

# 叶片倾斜角度对小型轴流风扇静特性的影响

吴泳敏, 金英子, 赵屹, 朱立夫, 李 晔, 孙 哲

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 采用叶片周向倾斜设计法, 改变一直叶片小型轴流风扇叶型, 得到不同周向倾斜角的小型轴流风扇, 并对其内部流场进行定常流动的数值模拟, 分析直叶片、前倾斜叶片、后倾斜叶片等风扇叶型对气动性能的影响。模拟结果表明, 采用叶片前缘倾斜设计可减弱附面层分离, 改善风扇流动状况, 从而达到提高风扇静压和效率的目的。

**关键词:** 轴流风扇; 周向倾斜; 气动性能; 静压

**中图分类号:** TH432.1

**文献标志码:** A

## 0 引 言

叶片形状是影响小型轴流风扇性能的主要因素, 因此针对风扇叶片的改型是优化小型轴流风扇性能的重要手段。为了提高风扇性能, 风扇叶片常采用弯、掠、扭、倾斜等设计。国内外学者针对叶片的各种变形设计开展了大量研究工作, 取得了许多有益的成果。杨波等<sup>[1]</sup>对窄动叶片和常规直叶片进行了变工况气动性能的实验研究, 研究表明相对于直叶片, 前弯窄叶片不仅可以提高气动效率, 而且扩大了风机的稳定工作范围。李杨等<sup>[2]</sup>对三种带有周向弯曲叶片的低压轴流通风机(原型叶轮、周向前弯及后弯叶轮)的叶顶泄漏流动进行了研究, 从压力场等不同角度分析探讨了叶片周向弯曲后, 叶顶泄漏流动和泄漏涡的形成和发展规律。Grimes<sup>[3]</sup>对小尺寸风扇进行了研究, 提出了小尺寸风扇的制造方法和压力及效率的测试方法。唐涛等<sup>[4]</sup>研究动叶轮的掠型对风扇性能的影响, 研究表明前掠叶片增大了风扇的流量, 降低了流动损失; 后掠叶片风扇降低了气动性能, 不仅使风扇的做功能力减少, 而且大大增加了流动损失。王仲奇等<sup>[5]</sup>对叶片弯曲降低能量

损失的机理以及静态和动态实验对采用弯曲叶片的效果做了综合评述, 对压气机采用弯曲叶片的科研进展, 以及遇到的难点也作了概要的介绍。金永平等<sup>[6]</sup>应用响应面法(RSM)和三维流场分析对矿用对旋式轴流通风机前后两级叶片弯掠参数进行优化设计。Lin等<sup>[7]</sup>提出一种设计轴流风扇的方法, 即结合叶栅理论和反向设计的集成设计法。Iwase等<sup>[8]</sup>提出对初始和优化的风扇进行数值模拟以此提出了高效率风扇的主要因素。

叶片弯曲是国内外学者对于优化叶型的重要研究方向, 但在小型轴流风扇上采用叶片弯曲来提高风扇性能的研究方法至今还比较少。本文通过数值模拟方法研究周向倾斜叶片对微型轴流风扇性能的影响, 从内部流动的详细结构中探索倾斜叶片的作用机理与提高气动性能的因素, 为提高风扇静压和效率提供参考。

## 1 计算模型和数值模拟方法

图1为叶片积叠线(加粗线条)与周向倾斜角度示意图, 倾斜角为 $\delta$ , 与旋转方向相同的角度为前倾斜, 与之相反为后倾斜。

收稿日期: 2013-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(51076144), 浙江省科技计划项目(2011C16038, 2009C13006)

作者简介: 吴泳敏(1989-), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要从事流体机械及工程的研究。

通信作者: 金英子, E-mail: jin\_yz@163.com

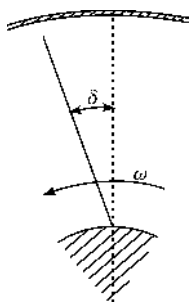


图1 倾斜角度示意

原型风扇的几何参数:

轮毂直径  $D_1 = 32$  mm;

叶轮外径  $D_2 = 74$  mm;

轮毂宽  $H = 15$  mm;

轮毂比  $R = 0.43$ ;

叶片数  $Z = 11$ ;

流量  $Q = 51$  m<sup>3</sup>/h;

转速  $N = 3\,500$  r/min。

在叶型参数保持不变的情况下,通过使叶片的径向成型积叠线周向倾斜,形成周向倾斜叶片。选取 0°、5°、10°、18°、25°及 -10° 六种模型进行计算。图 2 是风扇叶片模型示意图,倾斜角分别是 0°(原型)、10°、-10°(后倾斜)。

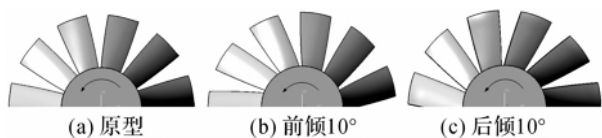
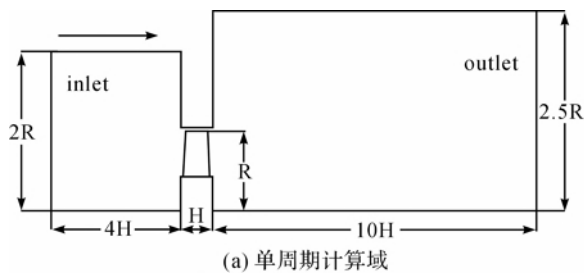


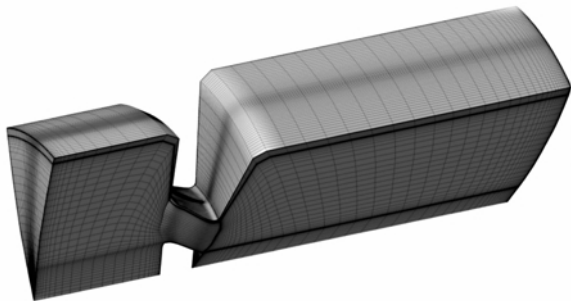
图2 风扇模型

计算流场为三维不可压缩粘性流场。计算借助 NUMECA 的 FINE™/TURBO 软件包,采用体积差分格式并结合湍流模型对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,计算中采用 S-A 湍流模型,湍流粘度为 0.000 5 m<sup>2</sup>/s。采用显式四阶 Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解,同时为了加快时间推进速度,使用了多重网格技术和隐式残差平均速度,CFL 数 3.0。由于流场低速不可压缩,流场速度远小于声速时收敛速度较慢,故采用预处理方法,人工压缩项  $\beta = 30$ 。

计算在具有周期性的单个叶道内进行,前后增加进、出口延伸段,计算域及网格如图 3 所示,网格节点数 90 万左右。边界条件:进口给定质量流量;出口给定平均静压;叶轮和轮毂设定为相对静止壁面,机匣设定为无滑移壁面。在叶片近壁面、叶栅端壁、头尾缘等流动复杂区域,对网格进行了局部加密以提高这些区域内解的分辨率。



(a) 单周期计算域



(b) 计算风格

图3 计算域及网格示意

## 2 叶片周向倾斜对风扇静特性的影响

### 2.1 不同倾斜叶片的流量与静压升及效率曲线

图 4、图 5 分别是采用本文的计算模型进行模拟绘制的 3 种不同叶片(直叶片、前倾叶片、后倾叶片)的流量与静压及效率关系曲线。本文选取了前倾 10° 与后倾 10° (以 -10° 表示) 的叶片与原始直叶片进行比较。

由图 4 和图 5 可以发现:在整个流量范围内,静压的总体变化趋势是随着流量的增加逐渐减小。对比不同叶片,在小流量区域( $Q < 0.006$  kg/s),后倾叶片静压略有优势。当流量大于 0.010 kg/s 以后,前倾叶片的静压显著升高,经过工况点流量 0.014 kg/s 以后,趋于减小,较直叶片和后倾叶片,前弯叶片的压升值明显最大。

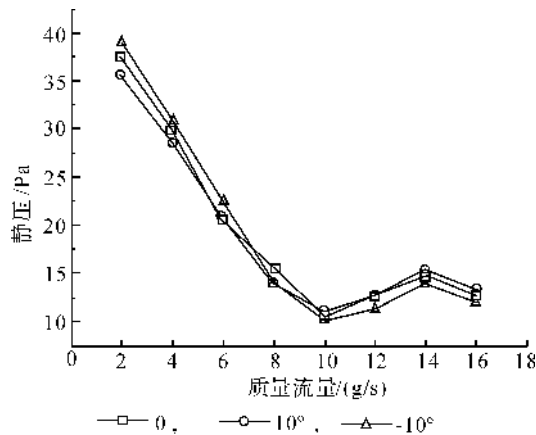


图4 不同倾斜叶片的流量与静压的关系

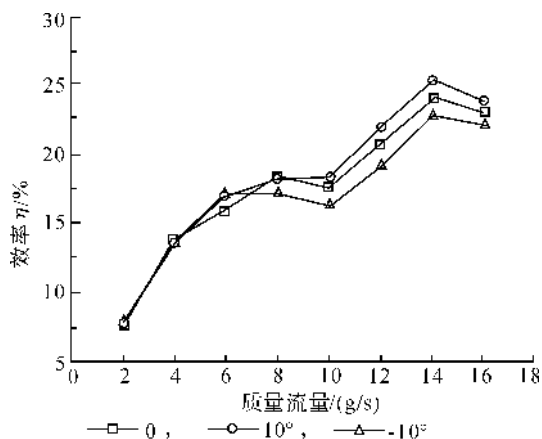


图5 不同倾斜叶片的流量与效率的关系

由效率曲线可以看出,直叶片和前、后倾叶片工况点为  $0.014 \text{ kg/s}$ 。在小流量区,三种叶片的效率无明显差别。随着流量的增大,前倾叶片风扇的效率保持上升趋势,直到工况点为止,效率值比另两种叶型略高。流量大于  $0.014 \text{ kg/s}$  以后,前倾叶片的效率较另外两种叶型提高更为明显,直叶片其次,后倾叶片最低。

## 2.2 同一流量下前倾角度对静特性的影响

图6是采用本文提出的计算模型模拟绘制的工况流量下随周向正倾斜角度变化的效率、静压变化曲线。图6可以看出,随着前倾角度的增加,效率和静压都有提升,叶片的倾斜有利于提高效率与静压;但是当倾斜角度过大之时,两项指标反而都下降了,比如效率,从前倾  $10^\circ$  到前倾  $25^\circ$ ,效率降低了1个百分点。由此可以看出,倾斜角度并不是越大越好,过大的倾斜角度会使两个指标降低。

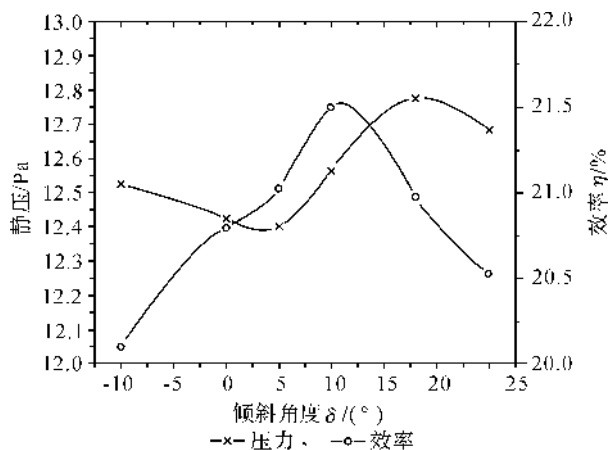


图6 静压和效率与倾斜角的关系

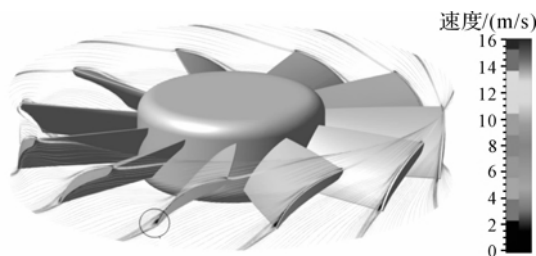
分析图中数据,由于微型轴流风扇更注重静压性能,提高静压是主要目的,效率的降低换来压升的提高是可以接受的,所以倾斜角度为  $18^\circ$  的风扇是几个风扇中性能最好的。

## 3 叶片周向倾斜对风扇内部流场特性的影响

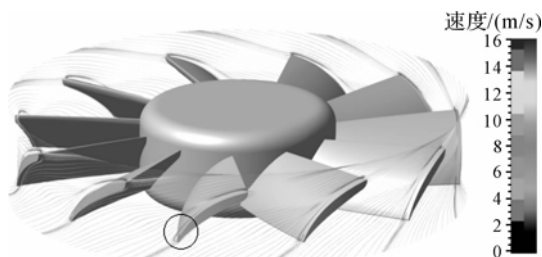
### 3.1 叶顶面速度分布流线特点

在工况点  $0.014 \text{ kg/s}$  流量下,选取原型、前倾斜角  $18^\circ$ 、后倾  $10^\circ$  三个风扇模型靠近叶片顶端的流面流线图进行比较。叶片顶部流线分布见图7。

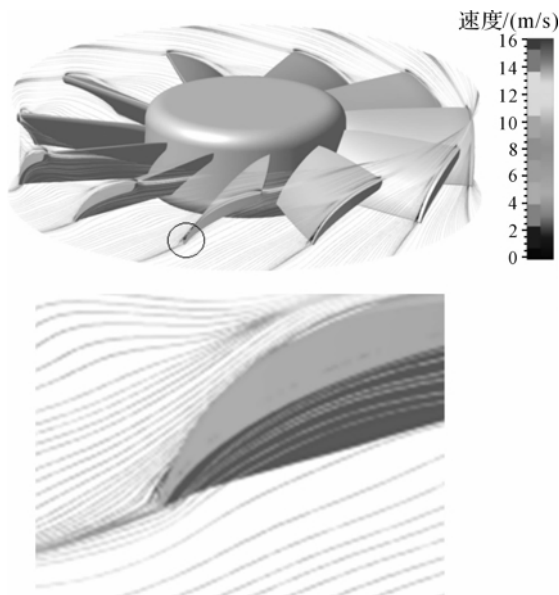
从图7可以看出,在  $0.014 \text{ kg/s}$  流量下,直叶片及后倾叶片尾缘处出现明显漩涡,由此造成能量损失。这主要是由于气体的粘性在叶片表面形成附面层,特别当流体到达吸力面尾缘附近,与压力面气流相遇,存在剧烈的扩压,产生附面层分离,形成漩涡。前倾叶片改变了流道形状并减小了进口角,使吸力面上的附面层分离现象发生得较晚,尾缘处的漩涡有了明显减小。对速度大小产生的影响进行分析,在吸力面尾缘处,直叶片和后倾叶片的流速都很低,恶化了流动状况,而前倾叶片尾缘无明显低速区。



(a) 直叶片及其局部放大



(b) 前倾叶片及其局部放大



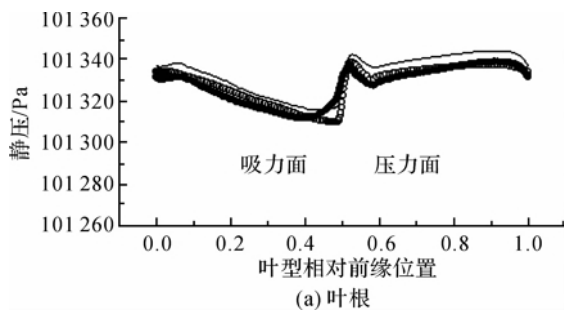
(c) 后倾叶片及其局部放大

图7 叶片顶部流线分布

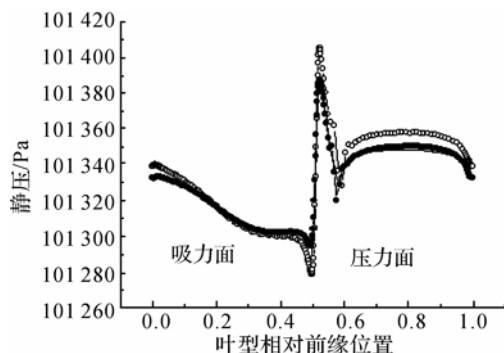
所以,较直叶片和后倾叶片,前倾叶片优化了流型,使流速均衡,减弱了附面层分离的影响,使叶片做功能力得到提升,在外特性上则表现为风扇静压增大,效率提高。

### 3.2 叶片不同叶高处的静压特点

图8是0.014 kg/s工况流量下三种风扇叶片的静压分布,其中横坐标为叶型相对前缘位置,0.5位置为前缘,0.5左边为吸力面,右边为压力面,纵坐标为静压值。选取三个位置进行分析,分别为叶根、50%叶高、叶顶。



(a) 叶根



(b) 50%叶高

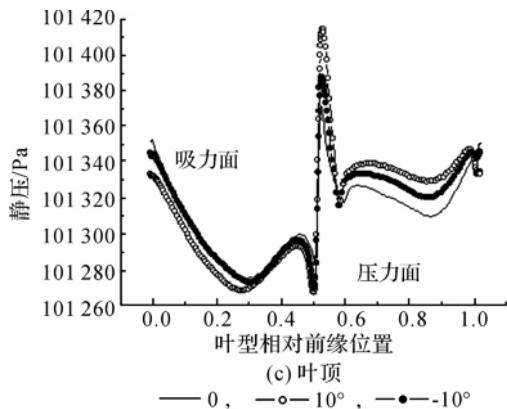


图8 叶片不同叶高处的静压表现

由图8中可以看出,沿叶高方向,叶片的载荷越来越大,这与真实流动一致。其次,不管在叶根、叶顶还是50%叶高,前倾叶片的数据左与右静压差别最大,也就是压力面和吸力面静压差最大。从叶片间流动状况分析,横向压力梯度越大,流动越顺畅,叶片对流体做功越多。相反,后倾斜叶片压力面和吸力面压差最小,使其叶片做功能力减小,流量也相应减小。同时可以看出,除了在前缘,在吸力面也有较大压力波动。如果倾斜角过大,很可能导致流体附面层过早分离,造成不必要的损失,如图7所示。

这也表明,合理利用叶片的倾斜可以改变叶轮流道内的压力分布,激活叶片进口靠近轮缘处的低能流体,减弱吸力面低能流体的聚集和回流,从而减弱流动阻塞和流动损失。

## 4 结论

通过对6种不同叶片的风扇进行数值模拟,研究不同周向倾斜角度对风扇内部流场的影响情况,可以得到以下结论:

(a) 在工况流量下,周向前倾叶片有利于提高风扇的静压和效率。保持一个适度倾斜角可以提高气动性能,过大的周向前倾角度使风扇性能不升反降。6个风扇模型中,前倾角度 $18^\circ$ 的风扇性能最优。

(b) 与前倾叶片相比,后倾斜叶片与直叶片恶化流场状况,降低横向压力梯度,附面层分离现象显著,因此造成风扇性能的降低。

### 参考文献:

- [1] 杨波,刘富斌,钟芳源,等.轴流式前弯动叶的变工况气动性能实验研究[J].实验流体力学,2005,19(1):40-46.
- [2] 李杨,欧阳华,杜朝晖.周向弯曲低压轴流风机叶顶泄漏流动数值研究[J].工程热物理学报,2005,26(2):240-242.

- [3] Grimesr Q D A. Theoretical and experimental investigation of the scaling of micro fan performance[C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition. Washington: ASME Press, 2003: 1-8.
- [4] 唐 涛, 杨爱玲, 陈康明, 等. 掠叶型对小型轴流风扇性能的影响[J]. 流体机械, 2008, 36(2): 14-17.
- [5] 王仲奇, 郑 严. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势[J]. 中国工程科学, 2000(6): 40-48.
- [6] 金永平, 刘德顺, 文泽军. 矿用对旋式轴流风机前后两级叶片弯掠参数优化设计[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1754-1759.
- [7] Lin S C, Tsai, M L. An integrated study of the design method for small axial-flow fans based on the airfoil theory[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(4): 885-895.
- [8] Iwase T, Sugimura K, Tanno T. Study on improvement of fan efficiency in small axial-flow fans: 2nd report, influence of tip leakage vortex on static pressure and fan efficiency[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 2009, 75(757): 1757-1762.

## Effect of Tilt Angle of Blades on Static Characteristics of Small Axial Flow Fans

WU Yong-min, JIN Ying-zi, ZHAO Yi, ZHU Li-fu, LI Yi, SUN Zhe

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

**Abstract:** This study changes the blade profile of a small axial flow fan with straight blades and obtains a small axial flow fan with different circumferential tilt angles with the design method of circumferential tilt of blades, conducts numerical simulation of its internal fluid field and analyzes the effect of straight blade, blade with forward tilt and blade with back tilt on aerodynamic performance. The simulated result shows that the design of front edge tilt of blade can weaken boundary layer separation, improve the flow situation of fans and thus realize the purpose of improving static pressure and efficiency of fans.

**Key words:** axial flow fan; circumferential tilt; aerodynamic performance; static pressure

(责任编辑: 张祖尧)