

第一章 流体的力学性质

- 1.1 流体、流体质点、连续介质假设
- 1.2 流体的主要物理性质
 - 流体的流动性
 - 流体的可压缩性
 - 流体的粘滞性
 - 表面张力特性
- 1.3 牛顿流体与非牛顿流体

21

固体可承受一定的剪切力而不至于宏观变形或运动；但流体不能！

不管剪切力多大(多小), 流体都会发生宏观运动, 形成旋涡(以后将进一步说明)。



陆士嘉：

“流体经不起搓，
一搓就搓起了涡”



旋涡是真实流体流动的最基本的特征！
谁要是把旋涡运动搞明白了，流体力学就学好了。

旋涡？ / 漩涡？

23

流体的连续介质(Continuum)假设

将流体看成由无限多个流体质点所组成的密集而无间隙的连续介质。

流体质点：不呈现流体个别分子无规则运动的最小部分所包含的大量分子的组合。

• 流体质点：微观上足够大、宏观上足够小、具有一定体积的流体微团；各参数的统计平均特性即为流体质点的宏观特性。

• 流体质点就是使流体统计平均特性为确定值(与分子随机进出无关)的最微小体元 ΔV_i



流体质点

25

1.1 流体、流体质点、连续介质假设

一、流体：

能够流动的物体。流体是相对固体而言的。(?)
液体和气体的总称。(液~气，有何异/同?)

力学中流体的定义：在任何微小的剪切力(shear force)的作用下，都能够发生连续不断地变形的物质称为流体。

流体的基本特点：

- ★无固定的形状: 分子间距大, 吸引力小 (固体?)
- ★能承受压力, 但不能承受拉力
- ★易流动性: 剪切力是真实流体流动的充要条件

22

二、流体质点、连续介质假设

从微观角度看：流体分子之间存在空隙，流体物理量的分布在空间和时间上都是不连续的。

但宏观尺度看，即使是很小的体积中，包含的分子数目也十分巨大。

例: 标准状态下，体积为 $\delta V=10^{-9} \text{ mm}^3$ 的空气，
分子数目： 3×10^7 。

(潜台词：不可能一一考察单个流体分子…)

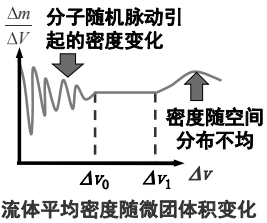
流体力学中，感兴趣的是流体的宏观特性，
因此提出了连续介质假设。

24

连续介质模型的数学表达式：

$$\rho(x, y, z, t) = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V_i} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

- ★流体密度是物性参数
- ★某种流体的密度主要与温度 T 和压强 p 有关，
即 $\rho = \rho(p, T)$



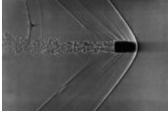
- ◆ 连续介质假设的合理性
- ◆ 采用连续介质假设的好处
 - ★ 无需关心分子的微观运动和个别行为
 - ★ 流场参数为空间坐标的连续函数

26

◆ 教科书P2提“连续介质模型”有3要点，其实归结为只有一个要点：假设流体的任一物理参数Φ(密度、压力、速度、温度等等)，都是空间坐标和时间的连续可导的函数， $\Phi = \Phi(x, y, z, t)$

◆ “连续介质假设”失效的情况

- ★ 外太空气体十分稀薄
 - ★ 激波
 - ★ 微尺度流动
- 例如MEMS (Micro-Electro-Mechanical System, 机电系统)



飞行的子弹、激波、马赫锥



MEMS微流体传感器

27

液体和气体的可压缩性显著不同：

液体的可压缩很小，是难于压缩的流体，而且其可压缩性（ β_p 或 E_v ）受温度和压力的影响也相对较小。

例：20℃和标准大气压下的水， $E_v=2 \times 10^9 \text{Pa}$ ，求当压力增大1atm ($1.013 \times 10^5 \text{Pa}$) 时，体积减小率为多少？

$$E_v = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{dp}{dV/V} \Rightarrow -\frac{dV}{V} = \frac{dp}{E_v} = \frac{1.013 \times 10^5}{2 \times 10^9} \approx 5 \times 10^{-5}$$

29

1.2 流体的力学性质

1.2.1 流体的易流动性（如前所述）

1.2.2 流体的可压缩性（Compressibility）

体积压缩系数：一定温度下，单位压力变化引起的体积的相对收缩。

$$\beta_p = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad \text{恒为正, 单位: } 1/\text{Pa, m}^2/\text{N}$$

β_p 越大~可压缩性越大。

体积弹性模数：单位体积的相对变化所需的压力增量

$$E_v = \frac{1}{\beta_p} = -\frac{dp}{dV/V} \quad \text{恒为正, 单位与压力同: Pa}$$

E_v 越大~可压缩性越小。

和流体密度相似， β_p 和 E_v 也都是物性参数。

28

气体的压缩性与压缩的热力学过程有关，受具体过程参数的影响也较大，但整体上压缩性表现较易于压缩。

例：理想气体多变过程

$$pV^n = \text{const} \quad npV^{n-1} + V^n dp = 0 \quad np = -V \frac{dp}{dV}$$
$$(E_v)_{\text{等温压缩, } n=1} = -\frac{dp}{dV/V} = p \quad (E_v)_{\text{等熵压缩, } n=k} = -\frac{dp}{dV/V} = kp$$

标况下，空气： $E_v \sim 10^5 \text{Pa}$ ；水： $E_v = 2 \times 10^9 \text{Pa}$ ，相差几个数量级。

液体和气体的可压缩性显著不同



30