

工程流体力学和热工基础

授课对象：面向机械工程专业

授课教师和班级：

I 班（周二第 6,7,8 节；周四第 7,8 节）西 1-405 胡亮 / 阮晓东 / 傅新

II 班（周二第 3,4,5 节；周五第 1,2 节）西 1-408 阮晓东 / 胡亮 / 傅新

本课件仅供选课学生使用，未经允许禁止对外拷贝，上传网站

时间安排

	I 班		
上课时间	学时数	任课老师	内容
5 月 06 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	阮晓东	流体力学
5 月 11 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	阮晓东	流体力学
5 月 13 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	阮晓东	流体力学
5 月 18 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	阮晓东	流体力学
5 月 20 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	阮晓东	流体力学
5 月 25 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	阮晓东	流体力学
5 月 27 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	阮晓东	流体力学
6 月 01 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	阮晓东	流体力学
6 月 03 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	阮晓东	流体力学
6 月 08 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	傅新	工程应用
6 月 10 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	胡亮	热工基础
6 月 15 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	胡亮	热工基础
6 月 17 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	胡亮	热工基础
6 月 22 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	胡亮	热工基础
6 月 24 日周四（ 14:05-15:40 ）	2	胡亮	热工基础
6 月 29 日周二（ 13:15-15:40 ）	3	胡亮	热工基础

	II 班		
上课时间	学时数	任课老师	内容
5 月 07 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	阮晓东	流体力学
5 月 11 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	阮晓东	流体力学
5 月 14 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	阮晓东	流体力学
5 月 18 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	阮晓东	流体力学
5 月 21 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	阮晓东	流体力学
5 月 25 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	阮晓东	流体力学
5 月 28 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	阮晓东	流体力学
6 月 01 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	阮晓东	流体力学
6 月 04 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	阮晓东	流体力学
6 月 08 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	傅新	工程应用
6 月 11 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	胡亮	热工基础
6 月 15 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	胡亮	热工基础
6 月 18 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	胡亮	热工基础
6 月 22 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	胡亮	热工基础
6 月 25 日周五（ 08:00-09:35 ）	2	胡亮	热工基础
6 月 29 日周二（ 09:50-12:15 ）	3	胡亮	热工基础

工程流体力学

教材：《流体力学》（高教）张也影

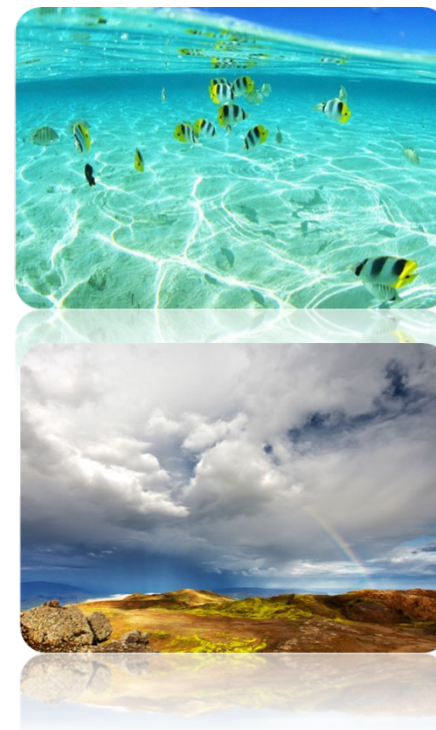
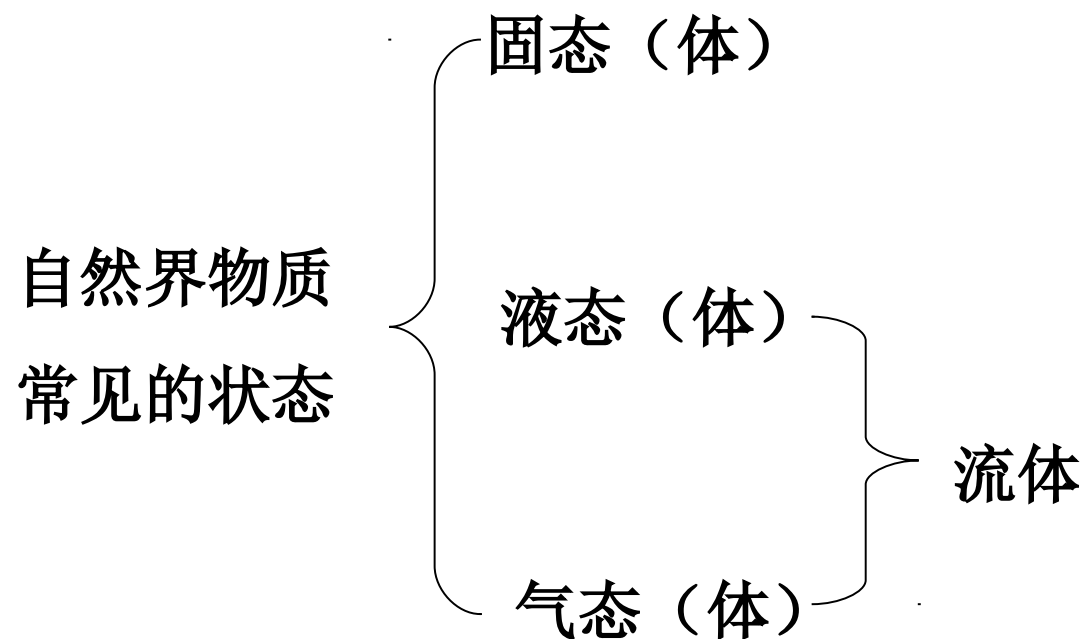
参考书目：

1. 《流体力学》（清华）林建忠等编
2. 《工程流体力学》（机工）高殿荣
3. 《液压流体力学》（国防）金朝铭

第一章 绪论

1-1 工程流体力学的研究对象、任务和方法

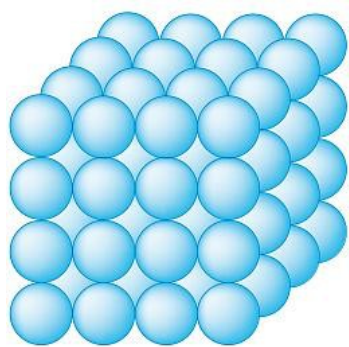
1.1.1 流体的物理属性



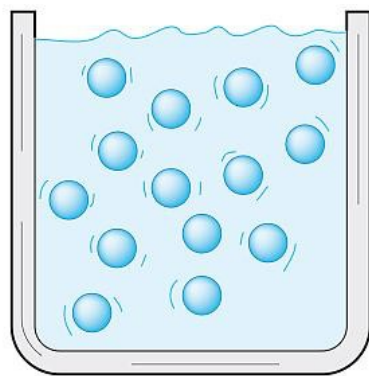
流体和固体都具有物质的基本属性：

1. 由大量的分子组成；
2. 分子不断作随机热运动；
3. 分子与分子之间存在着分子力的作用。

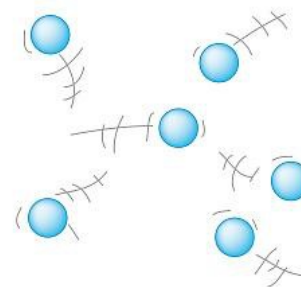
—— 三个基本属性表现在气体、液体与固体方面有量和质的区别。



固体



液体



气体

流体与固体的特性区别

➤宏观表象：体积、形状

➤力学性能

流体不能承受拉力和剪切力——易流动性

固体可以承受拉力、压力和剪切力

易流动性是流体区别于固体的根本标志

气体与液体的特性区别

➤液体有一定的体积，存在一个自由液面；气体能充满任意形状的容器，无一定的体积，不存在自由液面

➤气体易于压缩，而液体难于压缩

可压缩性是气体区别于液体的根本标志

王振东：不尽长江滚滚流——漫话流体与流动性



何处望神州？
满眼风光北固楼。
千古兴亡多少事？
悠悠，不尽长江滚滚流！

辛弃疾（1140～1207年）在宋宁宗嘉泰四年（1204年）三月赴镇江任知府，登临北固亭时，所写的《南乡子·登京口北固亭有怀》一词的上半阙。词人以流体的流动抒发了感怆雄壮的忧虑之情，以长流不息的江水表达了胸中翻滚的不尽愁思和感慨。

王振东：不尽长江滚滚流——漫话流体与流动性

唐宋诗词的名家都善于用流体的流动性来表达各种情感，写出了一些脍炙人口的精美绝句：

李白（**701**～**762**年）《金陵酒肆留别》诗

请君试问东流水，别意与之谁短长。

《梦游天姥吟留别》诗

世间行乐亦如此，古来万事东流水。

《将进酒》诗

君不见黄河之水天上来，奔流到海不复回。

杜甫（**712**～**770**年）《登高》诗

无边落木萧萧下，不尽长江滚滚来。

王振东：不尽长江滚滚流——漫话流体与流动性

唐宋诗词的名家都善于用流体的流动性来表达各种情感，写出了一些脍炙人口的精美绝句：

李煜（**937 ~ 978** 年）《虞美人》词

问君能有几多愁？恰似一江春水向东流。

寇準（**961 ~ 1023** 年）《江南春二首（其二）》诗

日落汀州一望时，柔情不断如春水。

王安石（**1021 ~ 1086** 年）《桂枝香·金陵怀古》
词

六朝旧事随流水，但寒烟衰草凝绿。

苏轼（**1140 ~ 1207** 年）《念奴娇·赤壁怀古》词

千古风流人物，一时多少豪雄。

1.1.2 流体力学的研究内容和方法

- a. 流体 （研究的对象）
- b. 力学 （研究物体与物体的作用和反作用）
- c. 工程 （流体力学在工程上的应用）

定义：工程流体力学是以流体为对象，主要研究流体和流体及流体和固体间的作用和反作用，并把这些规律运用到有关工程技术部门中去的力学分支。

方法：理论、实验、计算

解决流体力学问题方法：

理论——对实际流动作适当简化，建立力学、

数学模型，寻求精确或近似解；

Analytical Fluid Dynamics

实验——流动现象的流场观测、实验室模拟

实验论证等；

Experimental Fluid Dynamic

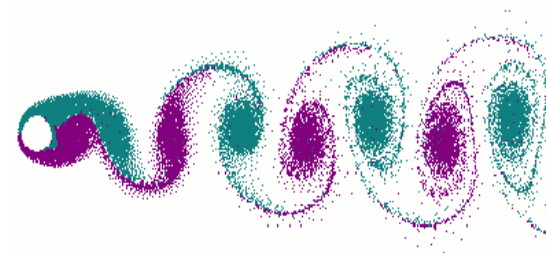
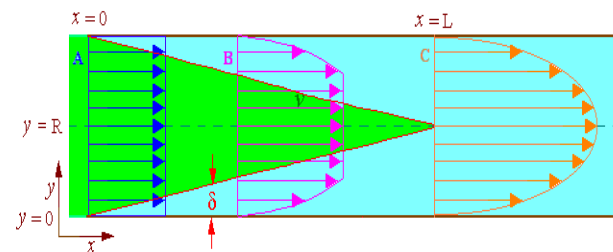
计算——利用计算机进行流动的数值模拟和

数值计算。

Computational Fluid Dynamics

三种方法相辅相成、相互促进、缺一不可

。



见 Tacoma 大桥坍塌祸首冯卡曼涡脱

(查阅相关文献)

工程流体力学在工程实践中的应用：

日常生活：风扇、空调、冰箱涉及空气及制冷介质的流动

建筑领域：上下水管道、采暖通风管道的设计；分析风对高层建筑的影响

流体机械：泵、风机、透平机

水利工程：大坝等水利枢纽工程的设计和建设

机械制造等设备：液压、气压的传动系统

航空航天：飞行器设计、机翼绕流、升力和阻力的计算

大气、海洋、航运、石油、化工、能源、环保…….

根据流体力学在各个工程领域的应用，主要分为以下三类：

水利类流体力学：面向水工、水动、海洋等

土木类流体力学：面向市政、工民建、道桥、城市防洪等

机械类流体力学：面向机械、冶金、水机等

流体力学学习方法

掌握基本概念；多做练习、独立思考完成

学习的难点与对策

1. 新概念多、抽象、不易理解： 认真听课，看书。
2. 推演繁难： 分析推导要领，不要求各过程死记硬背。
3. 偏微分方程（组）名目繁多： 重在理解物理意义，适用范围、条件，主要求解方法。

1-2 流体质点与连续介质概念

微观：流体是由大量做无规则运动的分子组成的，分子之间存在空隙。

标准状况下，

1cm³ 液体 约 3.3×10^{22} 个分子，相邻分子间距约为 3.1×10^{-8} cm 。

1cm³ 气体 约 2.7×10^{19} 个分子，相邻分子间距约为 3.2×10^{-7} cm 。

宏观：考虑宏观特性，在流动空间和时间上所采用的一切特征尺度和特征时间都比分子距离和分子碰撞时间大得多。

流体力学主要是研究流体的宏观规律，不追究流体个别分子的微观运动，是研究大量分子的平均特性。

流体质点：

1. 流体质点的宏观尺寸非常小；
2. 流体质点的微观尺寸非常大；
3. 流体质点具有空间和时间的宏观物理量；
4. 流体质点间没有空隙，连续不断。

连续介质模型假设

1753 年欧拉首先建立。

基本思想：

- (1) 流体质点看作是流体介质的基本单位；
- (2) 流体质点与质点间没有间隙，流体由无穷多个、无穷小、连绵不断的流体质点所组成；
- (3) 运动的物理量都是空间坐标和时间的连续函数的一种假设模型：
$$u = u(t, x, y, z)。$$

优点：

- (1) 排除了分子运动的复杂性。
- (2) 物理量作为时空连续函数，则可以利用连续函数这一数学工具来研究问题。

连续介质模型的适用范围：

判断式：

$$l \ll d \ll L$$

d 为流体质点的特征尺度；
 l 为流体分子运动的平均自由程；
 L 为所研究流动的特征长度。

什么情况下连续介质模型不适用



流体物理量

流场：流体所占据的空间。

流场中，任何瞬时和每一空间点上都有一个流体质点存在，流体质点没有空间尺寸，但具有宏观物理量（如密度、速度、压力、温度等），这些宏观物理量是时间和空间的函数。

$$u = u(t, x, y, z)$$

1-3 流体的密度、重度、比体积和比重

密度（ ρ ）：给定点上流体的密度是指该点上流体质点的密度

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV}$$

比体积（ v ） $v=1/\rho$

重度（ γ ）： $\gamma=\rho g$

相对密度即比重（ d ）：物体重量与同体积 4°C 蒸馏水重量之比，是一个无量纲数。

1-4 流体的可压缩性和热膨胀性

定义：

1. 流体的可压缩性

2. 流体的热膨胀性

流体具有压缩性和膨胀性，气体较液体显著。

流体压缩性和膨胀性的系数表示法

$$V = V(T, p)$$

p 不变, $T \uparrow$, $V \uparrow$; T 不变, $p \uparrow$, $V \downarrow$

1. 流体的体胀系数 (膨胀系数)

$$\alpha_v = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V / V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (\text{K}^{-1})$$

物理意义: 当压强不变时, 每增加单位温度所产生的流体体积相对膨胀率或密度的相对减小率。

气体: $\alpha_v = \frac{1}{T} \quad (\text{K}^{-1})$

如何推导



液体: 随温度变化很小, 10^{-4} 数量级。

2. 流体的（等温）压缩系数（率）

$$\kappa_T = \lim_{\Delta p \rightarrow 0} \frac{-\Delta V / V}{\Delta p} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (\text{Pa}^{-1})$$

物理意义：当温度不变时，每增加单位压强所产生的流体体积相对缩小率或密度的相对增加率。

气体： $\kappa_T = \frac{1}{p}$ (Pa^{-1})

如何推导



液体：随压强变化很小， 0.5×10^{-4} 数量级。

3. 流体的体积弹性模量——工程上重要的概念

$$K = \frac{1}{\kappa_T} = -V \frac{dp}{dV} \quad (\text{Pa})$$

物理意义：当温度不变时，每产生一个单位体积或密度相对变化率所需要的压强变化量。

当 K 大，流体可压缩性小，反之，可压缩性大。

液体：压缩率小，体积弹性模量很大，如果混入气体， K 大大的下降。见例。

例:

如果液体中混有不溶解的气体, 弹性模量将有很大的降低。设体积为 V_m 的混气油液中, 如果气体的体积为 V_g , 则纯油液的体积 $V_f = V_m - V_g$, 当压强增加 Δp 时, 混气油液的体积减小 ΔV_m , 应为气体体积减小 ΔV_g 和纯油体积减小 ΔV_f 的总和, 即

$$\Delta V_m = \Delta V_g + \Delta V_f$$

因为体积弹性模量为: $K_m = -\frac{V_m \Delta p}{\Delta V_m}$, $K_g = -\frac{V_g \Delta p}{\Delta V_g}$ 及 $K_f = -\frac{V_f \Delta p}{\Delta V_f}$, 代入上式得

$$\frac{V_m \Delta p}{K_m} = \frac{V_g \Delta p}{K_g} + \frac{V_f \Delta p}{K_f}$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{K_m} = \frac{V_g}{V_m} \left(\frac{1}{K_g} \right) + \frac{V_f}{V_m} \left(\frac{1}{K_f} \right) = \frac{V_g}{V_m} \left(\frac{1}{K_g} \right) + \left(1 - \frac{V_g}{V_m} \right) \left(\frac{1}{K_f} \right)$$

例如某油液 ($K_f = 1.8 \times 10^8 \text{MPa}$), 混有一定的气体, 作用 10MPa 压强后油液的温度不变, 则 $K_g = 10 \text{MPa}$, 这样, 混气油液的体积弹性模量 K_m 为

$$\frac{1}{K_m} = \frac{V_g/V_m}{10} + \frac{1 - V_g/V_m}{1.8 \times 10^8}$$

由此可以计算出不同混入气体量时的体积弹性模量。上例说明在一定压强下, 油液夹带 1% 气体时弹性模量降为纯油的 35.6%, 夹带 4% 气体时则仅为纯油液的 12.2%。由此可见, 在需要大体积弹性模量的场合, 必需严格排除油液中夹带的气体。实际计算中常用 $K = 7000 \sim 10000 \text{MPa}$ 。

不可压缩性流体的假设

将可压缩性很小的流体近似看成不可压缩流体。

$$\rho = \text{常数}$$

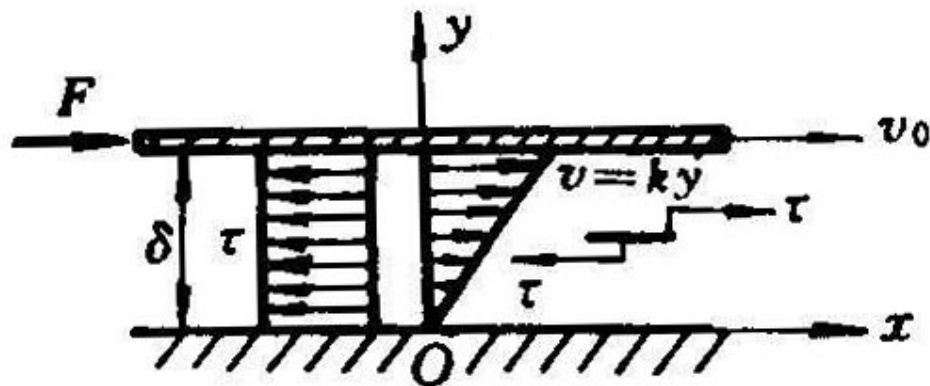
由 K 的定义，可近似认为：
$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta p}{K}$$

要使密度为常数，

1. K 很大，为不可压缩流体，如液体；
2. P 变化很小，低速气体流动，小于 100m/s，流体的不可压缩流动。

1-5 流体的粘性

1.5.1 流体的粘性



流体的粘性

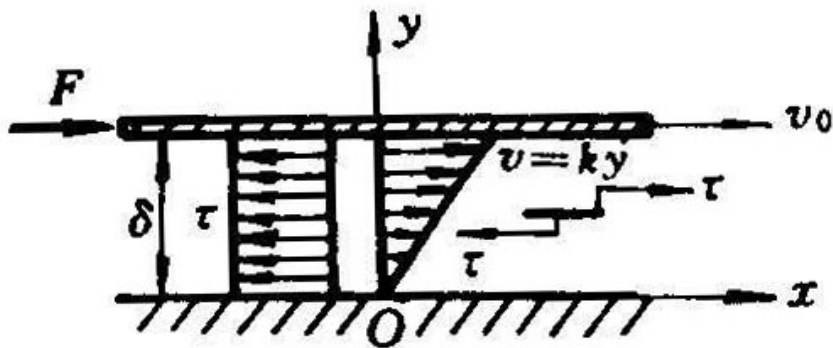
粘性的定义：流体运动时内部产生内摩擦力（切应力）的这种性质称流体的粘性。

粘性是流体本身的一种属性，只有当流层发生相对运动，产生内摩擦力时，粘性才表现出来。静止流体不呈现粘性。

粘性产生的原因:

1. 分子间相互吸引力
2. 分子不规则热运动的动量交换

1.5.2 牛顿粘性定律



流体的粘性

$$\tau = \pm \mu \frac{dv}{dy}$$

τ 为粘性切应力;
 μ 为动力粘度或动力粘性系数;
 dv/dy 为剪切应变率。

牛顿经实验研究发现, F 的大小与平移速度 v_0 及接触的面积 A 成正比, 与两板间距成反比, 而与接触面上的压强无关, 即

$$F \propto A \frac{v_0}{\delta}$$

—— 牛顿内摩擦定律

注意

1、固体摩擦力与流体内摩擦力不同点

2、粘性力（内聚力）、附着力和表面张力区分

- **内聚力**：分子间的相互吸引力；
- **附着力**：两种不同物质接触部分的相互吸力；
- **表面张力**：液体表面由于分子引力不均衡而产生。



在相距 $h=0.06\text{m}$ 的两个固定平行平板中间放置另一块薄板，在薄板的上下分别放有不同黏度的油，并且一种油的黏度是另一种油的黏度的 2 倍。当薄板以匀速 $v=0.3\text{m/s}$ 被拖动时，每平方米受合力 $F=29\text{N}$ ，求两种油的黏度各是多少？

解：设薄板上层油的黏度为 μ ，则下层为 2μ ，并假定缝隙中的速度按线性分布，薄板与流体接触的面积为 A 。

由牛顿内摩擦定律可知，上部流体对板的阻碍力为

$$F_1 = \mu A \frac{dv}{dn} = \mu A \frac{v}{(h/2)}$$

其作用方向与薄板的运动方向相反。

下部流体对板的作用力为

$$F_2 = 2\mu A \frac{dv}{dn} = 2\mu A \frac{v}{(h/2)}$$

其作用方向仍与薄板的运动方向相反。

薄板匀速运动，受力处于平衡状态，必有

$$F = F_1 + F_2$$

即

$$\mu A \frac{v}{(h/2)} + 2\mu A \frac{v}{(h/2)} = F$$

或

$$\mu = \frac{h}{6v} \times \frac{F}{h}$$

代入相关数据得 $\mu = 0.97\text{Pa} \cdot \text{s}$ ，这是薄板上层油的黏度。薄板下层油的黏度 $2\mu = 1.94\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

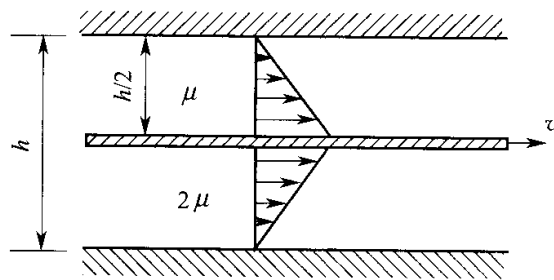


图 2-2 例 2-3 图

1.5.3 流体的粘度

定义：流体粘性的大小用粘度来量度。

分类：

1. 动力粘度 μ

表示单位速度梯度下流体内部摩擦应力的
大小，直接反应了流体粘性的大小，单位为

$$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2=\text{Pa}\cdot\text{s}。$$

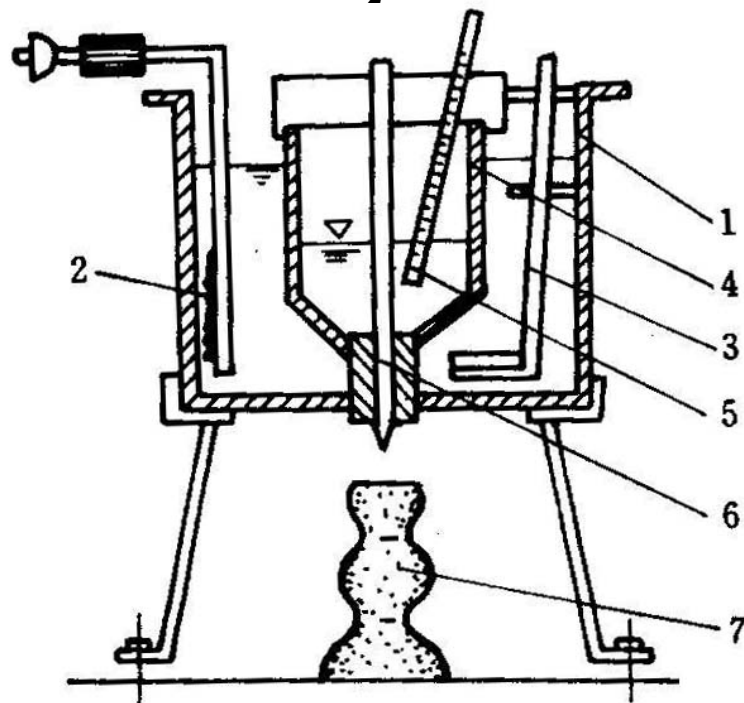
2. 运动粘度 ν ：

动力粘度 μ 与流体密度 ρ 的比值， $\frac{\mu}{\rho}$

ν 的单位 m^2/s 。

3. 恩氏粘度 r

将 200ml 待测液体装入恩氏粘度计中，测定它在某一温度下通过底部 2.8mm 直径标准小孔口，流尽所需的时间 T_1 ，再将 200ml 的蒸馏水加入同一恩氏粘度计中，在 20°C 标准温度下，测出流尽所需的时间 T_2 （约 51 秒）。



- 1 — 容器
- 2 — 恒温加热器
- 3 — 搅拌器
- 4 — 待测液体容器
- 5 — 温度计
- 6 — 柱塞
- 7 — 量杯

恩氏粘度计

3. 恩氏粘度 r

T_1 与 T_2 的比值就是该液体在该温度下的恩氏粘度。即

$$r = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{无量纲数}$$

—— 恩氏粘度一种相对粘度，它仅适用于液体。是被测液体与水的粘度的比较值。

与运动粘度的关系有经验公式：

$$\nu = (7.31r - \frac{6.31}{r})\text{mm}^2/\text{s}$$

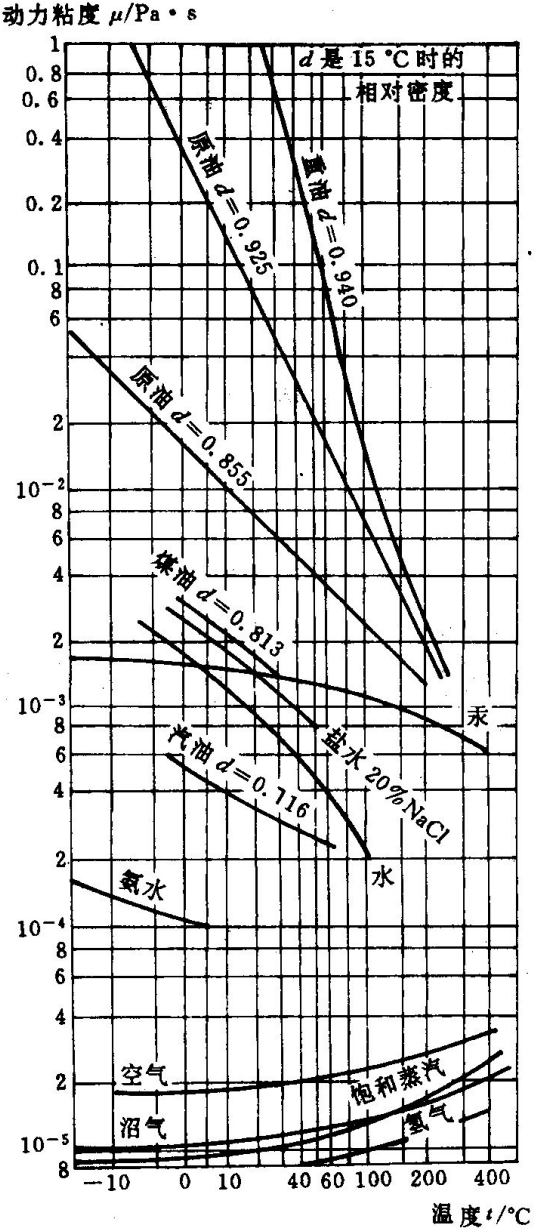
4. 机械油牌号

所谓 XX 号机械油就表示该机械油在 50°C 时的运动粘度约为纯水 20.2°C 时的运动粘度 XX 倍。

我国现行机械油的新牌号以 40°C 为标准，新牌号 N32 ， N46 ， N68 分别对应旧牌号 20 ， 30 ， 40 等。

粘度的变化规律

流体粘度随温度和压强而变化，由于分子结构和分子运动机理的不同，液体和气体的变化规律是截然相反的。



流体的动力粘度曲线

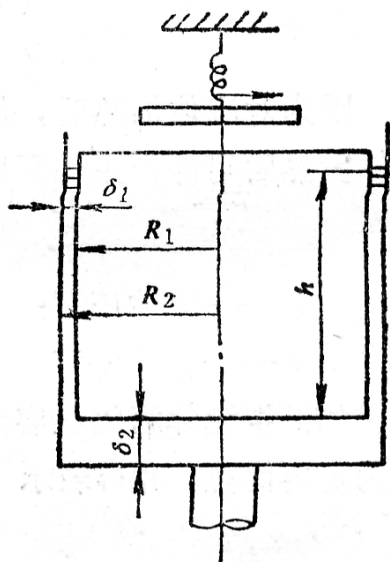
粘度的变化规律

液体粘度主要取决于分子间的距离和分子引力。当温度升高或压强降低时液体膨胀，分子间距增加，分子引力减小，粘度降低。反之增大。

气体分子间距较大，内聚力较小，分子运动较剧烈，粘性主要取决于流层间分子的动量交换。当温度升高时，分子运动加剧，所以粘性增大；而当压强提高时，粘度减小。

粘度的测定

1. 直接测定法 转筒式、毛细血管式等粘度计（见例1-2)
2. 间接测定法 恩氏粘度计



旋转式粘度计

例 旋转式粘度计由内外圆筒构成，它们的半径各为 R_1 及 R_2 ，内圆筒用扭力弹簧固定，外圆筒以等角速度 ω 旋转，两圆筒的径向间隙为 δ_1 ，底面间隙为 δ_2 ，内外圆筒间充入被测液体至 h 高度，如果扭力弹簧上扭矩为 T ，求被测液体的粘度 μ 。

解 因为间隙 δ_1 及 δ_2 均很小，间隙中速度成线性分布，所以径向间隙中速度梯度 $\frac{du}{dr} = \frac{\omega R_2}{\delta_1}$ ，剪切应力 τ_1 为

$$\tau_1 = \mu \frac{du}{dr} = \mu \frac{\omega R_2}{\delta_1}$$

由此，内圆筒侧面上剪切应力引起的扭矩 T_1 为

$$T_1 = A \tau_1 R_1 = (2\pi R_1 h) \left(\mu \frac{\omega R_2}{\delta_1} \right) R_1 = 2\pi R_1^2 \frac{\omega R_2}{\delta_1} \mu h$$

内圆筒底部的剪切应力

$$\tau_2 = \mu \frac{du}{dz} = \mu \frac{\omega R}{\delta_2}$$

式中， R 为变量，由此引起的扭矩 T_2 为

$$T_2 = \int dT_2 = \int \tau_2 R dA = \int \int \mu \frac{\omega R^2}{\delta_2} R dR d\theta$$

即

$$T_2 = \mu \frac{\omega}{\delta_2} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} R^3 dR d\theta = \frac{\pi}{2\delta_2} \mu \omega R_1^4$$

总扭矩 T 为

$$T = T_1 + T_2 = \frac{2\pi R_1^2 R_2 h \omega \mu}{\delta_1} + \frac{\pi R_1^4 \omega \mu}{2\delta_2}$$

由此可得被测液体的粘度 μ 为

$$\mu = \frac{2\delta_1 \delta_2 T}{\pi R_1^2 \omega (4R_2 \delta_2 h + R_1^2 \delta_1)}$$

如何得到

(参见教材 p29-30)

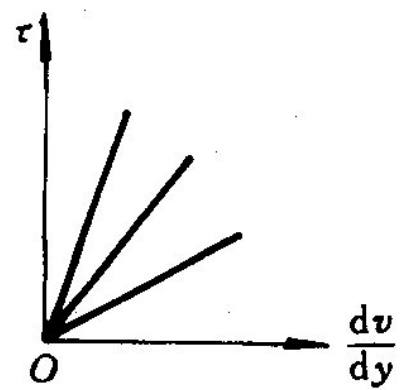


1.5.4 牛顿流体与非牛顿流体

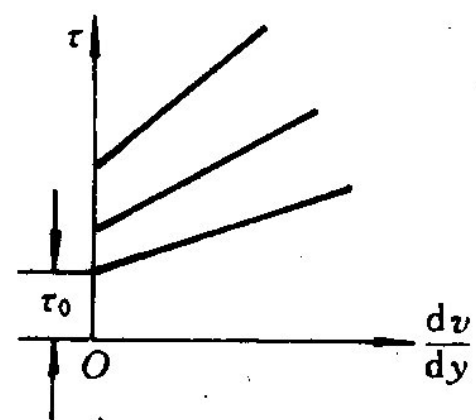
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

牛顿流体： μ 不随 du/dy 而变化，流体中的粘性切应力与剪切应变率成线性关系。满足牛顿内摩擦定律。

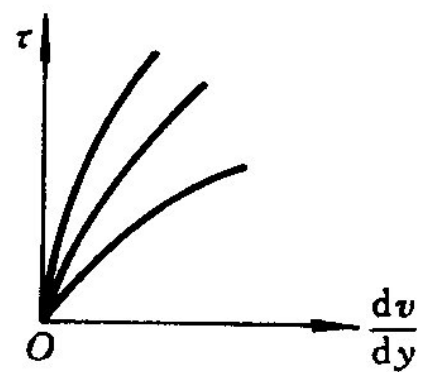
非牛顿流体： 不满足牛顿内摩擦定律



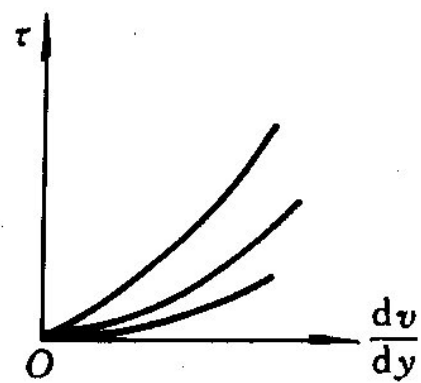
(1) 牛顿流体



(2) 塑性流体



(3) 假塑性流体



(4) 胀塑性流体

1.5.5 无粘性流体的假设

理想流体和实际流体

实际流体：具有粘性。

理想流体：假设的一种流体，不存在粘性。

作业

阅读：第一章 绪论 §1-1 ~ §1-5

习题： 1-13, 1-15

基本概念

- 1、流体与固体在力学性能上有什么区别？
- 2、液体与气体的特性区别？
- 3、流体质点的概念？连续介质模型假设的基本思想？
引入连续介质模型假设的优点？
- 4、什么是流体的可压缩性？什么是流体的热膨胀性？
- 5、流体的压缩系数（体积弹性模量）？膨胀系数？
- 6、油液混入气体后，体积弹性模量如何变化？
- 7、不可压缩性流体和不可压缩流动的假设？
- 8、什么是流体的粘性？粘性产生的原因，温度和压强变化对流体粘性的影响规律。粘度的表示方法。

计算

- 1、牛顿内摩擦定律