



粘性流体力学

—第十四讲：边界层测量实验

田 伟

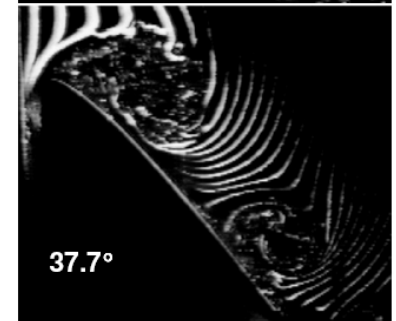
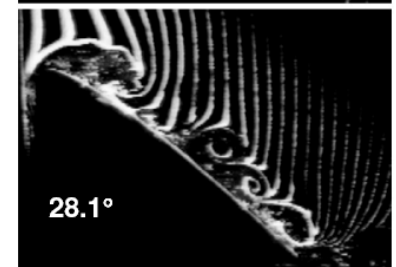
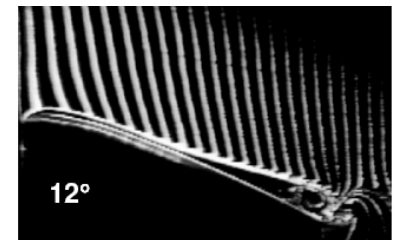
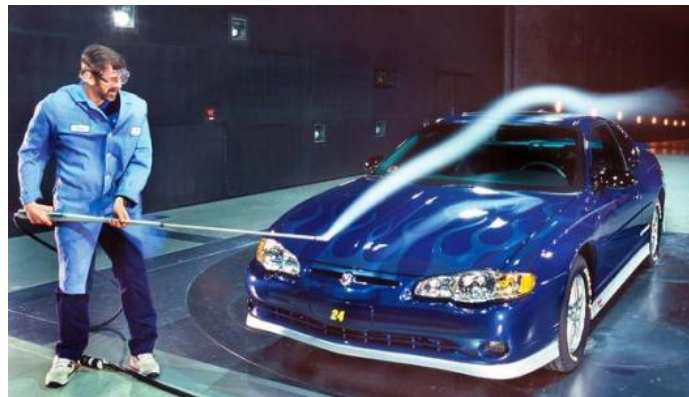


上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

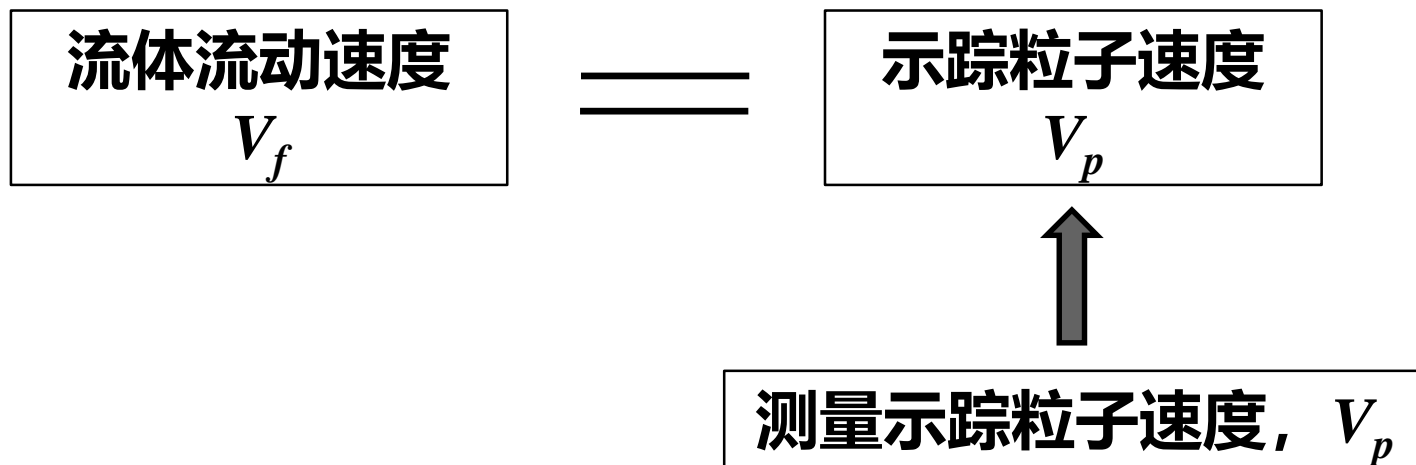
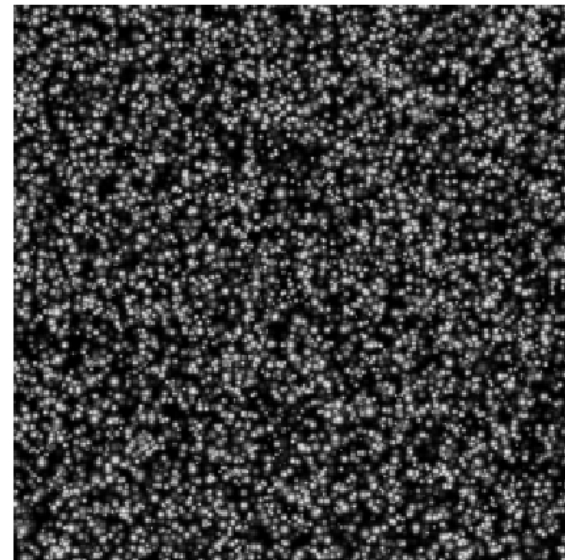
流动显示实验

- 空气，水等介质——不可见
- 流动显示实验：通过在流体中添加示踪物质使流动可见

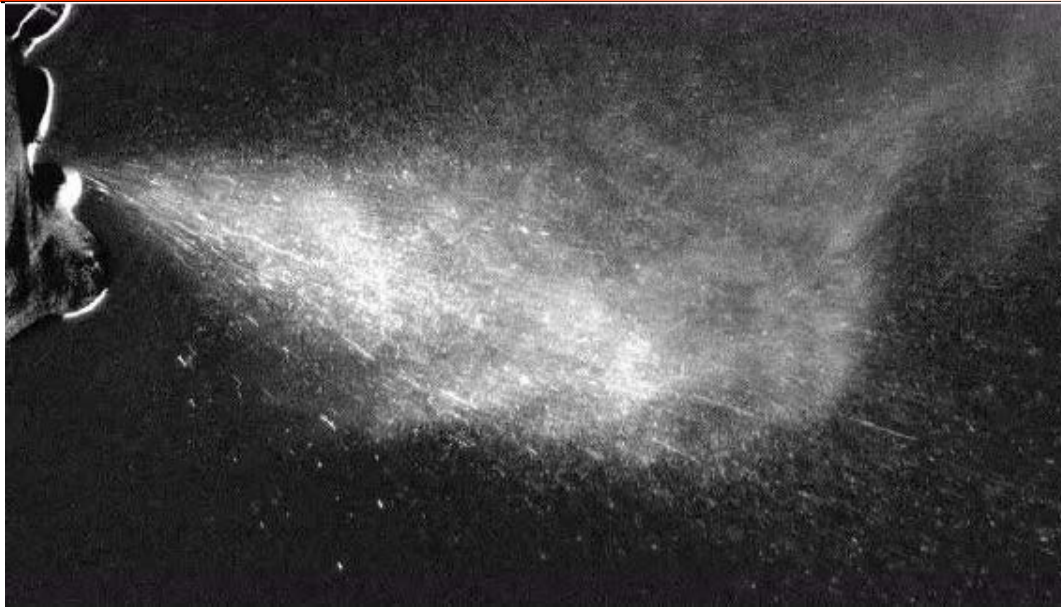


基于粒子的流动测量技术

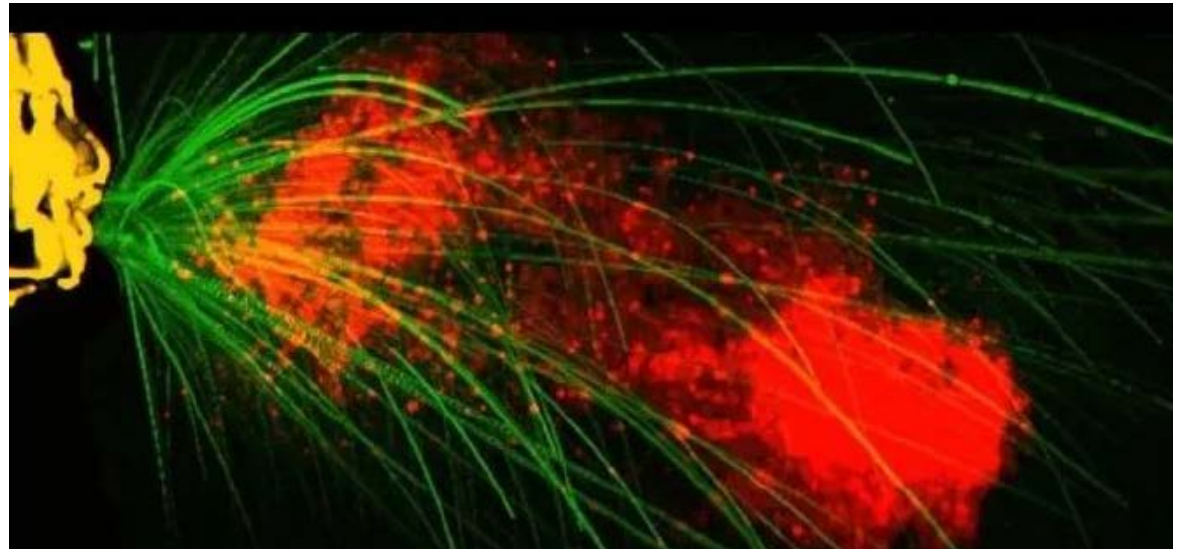
- 在流体中投入粒子 ($\sim \mu\text{m}$ 量级大小)
- 假设:** 示踪粒子与当地流体具有相同的速度。



基于粒子的流动测量技术



**问题1：喷嚏中的液滴
可以作为示踪粒子吗？**



**问题2：飞沫/气溶胶
Vs. 示踪粒子**

Particle Image Velocimetry (PIV)

- 示踪粒子位移: 在固定时间间隔下测量投入在流体中的示踪粒子的位移。

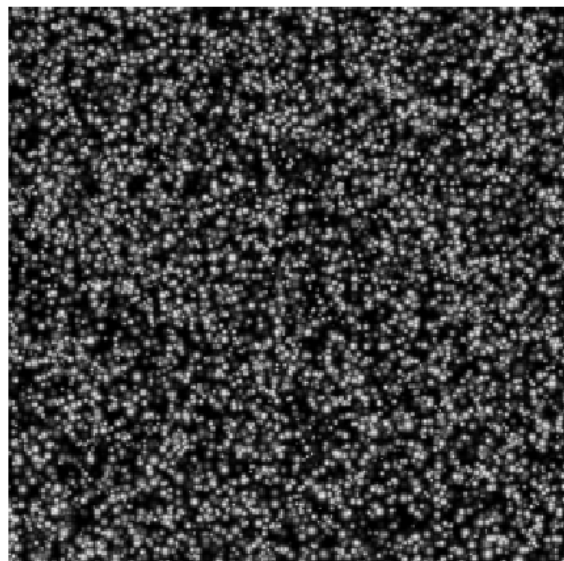


Image A: $t=t_0$

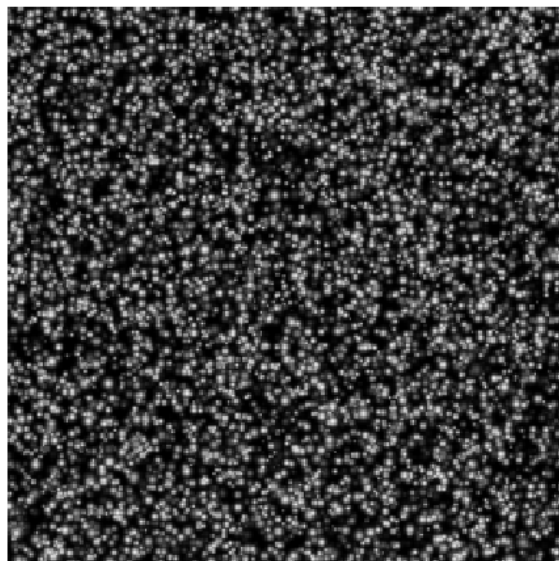
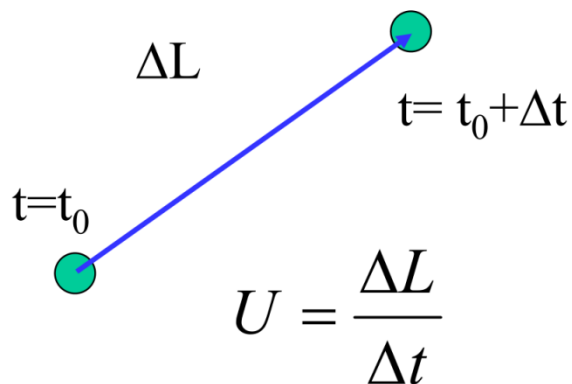
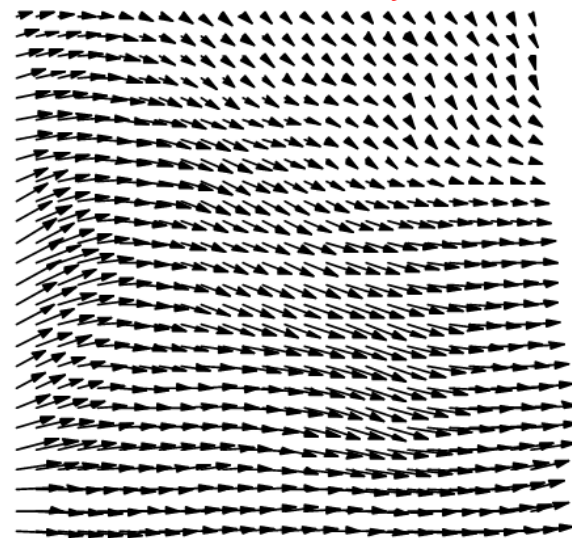


Image B: $t=t_0+4ms$



Velocimetry



对应速度场

Particle Image Velocimetry (PIV)

- 步骤 1: 怎样得到原始图像 Image A 和 Image B?

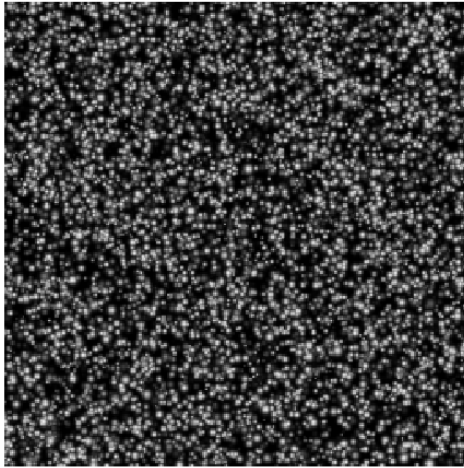


Image A: $t=t_0$

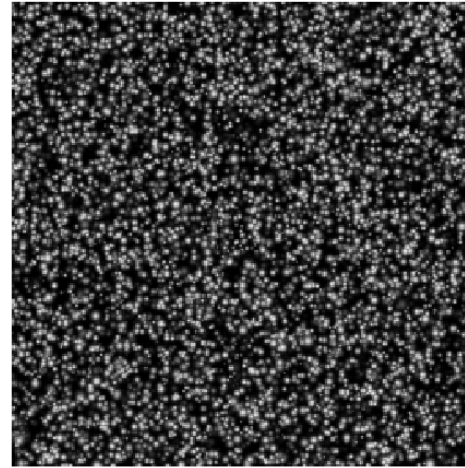
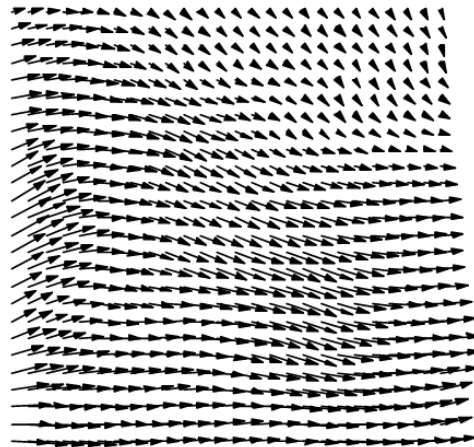


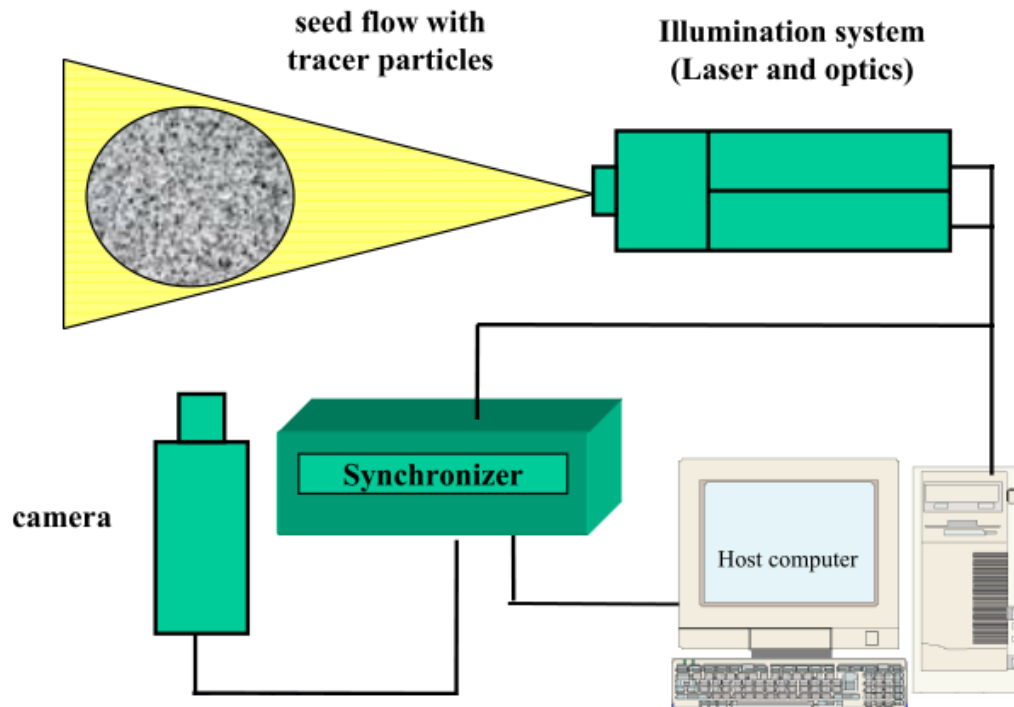
Image B: $t=t_0+4ms$

- 步骤 2: 怎样利用原始图像 Image A 和 Image B 得到对应的速度场?



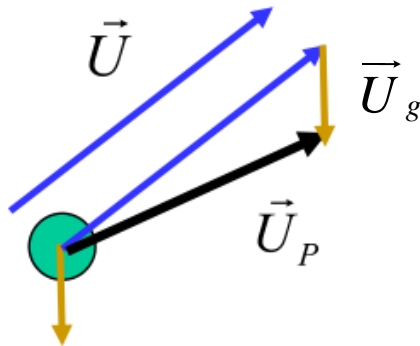
PIV 硬件系统 — 如何得到原始图像

- **示踪粒子:** 追踪流体的运动.
- **照明系统:** 照亮流场中需要测量区域的粒子.
- **相机:** 获得流场中示踪粒子图像.
- **同步器:** 控制光源发光及相机拍摄图像的时间.
- **主机:** 存储粒子照片及进行图像处理.



PIV 中的示踪粒子

- 示踪粒子需要**浮力与重力基本相同、足够小**，从而可以完全跟随流体的流动

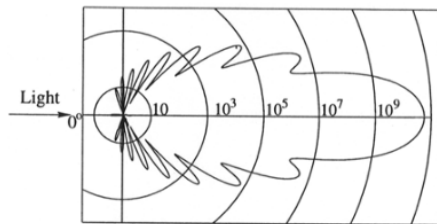
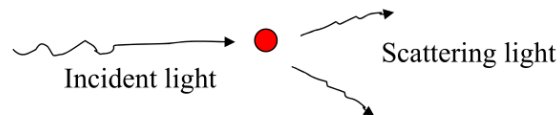


$$U_g = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} g$$

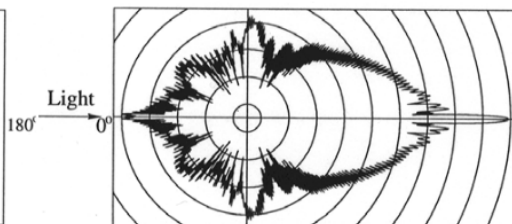
$$\vec{U}_g = \vec{U}_p - \vec{U} = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} g$$

测量误差的来源之一：示踪粒子及流体介质密度不同时重力的影响

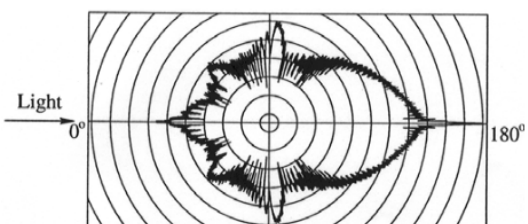
- 示踪粒子需要**足够大**，从而**有效的散射**照明光源发出的光



$d=1\mu m$



$d=10\mu m$



$d=30\mu m$

PIV 中的示踪粒子

- 在液体介质(水)中示踪粒子的选择:
 - 聚合物颗粒 ($d=10\sim100\ \mu\text{m}$, 密度 = $1.03\sim1.05\ \text{kg/cm}^3$)
 - 空心玻璃珠 ($d=10\sim100\ \mu\text{m}$, 密度 = $1.03\sim1.05\ \text{kg/cm}^3$)

通常情况下液体介质中示踪粒子大小在 $20\sim50\ \mu\text{m}$ 范围内

- 在气体中示踪粒子的选择:
 - 烟, 雾, 蒸汽
 - 不同的油
 - 聚苯乙烯 ($d=0.5\sim10\ \mu\text{m}$)
 - 镁($d=2\sim5\ \mu\text{m}$), 铝 ($d=2\sim7\ \mu\text{m}$)

在气体介质中, 由于示踪粒子及气体介质的反射率相差很大, 因此较小的粒子就可以达到要求。



射流, 测量水滴速度

通常情况下气体介质中示踪粒子大小在 $1\sim5\ \mu\text{m}$ 范围内

照明系统

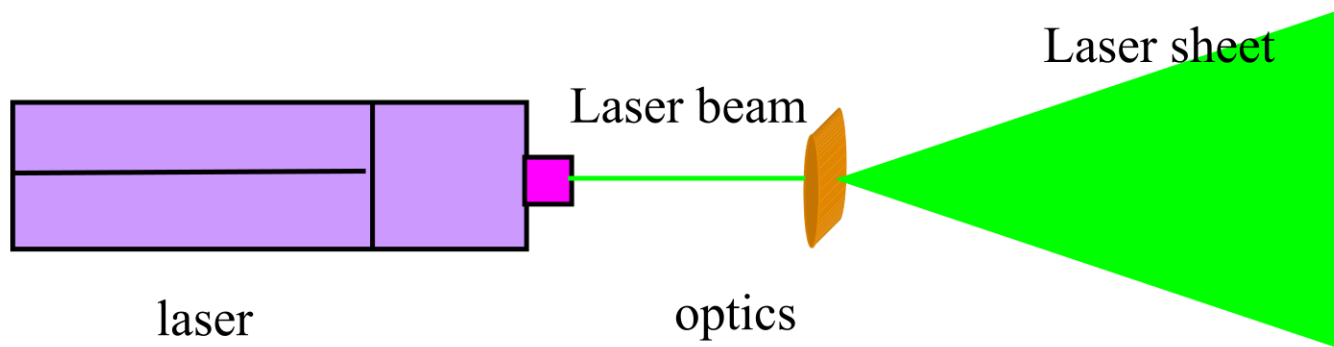
- PIV的照明系统由光源及光学镜片组成。

- 光源：

激光是PIV系统中应用最广泛的光源，其具有单色，高能量的特点。激光束可以很容易的转换为薄片光，并且在记录示踪粒子时不会产生色差。

- 光学镜片：

利用一组柱面镜头可以将激光束转化为激光片光，从而照亮测量区域。



光源—双脉冲激光器

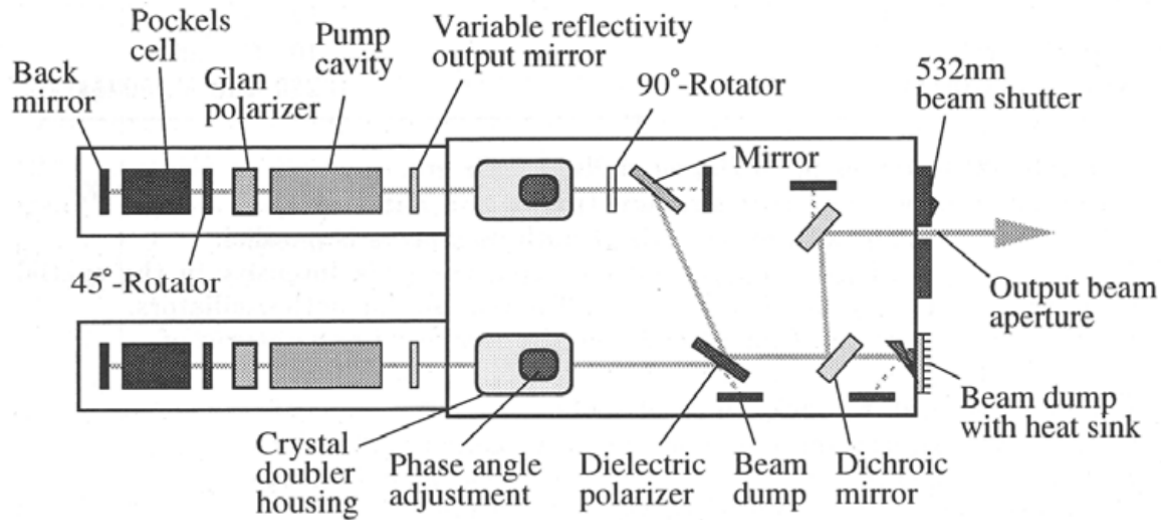


Fig. 2.17. Double oscillator laser system with critical resonators



光学镜头

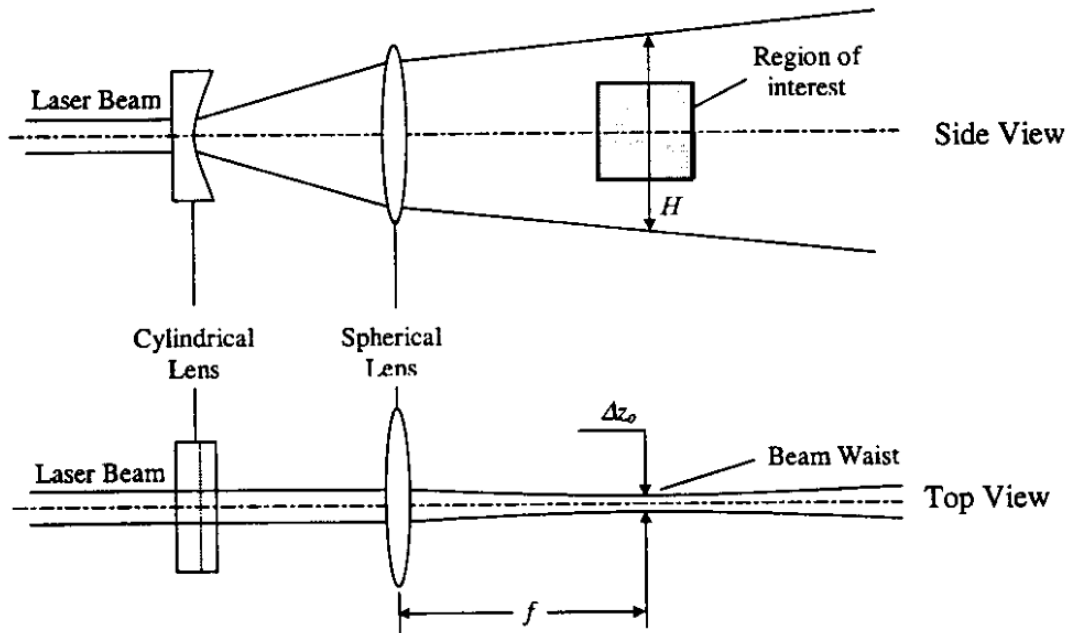


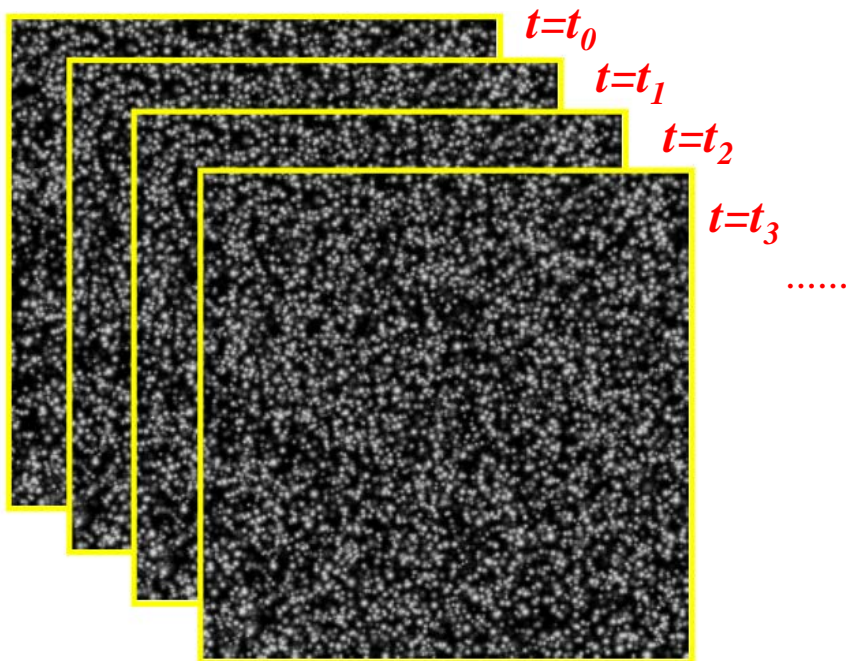
Figure 6. Schematic of a simple sheet-forming module.



导光臂

CCD相机

- PIV实验技术对CCD相机的要求：
 - 记录序列图像
 - 高空间分辨率 (高像素)
 - 高时间分辨率 (拍摄频率)
 - 高灵敏度



同步器及主机

- 同步器

控制激光发光时间和相机采集时间

- 主机

存储粒子图像并进行图像处理

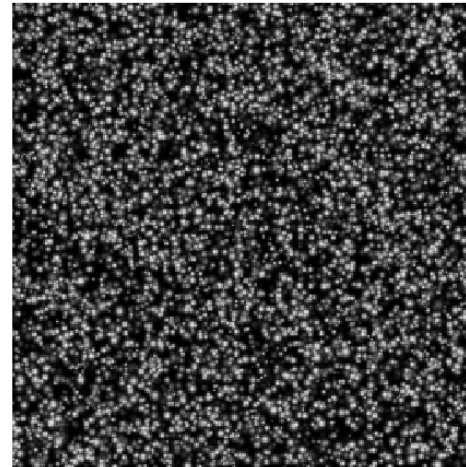


Image A: $t=t_0$

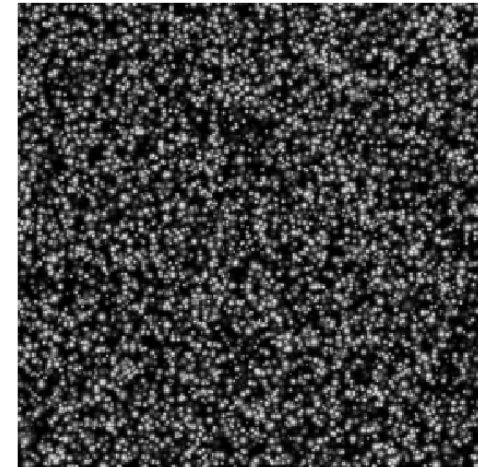
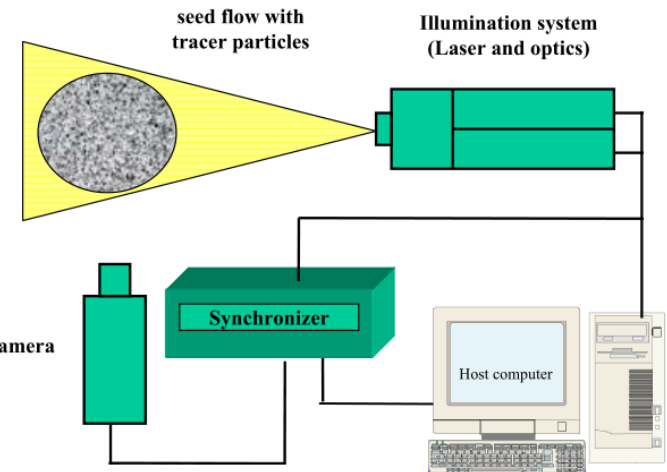
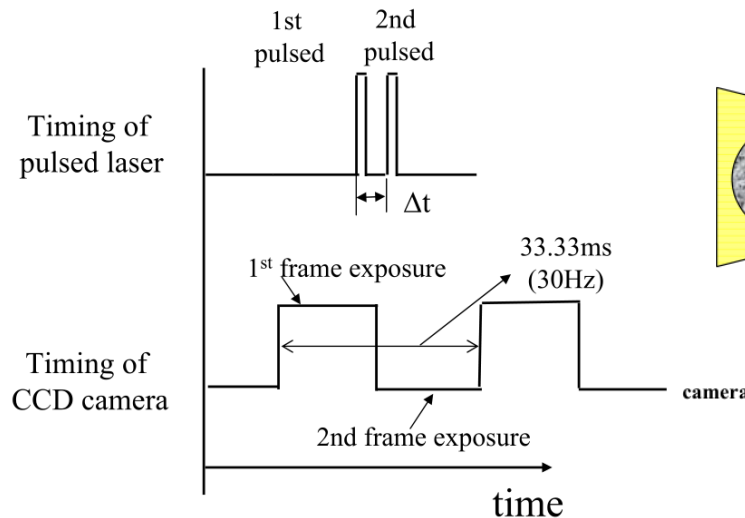
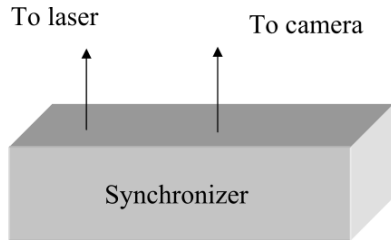


Image B: $t=t_0+4ms$



Particle Image Velocimetry (PIV)

- 步骤 1: 怎样得到原始图像 Image A 和 Image B?

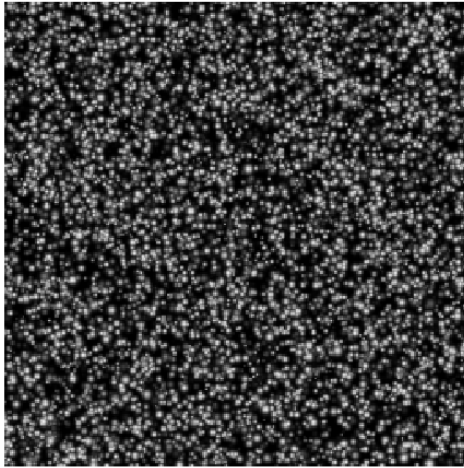


Image A: $t=t_0$

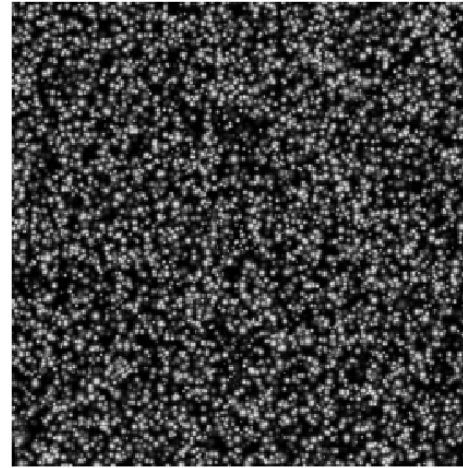
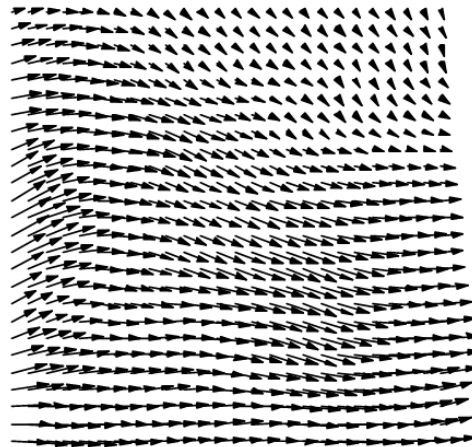


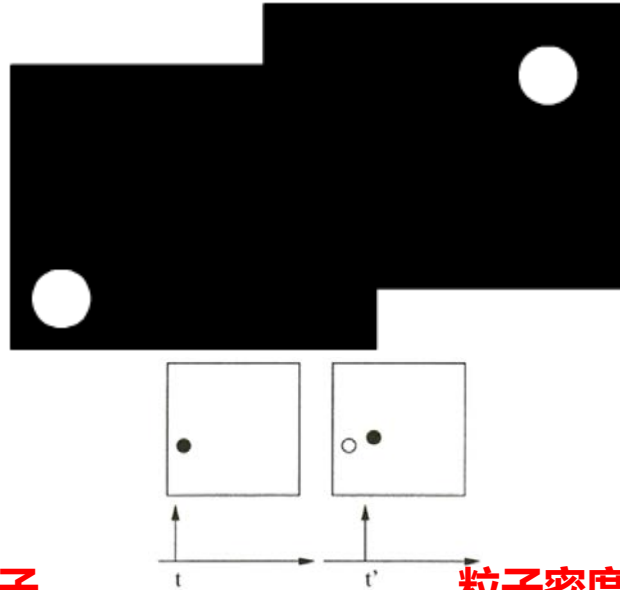
Image B: $t=t_0+4ms$

- 步骤 2: 怎样利用原始图像 Image A 和 Image B 得到对应的速度场?



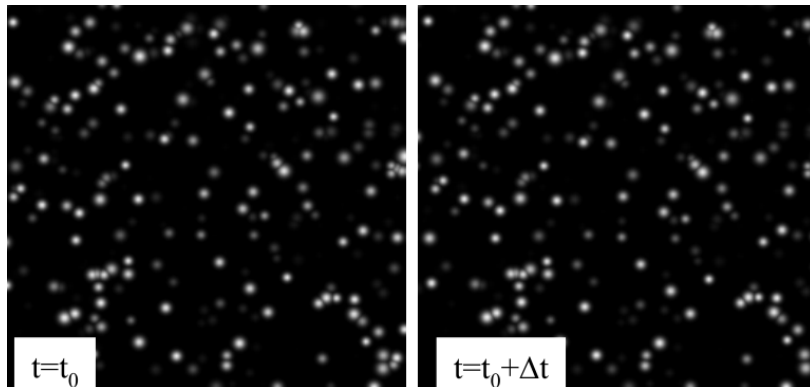
多帧技术

- 多帧/多次曝光

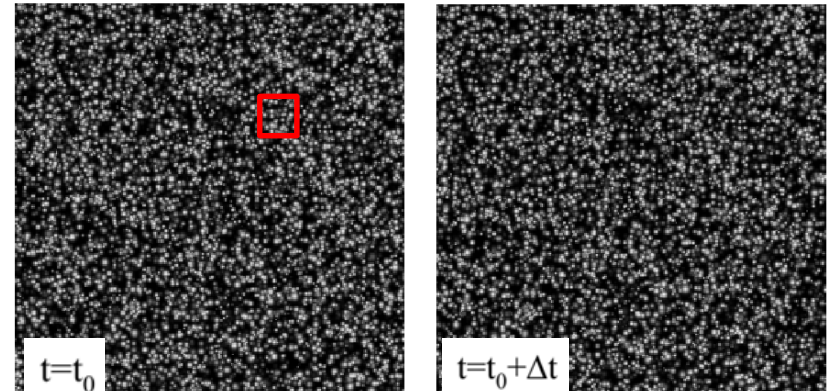


粒子密度小：追踪单个粒子

粒子密度大：追踪一组粒子(一定区域)

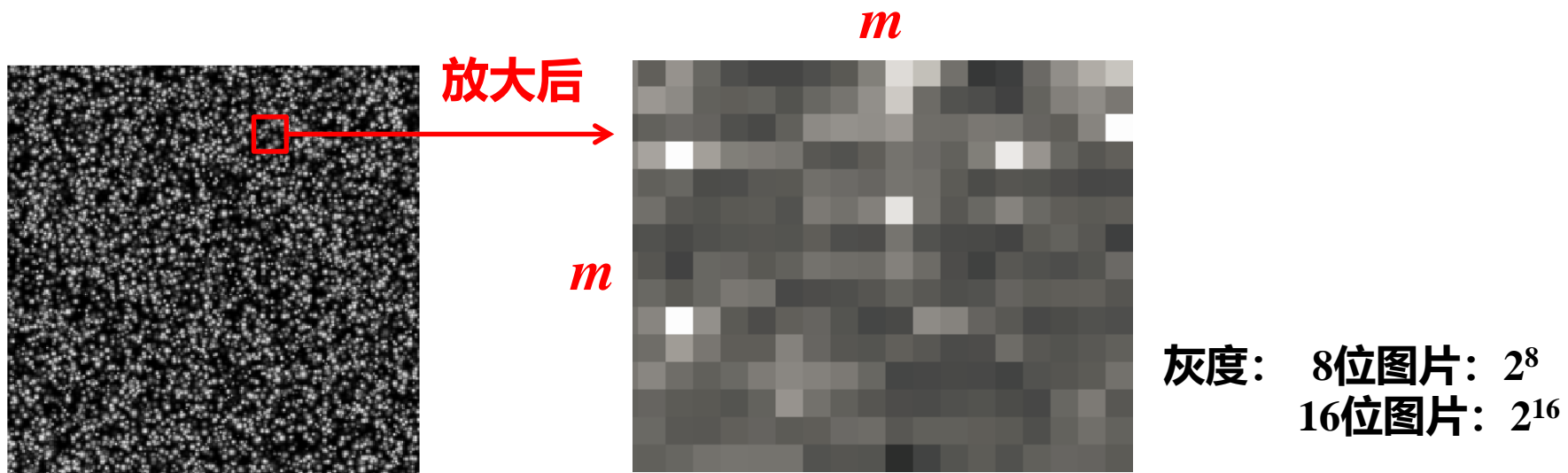


Particle Tracking Velocimetry (PTV)



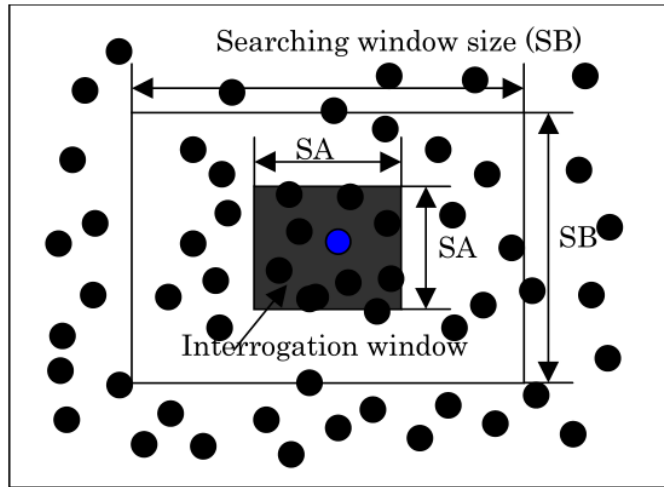
Particle Image Velocimetry (PIV)

基于互相关运算的PIV方法-图像处理

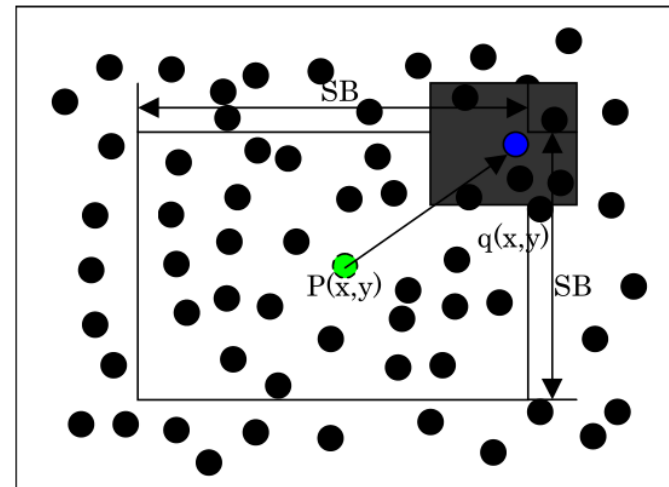


像素为图像中的最小单位，每个像素点具有固定灰度值，可视为二维数组。

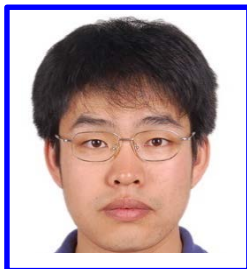
基于互相关运算的PIV方法



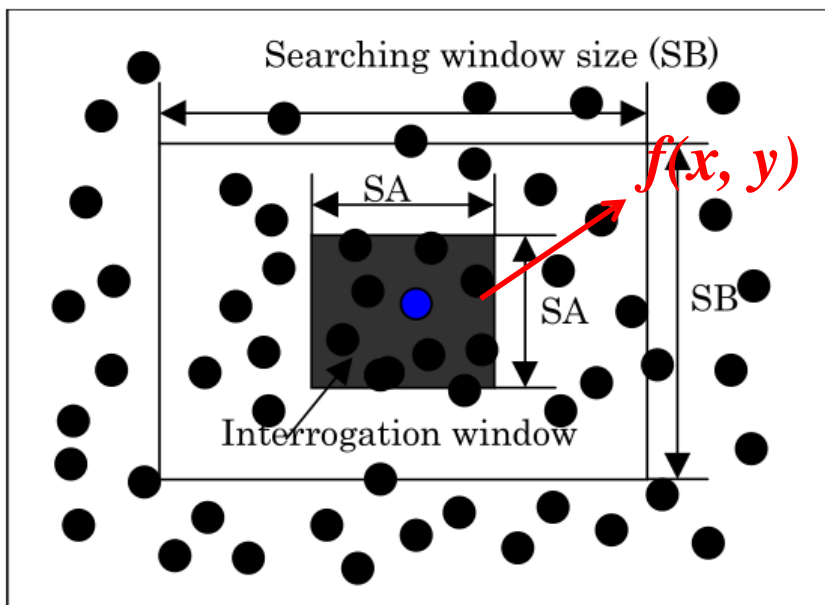
$t=t_0$



$t=t_0+\Delta t$

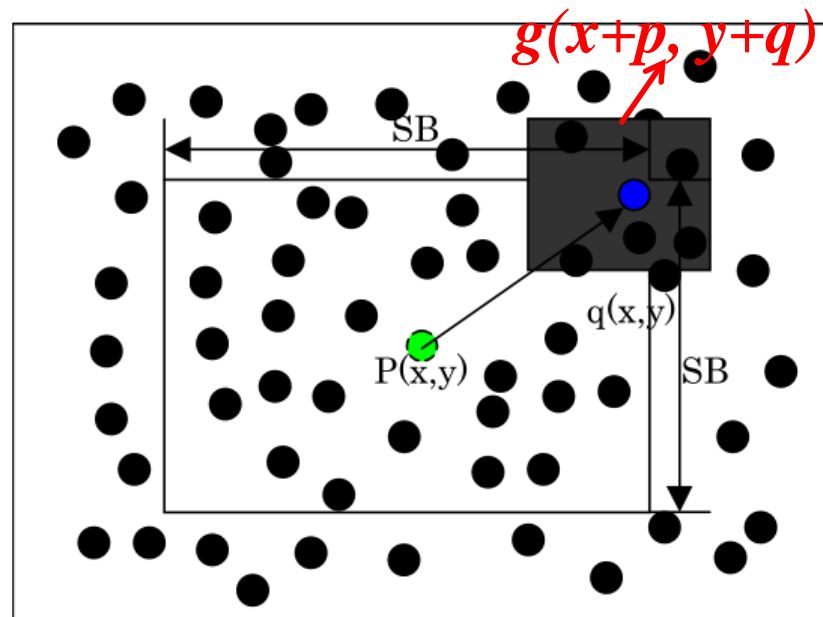


基于互相关运算的PIV方法



$t=t_0$

诊断窗口大小: $SA*SA$



$t=t_0+\Delta t$

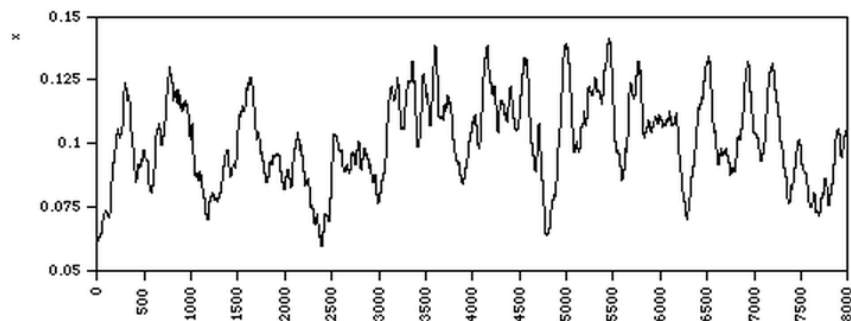
搜索窗口大小: $SB*SB$

基本准则: 保证在 Δt 时间内, 诊断窗口中的粒子没有移出搜索窗口

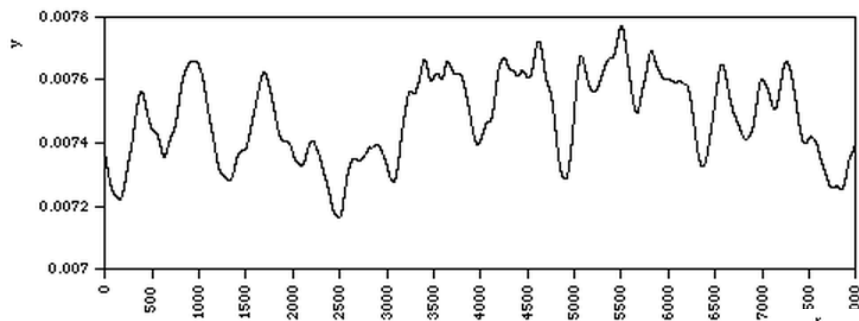
相关系数:
$$R(p, q) = \frac{\int (f(x, y) - \bar{f})(g(x + p, y + q) - \bar{g}) dv}{\sqrt{\int (f(x, y) - \bar{f})^2 dv \int (g(x + p, y + q) - \bar{g})^2 dv}}$$

互相关运算

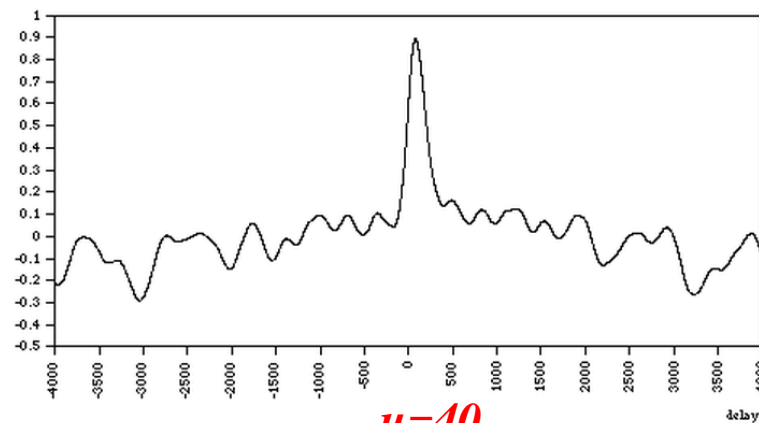
信号A:



信号B:

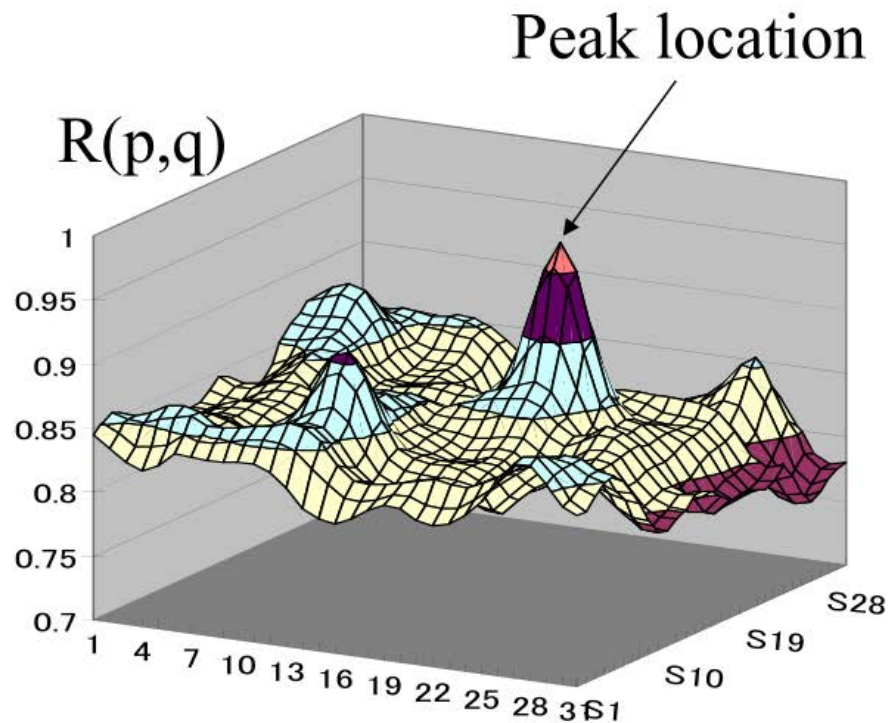
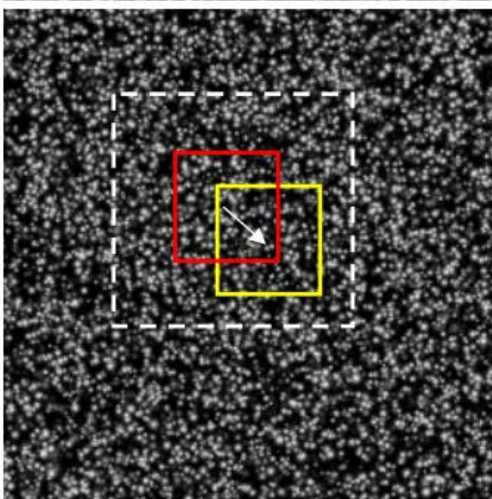
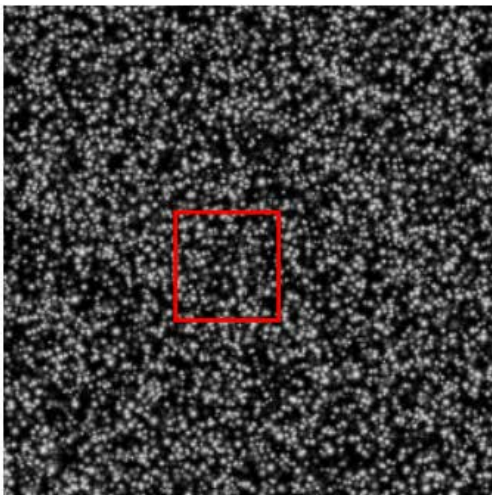


$$R(u) = \frac{\int (f(x) * g(x+u)) dx}{\sqrt{\int (f(x)^2) dx * \int (g(x+u)^2) dx}}$$



$u=40$

相关系数的计算



$$R(p, q) = \frac{\int (f(x, y) - \bar{f})(g(x + p, y + q) - \bar{g}) dv}{\sqrt{\int (f(x, y) - \bar{f})^2 dv \int (g(x + p, y + q) - \bar{g})^2 dv}}$$

总结 -PIV硬件系统

• PIV硬件系统 — 如何得到原始图像

- 示踪粒子: 追踪流体的运动.
- 照明系统: 照亮流场中需要测量的区域.
- 相机: 获得流场中示踪粒子图像.
- 同步器: 控制光源发光及相机拍摄图像的时间.
- 主机: 存储粒子照片及进行图像处理.

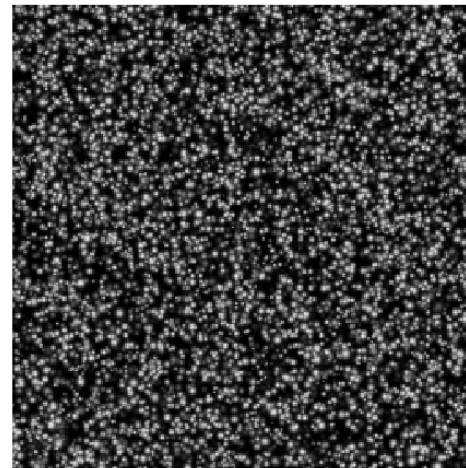
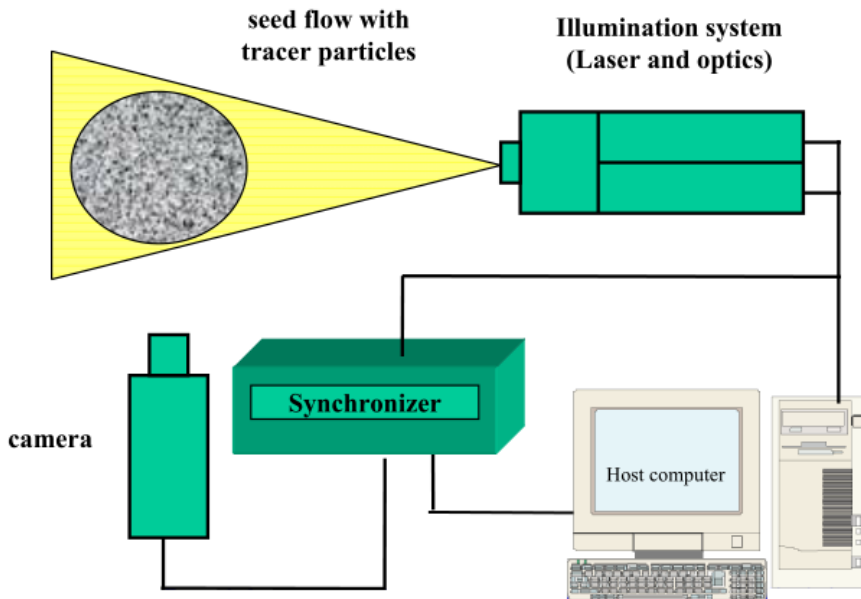


Image A: $t=t_0$

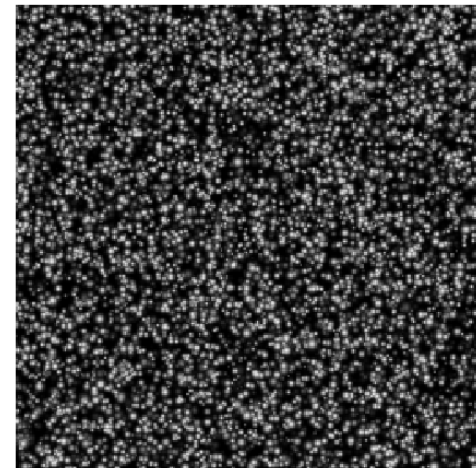
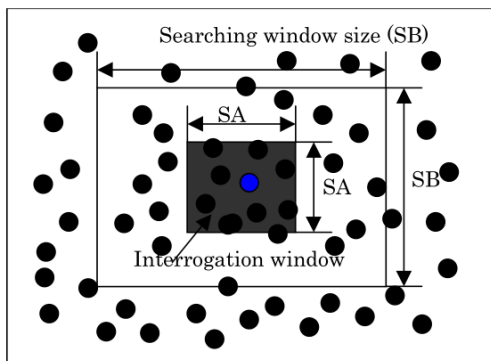
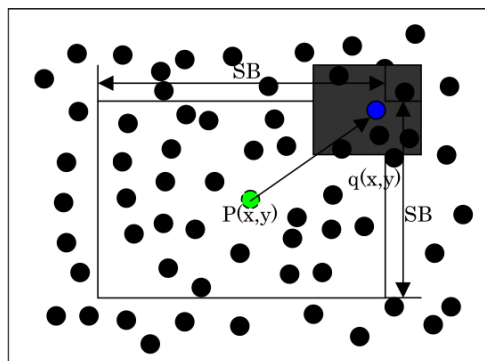


Image B: $t=t_0+4ms$

总结 - 基于互相关运算的PIV方法



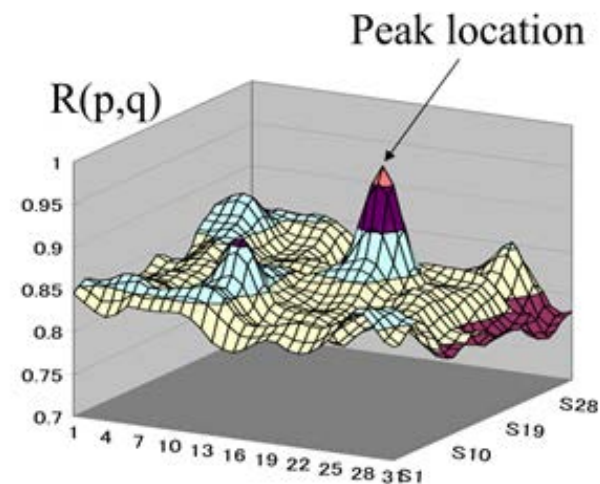
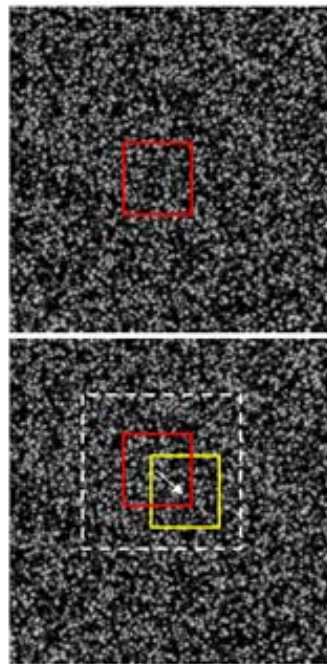
$t=t_0$



$t=t_0+\Delta t$

$$R(p, q) = \frac{\int (f(x, y) - \bar{f})(g(x + p, y + q) - \bar{g}) dv}{\sqrt{\int (f(x, y) - \bar{f})^2 dv \int (g(x + p, y + q) - \bar{g})^2 dv}}$$

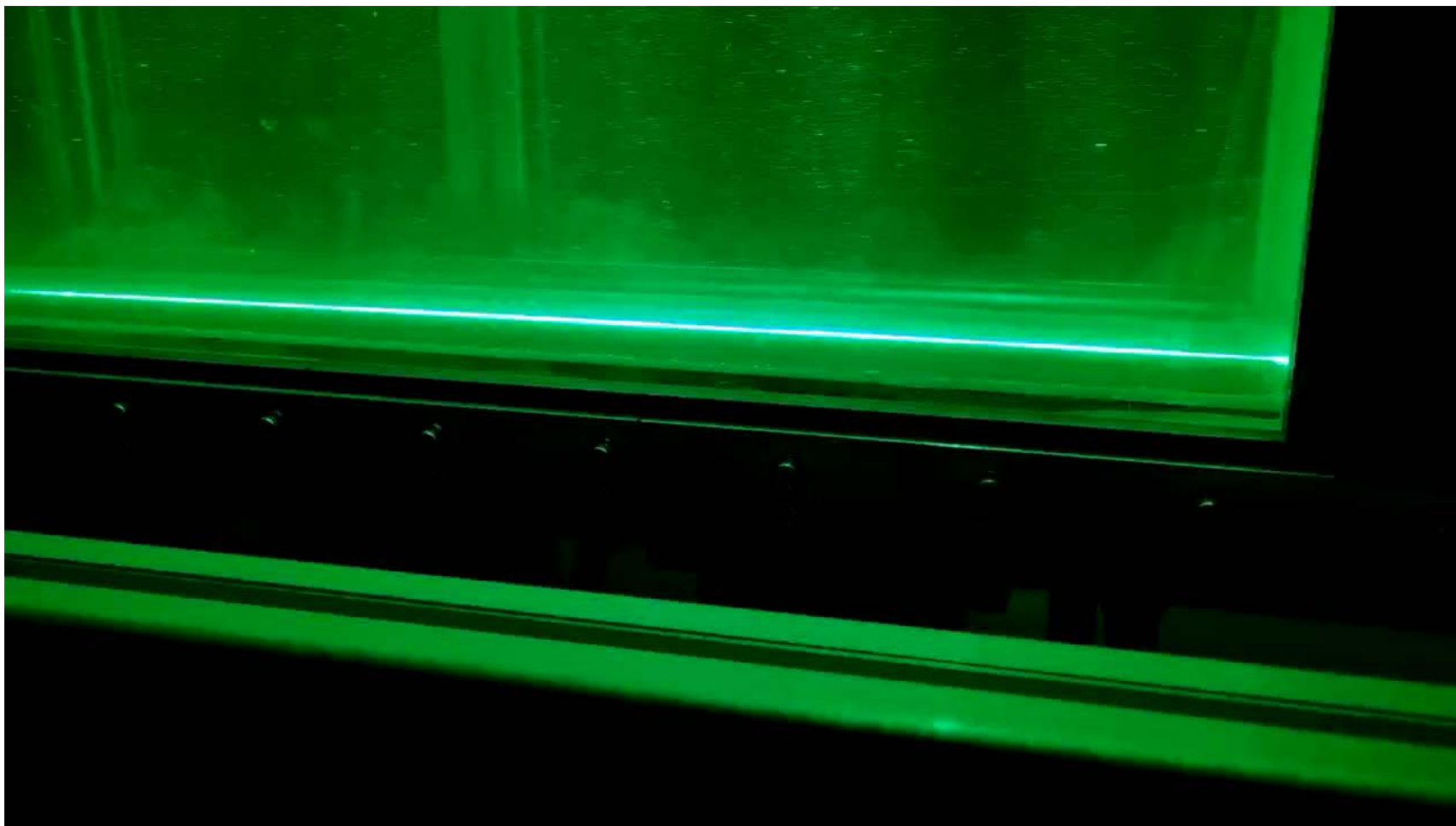
- (1) 子像素插值，提高PIV测量精度
- (2) 诊断窗口的重叠率
- (3) 诊断窗口大小的影响
- (4) 搜索窗口大小的影响
- (5) 相关计算误差校正技术



边界层测量实验—实验装置



边界层测量实验—PIV实验视频



数据格式

VARIABLES= "X(mm)", "Y(mm)", "U(m/s)", "V(m/s)"

F=POINT

0.000000,	59.625671,	0.216797,	0.002578,
0.751900,	59.625671,	0.222501,	-0.015474,
1.503800,	59.625671,	0.229800,	0.000508,
2.255700,	59.625671,	0.214808,	-0.002599,
3.007600,	59.625671,	0.220828,	0.006591,
3.759500,	59.625671,	0.212773,	0.000294,
4.511399,	59.625671,	0.227950,	0.000007,
5.263301,	59.625671,	0.231883,	-0.000580,
6.015201,	59.625671,	0.226876,	0.002335,
6.767100,	59.625671,	0.223717,	-0.002003,
7.519000,	59.625671,	0.219564,	0.006272,
8.270900,	59.625671,	0.231064,	-0.001515,
9.022799,	59.625671,	0.229551,	0.001992,
9.774699,	59.625671,	0.217515,	-0.008153,

实验报告

- 1.边界层速度剖面（注意：壁面处速度为0）
- 2.边界层厚度
- 3.边界层位移厚度
- 4.边界层动量厚度
- 5.利用多项式拟合边界层速度剖面
- 6.利用动量积分方程计算位移厚度、动量厚度及壁面剪切应力

- 本课件中所用图片主要来自网络及原始文献，仅限教学使用
- 联系方式：邮箱：tianwei@sjtu.edu.cn
手机：15800802363