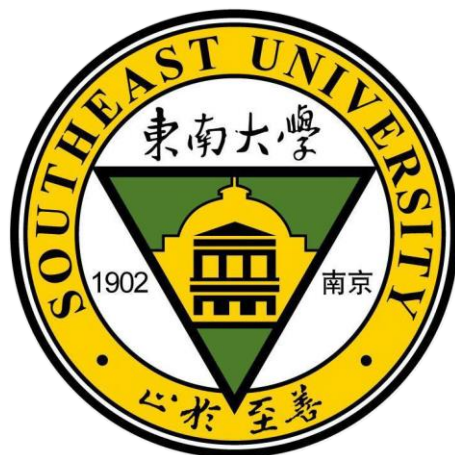


Engineering Fluid Mechanics

工程流体力学

第1章 绪论

教学团队：严 岩
韩 煜
吴 泽
李 晓
莫景文
孙东科



东南大学机械工程学院

2023/3/9

课程简介 · 课程性质

工程流体力学（第三版）

归柯庭、汪军、王秋颖编著
科学出版社

流体力学（第4版）

罗惕乾主编
机械工业出版社



- 课程代码：B0201120
- 课程名称：工程流体力学 Engineering Fluid Mechanics
- 学分/总学时：2学分/32学时
- 讲课学时：32；实验学时：0；
- 课程类别：大类学科基础课
- 开课学期：2022-2023-3
- 适用对象：机械工程专业大学二、三年级
- 先修课程：高等数学、线性代数、大学物理
- 后续课程：机械制造工程学、液压与气动技术
- 教学团队：严岩、韩煜、吴泽、李晓、莫景文、孙东科

课程简介 · 课程目标

- 1. 能使用**流体力学基本方程**和计算方法分析并解决机械工程中的流体静力学和动力学的问题，为从事专业技术和科学研究工作打下必要的**流体力学基础**。
- 2. 通过课堂教学在传授流体力学专业知识的同时，通过**工程与科学**案例说明我国在流体力学方面的成就与不足，例如**都江堰、港珠澳大桥、国家数值风洞**等，增强学生的**荣誉感、使命感和责任感**。

目标	考核与评价方式及成绩分值			成绩
	平时作业	项目报告	期末考试	
课程目标1	10	5	15	30
课程目标2	10	5	15	30
课程目标3	-	10	30	40
总计	20	20	60	100

- 3. 对学生进行**德育教育**，培养学生的**科学精神、民族自豪感和爱国主义**情感；促进学生形成**良好的职业素养**和树立**科学的世界观**。

绪论

为什么要学习流体力学？

人类文明前进的每一小步几乎都伴有流体力学进展的影子。

我国古代著名水利工程：

都江堰 - 天府之国



京杭大运河



绪论

为什么要学习流体力学？

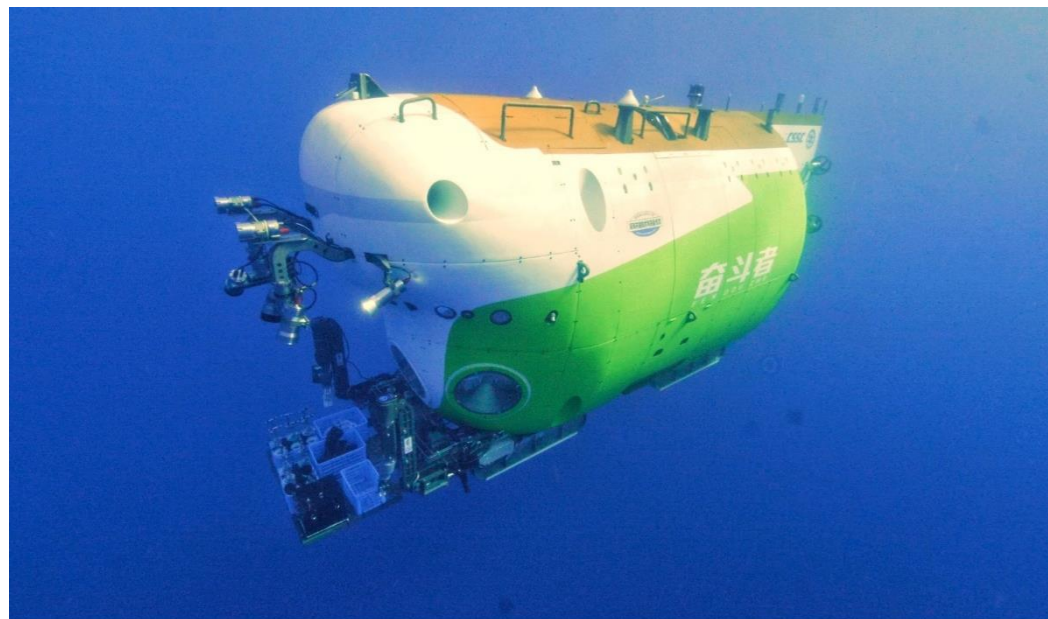
人类文明前进的每一小步几乎都伴有流体力学进展的影子。

今天的深海、极地、深空探测：

“雪龙”号极地科考船



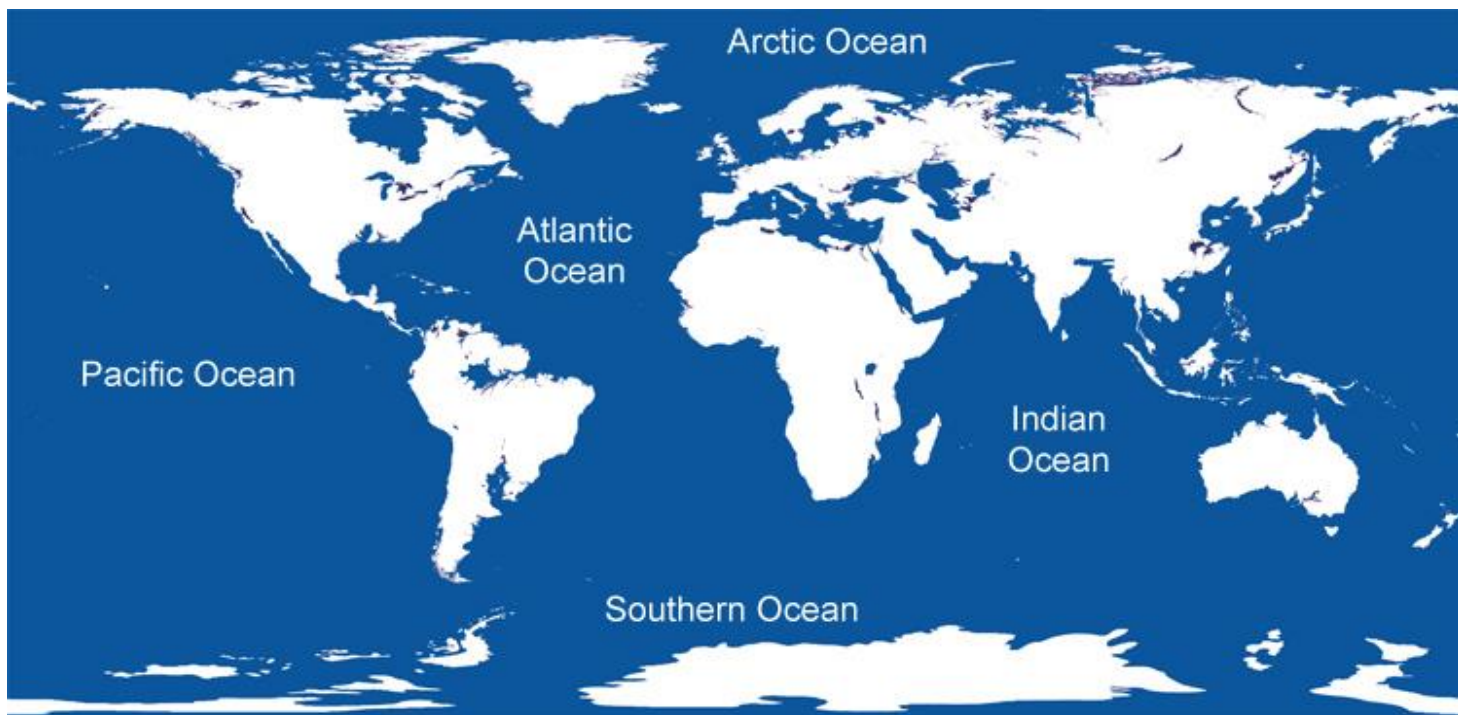
“奋斗者”号万米载人潜水器



绪论

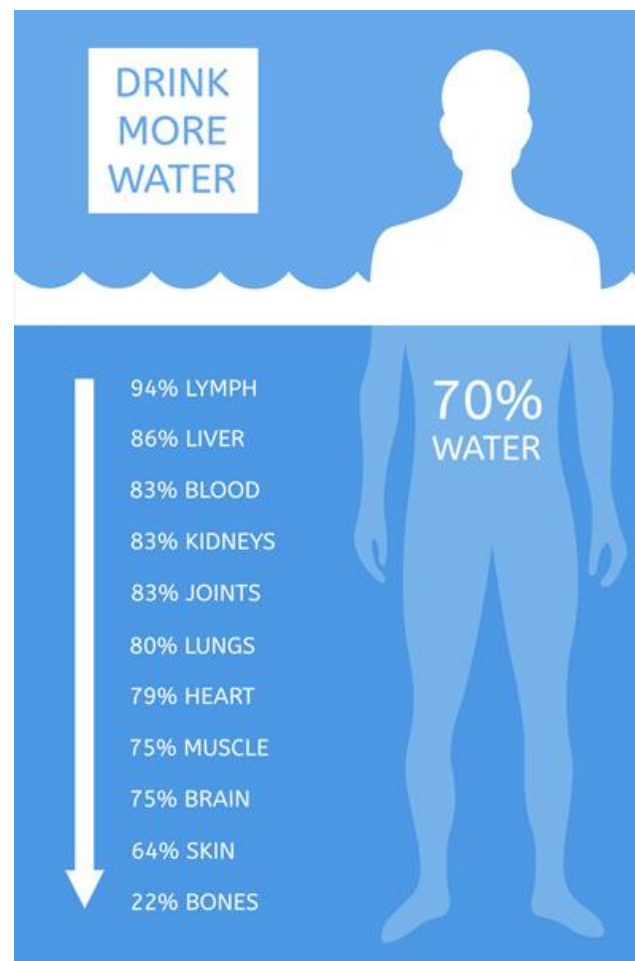
为什么要学习流体力学？

人类生活在一个被流体包围着的世界，流体力学与我们的日常生活与生产实践紧密相连



海洋覆盖地球表面积的71%

水分占人体重量的70%



第1讲 流体及其性质



目录

CONTENTS

- 1.1 流体的特性和定义
- 1.2 流体力学的发展简史
- 1.3 流体力学的工程应用
- 1.4 流体的连续介质假设
- 1.5 流体的主要物理性质
- 1.6 流体的粘性和牛顿内摩擦定律
- 1.7 流体的表面张力

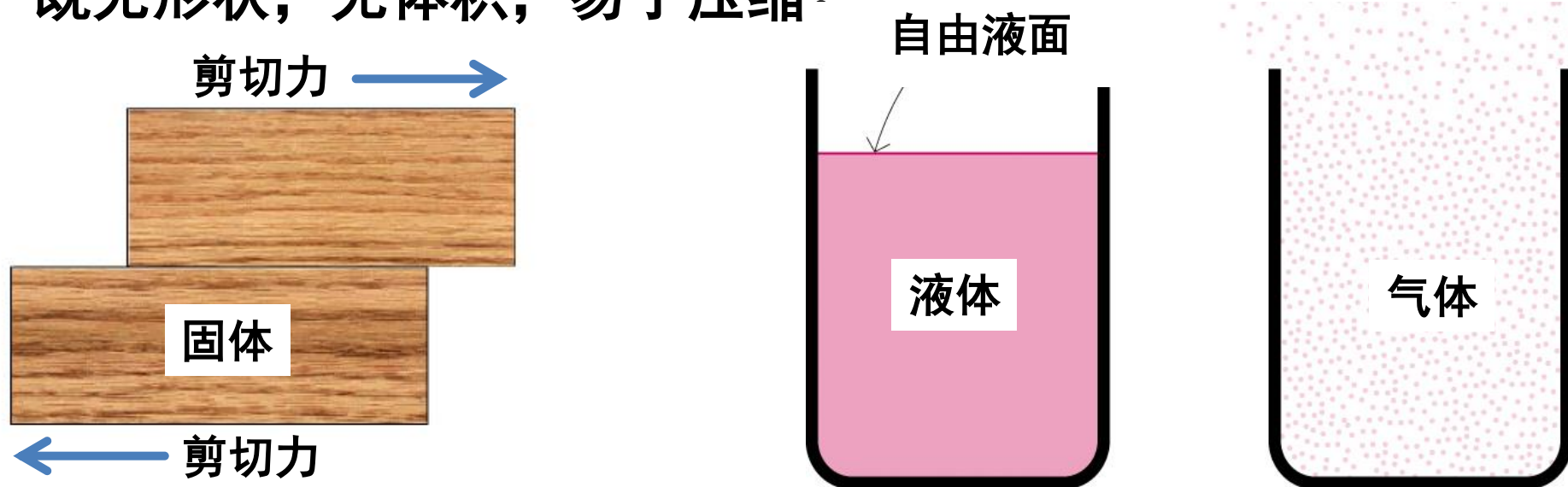
1.1 流体的定义与特性

流体力学的研究对象是流体，那么什么是流体？

固体：有固定形状和体积，能承受压力，拉力，剪切力。

液体：无形状，有一定的体积；不易压缩，存在自由(液)面。

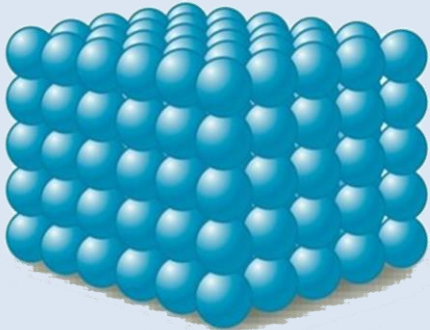

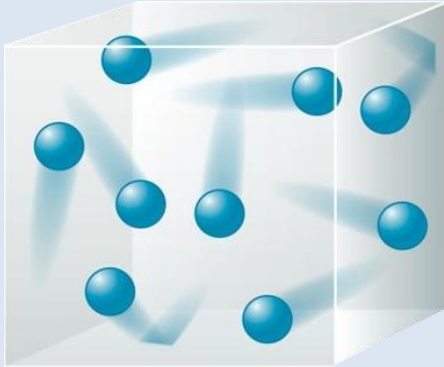
气体：既无形状，无体积，易于压缩



流体就是指**液体**或**气体**，如水空气、水蒸气、牛奶、润滑油、地下石油、血液、超高压作用下的金属和烟气、高温条件下的等离子体等等。

1.1 流体的特性与定义

为什么流体无法承受剪切应力？ 微观分子排列与流体特性的关系

物质状态	固态	液态	气态
示意图			
分子排列方式	紧密、有序排列；分子间作用力大，无法自由移动；	较紧密、无序排列；分子间作用力较小，分子运动强烈，易流动；	分子间距离大、分子间作用力微小；
宏观特性	有固定形状，有固定体积；	无固定形状、有一定体积、不易压缩；	无固定形状，无固定体积，易于压缩。

流体的特性： 不能承受拉应力和剪切力。即使在很小剪力作用下，它都会产生连续不断的变形而形成流动。

1.1 流体的定义与特性

流体的定义： 在任何微小的剪切力的作用下都能够发生连续变形的物质称为流体。 通俗的说法就是，能够流动的物质叫流体。

A *fluid* is a substance which *deforms* continuously under the application of a *shear stress*.

1.2 流体力学发展简史

第一阶段
(16世纪以前)



**流体力学形成的
萌芽阶段**

第二阶段
(16世纪-18世纪中)



**流体力学成为一门
独立学科的基础阶段**

第三阶段
(18世纪中叶-19世纪末)



**流体力学沿着两个方向发展
— 欧拉、伯努利**

第四阶段
(19世纪末以来)



流体力学飞跃发展

1.2 流体力学发展简史 — 第一阶段

流体力学形成的萌芽阶段

- 公元前2286年 - 公元前2278年
大禹治水——疏壅导滞（洪水归于河）
- 公元前300多年
李冰 都江堰——深淘滩，低作堰
- 公元584年 - 公元610年
隋朝 南北大运河、船闸应用
埃及、巴比伦、罗马、希腊、印度等地水利、造船、航海产业发展
- 系统研究
古希腊哲学家阿基米德《论浮体》（公元前250年）奠定了流
体静力学的基础



1.2 流体力学发展简史 — 第二阶段

流体力学成为一门独立学科的基础阶段

- 1586年 斯蒂芬——水静力学原理
- 1650年 帕斯卡——“帕斯卡原理”
- 1612年 伽利略——物体沉浮的基本原理
- 1686年 牛 顿——牛顿内摩擦定律
- 1738年 伯努利——不可压缩理想流体一维流动的伯努利方程
- 1775年 欧拉——理想流体的运动方程即欧拉运动微分方程

1.2 流体力学发展简史 — 第三阶段

流体力学沿着两个方向发展——欧拉（理论）、伯努利（实验）

- 工程技术快速发展，提出很多经验公式

1769年 谢才——谢才公式（计算流速、流量）

1895年 曼宁——曼宁公式（计算谢才系数）

1732年 比托——比托管（测流速）

1797年 文丘里——文丘里管（测流量）

- 理论

1823年纳维，1845年斯托克斯分别提出粘性流体运动方程组
(N-S方程)

1.2 流体力学发展简史 — 第四阶段

流体力学飞跃发展

- 理论分析与试验研究相结合
- 量纲分析和相似性原理起重要作用

1883年 雷诺——雷诺实验（判断流态）

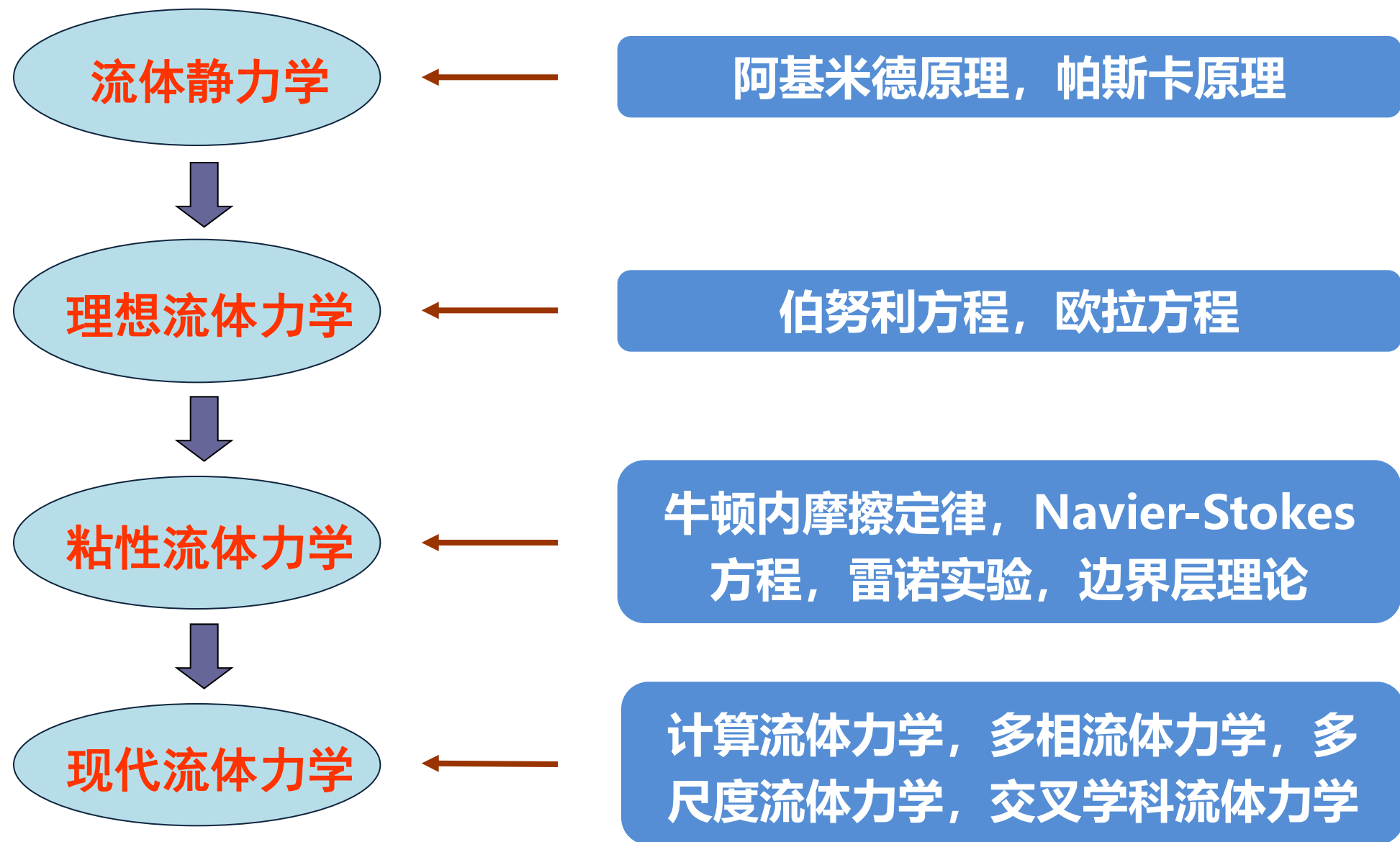
1903年 普朗特——边界层概念（绕流运动）

1933-1934年 尼古拉兹——尼古拉兹实验（确定阻力系数）

.....

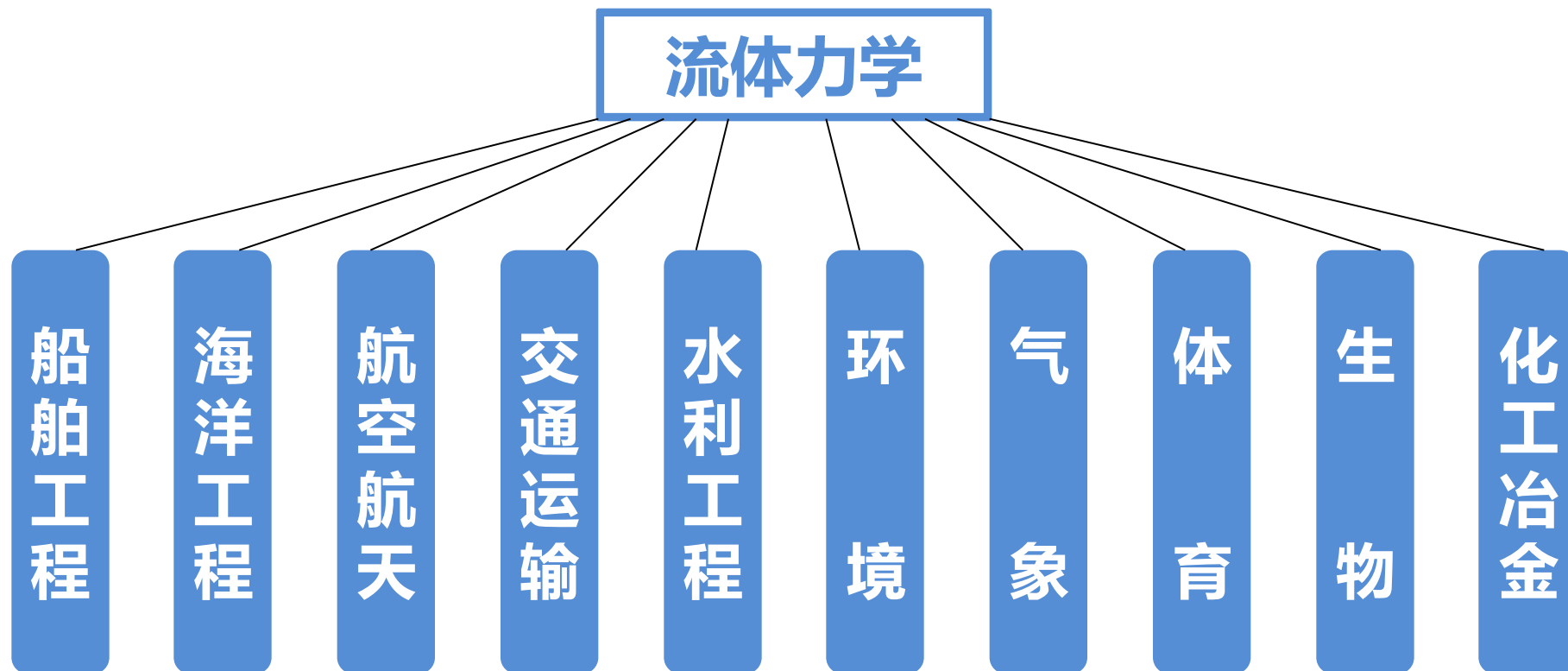
流体力学与相关的邻近学科相互渗透，形成很多新分支和交叉学科

1.2 流体力学发展简史 — 发展过程



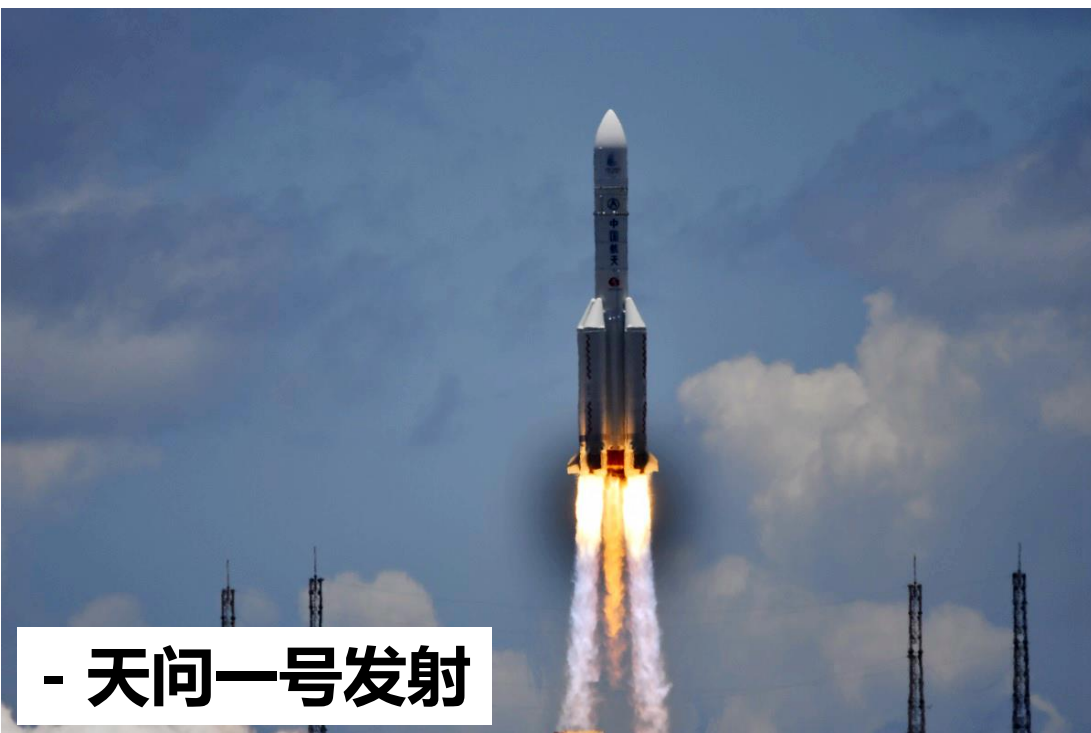
1.3 流体力学的工程应用

流体力学是一门理论性很强的基础性学科，同时又是工程领域和现实生活中应用非常广泛的学科。



1.3 流体力学的工程应用 — 航空航天

中国火星探测计划、探月计划



第五代战斗机



1.3 流体力学的工程应用 — 船舶工程

“南昌号” 驱逐舰



中国人民解放军海军山东舰



1.3 流体力学的工程应用 — 水利、能源

西气东输 – 能源大动脉



南水北调



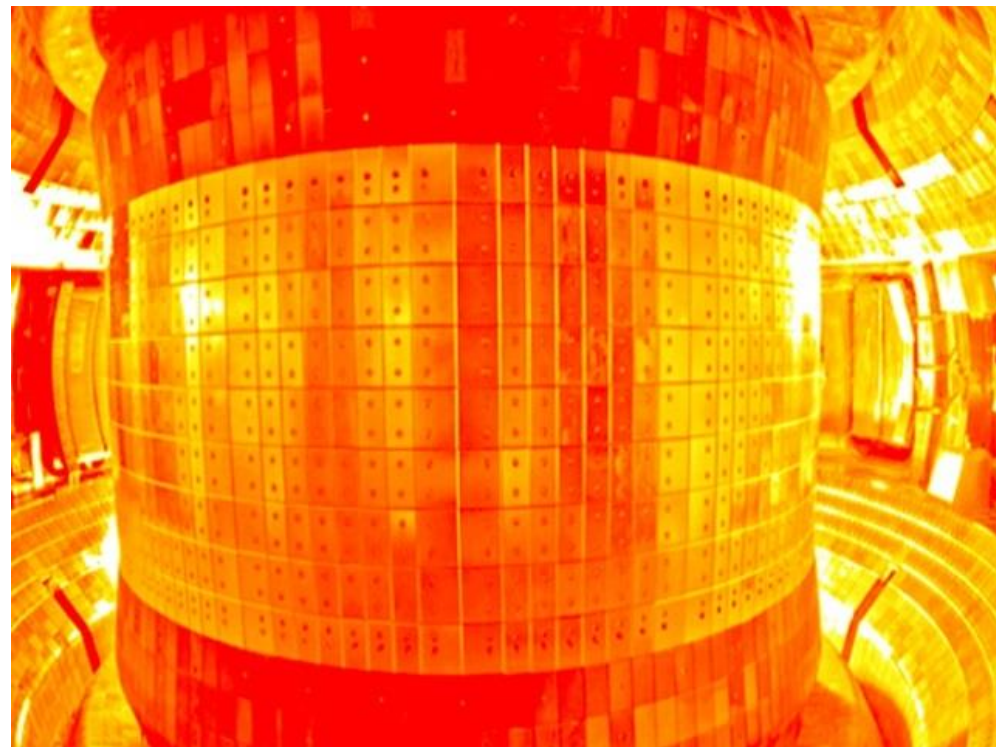
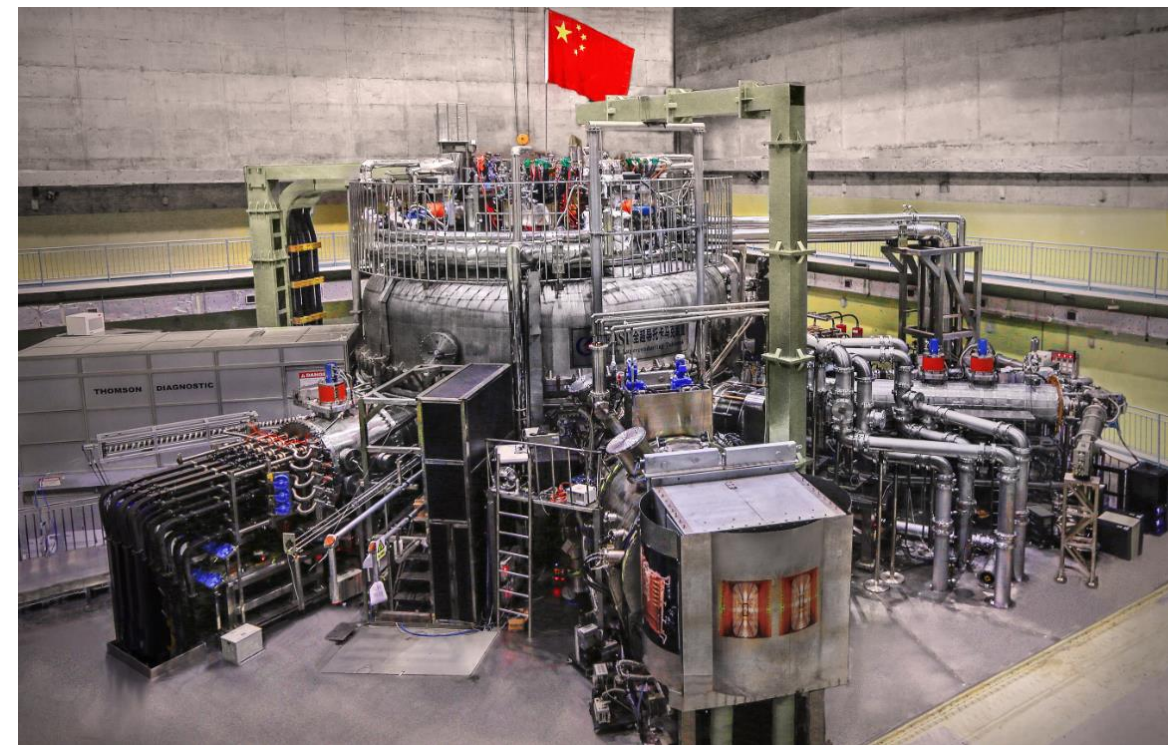
西气东输管线长4200千米，西起塔里木盆地，东至上海。年输气12立方千米，可减少二氧化碳排放2亿吨、减少二氧化硫排放226万吨

南水北调输水总长4350千米，南水北调累计调水418.55亿立方米，惠及人口4.38亿人

1.3 流体力学的工程应用 — 能源

全超导托卡马克聚变实验装置(EAST)

托卡马克装置内部结构



2021年5月28日，EAST创造了1.2亿摄氏度 101 秒等离子体运行的新纪录

托塔马克装置中的磁流体力学、磁流体稳定性问题，是聚变堆稳定运行的关键问题之一

1.3 流体力学的工程应用 — 气象

玛利亚飓风 (2017年)



玛利亚飓风过后



2017年玛利亚席卷波多黎各，累计造成2 975人死亡，带来经济损失430亿美元以上

流体力学作为重要的基础学科，与工程实际、日常生活息息相关

1.4 流体的连续介质假设

一、流体的连续介质假设

定义：不考虑流体分子间的间隙，把流体视为由无数连续分布的流体微团组成的连续介质。

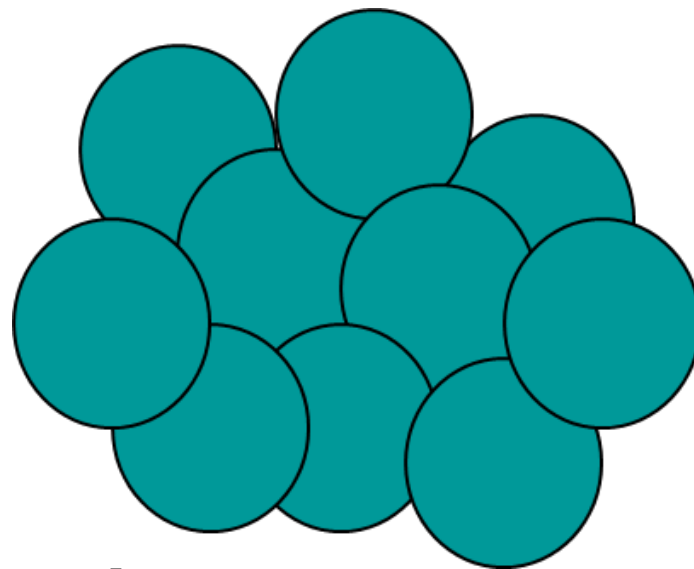
流体微团必须具备的两个条件：

- 必须包含足够多的分子
- 体积必须很小 - 质点

适用范围：

$$L/l > 100$$

L： 物体的特征尺寸； **l：** 流体质点的特征尺寸



1.4 流体的连续介质假设

二、采用流体连续介质假设的优点

1. 避免了流体分子运动的复杂性，只需研究流体的宏观运动。
2. 可以利用数学工具来研究流体的平衡与运动规律。

1.5 流体的主要物理性质 — 密度

密度是表征物体惯性的物理量

1、流体的绝对密度

单位体积流体所具有的质量

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

均匀流体： $\rho = \frac{m}{V}$

单位： kg/m^3

常见流体的密度：

水—— $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

空气—— 1.23 kg/m^3

水银—— $1.36 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$

1.5 流体的主要物理性质 — 密度

2、流体的相对密度

流体的密度与4°C时水的密度的比值

$$S = \frac{\rho_f}{\rho_w}$$

ρ_f — 流体的密度 (kg/m^3)

ρ_w — 4°C时水的密度 (kg/m^3)

3、流体的比容/比体积

单位质量的流体所占有的体积，流体密度的倒数

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

单位: m^3/kg

1.5 流体的主要物理性质 — 压缩性

1、流体的压缩性

流体体积随着压力的增大而缩小的性质

压缩系数

单位压力增加所引起的体积相对变化量

$$\beta_P = -\frac{1}{dp} \frac{dV}{V} \quad (m^2/N)$$

体积模量

$$K_P = \frac{1}{\beta_P} \quad (N/m^2)$$

1.5 流体的主要物理性质 — 膨胀性

2、流体的膨胀性

流体体积随着温度的增大而增大的性质

体积膨胀系数

单位温度增加所引起的体积**相对变化量**

$$\beta_T = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad \text{单位: } 1/K$$

流体的体积膨胀系数还取决于压强。

当温度低于50℃时，水的体胀系数随压强增大而增大，
当高于50℃时，随压强增大而减小。

1.5 流体的主要物理性质 — 压缩性

3、可压缩性流体和不可压缩性流体

可压缩性

流体体积随着**压力**和**温度**的改变而发生变化的性质

➤ 不可压缩流体：

$$\rho = \text{常数}$$

➤ 可压缩流体：

$$\rho \neq \text{常数}$$

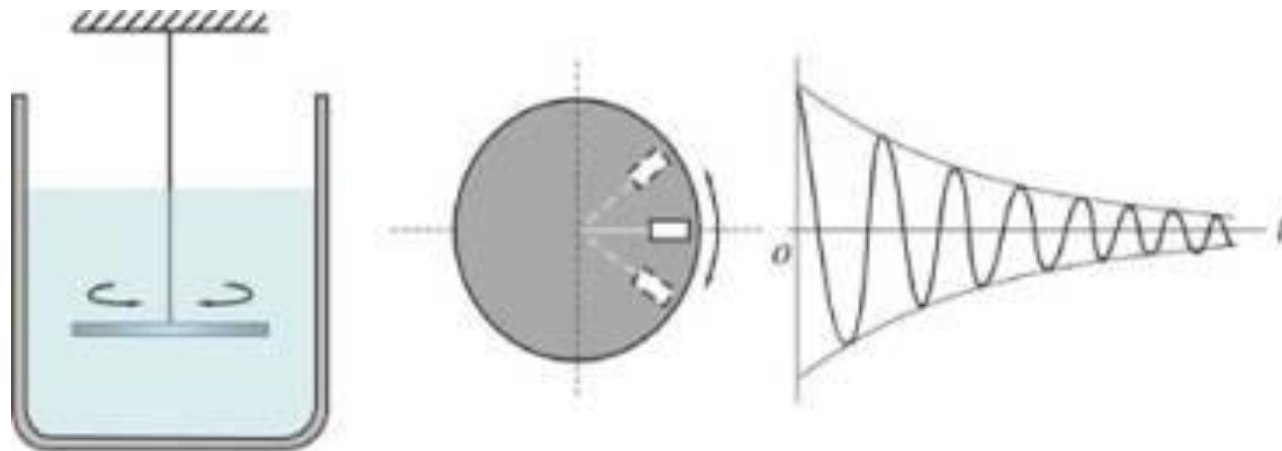
1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

粘性的定义

流体内部各流体微团之间发生相对运动时，流体内部会产生摩擦力（即粘性力）的性质。

库仑实验(1784)

库仑用液体内悬吊圆盘摆动实验证实流体存在内摩擦。



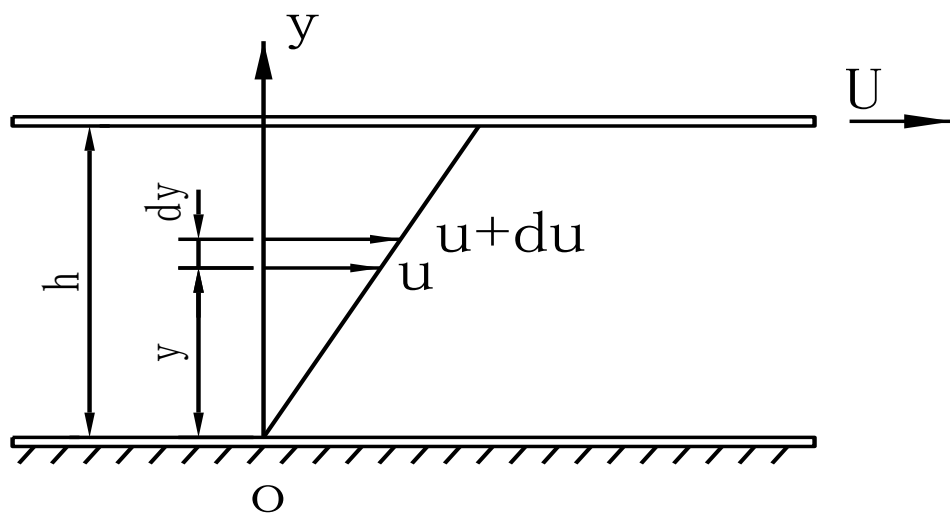
1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

流体粘性所产生的**两种效应**:

- 流体内部各流体微团之间会产生粘性力
- 流体粘附于它所接触的固体表面

2. 牛顿内摩擦定律

牛顿平板实验



当 h 和 u 不是很大时，两平板间沿 y 方向的流速呈线性分布

$$u = \frac{U}{h} y \quad \text{或} \quad du = \frac{U}{h} dy$$

1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

实验表明，对于大多数流体，存在

$$F \propto A \frac{U}{h} = A \frac{du}{dy}$$

引入比例系数 μ ，得：
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

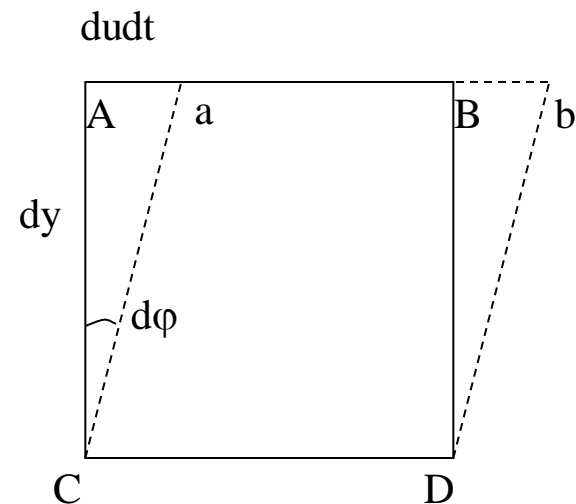
μ --动力粘度，简称粘度

牛顿内摩擦定律表明：

(1) 粘性切应力与速度梯度成正比

(2) 粘性切应力与角变形速率成正比

$$\frac{d\varphi}{dt} = \left(\frac{du}{dy} \right) / dt = \frac{du}{dy}$$



1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

流体粘性大小的度量,由流体流动的内聚力和分子的动量交换引起。

(1) 动力粘度

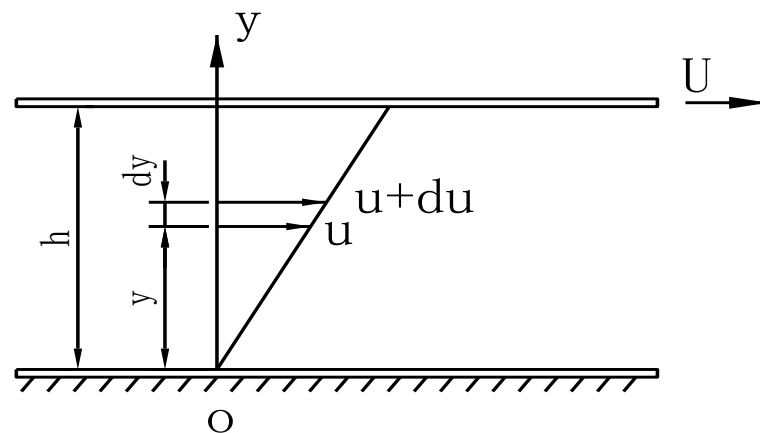
$$\mu \quad (\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}))$$

(2) 运动粘度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2 / \text{s})$$

(3) 粘度的测量

管流法、落球法、旋转法、工业粘度计



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

1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

3. 粘度的影响因素

➤ **温度**对流体粘度的影响很大

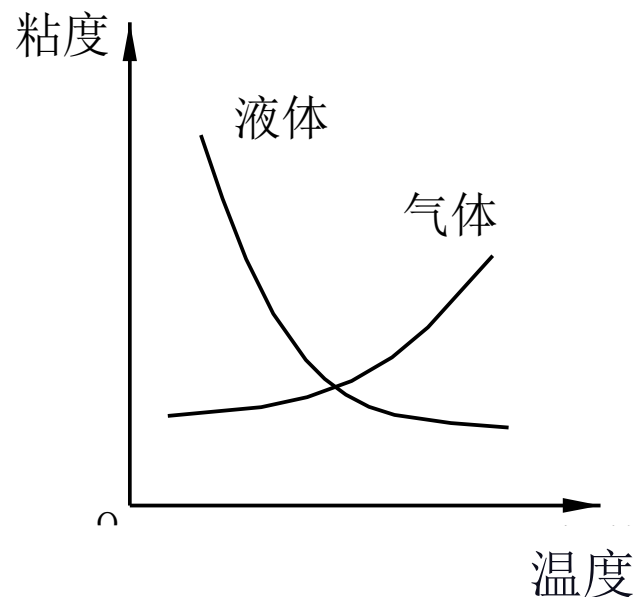
液体：分子内聚力是产生粘度的主要因素。

温度 \uparrow \rightarrow 分子间距 \uparrow \rightarrow 分子吸引力 \downarrow \rightarrow 内摩擦力 \downarrow \rightarrow 粘度 \downarrow

气体：分子热运动引起的动量交换是产生粘度的主要因素。

温度 \uparrow \rightarrow 分子热运动 \uparrow \rightarrow 动量交换 \uparrow \rightarrow 内摩擦力 \uparrow \rightarrow 粘度 \uparrow

➤ **压力**对流体粘度的影响不大，一般忽略不计



1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

4、粘性流体和理想流体

粘性流体 具有粘性的流体 ($\mu \neq 0$)

理想流体 忽略粘性的流体 ($\mu = 0$) - - 理想的流体模型

5、牛顿流体和非牛顿流体

牛顿流体

符合牛顿内摩擦定律的流体

如水、空气、汽油和水银等

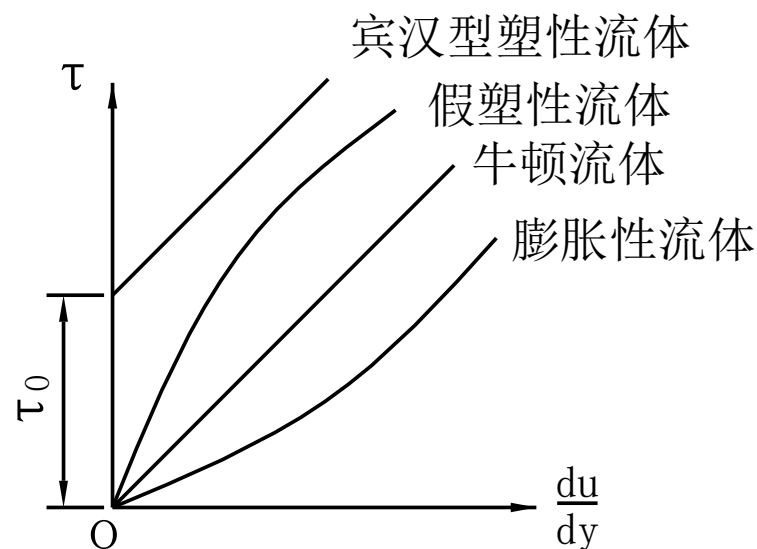
非牛顿流体

不符合牛顿内摩擦定律的流体

宾汉型塑性流体：牙膏

假塑性流体：黏土浆、纸浆

膨胀性流体：油漆、油墨



1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

例1：汽缸内壁的直径 $D=12\text{ cm}$ ，活塞的直径 $d=11.96\text{ cm}$ ，活塞长度 $L=14\text{ cm}$ ，活塞往复运动的速度为 1 m/s ，润滑油的 $\mu=0.1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。求作用在活塞上的粘性力。

解： $T = A\mu \frac{du}{dy}$

$$A = \pi dL = \pi \times 0.1196 \times 0.14 = 0.053\text{ m}^2$$

$$\frac{du}{dy} = \frac{v - 0}{(D - d)/2} = \frac{1 - 0}{(0.12 - 0.1196)/2} = 5 \times 10^3\text{ s}^{-1}$$

$$T = 0.053 \times 0.1 \times 5 \times 10^3 = 26.5\text{ N}$$



注意：面积、速度梯度的取法

1.5 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

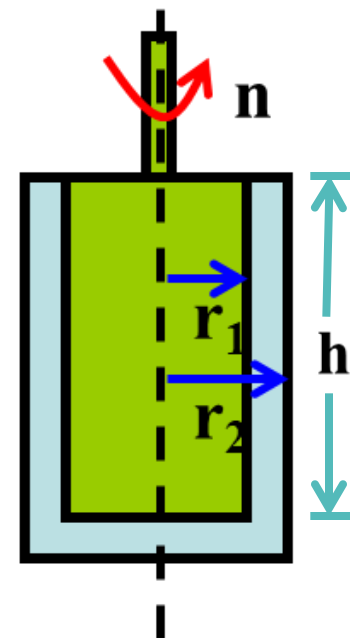
例2：旋转圆筒粘度计，外筒固定，内筒转速 $n=10\text{r/min}$ 。内外筒间充入实验液体。内筒 $r_1=1.93\text{cm}$ ，外筒 $r_2=2\text{cm}$ ，内筒高 $h=7\text{cm}$ ，转轴上扭矩 $M=0.0045\text{N}\cdot\text{m}$ 。求该实验液体的粘度。

解： $\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1 - 0}{r_2 - r_1}$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$M = \tau A r_1 = \tau \cdot 2\pi r_1 h \cdot r_1 = 0.0045$$

得 $\mu = 0.952\text{Pa}\cdot\text{s}$

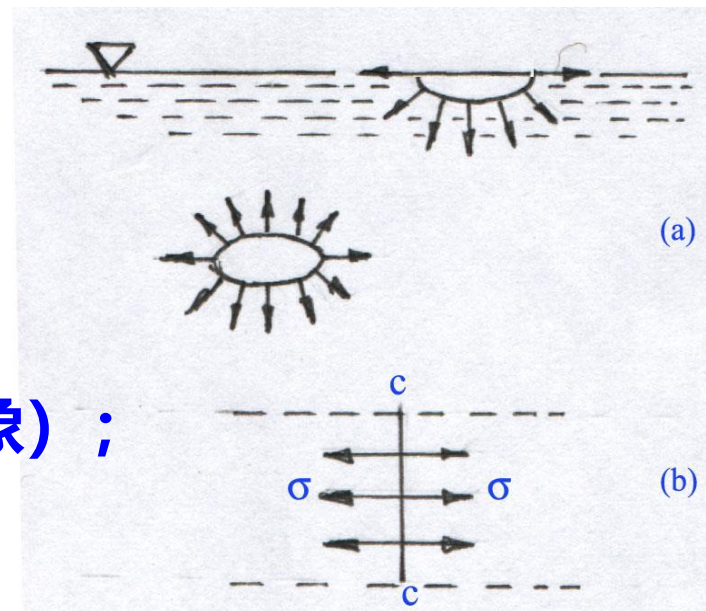


注意：1.面积A的取法；
2.单位统一

1.7 液体的表面张力和毛细现象

1、表面张力

- ◆水滴悬在水龙头出口而不滴落；
- ◆细管中的液体自动上升或下降一个高度（毛细管现象）；
- ◆铁针浮在液面上而不下沉。



1) 影响球

液体分子吸引力的作用范围大约在以3~4倍平均分子距为半径的球形范围内，该球形范围称为“影响球”。

2) 表面层

厚度小于“影响球”半径的液面下的薄层称为表面层。

3) 表面张力

自由表面的合力方向指向液体内部，导致液体表面具有自动缩小的趋势，这种收缩力称为表面张力。

1.7 液体的表面张力和毛细现象

液体分子间的吸引力称为**内聚力**。

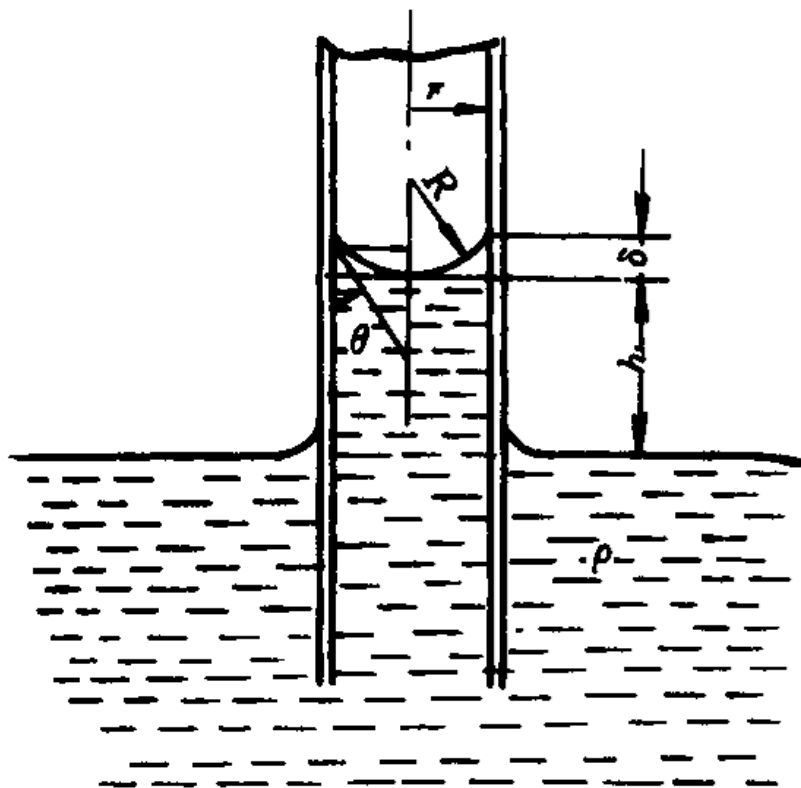
液体与固体分子之间的吸引力，称为**附着力**。

把细管插入液体内，若液体(如水)的内聚力小于附着力，则液体能够润湿固体，液体将在管内上升一定的高度，管内的液体表面呈凹面；

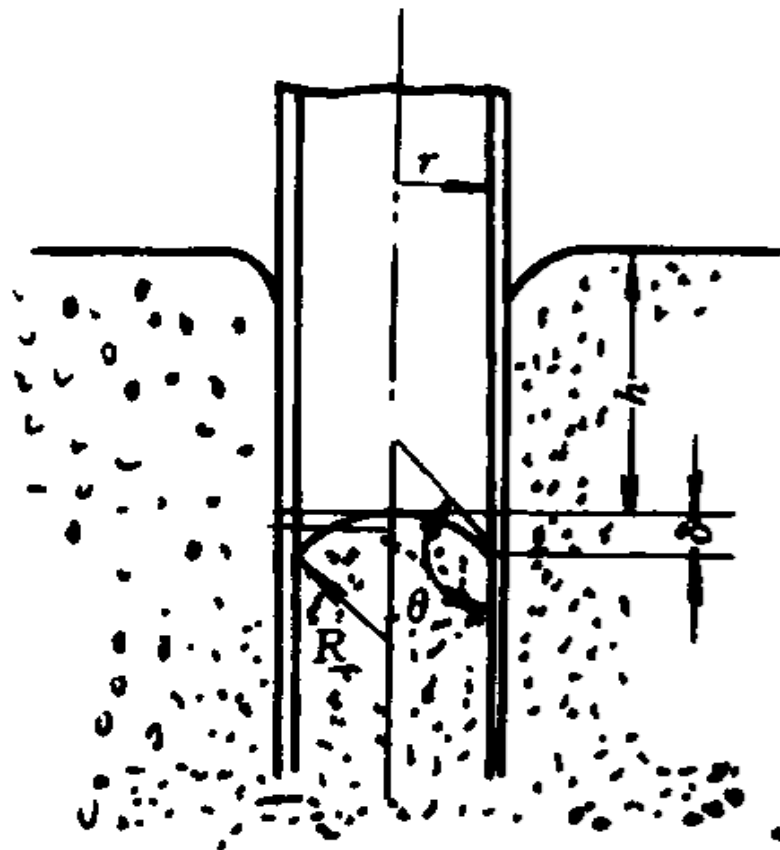
若液体(如水银)的内聚力大于附着力，则液体不能润湿固体，液体将在管内下降一定的高度，管内的液体表面呈凸面。

液体在细管中能上升或下降的现象称为毛细现象。

1.7 液体的表面张力和毛细现象



湿润管壁的液体的液面上升



不湿润管壁的液体的液面下降

本章作业

- 1-8
- 1-13
- 1-18
- 1-25

Thanks!

感谢关注 敬请指导