

一类轴流叶轮机转/静干扰问题的 3D Euler 数值研究方法

北京航空航天大学 季路成* 孟庆国 周 盛

【摘要】 本文将作者发展的定常 N-S 解程序, 改编成时间精确 Euler 解程序, 用于研究转/静干扰问题。对一台高负荷风扇级无粘流场进行时间精确模拟的结果表明, 该方法可被应用于轴流叶轮机内非定常流动机理研究。

主题词: 叶轮机械 非定常流动 气动力干扰

分类号: V231.3

1 引言

多排环境下叶轮机流动本质是非定常的。随着计算机技术及计算技术的发展, 叶轮机内非定常流动的数值模拟已成为叶轮机计算分析的前沿方向。为了预测实际复杂流动, 人们必须借助关于整个叶轮机的时间精确解, 这便确定了时间精确模拟方式在研究叶轮机内非定常流动的主导地位, 它是获得从叶轮机声学特性、气动弹性特性到完整气动性能的必由之路。

目前这方面工作国外已开展很多, 并且取得了很大进展。如 Erdos^[1]、Rai^[2]、Giles^[3]、Chen^[4]和 Rao&Delaney^[5]等。他们研究工作及发展的主线一直是围绕着减少计算量、合理的边界处理技术和加速收敛技术。在适当简化并保留尽可能多非定常流动机制的基础上, 时间精确非定常流动的计算速度, 已能够提高一、两个量级, 使之应用于工程设计和机理研究成为现实。

国内受计算条件影响, 时间精确模拟转/静非定常流动的研究工作才刚刚起步。这种背景下, 本文在原有叶轮机定常流场 N-S 解程序^[6]基础上, 用时间三阶精度三步 Runge-Kutta 方法求解 Euler 方程。初步用于某高负荷跨音风扇级无粘非定常流场研究, 通过数值模拟, 观察到了一些关于转/静干扰非定常流场的特有现象。进一步推广于粘性非定常流动及多个叶片通道的工作可顺利进行, 基本不存在技术上的困难, 只是如何减少计算时间的问题。

2 控制方程

本文时间精确方式控制方程为曲线坐标下直角坐标系参数为变量的守恒 Euler 方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + \frac{\partial G}{\partial \zeta} = H \quad (1)$$

其中:

$$Q = J^{-1} \{ \rho, \rho u, \rho v, \rho w, e \}^T$$

$$E = J^{-1} \{ \rho U, \rho u U + \xi_x P, \rho v U + \xi_y P, \rho w U + \xi_z P, e U + P U \}^T$$

$$F = J^{-1} \{ \rho V, \rho u V + \eta_x P, \rho v V + \eta_y P, \rho w V + \eta_z P, e V + P V \}^T$$

$$G = J^{-1} \{ \rho W', \rho u W' + \zeta_s P, \rho v W' + \zeta_s P, \rho w W' + \zeta_s P, e W' + P W \}'$$

$$H = J^{-1} \{ 0, 0, \rho \Omega w, -\rho \Omega u, 0 \}', \quad e = P/Y - 1 + (1/2) \rho (u^2 + v^2 + w^2)$$

其中: J^{-1} 和 $J^{-1} \zeta_s$ 等为几何参数, 代表体积和面积。 u, v 和 w 是直角坐标系下绝对速度, U, V, W 和 U', V', W' 则是曲线坐标系下变换速度。

3 空间离散和人工粘性

由于程序中大量特征值和曲线坐标系参量的应用, 方程(1)采用了方便的曲线坐标形式。控制方程的空间离散是基于对控制方程应用格林定理写成积分形式, 并以微元中心有限体积方法离散。在微元边界面, 自变参数由直接平均相邻两微元中心的自变变量获得, 从而可以方便地算出各微元面通量。由于格式等效于中心差分, 格式固有的奇偶振型无法消除。为了抑制激波前后及驻点附近的数值振荡, 本文采用 Jameson 等人提出的人工粘性添加方法。为减少由于网格展弦比带来的人工粘性耗散(虽然无粘计算中不甚严重), 采用空间变时间尺度, 而非用整个计算域最小时间步长, 大大降低了人工粘性带来的耗散。

4 时间步长和时间积分格式

时间精确解中, 时间步长的选取既不能超过格式数值稳定性限制, 又不能因不一致造成时间精度受到破坏, 因而时间步长统一为整个计算域内满足稳定性要求时间步长中最小。

方程(1)由空间离散和人工粘性的加入成为一常微分方程组: $\partial Q / \partial t = -R(Q)$, 其中 $R(Q)$ 包含了对流项通量和人工粘性。该常微分方程组用显式三阶精度三步 Runge-Kutta 格式求解。为了节省计算, 人工粘性项只在第一步计算, 以后保持不变。具体时间积分格式如下:

$$Q^0 = Q^n, \quad Q^1 = Q^0 + \Delta t R(Q^0), \quad Q^2 = (3/4) Q^0 + (1/4) Q^1 + (1/4) \Delta t R(Q^1)$$

$$Q^3 = (1/3) Q^0 + (2/3) Q^2 + (2/3) \Delta t R(Q^2), \quad Q^{n+1} = Q^3$$

这种算法与定常计算需用内存量没有增加, 但时间精度提高。

5 边界条件和初场

转静非定常流动模拟过程中需要给出五类边界条件: 进口边界条件、出口边界条件、固壁边界条件、周期边界条件和内边界条件。前四类边界条件的给定与定常计算相同, 此处不再赘述, 只不过在非定常计算中, 周期边界条件是针对周期叶片组。内边界条件的给定则是转/静非定常流动模拟成败关键。本文计算中: 由于格式是基于微元中心, 为传递参数转子通道和静子通道网格子午投影交迭一个网格间距; 在转子计算域内, 出口边界通量由静子计算域内插值获得转子出口参数算得; 静子计算域内计算从轴向序列第二点开始, 第一点则从转子计算域内插值获得。Rai^[7]曾强调指出内边界的处理一定要保证通量守恒, 本文对待内边界的处理目前尚属非守恒的, 这样处理的差别有多大, 还不能给出定量估计。但本文算例的排间区, 流动不存在强间断, 通量监测表明, 方法能够保证一定精度的通量守恒。

转/静非定常流计算初场由定常多级计算结果提供, 本文供建立初场的定常多级计算采用掺混界面方法。这种方法将上游叶排出口参数做周向平均, 所得参数抽出作为下排叶片计算的进口边界条件, 而下游进口计算得的参数周向平均后, 根据需要作为上游叶排计算的出口边界条件。虽然掺混界面方法本身有不足, 但以此定常解做初场是令人满意的。

6 计算结果与分析

本文将所发展的程序用于一台高负荷跨音风扇级无粘非定常流场模拟。该风扇设计工况

下, 流量约为 25 公斤/秒, 级压比达到 2.2, 叶尖切向速度为 495.32 米/秒, 进口尖部直径为 440 毫米, 进口轮毂比为 0.4, 设计转速为 21500 转/分。风扇级具有 12 片导叶、14 片转子叶片和 36 片静子叶片。导叶的设计只是为了实验调节, 进出气角都为零度, 因而非定常流场模拟时忽略导叶的存在。另外, 由于本文非定常流动模拟属叶排完全耦合方式(FCBR), 目前也还没有处理使之能够模拟任意栅距比(当然, 如果计算机能力足够, 本文方法完全能模拟真实叶排非定常流场), 因而必须对转/静叶片数进行建模, 以使计算域叶片通道数尽可能少, 考虑本人所用计算机情况及实际设计, 本文将静子叶片数简化为 28 片, 为保证静子造成的金属堵塞不变, 对静子重新造型。造型中将静子最大厚度、前后缘厚度按比例放大。这样, 本文风扇级非定常流场模拟实际包含一个转子通道, 两个静子通道。

由于无粘计算, 为节省计算量采用网格为: 转子网格 $65 \times 13 \times 13$, 静子网格 $65 \times 13 \times 26$, 从子午看, 由于转静计算域交迭一个网格, 所以子午图 1 上轴向共有 128 而非 129 点。具体整个计算域三维网格见图 2。

本文计算收敛判别标准定为: 排间界面处流量随时间变化显示明显周期性, 即:

$$\left| \frac{m_{mix}(t+T) - m_{mix}(t)}{m_{mix}(t)} \right| \leq 0.0001$$

图 3 中曲线(F1)代表转子进口截面流量随时间变化, 曲线(F3)为转静间交迭面上流量随时间变化, (F4)为静子出口流量。计算工况对应堵塞(choke)流量, 转子中信息没有前传至喉道以前, 因而转子进口流量不应受影响, 曲线(F1)恰

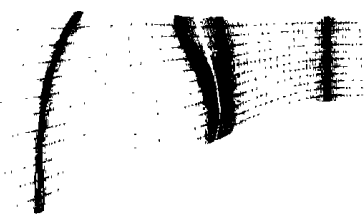


图 1 计算域网格子午投影

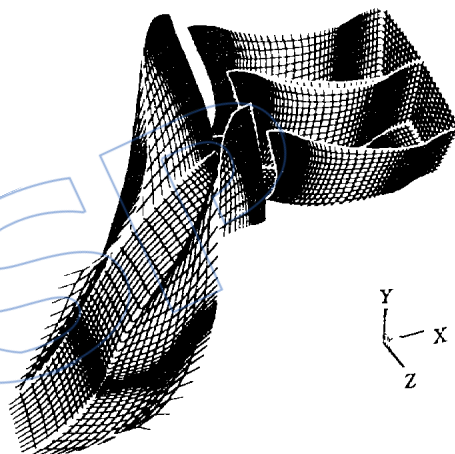


图 2 计算域三维网格

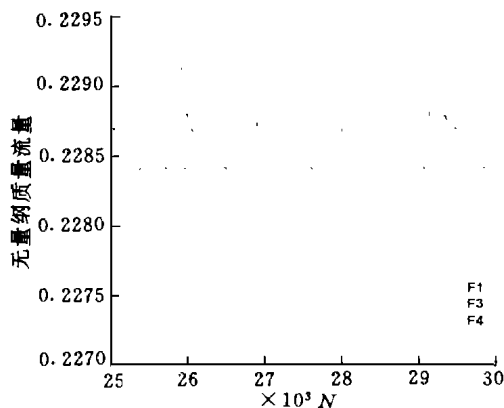


图 3 转子进出口静子出口流量变化图

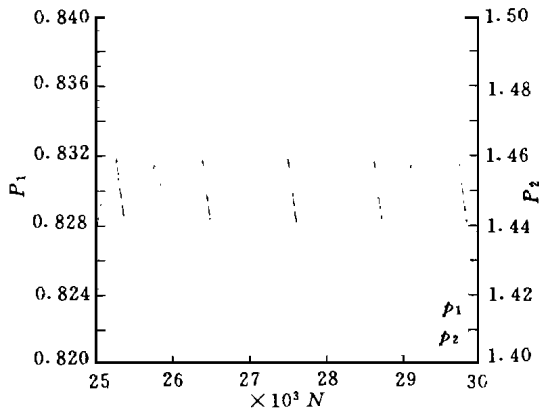


图 4 叶表两点压力变化

恰确认了这一判断的正确性。曲线(F_2)的平均值与进口流量差别在0.5%以内。从图中可以看出,流动已经明显显现周期性。

计算中另一组监控参数是分属转静叶表的两点处压强,如图4所示, (P_1)是转子吸力面激波附近一点压强变化, (P_2)静子吸力面一点压强变化, (P_2)显示了良好的周期性变化。(P_1)的随时间变化,体现了激波振荡,其振荡频率在无粘意义下基本等于周期叶片组通过频率,由于一个转子通道对应两个静子通道,压强波动一个周期内出现两个不同的峰值。在粘性情形下,激波振荡频率并非如此,国外学者认为,涡流脱落是造成激波以远低于叶片通过频率振荡的根本原因,本文从侧面说明了这种可能性。

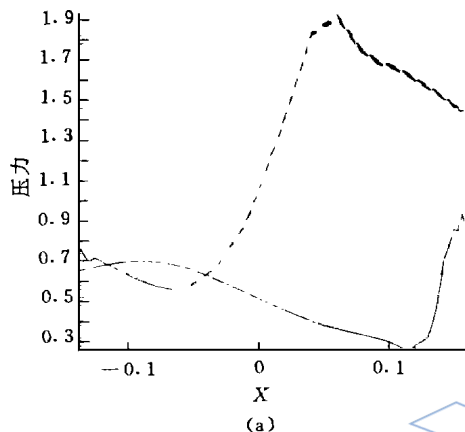


图 5(a) 转子叶表压强变化和时均压强

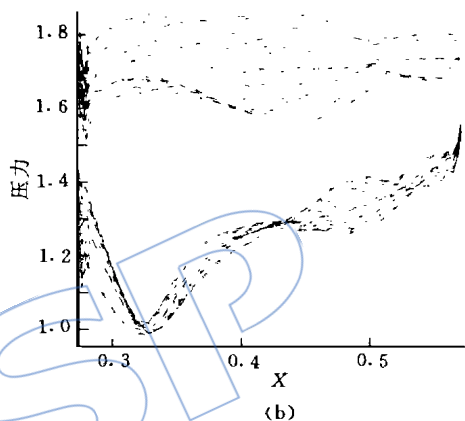


图 5(b) 静子叶表压强变化和时均压强

图5是转静近叶尖截面叶表压强随时间变化和时均压强对比(实线代表时均压强,虚线代表瞬态压强)。从图5(a)可见,转子叶表压强在激波之前无变化,说明堵塞流量下转子进口区不受静子相对运动的影响。但转子来流使静子整个叶表压强都高幅变化,见图5(b)。

图6也表明,在转子堵塞流量下激波前流场不受静子非定常干扰影响,在激波后流动受非定常影响逐渐加强。静子进口转子坐标系下气流角变化幅度在3度左右,这基本上是势干扰作用结果,可想而知,真实情况很可能更为严峻,因为尾迹的存在使周向不均匀性更大,非定常作用更强。图7(a)~(e)是一周期内转子静子流动的相对等马赫线,可以粗略看出非定常流动发展过程。

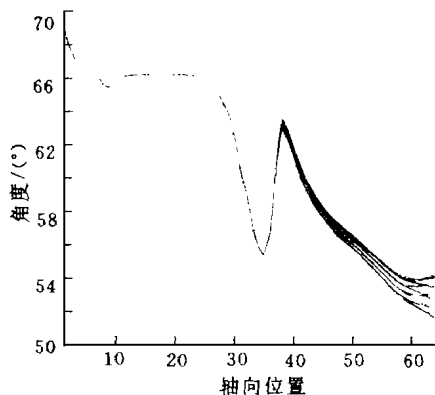
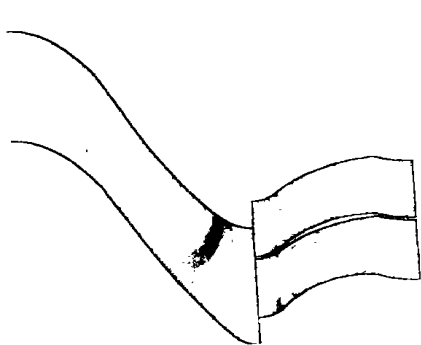
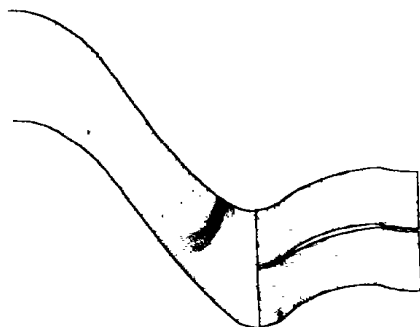
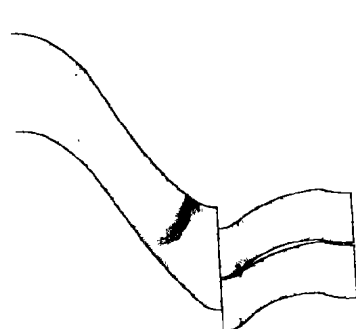
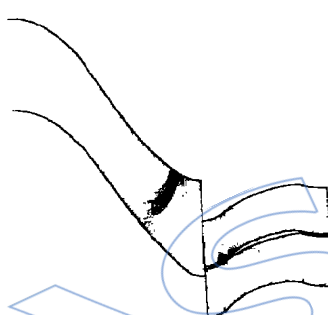
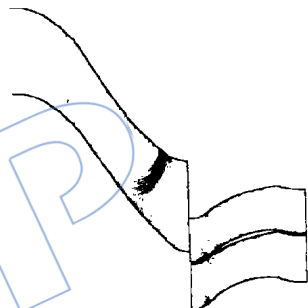


图 6 转子叶尖槽道中心线上一周期内气流角变化

7 小 结

通过数值模拟结果的观察分析,获得如下结果:(1)在堵塞流量下,来自静子的干扰没有越过喉道,转子进口流量保持不变;(2)转静干扰下,转子内激波以周期叶片组通过频率的振荡;(3)转静干扰下,静子进口气流角变化幅度很大,静子叶表压强变化很大。本文工作可以容易的推广于粘性非定常流动计算,并可包含任意多的叶片通道。

图 7(a) 时间余数为 $0.1T$ 时等马赫线图 7(b) 时间余数为 $0.3T$ 时等马赫线图 7(c) 时间余数为 $0.5T$
时等马赫线图 7(d) 时间余数为 $0.7T$
时等马赫线图 7(e) 时间余数为 $0.9T$
时等马赫线

参 考 文 献

- 1 Erdos J I, Alzner E. Computation of Unsteady Transonic Flows Through Rotating and Stationary Cascades. NASA CR-2900, 1977
- 2 Rai M M. Three- Dimensional Navier- Stokes Simulations of Turbine Rotor/ Stator Interaction, Part I: Methodology, Part II: Results. AIAA Journal of Propulsion and Power, 1989, 15(3): 305- 319
- 3 Giles M B. UNSFLO: A Numerical Method for Unsteady Inviscid Flow in Turbomachinery. GTL- 195
- 4 Chen J P, Whitfield D L. Navier- Stokes Calculations for Unsteady Flow- Field of Turbomachinery. AIAA- 93- 0676
- 5 Rao K V, Delaney, R A. 3- D Simulation of Vane- Blade Interaction in a Transonic Turbine. AIAA 93- 2256, 1993
- 6 季路成, 周盛. 用 $N-S$ 方程计算三维叶栅流. 航空动力学报, 1997, 12(3): 306- 308
- 7 Rai M M. A Conservative Treatment of Zonal Boundaries for Euler Equation Calculations. J. of Computational Physics, 1996, 62: 472- 503

(责任编辑 王震华)

FULL- LENGTH PAPERS

A MODEL OF INTERACTION BETWEEN SHOCK WAVE AND LEAKAGE VORTEX ON TRANSONIC FAN

Yang Zhi, Ma Jihua, Tao Deping

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

ABSTRACT

A strong interaction between shock wave and leakage vortex, induced by an intensive inter-impact of rotating motion on abrupt anti-pressure gradient, makes their formations and strengths varied. The vortex breakdown deteriorates the stability and efficiency of compressor and fan. So a model of interaction between shock wave and leakage vortex is formulated. The solution of vortex core movement equations shows that the small initiative vortex core velocity and enhanced initiative vortex core pressure will induce the vortex instability. The high Mach number and circulation gradient outside the vortex core will result in breakdown of the vortex. The analysis of the factors leading to vortex breakdown serves as a foundation for its controlling.

Key Words Transonic compressor Shock wave Interaction Numerical calculation

A 3D EULER NUMERICAL RESEARCH METHOD WITH REGARD TO ROTOR/STATOR INTERACTION OF AXIAL TURBOMACHINERY

Ji Lucheng, Meng Qingguo, Zhou Sheng

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 210016)

ABSTRACT

Based on steady Euler solver developed by the author, a new time accurate Euler solver is modified to study Rotor/Stator interaction problems. The inviscid flow field of a highly loaded transonic fan stage is simulated by this time accurate method. The results indicate that rotor inlet flow fields are not affected by the downstream stator at choke condition, but the shock in the rotor will oscillate periodically. Moreover the stator will operate at highly varying incident angle. The method can be easily extended to viscous unsteady flow research in axial turbomachines.

Key Words Turbomachinery Unsteady flow Aerodynamic interference