

圆弧斜槽处理机匣的实验研究

北京航空航天大学 张燕东** 陆亚钧

【摘要】 在一台轮毂比为 0.49 的低速单转子轴流风机上,开展了圆弧斜槽处理机匣的实验研究,以便了解它对风机失速裕度和工作效率的影响,并在此基础上,借助转子进、出口三维流场的测量结果,研究该处理机匣的扩稳机理。另外,通过实壁机匣、轴向斜槽处理机匣的性能及流场测量,对不同处理机匣的作用效果和作用方式进行研究。研究结果表明,圆弧斜槽处理机匣的最大扩稳能力能使该风机的失速裕度较之实壁机匣提高 27%,并且在峰值效率上有 1% 左右的提高。

主题词: 轴流通风机 处理 机匣 流场测量

分类号: V231.3

1 前 言

圆弧斜槽处理机匣作为一种较新的设计结构,被用于高性能轴流压气机的设计,并在扩稳和提高峰值效率方面获得良好收益,具有一定的应用潜力。然而,处理机匣在改善轴流压气机的性能上存在的不足以及处理机匣作用机理研究的滞后限制了它的应用。早期开展的处理机匣的扩稳研究工作,更多在于应用研究。Takata(1977)等人对轴向斜槽处理机匣的机理研究^[1],以及 Johnson(1987)^[2]等人理论研究。此外,庄平(1984)^[3]等人基于丝线技术开展的实验研究工作将有助于对带有气室的圆弧斜槽处理机匣的机理研究。

2 实验设备和测试仪表

选用一台具有较高性能的轴流风机,为使研究具有较强的针对性,实验采用了单转子工作方式,转子叶尖直径为 450 mm,叶尖切线速度为 66.9 m/s,轮毂比为 0.49。风机转子采用 C4 叶型,共有 7 个工作叶片,由一台功率为 2.2 kW 的三相交流电机驱动。该风机的早期实验已经表明,旋转失速通常发生在转子叶尖,因此适用于对处理机匣的实验研究。

性能实验由稳态测量设备完成,采用皮托管测量试验风筒出口附近不同径向位置上的动压,计算出风机的流量。转子出口的三维真实流场,采用斜度为 45° 的单斜丝探针测量技术,速度拟合精度可以达到 1 m/s,气流角拟合精度在 1° 以内。测量过程由一台实验专用的 Compaq 486 微机控制,通过内置的 EISA-A2000 数据采集器进行数据采集,并采用锁相采样平均技术对所采集的数据实时处理,以消除一些非周期性信号的干扰,提高测量精度。当采用 300 周的采样数据平均时,在相同工况下的不同时刻的采样结果具有很好的重复性,各采样点偏差的均方根平均值不大于 0.05。

1997 年 7 月收稿,1997 年 9 月收到修改稿。

** 男 32 岁 博士生 北京航空航天大学 407 教研室 100083

3 圆弧斜槽处理机匣的设计

圆弧斜槽处理机匣的结构形式如图 1 所示, 设计中, 选择 73 个处理槽, 斜槽与径向夹角为 55° , 槽宽为 12 mm, 从而使机匣的处理面积达到 60%, 处理槽的轴向宽度为 40 mm, 气室位于

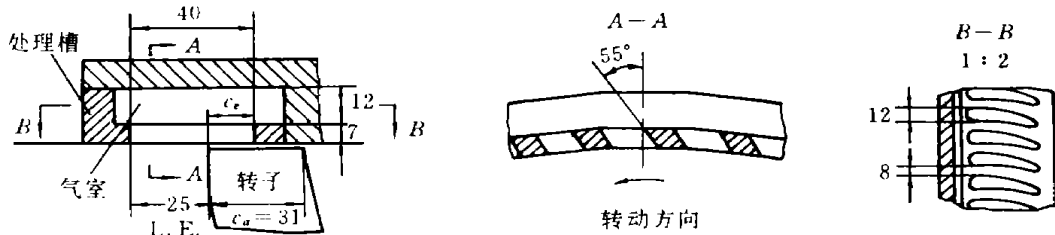


图 1 圆弧斜槽处理机匣结构简图

处理槽上方, 宽为 55 mm, 高为 12 mm。同时, 处理槽与转子相对位置如图 1 所示, $C_e/C_a=48.38\%$, 并从转子叶尖进口沿上游伸出 25 mm。根据过去对轴向斜槽处理机匣的研究经验, 适当的处理槽斜角、气室容积和与转子叶尖的相对位置, 可以控制叶尖的回流量, 使其在确保充分吹除转子叶尖进口附面层的前提下, 尽量减少回流造成的能量损失, 从而在回流损失不大于实壁机匣二次流损失的基础上, 确保峰值效率维持在原有水平上。

4 性能实验

轴流风机采用不同机匣结构的性能如图 2 所示, 分别给出了 3 种机匣结构的总压升系数 Ψ 和级效率 η 与流量系数 Φ 的关系曲线, 这里: $\Psi = \Delta P / 0.5 \rho U_m^2$, $\Phi = V_x / U_m$ 。其中, ΔP 表示风机的全压; ρ 为空气密度; U_m 表示转子叶中切线速度; V_x 代表转子出口气流速度的轴向分量。

通过图 2 的性能对比, 轴向斜槽处理机匣使风机的失速流量裕度提高 10.01%, 失速压升系数增加 2.04%, 但峰值效率损失 2.32%; 圆弧斜槽处理机匣使风机的失速裕度较之实壁机匣增加了 27%, 失速流量裕度提高 19.88%, 失速压升系数增加 6.83%, 并且风机的峰值效率提高了 0.98%。由此可见, 一度被认为具有最佳处理效果的轴向斜槽处理机匣, 在扩稳能力和减少转子叶尖流动损失上, 与圆弧斜槽处理机匣的处理效果相比, 都存在一定的差距。

应该指出的是, 以上的实验结果只是针对风机转速为 2900 r/min 取得的, 对于不同的工作转速, 同样结构的处理机匣不能取得同样令人满意的效果。在对实验风机的转速为 1850 r/min 和 2450 r/min 的性能实验结果进行分析时发现, 轴向斜槽处理机匣作用效果在低速情况下要优于圆弧斜槽处理机匣; 进一步的研究还发现, 两种不同结构处理机匣的峰值效率在低转速情况下均有所下降, 并且扩稳能力也没有达到转速为 2900 r/min 时的水平。

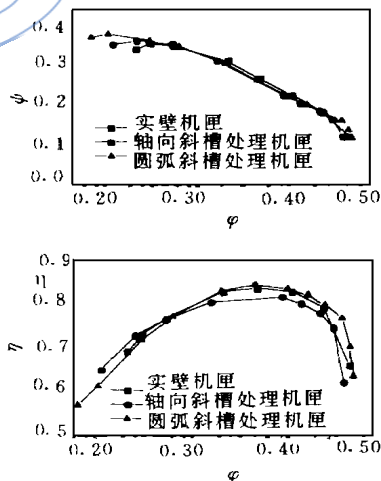


图 2 采用实壁机匣、轴向斜槽处理机匣及圆弧斜槽处理机匣的风机特性线

5 流场测量结果分析

采用锁相平均技术测量了 3 种不同机匣结构的风机转子进出口速度场以及转子叶尖间隙沿轴向的三维速度分布。进口流场的测量,将测量感头放置在距转子叶尖前缘 6 mm 的位置处。出口流场的测量,将测量感头放置在距转子叶尖尾缘 12 mm 的位置处。转子叶尖与处理机匣之间的间隙流动测量,将测量感头放置在距转子叶尖 1 mm 的位置处,并沿轴向间隔 7 mm 测量了从转子上游流场至弦长中部的五个轴向位置上的速度分布。

为进一步摸清通过转子的气流速度分布随流量的变化,分别在流量系数 $\Phi = 0.48$, $\Phi = 0.44$, $\Phi = 0.29$, $\Phi = 0.26$ 等 4 个节流位置进行了速度场的测量。由图 4 的性能实验结果, $\Phi = 0.48$ 时,风机的实验风筒出口处于全开状态; $\Phi = 0.44$ 时,是该风机的设计状态; $\Phi = 0.29$ 时,实壁机匣的风机接近失速状态; $\Phi = 0.26$ 时,处理机匣的风机接近失速状态。

5.1 攻角的变化

图 3 给出实壁机匣和圆弧斜槽处理机匣的气流攻角变化。性能研究中,已经得到这样的结论,即圆弧斜槽处理机匣可以使失速裕度发生较大幅度的改善,并且使峰值效率有进一步的提高。从图 3 可见, $\Phi = 0.44$ 的设计工况下,转子叶尖处,进气攻角由实壁机匣的 9.41° 下降到处理机匣的 4.95° ; 转子叶片的中部,进气攻角基本保持在 -1.84° ; 从转子叶片 60% 叶高到 85% 叶高的一段区域里,进气攻角则由实壁机匣的 -2.59° 变化到处理机匣的 0 附近。这表明,采用圆弧斜槽处理机匣后,气流在转子叶栅通道的流动得到改善,叶盆及叶背分离区减少,流动损失下降。这个结论与性能实验得到的其峰值效率提高 0.98% 以及在相当大的流量范围内维持效率不变的结论相吻合。

5.2 落后角的变化

落后角的变化直接反映了气流分离程度。大量实验表明,对于几何形状已定的叶栅,当气流攻角大于额定攻角时,攻角加大总会引起落后角增加。图 4 表示了在两种流量系数下不同机匣的落后角变化沿展向的分布。

在流量系数 $\Phi = 0.48$ 的节流工况下,实壁机匣与处理机匣的落后角沿展向的分布相互交错且差距不大。这说明在节流器处于大开度的情况下,处理机匣对转子出口流场的影响较小,在除尖部的整个展向位置上不存在严重的气流分离问题。转子叶尖位置存在实壁机匣引起的径向潜流和倒流,对处理机匣而言,则是由于吹除进口附面层的回流造成的影响,引起尖部的轴向速度减少,落后角增加。

在流量系数 $\Phi = 0.29$ 的近失速工况时,由于轴向速度降低,沿展向的气流攻角增加,导致

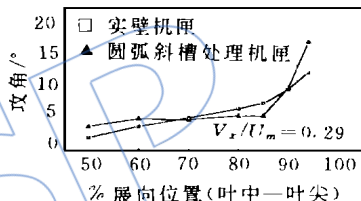
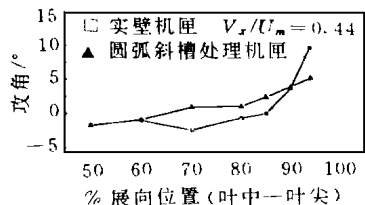


图 3 采用实壁机匣和圆弧斜槽处理机匣时, 气流攻角沿叶片展向的变化

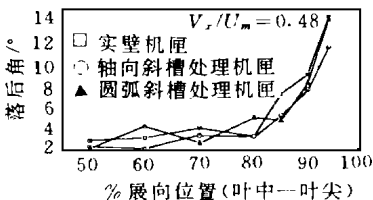
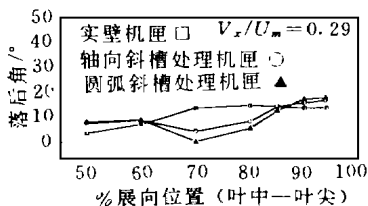


图 4 在两种节流工况下,采用不同机匣结构的落后角沿展向的分布

气流分离现象加剧。在此情况下,实壁机匣的落后角急剧增加,气流沿展向的分离较为严重,部分叶栅通道出现气流堵塞现象。采用处理机匣后,除转子叶尖由于回流影响导致较大的落后角,从 60% 到 85% 的展向区域内,落后角明显回落,这一方面说明,该区域的加功能力有所回升,加功分布趋于合理,另一方面说明分离现象有较大的减弱,流动处于稳定状态。进一步的观察可以看到,采用圆弧斜槽处理机匣的落后角较之采用轴向斜槽处理机匣有更大的回落,说明前者使吸力面的分离进一步减弱,流动损失降低,是一种更加合理的结构形式。

5.3 转子叶栅进出口的速度场分布

图 5 给出的采用不同机匣结构,进口平均气流速度 V 及其轴向速度 V_x 、径向速度 V_y 和切向速度 V_z 沿叶高的分布,图 6 给出了出口平均气流速度及其分量沿叶高的分布。从图 5 的进口速度分布规律发现,在流量系数 $\Phi = 0.44$ 的设计工况附近,进气速度受处理机匣的影响,较之实壁机匣,在叶尖区 5% 叶高的位置上出现速度下降现象,这个速度的降低可能由于处理槽出口径向流动造成。

在靠近失速点的节流工况下,实壁机匣进口平均速度沿径向分布出现较大变化,这种变化同样反映在该速度切向分量上。处理机匣在转子尖部区域的平均流场被完全改变,与其它速度分量相比,轴向速度分量的变化不大,切向速度分量 V_y 在 90% 叶高位置上增强,然后又被消弱。两种机匣结构的径向速度分量在转子叶尖 10% 的区域内都得到增强。

观察图 6 可以发现,在远离失速点的节流工况下,

几种机匣结构的出口气流速度沿展向的分布规律没有明显的不同。该图的右侧是在流量系数

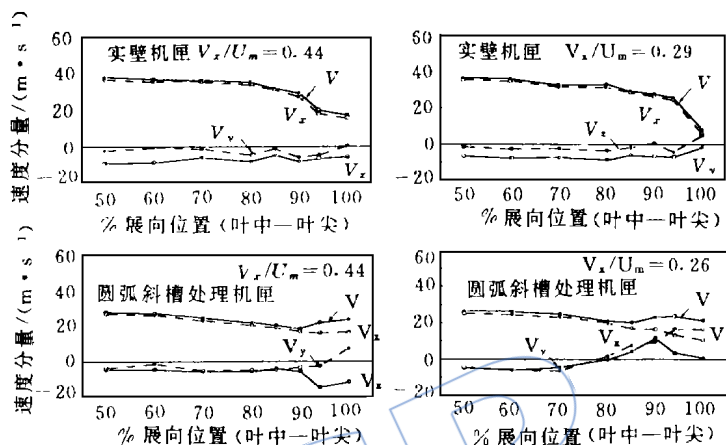


图 5 实壁机匣和圆弧斜槽处理机匣的进口平均气流速度沿展向的分布

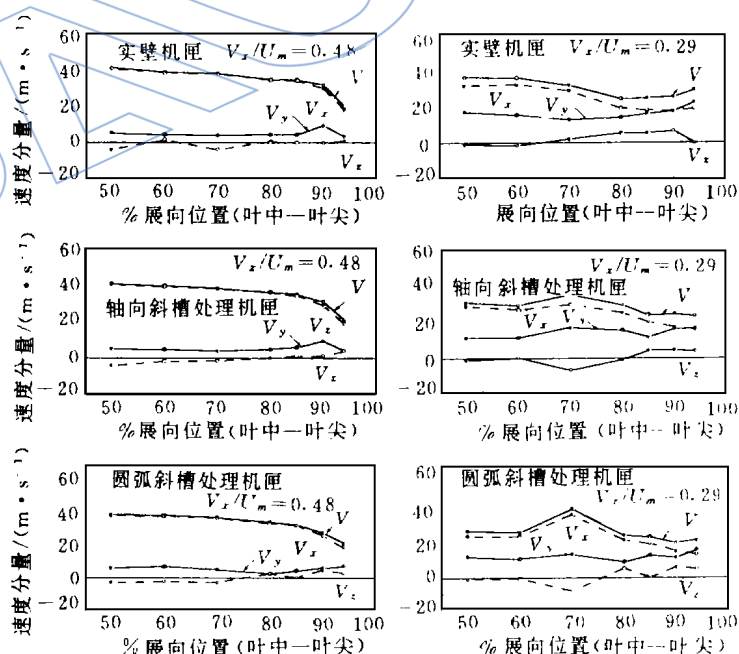


图 6 采用实壁机匣、轴向斜槽处理机匣和圆弧斜槽处理机匣的出口平均气流速度沿展向的分布

$\Phi = 0.29$ 的近失速工况下的速度分布情况, 与实壁机匣相比, 采用处理机匣后, 叶片中上部大约 70% 叶高位置速度值有所提升, 到叶尖又有一定程度下降。

5.4 转子叶尖沿轴向的速度分布

图 7 给出了圆弧斜槽处理机匣的尖部速度场的轴向分布规律。图中的横坐标从 0 到 1 是叶尖弦长在子午面的投影的单位长度。当 $\Phi = 0.44$ 时, 从转子前缘到叶栅通的中部, 径向速度增强, 叶尖速度及其轴向分量逐渐增大, 然后平缓地进入尾缘。当 $\Phi = 0.26$ 时, 进入近失速状态, 径向速度分量加强, 说明经处理槽流进气室的气流量加大, 受此影响, 叶尖速度及其轴向分量下降。

6 处理机匣作用机理的探讨与结论

在叶尖区采取机匣处理技术, 可以明显改善叶尖的流动状况, 从图 7 的叶尖速度分布可以看出, 在近失速点附近, 径向速度分量明显增强, 说明借助叶栅通道中后部的高压和叶片扫过处理槽的惯性力使气流在叶片通道中后部进入处理槽, 因而限制了从叶盆向叶背的串流, 有效地消弱了端涡和卷吸涡, 改善叶尖区的堵塞裕度。从图 6 尾迹流场分布, 可以看到流线的走向, 与子午流面上出口流动基本维持轴向流动的假设是一致的。经过处理槽并流入气室的气流, 依靠气室内沿轴向的逆压梯度, 产生一定的流, 处理机匣的回流与主流的掺混, 导致叶尖区进口速度的下降。同时, 在叶背低压区形成的喷流, 吹除了叶背上易引起分离的附面层, 使流动状况进一步改善, 延迟了旋转失速现象的发生。

根据以上研究工作可以得出下面的结论: (1) 通过不同几何设计的机匣结构的性能测试, 已经得到 27% 的失速裕度改善和 6.8% 的最大压升系数改善。证明圆弧斜槽处理机匣性能在一定条件下优于轴向斜槽处理机匣性能。(2) 在特定转速下, 合理的处理机匣结构设计不会对效率曲线产生明显影响, 在峰值效率上可能有一定的提高, 圆弧斜槽处理机匣的性能实验证实了这一点, 使峰值效率提高了 1%。(3) 处理机匣对叶尖流场具有一定影响, 在失速点附近可能导致压气机性能的较大下降, 在多级压气机中采用处理机匣技术扩稳时, 应该适当注意处理机匣在这方面的负面影响。(4) 从机理分析上可以看出, 处理机匣改善失速裕度不是通过减少气流攻角和增加上游区域的总压实现的, 而是由于进入处理槽的气流消除了端涡及卷吸涡的影响, 吹除了叶背附面层, 改善了叶尖区域的堵塞特性。

参 考 文 献

- 1 Takata H and Tsukuda Y. Stall Margin Improvement by Casing Treatment- its Mechanism and Effectiveness. Trans. ASME, Journal of Engineering for Power, 1977, 99
- 2 Johnson M C and Greitzer E M. Effect of Slotted Hub and Casing Treatments on Compressor Endwall Flow Fields. Trans. ASME, Journal of Turbomachinery, 1987, 109
- 3 Zhuan Ping, Lu Yajun. An Experiment Investigation on Mechanism of Stall Margin Improvement of Casing Treatment. ASME 85- GT- 102

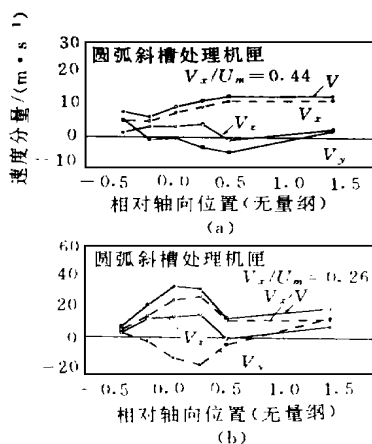


图 7 圆弧斜槽处理机匣的平均速度及其分量沿轴向的分布

developed in SIM PLEC algorithm with a layout of staggered grid in generalized curvilinear coordinates. This method is applied to three flow problems as test tasks. The comparison between the iteration performance of the Multi- Grid (MG) and Single- Grid (SG) methods in different grid sizes, Reynolds number and geometries demonstrates that the multigrid method improves convergence rate, reduces CPU time, and overcomes the deficiency of single - grid SIM PLEC algorithm in generalized curvilinear coordinates.

Key Words Incompressible flow Aerodynamic computation Curvilinear coordinates
Convergence

EFFECTS OF GEOMETRIC AND AERODYNAMIC PARAMETERS ON INTERACTION OF WAVES AND VORTEX ON PERFORATED PLATE

Tang Lingyun, Wang Tongqing, Sun Xiaofeng

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT An experimental investigation has been carried out on a kind of perforated liner with a bias flow through the apertures, according to Howe's vortex sound theory. The attention was focused on the effects of the aperture size, the cavity depth and the perforated plate thickness on the impedance of the liner. The algorithm of the reactance is modified for the liner with thick perforated plate, based on the analysis of experimental results. The perforated liners with sucking and blowing bias flow are compared and the same conclusions are drawn out.

Key Words Geometry Aerodynamic forces Sound reduction

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON ARC SKEWED SLOT CASING TREATMENT

Zhang Yandong and Lu Yajun

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT Different geometrical designs of arc skewed slot casing treatments have been investigated experimentally to research their influences on stall margin and operating efficiency. A study on the mechanism of the casing treatment was carried out on the basis of three dimension flow field measurement. The comparison of different casing treatments revealed that the best configuration of an arc skewed slot casing treatment improved the stall margin by 27%, and the peak efficiency by 1%. Compared with an axial skewed slot casing treatment, the arc skewed one not only made an improvement in stall margin, but also ended the history that the casing treatment had to pay a loss of efficiency in order to improve stall margin.

Key Words Axial fan Treatment Casing Flow measurement