

文章编号:1000-8055(2013)12-2813-08

跨声轴流压气机转子尾迹的总压平均方法

王偲臣^{1,2,3}, 林 峰^{2,3}, Scott C. Morris⁴, Joshua Cameron⁴, 聂超群^{2,3}

(1. 中国科学院大学 物理学院, 北京 100049;

2. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院 先进能源动力重点实验室, 北京 100190;

4. Department of Aerospace and Mechanical Engineering,
University of Notre Dame, Notre Dame 46556, USA)

摘 要: 对一台跨声轴流压气机转子的尾迹流场进行了数值模拟研究和总压实验测量, 结合理论分析方法, 研究了面积平均和质量平均这两种常用的总压平均方法在跨声轴流压气机转子尾迹测量中的联系与差异. 结果表明: 在靠近转子尾缘的测量截面, 由于转子尾迹流场中存在总压高而轴向速度低的区域, 导致面积平均总压大于质量平均总压; 而随着尾迹与主流在下游逐渐掺混均匀, 面积平均总压又小于质量平均总压. 两种总压平均方法的这一规律性关联可以在研究压气机转子尾迹特征尤其是进行数值计算和实验测量结果对比分析时提供一些有价值的参考.

关 键 词: 跨声压气机; 转子尾迹; 总压测量; 质量平均; 面积平均

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Total pressure averaging method in rotor wake of transonic axial compressor

WANG Si-chen^{1,2,3}, LIN Feng^{2,3}, Scott C. Morris⁴,
Joshua Cameron⁴, NIE Chao-qun^{2,3}

(1. School of Physics,

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Advanced Energy and Power,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. Department of Aerospace and Mechanical Engineering,

University of Notre Dame, Notre Dame 46556, USA)

Abstract: Numerical simulation and experimental measurements were conducted to investigate the rotor wake of a transonic axial compressor. Combined with theoretical analysis, the relations between area-average total pressure and mass-average total pressure that are commonly calculated in transonic rotor wake flow fields were studied. The results showed that the area-average total pressures were larger than the mass-average total pressures at surfaces close to rotor trailing edge because of the existence of the wake flow, which had higher

收稿日期: 2013-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131111.1602.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51010007, 50736007)

作者简介: 王偲臣(1985—), 男, 河南商丘人, 博士生, 主要从事压气机流动失稳机理及控制策略研究.

total pressure and lower axial velocity than the main flow. However, the downstream area-average total pressure changed to become smaller than the mass-average total pressure as the wake dissipated under the interaction with the main flow. These results can provide some references for investigations on the compressor rotor wakes, especially during comparative analysis of computational and experimental results.

Key words: transonic compressor; rotor wake; total pressure measurement; mass-average; area-average

压气机内部流动具有强湍流和强非定常性特征,尤其是当压气机运行在非设计工况时,叶片附面层分离和非定常尾迹流动会对压气机的工作效率和稳定性带来很大影响.围绕叶片附面层发展和尾迹流动,许多研究者开展了动静间隙流动与压气机性能和稳定性关系的实验和数值模拟研究.研究表明:上游叶片的边界层发展结构对下游叶片通道的流动起到关键的影响作用^[1-2],动静间隙的大小会影响边界层在间隙内的非定常流动特征^[3-4],而尾迹的固有非定常特征及其与叶顶泄漏流动和角区涡等流动相互作用形成的复杂涡系结构造成了下游叶片的复杂进口流场^[5-6],由此产生的时序效应^[7-9]和尾迹恢复效应^[10-11]使尾迹流动与压气机性能之间的关系十分密切.

在对压气机内部流动和整机性能的描述中,总压是最重要的物理参数,对非定常尾迹流场而言更是如此.在衡量压气机级或转子特性时,往往采用尾迹流场中某个轴向截面上的总压平均值.在压气机实验中,经常使用所谓的基尔探针对转子尾迹流场的总压进行测量,这些探针一般在静子叶片前缘,在径向等环面离散分布,对多个探针在绝对坐标系下的测量结果进行时间和空间平均,就得到了整个测量截面的总压平均值.由于目前的测量手段很难测量流场的密度分布即质量流量分布,所以几乎所有的总压测量手段都是面积平均后的结果.相应地,在对压气机的数值模拟研究中,也需要对计算域内不同轴向截面的总压进行平均处理,尤其是在与实验结果进行对比分析时,需要分析不同的平均方法对实验和数值模拟结果中平均总压流场产生的影响.

本文将首先对总压的平均方法进行理论分析,讨论平均方法的不同对复杂的三维流场的总压平均值造成的差异;然后以一台跨声轴流压气机转子为对象,从实验和数值模拟结果出发,定量分析不同平均方法对转子尾迹总压平均结果的影响,并对转子尾迹结构及其沿流向掺混的规律进行研究;最后通过对转子尾迹流场细节的分析,为

压气机实验和数值模拟的总压测量及对比分析提供指导意见.

1 总压平均理论分析

对非均匀总压流场的平均方法,已经有了比较成熟的理论研究成果^[12-14],最常用的总压平均方法是面积平均和质量平均,两者也是数值计算软件 FLUENT 中的常用总压平均方法.面积平均总压和质量平均总压的定义式分别为

$$\bar{p}_t^a = \frac{1}{A} \int_A p_t dA \quad (1)$$

$$\bar{p}_t^m = \frac{1}{\dot{m}} \int_{\dot{m}} p_t d\dot{m} = \frac{\int_A p_t \rho V_x dA}{\int_A \rho V_x dA} \quad (2)$$

其中 p_t 是流体在微元面的总压, A 是总压测量平面的面积, x 轴是与总压测量平面垂直的方向, V_x 是气流在 x 方向上的速度, $\dot{m}$ 是通过总压测量平面的质量流量.从定义式可以看出:质量平均总压保证了平均值与初始值的能量守恒,而面积平均则不保证任何物理意义上的守恒.总压的物理含义是可压缩流体经过等熵过程达到速度为 0 m/s 时的压力,为了更方便地理解两种总压平均方法的联系和差别,可以先以不可压缩流体做为研究对象.对不可压缩流体而言,总压就可以表示为静压和动压的代数和,式(1)和式(2)就可分解为两部分

$$\bar{p}_t^m = \frac{1}{\dot{m}} \left(\int_{\dot{m}} p_s d\dot{m} + \frac{\rho}{2} \int_{\dot{m}} V^2 d\dot{m} \right) \quad (3)$$

$$\bar{p}_t^a = \frac{1}{A} \left(\int_A p_s dA + \frac{1}{2} \int_A \rho V^2 dA \right) \quad (4)$$

其中 V 是流体的合速度.在压气机转子出口流场中,总压的不均匀性主要是由气流速度和密度即动压的不均匀性导致,此现象将在下文中具体分析,因此,不妨对总压流场做均匀性静压分布假设,在此基础上对两种总压平均方法进行定性分析.

首先考虑最简单的一维不均匀流动,即气流只在垂直于测量面 A 的 x 方向上存在不均匀速

度分布.从两种平均方法的定义式可以看出:对质量平均而言,每个微元面积权重的分配是由此区域的速度大小决定的,而速度大小决定了总压的大小,即总压大的区域在平均过程中占据较大的权重,总压小的区域占据较小的权重;而对于面积平均而言,每个微元面积权重的分配不涉及速度分布,即不管总压大小,各区域在平均过程中占据相等的权重.通过数学推导可知:只要测量面内的速度分布不均匀,质量平均总压一定大于面积平均总压,只有当速度分布均匀的情况下,质量平均总压与面积平均总压相等.

然而,对二维或三维流动而言,两种总压平均方法的对比就变得更加复杂了.主要是因为对质量平均而言,总压的大小是由合速度的大小决定的,而微元面积权重的分配则仅仅由与测量面垂直方向即 x 方向的速度分布决定.假设在测量面内有这样一个区域,其 x 方向的速度分量很小,但与 x 轴垂直的速度分量却很大,在这种情况下,此具有较大总压的微元面积在质量平均过程中占据较小的权重,却在面积平均过程中占据较大的权重,而具备这种流动特征的区域会使得两种总压平均方法的对比变得更加复杂.

压气机转子尾迹流场恰恰具有以上所述流场的总压分布特征.图 1 是压气机转子出口速度三角形的示意图.(图中 W_2 表示主流相对速度, $C_{2,axial}$ 表示主流轴向速度)其中黑色实线表示了通道中心处即叶片尾迹之间的气流速度,红色实线表示尾迹区的速度分布.可以看出:叶片表面边界层的作用使得尾迹区的相对速度 W_2' 大大降低,由于切向速度 U 由叶片转速决定,所以尾迹区气流的绝对速度 C_2' 反而升高,这也导致了尾迹区的

绝对总压升高.同时,尾迹区气流偏角的增大导致了气流轴向速度 $C_{2,x}'$ 大大降低,这就导致了在质量平均过程中此区域权重的降低.本文将对一台跨声轴流压气机的转子尾迹流场进行总压平均方法的分析,结合转子尾迹的结构特征,研究不同总压平均方法对压气机实验和数值模拟结果的影响.

2 压气机实验台和数值模拟方法

本文的实验工作是在美国圣母大学跨声轴流压气机实验台(ND-TAC)上进行的^[15],研究对象是一台跨声轴流压气机转子,如图 2 所示,此转子共有 20 个叶片,转子进口叶尖直径为 0.457 m,进口轮毂比为 0.75.压气机设计转速为 14 684 r/min,叶中切向速度为 307 m/s,叶尖马赫数为 1.27.

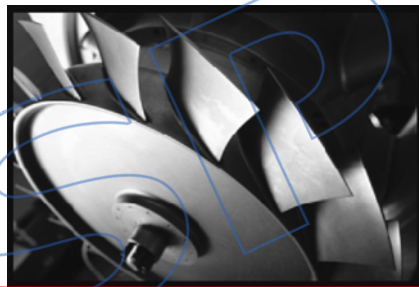


图 2 ND-TAC 跨声轴流压气机转子

Fig. 2 Photo of the ND-TAC transonic axial compressor rotor

实验的研究对象是压气机转子尾迹的结构和发展规律,对转子出口总压的测量一般在转子和静子之间的间隙进行,基尔探针一般安装在静子叶片的前缘.为了对测量面的总压进行径向平均,在静叶前缘径向等环面积的位置分布了 7 个基尔总压探针,图 3 显示了基尔探针在轴向的安装位置及其与动、静叶片的空间关系.

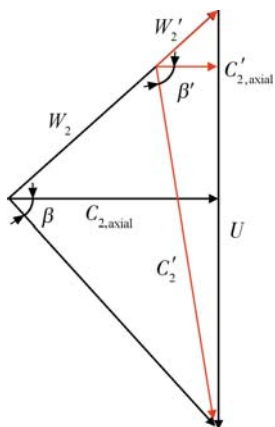


图 1 压气机转子出口速度三角形

Fig. 1 Velocity triangle at the compressor rotor exit

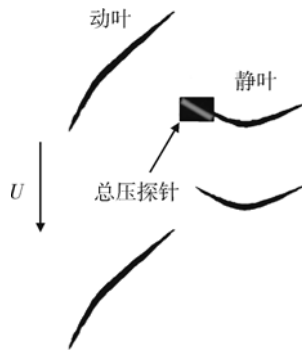


图 3 基尔探针在动静间隙中的安装位置

Fig. 3 Installation location of Kiel probes in rotor-stator clearance

采用商用数值模拟软件 FLUENT 对压气机转子流场进行了定常和非定常 Navier-Stokes 雷诺时均方程求解,采用了三维 2 阶精度求解器,湍流的求解采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和标准壁面方程. 计算域的网格采用软件 ANSYS TURBO-GRID 进行划分,为了保证计算的准确度,针对定常工况计算进行了网格独立性验证,经过不同网格类型和网格密度的对比计算,综合考虑计算精度和计算时间的因素,最终采用 92 万结构化网格对此压气机转子进行数值计算.

为了提高计算精度并同时缩短计算收敛所需时间,在计算域的进、出口都给定均匀边界条件,则同时需要延长计算域进出口的长度. 图 4 所示为计算域横切面的一部分,从转子叶片尾缘到计算域出口有足够长的轴向距离,以使转子尾迹的非定常流场能够充分掺混至均匀流动状态,图中也显示了与实验中的总压测量位置,即图 3 中所示的基尔探针的探头所在轴向截面位置.

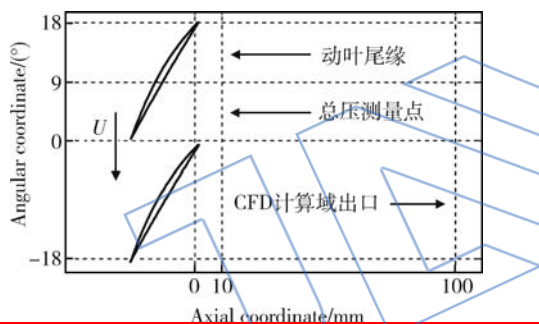


图 4 CFD 计算域中的总压测量位置

Fig. 4 Total pressure measuring location in the computational domain

3 转子尾迹的总压平均

图 5 所示为 ND-TAC 单转子实验和数值模拟的特性线,如上文所述,实验特性线的总压比是用面积平均总压计算的,而数值模拟的总压比分别用质量平均和面积平均方法计算. 从数值模拟结果可以看出:采用面积平均总压得到的总压比高于质量平均的总压比,而且随着流量减小和总压比升高,这种差异越来越大,这表明了总压平均方法的选取对压气机性能评价的重要性.

为了弄清两种总压平均方法出现差异的原因及其与转子尾迹流场结构之前的关系,选取了图 5 中所示的 A, B, C 三个流量工况进行进一步研

究. 在图 4 所示的数值模拟计算域中,从转子尾缘到计算域出口选取 20 个测量截面,对每个测量截面上的总压进行质量平均和面积平均,将平均总压沿流向的发展规律显示出来,并在对应的实验测量位置,将总压的实验测量值即面积平均总压画出,三个流量工况下的总压平均结果如图 6 所示.

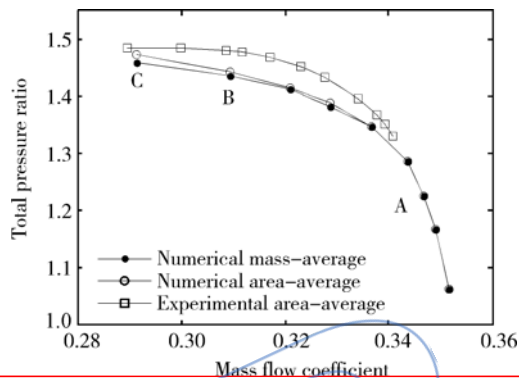


图 5 ND-TAC 单转子实验和数值模拟特性线及所选研究工况

Fig. 5 Experimental and numerical performance curves of the ND-TAC rotor and the tested operating conditions A, B, C

从图 6 中两种方法的总压比平均结果可发现三个主要特征:第一,整体看来,面积平均总压的衰减梯度大于质量平均总压的衰减梯度,尤其是在靠近转子尾缘的截面上;第二,在不同流量工况下,面积平均总压和质量平均总压沿流向的相互关系不同,工况 C 质量平均总压则始终小于面积平均总压,而对于 A, B 两个工况,在靠近转子尾缘的位置,质量平均总压小于面积平均总压,但随着流动向下游发展,质量平均总压又大于面积平均总压;第三,从 A 到 C 的三个工况,随着转子质量流量不断减小,质量平均总压和面积平均总压的差距越来越大,这从转子尾缘的第一个截面可以明显看出. 另外,从实验测量的面积平均总压结果来看,除去实验和计算的整体误差,由平均方法造成的总压差距也在实验和数值模拟结果对比分析中扮演重要的角色. 在靠近转子尾缘的流场内,质量平均总压和面积平均总压各自沿轴向的衰减和两者之间的差异都对轴向位置十分敏感,这就要求在实验测量过程中,总压的测量位置不能离转子尾缘太近,而且测量位置的选择也要充分考虑转子尾迹的平均总压沿轴向的衰减.

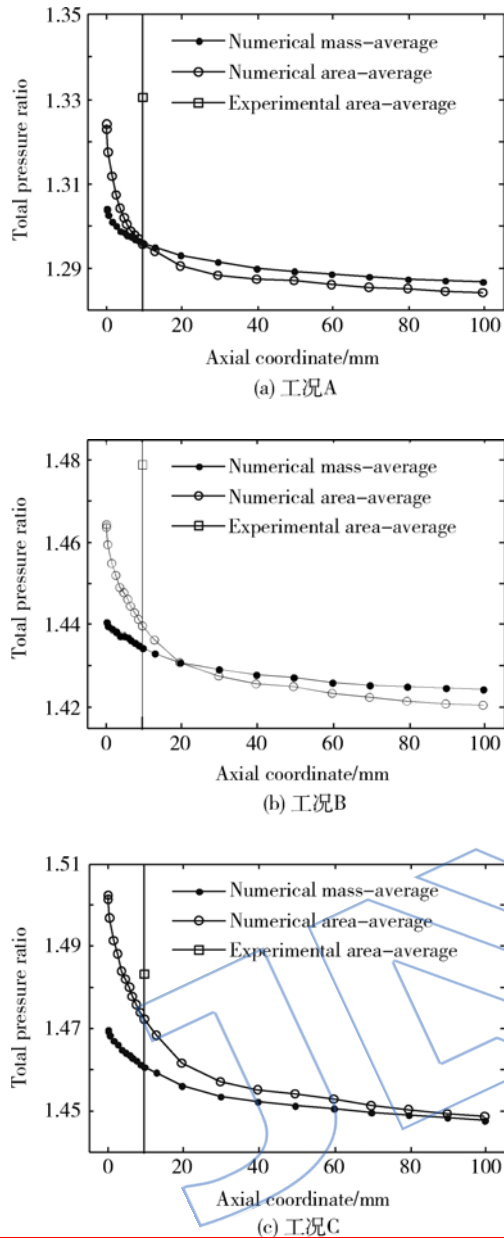


图 6 A,B,C 三个工况的总压比沿流向分布图

Fig. 6 Total pressure ratio distribution along stream direction of A,B,C

4 转子尾迹结构

测量截面上的质量平均总压和面积平均总压随着压气机流量的大小和测量面距转子尾缘的距离大小而改变,这反映了转子尾迹结构的相应改变.从引言中对两种平均方法的理论分析可知,如果某内部流动是一维轴向的,则测量截面上的质量平均总压在任何工况下都大于面积平均总压的.但是从图 6 的结果看出:三个工况都出现了质量平均总压小于面积平均总压的情况,这说明了转子尾迹具有引言中所述的很强的三维分布特征.

为了直观地观察转子尾迹的流动结构,首先绘出了转子尾缘截面的关键物理参量云图.如图 7 所示,分别绘出了 A,B,C 三个工况的转子尾缘截面轴向速度和无量纲总压云图,其中无量纲总压 p_r 的定义式为

$$p_r = \frac{p_{t,\text{inflow}} - p_{t,\text{rel}}}{p_{t,\text{inflow}} - p_{t,\text{outflow}}} \quad (5)$$

式中 $p_{t,\text{inflow}}$ 为转子进口气流的面积平均总压, $p_{t,\text{outflow}}$ 为转子出口气流的面积平均总压, $p_{t,\text{rel}}$ 为转子出口气流的相对总压.从式(5)可知,相对总压越高,无量纲总压值越小.所以从图 7 中可看出:在靠近转子叶片尾缘的位置,轴向速度 V_{axial} 很小而无量纲总压很高的位置代表了转子尾迹的区域,而从工况 A 到工况 C,随着流量的不断减小,尾迹区的周向范围不断增大,这表明随着流量的减小和转子气流攻角的逐渐增大,在转子叶片尾缘发生了更加严重的气流分离,从而导致尾迹低速区面积的增大.另外,从叶顶区域的流场变化可以看出,随着流量减小和攻角增大,端区流动状态也发生了恶化并占据了更大的展向空间,对转子工作特性产生更为重要的作用.

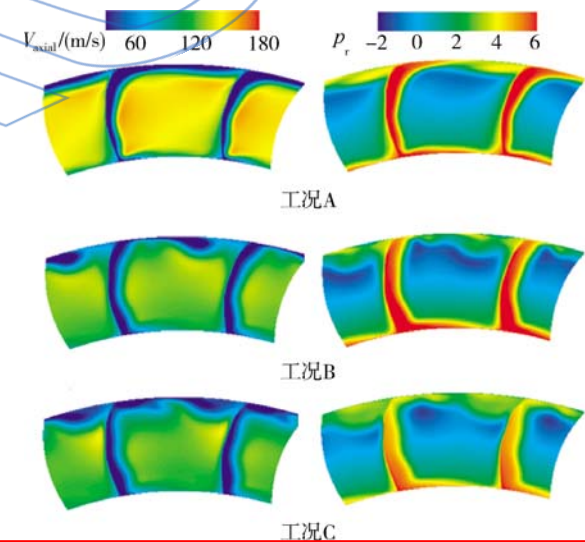


图 7 转子尾缘截面的轴向速度和无量纲总压云图

Fig. 7 Contours of axial velocities and non-dimensional total pressures at the rotor trailing edge slice

为了定量研究转子尾迹的结构和不同总压平均方法的大小关系,图 8 画出了工况 A 和工况 C 下,关键气动参数在 50% 叶高截面上转子尾缘截面、静子前缘(即总压测量截面)和计算域出口截面在一个通道内的周向分布.图 8(a)~图 8(d)表

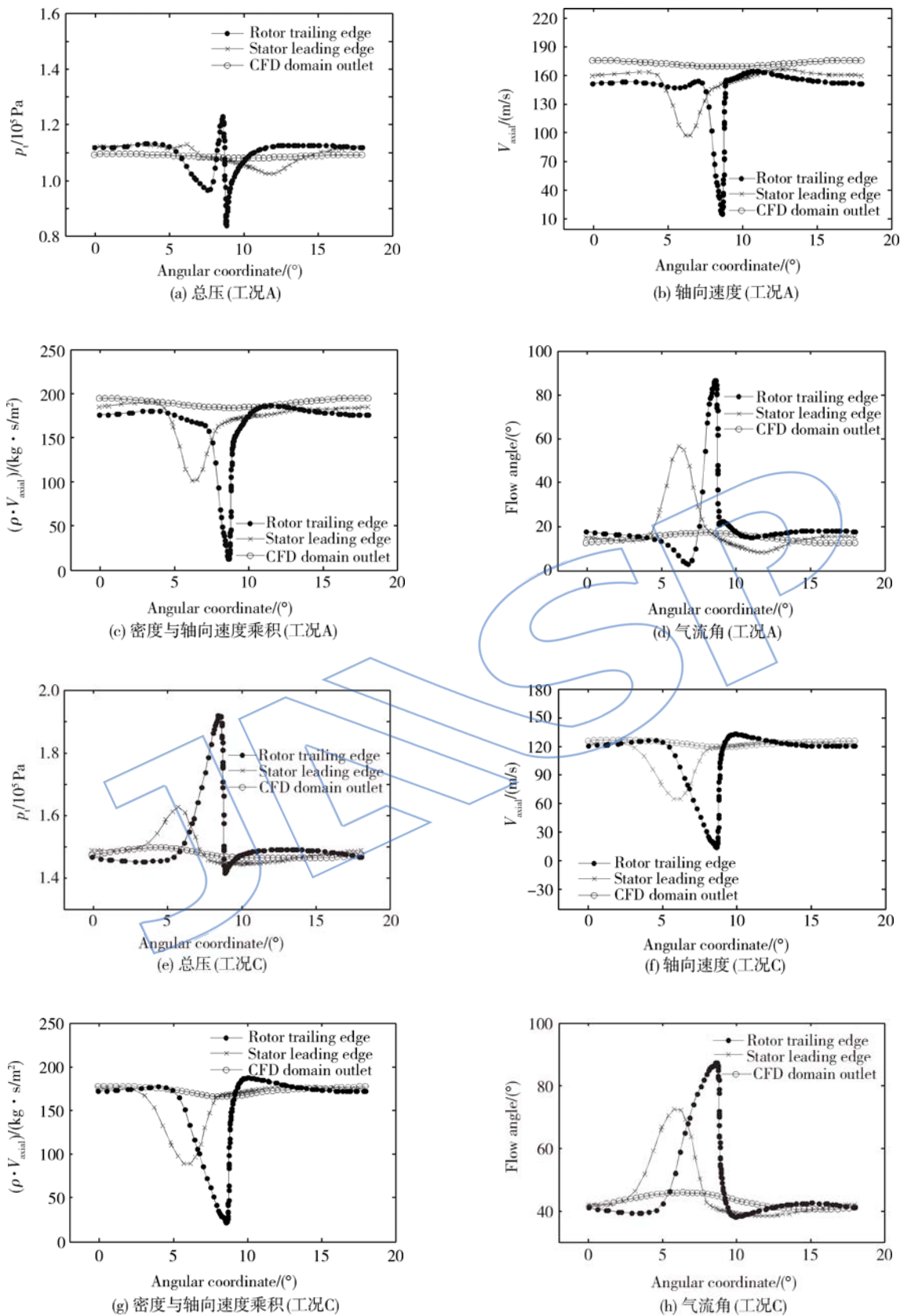


图8 总压、气流角、轴向速度和密度与轴向速度乘积在3个轴向位置的50%叶高的周向分布

Fig. 8 Angular distributions of total pressure, flow angle, axial velocity and product of density and axial velocity at three axial locations of 50% span

示工况 A;图 8(e)~图 8(h)表示工况 C。在这些图中,横坐标为一个叶片通道的 18° 周向范围,其中叶片尾缘位于大约 9° 的轴向位置。

从三个测量截面的气流参数分布可以明显看出:转子尾迹从转子尾缘到计算域出口的掺混过程,在靠近转子尾缘的截面内,转子尾迹区域具有较高的总压和较小的轴向速度,其气流角度最大可达到接近 90° ,这说明尾迹区域的气流是接近于切向运动的,而随着气流向下游发展,尾迹区气流与主流相互掺混,最终达到均匀分布状态。并且可以看出:在实验测量截面,尾迹区域的气流参数与主流仍然有一定差异,即非均匀气流还远未掺混到均匀分布状态,这种流动状态会给基尔探针的测量精度带来一定影响^[16]。

从总压分布和密度与轴向速度的乘积分布可以看出:转子尾迹区的流动满足引言中提到的可以使质量平均总压小于面积平均总压的条件,即在质量平均过程中存在总压很高但是平均权重很小的区域。但是,是否出现质量平均总压小于面积平均总压的情况还受到尾迹强度的影响,即如果上述区域的面积足够大,则有可能出现质量平均总压大于面积平均总压的截面,如图 6 中工况 C 所示。

仔细观察轴向速度和气流角度的分布可以发现:工况 A 和工况 C 虽然流量和流动结构相差很大,但是尾迹区的轴向速度和气流角度大小几乎相同,主要的差别则是尾迹区域周向范围大小的不同。从图中可以看出:工况 A 的尾迹区域占据大约 1.5° 的通道周向范围,而工况 C 的尾迹区域则占据了大约 4.5° 的通道周向范围。这是因为在转子叶片尾缘的边界层内,气流的相对速度接近于 0 m/s ,随着流量和攻角的改变,反映在尾迹强度上的变化主要是边界层厚度或边界层分离的区域大小,而不是气流速度或气流角度大小的变化。

5 结 论

本文对压气机转子尾迹结构及总压平均方法的研究,主要有以下几点结论:

1) 对一维流动和普通的三维流动而言,质量平均总压总是大于面积平均总压,但是本文对压气机转子尾迹的定量研究结果表明:当测量截面内存在总压较大而轴向速度较小的流动区域时,质量平均总压就会出现小于面积平均总压的可能;而且,两种总压平均方法的差异还取决于压气机的流量工况和总压的轴向测量位置。另外,在不

同流量工况下,尾迹区的总压值和轴向速度值变化是几乎相等的,而尾迹区域所占据的周向空间范围会发生明显变化。

2) 以上研究结果对压气机实验和数值模拟工作具有一定参考价值:在对叶轮机机械的数值模拟结果和实验结果进行对比分析时,一定要明确实验的测量位置;在实验过程中,应当注意质量平均总压和面积平均总压在靠近叶片尾缘处的快速衰减,一般要尽量避免总压探针离尾缘太近而造成较大误差。

参考文献:

- [1] Mailach R, Vogeler K. Aerodynamic blade row interactions in an axial compressor: Part 1 unsteady boundary layer development[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2004, 126(1): 35-44.
- [2] Mailach R, Vogeler K. Aerodynamic blade row interactions in an axial compressor: Part 2 unsteady pressure profile distribution and blade forces[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2004, 126(1): 45-51.
- [3] Zachcial A, Nurnberger D. A numerical study on the influence on vane-blade spacing on a compressor stage at sub- and transonic operating conditions[R]. ASME Paper GT-2003-38020, 2003.
- [4] 毛明明, 宋彦萍, 王仲奇. 跨声压气机动静干涉效应的数值研究[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(9): 1468-1474.
MAO Mingming, SONG Yanping, WANG Zhongqi. Numerical research on influence of rotor-stator interactions in transonic compressor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(9): 1468-1474. (in Chinese)
- [5] Nolan S P R, Botros B B, Tan C S, et al. Effects of upstream wake phasing on transonic axial compressor performance[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(2): 021010. 1-021010. 12.
- [6] 邹正平, 綦蕾, 李维, 等. 上游尾迹与涡轮转子泄漏流相互作用数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(1): 58-65.
ZOU Zhengping, QI Lei, LI Wei, et al. Numerical simulations of upstream wake-tip leakage vortex interactions in turbine rotor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(1): 58-65. (in Chinese)
- [7] CHEN Fu, GU Zhonghua, LU Huawei, et al. Experimental study of stator clocking effects in an axial compressor[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2006, 19(4): 278-185.
- [8] Müller L, Mailach R, Vogeler K, et al. Unsteady blade loading with clocking in multistage axial compressors: Part 2[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(1): 36-45.
- [9] Key N L, Lawless P B, Fleeter S. An experimental study of vane clocking effects on embedded compressor stage performance[J]. *Journal of turbomachinery*, 2010, 132(1): 011018. 1-011018. 10.

- [10] Van Zante D E, Adamczyk J J, Strazisar A J, et al. Wake recovery performance benefit in a high-speed axial compressor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124(2): 275-284.
- [11] 史亚锋, 吴虎, 陈立新, 等. 轴向间距对某跨声速轴流压气机叶排间干扰的影响规律[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(5): 1085-1091.
SHI Yafeng, WU Hu, CHEN Lixin, et al. Effect of different axial spacing between blade rows on transonic axial compressor performance[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(5): 1085-1091. (in Chinese)
- [12] Greitzer E M, Tan C S, Graf, M B. Internal flow concepts and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 244-258.
- [13] Kazimierski Z, Trojnarowski J. Time-averaged pressure of fluctuating gas motion in small-diameter tubes[J]. *AIAA Journal*, 1987, 25(4): 567-572.
- [14] Kazimierski Z, Horodko L. Total pressure averaging by small-diameter tubes in pulsating flows[J]. *AIAA Journal*, 1990, 28(1): 140-145.
- [15] Cameron J D, Gendrich C P, Morris S C, et al. A transonic axial compressor facility for fundamental research and flow control development[R]. AIAA-2006-416, 2006.
- [16] WANG Sichen, Morris S C, WANG Kai, et al. Numerical study on a Kiel probe used in rotor wake of a high-speed axial compressor[R]. ACGT 2012-1070, 2012.

JALSP