

# 周向前弯轴流风扇转子 叶顶泄漏流动研究

李 杨, 欧阳华, 杜朝辉

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘 要:** 以低压轴流风扇 3 个代表性的周向前弯角(前弯  $1.27^\circ$ 、 $8.3^\circ$  和  $25^\circ$ )的叶轮作为研究对象, 对三维粘性流场进行了数值计算, 并对出口损失进行了试验测量, 计算与测量结果能够较好地吻合。结果显示, 叶顶泄漏涡的起始位置随着叶片周向前弯角度的增加而沿叶弦后移, 逐渐接近叶片后缘, 但旋涡的强度并不是一直增大, 达到某一前弯角度以后, 泄漏涡由于受到叶片尾迹的影响而减弱。由此反映出, 较大的前弯角度的叶轮, 叶顶区域流动变得更加复杂, 同时对上端部损失的影响因素增多, 包括了泄漏涡、二次涡、尾迹以及它们之间的相互掺混。

**关 键 词:** 低压轴流风扇; 周向前弯; 叶顶泄漏流; 尾迹

中图分类号: TH432.1 文献标识码: A

## 引 言

弯掠技术的应用与研究为改善叶轮机械的性能提供了可能。这项技术最早起源于航空机翼领域<sup>[1]</sup>, 取得巨大成功的同时, 进入到了叶轮机械领域。在该领域, 经过国内外学者多年的深入研究, 发现叶片采用弯掠技术以后, 在减小流动损失、提高气动效率、降低气动噪声以及扩大稳定工作范围方面作用明显<sup>[2~13]</sup>。但是由于各种原因, 对周向弯曲叶片的研究当前还仅局限在不同周向弯曲方向的叶轮之间的比较, 很少有相同弯曲方向不同弯曲角度的叶轮研究的相关报道。

基于上述原因以及低压轴流风扇的流动特点, 包括进、出口压升较小, 壁面的边界层较薄, 叶顶泄漏流动对整个流场的影响较大等, 本文选择了 3 个代表性的前弯叶轮, 对叶顶泄漏流场的损失、涡量和速度几方面进行了讨论。

为便于阐述, 3 个周向前弯角度为  $1.27^\circ$ 、 $8.3^\circ$  和  $25^\circ$  叶轮分别冠以小前弯角、中等前弯角和大前弯角

叶轮的称呼来表示。

## 1 研究模型

利用叶片的重心积迭线的不同周向弯曲角度得到不同的叶片。具体做法: 截取直叶片相对叶高分别为 0、0.4 和 1 的叶型轮廓线(分别为 A/B/C), 将它们的重心(CG)连线。将 C 叶型在圆周面上沿叶轮旋转方向移动, 同时保持叶型的攻角不变。当到达某一位置后, 将 B 与 C 之间的叶型按照圆弧形状的积迭线进行光滑, 这样就得到了所需的周向前弯叶片。周向前弯角度是叶轮转轴与 C 叶型重心连线在圆周向上的旋转角度, 如图 1 所示。

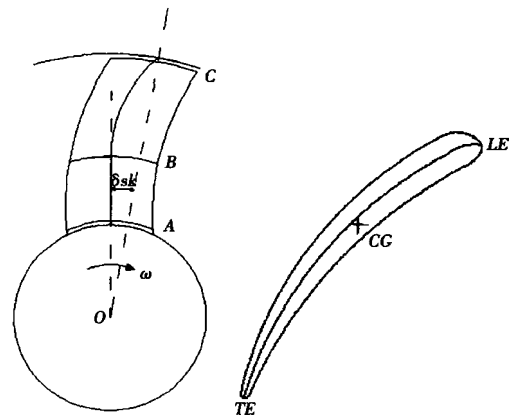


图 1 叶片积迭线及周向前弯角度

所利用的原始叶轮是 T35 No. 5 的改进型。前弯角度  $\alpha_k = 1.27^\circ$ 。取消它本身的前弯角度后再追加相应的前弯角。以周向前弯角度  $1.27^\circ$  和  $20^\circ$  为上、下限, 以为  $2^\circ$  变化步长, 再加上  $25^\circ$  叶片, 得到 12 个不同周向前弯角度的叶片, 经过对这些叶轮的

收稿日期: 2006-03-20; 修订日期: 2006-06-14

作者简介: 李 杨(1973-), 男, 辽宁沈阳人, 上海交通大学博士研究生, 现在青岛科技大学工作。

分析研究,最后给出 3 个最具代表性的叶轮作为研究模型,如图 2 所示。

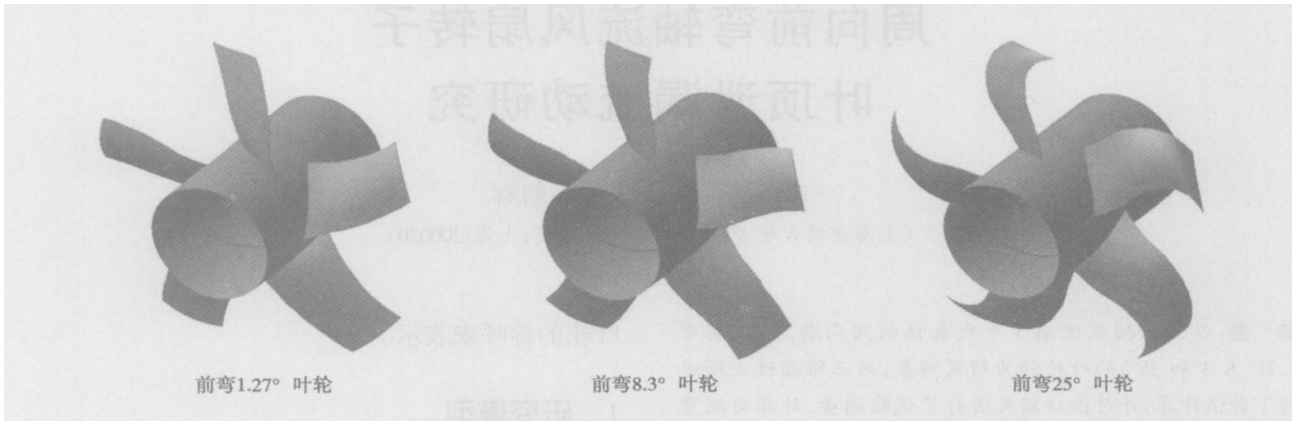


图 2 研究模型示意图

主要设计参数: 额定转速 1 440 r/min, 轮毂比 0.35, 叶片数 5 个, 叶轮外径 500 mm, 进口安装角 25°, 叶顶和机匣壁面之间的间隙高度为 1.5% 叶高。叶轮为单转子, 等厚平板圆弧叶型, 电机直联驱动。

## 2 研究方法

计算该三维不可压缩粘性流动, 采用时间平均法求解控制方程组加湍流方程的数值模拟方法。

选用 Spalart-Allmaras 一方程湍流模型。中心差分格式进行空间离散, 时间推进采用四步 Runge-Kutta 法。利用多重网格和隐式残差均化对流动实施加速收敛。

计算网格分为叶片主流区和顶部间隙区, 如图 3 所示。主流区采用 H 型网格, 网格点数分布为: 主流方向× 叶展方向× 跨叶片方向= 129× 73× 65, 顶部间隙区采用 H & O 型网格, 网格点数为 65× 17× 13 和 161× 13× 13, 即在叶顶间隙高度方向和叶片厚度方向分别取 13 个点。

边界条件: 进口给定绝对总压, 总温; 出口给定质量流量以及参考静压; 叶轮进、出口延伸区给周期条件。

当进、出口质量流量误差小于或等于  $5 \times 10^{-5}$  时认为计算达到收敛。

试验采用五孔探针叶轮出口进行测量。在轴流风扇出气试验装置中, 测量截面距离叶片出气端约 15 mm, 沿叶高方向共布置 7 个测点, 分别位于相对叶高 1.54%、20%、38.5%、56.9%、75.4%、93.8%、97.5% 处。

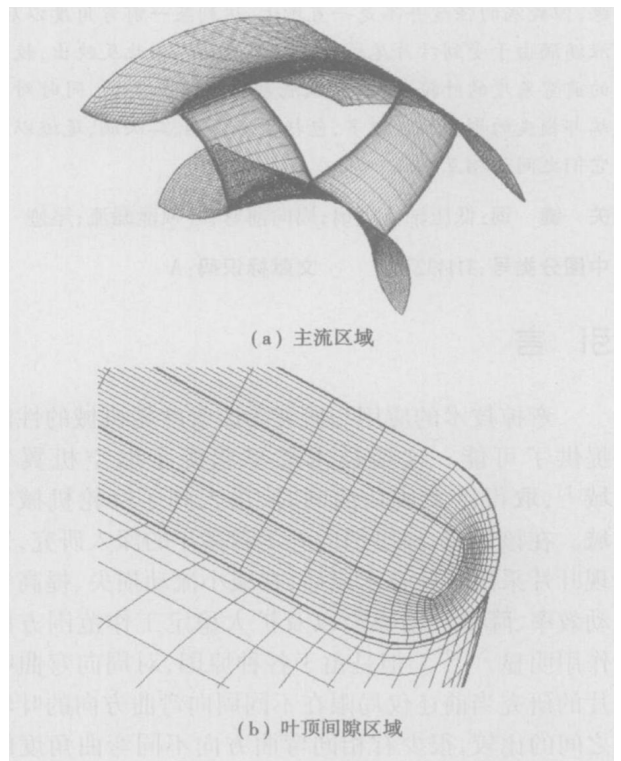


图 3 计算网格

## 3 结果分析

### 3.1 出口总压损失分析

如图 4 所示为 3 个前弯角度的叶轮出口处的总压损失分布。

图 4 中曲线为计算结果, 离散点为试验结果。如图所示, 计算与试验结果吻合较好。从整体看, 损失分布沿叶高呈现“两端大, 中间小”的特点。这说明上、下端壁存在大量的低能流体, 同时在中部叶高

范围内属于主流的主要通过区域, 是整个叶片的主要做功区域。

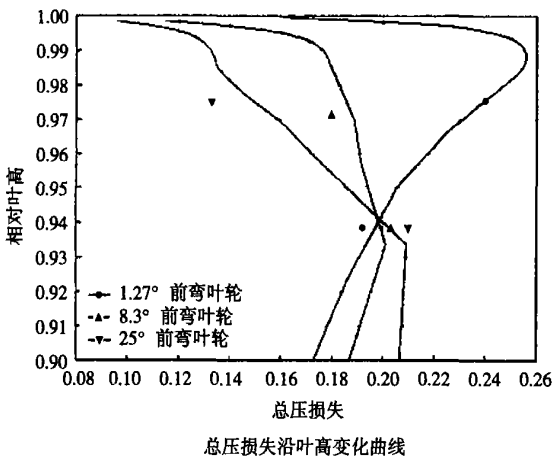
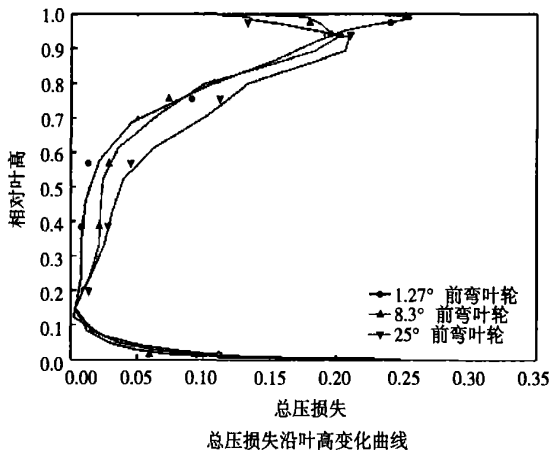


图 4 不同周向弯角叶轮出口总压损失分布

从不同叶高的损失分布来看, 由于 3 个叶片在 0.4 倍以下的叶高无周向弯曲, 叶片形状完全一致, 加之相同的进气条件, 因此在轮毂壁面附近, 流动相似, 造成的损失也相近。在约 0.2 倍叶高以上区域, 流动损失有所差异, 并且沿着径向向上, 这种差异越来越大。其主要原因是叶片中上部分不同的周向前弯角度造成叶片形状的不同, 从而引起流动损失的差异。同时, 叶顶间隙的存在加之叶片形状的剧烈变化使叶顶区域的流场更加复杂, 包括泄漏流动以及由此产生的泄漏涡的位置以及强度的变化等因素的影响, 导致该区域流场差异更大。另外, 流体径向的能量交换, 造成了叶顶间隙流场的这种巨大差异向下传播, 因此出现了不同前弯叶轮顶部损失差别较大的现象。

从叶顶区域的损失图来看, 反映了 3 个叶轮鲜明的结构特点。对于小前弯叶轮, 流体对叶片的作用

用力的径向分力很小, 使之很难抵抗离心力对叶片近壁面的低能流体的作用, 通道内部压力沿径向上的分布主要是由回转面流体微团旋转产生的离心力所决定, 因而沿叶高存在一正的压力梯度, 大量低能流体在叶顶附近堆积, 进一步加大了该区域的损失。对于大前弯叶轮, 叶片径向分力很大, 抵消掉了离心力, 出现了沿径向向下的压力梯度, 造成上端壁以及叶片近壁面边界层的低能流体向叶片中部转移。对于中等前弯叶片, 正是由于上述流动机理以及弯曲角度的特点, 流体在叶顶和中部区域所受到的影响程度介于二者之间。

另一方面, 叶顶泄漏流动也会对损失造成影响。叶顶泄漏流卷起形成泄漏旋涡, 它给叶顶损失带来正反两方面的效应。一方面, 泄漏涡加强了叶顶流体、二次涡以及尾迹之间剧烈的掺混, 一定程度上对主流造成堵塞; 另一方面, 泄漏涡使上端壁边界层发生分离, 导致低能流体进入主流, 并被主流带走, 降低了端部损失。

以上分析发现, 从能量损失的角度来评价叶片性能, 就要定量分析不同前弯叶轮在叶顶区域损失的减小量与中部损失增加量之间的关系, 同时也要考虑叶顶泄漏流动对端部损失的双重影响。最佳性能的叶轮应该是总损失最小, 而从数学分析的角度来看, 在本文的研究模型下, 这个性能最佳的前弯叶片的弯曲角度应该位于中等前弯角度附近。测量结果也验证了这一点, 中等前弯叶轮的总压损失系数比其它两个叶轮都降低了 10% 左右。

### 3.2 叶顶流道的涡量分析

图 5 所示为 98% 相对叶高位置周向平面的涡量分布, 左侧是进气端, 右侧是出气端。

从图 5 中可以看出, 这 3 个叶轮的叶顶泄漏涡的起始位置以及发展状况。从泄漏涡的起始位置看, 小前弯叶轮最靠近叶片前缘, 在 30% 弦长左右, 中等前弯叶轮居中, 在 50% 弦长位置左右, 大前弯叶轮最靠近叶片后缘, 在 80% 弦长左右的位置, 这与文献 [13] 的研究结果吻合。另外, 旋涡的发展状况也有差异。从涡量最大值来看, 中等前弯叶轮最高, 小前弯叶轮其次, 大前弯叶轮最低。从旋涡的稳定性来看, 中等前弯叶轮最稳定, 大前弯叶轮其次, 小前弯叶轮稳定性最差。

从细节来看, 对于大前弯叶轮由于泄漏涡的起始位置进一步靠近叶片尾缘, 造成在泄漏流刚刚卷起形成旋涡后就与叶片尾迹相互掺混。流动方向的混杂性导致泄漏涡的强度减弱, 从而影响旋涡的稳

定性以及抗主流的冲击能力。对于小前弯和中等前弯叶轮来说, 泄漏涡起始位置靠前, 避免了与尾迹之

间的较大掺混, 使得旋涡基本上能够以其最原始的状态向前发展。

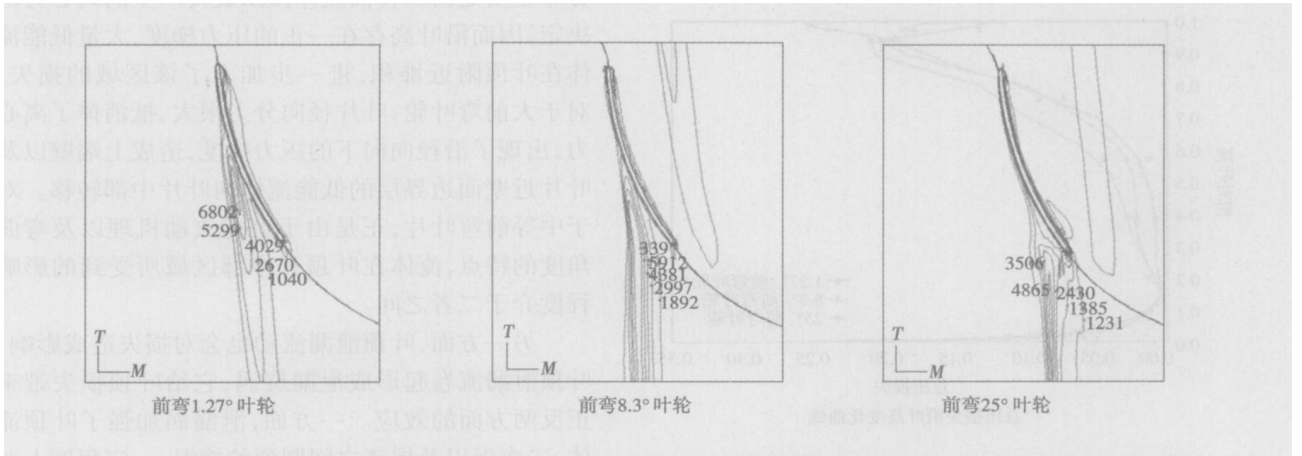


图 5 近叶顶流道区域的涡量分布(1/s)

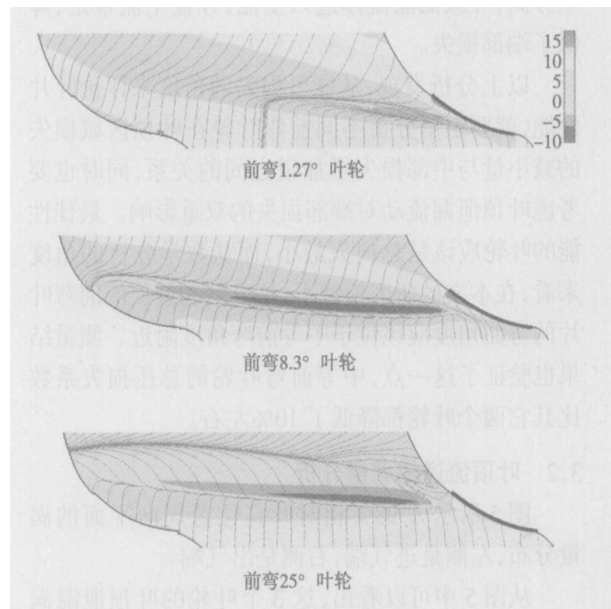


图 6 近叶顶流道区域流线和轴向速度大小分布(m/s)

### 3.3 叶顶流道的流线分析

图 6 给出了叶顶附近的流道内流线以及轴向速度大小的分布。图中明显反映出 3 个不同前弯角度的叶轮的叶顶泄漏流动规律。小前弯叶轮泄漏涡起始位置最靠近叶片前缘, 旋涡主要受到主流的影响, 强度最低, 对主流的抵抗能力最差; 中等前弯叶轮泄漏涡起始位置居中, 旋涡主要受到主流的影响, 强度最高, 对主流的抵抗能力最强, 但作用区域不大; 大前弯叶轮的泄漏涡起始位置最靠近叶片后缘, 旋涡在初始点主要与叶片尾迹之间相互作用, 导致旋涡

强度减弱, 在以后的发展中主要受到主流的影响, 强度低于中等前弯叶轮, 但是与主流的作用区域较大, 造成叶顶区域大面积的流动堵塞。

由于叶顶泄漏涡与叶片尾迹以及主流之间的相互影响, 导致大前弯叶轮的顶部区域流场比其它两类叶轮更加复杂, 在该区域流动稳定性较差。另外, 过大的前弯角度对叶片材料的要求更高, 因此从性价比的观点看, 大前弯叶轮不是首选叶轮。

## 4 结 论

(1) 对于前弯叶轮来说, 弯曲角度并不一定与叶顶泄漏涡的强度成正比发展。当前弯角度过大时, 由于泄漏涡的起始位置更加靠近尾缘, 造成它与叶片尾迹相互掺混, 从而减弱了旋涡的强度以及降低稳定性。

(2) 上述结论说明, 对于前弯叶轮, 在某一前弯角度它的泄漏涡可能最强, 对叶顶区域流动的影响最剧烈。

(3) 对于低压轴流风扇来说, 叶片不同的前弯角度对流动损失产生复杂的影响。叶片径向力、叶顶泄漏涡以及与二次涡、尾迹之间的掺混造成对上端部损失的双重效应, 同时这种效应又进一步向叶片中部区域传播, 从而对叶轮的整体性能产生重要影响。

### 参考文献:

[1] WADIA A R, SZUCS P N, CRALL D W. Inner workings of aerodynam...

- ic sweep[ J ]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 671—682.
- [ 2 ] WRIGHT T, SIMMONS W E. Blade Sweep for low-speed axial fans [ J ]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 151—158.
- [ 3 ] YAMAGUCHI N, TOMINAGA T, MITSUBISHI T. Secondary loss reduction by forward skewing of axial compressor rotor blading // Proceeding of 1991 Yokohama International Gas Turbine Congress [ C ]. Yokohama: GTSJ, 1991. 61—68.
- [ 4 ] YAMAGUCHI N, TOMINAGA T. Performance improvement by forward skewed blading of axial fan moving blades // 11<sup>th</sup> ISABE 93—7055 [ C ]. Tokyo: ISABE, 1993. 580—589.
- [ 5 ] 王仲奇, 苏杰先, 钟兢军. 弯扭叶片栅内减少能量损失机理研究的新进展[ J ]. 工程热物理学报, 1994, 15(2): 147—152.
- [ 6 ] 王松涛, 王仲奇, 冯国泰. 弯曲叶片降低能量损失的涡动力学机制[ J ]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5): 607—613.
- [ 7 ] CAROLUS T H, BEILER M G. Skewed blades in low pressure fans; a survey of noise reduction mechanisms // AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference 11th [ C ]. Atlanta: AIAA/CEAS, 1997. 47—56.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] WEINGOLD H D, NEUBERT R J, BEHLKE R F. Bowed stator; an example of CFD applied to improve multistage compressor efficiency[ J ]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(1): 161—167.
- [ 10 ] SASAKI T, BREUGELMANS F. Comparison of sweep and dihedral effects on compressor cascade performance[ J ]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(3): 454—464.
- [ 11 ] BEILER M G, CAROLUS T H. Computation and measurement of the flow in axial flow fans with skewed blades[ J ]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 121(1): 59—66.
- [ 12 ] CAROLUS T H, STREMEL M. Sichelshaufeln bei axialventilatoren [ J ]. Luftungstehnik, 2000, Bd51: 33—39.
- [ 13 ] 李 杨, 欧阳华, 杜朝辉. 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

(何静芳 编辑)

## 新 产 品

## 新一代涡轮压气机装置

据《СУДОСТРОЕНИЕ》2006年5~6月号报道,基洛夫工厂半个多世纪来在燃气轮机涡轮压气机装置的科研、设计和生产方面积累了丰富的经验。在为舰艇装备新一代具有涡轮增压装置的锅炉汽轮机装置时,利用了已有的建造舰船用燃气轮机装置(ГТУ—42, 1949年;ГТУ 20, 1965年)的经验。

与燃气轮机装置相比较,这种结构的舰用动力装置具有很高的寿命。同时,由于小的过量空气系数,燃烧时在汽轮机装置内空气和燃气的流量比燃气轮机内的流量小3/4~5/6,这明显减少了进气装置(空气竖风道)和排气装置(燃气通道和烟囱)的截面。这一点对于舰船上层武备的设置尤为有利(如航空母舰)。

采用下列措施使涡轮压气机达到高寿命、高效率 and 高度紧凑:

(1) 通过数值模拟和试验研究,保证使压气机叶片内的疲劳应力比航空燃气轮机压气机叶片的降低2/3(从70 MPa降到25 MPa);

(2) 优化工作叶片和导向叶片安装角之间的关系、工作叶栅和导向叶栅之间特定的切向移动、加厚叶型及其它一些新方案来保证压气机的绝热效率在87%~90%水准。

根据计算资料,用于一台具有THA4和THA3M型涡轮增压装置的增压锅炉舱室的容积约为10 km<sup>3</sup>,而用于具有引风机送风的常规锅炉机组舱室的容积约为150 km<sup>3</sup>。同时,在底座上的载荷分别为50 t和500 t。要求用于建筑具有最新一代THA(涡轮增压装置)的增压锅炉侧壁和承载底座的建造材料要比传统的具有引风机送风的锅炉少90%。

新型的THA5型涡轮压气机装置已装备了全部俄罗斯最新一代原子能破冰船。

(吉桂明 供稿)

某核电站启动锅炉的电气设计和调试中问题的解决= **Resolution of Problems Involved in the Electrical System Design and Commissioning Tests of Pre-operational Test Boilers for a Nuclear Power Plant**[刊, 汉]/ZHANG Qing-jiang, SUN Shi-feng, DAI Yue, et al (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(1). — 73~74, 83

In accordance with the special requirements for the design of the electrical system of pre-operational test boilers for a nuclear power plant, proposed was a design scheme for the pertinent electrical system. The special requirements include the relevant technical conditions, safety and reliability of the boiler electrical system as well as the loading nature and capacity of the pre-operational test boilers. The design of the electrical system adopts a three-phase five-wire system of AC 380 V dual power source lead-in wires with each lead-in wire power source incorporating a section of busbar and a bus coupler being provided between any two sections of the busbar. Moreover, the motors in groups would undergo a check inspection through a self start-up. During the commissioning test, occasional trips occurred to the lead-in wire circuit-breakers. The causes of such problems were analyzed from the perspective of underlying principles. As regards the problems emerging in the commissioning test, proposed was a method to solve the problem through the formation of a ring current by the use of a common zero line in the three-phase five-wire electrical system. **Key words:** nuclear power station, start-up boiler, electrical equipment, three phase five wire system, four-pole switch, zero line

周向前弯轴流风扇转子叶顶泄漏流动研究= **Research Findings Concerning Blade-tip Leaking Flow in Circumferential Forward-skewed Axial-flow Fan Rotors**[刊, 汉]/ LI Yang, OU Yang-hua, DU Zhao-hui (College of Mechanical and Power Engineering under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(1). — 75~79

With a blade wheel of a low-pressure axial flow fan having three typical circumferential forward-skewed angles (forward-skewed angles of 1.27, 8.3 and 25 degrees) serving as an object of study, a numerical calculation was conducted of a three-dimensional viscous flow field along with a testing and measurement of the outlet loss. The calculation results are in comparatively good agreement with the measured ones. The results show that with an increase in the circumferential forward-skewed angle of blades, the starting location of the blade-tip leaking vortex will shift backward along the blade chord, gradually approaching the trailing edge of the blades. The vortex intensity will not increase all along but show a sign of weakening as influenced by the blade wake after a certain forward-skewed angle has been reached. The foregoing reflects that for a wheel with a big forward-skewed angle, the flow in the blade-tip area becomes more complicated, and meanwhile the factors influencing the top-end loss will multiply, including leaking vortex, secondary vortex, wake, and mutual mingling and dilution. **Key words:** low-pressure axial flow fan, circumferential forward-skew, blade-tip leaking flow, wake

大型离心式风机变工况调节中噪声特性的实验研究= **Experimental Study of Noise Characteristics of a Large-sized Centrifugal Fan During its Off-design Regulation Process**[刊, 汉]/ LI Chun-xi, LEI Yong, WANG Song-ling, et al (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003)// Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(1). — 80~83

Nowadays, the centrifugal fans used in large-sized power plants universally suffer from a high noise level. Noise reduction has become a pressing task in environmental protection. An experimental study of noise characteristics of a Model G4-73No.8D large-sized centrifugal fan was conducted in three respects: outlet throttle regulation, flow-guide regulation and variable speed regulation. Noise characteristic curves under off-design conditions were obtained. The experiments show that when the flow rate falls, the noise level under the outlet throttle regulation mode will rise somewhat and that under the flow guide regulation mode fall slightly. But, by contrast, the noise level at certain opening degrees of the flow guide will somehow go up and that under the variable speed regulation mode will drop by a great margin, thus making it possible to effectively control the noise level. When viewed from the aspect of noise reduction and cost-effectiveness, the variable speed regulation offers an optimum overall performance. **Key words:** centrifugal fan, noise, throttle regulation,