

文章编号: 1000-8055(2003) 06-0768-04

双级风扇三维粘性非定常流动的数值解

刘前智

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对一台双级跨音速轴流风扇动静叶片排相互干扰的三维非定常流动, 进行了 N-S 方程的数值求解。首先计算风扇定常流场, 以定常流收敛结果为起始场计算非定常流动。计算结果表明, 非定常流动对各叶片排进口气流角有较大的影响, 其中静叶的变化大于动叶, 与定常流结果相比, 非定常的瞬态攻角增大的量大于减少的量, 最多时增大近 10 左右。静子叶片受到的非定常气动力变化幅度也大于转子叶片, 叶片排所处的轴向位置不同, 非定常流动的影响会有较大的差别。

关键词: 航空、航天推进系统; 多级压气机; 非定常流动; N-S 方程; 数值模拟

中图分类号: V211.1+8

文献标识码: A

Numerical Solutions of 3D Unsteady Viscous Flow in a Two-Stage Fan

LIU Qian-zhi

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The numerical simulations of the unsteady flow induced by rotor-stator interaction in a two-stage fan were carried out. A three-dimensional unsteady Navier-Stokes equations solver using a high-resolution finite difference has been developed. It can be used for the calculation of steady flow field with an implicit scheme. The solution of steady flow was firstly obtained by this code. The unsteady flow computations were started from this solution. The unsteady flow results show that the unsteady effects on inlet flow angles of blade rows are significant. The variations in inlet flow angles of stator blades are larger than that of rotor blades. In comparison with the steady flow solution, the increases in unsteady flow attack angle are larger than the decreases. The maximum increase is about 10 degrees. The variations in unsteady aerodynamic force on stator blades are also larger than that on rotor blades. The unsteady flow effects caused by several blade rows are different from that by single blade row.

Key words: aerospace propulsion system; multi-stage compressor; unsteady flow; Navier-Stokes equations; numerical simulation

轴流风扇和压气机内部存在着非常复杂的三维非定常流动, 除了对气动性能有较大的影响以外, 对叶片强度、振动等特性的影响也是不容忽视的。国外从二十世纪八十年代就开始了叶轮机动静相干非定常流数值研究工作, 在多级叶轮机非

定常流数值研究方面也开展了一些工作^[1~4], 主要是在涡轮方面的研究。国内在单级压气机非定常流研究方面做了一些工作^[5,6], 并开展了多级叶轮机动静叶排相干的非定常无粘流数值模拟研究^[7]。单级叶轮机只有两排叶片, 其相互干扰特性

收稿日期: 2003- 01- 16; 修订日期: 2003- 04- 08

作者简介: 刘前智 (1961-), 男, 安徽巢县人, 西北工业大学航空动力与热力工程系副教授, 硕士, 主要从事叶轮机气动设计与流场数值模拟研究。

相对比较简单,但在多级环境下,多叶排干涉的影响是相互叠加在一起的,其对不同叶片排的流动特性产生何种影响,目前还不甚明了。在深入了解多级环境非定常流动的条件下,通过给定叶片排相互之间周向定位(周向布局),使这种影响叠加的结果是彼此相互削弱而不是增加,将会对气动性能和结构强度带来积极的影响,从而挖掘出非定常流动的潜力。本文通过数值求解全三维非定常 N-S 方程,研究了双级轴流风扇动静叶排相干的非定常流动问题,对计算结果进行了分析,给出了多叶排环境下动静叶干扰对流动所产生的非定常影响。

1 基本方程与数值解法

圆柱坐标系下 (θ, r, z) 三维雷诺平均 N-S 方程转换到一般曲线坐标系 (ξ, η, ζ) 下,可表达为:

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

式中: Q 为原参数, E, F, G 分别是对流通量, E_v, F_v, G_v 分别是粘性通量, H 为源项,详细表达式见文献[5]。

在跨音速流场计算中,为了提高激波的捕获精度,保证流场中激波的高分辨率,本文方法中对流项的空间离散采用了二阶无波动、无自由参数的耗散差分格式^[8],粘性项则采用中心差分进行空间离散,紊流模型采用 B-L 代数模型。

非定常流计算利用定常流场解作为起始场,该定常解采用 LU-SGS 隐式方法^[9]来求解。对方程(1)作 LU 分解,则得:

$$LD^{-1}U\delta Q = -R\Delta t \quad (2)$$

式中: R 包含对流项的差分 and 源项。令 $\Delta t \rightarrow \infty$, 即形成隐式迭代求解,且不含有一般隐式方法必需的块矩阵求逆过程,可迅速得到收敛结果。

非定常流场解的时间离散采用一阶显式方法,其格式为:

$$\delta Q = -R\Delta t \quad (3)$$

式中: Δt 为显式格式稳定性条件所限制的全场最小的时间步长。边界条件及动静叶排间交界面处理方法参见文献[5]。

2 计算结果与分析

采用本文所述的方法,自行开发了多级压气

机动静叶排相干全三维非定常流动计算程序,并对一台双级高负荷轴流风扇^[10]的算例进行了计算,各排叶片数分别为28、46、60、59,计算时选取的叶片通道数为2、3、4、4,整个计算域网格点总数超过105万个。利用隐式解法得到定常流场收敛解,并以这个收敛解为初场,进行非定常时间精确求解,得出了非定常流场解。图1、图2和图3分别是

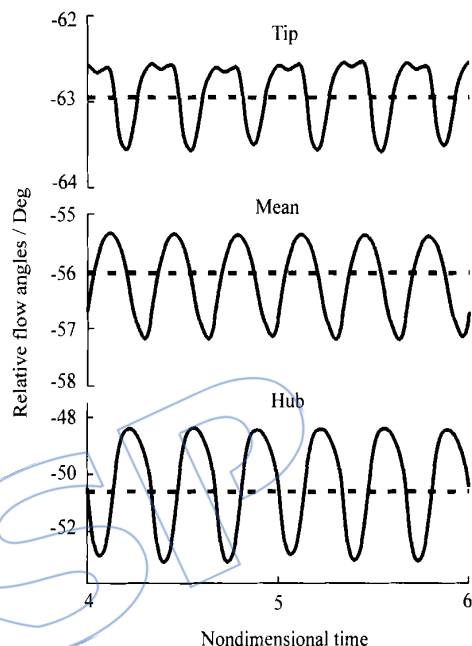


图1 第二级转子叶片进口气流角变化

Fig. 1 Inlet Flow Angle of Second Rotor

各叶排进口处一固定点的气流角随时间的变化曲线(动叶进口固定点与动叶一起转动),图中的虚线为定常流场解的进口气流角。第二级转子的进口气流角在定常解附近变化,从根部的 $\pm 3^\circ$ 左右到尖部的约 $\pm 1^\circ$ 左右逐渐减小。第一级静子进口气流角的变化幅度大于第二级静子,尖部幅度最大可达到 14.5° ;而且静叶气流角的变化幅度均大于动叶。对于动叶来说,除了根部的变化基本上是对称于定常解以外,其它截面的变化都是攻角增大的幅度大于减小的幅度,但由于变化幅度均较小,即使以定常解作为进口气流角的设计值,攻角的变化对气动性能的影响也不大。然而,对于静子叶片来说,如果定常解就是进口气流角的设计值,则攻角可增大近 10° 左右,必将对叶片的气动性能产生较大的影响,在设计时应该加以考虑。从第二级静叶气流角变化可以看到,上游叶排各叶片扫过所产生的进口气流角变化幅度是有差别的,在内径处较小(气流角本身的变化幅度也较小),外

径处的差别较大,尤其是在攻角增大一侧更加明显(最大约为 4°)。

干扰,叶片力也是变化的。从变化幅度来看,转子

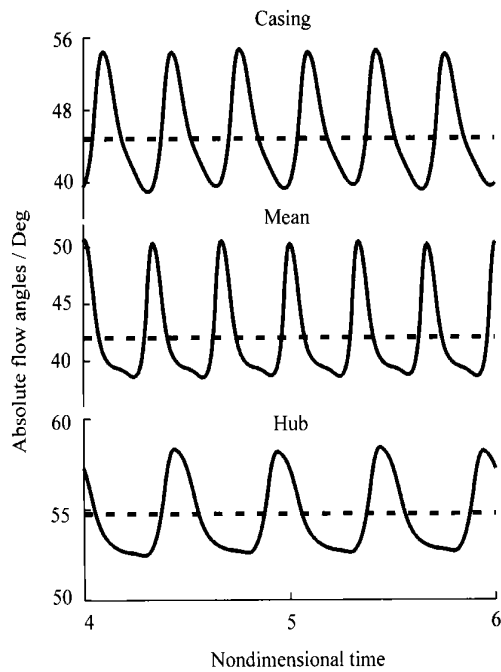


图2 第一级静子叶片进口气流角变化
Fig. 2 Inlet Flow Angle of First Stator

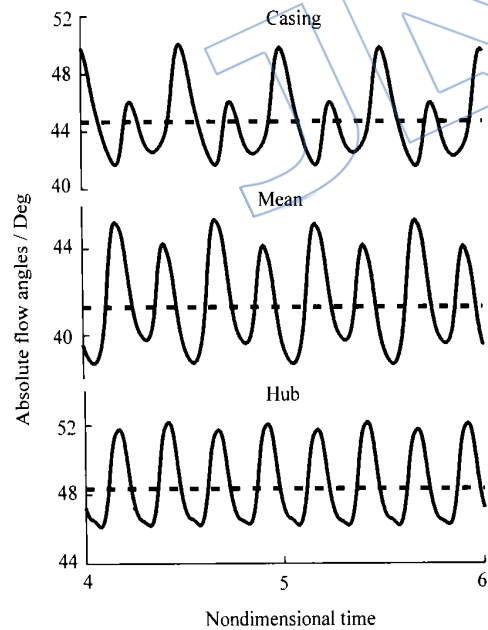


图3 第二级静子叶片进口气流角变化
Fig. 3 Inlet Flow Angle of Second Stator

图4、图5、图6和图7分别为各叶排叶片所受到的非定常气动力合力的变化曲线,虽然第一级转子的进口条件为定常的,但受到下游静子叶排的

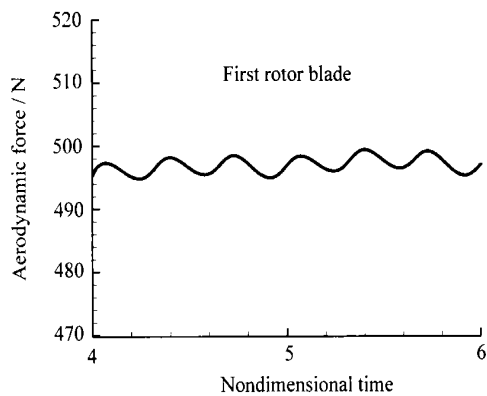


图4 第一级转子叶片非定常气动力的变化
Fig. 4 Aerodynamic Force on First Rotor

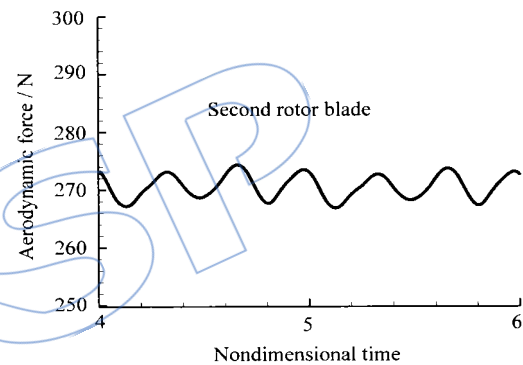


图5 第二级转子叶片非定常气动力的变化
Fig. 5 Aerodynamic Force on Second Rotor

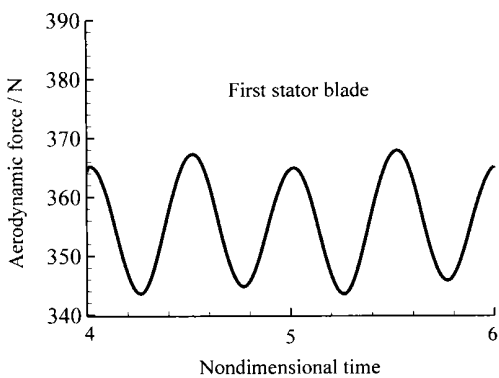


图6 第一级静子叶片非定常气动力的变化
Fig. 6 Aerodynamic Force on First Stator

叶片明显比静子叶片要小,而且第二级静子叶片的变化也大于第一级静叶。各排叶片所受气动力的变化频率除第一级动叶取决于下游叶排的影响以外,第一级静叶和第二级动叶则受到了其上游叶排的影响,但第二级静子叶片受力变化的频率

却只有其进口气流角变化频率的一半。与进口气流角的影响一样, 动静叶排相互间的非定常干扰对叶片气动力变化幅度的影响也是静叶明显大于动叶。图8是各叶片排平均半径处某一点绝对总压

分别加以考虑。

3 结 论

本文对一台双级风扇动静叶片排相干非定常流场的计算结果表明:

(1) 在多级风扇中, 动静叶片排相互干扰的非定常流动对动、静叶片的影响是不同的, 不论是叶片进口气流角还是叶片所受气动力的变化幅度, 静叶都比动叶更大。

(2) 非定常流动对攻角的影响更偏向于增大攻角(尤其在尖部附近), 瞬态攻角可能比定常值增大近 10° ; 其对流动的影响应该加以重视, 在选择设计攻角时应加以考虑。

(3) 在多级环境下, 动静叶排相干对某叶片排的非定常影响与其所处的轴向位置有关, 叶片排位置越靠后, 非定常流动影响下的参数波动规律就越复杂。

参考文献:

- [1] Gony-Burlet K L, Rai M M, Madavan N K. Unsteady Three-Dimensional Navier-Stokes Simulations of Multistage Turbomachinery Flows[R]. AIAA 93-1979, 1993.
- [2] Davis R L, Shang T, Buteau J, et al. Prediction of 3-D Unsteady Flow in Multi-Stage Turbomachinery Using an Implicit Dual Time-Step Approach[R]. AIAA 96-2565, 1996.
- [3] Hohn W, Heinig K. Numerical and Experimental Investigation of Unsteady Flow Interaction in a Low-Pressure Multistage Turbine[J]. J. of Turbomachinery, Trans. of the ASME, 2000, 122(4): 628-633.
- [4] Uzol O, Chow Y C, Katz J, Meneveau C. Experimental Investigation of Unsteady Flow Field within a Two-Stage Axial Turbomachine Using Particle Image Velocimetry[J]. J. of Turbomachinery, Trans. of the ASME, 2002, 124(4): 542-552.
- [5] 刘前智, 周新海. 单级跨音压气机三维非定常粘性流动计算[J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 12-16.
- [6] 季路成, 周盛. 一个跨音风扇级转/静干扰流动的时间精确模拟[J]. 工程热物理学报, 1999, 20(4): 426-430.
- [7] 刘前智, 周新海. 多级压气机非定常流动的数值模拟[J]. 推进技术, 2001, 22(5): 408-410.
- [8] 张涵信. 无波动、无自由参数的耗散差分格式[J]. 空气动力学学报, 1988, 6(2): 143-165.
- [9] Yoon S, Jamson A. Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel Method for the Euler and Navier-Stokes Equations[J]. AIAA J., 1988, 26(9): 1025-1030.
- [10] Messenger H E, Kennedy F E. Two-Stage Fan: I - Aerodynamic and Mechanical Design[R]. NASA CR-120859, 1972.

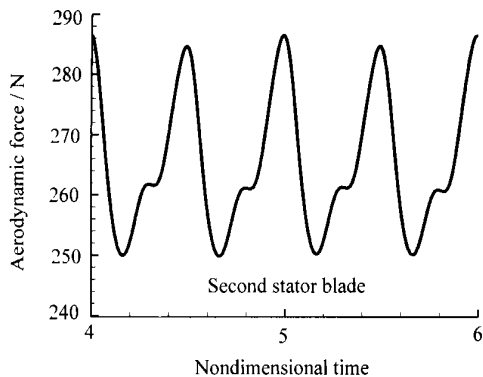


图7 第二级静子叶片非定常气动力的变化

Fig. 7 Aerodynamic Force on Second Stator

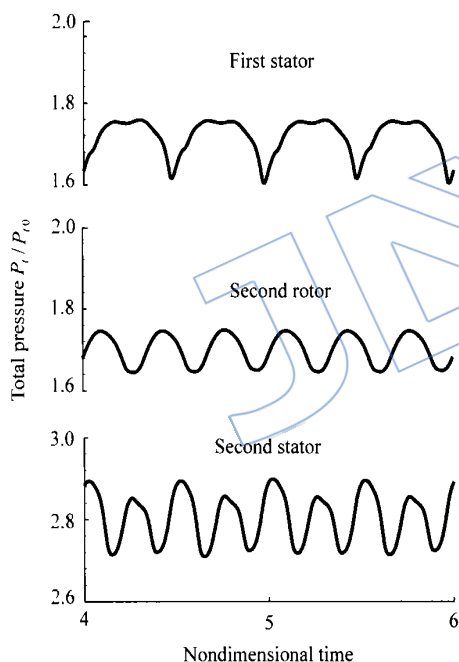


图8 叶片进口总压的变化曲线

Fig. 8 Total Pressure at Inlet of blade rows

随着时间的变化曲线, 在第一级静叶进口处的总压变化有明显的主流区与尾迹区, 且主流区的范围较宽。第二级动叶进口总压已没有非常明显的主流区, 类似于正弦波的变化, 第二级静叶进口的总压变化就更能说明问题, 波谷的数值基本相同, 而波峰的数值却有差别, 说明上游叶排相邻叶片通道中的流动出现了明显的差别。因此, 在多级环境下, 叶片排所处的轴向位置不同, 动静叶排相干对其流动所产生的非定常影响会有较大差别, 必须