

文章编号: 1673-3851 (2015) 06-0818-06

叶片周向弯曲对小型轴流风扇静特性及内部流动特征的影响

储微,金英子,王艳萍,吴文军,余辅波

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

摘要:对带有周向弯曲叶片的小型轴流风扇的内部流场进行三维数值模拟研究;对原型风扇的静特性进行实验研究验证数值模拟的可靠性;保持其他几何参数不变,沿周向对原型风扇前弯 5° 以及后弯 5° ,对设计工况下径向叶片以及周向弯曲叶片风扇的子午面内的流线图、不同叶高处风扇回转面内的静压分布以及叶片下游的速度场进行分析,研究周向弯曲角度对小型轴流风扇静特性及内部流场的影响。研究表明:前弯 5° 和后弯 5° 风扇的静压在设计工况点较原型风扇分别提高了8.84%、2.54%;相比于后弯 5° 风扇,前弯 5° 风扇可以有效地减少泄露流,降低泄露损失;与原型和后弯 5° 风扇相比,在叶片尾缘下游15 mm处,前弯 5° 风扇的轴向速度有明显的提高。

关键词:轴流风扇;周向弯曲;静特性;内部流动;泄露流

中图分类号: TM925.11 **文献标志码:** A

0 引言

弯掠叶片最早应用于机翼设计,以减少空气流动损失以及飞行阻力。在叶轮机械研究领域,弯掠叶片不同于常规的径向叶片,是一种非常复杂的三维空间叶片,可以沿周向弯曲倾斜,也可以沿着气流方向倾斜或沿垂直于气流方向倾斜^[1]。通过引入流体的径向平衡方程,可以简化弯掠叶片的设计。合理地设计和使用弯掠叶片,可以在一定程度上提高叶轮机械的气动性能,降低噪声^[2]。Beiler等^[3]在实验的基础上对弯掠轴流风扇进行数值模拟研究,在固定参考坐标系中使用热线探针测三维速度场,使用快速反应压力探针测量总压场的分布,结果表明:向前弯叶片具有较好的气动性能以及更低的噪声。蔡娜等^[4]在变工况下对常规径向叶片和弯掠动叶的轴流试验风机进行了气动—声学性能研究,发现相比于径向叶片,弯掠动叶的压升增加了13.1%,效率增加了5%,稳定工作范围扩大了20%左右。李杨等^[5]在相同工况下,对带有周向弯曲叶片的低压轴流风扇进行试验和数值模拟研究,发现适当的

周向弯曲可以改善上下端壁附近的流动状况,延迟流动分离。Sieverding^[6]和Langston^[7]对径向叶片的流结构以及二次流所产生的损失做了大量的研究,在此基础上,Pullan等^[8]对径向叶片和弯掠叶片的二维叶栅进行实验研究,结果表明:弯掠叶片使轮毂处的载荷向叶片下游移动,使机匣处的载荷向叶片上游移动,二次流损失减少达24%。Starzmann等^[9]通过实验和数值模拟的方法设计带有弯掠叶片的水轮机,与直叶片水轮机相比,弯掠叶片水轮机可以延迟失速,静压水头的稳定工作范围可以扩大5%,在稳定工作范围内降低噪声达3dB。

目前国内外学者主要将弯掠叶片技术应用于大型高载荷叶轮机械领域,将该技术应用于小型轴流风扇的研究较少。周向弯曲叶片是一种弯掠叶片,本文对小型轴流风扇应用周向弯曲叶片技术,在实验的基础上,通过数值模拟的方法,对比分析原型风扇与周向弯曲风扇在标况下的静压升、效率以及内部流场,研究叶片周向弯曲对小型轴流风扇静特性及内部流场的影响,为提高风扇的性能做参考。

收稿日期: 2015-01-30

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(LY14E060003)

作者简介: 储微(1991-),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事流体机械方面的研究。

通信作者: 金英子, E-mail: jin.yz@163.com

1 数值计算方法

本文以 5 叶片小型轴流风扇为研究对象,其几何模型如图 1 所示。风扇的主要设计参数为:叶轮外径为 85mm,轮毂比为 0.72,安装角为 27.7° ,叶片数为 5,叶顶间隙为 2mm(0.073 倍的全弦长),风扇电机的额定转速设定为 3000rpm。对径向直叶片的重心积叠线进行周向弯曲,研究周向弯曲对小型轴流风扇静特性及内部流动特征的影响。这里定义叶片顺旋转方向弯曲为周向前弯叶片,相反为周向后弯叶片,如图 2 所示。本文的模型主要分为:原型、前弯 5° 模型和后弯 5° 模型。

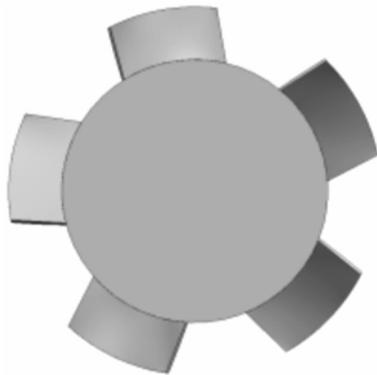
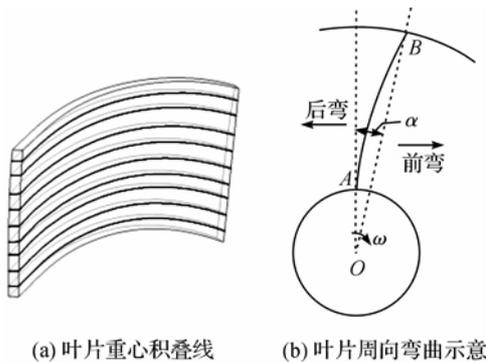


图 1 原型风扇几何模型



(a) 叶片重心积叠线 (b) 叶片周向弯曲示意

图 2 叶片重心积叠线和周向弯曲示意

运用计算流体力学的方法,对定常不可压缩 Navier-Stokes 方程进行数值计算。RNG $k-\epsilon$ 模型作为粘性模型,采用标准壁面函数进行近壁面处理,采用 SIMPLE 算法进行压力-速度耦合,应用二阶精度的迎风差分格式对控制方程离散化。叶轮区采用旋转参考坐标系,控制计算域的入口质量流量,设定计算域的出口边界条件为大气压。质量守恒的收敛标准设定为 0.001。计算域分为进、出口区,叶轮区,叶顶间隙区。计算域示意图如图 3 所示。进、出口区使用结构化网格,旋转和叶顶区使用非结构化网格,经网格无关性验证,总网格数大约为 230 万,

计算域网格与风扇旋转区域网格如图 4 所示。

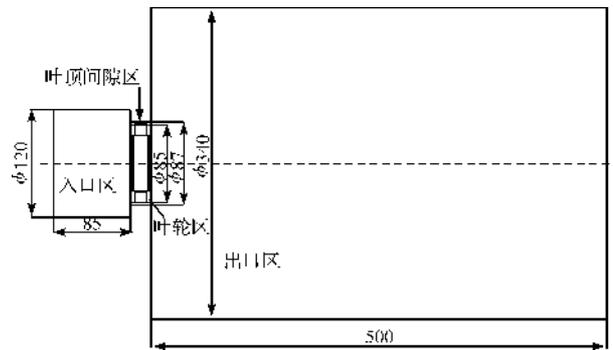


图 3 计算域示意(单位:mm)

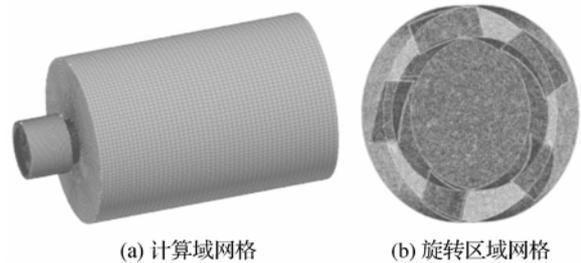


图 4 计算域网格与风扇旋转区域网格

2 原型风扇静特性实验和数值模拟结果的对比

静特性是风压、效率与流量的关系曲线,是影响小型轴流风扇性能的重要参数。为验证数值模拟的可靠性,本文在风洞实验台上对原型风扇的静特性进行实验测试。实验台如图 5 所示。原型风扇模拟结果与实验结果的对比如图 6 所示。从图 6 中可以看出:当质量流量系数小于 0.0559 及大于 0.1118 时,静压系数随着流量系数的提高而急剧降低;当质量流量系数在 0.0559 至 0.1118 之间时,静压系数变化不明显,是风扇稳定工作的范围。在整个流量区间范围内,原型风扇实验和模拟的结果基本吻合,证实了数值模拟的可靠性。

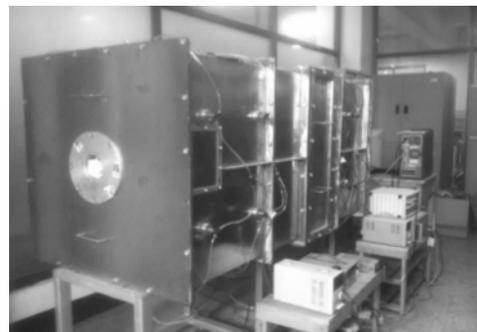


图 5 风洞实验台

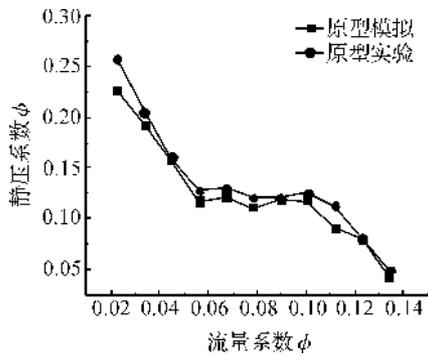


图6 原型实验与模拟结果的对比

3 数值模拟的结果与讨论

3.1 不同流量下的静特性对比与分析

图7和图8分别是原型、前弯5°、后弯5°风扇的静压-流量无因次曲线以及效率-流量无因次曲线。图7和图8中,流量系数为 φ ,静压系数为 ψ ,效率为 η ,定义如下:

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

$$\psi = \frac{2\Delta P}{\rho u_t^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Q_v \cdot \Delta P}{N} \times 100\% \quad (3)$$

其中: ρ 为气体的密度, Q_m 为质量流量, Q_v 为体积流量, D 为风扇的外径, u_t 为风扇叶顶圆周速度, ΔP 为风扇进出口的压力差, N 为轴功率。

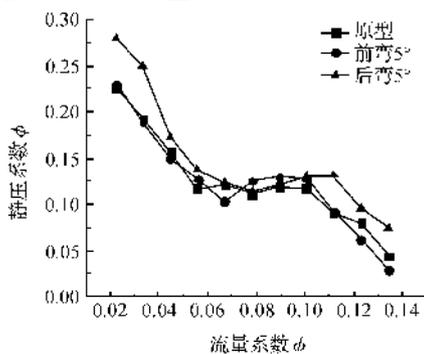


图7 静压-流量无因次曲线

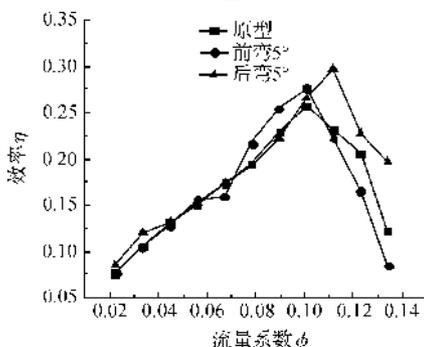


图8 效率-流量无因次曲线

在图7中,静压系数总体随着质量流量系数的升高而降低。当质量流量系数为0.0894时,效率较高,且静压变化较为平缓,这里选取质量流量系数为0.0894的点为设计工况点。在设计工况点处($\varphi=0.0894$),与原型风扇相比,前弯5°和后弯5°风扇的静压分别提高了8.84%、2.54%,前弯5°风扇的效率提高11.31%,后弯5°风扇的效率降低2.89%。

当质量流量系数在0.0025至0.06705之间时,后弯5°风扇的静压系数较原型和前弯5°风扇大,原型和前弯5°风扇的静压升系数相差不大。当质量流量系数在0.06705至0.10058之间时,相比于原型风扇,前弯5°风扇较后弯5°风扇具有更高的静压系数。当质量流量系数在0.10058至0.1341之间时,后弯5°风扇又呈现出比前弯5°风扇更好的静压性能。

在图8中,当在小流量工况下,三种模型的效率区别不大,当质量流量系数在0.07823至0.10058之间时,前弯5°风扇的效率远大于原型和后弯5°风扇。当质量流量系数大于0.10058时,前弯5°风扇的效率急剧下降,后弯5°风扇的效率下降较为平缓。

3.2 设计工况点子午面内的流线图分析

在设计工况下($\varphi=0.0894$)原型、前弯5°、后弯5°风扇在子午面内的流线图如图9所示。当气体进入风扇后,轮毂附近气体轴向速度大量转化为径向速度。在风扇表面,有部分气体沿着径向方向流动。由于压力面与吸力面之间的压力差,叶顶存在明显的泄露流。与前弯5°、后弯5°风扇相比,原型风扇在叶片下游产生泄露涡。叶尖处的流体受到较大的离心力的作用,前弯5°风扇顺旋转方向旋转了一定的角度,在一定程度上,阻止流体的径向流动,相较于后弯5°风扇可以有效地改善叶顶的泄露流。

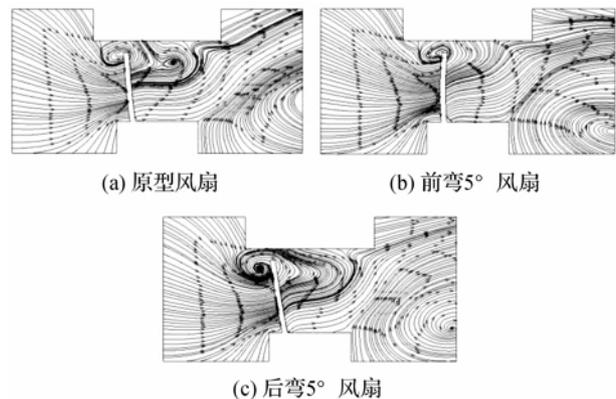


图9 子午面流线图

3.3 设计工况点不同叶高处回转面内的静压分布
在设计工况下($\varphi=0.0894$)原型、前弯5°、后弯

5°风扇在 10%、30%、50%、90% 相对叶高位置处的静压分布图如图 10 所示。在 10% 的相对叶高位置处,在距离叶片前缘约 1/3 弦长的吸力面上,三种模型均存在低压区。

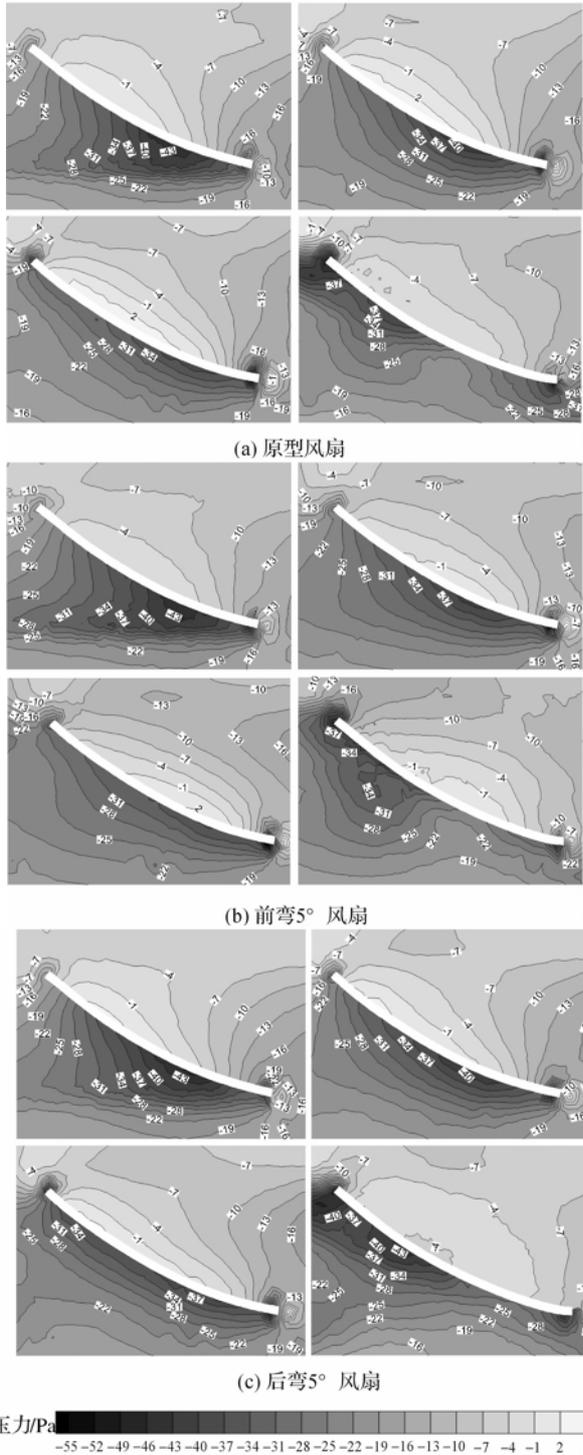


图 10 10%、30%、50%、90% 相对叶高位置处的静压分布
在风扇前缘位置处,存在明显的高压区,尤其是在 30% 至 50% 的相对叶高位置处,高压区稳定且压力梯度变化较大。由于存在不为 0 的攻角,气体在

从叶片前缘处流入叶片时动能会有所损失,转化为压力能,导致此区域压力局部升高。与原型和前弯 5° 风扇相比,后弯 5° 风扇在叶片前缘处动能损失更小。

在 50% 的相对叶高位置处,压力面和吸力面上的压力较稳定,是风扇工作稳定区域。

在 90% 的相对叶高位置处,叶片的做功能力整体都降低,压力分布变得不均匀,这是由于叶顶间隙流的泄露作用破坏了主流流动;当气体流经叶片的尾缘时,产生尾缘涡和尾迹,使得这个区域的压力局部降低;与原型和前弯 5° 风扇相比,后弯 5° 风扇的低压区的影响范围更广,这是由于后弯 5° 风扇在叶顶处的流体受到更强的径向力作用,较强的泄露流与尾缘涡、尾迹产生混合作用,这与图 7 相对应。

3.4 设计工况点风扇出口下游速度场分析

在叶片尾缘下游 15mm 处的流场中,沿叶高方向分别布置 20 个点,分别位于 5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、85%、90%、95%、100% 的相对叶高位置。图 11—图 14 分别是设计工况下($\varphi=0.0894$)风扇出口静压、轴向速度、径向速度、切向速度沿叶高方向的分布。

图 11 是原型、前弯 5°、后弯 5° 风扇在下游流场中静压沿叶高方向的分布。图 11 中,沿叶展方向,三个风扇模型的静压都逐渐提高,其中前弯 5° 风扇的静压升高最快,在相对叶高大于 65% 时,前弯 5° 风扇的静压大于原型风扇。后弯 5° 风扇的静压整体比原型风扇低约 1Pa。这说明前弯 5° 风扇叶片的上半部分对气体做功较大。

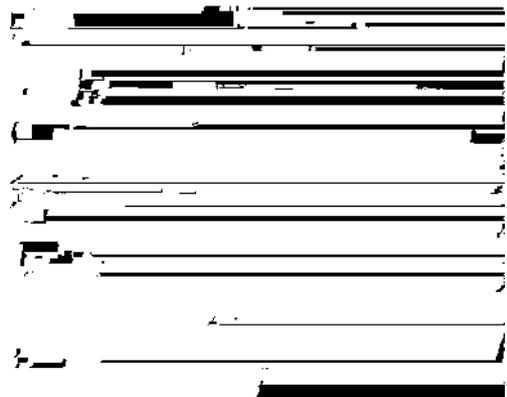


图 11 静压沿叶高的分布

图 12 是原型、前弯 5°、后弯 5° 风扇在下游流场中轴向速度沿叶高方向的分布。图 12 中,前弯 5° 风扇的轴向速度最高,后弯 5° 风扇和原型风扇的轴向速度相对较低,与图 7 和图 8 中的静特性曲线相对应。在相对叶高为 35% 至 85% 的区间范围内,前弯 5° 风扇

的轴向速度比较稳定,维持在 2m/s 到 3m/s,相较于原型风扇和后弯 5° 风扇,其轴向速度大小明显提高。

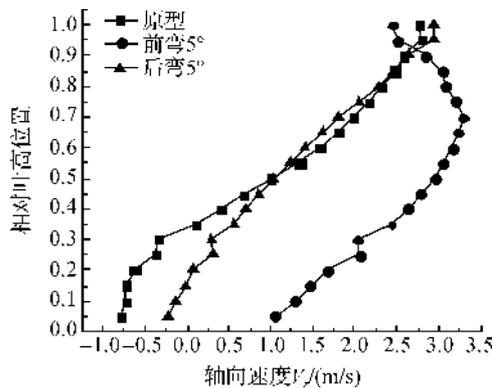


图 12 轴向速度沿叶高的分布

在相对叶高小于 35% 的范围内,原型风扇存在轴向速度为负的区域,表明原型风扇在轮毂附近位置处存在着回流和漩涡,后弯 5° 风扇在轮毂附近也存在速度大小为负的区域,前弯 5° 风扇则可以有效改善叶根附近的流动状态,避免漩涡的产生。

与原型风扇相比,后弯 5° 风扇在轮毂附近轴向速度较高,当相对叶高在 50% 至 75% 之间时,后弯 5° 风扇的轴向速度稍低于原型风扇,当相对叶高大于 85% 时,后弯 5° 风扇的轴向速度又大于原型风扇。

在叶顶附近,三个风扇模型的轴向速度均有不同程度的降低。叶顶间隙区域轴向速度的减小主要是由于叶顶泄露流动过强,阻塞了叶顶附近的主流流动,与图 9 相对应。

图 13 是原型、前弯 5°、后弯 5° 风扇在下游流场中径向速度沿叶高方向的分布。图 13 中,原型风扇和后弯 5° 风扇的径向速度总体上沿叶展方向呈现逐渐升高的趋势。前弯 5° 风扇沿叶展方向先减小后增大,在叶高大于 50% 时径向速度总体大小稳定在 0.05m/s 左右,这是因为前弯风扇在一定程度上阻止流体的径向流动,从而导致前弯风扇的径向速度不大。

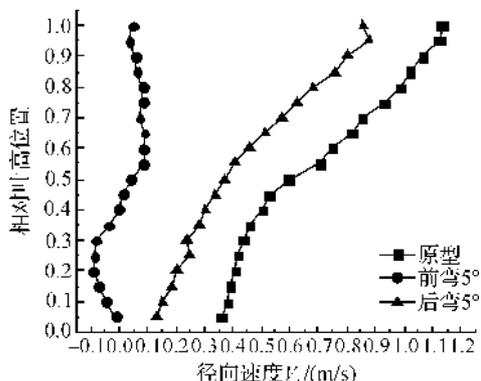


图 13 径向速度沿叶高的分布

图 14 是原型、前弯 5°、后弯 5° 风扇在下游流场中切向速度沿叶高方向的分布。图 14 中,前弯 5° 风扇的切向速度最大,后弯 5° 风扇的切向速度最小,原型风扇的切向速度大小介于以上两者之间。

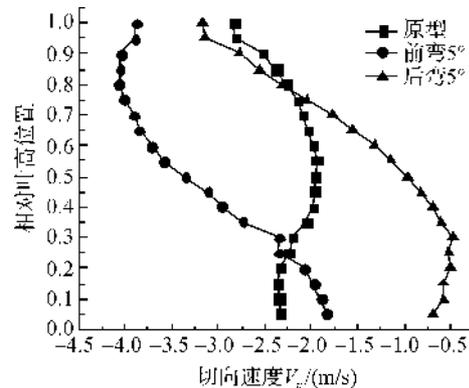


图 14 切向速度沿叶高的分布

4 结论

本文在实验验证了数值模拟可靠性的基础上,对原型、前弯 5°、后弯 5° 风扇进行了数值模拟研究,研究不同周向弯曲角度对小型轴流风扇静特性及内部流动特征的影响,研究结果表明:

a) 在设计工况点处,相较于原型风扇,前弯 5° 和后弯 5° 风扇的静压分别提高 8.84%、2.54%,前弯 5° 风扇的效率提高 11.31%,后弯 5° 风扇的效率降低 2.89%。后弯 5° 风扇的稳定工作范围大于前弯 5° 风扇。

b) 前弯 5° 风扇有效阻止了部分气体的径向流动,减少了泄露流的产生,改善了叶顶的流动状况,减少了损失。

c) 与原型和后弯 5° 风扇相比,在叶片尾缘下游 15mm 的出口流场中,前弯 5° 风扇气体的轴向速度有明显的提高,做功能力变强。

周向弯曲对小型轴流风扇的静特性及内部流场产生以上影响的原因将会在后续工作中做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 欧阳华, 李 杨, 杜朝辉, 等. 周向弯曲方向对弯掠叶片气动-声学性能影响的实验[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 668-674.
- [2] Wright T, Simmons W E. Blade sweep for low-speed axial fans[J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 151-158.
- [3] Beiler M G, Carolus T H. Computation and measurement of the flow in axial flow fans with skewed blades[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(1): 59-66.

- [4] 蔡 娜, 钟芳源. 轴流式弯掠动叶变工况气动-声学性能的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(3): 280-285.
- [5] 李 杨, 欧阳华, 杜朝辉. 相同工况下叶片的不同周向弯曲对低压轴流风扇性能影响的对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2101-2105.
- [6] Sieverding C H. Recent progress in the understanding of basic aspects of secondary flows in turbine blade passages[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 107(2): 248-257.
- [7] Langston L S. Secondary flows in axial turbines-a review[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2001, 934: 11-26.
- [8] Pullan G, Harvey N W. The influence of sweep on axial flow turbine aerodynamics in the endwall region[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(4): 1-10.
- [9] Starzmann R, Carolus T. Effect of blade skew strategies on the operating range and aeroacoustic performance of the wells turbine[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136(1): 011003.

Effects of Circumferential Skewed Blades on Static Performances and Internal Flow Characteristics of Small Axial Fans

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

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

Abstract: 3D numerical simulation research was conducted for internal flow field of small axial fan with circumferential skewed blade. Experimental study on static characteristics of prototype fan was carried out to verify reliability of numerical simulation. With other geometrical parameters unchanged, the blades of the prototype fan were skewed 5° forward and 5° backward along circumferential direction. The flow pattern of the fans with radial-direction blade and circumferential skewed blade in the meridian plane under design conditions, static pressure distribution in blade passage at different span and velocity field near fan outlet at design point were analyzed. The effects of circumferential skew angle on static characteristics and internal flow field of small axial fan were researched. The research results demonstrate that: at the design point, compared to the prototype fan, the static pressure coefficients of the fans with 5° forward bending and 5° backward bending increase 8.84%, and 2.54%, respectively. Besides, the fan with 5° forward bending can effectively reduce leakage flow in comparison with the fan with 5° backward bending, decreasing leakage loss. Compared with the prototype fan and the fan with 5° backward bending, the axial velocity of with 5° forward bending increases obviously at the position 15mm away from the downstream of trailing edge of the blade.

Key words: axial fan; circumferential skew; static performance; internal flow; leakage flow

(责任编辑: 康 锋)