

驻涡式处理机匣对跨声速压气机扩稳的 数值模拟

王卓奇¹, 陆利蓬², 袁 巍², 宋西镇²

(1. 北京航空航天大学 无人驾驶飞行器设计研究所, 北京 100191;

2. 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)

摘 要: 提出了一种驻涡式处理机匣结构, 通过叶片通道前后以及叶片压力面和吸力面共同作用的压差, 驱动流体产生回流, 将通道后部的附面层流体吸除, 然后在叶片前缘注入, 增大叶尖泄漏流内的动量, 从而达到扩稳的效果. 该设计将抽气槽与喷气槽的方向和主流流动方向设计成一致方向, 以减少掺混损失. 此外, 该处理机匣在轴向上完全在转子叶片内部, 不需要前伸量, 因而可以方便地应用于多级压气机中的任何一级, 而不会和静子叶片发生干涉. 通过数值模拟对这一设计进行了验证, 结果表明该处理机匣可以扩大跨声速压气机转子裕度 17.39%, 而对效率不会产生明显的影响.

关 键 词: 扩稳; 压气机; 跨声速; 叶尖泄漏流; 旋转失速; 处理机匣

中图分类号: V231

文献标志码: A

Numerical simulation on stall margin improvement of transonic compressor by a trapped vortex casing treatment

WANG Zhuo-qi¹, LU Li-peng², YUAN Wei², SONG Xi-zhen²

(1. Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle,

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

2. 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)

Abstract: A type of trapped vortex casing treatment (CT) was designed, using pressure difference between suction side at front and pressure side at rear of passage to drive fluid flowing back. Boundary flow was sucked into slot at rear of passage, then injected into main flow at front of passage. During this process, momentum of the fluid in the leakage was increased, and then the stall margin of the blade was enhanced. The loss of mixing is decreased by adjusting the direction of suction and injection to the direction of main flow. Also the size of CT in axial direction is inside the blade dimension, which means this CT could be used in each stage of multistage compressors, without overlapping with stators. Numerical simulation was used to evaluate the effectiveness of this CT. Result shows that this CT could increase the stall margin 17.39% of a transonic compressor rotor without compromise on efficiency.

Key words: stall margin improvement; compressor; transonic; tip leakage flow;

收稿日期:2013-07-26

基金项目:国家自然科学基金(50906001)

作者简介:王卓奇(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,工程师,博士,主要从事航空发动机气动热力学研究.

通讯作者:袁巍(1974—),男,山东青岛人,副教授,博士,主要从事叶轮机内部流动的相关研究.

rotating stall; casing treatment

虽然对于压气机内部喘振/失速的机理并没有完整的、明确的物理机理解释,但可以确认的是这一不稳定现象发生的本质原因是由于叶片通道内端壁区或者叶片表面的低能量流体无法抵御流动内的逆压梯度,进而堵塞流道所造成的。而目前的研究已经发现,在跨声速压气机中,叶尖泄漏流是叶尖区域主要的低能量流体,而叶尖泄漏流的失稳或者破碎与跨声速压气机的失速现象有着非常紧密的联系^[1-8]。

在前人对于处理机匣的研究中,普遍认为在对扩稳有效的处理机匣中,处理槽可以将主流中的高压流体吸入,然后在低压位置以射流的形式喷出^[9]。而驱动这一流动过程的压差可以来自于激波前后压差、叶片通道前后的压差和叶片压力面吸力面之间的压差。经过这一过程,一方面可以将主流区的低能量流体吸除;另一方面可以在低压区将这部分流体注入^[10-11]。一般而言,虽然吸入的为低能量流体,但相对于处理槽注入的区域而言,这部分流体还是属于高能量流体,因此会提高注入区主流的流体能量,提高其抵御逆压梯度的能力。

经过研究人员的努力,目前可以得到一些经验性的处理机匣设计准则^[12-13]:

- 1) 由压差驱动,产生从通道后向通道前的回流。
- 2) 通过吸除低能量流体或注入能量的方式扩稳。
- 3) 控制处理槽内流动,处理槽与主流相互作用来减小效率损失。

然而目前的处理机匣仍然存在两个主要问题,限制了其在压气机中的大规模应用:

1) 绝大多数处理机匣依然是扩稳降效型,使得裕度的提升必须以效率的降低为代价。而少数几个扩稳不降效型处理机匣,也并未给出其明确的设计准则或者不降效的机理,因而没有得到推广应用。处理机匣损失的来源一般有 3 个方面:①处理槽内的流动损失;②处理槽内流体与主流相互作用带来的掺混损失;③由于处理机匣使得主流区流动参数变化所带来的损失。对于第①点,可以通过优化处理槽的形状来减小损失^[2,9]。对于第②点,主要是由于处理槽需要与转子转动方向倾斜一致,才能够得到很好的扩稳效果^[14],而这使得处理槽内气体流出的时候与主流在轴向和周

向上并不一致,因此会造成比较大的掺混损失。对于第③点,则是需要将处理机匣与主流流动综合考虑,将其流动组织得更加有序,来减小处理机匣对主流区流体所造成的影响。

2) 几乎所有扩稳效果较好的处理机匣都需要一定的前伸量,特别是几个扩稳不降效型处理机匣^[15-18]。然而在真实的多级压气机中,转子叶片前往往存在导流叶片或者可调静子叶片或者常规静子叶片,处理机匣前伸会与这些叶片发生干涉,甚至根本无法应用。这主要是因为上述处理机匣都是通过将泄漏流内的低能量流体抽走,然后在上游注入的方式来实现扩稳,因此需要一定的前伸量。而如果采用在通道后部抽取,而在泄漏流内注入的扩稳方式,则不需要前伸量,但是这需要对抽取和注入的位置、角度进行合理的设计。

基于上述对于处理机匣扩稳机理的总结,本文设计了一种处理机匣,称之为驻涡式处理机匣(trapped vortex casing treatment, TVCT)。该处理机匣采用通道后抽取流体,向叶片前缘叶尖泄漏流注入的方式扩稳,因此并不需要前伸量,并且吸气槽和喷气槽角度都与主流流动方向相同,在驻涡式处理机匣内壁形成有利于流动的稳定驻涡,因此减小了掺混损失。经过数值模拟验证,表明该处理机匣可以在不影响效率的情况下,大幅提高跨声速压气机的裕度,具有较好的应用前景。

1 驻涡式处理机匣及跨声速压气机叶片设计参数

如图 1 所示,处理槽由吸气槽、桥式气流通道和喷气槽 3 部分组成。流体由通道后部叶片压力

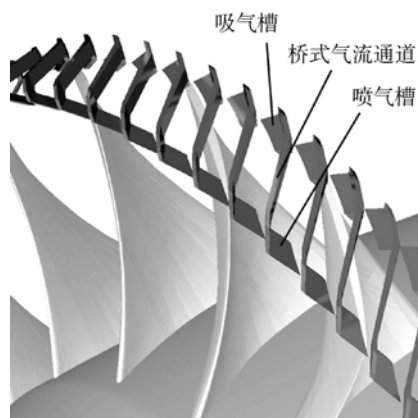


图 1 驻涡式处理机匣示意图

Fig. 1 Schematic of TVCT

面处进入吸气槽,经桥式气流通道回流至通道前,然后经由喷气槽向主流注入。

驻涡式处理机匣的设计主要是为了实现前面分析的3点,即:

1) 通过通道后部叶片尾缘压力面和通道前部叶片前缘吸力面产生压差,驱动回流。

2) 通过将通道后部附面层的流体吸除,然后在叶片前缘叶尖泄漏流(下文简称泄漏流)处注入能量的方式实现扩稳。

3) 吸气槽和喷气槽内气体吸入和喷出方向与主流保持一致,减小掺混所产生的效率损失。

吸气槽和喷气槽在子午面和驻涡式处理机匣的投影分别如图2(a)、图2(b)所示。

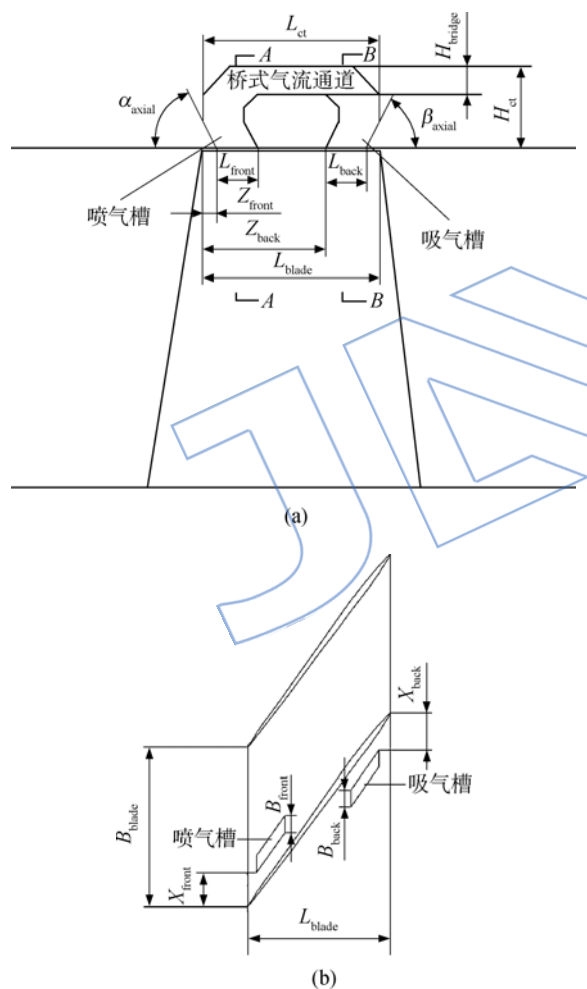


图2 驻涡式处理机匣前后槽与叶片相对位置

Fig. 2 Relative position between blade and front and back slots of TVCT

在对驻涡式处理机匣扩稳效果验证中,所采用的压气机转子为一个跨声速压气机(下文简称压气机)转子,叶片数为17,轮毂比为0.565,设计转速为22 000 r/min,叶尖相对马赫数为1.4。在

之前的实验研究中已经证明,该转子为叶尖失速型转子^[19]。

2 数值方法介绍

采用商用软件 Numeca/Euranus 求解三维流场,湍流模型选用了 Spalart-Allmaras 一方程模型。分别模拟了实壁机匣、弦向斜槽处理机匣和驻涡式处理机匣3种方案。图3和图4为两种处理机匣的计算网格,主流区网格数为640 029,弦向斜槽处理机匣每个处理槽网格数为85 466,驻涡式处理机匣每个处理槽网格数为10 217。在所有的网格中,靠近壁面的 y^+ 保持在3左右。

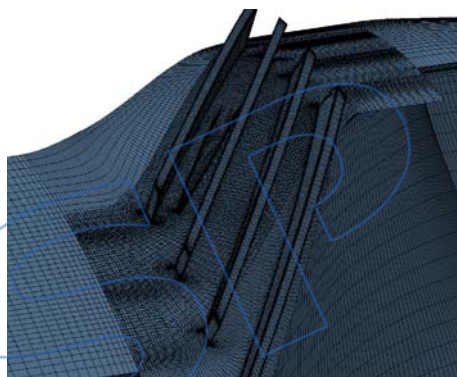


图3 弦向斜槽处理机匣计算网格

Fig. 3 Mesh of chord slot casing treatment

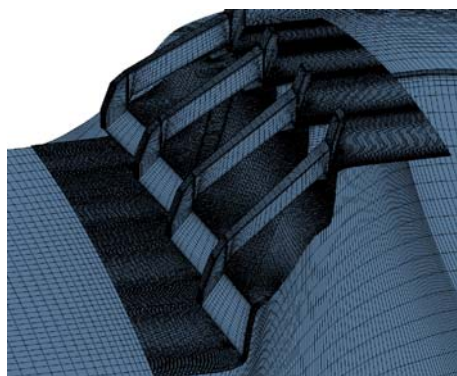


图4 驻涡式处理机匣计算网格

Fig. 4 Mesh of TVCT

进口边界条件给定绝对总压、绝对总温、绝对气流角;出口为亚声速,给定了出口静压,并且满足径向平衡方程。在处理槽和转子之间设置了过渡层网格,该过渡层网格上表面与处理槽采用CON方式连接,下表面与主流区机匣连接部分设置为转静交界面,定常计算转静交界面使用了冻结转子(frozen rotor)方法。采用了数值发散判定失速边界点。

3 数值结果分析

3.1 总体性能

首先看一下 3 种方案下的总体性能比较. 图 5 为流量-压比特性, 图 6 为流量-效率特性.

为了便于对比两种处理机匣对于压气机压比、效率以及裕度的影响, 在特性线上取两个工作状态, 分别为峰值效率点 PE(peak efficiency)和

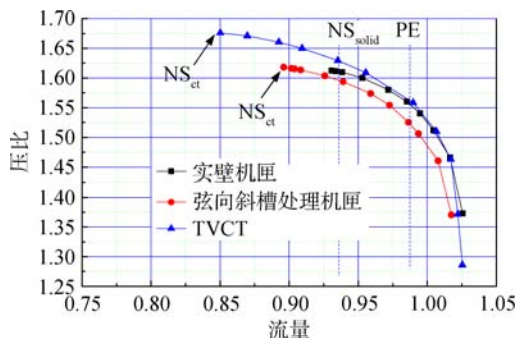


图 5 流量-压比特性

Fig. 5 Mass flow-pressure ratio map

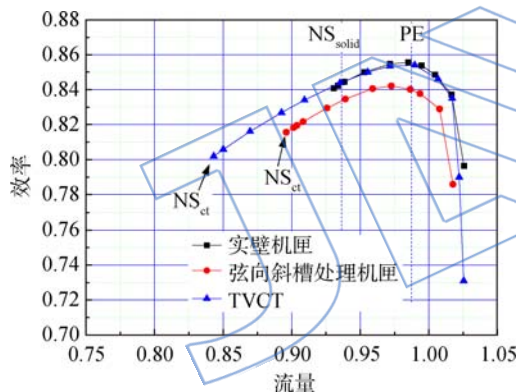


图 6 流量-效率特性

Fig. 6 Mass flow-efficiency map

近失速点 NS(near stall), 其中实壁机匣的近失速点表示为 NS_{solid} , 处理机匣的近失速点为 NS_{ct} .

3 种方案相比, 采用处理机匣的两种方案均可以使压气机转子的裕度得到提升. 并且驻涡式处理机匣带来的裕度提升要大于弦向斜槽处理机匣.

在压比方面, 弦向斜槽处理机匣虽然提高了压气机转子的裕度, 但是在整体上降低了压气机的压比. 而驻涡式处理机匣在 PE 压比与实壁机匣转子基本相同, 而当流量小于 PE 之后, 其压比还大于实壁机匣转子.

在效率方面, 弦向斜槽处理机匣的效率在整条特性线上均比实壁机匣转子的效率要低. 而驻涡式处理机匣的效率则在整条特性线上与实壁机匣基本相同, 仅在设计点附近有略微降低, 表 1 中进行更详细的对比.

表 1 为 3 种方案分别在 PE, NS_{solid} 工况的性能数据. 其中, 各参数增量的定义如下.

压比增量 $\Delta\pi^*$ 表示带处理机匣的压比 π_{ct}^* 相对于实壁机匣压比 π_{solid}^* 的增量

$$\Delta\pi^* = (\pi_{ct}^* - \pi_{solid}^*) / \pi_{solid}^* \times 100\% \quad (1)$$

效率增量 $\Delta\eta$ 表示带处理机匣的效率与实壁机匣效率的差值

$$\Delta\eta = \eta_{ct} - \eta_{solid} \quad (2)$$

裕度 Φ 采用 PE 和 NS_{solid} 的参数来定义

$$\Phi = \left[\frac{\pi_{ns}^* / \dot{m}_{ns}}{\pi_{pe}^* / \dot{m}_{pe}} - 1 \right] \times 100\% \quad (3)$$

式中 π_{ns}^* 和 $\dot{m}_{ns}$ 分别为 NS_{solid} 的压比和流量; π_{pe}^* 和 $\dot{m}_{pe}$ 分别为 PE 的压比和流量. 裕度增量 $\Delta\Phi$ 表示处理机匣与实壁机匣裕度的差值

$$\Delta\Phi = \Phi_{ct} - \Phi_{solid} \quad (4)$$

表 1 3 种方案的总体性能对比

Table 1 Overall performance comparison of three plans

参数	实壁机匣		弦向斜槽处理机匣		驻涡式处理机匣	
	PE	NS_{solid}	PE	NS_{solid}	PE	NS_{solid}
$\dot{m}$	12.8	12.1	12.82	12.21	12.87	12.16
π^*	1.56	1.61	1.53	1.59	1.56	1.63
$\Delta\pi^* / \%$			-2.25	-1.11	-0.12	4.44
$\eta / \%$	85.6	84.2	84.0	82.9	85.4	84.4
$\Delta\eta / \%$			-1.55	-1.28	-0.17	0.15
$\Phi / \%$		8.98		15.98		26.37
$\Delta\Phi / \%$				7.00		17.39

由表1可以看出,在PE附近,弦向斜槽处理机匣的压比相对于实壁机匣下降了2.25%,效率则下降了1.55%。驻涡式处理机匣的压比和效率在PE也低于实壁机匣,不过降低得较小,只有0.12%和0.17%。在 NS_{solid} 附近,弦向斜槽处理机匣的压比相对于实壁机匣下降了1.11%,效率则下降了1.28%。驻涡式处理机匣则不同,在 NS_{solid} 附近,其压比和效率均高于实壁机匣,其中压比高于实壁机匣4.44%,效率高于实壁机匣0.15%。而在裕度方面,也是驻涡式处理机匣的扩稳效果最好,比实壁机匣裕度提高了17.39%,弦向斜槽处理机匣次之,比实壁机匣提高了7.00%。

总体看来,弦向斜槽处理机匣可以起到提高压气机稳定工作范围的效果,但是这种裕度的提高是以牺牲压比和效率为代价的,属于传统的扩稳降效型处理机匣。而驻涡式处理机匣的扩稳能力明显强于弦向斜槽处理机匣,在PE处对于效率和压比也仅有微小的降低(不到0.2%),特别是在 NS_{solid} 附近,其压比和效率还高于实壁机匣。下文将分析产生这一效果的原因。

3.2 性能参数展向分布

3.2.1 出口压比分布

图7和图8给出了PE和 NS_{solid} 的出口压比沿展向分布图。

从图7可以看出,在PE,弦向斜槽处理机匣的在全展向上都会降低压比,而驻涡式处理机匣只会降低叶尖处的压比。

在图8所示的 NS_{solid} ,弦向斜槽处理机匣依然会降低全展向上的压比,而驻涡式处理机匣只会略微降低叶尖处的压比,但是会提高其他叶高的压比。

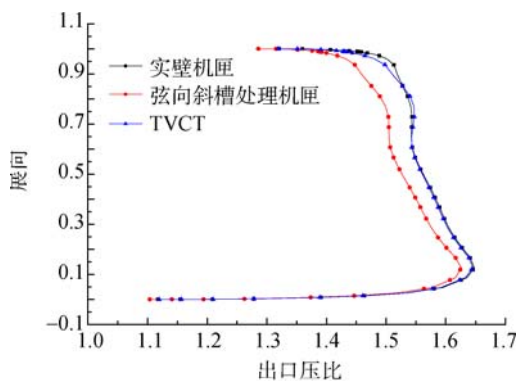


图7 PE出口压比沿展向分布

Fig. 7 Pressure ratio distribution along spanwise at outlet on PE

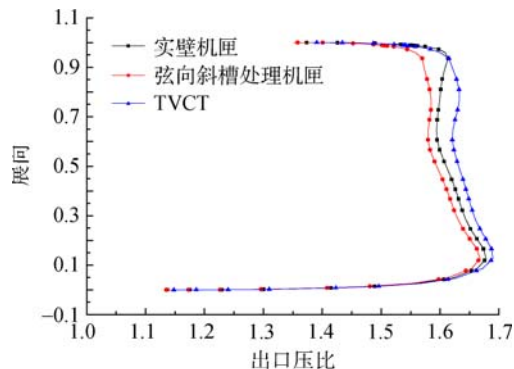


图8 NS_{solid} 出口压比沿展向分布

Fig. 8 Pressure ratio distribution along spanwise at outlet on NS_{solid}

与所有有效的处理机匣一样,上述两种处理机匣也是通过降低叶尖区域的负荷来实现扩稳。但与一般处理机匣不同的是,在其他叶高上,驻涡式处理机匣并不会降低甚至在 NS_{solid} 工况还会提高出口压比。

3.2.2 出口效率分布

在出口效率的对比中发现,3种方案的出口效率区别主要表现在上半叶高,如图9和图10所示。

从图中可以看出,无论是PE还是 NS_{solid} ,两种处理机匣都会降低叶尖处的效率,增大叶片中上部的效率。综合总效果来看,弦向斜槽处理机匣降低得要多一些,而驻涡式处理机匣的两者相当。

3.3 叶尖区域流动

3.3.1 泄漏流分析

在对泄漏流进行分析的过程中,发现泄漏流主要产生在两部分:一部分是叶尖前缘;一部分是叶片弦长中部激波前的部分。泄漏流由叶片压力面通过叶尖间隙流向吸力面,然后形成通道中的

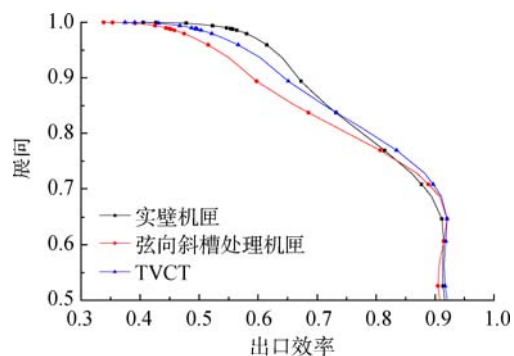
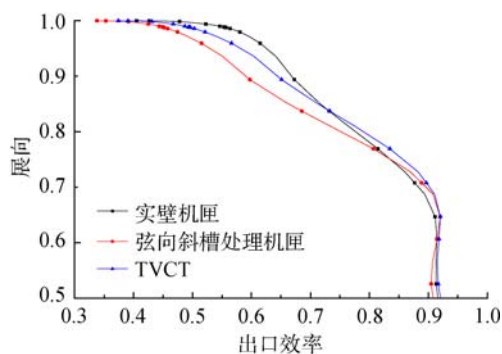


图9 PE出口效率沿展向分布

Fig. 9 Efficiency distribution along spanwise at outlet on PE

图 10 NS_{solid} 出口效率沿展向分布Fig. 10 Efficiency distribution along spanwise at outlet on NS_{solid}

泄漏涡向下游流动. 其中叶片前缘的泄漏流主要形成泄漏涡的涡核部分, 而后面的泄漏流主要形成泄漏涡的外围部分, 下面分别对这两处泄漏流进行分析.

图 11 给出了叶片前缘泄漏流在叶片通道内的流线图, 同时给出的还有垂直流向的熵增分布云图. 左边的图为 PE 工况, 右边的图为 NS_{solid} 工况, 每幅图中的白色虚线都是实壁机匣的泄漏流轨迹.

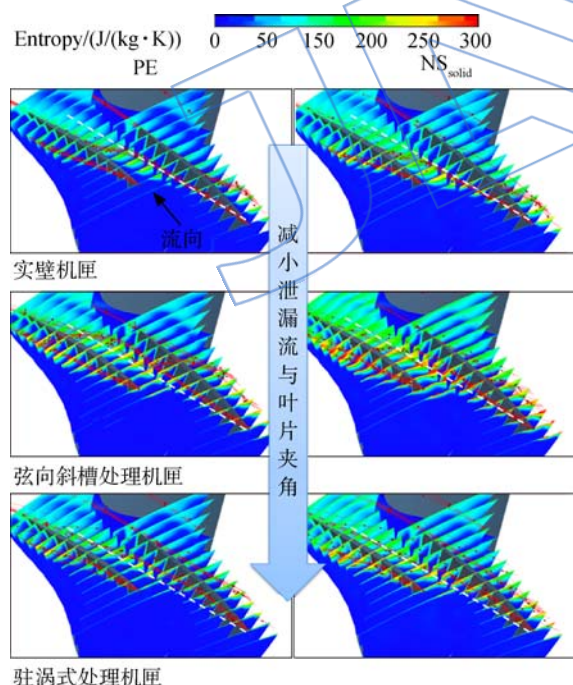


图 11 叶片前缘泄漏流流线与不同截面的熵增

Fig. 11 Streamlines of tip clearance flow at front chord and entropy increase at different sections

先来看一下每种方案下 PE 工况与 NS_{solid} 工况的不同. 首先, NS_{solid} 工况下泄漏流的流线与叶片的夹角要大于 PE 工况, 另外, 如果泄漏流在向

后发展的过程中撞到邻近叶片的压力面的话, 那么 NS_{solid} 工况下两者撞击点要比 PE 工况下更靠前, 并且从熵增分布云图可以看出, NS_{solid} 工况下的熵增要大于 PE 工况, 以上这些变化都是由于压气机流量减小, 负荷增大, 压力面与吸力面之间的压差增大, 因此泄漏流的强度增大所导致的结果.

再来看一下 3 种方案下的对比, 首先来看 PE 工况. 与实壁机匣相比, 弦向斜槽处理机匣的泄漏流在通道的前半部与实壁机匣没有太大区别, 但是在通道的后半部, 实壁机匣的泄漏流全部流向通道出口, 而弦向斜槽处理机匣的泄漏流则穿过相邻叶片的间隙流到了下一个通道, 然后才汇入主流流向通道出口. 并且其无论是在前半部还是后半部的熵增都要大于实壁机匣. 驻涡式处理机匣与实壁机匣相比, 在通道的前半部泄漏流与叶片的夹角要小于实壁机匣, 后面绝大部分泄漏流都流向通道出口, 并且泄漏流与相邻叶片压力面的撞击点也要更加偏后, 熵增整体上要大于实壁机匣但小于弦向斜槽处理机匣. NS_{solid} 工况下的情况与此类似, 不再赘述.

图 12 给出了叶片中部泄漏流在叶片通道内的流线图, 同时给出的还有垂直流向的熵增分布云图. 左边的图为 PE 工况, 右边的图为 NS_{solid} 工况. 与叶片前缘的泄漏流不同, 叶片中部的泄漏流

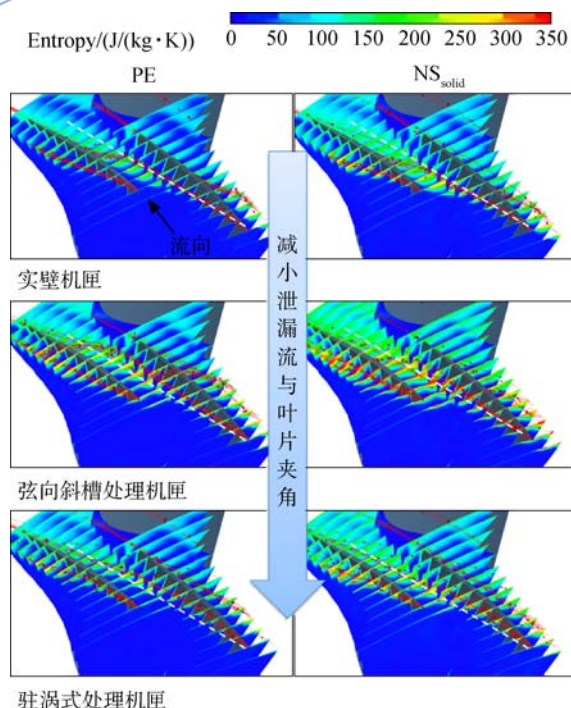


图 12 叶片中部泄漏流流线与不同截面的熵增

Fig. 12 Streamlines of tip clearance flow at mid chord and entropy increase at different sections

经过叶尖间隙后不是直接进入主流向叶片尾缘流去,而是首先横向流动到靠近下一片叶片的压力面,然后再向叶片尾缘流去。

PE 工况与 NS_{solid} 工况的区别是, NS_{solid} 工况下泄漏流横向流动的距离要大于 PE 工况,而且更加靠近下一级叶片的前缘。并且从熵增分布图可以看出, NS_{solid} 工况下的熵增要大于 PE 工况。这些也是由于压气机流量减小, 负荷增大, 压力面与吸力面之间的压差增大, 因此泄漏流的强度增大所导致的结果。

再来看一下 3 种方案下的对比, 首先来看 PE 工况。与实壁机匣相比, 带有处理机匣的两种方案的泄漏流横向流动的距离要小于实壁机匣, 相应的损失则大于实壁机匣, 并且弦向斜槽处理机匣的损失要更大一些。在 NS_{solid} 工况, 实壁机匣的泄漏流已经打到相邻叶片的叶片前缘, 而两种处理机匣的泄漏流则还在叶片通道中部, 当泄漏流向叶片通道后部流动时, 流动到叶片尾缘附近的时候才撞击到相邻叶片的压力面。 NS_{solid} 工况下的叶尖部位损失依然是弦向斜槽处理机匣的损失最大, 其次驻涡式处理机匣, 损失最小的为实壁机匣。

3.3.2 泄漏流与激波相互作用

对于压气机而言, 一方面泄漏流本身可以导致压气机的失速; 另一方面泄漏流与激波相互作用, 在激波后所产生的低速区也可能堵塞通道导致压气机失速, 下面就来分析一下处理机匣对于泄漏流与激波相互作用的影响。

图 13 给出了两种工况下的 98% 叶高的泄漏流与激波相互作用的相对马赫数分布图。在 PE 工况下, 在图 13 左上图中可以看到泄漏流的轨迹、激波的位置以及泄漏流经过激波后的低速区。3 种方案相比, 实壁机匣的激波后低速区最大, 驻涡式处理机匣最小。

在 NS_{solid} 工况下, 实壁机匣激波后产生了很大的低速区, 这一大面积低速区会使得压气机很容易发生失稳而进入失速。相比之下弦向斜槽处理机匣的激波后低速区要减弱很多, 而驻涡式处理机匣的低速区则基本上被消除了。

从这部分分析可以看出, 处理机匣可以通过移除泄漏流或者向泄漏流内注入能量的方式, 来减小低速区的大小或者提高低速区内流体的动量, 从而提高转子叶片的裕度。

3.4 处理槽内流动

驻涡式处理机匣的设计初衷之一就是通过对

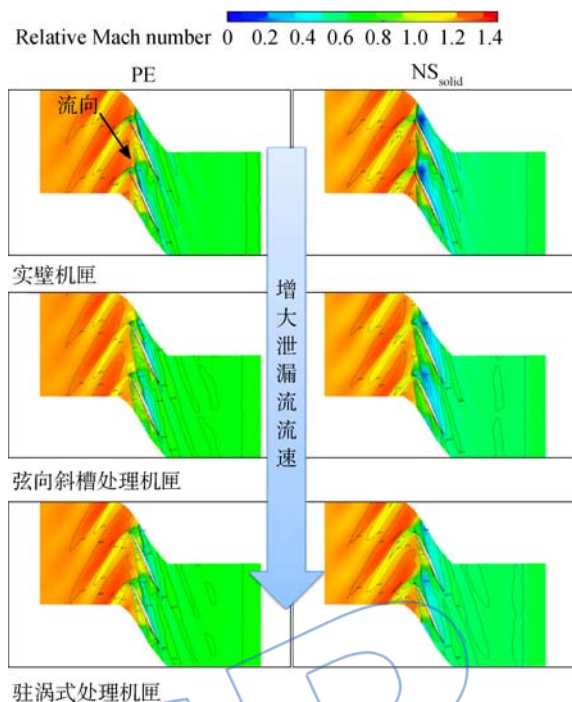


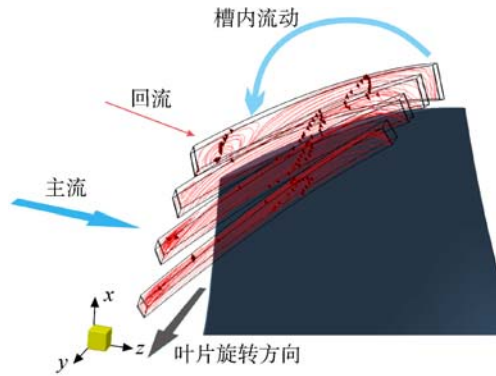
图 13 泄漏流与激波相互作用的相对马赫数分布图
Fig. 13 Relative Mach number distribution effected by interaction between tip clearance flow and shock wave

理地设置吸气槽和喷气槽的角度来降低槽内流体与主流之间的掺混损失, 从而减小对效率的影响。下面来看一下是否实现了这一设计目标。

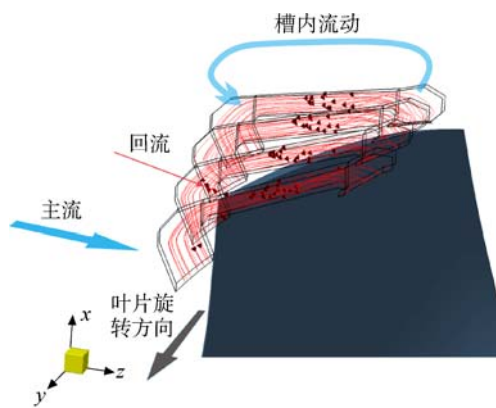
图 14 给出了 NS_{solid} 工况下两种不同形式的处理机匣处理槽内的绝对速度流线图。图 14(a) 和图 14(b) 两图查看的是轴向流动情况, 图 14(c) 和图 14(d) 两图查看的是周向流动情况。

由图 14(a) 可以看出, 弦向斜槽处理机匣将通道后部的流体吸入处理槽内, 然后向前输送, 在处理槽的前面部分将这一部分流体再喷入主流。流体进入处理槽的方向基本上与轴向垂直, 而在前面注入的时候则与主流流动方向几乎相反。并且在每个处理槽的前方都有一部分回流区, 这部分回流在处理槽前面角区形成了一个旋涡(图中左上方红色回流所示)。从轴向流动方向来看, 无论是流体进入处理槽的方向还是流出处理槽的方向, 都与主流有较大的夹角(大于 90°)。较大的夹角一方面对处理槽内流体造成较大的流动损失; 另一方面和主流掺混也会造成较大的掺混损失。此外在处理槽前方角区形成的回流区也会产生较大的损失。

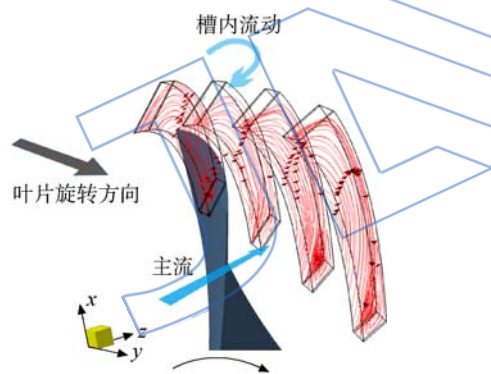
由图 14(b) 可以看出, 与弦向斜槽处理机匣一样, 驻涡式处理机匣也是将通道后部的流体吸



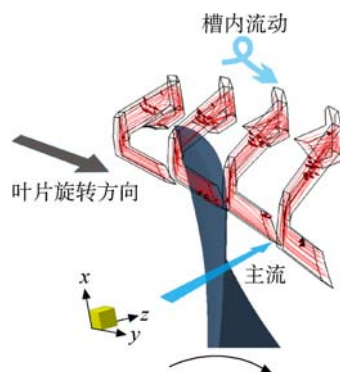
(a) 弦向斜槽处理机匣轴向流线图



(b) 驻涡式处理机匣轴向流线图



(c) 弦向斜槽处理机匣周向流线图



(d) 驻涡式处理机匣周向流线图

图 14 处理槽内的绝对速度流线图

Fig. 14 Absolute velocity streamlines in treatment slots

入处理槽内,然后向前输送,在处理槽的前面部分将这一部分流体再喷入主流.不同的是,流体进入处理槽的方向与主流的流动方向的夹角小于 90° ,流体由处理槽内注入主流的时候与主流在轴向的夹角也小于 90° .并且由于处理槽转角处专门的结构设计,并没有产生明显回流区.从轴向上流体进入、流出处处理槽的方向以及槽内回流区的大小、数量上看,驻涡式处理机匣有着比弦向斜槽处理机匣更好的流动状态.

由图 14(c)中可以看到,在周向上,流体进入弦向斜槽处理机匣的方向与叶片旋转方向一致,而经过处理槽内流动到叶片前缘向主流注入的时候则与叶片旋转方向相反.在压气机内,主流区的绝对速度方向在没进入叶片通道之前为轴向,在进入叶片通道之后,由于叶片为流体增加了扭速,速度方向会向叶片旋转方向偏转.这说明流体在进入弦向斜槽处理机匣的时候周向速度与主流区的绝对速度方向一致,而在流出弦向斜槽处理机匣的时候与主流方向相反.这会造成处理槽向主流注入流体时的掺混损失.

由图 14(d)中可以看到,在周向上,流体流入驻涡式处理机匣和流出的时候其速度方向均与主流在周向的方向一致.这会减小处理槽向主流注入流体时的掺混损失.在图 15 所示的 98% 叶高处的熵增分布云图中可以看到,无论是 PE 工况

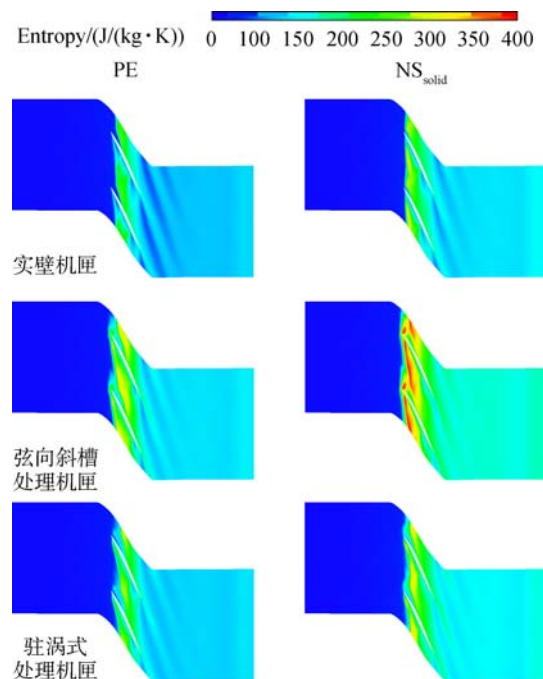


图 15 98% 叶高处的熵增分布云图

Fig. 15 Contour of entropy increase at 98% span

还是 NS_{solid} 工况,驻涡式处理机匣由于掺混损失所带来的熵增均小于弦向斜槽处理机匣,这正是驻涡式处理机匣效率较高的原因所在。

4 结 论

1) 驻涡式处理机匣可以扩大转子裕度 17.39%,并且基本上不影响效率和压比。

2) 扩稳是通过将通道后的附面层流体抽吸然后注入到叶片前缘的吸力面,增加泄漏流的能量实现的。

3) 由于驻涡式处理机匣处理槽抽吸和注入的方向与主流在轴向和周向上都一致,因而减小了掺混损失,减小了对效率的影响。

4) 相比于传统的处理机匣,驻涡式处理机匣有着更加灵活的设计参数,例如吸气槽与喷气槽的位置、大小、轴向角度、周向角度等。这些设计参数分别可以对应于流动参数中的回流流量、引气方向、射流方向等,通过单独调整这些参数,就可以实现定制处理机匣的目的。

参考文献:

- [1] Wilke I, Kau H P, Brignole G. Numerically aided design of a high-efficient casing treatment for a transonic compressor[R]. ASME Paper GT2005-68993, 2005.
- [2] Wilke I, Kau H P. A numerical investigation of the flow mechanisms in a HPC front stage with axial slots[R]. ASME Paper GT2003-38481, 2003.
- [3] Wilke I, Kau H P. A numerical investigation of the influence of casing treatments on the tip leakage flow in a HPC front stage[R]. ASME Paper GT2002-30642, 2002.
- [4] Hoffman W H, Ballman J. Some aspects of tip vortex behavior in a transonic turbocompressor[J]. ISABE 2003-1223, 2003.
- [5] Hofman W, Ballmann J. Tip clearance vortex development and shock-vortex-interaction in a transonic axial compressor rotor[R]. AIAA-2002-0083, 2002.
- [6] Schlechtriem S, Loetzerich M. Breakdown of tip leakage vortices in compressors at flow conditions close to stall [R]. ASME Paper 97-GT-41, 1997.
- [7] 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.
- [8] Hoeger M, Fritsch G, Bauer D. Numerical simulation of the shock-tip leakage vortex interaction in a HPC front stage [J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(3): 456-468.
- [9] Smith G D J, Cumpsty N A. Flow phenomena in compressor casing treatment[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(3): 532-541.
- [10] Johnson M C, Greitzer E M. Effects of slotted hub and casing treatments on compressor endwall flow fields[J]. Journal of Turbomachinery, 1987, 109(3): 380-387.
- [11] Lee N K W, Greitzer E M. Effects of endwall suction and blowing on compressor stability enhancement[J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 133-144.
- [12] Prince D C, Wisler D D, Hilvers D E. Study of casing treatment stall margin improvement phenomena[R]. ASME Paper 75-GT-60, 1975.
- [13] Wisler D C, Hilvers D E. Stator hub treatment study[R]. NASA Report CT-134729, 1974.
- [14] Takata H, Tsukuda Y. Stall margin improvement by casing treatment: its mechanism and effectiveness[J]. Journal of Engineering for Power, 1977, 99(4): 121-133.
- [15] 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): 255-259, 344.
ZHANG Yandong, LU Yajun. An experimental investigation on arc skewed slot casing treatment[J]. Journal of Aerospace Power, 1998, 13(3): 255-259, 344. (in Chinese)
- [16] 李玲, 于清, 陆亚钧. 处理机匣在单级跨声速风扇上的实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(3): 49-52.
LI Ling, YU Qing, LU Yajun. Experimental research of casing treatment on single stage transonic fan[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(3): 49-52. (in Chinese)
- [17] 钱煜平, 刘建勇, 李秋实, 等. 实壁/圆弧斜槽周向不对称组合式处理机匣实验[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1633-1638.
QIAN Yuping, LIU Jianyong, LI Qiushi, et al. Experimental investigation of a solid/arc slot asymmetrical combined casing treatment[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1633-1638. (in Chinese)
- [18] 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.
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. (in Chinese)
- [19] 王卓奇, 袁巍, 宋西镇, 等. 跨声速压气机转子失速过程的实验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1456-1463.
WANG Zhuoqi, YUAN Wei, SONG Xizhen, et al. Experimental investigation on the stall process of a transonic compressor rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1456-1463. (in Chinese)