

文章编号: 1000-8055(2010)03-0629-07

不同轴向间距下涡轮级内 非定常流场的数值研究

周 莉, 蔡元虎

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 针对不同轴向间距下涡轮级内非定常流动进行了数值研究. 讨论了非定常条件下轴向间距变化对非定常性及流场分布的影响, 探讨了转子和静子叶片之间的非定常相干的机理. 结果表明, 轴向间距 L 对转子内流动的非定常性有着强烈的影响. 随着轴向间距的减小, 静叶尾迹的强度及影响范围增加, 静叶尾迹对动叶的周期性非定常影响还是主要出现在前缘附近. 由于静叶尾迹的恢复效应与来流尾迹强度成正比, 50 % 轴向间距下动叶出口流场的湍动能在动叶通道中央区域最小.

关 键 词: 涡轮; 轴向间距; 非定常性; 非定常相干; 尾迹; 恢复效应

中图分类号: V231

文献标识码: A

Numerical investigation on the unsteady flowfield of the turbine stage under different axial gaps

ZHOU Li, CAI Yuan-hu

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The unsteady flowfield of the turbine stage were investigated numerically under different axial gaps, and the influence of the axial gap on the flow unsteadiness and the flowfield was discussed. Results show the axial gap L has great influence on the flow unsteadiness in the rotor. The intensity of the stator wake and its influence range increase with the reduction of the axial gap, and the unsteady influence of the stator wake mainly occurs near the leading edge of the rotor. The turbulent kinetic energy of the rotor outlet is minimum under the half of the design axial gap because the recovery effect of the stator wake is directly proportional to the wake intensity of the incoming flow.

Key words: turbine; axial gap; unsteadiness; unsteady interaction; wake; recovery effect

对于静子叶片与转子叶片间轴向间距对其气动性能的影响, 许多研究者曾作过大量的研究^[1-3]. Chung 通过数值模拟针对不同轴向位置研究了势流扰动和涡扰动对轴流压气机性能的影响^[4]. Sharma 等人在研究对转压气机的各种性能影响因素时, 发现两转子的轴向间距和转速比对性能的影响最大^[5]. Inoue 等人在低速轴流压气机上研究了

三个轴向间距下小尺度扰动和大尺度扰动诱导旋转失速的动态过程, 结果表明, 扰动波的演变过程与动静叶间距有很大的关系^[6]. Dring 等人的研究表明当静子和转子之间间距为 15 % 平均轴向弦长左右时, 转子前缘的非定常脉动可高达相对动压的 80 % 左右^[7], 这意味着它在叶片表面上会产生大的非定常载荷, 对叶轮机械的性能、叶片强度等将会

收稿日期: 2009-03-12; 修订日期: 2009-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(50906071); 航空科学基金(2008ZB53014); 陕西省自然科学基金(SJ-08-ZP06)

作者简介: 周莉(1978 -), 女, 河南信阳人, 副教授, 博士, 主要从事热机气动热力学的研究.

产生大的影响。Dring 的研究还表明当涡轮动静部件之间的轴向间距变化时,涡轮级效率的变化能达到 2%^[8]。国内,党政的研究表明轴向间距的增大会减弱动/静叶排间的非定常相干效应^[9]。胡骏课题组对轴向间距对压气机气动性能的影响也进行了大量的研究^[10-12],他们发现随着转静子之间轴向间距的减小,静子的增稳作用增强,压气机的失速流量减少。因此,对不同轴向间距下叶轮机械内部非定常流动机理的深入理解,不仅有助于人们在设计中减少内部损失,而且有可能充分利用非定常效应进一步提高叶轮机械的性能。

本文对不同轴向间距下涡轮级内非定常流动进行了数值研究,讨论了轴向间距变化对非定常性及流场分布的影响,探讨了转子和静子叶片之间的非定常相干的机理。

1 数值计算方法

1.1 基本控制方程及数值算法

流场的计算采用了 UNSTREST 程序,该程序是基于薄边界层近似的 Navier-Stokes 方程的流场求解代码,采用了二阶精度显式的 SCREE 格式,其仅需要非常小的人工黏性,可以在非常低的马赫数下运行,也可以在跨声速甚至超声速马赫数下求解。在非定常计算中引入了隐式的双时间步方法,表面剪切应力通过物面上第一个网格点上的特定 Y^+ 值和速度值来计算。

1.2 边界条件

计算中给定了整个级的进出口条件。在静子的进口边界处给定了总温、总压和气流角;在转子的出口边界上给定了静压,并使用了径向平衡。上下游延伸部分的周向边界采用周期性边界条件。对于固体壁面,取不可渗透、无滑移及绝热壁面边界条件,以确保通过与固体边界重合的网格面的质量流量、动量通量及能量通量为零。在动静部件的交界面上施加了内边界条件,在定常计算中采用了混合平面方法,而在非定常计算中则使用了滑移界面方法以进行信息的传递。

2 计算模型

本文以某一涡轮级的末级为研究对象,对其级环境下的流动进行了数值模拟。静子和转子的叶片数分别为 56 和 90。为了使计算所用各叶片排的通道数尽量少,把静子的叶片数由 56 调整到 60。这样根据区域缩放的原则,计算在 2 个静子通

道和 3 个转子通道内进行。计算在中间叶高处所采用的结构化网格如图 1 所示,每个静子通道的网格数为 88×46 ,每个转子通道的网格数为 137×46 ,其中沿周向有 46 个计算站。交界面位于静子尾缘后 40% 轴向间距的位置上。本文把转子通过 2 个静子通道所用的时间作为一个周期,在进行非定常计算时,每个周期内设定 100 个物理时间步,分别对应 100 个不同的转子周向位置(相对于静子),每个物理时间步下进行 100 次的虚拟时间步的内迭代。

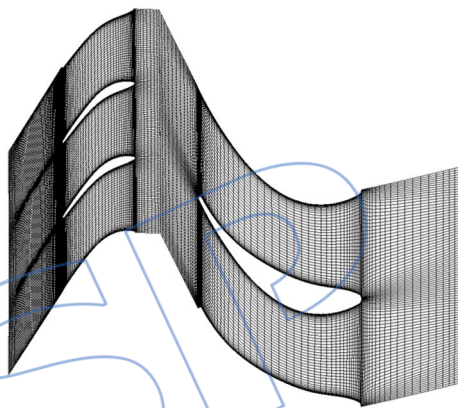


图1 计算网格图

Fig. 1 Structure mesh of the turbine stage

图 2 比较了不同轴向间距 L 下动叶表面静压系数 p_{mag} 的波动情况,图中 BPF (blade passing frequency) 为叶片通过频率。原始波动表明,动叶表面静压系数在前缘点及尾缘的非定常波动幅度非常大,50% 轴向间距下的静压系数波动在整个动叶叶片上均表现出比其他轴向间距大的趋势,在吸力面侧靠近前缘的 30% 叶片弧长处的波动尤为显著,仅在叶片的中间弧长处呈现出比设计轴向间距小的波动。由图 2 中的结果可以看出,轴向间距 L 对转子内流动的非定常性有着强烈的影响。 L 较小时,动叶表面的压力脉动很强。当静子出口的尾迹强度一定时, L 小即意味着静子出口的尾迹流至转子进口的衰减减小,亦即动叶进口气流攻角或轴向速度系数的变化强烈,故而动叶表面的压力脉动强烈,反之, L 较大时,静子出口的尾迹流至转子进口的衰减大,动叶进口气流攻角或轴向速度系数的变化较弱,从而使动叶表面的压力脉动较小。从 1 倍频曲线可见在设计轴向间距和 150% 轴向间距下静叶尾迹对动叶的周期性非定常影响还是主要出现在前缘附近,且设计轴向间距下在叶片的吸力面侧影响范围比 150% 轴向间距下要大 10% 叶片弧长,而在 50%

轴向间距下静叶尾迹的非定常影响除了在吸力面侧的影响范围达到 50 %弧长外,在压力面侧的整个叶片范围内都存在较大的影响.这些均是由于 150 %轴向间距下静叶尾迹强度大幅降低,而 50 %轴向间距下静叶尾迹衰减幅度最小,且进入动叶区域的流动最不均匀造成的.2 倍频与 3 倍频曲线继续表现出 50 %轴向间距下的波幅在动叶叶片前缘附近的波动远大于其他轴向间距的趋势,此时 150 %轴向间距下的波动已非常小,这些都反映出不同轴向间距下静叶尾迹的强度及影响范围.

图 3 比较了静叶表面静压系数的波动情况.此时设计间隙和 150 %轴向间距在各个倍频下静压系数的波动呈现出类似的分布趋势,而 150 %轴向间距下的波动幅度尤其的小,同其他轴向间距相比几乎可以忽略.设计轴向间距的长度为动叶轴向弦长的 85 %,这就说明了动叶对静叶的势反冲效应往上游的传递距离在超过动叶轴向弦长时已经非常的微弱,势流的非定常效应的范围不能超过一个弦长范围,其并不能象尾流的黏性影

响那么持久地向下游传播.原始波动表明,静叶表面静压系数从前缘到尾缘的静压波动幅值不断增大,在整个叶片上的波动随着轴向间距的减小而增大,即动叶对静叶的势反冲效应随着轴向间距的减小而增大.设计轴向间距下 1 倍频曲线上主要的波动集中在静叶吸力面侧靠近尾缘的 25 %叶片上,而 50 %轴向间距下的影响范围达到 50 %叶片弧长.2 倍频与 3 倍频曲线上 50 %轴向间距下的静叶系数波动也呈现出远大于其他轴向间距的分布.静叶表面静压系数的波动情况反映出随轴向间距的减小,动叶对静叶的势反冲效应不仅强度增大,而且影响范围也大大增加.

表 1 给出了不同轴向间距下的时均效率值,从图 2~图 3 的分析可以看出,在 150 %轴向间距下,由于尾迹的掺混距离增加,下游动叶入口的尾迹强度相对弱,流动的非定常性减小.由于大间隙下的掺混距离大,相应的掺混损失较大,因而对应的效率比设计轴向间距下小.同时还可看出,50 %轴向间距下的等熵效率也比设计轴向间距下要小.

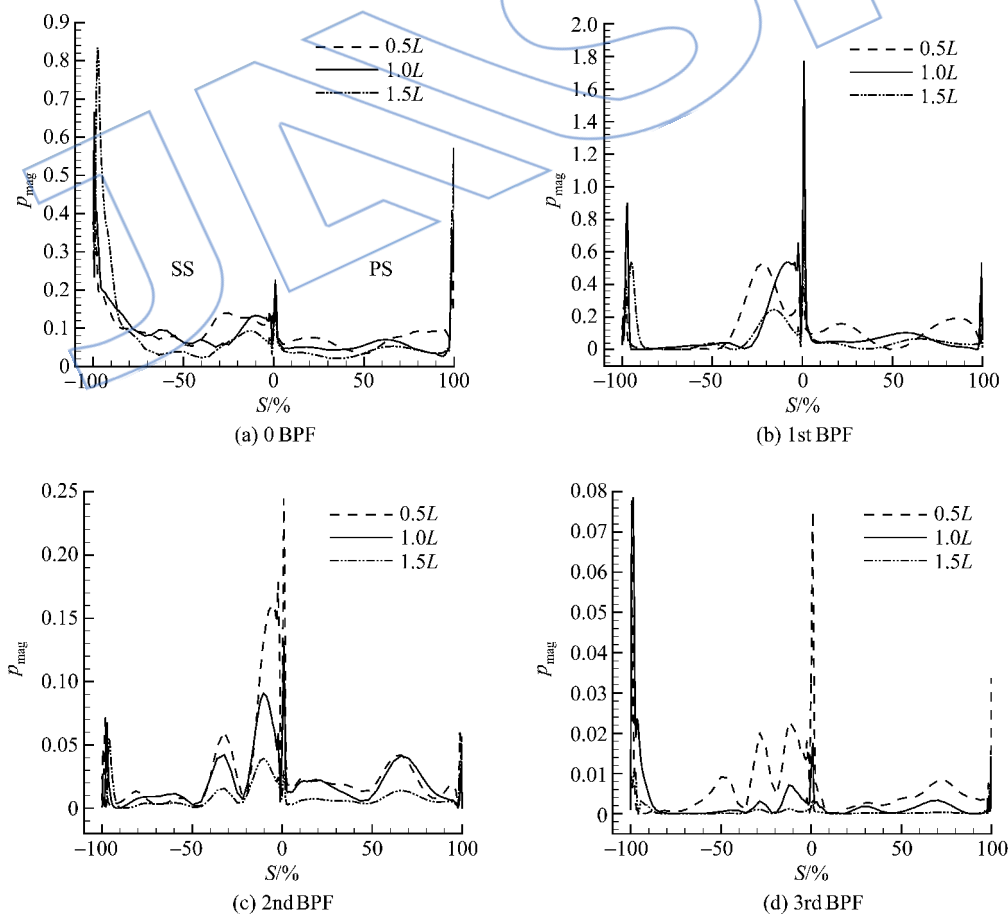


图 2 不同轴向间距下动叶表面非定常静压系数波动幅度的分布

Fig. 2 Distribution of the unsteady fluctuation of the static pressure coefficient on the rotor blade under different axial gaps

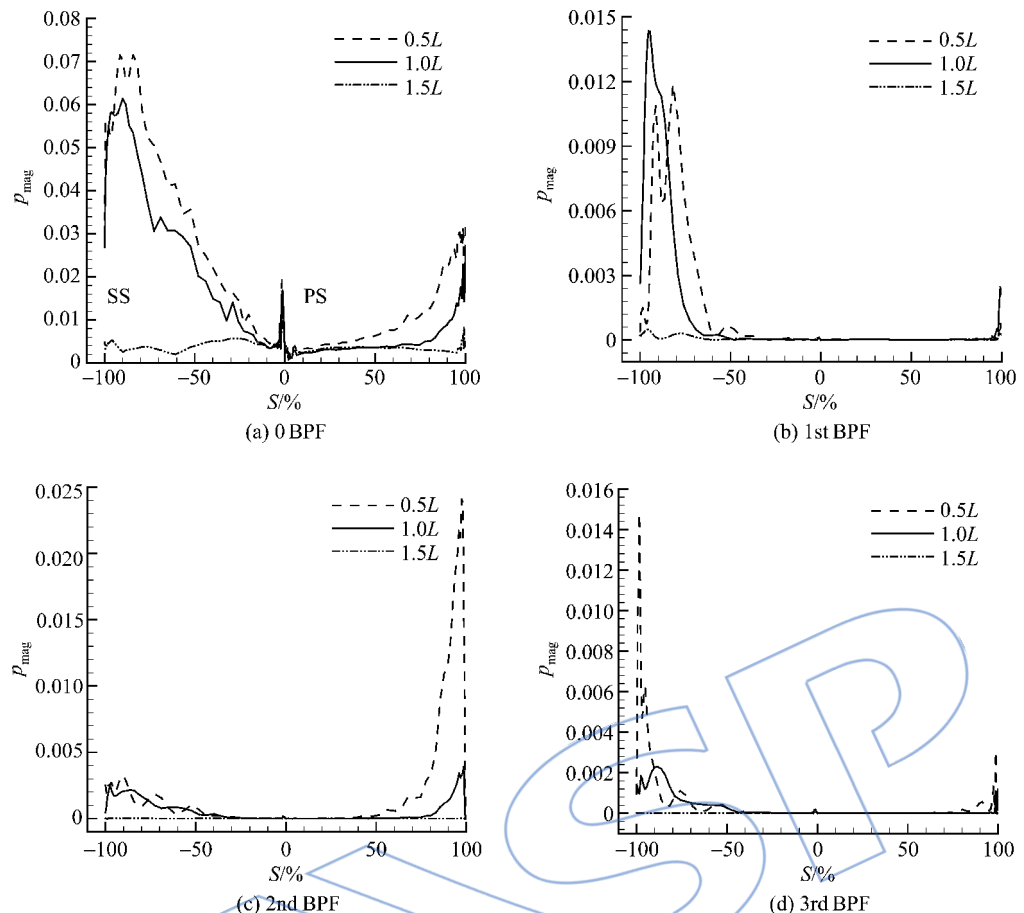


图 3 不同轴向间距下静叶表面非定常静压系数波动幅度的分布

Fig. 3 Distribution of the unsteady fluctuation of the static pressure coefficient on the stator vane under different axial gaps

表 1 不同轴向间距下的时均效率

Table 1 Time-averaged efficiency under different axial gaps

	50 %轴向间距	设计轴向间距	150 %轴向间距
效率	0. 9535	0. 9596	0. 9563

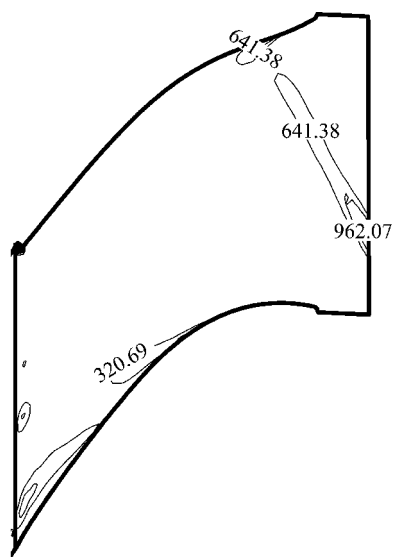
当静子尾迹通过转子通道时会引起气流速度的脉动,类似于雷诺应力的分析方法,尾迹通过所引起的非定常气动应力也可以通过气流脉动速度的相关分析得到. 本文所采用的脉动速度相关计算公式如下:

$$u \acute{u} '=[u(t)-\tilde{u}][u(t)-\tilde{u}]$$
$$v \acute{v} '=[v(t)-\tilde{v}][v(t)-\tilde{v}]$$

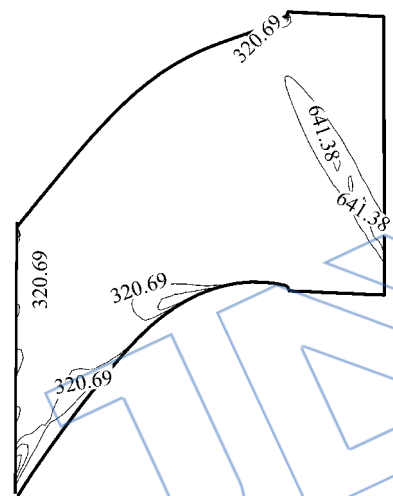
其中 $\tilde{u}, \tilde{v}$ 表示所得到的平均速度,即在转子运动一个周期内对流场进行平均得到的值. $u(t)$ 和 $v(t)$ 分别为某时刻下的轴向和切向速度, $u \acute{u} '$ 和 $v \acute{v} '$

表示瞬时轴向和切向脉动速度的相关量.

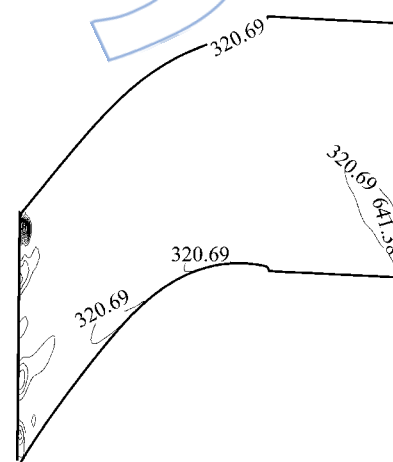
图 4 和图 5 分别表示了不同轴向间距下轴向与切向脉动速度的相关等值线图. 从图中可以看出,当轴向间距为 150 %设计间隙时,轴向脉动速度在进口处很快消失掉,而切向脉动速度向下游保持得略微远一些,但也在叶片前缘附近消失. 上述结果表明在转-静轴向间距较远时,尾迹所产生的非定常气动应力在动叶通道中几乎等于零. 换句话说,尾迹对动叶通道中的平均速度流场没有什么影响. 当转-静轴向间距缩短为 50 %设计轴向间距时,从图 4(a) 和图 5(a) 可以看出,轴向脉动速度和切向脉动速度对动叶通道的影响不但范围是增大的,而且速度的脉动幅度也大大增加. 但从轴向脉动速度和切向脉动速度的分布图中可以看出,在不同的轴向间距下,它们的影响范围均在动叶叶片的前半部分就截止了,在动叶叶片通道的尾缘附近的影响几乎相同.



(a) 50%轴向间距



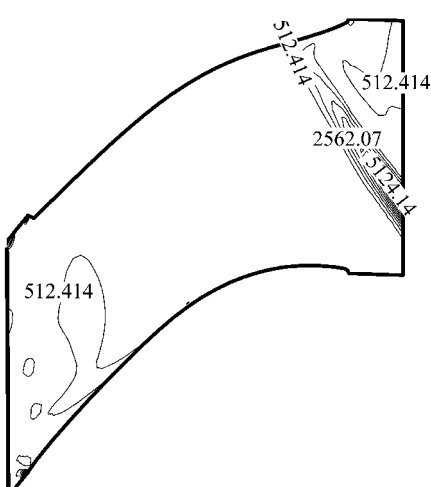
(b) 设计轴向间距



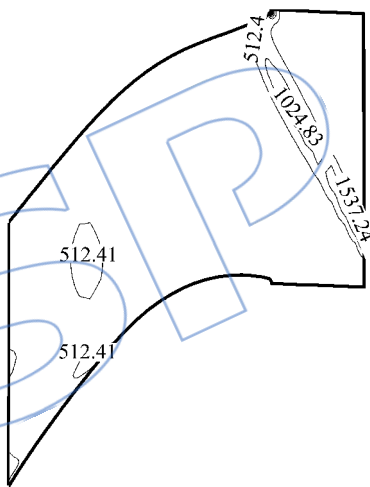
(c) 150%轴向间距

图 4 不同轴向间距下轴向速度的脉动分布图
(单位:m/s)

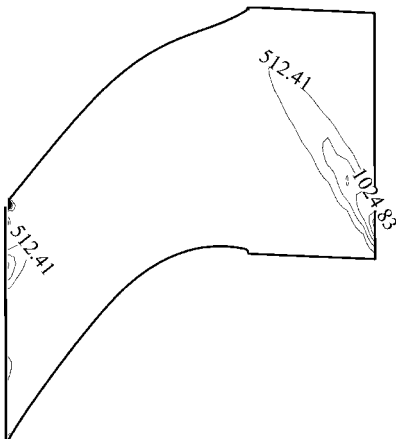
Fig.4 Distribution of the unsteady fluctuation of the axial velocity under different aixal gaps(unit: m/ s)



(a) 50%轴向间距



(b) 设计轴向间距



(c) 150%轴向间距

图 5 不同轴向间距下切向速度的脉动分布图
(单位:m/s)

Fig.5 Distribution of the unsteady fluctuation of the tangential velocity under different aixal gaps(unit: m/ s)

根据上面所采用的脉动速度相关计算公式,图 6 给出了不同轴向间距下动叶通道进出口湍动

能 $K = \frac{1}{2} \overline{v'v'}$ 的分布图. 图 6 中的曲线包含两层意义: 其一, 曲线包围的面积表征了流体通过动叶流道后发生的紊流程度上的变化; 其二, 出口位置对应的曲线表征了流体离开动叶流道时的紊流水平. 显然, 在动叶通道的进口, 随着轴向间距的减小, 进口的湍动能不断的增大, 且 50 % 轴向间距下湍动能的增加幅度非常显著. 在动叶通道出口, 在通道内的绝大部分是设计轴向间距下的湍

动能最大, 而在靠近叶片区却是 150 % 轴向间距下的湍动能最大, 这是因为 150 % 轴向间距下计算区域的出口离叶片最近, 动叶尾流的衰减比其他间隙都小的缘故. 由图还可以看出通过动叶流道后, 50 % 轴向间距表现出最明显的波动水平下降; 150 % 轴向间距方案最弱. 离开动叶流道时, 设计轴向间距在叶片附近的波动水平最低; 50 % 轴向间距与 150 % 轴向间距相差不大. 无论轴向间距如何变化, 动叶流道进口到出口的距离唯一不变. 假设这段距离内静叶尾迹与动叶尾流的掺混效应所导致的流场紊流程度的增大是一定的. 但图 6 显示, 对应不同的轴向间距, 通过动叶流道后, 流体的紊流程度增大的水平有着非常显著的差别. 这说明除了掺混效应, 在动叶流道内, (静叶尾迹) 还发生了某种可逆的恢复过程, 导致尾迹内紊流程度的降低. 众所周知, 尾迹是由一系列小尺度的漩涡组成, 当它进入动叶通道时, 这些漩涡将会变形, 其强度减弱, 紊流程度同时降低. 根据 Smith 的理论, 这种恢复效应与来流尾迹强度成正比, 对于小轴向间距的情况, 上游尾迹得以维持较高的强度进入下游流道, 因而发生的恢复效应也就强, 相应的动叶出口流场紊流程度的降低也就更加明显了, 最终使得 50 % 轴向间距下动叶出口流场的湍动能在动叶通道中央区域最小.

3 结 论

本文对不同轴向间距下涡轮级内非定常流动进行了数值研究. 讨论了轴向间距变化对非定常性及流场分布的影响, 探讨了转子和静子叶片之间的非定常相干的机理. 结论如下:

- 1) 轴向间距 L 对转子内流动的非定常性有着强烈的影响. L 较小时, 动叶表面的压力脉动很强.
- 2) 随轴向间距的减小, 静叶尾迹的强度及影响范围增加. 静叶尾迹对动叶的周期性非定常影响还是主要出现在前缘附近, 且其影响范围均在动叶叶片的前半部分就截止了.
- 3) 随着轴向间距的减小, 进口的湍动能不断的增大. 在动叶流道内, 由于静叶尾迹的恢复效应与来流尾迹强度成正比, 50 % 轴向间距下动叶出口流场的湍动能在动叶通道中央区域最小.

参考文献:

[1] Gorrell S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator-rotor interaction in a transonic compressor: Part 1 - Effect of

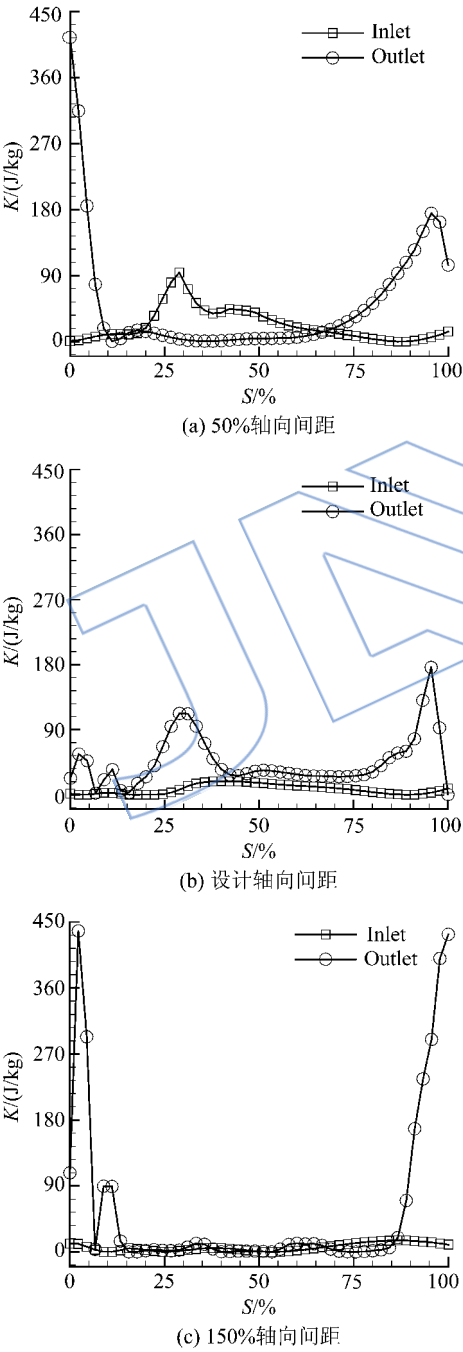


图 6 不同轴向间距下动叶通道进出口湍动能的分布图
Fig. 6 Distribution of the turbulent kinetic enery under different axial gaps on the rotor inlet and outlet plane

- blade-row spacing on performance[R]. ASME Paper GT-2002-30494, 2002.
- [2] Correll S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator-rotor interaction in a transonic compressor: Part 2 - Description of a loss production mechanism[R]. ASME Paper GT-2002-30495, 2002.
- [3] Smith L H. Casing boundary layers in multistage axial flow compressors [M]. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1970.
- [4] Chung M H, Wo A M. Navier-Stokes and potential calculations of axial spacing effect on vortical and potential disturbances and gust response in an axial compressor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119 (2): 472-481.
- [5] Sharma P B, Jain Y P, Pundhir D S. Study of some factors affecting the performance of a contra-rotating axial compressor stage[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering, 1988, 202(1): 15-21.
- [6] Inoue M, Kuroumaaru M, Yoshida S, et al. Short and long-length scale disturbances leading to rotating stall in an axial compressor stage with different stator/ rotor gaps [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124 (2): 376-384.
- [7] Dring R P, Joslyn H D, Hardin L W, et al. Turbine rotor-stator interaction[R]. ASME Paper 82-GT-3, 1982.
- [8] Dring R P, Joslyn H D, Hardin L W, et al. Research on turbine rotor-stator interaction and rotor negative incidence stall[R]. AFWAL-TR-81-2114, 1981.
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 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 Technolog, 2004, 25 (6): 508-511. (in Chinese)
- [12] 李传鹏, 胡骏, 王英锋, 等. 轴向间距对压气机失速特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 246-248.
- LI Chuanpeng, HU Jun, WANG Yingfeng, et al. Effects of axial spacing on compressor stalling characteristics [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26 (2): 246-248. (in Chinese)