轴流压气机内导叶/转子干涉对转子流场的影响

弓志强 陆亚钧 李志平 李茂义

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室，北京 100083)

摘 要：叶轮机械内的转静干涉现象多年来一直是一个研究的热点，然而现有的对于转静干涉的研究多局限于对流动现象的描述，缺乏理论指导，因此无法在叶轮机械的设计体系中包含这一非常重要的非定常流动现象，限制了叶轮机械性能的进一步提升. 利用流动稳定性及感受性理论来指导对这一问题的研究，能够找到利用这一现象提升叶轮机性能的规律. 对于一台单级低速轴流压气机内的导叶/转子干涉现象进行了实验研究. 利用二维粒子图像速度仪测量得到了导叶/转子干涉的定量流动细节，及其对于转子流场的影响. 结果表明，转子流场在定常来流条件下也表现出显著的非定常性. 在引入导叶/转子干涉之后，转子流场结构发生显著变化. 动叶尾迹强度明显减弱，叶背流动分离得到抑制，叶尖泄漏涡也得到了周期性的抑制. 除了导叶尾迹对动叶流场的干涉作用以及气流角的周期性变化以外，动叶非定常流动对于不同的导叶/动叶干涉激励频率的不同响应是引起压气机性能变化的主要原因.

关 键 词：叶轮机械；轴流压气机；流动可视化；非定常流动

中图分类号：V 231.3

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)01-0032-06

Impact of IGV/rotor interaction on rotor flow field in an axial compressor

Gong Zhiqiang Lu Yajun Li Zhiping Li Maoyi

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The IGV/rotor interaction phenomenon in turbomachinery has been research focuses for years, but until now such researches have been restricted to qualitative description of flow phenomenon without theory instructions. So this very important unsteady phenomenon can not be included in turbomachinery design regime to further improve turbomachinery performance. By the theory of flow instability and receptivity, the rule of using this phenomenon to improve turbomachinery performance can be found. The IGV/rotor interaction phenomenon in a one stage low speed axial compressor was investigated experimentally. A 2D digital particle image velocimetry was used to acquire the quantitative flow field structure around the rotor with and without IGV. The rotor flow is evidently unsteady even under steady flow condition. With IGV/rotor interaction, the rotor flow field was changed significantly. The intensity of rotor wakes was reduced, flow separation on rotor suction side was suppressed and the tip leakage flow was suppressed periodically. Besides IGV wake interaction and periodic variation in flow angle, different response of the rotor unsteady flow to different unsteady IGV/rotor excitation frequency was decided to be the most important reason for the compressor performance changes.

Key words: turbomachinery; compressors-axial flow; flow visualization; unsteady flow

轴流压气机内的转静干涉现象多年来一直受到研究人员的关注，因为这一现象会对压气机的噪声、结构强度和气动性能产生较大的影响.

对于转静干涉对轴流压气机气动性能的影响

收稿日期：2006-01-13

作者简介：弓志强(1980—)，男，山西阳泉人，博士生，gzq@sjp.buaa.edu.cn.

的研究,最早来自于 Smith[1]. 他在研究中发现转静之间的轴向间距对于轴流压气机的气动性能有显著影响. 对于转静之间轴向间距的研究构成了转静干涉对于压气机性能影响研究的一个方面. 另一个方面是转子和静子之间的相对旋转对于压气机性能的影响的研究[2-3].

到目前为止,关于转静之间的相对旋转对于轴流压气机性能影响的研究存在一个很大的局限,就是都无法预测转静干涉所能带来的气动收益,从而无法在压气机设计环节中充分利用转静干涉现象. 事实上这一方面的研究可以借鉴外流中关于流动稳定性和感受性的研究[4-6]. 研究证明,通过施加适当的非定常激励,可以控制剪切层的非定常漩涡流动,改善流场结构,获得气动性能的提升.

本文研究内容与以往对于转静干涉的研究最大不同之处就在于,将转静干涉作为一个非定常的激励机制,试图通过合理利用这一机制,来改善下游叶片非定常绕流的流场结构,实现压气机气动性能的提升. 相关的实验研究工作在一台单级低速轴流压气机上展开. 导叶与转子的干涉及其对于动叶绕流流场结构的影响是主要研究内容.

1　单级低速轴流压气机特性

在本课题组之前的实验中已经通过改变导叶数目得到了压气机性能与导叶数目之间的关系,发现在某些导叶数下压气机性能获得较大提升[7]. 图 1 显示了导叶后单级压气机的失速裕度相对于基准状态的增量 ΔS 随着导叶数目 Z_{IGV} 变化的情况. 其中基准状态为 3 片导叶状态,此时 3 片导叶起支撑机匣的作用.

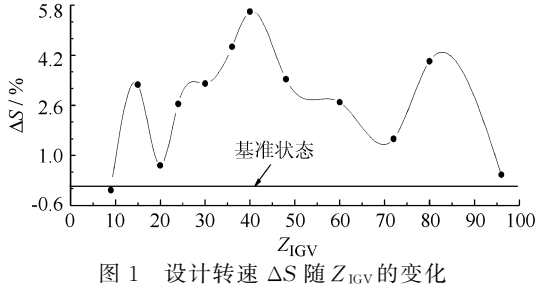


图 1　设计转速 ΔS 随 Z_{IGV} 的变化

失速裕度 S 按照公式(1)计算:

$$S=\left(\frac{\Delta P_s^*/Q_s}{\Delta P_0^*/Q_0}-1\right)\times 100\% \qquad (1)$$

式中,ΔP^* 表示通过单级压气机的总压升,Pa;Q 表示体积流量,m^3/s;下标 s 和 0 分别表示近失速点工况和设计工况.

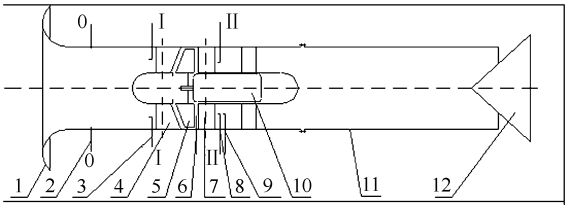
从图 1 可以看到压气机性能随导叶数目变化的曲线非常复杂,在导叶数目为 40 片和 80 片时,失速裕度出现 2 个极大值,而在 20 片时出现一个极小值. 总压升和效率的变化也具有相似的规律. 这一性能的变化是以往关于转静干涉的研究所无法解释的.

为了获得轴流压气机中转静干涉的真实流场结构,并从流动机理上解释上述实验结果,本文采用二维粒子图像测速仪 PIV(Particle Image Velocimetry)结合锁相技术作为研究流场结构的主要测量手段. 粒子图像测速仪具有同时测量一个平面内各点瞬时流动速度的能力,已经被证明非常适合于叶轮机内复杂流场结构的测量[8-10].

2　实验设备

2.1　单级低速轴流压气机实验台

图 2 为该单级低速轴流压气机实验台的结构简图. 实验段为一台单级轴流压气机,其上游有一排可以在很大范围内调整叶片数的导流叶片. 导流叶片数调整范围从 3 片到 96 片. 转子叶片为 19 片,静子叶片为 13 片. 导叶与转子之间轴向间隙约为 5 mm,转子与静子之间轴向间隙约为 4 mm. 转子叶片高度为 $h=56$ mm,叶尖间隙为 0.25 mm. 设计转速为 3 000 r/min,设计流量为 2.4 m^3/s,设计压升为 1 500 Pa,设计点效率为 85%,叶尖切线速度为 70.69 m/s.



1—集流器;2—流量测孔;3—进口总压梳;4—进口导叶;5—转子;6—动态压力传感器;7—静子;8—出口总压梳;9—出口总压耙;10—交流电机;11—后筒;12—堵锥.

图 2　低速轴流压气机实验台结构

2.2　二维粒子图像测速仪

此实验所使用的二维粒子图像测速仪为 TSI 公司生产. 主要组成部分为一台脉冲式双腔 Nd:YAG 激光器,高分辨率 CCD 相机,同步器和图像传输设备.

激光器的工作频率为 10 Hz,激光波长为 532 nm. 单个脉冲宽度为 8 ns,最大脉冲能量为 200 mJ,2 个脉冲之间的时间间隔从 0.200～100 ms 可调. 所使用的相机为 PowerView Plus630059 CCD 相机,提供高达 2 048×2 048 像

素的分辨率和12位的数字图像,最大采样频率为15 Hz.同步器用于管理激光脉冲的发射和拍照的同步进行.

为了实现相位锁定测量,以研究流场在导叶/转子干涉过程中随时间的变化,将一个轴编码器连接在转子轴上.轴编码器每旋转一周输出一个脉冲信号,这个信号被送往同步器,在测量时设定不同的延迟时间就可以实现随时间变化的锁相测量.

2.3 测量光路布置

粒子图像测速仪测量光路如图3所示.

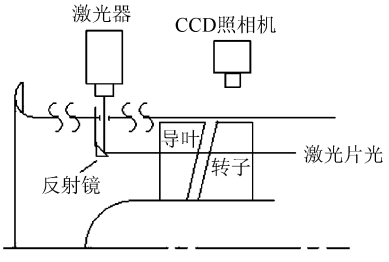


图3 粒子图像测速仪实验光路

激光器产生的片光通过一个反射镜从实验段的上游引入实验台.片光面垂直于径向,则测量的流场平面也垂直于径向.激光由上游向下游传播,只能照亮转子叶片的叶背区域,因此本实验中只能测量动叶叶背一侧的流场.反光镜尺寸较小,约10 mm×40 mm,距离转子前缘约500 mm,对于流场的影响不大.反光镜的径向位置可以调节,从而能够改变片光的径向位置,实现对于沿动叶叶高不同位置流场的测量.转子机匣由有机玻璃制成,便于相机从实验段外部拍摄流场.

2.4 示踪粒子撒播

示踪粒子的质量对于粒子图像测速仪的测量结果具有至关重要的影响.粒子的质量包括:对于流动的跟随性,在测量区域内的浓度和均匀程度.

本实验利用熏香产生的烟作为示踪粒子.该粒子为平均直径1 μm的球体,对流动的跟随性比较好.

2.5 数据采集及处理

在测量的每一个工况下,都采集了连续的40对粒子图像照片,采样频率为5 Hz,两帧图片之间的时间间隔为5 μs.然后利用Insight3.3的后处理功能对每一对照片进行互相关分析,得到40个瞬时速度分布.进行互相关分析时,首先要将整个测量范围划分为很多小的查问区,其尺寸为64×64像素,查问区相互之间重叠50%.由于本实验中相机的分辨率为2 048×2 048像素,因此测得的速度矢量个数为4 096个,速度测量的空间分辨率为32个像素.

每一个工况下对40个瞬时速度场进行总体平均得到锁相平均速度场.通过对速度场的进一步计算可以得到流场的涡量和气流角分布以及湍流统计信息等信息.

3 实验方案

为了孤立地研究导叶/转子干涉对于动叶绕流流场结构的影响,在实验中将静子向下游移动,转子与静子之间的轴向距离达到约80 mm,基本可以排除静子对转子的势流干扰.

首先测量了3片导叶时动叶流场,作为基准状态.此时转子可以视为孤立转子,来流条件基本上是定常的.然后测量40片导叶时的转子流场,与基准状态进行比较就可以得到导叶/转子干涉对于动叶流场结构的影响.

从图2可以看出,85%转速时40导叶相对于基准状态的性能提升最明显,因此在流场结构测量实验中采用85%设计转速.实验在3个流量下进行,体积流量分别为Q=2.07 m^3/s、1.75 m^3/s和1.67 m^3/s.其中最大流量接近于基准状态的最大效率点,中间流量接近于基准状态的失速点,在最小流量下基准状态已经进入旋转失速状态,而40导叶此时还没有失速.

利用粒子图像测速仪测量了沿叶高方向分别距叶根20%,50%和80%3个截面的流场结构.在这3个截面的测量面积分别为:66.17 mm×66.17 mm,59.25 mm×59.25 mm和55.9 mm×55.9 mm.因此在这3个截面速度测量的空间分辨率分别为:1.03 mm,0.93 mm和0.87 mm.

对于40导叶情况,测量了一片动叶相对于导叶排处于3个不同周向位置时的流场.这3个周向位置分别称作相位1,2,3.其具体位置如图4所示.图中x表示轴向来流方向,y表示转子旋转的反方向.实验中发现导叶数太多挡住了激光片光,必须拆掉一片导叶,其位置也显示在图4中,

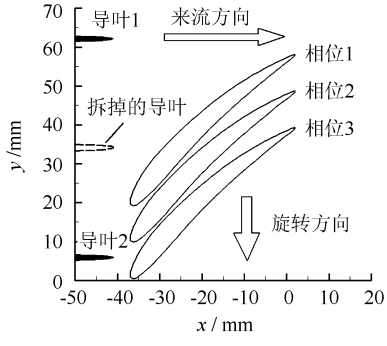


图4 转子相对于导叶的3个周向位置

因此实际实验中导叶数为 39 片.由于导叶之间的距离不变,拆掉一片导叶并不会改变导叶扫过转子的频率,所以对流场影响不会很大.

4　动叶流场结构测量结果

4.1　定常来流条件下动叶流动的非定常性

图 5 所示为基准状态下 50%叶高位置 40 个瞬时速度场的标准差分布,$Q=1.67\ \mathrm{m^3/s}$.图中速度的标准差 σ 利用叶尖切线速度 V_t 进行了无量纲化.轴向距离 x 和切向距离 y 都由动叶的轴向弦长 C_x 进行了无量纲化.可以看到即使在没有导叶和静叶干扰的定常流动条件下,动叶流动也具有明显的非定常性,且非定常流动区域主要集中在叶背附近和尾迹区内.图中叶片周围的空白区域是由于固壁反光强烈而无法测量的区域,这一问题在 39 片导叶方案中得到了一定的解决.

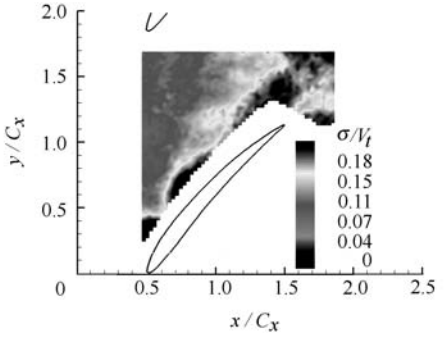


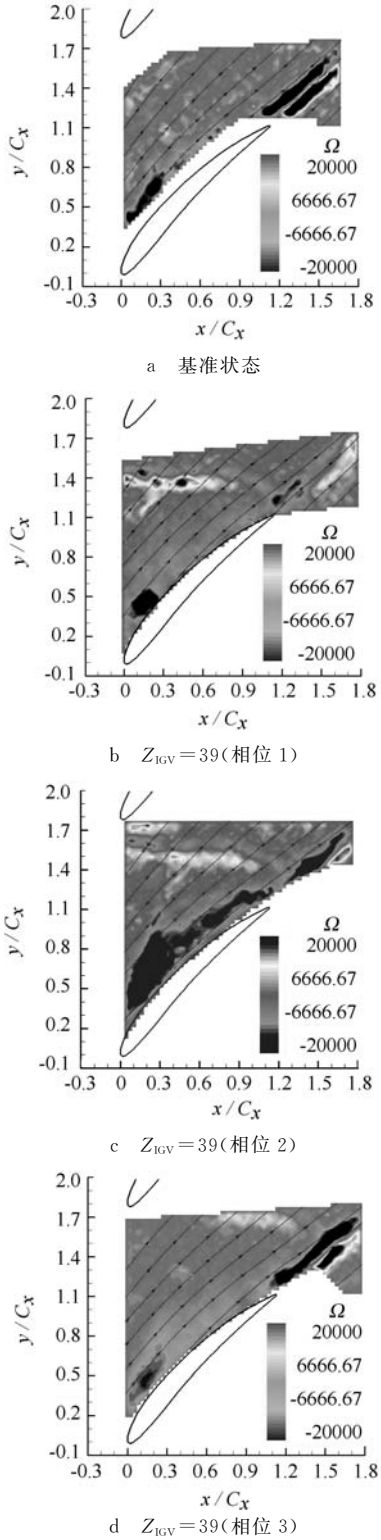
图 5　基准状态 50%叶高速度标准差分布

4.2　导叶/转子干涉对动叶流场结构的影响

图 6 显示 20%叶高锁相平均涡量 $\Omega,\mathrm{s^{-1}}$.引入导叶/转子干涉之后,如图 6b～图 6d 所示,导叶尾迹的干涉作用使得动叶尾迹发生弯曲,且涡量明显减弱.导叶相对于转子处于不同相位时,流场也不相同.当动叶位于相位 1 时,导叶尾迹正好与动叶尾迹相交于动叶尾缘附近,此时动叶尾迹最弱;随着动叶的转动,导叶尾迹在相位 2 和相位 3 逐渐向下游移动,对于动叶尾迹的干涉作用也逐渐减弱,动叶尾迹强度逐渐恢复.

图 7 显示了锁相平均气流角 β,rad 的分布.在基准情况下,转子进口的气流角在栅距方向上是比较均匀的.导叶数目为 39 片时,导叶所对应的位置出现一个明显的大气流角的区域,沿着动叶旋转的反方向移动,这是由导叶尾迹的速度亏损造成的.

图 8 显示的是 50%叶高处转子流道中锁相平均轴向速度 U,m/s 的分布.在小流量工况下,动叶叶背附近容易发生流动分离,使得叶背一侧流速较低.从图 8 可以看到,在相同流量下,39 片



a　基准状态

b　$Z_{IGV}=39$(相位 1)

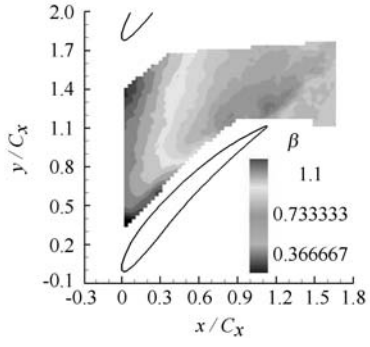
c　$Z_{IGV}=39$(相位 2)

d　$Z_{IGV}=39$(相位 3)

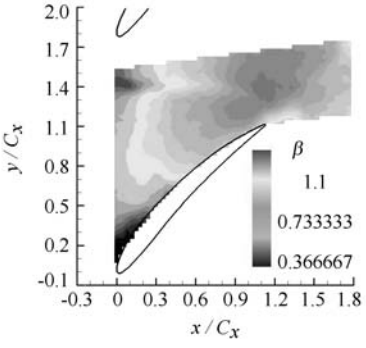
图 6　20%叶高锁相 Ω 分布($Q=2.07\ \mathrm{m^3/s}$)

导叶条件下动叶叶背附近的气流轴向速度显著增加.在 20%和 80%叶高,流场也有相同的变化.这就意味着导叶转子干涉对于叶背的流动分离有抑制作用,减少了对流道的堵塞.

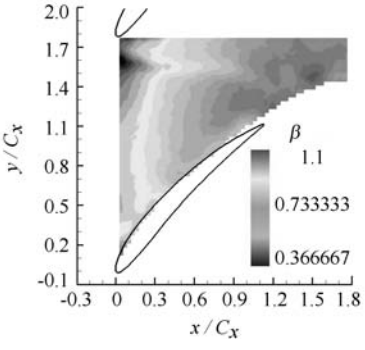
80%叶高流场结构的测量结果与 50%和 20%叶高显示出很大的不同.图 9 所示为 80%叶高锁相平均涡量分布,$Q=1.75\ \mathrm{m^3/s}$.如图 9a 所



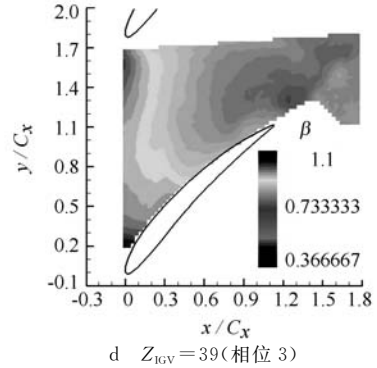
a 基准状态



b $Z_{IGV}=39$(相位 1)

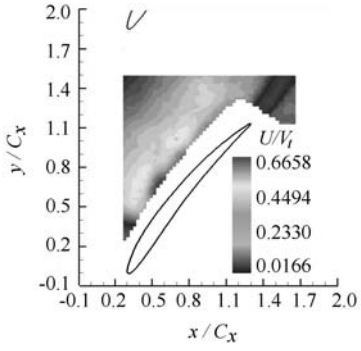


c $Z_{IGV}=39$(相位 2)

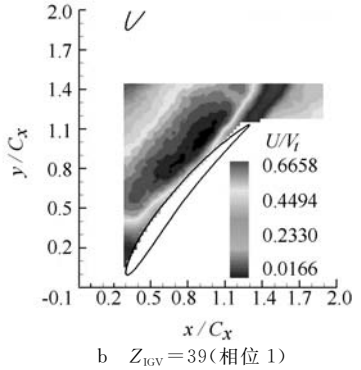


d $Z_{IGV}=39$(相位 3)

图 7 20%叶高锁相 β 分布($Q=2.07\ m^3/s$)

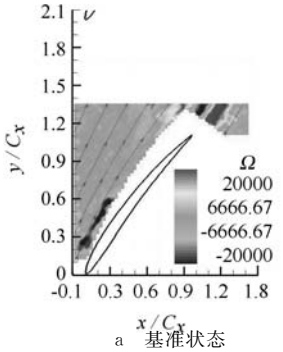


a 基准状态

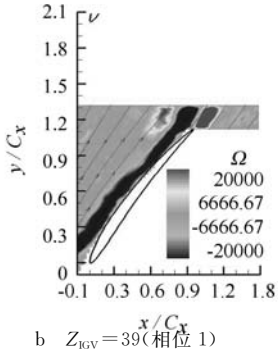


b $Z_{IGV}=39$(相位 1)

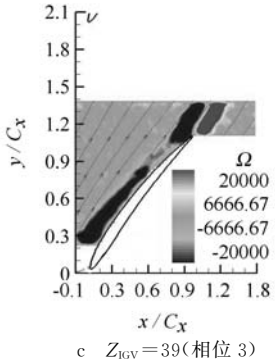
图 8 50%叶高锁相 U 分布($Q=1.67\ m^3/s$)



a 基准状态



b $Z_{IGV}=39$(相位 1)



c $Z_{IGV}=39$(相位 3)

图 9 80%叶高锁相 Ω 分布($Q=1.75\ m^3/s$)

示,基准状态下除了动叶尾迹涡街,在叶片吸力面一侧靠近动叶尾缘的位置还存在一条涡街.由于这一涡街只是在80%叶高才观察到,因此可以判断这条涡街是叶尖间隙涡在这一测量截面上的反映.如图9b所示,39导叶相位1状态下仍然能观察到叶尖间隙涡的存在.当转子位于39导叶相位3时,如图9c所示,测量区域中不再出现叶尖间隙涡,可见在这一相对位置时叶尖间隙流得到了一定的抑制.

5 流场及性能变化机理分析

从20%叶高截面的测量结果可以看到,导

叶/转子干涉现象在流场中的具体体现主要在于导叶尾迹涡量对于动叶尾迹的干扰以及导叶尾迹速度亏损所造成的动叶进口气流角的周期性变化.因此流场和气动性能产生变化的机理应当包括以下 2 方面:①导叶尾迹中较高的湍流度增加了动叶叶背附面层与主流的动量交换能力,从而抑制了流动分离以及减小了动叶尾迹的宽度,减少了对流道的堵塞;②周期性的进气角变化使得小流量下动叶的气动负荷得到暂时性的减轻,从而从时均效果来看,叶尖泄漏流得到一定的抑制,失速裕度得到一定的增加.

然而以上 2 种机理却不足以解释图 1 所示的随着导叶数目的变化所导致的失速裕度的显著变化.此处就必须考虑导叶/转子干涉作为一种非定常激励源,其激励频率与被控制的转子非定常流动固有频率之间的相互关系.文献[7]的测量结果表明,在 3 000 r/min 的设计转速下,该实验转子的固有流动频率在大约为 2 000 Hz 左右.当导叶数目为 40 和 80 时,导叶/转子干涉频率分别为 2 000 Hz和 4 000 Hz,达到了转子流动固有频率的倍频,导叶尾迹与转子流动发生了耦合整流的效果,因此达到了性能的极大值.由于非定常流动对于激励频率非常敏感,激励频率的变化会导致性能的较大幅度的变化.这样就解释了图 1 中复杂的失速裕度变化曲线.

6　结　论

本文研究了一台低速轴流压气机内的导叶/转子干涉现象对于转子的流场结构以及级气动性能的影响.

PIV 流场测量实验证明不同的导叶/转子干涉状态对于流场和性能会产生显著影响.当导叶数目适当时,导叶/转子干涉能够有效减少转子尾迹亏损、提高转子流道中的相对速度、抑制叶尖泄漏流的发展,从而能够在小流量下提高该单级压气机的总压升和增加其失速裕度.

导叶/转子干涉所带来的导叶尾迹与转子尾迹的涡涡干涉作用以及导叶尾迹亏损所造成的转子进气角的周期性变化,是产生上述流场和性能变化的部分原因.

为了全面解释观察到的实验现象,必须考虑导叶/转子干涉的频率与转子非定常流动固有频率之间的关系.当导叶/转子干涉的频率处于转子流动固有频率的倍频附近时,产生了共振整流的效果,从而产生了流场结构和气动性能的变化.当激励频率离开固有频率的倍频附近时,气动性能迅速下降.

这为轴流压气机设计者们提供了一个可行的思路,可以将转静干涉这一十分重要的非定常现象纳入压气机设计体系中,充分利用转静干涉来提升压气机的性能.然而已有的实验研究都是在低速条件下进行的,对于真实的高速轴流压气机,由于激波的存在和气体压缩性的影响,转静干涉的流动过程可能会有较大的差别.

参考文献(References)

[1] Smith L Jr. Casing boundary layers in multistage axial flow compressors. flow research in blading[M]. Amsterdam: I Elsevier Publishing Company, 1970

[2] Boyd D M, Fleeter S. Rotor blade unsteady aerodynamics at high loading including dynamic stall[R]. AIAA 2002－3637, 2002

[3] Sirakov B T, Tan C S. Effect of upstream unsteady flow conditions on rotor tip leakage flow[R]. ASME GT2002-30358, 2002

[4] Wu J Z, Vakili A D, Wu J M. Review of the physics of enhancing vortex lift by unsteady excitation[J]. Prog Aerospace Sci, 1991, 28:73－131

[5] Ahuja K K, Burrin R H. Control of separation by sound [R]. AIAA-84-2298, 1984

[6] McManus K, Magill J. Airfoil performance enhancement using pulsed jet separation control[R]. AIAA-97-1971, 1997

[7] 金亮. 非定常激励对压气机时均性能影响的实验研究[D]. 北京:北京航空航天大学能源与动力工程学院,2005
Jing Liang. Experiment study on the time-mean performance of low speed axial compressor by unsteady excitation[D]. Beijing: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese)

[8] Wernet M P, John W T, Prahst P S, et al. Characterization of the tip clearance flow in a axial compressor using digital PIV[R]. AIAA-2001-00697, 2001

[9] Key N L, Lawless P B, Fleeter S. Rotor generated vane row off-design unsteady aerodynamics including dynamic stall: part I: stator particle image velovimetry (PIV) investigation [R]. AIAA 2002-3542, 2002

[10] Uzol O, Chow Y C, Katz J, et al. Experimental investigation of unsteady flow field within a two-stage axial turbomachine using particle image velocimetry[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124: 543－552

(责任编辑:张　嵘)