

工程流体力学

Engineering Fluid Mechanics

南京航空航天大学
能源动力学院

第一章 流体的性质

1、流体力学简介

◎流体对象——流体包括了气体和液体。

◎研究内容——应用物理学的基本原理研究流体受力及其运动规律的学科称为流体力学。

◎研究流体力学的意义—流体是无所不在的

☆天气和气候

☆交通工具: 火车, 飞机, 汽车, 船舶

☆环境

☆生理学和医学

☆体育运动和休闲娱乐

☆工业、农业等等

Weather & Climate

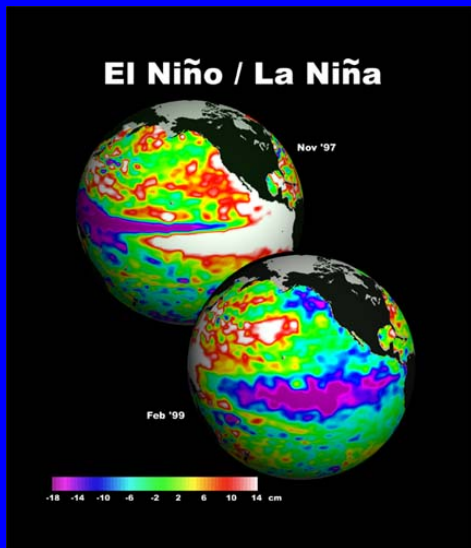
龙卷风



雷暴



全球气候



飓风



Vehicles

飞机



水面舰只



高速列车



潜艇



Environment

空气污染



河流、水利



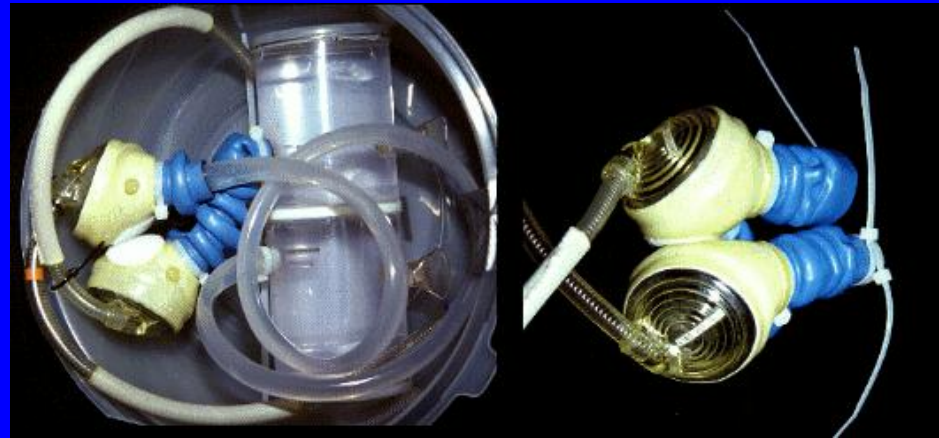
Physiology and Medicine

血泵



A BVS blood pump

心脏辅助装置



Sports & Recreation

水上运动



自行车



赛艇



赛车



冲浪



工业



建筑



农业：灌溉

食品：纯净

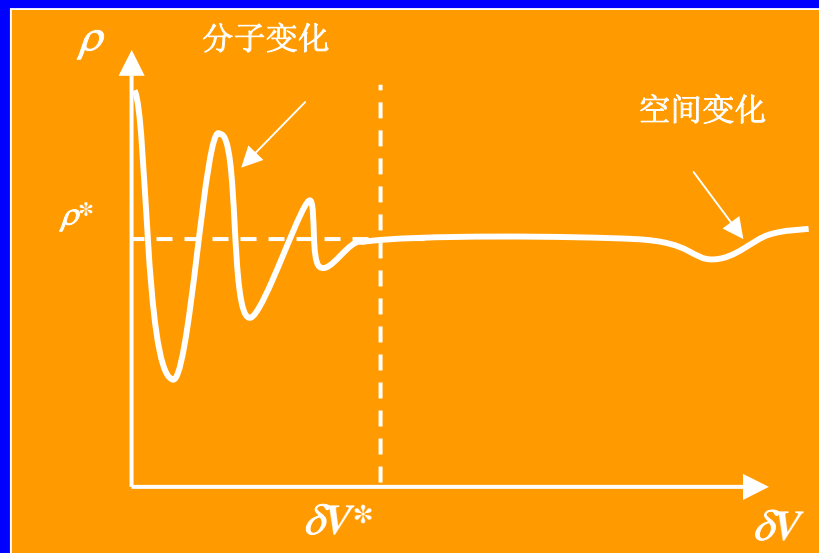
化工：干燥、分离等等

2、连续介质假设

2.1 流体质点的概念

- ◆ 流体分子是不连续的。但流体力学中通常都关心的大量分子的一些平均统计特性。
- ◆ 在流体中任意一个微元体的平均密度可表示为

$$\rho^* = \frac{\delta m}{\delta V}$$



- ◆ 用于描述物理量统计平均的微元应该是使物理量统计平均值与分子的随机运动无关的最小微元，并将该微元定义为流体质点，该微元的平均密度就定义为流体质点的密度：

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \frac{\delta m}{\delta V}$$

- ◆对一般工程问题，完全把流体视为由连续分布的质点构成，而忽略流体质点的体积。认为在空间中的每个点上都有对应的一个流体质点。这就是连续性假设。
- ◆根据流体质点的定义及连续性的假设，流动空间中的物理量就是空间上的连续可微函数。比如密度，就有：

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

2.2 连续性假设的意义

3、流体的性质

3.1 易流动性

3.2 压缩性和膨胀性

★压缩性：——压力增加，体积减小。

体积压缩系数——一定质量的流体在温度不变时，每增加一个单位压力，单位体积流体所产生的体积增加量，即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad [m^2/N]$$

★体积弹性模量

★膨胀性——温度变化，体积也变化（热胀冷缩）。

温度膨胀系数——一定质量的流体保持压力不变时，温度升高1K，单位体积流体的体积增加量，即

$$\beta_t = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad [1/K]$$

- 说明:

(1) 液体的压缩性和膨胀性系数都非常小。

水的压缩系数: $\sim 10^{-9}$

→ 可压缩流体和不可压缩流体。

气体通常作为可压缩流体,

液体通常作为不可压缩流体。

但不是绝对的。

→ 对流体

$M < 0.3 \rightarrow$ 不可压缩流动

$M > 0.3 \rightarrow$ 可压缩流动

$M < 1.0 \rightarrow$ 亚音速流动

$M > 1.0 \rightarrow$ 超音速流动

$M = 0.8 \sim 1.2 \rightarrow$ 跨音速流动

$M > 5.0 \rightarrow$ 高超音速流动

(2) 可压缩流体的密度是变化的，而不可压缩的流体当作是不变的。

(3) 压力和温度的变化显著地影响着气体的压缩性。

气体的可压缩性也是和热力学过程有关的。

例：理想气体在等温压缩下

$$pV = \text{const.}$$

因此， $\beta_p = 1/T$ 。

→如果是绝热压缩。。。。

3.3 粘性

◆粘性的现象

◆粘性的物理本质

流体内部对变形的抵抗，并以内摩擦力的形式表现出来。

这种摩擦力出现在流体内部，因此称为流体的内摩擦力。

这是流体的一种固有的物理属性，称为粘性或粘滞性。产生的内摩擦力称为流体的粘性力。

◆无滑移边界条件—固体边界处，流体与固体的相对速度为零。这就是无滑移边界条件。

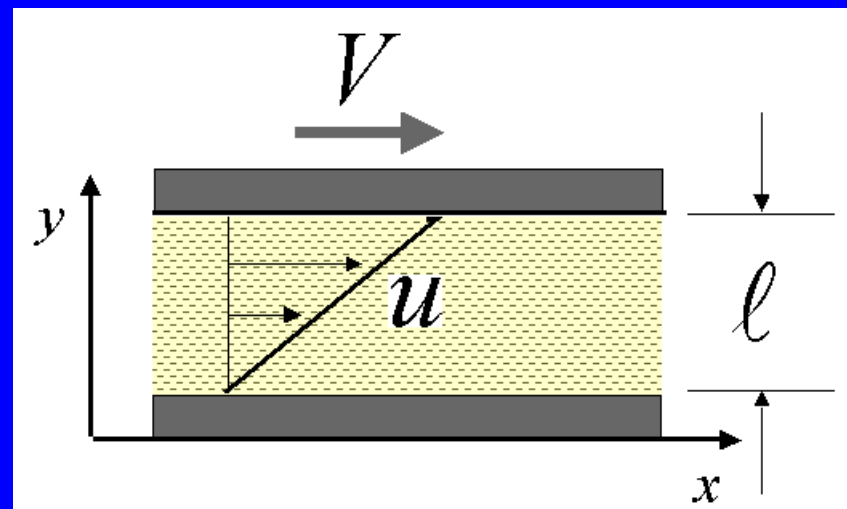
注意：这是在实际情况下。

◆ Newton内摩擦定律

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{l}$$

一般情况下

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



τ 单位面积上的摩擦力，即摩擦应力

◆粘性系数

- 动力学粘性系数（粘度） μ

单位： $Pa \cdot s$

工程上常用泊(p)和厘泊(cp)。

$$1 \text{ p} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ cp} = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

- 运动学粘度 $\nu = \mu / \rho$

单位： m^2/s 。

工程上常用斯。 1斯= $1 \text{ cm}^2/s$ 。

- 粘性系数与温度有关。

气体的随温度升高而升高，
液体则相反。

两个制约因素：分子间的吸引力和
分子的随机运动（也称为热运动）。

- 实际流体与理想流体

（或称：有粘和无粘流体）

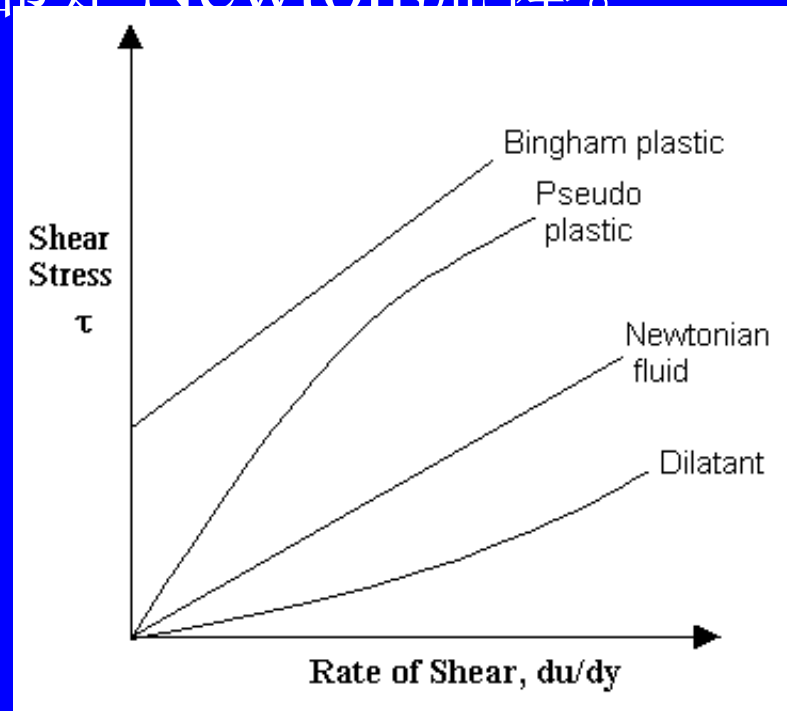
→ 实际流体的粘性不大。

→ 忽略粘性，将大大简化问题。

→ 忽略粘性，最重要的差别是关于固体边界条件。

◆ Newton流体与非Newton流体

- 应力应变之间是线性关系，并且经过原点，这种流体称为Newton流体。
- 不是如此的流体统称为非Newton流体。常见的流体大多数是Newton流体，如水、大多数气体（包括空气）、许多润滑油及低碳氢化合物都是Newton流体。



- 一般，非牛顿流体是复杂的混合体：泥浆、黏糊、凝胶、聚合体、溶液等等。
- 各种非牛顿流体的行为：
 - 与时间无关的行为：
 - ◆ Bingham-弹性流体：对小剪切有抵抗，但在大剪切下容易流动。如：牙膏、凝胶，和某些泥浆。

- ◆ **拟弹性流体:** 大多数非牛顿流体落入这个范畴. 其特点是粘性随着速度梯度的增加而减小. 例如. 聚合体溶液, 血液. 也称为剪切变稀流体 (Shear thinning fluids) 。 在低剪切率 (du/dy) 下, 其粘性比牛顿流体大, 但在大剪切下则变小。
- ◆ **膨胀流体:** 粘性随着速度梯度的增加而增加。 它们不多见, 但是淀粉悬浮物和沙子的行为如此。 也称为剪切增厚流体。

→下面的与剪切持续时间有关。

- ◆触变（或摇溶）流体:当存在剪切力时，其动力粘度随时间而减小。例如，摇溶性凝胶漆。
- ◆震凝:当存在剪切力时，其动力粘度随时间而增大。例如，石膏悬浮在水中时。
- ◆粘弹性流体:某些流体具有弹性性质，使得当剪切力消失时，流体呈收缩状。例如，蛋白。

基本量纲与单位

- 量纲:一般化的“单位”，申明一个物理量的类型；
 - 质量[M], 长度 [L], 时间 [T], 温度 [θ]
- 单位:特殊的量纲，它们也是基本量纲
 - kg, m, s, °K (SI制)

派生量纲与单位

- 力

$$\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \quad (\text{牛顿})$$

- 功 (通过一段距离的力)

$$\text{J} = \text{N} \cdot \text{m} \quad (\text{焦耳})$$

- 能 (单位时间的功)

$$\text{W} = \text{J}/\text{s} \quad (\text{瓦特})$$

- 重度和比重

重度: $\gamma = \rho g$ $[N / m^3]$

比重: 流体密度与标准大气(e.g., 20°C, 1 atm)下的某种流体的比值。

$$SG_{gas} = \frac{\rho_{gas}}{\rho_{air}} = \frac{\rho_{gas}}{1.205 \text{ kg} / \text{m}^3}$$

$$SG_{liquid} = \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{water}} = \frac{\rho_{liquid}}{9790 \text{ kg} / \text{m}^3}$$

压力单位换算表

$$\begin{aligned} 1(\text{Pa}) &= 10^{-5}(\text{bar}) = 1.0197 \times 10^{-5}(\text{kg/cm}^2) \\ &= 10.21 \times 10^{-2}(\text{mmH}_2\text{O}) = 7.5 \times 10^{-3}(\text{mmHg}) \end{aligned}$$

第一章 流体的性质

作业：(PP.10)

Ex.1-1

Ex.1-7

Ex.1-12