

## 叶根倒角对小型轴流风扇静特性的影响

吴文军,金英子,王艳萍,储微,余辅波

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

**摘要:**以小型轴流风扇为原型,对其压力面侧叶根沿中弧线的不同方位进行倒角,分别建立了1/3倒角模型(距离前缘1/3中弧线)、2/3倒角模型(距离前缘2/3中弧线)和全倒角模型(沿整个中弧线)。采用RNG  $\kappa-\epsilon$  湍流模型、SIMPLE算法、二阶精度的迎风差分格式等数值方法分析风扇的内部流场特性。结果表明:1/3倒角和2/3倒角模型会提高风扇的静压和效率,但1/3倒角模型的性能更优;全倒角对风扇的静压没有多大影响,但是会使风扇效率降低;压力面侧的叶根局部倒角促使流道中流体再分配,从而改善了吸力面侧叶顶和叶根的低压区以及压力面侧叶根附近的高压区,进而避免了产生二次流的可能性;同时叶根倒角会增加压力面叶中附近的高压区面积,使风扇的做功能力增强。

**关键词:**轴流风扇;叶根倒角;内部流场特征;数值模拟

**中图分类号:** TH421

**文献标志码:** A

### 0 引言

电子产品的不断小型化和高性能化,需要更高要求的小型轴流风扇与其相匹配,而气动性能和噪音是影响小型轴流风扇性能和寿命的决定性因素。研究人员不仅要深入研究和设计影响小型轴流风扇性能的主要部件(如叶片和流道等),也需要关注其次要部位(如顶隙和倒角等)的影响,然而目前对于其次要部位的研究还相对比较少。尽管测试方法在不断改善,但是对于次要部位进行详细试验还非常困难,因而计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术成为分析这些因素对小型轴流风扇性能影响的重要手段。目前,国内外关于叶顶间隙对小型轴流风扇气动性能影响方面的研究较多,但这些研究都忽略了叶根倒角对小型轴流风扇气动性能的影响。

朱立夫等<sup>[1]</sup>研究了在不同周向位置添加分流叶片的小型轴流风扇,发现分流叶片会抑制原型叶片尾缘的涡脱落,进而降低风扇的噪音。康顺等<sup>[2]</sup>、孙

丽萍<sup>[3]</sup>研究了有无叶根倒角对离心叶轮内部流场特性的影响,发现叶根倒角会减小叶轮的流量、效率和压比。王大磊等<sup>[4]</sup>研究了有无叶根倒角对涡轮叶栅气动性能的影响,发现叶根倒角会改变流道涡的结构,使流道内的流体再分配,从而降低了涡轮的工作效率,同时发现随着倒角半径的增大,叶根前缘的分离程度先略微增加后减小,导致马蹄涡和下通道涡的强度先增加后减小,而上通道涡则先减小后增大。石龔等<sup>[5]</sup>研究了有无倒角结构对透平级涡轮气动性能的影响,发现叶根倒角会使上、下通道涡向叶中移动,同时增大端壁处的角涡强度和次流损失。Sauer等<sup>[6]</sup>发现在涡轮叶片前缘添加不同厚度的凸起,会增大马蹄涡在吸力面侧的分支,从而使通道涡与其相遇并远离吸力面,同时引起来流附面层增加。Zess等<sup>[7]</sup>发现在涡轮的叶栅前缘端壁处添加倒角,可以消弱马蹄涡的强度并推迟通道涡的形成。Mahmood等<sup>[8-9]</sup>研究了有无倒角对涡结构的影响。

目前国内外对叶根倒角的研究主要针对涡轮气动性能的影响与改善,但是对小型轴流风扇气动性

收稿日期: 2015-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51276172);浙江省自然科学基金项目(LZ14E050004)

作者简介: 吴文军(1989-),男,甘肃酒泉人,硕士研究生,主要从事流场测试及计算方面的研究。

通信作者: 金英子, E-mail: jin. yz@163. com

能的影响却几乎没有。本文以某一小型轴流风扇为研究对象,通过数值模拟和实验详细研究叶根倒角对小型轴流风扇内部流场特性的影响。

1 计算模型与数值方法

1.1 倒角设计及计算模型

本文研究的小型轴流风扇的几何参数如表 1 所示。

表 1 原型风扇模型的参数

参数	数值	单位
叶片数	5	片
叶轮外径	85	mm
轮毂直径	61	mm
轮毂比	0.72	
旋转速度	3000	r/min
叶顶间隙	2	mm
安装角	27.7	(°)

为了研究叶根倒角对小型轴流风扇性能的影响,本文对三种不同方位的叶根倒角进行研究。风扇原型如图 1(a)所示;在距离前缘 1/3 中弧线的压力面侧倒圆角,其圆角半径为 1 mm,宽为 2 mm,称为 1/3 倒角,如图 1(b)所示;在距离前缘 2/3 中弧线的压力面侧倒圆角,其圆角半径为 1 mm,宽为 2 mm,称为 2/3 倒角,如图 1(c)所示;在整个中弧线的压力面侧倒圆角,圆角半径为 1 mm,称为全倒角,如图 1(d)所示。

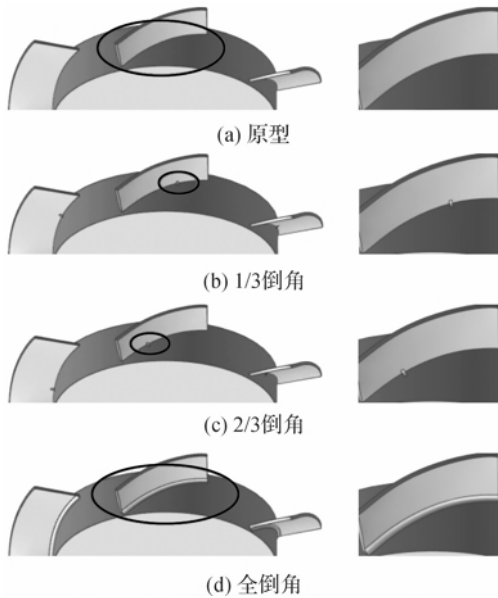
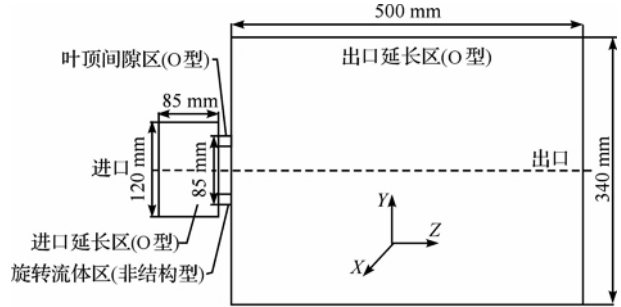


图 1 风扇模型

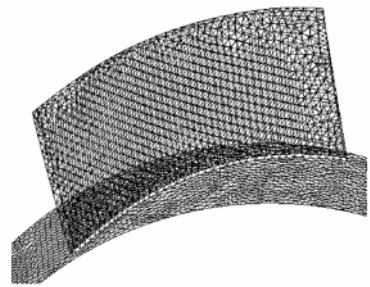
1.2 数值计算方法

流道截面上的网格部分情况如图 2 所示,整个计算域被划分为四个部分:进口延长区、叶顶间隙区、旋转流体区和出口延长区;由于进、出口延长区和叶顶间隙区的形状较为规则,所以应用结构网格

(O 型网格)进行划分;对于形状不规则的风扇形状,采用结构型网格划分得到的网格质量反而没有采用非结构型网格进行划分的质量高,因此采用非结构型网格对旋转流体区进行划分并在倒角附近进行适当的加密。对计算域的网格进行网格无关性验证后,得出网格总数为 240 万左右时计算结果较为准确,并且无量纲参数  $y^+$  小于 25。



(a) 网格拓扑结构示意图



(b) 叶片网格的局部放大

图 2 流道截面上的网格部分情况

本文采用质量流量入口和压力出口作为进出口的边界条件;风扇的叶片表面及轮毂采用固壁无滑移为边界条件;为了便于划分网格,在区域间设置交界面。

本文定常计算采用 RNG  $\kappa\epsilon$  湍流模型;使用 SIMPLE 算法进行压力-速度耦合;采用非耦合隐式求解器(segregated)求解方程;采用二阶精度的迎风差分格式对控制方程进行离散,以提高计算精度;在风扇旋转区动静界面的数据通过运动参考系 MRF (moving reference frame) 进行传递,从而将非定常流动作为定常流动进行计算。通过迭代前后的残差及监测面上流量和压力的相对误差来判断计算是否收敛,当迭代前后的残差及监测面上流量和压力的变化误差小于 0.5% 并且基本保持不变时认为收敛,本文中的残差全部小于  $10^{-3}$ 。

2 静特性实验

2.1 静特性实验

本文的风扇静特性测试实验在浙江理工大学风

洞实验室进行,风洞实验台主要用于小型轴流风扇的性能测试,主要测试原型风扇的静压-流量( $\psi\Phi$ )无因次曲线。图3为实验结果和数值模拟结果的对比图。从图3中可以看出,实验值均在一定程度上低于数值模拟的结果,这主要是由于实验中一些不可避免的因素而引起的误差;同时发现,实验结果和数值模拟的结果吻合的比较好,这可以说明本文中的数值模拟具有较好的可靠性。

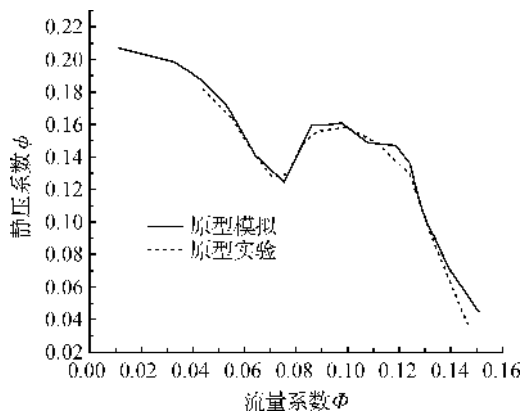


图3 静压-流量( $\psi\Phi$ )无因次曲线

### 3 数值计算结果及分析

#### 3.1 静特性

对三种不同方位倒角的风扇和原型风扇进行定常计算的数值模拟,得到静压-流量( $\psi\Phi$ )无因次曲线和效率-流量( $\eta\Phi$ )无因次曲线,如图4和图5所示。 $\Phi$ 为质量流量系数, $\psi$ 静压系数,可由式(1)和式(2)得到:

$$\Phi = \frac{4Q_m}{\rho\pi D^2 u} \quad (1)$$

$$\Psi = \frac{2\Delta P}{\rho u^2} \quad (2)$$

其中: $Q_m$ 为质量流量, $D$ 为风扇外径, $u$ 为风扇外缘的圆周速度。

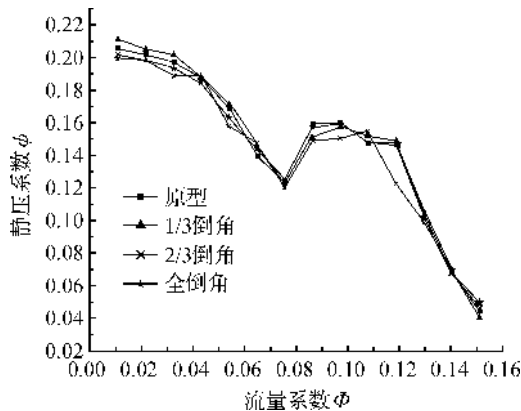


图4 静压-流量( $\psi\Phi$ )无因次曲线

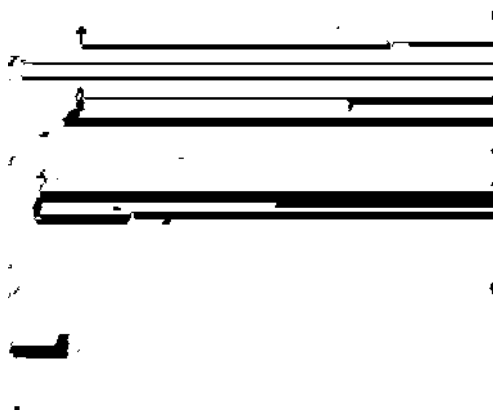


图5 效率-流量( $\eta\Phi$ )无因次曲线

由图4可知:在整个流量段,1/3倒角的静压都高于原型风扇的静压;2/3倒角除了在 $\Phi=0.11$  ( $Q_m=0.01$  kg/s)处的静压高于原型风扇的静压外,其它流量点处的静压值均低于原型风扇;当 $\Phi<0.065$  ( $Q_m=0.006$  kg/s)时,全倒角的静压都低于原型风扇的静压,当 $\Phi>0.065$ 时,全倒角和原型风扇的静压值相当。当 $\Phi=0.075$  ( $Q_m=0.007$  kg/s)时,因为风扇工作不稳定,能量损失较大,所以其静压突然减小。

由图5可知:a)当 $\Phi<0.097$ 以及 $0.13<\Phi<0.15$ 时,1/3倒角和原型的效率相同,但是在 $0.097<\Phi<0.13$ 时,1/3倒角的效率较原型的效率大;b)当 $\Phi<0.075$ 与 $0.13<\Phi<0.15$ 时,2/3倒角和原型的效率相同,但是在 $0.075<\Phi<0.13$ 时,除了 $\Phi=0.11$ 附近的效率比原型的效率大以外,其余各点的效率都比原型的效率小;c)在整个流量段,全倒角和原型风扇的效率相同。

综合性能曲线特征表明:2/3倒角的静特性仅在额定工况点略优于原型,而在额定工况点附近流量点所对应的静压则略低;全倒角和原型的静压相同,但是其效率会降低;在整个流量段,1/3倒角的静压和效率相对优于原型,且相对其它不同方位倒角模型的性能更优。

#### 3.2 轴向截面的压力分布

为了研究不同方位倒角在额定工况点( $\Phi=0.11$ )对风扇性能的影响,本节分析了不同风扇模型的三个轴向截面的静压等值线图,分别是 $Z=-6$ (流道进口处)、 $Z=0$ (流道中间)、 $Z=6$ (流道出口处),它们可以反映增加倒角后流道内的流动变化情况。

对比图6—图9可知:a)在流道进口处,原型、1/3倒角和2/3倒角在靠近吸力面侧的叶顶和叶根附近的压力等值线图几乎没有改变,只有全倒角模型在吸力面侧叶顶和叶根附近的低压区面积有明显

的减小,其距离前缘明显小于  $1/3$  中弧线,说明倒角可以改变吸力面侧叶顶和叶根附近的低压区;b)在流道中间,有倒角的风扇模型在靠近吸力面侧叶顶附近的低压区分离,其面积也随之减小,而且  $1/3$  倒角和  $2/3$  倒角在叶顶附近的最低压力相对原型都有明显减小, $1/3$  倒角和  $2/3$  倒角在靠近压力面侧叶中附近的高压区面积相对原型都有所增大,而全倒角模型的高压区面积则有所减小,说明局部倒角会

使靠近吸力面侧叶顶附近的低压增大,压力梯度减小,产生二次流的可能性也随之减小,压力面侧的高压区面积增大,风扇的做功能力也随之增大;c)在流道出口处, $1/3$  倒角和  $2/3$  倒角在靠近压力面侧叶中附近的高压区面积相对原型有所增大,而全倒角模型的高压区面积则明显减小, $1/3$  倒角和  $2/3$  倒角在靠近吸力面侧叶顶附近的低压区面积相对原型明显降低。

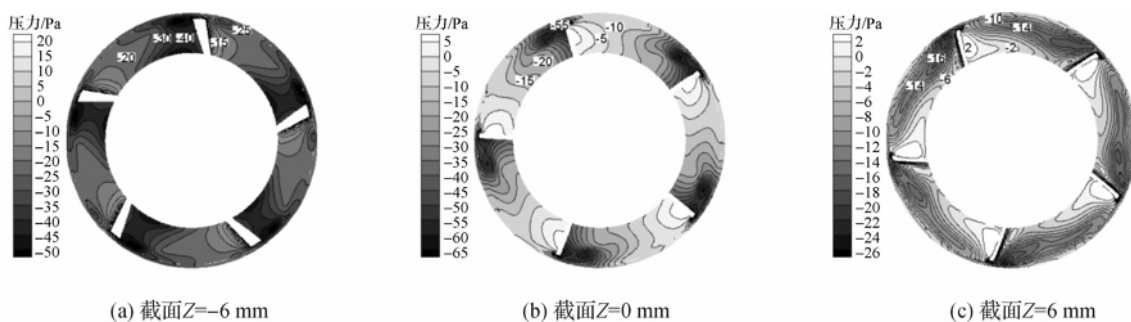


图6 原型风扇不同轴向截面的压力等值线

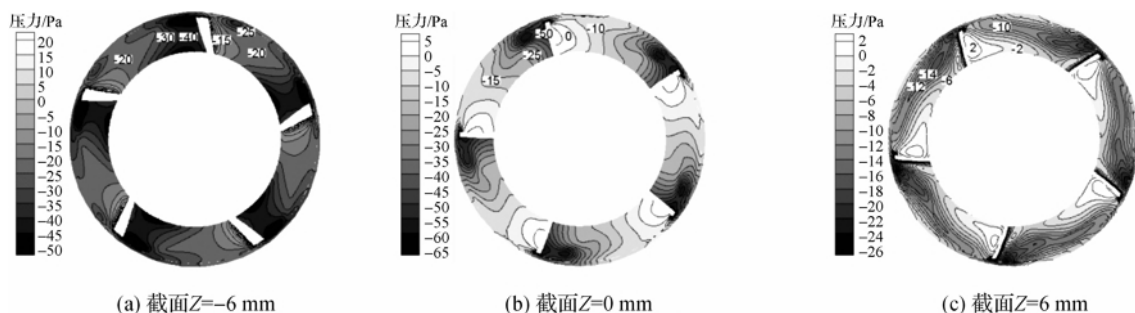
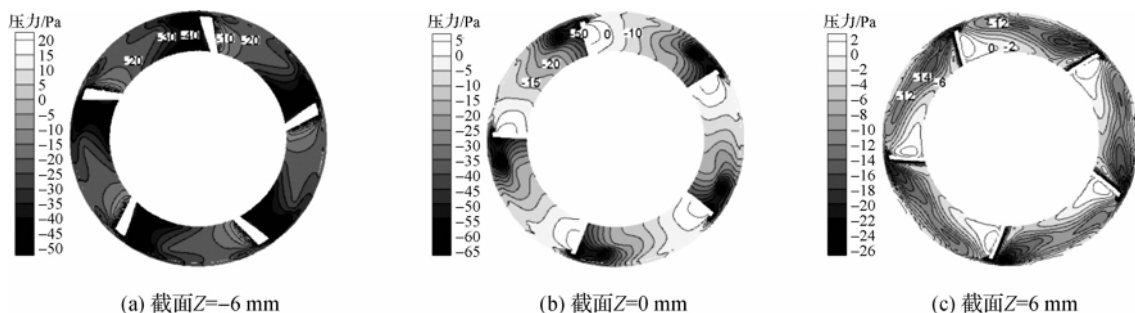
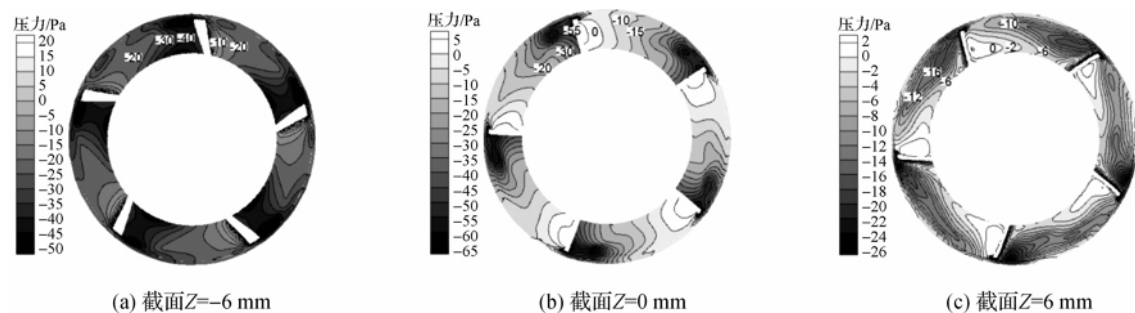
图7  $1/3$  倒角风扇不同轴向截面的压力等值线图8  $2/3$  倒角风扇不同轴向截面的压力等值线

图9 全倒角风扇不同轴向截面的压力等值线

综合分析流体沿流道流动的压力分布情况可知:1/3 倒角和 2/3 倒角模型的低压区面积明显减小,其数值增大,同时高压区的面积变大,说明增加倒角会促使流道中的流体重新分布,以至于低压区的面积减小,其数值增大,从而减小了形成涡的可能性,在压力面侧叶中附近的高压区面积增大,使风扇的做功能力进一步的提升。

### 3.3 叶顶局部压力分布

为了进一步了解风扇的内部流动特性,本节分析了不同风扇模型在额定工况点( $\Phi=0.11$ )的子午面( $X=0$ )压力等值线图,并选取叶顶处静压分布的局部放大图进行研究,结果如图 10 所示。

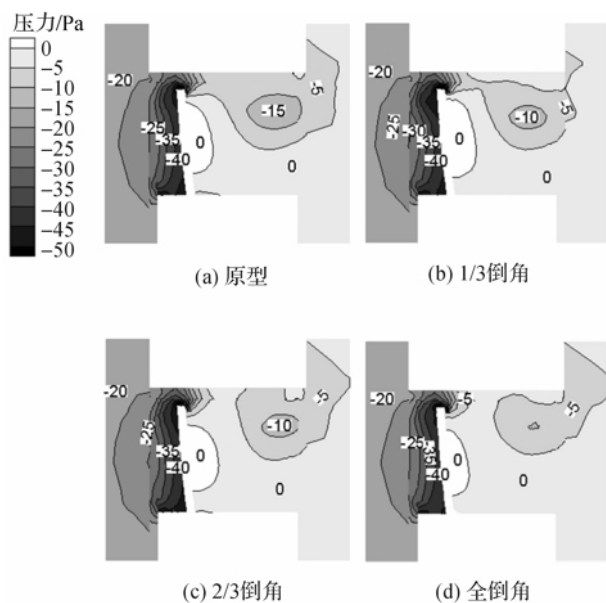


图 10 叶顶局部压力等值线图

从图 10 可以看出,在吸力面侧的叶根附近,1/3 倒角和全倒角模型的低压区面积会减小,但全倒角模型的低压区面积减小更大,意味着在该位置的压力梯度在不断的减小,从而改善了风扇吸力面侧叶根附近的压力分布情况,同时也说明压力面侧的叶根倒角可以改善吸力面侧叶根附近的低压区;在压力面侧的叶根附近,2/3 倒角的低压区面积相对原型有所减小,而 1/3 倒角和全倒角模型则不会出现低压区,从根本上抑制了二次流产生的可能。

从图 10 中也可以看出,在流道中的低压区面积及大小明显减小,说明流体在经过倒角时会产生二次流,并随着风扇的不断旋转与流道涡相遇,从而在一定程度上减小了流道涡的形成,使流道中的低压区面积减小、大小增大。

在吸力面侧叶中附近,1/3 倒角的压力梯度明显小于全倒角的压力梯度,产生涡的可能性也随之

降低;在压力面侧叶中附近,1/3 倒角的高压区面积明显要比其它模型大,说明 1/3 倒角会提高风扇静压。综合以上叶顶局部压力等值线图的分析,1/3 倒角模型的内部流动特性相比其它模型更优。

### 3.4 叶顶局部速度分布

为了更清楚的了解风扇在额定工况点( $\Phi=0.11$ )的内部流动特征,本节对不同倒角模型在子午面( $X=0$ )的速度流线图进行分析,结果如图 11 所示。

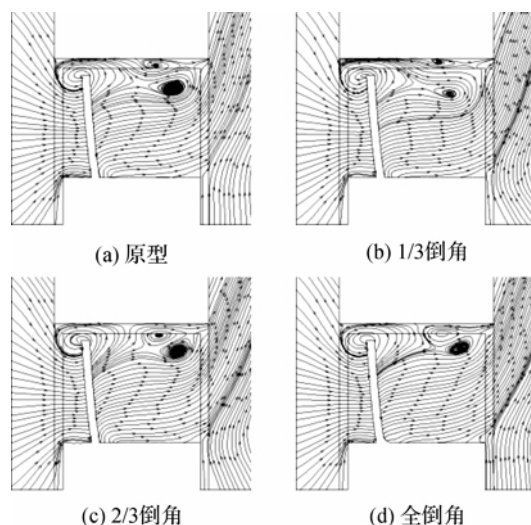


图 11 叶顶局部速度流线图

从图 11 可以看出,三种倒角模型在流道中都会形成两个旋向相反的涡。相比原型,在 1/3 倒角模型的流道中,小涡向机匣内壁运动,并且逐渐衰减,说明有部分涡在接触到机匣内壁时可能产生涡破裂,而另外一个大涡的位置没有变化,但是其大小有明显地减小;在 2/3 倒角模型的流道中,小涡的位置和大小几乎没有发生变化,大涡有移动的趋势,但是其衰减不明显;在全倒角模型的流道中,相对原型,小涡消失,大涡衰减,说明增加倒角可以使通道涡减小,与之前在分析压力等值线图时得出的结论一致。

综合分析不同方位倒角的速度流线图可知,1/3 倒角模型的速度分布最好,更利于流体的流动和风扇性能的提升。

## 4 结 论

本文对小型轴流风扇不同方位的倒角模型进行了数值分析,得到以下结论:

a) 叶根局部倒角会使小型轴流风扇的静压和效率有所提升,全倒角风扇的静压不变,但其效率会降低,同时可以发现,1/3 倒角模型的性能明显优于其余模型的性能;

b) 叶根倒角有助于改善小型轴流风扇流道中

低压区的面积及大小,尤其在靠近吸力面侧叶根和叶顶附近的低压区,同时也改善了压力面侧叶根附近的高压区;

c) 局部叶根倒角使流道中流体流动更流畅,改善了压力梯度较高的区域,进而避免了产生二次流的可能性。

基于目前对有无倒角小型轴流风扇内部流场特性的研究,说明压力侧的叶根倒角对小型轴流风扇的气动性能有一定的影响,后续还需要研究压力侧叶根倒角对小型轴流风扇气动噪音的影响。

#### 参考文献:

- [1] 朱立夫,金英子,李 跃. 分流叶片周向位置对小型轴流风扇性能的影响[J]. 浙江理工大学学报,2014,31(3):241-246.
- [2] 康 顺,孙丽萍. 叶根倒角对离心叶轮气动性能的影响[J]. 工程热物理学报,2009,30(1):41-43.
- [3] 孙丽萍. 叶根倒角及边界层转捩对离心叶轮气动性能的影响[D]. 保定:华北电力大学,2008:5-61.
- [4] 王大磊,朴 英,陈美宁. 叶根倒角对轴流涡轮转子气动性能的影响[J]. 航空动力学报,2011,26(9):2075-2081.
- [5] 石 龔,李少军,李 军,等. 动叶栅倒角对透平级气动性能的影响[J]. 航空动力学报,2010,25(8):1842-1848.
- [6] Sauer H, Muller R, Vogeler K. Reduction of secondary flow losses in turbine cascades by leading edge modifications at the endwall [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 207-213.
- [7] Zess G A, Thole K A. Computational design and experimental evaluation of using a leading edge fillet on a gas turbine vane[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 167-175.
- [8] Mahmood G I, Acharya S. Experimental investigation of secondary flow structure in a blade passage with and without leading edge fillets [J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(3): 253-262.
- [9] Mahmood G I, Gustafson R, Acharya S. Experimental investigation of flow structure and Nusselt number in a low-speed linear blade passage with and without leading-edge fillets[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(5): 499-512.

## Effect of Blade Root Fillet on Static Characteristics of Small Axial Fans

WU Wen-jun, JIN Ying-zi, WANG Yan-ping, CHU Wei, YU Fu-bo

(School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Small axial fan served as the prototype, and blade root at the side of pressure surface was filleted along the different locations of central arced curve to establish 1/3 root fillet model(leading edge 1/3 central arced curve), 2/3 root fillet model(leading edge 2/3 central arced curve) and the whole root fillet model (along the whole central arced curve). Characteristics of internal flow field of the fan were analyzed by RNG $\kappa$ - $\epsilon$  turbulence model, SIMPLE algorithm and second order accurate upwind difference scheme. The results show that 1/3 root fillet model and 2/3 root fillet model increase the static pressure and efficiency of the fan, but the performance of the former is better; the whole root fillet model influences static pressure of the fan little, but fan efficiency decreases; the local root fillet at the pressure side makes the fluid in the passageway redistribute to improve the low pressure area near the blade tip and root of the suction side and the high pressure area near the blade root at the pressure side, so that the possibility of secondary flow is avoided; simultaneously, root fillet increases the high pressure area of 1/2 blade height near the pressure side and reinforce power capability of the fan.

**Key words:** axial fan; blade root fillet; internal flow field characteristics; numerical simulation

(责任编辑: 康 锋)