



流体力学 · 蠕流流动与绕流物体阻力

孙东科

dksun@seu.edu.cn

东南大学机械工程学院

2026年5月27日



目录 CONTENTS

- 1 边界层概念
- 2 绕平板流动边界层的近似计算
- 3 绕曲面流动及边界层的分离
- 4 黏性流体绕小圆球的蠕流流动
- 5 黏性流体绕流物体的阻力

知识回顾：什么是不可压缩流体的外部流动？

“南昌号” 驱逐舰



“南海二号” 钻井平台

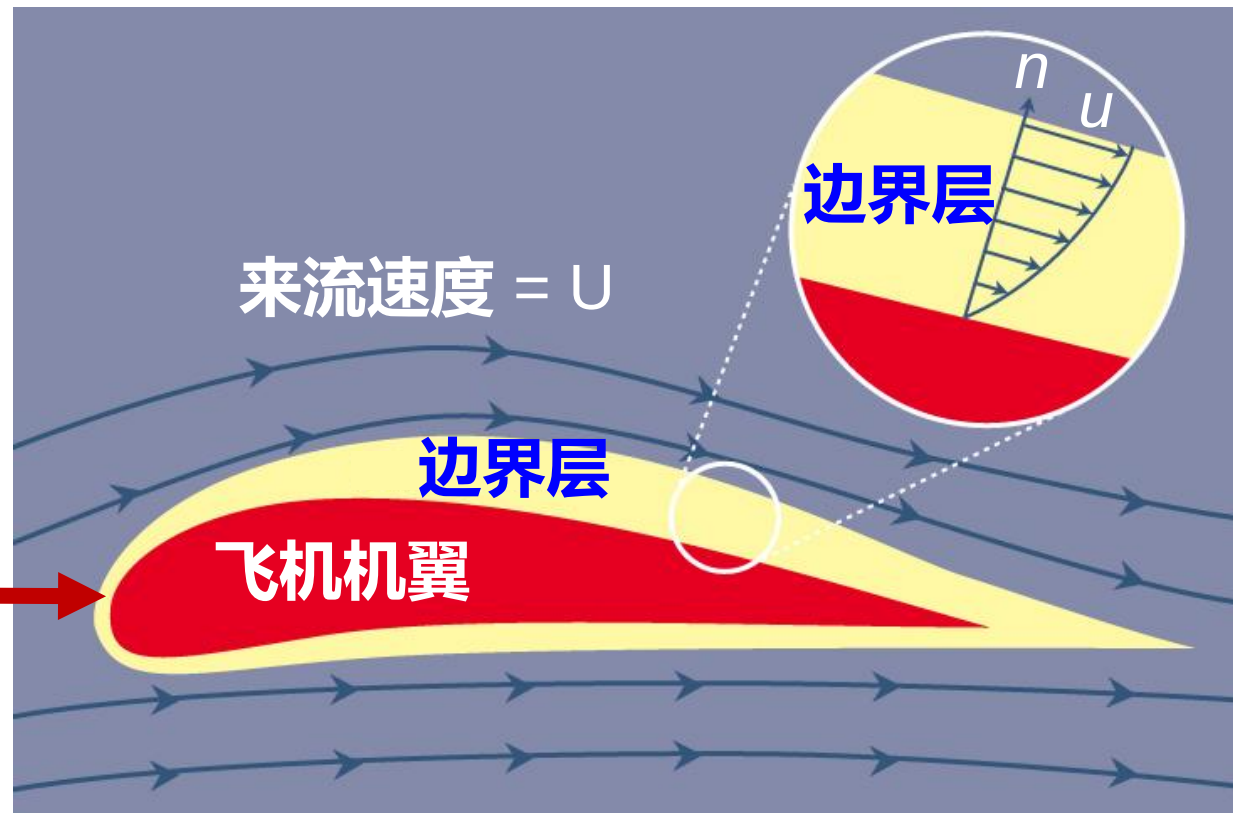


海水围绕军舰、潜艇、航母流动，海水围绕海岛、钻井平台流动

空气围绕飞机、飞艇、气球、风筝、小鸟、树木、高楼大厦流动

知识回顾 - 什么是边界层?

气流绕过机翼形成的边界层



边界层内、外区域并没有明显的分界面，一般将壁面流速为零与流速达到来流速度99%处之间的距离定义为**边界层厚度**。

第三届国际数学大会

德国海登堡

德国著名的力学家 - 普朗特

《论黏性很小的流体运动》

或译为《关于摩擦极小的流体运动》



Ludwig Prandtl (1875-1953)

水和空气等黏度很小的流体，在大雷诺数下绕物体流动时，黏性对流动的影响仅限于紧贴物体壁面的薄层中，而在这一薄层外黏性影响很小，完全可以忽略不计，这一薄层称为边界层。

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

工程背景及研究意义

机械制造、石油化工、环境工程、水力工程、采矿冶金、生物工程、天文气象等领域

- ① 微小粒子、液滴或气泡在黏性流体中的缓慢流动。
- ② 黏性流体在微小尺寸通道内的缓慢流动, 如地下水的流动、石油在岩层中的流动。
- ③ 黏性薄液膜的流动, 如滑动轴承中的润滑油膜的流动等。

小雷诺数流动

惯性力与黏性力相比可以忽略不计, 或只占次要地位。

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

蠕流流动现象

蠕流流动：雷诺数很低的流动。 **特点：**特征尺度和流动的速度均很小。

如：粉料的气力输送、除尘器中灰尘的沉积、煤粉在炉膛中的沉降等等。



沙尘暴风沙颗粒的沉降



携带病菌的飞沫传播

The basic equations of fluid dynamics and equations of states

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0,$$

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho f_j,$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial e}{\partial x_k} = -p \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \lambda \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right),$$

$$p = p(\rho, T), \quad e = e(\rho, T).$$

There are 7 equations and 7 unknown variables.

For incompressible fluid flows with a constant μ .

The continuity equation is expressed as

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0,$$

The momentum equation is written as

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho f_j.$$

There are 4 unknown variables. The equations are closed, and have a solution.

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

蠕流流动的微分方程：

在直角坐标系下，不可压缩流体

对于定常流动，忽略惯性力和质量力，可把Navier-Stokes方程组简化为：

动量方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (46a)$$

连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (46b)$$

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

蠕流流动的微分方程：

将式(46a)依次求 $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ 、 $\frac{\partial^2 p}{\partial y^2}$ 、 $\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}$ 后相加

同时，结合连续性方程，即

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (46b)$$

最终，可得

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \nabla^2 p = 0 \quad (47a)$$

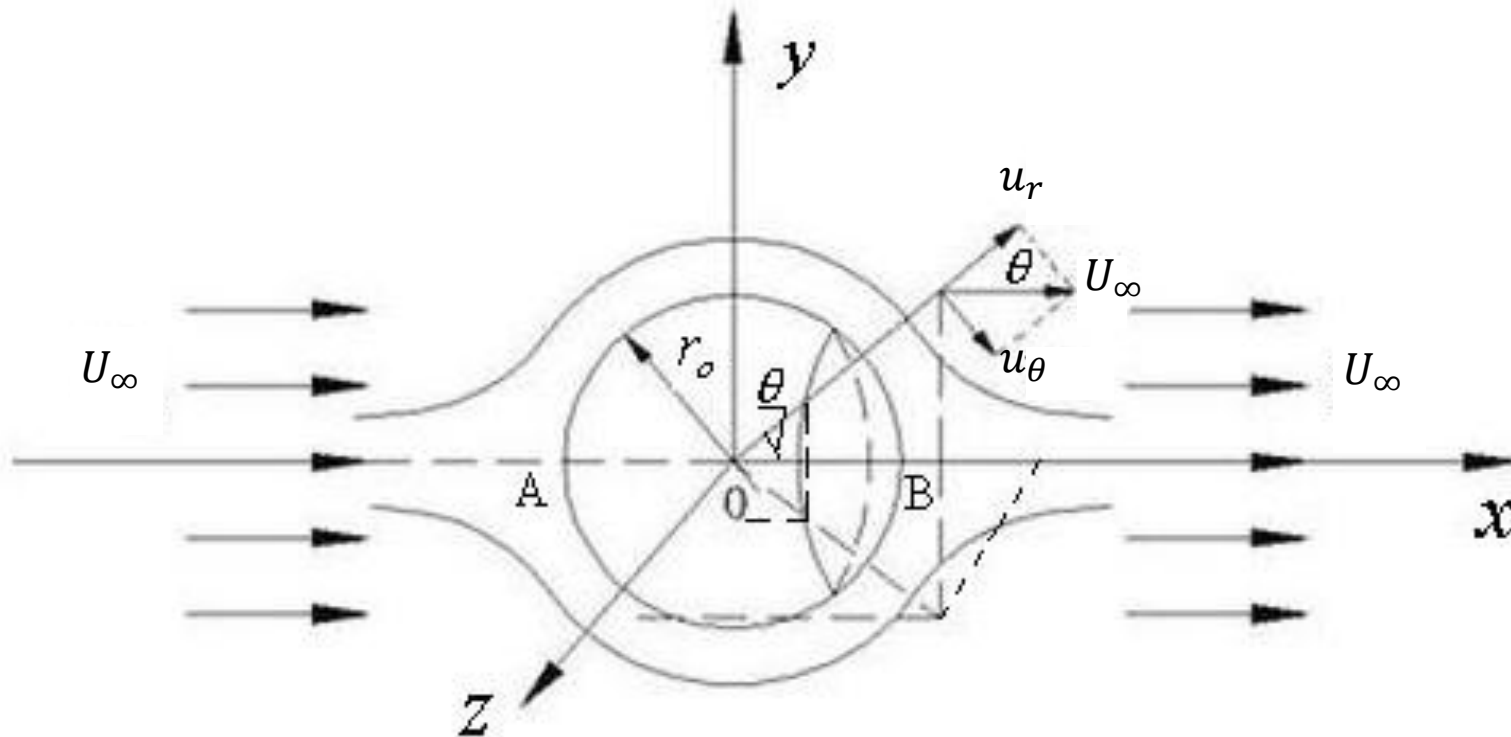
这就是蠕流流动的压力场，即拉普拉斯方程。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (46a)$$

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

蠕流流的物理模型：

无穷远流速度 U_∞ ，
流动方向与 x 轴平行，
绕半径为 r_0 的静止圆球流动



1. 流动是轴对称的。

因此，所有参量在球坐标系中均与 φ 坐标无关。

2. 边界条件：

在球面上 $r = r_0, u_r = u_\theta = 0$

无穷远处 $r \rightarrow \infty, u_r = U_\infty \cos\theta, u_\theta = -U_\infty \sin\theta$

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

描述蠕流流动的方程：

考虑到蠕流流动为不可压**定常流动**，**忽略惯性力、质量力**，则公式简化如下：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial r} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{2u_r}{r^2} - \frac{2u_\theta \cot \theta}{r^2} \right) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} \right) \\ \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{2u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\theta \cot \theta}{r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

边界条件：

在球面上 $r = r_0, u_r = u_\theta = 0$

无穷远处 $r \rightarrow \infty, u_r = U_\infty \cos \theta, u_\theta = -U_\infty \sin \theta$

此时，可得到如下形式的解：

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

描述蠕流流动的方程：

$$\left. \begin{aligned} u_r &= U_\infty \cos \theta \left(1 - \frac{3r_0}{2r} + \frac{r_0^3}{2r^3} \right) \\ u_\theta &= -U_\infty \sin \theta \left(1 - \frac{3r_0}{4r} - \frac{r_0^3}{4r^3} \right) \\ p(r, \theta) &= p_0 - \frac{3\mu U_\infty r_0 \cos \theta}{2r^2} \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

小球表面的速度分布为：

$$u_r = u_\theta = 0 \quad \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{\partial u_\theta}{\partial r} = 0$$

正应力 p_{rr} 与切应力 $\tau_{r\theta}$ 公式为：

$$\left. \begin{aligned} p_{rr} &= -p + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \tau_{r\theta} &= \mu \left(\frac{\partial u_r}{r \partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right) \end{aligned} \right\} \xrightarrow{\text{在小球表面上:}} \left. \begin{aligned} (p_{rr})_{r=r_0} &= -p_0 + \frac{3\mu U_\infty \cos \theta}{2r_0} \\ (\tau_{r\theta})_{r=r_0} &= -\frac{3\mu U_\infty \sin \theta}{2r_0} \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

斯托克斯阻力公式:

在球面取微分面积:

$$dA = 2\pi r_0 \sin \theta r_0 d\theta$$

式(51)就是圆球的斯托克斯阻力公式, 由斯托克斯1851年导出。

正应力作用在圆球上的合力在 x 方向的分量为:

$$P_x = \int_A (\tau_{r\theta})_{r=r_0} \cos \theta dA = \int_0^\pi \left(-p_0 + \frac{3}{2} \mu U_\infty \frac{\cos \theta}{r_0} \right) \cos \theta \cdot 2\pi r_0 \sin \theta r_0 d\theta = 2\pi \mu r_0 U_\infty$$

切应力作用在圆球上的合力在 x 方向的分量为:

$$F_x = - \int_A (\tau_{r\theta})_{r=r_0} \sin \theta dA = - \int_0^\pi \left(-\frac{3}{2} \mu U_\infty \frac{\sin \theta}{r_0} \right) \sin \theta \cdot 2\pi r_0 \sin \theta r_0 d\theta = 4\pi \mu r_0 U_\infty$$

圆球所受总阻力:

$$F_D = P_x + F_x = 6\pi \mu r_0 U_\infty = 3\pi \mu d_0 U_\infty \quad (51)$$

流动阻力系数为:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A} = \frac{6\pi \mu r_0 U_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \pi r_0^2} = \frac{24}{\frac{U_\infty d}{\nu}} = \frac{24}{Re} \quad (52)$$

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

例：试确定雾滴在空气中的沉降速度。

解：设雾滴近似为半径为 a 的球形，密度为 ρ ，空气的密度和黏性系数分别为 ρ' 和 μ_0 。露滴除本身重量外。

在沉降过程中受到空气浮力和斯托克斯阻力作用

$$\frac{4}{3}\pi a^3 \left(\rho' + \frac{1}{2}\rho \right) \frac{du}{dt} = (\rho' - \rho) \frac{4}{3}\pi a^3 g - 6\pi\mu a u$$

初始条件 $t = 0, u = 0$

$$u/u_t = 1 - \exp\left(-\frac{9}{2} \frac{\mu t}{(\rho' + \rho/2) a^2}\right), \quad u_t = \frac{2}{9} (\rho' - \rho) \frac{ga^2}{\mu}$$

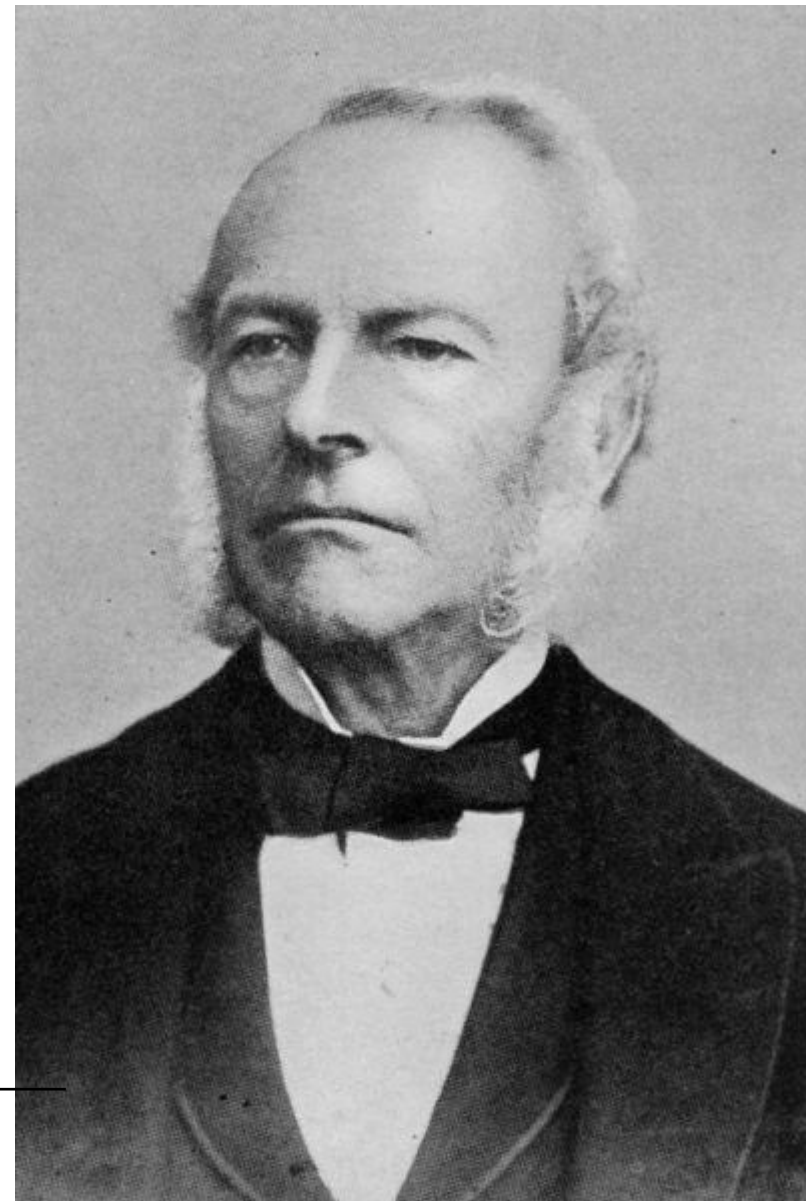
u_t 是 $t \rightarrow \infty$ 时的终极沉降速度。

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

斯托克斯阻力公式:

当 $Re < 1$ 时, Stokes公式与实验结果符合较好

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} = \frac{6\pi\mu r_0 U_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \pi r_0^2} = \frac{24}{\frac{U_\infty d}{\nu}} = \frac{24}{Re} \quad (52)$$



斯托克斯(George Gabriel Stokes, 1819~1903), 英国数学家、力学家。

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

斯托克斯阻力公式:

当 $Re < 1$ 时, Stokes公式与实验结果符合较好

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} = \frac{6\pi\mu r_0 U_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \pi r_0^2} = \frac{24}{\frac{U_\infty d}{\nu}} = \frac{24}{Re} \quad (52)$$

奥森 Carl Wilhelm Oseen 于1910年修正了Stokes阻力公式。

当 $Re > 1$ 时, 奥森(Oseen)解更接近实验结果

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right) \quad (53)$$



4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

怀特(White)通过实验得到的
阻力系数经验公式:

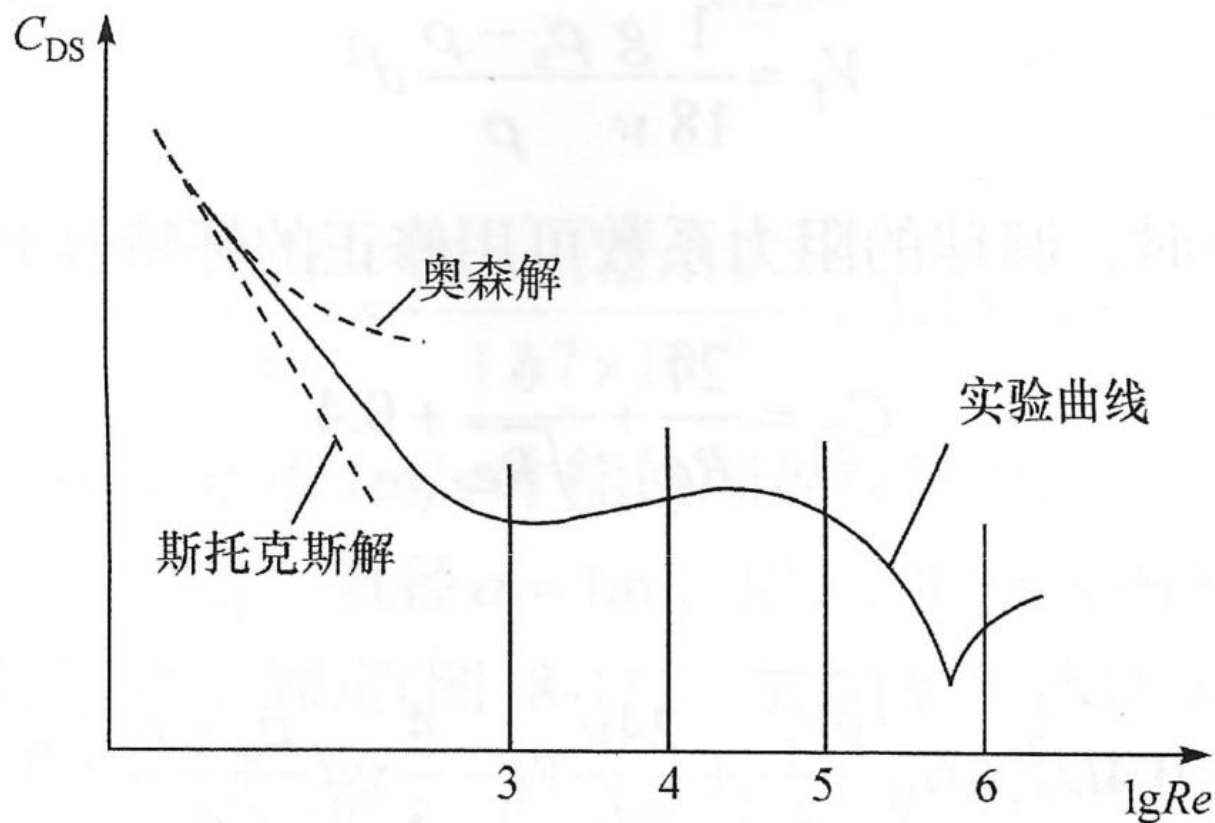
Page289 图8-14 比较

当 Re 为 $0 \sim 10^3$ 时,

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{24}{\sqrt{Re}} + 0.4$$



陈景尧, 1947年毕业于中央大学机械系
1975年将奥森解作为N-S方程的一级近似解



奥森解并无明显的改进, 怀特通过实验所得到的圆球阻力系数刚好位于斯托克斯解和奥森解之间

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

颗粒在静止流体中的自由沉降问题：

圆球在流体中以等速度自由沉降：

当浮力 F_B 、阻力 F_D 和重力 W 达到平衡时，有

$$W = F_D + F_B$$

此时，圆球速度为自由沉降速度 U_f ，则有：

$$F_B = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho g$$

$$W = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_s g$$

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{4}\pi d^2 \cdot \frac{1}{2}\rho U_f^2$$

$$\rightarrow \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_s g = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho g + C_D \cdot \frac{1}{4}\pi d^2 \cdot \frac{1}{2}\rho U_f^2$$

→ 圆球的自由沉降速度：

$$U_f = \sqrt{\frac{4gd(\rho_s - \rho)}{3C_D\rho}}$$

(55)

4. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

颗粒在静止流体中的自由沉降问题:

圆球的自由沉降速度:

$$U_f = \sqrt{\frac{4gd(\rho_s - \rho)}{3C_D\rho}} \quad (55)$$

当 $Re \leq 1$ 时

采用拖曳力系数 $C_D = \frac{24}{Re}$ $\rightarrow$
$$U_f = \frac{1}{18} \frac{g}{\nu} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d^2 \quad (56)$$

当 $1 \leq Re \leq 10^3$ 时

采用 $C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{\sqrt{Re}} + 0.4$ $\rightarrow$
$$0.4U_f^2 + 6\sqrt{\frac{\nu U_f^3}{d}} + \frac{24\nu}{d} U_f - \frac{4}{3}gd\frac{\rho_s - \rho}{\rho} = 0 \quad (57)$$

当 $10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 时

采用 $C_D = 0.48$ $\rightarrow$
$$U_f = \sqrt{2.8gd\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \quad (58)$$

例 8-4 鼓泡流化床锅炉是在炉排上加一层劣质细煤颗粒，从炉排下部鼓风，使炉排上的细煤颗粒在悬浮状态下燃烧。假设细煤粒径为 $d = 1.2\text{mm}$ 的球体，密度 $\rho_s = 2250\text{kg/m}^3$ 。悬浮燃烧层的温度 $t = 1000^\circ\text{C}$ ，此时烟气的运动黏度 $\nu = 1.67 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。而烟气在 0°C 时的密度为 $\rho_0 = 1.34\text{kg/m}^3$ 。试问烟气速度应为多少才能使颗粒处于悬浮状态？

解 根据状态方程，计算在 $t = 1000^\circ\text{C}$ 时的烟气密度

$$\rho = \frac{\rho_0 T_0}{T} = \frac{1.34 \times (273 + 0)}{273 + 1000} = 0.287(\text{kg/m}^3)$$

要使细煤处在悬浮状态，则应使烟气速度 V 恰好与煤粒的自由沉降速度 V_f 相等。假定

$$Re \leq 1, C_D = \frac{24}{Re}, \text{ 得}$$

$$V_f = \frac{1}{18} \frac{g}{\nu} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d^2 = \frac{9.8(2250 - 0.287)}{18 \times 1.67 \times 10^{-6} \times 0.287} \times (1.2 \times 10^{-3})^2 = 3680(\text{m/s})$$

校验

$$Re = \frac{U_f d}{\nu} = \frac{3680 \times 1.2 \times 10^{-3}}{1.67 \times 10^{-6}} = 2.64 \times 10^6$$

可见所选 Re 范围不对, 重新假定 $Re = 10^3 \sim 2 \times 10^5, C_D = 0.48$, 得

$$V_f = \sqrt{\frac{2.8gd(\rho_s - \rho)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.8 \times 9.8 \times 1.2 \times 10^{-3} (2250 - 0.287)}{0.287}} = (16.1 \text{ m/s})$$

校验

$$Re = \frac{U_f d}{\nu} = \frac{16.1 \times 1.2 \times 10^{-3}}{1.67 \times 10^{-6}} = 1.15 \times 10^4$$

与假定相符. 故应使烟气速度为 16.1 m/s 才能使细煤粒悬浮.

例 8-5 气球质量 $m=0.32\text{kg}$ ，直径 $d=1\text{m}$ ，以 $V_0=3.7\text{m/s}$ 的速度在静止空气中上升。
(1) 求阻力系数；(2) 若用绳子固定(图 8-15)，气流水平速度为 $V=3.5\text{m/s}$ ，求绳子的张力和倾角。空气密度 $\rho=1.25\text{kg/m}^3$ ，运动黏度 $\nu=14.7\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

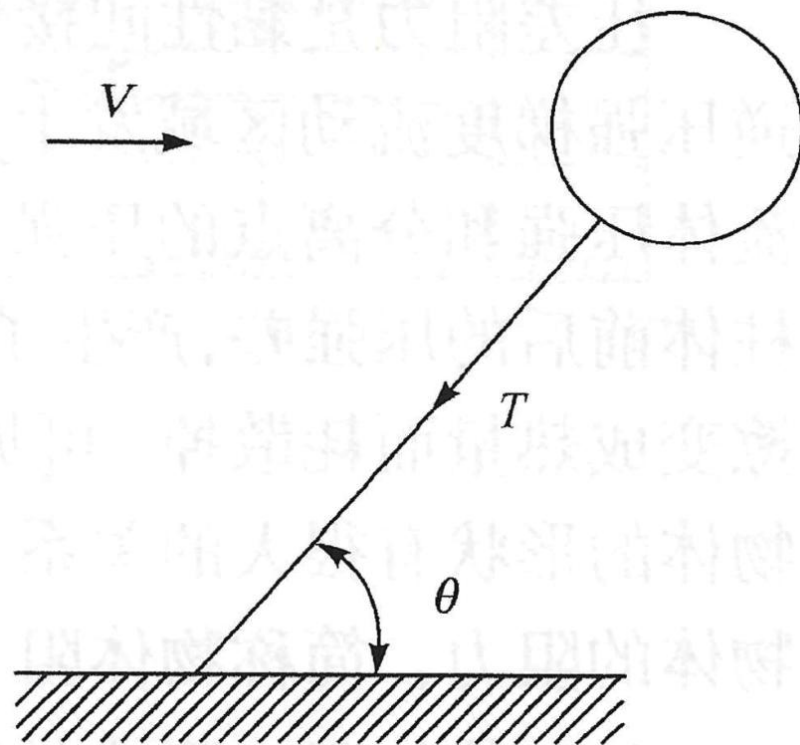
解: (1) 气球匀速上升时重力、阻力与浮力平衡

$$mg + C_D \frac{1}{2} \rho V_0^2 \frac{\pi d^2}{4} = \frac{1}{6} \rho g \pi d^3$$

代入已知数据, 可得阻力系数 $C_D = 0.488$

此时, 雷诺数

$$Re_1 = \frac{V_0 d}{\nu} = 2.5 \times 10^5$$



例 8-5 气球质量 $m=0.32\text{kg}$ ，直径 $d=1\text{m}$ ，以 $V_0=3.7\text{m/s}$ 的速度在静止空气中上升。
(1) 求阻力系数；(2) 若用绳子固定(图 8-15)，气流水平速度为 $V=3.5\text{m/s}$ ，求绳子的张力和倾角。空气密度 $\rho=1.25\text{kg/m}^3$ ，运动黏度 $\nu=14.7\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

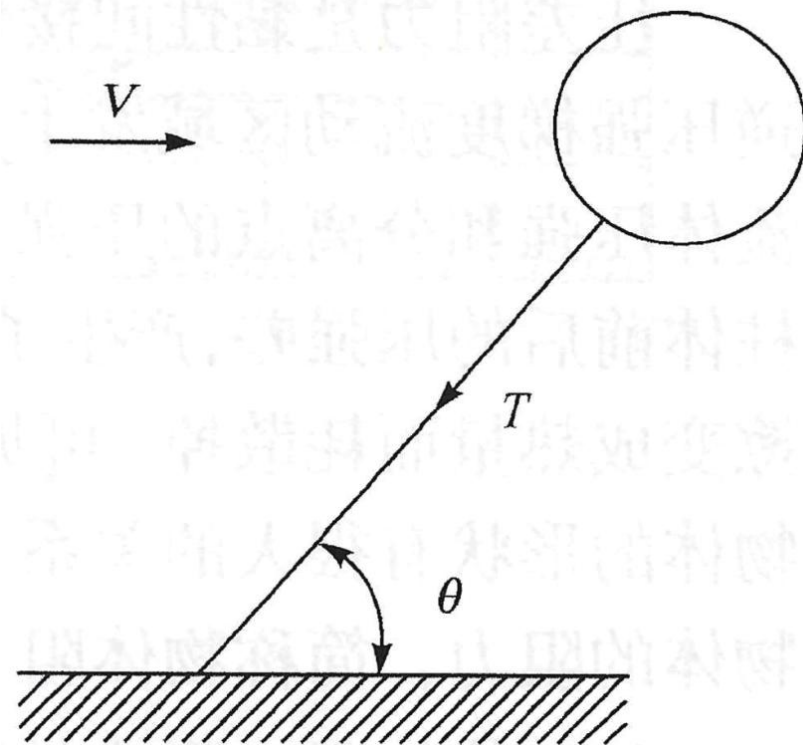
解: (2) 气球被绳子固定时，流动雷诺数

$$Re_2 = \frac{Vd}{\nu} = 2.38 \times 10^5$$

与(1)情况类似，阻力系数大致相等。

那么，气球受到空气向右的推力为

$$F_D = C_D \frac{\rho V^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} = 2.93 \text{ (N)}$$



例 8-5 气球质量 $m=0.32\text{kg}$ ，直径 $d=1\text{m}$ ，以 $V_0=3.7\text{m/s}$ 的速度在静止空气中上升。
(1) 求阻力系数；(2) 若用绳子固定(图 8-15)，气流水平速度为 $V=3.5\text{m/s}$ ，求绳子的张力和倾角。空气密度 $\rho=1.25\text{kg/m}^3$ ，运动黏度 $\nu=14.7\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ 。

解：在水平方向，气球受力平衡

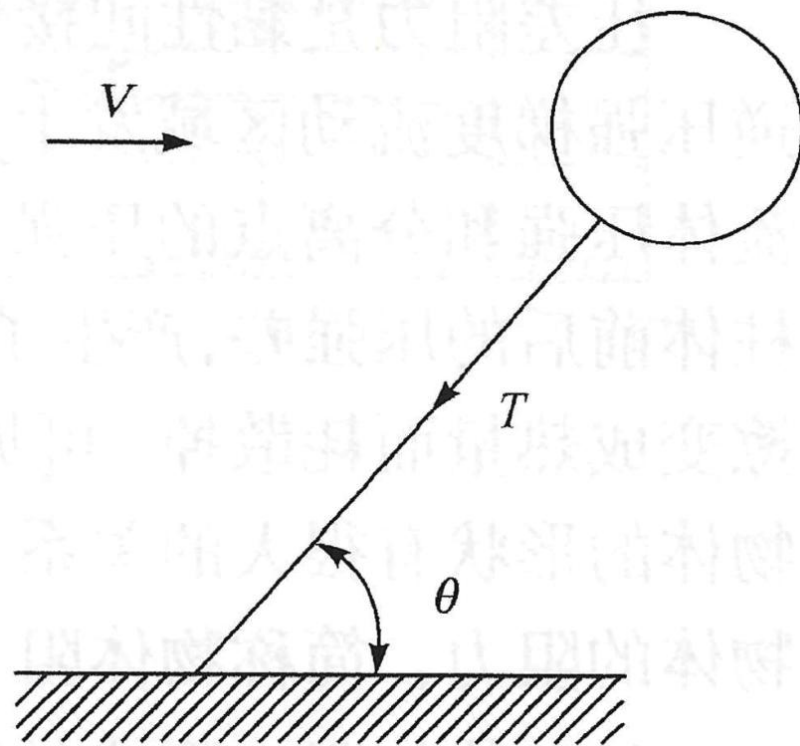
$$T \cos \theta = F_D$$

在竖直方向，气球受力平衡

$$mg + T \sin \theta = \frac{\pi}{6} \rho g d^3$$

联立求解，得

$$T = 4.4 \text{ N}, \quad \theta = 48.2^\circ$$



5. 黏性流体绕流物体的阻力

物体所受到的阻力来源:

1. 摩擦阻力 — 由黏性直接作用的结果

流体绕过物体流动所引起的切向应力造成的阻力

特点: (i) 分离点之前 (ii) 层流 + 湍流

2. 压差阻力 — 由黏性间接作用的结果

流体绕过物体流动所引起的压强差造成的阻力

特点: 与物体的形状有关

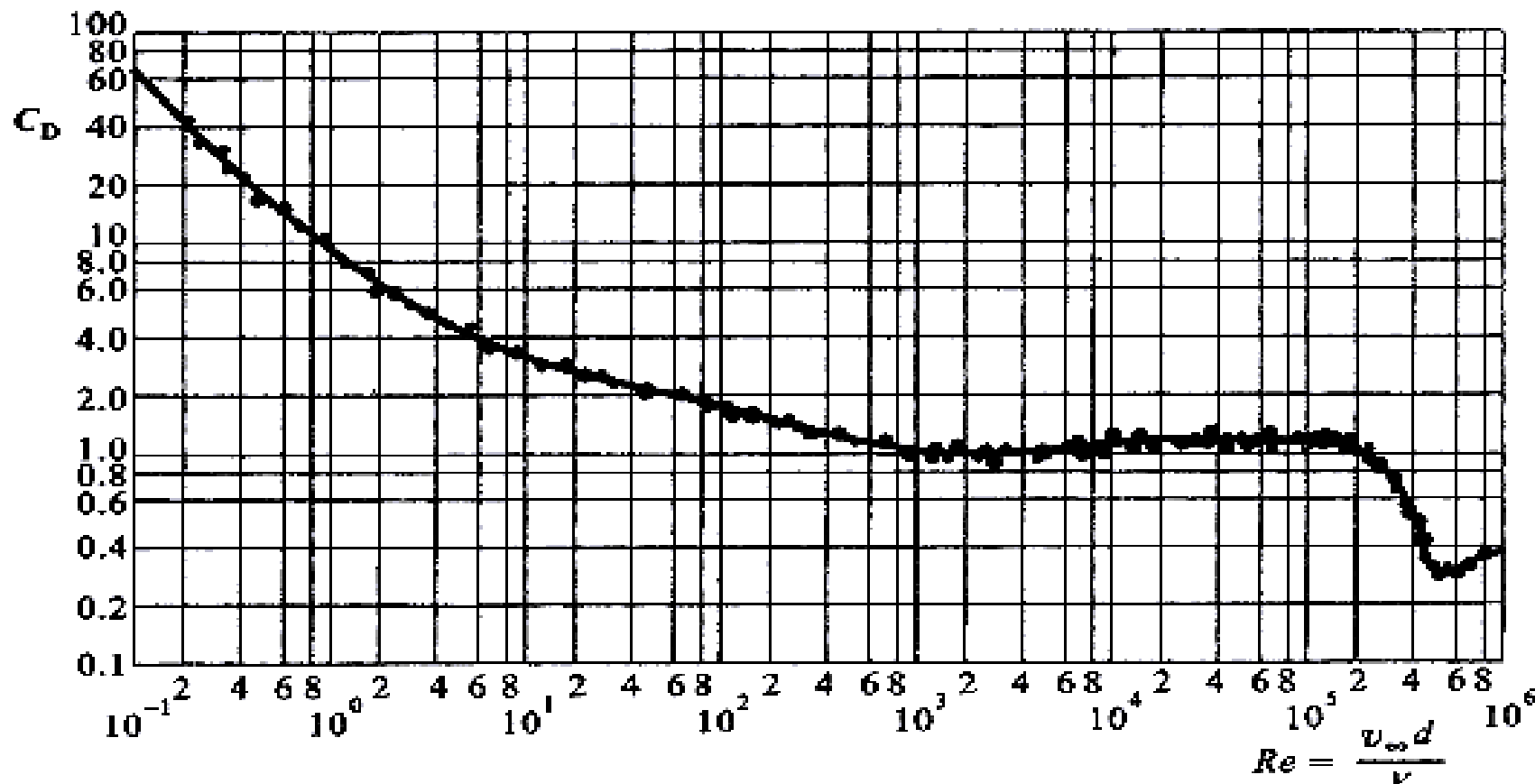
物体的阻力系数 $C_D = f(Re)$ 通过实验获得

5. 黏性流体绕流物体的阻力

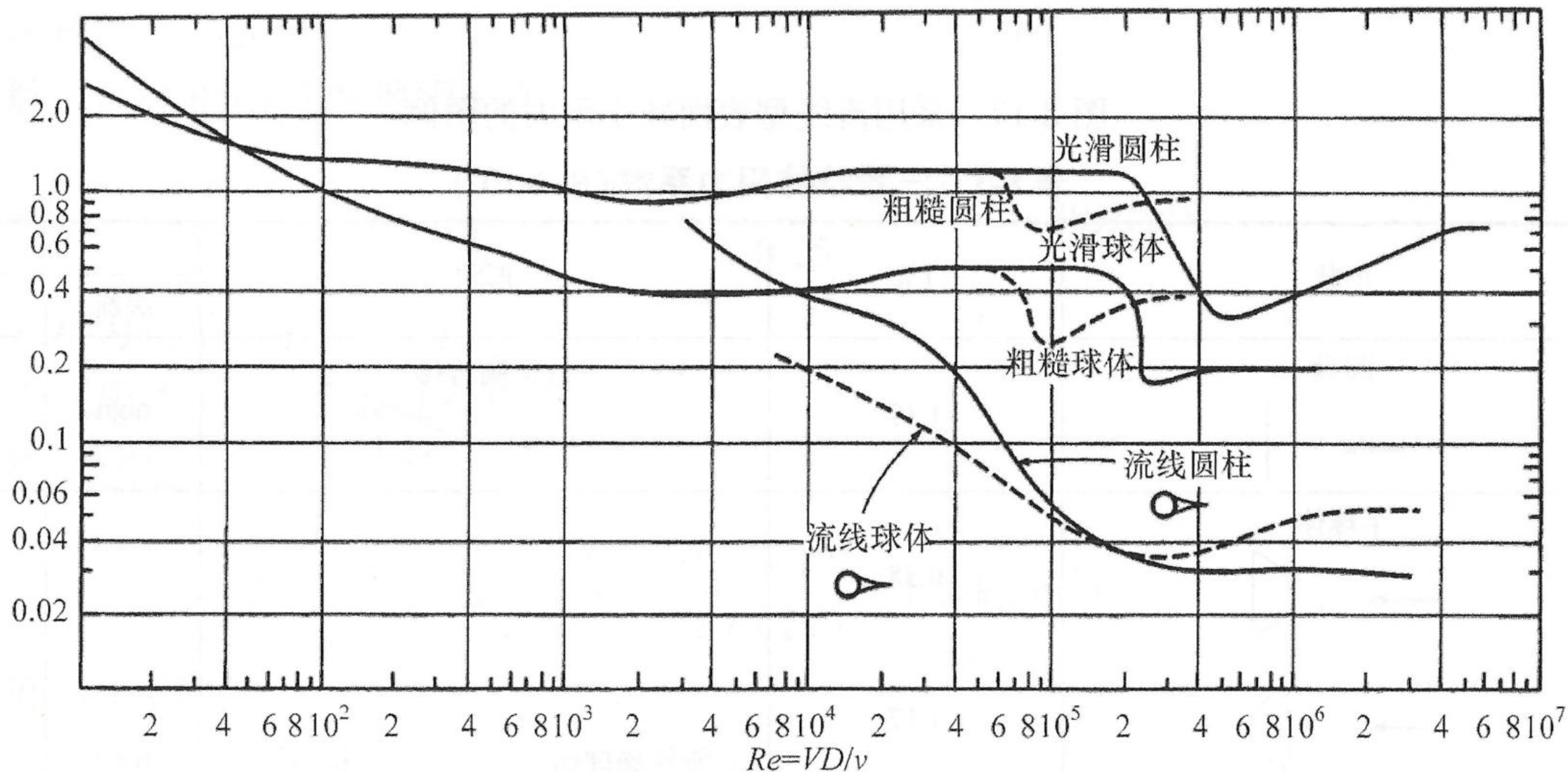
物体阻力的大小与雷诺数的关系

- 按相似定律可知，对于不同的不可压缩流体中的几何相似的物体，如果雷诺数相同，则它们的阻力系数也相同。
- 在不可压缩粘性流体中，对于与来流方向具有相同方位角的几何相似体，其阻力系数： $C_D = f(Re)$ 。

绕圆柱流动的
阻力系数与
雷诺数的关系



物体阻力的大小与雷诺数的关系



5. 黏性流体绕流物体的阻力

减小黏性流体绕流物体阻力的办法

- **减小摩擦阻力：**可以使层流边界层尽可能的长，即层流-湍流转变点尽可能向后推移，计算合理的最小压力点的位置。

在航空工业上采用一种“层流型”的翼型，便是将最小压力点向后移动来减阻，并要求翼型表面的光滑程度。

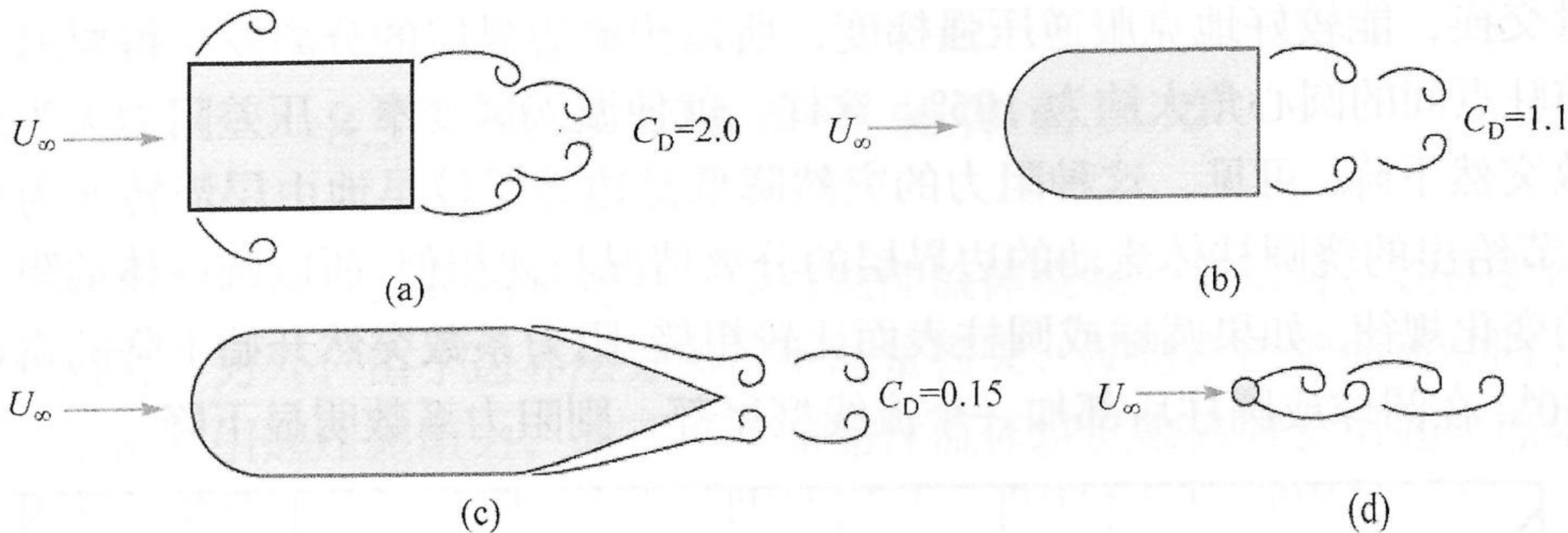
- **减小压差阻力：**使用翼型使得后面的“尾涡区”尽可能小。也就是使边界层的分离点尽可能向后推移。

例如，采用流线性物体就可以达到这样的目的。

- 工程上习惯用无因次的阻力系数 C_D 来代替阻力 F_D

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A}$$

减小黏性流体绕流物体阻力的办法



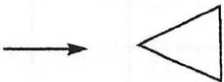
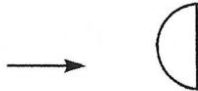
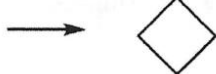
采用流线型表面减小阻力的图例

5. 黏性流体绕流物体的阻力

减小黏性流体
绕流物体阻力
的办法

$Re \geq 10^4$

三维物体阻力系数

形状	C_D	形状	C_D	
			层流	湍流
圆盘 	1.17	60°圆锥体 	0.80	0.36
半球体 	0.38	旋转椭球体 长径比 1 2 4 8	0.47	0.20
	1.17		0.27	0.13
半球罩 	0.38		0.25	0.10
	1.42		0.20	0.08
立方体 	1.07			
	0.81			

例 8-6 一质量 M 为 2000kg 的小型旅行车，车长 L 为 4m，假定其为长径比 L/D 为 2 的圆柱体，初始速度 V_i 为 100km/h，轮子的滚动摩擦阻力系数 α 为 0.5mm，轮胎直径 d 为 500mm，求汽车关闭油门减速到 V_o 为 50km/h 所走过的路程。其中空气温度为 20℃，不计风速。

解 轮子的滚动摩擦阻力为

$$F_r = \frac{P\alpha}{d/2} = \frac{2000 \times 9.81 \times 0.5 \times 10^{-3}}{0.25} = 39.2(\text{N})$$

式中， P 为轮子上的正压力。

空气阻力 F_D 的求解过程

首先，算出 Re 查表得 C_D ;

其次，根据截面积与 C_D ，算出 F_D ;

然后，列出动力学方程;

最终，获得路径-速度关系; 算出路程。

详细过程见
Page295-296

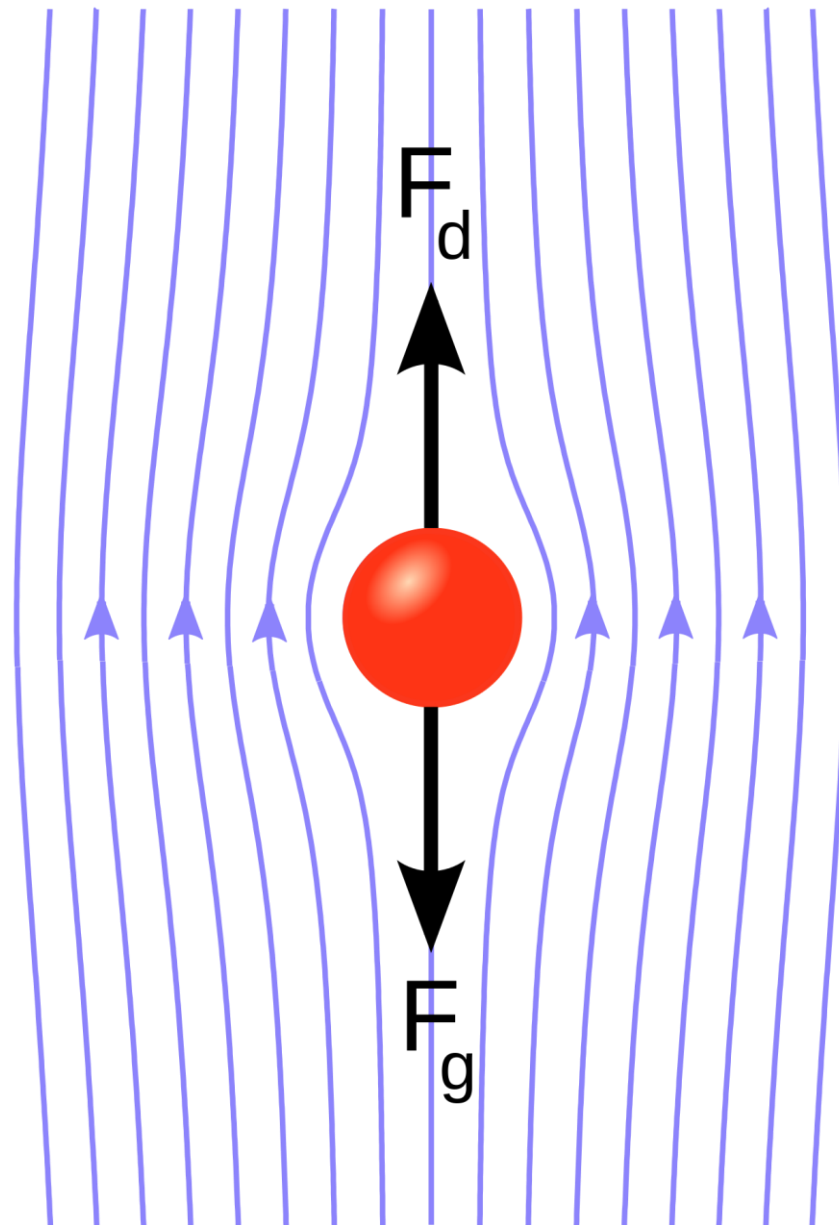
我们讲解和学习了如下内容：

1. 黏性流体绕小圆球的蠕流流动

- 蠕动流动微分方程
- 静止流体颗粒自由沉降问题
- 斯托克斯阻力公式

2. 黏性流体绕流物体造成的阻力

- 阻力的大小与雷诺数的关系
- 减小黏性流体绕流阻力的办法



8-17、8-24、8-25



Thanks!

欢迎提问 敬请指导



孙东科

微信: DongkeSun

电邮: dk.sun@seu.edu.cn

手机: 18651683583

推荐字体：

微软雅黑

方正清刻本悦宋简体，等线，

华中中宋

Times New Roman

Arial

不宜超过三种。

Design by

李岚璟