

跨音速压气机动静叶排相干的 三维非定常流动数值分析*

西北工业大学 宁卫** 刘前智 姚吉先 周新海

【摘要】 采用时空二阶精度 NND 显式差分格式求解三维 Euler 方程, 对跨音速压气机级中动静叶排相干形成的非定常流动进行了数值分析。除动静叶排流动的控制方程体系、数值方法外, 着重讨论了动静叶排计算域、网格以及边界条件的处理。对某压气机第 1 级动静叶排相干的非定常流场的计算, 给出了叶片表面的马赫数分布、压力波动幅值, 以及叶片槽道中瞬态密度等值线等, 并分析了结果的合理性。

主题词: 动叶片 静叶片 相干 非定常流动 三维流动

分类号: O 241.82 V 231.3

1 前言

航空发动机长度的缩短, 动静叶排之间轴向间隙变得相当小, 使动静叶排相互干扰形成的非定常特征越发明显。因此, 为了进一步提高轴流叶轮机械的设计水平, 建立有效的数值模拟方法来分析叶轮机内动静叶排干扰三维非定常流动是十分必要的。从 80 年代中期开始, 国外学者在此领域进行了不少的研究工作^[1-5]。但这些的研究大都集中于对涡轮的分析, 而具有强激波的跨音速压气机级的分析至今还较少见。

本文以跨音速压气机级为研究对象, 发展了一种计算动静叶排相干的三维非定常流分析方法, 研究了控制方程的有限差分时间推进解法、动静叶排计算域和网格体系以及边界条件的处理等问题。利用本文的方法对某压气机的第 1 级非定常流场进行了计算, 得到了周期性非定常解, 给出了瞬态参数的分布。计算结果的分析表明, 本文方法有望在压气机设计的流场校核以及研究叶片非定常气动载荷和与之相联系的叶片动应力和振动分析中得到应用。

2 控制方程和数值方法

圆柱坐标系 (r, θ, z) 下控制流动的三维非定常 Euler 方程转换到一般曲线坐标系 (ξ, η, ζ) 后的形式是

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha} + \frac{\partial F}{\partial \xi} + \frac{\partial G}{\partial \eta} + \frac{\partial H}{\partial \zeta} = K \quad (1)$$

式中 $U = J^{-1} [r\rho, r\rho u_r, r\rho u_\theta, r\rho u_z, rE]^T$

$$F = J^{-1} [r\rho U_\xi, r\rho u_r U_\xi + p\xi_r, r\rho u_\theta U_\xi + p\xi_\theta/r, r\rho u_z U_\xi + p\xi_z, rU_\xi (E + p) + \omega r \rho \xi_\theta]^T$$

$$G = J^{-1} [r\rho U_\eta, r\rho u_r U_\eta + p\eta_r, r\rho u_\theta U_\eta + p\eta_\theta/r, r\rho u_z U_\eta + p\eta_z, rU_\eta (E + p) + \omega r \rho \eta_\theta]^T$$

$$H = J^{-1} [r\rho U_{\xi} + r\rho u U_{\xi} + \eta p_{\xi}, r\rho u U_{\xi} + \eta p_{\xi}/r, r\rho u U_{\xi} + \eta p_{\xi}, rU_{\xi}(E+p) + \omega r\rho U_{\xi}]^T$$

$$K = J^{-1} [0, \rho u_{\theta}^2 + p, -\rho u_r u_{\theta}, 0, 0]^T$$

其中 $E = [p/(k-1)] + (\rho/2)(u_r^2 + u_{\theta}^2 + u_z^2)$, J 是转换雅可比, U_{ξ} , U_{η} , U_{ζ} 是转换协变速度^[6], ξ , η , ζ 等是转换几何偏导数, u_r , u_{θ} , u_z 是 r , θ , z 方向的绝对速度分量, ρ 为密度, p 是静压, ω 是旋转角速度。方程 (1) 对转子和静子都适用, 只是对于静子 $\omega = 0$ 。方程中的原参数包含周向绝对速度分量, 这对同时具有相对与绝对两种坐标系的动静叶排相干的非定常流计算十分方便。

方程 (1) 用显式精确时间推进差分格式求解来进行非定常流计算。为清晰地分辨激波, 采用文献 [7] 中提出的一种无波动、无自由参数的耗散格式 (NND 格式), 该格式经大量计算实践证明, 其分辨率较高。特别是这种格式相对来说比较简单, 运算量较小。

3 计算域、网格和边界条件

为了减小振动和噪音, 通常压气机转子和静子的叶片数目设计成不相等的。在这种情况下, 流动在周向不再具有简单的空间周期性, 这就使周期性边界条件的处理大大复杂化了。为了获得具有全部非定常信息的解, 严格地说, 计算域应包括转子和静子所有叶片的通道。但是这种方案对计算机资源的要求太高。本文采用的方法是: 假设转子叶片数与静子叶片数之比是两个小整数之比, 如 1:1、2:3、3:4 等, 为了保持相同的堵塞效应, 动叶或静叶的几何尺寸根据稠度不变的原则作相应少量调整, 使动、静叶片栅距相同 (多叶片为组合栅距)。国外采用这种方法完成了大量动静叶排相干的流动计算^[1-4], 其中包括二维和三维 Euler 和 N-S 方程解, 都取得了较好的结果。图 1 是转子和静子叶片数 1:1 情况下的三维网格体系。网格体系由转子和静子网格两部分组成, 转子网格随转子一起转动。为了满足转子和静子之间交界面处流动参数的传递的需要, 转子出口和静子进口重叠了一个网格。

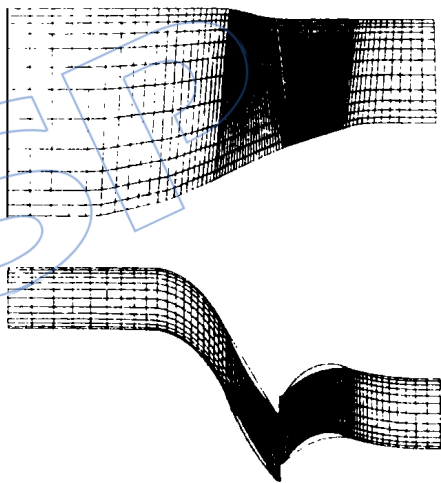


图 1 计算网格

在计算域上存在转子上游进口边界、静子下游出口边界、物面边界 (包括叶片表面和端壁) 以及周期边界。在进口边界上给定总压、总温、气流的切向和径向分速, 其余参数由特征相容关系 $DJ^{-1}/Dt = 0$ 用外插法求得, 其中 $J^{-1} = u_m - [2/(k-1)]a$, u_m 是子午速度, a 是音速。在出口边界给定内径处的静压, 其它径向位置处的压力由径向平衡方程确定, 速度和密度采用沿轴向相邻站零阶外插方法求得。在物面边界采用气流速度与物面相切条件。在转子出口与静子进口交界面上, 动、静叶排间参数的传递是在重叠的网格上用周向插值法来进行的。

4 计算结果及分析

利用以上方法对某高压压气机的第 1 级非定常流场进行了计算。压气机转子叶片数为 28, 静子叶片数为 34, 压气机转速为 16042.3 r/min, 平均半径处转子和静子的气动弦长分别为 7.85 cm 和 5.508 cm。由于转子、静子叶片数接近, 这里用转子和静子叶片数 1:1 的方式进行计算, 这样只需对静子作少量调整。图 1 所示的网格体系, 网点数为 $13 \times 13 \times 101$ 。为了使计算尽快收敛, 首先将转、静叶网格交界面上的气流参数进行周向平均, 计算出一个级中

的定常流场, 以此为初场进行非定常流的计算。

对于本算例, 转子旋转经历 8 个栅距就已形成了明显的周期性非定常流动, 图 2 是计算得到的转子叶中出口处周向平均气流角随转子转动的变化曲线, 横坐标是时间推进步数, 每 220 步转子旋转一个栅距。在最终收敛状态下, 要求转子出口气流角在同一相位上其变化值不大于 0.01 度。图 3 给出了转子中径处叶面上瞬态马赫数分布及其变化包线, 由于转子内激波的存在, 扰动不能

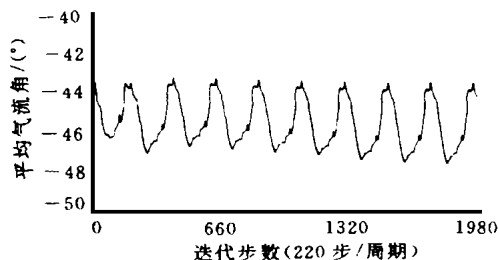


图2 转子出口瞬态气流角

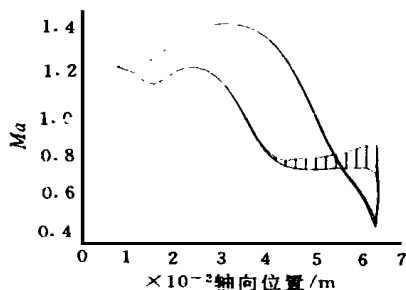


图3 转子中径处叶表面马赫数分布

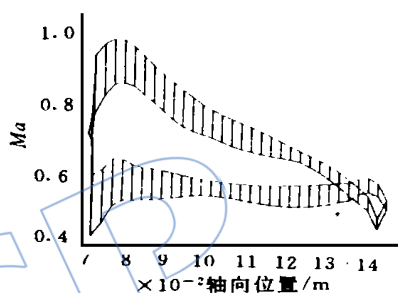


图4 静子中径处叶表面马赫数分布

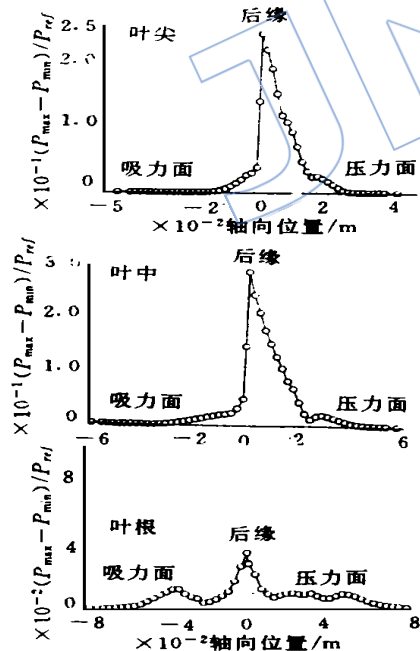


图5 转子表面压力波动幅度分布

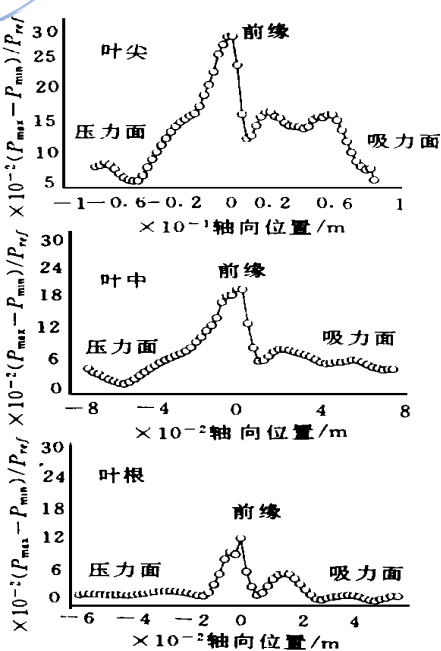


图6 静子表面压力波动幅度分布

越过超音区, 非定常影响在转子叶片尾缘部分的亚音流场中比较显著。图 4 给出了静子叶片

中径处叶面马赫数分布及变化包线, 显然, 在静子内叶中处的纯亚音速流场中, 非定常影响相当显著。图 5 和图 6 分别是转子旋转一个栅距时转子和静子在叶尖、叶中、叶根 3 个截面处压力面和吸力面上压力的波动幅值, $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 是一个周期内叶表面同一点上压力的最大值和最小值, P_{ref} 是参考压力。从图 5 可以看出, 叶尖和叶中的压力波动幅值较大, 且沿压力面向前传播, 叶根处压力波动涉及整个吸力面和压力面, 但波动量相对较小。静子的最大压力波动发生在前缘附近 (图 6), 波动涉及整个叶面, 叶根叶面上波动幅值较小。图 7 给出了中径处 4 个不同时刻叶片槽道内的等密度线图。

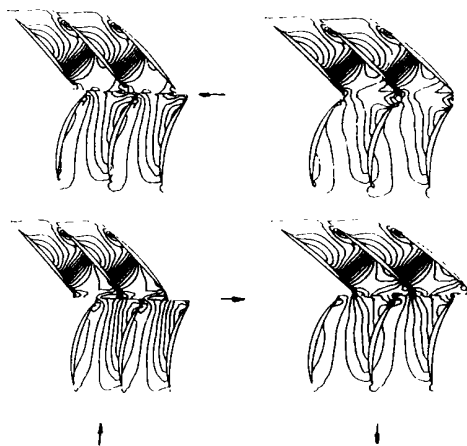


图 7 中径处不同时刻的等密度图

从以上结果的分析不难看出, 在跨音速压气机中存在强烈的动/静叶排间的相互干扰。在转子后缘和静子前缘附近, 这种非定常效应表现最强, 扰动波及流场中的整个亚音速区。这一结果与压气机实际流动情况及信息在跨音速流场中的传播规律相吻合。

5 结 论

本文采用时空二阶精度高分辨率 NND 显式格式数值求解 Euler 方程, 建立了一种计算压气机动、静叶排相互干扰三维非定常流场的方法, 对跨音速压气机级所完成的计算, 正确地给出了这种流场中重要的非定常特征。进一步的工作将是把计算扩展到多级环境, 研究多排动、静叶间的相互作用, 另一目标则是求解三维粘性非定常流动。我们已经进行的探索表明, 在本文方法的基础上, 开展上述研究没有实质性的困难。

参 考 文 献

- 1 Rai M M. Three- Dimensional Navier- Stokes Simulations of Turbine Rotor- Stator Interaction. J. Propulsion, 1989, 5 (3): 306- 311
- 2 Ni R H, etc. 3D Unsteady Flow Simulation Through a Turbine. The Australian Aeronautical Conference 1989, 254- 258
- 3 Philip C E Jorgenson and Rodrick V China. Explicit Runge- Kutta Method for Unsteady Rotor/Stator Interaction. AIAA Journal, 1989, 27 (6)
- 4 A kil A Rangwalla and Nateri K Madavan. Application of an Unsteady Navier- Stokes Solver to Transonic Turbine Design. J. of Propulsion and Power, 1992, 8 (5)
- 5 Giles M B. Stator/Rotor Interaction in a Transonic Turbine. AIAA, 1988: 88- 3093
- 6 宁卫, 周新海等. 跨音速压气机回转叶片排中三维流场的数值分析. 工程热物理学报, 12 (1): 42- 45
- 7 张涵信. 无波动、无自由参数的耗散差分格式. 空气动力学报, 1988, 6 (2): 143- 165

(责任编辑 魏星禄)