

弯掠动叶扩大稳定工作范围的实验研究

华东工业大学 蔡 娜* * 上海交通大学 钟芳源

【摘要】 本实验利用两组轴流试验风机, 每组分别为一台是常规(径向)动叶, 另一台为弯掠动叶。一组保持它们具有(除弦长外)相同的几何参数和相同的转速(弯掠动叶中径处弦长增加量为 20.4%); 另一组具有相同的风机最高压比及其相对应的流量。在这两种条件下对每组风机进行了气动—声学性能的实验, 其结果表明: 具有弯掠动叶的轴流风机不仅改善了气动—声学性能, 而且还大幅度地扩大了稳定工作范围。根据实验结果, 对弯掠动叶扩大轴流风机稳定工作范围的机理进行了讨论。

主题词: 叶片 气动特性 声性质 稳定性

分类号: O317.2

1 引 言

弯掠(Skewed-Swept)叶片, 由于它在气动—声学性能方面的优点, 已经在国内外得到了广泛的研究和应用^[1-3], 弯掠动叶由于其本身的几何和气动声学方面的特点不同于弯掠静叶, 迄今为止, 仍极少见到有关弯掠动叶变工况性能的实验资料发表, 其主要原因在于, 弯掠动叶流动机理远比弯掠静叶复杂。弯掠动叶已应用于轴流压气机(风机)上, 并进行过实验研究、理论分析和数值计算中^[4], 但绝大多数是对稳定工况下弯掠动叶的性能进行研究的。可是, 轴流压气机(风机)的气动—声学性能的非设计工况(主要指低流量)的性能是至关重要的, 为此本文主要介绍了弯掠动叶风机的变工况性能, 与径向动叶风机相比, 首次发现了弯掠动叶具有扩大稳定工作范围(21%以上)的特点, 同时分析研究它们的实验结果及其机理。

2 实验装置及测量系统

实验装置如图 1 所示(图中 1. 风筒, 2. 动叶轮, 3. 静叶轮, 4. 整流栅格, 5. 消声末端, 6. 消声节流锥; A. 动叶进口流场测量截面(五孔探针), B、C.

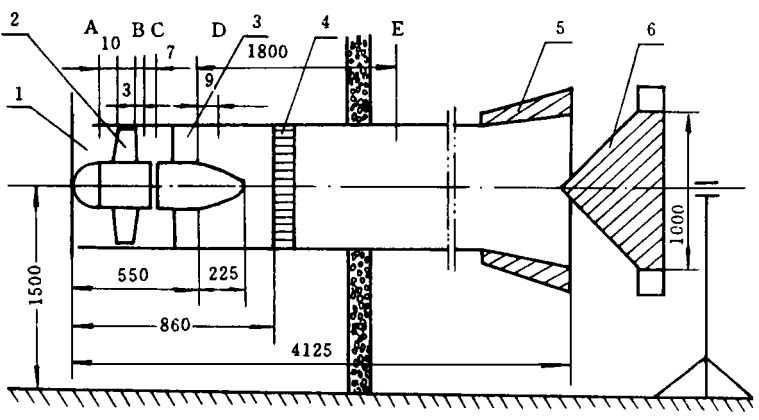


图 1 实验装置

动叶出口流场测量截面(五孔探针和热线风速仪), D. 静压温度的测量, E. 温度、总压、静压的测量)。风机进口设置在全消声室内, 风机出口采用声学末端和声学截流锥(调节流量)。风机转速在实验范围内无级调速。

总体气动性能测量得到风机的总压升、流量和气动效率。稳态三维流场测量是由布置在动叶前后可以径向移动的微型五孔球型探针和热线风速仪来完成的。气动声学测量系统主要由放置在消声室内的声级计和声强仪组成的。

动叶内外径分别是 240 mm 和 594 mm。动、静叶均为平板圆弧型叶型, 分别 6 片和 7 片。弯掠动叶片为弯掠角是 8.3 的周向前弯叶片, 弯掠动叶片在中径处弦长加长 20.4%^[5]。

3 实验结果

弯掠动叶和径向动叶风机的稳定工况气动—声学性能曲线如图 2(图 2 中● 弯掠动叶 n_1 转速、I 点, ▲ 弯掠动叶 n_2 转速、II 点, ▼ 弯掠动叶 n_3 转速、III 点; △ 径向 n_1 转速、I 点, ▽ 径向动叶 n_2 转速、II 点, * 径向动叶 n_3 转速、III 点)和图 3(图 3 中△▲ 弯掠动叶, ○● 径向动叶)所示。由实验结果对比可知, 在相同转速下弯掠动叶压头高于径向动叶 13.1%, 流量增加

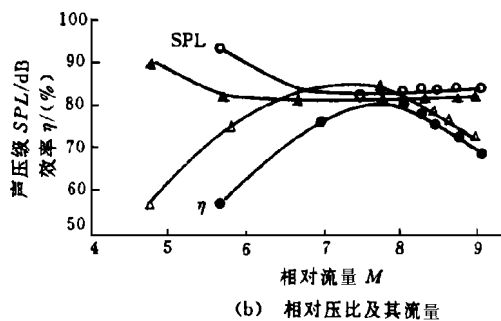
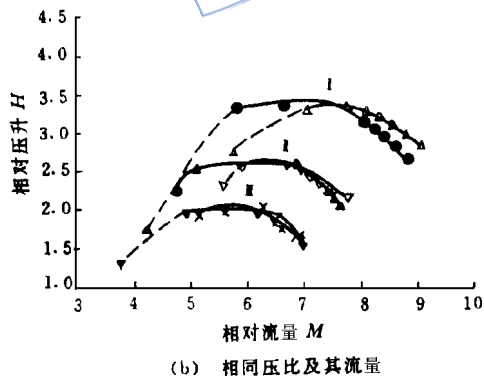
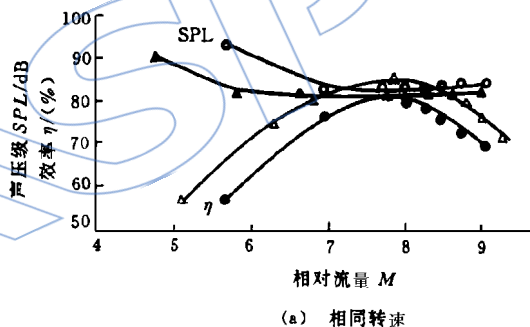
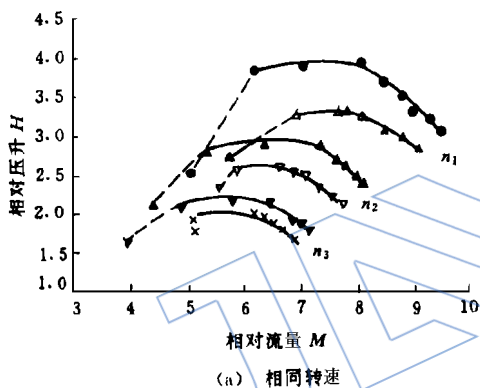


图 2 两组试验风机性能

图 3 气动声学性能和气动效率

5%, 噪声降低约 2 dB。在具有相同最高压比及其对应的流量下, 弯掠动叶和径向动叶的试验风机相比, 噪声降低约 3 dB。由以上性能曲线可知: 弯掠动叶风机低流量区稳定工况特性曲线明显较径向动叶风机的特性曲线平坦, 且稳定工作范围大幅度地扩大。表 1 是弯掠动叶和径向

动叶试验风机两组实验结果。其中 M_{st} 为风机的稳态非失速边界点流量。弯掠动叶风机的最高压比点和最高效率点有一段流量裕度。径向动叶风机最高压比点和最高效率点十分接近, 可认为是同一点。

表 1 弯掠动叶风机和径向动叶风机稳定工作范围的对比

	弯掠叶片 $(M_{1}-M_{st})/M_{st}$	径向叶片 $(M_{1}-M_{st})/M_{st}$
相同转速	$M_{\eta_{\max}}-30.3\%$ $M_{P_{\max}}-13.6\%$	$M_{\eta \cdot p}-33.2\%$
相同最高压比点参数	$M_{\eta \cdot p}-33.2\%$	$M_{\eta \cdot p}-11.2\%$

从表 1 得到以下结论: 相同转速下弯掠动叶和径向动叶试验风机相比, 稳定工作范围扩大 21.1%, 在保持相同最高压比及其对应的流量下, 弯掠动叶扩大稳定工作范围达 22.0%。这就说明弯掠动叶风机稳定工况运行的流量范围大, 稳定运行工况性能明显好于径向动叶风机, 其气动效率一直高于径向动叶风机, 变工况下的气动噪声值始终低于径向动叶风机。

表 2 为弯掠动叶和径向动叶轴流风机的动叶和静叶在稳定工况下最高效率点和稳态非失速边界点的攻角。

表 2 弯掠和径向动叶风机在相同转速 1441 r/min 下, 动叶和静叶攻角沿径向分布

径向截面半径 r/mm	动叶攻角 $\alpha_{bl}/(^{\circ})$		动叶攻角 $\alpha_{blD}/(^{\circ})$		风机静叶攻角 $\alpha_s/(^{\circ})$		风机静叶攻角 $\alpha_{sD}/(^{\circ})$	
	弯掠	径向	弯掠	径向	弯掠	径向	弯掠	径向
140.0	2.7	4.0	5.7	7.2	3.8	2.0	6.7	5.1
164.0	2.4	1.9	6.5	4.5	4.4	3.8	8.8	6.9
198.5	1.0	2.5	8.9	4.4	4.2	4.5	7.2	7.3
248.0	1.7	2.9	3.9	4.0	3.8	5.	6.8	8.1
289.0	3.8	4.5	3.6	4.3	2.0	3.7	5.0	6.5

注: α_{bl} 和 α_s 表示最高效率点处的攻角; α_{blD} 和 α_{sD} 表示稳定工况下非失速边界点处的攻角。

由表 2 中可知, 最高效率点处弯掠动叶各截面(除中径外)的攻角均小于径向动叶(相差 $-0.4^{\circ} \sim +1.5^{\circ}$), 而且两者分布呈叶顶和叶根两端偏大, 中部偏小的形状。两种风机的静叶攻角相差不大。弯掠动叶试验风机的静叶攻角在轮毂处偏大, 而径向动叶试验风机的静叶攻角在叶顶处偏大。在稳态非失速边界点处, 弯掠动叶风机的攻角明显大于径向动叶风机的攻角, 两相差可达 $-1.6^{\circ} \sim +4.3^{\circ}$; 但是最大攻角(不在同一半径上)相差不大, 为 1.7° 。这是弯掠动叶风机扩大稳定工作范围的最好证明。弯掠动叶攻角在叶中部达到最大值, 而径向动叶则在叶根部。两种风机的静叶攻角值相差不多, 且分布规律近似, 只不过弯掠动叶风机的最大静叶攻角在近轮毂处, 而径向动叶风机的最大静叶攻角在近叶顶处。

4 弯掠动叶扩大稳定工作范围的机理分析

弯掠动叶与径向动叶试验风机相比, 稳定工作范围扩大 21% 以上。在两组实验中, 两种试验风机的几何和气动参数不同点在于弯掠动叶弦长加长和弯掠动叶有一个弯掠角度, 这两方面因素影响了弯掠动叶的失速攻角, 扩大了弯掠动叶的稳定工作范围。弯掠动叶的失速攻角与径向动叶相比, 在中径部分较大(差值为 4.5°), 但是弯掠动叶的最大失速攻角在叶中部, 而径向动叶在叶根部(参见表 2)。

在实验范围内,弯掠动叶与径向动叶的弦长雷诺数都在自模化区域,因此可以忽略弦长雷诺数对气动性能的影响。暂时只讨论弦长加长的影响。对平板圆弧型动叶栅用 W_{enig} 曲线可以近似估计,弦长增加,其它几何和气动参数不变,进口攻角增加很小,失速攻角也增加很小。可以推断弦长增加(实验中弯掠动叶中径弦长加长 20.4%),稳定工作范围基本不变。弦长(稠度)对稳态非失速边界点和失速进入点的相对流量系数影响很小。根据文献[6]中实验,弦长(稠度)增加会使特性曲变陡,失速边界(攻角)提前或基本上不变,但气动性能恶化。实验中对两种稠度相差一倍的叶片进行实验,它们在几乎相同的流量系数下达到非失速边界点,进入失速点对应的流量系数相差也不大(稠度大的略小)。即增加一倍稠度时,失速边界点(攻角)提前或基本上不变。文献[7]中,对只有一级工作叶轮展弦比不同的多级轴流压气机进行试验结果来看,加大叶片弦长(缩小展弦比),弦长增加量为 33.3%,在均匀进气下,压气机的喘振边界影响不大。本实验中对进口三维流场进行测量,可认为是均匀进口流场^[5]。那么说明弦长增加(即稠度增加,展弦比减小)对稳定工作范围影响不大,可近似认为基本不变。

实验中弯掠动叶与径向动叶除了弦长不同外另一个差别是弯掠动叶的周向前弯角 θ_{sk} 是 8.3° 而径向动叶 $\theta_{sk} = 0^\circ$ 。从上述分析中可知,弦长增加对失速攻角影响量值很小,对稳定工作范围影响也很小,那么弯掠动叶失速攻角的增加量主要是由于弯掠角度的作用。这主要表现在:(1)弯掠动叶沿叶高叶型表面附面层显著减薄,尤其在上半叶高,致使弯掠动叶最大失速攻角大于 8.9° 才发生失速,比径向动叶最大失速攻角要大 1.7° 但是弯掠动叶的最大失速攻角在叶中部,而径向动叶在叶根部);(2)弯掠动叶改变了加工量沿径向分布规律(由轮毂向中部偏移)^[5],明显地降低了轮毂处过大的攻角值。这样充分利用了弯掠动叶中径以及上半叶高流动损失小的特点,从而扩大了弯掠动叶的稳定工作范围。

5 结 论

(1)弯掠动叶能够大幅度地扩大轴流风机的稳定工作范围,扩稳范围达 21% 以上。从两组实验结果和机理分析可以初步推断,动叶的弯掠特性是扩大稳定范围的主要机理。(2)弯掠动叶不仅具有低噪高效的优点,而且适当增加叶片弦长可以进一步提高它的气动—声学性能。选择合适弦长的弯掠动叶是控制轴流风机噪声的一种有效的工程方法。(3)将弯掠动叶具有扩大稳定工作范围的优点应用于轴流压气机中有待于进一步理论和实验研究。

参 考 文 献

- 1 Mikkelsen D C, Mitchell G A, Bober L J. Summary of Recent NASA Propeller Research. NASA TM - 83733, 1984
- 2 Breugelmans F A E. Influence of Incidence Angle on the Secondary Flow in a Compressor Cascade with Different Dihedral Distribution. ISABE 85- 7078, 1985
- 3 Wright T, Simmons W E. Blade Sweep for Low - Speed Axial Fans. ASME of Turbomachinery, 1990, 112(1)
- 4 钟芳源主编. 节能低噪声轴流离心风机理论、计算、设计、试验研究论文集. 机械工业出版社, 1994
- 5 蔡娜. 轴流式弯掠动叶的气动—声学性能与计算和设计方法的研究:[学位论文]. 上海交通大学博士学位论文, 1994
- 6 刘志伟, 蔡运金, 王淮生. 叶片排旋转失速性能的研究. 航空动力学报, 1988, 3(1)
- 7 高耀林, 蔡运金, 王惠林, 钟玉玲. B₁ 型低压压气机畸变试验与分析. 工程热物理学报, 1980, 1(1)

FULL- LENGTH PAPERS

NUMERICAL ANALYSIS OF THREE- DIMENSIONAL TURBULENT FLOW IN COMPRESSOR BLADE ROW BY IMPLICIT HIGH- RESOLUTION SCHEME

Yao Jixian, Liu Qianzhi, Zhou Xinhai

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT

It is found that a three or high order accurate high- resolution scheme may be more suitable for the correct prediction of turbulent flow field characteristics in the numerical analysis of three- dimensional turbulent shocked flow in transonic compressor blade row. The convergence of the three- dimensional turbulent flow calculation can be remarkably sped up by using the implicit LU- SGS algorithm, which is unconditionally stable. A detailed comparison between numerical solutions and experimental data indicates that their agreement is quite satisfactory.

Key Words Compressors High resolution Implicit methods Numerical simulation

AN EXPERIMENT ON ENLARGING STEADY WORKING RANGE OF SKEWED- SWEEPED ROTATING BLADES

Cai Na (431#, East China University of Technology, Shanghai 2000093)

Zhong Fangyuan (2nd Dept. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

ABSTRACT

An experimental investigation on enlarging the steady working range of skewed- swept rotating blades has been completed. Two types of fan were compared, a fan with conventional (radial) rotating blades and other with the skewed- swept blades. One comparative group was carried out on the conditions of same rotating speed and geometrical parameters but median chord of the skewed- swept rotating was increased about 20.4%, another was carried out at same peak pressure ratio and flow rate. The results of aerodynamic- aeroacoustic performance testing of the groups show not only a noise reduction about 2- 4 dB (A) overall, and an increase of aerodynamic efficiency for the skewed- swept blade, but also a great enlargement of steady working range (one group about 21%, other more than 22%). On the basis of the experimental results, the mechanism of the enlargement of steady working range for skewed- swept rotating blades was analyzed.

Key Words Blades Aerodynamic characteristics Acoustic properties Stability

NUMERICAL SIMULATION OF REACTING FLOWS IN NOZZLE

Wang Jianping and Fang Dingyou

(1st Dept. National University of Defence Technology, Changsha 410072)

ABSTRACT

The numerical simulation of chemically reacting flows in the nozzle is accomplished by a time- dependent technique using semiimplicit scheme. A second- order implicit difference approximation is applied to the time derivatives in governing equations and a noncentered difference approximation is explicitly employed to the spatial derivatives. The numerical instability caused by the stiffness of chemical relaxation equations is successfully