空气与气体动力学

张科

回顾：

1.边界层方程；

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ u\dfrac{\partial u}{\partial x} + v\dfrac{\partial u}{\partial y} = -\dfrac{1}{\rho}\dfrac{dp}{dx} + \nu\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{cases}$$

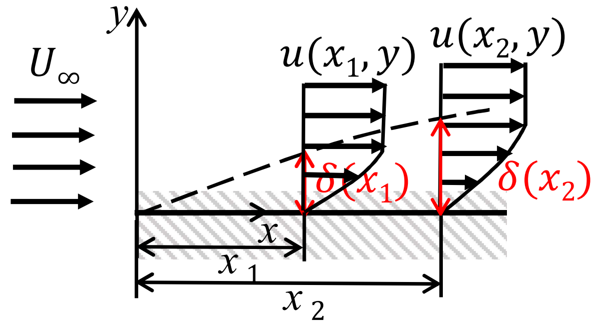
2.平板边界层Blasius精确解：

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}} \quad \frac{\delta^*}{x} = \frac{1.72}{\sqrt{Re_x}} \quad \frac{\theta}{x} = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad C_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad C_D = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} \quad H = \frac{\delta^*}{\theta} = 2.59$$

H⬇，速度分布更贴近壁面，更饱满。

湍流边界层$H = 1.3$

6.7边界层方程（10.2，10.3）



② 平板边界层(Blasius精确解)：

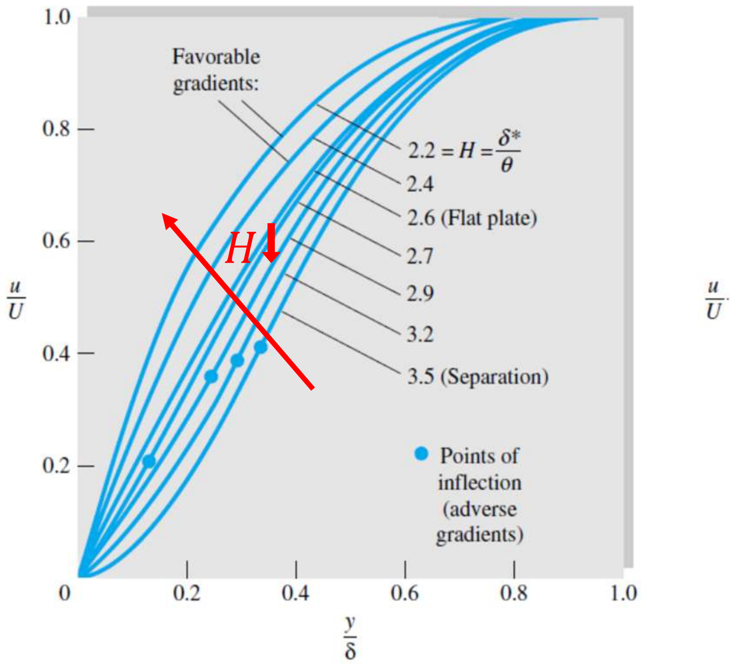
$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}=0 \\ u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}=\nu\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{cases} \xrightarrow{\eta=\frac{y}{\sqrt{\frac{\nu x}{U_\infty}}} \quad \frac{u}{U_\infty}=f'(\eta)} f'''+\frac{1}{2}ff'=0$$

Blasius 方程（1908）

➢ 形状因子：

$$H=\frac{\delta^*}{\theta}=\frac{1.721}{0.664}=2.59$$

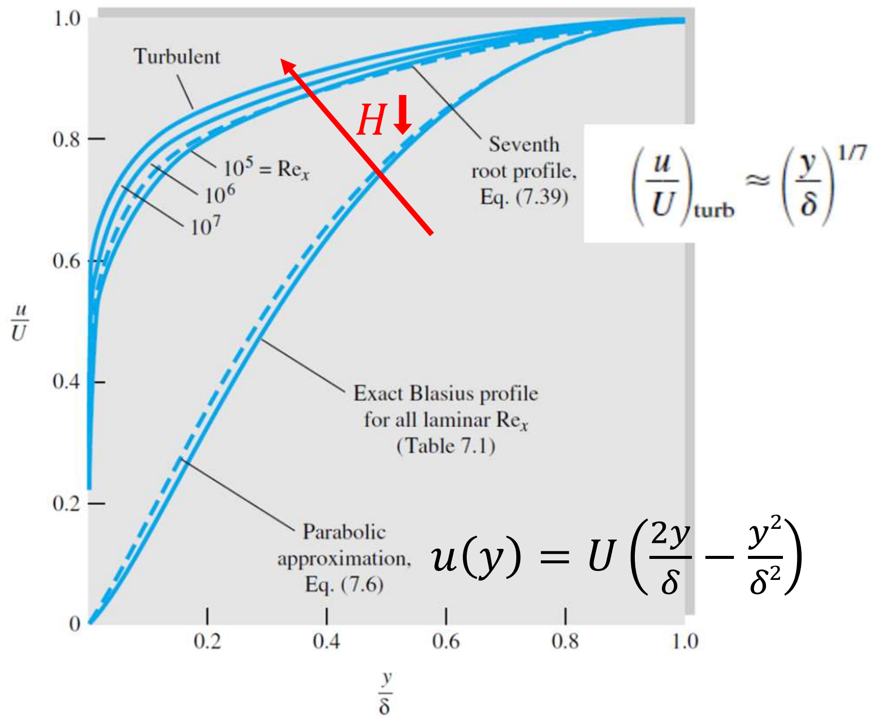
H⬇，速度分布更贴近壁面，更饱满



6.7边界层方程（10.2，10.3）

② 平板边界层：
$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial x}+\dfrac{\partial v}{\partial y}=0 \\ u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}=\nu\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{cases}$$

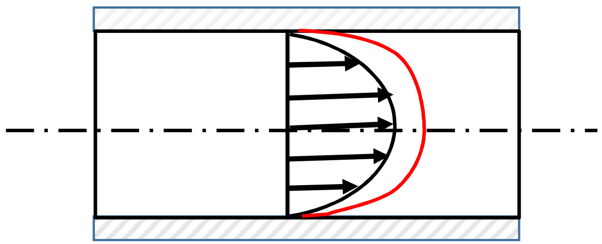
湍流：P402~P404.



$$\frac{\delta}{x}=\frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \qquad C_f=\frac{0.027}{Re_x^{1/7}}$$

$$\frac{\delta^*}{x}=\frac{1}{8}\delta \qquad H=1.3$$

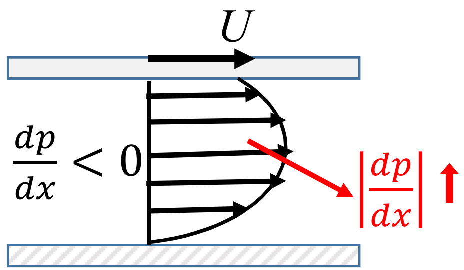
$$C_D=\frac{0.031}{\mathrm{Re}_L^{1/7}}=\frac{7}{6}c_f(L)$$

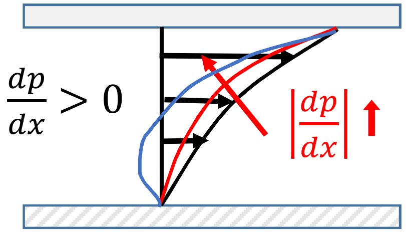


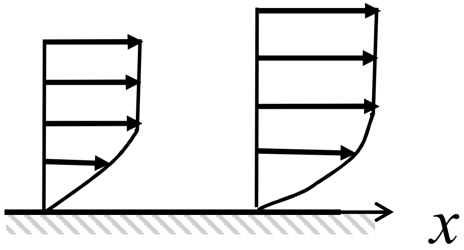
H↓，速度分布更贴近壁面，更饱满

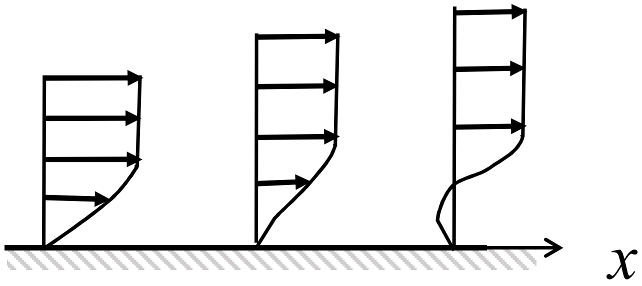
6.7边界层方程（10.2，10.3）

③ $\dfrac{dp}{dx} \neq 0$：









顺压：$\dfrac{dp}{dx} < 0$

$$U\frac{dU}{dx} = -\rho\frac{dp}{dx} > 0$$

主流加速，速度分布更饱满(H⬇)

流动更稳定（不分离），阻力更大！

逆压：$\dfrac{dp}{dx} > 0$ 流动分离点：$\tau_w = 0$

$$U\frac{dU}{dx} = -\rho\frac{dp}{dx} < 0 \qquad \frac{\partial u}{\partial y}\bigg|_{y=0} = 0$$

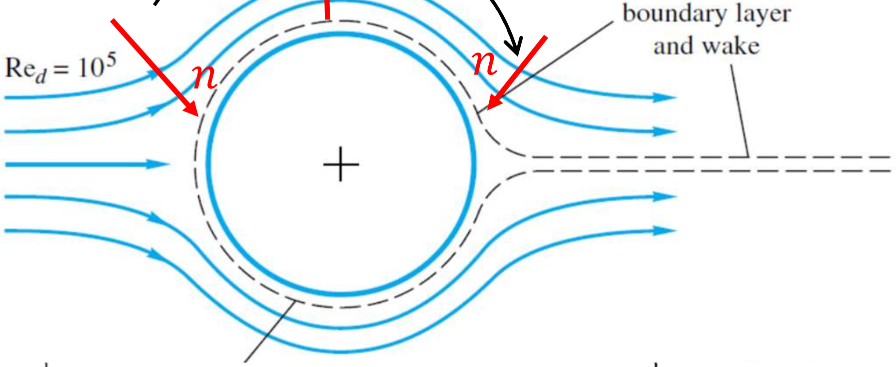
主流减速，速度分布更不饱满(H⬆)

流动不稳定（易分离），阻力更小！

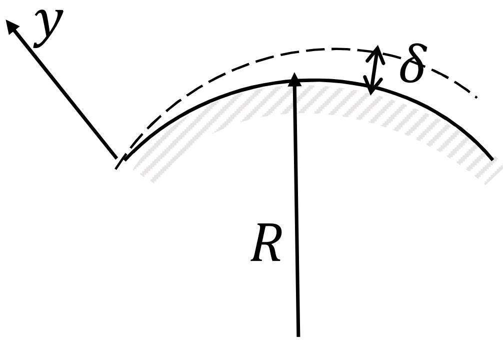
6.8曲面边界层及边界层分离（10.5）

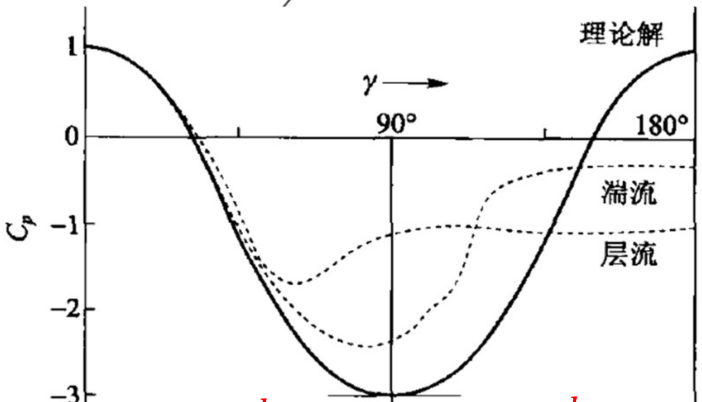
$U\frac{dU}{dx} > 0, \frac{dp}{dx} < 0$

$U\frac{dU}{dx} < 0, \frac{dp}{dx} > 0$



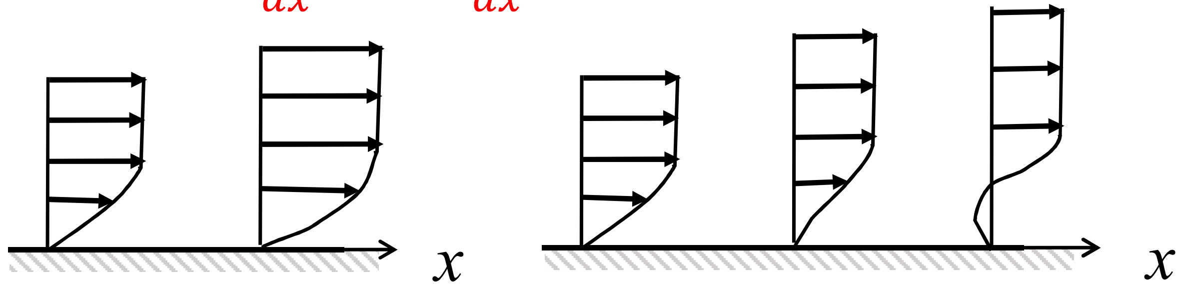
$Re \gg 1 \rightarrow \delta \ll R$





顺压：$\frac{dp}{dx} < 0$ 逆压：$\frac{dp}{dx} > 0$

主流区：$U\frac{dU}{dx} = -\rho\frac{dp}{dx}$

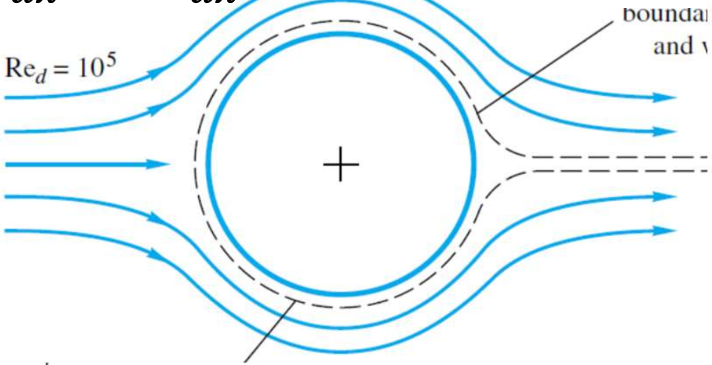


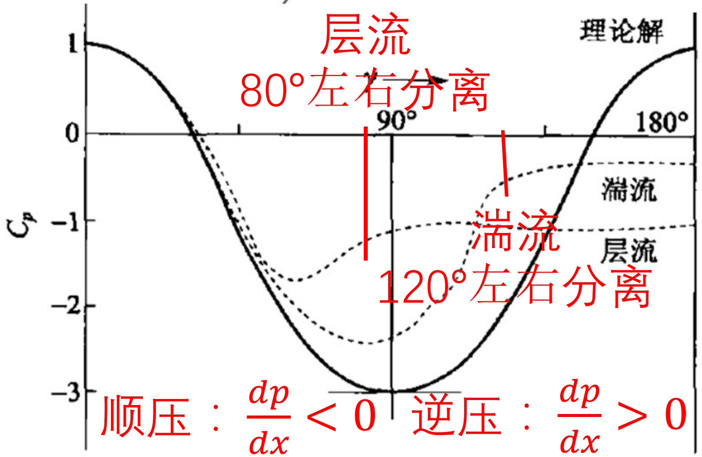
顺压：$\frac{dp}{dx} < 0$

逆压：$\frac{dp}{dx} > 0$

6.8曲面边界层及边界层分离（10.5）

$\frac{dU}{dx} > 0, \frac{dp}{dx}$ <0　　$\frac{dU}{dx} < 0, \frac{dp}{dx}$ >0





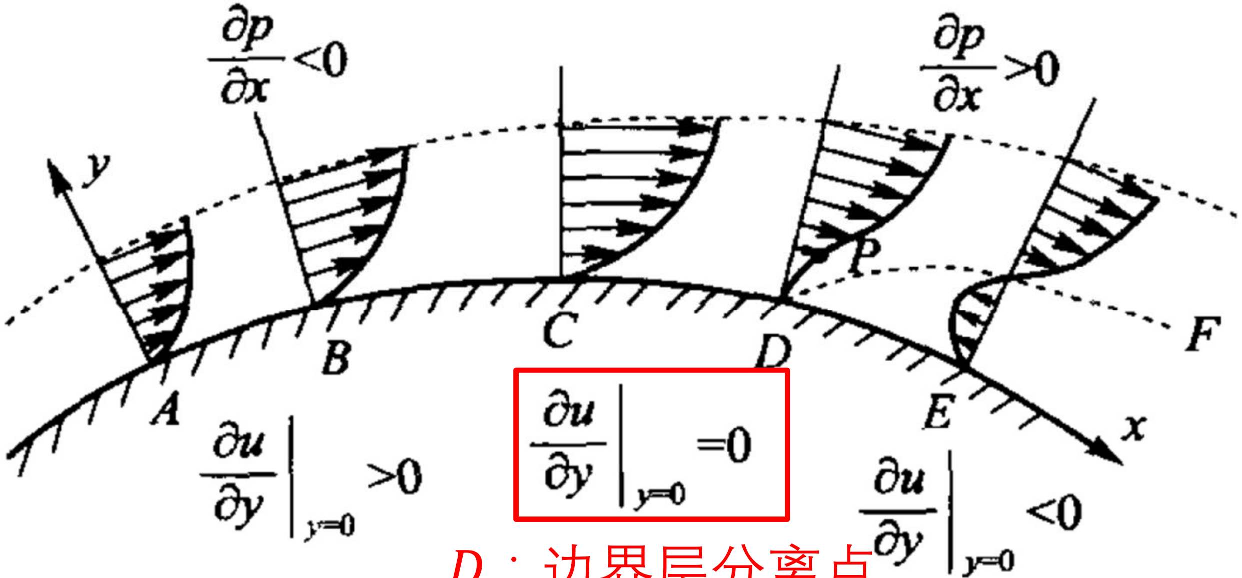
层流
80°左右分离

湍流
120°左右分离

顺压：$\frac{dp}{dx} < 0$　逆压：$\frac{dp}{dx} > 0$

$A - B - C$:
顺压，加速

$C - D - E$:
逆压，减速



D：边界层分离点

分离点下游有回流、漩涡
压强不变！

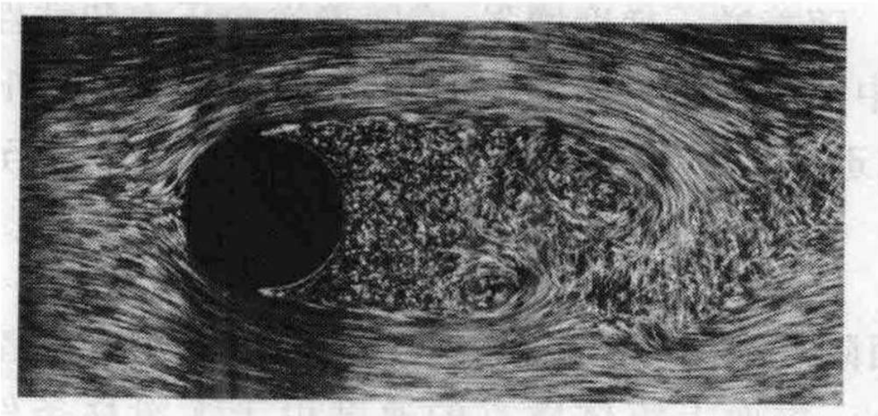
流动分离:
粘性和逆压的共同作用！

6.8曲面边界层及边界层分离（10.5）

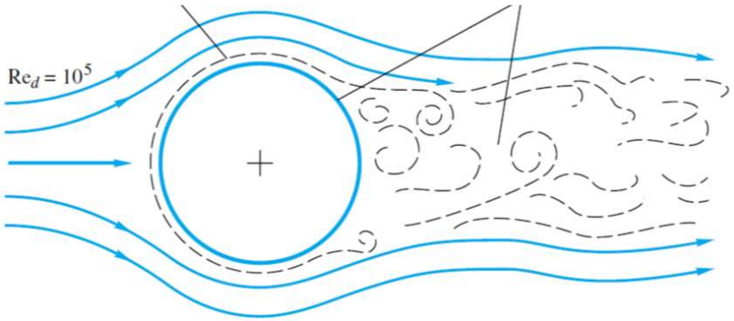
流动分离:粘性和逆压的共同作用！

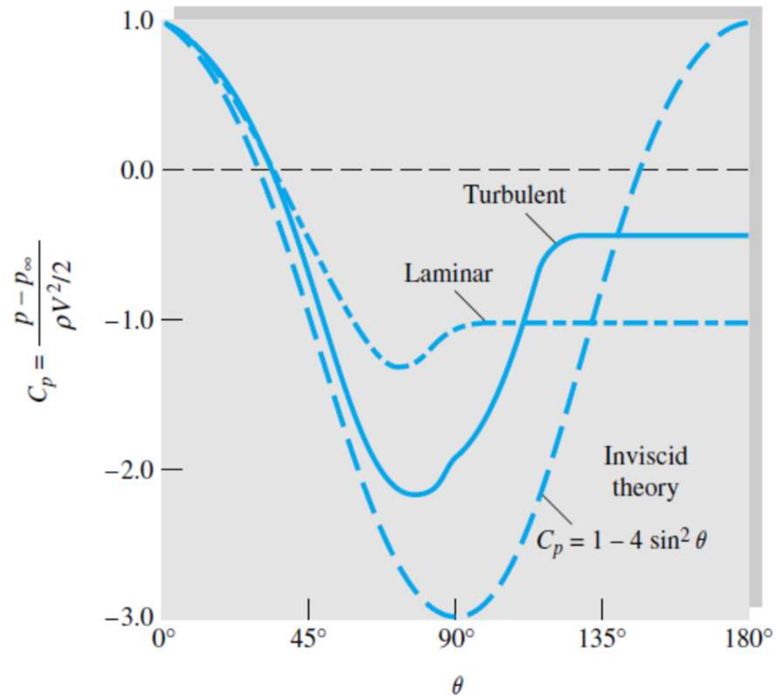
分离点下游有回流、漩涡，压强不变！

层流：



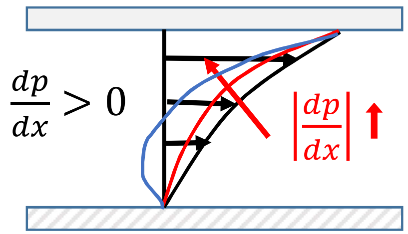
湍流：

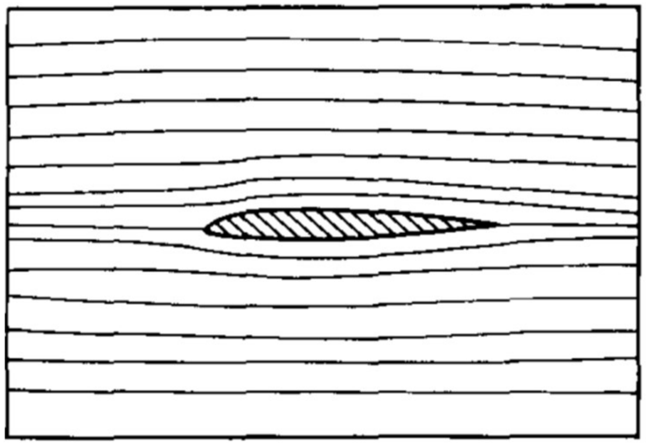


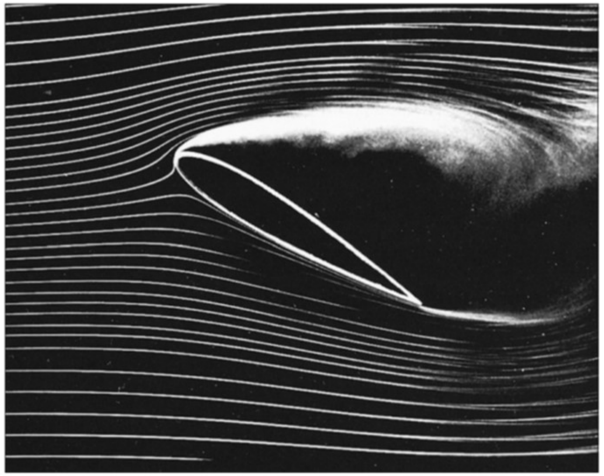


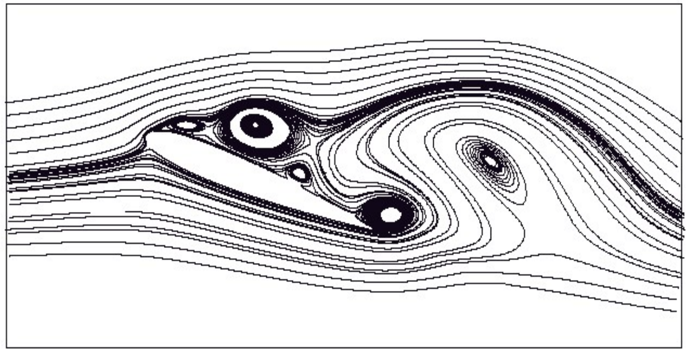
湍流抗逆压梯度能力强！

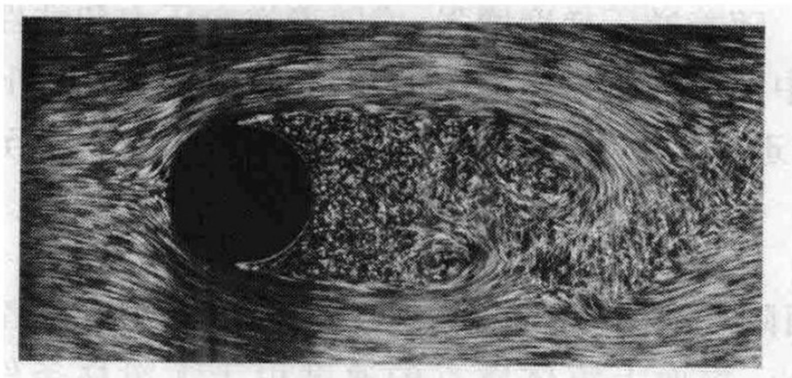
6.8曲面边界层及边界层分离（10.5）







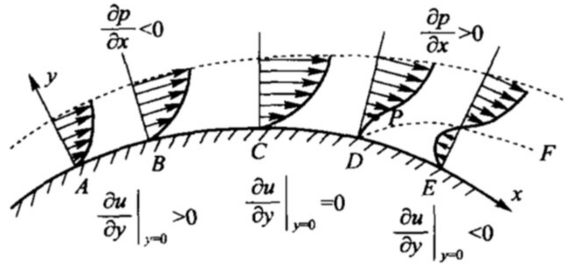




$\frac{dp}{dx}$ >0，增大到一定程度

→流动分离点：$\tau_w = 0$

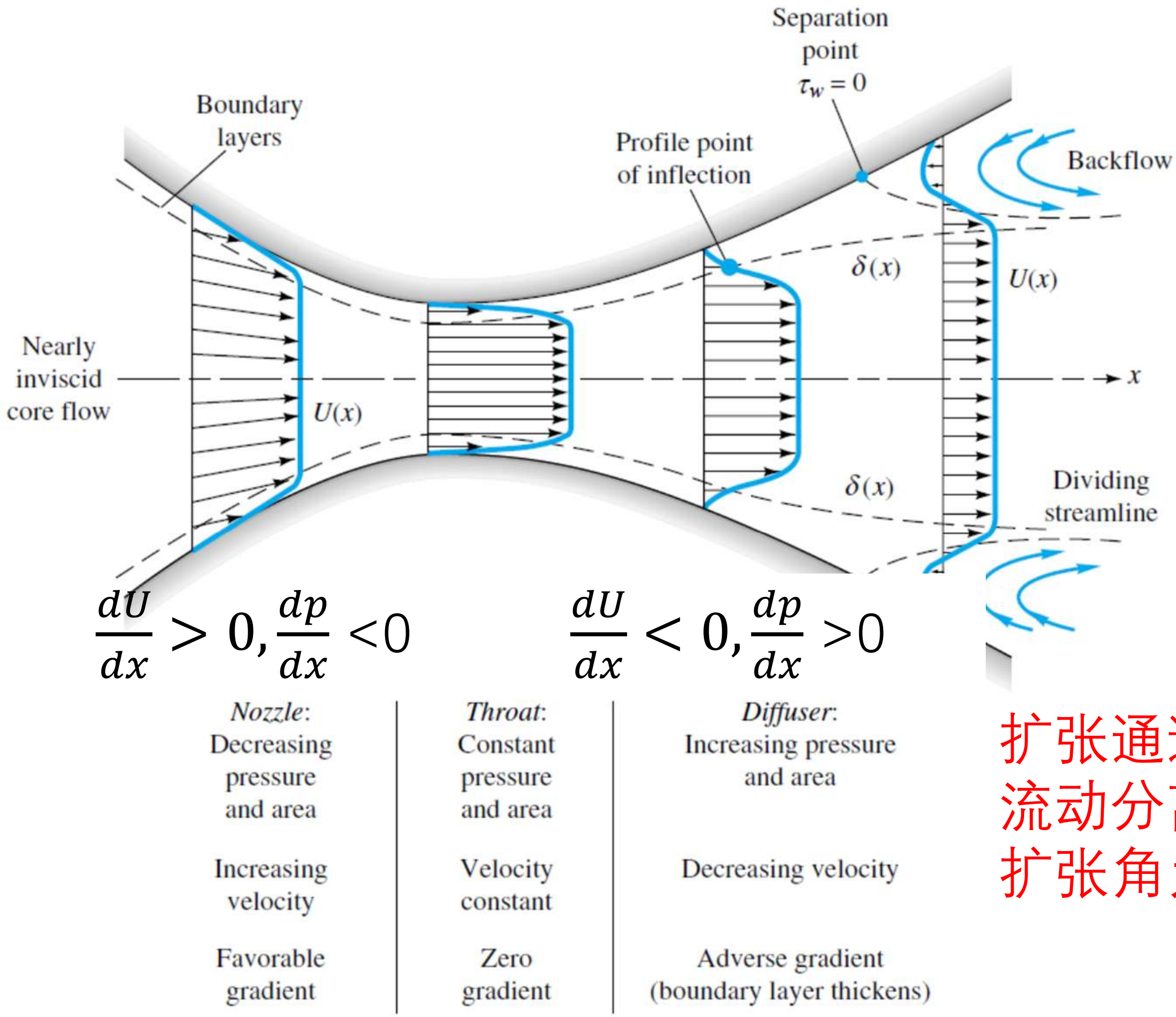
→分离



$\frac{dp}{dx}$，壁面/流线曲率决定分离点

6.8曲面边界层及边界层分离（10.5）

$\frac{dp}{dx}$，壁面/流线曲率决定分离点

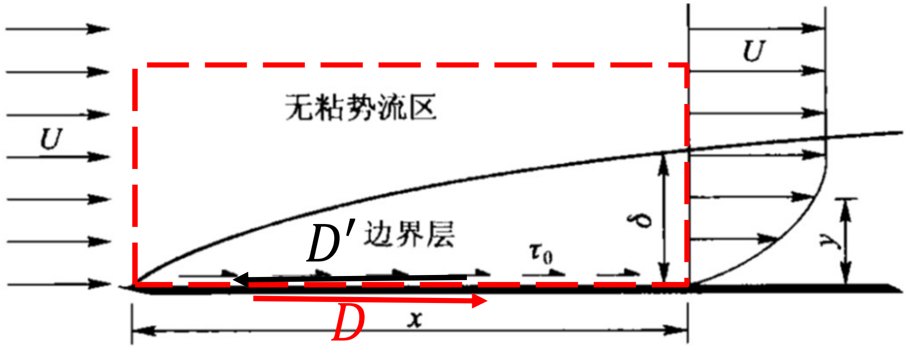


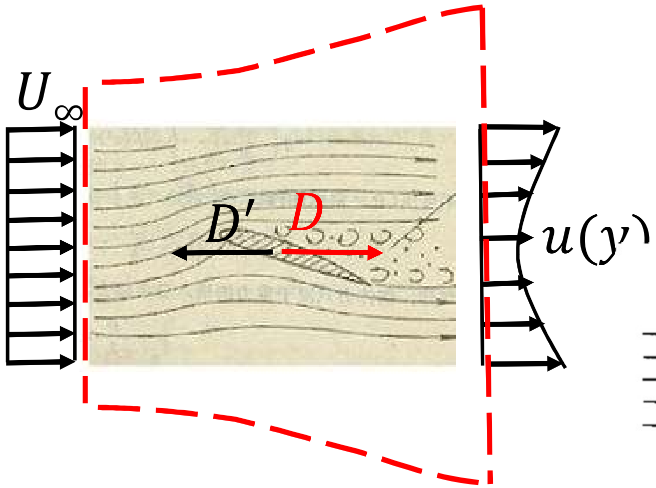
$$\frac{dU}{dx} > 0, \frac{dp}{dx} < 0$$

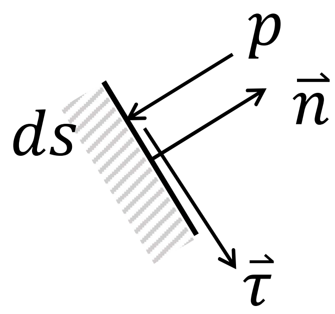
$$\frac{dU}{dx} < 0, \frac{dp}{dx} > 0$$

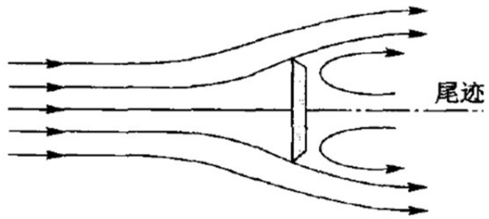
扩张通道内，壁面可能发生流动分离，能量损失增加。扩张角为关键参数！

6.9扰流物体的阻力（10.6）









从物体(固体)角度：

阻力D 是壁面 粘性 力的积分；

此处粘性力积分是否为阻力D？？

从流动角度：

1. D可由积分方法求出(流体动量损失）；

2. $C_D = \dfrac{D}{0.5\rho U^2 A} = f(Re)$，实验得到；

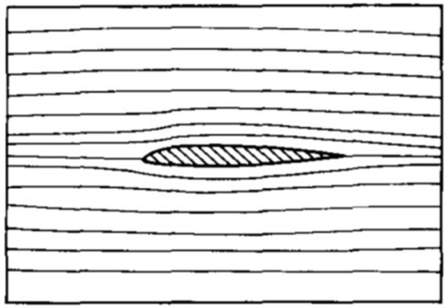
A为迎风面积，润湿面积。

阻力D为p,τ积分在运动方向的分量：

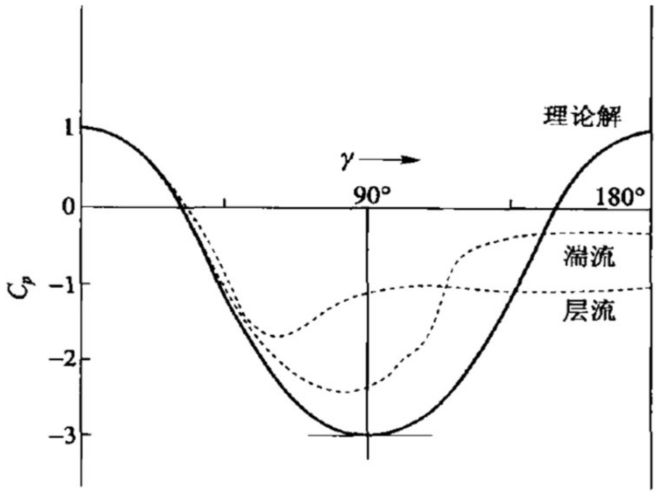
$$\boxed{\text{阻力}\begin{cases}\text{摩擦阻力} \\ \text{压差阻力}\end{cases}}\begin{matrix}\tau\text{积分} \\ p\text{积分}\end{matrix}$$

6.9扰流物体的阻力（10.6）

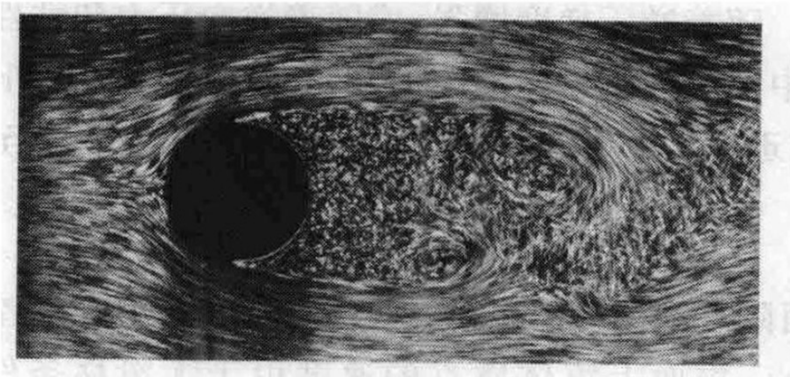
阻力
- 摩擦阻力
- 压差阻力

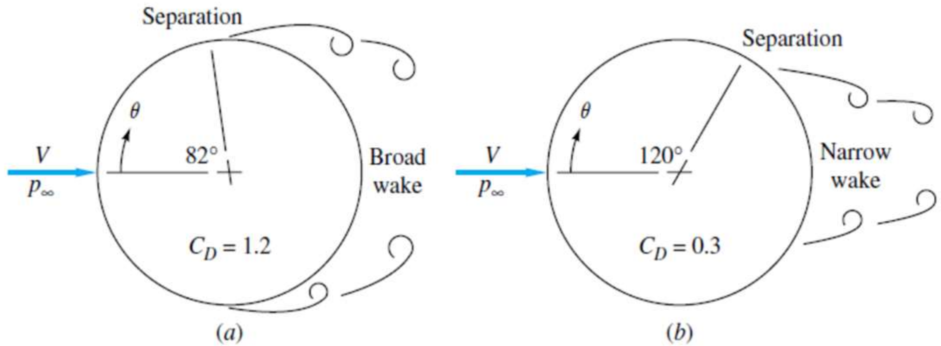


- 摩擦阻力：Re小时占比大，流线型物体占比大
- 压差阻力：主要由流动分离引起，
  与尾迹区大小，分离点位置有关，
  也称形状阻力。



6.9扰流物体的阻力（10.6）

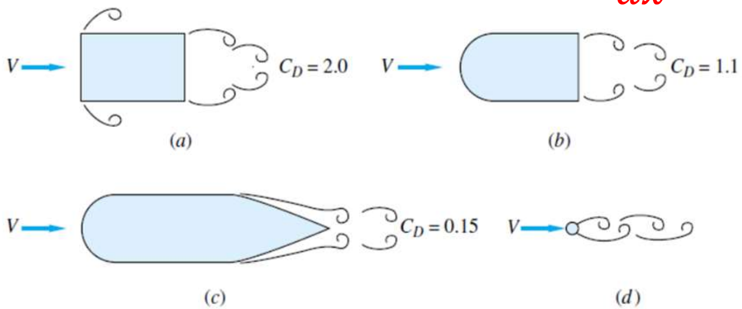


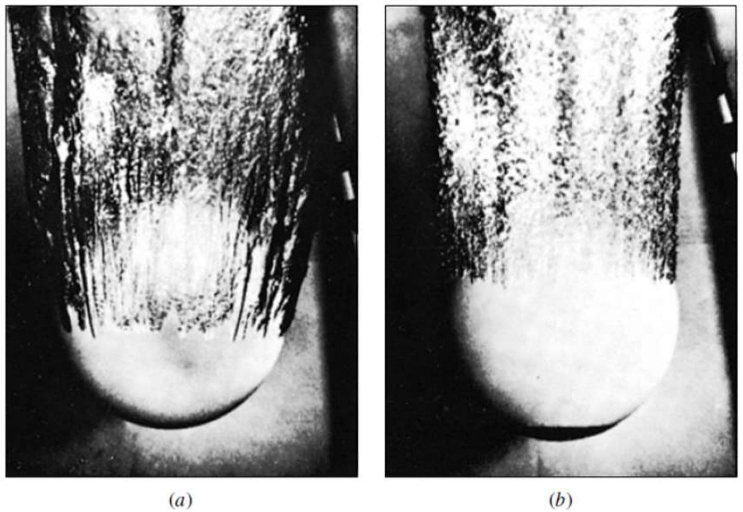


- 压差阻力(**形状阻力**)：流动分离引起， 与尾迹区大小，分离点位置有关。

  减小流动分离区→减小阻力！

  1. 层流→湍流；(增加表面粗糙度)
  2. 改变形状(钝体→流线型)。$\frac{dp}{dx}$





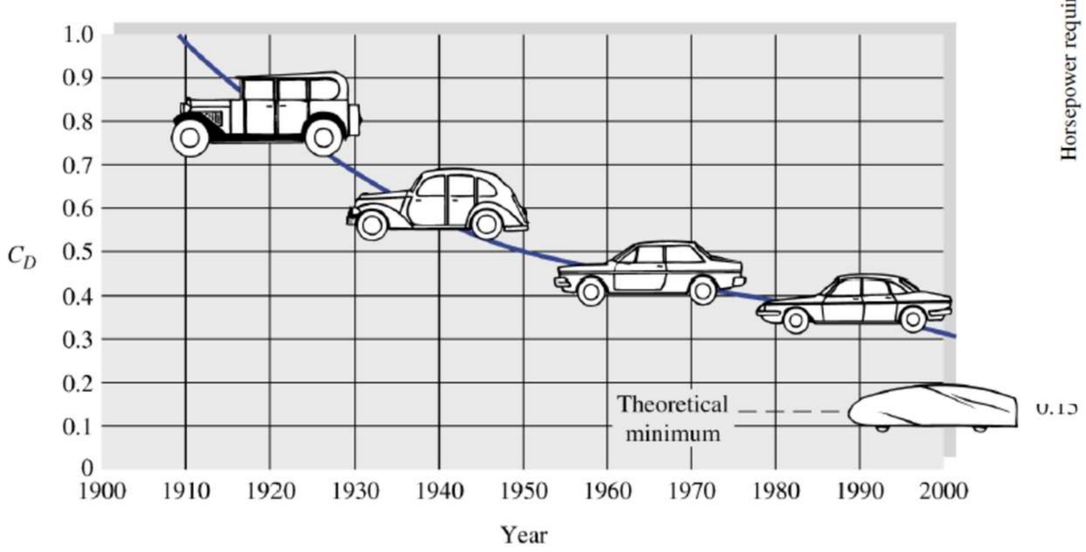
6.9扰流物体的阻力（10.6）

- 压差阻力(**形状阻力**)：流动分离引起， 与尾迹区大小，分离点位置有关。

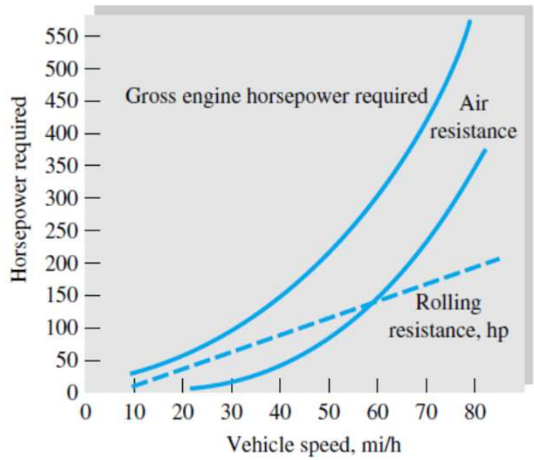
减小流动分离区→减小阻力！

$\frac{dp}{dx}$， 壁面/流线曲率决定分离点。

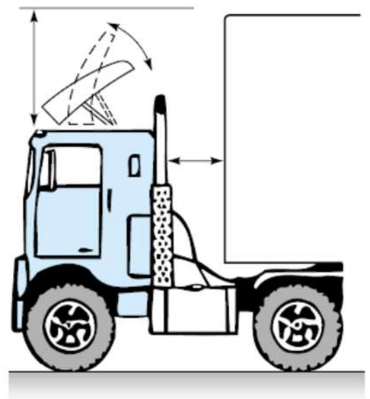
1. 层流→湍流；
2. 改变形状(钝体→流线型)。



(a)



(a)

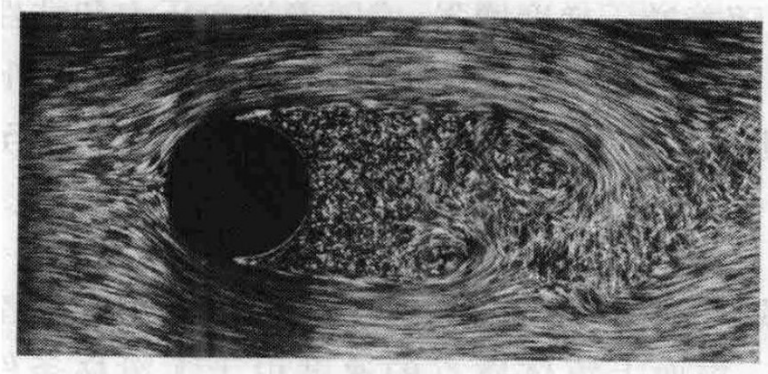


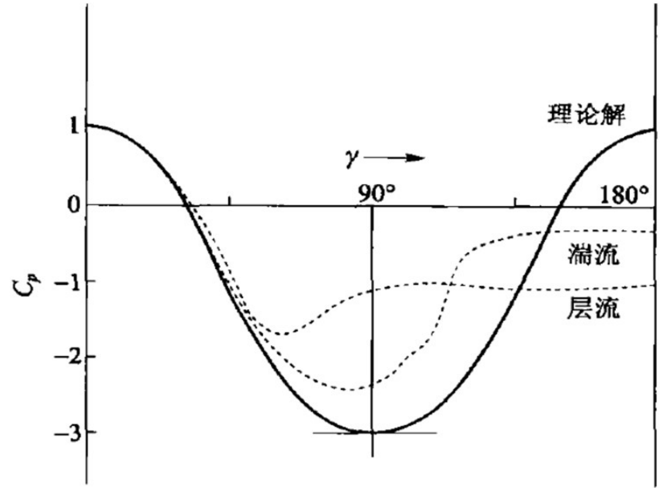
(b)

$C_D \approx 1.0$,
调整挡风板， 可减小20%。

6.9扰流物体的阻力（10.6）

阻力
- 摩擦阻力
- 压差阻力





➢ $C_D \sim Re$关系：

1. $Re \sim 1$,粘性力大， $C_D \sim \frac{1}{Re}$

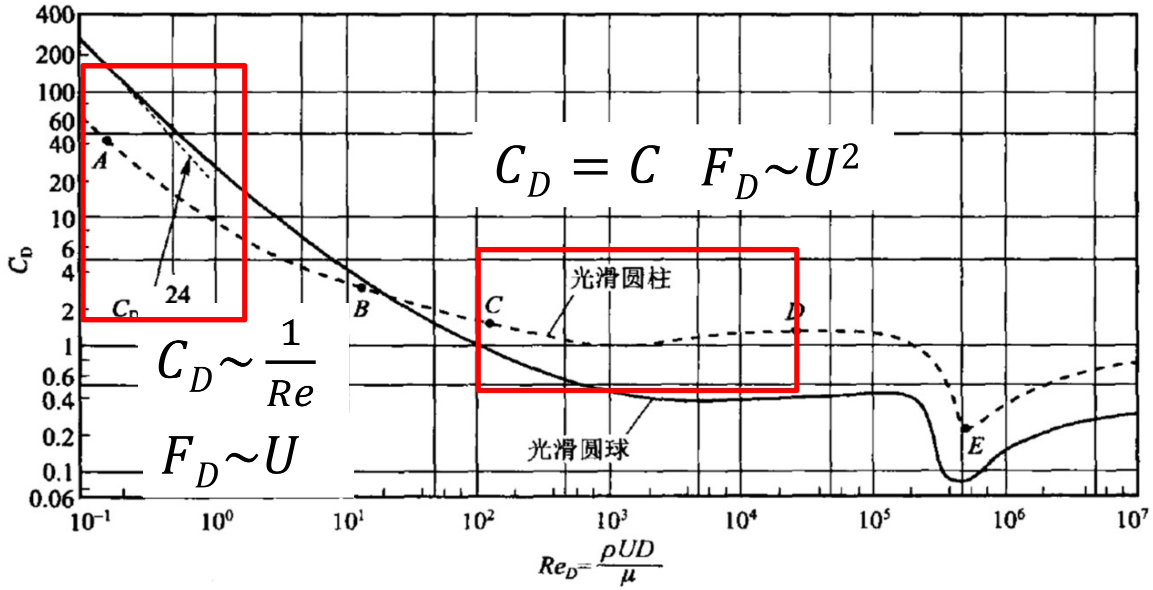
2. Re⬆，粘性⬇，压差阻力⬆

$10^3 < Re < 10^5$, C_D不变，

层流分离，压差阻力占比95%。

3. $10^5 < Re < 10^7$，层流➔湍流

分离点后移， C_D减小！



6.9扰流物体的阻力（10.6）

➢ 粗糙度影响：

1. 对钝体：

增加表面粗糙度→层流变湍流

→分离区减小→阻力减小。

有凹坑的高尔夫球$C_D \approx 0.25$，

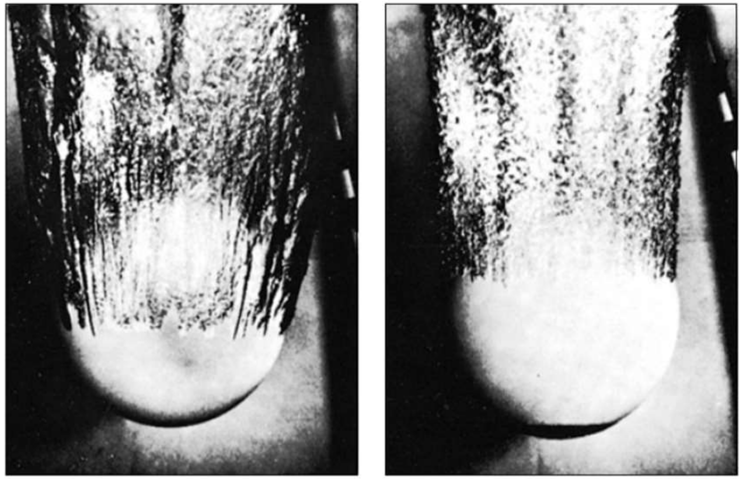
为光滑圆球C_D的1/2。

2. 对流线型物体：

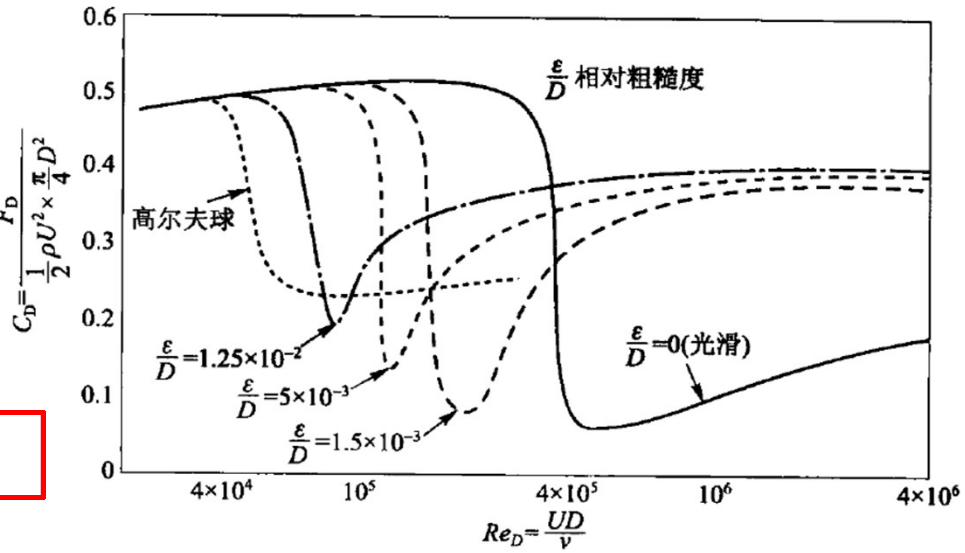
增加表面粗糙度→ τ⬆， C_D⬆，

尽量光滑，减小τ

阅读p408~423，边界层分离、扰流阻力！



(a) (b)



作业：

复习笔记！

10.27，10.32

八. 无粘不可压势流(8.1-8.4)

势流、势函数

流函数

基本平面势流

叠加复杂流动

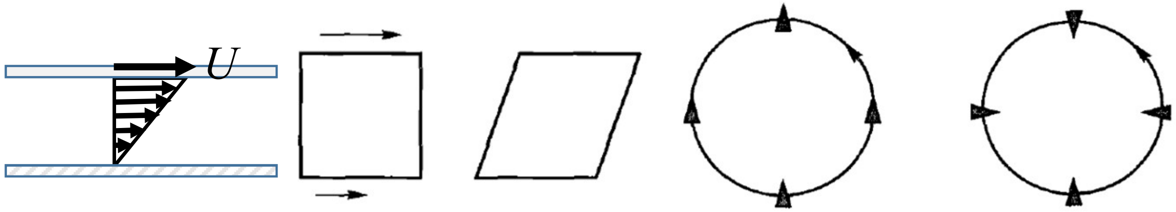
8.1势流、速度势函数（8.1）

扰流物体边界层外
理想流均为势流！?

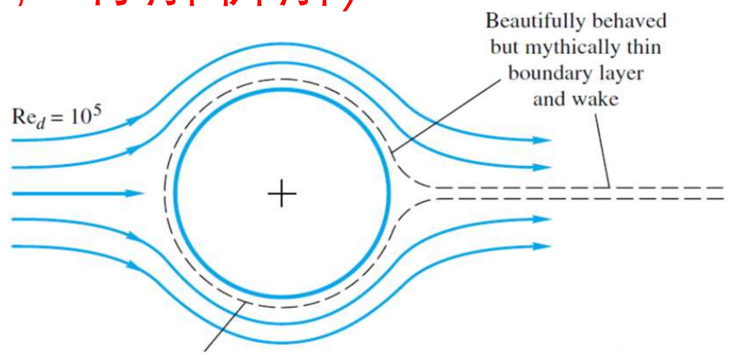
1. 势流：无旋流动！(速度场控制方程特殊，有解析解)
potential irrotational

$$\vec{\Omega}=\vec{\nabla}\times\vec{V}=0$$

流体微团绕自身旋转角速度：$\vec{\omega}=\frac{1}{2}\vec{\Omega}$

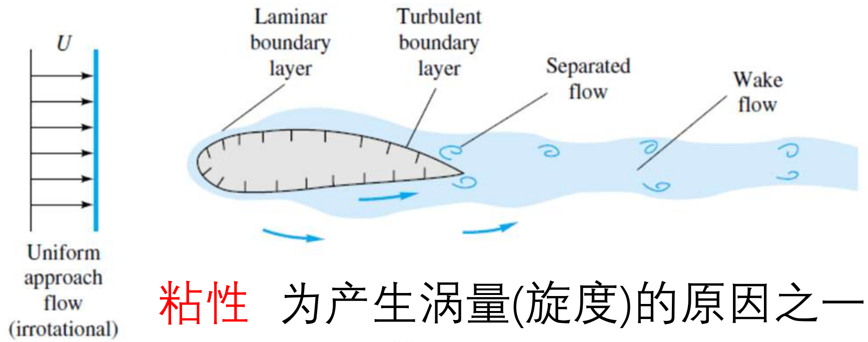


$\vec{\Omega}\neq0$ $\vec{\Omega}=0$ $\vec{\Omega}\neq0$



均匀来流无旋→理想扰流无旋！

- 流体微团所受力偶为0时，其$\vec{\omega}$、$\vec{\Omega}$不变；
- 压力、重力对微团中心力矩为0；
- 理想流粘性力为0→微团受力偶为0；



粘性 为产生涡量(旋度)的原因之一。