

文章编号:1000-8055(2011)09-2089-06

机匣处理改善某单级跨声轴流压气机 性能的机理研究

杜 辉¹, 滕金芳²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 上海交通大学 航空航天学院, 上海 200240)

摘 要: 采用全三维数值方法研究了轴向倾斜缝机匣处理对某单级跨声轴流压气机性能的影响. 数值结果表明: 机匣处理不仅扩宽压气机稳定工作范围, 而且还略微提高了单级跨声轴流压气机峰值效率. 通过详细分析压气机转子内部流场, 揭示了该机匣处理对该单级跨声轴流压气机性能及流场影响的机理, 在倾斜缝中形成的回流作用下, 使叶顶吸力面气流分离的起始位置向下游推移, 并削弱了分离流与叶顶间隙泄漏流相互作用造成的恶劣影响, 提高了叶顶通道的流通能力, 进而推迟压气机失速的发生.

关 键 词: 轴流压气机; 机匣处理; 压气机性能; 泄漏流; 流动机理

中图分类号: V231. 3

文献标志码: A

Study on the flow mechanisms of casing treatment on a transonic single stage axial-flow compressor

DU Hui¹, TENG Jin-fang²

(1. School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. School of Aeronautics and Astronautics,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The influences of axial skewed slot casing treatment on the performance of a transonic single stage axial-flow compressor were investigated through three-dimensional (3-D) numerical method. The numerical results indicate that the stable operating range of axial compressors is enlarged and the compressor efficiency is increased with casing treatment appreciably. The flow mechanisms of affecting compressor performance were obtained by analyzing in detail the flow-field in compressor rotor with casing treatment. It was found that the starting location of flow separation near rotor blade suction was moved backward by the back flow formed in the slots, which weakened the adverse influence rooted in interaction of separated flow and tip leakage flow and improved the current ability of blade tip passage. So the compressor stall was suspended.

Key words: axial-flow compressor; casing treatment; compressor performance;
leakage flow; flow mechanisms

轴向倾斜缝机匣处理能扩大轴流压气机的稳定工作范围已被国内外大量的研究所证实^[1-4]. 该

类机匣处理的扩稳能力在目前已有的机匣处理结构中几乎是最强的, 通常用于对稳定性要求比较

收稿日期: 2010-10-19; 修订日期: 2011-04-11

作者简介: 杜辉(1970—), 男, 山东烟台人, 博士生, 主要从事压气机、风扇设计方面研究.

高的压气机.同时,轴向倾斜缝机匣处理具有简单结构、易于改装、技术风险小等特点,所以在亚声速和跨声速压气机上得到了广泛应用.尽管缝式机匣处理技术已经应用了近40多年,但对其作用机理的了解还很不清楚.虽然试验中可采用先进的测量技术及流场显示技术来分析这些复杂的流动现象,但仍有很大的不足之处,特别是对压气机及处理机匣内部细致流场的试验研究仍非常困难.

随着计算机技术以及计算流体力学的发展,国内外的一些学者开始尝试对轴向倾斜缝机匣处理进行数值模拟,现有关于机匣处理数值模拟的研究往往针对孤立转子或在无导叶的单级环境下进行^[5-11].由于带导叶后,在转子前的进口气流带有一定的预旋,同时带导叶的单级压气机内部流动较无导叶时更加复杂,因此在有导叶环境下关于单级轴流压气机轴向缝机匣处理的数值研究很少^[12].本文以某带导叶的单级跨声轴流压气机为研究对象,利用计算流体动力学(CFD)软件Numeca研究处理机匣和主流之间的耦合流动,探讨轴向缝机匣处理对该单级跨声轴流压气机内部流场及性能影响的流动机理.

1 处理机匣结构及数值计算方法

表1给出了轴向倾斜缝处理机匣的主要几何参数,表中轴向叠合量的定义为处理机匣与转子叶顶轴向弦长的重合长度与动叶叶顶轴向弦长之比.处理机匣位于转子前部分,当带导叶后,不与导叶相联且无重叠.

表1 轴向倾斜缝处理机匣主要几何参数
Table 1 Basic geometry parameters of slotted casing treatment

几何参数	数值
槽数/个	192
轴向叠合量/%	30
开缝面积/%	67
径向倾斜角/(°)	45
缝片宽与缝宽之比	0.5
处理总宽/mm	130

计算中结合Spalart-Allmaras湍流模型,并采用有限体积中心差分格式对三维雷诺时均Navier-Stokes方程进行求解,定常计算中采用显式四阶龙格库塔法时间推进以获得数值解,同时加入了二阶和四阶人工黏性项用来消除数值计算

过程中的伪数值振荡.并使用多重网格法、局部时间步长等措施加速计算.

计算中采用分区网格技术,所有叶片通道内使用O型贴体网格,压气机进出口延伸段使用H型网格,动叶叶顶间隙分为两层,第一层采用“蝶形网格”,第二层为H型网格,同时在动叶机匣上有一个薄块,处理机匣就固接在这个薄块上(如图1所示).计算时,动静叶排之间的交接面采用混合面平均方法传递数据,薄块与原机匣的交界面采用full non match方法处理,而处理机匣和薄块之间的交接面采用转子冻结法传递数据.图2给出了带机匣处理的压气机三维简图,数值模拟采用单通道计算,带机匣处理后的通道网格总数约为200万,实体壁机匣时网格总数约为165万.

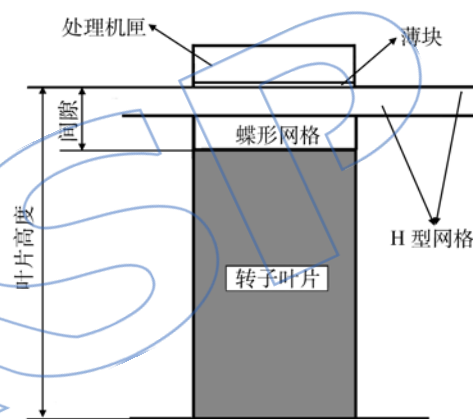


图1 转子叶顶间隙分层示意图

Fig. 1 Sketch of rotor tip clearance delamination

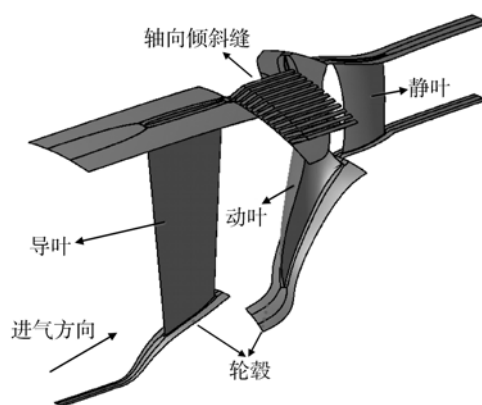


图2 带机匣处理的压气机三维简图

Fig. 2 Configuration of compressor with casing treatment

计算中,轮毂、机匣以及叶片等固壁上给定绝热无滑移边界条件,导叶上游延伸段进口边界条件取总压为101325 Pa、进口总温为288.2 K,进口气流方向为轴向.静叶下游延伸段出口边界条件

设为平均静压。

2 数值计算结果分析

数值计算在设计转速下进行,引入稳定裕度改进量 $\bar{m}$ 指标

$$\bar{m} = [(\pi_{cs}^* / \pi_{bs}^*) / (M_{cs} / M_{bs}) - 1] \times 100\%$$

式中 π^* 和 M 分别代表总压比、流量,下标 c,b,s 分别代表处理机匣、实壁机匣、近稳定边界点。

2.1 总性能分析

计算时保持转速不变,通过提高静子延伸段出口的背压来获得各个流量点的工况,当全局残差收敛到一定的量级并且进出口流量、总压比及效率保持恒定时可认为计算已经收敛,把数值发散前的最后一个工况认为近失速点,对应的静子出口背压最大。

图 3 为设计转速下计算得到的实壁、缝式机匣处理的总性能图,Baseline,CT 分别代表实壁

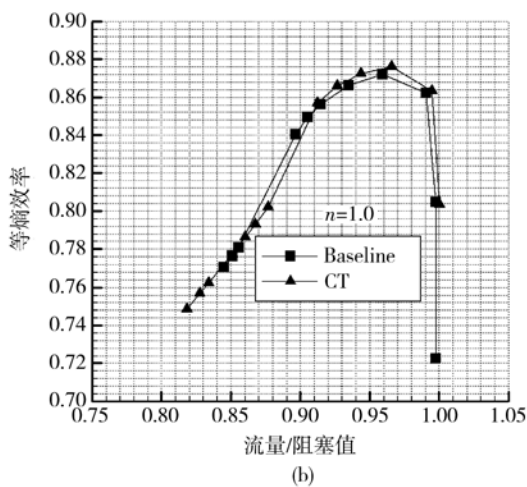
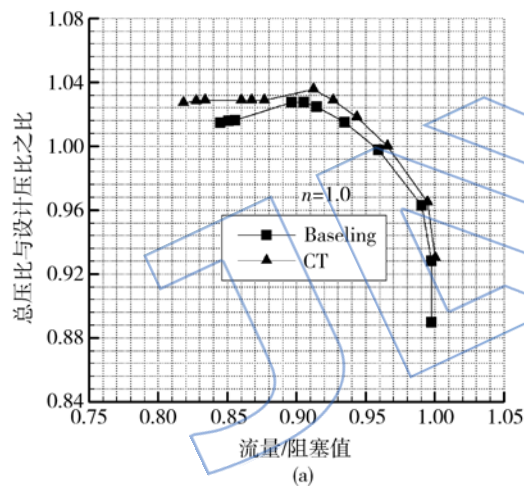


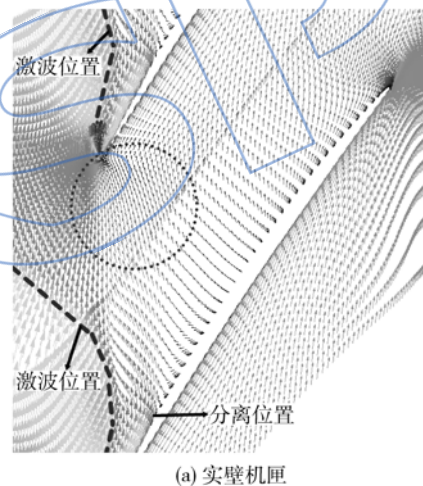
图 3 压气机性能曲线

Fig. 3 Compressor performance lines

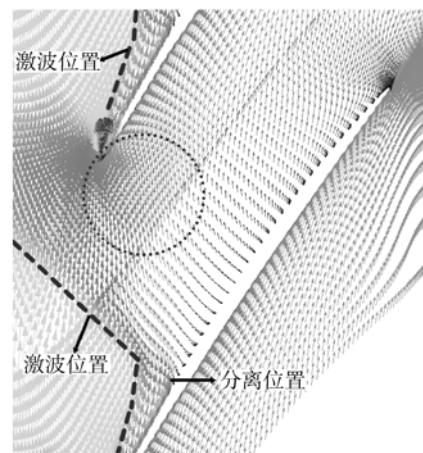
机匣、机匣处理.在图中可看到,轴向倾斜缝机匣处理后,明显地扩大了单级压气机的稳定工作范围,获得了 4.54% 左右的失速裕度改进量,同时在整个流量范围内压气机的总压比与实壁机匣比较,都有不同程度的提高.并且机匣处理后在大部分流量范围内,压气机等熵效率略有提高,峰值效率约上升 0.4%。

2.2 压气机叶尖的耦合流动分析

图 4 给出了约 99.5% 叶高处 S_1 流面上的相对速度矢量图,实体壁机匣近失速状态.实体壁机匣时,在图 4(a)中可看到在叶片吸力面处的气流分离起始位置比机匣处理的更靠近叶片前缘,这意味着通道内的流动较为恶劣,分离的气流与间隙泄漏流相互作用,使图 4(a)中圆形标注区域的气流攻角增大,甚至该处气流的轴向分量为负值,造成实壁机匣的叶顶通道流通能力弱.同时比较



(a) 实壁机匣



(b) 带机匣处理

图 4 转子 99.5% 叶高处相对速度矢量

Fig. 4 Relative velocity vector at the 99.5% blade height of rotor

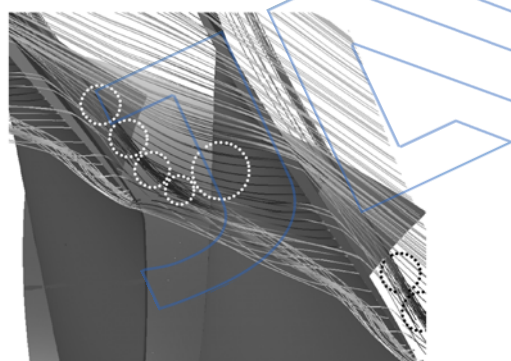
图4(a),(b)也可看实壁机匣时,激波位置也更靠近上游,如果沿着垂直叶片吸力面方向延伸激波线,可发现其与吸力面的交点差不多与气流分离起始位置重合.机匣处理后,在倾斜缝中形成的喷射流的作用下,叶顶通道内的低速气团得到了有利的激励,使叶片吸力面处的气流分离起始位置往下游推移,从而增加了叶顶通道的有效流通面积及流通能力.从而推迟了压气机转子失速的发生.

图5为转子叶顶间隙处的泄漏流线分布图,此时实体壁机匣近失速状态.在图5(a)中可看到叶顶通道内有大量的低速泄漏流体(图中圆形标注范围内),叶顶间隙形成的泄漏流在流向通道下游的过程中,泄漏涡核半径变大.同时间隙泄漏流分成两股,其中一股泄漏流能顺利地通道内流出;另外一股泄漏流转折到相邻叶片前缘处,最后在前缘处绕流入相邻叶片通道,这样的泄漏流运动方式不利于叶顶进口处的气流流入叶顶通道.从图5(b)中可看到,机匣处理后,间隙泄漏流在流向下游通道的过程中,在某一位置(图中椭圆标注内)被处理缝抽吸入缝内,消除了其转折向相邻叶片前缘压力面处的可能,从图5(b)中还可观

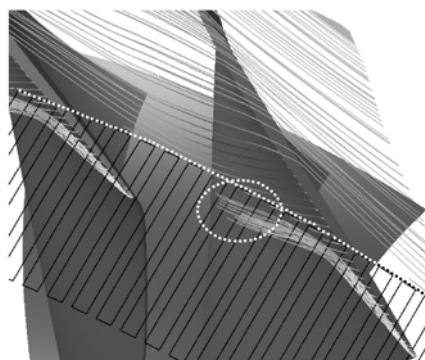
察到,通道内的间隙泄漏流在处理缝下游端面(图中点直线所示位置)均被吸入处理缝内,这也是机匣处理后,通道内低能气流较实壁机匣少的原因之一.

结合图4的速度矢量分布及图5可以推断:该单级跨声速转子失速是由叶顶间隙泄漏流及叶片吸力面处的气流分离共同引起,其中叶片吸力面处的气流分离起主导作用,分离的气流迫使间隙泄漏流更接近切向.机匣处理后,在缝内形成的喷射流激励下,叶顶通道内的间隙泄漏流得到有效的控制,间隙泄漏流线都保持较为集中的形态,并改善了叶顶通道内的流动状态.

对于轴向倾斜缝机匣处理结构来说,缝内的回流具有抽吸或吹除端部低能流体的能力,一般来说,缝内产生的回流越强,处理机匣的扩稳效果就越显著.产生回流的主要动力是缝的下游端感受到叶片近尾缘区高静压与缝的上游端感受叶片前缘区低静压所形成的压差.图6给出了转子通道子午面上的相对马赫数分布(周向平均),同时给出了某一轴向倾斜缝内中间截面上的流线分布.从图可看到,采用轴向倾斜缝机匣处理后,缝中有明显的回流存在,该回流能抽吸或吹除叶顶端壁区的低能流体.在图中6(a)中转子叶顶处有大面积的低能流体存在,在径向及轴向方向该低能气团占据了很大的叶顶通道范围,这就意味着



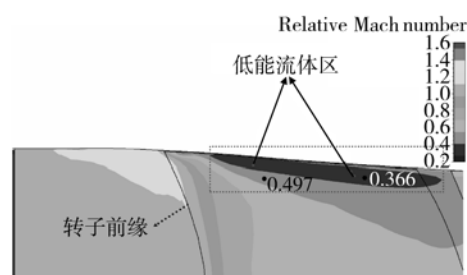
(a) 实壁机匣



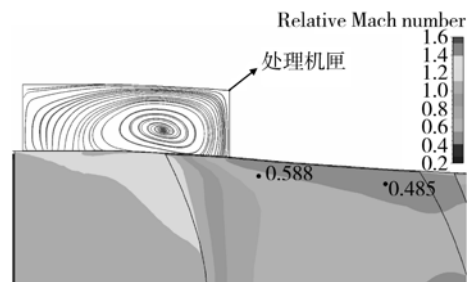
(b) 带机匣处理

图5 转子叶顶间隙泄漏流线图

Fig. 5 Blade tip leakage streamlines of rotor



(a) 实壁机匣



(b) 带机匣处理

图6 转子叶顶子午面相对马赫数分布

Fig. 6 Relative Mach number of part meridional plane of rotor

转子叶顶通道内的堵塞现象恶劣,叶顶通道的流通能力弱,气流不能顺畅地流出叶片通道.轴向倾斜缝机匣处理后,通过比较可看出(图6中给出了对应区域的相对马赫数数值),叶顶通道内对应部位无低速流体出现.机匣处理技术的引入,有效地解除了转子叶顶通道的堵塞状况,进而提高了叶顶通道的流通能力.综合上面的分析,压气机效率提高的原因为机匣处理后有效地减少了转子叶顶的总压损失(从总压比曲线可看出)及激波与转子叶片吸力面附面层相互作用的强度,以及产生的流动损失(从图4也可看到),机匣处理获得的增益大于带来的损失,所以使得效率有所提高.

图7为转子进出口气流速度轴向分量沿叶高的分布图(周向平均),以及实体壁机匣近失速工况.从图可看到,机匣处理后,进口处叶顶近70%叶高以上(出口处近80%叶高以上)区域的轴向速度均比实体壁机匣在相同部位的大,这说明从轴向倾斜缝内喷出的气流不仅带有较大的切向分速,而且具有一定的轴向分速,促使主流在靠近叶顶处的轴向速度分速有所增加,从而提升叶顶通道的流通能力.

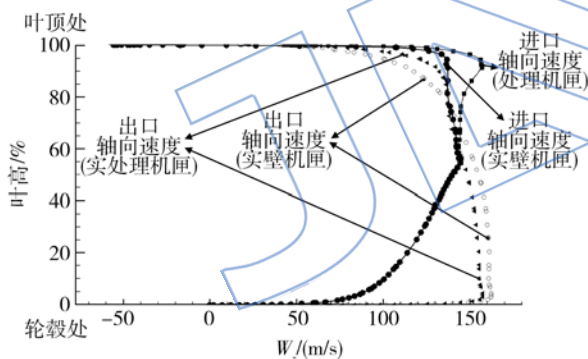


图7 转子进出口处气流轴向速度分量沿叶高分布

Fig. 7 Axial velocity distribution along rotor blade height in inlet and outlet

图8给出了99.5%导叶叶高处 S_1 流面上的绝对速度矢量图,同时还给出了处理缝最靠近机匣壁面的截面内绝对速度矢量分布.从图中看到导叶通道内的气流带有一定的进口预旋,即导叶起到了减少转子进口来流攻角的作用,从轴向倾斜缝内喷出的气流方向不全都是与导叶中的气流方向一致,有的还与导叶中气流流动方向相反.轴向倾斜缝的存在在一定程度上削弱了导叶的作用.但处理缝内喷射气流能把转子叶顶的低能流体吹除掉(如图6所示).综合起来,处理机匣起到

的正面作用比其削弱导叶作用的影响强,因此处理缝的引入能扩大该压气机的稳定工作范围.

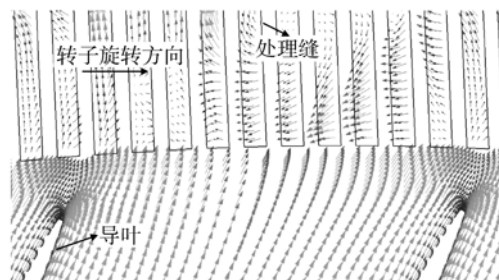


图8 99.5%导叶叶高内及处理缝内绝对速度矢量分布

Fig. 8 Velocity vector at the 99.5% blade height of vane and in slots

3 结论

采用数值计算方法研究了轴向倾斜缝机匣处理对带导叶单级跨声轴流压气机性能及流场的影响,同时判明设计转速下该压气机失速的原因为叶顶间隙泄漏流及叶片吸力面处的气流分离,其中叶片吸力面处的气流分离起主导作用.得到的主要结论如下:

1) 在设计转速下,机匣处理获得了4.54%左右的失速裕度改进量,在整个流量范围内压气机的总压比都有不同程度的提高.同时机匣处理后在大部分流量范围内,压气机等熵效率略有提高,峰值效率约上升0.4%.

2) 所研究的压气机由于转子叶顶流动状况恶劣引起失速,采用轴向缝机匣处理后,拓宽了该压气机的稳定工作范围.其原因为:在倾斜缝中形成的喷射流的作用下,叶顶通道内的低速气团得到了有利的激励,使叶顶吸力面气流分离的起始位置向下游推移,并削弱了分离流与叶顶间隙泄漏流相互作用造成的恶劣影响,提高了叶顶通道的流通能力,进而延缓了该单级跨声压气机失速的发生.

参考文献:

- [1] Pundhir D S, Sharma P B. Effect of casing treatment on aerodynamic performance of a contra-rotating axial compressor stage[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1990, 240(1): 46-55.
- [2] Fujita H, Takata H. A study on configurations of casing treatment for axial flow compressors[J]. Bulletin of the JSME, 1984, 27(230): 1675-1681.
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] Wilke I, Kau H P. A numerical investigation of the flow mechanisms in a HPC front stage with axial slots[R]. ASME Paper, GT-2003-38481, 2003.
- [6] 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.
- [7] 卢新根, 楚武利, 朱俊强, 等. 轴向斜缝机匣处理与转子通道之间耦合流动分析[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 226-228.
- LU Xingen, CHU Wuli, ZHU Junqiang, et al. Analysis of the coupled flow through axial skewed slots casing treatment and rotor passage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(2): 226-228. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] Engel K, Zscherp C, Wolfrum N, et al. CFD simulations of the TP400 IPC with enhanced casing treatment in off-design operating conditions[R]. ASME Paper, GT-2009-60324, 2009.
- [10] Schnell R, Voges M, Mönig R. Investigation of blade tip interaction with casing treatment in a transonic compressor Part 2: numerical results[R]. ASME Paper, GT-2008-50212, 2008.
- [11] Emmrich R, Kunte R, Hönen H, et al. Time resolved investigation of an axial compressor with casing treatment Part 2: simulation[R]. ASME Paper, GT-2007-27582, 2007.
- [12] Hembera M, Kau H P, Johann E. Simulation of casing treatments of a transonic compressor stage[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2008, 2008(1): 1-10.