



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

课程：船舶流体力学

主讲人：万德成

章节：第1章 流体的基本特性

内容：1.3 作用在流体上的力



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

作用在流体上的力



体积力 (body force)



表面力 (surface force)



表面张力 (surface tension)



体积力

体积力(body force)也称为**质量力**(mass force):

是指作用在流体某体积内所有流体质点上，并与这一体积的流体质量成正比的力。

也可以理解为某种力场作用在全部流体质点上的力，其大小和流体的质量或体积成正比，故称为**质量力**或**体积力**。



体积力

例如：重力是最普遍的质量力 ($G=mg$)。

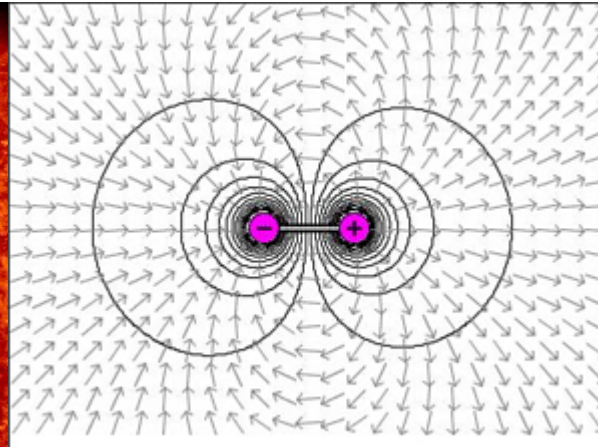
其他质量力如：磁场中的磁力；

电力场中的电力；

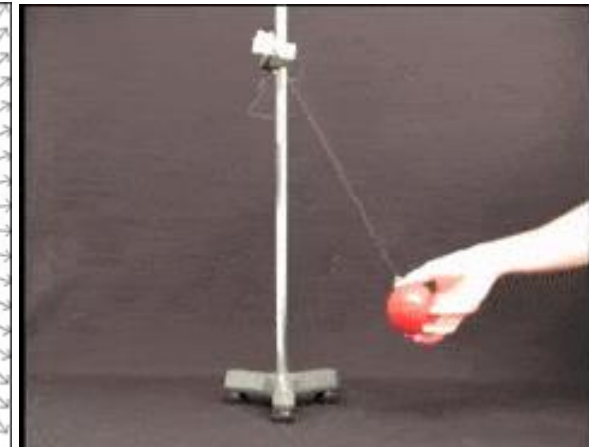
加速运动中的惯性力。



磁力



电力



惯性力



体积力的度量方法：单位质量力 $\mathbf{f}(x, y, z, t)$

$$\mathbf{f}(x, y, z, t) = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{F}}{\Delta m} = \frac{1}{\rho} \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{F}}{\Delta V} = \frac{d\mathbf{F}}{\rho dV} \quad \text{单位: } \text{m} / \text{s}^2$$

$$\text{其中, 质量力: } \mathbf{F} = \iiint_V \rho \mathbf{f}(x, y, z, t) dV$$

$$\text{单位质量力的矢量表达: } \mathbf{f} = f_x \mathbf{i} + f_y \mathbf{j} + f_z \mathbf{k}$$

$$f_x = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta m}, \quad f_y = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta m}, \quad f_z = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta m}$$



体积力

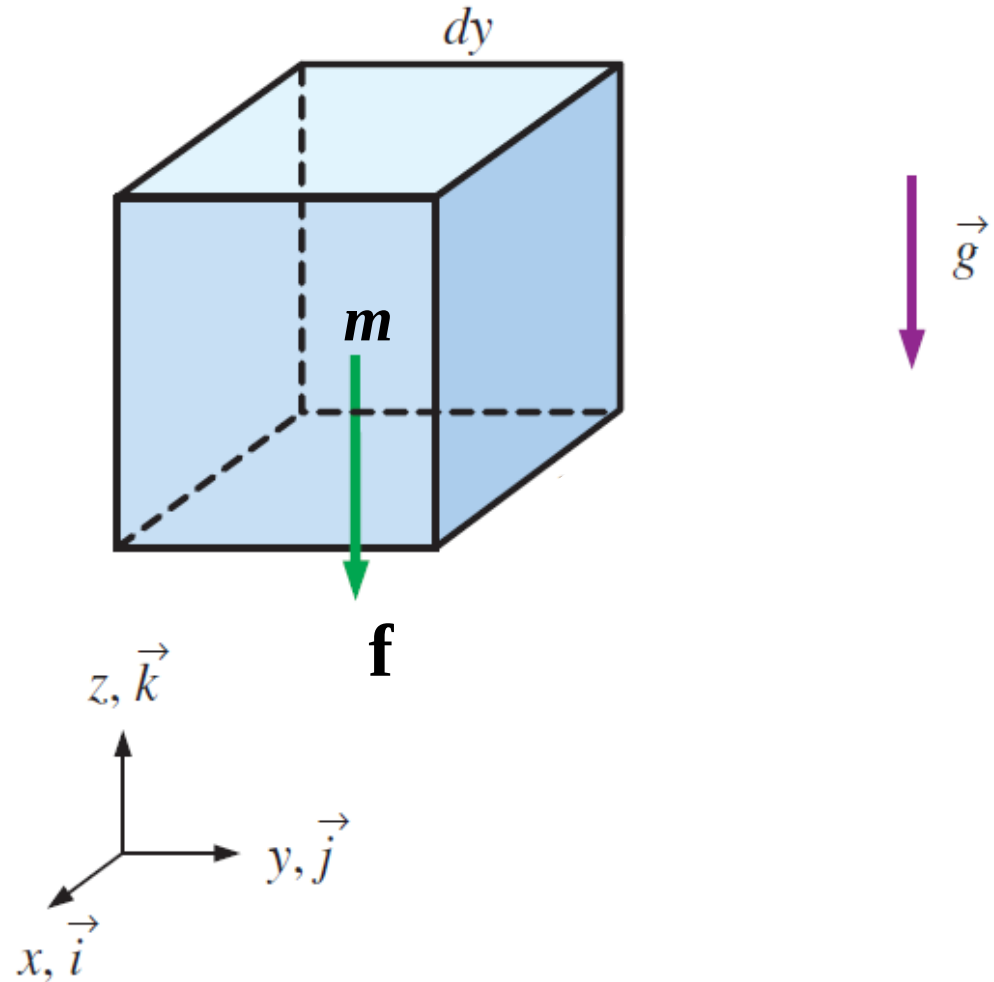
在重力场中:

$$f_x = \frac{G_x}{m} = 0$$

$$f_y = \frac{G_y}{m} = 0$$

$$f_z = \frac{G_z}{m} = -g$$

$$\mathbf{f} = \mathbf{g} = -g\mathbf{k}$$



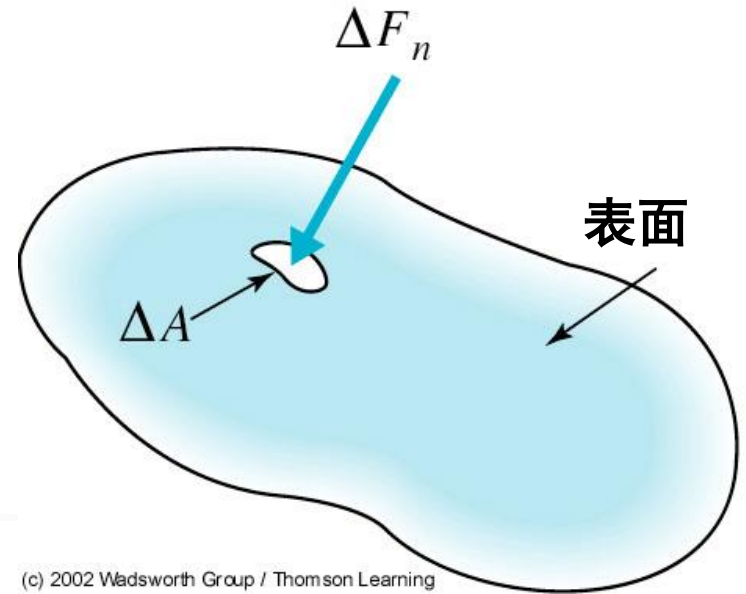


表面力

表面力 (surface force):

作用在流体体积**表面**上, 并与受作用的表面**面积**成正比的力称为**表面力**。

如：固体表面对流体的压力、流体内部的压力、流体内部摩擦力（粘性力）等。





表面力

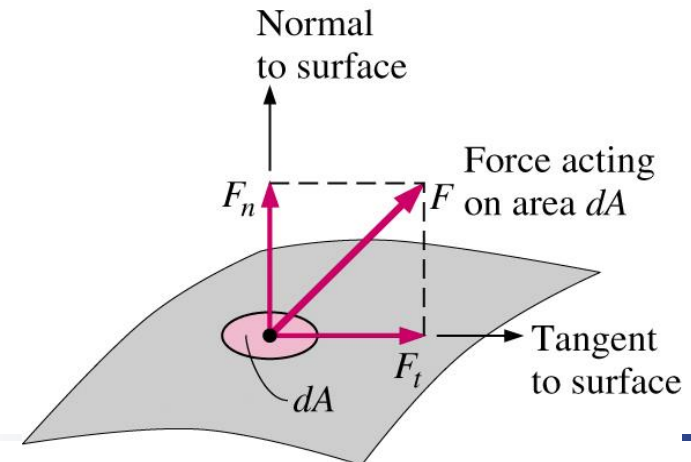
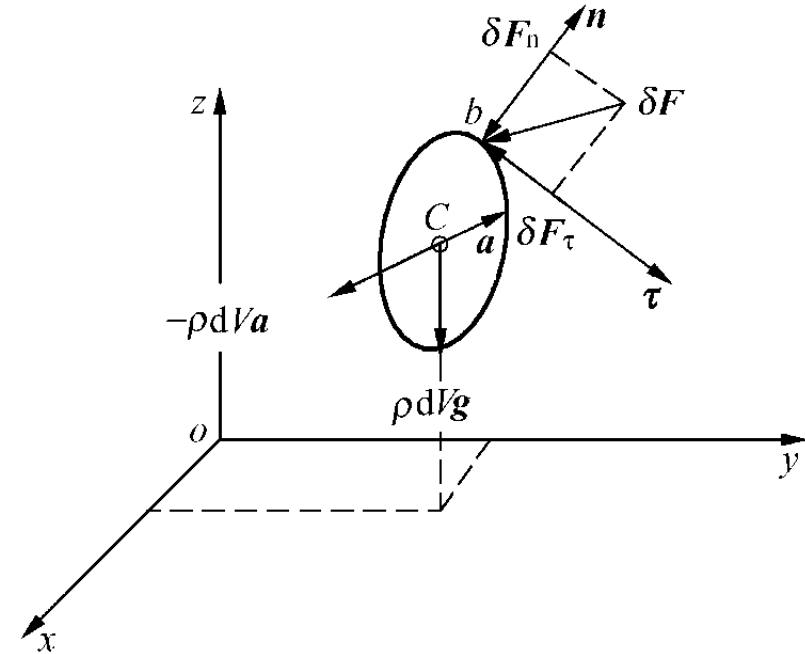
表面力 (surface force) 可分解为**法向**和**切向**两个分量:

法向应力: 与流体表面**垂直**
(压力或拉力)

$$\overrightarrow{p_{nn}} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \overrightarrow{F}_n}{\delta A} = \frac{d \overrightarrow{F}_n}{dA}$$

切向应力: 与流体表面**相切**

$$\overrightarrow{p_{n\tau}} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta \overrightarrow{F}_\tau}{\delta A} = \frac{d \overrightarrow{F}_\tau}{dA} = \tau$$



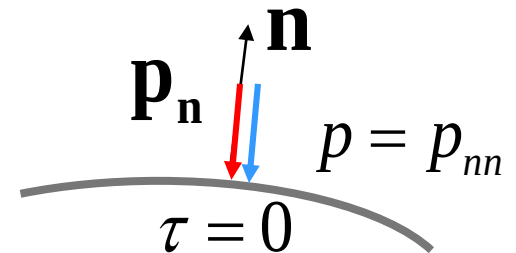


表面力

理想（静止）流体中某一点处的应力

理想（静止）流体中没有切应力 $\tau=0$ ，只承受压力 $p=p_{nn}$ ，不能承受拉力。表面力只有法向压应力 $p = -\mathbf{p}_n \cdot \mathbf{n}$

习惯上认为该压力产生在静止流体中，因而称为静压力。

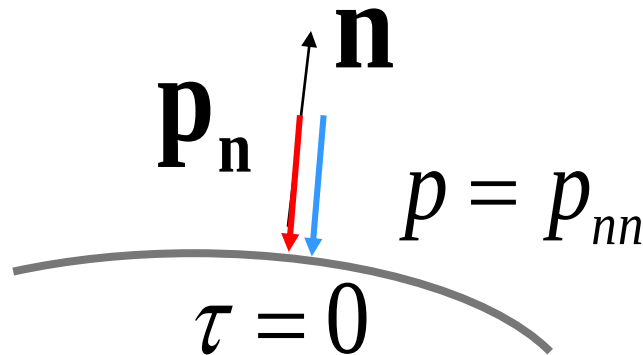




表面力

静压力的特点：

1. 流体静压力的方向总是和作用的面相垂直，并指向所考虑的那部分流体的内部，即沿着作用面的内法线方向

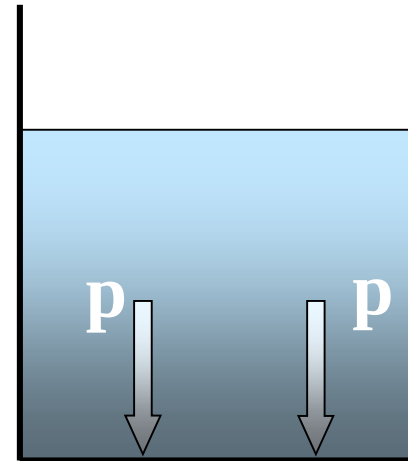




表面力

静压力的特点：

2. 在流体与固体接触的表面，不论器壁的方向或形状如何，流体静压力总是垂直于器壁

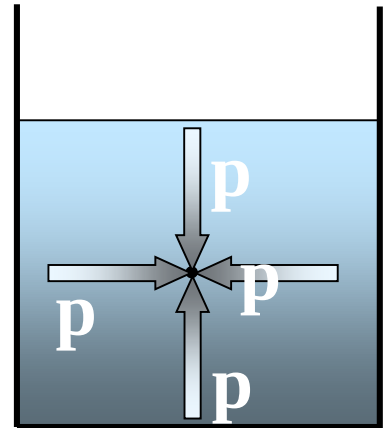




表面力

静压力的特点：

3. 静止流体内部任何一点处的流体静压力，在各个方向都相等（**Pascal定律**）





压力单位的不同表达:

- $\text{Pa} = \text{N/m}^2$;
- 物理大气压 atm ;
- 某流体柱高度;
- bar (巴);
- kgf/cm^2
- 等

基本关系:

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 101325 \text{ Pa} \\ &= 1.033 \text{ Kgf/cm}^2 \\ &= 10.33 \text{ mH}_2\text{O} \\ &= 760 \text{ mmHg} \\ 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$



压力大小的两种表征方法：

绝对压力（绝压）

---以绝对零压作为基准

相对压力（表压）

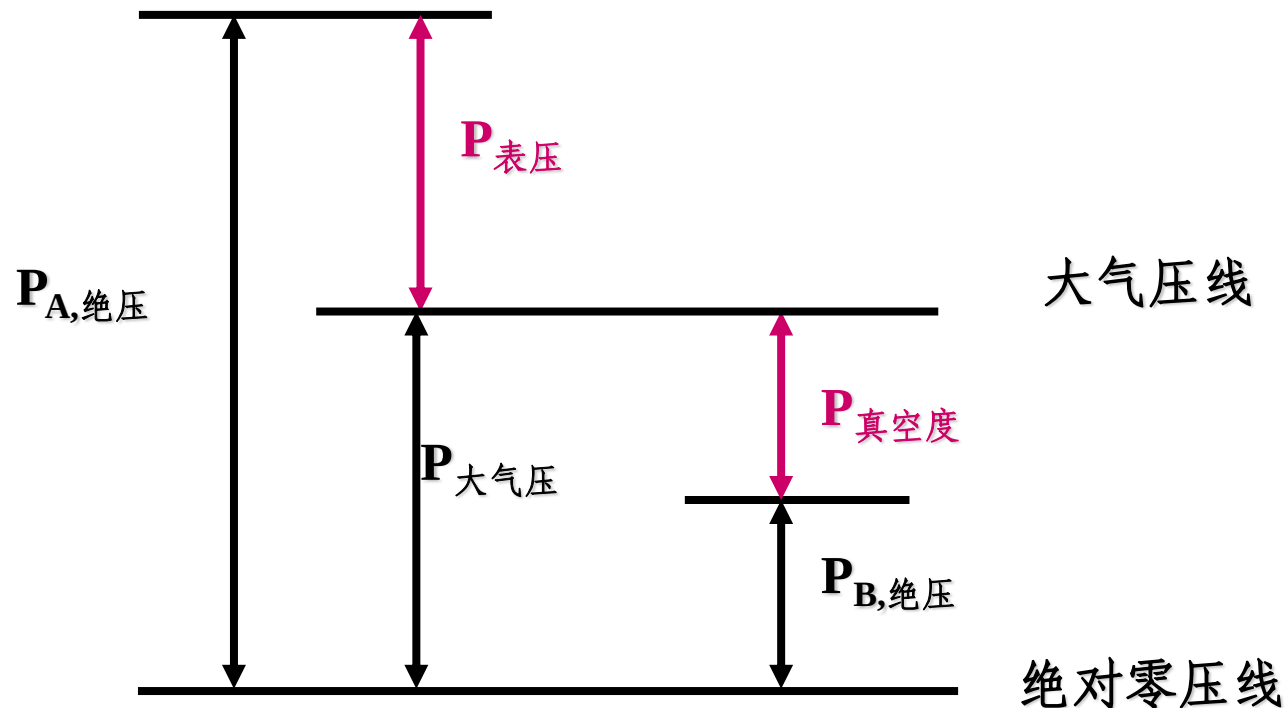
---以当地大气压为基准

表压=绝对压力-大气压力

真空度=大气压力-绝对压力

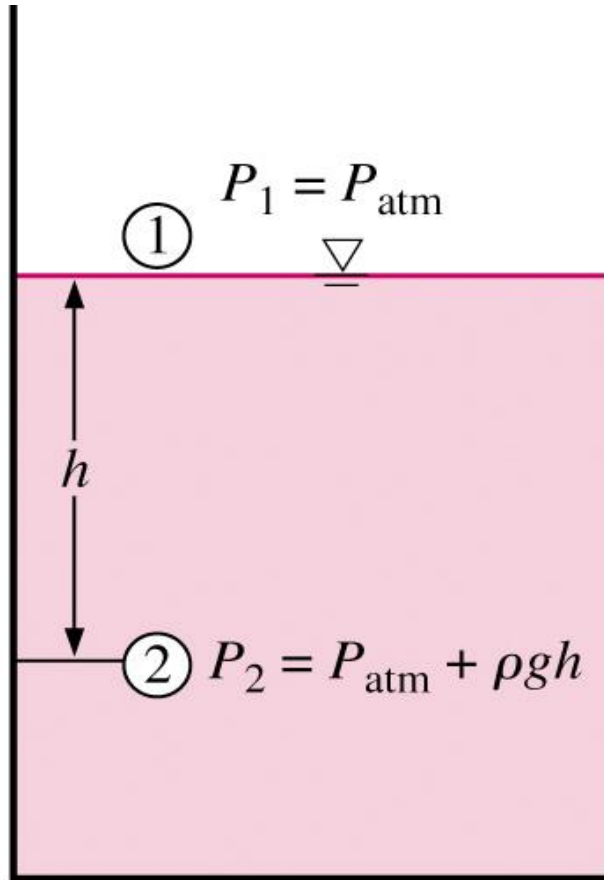


绝压 (absolute pressure)、表压 (gauge pressure)及真空度 (vacuum)之间的关系:

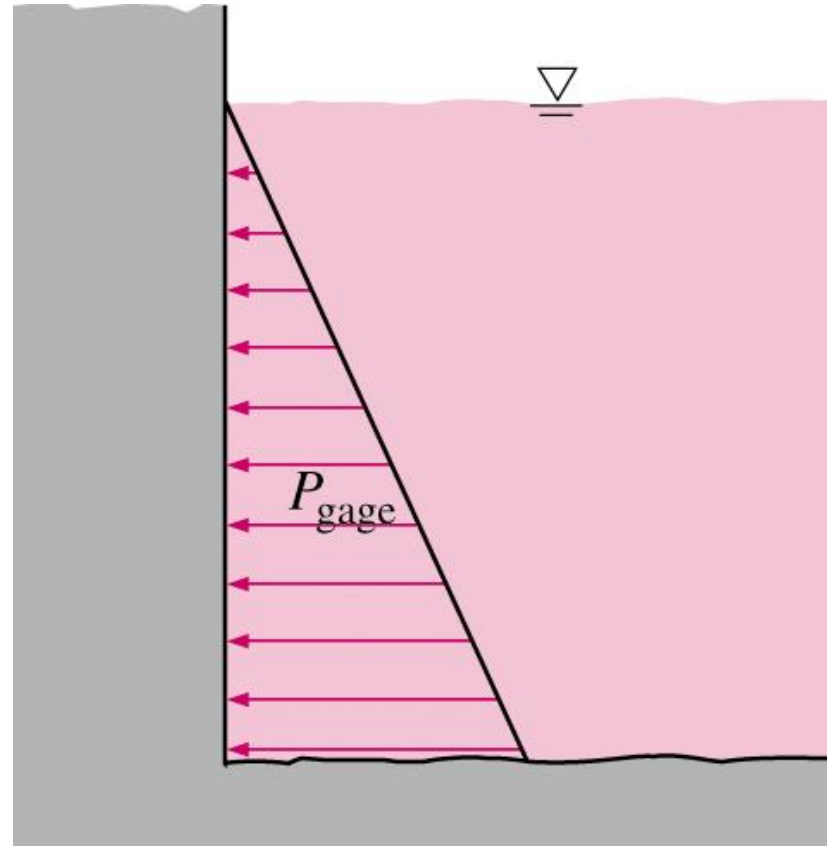




表面力



基于绝压的压力表达



基于表压的压力表达

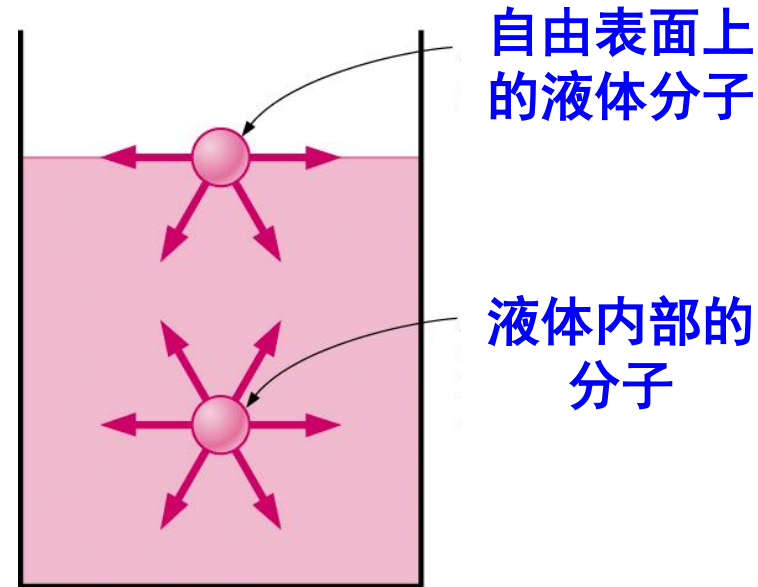


表面张力

表面张力(surface tension):

当液体出现自由表面时，液体表面层中的液体分子都受到指向液体内部的拉力，称为表面张力。

表面张力存在液体自由面上，以长度单位边界线上的拉应力来度量，因此也称为线力 (line force)





上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

表面张力

观察现象：

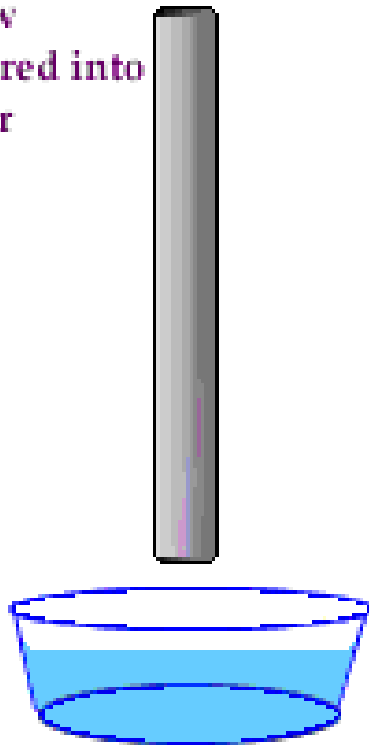
假如把一根玻璃试管垂直放入水盆内的水中，会发生什么？



表面张力

水盆的水“爬上”了玻璃吸管，吸管内的水面呈现出中间低，四周高的“凹陷”

Straw
lowered into
water



此为毛细现象 (capillarity)

现象的原因？

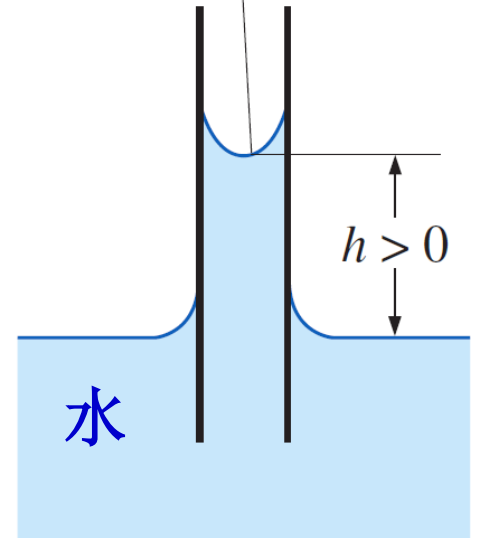


表面张力

原因:

液体与固体壁面相接触时, 当液体分子间内聚力 (intermolecular cohesion) 小于 液体与壁面间的附着力 (Adhesive force) 时, 液体的表面张力将使液体沿垂直管壁上升

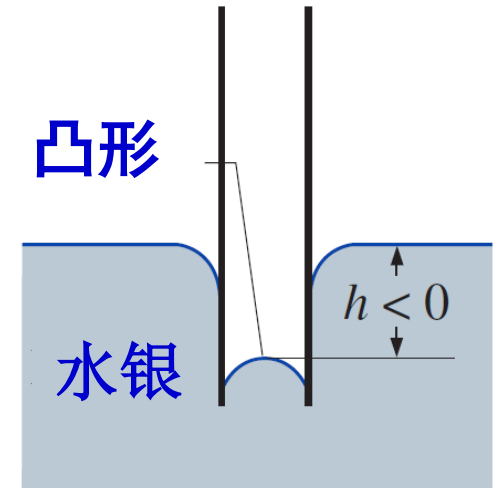
凹形





表面张力

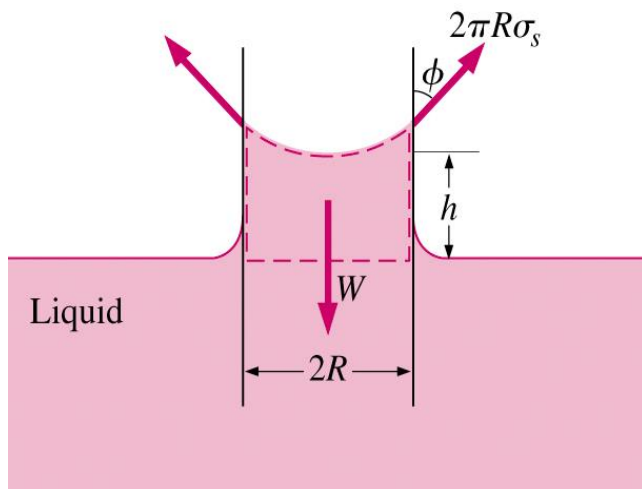
反之，液体分子间内聚力
(intermolecular cohesion)大于液
体与壁面间的附着力 (Adhesive
force)时，液体的表面张力将使
液体沿垂直管壁下降





表面张力

毛细现象引起的液面上升高度 h 可以通过以下公式计算得到：



液柱的重量 = 表面张力的拉应力

$$\Rightarrow \rho g (\pi R^2 h) = 2\pi R \sigma_s \cos \phi$$

$$\Rightarrow h = \frac{2\sigma_s \cos \phi}{\rho g R}$$

σ_s 液体的表面张力

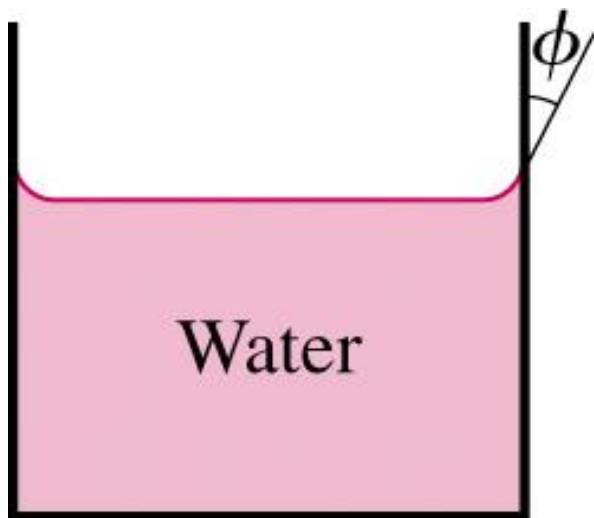
ϕ 接触角（液面切线与固壁的夹角）

R 液柱半径

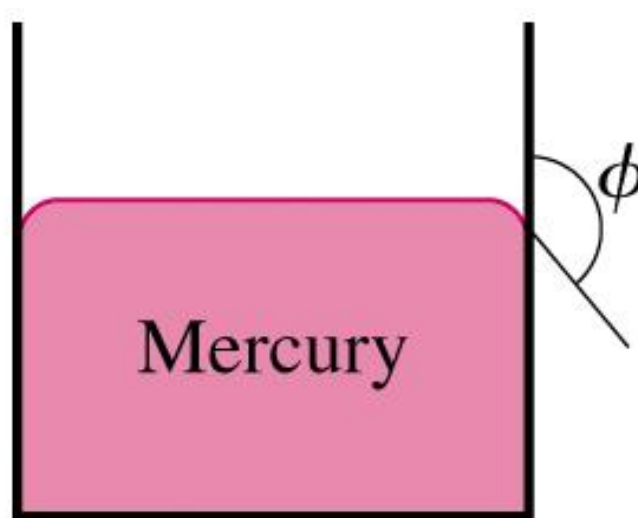


表面张力

根据液体和固壁接触时不同的表现形式，可区分为：



浸润现象



不浸润现象

取决于接触角 ϕ



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

表面张力

自然界中其他与表面张力有关的现象



小昆虫在水面上行走



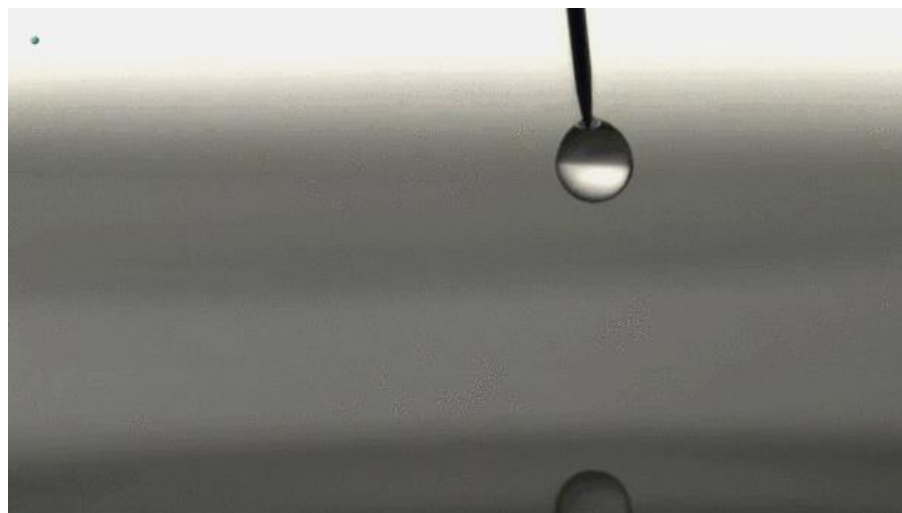
植物叶片上的水珠



表面张力

表面张力在一般工程问题中可以忽略。但在下面一些情况，必须考虑表面张力的影响：

1. 细小管中的毛细现象
2. 气泡，液滴
3. 波浪破碎
4. 小尺度问题等





1. 流体的定义和连续介质模型

2. 流体的基本性质 • 流体的粘性 (viscosity)

牛顿内摩擦定律

粘性流体和理想流体

牛顿流体和非牛顿流体

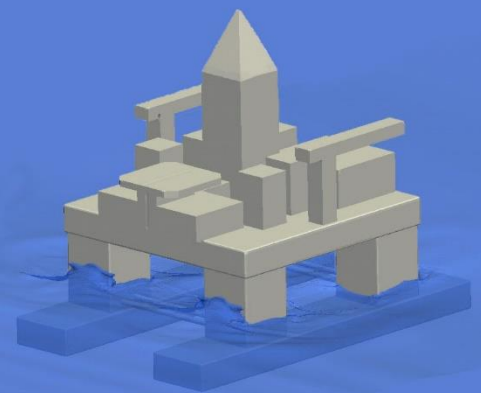
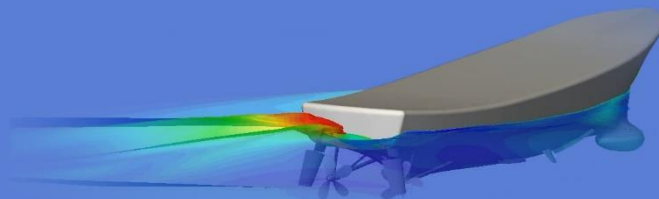
- 流体的易流动性 (fluidity)
- 流体的易变形性 (deformability)
- 流体的可压缩性 (compressibility)

可压缩流体和不可压缩流体

3. 作用在流体上的力：体积力、表面力和表面张力

CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

<http://dcwan.sjtu.edu.cn>



*部分素材来源于网络