

文章编号:1000-8055(2013)11-2483-12

# 高负荷多级轴流压气机级间引气数值模拟

沙心国<sup>1,2</sup>, 严 明<sup>1</sup>, 刘政良<sup>1</sup>

(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国家级重点实验室, 北京 100191;

2. 中国航天科技集团公司 中国航天空气动力技术研究院, 北京 100074)

**摘 要:** 采用数值模拟的方法,以一台高负荷 8 级轴流压气机为研究对象,研究了级间引气对压气机总体性能、内部流场和级间匹配特性的影响。结果表明:级间引气可以显著提高压气机的总体性能,引气使得压气机进口流量增加近 1%,最高效率提高约 1.5%;引气会使引气位置处的压力降低,气流密度减小,从而使得引气位置上游的流量增加,转子最大载荷位置向下游移动,引气位置下游的流量减小,而转子最大负荷位置基本保持不变;引气还会使引气位置上下游各级的工作点位置发生变化,改变压气机的级间匹配特性。同时静子尾部机匣处引气还会使引气位置下游机匣处的附面层厚度减小,改变下游转子的进口条件。

**关 键 词:** 多级轴流压气机; 级间引气; 内部流场; 级间匹配; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

## Numerical simulation of inter-stage bleeding in highly-loaded multistage axial compressor

SHA Xin-guo<sup>1,2</sup>, YAN Ming<sup>1</sup>, LIU Zheng-liang<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,

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

2. China Academy of Aerospace Aerodynamics,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Taking a highly-loaded eight-stage axial compressor as an object of research, the effect of inter-stage bleeding on compressor performance, inner flow-field and inter-stage matching in highly-loaded multistage axial compressor was investigated numerically. The result shows that inter-stage bleeding can significantly improve the compressor's performance. The bleeding results in 1% increase of the inlet mass flow and of 1.5% increase of the highest efficiency. In addition, the bleeding can decrease the pressure and density of air near the bleeding pores. This leads to an increase of mass flow upstream with the largest load position of rotors moving to downstream as well as a decrease of the mass flow downstream with the largest load position of rotors kept steady proximately. Moreover, bleeding contributes to change the working point position of stages in upstream and downstream of the bleeding position and alter the inter-stage matching of compressor. At the same time, bleeding at the trailing edge of stator could diminish thickness of boundary layer and change inlet condition of rotor downstream.

**Key words:** multistage axial compressor; inter-stage bleeding; inner flow-field; inter-stage matching; numerical simulation

收稿日期:2012-10-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131105.1002.011.html>

作者简介:沙心国(1987-),男,河北邢台人,助理工程师,硕士,主要从事流体测试与计算。

现代航空发动机多级轴流压气机的设计中常因应用或性能方面的需要引入级间引气. 在高压压气机中引出部分气体, 用于机舱空气的供应、间隙结构的密封、涡轮叶片的冷却、飞机防冰、提供油箱及某些附件设备的高压环境等. 级间引气会对多级压气机的总体性能和内部流场产生影响, 适当的引气可以减小流动阻力, 改善压气机内部流场, 提高压气机的性能. 国内外的文献从引气方式、引气模型、引气位置和引气量等方面进行了大量的研究工作.

1991年, NASA的Alison<sup>[1]</sup>研究了F100-PW-200发动机的压气机第7级中抽气对压气机性能的影响. 1992年, NASA的Yuhas和Ray<sup>[2]</sup>通过地面试验, 研究了F404-GE-400发动机压气机内部引气对发动机性能的影响. 1997年, Kerrebrock等<sup>[3]</sup>首先提出了边界层抽气方案, 其机理是抽吸附面层的低能量流体, 抑制流动分离, 改善内部流场. 后来, Kerrebrock与Merchant等<sup>[4-5]</sup>合作, 利用CFD和试验的方法对边界层引气理论进行了研究, 并证明了在压气机的适当位置进行边界层引气能够提高机组的运行稳定性. Leishman等<sup>[6-8]</sup>针对压气机中引气位置、引气量和引气槽结构等方面做了大量的研究.

国内在这方面也做了大量的工作. 戴四敏<sup>[9]</sup>对离心压气机机匣处引气对压气机的影响进行了研究. 张皓光等<sup>[10]</sup>对某双级轴流压气机引气进行数值模拟, 计算了3个不同轴向间隙位置引气对压气机总体性能和顶部区域流场结构的影响. 顾春伟等<sup>[11]</sup>比较了不同引气量下单级叶片排的流场情况, 证明了通过静叶吸力面引气改善叶片性能和流动状况的可行性. 顾杨等<sup>[12]</sup>通过试验方法对某多级高压压气机进行部分转速下引气的研究, 指出了压气机中间级引气对其性能和稳定工作范围的影响. 陈哲等<sup>[13]</sup>研究了轴流压气机级间环形槽引气对下游叶排 $S_1$ 和 $S_2$ 流面的速度、压力分布以及叶片表面压力分布的影响. 周文啸等<sup>[14]</sup>研究了3种不同的引气槽结构在外机匣端壁处引气对压气机总体性能和局部流场的影响. 赵斌等<sup>[15]</sup>在单级压气机中研究了引气对压气机总压升和稳定裕度的影响.

从以上的分析来看, 国内外的学者对压气机引气技术的研究大多是在低负荷的单级环境或者是比较少的级数之中展开, 在高负荷多级环境中的研究较少. 另外目前的研究主要是针对引气对引气级和下游内部流场影响的研究, 关于引气对

多级压气机上游各级和多级压气机级间匹配影响方面的文章较少. 基于此, 在本文的研究中, 通过对一台高负荷多级轴流压气机中间级机匣引气的数值模拟研究, 进一步探讨多级压气机中间级引气对多级压气机总体性能、内部流场以及多级压气机级间匹配特性的影响.

## 1 研究对象和计算方法

本文的研究对象为带有前置导叶的一台高负荷8级轴流压气机, 其中最后两级使用大小叶片转子, 设计引气位置为 $S_4$ 尾部机匣处, 引气口呈环形缝隙形状, 计算模型如图1所示. 图1中R1~R8表示转子1~8.

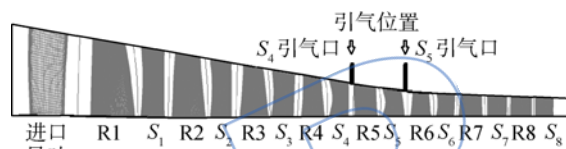


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Diagram of calculation model

采用CFD计算软件ANSYS CFX对多级轴流压气机进行数值模拟. 由结构化网格生成软件Autogrid 5进行网格的绘制, 叶片通道采用H-O-H型网格. 采用shear stress transport(SST)二方程湍流模型, 使用1阶精度的迎风格式求解含有黏性做功项的总能方程. 计算进口给定总温、总压和气流角, 出口给定平均静压, 通过调整引气口的平均静压值控制引气量, 固壁绝热无滑移.

为了验证软件计算结果与计算所用网格无关, 本文进行网格无关性验证. 通过调整在周向、轴向和展向3个方向上的网格层数, 制作出3种不同数目(约为500万、700万和1000万)的网格进行数值模拟计算, 计算结果如图2所示, 从图中可以看出计算结果不随网格数目的变化而改变, 3种网格计算结果基本一致. 说明以上3种数目的网格计算结果是真实可信的. 在计算资源允许的前提下, 为了获得更加详细的内部流场信息, 本文选用1000万的网格进行数值模拟计算. 网格最小正交性大于 $10^\circ$ , 最大延展比控制在5以下, 计算采用SST湍流模型, 该湍流模型对 $y^+$ 要求较高, 这就需要最内层网格的厚度较小, 同时由于计算资源有限, 需要控制网格总数. 这就使得壁面处的网格长宽比很难控制在1000以下. 长宽比超过1000的网格主要集中在叶片、机匣和轮毂等壁面处, 在壁面处流动参数在垂直壁面方向上的变化

最为明显,而在平行壁面方向上流动参数的变化相对要小许多,在壁面处的网格长宽比较大对计算精度的影响很小,基本可以忽略,因此网格质量可以保证计算结果的准确性.

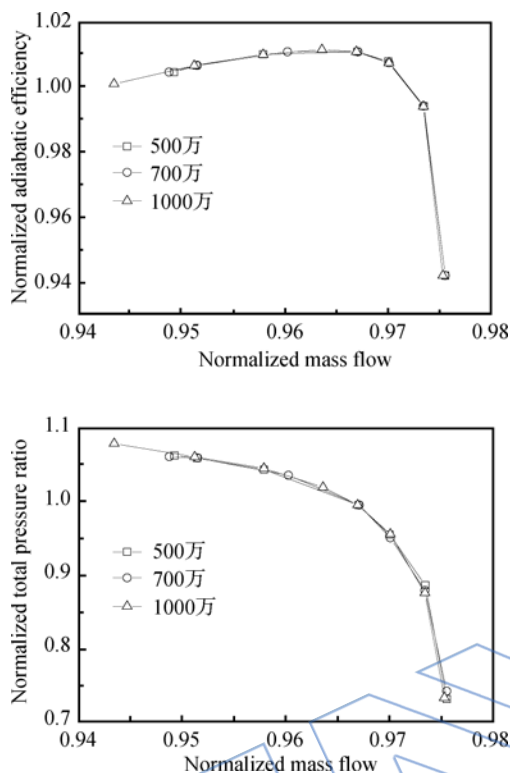


图 2 3 种不同网格的无因次化性能曲线

Fig. 2 Normalized performance curves of three different meshes

## 2 引气对压气机总体性能的影响

图 3 为无引气和两个不同位置引气计算获得的无因次化性能曲线, NB 为无引气; S4B 为  $S_4$  尾部机匣处引气; S5B 为  $S_5$  尾部机匣处引气. 从曲线图中可以看出, 在  $S_4$  尾部机匣处引气获得的效率最高, 压比和流量最大, 性能最好. 不引气的情况下, 效率最低, 压比和流量最小, 性能最差. 在  $S_5$  尾部机匣处引气的性能介于两者之间.

表 1 为两个不同位置引气造成的进出口流量变化对比, 从表 1 中的流量变化对比可以看出, 引气使得压气机的进口流量增加, 出口流量减小, 且引气对出口流量变化的影响更大. 但是进口流量的增加量并不等于引气量, 这与邓峰等<sup>[16]</sup>的研究结果相符. 引气位置越靠后, 出口流量减小值越大, 进口流量的增加值越小. 进口流量的变化主要由第 1 级控制, 在中间级机匣处引气改变了中间级的静压, 静压的变化向上游逐级传递, 影响压气

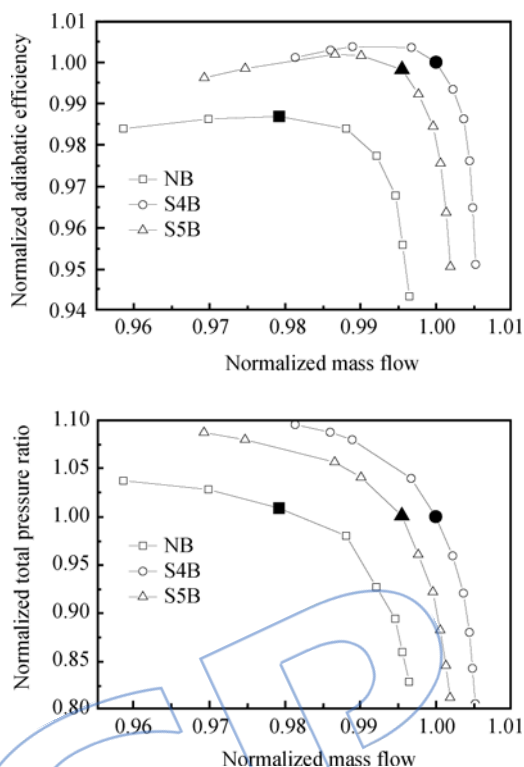


图 3 无引气和两个不同位置引气的无因次化性能曲线

Fig. 3 Normalized performance curves with no bleeding and bleeding in two different positions

表 1 不同位置引气的流量变化

Table 1 Mass flow change with bleeding in different positions

| 引气位置 | 引气量 | 进口流量增加值/引气量 | 出口流量减小值/引气量 |
|------|-----|-------------|-------------|
| S4B  | 1   | 0.185       | 0.815       |
| S5B  | 1   | 0.115       | 0.885       |

机的进口流量, 引气位置越靠后, 其造成的静压变化向上游传播的路径越长, 对进口的影响越小, 进口流量增加值越小. 而出口流量主要由引气位置下游相邻的级控制, 在机匣处引气直接影响引气位置下游相邻转子进口的气流压力, 压力减小造成气流密度减小和叶尖部位的局部气流速度增加, 而对整个叶片通道中的气流速度影响并不大 (如图 4 所示), 造成出口流量减小的主要原因是引气引起的压力降低和气流密度减小, 而不是气流速度的变化. 且位置越靠后, 叶片高度越小, 引气造成的流动参数变化影响范围所占的径向比例越大, 其对出口流量的影响也越大.

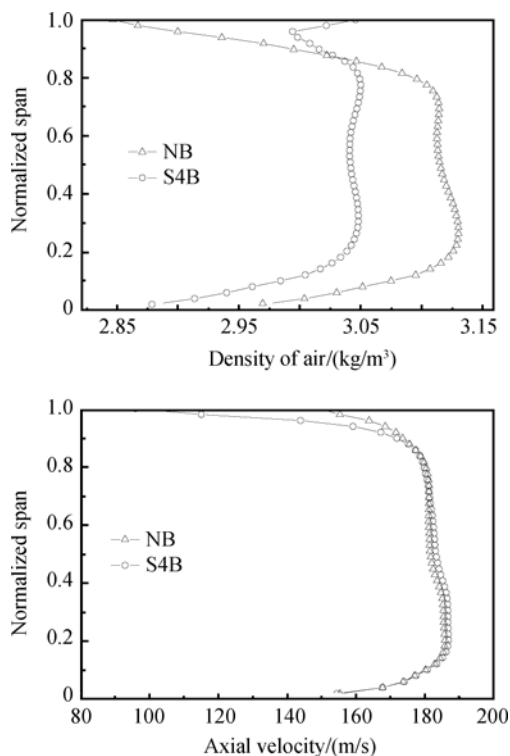


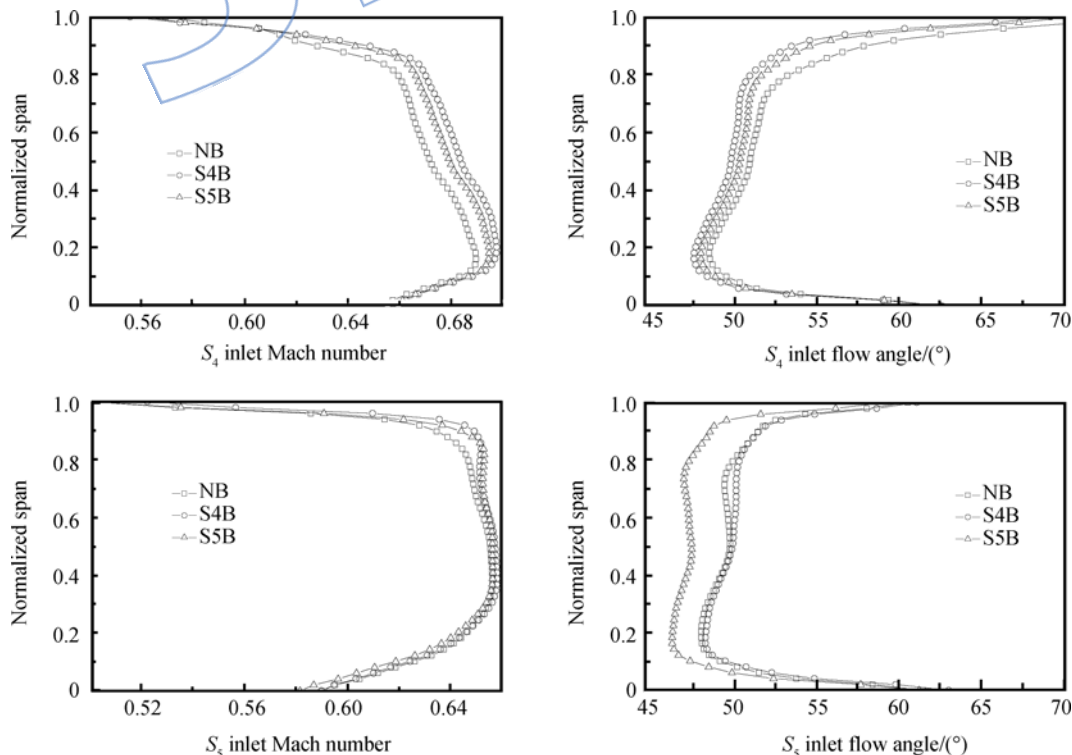
图4  $S_4$  引气和不引气时 R5 进口的气流密度和轴向速度沿叶高的分布

Fig. 4 Density of air and axial velocity at R5 inlet with no bleeding and bleeding of  $S_4$  along spanwise

### 3 引气对内部流场的影响

#### 3.1 静子进出口局部流场

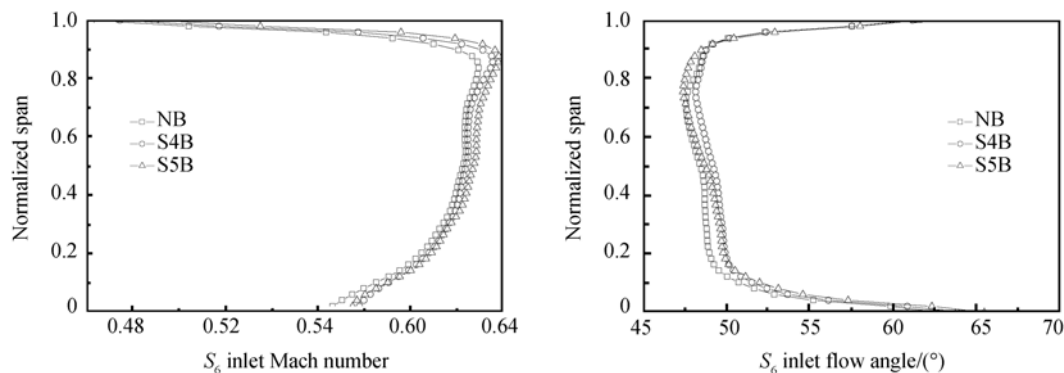
图5为3种情况下  $S_4$ 、 $S_5$  和  $S_6$  进口马赫数和



和气流角沿叶高的分布曲线,从图中可以看出,在  $S_4$  尾部机匣处引气对  $S_4$  进口气流参数的影响已经发展到整个叶高,进口气流角和马赫数在整个叶高都有明显的变化,马赫数在 10%~90% 叶高范围变化比较明显,进口气流角在约 90% 叶高位置变化最大,气流角变化近  $5^\circ$ ,气流参数在近轮毂处变化最小.在  $S_5$  尾部机匣处引气对  $S_5$  进口气流角的变化情况与在  $S_4$  尾部机匣处引气对  $S_4$  进口气流角的变化情况类似,但是对马赫数的影响有所差别,在  $S_5$  尾部机匣处引气对  $S_5$  进口马赫数的影响主要在 50% 叶高以上,对 50% 叶高以下的区域影响较小.经过一级以后,在  $S_5$  尾部机匣处引气对  $S_4$  进口气流参数的影响已经扩展到整个叶高范围内.

观察  $S_5$  和  $S_6$  进口马赫数和气流角沿叶高的分布曲线可以看出,  $S_4$  尾部机匣处引气对  $S_5$  进口流动参数的影响仅限在 50% 叶高以上区域.  $S_4$  尾部机匣处引气对  $S_6$  进口气流参数的影响扩展到整个叶高范围内.同样,观察  $S_5$  尾部机匣处引气对  $S_6$  进口气流参数变化可以看出,  $S_5$  尾部机匣处引气对  $S_6$  进口气流参数的影响仅限在 50% 叶高以上区域内.

观察图5中3排静子叶片的进口气流角发现,在  $S_4$  尾部机匣处引气使得  $S_4$  进口气流角减小,而对引气位置下游的  $S_5$  和  $S_6$  进口气流角影响不大;在  $S_5$  尾部机匣处引气使得上游的  $S_4$  和  $S_5$  进口气流角减小,而对引气位置下游的  $S_6$  进

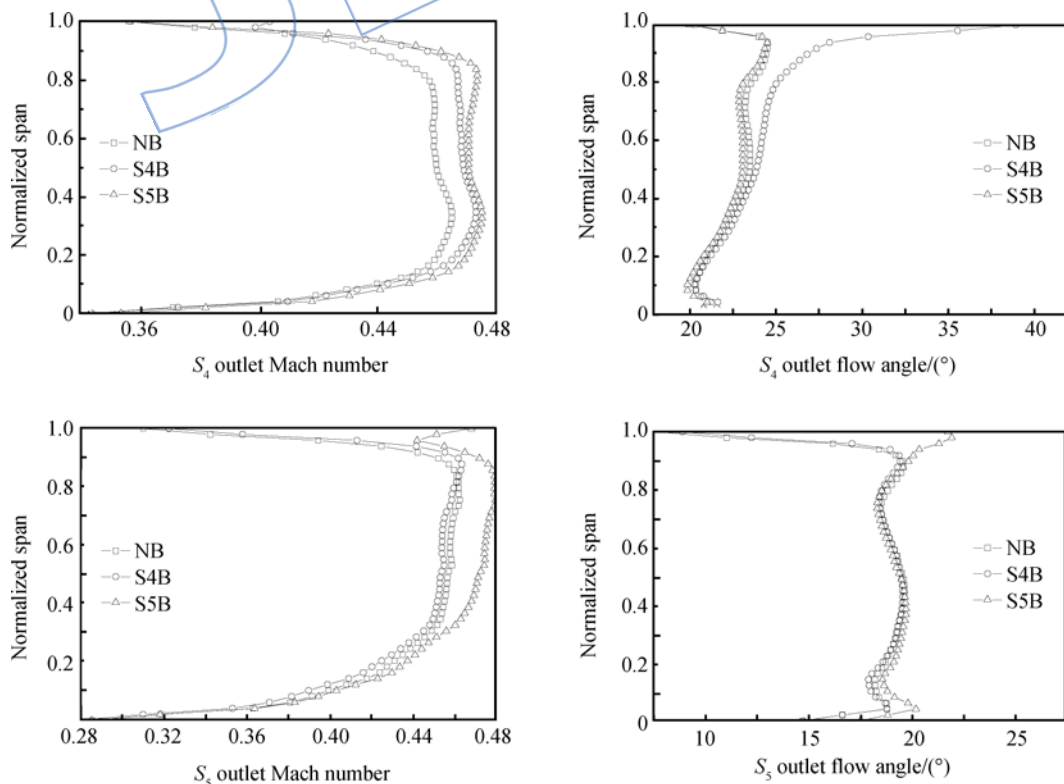
图 5  $S_4$ ,  $S_5$  和  $S_6$  进口马赫数和气流角沿叶高的分布Fig. 5 Inlet Mach number and flow angle distribution of  $S_4$ ,  $S_5$  and  $S_6$  along spanwise

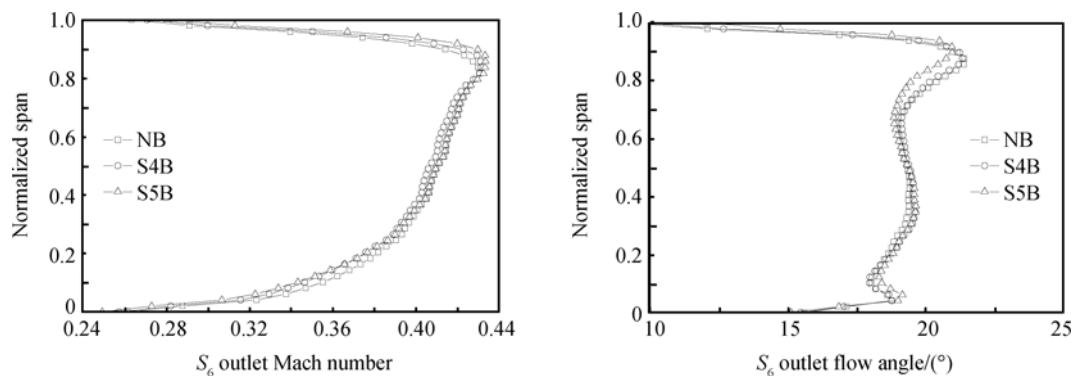
口气流角影响不大. 引气使得上游流量增加, 气流轴向速度增大, 在转子出口相对气流速度方向基本不变的情况下, 根据速度三角形可知转子出口气流的绝对速度与轴向夹角减小, 从而造成静子叶片的进口气流角减小. 引气使得引气位置附近的局部压力下降, 气流密度降低, 虽然引气后下游叶片进口流量减小, 但是压力和密度的变化使得下游气流的轴向速度最终改变不大, 因此造成转子进口相对气流角变化不大, 根据速度三角形, 转子出口的相对气流角和绝对气流角变化不大, 从而使得其后静子叶片的进气角变化不大.

图 6 为  $S_4$ ,  $S_5$  和  $S_6$  三排静子叶片出口马赫数和气流角沿叶高的分布曲线, 从曲线中可以看出,  $S_4$  尾部机匣处引气会使得  $S_4$  出口的马赫数

增大, 同时会使得下游  $S_5$  和  $S_6$  的出口马赫数减小; 同样  $S_5$  尾部机匣处引气会使得  $S_4$  和  $S_5$  出口马赫数增大, 下游  $S_6$  出口马赫数减小. 主要原因是在中间级机匣处引气使得引气位置上游的流量增加, 上游叶片出口的速度增加, 马赫数增加, 同时引气使得引气位置下游的流量减小, 下游叶片出口的气流速度减小, 马赫数减小. 在  $S_4$  尾部机匣处引气, 使得在  $S_4$  尾部叶尖部位附面层内的低速流体流出内部通道, 从而使得叶尖部位的流通能力增加, 马赫数增加, 气流角增加. 同样在  $S_5$  尾部机匣处引气, 使得  $S_5$  尾部叶尖部位附面层内的低速流体流出内部通道, 使得该处的流通能力增加, 马赫数增加, 气流角增加.

由以上的分析可以看出, 在多级压气机的中



图6  $S_4$ 、 $S_5$  和  $S_6$  出口马赫数和气流角沿叶高的分布Fig. 6 Outlet Mach number and flow angle distribution of  $S_4$ ,  $S_5$  and  $S_6$  along spanwise

间机匣处引气会对引气位置上下游的流场产生影响,并且随着远离引气位置,引气造成的影响在径向上逐渐扩展到整个叶高。

### 3.2 各级转子的载荷分布

图7~图14为3种不同的情况下各级转子不同叶高叶片表面载荷分布曲线。图例中的数字0.1,0.5,0.9分别表示10%,50%,90%叶高。对比各级转子在3种情况下不同叶高的载荷分布可以发现,在转子R1,R2,R3和R4之中S4B相对于NB最大载荷位置向下游移动5%~10%弦长,在下游的R5,R6,R7和R8之中,S4B和NB两种情况下,3个不同叶高转子的最大载荷位置相差不大。同样对比S5B和NB两种情况下各级

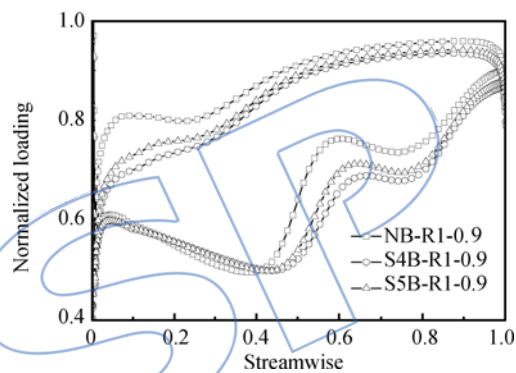
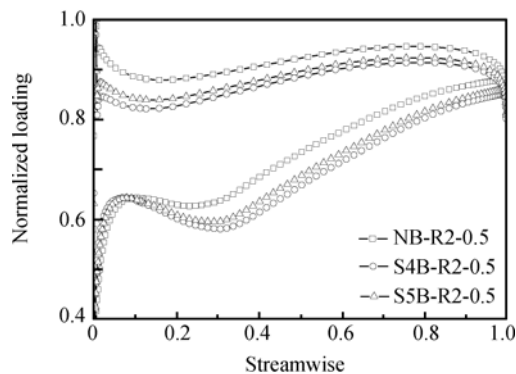
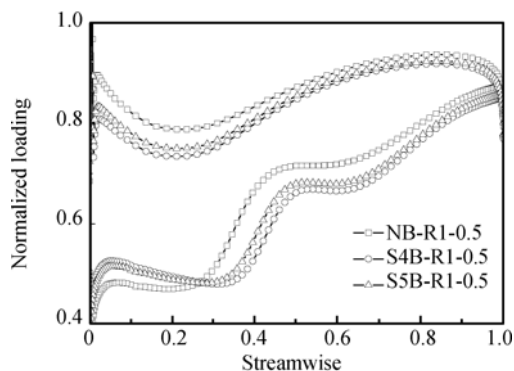
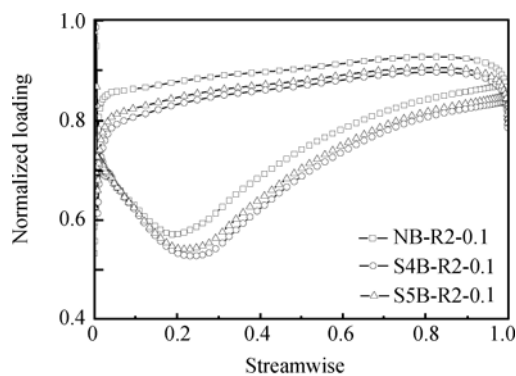
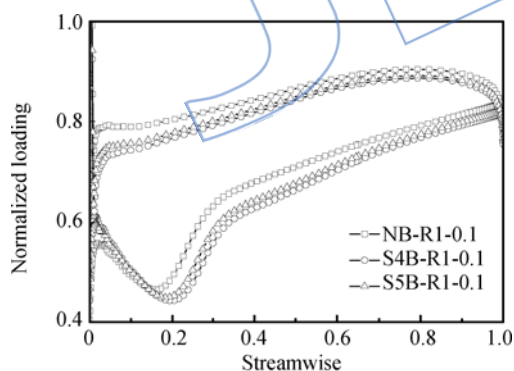


图7 转子R1在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 7 Loading distribution of rotor R1 in three different spans



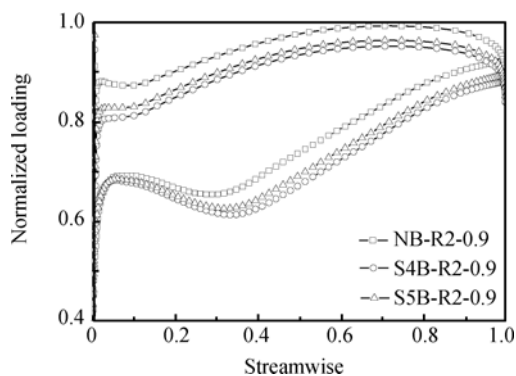


图 8 转子 R2 在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 8 Loading distribution of rotor R2  
in three different spans

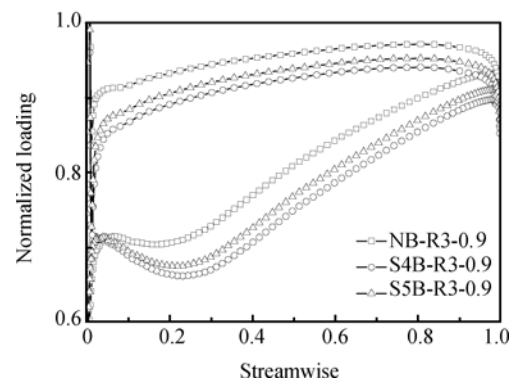
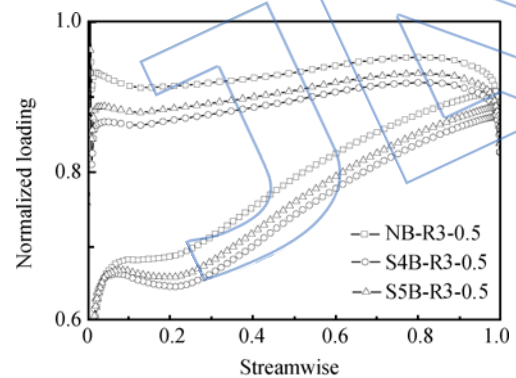
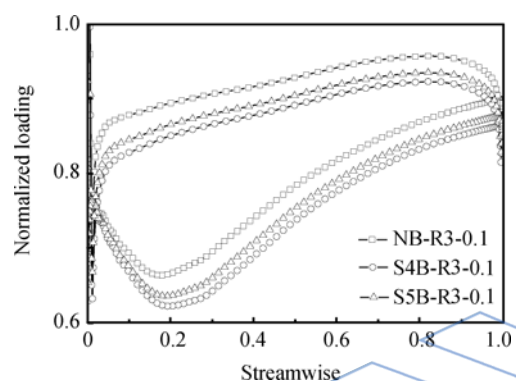
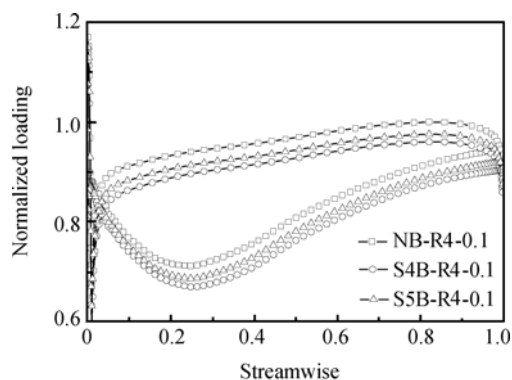


图 9 转子 R3 在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 9 Loading distribution of rotor R3  
in three different spans

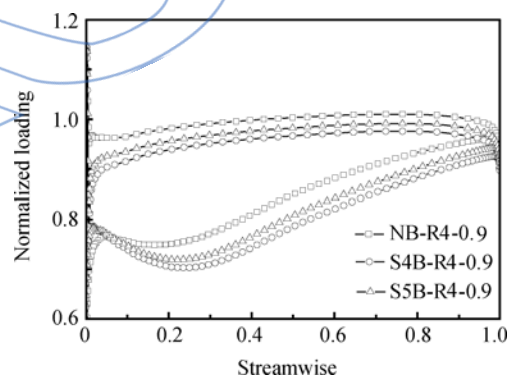
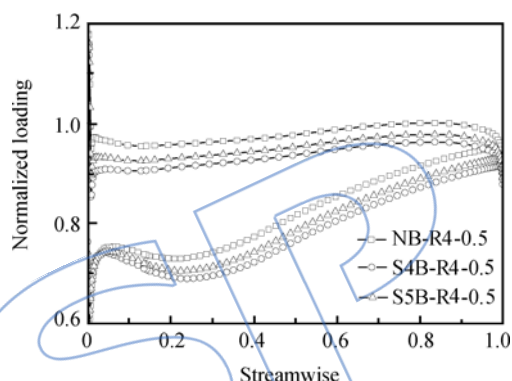
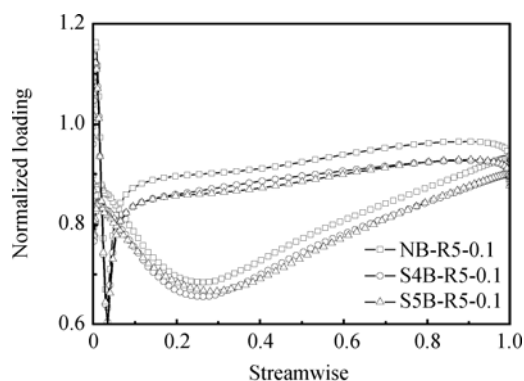


图 10 转子 R4 在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 10 Loading distribution of rotor R4  
in three different spans



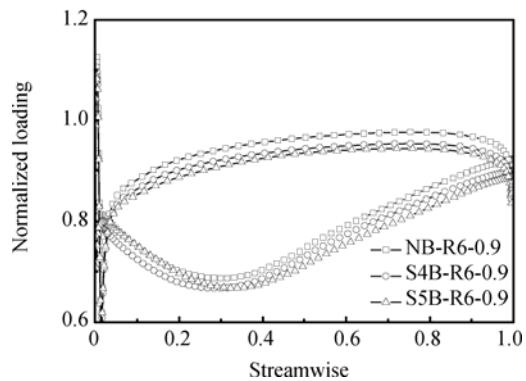
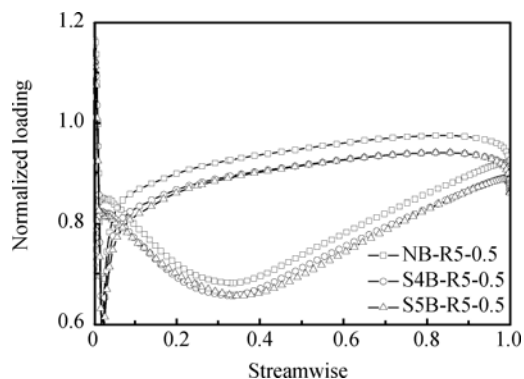


图 12 转子 R6 在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 12 Loading distribution of rotor R6 in three different spans

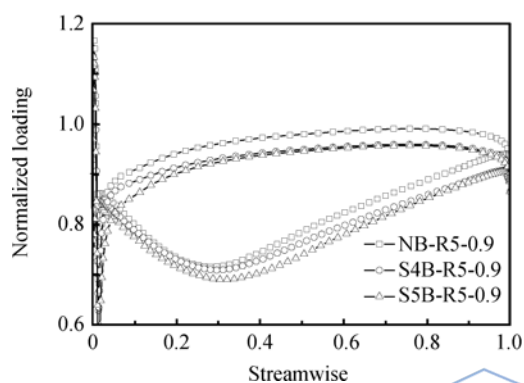


图 11 转子 R5 在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 11 Loading distribution of rotor R5 in three different spans

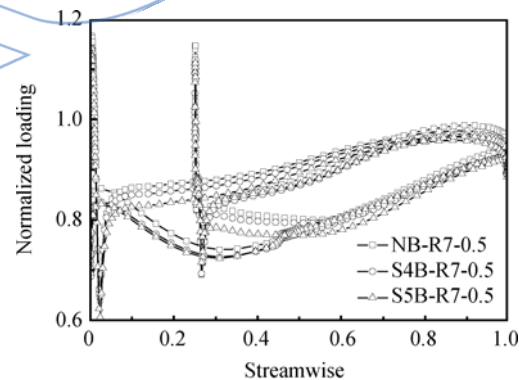
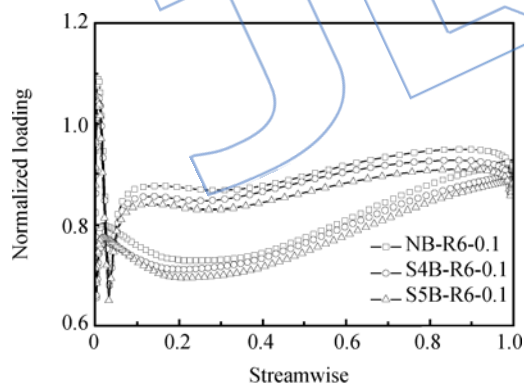
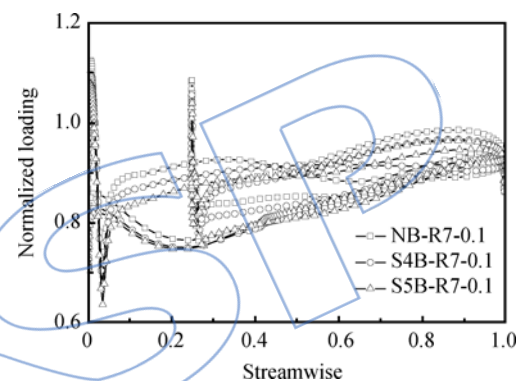
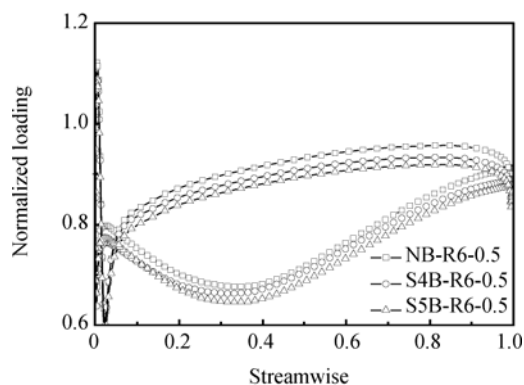


图 13 转子 R7 在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 13 Loading distribution of rotor R7 in three different spans



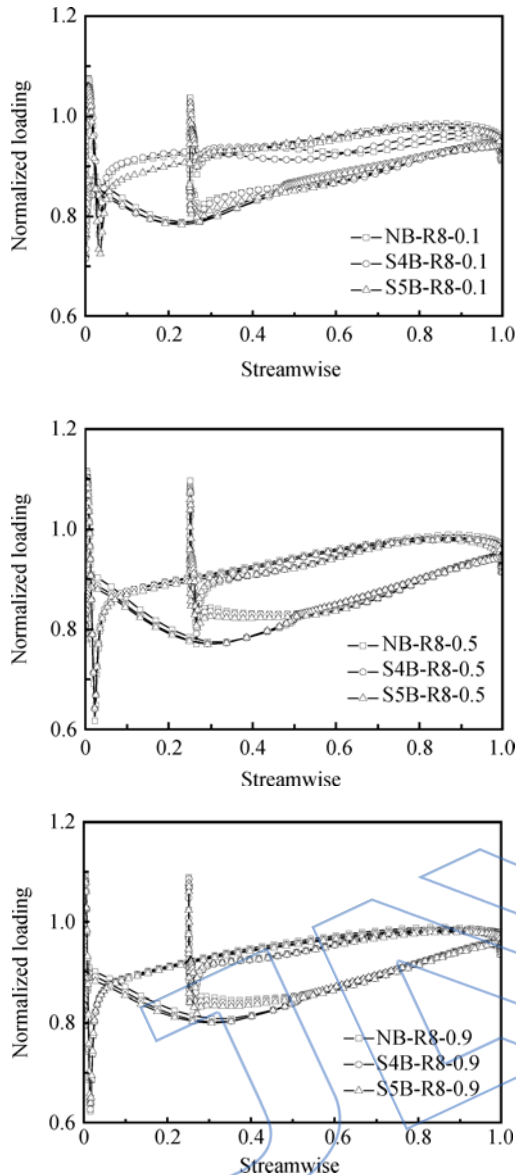


图 14 转子 R8 在三个不同叶高的载荷分布

Fig. 14 Loading distribution of rotor R8 in three different spans

转子的载荷分布曲线可以发现,在引气位置上游的 R1, R2, R3, R4 和 R5 不同叶高的最大载荷位置均向下游移动了 5%~10% 弦长,在引气位置下游的 R6, R7 和 R8 最大载荷位置相差不大。

综上所述,引气使得在引气位置上游各级转子的最大载荷位置向下游移动,而对下游转子叶片最大载荷位置影响不大。主要原因是多级压气机中间级机匣处引气使得压气机的进口流量增加,气流的轴向速度增加,从而减小了上游各级转子的攻角,使得转子最大载荷位置向下游移动。引气使得引气位置下游的压力和气流密度减小,从而造成出口流量减小,而对轴向速度和气流角影响很小,转子最大载荷位置变化不大。

### 3.3 转子叶尖间隙泄漏流

图 15 是在 3 种不同情况下各级转子叶尖间隙泄漏流量的变化分布曲线,从曲线上可以看出, S4B 相对于 NB 的情况下, R5 的叶尖泄漏流量减小, S5B 相对于 NB 的情况下, R6 的叶尖泄漏流量减小。由此可知,在静子尾部机匣处引气会造成引气位置下游相邻转子的叶尖泄漏流量减小。参考图 16 中转子 R5 和 R6 在 98% 叶高叶片表面载荷分布可知,主要原因是机匣处引气使得下游转子叶尖部位的载荷降低,且在下一级转子叶尖前段载荷变化较大,沿流向随着径向掺混的发生,引

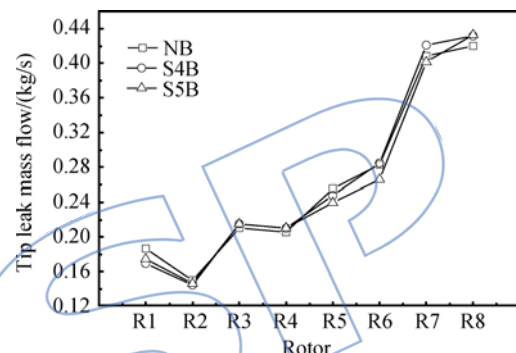


图 15 转子叶尖泄漏流量分布

Fig. 15 Distribution of rotors tip leak mass flow

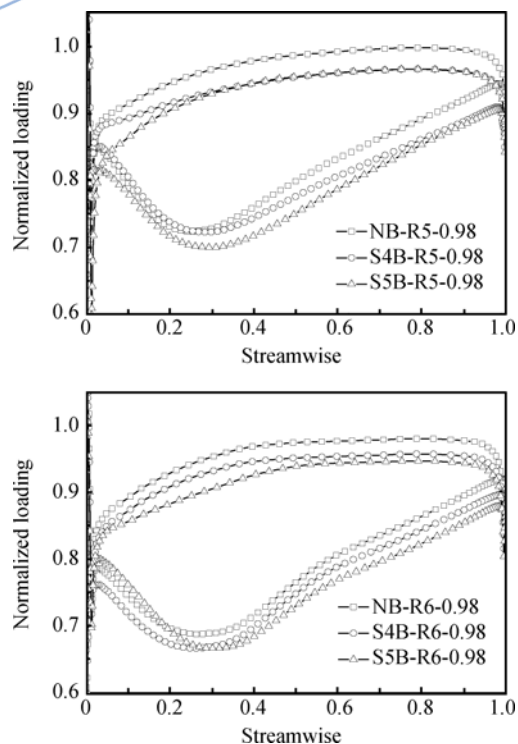


图 16 转子 R5 和 R6 的 98% 叶高位置载荷分布

Fig. 16 Loading distribution of rotors R5 and R6 in 98% span

气引起的载荷变化逐渐减弱,在下游一级转子叶尖尾部,引气和不引气两种情况下转子叶尖部位的载荷分布又基本恢复一致. 转子叶尖泄漏流量的变化主要是由转子前段的泄漏流量变化造成.

### 3.4 附面层

在设计点,多级压气机也会出现级间匹配问题,这主要是由于环壁附面层增长造成的. 轮毂和机匣表面的附面层不仅带来了高损失,更重要的是产生了流道堵塞,减小了流通面积. 压气机的级压比越高对流通面积的变化越敏感,多级压气机的任何一级偏离了其给定的工作点,必然会导致全台压气机达不到其预期的性能. 因此在多级压气机之中采用机匣或者轮毂表面引气可以抽掉前面各级累积的附面层,提高后面级的流通能力.

图 17 为  $S_4$  尾部机匣处不引气和引气两种情况下  $S_4$  出口截面的熵值分布,从图中可以看出,在机匣处引气后使得叶尖附近及尾迹区的熵值明显降低,尾迹宽度减小. 引气使得叶尖区域由于附面层的存在积累的低能流体流出,叶尖部位的附面层厚度减小,减小了附面层中低能量气体与主流区高能量气体的掺混,改善了通道内的流动状况.

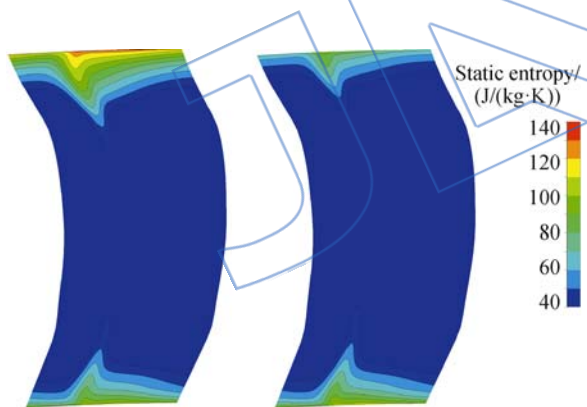


图 17 不引气和引气时  $S_4$  出口处熵值分布

Fig. 17 Static entropy distribution in exit of  $S_4$  with no bleeding and bleeding

图 18 和图 19 为  $S_4$  尾部机匣处引气的情况下  $S_4$  尾部出口处沿流向 4 个不同截面的熵值分布,其中机匣处引气缝的位置如图中两条黑线所示,引气缝的一端在 B 和 C 截面之间,引气缝的另一端在 D 截面处. 从 4 个截面图中可以看出,截面 A, B, C 和 D 在靠近机匣处的高熵区范围逐渐缩减,峰值逐渐减小. 另外,随着截面逐渐远离叶片, B, C, D 截面中叶片尾迹逐渐减小.

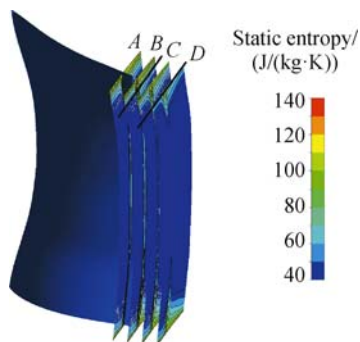


图 18 引气时  $S_4$  出口处 4 个截面熵值分布

Fig. 18 Static entropy distributions in four sections near exit of  $S_4$  with bleeding

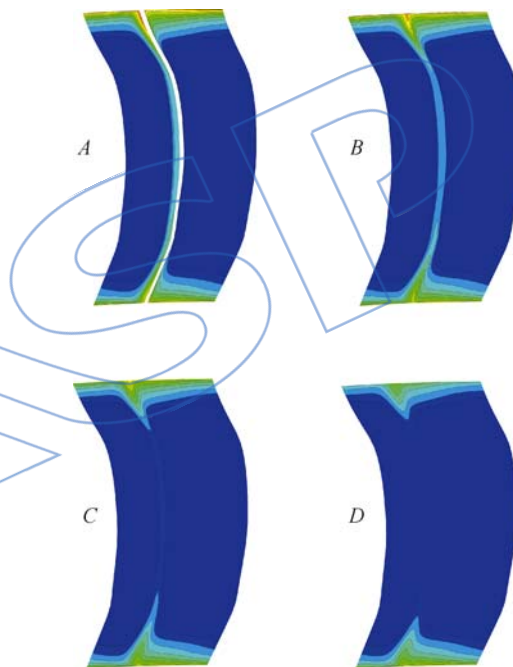


图 19 引气时  $S_4$  出口处沿流向 4 个截面熵值分布

Fig. 19 Static entropy distributions in four streamwise sections near exit of  $S_4$  with bleeding

## 4 引气对级间匹配特性的影响

对比  $S_4B$  和  $NB$  两种情况下的压比沿各级的分布可以看出,在  $S_4$  的尾部机匣处引气使得压气机前 3 级的压比降低,引气位置下游级的压比提高. 对比  $S_5B$  和  $NB$  两种情况下的压比分布有相同的规律. 主要原因是多级压气机中间级引气使得引气位置上游各级的流量变大,下游各级的流量减小,从而使得引气位置上游级工作点向堵点移动,压比减小,下游级的工作点向喘点移动,压比增加.

从压气机各级的绝热效率分布(见图 20)可以看出,相对于不引气的情况,在  $S_4$  尾部机匣处引气使得压气机第 4 级的绝热效率提高,第 5 级绝热效率降低。在  $S_5$  尾部机匣处引气使得压气机第 5 级的绝热效率提高,第 6 级的绝热效率降低,原因在于静子尾部机匣处引气使得该静子尾部的尾迹区域减小,同时引气使得机匣处的附面层厚度减小,从而提高了引气级的绝热效率,但机匣处引气会使下一级转子进口参数发生径向畸变,在该级中的径向掺混使得这一级的绝热效率降低。在多级轴流压气机的设计状态,前面级工作在喘点和最高效率点之间,压气机的后面级工作在最高效率点和堵点之间。引气使得上游各级流量增加,上游各级的工作点向最高效率点移动;引气使得下游流量减小,摩擦损失减小,绝热效率提高,因此中间级引气使得除引气位置下游相邻一级以外的其他各级效率均有不同程度的提高。

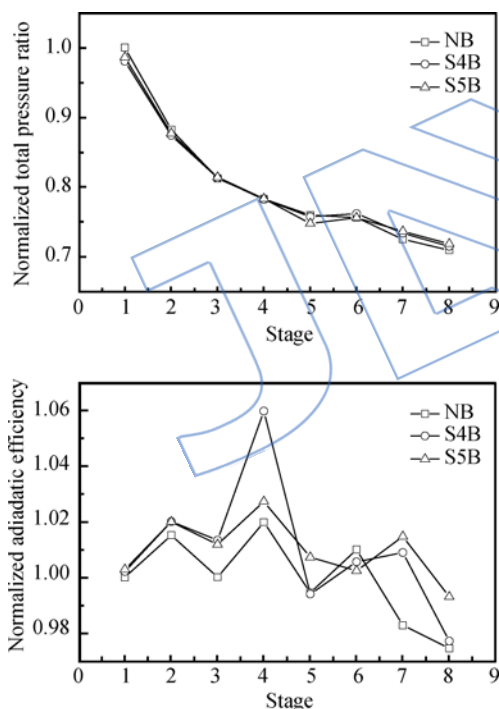


图 20 无因次化总压比和绝热效率的分布

Fig. 20 Normalized total pressure ratio and adiabatic efficiency distribution

## 5 结 论

本文以一台高负荷的 8 级轴流压气机为研究对象,研究了中间级机匣处引气对压气机总体性能、内部流场和级间匹配特性的影响。通过详细地数值计算和结果分析,得到如下结论:

1) 压气机的中间级进行适当引气可以提高压气机的总压比和绝热效率,改善压气机的总体性能。

2) 多级轴流压气机中间级引气会使引气位置上游各级流量增加、压比减小;引气位置下游流量减小、压比增加,并且引气位置越靠后,进口流量增加值越小,出口流量减小值越大。

3) 压气机中间级引气会使引气位置上游各级的流量增大,从而造成上游各级的攻角和转子叶片最大载荷位置发生变化;中间级引气会引起引气位置下游的压力降低,气流密度减小,流量减小,而对下游各级的气流速度、气流角和各级转子叶片的最大载荷位置影响不大。

4) 中间级机匣处引气改变了转子叶尖部位的载荷分布,从而引起各级转子叶尖间隙泄漏量的变化。

5) 中间级机匣处引气使得叶尖部位的附面层厚度减小,避免了附面层中的低能量气体与主流区高能量气体掺混,改善了叶轮通道内的流动,从而提高引气级的绝热效率。但是引气会造成引气位置下游一级进口流动参数的径向畸变和在该级中的径向掺混,使之效率降低;总之,中间级引气会造成引气位置上下游的流量变化,影响上下游各级的工作点,从而造成各级的总压比和绝热效率发生变化,影响压气机各级之间的匹配特性。

## 参考文献:

- [1] Alison B E. The effects of compressor seventh-stage bleed air extraction on performance of the F100-PW-220 afterburning turbofan engine[R]. NASA CR-179447, 1991.
- [2] Yuhas A, Ray R. Effects of bleed air extraction on thrust levels of the F404-GE-400 turbofan engine[R]. AIAA 92-3092, 1992.
- [3] Kerrebrock J L, Reijnen D P, Ziminsky W S, et al. Aspirated compressors[R]. ASME Paper 97-GT-525, 1997.
- [4] Kerrebrock J L, Drela M A, Merchant A, et al. A family of designs for aspirated compressors[R]. ASME Paper 98-GT-196, 1998.
- [5] Merchant A, Kerrebrock J L, Adamczyk J J, et al. Experimental investigation of a high pressure ratio aspirated fan stages[R]. ASME Paper GT2004-53679, 2004.
- [6] Leishman B A, Cumpsty N A, Denton J D. Effects of bleed rate and end-wall location on the aerodynamic behavior of a circular hole bleed off-take[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 645-658.
- [7] Leishman B A, Cumpsty N A. Effects of inlet ramp surfaces on the aerodynamic behavior of bleed hole and bleed slot off-take configurations[J]. Journal of Turbomachin-

- ery, 2007, 129(4): 659-668.
- [8] Leishman B A, Cumpsty N A. Mechanism of the interaction of a ramped bleed slot with the primary flow[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 669-678.
- [9] 戴四敏. 导风轮轮罩引气对离心式压气机性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1): 125-129.
- DAI Simin. Numeric simulation of inducer shroud bleeding effect on centrifugal compressor performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1): 125-129. (in Chinese)
- [10] 张皓光, 楚武利, 吴艳辉, 等. 轴向间隙引气对双级轴流式压气机性能及流场影响的数值研究[J]. 流体机械, 2006, 34(7): 24-27.
- ZHANG Haoguang, CHU Wuli, WU Yanhui, et al. Numerical investigation on the effect of axial clearance bleeding on a two-stage axial-flow compressor flow-field and performance[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(7): 24-27. (in Chinese)
- [11] 顾春伟, 薛耀华, 邓焱, 等. 压气机抽气级静叶吸力面抽气方式的研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 574-576.
- GU Chunwei, XUE Yaohua, DENG Hao, et al. Research of bleeding mode on suction face of compressor stator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(4): 574-576. (in Chinese)
- [12] 顾杨, 崔健, 夏联, 等. 压气机带静叶优化的引气试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(4): 15-19.
- GU Yang, CUI Jian, XIA Lian, et al. An experimental investigation on bleeding of optimized compressor vane[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(4): 15-19. (in Chinese)
- [13] 陈哲, 刘应征. 轴流压气机抽气对下游叶排流场影响的数值研究[J]. 风机技术, 2012(3): 22-25.
- CHEN Zhe, LIU Yingzheng. Numerical investigation on the effect of bleeding to the flow-field of the downstream row in the axial compressor[J]. Compressor, Blower and Fan Technology, 2012(3): 22-25. (in Chinese)
- [14] 周文啸, 羌晓青, 滕金芳, 等. 多级轴流压气机级间引气的数值模拟研究[J]. 节能技术, 2011, 29(6): 490-494.
- ZHOU Wenxiao, QIANG Xiaoping, TENG Jinfang, et al. Numerical research of inter-stage bleeding in a multistage axial compressor[J]. Energy Conservation Technology, 2011, 29(6): 490-494. (in Chinese)
- [15] 赵斌, 李绍斌, 李秋实, 等. 引气提升轴流压气机性能的数值研究[J]. 航空动力学报, 2011, 26(2): 262-271.
- ZHAO Bin, LI Shaobin, LI Qiushi, et al. Numerical research on enhancing the axial compressor performance by bleeding[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(2): 262-271. (in Chinese)
- [16] 邓焱, 顾春伟, 薛耀华, 等. 压气机级间抽气的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 40-42.
- DENG Hao, GU Chunwei, XUE Yaohua, et al. Numerical simulation of the interstage bleed in an axial compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(1): 40-42. (in Chinese)