

低工况下轴流压气机可转导叶调节规律研究

王萌,王明金,王忠义,孙涛

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:以某型两级跨音速轴流压气机为研究对象,采用实验及数值模拟方法,针对非设计转速下可转导叶调节角度对压气机工作稳定性的作用规律展开研究。首先,通过与实验结果进行对比,验证了数值模拟方法的有效性。其次,对三种不同调节角度下的压气机稳定工作裕度及内部流动机理进行了深入分析。结果表明:随着安装角由正到负调节,效率-流量曲线总体向左移动,压比-流量曲线向左下方移动,当可转导叶调节角度为 -8° 时,压气机喘振裕度由 0° 时的7.71%增加到8.24%。

关键词:轴流压气机;可转导叶;喘振裕度;数值模拟;实验测量

中图分类号:TK474.8⁺1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.09.005

[引用本文格式]王萌,王明金,王忠义,等.低工况下轴流压气机可转导叶调节规律研究[J].热能动力工程,2021,36(9):33-41. WANG Meng, WANG Ming-jin, WANG Zhong-yi, et al. Research on the adjustment law of variable inlet guide vane of axial compressor at off-design condition [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(9): 33-41.

Research on the Adjustment Law of Variable Inlet Guide Vane of Axial Compressor at Off-design Condition

WANG Meng, WANG Ming-jin, WANG Zhong-yi, SUN Tao
(Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: A two-stage transonic axial flow compressor is adopted as the research object. Experimental and numerical simulation methods are used to study the effect of the angle of the inlet guide vane on the working stability of the compressor at off-design speed. Firstly, the validity of the numerical simulation method is verified by comparing with the experimental results. Secondly, the stability working margin and internal flow mechanism of the compressor under three different adjustment angles are analyzed in depth. The results show that as the installation angle is adjusted from positive to negative, the overall efficiency-flow curve moves to the left on the working characteristic map, and the pressure ratio-flow curve moves to the lower left. As the angle of the inlet guide vane is set to -8° , the surge margin of the compressor is increased from 7.71% at 0° to 8.24%.

Key words: axial compressor, inlet guide vane, surge margin, numerical simulation, experimental measurement

引言

随着时代的发展,先进的燃气轮机对压气机的

工作性能提出了更高的要求,对压气机工作的稳定性造成了极大的挑战。为了避免压气机失稳,保证其在不同工况下有充足的喘振裕度,进一步研究压气机扩稳技术是十分必要的。可转导叶法技术

收稿日期:2021-04-14; 修订日期:2021-05-26

基金项目:国家科技重大专项(2017-1-0007-0008)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017-1-0007-0008)

作者简介:王萌(1991-),男,陕西蒲城人,哈尔滨工程大学讲师。

作为一种有效的扩稳方法,近年来得到了快速的发展,通过调节导叶角度可以有效地改善压气机性能,提高非设计点效率,拓宽其稳定工作范围。

近年来,国内外学者针对可转导叶扩稳技术展开了大量研究。Cyrus 等人^[1]对一台低速轴流压气机进行了可转导叶研究,发现改变安装角后各叶排中分离流动和局部堵塞情况随之发生变化,可以拓宽喘振裕度和失速区域范围。Rodgers^[2]研究了带有可调导叶的高速离心压气机。结果表明,尽管在叶片扩压器中的流动损失有所增加,但由于导叶的调节,喘振范围得到了很大扩展,提高了叶轮的工作稳定性。屠仁涌^[3]采用自编程序计算了带有可转导叶的15级轴流压气机,指出导叶转角过大将造成流量范围急剧减小,损失增加,压比和效率值下降。尤其对于负导叶转角,在高转速条件下,喘振和堵塞边界点将很快合拢,导致压气机无法稳定工作。曹志鹏等人^[4]综合自己开的计算程序与导叶角度调节方案,得出了不同转速下的调节规律。结果表明,导叶角度在一定范围内合理调节可以明显减小压气机叶排中的激波强度,降低流动损失,可以对附面层分离起到抑制作用。宫伟等人^[5]通过同时改变导叶安装角的方法,分析了压气机在设计转速和非设计转速下的流动损失情况和喘振裕度,并对效率变化趋势进行了研究,结果表明,导叶和静叶联调规律随着转速的不同而不同,为压气机实际工作的调节规律提供了参考准则。胡晏铭等人^[6]通过实验对三级低速轴流压气机在设计及非设计工况下的导叶、静叶和转速联调规律进行了研究,结果表明,通过优化导叶和静叶安装角的合理匹配,可以改善非设计工况下的压气机性能,并且根据转速和动叶攻角之间的匹配关系,利用动态数据处理技术,实现了导叶和静叶安装角的实时调节功能。廖吉香等人^[7]提出了一种新的优化方法,利用 HARIKA 算法及 Isight 多学科优化设计平台建立了可转导叶联合调节方案的优化设计方法,并采用该方法对某八级轴流压气机进行了研究,优化后非设计转速的喘振边界及低工况流动稳定性得到有效改善。裘浔隽等人^[8]研究了燃气轮机在启动过程中和正常运行工况下的导叶调节规律,在启动过程中导叶的角度要与燃机转速同时变化,在正常工况下,导叶用于控制

排气温度,防止超温,保证燃气轮机安全运行,同时,导叶对降低启停过程中压气机耗功也起到重要作用。刘波等人^[9]利用商业软件 NUMECA 对对转压气机进口导叶在不同弯度条件下的内部流场进行了数值模拟,研究发现,采用可调弯度进口导叶能调节和改善压气机性能和流场结构,可以用于调节转子攻角,使其更接近设计攻角,进而改善压气机性能。

本文在总结前人研究经验的基础上,以某型两级跨音速模化压气机为研究对象,针对压气机进口可转导叶的调节规律展开了数值模拟和实验研究,深入分析了不同可转导叶调节角度下压气机工作特性和动叶表面压力分布的变化规律。

1 数值模拟方法

1.1 几何模型

以某型跨音速两级轴流压气机为研究对象,该型压气机由1列进口导叶、两级交替排列的动叶和静叶以及1列出口导叶构成,其设计转速为16 524 r/min,其他的详细设计参数如表1所示。图1为压气机的几何模型示意图。

表1 2级轴流压气机详细设计参数

Tab. 1 Detailed design parameters of 2 stage axial compressor

参 数	数 值
设计转速/ $r \cdot \min^{-1}$	16 524
进口导叶数	26
一级动叶叶片数	19
一级静叶叶片数	30
二级动叶叶片数	22
二级静叶叶片数	20
出口导叶叶片数	20
叶尖间隙/mm	0.45

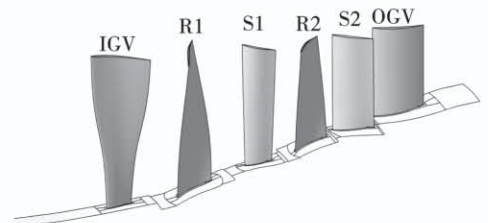


图1 两级轴流压气机几何模型示意图

Fig. 1 Geometric model diagram of two stage axial compressor

1.2 网格划分及无关性验证

采用商业软件 AUTOGRID 对轴流压气机进行网格划分。整个计算域采用 HOH 型结构化网格拓扑结构,叶片进出口及上下流体域采用 H 型网格,叶片近壁面采用 O 型网格,动叶叶顶间隙处采用蝶形网格。通过调节 S1 流面的叶片压力面、吸力面及进出口周向节点数的分布情况来调节网格质量,最终得到的网格划分在单通道上的网格数约为 553 万。图 2 为压气机前缘和尾缘处网格分布示意图。采用 S-A 模型对压气机的内部流动进行模拟,为了保证计算结果的有效性,对近壁面的网格进行了局部加密,加密后的近壁面 y^+ 值最大约为 3.5,整体在 1 左右,能够满足 S-A 模型的计算要求。图 3 为近壁面 y^+ 值的分布情况。

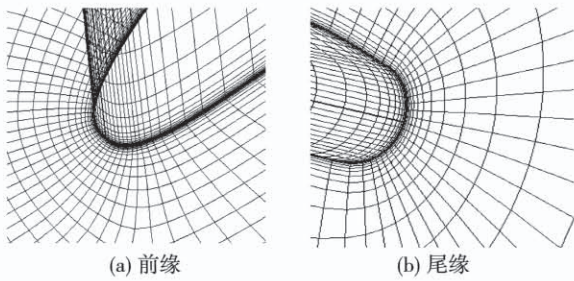


图 2 1 级动叶网格

Fig.2 The rotor grid of first stage

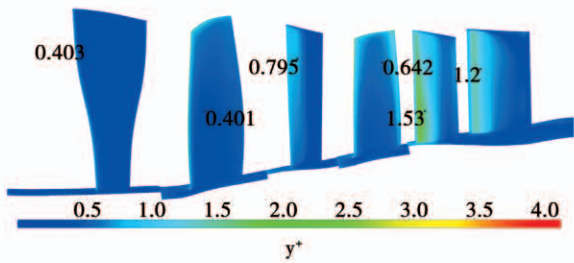


图 3 y^+ 值分布

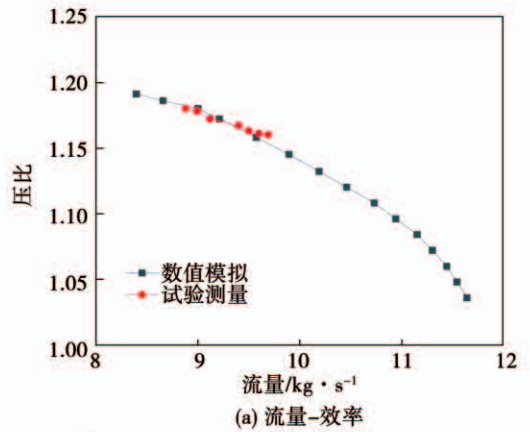
Fig.3 Distribution of y^+

1.3 数值模拟结果验证

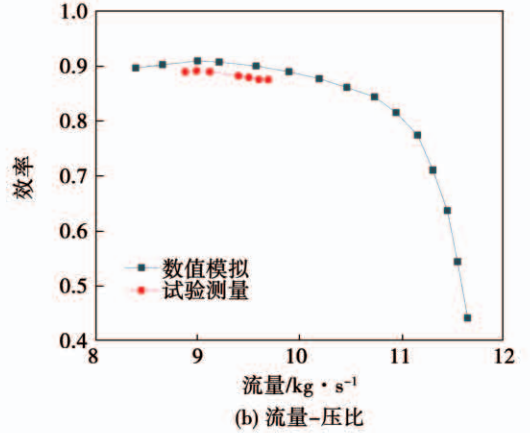
为了验证数值模拟计算结果的有效性,首先给出了在 60% 设计转速下,可转导叶为 -8° 和 0° 时压气机工作特性数值模拟结果与试验结果的对比情况,如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知,实验测量得到的效率和压

比曲线与计算结果趋势一致,但实验所测效率值略低于计算值,所测压比曲线与计算值基本一致,吻合情况较好。当可转导叶调节角度为 -8° 时,在峰值效率点上,计算得到的效率、压比和流量与实验测量结果之间的误差分别为 2.01%,0.17% 和 0.10%。当可转导叶调节角度为 0° 时,计算得到的效率、压比和流量与实验测量结果之间的误差分别为 2.12%,0.50% 和 2.19%。总体来看,两者吻合情况较为良好,误差在合理范围之内,可以验证数值模拟计算的准确性。



(a) 流量-效率



(b) 流量-压比

图 4 -8° 安装角压气机性能曲线

Fig.4 Characteristic curve of compressor at -8° mounting angle

2 实验方法

2.1 导叶调节方法

针对两级轴流压气机在 60% 设计转速下压气机进口可转导叶调节规律进行了研究,通过不断调整导叶安装角,研究压气机工作特性变化规律,来提

高非设计转速下的压气机运行效率和工作稳定性。导叶调节方向如图 6 所示。俯视图中顺时针旋转为正方向调节(前缘向叶片吸力面旋转),逆时针旋转为负方向调节(前缘向叶片压力面旋转),当导叶处于设计安装角度时,定义为 0° 。

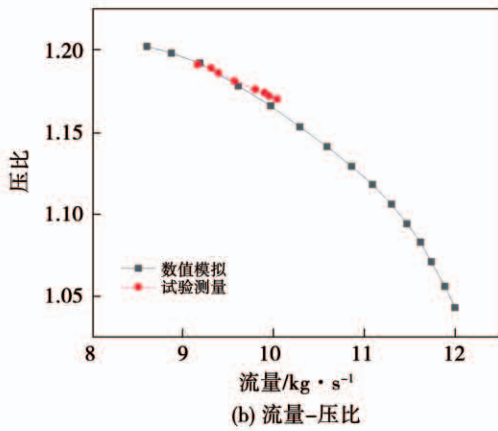
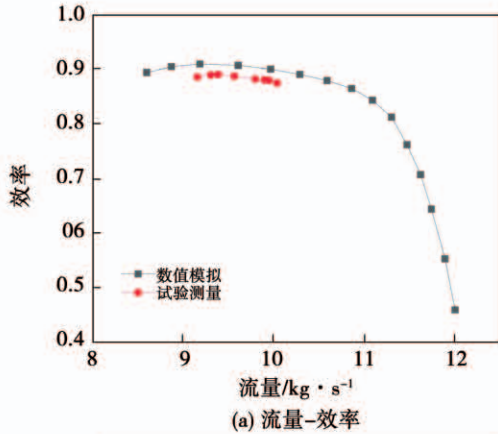


图 5 0° 安装角压气机性能曲线

Fig. 5 Characteristic curve of compressor at 0° mounting angle

2.2 实验原理及测点分布

图 7 为该型两级轴流压气机实验台简图。实验台主要由过渡段和进气稳压箱组成的进气系统、轴流压气机、排气蜗壳和节流阀门组成的排气系统、电机和增速齿轮箱组成的动力系统、常规测量及多普勒激光测速仪(PDA)等测量系统以及滑油冷却等附属系统组成。压气机转速通过变频调速器、电机及齿轮箱来控制。空气经过渡段后进入稳压箱,经稳压箱整流后进入压气机,以保证压气机出口处气流的均匀度和湍流度。气流在压气机中受到压缩后,从排气蜗壳管道流出。

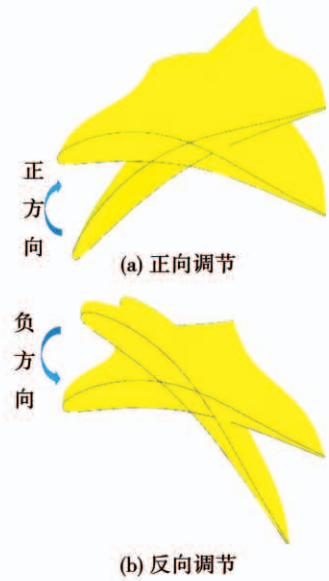


图 6 导叶调节方向

Fig. 6 Adjustment direction of guide vane

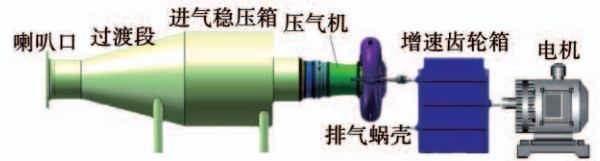


图 7 两级轴流压气机实验台

Fig. 7 Two stage axial compressor test bench

图 8 为实验中测点布置示意图。如图 8 所示,其中 0-0 为压气机进口测量截面,1-1 为一级动叶前测量截面,2-2 为二级动叶前测量截面,3-3 为压气机出口测量截面。

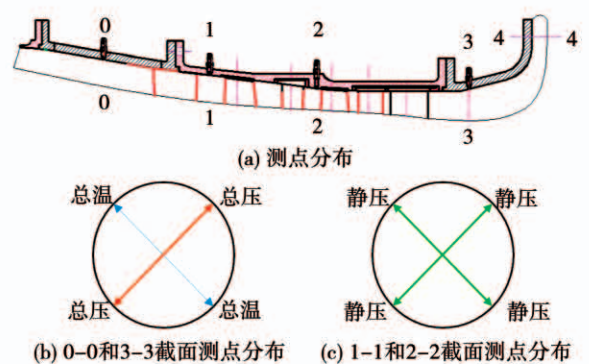


图 8 测点分布示意图

Fig. 8 Distribution of measuring points

3 计算结果分析

在 60% 设计转速下,保持进口条件不变,通过

改变出口背压来改变工况,从而得到压比和效率随流量变化的压气机工作特性曲线。图9为3种不同可转导叶调节角度对应的压气机工作特性曲线。

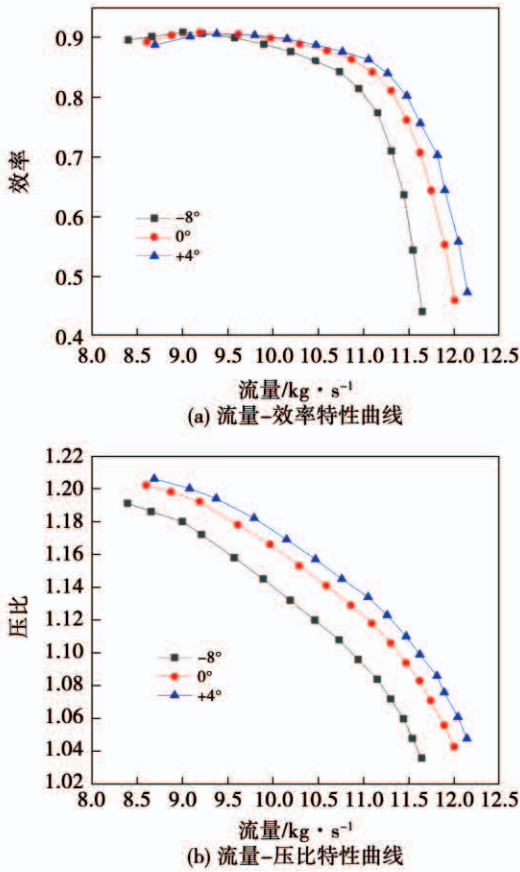


图9 不同导叶安装角时压气机特性曲线

Fig.9 Compressor characteristic curve at different guide vane installation angle

由图9可知,在近失速点附近,效率-流量曲线随着流量的增大而增大到峰值,该阶段曲线变化较为平稳,之后效率开始小幅度下降。当流量增大到一定程度,在近堵塞点附近,压气机工作效率开始急剧下降。压比曲线在全工况范围内随着流量的增大而逐渐减小,曲线变化较为平稳。效率曲线中3个安装角的最高效率点相差不大。当可转导叶在+4°时,工作流量范围为8.69~12.14 kg/s,0°时为8.60~12.0 kg/s,-8°时为8.40~11.64 kg/s,总体工作范围变化不大。随着可转导叶调节角度由正到负慢慢变化,压气机效率特性曲线总体向左移动,压比特性线总体向左下方移动。

随着安装角由正到负的调节,喘振边界明显向

小流量方向偏移,喘振裕度由0°时的7.71%增加到-8°时的8.24%,产生这种现象的原因是随着导叶向负方向地不断调节,导致气流攻角由正攻角逐渐降低为负攻角。因此,叶片对气流的做功能力逐渐下降,使各级叶片的角区分离有所减弱。同时,压气机的压比也相应降低,这与流量-压比特性线的变化趋势也是一致的。

图10为吸力面极限流线和熵分布情况。导叶调节对进口导叶和一级动叶影响较小,流动较为平稳。安装角为+4°时一级静叶上下端壁角区均出现分离泡,在向负方向调节过程中分离范围逐渐减小,直到下端壁角区分离泡消失。

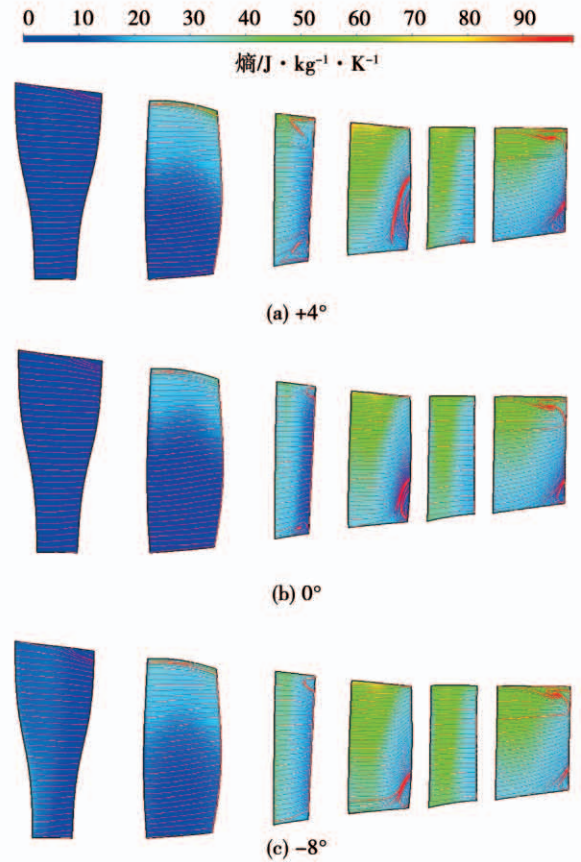


图10 吸力面极限流线和熵

Fig.10 Limiting streamlines and entropy on suction side

此时二级动叶分离区发展到60%叶高,在向负方向调节时,分离区向下端壁方向移动,分离情况有所好转。由于出口导叶对气流有校直作用,上下端壁均出现不同程度分离,并伴随产生旋涡。熵的损

失主要体现在一级动叶顶部和之后各叶排,高熵损失主要集中在叶顶切向速度较高的叶片的顶部和前部,随着导叶向负方向调节,熵损失面积逐渐增大且向下移动,但是角区分离涡有所减弱。

图 11 和图 12 为 3 种不同可转导叶调节角度对应的 10% 和 90% 叶高处叶片表面压力分布。由图可知,导叶调节对叶片表面静压分布有很大影响,可转导叶角度由正向负调节时,全叶高范围内叶片表面压力分布曲线向下移动,表明叶片载荷降低,叶片对气流的增压能力降低,压比降低。在第一级静叶的 90% 叶高处,也就是静叶叶顶附近,吸力面静压在 41% 弦长处降低到最小值后突然以较大斜率陡增。这表明在此处流场产生了较大梯度的突变,随着逆压力梯度的增大,附面层分离现象会越来越严重,吸力面流动情况变得更加复杂。另外,对比图 11 和图 12 还可以看出,随着可转导叶角度的逐渐变化,叶根处叶片表面压力分布的变化量要明显大于叶顶处,这表明叶根处的流动对可转导叶的角度调节更加敏感。

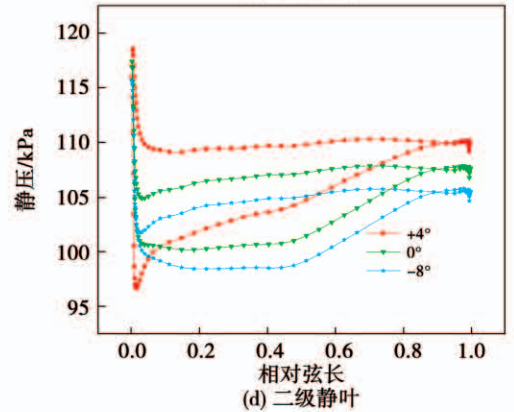
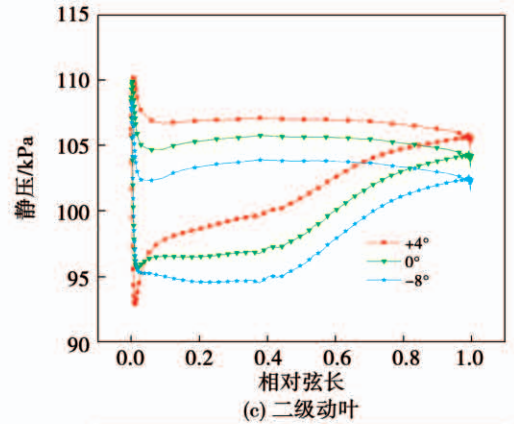
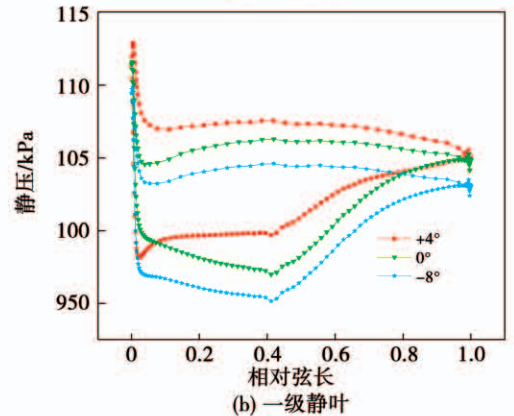
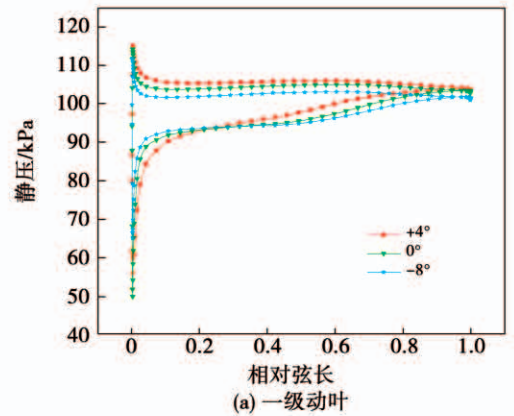
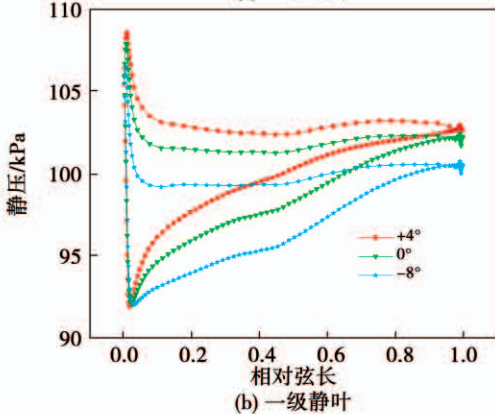
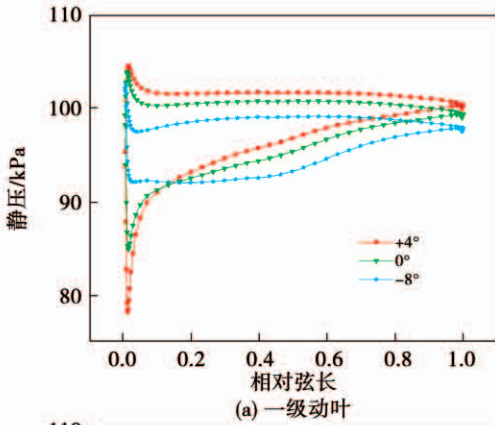


图 11 10% 叶高位置叶表压力分布
Fig. 11 Distribution of pressure on blade surface at 10% span location



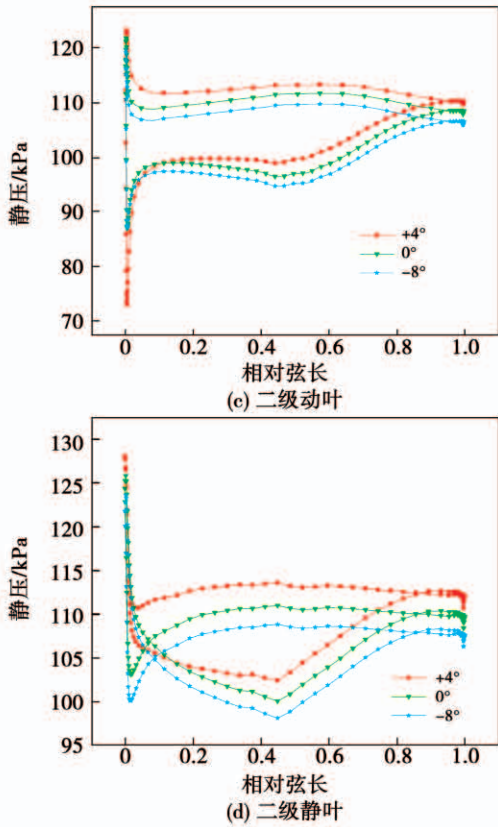


图 12 90%叶高位置叶表压力分布

Fig. 12 Distribution of pressure on blade surface at 90% span location

图 13 为各叶排的进口气流角曲线。对于一级动叶,安装角在 +4°时从叶根到叶顶均处于约 9°的较大正攻角状态。在 0°时正攻角约为 6°,其吸力面极易发生气流分离,导致效率下降,流动失稳。在 -8°时两条曲线吻合情况较好,气流攻角接近 0°,这时吸力面的流动情况较为平稳。1 级静叶进口气流角曲线与几何进口角曲线吻合情况较差,只有在 60% 叶高处相对吻合。安装角在 +4°时严重偏离设计攻角,只有在 -8°时相对接近几何进口角曲线,在叶根处于约 3°正攻角,叶顶处于约 7°负攻角状态,这也是一级静叶中流动情况较差的根本原因。二级动叶 3 条进口气流角曲线基本与几何进口角曲线重合,吻合情况较好,在叶根处稍有区别,在 -8°时处于较小的负攻角状态,可以在一定程度上抑制吸力面的附面层分离。二级静叶进口处气流角曲线与几何进口角曲线吻合情况较差,安装角在 +4°时严重偏离设计攻角,在 40% 叶高以下与可转导叶为 0°和 -8°的情况吻合较好,气流处于较小的负攻角状态。在 80% 叶高以上处于约 7°负攻角状态,过大的负攻

角易引起叶片表面附面层分离,造成流动失稳。

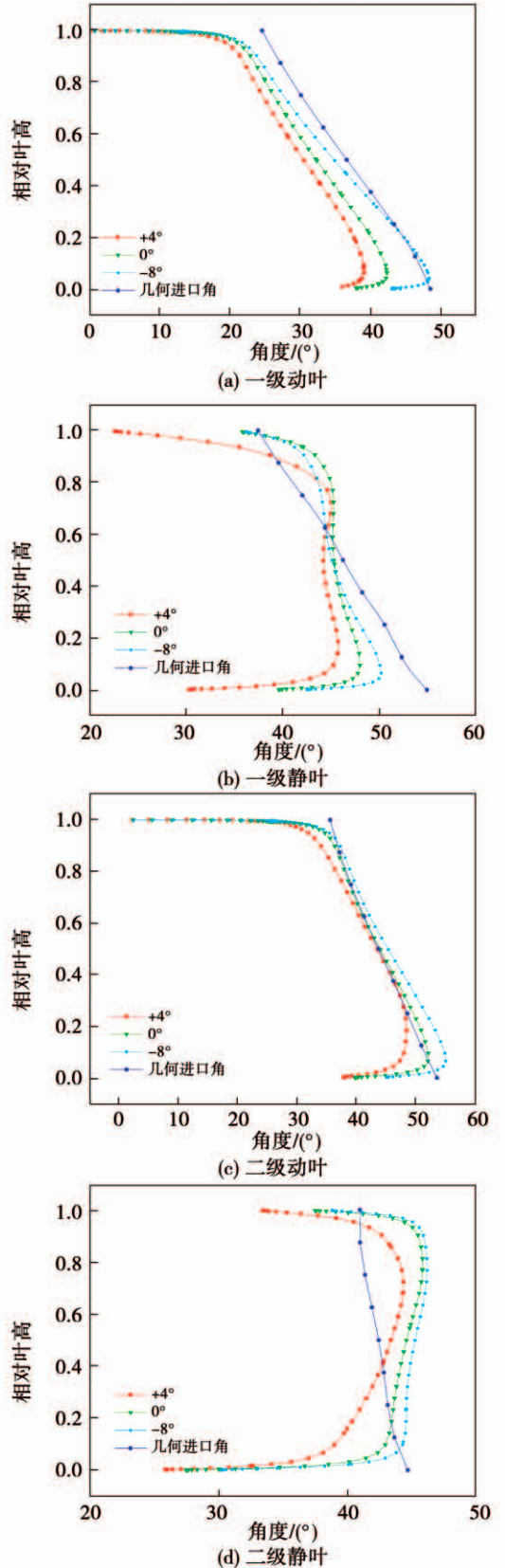


图 13 各叶排进口气流角

Fig. 13 Inlet flow angle of each row

综上所述,可转导叶角度的调节对各叶排流动均有一定影响,当可转导叶调节角度为 -8° 时,第一级动叶和静叶中的气流攻角要明显好于其他两种情况。虽然在二级静叶叶顶处会造成较大的负攻角,但是其他两种情况下也会在二级静叶进口处产生较大的负攻角。因此,综合来看,可转导叶安装角为 -8° 时压气机的稳定性要高于其他两种情况。

图14为叶顶(90%叶高处)相对马赫数分布图。当可转导叶为 $+4^\circ$ 时,一级动叶入口气流攻角较大,导致吸力面附面层较厚。但从矢量图看,附面层并未发生分离,一级静叶和出口导叶尾缘产生明显尾迹,且分离流动较为剧烈,流动损失较大。随着导叶向负方向调节,气流攻角逐渐降低,第一级动叶吸力面附面层明显减弱,形成的尾迹区域也有所减小,分离现象明显减弱,流动稳定性有一定增加。

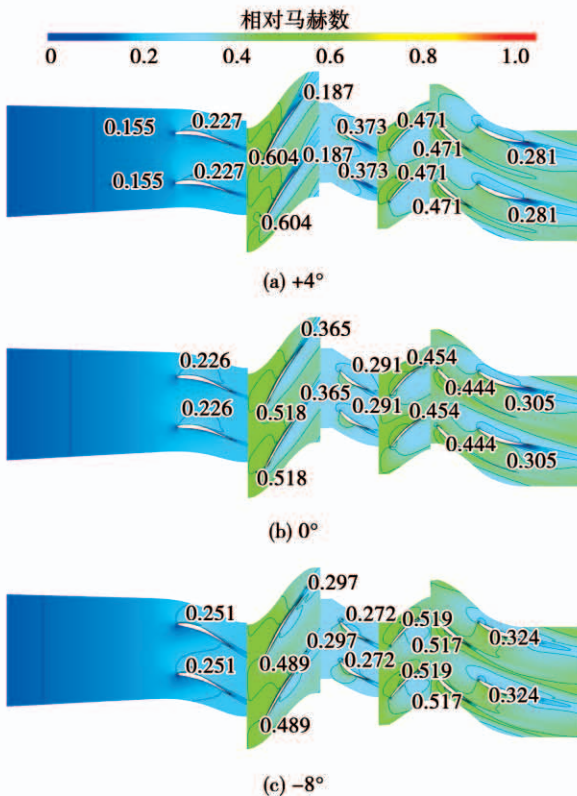


图14 90%叶高位置相对马赫数分布

Fig. 14 Distribution of relative Mach number at 0.9 span location

4 结论

以某型两级跨音速轴流压气机为研究对象,采

用商业软件 NUMECA 计算出该型轴流压气机在60%设计转速下可转导叶的调节规律,并通过实验方法进行了验证。最后,绘制出了3种导叶调节角度下的压气机性能曲线,同时对压气机内部流场进行了分析。得到结论:

(1) 随着可转导叶调节角度从 $+4^\circ$ 向 -8° 逐渐转动,压气机工作特性曲线的整体趋势基本保持一致,流量-效率特性曲线整体向左偏移,而且最高效率点处的压气机工作效率相差不大,流量-压比特性曲线整体向左下方逐渐偏移。

(2) 随着可转导叶角度由 0° 逐渐降低到 -8° ,压气机喘振裕度由7.71%增加到8.24%,表明压气机喘振边界明显向小流量方向移动。造成这种现象的原因在于随着导叶向负方向的不断调节,气流攻角逐渐降低,叶片对气流的做功能力下降,使得各级叶片的角区分离有所减弱。同时,压气机的压比也相应地有所降低。

参考文献:

- [1] CYRUS V. Aerodynamic performance of an axial compressor stage with variable rotor blades and variable inlet guide vanes [C]// ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, 1998.
- [2] RODGERS C. Centrifugal compressor inlet guide vanes for increased surge margin [J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113 (4): 696-702.
- [3] 屠仁涌. 可转导叶轴流压气机的变工况特性估算[J]. 上海交通大学学报, 1985(4): 53-60, 126.
TU Ren-yong. Off-design performance estimation of axial compressor with variable guide vane geometry [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1985(4): 53-60, 126.
- [4] 曹志鹏, 刘波, 丁伟. 静叶角度调节对组合压气机性能优化机理[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 878-881.
CAO Zhi-peng, LIU Bo, DING Wei. Stator setting angles adjustment on performance improvement of axial-centrifugal compressor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 878-881.
- [5] 宫伟, 张宏武, 聂超群. 三级轴流压气机变工况条件下导叶/静叶和转速联动的调节规律[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1122-1128.
GONG Wei, ZHANG Hong-wu, NIE Chao-qun. Investigation on the aerodynamic adjustment between inlet guide-vane, stator, and oper-

- ating speed of three-stage axial compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5): 1122 - 1128.
- [6] 胡晏铭, 聂超群. 轴流压气机变工况导叶/静叶/转速联调规律探索[J]. 中国科学: 技术科学, 2010(7): 765 - 771.
HU Yan-ming, NIE Chao-qun. Exploration of combined adjustment laws about IGV, stator and rotational speed in off-design conditions in an axial compressor [J]. Scientia Sinica Technologica, 2010 (7): 765 - 771.
- [7] 廖吉香, 姜 斌, 吕从鹏, 等. 多级轴流压气机多排可转导/静叶联合调节规律研究[J]. 推进技术, 2017, 38(2): 334 - 340.
LIAO Ji-xiang, JIANG Bin, LYU Cong-peng, et al. Numerical optimization of combined adjustment of multi-row variable inlet guide vane and stators in a multistage axial-flow compressor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2): 334 - 340.
- [8] 裘浔隽, 张 君. 燃气轮机进口可转导叶的控制规律分析[J]. 能源研究与利用, 2014(5): 30 - 32.
QIU Xun-jun, ZHANG Jun, Analysis of the inlet guide vane regulation law of gas turbine [J]. Energy Research & Utilization, 2014 (5): 30 - 32.
- [9] 刘 波, 张国臣, 巫骁雄, 等. 可调弯度进口导叶在对转压气机中的应用[J]. 航空动力学报, 2015, 30(5): 1184 - 1191.
LIU Bo, ZHANG Guo-chen, WU Xiao-xiong, et al. Application of variable-camber inlet guide vanes in counter-rotating compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(5): 1184 - 1191.

(刘 颖 编辑)

(上接第 32 页)

- [10] 张晨凯, 秦永明, 欧 平, 等. 跨声速压气机转子缩尺效应的数值研究[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(S1): 101 - 108.
ZHANG Chen-kai, QIN Yong-ming, OU Ping, et al. Numerical study on the rotor scale effect of transonic compressor [J]. Mechanical Science and Technology, 2017. 36(S1): 101 - 108.
- [11] KIM T G, JUNG Y J, JUNG Y, et al. Effects of low reynolds numbers on performance of a one-stage axial compressor [J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2015, 58(5): 280 - 288.
- [12] 邹滋祥. 相似理论在叶轮机械模型研究中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
ZOU Zi-xiang. Application of similarity theory in the research of impeller mechanical model [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [13] MOODY L F. Friction factors for pipe flow [J]. Trans. ASME, 1944, 66: 671 - 684.
- [14] PFLEIDERER C, PETERMAN N. Strömungsmaschinen [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [15] DIETMANN F, CASEY M V. The effects of reynolds number and roughness on compressor performance [C] // 10 th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics Thermodynamics. EUROPEAN TURBOMACHINERY SOCIETY, 2013.

(丛 敏 编辑)