

DOI: 10.7652/xjtuxb201712019

内凹式蜗舌对多翼离心风机 气动性能和噪声的影响

刘小民, 魏铭, 杨罗娜, 乔亚光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对吸油烟机用多翼离心风机设计了内凹弧形、内凹槽形 2 种内凹式蜗舌,采用实验测量和数值模拟方法研究了内凹式蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响。与传统的原型蜗舌相比,采用内凹式蜗舌在风机出口压力和运行效率基本保持不变的情况下,叶轮出口气流对蜗舌的冲击强度减小,蜗舌处流场的逆压梯度降低,使得风机气动噪声下降。实验结果表明:与原风机相比,带有内凹弧形蜗舌和内凹槽形蜗舌的多翼离心风机的噪声分别下降了 1.4 dB 和 1.7 dB;同时,由于内凹式蜗舌能够抑制流动分离,使风机出口处的有效流通面积增大,蜗舌附近区域的旋涡强度及其影响区域减小,从而增加了多翼离心风机的流量。

关键词: 多翼离心风机;蜗舌;气动性能;噪声;数值模拟

中图分类号: TB17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0128-08

Study on the Effects of Concave Volute Tongues on Aerodynamic Performance and Noise of a Multi-Blade Centrifugal Fan

LIU Xiaomin, WEI Ming, Yang Luona, QIAO Yaguang

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

Abstract: Two types of volute tongue are designed for a multi-blade centrifugal fan used in range hoods. One is an inner concave arc volute tongue and the other is an inner concave grooved volute tongue. The effects of the inner concave volute tongues on both the aerodynamic performance and the noise of the multi-blade centrifugal fan are studied by using the measurement and numerical simulation methods. Compared with the traditional tongue, the impact of the air flow discharged by the impeller on the surface of the volute tongue is weakened and the inverse pressure gradient of the flow field near the volute tongue is reduced when the inner concave arc and the inner concave grooved volute tongues are used. Under the condition that the total pressure and operating efficiency of the multi-blade centrifugal fan keep constant, the aerodynamic noise is reduced. Experimental results show that the sound pressure level of the multi-blade centrifugal fans with the inner concave arc volute tongue and the inner concave grooved volute tongue goes down by 1.4 dB and 1.7 dB, respectively. At the same time, the effective flow area at the fan outlet increases because the flow separation occurred near the volute tongue is suppressed. The vortex intensity and the corresponding influence area are reduced. These results show that the flow rate of the multi-blade centrifugal fan with the concave volute tongues effectively increases.

收稿日期: 2017-06-10。 作者简介: 刘小民(1971—),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: 2017-09-22 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170922.1743.008.html>

Keywords: multi-blade centrifugal fan; volute tongue; aerodynamic performance; noise; numerical simulation

多翼离心风机具有流量大、压力高、结构紧凑、噪声低等优点,广泛应用于吸油烟机、空调等与日常生活密切相关的领域^[1]。随着人们生活质量的提高以及行业对家电标准要求的提高,如何有效降低多翼离心风机噪声也受到越来越多的关注。

为了揭示多翼离心风机内部流动状态和噪声分布,进而达到提高多翼离心风机效率、降低噪声的目的,许多学者开展了大量的实验研究和数值分析。文献[2]表明,多翼离心风机工作时出口气流对蜗舌冲击比较强烈,蜗舌区是多翼离心风机主要的气动噪声源之一,同时蜗舌的结构和位置对风机的内部流场也有较大影响。由于多翼离心风机结构紧凑、叶轮叶片数多,通过实验很难准确捕捉到较为详细的多翼离心风机内部三维非定常流场信息^[3],因此先通过实验测量来获得所设计风机的整体性能,再采用数值模拟方法来研究多翼离心风机工作过程中的非定常流动现象和气动噪声产生机理是一个重要且有效的选择^[4]。

蜗舌的作用是防止部分气体在蜗壳内循环流动以减少回流的产生,提高风机的工作效率^[5]。蜗舌形状、间距和半径的变化都与风机内部流场的变化和噪声的产生密切相关^[6]。由于蜗舌的结构特点和蜗舌与叶轮的相互作用,在蜗舌附近区域会出现一定强度的旋涡和分离回流^[7],因此蜗舌形状的改进和优化设计对提高多翼离心风机性能具有十分重要的意义。Younsi 等通过数值模拟与实验测量发现,蜗舌区域是多翼离心风机流动扰动与不稳定的主要区域,风机的主要噪声来自于蜗舌与叶轮之间气流的相互作用^[8]。付双成等将倾斜蜗舌应用于多翼离心风机,使得气流到达蜗舌时产生一定的相位差,达到降低风机旋转噪声的目的^[9]。李栋等设计并采用了阶梯形蜗舌,该蜗舌由上下两个蜗舌构成,下蜗舌控制蜗舌与叶轮的间距以保证风机性能,上蜗舌拉开空间以减小气流对蜗舌的冲击和蜗舌区域的涡流强度,从而降低风机的气动噪声^[10]。宫武旗等利用粒子图像测速仪(PIV)对多翼离心风机蜗舌区域的流场进行了实验测量,结果表明对于小流量的多翼离心风机,应适当减小蜗舌间隙以减小风机的流量损失;对于大流量的多翼离心风机,应适当增大蜗舌间隙以降低风机的噪声^[11]。刘小民等基于长耳鸮翅膀翼型设计了仿鸮翼前缘形状蜗舌,能够减弱叶

轮出口气流对蜗舌的冲击作用,抑制蜗舌区域的流动分离,减少涡脱落,从而有效降低了多翼离心风机的气动噪声^[12]。Velarde-Suárez 等研究了蜗舌位置与形状对多翼离心风机气动噪声的影响,结果表明减小蜗舌到风机出口的距离可以降低风机的噪声,采用弯曲蜗舌可以使叶片受力更为均匀^[13]。

尽管蜗舌是静止部件,但由于蜗舌与旋转叶轮尾迹气流直接相互作用,因此蜗舌区域的气流运动状态十分复杂,蜗舌的设计直接关系到多翼离心风机的气动性能和噪声特性。本文设计了内凹弧形和内凹槽形 2 种曲面形式的蜗舌,采用数值模拟和实验测量的方法研究了这 2 种蜗舌结构对多翼离心风机气动与噪声性能的影响;基于数值模拟结果,揭示了内凹式蜗舌对多翼离心风机内部流场的影响及其降噪机理,以为多翼离心风机的增风和降噪设计提供参考和理论依据。

1 研究对象

如图 1 所示为某吸油烟机用原型多翼离心风机及相应的传统蜗壳蜗舌结构,其中风机叶轮为双进气型,蜗壳型线由不等边基元法绘制,4 段圆弧半径

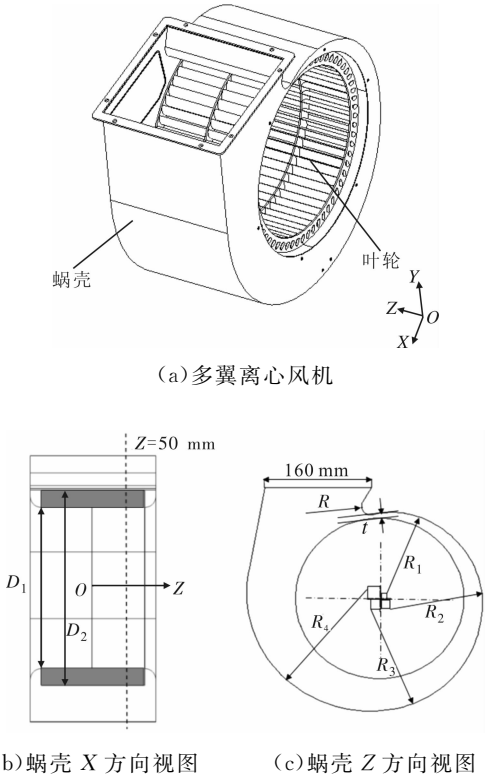


图 1 多翼离心风机及其蜗壳结构

R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为 113、146、165、186 mm, 蜗舌半径 R 为 13.3 mm, 蜗舌间隙 t 为 5.7 mm, 蜗壳出口矩形截面尺寸为 160 mm×165 mm。叶轮叶片采用单圆弧形叶片, 叶片数 B 为 60, 叶轮其他主要参数见表 1。

表 1 风机叶轮主要参数

叶轮参数	数值
叶轮内径 D_1 /mm	216
叶轮外径 D_2 /mm	252
叶片厚度 δ /mm	0.4
叶片进口安装角 $\beta_1/(^{\circ})$	74
叶片出口安装角 $\beta_2/(^{\circ})$	166

本文研究的蜗舌结构如图 2 所示, 与原风机传统蜗舌相比, 内凹弧形蜗舌在保持原有蜗舌间隙不变的同时, 蜗舌半径由蜗舌中心处向两端逐渐减小, 从而形成内凹式蜗舌。内凹槽形蜗舌在内凹弧形蜗舌的基础上增加了 4 个凹槽。

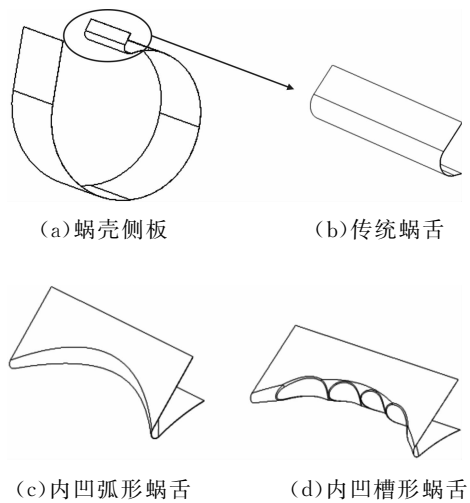


图 2 蜗舌结构

2 数值计算方法

2.1 计算模型

采用 Pro/E 和 ICEM 软件对风机进行三维数值建模和网格划分。计算模型分为进风区、叶轮区、蜗壳区和出风区 4 个区域, 模型风机的进风区和出风区均设置了延伸段, 进风区延伸段长度为 $0.5D_2$, 出风区延伸段长度为 $1.5D_2$, 如图 3 所示。由于实验时多翼离心风机的出风管道是由矩形到圆形的过渡结构, 因此为了能够更真实地模拟流场, 本文数值计算模型的出风区也设置为由矩形截面到圆形截面的过渡结构, 相应的矩形截面尺寸为 160 mm×165

mm, 圆形截面直径为 160 mm。

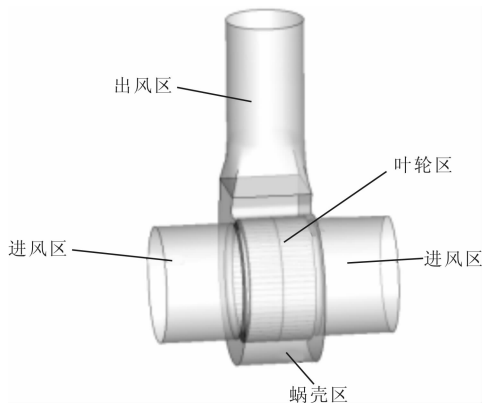


图 3 多翼离心风机三维数值计算模型

2.2 模拟计算

2.2.1 定常计算 采用计算流体力学软件 ANSYS Fluent 15.0 对多翼离心风机内部流场及气动性能进行数值模拟计算。多翼离心风机内流动控制方程为 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-速度耦合方程的求解采用 SIMPLE 算法, 压力插值修正采用 PRESTO! 算法。扩散项的离散采用中心差分格式, 对流项的离散采用二阶迎风格式。进口边界给定总压, 出口边界给定静压。由于风机内部流动马赫数小于 0.3, 因此假设气体不可压缩且黏性系数为常数。蜗壳区、进风区、出风区设置为静止区域, 叶轮区设置为旋转区域, 采用多参考系模型, 转速为 800 r/min, 控制方程的收敛残差设为 10^{-4} 。

考虑到风机内部流场和结构的复杂性, 网格采用六面体和四面体组成的混合网格, 其中叶轮区域为六面体网格, 其余计算区域为四面体网格。为保证数值模拟结果的准确性, 通过细化蜗壳蜗舌和叶轮近壁面区域的网格, 对风机进行了网格无关性验证, 其中第一层网格到壁面的无量纲距离 y^+ 保持在 30~70 范围内。图 4 给出了多翼离心风机风量计

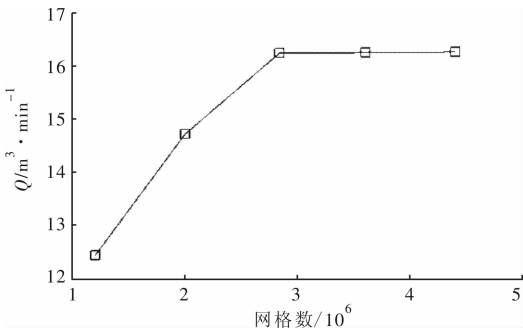


图 4 网格无关性验证

算结果随模型网格数的变化。由图 4 可以看出,当网格数超过 2.8×10^6 时,随着网格数的增加,风量的计算结果几乎保持不变。权衡计算效率和计算精度,本文计算选取的网格总数约为 2.84×10^6 ,各区域网格数见表 2。

表 2 计算模型各区域网格数

区域	网格数
进风区	0.76×10^6
叶轮区	0.76×10^6
蜗壳区	1.04×10^6
出风区	0.28×10^6

2.2.2 非定常计算 当定常计算完成后,以定常计算的收敛解作为非定常计算的初始场进行非定常计算。时间项的离散采用二阶精度隐式格式,叶轮区采用滑移网格模型。由于叶片在叶轮内沿圆周均匀分布且假定转速恒定,所以叶轮和蜗壳之间的耦合为周期性关系,非定常计算的时间步长为

$$\Delta t = \frac{60}{KnB}$$

(1)

式中: K 为每一个时间步内的最大迭代步数,模拟计算中 K 取 30; n 为叶轮转速。

根据式(1)的计算,本文非定常计算过程中时间步长取为 4.16×10^{-5} s,当监控变量的计算结果呈现出明显的周期性变化时,即认为计算收敛。

2.2.3 噪声计算 在非定常计算得到稳定流场的基础上进行噪声的模拟计算,由于 Fluent 软件中采用积分解法对远场噪声进行计算,不需要对流场外建立额外的声学网格,所以在设置噪声源和接收点时,噪声源设置为叶轮和蜗壳壁面,接收点按照全球包络法进行设置^[14],如图 5 所示。风机位于半径 R_s 为 1.414 m 的球面中心,4 个接收点分别布置在被测风机中心下方垂直距离 1 m 处,且与球面相交的水平面上,其中 A、B、C、D 这 4 个点的坐标分别为 (1 m, -1 m, 0 m)、(0 m, -1 m, 1 m)、(-1 m,

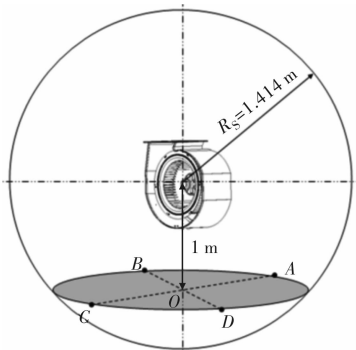


图 5 全球包络法噪声测试示意图

-1 m, 0 m)、(0 m, -1 m, -1 m)。

声比拟理论最早是由 Lighthill 提出,其方程适用于无固体边界的湍流噪声预测。Curle 考虑到静止固体边界对流体的影响,Ffowcs Williams 和 Hawkings 进一步考虑流体中任意运动固体边界对声波传播的影响,提出了 FW-H 方程^[15]

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial \{ [\rho_0 u_0 + \rho(u_n - v_n)] \delta(f) \}}{\partial t} - \frac{\partial \{ [p_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \}}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 [T_{ij} H(f)]}{\partial x_i \partial x_j}$$

(2)

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - c_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij}$$

(3)

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]$$

(4)

式中: ρ 为空气的密度; c_0 为远场声速; p' 为 t 时刻在观测点处的声压强; u_i 为流体速度在 x_i 方向的速度分量; u_n 和 v_n 分别为沿积分面的流体速度的法向和切向分量; $H(f)$ 为 Heaviside 函数; $\delta(f)$ 为 Dirac 函数; T_{ij} 为 Lighthill 张量; P_{ij} 为应力张量; δ_{ij} 为克罗内克符号。

式(2)右侧分别代表的是单极子源、偶极子源和四极子源。单极子源是由于流体中流入的质量或热量不均匀时形成的;偶极子源是当流体中有障碍物存在时,流体与物体产生的不稳定作用力形成的,属于力声源;四极子源是由黏滞应力辐射的声波形成的,只有在超声速流动时才会突显。单极子源和偶极子源是面声源,四极子源是体声源。本文是对于多翼离心风机声场的数值计算,四极子源忽略不计^[16-17],式(2)可以简化为

$$p'(x, t) = p'_T(x, t) + p'_L(x, t)$$

(5)

$$p'_T(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 (\dot{U}_n + U_n)}{r(1 - M_r)^2} \right] dS + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left\{ \frac{\rho_0 U_n [r \dot{M}_r + c_0 (M_r - M^2)]}{r^2 (1 - M_r)^2} \right\} dS$$

(6)

$$p'_L(x, t) = \frac{1}{4\pi c_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{L}_r}{r(1 - M_r)^2} \right] dS + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{L_r - L_M}{r^2 (1 - M_r)^2} \right] dS + \frac{1}{4\pi c_0} \int_{f=0} \left\{ \frac{L_r [r \dot{M}_r + c_0 (M_r - M^2)]}{r^2 (1 - M_r)^3} \right\} dS$$

(7)

式中: $p'_T(x, t)$ 和 $p'_L(x, t)$ 分别为单极子源和偶极子源; $f=0$ 表示声源积分面。式(6)、式(7)中带有下标的项均表示 2 个向量的内积,即

$$L_r = \mathbf{L} \cdot \mathbf{r} = L_i r_i$$

(8)

$$U_n = \mathbf{U} \cdot \mathbf{n} = U_i n_i$$

(9)

式中： $\boldsymbol{r}$ 表示由声源点指向接收点的单位向量； $\boldsymbol{n}$ 表示平面的单位法向量。FW-H 方程中出现的变量的物理意义以及公式的具体求解过程详见参考文献 [18]。

当声场计算完成后,通过傅里叶变换可得到噪声频谱图和噪声结果。在数值模拟计算中,由于波长远大于风机特征尺寸,因此蜗壳和叶轮之间的反射、衍射和散射在计算中均忽略不计,其中风机叶片的通过频率 f' 可以用下式得到

$$f' = \frac{nB}{60}I$$

(10)

式中： I 表示谐波次数 ($I=1$ 时为基频)。

3 实验测量

按照 GB/T 17713—2011《吸油烟机》对多翼离心风机进行空气性能实验。如图 6 所示,实验装置主要由连接器、十字整流器、扩散段和减压筒等组成。通过调节减压筒末端的出口面积,得到风机工作时各个工况点的全压、静压、流量和效率等实验数据。噪声测试按照 GB/T 17713—2011《吸油烟机》标准,采用全球包络法进行测量。

为减小风机实验造成的误差和制造成本,在加工过程中采用可拆卸蜗舌设计方式,蜗舌和蜗壳分别独立加工。蜗舌材料为 ABS 塑料,用螺钉将可拆卸内凹式蜗舌和蜗壳固定在一起。每次更换蜗舌后,在实验前对蜗壳的主要参数进行测量以确保实验的准确性。

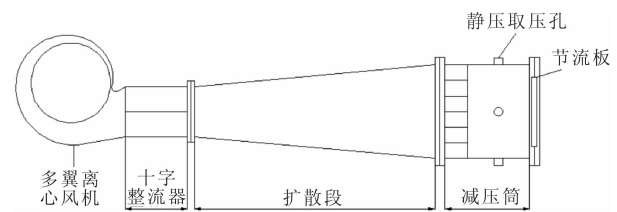


图 6 风机性能实验装置

4 实验结果分析

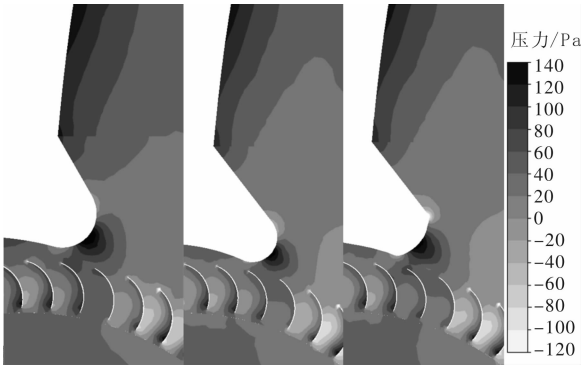
表 3 给出了多翼离心风机的数值模拟结果和实验测量结果的比较。由表 3 可以看出:本文研究的具有不同蜗舌结构的多翼离心风机出口压力的计算值在 70.5~72.1 Pa 范围内变化,风机效率在 36.9%~38.5% 范围内变化;出口压力的测量值在 70.5~71.9 Pa 范围内变化,风机效率在 37.3%~38.0% 范围内变化。不管是采用内凹弧形蜗舌还是采用内凹槽形蜗舌,在出口压力和运行效率基本不

变的情况下,多翼离心风机的风量都会有所增加,噪声有所降低。与传统蜗舌相比,内凹弧形蜗舌风机噪声下降了 1.4 dB,风量提高了 0.23 m³/min;与传统蜗舌相比,内凹槽形蜗舌风机噪声下降了 1.7 dB,风量提高了 0.17 m³/min。与采用内凹弧形蜗舌相比,采用内凹槽形蜗舌的多翼离心风机的噪声降低了 0.3 dB,但风机的效率也有一定程度的下降。

表 3 风机性能数值模拟和实验结果

蜗舌类别	数据来源	风量/ m ³ ·min ⁻¹	噪声/ dB	出口压 力/Pa	效率/ %
传统	计算	16.24	59.4	71.3	37.6
蜗舌	测量	16.35	58.7	71.5	37.8
内凹弧 形蜗舌	计算	16.45	57.9	72.1	38.5
	测量	16.61	57.4	71.9	38.0
内凹槽 形蜗舌	计算	16.41	57.7	70.5	36.9
	测量	16.54	57.0	70.5	37.3

图 7 给出了传统蜗舌区域和内凹式蜗舌区域在 $Z=50$ mm 平面处的压力分布,可以看出,与内凹式蜗舌区域相比,传统蜗舌区域的压力变化更加剧烈,压力梯度更大,内凹式蜗舌顶部压力梯度明显减小。与传统蜗舌相比,采用内凹弧形蜗舌在蜗舌处压力减小了 12 Pa,采用内凹槽形蜗舌在蜗舌处压力减小了 9 Pa,这表明内凹式蜗舌对气流有更好的分流作用,有效减小了出口气流对蜗舌的冲击作用,从而减小了风机的旋转噪声。由于内凹式蜗舌的分流效果好,使蜗舌区域的冲击损失降低,从而提高了风机的效率。与传统蜗舌风机相比,在蜗舌的上侧,内凹式蜗舌风机产生压力梯度的强度和范围也更小,较大程度地减小了流动分离,有利于风机出口处气体的流动。

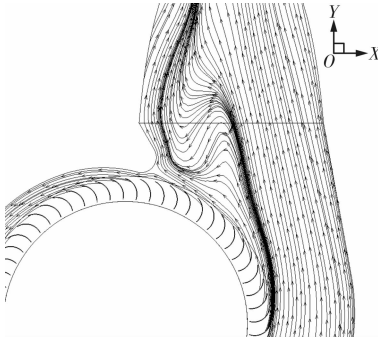


(a)传统蜗舌 (b)内凹弧形蜗舌 (c)内凹槽形蜗舌

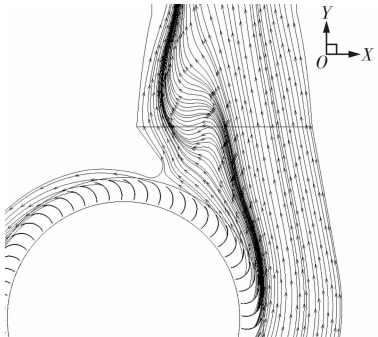
图 7 $Z=50$ mm 处蜗舌区域压力云图

由于叶轮出口的气流在冲击到蜗舌时,一部分气流会经过蜗舌的作用流向蜗壳出口,另一部分气流会回流至蜗壳内与叶轮内气流产生相互作用。由于蜗舌的作用,气流流速下降,静压增大,但是蜗舌附近的叶轮出口区域静压较低,因此在该区域就会形成一个压力梯度,气流在压力梯度和离心力的共同作用下,在蜗舌附近形成一个如图 8 所示的较大区域的旋涡。旋涡的存在减小了风机出口有效流通面积,降低了风机流量。由图 8 可以看出,采用内凹式蜗舌之后,减小了风机出口处流线的变形与旋涡强度,同时也减小了旋涡的影响区域面积,这不但有利于增大风机的流量,也有利于风机通道内流体流动的顺畅性和蜗舌附近区域流场的稳定性。

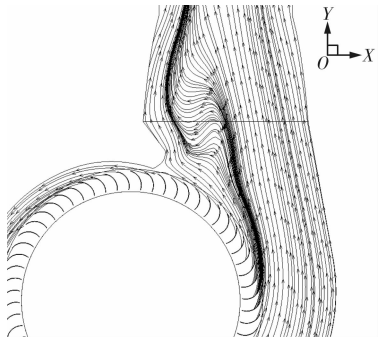
数值模拟计算时,采用传统蜗舌的多翼离心风



(a)传统蜗舌



(b)内凹弧形蜗舌



(c)内凹槽形蜗舌

图 8 $Z=50\text{ mm}$ 处蜗舌附近区域流线图

机在 4 个接收点的声压级随频率的变化如图 9 所示。由图 9 可以看出,噪声随频率有周期性变化,基频为 800 Hz ,此频率与计算中叶轮的旋转频率一致。风机的远场噪声中, B 点和 D 点在不同频率的声压级分布几乎相同。 A 点和 C 点声压级有一定差别,在 $0\sim 2\text{ kHz}$ 范围内差别最为明显。

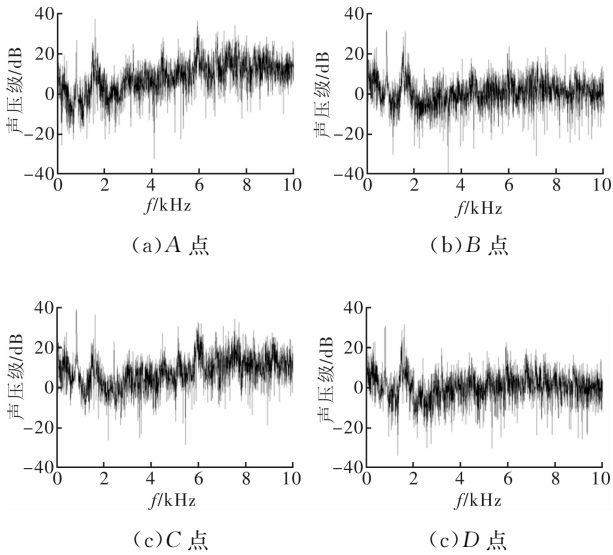


图 9 不同接收点的频率声压图

图 10 给出了带有不同形状蜗舌的多翼离心风机的 A 计权声压级倍频程频谱。与传统蜗舌的风机相比,采用内凹式蜗舌的风机在整个频段的噪声都比较低,在频率小于 4 kHz 的范围内降噪效果更为明显。结合图 9 可以看出,噪声在 $1\sim 2\text{ kHz}$ 内有一峰值,采用内凹式蜗舌的风机的噪声在这个频段内明显降低,噪声的峰值也有所下降。与内凹弧形蜗舌相比,内凹槽形蜗舌在 $1\sim 4\text{ kHz}$ 范围内的降噪效果更好,这是由于风机在工作过程中叶轮和蜗舌相互作用,在蜗舌表面形成了非定常的压力脉动,内凹式蜗舌使得非定常的压力脉动到达蜗舌表面上

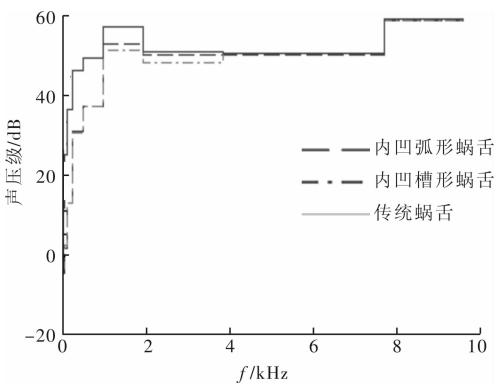


图 10 A 计权声压级倍频程频谱图

的时间和幅值存在一定的差异,合理的蜗舌设计就会减弱噪声在反射和传播过程中产生的干涉。由图10可以看出,内凹槽形蜗舌除了具有弧形结构外,内弧表面还具有凹槽构形,这无疑增强了对噪声传播的相位的影响,因此内凹槽形蜗舌的降噪效果更好。

图11给出了多翼离心风机的噪声指向性分布,极坐标下每种蜗舌的噪声曲线由12个点的噪声值连接而成,12个噪声接收点分布由全球包络法给定。由极坐标图11可以看出,在 0° 、 90° 、 210° 、 240° 位置处,2种内凹式蜗舌具有明显降噪效果,在每个接收点位置处的噪声都低于相同位置处测定的带有传统蜗舌的风机的噪声,其中内凹槽形蜗舌的降噪效果较为理想。

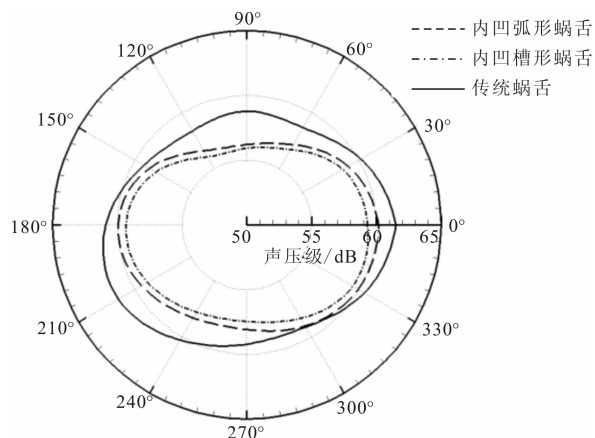


图11 噪声分布的极坐标图

5 结 论

蜗舌形状对风机内部流动状态和气动性能有着重要的影响。

(1)采用内凹弧形蜗舌和内凹槽形蜗舌均在不同程度上减小了多翼离心风机出口气流对蜗舌的冲击强度。与传统蜗舌相比,内凹弧形蜗舌处压力减小了12 Pa,内凹槽形蜗舌处压力减小了9 Pa。采用内凹弧形蜗舌和内凹槽形蜗舌,减小了多翼离心风机在蜗舌附近区域的旋涡强度和旋涡影响区域面积,风机内流场更加稳定,通道内气流流通顺畅,风机出口处的有效流通面积增加。

(2)采用内凹弧形蜗舌和内凹槽形蜗舌的多翼离心风机,在保持风机出口压力和流量基本不变的情况下,抑制了噪声的叠加,低频噪声峰值下降,从而有效降低了风机噪声。与采用传统蜗舌的多翼离心风机相比,采用本文提出的内凹弧形蜗舌,风机噪声下降了1.4 dB;采用内凹槽形蜗舌,风机噪声下降了1.7 dB。

参考文献:

- [1] 赵婷, 赵付, 任刚, 等. 倾斜蜗舌对离心风机降噪影响的试验研究 [J]. 流体机械, 2012, 40(3): 1-7.
ZHAO Ting, ZHAO Cun, REN Gang, et al. Experimental study on the effect of inclined volute tongue on the noise reduction of centrifugal fan [J]. Fluid Machinery, 2012, 40(3): 1-7.
- [2] ZHOU S, WANG J. Prediction and reduction of aerodynamic noise of the multiblade centrifugal fan [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 2014: 1-10.
- [3] 孙少明, 任露泉, 梅涛, 等. 仿生降噪蜗舌试验研究与数值模拟分析 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 32-34.
SUN Shaoming, REN Luquan, MEI Tao, et al. Practice and simulation analysis for reducing the centrifugal fan noise with bionics volute tongue [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 32-34.
- [4] 毛义军, 祁大同, 刘秋洪. 基于非定常流场的离心风机气动噪声分析 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9): 989-993.
MAO Yijun, QI Datong, LIU Qihong. Analysis of the aeroacoustics in centrifugal fan based on numerical simulation of unsteady viscous flow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9): 989-993.
- [5] LI Du, YANG Ce, ZHOU Mi, et al. Simulation of volute tongue of small-size centrifugal compressor [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011, 20(4): 496-501.
- [6] 张师帅, 罗亮, 秦松江. 蜗舌间隙对空调用贯流风机性能及噪声的影响 [J]. 制冷与空调, 2008, 22(2): 6-9.
ZHANG Shishuai, LUO Liang, QIN Songjiang. Influence of volute throat gap on the performance and aeroacoustic noise of cross-flow fan used by air-conditioning [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2008, 22(2): 6-9.
- [7] 门艳忠, 卢铁光, 蒋恩臣. 4ZTL-1800 联收机风机倾斜蜗舌降噪的试验与分析 [J]. 东北农业大学学报, 2005, 36(1): 91-94.
MEN Yanzhong, LU Tiegua, JIANG Enchen. Experiment and analysis on reducing noise of the 4ZTL-1800 combine gain machine fan incline tongue [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2005, 36(1): 91-94.
- [8] YOUNSI M, BAKIR F, KOUIDRI S, et al. Numerical and experimental study of unsteady flow in a centrifugal fan [J]. Proceedings of the Institution of Me-

- chanical Engineers; Part A Journal of Power and Energy, 2007, 221(7): 1025-1036.
- [9] 付双成, 刘雪东, 邹鑫, 等. 倾斜蜗舌对多翼离心风机流场及噪声的影响 [J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(3): 87-89.
- FU Shuangcheng, LIU Xuedong, ZOU Xin, et al. Numerical simulation of the influence of inclined volute tongue on flow field and noise of multi-blade centrifugal fans [J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(3): 87-89.
- [10] 李栋, 顾建明. 阶梯蜗舌蜗壳降噪的分析和实现 [J]. 风机技术, 2005(3): 3-5.
- LI Dong, GU Jianming. Analysis and realization of step-volute tongue scroll denoising [J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2005(3): 3-5.
- [11] 宫武旗, 吕伟领, 席光, 等. 前向多翼式离心风机蜗舌附近流场的 PIV 试验研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 166-171.
- GONG Wuqi, LV Weiling, XI Guang, et al. Experiment study on the velocity field near the tongue of a forward curved multi-blades centrifugal fan [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(1): 166-171.
- [12] 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.
- [13] VELARDE-SUAREZ S, BALLESTEROS-TAJADURA R, SANTOLARIA-MORROS C, et al. Reduction of the aerodynamic tonal noise of a forward-curved centrifugal fan by modification of the volute tongue geometry [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(3): 225-232.
- [14] 刘小民, 赵嘉, 李典. 多翼离心风机性能的数值计算和实验测量 [J]. 风机技术, 2015(3): 11-17.
- LIU Xiaomin, ZHAO Jia, LI Dian. Numerical simulation and experimental measurement of aerodynamic performance for a multi-blade centrifugal fan [J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2015(3): 11-17.
- [15] FLOWCS WILLIAMS J E F, HAWKINGS D L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London; Series A Mathematical and Physical Sciences, 1969, 264(1151): 321-342.
- [16] MOON Y J, YONG C, NAM H S. Computation of unsteady viscous flow and aeroacoustic noise of cross flow fans [J]. Computers & Fluids, 2003, 32(32): 995-1015.
- [17] LIU Q, QI D, MAO Y. Numerical calculation of centrifugal fan noise [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(8): 1167-1177.
- [18] 韩忠华, 宋文萍, 乔志德. 基于 FW-H 方程的旋翼气动声学计算研究 [J]. 航空学报, 2003, 24(5): 400-404.
- HAN Zhonghua, SONG Wenping, QIAO Zhide. Aeroacoustic calculation for helicopter rotor in hover and in forward flight based on FW-H equation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003, 24(5): 400-404.
- [本刊相关文献链接]
- 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. 2015, 49(11): 49-54. [doi:10.7652/xjtuxb201511009]
- 刘小民, 赵嘉, 李典. 单圆弧等厚叶片前后缘多元耦合仿生设计及降噪机理研究. 2015, 49(3): 1-10. [doi:10.7652/xjtuxb201503001]
- 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. 2015, 49(1): 14-20. [doi:10.7652/xjtuxb201501003]
- 温选锋, 杨昕, 祁大同, 等. 椭圆形进口集流器对多翼离心风机性能影响的实验研究. 2011, 45(11): 45-51. [doi:10.7652/xjtuxb201111009]
- 周正, 卢傅安, 祁大同, 等. 一种离心风机蜗壳减振降噪的数值优化方法. 2011, 45(9): 59-64. [doi:10.7652/xjtuxb201109011]
- 顾媛媛, 袁民建, 毛义军, 等. 离心风机吸声蜗壳结构的数学物理模型及实验验证. 2011, 45(1): 83-88. [doi:10.7652/xjtuxb201101017]
- 蔡建程, 祁大同, 卢傅安. 离心风机基频气动偶极子噪声的数值研究. 2009, 43(11): 66-70. [doi:10.7652/xjtuxb200911014]
- 李景银, 牛子宁, 梁亚勋. 可控减速法设计离心风机两元叶片的研究. 2009, 43(9): 67-70. [doi:10.7652/xjtuxb200909015]
- 蔡建程, 祁大同, 唐因. 离心风机蜗壳振动声辐射的定量预测. 2009, 43(9): 71-74. [doi:10.7652/xjtuxb200909016]
- 毛义军, 祁大同, 刘晓良. 蜗壳散射对离心风机气动噪声传播的影响. 2009, 43(5): 51-55. [doi:10.7652/xjtuxb200905011]

(编辑 武红江 苗凌)