

文章编号: 1000-8055(2007)09-1475-06

机匣处理的非定常数值分析

屠宝锋, 胡 骏, 王永明

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 采用非定常计算方法对轴流式压气机中机匣处理的扩稳效果进行了研究. 进行了某型风扇斜缝带背腔式机匣处理在单转子和单级环境下及 Rotor37 轴向缝式机匣处理的数值计算, 分析了下游静子的存在对机匣处理数值模拟结果的影响. 结果表明该计算方法能够模拟出机匣处理的非定常作用, 并且只有当危险截面位于叶尖附近时, 机匣处理才有扩稳的能力. 发现单转子环境下的计算不能准确地表现出机匣处理的真实作用, 下游静子的存在会导致上游转子危险截面位置的变化.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 机匣处理; 非定常; 数值分析; 危险截面

中图分类号: V231

文献标识码: A

Unsteady numerical analysis for casing treatment

TU Bao-feng, HU Jun, WANG Yong-ming

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The improved effect of casing treatment in axial compressors was studied by using an unsteady simulation method. Numerical calculation was performed for the cavity casing treatment with oblique slots under one-rotor and one-stage environment as well as for axial slots casing treatment of Rotor 37. The influence of downstream stator upon casing treatment simulation was also analyzed. The results show that, this computation method could simulate unsteady casing treatment, but the casing treatment cannot extend the stall margin of a compressor until the dangerous section is near the tip of rotor blade. It's found that the real role of casing treatment cannot be manifested accurately under one-rotor environment, and the presence of downstream stator would change the dangerous section of upstream rotor.

Key words: aerospace propulsion system; casing treatment; unsteady; numerical analysis; dangerous section

“机匣处理”这个概念的提出至今已经有 40 多年的历史了^[1]. 虽然研究人员对机匣处理已经进行了大量的试验研究^[2-3]和数值研究^[4-7], 多种型号上也成功地采用了机匣处理装置, 但是对于机匣处理的扩稳机理至今也没有一致的结论. 现阶段机匣处理结构的设计还主要依赖于试验调试. 其主要原因在于叶尖间隙区域以及机匣处理

结构内部的流场异常复杂, 目前的试验设备还无法准确地测量出这些部位的细致流场.

计算机技术的进步给机匣处理的研究开辟了新的路径, 许多研究者采用数值计算方法模拟机匣处理对压气机流场的影响. 但是这些研究由于受到计算机水平以及计算方法的限制, 一般停留

收稿日期: 2006-08-14; 修订日期: 2006-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(10272057)

作者简介: 屠宝锋(1981-), 男, 浙江嵊州人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动力的研究.

在定常计算及单转子计算,而现在使用比较普遍的缝式机匣处理与压气机转子之间实际上存在着非定常的相互作用.本文进行了处理机匣的非定常数值计算,可以真实地模拟处理机匣与转子以及与静子之间的非定常相互作用.虽然单转子机匣处理网格量比较少、计算方法比较简单,没有考虑转静子相互作用的影响,能够计算出机匣处理的扩稳作用.但是,真实的发动机中压气机是多级的,上、下游叶排对处理级的转子流场会有很大的影响,甚至会改变其危险截面的位置.如文献[8]所述,机匣处理沿叶高方向的影响范围是有限的,只有在靠近危险截面的位置才有效果,叶尖部位为失速截面时则需要采用外壁机匣处理.因此本文进行了单转子环境下和级环境下机匣处理扩稳效果的比较及分析.

1 单转子计算

1.1 模型

单转子计算采用的第1个模型是某风扇第1级转子.转子共有24个叶片,其设计转速为11 000 r/min,叶尖间隙为1 mm.机匣处理为斜缝带背腔式,共有224个缝,缝与轴线夹角为 10° ,与径向夹角为 45° .为了减少计算量,本文简化了缝的数目,取216个,这样只需要计算1个通道.每1个通道对应9个缝,并且覆盖了转子叶尖顶部大约-42%~52%的叶尖弦长轴向范围(轴向缝前缘在叶尖前缘上游,离叶尖前缘的距离为叶尖弦长的42%).第2个模型是Rotor37转子,叶尖间隙值为1 mm,轴向缝大约位于-41.4%~48.9%叶尖位置,共有36×8个缝,开缝面积占总面积的53.57%.

1.2 网格划分

风扇转子机匣处理计算域包括主通道总共有22个网格块,分两步做网格.首先,使用AUTO-GRID软件生成带有0.5 mm间隙的主通道,有5个网格块;然后,在IGG里划分其余0.5 mm间隙的网格以及机匣处理的网格,间隙部分的网格共分为3层,其中第1层高0.1 mm,一个网格块;第2层高0.1 mm,有3个网格块,分别对应缝前,缝中,缝后3个位置;第1层0.3 mm,3个网格块的轴向位置与第2层间隙的3个网格块相同.机匣处理结构包括9个斜缝和1个背腔,共10个网格块.主通道与第1层间隙,第1层间隙与第2层间隙,第3层间隙缝中的网格块与9个斜缝的交

接面均采用完全非匹配连接,为了获得良好的连接效果,一般采用多对1或1对1的连接方式.斜缝带背腔式机匣处理网格如图1所示.

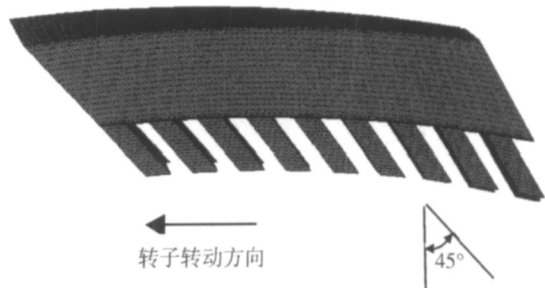


图1 缝式带背腔式机匣处理网格示意图

Fig. 1 Grid of the slots and cavity

Rotor37采用了类似的网格划分,但是比上面的稍微简单一些,主通道包括0.5 mm的叶尖间隙,网格数为30万,在IGG里做出另外的0.5 mm叶尖间隙网格,分为2层:第1层间隙高0.25 mm,网格分布为 $65 \times 9 \times 133$;第2层间隙高0.25 mm, $133 \times 13 \times 133$ 个网格;共8个轴向缝,每个轴向缝网格数为 $8 \times 21 \times 49$.除主通道采用HOH网格外其它网格块均采用H型网格.结构如图2所示.

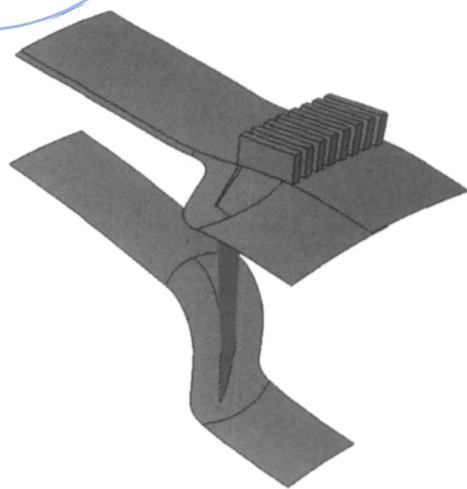


图2 Rotor37机匣处理示意图

Fig. 2 Casing treatment of Rotor37

1.3 计算方法

采用Jameson有限体积差分格式进行空间离散,结合Spalart-Allmaras湍流模型对三维雷诺平均N-S方程封闭进行求解,采用显式四阶Runge-Kutta法时间推进求解.为了节省计算时间还采用了伪数值振荡、局部时间步长和残差光顺等技术来加速收敛.非定常计算采用隐式双时间步方法,计算中每一个转子通道采用30个物理

时间步,每一个物理时间步下设置 15 个虚拟时间步.除斜缝、背腔、第 3 层间隙缝中网格块以外其它的网格块均转动,转速为 11 000 r/min;转静干涉面设为转子相对固定的边界条件;进口给定总温 288.2 K、总压 101 325 Pa、速度沿 z 轴方向(共给定了 4 个进口边界条件,其中速度沿周向和径向均为零);出口给定背压,通过调节背压的大小得到 1 条特性线;主通道与第 1 层间隙、各间隙层之间、第 3 层间隙缝中与斜缝、斜缝与背腔等网格块之间的相互连接是采用完全非匹配连接,在 IGG 经过完全非匹配连接计算后,默认为是固壁条件,所以在 FINE 里要进行边界条件设置,实际转动的边界就必须转动.

1.4 计算结果

如图 3 所示, Rotor37 计算结果显示轴向缝式机匣处理使得失速点的流量减小了 5.4%,但同时造成了效率和压比的下降.图 4 给出了某风扇第一级转子的特性图,图中比较了机匣处理前后等熵效率和总压比随流量的变化情况.从图中可知,该机匣处理没有造成转子性能严重的恶化.在峰值效率点右边(大流量状态)时机匣处理会降低转子的性能,但是在峰值效率的左侧(小流量状态)时,效率和压比均有所改善,说明该机匣处理能够改善非设计点性能.但是从该图还可以发现,机匣处理后,失速点流量几乎没有减小,也就是说该机匣处理不能提高该转子的失速裕度.下面将从失速危险截面方面来分析这个原因.

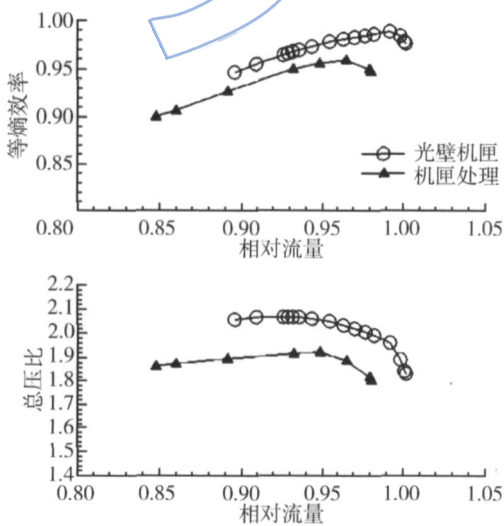


图 3 机匣处理前后 Rotor37 特性图比较

Fig. 3 Characteristic picture of Rotor37

一般认为,只有当危险截面位于处理级的叶尖部位时,机匣处理才具有扩稳的能力.文献[8]

描述了一种诊断压气机失速危险截面的方法.本文计算采用均匀进气,因此通过比较大流量和小流量时出口截面沿径向总压的分布,观察其变化的趋势即可以判断出危险截面的位置.

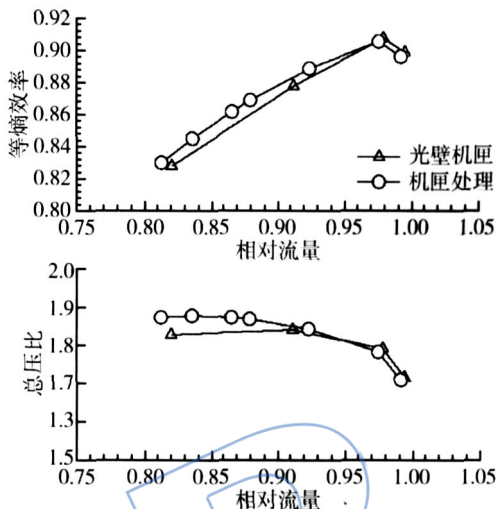
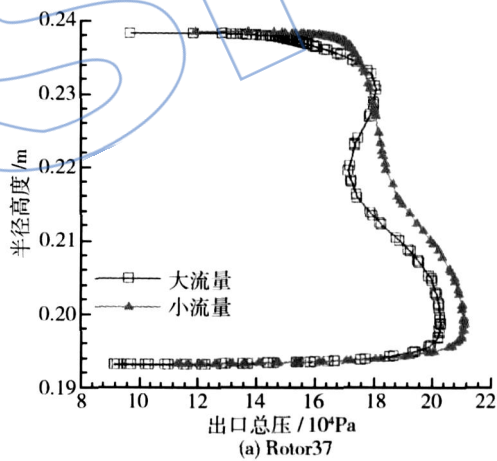
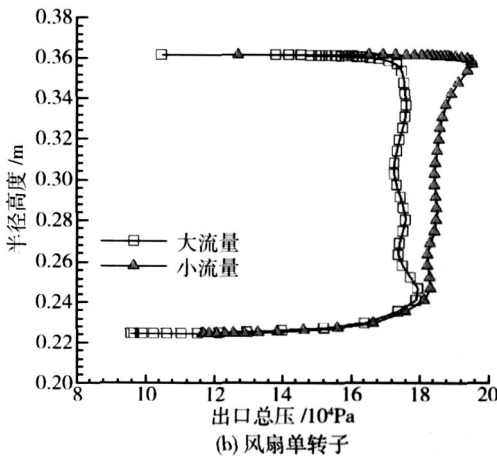


图 4 机匣处理前后某风扇转子特性图比较

Fig. 4 Characteristic picture of the fan rotor



(a) Rotor37



(b) 风扇单转子

图 5 两种转子危险截面的比较图

Fig. 5 Dangerous section of the two different rotors

从图 5 中可以发现,风扇转子和 Rotor37 的

危险截面位置不同, Rotor37 的危险截面位于叶尖附近, 而风扇转子的危险截面位于叶根附近, 这就解释了前面机匣处理是否能够有效降低失速点流量, 提高失速裕度的原因.

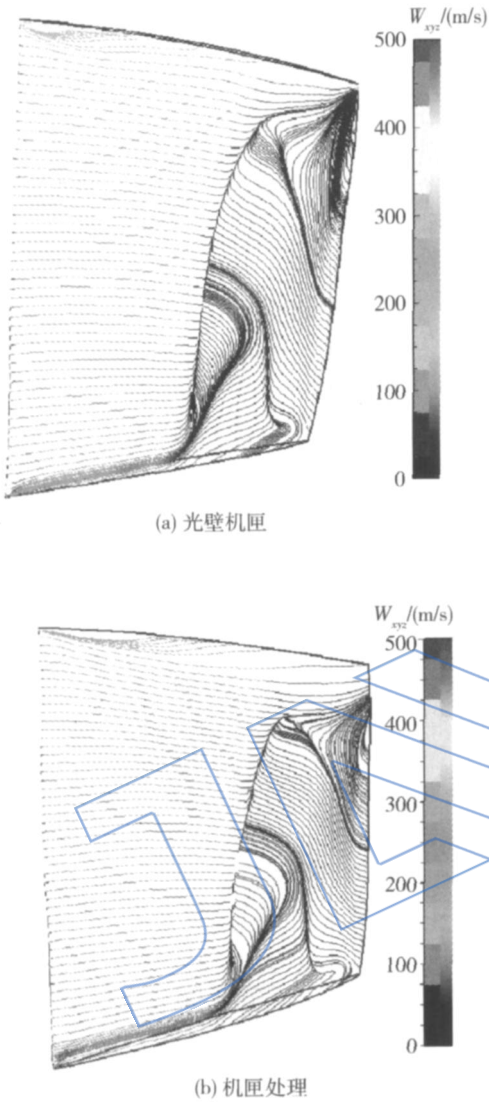


图 6 等流量下无机匣处理叶背极限流线比较
Fig. 6 Limited vector lines in suction face

图 6 给出了等流量状态点光壁机匣和带轴向缝式机匣处理两种情况下转子叶片吸力面极限流线比较, 从图中可以看到, 经过机匣处理后, 叶尖附近的分离线向叶根移动, 改善了叶尖附近的堵塞情况. 但是由于机匣处理并没有减小分离造成的损失, 而且由于将通道激波后的高压流抽吸到缝的前面, 与主流的低压流掺混造成了额外的损失. 所以机匣处理后损失反而有所增加, 效率和压比都有不同程度的降低. 从图 6 还可以发现, 机匣处理改变叶尖附近的分离及堵塞比较明显, 而对于叶根没有什么影响, 从中也说明机匣处理只对

危险截面位于叶尖附近的压气机有扩稳能力.

2 级环境计算

2.1 计算模型

保持单转子计算时的流道不变, 在转子后加上静子形成一个 1 级的计算域, 其流道如图 7 所示. 1 级计算的网格划分和边界条件的设置比单转子的稍微复杂一些, 但是基本原理是一致的. 由于要进行非定常计算, 因此转子和静子的通道比是 1 : 2.

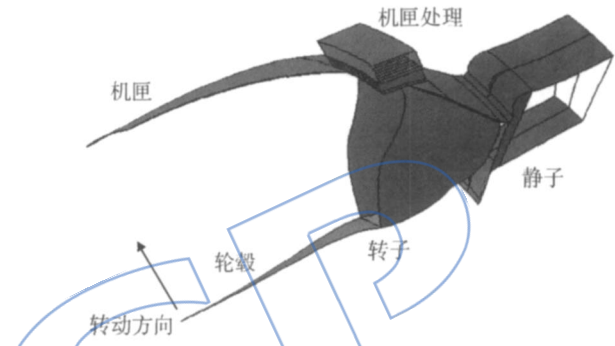


图 7 级环境计算域示意图
Fig. 7 Stage environment computation field of the fan

2.2 计算方法

基本的计算方法跟 1.3 部分介绍的一样, 只是转子跟静子之间采用了转静干涉面连接.

2.3 计算结果

图 8 给出了级环境下特性图, 从图中可以发现机匣处理具有明显的扩稳效果. 在级环境下失速裕度扩大了 17. 7 %, 但同时也使得峰值等熵效率下降了 0. 8 %, 峰值效率点对应的总压比下降了 0. 365 %. 从图中还可以发现随着斜缝数目的

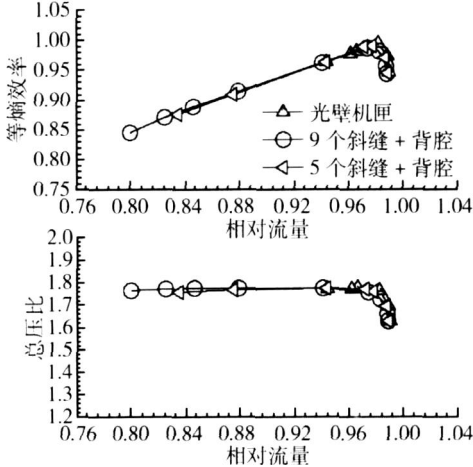


图 8 级环境下无机匣处理的特性比较

Fig. 8 Compare of characteristic in stage environment between smooth wall and casing treatment

降低,机匣处理的扩稳能力有所下降,但是对效率和压比这些性能的影响也随之减小.这就说明在设计缝类机匣时,可以通过调节斜缝的数目来获得所需要的失速裕度和性能要求.

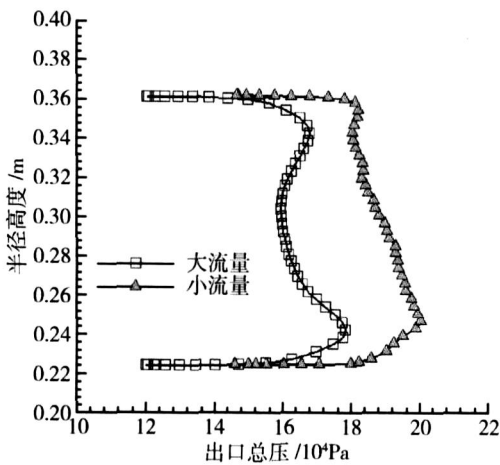


图 9 级环境下风扇危险截面的比较图

Fig. 9 Dangerous section of the one stage

图 9 给出了级环境下出口总压在不同流量下沿径向的分布,从图中可以看到危险截面位于叶尖附近.

3 机匣处理内的非定常流动

图 10 给出了非定常计算中一个周期内 4 个等分时刻斜缝内相对速度流线的分布.

在跨声速压气机中,机匣处理一般位于转子上方,在叶尖部位马赫数很高,激波强度很大,气流通过叶尖通道激波后,静压急速增加.而通道激波的位置随着流动状态的改变而改变,当通道激波位于机匣处理下方时,由于静压差的作用,激波后的气体进入机匣处理内部,然后再通过斜缝和背腔的流动,喷射到叶尖前缘部分,从而使得叶尖区流场改善,推迟了失速的发生.

从图 10 中可以看到,相对转子的转动,处理机匣保持静止.在相对坐标系下斜缝下方的激波位置会不停的改变,从而导致斜缝内流动状况会发生周期性的变化,从吸力面到压力面激波位置相对相下游移动.缝式机匣处理内部的流场是非定常的,这种非定常流动的时间尺度和转子旋转速度和叶片的数目有关,空间特征尺度与弦长相当,与叶尖泄漏涡的非定常流动相比,空间特征尺度相近,时间尺度要小,这种非定常喷射/抽吸气流会对转子流场产生一种非定常作用力.

从图 8 可以看到 5 个斜缝的机匣处理扩稳效果远远低于 9 个斜缝的扩稳效果,可以认为非定

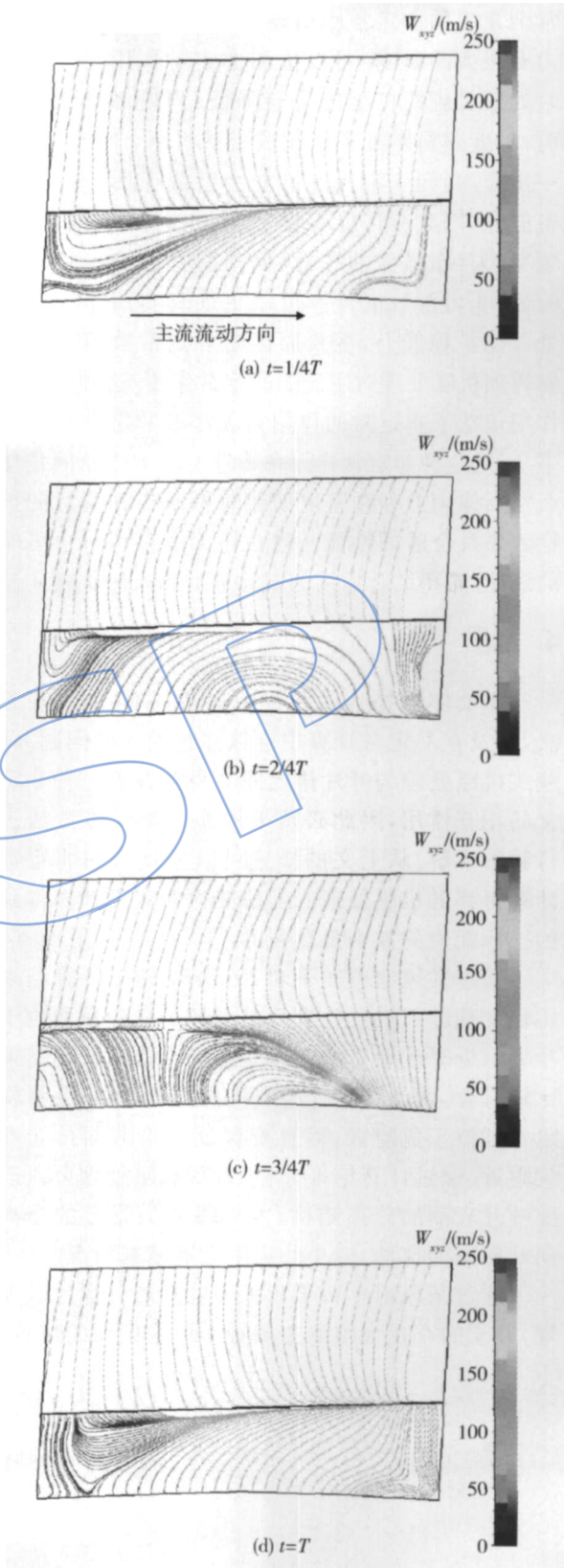


图 10 非定常计算 1 个转子通道周期内 4 个等分时刻机匣处理内相对速度分布

Fig. 10 Distribution of W_{xyz} in the casing treatment at different instants during one blade passing period

常因素中的非定常作用频率对机匣处理的扩稳能力有很大的影响.可以推测非定常作用频率降低时处理机匣的扩稳能力会降低.当频率降低到零时,斜缝式机匣处理退化成光壁机匣,而当频率进一步增加,到一定程度可能会近似于周向槽的扩稳能力,因此有可能存在一个最佳的非定常作用频率即存在最佳的缝数,但是需要进一步的研究验证.非定常数值计算可以更加真实地体现机匣处理的扩稳能力,主要原因是非定常数值计算能够得到机匣处理对主流的非定常作用.这种非定常作用包括了非定常的作用力大小及非定常作用频率,但是这种非定常作用在物理上的本质原因是什么?当作用力和频率取何值时可以得到满意的扩稳效果及合适的性能?现在还无法得到一个可靠的结论,希望结合后续的试验进行深入的研究.

4 结 论

本文侧重描述了机匣处理的非定常处理方法,以及在非定常计算中应该注意的一些问题.斜缝式机匣处理与叶片排之间本身存在着一种非定常的相互作用,因此必须采用非定常计算方法进行数值求解.从上文的描述可以发现采用非定常计算得到的机匣处理的扩稳能力和定常计算得到的扩稳能力的差别是存在的.

通过某风扇单转子和 Rotor37 转子计算结果比较发现缝式机匣处理只有在转子危险截面位于叶尖附近时才有扩稳效果.这与一般的试验结果比较符合,因此在设计压气机机匣处理时,要将机匣处理位于危险级,而且要保证危险截面位于叶尖附近.通过计算结果分析,发现机匣处理可以改变叶片表面的分离结构,可以将叶尖附近的分离向叶根方向移动,减小叶尖附近的堵塞情况.

通过某风扇单转子和级环境下的计算比较发现,静子的存在会改变上游转子危险截面的位置,

这就使得在单转子环境下没有扩稳效果的机匣处理在级环境下可以发挥扩稳能力,这就说明要真实地模拟机匣处理的扩稳能力,一定要进行级环境下的计算,否则结果不能应用到真实的多级压气机上.

参考文献:

- [1] Hartmann M J, Benser W A, Hauser C H. Fan and compressor technology[R]. NASA SP-259, 1970.
- [2] Osborn W M. Effect of several porous casing treatment on stall limit and on overall performance of an axial-flow compressor rotor[R]. NASA TN D6537, 1971.
- [3] Fabri J, Reboux J. Effect of outer casing treatment and tip clearance on stall margin of a supersonic rotating cascade [R]. American Society of Mechanical Engineers (Paper), 75-GT-95, 1975.
- [4] Hall E J, Crook A J, Delaney R A. Aerodynamic analysis of compressor casing treatment with a 3D Navier-Stokes solver[R]. AIAA-94-2796, 1994.
- [5] Ingo W, Hans P K. A numerical investigation of the flow mechanisms in a high pressure compressor front stage with axial slots[J]. ASME, Journal of Turbomachinery, 2004, 126:339-349.
- [6] Behnam H B, Joao A T, Paul C, et al. Parametric study of tip clearance casing treatment on performance and stability of a transonic axial compressor[J]. ASME, 2004, 126:527-535.
- [7] 袁巍, 周盛, 陆亚钧. 压气机间隙流与处理机匣作用的三维数值分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9):885-888.
YUAN Wei, ZHOU Sheng, LU Yajun. 3D numerical analysis for the effect between tip clearance and casing treatment in turbomachinery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(9):885-888.
- [8] 蒋世亮. 机匣处理若干问题探讨[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(1):46-49.
JIANG Shiliang. A discussion of some questions about casing treatment[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(1):46-49.