

透平叶栅二次流瞬态特性的新测试方法

王顺森, 毛靖儒, 刘观伟, 丰镇平
(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了解决常规粒子图像测速系统(PIV)对小于20%主流速度的弱次流场进行测量时无法得到可靠矢量场的问题,通过调整第二束片光使其沿主流方向偏移1~1.5 mm来跟踪粒子运动,实现了对高速流动中弱二次流瞬态速度场的可靠测量.在此基础上,组合调制4束激光片光的触发时序和空间位置,使不同时间触发的片光能跟踪粒子的运动,再结合2套互相关CCD和偏振光技术,可获得3组高时间分辨率的连续瞬态矢量场,从而实现了非定常二次流质点运动及涡系结构演绎过程的跟踪测量.

关键词: 透平叶栅;粒子图像测速系统;非定常流;二次流;测试方法

中图分类号: TK474.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1361-06

New Measurement Method for Transient Performance of Secondary Flow in Turbine Vane Cascade

WANG Shunsen, MAO Jingru, LIU Guanwei, FENG Zhenping
(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is unreliable or infeasible that normal PIV is used to test the weak secondary flow field whose velocity is less than 20% of the main flow velocity. In this study, a new method was proposed to obtain reliable measuring results for instantaneous vector field of weak secondary flow in high velocity flow. The second light sheet was modulated to the plane of 1.0-1.5 mm downstream from the first light sheet to trace the motion of particles. In order to measure quantitatively the evolution of particle motion and vortex structure for time-dependent secondary flow, the sequence in time and space of four laser light sheets was modulated so that the motion of the particles in four transient states could be continuously traced by two sets of double-exposure CCD. The results show that three instantaneous vector fields with high time resolution can be obtained.

Keywords: turbine vane cascade; particle image velocimetry; unsteady flow; secondary flow; measurement method

透平叶栅内的二次流涡系结构非常复杂,除了通道涡外,还包括马蹄涡、角涡等^[1].许多学者根据自己的实验观察和理论分析提出了各种各样的二次流模型,其中比较著名的有:Klein(1966)的通道涡和驻点涡模型;Langston等人的马蹄涡及二次流模型^[2];Moore等人的马蹄涡和通道涡同步演变模型^[3];Sharma等人的涡流模型^[4];Wang Haiping等

人的多涡模型^[5].但是,上述模型均是建立在定性流场可视化和探针单点测量基础上的,其中烟线示踪法和乙烯示踪法是其主要的可视化手段.这些方法对气流速度有很大的限制,如在文献[5-6]中,叶栅出口速度仅为2 m/s,以如此低速流动中的二次流现象模拟汽轮机叶栅内的高速可压缩流动,会造成其非定常时频特性的失真,从而使结果失去指导意

义.表面迹法和探针虽然可测量高速流动,然而其对流场的瞬态特性却无能为力.尽管目前计算流体力学(CFD)技术发展十分迅速,但由于无法准确定义边界和壁面条件,也缺乏可靠实验数据的验证,加之流动不稳定区对扰动的发散性与方程收敛性的矛盾,使其很难模拟真实的非定常涡系结构.因此,在透平叶栅二次流研究领域急需测试方法的创新.

近年来,粒子图像测速系统(PIV)得到了快速的发展,它实现对高速瞬态流场的非接触式整场测量,为叶栅二次流研究提供了新途径.但是,PIV是为测量流场主流设计的,而次流的速度常常比主流低一个数量级,这将使得PIV在测量次流时存在很多问题.作者通过长期的实验研究和尝试,提出一种基于PIV测量次流的新方法,实现了对高速流动弱次流瞬态流场的可靠测量.经大量国内外文献检索,尚未发现同类测量方法.

1 二次流瞬态流场的新测量方法

1.1 常规 PIV 测试二次流存在的问题

常规 PIV 通过互相关函数对粒子图像进行处理来确定流体微团的运动速度,若 CCD 获得的时间间隔为 Δt (单位为 μs) 的 2 帧图像中各对应查问区内可匹配的粒子对越多,且不可匹配的粒子数量越少,则所得速度矢量的可靠性也就越高.由于 PIV 所用激光片光的厚度一般都不超过 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$,为了使出现在 $1^\#$ 片光内的粒子尽可能多地出现在 $2^\#$ 片光内,所有 PIV 都要求测量时片光与流场的主流流线平行,且 2 束片光的位置重叠度至少达到 98% 以上,以尽可能减少粒子沿片光厚度方向的位移.

图 1 所示为采用 PIV 测量叶栅流场时的常用布置方式,图 1a 用于测量主流和叶展方向的速度,图 1b 用于测量主流和节距方向的速度.因片光与主流流线平行,且根据统计结果,叶栅次流速度仅为主流速度的 $1/5 \sim 1/20$,所以无论采用哪种打光方式,示踪粒子沿片光厚度方向的位移都很小,因此都能获得令人满意的测量结果.

然而,若要测量叶栅二次流场的瞬态特性,上述 2 种 PIV 布置方式就无能为力了.此时必须使片光与主流流线垂直,即按图 2a 所示的方式布置 PIV,但由此引起的问题如图 2b 所示,图中 S_1 为 Δt 时间内粒子沿主流方向的位移, S_2 为沿次流方向的位移,箭头代表粒子运动方向, δ 是片光厚度.随着 S_1 的增大,出现在第一束片光内的粒子经 Δt 后已移动到片光之外,得到的互相关图像中可匹配的粒子对

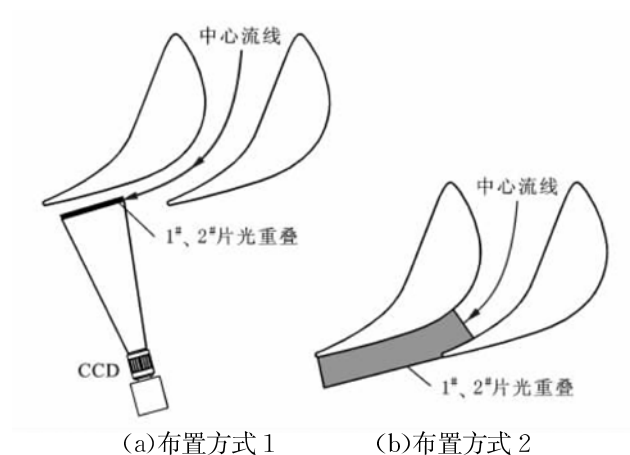
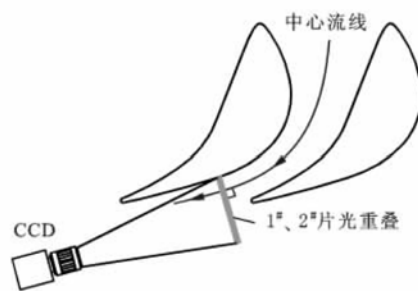
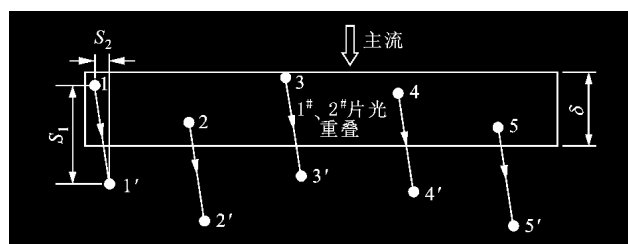


图 1 PIV 测量叶栅流场常规布置示意图

减少,最终导致查问区内互相关运算失败或产生虚假匹配.大量的实践表明,当粒子沿片光厚度方向的位移超过 $1/4$ 片光厚度时,测量结果发生错误的概率将大大增加.



(a)PIV 常规布置方式



(b)对测量的影响

图 2 常规 PIV 测量叶栅次流示意图

当次流平均速度大于 20% 主流速度时,可适当增大片光厚度实现次流场的测量,但事实上片光厚度的增加是非常有限的.根据我们的经验,在三维性较强的流场中,片光的厚度应大于 0.5 mm ,但最好不要大于查问区尺寸的 4 倍,否则很难获得有效的矢量场.由此可以想象对普遍存在的小于 20% 主流速度的弱次流场进行可靠测量的难度:当满足粒子沿片光厚度方向的位移小于 $1/4$ 片光厚度时,粒子在次流方向上位移太小,在大多数区域 S_2 常常小于

1 像素,如此之小的位移量在图像插值和重建时引起的峰锁误差将使测量结果失去可靠性^[7]。

若通过三维 PIV,即 SPIV(Stereo PIV)来获取瞬态次流场,也将面临与二维 PIV 同样的问题,即片光应与主流流线垂直,但其测量范围比二维 PIV 要大一些,这是因为每个 CCD 拍摄时与片光方向都有夹角,尽管次流方向的粒子位移仍然很小,但是所测到的粒子位移因为含有主流分量而大于 1 像素,使得峰锁影响明显减弱。将 2 组 CCD 的测量结果进行几何处理后,可得到包含 2 个次流分量的矢量场。因此,用 SPIV 对次流场进行测量比用片光重叠的二维 PIV 更有效,这在二次流测试中也有一定的应用^[8]。

但是,通过 SPIV 测量二次流场仍存在很多问题,主要有以下 3 个方面。

(1)在 SPIV 测量中各参数只能按主流的条件设置,由于 SPIV 要经历 3 次互相关运算和图像重建^[9],即使每次运算误差只有主流的 1%,对速度远小于主流的次流来说,这个测量误差也常常足以改变二次流的流线结构。

(2)受片光厚度和 PIV 所能达到的最小时间间隔($\Delta t > 0.5 \mu\text{s}$)的双重限制,SPIV 对次流场的测量还非常有限。

(3)SPIV 的最终结果是 2 个不同视角 CCD 测量结果的叠加,如图 3 所示,因视角的差异,标定焦面外的同一信号 C 在 1[#] CCD 上将处于 A 处,而在 2[#] CCD 上将处于 B 处,将 2 个 CCD 所得的粒子位移进行叠加时,由此引起的互相关匹配误差将扩展到 A、B 两处,但二维 PIV 将不存在这个问题。对 SPIV 来说,壁面反光、片光过厚和片光外的粒子光散射都是引起上述误差的主要原因,特别是光散射,尽管强度很弱,但影响范围很大,且很难避免。在测量中可以看到,对于同一流场,SPIV 的测量结果比二维 PIV 更不稳定,且存在更多的孤立向量和虚假向量。根据我们的分析,不在焦面上的粒子光散射是造成这一结果的主要原因。关于该问题的进一步讨论我们将有后续报道。

1.2 二次流测试的新方法

鉴于常规 PIV 测量二次流瞬态流场存在的问题,本文对其激光光路进行重新调制,让 2 个脉冲片光不重叠,如图 4 所示,并使 2[#] 片光沿主流方向偏移 ΔS 的距离,就像片光跟着主流运动,从而消除粒子沿主流方向的位移对次流测量的影响。若 $\Delta S = S_1$,则片光对主流具有最佳的跟随性,因此 ΔS 的

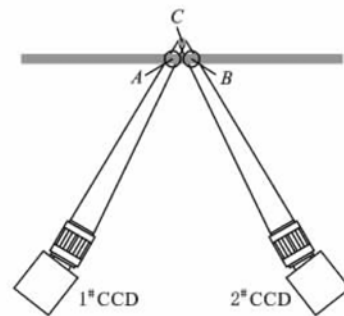
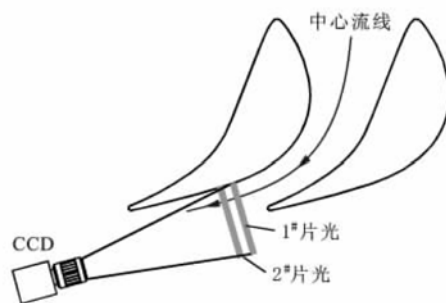


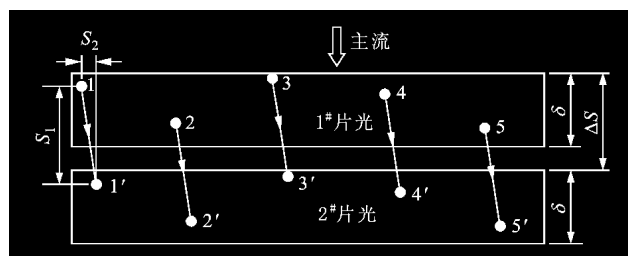
图 3 标定焦面外的粒子光散射对 SPIV 测量的影响

大小正比于被测主流速度 v , 并与选取的 2 个激光脉冲时间间隔有关,即

$$\Delta S = v \Delta t$$



(a)PIV 布置方式



(b)对测量的影响

图 4 激光偏移测量叶栅二次流示意图

在实际测量中,应在拍摄前依据要测试的主流平均流速(一般事先可估计出),将 2[#] 片光沿着主流方向预偏移 ΔS ,接着选择不同 Δt 进行拍摄尝试,从中优化出能最准确捕获二次流的结果。如图 4b 所示,箭头代表粒子运动方向,激光偏移使 1[#] 片光内的所有粒子都出现在 2[#] 片光内,从而大大提高了 PIV 对次流场测量的可靠性,很好地解决了主、次流差异悬殊的二次流速度场的测量难题,也将次流场的实验研究从定常特性拓展到瞬态特性或非定常特性。这一结果将有力地推动叶栅、高速旋流等各种具有旋涡系结构的流动的稳定性及非定常性研究。

1.3 测量方法的误差和有效性分析

首先说明,本节讨论的测量误差不包括流动可视化引起的误差,主要分析当可视化手段一定时,

由于拍摄参数选取和方法实施引起的误差。

通过对2帧图像灰度的互相关运算得到每个查问区的粒子位移 S (单位为像素)后,各查问区的速度矢量 $\mathbf{v}$ (单位为m/s)可按下式计算

$$\mathbf{v} = \mathbf{SP}/\Delta t \quad (2)$$

式中: $P(\mu\text{m}/\text{像素})$ 表示图像每像素代表的被拍视场的尺寸.因此,PIV的测量误差主要与 P 、 Δt 和 S 有关,其中 P 仅为一比例常数,而随着电子技术的发展, Δt 已能控制得非常精确.粒子位移的互相关估计误差 σ_d 主要取决于相关峰宽度 d_r 与 S 的比值^[10-11],即

$$\sigma_d = d_r/S \quad (3)$$

进一步分析可知, σ_d 主要与拍摄获取的图像信噪比、查问区尺寸以及相关算法中参数的设置有关.上述因素的最终效果,体现为匹配的有效粒子对数量及各帧图像查问区内粒子位移大小和方向的一致性程度。

对于新的二次流测试方法,由于2[#]片光追随主流方向移动, Δt 的选择只需要考虑使 S_2 达到最佳值——4~8像素,从而使图像信噪比和测量精度大大提高,根据互相关误差分析^[11],此时的误差小于1%。

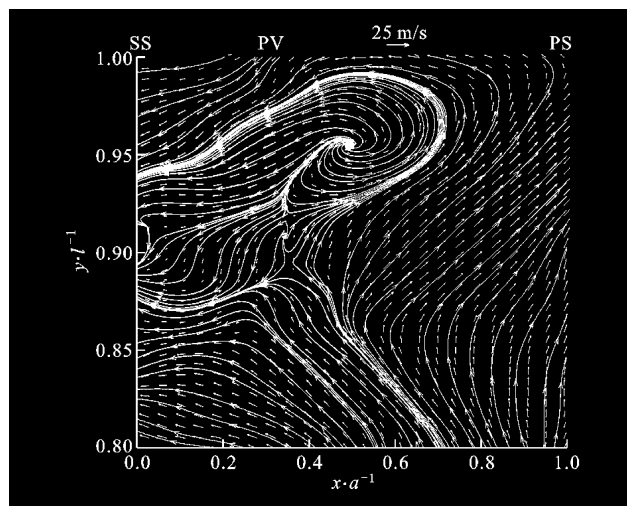
当采用激光偏移的二次流测量方法时,只要保证 $\Delta S=S_1$,理论上次流速度的测量范围可以达到若干马赫数.由于目前激光器结构的限制, ΔS 的调整范围都很小,一般不超过1~2 mm,但这已能满足主流速度为500 m/s以下流场的二次流测量要求.在实际测试中,由于常用镜头参数和空间布置上的原因,CCD镜头的物距都大于500 mm,若将镜头成像焦面置于2束片光中间,则2束激光都将处于CCD镜头的景深范围之内,而物距不同所引起的流场测量偏差小于 $\pm 0.2\%$,即使平均物距小到200 mm,所引起的偏差也仍小于 $\pm 0.5\%$,因此测试误差极小,对测量结果的影响可以忽略。

1.4 新方法测试实例

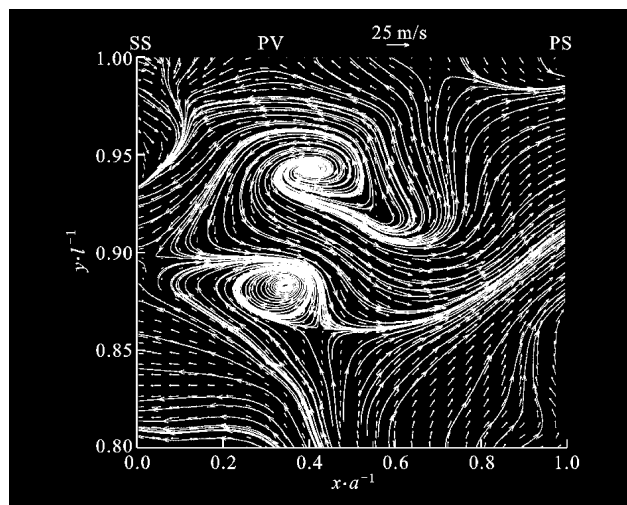
为了验证上述二次流测量新方法的有效性,作者在环形叶栅实验台上对后加载反动级叶栅出口斜切区的二次流进行了测量.实验叶栅出口气流马赫数为0.3和0.4,展弦比为1.25,激光和CCD的布置如图4a所示,片光垂直于主流中心流线,2[#]片光偏移量 $\Delta S=1.2\text{ mm}$,片光厚度为1 mm。

图5为 $Ma=0.30, 0.40$ 时靠近叶栅上端壁区域的二次流瞬态流场测量结果,图中带箭头的短线表示速度矢量,PS为压力面,SS为吸力面,PV代表

通道涡,横坐标是距吸力面的距离 x 与叶栅喉部宽度 a 之比 x/a ,纵坐标是沿叶高方向距叶根的距离 y 与叶栅总高 l 之比 y/l .因矢量的空间分辨率已达到 $0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$,因此可以从图中清晰地分辨出通道涡和其他二次流旋涡结构.之前用无片光偏移的PIV进行的测试表明,常规PIV根本无法对如此高速流动的二次流场进行测量。



(a) $Ma=0.30$



(b) $Ma=0.40$

图5 叶栅二次流的测量结果

显然,本文提出的片光偏移测量叶栅二次流的方法无论从测试矢量场的质量还是可靠性方面,都能满足对叶栅二次流瞬态流场精确测量的要求.关于二次流测试结果的进一步讨论,我们即将进行后续报道。

2 二次流涡系非定常演化测量方法

尽管上述测量方法实现了对次流瞬态流场的精确测量,但由于各个瞬态间的时间间隔远大于二次流的周期,很难建立各个瞬态间的时间关联性,因此

也就无法跟踪次流场涡系的演化过程. 这些问题是由 PIV 的硬件特性决定的, 即每组互相关图像 2 次曝光的时间间隔 Δt 是靠调制 2 个激光器的触发时间来实现的, 虽然在理论上可以无限小, 但激光能量释放后需要一定的时间为下一个脉冲积累能量, 而 CCD 也需要时间存储图像, 所以 2 组图像的时间间隔却很长, 目前最大采样率在 15 Hz 左右. 因此, 常规 PIV 对非定常流动的测量还有很大的局限性.

在对流场加速度的 PIV 测量方法研究中, Christensen 等人^[12]和 Perret 等人^[13]相继提出或实施了用 2 套双脉冲激光器和多套双曝光 CCD 进行组合的方法, 相当于用 2 套 PIV 各获得 1 个矢量场, 因为 2 套 PIV 之间的触发时间间隔可以任意选择, 因此可以获得 2 组极小时间间隔的瞬态矢量场.

为了实现对二次流场涡系非定常演化过程的测量, 本文在上述文献研究的基础上, 提出如图 6 所示的 2 套双脉冲激光器组合方案: 调制 4 束激光进入同一个光导臂, 并通过调整 M1~M6 6 个光学镜片使 4 束片光在测量区沿主流方向依次偏移一定的距离 ΔS , 每束光之间的时间间隔均为 Δt , 其中 ΔS 和 Δt 仍按 1.2 节的方法选择; 然后, 用 2 个 CCD 分别记录 L1、L2、L3 和 L4 片光处的粒子图像, 并记作 1[#]、2[#]、3[#] 和 4[#] 图像; 最后, 按照 1+2、2+3 和 3+4 模式进行互相关匹配处理, 即可得到 3 组可调时间分辨率的瞬态矢量场. 该方法与文献^[10-12]的方法有很大区别, 主要表现在以下 3 个方面:

(1) 4 束片光在空间上相互偏移, 以主动跟踪粒子的运动, 而不像文献中那样都重叠在一起或两两重叠;

(2) 以次流测量为主, 且只需要 2 个 CCD 即可实现对次流场运动特性的连续跟踪;

(3) 4 束片光由同一柱面镜调制, 片光间平行度高, 因此可对 2[#] 和 3[#] 图像进行互相关, 最终获得 3 组矢量场和 2 组加速度场.

由于目前互相关 CCD 采用的是短-长曝光模式, 即第 1 帧的曝光时间为 1~5 μs , 而第 2 帧的曝光时间为 800~10 000 μs , 因此如果不采取一些光路措施, 第 3 个甚至第 4 个激光脉冲都会落在 1[#] CCD 的第 2 次曝光中. 为解决上述问题, 本文提出 2 个方案: 方案 1 是在 L3 和 L4 光路中增加偏振片 P1, 而在 1[#] CCD 镜头前安装偏振片 P2, 且与 P1 的相位差 90°, 使 L3 和 L4 无法进入 1[#] CCD, 另外 2[#] CCD 的触发时间应在 L2 和 L3 之间, 以避免 L1 和 L2 落在 2[#] CCD 的第 1 帧曝光时间内; 方案 2 是通

过调整激光光强和 CCD 光圈, 即采取 1[#] CCD 小光圈、L1 和 L2 高光强, 而 2[#] CCD 大光圈、L1 和 L2 低光强的措施, 结合图像后处理来解决上述问题, 其优点是不用增加光学元件, 但缺点是测量范围受到所测流场及光强、光圈可调范围的限制, 不如偏振片方案通用. 考虑到偏振片并不能 100% 过滤掉另一个偏振方向的激光能量, 若同时采用这 2 种方案则可取得最佳的测量结果.

由于可对每个 CCD 单独标定, 使其焦面均处于所测 2 束片光的中间, 因此测量误差与 1.3 节所分析的结果完全相同. 常规 PIV 测量从本质上说仍属于欧拉方法, 但本文提出的方法由于实现了对粒子运动的连续跟踪, 因此应属于类拉格朗日方法. 尽管本文方法只实现了每组 4 个瞬态的连续跟踪, 但在每个二次流周期内可获得 3 个瞬态矢量场和 2 个加速度场, 还可通过调整 Δt 进行更高时间分辨率的非定常流场研究, 因此基本可以满足对二次流演化过程的跟踪. 鉴于目前高分辨率 1 MHz 高速摄影也只能采集 4 帧图像, 所以本文方法比高速摄影具有更大的优势.

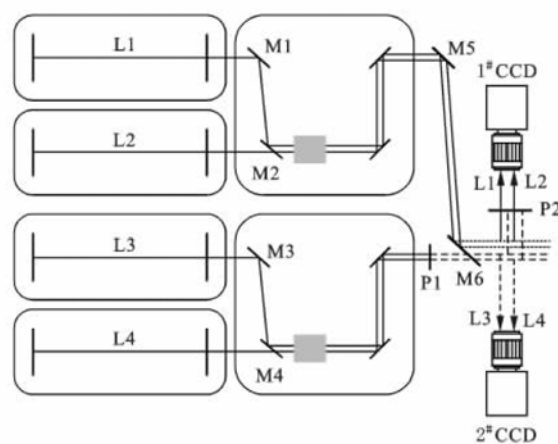


图 6 双 CCD 4 脉冲激光测量二次流组合方案

3 结 论

(1) 目前的 PIV 对平均速度小于 20% 主流速度的弱次流场进行测量时, 无法得到可靠的矢量场. 本文提出的通过调整使第二激光片光沿主流方向偏移 1~2 mm、通过跟踪粒子拍摄的类拉格朗日方法, 实现了主流速度小于 500 m/s 的二次流场的精确测量, 并通过实验验证了其可行性.

(2) 提出了对二次流场非定常涡系演化过程 PIV 测量的新方案: 组合调制 4 束激光片光的触发时序和空间位置, 使不同时间触发的片光能跟踪粒子的运动, 再结合 2 套互相关 CCD 和偏振光技术获

得3组高时间分辨率的连续瞬态矢量场,从而实现了非定常二次流质点运动及涡系结构演绎过程的跟踪测量。

参考文献:

- [1] DENTON J D. Loss mechanisms in turbomachinery [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1993, 115(4): 621-656.
- [2] LANGSTON L S, NICE M L, HOOPER R M. Three dimensional flow within a turbine blade passage [J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1977, 99(1): 21-28.
- [3] MOORE J, SMITH B L. Flow in a turbine cascade, part 2: measurement of flow trajectories by ethylene detection [J]. ASME Journal of Energy for Gas and Power, 1984, 106(2): 409-413.
- [4] SHARMA O P, BUTLER T L. Predictions of endwall losses and secondary flows in axial flow turbine cascades [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1987, 109(2): 229-236.
- [5] WANG Haiping, OLSN S J, GOLDSTEIN R J, et al. Flow visualization in a linear turbine cascade of high performance turbine blade [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119(1): 1-8.
- [6] SIEVERDING C H, VAN DEN BOSCH P. The use of coloured smoke to visualize secondary flow in a turbine-blade cascade [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 134(1): 85-89.
- [7] WESTERWHEEL J, DABIRI D, GHARIB M. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings [J]. Experiments in Fluids, 1997, 23(1): 20-28.
- [8] LIU Baojie, YU Xianjun, LIU Huoxing, et al. Application of SPIV in turbomachinery [J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(4): 621-642.
- [9] HINSCH, KLAUS D. Three-dimensional particle velocimetry [J]. Measurement Science and Technology, 1995, 6(6): 742-753.
- [10] SCARANO F. Iterative image deformation methods in PIV [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(1): 1-19.
- [11] WERNET M P. Development of digital particle imaging velocimetry for use in turbomachinery [J]. Experiments in Fluids, 2000, 28(2): 97-115.
- [12] CHRISTENSEN K T, ADRIAN R J. Measurement of instantaneous Eulerian acceleration fields by particle image accelerometry: method and accuracy [J]. Experiments in Fluids, 2002, 33(6): 759-769.
- [13] PERRET L, BRAUD P, FOURMENT C, et al. 3-component acceleration field measurement by dual-time stereoscopic particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(5): 813-824.

(编辑 葛赵青 王焕雪)

“过程控制与效率工程教育部重点实验室”建设计划通过专家论证

2008年8月13日,教育部科技司组织专家对依托我校建设的“过程控制与效率工程教育部重点实验室”的建设计划进行了论证。专家组由中南大学何继善院士担任组长,成员包括来自北京大学、清华大学、浙江大学、天津大学、重庆大学以及西安理工大学的专家。

会议由教育部科技司基础处李渝红处长主持,我校党委常委、校长助理宋晓平教授致欢迎辞,汪应洛院士、科技处席光处长、赵广社副处长、管理学院王刊良副院长及实验室的部分学术带头人参加了论证会。

李渝红处长对实验室建设计划论证的具体要求做了说明,她特别强调,依托我校建设的“过程控制与效率工程”教育部重点实验室属于自然科学与人文社会科学交叉的实验室,目前教育部也只是在国内部分高校试点建设,希望我校能够加强实验室建设,不断总结经验,为此类实验室的建设和发展摸索出更好的模式。“过程控制与效率工程教育部重点实验室”负责人孙林岩教授就实验室的《建设计划任务书》进行了汇报,重点介绍了重点实验室的建设目标与建设内容。专家组在听完汇报后,现场考察了实验室,并就重点实验室建设目标的科学性、建设内容的前瞻性以及政策机制等问题进行了质询和讨论,认为实验室建设计划合理可行,一致同意通过论证。专家组建议,进一步集中研究内容,更加突出重点,在研究队伍中适当充实工程类的研究人员,并希望学校进一步加大对实验室建设的支持力度。

(来源:西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>)