

文章编号: 1000-8055(2009)09-2107-08

周向弯曲叶片叶顶泄漏流随流量变化特性数值研究

金光远, 欧阳华, 杜朝辉

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 对带有周向前弯和周向后弯叶片的低压轴流风机, 叶顶泄漏流动随流量变化特性进行了数值研究和实验校核, 探讨了随流量减小, 周向弯曲对叶顶泄漏流的起源和发展规律的影响. 性能计算结果与试验测量较为吻合, 计算结果表明: 随着流量减小, 泄漏流起源向前缘方向迁移, 周向弯曲使泄漏流与主流掺混加剧; 周向前弯叶片泄漏流的起源距叶片前缘最远, 涡强度最弱, 移动最缓慢; 周向前弯稳定叶顶流动, 降低端壁损失, 扩大稳定工作范围.

关 键 词: 轴流风机; 弯掠叶片; 变工况; 叶顶泄漏流; 稳定工作范围

中图分类号: TH432. 1; V231. 3

文献标识码: A

Numerical analysis on tip leakage flow of circumferential skewed blades according to flow rates

J IN Guang-yuan, OU YANG Hua, DU Zhao-hui

(School of Mechanical Engineering,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Tip leakage flow in lower pressure axial flow fans with circumferential forward-skewed, backward-skewed and radical blade, were investigated numerically at the off-designation conditions and validated experimentally. The circumferential skewed effects on origination and development of tip leakage vortex were discussed according to flow rates. The results show that as flow rates decrease, tip leakage vortex origination move towards the leading edge, and circumferential skewing strengthen the mixing between tip leakage vortex and main flow; tip leakage vortex of forward-skewed blade is located most far from leading edge, vortex strength is weakest, and movement is slowest. The circumferential forward blades stabilize tip leakage flow, decrease end-wall losses at off-designation conditions and improve stable operation rang.

Key words: axial flow fan; circumferential skew; off-designation; tip leakage flow; range of steady operation condition

近年来, 弯掠技术在叶轮机械领域逐渐显示出良好的应用前景^[1-3]. 在国内叶轮机械领域, 上海交通大学涡轮机研究所在钟芳源教授的指导下

对弯掠动叶技术的研究取得了许多重要成果. 在理论方面, 钟芳源教授和王建民针对轴流式弯掠动叶产生较大径向分力的特点, 提出了“双激盘”

收稿日期: 2008-09-24; **修订日期:** 2008-11-24

基金项目: 航空科学基金(2007ZB57003); 上海市青年科技启明星计划(08QA14038)

作者简介: 金光远(1979-), 女, 辽宁铁岭人, 博士生, 主要从事叶轮机械的气动声学性能和内部流动测量方面的研究.

E-mail: jgy321_123@sjtu.edu.cn

理论及相应的一套计算方法,用来进行低速低负荷轴流弯掠风扇的设计和性能评价^[3].在实验方面,蔡娜研究前弯掠动叶轴流风机,在相同转速条件下,对具有不同弦长的径向动叶和弯掠动叶的气动性能、气动噪声以及稳定工况范围进行了比较,指出大弦长弯掠动叶可以达到提高风机气动效率、降低气动噪声、扩大稳定工作范围的目的^[4].刘富斌考察了弯曲窄叶片弦长对气动性能和稳定工作范围的影响,认为叶片弦长对稳定工况范围的影响要大于叶片前弯^[5].欧阳华研究了周向弯曲动叶降噪技术在低压轴流风机气动噪声领域的应用,指出动叶前弯技术可以较大幅度地降低气动噪声^[6].李杨对低压轴流风扇周向弯曲动叶的弯曲方向和弯曲角度进行了优化设计,采用粒子图像测速(particle imaging velocimetry, 简称 PIV) 激光流场测试手段研究了设计工况下弯掠叶片周向弯曲方向和弯角大小对于旋转动叶叶顶泄漏涡的影响规律^[7].目前对弯掠技术的研究,主要在设计工况下考察详细的内部流动和气动声学性能,对小流量下详细的内部流动测量和气动声学性能的研究工作开展较少.

运行工况变化后,弯曲叶片顶部的间隙流动变得十分复杂,不仅对低压轴流风机的工作效率和运行稳定性有较大的影响,也是轴流风机叶顶间隙噪声的声源区^[8-9].本文将采用数值模拟的方法,考察了不同流量下,带有周向前弯、后弯叶片的低压轴流叶轮的叶顶泄漏流动特性.探讨随着流量的减小,叶片不同周向弯曲方向和角度对叶顶泄漏流动和泄漏涡形成、产生以及耗散的影响.

1 计算模型和方法

弯掠叶片是弯叶片、掠叶片以及弯和掠组合叶片的统称.由于在叶轮机械弯掠叶片研究领域目前还没有关于弯、掠以及前、后的统一定义,因此,本文研究中所使用的上述称谓并不是所有研究学者都采用的.如图1所示,本文研究的弯曲叶片是通过将平板圆弧叶片的重心积迭线周向弯曲获得,顺旋转方向周向弯曲为周向前弯叶片,逆旋转方向周向旋转为周向后弯叶片.本文将针对原型径向叶轮、周向前弯 8.3° 叶轮、周向后弯 8.3° 叶轮,定性和定量的对比研究,工况变化后叶片周向弯曲对叶顶泄漏流动的影响.

本文所研究的弯掠叶片以低压轴流通风机 T35-11 No.5 为原型进行设计. T35 原型叶片具有上反角度 $\gamma = 2.42^\circ$,周向前弯角度 $\delta_k = 1.27^\circ$.

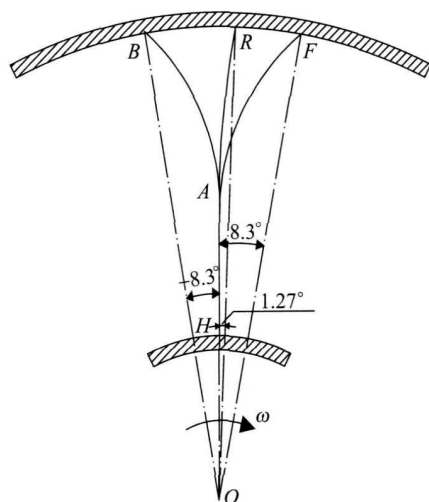


图1 叶片弯曲的定义示意图

Fig.1 Circumferential skewed Definition

保持 T35 原型叶片几何参数不变(叶片数、弦长和安装角等),取消原型叶轮前弯角后将叶片顺叶轮旋转方向前弯,前弯和后弯角度均为 8.3° ,采用直线+圆弧型积迭线,交点在相对叶高 0.4 处.几何模型如图2所示,其它参数见文献[6].叶轮的主要设计参数有,额定转速为 1440 r/min ,轮毂比为 0.35,叶轮外径为 500 mm,安装角为 25° (61.5% 叶高).

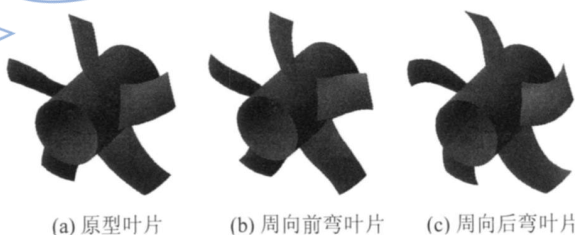


图2 三种叶片模型

Fig.2 Model of blades

计算区域由叶片主流区和叶顶间隙区两部分组成.其中叶片通道主流区采用 H 型网格,网格点数为:流向 $\times$ 叶展方向 $\times$ 跨叶片方向 = $129 \times 73 \times 65$,叶顶间隙区采用 H-O 型网格,网格点数为 $65 \times 13 \times 13$,即在间隙高度方向和叶片厚度方向分别取 13 个点.利用勃拉修斯(Blasius)公式,近似预估第一层网格点与壁面之间的距离 y_{wall} , y^+ 取 1.

采用时间相关法求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程组,选用 (Spalart-Allmaras) S-A 湍流模型.空间离散为守恒形式的有限体积法,中心差分格式.采用四阶 Runge-Kutta 法进行时间推进.同时利用多重网格和隐式残差均化对流动实施加

速收敛。

边界条件具体设置为:进口给定总压、总温;出口给定质量流量;叶轮进出口延伸区给周期条件,绝热固体壁面给定无滑移条件。当进、出口质量流量误差小于或等于 5×10^{-5} 时认为计算达到收敛。

2 结果分析和讨论

2.1 气动性能

根据 GB1236-2000 的通风机性能试验标准对三种叶轮进行了气动性能试验。图 3 给出了三种叶轮的气动性能曲线和单通道流场计算结果,图中不同形状实心点分别为原型叶片、前弯和后弯叶片的数值模拟结果。为了考察周向弯曲叶片对叶顶泄露流动的发展规律,本文选择四种工况:设计流量,介于设计流量和压力峰值流量之间的流量,压力峰值流量,以及近压力峰值流量,其流量系数分别为 $\phi=0.235, 0.20, 0.18, 0.168$ 。四个工况 3 个叶片计算总压升,与实验符合较好,最大相对误差小于 5%,计算结果是准确可靠的。

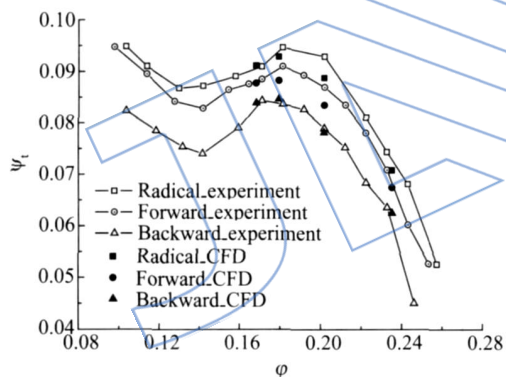


图 3 实验测量全压特性和数值预测对比

Fig. 3 Predicted total pressure coefficient compared to Experiment result

2.2 叶顶泄漏流的空间发展

当偏离设计工况点进入小流量区时,进入叶栅通道的气流进气角增大,叶片吸力面将产生气流分离,叶片前缘气流将发生扰动,这将影响到叶顶泄漏流动形成、发展、衰灭规律。端壁附面层的增厚,与周向前弯和周向后弯叶片叶顶泄漏流动间的干涉更加强烈,预示不同周向弯曲叶片叶顶泄漏流的空间特性发生了变化。随着流量的减小,周向前弯和后弯的叶顶流动特性,如图 4 所示,图中分别为设计流量和压力峰值流量两种工况,三种叶片叶顶流动的三维相对速度流线分布。

与设计流量相比,压力峰值流量 $\phi=0.18$ 下,原型叶片的叶顶泄漏流,起始位置由叶顶弦长中部附近转移至叶顶前缘,泄漏涡起源位置由叶顶前缘附近转移至前缘前方,泄漏涡核弥散的趋势更加强烈,在向压力面方向前进的过程中,泄漏涡破碎。而对于周向前弯和后弯叶片,泄漏流的起始位置转移至叶顶前缘前方,且起始位置已不像原型叶片那样清晰,泄漏涡核弥散的程度加剧,泄漏流的衰亡加速。叶片周向弯曲,加剧了压力峰值流量下叶顶泄漏流与通道流的混合,泄漏涡心区域增大。泄漏涡核的弥散趋势与设计流量是一致的,但弥散程度更强烈些。

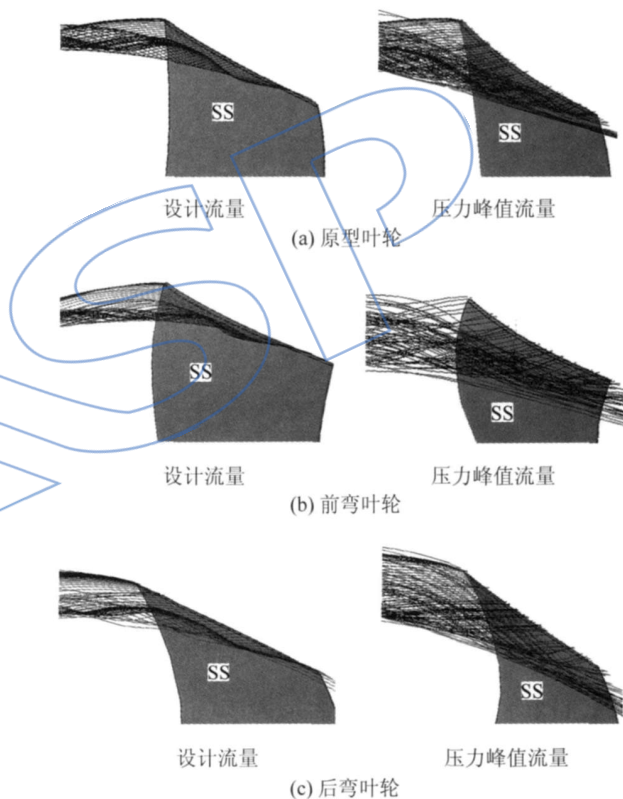


图 4 叶顶泄漏流的起源与发展

Fig. 4 Origination and development of tip leakage flow

为考察叶顶泄漏涡心轨迹的空间特性,绘制周向不同截面相对速度分布图。泄漏涡涡心的位置通过相对速度分布和涡量分布的结果来确定,该处的涡量具有临近区域最大值的特点。观察位置如图 5 所示,在周向截取 6 个截面, P_1 距前缘 5 mm,两截面间叶顶处周向距离为 8 mm。叶顶泄漏涡心轨迹的空间分布如图 6 所示,图中为 $\phi=0.235, 0.20$ 和 0.18 工况的叶顶区域相对速度分布,虚线即为叶顶泄漏涡心向压力面方向发展的轨迹。对于原型叶片,在设计流量下,泄漏流起始

于叶顶弦长中部附近,在距叶顶前缘 24 % 弦长处开始形成泄漏涡,并脱离吸力面向着相邻叶片的压力面方向流动. 流量减小后,泄漏涡形成位置开始向叶片前缘方向转移,泄漏涡涡核的弥散趋势

更趋向于压力面方向,涡核弥散区域扩大. 在叶弦尾部,泄漏涡涡核有弥散的趋势,在向压力面方向前进的过程中,泄漏涡破碎.

与原型叶片相比,周向前弯和后弯叶片叶顶泄漏涡的发生、发展有所不同. 随着流量减小,周向前弯叶片泄漏涡的起始位置由距叶片前缘 32 % 的弦长处向前缘方向移动,更加远离叶片前缘,且不论在叶弦尾部还是向压力面方向的整个发展过程,泄漏涡涡核的弥散程度减小,弥散区域减小. 而周向后弯叶片泄漏涡的起始位置由距叶片前缘 26 % 的弦长处向前缘方向移动,涡核的弥散程度更强,弥散范围更大. 三种叶片中,周向前弯叶片,弥散区域扩张最大,泄漏涡失稳后衰减要慢一些.

图 5 叶顶泄露流周向考察位置示意图
Fig. 5 Distribution of circumferential section

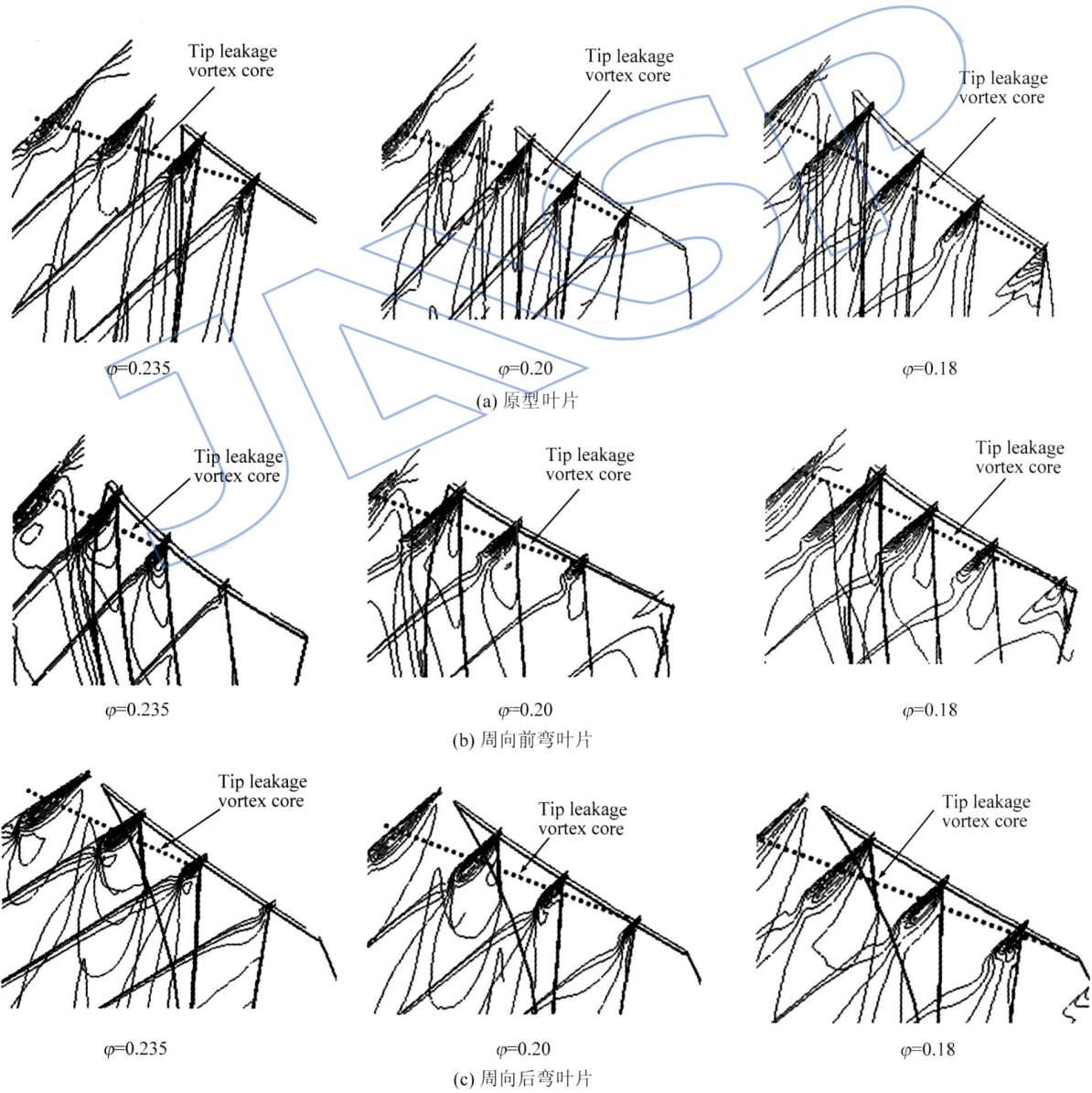


图 6 叶轮不同流量叶顶泄露流涡心轨迹发展
Fig. 6 Trajectory of tip leakage vortex core according flow rates

为了定量比较泄漏涡心位置随流量变化的规律,绘制了三种叶片不同流量下子午面内涡心位置沿叶高和弦向变化,如图 7 所示,图中给出了流量系数由 $\phi=0.235$ 减小至 $\phi=0.168$ 过程中的涡心位置变化,涡心位置确定方法同前.横坐标为涡心与叶片前缘距离占叶顶弦长的百分比,纵坐标为涡心径向位置.设计流量下,前弯叶片涡心位置最靠前,径向次之,后弯最小;随流量的减小,三种叶片的总体趋势是向叶片前缘方向移动,径向和后弯叶片展向高度减小,前弯涡心展向高度变化较小,涡心位置是三种叶片中,变化最缓慢的,暗示前弯的叶顶泄露流动随流量的减小,变化趋缓,对叶顶流动恶化起到了抵制作用,减缓叶顶流动损失增加.当流量将减小至压力峰值工况时,前弯叶片叶顶涡心最后到达叶片前缘顶端,叶顶区域流通受阻最弱,叶顶附近失速将延迟发生.暗示周向前弯能够缓解流量减小后叶顶流动恶化,对稳定叶片叶顶流动起着重要作用.

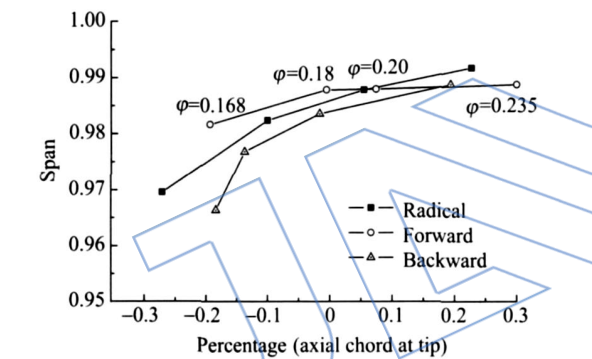


图 7 子午面内泄漏涡涡心位置的发展
Fig. 7 Position of tip leakage vortex core on meridional plane

随流量减小,叶顶泄漏流的发生发展规律总

结为表 1.

2.3 上端壁极限流线分布

图 8 给出三种叶片不同工况的上端壁极限流线分布.如原型叶片设计工况流线分布图所示,从吸力面一侧靠近叶片前缘附近流体开始汇集形成一条低压区,并不断向同一流道的压力面后缘方向蔓延,这是一条分离线.

从吸力面一侧可以看出,设计流量工况下,原型叶片的分离线的起始位置最靠近叶片前缘,即叶顶泄漏涡发生地点,前弯叶片次之,后弯叶片最远.且原型叶片分离线长度最短.分离线反映了泄漏涡的发生、发展的过程.流量减小后,分离线的位置发生了明显的变化,三种叶片的分离线均移至叶片前缘前方,周向前弯叶片和后弯叶片偏移距离均较原型叶片远,周向前弯叶片分离线的起点区域呈现漩涡状,周向后弯叶片也呈现汇集状,暗示叶片前缘前方已经出现了涡流.分离线发展方向已不再是向压力面尾缘方向发展,发展方向近乎平行于前缘线,已不再反映叶顶泄露涡的发生发展过程.这也同图 9 所示通道内静压分布趋势一致.

前弯和后弯周向平均叶顶涡量分布和熵分布如图 9 所示,设计流量下,后弯叶片旋涡的强度在起始段最强,前弯叶片要弱一些,而且后弯叶片涡量最大点较靠近叶片前缘;流量减小后,前弯叶片的叶顶前缘旋涡的强度仍低于后弯,两者最大涡量位置相似.从熵分布可以更清晰看出,旋涡的强度最大的区域,对应于较大的能量损失,周向前弯叶片前缘的能量损失量值上小于后弯.偏离设计工况下,叶片周向前弯较周向后弯更有利于降低叶顶前缘的损失,弱化叶顶泄漏流动,流动状态更稳定.

表 1 随流量减小叶顶泄漏涡的发展
Table 1 Tip leakage vortex development according to flow rates

		原型叶轮	前弯叶轮	后弯叶轮
位置迁移	弦向迁移(向前缘方向)	最快	次之	最慢
	展向迁移(向轮毂方向)	居中	最小	最大
运动方向		从吸力面向同一流道的压力面方向流动		
发展过程		从稳定走向不稳定,在流道出口涡核弥散		
涡核弥散		最快	最慢	一般
涡心区域增加		最大	一般	最小
原因		叶片叶顶弯曲方向及弯曲角度		

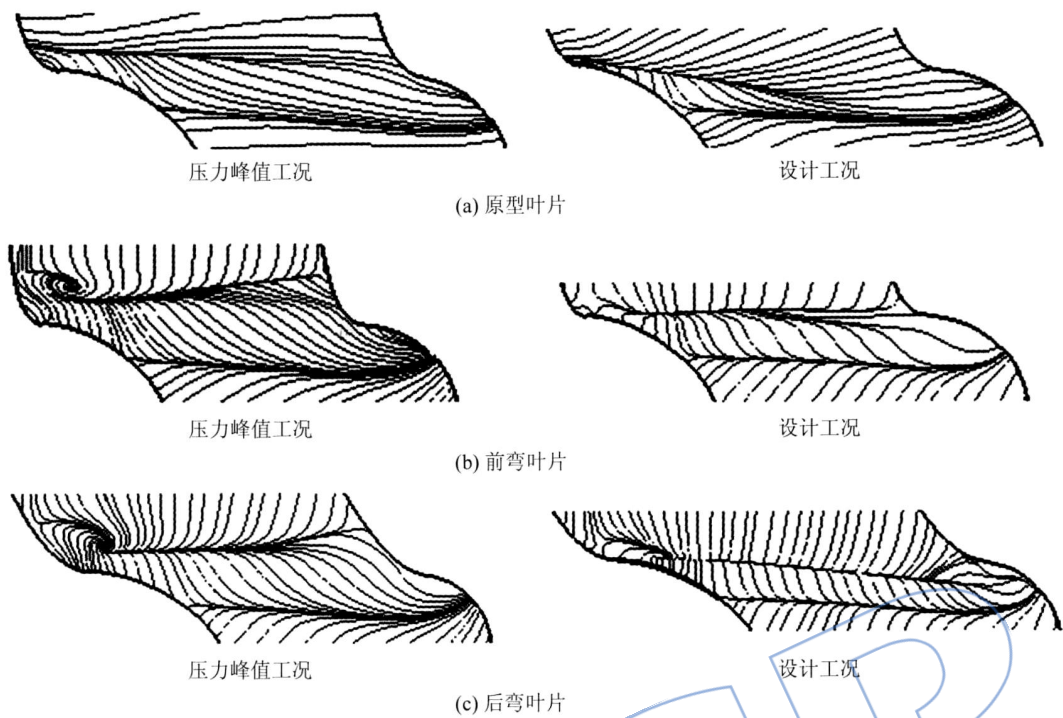


图 8 端壁极限流线分布
Fig. 8 Limiting streamlines distribution

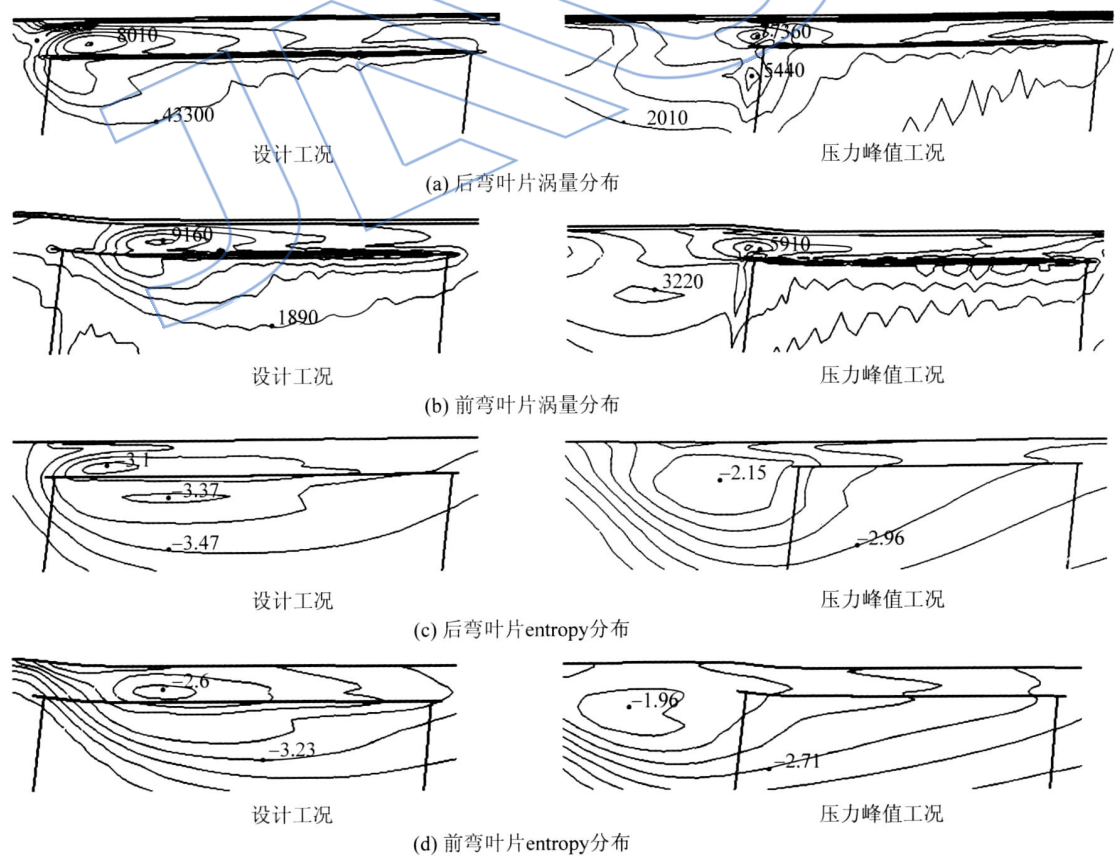


图 9 子午面叶顶泄漏涡量和 entropy 分布
Fig. 9 Vorticity and entropy distribution on meridional plane

2.4 叶顶间隙区域压力分布

图 10 为两种流量叶顶间隙区域 blade-blade 面的静压压力系数分布. 静压系数 C_p 表示

$$C_p = (p - p_a) / (0.5 \rho U_t^2)$$

式中 U_t 为叶片尖部旋转速度; p_a 为大气压力; p 为当地静压值; ρ 为流体密度.

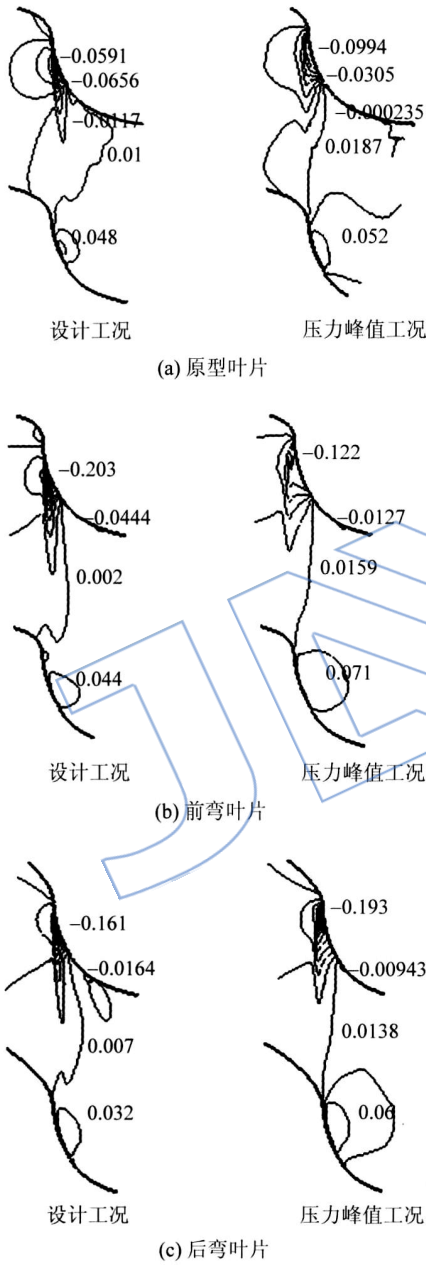


图 10 0.995 展高 blade to blade 面内叶顶区域的静压系数分布

Fig. 10 Static pressure coefficient distribution on blade to blade plane 0.995 span

由图 10 可以看出,吸力面一侧压力等值线呈现凹槽结构与叶顶泄漏流动是相对应的,即泄漏

流与压力极小值相对应,反映了叶顶间隙区域的压力大小. 在设计流量下,比较三个叶片的压力分布,沿主流方向后弯叶片最先出现凹槽结构的压力分布,原型叶片次之,前弯叶片最迟. 在压力峰值流量下,三种叶片的凹槽结构的压力分布发生了变化,凹槽区域区域增大且均向前缘转移. 这与前面的分析完全吻合.

从凹槽区域的压力大小来看,随着流量减小,前弯叶片的凹槽区域压力趋于减小,而原型和后弯叶片趋于增加. 凹槽区域的压力大小反映的是叶顶泄漏流卷曲形成的泄漏涡的强弱,涡心处压力越低,旋涡强度越大. 前弯叶片的变化趋势暗示,叶片周向前弯可以弱化小流量下的叶顶泄漏流动,改善叶顶流动的稳定性的,这将有助于扩大风机的工作范围.

通道内的静压系数分布显示出,主流特征随叶顶间隙流轨迹位置移动发生明显改变,静压系数为零值位置向前缘方向显著转移. 三种叶片中,对于静压系数近零值区域,前弯叶片向进口方向转移最明显,后弯次之,原型叶片转移最小. 静压系数近零值区域反映了叶顶泄漏涡的衰灭,因此当该区域向进口方向偏移暗示了叶顶泄漏流的快速衰减.

3 结 论

本文对不同流量下的周向弯曲叶片叶顶流动进行了数值考察,主要结论如下:

- 1) 随着流量的减小,叶顶泄漏涡动起源向前缘方向迁移,泄漏流向下扩散强烈,流动趋于恶化. 周向前弯和后弯叶片加剧了泄漏涡与主流的掺混.
- 2) 随着流量的减小,周向前弯叶顶泄漏涡的起源在三种叶片中距离叶片前缘最远,向前缘方向和轮毂方向移动最缓慢. 暗示周向前弯的叶顶泄漏流动随流量的减小,变化趋缓,对叶顶流动恶化起到了抵制作用,叶顶区域流通受阻最弱,叶顶附近失速将延迟发生,为实验研究提供参考.
- 3) 与周向后弯叶片相比,相同流量下周向前弯叶片的叶顶泄漏涡流强度更弱,泄漏涡造成的叶顶区域能量损失较少,有助于改善叶顶泄漏流动和降低端壁损失,稳定叶顶区域流动;随着流量的减小,周向前弯有利于稳定叶顶泄漏流动,是扩大叶轮稳定工作范围的重要因素.
- 4) 流量减小后形成的强度大、衰减慢的泄漏涡,降低了叶顶的通流能力,增加叶轮的端部损失.

参考文献:

- [1] Wright T, Simmons W E. Blade sweep for low-speed axial fans [J]. Journal of Turbomachinery, Transactions of ASME, 1990, 112(1): 151-158.
- [2] Beiler M G, Carolus T H. Computation and measurement of the flow in axial flow fans with skewed blades[J]. Journal of Turbomachinery, Transactions of ASME, 1999, 121(1): 59-66.
- [3] 钟芳源,王建民,蔡娜,等. 双激盘理论及其在轴流式弯掠动叶栅气动计算中的应用[J]. 航空动力学报, 1994, 9(4): 394-398.
- ZHONG Fangyuan, WANG Jianmin, CAI Na, et al. Application of diactuator disc theory to aerodynamic computation of axial-flow fan with skewed-swept rotor blades[J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(4): 394-398. (in Chinese)
- [4] 蔡娜,李地,钟芳源. 弯掠动叶气动-声学优化设计及实验研究[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(2): 81-85.
- CAI Na, LI Di, ZHONG Fangyuan. Optimum design and experiment on skewed-swept rotating blades[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1997, 31(2): 81-85. (in Chinese)
- [5] 刘富斌,杜朝辉,钟芳源. 轴流通风机动叶前弯对扩大稳定工况的试验研究[J]. 风机技术, 1999, (6): 5-9.
- LIU Fubin, DU Zhaozhui, ZHONG Fangyuan. Experimental investigation of forward curved blade at off-design conditions [J]. Compressor Blower and Fan Technology, 1999, (6): 5-9. (in Chinese)
- [6] 欧阳华. 新型可逆式弯掠组合叶片的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- OU YANG Hua. Study on a new type reversible axial flow fan with skewed and combined blades [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2002. (in Chinese)
- [7] 李杨,欧阳华,杜朝辉. 周向前弯轴流风扇转子的叶顶泄漏流动研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(1): 75-79.
- LI Yang, OU YANG Hua, DU Zhaozhui. Research findings concerning bladetip leaking flow in circumferential forward-skewed axial-flow fan rotors[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(1): 75-79. (in Chinese)
- [8] Lakshminarayana B, Pandya A. Tip clearance flow in a compressor rotor passage at design and off-design conditions[J]. ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 1984, 106(3): 570-577.
- [9] Jang C M, Sato D, Fukano T. Experimental analysis on tip leakage and wake flow in an axial flow fan according to flow rates[J]. ASME J. Fluids Eng., 2005, 127(2): 322-329.