

文章编号: 1000-8055(2006)05-0914-09

低速压气机静叶非定常 Clocking 效应数值模拟

綦 蕾^{1,2}, 邹正平^{1,2}, 陈 浮³, 徐国强¹, 聿汀¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083;

2. 北京航空航天大学 航空发动机数值仿真研究中心, 北京 100083;

3. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用三维粘性非定常数值模拟方法研究了重复级低速压气机内部非定常流动, 其中包括静叶 Clocking(时序)效应以及尾迹-边界层、尾迹-尾迹和尾迹-泄漏流的相互作用。对静叶时序效应的结果分析显示, 当两级静叶相对周向位置改变时最大效率变化只有 0.1%, 表明低速压气机中静叶时序效应不明显。另外, 非定常结果流动图画显示, 在非定常环境下上游周期性尾迹的通过对下游叶片边界层、尾迹以及叶尖泄漏流的发展都有一定影响。

关 键 词: 航空、航天推进系统; Clocking 效应; 相互作用; 非定常流动; 低速压气机
中图分类号: V221 **文献标识码:** A

Numerical simulation of stator clocking effect in a low speed compressor

QI Lei^{1,2}, ZOU Zheng ping^{1,2}, CHEN Fu³,
XU Guo qiang¹, DIN G Shu ting²

(1. National Key Laboratory on Aero Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Aeroengine Numerical Simulation Research Center,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

3. School of Energy Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The unsteady flow in a low speed compressor with repeated stages was simulated by numerical simulation of 3-D viscous flow. The influence of clocking and the interaction of wake, boundary layer and leakage vortex were discussed. The results show that only a 0.1% overall efficiency variation due to clocking of the second stage stator is found, and it is considered that the clocking effects in low speed compressor is not distinct. The unsteady flow indicates that the upstream wake can influence the boundary layer, wake and leakage

收稿日期: 2005-08-04; 修订日期: 2006-01-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(50106002); 国家自然科学基金资助(50106001; 50546013)

作者简介: 綦蕾(1981-), 女, 湖南株洲人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事叶轮机内部非定常流动机理的研究

flow of the downstream flow.

Key words: aerospace propulsion system; clocking effect; interaction; unsteady flow; low speed compressor

基于非定常流动的叶轮机设计体系已经成为当前叶轮机械研究的热点之一。众所周知,多级叶轮机内部的真实流动本质上是非定常的,各叶片排之间的相对运动导致通道内转子和静子之间压力场、激波以及尾迹等的相互作用,这些非定常流动对多级叶轮机的效率会产生不可忽略的影响。深入了解多级环境下的非定常流动机理,并在设计中有效控制叶片排内流动,提高工作效率,对于提高叶轮机械的性能和稳定性具有重要意义。

在叶轮机内部非定常流动中, Clocking 效应是影响其效率的主要因素之一,它是由静子/静子(转子/转子)叶片周向位置不同导致尾迹对下游叶片边界层发展的影响不同造成的。目前对 Clocking 效应影响比较统一的观点是:当第一排静子(或转子)尾迹输运到第二排静子(或转子)的前缘附近时效率最高,当第一排静子(或转子)尾迹输运到第二排静子(或转子)的通道中央时效率最低。已经有很多学者对 Clocking 效应进行了研究, Huber et al.^[1]对两级高压涡轮的实验研究显示, Clocking 效应引起的效率变化达 0.3%。Andrea A. et al.^[2]通过数值计算研究了 Clocking 效应对低压涡轮性能的影响,结果表明当静叶相对周向位置改变时,效率变化达 1.1%。对于压气机中 Clocking 效应的影响, Gundy-Burlet 和 Dorney^[3,4]通过数值模拟表明静子相对位置的改变引起效率变化在 0.5%~0.8% 之间。Wendy et al.^[5]对多级低速压气机进行了实验研究,结果表明 Clocking 效应对总效率的影响为 0.2%。由此可见在以提高多级叶轮机效率为目标的设计过程中,研究 Clocking 效应对多级叶轮机流动特性的影响必不可少。

另外,尾迹-边界层、尾迹-尾迹以及尾迹-泄漏流的相互作用也是多级叶轮机内部非定常流动的重要特征。文献[6]的研究表明一定频率的尾迹通过对边界层内分离流动能起到抑制作用,从而达到减小流动损失,提高效率的目的。Maik et al.^[7]在研究涡轮静叶 Clocking 效应时发现,转子尾迹中受上游静子尾迹影响的区域尾迹强度明显减小。Hodson^[8]研究了尾迹与边界层作用的问题,发现周期性的尾迹能使边界层提前转捩,并

减小分离泡尺度,使分离再附提前以及产生平静区。

不难发现 Clocking 效应与尾迹-边界层相互作用在物理机理上是相互联系的。当静子/静子(转子/转子)叶片相对周向位置改变时,前排叶片尾迹进入后排叶片的位置也会发生变化,因此对后排叶片上的边界层发展产生影响,导致边界层中转捩和分离等过程相应发生变化,从而影响到整级的效率。

本文对重复级低速压气机不同静叶相对周向位置的非定常流场进行数值模拟,并对结果的 Clocking 效应以及非定常尾迹-边界层、尾迹-尾迹和尾迹-泄漏流相互作用等流动图画进行了分析,以增强对低速压气机内部非定常流动机理的了解。

1 数值方法

1.1 算例

本文的算例为重复级低速压气机,四排叶片数均为 20,轮毂比为 0.666 7,轮毂半径 0.2 m,静叶叶中稠度为 1.018。

1.2 计算方法

数值模拟采用改进后的 Denton 程序进行计算,计算中采用多级叶片排三维非定常方法,详见文献[9]。采用二阶精度显式格式求解非定常雷诺平均 N-S 方程,并采用零方程混和长度湍流模型。定常计算交界面处采用掺混面方法。在非定常计算中采用了隐式双重时间步法以加速收敛。

1.3 网格设置

采用 H 型网格进行计算,网格总数约为 82 万。其中各排叶片周向、展向和轴向网格数如下:第一级动叶 $46 \times 43 \times 108$, 第一级静叶 $46 \times 43 \times 94$, 第二级动叶 $46 \times 43 \times 98$, 第二级静叶 $46 \times 43 \times 115$ 。具体网格分布见图 1。

1.4 计算参数设定

边界条件进口给定总温 $T_{in}^* = 289.3$ K, 总压 $P_{in}^* = 100\ 000$ Pa, 气流角 $\alpha_n = 0^\circ$; 出口给定静压 $P_{out} = 103\ 500$ Pa。

非定常计算采用定常计算收敛结果作为初场。计算中一个周期内设定 60 个物理时间步。动静叶交界面处信息传递采用插值方法。

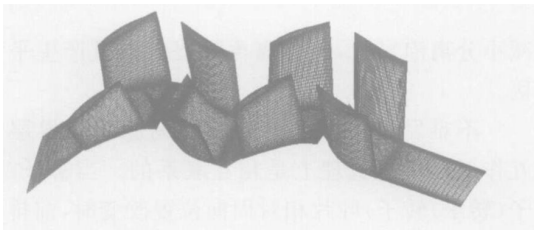


图 1 计算网格
Fig. 1 Computational grid

在静叶 Clocking 效应计算中改变第一级静叶的周向位置, 每次变化 1/8 节距。

2 计算结果及分析

2.1 Clocking 效应分析

表 1 为两级压气机定常计算结果和实验结果的总参数对比, 数据显示流量和压比的计算结果与实验结果相差在 1% 以内, 数值计算结果较为可信。

表 1 定常计算结果与实验结果总参数对比
Table 1 Comparison of steady results and experiment results

	实验结果	定常计算结果
流量/(kg/s)	8 498	8 513
总压比	1.047 6	1.047 7

图 2 为计算结果效率随第二级静叶周向位置的变化, 可以看出最高效率和最低效率之差约 0.1%, 表明本算例的静叶 Clocking 效应影响不明显。

下面通过对比分析定常结果以及最高效率位置(以下简称“0 位置”)和最低效率位置(以下简称“3 位置”)流动图画进一步分析算例中 Clocking 效应不明显的原因。众所周知, 熵增是衡量叶轮机械内部流动损失的一个重要参数, 本文中求熵增的表达式如下:

$$S = \frac{C_p}{\gamma} \ln \left[\left(\frac{P}{P_{ref}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\gamma} \right]$$

其中: T_{ref} 和 P_{ref} 取进口总温和总压。

$$C_p = 1\,005\text{ J/kg}\cdot\text{K}, \quad \gamma = 1.4$$

图 3~ 图 5 是定常结果、0 位置和 3 位置叶

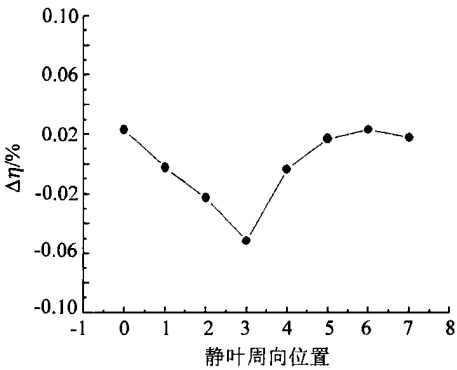


图 2 效率随第一级静子周向位置的变化
Fig. 2 Efficiency variation versus 1st stator clocking position

根、叶中、叶尖(分别对应 10%, 50%, 90% 叶高)时间平均熵增分布。可以看出, 时间平均结果中损失较大的区域主要为叶片表面边界层及尾迹。而第二级动叶通道中央也存在高损失区, 比较定常结果显示这是第一级动叶尾迹经过第二级动叶通道时产生的。

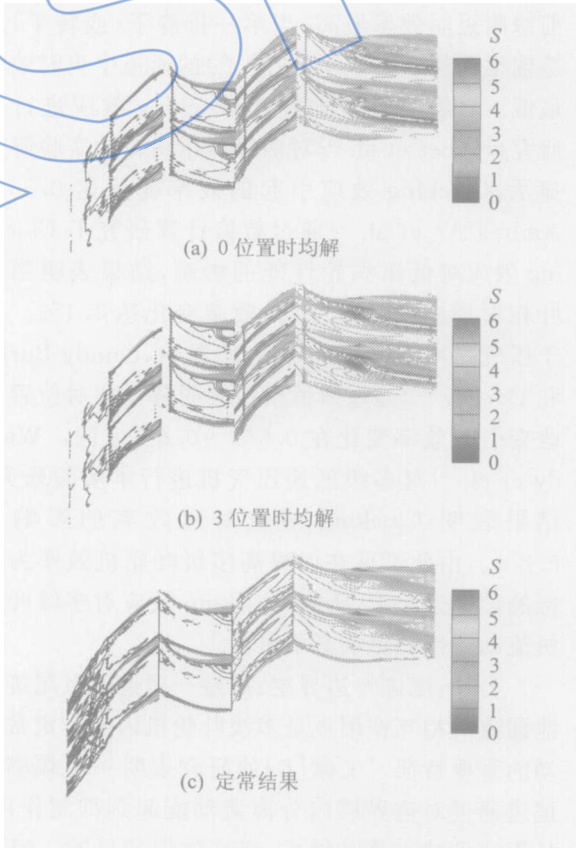


图 3 叶根熵增分布
Fig. 3 Root span surface entropy distributions

第二级静叶的分布情况比前三排复杂得多。从根部来看, 高损失区域主要有两个, 即第二级静

叶出口尾迹处的高损失区和第二级静叶通道中间的高损失区。尾迹处高损失区的非定常时均结果与定常结果相似, 从图中可以看出此区域的损失占根部损失的绝大部分。另外, 受上游叶片排流动影响, 根部通道中间也存在高损失区域, 由熵增值的大小可以看出这一区域的损失比尾迹区的损失小很多, 但作用范围较大。对比定常结果和非定常时均结果发现, 此区域的损失是非定常流动产生的。将0位置和3位置的根部熵增分布进行比较, 0位置比3位置在尾迹区的损失值大; 而0位置比3位置在通道中的损失小。0位置和3位置在根部的总损失大小很难比较。

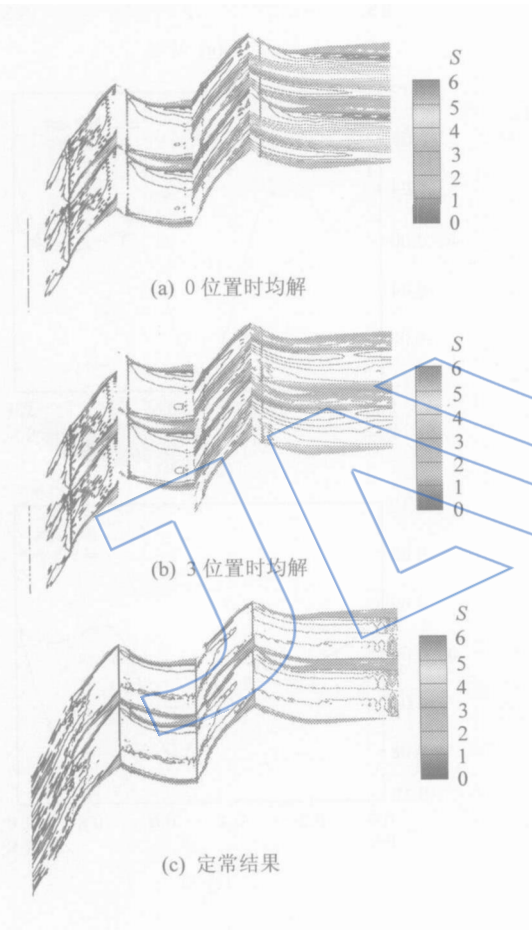


图4 叶中熵增分布

Fig. 4 Mid span surface entropy distributions

第二级静叶整个叶尖区域的非定常流动损失都比定常损失大, 主要由靠近机匣处的端壁损失在前面几排的积累, 以及上游动叶叶尖间隙流动所导致。图中显示, 第二级静叶靠近机匣处的大部分区域损失较大, 并且0位置和3位置两者分布情况差别不大, 但是在靠近静叶吸力面边界层以及下游尾迹中心处0位置比3位置的损失值明显增大。

叶中处0位置第一级静叶尾迹主要从第二级静叶通道中间流过, 并与通道中的主流发生掺混; 3位置的第一级静叶尾迹则作用在第二级静叶的前缘附近, 并与叶片表面边界层相互作用。从叶中的分布特点来看, 这与前面提到对 Clocking 效应研究的结论相违背, 进一步说明总效率随静叶相对位置的变化不是由 Clocking 效应引起的, 而是 Clocking 效应和通道中其它复杂流动的综合影响。

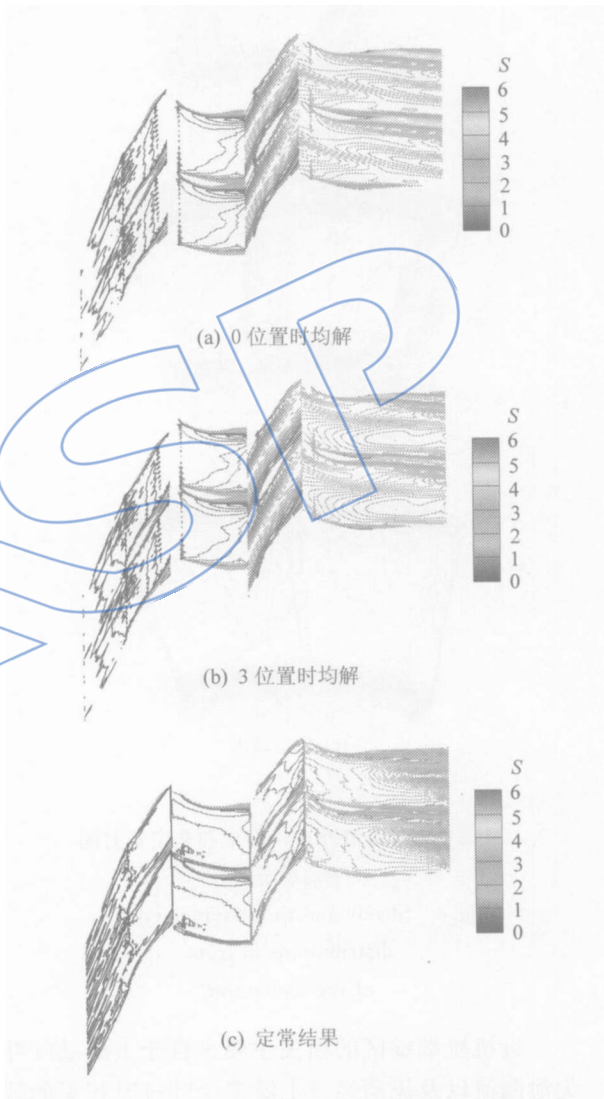


图5 叶尖熵增分布

Fig. 5 Tip span surface entropy distributions

为了进一步对比最高效率和最低效率位置的 Clocking 效应影响, 下面分析第二级静叶通道中沿叶高方向的损失分布。图6是定常结果、0位置和3位置的第二级静叶进口时间平均熵分布云图, 图中左侧靠近叶片吸力面, 右侧靠近叶片压力面。

图中显示非定常时均结果第二级静叶进口处高损失区主要有 3 处,即近机匣端壁区、近轮毂端壁区和第一级静叶尾迹影响的高损失区。

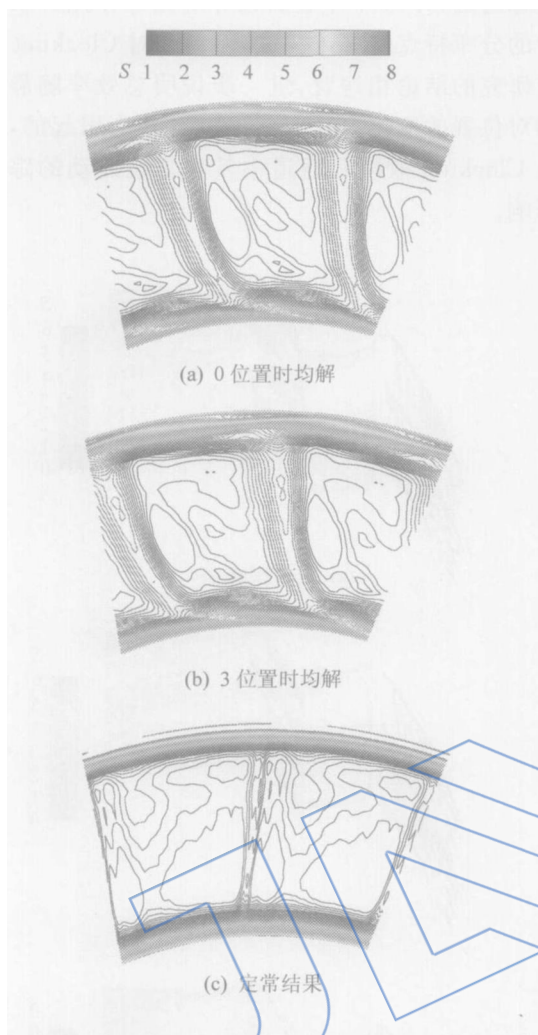


图 6 第二级静叶进口定常和非定常时间平均熵分布

Fig. 6 Steady and time average entropy distributions in front of the 2nd stator

近机匣端壁区的损失主要来自于上游动叶叶尖泄漏流以及流动经过上游多个叶排时积累的端壁损失和通道涡损失,从它的范围和大小来看,这部分损失占整个叶高损失的绝大部分。

近轮毂端壁区的损失同样来源于流动在上游多个叶排中积累的轮毂端壁损失和通道涡损失,另外还有第一级静叶轮毂间隙的泄漏流也是损失的来源之一,这一部分的损失也较大。

另外一部分损失是由第一级静叶尾迹在下游的传播产生的。可以看出,0 位置和 3 位置的分布与目前对 Clocking 效应的认识不一致,最高效

率时第一级静叶尾迹没有作用在叶片前缘附近,而最低效率时第一级静叶尾迹的一部分区域向下游发展后反而比较接近叶片前缘。

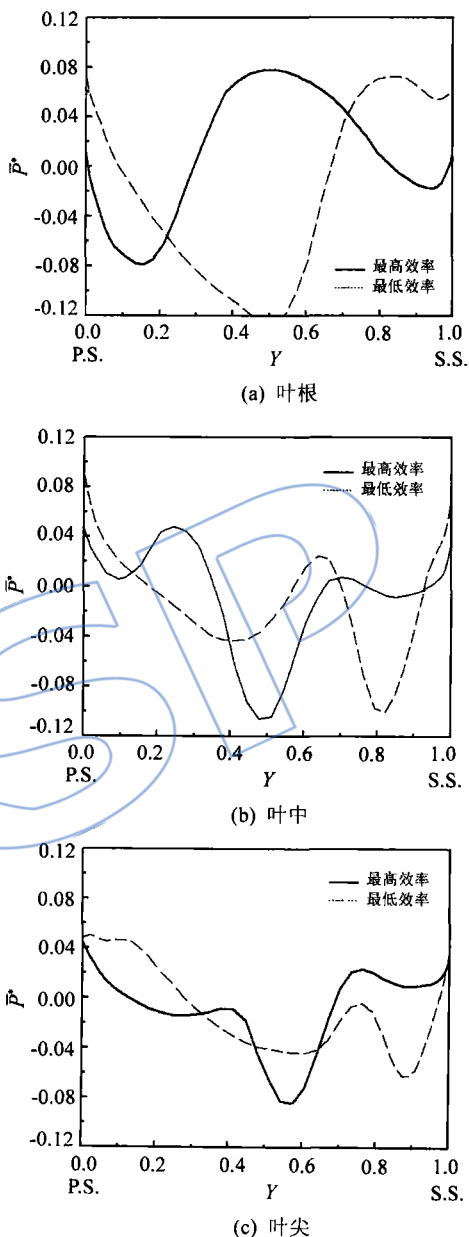


图 7 第二级静叶进口时间平均相对总压分布
Fig. 7 Time average relative total pressure distributions in front of the 2nd stator

图 7 对应图 6 中根、中、尖相对总压 P^* 时均值沿周向的变化,相对总压的定义如下:

$$P^* = \frac{P^*(\Phi, r) - P_{ave}^*}{P_{ref}^*} \times 100\%$$

其中: P_{ave}^* 是相对总压的周向平均值, P_{ref}^* 的值在熵增的定义中已经给出,图中 Y 表示周向位置。

P. S. 和 S. S. 分别表示靠近静叶压力面和吸力面一侧。

可以看出时间平均结果中, 虽然 0 位置和 3 位置的总压分布规律不同, 即波峰和波谷值以及周向位置都不相同, 但是第一级静叶尾迹在第二级静叶通道中引起的相对总压变化都很小, 不到 0.25%, 很难使总效率有明显变化。

图 6 和图 7 再次说明了, 叶轮机内部的非定常流动非常复杂, 除了 Clocking 效应外, 还有许多其他的非定常作用需要考虑, 如尾迹与泄漏流等的相互作用。这些三维非定常的综合作用最终决定非定常流动对叶轮机性能影响的效果。只有在 Clocking 效应非常强的情况下, 即该效应占主导地位情况下才能发挥其作用。

文献[10]中提到压气机中的 Clocking 效应比在涡轮中要低, 而低速情况下的 Clocking 效应比高速情况下的效应低, 这可能是导致本算例的低速压气机计算结果效率变化的 Clocking 效应不明显的直接原因之一。

从上面的分析中可以看出, 本算例中的两级低速压气机非定常计算结果 Clocking 效应不明显。虽然数值计算的精度会对 Clocking 效应产生一定程度的影响, 但更主要的是由低速压气机自身的流动特点决定的, 下一节中将通过对非定常流动图画的分析来说明这一点。

2.2 非定常流动分析

本节主要分析 0 位置的非定常结果, 通过对流动图画的分析初步了解非定常尾迹- 边界层、尾迹- 尾迹以及尾迹- 泄漏流相互作用。

2.2.1 叶中流动

图 8 为叶中 0/60T 时刻熵增分布。从图中可以明显看到各排叶片尾迹向下游通道运动, 并与叶片表面边界层以及下游叶片排的尾迹相互作用。

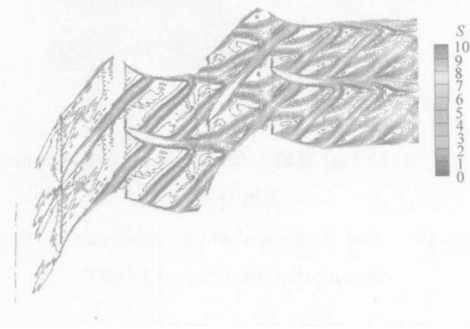


图 8 0/60T 时刻叶中熵增分布

Fig. 8 Mid span entropy distributions of 0/60T

用。从图中还可以看出静叶出口尾迹强度明显小于动叶出口尾迹强度, 且第一级静叶的尾迹在进入第二级静叶通道前, 受到第一级动叶尾迹的干扰, 并与之相互作用, 之后又被第二级动叶的前缘切割, 因此在进入第二级静叶通道前第一级静叶的尾迹强度已经很小, 这也使得 Clocking 效应不明显。

图中还显示了“经典的”尾迹在下游通道中的传播过程, 较为经典的描述是利用简单动力学理论将这一作用机理分为三个方面: 弯曲、剪切和拉伸^[11,12]。弯曲是由于尾迹在通道中的传播速度不同导致尾迹中心线的扭曲; 剪切是叶片吸、压力面之间的速度梯度造成的尾迹运动方向的改变; 拉伸过程是因为下游叶片前缘附近的速度梯度使得尾迹宽度增加。图中显示, 转子尾迹在下游通道中的弯曲程度较小, 远小于涡轮中的尾迹弯曲程度, 这是因为压气机中叶片吸力面和压力面的压差远小于涡轮中的压差, 导致尾迹在通道中变形减小。

2.2.2 尾迹与边界层相互作用

图 9 为非定常结果 12/60T 和 20/60T 时刻第一级静叶叶中同一区域的熵增和轴向速度分布。图中显示边界层和尾迹处具有熵增值高和轴向速度小的特点。当不同时刻第一级动叶的尾迹撞击到第一级静叶吸力面边界层的不同位置时, 叶片表面边界层分布出现以下现象:

- (1) 第一级动叶尾迹作用到第一级静叶吸力面边界层时, 两者的掺混使得相互作用区域的熵增值增加, 即掺混损失增加;
- (2) 第一级动叶尾迹作用的第一级静叶边界层下游区域, 边界层变薄;
- (3) 第一级动叶尾迹作用的第一级静叶边界层上游区域, 边界层厚度增加。边界层厚度增加和变薄在图 9 的轴向速度分布中体现出来。

目前许多文献中也对尾迹- 边界层的相互作用进行了研究。Yi Chih et al.^[13]对涡轮进口导向叶片下游的转子叶片吸力面边界层进行实验测量发现, 进口导向叶片尾迹作用的边界层下游区域, 转子边界层变薄, 而上游区域边界层厚度增加。文献[14]中对某涡轮进口导向叶片尾迹作用在转子叶片的区域进行测量显示, 进口导向叶片尾迹作用区域之间动叶边界层变薄。这一现象类似于湍流撞击到平板上, 对此 D Keith Walters et al.^[6]解释为当来流有尾迹通过时, 边界层的发展将经过周期性的过程, 尾迹通过时诱导平板边界层产生湍流斑, 并逐渐向下游传播, 在向下游传播的过程中, 湍流斑将改变分离区的位置, 伴随着流

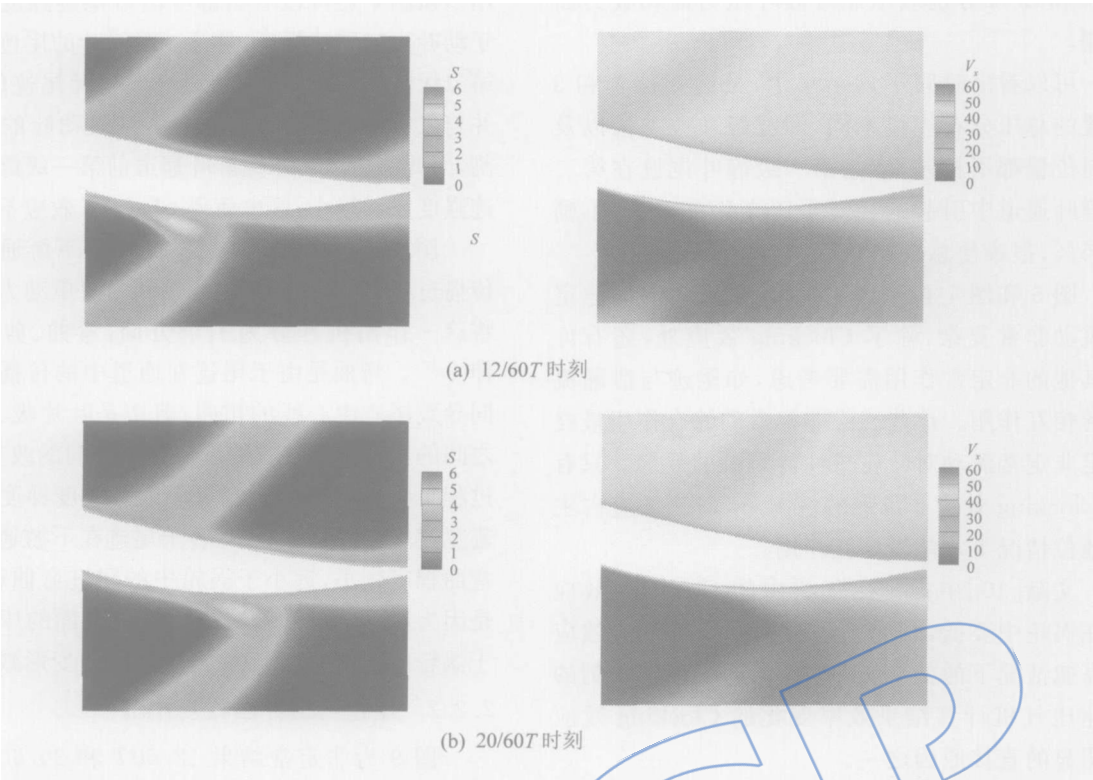


图 9 第一级静叶叶中熵增和轴向速度分布

Fig. 9 1st Stator mid span entropy and axial velocity distributions

动的再附, 出现平静区, 因此尾迹经过的区域之间边界层变薄。虽然本文的计算结果无法对湍流斑和平静区的具体流动图画进行描述, 但是尾迹作用导致边界层厚度的变化在流动图画中体现的较明显。

2. 2. 3 尾迹与尾迹相互作用

非定常结果中还显示出尾迹- 尾迹之间复杂的相互作用。关于尾迹- 尾迹相互作用已经有许多学者进行了研究, Maik et al.^[7] 对某单级跨音高压涡轮内部的非定常流场进行了测量, 发现转子尾迹中受静子尾迹影响的区域尾迹强度减小, 实验数据显示静子尾迹对脉动值造成的影响约 50%。Chow et al.^[14] 的研究也表明尾迹- 尾迹相互作用使得转子尾迹发生“ 纽结”, 并导致尾迹传播轨道的不连续, 以及湍流斑的产生。

图 10 为第二级动叶和第二级静叶叶中 0/ 60T 时刻熵增分布, 在前面的分析中已经提到, 低速压气机中由于叶片负荷较小, 导致出口尾迹的强度较小, 因此尾迹- 尾迹相互作用对流动结构的影响不十分明显, 从流动图画中很难观察到尾迹- 尾迹相互作用产生的湍流斑。虽然如此, 从图中圆圈标出的区域仍然可以看到两个尾迹相互作用产生的纽结现象, 第二级动叶的尾迹在向下

游发展的过程中, 由于受到上游叶片排尾迹的影响, 运动轨迹不再沿着直线方向, 而在相互作用的区域发生了扭曲, 进而尾迹强度和宽度都发生了改变。



图 10 0/60T 时刻第二级动叶和第二级静叶叶中熵增分布

Fig. 10 2nd Rotor and stator mid span surface entropy distributions of 0/60T

2. 2. 4 尾迹与泄漏流相互作用

由于两级压气机动叶均存在叶尖间隙, 所以动叶间隙泄漏流会对通道内的流动产生一定影

响,下面通过相对马赫数和熵增的分布来分析动叶叶尖泄漏流。

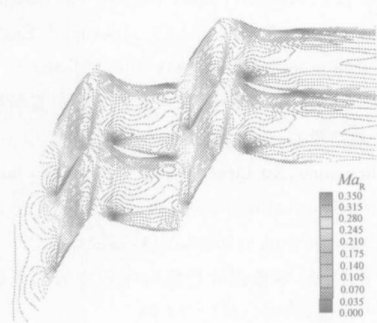


图 11 0/60T 时刻叶尖间隙处相对马赫数分布
Fig. 11 Tip clearance relative mach number distributions of 0/60T

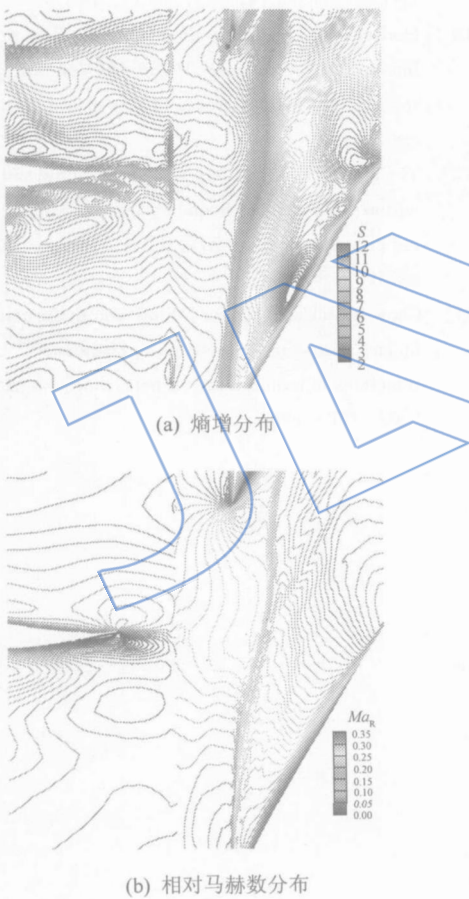


图 12 0/60T 时刻第二级动叶叶尖间隙熵增和相对马赫数分布
Fig. 12 2nd Rotor tip clearance entropy and relative mach number distributions of 0/60T

图 11 为非定常结果 0/60T 时刻动叶叶尖处相对马赫数等值线图,从图中能明显看到动叶叶

尖泄漏涡从动叶前缘出发,向下游运动一直到达相邻动叶的压力面。其中第一级动叶叶尖泄漏涡的运动轨迹比较平直,泄漏涡的运动轨迹在到达相邻叶片压力面之前一直比较集中,没有明显扩散,这是因为在低速压气机中主流的速度本身不大,导致泄漏涡中的速度亏损也不大,泄漏涡与主流之间的掺混作用不强,因此泄漏涡在下游发展的过程中保持分布比较集中。

第二级动叶中的马赫数分布则表明尖部的泄漏涡在向下游传递时发生扭曲,是因为前排静叶尾迹向下游运动时与第二级动叶叶尖泄漏涡发生了相互作用。图 12 为叶尖间隙处第二级动叶熵增和相对马赫数分布,图中显示在第一级静叶尾迹与第二级泄漏涡发生作用的区域,泄漏涡的运动轨迹发生了改变,不再沿直线传播,而是发生了扭曲,最终作用在相邻叶片压力面的位置也发生了变化。同时尾迹与泄漏涡的掺混使得泄漏涡的宽度增加,而强度相应减小。

综上所述,本算例中两级低速压气机非定常计算 Clocking 效应不明显,产生这一现象的原因一方面是因为数值计算精度的影响,更主要的原因在于虽然所模拟的压气机内部流动的局部非定常性较为明显,但三维综合产生的效果并未对压气机性能产生较为明显的影响。所以,在压气机内部流动非定常效率的利用及流动控制中,应充分考虑三维综合的效应。

3 结 论

(1) 对低速重复级压气机静叶 Clocking 效应的数值计算显示,总效率变化不到 0.1%。经过分析认为,低速压气机自身的流动特点是造成静叶 Clocking 效应不明显的主要原因。

(2) 非定常计算结果显示,通道内存在明显的上游叶片尾迹与下游叶片边界层以及下游叶片尾迹的相互作用,分析显示这一相互作用在结果的流动图画中体现的比较明显,但是对低速压气机整体特性的影响较小。

(3) 非定常计算结果显示动叶叶尖间隙处存在明显的泄漏涡,虽然在 S1 流面的流动图画中体现的比较明显,但是由于低速压气机负荷较小,叶尖泄漏流在叶高方向的分布范围和强度均较小,对整体特性的影响不明显。此外,在结果的流动图画中还显示了上游叶片排尾迹与动叶叶尖泄漏流之间发生相互作用,它也对低速压气机内部的流动结构产生一定影响。

(4) 叶轮机内部非定常流动效应是各种复杂三维非定常流动的综合结果, 局部强烈的非定常流动并不意味着叶轮机总体性能将发生明显的改变。在评估和利用非定常效应时, 应充分考虑非定常流动的三维综合效果。

参考文献:

- [1] Huber F W, Johnson P D, Sharma O P, et al. Performance improvement through indexing of turbine airfoils: Part I - Experimental investigation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118: 630-635.
- [2] Andrea A, Michele M, Alberto S D G, et al. Numerical investigation of three dimensional clocking effects in a low pressure turbine[J]. ASME Journal of Turbomachinery, ASME Paper 2003-GT-38414.
- [3] Gundy Burlet K L, Dorney D J. Investigation of airfoil clocking and inter-blade row gaps in axial compressors[R]. AIAA Paper 97-3008, 33rd AIAA, ASME, SAE, and ASEE Joint Propulsion Conference, Seattle, WA, July 6-9, 1997.
- [4] Gundy Burlet K L, Dorney D J. Physics of airfoil clocking in axial compressors[R]. ASME Paper 97-GT-444, ASME Turbo Expo 1997, Orlando, FL, 2-5 June, 1997.
- [5] Barankiewicz W S, Hathaway M D. Effects of stator indexing on performance in a low speed multistage axial compressor[R]. ASME Paper 97-GT-496.
- [6] Keith Walters D, James H L. A CFD study of wake induced transition on a compressor like flat plate[R]. ASME Paper 2003-GT-38680.
- [7] Maik T, Friedrich K. Some aspects of wake wake interactions regarding turbine stator clocking[R]. ASME Paper 2000-GT-487.
- [8] Hodson H P. Boundary layer and loss measurements on the rotor of an axial flow turbine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106: 391-399.
- [9] 邹正平, 徐力平. 双重时间步方法在非定常流场模拟中的应用[J]. 航空学报, 2000, 21(4): 317-321.
Zou Zhengping, Xu Liping. Prediction of 3-D unsteady flow using implicit dual time step approach[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(4): 317-321.
- [10] 侯安平, 周盛. 轴流式叶轮机时序效应的机理探讨[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 70-75.
Hou Anping, Zhou Sheng. Probe into the mechanism of clocking effect in turbomachinery[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 70-75.
- [11] Korakianitis T. On the propagation of viscous wakes and potential flow in axial turbine cascade[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1): 118-127.
- [12] Hodson H P. Blade row interactions in low pressure turbines[R]. Lecture series 1998-02, Von Kármán Institute, Blade Row Interference Effects in Axial Turbomachinery Stages.
- [13] Yf Chih C, Oguz U, Joseph K. On the flow and turbulence within the wake and boundary layer of a rotor blade located downstream of an IGV[R]. ASME Paper 2003-GT-38599.
- [14] Chow Y C, Uzel O, Katz J. Flow non uniformities and turbulent "hot spots" due to wake blade and wake wake interactions in a multistage turbomachine[R]. ASME Paper 2002-GT-30667.