

采用仿鲤科鱼C型启动构型叶片的多翼离心风机气动性能研究

王加浩¹, 龚东巧², 刘小民¹, 田晨晔¹, 王越¹, 席光¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 青岛海尔智能研发有限公司, 266000, 山东青岛)

摘要: 受鲤科鱼类C型启动逃逸反应时高效率游动姿态及其周围涡流特征的启发,进行叶片仿生设计,以提升多翼离心风机的气动性能。首先,采用逆向工程方法获取了鲤科鱼C型启动姿态时鱼体中心线方程和水平剖面轮廓线方程,以C型启动时鱼体中弧线为基准,设计了仿生等厚叶片。其次,通过多翼离心风机气动性能数值计算和实验测试,得到了具有最佳进口安装角的仿生等厚叶片(O-BETB),采用O-BETB的多翼离心风机的风量增加了6.8%,噪声下降了0.5 dB(A)。最后,将仿生重构的鱼体流线型轮廓与O-BETB相耦合,得到仿生耦合叶片(CBB),以进一步提高多翼离心风机气动性能。结果表明:当采用CBB时,多翼离心风机的风量增大了8.3%,噪声下降了1.1 dB(A)。基于流场分析,发现具有仿生中弧线和鱼体轮廓特征的耦合叶片在前缘进口角及叶片型线具有更好的引流导向作用,叶间流道的低速分离旋涡明显小于另外两种叶轮;叶片尾缘的尾迹涡脱落引起气流不均匀性程度也最弱,有效缓解了尾流与蜗舌、蜗壳之间的非定常相互作用。通过多翼离心风机声场特性的分析,发现多翼离心风机的气动噪声主要集中在中低频段。CBB的采用,叶轮通道内分离涡被抑制,叶片尾流与蜗壳壁面之间非定常作用减弱,叶片表面和蜗舌处的声压脉动得到有效的控制,这也是CBB风机中低频噪声降低的主要原因。

关键词: 多翼离心风机;叶片;C型启动;仿生设计;气动性能;噪声

中图分类号: TH432 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209007 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0057-12



OSID 码

Aerodynamic Performance of Multi-Blade Centrifugal Fan with Bionic Blades Inspired by C-Type Start of Cyprinidae

WANG Jiahao¹, GONG Dongqiao², LIU Xiaomin¹, TIAN Chenye¹, WANG Yue¹, XI Guang¹

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

2. Qingdao Haier Technology R&D Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China)

Abstract: Inspired by the high-efficiency swimming posture of cyprinid C-type escape reaction and the characteristics of eddy-current around the fish body, the bionic blades are designed to improve the aerodynamic performance and reduce the noise of a multi-blade centrifugal fan. Firstly, the reverse engineering method is used to obtain the center line equation and horizontal profile equation of cyprinidae in C-type starting posture, and bionic equally-thick blades are designed and optimized based on the C-type middle-arc. Through the comparison of numerical calculation and experimental results of fan aerodynamic performance, bionic equally-thick blades with the optimal

收稿日期: 2022-01-20。 作者简介: 王加浩(1995—),男,博士生;刘小民(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1504601);国家自然科学基金资助项目(51676152)。

网络出版时间: 2022-04-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220412.1803.007.html>

installation angle (O-BETBs) are obtained. After applying the O-BETB to the prototype fan, the fan flow-rate increases by 6.8% while the noise decreases by 0.5 dB(A). Further, the reconstructed geometric profile of fish body is coupled into the O-BETB to obtain a coupled bionic blade (CBB) to further improve the aerodynamic performance of the multi-blade centrifugal fan. The results show that the flow-rate of a CBB fan is increased by 8.3% while the noise is reduced by 1.1 dB(A). The flow field analysis shows that the coupled blade with bionic middle arc and fish body contour has better guidance effect at the leading edge inlet angle and blade profile, and the low-speed separation vortex in the inter-blade channel is significantly smaller than that of the other two impellers; The wake vortex shedding at the trailing edge causes the weakest degree of air flow heterogeneity, which alleviates the unsteady interaction of the wake with the volute tongue and with the volute. Analysis of sound field characteristics shows that the aerodynamic noise of the multi blade centrifugal fan is mainly concentrated in the middle and low frequency bands. The reduced noise of CBB fans in the middle and low frequency bands is also mainly attributed to the use of the CBB, the suppression of separation vortex in impeller channel, the weakening of unsteady interaction between wake and volute wall, and the effective control of sound pressure pulsation on the blade surface and volute tongue.

Keywords: multi-blade centrifugal fan; blade; C-type starting; bionic design; aerodynamic performance; noise

长期的自然进化使鲤科鱼逐渐形成了一种低阻力、高效率的流线型身躯和游动方式。鲤科鱼类游动状态可以分为正常巡游状态和C型启动逃逸游动状态^[1]。C型启动逃逸游动状态下的鱼体躯体中线的具体变化为在短时间内由直线迅速地弯曲成“C”型^[2]。该状态下的鱼体表面及周围没有低速流动分离,流动阻力减小^[3]。

多翼离心风机具有结构紧凑、气动性能优良、能耗低等特点,这使其在空调等家用电器领域的应用必不可少^[4],多翼离心风机的气动性能主要受风道系统的集流器、叶轮和蜗壳这3个过流部件的影响。多翼离心风机叶片普遍为圆弧形叶片,存在着叶片进口边压力脉动较强、叶片出口尾迹涡脱落严重、叶间流道内部流动损失大和叶片型线不合理等一系列问题。许多学者对叶轮引起的流动不稳定现象、噪声产生的原因及相关研究方法进行了深入的研究。基于计算流体力学(CFD)和实验研究方法。肖千豪等采用最优拉丁超立方的优化方法获得了较优的单圆弧叶片型线,整体提高了风机多工况下的风量和效率^[5]。Kim等采用正交试验设计和进化算法(EA)获得了噪声最低的最佳等厚圆弧叶片参数集^[6]。王加浩等指出单圆弧叶片的气动性能比双圆弧叶片差,通过采用响应面法对双圆弧叶片型线的多个设计参数进行优化,提高了风机的整体气动性能^[7]。此外,Adachi等通过实验研究了圆弧叶片的

进口角、出口角、倾角、弦长等参数对多翼离心风机流场和气动性能的影响^[8]。上述研究表明,多翼离心风机叶片型线的优化对提高风机的气动性能和降低噪声有明显的效果。然而,由于圆弧形叶片形状特征和传统叶片设计方法的局限性,使得单纯的依赖叶片优化设计已不能满足风机更高的性能要求。

仿生技术是工程技术与生物科学相结合的交叉学科,为流体机械气动性能的提升提供了新的途径。近年来,研究人员采用仿生技术来提升风机的空气动力学性能^[9],如海鸥翼^[10]、长耳鸮翼^[11-12]、鲨鱼鳍和表皮^[13]、海豚头部特征^[14]等,这些经自然进化形成的结构为风机叶片的减阻、降噪和节能改进设计提供了新的途径。Liao等^[15]将雀鹰和鸮的翼型特征应用于轴流风机的仿生优化设计,仿生叶片的气动性能明显优于原叶片。王雷等将长耳鸮翅膀进行仿生翼型重构,并将其应用于轴流叶片的改型设计中,使得风机风量提升的同时,有效降低了风机的气动噪声^[16]。王梦豪等提取了长耳鸮翅膀40%展向的翼型截面,将其应用于多翼离心风机叶片的型线中,减弱了叶间流道内旋涡流和叶片与蜗舌的非定常相互作用^[17]。家用电器中的多翼离心风机叶片大多采用等厚度的金属叶片,若材料满足热性能和工艺要求,也可使用不等厚度叶片。多翼离心风机叶片中弧线主要采用单圆弧和双圆弧中弧线,中弧线形状及控制参数决定了叶片的气动性能。圆弧形

叶片形状与C型启动下的鱼体的中心线形状相近,均具有前向弯曲特征。同时,鱼类高效游动姿态下身体中心线所呈现的流线型样条曲线在叶片中弧线上的应用还尚未有人研究。

本研究从鲤科鱼C型启动游动特性出发,提出了仿生等厚叶片(BETB)和仿生耦合叶片(CBB),并将其应用到多翼离心风机的设计中。首先采用逆向工程方法提取了C型启动姿态下鱼体横截面中心线和轮廓型线。根据仿生中弧线进、出口角特性和叶片降噪机理,设计了不同方案的BETB。以原型风机为参考,通过数值求解RANS方程和FW-H方程,得到了气动性能和噪声最优的仿生等厚叶片(O-BETB)。在O-BETB中弧线的基础上,对鱼体的横截面轮廓进行耦合重建获得了CBB。最后,对比分析了原型风机、O-BETB风机和CBB风机的流场特性和噪声产生机理。从仿生流动控制控制和仿生降噪的角度,为多翼离心风机的综合性能优化提供了有益的参考。

1 鱼体特征型线提取与仿生叶片重构

1.1 C型启动特征型线提取

鲤科鱼在捕食或受到外界刺激时会产生猝发运动状态,使其从静止突然加速,在极短的时间内的鱼体中心线由直线迅速地弯曲成C型,并形成较高的速度,称为C型逃逸启动。该过程中鱼体表面及周围则没有流动分离和旋涡的产生,仅在鱼尾尾迹较远处会形成脱落涡^[3]。考虑到鱼体在该姿态下具有高效率的流动特性以及较好的流线型外形特征,将其进行多翼离心风机叶片中弧线仿生应用,以提高风机的气动性能。采用仿生方法的本质为利用某种仿生结构对流体的流动控制机理进行探索应用,这种控制效果对于水和气体等常规流体的作用效果是不变的,并且鱼类游动和风机的运行的工质和相关流动参数虽然存在一定差异,但两种流动工质的本质均为不可压缩黏性流体,两种状态下的流动速度以及雷诺数差异不大,因此流动工质和相关流动参数的差异基本可以忽略。不同种类鱼的仿生结构特征虽不同,但其仿生结构的作用本质不变,首次选择自然界中机动性强、较为普遍的草鱼作为研究对象。通过对其进行刺激,使其产生最大C型逃逸启动运动状态,如图1所示。为保证所获得的仿生结构的代表性,获取该姿态下的大量特征型线并比较分析,提取最具有代表性的平均状态下鲤科鱼C型启动鱼体中心线。利用PIV系统拍摄鱼体C型启动姿

态下的鱼体形状及流场结构,拍摄场景如图2所示。通过软件Davis进行解析,并采用阈值分割法提取鱼体中间截面和中心线的二维轮廓和特征点,将特征点进行连线,获得C型启动姿态下鱼体中间横截面的型线,如图3所示。



图1 C型启动逃逸反应

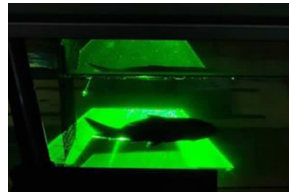


图2 鱼体拍摄场景

Fig. 1 C-type start reaction

Fig. 2 Fish shooting scene

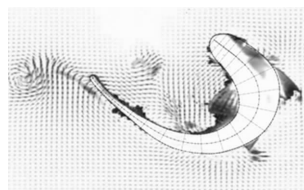


图3 鱼体C型姿态中心截面

Fig. 3 Center section in C-type posture

以鱼体轮廓的最低点为原点建立图4中的鱼体型线坐标系,获得鱼体横截面轮廓曲线和中心线的几何特征点坐标 (x, y) 。根据弯曲特征将鱼体中心线分为4段,分别为曲线 a 、 b 、 c 、 d 。采用最小二乘法对鱼体中心线特征点进行拟合修正,所形成的拟合曲线如图5所示,鱼体中心线拟合方程的 R^2 均在0.999以上,根据方程所形成的曲线与鱼体中心线形状较一致,保证了拟合曲线具有与鱼体中心线相同的性能特性。拟合曲线 $a(y_{aj})$ 、 $b(y_{bj})$ 、 $c(y_{cj})$ 、 $d(y_{dj})$ 所对应的方程分别为

$$y_{aj} = j[-0.282\ 14 - 241.55(1 - e^{323.87x}) + 1.25x] - 153 \leq x < 0, R^2 = 0.999\ 34 \quad (1)$$

$$y_{bj} = j\left[48.039\ 5 \sqrt{1.002\ 49 - \left(\frac{x+0.951\ 4}{61.034}\right)^2} + 47.973\ 8\right] \quad 0 \leq x < 60, R^2 = 1 \quad (2)$$

$$y_{cj} = j\left[6\ 559.984\ 2 \sqrt{0.000\ 6 - \left(\frac{x+1.377\ 6}{1.378}\right)^2} + 52.030\ 8\right] \quad 60 \leq x < 42.5, R^2 = 1 \quad (3)$$

$$y_{dj} = j[117.608 - 0.659\ 4x - 0.002\ 38x^2] \quad 42.5 \leq x < 10.5, R^2 = 0.999\ 5 \quad (4)$$

式中: j 表示不同大小鱼体中线尺寸的差异度, $j = 0.36 \sim 1.8$; x 、 y 分别为鱼体横截面轮廓的横坐标和纵坐标。其中,曲线 d 为鱼头处型线,鱼头处为头

骨,而非脊柱骨,该处鱼体中心线近似为直线,与多翼风机叶片中弧线的曲线特征不符,同时考虑到叶片进口角特点,为保证叶片的气动性能,曲线 d 不应用于叶片中弧线上。拟合曲线 $a(y_{aj})$ 、 $b(y_{bj})$ 、 $c(y_{cj})$ 组成仿鲤科鱼C型启动叶片中弧线,图5中A点为仿生叶片中弧线进口点,B点仿生叶片中弧线出口点。

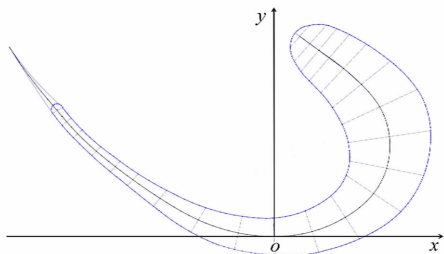


图4 鱼体特征型线坐标

Fig. 4 Fish body characteristic line coordinates

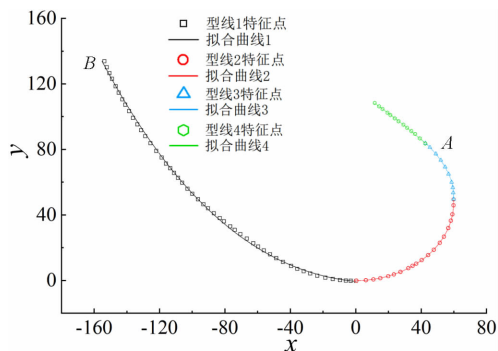


图5 鱼体中心线特征点及其拟合曲线

Fig. 5 Feature points of fish body centerline and its fitting curve

根据图4中鲤科鱼体中间横截面剖面轮廓的特征点坐标,采用最小二乘法拟合获得鱼体轮廓曲线方程如下

$$y_1 = \frac{6}{35} \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 - x^2}, -0.05 \leq x < 0 \quad (5)$$

$$y_2 = \sqrt{\left(\frac{0.13-x}{1750}\right)^2}, 0 \leq x < 0.1 \quad (6)$$

$$y_3 = \frac{10}{299}(x - 0.16), 1 \leq x \leq 0.161 \quad (7)$$

式中: y_1 为头部轮廓线1的纵坐标; y_2 为中间轮廓线2的纵坐标; y_3 为尾部轮廓线3的纵坐标。鱼体翼型结构如图6所示,其上下翼型表面对称, C_l 是鱼体横截面轮廓的弦长。

1.2 仿生等厚叶片重构

叶片中弧线的弯曲特性直接影响到风机的气动性能。本研究中选择原型叶片型线设计参数为采

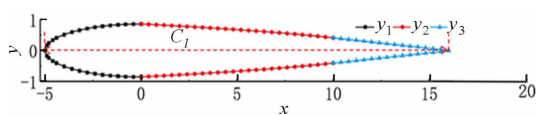


图6 鱼体中间截面型线

Fig. 6 The upper profile of the middle section of the fish body

用响应面法多参数寻优设计获得,该叶片较同类风机叶片的整体气动性能较优。叶片的进口角 $\beta_1 = 65^\circ$,出口角 $\beta_2 = 165^\circ$,中心角 $\theta = 6^\circ$,如图7所示。采用鲤科鱼C型启动鱼体中心曲线作为中弧线的仿生叶片的形状由曲线方程(1)~(3)确定。与原型叶片的中弧线相比,仿生中弧线的固定只需要确定叶片进口角 β_1 ,无其他尺寸参数控制叶片中弧线形状,降低了叶片中弧线设计的难度和复杂性。仿生中弧线左右等距偏移形成仿生等厚叶片(BETB)的横截面。图8是BETB横截面与鱼体中心线形状的比较,两者的形状基本相同。考虑到BETB中弧线的特点和叶片的气动性能影响机理,BETB的 β_1 设计范围选择为 $5^\circ \sim 25^\circ$,不同中弧线方案的 β_1 值间隔为 2.5° 。由此得到了9种BETB设计方案,分别为 $\beta_1 = 5^\circ, 7.5^\circ, 10^\circ, 12.5^\circ, 15^\circ, 17.5^\circ, 20^\circ, 22.5^\circ, 25^\circ$ 。不同 β_1 的BETB如图9所示。

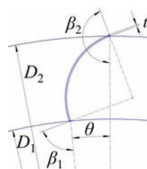


图7 原型叶片型线
Fig. 7 Original blade profiles

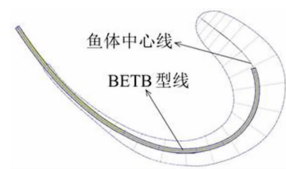


图8 BETB与鱼体中心线
Fig. 8 BETB and fish centerline

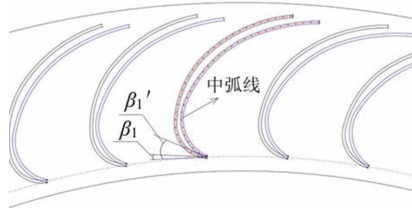


图9 不同进口角 β_1 下的BETB
Fig. 9 BETB with different β_1

2 数值计算模型和方法

2.1 研究对象与计算模型

本研究中多翼离心风机为双进气形式,叶轮中间由中盘间隔。原型机叶片为单圆弧等厚叶片,风机的风道系统主要由蜗壳、叶轮和集流器组成。图

10 为原型风机风道系统的各部分主要结构。

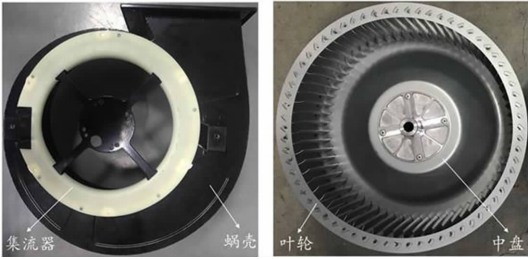


图 10 原型多翼离心风机

Fig. 10 Prototype multi-blade centrifugal fan

风机计算域划分为上、下进口域,上、下叶轮区域,蜗壳域和出口域。考虑到多面体网格的质量高和适应性好的优点,采用 Fluent meshing 对计算域进行多面体网格划分。为满足瞬态计算中湍流模型和壁面函数对计算域网格质量的要求,在蜗壳与叶轮的固体壁面添加边界层,使壁面处第一层网格的 y^+ 处于 30~100。图 11 为所建立的计算域模型网格。为控制网格数量并保证计算的准确性,以风量作为响应进行网格无关性验证,确定计算域网格数为 585 万,叶轮和蜗壳区域分别为 306 万和 192 万。

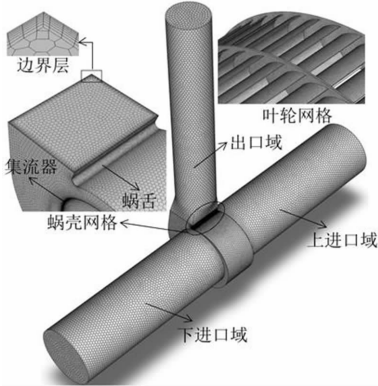


图 11 计算域模型及网格

Fig. 11 Computational domain model and grid

2.2 计算方法

采用数值计算软件 ANSYS Fluent 对风机的流动和声场特性分别进行计算。流动控制方程为非定常雷诺时均 Navier-Stokes 方程,湍流模型采用 Standard k-epsilon 两方程模型,近壁面函数选用 Standard Wall Functions,壁面的边界条件采用无滑移边界条件,压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法。为保证计算精度,控制方程的湍动能和湍流耗散率均采用 Second Order Upwind 格式,压力项采用 PRESTO! 离散格式。根据实际试验状况,风机上、下进口给定总压边界条件,总压值均取为

101 325 Pa;风机出口给定静压边界条件,出口静压为 101 325 Pa。风机中的旋转区域即叶轮流体域,其在额定工况转速为 $810 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,定常计算采用 MRF 方法。为保证初始瞬态计算有比较好的初始流场,以稳态计算的收敛解作为非定常计算的初始值。在瞬态计算中,时间项选用 Second Order Implicit 格式,叶轮区域仍为旋转区域,但使用滑移网格方法。设置 K、epsilon 及黏性项等各量的收敛残差为 10^{-6} 。瞬态计算和噪声计算的时间步长由下式^[19]确定

$$\Delta t = \frac{60}{Kvz} \tag{8}$$

式中: $K=40$ 为每一个时间步内的最大迭代步数; $v=810 \text{ r/min}$ 为叶轮转速; $Z=56,60$ 为叶片数,分别对应于下文中 CBB 和 BETB 风机的叶片数。时间步长取为 $3.125 \times 10^{-5} \text{ s}$,叶轮旋转 4 周。

风机气动噪声数值计算目前常采用方法为瞬态计算结合声类比理论的 FW-H 方法,即通过瞬态计算获得近场的风机内部流动信息和叶轮、蜗壳壁面的声压脉动变量,结合 FW-H 方程得到风机的远场噪声和接收点噪声的时域信息,再通过快速傅里叶变换得到声压级频谱,进一步获得声场的声压、声源强度等信息^[20]。因此,将上述风机瞬态流动计算收敛后的结果作为 FW-H 声学方程计算的输入项,设置叶轮和蜗壳壁面为噪声源,进一步计算叶轮旋转 4 周的气动噪声。噪声接收点根据 GB/T 2888—2008 中的通风机噪声实际测试要求进行布置,风机位于球心处,4 个噪声接收点均布于水平面与下半包络球面相交的圆周上,图 12 为噪声测点分布情况。根据风机计算域模型的中心坐标,计算中接收点的坐标分别设置为 $A(0 \text{ m}, -1 \text{ m}, -1 \text{ m})$ 、 $B(1 \text{ m}, -1 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 、 $C(0 \text{ m}, -1 \text{ m}, 1 \text{ m})$ 、 $D(-1 \text{ m}, -1 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 。噪声计算结果为 4 个测点上噪声的算术

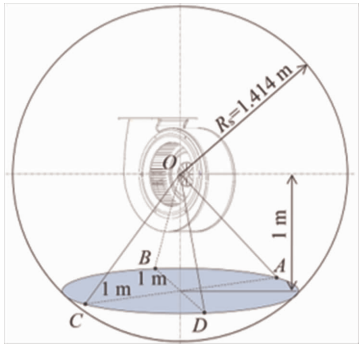


图 12 噪声监测点分布

Fig. 12 Distribution of noise monitoring points

平均值。

2.3 计算结果及验证

风机气动性能测试按照 GB/T 1236—2000 中的要求进行,通过改变多喷嘴装置中喷嘴大小和数目,再经数据采集系统处理得到风机各个工况点动态的数据。为减小测量误差,风机需热机 30 min 后进行测试。原型机气动性能测试场景如图 13 所示。风机噪声测试在专业半消音室中进行,根据 GB/T 2888—2008 中噪声测试要求进行,半消音室中噪声测点的布置与噪声计算中声源接收点位置相同,测量仪器采用 CRY2120 型声压传感器测量声压,其测试精度为±0.2 dB。噪声测试场景如图 14 所示。



图 13 风机气动性能测试场景

Fig. 13 The aerodynamic performance test of the fan

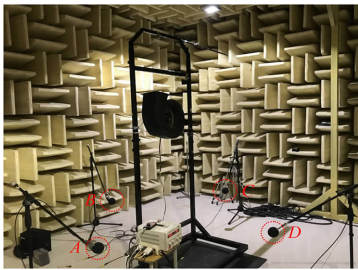


图 14 风机半消音室噪声测试场景

Fig. 14 The noise test of the fan

原型风机在 0 Pa 静压工况下的风量和噪声实验测试与计算结果如表 1 所示。风量实验测量值为 $1\,219\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,计算值为 $1\,245.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,相对误差为 2.2%。噪声实验测量值为 67.4 dB,数值计算值为 69.5 dB,绝对误差为 2.1 dB,相对误差为 3.02%,噪声计算误差和风量计算误差都在 5% 以内,表明本文数值计算模型及方法可靠,能够准确预测本研究中多翼离心风机的气动性能。

表 1 原型风机噪声实验结果与计算结果

Table 1 Experiment and calculation noise of prototype fan

参数	转速/(r·min ⁻¹)	噪声/dB	风量/(m ³ ·h ⁻¹)
实验测试	810	67.4	1 245.5
数值计算	810	69.5	1 219
绝对误差	0	2.1	26.5
相对误差/%	0	3.02	2.2

3 结果分析

3.1 气动性能分析

出口 $p_s=0\text{ Pa}$ 工况下原型叶片风机和不同 β_1 的 BETB 风机的流量和声压级(SPL)如图 15 所示。

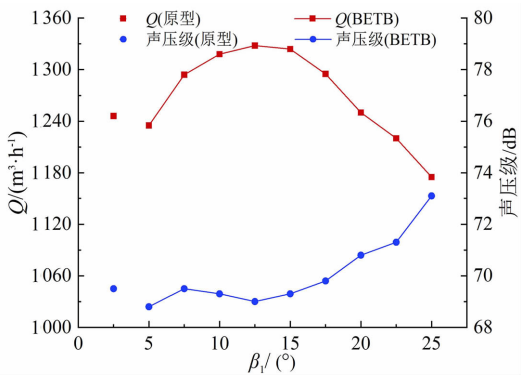


图 15 不同叶片方案下流量和声压级随进口角的变化

Fig. 15 Variation of Q and SPL with β_1 for different schemes

从图中可以看出,随着 β_1 的增加,BETB 的流量呈现先增大后减小的趋势。当 β_1 在 12.5° 和 15° 之间时,流量达到最大值。当 β_1 大于 17.5° 时,流量随 β_1 的增大而线性减小。这主要是因为 β_1 越大,叶片出口角 β_2 越大,导致叶间流道出口堵塞,从而降低了流量。与原型风机相比,BETB 风机在 β_1 为 7.5° 、 10° 、 12.5° 、 15° 和 17.5° 时的流量优于 OETB 风机。从不同 β_1 的 BETB 风机的噪声分布可以看出,当 β_1 在 $5^\circ\sim 15^\circ$ 范围内时,噪声波动较小,在 β_1 为 5° 和 12.5° 时,气动噪声最低。当 β_1 大于 15° 时,随着 β_1 的增大,噪声有急剧增加的趋势,这主要是由于叶间流道出口气流受阻所致。综合考虑不同 β_1 下 BETB 风机的流量和噪声,确定 $\beta_1=12.5^\circ$ 为最佳仿生中弧安装角度,具有该中弧线的叶片为最佳仿生等厚叶片(O-BETB)。O-BETB 风机在 $\beta_1=12.5^\circ$ 时的流量为 $1\,330\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,比原型风机的风量提高了 6.8%;噪声为 69.0 dB,比原型风机的噪声降低了 0.5 dB。

3.2 建立仿生耦合叶片

考虑到 O-BETB 的等厚特性对叶片性能的提升有限,结合鱼体流线型轮廓结构的低流阻特性,对 O-BETB 表面进行非等厚耦合仿生设计,进一步提高风机的气动性能。结合 O-BETB 的最优仿生中弧线和图 6 中鱼体的横截面轮廓型线,对 O-BETB 进行仿生耦合设计。首先,根据 O-BETB 的中弧长度和鱼体横截面的 C_1 长度,按比例重构鱼体横截面曲线方程(5)~(7)。然后,根据式(5)~(7),将鱼体

的横截面曲线离散为特征坐标点,并根据鱼体轮廓厚度分布特征将特征点布置在中弧线两侧。通过样条曲线拟合将特征点连接成闭合曲线,从而形成仿生耦合叶片(CBB)。

图 16 显示了原型叶片、O-BETB 和 CBB 的横截面结构的比较。O-BETB 和 CBB 的中弧线均为 $\beta_1=12.5^\circ$ 的仿生中弧线。根据 3 种叶片轮廓得到的原型叶轮、O-BETB 叶轮和 CBB 叶轮分别如图 17 (a)、图 17(b)和图 17(c)所示。O-BETB 叶轮和原型叶轮是等厚叶片,所以保持叶片数为 60 不变。为了保证种叶轮的叶栅稠密度相同,CBB 叶轮的叶片数为 56 片。从图 17 可以看出,由 3 种叶片形成的叶间流道的形状存在显著差异。从进口到出口,原型叶轮的叶间流道呈逐渐收缩的形状,BETB 叶轮的叶间流道呈先扩大后逐渐收缩的形状。由于 CBB 叶轮和 BETB 叶轮采用相同的中弧线,叶轮流道也呈现出先扩大后逐渐收缩的形状,但其仿生鱼

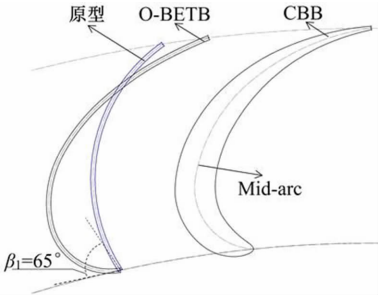
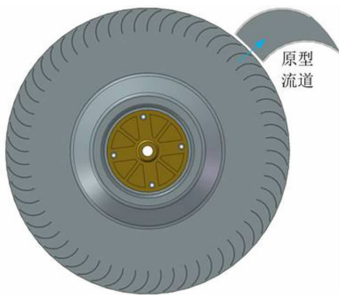
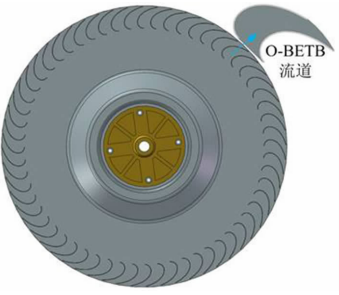


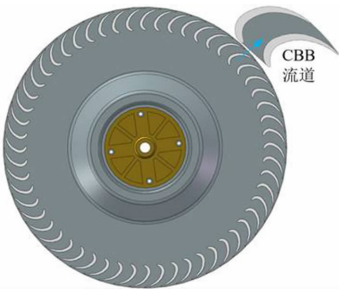
图 16 原型叶片、O-BETB 和 CBB 的横截面轮廓
Fig. 16 Cross-section of prototype blade,O-BETB and CBB



(a)原型叶轮



(b)O-BETB 叶轮



(c)CBB 叶轮

图 17 风机叶轮示意图
Fig. 17 Fan impellers

体外形使叶轮流道过渡更加平滑,叶片吸力面和压力面的曲率变化也不同。

为验证 CBB 风机的气动性能,对 O-BETB 风机和 CBB 风机在不同 p_s 工况下的气动性能进行计算,得到 3 种风机的 p_s - Q 性能曲线如图 18 所示。

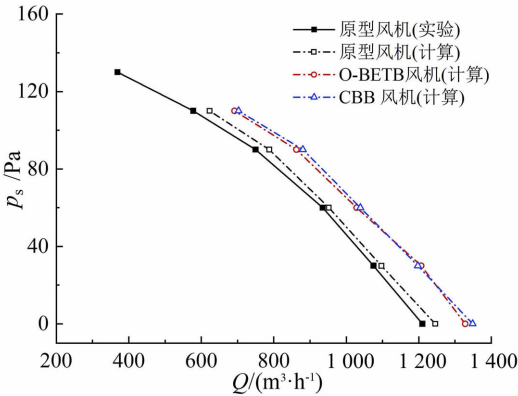


图 18 p_s - Q 性能曲线
Fig. 18 p_s - Q performance curve

对比图 18 中的原型风机在不同静压工况点风量的数值结果与实验 p_s - Q 性能曲线,可以看出风量计算与实验结果的变化趋势相同,随着出口静压的降低,风量先缓慢增大后快速增加。在出口静压为 0 Pa 时,风量最大,这进一步说明了本文计算方法的准确性。随着 p_s 的增加,3 种风机的流量均呈下降趋势。O-BETB 风机和 CBB 风机在所有工况下的流量均大于原型风机。O-BETB 风机和 CBB 风机的 p_s - Q 性能曲线实现了对 OETB 风机的 p_s - Q 性能曲线的覆盖。这表明两种仿生叶片的风机在所有工况下的气动性能均较原型风机有显著提升。在低 p_s 工况下,O-BETB 风机的流量与 CBB 风机基本相同。在高 p_s 工况下,CBB 风机的流量明显高于 O-BETB 风机。这表明 CBB 具有更强的做功能力,尤其是在高 p_s 工作条件下。在 $p_s=0$ Pa 下,CBB 风扇的流量最大。与原型风机相比,CBB 风机

的流量增加 $103.5\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 相对增加了 8.3% , 而在相同流量工况下, CBB 风机的风压大于 O-BETB 和 OETB 风机, 因此 CBB 风机的综合气动性能最好。

在 $p_s=0\text{ Pa}$ 工况下, 3 种风机的噪声在各个测点的计算结果见表 2。O-BETB 风机和 CBB 风机的噪声分别为 69.0 dB 和 68.4 dB 。结合上述风机风

表 2 风机各测点噪声值

Table 2 Noise at measurement points of fans

测点	噪声/dB		
	原型风机	O-BETB 风机	CBB 风机
A	67.7	67.3	66.6
B	71.1	70.3	70.2
C	66.9	65.9	65.1
D	72.3	72.5	72.1
平均值	69.5	69.0	68.4

量分析, 与原型风机相比, BETB 风机在流量增加了 6.8% 的基础上, 噪声降低了 0.5 dB 。CBB 风机的流量在 BETB 风机的基础上进一步增加 1.3% , 噪声进一步降低 0.6 dB , 其中 A、C 两个测点的降噪效果最为明显。在 3 种风机中, CBB 风机在各种工况下的气动性能和噪声特性是最优的, CBB 风机的耦合仿生结构特性可以进一步提高风机的流量, 同时降低气动噪声。

3.3 风机内部流动特性分析

通过分析 3 种风机在最大流量工况点的内部流动状况来揭示仿生叶片提高风机气动性能的原因。为了分析原型风机与仿生风机内部不同位置截面的流动状态, 揭示叶轮内部流动的改善效果, 这里针对沿多翼离心风机轴线方向上不同距离处的 3 个截面进行分析, 如图 19 所示。其中, 图 19(a) 中的 20% 叶轮轴向距离截面为靠近风机主进风口侧的叶轮截

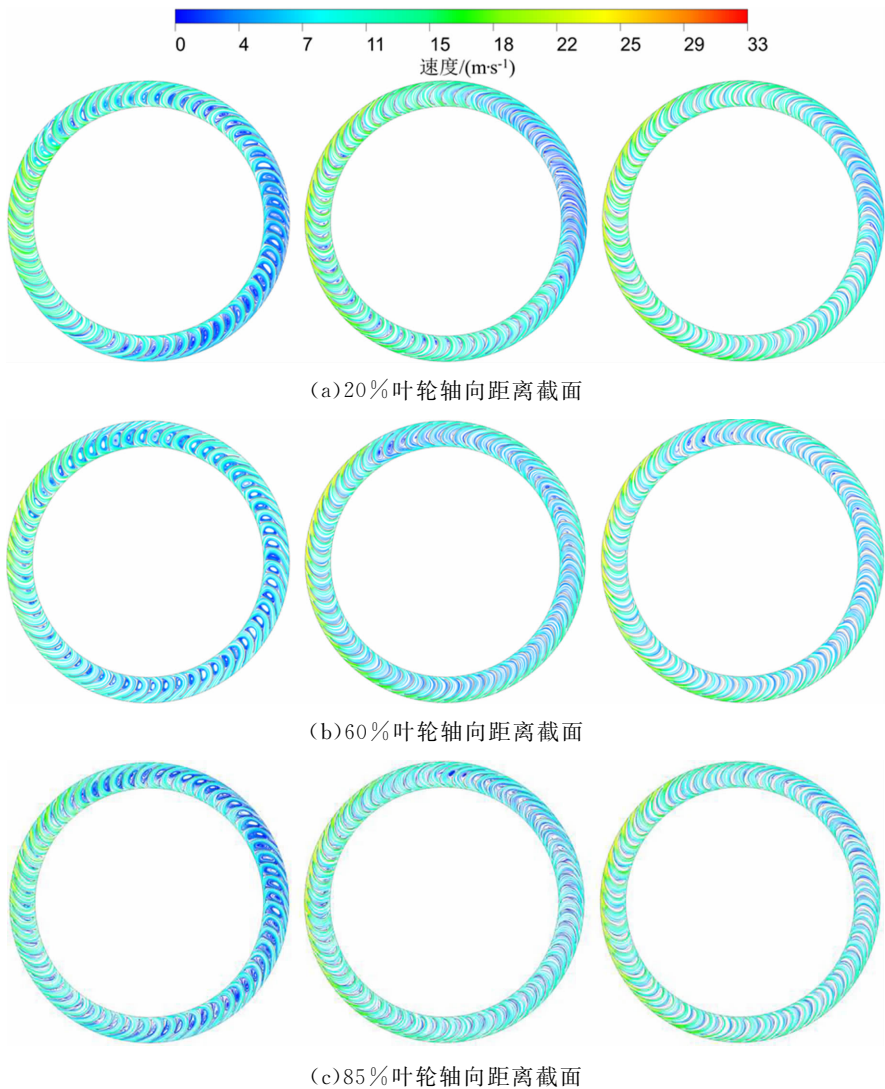


图 19 不同截面叶间流道流线图

Fig. 19 Flow diagram of the flow path between the blades of different sections

面,图 19(b)中的 60% 叶轮轴向距离截面为靠近叶轮中盘处的叶轮截面,图 19(c)中的 85% 叶轮轴向距离截面为靠近副进风口侧的叶轮截面。在沿叶轮轴向长度上,靠近中盘位置处的叶间流道内流动最为稳定,两侧进风口处叶间流道内的流动分离现象最为严重,叶片背面出现较为明显的低速旋涡区域,原型风机和仿生优化风机呈现相同的变化规律,其中以 CBB 叶轮叶间流道内的低速分离程度最弱,宏观表现为叶轮做功能力更强和产生的涡流噪声更小。在相同的叶轮截面上,O-BETB 叶轮和 CBB 叶轮的叶间流道内的旋涡和叶片吸力面的流动分离程度均相对原型风机得到明显改善,这是由于采用仿生中弧线的叶片进、出口角更符合气流进入叶轮时的流动角度,叶片中弧线的曲线特征对气流有更好的引导和做功作用,使得叶间流道内的速度分布更加均匀,抑制了叶道内的旋涡的产生与发展,改善了叶间流道内的漩涡堵塞程度,进而减小了叶轮内部的局部能量损失和涡流噪声,提高了风机的风量和效率。由于两种叶片的中弧线均采用仿鲤科鱼 C 型启动中心线,使得两者叶轮内的流场呈现相同的

流动特点,流动的改善程度及位置几乎一致。其中,由于 CBB 叶片在 O-BETB 叶片的基础上表面添加了鱼体翼型,使得气流更好的附着在叶片表面,叶片吸力面的低速气流的流动分离程度进一步减弱,抑制了旋涡流的产生与发展,从而使叶间流道内的气流流动更加稳定,表现为风机气动性能的进一步提高和宽频噪声的进一步降低。

3 种风机在 60% 叶轮轴向距离截面及蜗舌处的湍动能分布如图 20 所示,与原型风机相比,两种仿生叶片风机在叶间流道和蜗舌处的较强湍动能区域均得到有效抑制并消失。这是由于仿生叶片的流线型中弧线结构以及进出口角度特点使其叶道内流动能量损失减弱,同时在该叶片出口段型线的控制下,叶片出口尾流能够被蜗舌更好的分流,减小了蜗舌处湍流脉动,从而使得这两处的湍流耗散情况得到有效缓解。两种仿生叶片风机在出口扩压区域湍流脉动区域相对原型风机较大,容易造成出口扩压区域较大的能量损失和流动紊乱。O-BETB 风机与 CBB 风机流场分布情况几乎一致,但 CBB 叶片采用鱼体轮廓特征,使得风机内部流动更加稳定。

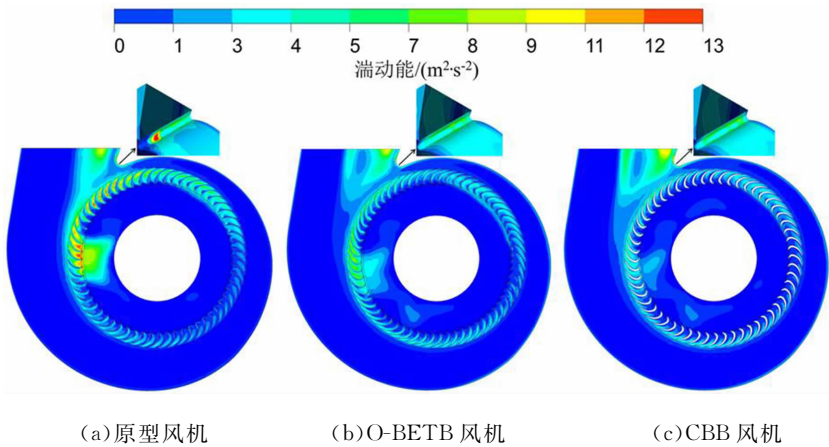


图 20 60% 叶轮轴向截面及蜗舌表面湍动能分布

Fig. 20 The distribution of turbulent kinetic energy on the 60% impeller section and volute tongue surface

3.4 叶轮区域涡核脱落分析

原型与仿生叶轮在 Q 准则的 $65 \times 10^5 \text{ s}^{-2}$ 等值面的涡核心区分布如图 21 所示。3 种叶轮在靠近蜗壳出口区域和蜗舌区域的涡核脱落明显,这分别是由于这两处区域的较大气流速度在叶片出口边所形成的气流紊乱程度大和蜗舌处壁面气流的非定常相互作用强所在造成的。两种仿生叶轮的涡结构与原型叶轮有着明显的差别,仿生叶轮在前后盘侧泄露涡以及叶片吸力面和出口边的分离涡相对于原型叶轮明显减少、变薄,但在叶片进口边的冲击涡改善

程度并不明显。由于叶片出口边和前后盘侧距离蜗壳壁面较近,吸力面的分离涡产生在叶片背侧壁面上,对噪声的贡献较大。O-BETB 叶轮与 CBB 叶轮所产生的涡及分布几乎相同,CBB 叶轮在叶片进口处的冲击涡和叶片表面强度相对 O-BETB 叶轮较小,宏观反映了叶片涡流噪声的降低。

3.5 噪声分析

图 22 为原型风机、O-BETB 风机以及 CBB 风机在声压接收点 C 处的声压级频谱。多翼离心风机在中低频区域的声压级对整体计算频谱的总声压

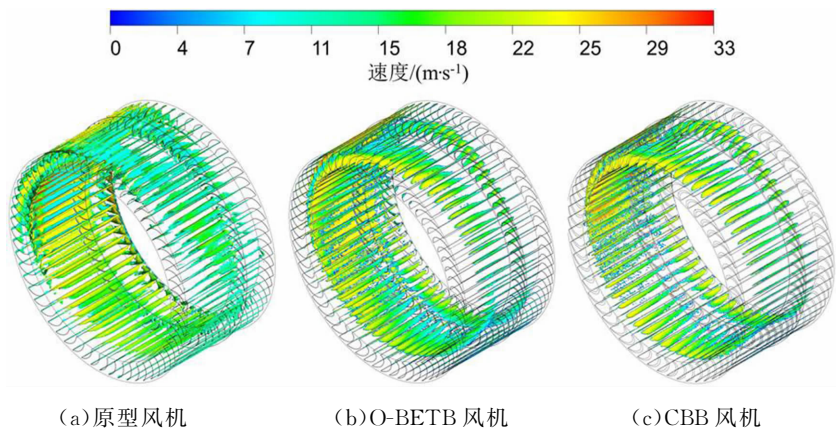


图 21 叶轮内部涡结构分布

Fig. 21 Vortex structure distribution inside the impeller

级贡献较大,两种仿生风机在低中频段区域的声压级相对原型风机的降低程度比较明显,间接反映了仿生风机噪声降低的原因。结合流场分析可以得出这部分噪声的降低主要是宽频涡流噪声和进出口干涉噪声。其中,CBB 叶片的鱼体翼型轮廓的施加使得大部分低中频区域的宽频涡流噪声在 O-BETB 的基础上进一步降低。原型风机和 O-BETB 风机的通过频率为 810 Hz,CBB 风机的叶片旋转频率为 756 Hz,与图 22 中计算频率一致,噪声峰值均出现在基频和倍频处,符合理论分析。3 种风机在整个频率范围内的噪声极值点均出现在基频处,3 种风机在整个频谱的噪声分布特征也没有较大的差别。叶轮的尾缘分离涡相对 O-BETB 叶轮稍有增加。

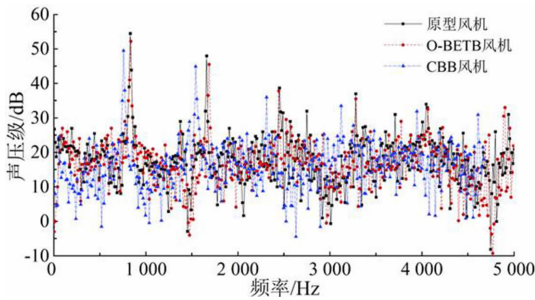


图 22 监测点 C 处的声压级频谱图

Fig. 22 The frequency spectrum of SPL at monitoring point C

1/3 倍频频谱图可以显示风机声压级频谱的宽频特性,图 23 为 3 种多翼离心风机在接收点 C 处的声压级 1/3 倍频频谱图。从图中可以看出,在 0~2 500 Hz 范围的大部分区域内,CBB 风机相对于其他两种风机的声压级普遍存在较为明显的下降,而在 2 500~5 000 Hz 这一频率范围内的降噪效果并不明显,说明 CBB 风机在中低频段范围内声压级的

降低是其整体噪声低的主要原因。根据图 19~图 21 中的流场结构,进一步说明了仿生中弧线和鱼体翼型轮廓曲线特征能有效降低叶片表面的边界层噪声和叶片尾缘的脱体涡流噪声。

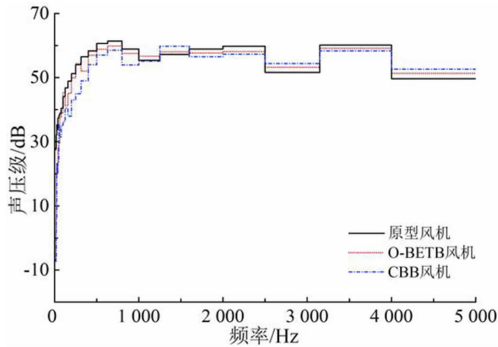


图 23 接收点 C 处的声压级 1/3 倍频谱

Fig. 23 1/3 octave spectrum of SPL at monitoring point C

叶轮壁面静压分布是风机噪声的重要源头之一,声压脉动时均值是采样点的静态压力对时间偏导的均方根值^[1]。原型叶轮与 CBB 叶轮的叶片表面声压脉动时均分布如图 24 所示,叶片的高声压脉动时均区域主要分布在叶片前缘、叶片尾缘以及叶片吸力面,这也是叶轮的主要噪声声源位置,CBB 叶片在这几处位置的声压脉动得到改善,O-BETB 的改善效果次之。原型叶片前缘的高声压脉动较大,而 CBB 叶片前缘的较大声压脉动仅存在叶片厚度面上,这是因为原始叶片的进口角大于气流进口冲角,气流对叶片前缘的冲击较大,从而产生较大的声压脉动,且 CBB 叶片的进口角与气流进口冲角较为一致,有效降低了叶片前缘处的来流紊流噪声。仿生叶片的进口角和流线型叶片结构特征使气流更加平稳地进入叶间流道,减小叶片背面所产生的脱流旋涡,降低叶片背面流动分离所产生的边界层噪

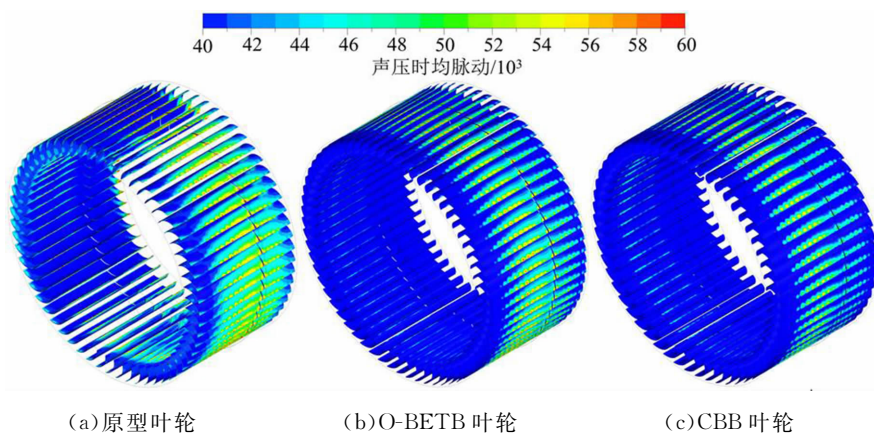


图24 叶片表面声压脉动分布

Fig. 24 Dpdt RMS on the blade surface

声,CBB叶片表面的流线型鱼体翼型曲线和合适的叶片出口角也使得叶片尾缘的声压脉动强度也得到明显减弱,较大声压时均脉动区域的分布面积减小,造成叶片尾缘的尾迹分离涡脱落程度改善以及气流与蜗壳近处内壁的冲击作用得到缓解,从而使得叶片尾缘区域噪声的强度降低。

4 结 论

本文选取鲤科鱼C型启动姿态下的鱼体中心线及鱼体轮廓构型作为仿生元素,对多翼离心风机叶片分别进行仿生设计和仿生耦合设计。通过数值计算、流场分析和性能实验测试相结合的方法,得到主要结论如下。

(1)与原型风机相比,仿生中弧线叶片和仿生耦合叶片的气动性能和噪声特性均得到改善。带有仿生耦合叶片的多翼离心风机在0 Pa出口静压工况下,风量增加了8.3%,噪声降低了1.1 dB,在不同运行工况条件下风机 p_s - Q 性能曲线均得到有效提升,这表明将鲤科鱼C型启动时鱼体中心线及鱼体轮廓结构型线应用于多翼离心风机叶片的仿生设计是有效的。

(2)仿生耦合叶片中弧线弯曲和叶片曲面特征能够有效减小叶片进口边的气流冲击和叶片表面的低速流动分离,使得叶间流道的流速分布更加均匀。同时,仿生耦合叶片前缘进口角能够更好地对气流进行导向,降低了叶片前缘压力脉动产生的来流噪声,匹配的出口角设计也有效减弱了尾迹流以及出口气流对蜗壳壁面的非定常冲击作用。

(3)噪声分析结果表明,仿生耦合叶片多翼离心风机在中低频率范围的声压级降低是风机整体噪声下降的主要原因,具体表现为叶片耦合仿生设计降

低了多翼离心风机的宽频噪声和离散噪声。

(4)基于鱼类游动的仿生特征结构,对叶片进行仿生设计可以有效实现叶轮通道内流动控制,这也说明了对于水和空气等黏性流体,在流动参数差别不大的情况下,仿生设计可以跨介质交叉应用,并能取得理想的设计效果。

参考文献:

- [1] MWAFFO V, ZHANG Peng, ROMERO CRUZ S, et al. Zebrafish swimming in the flow: a particle image velocimetry study [J]. Peer J, 2017, 5: e4041.
- [2] 王仲威,余永亮. 基于曲率模型的斑马鱼C型转弯和逃逸的力能学比较 [J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(4): 467-480.
WANG Zhongwei, YU Yongliang. Energetics comparison between zebrafish C-shaped turning and escape: self-propelled simulation with novel curvature models [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(4): 468-470.
- [3] 王福君,王洪平,高琪,等. 鱼游动涡结构PIV实验研究 [J]. 实验流体力学, 2020, 34(5): 20-28.
WANG Fujun, WANG Hongping, GAO Qi, et al. PIV experimental study on fish swimming vortex structure [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(5): 20-28.
- [4] 赵燕杰,谭俊飞,党飞龙,等. 离心风机集流器的响应面优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 49-54.
ZHAO Yanjie, TAN Junfei, DANG Feilong, et al. Optimization design of centrifugal fan inlet collector by response surface methodology [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 49-54.
- [5] YOUNSI M, BAKIR F, KOUIDRI S, et al. Numeri-

- cal 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] 肖千豪, 王军, 蒋博彦, 等. 多翼离心风机叶片参数化及多目标优化研究 [J]. *工程热物理学报*, 2020, 41(12): 2977-2981.
- XIAO Qianhao, WANG Jun, JIANG Boyan, et al. Parametric and multi-objective optimization of the squirrel cage fan [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(12): 2977-2981.
- [7] KIM J S, JEONG U C, KIM D W, et al. Optimization of sirocco fan blade to reduce noise of air purifier using a metamodel and evolutionary algorithm [J]. *Applied Acoustics*, 2015, 89: 254-266.
- [8] 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.
- [9] ADACHI T, SUGITA N, YAMADA Y. Study on the performance of a sirocco fan (flow around the runner blade) [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2004, 10: 592040.
- [10] 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.
- [11] HUA Xin, GU Rui, JIN Jingfu, et al. Numerical simulation and aerodynamic performance comparison between seagull aerofoil and NACA 4412 aerofoil under low-Reynolds [J]. *Advances in Natural Science*, 2010, 3(2): 244-250.
- [12] CHEN Kun, LIU Qingping, LIAO Genghua, et al. The sound suppression characteristics of wing feather of owl (*Bubo bubo*) [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2012, 9(2): 192-199.
- [13] 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*, 2020, 15(1): 016009.
- [14] PATRICIA F W, GUZMAN D, INIGO B, et al. Morphological characterization and hydrodynamic behavior of shortfin mako shark (*Isurus oxyrinchus*) dorsal fin denticles [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, 16(4): 730-741.
- [15] HUANG Shengxian, HU Yu, WANG Ying. Research on aerodynamic performance of a novel dolphin head-shaped bionic airfoil [J]. *Energy*, 2021, 214: 118179.
- [16] LIAO Genghua, LIU Qingping, REN Luquan, et al. Efficiency increase research on blade of axial fan based on characteristics of the typical birds' wing [C]// *Selected Abstracts in the 3rd International Conference of Bionic Engineering*. Changchun, China: ISBE, 2010: 66.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] PREZELJ J, NOVAKOVIC T. Centrifugal fan with inclined blades for vacuum cleaner motor [J]. *Applied Acoustics*, 2018, 140: 13-23.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)