



绪论

上课内容

- 流体力学的研究对象
 - 流体的主要物理性质
 - 流体的力学模型
-





流体力学的研究对象



流体力学的研究对象

- 液体 (liquid) 与气体 (gas) 统称为流体 (fluid) 。流体力学 (fluid mechanics) — 研究流体机械运动规律的科学。
- 流体力学除了研究流体的运动规律以外，还要研究它的传热、传质规律。同样，在固体、液体或气体界面处，不仅研究相互之间的作用力，而且还需要研究它们之间的传热、传质规律。



流体力学的基础理论由三部分组成:

- ✓ 一是流体处于平衡状态时，各种作用在流体上的力之间关系的理论，称为流体静力学；
- ✓ 二是流体处于流动状态时，作用在流体上的力和流动之间关系的理论，称为流体动力学；
- ✓ 三是气体处于高速流动状态时，气体的运动规律的理论，称为气体动力学。

工程流体力学的研究范畴是将流体流动作为宏观机械运动进行研究，而不是研究流体的微观分子运动，因而在流体动力学部分主要研究流体的质量守恒、动量守恒和能量守恒及转换等基本规律。

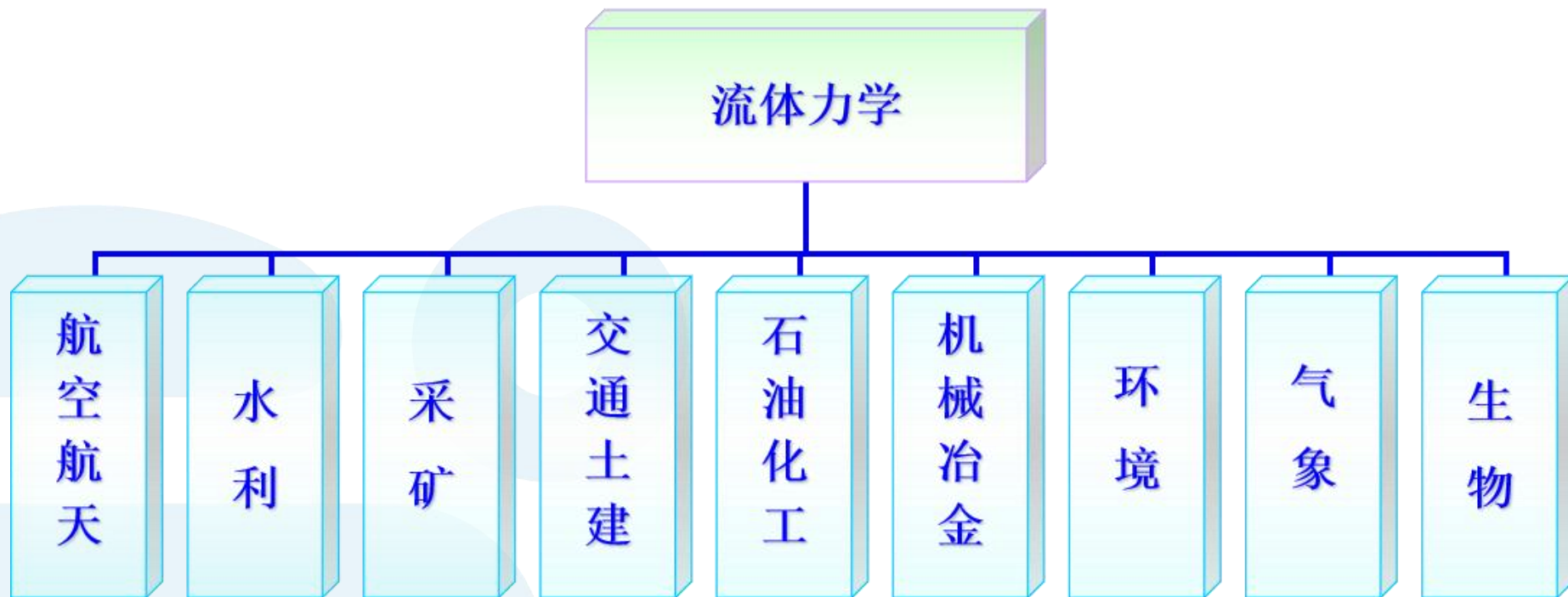


三种不同流动形式

在能源、化工、环保、机械、建筑（给排水、暖通）等工程技术领域的设计、施工和运行等方面都涉及到流体力学问题。不同工程技术领域的流体力学问题有各自不同的特点，概括起来主要有三种不同流动形式：

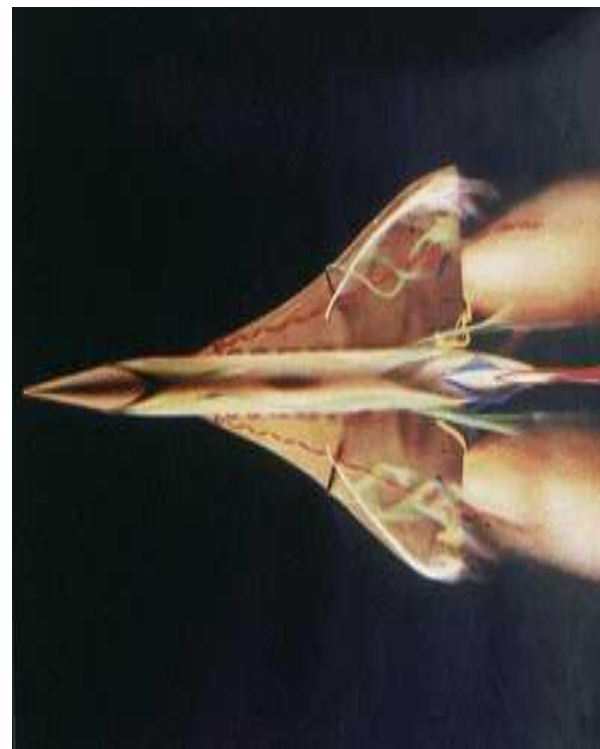
- 一是有压管流，如流体在管道中的流动；
 - 二是绕流，如流体在流体机械中绕过翼型的流动；
 - 三是射流，如流体从孔口或管嘴喷出的流动。
-

实际工程中的流体力学应用



实际工程中的流体力学应用

航空航天



实际工程中的流体力学应用

水利



采矿通风



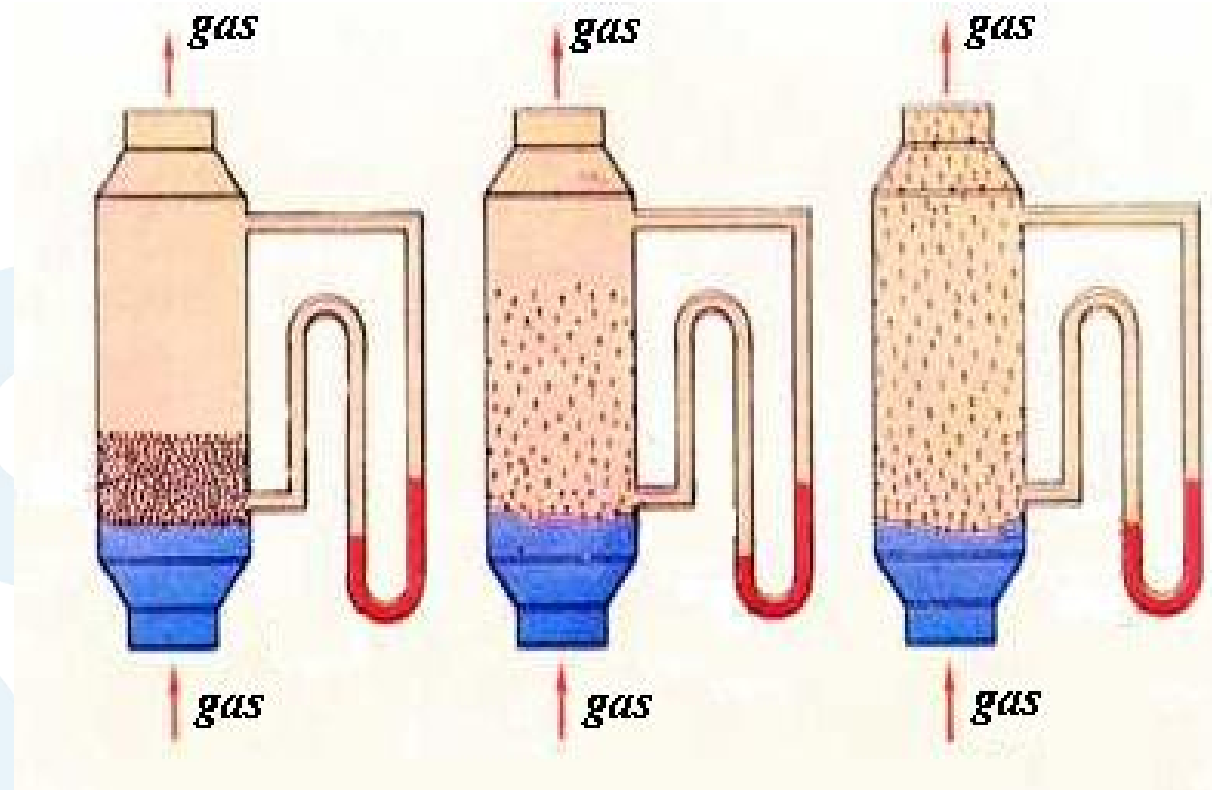
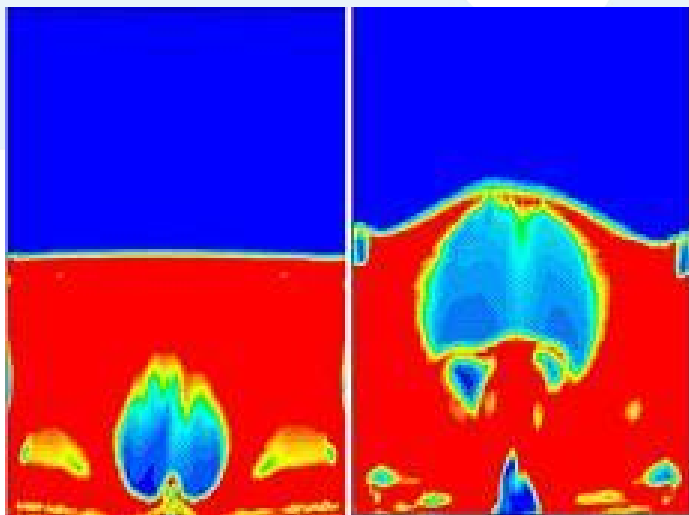
实际工程中的流体力学应用

交通土建



实际工程中的流体力学应用

石油化工



实际工程中的流体力学应用

机械冶金

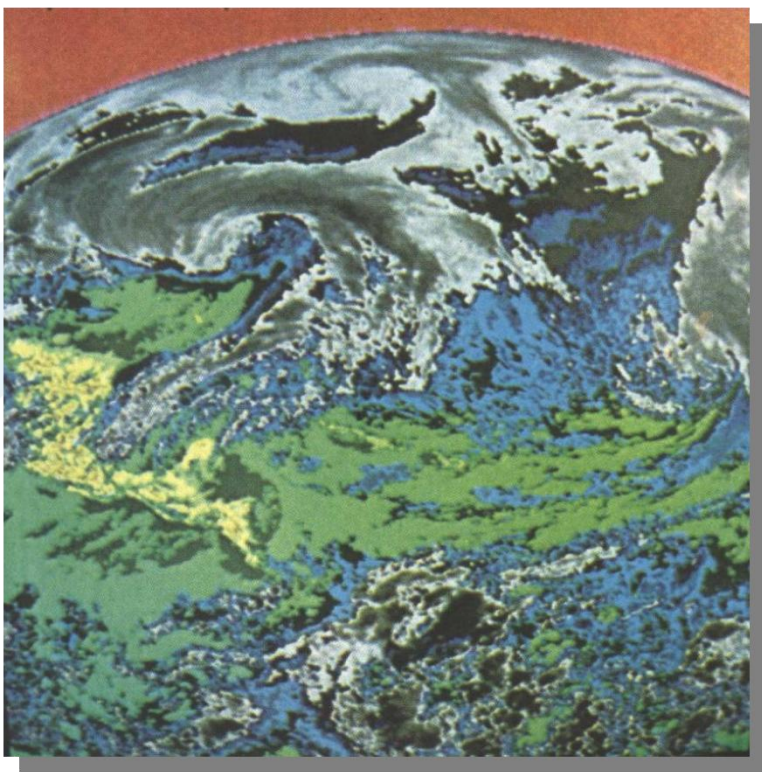


环境

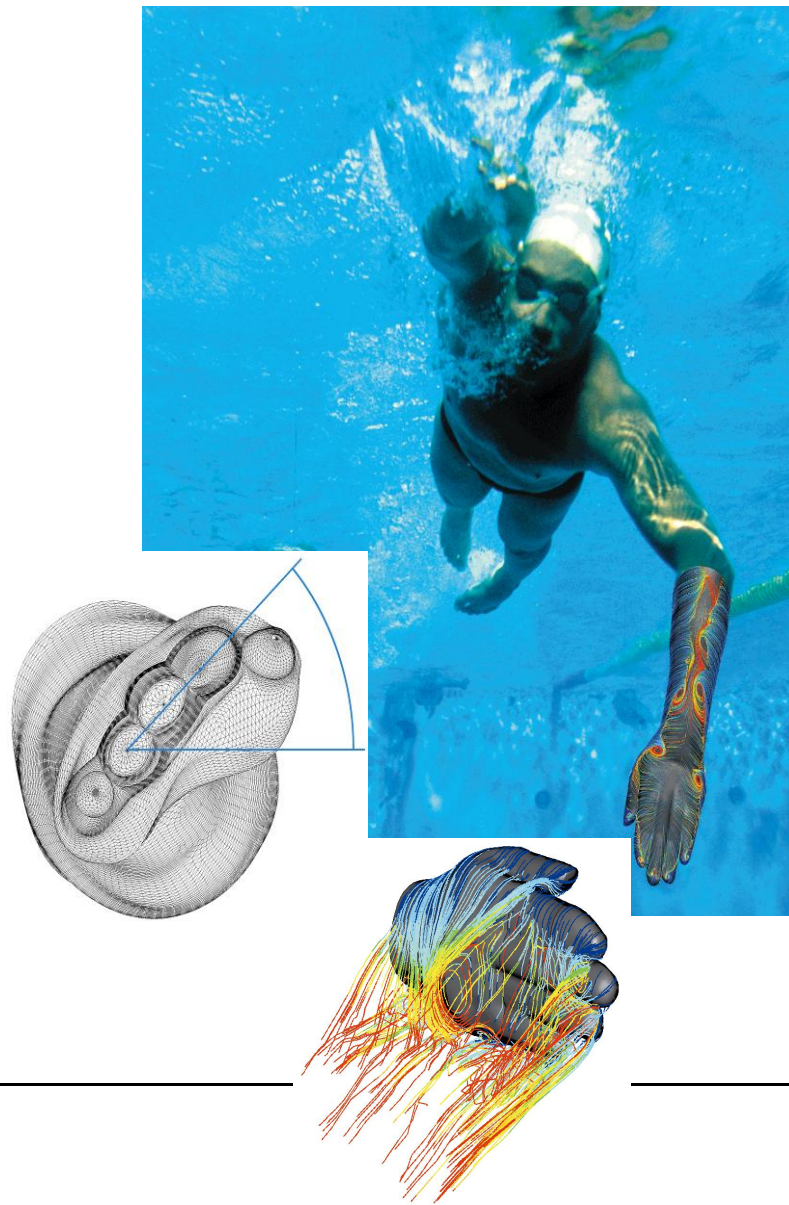


实际工程中的流体力学应用

气象



生物



流体的定义和特征

定义：

- ✓ 在任何微小剪切力的持续作用下能够连续不断变形的物质，称为流体。

特征：

- ✓ 液体的分子距很难缩小，液体的形状取决于容器的形状，并且由于分子间吸引力的作用，液体有力求自身表面积收缩到最小的特性。故在重力的作用下，液体总保持一个自由表面(或称自由液面)，通常称为水平面。
- ✓ 气体具有很大的压缩性。此外，因其分子距与分子平均直径相比很大，以致分子间的吸引力微小，分子热运动起决定性作用，所以气体没有一定形状，也没有一定的体积，它总是能均匀充满容纳它的容器而不能形成自由表面。



流体连续介质假设

定义：

- ✓ 从微观角度看，流体和其它物体一样，都是由大量不连续分布的分子组成，分子间有间隙。
- ✓ 在流体力学中，取流体微团来作为研究流体的基元。所谓流体微团是一块体积为无穷小的微量流体，由于流体微团的尺寸极其微小，故可作为流体质点看待。流体可看成是由无限多连续分布的流体微团组成的连续介质。





流体的主要物理性质



流体的主要物理性质

A 流体密度

● 流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一，它表征流体在空间某点质量的密集程度，流体的密度定义为：单位体积流体所具有的质量，用符号 ρ 来表示。

$$\rho = \frac{m}{V}$$

对于各点密度不同的非均质流体，在流体的空间中某点取包含该点的微小体积 ΔV ，该体积内流体的质量 Δm ，则该点的密度为 $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$

流体的主要物理性质

- 流体的相对密度

流体的相对密度是指某种流体的密度与4°C时水的密度的比值，用符号d来表示。

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

表1和表2列出了一些常用液体、气体在标准大气压强下的物理性质。

表1 在标准大气压下常用液体的物理性质

液体种类	温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密度 ρ (kg/m^3)	相对密度 d	动力黏度 $\mu \times 10^4$ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
纯水	20	998	1.00	10.1
海水	20	1026	1.03	10.6
20%盐水	20	1149	1.15	—
乙醇（酒精）	20	789	0.79	11.6
苯	20	895	0.90	6.5
四氯化碳	20	1588	1.59	9.7
氟利昂-12	20	1335	1.34	—
甘油	20	1258	1.26	14900
汽油	20	678	0.68	2.9
煤油	20	808	0.81	19.2
原油	20	850-958	0.85-0.93	72
润滑油	20	918	0.92	—
氢	-257	72	0.072	0.21
氧	-195	1206	1.21	2.8
水银	20	13555	13.58	15.6

表2 在标准大气压和20℃常用气体性质

气 体	密 度 ρ (kg/m ³)	动力黏度 $\mu \times 10^5$ (Pa · s)	气体常数 R [J/(kg · K)]	气 体	密 度 ρ (kg/m ³)	动力黏度 $\mu \times 10^5$ (Pa · s)	气体常数 R [J/(kg · K)]
空 气	1.205	1.80	287	氮	1.16	1.76	297
二氧化碳	1.84	1.48	188	氧	1.33	2.00	260
一氧化碳	1.16	1.82	297	甲 烷	0.668	1.34	520
氦	0.166	1.97	2077	饱和水蒸 汽	0.747	1.01	462
氢	0.0839	0.90	4120				

流体的主要物理性质

B 流体的压缩性和膨胀性

● 流体的膨胀性

在一定的压强下，流体的体积随温度的升高而增大的性质称为流体的膨胀性。流体膨胀性的大小用体积膨胀系数 α_V 来表示，它表示当压强不变时，升高一个单位温度所引起流体体积的相对增加量，即。

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}$$

实验指出，液体的体积膨胀系数很小，例如在 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 下，温度在 $1 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内，水的体积膨胀系数为 $14 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ；温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内，水的体积膨胀系数为 $150 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 。

水的体胀系数与温度的关系

不同的压强下，水的体积膨胀系数不一样

压 强	温 度 (°C)				
(10^5Pa)	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.98	14×10^{-6}	150×10^{-6}	422×10^{-6}	556×10^{-6}	719×10^{-6}
98	43×10^{-6}	165×10^{-6}	422×10^{-6}	548×10^{-6}	704×10^{-6}
196	72×10^{-6}	83×10^{-6}	426×10^{-6}	539×10^{-6}	
490	149×10^{-6}	236×10^{-6}	429×10^{-6}	523×10^{-6}	661×10^{-6}
882	229×10^{-6}	289×10^{-6}	437×10^{-6}	514×10^{-6}	621×10^{-6}

流体的主要物理性质

- 流体的压缩性

在一定的温度下，流体的体积随压强升高而缩小的性质称为流体的压缩性。流体压缩性的大小用体积压缩系数 κ 来表示。它表示当温度保持不变时，单位压强增量引起流体体积的相对缩小量，即

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$$

由于压强增加时，流体的体积减小，即 dp 与 dV 的变化方向相反，故在上式中加个负号，以使体积压缩系数 κ 恒为正值。

流体的主要物理性质

- 可压缩流体和不可压缩流体

压缩性是流体的基本属性。任何流体都是可以压缩的，只不过可压缩的程度不同而已。液体的压缩性都很小，随着压强和温度的变化，液体的密度仅有微小的变化，在大多数情况下，可以忽略压缩性的影响，认为液体的密度是一个常数。 $d\rho/dt=0$ 的流体称为不可压缩流体，而密度为常数的流体称为不可压均质流体。

流体的主要物理性质

C 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

● 流体的黏性

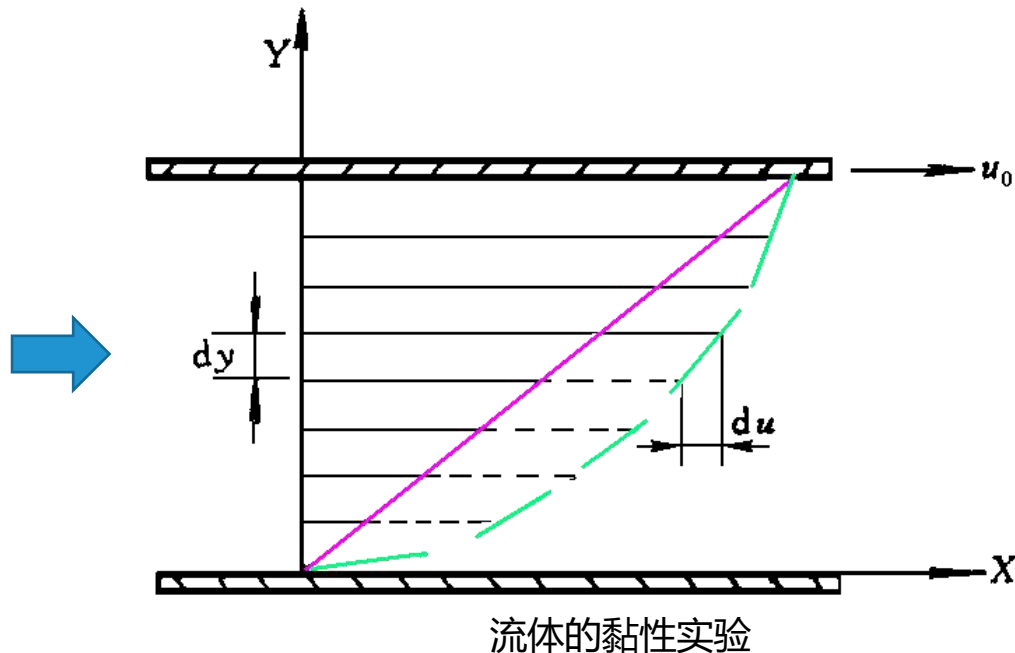
黏性是流体抵抗剪切变形的一种属性。由流体的力学特点可知，静止流体不能承受剪切力，即在任何微小剪切力的持续作用下，流体要发生连续不断地变形。但不同的流体在相同的剪切力作用下其变形速度是不同的，它反映了抵抗剪切变形能力的差别，这种能力就是流体的黏性。

流体的主要物理性质

- 流体的黏性

由于各流层速度不同，流层间就有相对运动，从而产生切向作用力，称其为**内摩擦力**。

速度较大的流体层作用在速度较小的流体层上的内摩擦力 F ，其方向与流体流动方向相同，带动下层流体向前运动，而速度较小的流体层作用在速度较大的流体层上的内摩擦力 F' ，其方向与流体流动方向相反，阻碍上层流体运动。



流体的主要物理性质

- 牛顿内摩擦定律

根据牛顿(Newton)实验研究的结果得知, 运动的流体所产生的内摩擦力(切向力) F 的大小与垂直于流动方向的速度梯度 du/dy 成正比, 与接触面的面积 A 成正比, 并与流体的种类有关, 而与接触面上压强 P 无关。内摩擦力的数学表达式可写为

$$F \propto A \frac{du}{dy}$$

写成等式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

流体的主要物理性质

- ✓ 从上式可知，当速度梯度等于零时，内摩擦力也等于零。所以，当流体处于静止状态或以相同速度运动(流层间没有相对运动)时，内摩擦力等于零，此时流体有黏性，流体的黏性作用也表现不出来。当流体没有黏性($\mu=0$)时，内摩擦力等于零。
- ✓ 在流体力学中还常引用动力黏度与密度的比值，称为运动黏度用符号 ν 表示，即

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

流体的主要物理性质

- 影响黏性的因素

- ✓ 流体黏性随压强和温度的变化而变化。
- ✓ 在通常的压强下，压强对流体的黏性影响很小，可忽略不计。
- ✓ 在高压下，流体(包括气体和液体)的黏性随压强升高而增大。
- ✓ 流体的黏性受温度的影响很大，而且液体和气体的黏性随温度的变化是不同的。
- ✓ 液体的黏性随温度升高而减小，气体的黏性随温度升高而增大。

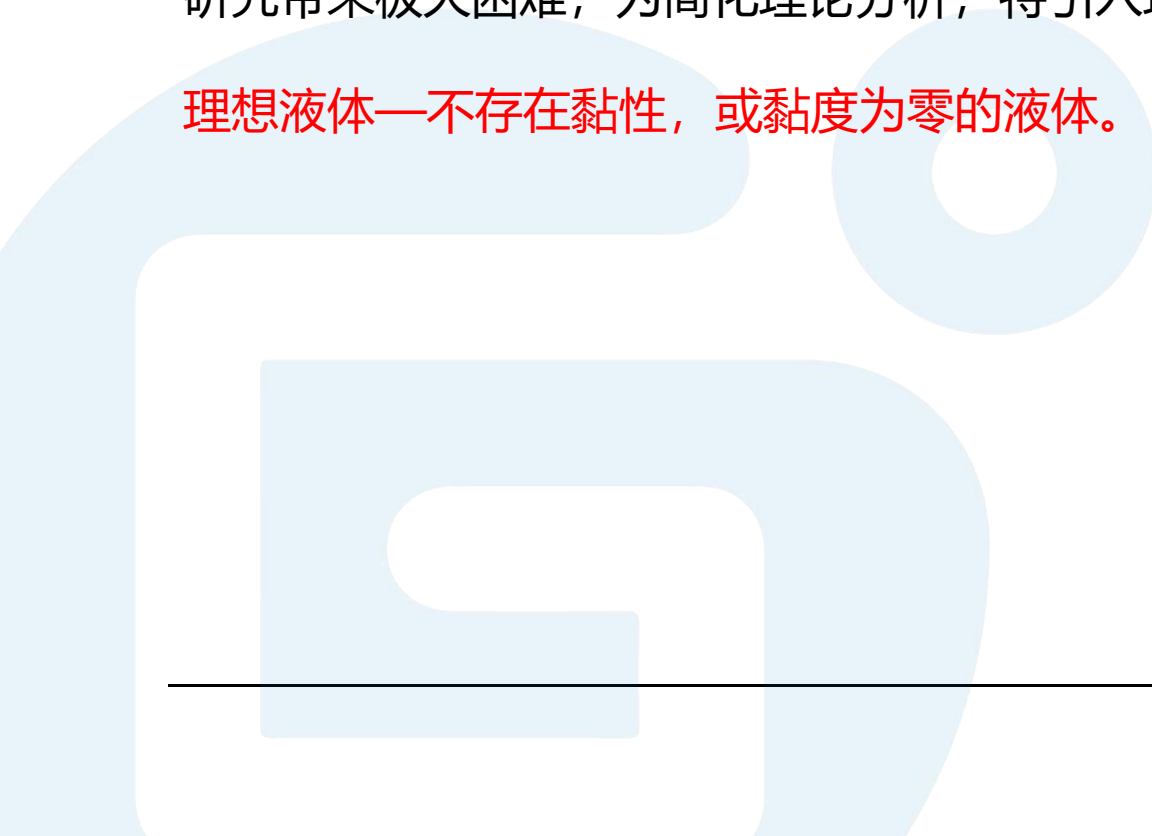


流体的主要物理性质

● 理想流体的假设

如前所述，实际流体都是具有黏性的，都是黏性流体。液体黏性的存在，往往给运动规律的研究带来极大困难，为简化理论分析，特引入理想液体的概念。

理想液体—不存在黏性，或黏度为零的液体。



水的黏度与温度的关系

温 度 (℃)	$\mu \times 10^3$ (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	温 度 (℃)	$\mu \times 10^3$ (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

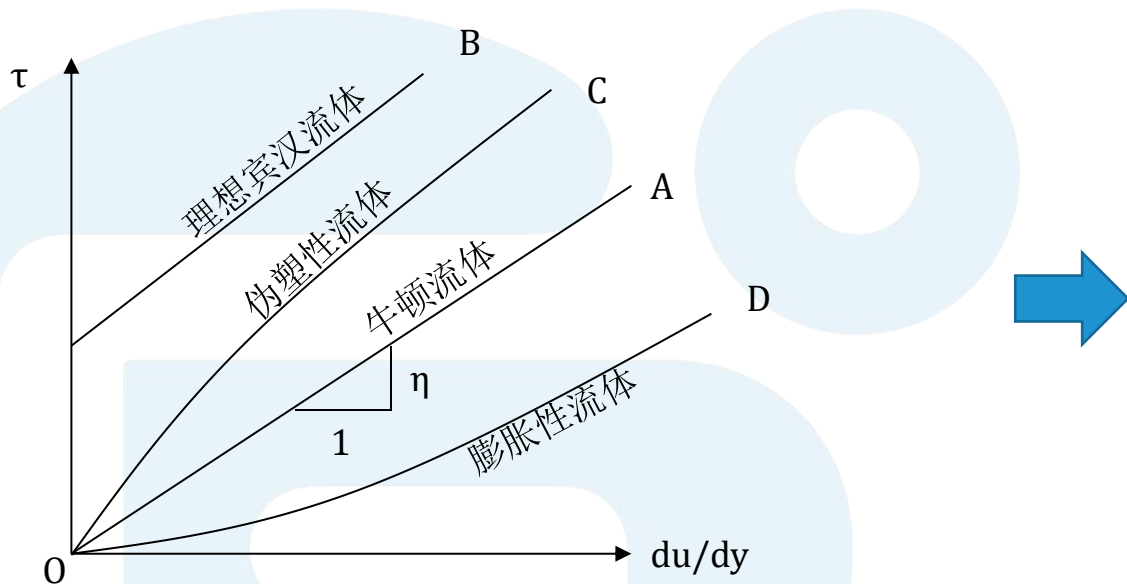
空气的黏度与温度的关系

温 度 (℃)	$\mu \times 10^6$ (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	温 度 (℃)	$\mu \times 10^6$ (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)
0	17.09	13.00	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.80	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50
120	22.60	25.20	380	32.10	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

流体的主要物理性质

牛顿流体与非牛顿流体

一般把符合牛顿内摩擦定律的液体称为牛顿流体反之称为非牛顿液体。



A线为牛顿流体，当流体种类一定、温度一定时， $\mu = \text{const}$ ，切应力与剪切变形速度成正比

B线是理想宾汉流体，如泥浆、血浆等

C线是伪塑性流体，如尼龙、橡胶的溶液、颜料、油漆等

D线膨胀性流体，如生面团、浓淀粉糊等

流体的主要物理性质

D 液体的表面张力和毛细现象

● 表面张力

- ✓ 表面张力是自由表面上液体分子由于受两侧分子引力不平衡，使自由面上液体受有极其微小的拉力，它是一种局部受力现象。
- ✓ 表面张力 δ 的大小以作用在单位长度上的力表示，单位为N/m。
- ✓ 不同的液体在不同的温度下具有不同的表面张力值。所以液体的表面张力都随着温度的上升而下降。

常用液体在20℃时与空气接触的表面张力

液 体	表面张力 σ (N/m)	液 体	表面张力 σ (N/m)	液 体	表面张力 σ (N/m)
纯 水	0.0728	四氯化碳	0.0266	润滑油	0.0350~0.0379
乙醇（酒精）	0.0223	煤 油	0.0234~0.0321	水 银	0.513 [*] ~0.485 ^{**}
苯	0.0289	原 油	0.0234~0.0379		

水与空气接触的表面张力

温 度 (℃)	表面张力 σ (N/m)	温 度 (℃)	表面张力 σ (N/m)	温 度 (℃)	表面张力 σ (N/m)
0	0.0756	25	0.0720	60	0.0662
5	0.0749	30	0.0712	70	0.0644
10	0.0742	35	0.0704	80	0.0626
15	0.0735	40	0.0696	90	0.0608
20	0.0728	50	0.0679	100	0.0589

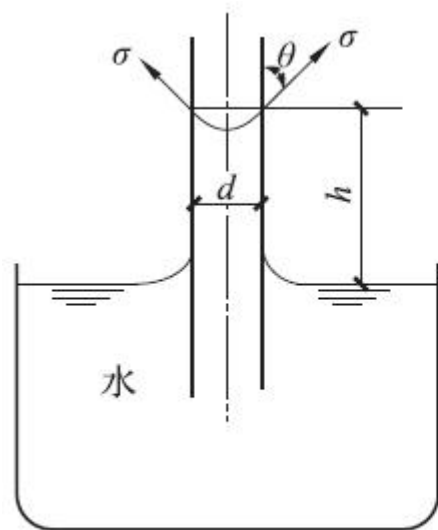
20°C时两种介质分界面上的表面张力

场 合	温度 (°C)	表面张力 σ (N/m)	场 合	温度 (°C)	表面张力 σ (N/m)
苯-水银	20	0.375	水-四氯化碳	20	0.045
水-苯	20	0.035	水-水银	20	0.0375

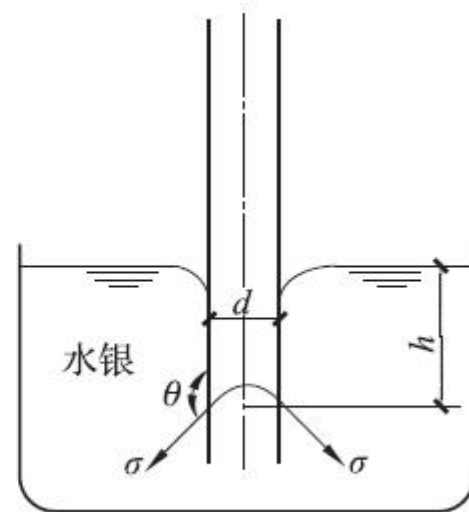
流体的主要物理性质

● 毛细现象

- ✓ 液体与气体、固体交界处，在液体的附着力、内聚力和表面张力的作用下，液体自由表面可以沿固体壁面上升或下降，呈现凹（凸）液面。由于这一现象在毛细管中特别明显，因此称为毛细管现象，如图所示。



(a)



(b)

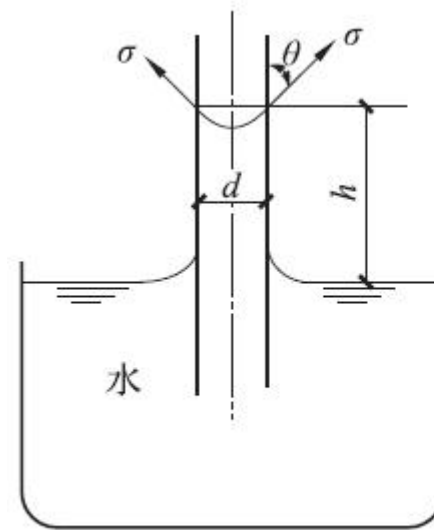
流体的主要物理性质

● 毛细现象

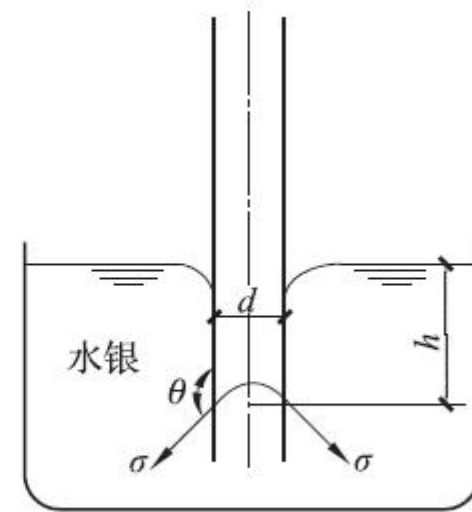
- ✓ 毛细管内液面上升或下降的高度 h 与液体的表面张力 σ 、毛细管的直径 d 、液体的密度 ρ 及液面与管壁的接触角 θ 等有关。通过受力分析可知，表面张力的合力的垂直分量等于上升液柱的重量，即

$$\pi d \sigma \cos \theta = \frac{1}{4} \pi d^2 \rho g h$$

$$h = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\rho g d}$$



(a)



(b)



流体的力学模型

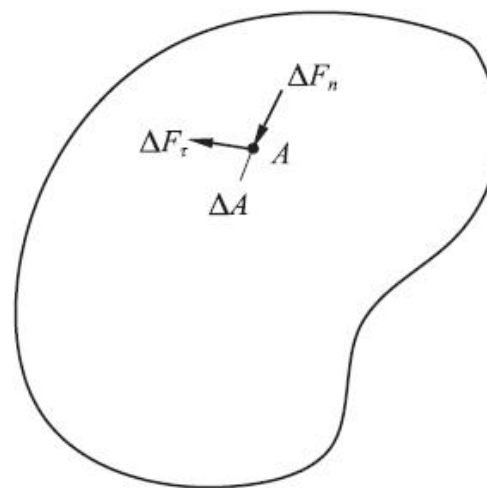


表面力

● 理想流体

表面力是指作用在隔离体表面上的力，是隔离体周围的流体或固体通过接触面作用在隔离体上的力，它的大小与受力作用的表面面积成正比。表面力连续作用于流体表面，可将其分解为垂直于作用面的压应力和平行于作用面的切应力。

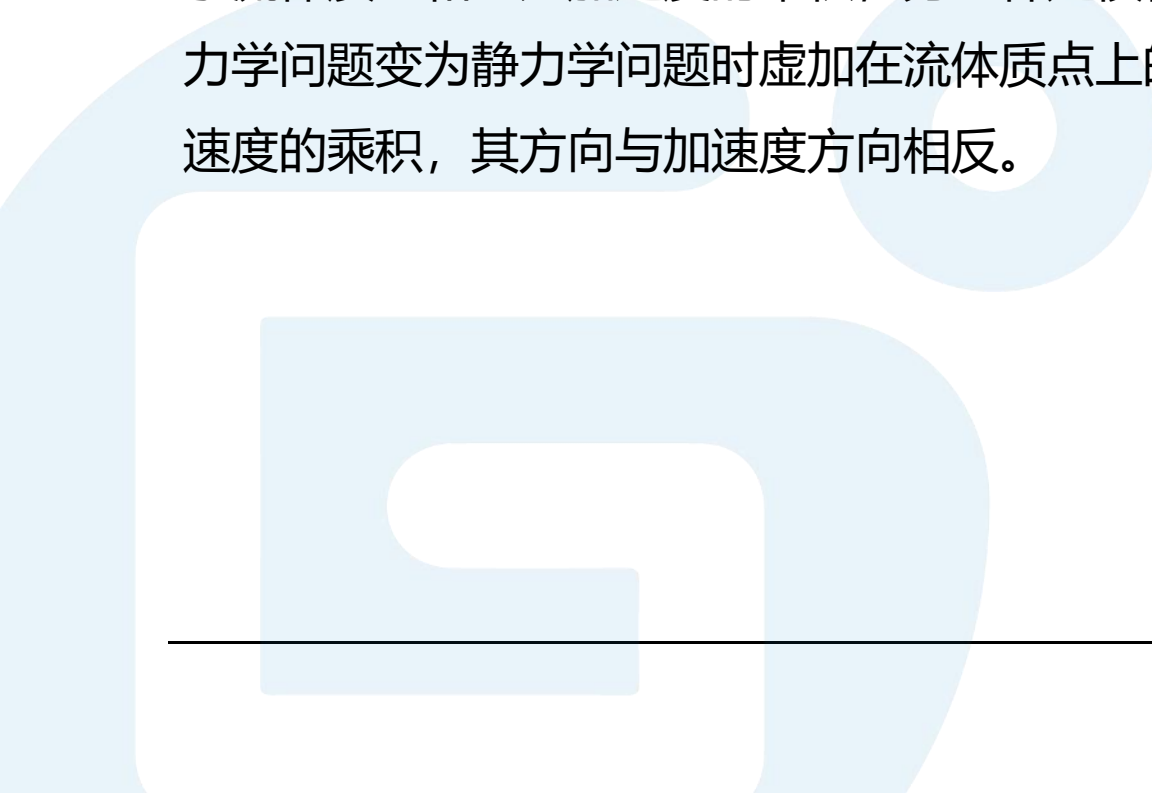
如图0-4所示，在流体隔离体表面上，围绕任意一点A取一微元面积 ΔA ，设作用在该微元面积上的表面力为 ΔF 。





质量力

质量力是指作用在隔离体内每个流体质点上的力，其大小和流体的质量成正比。对均质流体，其质量力与体积成正比，故质量力又称为体积力。常见的质量力有两种：一种是重力，是流体质点受地球地心引力作用的结果，它等于流体质量和重力加速度的乘积；另一种是惯性力，是利用达朗伯原理将动力学问题变为静力学问题时虚加在流体质点上的力，它的大小等于质量与加速度的乘积，其方向与加速度方向相反。





谢谢!

