

办公室：教一北420；电话：15929329558

邮箱：[kezhang@mail.xjtu.edu.cn](mailto:kezhang@mail.xjtu.edu.cn)；QQ群：143070640

答疑：短信、邮件、QQ群

# 空气与气体动力学

张科

# 教材

## 教材及参考书目：

- [1] 张鸣远, 流体力学, 北京, 高等教育出版社, 2010
- [2] 李风蔚, 空气与气体动力学引论, 西安: 西北工业大学出版社, 2007
- [3] Frank M. White, Fluid Mechanics, 北京: 清华大学出版社 (影印版), 2005
- [4] John D. Anderson. 空气动力学基础 (Fundamentals of Aerodynamics) .北京: 航空工业出版社, 2010

投票 最多可选1项

是否加入QQ群（ 143070640 ）下载教材【1】？

A 是

B 否

# 课程要求

## 考核要求：

闭卷考试成绩占70%：

期中：第一章到第八章流体力学基础部分一次 35%；

期末：第九章到第十四章气体与空气动力学基础部分一次 35%；

平时作业10%（每周二上课前在思源学堂提交上周作业）；

笔记（课后复习整理，和每周作业同时提交）10%；

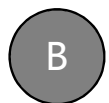
实验成绩10%；

投票 最多可选1项

是否清楚课程考核方式与内容？



清楚



不清楚

# 大纲

## 流体力学基础部分

1. 基本概念 (2.5)
2. 流体静力学 (3.5)
3. 流体运动学基础 (2)
4. 流体动力学积分方程 (6)
5. 流体动力学微分方程 (4)
6. 粘性不可压流动 (7)
7. 相似原理 (3)
8. 无粘不可压势流理论 (4)

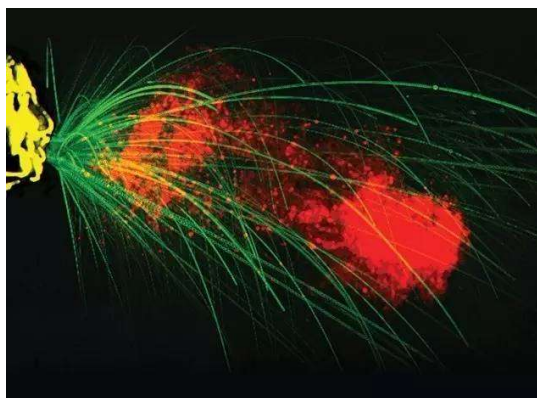
## 空气动力学部分

1. 绕翼型不可压流动 (7)
2. 绕机翼不可压流动 (7)
3. 高速可压流动基础 (8)
4. 一维定常可压管内流 (3)
5. 绕翼型亚声速流动 (3)
6. 绕翼型超、跨声速流动 (4)

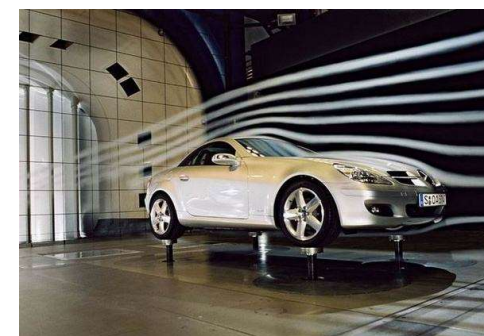
# 一. 绪论与基本概念

## 1.1 绪论（对象，范围，方法）

### ① 流体力学：？



MIT, Lydia Bourouiba

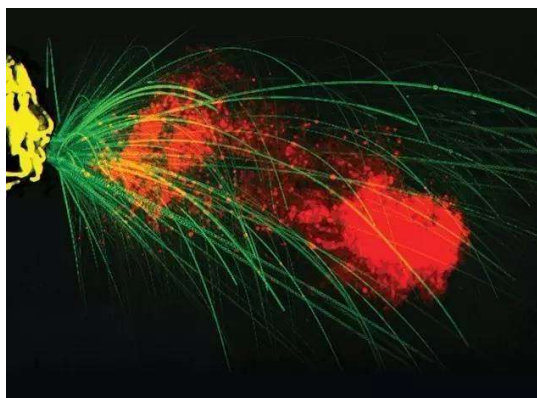


应用：生物，海洋，大气，河流，能源动力，化工，汽车，船舶，飞行器

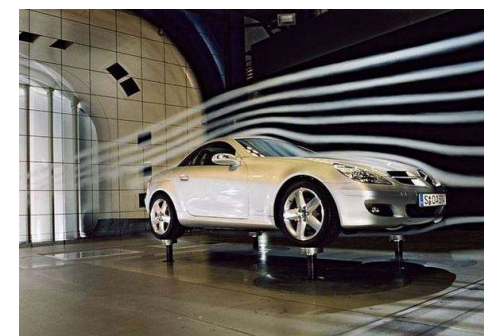
# 一. 绪论与基本概念

## 1.1 绪论（对象，范围，方法）

### ① 流体力学：



MIT, Lydia Bourouiba



流体力学：研究流体运动规律，流体与其中物体间相互作用力。



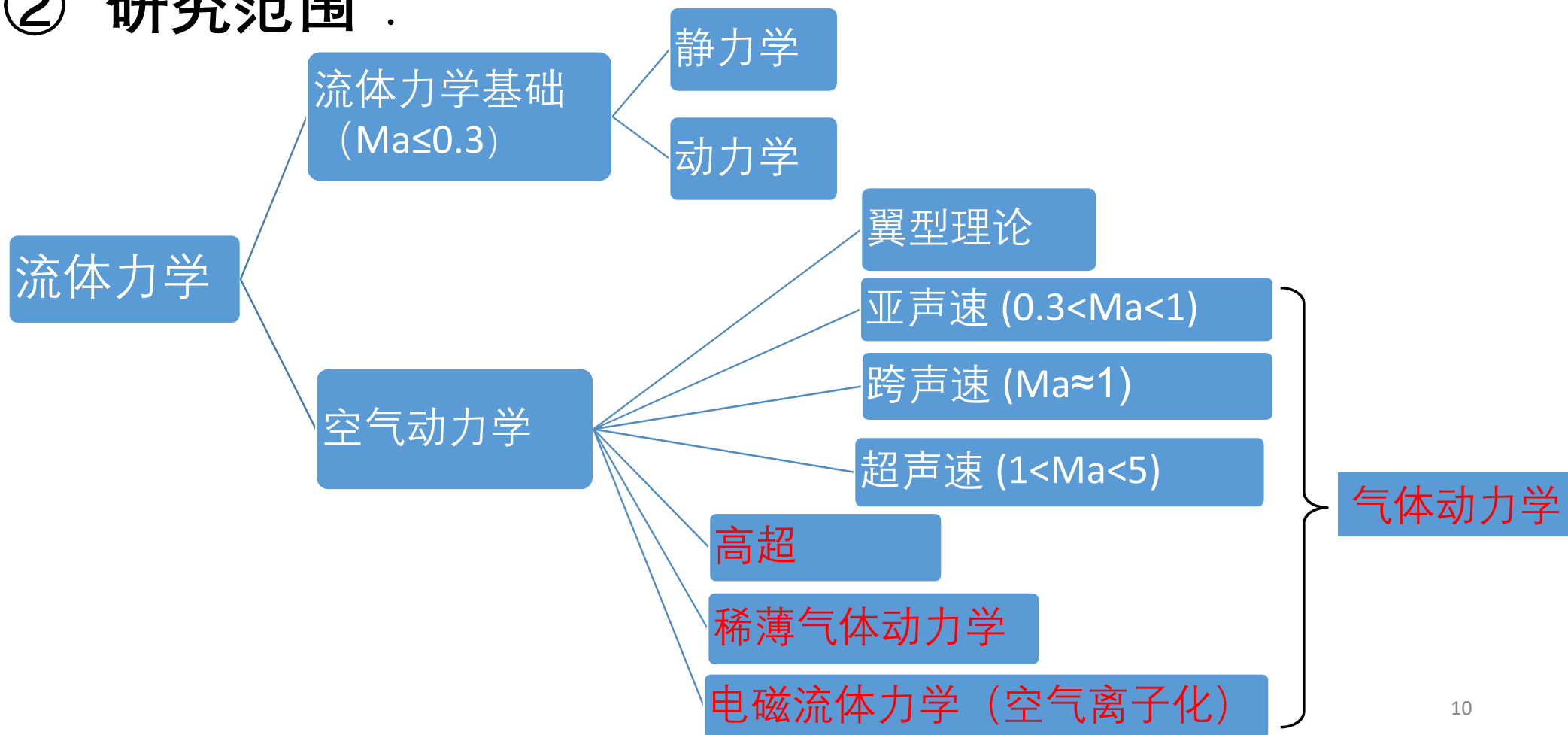
# 1.1 绪论（对象，范围，方法）

## 应用领域

- 研究大气和海洋运动→天气和海情预报→农业、渔业、航空航天、航海、国防和日常生活
- 研究各种空间飞行物和各种水上或水下运动物体→高效率(低阻力、高升力或高推进)、高稳定性、高可控性→改造飞机、人造卫星、导弹、炮弹和船舰、潜艇、鱼雷等
- 研究河流、渠道和各种管路系统→低能耗、高安全性的工程设计
- 研究热交换系统→传热传质→水暖系统、核反应堆
- 研究油气田、地下水、泥石流、机械润滑等
- 研究含有化学反应的流体运动(如燃烧)
- 研究生物工程和生命科学中的流体动力学，如人体内的血液流动、肺部循环、人工肾等
- 。 。 。

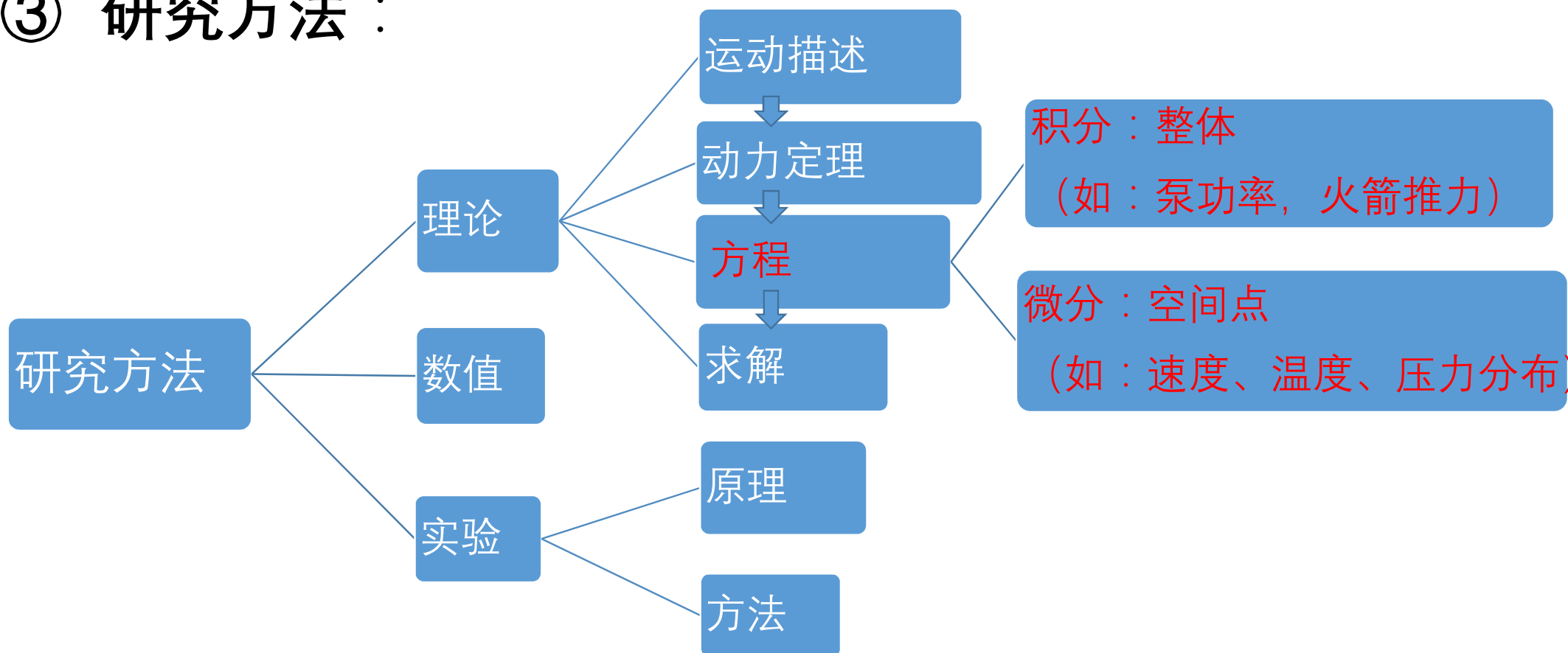
# 1.1 绪论（对象，范围，方法）

## ② 研究范围：



# 1.1 绪论（对象，范围，方法）

## ③ 研究方法：



## 1.2 流体与连续介质假设

### ① 流体：??

物质：固、液、气（分子间距、作用力不同）。

## 1.2 流体与连续介质假设

### ① 流体：??

物质：固、液、气（分子间距、作用力不同）。

## 1.2 流体与连续介质假设

① 流体：力、变形

任何微小的切应力持续作用下会连续变形的物质。

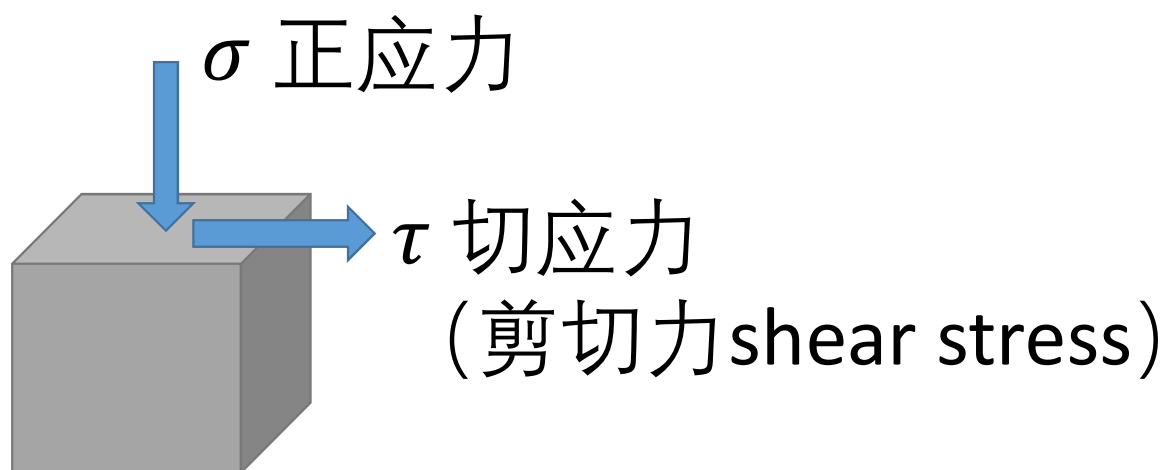
## 1.2 流体与连续介质假设

### ① 流体：

力、变形 微分

任何微小的切应力持续作用下会连续变形的物质。

应力：单位面积受力

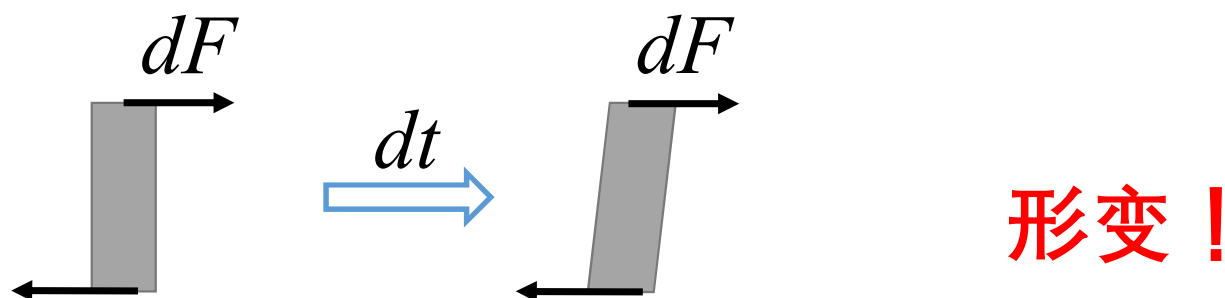


## 1.2 流体与连续介质假设

① 流体：

语言 $\leftrightarrow$ 图形 $\leftrightarrow$ 数学

任何微小的切应力持续作用下会连续变形的物质。





单选题 1分

平衡态流体中是否存在剪切力？

- ☐ A 是
- ☐ B 否
- ☐ C 不确定
- ☐ D 都可能

## 主观题 1分

剪切力作用下，固体有无形变？若有，停止作用后能否恢复？流体呢？

## 1.2 流体与连续介质假设

### ① 流体：

任何微小的切应力持续作用下会连续变形的物质。

液体：

气体：

## 1.2 流体与连续介质假设

### ① 流体：

任何微小的切应力持续作用下会连续变形的物质。

液体：分子间距小，保持体积，无形状，不易压缩

气体：分子间距大，自由运动，充满空间，易压缩

研究对象：？？

？单个粒子，~~X~~多个粒子？

连续介质

## 1.2 流体与连续介质假设

### ② 连续介质假设:

微积分方程

物质**连续无间隙地**分布于所占整个空间，流体的**宏观物理量**是空间、时间的**连续函数**。

**宏观**物理量：微观的统计平均。 $(P, \vec{V}, T, \rho \dots)$

研究对象：连续介质（抽象模型）



连续（足够小）  
宏观（足够大）  
尺度：??

## 1.2 流体与连续介质假设

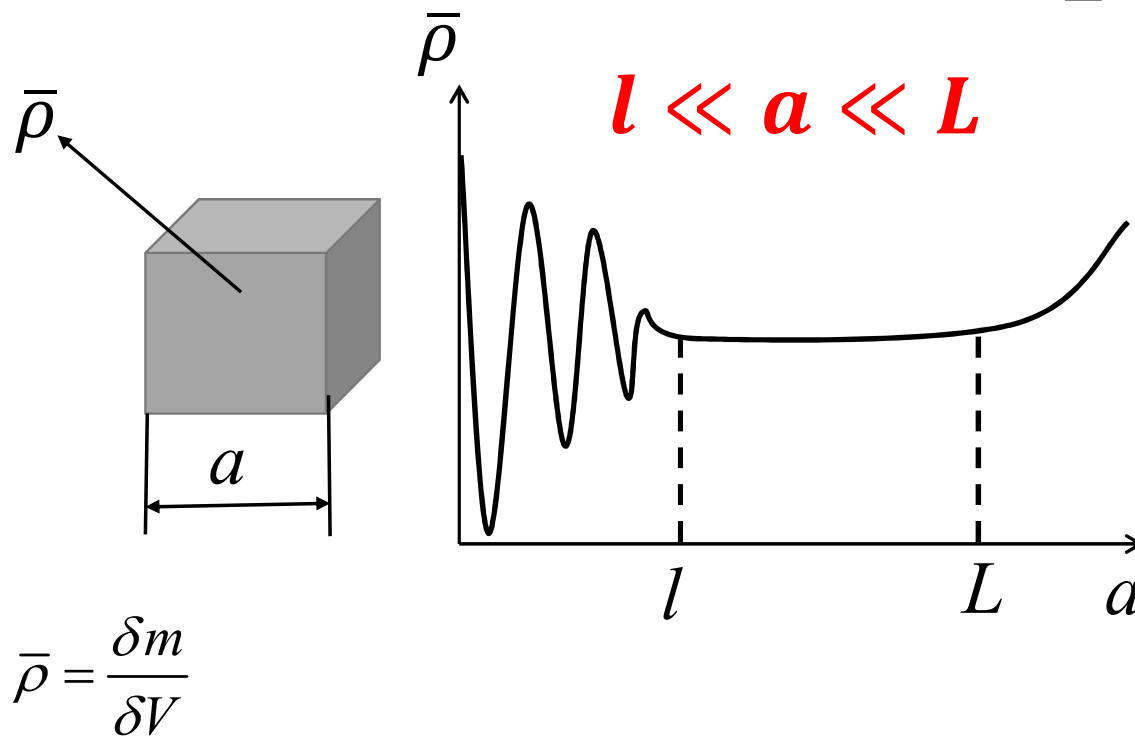
### ② 连续介质假设:

尺度：??

$a$  : 宏观物理量的统计平均尺度

$l$  : 分子间平均距离

$L$  :  $\bar{\rho}$  有显著变化的尺度



微观： $l \ll a$

足够大 → 有确定统计平均值

宏观： $a \ll L$

足够小 → 看作一点

## 1.2 流体与连续介质假设

### ② 连续介质假设:

质点：

流体力学中把包含足够多分子，具有确定宏观统计特征，同时较特征尺度充分小，可看作一个几何点的流体团，称作质点。

Note: 1.流体由连续分布的质点组成

2.质点的物理量是空间连续函数

3. 应用范围  $l \ll a \ll L$

主观题 2分

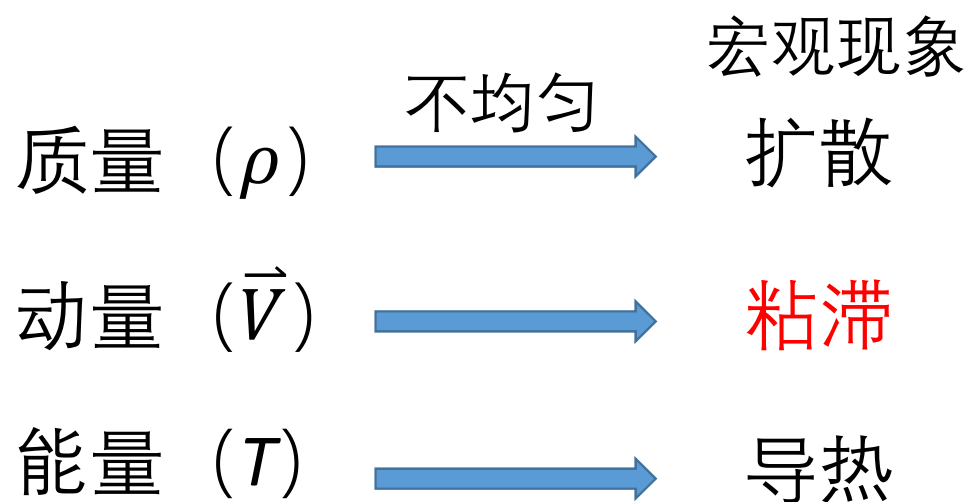
举例连续性介质假设不适用的情况？



## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

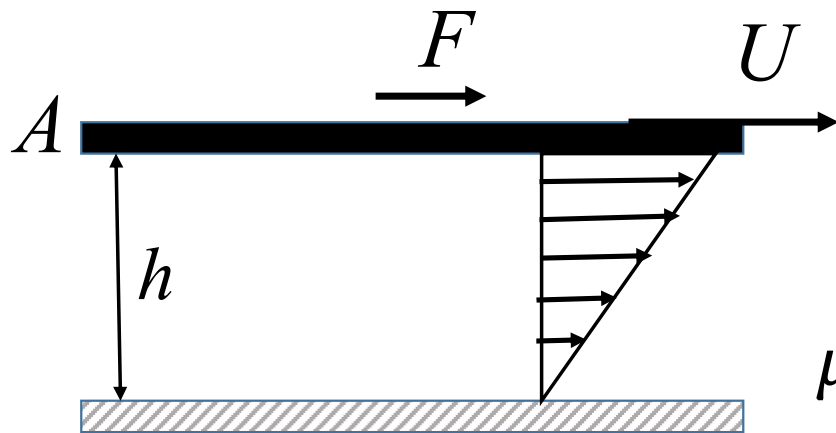
输运性质：物质由非平衡态→平衡态过程中，物理量的传递性质



## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

#### ① 牛顿剪切流动实验（1687年）



$$\text{粘性应力} : \tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h}$$

$$F \propto \frac{U}{h} A$$
$$F = \mu \frac{U}{h} A$$

$\mu$ : 粘性系数, 动力粘性系数( $Pa \cdot s$ )

$\nu = \mu/\rho$ : 运动粘性系数, 动量扩散率  
( $m^2/s$ )

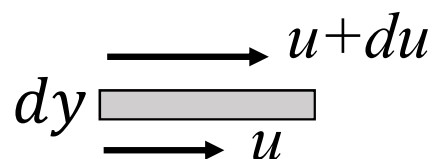
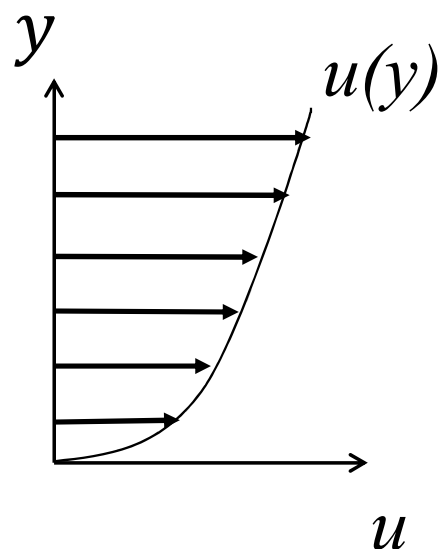
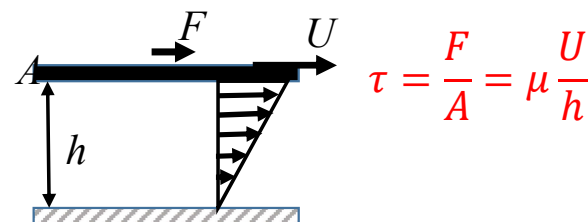
主观题 10分

如何推出 $\mu$ 和 $\nu = \mu/\rho$ 的单位？

## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

#### ② 牛顿内摩擦定理（粘性定理）



相邻层相对运动 → 内摩擦力

内摩擦力： $\tau = \mu \frac{du}{dy}$

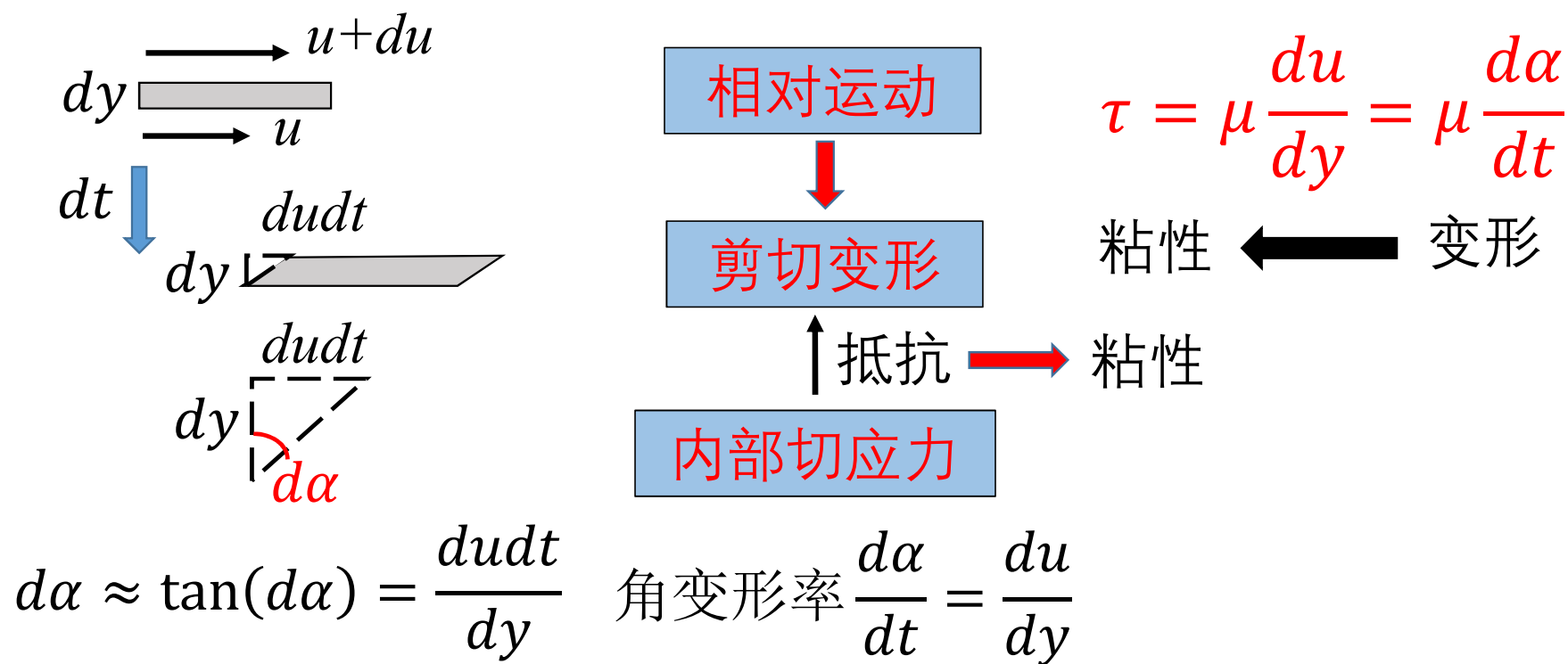
粘性应力

速度梯度

## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

② 牛顿内摩擦定理（粘性定理） 内摩擦力： $\tau = \mu \frac{du}{dy}$



## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

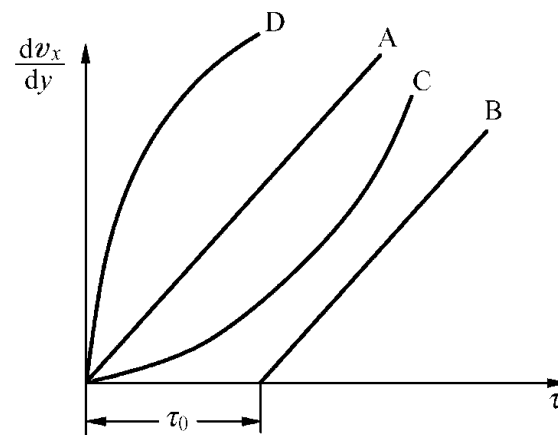
输运性质：物质由非平衡态→平衡态过程中，物理量的传递性质

质量 ( $\rho$ )	不均匀	宏观现象	
	→	扩散	扩散率： $j_{AB} = -D_{AB} \frac{d\rho}{dy}$
动量 ( $\vec{V}$ )	→	粘滞	粘性应力： $\tau = \mu \frac{du}{dy}$
能量 ( $T$ )	→	导热	导热率： $q = -K \frac{dT}{dy}$

## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

③ 牛顿流体：符合  $\tau \propto \frac{du}{dy}$  ( $\frac{d\alpha}{dt}$ )  
气，水，油等（图中A）；



非牛顿流体:牛奶、血液等（图中B、C、D）；

## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

- 常温常压下水的粘度是空气的55.4倍

水

$$\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

空气

$$\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

- 常温常压下空气的运动粘度是水的**15**倍

水

$$\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} = 0.01 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

空气

$$\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} = 0.15 \text{ cm}^2 / \text{s}$$



## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

④ 气体：

$$\frac{\mu}{\mu_0} \approx \begin{cases} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n & \text{power law} \\ \frac{(T/T_0)^{3/2}(T_0 + S)}{T + S} & \text{Sutherland law} \end{cases}$$

液体：

$$\ln \frac{\mu}{\mu_0} \approx a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2$$

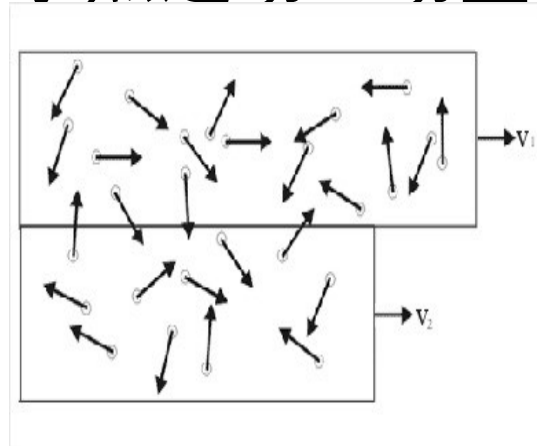
填空题 2分

气体的粘性系数随温度的增大而 [填空1]，液体的粘性系数随温度的增大而 [填空2]。

## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

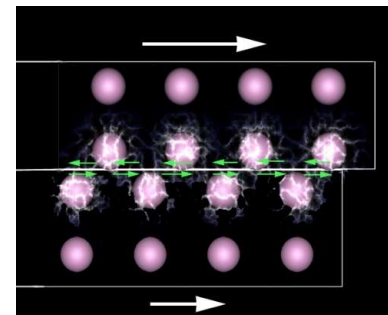
④ 气体：分子热运动→动量交换→粘性



$$\tau \uparrow, u \uparrow$$

液体：分子间作用力→粘性

$$\tau \uparrow, u \downarrow$$



## 1.3 流体的物理学特性：

### 1.3.1 粘性

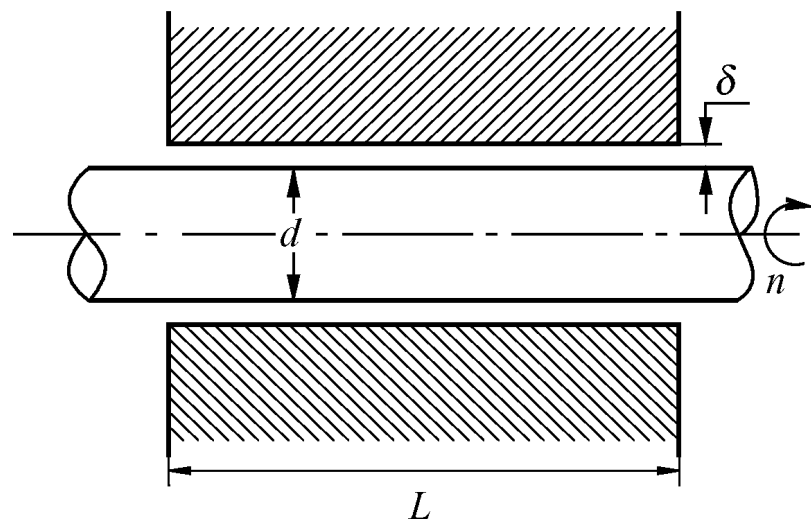
⑤ 理想流体：假象无粘性的流体，可忽略粘性的流体。

如？？

$$u \text{ 小, 或 } \frac{du}{dy} \text{ 小}$$

## 例 题

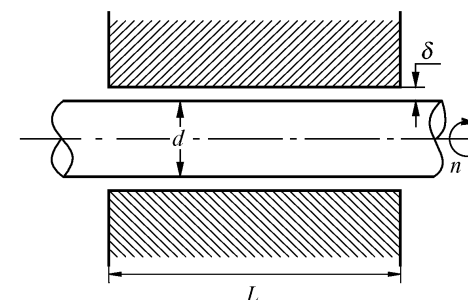
- 如图所示，转轴直径 $d=0.36\text{m}$ ，轴承长度 $L=1\text{m}$ ，轴与轴承之间的缝隙 $\delta=0.2\text{mm}$ ，其中充满动力粘度 $\mu=0.72\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 的油，如果轴的转速 $n=200\text{rpm}$ ，求克服油的粘性阻力所消耗的功率。



## 例 题

解：油层与轴承接触面上的速度为零，与轴接触面上的速度等于轴面上的线速度：

$$v = \frac{n\pi d}{60} = \frac{\pi \times 200 \times 0.36}{60} = 3.77 \text{ m/s}$$



设油层在缝隙内的速度分布为直线分布，即则轴表面上总的切向力为：

$$F = \tau A = \mu \frac{v}{\delta} (\pi \cdot dL) = \frac{0.72 \times 3.77 \times \pi \times 0.36 \times 1}{2 \times 10^{-4}} = 1.535 \times 10^4 \text{ (N)}$$

克服摩擦所消耗的功率为：

$$N = Fv = 1.535 \times 10^4 \times 3.77 = 5.79 \times 10^4 \text{ (Nm/s)} = 57.9 \text{ (kW)}$$

作业:

复习笔记!

P25. 1.2, 1.3, 1.4, 1.8

**回顾：**

- 1.流体、连续介质假设、质点**
- 2.粘性、粘性系数、牛顿粘性定理**
- 3.牛顿流体、理想流体**