

超声速低反力度吸附式压气机变工况特性

张龙新¹, 王松涛¹, 阮国辉¹, 刘 勋², 王仲奇¹

(1. 哈尔滨工业大学 发动机气体动力研究中心, 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶重工集团公司 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 哈尔滨 150078)

摘 要: 为探讨非设计点的气动性能,以某3级高负荷低反力度吸附式压气机首级超声速级作为研究对象,借助数值模拟的方法,分别研究了变转速、变抽吸量以及近失速点首级超声速级参数以及内部流场的变化。结果表明:变转速条件下,基于低反力度设计概念研制的吸附式压气机所采用的抽吸方案仍能适应设计要求;减少抽吸量,在降低本级气动性能的同时,增加了其与下一级流动匹配的难度;通过在端壁抽吸槽道前段添加附加抽吸槽道/孔可进一步拓宽吸附式压气机的工作范围。

关 键 词: 超声速压气机; 低反力度; 抽吸; 变工况; 附面层

中图分类号: V21; TK474.7

文献标志码: A

Characteristics under variant working conditions of a supersonic low-reaction aspirated compressor

ZHANG Long-xin¹, WANG Song-tao¹, RUAN Guo-hui¹,

LIU Xun², WANG Zhong-qi¹

(1. Engine Aerodynamics Research Centre,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Harbin Boiler and Turbine Institute,

China Shipbuilding Industry Corporation, Harbin 150078, China)

Abstract: In order to explore the aerodynamic performance at off-design points, taking an supersonic first stage of three-stage highly-loaded low-reaction aspirated compressor as research objection, the variation of parameters and inner flow filed for an supersonic first stage operating at various speeds, aspiration mass flow rates, and near stall point were investigated by numerical simulations. As a result, the aspiration schemes of the aspirated compressor designed with the low-reaction concept can still meet the design demands at various speeds; the reduction of aspiration mass flow rate will not only decrease the stage aerodynamic performance, but also affect the matching with the next stage; the working range of aspirated compressor can be further broadened by adding additional aspirated slot/holes before the endwall aspiration slot.

Key words: supersonic compressor; low-reaction; aspiration;
variant working conditions; boundary layer

进一步提高转速与扭速可大幅度提升单级风
扇/压气机的做功能力,但国内外研究学者们发

现,当单级负荷系数提高到一定程度时,动叶叶顶
以及静叶叶根处的扩压因子^[1]将远超出常规限

收稿日期:2013-11-11

基金项目:国家自然科学基金(51206035); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51121004)

作者简介:张龙新(1987—),男,吉林蛟河人,博士生,主要从事高负荷压气机设计研究。

制,采用传统的被动流动控制技术^[2-3]已经不足以对扩压叶栅内部流动进行有效地整合.鉴于此,麻省理工学院^[4-6]提出了吸附式压气机的设计概念,并展开了大量的数值与实验工作,其研究结果表明,通过将附面层抽吸技术融入到压气机气动设计中可显著提高吸附式压气机的负荷水平.国内北京航空航天大学、西北工业大学、南京航空航天大学等高校及科研院所^[7-11]也相继展开有关附面层抽吸技术的研究工作,通过在高负荷平面叶栅或者现有机型上应用附面层抽吸技术可进一步提升其气动性能.

对于一台严格意义上的吸附式压气机,附面层抽吸已不再是简单的流动控制技术,而是气动设计中最重要的一部分,这就需要其在保证工作点处气动性能满足设计要求的前提下,同时兼顾整体工作范围以及非设计点处的气动性能.从 Merchant 等^[12]的研究中可以发现,对超声速吸附式压气机,仍然存在起动以及工作范围较小的问题,并且其通流效率对抽吸量的选择十分敏感.

目前,有关吸附式压气机的研究多集中于设计点,而关于非设计点处的研究较少.国内的研究则多集中在对现有机型上进行附面层抽吸,这种研究虽然在理论上具有一定的指导意义,但是可能弱化抽吸对总体性能的影响.此外,在超声速来流条件下,由于强激波的存在致使抽吸方案的设计更为困难.本文以某3级高负荷低反力度吸附式压气机^[13]首级超声速级作为研究对象,重点考察其在非设计点处,基于低反力度理念设计的吸附式压气机是否仍能够满足一定的设计要求,并初步探讨导致其失速的原因以及相应解决方法.

1 研究对象及数值方法

本文研究对象为某3级高负荷低反力度吸附式压气机(以下简称吸附式压气机)首级超声速级(以下简称首级),在叶尖切线速度为370 m/s前提下实现了2.6的总压比.动叶进口为跨声速来流条件,而静叶进口除靠近端壁处全部为超声速.设计点处首级反力度仅为0.282.由于仅在静叶内部实施附面层抽吸,大幅度提高了抽吸系统设计的可靠性.动叶和静叶几何参数见表1.

数值模拟采用 Numeca 软件.空间离散网格利用 Autogrid 5 生成,动、静叶拓扑结构均为 O4H 型结构化网格,控制壁面 y^+ 小于 6,抽吸槽道通过提取壁面网格获得,网格节点总数为 275 万,如图 1 所示.湍流模型选择一方程 Spalart-Allmaras

表 1 动叶和静叶几何参数

Table 1 Geometry parameters for rotor and stator

参数		数值	
		动叶	静叶
叶片数		36	60
展弦比		0.8	1
稠度	轮毂	2.89	1.99
	轮缘	2.20	1.67
叶型折转角/(°)	轮毂	60.77	36.80
	轮缘	54.37	35

(S-A)模型,目前,国内外在应用 Numeca 软件对吸附式压气机进行数值研究时基本均采用该湍流模型^[14-17].差分格式采用具有2阶精度的中心差分格式,全多重网格法加速收敛.进口给定总温、总压以及进口气流角,出口静压由简单径向平衡方程给出.网格无关性验证参考了文献^[18].

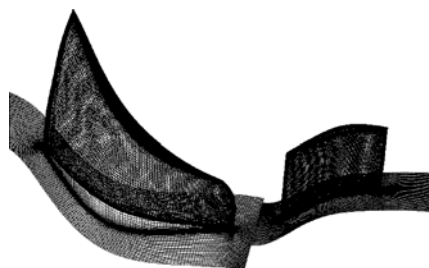


图 1 计算网格

Fig. 1 Computational mesh

2 动、静叶设计特点

对于低反力度首级动叶,在无进口导叶的情况下,通过大幅度提升出口轴向速度以保证气流能够在经过激波之后实现进一步的折转进而提升其做功能力.图2对比了本文研究的低反力度动叶与某典型小流量跨声速压气机常规动叶经过周向平均后轴向速度在90%叶高处沿流向的变化(LE/TE代表叶片前缘/尾缘,横坐标 $\bar{z}$ 为 z 轴的相对位置),从中可以发现,忽略激波减速引起的轴向速度亏损段,低反力度动叶在轮缘附近轴向加速段更长,这有效地降低了流道内的逆压力梯度,控制了端壁附面层的进一步发展,使高效流动成为可能.

吸附式静叶设计需综合考虑叶型设计、抽吸方案设计以及整级喘振裕度的要求.对于本文所研究的吸附式静叶,其气动边界条件有两个特点:

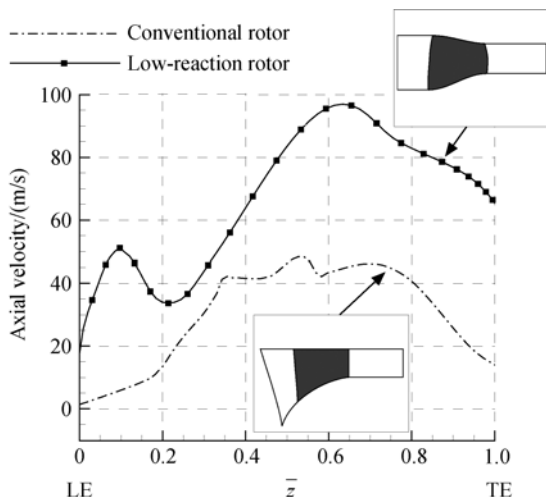


图2 90%叶高处低反力度动叶与常规动叶轴向速度沿流向的变化

Fig. 2 Variation of axial velocity along flow direction at 90% span for low-reaction rotor and conventional rotor

其一,进口为超声速来流;其二,需实现一定的折转为下一级动叶提供预选。过高的波前马赫数会导致激波附面层干扰增强,分离起始位置前移,附面层抽吸量增加。而当抽吸位置过于靠前时,可能会导致在变工况条件下,抽吸槽道位于低压区内,此时将会发生射流现象,致使吸附式压气机失稳。鉴于以上因素,本文采用预压缩叶型技术以降低波前马赫数,同时将吸力面抽吸槽道固定在叶型折转段起始位置附近最大厚度位置处,上、下端壁抽吸槽道均沿流向并紧贴叶型吸力面,具体抽吸方案如图3,抽吸槽道出口给定静压。这里需要说明,在许多文献里提出了“最佳抽吸位置”的概念,作者认为其“最佳”的含义只是相对而言,在变工况条件下,激波以及附面层迅速增长的位置都将发生改变,而抽吸槽道的布置是既定的,因此,对吸附式压气机而言,“最佳抽吸位置”应综合考虑设计点以及非设计点处内部流动特点,其最终的确定是一个折中的结果。

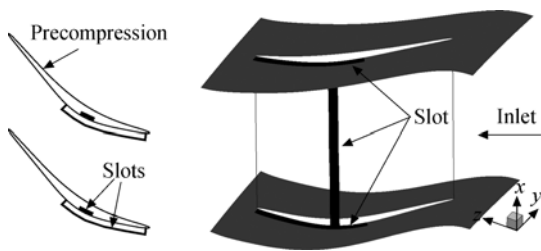


图3 静叶的抽吸方案

Fig. 3 Aspiration scheme for stator

3 计算结果与分析

3.1 变转速特性分析

图4给出了首级变转速吸附式压气机特性曲线,分别选取相对转速(n)为80%,90%,100%以及105%进行研究。本文应用通流效率(以下简称效率)对吸附式压气机的气动性能进行评价,与麻省理工学院结果一致,不包含抽吸引起的熵增或功耗,图中横坐标为当地流量与设计流量的比值。当相对转速发生变化时,抽吸槽道出口背压也重新进行调整以适应工况的变化,以保证每个相对转速下吸附式压气机都能够正常工作,但在特定相对转速下,抽吸槽道位置以及抽吸槽道出口背压是不发生改变的,因此,随着首级抽吸槽道出口背压的提升,抽吸量会相应地增加,本文的结论均在此前提下得出的。从图中可以看出,当相对转速逐渐减小时,首级做功能力降低,但峰值效率以及工作范围逐渐增加,而高相对转速下虽然工作范围以及效率都有所降低,但降低幅度不是很大。这表明虽然首级气动设计以及抽吸方案的制定基于设计转速,但就整体特性而言,其仍然适用部分转速工况。

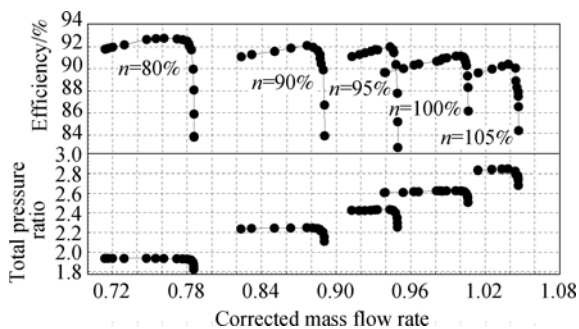


图4 吸附式压气机特性曲线

Fig. 4 Characteristics curves for aspirated compressor

图5所示为各相对转速下峰值效率点处出口效率及总压比展向分布。首级端区流动较为复杂,特别是顶部区域,由于激波、附面层以及泄漏流动之间的相互作用,对动、静叶之间的流动匹配造成一定的影响,导致上端壁附近效率相对较低。从整体来看,效率随相对转速降低不断提升,当相对转速达到80%时,静叶进口马赫数已经大幅度降低,轮毂附近流动状况得到显著的改善,效率获得提升。

图6所示为不同相对转速下峰值效率点处动、静叶内相对马赫数云图。当相对转速提高时,

来流相对马赫数增大,通过应用轮缘收缩并辅以预压缩叶型技术保证了动叶表面附面层基本处于

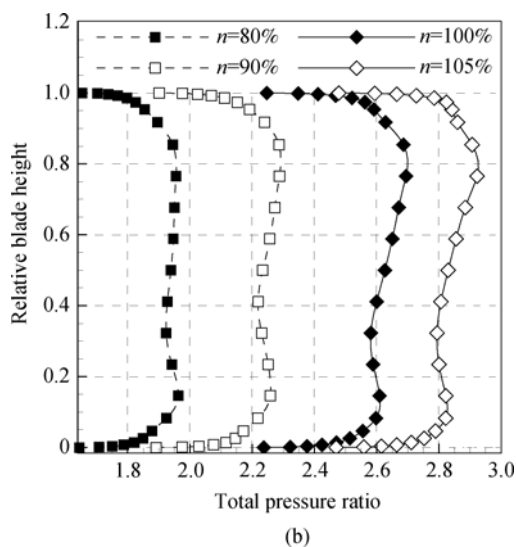
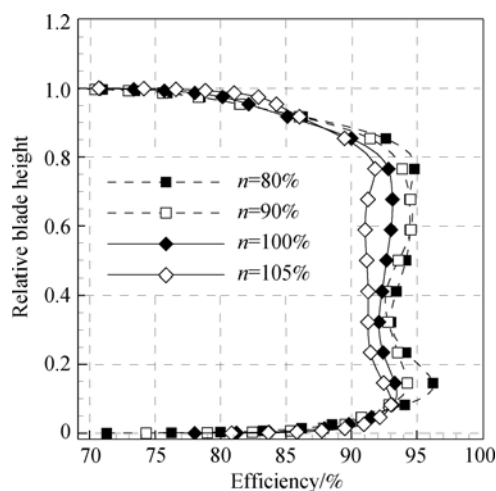


图5 峰值效率点处出口效率及总压比展向分布
Fig. 5 Spanwise distribution of efficiency and total pressure ratio of stage outlet at peak efficiency point

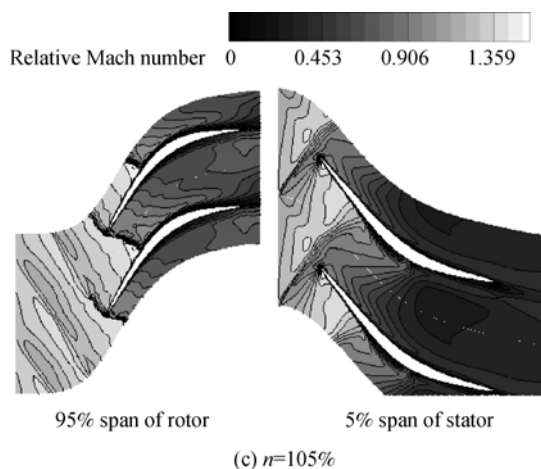
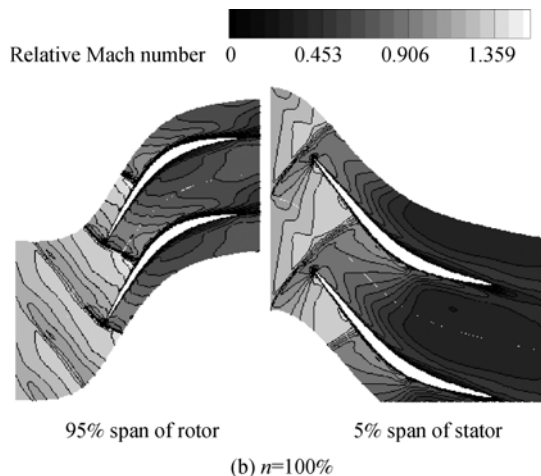
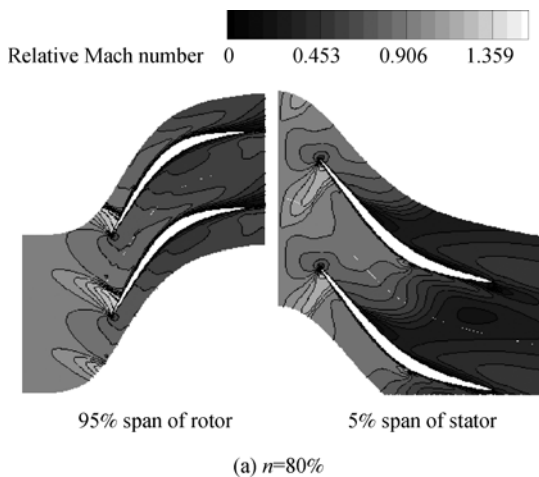


图6 峰值效率点处动、静叶内相对马赫数云图
Fig. 6 Relative Mach number contours of rotor and stator at peak efficiency point

附着状态;当相对转速降低时,来流相对马赫数减小,攻角增加,此时基于低反力度概念设计的高负荷动叶仍可保持流动的高效性.静叶根部附近未出现大尺度的分离流动或经历附面层分离并再附的过程,这表明,在峰值效率点附近,抽吸方案具有较高的普适性.

3.2 设计转速下抽吸敏感性研究

图7所示为设计转速下附面层抽吸量对吸附式压气机气动特性的影响.抽吸量的调节通过同时提升3条抽吸槽道出口背压得以实现,分别在设计抽吸方案(slot_sp+0 kPa)的基础上增加10 kPa以及15 kPa抽吸槽道出口背压(slot_sp+10 kPa和slot_sp+15 kPa).当抽吸槽道出口背压提高时,首级气动性能衰减,总压比降低,单级效率下降,最高效率点向左侧移动,工作范围也大幅度缩减.但在堵塞点附近,首级气动性能基本无变化.从图7(b)中抽吸量随抽吸槽道出口背压的变化趋势中可以发现,在堵塞点附近,由于抽吸槽道

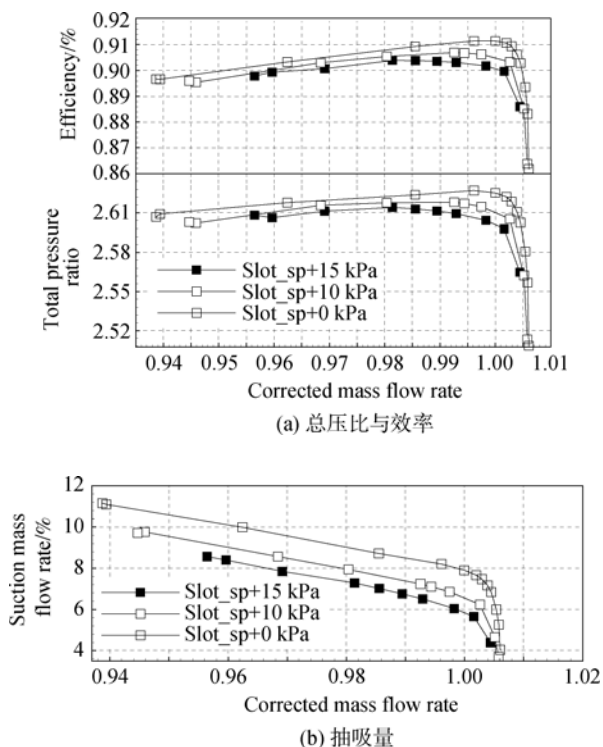


图 7 变抽吸槽道出口背压对吸附式压气机气动性能的影响

Fig. 7 Influence of various outlet pressure of aspiration slots on aerodynamic performance of aspirated compressor

出口背压较低,抽吸槽道仍位于低压区内,不同抽吸方案之间的抽吸量差异很小,因此,堵塞点附近的气动性能变化较小,当首级抽吸槽道出口背压提高时,抽吸量开始增加,不同抽吸方案之间的差异开始变得明显。

表 2 为不同抽吸量方案下,设计点处关键气动参数对比。在设计点处,当抽吸量降低时,动叶气动性能基本未发生变化,首级效率及总压比的降低主要是由静叶内部流动状况变化引起的,当抽吸槽道出口背压提升 15 kPa 时,抽吸量相对于进口流量减小 1.82%,总压损失系数增加 34.58%,效率降低接近 1%,但整体首级效率仍旧较为可观。

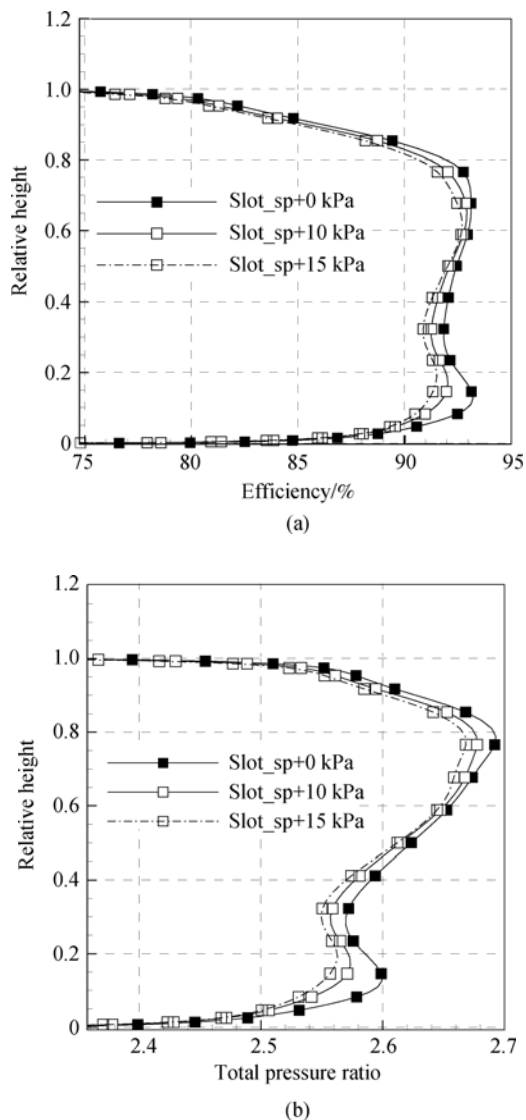
图 8 所示为不同抽吸方案下,设计点处出口主要气动参数展向分布。当抽吸槽道出口背压提升时,主流区内的损失增加幅度较小,气动性能衰退主要集中在两端区,尤其是下端壁附近。结合静叶壁面流谱(图 9,SS 表示吸力面)可知,随着抽吸量的降低,端区回流范围增加,甚至出现了小范围的射流现象,造成了额外的掺混损失,效率降低。此外,上、下端区流动堵塞致使静叶叶栅出口落后角增加,整个叶展范围内气流角分布不均匀,

这对与下一级动叶匹配工作也将造成一定的影响。

表 2 变抽吸量对设计点处气动参数的影响

Table 2 Influence of various aspiration mass flow rate on aerodynamic parameters at design point

参数	抽吸方案		
	Slot_sp +0 kPa	Slot_sp+ 10 kPa	Slot_sp +15 kPa
总压比	2.619	2.605	2.598
效率/%	90.95	90.33	89.97
动叶总压比	2.708	2.708	2.709
动叶效率/%	94.26	94.26	94.26
静叶总压 损失系数	0.0314	0.0414	0.4800
抽吸量/%	7.47	6.24	5.65



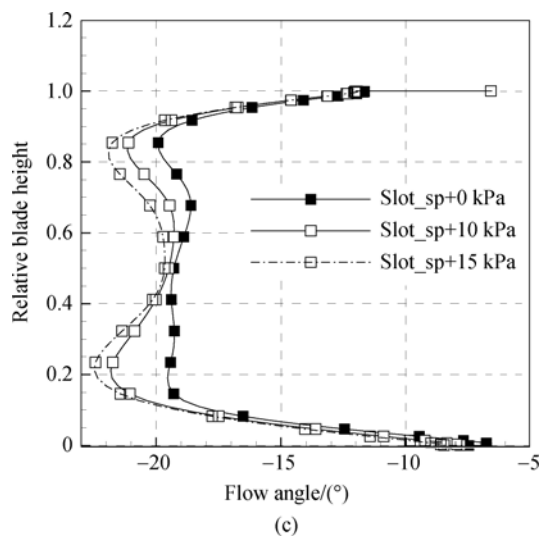
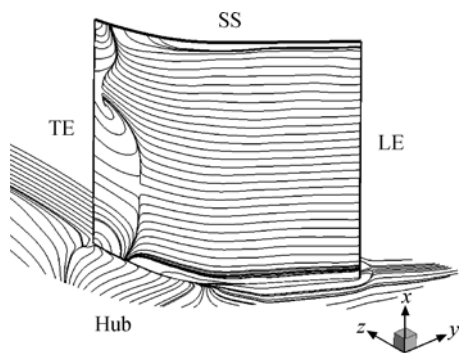


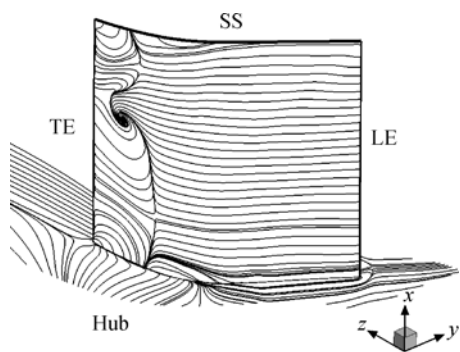
图8 变抽吸量对出口主要气动参数展向分布的影响
Fig. 8 Influence of various aspiration mass flow rate on spanwise distribution of main aerodynamic parameters at outlet

3.3 首级失速原因初步研究

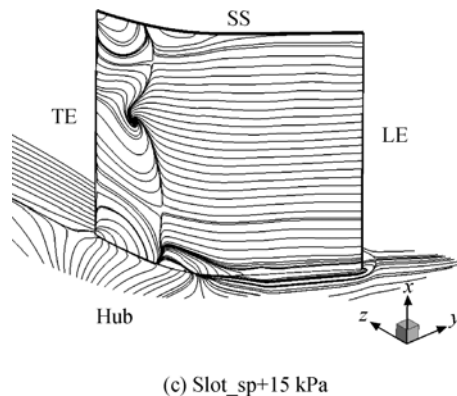
虽然定常计算对失速边界预测的准确性存在一定的局限性,但是通过分析近失速点附近的叶栅内的流场可以初步获得吸附式压气机首级失速的原因.



(a) Slot_sp+0 kPa



(b) Slot_sp+10 kPa



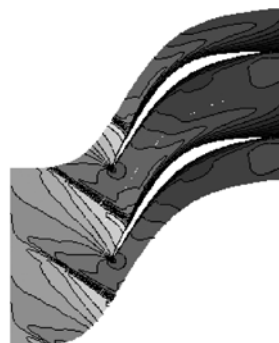
(c) Slot_sp+15 kPa

图9 变抽吸量对静叶壁面流谱的影响

Fig. 9 Influence of various aspiration mass flow rate on flow pattern of stator wall

图10给出了近失速点动叶在相对转速为90%,100%及105%下95%叶高处相对马赫数云图.在近失速点,动叶顶部流动基本为附着状态,结合张龙新前期工作^[13]可知,动叶的工作范围要明显大于整机,这间接说明,首级失速主要由静叶引起.结合近失速点处静叶壁面流谱(图11)可以发现,在近失速点处,由于静叶根部槽道激波被推出流道外,角区分离起始位置提前,此时抽吸槽道

Relative Mach number 0 0.453 0.906 1.359



(a) $n=90\%$

Relative Mach number 0 0.453 0.906 1.359



(b) $n=100\%$

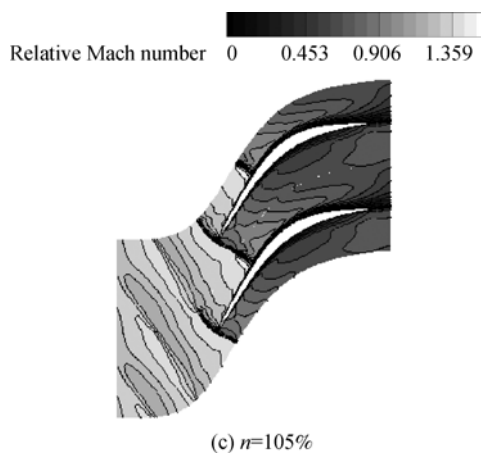


图10 近失速点动叶95%叶高相对马赫数云图

Fig. 10 Relative Mach number contour of rotor for 95% span near stall point

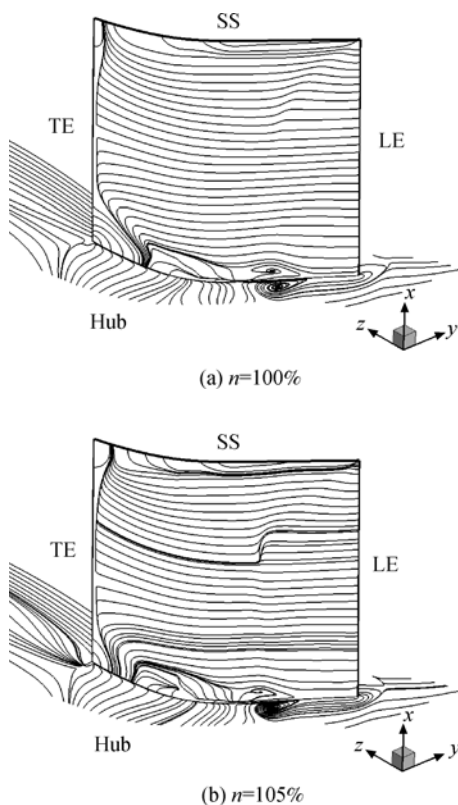


图11 近失速点静叶壁面流谱

Fig. 11 Flow pattern of stator wall near stall point

位置相对靠后,当抽吸槽道出口背压进一步提升时,进口冲角继续增加,在前缘附近吸力面与端壁之间已形成闭式分离泡,此时即使进一步增加附面层抽吸量,也不能够有效地抑制失速的发生.另一方面,由于吸力面表面未发生明显的分离流动,说明在吸力面单条抽吸槽道即可满足设计要求.因此,如果想进一步扩大吸附式压气机的工作范围,应加长端壁抽吸槽道.此时解决的办法可以在

端壁抽吸槽道之前贴近吸力面开设若干附加抽吸装置,并且在前缘附近增设周向抽吸槽道或抽吸孔,当运行工况进一步恶化时,打开附加抽吸装置进行附面层抽吸将会进一步提升吸附式压气机的工作范围.文献[12]应用增设附加抽吸装置的方法解决了部分转速下吸附式压气机的起动问题.

4 结 论

本文以吸附式压气机首级作为研究对象,利用数值模拟的方法对其变工况性能进行了研究,得出了如下结论:

1) 基于低反力度设计概念研制的吸附式压气机的气动设计以及抽吸方案制定虽然基于设计转速,但其在部分转速下仍能满足一定的设计要求,进一步验证了吸附式压气机设计概念的可行性.

2) 设计转速下,抽吸量降低,动叶气动性能基本无变化,吸附式压气机气动性能降低主要是由于吸附式静叶端区流动恶化引起的,其在造成本级流动损失增加的同时,对与下一级动叶匹配工作也将造成一定的影响.

3) 对于本文研究的吸附式压气机,其失速是由静叶端区流动阻塞引起.通过在端壁抽吸槽道前增设附加抽吸装置可进一步扩大吸附式压气机的工作范围.

参考文献:

- [1] Lieblein S, Schwenk F C, Broderick R L. Diffusion factor for estimating losses and limiting blade loadings in axial-flow-compressor blade elements[R]. NACA Technical Report RME53D01, 1953.
- [2] Gümmer V, Wenger U, Kau H P. Using sweep and dihedral to control three-dimensional flow in transonic stators of axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 40-48.
- [3] Takahashi Y, Hamatake H, Katoh Y. Experimental and numerical investigations of endwall flow in a bowed compressor cascade[R]. AIAA-2005-3638, 2005.
- [4] Kerrebrock J L, Drela M, Merchant A A, et al. A family of designs for aspirated compressors[R]. ASME Paper 1998-GT-0445, 1998.
- [5] Merchant A A. Aerodynamic design and performance of aspirated airfoils[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1): 141-148.
- [6] Kerrebrock J L, Epstein A H, Merchant A A, et al. Design and test of an aspirated counter-rotating fan[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 021004. 1-021004. 8.
- [7] 周海, 李秋实, 陆亚钧. 跨音风扇转子叶片抽吸气数值实验

- 探索[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 408-412.
- ZHOU Hai, LI Qishi, LU Yajun. Prospects of numerical analysis of an aspirated transonic fan rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 408-412. (in Chinese)
- [8] 兰发祥. 吸附式压气机设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- LAN Faxiang. Research on design technology of the aspirated compressor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [9] 兰发祥, 周拜豪, 梁德旺, 等. 跨、超声速吸附式压气机平面叶栅试验[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1123-1128.
- LAN Faxiang, ZHOU Baihao, LIANG Dewang, et al. Experimental investigation of transonic and supersonic aspirated compressor cascades[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1123-1128. (in Chinese)
- [10] 刘波, 南向谊, 陈云永, 等. 附面层抽吸对转子激波结构和分离流动的影响[J]. 航空学报, 2008, 29(2): 315-320.
- LIU Bo, NAN Xiangyi, CHEN Yunyong, et al. Effects of BLS on the shockwave structure and separation flow of fan rotor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(2): 315-320. (in Chinese)
- [11] 刘波, 曹志远, 魏巍, 等. 级环境下附面层抽吸对对转压气机性能的影响[J]. 航空动力学报, 2013, 28(4): 885-892.
- LIU Bo, CAO Zhiyuan, WEI Wei, et al. Effects of boundary layer suction on counter-rotating compressor in multi-stage environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(4): 885-892. (in Chinese)
- [12] Merchant A, Kerrebrock J L, Adamczyk J J, et al. Experimental investigation of a high pressure ratio aspirated fan stage[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 43-51.
- [13] 张龙新. 三级高负荷低反动度吸附式压气机设计及相关问题分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- ZHANG Longxin. Design and associated issues of a three-stage highly-loaded low-reaction boundary-layer-suction compressor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] Knapke R D, Turner M G. Unsteady simulations of a counter-rotating aspirated compressor[R]. ASME Paper 2013-GT-95209, 2013.
- [15] Knapke R D, Turner M G, List M G, et al. Time accurate simulations of a counter-rotating aspirated compressor [R]. ASME Paper 2008-GT-50877, 2008.
- [16] Qiang X Q, Wang S T, Lin W C, et al. A new design concept of highly-loaded axial flow compressor by applying boundary layer suction and 3D blade technique[R]. ASME Paper 2008-IMECE-66899, 2008.
- [17] Wang S T, Qiang X Q, Lin W C, et al. A study of parameter selection principle and internal flow mechanism in a multi-stage low-reaction axial flow compressor[R]. ASME Paper 2008-GT-50554, 2008.
- [18] 都昆, 杜鑫, 王松涛. 转静子干涉对跨声速吸附式压气机流场的影响分析[R]. 呼和浩特: 中国工程热物理年会 热机气动热力学与流体机械学术会议, 2013.