

轴流压气机转-静二维非定常薄层 N-S 数值模拟*

葛 宁

(南京航空航天大学 动力工程系, 江苏 南京 210016)

摘 要: 采用非定常薄层 Navier-Stokes 紊流运动方程来描述一跨声轴流压气机中径处的二维转-静非定常流场, 速度脉动的相关分析表明转子尾迹对静子的势流流场几乎没有什么影响, 而粘性的影响取决于叶片排之间的轴向距离。

关键词: 轴流式压气机, 非定常流, 计算流体力学, 纳维尔-斯托克斯方程

中图分类号: V235 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2001) 01-0036-04

Unsteady two-dimensional thin-layer Navier-Stokes solutions for rotor-stator in an axial flow compressor

GE Ning

(Dept. of Power Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A two-dimensional unsteady, viscous aerodynamic analysis has been developed for the flow inside a transonic single stage compressor. The analysis is based on a numerical method for solving the two-dimensional thin-layer Navier-Stokes equations for unsteady viscous flow through rotor-stator blade rows. The B-L turbulent model is applied for the turbulence closure. The dynamic grid method is used for the connection of rotor and stator grids. The velocity fluctuation correlation analyses show that the potential flow field inside the stator is not influenced by the rotor wake passing, but when the gap of rotor-stator is decreased, the rotor wake will affect the stator boundary layer.

Key words: Axial flow compressor, Unsteady flow, computational fluid dynamics, Navier-Stokes equation

1 引 言

非定常流对轴流压气机级性能的影响主要包括转-静势流相互干扰以及转子尾迹对静子的周期性冲击。因此, 气动参数在任一时刻可以分解为三个分量: 1) 时间平均流动; 2) 叶片周期性旋转引起的气流脉动; 3) 紊流脉动。前两者加起来就是气动参数按相位平均下的流场。在绝对坐标系下该流场是非定常的, 且气流脉动频率是转子旋转速度的整数倍。Adamczyk^[1]把这类流动称之为确定的非定常流, 而把气流脉动频率与转子旋转速度不相关的非定常流, 如紊流、脱落涡等称为不确定的非定常流。确定的非定常流对压气机的性能有较大的影响^[2-4], 其根源与尾迹

的运动有关, 因此有必要对压气机确定的非定常流作些研究工作。

本文通过数值计算的方法来研究压气机转-静相对运动所产生的非定常流场。NASA67 单级轴流跨声压气机被选为研究的对象^[5]。该压气机叶片转子有 22 个, 静子有 34 个。中径处转-静轴向间距为转子轴向弦长的 85%。设计转速为 16.043 kr/min, 流量为 33.25 kg/s。压气机中径处的叶型被用于二维非定常流场的计算, 转-静叶片比选择了 2/3。

2 计算方法及结果分析

计算所解的方程是 Reynolds 平均下的非定常薄层近似 N-S 粘流运动方程, 紊流模型采用 B-L 代数经

* 收稿日期: 2000-07-24; 修订日期: 2000-09-26。

作者简介: 葛 宁 (1961—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为叶轮气体动力学。

验公式并扩展到尾迹的计算中^[6]。流场计算采用有限体积法,无粘数值通量由 Roe 迎风格式计算,粘性通量采用空间中心差分方法获得。非定常流的时间推进采用一阶显示格式。

计算网格由三部分构成:转子网格,静子网格和中间连接网格。其中,转子网格同转子一起移动,静子网格保持不动。中间网格处于转-静两流场的中间区域,在流场计算中起连接作用。中间网格前端同转子网格连在一起并随转子一起运动,后端通过滑动的方式同静子连在一起。具体过程是:人为设定一平均网格间距,当转子移动的距离等于平均间距时,同静子相连的连接点沿转子移动方向分别同各自下一个静子网格点相连,即改变连接点的序号,在交接线上形成动网格的连接方式^[7]。而中间网格的其它点则通过两端点的线性插值获得。两次滑动之间,中间网格仅随转子作平行扭动。

滑动与扭动的差别在于前者发生时格元面积会发生变化,而扭动则不会引起面积变化。当转子移动一个转-静空间周期后,中间网格正好也移动一个空间周期。上述连接方法的最大好处是转-静流场之间无需插值。但是,当网格滑动时,由于格元面积的变化,此时方程中不仅要考虑格元面积变化对守恒变量的影响,而且这种格元面积的变化同时要满足几何守恒定律。具体方程在有限体积法下的最终表达形式是

$$q^{n+1} = q^n - \frac{\Delta \tau}{J^{n+1}} \left[\left| F_{i+\frac{1}{2}} - F_{i-\frac{1}{2}} \right| + \left| G_{j+\frac{1}{2}} - G_{j-\frac{1}{2}} \right| - \left| G_{j+\frac{1}{2}}^v - G_{j-\frac{1}{2}}^v \right| \right] - \frac{\Delta I q^n}{J^{n+1}}$$

其中 q 代表守恒变量, F, G 是曲线坐标系下的无粘数值通量, G^v 为粘性数值通量, n 是迭代的时

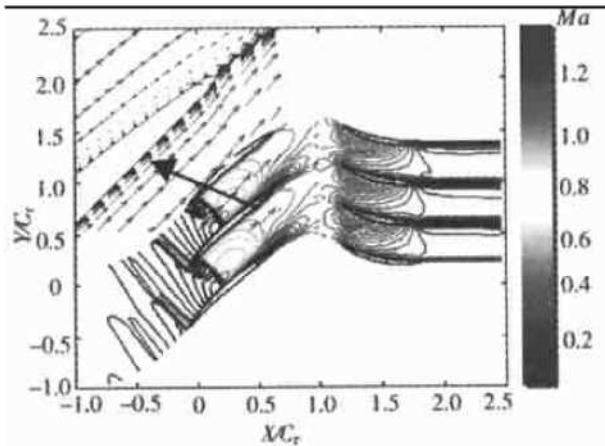


Fig. 1 Mach number contour and velocity vector plots

间。 J 是雅可比变量,物理上代表格元面积, ΔJ 即为网格滑动时格元面积的变化量。上述方程中的最后一项是当格元面积变化时对守恒变量的修正项,而 ΔJ 的计算必需满足几何守恒定律^[8]:

$$J_{\tau+} (\hat{\xi})_{\xi+} + (\hat{\eta})_{\eta=} 0$$

$$\text{式中 } \hat{\xi} = J\xi = -J(\xi_{x\tau+} \xi_{y\tau}), \hat{\eta}_{\tau} = J\eta_{\tau} = -J(\eta_{x\tau+} \eta_{y\tau})。$$

计算所用的网格点数为:转子 $2 \times 110 \times 25$,静子为 $3 \times 60 \times 17$,中间为 5×49 。

2.1 静子时间平均流场

计算收敛时,转子通道位于叶背中弦长处有一道正激波。激波与附面层干扰导致激波后叶背附面层产生分离。倒流使附面层增厚,同时也使尾迹加宽,加大了对下游流场的干扰,如图 1 所示。下游的压力场扰动对激波几乎没有影响。但转子的运动对下游静子流场有一定的干扰作用。最明显的是静子计算域进口气流角(与轴向)随转子运动作周期性的变化,如图 2 所示。参照 Adamczyk 相对时间平均的方法,在转子运动一个转-静周期内对静子流场内每一点都进行了平均处理。图 3 是所得到的速度等值线图。与测量结果相比,计算得到的速度低了一些。说明二维计算同三维实际流动有一定差距,但通道内气流速度变化的趋势同试验基本一致。

2.2 脉动速度相关分析

当转子尾迹通过静子通道时会引起气流速度的脉动,类似于雷诺应力的分析方法,尾迹通过所引起的非定常气动应力也可以通过气流脉动速度的相关分析得到。本算例中所采用的脉动速度相关计算公式如下:

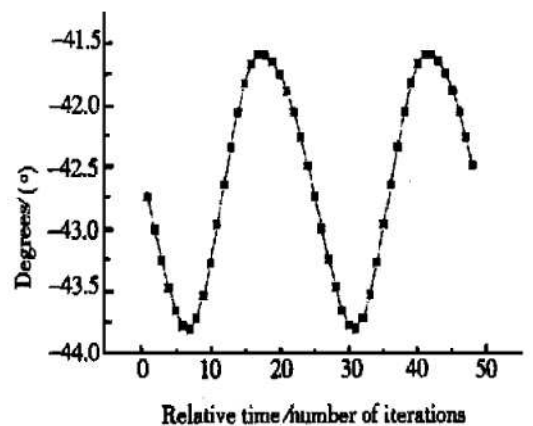


Fig. 2 Periodical variation of stator inlet flow angle with time iteration

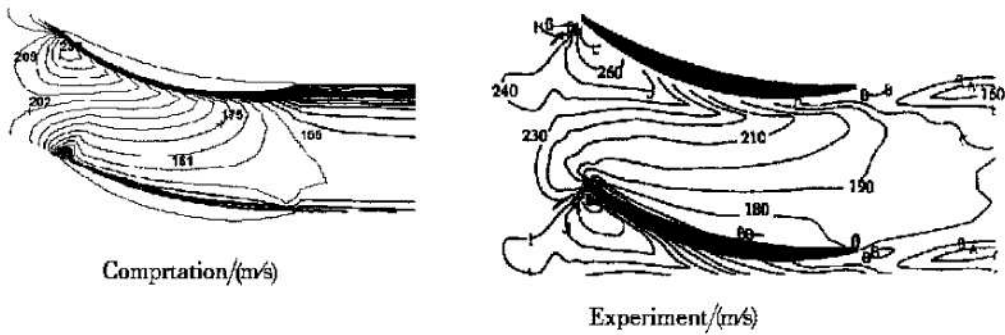


Fig. 3 Contours of absolute total velocity

$$\overline{u'u'} = (\overline{u(t) - u})(\overline{u(t) - u})$$

$$\overline{v'v'} = (\overline{v(t) - v})(\overline{v(t) - v})$$

其中, ' \sim ' 表示由 2.1 节所得到的平均速度, 即在转子运动一个周期内对静子流场进行平均得到的值。 $u(t)$ 和 $v(t)$ 分别为某时刻下的轴向和切向速度, $\overline{u'u'}$ 和 $\overline{v'v'}$ 表示瞬时轴向和切向脉动速度的相关量。

图 4 和图 5 分别表示了当转-静轴向间距为转子轴向弦长 85% 时, 轴向与切向脉动速度的相关等值线图

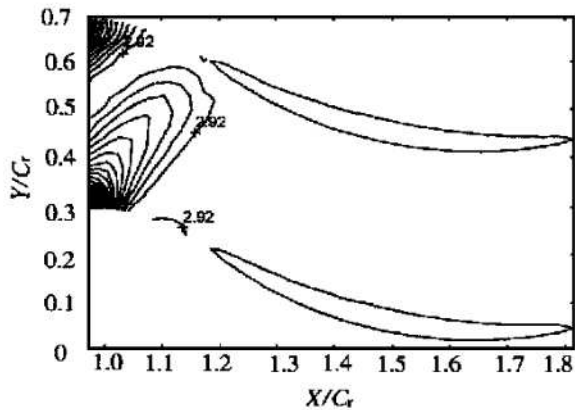


Fig. 4 Instantaneous contours of axial velocity fluctuation correlation $\overline{u'u'}$ (m^2/s^2) (85% rotor axial chord)

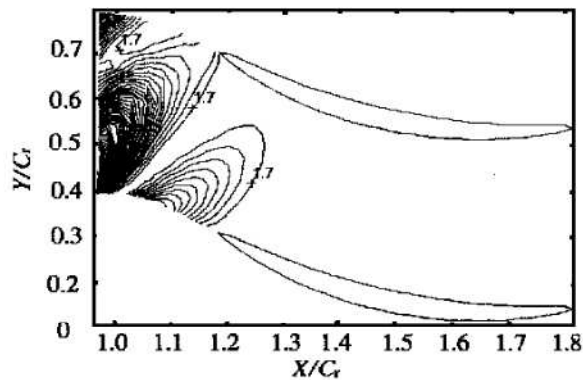


Fig. 5 Instantaneous contours of tangential velocity fluctuation correlation $\overline{v'v'}$ (m^2/s^2) (85% rotor axial chord)

图。从图中可以看出, 轴向脉动速度在进口处很快消失掉, 而切向脉动速度向下游保持得略微远一些, 但也在叶盆进口处消失。上述结果表明在转-静轴向间距较远时, 尾迹所产生的非定常气动应力在静子通道中几乎等于零。换句话说, 尾迹对静子通道中的平均速度流场没有什么影响。

当转-静轴向间距缩短为转子轴向弦长的 30% 时, 从图 6 和图 7 可以看出, 轴向脉动速度对静子叶盆和叶背附面层都有一定的干扰, 且干扰的方式并不

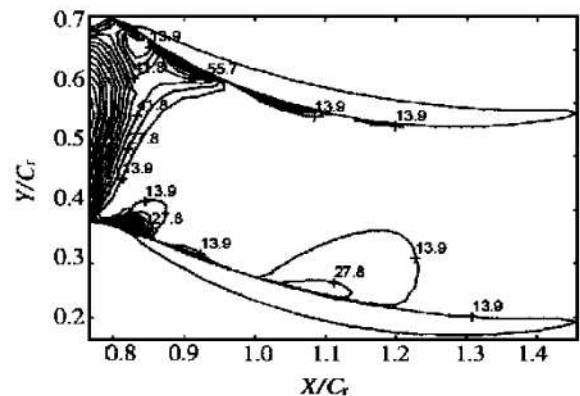


Fig. 6 Instantaneous contours of axial velocity fluctuation correlation $\overline{u'u'}$ (m^2/s^2) (30% rotor axial chord)

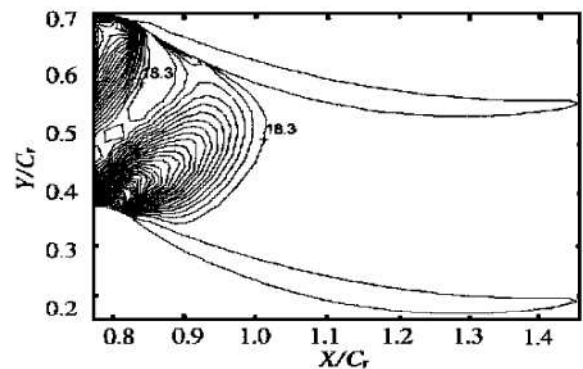


Fig. 7 Instantaneous contours of tangential velocity fluctuation correlation $\overline{v'v'}$ (m^2/s^2) (30% rotor axial chord)

一样。在叶背附面层中, 轴向脉动速度的影响范围是逐渐减小的, 呈衰减趋势。但在叶盆附面层中, 轴向脉动速度在中弦长附近不但没用减小其影响范围, 反而有所扩大。切向脉动速度除在叶背前缘附近附面层有一点影响, 在静子通道中同图 5 相比变化不大。

3 结 论

通过数值解非定常薄层近似下的紊流 N-S 运动方程, 计算了一台轴流压气机中径处的转-静二维流场, 并对静子流场进行了时间平均、速度脉动相关分析, 转子尾迹对静子的非定常气动干扰程度同叶片排的轴向间距关系较大。当轴向间距较大时, 尾迹通过对静子通道内的时间平均流场几乎没有影响。而当间距小时, 尾迹对静子附面层有一定的干扰作用, 而对平均流场同样没有太大的影响。

参考文献:

- [1] Adamczyk J J. Unsteady aerodynamic interaction effects on turbomachinery blade life and performance[R]. AIAA Paper 92-0149.

- [2] Mikolajczak A A. The practical importance of unsteady flow [R]. AGARD CP-177, 1977.
- [3] Hunter I. Endwall boundary layer flows and losses in an axial turbine stage [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1982, 104.
- [4] Smith L Jr. Wake ingestion propulsion benefit [R]. AIAA-91-2007.
- [5] Hathaway M D. Unsteady flows in a single stage transonic axial flow fan stator row [R]. NASA TM 88929, 1986.
- [6] Chen J P. Unsteady three dimensional Thir-Layer Navire-Stocks solutions for turbomachinery in transonic flow [D]. Ph. D Dissertation, Mississippi State University, Mississippi, May 1991.
- [7] Janus J M. Advanced 3-D algorithm for turbomachinery [D]. Ph. D Dissertation, Mississippi State University, Mississippi, May 1989.
- [8] Thomas P D, Lombard C K. Geometric conservation law and its application to flow computations on moving grids [J]. AIAA Journal, 1979, 17(10).

(编辑: 盛汉泉)

(上接第 32 页)

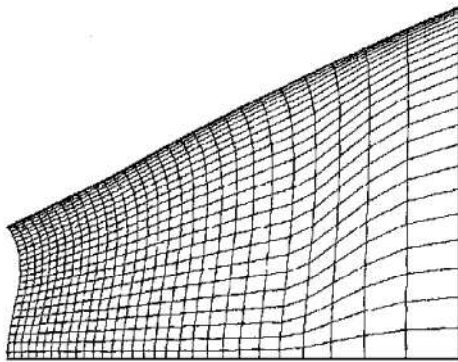


Fig. 8 Grid detail of the divergent region

4 讨 论

K_1 和 K_2 可控制正交由边界向网格内部的扩展程度, K_1 和 K_2 取值较大时, 不仅边界, 而且与边界接近的若干内部网格也正交, 但过大的 K_1 和 K_2 会使内部网格过于密集, 甚至出现网格交错的现象。需要根据生成的网格对 K_1 和 K_2 作适当的调整, 直到得到满意的网格为止。

采用 Hermit 三次多项式插值函数作为弯曲函数, 有时会得到过于弯曲的网格线, 从而导致网格单

元过于倾斜甚至发生网格交错, 这时可采用张量样条插值, 通过调整张量参数得到介于线性与三次多项式之间的弯曲函数来控制网格线的形状^[5]。

发展的代数网格生成方法仅用到代数插值运算, 无需迭代求解偏微分方程组, 故网格生成速度远高于微分方程方法, 实践表明计算时间可节省几百倍以上。

参考文献:

- [1] 张正科, 庄逢甘, 朱自强. 两种椭圆型方程求源项方法在喷管内流场网格生成中的应用 [J]. 推进技术, 1997, 18(2).
- [2] 苏铭德, 黄素逸. 计算流体力学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 143.
- [3] Shih, T F-P, Bailey R T, Nguyen H L, et al. Algebraic grid generation for complex geometries [J]. Int J Numer Meth Fluids, 1991, 13: 1~ 31.
- [4] 《数学手册》编写组. 数学手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 376.
- [5] Steinthorsson E, Shih T F-P, Roelke R J. Enhancing control of grid distribution in algebraic grid generation [J]. Int. J Numer Meth Fluids, 1992, 15: 297~ 311.

(编辑: 王居信)