

DOI: 10.7652/xjtuxb201806009

采用仿鸮翼叶片降低空调用离心风机 气动噪声的研究

王梦豪¹, 吴立明¹, 刘小民¹, 马列², 李金波²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 广东美的制冷设备有限公司, 528311, 广东佛山)

摘要: 基于逆向工程设计方法,提取具有优良气动性能和低噪声特性的长耳鸮翅膀展向 40% 截面位置处的翼型进行仿生重构,并将其应用于窗式空调用离心风机叶片的叶型改进中。采用数值计算方法研究了仿鸮翼翼型叶片 4 种不同中弧线分布方式的降噪效果,对最优设计风机的气动性能和噪声进行了试验验证。与原型相比,仿生翼型叶片按照单圆弧中弧线分布设计的离心风机降噪效果最好,在风量基本保持不变的同时风机噪声下降了 1.3 dB。风机内部流动及其噪声特性的数值模拟结果表明:仿鸮翼叶片的应用可减少叶轮流道内的低速分离区域,有效抑制通道内旋涡流的产生和发展,同时减弱叶轮与蜗舌间周期性的非定常相互作用,降低叶片前缘区域和蜗舌区域的压力脉动,从而有效降低空调用离心风机产生的气动噪声。

关键词: 仿生翼型;离心风机;气动噪声;数值模拟

中图分类号: TH432;TB535 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)06-0055-07

A Study on Noise Reduction of Centrifugal Fan in Air Conditioner by Using the Bionic Blade Inspired by the Owl Wing

WANG Menghao¹, WU Liming¹, LIU Xiaomin¹, MA Lie², LI Jinbo²

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

2. Guangdong Midea Air-Conditioning Equipment Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528311, China)

Abstract: The airfoil in the position of 40% spanwise of the long-eared owl wing which has excellent aerodynamic performance and low noise characteristics is extracted to reconstruct the bionic blades based on the reverse engineering design method. Then these designed bionic blades are applied to improve the aerodynamic performance and reduce the aerodynamic noise of centrifugal fan in window air conditioner. Numerical simulation and experimental study are conducted to investigate the effects of four different distributions of medial camber line of the bionic blades on the aerodynamic performance. The validity of the numerical model and the method is confirmed through experimental measurements. When the bionic blade inspired by the long-eared owl wing airfoil is distributed by mono-arc medial camber line, the noise of the centrifugal fan reduces by 1.3 dB while the flow rate is basically unchanged. The numerical results of the internal flow and noise characteristics on the centrifugal fan show that when the optimal bionic blade is used, the low-speed separation region in the impeller reduces and the generation and development of the vortex is suppressed effectively. At the same time, the

收稿日期: 2018-01-03。 作者简介: 王梦豪(1994—),男,硕士生;刘小民(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51676152);陕西省科学技术研究发展计划资助项目(2014K06-24)。

网络出版时间: 2018-03-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180327.0847.010.html>

periodic unsteady interaction between the impeller and the volute tongue and the amplitude of pressure fluctuation in the region of blade leading edge and volute tongue were weakened. This is also one of the reasons why the aerodynamic noise of the centrifugal fan in the air conditioner is reduced when the bionic blade inspired by the long-eared owl wing is used.

Keywords: bionic airfoil; centrifugal fan; aerodynamic noise; numerical simulation

窗式空调器因其结构简单、生产成本低、价格便宜、安装方便等优点,具有广泛的应用前景和较高的市场占有率。在空调外观和性能改进的同时,噪声逐渐成为人们关注的热点问题,因此开展窗式空调器的降噪技术研究具有十分重要的实际应用价值。

窗式空调器的噪声主要由机械噪声、电磁噪声、气动噪声组成,其中气动噪声占比最大,因此风道系统的噪声成为空调降噪的重点研究对象。风道系统主要由蜗壳和叶轮组成,单纯对于窗式空调风道系统的降噪研究较少,但对于离心风机的降噪问题具有较为广泛的研究。风机降噪主要着眼于蜗壳、蜗舌部位,主要改进措施有倾斜蜗壳^[1]、阶梯蜗壳^[2]、多孔蜗舌^[3]、仿鸮翼前缘蜗舌^[4]、内凹式蜗舌^[5]。叶轮是风机中的旋转部件,对风机的能量传递起着重要作用,也是重要的噪声来源。Lin 等采用标准 NACA4412 翼型叶片对笔记本电脑冷却风扇的叶片叶型进行了改进设计,选用新的翼型减弱了吸力面的流动分离,性能方面表现为风机效率提升和噪声降低^[6];罗嘉陶等选用 CW-1 和 C-4 这 2 种翼型,采用数值模拟的方法研究不同翼型对风机性能的影响,研究结果表明 CW-1 翼型表面更加符合气流流动,可以获得更大的风量和风压^[7];吴大转等对叶片分布方式进行了数值研究,发现叶片不等距分布可以降低叶片通过频率处的噪声,将基频处的噪声峰值分布到附近频率上^[8];焦硕博等比较了直叶片和倾斜叶片对风机性能的影响,发现倾斜叶片较直叶片可改善叶轮叶道内的流动,在叶轮前盘侧外径较小时可降低风机噪声^[9];Heo 等对于冰箱用离心风机采用倾斜尾缘 S 型叶片设计进行降噪处理,通过试验验证噪声可降低 2.2 dB^[10]。近年来仿生技术的发展与应用给风机性能提升和噪声降低提供了新的思路与方法,国内外研究者们对自然界鸟类飞行的低噪特性进行了研究,认为鸟类翅膀翼型结构、前尾缘非光滑结构和羽毛结构是降噪的主要特征元素^[11-13]。

本文提取具有低噪特性的长耳鸮翅膀 40% 展向位置处的翼型结构,以某型号窗式空调用离心风机为研究对象,采用数值模拟的方法研究仿鸮翼翼型按照不同中弧线的优化设计方案对离心风机噪声

性能的影响,通过试验验证数值计算模型和优化设计的有效性,对其降噪效果进行可视化分析。

1 仿鸮翼翼型提取与重构

长耳鸮在 8 m/s 的飞行速度下可实现无声扑食,此速度与空调用离心风机进口的气流速度处于相同的水平量级上,因此选择具有静音飞行特点的长耳鸮作为仿生对象。根据廖庚华建立的长耳鸮翅膀结构^[14],提取气动性能优良和低噪声特性的翅膀 40% 展向截面处翼型结构,将其应用于风机叶片的改型设计中。

翼型型线通过中弧线和厚度的关系得到,相应的型线控制方程如下

$$z_u = z_c + z_t \quad (1)$$

$$z_l = z_c - z_t \quad (2)$$

式中: z_u 、 z_l 分别为翼型某弦向截面上表面型线、下表面型线分布坐标; z_c 为翼型某弦向截面的中弧线分布坐标, z_t 为翼型某弦向截面的厚度分布坐标。 z_c 和 z_t 的计算公式如下

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

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

式中: c 为翼型某弦向截面的弦长; x 为翼型某弦向截面的弦向坐标, $\eta = x/c$ 为翼型某弦向截面的弦坐标比; $z_{c,\max}$ 为翼型某弦向截面的最大弧度坐标; S_m ($m=1,2,3$) 为描述翼型的多项式系数; $z_{t,\max}$ 为翼型某弦向截面的最大厚度; A_n ($n=1,2,3,4$) 为描述翼型的多项式系数; $z_{c,\max}$ 和 $z_{t,\max}$ 关系式如下

$$\frac{z_{c,\max}}{c} = \frac{0.18}{1 + 7.31\xi^{2.77}} \quad (5)$$

$$\frac{z_{t,\max}}{c} = \frac{0.1}{1 + 14.86\xi^{3.52}} \quad (6)$$

式中: ξ 为翼型展向比,取 $\xi=0.4$ 。 S_m 和 A_n 是通过最小二乘法拟合得到的多项式系数,其中 $S_1=3.936\ 2$, $S_2=-0.770\ 5$, $S_3=0.848\ 5$, $A_1=-29.486\ 1$, $A_2=66.456\ 5$, $A_3=-59.806$, $A_4=19.043\ 9$ 。

根据上述各式,提取长耳鸮翅膀沿展向 40% 截

面位置处的翼型结构,得到翼型上下表面型线的相对坐标,根据翼型坐标点绘制的仿鸮翼翼型如图1所示。

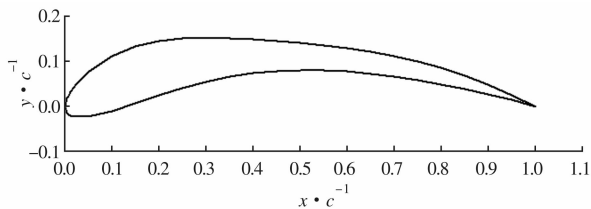
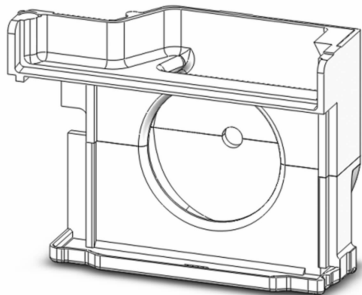


图1 仿鸮翼翼型

2 数值计算方法

2.1 物理模型

窗式空调器室内侧风道系统主要由蜗壳和叶轮组成,其结构如图2所示。



(a) 蜗壳



(b) 叶轮

图2 空调室内侧风道模型

根据风道系统结构对流体区域进行三维建模,流体区域主要分为进口区、叶轮区、蜗壳区,其中进口向上游延伸0.5倍叶轮外径,出口向下游延伸1.0倍叶轮外径。对计算域进行非结构网格化划分,在叶轮叶片前尾缘和蜗舌区域进行局部网格加密,固体近壁面第一层网格 y^+ 保持在30~100以满足本文采用的湍流模型以及壁面函数对网格的要求。为保证数值计算的准确性和有效性,对网格进行无关性验证,最终的网格布置方案为:进口区网格79万,叶轮区域网格153万,蜗壳区域网格172万,网格总数共计404万。

2.2 流场计算

2.2.1 定常计算 采用商业软件 ANSYS Fluent

对其内部流场进行数值计算,控制方程为 Navier-Stokes 方程,湍流计算采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型,近壁方程采用标准壁面函数,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,压力离散格式采用 PRESTO! 格式,动量方程、能量方程和湍流耗散方程均采用二阶迎风格式,计算收敛残差设置为 10^{-4} 。进出口均给定压力边界条件,进口边界总压为101 325 Pa,出口静压为101 325 Pa。蜗壳区和风机叶轮进口区设置为静止区域,叶轮区设置为旋转区域,采用 Frame Motion 模型,设定旋转区域转速为1 500 r/min。

2.2.2 非定常计算 以定常计算的收敛解作为初始值进行非定常计算,时间项选用二阶隐式格式,叶轮区为旋转区域,非定常计算改用 Mesh Motion 模型,时间步长由下式确定

$$\Delta t = \frac{60}{KvZ} \quad (7)$$

式中: K 为每一个时间步内的最大迭代步数,取 $K=30$; v 为叶轮转速, $v=1\,500$ r/min; Z 为叶轮叶片数, $Z=11$ 。

根据式(7)的计算,本文非定常计算过程中时间步长取为 1.21×10^{-4} s,叶轮旋转5周,监控变量的计算结果出现明显的周期性变化,表明风机内流达到了稳定流动状态。

2.2.3 噪声计算 将非定常计算得到稳定流场作为 FW-H 声学方程的输入条件,并设置噪声源和噪声接收点,再进行叶轮旋转5周的瞬态计算。由于 Fluent 软件中采用积分解法对远场噪声进行计算,不需要对流场建立额外的声学网格,所以在设置噪声源和接收点时,噪声源设置为蜗壳和叶轮壁面,并按照《GB/T 7725—2004 房间空气调节器》中窗式空调器室内规定的测试点设置噪声接收点,以便和试验进行对比,根据建立的坐标系最终接收点坐标设置为 $(-40.32\text{ mm}, 8.01\text{ mm}, 1\,110.6\text{ mm})$ 。

声场计算完成后,通过快速傅里叶变换可得到噪声计算的频谱图。叶片的通过频率可以按下式计算

$$f_p = \frac{vZ}{60} I \quad (8)$$

式中: I 为谐波序号($I=1$ 时为基频)。通过式(8)计算得到的风机基频为275 Hz,波长为1.236 4 m。由于波长远大于风机的特征尺寸,因此噪声计算中蜗壳和叶轮之间噪声的反射、衍射和散射作用可以忽略不计。

3 试验测试

3.1 气动性能测试

气动性能测试按照《GB/T 1236—2000 工业通风机用标准化风道进行性能试验》进行,采用 B 型试验装置,系统主要由试验风机、辅助风机、喷嘴、温度传感器、差压变送器以及数据采集系统组成。通过上述装置及仪器,选取适合试验的喷嘴直径,经数据采集系统处理得到风机流量。试验中去除出口格栅、除尘网、蒸发器等部件,只保留风机部分,目的是便于与数值计算比较。

3.2 噪声测试

噪声测试在专业半消音室中进行,实验室本底噪声为 17.0 dB。采用 B&K 4189 型声压传感器测量声压,通过 B&K 2669 型前置放大器,传送至 LMS SCADAS Mobile SCM01 数据采集系统,采集信号通过 LMS Test. Xpress 7A 振动噪声分析软件进行处理。试验前采用 B&K 4231 型声学校准器对声压传感器进行校准,待运行稳定后进行测试,测试精度为±0.2 dB。试验装置满足《GB/T 7725—2004 房间空气调节器》规定,试验噪声测试点按照标准进行测量,即距离空调前表面和基准地面 1 m,与噪声计算的接收点相同。

3.3 试验测试与数值计算对比验证

风机试验是在空调整机去除出口格栅、除尘网、蒸发器的情况下进行的,通过前期试验测试发现出口栅格、除尘网、蒸发器等空调部件对噪声影响不大,因此在数值模拟时只对单纯风机进行数值计算,这样可以简化计算模型,节省计算时间,同时可达到噪声预测的目的。表 1 是风机试验测试和数值计算的对比结果,从中可以看出,数值计算结果的相对误差均在 5% 以内,表明本文计算方法可靠,可以准确模拟风机的风量和噪声。

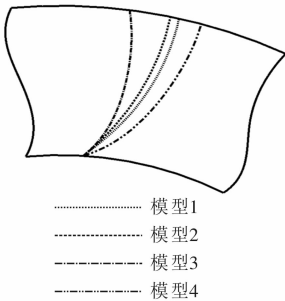
表 1 风机试验测试和数值计算的对比结果

数据类别	风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	噪声/dB
试验测试	301	54.0
数值计算	307	52.6
绝对误差	6	1.4
相对误差	2%	2.6%

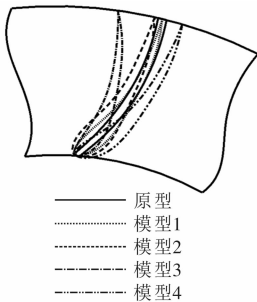
4 仿鸮翼叶片的应用

长耳鸮翅膀 40% 截面翼型存在其特有的中弧线,因此翼型在风机叶型的改进中就存在多种应用

方式,可以按照常规的单圆弧中弧线分布,也可以按照其自身的翼型中弧线进行分布。本文根据提取的仿鸮翼翼型,分别按照原型叶片的中弧线、单圆弧中弧线、翼型中弧线进行仿鸮翼翼型的布置,又因为叶片进出口安装角同中弧线的固有关系,按翼型中弧线分布为保证其原有的中弧线型线,分别确保叶片的进口安装角 β_1 和出口安装角 β_2 同原型叶片相同,因此共有 4 种不同的翼型布置方式。表 2 给出了原型和仿鸮翼叶轮叶片进出口安装角参数,图 3 给出了不同的中弧线和叶型分布图。模型 1、2、3、4 分别是仿鸮翼翼型按照原型中弧线、单圆弧中弧线、进口安装角同原型相同的翼型中弧线、出口安装角同原型相同的翼型中弧线进行布置的叶轮。



(a) 4 种中弧线分布



(b) 原型和 4 种仿鸮翼叶片的叶型分布

图 3 中弧线和叶型不同型式分布图

表 2 原型和仿鸮翼叶轮叶片进出口安装角参数

模型	$\beta_1 / (^\circ)$	$\beta_2 / (^\circ)$
原型	45.5	91.7
1	45.5	91.7
2	45.5	91.7
3	45.5	106.4
4	22.5	91.7

采用数值计算的方法分别计算 4 种应用仿鸮翼叶片风机的风量和噪声。为了保证计算结果的可比性,4 种不同的仿鸮翼叶片风机采用相同的计算模型、网格划分和计算方法,具体计算结果见表 3。

表 3 原型和 4 种仿鸮翼叶片风机的数值计算结果

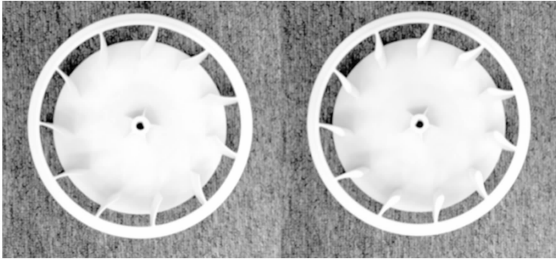
模型	风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	噪声/dB
原型	307	52.6
1	306	52.0
2	304	50.9
3	320	53.0
4	305	52.2

分析表 3 可知,仿鸮翼翼型不同的应用方式对风机气动性能和噪声产生不同的效果。与原型风机相比,仿鸮翼翼型按照叶片进口安装角同原型相同的中弧线分布的风机,风量增加了 $13 \text{ m}^3/\text{h}$,但同时噪声也增加 0.4 dB ;仿鸮翼翼型按照原型中弧线、单圆弧中弧线和叶片出口角同原型相同的中弧线分布的风机,在保持风量基本不变的情况下,噪声均有不同程度的降低,其中仿鸮翼翼型按单圆弧中弧线分布时噪声降低程度最大,与原型噪声相比可降低 1.7 dB 。由此可以看出,将仿鸮翼翼型优化设计应用于离心风机中,在保证风机气动性能的同时可较大程度地降低风机的气动噪声。

5 试验结果及降噪分析

5.1 试验结果

在数值计算的基础上,采用试验测试的方法对计算结果进行比较验证。采用 ABS 材料对最佳降噪效果的仿鸮翼叶轮,即对仿鸮翼翼型按照单圆弧中弧线分布的叶轮进行手板加工。保持与原型叶轮同样的材料,从而忽略材料对风机性能和噪声的影响。图 4 为原型叶轮和仿鸮翼叶轮实物。



(a)原型叶轮 (b)仿鸮翼叶轮

图 4 原型叶轮和仿鸮翼叶轮实物

表 4 是原型和仿鸮翼叶片风机试验测试、数值计算结果的比较。由表 4 可以看出,采用仿鸮翼叶片的风机试验测试和数值计算都表现出在风机风量基本不变的情况下噪声有明显的下降。与试验测试相比,数值计算的结果显示仿鸮翼叶片风机的风量和试验测量风量差距较小,相对误差为 1.7% ,而噪

声的相对误差为 3.4% 。在工程允许的误差范围内,本文的数值计算能够满足对噪声进行定量预测的要求。通过试验验证,仿鸮翼翼型叶片的使用可以降低风机噪声 1.3 dB ,表现出良好的降噪效果。

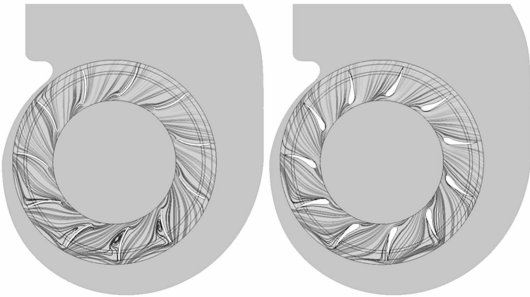
表 4 风机试验测试和数值计算的对比结果

风机模型	数据类别	风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	噪声/dB
原型风机	试验测试	301	54.0
	数值计算	307	52.6
仿鸮翼叶片风机	试验测试	299	52.7
	数值计算	304	50.9

5.2 内流及噪声分析

以具有最佳降噪效果的仿鸮翼翼型设计及应用为例,与原型离心风机比较,分析其内部流动特性及降噪机理。

图 5 给出了原型叶轮与仿鸮翼叶轮在 85% 叶高截面的流线图。原型叶轮和仿鸮翼叶轮在蜗壳出口处流动状况良好,流动基本一致,但带有仿鸮翼叶片的风机叶轮区域流动可以更好地附着叶片表面,有利于流体流动的稳定性。在蜗壳内部的叶轮区域,与原型叶片相比,仿鸮翼叶轮流动表现更优,在叶片吸力面低速区域减少,流动分离减弱,抑制了涡流的产生和发展,宏观方面表现为风机宽频噪声的降低。



(a)原型叶轮 (b)仿鸮翼叶轮

图 5 原型叶轮与仿鸮翼叶轮 85% 叶高截面流线图

图 6 给出了以蜗壳和叶轮为噪声源在接收点处的噪声频谱图。风机叶片的通过频率为 275 Hz ,与图 6 中计算的旋转频率基本一致,噪声随频率呈现出明显的周期性,在基频和倍频处噪声出现明显的峰值,与理论分析一致。从图 6 中可以看出,采用仿鸮翼叶片的风机在各个频率处噪声分布基本都低于原型叶片风机,基频和倍频处峰值也低于原型风机,其中 275 、 $1\,375$ 、 $3\,025 \text{ Hz}$ 处噪声峰值分别降低 1.0 、 2.2 、 3.7 dB ,最终数值计算结果为噪声降低了 1.7 dB ,表明采用仿鸮翼叶片的风机具有良好的低

噪声特性。

采用 1/3 倍频程频谱分析可以更加明确地反映噪声源的频谱特性,图 7 给出了原型风机与仿鸮翼翼型叶片风机 A 声级 1/3 倍频程频谱图。与原型风机相比,带有仿鸮翼翼型叶片的风机在整个频段噪声都有所降低,结合图 6 可以看出,带有仿鸮翼翼型叶片的风机在 600 Hz 之后的频率上噪声降低更为明显,这与鸮类在中低频率段产生低噪声飞行的特征是一致的。同时,离心风机宽频噪声和离散噪声都有所降低,表明采用仿鸮翼翼型叶片对于流动分离引起的涡流噪声和叶片与蜗舌之间非定常相互作用引起的旋转噪声都有较为明显的改善作用。

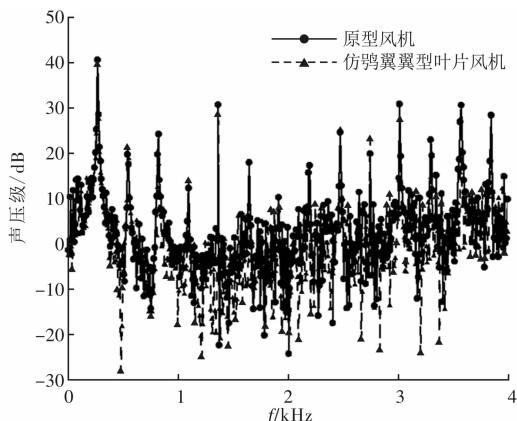


图 6 原型与仿鸮翼翼型叶片风机噪声频谱图

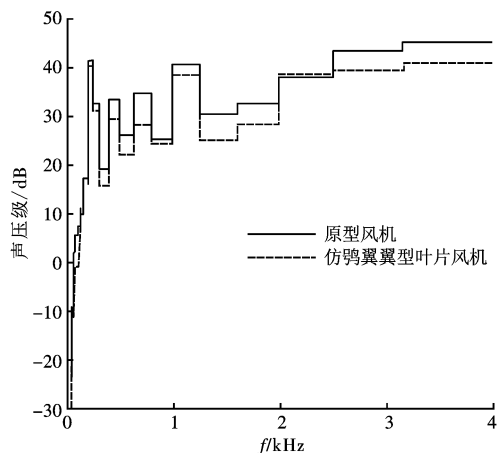
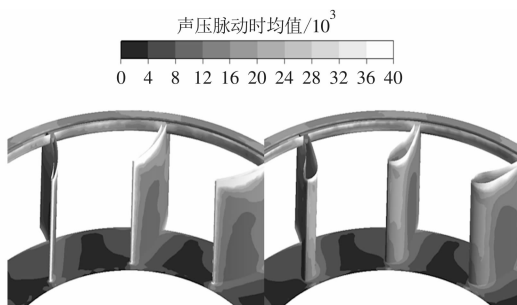


图 7 原型与仿鸮翼翼型叶片风机 A 声级 1/3 倍频程频谱图

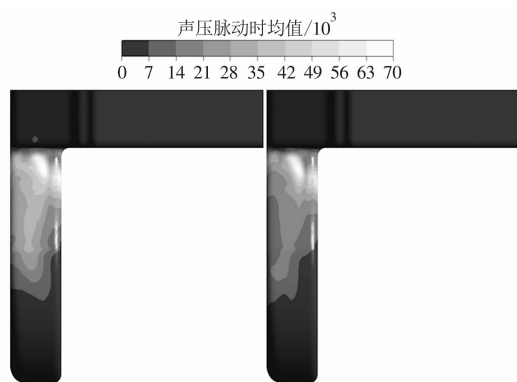
声压脉动时均值^[15-16],即静态压力对时间偏导的均方根值,可直接反映声源区域并清楚显示各部位对噪声的贡献值。图 8 给出了原型和仿鸮翼翼型叶片风机叶轮表面声压脉动时均值分布图。由于叶轮是开式叶轮,且集流器出口比叶轮内径大,因此轴向进气对叶轮前盘端部冲击较大,又因为气流在轴向转径向的过程中,叶片前缘受到气流冲击较大,在

图 8 中表现为叶轮前盘端部和叶片前缘压力脉动值较大,对噪声贡献较多。对比原型叶片和仿鸮翼翼型叶片,可以发现仿鸮翼叶片的使用可以减轻叶片前缘的压力脉动,其前缘结构可使气流更加平稳地经轴向转径向从而进入叶轮流道,有效抑制前缘区域压力脉动产生的噪声。图 9 给出了原型和仿鸮翼翼型叶片风机蜗壳蜗舌处声压脉动时均值分布图,可见采用仿鸮翼翼型叶片有效降低了蜗壳、蜗舌部位处的压力脉动,局部压力脉动剧烈的区域减小,减弱了叶片与蜗舌之间的非定常作用,在图 6 噪声频谱图上表现为基频和倍频峰值的降低。



(a)原型风机叶轮 (b)仿鸮翼翼型叶片风机叶轮

图 8 风机叶轮表面声压脉动时均值分布图



(a)原型风机 (b)仿鸮翼翼型叶片风机

图 9 风机蜗壳蜗舌处声压脉动时均值分布图

6 结 论

基于仿生降噪原理对窗式空调器用离心风机叶片进行仿生重构设计,采用数值计算和实验测试方法研究了仿鸮翼翼型叶片对风机气动噪声的影响,获得的主要结论如下。

(1)4 种不同的仿鸮翼翼型分布中,翼型按单圆弧中弧线分布的风机在保证风量的同时降噪效果最为明显,试验验证可降低 1.3 dB。

(2)分析最佳降噪效果的仿鸮翼叶片风机,采用仿生翼型叶片可减少叶轮流道内的低速分离区域,

抑制涡流的产生和发展。翼型前缘结构可使气流更加平稳地经轴向转径向,降低叶片前缘的压力脉动幅值,有效抑制前缘区域压力脉动产生的噪声,减弱叶轮与蜗舌、蜗壳间的非定常相互作用,从而有效降低离心风机产生的宽频噪声和离散噪声。

参考文献:

- [1] 游斌,周拔,吴文新,等.多翼风机新型斜蜗壳和常规直蜗壳的对比研究[J].工程热物理学报,2006,27(2):235-237.
YOU Bin, ZHOU Bo, WU Wenxin, et al. Comparison research of the new-type inclined volute and the straight volute in the multi-blade fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 235-237.
- [2] 李栋,顾建明.阶梯蜗舌蜗壳的降噪分析和实验[J].流体机械.2004,32(2):10-12.
LI Dong, GU Jianming. Practice and analysis to reduce the fan noise with step-tongue volute [J]. Fluid Machinery, 2004, 32(2): 10-12.
- [3] 赖焕新,王孟,云楚烨,等.使用多孔蜗舌的贯流风机[J].工程热物理学报,2011,32(9):1493-1496.
LAI Huanxin, WANG Meng, YUN Chuye, et al. Cross-flow fan with porous stabilizer [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1493-1496.
- [4] 刘小民,李烁.仿鸮翼前缘蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响[J].西安交通大学学报,2015,49(1):14-20.
LIU Xiaomin, LI Shuo. Effects of bionic volute tongue bioinspired by leading edge of owl wing on aerodynamic performance and noise of multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 14-20.
- [5] 刘小民,魏铭,杨罗娜,等.内凹式蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声影响的研究[J].西安交通大学学报,2017,51(12):1-8.
LIU Xiaomin, WEI Ming, YANG Luona, et al. Study on the effects of concave volute tongue on aerodynamic performance and noise of a multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(12): 1-8.
- [6] LIN S C, HUANG C L. An integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(5): 421-434.
- [7] 罗嘉陶,王嘉冰.多翼离心通风机叶片翼型的研究[J].风机技术,2004,46(3):20-22.
LUO Jiatao, WANG Jiabing. Research on airfoil of multi-blade centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2004, 46(3): 20-22.
- [8] 吴大转,赵飞,杨帅,等.叶片分布方式对微型风机气动噪声影响的数值研究[J].风机技术,2015,57(2):20-25.
WU Dazhuan, ZHAO Fei, YANG Shuai, et al. Numerical simulation of the effect of blade distribution on the performance and aerodynamic noise of a mini fan [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2015, 57(2): 20-25.
- [9] 焦硕博,李晓芳,谢军龙,等.倾斜叶片对多翼离心风机性能影响的研究[J].工程热物理学报,2016,37(11):2362-2365.
JIAO Shuobo, LI Xiaofang, XIE Junlong, et al. Research on the effect of inclined blade on performance of multi-blade centrifugal fan [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(11): 2362-2365.
- [10] HEO S, CHEONG C, KIM T H. Development of low-noise centrifugal fans for a refrigerator using inclined S-shaped trailing edge [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(8): 2076-2091.
- [11] LILLEY G M. A study of the silent flight of the owl [C]//Proceedings of the 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1998: 1-6.
- [12] GEYER T, SARRADJ E, FRITZSCHE C. Measurement of the noise generation at the trailing edge of porous airfoils [J]. Experiments in Fluids, 2010, 48(2): 291-308.
- [13] 李典,刘小民.几种仿生翼型气动性能及噪声特性研究[J].工程热物理学报,2015,36(12):2629-2632.
LI Dian, LIU Xiaomin. Numerical study on aerodynamic performance and noise characteristic of several bionic airfoils [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(12): 2629-2632.
- [14] 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,2013:40-45.
- [15] 李晨曦,林卿,叶学民.单动叶安装角异常时轴流风机的噪声特性[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1183-1192.
LI Chunxi, LIN Qing, YE Xuemin. Acoustic characteristic of an axial flow fan with abnormal installation angle of single blade [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1183-1192.
- [16] LI D, LIU X M. A comparative study on aerodynamic performance and noise characteristics of two kinds of long-eared owl wing models [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(8): 3821-3830.

(编辑 武红江)