

文章编号:1000-8055(2011)05-1085-07

轴向间距对某跨声速轴流压气机 叶排间干扰的影响规律

史亚锋¹, 吴 虎¹, 陈立新², 王 征¹, 杨金广¹, 李 密¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 河南省电力公司 河南省电力勘测设计院, 郑州 450007)

摘 要: 对不同轴向间距下的某跨声速轴流压气机内流场在设计转速时进行了定常数值模拟, 结果表明当转子与上游静子轴向间距减小时, 压气机的效率和压比有明显降低, 而转子和下游静子间距减小时, 压气机的效率和压比反而有所提高. 进一步的非定常数值模拟结果表明: ①转子与上游静子轴向间距减小时, 转子前激波与静子尾缘干扰增强, 造成了效率和压比的下降; ②转子与下游静子轴向间距减小时, 由于转子尾迹通过静子叶排时的恢复效应, 由尾迹造成的掺混损失会减小, 效率和压比会有所提高.

关 键 词: 轴向间距; 压气机; 叶排; 干扰; 尾迹

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effect of different axial spacing between blade rows on transonic axial compressor performance

SHI Ya-feng¹, WU Hu¹, CHEN Li-xin², WANG Zheng¹,
YANG Jin-guang¹, LI Mi¹

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Henan Electric Power Survey and Design Institute,

Electric Power of Henan, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The steady flow field of a transonic axial compressor under design rotation speed was numerically simulated, proving that the close spacing between upstream stator and rotor can largely reduce the efficiency and pressure ratio, however the close spacing between rotor and downstream stator can improve the efficiency and pressure ratio. The unsteady numerical simulation indicates: (1) the close spacing between upstream stator and rotor can enlarge the interaction of rotor shock on the stator wake, causing the deterioration of performance; (2) the wake recovery effect under the close spacing between rotor and downstream stator decreases the mixing loss, thus slightly improving the performance.

Key words: axial spacing; compressor; blade rows; interaction; wake

现代航空发动机制造技术的发展要求压气机性能更高和结构更轻. 减小叶排间的轴向间距可以使压气机的质量减小, 但是随着轴向间距的减小, 跨声速压气机叶排间的气流扰动会大大加强.

为此, 本文对不同叶排轴向间距下压气机内流场进行了定常和非定常数值模拟, 并对模拟结果做了进一步分析, 以期跨声速压气机的设计提供一定的技术支持.

收稿日期: 2010-04-29; 修订日期: 2010-09-03

作者简介: 史亚锋(1979-), 男, 河南洛阳人, 博士生, 主要从事叶轮机械内气体动力学研究.

对于不同叶排轴向间距时的流动干扰现象,国外的学者做了大量的工作. Smith 对一台四级亚声速压气机进行了实验测量,结果表明,对于亚声速压气机在给定流量下,减小叶排轴向间距能够增加压气机压比和效率,性能获得增益的原因是尾流提前进入叶排中,由于恢复效应导致掺混损失的减小^[1-4]. Ottavy 等人对某跨声速轴流压气机叶排间流场的实验揭示:斜激波与进口导向叶片产生的尾迹互相干扰,支配着整个叶排间流场^[5-6]. Gorrell 等在某跨声速压气机静-动干扰实验的基础上,进一步分析了上游静子与转子叶排轴向间距大小对其性能的影响规律,并进一步阐述了静-动干扰的非定常流动机理^[1,7]. 国内的学者也在这一领域开展了相应的研究工作,党政等对不同轴向间距时某一透平级内的流场进行了数值模拟^[8],计算结果表明轴向间距的增大将使动/静叶排间的相互扰动减弱,从而使其内部非定常流动特性减小. 闫朝等对叶排间轴向间距对时序效应影响进行了深入的二维非定常数值研究^[9],结果发现,叶排间轴向间距对时序效应自身影响很大,会使涡轮效率的变化幅度以及效率极值的出现位置发生明显变化. 李传鹏、张环等对轴向间距变化对轴流压气机全流量特性和气动稳定性进行了研究^[10-11].

本文在前人的基础上,对某跨声速级压气机进行了定常数值模拟,结果表明增加上游静子和转子叶排轴向间距可以使压气机的性能有比较大的提高,增加转子与下游静子叶排轴向间距反而使压气机的性能有所降低,进一步通过非定常流动模拟,深入探讨了产生上述现象的机理.

1 数值模拟与非定常流动机理分析

本文研究对象是 NASA(美国航空航天局)的风扇级“Stage 11-4”^[12],为了研究上游静子与转子叶排间干扰,作者参考文献[13]中的方法,在风扇级前面设计了一个简单的尾迹发生器,模拟静子的尾迹,尾迹发生器叶型截面参数选取 NACA 0012. 转子叶片数为 44,静子叶片数为 42,为了便于计算,尾迹发生器也取 44 个叶片. 设计转速为 16 100 r/min,在此转速下转子叶尖速度为 425 m/s.

数值计算采用了 NUMECA FINE 软件包的 Euranus 求解器. 采用 Jameson 的有限体积格式并结合 Spalart-Allmaras 湍流模型对相对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,

采用显式四阶 Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解,同时加入二阶和四阶人工黏性项以消除数值计算过程中的伪数值震荡,为提高计算效率,采用了多重网格法、局部时间步长和残差光顺等加速收敛措施. 非定常计算采用了隐式双时间方法. 为了节省计算时间,以定常计算结果为非定常计算的初场.

为了减小计算量,在研究上游静子与转子叶排轴向间距对压气机性能的影响规律时,计算域仅取尾迹发生器和转子区域,这样可以排除下游静子的干扰. 同理,在研究转子与下游静子叶排间干扰时,计算域只取转子和下游静子区域.

1.1 尾迹发生器与转子叶排数值模拟

图 1 为轴向间距取动叶根部弦长 18%, 55% (图中分别用 close spacing 和 far spacing 表示,其中,轴向间距取动叶根部弦长的 18% 和 55% 为目前压气机设计中常采用的轴向间距)时的叶片单通道几何外形对比图.

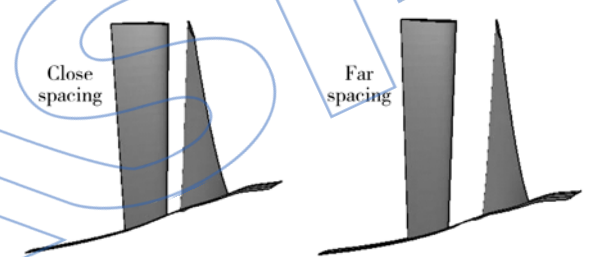


图 1 尾迹发生器-转子几何外形图

Fig. 1 Wake generator-rotor geometry

计算域网格的划分:叶片的进、出口和上下部采用 H 型网格,环绕叶片采用 O 型网格,网格总数量为 751 602. 进口总压为 101 325 Pa,总温为 293 K,进口绝对气流角为 0°,转子转速为设计转速.

取不同叶排轴向间距时只有尾迹发生器的轴向位置做了改变,计算域保持不变.

通过改变出口背压获得级效率压比对比图 2. 从图 2 中可以看出,远轴向间距下的级效率和

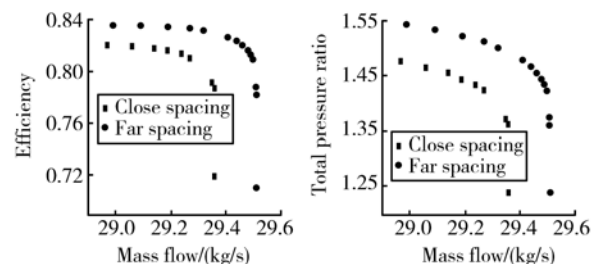


图 2 尾迹发生器-转子特性图

Fig. 2 Wake generator-rotor performance

压比有明显的提高。

为了深入探讨上述规律产生机理,本文又进行了非定常流动数值模拟,计算时给定的进口流量为 28.97 kg/s ,在此流量下,尾迹发生器与转子在远、近叶排间轴向间距时的级效率分别是 $0.835, 0.820$ 。

图3为轴向间距取动叶根部弦长 18% , 55% 时,沿径向 20% , 50% 与 80% 叶展处(为了排除轮毂与机匣附面层的干扰,径向截面极限位置选取在 20% , 80% 叶展处)一个稳定的非定常周期内6个时刻的尾迹发生器与转子级静压分布图,一个周期内物理时间步为30。

从图3(a)中可以看出,在 20% 叶展位置,近轴向间距时尾迹发生器只有在尾缘位置受到下游转子的轻微扰动,扰动在图中表现为尾迹发生器尾缘上下表面一个周期内的静压波动,而远轴向间距时尾迹发生器几乎未受下游转子的任何扰动,和 20% 叶展位置处相比,在 50% 叶展位置近轴向间距时尾迹发生器尾缘受下游转子扰动的范

围大大增加,在图3(b)中表现为尾迹发生器上下表面的静压波动范围从尾缘向前延伸到整个叶片弦长的约 25% ,远轴向间距时尾迹发生器在此展向位置也受到下游转子的扰动,在图中表现为仅尾缘位置叶片表面的静压波动。在 80% 叶展位置处,尾迹发生器受下游转子的扰动明显加强,在图3(c)中,近轴向间距时叶片上下表面静压波动范围从尾缘向上游,占整个弦长的近一半,远轴向间距时的静压波动范围从尾缘向上游延伸到整个弦长的约 20% 。

从三个展向位置静压分布图的对比中可以看出:从轮毂沿径向靠近机匣,上游叶排展向位置受到的扰动逐渐加大。这是因为随着半径的增大,转子前缘会产生弓形激波,转子高速旋转时,弓形激波会与上游叶排发生相交,图3(e)中近叶排轴向间距时的静压分布图给出了一个周期内激波与上游叶排相交时清晰的全过程。激波与上游叶排相交时,叶片的附面层会受到扰动,表现为叶片表面静压的波动,由文献[4]中的损失机理分析可知,

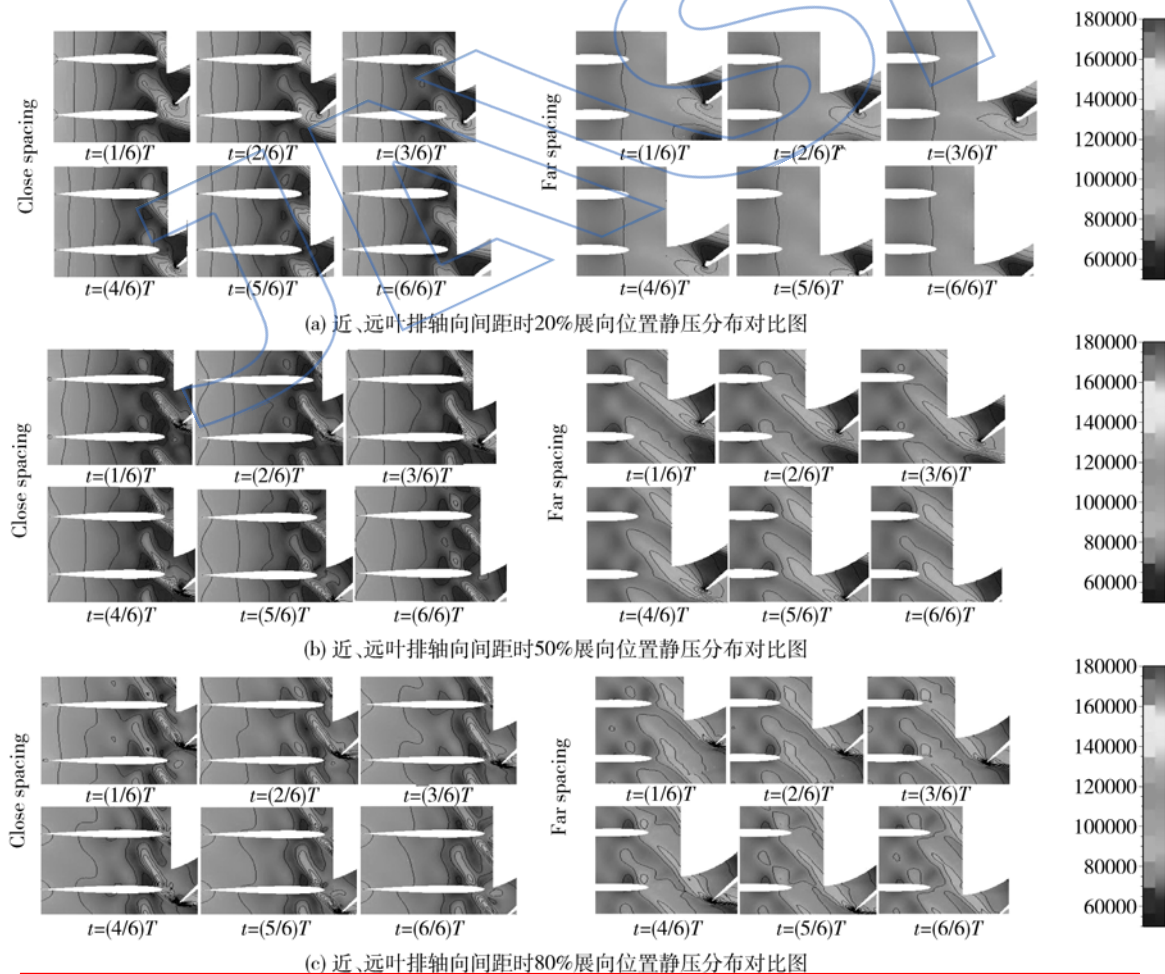


图3 近、远叶排轴向间距时尾迹发生器-转子不同展向位置静压分布图(单位:Pa)

Fig. 3 Close and far spacing static pressure contours at 20% span, 50% span and 80% span (unit:Pa)

激波与叶片附面层的相互干扰是涡轮机械流动损失产生的一个重要来源. 和远轴向间距时相比, 近轴向间距时整个叶展区间内激波与上游叶排的干扰无论强度和范围都要大得多, 结果近轴向间距时的激波与叶片附面层干扰产生的流动损失要大得多, 所以远轴向间距时的性能和近轴向间距相比明显有所改善, 级效率由 0.820 提高到 0.835.

1.2 转子与下游静子叶排数值模拟

图 4 为轴向间距取动叶根部弦长 34%, 94% (图中分别用 close spacing, far spacing 表示, 原级的轴向间距为 70% 动叶根部弦长, 为了观察轴向间距大小对压气机性能的明显影响, 对原轴向间距进行了一定的缩小和增大) 时几何外形图.

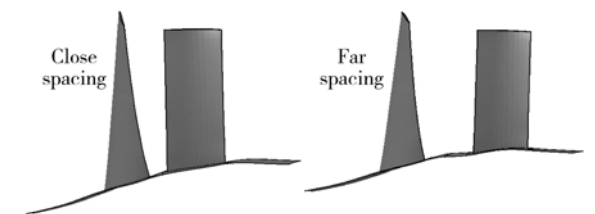


图 4 转子-下游静子几何外形图

Fig. 4 Rotor-downstream stator geometry

为了在保证最小计算量的同时满足 domain scaling 非定常计算方法的要求, 将静子叶片数调整为 44 并将其弦长放大保证稠度不变. 计算域网格的划分、边界条件给定与尾迹发生器-转子叶排数值模拟时一样, 转子转速为设计转速.

取不同叶排轴向间距时只有下游静子的轴向位置做了改变, 计算域保持不变.

通过改变背压获得级效率压比对比图 5. 从图 5 中可以看出, 远轴向间距时的效率与压比均有所降低.

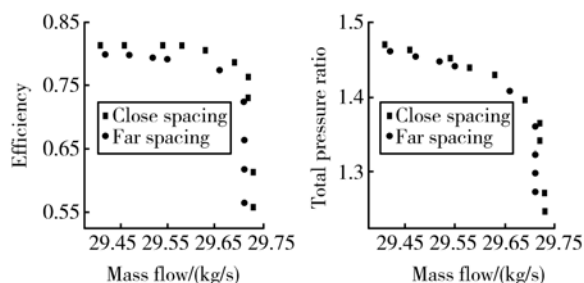


图 5 转子-下游静子特性图

Fig. 5 Rotor-downstream stator performance

Smith^[14]对尾迹通过推进器时的变化进行了详细的描述, 并给出了尾迹恢复 (wake recovery) 数 R 的定义, 如图 6 所示.

$$R = 1 - \frac{\Delta_i}{\Delta_o}$$

其中 Δ_i 为出口流轴向速度的波动幅度, Δ_o 为进口流轴向速度的波动幅度. R 值越高, 效率的改善就越明显.

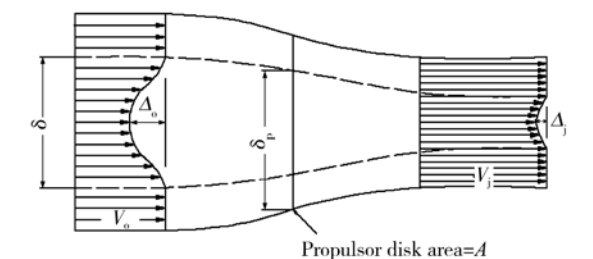


图 6 尾迹通过推进器

Fig. 6 Propulsor ingesting wake

转子出口的尾迹通过下游静子模型与此类似, 所以可以用同样的思路来分析近轴向间距时性能的提高是否是尾迹恢复效应的结果.

当进口流量为 29.66 kg/s, 转子与下游静子叶排轴向间距取动叶根部弦长 34%, 94% 时的级效率分别为 0.7955, 0.7738. 在此流量下, 对远、近轴向间距时的转子-下游静子级进行了非定常数值模拟, 一个周期内物理时间步为 25, 当达到稳定的非定常状态时, 获取一个周期内 5 个不同时刻静子通道进、出口 20%, 50% 与 80% 叶展处 19 个点的轴向速度以观察静子通道对尾迹的恢复效应. 其中, 进口轴向位置取在静子前缘上游 10% 弦长处, 这样可以避开叶片前缘的干扰, 出口轴向位置取在静子尾缘, 进口 19 个点周向均匀分布一个单通道, 出口 19 个点周向位置的选取要避开叶片附面层干扰, 轴向位置如图 7.



图 7 轴向位置图

Fig. 7 Axial position

静子进、出口一个周期内 5 个时刻 20%, 50%, 80% 叶展处 (为了排除轮毂与机匣附面层的干扰, 径向截面极限位置选取在 20%, 80% 叶展处) 轴向速度大小如图 8 所示 (图中 close spacing

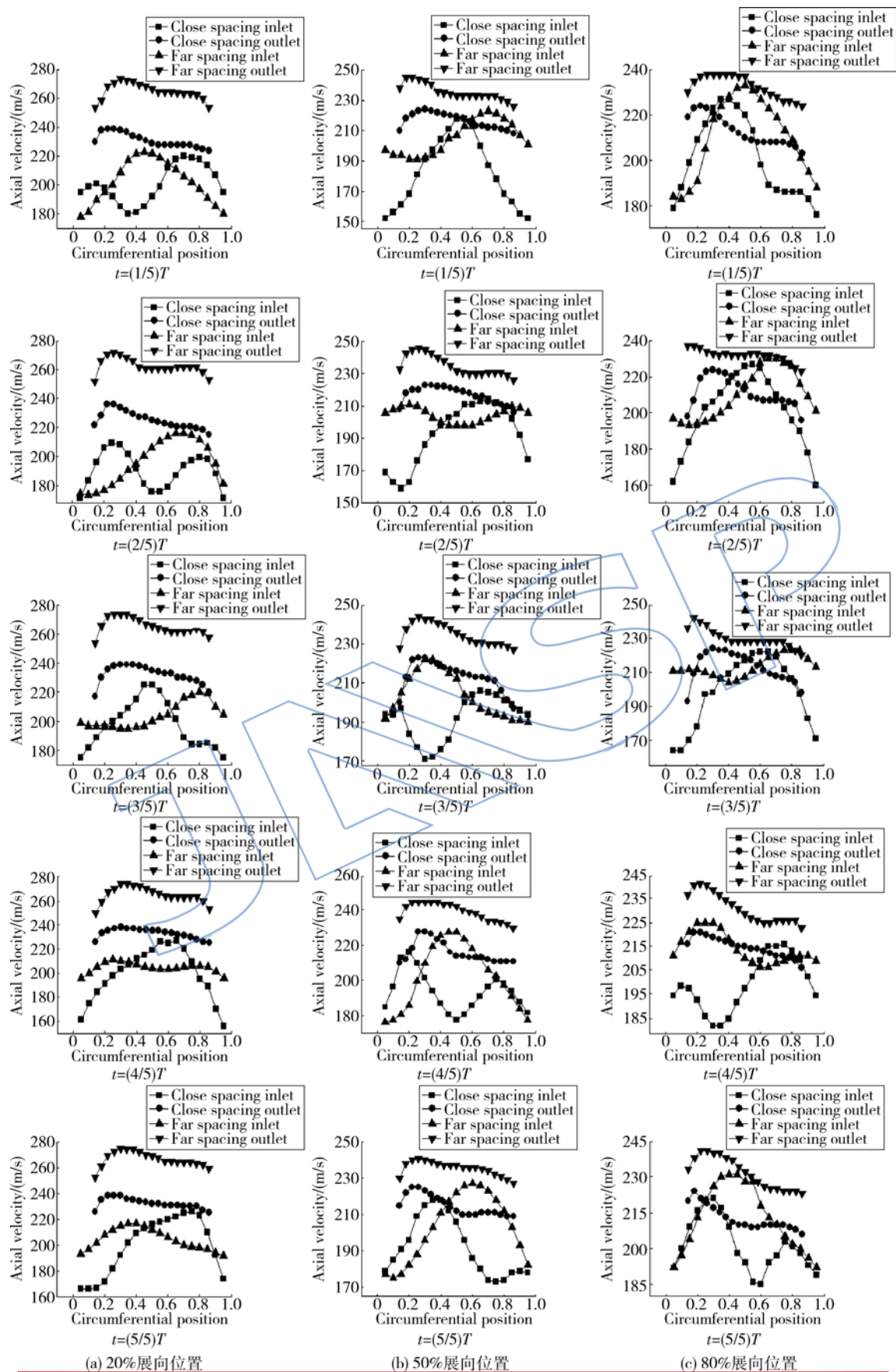


图8 20%,50%,80%叶展处静子通道进、出口的轴向速度图

Fig. 8 Stator inlet and outlet axial velocity profiles at 20% span, 50% span and 80% span

inlet, close spacing outlet 分别表示近轴向间距时静子进、出口轴向速度, far spacing inlet, far spacing outlet 分别表示远轴向间距时静子进、出口轴向速度)。

从图 8(a) 中 20% 展向位置处可以看出, 当 $t=(1/5)T$ 和 $(2/5)T$ 时, 两种轴向间距时进、出口气流的轴向速度波动值相差不大, 此时间段的 R 值大致相等; 当 $t=(3/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值大于远轴向间距时的波动幅度, 出口气流的波动值相差不大, 所以, 近轴向间距在此时间段的静叶排尾迹恢复数 R 大于远轴向间距时的 R 值; 当 $t=(4/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值远大于远轴向间距时的波动幅度, 此时的 R 值远大于远轴向间距时的 R 值; 当 $t=(5/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值大于远轴向间距时的波动幅度, R 值也相应较大。

图 8(b) 是 50% 展向位置处的进、出口轴向速度图。当 $t=(1/5)T$ 和 $(2/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值远大于远轴向间距时的波动幅度, 出口气流的波动值相差不大, 所以, 近轴向间距在此时间段的静叶排尾迹恢复数 R 远大于远轴向间距时的 R 值。当 $t=(3/5)T$ 时, 两种轴向间距时进、出口气流的轴向速度波动值相差不大, 此时间段的 R 值大致相等。当 $t=(4/5)T$ 和 $(5/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值略小于远轴向间距时的波动幅度, 在此时间段的静叶排尾迹恢复数 R 要略小于远轴向间距时的 R 值。

在图 8(c) 80% 展向位置处, 当 $t=(1/5)T$ 和 $(5/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值略小于远轴向间距时的波动幅度, 出口气流的波动值相差不大, 所以, 近轴向间距在此时间段的静叶排尾迹恢复数 R 略小于远轴向间距时的 R 值; 当 $t=(2/5)T$ 和 $(3/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值远大于远轴向间距时的波动幅度, 此时的 R 值也远大于远轴向间距时的 R 值; 当 $t=(4/5)T$ 时, 近轴向间距进口气流的轴向速度波动值大于远轴向间距时的波动幅度, R 值也相应较大。

综上所述, 在一个完整的周期内, 近轴向间距时下游静叶排在整个叶展范围内对尾迹的恢复效应更好, 从而导致较高的级效率。

2 结 论

本文通过对某跨声速轴流压气机内尾迹发生器-转子与转子-下游静子通道在不同轴向间距下的定常和非定常数值模拟, 给出了轴向间距对级性能的影响规律, 主要结论如下:

1) 增加上游静子与转子之间的轴向间距, 级效率和压比均有比较大的提高, 这主要是由于转子前缘弓形激波与上游静子叶片尾缘附面层强烈干扰的结果。

2) 增加转子与下游静子间的轴向间距会使级性能有所降低, 这主要是转子出口的尾迹恢复效应在非定常干扰中居主导地位, 近轴向间距时较大的尾迹恢复数 R 值导致压气机级性能有所提高。

3) 上游静子与转子之间的轴向间距变化要比转子与下游静子之间轴向间距变化对压气机性能的影响剧烈得多。

参考文献:

- [1] Gorrell S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator-rotor interactions in a transonic compressor Part 1: effect of blade-row spacing on performance[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125(2): 328-335.
- [2] Van Zante D E, Adamczyk J J. Wake recovery performance benefit in a high-speed axial compressor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(2): 275-284.
- [3] Adamczyk J J. Wake mixing in axial flow compressors[R]. ASME Paper 1998-GT-29, 1998.
- [4] Denton J D. Loss mechanisms in turbomachines[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(4): 621-656.
- [5] Ottavy X, Trébinjac I, Vouillarmet A. Analysis of the interrow flow field within a transonic axial compressor Part 1: experimental investigation[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 49-56.
- [6] Ottavy X, Trébinjac I, Vouillarmet A. Analysis of the interrow flow field within a transonic axial compressor Part 2: unsteady flow analysis[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 57-63.
- [7] Gorrell S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator-rotor interactions in a transonic compressor Part 2: effect of blade-row spacing on performance[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2003, 125(2): 336-345.
- [8] 党政, 席光, 王尚锦. 轴向间隙对动/静相干叶排内部非定常特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2000, 21(5): 584-586.
DANG Zheng, XI Guang, WANG Shangjin. Axial spacing effects on unsteady rotor/stator interaction flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(5): 584-586.

- (in Chinese)
- [9] 闫朝,季路成,陈江. 叶排间轴向间距对时序效应影响的数值研究[J]. 推进技术,2004,25(5):417-420.
YAN Chao,JI Lucheng,CHEN Jiang. Numerical investigations for the influence of the axial gap on the use of clocking effect [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004,25(5):417-420. (in Chinese)
- [10] 李传鹏,胡骏,张燎原,等. 轴向间距变化对轴流压气机全流量特性的影响[J]. 推进技术,2004,25(6):508-511.
LI Chuanpeng,HU Jun,ZHANG Liaoyuan,et al. Effects of axial spacing on compressor performance in all flow range[J]. Journal of Propulsion Technology,2004,25(6):508-511. (in Chinese)
- [11] 张环,胡骏,李传鹏,等. 轴向间距对压气机气动稳定性的影响[J]. 航空动力学报,2005,20(1):120-124.
ZHANG Huan,HU Jun,LI Chuanpeng,et al. Effect of axial spacing between rotor and stator on axial compressor stability[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1):120-124. (in Chinese)
- [12] Sanger N L. Performance of a 1.57-pressure-ratio transonic fan stage with a screen-induced 90° circumferential inlet flow distortion[R]. NASA TN-D8163,1975.
- [13] Gorrell S E, Copenhaver W W, Chriss R M. Upstream wake influences on the measured performance of a transonic compressor stage[J]. AIAA Journal of Propulsion and Power,2001,17(1):43-48.
- [14] Smith L H, Jr. Wake ingestion propulsion benefit [J]. AIAA Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1):74-82.