

处理机匣情形下的轴流压气机转子失速

樊琳

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了解在处理机匣作用下的压气机转子失速点流动, 采用非定常模拟方法对跨声轴流压气机转子在带气室斜槽处理机匣情形下的流动进行了模拟研究, 获得了高、低转速下的转子特性, 并针对近失速点流场进行了分析. 结果表明, 在处理机匣的作用下, 转子失速的主要产生原因与实壁情形不同. 在失速点, 处理机匣有效地抑制了叶尖泄漏流的负面作用, 但由于不能更多地吸纳叶尖的低能流体, 使得叶片吸力面附面层中向叶尖迁移的低流向动量流体堆积于叶尖吸力面尾缘处, 形成严重的流动堵塞, 从而导致转子叶尖失速.

关 键 词: 轴流压气机; 非定常数值模拟; 处理机匣; 斜槽; 失速

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Stall of an axial-compressor rotor with casing treatment

FAN Lin

(School of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: For investigating the stall of compressor with casing treatment, using the unsteady Reynold averaged numerical simulation method, numerical simulations of an axial transonic rotor with a axial skewed slot casing treatment with back plenum were carried out. Then, the rotor characteristics at high/low speed were gained, accordingly, the flow fields at near stall points were analyzed as well. It was found that the main responsibility of the inception of stall under the condition of casing treatment is different from the condition of the solid casing. At the operation point of stall, due to that the casing treatment could not absorb any more low energy fluid at blade tip, the fluid with little streamwise momentum was accumulated near the trailing edge of suction surface at blade tip, and a serious flow blockage was formed, the stall was finally triggered, even though the negative influence of the blade tip leakage flow was still suppressed effectively.

Key words: axial-compressor; unsteady numerical simulation; casing treatment; skewed slot; stall

处理机匣作为一种被动扩稳技术不仅结构简单, 而且扩稳作用显著, 得到了广泛的应用, 一直到现在仍然是研究热点. 处理机匣技术在早期的实验中被偶然发现^[1], 后来通过对各种类型处理机匣的实验研究, Takata 等^[2]发现斜槽型处理机匣具有较好的扩稳作用, Greitzer 等^[3]则指出处理机匣只对叶尖发生失速的压气机有扩稳作用. 随着对压气机失速机理研究的进展^[4-6], 人们

发现在叶尖发生的失速通常与叶尖泄漏涡所造成的流动堵塞相关. 大量的数值与实验研究^[7-16]表明, 斜槽型处理机匣对叶尖泄漏涡及其造成的流动堵塞的抑制作用是扩稳的重要原因. 本文前期的工作^[17]中对所研究的处理机匣在转子峰值效率点和对应实壁情形下失速点流量处的流动进行了非定常数值模拟研究, 得到了同样的结论. 此外, 还发现处理机匣与叶片通道之间的交换流动

收稿日期: 2015-03-05

作者简介: 樊琳(1982—), 男, 湖南益阳人, 博士, 主要从事压气机气体动力学研究.

是处理机匣扩稳的主要作用机制. 叶尖区域中的低能流体可以借助这种交换流动再次或多次经历叶片做功过程, 从而得到足够的能量以抵抗逆压梯度流向下游.

为了更进一步地了解处理机匣的扩稳机理, 有必要考察处理机匣情形下转子在失速点附近的流动结构, 这也有利于进一步改进处理机匣的设计. 然而, 由于槽道型处理机匣与叶片通道之间流动的非定常性不可忽略^[9, 17-18], 通常需要采用非定常数值模拟方法才能较为准确地模拟这种流动, 需要耗费大量的计算资源与时间. 所以, 到目前为此的公开文献中, 针对槽道型处理机匣情形下转子失速的数值研究很少, 只在相关的实验研究^[12, 19-22]中有所涉及. 为此, 基于前期的研究^[17], 本文的工作采用非定常模拟方法进一步考察了处理机匣情形下的转子失速流动.

1 跨声转子和处理机匣

本文工作所模拟的转子为早期设计的某发动机第1级轴流转子, 如表1所示, 为小展弦比跨声转子, 其设计点的压比为1.6, 设计转速为22000 r/min, 叶尖相对马赫数为1.404. 本文所研究的带气室轴向斜槽处理机匣(下文简称为处理机匣)的结构如图1所示, 它与转子叶尖的搭接量接近叶尖轴向弦长的40%, 其总轴向长度为搭接量的2倍. 实壁和处理机匣情形下的静态叶尖间隙都为1.0 mm. 通过在北京航空航天大学跨声压气机/风扇高速台上的性能实验, 对此处理机匣的扩稳效能进行了测量.

表1 实验转子的主要结构和气动参数

Table 1 Structure and aerodynamic parameters of the rotor

参数	数值
叶片数	17
转子叶尖直径/mm	355.8
设计转速/(r/min)	22000
轮毂比	0.565
叶片展弦比	0.956
设计点流量/(kg/s)	13.4
设计点级总压比	1.6
设计点级绝热效率	0.88
转子叶尖设计点相对马赫数	1.404

2 数值方法

数值模拟中所用 CFD 程序为自主发展的 MAP(multi-block aerodynamic prediction code)程序^[18]. 此程序采用有限体积法, 求解全三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程组, 并采用了 Spalart-Allmaras 模型. MAP 程序的空间离散采用单元中心的有限体积方法. 对流通量采用 LDFSS (low-diffusion flux-splitting scheme) 格式^[23]求解, 并且采用 MUSCL(monotonic upstream-centered scheme for conversation laws)插值以达到2阶精度. 对于扩散通量, 采用了传统的中心差分格式. 为了提高计算速度, MAP 采用了基于 MPI (message passing interface)的并行方法.

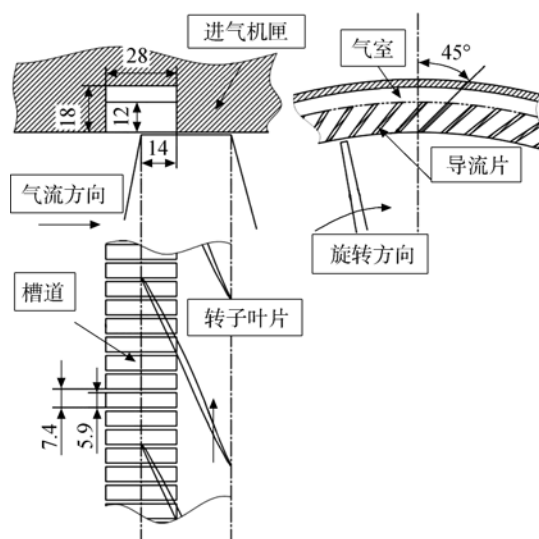


图1 处理机匣结构图(单位: mm)

Fig.1 Structure of the casing treatment (unit:mm)

计算网格同样由自主开发的网格生成程序生成. 在数值模拟中, 叶尖间隙经验性的设置为0.7 mm, 约为0.8%叶尖弦长. 叶片通道的网格拓扑结构为H-O-H-H型, 如图2所示, 总网格数为33万. 带处理机匣的网格如图3所示. 采用文献^[17]中的处理方式, 为了解决静止的处理机匣与转动的叶片通道之间的流场信息传递问题, 在处理槽与叶片通道交界面的叶片通道一侧设置了一块H型网格, 即图3中的过渡网格. 过渡网格与处理槽部分的网格点对点对接, 而与叶片通道的网格在叶尖间隙的径向空间内交错相叠. 与此同时, 在处理机匣网格(包括过渡网格)附于叶片通道的网格之上后, 将叶片通道位于机匣的第1层网格去除. 在计算中, 叶片通道的流场信息通过在过渡

网格浸于叶片通道中的底层滑移面插值传入过渡网格,继而传给处理机匣;而处理机匣一侧的流场信息则通过叶片通道网格浸于过渡网格的顶层滑移面插值传递给叶片通道.这里的流场参数插值方法为基于有限体积的积分方法以保证流场信息传递的守恒性.处理机匣部分的网格节点总数约为 22 万,为叶片通道部分网格规模的 60%.

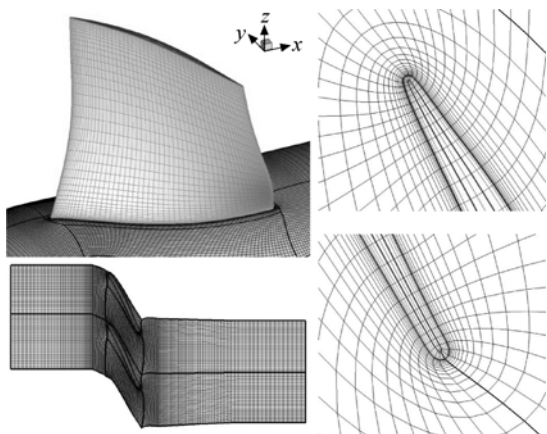


图 2 叶片通道网格

Fig. 2 Mesh of the blade passage

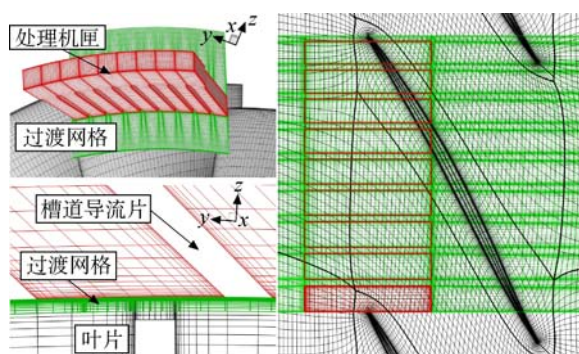


图 3 处理机匣网格

Fig. 3 Mesh of the casing treatment

在边界条件的给定上,转子进口给定总温、总压以及绝对气流角,其中在给定的总压展向分布中考虑了轮毂和机匣附面层厚度分别为 5% 和 12% 叶高.出口在机匣处给定静压,其他展向位置的静压则根据径向平衡方程获得.壁面边界条件采用无滑移条件.

在这种离散槽道型处理机匣的非定常数值模拟中存在两个时间周期,一个是通常的叶片通过周期,另一个是处理机匣单个处理槽通过周期,即叶片扫过单个处理槽的时间.为了保证非定常计算能正确地模拟处理机匣与叶片通道的流动,考虑计算耗时和时间精度,在远离失速边界的大流

量工况下,处理机匣的非定常数值模拟的物理时间步设定为 1/30 个处理槽通过周期;而在接近失速点的工况下为 1/60.

对实壁情形的转子流场采用定常方法进行数值模拟,而处理机匣情形则采用非定常方法,分别完成了 98% n_d (n_d 为设计转速)和 60% n_d 下转子特性的模拟.非定常计算过程中,当转子流量和进/出处理机匣槽道的流量达到收敛状态或呈稳定的周期性结果时,可以认为在当前工作点下非定常解已“收敛”.在下文,如不特别说明,非定常结果皆为一个叶片通过周期时均结果.

3 结果与分析

3.1 数值模拟结果与实验结果对比

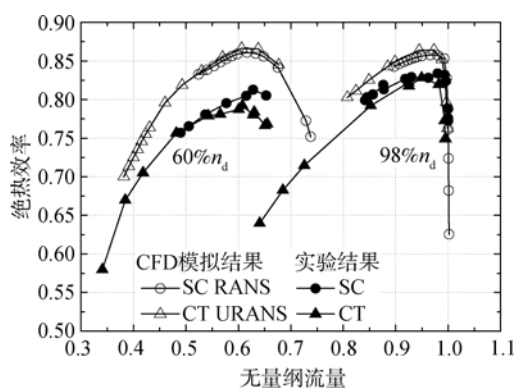
首先,通过与实验测量结果对比,考察非定常计算结果的正确性.由于实验条件的限制,转子高转速受限,最高只测得了 98% n_d 下的结果,此时转子处于跨声速工况,低转速为 60% n_d ,转子处于亚声速工况.表 2 是转子在 98% n_d 和 60% n_d 有无处理机匣情形下的失速裕度和峰值绝热效率,其中 SC 表示实壁机匣情形,CT 表示处理机匣情形.图 4 中是转子在 98% n_d 和 60% n_d 下有无处理机匣情形下的性能曲线.图中,RANS 为雷诺平均方法,URANS 为非定常雷诺平均方法.失速裕度以峰值效率点和近失速点为参考求得.结果表明,数值模拟能预测出处理机匣有效扩大转子的失速裕度,数值模拟所预测的特性曲线形状与趋势与实验结果相符.

表 2 转子失速裕度和峰值绝热效率的实验与数值结果

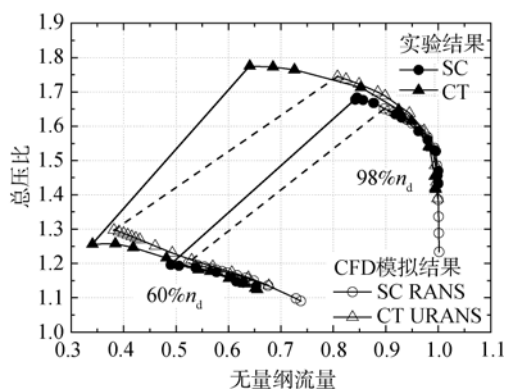
Table 2 Measured and calculated surge margin and peak adiabatic efficiency of the rotor

转速	项目	失速裕度/%		峰值绝热效率/%	
		实验	数值	实验	数值
60% n_d	SC	34.4	25.4	81.3	85.97
	CT	103.9	81.8	79.2	86.56
98% n_d	SC	25.7	12.0	83.4	85.77
	CT	74.0	32.4	82.8	86.42

然而,98% n_d 失速裕度的数值预测值明显小于实测值,这是因为此时处理机匣与叶尖主流的非定常干涉要大大强于 60% n_d ,在这种强非定常流动条件下(并且处理槽周向宽度要比叶片栅距小一个数量级),基于 RANS 的湍流模型对流动



(a)



(b)

图4 转子性能结果

Fig. 4 Performance of the rotor

掺混过程的模拟其准确性是值得怀疑的,这可能是98% n_d 时失速裕度模拟准确性不够的原因.同样地,这也是造成效率的数值预测偏差原因.

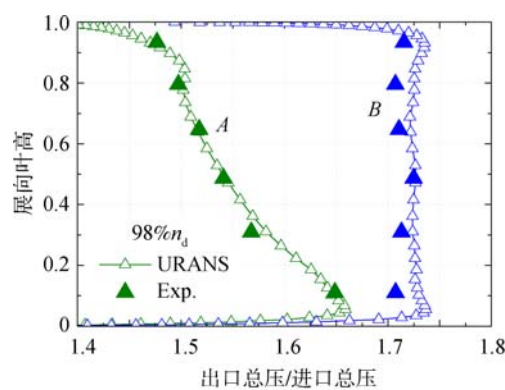
更进一步地,以98% n_d 结果为例,图5给出了不同工作点(A点靠近设计点,B点远离峰值效率点的小流量点)数值模拟和实验测量的转子出口周向平均总压的展向分布.数值预测的出口总压分布与实测结果相符.

综上所述,虽然本文所采用的数值方法存在一定的偏差,但在整体上,数值模拟能正确预测处理机匣对转子叶片通道内流动的影响.因此,对于本文所讨论的问题,所采用的数值方法足以提供较为可信的预测结果.

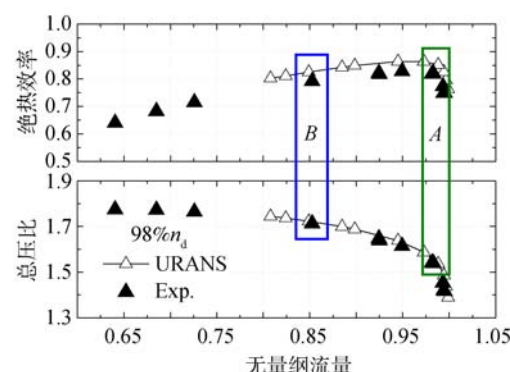
以下将基于数值模拟结果,对实壁情形下的失速点和处理机匣情形下的相同流量点以及处理机匣情形下失速点的详细流动展开分析.为了方便,前两个工作点称为实壁失速点 SCNS(solid casing near stall point),最后一个称为处理机匣失速点 CTNS(casing treatment near stall point).

3.2 处理机匣与叶片通道之间的交换流动

处理机匣能够在转子叶尖上方构造一个旁通流道,借助叶尖压力梯度,可以使得从叶片通道主



(a)



(b)

图5 98% n_d 下非定常结果与实验结果对比

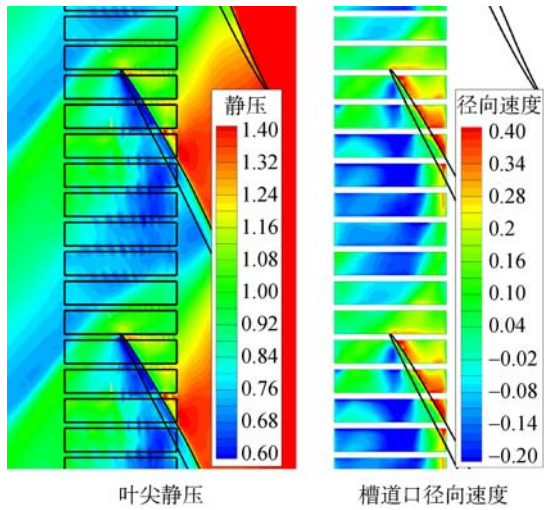
Fig. 5 Comparison of URANS and experiments at 98% design speed

流中的部分流体进入处理机匣并经旁通流道再次返回主流.这种流动构成了处理机匣与叶片通道之间的流体交换,是处理机匣作用于叶片通道主流的主要流动机制,本文称之为交换流动.

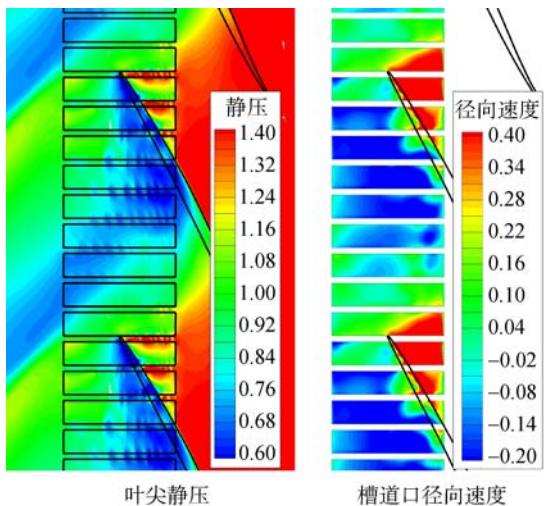
图6在叶尖周向展开平面上呈现了这种流动的空间形态.图中给出了高、低转速下实壁失速点和处理机匣失速点的瞬时叶尖静压和槽道口(即处理机匣与叶片通道的交界面)瞬时径向速度分布.图6中静压以标准大气压无量纲化,速度以叶尖切线速度无量纲化,结果皆为瞬时结果.宁方飞对处理机匣的非定常数值模拟结果^[18]表明,虽然在绝对坐标系下处理机匣具有较强的非定常性,但从转子叶片的角度观察,处理机匣流动可以是近似定常的.通过图6足以描述处理机匣与叶片通道交界面的流动.在高转速时,交换流动中的流体是当处理槽道位于通道激波后时进入处理机匣,当转子叶尖扫掠过后,槽道位于叶尖吸力面一侧时,流体在通道激波前重新返回主流.此时,交换流动大体上是一种周向的迁移流动.而在低转速时,交换流动中流体在叶尖前缘下游进入处理机匣,而后在上游返回主流,基本是一种轴向的回

流流动.

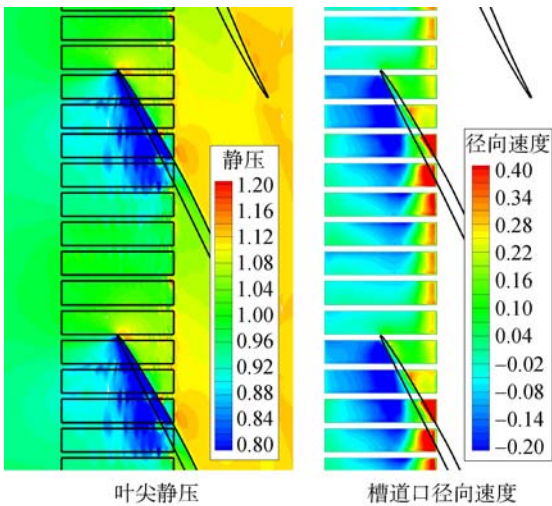
由于转子在高转速时是通过通道激波对流体做功,而在低转速时通过叶片使气流拐弯做功,所



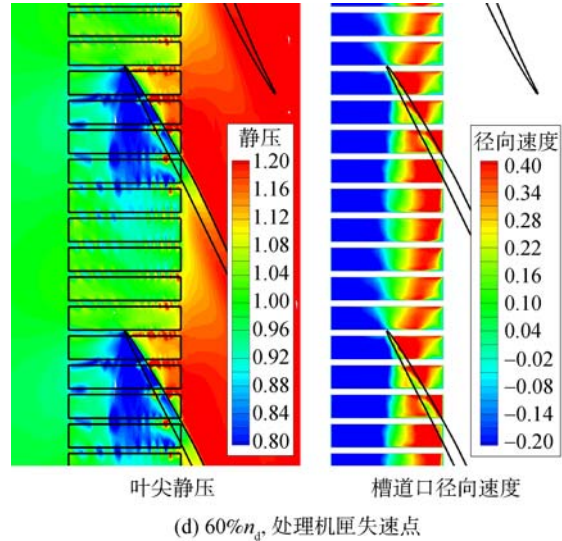
(a) $98\%n_d$, 实壁失速点



(b) $98\%n_d$, 处理机匣失速点



(c) $60\%n_d$, 实壁失速点



(d) $60\%n_d$, 处理机匣失速点

图 6 处理机匣与叶片通道之间的交换流动
Fig. 6 Exchange flow between the casing treatment and the blade passage

以上述交换流动可使其中的流体经历多次叶片做功过程. 叶尖的低能流体能够借助交换流动, 经历叶片多次做功, 获得足够的动能以对抗逆压梯度, 从而流动趋于稳定, 失速裕度得以增加. 由于交换流动受叶尖压力梯度驱使, 随着转子总压比增加, 交换流动随之增强, 处理机匣对叶片通道主流的作用自然也将逐步加强.

更进一步地观察处理机匣内的流动. 图 7 是周向平均流动, 依据其中实壁失速点的流动特征, 图 8 在气流从处理机匣返回主流处、进/出处理机匣分界处和从主流进入处理机匣处等三处(A, B 和 C)给出了处理机匣横截面的瞬时绝对速度轴向投影矢量和轴向速度分布. 还有处理机匣气室中径处周向展开柱面(D)的绝对速度径向投影矢

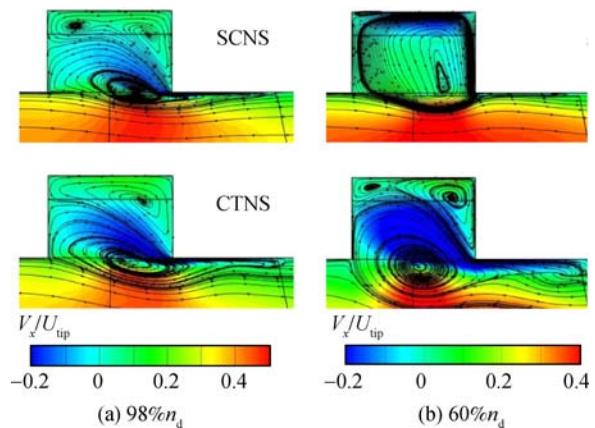


图 7 子午面周向平均的轴向速度分布和拟流线
Fig. 7 Pitch-averaged axial velocity and quasistreamlines in the meridian surface

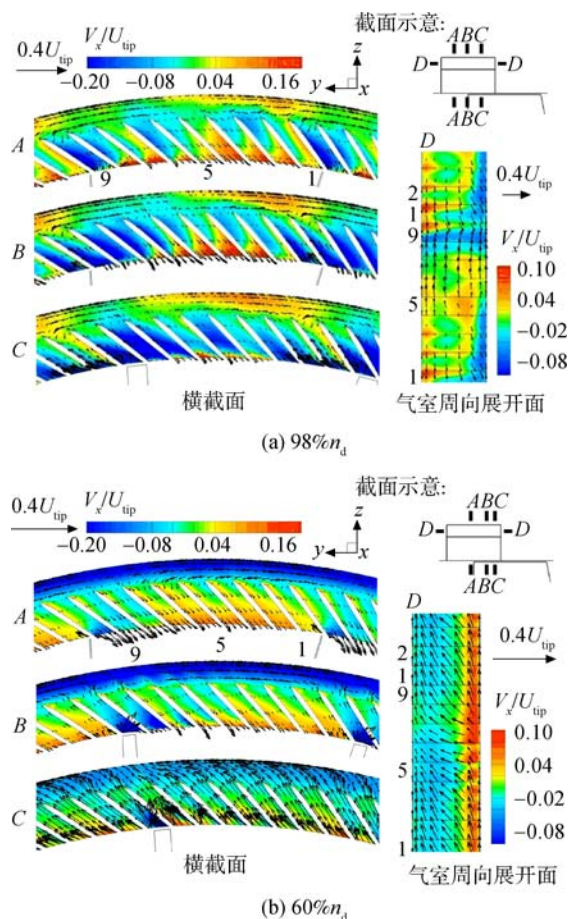


图8 实壁失速点处理机匣内流动的瞬时绝对速度矢量分布

Fig. 8 Transient absolute velocity vectors of the flow inside the casing treatment at solid casing near stall point

量和径向速度分布. 由以上结果可知, 在 $98\% n_d$ 时, 处理槽道随转子叶尖扫过吞吐主流气体, 流动具有较强的非定常性, 其时均流动具有从下游往上游的回流特征. 此时, 气室可视为周向连通的集气室, 其中的流动由处理槽道中的流动诱导形成, 且随处理槽道内流动的吞吐变化, 气室中的气流沿周向往复振荡. 在 $60\% n_d$ 时, 处理机匣中的流动整体是连续的从下游到上游的回流, 在实壁失速点, 气室中的流动也是回流的一部分, 气流主要通过气室回流至上游. 从实壁失速点到处理机匣失速点, 由图6可知 $60\% n_d$ 下的交换流动仍然为连续的回流, 但其强度大为增强, 且只局限在处理槽道内, 如图8所示, 气室中的流动由交换流动诱导形成, 不难推断, 其中的流动在绝对坐标系下是连续的周向旋转流动.

由上可知, 处理机匣引起的交换流动是影响叶片通道主流的主要作用机制, 而交换流动形态

由转子叶尖区域的压力分布所决定. 基于以上对处理机匣流动的认识, 接下分析在处理机匣作用下的转子失速流动.

3.3 转子失速点流动

图9给出了周向平均的转子出口总压、绝热效率和轴向速度的展向分布. 图9表明, 在实壁失速点处理机匣虽然在叶尖区域带来了较大的效率下降, 但增加了出口轴向速度, 缓解了叶尖区域的流动堵塞. 随之而来, 处理机匣使得较低叶高部分分配的流量减小, 出口轴向速度减小, 出口总压增加, 这部分叶高的叶片气动负荷有所增加. Danner等^[24]和Müller等^[22]在同样类型的处理机匣的实验测量中也观察到了上述现象. 从实壁失速点开始, 转子流量进一步减小, 到处理机匣失速点, 叶尖的出口气流轴向速度和绝热效率大幅下降, 出口总压急剧上升, 叶尖区域的流动恶化. 这表明, 在处理机匣作用下, 转子的失速仍然是在叶尖发生的, Müller等^[22]的实验测量结果也是如此.

图10中给出了叶尖泄漏流垂直叶尖弦向的法向相对速度沿轴向的分布, 以表征叶尖泄漏流流量的变化. 结果表明, 处理机匣能有效地削弱甚至消除叶尖泄漏流, 从而抑制叶尖泄漏流所造成的流动堵塞. 即使在处理机匣失速点, 其流量也远小于实壁情形下在失速点的大小. 由图6可知, 这是因为两方面的原因: 一方面处理机匣去除了其覆盖部分的固壁条件; 另一方面, 交换流动对叶尖流动的抽吸和吹除作用, 能消除叶尖可能的低能流体堆积. 以上这些表明, 在处理机匣作用下, 叶尖泄漏流不应再是导致转子失速的主要原因.

图11中是叶片吸力面的静压分布和极限流线. 结合前述对图9结果的分析可知, 在实壁失速点处理机匣使得较低叶高流量减小, 来流攻角增加, 如图11所示, $98\% n_d$ 下通道激波将往上游移动, $60\% n_d$ 下吸力面出现分离. 在处理机匣失速点, 这种低叶高流动的恶化更为严重, 尤其在 $60\% n_d$, 整个叶片吸力面的极限流线都是径直从根到尖的, 吸力面似乎处于完全分离状态, 在处理机匣作用下, 这种低叶高的流动变化使得叶片吸力面附面层中的流体更易于向叶尖迁移. 一方面低叶高叶片吸力面附面层中的低能流体更多向叶尖迁移, 另一方面, 这些低能流体迁移至叶尖后借助交换流动通过处理机匣再次进入主流, 经叶片做功后获得足够的能量克服逆压梯度流向转子出口. 由此可以推论, 当处理机匣形成的交换流动达到其流量的最大值之后, 堆积于叶尖区域的低能

流体不能及时被吸除,最终将形成严重的流动堵塞,导致转子在叶尖发生失速。

图 12 和图 13 分别是高、低转速下 98%,50% 和 30% 叶高的相对马赫数分布,图中的叶尖流场

表明,在处理机匣作用下,叶尖的主要流动堵塞不再是由叶尖泄漏涡所导致的。对照图 11,观察处理机匣失速点 98% 叶高的相对马赫数分布可知,此时叶尖的主要流动堵塞位于被处理机匣覆盖区

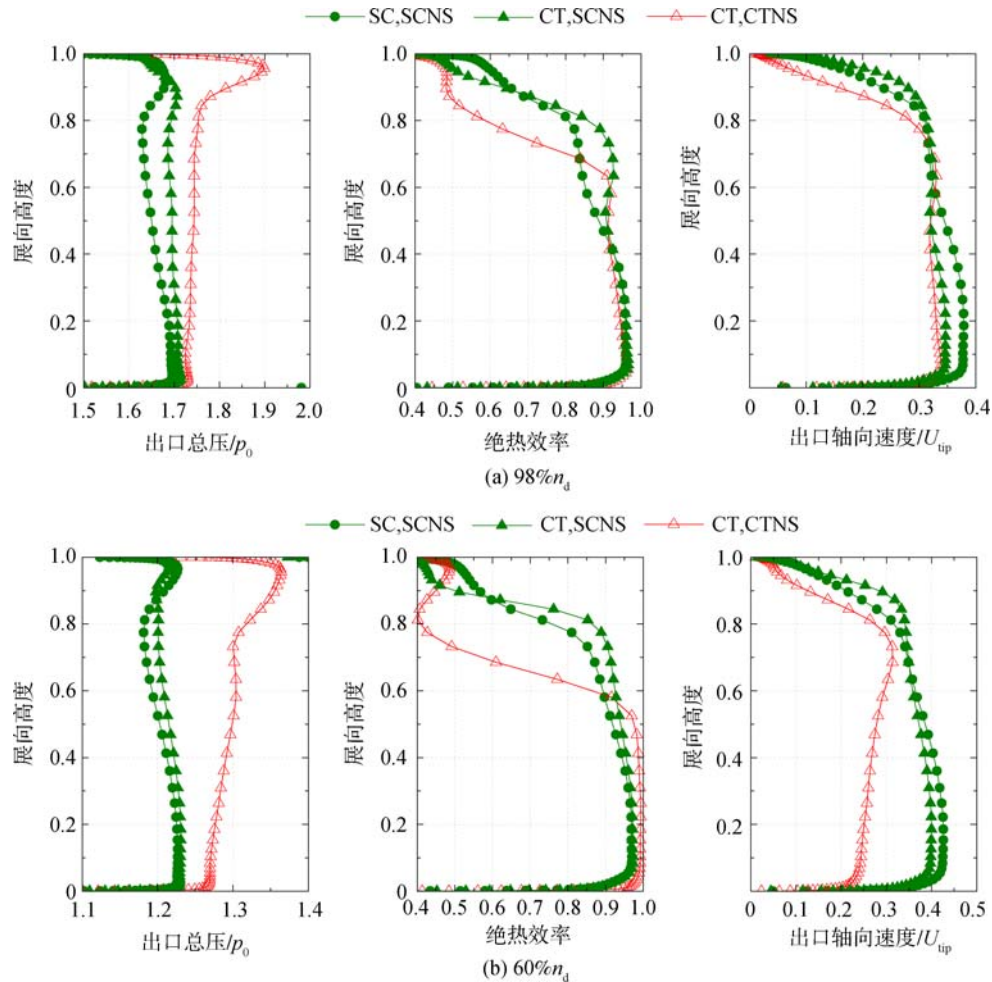


图 9 周向平均的出口参数的展向分布

Fig. 9 spanwise distribution of the circumferential averaged parameters at 98% design speed

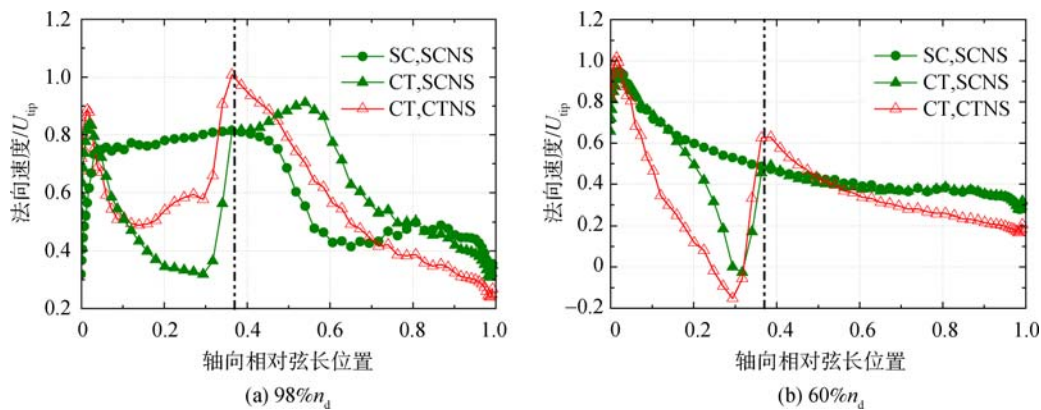


图 10 叶尖泄漏流垂直叶尖弦向的法向相对速度的轴向分布(跨过叶尖从压力面侧向吸力面侧方向为正)

Fig. 10 Axial distribution of the normal relative velocity across the blade tip at 98% design speed
(positive direction is from pressure side to suction side over the blade tip)

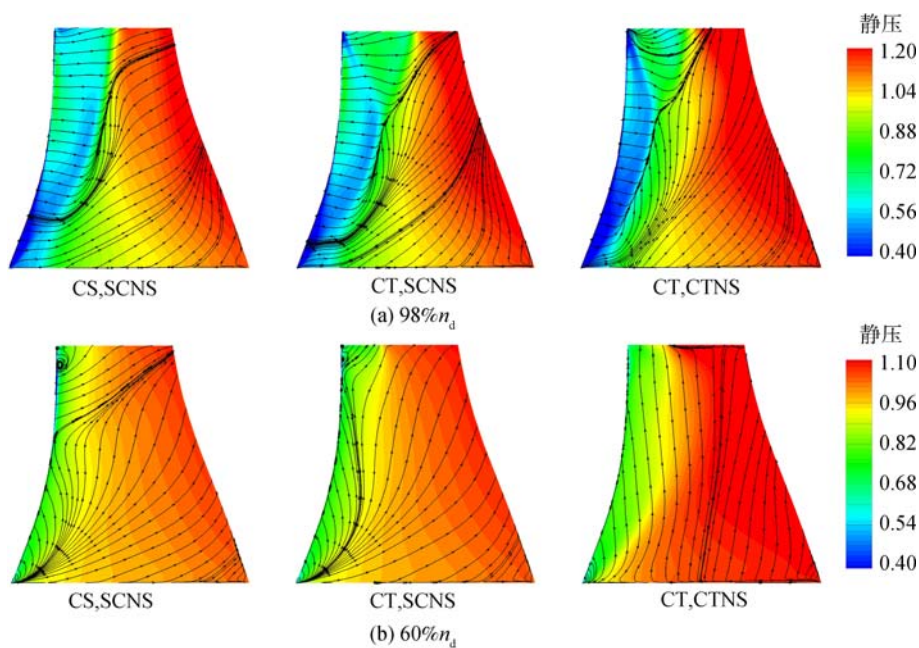


图 11 叶片吸力面静压分布和极限流线(静压以进口总压无量纲化)

Fig. 11 static pressure and limited streamlines on the blade suction surface
(static pressure is normalized by inlet total pressure)

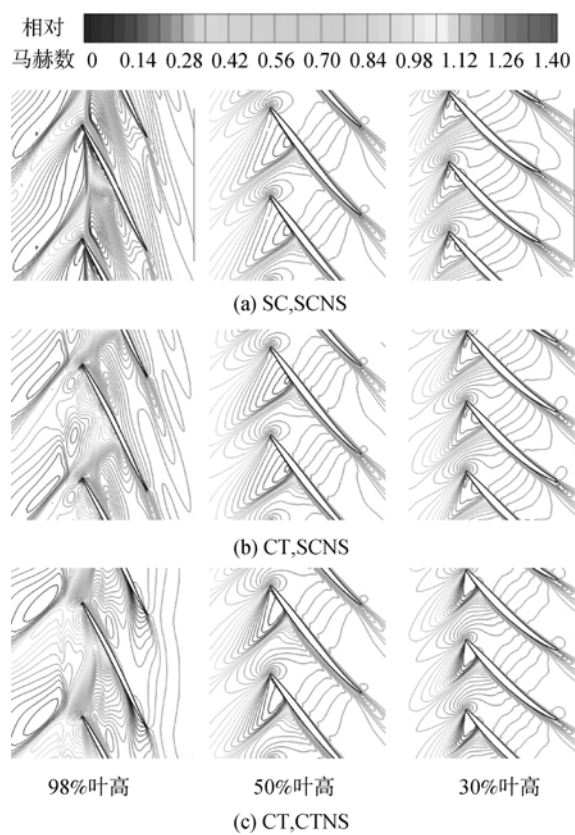


图 12 98% n_d 下不同叶高的相对马赫数分布

Fig. 12 Relative Mach number distribution at different span, 98% design speed

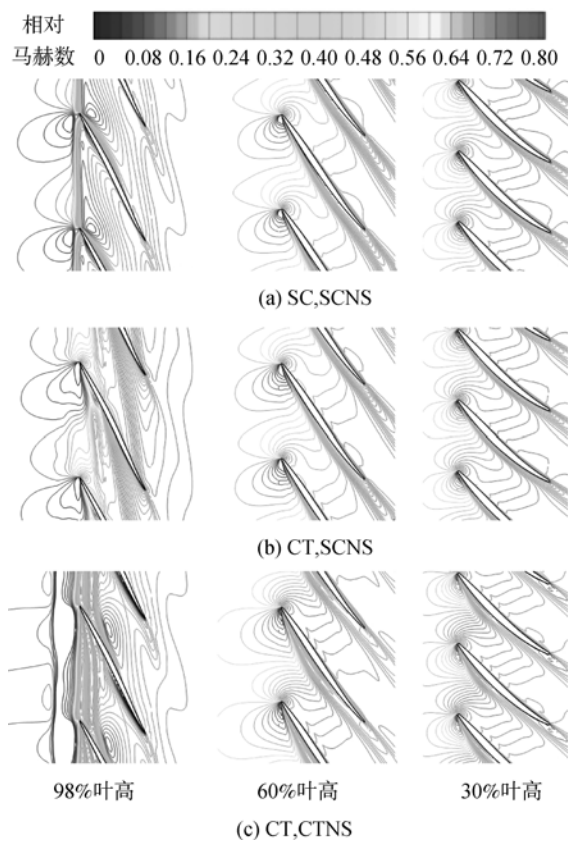


图 13 60% n_d 下不同叶高的相对马赫数分布

Fig. 13 Relative Mach number distribution at different span, 60% design speed

域之外的叶尖尾缘吸力面处,正好对应于低叶高吸力面附面层中低能流体向叶尖迁移所至的区域.此时,低叶高部分的吸力面附面层已有所增厚.更进一步地,图 14 给出了处理机匣失速点 1/2 和 3/4 弦长处约 20% 叶高以上的叶片通道内准流向法平面的轴向速度与相对速度投影矢量分布,其中准流向法平面近似与主流方向垂直.图中的矢量显示附面层中存在较强的径向迁移流动,特别是 $60\% n_d$ 下,清楚地呈现了低叶高吸力面附面层中低能(更为严格地说:低流向动量)流体向叶尖迁移、堆积、最终导致堵塞的流动现象.

综上可知,在处理机匣失速点,处理机匣形成的交换流动流量达到最大,不能吸纳更多的低能流体,从低叶高吸力面附面层迁移至叶尖的更多低能流体不能被及时吸除,从而在叶尖堆积,以至形成严重的流动堵塞,导致了转子在叶尖发生失速.

特别地,在 $60\% n_d$ 下,图 11、图 13 和图 14 中处理机匣失速点的流场结果表明,整个叶片吸力面似乎处于完全分离状态,然而非定常数值模拟表明此时转子仍能稳定工作.这是因为此时较强的交换流动使得叶片通道中的流动具有较强的三维性,不再是简单的径向平衡流动.为此,图 15 给出了 $60\% n_d$ 下 60% 叶高中间弦长处相对马赫数、轴向速度和径向速度的周向分布.

从图 15 可知,此时吸力面附面层中的径向速度比主流中的轴向速度还大,靠近吸力面的区域相对马赫数大小与主流接近,“附面层”厚度接近 20% 栅距.实际上,在相对坐标系下,其中的流体通过离心力做功获得了较高的径向速度,却几乎

没有流向(即主流方向)速度,是一股低流向动量而高动能的离心气流,不再是通常意义上的“附面

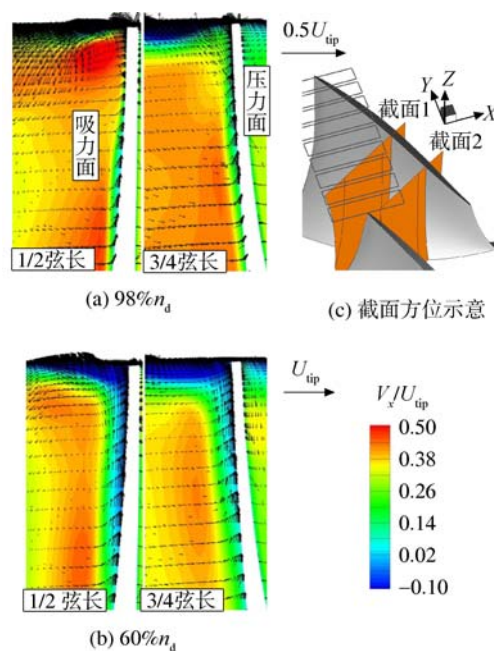


图 14 叶片通道内 1/2 和 3/4 弦长处流向准法平面的轴向速度与相对速度投影矢量分布(准法平面垂直于叶尖弦向,其弦长位置由其与叶尖的相交点确定)

Fig. 14 Axial velocity distribution and projected vectors of the relative velocity on the quasnormal plane of flow direction at 1/2 and 3/4 chord position inside the blade passage (the quasnormal plane is perpendicular to the blade tip chord, its chord position decided by the cross point of this plane and the blade tip)

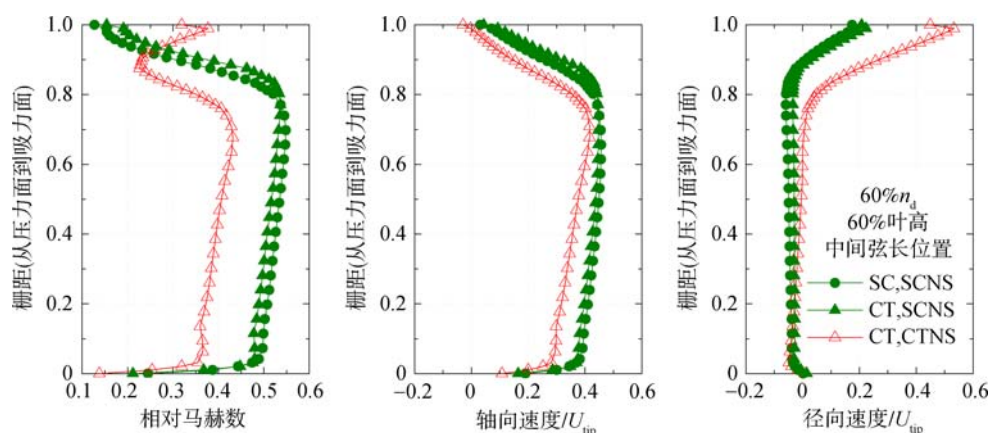


图 15 $60\% n_d$ 、 60% 叶高中间弦长处相对马赫数、轴向速度和径向速度的周向分布

Fig. 15 Circumferential distribution of relative Mach number, axial velocity and radial velocity at middle chord position of 60% span, 60% design speed

层”流动.此时,叶片通道中形成了两股流向完全不同的流动:一种是径向平衡的主流,另一种是吸力面附近的离心气流.在黏性的作用下,如图15所示,从吸力面附面层边界向压力面,径向速度逐渐减小而轴向速度逐渐增加,某个位置上出现相对马赫数的极小值,此处即为两种气流的气动界面.离心气流中的高能流体从较低叶高迁移至叶尖,而后通过处理机匣,借助交换流动重新进入主流,以维持主流的径向平衡.

此外,这种离心流动将吸力面附面层中的主要损失输运到了叶尖,而较少扩散至低叶高主流之中,这也就解释了图9中60% n_d 时处理机匣失速点低叶高部分的绝热效率为什么那么接近1.

4 结 论

通过性能实验测量和非定常数值模拟,获得了98% n_d 和60% n_d 时带气室轴向斜槽处理机匣情形下的转子性能结果,并考察了转子在失速点处的流动.

1) 实验结果表明,处理机匣能有效增加实验转子的失速裕度;同时与数值模拟结果的对比证明:数值方法能正确模拟处理机匣对实验转子流动的作用.

2) 数值模拟结果表明,在带有处理机匣时,转子失速仍然应是在叶尖发生.

3) 在处理机匣情形下,失速点叶尖区域的主要流动堵塞是由较低叶高吸力面附面层中的低流向动量流体在叶尖吸力面附近的堆积所导致的,这与实壁情形下叶尖泄漏流导致堵塞而引起失速有所不同.

4) 处理机匣与主流的交换流量是其扩稳能力的重要因素,通过改进处理机匣使其能更多地抽吸堆积于叶尖的低流向动量流体,将有可能使转子获得更大的失速裕度.

以上结论虽然是基于所模拟的转子获得的,但是应具有一定的普遍性,特别是对于轮毂比较小的转子设计,无论机匣的形式如何,失速在叶尖发生的可能性最大.

参考文献:

- [1] Bailey E E, Voit C H. Some observations of effects of porous casings on operating range of a single axial-flow compressor rotor[R]. NASA TMX-2120, 1970.
- [2] Takata H, Tsukuda Y. Stall margin improvement by casing treatment: its mechanism and effectiveness[J]. Journal of Engineering for Power, 1977, 99(1): 121-133.
- [3] Greitzer E M, Nikkanen J P, Haddad D E, et al. A fundamental criterion for the application of rotor casing treatment[J]. Journal of Fluids Engineering, 1979, 101(2): 237-243.
- [4] 徐力平. 轴流压气机的旋转失速的生成及其主动控制[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] Furukawa M, Inoue M, Saiki K, et al. The role of tip leakage vortex breakdown in compressor rotor aerodynamics[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(3): 469-480.
- [6] Vo H D, Tan C S, Greitzer E M. Criteria for spike initiated rotating stall[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(1): 11023-11029.
- [7] 张燕东, 陆亚钧. 圆弧斜槽处理机匣的实验研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(3): 254-258.
ZHANG Yandong, LU Yajun. An experimental investigation on arc skewed slot casing treatment[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(3): 254-258. (in Chinese)
- [8] 楚武利, 朱俊强, 刘志伟. 折线斜缝式机匣处理的实验研究及机理分析[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 270-274, 331.
CHU Wuli, ZHU Junqiang, LIU Zhiwei. Experimental research and analysis of sloped slotted casing treatment[J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3): 270-274, 331. (in Chinese)
- [9] Wilke I, Kau H. A numerical investigation of the flow mechanisms in a high pressure compressor front stage with axial slots[J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(3): 339-349.
- [10] 袁巍, 周盛, 陆亚钧. 压气机间隙流与处理机匣作用的三维数值分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(9): 885-888.
YUAN Wei, ZHOU Sheng, LU Yajun. 3D numerical analysis for the effect between tip clearance and casing treatment in turbomachinery[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(9): 885-888. (in Chinese)
- [11] ZHU Junqiang, CHU Wuli. The effects of bend skewed groove casing treatment on performance and flow field near endwall of an axial compressor[R]. AIAA-2005-809, 2005.
- [12] Emmrich R, Honen H, Niehuis R. Time resolved investigations of an axial compressor with casing treatment: Part 1 experiment[R]. ASME Paper GT2007-27581, 2007.
- [13] Emmrich R, Kunte R, Honen H, et al. Time resolved investigations of an axial compressor with casing treatment: Part 2 simulation[R]. ASME Paper GT2007-27582, 2007.
- [14] 祝剑虹, 朴英, 周建兴, 等. 跨声压气机缝式处理机匣非定常模拟研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 882-888.
ZHU Jianhong, PIAO Ying, ZHOU Jianxing, et al. Unsteady numerical simulation on transonic compressor with screwed slots casing treatment[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 882-888. (in Chinese)
- [15] 蒋永松, 王咏梅, 杜辉, 等. 驻室式处理机匣: 内部流动及扩稳机理的数值研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 361-366.

- JIANG Yongsong, WANG Yongmei, DU Hui, et al. Ple-
num chamber casing treatment; numerical research of in-
ternal flow and mechanism of stall margin improvements
[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23 (2): 361-366.
(in Chinese)
- [16] Lu X, Chu W, Zhu J, et al. Numerical investigations of the
coupled flow through a subsonic compressor rotor and axi-
al skewed slot [J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131
(1): 011001. 1-011001. 8.
- [17] Fan L, Ning F, Liu H. Aerodynamics of compressor casing
treatment; Part I experiment and time-accurate numerical
simulation[R]. ASME Paper GT 2008-51541, 2008.
- [18] 宁方飞. 考虑真实几何复杂性的跨音压气机内部流动的数
值模拟[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.
NING Fangfei. Numerical investigations of flows in tran-
sonic compressors with real geometrical complexities[D].
Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronau-
tics, 2002. (in Chinese)
- [19] 庄平, 陆亚钧. 机匣处理对压气机性能和气流结构影响的
试验研究[J]. 航空学报, 1986, 7(4): 363-370.
ZHUANG Ping, LU Yajun. The effect of casing treatment
on the performance and flowfield in axial compressors[J].
Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1986, 7(4): 363-
370. (in Chinese)
- [20] 吴艳辉, 楚武利, 刘志伟. 机匣处理对轴流压气机失速恢复
性的影响[J]. 推进技术, 2004, 25(3): 215-218.
WU Yanhui, CHU Wuli, LIU Zhiwei. Research on stalling
recoverability of an axial-flow compressor with treated
casing[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(3):
215-218. (in Chinese)
- [21] 孙大坤, 孙晓峰. 非定常机匣处理对失速先兆波的抑制作
用实验研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4): 671-679.
SUN Dakun, SUN Xiaofeng. An experimental study on in-
hibition of unsteady casing treatment on stall inception
[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4): 671-679.
(in Chinese)
- [22] Müller M W, Schiffer H P, Voges M, et al. Investigation of
passage flow features in a transonic compressor rotor with
casing treatments[R]. ASME Paper GT2011-45364, 2008.
- [23] Edwards J R. A low-diffusion flux-splitting scheme for
Navier-Stokes calculations [J]. Computers and Fluids,
1997, 26(6): 635-659.
- [24] Danner F C T, Kau H, Müller M M, et al. Experimental
and numerical analysis of axial skewed slot casing treat-
ments for a transonic compressor stage[R]. ASME Paper
GT2009-59647, 2009.

(编辑: 秦理曼)