

机匣处理对轴流压气机失速恢复性的影响^{*}

吴艳辉, 楚武利, 刘志伟

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘 要: 针对一种扩稳增效的新型处理机匣, 实验研究了亚声速单级轴流压气机机匣处理前后的过失速性能的变化。借助于压缩系统的一维逐级可压流的数学模型, 发展了一种可用于带机匣处理的压气机失速可恢复性预测程序。数值模拟的结果很好地展示了机匣处理前后失速恢复性地变化, 并解释了机匣处理后单级压气机失速恢复性改善的原因。

关键词: 轴流式压缩机; 机匣处理⁺; 失速特性; 数值仿真

中图分类号: V235.113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2004) 03-0215-04

Research on stalling recoverability of an axial-flow compressor with treated casing

WU Yan-hui, CHU Wu-li, LIU Zhi-wei

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: Post-stall performance of a subsonic one-stage compressor with and without a new treated casing was investigated experimentally. The aerodynamic parameters of pre-stall and post-stall and recovery forms from stalled flow were compared. Using an unsteady stage-by-stage compression system modeling technique, the numerical simulation of compressor performance recovery from rotating stall with and without the treated casing was accomplished. The calculation results verified that the method of casing-treated could improve the stalling recoverability of the compressor.

Key words: Axial flow compressor; Treated casing⁺; Stalling characteristic; Numerical simulation

1 引 言

自从20世纪70年代美国F-100涡扇发动机发生了“不可恢复性失速”(Nonrecoverable stall)现象以来,人们对压气机的过失速性能、失速恢复性以及失速控制技术的研究从广度和深度上都出现了质的飞跃^[1~9]。文献[1]中发展了一种基于压气机级特性的一维逐级模型;文献[2]中应用该模型研究了机匣处理和进气畸变对低展弦比风扇过失速性能的影响。文献[3]利用该模型研究了一高速、高压比、十级轴流压气机失速恢复性的影响因素,并得到了实验验证。

在对一新型的扩稳增效型机匣处理的实验研究中发现,它不仅在不牺牲效率的前提下提高了压气机

的稳定工作裕度,而且也改变了压气机的过失速性能及失速解除性质。为了更系统地理解机匣处理的作用和轴流压气机失速可恢复性的变化规律,本文实验研究了带“折线倾斜缝式”处理机匣的单级压气机的稳态和过失速特性,并且发展了文献[2]中Davis M W所建立的预测压气机过失速性能模型,把它用于分析轴流压缩系统的失速恢复性。以实验资料为基础,用该程序数值研究了“折线倾斜缝式”机匣处理前后单级轴流压气机过失速性能及失速可恢复性,数值模拟的结果很好地展示了机匣处理前后单级压气机失速可恢复性的变化,并解释了机匣处理前后压气机失速恢复性改善的原因。

^{*} 收稿日期: 2003-07-10; 修订日期: 2003-11-28。

基金项目: 国家自然科学基金(50176042); 航空基金(00c53072)。

作者简介: 吴艳辉(1972—),女,博士生,研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: wu_yan_hui704@hotmail.com

2 实验结果分析

实验在西北工业大学单级轴流压气机实验台上完成。实验台主要由调速电机、增速器、实验段、排气段和移动式锥体节气装置组成。单级轴流压气机主要参数为: 轮毂比 0.61, 尖部直径 0.298m, 设计转速 15200r/min, 设计压比 1.25。对稳态性能测量采用的测试系统由探针、扫描阀、DAS-20 数据采集板和 586 微机组成, 其中压力测量系统经过系统校正。测总性能时, 用扭力测功仪进行测功。动态测试系统由动态压力传感器、PRESTON 高精度阻隔放大器、(示波器) A/D 转换器、586 微机组成。

所采用的“折线倾斜缝式”处理机匣的结构如图 1 所示, 它兼容了轴向缝、叶片角向缝及径向缝三类缝式机匣的优点。依照进口气流方向确定前段缝的走向及转子叶片叶顶基元的安装角确定后段缝的走向, 希望缝齿的走向及间距能够引导转子叶片尖部气流的走向, 改变转子叶片尖部基元叶片的气流冲角, 推迟叶背气流的分离, 延缓失速, 减少端部的流动损失, 达到扩稳增效的目的。处理机匣的几何尺寸为: 轴向尺寸 18mm, 缝宽/齿宽 2, 轴向叠合量 50%, 径向倾角 45°, 轴向倾角 37°10′, 背腔容积 280.8cm³。

机匣处理前后, 单级压气机失速边界点和退出失速点(分别用下标 cr 和 out 表示) 的流量系数 Φ , 压升系数 Ψ , 效率 η , 失速团相对传播速度 V_{pa} 及失速团数目 n 列于表 1 中。退出失速点是指打开节气门

过程中单级压气机回到稳态工作范围的点。

实验表明: (1) 机匣处理后, 转子的基元参数受处理机匣的影响而重新分布(如图 2)。不同于以往的处理机匣, 整个叶高的基元叶片性能都受到处理机匣的影响, 一方面它改善了叶尖部的流动状况, 使压气机的稳定工作裕度得以改进, 另一方面它改进了叶高不同流管的流量分配, 使流动损失小的叶中部流量加大, 使失速边界点和进入失速点的效率也得以改进; (2) 机匣处理前后(见表 2), 压气机全叶高的失速流场结构基本不变, 传播速度略有降低。“折线倾斜缝式”机匣处理, 虽然推迟了失速的发生, 但一旦失速发生后, 其流场结构并未有大的改变; (3) 机匣处理后(见表 2 和图 3), 不仅失速发生前的压升系数有所提高, 失速发生后的压升系数也明显提高, 即失速后的性能得以改善, 并使压气机的失速程度趋于平缓, 失速滞后区面积减小, 更利于改善压缩系统的失速恢复性; (4) 扩稳增效型的“折线倾斜缝式”处理机匣, 使单级压气机失速解除形式发生了变化。实壁机匣情况下, 打开节气门或降低转速时, 压气机退出旋转失速状态的过程存在着明显的滞后性; 而装有处理机匣后压气机失速解除状况得到了改善, 实验过程中失速的解除过程与喘振类似, 轻微地打开节气门压气机便退出失速, 即失速解除过程几乎没有滞后性。

3 轴流压缩系统失速可恢复性的数值模拟

该实验台可以认为是由进口管道、压气机、排气管道及节气门所组成的压缩系统。首先, 对它取一总控制体, 则作用在控制体上的力为连续分布的轴向力 F (它包括叶片的作用力和壁面的作用力), 控制体与外界的能量交换为连续分布的机械功 SW 和热量 Q , 控制体与外界的质量交换(不包括进出口截面)用一

Table 1 Comparison of poststall performance between solid and slopped slotted treated casing

Configuration	Φ_{cr}	Ψ_{cr}	η_{cr}	Φ_{out}	Ψ_{out}	η_{out}	V_{pa}	n
Solid	0.5175	0.9316	0.8720	0.5546	0.929	0.9034	0.62	2
Sloped slot	0.4862	0.9320	0.8764	0.5438	0.937	0.9158	0.61	2

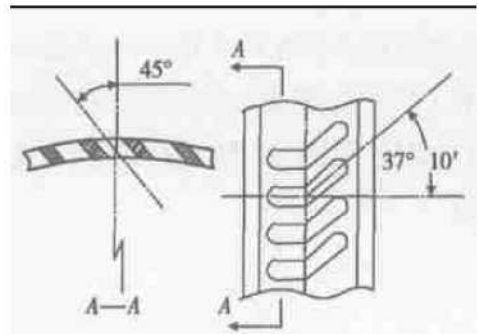


Fig. 1 General layout of sloped slotted treated casing

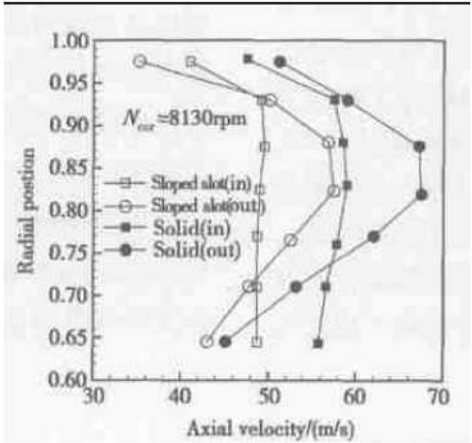


Fig. 2 Radial distribution of rotor inlet and outlet axial velocity stall point

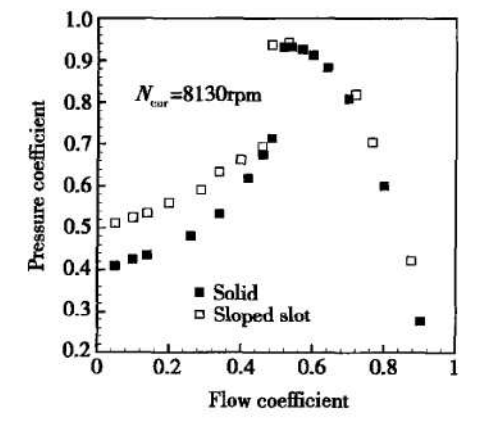


Fig. 3 Pre and post stall stage characteristics for solid and sloped slotted treated casing

连续分布的流量 m 来表示。

3.1 控制方程

将压缩系统根据需要划分为若干单元控制体(对压气机通常取压气机的一级),见图 4,控制体的轴向尺寸由所需的响应频率来确定。将质量守恒定律、动量方程及能量守恒定律应用于单元控制体,可得:

连续方程:

$$\partial(\rho A)/\partial t = -\partial W/\partial x - m \quad (1)$$

动量方程:

$$\partial W/\partial t = -\partial(IMP)/\partial x + F, IMP = WU + P_s A \quad (2)$$

能量方程:

$$\partial(EA)/\partial t = -\partial H/\partial x + SW, E = \rho(e + V^2/2) \quad (3)$$

压气机作用力的动态修正方程:

$$\tau(dF/dt) + F = F_{ss} \quad (4)$$

压气机轴功的动态修正方程:

$$\tau(d(SW)/dt) + SW = (SW)_{ss} \quad (5)$$

式中 W 为流量, A 为面积, m 为放气量, U 为轴向速度, P_s 为静压, F 为级作用力, SW 为轴功, H 为总焓, E 为单位体积内的总能量, τ 为时间滞后常数, F_{ss} 和 $(SW)_{ss}$ 分别为稳态作用力和轴功。

描述压气机过失速性能及失速恢复性的控制方程(1~3)是双曲型的非线性偏微分方程组,本文应用 MacCormack 二阶显示格式来求解。显式 MacCormack 格式的稳定性条件为 $CFL < 1$,由此推出本文所研究的单级压气机最大允许时间步长为 $\Delta t_{max} = 2.398 \times 10^{-4}$ s,在计算中时间步长取为 10^{-4} s。动态修正方程(4~5)用四阶 Runge-Kutta 方法来求解。边界条件的处理方法同文献[2],即在处理压气机及其系统的进出口边界条件时应用特征线方法。

压气机特性是求解压气机过失速性能和失速恢复性的基础。模型中的压气机特性是指压气机工作于稳定工作区域、失速区域和反流工作区域的环面平均性能。对于该单级轴流压气机实验台,文献[8]中

录取了实壁机匣下上述 3 种状态下的环面平均性能。

3.2 数值模拟结果及分析

针对“折线倾斜缝式”处理机匣和标准实壁机匣两种情况,利用上述方法数值模拟了单级压气的过失速性能和失速可恢复性。图 5,6 中表示的是该压气机在相对转速 0.535 时,关小节气门使压气机进入过失速状态,然后打开节气门压缩系统所展现出的过失速性能和失速可恢复性。从图 5 中可以看出,受节流扰动后压气机的流量和压升都开始减小,并且随着时间的增长而出现振荡,频率为 4Hz 左右,振荡衰减很快,在经历了 3 次较大的振荡后,最终稳定于一定值 ($\Phi = 0.36$, $\Psi = 0.552$),稳定的时间约为 1s,可见压气机进入了突变型旋转失速状态,此时节气门的关度为 10%。打开节气门的过程中,压气机的流量系数和压升系数迅速回升,经过一个小幅的波动后便稳定于一个新值 ($\Phi = 0.56$, $\Psi = 0.935$),此时流量系数的值大于失速点的值,压升系数略低于失速点的水平。图 6 示出了压气机的动态工作点在压气机特性图上的变化,当节气门的打开到一定的程度(约为初始面积的 22.5%),压气机的工作点回到了稳态特性线上,也就是说单级压气机退出了旋转失速状态。退出失速时节气门的开度大于进入失速时节气门的关度,说明实壁机匣情况下旋转失速的解除过程具有明显的滞后性。

图 7,8 给出了带“折线倾斜缝式”处理机匣的该单级压气机,相对转速 0.535 时,关小节气门使压气机进入过失速状态,然后打开节气门压缩系统所展现出的过失速性能和失速可恢复性。图 7 中曲线变化表明,带机匣处理的压气机在进入失速区后,流量系数和压升系数并不能稳定于一个定值,而是处于一种较小幅度的振荡状态。振荡的频率为 5Hz,幅值比喘振时的幅值小得多,说明此时压缩系统处于喘振和旋转失速两种不稳定型式的混合状态(节气门的关度为

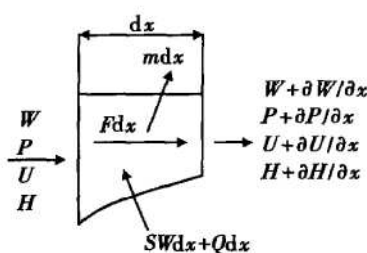


Fig. 4 Elemental control volume

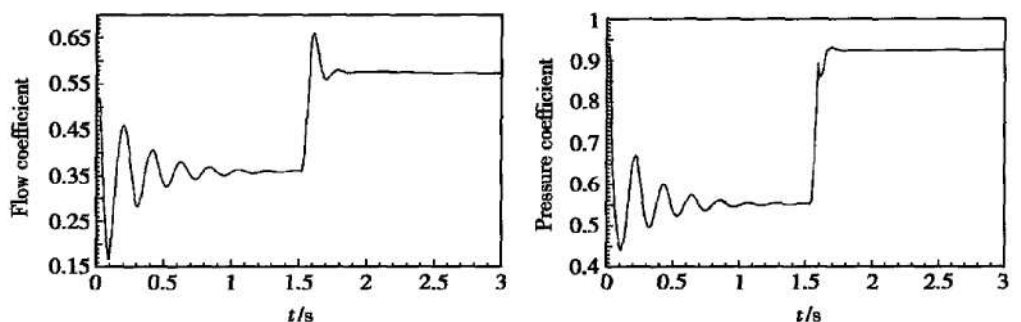


Fig. 5 Flow and pressure oscillations of compression system with solid casing during recovery from post stall state

10%)。随着节气门的打开,压气机的流量系数和压升系数振荡到最高点后,继续回升并很快稳定下来,此时的流量系数大于失速点的值,压升系数略低于失速时的水平。图 8 示出了特性图上压气机动态工作点的变化过程,可以看出打开节气门后,压气机的动态工作点沿着振荡循环线运动,达到振荡最高点后继续回升,回到压气机稳态特性线便稳定下来,可见压缩系统的失速状态得到了解除。退出失速时节气门的开度与进入失速时节气门的关度几乎相等(12%),说明带处理机匣后单级压气机的失速解除过程几乎

没有滞后性,即压气机的失速恢复性得到了改善。

通过对实验结果和数值模拟结果的分析可知,压气机经过“折线倾斜缝式”机匣处理后的失速形式已有所不同,介于传统的旋转失速和喘振流动之间,即实验过程中见不到喘振现象,但又不象旋转失速那样能稳定地工作在失速区。从机匣处理前后转子流量系数和压升系数的变化可以看出,经过机匣处理后二者变化比较小,其失速损失程度也比较小,即较实壁机匣时的失速程度减弱,并且经过“折线倾斜缝式”机匣处理后压气机的失速恢复性得到了改善。

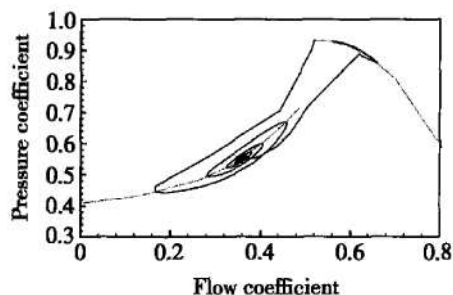


Fig. 6 Transient compression system response with solid casing

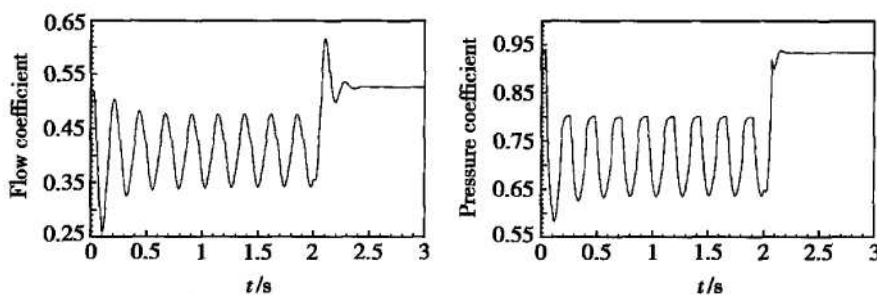


Fig. 7 Flow and pressure oscillations of compression system with sloped slotted treated casing during recovery from post-stall state

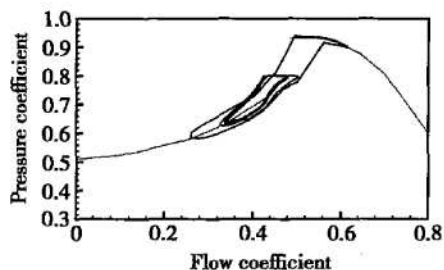


Fig. 8 Transient compression system response with sloped slotted treated casing

4 结 论

(1)“折线倾斜缝式”处理机匣,不仅改善了压气机预失速性能,而且也改善了压气机的过失速性能,为压缩系统的失速恢复性的改善奠定了基础。

(2)在文献[2]的基础上所建立的一维逐级可压流数值模拟程序,成功地进行了单级压气机机匣处理前后失速恢复性的数值模拟,计算结果很好地展示了机匣处理前后压气机过失速性能和失速恢复性的差别,并能解释“折线倾斜缝式”机匣处理后压气机失速恢复性改善的原因。

参考文献:

[1] Davis M W, O'Brien W F. A stage-by-stage post-stall com-

pression system modeling technique[R]. AIAA 87-184.

- [2] Gorrell 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, 1993.
- [3] Boyer K, O'Brien W. Model predictions for improved recoverability of a multistage axial-flow compressor[R]. AIAA 89-2687, 1989.
- [4] Simon Y, Richard M. Simultaneous stabilization of stall and surge via axisymmetric air injection[R]. AIAA 99-2130.
- [5] Sankar L N, Prasad J V R, Neumeier Y. Recent progress in compressor stall and surge control[R]. AIAA 99-3124, 1999.
- [6] Saxer-Felici H M, Saxer A P, Inderbitzin A, et al. Prediction and measurement of rotating stall cells in axial compressor[J]. *Transactions ASME Journal of Turbomachinery*, 1999.
- [7] Gregory H. Large scale flow phenomena in axial flow compressors: Modeling, analysis, and control with air injectors[D]. *Ph.D. Thesis, University of California*, 2001.
- [8] 李 军. 轴流压气机过失速性能及失速主动控制研究[D]. 西安:西北工业大学, 1992.
- [9] 楚武利. 轴流压气机扩稳增效的新型机匣处理研究[D]. 西安:西北工业大学, 1999.

(编辑:梅 瑛)