

处理机匣在单级跨声速风扇上的实验研究^{*}

李玲¹, 于清², 陆亚钧²

(1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084; 2. 北京航空航天大学 动力系, 北京 100074)

摘要: 为新研制的单级跨声速风扇设计了3种不同形式的处理机匣, 圆弧斜槽处理机匣、轴向斜槽处理机匣和反旋涡式处理机匣, 并在该单级跨声速风扇上进行了实验研究。采用新建立的试车台数据实时采集与监控系统, 测量了该单级跨声速风扇的总性能和采用处理机匣后风扇的总性能、基元级性能。通过分析表明圆弧斜槽处理机匣使风扇的稳定工作裕度获得较大的改善, 并且与实壁参考机匣相比, 提高了峰值效率, 其作用效果明显地优于其他形式的处理机匣。

关键词: 涡轮风扇发动机; 风扇; 处理机匣; 旋转失速; 安全系数

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)03-0049-04

Experimental research of casing treatment on single stage transonic fan

LI Ling¹, YU Qing², LU Ya-jun²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua Univ., Beijing 100074, China;

2. Department of Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aerodynamics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Three types of different casing treatment were designed for new-developed single stage transonic fan. They are arc curved skewed slot casing treatment, axial skewed slot casing treatment and counter-vortex slot casing treatment. By using real-time data gathering and test system of the aero-engine test bed, the detail measurement of single stage transonic fan performance with and without different casing treatments were made. Research results show that a further improvement is obtained with arc skewed slot than other casing treatments in stall margin and peak efficiency.

Key words: Turbofan engine; Fan; Casing treatment; Rotating stall; Safety factor

1 引言

早在60年代, 人们开始对轴流压气机机匣处理技术进行研究, 设计了多种结构形式的处理机匣。70~80年代, 人们认识到机匣处理在扩大压气机/风扇裕度的同时降低了压气机的效率^[1~3], 进入90年代以来, 随着新型处理机匣结构的出现, 处理机匣已不仅仅单纯地提高压气机/风扇的失速裕度, 而且对效率影响不大^[4,5]。本文针对新研制的单级跨声速风扇的扩稳要求, 分别设计了3种不同形式的处理机匣, 反旋涡式处理机匣根据叶片叶尖处的间隙涡的旋转

方向, 在机匣壁面上安装凹凸面, 使其在曲率上有明显的变化, 能够产生与已知旋涡反号涡量, 与叶尖处的间隙涡直接抵消, 从而改善压气机叶尖处的流动情况。轴向斜槽处理机匣是一种传统的处理形式, 在抑制旋转失速方面有着特殊效果, 在设计状态下能够提高压气机失速裕度20%左右, 但效率有所下降1%~2%。圆弧斜槽处理机匣是一种新型的处理形式, 它具有大幅度扩大压气机/风扇的稳定工作范围的同时对效率影响不大的特点, 目前在某些机种中正式被采用, 获得了令人满意的结果。本文对3种形式的处理

* 收稿日期: 1999-06-03; 修订日期: 1999-09-06。

作者简介: 李玲(1970—), 女, 博士后, 现主要从事水力学与河流动力学方面的研究。

机匣进行实验研究,探讨各自流动机理及其对风扇总性能和基元级性能的影响。

2 处理机匣的结构参数

单级跨声速风扇的性能参数:在设计转速为 21.5 kr/min 的前提下,设计流量为 25 kg/s,级设计压比为 2.203,级设计绝热效率为 0.868。为了保证最大限度地扩大风扇稳定工作范围的同时风扇的效率不下降,本文为其设计了 3 种形式的处理机匣,如图 1~3 所示。为了便于在实验过程中调整处理机匣的几个配置,设计了过渡机匣结构,通过与前后机匣的搭配构成完整的外机匣结构。处理槽加工在可拆卸的金属环上,可以方便地加工和安装。处理机匣气室加工在过渡机匣上,通过过渡机匣与处理环的配合来实现。

圆弧斜槽处理机匣的圆弧斜槽数为 96;斜槽肋厚 5 mm;处理槽长度的轴向投影 56 mm;处理槽深 10 mm;处理槽斜角 55°;敞开比为 0.532;处理槽与转子叶尖搭接量 28 mm。

轴向斜槽处理机匣的轴向斜槽数为 120;斜槽肋厚 4 mm;处理槽长度的轴向投影 51 mm;处理槽深 10 mm;处理槽斜角 60°;敞开比为 0.502 5;处理槽与转子叶尖搭接量 28 mm。

反旋涡式处理机匣的反旋涡槽数为 144;处理槽宽度 9.66 mm;处理槽长度的轴向投影 49 mm;处理槽深 1.8 mm;处理槽位于转子叶尖正上方,距离转子叶片前缘 10 mm。

3 实验结果与分析

3.1 处理机匣结构对单级跨声风扇总性能的影响

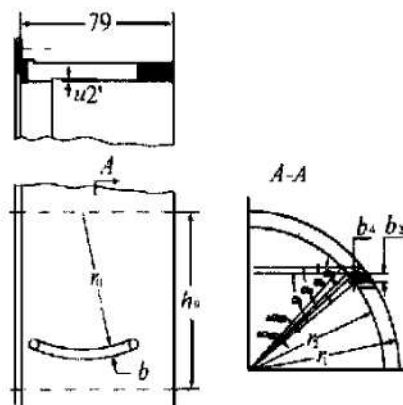


Fig. 1 Arc curved skewed slot casing treatment

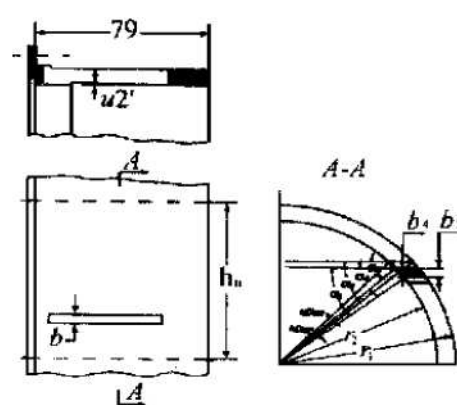


Fig. 2 Axial skewed slot casing treatment

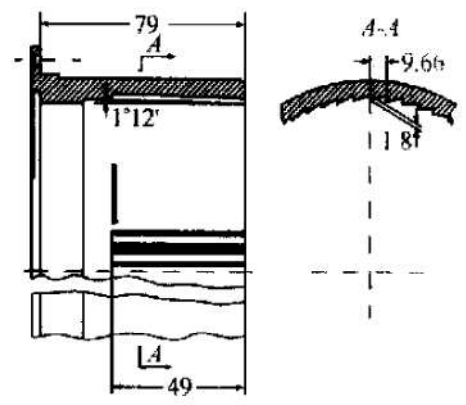


Fig. 3 Counter-vortex slot casing treatment

图 4、5 示出了 3 种机匣与实壁参考机匣结构的总性能曲线。从图上可以看到,采用不同结构形式的处理机匣后,不同转速的特性变化趋势均使失速边界线推向更低的流量处。在大流量点处,各种机匣结构的压气机特性线重叠良好;在失速点附近,所有机匣处理结构均使压气机特性线向左延伸,而且使压气机的压比有所提高,这正是扩稳效果的体现。圆弧斜槽处理机匣的扩稳效果更加明显,压气机特性线向左延伸的同时,压气机的压比有了较大的提高,这充分体现出这种处理机匣扩稳的特点和改善近失速工况下的流动状态。反旋涡式处理机匣结构的总增压比在实壁参考机匣稳定工作范围内基本上能保持实壁参考机匣的水平,在实壁参考机匣失稳后的区域内,反旋涡式处理机匣的总增压比曲线基本上可视为实壁参考机匣右支稳定特性线的自然延伸。

从总体上来讲,在高转速下,采用处理机匣后压气机峰值效率与采用实壁参考机匣的压气机峰值效率基本持平。圆弧斜槽处理机匣可使压气机峰值效率高于实壁参考机匣的压气机的峰值效率。在低转速下,采用处理机匣结构后,压气机峰值效率比实壁参考机匣有明显改进。

3.2 处理机匣对风扇基元级性能的影响

从图 6 可以看出在最大流量点工况下,3 种机匣的转子出口气流轴向速度沿展向的分布规律没有明显的不同,在实壁机匣的近失速点处,实壁机匣的转子出口叶尖区轴向速度很小,说明叶尖区产生阻塞,因此在叶尖区产生失速。经机匣处理后,叶尖区的出口轴向速度大于实壁机匣的出口轴向速度,并且沿径向也比实壁机匣均匀。即:机匣处理改善了叶尖区的流通能力,从而延迟了旋转失速的发生。

从图 7 可以看出, 实壁机匣与处理机匣的气流落后角沿展向的分布差距不大 (尤其在叶尖区), 这说明在大流量情况下, 处理机匣对转子出口流场的影响较小。在实壁机匣的近失速工况处, 实壁机匣的落后角急剧增加, 采用机匣处理后, 减少气流落后角, 这

说明气流分离现象减弱, 流动较为稳定, 这也是机匣处理推迟分离, 延迟失速的原因。同时在展长范围内, 圆弧斜槽处理机匣的落后角比轴向斜槽处理机匣的落后角更小, 说明前者使叶尖堵塞进一步减弱, 叶背分离减少, 流动损失降低, 其扩稳效果更理想。

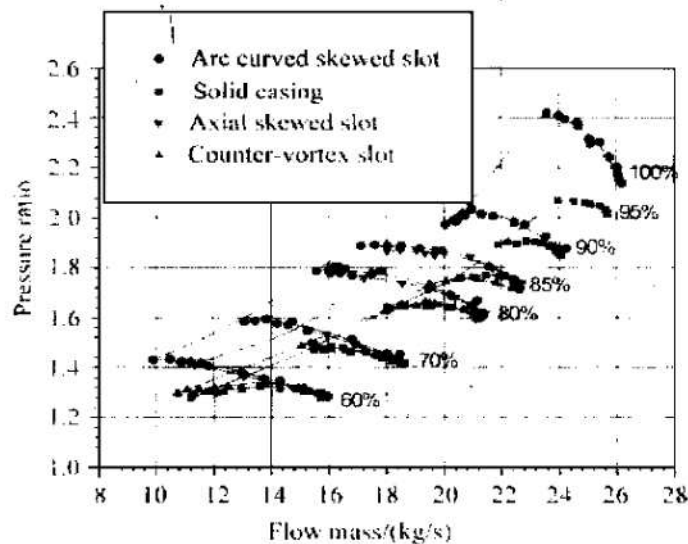


Fig. 4 flow mass-pressure ratio

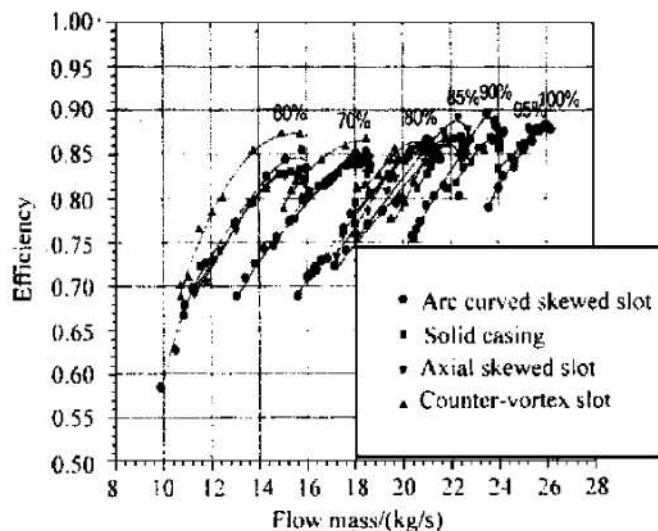


Fig. 5 Flow mass efficiency

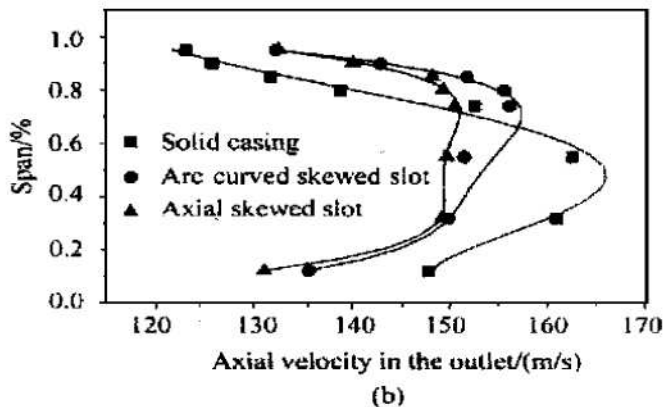
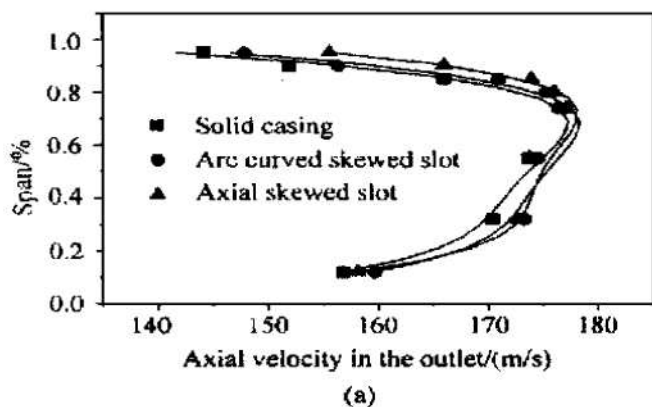


Fig. 6 Axial velocity distribution in the outlet of rotor at 80% designed rotating speed

(a) Maximum of flow mass

(b) Stall point of solid casing

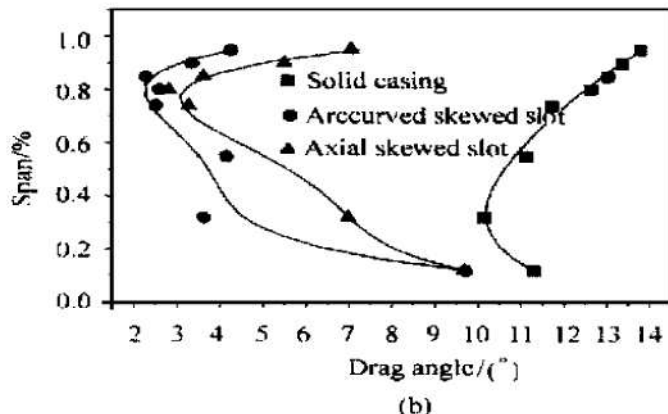
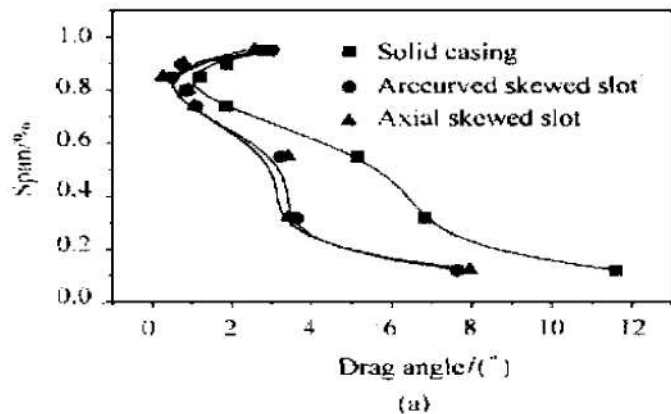


Fig. 7 Drag angle distribution in the outlet of rotor at 80% designed rotating speed

(a) Maximum of flow mass

(b) Stall point of solid casing

3.3 加功量分析

图 8 给出了 60% 和 80% 转速, 实壁机匣近失速工况下两种机匣转子出口气流绝对速度周向分量沿径向的变化趋势。因进口无预旋, 故 C_{2u}/U 沿径向的变化就代表了功沿叶高的变化, 流量节流到实壁机匣

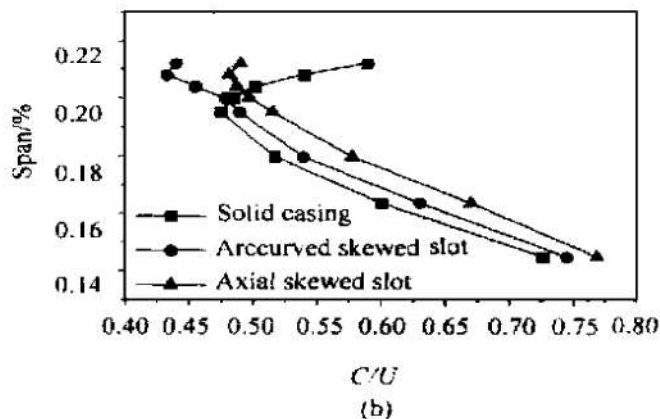
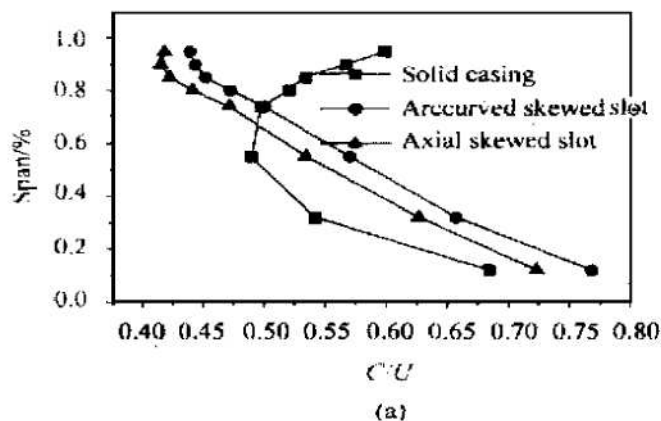


Fig. 8 Distribution of power

(a) At 60% designed rotating speed (b) At 80% designed rotating speed

通过以上分析可以看出, 装有处理机匣后, 转子基元参数受处理机匣的影响而重新分布, 尤以对 70%~80% 叶高处的基元参数影响最大, 同时由于处理机匣改善了叶尖的流动状况, 使得风扇的失速裕度也得以改进。

4 结 论

(1) 圆弧斜槽处理机匣是一种新型的处理机匣形式, 对其还未做过深入细致的研究, 特别是在高速压气机台上。从实验研究的风扇总性能对比可以看出, 圆弧斜槽处理机匣具有最佳的扩稳效果, 它使得风扇的失速裕度提高 20% 以上, 同时峰值效率提高 1%~2%。

(2) 通过对比不同机匣结构的转子出口流动参数的变化规律, 分析旋转失速产生的原因和处理机匣延迟失速发生的机理, 指出了圆弧斜槽处理机匣能够显著地提高叶尖区气流的流通能力, 增加了叶尖区出口气流轴向速度, 减少气流的落后角。

(3) 在圆弧斜槽处理机匣的作用下, 气流周期性地部分 (非全部) 进入处理槽内, 从进气位置处以切向速度分量为主的流动逐渐折转到喷流位置上以轴向速度分量为主的流动。这种流动可以使气室内的回流吹除叶片进口环壁附面层的效率提高。在与轴向斜

失速点附近, 处理机匣结构叶尖区基元级的加功量低于实壁参考机匣, 而叶中和叶根区基元级的加功量高于实壁参考机匣, 这说明了经处理机匣作用以后, 通过卷吸流动改善了叶中和叶根区的流动, 使叶中和叶根能充分发挥其加功能力。

槽处理机匣具有相同的处理槽几何结构的条件下, 可更好地改善叶尖区的流动环境, 减少流动损失, 进一步提高风扇的稳定工作裕度, 并使槽内流动损失减少。

参 考 文 献

- [1] Osborn Walter M, Lenis George W Jr, Heidelberg Laurence J. Effect of several porous casing treatments on stall limit and on overall performance of an axial-flow compressor rotor [R]. NASA TN D-6537, 1971.
- [2] Prince D C J, Wisler D C, Hilvers D E. A study of casing treatment stall margin improvement phenomena [R]. ASME 75-GT-60.
- [3] Johnson M C, Greitzer E M. Effects of slotted hub and casing treatments on compressor endwall flow fields [R]. ASME 86-GT-247.
- [4] Kang C S, McKenzie A B, Elder R L. Recessed casing treatment effects on fan performance and flow field [R]. ASME 95-GT-197.
- [5] Gornell S E, Davis M W. Application of a dynamic compression system model to a low aspect ratio fan: casing treatment and distortion [R]. AIAA 93-1871.

(责任编辑: 史亚红)