

# 多翼离心风机蜗壳改型设计与性能试验

周水清 王曼 李哲宇 张生昌

(浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310024)

**摘要:** 为改善小型多翼离心风机受气体粘性影响导致流动分离加剧的现象,在传统蜗壳型线设计理论的基础上,研究气体粘性力矩对蜗壳壁线分布的影响,并采用动量矩修正方法对其进行改型设计。另外,为真实反映风机内流场分布情况,在标准  $k-\varepsilon$  计算模型的扩散项中加入粘性应力作用,使其最高计算误差降低至 3%。对比分析改型前后风机数值模拟计算和试验测量结果可知,采用修正的  $k-\varepsilon$  模型进行计算发现改型后风机内旋涡强度减小,蜗壳出口靠近蜗舌处流动分离得到改善。试验结果表明:改型风机出口静压提升约 25 Pa,最大全压效率较原型机提升约 10%。同时,由于蜗壳张开度扩大能够抑制流动分离,使蜗舌附近区域的旋涡强度及其影响区域减小,从而使多翼离心风机噪声降低了 2.5 dB。

**关键词:** 多翼离心风机; 蜗壳型线; 降噪; 模型修正; 优化

**中图分类号:** TH432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0180-07

## Influence of Volute Retrofit Design on Performance of Multi-blade Centrifugal Fan

ZHOU Shuiqing WANG Man LI Zheyu ZHANG Shengchang

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China)

**Abstract:** In order to improve the phenomenon of increased flow separation caused by the influence of gas viscosity on the small multi-blade centrifugal fan, the influence of gas viscous torque on volute wall distribution was studied based on the traditional volute design theory, and the momentum correction was used to modify the design. In addition, in order to truly reflect the distribution of the flow field in the fan, the viscous stress was added to the diffusion term of standard  $k-\varepsilon$  calculation model to reduce the maximum calculation error to 3%. Comparing and analyzing the fan's numerical simulation and experimental results before and after modification, the modified  $k-\varepsilon$  model was used to calculate, and it was found that the vortex intensity in the modified fan was reduced, and the flow separation near the volute outlet at the volute outlet was improved. The experimental results showed that the static pressure at the outlet of the modified fan was increased by about 25 Pa, and the maximum full-pressure efficiency was improved by about 10% compared with the prototype. At the same time, due to the expansion of the volute expansion, flow separation can be suppressed, the vortex intensity in the vicinity of the volute tongue and its influence area were reduced, and the noise of the multi-blade centrifugal fan was effectively reduced by 2.5 dB.

**Key words:** multi-blade centrifugal fan; volute profile; noise reduction; model correction; optimization

## 0 引言

多翼离心风机广泛应用于国民经济的各个领域,是工业生产中主要耗能设备之一<sup>[1]</sup>。蜗壳作为离心风机中不可或缺的基本元件,其结构的不对称性及内部流动的复杂性会对叶轮出口气流角造成较

大影响<sup>[2-4]</sup>,使其沿圆周方向呈现出明显的不对称性<sup>[5-6]</sup>。在风机实际运行过程中,叶轮出口气流与蜗壳壁面间存在强烈的非定常干涉,使得蜗壳壁面成为风机的主要噪声源<sup>[7-9]</sup>。提高蜗壳型线设计水平,不仅能改善风机气动性能,还能达到降低噪声的效果。目前国内外学者对离心风机蜗壳型线的研

究,主要集中在寻找能真实反映蜗壳内流体流动状态的设计方法,王军等<sup>[10]</sup>以蜗壳与叶轮出口在半径方向上的间距随方位角线性递增来优化蜗壳型线,并用试验证明了良好的蜗壳型线不仅能提高风机效率及全压,还能改变流量-压力曲线的变化趋势;BALONI等<sup>[11]</sup>通过应用层次分析法(AHP)对蜗壳的重要几何参数进行了优先排序,阐明了各参数对离心风机性能的影响;QI等<sup>[12]</sup>采用3种不同流量的五孔探头,测量了风机蜗壳内流体的三维流动,得出传统一维蜗壳型线设计方法忽略了风机内部严重的泄漏情况,应根据流体实际流动进行修正的结论。

本文在传统蜗壳型线设计理论基础上,以某多翼离心风机为研究对象,采用动量矩修正方法对其进行性能优化。并考虑粘性应力的作用对原有  $k-\varepsilon$  计算模型进行修正,以期提高数值计算结果的准确度,为 CFD 数值模拟预测风机性能的可靠性提供参考。

## 1 研究对象与数值模拟

### 1.1 研究对象

多翼离心风机由进口集流器、叶轮及蜗壳组成,具体结构如图 1 所示。其设计转速  $n = 1\ 200\ \text{r/min}$ ,设计流量  $Q_v = 0.15\ \text{m}^3/\text{s}$ ,主要尺寸参数为:蜗壳宽度  $b_1 = 152\ \text{mm}$ ,叶轮内径  $D_1 = 210\ \text{mm}$ ,叶轮外径  $D_2 = 246\ \text{mm}$ ,叶片进口安装角  $\beta_{1A} = 78^\circ$ ,叶片出口安装角  $\beta_{2A} = 160^\circ$ ,叶片圆弧半径  $r = 14\ \text{mm}$ ,叶片数  $z = 60$ 。

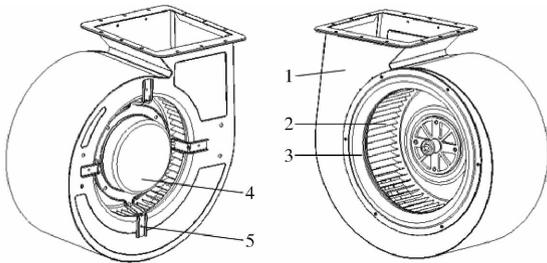


图 1 多翼离心风机结构图

Fig. 1 Structure diagram of multi-blade centrifugal fan

1. 蜗壳 2. 叶轮 3. 集流器 4. 电动机 5. 电动机支架

### 1.2 三维建模及网格划分

为了提供更好的来流条件,给定较为准确的边界条件<sup>[13]</sup>,本研究在利用 Solidworks 软件对风机进行三维建模时,分别将进风区域和出风区域进行延长处理,以保证进出口气体的流动充分发展。另外,为了方便模型的建立,在尽量减小数值模拟误差的前提下对电动机结构进行一定程度的简化,具体计算模型如图 2 所示。

将建立好的风机三维模型导入 ICEM 软件进行混合网格的划分。其中进出口和叶轮区域采用结构

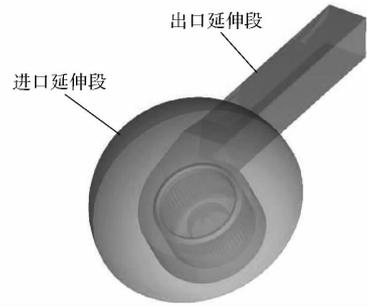


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

化网格,而蜗壳部分由于其内部结构复杂,尤其是电动机周围结构并非规则模型,故采用适应性较强的非结构化四面体网格,具体网格如图 3 所示。综合考虑动静耦合区域对数值模拟预测结果的影响,在进行网格划分时,对边界层进行加密处理,其最低网格质量雅克比<sup>[14]</sup>在 0.3 以上。

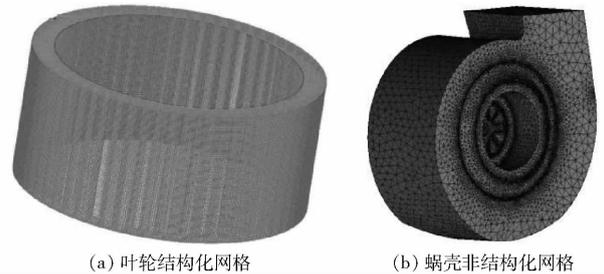


图 3 网格模型

Fig. 3 Grid model

为了保证数值计算结果的准确性,避免网格误差对其模拟结果造成影响,对多翼离心风机进行网格无关性验证,如表 1 所示。综合考虑计算精度和计算效率可知,当网格数为  $2.5 \times 10^6$  左右时预测结果较为合理,最终确定整个计算域的网格数为 2 513 558。

表 1 网格无关性验证

Tab. 1 Grid independence verification

序号	网格数	全压/Pa
1	1 554 635	324. 613
2	1 986 324	342. 249
3	2 546 319	361. 834
4	2 854 679	362. 045
5	3 012 476	361. 943

### 1.3 数值计算模型及其修正

$k-\varepsilon$  模型作为最为普遍有效的湍流模型,能够计算大量的各种回流和薄剪切层流动,被广泛应用于各类风机的数值求解计算中。

标准  $k-\varepsilon$  模型的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon U) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2 \mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中  $\rho$ ——流体密度  $t$ ——时间  
 $k$ 、 $\varepsilon$ ——湍动能及湍动能耗散率  
 $U$ ——时均速度  $\sigma_t$ ——普朗特数  
 $E_{ij}$ ——流体元变形率的时均分量  
 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ ——可调经验常数  
 $C_\mu$ ——无量纲常数  
 $\mu_t$ ——湍流粘性系数

由于有梯度扩散项,模型  $k-\varepsilon$  方程为椭圆形方程,故其特性同其他椭圆形方程,需要边界条件:出口或对称轴处  $\partial k/\partial n=0$  和  $\partial \varepsilon/\partial n=0$ ,其中  $n$  表示空间向量维数。

但上述边界条件只针对高雷诺数而言,在固体壁面附近,流体粘性应力将取代湍流雷诺应力,并在临近固体壁面的粘性底层占主要作用。而多翼离心风机由于结构尺寸小、相对马赫数低,气体粘性力在流体流动过程中起重要作用,因此,在实际运用过程中,标准  $k-\varepsilon$  模型由于未充分考虑粘性力的影响,导致计算模型出现偏差。

为了真实反映风机内流场分布情况,在  $k-\varepsilon$  计算模型的扩散项中加入粘性应力作用,对式(1)~(3)分别进行修正,即

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla k \right] + 2 \mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\varepsilon U) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} f_1 \frac{\varepsilon}{k} 2 \mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\text{其中} f_\mu = [1 - \exp(-0.0165 Re_y)]^2 \left( 1 + \frac{20.5}{Re_t} \right) Re_y \quad (7)$$

$$\begin{cases} f_1 = \left( 1 + \frac{0.05}{f_\mu} \right)^3 \\ f_2 = 1 - \exp(-Re_t) \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Re_t = \frac{k^2}{\varepsilon v} \\ Re_y = \frac{y k^{1/2}}{v} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\mu$ ——层流粘度  $v$ ——运动粘度

$y$ ——直角坐标系中  $y$  轴坐标值

运用 Visual C++ 将上述修正函数编写为 UDF 代码,并导入 Fluent 内置 Calculation module。为符合实际运行状态,进出口边界条件设置为压力入口和压力出口,出口压降与动能成正比,从而避免在进口和出口定义一致的速度分布<sup>[15]</sup>。最后以 CFD 计算的定常结果作为初始条件,进行非定常数值计算。

#### 1.4 原风机性能试验原理及其装置

为了验证修正后数值计算模型的准确度,对原风机的不同工况进行气动性能试验<sup>[16]</sup>。其试验装置如图 4 所示。

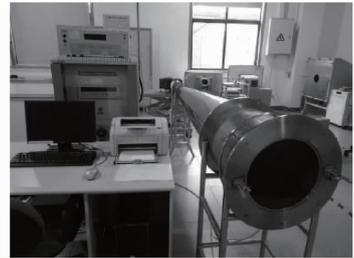


图 4 气动性能试验装置

Fig. 4 Aerodynamic performance tester

将修正前后数值计算模型预测原型机性能结果与试验值作对比分析,得到如图 5 所示的静压-流量性能曲线。

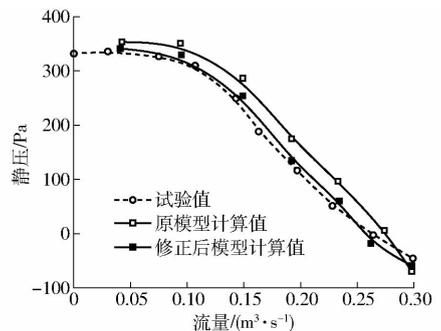


图 5 风机性能曲线

Fig. 5 Fan performance curves

由数据可知,采用标准  $k-\varepsilon$  模型预测的风机性能曲线较试验值存在一定误差,其最大误差达 9.5%,修正的  $k-\varepsilon$  模型,各流量工况下风机出口静压计算值与试验值吻合,其性能曲线趋于重合,两者误差明显减小,且最大误差降低至 3%,充分验证了所采用的数值计算模型修正方法的可行性,同时为风机性能的准确度和可靠性预测提供了支撑。

## 2 蜗壳改型设计

### 2.1 设计原理分析

原风机蜗壳内壁型线采用的是传统蜗壳型线设

计方法,即不考虑壁面粘性摩擦的影响,气流动量矩保持不变,运用不等边基圆法绘制的近似阿基米德螺旋线。而实际流动过程中,气体粘性作用常导致其速度在过流断面上呈现如图 6 所示的分布不均匀现象。

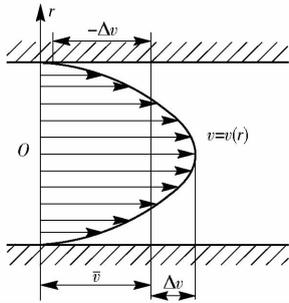


图 6 过流断面速度分布

Fig. 6 Overcurrent section velocity distribution

图 6 中  $\bar{v}$  为平均速度,  $\Delta v$  为真实速度与平均速度之差,其值在近壁处为负,中心处为正。在工程计算中,单位时间内通过过流断面的动量常用平均速度法表达为  $q_m \bar{v} = \rho \bar{v}^2 S$ ,但真实动量为

$$\int_A d(q_m \bar{v}) = \rho \bar{v}^2 S \left( 1 + \frac{1}{\bar{v}^2} \int_S \Delta v^2 dS \right) \quad (10)$$

式中  $q_m$ ——质量流量  
 $S$ ——过流断面面积

而流道内速度分布越不均匀,  $\int_S \Delta v^2 dS$  值越大,计算所得动量与真实动量间误差也越大。对于低速小型多翼离心风机而言,由于气体流道狭窄,受粘性作用的影响,风机内壁面边界层分离加剧,经过叶轮加速的气体流速沿蜗壳径向方向逐渐减小,而在蜗壳出口处,由于同时受到蜗舌结构和蜗壳壁面的影响,其流速为管道流速度分布,具体如图 7 所示。

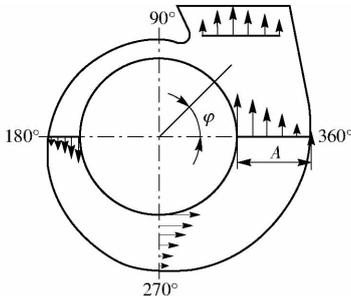


图 7 不同方位角监测截面

Fig. 7 Different azimuthal monitoring sections

由图 7 可知,受粘性作用的影响,蜗壳内流体于整个流道空间内呈现速度分布不均匀的现象,因此在实际流动过程中,流体动量矩并不是不变的,而是随流动的进行不断减小,故基于动量矩守恒定律设计的传统蜗壳型线存在动量修正的必要。

## 2.2 成型设计方法

由于气体粘性力无法通过简单的公式运算获得,且其大小受气体速度的影响,因此本文采用一种简单化的求解方法,即基于传统不等边基圆法,运用改进后的  $k-\epsilon$  模型对原风机进行数值模拟,设置如图 8 所示的 4 个监测截面,其方位角  $\varphi$  分别为  $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 、 $360^\circ$ 。通过 Fluent 后处理计算得出蜗壳壁面区域于以上 4 个截面处所受粘性力  $F_v$ ,测量力矩中心至力原点距离  $R$ ,由额定工况下风机总质量流量  $q$  计算得单位质量流体所受粘性力矩平均值  $m = F_v R / q$ 。

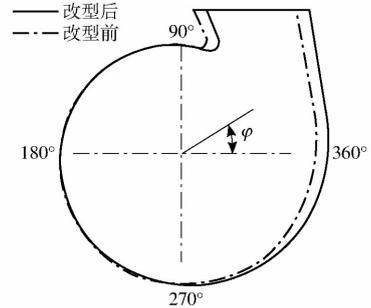


图 8 成型前后蜗壳型线对比

Fig. 8 Comparison diagram of volute profiles before and after retrofit

不考虑黏性力矩影响时,蜗壳出口张开度

$$A = R_2 \frac{Q}{2\pi b_1 c'_{2u} R_2} 2\pi = \frac{Q}{b_1 c'_{2u}} \quad (11)$$

式中  $Q$ ——风机总体积流量  
 $b_1$ ——蜗壳宽度  
 $c'_{2u}$ ——气流圆周分速度  
 $R_2$ ——叶轮外半径

考虑黏性力矩影响后,蜗壳出口张开度修正为

$$A' = R_2 \frac{Q}{2\pi B (c'_{2u} R_2 - m_{2\pi})} 2\pi \quad (12)$$

式中  $m_{2\pi}$  为  $\varphi = 360^\circ$  截面处动量矩修正项。同理,由上述修正思路计算其他各截面处张开度,重新绘制蜗壳外型线,并与原蜗壳型线进行对比,如图 8 所示。

## 3 数值模拟及流场分析

图 9 为多翼离心风机轴向方向视图,由于叶轮前盘与蜗壳前盖板间存在一定间隙,经过叶轮加速的气流压力得到提升,与蜗壳进口处气流形成压力梯度,进而造成叶轮出口靠近前盘侧气体回流现象的产生,而蜗壳后盖板侧由于受到电动机结构的影响,其附近流场较蜗壳中部紊乱,为了更好地研究蜗壳型线对风机内部流场的影响情况,选取与蜗壳前盖板气体进口截面轴向距离为 80 mm 的截面进行观测。

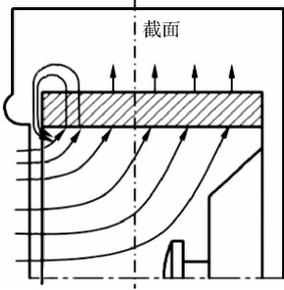


图9 风机观测截面示意图

Fig. 9 Schematic of fan observation section

根据数值计算结果得知最高效率点流量  $Q_{BEP} = 0.192 \text{ m}^3/\text{s}$ , 因此, 为研究不同工况下风机内部流体流动特性, 选定  $0.6Q_{BEP}$ 、 $Q_{BEP}$  及  $1.4Q_{BEP}$  3种流量工况进行分析。图10给出了各工况下观测截面在

距离轮心为125 mm处叶轮出口气流径向速度沿不同方位角的分布图。分析极坐标图可知, 由于受到蜗舌结构的影响, 各工况下流体径向速度在  $30^\circ \sim 90^\circ$  范围内明显降低, 这是因为在叶轮旋转过程中, 其出口气流周期性地冲击蜗舌间隙后又回流至蜗壳内, 导致附近区域流体流动紊乱, 叶轮流道处于堵塞状态。改型后该区域内流体在小流量及设计流量工况点下降程度减弱, 速度分布更为均匀, 且在各工况点下叶轮出口径向速度较原型机均有一定程度提高, 其中  $Q_{BEP}$  流量工况下各方位角出口径向速度平均提升约  $2.5 \text{ m/s}$ 。这说明改型后风机内流体流动状况得到改善, 气流有效出流量升高, 出口有效流通面积增大, 进而提升了风机效率。

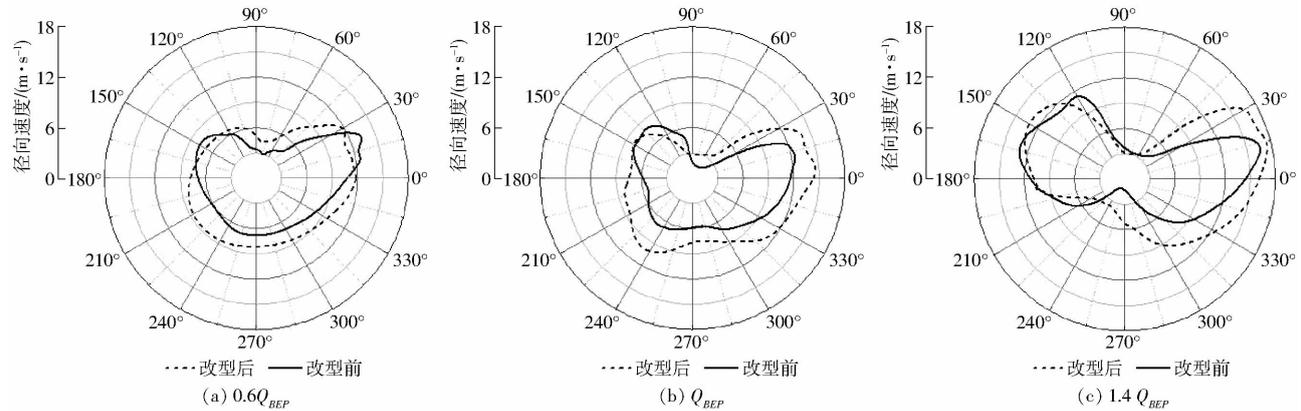


图10 不同工况下叶轮出口气流径向速度沿方位角的分布图

Fig. 10 Distribution diagrams of radial velocity along azimuth of impeller outlet under different working conditions

结合图10知, 多翼离心风机内蜗舌附近区域流体流动复杂, 压力脉动较其他区域强烈, 是众多研究者关注的重点<sup>[17]</sup>, 而气动噪声来源于涡的拉伸与破裂<sup>[18]</sup>, 因此图11、12给出了不同工况点下, 改型前、后风机在观测截面处蜗舌附近区域的涡量 ( $\text{s}^{-1}$ ) 等值线图。对于二维流体速度矢量, 其涡量

式中  $v$ 、 $u$ ——二维速度在  $x$ 、 $y$  坐标轴上的分量<sup>[19]</sup>

$$\omega_z = \partial u / \partial y - \partial v / \partial x \quad (13)$$

分析图11、12可知, 改型后各工况点下叶轮入口附近涡量明显较小, 其最大值由  $1.4Q_{BEP}$  下的  $1842.11 \text{ s}^{-1}$  降至  $465.324 \text{ s}^{-1}$  (区域I), 另外, 风机出口处大涡量范围也在一定程度上缩小, 而  $Q_{BEP}$  下大涡量区域已得到基本消除, 涡量最大值减小至改型前的  $1/2$  (区域II), 旋涡强度及其影响区域减小。

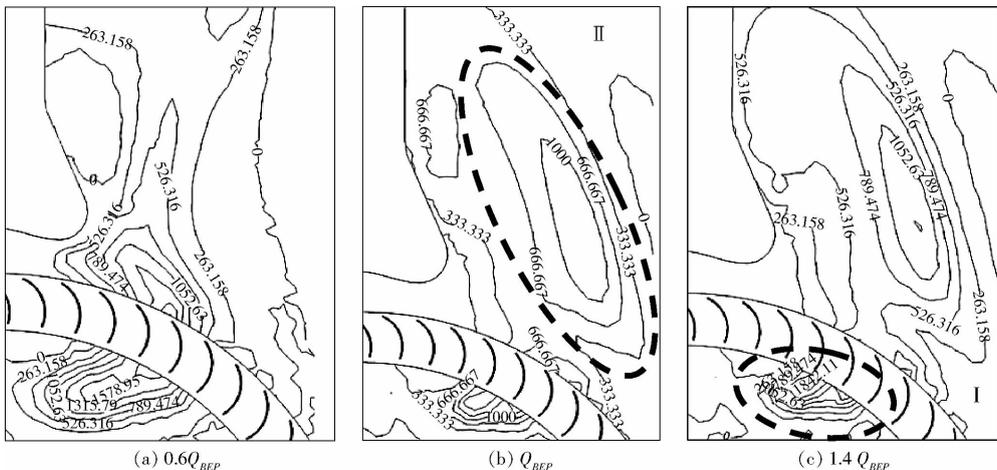


图11 改型前各工况观测面涡量分布

Fig. 11 Vorticity distribution contours of observation surface before modification

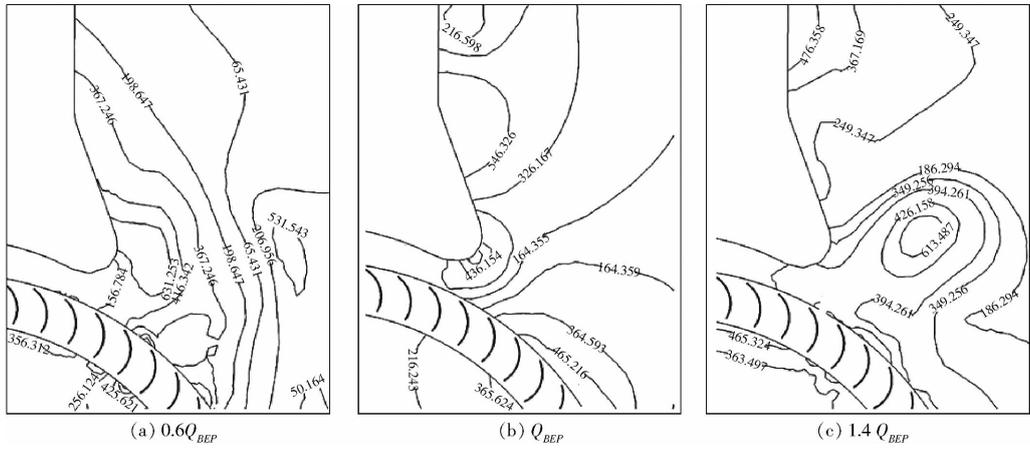
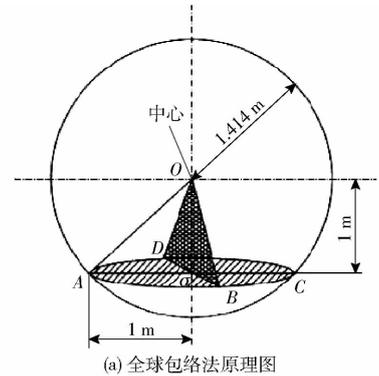


图 12 改型后各工况观测面涡量分布

Fig. 12 Vorticity distribution contours of observation surface after modification

### 4 试验验证

为了更好地验证上述数值计算结果的准确性,将改型后蜗壳制作成样机并分别进行气动性能试验和噪声测试。其中风机噪声测试采用全球包络法于半消音室中进行,具体试验装置及原理见图 13。风机放置于半消音室中央,即球面半径为 1.414 m 的球心处,设置如图 13a 所示的 4 个测试点(A、B、C、D),使其均布于与被测风机中心相距 1 m 的水平面与包络面相交的圆上。试验过程严格参照文献[20]标准规定放置 4 个测试点处的声压计位置,并在频率 19.7 ~ 1.014 kHz 范围内测量 1/24 倍频带的 A 计权声压级。另外,为避免环境或人为因素对测量结果造成影响,进而降低试验结果的可信度,在进行风机气动性能试验及噪声测试时采用重复试验方法,并将测量误差结果与改型前后风机性能一起做定量分析。



(a) 全球包络法原理图



(b) 半消音室噪声测试

图 13 噪声测试

Fig. 13 Noise test

图 14 给出了改型前、后风机静压及全压效率随流量的分布情况。结果表明,改型后试验所得 3 组风机静压及全压效率曲线趋于重合,各工况平均测量误差低于 3%,故可认为本文试验测量结果具有一定可信度。分析图 14 改型前、后风机性能曲线可知,小流量工况下改型后风机出口静压较原型机提升较小,当流量大于  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  时,静压得到明显提升,各工况下静压平均提升 25 Pa 左右。另外分析图 14 可知,风机全压效率呈现先增加再减小的趋势,且最大全压效率均向大流量工况点偏移,蜗壳改型后,全压效率得到提升,且在大流量工况点附近表现明显,其最大值较原型机提升约 10%。考虑其全工况,两种风机流量-全压效率曲线平缓程度相当,但改型后风机的高效区域较原型机更为宽阔。

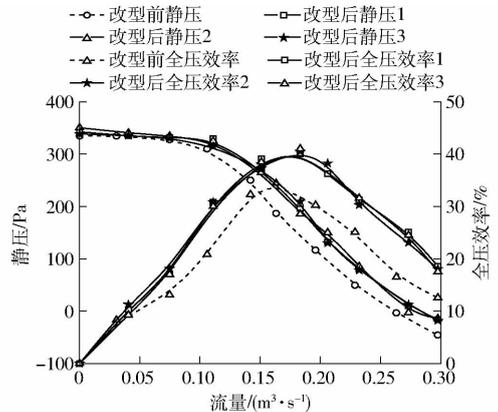


图 14 改型前、后风机性能比较

Fig. 14 Comparison of fan performance before and after retrofit

图 15 为不同流量下风机总声级曲线。由图可知,风机 A 计权声压级随流量呈线性递增趋势。改

进蜗壳型线后,风机气动噪声得到改善,A 计权声压级平均降低 2.5 dB。这是由于原风机蜗壳采用传统方法设计时未考虑黏性影响,蜗壳张开度取值偏小,

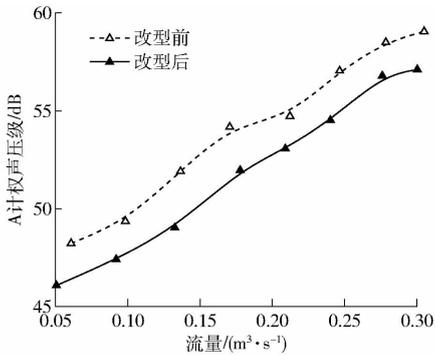


图 15 噪声分布曲线

Fig. 15 Noise distribution curves

使得蜗壳内部气流对蜗舌处的冲击速度较大。蜗壳壁线改型设计后张开度增大,横截面处气流速度分布不均匀的现象得到改善,故改型后风机的声压级有所降低。

## 5 结论

(1)通过在  $k-\varepsilon$  计算模型的扩散项中加入粘

性应力作用的影响,对原计算模型进行改进,使其预测风机性能结果的准确性得到提升,最大误差降低至 3%。

(2)在传统蜗壳型线设计方法的基础上,采用新的设计思路并利用改进后  $k-\varepsilon$  计算模型,对某多翼离心风机蜗壳进行改型设计。对比分析改型前后风机数值模拟结果知,原风机在方位角  $30^\circ \sim 90^\circ$  范围区域内流动紊乱,流体速度分布不均匀,改进蜗壳型线后,回流现象得到改善,叶轮出口径向速度提升,  $Q_{BEP}$  下各方位角出口径向速度平均提升约 2.5 m/s,风机有效流通面积增大。

(3)气动性能试验和噪声测试结果表明:改进后风机气动性能得到一定程度提升,其中出口静压提升约 25 Pa,最大全压效率较原型机提升约 10%。另外,蜗壳型线改型设计方法能有效降低风机噪声,各流量工况点下改进后风机声压级降低约 2.5 dB。

## 参 考 文 献

- 孙长辉,刘正先,王斗,等.蜗壳变形线改进离心风机性能的研究[J].流体机械,2007,35(4):1-5.  
SUN Changhui, LIU Zhengxian, WANG Dou, et al. Investigation on the performance influence of centrifugal blower by changing the volute type[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(4):1-5. (in Chinese)
- MONTAZERIN N, DAMANGIR A, FARD A K. A study of slip factor and velocity components at the rotor exit of forward-curved squirrel cage fans, using laser Doppler anemometry[J]. Journal of Power and Energy, 2001, 215(4):453-463.
- 杨春鱼,潘地林.离心通风机在不同流量下流畅的对比分析[J].风机技术,2011,53(3):48-52.  
YANG Chunyu, PAN Dilin. Comparative analysis on flow field with different flow in centrifugal fans[J]. Fan Technology, 2011, 53(3):48-52. (in Chinese)
- 丛高伟.离心通风机内部流场的数值模拟分析与比较[D].大连:大连理工大学,2006.  
CONG Gaowei. Numerical simulation analysis and comparison of internal flow field in centrifugal fan [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 王嘉冰,曲颖达.柜式空调用多翼离心通风机内流场的数值分析[J].风机技术,2004,46(4):23-29.  
WANG Jiabing, QU Yingda. Numerical analysis of internal flow field of multi-blade centrifugal fan for floor standing air-conditioner [J]. Fan Technology, 2004, 46(4):23-29. (in Chinese)
- LGARASHI A, TODA K, YAMAMOTO M, et al. Numerical and experimental evaluation of turbulent flow in volute [C] // Proceedings of FEDSM'03 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference, 2003:857-862.
- LIU Qihong, QI Datong, TANG Hongtao. Computation of aerodynamic noise of centrifugal fan using large eddy simulation approach, acoustic analogy, and vortex sound theory [J]. Mechanical Engineering Science, 2007, 221(5):1321-1332.
- LIU Qihong, QI Datong, MAO Yijun. Numerical calculation of centrifugal fan noise: proceedings of the institution of mechanical engineers [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2006, 220(8):1167-1178.
- 冯新粮,郭津津.基于CFD的离心通风机蜗壳型线结构性能分析[J].流体机械,2009,37(8):21-24.  
FENG Xinliang, GUO Jinjin. Analysis of the structure and performance of volute profile of centrifugal fan based on CFD [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(8):21-24. (in Chinese)
- 王军,李佳峻,梁钟,等.蜗壳及叶片外形对双吸式多翼离心风机性能影响的试验研究[J].风机技术,2017,59(3):49-53.  
WANG Jun, LI Jiajun, LIANG Zhong, et al. The experimental study on influence of volute case and blade shape on performance of double suction multi-blade centrifugal fan [J]. Fan Technology, 2017, 59(3):49-53. (in Chinese)
- BALONI B D, PATHAK Y, CHANNIWALA S A. Centrifugal blower volute optimization based on Taguchi method [J]. Computers & Fluids, 2015, 112(2):72-78.
- QI D, ZHANG Y, WEN S, et al. Measurement and analysis of three-dimensional flow in a centrifugal fan volute with large volute width and rectangular cross-section [J]. Proc. IMech E, Part A—Journal of Power and Energy, 2006, 220(2):133-153.
- 陈慎宇,睦曦,王灿星.离心式通风机内部流场的数值模拟[J].流体机械,2007,35(9):22-25.  
CHEN Shenyu, SUI Xi, WANG Canxing. Three-dimensional numerical simulation of the internal flow in the centrifugal fan [J]. Fluid Machinery, 2007, 35(9):22-25. (in Chinese)

- 24 ZHENG L, ZHANG J, WANG Q. Mean-shift-based color segmentation of images containing green vegetation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 65(1): 93–98.
- 25 BAI X, CAO Z, WANG Y, et al. Vegetation segmentation robust to illumination variations based on clustering and morphology modelling[J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 125: 80–97.
- 26 GUO W, RAGE U K, NINOMIYA S. Illumination invariant segmentation of vegetation for time series wheat images based on decision tree model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 96: 58–66.
- 27 牛亚晓, 张立元, 韩文霆, 等. 基于无人机遥感与植被指数的冬小麦覆盖度提取方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 212–221. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180424&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180424&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.024.
- NIU Yaxiao, ZHANG Liyuan, HAN Wenting, et al. Fractional vegetation cover extraction method of winter wheat based on UAV remote sensing and vegetation index[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 212–221. (in Chinese)
- 28 韩文霆, 张立元, 张海鑫, 等. 基于无人机遥感与面向对象的田间渠系分布信息提取[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 205–214. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170326&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170326&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.026.
- HAN Wenting, ZHANG Liyuan, ZHANG Haixin, et al. Extraction method of sublateral canal distribution information based on UAV remote sensing[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 205–214. (in Chinese)
- 29 刘峰, 刘素红, 向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 250–257. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20141139&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141139&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.039.
- LIU Feng, LIU Suhong, XIANG Yang. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 250–257. (in Chinese)
- 30 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 1–12.
- WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(18): 1–12. (in Chinese)
- 31 孙刚, 黄文江, 陈鹏飞, 等. 轻小型无人机多光谱遥感技术应用进展[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(3): 1–17. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180301&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180301&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.001.
- SUN Gang, HUANG Wenjiang, CHEN Pengfei, et al. Advances in UAV-based multispectral remote sensing applications [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(3): 1–17. (in Chinese)
- 32 马立平. 统计数据标准化——无量纲化方法——现代统计分析方法的学与用(三)[J]. *数据*, 2000(3): 34–35.

~~~~~

(上接第 186 页)

- 14 周水清, 孔繁余, 王志强, 等. 基于结构化网格的低比转速离心泵性能数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7): 66–69.
- ZHOU Shuiqing, KONG Fanyu, WANG Zhiqiang, et al. Numerical simulation of performance of low specific speed centrifugal pumps based on structured grid [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7): 66–69. (in Chinese)
- 15 FERNAIDEZ O J M, PEREIRAS G B, GONZALEZ J, et al. Numerical methodology for relative and absolute deterministic flow structures in the analysis of impeller-tongue interactions for centrifugal fans [J]. *Computers & Fluids*, 2013, 86: 310–325.
- 16 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 工业通风机用标准化风道性能试验: GB/T 1236—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- 17 AKBARI G, MONTAZERIN N, AKBARIZADEH M. Stereoscopic particle image velocimetry of the flow field in the rotor exit region of a forward-blade centrifugal turbomachine[J]. *Proc. IMech E, Part A—Journal of Power and Energy*, 2012, 226(2): 163–181.
- 18 周水清, 王军, 王兴双. Bezier 函数型弯叶片的轴流风扇气动性能研究[J]. *华中科技大学学报*, 2013, 41(3): 106–109.
- ZHOU Shuiqing, WANG Jun, WANG Xingshuang. Study on aerodynamic performance of axial flow fan with bowed blade on Bezier function[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2013, 41(3): 106–109. (in Chinese)
- 19 蒋博彦, 刘辉, 王军, 等. 多翼离心风机小流量工况流动特性 PIV 研究[J]. *华中科技大学学报*, 2017, 45(5): 98–103.
- JIANG Boyan, LIU Hui, WANG Jun, et al. PIV research on flow characteristics of small flow conditions of multi-wing centrifugal fan [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2017, 45(5): 98–103. (in Chinese)
- 20 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 风机和罗茨鼓风机噪声测量方法: GB/T 2888—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.