

文章编号: 1000-8055(2010)04-0868-09

压气机转子内部流场 SPIV 测量的精度分析

张志博, 于贤君, 刘宝杰

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 讨论了压气机转子内部流场测量结果的不确定度分析方法, 分析了三维速度的直接测量结果、一阶统计量(涡量)和二阶统计量(雷诺应力)测量结果的收敛性, 及其所能够达到的典型测量精度; 最后分析了影响速度高阶统计量测量精度的主要因素, 及提高其精度的可行技术途径。

关 键 词: 体式粒子图像测速; 湍流统计量; 测量精度; 压气机

中图分类号: V211. 71

文献标识码: A

Precision analysis of the flow field measured in compressor rotor by using stereoscopic particle image velocimetry

ZHANG Zhi-bo, YU Xian-jun, LIU Bao-jie

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,

School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,

Beijing 100191, China)

Abstract: This paper discussed the uncertainty analysis method of some SPIV results measured inside the compressor rotor. The convergence characteristics of the SPIV results of the three velocity components, the first-order results (vorticity) and the second-order statistics (the Reynolds stress) were investigated, and the measurement accuracy was analyzed. Then, the analysis of the main influential factors to the measurement accuracy of high-order statistics was carried out. At last, some advices for improving the measurement accuracy of SPIV in turbomachinery were given.

Key words: stereoscopic particle image velocimetry (SPIV); turbulence statistic; measurement accuracy; compressor

叶轮机内部流场具有强非定常性、三维性和强湍流脉动等特点, 对叶轮机内部复杂流场的准确测量, 对于研究叶轮机内部流动结构和流动机理, 以及校验数值模拟方法及其湍流模型等具有重要意义。

叶轮机内部流场测量, 特别是转子叶片通道内部流场测量, 是一项非常具有挑战性的工作。随着具备瞬态场测量能力的粒子图像测速技术 PIV

(particle imaging velocimetry) 和 SPIV (stereoscopic particle image velocimetry) 的日趋成熟, 近年国内外已经将其用于叶轮机内部非定常流场的测量^[1-4], 为叶轮机内部复杂流动研究提供了新的先进测量手段。

以往, 由于 PIV/ SPIV 系统硬件水平的限制, 以及叶轮机内部流场的高度复杂性(强非定常、多尺度、强剪切、叶片三维扭曲、叶片间的相互遮挡,

收稿日期: 2009-03-31; 修订日期: 2009-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(50476001); 国家重点基础研究发展计划课题(2007CB210103)

作者简介: 张志博(1984 -), 男, 黑龙江伊春人, 博士, 主要从事叶轮机内复杂流动研究。

以及转子的高速旋转等),用 PIV/ SPIV 测量叶轮机内部流场通常会面临数据率低和测量精度低的问题,因此难以得到较为可靠的湍流统计量测量结果.经过多年的努力,作者所在课题组提出并逐步发展完善了适用于多级叶轮机任意叶排内流场测量的 SPIV 技术,目前其转静子叶片通道内部测量的有效数据率可达 90 % 以上,从而为利用 SPIV 技术测量叶轮机内部复杂流动的湍流统计量奠定了坚实的基础.

考虑到叶轮机工作条件和内部流动的复杂性,有必要对 SPIV 速度场测量结果的统计量(速度、涡量和雷诺应力等)的收敛性、所能达到的典型精度及其影响因素做深入的探讨.为此,本文采用 SPIV 技术,对低速大尺寸压气机转子内部流场进行了大数据样本的测量,得到了被测流场的湍流统计结果,并对速度、涡量、雷诺应力等各种典型测量结果的精度进行了深入分析,旨在为相关实验结果的分析 and 利用提供参考,并促进用 PIV/ SPIV 测量叶轮机内部高精度湍流统计信息的研究.

1 实验设备而和测量方法

1.1 压气机设备

本文实验是在北京航空航天大学的低速大尺寸实验台上进行的,该实验台是典型的单级布局,包括进口导叶、动叶和静叶,转静子均为等环量设计,C4 叶型.气流通道外径 1 m,轮毂比 0.6.转子设计转速 1 200 r/ min,设计流量 22.4 kg/ s^[3].

1.2 SPIV 系统和测量

实验采用 TSI 公司的 SPIV 系统,具体参数如表 1 所示.

表 1 SPIV 系统主要参数

Table 1 Parameters of the system of SPIV

设备	参数
激光器	双腔 Nd: YAG 激光器; 能量 150 mJ/ Pulse; 频率 15 Hz
CCD(charge coupled device) 相机	PIVCAM13-8; 1 280 Pixels ×1 024 Pixels; 12 bit
控制软件	TSI 公司的 Insight 5

在实验中,采用了相机位于激光片光源异侧的 SPIV 测量模式^[3,5].用 SPIV 测量了转子通道内的一系列截面的流场(图 1),每个测量截面都采集了至少 2 000 个数据样本.本文选取在设计

状态下吸力面距离叶片前缘 60 % 弦长截面处(在该截面位置的各种典型二次流动结构,如叶尖泄漏涡和通道涡等,已经充分发展)的数据进行分析.

为了便于二次流的分析,本文实验中的测量截面垂直于叶尖方向,即近似垂直于流向,因此文中的数据分析是建立在如图 1 所示的绝对坐标系中(图中 P 为通道宽度, S 为叶片高度). X 、 Y 和 Z 三个方向的速度分量分别对应为 U 、 V 和 W ,速度分布如图 2 所示,图 2~图 4 中的白色区域是被剔除的非有效数据点.

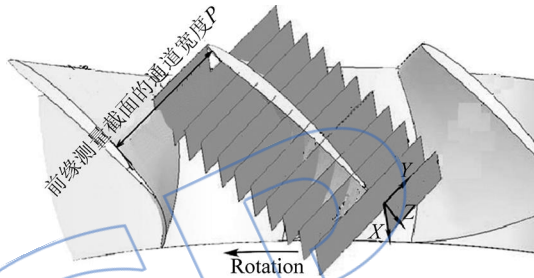


图 1 SPIV 实验转子通道内测量截面布置方案

Fig. 1 Schematic layout of the SPIV measurement cross sections

2 数据处理方法和相关问题说明

2.1 数据处理算法

两束激光的时间间隔 Δt 是 8 μ s,数据处理用软件使用了 PIVview 2.5,相关算法采用 Multi-grid FFT(fast Fourier transform)互相关算法,初始查问域为 64 像素 $\times$ 64 像素,最终查问域为 24 像素 $\times$ 24 像素.为了最小化 Peak Locking 现象,数据处理过程中采用了高斯拟合的方法来判断粒子图像峰值^[4].

2.2 精度分析方法

2.2.1 瞬态速度场的不确定度分析方法

影响 PIV/ SPIV 测量精度的因素有很多,不仅与 PIV/ SPIV 系统自身的特性有关,也和被测量流场的特性有关,同时还和数据后处理算法有关,但是其中最为关键和直接的因素是粒子图像位移的判断精度.粒子图像位移的确定受粒子的大小、浓度、位移量和处理图像时的算法等众多因素的影响.由于本文在实验测量和数据处理过程中采取了多种优化措施,使得测量结果的精度得到了有效的提高.受文章篇幅限制,在这里不再做详细论述,具体可参考文献[1]中的分析.

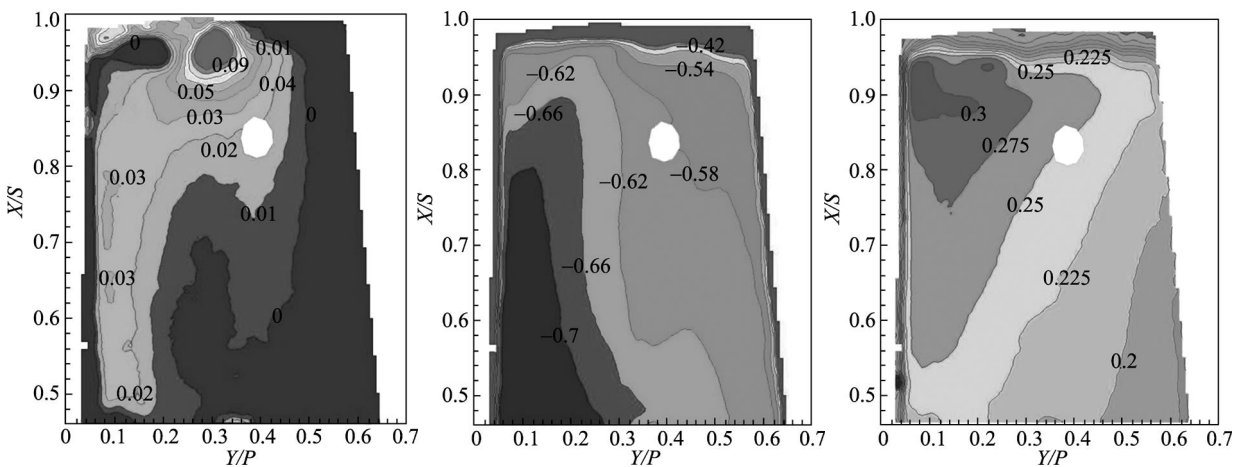


图 2 当样本数为 700 时 U, V, W 的时均速度场

Fig. 2 Maps of the U, V, W velocity ensemble-averaged measurement results when sample size of 700

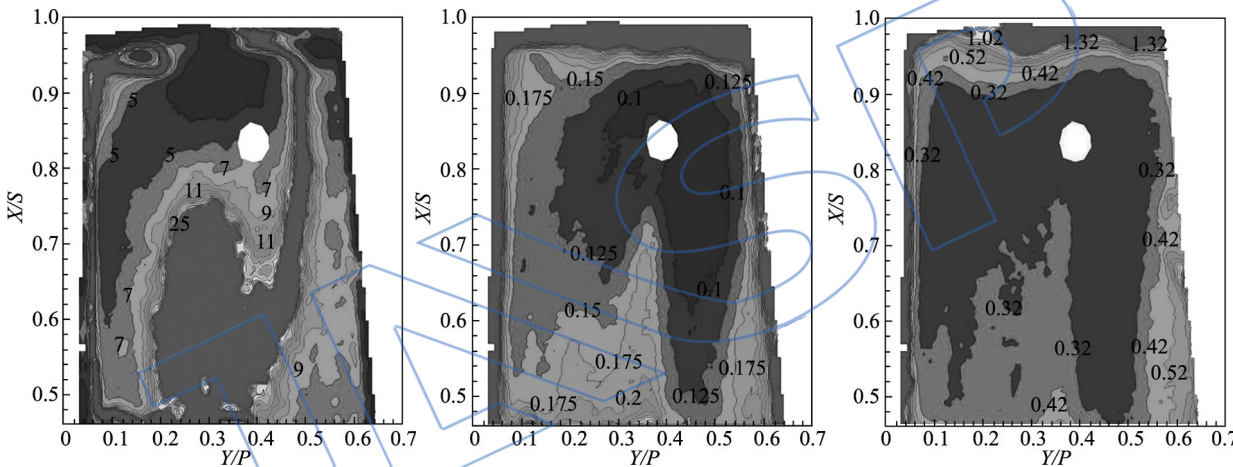


图 3 当样本数为 700 时 U, V, W 时均速度场的 A 类相对不确定度

Fig. 3 Distribution of type A relative uncertainty of the U, V, W velocity ensemble-averaged measurement results when sample size of 700

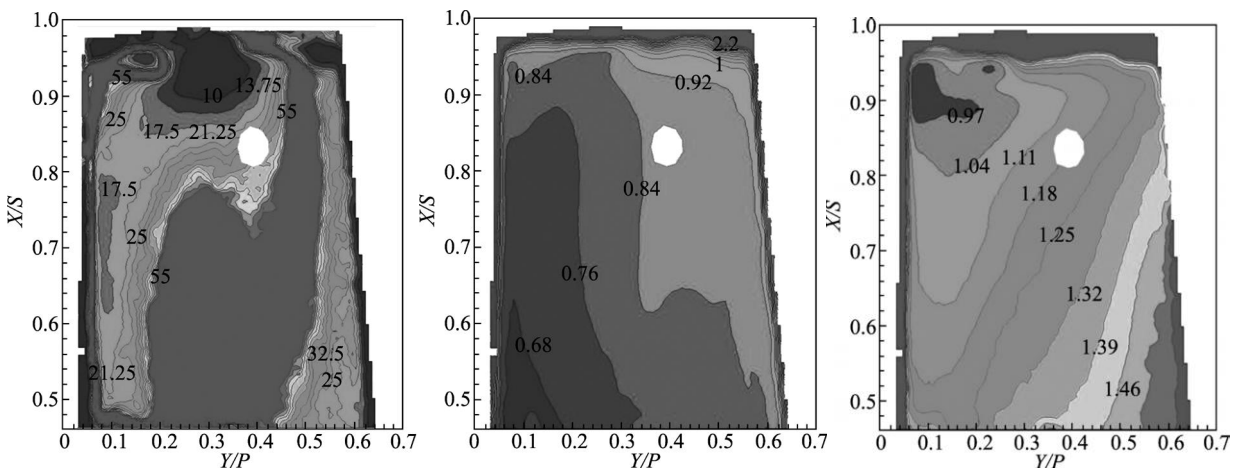


图 4 当样本数为 700 时 U, V, W 时均速度场的 B 类相对不确定度

Fig. 4 Distribution of type B relative uncertainty of the U, V, W velocity ensemble-averaged measurement results when sample size of 700

根据 Westerweel 的分析^[6-7],在本文的实验测量条件和数据处理方法的基础上,粒子图像位移的偏差大约为 0.05 个像素.但是考虑到背景噪音、加速度、速度梯度和标定等各种影响因素无法完全忽略,保守起见本文估计 x 方向和 y 方向的位移分量的误差限都为 0.1 个像素.将这个粒子图像位移误差限引入三维速度的合成中,就可以估计出瞬态场中各个方向速度分量在不同位置的测量精度.

2.2.2 统计量的不确定度分析方法

众所周知,统计量的不确定度可以分为两个分量,即采用统计方法评定的 A 类分量(A 类不确定度 $U_{x_{ij}}^A$)和采用其它方法评定的 B 类分量(B 类不确定度 U^B).

A 类不确定度评价的主要是随机误差,可以表示为

$$U_{x_{ij}}^A = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{k=1}^N (x_{ij}^k - \bar{x}_{ij})^2} \quad (1)$$

其中 $\bar{x}_{ij}$ 是对应的变量, i 和 j 对应相应的网格结点.当样本数为 700 时,速度场的 A 类相对不确定度如图 3 所示.

除了 A 类不确定度以外的其他不确定度都属于 B 类不确定度. B 类不确定度通常由多种因素合成,在本文的实验中包括每个单独样本自身的不确定度,也就是瞬态速度场自身的不确定度,压气机流场测试过程中锁相不稳定和转速不稳定等因素.通过对数据处理方法的改进,基于文献[1]中的分析可以知道,锁相不稳定和转速不稳定对平均速度场测量精度的影响很小,几乎可以忽略.因此平均速度场不确定度 B 类分量的直接决定性因素是瞬态场的测量精度,即

$$U_{x_{ij}}^B = \Delta/K \quad (2)$$

其中 Δ 是瞬态场测量结果的误差限, K 是与分布特性相关的包含因子.湍流速度场分布是正态分布,并且有足够的样本数($N \geq 100$),这里 K 取 3,误差限对应于 0.9973 的置信概率.

根据不确定的合成原则,合成后的不确定度可以表示为

$$U_{x_{ij}} = \sqrt{U_{x_{ij}}^A + U_{x_{ij}}^B} \quad (3)$$

当样本数 $N = 700$ 时,速度场的 B 类相对不确定度如图 4 所示.对比图 3 和图 4 可知, U 、 V 和 W 三个方向速度场大部分区域的 B 类不确定度均明显大于 A 类不确定度或者与之相当.

上面给出了平均速度场的不确定度分析方法,由于系综平均涡量场、雷诺应力场等物理量也是经过对瞬态速度场做统计分析之后得到的物理量,其不确定度评定的基本原理和上面的方法相似,但是对于 B 类不确定度的求解需要根据误差传递准则来计算.间接测量的 B 类不确定度,可以根据下式来计算

$$u = \sqrt{\sum u_i^2} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (4)$$

其中 $u_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i)$, $u(x_i)$ 是输入量 x_i 的不确定度, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ 代表间接测量量对 x_i 的偏导数.

2.3 测量结果收敛性的初步判断

在叶轮机内部流场的 SPIV 测量中,粒子对视窗的污染是测量过程中很难解决的问题,要经常清理视窗,因而当采集大量样本数据时,常常需将实验分多次测量(每测量一次需要将实验台重新启动一次).受压气机实验台控制系统精度限制,每次重新启动后并不能保证测量的流动状态完全一致.在本文实验中,测量了设计状态下吸力面距离叶片前缘 60%弦长截面处转子内部流场,共分 5 次采集了 2200 个数据样本(瞬态场).

为了分析这 5 组的流动状态是否一致,在主流区提取数据进行比较,提取位置在如图 5 的位置 3 处.将同一次开车测量的数据放在一组,得到 5 组数据.如图 6 所示,图中 1~200 代表第一次开车测量的第 1 到第 200 个瞬态场的系综平均结

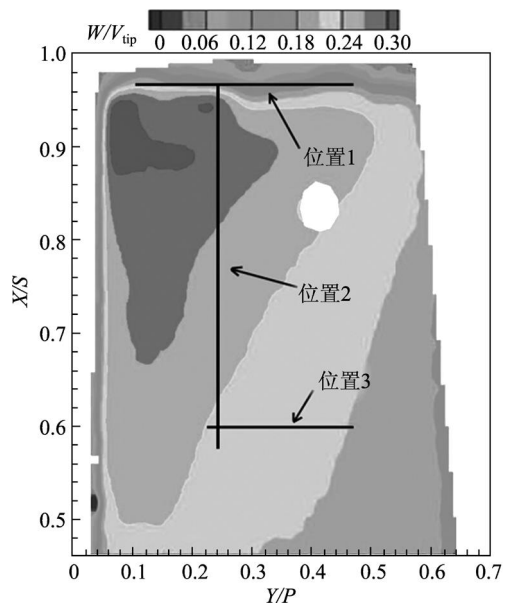


图 5 提取数据的区域

Fig. 5 Regions of data extraction

果;第二次开车采集了400个样本,即第201个瞬态场到第600个瞬态场,其他的编号代表的意思以此类推。

图6给出的是位置3处提取的接近主流流向速度的 $V_{rel} = \sqrt{V^2 + W^2}$ 的5组测量结果,每组测量结果计算中都用了叶尖切线速度 V_{tip} 无量纲化;由于测量截面是接近与主流垂直的,所以 V_{rel} 能够代表主流相对速度。对比图6的5组数据可以看出,除最后两组数据外,其他组数据得到的速度分布都有明显差别,即使第3组(601~1100)和第4组(1101~1600)统计样本数相同,速度分布仍不能很好的重合,这是由于每次开车之后压气机的工作状态都有一点变化,在主流区速度的变化范围在3.3%左右。图6各条线中间处的速度亏损是由上游支板尾迹造成的;对比5组测量结果可以发现,测量的样本数对于测量结果有影响,一次测量的样本数越大,则各组之间的测量结果越接近;另外,虽然5组测量的压气机工作点变化很小,但是它们的流动在尾迹、泄漏和二次流等区域与主流的变化趋势并不一致,既流动并不相似,因此无法根据相似准则修正实验数据。该现象在近失速状态下更加明显。

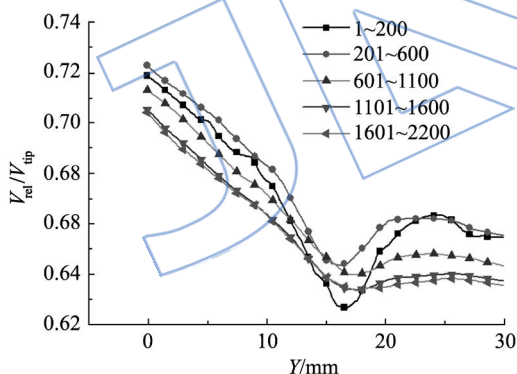


图6 位置3的 V_{rel} 分布

Fig. 6 Distribution of V_{rel} in position 3

因此,保证测量过程中压气机工作状态的稳定对于测量高精度的湍流场是关键的一个技术环节。要解决这个问题,应该选择合适的示踪粒子,减少视窗的污染,尽量保证实验在一次测量中完成。此外,要提高压气机台控制系统的精度,要实现包括转速随进口温度变化的自动调解与实时记录。最后,最重要的就是提高SPIV系统的采集频率,本实验的采集频率为2 Hz,当前的SPIV系统采集频率容易做到20 Hz以上,这样就可以在一次开车中测量2000个以上的样本,将大大降低状态点偏移带来的影响。

如图6所示,5组数据中第4组(1101~1600)和第5组(1601~2200)的结果非常接近,说明这两次开车压气机的工作状态几乎一致。为了进一步排除压气机状态点的偏移对统计量分析带来的影响,将这1100幅数据每100幅为一组求平均场,通过对比分析发现,前100幅和最后300幅与其他组获得的结果差异较大。为此,本文下面的讨论和分析都是选取的编号为1201~1900的数据。为了分析统计量的收敛性,分别随机处理了样本数 $N = 100, 300, 500, 600, 700$ 的数据,并提取叶尖和由叶尖到主流两个位置(如图5位置1和2所示)的数据进行分析,以更好地代表整个测量截面的情况。

本文中,速度、涡量和雷诺应力分别用叶尖切线速度 V_{tip} 、转子角速度 Ω 和 V_{tip}^2 无量纲化。

2.4 收敛性判断准则

为了判断收敛性,先求当 $N = 700$ 时统计量的相对不确定度 $\langle U_{700} \rangle$ 。如果其他样本数 N 求得的平均场结果与 $N = 700$ 的结果的偏差小于对应统计量的 $\langle U_{700} \rangle$,则认为结果收敛。另外,当 $\langle U_{700} \rangle \leq 5\%$ 的时候,本文认为该统计量有足够的测量精度可以做定量分析,否则认为测量精度不足。

选择相对不确定度作为收敛性判断标准是因为这样不但可以判断收敛性,还可以评价 $N = 700$ 时结果的测量精度。但有些统计量的值在一些区域非常小,比如部分区域的径向速度,雷诺切应力和主流区的涡量等等,此时就不再适合采用相对不确定度,此时收敛的判断准则采用绝对不确定度 U_{700} 。

本文图中的绝对偏差是其他样本数的结果和 $N = 700$ 得到的结果的绝对偏差,并且做无量纲化处理。相对偏差是该绝对偏差对于 $N = 700$ 时的结果的相对值。

3 结果及讨论

3.1 速度(零阶统计量)

在3个速度分量中, U 分量接近径向速度,在主流区其值很小,因此用绝对不确定度分析其收敛性。图7和图8的计算结果表明,对于主流区,当样本数超过100时结果就能够收敛,但在叶尖区域,当样本数超过300时结果才收敛。需要说明的是,速度分量 U 的绝对值与其不确定度在一个量级上,因此其测量精度不足以进行定量分析,只能用于定性分析。

速度分量 V 和速度分量 W 比速度分量 U 大 1 个量级,其测量结果要准确得多,这两个速度分量的测量精度相当,因此这里只给出相对差一些的 W 分量结果,如图 9 和图 10 所示。对于主流区,当样本数超过 300 时, V 分量相对偏差不大于 1%, W 分量相对偏差小于 1.5%;对于叶尖区域,当样本数超过 500 时, V 分量相对偏差小于 1%,

W 分量相对偏差小于 2%。由此可见,速度分量 V 和 W 有足够高的测量精度,可以用于定量分析。

综合考虑速度 U 、 V 和 W 三个速度分量的情况,当叶尖区域的样本数达到 500 以上,主流区域的样本数达到 300 以上时,可以得到收敛的速度场,并且 V 分量和 W 分量的精度能够达到定量分析的要求。

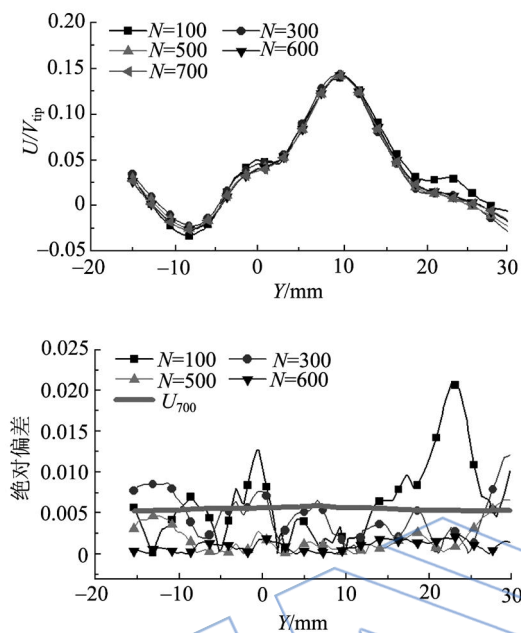


图 7 位置 1 的速度 U 及其绝对偏差

Fig. 7 Distribution of velocity U and the absolute deviation in position 1

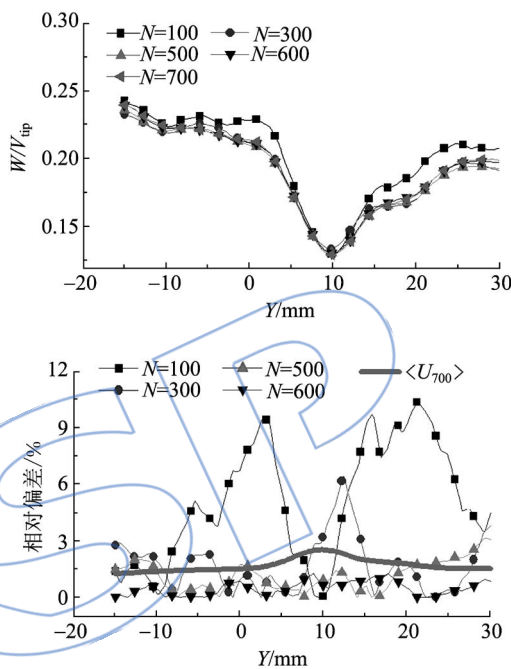


图 9 位置 1 的速度 W 及其相对偏差

Fig. 9 Distribution of velocity W and the relative deviation in position 1

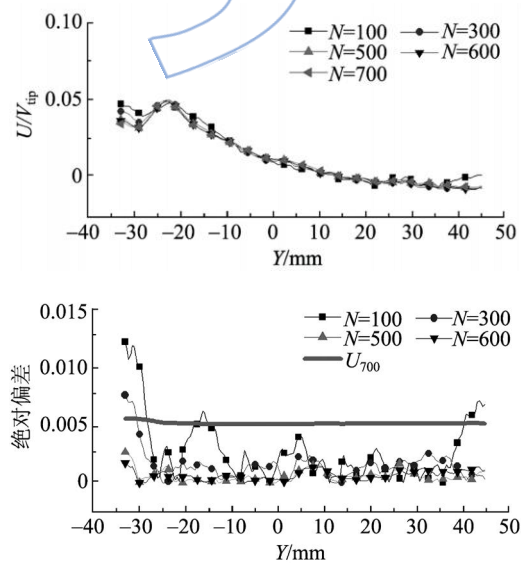


图 8 位置 2 的速度 U 及其绝对偏差

Fig. 8 Distribution of velocity U and the absolute deviation in position 2

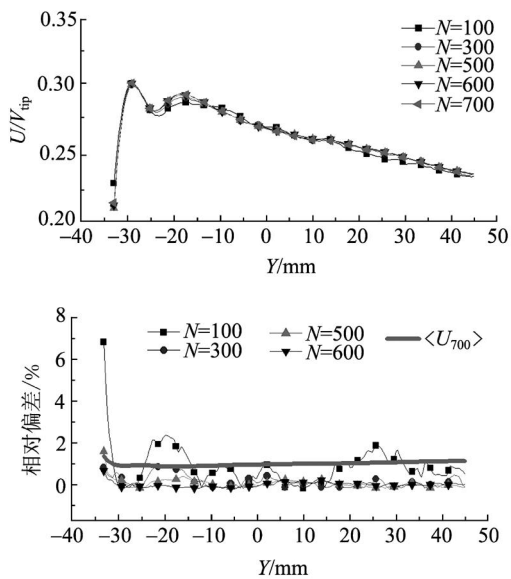


图 10 位置 2 的速度 W 及其相对偏差

Fig. 10 Distribution of velocity W and the relative deviation in position 2

3.2 涡量(1 阶统计量)

如图 1 所示,SPIV 的测量截面是 XY 平面,因此速度只能沿着 X 和 Y 方向做空间偏导数,既只能分析垂直于测量截面的涡量分量 $\omega_z = \partial V / \partial x - \partial U / \partial y$. 图 11 和图 12 分别给出了叶尖区和主流区的对应结果.

主流区涡量接近于零,只能计算其绝对不确

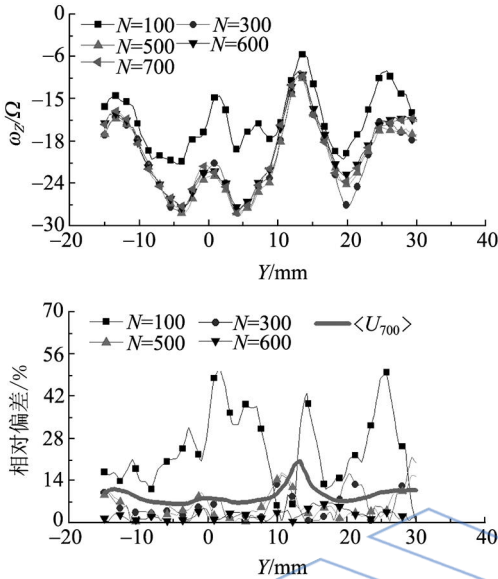


图 11 位置 1 的速度 ω_z 及其相对偏差
Fig. 11 Distribution of ω_z and the relative deviation in position 1

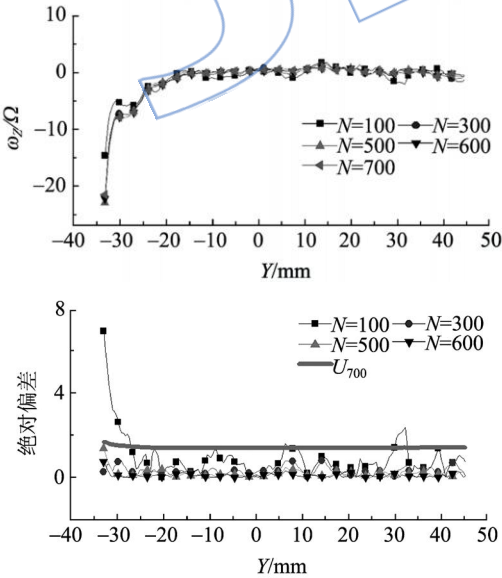


图 12 位置 2 的速度 ω_z 及其绝对偏差
Fig. 12 Distribution of ω_z and the absolute deviation in position 2

定度.由图 12 可见,当统计样本达到 100 以上,主流区涡量的统计结果就能收敛.由于叶尖泄漏流的存在,叶尖区域的涡量明显比主流区的涡量大很多.由图 11 可见,由于流动非定常性较强,当统计样本达到 500 以上时,叶尖区涡量的统计结果才能收敛;但是由于 $N = 700$ 时叶尖区域涡量的相对不确定度 $\langle U_{700} \rangle$ 还在 10 % 左右,因此涡量测量的精度不足,不能用于定量分析,只能用于定性分析.

3.3 雷诺应力(2 阶统计量)

测量结果表明,对于本文压气机转子测量截面处的流场,其雷诺正应力 $\overline{u'u'}$, $\overline{v'v'}$ 和 $\overline{w'w'}$ 较大,可以用相对不确定度表示其精度;而雷诺切应力 $-\overline{u'v'}$, $-\overline{u'w'}$ 和 $-\overline{v'w'}$ 较小,只能用绝对不确定度表示其精度.3 个雷诺正应力的统计分析结果相近,这里只给出 $\overline{v'v'}$ 分量的结果(图 13 和图 14);3 个雷诺切应力的统计分析结果也类似,这里只给出 $-\overline{v'w'}$ 分量(图 15 和图 16).

各雷诺应力不同样本数的统计分析结果表明:叶尖区域的雷诺应力虽然较大,但是由于流动复杂,当样本数大于 500 时才可以得到收敛的结果.主流区的雷诺应力虽然比叶尖区域小很多,但是流动简单,雷诺应力在主流区域比在叶尖区域更容易收敛,样本数大于 300 即可.

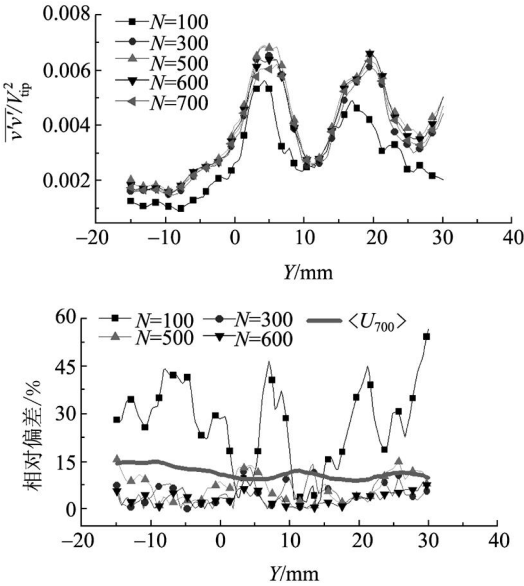


图 13 位置 1 的速度 $\overline{v'v'}$ 及其相对偏差
Fig. 13 Distribution of $\overline{v'v'}$ and the relative deviation in position 1

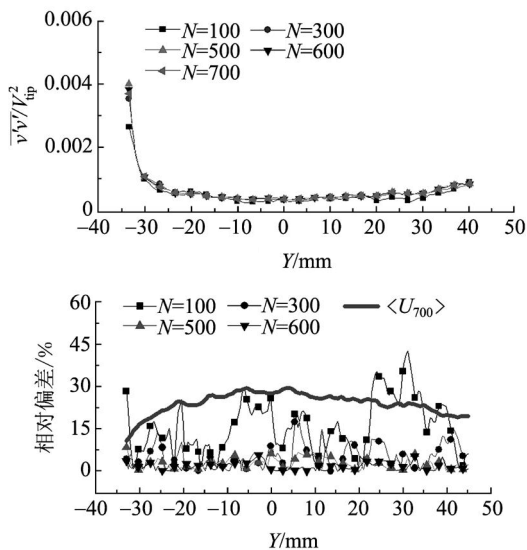


图 14 位置 2 的速度 $\overline{v'v'}$ 及其相对偏差

Fig. 14 Distribution of $\overline{v'v'}$ and the relative deviation in position 2

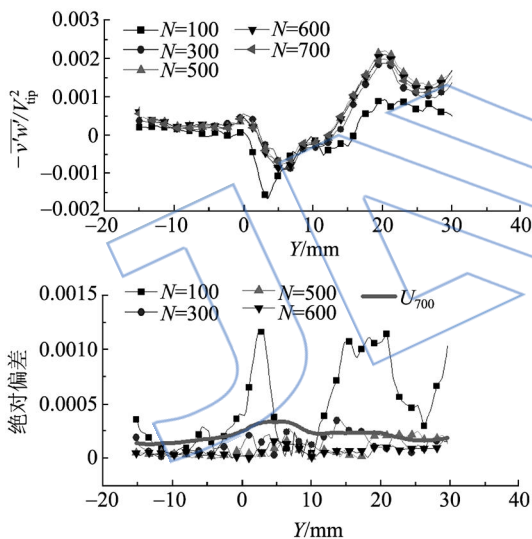


图 15 位置 1 的速度 $-\overline{v'w'}$ 及绝对偏差

Fig. 15 Distribution of $-\overline{v'w'}$ and the absolute deviation in position 1

当 $N = 700$ 时,雷诺正应力在叶尖区域的相对不确定度为 $7\% \sim 15\%$,主流的相对不确定度达到 $10\% \sim 30\%$;雷诺切应力的相对误差则更大,因此雷诺应力测量结果的精度不足以支持定量分析,也只能用于定性分析。

3.4 关于收敛性和精度的讨论

从速度、涡量和雷诺应力的以上分析结果可知,对于所测量的转子内流场,当 $N \geq 300$ 时主流区域的各阶统计量可以收敛,当 $N \geq 500$ 时叶尖

区域的各阶统计量基本上可以收敛,这主要是由于湍流度在叶尖区域明显高于在主流区域。此外,除了速度 v 和 w 的测量精度在 2% 以内,能够用于定量分析之外,其它统计量由于相对误差较大,都只能用于定性分析。

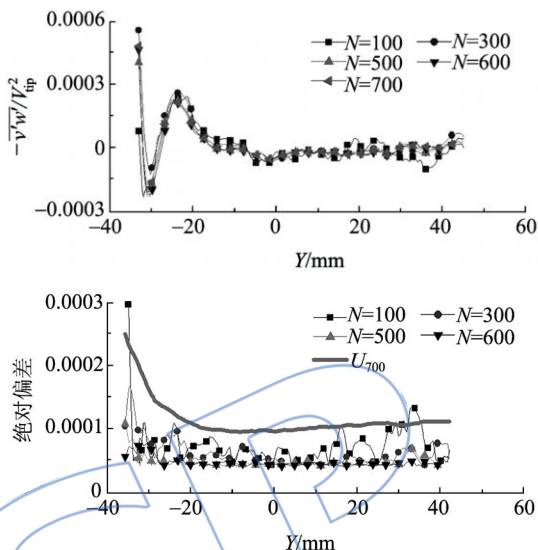


图 16 位置 2 的速度 $-\overline{v'w'}$ 及绝对偏差

Fig. 16 Distribution of $-\overline{v'w'}$ and the absolute deviation in position 2

要得到高精度的涡量和雷诺应力等测量结果,简单增加测量的样本数是不行的,因为样本数增加只能降低测量结果的 A 类不确定度。由图 3 和图 4 可知,当前的测量结果的总不确定度主要是由 B 类不确定度造成,因此只有进一步提高瞬态场的测量精度,才能得到高精度的涡量和雷诺应力等统计结果。

下面本文将着重分析 B 类不确定度的影响因素,探讨提高其精度的可行技术途径。速度的 B 类不确定度为

$$U_{U_{ij}}^B = \Delta U / K \quad (5)$$

速度的 B 类相对不确定度为

$$\langle U_{U_{ij}}^B \rangle = U_{U_{ij}}^B / U_{ij} \quad (6)$$

其中 ΔU 是根据 Westerweel 提出的理想的粒子图像位移偏差估算方法^[45]得出的误差限。

涡量 $\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, 其中 Δv 和 Δu 的 B 类不确定度分别为

$$U_{\Delta v_{ij}}^B = \frac{\Delta v_{ij}}{K} = \frac{U_{v_{i+1,j}} + U_{v_{i-1,j}}}{K} \quad (7)$$

$$U_{\Delta u_{ij}}^B = \frac{\Delta u_{ij}}{K} = \frac{U_{u_{i,j+1}} + U_{u_{i,j-1}}}{K} \quad (8)$$

根据不确定合成法则,得到涡量的 B 类不确定度为

$$U_{\omega_{ij}}^B = \frac{\sqrt{(U_{v_{i+1,j}} + U_{v_{i-1,j}})^2 + (U_{u_{i,j+1}} + U_{u_{i,j-1}})^2}}{dx \cdot K} \quad (9)$$

假定临近点的不确定度近似,并且速度 U 和速度 V 的不确定度在一个量级,则涡量的 B 类相对不确定度可以近似表示为

$$\langle U_{\omega_{ij}}^B \rangle = \frac{U_{\omega_{ij}}^B}{\omega_{ij}} = \frac{2\sqrt{2}U_{u_{ij}}}{K(\Delta V - \Delta U)} \quad (10)$$

由此可知,涡量的测量精度直接和速度的不确定度以及当地涡量大小相关。

雷诺应力的 B 类不确定度这里只对 u_{ij} 进行分析,其他雷诺应力分量的分析方法与之类似,本文不再逐一列举。

当地脉动速度为

$$u_{ij} = U_{ij} - \overline{U_{ij}} \quad (11)$$

因此脉动速度的 B 类不确定度为

$$U_{u_{ij}}^B = \frac{\Delta_{u_{ij}}}{K} = \frac{U_{U_{ij}}^B + U_{U_{ij}}}{K} \quad (12)$$

根据公式(4)雷诺应力的 B 类不确定度为

$$U_{u_{ij}}^B = 2u_{ij} \cdot U_{u_{ij}}^B \quad (13)$$

因此雷诺应力的 B 类相对不确定度为

$$\langle U_{u_{ij}}^B \rangle = \frac{2u_{ij} \cdot U_{u_{ij}}^B}{u_{ij} u_{ij}} = \frac{2}{K} \cdot \frac{U_{U_{ij}}^B + U_{U_{ij}}}{u_{ij}} \quad (14)$$

可见雷诺应力的测量精度和速度的测量精度直接相关,并且受到当地的脉动速度大小的影响。

由以上分析可知,提高速度的各阶统计量测量精度的关键是要在测量中保证速度的测量精度,而提高速度测量精度的关键是要保证瞬态速度场具备较高的测量精度。

公式(5)和(6)中误差限 $\Delta_u = \frac{d}{m \cdot dt}$,

$U_{ij} = dx/dt$,其中 d 是粒子图像位移的偏差。 m 是放大率(等于像上的线段的像素值大小除以该线段的实际长度), dt 是两束激光的时间间隔, dx 是在该时间间隔内粒子的位移。因此,速度的 B 类相对不确定度可以表示为

$$\langle U_{U_{ij}}^B \rangle = \frac{U_{U_{ij}}^B}{U_{ij}} = \frac{d}{m \cdot dx \cdot K} \quad (15)$$

由此可见,速度的 B 类不确定度主要和放大率 m ,位移偏差的估计值 d 以及粒子位移 dx 大小有关。为了提高测量精度应该提高放大率,减小粒子位移偏差,以及增大粒子位移。

4 结 论

技术测量压气机转子内部流场的精度问题,得到了以下一些主要结论:

1) 测量准确的湍流场对测量过程中压气机工作状态的稳定性提出了较高要求。有三个技术环节要重视:一是减少视窗的污染;二是提高实验台控制系统的精度;三是要采用尽可能高的 SPIV 系统测量频率。

2) 速度的各阶统计量收敛所需要的样本数和流场的湍流度密切相关,湍流度越大,需要的样本数越多。对于本文所测量的流场情况,转子近叶尖区测量的样本数要达到 500 以上,主流区测量的样本数要达到 300 以上,测量速度的各阶统计量才能够收敛。

3) 在本文的实验条件和 SPIV 测量参数情况下,只有速度 v 和 w 分量的测量精度能够满足定量分析的要求,涡量和雷诺应力等其他量都只能用于定性分析。

4) 提高瞬态速度场的测量精度,降低速度测量结果的 B 类不确定度,是获得湍流统计量准确测量结果的关键。为此,SPIV 测量中要尽可能提高测量的放大率,减小粒子位移偏差,以及增大粒子位移。

参考文献:

- [1] LIU Baojie, YU Xianjun, YUAN Huijing, et al. Application of spiv in turbomachinery[J]. Exp. Fluids, 2006, 40(4): 621-642.
- [2] YU Xianjun, LIU Baojie. Stereoscopic PIV measurement of unsteady flows in an axial compressor stage[J]. Exp. Thermal & Fluid Sci., 2007, 31: 1049-1060.
- [3] LIU Baojie, LIU Huoxing, YUAN Huijun, et al. SPIV application in the measurement leakage flow of compressor rotor[C]// Proceedings of SPIE, Optical Technology and Image Processing for Fluids and Solids Diagnostics 2002. Beijing: SPIE, 2002.
- [4] Wernet M P. Development of digital particle image velocimetry for use in turbomachinery[J]. Exp. Fluids, 2000, 28(2): 97-115.
- [5] Coudert S, Westerweel J, Fournel T. Comparison between asymmetric and symmetric stereoscopic DPIV system[J]. Exp. Fluids, 2000(Suppl.): 1-6.
- [6] Westerweel J. Theoretical analysis of the surement precision in particle image velocimetry[J]. Exp. Fluids, 2000(Suppl.): 3-12.
- [7] Westerweel J. Fundamentals of digital particle image velocimetry[J]. Meas. Sci. Technol., 1997, 8: 1379-1392.