

华南理工大学 South China University of Technology

华南理工大学 | 土木与交通学院
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING & TRANSPORTATION
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

船舶阻力

第二讲：粘性阻力

（9学时）

焦甲龙 主讲

船舶与海洋工程系

2023年9月

华南理工大学 South China University of Technology

目录

第二讲：粘性阻力

- 1 粘性阻力的组成与船体边界层
- 2 平板边界层与摩擦阻力
- 3 平板摩擦阻力系数计算公式
- 4 船体表面弯曲度对摩擦阻力的影响
- 5 船体表面粗糙度对摩擦阻力的影响
- 6 船体摩擦阻力的计算步骤
- 7 减小摩擦阻力的方法
- 8 粘压阻力的成因及特性

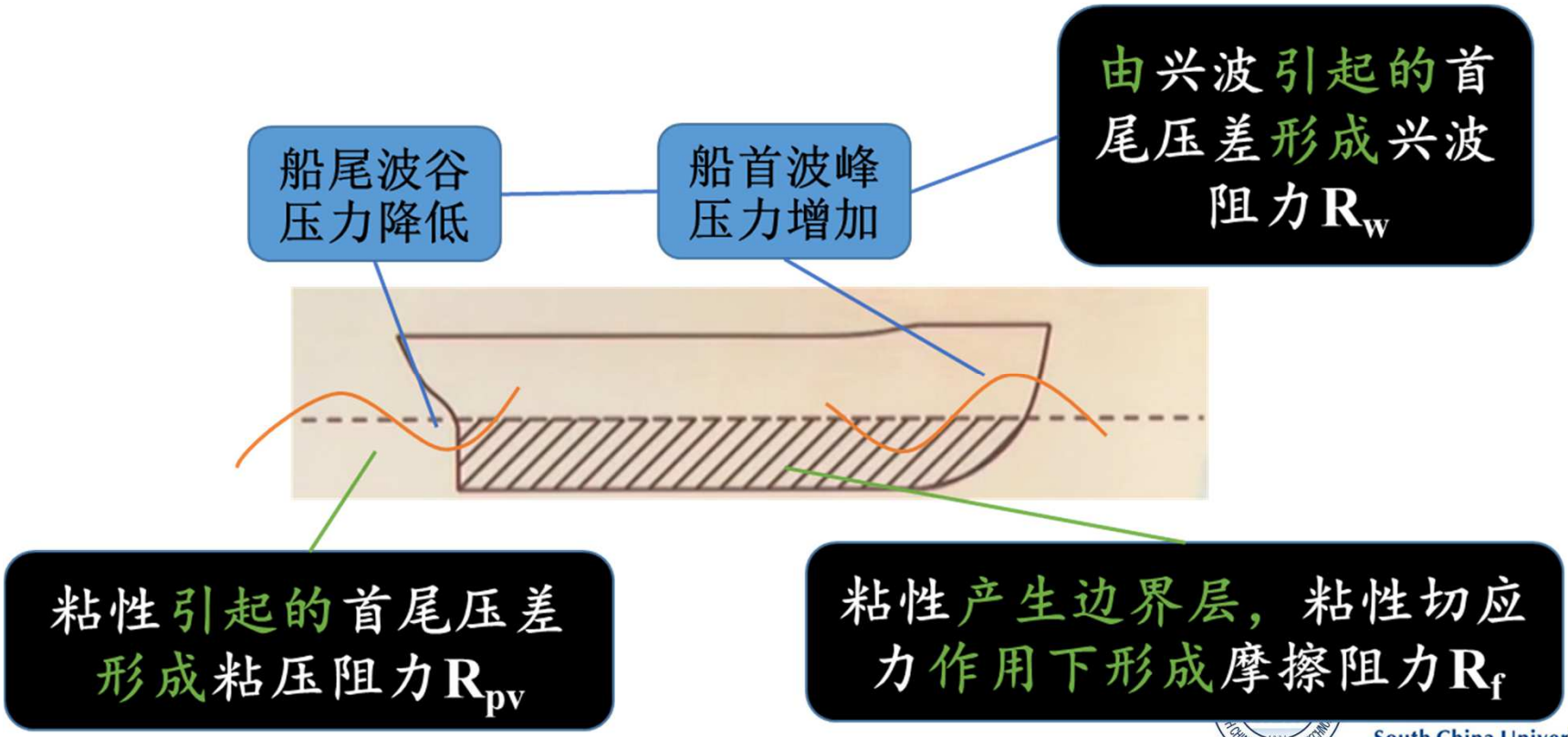
South China University of Technology

1 粘性阻力的组成与船体边界层

粘性阻力是由于流体的粘性作用

而产生的作用在船体上的阻力。

其包括摩擦阻力和粘压阻力。



摩擦阻力：

船体表面的剪切应力在船舶运动方向上的投影沿船体表面进行积分，所得的合力。

从能量的观点出发：当船舶在静水面上航行时，由于流体粘性作用，其必然带动一部分流体与其一起运动，即船体表面边界层。而为了带动这部分流体（水），船体就必须不断地向这部分流体提供能量，因而产生摩擦阻力。

华南理工大学
South China University of Technology

粘压阻力：

由于流体粘性作用，船体前后压力分布不对称，由此产生的压差力，也称为形状阻力或旋涡阻力。

从能量的观点出发：在船尾部的流体离体形成旋涡需要消耗能量，其中部分旋涡被冲向后方的同时，在船尾又持续不断地产生新的旋涡，因而船体必须不断地为这部分流体提供能量，而这部分能量的损耗就是以粘压阻力的形式表现的。

华南理工大学
South China University of Technology

船体边界层

1、边界层外缘势流不同

2、界层内纵向压力分布不同

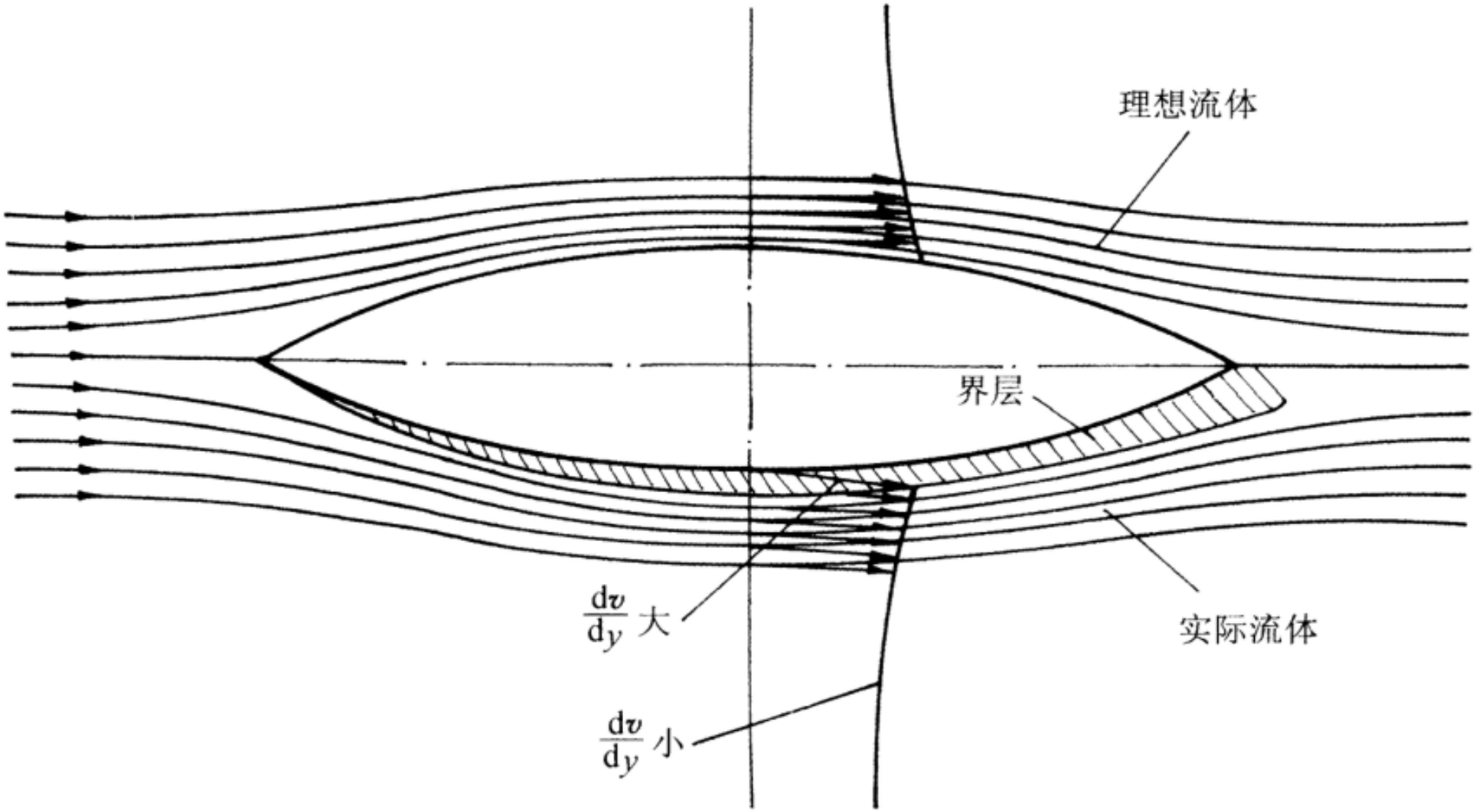


图 2-6　边界层内外的速度梯度比较

一. 船体边界层的特点

1. 船体几何形状十分复杂，数学表达困难

2. 边界层外缘势流与平板的势流明显不同

平板：边界层外缘势流速度和压力均保持不变

船体：势流是三维的，存在纵横向的速度梯度、压力梯度，首尾尤显著。

3. 船前75—80% L是薄边界层，以后边界层变厚。压力在边界层内有变化，要用N-S方程解。

华南理工大学
South China University of Technology

2 平板边界层与摩擦阻力

一、平板边界层

假设顺着水流流动方向放置一薄平板，水流以均匀速度V流经平板，由于水具有粘性，平板表面处的水质点被吸附在平板上，故平板表面上的水流速为零。随着与平板表面距离y的增加，水流速逐渐增加；当y增加至某一距离δ时，其流速达到与来流速度相同。

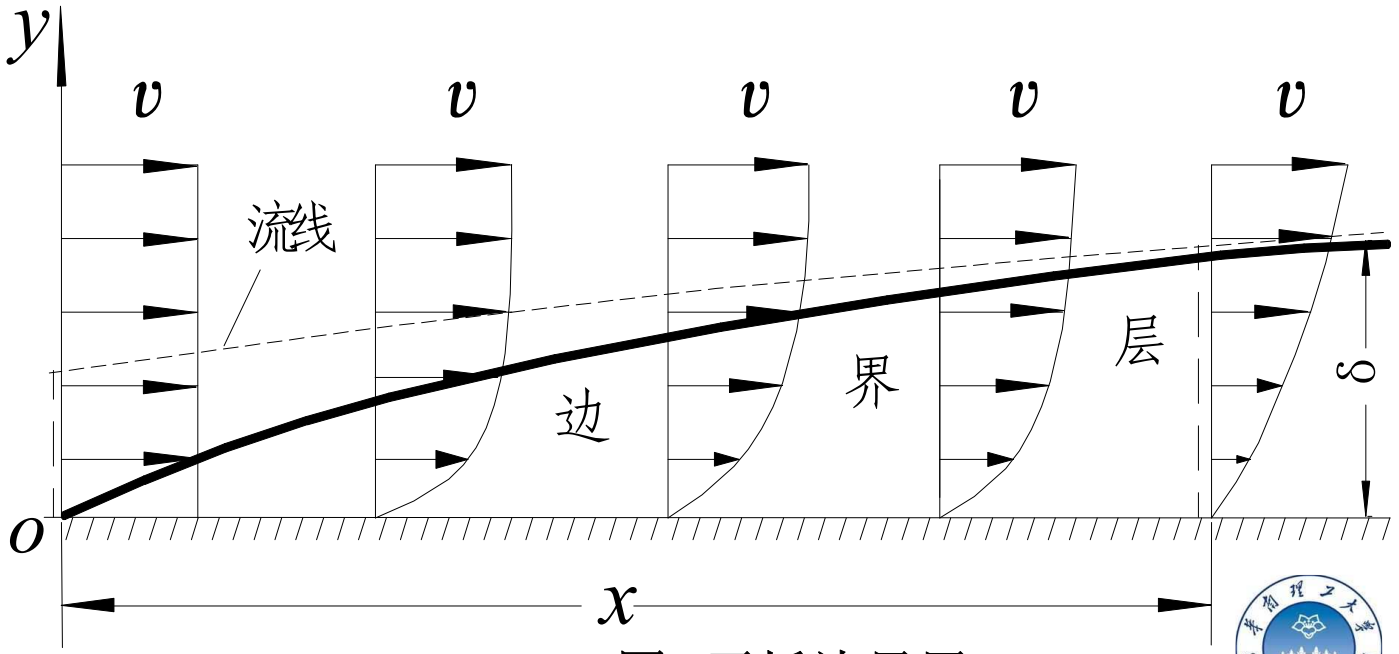
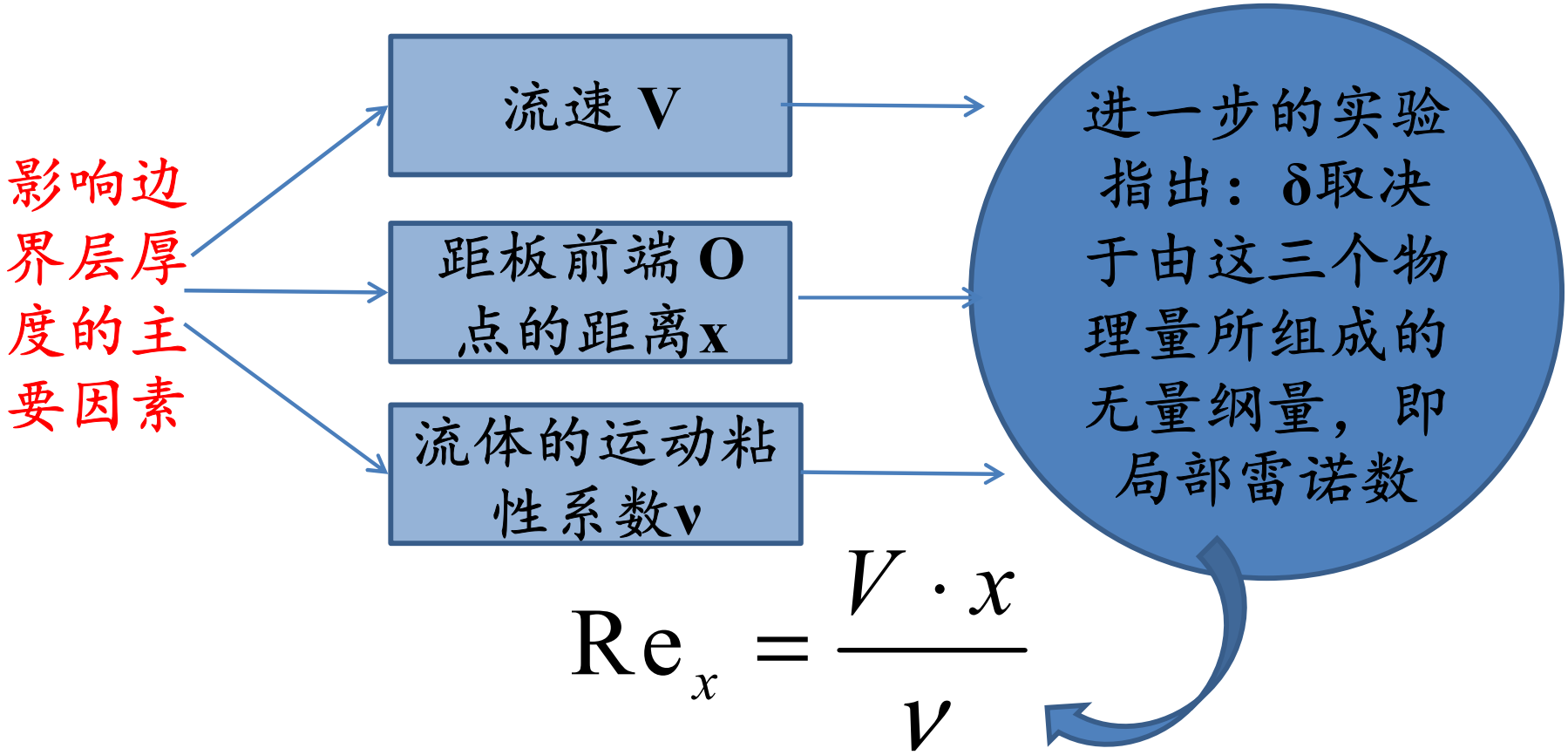


图　平板边界层

华南理工大学
South China University of Technology

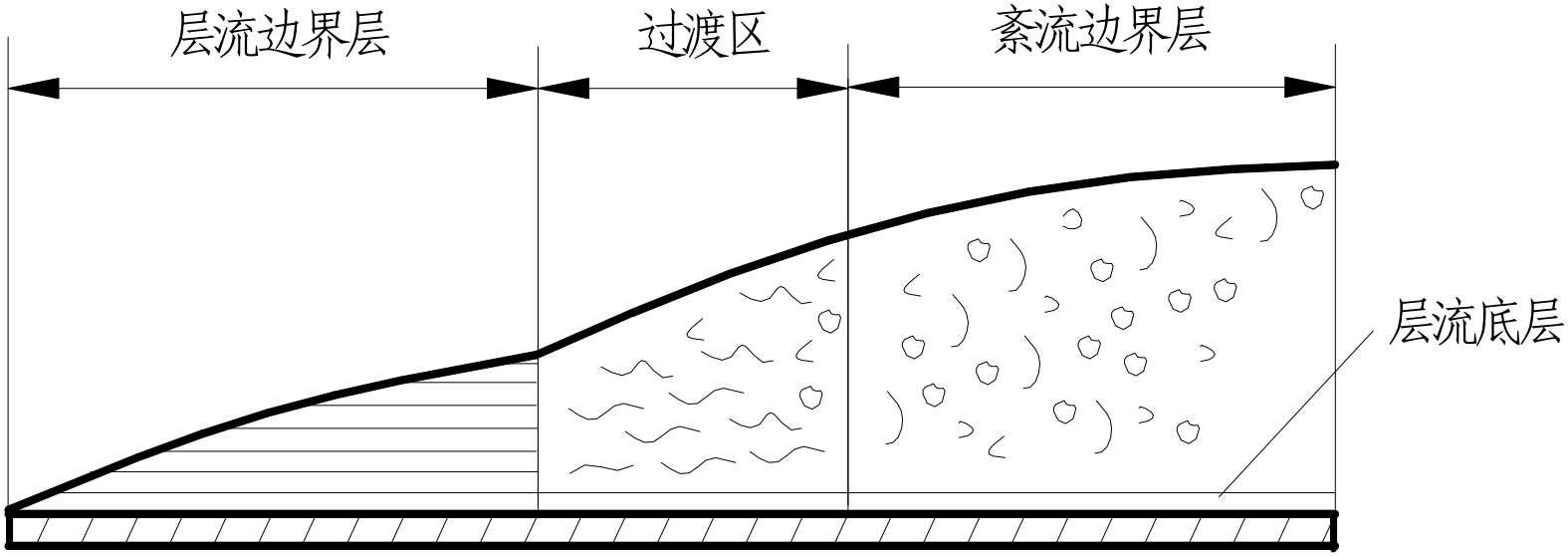
影响边界层厚度的主要因素有：来流速度v、距板前单点0的距离x和流体的粘性（运动粘性系数）。边界层厚度取决于有这三个物理量所组成的无量纲数



如果V、x一定，当Re_x很大时，表示流体的粘性作用很小，δ就很小。理想流体可以看做是流体的运动粘性系数v=0的实际流体，其雷诺数Re=∞，边界层的厚度δ=0。

华南理工大学 South China University of Technology

边界层内存在着两种流动状态：平板前端部分，水质点具有稳定的分层流动，边界层厚度沿板长方向增长缓慢，该流动状态称为**层流**；



平板边界层的流动状态

在平板后部，水质点互相碰撞，运动方向极不规则，但其平均速度还是沿平板方向前进，界层厚度沿板长方向增长较层流情况为快，称为**紊流（或湍流）**。

华南理工大学
South China University of Technology

通过实验观察可知：边界层内的流体流动状态取决于平板的局部雷诺数	
层流状态：	$Rex<(3.5\text{-}5.0)\times10^5$
过渡流（变流）状态：	$(3.5\text{-}5.0)\times10^5<Rex<3.0\times10^6$
湍流（紊流）状态：	$Rex>3.0\times10^6$

由边界层理论可求得边界层的厚度：

层 流：

$$\delta=5.2\,\mathrm{Re}x^{-\frac{1}{2}}\cdot x$$

湍 流：

$$\delta=\frac{0.0598}{\lg\mathrm{Re}x-3.107}\cdot x$$

！注意：在湍流边界层的底部，还有一极薄层水流仍为层流，称为层流（粘流）底层。原因就是紧靠物面的水质点的运动速度极低，其雷诺数很小，故呈现出层流状态。

华南理工大学 South China University of Technology

边界层理论的重要意义

将流体划分为截然不同的两部分，并分别加以处理。

（1）界层外面视为理想流体，可用势流理论来解决；

（2）界层内部则视为真实流体，需用边界层理论来求解。

华南理工大学
South China University of Technology

二、平板摩擦阻力的成因

由牛顿内摩擦定律，平板表面受到的摩擦切应力τ为：

$$\tau = \mu \cdot \left.\frac{\partial v}{\partial y}\right|_{y=0}$$

μ —流体动力粘性系数；

$\partial v/\partial y$ —界层内的速度梯度。

尽管介质是水，其动力粘性系数 μ 较小，但由于界层内的速度梯度很大，所以整个平板上受到的摩擦切应力不能忽略不计。

整个平板上所受到的摩擦阻力 R_f 应是所有摩擦切应力的合力，即：

$$R_f = \int_S \tau \cdot ds$$

华南理工大学
South China University of Technology

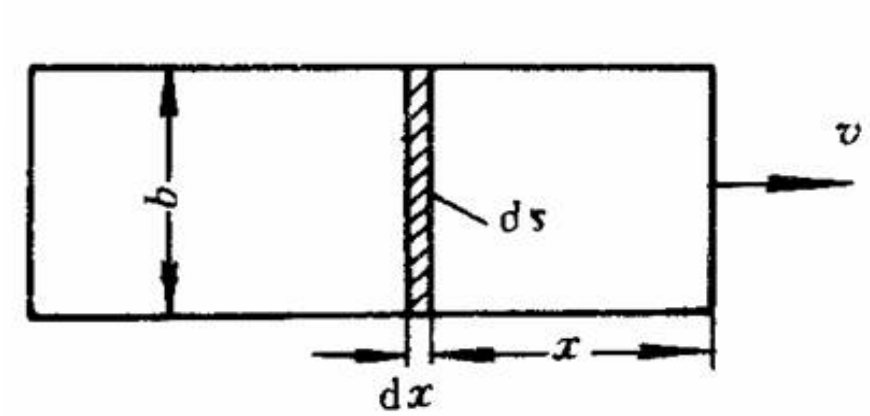
设平板宽度为**b**，则**X**一段内全部摩擦阻力为R_f，其无量纲形式为：

$$C_f = R_f / \frac{1}{2}\rho v^2 S = 2b\int_0^x \tau \cdot dx / (\frac{1}{2}\rho v^2 S \cdot 2bx) = \frac{1}{x}\int_0^x C_\tau \cdot dx$$

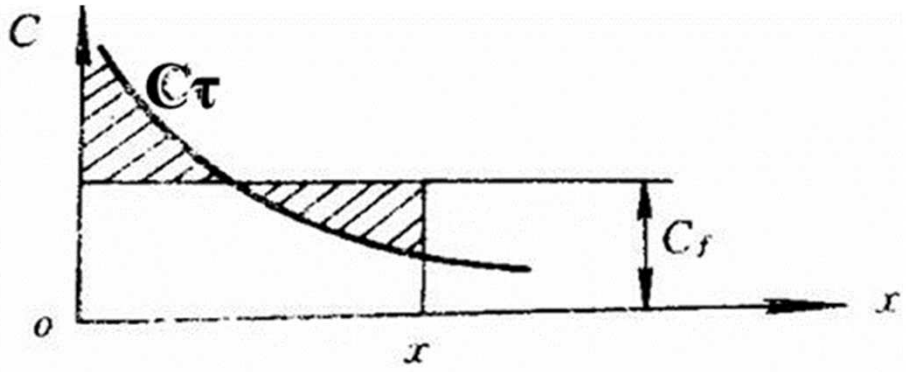
$C_\tau = \tau / \frac{1}{2}\rho V^2$ 为局部摩擦阻力系数

$$C_f = \frac{1}{x}\int_0^x C_\tau \cdot dx$$

为Cτ在整个x长度范围内的平均值，较相同雷诺数的Cτ为大。



平均摩擦阻力系数的计算

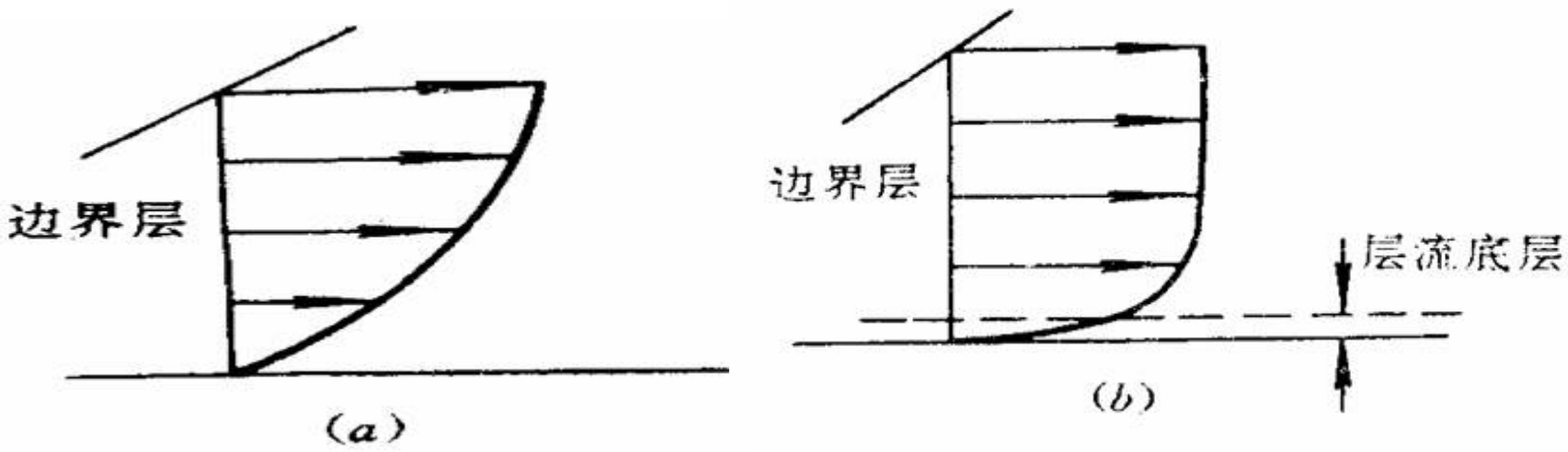


Cτ与Cf的关系示意图

华南理工大学 South China University of Technology

三、平板摩擦阻力的特性

1) 与流态的关系：



（a）层流时的速度分布　　（b）紊流时的速度分布

层流：速度梯度小 $\longrightarrow \tau$ 小 $\longrightarrow C_f$ 小

紊流：速度梯度大 $\longrightarrow \tau$ 大 $\longrightarrow C_f$ 大

华南理工大学
South China University of Technology

2)与雷诺数的关系

①来流速度v不变时：

$$x\uparrow\Rightarrow \mathrm{Re}_x\uparrow\Rightarrow \delta\uparrow\Rightarrow \frac{\partial v}{\partial y}\downarrow\Rightarrow \tau\downarrow\Rightarrow C_\tau\downarrow \quad C_f\downarrow$$

②当x一定时

$$v\uparrow\Rightarrow \mathrm{Re}_x\uparrow\Rightarrow \delta\downarrow\Rightarrow \frac{\partial v}{\partial y}\uparrow\Rightarrow \tau\uparrow\Rightarrow C_\tau\downarrow \quad C_f\downarrow$$

3)与平板湿表面积的关系

在流体介质给定，边界层内的流动状态固定时，则流体动力粘性系数μ和边界层内的速度梯度均为常数，因而摩擦切应力τ亦为常数。此时，板长为L的平板摩擦阻力值正比于平板的湿表面积。

华南理工大学 South China University of Technology

3 平板摩擦阻力系数计算公式

一、光滑平板层流摩擦阻力系数公式

在平板边界层为层流状态时Blasius（勃朗齐） 精确解：

$$C_f = 1.328\,\mathrm{Re}^{-\frac{1}{2}}$$

！注意：层流平板摩擦阻力系数的精确解并不适用于造船工程实际！原因是：

层流平板对应的雷诺数范围是：

$Re_x < (3.5\sim5.0)\times10^5$；

一般船舶的雷诺数范围是：

$4.0\times10^6 < Re_x < 3.0\times10^9$。

华南理工大学 South China University of Technology

二、光滑平板紊流摩擦阻力系数公式

在船舶摩擦阻力计算中采用的是平板湍流边界层摩擦阻力系数计算公式。

计算基础：卡门边界层动量积分方程式

华南理工大学
South China University of Technology

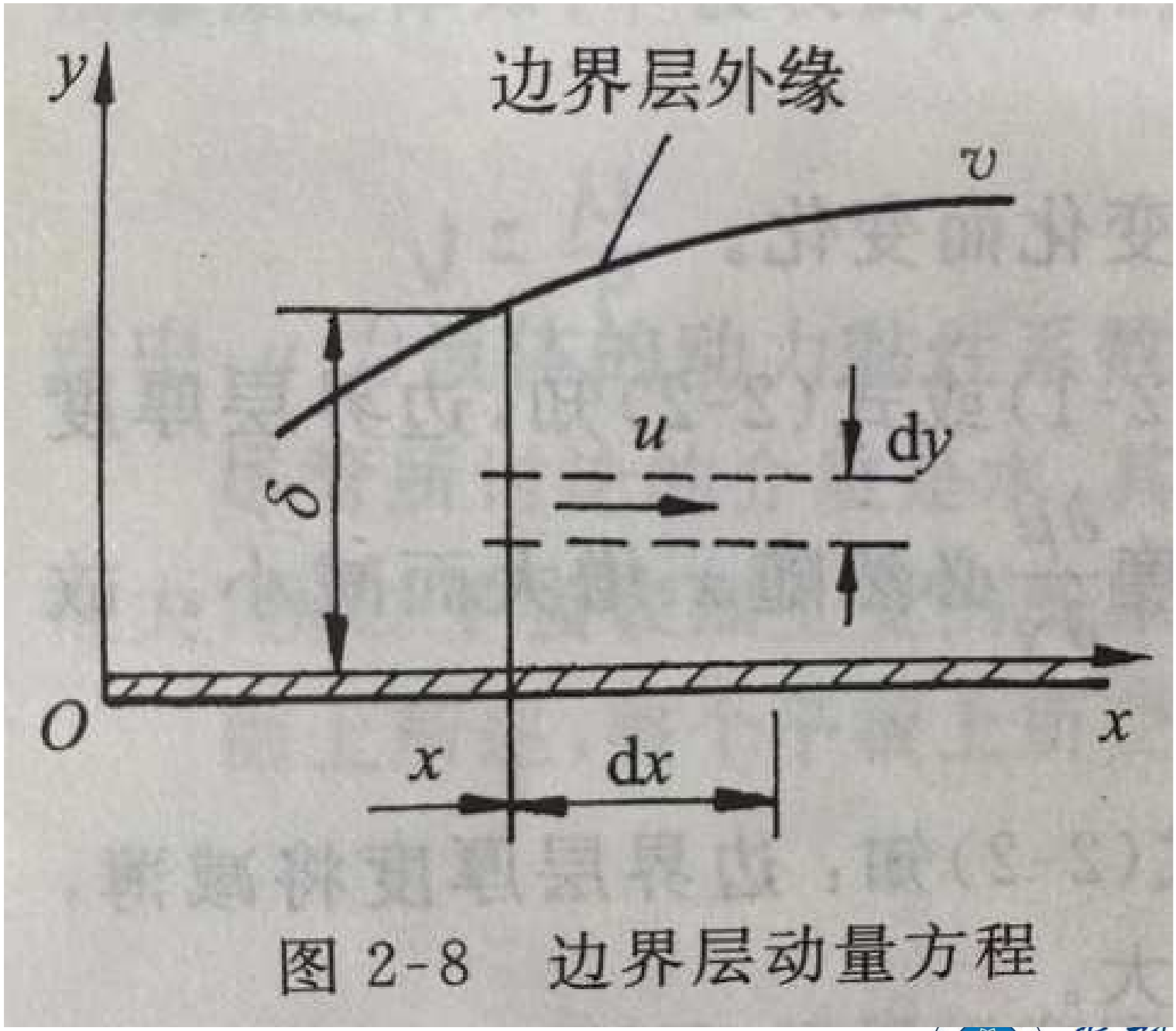


图 2-8　边界层动量方程

South China University of Technology

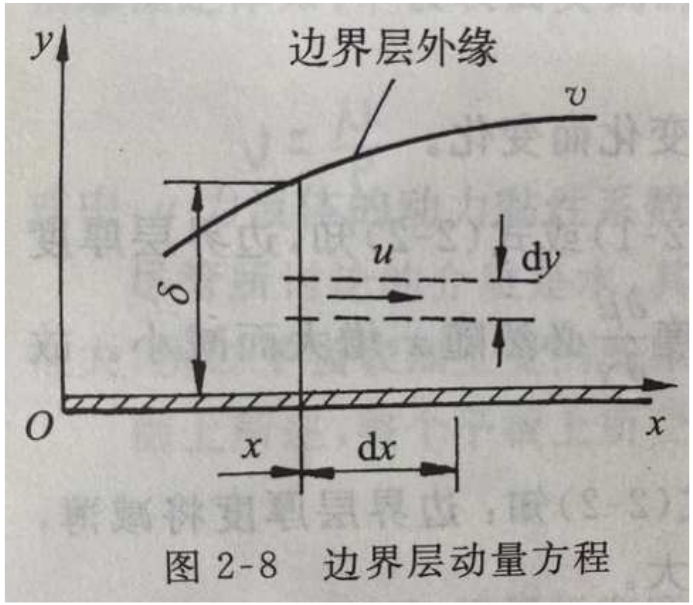


图 2-8　边界层动量方程

- 平板摩擦阻力原理
  - 根据应力　$R_f = \iint \tau dS = b\int \tau dx$
  - 根据动量定理　$R_f = b\int_0^{\delta} \rho u(v-u)dy$

$$\int_0^x \tau dx = \int_0^{\delta} \rho u(v-u)dy$$

动量损失厚度，
与边界层厚度相关

$$\tau = \frac{d}{dx}\int_0^{\delta} \rho u(v-u)dy = \rho v^2 \frac{d}{dx}\int_0^{\delta} \rho \frac{u}{v}(1-\frac{u}{v})dy = \rho v^2 \frac{d\theta}{dx}$$

$$C_f = \frac{2\theta_L}{L}$$

华南理工大学
South China University of Technology

1、速度为指数分布的计算方法

平板湍流边界层内的速度分布形式：$\frac{u}{v}=\left(\frac{y}{\delta}\right)^{n}$，

对于不同的雷诺数，n值是不同的。

当 $Re<2\times10^{7}$时，把 n=7代入平板边界层动量积分方程，可得：

$$C_f=\frac{0.072}{R_e^{1/5}}$$

South China University of Technology

经过试验结果修正，可得到光滑平板的湍流摩擦阻力系数计算公式如下：

$$C_f = \frac{0.074}{Re^{1/5}}$$

若$Re > 2 \times 10^7$时，指数的速度分布规律就不适当了，此时可以用对数速度分布求解。

华南理工大学
South China University of Technology

2、速度为对数分布的计算方法

① 桑海（Schoenherr）公式

1932年，桑海运用对数速度分布规律，并根据平板拖曳试验结果，给出了如下摩擦阻力系数公式：

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_f}} = \lg(R_e \cdot C_f)$$

该公式在美国应用最为普遍。由于该公式在实际计算中较为困难，所以**Re**在10^6~10^9时，化成了具有相同结果的简便公式：

$$C_f = \frac{0.4631}{(\lg R_e)^{2.6}}$$

华南理工大学 South China University of Technology

② 普朗特-许立汀（Prandtl-Schlichting）公式

普朗特和许立汀应用与上述相同的原则，得到了与桑海公式形式十分相近的普朗特-许立汀公式：

$$C_f = \frac{0.455}{(\lg R_e)^{2.58}}$$

该公式在欧洲大陆应用最为普遍。

③ 休斯（Hughes）公式

1952年，休斯在分析了以往所发表的许多平板数据，证实了摩擦阻力系数与平板展弦比有关。**1954**年他发表了平板试验资料，实验平板的雷诺数在$\mathbf{Re= 2.0\times10^4\sim 3.0\times10^9}$，展弦比在**0.0156~42**。并由此得出展弦比为无穷大时的二因次紊流光滑平板公式：

$$C_f = \frac{0.066}{(\lg \mathrm{Re} - 2.03)^2}$$

华南理工大学 South China University of Technology

3、1957年国际船模试验水池会议实船-船模换算公式

在1957年西班牙马德里召开的第八届国际船模水池会议（简称ITTC）上，根据分析几何相似船模阻力实验结果，提出了一个新的公式，即1957年国际船模试验水池会议建议的实船-船模换算公式，简称ITTC-1957公式：

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg \mathrm{Re} - 2)^2}$$

我国现在使用该公式。

华南理工大学 South China University of Technology

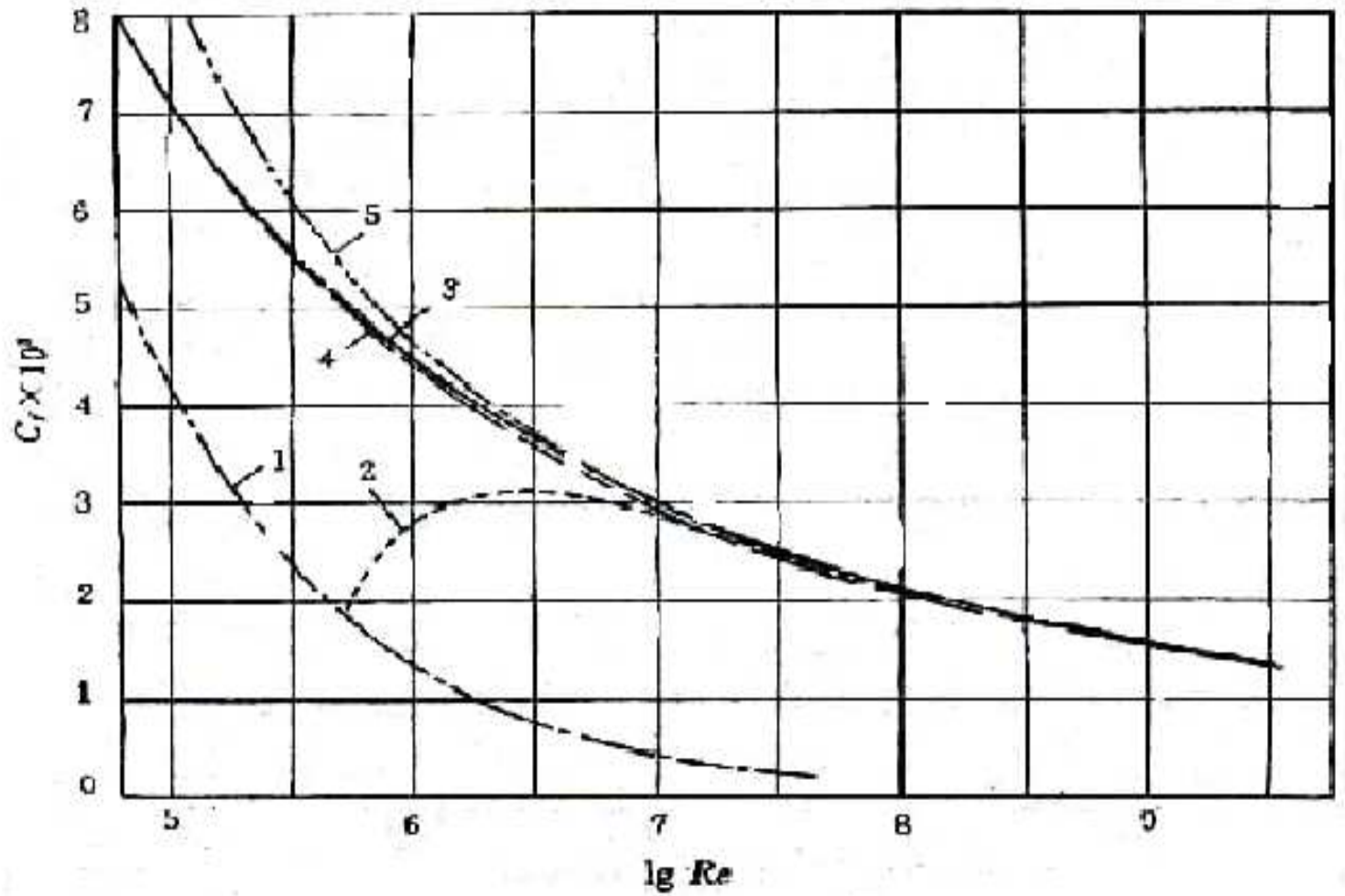
4、过渡流平板摩擦阻力系数公式

普朗特给出的半经验公式：

$$C_f = \frac{0.455}{(\lg \mathrm{Re})^{2.58}} - \frac{1700}{\mathrm{Re}}$$

式中的**1700/Re**为层流影响修正值。显见，当**Re**很大时，该值趋于零。这也说明，平板边界层内湍流占绝对主要部分，可按照全部湍流平板进行处理。

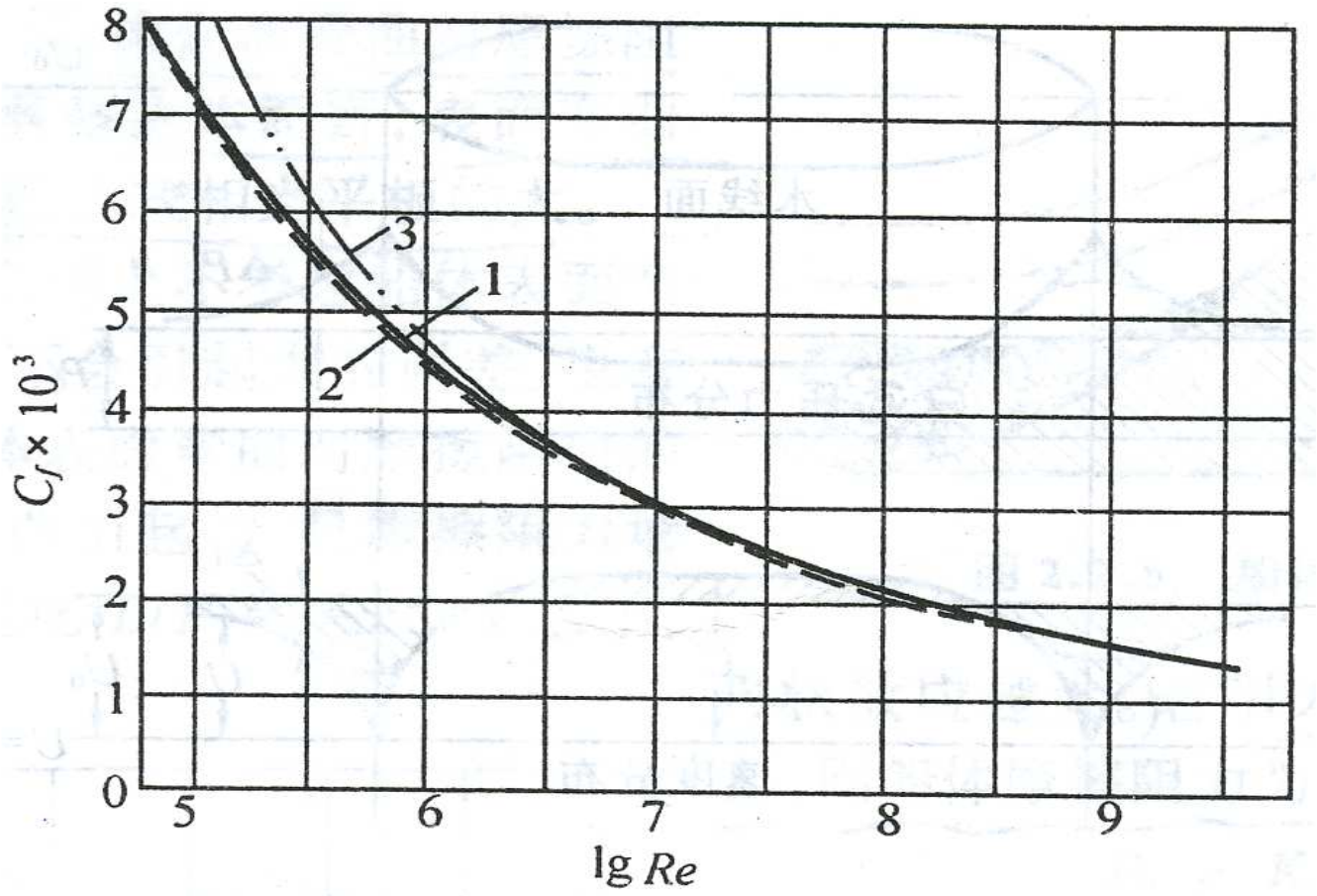
华南理工大学
South China University of Technology



光滑平板摩擦阻力系数公式的比较

1、勃朗齐公式（层流）；2、柏朗特公式（过渡流）；3、柏朗特—许立汀公式 （湍流）4、桑海公式（湍流）；5、ITTC—1957公式（湍流）

华南理工大学 South China University of Technology



不同摩擦阻力系数公式的比较

1、柏朗特—许立汀公式 2、桑海公式 $\frac{0.243}{\sqrt{C_f}} = \lg(R_e.C_f)$ ；

3、1957ITTC公式

华南理工大学 South China University of Technology

通过比较表明，在低雷诺数时，ITTC－1957公式的坡度较其它公式偏大，高雷诺数时，ITTC－1957公式与桑海公式相差甚微。

柏兰特－许立汀公式与桑海公式不但在形式上极为相似，数值上也很接近，前者至多比后者大2.0%～2.5%。

另外， ITTC－1957公式与休斯公式尽管在形式上十分接近，但数值相差较大，约大12.5%。

目前，世界上绝大多数船模水池采用ITTC－1957公式计算船体摩擦阻力系数。

华南理工大学
South China University of Technology

5、船体摩擦阻力的处理方法

由于船体形状非常复杂，目前应用理论方法精确计算船体摩擦阻力还不能付诸于工程实用，在船舶工程中还不得不沿用佛汝德提出的相当平板假定（理论）。

相当平板假定（理论）：

假设具有相同长度、相同湿表面积、相同运动速度的船体和光滑平板的摩擦阻力相同。

!注意：

应用相当平板假定（理论），所得到的船体摩擦阻力与实际船体摩擦阻力之间是存在一定差异的。

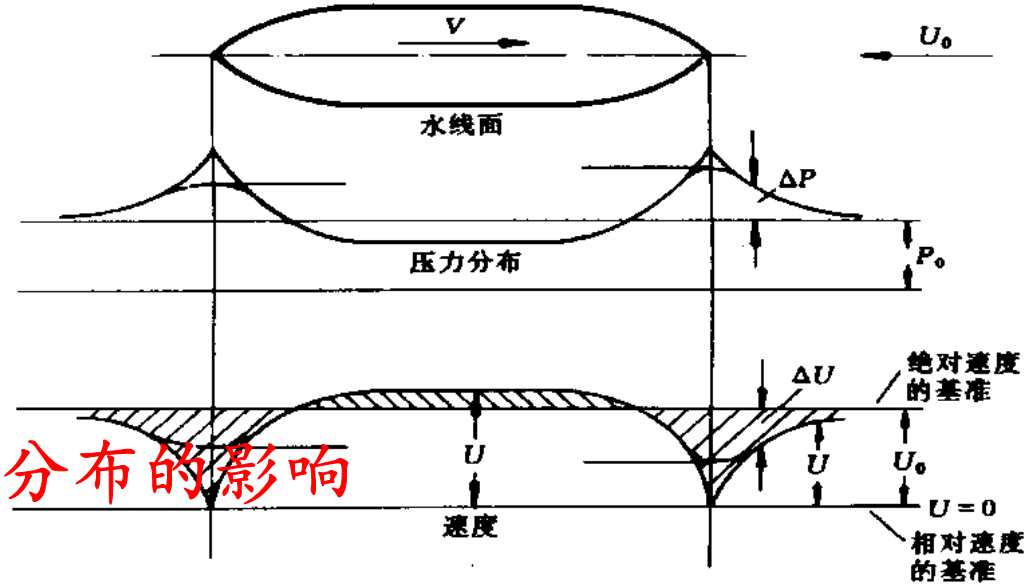
华南理工大学
South China University of Technology

- 相当平板假设
  - 实船或船模
  - 其阻力与同速度、长度、湿面积平板相等
  - 显然，由于实船和船模的Re数不同，其摩擦阻力系数是不同的
    - 称为尺度效应

- 相当平板假设，忽略了
  - 表面粗糙度的影响
    - 油漆的影响（跟材料相关）
    - 焊缝的影响（局部粗糙度）
  - 船体表面弯曲的影响
    - 造成流速分布不均匀
    - 二次流（流动变向、旋涡分离）

4 船体表面弯曲度对摩擦阻力的影响

1、船体表面纵向弯曲的影响



●对边界层外主流区速度和压力分布的影响

平板：沿长度方向压力、速度保持不变。

船体：1）各处流速不同，船中部流体速度大于船舶的绝对速度，而航行绝对速度大于船体艏艉处的流速；

2）各处压力不同，艏艉压力高于船中部，沿船长方向存在着纵向压力梯度。

华南理工大学 South China University of Technology

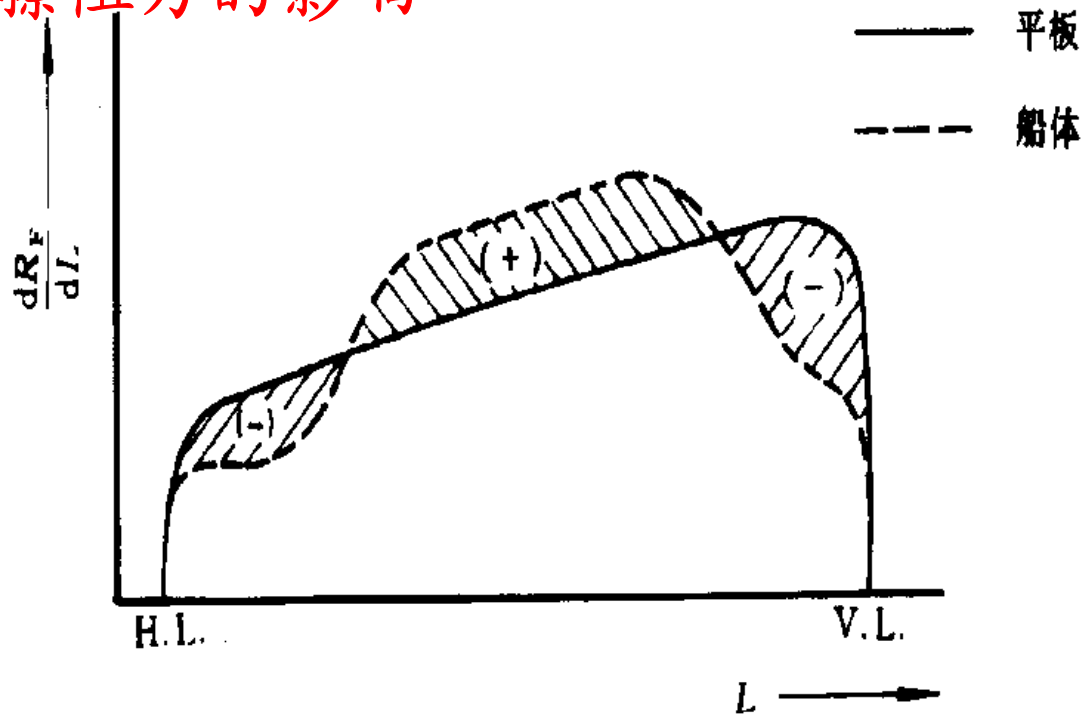
●对边界层内纵向压力分布的影响

平板：内部的纵向压力相等；

船体：各处压力不同，艏部力高于舯部，艉部压力有所升高但低于艏部。

●对剪切应力和摩擦阻力的影响

船体中部的剪切应力比平板大，首尾部比平板小，总体上摩擦阻力比相当平板大。



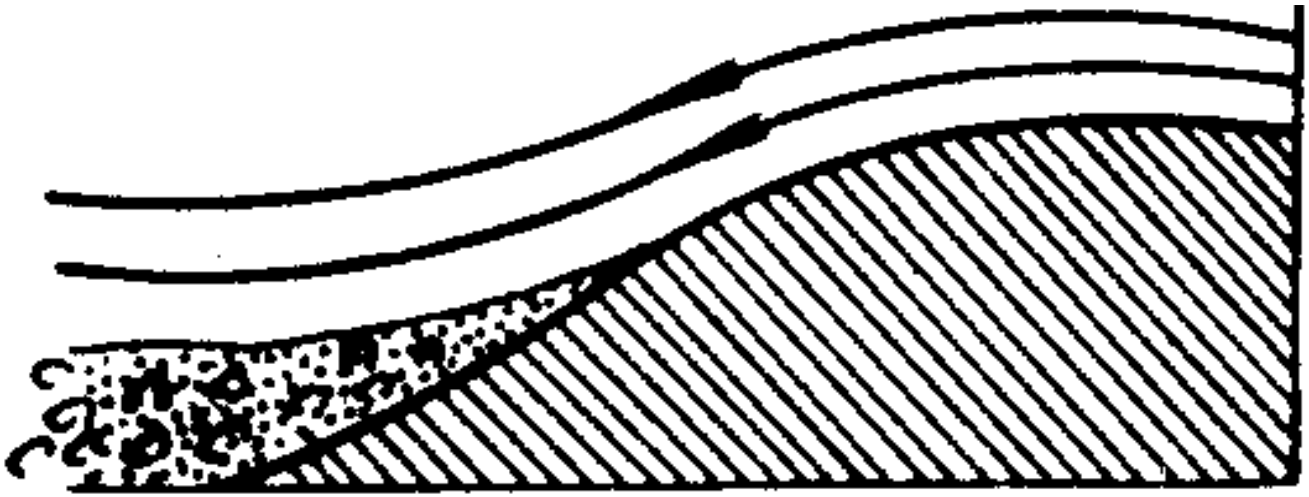
平板和船体表面剪切应力分布示意图

华南理工大学
South China University of Technology

2、船体表面横向弯曲的影响

●与纵向弯曲相同，船体表面横向弯曲处的边界层厚度变薄，船舭部尤为显著，摩擦阻力大。水流在舭部会产生纵向和横向流动，使得局部摩擦阻力增大。

●船体表面弯曲还易发生边界层分离，产生旋涡，漩涡区流速较低，摩擦阻力减小。



船体表面旋涡区

华南理工大学 South China University of Technology

3、船体表面弯曲对摩擦阻力的影响

船体表面弯曲对船体摩擦阻力的影响较为复杂，但总的来说，其影响导致船体表面摩擦阻力较相当平板大。

依据佛汝德假设，在实用上不考虑船体表面弯曲对摩擦阻力的影响不会引起较大误差。也有研究者认为，船体表面弯曲对摩擦阻力的影响主要由船体纵向弯曲引起，且摩擦阻力的增加值主要与平板的长宽比L/B有关，且L/B越小，形状效应越大。

华南理工大学
South China University of Technology

形状效应：

由于船体表面弯曲的影响而使得船体的摩擦阻力与应用相当平板计算所得结果之间的差别称形状效应。

思考：

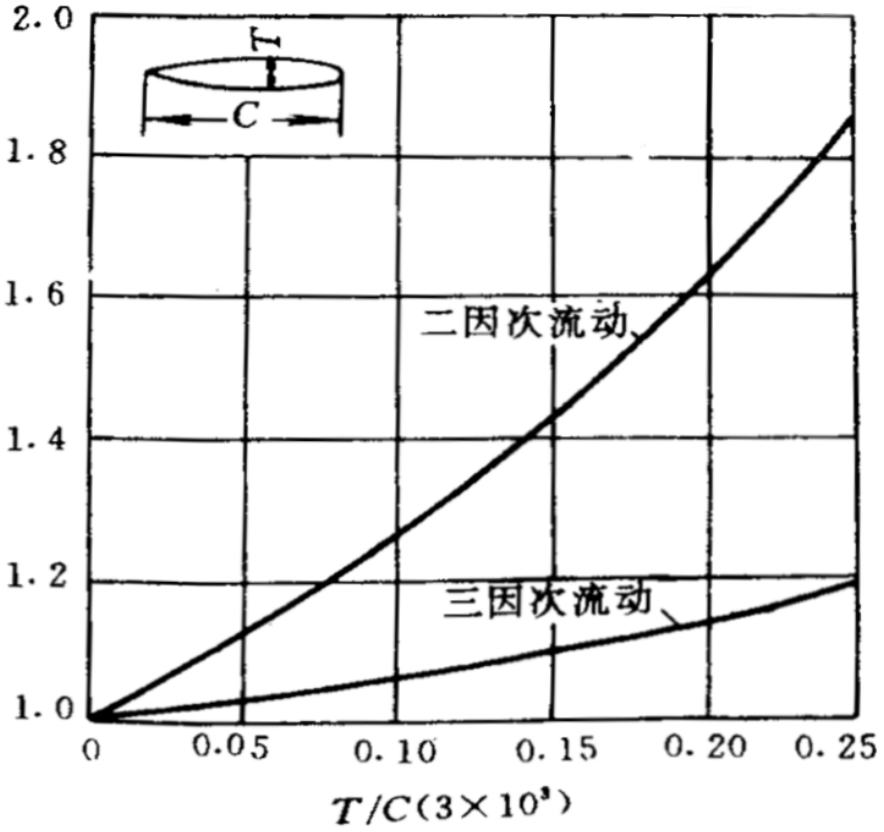
- 为了减少形状效应的影响，进行船模试验时船模要做的尽可能大，为什么？
- 为何通过改变船体形状来减少摩擦阻力收益甚微？

华南理工大学 South China University of Technology

二、船体形状效应的修正

1、史高斯结论

- 曲面物体的摩擦阻力较相当平板的大，且随物体表面曲度增加而增加；
- 二次对称扁柱平均相对速度比三因次回转体大，边界层薄， 其摩擦阻力大；
- 由于曲度而增加的摩擦阻力与相当平板摩擦阻力的百分数与**Re**无关。



对称扁柱和向转体的摩擦阻力

2、船体曲面摩擦阻力

略大于相当平板摩擦阻力，但增加量较小。

华南理工大学
South China University of Technology

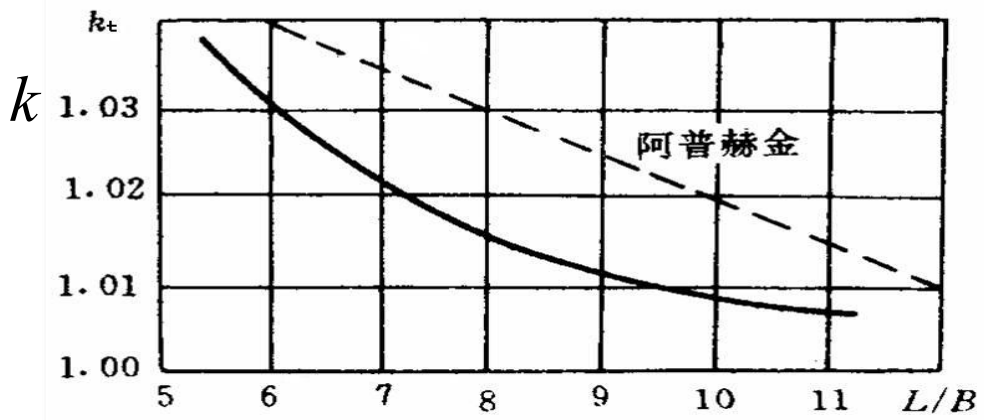
3、修正方法

1）汤恩假定下修正；

$$\frac{\Delta R_f}{R_f} = 0.01\left[\frac{\left(11.25-\frac{L}{B}\right)^2}{5}+2.5\right]\left(0.35+C_p\right)\left(1.3-\frac{B}{10T}\right)$$

2）形状效应修正因子；

$$R_f = k_f C_f \cdot \frac{1}{2}\rho v^2 S$$



船体形状效应修正因子

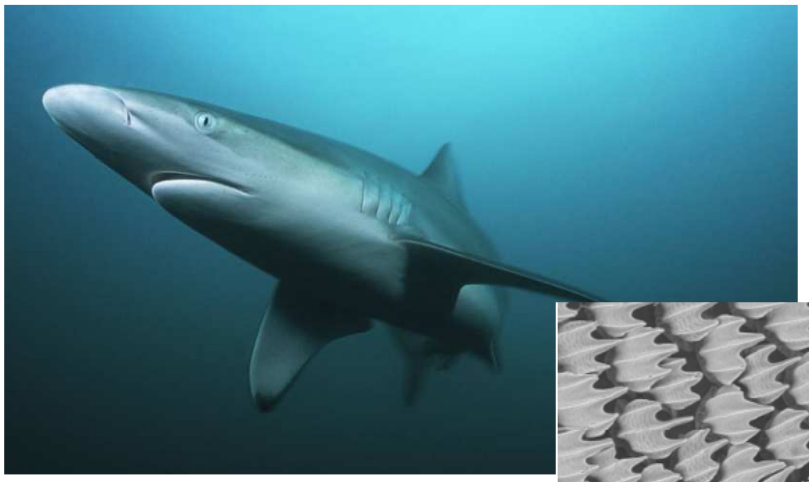
3）不单独作修正，将其合并于粘压阻力，通过模型试验方法确定；

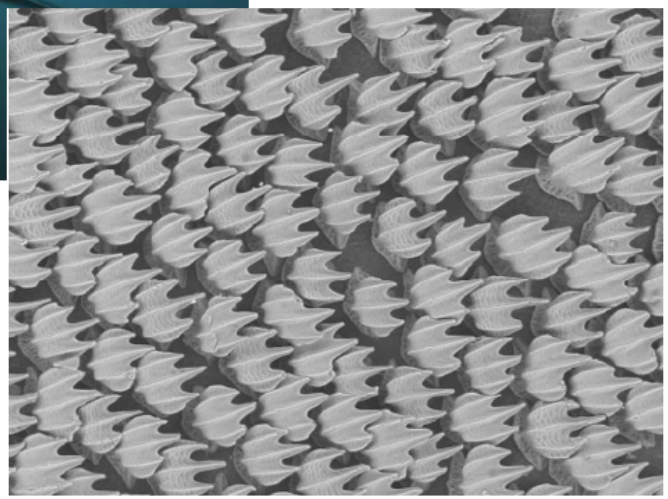
华南理工大学
South China University of Technology

船体及平板摩擦阻力系数计算公式均是相对于水力光滑表面而言的，而实船船体表面存在着一定的粗糙度，这种粗糙度会导致摩擦阻力的较大增加。

？问题：是否物体表面越光滑，其阻力性能越好呢？







https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=11500962383171003629

https://haokan.baidu.com/v?pd=wisenatural&vid=10881123697788328090

5 船体表面粗糙度对摩擦阻力的影响

一、普遍通粗糙度（油漆面粗糙度）

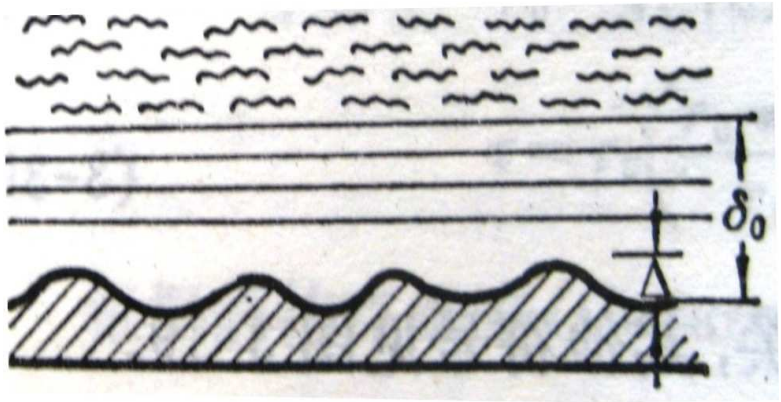
——油漆、壳板表面凹凸不平



华南理工大学
South China University of Technology

船体普遍粗糙度研究的是带有均匀性质的粗糙因素，重点在于漆面粗糙度的研究。

当相对粗糙度一定时，摩擦阻力系数C_{fr}随Re数变化分三个阶段：



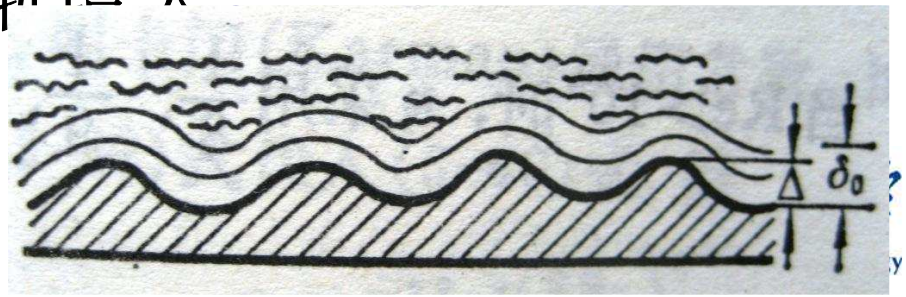
（1）水力光滑阶段

当Re数较小时，粗糙度对阻力没有影响。

（2）过渡阶段

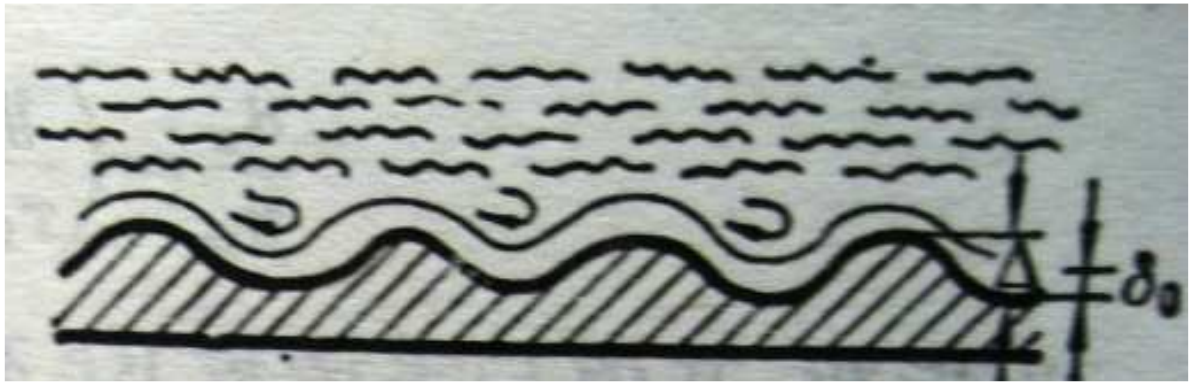
当Re增大到某一值时，C_{fr}开始大于光滑平板摩擦阻力系数C_f，且它们之间的差别逐渐增大。

且随Re继续增大，沿平板将有更多的部分出现$\frac{\Delta}{\delta_0} \geq 1$的情况，因而$C_{fr}$必然逐渐增大



（3）完全粗糙阶段

当 **Re** 增 大 到 某 一 雷 诺 数 后 ， ΔC_f 基本上不再随**Re**数而变化，近似为一常数。



船模表面由于加工精良，同时其速度较实船要低得多，船模表面粗糙度相对于其界层的层流底层要小。一般认为船模表面属于水力光滑情况.

华南理工大学
South China University of Technology

k_σ ：涂在平板上的漆面高度

k_σ / L ：相对粗糙度

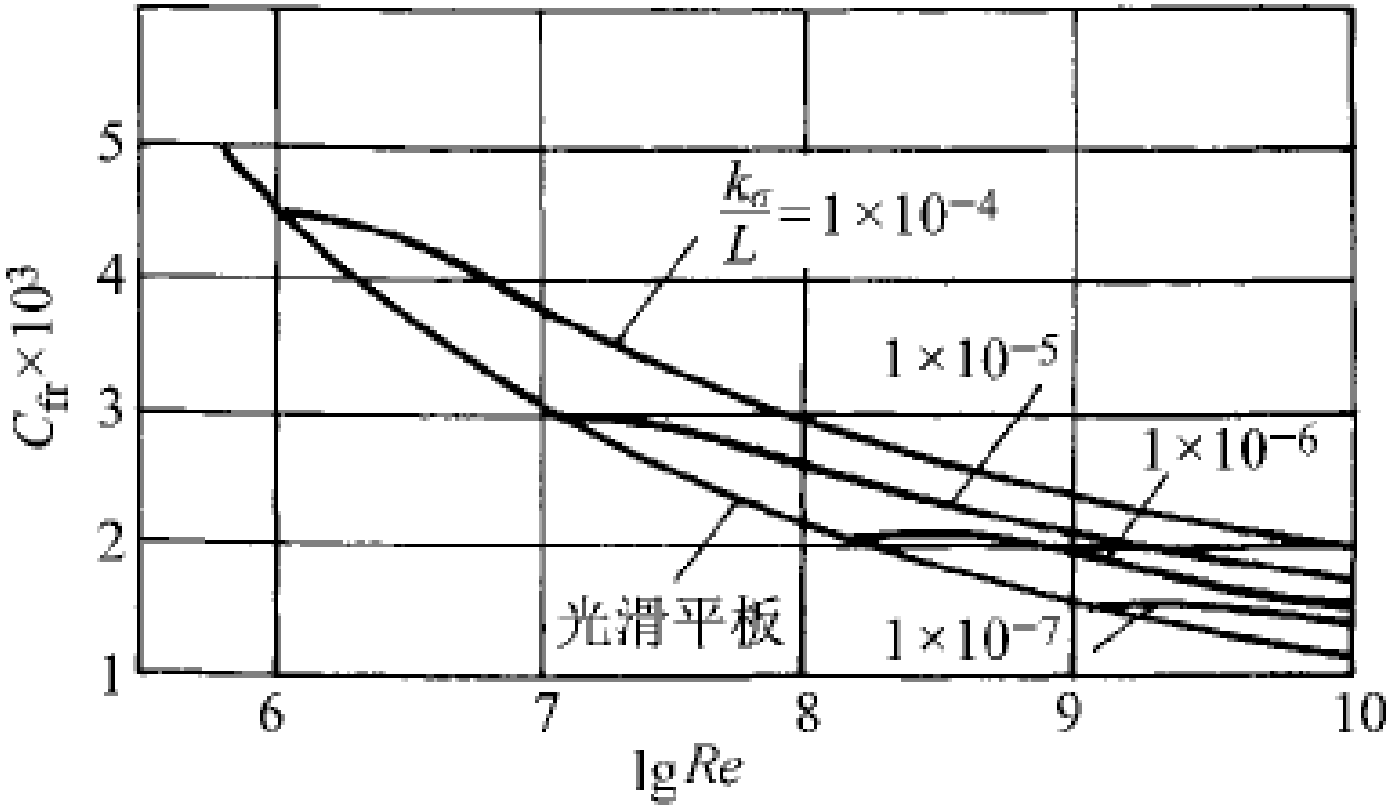


图 2-14　漆面平板之摩擦阻力系数

南理工大學
South China University of Technology

二、局部粗糙度（结构粗糙度）

——焊缝、铆钉、表面开孔、海水箱以及突出物等





1、焊接船舶的局部粗糙度使阻力增加约为：1.27%，

2、铆接船舶的局部粗糙度使阻力增加约为：16%。

华南理工大学
South China University of Technology

局部粗糙度对船体表面摩擦阻力的影响：

（1）铆接船的局部粗糙度对阻力的影响远较焊接船为大

（2）对焊接船，局部粗糙度引起的阻力增加的百分数是不大。

（3）对焊接船来说，横向焊缝是造成局部粗糙度对阻力影响的主要因素。

South China University of Technology

三、船体粗糙表面摩擦阻力计算

粗糙度补贴系数法：

在光滑平板摩擦阻力系数C_f的基础上增加粗糙度补贴系数ΔC_f，认为考虑了船体表面粗糙度影响的船体摩擦阻力为：

$$R_f = (C_f + \Delta C_f) \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 S$$

？问题：新建船舶，其表面是否存在粗糙度？

华南理工大学 South China University of Technology

ΔC_f 影响因素

——船型、船体表面所用油漆、涂敷时的操作条件等有关

实船粗糙度阻力测量结果

船	类　型	油　漆	光滑 C_f	ΔC_f	阻力增加的百分数		实船数据测量方法
					摩擦阻力	总阻力	
A	驱逐舰	标准漆	0.001 47	0.000 40	28	9	推力仪
B	驱逐舰	热塑胶	0.001 48	0.000 65	25	14	推力仪
C1	巡洋舰	黄丹	0.001 29	0.000 15	12	5	推力仪
C2	巡洋舰	热塑胶	0.001 29	0.000 75	58	23	推力仪
D	巡洋舰	标准漆	0.001 37	0.000 10	7	2	推力仪
E	货船	标准漆	0.001 54	0.000 15	10	5	推力仪
F1	货船	黄丹	0.001 30	0.000 55	45	20	推力仪
F2	货船	热塑胶(新)	0.001 30	0.000 70	55	25	推力仪
G	货船	热塑胶(粗)	0.001 30	0.000 95	77	34	推力仪
H1	驱逐舰	松香(洁净)	0.001 44	0.000 45	30	8	推力仪
H2	驱逐舰	松香(航行 10 个月后)	0.001 44	0.000 95	53	14	推力仪
I	油船(单桨)	商品漆	0.001 50	0.000 15	10	5	力矩仪
J	油船(单桨)	商品漆	0.001 50	0.000 30	20	11	力矩仪
K	客船(双桨)	商品漆	0.001 43	0.000 40	28	12	力矩仪

该表为陶德于1951年给出的不同油漆、不同类型的14艘船舶自航试验所得到的摩擦阻力结果。可见，由粗糙度引起的摩擦阻力增加值最大可达到70%以上。

华南理工大学 South China University of Technology

荷兰水池于1973年发表了不同船长范围的粗糙度补贴值

ΔC_f 值随船长变化

船长 /m	$\Delta C_f \times 10^3$
50 ~ 150	0.35 ~ 0.4
150 ~ 210	0.2
210 ~ 260	0.1
260 ~ 300	0
300 ~ 350	- 0.1
350 ~ 450	- 0.25

由表中可见，随着船长的增加，粗糙度补贴系数逐渐减小，甚至为负值。

对于长度100米左右的船，通常取： $\Delta C_f = 0.0004$

华南理工大学 South China University of Technology

1975年14届ITTC建议，船长小于400m的常规船舶，若摩擦阻力系数按照ITTC－1957公式计算，则相应的粗糙度补贴系数可以按照经验公式计算：

$$\Delta C_f = \left[105\left(k_s / L\right)^{\frac{1}{3}} - 0.64\right] \times 10^{-3}$$

其中，Ks为粗糙度表观高度，对于质量较好的新建船舶可取$Ks = 150 \times 10^{-6}$ m

华南理工大学 South China University of Technology

事实上，引用ΔC_f值时除了考虑船体表面粗糙度修正以外，还包括了应用不同的摩擦阻力系数公式和尺度效应的差别，以及螺旋桨效率、伴流、推力减额和相对旋转效率等方面的影响。

粗糙度补贴系数 ΔC_f通常称为船模-实船换算补贴系数**Ca**

华南理工大学
South China University of Technology

四、污底

锈、水生物（贝壳、海草）——阻力增加（新船下水6个月△Ct增加~10%）——螺旋桨效率下降

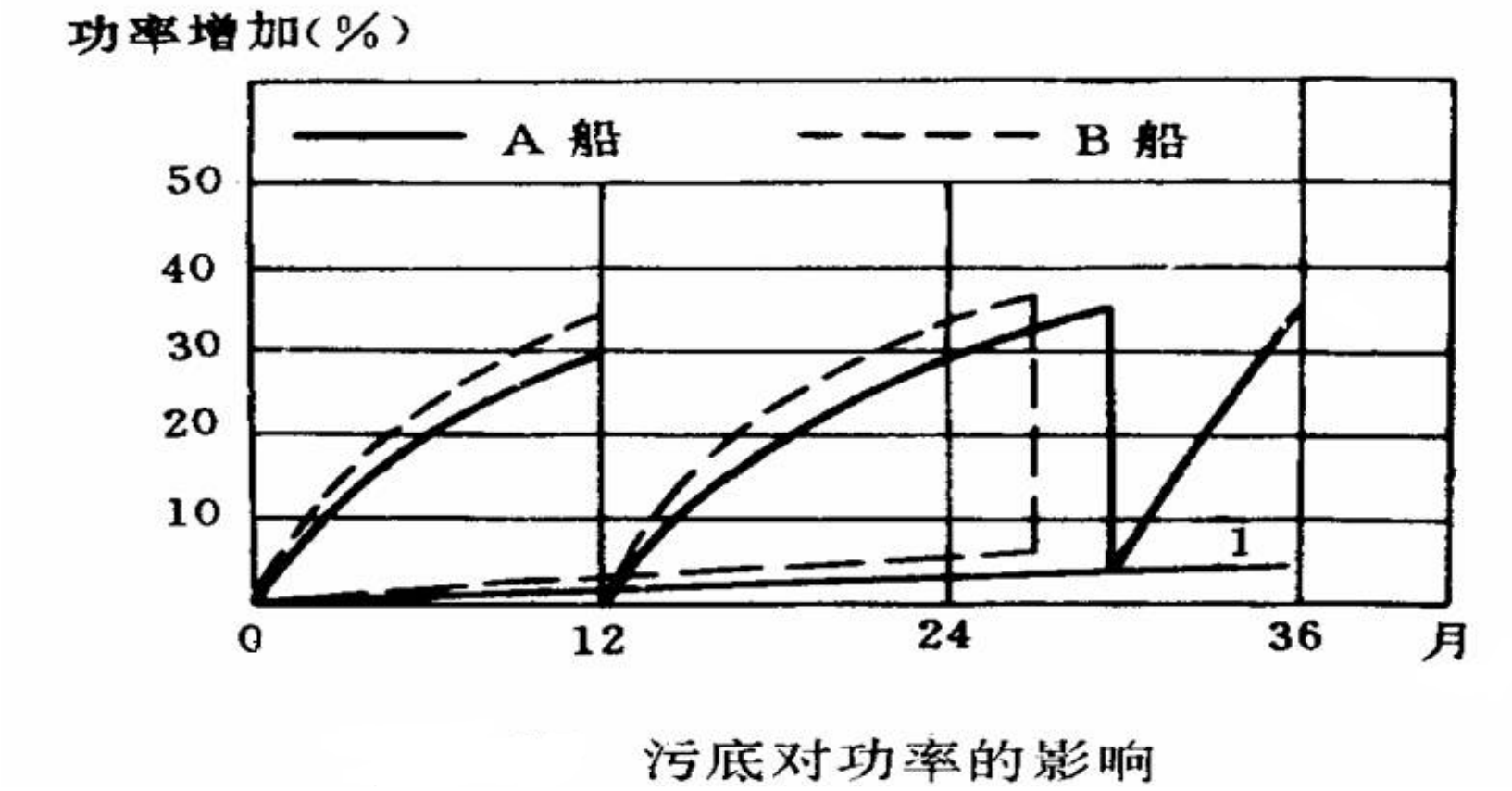






华南理工大学
South China University of Technology

1、真实污底：较大，与时间成非线性关系



污底对功率的影响

2、船体腐蚀：较小，与时间成线性关系

华南理工大学
South China University of Technology

由于污底所增加的阻力主要与船舶出坞的时间有关，所以可以用公式估算出因污底而增加的摩擦阻力百分数：

$$F = \frac{k_1 \cdot d}{k_2 + d} + \frac{d_0}{k_3}$$

其中：F为摩擦阻力增加百分数；

d为距最后一次出坞的时间（天）；

d_0为距新船首次出坞的时间（天）；

k_1、k_2、k_3为常数，根据在一定航线上航行的一定类型船舶的试航结果确定。

华南理工大学 South China University of Technology

3、防治污底方法：

涂敷防污底漆；
进坞除污；
进入淡水区域除污。













6 船体摩擦阻力的计算步骤

计算公式：$R_f = (C_f + \Delta C_f) \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 S$

具体步骤

1）计算湿面积S

较精确方法：

① 可按型线图量取不同站位横剖面曲线的半围长l，沿船长方向进行积分

$$S = \int_0^{L_{wl}} 2l \, \mathrm{d} L$$

② 若已用一些软件绘制出三维的船体表面型线图，也可利用软件直接得到船体湿表面积数值。

华南理工大学
South China University of Technology

近似方法

I、荷兰瓦根宁（Wagningen）

一般民船的湿表面积计算公式：

$$S = (3.4 \cdot \nabla^{1/3} + 0.5 \cdot L_{pp}) \cdot \nabla^{1/3}$$

其中Lpp为船的垂线间长（m），▽为船的排水体积（m）

II、Danckwardt公式：

$$S = \frac{\nabla}{13}\left(\frac{1.7}{C_b - 0.2(C_b - 0.65)} + \frac{13}{T}\right)$$

其中，C_b为方型系数。此式适用于货船及客船。

III、Schneekluth公式：

$$S = L_{pp}(1.8T + C_b B)\left(1 - 0.01\sqrt[3]{64(1 - C_m)}\right)(0.88 + 0.176C_b) - 0.75R$$

此式对于普通船型和泰勒船型较为准确

华南理工大学 South China University of Technology

IV、我国长江船型：

$$S = L_{wL}(1.8T + C_b B)$$

V、交通部船舶运输科学研究所提出的系列江船船型：

$$S = \frac{59 L_{wL}}{64 - B/T}(1.8T + C_b B)$$

VI、系列资料图谱曲线：

对于船体湿表面积，也可以利用一些资料给出的系列船型湿表面积系数曲线进行估算：

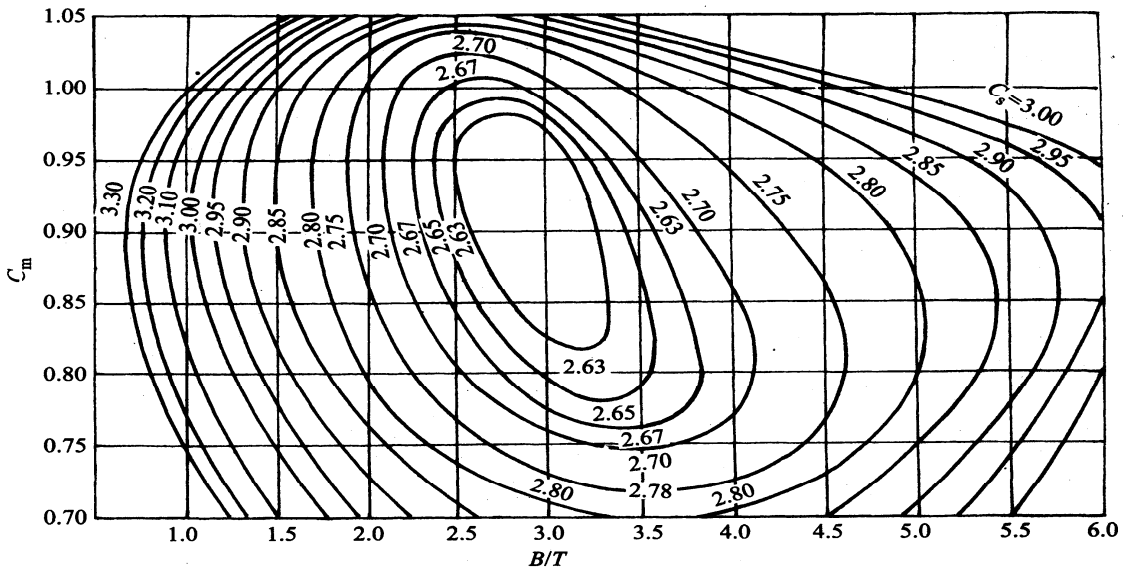
$$S = Cs\sqrt{\nabla L_{wl}}$$

其中，Cs为湿表面积系数，与船型有关，不同系列给出的函数形式不同。

华南理工大学
South China University of Technology

① 桑地系列图谱：

$$C_s = f(\frac{B}{T}, C_m)$$



估算湿表面系数的桑地图谱

② 泰勒系列图谱：

$$C_s = f(C_p, \frac{\nabla}{L^3}, \frac{B}{T})$$

③ 高速排水型快艇系列图谱：

如：格罗特建议园舭快艇的湿表面积系数：**Cs=2.75**

华南理工大学
South China University of Technology

2) 计算Re：

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L_{wl}}{\nu}$$

3) 计算摩擦阻力系数C_f：

应用相当平板公式：

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg \mathrm{Re} - 2)^2}$$

4) 决定粗糙度补贴系数：

$$\Delta C_f = 0.4 \times 10^{-3}$$

5) 计算船体摩擦阻力

$$R_f = (C_f + \Delta C_f) \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 S$$

华南理工大学
South China University of Technology

7 减小摩擦阻力的方法

$$R_f = (C_f + \Delta C_f) \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 S$$

传统方法：

1、减小湿表面积：

选择合适的船型参数（如：主尺度）,如低速船采用肥而短的船型可使得R_f减小，尽量减少不必要的附体（如呆木），采用表面积较小的附体等。

2、减小船体表面粗糙度：

建造时使得船体表面尽可能的光滑，同时注意防止污底。

注意:方法不多，且效果不明显！

华南理工大学 South China University of Technology

现代方法、新的思路：

将船体抬出水面，减小湿面积（水翼艇、气垫船）



艇体抬出水面，减小摩擦阻力的同时，具有良好的冲击性、飞溅性和淹湿性



艇体抬出水面，航行阻力大大减小，且两栖性好，适合浅水航行。

局限性：经济性，仅适用于小艇

华南理工大学
South China University of Technology

新方法、新思路：

1、降低流体密度、粘性系数：

气膜（泡）减阻，紧贴船体表面由一层空气薄膜或者水气混合物覆盖。



局 限 性：气泡极易逃逸；

关键技术：减少气泡逃逸量；气膜均匀覆盖。

华南理工大学
South China University of Technology

2、降阻剂减阻：

向与船体表面相邻的流体中不断喷注稀释的聚合物溶液（高分子化合物）

机理不明：抑制湍流加剧？

效 果：平板减阻60-70%，船模减阻30%

局限性：实船应用很难（成本、污染、技术薄弱）

3、边界层控制：

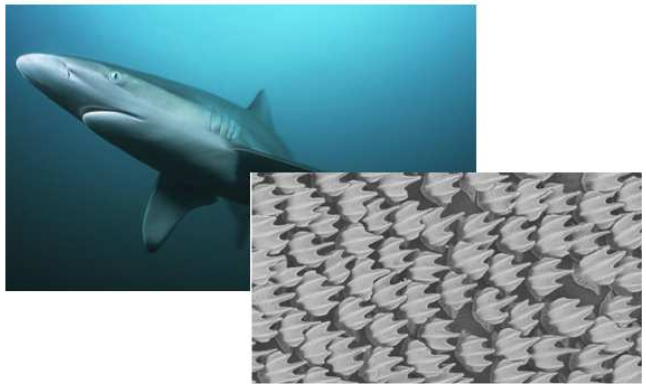
抽吸边界层内一部分流体以延长层流区；

自物体表面沿着流体流动方向向后吹喷流体，使得湍流边界变厚，进而减小边界层内的流体速度梯度.

华南理工大学 South China University of Technology

4、仿生学研究：

表面波纹（鲨鱼皮减阻）；



在船体表面敷贴橡皮等弹性覆盖层（海豚皮减阻）；



疏水表面减阻（荷叶）

等等。。。



机理：

效果：

应用：

South China University of Technology



华南理工大学
South China University of Technology

8 粘压阻力的成因及特性

一、船体粘压阻力产生的原因

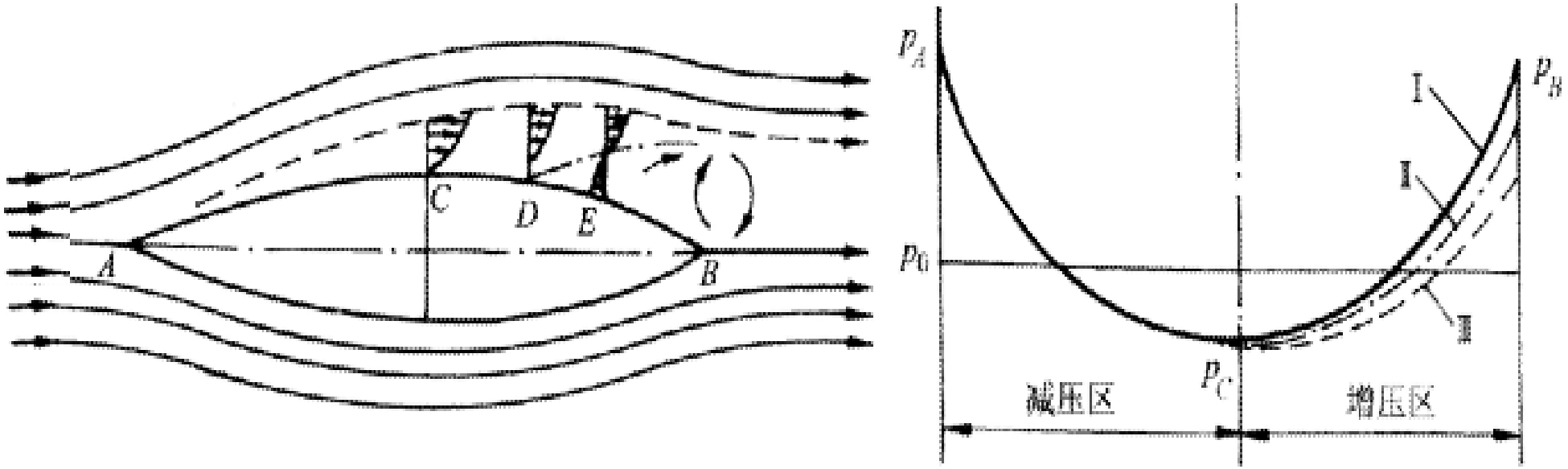


图 2-20 粘压阻力的成因

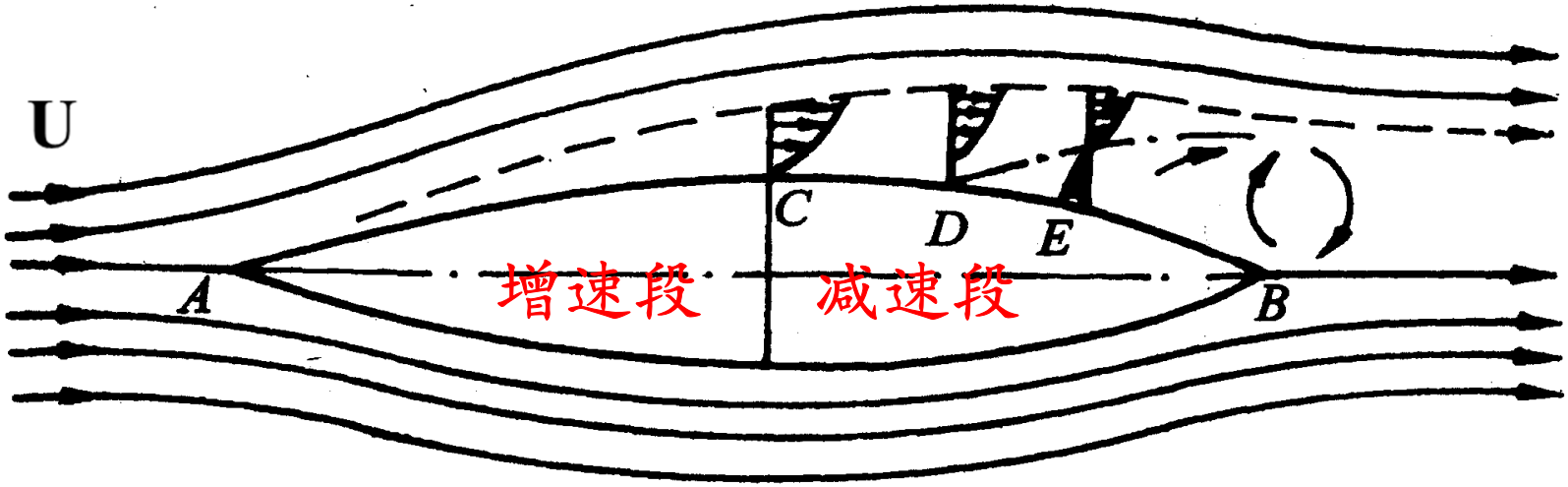
粘压阻力产生的原因是由于粘性作用和物体后部的纵向压力梯度。

华南理工大学
South China University of Technology

粘性阻力的形成与船体周围流体的流动状态密切相关。

理想流体中：根据相对性原理，认为船体不动，水从无穷远处以速度U流向船体。在理想流体假设下，忽略粘性，流体沿船体表面滑过而无阻滞，如下图中下半部所示。

伯努利方程、能量守恒、达朗贝尔疑题



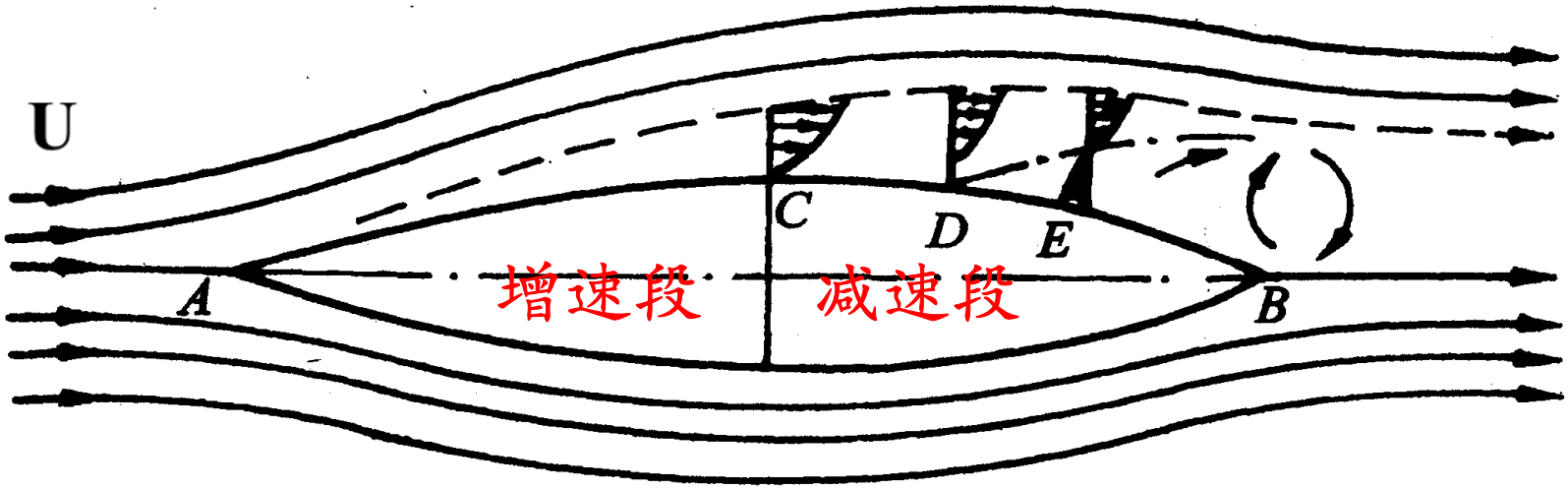
船体周围流动示意图

华南理工大学
South China University of Technology

粘性流体中：由于存在能量的消耗，船体前后流动不对称，导致了船体前后压力分布的不对称。

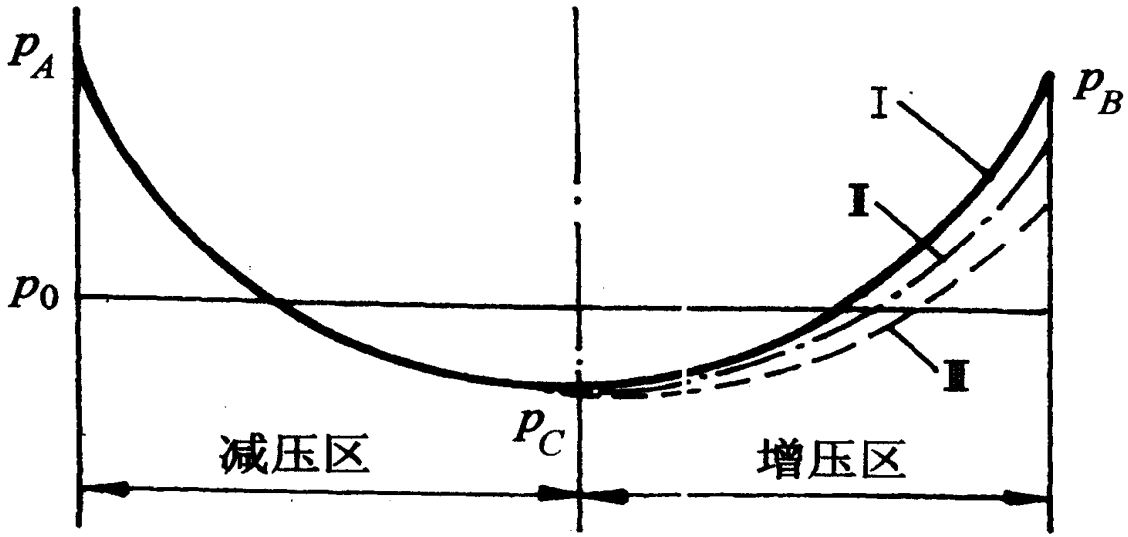
实际船体周围的流场包括三个区域：主流区、边界层区和旋涡区（由边界层离体产生的）。在边界层和旋涡区存在粘性作用，而主流区可以忽略粘性作用，简化为理想流体。

剪切应力、能量消耗、压力差、漩涡流



船体周围流动示意图

华南理工大学
South China University of Technology



船体表面压力分布示意图

曲线I为处于理想流体中时船体表面压力分布情况

曲线II为仅存在边界层（不发生离体）时的船体表面压力分布

曲线III界为边界层发生离体时船体表面压力分布情况

华南理工大学
South China University of Technology

二、粘压阻力的特性

1、粘压阻力与船后体形状的关系

船后体形状是影响粘压阻力的主要因素

要避免产生大量的旋涡，在船舶设计中必须注意下面两点：

(1) 船后体长度**Lr**（又称去流段长度）；

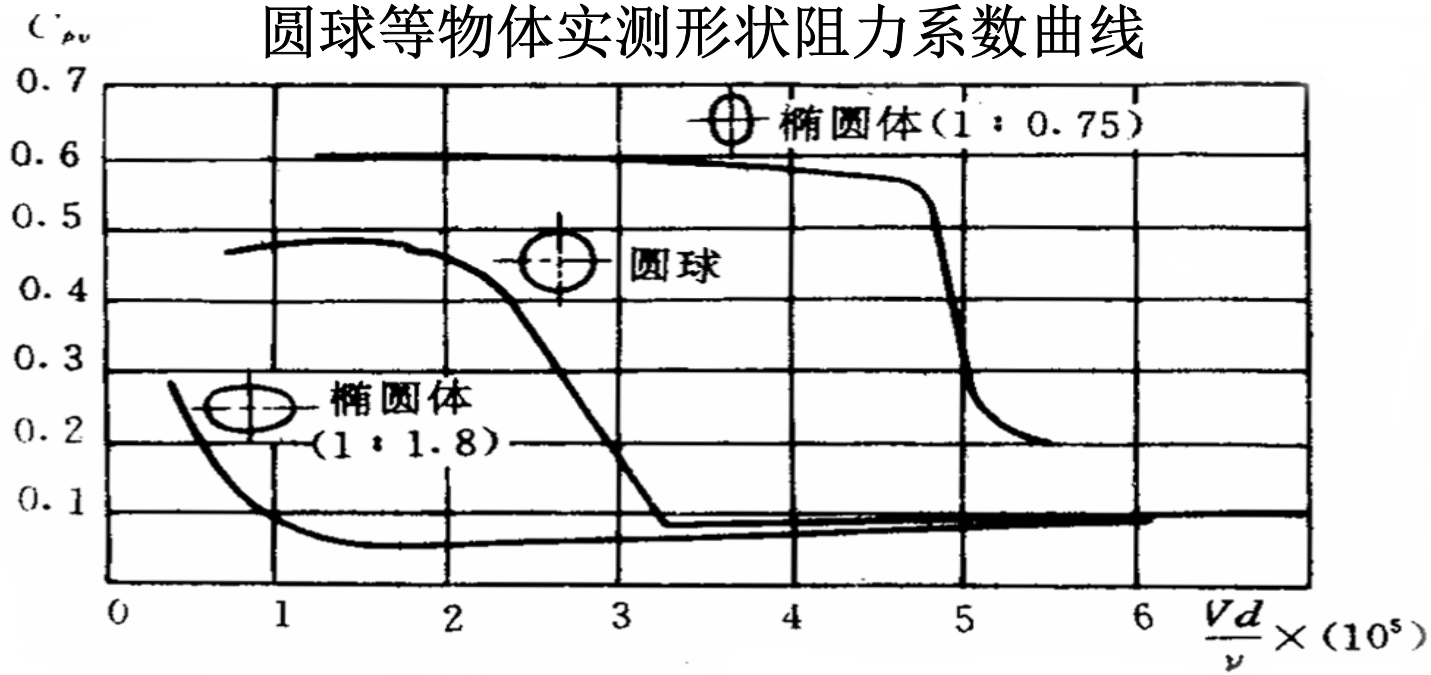
应满足$Lr \geqslant 4.08 \times Am^{0.5}$，其中Am为船中横剖面面积

(2) 船后体收缩要缓和。

为了延缓边界层离体，应尽量使船后体收缩缓和。反之，若船后体收缩急剧，会出现严重的边界层内流体离体现象，形成大量旋涡，导致粘压阻力增大。

华南理工大学
South China University of Technology

圆球等物体实测形状阻力系数曲线



船体粘压阻力产生

由于船体表面具有边界层或边界层离体。其中主要是边界层离体。

边界层离体的充要条件是流体的粘性和增压区具有逆压梯度。逆压梯度越大，边界层越易离体。而逆压梯度与物体表面形状有关，尤其与物体后部形状有关。

华南理工大学 South China University of Technology

经验公式

巴普米尔粘压阻力估算公式

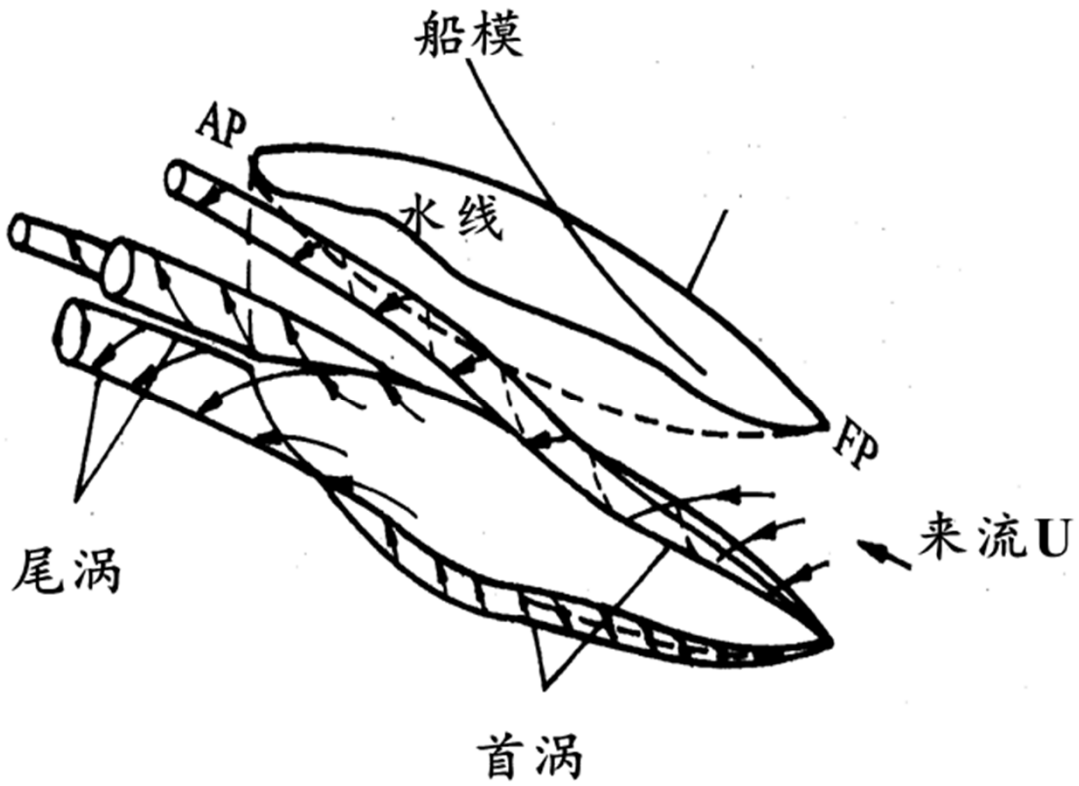
$$C_{PV} = \frac{R_{PV}}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} = 0.09 \frac{A_m}{S} \sqrt{\sqrt{A_m} / 2L_r}$$

其中，Am为船中横剖面面积，Lr为船体去流段长度。

华南理工大学
South China University of Technology

2、前体形状对粘压阻力的影响

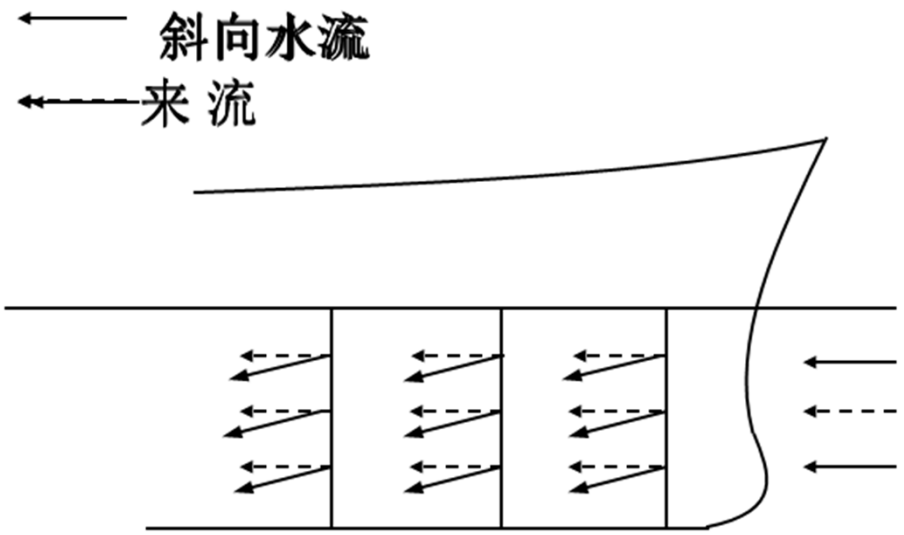
如果船前体形状过于肥短，流线扩张很大，流速增加快，在最大剖面处的速度很高，则压力会降得很低，使得后体范围内的压力梯度增加，流速急剧下降，容易形成流体离体，导致粘压阻力增大。



试验表明，对于丰满，特别是肥大船型，常在船首、尾舭部产生旋涡，如图所示。

华南理工大学
South China University of Technology

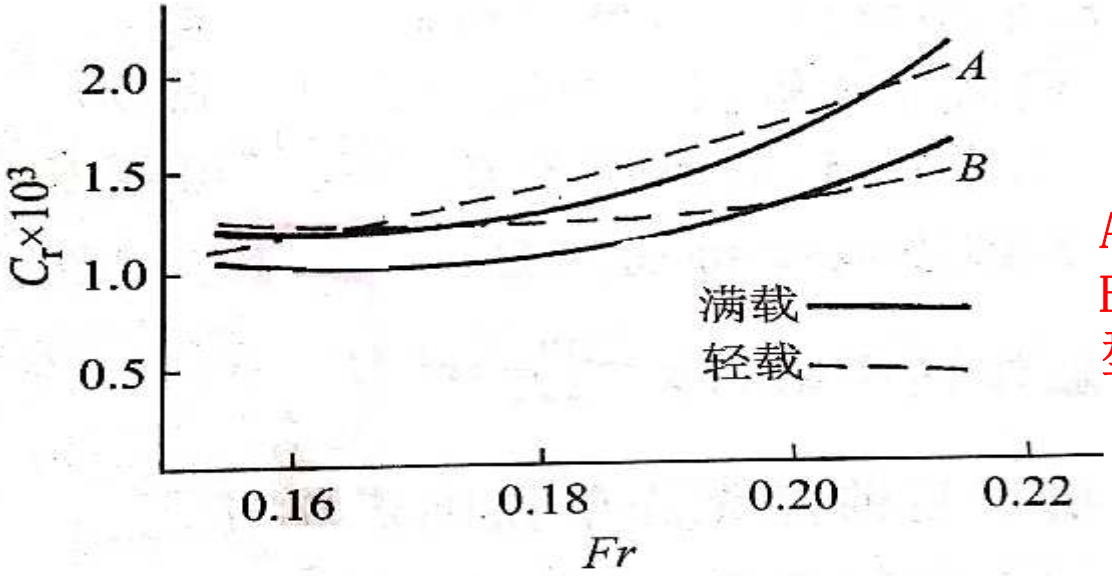
由流线试验可以清楚地看到，首部舷侧水流沿斜向流入船底，因此在船体舭部很容易产生边界层分离进而形成舭涡。舭涡产生使船首底部形成低压区，不但使粘压阻力增加，而且造成了船体航行过程中产生埋首现象，增加阻力。



船首部水流的流动示意图

措施：采用船首底升高的球鼻型船首，首部舭侧水流会明显趋于沿水平方向的流动，因此阻力性能得到明显改善，同时防止埋首现象。

华南理工大学
South China University of Technology



A--普通船首，
B--船首底部升高的球鼻型首。

7313船模组的Cr曲线

采用球鼻首后，无论在满载状态还是轻载状态，其剩余阻力系数均有明显减小，由于丰满船型的速度较低，兴波阻力占比较小，粘压阻力在剩余阻力中占较大比重。因而可以认为上述剩余阻力降低的主要原因是由于减小或消除了船首底部的旋涡运动所致。

采用球鼻型首的船模，其航行过程中埋首和平行下沉均较普通船首的船模有明显减小。

华南理工大学
South China University of Technology

3、界层内流动状态对粘压阻力的影响

层流比紊流更容易分离，分离点比较靠近前端，分离区较大，因而粘性阻力比紊流情况为大

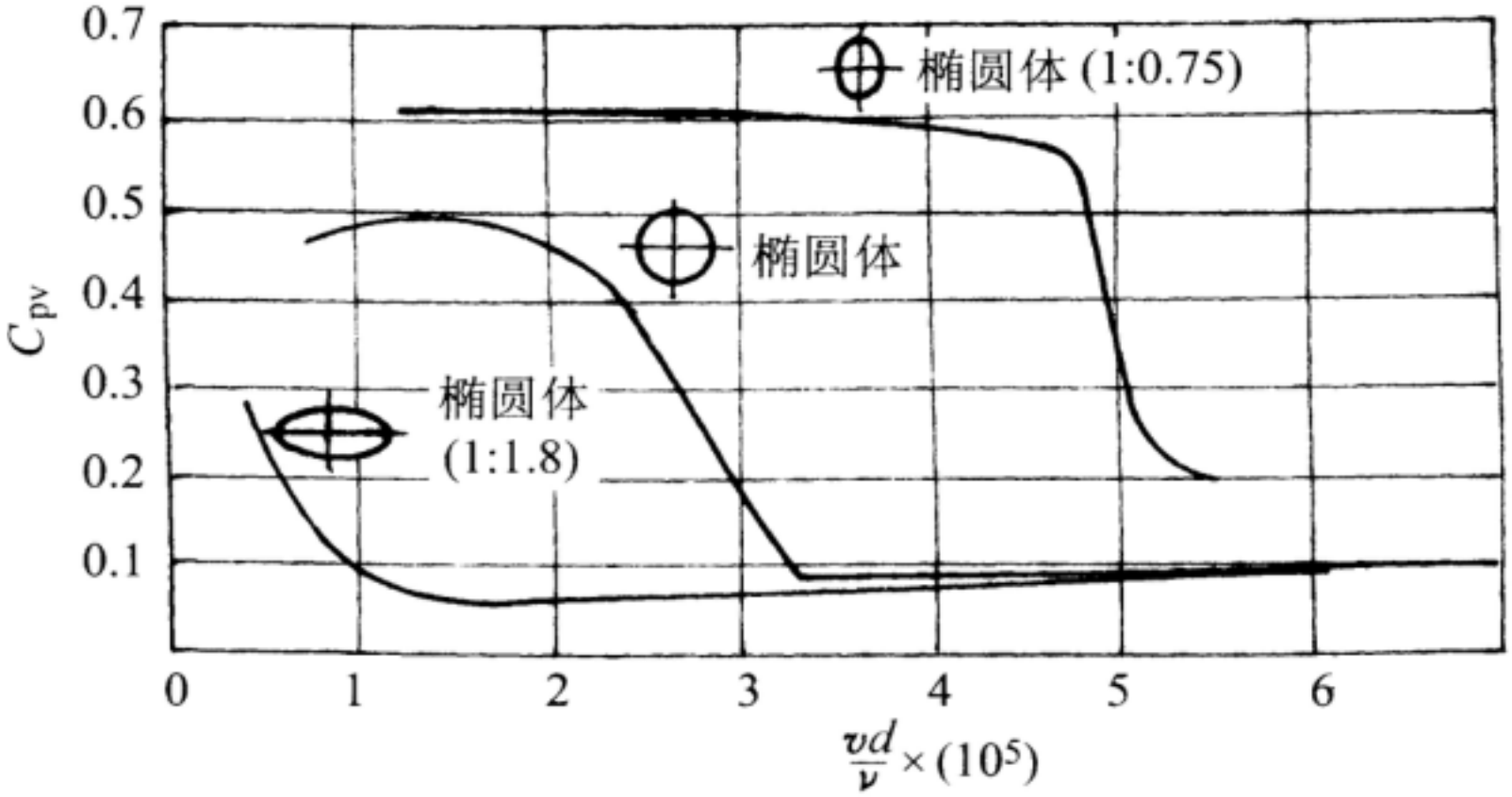


图 2-21　圆球等物体实测形状阻力系数曲线

理工大學
South China University of Technology

三、降低粘压阻力的船型要求

1、注意船的后体形状：船后体长度Lr（又称去流段长度）应满足 $Lr \geq 4.08 \times Am^{0.5}$，其中Am为船中横剖面面积；对于低速肥大型船，可以允许 $Lr \geq 2.5 \times Am^{0.5}$。同时船后体收缩要缓和，避免尾部产生大量旋涡。

2、避免船体曲率变化过大：在横剖面面积曲线上前肩切勿过于隆起，后肩切勿过于内凹，以免在两肩部产生旋涡。

华南理工大学 South China University of Technology

3、充分注意船前体形状：特别是对低速肥大型船，其舭涡阻力是粘压阻力的重要组成部分，采用球鼻型船首有可能减小这部分阻力。

统计资料显示：粘压阻力系数随船舶方形系数C_b增大而增大，特别是对于$C_b \geq 0.80$的肥大船型，流体分离现象几乎不可避免，而分离区的大小与船后体棱形系数关系密切，所以对船尾部线型要特别注意。

华南理工大学
South China University of Technology

四、船体粘压阻力的处理方法

1、Froude 法（2因次法）

将粘压阻力并入兴波阻力，统称为剩余阻力

$$C_t = C_{fp}(R_e) + C_r(F_n)$$

2、3因次法

将粘压阻力以形状因子的形式并入摩擦阻力，
统称为　粘性阻力

$$C_t = (1+k)C_{fp} + C_w$$

（1+k）——形状因子。k——形状系数。

希望k与Re，Fn无关，只是形状的函数。

华南理工大学
South China University of Technology

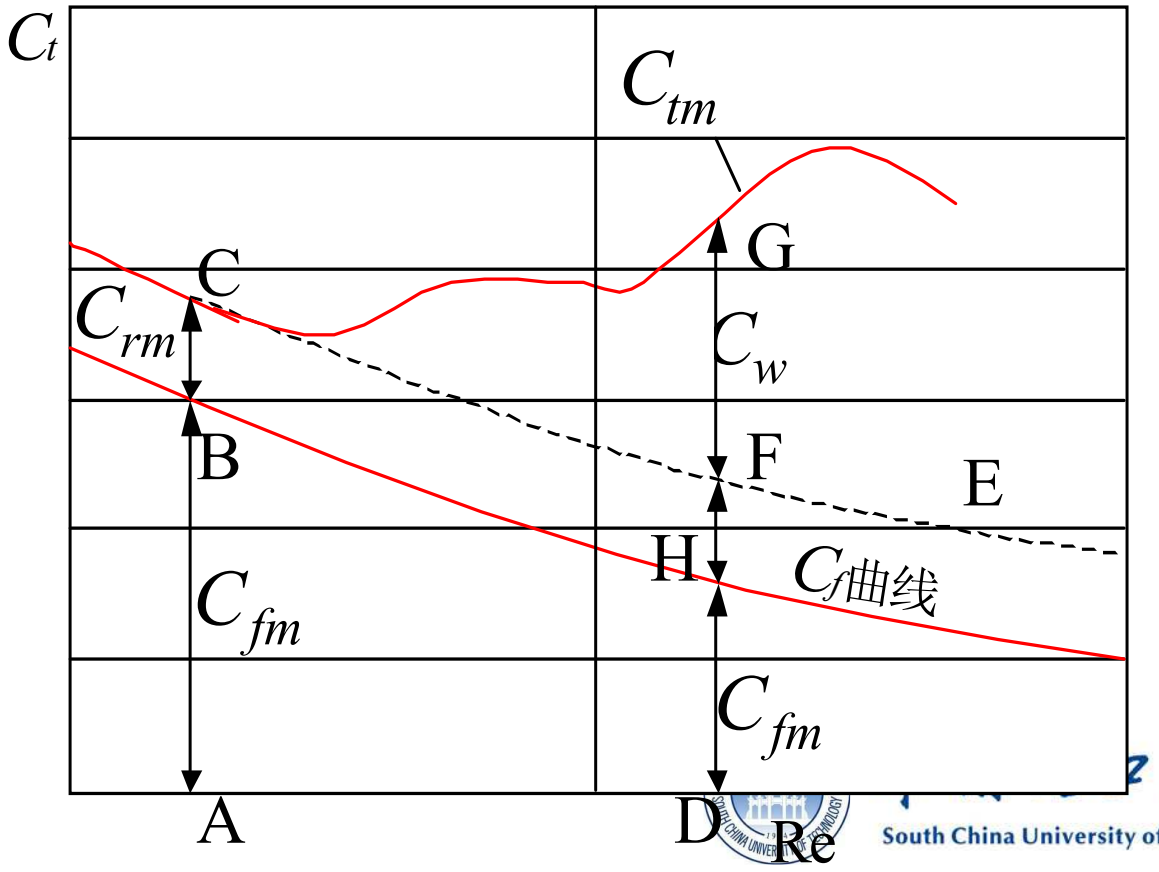
一、傅汝德对粘压阻力的处理

基本思想：在低速时粘压阻力系数为常数的结论可以推广应用于实船。

$$C_{pvm} = C_{rm} - C_{wm} = (C_{tm} - C_{fm}) - C_{wm}$$

低速时有 $C_{wm} \to 0$

$$C_{pvm} = C_{tm} - C_{fm} = \text{常数}$$



South China University of Technology

根据同型船的粘压阻力系数为常数的假定，同样意味着实船和船模的粘压阻力系数是相等的，即认为：$C_{pvm}=C_{pvs}$。

速度相应时，$C_{wm}=C_{ws}$

剩余阻力系数

$$C_{rs}=C_{pvs}+C_{ws}=C_{pvm}+C_{wm}=C_{rm}$$

粘压阻力系数可以和兴波阻力系数合并，并符合比较定律。

华南理工大学 South China University of Technology

实船总阻力系数换算式：

$$C_{ts} = C_{fs} + C_{rs} = C_{fs} + C_{rm}$$

$$C_{ts} = C_{fs} + (C_{tm} - C_{fm}) = C_{tm} - (C_{fm} - C_{fs})$$

同型船的C_{pv}=常数的处理中，粘压阻力系数由几部分组成：

（1）粘压阻力；

（2）低速时极小的兴波阻力；

（3）船体表面弯曲引起的摩擦阻力增加值（与相当平板计算结果比较）。

将粘压阻力与兴波阻力合并处理认为适用比较定律，所得结果的准确性尚能满足工程实际的要求。

（1） 若船型优良，粘压阻力所占百分比很小，将其并入兴波阻力进行换算不致引起太大误差。

（2） 若船型较差，边界层分离，粘压阻力在总阻力中所占的比重较大，粘压阻力系数近似为常数，因此将其作为剩余阻力的一部分进行换算也不致有明显的误差。

存在问题：

对大型船舶，将实船试航结果与相应的船模数据进行分析比较，则需对粗糙度补贴系数取负值才能使两者一致，这在理论上无论如何也是说不通的。

华南理工大学
South China University of Technology

按照傅汝德假定，造成△C_f为负值的因素有两种：

（1） 计算摩擦阻力系数公式准确性不够。

（2） 粘压阻力与兴波阻力系数合并后使适用比较定律的成分偏大。

South China University of Technology

当时试图解决这一问题有两种方法：

（1）在保持傅汝德换算法的前提下，修改摩擦阻力计算公式，即认为造成不正确的主要原因是摩擦阻力公式有问题。

（2）傅汝德假定将两种不同性质的力,即将粘压阻力与兴波阻力合并进行换算，理论上是不妥，只有建立新的换算方法。

华南理工大学
South China University of Technology

二、三因次换算方法

1、 三因次换算法的内容

粘性阻力（粘压阻力+摩擦阻力）与**Re**数有关，

兴波阻力系数与**Fr**数有关。

South China University of Technology

$$R_t = (R_f + R_{pv}) + R_w = R_v + R_w$$

$$R_v = R_f + R_{pv} = f_1(\mathrm{Re})$$

$$R_w = f_2(Fr)$$

根据船模试验结果，认为粘压阻力与摩擦阻力系数之比为一常数***k***

$$k = \frac{C_{pv}}{C_f} \qquad 1 + k = \frac{C_v}{C_f}$$

$$C_v = C_f + C_{pv} = (1 + k)C_f$$

华南理工大学
South China University of Technology

对于几何相似的船模和实船来说，形状因子相等，这样船体总阻力为：

$$R_t = R_f + R_{pv} + R_w = (1+k)R_f + R_w$$

船模总阻力系数可以写成：

$$C_{tm} = (1+k)C_{fm} + C_{wm}$$

在相应速度时，由于兴波阻力符合比较定律，故实船在相应速度时的总阻力系数的换算式为：

$$C_{ts} = (1+k)C_{fs} + C_{wn} + \Delta C_f$$

$$C_f = \frac{0.066}{(\lg \mathrm{Re} - 2.03)^2}$$

华南理工大学 South China University of Technology

三因次换算法与傅汝德法的主要区别：

（1）傅汝德法中，应用平板公式计算船的摩擦阻力——二因次换算法。

三因次换算法中引进形状因子以照顾船的三因次流动——三因次换算法，又称(1+*k*)法。

（2） 在三因次换算法中，将粘压阻力与摩擦阻力合并处理，且认为是Re数的函数。

（3） 在三因次换算法中适用于比较定律的成分较傅汝德法大为减小。

2、形状因子(1+k)

（1） 低速船模试验法---休斯法

$$R_{tm} = (1+k)R_{fm} + R_{wm}$$

当极低速时，即$F_r \to 0$, 则 $R_{wm} \to 0$

$$R_{tm} = (1+k)R_{fm}$$

船舶在相应速度时的总阻力系数

$$C_{ts} = C_{tm} - (1+k)(C_{fm} - C_{fs}) + \Delta C_f$$

华南理工大学
South China University of Technology

这种应用低速船模试验确定**(1+*k*)**的方法在实际上却是行不通的，因为：

①在低速试验时，船模总阻力是一个小量，所以所得结果误差较大；

②在低速试验时，船模的**Re**数较低，存在严重的层流影响。故由此决定的**(1+*k*)**值，其正确性值得怀疑。

South China University of Technology

（2） 普鲁哈斯卡法（Prohaska）

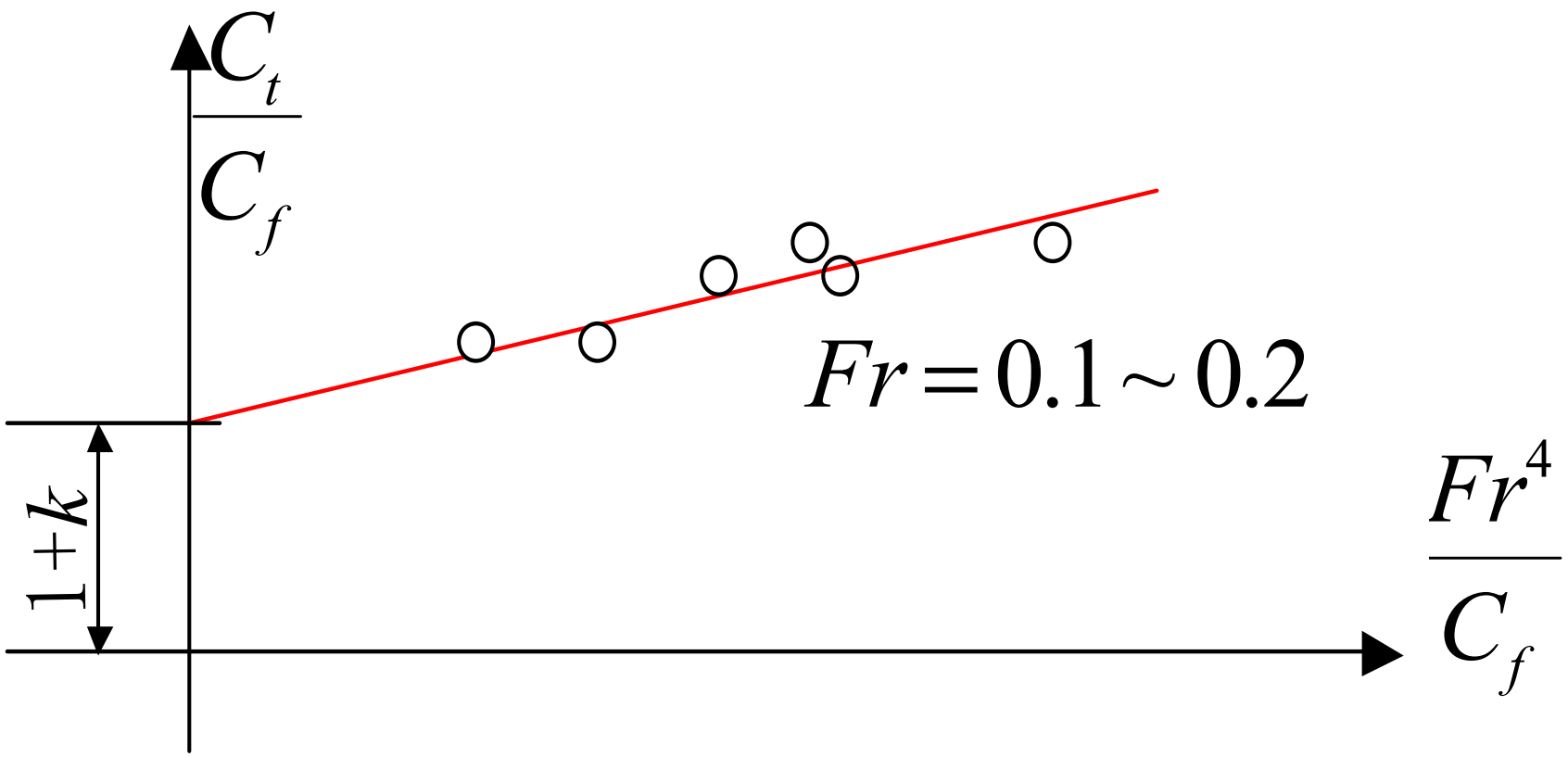
1966年，普鲁哈斯卡认为：在F_r=0.1~0.2范围内可以假定兴波阻力系数C_w与Fr数的4次方成比例，即

$$C_w = yFr^4$$

$$C_t = (1+k)C_f + C_w = (1+k)C_f + yFr^4$$

$$\frac{C_t}{C_f} = (1+k) + y\frac{Fr^4}{C_f}$$

华南理工大学
South China University of Technology



普鲁哈斯卡法（**Prohaska**）确定形状因子

华南理工大学
South China University of Technology

（3）15届ITTC推荐方法

许多试验表明：在F_r=0.1~0.2范围内兴波阻力系数与F_r数的关系表示为：

$$C_w = yFr^n$$

1978年第15届国际船模试验池会议提出一个更为普遍的表达式

$$C_t = (1+k)C_f + yFr^n$$

式中(1+k)，y，n三个未知数根据船模试验结果用最小二乘法来决定。

华南理工大学
South China University of Technology

会议建议摩擦阻力系数按**1957ITTC**公式计算，粗糙度补贴$\triangle C_f$

$$\Delta C_f = [105(\frac{k_s}{L})^{\frac{1}{3}} - 0.64] \times 10^{-3}$$

华南理工大学
South China University of Technology

End

華南理工大學
South China University of Technology