

# 2012 年 春 季学期研究生课程考核

( 读书报告、研究报告 )

考 核 科 目: 现代动力 / 流体机械实验技术

学生所在院 ( 系 ) : 能源科学与工程学院

学 生 所 在 学 科: 动力工程及工程热物理

学 生 姓 名: 国成

学 号: 11S002050

学 生 类 别:

考 核 结 果

阅 卷 人

# PIV 技术及其应用

粒子图像测速技术（ PIV ）是近些年从流场显示技术基础上发展起来的一种崭新的流速测量技术。所谓流场显示是将流场的某些特性进行可视化，从而获得该流场直观的信息。随着计算机图像处理与光学技术等的发展， PIV 技术可在同一时刻记录下整个测量平面的相关信息，从而可以获得流动的瞬时平面速度场。

## 1、PIV 原理

PIV 的基本原理是基于最直接的流体速度测量方法。首先在流体中掺入密度与流体相当并具有很好的跟随性的示踪粒子。某一时刻，激光照明流体一次， CCD 相机同时拍摄下此时被照亮的粒子图像，另一时刻，激光再照明一次， CCD 相机也同时记录一次，发生移动后的示踪粒子图像又被拍摄下来。两个不同时刻的粒子图像被划分成许多“判询域”（积分格），每对判询域进行相关运算，运算得到的结果是一个速度矢量，即一块判询域产生一个速度矢量。成千上万个判询域做相关运算，就产生成千上万个速度矢量，形成矢量场和速度大小的分布。

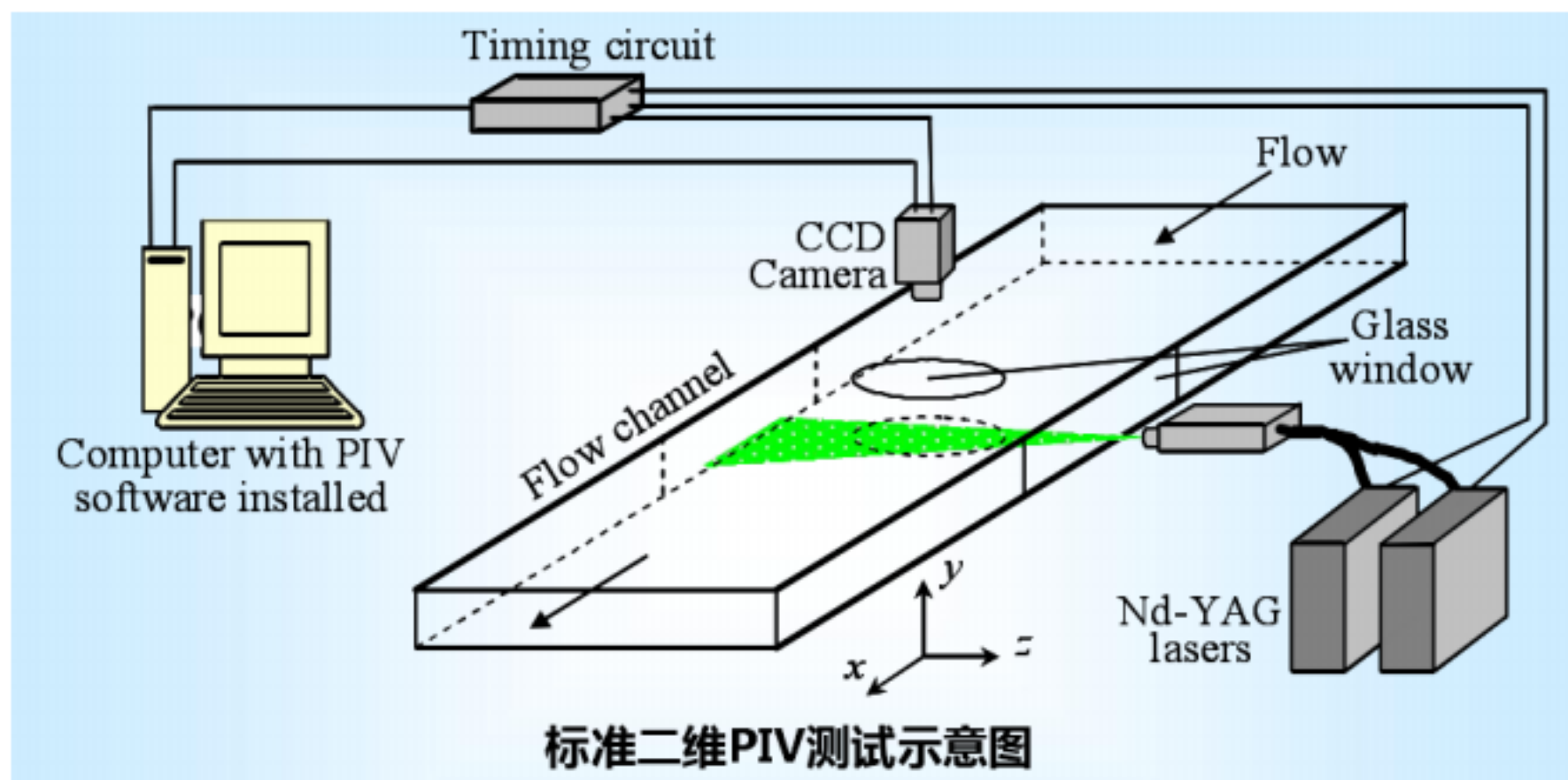


图 1 标准二维 PIV 系统示意图

上图为标准二维 PIV 系统示意图。系统的重要硬件组成：脉冲激光源、高速相机（ CCD或 CMOS）、同步控制器、数据采集（及控制）计算机。主要过程是：

示踪粒子（加入被测流动中）；脉冲激光面照亮流场中的待测平面；高速相机采集照亮平面内的示踪粒子图像；数采系统中的软件处理粒子图像获得速度场。

2DPIV 系统通常是使观察流场中的速度最快的分量平行于面光源，相机的视场方向在面光源的法线方向上。即使这种摆放设置受实验条件的限制，像光学通道等，安装也不要和理想的垂直摆放有太大的差别，从而尽可能减少系统误差，以便得到更为真实准确的实验结果。

当已知曝光间隔时间  $t=t_2-t_1$  后，便可以计算获得粒子在图像上的平均速度  $V$ ，其原理如图 2 所示。考虑系统光学放大倍率后，就可以计算出粒子的实际速度。如果  $t$  很小，则可用该速度近似为粒子在  $t_1$  时刻位置的瞬时速度。因此，PIV 测量得到结果实际上是以平均速度代替瞬时速度，示踪粒子速度代替所在位置的流场速度。

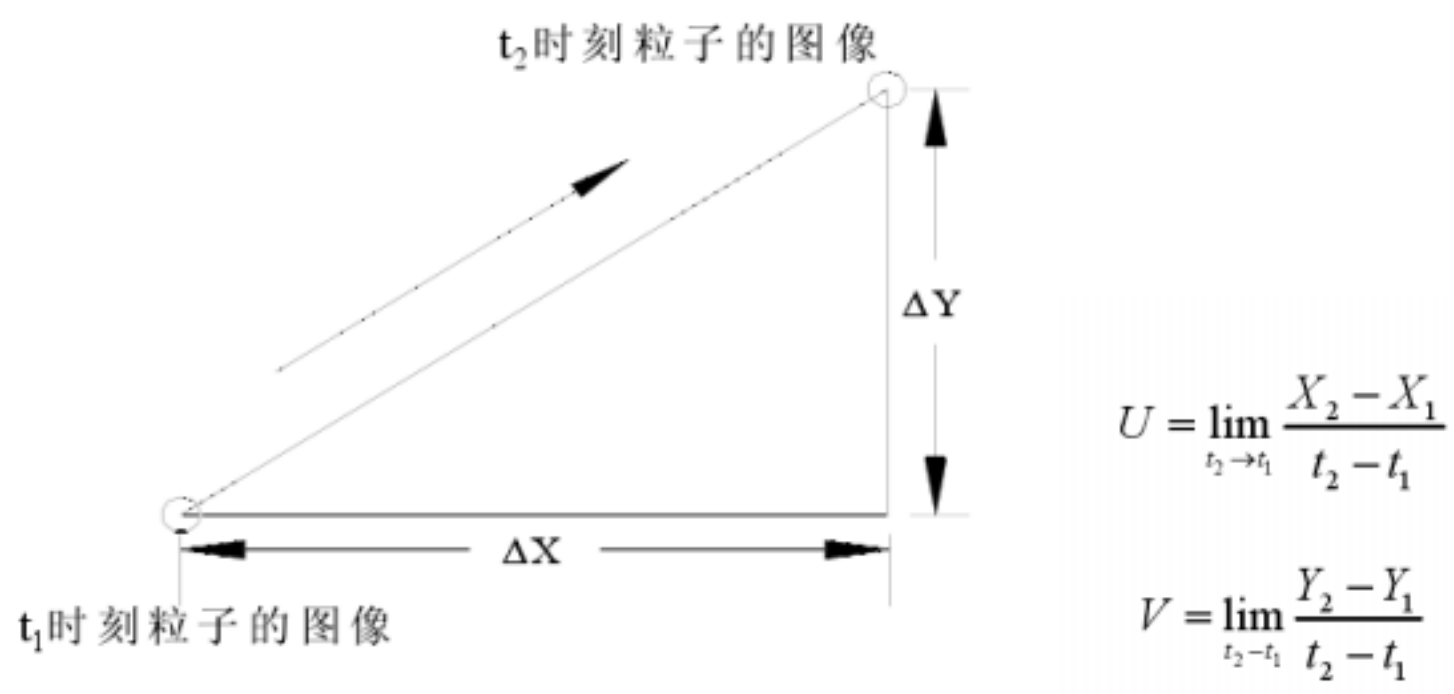


图 2 PIV 原理

## 2、示踪粒子的选择

PIV 技术的实现过程是通过在流场中布撒合适的示踪粒子，利用 CCD 等成像系统获得曝光后的示踪粒子图像，再应用特定软件对图像进行处理与分析，从而获得流场的速度分布情况。因此测试中所使用的示踪粒子的特性对整个 PIV 系统的测量结果影响非常大，特别在定量测量时更是如此。

合适的示踪粒子尺寸应该能够保证流场测量的精度，PIV 示踪粒子须具备以下三个特点：

- (1) 中性漂浮、相对于待测流动现象尺寸足够小，保证好的跟随性。

(2) 尺寸足够大，保证有效地散射足够光强。

(2) 示踪粒子散射效率还取决于其折射率与被测流体折射率之比。

选择示踪粒子并非绝对的，需要根据研究的介质和问题选择正确的示踪粒子。

选用粒子的一个重要原则是粒子密度应与实验流体密度尽量一致，这样粒子所受浮力与重力互相抵消，粒子仅受流体的粘性力作用。密度小于实验流体时粒子将漂浮在实验流体的表面，达不到跟踪流场的目的；如果密度大于实验流体，由于重力场作用粒子会产生沉降，在重力方向会有分速度，影响测量结果。当示踪粒子密度与被测流体密度不同时，PIV 测量误差主要来自重力的影响

$$U_g = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} g$$

一般来说，光经过微小粒子散射的强度是粒子大小、形状、所在位置及粒子折射指数与粒子所在介质（流场）折射指数之比的函数。另外，散射光强还与入射角度和观察角度有关。示踪粒子的表面反射率反映了粒子的成像特性。示踪粒子要具有良好的光反射性，这样成像对比度高，而且在照射激光光强有限时，反射率越高则粒子可成像数目也越多，故能更好显示流场的细节，提高流场测量精度。相对于同一介质，折射率越高的粒子表面反射率也越高，因此最初在粒子材料选择时可选取折射率高的材料。

对于 PIV 全场测速讲，只有粒子存在才能测速，没有粒子的区域，该区域也就没法测得速度，因而要求全场均匀布撒粒子，才能保证全流场都能测得速度。如果粒子浓度太高，实际记录在底片上的不是粒子图像，而是粒子群的散斑图像及其散斑图像的位移，并称为激光散斑测速技术。如果流场中的粒子浓度很稀，在确定粒子位移时常常采用单个粒子的识别和跟踪方法，一个一个确定该粒子的速度，称为粒子跟踪测速技术。在一定片光厚度、放大率下，其粒子浓度可表示为

$$N = \frac{4nM^2}{\Delta Z \pi d_{int}^2}$$

式中  $n$  为判询域的粒子对数，一般应为  $n=4\sim 12$ ； $M$  为放大率； $Z$  为片光厚度； $d_{int}$  为判询域直径。

### 3、PIV 系统激光

实验所用 PIV 测试系统购自专注于激光—图像测量领域的德国 LaVision 公司。激光光源采用北京镭宝光电技术有限公司的 Nd-YAG（掺钕钇铝石榴石）双脉冲激光器。Nd-YAG 双脉冲激光器的阈值低，可以获得各种功率等级的输出。两路波长为 1064nm 的激光器安置到同一光学平台内，避免了传统 PIV 激光器分体式设计中存在的一些弊端。这两路激光器产生的波长为 1064nm 的激光利用偏振耦合技术同轴输出，进入 SHG 晶体后产生可见光波长为 532nm 的绿光。随后经过分光系统，滤掉红外波段的激光，只将绿光反射出。再经导光系统传输到所需位置，并利用片光系统将光斑转化成片状光源，之后就可以照射在 PIV 实验装置上，进行实验与分析。

所用激光的参数指标为：

输出波长为 532nm，单脉冲能量为 200mJ，重复频率为 1-15Hz，脉冲宽度为 6~8ns@532nm，能量不稳定性（RMS）5%@532nm。

激光光束直径很小，要想把它变成 PIV 所用的片状激光需要经过棱镜组合，但是片状激光的厚度是不一样的，有个非常薄的束腰位置，PIV 的待测流场必须放到这个束腰位置测量结果才能精确。而且，片状激光的束腰位置在激光工作时要连续可调，这样，测量时可以不移动待测流流体而通过调节光学器件即可，否则，需要移动待测流场，给测量带来不便。实验所用激光光束通过系统后，将在距激光头 1 米附近产生最薄的片光，厚度 1mm，最大工作面积达到 200mm × 200mm。

### 4、PIV 图像采集

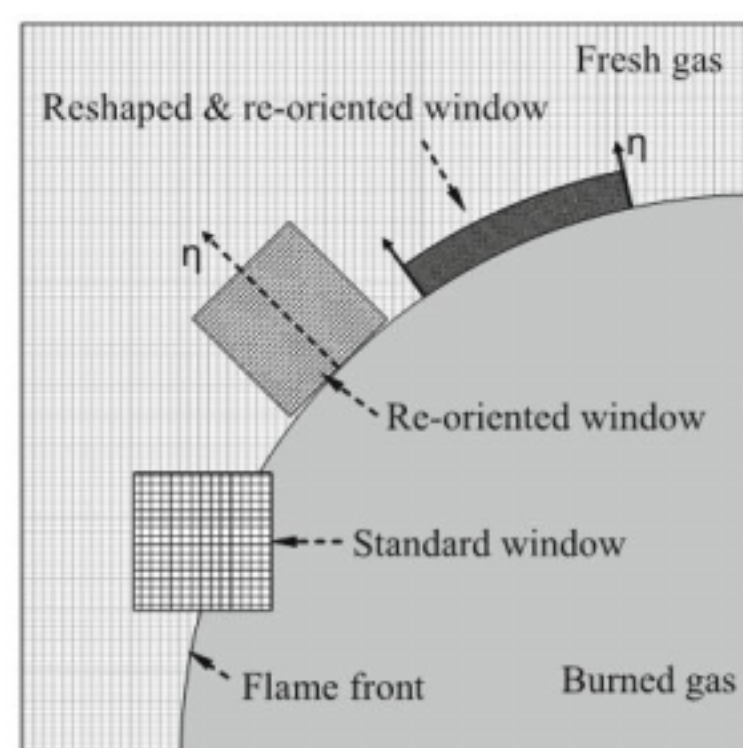
将多次曝光的粒子位移场的信息瞬时记录下来，通常有两种记录方式：早期采用照相机记录在底片上；现在多采用 CCD 相机，直接由 CCD 光电转换芯片将粒子图像的信息转换成数字信息传输至计算机，即数字式 PIV 或 DPIV。

目前 CCD 相机发展较快，空间分辨率由 512 × 512pixel 发展到 4096 × 4096pixel；从同帧 CCD 发展到跨帧 CCD，即将两次曝光的粒子图像分别记录在两帧图像上，继而用互相关法处理数据。被 532nm 的绿激光照亮的示踪粒



子发生 Mie 散射，散射的绿光携带着光信息映射到 CCD 芯片上，发生光电效应，然后光信号转换成模拟电信号进而转换成数字电信号，这些数字信号携带着所拍摄的图像信息传输至计算机中由软件进行处理。

在 PIV 图像采集过程中，针对不同的情况，需要采用不同的采集方法，否则，采集到的图像就会不理想，以致无法进行实验研究。例如，在对局部瞬时层流燃烧速度的直接测量中，如果采用标准的 PIV 技术进行图像采集，就不会很好地预测到火焰前方两毫米的燃烧速度，减小火焰前沿的检测能力，这就需要调整询问窗口。根据 PIV 算法自适应性，将询问窗口调整到火焰前沿局部法向矢量方向，如下图，这样就可以达到理想的检测效果。因此，在 PIV 的图像采集过程中，需要根据需要来适当调整图像采集方法，以便采集到所需的最佳数据。



## 5、PIV 数据处理

PIV 图像数据处理和流场显示是通过与之相连的计算机和配置的软件实现的，本质上就是图像处理技术。

PIV 处理数据时，粒子图像的判读是其中的关键一环。PIV 成像系统提供了在已知时间间隔  $t$  内流场粒子的位移信息记录，提取粒子位移信息尽管在原理上很简单，但由于信息十分巨大，如果用人工来提取和判读的话，将成为十分繁重的工作。Adrian 等人首先提出和实现了自动判读系统。

PIV 对所得的粒子图像进行处理是由 CCD 对这些图像的储存方式决定的。CCD 记录图像有两种方式：一种是单帧双曝光，即两次曝光的图像记录在一帧

图片中，此种记录方式可采用自相关处理；另一种是双帧双曝光，即两次曝光分别记录在两帧中，此种记录方式可采用互相关处理。不管采用何种处理方式，PIV均把所记录的图片划分为许多很小的判询域（每个判询域就是一个积分窗口），然后对每个判询域进行相关计算，进而每个判询域得出一个速度矢量。需要注意的是在同一个积分窗口内的粒子必须是在同一方向上和距离上移动，以确保良好的相关性。另外，比较合适的密度是每个判询域内有 10 个左右的示踪粒子。

为了获得精确的结果和高的空间分辨率，在进行后处理时所用参数如下：

- （1）积分窗口 / 格迭代：多次，但尺寸递减。
- （2）最初的积分窗口尺寸： $64 \times 64$ ，迭代：2 次。
- （3）最终的积分窗口尺寸： $32 \times 32$ ，迭代：2 次。
- （4）积分窗口 / 格重叠：50%。
- （5）初次迭代：相关函数：‘标准’ FFT。
- （6）末次迭代：相关函数：归一化。

PIV 算法有两种：自相关算法和互相关算法。自相关算法是由两个同样的相关峰来计算位移，这两个峰关于标志零点的最高峰对称，从而无法判别方向。同时，如果这两个峰离最高峰很近的话，不容易测量出小位移或者测量出来不准确。互相关算法所用的相关图像是两帧粒子图像，与自相关相比，粒子浓度可以更浓，判询域可以更小来获得更多的有效粒子对；由于两帧图像的先后顺序已知，故不需要相对位移装置就可以直接判定粒子的运动方向；由于自相关采用单帧多脉冲法拍摄的图像使背景噪声也有所增大，因此其信噪比较差。而互相关采用多帧多脉冲法来拍摄图像，从而减少了背景噪声，提高了信噪比；由于自相关必须将两个高峰的形心进行定位，而互相关只要求对一个高峰的形心进行定位，因此互相关的精度更高，测量范围更广。

## 6、PIV 的特点和应用

PIV 技术的特点：

- （1）PIV 能对多种瞬态流场进行测试。比如燃烧火焰场，内燃机，自然对流，火箭发射，尾部流场，火炮发射口流场等等都是典型的瞬态流场。

(2) PIV 能测量流动的空间结构。通常只有在同一时刻记录下整个信息场时才能看到空间结构的。如在湍流流动中，采用整体平均的数据不适合于保持流动中不断改变的空间结构，且平均数据的过程容易引起流动结构图像的消失，只有通过诸如 PIV 技术才有可能获得流动中的小尺度结构的逼真的图像。

(3) PIV 能对某些稳定流场进行测试。实际流动中存在着很多特殊情况，比如狭窄流场，其流动本身是稳定的，但流场狭小，而热线热膜风速计)又会破坏流场的状态 [2]，此时 PIV 技术可以大显身手。

经过近十年的发展，二维平面 PIV 的应用范围已经十分广泛，具体可用于以下研究：1) 内流研究(例如各种发动机流场)；2) 高速气流的涡流、湍流分析(例如火焰喷射器流场)；3) 室内外气流的流场分析(例如空调房间气流场)；4) 各种流态的水流分析(例如水泵吸水池流动状态)；5) 风洞等大型设备中各种模型状态下的复杂流动(例如低速开口风洞飞机流场)；6) 涡流研究(例如搅拌器流场)；7) 医学中微循环、血液流动研究(例如人造心脏动脉瘤流场)。