

考虑压气机动静干涉效应的非设计工况性能数值模拟*

赵养正, 刘前智

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 应用数值模拟方法研究了非设计工况下轴流压气机动静叶排相互干涉的非定常流动, 利用高分辨率格式求解准三维雷诺平均 N-S 方程, 非定常流场计算采用了双时间步法与 LU-SGS 隐式解法耦合的方法。计算给出了在 100%、90% 和 80% 设计转速下等转速特性的定常和非定常流的计算结果, 两者的比较表明, 定常流计算得到的效率低于非定常的结果, 边界点附近定常流的增压比高于非定常的结果。不稳定边界附近的非定常流计算结果表明, 利用叶片表面压力变化是否具有周期性作为等转速线上边界点的判别准则更为合理。

关键词: 非定常流动; 非设计工况; 数值仿真; 轴流压气机

中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2006) 05-0422-05

Numerical simulations of compressor off-design performances with rotor-stator interaction

ZHAO Yang-zheng LU Qian-zhi

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract The unsteady flow of rotor/stator interaction at off-design condition in axial compressor was investigated numerically. Quasi three-dimensional unsteady Navier-Stokes equations were solved with high-resolution scheme. Dual time-stepping approach in conjunction with LU-SGS implicit method was used to calculate the unsteady flow. The steady and unsteady performances at 100%, 90% and 80% design rotating speed respectively were presented. The computation showed that adiabatic efficiency values for steady flow is lower than that of unsteady flow. However, the calculated total-to-total pressure ratio is greater than the unsteady results. The numerical analysis showed that the stall margin can be determined by the unsteady computed results. The state is stable if unsteady surface pressure varies periodically with time, while it is unstable when the variations are not periodic.

Key words Unsteady flow; Off-design condition; Numerical simulation; Axial compressor

1 引 言

非定常流动是叶轮机内部固有的本质属性, 而现有的设计体系中不论是在设计或分析时基本上采用定常流动的假设, 从而忽略了非定常流动对叶轮机在气动、结构强度等方面的影响。目前, 国内外对非定常流动的研究比较多, 但其中采用非定常流动数值模拟方法预估压气机非设计工况性能方面的研究并不多见, 文献 [1] 研究了 Rotor 67 单转子在设计转速下非设计工况的非定常流数值模拟问题, 并研究了

进口总压畸变对旋转失速的影响, 文献 [2] 用非定常数值计算和实验方法研究了离心压气机的非设计状态性能和扩压器中的非定常流动, 文献 [3] 对单级跨声速压气机非设计工况下准三维动静叶干扰问题的研究表明, 在非设计工况下准定常假定是不适用的, 而直接进行动静叶干扰的非定常数值模拟是一个合理的选择。由于全三维非定常流动的数值模拟计算量很大, 目前直接用于压气机非设计工况流场模拟和性能预估尚比较困难。

本文应用的双时间步法与 LU-SGS 隐式解法相

* 收稿日期: 2005-11-17; 修订日期: 2006-01-28。

作者简介: 赵养正 (1965—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为叶轮机气动热力学及流场数值计算。

Email: jie_lan2000@sina.com

耦合的方法^[4],采用无波动、无自由参数的耗散 NND 格式数值求解轴流压气机准三维非定常粘性 N-S 方程^[5]。利用本文的方法和所研制的流场计算程序,对三种不同转速、不同工况下单级轴流压气机准三维叶栅流场进行了定常和非定常流动的数值模拟,并对结果进行了对比分析。

2 基本方程和数值方法

采用有限差分方法求解任意回转面上的准三维雷诺平均非定常 N-S 方程,紊流模型采用 Baldwin-Lomax 的代数模型。对方程采用时间后差二阶精度隐式格式离散,可得

$$\frac{3Q^{n+1} - 4Q^n + Q^{n-1}}{2\Delta t} + R(Q^{n+1}) = 0 \quad (1)$$

式中 n 表示物理时间域的 $n\Delta t$ 时刻。式 (1) 为时间隐式格式,式中 R 包括对流项、粘性项以及原项。粘性项采用中心差分格式离散,而对流项则采用了二阶高分辨率 NND 格式。

为了求解方程 (1), 定义

$$R^*(Q^{n+1}) = \frac{3Q^{n+1} - 4Q^n + Q^{n-1}}{2Q\Delta t} + R(Q^{n+1}) \quad (2)$$

$$\partial(Q^{n+1})/\partial\tau + R^*(Q^{n+1}) = 0 \quad (3)$$

式中 τ 为虚拟时间。利用 LU-SGS 隐式方法求方程 (3) 的定常解, 则

$$\begin{aligned} LD^{-1}UQ^\tau &= -\Delta R^*(Q^{n+1}) \\ Q^\tau &= (Q^{n+1})^{m+1} - (Q^{n+1})^m \end{aligned} \quad (4)$$

m 是虚拟时间域中的推进步数。

动、静叶均采用分区的 H 形网格。转子网格随转子一起转动, 静子网格固定在静子上, 排间界面重叠一列网格。进口、出口、物面均采用常规边界条件。为了便于周期边界的处理, 在动静叶片数不等的情况下, 如果计算所用的动静叶通道数之比不等于叶片数的比值, 则在保持稠度不变的条件下, 调整动、静叶数目和叶片几何来满足周期性条件。

3 计算结果及分析

本文的算例是某单级轴流压气机近叶尖径向位置处的叶栅, 转子和静子叶片数分别为 41 和 60。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 $59 \times 115 \times 2$, 交界面至静子下游为 $59 \times 125 \times 3$ 。

图 1 为计算得到的三个转速下的等转速特性线, 其中横坐标为流量系数, 其数值等于进口绝对 Ma 数的 q 函数与进口绝对气流角 (与轴向的夹角) 的余弦

的乘积。可以看出, 非定常流计算得到的效率值高于定常的结果, 这是因为定常计算在动静叶交界面处采用了周向掺混模型, 使本来不均匀的动叶出口流场人为地混合均匀, 增加了流动的掺混损失。同时, 定常计算得到的增压比高于非定常的结果, 其原因是在同样的出口反压条件下, 在非定常计算时动叶出口尾迹的低能气体流入到了后面的静叶通道中, 使静叶通道受到一定程度的堵塞, 流量降低, 这反过来又使前面动叶的进口气流攻角增大, 进一步降低了流量; 而在定常流计算中, 后面静叶进口气流是均匀的, 流通能力较强。所以, 在反压提高较小的情况下, 非定常计算得到的流量减少较多, 而定常计算只有在反压提高较多时才会得到相同的流量下降。从不同的转速特性线来看, 转速越低, 定常流结果与非定常结果之间的差别就越大, 说明偏离设计工况越远, 非定常流动的影响也就越大, 这分别体现在增压比和效率的计算结果上。

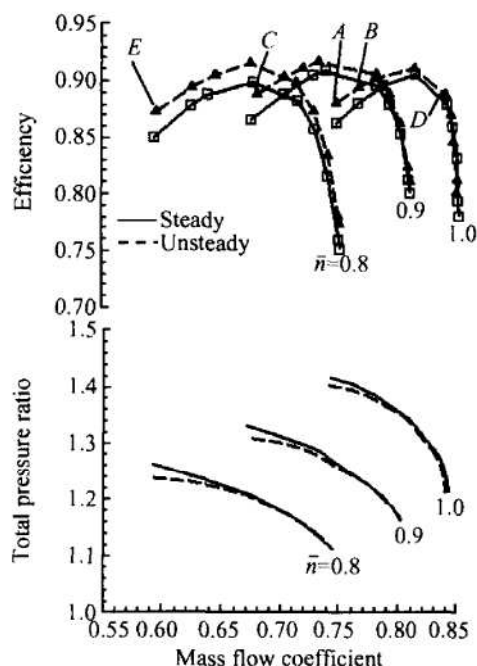


Fig 1 Compressor performance map

图 2 为 D 点 (设计点) 动叶尾缘附近和静叶前缘附近叶片叶背和叶盆表面共四个点的压力随时间的变化曲线。静叶压力面的压力最大, 而静叶吸力面的压力最小。从中可以看出, 四条曲线都呈现非常稳定的周期性变化, 第 6 个周期与前一周同期相位点的压力相对偏差不大于 4%。动叶表面压力受到下游静叶的影响, 叶背和叶盆的压力在波动幅度和相位上有差异, 叶盆的压力波动幅度明显大于叶背。而下游静叶两个表面压力波动的波型具有明显的区别, 这可能

是动叶尾迹以不同方式扫过静叶的叶背和叶盆造成的。

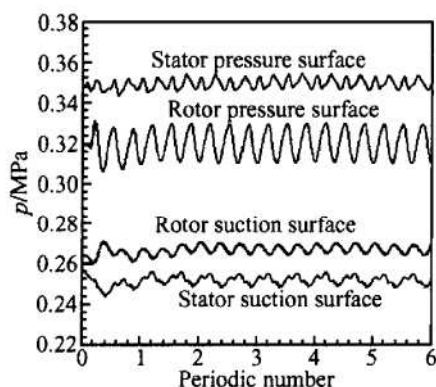


Fig 2 Variations of surface pressure with time

图 3 为 A 状态叶片表面压力随时间周期性变化曲线。动叶压力面的变化曲线在 6 个周期内周期性

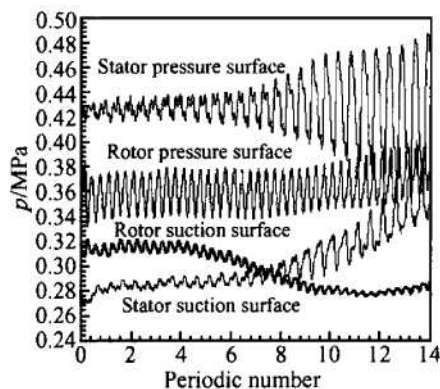


Fig 3 Variations of surface pressure with time

基本稳定, 其吸力面曲线的幅值基本不变但时均值不断下降; 静叶压力面曲线的幅值越来越大但时均值基本不变, 其吸力面曲线的幅值基本不变但时均值略有

上升。进一步计算到 14 个周期后, 可以看到, 静叶压力面曲线的时均值逐渐显出下降态势, 而吸力面的时均值上升加快, 两条曲线的变化幅值也越来越大; 动叶压力面的变化曲线与前 6 个周期相比也失去了稳定的周期性, 时均值逐渐上扬, 但幅值仍然未变, 吸力面曲线的时均值由逐渐下降变为基本稳定了, 最后又有所上升, 而压力波动曲线出现了类似于实验中观察到的旋转失速时压力变化的型态 (波幅和波动规律均发生变化)^[6]。

图 4 为 B 状态叶片表面压力随时间周期性变化曲线。四条曲线具有稳定的周期性变化规律, 而且第 14 个周期与前一周期同相位点的压力相对偏差不大于 2.5%, 也未出现 A 状态的不稳定周期性变化。在设计转速线上, A 点与 B 点是两个相邻的状态点, 因此在失速边界附近, A 点是不稳定工作点而 B 点是稳定工作点。

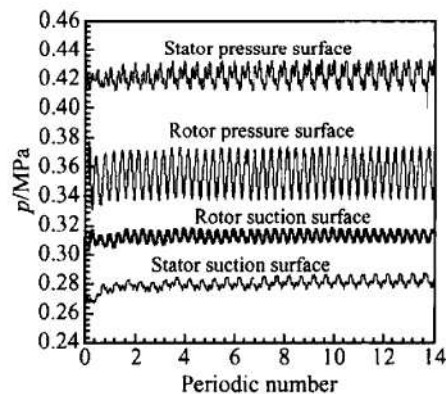


Fig 4 Variations of surface pressure with time

为了更进一步说明两个状态的不同现象, 图 5 和图 6 分别给出了状态 A 和状态 B 非定常计算得到的一个周期内流场的瞬态熵分布图。

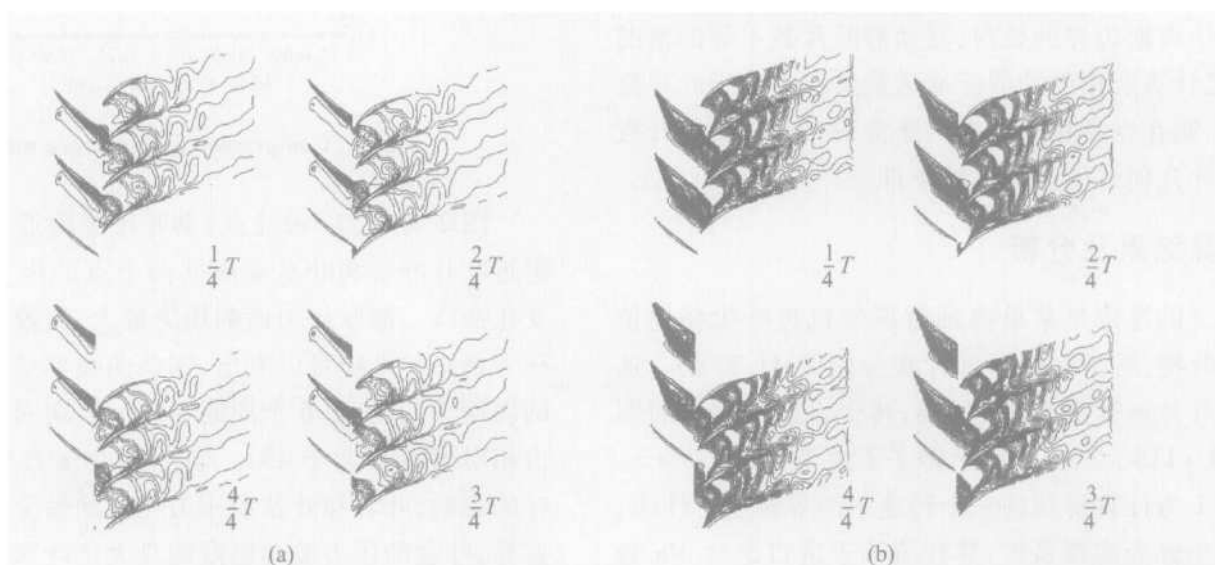


Fig 5 Entropy contour of unsteady flow field

在图 5 中, (a) 为第 6 个周期的计算结果。动叶的叶背出现了较大的分离, 分离区的低能流体进入静叶通道, 形成了一个低速流区, 阻塞了静叶通道。(b) 是继续计算得到的第 14 个周期的计算结果, 可以看出动叶通道几乎完全堵塞, 下游静叶通道也出现了更多的低能流区, 这是因为当动叶叶背出现较大分离时, 分离流进入静叶通道形成阻塞, 这又反过来影响了上游动叶进口的气流攻角, 使动叶的叶背分离更加严重, 这样相互干扰的结果, 就造成流场失稳。

图 6 为状态 B 一个周期内非定常流场的瞬态熵分布图。(a) 为第 6 个周期的计算结果, (b) 为第 14 个周期的结果, 从两个结果的比较可以看出, 尽管动叶叶背也出现了附面层分离, 但随着时间的推进流动并没有像状态 A 那样不断恶化, 而基本上保持不变, 说明 B 点确实是稳定工作点。

为了更进一步了解不稳定流动的非定常现象, 图 7 和图 8 分别给出了 90% 设计转速线上的 C 点和

80% 设计转速线上的 E 点两个状态叶片表面压力随时间变化曲线。与 A 点的变化相比, 尽管具体的变化形态不同, 但其共同的特点是, 动、静叶表面压力都不具有稳定的周期性变化规律, 因而 A、C、E 点都属于不稳定工作点。图 9 为 E 状态第 14 个周期内的瞬态熵分布, 其流动与图 5(b) 基本类似。

在用定常流方法进行流场计算确定压气机等转速特性时, 常常出现在边界点附近计算的压比偏高, 计算的最大效率偏低, 尤其是多级情况下更加明显。同时, 边界点的确定没有明确合适的判别准则, 致使边界点的确定非常困难, 且边界附近的流量和压比计算值误差较大。比如, 相对于非定常计算中的不稳定工作点 A 而言, 定常流计算仍然可以在小于该状态流量的情况下获得稳定收敛的定常解。而采用非定常流计算结果给出边界点时, 利用叶片表面压力波动曲线的周期性与否作为判别准则将非常明确, 且便于应用。

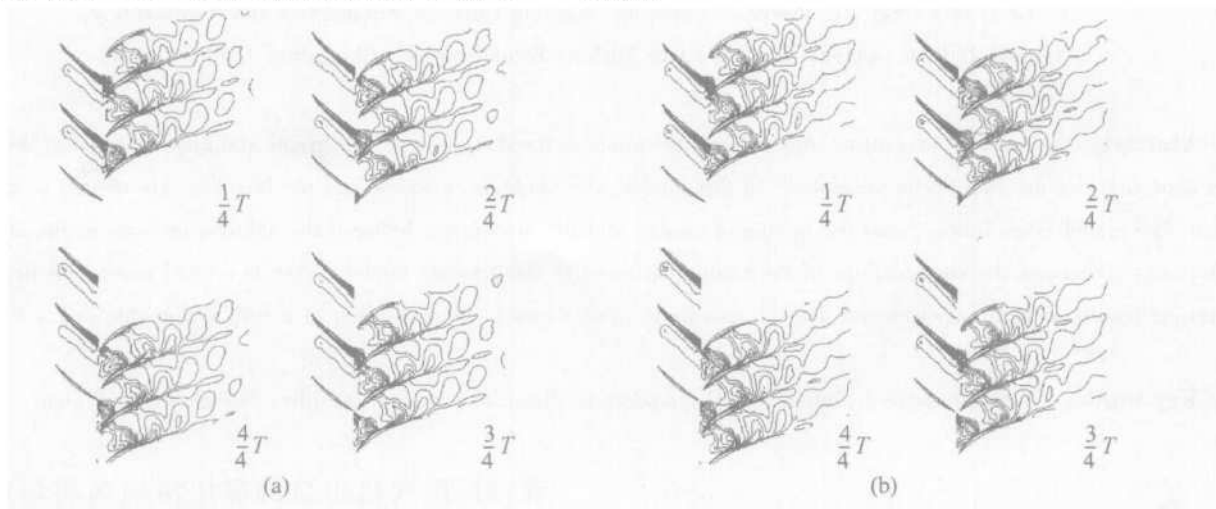


Fig 6 Entropy contour of unsteady flow field

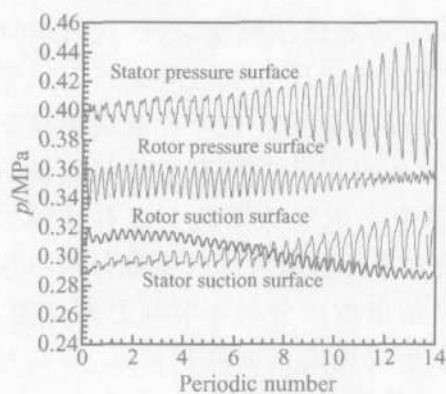


Fig. 7 Variations of surface pressure with time

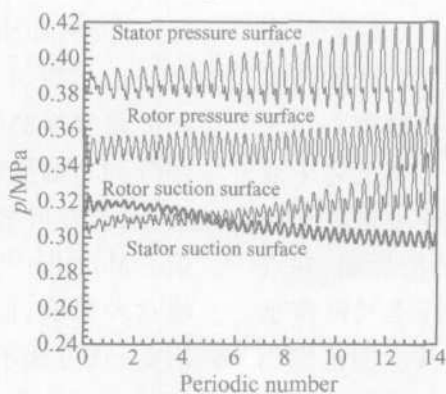


Fig. 8 Variations of surface pressure with time

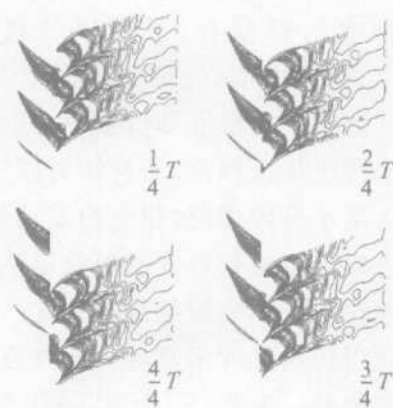


Fig. 9 Entropy contour of unsteady flow field

(下转第 430 页)

90%转速下的敏感系数与试验偏差的主要原因,是由于在试验过程中防喘系统提前投入工作,亦即尚未达到最小流量即认为进入失速,导致在该转速下的稳定边界即稳定工作裕度出现了较大偏差,从而引起了上述差异。

4 结 论

(1)本文基于平行压气机理论,成功发展了一种用于分析动、稳态畸变传递的准二维模型,物理模型是把发动机作为一个整体来研究的,只在发动机的进口及出口给定边界条件,在发动机内部并不再施加其它的附加边界条件,因而可反映发动机内部流动的特征,克服了传统平行压气机模型的局限;

(2)采用白噪声、纵向和切向时间尺度模拟了随机性压力脉动分量,通过周向掺混系数的引入,考虑了切向子压气机的动量和质量的掺混作用,从而使得模型更加符合实际流动情况;

(3)针对某双涵道涡轮风扇发动机和某三级风扇进行的验证分析表明,理论预测和试验结果具有较好的符合性,这反映在稳定性间接准则—畸变敏感系数参数预测较准确,这说明本文所发展的准二维模型可以用于燃气涡轮发动机以及压缩部件对于进口流场畸变响应的分析研究。

(上接第 425 页)

4 结 论

(1)本文计算结果中,非定常流计算的压气机效率在同流量条件下高于定常流的结果,而且转速越低,差别越明显;非定常流计算结果可以改善定常流计算中边界点附近压比偏高的现象,同样是转速越低越显著。

(2)当流动处于稳定状态时,增加非定常计算的周期数,叶片表面的压力波动都能保持稳定的周期性变化规律。而当流动处于不稳定状态时,随着非定常计算的周期数增加,叶片表面的压力波动将不具有稳定的周期性变化规律。

(3)本文的初步研究表明,用叶片表面的压力波动是否具有周期性来作为等转速线边界点的判别准则更为合理。

参考文献:

- [1] Saeid Niaz, Alex Stein, Lakshmi N Sankar. Numerical stud-

参考文献:

- [1] Tesch W A, Steenken W G. Blade and dynamic digital compressor program-volume 1-J85 clean inlet flow and parallel compressor models[R]. NASA, 1976
- [2] Davis M W, O'Brien W F. Stage-by-stage poststall compression system modeling technique[R]. AIAA 87-2088
- [3] Davis M W. Parametric investigation into the combined effects of pressure and temperature distortion on compression system stability[R]. AIAA 91-1895
- [4] Hale A, O'Brien W. A three-dimensional turbine engine analysis compressor code (TEACC) for steady-state inlet distortion[J]. *Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery*, 1998, 120(7).
- [5] Chalk J C, Hale A A. A three-dimensional compression system model using NPARC[R]. AIAA 97-0992
- [6] Mazzawy R S, Banks G A. Circumferential distortion modeling of the TF30-P-3 compression system (PWA-5448) [R]. NASA CR-135124, 1977.
- [7] Walter W A, Shaw M. Distortion analysis for F100(3) engine[R]. NASA CR-159754, 1980
- [8] 刘大响. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2004
- [9] Mokeike H. Prediction techniques[R]. AGARD LS-72, 1974
- (编辑: 崔永刚)

ies of stall and surge alleviation in a high-speed transonic fan rotor[R]. AIAA 2000-0225

- [2] Hartmut KRAHN, Chunill HAH. Numerical and experimental investigation of the unsteady flow field in a transonic centrifugal compressor[C]. *IGTC Tokyo TS-049*, 2003
- [3] 任玉新, 沈孟育, 刘秋生. 跨音速压气机在非设计工况下动静叶相互作用的数值模拟 [J]. 航空动力学报, 1999, 14(3).
- [4] 刘前智, 周新海, 胡运聪. 轴流叶轮机三维粘性非定常流动计算的双时间方法 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22 (增刊): 21~24
- [5] 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).
- [6] 聂超群, 桂幸民, 于清, 等. 跨音压气机近失速状态的非定常特征 [J]. 工程热物理学报, 1999, 20(2).

(编辑: 郭振伶)