

大学物理（一）

任课老师：蔡林
cailin@hust.edu.cn

第4章 流体运动简介

一、理想流体的运动

- 连续性方程

- 伯努利方程

二、黏性流体的运动

- 伯努利方程

- 泊肃叶定律

流体

船舶运动

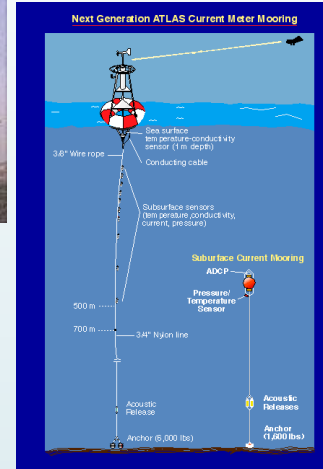


地效翼艇

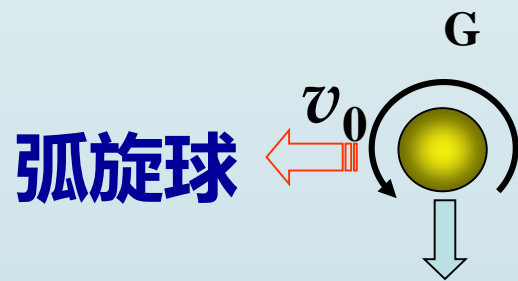


海洋平台

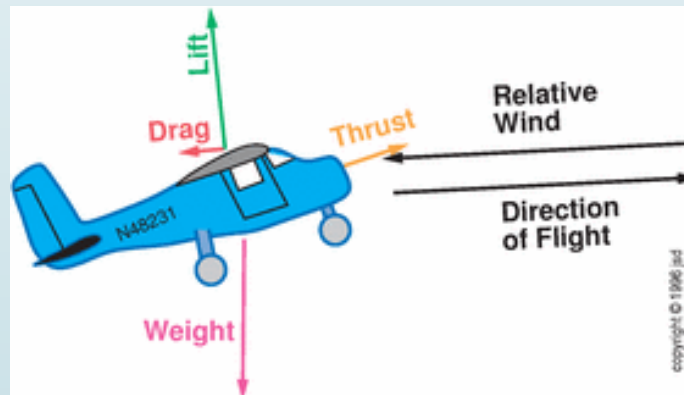
潜器



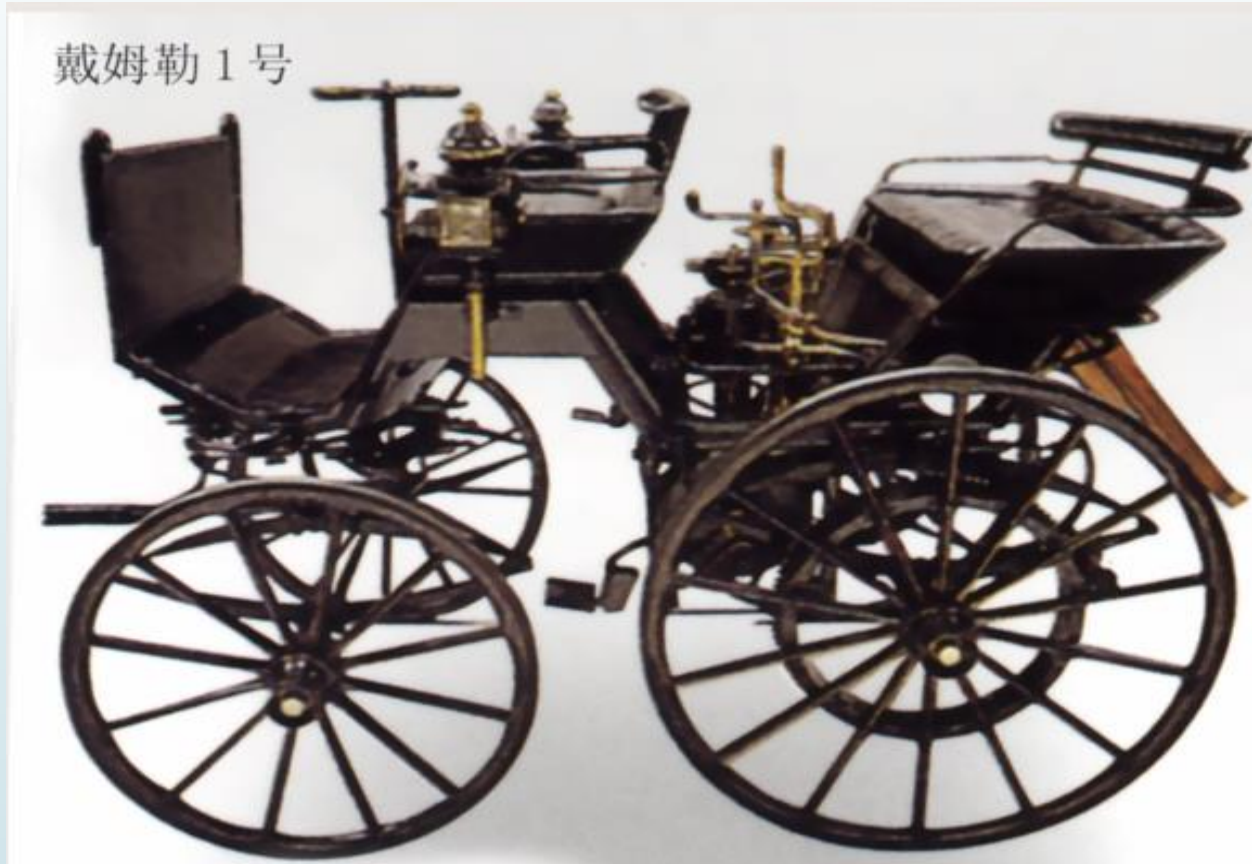
浮标



弧旋球

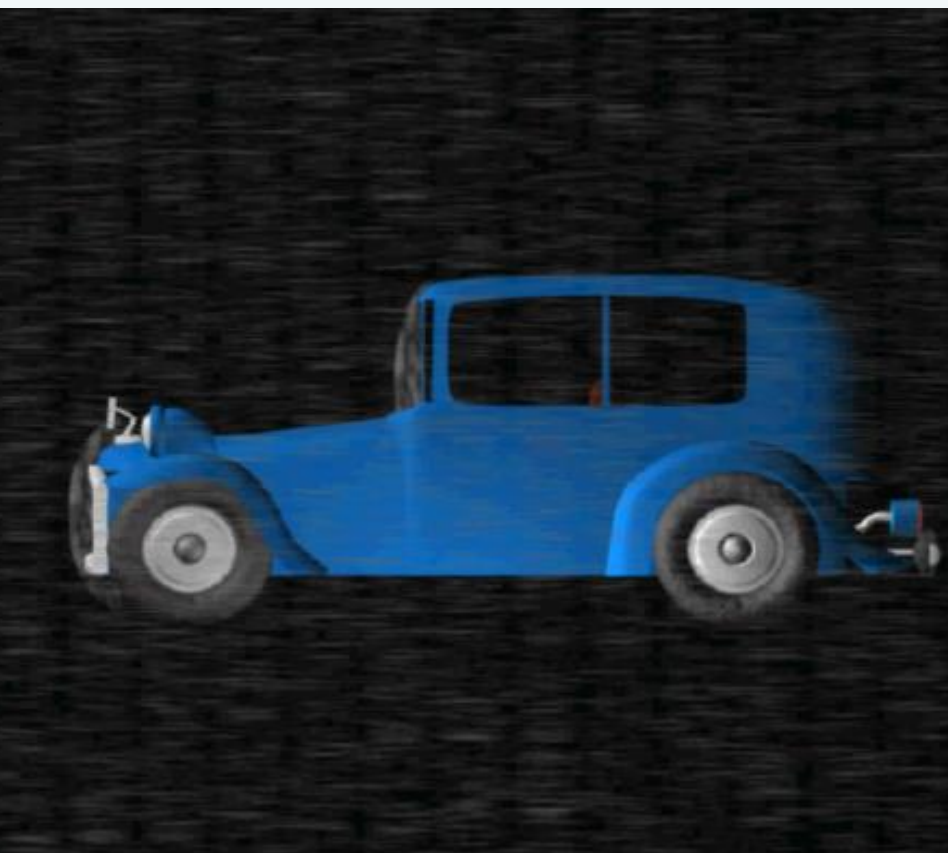


汽车阻力：汽车发明于19世纪末。



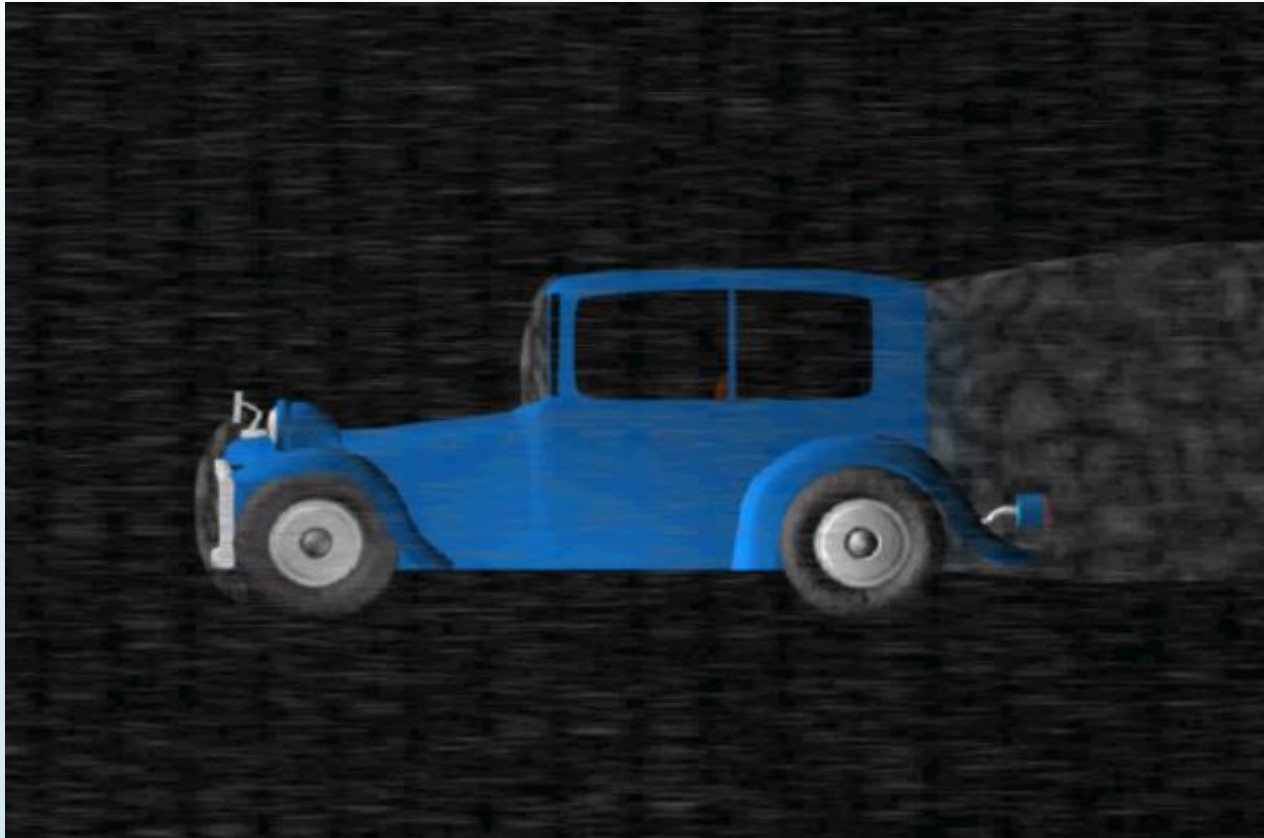
汽车阻力：汽车发明于19世纪末。

当时人们认为汽车高速前进时的阻力主要来自车前部对空气的撞击。



因此，早期的汽车后部都是陡峭的，称为箱型车。其阻力系数很大，约0.8。

实际上，汽车高速前进时阻力主要取决于车后部形成的尾流。



20世纪30年代，人们开始根据流体力学原理改进汽车的尾部形状。出现了甲壳虫型汽车，其阻力系数下降至0.6。



经过80余年的研究和改进，汽车的阻力系数从0.8下降至0.137，减小到原来的1/5。



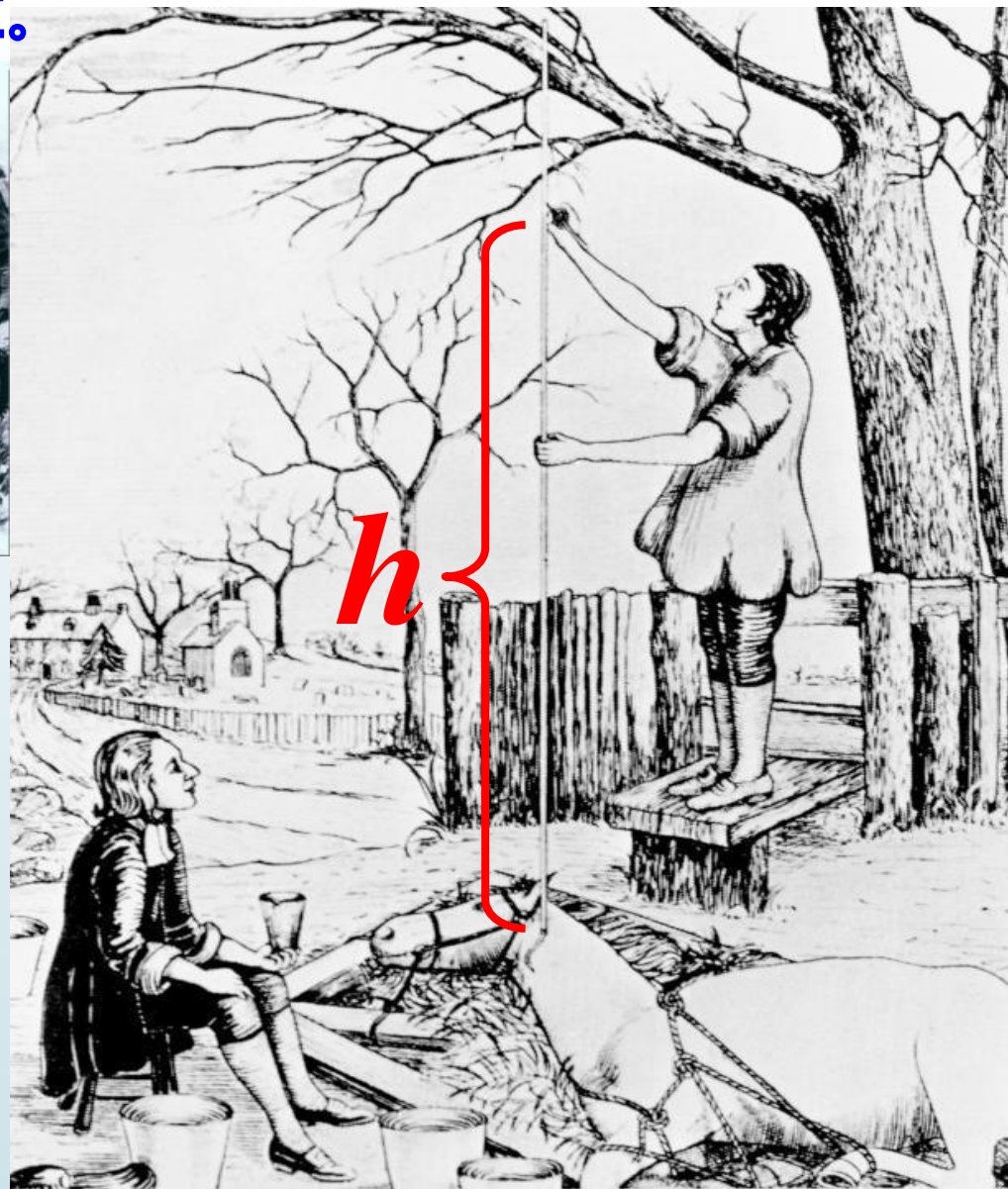
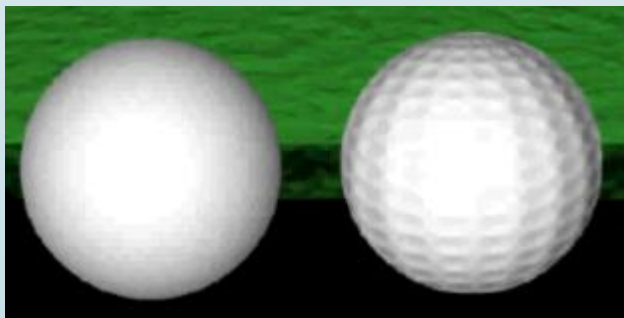
高尔夫球运动起源于15世纪的苏格兰。



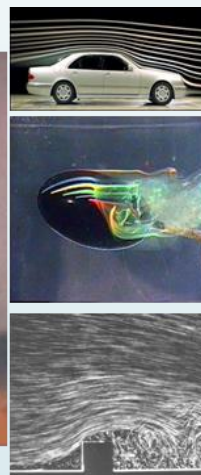
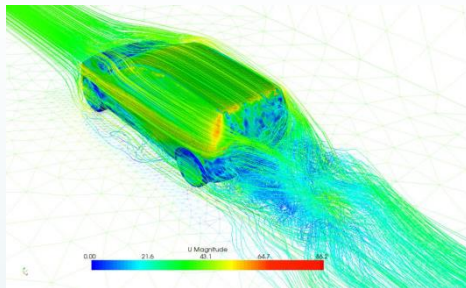
起初，人们认为表面光滑的球飞行阻力小，因此当时用皮革制球。



最早的高尔夫球(皮革已龟裂)



血压的测量



一、理想流体的运动



欧拉 (L.Euler,
1707-1783,瑞士)

1. 流体——**气体、液体**等具有流动性的物体
(**易形变、无固定的形状...**)

(1) 实际流体

- ① 可压缩性 —— 体积或密度随压强而改变
- ② 黏性 —— 相邻部分发生相对运动时有摩擦力

(2) 理想流体

绝对不可压缩的、完全没有黏性的流体。

采用方法 —— 欧拉法

研究流体质元的密度和速度的空间分布
及其随时间的变化。

2. 理想流体稳定流动

(1) 流速场

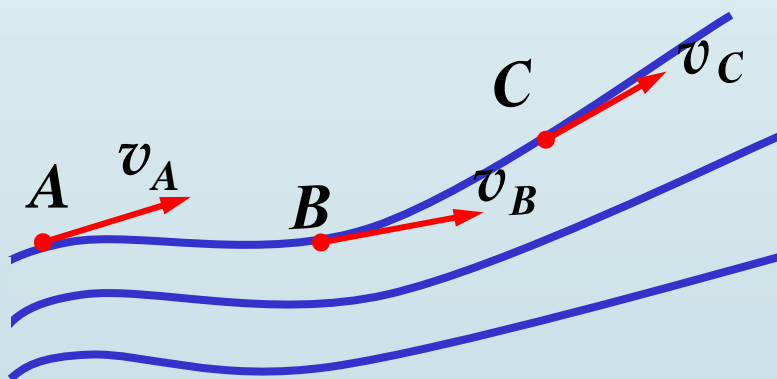
流体空间中每一点 (x, y, z) 上
有一个速度矢量 $\vec{v}(x, y, z)$

——流速场



(2) 流线

每一流体元所经过的路径



2. 理想流体稳定流动

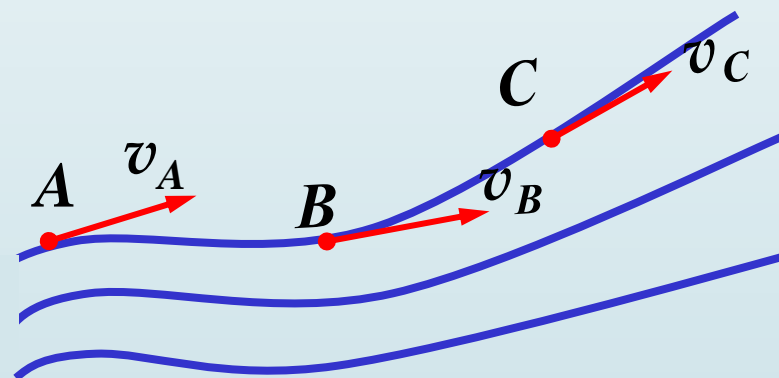
(3) 稳定流动

流体流动时, 在空间任意点, 流体质元的速度均不随时间变化——**稳定流动**

即: 流速场的空间分布不随时间变化。

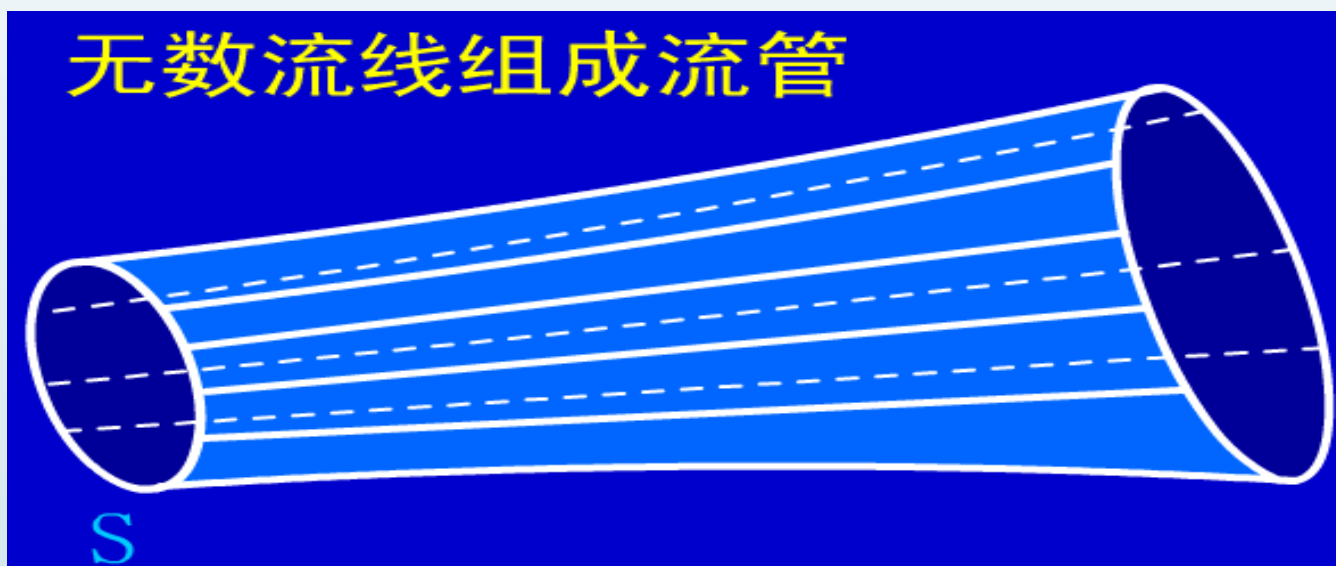
流体作稳定流动时的流线

- ① 流线的分布不随时间改变
- ② 任意两条流线互不相交



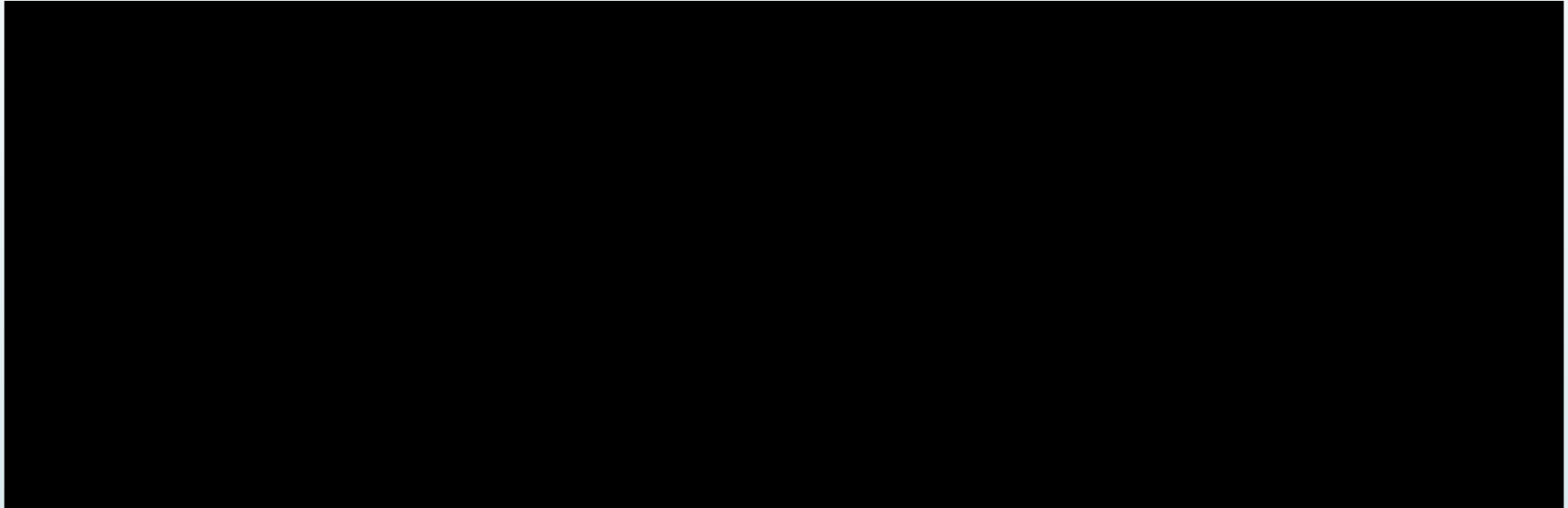
2. 理想流体稳定流动

(4) 流管



2. 理想流体稳定流动

(4) 流管



- ① 流场中的流体都可看作在某一根流管中运动
- ② 流体稳定流动时，流管的形状保持不变
- ③ 流体稳定流动时，流体不能穿过流管壁 ?

3. 理想流体连续性方程

单位时间内流体流过 ΔS 的体积

$$\Delta V = v \Delta S$$

单位时间内流过 ΔS 的质量

$$\Delta m = \rho v \Delta S$$

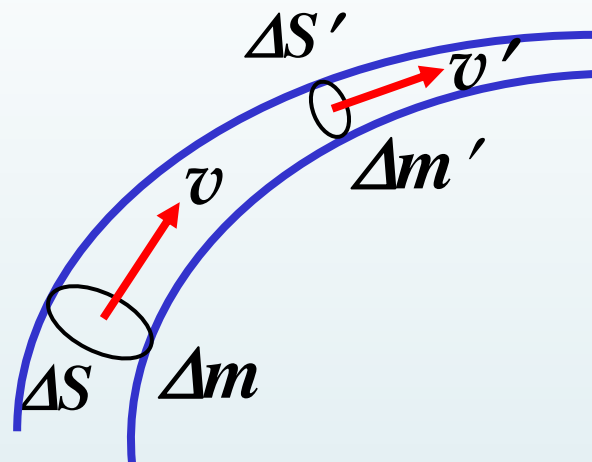
不可压缩的流体作稳定流动，则 $\Delta m = \Delta m'$

即质量守恒 $\rho \Delta S v = \rho \Delta S' v'$

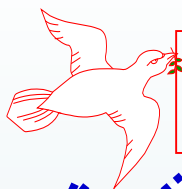
又：理想流体各处密度保持不变

$$\Delta S v = \Delta S' v' = \text{常量}$$

——理想流体连续性方程



体积流量 Q



$$\Delta S v = \text{常量}$$

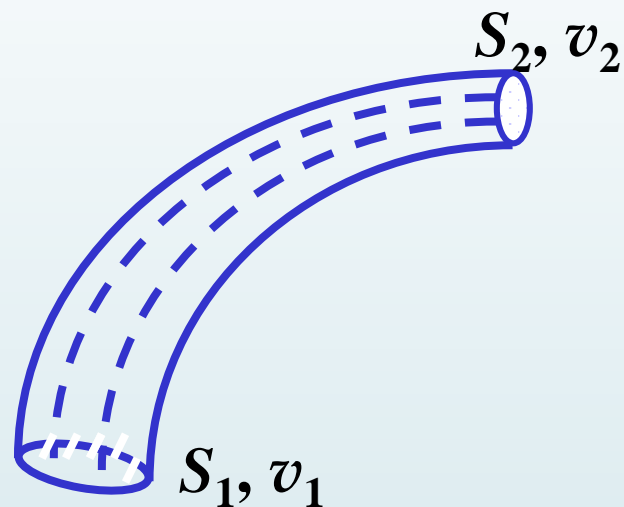
——连续性方程

讨论

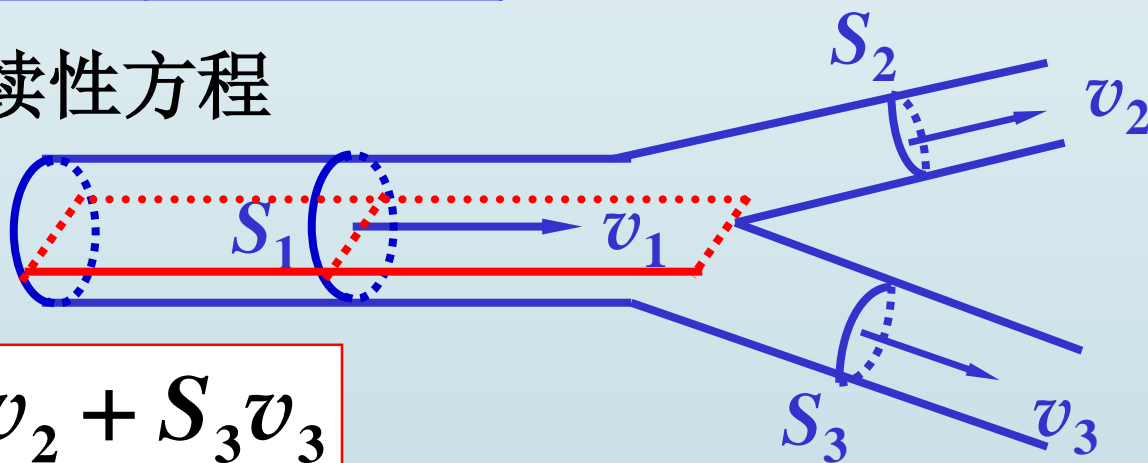
1° 理想流体作稳定流动

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

S	v	说明
大	小	流线稀
小	大	流线密



2° 分支流管的连续性方程



$$S_1 v_1 = S_2 v_2 + S_3 v_3$$

例： 你知道一个人约有多少根毛细血管吗？

已知正常人主动脉（从心脏出来的主血管）的截面积 $S_0 \cong 3\text{cm}^2$ ，通过它的血流速度 $v_0 = 30\text{cm/s}$ ；典型的毛细血管（直径约为 $6\mu\text{m}$ ）的截面积约为 $3 \times 10^{-7}\text{cm}^2$ 、血流速度约 0.05cm/s 。

解： 通过毛细管的血液总流量 = 通过主动脉的流量

设 N 根毛细血管具有相同的面积 S 和流速 v

根据分支流管的连续性方程，有

$$S_0 v_0 = N S v$$

$$N = \frac{S_0 v_0}{S v} = \frac{3 \times 30}{3 \times 10^{-7} \times 0.05} \approx 6 \times 10^9$$

伯努利方程及其应用 (Bernoulli equation)

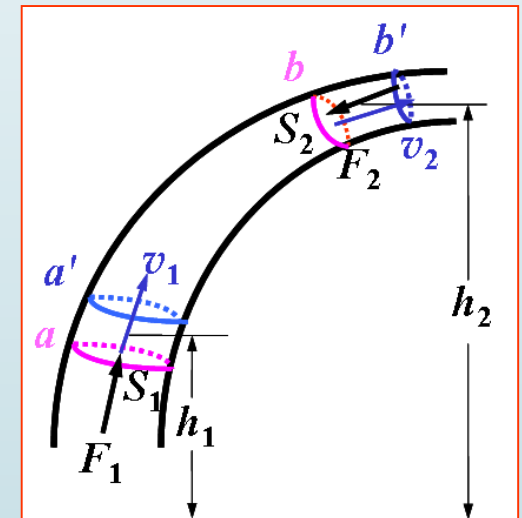
1738年, 英国科学家D. Bernoulli(1700 ~1782)利用力学中的功能原理, 推导出理想流体在流动中的动力学方程.

理想流体作稳定流动时, 在流体内同一流管任意点的压强、单位体积势能、单位体积动能之和为常量, 即:

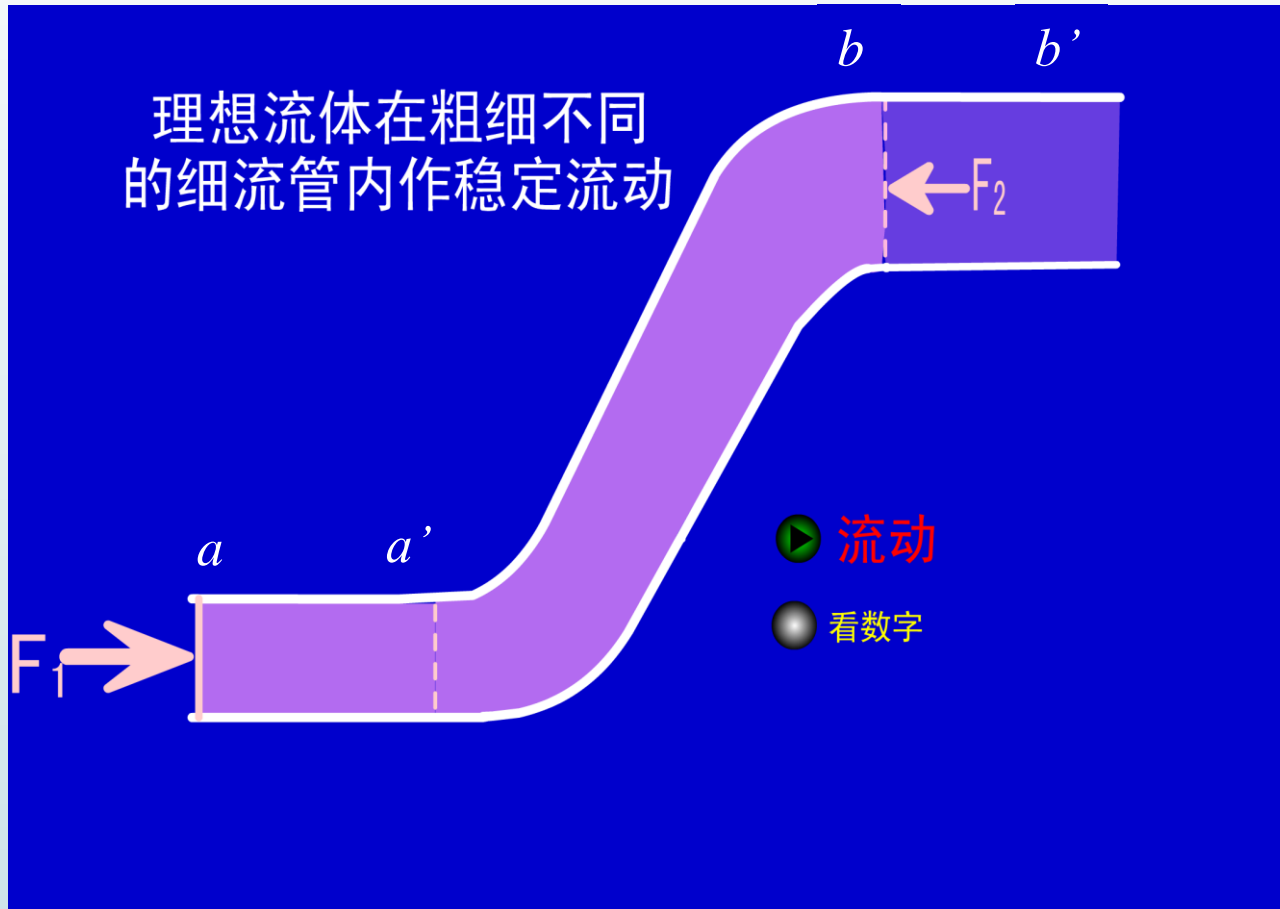
$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常量}$$

或在流体中同一流管任意两截面处有:

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

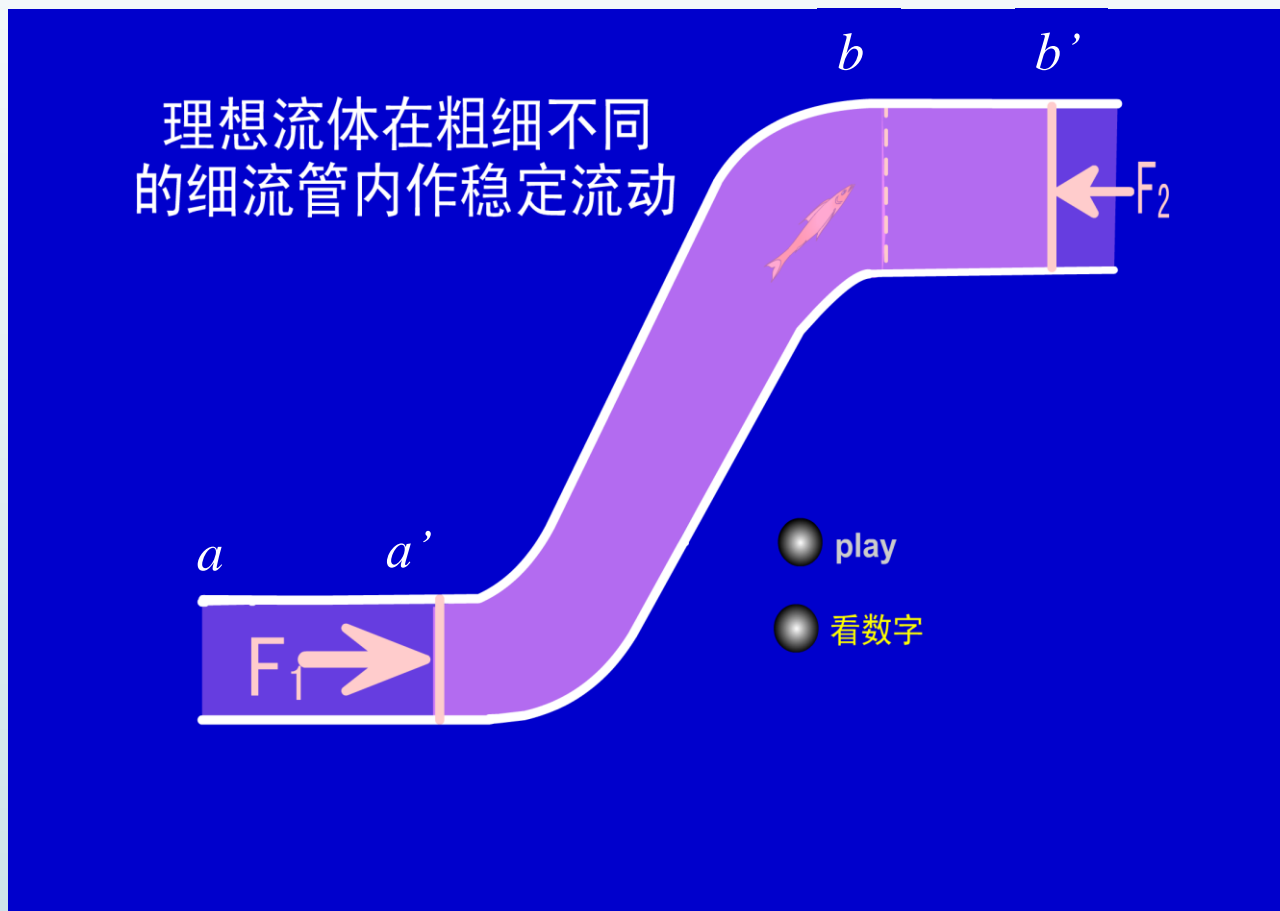


推导依据：连续性方程和功能原理.



初态

推导依据：连续性方程和功能原理。

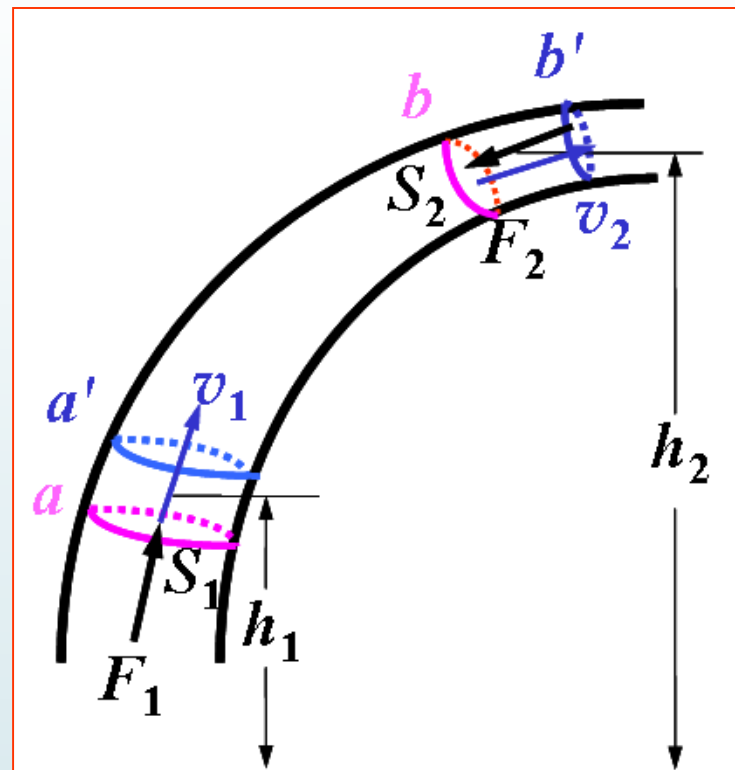


末态

推导过程:

(1) 假设与近似

- ① aa' 处的截面积近似相等(S_1)
- ② bb' 处的截面积近似相等(S_2)
- ③ aa' 体积内的 v_1 、 p_1 不变, 高度 h_1
- ④ bb' 体积内的 v_2 、 p_2 不变, 高度 h_2
- ⑤ aa' 和 bb' 体积相等为 ΔV , 质量均为 Δm
- ⑥ 流管周围的流体对流体柱 ab 不做功
- ⑦ 只有推力 F_1 和阻力 F_2 对流体柱做功



(2) 合外力所做的总功A:

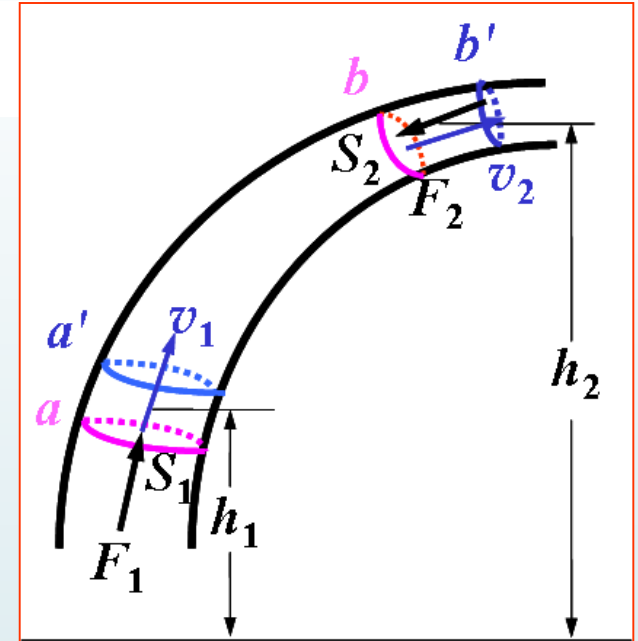
$$A_1 = p_1 S_1 \cdot v_1 \Delta t = p_1 \Delta V \quad A_2 = p_2 \Delta V$$

$$A = (p_1 - p_2) \Delta V$$

(3) 动能 ΔE_k 和势能 ΔE_p 的变化

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2$$

$$\Delta E_p = \Delta m g h_2 - \Delta m g h_1$$



(4) 功能原理

$$A = \Delta E_k + \Delta E_p$$

$$p_1 \Delta V + \Delta m g h_1 + \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 = p_2 \Delta V + \Delta m g h_2 + \frac{1}{2} \Delta m v_2^2$$

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$



$$p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = C$$

说明



$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = C$$

① 伯努利方程是理想流体稳定流动的动力学方程，
实质上是牛顿力学中功能原理的具体运用。

② 方程中各个物理量的单位

$$p : \text{Pa} \Rightarrow \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \Rightarrow \left(\text{kg} \times \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) / \text{m}^2$$

$$\rho gh : \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \text{m} \Rightarrow \left(\text{kg} \times \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) / \text{m}^2 \Rightarrow \text{Pa}$$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 : \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \Rightarrow \left(\text{kg} \times \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) / \text{m}^2 \Rightarrow \text{Pa}$$

静压强

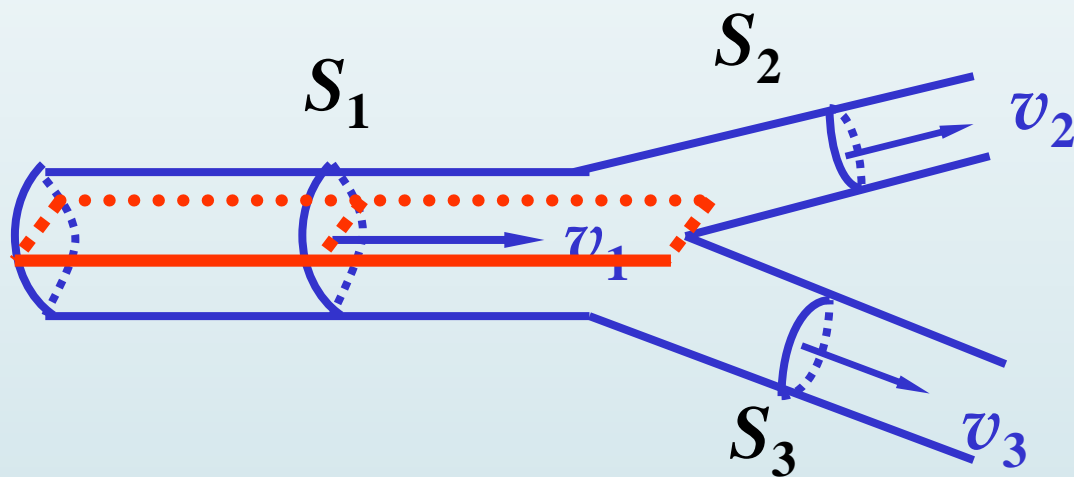
动压强



③ 适用条件

- 理想流体做稳定流动;
- 同一流管的不同截面积处或同一流线的不同点;

④ 分支管道的伯努利方程:



$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_3 + \rho gh_3 + \frac{1}{2} \rho v_3^2$$

⑤ 特殊情况下方程的简化

a. 不均匀水平管, $h_1=h_2=h$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

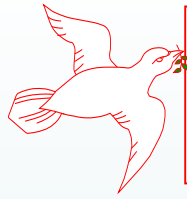
b. 均匀管, $S_1=S_2$, $v_1=v_2=v$

竖直: $p_1 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2$

水平: p, h, v 均为常量

c. 若某处与大气相通, 则该处的压强为大气压 p_0

(2) 伯努利方程的应用



$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常量}$$

流体截面三参量： p 、 h 、 v

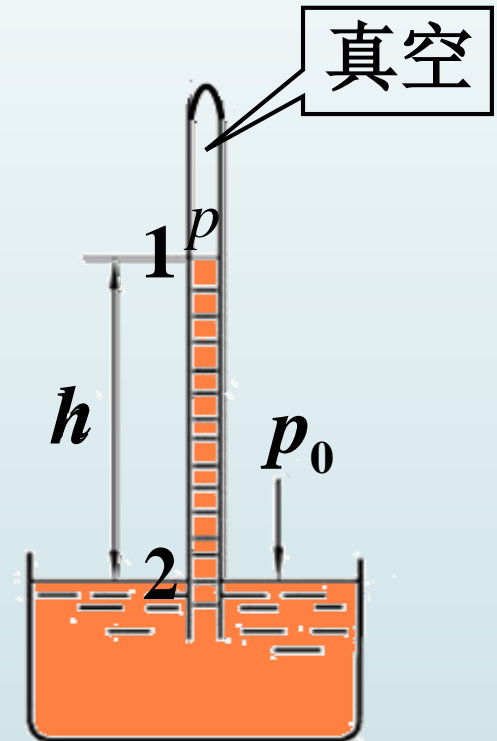
1° 不同流管中流速与压强的关系

① 均匀截面流管 $S = \text{常数}$

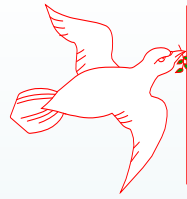
水平流管 $\left\{ \begin{array}{l} p = \text{constant} \\ h = \text{constant} \\ v = \text{constant} \end{array} \right.$

竖直流管 $\left\{ \begin{array}{l} v = \text{constant} \\ p + \rho gh = \text{常数} \\ p_1 + \rho gh = p_2 \end{array} \right.$

$$p + \rho gh = p_0 \implies p = p_0 - \rho gh \quad \text{抽真空}$$



(2) 伯努利方程的应用



$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常量}$$

1° 不同流管中流速与压强的关系

② 不均匀水平流管

$h = \text{常数}$

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

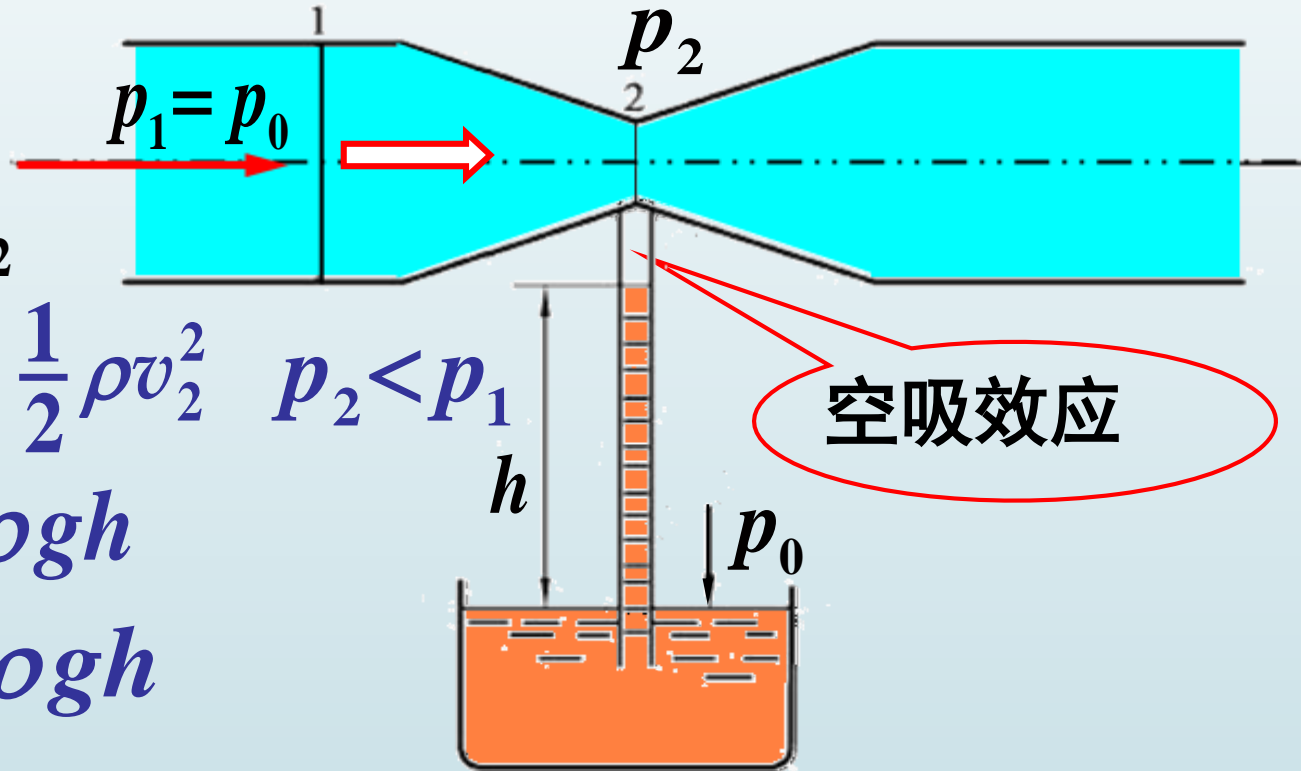
$$S_1 > S_2 \quad v_1 < v_2$$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad p_2 < p_1$$

$$p_0 = p_2 + \rho gh$$

$$p_1 = p_2 + \rho gh$$

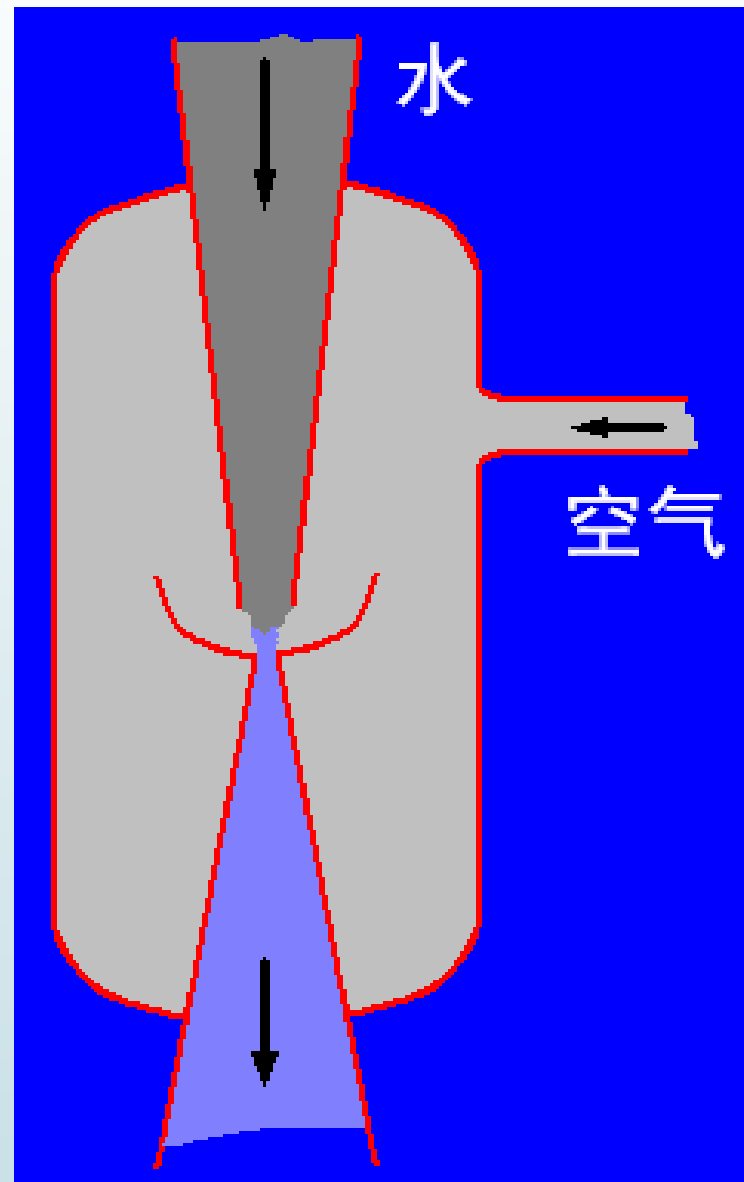
将流面提升高度 h



实例：喷雾器



实例：水流抽气机



$$p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常量}$$

在火车以每小时**50**公里的速度前进时，把人推向火车的推力有多大？

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3 \quad S = 0.4 \times 1.7 \text{ m}^2 \quad F = 78 \text{ N}$$

8公斤左右的推力！

当江心的水流以每秒**1**米的速度前进时，把人推向江心的推力有多大？

$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3 \quad F = 340 \text{ N}$$

差不多有30多公斤的力在吸引着人的身体！

“弧线球”

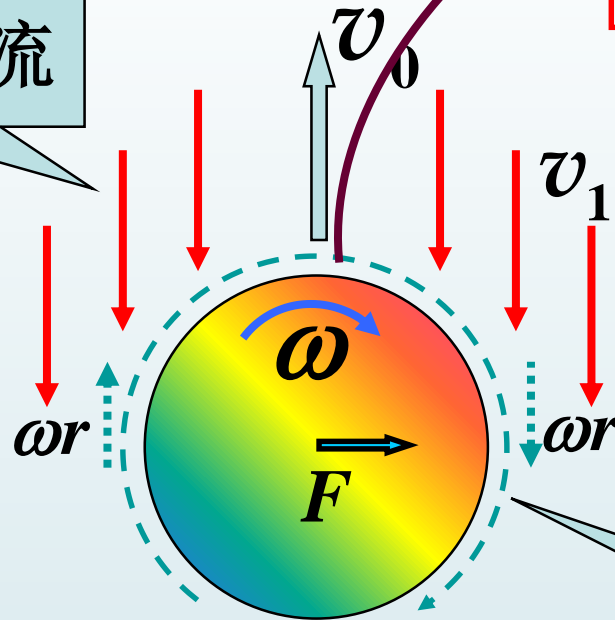


“香蕉球”



弧线球原理：

球对面的气流



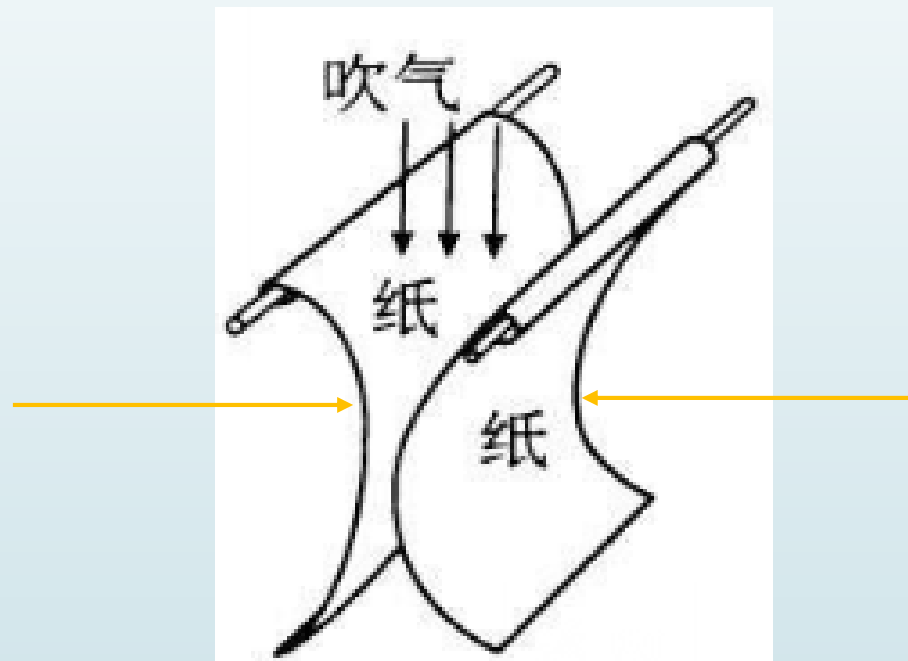
球表面的气流

$$v_{\text{左}} = v_1 - \omega r < v_{\text{右}} = v_1 + \omega r$$

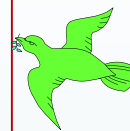
$$p_{\text{左}} > p_{\text{右}}$$

球受到向右的力，轨迹向右倾斜！

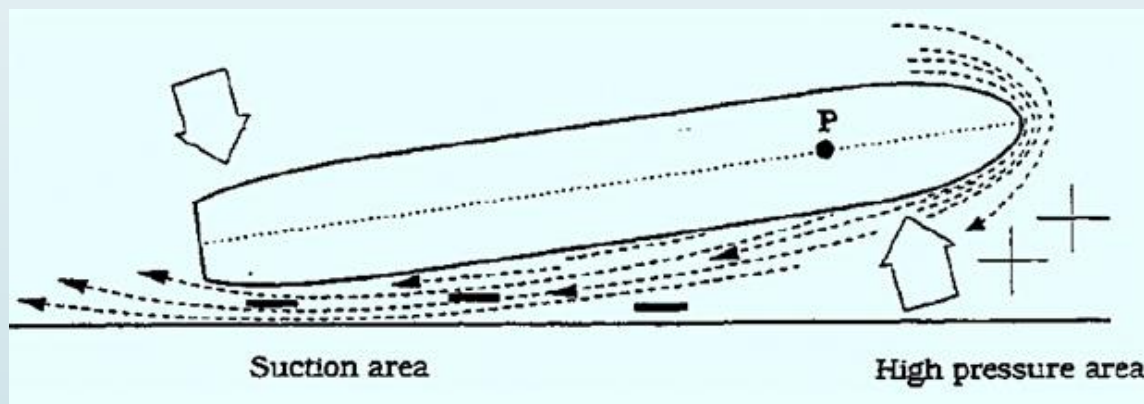
$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$



$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$



在狭窄的水道中行驶时，当船体开始转向时，更靠近河岸的那一边船身就容易被河岸吸过去。因此学船舶的都知道，大船过小道时，别让船体和河岸或其他船只靠太近，速度不能太快，要尽量走河道中心线。



船身附近的水压比船头小，更容易被河岸吸引

※ 长赐号 (Ever Given)

超大型货柜轮

约长400米，宽59米，
重22万吨

2021年3月23日，
长赐号在埃及苏
伊士运河里触底
搁浅，造成河道
严重堵塞。

鳳凰網 资讯 资讯 > 国际 > 正文

凤凰网 <https://www.ifeng.com> 苏伊士运河被堵，可能是因为这个邪门的物理现象

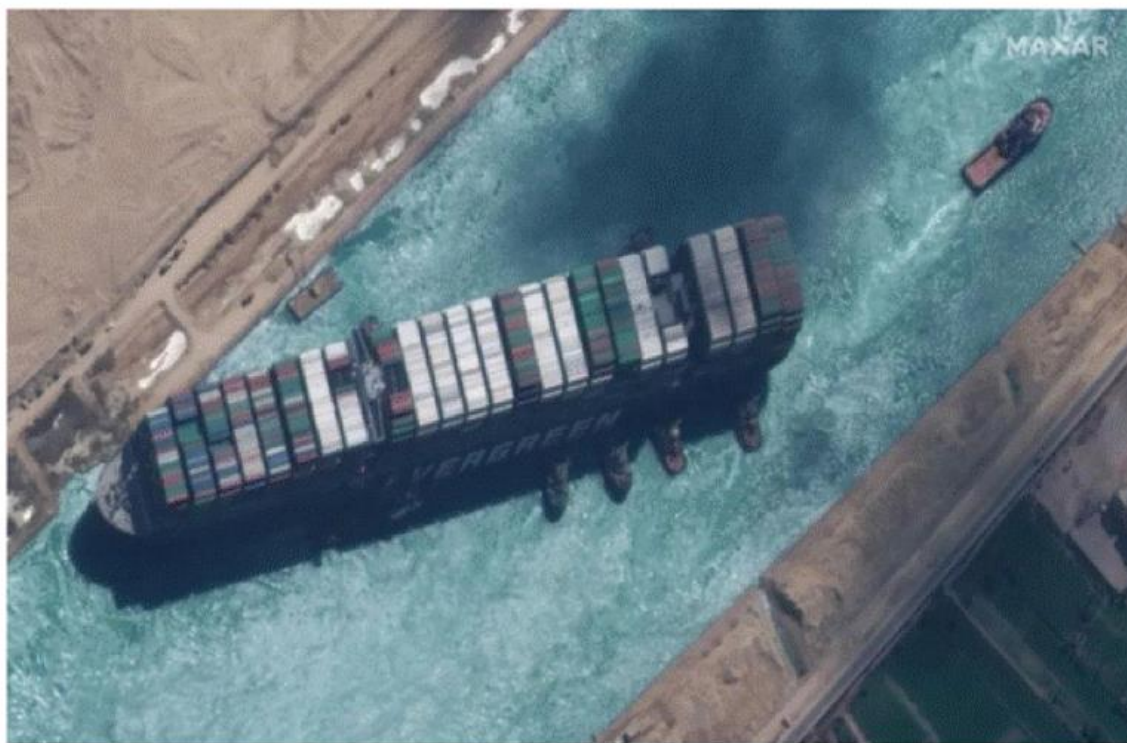
2021年04月08日 08:47:42

来源：视野科学

29人参与 15评论

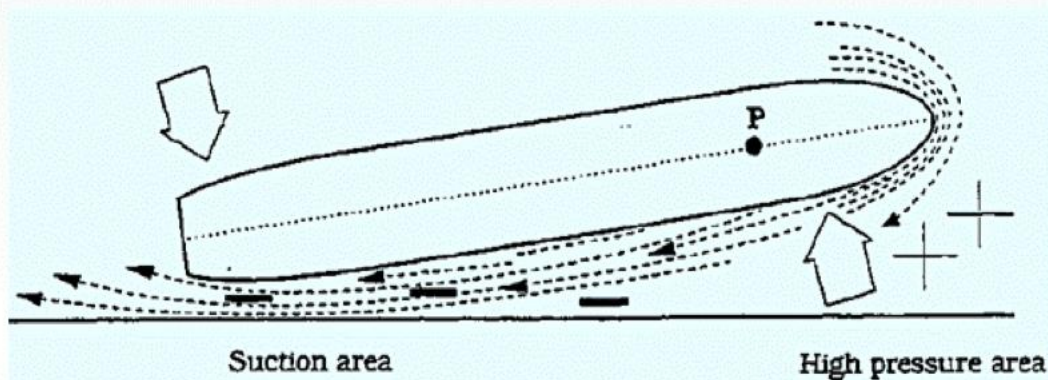


今年3月24号，由日本制造、船员来自印度、运营公司来自中国台湾、挂的是巴拿马的旗、最后被荷兰人和埃及人帮忙拖走的长赐号巨型集装箱船在苏伊士运河搁浅。



搁浅的长赐号巨型集装箱船

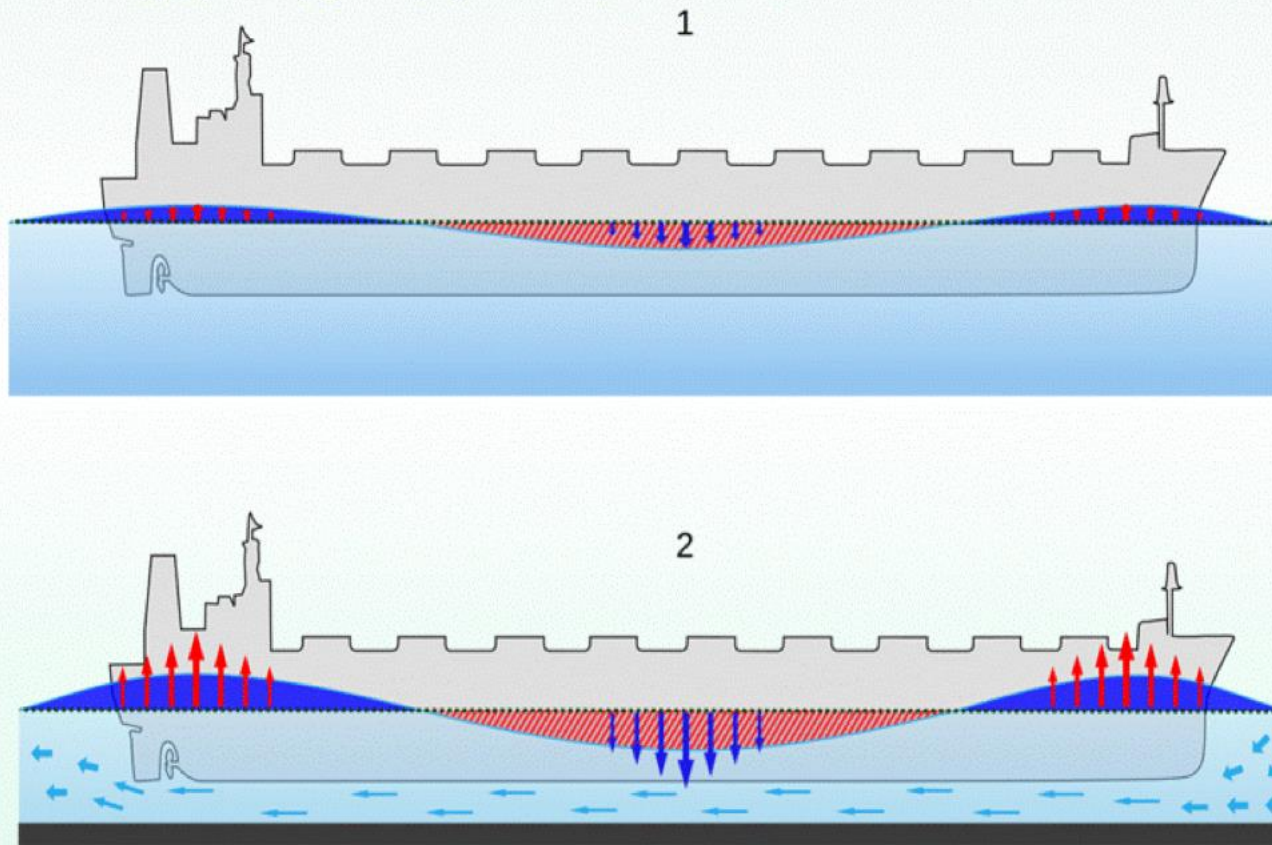
根据岸壁效应可知，在狭窄的水道中行驶时，当船头开始转向时，更靠近河岸的那一边船身就容易被河岸吸过去。因此学船舶的都知道，大船过小道时，就要特别留心别让船体和河岸或其他船只靠太近，速度不能太快，要尽量走河道中心线。



船身附近的水压比船头小，更容易被河岸吸引。图片来源：[themarigestudy](#)

历史上岸壁效应曾经造成一些大事故。

刚才说到，当船在狭窄的水道中前进时，船头的水位总是比船身和船尾的高，因此船身的水流速度比船头更大，压强更低。实际上这一点也适用于船底的情况，因为水流从船头流到船底时，也要经过更狭窄的通道。如此一来，船底也会被河床吸引，也就是说船屁股容易在浅水区下沉，这就是艏坐效应。



在深海（上）轮船不容易受到艏坐效应的影响，在浅滩（下）艏坐效应很明显。

图片来源: [wikipedia](#)

甚至还有轮船利用艏坐效应强行降低“身高”，避免超过最大安全通航高度的奇怪操作。

2009年11月1日，世界第三大游轮、高出水面72米的海洋绿洲号为了能通过丹麦的大贝尔特桥，在过桥时加速至每小时37千米，成功让大船多入水30厘米，最终以小于最大安全通航高度4厘米的距离惊险过桥，大秀了一把“过桥米线”技术。



海洋绿洲号擦线过大贝尔特桥。图片来源：cnn

运用之妙，存乎一心

勇于创新
习惯创新