



# 实验流体力学

## 第1讲 绪论

2021 春季



# 教学内容（理论课）

- 第一章 绪论
- 第二章 流体的基本性质
- 第三章 相似理论
- 第四章 误差理论
- 第五章 流体力学实验的基本设备
- 第六章 流体力学实验的基本方法
- 第七章 实验流体力学的新进展

# 教学内容（实验+理论课）



- 实验一 认识低速风洞
- 实验二 伯努利原理实验
- 实验三 圆柱绕流实验
- 实验四 三角翼前缘涡发展与破碎流动显示实验（理论）
- 实验五 热线风速仪进行平板边界层的发展及速度分布分布（理论）
- 实验六 风洞三角翼气动力测量实验（理论）
- 实验七 平面激光诱导荧光（PLIF）流动显示实验（理论）
- 实验八 基于数字粒子图像测速技术（DPIV）的涡环速度场测量实验（理论）

# 参考教材



1. 《实验流体力学基础（第二版）》，高永卫、孟宣市、肖春生编，西北工业大学出版社，2011
2. 《实验流体力学（第二版）》，颜大椿编著，北京大学出版社，2019
3. 《流动显示与测量技术及其应用》，申功炘、康琦 著，科学出版社，2020
4. 《Flow Visualization Techniques and Examples》，A. J. Smits and T. T. Lim, Imperial College Press, 2012
5. 《Particle Image Velocimetry》，R. J. Adrain and J. Westerweel, Cambridge University Pressure, 2011

# 教学目的与考核



- 了解流体力学学科的实验研究方法与技术
  - 掌握流体力学实验方法的基本原理和实验设计准则
  - 熟悉流体力学实验设施与实验技术
  - 培养实践能力，多学科（如力学、光学、信号处理、高性能计算等）知识的运用
- 
- 成绩评定：平时实践50%+期末理论考试50%



# 本次课内容



- 第一章 绪论

- 科学实验的定义和基本特点
- 流体力学实验技术的发展历史与基本研究方法

- 第二章 流体的基本性质

- 流体物理性质
- 流体静力学方面基本特性
- 流体动力学方面的特性

# 本次课内容



- 第一章 绪论

- 科学实验的定义和基本特点
- 流体力学实验技术的发展历史与基本研究方法

- 第二章 流体的基本性质

- 流体物理性质
- 流体静力学方面基本特性
- 流体动力学方面的特性

# 科学实验的定义



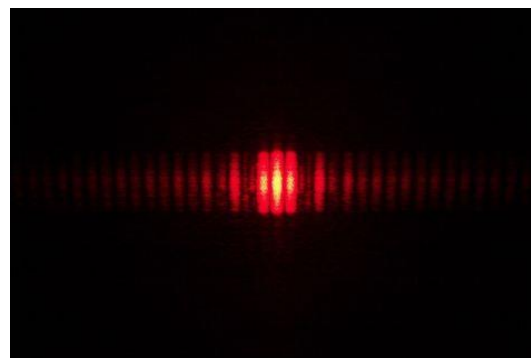
- 科学实验是指人们根据**研究的目的**，利用科学仪器和设备，人为地控制或模拟自然现象，**排除干扰，突出主要因素**，在有利于研究的条件下**探索自然规律**的认识活动。
- 科学实验的目的是为了**支持、反驳或验证某个假说/猜想**



化学实验



婴儿探索实验



双缝干涉实验



引力波实验





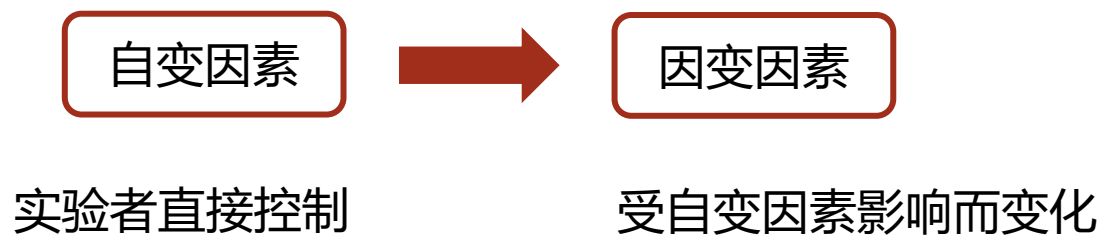
# 科学实验的基本特点

- 目的性

- 实验要有明确的目的
- 精确的概念体系来认识、区别和描述实验过程与结论

- 干预性

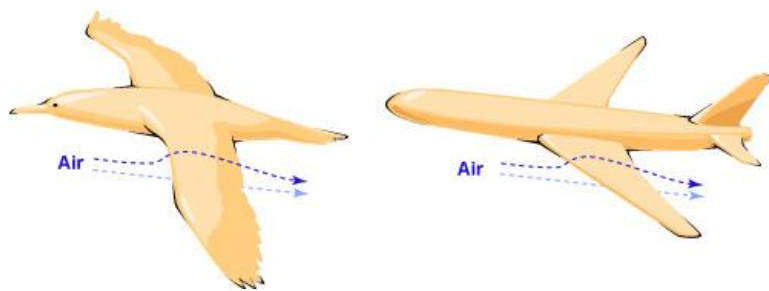
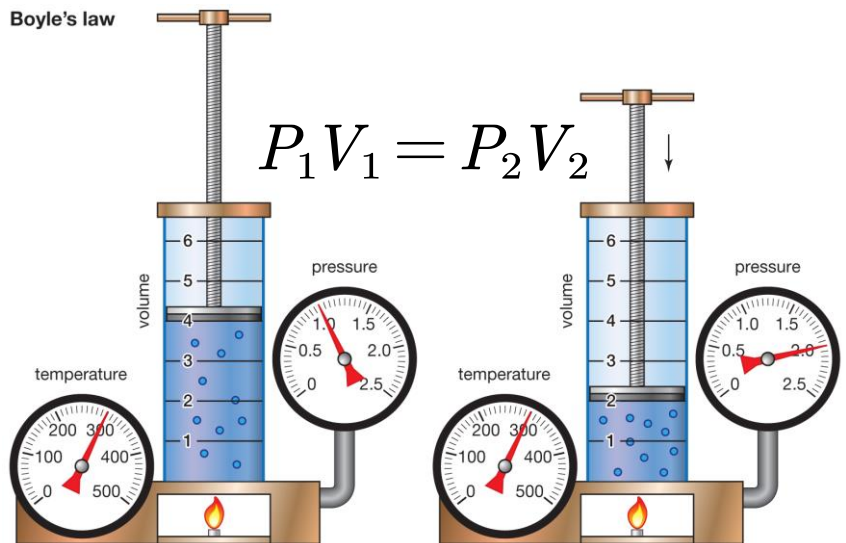
- 实验者要积极干预自然过程，对多种自然过程进行单独研究
- 隔离和控制自变因素、因变因素



# 实验研究的问题



- 把不同条件下的某些可变特性测量出来，从而建立某种定律
- 试图把已发现的物质结构和有关的作用过程联系起来
- 检验理论或验证设计



# 实验研究原则



## • 条件性

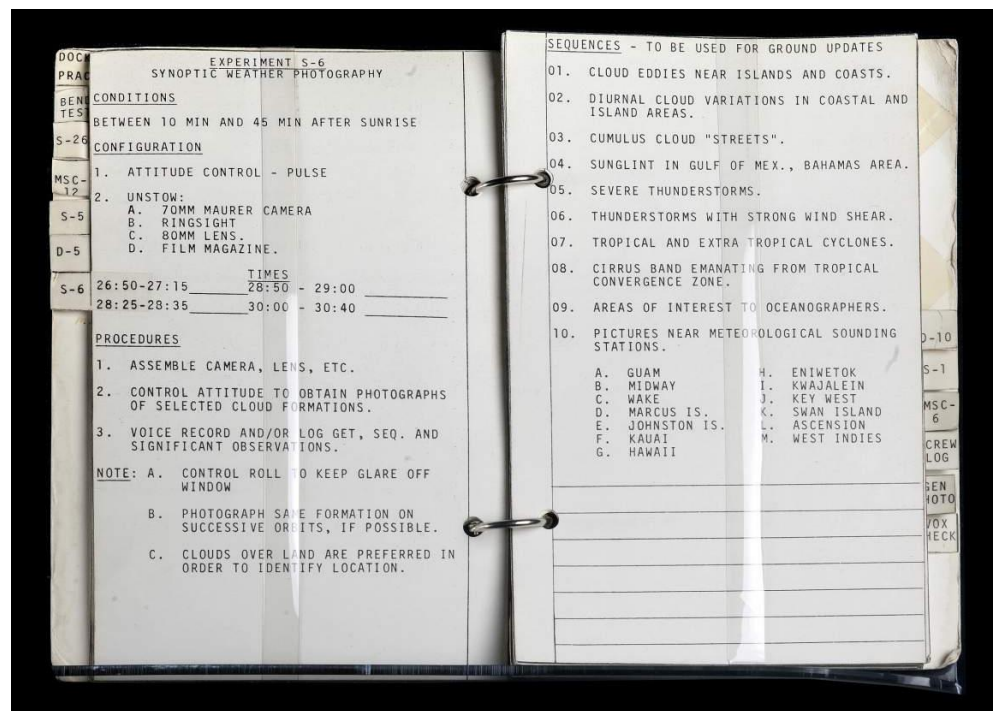
- 尽可能地注意到研究成立的所有前提条件
- 尽量全面记录研究时的环境条件

## • 精准性

- 尽量追求高精度性
- 误差是否在合理范围之内，例：人的身高测得为  $1.8 \pm 1.0$  m

## • 再现性

- 提供相同或相似的条件能再现实验结果

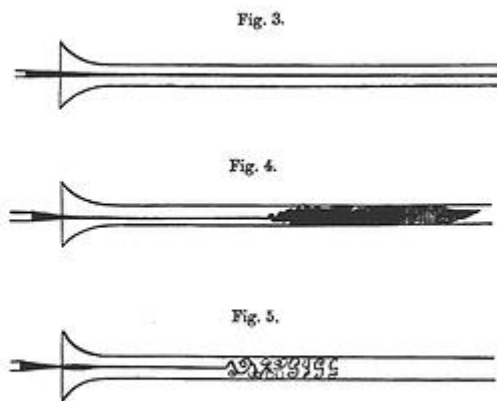
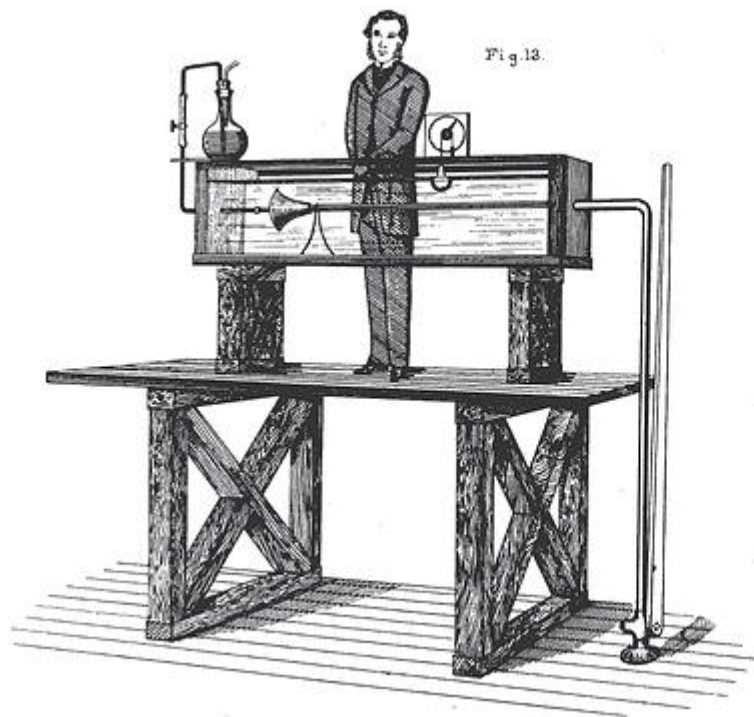


不可再现的实验结果无法得到公认！！

# 什么是实验流体力学？



- 实验流体力学与理论力学、计算流体力学并列流体力学三大分支，是研究流体力学实验的基本理论、实验设备、实验方法和实验数据修正与处理的一门学科分支。



1883年的雷诺实验 by Osborne Reynolds  
An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels



# 发展历史与基本研究方法

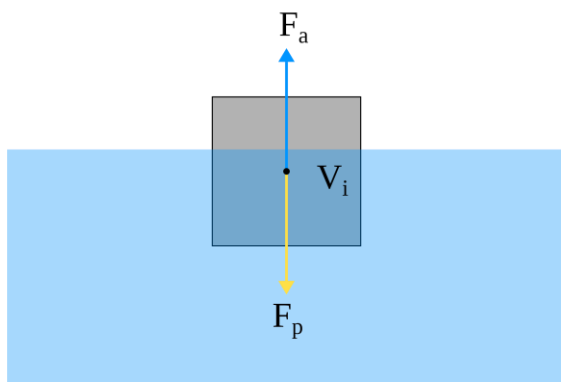
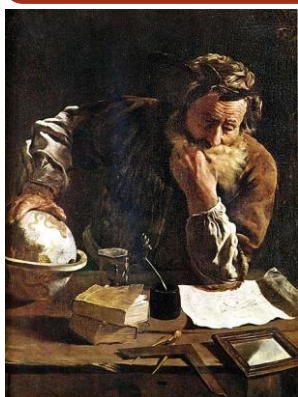


## 第一时期——17世纪中叶以前

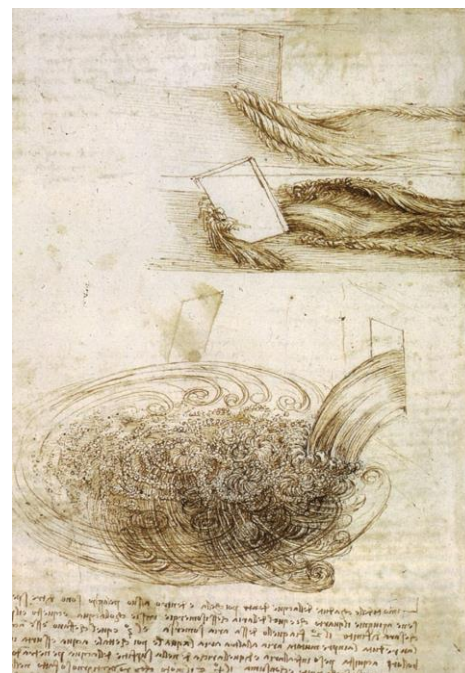
- 主要依靠仔细观察和粗略测量去了解流动现象并加以运用

### 流体静力学

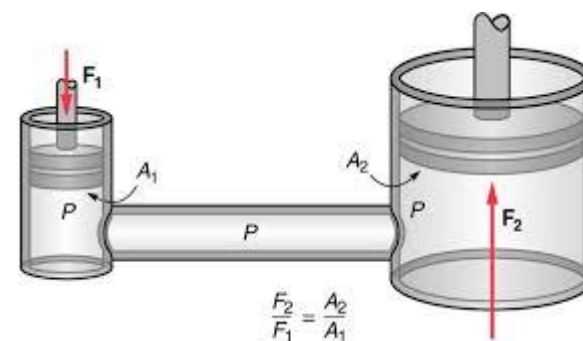
阿基米德浮力原理，约公元前250



北宋时期 (960-1127)  
运用浮力运输60吨的  
镇河铁牛



达芬奇 (1452-1519)  
描述流动状态的手稿



帕斯卡定理

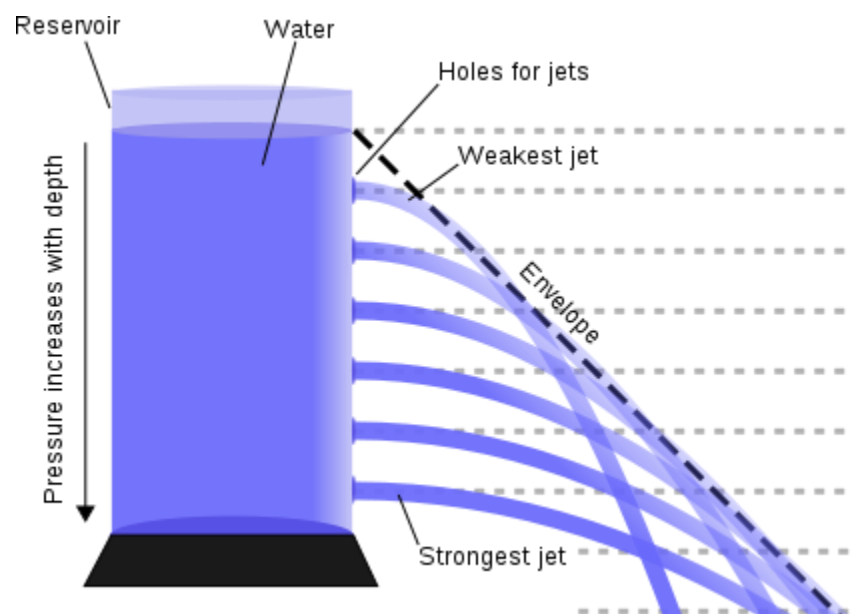
# 发展历史与基本研究方法



## 第一时期——17世纪中叶以前

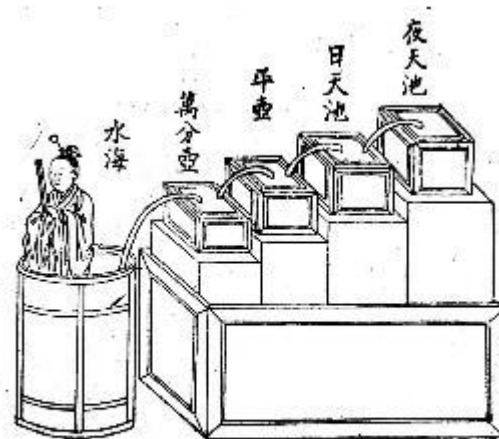
- 主要依靠仔细观察和粗略测量去了解流动现象并加以运用

### 流体动力学



$$\frac{dy}{dt} = -k\sqrt{u(y)y}$$

托里拆利 (1608-1647) 公式  
伯努利方程的应用



北宋 沈括 (1031-1095)  
《浮漏仪》

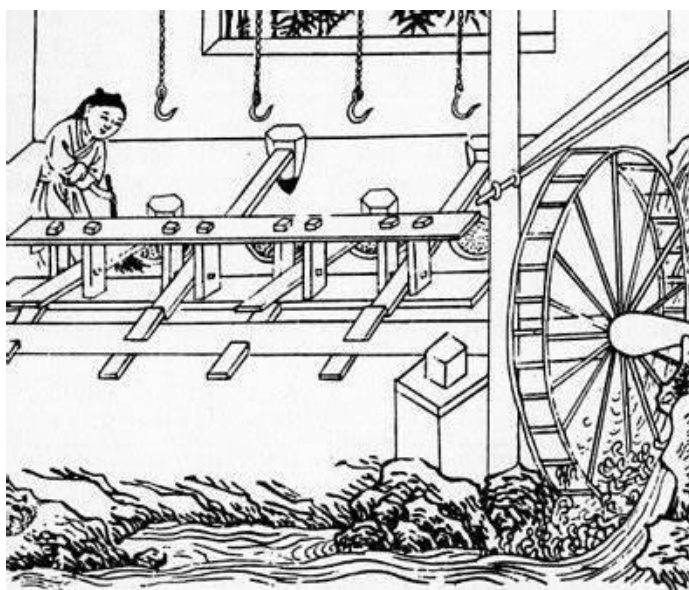
# 发展历史与基本研究方法



## 第一时期——17世纪中叶以前

- 主要依靠仔细观察和粗略测量去了解流动现象并加以运用

### 流体机械



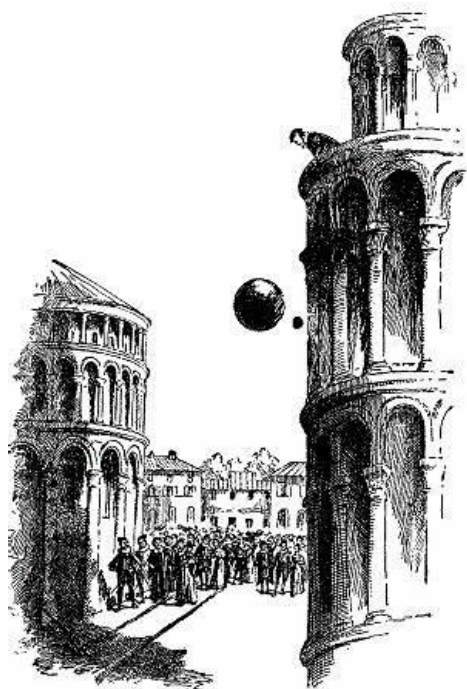
南北宋时期的水力设备和鼓风机，领先欧洲700-800年

# 发展历史与基本研究方法

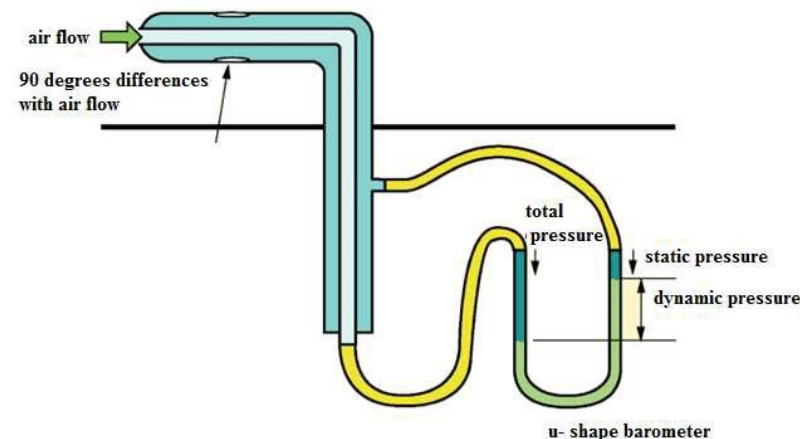


## 第二时期——17世纪中叶至20世纪初

- 开始发展实验所需的设备、仪器和技术，逐步开展实验研究
- 发现了一些新现象并提出了原理： $\pi$ 定理



伽利略著名的自由落体实验，但是没有考虑空气阻力，后来他用双摆来研究空气阻力与运动速度的关系，结果不合理，牛顿后来用垂直落球在水和空气中进行阻力实验，获得了与理论相符的结果



$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_1 u_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_2 u_2^2$$

皮托管，伯努利方程（1738）

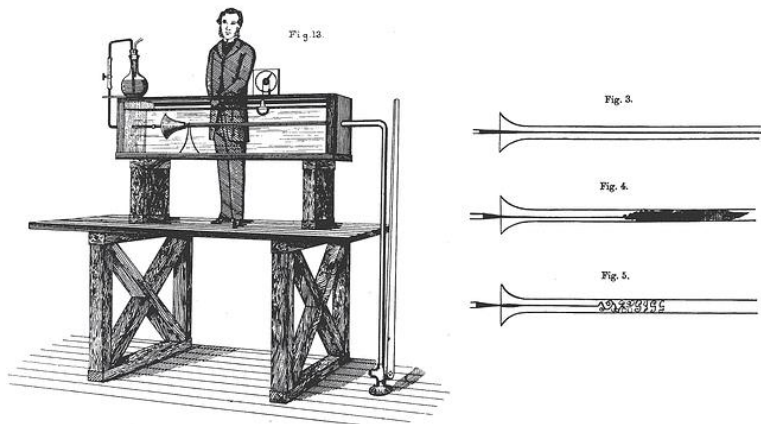


# 发展历史与基本研究方法

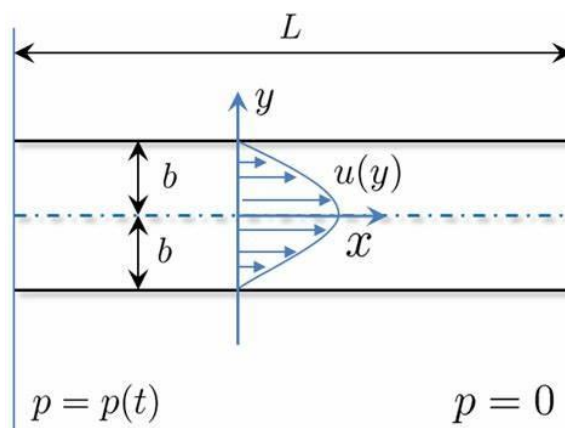


## 第二时期——17世纪中叶至20世纪初

- 开始发展实验所需的设备、仪器和技术，逐步开展实验研究
- 发现了一些新现象并提出了原理： $\pi$ 定理

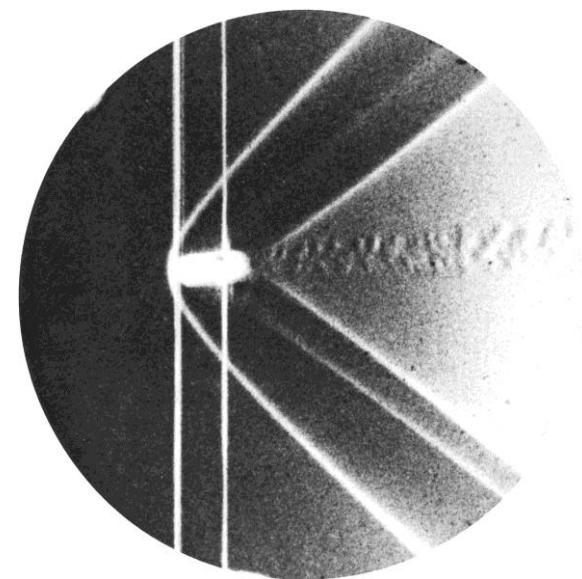


1883年雷诺流动显示实验



$$Q = \frac{\Delta P \pi r^4}{8 \eta l}$$

1840年哈根-泊肃叶公式



1888年马赫利用密度场变化发表的超声速子弹运动照片

# 发展历史与基本研究方法



## 第三时期——20世纪初以后

- 围绕航海、航空、航天系统开展研究
- 发展实验设备与技术
- 提出很多新概念：湍流、边界层理论

Von Karman

G. I. Taylor

A. A. Townsend

P. Bradshaw



# 近代实验流体力学研究方法



- 实验研究方法
  - 实验设施-水洞/水槽



立式水洞

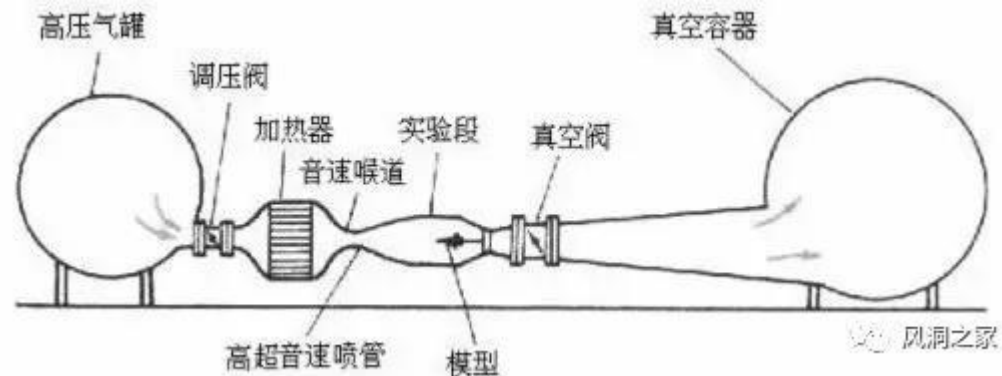
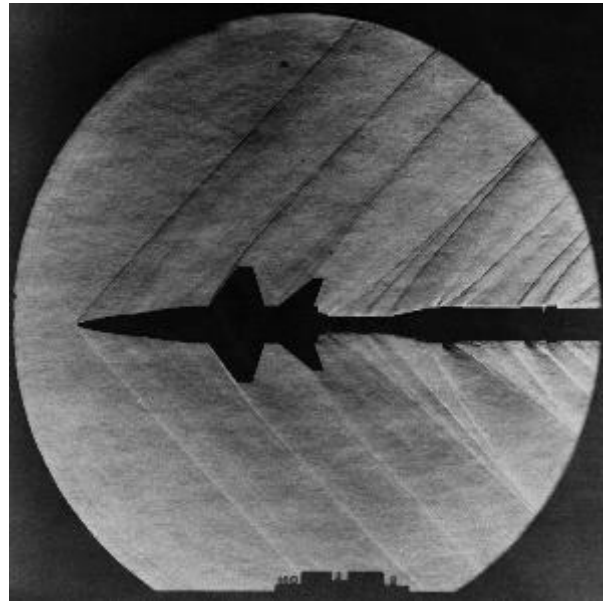




# 近代实验流体力学研究方法



- 实验研究方法
  - 实验设施-激波管



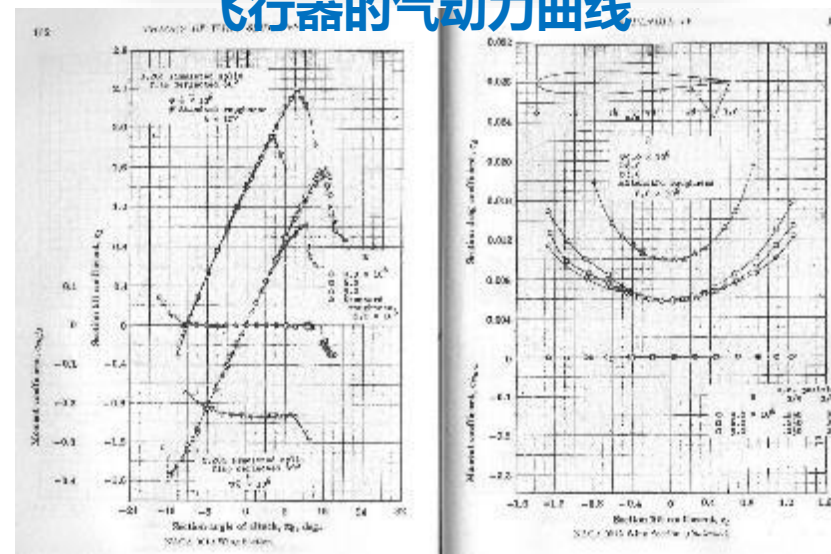
# 近代实验流体力学研究方法



- 实验研究方法
  - 测量设备-天平



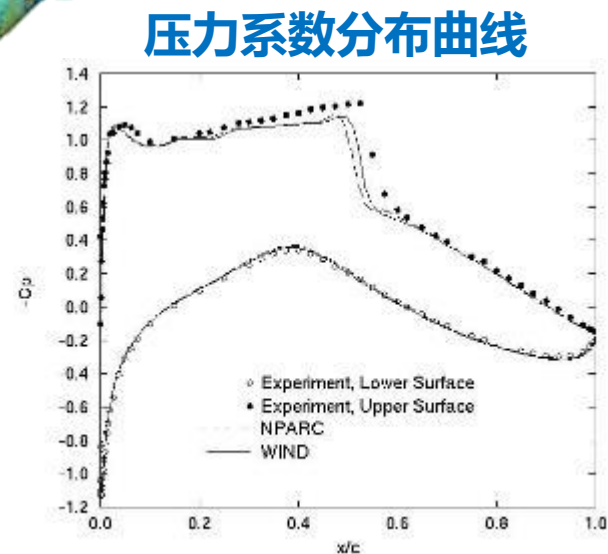
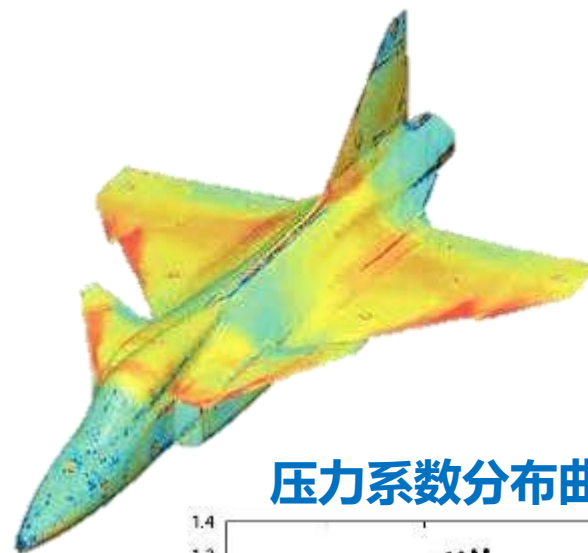
飞行器的气动力曲线



# 近代实验流体力学研究方法



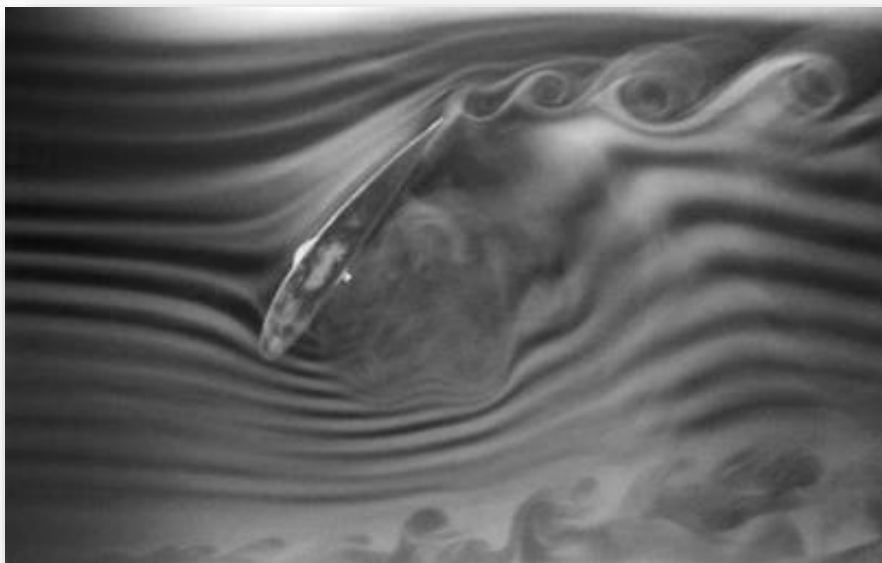
- 实验研究方法
  - 测量设备-压力传感器、压敏漆



# 近代实验流体力学研究方法



- 实验研究方法
  - 测量设备-流动显示技术



翼型绕流的烟线流动显示



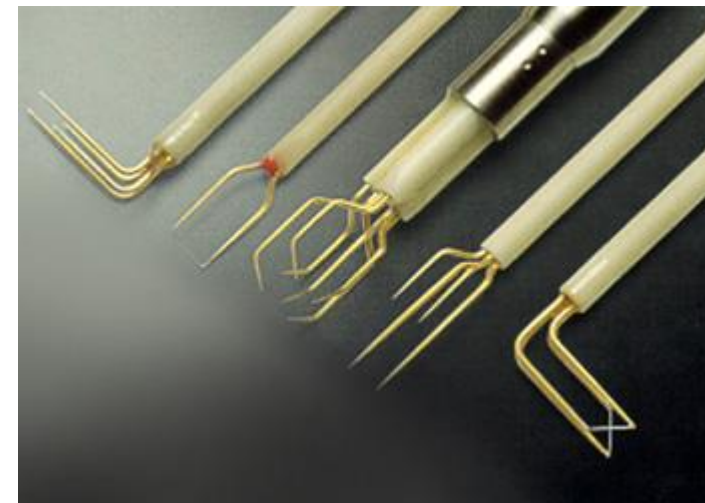
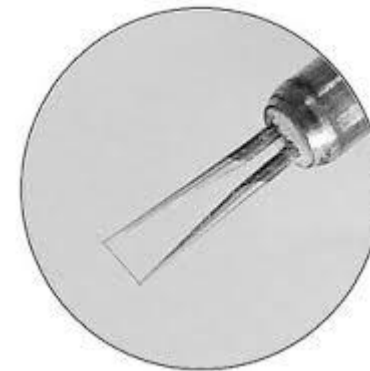
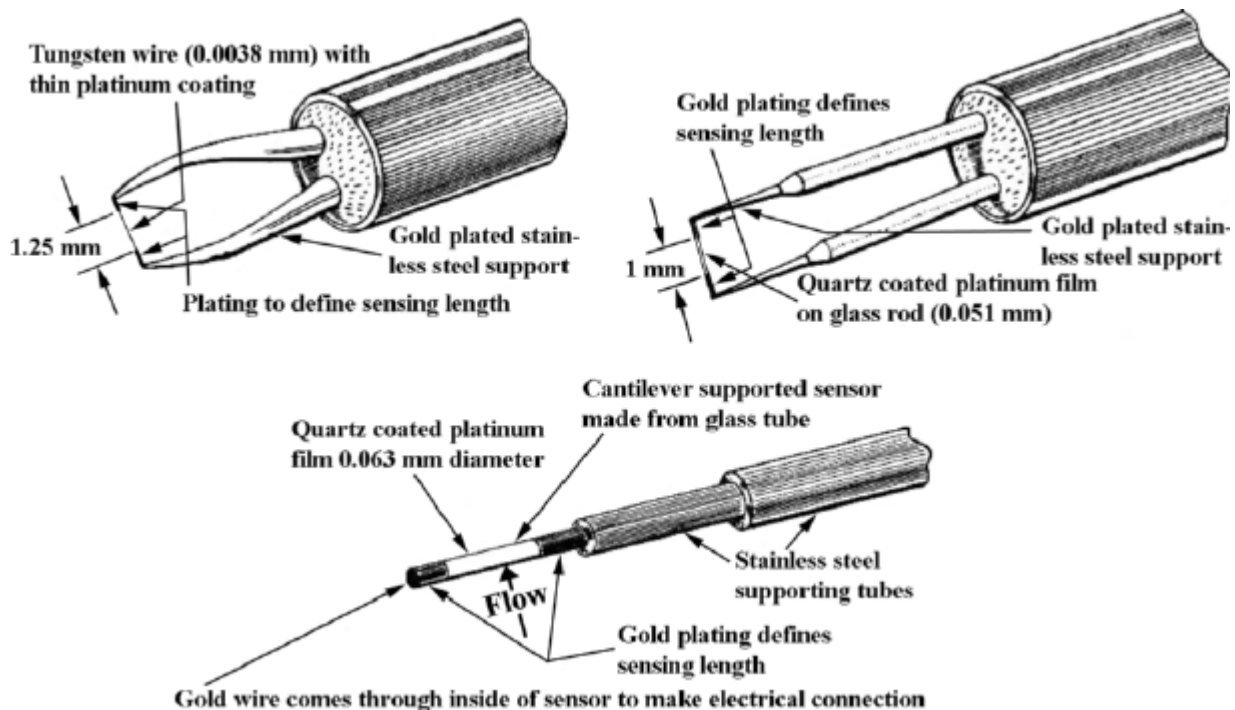
翼尖涡流动显示



# 近代实验流体力学研究方法



- 实验研究方法
  - 测量设备-**热线测速**

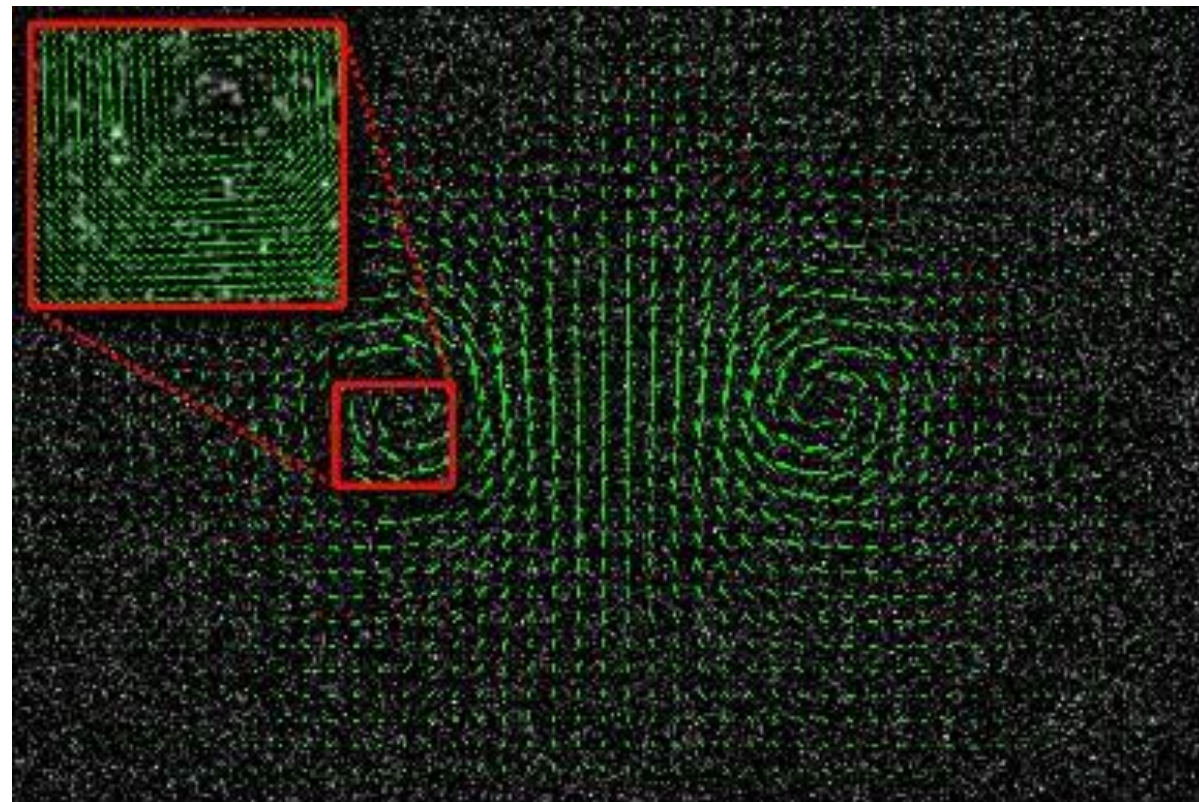
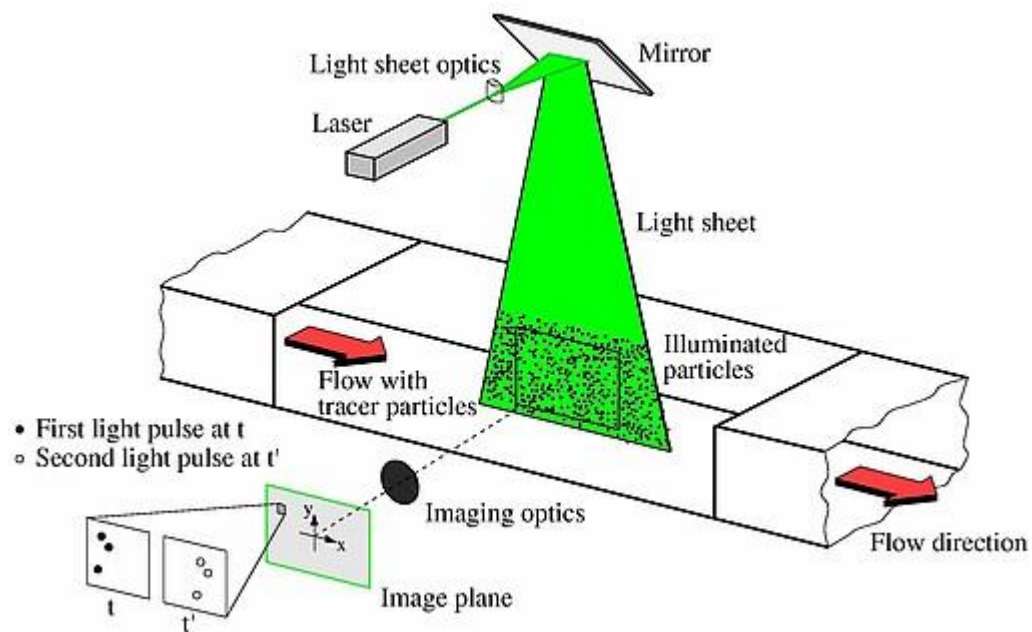




# 近代实验流体力学研究方法



- 实验研究方法
  - 测量设备-粒子图像测速 (PIV)



涡环平面速度场矢量图

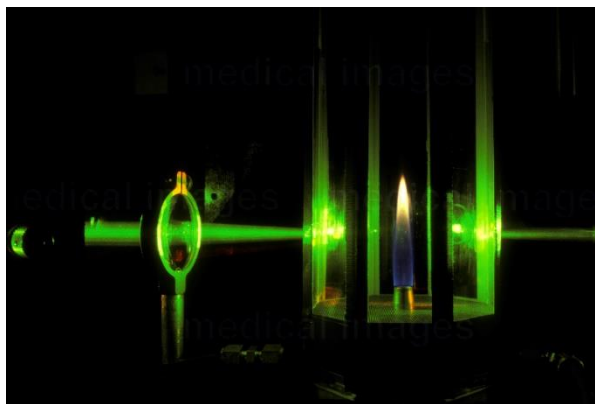
# 近代实验流体力学研究方法



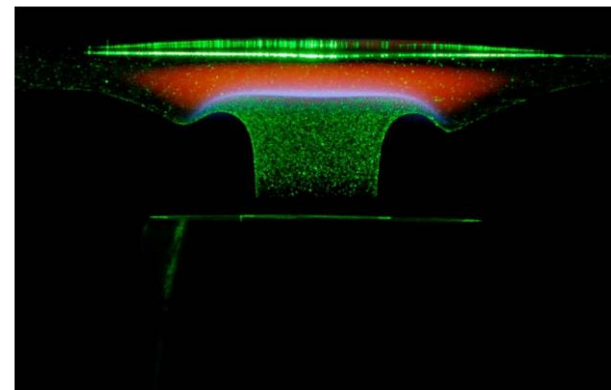
- 激光诊断技术



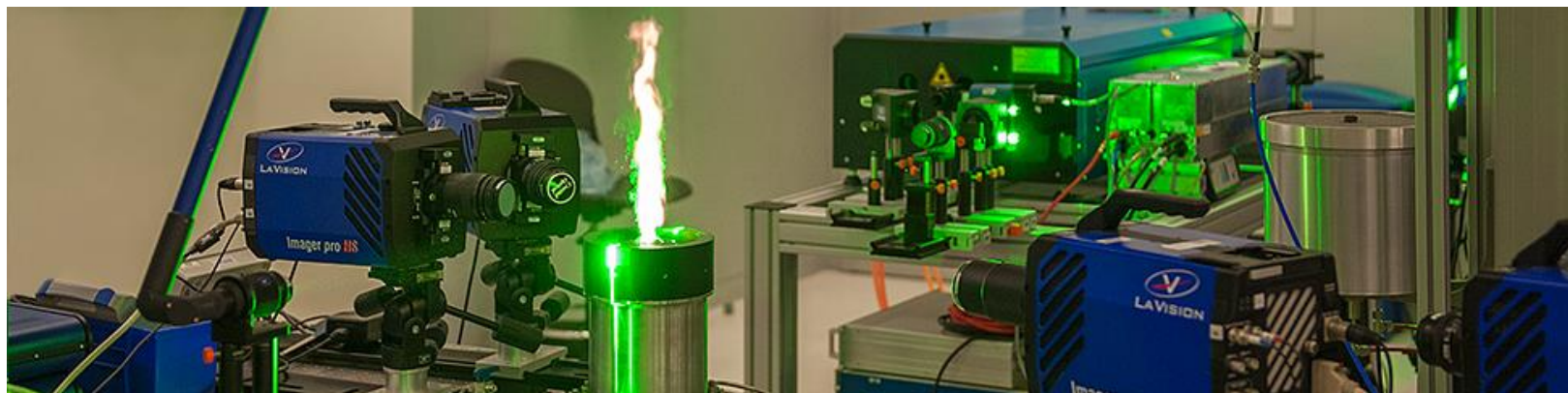
TDLAS (吸收光谱)



CARS (相干反斯托克斯拉曼散射)



PIV (平面速度成像)



PLIF (平面激光诱导荧光)

# 本次课内容



- 第一章 绪论

- 科学实验的定义和基本特点
- 流体力学实验技术的发展历史与基本研究方法

- 第二章 流体的基本性质

- 流体物理性质(压力、温度、密度、粘度、可压缩性)
- 流体静力学方面基本特性
- 流体动力学方面的特性

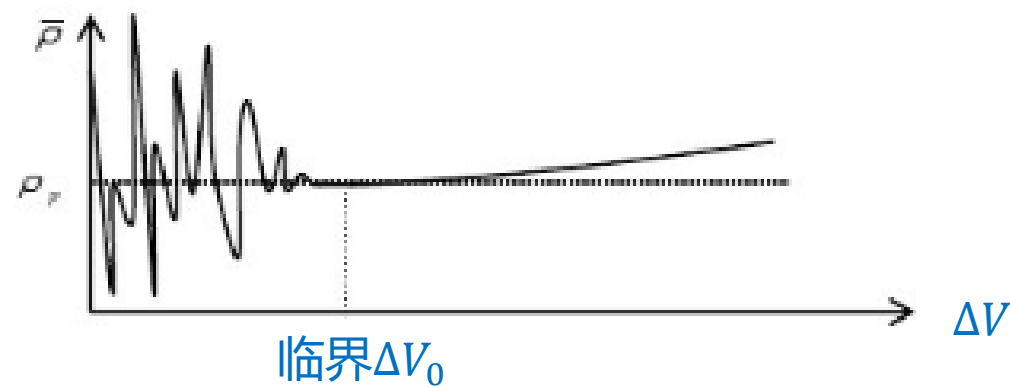
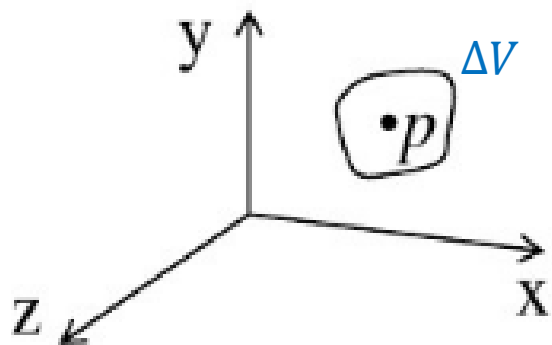
# 连续性假设



- 流体的连续性假设
  - 密度的定义

$$\rho_p = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

空气:  
 $\Delta V_0 = 10^{-9} \text{m}^3$   
含有  $3 \times 10^7$  个分子

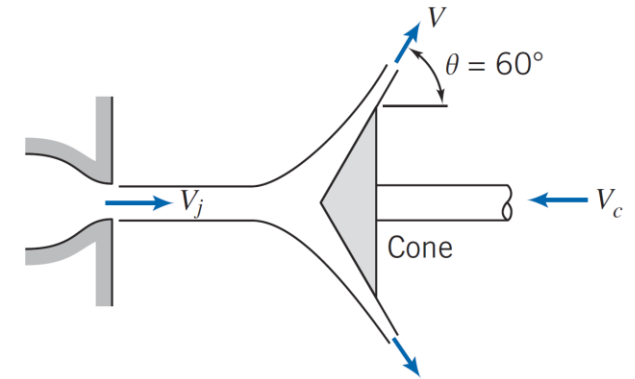


# Fluid Motion



- **Question 1**
- Water moving at 30 m/s from a 100 mm jet is deflected by a cone moving at 14 m/s. Find the thickness of the jet at a distance of 230 mm from the center of the cone and the force to move the cone.

- Hint : mass conservation
- Hint: momentum conservation



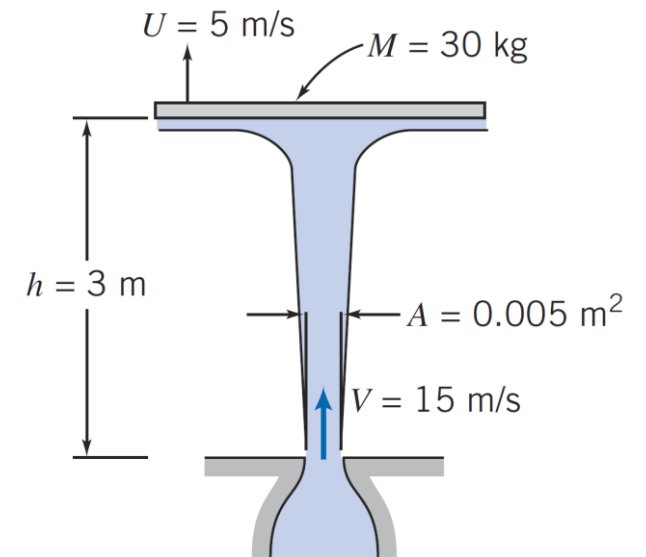


# Fluid Motion



- **Question 2**
- Water from a jet hits a horizontal disk that will be moving upward at 5 m/s when it is 3 m above the nozzle exit. What is the vertical acceleration of the disk at this point?

- Hint 1: proper selection of control volume
- Hint 2: Bernoulli's Equation
- Hint 3: mass conservation
- Newton's second law and momentum equation



# Flow Similarity



- Example

- Free flight of **Boeing 747** at an altitude 11.6 km:

$$V_1 = 885 \text{ km/h}$$

$$p_1 = 20.713 \text{ kap}$$

$$T_1 = 216.67 \text{ K}$$

- Scale model in wind tunnel:

$$\text{Model size : } 1/50 \text{ scale}$$

$$T_2 = 238.89 \text{ K}$$

- Assume that both  $\mu$  and  $a$  are proportional to  $T^{1/2}$
  - **Find:** the required velocity and pressure of the test airstream in the wind tunnel such that the lift and drag coefficients measured for the wind-tunnel model are the same as for free flight.



# Fluid Motion

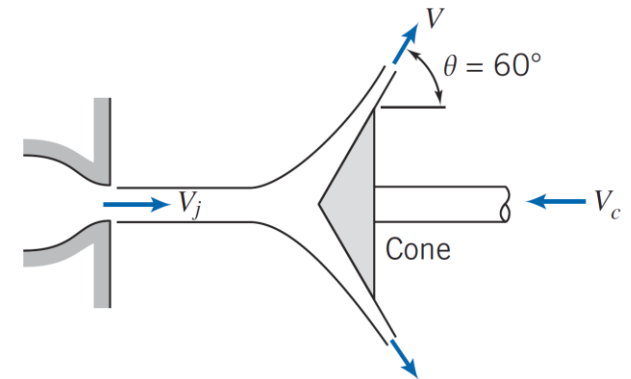


- **Question 1**
- Water moving at 30 m/s from a 100 mm jet is deflected by a cone moving at 14 m/s. Find the thickness of the jet at a distance of 230 mm from the center of the cone and the force to move the cone.

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2$$

$$\rho(V_j + V_c) \frac{\pi D_j^2}{4} = \rho(V_j + V_c) (2\pi R t)$$

$$t = \frac{D_j^2}{8R} = \frac{100}{8 \cdot 230} = 5.435 \text{ mm}$$





# Fluid Motion



- **Question 2**
- Water from a jet hits a horizontal disk that will be moving upward at 5 m/s when it is 3 m above the nozzle exit. What is the vertical acceleration of the disk at this point?

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \quad V_1 = 12.9 \text{ m/s}$$

$$\text{momentum equation: } \dot{m}_2 U - \dot{m}_1 V_1 = F = -Mg - Ma$$

$$\text{mass conservation: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \rho(V_1 - U)A_1, \quad \rho V_1 A_1 = \rho V A$$

$$a = \frac{\rho(V_1 - U)A_1(V_1 - U) - Mg}{M} = 2.29 \text{ m/s}^2$$

