

文章编号:1000-8055(2013)06-1350-07

叶尖泄漏流/尾迹掺混对串列转子 非设计点性能影响

钱煜平, 李秋实, 陆亚钧

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在串列转子设计中, 为研究前后排叶片周向位置的变化所引起的泄漏流/尾迹之间掺混的变化对串列转子近失速点性能的影响, 首先建立了泄漏流/尾迹掺混分析模型. 模型分析结果指出流动掺混可以有效减小通道下游堵塞. 在模型分析的基础上, 进一步在高负荷串列转子中进行了不同周向位置的对比研究, 对模型进行了验证; 研究发现在近失速工况, 对比无掺混情况, 后排叶尖泄漏流/前排尾迹掺混使叶尖堵塞减少了近 20%, 从而使得高负荷串列转子的失速裕度相对提高了 11.7%.

关 键 词: 叶尖泄漏流; 尾迹; 流动掺混; 失速裕度; 高负荷串列转子

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Effect of tip leakage flow and wake interactions on off-design point performance of tandem rotors

QIAN Yu-ping, LI Qiu-shi, LU Ya-jun

(School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Interactions of tip leakage flow and wake in tandem rotors were researched based on the changes of the circumferential position of back rotor in relation to the front rotor. An analysis flow model was established for studying the effect of above flow interactions. The model results indicate the mixing of tip leakage flow and wake can reduce the blockage greatly. 3-D numerical simulations were further carried out in high loading tandem rotors with three typical circumferential arrangements and the model results were verified by the numerical results. According to the research, the mixing of back rotor tip leakage flow and front rotor wake can reduce tip blockage almost by 20% compared with non-mixing case and the stall margin of the tandem rotors increases by 11.7% relatively.

Key words: tip leakage flow; wake; flow interactions; stall margin;
high loading tandem rotors

相对于传统单叶排设计, 串列转子设计可以有效提高气动负荷, 并且串列叶栅设计也是提高静子气流转角、降低损失的有效途径.

Bammert 等^[1]的研究发现, 相对于传统轴流

压气机设计, 在相同的气动负荷下, 串列叶排设计可以减少 40% 的叶片数和 30% 的轴向长度.

Ihlenfeld^[2]给出了前后排叶片最优相对位置的判定准则, 即前排叶片的尾迹必须在后排叶片

收稿日期: 2012-10-17

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1350_018.html

基金项目: 国家自然科学基金(10902008, 51176005)

作者简介: 钱煜平(1984—), 男, 江苏无锡人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学研究.

吸力面尾缘处与附面层混合,也就是后排叶片通道的出口平面上只能有一个尾迹;并且前后排叶片的负荷应该相等。

针对串联转子设计, Linnemann^[3]对前后排叶片在不同周向位置进行了细致完整的实验研究,如图1所示,研究发现当周向位置参数 h^*/s 在 $0.8 \sim 0.85$, 同时前后排叶片的轴向间隙为0时,压气机性能最优;而且上述结论在串联静子或是串联转子中均能适用。但是 Bammert 等^[1]通过计算和实验发现,前后排周向最优的相对位置是 h^*/s 在 $0.7 \sim 0.8$ 。

QIAN 等^[4]的研究发现,在设计工况,前后排叶片周向相对位置对串联转子内部流动最主要的影响体现在后排转子对前排转子叶根吸力面尾缘处流动的势影响;当 h^*/s 较小时,后排转子对前排转子吸力面尾缘处流动的势影响将逐步增强,导致该区域流体面临的逆压梯度增加,流动更易发生分离;当 $h^*/s = 0.2$ 时,前排转子叶根吸力面尾缘发生分离,由于后排转子前缘位于分离区下游,后排转子叶根发生进口分离,导致串联转子性能大幅降低。

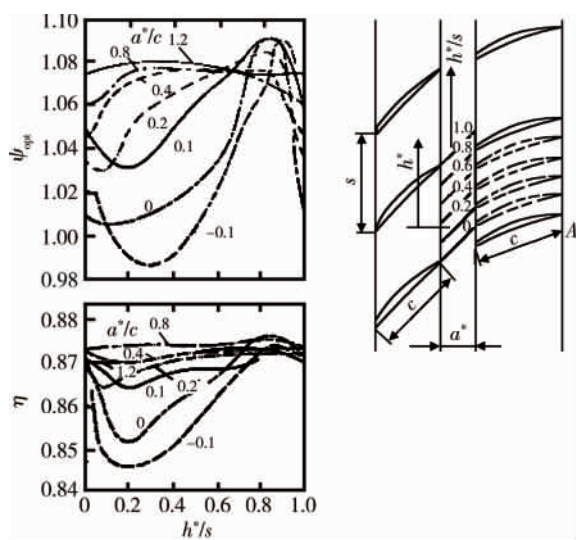


图1 Linnemann^[3]对串联转子的实验研究

Fig. 1 Experimental reaseach on tandem rotor of Linnemann^[3]

但是,上述研究都只分析了前后排叶片周向位置的变化对串联转子设计点性能的影响,并未阐述周向位置的变化对非设计点性能的影响。根据近年的研究显示,转子叶尖泄漏流对压气机非设计工况的性能有着重要影响^[5-15],尤其对高负荷压气机性能有着至关重要的影响。本文的主要工作就是在设计工况下对串联转子周向布局研究

的基础上,进一步分析串联转子叶尖泄漏流与后排叶片通道内尾迹之间的掺混对串联转子非设计点性能的影响。为了便于分析叶尖泄漏流与尾迹掺混的影响,本文首先建立了简化的叶尖泄漏流/尾迹掺混分析模型;其次,通过三维数值模拟,将模型分析结果与串联转子的数值结果进行对比,验证了模型计算结果的可靠性;最后,本文阐述了叶尖泄漏流/尾迹掺混对串联转子非设计点性能影响的流动机理。

1 叶尖泄漏流/尾迹掺混分析模型

QIAN 等^[4]的研究显示,为保证串联转子设计工况性能相对较优,后排转子叶根尾缘吸力面必须保证靠近前排转子尾缘压力面一侧。在这种布局的基础上,前后排叶尖泄漏流与前排尾迹在后排通道中的发展情况可以分为两类:①3股流动独立发展,相互之间基本没有掺混或掺混程度很小,即前排叶尖泄漏流靠近后排叶片压力面侧发展、前排尾迹在后排叶片通道中间发展以及后排叶尖泄漏流在靠近后排叶片吸力面侧发展;②前排叶尖泄漏流在靠近后排叶片压力面侧独自发展,而后排叶尖泄漏流与前排尾迹在后排通道中发生掺混。为评估后排叶尖泄漏流与前排尾迹掺混与否对串联转子非设计点性能的影响,本节建立了简化的三维流动分析模型,如图2。

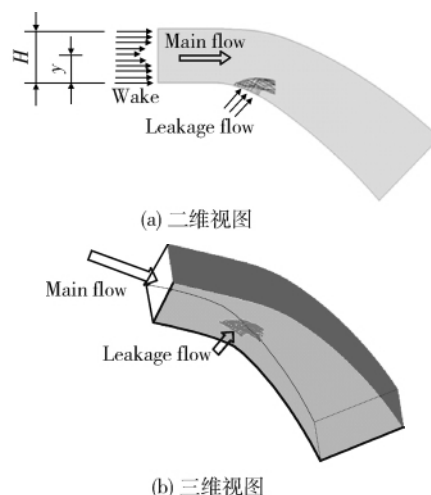


图2 泄漏流/尾迹掺混分析模型

Fig. 2 Analysis model of leakage flow and wake interaction

模型中后排叶片通道被简化为一个扩压器通道,在扩压器吸力面侧开有一条细缝,流体从细缝处进入通道,以模拟叶尖泄漏流对主流的影响。分析模型通过参数 y 来改变进口边界上速度亏损

的位置,据此来模拟不同周向位置下,后排叶尖泄漏流与前排尾迹之间相互作用的变化。在尾迹强度 $\frac{p_{t, \text{wake}} - p_{t, \text{wake}}}{0.5 \rho V_{\text{in, main}}^2} = \frac{7}{6}$ 及泄漏强度 $\frac{V_{\text{leakage}}}{V_{\text{main}}} = 1$ 的情况下 ($V_{\text{in, main}}$ 为进口主流速度, V_{main} 为主流速度, V_{leakage} 为泄漏流速度), 图 3 中显示了 y/H 在取值为 15%, 35%, 55%, 75% 及 85% 情况下, 扩压器流道中熵增的变化, 也反映出周向位置改变后, 尾迹与泄漏流之间相互作用的变化。当 $y/H = 15\%$ 时, 尾迹在下游泄漏流中心区域与泄漏流进行掺混; $y/H = 35\%$ 时, 尾迹在靠近下游泄漏流边缘处与泄漏流发生掺混; 当 y/H 进一步增加时, 尾迹逐步靠近扩压器的压力面一侧, 下游处尾迹也逐步远离泄漏流, 两者之间不发生掺混。这里 y/H 的取值不接近于 0 主要是考虑到如果后排转子与前排转子周向位置相同或者距离很小, 后排转子前缘会落在前排转子的尾迹区内, 导致后排转子发生进口分离。此外, 由于叶片造型三维扭角到积叠的原因, 叶尖截面与叶根截面在周向上会有差别, 如果叶尖截面的 y/H 过分接近于 0, 那后排转子的叶根截面的压力面在前排转子叶根吸力面一侧, 这会造成后排转子叶根处发生大尺度分离^[4]。

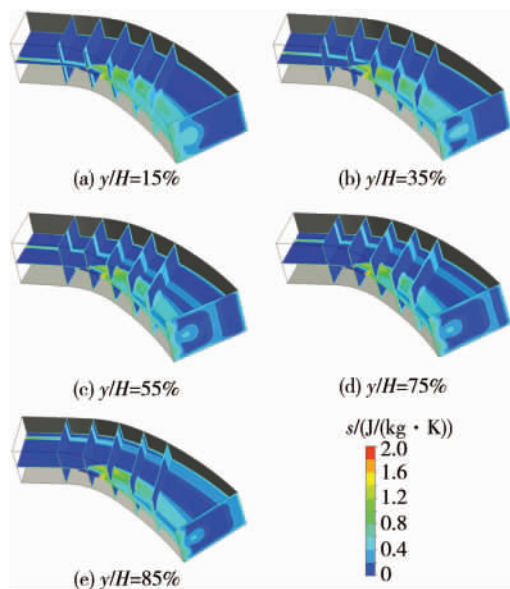


图 3 尾迹/泄漏流之间的不同相互作用

Fig. 3 Different interactions of wake and leakage flow

在尾迹与泄漏流之间相互作用发生变化时, 下游平面上损失与堵塞的变化如图 4 和图 5 所示。其中泄漏系数(泄漏质量流量与进口质量流量之比)为 1.3%, 所选取的下游分析平面距离泄漏缝尾缘约为 50% 泄漏缝长度, 这一距离的选择主

要是考虑实际压气机中泄漏流主要发生在叶尖前缘至 50% 叶尖弦长的部分, 如果该距离取得过长, 泄漏流/尾迹之间掺混过度, 超过实际压气机中两者之间的掺混程度, 与实际不符。图 4 和图 5 的结果显示, 泄漏流/尾迹掺混程度的变化对损失影响很小, 但对下游平面上的堵塞却影响显著。当尾迹与下游泄漏流发生掺混时, 下游平面上的堵塞大幅减小。因此, 在串列转子非设计点, 利用后排叶尖泄漏流与前排尾迹之间的掺混将可以减小后排通道内的堵塞, 改善叶尖区域的通流能力。

本文中对于堵塞的计算采用如下方法: ①通过 $V < \bar{V}$ ($\bar{V}$ 为当地截面上面积平均后的速度) 判定出该平面上的速度亏损区; ②通过公式

$$B_{\text{blockage}} = \frac{\int_{\text{defect region}} \left(1 - \frac{\rho V}{\rho \bar{V}}\right) dA}{S_{\text{area}}}$$

计算出当地截面上的实际堵塞量, 其中 ρ 为密度, A 为面积。

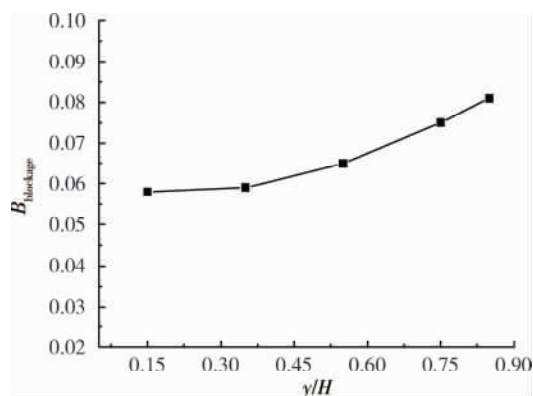


图 4 泄漏流下游平面上堵塞变化曲线

Fig. 4 Blockage curve in downstream planes of leakage flow

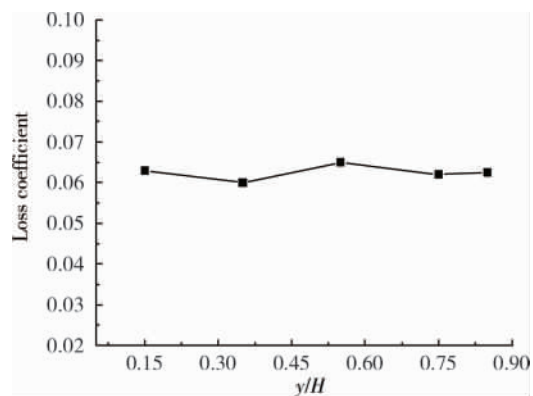


图 5 泄漏流下游平面上损失变化曲线

Fig. 5 Loss coefficient curve in downstream planes of leakage flow

2 叶尖泄漏流/尾迹掺混对串联转子性能影响的流动机理

2.1 高负荷串联转子参数介绍

由叶尖泄漏流/尾迹掺混模型分析可知,叶尖泄漏流与尾迹之间发生掺混可以有效减小泄漏流下游平面上的堵塞。本文在 QIAN 等^[4]的研究基础上,进一步设计了串联转子 3 个典型周向布局,研究叶尖泄漏流/尾迹掺混对串联转子非设计点性能的影响,并验证上述模型结论在串联转子中的适用性。本文研究用串联转子的设计流量系数为 0.737,详细设计参数参见 QIAN 等^[4]。为构建后排叶尖泄漏流与前排尾迹之间不同的掺混程度对串联转子后排叶片通道内流动的影响,分别将后排转子布置在距离前排转子压力面 24%, 12% 和 9% 栅距处,具体周向相对位置如图 6 所示。在上述周向布局下,下面章节将主要研究后排叶尖泄漏流与前排尾迹之间的流动掺混对串联转子非设计点性能的影响。

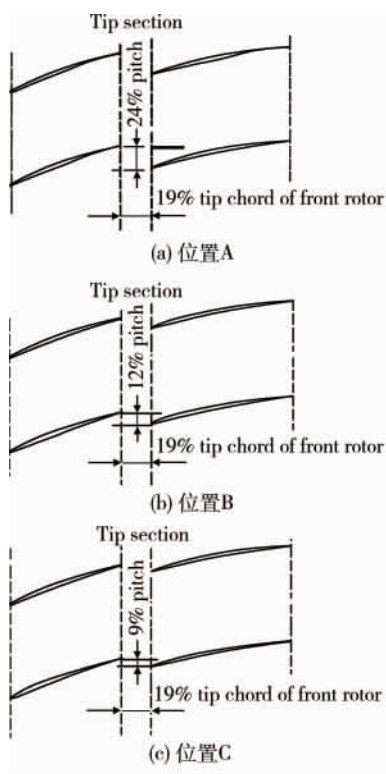


图 6 串联转子的 3 种周向布局

Fig. 6 Three circumferential arrangements of tandem rotor

2.2 数值模拟方法介绍

本文数值模拟所用求解器是软件 ANSYS-

CFX,求解的控制方程是基于有限体积法的雷诺平均的 N-S 方程,差分格式采用的是具有 2 阶精度的高分辨率格式。选用的湍流模型是 shear stress transport (SST) 模型, y^+ 控制在 5 以内。进口边界条件:给定总压为 101325 Pa,总温为 293 K 以及轴向进气方向;出口边界条件:给定径向平衡的静压以模拟不同工况。串联转子的网格拓扑采用的是 HOH 型网格,包围叶片的区域为 O 型网格,其他区域为 H 型网格,叶尖区域 blade-to-blade 的网格拓扑如图 7 所示。单个叶片通道内,流向分布 169 个网格点,径向分布 45 层网格(其中间隙内有 13 层网格),周向分布 49 个网格点,单通道总网格数约为 60 万。

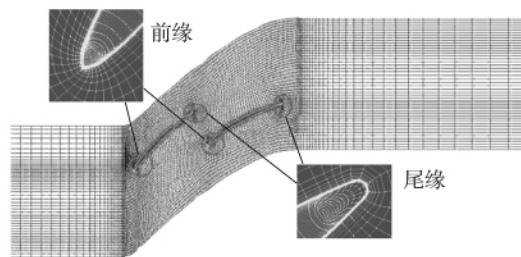


图 7 叶尖 blade-to-blade 网格拓扑

Fig. 7 Blade-to-blade mesh topology of tip

2.3 叶尖泄漏流与尾迹之间的相互作用对串联转子总性能的影响

不同周向位置下,串联转子通过单通道数值模拟所得的总性能对比如图 8、图 9 所示(ϕ 为流量系数, ψ 为总压升系数, η 为效率)。串联转子近失速点性能对比如表 1 所示。对效率-流量系数曲线而言,在流量(质量流量和体积流量均可)大于设计流量的右半支曲线上,后排转子前缘越靠近前排转子压力面尾缘,后排叶尖泄漏流与前排尾

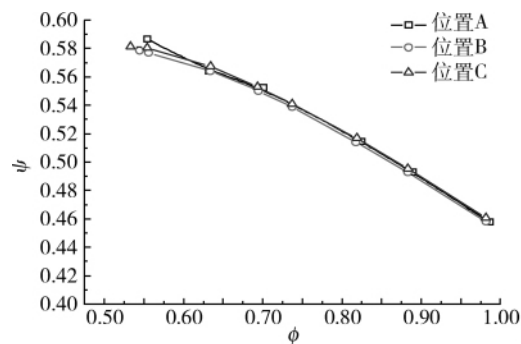


图 8 总压升系数-流量系数特性

Fig. 8 Characteristic of total pressure rise coefficient vs. flow rate coefficient

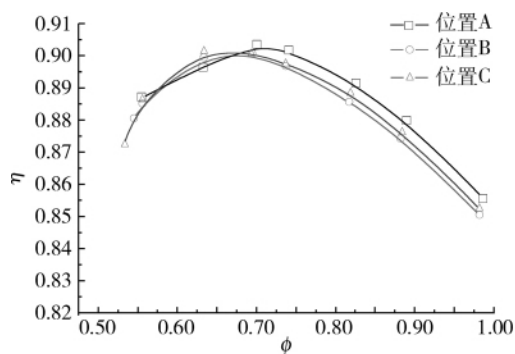


图 9 效率-流量特性系数

Fig. 9 Characteristic of efficiency vs. flow rate coefficient

迹掺混越会引起额外的损失,导致效率有所降低;但在近失速工况附近,后排叶尖泄漏流/前排尾迹之间的掺混却使得效率有所增加.对总压升系数-流量系数曲线而言,后排叶尖泄漏流/前排尾迹掺混只对近失速工况的压升有影响.从定量分析看,后排叶尖泄漏流/前排尾迹掺混对串联转子的峰值效率、总压升系数影响均不大,但对失速裕度影响显著,相对于位置 A,位置 C 的失速裕度相对增加了 11.7%.下面将通过对流场参数的分析,从后排叶片通道中后排叶尖泄漏流与前排尾迹之间掺混的角度去解释导致串联转子失速裕度变化的原因.

表 1 近失速点性能对比

Table 1 Performance comparison at near stall point

位置	ϕ	ψ	η
A	0.554	0.586	0.886
B	0.544	0.578	0.88
C	0.533	0.581	0.872

2.4 叶尖泄漏流/尾迹掺混对串联转子非设计点性能影响的机理

2.4.1 近失速工况,不同周向布局下叶尖泄漏流与尾迹掺混的变化

近失速工况,流量系数为 0.554,不同周向布局下串联转子 96% 叶高轴向速度分布如图 10 所示.位置 A 时,在后排通道中,前排叶尖泄漏流、前排尾迹和后排叶尖泄漏流各自独立发展;位置 B 和位置 C 时,在后排通道中,前排叶尖泄漏流在靠近压力面侧独自发展,后排叶尖泄漏流与前排尾迹发生掺混,位置 C 的情况下掺混更加均匀.后排转子叶尖泄漏流与前排尾迹进行掺混后,后

排通道中的低速区域明显减小,而且后排转子越靠近前排转子压力面,掺混越充分,低速区域越小.因此,在近失速工况,后排叶尖泄漏流与前排尾迹发生掺混可以有效减小后排叶尖泄漏流在后排通道中造成的堵塞.

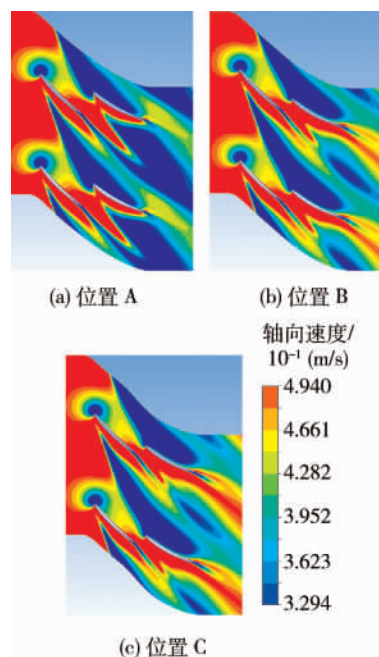


图 10 近失速工况,96%叶高轴向速度分布

Fig. 10 Axial velocity distribution on 96% span at near stall point

2.4.2 后排叶尖泄漏流与前排尾迹掺混对后排叶片通道叶尖流场的影响

在近失速工况,流量系数为 0.554,后排转子通道中不同轴向平面上轴向速度的展向分布如图 11 所示.后排叶尖泄漏流与前排尾迹发生掺混后,后排转子通道出口叶尖区域的轴向速度明显增加,也就是说流动掺混增加了后排转子通道的叶尖通流能力.图 12 进一步显示了后排转子出口平面叶尖堵塞随质量流量的变化趋势.在设计工况附近,后排叶尖泄漏流/前排尾迹掺混对叶尖堵塞的影响不大;但在近失速工况附近,相同的质量流量下,后排叶尖泄漏流/前排尾迹掺混使得叶尖堵塞减小了近 20%.

2.4.3 近失速工况下,对于叶尖泄漏流/尾迹掺混分析模型的验证

在近失速工况,流量系数为 0.554,后排转子通道出口平面叶尖堵塞对比如图 13 所示.横坐标为在后排转子叶尖前缘吸力面相对于前排转子压力面的周向距离.与图 4 所示曲线进行对比,两条

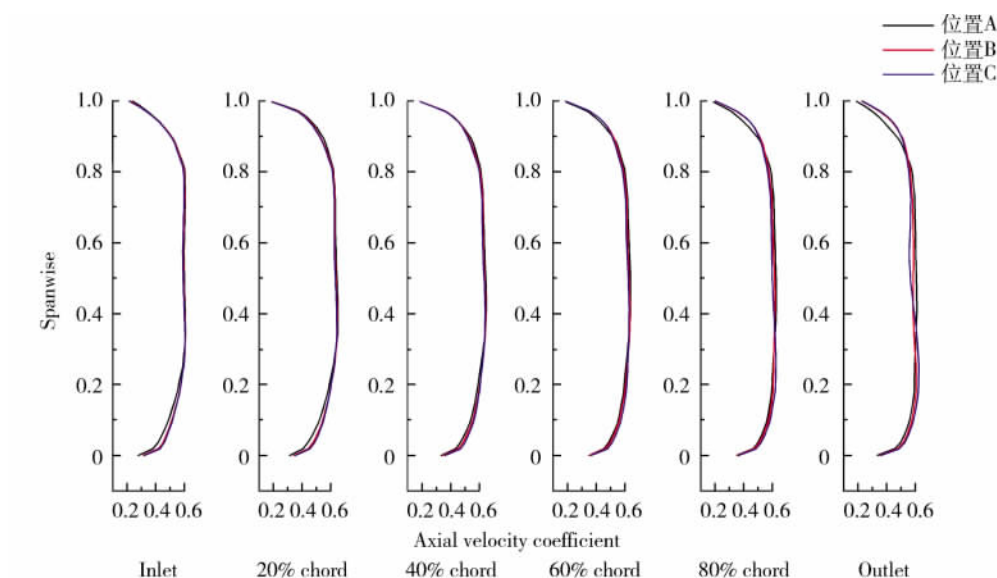


图 11 近失速工况, 后排转子通道中不同轴向平面上轴向速度的展向分布

Fig. 11 Spanwise distribution of axial velocity in different streamwise planes in back rotor passage at near stall point

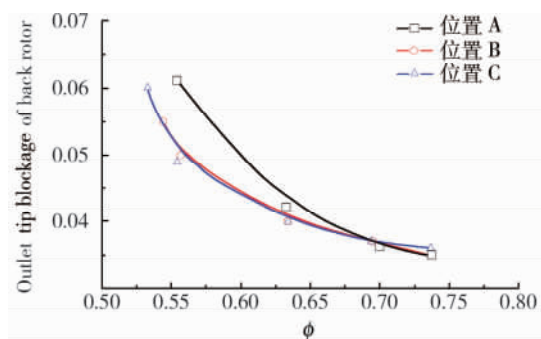


图 12 不同流量系数下, 后排转子通道出口平面叶尖堵塞

Fig. 12 Tip blockage in outlet plane of back rotor passage under different flow rate coefficients

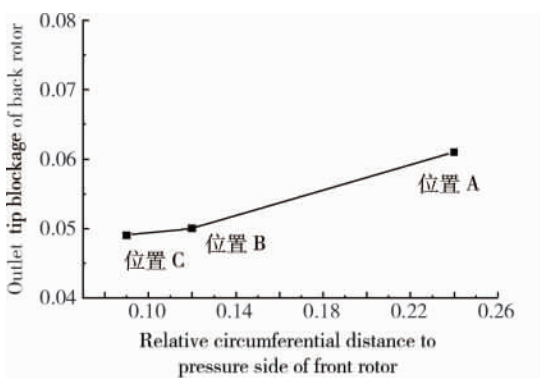


图 13 近失速工况, 后排转子通道出口平面叶尖堵塞

Fig. 13 Tip blockage in outlet plane of back rotor at near stall point

曲线都说明了后排转子通道中, 后排叶尖泄漏流与前排尾迹之间掺混可以显著减小下游堵塞, 并且两条曲线的趋势也基本一致, 即当后排叶尖泄漏流与前排尾迹发生掺混时, 下游堵塞减小。因此, 本文所建立的叶尖泄漏流/尾迹掺混分析模型完全可以适用于评估近失速工况下串联转子后排通道内后排叶尖泄漏流与前排尾迹之间掺混的影响。

3 结 论

1) 与单排叶片设计相比, 串联转子通道内流动更趋复杂, 后排转子叶尖泄漏流与前排尾迹在后排叶片通道中的掺混对串联转子近失速工况的性能有着至关重要的影响。

2) 为评估后排转子叶尖泄漏流与前排尾迹掺混对串联转子非设计点性能的影响, 本文建立了叶尖泄漏流/尾迹掺混分析模型。模型结果指出, 当叶尖泄漏流与尾迹之间发生掺混后, 可以有效减小泄漏流下游平面上的堵塞。

3) 为验证模型的适用性, 本文进一步对高负荷串联转子在非设计工况下进行了数值模拟研究。研究显示在近失速工况下, 模型计算结果与数值模拟结果一致, 证实了模型的可靠性。

4) 在近失速工况, 后排叶尖泄漏流与前排尾迹发生掺混可以有效减小由后排叶尖泄漏流在后排通道中造成的堵塞, 使得串联转子可以工作在更小的质量流量下, 有效拓宽串联转子的失速裕度。

参考文献:

- [1] Bammert K, Staude R. Optimization for rotor blades of tandem design for axial flow compressors[R]. ASME Paper 79-GT-125, 1979.
- [2] Ihlenfeld H. Stromungsvorgange an stark verzogernden spaltflugelgittern[J]. Maschinenbautechnik, 1965, 14 (7/8):361-365.
- [3] Linnemann H. Untersuchungen eines einstufigen axialgeblases mit tandemgittern [J]. Konstruktion, 1964 (4): 128-135.
- [4] QIAN Yuping, LI Zhiping, LU Yajun, et al. Flow mechanics in tandem rotors[R]. ASME Paper GT2012-69665, 2012.
- [5] Khalid S A. The effects of tip clearance on axial compressor pressure rise[D]. Boston, US: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [6] Hah C, Bergner J, Schiffer H P. Short length-scale rotating stall inception in a transonic axial compressor: criteria and mechanism[R]. ASME Paper GT2006-90045, 2006.
- [7] Vo H D, Tan C S, Greitzer E M. Criteria for spike initiated rotating stall[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130 (1):011023. 1-011023. 9.
- [8] Yamada K, Furukawa M, Nakano T. Unsteady three-dimensional flow phenomena due to breakdown of tip leakage vortex in a transonic axial compressor rotor [R]. ASME Paper GT2004-53745, 2004.
- [9] Adamczyk J J, Celestina M L, Greitzer E M. The role of tip clearance in high-speed fan stall[J]. Journal of Turbomachinery, 1993, 115(1):28-38.
- [10] Hah C, Rabe D C. Role of tip clearance flows on flow instability in axial flow compressors[R]. ISABE Paper 2001-1223, 2001.
- [11] Schlechtriem S, Loetzerich M. Breakdown of tip leakage vortices in compressors at flow conditions close to stall [R]. ASME Paper 97-GT-41, 1997.
- [12] Yamada K, Funazaki K, Furukawa M. The behavior of tip clearance flow at near-stall condition in a transonic axial compressor rotor[R]. ASME Paper GT2007-27725, 2007.
- [13] Yamada K, Furukawa M, Inoue M, et al. Numerical analysis of tip leakage flow field in a transonic axial compressor rotor[R]. IGTC Paper 2003-095, 2003.
- [14] Hoffman W H, Ballman J. Some aspects of tip vortex behavior in a transonic turbocompressor[R]. ISABE Paper 2003-1223, 2003.
- [15] Chima R V. Calculation of tip clearance effects in a transonic compressor rotor[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 20(1):131-139.