,从而造成较强的压力脉动,使气流在流经叶片表面时造成较大的冲击。图 11 和图 12 分别给出了仿鸭翼翼型风机和仿生耦合风机 50% 叶高截面处的静压分布,可以看出仿鸭翼翼型风机和仿生耦合风机的静压分布梯度的过渡范围在 50% 叶高截面处分布相似,均改善了原型风机在叶片中部较窄的静压梯度分布,使压力分布更为均匀,因此仿鸭翼翼型

风机和仿生耦合风机能够改善叶片表面因流动紊乱而引起的涡流噪声。

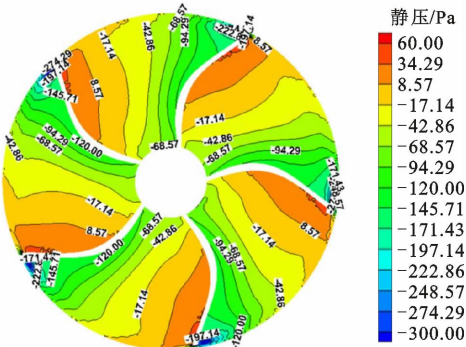


图 10 原型风机 50% 叶高截面处静压分布

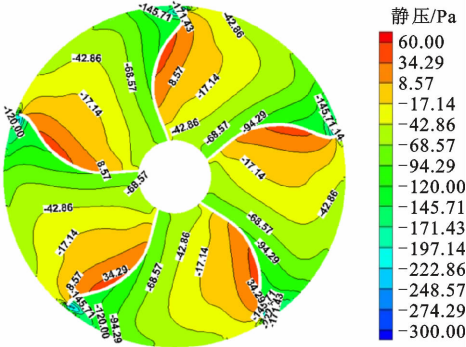


图 11 仿鸭翼翼型风机 50% 叶高截面处静压分布

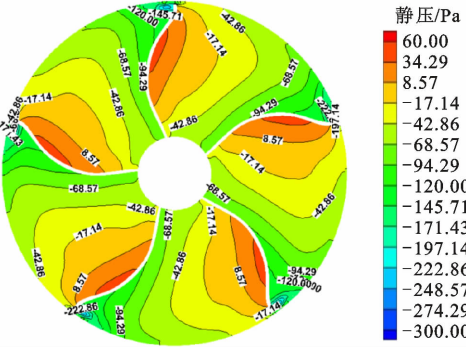


图 12 仿生耦合风机 50% 叶高截面处静压分布

图 13 给出了 50% 叶高截面处的叶尖流线图,可以看出原型风机在叶尖区域的吸力面向压力面过渡的区域形成了较大的逆压旋涡,且流线过渡出现了严重的流动分离现象,导致流动过渡不平稳造成叶顶间隙处的泄漏涡流严重。图 14 和图 15 分别为仿鸭翼翼型风机和仿生耦合风机 50% 叶高截面处叶尖流线图,可以看出仿鸭翼翼型风机和仿生耦合风机的静压分布在叶顶间隙处的逆压旋涡明显减小,且从吸力面向压力面的流线过渡更为均匀。由于仿生耦合风机与仿鸭翼翼型风机在叶顶处的结构

相同,因此流线图分布整体呈现相似性,在叶尖处的改善程度几乎一致,均减小了叶尖处由于吸力面和压力面来流过渡不均匀造成的气流分离恶化情况。

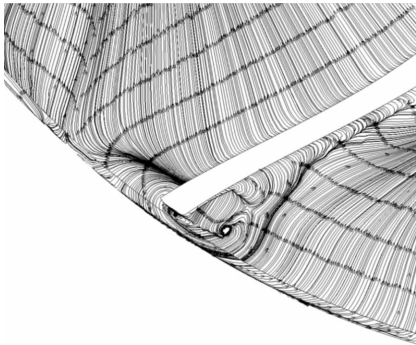


图 13 原型风机 50%叶高截面处叶尖流线图

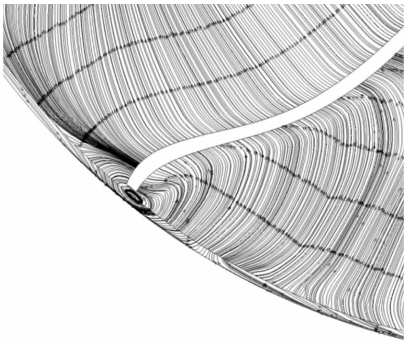


图 14 仿鸮翼翼型风机 50%叶高截面处叶尖流线图

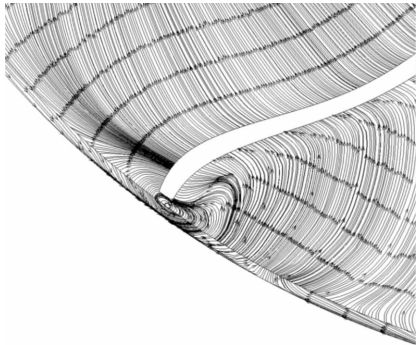


图 15 仿生耦合风机 50%叶高截面处叶尖流线图

3.3 声场分析

表 1 给出了原型风机的数值模拟和实验结果对比,可以看出风量的数值模拟与实验结果的相对误差为 1.08%,噪声的数值模拟与实验结果的相对误差为 2%,误差均在 5%以内,满足工程应用对误差的计算要求。以原型风机 50%叶高处叶顶间隙监测点速度随时间的分布为依据,得到图 16 所示的 Kolmogorov 的 $-5/3$ 幂律^[16]分布,可以看出整体能谱基本符合普适湍动能谱分布。

表 1 原型风机的数值模拟与实验结果对比

参数	风量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	噪声/dB
数值模拟结果	13 472.23	68.62
实验结果	13 619.16	70.02
绝对误差	146.82	1.4
相对误差/%	1.08	2

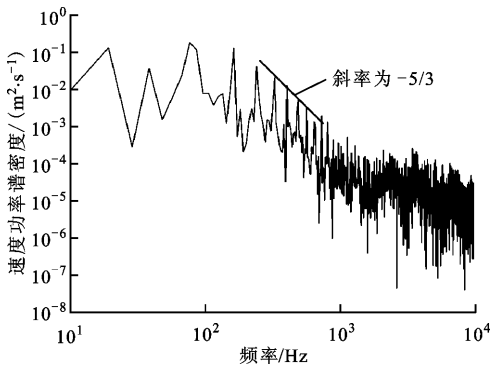


图 16 速度功率谱密度

表 2 给出了原型风机、仿鸮翼翼型风机及仿生耦合风机的数值模拟对比,可以看出仿生耦合叶片在最大流量时整体降噪幅度为 2 dB,且风量提升 4.69%。仿鸮翼翼型风机的整体降噪幅度为 1.41 dB,可以看出尾缘锯齿结构改善尾迹涡的降噪幅度约为 0.6 dB。

表 2 原型风机和仿生重构设计风机的数值模拟对比

模型	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	噪声/ dB
原型	969	13 472.23	68.62
仿鸮翼叶片	969	14 076.94	67.21
仿生耦合叶片	969	14 103.78	66.62

图 17 给出了原型风机、仿鸮翼翼型风机及仿生耦合风机的声压级频谱,可以看出仿鸮翼翼型风机和仿生耦合风机均改善了中低频区域的声压级分布,结合原型风机和两种仿生风机的流场结构,仿鸮翼翼型风机和仿生耦合风机的吸力面向压力面的过渡较为平缓,可以进一步改善叶片表面与静止部件之间的非定常相互作用。仿生耦合风机尾缘锯齿结构的施加使大部分中低频范围的宽频噪声和离散噪声在仿鸮翼翼型风机的基础上进一步降低,在 1 kHz 左右的频率范围内降噪效果较为显著。

功率谱密度反映了声波辐射能量随频率的变化关系。从图 18 所示的声压级功率谱密度图可以看

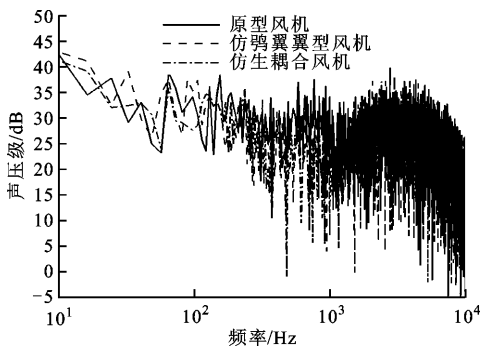


图 17 原型风机与仿声重构风机的声压级频谱图

出,中低频区域的声压级对整体计算频谱的总声压级贡献较大,仿鸮翼翼型风机的功率谱密度的峰值约为原型风机的一半,而仿生耦合风机的峰值虽然大于仿鸮翼翼型风机,但是在整个计算频段内的其他区域都有小幅降低,从而使整体声压级降低。这是由于尾缘锯齿结构在一定程度上虽然改善了尾迹涡分布,但是在涡脱落过程中会造成一小部分气流的不稳定性而引起离散噪声增加。

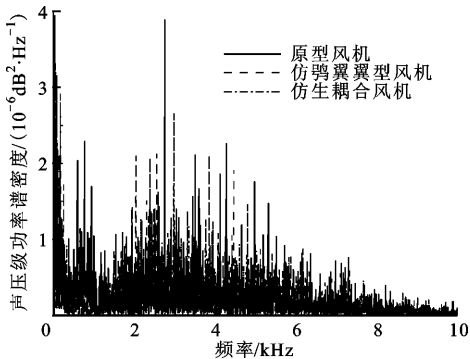


图 18 原型风机与仿声重构风机的声压级功率谱密度分布

倍频图可以显示出噪声的宽频特性,结合图 19 所示的 A 计权 1/3 倍频图进行分析,发现在 0~2 kHz 的频段范围内仿鸮翼翼型风机和仿生耦合风机与原型风机相比声压级呈现明显下降,仿生耦合风机的最大降噪幅度在 1 kHz 时为 8 dB,且在整个

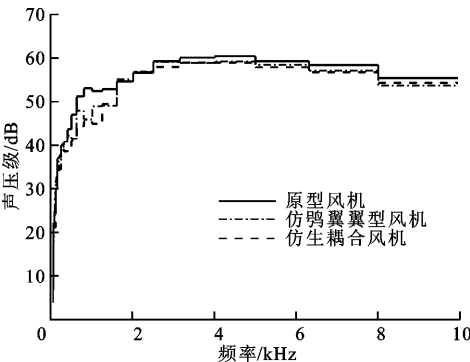
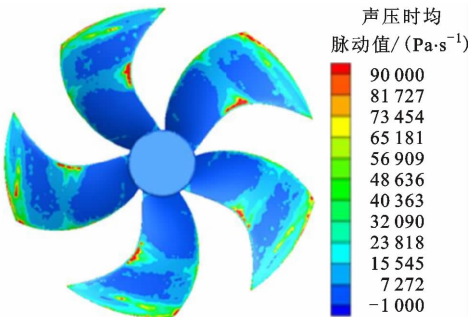


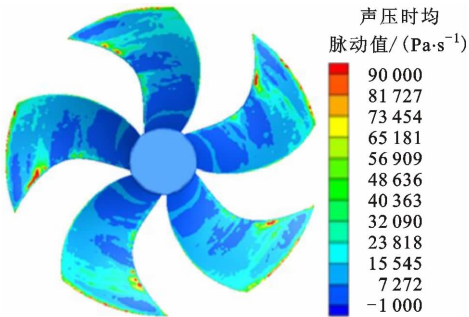
图 19 原型风机与仿声重构风机的 A 计权 1/3 倍频图

频段范围内仿鸮翼翼型风机和仿生耦合风机的声压级均有所下降。与此同时,与仿鸮翼翼型风机相比,仿生耦合风机的尾缘锯齿结构明显改善了低频区域的宽频噪声,使气流在流经轴流风机的湍流边界层及尾迹涡脱落所引起的气流脉动减弱。

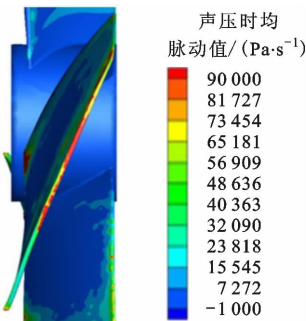
声压时均脉动值(PRMS)被定义为静压对时间偏导的均方根值^[17-18],能反映出风机整体各部分的声源强度,从而对风机进一步设计提供优化方向。从图 20 所示的原型风机的声压时均脉动图可以看出,噪声源主要集中在叶片前缘区域、叶尖区域以及叶片尾缘区域。由于原型风机的翼型设计不合理导致气流在流经叶片时对叶片产生了强烈冲击,从而造成气流持续产生不规则的局部压力脉动,在前缘产生了流动分离;叶片尾迹区域由于尾迹涡的不断脱落也形成了局部声源强度的增大;叶顶间隙处从



(a)吸力面



(b)压力面



(c)叶尖

图 20 原型风机叶片表面的声压脉动时均图

吸力面向压力面过渡过程中气流的不均匀性导致叶尖涡增强,从而使叶片与导风圈的非定常相互作用进一步增强。

图 21 给出了仿鸮翼翼型风机叶片表面的声压时均脉动图,可以看出仿鸮翼翼型风机改善了原型风机前缘区域的压力脉动强度,使局部声源强度减弱;图 22 给出了仿生耦合风机叶片表面的声压时均脉动图,可以看出仿生耦合风机在改善叶片前缘区域声压脉动强度的基础上,改善了叶片尾部的声源强度,即削弱了叶片尾迹的涡流噪声对整体声压级的贡献度。仿生耦合风机使气流在经过叶片前缘时能够平稳流经叶片表面,能够减小原型风机由于前缘流动分离造成气流对叶片前缘的冲击性,同时也使叶顶间隙处的流动从吸力面向压力面过渡更为平缓,使叶顶间隙处的泄漏涡的强度进一步减弱,表现

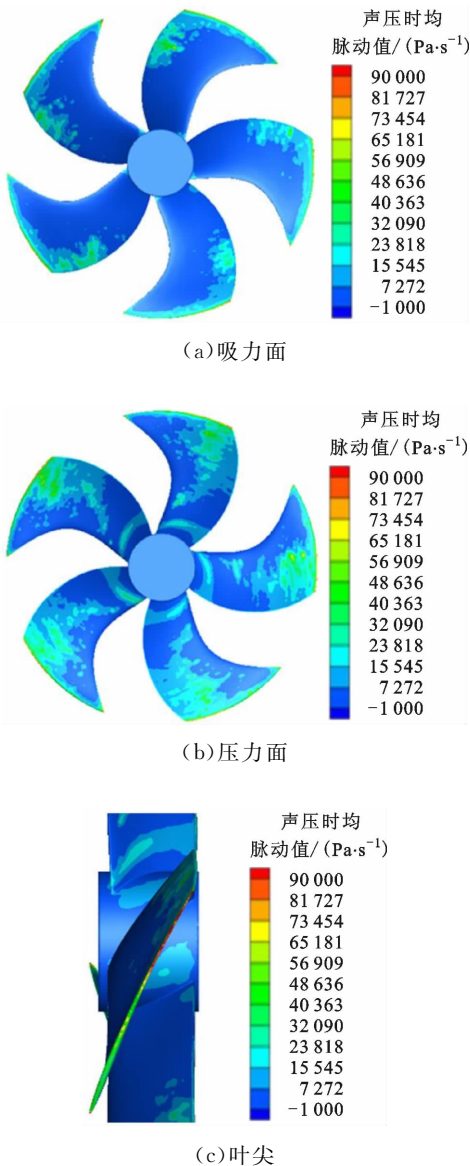


图 21 仿鸮翼翼型风机叶片表面的声压脉动时均图

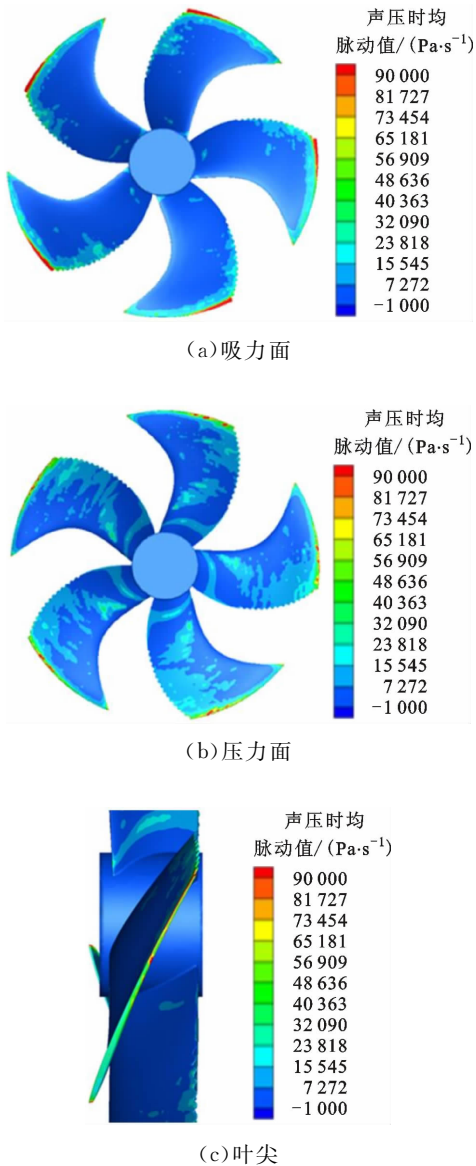


图 22 仿生耦合风机叶片表面的声压脉动时均图

为叶顶声源强度减弱,且叶片尾部的声源强度也有了明显的改善。这是由于尾缘锯齿能够耗散一部分声波辐射能量,使整体声压级降低。

通过进一步观察仿生耦合风机的声压时均脉动图,发现叶尖区以及在接近叶尖处的尾迹流产生声压脉动仍是主要噪声源,因此下一步可从控制叶尖处流动进行噪声控制。

4 结 论

选取鸮翼 40%翼展截面处翼型及边缘非光滑结构为耦合元素,对轴流风机叶片进行仿生耦合设计,并对原型风机和仿生耦合风机流场及声场的数值模拟结果进行对比分析,得出以下结论。

(1)与原型风机相比,仿生耦合风机的最大风量

提高 4.6%,降噪幅度为 2 dB。从静压和效率曲线可以看出,仿生耦合风机能满足风机正常运转时对性能的要求,在大流量运行工况范围内静压均有所提升,但提升程度稍小于仿鸮翼翼型风机。仿生耦合风机由于尾缘锯齿结构的施加使叶片整体轴向投影的迎风面积减小,导致做功能力稍有降低,同时整体质量减轻又使电机的负载减小,因此与仿鸮翼翼型风机相比,额定工况下效率降低程度不明显。

(2)仿生耦合风机改善了风机运转时中低频频率范围内的噪声特性,表现为宽频噪声和离散噪声均有所降低,且明显改善了 1 kHz 频率范围左右的声压级以及中低频区域的声波辐射能量,但部分离散噪声有所增加。这是由于尾缘锯齿结构在一定程度上虽然改善了尾迹涡,但在尾迹涡脱落过程中会造成一小部分气流的不稳定性而引起离散噪声增加。

(3)原型风机叶片厚度分布的不合理导致了气流在经过原型风机叶片时气流不稳定,造成前缘局部区域的流动分离,同时叶片尾部的尾迹涡脱落造成了叶片尾部声源强度增强。与原型风机相比,仿生耦合风机的气流在经过叶片前缘时能够平稳流经叶片表面,改善气流对叶片前缘的冲击性,减弱叶顶间隙处的泄漏涡强度,且尾缘处的声源强度减弱使轴流风机的整体声压级进一步降低。

参考文献:

- [1] 游斌,刘东瀛,伍光辉,等. 尾缘凹陷轴流风轮内流特性分析与降噪研究 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(3): 411-413.
YOU Bin, LIU Dongying, WU Guanghui, et al. Analysis of internal flow characteristics and noise reduction of axial-flow wind wheel in the trailing edge depression [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(3): 411-413.
- [2] 游斌,程志明,马列,等. 齿形尾缘轴流叶轮内流数值分析与实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 592-594.
YOU Bin, CHENG Zhiming, MA Lie, et al. Numerical analysis and experimental research on the internal flow characteristic of axial flow fan with tooth shaped trailing edge [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4): 592-594.
- [3] 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 on the effect of blade sawtooth trailing edge on reducing aerodynamic noise of air conditioner outdoor unit [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(10): 1681-1684.
- [4] 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): 103-108.
TANG Jun, WANG Jun, QI 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): 103-108.
- [5] 贺艳文,李学军,冯和英,等. 锯齿尾缘对叶片尾迹特性的影响 [J]. 机械工程与自动化, 2019, 212(1): 25-27.
HE Yanwen, LI Xuejun, FENG Heying, et al. Effect of sawtooth tail edge on wake characteristics of blade [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019, 212(1): 25-27.
- [6] HOWE M S. Aerodynamic noise of a serrated trailing edge [J]. Journal of Fluids and Structures, 1991, 5(1): 33-45.
- [7] HOWE M S. Noise produced by a sawtooth trailing edge [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 90(1): 482-487.
- [8] 秦静静,杨启容,王翠苹,等. 空调室外机气动与声学特性的研究 [J]. 流体机械, 2013, 41(5): 72-75.
QIN Jingjing, YANG Qirong, WANG Cuiping, et al. Investigation of acoustic and aerodynamic noise in air conditioner outdoor unit [J]. Fluid Machinery, 2013, 41(5): 72-75.
- [9] SHARLAND I J. Sources of noise in axial flow fans [J]. Journal of Sound & Vibration, 1964, 1(3): 302-322.
- [10] 刘庆萍. 轴流风机叶片仿生降噪研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2006: 1-5.
- [11] 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: 5-10.
- [12] 廖庚华. 长耳鸮翅膀的三维建模 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(S1): 432-436.
LIAO Genghua. Three-dimensional modeling of long-eared wings [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(S1): 432-436.
- [13] 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 Tecnology Edition), 2009, 39(2): 382-387.
- [14] LIU Q, QID, TANG H. Computation of aerodynamic noise of centrifugal fan using large eddy simulation approach, acoustic analogy, and vortex sound theory [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2007, 221(11): 1321-1332.
- [15] 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): 1-7.
- 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): 1-7.
- [16] AKIRA Y. Statistical derivation of Kolmogorov's-5/3 power law by turbulent-viscosity approach [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 1978, 45(3): 1019-1024.
- [17] LI D, LIU X. A comparative study on aerodynamic performance and noise characteristics of two kinds of long-eared owl wing models [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2017, 31(8): 3821-3830.
- [18] WANG M, LIU X. Numerical investigation of aerodynamic and acoustic characteristics of bionic airfoils inspired by bird wing [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(11): 4004-4016.
- (编辑 荆树蓉)

(上接第 25 页)

- [20] VELÁSQUEZ M, MONDRAGÓN F, SANTAMARÍA A. Chemical characterization of soot precursors and soot particles produced in hexane and diesel surrogates using an inverse diffusion flame burner [J]. Fuel, 2013, 104: 681-690.
- [21] VERMA P, PICKERING E, JAFARI M Y, et al. Influence of fuel-oxygen content on morphology and nanostructure of soot particles [J]. Combustion and Flame, 2019, 205: 206-219.
- [22] SEONG H J, BOEHMAN A L. Evaluation of Raman parameters using visible Raman microscopy for soot oxidative reactivity [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(3): 1613-1624.
- [23] WANG Y, LIANG X, TANG G, et al. Impact of lubricating oil combustion on nanostructure, composition and graphitization of diesel particles [J]. Fuel, 2017, 190: 237-244.
- [24] JANSMA H, FINO D, UITZ R M, et al. Influence of diesel fuel characteristics on soot oxidation properties [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 51(22): 7559-7564.
- [25] CADRAZCO M, SANTAMARÍA A, AGUDELO J R. Chemical and nanostructural characteristics of the particulate matter produced by renewable diesel fuel in an automotive diesel engine [J]. Combustion and Flame, 2019, 209: 130-142.
- [26] 王林. 不同特性燃料条件下柴油机缸内微粒纳观结构、表面官能团及氧化活性的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 117-119.
- [27] WEI L, CHEUNG C S, NING Z. Influence of waste cooking oil biodiesel on the nanostructure and volatility of particles emitted by a direct-injection diesel engine [J]. Aerosol Science and Technology, 2016, 50(9): 893-905.

(编辑 荆树蓉)