

叶轮机转静干涉计算建模方法比较

杜鹏程¹, 宁方飞²

- (1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过对尾迹-叶片干涉和激波-叶片干涉这两类典型转静干涉流动的模拟,对 3 种基于傅里叶分析的时域非定常计算建模方法,即形修正相延迟法、空间-时间梯度法和谐波平衡法进行对比分析;详细考察它们的区别与联系,不同方法的计算准确度和计算速度.计算表明:3 种建模方法都可以很好地捕捉到非定常流动细节;与传统的时间推进法相比,计算速度提高了几倍到几十倍,可用于工程设计之中.

关 键 词: 叶轮机; 转静干涉; 形修正相延迟法; 空间-时间梯度法; 谐波平衡法

中图分类号: V211.3 **文献标志码:** A

Comparison of computation models for simulation of turbomachinery rotor-stator interactions

DU Peng-cheng¹, NING Fang-fei²

- (1. School of Aeronautic Science and Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Comparative study on three Fourier-based time-domain unsteady computation methods, including the shape-correction phase shift method, space-time gradient method and harmonic balance method, was carried out by simulation of two typical kinds of rotor-stator interactions, i. e. : wake-blade interactions and shock-blade interactions. Differences and relations between these computation methods were investigated in detail, and their computational accuracy and speed were also analyzed. The results indicate that three methods can resolve the unsteady flow details well. Compared with the conventional time-marching method, the computational speed of these methods can be enhanced from several to dozens of times, making these methods applicable to daily design process.

Key words: turbomachinery; rotor-stator interactions; shape-correction phase shift method; space-time gradient method; harmonic balance method

由于转子和静子的相对运动,多排叶轮机内的流动本质上是非定常的.大量的研究表明转静

干涉引起的确定性非定常作用(以叶片通过频率为特征频率)会对叶轮机的气动、气固、气热等特

收稿日期:2015-11-21

作者简介:杜鹏程(1986—),男,博士后,主要从事叶轮机机械气动数值模拟研究.

引用格式:杜鹏程,宁方飞.叶轮机转静干涉计算建模方法比较[J].航空动力学报,2017,32(3):528-537. DU Pengcheng, NING Fangfei. Comparison of computation models for simulation of turbomachinery rotor-stator interactions[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 528-537.

性产生一定的影响^[1].在设计阶段合理评估转静干涉引起的非定常效应可以帮助提高叶轮机的设计水平.目前,对于转静干涉流动的数值模拟通常采用传统的时间推进法.为满足周期性条件,往往需要采用多通道甚至全环的计算域,而且计算的大部分时间用于从初场过渡到周期性状态的中间计算过程,使得基于时间推进法的非定常计算花费较高,限制了其在工程中的应用.

为了减少转静干涉的计算时间,近几十年来出现了一些简化计算建模方法,如确定性应力法、小扰动法、相延迟法、时间倾斜法^[2]和非线性谐波法等.考虑到叶轮机内的流动具有时间、空间上的周期性这个特点,傅里叶分析被引入到转静干涉非定常计算中^[3].He^[4]在1990年便提出了基于傅里叶级数的形修正相延迟方法,但直到近十年才得到一定的应用^[5-6].随后,He等^[7]提出了在频域求解的非线性谐波法,该方法已纳入到商用软件Numeca中^[8].在2002年,Hall等^[9]提出了时域的谐波平衡法,该方法可以很方便地处理湍流模型问题且程序实现相对简单,得到了广泛关注和应用^[10].2015年,Yi和He^[11]提出了时域的空间-时间梯度法,将多通道的非定常计算转化为多通道的定常计算,从而加速收敛.

从公开文献来看,上述基于傅里叶分析的时域非定常建模方法,即形修正相延迟法、谐波平衡法和空间-时间梯度法都得到了一定的工程应用;但是对于这几种不同方法的区别与联系,在叶轮机转静干涉流动中的计算准确度及计算速度缺少详细的对比分析.因此本文利用尾迹-叶片干涉和激波-叶片干涉这两类典型的转静干涉流动的非定常计算,对上述问题开展研究,进一步为在单级转静干涉流动中选取合适的计算建模方法提供参考.

1 流动控制方程

1.1 时间推进法

采用有限体积法离散的Navier-Stokes方程

$$V \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \mathbf{R}(\mathbf{Q}) = 0 \quad (1)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 为守恒变量, $\mathbf{Q} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho E]^T$; V 为控制体的体积; $\mathbf{R}$ 为残差向量.对于定常计算,本文采用隐式离散,即是求解

$$V \frac{\mathbf{Q}^{n+1} - \mathbf{Q}^n}{\Delta t} = -\mathbf{R}(\mathbf{Q}^{n+1}) \quad (2)$$

非定常计算采用时间推进法(dual time

stepping, DTS)推进求解如下方程:

$$\left[\left(\frac{V}{\Delta t} - \frac{3V}{2\Delta t^*} \right) \mathbf{I} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{Q}} \right] \Delta \mathbf{Q} = - \left(\mathbf{R}(\mathbf{Q}) + V \frac{3\mathbf{Q}^{n+1} - 4\mathbf{Q}^n + \mathbf{Q}^{n-1}}{2\Delta t^*} \right) \quad (3)$$

式中 Δt 为虚拟时间步长, Δt^* 为物理时间步长.在转静干涉计算中,当相邻叶片排的叶片数不同时,需要采用多通道的计算网格才能应用直接的周期性边界条件.转静交界面采用滑移网格法进行流场变量的插值传递.

1.2 形修正相延迟法

在He^[4]提出的形修正相延迟法(shape correction phase shift, SCPS)中,虽然单个叶片通道内的流动不再具有直接的周期性,但在叶片两侧的周向边界上,流场参数存在一个“相延迟”的周期性.上下相隔一个栅距 θ_g 的周向边界在一个时间差 δt 后流场变量相同

$$\mathbf{Q}(x, r, \theta + \theta_g, t) = \mathbf{Q}(x, r, \theta, t + \delta t) \quad (4)$$

式中 $\delta t = \sigma / \Omega$,取决于相位延迟角 σ 和旋转角速度 Ω .在该方法中,上下周向边界和转静交界面处的流场变量采用有限阶(本文采用15阶)的傅里叶级数近似,即

$$\mathbf{Q}(t) \approx \bar{\mathbf{Q}} + \sum_{n=1}^N [\mathbf{A}_n \cos(n\omega t) + \mathbf{B}_n \sin(n\omega t)] \quad (5)$$

在利用式(3)进行时间推进过程中,在包含 N_p 个物理时间步的一个扰动周期内,采用下式计算傅里叶系数:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_n = \frac{2}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{Q}(t_i) \cos(n\omega t_i) \\ \mathbf{B}_n = \frac{2}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{Q}(t_i) \sin(n\omega t_i) \end{cases} \quad (6)$$

在得到了傅里叶系数的值后,就可以根据相延迟条件式(4)更新上下周向边界和转静交界面处的流场变量,直至流场收敛到良好的周期性状态.由于利用了“相延迟”条件,该方法只需单通道的计算网格.在时间推进过程中,转静交界面处需要利用傅里叶级数插值重构出多通道的流场,然后利用滑移网格方法进行处理.

1.3 空间-时间梯度法

空间-时间梯度法(space-time gradient, STG)^[11]的巧妙之处在于将流场变量的时间导数转为为空间的梯度,即

$$V \left(\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \theta} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} \right) + \mathbf{R}(\mathbf{Q}) = 0 \quad (7)$$

式中 $\partial\theta/\partial t=\Omega$ 。例如,对于图 1 所示(图中 R 代表转子,S 代表静子)的转静干涉流动(转静子的叶片数 $N_r:N_s=18:23$),静子通道中相隔一个栅距的 $p(i),i=1,\cdots,N_s$ 在该时刻的轴向速度(V_x)分布如图 2(a)所示,并没有明显的规律。但是按照不同的静子叶片相对于转子 R1 的不同周向位置进行排序,则静子中 $p(i)$ 的流场对应于转子一个栅距内均匀分布的第 j 个周向位置的流场,其中

$$j = \text{mod}[(i-1) \cdot N_r, N_s] + 1 \tag{8}$$

静子中 $p(i),i=1,\cdots,N_s$ 重新排序后的轴向速度分布如图 2(b)所示,清晰地显示了一个转子的尾迹形。同样,由图 2 可知,空间-时间梯度法非常适合于转静子的叶片数较多且叶片数之比接近 1、但不等于 1 的情况。因为这时就有足够多的不同周向位置的叶片来分辨相邻叶片排一个栅距内的流场分布。

叶片重新排序得到了空间分布 $Q(\theta)$ 后,就可以利用差分或傅里叶级数求得流场变量的空间梯度 $\partial Q/\partial\theta$ 。本文利用傅里叶级数的方式,即是先将该空间分布用傅里叶级数近似,即

$$Q(\theta) = \bar{Q} + \sum_{k=1}^K A_k \cos(N_r k\theta) + B_k \sin(N_r k\theta) \tag{9}$$

式中 K 为空间傅里叶级数的阶数。由式(9)可进一步解析地求得 $\partial Q/\partial\theta$ 。实际上,空间-时间梯度法将流场变量的时间导数项转化为源项 $S_{\text{sig}}=\Omega V(\partial Q/\partial\theta)$,从而将时间推进的非定常计算转化为某个固定周向位置的准定常计算。空间-时间梯度法计算时在上、下周向边界和转静交界面的处理

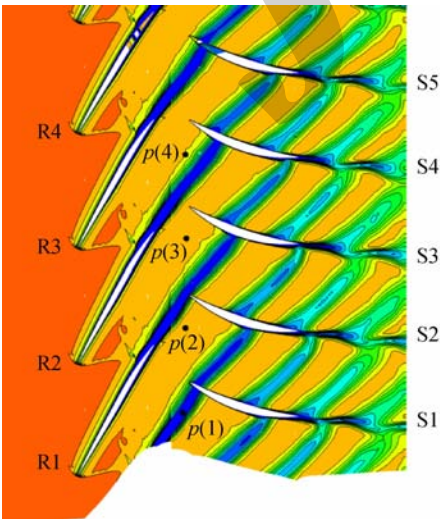


图 1 空间-时间梯度法示意图

Fig. 1 Illustration of the space-time gradient method

方式和时间推进法完全相同。

另外,对于空间-时间梯度法的控制方程,Yi 和 He 等^[11]采用显式的 Runge-Kutta 法求解。本文对式(7)采用隐式离散,该源项需要进行隐式处理以保证计算的稳定性,即

$$\frac{\partial Q^{n+1}}{\partial\theta} = \frac{\partial(Q^n + \Delta Q^n)}{\partial\theta} = \frac{\partial Q^n}{\partial\theta} + \frac{\partial \Delta Q^n}{\partial\theta} \tag{10}$$

式中 $\partial \Delta Q^n/\partial\theta$ 同样采用空间傅里叶级数近似然后解析计算。

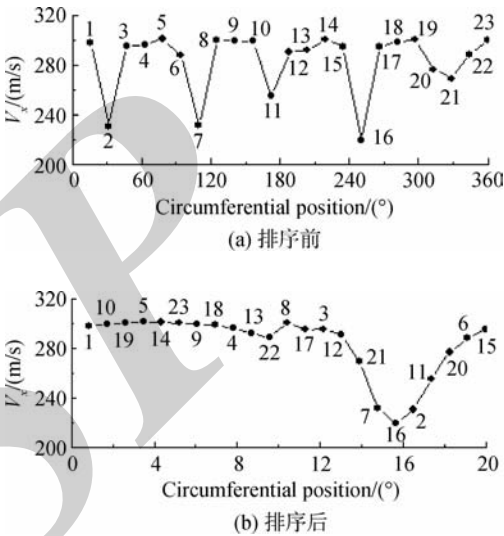


图 2 监控点排序前后的轴向速度分布

Fig. 2 Axial velocity distribution before and after the re-ordering of the blade passages

1.4 谐波平衡法

对于时间周期性流动,谐波平衡法(harmonic balance, HB)利用傅里叶级数进行建模,具体的方程推导可见文献[9],这里只给出最终求解的控制方程

$$V \frac{\partial Q_{\text{hb}}}{\partial \tau} + \mathbf{R}_{\text{hb}} + \mathbf{S}_{\text{hb}} = 0 \tag{11}$$
$$\mathbf{S}_{\text{hb}} = \omega \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{Q}_{\text{hb}}$$

式中 Q_{hb} 和 R_{hb} 为一个周期 $T=2\pi/\omega$ 内均匀分布的 $N_T=2N+1$ 个时刻(间隔 $\Delta t=T/N_T$) 的解和残差

$$Q_{\text{hb}} = \begin{bmatrix} Q(t_0 + \Delta t) \\ Q(t_0 + 2\Delta t) \\ \vdots \\ Q(t_0 + T) \end{bmatrix} \quad R_{\text{hb}} = \begin{bmatrix} R(t_0 + \Delta t) \\ R(t_0 + 2\Delta t) \\ \vdots \\ R(t_0 + T) \end{bmatrix}$$

谐波平衡法即是同时求解一个周期内 N_T 个时刻的准“定常”流场,并通过源项 S_{hb} 将这些时刻的流场关联起来。本文谐波平衡方程的求解采用

Sicot 等^[12]提出的隐式 BJ-SSOR 法 (block-Jacobi symmetric successive over-relaxation strategy). 在转静干涉计算中, 谐波平衡法利用相延迟条件只需单通道的网格, 在每个准“定常”时刻转静交界面的处理方式和形修正相延迟法相同.

对比式(7)和式(11)可以发现, 空间-时间梯度法和谐波平衡法中分别代表时间导数项的源项 S_{stg} 和 S_{hb} 具有基本相同的形式. 前者是将同一时刻的不同叶片通道相关联起来(空间傅里叶变换); 后者是将同一叶片通道的不同时刻的流场关联起来(时间傅里叶变换). 另外, Ma 等^[13]的研究表明, 谐波平衡法计算中的非定常扰动频率和所选取的谐波阶数过高时, 即使采用隐式算法求解, 也需降低 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)数以保证计算的稳定性. 可以预见在空间-时间梯度法中, 当式(9)的空间谐波阶数较高时, 同样需要降低 CFL 数以保证计算的稳定性.

在本文的计算中, 定义非定常建模方法 (reduced-order modeling method, ROM) 相比于时间推进法所能获得的加速比为

$$S = \frac{M_{dts}}{M_{rom}} \cdot \frac{N_{dts_{mesh}}}{N_{rom_{mesh}}} \tag{12}$$

即加速比取决于两者计算的迭代步数之比和计算所需的网格数之比.

2 算例 1: 转静干涉

CFD 模拟采用自行开发的多块结构化三维黏性 CFD 程序 MAP (multi-block aerodynamic prediction). 控制方程采用单元中心的有限体积离散, 利用 Edwards 提出的低耗散通量分裂格式^[14]求解对流通量, 并使用 MUSCL (monotone upstream-centered schemes for conservation laws) 插值和 minmod 限制器获得高阶精度. 黏性通量采用通常的中心差分格式. 对控制方程组的时间离散采用了隐式离散方法, 并采用 Gauss-Seidel 算法求解. 湍流模型为 Spalart-Allmaras 一方程模型^[15]. 程序的并行化通过 MPI (message passing interface) 通信函数实现. 该 CFD 程序的校验可见文献^[16].

首先选取 NASA 设计的高负荷轴流压气机级 35, 转静子的叶片数为 36 和 46, 转子的设计转速为 17 188 r/min, 叶型几何等参数可见文献^[17]. 首先, 图 3 给出了本文利用 MAP 和某商用软件 CC (commercial code) 以及 Chima 利用 SWIFT 程序^[18]计算的定常总压比和效率的对比

(图中横坐标 $\dot{m}/\dot{m}_{choke}$ 代表无量纲质量流量). 进一步选取定常计算的最高效率点进行非定常计算建模方法的比较研究.

图 4 给出了时间推进法和空间-时间梯度法采用的半环 18 : 23 的多通道计算网格, 其中在一个叶片通道内流向、周向和展向的网格数为 121, 51 和 51, 一个叶片通道内的网格约为 30 万, 半环的网格总数约为 1 200 万.

在时间推进法和形修正相延迟法计算中, 将一个周期划分为 828 个物理时刻, 一个物理时间步内沿虚拟时间推进 20 步, 保证其残差下降 2 个数量级. 图 5 给出了这两种方法计算的效率收敛曲线. (图中 T 为转子的旋转周期, 且形修正相延迟法的效率直接由单通道计算, 只能反映计算的收敛过程). 形修正相延迟法的收敛速度和时间推进法相当, 推进 3 个周期左右流场就过渡到良好的周期性状态. 形修正相延迟法计算的时均效率比时间推进法低 0.001.

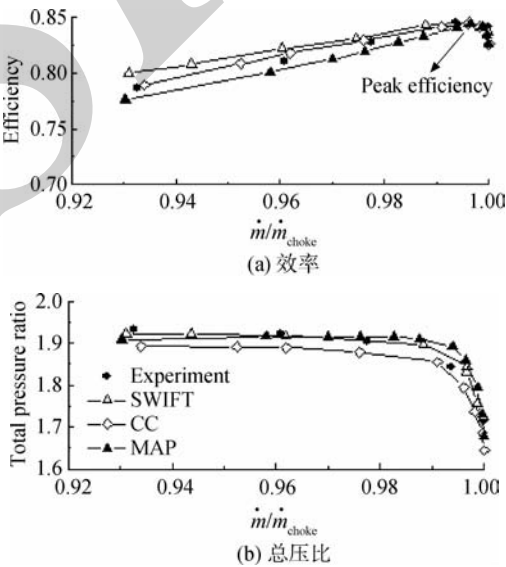


图 3 定常特性对比

Fig. 3 Comparison of the steady characteristics



图 4 多通道的计算网格

Fig. 4 Multi-passage computational mesh

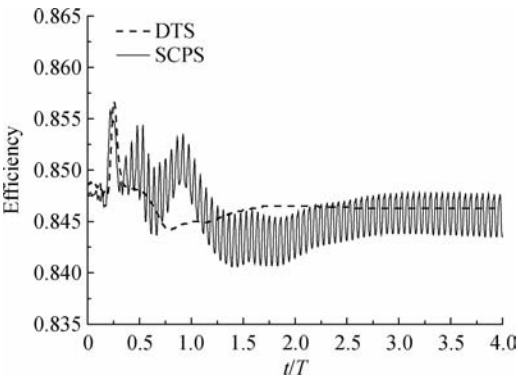


图 5 时间推进法和形修正相延迟法收敛曲线对比 (算例 1)

Fig. 5 Comparison of the convergence speed of the dual time stepping and shape correction phase shift methods (case 1)

计算表明,在谐波平衡法中采用 5 阶谐波就可以保证得到的解具有谐波无关性.图 6 给出了空间-时间梯度法和谐波平衡法计算的残差曲线对比.其中 STG, $K=11$ 表示在空间-时间梯度法中利用式(9)计算静子通道中流场的空间梯度时,包含了其所能分辨的前 $K=11$ 阶空间谐波分量. STG, $K=5$ 表示在计算流场变量的空间梯度时只考虑其前 $K=5$ 阶空间谐波分量. STG, $K=11$ 的收敛速度最慢,这是由于需要降低 CFL 数来保证计算的稳定性.图 7 给出了空间-时间梯度法和谐波平衡法计算的时均效率收敛曲线. STG, $K=5$ 和 HB, $N=5$ (表示在谐波平衡法计算中采用了前 $N=5$ 阶时间谐波分量)推进 1500 步左右达到稳定的定常状态, STG, $K=11$ 需要推进 2000 步左右. STG, $K=5$ 和 STG, $K=11$ 的时均效率与时间推进法计算结果十分吻合,而 HB, $N=5$ 计算的时均效率比时间推进法低 0.001,和形修正相延迟法计算结果相同.这是由于谐波平衡法和形修正相延迟法在周向边界采用相延迟条件,在转静交界面需要重构多通道流场然后插值,会带来一定的误差.而空间-时间梯度法的周向边界和转静交界面的处理方式和时间推进法完全相同,不但实现简单而且不会带来额外的误差,与时间推进法结果更加吻合.

图 8 给出了时间推进法和这 3 种非定常建模方法计算的 90% 叶高的瞬时熵分布.可以看到,这 3 种非定常建模方法都可以很好地模拟出转子尾迹在静子叶片通道中输运、扭曲直至和静子尾迹掺混的整个非定常过程.图 9 给出了该瞬时静子 90% 叶高的脉动静压与时均静压之比的分布,

3 种非定常建模方法的计算结果与时间推进法计算结果基本一致.

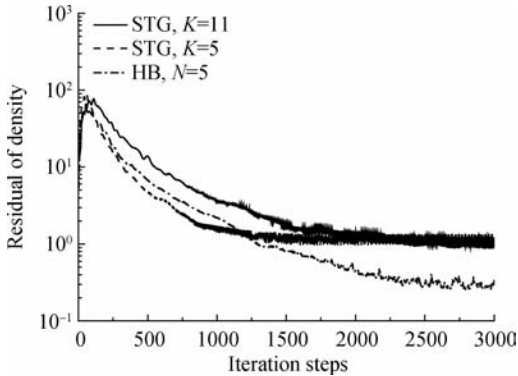


图 6 空间-时间梯度法和谐波平衡法的残差曲线 (算例 1)

Fig. 6 Residual of the space-time gradient and harmonic balance methods (case 1)

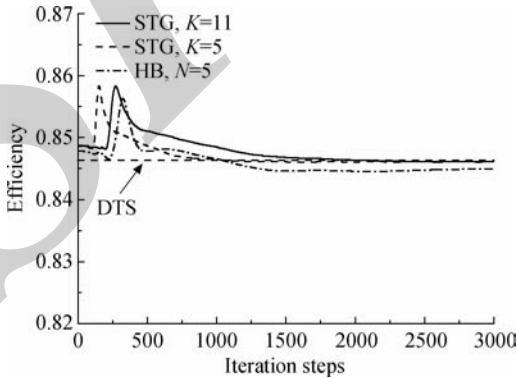


图 7 空间-时间梯度法和谐波平衡法的效率收敛曲线 (算例 1)

Fig. 7 Convergence of the efficiency calculated by the space-time gradient and harmonic balance methods (case 1)



(a) 时间推进法

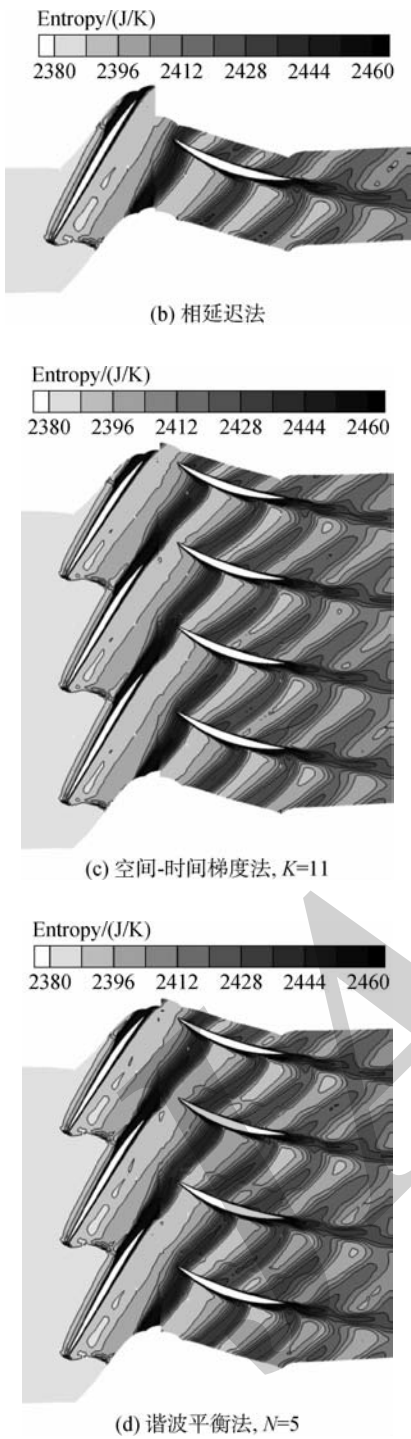


图 8 90%叶高瞬时熵分布

Fig. 8 Instantaneous entropy distribution at 90% span

图 10 给出了空间-时间梯度法、形修正相延迟法和谐波平衡法计算的 15% 叶高的瞬时熵分布。在图 10(c) 中 HB, $N=5$ 计算的流场在转静交界面附近存在一定的数值混淆 (aliasing) 现象。这是因为在该叶高处, 轴向间距较短, 上游转子的尾迹来不及掺混就到达转静交界面, 交界面处的尾迹较窄, 5 阶谐波对它的分辨率不够^[19]。虽然提高

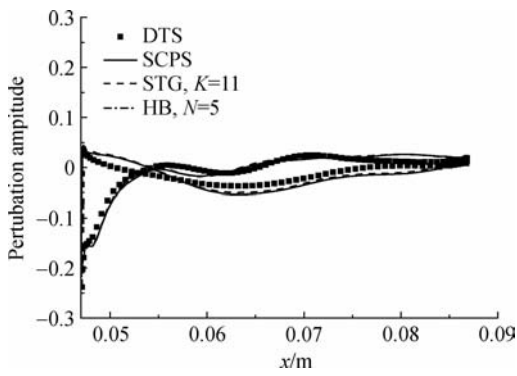


图 9 静子 90% 叶高脉动静压/时均静压分布对比
Fig. 9 Comparison of the normalized perturbation static pressure distribution on the 90% span of stator

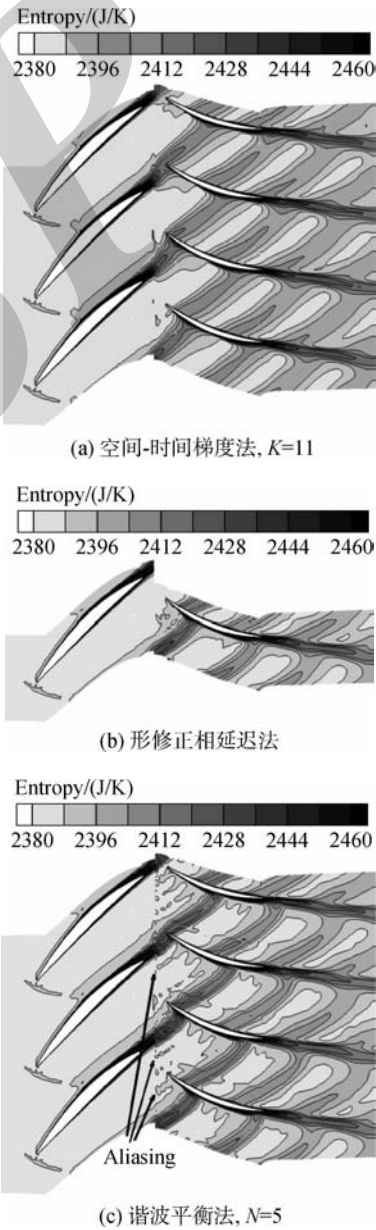


图 10 15% 叶高瞬时熵分布

Fig. 10 Instantaneous entropy distribution at 15% span

谐波平衡法计算中的谐波阶数会减小甚至消除数值混淆现象,但这无疑会增加计算量和降低收敛速度. STG, $K=5$ 的计算结果中同样会出现类似的数值混淆现象. 而在形修正相延迟法和 STG, $K=11$ 的计算中,由于采用了更高阶数的谐波分辨转子的尾迹,基本消除了数值混淆现象,使得流场的光顺性增强.

图 11 给出了该瞬时静子 15% 叶高的脉动静压与时均静压之比的分布对比. 相比于 90% 叶高,该叶高处转子尾迹较窄,尾迹的输运除了在叶片前缘附近引起一定的静压脉动外,对静子其余部分的影响很小.

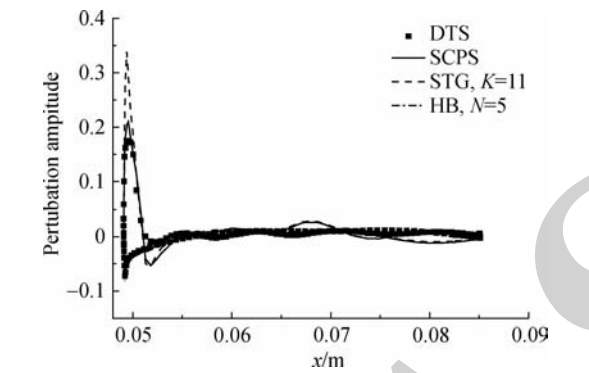


图 11 静子 15% 叶高脉动静压/时均静压分布对比
Fig. 11 Comparison of the normalized perturbation static pressure distribution on the 15% span of stator

对于该算例,形修正相延迟法只采用单通道的计算网格,内存需求最低,相比于基准的时间推进法计算速度提高了约 20 倍,计算加速比来自于计算网格数目的大幅降低. 空间-时间梯度法取决于计算流场变量的空间梯度所采用的周向谐波阶数,由式(12)计算的加速度可达 20~30. 谐波平衡法相当于求解了 11 个单通道的准“定常”流场,计算速度可提高约 40 倍,是缩减了计算域和加快收敛速度的共同结果. 但在实际三维计算中,空间-时间梯度法在计算某一叶片通道中流场变量的空间梯度时,需要从其他 CPU 节点得到重“排序”后的一系列流场值,不同 CPU 节点之间的通讯耗时较多,实际空间-时间梯度法可获得的加速比为 10 左右. 在谐波平衡法计算中,在进行转静交界面处理时,需要利用傅里叶级数重构交界面处的流场,增加了额外的计算量和不同 CPU 节点的通讯时间,实际获得的加速比约为 30.

3 算例 2:IGV-转子干涉

激波与叶片干涉是叶轮机中另一类常见的非

定常作用,这里选取某设计压比为 2.6 的高负荷跨声转子与上游 IGV(inlet guide vane)的非定常干涉进行计算. 可以考察上述 3 种建模方法对强非线性作用的计算精度和速度. 其中 IGV 和转子的叶片数分别为 21 和 19.

图 12 给出了时间推进法和空间-时间梯度法采用的全环 21:19 的多通道计算网格,其中在一个叶片通道内流向、周向和展向的网格数为 121, 51 和 51,一个叶片通道内的网格约为 30 万,全环的网格总数约为 1200 万.

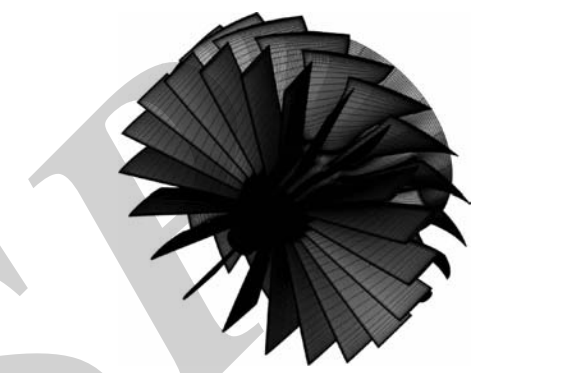


图 12 IGV 转子干涉多通道的计算网格
Fig. 12 Multi-passage computational mesh for the IGV rotor interactions

在时间推进法和形修正相延迟法计算中,将转子旋转一周划分为 798 个物理时刻,一个物理时间步内沿虚拟时间推进 20 步. 图 13 给出了时间推进法和形修正相延迟法计算的效率收敛曲线,两者的收敛速度相当,大约 3 个周期左右,流场收敛到周期性状态,形修正相延迟法计算的时均效率与时间推进法一致. 图 14 给出了空间-时

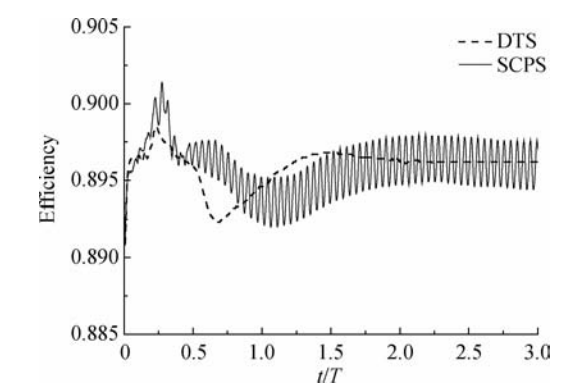


图 13 时间推进法和形修正相延迟法收敛曲线对比 (算例 2)

Fig. 13 Comparison of the convergence speed of the dual time stepping and shape correction phase shift methods (case 2)

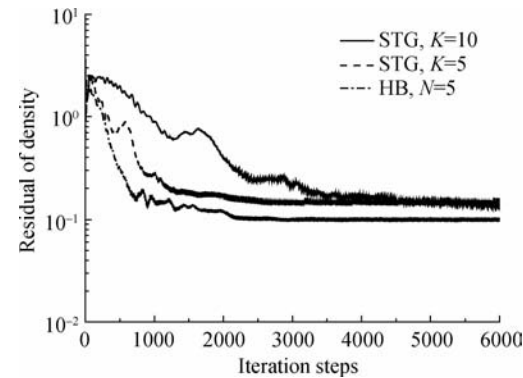


图 14 空间-时间梯度法和谐波平衡法的残差曲线 (算例 2)

Fig. 14 Residual of the space-time gradient and harmonic balance methods (case 2)

间梯度法和谐波平衡法计算的残差曲线. 图 15 给出了这两种方法计算的时均效率收敛曲线. STG, $K=5$ 和 HB, $N=5$ 采用相同的谐波阶数, 具有接近的收敛速度, 3 000 步左右收敛到定常状态, HB, $N=5$ 计算的时均效率比时间推进法计算值低 0.0005. STG, $K=10$ 由于采用了更多的周向谐波阶数, 降低了 CFL 数以保证计算的稳定性, 需要 5 000 步左右才达到定常状态, 收敛后的时均效率和时间推进法计算结果一致.

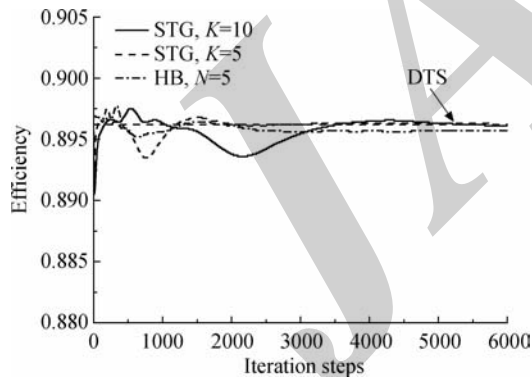
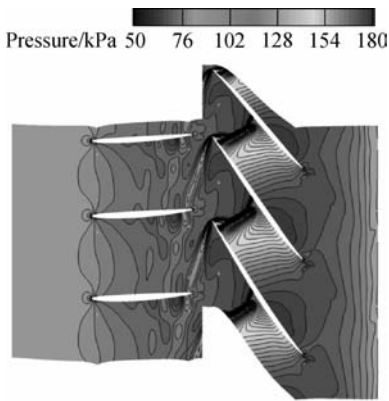


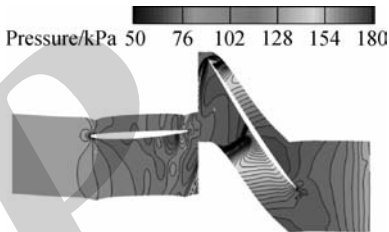
图 15 空间-时间梯度法和谐波平衡法的效率收敛曲线 (算例 2)

Fig. 15 Convergence of the efficiency calculated by the space-time gradient and harmonic balance methods (case 2)

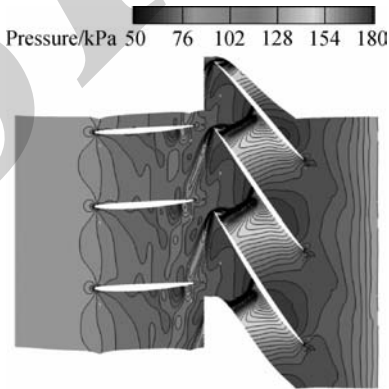
图 16 给出了几种方法计算的 90% 叶高的瞬时静压分布. 在该叶高处, 转子进口的相对马赫数达 1.6. 它们都能计算出由于转静相对运动, 转子前缘的斜激波向上游传播, 被 IGV 尾缘切割, 方向发生折转, 并沿着 IGV 叶片表面向前传播的整个非定常过程. 图 17 给出了该瞬时 IGV 叶片 90% 叶高的脉动静压与时均静压之比的分布.



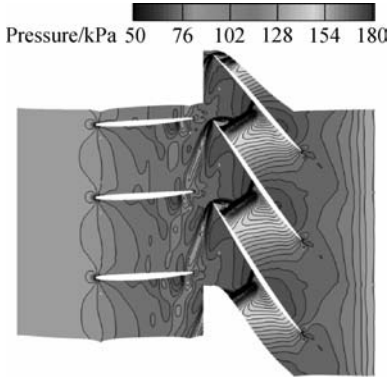
(a) 时间推进法



(b) 形修正相延迟法



(c) 空间-时间梯度法, $K=11$



(d) 谐波平衡法, $N=5$

图 16 90% 叶高瞬时静压分布

Fig. 16 Instantaneous static pressure distributions at 90% span

IGV 叶片表面静压的脉动主要集中于后 50% 弦长, 在尾缘脉动静压可达时均值的 15%, 但是向

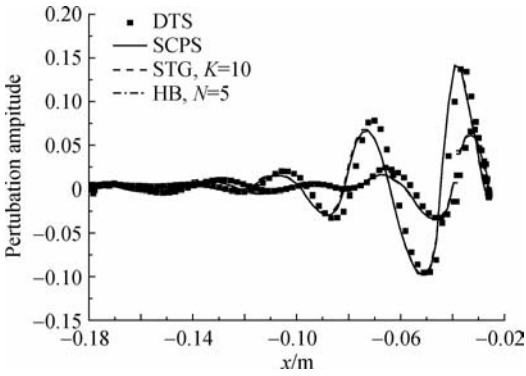


图 17 IGV 叶片 90% 叶高脉动静压/时均静压分布对比
Fig. 17 Comparison of the normalized perturbation static pressure distribution on the 90% span of IGV blade

前衰减较快。

图 18 给出了空间-时间梯度法和谐波平衡法计算的 50% 叶高的瞬时静压分布。在 HB, $N=5$ 计算中,只采用了 5 阶时间谐波,使得计算的流场会出现一定的数值混淆现象,表现为局部流场的光顺性降低,如在图 18(b)的转静交界面附近。图 19 给出了该瞬时 IGV 叶片 50% 叶高的脉动静压与时均静压之比的分布。虽然在该叶高处,转子前缘的相对马赫数约为 1.3,低于叶尖区域,但是由于转子前缘掠型的影响,该叶高处轴向间距小于 90% 叶高的轴向间距且转子前缘的激波接近脱体

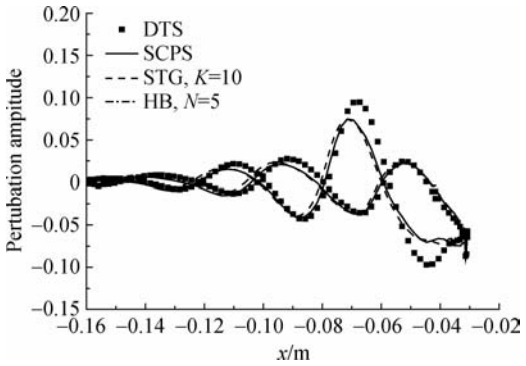


图 19 IGV 叶片 50% 叶高脉动静压/时均静压分布对比
Fig. 19 Comparison of the normalized perturbation static pressure distribution on the 50% span of IGV blade

状态,激波与 IGV 的轴向夹角更小,转子激波向前传播的影响范围更大。

整体来看,这 3 种非定常建模方法都适合处理激波-叶片干涉这种强非线性作用,其中空间-时间梯度法与时间推进法结果最吻合。对于该算例,形修正相延迟法相比于基准的时间推进法计算速度提高了约 20 倍,计算加速比来自于计算网格数目的大幅降低。空间-时间梯度法取决于计算流场变量的空间梯度所采用的周向谐波阶数,计算速度理论上(按式(12)计算)可提高约 7 到 15 倍,但实际上加速比只有 5 左右。5 阶的谐波平衡法可同时缩减计算域和加快收敛速度,理论上计算速度可提高约 30 倍,实际获得了约 20 倍的加速比。

4 结 论

1) 空间-时间梯度法利用转静干涉流动的空间-时间周期性,将时间推进的非定常计算转化为某瞬时的多通道准定常计算;谐波平衡法则是利用时间周期性并结合相延迟条件,将时间推进的非定常计算转化为多个时刻的单通道准定常计算,两者具有很强的相似性;都可以大幅加快收敛速度,从而减少计算时间。

2) 相比于形修正相延迟法和空间-时间梯度法,谐波平衡法计算时的时间谐波阶数较少,流场中可能出现数值混淆现象。虽然数值混淆对总的气动性能基本没有影响,但会降低流场的光顺性。由于空间-时间梯度法在周向边界和转静交界面的处理方式和时间推进法相同,相比于形修正相延迟法和谐波平衡法,计算结果和时间推进法更加吻合。

3) 对于尾迹-叶片干涉和激波-叶片干涉这两类典型的单级转静干涉流动,形修正相延迟法、空

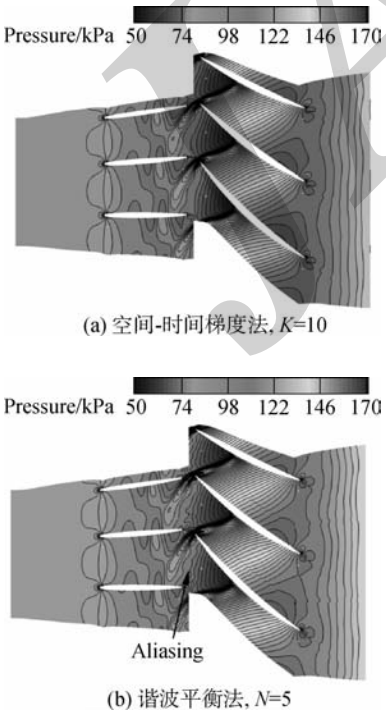


图 18 50% 叶高瞬时静压分布
Fig. 18 Instantaneous static pressure distributions at 50% span

间-时间梯度法和谐波平衡法的计算准确度高;相比于传统的时间推进法计算速度大幅提高,可用于工程设计之中.当然,在多级叶轮机转静干涉计算中(中间的叶片排内同时存在上、下游叶片通过频率的非定常扰动),这几种建模方法的计算准确性和计算速度还需要进一步研究.

参考文献:

[1] 陈懋章. 风扇/压气机技术发展和对今后工作的建议[J]. 航空动力学报, 2002, 17(1): 1-15.
CHEN Maozhang. Development of fan/compressor techniques and suggestions on future researches[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(1): 1-15. (in Chinese)

[2] 高丽敏, 李萍, 陈璇, 等. 时间倾斜法在叶轮机械非定常模拟中的应用[J]. 航空动力学报, 2015, 30(11): 2630-2637.
GAO Limin, LI Ping, CHEN Xuan, et al. Application of time-inclined method on the unsteady simulation of turbomachinery[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(11): 2630-2637. (in Chinese)

[3] He L. Fourier methods for turbomachinery applications[J]. Progress in Aerospace Science, 2010, 46(8): 329-341.

[4] He L. An Eulersolution for unsteady flows around oscillating blades[J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112(4): 714-722.

[5] Biesinger T, Cornelius C, Rube C, et al. Unsteady CFD methods in a commercial solver for turbomachinery applications[R]. ASME Paper GT2010-22762, 2010.

[6] 姜斌, 郑群, 王松涛, 等. 跨声速风扇气动设计及非定常流场结构研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(12): 2248-2252.
JIANG Bin, ZHENG Qun, WANG Songtao, et al. Research on the aerodynamic design of transonic fan and unsteady flow structure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(12): 2248-2252. (in Chinese)

[7] He L, Ning W. Efficient approach for analysis of unsteady viscous flows in turbomachines[J]. AIAA Journal, 1998, 36(11): 2005-2012.

[8] Vilmin S, Lorrain E, Hirsch C, et al. Unsteady flow modeling across the rotor/stator interface using the nonlinear harmonic method[R]. ASME Paper GT2006-90210, 2006.

[9] Hall K C, Thomas J P, Clark W S. Computation of unsteady nonlinear flows in cascades using a harmonic balance technique[J]. AIAA Journal, 2002, 40(5): 879-886.

[10] 马灿, 苏欣荣, 袁新. 用于非定常流动的谐波平衡方法研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(4): 739-743.
MA Can, SU Xinrong, YUAN Xin. Investigation on harmonic balance method for unsteady flow simulation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(4): 739-743. (in Chinese)

[11] Yi J, He L. Space-time gradient method for unsteady blade-row interaction; Part I basic methodology and verification[R]. ASME Paper GT2015-43152, 2015.

[12] Sicot F, Puigt G, Montagnac M. Block-Jacobi implicit algorithms for the time spectral method[J]. AIAA Journal, 2008, 46(12): 3080-3089.

[13] Ma C, Su X, Gou J, et al. Runge-Kutta/implicit scheme for the solution of time spectral method[R]. ASME Paper GT2014-26474, 2014.

[14] Edwards J R. Towards unified CFD simulations of real fluid flows[R]. AIAA-2001-2524, 2001.

[15] Spalart P R, Allmaras S R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows[R]. AIAA 92-0439, 1992.

[16] Ning F, Xu L. Numerical investigation of transonic compressor rotor flow using an implicit 3D flow solver with one-equation Spalart-Allmaras turbulence model [R]. ASME Paper 2001-GT-0359, 2001.

[17] Reid L, Moore R D. Design and overall performance of four highly-loaded, high speed inlet stages for an advanced, high pressure ratio core compressor[R]. NASA TP-1337, 1978.

[18] Chima R V. SWIFT code assessment for two similar transonic compressors[R]. AIAA-2009-1058, 2009.

[19] Gomar A, Bouvy Q, Sicot F, et al. Convergence of Fourier-based time methods for turbomachinery wake passing problems[J]. Journal of Computational Physics, 2014, 278(1): 229-256.

(编辑: 叶 青)