

粒 子 图 像 测 速 技 术

课 程 讲 义

授课人： 杜 海

单 位： 大连理工大学 建设工程学部

编制日期： 2016 年 4 月 5 日

第一章：粒子图像测试技术与摄影测量法

1.1 概述

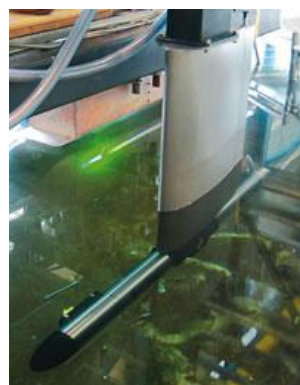
粒子图像测速技术（Particle Image Velocimetry, PIV）是在流动显示基础上发展起来的一种散斑图像测速技术。该技术充分利用了像面上所“冻结”的流场信息来剖析流体运动，具有非接触式测量的特点。PIV 技术作为一种具有代表性的运动追踪测量技术在各个应用研究领域中也显示出其独特的魅力与重要价值，如在医学研究领域中的血液流动测试、在工程领域中的管道测量、在环境研究领域的搅拌器流动测试、水产养殖领域的人工渔礁周围流场测试、航空领域中的飞行器风洞测试、汽车研究领域中的车体结构流动测试等等。目前 PIV 技术作为一种流体测量技术的价值已在科研与工业中得到了充分的验证，应用举例见图 1-1。



(a) 飞行器设计



(b) 管道研究



(c) 船舶研制

图 1-1 PIV 在各行各业中的应用

在流体测量技术的发展中看粒子图像测速的技术特点

在过去的几十年里，为了满足人们研究流动的物理机理及动力学特性的需要，流体测量技术取得了很大进展。以流速测量为例，传统的皮托管测速成本低、操作简单，但它的动态性能差，对流场扰动大，精度不高。热线热膜流速计（HWA/F）结合了现代迅猛发展的电子技术，测量精度和频响都大大提高了，但如果流场范围较小，与探头大小可比时，测量的空间分辨率受到限制，且此时对流场的影响很大。相比之下，激光多普勒测速仪（LDV）在测量较小的流场时显示出它的非接触式测量的优点，具有极好的时间分辨率和空间分辨力，可做三维测速，已经成为流速测量的标准技术并得到了广泛应用。相位多普勒测速仪（PDA 或 PDAP）不仅能像 LDV 那样给出粒子的速度，而且可以给出粒子的粒径，在两相流动的测

量中得到了广泛的应用。然而，它和 LDV 以及热线流速仪一样，都只是孤立点测量技术。在对流动测量过程中，这些方法的使用或多或少地干扰了流场的自由运动，而且很难获得细致的流动图像，难以满足瞬态流场测试的需要。流动显示技术对于提供瞬态流动图案无疑是非常有效的，但在定量上遇到了很大的困难，精度方面也很难满足测试要求。

随着科学技术的发展，在流体研究需求的刺激下，流动显示技术结合光学、图像处理及计算机技术，将流动显示所获得的定性图像推向定量化，PIV 技术应运而生。该技术综合了孤立点测量技术和显示测量技术的优点，克服了两种测量技术的弱点而成，可通过流场图像的分析获得流动结构，因此既具备单点测量技术的精度和分辨率，又能获得流动显示的瞬态信息和整体结构。PIV 技术的这个特点使得该技术具有获得小尺度结构矢量图的能力，这对于既拥有很宽范围的运动尺度，又要求具有能分析足够小尺度的空间分辨率的湍流研究无疑是非常重要的。另外，PIV 的技术特点也使得它可以满足一些稳定流动的测试需要。所谓稳定流动指的是速度脉动与平均速度相比很小的流动。实际流动中存在着许多特殊情况，比如狭窄流场，其流动本身是稳定的，但流场狭小，LDV 的分光束难以相交成可测状态，而 HWFA 又会破坏流场的状态，此时粒子图像测速技术便能派上用场了。

1.2 PIV 测速原理及系统结构

PIV 技术来源于流动显示技术，主要通过图像分析技术追踪散布在流场中小颗粒，并用这些颗粒的运动来表征流体的运动，其具体操作过程为：首先在流场中布撒示踪粒子，使用 532nm 的激光或其他光源照亮所测流场区域，通过连续两次或多次曝光，粒子的图像被记录在底片上或成像在 CCD 面上；然后采用自相关法、互相关法以及颗粒跟踪等方法处理粒子图像，计算出流场中各点的流速矢量；最后根据需求，反演出其他运动参量（包括流场速度矢量图、速度分量图、流线图等）。从本质上来讲，粒子图像测速测出的是流场中粒子的速度，是利用布撒在流体中的跟随性较好的示踪粒子来代表粒子所在位置的流场速度。

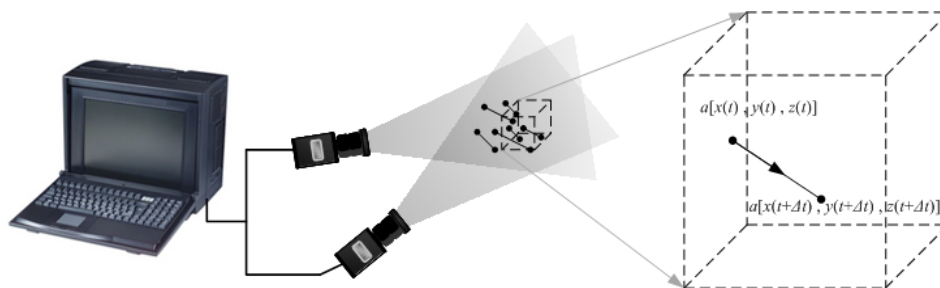


图1-2 PIV测速原理

如图1-2所示，测量粒子经过 Δt 时间的移动，其位置从 $(x(t), y(t), z(t))$ 变化到 $(x(t + \Delta t), y(t + \Delta t), z(t + \Delta t))$ ，当时间间隔 Δt 足够小，以至于小到与受精度约束的拉格朗日速度场的泰勒微尺度可以比较的程度。此时，粒子的速度可以用位移与时间间隔的比值来近似，如式(1-1)所示。

$$\begin{cases} v_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \\ v_y = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} \\ v_z = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dz(t)}{dt} \approx \frac{z(t + \Delta t) - z(t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (1-1)$$

根据式(1-1)可知只要在图像分析过程中获得粒子的位移信息，然后配合摄像机的定标参数，便可以得到该粒子的空间位移信息，另外由于在一次实验中 Δt 是固定的，所以该粒子在笛卡尔坐标系中的速度矢量可以计算得到。当获知足够多粒子的位移情况即可重建整个流场的速度分布。

PIV 技术按照示踪粒子的浓度大小可分为粒子跟踪测速技术（Particle Tracking Velocimetry, PTV）、粒子图像测速技术（这里指使用区域匹配方法的PIV）和激光散斑测速技术（Laser Speckle Velocimetry, LSV）。当粒子浓度极低时，可以通过识别、跟踪单个粒子的运动，从所采集的粒子图像中直接测得单个粒子的位移，这种低粒子密度模式的图像测速方法即为 PTV 技术；当流场中粒子浓度很高时，以至于粒子在成像系统像平面上形成激光散斑图案（散斑已经掩盖了真实的粒子图像），这种极高粒子密度模式的图像测速方法即 LSV 技术；PIV 技术则是指粒子浓度较高的成像模式，但尚未在成像系统像面上形成散斑图案，仍然是真实的粒子图像的图像测量方法，由于此时粒子的识别工作较为困难，只能获得一小块兴趣区域内多个粒子位移的统计平均值。LSV 技术由于其高粒子浓度对流场干扰较大，目前已很少采用；PTV 技术由于粒子稀疏，可以通过跟踪单个粒子的运动轨迹测得速度，比 PIV 测速方法更容易从二维推广到三维，但 PTV 技术所提取的流场速度信息较少，这也限制了它在流场细微结构研究中的应用。

根据粒子图像测速技术原理，PIV系统一般包含四个主要部分：示踪粒子、光学照明部分、图像采集部分以及图像处理部分。如图1-3所示。

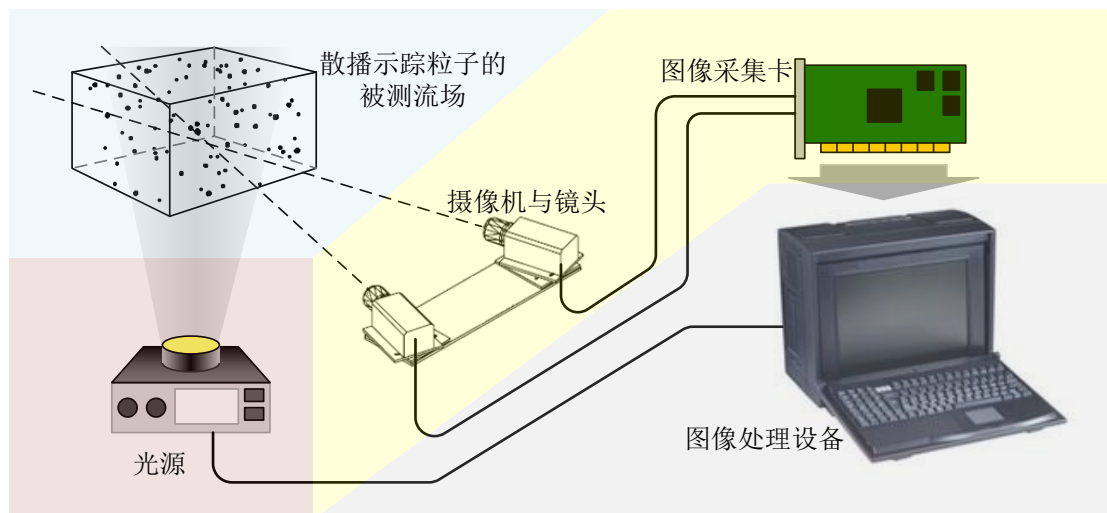


图1-3 PIV系统组成

示踪粒子: 为了提高透明流体的可测性,布撒示踪粒子用来显示流体的流动状态,通过测量粒子的运动来获取流场信息。

光学照明部分: 在 PIV 系统中,为了获取较好质量的粒子图像,需要外部辅助光源的配合,用以增强示踪粒子散射光的强度,一般采用 532nm 的激光光源,有时也采用高亮的 LED 光源。

图像采集部分: PIV 的核心是图像分析,所以采集到合适的图像十分重要,因此不仅需要高帧率、高分辨率的摄像机,还需要大带宽、高速的图像记录设备(如 CameraLink 高速图像采集记录器)以及相关的信号控制设备。

图像处理部分: 将粒子图像进行相关匹配分析、追踪分析等处理,以得到粒子散斑的运动,该部分功能主要在 PC 机上完成。

1.3 摄影测量原理

粒子图像测速方法在本质上说是一种摄影测量技术在透明柔性体运动测量上的一种应用。了解摄影测量的相关知识对于 PIV 技术的把握具有着重要的意义。

摄影测量是通过对摄像成像系统拍摄的图像进行分析计算,测量出被测物体在三维空间中的几何参数和运动参数的一种测量方法。空间物体通过成像系统映射在相机的像平面上,因此所采集的图像包含了物体的结构信息(PIV 中的粒子图像包含了示踪粒子的空间分布信息与颗粒的尺度信息)。数字图像的最小单位为像素(Pixel),每个像素的值(灰度信息)反映了空间物体表面对应点的光强大小,而该点的图像位置对应于空间物体表面的几何位置。物体在像面上的位置与它的实际物体位置的对应关系可由成像系统的几何投影模型(或称成像模型)

所决定。各种摄像测量任务中，都是基于成像映射关系，确定各种几何与运动参数。从几何角度来看，摄像成像过程是从三维空间向二维空间的映射，是从高维空间向低维空间的投影。

1.3.1 中心透视投影模型

中心透视投影又称为针孔模型是立体视觉系统中常用的一种理想的线性摄像机模型，是对光学成像几何关系的简化。中心透视投影模型假设物体表面的反射光或发射光都经过一个“针孔”点而投影在像平面上，这个针孔”点称为光心，也即投影中心或摄影中心。受光的直线传播条件约束，物点、光心和对应像点在一条直线上。图 1-4 是中心透视投影模型成像，也就是针孔成像的原理示意图。针孔模型主要由光心、成像面和光轴组成。中心透视投影模型中光心到像面的像距 v 称为焦距 f ，物距 u 等于光心到物体的距离。

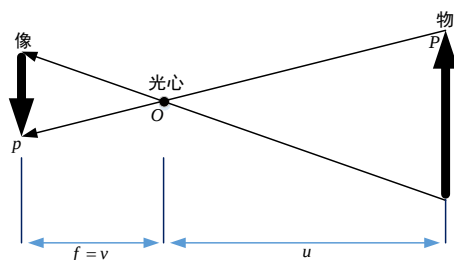


图 1-4 中心透视投影模型成像几何模型

根据图 1-4 所示的中心透视投影的几何映射关系，物点 P 到光轴的距离 D 与对应像点 p 到光轴的距离 d 之间满足式(1-2)。

$$\frac{D}{u} = \frac{d}{f} \quad (1-2)$$

1.3.2 透镜成像模型

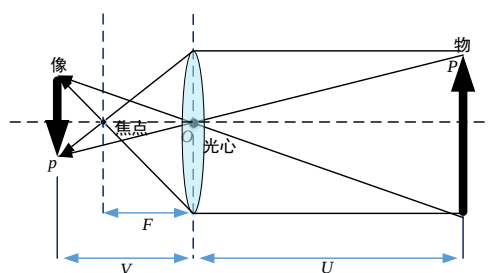


图 1-5 透镜成像几何模型

根据几何光学的基本原理，理想的凸透镜成像光路如图 1-5 所示，其中物平面到透镜中心的距离为物距 U ，清晰成像的像平面到透镜中心的距离为像距 V ，透镜焦距为 F ，三者满足如式(1-3)所示的成像公式：

$$\frac{1}{U} + \frac{1}{V} = \frac{1}{F} \quad (1-3)$$

从式(1-2)与式(1-3)的对比中可以看出中心透视投影模型中的焦距与透镜成像模型中的焦距的概念不同，中心投影模型中所称的焦距实际上是成像平面到光心的距离，而透镜成像中的焦距指的是光心到透镜焦点之间的距离。由式(1-3)可得：

$$F = \frac{UV}{U+V} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知，当物距 U 远大于像距 V 时，焦距 $F \approx V$ ，可以用像距来近似焦距，也就是说，只有当透镜模型的物距远大于焦距和像距时，透镜成像模型与中心透镜投影模型中的焦距的含义近似一致。因此，使用摄影测量技术对目标物体进行高精度测量时，不能直接取镜头的标称焦距作为成像模型中的焦距，而要采用通过摄像机参数标定得到的焦距值。

由于针孔成像光量小，实际成像需要很长的曝光时间，很难得到清晰的图像，没有实际应用价值。实际成像系统都是使用透镜组组成镜头，可以透过大量光线并能聚集光线，从而缩短曝光时间和获得清晰的图像。然而，中心透视投影模型中，物、像、物距、像距（焦距）之间存在有相似三角形联系起来的几何关系，它可以最佳地反映物与像之间的对应关系，同时又有最简单的表达形式。所以实际镜头中透镜组的复杂设计都是为了既能大光圈地通过大量的光，又能尽可能地满足中心透视投影模型的成像关系。

这里需要注意的是，由于镜头设计的复杂性和工艺水平等因素的影响，实际成像系统不可能严格地满足中心透视投影模型，这种镜头不满足中心透视投影模型的效应称为镜头畸变。这种主要由镜头畸变使得实际成像位置与根据中心透视投影模型给出的成像位置之间存在的偏差称之为像差。由于像差的存在，中心透视投影模型只能是实际成像的一种近似。尤其在使用广角镜头时，远离图像中心处会有较大的成像畸变，因此实际高精度摄像测量中应尽量采用考虑了像差的非线性成像模型来描述成像关系。

1.3.3 摄影测量中常用的坐标系

在 PIV 中所使用的摄像测量技术常用的坐标系为笛卡尔直角坐标系，坐标方向一般采用右手准则来定义。图 1-6 表示了四个不同层次的坐标系：世界坐标系、摄像机坐标系、图像物理坐标系以及图像像素坐标系，其定义如下：

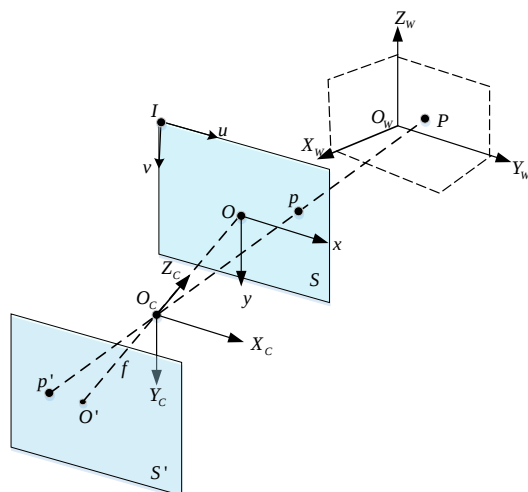


图 1-6 摄像测量常用坐标系及中心透视投影成像关系

1) 世界坐标系

世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 也称作全局坐标系或测量坐标系，它是由用户根据测量的需求定义的三维空间坐标系，通常是将被测物体和摄像机作为一个整体来考虑的坐标系。为了方便，此坐标系的建立较多地考虑应用环境和对象条件。空间点 P 的位置通常用它在世界坐标系中的坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 来描述。

2) 摄像机坐标系

摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 是拍摄系统自身的坐标系，其坐标系原点取为摄像机光心（透视投影的中心）， Z_c 轴与摄像机光轴重合，且取摄像方向为正向， X_c 轴， Y_c 轴与图像物理坐标系的 x 、 y 轴平行。图 1-6 中 S' 平面为实际成像靶面，称为反片， S 平面与 S' 平面关于光心 O_c 中心对称，称为正片。反片和正片分别位于摄像机坐标系的 $Z_c = -f$ 平面和 $Z_c = f$ 平面内，其中 f 为中心透视投影焦距。

3) 图像物理坐标系

在使用图像对目标物进行分析时，为了便于像点和物点空间位置的相互换算，在正片像面 S 中一般会建立图像物理坐标系。该坐标系 $O - xy$ 是以光轴与像平面的交点 O 为原点（称为图像主点），以实际物理尺寸（毫米、微米等）为单位的直角坐标系。其 x ， y 轴分别与图像像素坐标系的 $I - uv$ 平行。通常图像物理坐标系原点位于图像的中心。

4) 图像像素坐标系

如图 1-6 所示, 图像像素坐标系 $I-xy$ 是以图像左上角点 I 为原点, 以像素 (Pixel) 为坐标单位的直角坐标系。 x, y 分别表示该像素在数字图像中的列数与行数, 与数字图像像素的常用存储格式一致。图像像素坐标系通常也称为图像坐标系, 该坐标系是进行 PIV 图像分析程序设计时较为常用的坐标系。

中心透视投影成像的基本关系是所有的成像光线都通过光心, 并且物点、像点和光心三点共线。设物点 P 在世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 中的坐标为 (X_w, Y_w, Z_w) 。 P 经过中心透视投影得到的像点 p 的图像坐标为 (x, y) 。由于存在像差, 实际成像点 $(\hat{x}, \hat{y})$ 与中心透视投影像点 (x, y) 之间会存在偏差, 因此, 在进行 PIV 实验时需要对 $(\hat{x}, \hat{y})$ 进行校正, 而点 (x, y) 称为理想像点。

1.3.4 二维平面摄像测量

在二维 PIV 测量中, 仅对激光片上的粒子进行追踪, 此时有效的粒子均分布在同一物平面内, 即示踪粒子的运动、拓扑变化都在同一平面内, 这时用一台摄像机就可以测量得到各种所需几何结构和运动参数。根据中心透视投影模型, 可以直接导出单台相机测量物平面内目标运动参数的算法。

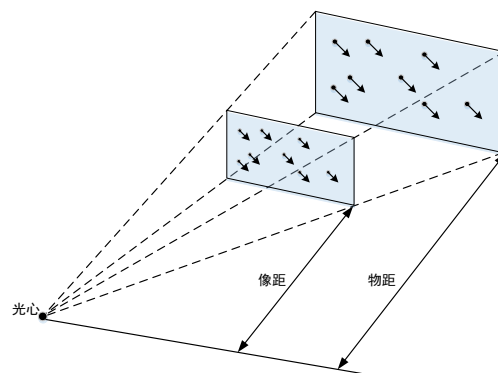


图 1-7 单相机平面摄像测量基本原理

如图 1-7 所示, 如果测量平面 (如 PIV 实验中的激光片) 与相机光轴垂直, 即与像面平行, 则根据中心透视投影关系可知, 目标及其所成的像满足相似关系, 且只相差一个比例系数。此时只要从图像上提取所需目标的几何参数, 乘上这个比例系数, 就得到空间物体的实际几何参数。然后再结合序列图像的时间轴信息, 便可以得到物体的运动参数。然而, 当物体在同一平面内分布, 但此物体平面与摄像机光轴不垂直时, 则不能直接根据一个比例系数便还原物体结构信息。此时若光轴与物平面的夹角已知, 则可以先通过角度投影变换, 将图像校正成像面与

物面平行的情况，使得两者满足相似关系，之后再行比例变化。

常见的二维平面测量主要有物体二维几何位置、尺寸、形状、变形测量、位移和速度的测量。其基本原理是利用单幅图像进行目标几何参数测量，或利用不同时刻在同一角度拍摄的图像，测量图像目标的变化和运动参数。

根据前述内容可知，在二维平面摄像测量中，像与物之间的比例系数的准确确定至关重要。如果物平面内能够提供某个方向上某对象的已知尺寸，则可以得到目标在物平面该方向上的几何或运动参数与目标成像之间的比例关系，完成测量。最常用、简单的方法是在测量物面上放置带有物理尺寸已知的标尺或参照物，然后在进行摄影测量前先拍照此标尺或参照物，得到此平面测量的比例系数，最后根据得到的这个比例关系将像素坐标转换为标识物体尺度的物理坐标，这便是二维摄影测量的一种定标方式。

1.3.5 三维交汇测量

如前所述，摄影测量的基本成像模型是中心投影模型（针孔模型）。在满足针孔模型假设的前提下，像点、光心和物点满足共线方程，即三点共线。对于单摄像机的情况，如果光心和像点已知，就可以确定一条成像光线，而对应的物点必然也在此直线上。但是，此时仅能确定成像光线与光轴之间的夹角而无法确定物点在此直线上的具体位置。因此在没有其他附加条件的约束下，仅用单个摄像机是无法确定目标的三维位置的。

当使用两台或多台摄像机从不同的角度对同一目标拍摄时，各个摄像机的光心和其对应同名像点组成的射线应该都通过同一空间物点，即各成像光线应在物点相交。利用这个原理就可以对空间物点进行交会定位。这就是摄像测量学三维交会定位的基本原理，也就是三角摄影测量的基本原理。

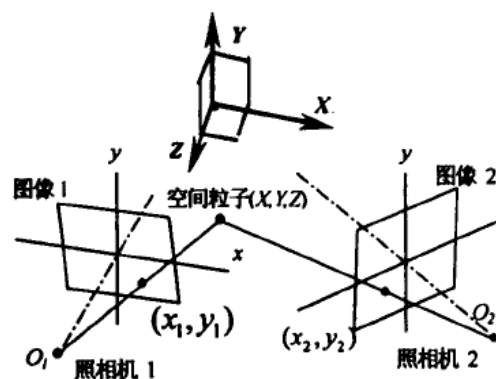


图 1-8 双目交会测量原理

图 1-8 为两台摄像机对空间某一粒子成像的示意图，该空间粒子为两台摄像机光心和相应的像点组成的射线的交点。理论上这两射线应该相交于一点。但是由于实际摄像系统与成像模型之间总存在各种误差，特别是图像上粒子提

取时的定位误差、摄像系统参数标定误差等，使得这些射线互为异面直线，即在空间中并没有相交于一点，此时可以近似地将这两条异面直线间公垂线的中点作为交点。

对多数摄像测量系统来说，由于成像系统的物距远大于焦距，所以在确定由光心和像点组成的成像光线过程产生微小误差，会对远距离的空间交会结果带来很大误差，可以说是“失之毫厘，谬以千里”。因此精确地确定由像点和光心组成的成像光线是摄像测量的关键。这不仅要求精确地提取目标对应像点的图像位置，还需要精确地确定摄像成像系统的内外系统参数。

综上所述，但从原理上来看，摄像测量技术并不难，但是要进行高精度的摄像测量，却是一项困难和复杂的工作。测量的核心是精度与速度，因此如何快速并高精度的得到交会结果，如何得到准确的摄像测量系统参数，如何高精度地定位目标成为了摄影测量技术中的几个关键性问题。只有解决了这些问题，摄像测量系统和图像测量方法才能满足高精度测量的需要。

第二章：PIV 技术内幕

如图 2-1 所示，PIV 技术通过粒子图像的分析得到流场信息，所以使用 PIV 技术对目标流场进行运动分析时，首先需要采集现场图像，然后对不同时刻的图像进行对比分析，找到同一粒子在不同时刻的位置，从而得到粒子的位移信息。最后根据摄影测量系统的定标参数得到世界坐标系下的流动信息。从这个分析过程中，很容易看出做好 PIV 实验，需要涉及四个方面的关键技术：图像的获取、图像分析、系统定标和示踪粒子的布撒。下面我们将按照此顺序依次对 PIV 的核心技术进行叙述。

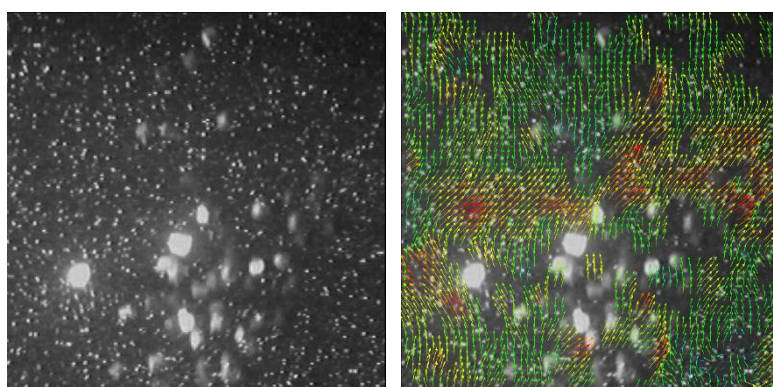
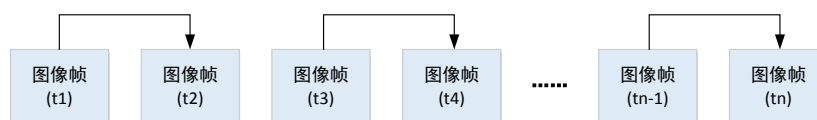


图 2-1 粒子图像与矢量场表示

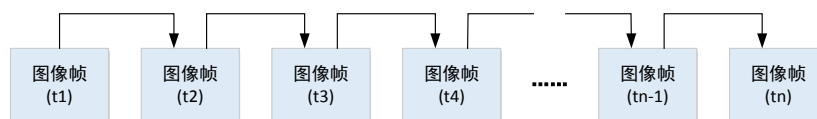
2.1 粒子图像的采集

从技术本质上说，PIV 是一种图像分析技术，因此能否采集到清楚的粒子图像是 PIV 分析的一个关键技术问题。

在 PIV 实验过程中，常常采用的图像分析方式如图 2-2 所示，其中 2-2a 图是双帧分析模式，2-2b 图是连续分析模式。前者将一对图像作为分析的最小单元，图像帧之间的时间间隔可以做到 200ns 甚至更小，但帧频较低，一般多为 30fps；而后者以相邻时刻的两幅图像进行分析，帧频很高，可到达 7500fps 甚至更高，但帧之间的时间间隔一般很少低于 100us（在保证一百万像素分辨率的基础上，否则粒子分辨不清）。根据这两种分析方式的特点，在对高速运动进行瞬态分析时常采用双帧分析模式，而对目标流场进行周期性运动分析时选择连续分析模式会比较适合。然而，不论采用双帧模式还是连续分析模式，为了能够让示踪粒子清楚成像均需要大功率光源的配合。脉冲激光便是 PIV 实验中常用的一种光源（流体运动测量时常采用 532nm 的绿色激光），而配合脉冲激光器进行粒子图像的采集技术一般称为跨帧采集技术。



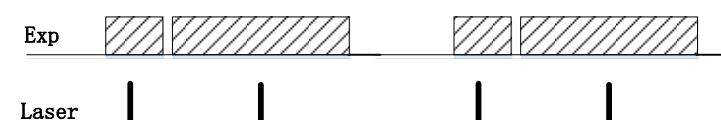
(a) 双帧分析模式



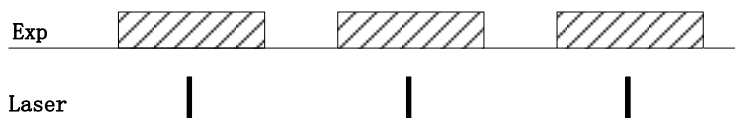
(b) 连续分析模式

图 2-2 PIV 图像分析的两种方式

所谓跨帧技术是指控制激光脉冲打在每帧图像的曝光间隔内，利用这种窄带脉冲光采集瞬态的粒子图像，如图 2-3 所示。当采用双帧分析模式时，摄像机需要调节到双曝光模式，同时将第一个脉冲激光打在第一次曝光间隔内，而第二个激光脉冲打在第二次曝光间隔内，时序关系见图 2-3a，这样就可以尽可能地缩短两幅图像间的时间间隔，从而提高 PIV 技术的可测速范围。目前水平的跨帧型采集方式最小跨帧时间间隔可达 200ns，理论上可测速度达 1250m/s。而对于采用连续分析模式的实验，如图 2-3b 所示，需要将激光脉冲的产生周期与相机采集帧率一致，使得每个激光脉冲均在曝光间隔内产生，这样便为采集清晰的粒子像做好了准备。



(a) 双曝光跨帧分析



(b) 连续采集跨帧分析

图 2-3 相机曝光时序与激光脉冲时序关系

2.2 PIV 图像分析技术

2.2.1 相关匹配分析法

PIV 分析流程如图 2-4 所示，首先采集不同时刻的两帧粒子图像，然后在像面上一定区域内对示踪粒子点进行追踪。

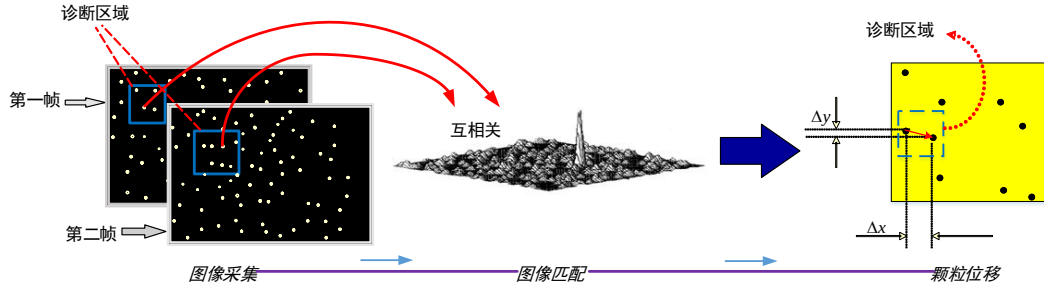


图 2-4 PIV 图像分析流程

由于示踪粒子小且分布密集，采用单点跟踪分析方法不仅难度大并且效率不高。为了克服单点跟踪分析的缺点，常采用原理简单、适用性强、精度高的相关分析法。假设在很短的时间间隔 Δt 内先后获得了同一流场的两幅粒子图像，这两幅图像分别表示为 $f(i, j, t)$ 与 $f(i + \Delta x, j + \Delta y, t + \Delta t)$ ， Δx 、 Δy 分别表示 x 轴方向与 y 轴方向的位置移动，分析窗口的尺寸为 $M \times N$ 。定义二者的自相关函数 $r(k, l)$ 为：

$$r(k, l) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I(i, j, t) I(i + \Delta x + k, j + \Delta y + l, t + \Delta t) \quad (2-1)$$

由于时间间隔 Δt 很小，可以认为在这段时间内流场内部没有剧烈的变化。根据自相关函数是偶函数并且在原点处取得最大值，得到不等式 (2-2)：

$$r(k, l) \leq r(-\Delta x, -\Delta y) \quad (2-2)$$

即自相关函数的最大值所在的位置对应着流场间的相对位移。因而若已知时间间隔 Δt 则可通过相关的最大值位置计算出这段间隔流场的速度。

然而，自相关匹配分析后，像面上的位移矢量存在着方向上的二义性问题。因此在实际分析过程中PIV技术广泛采用互相关图像匹配法：以参考图像帧的分析节点为中心，在其一定范围内提取图像数据作为模板；然后在目标图像上一定范围内进行搜索，寻找最相似的位置作为移动后的新位置，并将新旧位置之间的变化作为该分析节点的位移量。而位置搜索时往往采用归一化协方差互相关匹配法来评估两个图像区域之间的相似程度，该过程可以用式 (2-3) 来表示。

$$r(k, l) = \frac{\sum_{(i, j) \in W} [f(i, j) - f_m][g(i + k, j + l) - g_m]}{\sqrt{\sum_{(i, j) \in W} [f(i, j) - f_m]^2 \sum_{(i, j) \in W} [g(i, j) - g_m]^2}}, Rmin \leq (k, l) \leq Rmax \quad (2-3)$$

在式 (2) 中， r 为 (k, l) 位置的相关系数， f 与 g 分别表示前后两帧图像， W 表示分析窗口， f_m 与 g_m 分别表示分析窗口内 f 与 g 的平均灰度， $(Rmin, Rmax)$

表示参考模板在目标图像上的搜索范围。在一般情况下，相关系数矩阵的峰值位置作为最可能的匹配位置，因此PIV在图像方面的处理过程将以相关系数 r 矩阵的计算和峰值搜索为核心。只要匹配过程中存在准确的、合理的峰值位置，PIV便可以得到粒子空间的位移信息。

2.2.2 粒子追踪方法

PTV 方法是采用粒子跟踪的方式进行流体测速，由于流体运动是由示踪粒子的运动来表征，所以 PTV 方法具有准确直观的特点。但 PTV 算法仅适合于流场中粒子浓度较小的情况。因为当浓度增大时，除了粒子像存在相互叠加的现象而难以识别，不同粒子的运动轨迹还会相互粘连、交错，易使粒子轨迹跟踪测量失败。而当粒子浓度适中时，可通过前后两帧图像上的粒子跟踪方法对粒子群体运动特征进行分析。此时为了保证追踪的成功率，从方法角度需要对粒子图像的采集进行一定的约束：

1) 最大位移约束，即任何粒子在两帧图像采样间隔内位移小于一个确定值 $R_{\max}$ ， $R_{\max}$ 确定了粒子在第二帧图像中的范围，如图 2-5 所示。

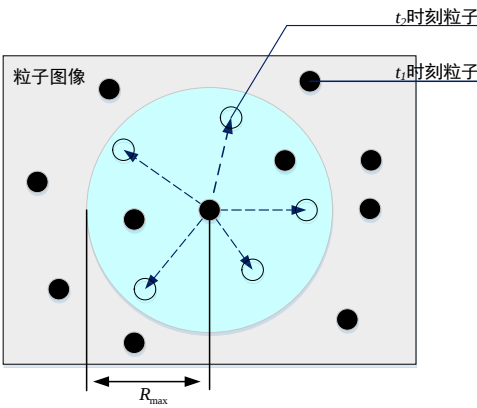


图 2-5 最大速度特征

2) 近邻运动相似性约束，即对于一个小区域（半径为 R_{nei} ）中的粒子群，其中的粒子运动矢量大致相同。

正如前述内容所说，单独对一个粒子进行追踪，成功率较低，因此在 PTV 技术中往往采用粒子团的追踪方法，其中基于匹配概率的粒子追踪方法是较为常用的一种方法，其实现过程如图 2-6 所示，从被研究的粒子的各种追踪轨迹中寻找最优对应关系，从而实现轨迹跟踪。其步骤如下：

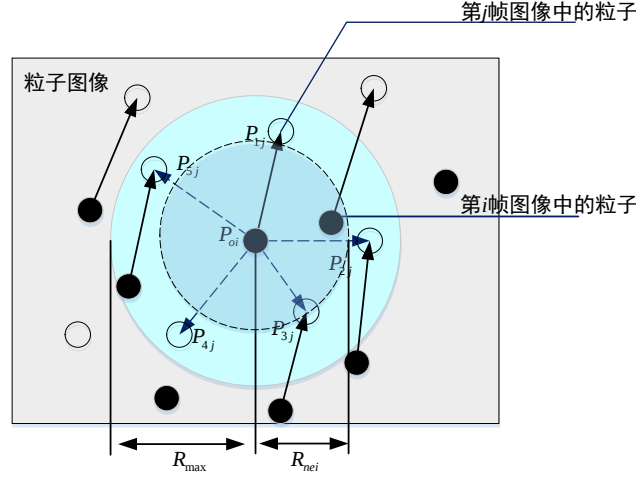


图 2-6 基于匹配概率的粒子追踪法

1) 按照最大位移约束条件，以第 i 帧图像中的粒子点 P_{oi} 为中心，在邻域范围内（半径为 $R_{\max}$ ），找到第 j 帧图像中的所有可能与 P_{oi} 配对的粒子 P_{nj} （ $n=1,2,3,4,5$ ），在图 2-6 中可以看出共 5 个粒子点可能成为匹配点。设 P_{oi} 与它们匹配的概率均为 P_0 ，不匹配概率为 P_0^* 。 P_0 与 P_0^* 的初始概率设为均匀分布：

$$P_0 = P_0^* = \frac{1}{N+1}, N=5 \quad (2-4)$$

2) 在 P_{oi} 的邻域范围内（半径为 R_{nei} ），找到第 i 帧图像中与 P_{oi} 近邻的所有粒子 P_{mi} ，在图 2-6 中 $m=1,2$ 。根据近邻运动相似性约束， P_{mi} 与 P_{oi} 的位移矢量差应满足：

$$|d_{mi} - d_{ok}| < \varepsilon_e \quad (2-5)$$

式中 d_{ok} 为第 i 帧图像中粒子 P_{oi} 的位移矢量， d_{mi} 表示第 i 帧图像中粒子 P_{oi} 的邻域粒子的可能位移矢量， l 为该邻域粒子可能位移矢量的下标； ε_e 为矢量误差范围。

3) 在第二步的基础上，将匹配概率按式(2-6)进行归一化：

$$P_I^n = A \cdot P_I^{n-1} + B \cdot Q_I^{n-1} \quad (2-6)$$

式中， $Q_I^{n-1} = \sum_m P_m^{n-1}$ ， I 为第 i 帧图像中研究粒子的下标， m 为第 I 个研究粒子的邻域粒子的下标； A, B 为松弛系数， $A < 1$ ， $B > 1$ ， B/A 越大，收敛速度越快； n 为迭代次数。最终可以得到：

$$P_I^n = \frac{\tilde{P}_I^n}{\sum_I \tilde{P}_I^n + P_I^{*n-1}} \quad (2-7)$$

$$P_I^{*n} = \frac{P_I^{*n-1}}{\sum_I \tilde{P}_I^n + P_I^{*n-1}} \quad (2-8)$$

4) 按照前面的几个步骤进行迭代运算，可能的运动矢量的概率会不断增加，而不可能的运动矢量的概率会逐渐减小。最后选取运动矢量中概率最大的运动矢量作为粒子点 P_{oi} 的运动矢量。

2.3 摄像系统的定标

从 1.3 节的摄影测量原理的相关知识可以知道，当使用图像分析方法对粒子图像处理后，仅得到了像平面上以 Pixel 为单位的粒子位移信息，若要获得世界坐标系（或测量坐标系）下的物理量则需要根据摄像系统的内、外参数进行数据转化。因此，用于获取摄像系统内、外参数的定标过程是 PIV 实验中必不可少的一个环节。

摄像机采集的图像通过传输线缆传输到图像采集卡，并通过 PCI（或 PCIE、USB3.0 以及千兆网）接口进入 PC 机的内存。每幅数字图像在计算机内可表示为 $M \times N$ 数组， M 行 N 列的每个元素的数值即是图像点的亮度(或称灰度)。图像坐标系定义如图 2-7 所示。

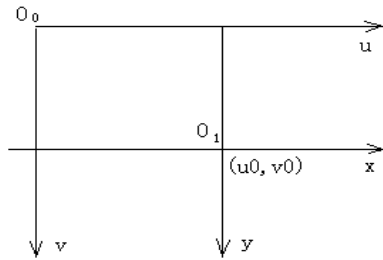


图 2-7 图像坐标系

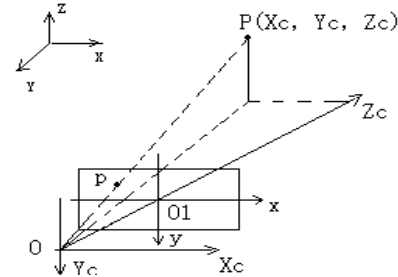


图 2-8 摄像机坐标系与世界坐标系

在图 2-7 中，图像上定义直角坐标系 u, v ，每一个像素的坐标 (u, v) 分别是该像素在数组中的列数和行数，所以 (u, v) 是以像素为单位的图像坐标系的坐标，由于 (u, v) 只表示像素位于数组中的列数和行数，并没有用物理单位表示出该像素在图像中的位置，因而，需要再建立以物理单位（例如毫米）表示的图像坐标系，该坐标系以图像内某一点 O_I 为原点。

x 轴与 y 轴分别与 u, v 轴平行，如图 2-7 所示， (u, v) 表示以像素为单位的图像坐标系的坐标， (x, y) 表示以毫米为单位的图像坐标系的坐标，在 x, y 坐标系中，

原点 O_I 定义在摄像机光轴与图像平面的交点，该点一般位于图像中心处，但由于摄像机制作的原因，也会有些偏离，若 O_I 在 u, v 坐标系中的坐标为 (u_0, v_0) ，每一个像素在 x 轴与 y 轴方向上的物理尺寸为 dx, dy ，则图像中任意一个像素在两个坐标系下的坐标可用式(2-9)表示。

$$u = \frac{x}{dx} + u_0, \quad v = \frac{y}{dy} + v_0 \quad (2-9)$$

为了使用方便，这里用齐次坐标与矩阵形式将上面两式表示为式(2-10)：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

另外，摄像机成像几何关系可由图 2-8 表示，其中 O 点称为摄像机光心， X_c 轴和 Y_c 轴与图像的 x 轴与 y 轴平行， Z_c 轴为摄像机的光轴，它与图像平面垂直，光轴与图像平面的交点，即为图像坐标系的原点，由点 O 与 X_c, Y_c, Z_c 轴组成的直角坐标系称为摄像机坐标系。 OO_I 为摄像机焦距。

由于摄像机可安放在环境中的任何位置，在环境中选择一个基准坐标系来描述摄像机的位置，并用它描述环境中任何物体的位置，该坐标系称为世界坐标系。它由 X_w, Y_w, Z_w 轴组成。摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系可以用旋转矩阵 R 与平移向量 T 来描述，因此，空间中某一点 P 在世界坐标系与摄像机坐标系下的齐次坐标如果分别是 $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 与 $(X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$ ，于是存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

其中， R 为 3×3 正交单位矩阵， T 为三维平移矢量， $0 = (0, 0, 0)^T$ ， M_1 为 3×4 矩阵。

视觉测量系统往往建立在线性摄像机模型（针孔模型）基础之上，因此空间任何一点 P 在图像上的成像位置可以用针孔模型近似表示，即点 P 在图像上的投影位置 p ，为光心 O 与 P 的连线 OP 与图像平面的交点。这种关系也可称为中心射影或透视投影，由比例关系可表示为式(2-12)。

$$x = \frac{fX_c}{Z_c} \quad \text{与} \quad y = \frac{fY_c}{Z_c} \quad (2-12)$$

其中， (x, y) 为 p 点的图像坐标； (X_c, Y_c, Z_c) 为空间点 P 在摄像机坐标系下的坐

标，用齐次坐标与矩阵表示上述透视投影关系为式(2-13)。

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

由以上各式可以得到以世界坐标系表示的 P 点坐标与其投影点 p 的坐标 (u, v) 的关系，如式(2-14)所示：

$$\begin{aligned} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-14)$$

其中， $a_x = f / dx$ ， $a_y = f / dy$ 。由于 a_x ， a_y ， u_0 ， v_0 只与摄像机内部结构有关，所以称这些参数为摄像机内部参数； R 与 T 完全由摄像机相对于世界坐标系的方位决定，称为摄像机外部参数。系统定标过程就是对摄像机内外参数的求解过程。在 PIV 实验前，一般需要一块已知尺寸的点阵板或网格板（称为标定板或定标靶），然后通过这些物理坐标和图像坐标已知的点来训练式(2-14)中的摄像机内外参数，即找到成像面与真实物理空间之间的转化关系，如图 2-9 所示。另外，需要注意的是：由于 PIV 实验过程往往将摄像机放在水槽的外面，而作为测量对象的示踪粒子在水中，因此在成像设备与目标之间存在着空气、玻璃、水三种介质，受这些介质折射的影响成像光线发生了改变。为了降低介质影响，提高测量精度，PIV 标定过程中需要将标定板放置在水中进行，并且尽量与测量位置一致，其现场布置如图 2-10 所示。

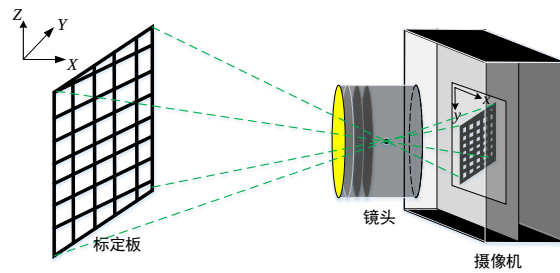


图 2-9 通过标定板进行系统定标

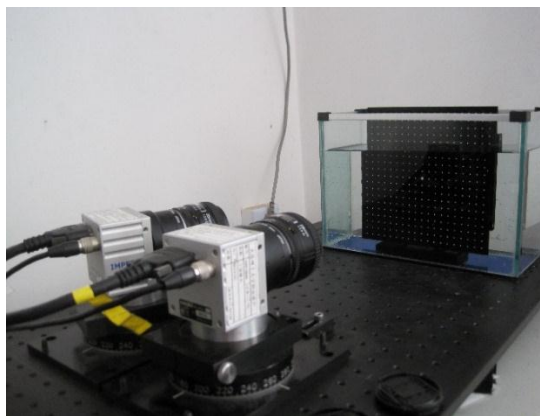


图 2-10 PIV 实验定标

2.4 示踪粒子的选择与布撒

示踪粒子一般应满足具有无毒、无腐蚀、无磨损、化学性质稳定、清洁等特征。除此以外，在 PIV 实验中还有三个基本要求：粒子对流体运动的跟随性好；粒子应是良好的散射体可拍摄记录性能或简称成像可见性好；粒子布撒均匀性和浓度要求，以能保证取得足够的流场信息为准。

PIV 粒子布撒要求不同于流动显示的布撒要求。在一般流动显示中，粒子往往要求局部布撒，以能显示流动的结构，如为展示混合流动、漩涡，往往需要将粒子注入和布撒在剪切界面区，从而能展示剪切层及其发展演化，反过来若全流场布撒就难以直观显示流动结构。对 PIV 全场测速讲，只有粒子存在才能测速，没有粒子的区域，该区域就无法获得速度，因而要求全场均匀布撒粒子，才能保证全流场取得速度测量（对速度场进行分析之后，就可以显示流场的流动结构）。然而在实际操作时，粒子的布撒绝非易事，有时需要观测的区域会没有粒子或缺少粒子，如漩涡中心区，边界层贴近壁面的区域，因存在离心力、速度梯度等粒子难以存在的区域，粒子越大，越难做到，存在所谓的黑洞现象。必要时需要采用特殊办法，保证这些区域不断有粒子存在。

对 PIV 讲，不仅要求全场均匀布撒粒子，而且粒子的浓度也有一定要求，粒子浓度太高，对流动本身有一定影响，有两相流问题。粒子浓度也不能太低，因为对每一点（实际上是每一判读区域）的测速，均需要在判读区域内有足够的粒子对数，只有这样才能通过统计分析法求得正确的位移量。因为从原则上讲，判读区域内粒子对数越多，信噪比越高。

一般讲，对于不同的流动介质，往往需要采用不同的粒子及布撒技术。对于水的流动一般大多采用无浮力的固体粒子，如密度接近于 1 克每立方厘米的聚苯乙烯等有机材料，也有密度满足条件且表面反射率也好的镀银玻璃微珠，但一般其粒径很难做得很小。粒子往往被直接撒在水中，搅拌均匀，如在循环水洞、水

槽，可以不断的添加粒子，直到合适的粒子浓度为止。对大型设备，粒子容易施加，但清除却十分困难。

对于空气介质的流动一般采用烟雾或油雾发生器（粒径可达到 $1\mu\text{m}$ 量级）作为粒子发生器，其发雾浓度可以调节。对于回流式风洞，可将粒子发生器的输出管口布置在风洞安定段，经过几次循环，粒子的布撒基本均匀，输入风洞内雾流时间越短，风洞内的粒子浓度越高，合适时关闭粒子发生器即可。但对于喷流一类，或下吹式风洞，则要求粒子发生器要有足够浓度的粒子流量与流体的流量匹配。

第三章：PIV 实验系统的搭建

3.1 PIV 实验系统

PIV 实验系统通过拍摄流体中示踪粒子的运动图像而进行流场运动分析。一套完整的 PIV 实验解决方案可以用图 3-1 来表示。在图 3-1 中的 PIV 实验系统中主要包括两大部分:其一是实验水槽（带有玻璃观测窗）；其二是 PIV 实验设备。实验过程中，摄像机的光轴垂直于激光面片，并通过水槽的玻璃壁观测流体运动情况。水槽系统可进行浪、流模拟，是水动力实验必不可少的。实验水槽的相关知识可以通过海洋工程实验方面的资料进行了解，而本章仅针对 PIV 的设备及其系统搭建进行叙述。

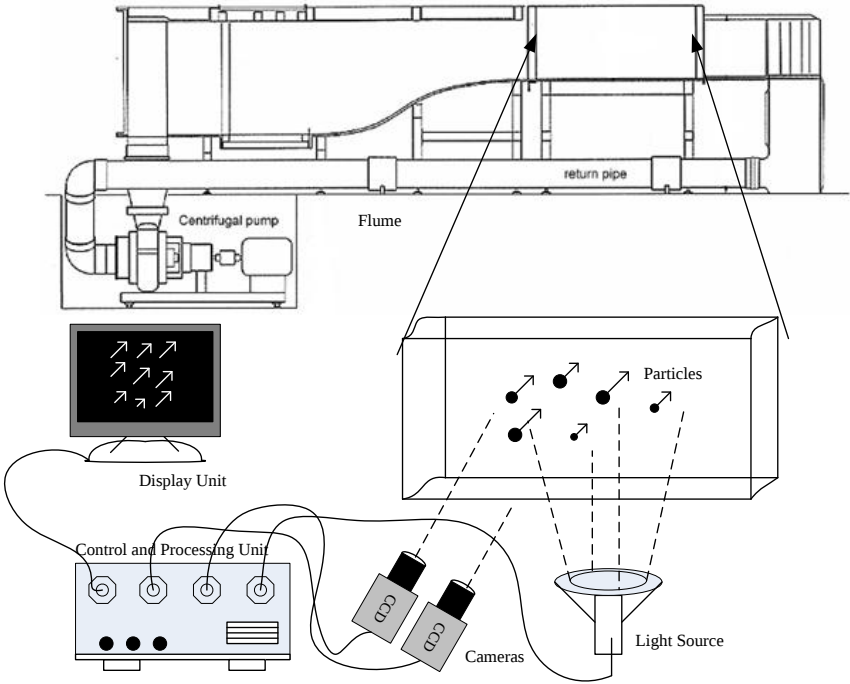


图 3-1 PIV 实验方案简图

从 1.2 节图 1-3 中可以了解到，PIV 实验系统除了包含作为实验耗材的示踪粒子外还包括光源系统、接收和记录粒子散射光的光学成像系统以及粒子图像处理系统。

从硬件系统搭建来看，PIV 系统包括相机、图像采集卡、光源、同步控制器以及计算机。这几个部件的连接关系如图 3-2 所示。

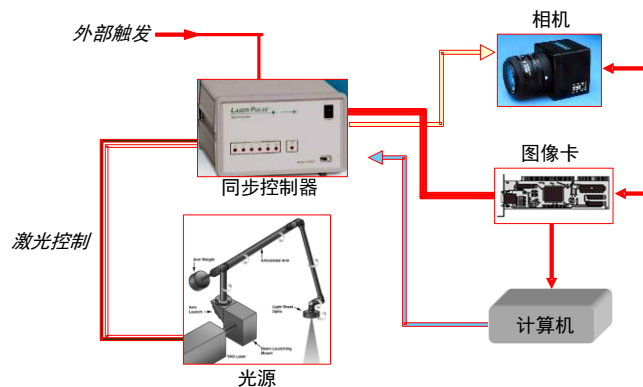


图 3-2 PIV 设备互连示意图

在图 3-2 中计算机（PC 机）是主控设备，在 PC 上不仅安装 PIV 的图像采集程序和图像分析程序，还要安装设备控制程序。与 PC 直接相连的设备是图像采集卡和同步控制器。图像采集卡一般通过 PCI 接口或 PCI-Express 接口插入 PC 的主板上，而同步控制器往往通过 USB 接口或 RS232 串口与 PC 相连。与图像采集卡相连的是相机，与同步器相连的是光源和图像采集卡（或直接与相机相连）。此外，当采用多种测量设备进行实验时，为了将 PIV 设备与其他设备同步，PIV 系统中的同步控制器同样也接受外部信号进行同步控制。下面将以引进的美国 TSI 公司的 PIV 系统为例，对 PIV 系统的数据流向进行说明。

在 PIV 实验中，上电完成后，由 PC 机发出图像采集指令，同步控制器收到指令后按照设定好的信息时序关系向激光器与图像采集卡发出触发信号。当脉冲激光器与图像采集卡接到触发信号后，按照跨帧图像采集原理进行现场图像的记录。相对于控制信号的流向，图像数据的传输首先从相机端开始，在相机内完成光电转换后，示踪粒子的光场信息转化为图像数据。然后图像数据通过传输线缆传到图像采集卡的板载内存上。接下来图像数据通过 PCIE 总线传输到 PC 内存中。最后在 PC 控制下，图像数据由内存转移到硬盘中，同时显示在屏幕上。

3.2 关键设备介绍

3.2.1 图像采集设备

图像采集系统是 PIV 图像系统的核心部分，粒子图像测速中的硬件配置与所选取的图像采集及处理方法密切相关。在 PIV 中广泛采用工业相机（如图 3-3 所示）与图像采集卡的配合来搭建粒子图像采集系统。工作时，图像采集卡插在 PC 机的扩展槽上，并和工业相机连接。图像采集卡的作用主要是将采集到的现场图像转移到 PC 机内存，从而为下一步的图像分析做好准备。而下面我们将着重介绍 PIV 中相机的应用特点。



(a) 大面阵相机 (b) 超高速摄像机

图 3-3 工业相机举例

(左: 型号 ICL-B2020-KF0、分辨率 2056×2060 、速度 20fps, 右: 型号 FastCAM SA5、分辨率 1024×1000 、速度 7500fps)

图像采集系统决定了可获得图像的速度和精度。对于普通摄像机而言, 摄像速度为每秒 25 帧 (PAL 制式) 或 30 帧 (NTSC 制式)。也就是说用这样的摄像机可以获得 40 毫秒或 33 毫秒内流体的瞬时速度。但随着光电技术的飞速发展以及快速冲放电 CCD 的发明和快速传输接口的出现, 使 CCD 性能有了很大程度的提高, 目前主要有普通型 (full frame) CCD, 帧转移型 (frame transfer) CCD 和跨帧型 (frame straddle) CCD。普通型 CCD 相机只能采用单一的连续采集模式, 无法跟外部信号同步; 帧转移型 CCD 相机在 CCD 感光阵列中则加了相应的缓存, 可以将感光的图像信号临时转移到缓存中, 提高了相机控制的灵活性, 可以很好的与外部信号同步; 跨帧型 CCD 相机沿用了帧转移技术的特点, 由于缓存区靠近感光阵列 (对应每一个像元都有一个存储单元), 因此可以大大缩短帧转移的时间, 从帧转移型的毫秒级缩短至微秒级甚至纳秒级, 使跨帧采集技术成为可能。

可进行高精度流体运动分析是 PIV 技术的一大亮点, 然而 PIV 分析精度不仅由运动分析算法来决定, 还受到图像采集设备的影响。图像的精度可定义为: $M = l/L$, 式中, M 为图像的分辨率, l 为所拍摄流场的实际尺寸 (单位为: mm), L 为流场的图像尺寸 (单位为: Pixel)。假设 $M = 0.1\text{mm/pixel}$, 则图像处理过程中 1 个 pixel 的误差就相当于实际流场中 0.1mm 的误差。因此 M 值越小, 表明图像的精度越高。为了提高图像的精度, 可以采用高分辨率的摄像机。对于 CCD 摄像机, 其分辨率主要决定于 CCD 芯片上光敏元件的数量, 数量越多则可产生的图像分辨率越高, 所拍图像的质量也就越高, 当然, 摄像机的价格也会大比例地增加。当摄像机分辨率一定时, 可以通过减小所摄流场的尺寸的方式, 提高图像的测量精度。这也就是为什么目前 PIV 技术多应用于实验室中且测量区域多为 $10\text{cm}^2 \sim 20\text{cm}^2$ 大小的原因之一。

在 PIV 技术中, 除了 CCD 相机的使用外, CMOS 型工业相机也常常出现在 PIV 的应用现场。尤其是在保证 1 百万像素分辨率基础上拍摄速度达到 500fps 以上, 基本上均为 CMOS 型相机。因此在 PIV 应用中, 具有双曝光模式的大面阵相机多采用 CCD 技术, 而高速摄像的应用中多采用 CMOS 技术。无论是采用大面阵 CCD

相机还是超高速的 CMOS 相机在 PIV 测量时都需要注意所选用相机的光谱敏感范围是否包括了流场测量时常用的光谱波段，即 532nm 波段，否则很难采集到清楚的粒子图像。总之，PIV 技术中相机的型号并不是固定的，一套 PIV 系统是否强大也不是由相机的价格来决定的，需要根据目标流场的特征和测试需求来选择适合的 PIV 系统部件。

3.2.2 成像光源

在 PIV 系统中，光源的辐射功率、谱分布和脉冲时间等对获取图像的质量有很大影响。获得清晰有效的粒子图像是整个 PIV 技术的一个关键步骤，如果无法获得清晰可靠的图像，后面的处理技术再好也不可能获得准确的位移矢量场。

在使用 PIV 技术进行流体分析过程中，为了防止示踪粒子对照明光产生色散现象，照明光一般用单色光。为了获得较好的图像信噪比，光源的强度应足以使流体中的示踪粒子清晰。此外为了达到较好的成像效果，不仅要求光源发出的光具有很强的穿透性，同时光强应分布均匀；光源最好为点光源，并通过一定的光学系统形成片光源来照亮测试平面；光源的谱分布应与图像传感器的敏感光谱区域相匹配；光源脉冲的频率与相位应与图像采集相匹配。



(a) 半导体连续激光器



(b) Nd:YAG 双脉冲激光器

图 3-4 PIV 中常用的两种激光器

目前在 PIV 应用中，532nm 的连续激光器与脉冲激光器最为常见。一般前者配合高速摄像机使用，多用在风洞实验中；而后者多配合高分辨率的跨帧型相机使用，在水动力实验室中应用较多。以海洋工程 PIV 实验系统为例，激光器一般分为激光产生部件、电源控制部件以及改变激光光路的导光臂三大部分，如图 3-4 所示。其中脉冲 Nd:YAG 激光器在水槽实验中采用较多，其波长为 532nm，每个

脉冲能量可达 200mJ 甚至更高，脉冲宽度 15ns，能连续发射脉冲，频率为 10Hz 或 50Hz。一般在商用 PIV 系统中多采用两台脉冲 Nd:YAG 激光器，用外同步装置来分别触发以产生脉冲，然后再用光学系统将这两路脉冲进行合束。脉冲间隔可调范围很大，从 200ns 到 100ms，可实现从低速到高速的流动测量。光学元器件主要包括柱面镜和球面镜，准直了的激光束通过柱面镜后在一个方向内发散，球面镜用于控制片光的厚度。

在 PIV 具体实验时，激光器与同步控制器连接，并接受同步器同步脉冲的控制，从而配合摄像机完成跨帧图像采集。

第四章：PIV 实验历程

在前面几章中，主要对 PIV 技术本身进行剖析，而在本章中，将以 PIV 实验的具体操作为主要内容进行讲解。在下面的讲解中将以美国 TSI 公司的 PIV 系统（大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 2008 年引进）为例对二维 PIV 实验操作过程的进行叙述。

4.1 PIV 系统硬件连接

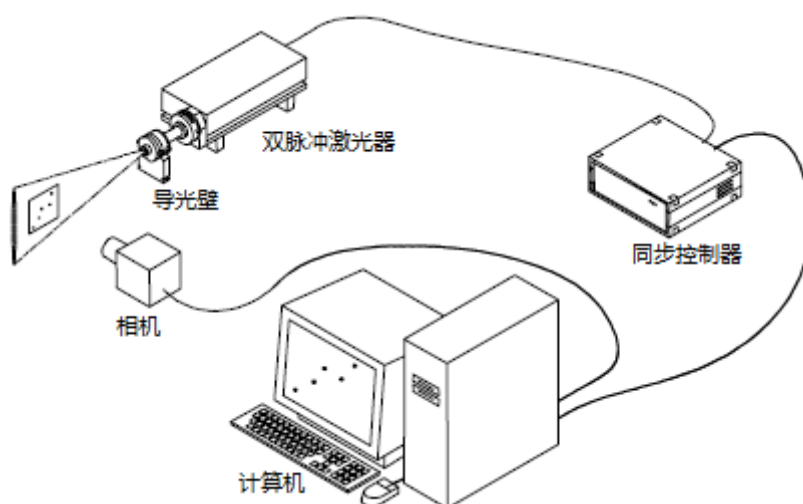


图 4-1 PIV 系统连接简图

如图 4-1 所示进行 PIV 硬件部件的连接，这里为了便于记忆连接顺序，我们根据控制信号的流向进行硬件连接。首先 PC 机与同步控制器（接口在后面板）通过 9 针的串口进行连接；然后从同步器前面板的端口 A~端口 D 引出 4 条触发线分别与 A 路激光器电源箱的 ClkIn 端口、Qin 端口，B 路激光器电源的 ClkIn 端口、Qin 端口相连。从同步器前面板的端口 E 引出一条触发线与图像采集卡（插入到 PC 机的 PCIE 插槽中）的 J4 触发接口连接；最后将图像采集卡与相机进行连接，同时将激光器与电源箱相连，并安装好导光臂。整个 PIV 系统连接过程如图 4-2 所示。



图 4-2 TSI 公司 PIV 系统连接图

4.2 PIV 实验中的软件操作

当硬件设备互连完毕后，进行 PIV 系统上电，并打开激光器的水泵进行水冷循环，之后打开激光器电源。与此同时，开启水槽的造流系统，并撒入示踪粒子，让粒子均匀分布在整個流场中。

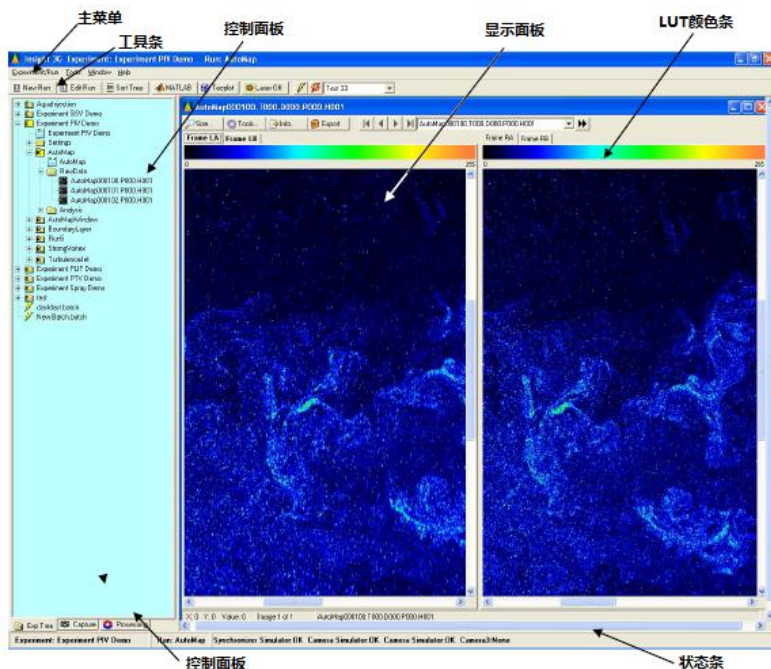


图 4-3 PIV 系统操作界面

左键点击 Insight4G 软件图标后进入 PIV 软件操作界面，如图 4-3 所示。操作界面主要分为三大部分：上侧为菜单栏主要完成 PIV 硬件系统的设置以及数据路径的设置；左侧为树状的控制面板，主要用于显示 PIV 实验的过程数

据，在该面板中可以建立多个实验，每个实验可以建立多个子项目，但当前处理的实验项目仅可以选择一项；右侧为窗口显示面板，主要用于 ROI 分析、显示粒子图像的采集过程以及 PIV 处理结果数据等。

实验开始时在本地硬盘上建立文件储存位置，分别点击 “Experiment/Run” 和 “New Run” 面板建立新的工作目录。新建文件夹在工作树中显示为亮黄色，并有 R 字母标识，如无上述显示，右键单击想设定的工作文件夹，选择 Set Experiment as Current 项。接下来，顺序按照标定，采集系统时序参数设置，图像采集，PIV 分析几个步骤来执行实验操作。

4.2.1 图像的静态采集及系统定标

将激光能量调低，开启激光器，调节激光光片位置，使得激光片打在测量位置。将如图 4-4 所示的标定板（靶盘单元格距离为 10mm）置于水槽中并于激光光片位置重合。相机垂直于激光光片进行布置，并在 Insight4G 软件中设置为静态采集控制，如图 4-5 所示:1)选择 Capture 选项卡；2)设置相机为 Free 模式；3)进行标定板的静态采集。



图 4-4 标定板

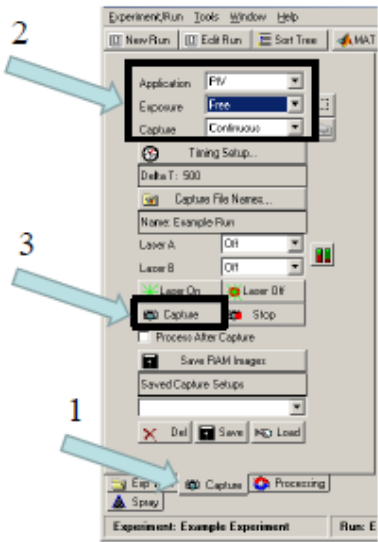


图 4-5 图像采集控制面板

选择 Processing 面板，选择 Application—PIV; Spatial Calibration—Create New…新建一个 Calibration，双击，在弹出的对话框中点击 Setup，弹出 2DSpatial Calibration 对话框。在此对话框的 Camera 选项可以任选两个相机中的一个 L/R，然后点击 Measured 按键，此时在所示图像上画出一竖直线，并使其在尺子上的刻度为整数，点击 Measure，在显示出像素值后填入刻度尺的实际尺寸，点击 OK，具体显示见图 4-6。此时完成标定。

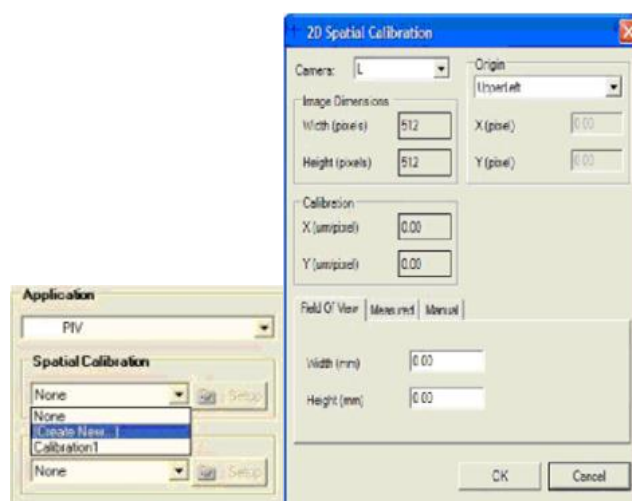


图 4-6 标定面板

4.2.2 PIV 图像的动态跨帧采集

在完成相机定标之后，需要对相机与激光器的时序进行设置，使之工作在跨帧模式。进入 Capture 选项卡选择 Timing Setup 进行时序参数设置，操作过程如图 4-7 所示。

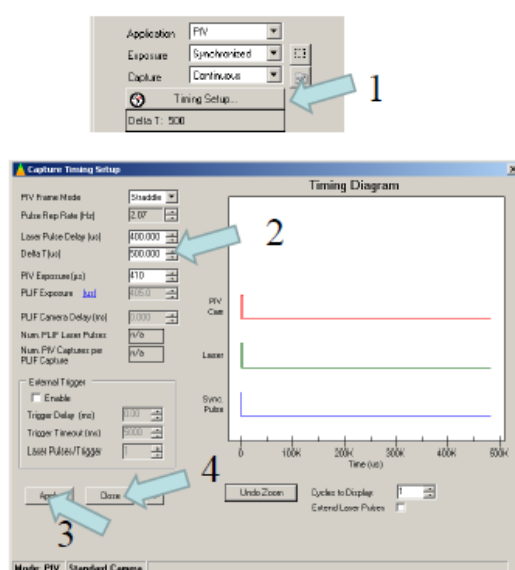


图 4-7 采集时序设置面板

在图 4-7 所示的时序设置面板上，PIV Frame Mode 为图像的采集模式。PIV 实验时选择 Straddle，即跨帧模式。Pulse Rep Rate 为激光发射频率；Laser Pulse Delay 为激光脉冲触发延迟；Delta T 表示 Laser A 和 Laser B 两束激光发射的时间间隔，这个参数在 PIV 实验时非常重要，它的设置是根据流场的速度来设置，并有速度 $V = \text{位移} / \Delta T$ 。PIV Exposure 表示相机曝光时间。要

保证：激光 A 和 B 必须跨帧，即相机 A 的曝光时间 PIV Exposure 应大于激光脉冲延迟时间 Laser Pulse Delay，小于 Laser Pulse Delay 与 Delta T 之和。当完成时序参数设置后，开始进行图像采集。此时仍使用图 4-5 所示的图像采集控制面板。在 Capture 选项卡上端 Application 下选择 PIV；Exposure 下拉列表中有 Free 和 Synchronized 两个选项，在对相机进行对焦及标定等调试工作时选择 Free 项；相机对实验模型采集图像时选择 Synchronized 项，表示相机与激光机进行同步测量。Capture 选项下有 single、continuous、sequence 三个选项，single 为单张图片采集设置；continuous 为连续采集选项，但不进行图像的储存，一般在相机调试及现场粒子分布情况观测时使用；sequence 为图像序列采集，在实验数据采集时选择此项。当选择此项时，点击旁边的文件夹标识，在出现的对话框中设置采集图片的帧数，还可以设置图片开始的序列号等信息。采集的图片先存在内存里，然后点击 Save RMA Image，图像数据便搬移到所设定的硬盘文件夹中。图像采集时，采集选项卡设置步骤如图 4-8 所示。

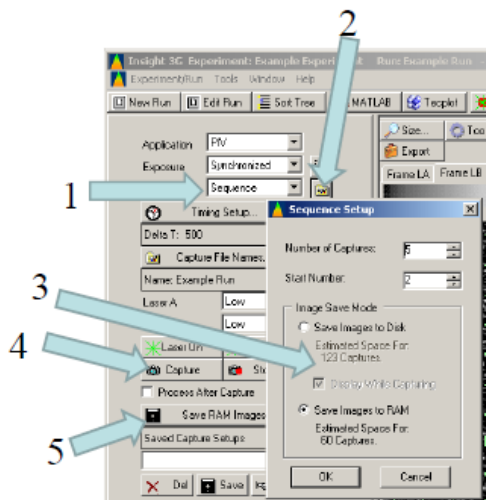


图 4-8 图像采集设置步骤

4.2.3 PIV 图像分析

采集完粒子图像后，进入 Processing 选项卡进行 PIV 分析，如图 4-9 界面的左侧栏所示。在 PIV 处理面板中从上到下按照 PIV 的处理顺序分别安排了标定参数设置选项、兴趣区域设定选项、PIV 预处理选项、PIV 分析选项以及 PIV 后处理选项。

标定参数设置面板如图 4-10 所示，在该步骤中是将图像坐标与世界坐标进行对应。ROI 区域选择面板如图 4-11 所示，该项目的设置目的是进行粒子图像的兴趣区域分析，而不进行全幅图像的分析，这不仅大幅度降低计算量，还可以剔除水槽背景的干扰或实验模型的影响。

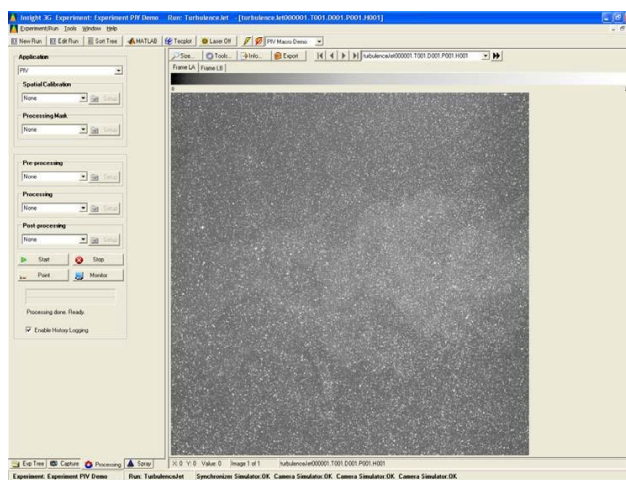


图 4-9 PIV 分析面板

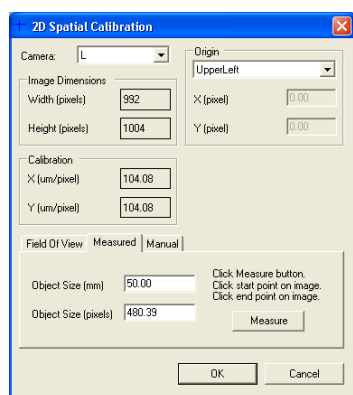


图 4-10 标定参数设置面板

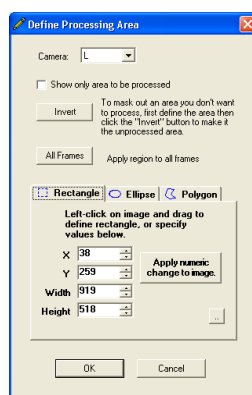


图 4-11 ROI 区域选择面板

粒子图像预处理设置如图 4-12 所示。在 PIV 图像预处理中主要完成图像的滤波操作，从而降低图像噪声，同时也可以扩大粒子的分布范围，提高分析的成功率。

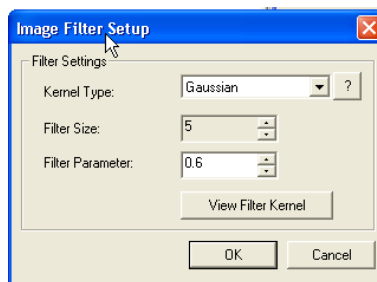


图 4-12 图像预处理设置

PIV 分析参数的设置面板如图 4-13 所示，左下部分是 PIV 算法的选择，其中包括分析网格的选择、掩模算法的选择、互相关算法的选择、以及相关峰优化算法四个部分。右侧最上面是分析网格的尺寸设置，如典型的 32×32 pixels 窗口分析；而右侧最下面是最大像面位移的限制选择，如设置为 $dx=dy=0.25$ 时，而窗口尺寸选择为 32 时，则像面上的最大粒子位移为 0.25×32 ，即粒子的行

向与列向最大位移为 8pixels，若粒子超过了这个限制则需要修改分析窗口的尺寸。

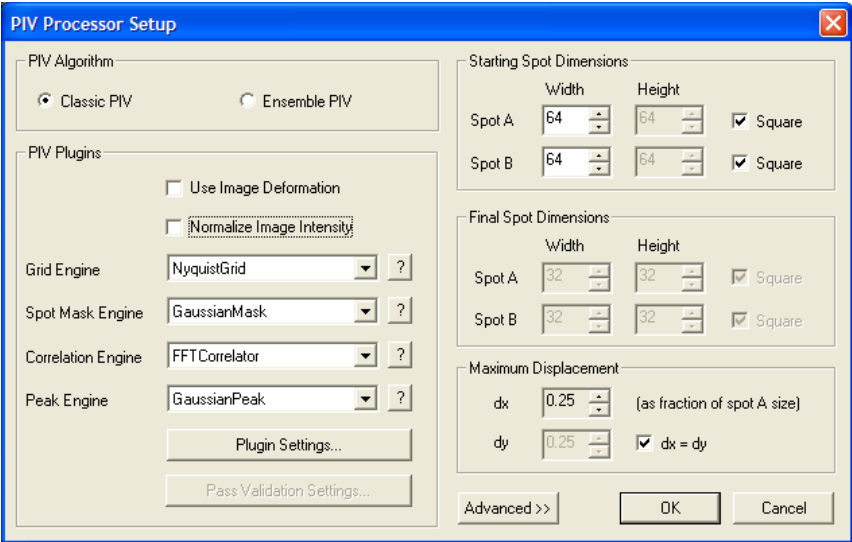


图 4-13 PIV 分析设置面板

当使用相关匹配法对粒子图像分析后，在流场矢量图中往往存在着许多的错误矢量，如图 4-14 中用红色表示的矢量线。这些错误矢量的存在会影响 PIV 数据的反演，如绘制流线图、涡度场等。因此在图像匹配分析后，还需要对已经得到的矢量场进行后处理。

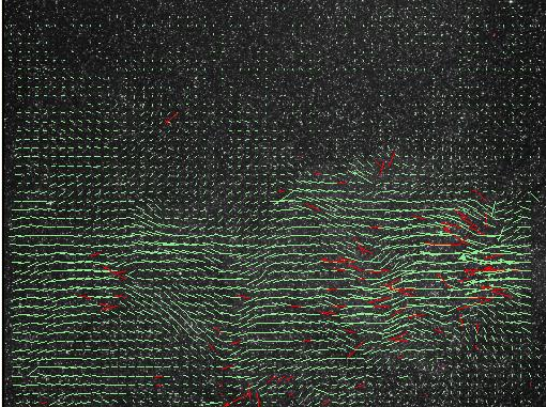


图 4-14 带有错误矢量的流场

常用的 PIV 后处理的方法有两种：其一为局部分析法，如图 4-15 所示；其二为全局分析法，设置面板如图 4-16 所示。前者的做法是将当前矢量与近邻矢量的统计量进行距离判断，当两者距离大到一定程度时则认为是错误的结果。而全局分析法则是在全局范围内进行矢量的对比，当在统计意义上满足全局一致性时，则认为是对的，否则认为是错的。

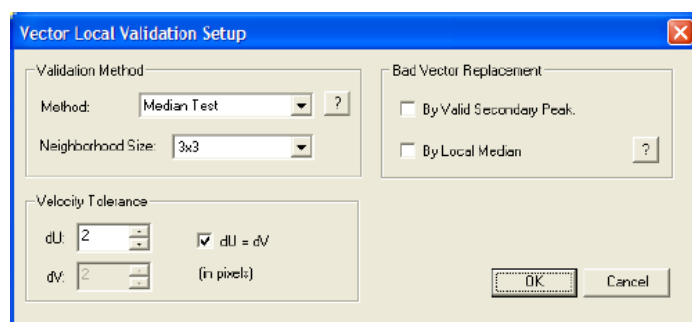


图 4-15 局部矢量检测

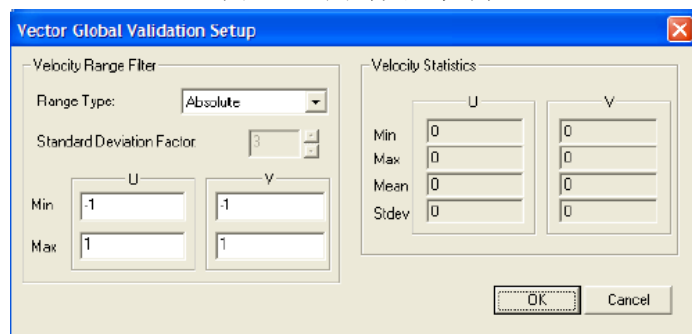


图 4-16 全局矢量检测

综上所述，PIV 实验过程中的操作步骤如下：

- (1) 进行硬件连接，并按数据流向检查连接的正确性。连接正确后整理线缆，使现场整洁，也便于排查故障。
- (2) 检查泵浦激光器电源的冷却水（去离子水）是否已达水箱刻度的 3/4 以上；检查 CCD 相机，保证光圈最小（避免因光源位置错误使 CCD 受损）。
- (3) 激光器上电，开启冷却水泵，2 分钟后开启激光电源箱电源。在内控模式下观测两路激光的合束质量并进行适当调节。最后将激光器设置为外控模式。
- (4) 同步控制器上电，相机上电，PC 机上电。
- (5) 开启 Insight4G 软件，并在软件中对硬件参数进行设置，同时设置 PIV 实验工作路径。
- (6) 调节相机镜头，采集标定板图像，进行摄像机定标。
- (7) 根据流场情况，在软件中设置跨帧图像采集的时序控制参数。
- (8) 进行粒子图像的采集与保存。
- (9) 设置 PIV 分析参数，进行 PIV 图像分析。
- (10) 实验结束。将相机光圈调到最小后关闭电源。关闭激光器但继续供电进行冷却循环，大约 5 分钟之后关闭激光器电源。关闭同步器，PIV 数据保存好后关闭 PC 机。

主要参考书:

- [1] 唐洪武, 唐立模, 陈红, 等. 《现代流动测试技术及应用》. 北京: 科学出版社, 2009
- [2] M Raffel, CE Willert, ST Wereley, J Kompenhans. 《Particle Image Velocimetry-A Practical Guide》(2nd Edition) Berlin Heidelberg: Springer, 2007
- [3] 于起峰, 尚洋. 《摄影测量学原理与应用研究》. 北京: 科学出版社, 2009