



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8章 粘性流体力学基本理论

内容：8.6 湍流流动



湍流流动

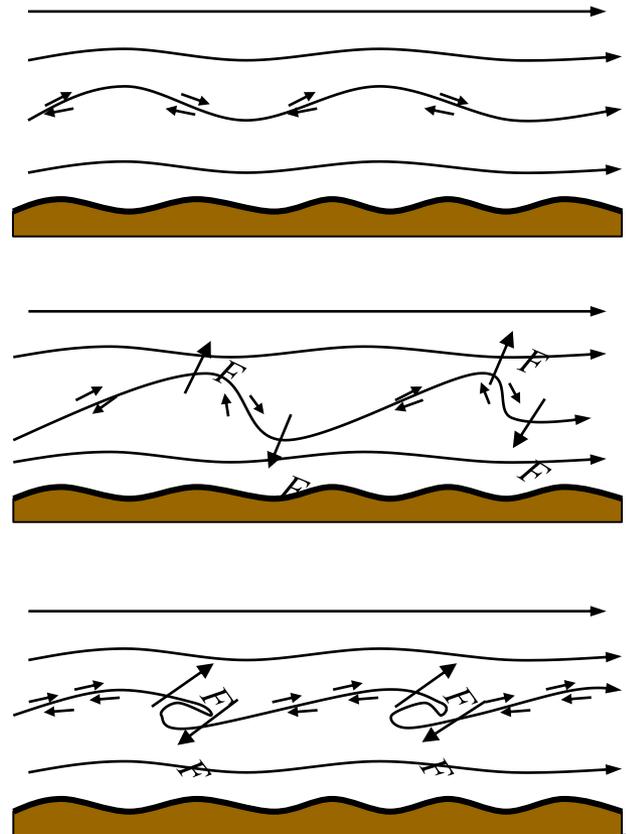
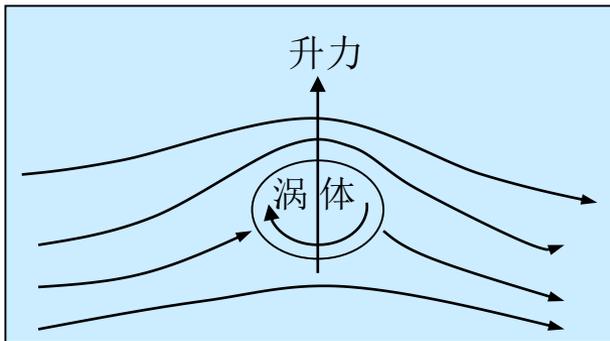
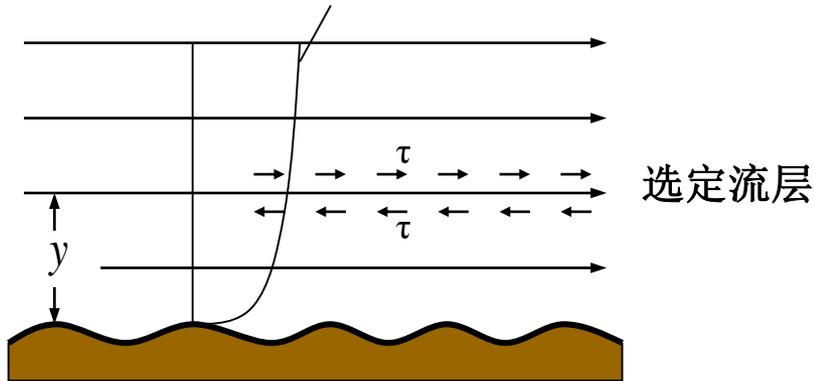
湍流形成机理:

湍流形成条件

涡体的产生(粘性流体和物体)

雷诺数达到一定的数值

流速分布曲线





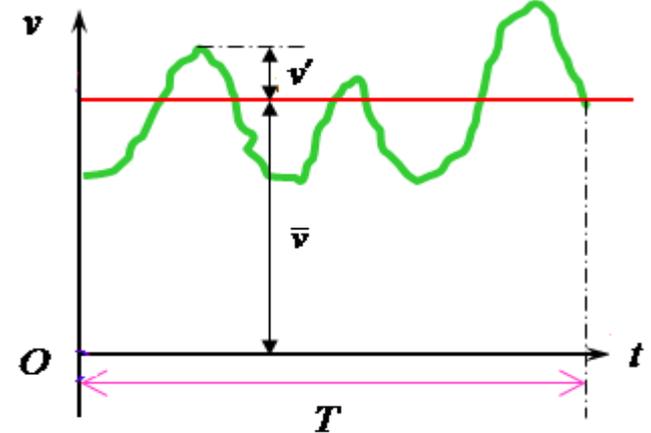
湍流流动

湍流特点及流动参数时均化处理:

流体作湍流流动时，运动参数随时间不停地变化，瞬时速度随时间 t 不停地变化，但始终围绕一“平均值”脉动，这种现象称为脉动现象。如取时间间隔 T ，瞬时速度在 T 时间内的平均值称为时均速度，可表示为：

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt$$

瞬时速度为： $v = \bar{v} + v'$



式中 v' 为脉动速度，即：**瞬时速度 = 时均速度 + 脉动速度**

类似地，其它运动参数也可时均化处理。由上可知，湍流流动总是非定常的，但从时均意义上分析，可认为是定常流动。



Reynolds湍流方程(RANSE)

雷诺认为：湍流的瞬时运动满足NS方程。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i$$

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned}$$

时均

时均

RANSE (1895)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} &= f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \\ &+ \frac{1}{\rho} \left(\mu \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \right) \end{aligned}$$



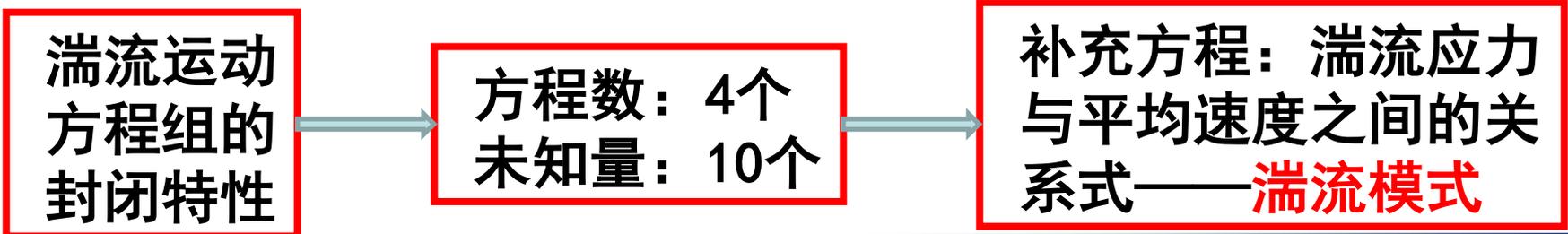
湍流流动

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \left(\mu \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \right)$$

$\mu \nabla^2 \bar{u}_i$ ——平均运动的粘性应力

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} -\rho \overline{u'u'} & -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{u'w'} \\ -\rho \overline{v'u'} & -\rho \overline{v'v'} & -\rho \overline{v'w'} \\ -\rho \overline{w'u'} & -\rho \overline{w'v'} & -\rho \overline{w'w'} \end{pmatrix}$$
 ——湍流应力（雷诺应力）

是对称张量，具有六个独立量。它源于湍流脉动引起的动量输运。因此，湍流应力 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 是和平均流关联的。





湍流切应力:

湍流切应力 τ 包括 τ_1 和湍流附加切应力 τ_2 两部分, 即:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

由相邻两流层间时间平均流速相对运动所产生的粘滞切应力

纯粹由脉动流速所产生的附加切应力

其中: $\tau_1 = \mu \frac{du}{dy}$, $\tau_2 = \rho \ell^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2$

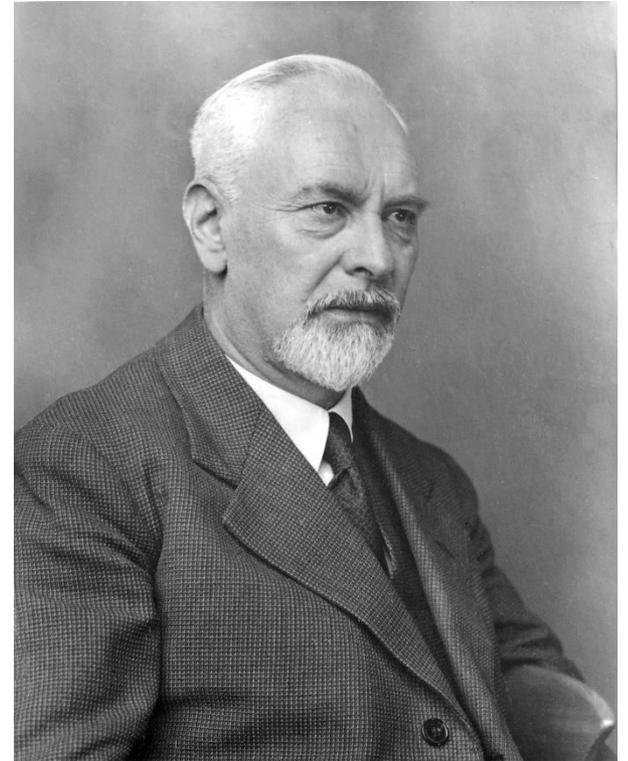
这里 ℓ 称为混合长度。



湍流流动

l 可用经验公式:

$$l = \kappa y \text{ 或 } l = \kappa y \sqrt{1 - \frac{y}{r_0}} \quad \text{计算}$$

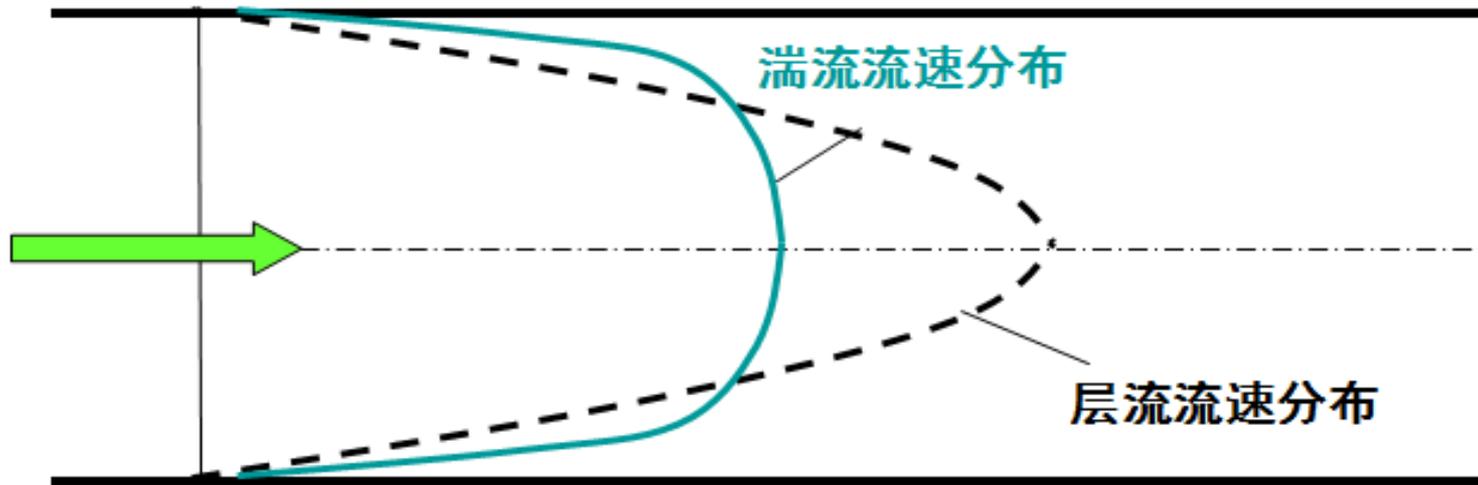


Ludwig Prandtl
(1875 - 1953)



湍流流动

湍流中由于液体质点相互混掺，互相碰撞，因而产生了液体内部各质点间的动量传递，动量大的质点将动量传给动量小的质点，动量小的质点影响动量大的质点，结果造成断面流速分布的均匀化。





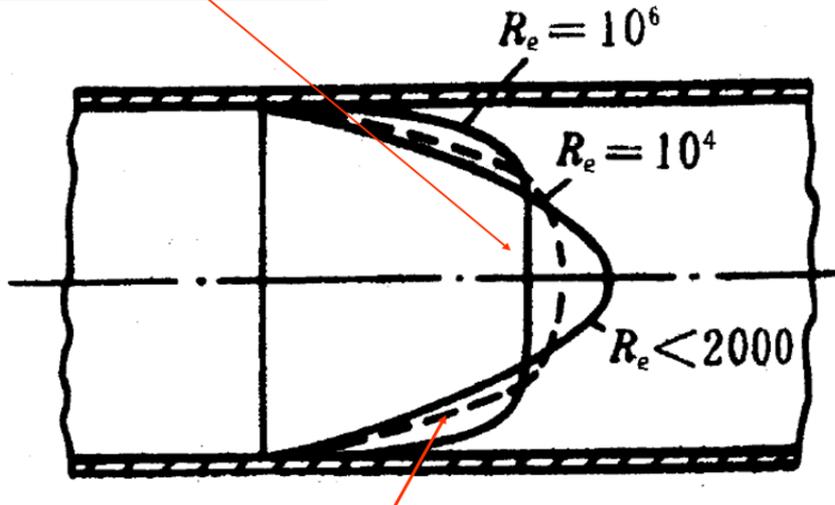
湍流流动

由大量实验测量，可得光滑圆管的流速分布为指数公式：

$$\frac{u_x}{u_m} = \left(\frac{y}{r_0}\right)^n$$

{ 当 $Re < 10^5$ 时, $n = \frac{1}{7}$
 当 $Re > 10^5$ 时, n 采用 $\frac{1}{8}$ 或 $\frac{1}{9}$ 或 $\frac{1}{10}$

轴心处趋向于平均



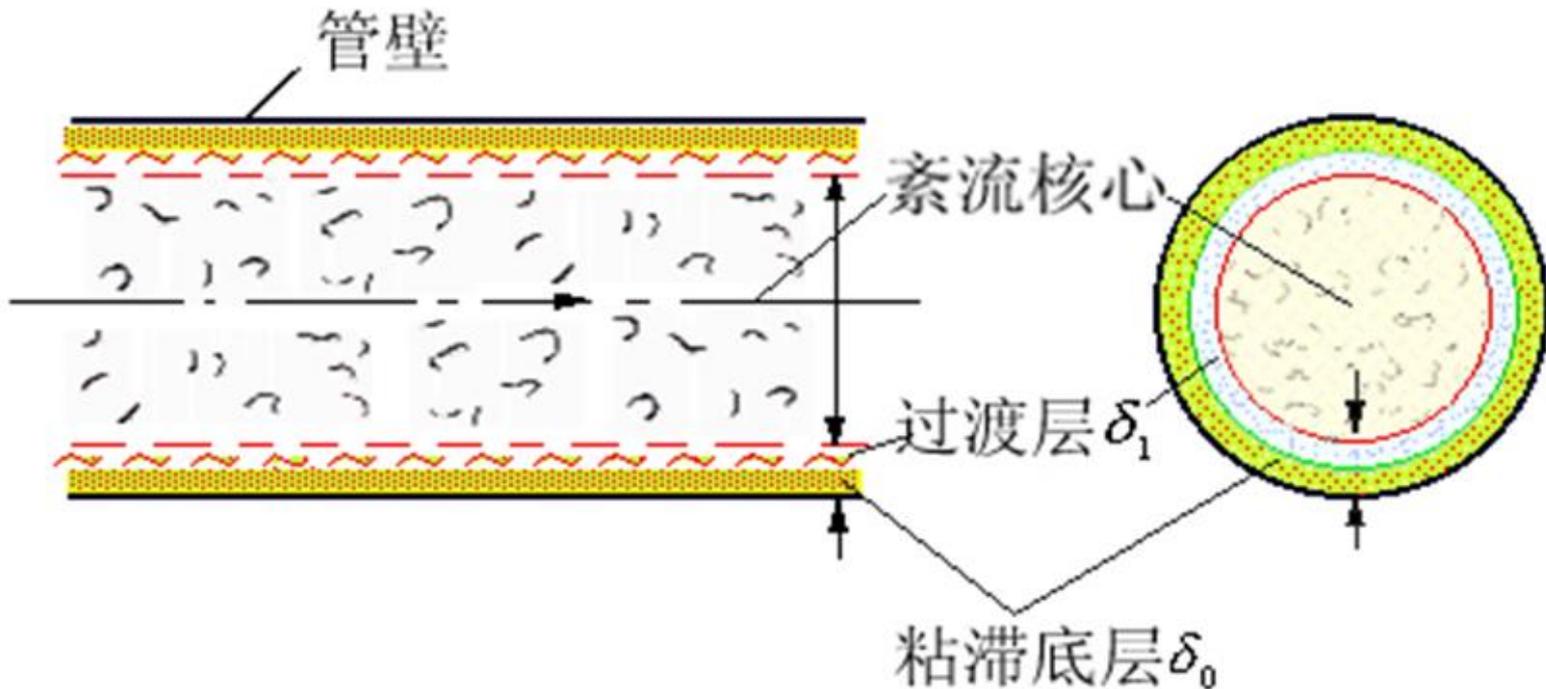
管壁附近速度梯度很大



湍流流动

层流底层和湍流核心：

——在湍流中紧靠固体边界附近，有一极薄的层流层，其中粘滞切应力起主导作用，而由脉动引起的附加切应力很小，该层流叫做**粘性底层**。





粘性底层厚度 δ_0 一般只有十分之几个毫米，但对流动阻力的影响较大。

$$\delta_0 = \frac{32.8d}{\text{Re} \sqrt{\lambda}}$$

所以，粘性底层对湍流沿程阻力规律的研究有重要意义。



1. 层流底层 ($y \leq \delta_0$) :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \tau_0 \quad (y \text{ 从壁面算起})$$

$$\Rightarrow u = \frac{\tau_0}{\mu} y + C_1 \quad \xrightarrow{y=0, u=0} \quad u = \frac{\tau_0}{\rho\nu} y$$

$$\Rightarrow \frac{u}{V_*} = \frac{yV_*}{\nu} \quad (V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \text{ — 壁面剪应力速度})$$

记 $u^+ = \frac{u}{V_*}$, $y^+ = \frac{yV_*}{\nu}$, 无因次速度分布:

$$u^+ = y^+ \quad (y^+ \leq 5)$$



2. 过渡层 ($5 < y^+ < 30$)

$$u^+ = 11 \arctan\left(\frac{y^+}{11}\right)$$

3. 水力光滑管湍流核心区 ($y^+ \geq 30$)

对数定律:
$$\frac{u}{V_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{yV_*}{\nu} + c$$

(尼古拉兹实验) $k = 0.4, c = 5.5 \implies u^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5$

最大速度 ($y = a$):

$$\frac{u_{\max}}{V_*} = 2.5 \ln \frac{aV_*}{\nu} + 5.5$$

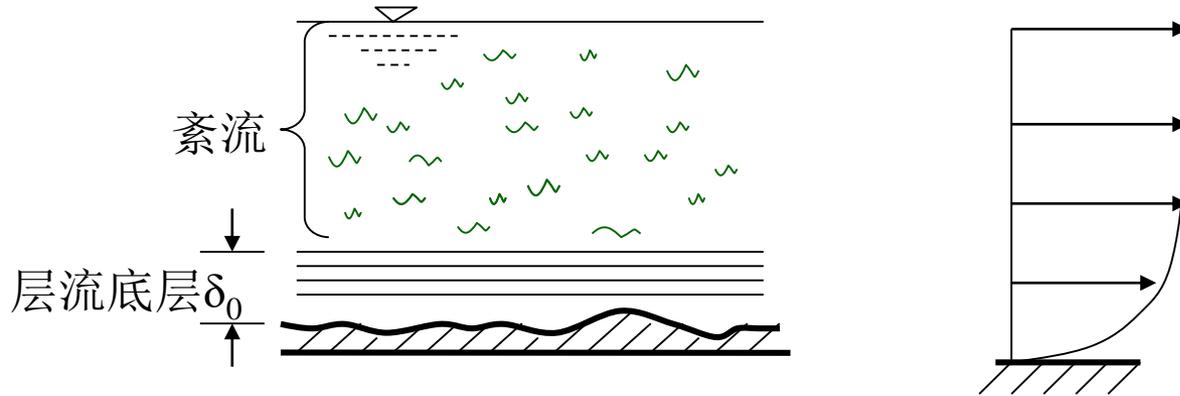
平均速度:

$$u_m = u_{\max} - 3.75V_*$$



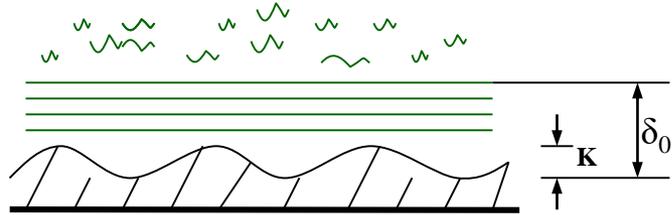
湍流流动

壁面粗糙度

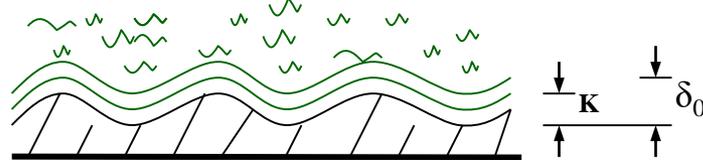


层流底层厚度 $\delta_0 = \frac{32.8d}{Re\sqrt{\lambda}}$ ，可见， δ_0 随雷诺数的增加而减小。

当 Re 较小时，



水力光滑壁面



过渡粗糙壁面

当 Re 较大时，



水力粗糙壁面



尼古拉兹实验



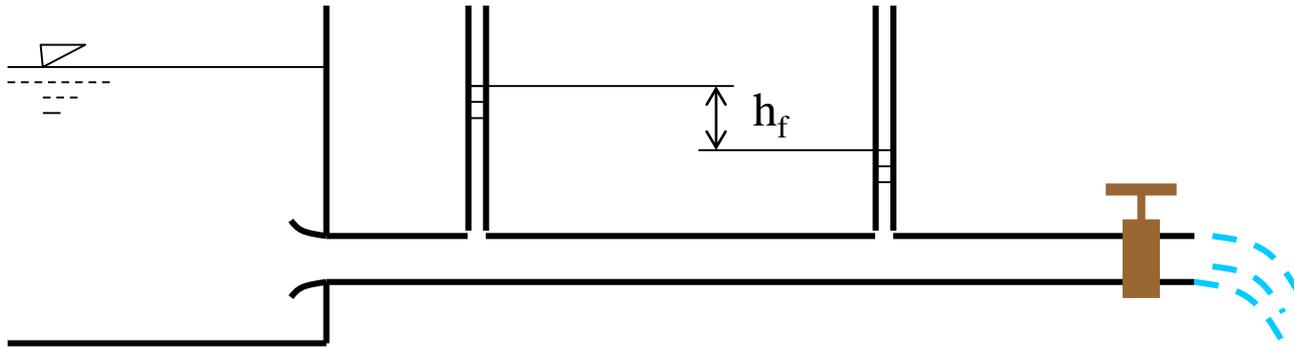
Johann Nikuradse
(1894 - 1979)



湍流流动

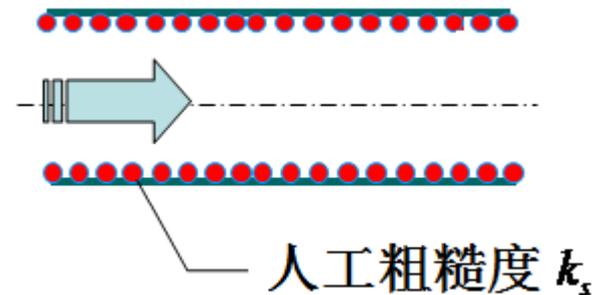
尼古拉兹实验

$$h_f = \lambda \frac{L V^2}{d 2g}$$



雷诺数 $Re = \frac{Vd}{\nu}$

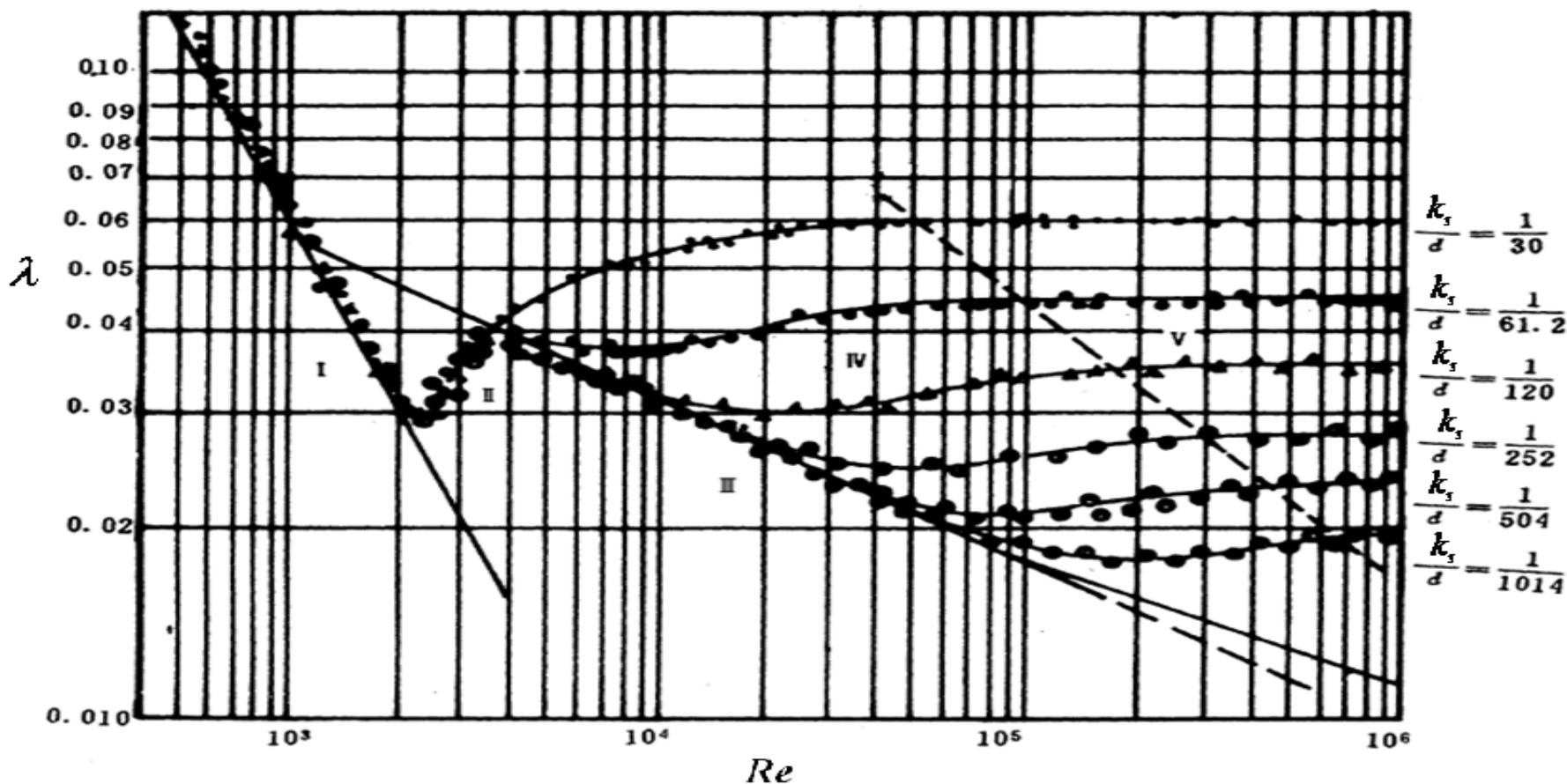
相对粗糙度 $\frac{k_s}{d}$ 或相对光滑度 $\frac{d}{k_s}$





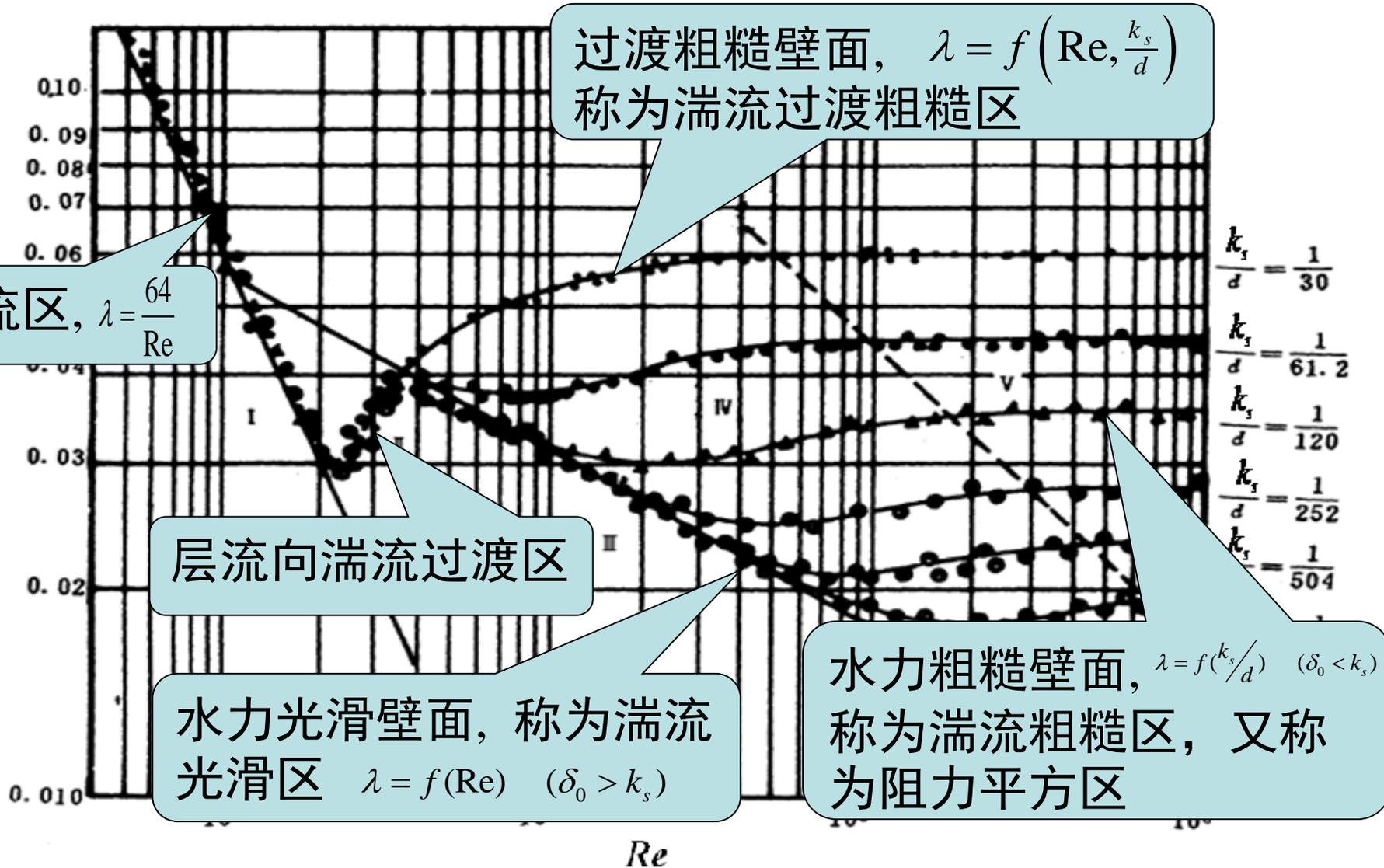
湍流流动

尼古拉兹实验曲线: 用各种不同的人工均匀砂粒粗糙度的圆管进行实验得到的沿程阻力系数的变化规律。





湍流流动





上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

湍流流动

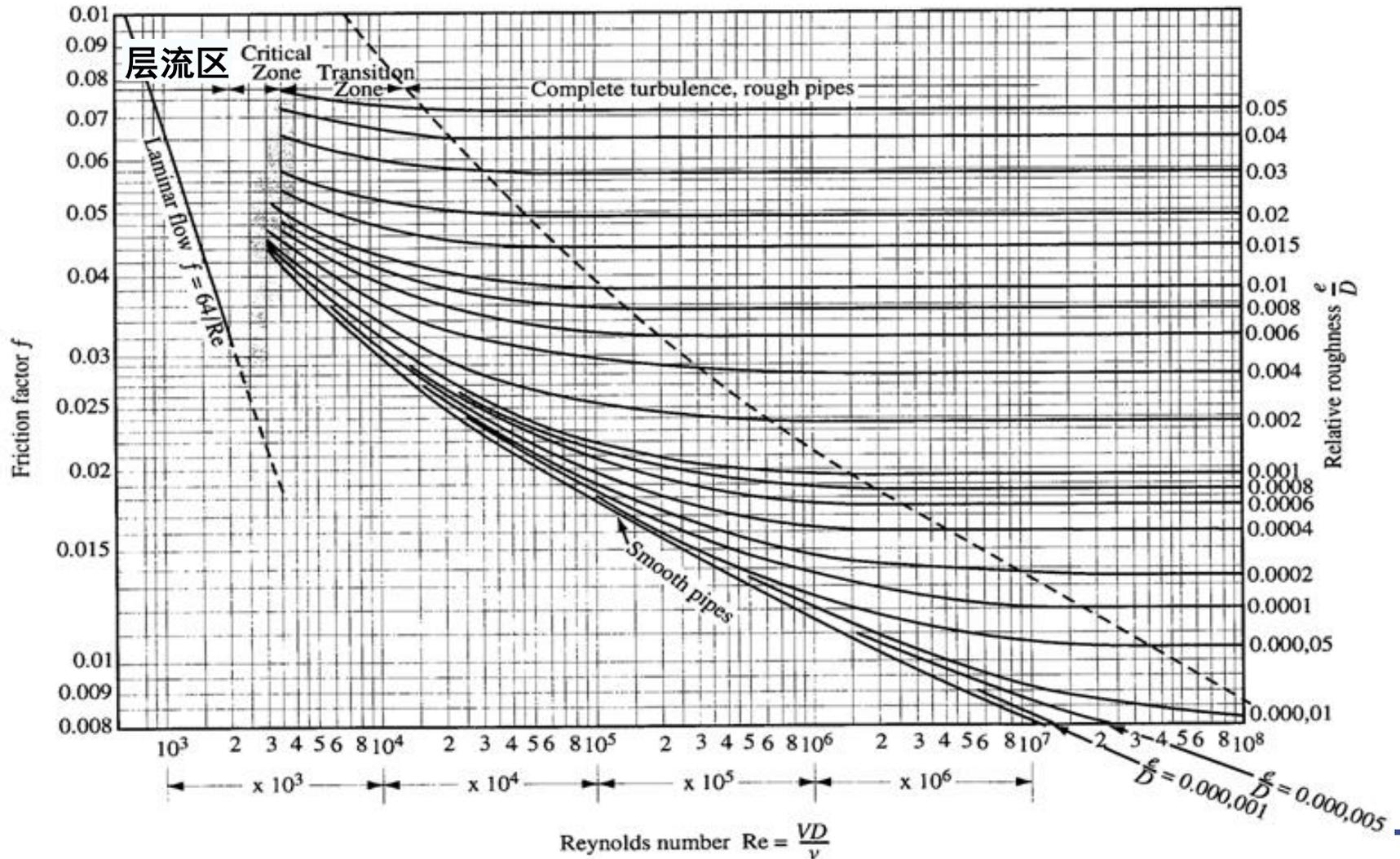


Lewis Moody



湍流流动

Moody图(Moody diagram): 摩擦阻力系数与雷诺数的关系。





- 层流区 (I) :

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{理论与实际完全一致})$$

$$h_f \propto V^{1.0}$$

- 层流-湍流过渡 (II) : 空白



- 湍流光滑区 (III) :

$$\lambda = \frac{0.316}{\text{Re}^{0.25}} \quad (\text{布拉休斯公式})$$

$$h_f \propto V^{1.75}$$

- 湍流过渡区 (IV) :

$$\lambda = \frac{0.0179}{d^{0.3}} \left(1 + \frac{0.867}{V}\right)^{0.3} \quad (\text{舍维列夫公式})$$



- 湍流粗糙区 (V) :

$$\lambda = \left(2.1 \lg \frac{r_0}{k_s} + 1.74 \right)^{-2} \quad (\text{尼古拉兹公式})$$

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{k_s}{d} \right)^{0.25} \quad (\text{希弗林标公式})$$

$$\lambda = \frac{0.0210}{d^{0.3}} \quad (\text{舍维列夫公式})$$

$$h_f \propto V^2$$



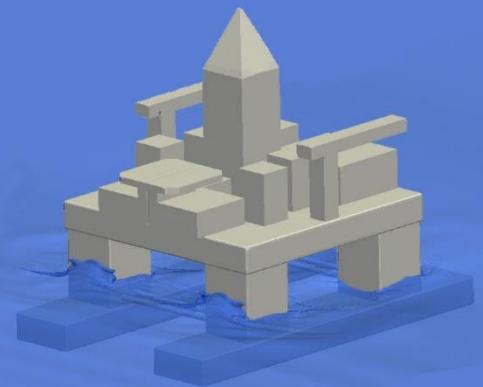
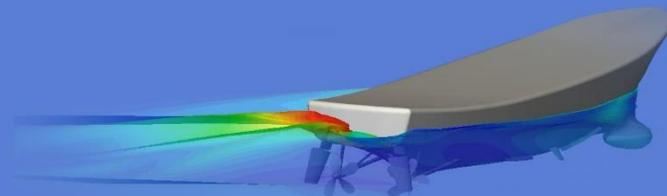
- 适合湍流区的公式：

$$\sqrt{\lambda} = -2.1 \lg \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) \quad (\text{柯列勃洛克公式})$$

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{k_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25} \quad (\text{阿里特苏里公式})$$

CMHL COMPUTATIONAL MARINE HYDRODYNAMICS LAB
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

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



*部分素材来源于网络