

文章编号: 1000-8055(2000) 01-0012-05

# 单级跨音速压气机三维非定常粘性流动计算

刘前智 周新海

(西北工业大学 航空动力与热能工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文以数值求解雷诺平均非定常  $N-S$  方程方法完成了单级跨音速压气机动静叶相干三维非定常粘性流动计算, 给出了高分辨率  $NND$  格式的时间推进有限差分解。对某跨音速单级压气机进行了定常和非定常流的详细数值计算, 设计转速下定常粘性流场计算所得到的性能参数与实验结果吻合较好。在此基础上, 对最高效率状态进行了动/静叶相互干扰的非定常流动计算, 并对结果进行了分析。非定常流计算模式更接近于真实流动, 在高性能压气机的设计与分析中具有广阔的应用前景。

关键词: 跨音速压气机; 非定常流动; 计算

中图分类号:  $V231.3$  文献标识码:  $A$

## 1 引言

在过去的十多年中所发展的三维定常流动的数值解法及其分析系统, 已形成了目前的设计体系的基本框架, 在工程实际中得到了广泛应用。为了进一步改进压气机和涡轮的气动设计方法, 必须更准确地模拟叶轮机中的实际流动。叶轮机中的流动是高度复杂的和非定常的, 叶片不断承受着瞬时的、周期性的气动负荷及热负荷, 这些非定常效应极大地影响叶轮机的气动性能和寿命。有效地预测叶轮机中动静叶排相干的非定常影响是改进目前的定常流设计方法和体系的一个重要课题, 特别是对高性能多级跨音速风扇、压气机和涡轮来说, 非定常干扰问题更加突出, 迫切需要发展相应的数值分析手段。

国外从 80 年代就开始了叶轮机动静叶排相干非定常流动方面的研究, 从单级进展到研究多级叶排间的相干流动<sup>[1~4]</sup>。不过, 早期的工作多集中在对涡轮流动的分析上, 近来对风扇压气机的研究也逐渐增多。国内在这一领域的研究也已开始, 三维问题主要集中于非定常无粘流动的分析研究上<sup>[5~6]</sup>。

本文着重研究了跨音速轴流叶轮机动静叶排

相干的三维非定常粘性流动的计算问题, 以无波动、无自由参数的耗散  $NND$  格式<sup>[7]</sup>为基础, 得到了高分辨率格式非定常  $N-S$  方程时间推进有限差分解, 保证了非定常流场中激波的分辨率。采用  $LU-SGS$  隐式解法<sup>[8]</sup>快速获得定常流场解, 以最大限度地减少计算时间。利用本文方法对某单级跨音速压气机进行了数值分析, 首先进行了设计转速下的不同状态定常粘性流场计算。在此基础上, 针对最高效率状态进行了非定常流动计算, 并对计算结果进行了分析。本文计算所得到的周期性非定常解, 有效地预估了动静叶排相干非定常效应及其对叶轮机内部流动的影响。

## 2 基本方程与边界条件

将圆柱坐标系 $(\theta, r, z)$ 下的三维非定常粘性流动的平均  $N-S$  方程转换到一般曲线坐标系 $(\xi, \eta, \vartheta)$ 下, 其形式为:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\alpha(E - E_v)}{\partial \xi} + \frac{\alpha(F - F_v)}{\partial \eta} + \frac{\alpha(G - G_v)}{\alpha \vartheta} = H \quad (1)$$

式中各项的意义详见文献[9]。其中的分子粘性系数  $\mu$ , 由 Sutherland 公式计算, 而紊流粘性系数

收稿日期: 1999-02-08; 修订日期: 1999-06-14

基金项目: 航空科学基金资助项目(97C53027)

作者简介: 刘前智(1961-), 男, 西北工业大学航空动力与热能工程系副教授, 硕士

$\mu_i$ , 由 Baldwin- Lomax 模型<sup>[10]</sup>确定。

计算所用的网格包括两部分, 即随同转子一起转动的转子网格, 以及固定在绝对坐标系上的静子网格, 均采用了 H 形网格。转子网格的出口与静子网格的进口沿轴向重叠了一个网格间距, 通过网格的重叠部分进行两叶排间的信息耦合。

进口边界(转子进口)上, 给定总压、总温、气流的绝对切向和径向分速度沿径向的分布; 出口边界(静子出口)上, 给定内径处的静压, 出口其他径向位置处的压力利用径向平衡方程确定。在物面边界, 为减少网格数, 采用壁面函数方法<sup>[11]</sup>求物面剪切应力。

周期边界的处理: 一般情况下, 压气机相邻动静叶数目是不相等的(甚至相互不成整数倍), 因此, 在计算时选择  $m$  个转子叶片通道与  $n$  个静子叶片通道,  $m$  和  $n$  的选取原则是尽量减少叶片任何调整的程度, 又不致使计算工作量成倍增加。此时, 转子叶排与静子叶排将用组合栅距(含数个叶片通道)来取代原单通道的栅距, 在一个组合栅距上流动参数满足周期性条件。

动静叶排间信息的传递将主要取决于叶排间交界面的处理方法。在定常流计算中, 采用周向平均模型。在非定常流动计算时, 则采用直接插值的方法传递叶排间的信息。

### 3 数值方法

本文采用如下方法进行方程的时间离散: 在作为非定常计算的初始场计算中, 采用 LU- SGS 隐式解法, 以便快速获得定常解。为了保证时间精度及简化计算, 非定常流动计算则采用了显式方法, 其时间步长满足稳定性条件。方程的空间离散采用高分辨率 NND 格式。

对方程(1)作 LU- SGS 分解<sup>[8]</sup>, 在计算定常流场时, 可令  $\Delta t \rightarrow \infty$ , 则得<sup>[9]</sup>:

$$LD^{-1}U\delta Q = -R \tag{2}$$

(2) 式已不像通常的隐式方法那样包括块对角阵的求逆, 每一步的运算时间大大缩短, 整个过程在  $\Delta t \rightarrow \infty$  的条件下已不含时间项, 变成了实际上的 GAUSS- SEIDEL 迭代, 可迅速得到收敛结果。

在非定常流动计算时, 方程(1)采用显式方法求解, 即:

$$Q^{n+1} - Q^n = -\Delta t R \tag{3}$$

计算时  $\Delta t$  的取值受到显式方法稳定性条件

的限制。

(2) 式及(3) 式中的右端项  $R$  包含有对流项和粘性项。对于粘性项, 采用中心差分格式离散。而对流项则采用了二阶 NND 格式。该格式具有形式简单、运算量小的突出优点, 而且又是 TVD 类型的高分辨率格式。

对于  $E$  的  $\xi$  向偏导数  $D_{\xi}E$  项来说, NND 格式的具体表达式为<sup>[17]</sup>:

$$D_{\xi}E = h_{i+1/2} - h_{i-1/2}$$

$$h_{i+1/2} = h_{i+1/2}^+ + h_{i+1/2}^-$$

$$h_{i+1/2}^+ = E_i^+ + \frac{1}{2}\min\text{mod}(\Delta E_{i-1/2}^+, \Delta E_{i+1/2}^+)$$

$$h_{i+1/2}^- = E_{i+1}^- - \frac{1}{2}\min\text{mod}(\Delta E_{i+1/2}^-, \Delta E_{i+3/2}^-)$$

$$\Delta E_{i+1/2}^+ = E_{i+1}^+ - E_i^+$$

$$\Delta E_{i+1/2}^- = E_{i+1}^- - E_i^-$$

$$\min\text{mod}(x, y) = \text{sign}(x) \cdot$$

$$\max\{0, \min[|x|, \text{sign}(x) \cdot y]\}$$

式中:  $E^+$  和  $E^-$  为对应的  $E$  经通量分裂后得到的正负通量。

### 4 计算结果及分析

本文的算例是某单级跨音速压气机, 其转子叶片数为 28, 静子叶片数为 40。计算时选取动/ 静叶片通道数之比为 2 : 3, 转子上游至交界面网格为  $62 \times 31 \times 99$ , 交界面至静子下游为  $93 \times 31 \times 102$ , 网点总数 484344, 计算网格如图 1 所示。

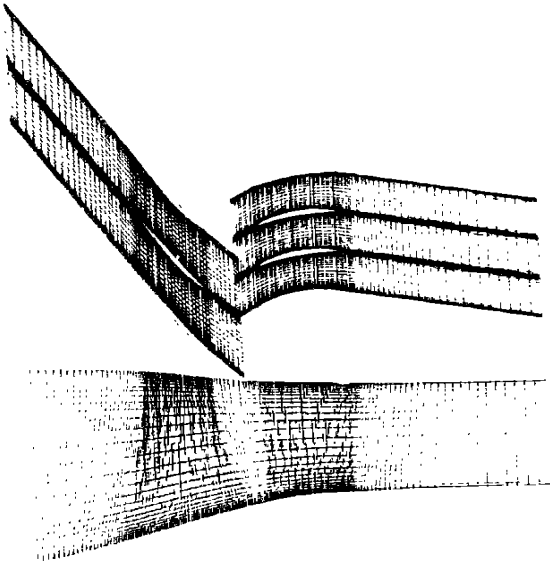


图 1 计算网格

在本算例的计算中, 首先对设计转速下的不

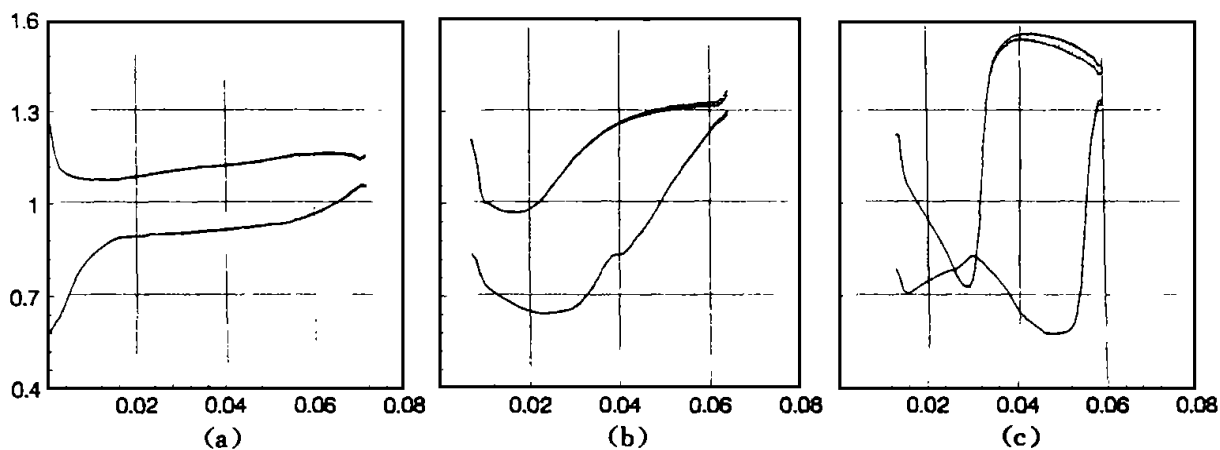


图2 动叶瞬态表面相对静压分布的变化包线(a. 近叶根; b. 叶中; c. 近叶尖)

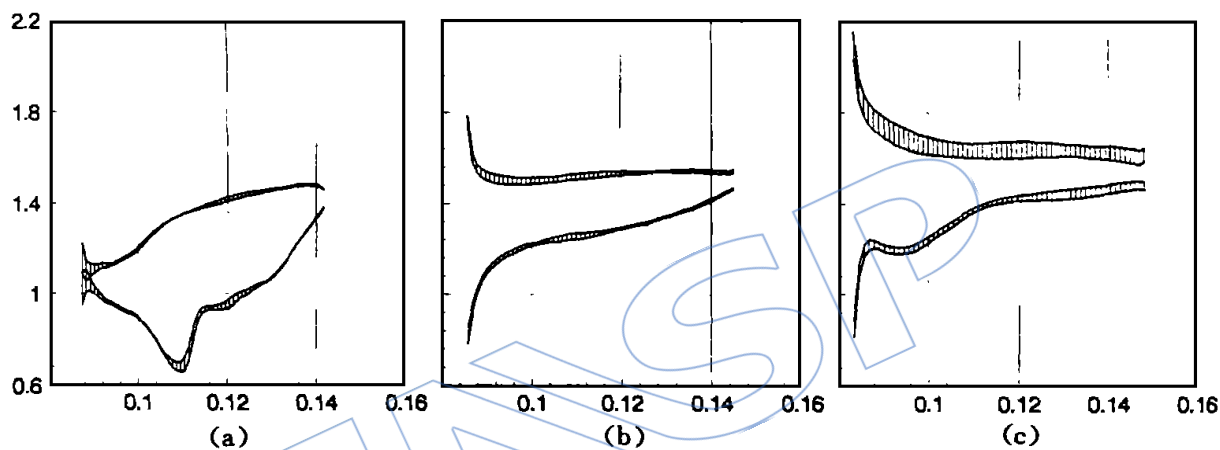


图3 静叶瞬态表面相对静压分布的变化包线(a. 近叶根; b. 叶中; c. 近叶尖)

同工况进行了三维定常粘性流动计算,采用 LU-SGS 隐式解法,每个状态计算 600 步,即收敛于定常状态。本文计算得到的性能参数与实验结果的变化趋势吻合得较好,计算的效率与实验曲线比较接近,压比略高一些。计算的最佳效率状态与实验重合(流量一致),本文选该状态为非定常流计算的工况。

非定常流动计算给出了最后一个周期内的瞬态流场解和时均性能参数。图 2 和图 3 分别是动叶及静叶在近叶根、叶中和近叶尖处瞬态表面相对静压分布的变化包线,可以明显地看出,叶排间的相互干扰在静叶通道中亚音区波及的范围很宽,而在动叶通道中只影响到叶盆尾缘附近的低速区。

图 4 与图 5 给出了一个周期内动叶和静叶的近叶尖、叶中、近叶根 3 个截面处压力面和吸力面上压力的波动幅值,代表了作用于叶片上气动负荷的变化。图 4 中波动最大的是尾缘处,其左边为压力面,右边为吸力面,而图 5 正好相反,波动最

大的地方是前缘处,左边为吸力面,右边为压力面。可见,动、静叶排相互干扰的结果,在动叶尾缘及静叶前缘引起最大的压力波动,特别是对静叶通道中的亚音速区影响大于动叶,这将为强度、振

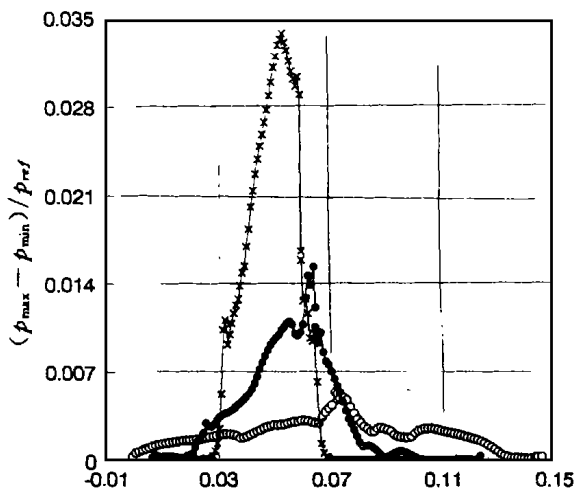
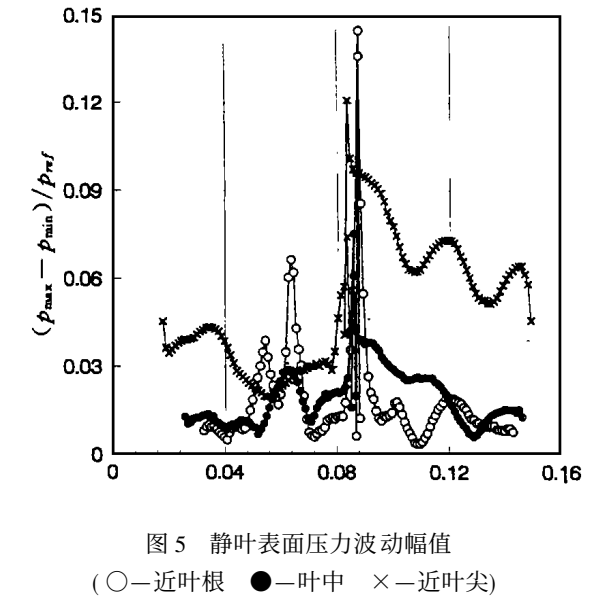


图4 动叶表面压力波动幅值  
(○—近叶根 ●—叶中 ×—近叶尖)

动与可靠性分析提供重要信息。

图 6 是最后一个周期内 4 个不同时刻叶中处瞬态熵等值线图。可以看到, 瞬态熵分布清晰地反映了高损失区在交变流场中的传播情况。上游转子叶片不断地将低能气体(尾迹高损失区的气体)



传送到静子叶片通道中, 这些低能区延伸到叶背表面, 且随着时间的推移向后运动, 它们对静子叶背表面附面层产生影响, 并使附面层增厚。转子叶片尾迹对静子叶盆表面的影响要小一些。

为了进行比较, 图 7 给出了由定常流动计算结果所得到的叶中处熵的等值线分布, 由于界面进行周向平均处理的缘故, 上游转子叶片的尾迹只扩散到交界面上就中止了, 并没有向下游静子叶排中传播, 静子叶排通道中的熵分布与转子叶片的熵分布基本无关。从这一点上来说, 周向平均处理方法带来了与实际流动的差别, 它将由于转子叶片尾迹所带来的气流参数的高度不均匀性人为地去掉了, 使得下游静叶面对的是均匀的来流, 这对静子叶片中的流动及其损失产生较大的影响。本文定常与非定常计算结果也证明了这一点, 非定常的时均压比与定常结果是相同的, 但效率低。从图 6 中还可以看到, 在两叶排间的交界面附近, 熵分布比较光滑, 未出现异常波动, 从而证明了本文所采用的交界面处理方法的合理性。

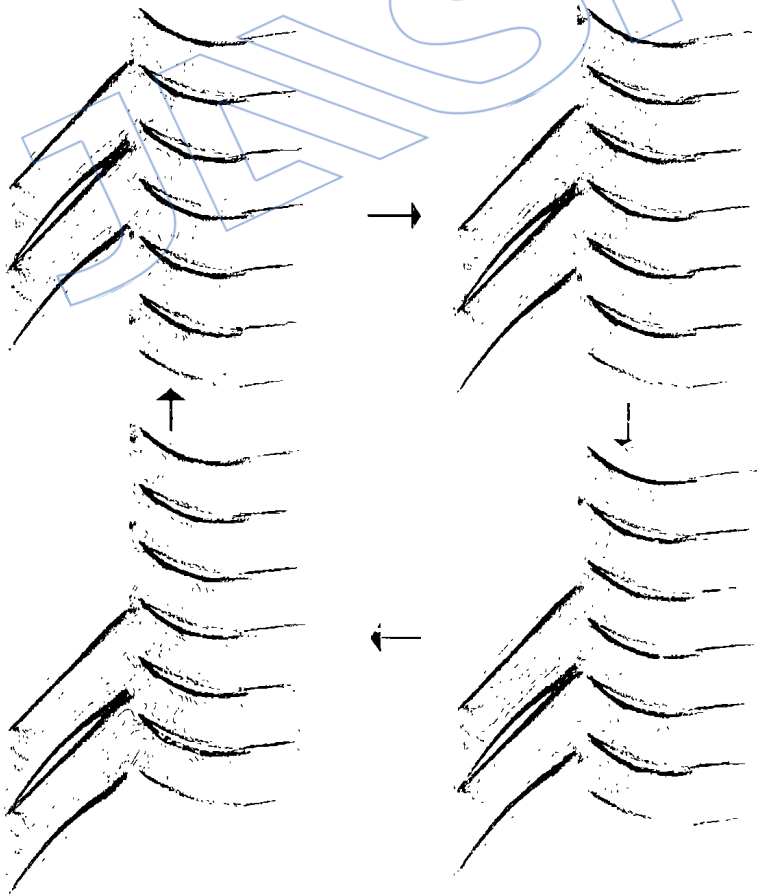


图 6 一个周期内 4 个不同时刻叶中处瞬态熵等值线图

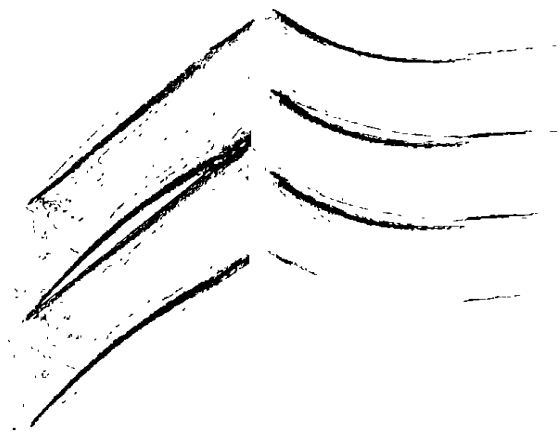


图 7 定常流动的熵等值线图

## 5 结 论

本文利用 NND 格式求解雷诺平均 N-S 方程,建立了轴流压气机动静叶相干的三维周期性非定常流的数值计算方法,对某单级跨音速压气机进行了定常流动状态及非定常流计算,对计算结果的分析验证了本文所采用的非定常粘流计算模式及动/静叶排间信息交互方法的合理性,有效地预估了叶轮机动静叶排相干的非定常效应,所得到的结果也与试验趋势吻合。这种方法可望在轴流叶轮机气动设计以及气动/结构耦合分析中应用。

## 参 考 文 献

- 1 Ni R H. 3D Unsteady Flow Simulation Through a Turbine [C]. The Australian Aeronautical Conference, 1989: 254-258
- 2 Chen S H. An Efficient Method in Predicting Rotor/Stator Interaction [R]. AIAA-91-3380, 1991
- 3 Georges Karadimas. The Position of the Unsteady Flow Computation in the Compressor and Turbine Design and Analysis Process [R]. AIAA 92-0015, 1992
- 4 Gony-Burlet K L. Unsteady, Three-Dimensional, Navier-Stokes Simulations of Multistage Turbomachinery Flows [R]. AIAA 93-1979, 1993
- 5 宁卫, 刘前智等. 跨音速压气机动静叶排相干的三维非定常流动数值分析[J]. 航空动力学报, 1996, 11(2): 161-164
- 6 刘前智, 周新海. 跨音速压气机级的三维周期性非定常流动计算[J]. 应用力学学报, 1997, 14(4): 84-87
- 7 张涵信. 无波动、无自由参数的耗散差分格式[J]. 空气动力学报, 1988, 6(2): 143-165
- 8 Yoon S, Jameson A. Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations [J]. AIAA J., 1988, 26(9):
- 9 刘前智, 周新海. 跨音速压气机级三维紊流场数值模拟[J]. 航空动力学报, 1996, 11(4): 369-372
- 10 Baldwin B S, Lomax H. Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows [R]. AIAA 78-257, 1978
- 11 Denton J D. The Calculation of Three-Dimensional Viscous Flow Through Multistage Turbomachinery [J]. Trans. of ASME, J. of Turbomachinery, 1992

(责任编辑 杨再荣)

## Computation of 3-D Unsteady Viscous Flow in Transonic Compressor Stage

Liu Qianzhi, Zhou Xinhai

(Dept. of Aeroengin Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A time-marching finite difference method is presented for the numerical simulation of the three dimensional unsteady viscous flow by rotor-stator interaction in an axial transonic stage. A high-resolution scheme is adopted to capture flow shocks. The flow information of rotor and stator is exchanged by using the system of overlaid grids. In order to reduce CPU time, an implicit LU-SGS method is applied to obtain rapidly a steady state solution, from which an unsteady flow computation can be started. A numerical example for a transonic compressor stage has been carried out. The results show a good prediction of the unsteady effects caused by rotor-stator interaction.

**Key words:** transonic compressors; non-steady flow; calculation