

文章编号: 1000-8055(2007)06-0961-06

吹气型周向槽机匣处理扩 稳机理的研究

张皓光, 楚武利, 吴艳辉, 邓文剑, 张 夏
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 实验证明在周向环槽中加入切向吹气可以比原型处理机匣获得更大的稳定裕度. 分别对带吹气型周向槽机匣处理与原型机匣处理的孤立转子进行全三维数值计算, 计算得到的总性能特性线同实验符合良好. 通过详细地对比分析两种机匣处理的叶顶区域流场, 揭示了吹气型周向槽机匣处理比未吹气的原型机匣处理获得更大的稳定裕度和提高效率的机理.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 轴流压气机; 吹气型机匣处理; 数值模拟; 流场

中图分类号: V231

文献标识码: A

Mechanism of stall margin improvement associated with the blowing circumferential grooved casing treatment

ZHANG Hao-guang, CHU Wu-li, WU Yan-hui,
DENG Wen-jian, ZHANG Xia

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Tangent blowing in the circumferential grooves has the effect of achieving broader stall margin in the previous experiments. Three-dimensional numerical simulation has been performed for a subsonic axial flow compressor rotor both with the blowing circumferential grooved casing treatment and archetypal casing treatment. The calculated overall performance lines showed good agreement with the experiments. The mechanism was that the blowing circumferential grooved casing treatment can achieve broader safety margin and improve the efficiency compared with archetypal casing treatment. This conclusion was obtained by detailed analyzing the flow-field at the blade tip of two kinds of casing treatment.

Key words: aerospace propulsion system; axial flow compressor;
casing treatment with blowing; flow-field

周向开槽能够有效地提高压气机的稳定裕度已经被国内外大量的实验研究所证实, 文献[1-5]提到了这方面的研究, 周向槽可以基本不降低压气机的原有效率而获得一定的稳定裕度改进, 例

如文献[4]中在 10 765 r/min 转速下 4 种周向槽机匣处理获得了 4.4%~7.1% 的裕度改进量. 在结构上也较为简单, 即在压气机机匣上进行周向开槽. 但其存在不足之处, 那就是稳定裕度的改进

收稿日期: 2006-05-17; 修订日期: 2006-10-18

基金项目: 国家航空科学基金资助 (05C53016)

作者简介: 张皓光 (1981-), 男, 广西宾阳人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学研究.

量还不够大,或是不能明显的提高效率.文献[6]中采用沟槽式机匣处理,通过实验得到了某种几何配置下提高压气机效率的方法,但在稳定裕度上带来一定程度的牺牲.文献[7]也提到机匣处理在提高压气机稳定裕度的同时造成了效率的损失,并且扩稳效果越大,效率损失越大.若能寻求一种机匣处理的方式,既能够扩大压气机的稳定裕度,又能提高压气机的效率,将为解决压气机设计中长期存在的性能矛盾-裕度与效率的矛盾,提供一种有效而简便的方法.本文数值研究了一种带吹气的周向槽机匣处理型式,数值计算结果同实验结果吻合较好,实验与数值结果都表明,这是一种能够实现预期目标的有效手段.通过详细地对比分析带切向吹气的周向槽机匣处理与原型机匣处理的孤立转子内部流场,特别是叶片顶部区域的流场,揭示了带吹气的周向槽机匣处理既能扩稳又能提高效率的机理.

1 压气机试验台与处理机匣结构

本文的研究对象为西北工业大学单级轴流压气机试验台的转子,表1给出了其设计条件下的主要性能参数及主要几何参数.数值计算时带吹气与未带吹气处理机匣的叶尖径向间隙都为0.25mm.实验判明该转子首先在叶尖部位发生旋转失速,并同时波及整个环面,因此数值分析时,主要分析叶顶区的流场.

表 1 转子主要性能参数及主要几何参数

Table 1 Primary geometry and performance parameter of rotor

主要性能及几何参数	数值
进口流量/(kg/s)	5.606
总压比	1.26
绝热效率	0.92
进口轮毂比	0.61
展弦比	1.94
叶片数	30
叶尖稠度	0.6

试验件是一个深度为6mm,槽数为5的周向槽处理机匣,在中部3条槽中分别开有与槽相切的沿圆周均匀分布的吹气孔,吹气方向与试验转子旋转方向一致.原处理机匣的特征尺寸列与表2中.试件的处理宽度覆盖转子叶顶的整个轴向宽度.

表 2 周向槽处理机匣主要几何参数

Table 2 Basic geometry parameter of circumferential groove

处理型式	周向槽
槽数	5
处理面积比/%	71
槽深/叶尖栅距/%	19
槽深/槽宽	2
槽宽/槽片宽	2

2 数值模拟方法、网格和边界条件

数值计算采用了NUMECA FINE 软件包的Euranus 求解器.采用Jameson 的有限体积差分格式并结合Baldwin-Lomax 湍流模型对相对坐标系下的三维雷诺时均Navier-Stokes 方程进行求解,采用显式四阶Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解,为提高计算效率,采用了多重网格法、局部时间步长和残差光顺等加速收敛措施.

转子通道内使用O型贴体网格,进出口延伸段使用H型网格,叶片前后缘处网格加密.周向槽采用H型网格.为了准确模拟叶尖间隙区的流动,在间隙区沿径向均匀分布17个节点,并对转子顶部间隙区和吹气圆管采用了“蝶型网格”,以便获得正交性良好的网格.

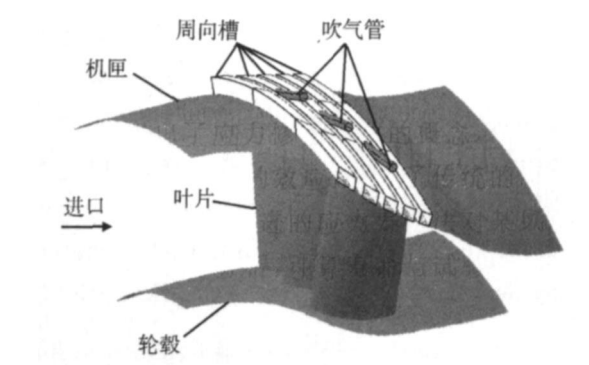


图 1 带吹气的周向槽机匣处理简图
Fig. 1 Configuration of rotor with the blowing circumferential grooved casing treatment

图1给出了带吹气的周向槽机匣处理简图,图2给出计算网格图(各周向槽沿轴向排列顺序分别为:1~5).实验中2~4周向环槽上各在圆周方向均匀分布8个吹气圆管,图1中的3个吹气圆管为一组,2号周向槽上的吹气圆管与3号周

向槽上的吹气圆管在圆周方向相隔 9° , 3 号周向槽上的吹气圆管与 4 号周向槽上的吹气圆管在圆周方向也相隔 9° , 实验中吹气装置共有 8 组. 严格地说, 计算域应采用全通道计算, 这样对计算机资源的要求太高, 只有在使用计算站的情况才能够实现. 因此, 计算中把 3 个周向槽上吹气圆管的数目都改为 10, 也在圆周方向均匀分布, 吹气装置数目变为 10 组. 使得吹气装置与转子通道(带周向槽处理)的比为 1: 3, 带吹气的周向槽机匣处理网格(包括转子网格)总数目约为 184 万.

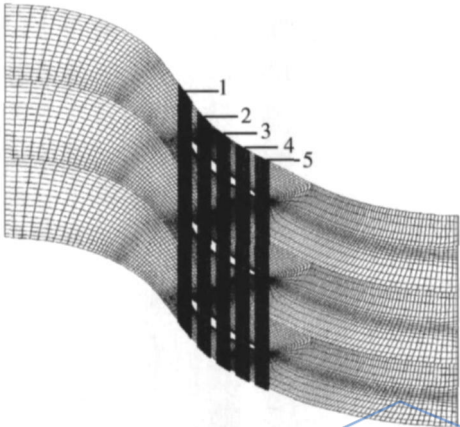


图 2 计算网格图
Fig. 2 Calculative grid

转子上游延伸段进口边界条件取总压为 101 325 Pa、进口总温为 288. 2 K. 转子下游延伸段出口边界条件设为平均静压, 通过不断调整出口延伸段背压获得特性线. 对于吹气圆管, 进口条件设为静压分布, 压力控制在 1. 2 个大气压左右, 与实验时的压力值相同. 当压气机出口背压调整到一定程度时, 经过一定迭代步数后各物理量不收敛时, 认为进入失速状况.

3 计算结果分析

图 3 是该孤立转子在换算转速 10 765 r/min 下周向槽处理、带吹气周向槽处理的试验和计算得到的压气机特性图. 数值计算的最后一个收敛解对应着近失速工况, 此时压气机出口背压在所有计算工况点中是最大的. 从图中可看到, 计算得到的总压比特性以及等熵效率特性线趋势与试验值符合得较好, 计算得到的失速流量比试验值偏小, 带吹气周向槽机匣处理与原型机匣处理比较, 获得了更小的失速流量, 扩大了压气机的稳定工作范围. 带吹气周向槽机匣处理后, 实验与计算的稳定裕度分别增加 2. 6%, 4. 3% (与原型机匣处

理的相比). 所有计算工况点的效率都比相对应的试验值偏低, 但是总的趋势与试验趋势吻合较好, 计算的带吹气周向槽机匣处理效率比计算的原型机匣处理效率高. 计算结果与试验结果相比有误差跟所选用的湍流模型、计算时吹气装置的组数与试验的不同、网格数等因素有关.

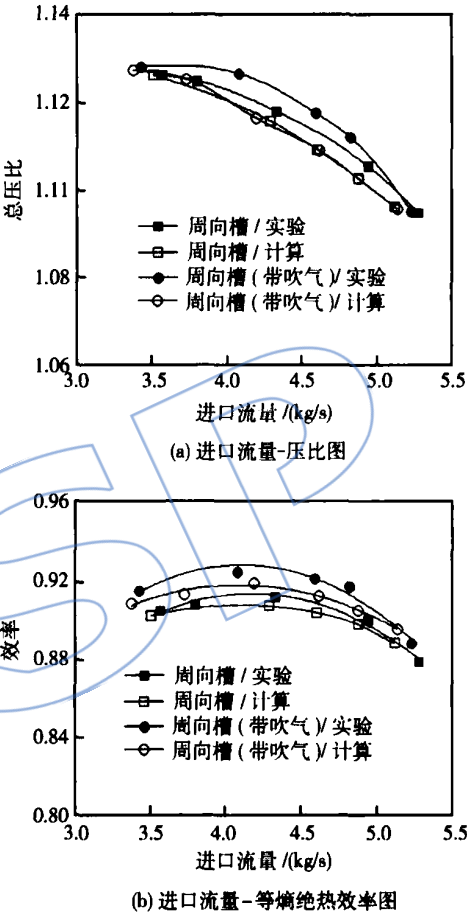


图 3 压气机总性能特性图
Fig. 3 Performance of rotor

以下分析中带吹气机匣处理和原型机匣处理的进口流量近似相同, 保证计算结果具有可比性, 此时原型机匣处理近失速状态. 这里总压损失定义为 $C_{pt} = \frac{p_{t_{inlet}} - p_t}{p_{t_{inlet}}}$, $p_{t_{inlet}}$ 为进口截面的相对平均总压, $p_t \left[= p_s + \frac{1}{2} w^2 \right]$ 为叶片通道内任一点的气流相对总压. 从图 4 中可看到, 原型机匣处理与带吹气机匣处理时与泄漏涡对应的椭圆形状已出现, 沿着叶片弦长方向, 泄漏涡涡核中心的位置都逐渐远离吸力面向压力面推移. 原型机匣处理时, 间隙泄漏涡沿着流道的发展在转子出口顶部几乎占据整个叶片通道, 在周向环槽中加入切向吹气后, 叶顶 A 区域的高总压损失分布范围比原型机

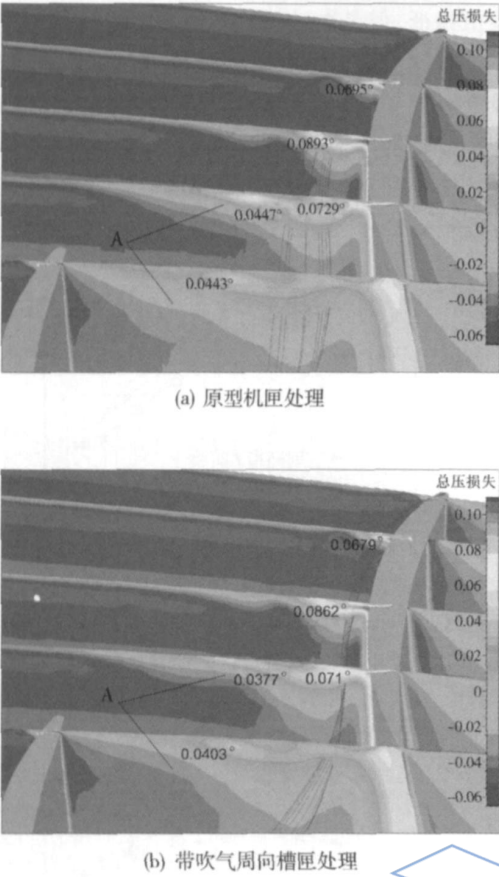


图 4 转子通道内总压损失系数云图
Fig. 4 Total pressure loss contours of rotor passage

匣处理时的小, 在圆周方向, 高总压损失范围远离叶片压力面, 同时在径向方向的损失范围也比原型机匣处理时的小. 在图中的不同截面处, 带吹气后, 对应位置的总压损失数值都比原型机匣处理的小, 从图中还看到原型机匣处理时通过叶片间隙前缘处的流线在流道内的扩散范围比带吹气机匣处理的大. 切向吹气的引入减少了叶顶端壁区的堵塞, 使该区域的总压损失减少.

图 5 所示是转子间隙内 S_1 流面密度流量的分布, 从图中可看到带吹气机匣处理后通过转子 50% 间隙高度的 S_1 流面上密度流量明显比原型机匣处理的高(其他间隙高度的情况与之类似, 与图 4 (a) 和 (b) 图中总压损失比较情况相对应), 这里密度流量定义为: $\rho \cdot V_z$, ρ 和 V_z 分别为密度和轴向速度. 其中在 2~ 4 周向槽对应的径向投影范围, 密度流量的增加幅度较大, 切向吹气的引入增大了间隙处气体的轴向速度, 加强该区域的流通能力, 有效地减少转子顶部上游通道的堵塞情况. 从图 5 中还可以看到, 带吹气机匣处理后, 叶背处的密度流量比原型机匣处理的大, 且低密度流量

范围比原型机匣处理的小, 这也预示着带吹气机匣处理在一定程度上能抑制气流在叶背的分离.

凹槽内径向诱导速度的增加提高了周向槽抽吸叶尖区附面层的能力, 使压气机获得更大的稳定裕度, 这在文献[4] 中得到了证实. 图 6 为第 4 周向槽内 S_3 截面上速度矢量分布图, 在图中可观察到, 第 4 周向槽带吹气处理后 S_3 截面对应位置的绝对速度比原型机匣处理的大, 特别是周向槽顶部的绝对速度增加较其他部位明显. 绝对速度的提高将增大径向诱导速度的绝对值, 径向诱导速度的增加提高了周向槽抽吸或吹除叶尖区附面层的能力, 即从叶尖的吸力面和环壁间的拐角附面层中带走低能量的气团, 使该区域的低能量气团推迟分离而稳定叶尖区的气流, 且可能消除产生的起始旋涡, 增加环壁气流的有效流量, 这从图 5 的分析也得到了证实, 这也是带吹气的周向槽机匣处理能比原型机匣处理获得更大稳定工作范围的原因.

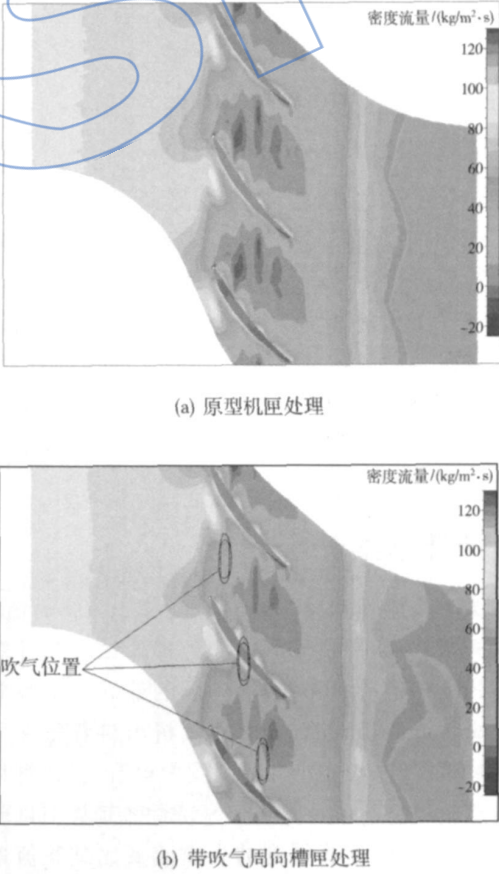


图 5 转子间隙内 S_1 流面密度流量分布图
Fig. 5 Density flux contours of S_1 flow surface in rotor clearance

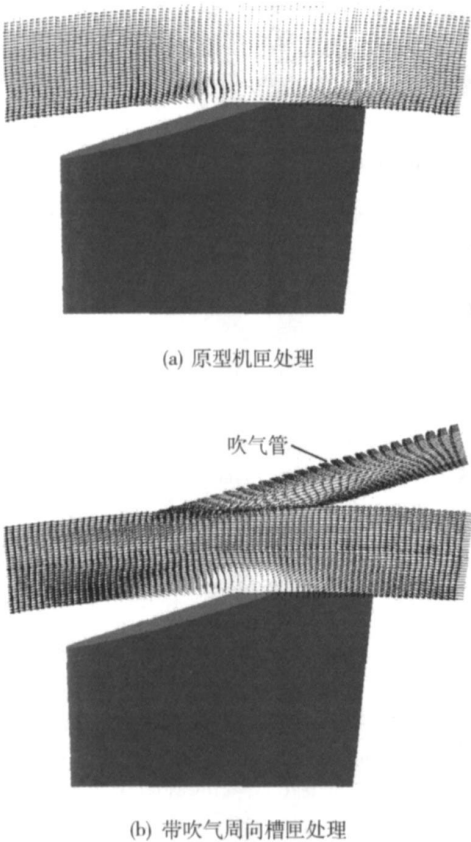


图 6 第 4 周向槽内 S_3 截面上绝对速度矢量图
Fig. 6 Absolute velocity vector of S_3 section in fourth circumferential groove

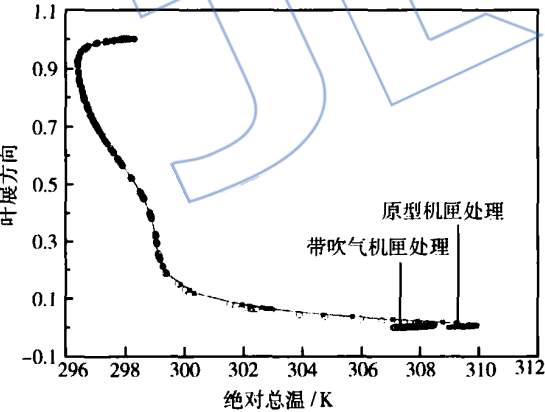


图 7 转子出口截面沿叶高方向的绝对总温分布图
Fig. 7 Absolute total temperature contours of rotor outlet section distributed form span

以下分析中带吹气机匣处理和原型机匣处理的进口流量近似相同, 此时原型机匣处理近失速状态.

图 7 为转子出口截面上沿叶高方向的绝对总温分布图(进行了周向平均), 纵坐标 0 代表 100% 叶高处, 1 代表轮毂处. 从图中可看到, 在叶

顶区相同叶高位置, 带吹气周向槽处理后的温度比原型机匣处理的低, 在其它叶高范围, 温度几乎相同. 这说明吹气处理后降低了转子出口顶部区的总温.

图 8 为 S_3 流面绝对总温分布云图, 如图所示, 吹气机匣处理后叶顶区域的总温都比原型机匣处理时相应位置的低, 高温区占据周向范围和径向范围也比原型机匣处理的小, 这与在图 4 中分析得到的关于原型机匣处理时转子出口顶部区域总压损失在数值和分布范围上都比带吹气机匣处理时大的结论相对应. 从图 9 可观察到在 2~4 周向槽对应的径向投影范围内的总温减少范围较其他位置的大, 这与图 5 中该区域密度流量增加幅度较大的现象很好地符合. 根据等熵效率的定义可知, 在相同绝对进口总温、总压比近似不变(从图 3(a) 可以观察到)情况下, 出口绝对总温的减少, 将能使等熵效率增加.

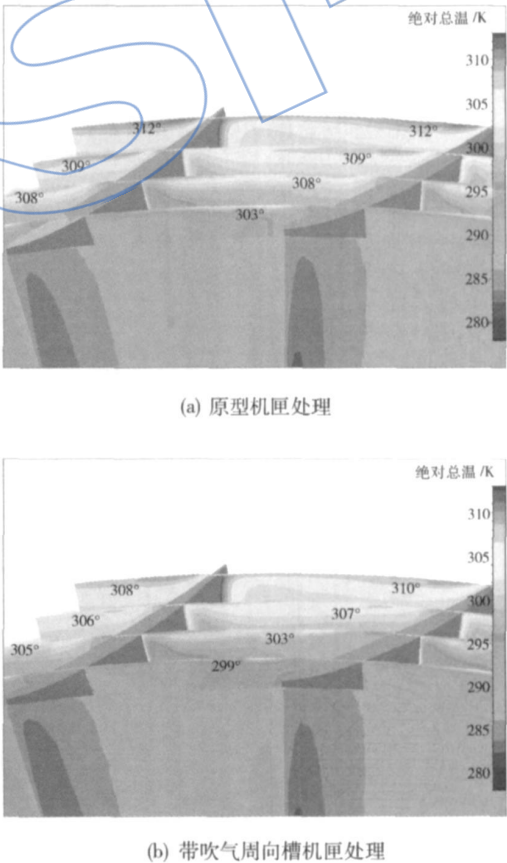
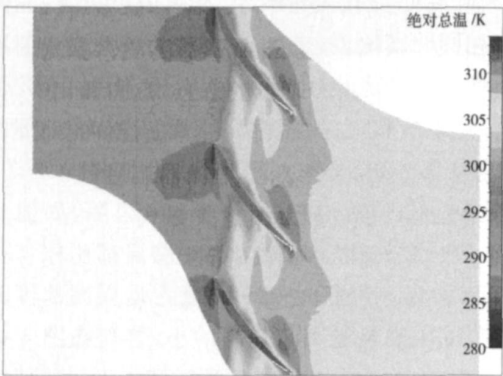
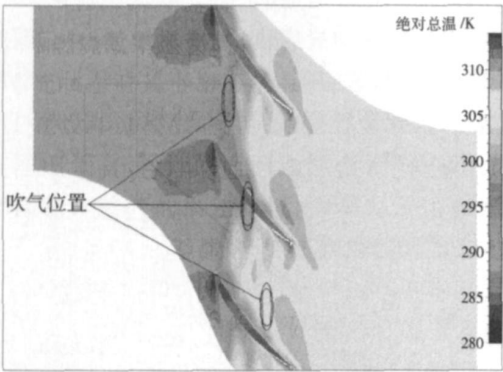


图 8 S_3 流面绝对总温分布图
Fig. 8 Absolute total temperature contours of S_3 flow surface in rotor passage



(a) 原型机匣处理



(b) 带吹气周向槽机匣处理

图 9 转子 50% 间隙高度内 S_1 流面绝对总温分布图
Fig.9 Absolute total temperature contours of S_1 flow surface in rotor 50% clearance

4 结 论

利用 CFD 方法对吹气型周向槽机匣处理进行数值研究,通过叶顶区域的流场分析表明,带切

向吹气周向槽处理后使凹槽内的径向诱导速度增加,提高抽吸或吹除叶尖区附面层的能力,增加叶顶区域的流通能力,延缓附面层的分离并减少附面层的损失,改善了叶顶端壁区的堵塞状况,减少了该区域的总压损失,使转子顶部出口绝对总温减少.在扩大压气机稳定工作范围的同时,也使效率得到提高.

参考文献:

[1] Horlock J H, Lakhwani C M. Propagating stall in compressor with porous walls[R]. ASME Paper 75-GT-59, 1975

[2] Rabe D C, Hah C. Application of casing circumferential grooves for improved stall margin in a transonic axial compressor[R]. ASME Paper GT-2002 30641, 2002

[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 GT-2002 30642, 2002

[4] 刘志伟, 张长生. 周向槽机匣处理增加失速裕度的改进机理[J]. 西北工业大学学报, 1986, 4(4): 405-415
LIU Zhiwei, ZHANG Changsheng. Mechanism of increasing stalled margin with the circumferential grooved casing treatment[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1986, 4(4): 405-415

[5] 朱俊强. 四种不同型式机匣处理的实验研究及机理分析[J]. 航空学报, 1997, 18(5): 567-570
ZHU Junqiang. Experimental research on four kinds of treated casing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(5): 567-570

[6] Wisler D C, Beacher B F. Improved compressor performance using recessed clearance[R]. AIAA-86 1745, 1986.

[7] Fujita H, Takata H. A study on configurations of casing treatment for axial flow compressor[J]. Bulletin of the JSME, 1984, 27(230): 1675-1681