

# PIV 技术在涡轮静叶测量中的应用

李 军

(上海交通大学动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030)

**摘 要:**详细介绍了 PIV 的工作原理、数据处理流程和使用要点。针对涡轮内部复杂的流动特性,应用具有较高空间分辨率的非接触式瞬态速度的 PIV 测量技术,获得了较清晰完整的沿叶高平面和叶栅出口速度场的瞬时速度场信息,并据此分析了涡轮静叶出口二次流的流动特性,为叶栅流场优化提供了有益的参考。

**关键词:**激光粒子图像测速仪;涡轮;二次流;尾迹;非定常

**中图分类号:**TK402      **文献标识码:**A

## Application of PIV Measurement Technology on Turbomachinery

LI Jun

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** PIV is a new measure instrument, which has better merit than others especially for complex flow field. The working rule, disposal flow chart and operation outline of PIV are introduced in detail. Finally, an example is used to measure the instantaneous entire velocity field along blade height and outlet plane with PIV. As a result, it is satisfied and beneficial to optimize the blade flow field.

**Key words:** PIV; turbine; secondary flow; wake; unsteady

### 1 前 言

为了定量地研究涡轮机械内部的复杂流动机理,国内外发展了纹影阴影法、旋转探针、热线风速仪、激光多普勒测速仪,高频动态压力探针等一系列测试技术。但是这些传统的流速测量仪器只能进行单点测量,且大多是接触式测量,无法对整个区域内的二维流场进行无扰动测量,而且得到的是平均意义下的流动速度分布;当流场内部的流速变化较大并有涡存在时,传统的仪器很难实现流速的准确测量。同时,对瞬态流场的观测和显示,不但要求测量系统有灵敏的反应速度,还需有较高的空间分辨率和连续观察、测量瞬时流速场的能力。激光粒子图像测速仪(PIV)是20世纪80年代末发展起来的一种非接触式瞬态速度测量技术,将定性的流动显示

和定量的速度场测量集于一身,并应用光学图像技术、图像处理技术、计算机技术等先进的测试技术,获得一个平面内的瞬时速度场,具有空间分辨率高(一般可达0.15mm)、信息量大、测量速度快、不干扰被测流场和可连续测量等非常实用的优点。总体而言,在当今测试技术从稳态测试转入动态测试,逐点测量变为全场测量的趋势下,PIV作为一种定量流动显示技术使实验研究水平大为提高,已在风洞试验和工业部门得到广泛应用。

降低涡轮装置能耗对国民经济的发展具有重要意义,而提高涡轮装置性能的关键是深入认识其内

**作者简介:**李 军(1979-),男,上海交通大学在读博士研究生,研究方向为动力系统的建模仿真。E-mail:ljjjjj@126.com

**收稿日期:**2007-08-15

部流动的本质、流动结构等。涡轮内部流动的时间和空间结构极其复杂,一般情况下为非定常三维湍流流动。典型的流动现象有分离流、二次流、边界层的相互作用以及叶片尾迹区的复杂流动等。本文针对涡轮内部复杂的流动特性,应用具有较高空间分辨率和可以测量瞬时流速场的 PIV 技术,获得了具有较高空间分辨率和较清晰完整的瞬态流场图。

## 2 PIV 工作原理

标准的 PIV 测试系统包括光源系统、图像采集系统和图像处理系统<sup>[1]</sup>,图1所示为 PIV 系统的光学框架图。激光器产生高强度的脉冲激光,通过光臂的引导,经过柱面镜和球面镜形成片光照亮流场中的示踪粒子,并将1台 CCD 摄像机置于和片光源照亮区域垂直的位置,用成像的方法记录2次曝光后示踪粒子的位置,采用图像分析技术得到流场中各点粒子的位移,以粒子速度代表所在流场内相应位置处流体的运动速度,由此位移和曝光的时间间隔得到流场中各点的流速矢量图。

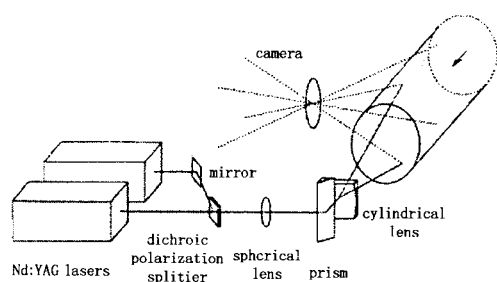


图1 PIV 光学系统框架图

### 2.1 光源类型

激光常用光源如表1所示。

表1 激光常用光源

光源	脉冲持续期/ $\mu\text{s}$	脉冲间隔/ $\mu\text{s}$	能量/脉冲/ $\text{mJ}$	重复率/ $\text{Hz}$
Ar-ion	50	500	0.1~1.0	2000
YAG	0.01	0.2	50~400	10
Rugby	0.025	50	1000	0.01
Cu Vapor	0.01	50	5	20000

### 2.2 片光系统及校准

片光系统的作用是照亮测量区,使测量区内的示踪粒子产生散射光,并保证散射光强足以使 PIV 图像拍摄系统记录下示踪粒子的位置。在 PIV 测量流场时,要求两个脉冲光形成的片光源在测量区域内完全重合且亮度分布一样。而实际上,激光器发出的激光经过光学元件之后形成的是两头尖、中间

厚的棱形片光源,况且两个激光器的工作特性不可能完全一样。这样,如果两个片光源在测量区域的亮度分布相差较大的话,就会使两幅粒子图谱缺乏可比性。因而,在 PIV 流动测量实验中,必须对片光源的位置和亮度进行校准。校准主要有以下几个步骤:①打开两个脉冲激光器,在没有球面镜和柱面镜的条件下调整光斑的位置和形状,使两个脉冲光源的光斑形状为圆形并且重合。②在光斑质量(圆度和亮度分布)满意的情况下,装上球面镜及柱面镜的组件,使激光器产生具有一定极小厚度的片光源。其中柱透镜控制光在一个方向内发散,球透镜控制片光厚度,得到光腰处的厚度可为几微米至几毫米。在确定测量截面之后,放上靶板,使靶板的一面与需要测量的截面重合,再通过调节光学元件使两个激光器产生的片光源都充分照亮靶板的测量面。③调整两个激光器的功率,使两束片光源的亮度分布相近。由于两个激光器的工作特性不一样,因而在测量时可以先拍摄一幅粒子图像,通过微调两个激光器的功率按钮使两幅粒子图谱的亮度分布相近,当然这样会给实验带来一定的误差。

### 2.3 图像拍摄系统及双曝光时间间隔的确定

图像拍摄系统的作用是感应示踪粒子产生的散射光。测量时片光源系统与图像拍摄系统必须能够同步工作,才可以实时“冻结”示踪粒子的当前位置,为相应时间间隔提供示踪粒子的位移信息。拍摄方式分为两类,一类是自相关模式,另一类是互相关模式。在自相关模式中,前后两帧示踪粒子图像信息都存储在同一个 CCD 相机内的帧存储器中,由于一个粒子两次曝光而产生的两个像点的时间顺序无法确定,使得粒子图像位移方向的判别存在二义性。而在互相关模式中,前后两个时刻拍摄得到的不同示踪粒子图像信息被存储到 CCD 相机中的不同帧存储器中,可以明确知道两帧示踪粒子图像的时间顺序,根本解决了粒子位移方向问题。两帧粒子图像之间双曝光时间间隔  $\Delta t$  由流场特性来决定的,主要从粒子穿透片光源厚度和穿越查询区两个时限来考虑。根据事先测得的进口速度估计一个流场中的速度最大值,使得  $\Delta t_1 \leq \delta/V_{\max}$ ,其中  $\delta$  为片光源的厚度,  $V_{\max}$  为测量平面内最大速度分量大小,这样就能够保证测量面中不会有大量示踪粒子流进流出。同时,为了提高信噪比,针对 50% 重叠率的查

询区,一般建议粒子在双曝光时间间隔内最大横向和纵向位移不能超过查询区宽度的 1/2,从而可以导出  $\Delta t_2 \leq 0.15 N_{int} S / V_{max}$ ,其中  $N_{int}$  为查询区宽度所占的 CCD 像素个数,  $S$  为测量区域尺寸与 CCD 相机像素之间对应比值。这样双曝光时间间隔可以确定  $\Delta t = \min(\Delta t_1, \Delta t_2)$ 。

### 2.4 数据处理软件系统

通过 PIV 图像采集系统可以得到具有 256 个灰度级的粒子图像,通过傅里叶正、逆变换及窗口函数、过滤函数等步骤,然后对查询区内粒子图像采用统计平均分析方法提取速度信息,获得整个流场的速度值。图 2 示出了 PIV 数据处理流程图。

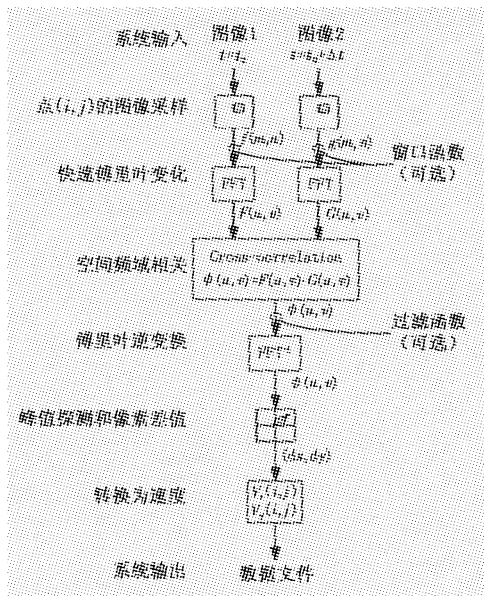


图 2 PIV 数据处理流程图

### 2.5 示踪粒子的选择与添加

激光测量技术均离不开示踪粒子。良好的光散射性和跟随性是选取示踪粒子最基本的要求,但这两个要求互相制约:散射性随尺寸的增加而增加,而尺寸愈大的示踪粒子对流动的跟随性愈差。另一关键环节是示踪粒子的浓度,它不但与激光强度的衰减、流体的流动、粒子凝聚速度、信噪比等有关,还与查询区的大小、光学系统的放大率以及片光的厚度等有关,在实验中必须权衡这些因素。有鉴于此,本文实验中采用舞台烟雾发生器添加示踪粒子,舞台烟雾的基本成分是一种烟油,能产生足量粒子。为了避免油烟聚集呈团雾状,导致图像处理无法分辨单个粒子图像,从烟雾发生器出来后的油烟不是直接流入流道,而是经过一个集烟器流入流场。这样既解决了团雾的问题,同时还避免了舞台烟雾喷射

出来时所带的速度影响进气均匀性。根据简化估算,该示踪粒子在一般亚音速流动中的跟随性不低于 99%。舞台烟雾示踪粒子发生器如图 3 所示。

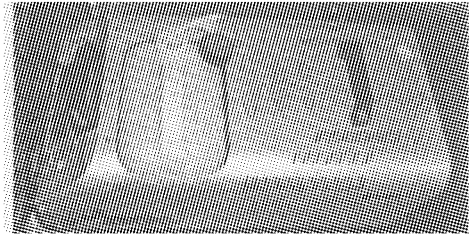


图 3 舞台烟雾示踪粒子发生器

### 3 PIV 测量实例

本实验所使用的 PIV 系统是丹麦 Dantec 公司产品,由片光源系统、图像拍摄系统、信号处理器和 FlowMap 软件等四部分组成。其中,片光源系统是以双谐振脉冲式 Nd:YAG 激光器为光源,激光器的最大工作频率为 10Hz,每个脉冲能量高达 200mJ。脉冲光采用 Qswitch 触发方式来获得,脉宽 5.0 ~ 10.0ns,输出的激光束波长为 532μm 的绿色脉冲光,这种脉冲光足以照亮空气中的亚微米级粒子。两台独立激光器的使用,可以很方便地选择两个激光脉冲之间的时间间隔,而且时间间隔可以达到微秒级,大大扩展了速度测量的范围。激光器发出的激光束经过光学部件后,可转变成约为 1mm 的片光源。CCD 采用 Kodak Mega plus ES1.0 互/自相关数字相机,分辨率为 1018 × 1008 像素,以 256 级灰度方式识别示踪粒子的信息。在相机镜头前还加上一个标准的 60mm 镜头 (Nikon Micro Nikkor 60/2.8),在实际测量中,调节镜头就可以保证 CCD 相机的焦平面和被测平面一致。通过计算机内软件 FlowMap3.11 来控制 and 协调各组成部件间的工作。利用 FlowMap 软件提供的界面,用户实时控制完成 PIV 系统的数据采集、处理和图像显示。图 4 示出了 PIV 系统实物图。

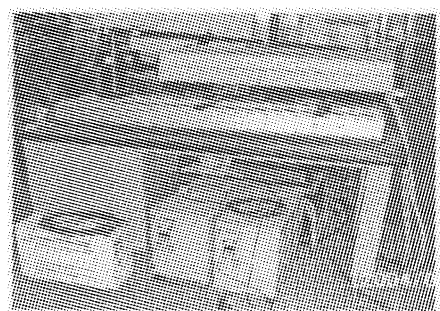


图 4 PIV 实验仪器及布置图

本实验测量区域物理尺度为  $85\text{mm} \times 85\text{mm}$ , 互相关设置为  $32 \times 32$  像素, 因此整个测量区域被划分为  $32 \times 32$  个查询区。此时双曝光间隔  $\Delta t$  设为  $30\mu\text{s}$ , 所以 PIV 可测最大速度值为  $21\text{m/s}$ 。如果把进口风量提升, 最大获得的叶栅流道中心值将达到  $30\text{m/s}$ 。相应的 PIV 设置更改有两种方法: 降低时间间隔; 增加每个互相关区域的物理大小(在测量区域已定的情况下, 只可通过降低每个互相关区域的像素数目达到)。

#### 4 PIV 测量结果和分析

叶轮机械内部的流动是极为复杂的。现有的实验测量手段还不能有效地获取叶轮机械内部流动的细流, 而 PIV 测量是一种行之有效地全场测量方法。本文采用的空气涡轮叶型采用静叶叶型 25NSP。前置圆柱列产生的尾迹用于模拟上游动叶旋转产生的尾迹。叶栅实验中将模拟动叶的圆柱列每次沿周向方向移动四分之一节距  $T$  (定义无圆柱、圆柱分别位于  $0T/4, 1T/4, 2T/4, 3T/4$  位置), 获取圆柱尾迹对叶栅速度场的影响情况。图 5 示出实验测量结果。

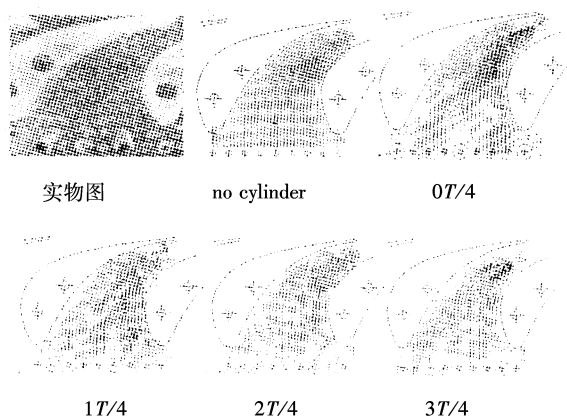


图5 非正常尾迹的 PIV 实验结果

从图 5 中可以看出, 上游没有圆柱列时, 流场均匀, 气流沿着叶栅流道平稳转折。而上游存在圆柱列时(后四种情况), 圆柱脱落涡均被吞入叶栅流道之中, 但相应于不同的圆柱列位置, 圆柱尾迹进入叶栅流道的部位不同, 导致上游圆柱尾迹进入静叶流道, 与主流进行掺混的位置不同。当损失团被输运到第二列静叶的流道中央时, 由于低能流体与主流区域的流体掺混, 势必增加第二列静叶叶栅的流动损失。而当损失团撞击到第二列静叶的前缘附近

时, 这些低能流体主要耗散到叶片表面的附面层里面去了, 对主流区域的流体影响不大, 因此第二列静叶叶栅的流动损失变化不大。综上所述, 上游圆柱的相对位置变化得到的最高效率对应着圆柱尾迹被输运到下游静叶的前缘附近, 最低效率对应着圆柱尾迹被输运到下游静叶的流道中央。同时, 使用 PIV 测量了叶栅出口平面的二次流, 如图 6 所示。图中明显测量得到了上、下端壁的二次涡, 可见 PIV 是一种有效地测量瞬态整场的工具。

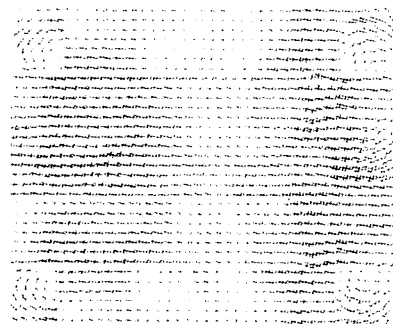


图6 二次流 PIV 测量结果

#### 5 结论

PIV 技术是一种新兴的测量手段, 拥有其他测量方式不可比拟的优点, 对于复杂流场的测量尤为明显。本文针对涡轮内部复杂的流动特性, 应用具有较高空间分辨率和可以测量瞬时流速场的 PIV 技术, 获得了较清晰完整的沿叶高平面和叶栅出口速度场的瞬时速度场信息, 并据此分析了涡轮静叶出口二次流的流动特性, 其结果是令人满意的, 为叶栅流场优化提供了有益的参考。

#### 参考文献:

- [1] Reda R Mankbadi. A study of unsteady rotor-stator interactions[J]. *Asme Journal of Turbomachinery*, 1989, 111: 394-400.
- [2] O P Sharma, G F Pickett. Assessment of unsteady flows in turbines[J]. *Asme Journal of Turbomachinery*, 1992, 114: 79-90.
- [3] V Schulte, H P Hodson. Unsteady wake induced boundary layer transition in high lift LP turbine[J]. *Asme Journal of Turbomachinery*, 1998, 120: 28-35.
- [4] 翁史烈. 燃气轮机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.