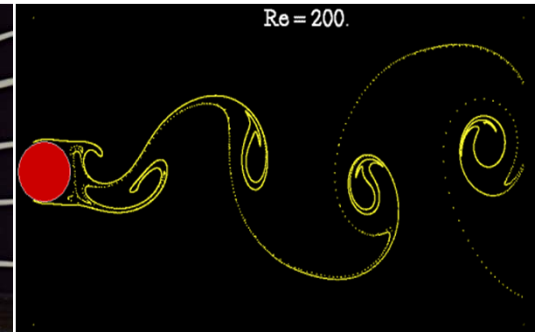
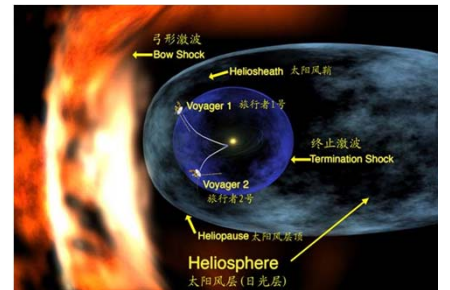
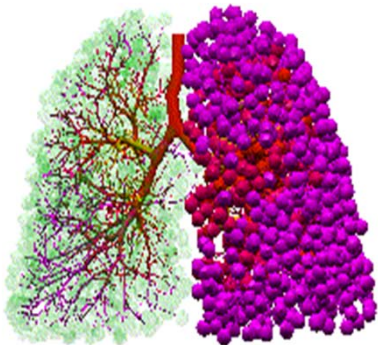


流体力学

主讲教师：张荻

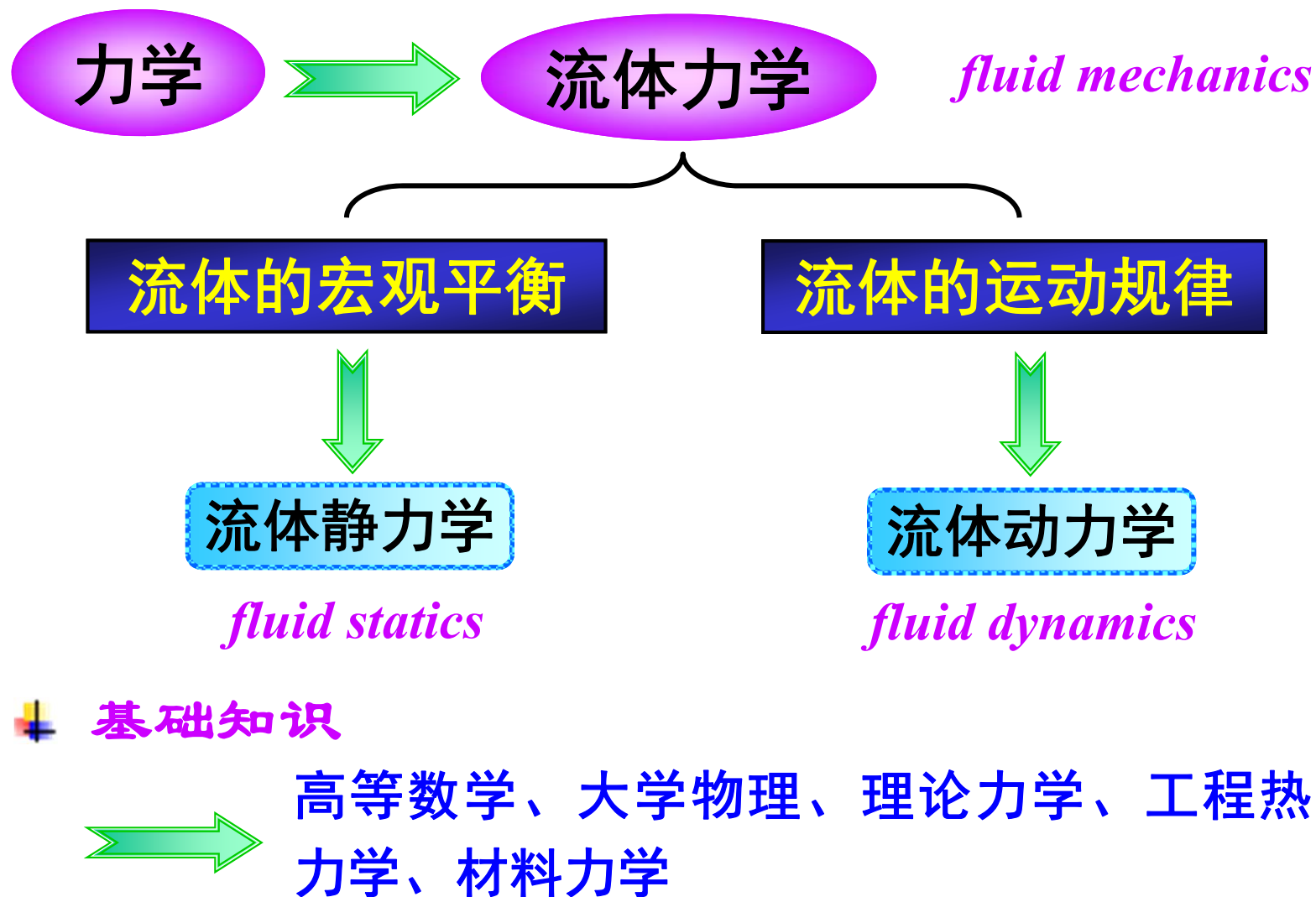
东三楼乙302 Tel: 82666559

zhang_di@mail.xjtu.edu.cn



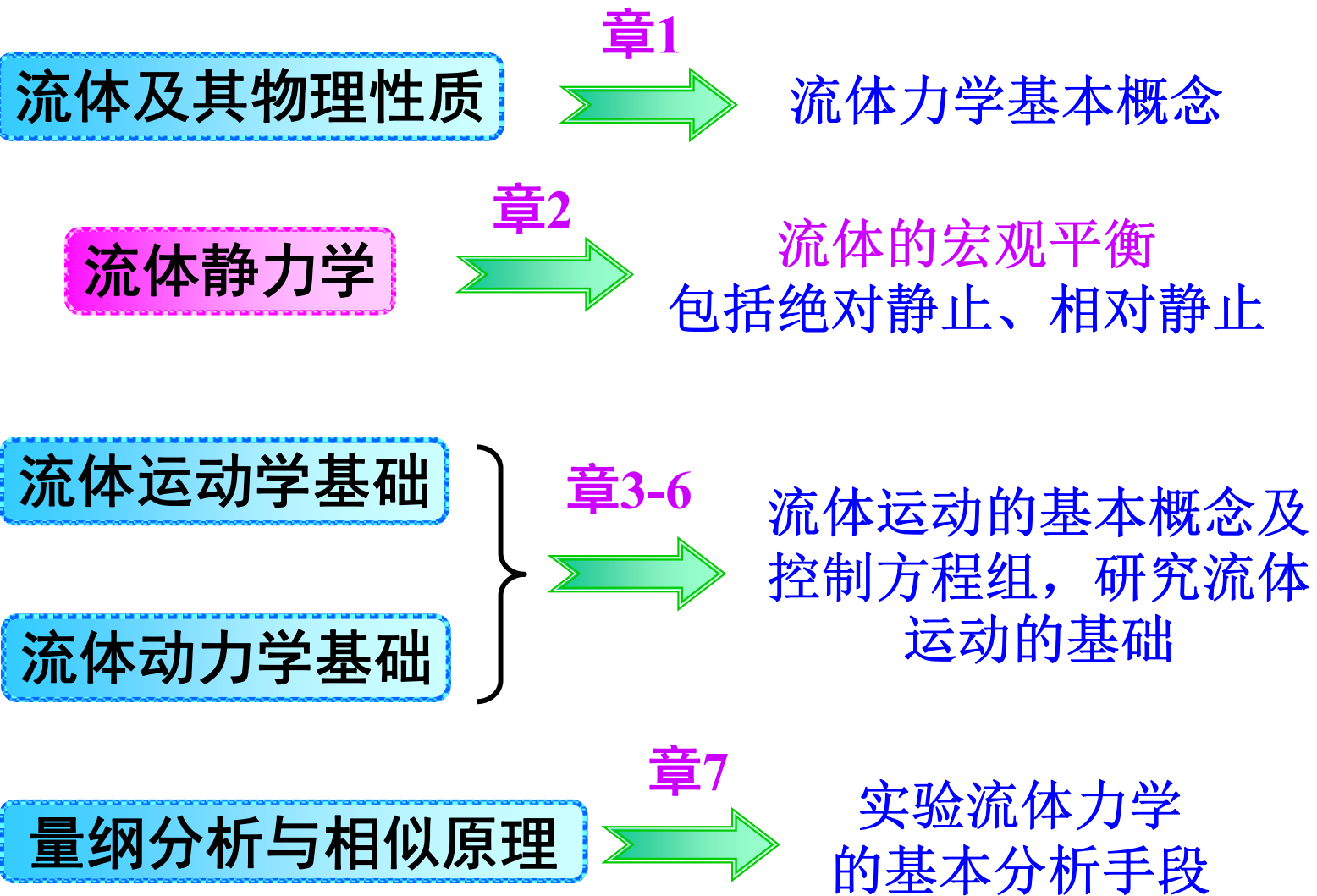


什么是流体力学





本书结构—流体宏观平衡及运动基础篇





本书结构—动力学应用篇

不可压缩流体平面
势流

章8



理想不可压缩流体应用
平面无旋

管道内的粘性流动

章9



粘性不可压缩流体应用
管道内流

绕物体的粘性不可
压缩流动

章10



粘性不可压缩流体应用
外流，边界层

可压缩流动基础

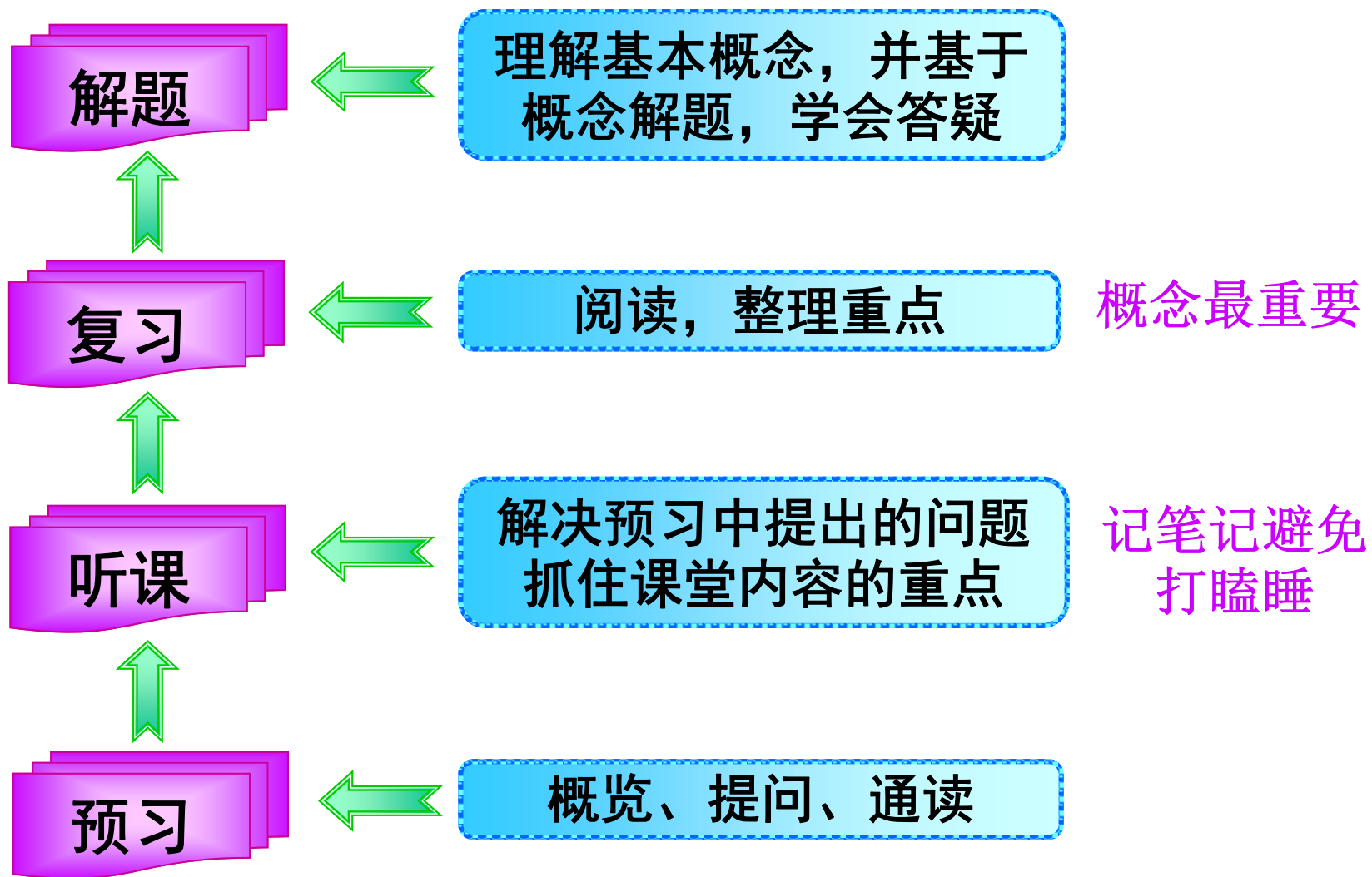
章11



理想可压缩流体应用
喷管一维等熵流动

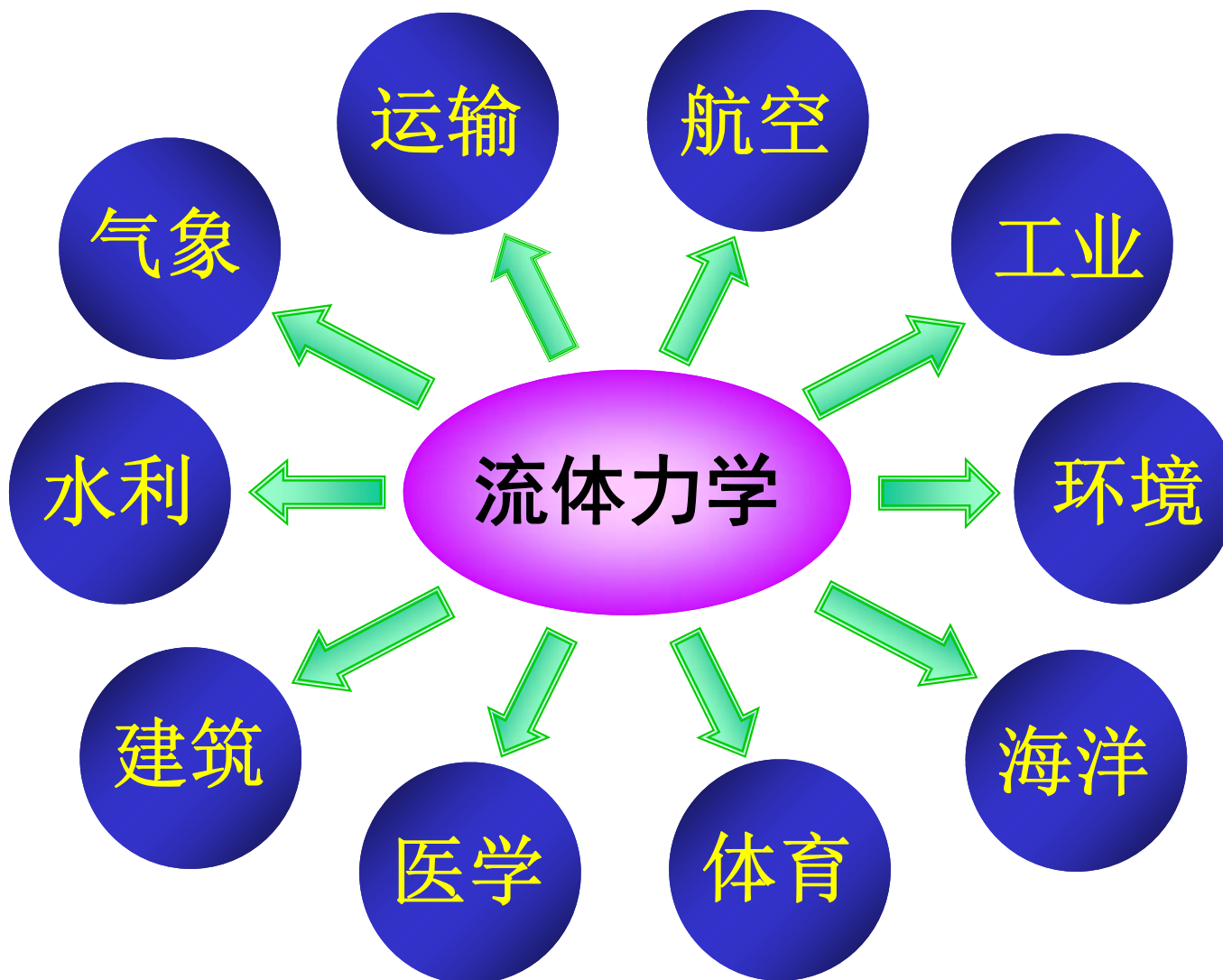


如何学习流体力学—学习过程





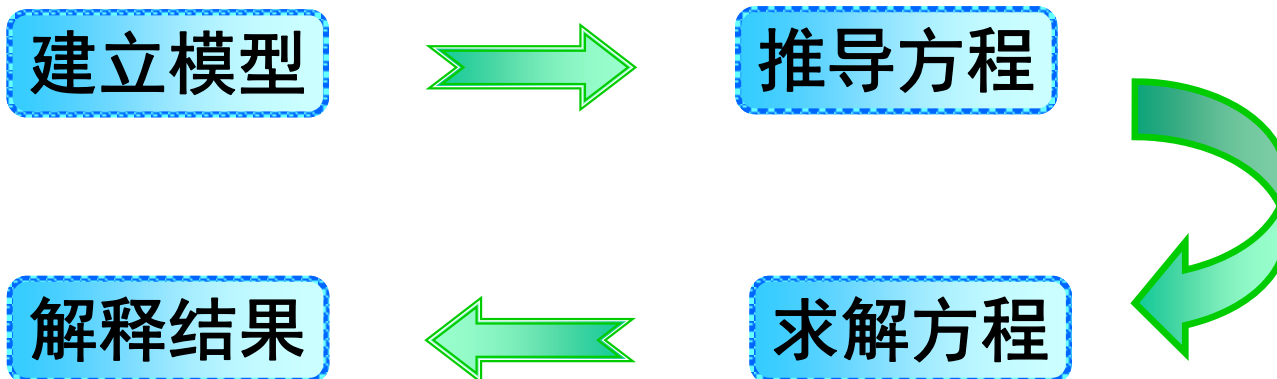
流体力学在生活中的应用





流体力学的研究方法1

理论分析方法



- ④ 理论分析揭示了流动的内在规律，具有普遍适用性
但分析范围有限



流体力学的研究方法2

粘性流体运动方程 — N-S方程

Navier-Stokes equations

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right]$$



流体力学的研究方法3

实验方法

相似理论



模型试验

数据分析



测量



- ④ 反映实际流动规律，发现新现象，检验理论结果等
但结果的普适性较差



流体力学的研究方法4

数值模拟方法

CFD

computational fluid dynamics

数学模型



离散化



检验结果



编程计算

- ④ 能计算理论分析方法无法求解的数学方程，适用范围受数学模型的正确性和计算机的性能所限制

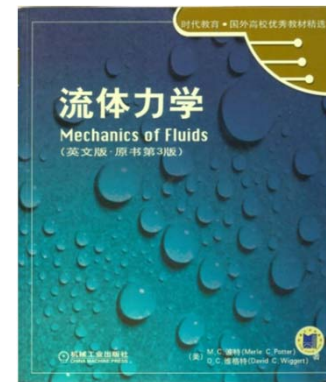


流体力学参考书

Frank M. White: 《流体力学》，清华大学出版社

M. C. Potter: 《流体力学》，机械工业出版社

吴望一编著：《流体力学》，北京大学出版社





第一章 流体及其主要物理性质

一、流体及连续介质假设

二、流体的主要性质



密度
粘性

三、作用在流体上的力





1.2 流体及连续介质假设

流体的定义

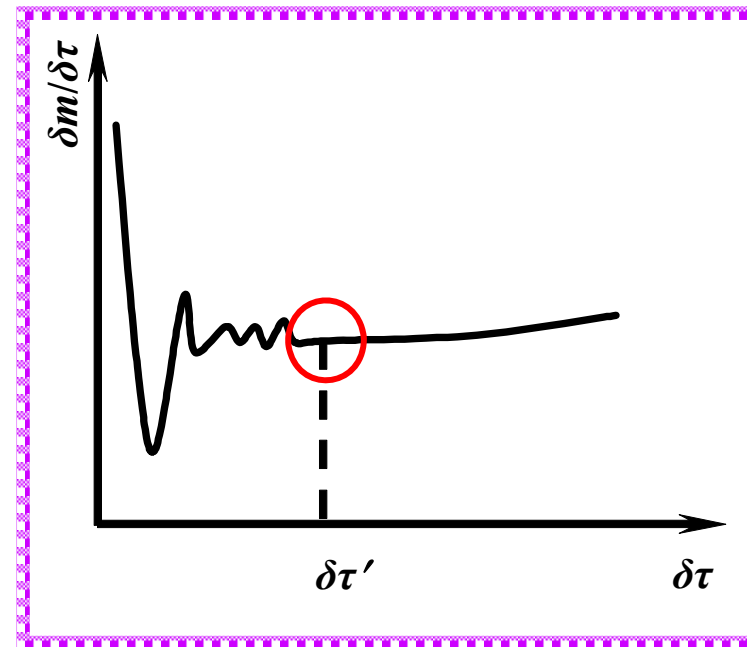
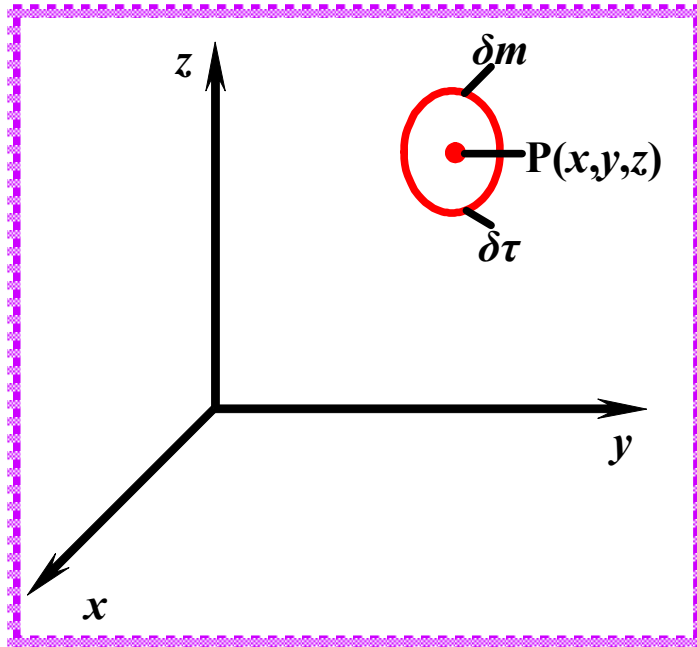
fluid

	形状	体积	压力	拉力	剪切力
固体	✓	✓	✓	✓	✓
液体	×	✓	✓	—	×
气体	×	×	✓	×	×

任意微小剪切力持续作用下发生连续变形的物质
称为流体



连续介质假设1



$\delta\tau'$



特征体积



连续介质假设2

特征体积

② 宏观上充分小 \Rightarrow 特征体尺度 \ll 流动问题特征长度

☞ 在数学上可近似地看成一个几何上没有维度的点

mean free path

② 微观上充分大 \Rightarrow 分子平均自由程 \ll 特征体尺度

☞ 包含大量的分子，对分子团进行统计平均后可以得到稳定数值，少数分子的进出不影响稳定的平均值



连续介质假设3

流体质点



fluid particle

微小特征体，包含大量分子，具有确定的宏观统计特性

- ① 分子平均自由程 \ll 流体质点尺度
 \ll 流动问题的特征长度
- ② 微观性质统计平均后可得到稳定值的时间
 $<$ 统计平均时间 \ll 流动问题的特征时间



连续介质假设4

连续介质假设

continuum hypothesis

- ⊙ 组成流体的最小物质实体是流体质点
- ⊙ 流体由无限多的流体质点连绵不断地组成，质点之间无间隙

✚ 适用条件



分子平均自由程 \ll 流动问题特征尺寸

✚ 不适用



稀薄气体，激波层内等



1.3 密度 *density*

问题

- ④ 密度的定义
- ④ 体积弹性模量
- ④ 不可压缩流体
- ④ 液体和气体的可压缩性



密度

密度

density



$$\rho = \lim_{\delta\tau \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta\tau} = \frac{dm}{d\tau}$$

kg/m^3
 $\delta\tau \rightarrow \delta\tau'$

任意时刻流体质量在空间的分布状态

比容

specific volume



$$v = \frac{1}{\rho}$$

m^3/kg 热力学常用

重度

specific weight



$$\gamma = \rho g$$


N/m^3 水力学常用



体积弹性模量1

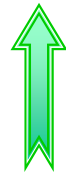
体积弹性模量

bulk modulus of elasticity

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial\rho}{\partial p} \right)_T \delta p + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial\rho}{\partial T} \right)_p \delta T$$


$$E_v = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad \text{Pa}$$

⊙ 体积弹性模量



流体可压缩性



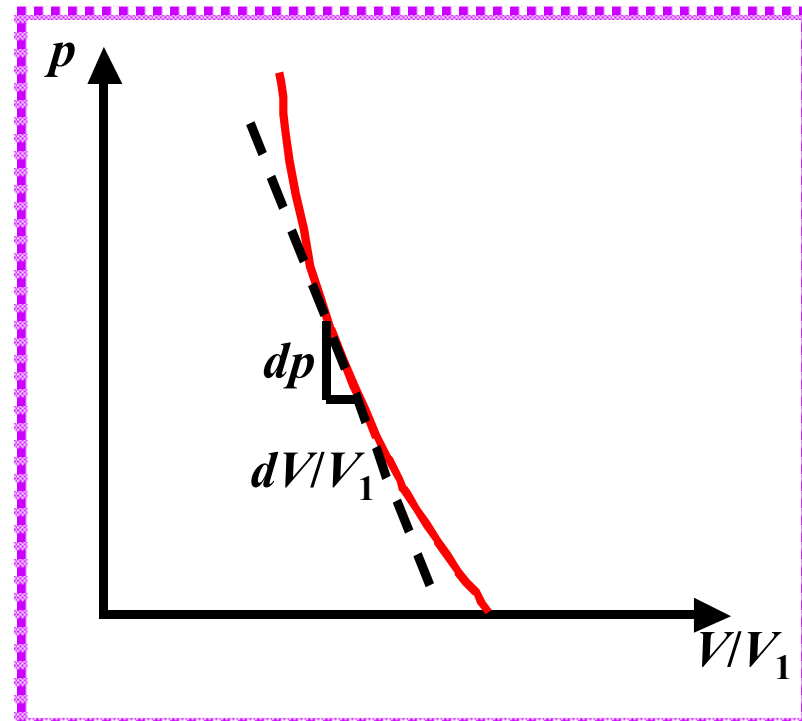
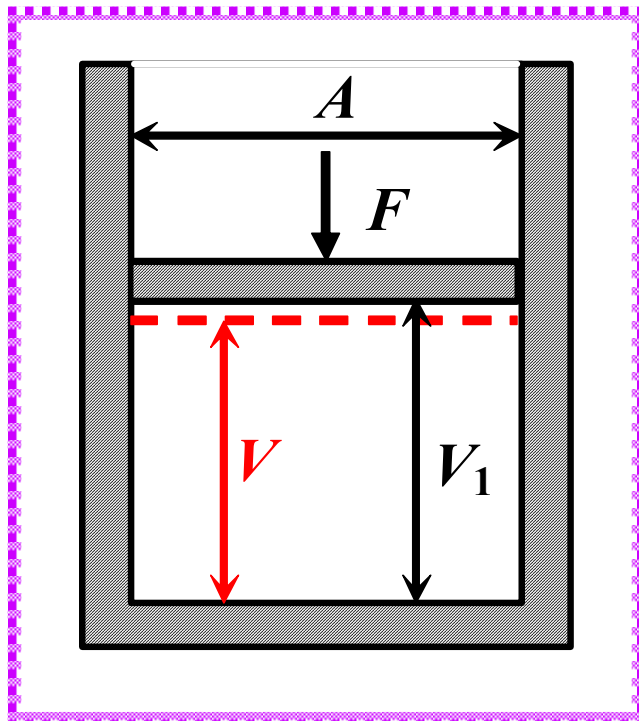


体积弹性模量2 - 液体

液体



压强与密度无简单表达式





体积弹性模量3 – 液体

液体的体积弹性模量很大，压缩性很小

水的体积弹性模量随温度的变化

温度 / °C	0	10	20	50	100
$E_v / \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	2.02×10^9	2.1×10^9	2.18×10^9	2.29×10^9	2.07×10^9




体积弹性模量4 - 气体

气体



根据过程方程、状态方程求解

⊙ 等温过程 $\frac{p}{\rho} = C$  $E_v = p$

	水	空气 (等温/标压)
E_v / Pa	2.1×10^9	1.013×10^5



可压缩和不可压缩流体1

不可压缩流体

incompressible fluid

② 均质不可压缩流体 \Rightarrow $\rho = \text{const}$



$$E_v \rightarrow \infty$$

② 流体都具有可压缩性，不可压缩流体是一种假想的模型



可压缩和不可压缩流体2

液体



不可压缩

© 水击、水下爆炸等必须考虑可压缩性

气体



可压缩

© 低速流动且温差不大的气体可认为是不可压缩的



体积弹性模量—例题1

例：把 20°C 水在1大气压下压缩 1% 所需的压强变化

解： $E_v = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right) \Rightarrow E_v = -\frac{\delta p}{\delta V/V}$

查附表B1 $E_v = 2.21 \times 10^9 \text{ Pa}$

$\Rightarrow \delta p = 2.21 \times 10^9 \times 0.01 = 2.21 \times 10^7 \text{ Pa}$



体积弹性模量－例题2

例：求空气在标准大气压下等温压缩 50% 时压强需增加到多少？

解： $E_v = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right) \Rightarrow \frac{dV}{V} = -\frac{dp}{p}$

$\Rightarrow \ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{p_1}{p_2}$

$\Rightarrow p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = 2.026 \times 10^5 \text{ Pa}$



相对密度

相对密度



$$S = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

- ④ 液体密度与 4°C 蒸馏水的密度之比
- ④ 4°C 蒸馏水的密度 $\rho_{ref} = 1000 \text{ kg/m}^3$



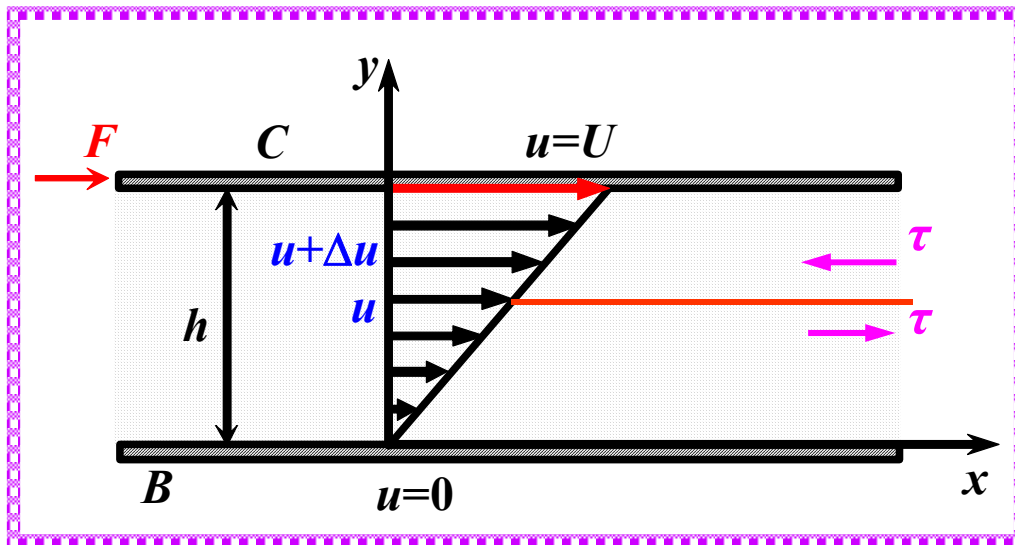
1.4 流体的粘性 *viscosity*

问题

- ④ 什么是粘性？
- ④ 粘性产生的原因是什么？跟什么因素有关？
- ④ 粘性力的大小跟什么有关？
- ④ 什么参数可以用来衡量流体粘性的大小？



流体的粘性定义

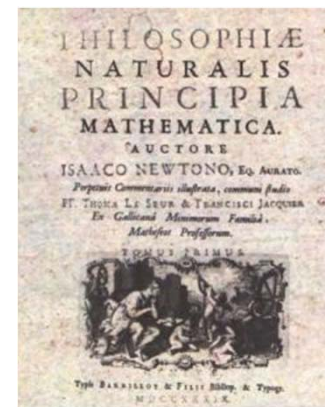


流体抵抗剪切变形（相对运动）
的一种属性

- ① 粘性是流体的固有属性
- ② 流体层间无相对运动时不表现粘性



Isaac Newton
1642 – 1727



自然哲学的
数学原理



粘性产生的机理1

液体 → 分子间内聚力

流体团剪切变形



改变分子间距离

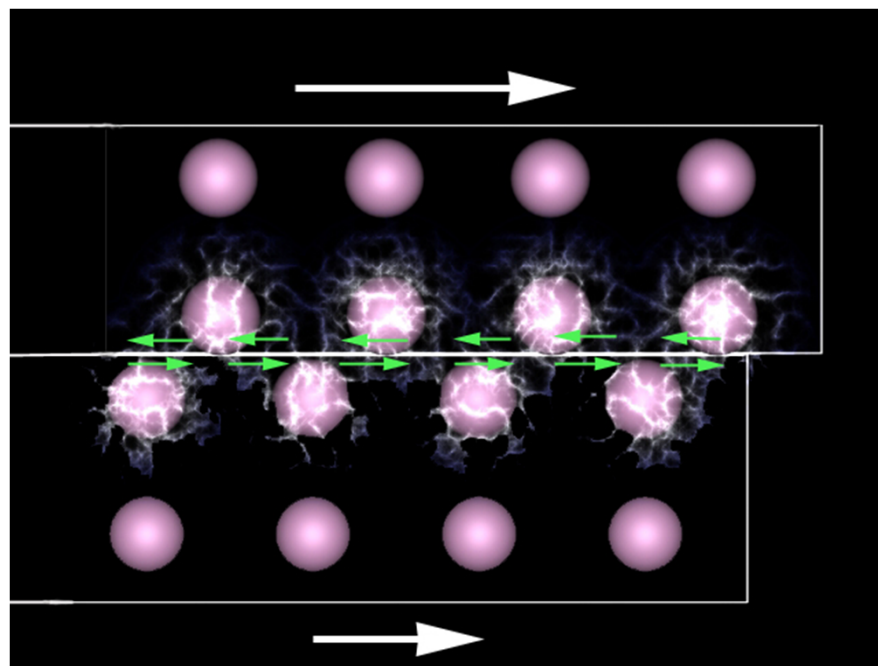


分子间引力阻止

距离改变



内摩擦抵抗变形





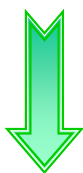
粘性产生的机理2

气体

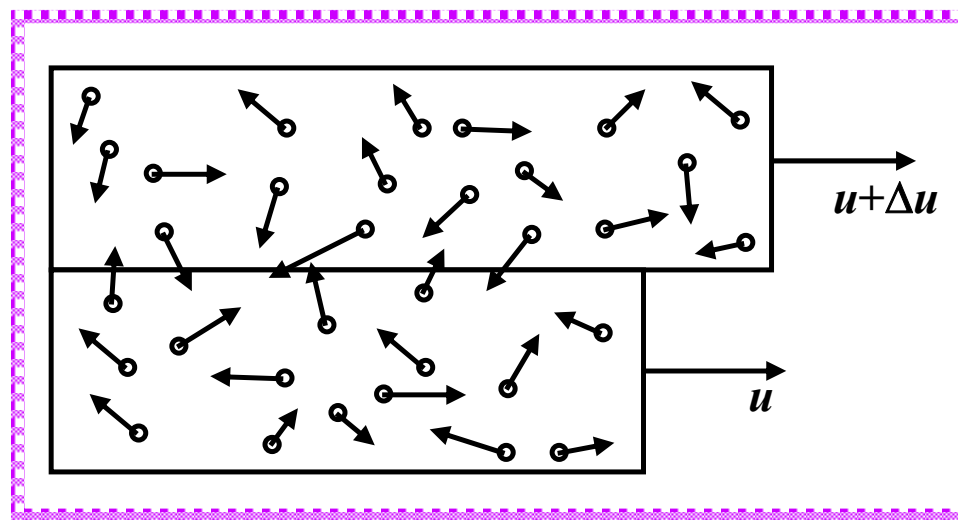


分子热运动

流体层间相对运动



分子热运动产生流
体层与层之间的动
量交换



内摩擦抵抗相对运动



粘性应力 (内摩擦应力) 1

切应力 *shear stress*

$$\tau = \frac{T}{A} \propto \frac{U}{h} = \mu \frac{U}{h}$$

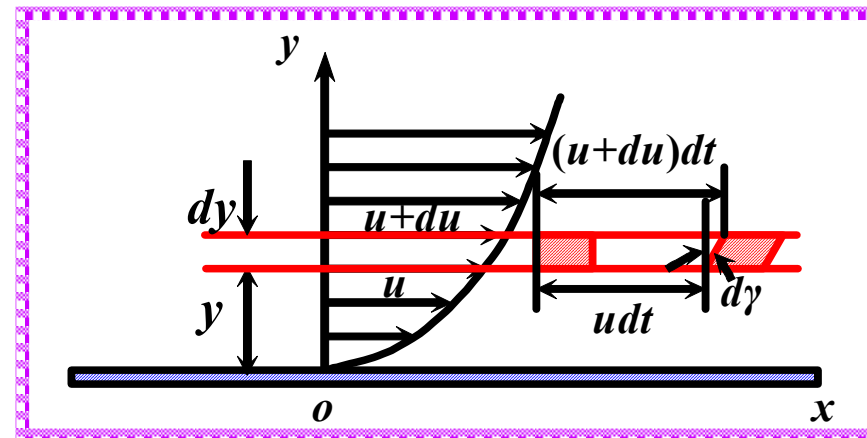
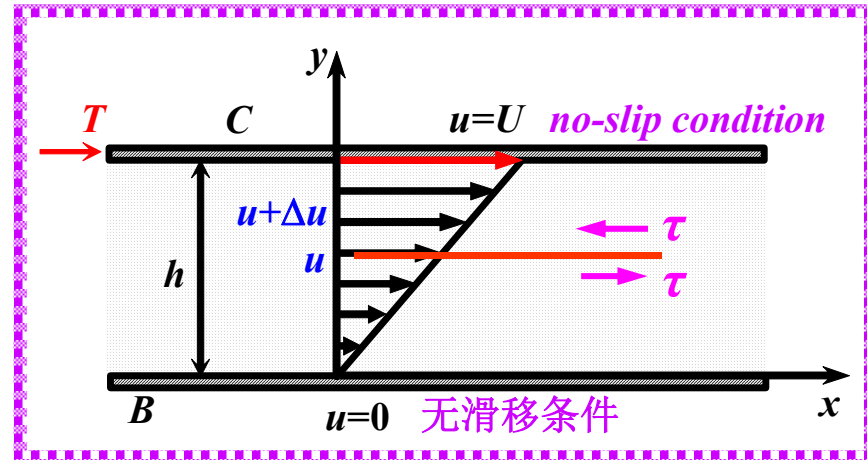
牛顿内摩擦定律



$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

velocity gradient

速度梯度



粘性切应力与层间速度梯度成正比，而不由速度决定



粘性应力（内摩擦应力）2

牛顿内摩擦定律



$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

④ 从相对运动的角度反映内摩擦力

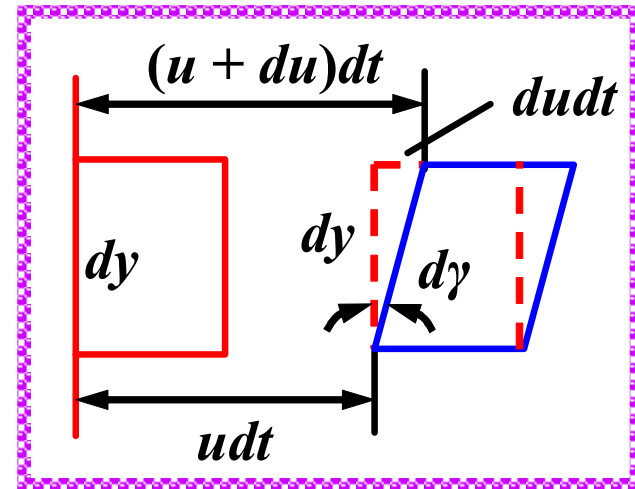


$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt} = \mu \dot{\gamma}$$



strain rate

角变形率



☞ 粘性切应力与角变形率成正比，而不由变形量决定

④ 从剪切变形的角度反映内摩擦力



动力粘度 μ

动力粘度



$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

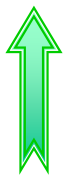
Pa·s
viscosity

① μ 反应流体真实粘性的大小

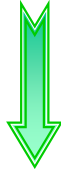
② μ 与温度的关系

液体

T

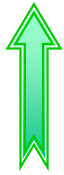


μ

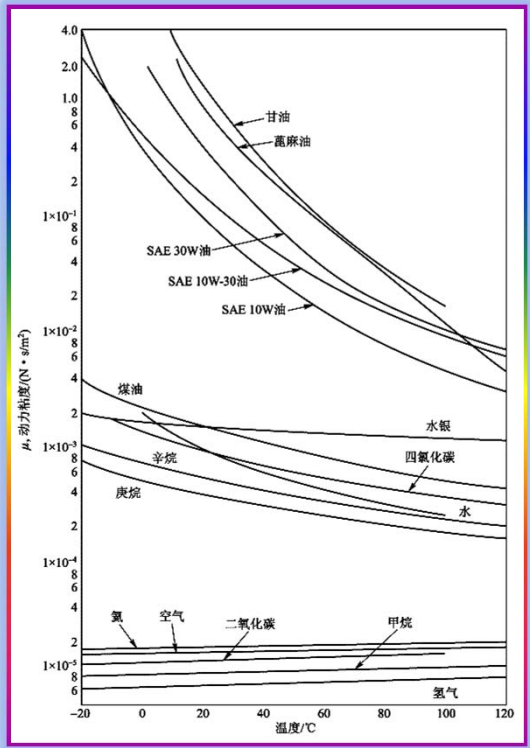
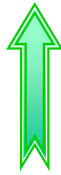


气体

T



μ





运动粘度 ν

运动粘度



$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

m^2/s
kinematic viscosity

⊙ ν 不能真实反应流体粘性的大小

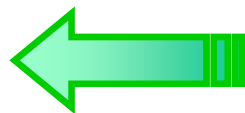
附表 B1 ~ 2, P. 534

20°C	$\mu / \text{Pa}\cdot\text{s}$	$\nu / \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
水	1.002×10^{-3}	1.004×10^{-6}
空气	1.82×10^{-5}	1.51×10^{-5}



几个概念1

牛顿流体与
非牛顿流体



是否符合牛顿内摩擦定律

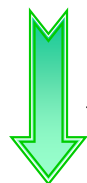
符合



牛顿流体

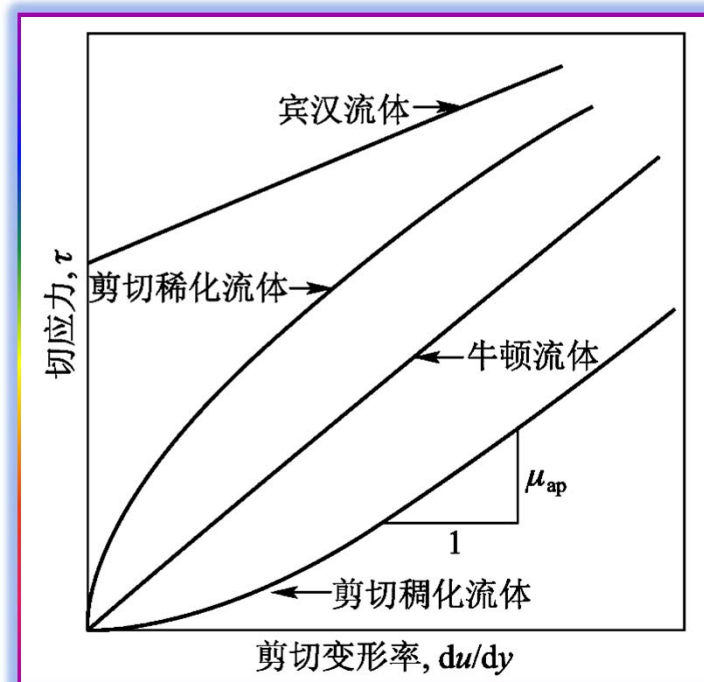
Newtonian fluid

不符合



非牛顿流体

Non-Newtonian fluid





几个概念2

理想流体

inviscid fluid

ideal fluid



粘度为零的流体

$$\mu = 0$$

◎ **实际流体都具有粘性，粘性是流体的基本属性**

☞ 理想流体理论在描述平面和空间无旋流动、液面波浪运动，物体升力（19世纪）等方面取得很大成功，但却解释不了绕流物体阻力和河道水头损失等问题



粘性 - 例题 1 - 1

几个概念:

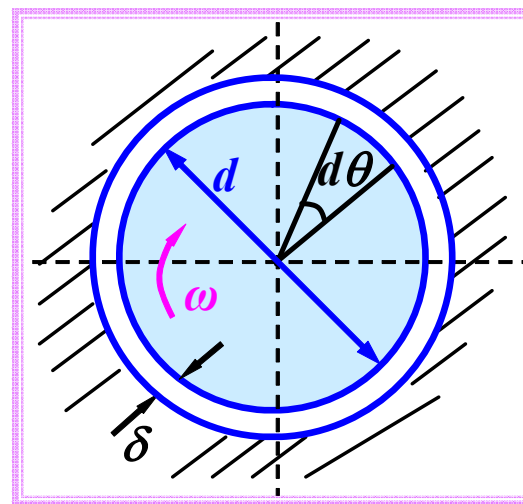
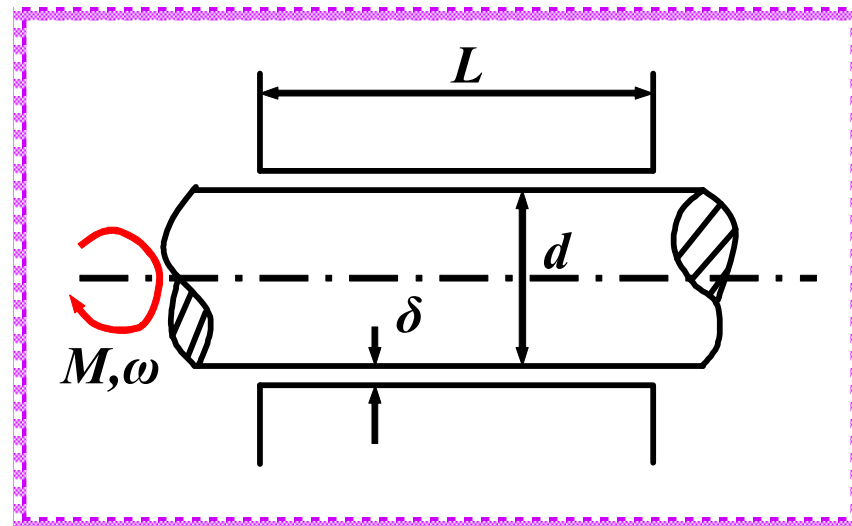
转速 n (r/min)

角速度 ω (rad/s) = $2\pi n / 60$

线速度 u (m/s) = $r\omega = d\omega / 2$

功率 N (W) = $F \cdot u = F \cdot r\omega = M\omega$

转矩 M (N·m) = $F \cdot r = F \cdot d / 2$

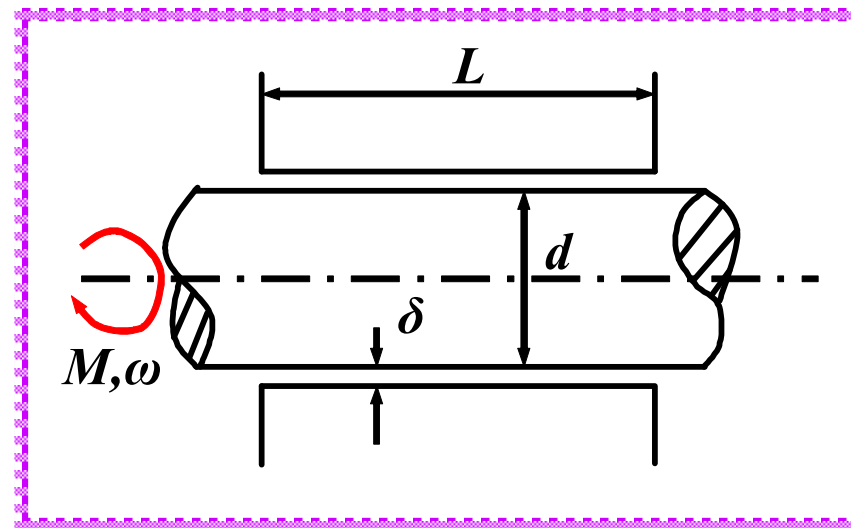
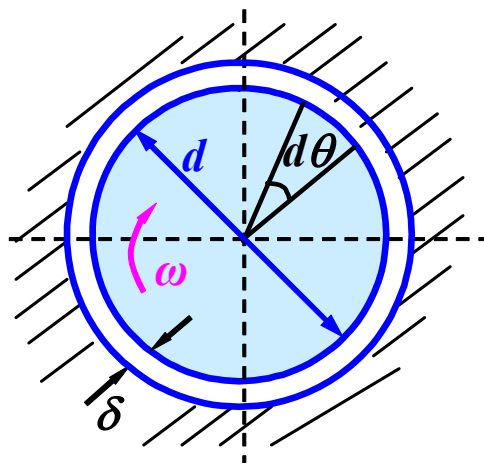




粘性 - 例题1-2

例：已知轴承长 $L = 0.5\text{m}$ ，轴径 $d = 150\text{mm}$ ，转速 $n = 400\text{r/min}$ ，轴与轴承间隙 $\delta = 0.25\text{mm}$ ，作用在转轴上的摩擦力矩 $M = 10.89\text{ N}\cdot\text{m}$ ，求 μ

解：1、切应力



$$dM = \frac{d}{2} dF = \frac{d}{2} \cdot \frac{d}{2} d\theta \cdot L \cdot \tau \quad \Rightarrow \quad M = \int dM$$

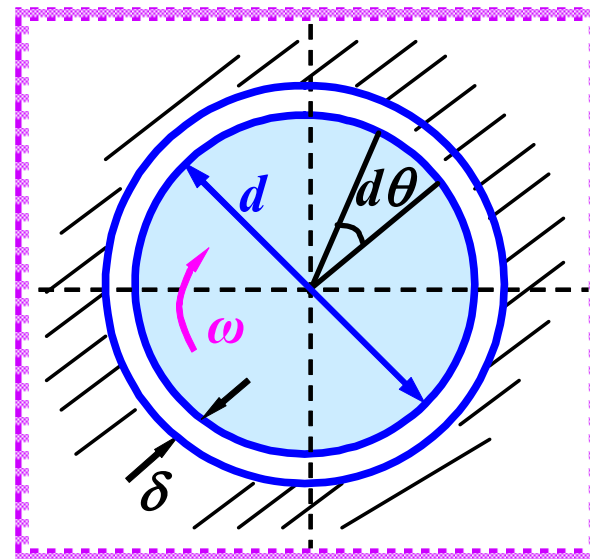


粘性 - 例题1-3

$$\Rightarrow M = \int_0^{2\pi} \left(\frac{d}{2}\right)^2 \tau L d\theta$$

2、速度梯度

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\pi dn}{60\delta}$$



$$\Rightarrow M = \frac{d}{2} dL \pi \mu \frac{\pi dn}{60}$$



$$\mu = \frac{120 M \delta}{d^3 \pi^2 n L}$$



粘性－例题2－1

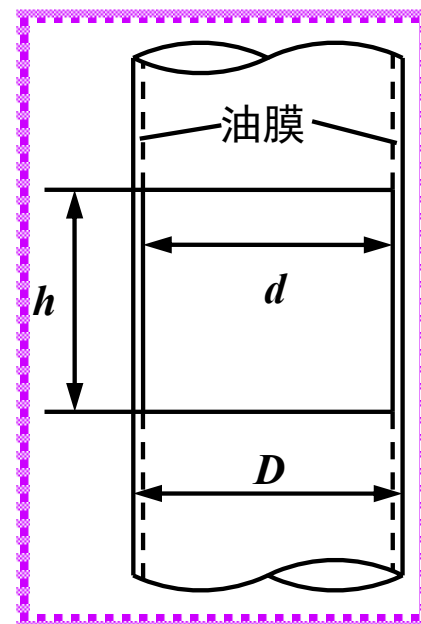
例：如图所示一重9N的圆柱体在同心圆管中以46mm/s的速度匀速下落，柱体直径 $d = 149.5\text{mm}$ ，高度 $h = 150\text{mm}$ ，圆管直径 $D = 150\text{mm}$ ，柱体与圆管间存在油膜，求油的动力粘度 μ

解：圆柱匀速下落，受力平衡

柱体与圆管间隙很小，可认为速度线性分布，则柱体所受切应力为



$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{V}{\delta}$$





粘性 - 例题2-2

柱体所受阻力与重力平衡

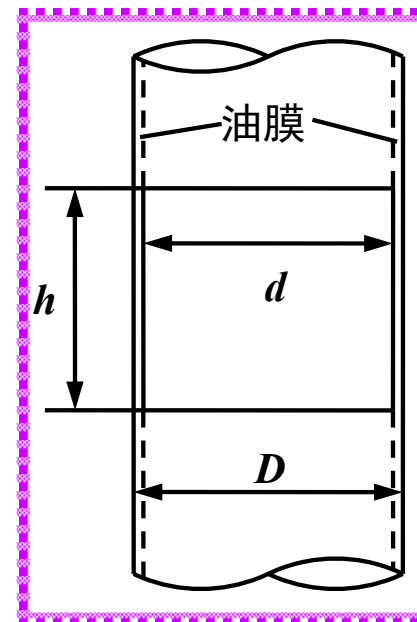


$$G = \tau A = \mu \frac{V}{\delta} A$$



$$\mu = \frac{G}{\pi d h \left(V / \frac{D-d}{2} \right)}$$

$$= 0.694 (\text{Pa} \cdot \text{s})$$



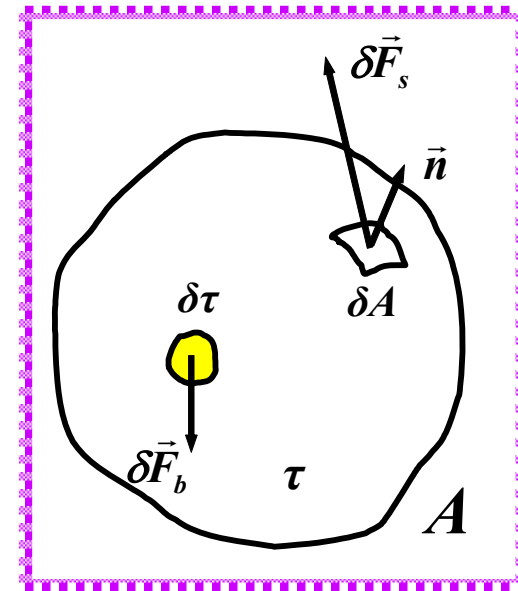


1.7 作用在流体上的力

质量力

body force

- ④ 作用在流体的每个质点上
- ④ 大小与流体质量成正比
- ④ 重力、惯性力等



单位质量力



$$\vec{f} = \lim_{\delta\tau \rightarrow 0} \frac{\delta\vec{F}_b}{\rho\delta\tau} = \vec{f}(x, y, z, t)$$

m/s^2

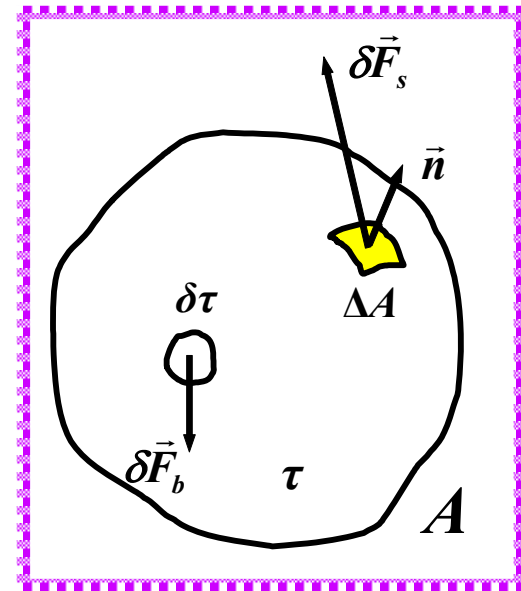


作用在流体上的力2

表面力

surface force

- ④ 作用在流体的封闭界面上
- ④ 大小与流体表面积成正比
- ④ 压力、摩擦力等



表面应力



$$\vec{p}_n = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \vec{F}_s}{\delta A} = \vec{p}_n(x, y, z, t, \vec{n}) \quad \text{Pa}$$



作业

作业： P.25~27

© 1.4

© 1.7

© 1.11

© 1.17

© 1.18



小结1

流体的定义



不能承受剪切力

连续介质模型



流体质点

连续介质模型

流体的粘性



牛顿内摩擦定律

粘性产生的机理

两种粘性系数



小结2

流体的可压缩性



不可压缩流体
体积弹性模量

作用在流体上的力



质量力
表面力

几个概念

理想流体、牛顿流体、不可压缩流体



小结3

公式

牛顿内摩擦定律



$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \mu \frac{d\gamma}{dt}$$

运动粘性系数



$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

体积弹性模量



$$E_v = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T$$



小结4

公式

体积弹性模量—等温



$$E_v = p$$



连续介质假设思考题

下列有关流体质点的描述，错误的是

- A、流体质点的尺寸远小于流动问题特征尺寸
- B、流体质点的宏观物理量具有确定性
- C、流体质点是由大量流体分子组成的流体团它的大小不超过0.1cm
- D、从微观上看，流体质点的尺寸远大于分子平均自由程



流体的粘性思考题1

静止流体是否具有粘性？是否表现粘性？

理想流体是否具有粘性？

流体粘性与温度有什么样的关系？为什么？

两种粘性系数有什么区别？



流体的粘性思考题2

与牛顿内摩擦定律有关的因素是

- A、流体的压强、速度、粘性系数
- B、流体的切应力，粘性系数，角变形率
- C、流体的法向应力、温度、粘性系数
- D、流体的压强、粘性系数、线变形率



流体的可压缩性思考题

下列情况中哪些不符合不可压缩流体模型

- A、原油在输油管道中的流动
- B、空气的低速流动，温度变化不大
- C、锅炉里的水蒸汽流动