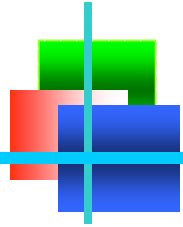


上海交通大学2006-2007学年第2学期

船舶原理（阻力）



张怀新 教授

2007年4月20日

第二章 粘性阻力



由于船体形状比较复杂，目前利用理论方法已经得到了很大的发展。已经能用边界层理论或直接求解雷诺方程的方法，对粘性阻力进行估算。但计算比较复杂，在实际设计和工程中还往往将摩擦阻力与粘压阻力分开处理，摩擦阻力使用Froude假定的相当平板假定。



按Froude假定

① $R_t = R_f(R_e) + R_r(F_r) \quad C_t = C_f(R_e) + C_r(F_r)$

② $R_f C_f$ 按相当平板计算

就 $R_f C_f$ 而言有几个问题

① 平板 C_f 如何计算 R_f

② 实质上船或模型的 C_f 与相当平板的差异何在？

相当平板：同速度、同长度、同湿表面积



2-1 边界层和摩擦阻力

一、平板边界层

边界层概念是Prandtl普朗特（1904年）引入的，是流体力学经典，走向近代的一个里程碑，在这之前都是理想流体。理想流体是水、空气这类小粘性流体的天然合理的简化。

淡水 15° C	$\mu = 1.13788 \times 10^{-3} \text{ pa.s}$	$\rho = 994.00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	$\gamma = 1.13902 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	
空气 15° C	$\mu = 1.795 \times 10^{-5} \text{ pa.s}$	$\rho = 1.226 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	$\gamma = 1.46 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	



大部分问题可以通过理想流体解释，但有些不行。

典型的事例有D' Alembert谬论 (paradox)

Prandtl注意到这一点，认识到近固壁处总是粘合的。于是引进了边界层的概念，解释了D' Alembert的谬论，这是定性的贡献。

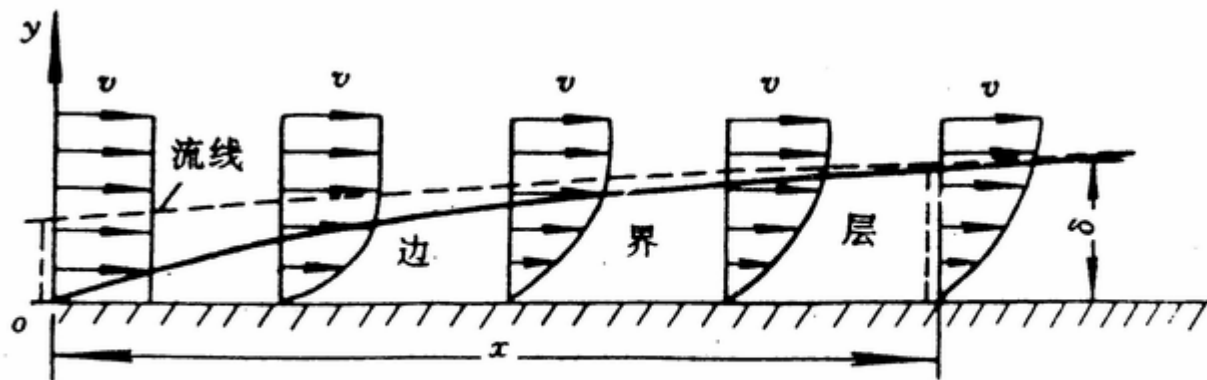


图 3-1 平板边界层

平板表面上流速为零，随着距平板表面的距离 y 增加，流速也增大，当 y 增至时，起处流速达到来流的速度。以内为边界层，粘性对流体的影响只有在这里面，边界层外端可以为理想势流。边界层理论的重要意义在于，它将流体划分为截然不同的两个部分，并加以分别处理。



对于粘性较小的流体（ R_e 数大），如水、空气，当流过平板表面时，粘性对流动的影响只存在于平板表面很薄的一层流体内，这说明边界层厚度 δ 是极小的。

但如何计算？

数学上对N-S方程予以简化，走向定量的基础是： $R_e = \frac{v_0 L}{\gamma}$ 是个大量，边界层 $\frac{\delta}{x}$ 是个小量。

∴ 边界层理论只适用于高雷诺数。



量阶分析 $\chi = o(1)$ $u = O(1)$ $y = o(\delta)$

结果以二维为例

(1) $\gamma \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ 项保留, $\gamma \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ (顺流) 忽略

(2) 沿边界层法向 $\frac{\partial p}{\partial y} \approx O\left(\frac{1}{\sqrt{R_{ex}}}\right)$, (层流)



层内的流动状态取决于局部雷诺数 $R_{ex} = \frac{v_0 x}{\gamma}$

层流
过渡区
湍流

$$R_{ex} < (3.5 \sim 5.0) \times 10^5$$

$$(3.5 \sim 5.0) \times 10^5 < R_{ex} < 3.0 \times 10^6$$

$$R_{ex} > 3 \times 10^6$$

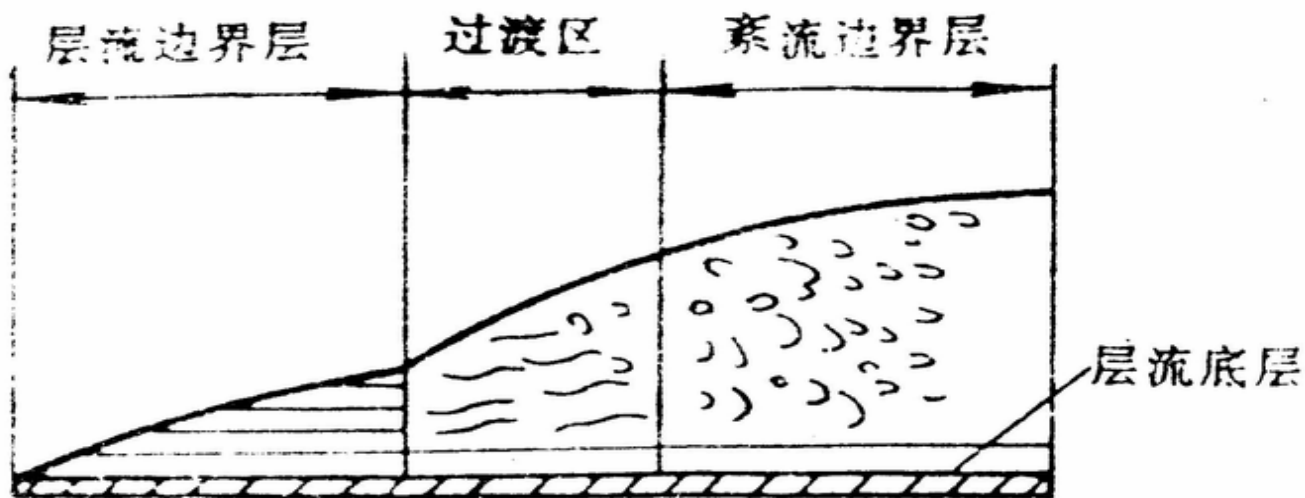


图 3-2 边界层内不同的流动状态



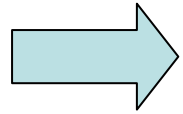
这样，N-S方程退化成边界层方程（以定常为例）

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \gamma \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} &\equiv 0 \end{aligned} \right. \quad (p = p_e)$$



二维定常层流边界层方程



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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} \equiv 0 \quad (p = p_e)$$

边界层外端压力

2-2 平板摩擦阻力系数计算公式



Blasius (勃拉修斯) 平板解是著名的1908年层流平板精确解。可求出边界层内的速度分布。通过速度分布可求出摩擦阻力。



由牛顿摩擦定律可知，平板表面受到的摩擦切应力 τ 为

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

式中 μ : 流体的动粘性系数
 $\frac{\partial u}{\partial y}$: 边界层内的速度梯度

尽管水、空气的动粘性系数较小，但由于在边界层内的速度梯度 $\frac{\partial u}{\partial y}$ 很大，所以平板表面上受到的摩擦切应力不能忽略不计。



平板上受到的摩擦阻力 $R_f = \int_s \tau ds$

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

局部摩擦阻力系数: $C_\tau = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho v^2}$

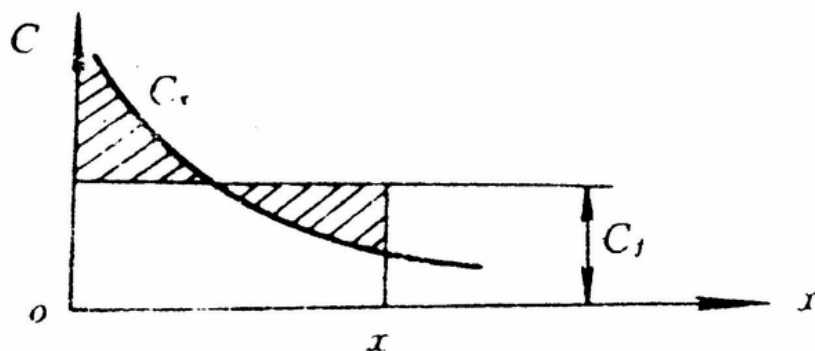


图 3-4 C_τ 与 C_f 的关系示意图



层流Blasius解

$$C_\tau = 0.664 R_{ex}^{-\frac{1}{2}}$$

$$C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} = 1.328 R_e^{-\frac{1}{2}}$$

$$R_e = \frac{vL}{\gamma} \quad \text{L:板长}$$

$$R_{ex} \rightarrow 0 \quad C_f \rightarrow \infty \quad \text{但} \quad \frac{1}{L} \int_0^L C_\tau dx$$

积分存在

$$\therefore C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho v^2 S} = 1.328 R_e^{-\frac{1}{2}}$$



虽然层流平板摩擦阻力有精确的计算式，但不适用于造船工程。因为一般船舶的雷诺数在 $4 \times 10^6 < R_e < 3 \times 10^9$ ，其对应的流动状态应为湍流边界层。

对于湍流

即使对于平板，理论上还没有精确解，而一般的近似算法的基础是Karman边界层动量积分方程。

湍流边界层的速度分布比较复杂，湍流边界层可分为内层与外层。内层与外层一分界线约在 $y/\delta = 0.4$ 处



内层着重壁面切应力的影响

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} = f\left(\frac{u_\tau y}{\gamma}\right) = f(y^+)$$

粘性底层

$$0 < y^+ < 5 \quad u^+ = y^+ \quad y/\delta < 0.001$$

缓冲层（过渡层）

$$4 < y^+ < 30 \quad u^+ = 11 \tan^{-1}\left(\frac{y^+}{11}\right) \quad y/\delta < 0.01$$

湍流区

$$30 < y^+ \leq 750 \quad u^+ = 2.44 \ln y^+ + 4.9 \quad 0.01 < y/\delta$$

外层受主流影响

$$v^+ - u^+ = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad \text{亏损律}$$

重叠内区（湍流区）

$$v^+ - u^+ = -2.5 \ln \frac{y}{\delta} + 2.35$$

Coles (1956)

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + B + \frac{\pi}{k} w\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad \text{对数律}$$

这里

$$w = 2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{y}{\delta}\right) \quad \pi = 0.48 \text{ (平板)} \quad 0.01 < \frac{y}{\delta} < 1$$

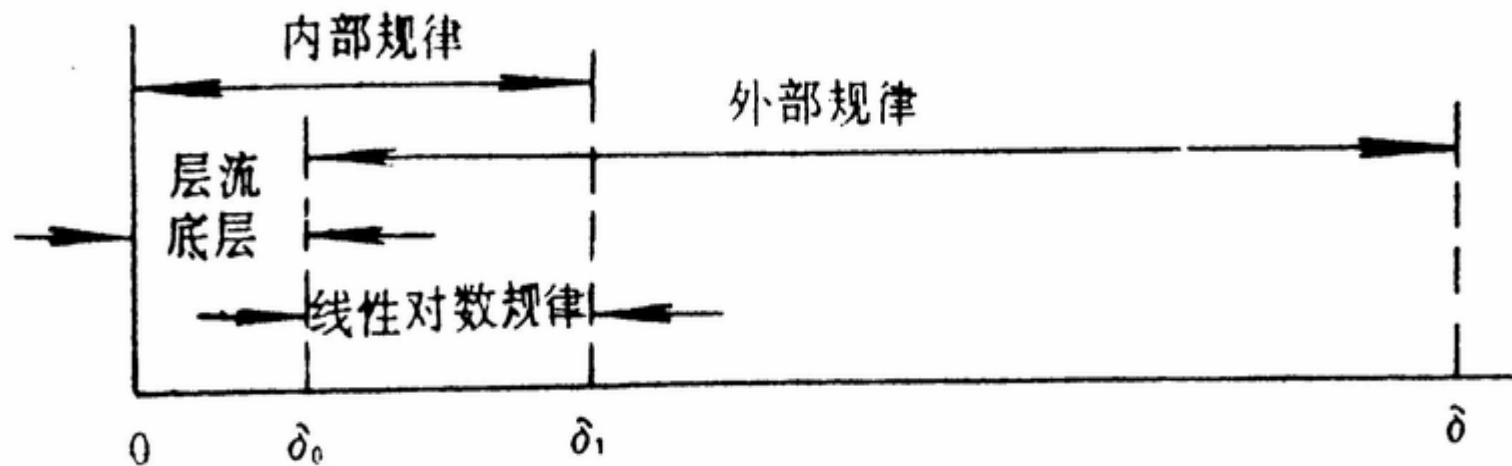


图 3-9 边界层不同区域内的速度分布规律



以上分布式半经验、半理论的，还有用其他公式逼近的，最简单的是幂次律：

$$\frac{u}{v} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^n \quad n = \frac{1}{7} \sim \frac{1}{11}$$

采用不同的速度分布近似地整个边界层，如对数律、幂次律、多层分布，其中系数一般应用实验结果校正所得，可得到不同的平板摩擦阻力公式。



对于湍流平板摩擦阻力，可运用Karman动量方程（1921），在边界层内沿法向方向积分而得，是综合效应，也发展成一种数学方法（积分法）。

对平板：
$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\tau}{\rho v^2}$$

这里，动量损失厚度

$$\theta = \int_0^\delta \frac{u}{v} \left(1 - \frac{u}{v}\right) dy \quad \tau = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0}$$
$$C_f = \frac{R_f}{\frac{1}{2} \rho v^2 L \times 1} = \frac{\int_0^L \tau dx}{\frac{1}{2} \rho v^2 L} = \frac{\int_0^L \rho v^2 \frac{d\theta}{dx} dx}{\frac{1}{2} \rho v^2 L} = \frac{2\theta_L}{L}$$



湍流平板摩擦阻力公式

1. 由幂次律（指数律）得到的平板公式

速度分布 $\frac{u}{v} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^n \quad n = \frac{1}{7} \sim \frac{1}{11}$

对于不同雷诺数，n值是不同的，

当 $R_e < 2 \times 10^7$, $n = \frac{1}{7}$

由Karman动量积分方程可得 $C_f = \frac{0.072}{R_e^{\frac{1}{5}}}$

经实验验证 $C_f = \frac{0.074}{R_e^{\frac{1}{5}}}$



2. 由对数分布得到的 湍流平板摩擦阻力公式

(1) Schoenherr (桑海) 公式
运用对数速度分布规律，由平板实验得

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

这公式在美国应用最为普遍。由于上式实际计算较为困难，在 $10^6 < R_e < 10^9$ 常用以下近似式：

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



(2) Prandtl-Schlichting (柏兰特-许立汀) 公式

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

(3) Hughes (休斯) 公式

Hughes发现，摩擦阻力系数不仅是 Re 的函数，还和平板 B/L 有关。通过实验得出二因次湍流光滑平板摩擦阻力系数为

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



3. 平板摩擦阻力的普遍公式

如在边界层内不同区域采用不同速度分布，一般可得

$$\frac{A}{\sqrt{2}} \ln Re = \frac{1}{\sqrt{C_f}} - \frac{A}{\sqrt{2}} \ln C_f - \frac{A}{\sqrt{2}} \left(\frac{A}{2} - \frac{\gamma}{\beta} \right) \sqrt{C_f} + \dots + \text{常数}$$

β 、 γ 为边界层常数， A 为常数
简化后可得

$$\sqrt{C_f} = \text{常数} + \text{常数} / \sqrt{C_f}$$

或

$$\frac{1}{\sqrt{C_f}} = A_1 \lg(C_f R_e) + B_1$$

4. ITTC公式（船模与实船的阻力换算）



1957年ITTC提出了新的公式

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg R_e - 2.0)^2}$$

我国现在主要用ITTC公式。这公式在模型与实船的雷诺数范围成为专用于船模与实船的阻力换算。



层流段、过渡区的影响

实际上平板总有一个层流段和过渡段，然后是湍流，这是一个十分复杂而有趣的问题。现在有许多学者在专研此问题。这与湍流的发生机制，湍流的物理性质有关。

过渡区 $(3.5 \sim 5.0) \times 10^5 < R_{ex} < 3.0 \times 10^6$

经常作为讨论，典型地取 转换雷诺数为

$$R_{etr} = 5.5 \times 10^5$$



举例 $L_s = 100m$ $F_n = 0.25$ $v_s = 7.83 m/s$ $\gamma = 1.14 \times 10^{-6} m^2/s$

相当于 $x_{ts} = \frac{5.5 \times 10^5 \times 1.14 \times 10^{-6}}{7.83} = 0.0728m$

层流段占平板总长的 $0.073\% L_s$ ， 可以认为全部是湍流

但如取模型与实船比为 $\alpha = 1/25$ ， $L_m = 4m$ ， $v_m = 1.566 m/s$

$x_{tm} = \frac{5.5 \times 10^5 \times 1.14 \times 10^{-6}}{1.566} = 0.384m$ 差不多占 $9.6\% L_m$

模型的层流影响较大



模型的 $R_e = \frac{1.566 * 4}{1.14 \times 10^{-6}} = 5.49 \times 10^6$

如平板为全部湍流

P-S公式 $C_f = 3.311 \times 10^{-3}$

ITTC公式 $C_f = 3.388 \times 10^{-3}$

转捩点雷诺数 $R_{etr} = \frac{1.566 * 0.384}{1.14 \times 10^{-6}} = 0.5275 \times 10^6$

湍流 $C_{ft} = 5.407 \times 10^{-3}$
 $C_{ft} = 5.048 \times 10^{-3}$

ITTC公式
P-S公式

层流 $C_{fl} = 4.773 \times 10^{-3}$

Blasius公式

$$L_m C_{fa} = C_f L_m - C_{ft} x_{tm} + C_{fl} x_{tm}$$

$$C_{fa} = C_f - \frac{x_{tm}}{L_m} (C_{ft} - C_{fl}) = C_f - \frac{R_{xt}}{R_e} (C_{ft} - C_{fl}) = C_f - \frac{A}{R_e}$$



这里 $A = R_{xt} (C_{ft} - C_{fl})$

Prandtl取 $A=1700$ ，给出了半经验公式

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

ITTC公式

$$\Delta C_{ft} = \frac{x_{tm}}{L_m} (C_{ft} - C_{fl}) = 0.096 \left(\frac{5.407 - 4.773}{5.048 - 4.773} \right) \times 10^{-3} = \begin{pmatrix} 0.0609 \\ 0.0264 \end{pmatrix} \times 10^{-3}$$

占 $\begin{pmatrix} 1.8\% \\ 0.79\% \end{pmatrix}$

P-S公式

如果是低速层流段的影响更大，另外一个问题， x_t 受背景湍流影响范围大，不是固定数值，造成不确定因素。

为了避免层流的影响，模型船常在首柱后 $1/20$ 船长的地方装有激流装置（小钉子），使其变成湍流，然后按全湍流计算 C_{fm} 。

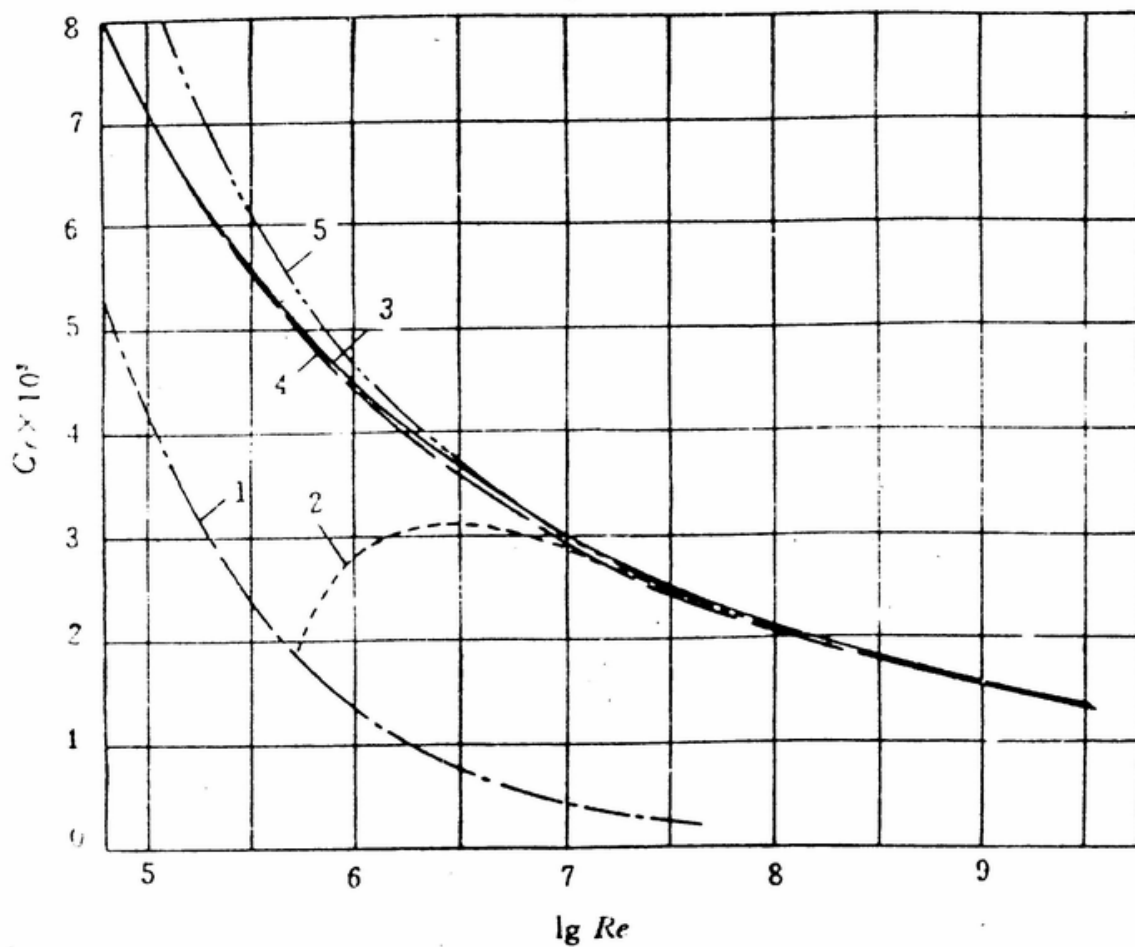


图 3-10 光滑平板摩擦阻力系数公式的比较

1— $C_f = 1.328 Re^{-1/2}$; 2— $C_f = 0.455 (\lg Re)^{-2.58} - 1700 Re$; 3— $C_f = 0.455 (\lg Re)^{-2.58}$;

4— $0.242 / \sqrt{C_f} = \lg(Re \cdot C_f)$; 5— $C_f = 0.075 / (\lg Re^{-2.0})^2$ 。



三、船体边界层

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。

2-3 船体表面弯曲度对摩擦阻力的影响



平板边界层外流速为船速 U ，而船体边界层外流速随表面弯曲度变化，一般船首尾 U 较小，而其他中间部分 U 较大。

以二维边界层为例，动量积分方程为

$$\frac{\tau}{\rho v_e^2} = \sqrt{\frac{C_f}{2}} = \frac{d\theta}{dx} + \left(2 + \frac{\delta^*}{\theta}\right) \frac{\theta}{v_e} \frac{dv_e}{dx}$$

动量损失厚度

$$\theta = \int_0^\infty \frac{u}{v_e} \left(1 - \frac{u}{v_e}\right) dy$$

排挤厚度

$$\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{v_e}\right) dy$$

v_e 是边界层边缘上的速度（势流速度）



当船体水流的平均速度较平板大，因此边界层厚度大部分（船前70%）比平板要小，这导致速度梯度和摩擦阻力增加。

但当船尾附近，船体边界层变厚，常伴有分离、旋涡现象，这时水流速度较小，摩擦阻力也随之减小。

这样前后相加，船体弯曲度对摩擦阻力的影响并不显著。可用傅汝德的相当平板来计算。这也表明想通过改变船体曲线的办法来减小摩擦阻力，其效果不明显。



二、船体形状效应的修正

形状效应:

船体形状引起的船体摩擦阻力与平板摩擦阻力差别

定性说明, 速度分布用指数分布, 曲率影响反映在 u_e 上

$$\frac{u}{u_e} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}}$$

但指数分布在 $y=0$ 处是不成立的。摩擦切应力要用经验公式

$$\frac{\tau}{\rho u_e^2} = 0.02333 \left(\frac{u_e \delta}{\gamma} \right)^{-\frac{1}{4}}$$

由 θ 、 δ 的定义可得

$$\theta = \frac{7}{72} \delta \quad \delta^* = \frac{1}{8} \delta$$



$$\frac{\tau_0}{\rho v_e^2} = 0.0233 \left(\frac{v_e \delta}{\gamma} \right)^{-\frac{1}{4}} = 0.0233 \left(\frac{v_e l}{\gamma} \right)^{-\frac{1}{4}} \left(\frac{\delta}{l} \right)^{-\frac{1}{4}}$$

二维的情况: $\frac{L}{B} = 12, 8, 4 \Rightarrow \frac{\Delta C_f}{C_{f\text{平板}}} = 8.5\%, 15\%, 21\%$

但对于三维的回转体来说，由于弯曲度对摩擦阻力的增加并不明显。二维影响比三维影响大得多（见书中图2-12）

注意：这只是曲率对 C_f 的影响，粘压不在内（不考虑漩涡影响）

实际船参照书中图2-13， k_f 在1.00—1.03之间较小，故一般认为，船体弯曲度对摩擦阻力的影响并不显著。故一般可认为想通过改变船体曲线的办法来减小摩擦阻力，其效果不明显。



粗糙度对平板阻力系数的影响

实践证明，船体表面粗糙度对摩擦阻力的影响是很显著的。

1937年，Schlichting曾在平板上敷涂砂砾，通过改变砂砾高度来测定粗糙度对平板摩擦阻力的影响。

后来米哈依洛夫将此方法推广到漆面

k_{σ} : 涂在平板上的漆面高度

k_{σ}/L : 相对粗糙度

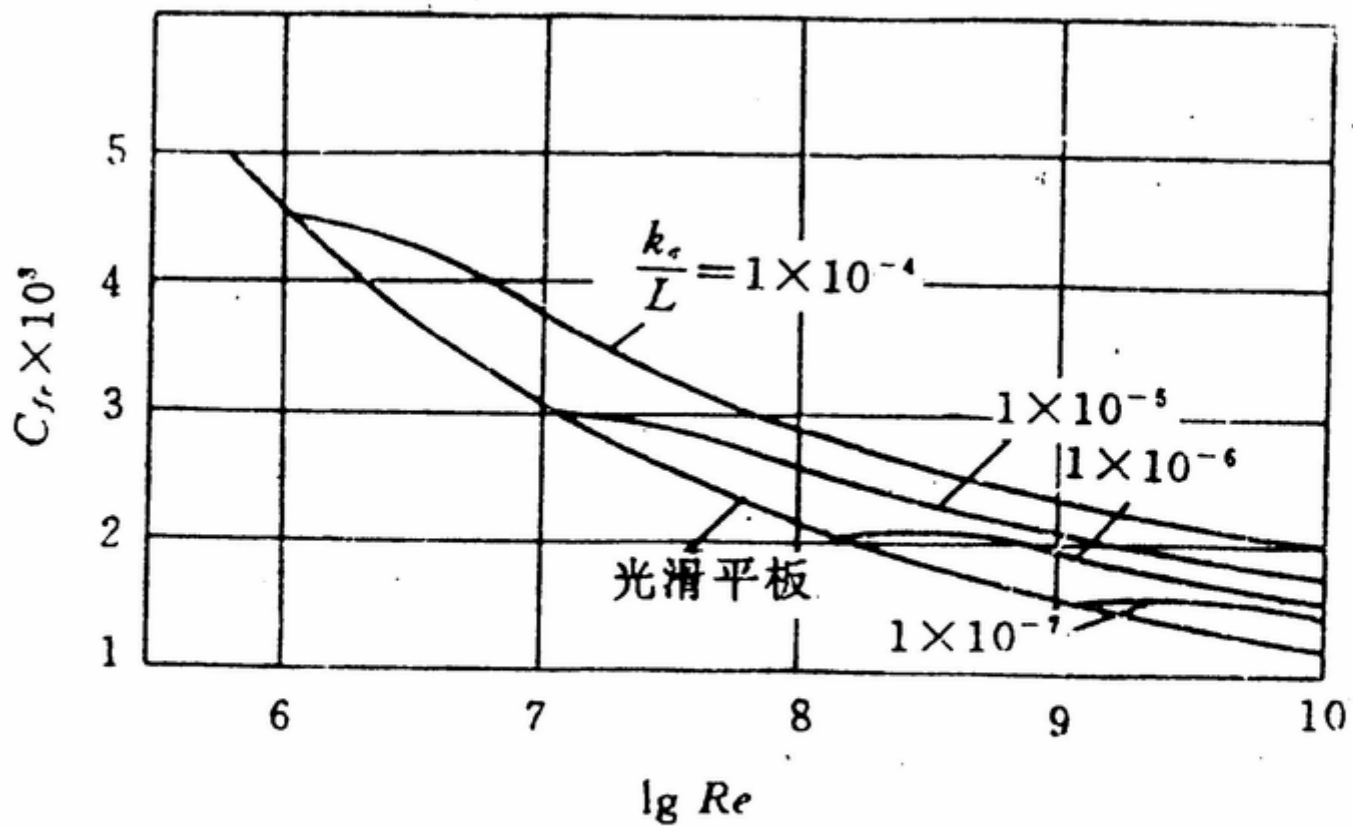


图 3-14 漆面平板之摩擦阻力系数



R_e 小时，粗糙度不起影响，接近光滑曲线。（光滑阶段）

R_e 较大时，粗糙度产生影响，阻力曲线渐渐离开光滑曲线。 C_f 值逐渐增大

$$C_f = f(R_e, L/k_\sigma)$$

过渡阶段

R_e 很大， $R_e > R_{Ncr} \left(x, \frac{L}{k_s} \right)$ ，（完全粗糙阶段）

完全粗糙（和 R_e 无关） ΔC_f 为常数



应用粗糙砂砾平板实验结果来计算船体粗糙表面的摩擦阻力的方法现在应用很少，这是因为决定值非常困难，而且实船壳板表面总是油漆面，它的特性和砂砾面有很大的差异。

米哈伊洛夫根据漆面平板实验结果，给出了漆面平板的摩擦阻力系数计算公式

$$C_{ft} = \frac{0.455}{(\lg R_e)^{2.58}} \left[1 + 0.208 \left(\lg \frac{\nu k_\sigma}{\gamma} - 1.96 \right)^{0.7} \right]$$

此式适用于 $100 < \frac{\nu k_\sigma}{\gamma} < 2000$

ν : 航速, k_σ : 漆面平均高度

对于模型船由于一般制作光滑，可不考虑粗糙度的影响。

2-4船体表面粗糙度对摩擦阻力的影响



一. 船体表面粗糙度的影响

- (1) 普通糙度——主要指新船的油漆表面，也包含伤痕、腐蚀、磨损、多次油漆等。
 - (2) 结构糙度——焊缝，突出、凹凸等壳板面不平。
 - (3) 污底——由小草、贝壳、粘泥等引起，总体上可分为
Bard Roughness, Soft Roughness
-
- 污底问题过去很严重，贝壳、海草可增加阻力80%，随下水时间有关，低温时每天增加0.2%，中温0.25%，高温天气0.5%。
 - 过去的方法：涂防污漆，定期入船坞除污。
 - 现在问题不是很严重，有一种异分子聚合物，防污很有效果。



二. 船体粗糙表面

摩擦阻力计算的处理方法

$\Delta C_f = \text{const}$ 早期研究 作为换算补贴

R_e 大于 10^7 , ΔC_f 渐趋于常数

① ITTC, 1947 $\Delta C_F = 0.4 * 10^{-3}$ 用桑海公式

② 解放后中国 $\Delta C_F = 0.4 * 10^{-3}$ 用P-S公式

但是数据表明 ΔC_F 随L而变 (见表2-3, p176)

1978年ITTC建议使用Bowden-Davison公式

$$C_a = \Delta C_F + \Delta C_R$$

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



ΔC_F : 仅指船体表面粗糙度

ΔC_R : 包括应用不同摩擦阻力公式、尺度效应、螺旋桨效率等

船长 $L < 400\text{m}$, 对质量较好的新建船舶,

$k_s = 150 * 10^{-6} m$ (钢板平均表面粗糙系数)

Lm	50	100	150	300	400
$\text{Ca} * 10^{-3}$	0.87	0.95	0.41	0.149	0.117

③ 1984年, 17thITTC阻力委员会建议使用Townsin公式

$$10^3 \Delta C_F = 44 \left[\left(\frac{k_s}{L} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 R_e^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.125$$

a. 引进了 R_e 的影响

b. 建立 $\frac{k_s}{L}$ 与 ΔC_F 的真实关系。



- ④ 1987年, 18thITTC进行了比较研究
- ⑤ 1990年, 19thITTC 拿出了217条船的实船与模型试验 以Townsin公式为基础

$$10^3 \Delta C_F = 44 \left[\left(\frac{k_s}{L} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 R_e^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.125 \quad (k_s = 150 * 10^{-6} m)$$

$$10^3 \Delta C_a = 5.68 - 0.6 \lg R_e = -0.24 + 2 F_r = 3 \times 10^{-3} V^{-1.4} L^{-1.3}$$

$$[V] = \frac{m}{s} \quad [L] = m$$

$$10^3 \Delta C_a = 10^3 (\Delta C_f + \Delta C_a)$$

ΔC_a 包括应用不同的摩擦阻力公式和尺度作用的差别以及螺旋桨效率、伴流、推力和相对旋转效率的尺度作用等的影响。

2-5 减小摩擦阻力的方法



传统的思路局限于：

1. 使湿表面积减少 $S \Rightarrow \min \quad C_f \frac{1}{2} \rho v^2 S = R_F$
2. 使表面尽可能光滑 $(\Delta C_f + C_F) \frac{1}{2} \rho v^2 S = R_F$

但办法不多，且不是很有效。与减小兴波的手段相比相当落后。而所占比重又很大，尤其是排水量船实在是“主要矛盾”。

许多办法、探索相继出现。今摘其要介绍，以扩大思路。



1. 将船体抬出水面，减小 ρ : $R_F = C_f \frac{1}{2} \rho v^2 S$

空气 ρ 比淡水小1000左右。空气 R_F 小。

小翼、气垫、滑行艇等都有作用，但经济性不能与排水量船相比。

2. 气膜减阻

① 气膜减阻。早期俄国人报道，颇有效果。

问题是：

- 气膜如何能稳定
- 哈尔滨曾在驳船上用过，据说有效果。
- 气膜降噪



② 微气泡引射 (Microbubble Injection)

由导线绕船横剖面而后用电产生气泡。

透气空面孔径 $1-50\ \mu\text{m}$ 。 据估计可省功率30%。

问题是：

- a) 孔很容易塞结
- b) 气泡在浮力作用下逃逸

③ 控制边界层



④ 高分子减阻

Tom (1948) 报道过，管子里加入少量高分子添加剂可减阻。救火笼头很有效。

在船体表面不断喷注高分子添加剂。

问题是：

- a) 控制减阻的物理机制并不清楚
- b) 什么配方效果好而量小
- c) 空间、经济代价如何



3. 软性（顺应）覆盖层（如海豚表皮）

覆盖层可以是

- ① 被动起作用——最有实用价值
- ② 人工驱动

效果最好的报道可达60%—70%

覆盖层与边界层扰动产生有利干扰的可能方式是：

- ① 延伸层流区长度
- ② 延长过渡区或减小过渡区中的剪切应力
- ③ 减小湍流应力——这一点对船舶最有实用价值

软性覆盖层可减噪，效果好，由此产生了消声瓦，用于潜艇。



4. 表面波纹和槽沟

两种形式：

① 横向波纹

波长与边界层厚度差不多，降摩擦阻力可达20%。但引起压力场改变，兴波阻力增加。

② 纵向波纹

机理是加厚Sublayer，减阻10%。

Riblets飞机试验表明可降6%。

“美洲杯”帆船赛

2-6 船体摩擦阻力的计算步骤



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

ΔC_f

1. 计算雷诺数 $R_e = \frac{\nu L_w}{\gamma}$

标准水温15℃（无特殊注明，实船）
具体各水温查P292页附表 ρ 、 γ

2. 光滑平板 $C_f = f(R_e)$

- ① Schoenherr公式
- ② Prandtl-Schlichting公式
- ③ 15th ITTC公式



3. C_f 用S或者P-S公式 则 $C_a = \Delta C_f = 0.0004$

1957年ITTC公式 $L_w < 150m$

150m以上 C_a 可用Bowden-Davison

C_a 可用19th ITTC (1990)

实际各水池结果不同，可略有出入。

4. S计算 $S = 2 \int_0^{L_{wl}} L dl$

Line已有，半围线长l

无Line初值，依靠统计资料

Holland水池：民船公式

$$S = \left(3.4 \nabla^{\frac{1}{3}} + 0.5 L_{bp} \right) \nabla^{\frac{1}{3}}$$

L_{bp} : 船的垂线间长 (m)

∇ : 船的排水体积 (m³)



长江船型: $S = L_{wL} (1.8T + C_b \cdot B)$

江船系列: $S = \frac{59L_{wL}}{64 - \frac{B}{T}} (1.8T + C_b \cdot B)$

系列船型: $S = C_s \sqrt{\nabla L_{wL}}$

C_s : 湿面积系数 $C_s = f\left(\frac{B}{T}, C_m\right)$

5. $R_f = (C_f + C_a) \frac{1}{2} \rho v^2 S$

目前我国一般取 $C_a = \Delta C_f = 0.4 \times 10^{-3}$



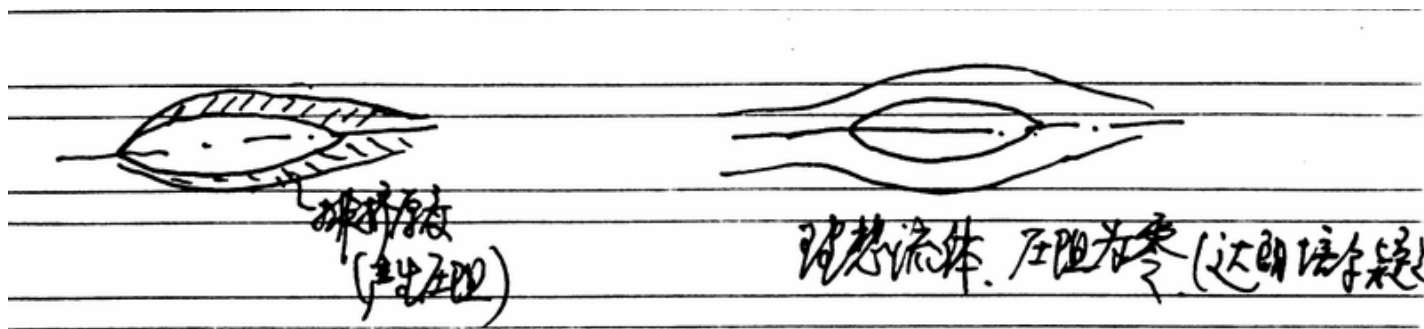
2-7 粘压阻力的成因及特性

顾名思义：

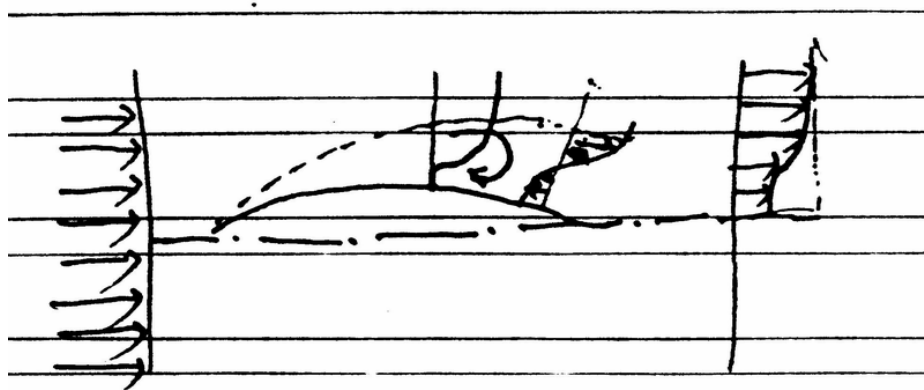
有粘性引起的压差阻力。

一. 船体粘压阻力产生的原因

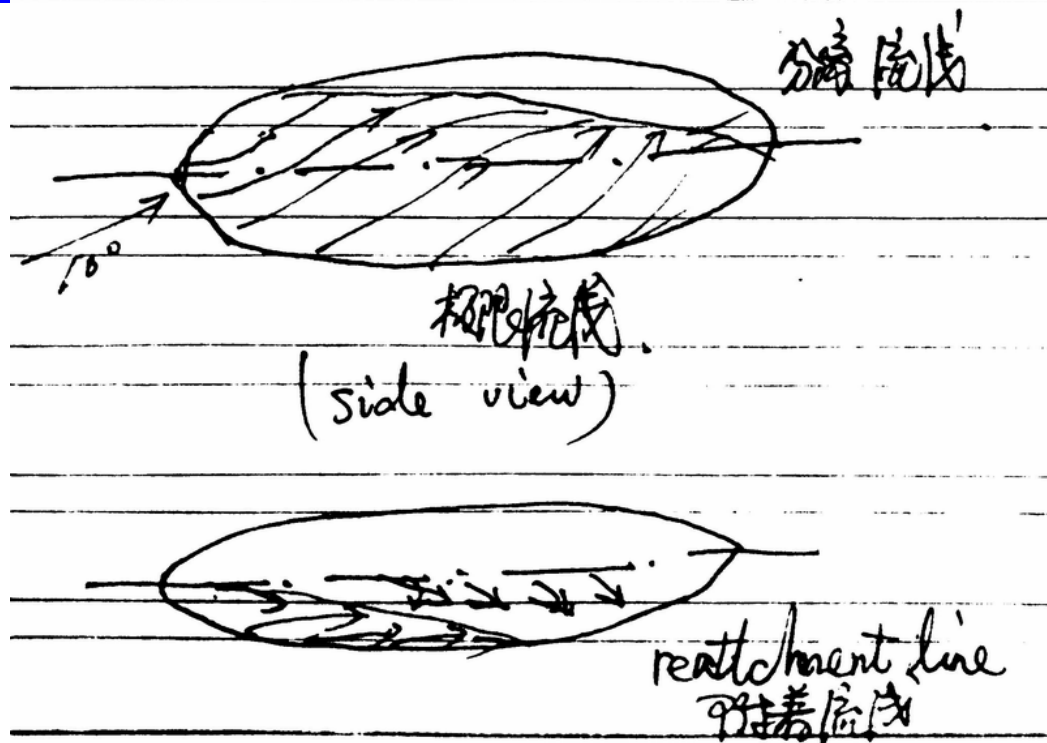
1. 不分离的情形



2. 2-D分离



3. 3-D分离



动量损失（压差阻力、能量损失）

从能量观点来看，在尾部形成漩涡，另一部分漩涡则被冲向船的后方，同船尾处又继续不断产生的漩涡，这样船体就要不断地提供能量。这部分能量损耗就是以粘压阻力的形式表现的。

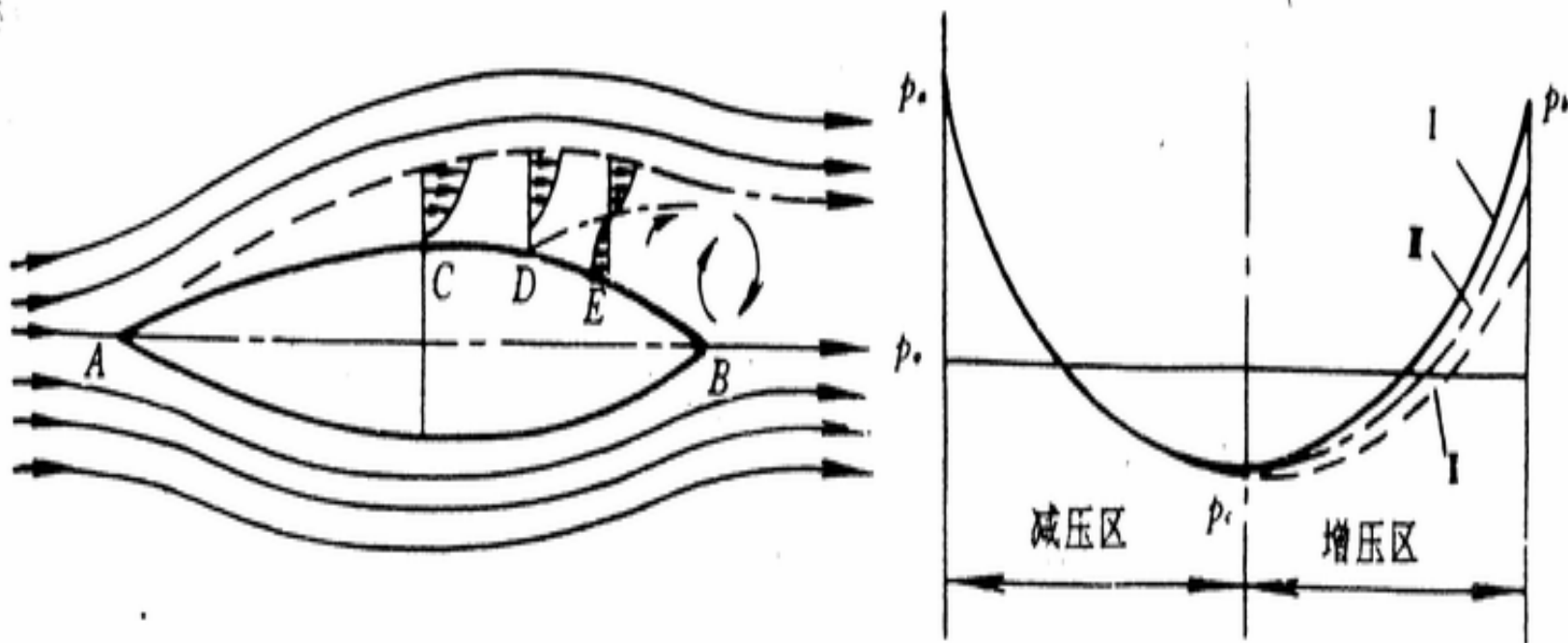


图 4-1 粘压阻力的成因



二. 影响粘压阻力的因素

1. 最重要的是物体后端的形状——减小纵向（沿流向）的逆压力梯度。

a) 后体收缩缓慢，逆向压力梯度变小，分离可能小或区域小。 Baker的试验归纳出，去流段（收敛段）长度

$$L_R \geq 4.08\sqrt{A_M}$$

A_M : 船中横剖面积

b) 具体体现在尾端流线的倾角，沿水线流动。限制水线与中纵线的夹角。

沿纵剖面流动，流动方向应尽量垂直于横剖面



2. 边界层的流动状态

- 分离点在层流区，分离点偏前，分离严重
- 湍流区，分离点后移
- 在超临界区，分离点基本稳定，
C_{pv}近似常数

$$R_{pv} = C_{pv} \frac{1}{2} \rho v^2 S$$

不再与Re有关，所以C_{pv}可以算在CR中的原因。

对于流线型物体，边界层分离较小。Re增大时，边界层厚度变薄，C_{pv}有所下降。

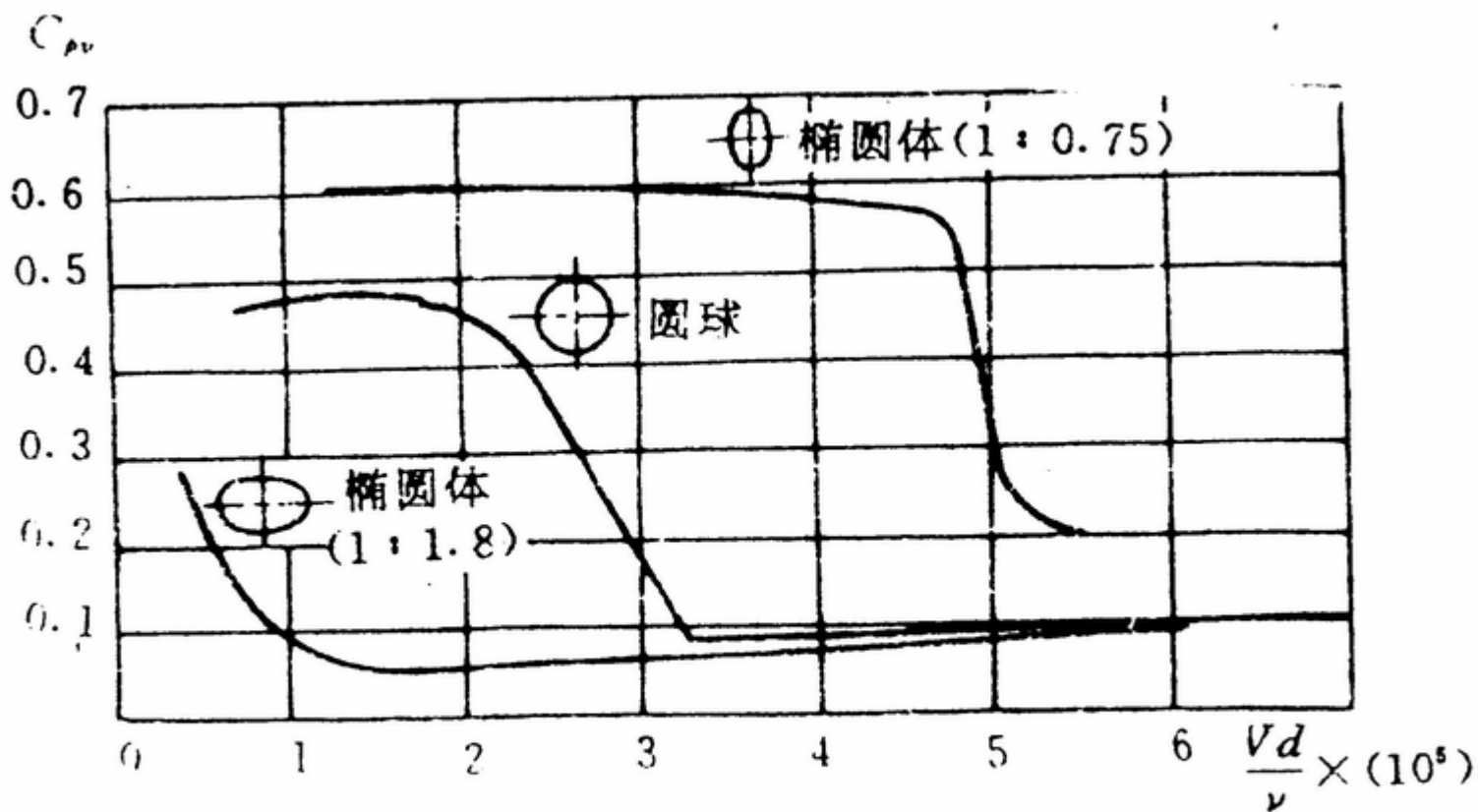
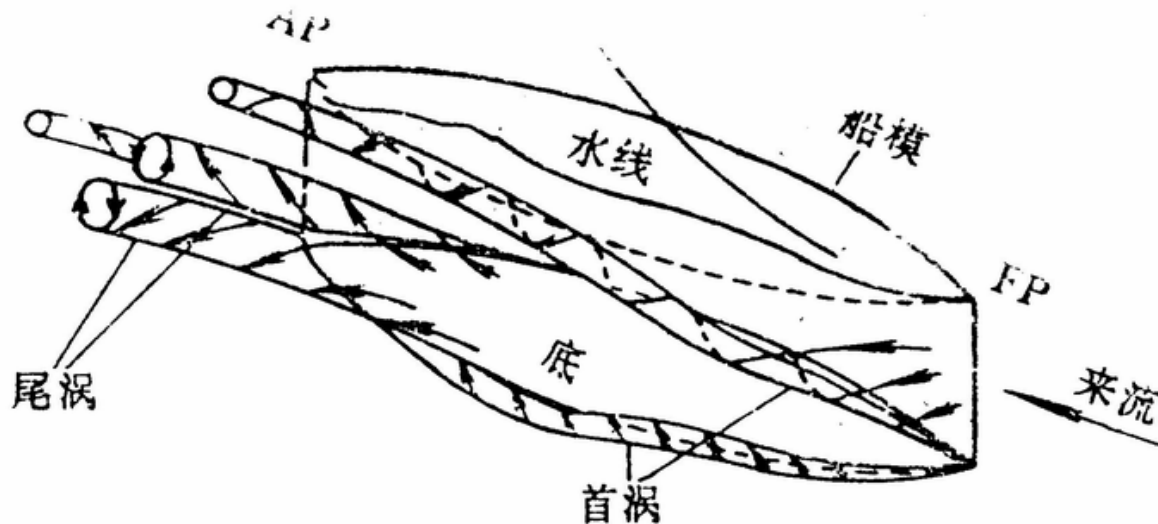


图 4-2 圆球等物体实测形状阻力系数曲线

3. 船体舦涡

肥大船常在船首舦部产生外旋得舦涡，而在船尾舦部产生内旋的舦涡。舦涡的产生不但使粘压阻力增加，而且是船首底部形成低压区，船体有所下沉，造成了船体航行过程中的埋首现象，又会增加阻力。如采用球鼻舦的话，可以明显改善这一现象。





4. 肥大船型

$$C_B > 0.8 \quad L/B < 6$$

分离不可避免

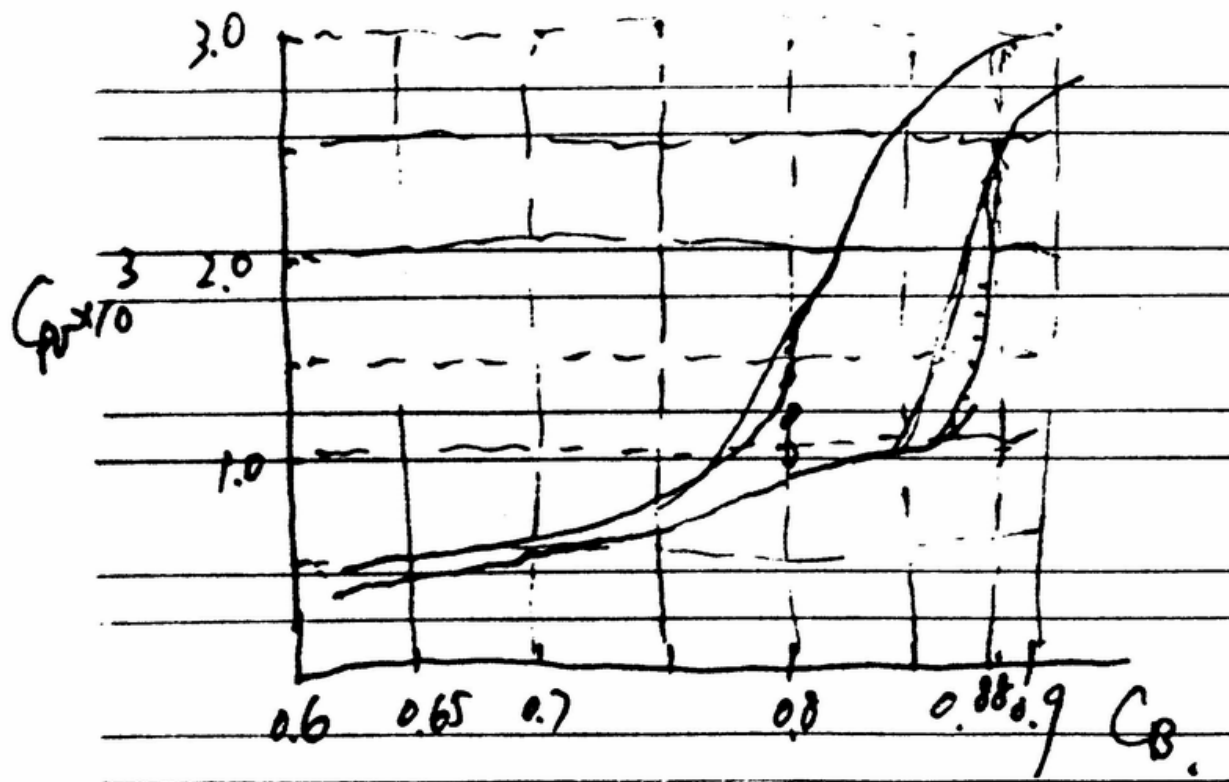
① $C_B \uparrow \quad C_{pv} \uparrow$

② $C_B > 0.88 \sim 0.88$
随外界条件影响出现异常。

是个不稳定区，

③ $C_B > 0.88 \quad C_{pv} \uparrow$
趋稳定

但又



5. 船模与实船的 Re 相差 10^3 左右，边界层分离不相似，往往船模分离而实船不分离，低速时尤须注意。



三、降低粘压阻力对船型的要求

1. 注意后体形状

① $L_R \geq 4.08\sqrt{A_M}$

② 控制船尾水流的变化平缓

2. 船型变化不宜过急，特别注意横剖面曲线A(x)前肩勿过于隆起，后肩勿过于内凹。

3. 对低速肥大船型，可采用球鼻艏以减少舭涡。



四、船体粘压阻力处理方法

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。

2-8 确定粘性阻力的尾流测量法



近年来，在研究船体阻力分类时，通常把船体阻力分成兴波阻力和粘性阻力两部分。前者可利用波形分析法确定，后者一般可应用“尾流测量法”进行试验测量得到。

“尾流测量法”最早是航空界采用，50年代Marshall Tulin将它搬到造船界。航空界有两个方法：Bete' s method和Jones' method

书上是Jones' method

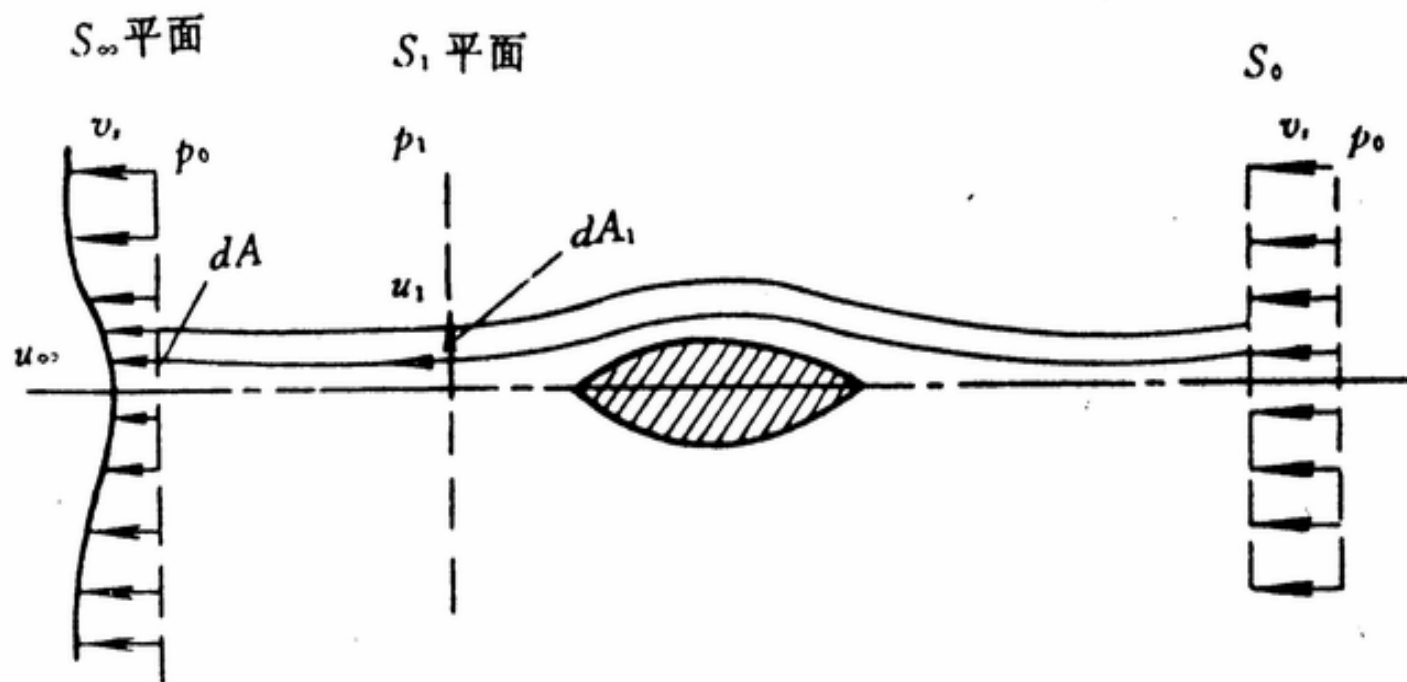


图 4-11 尾流测量法的原理



考虑近物体后面截面 S_1 和远离物体后面的截面 S_∞ 。

现假定

- ① 船后尾流平面内的动量损失完全有粘性所致。
- ② 船模的近后方测量平面 S_1 和船后足够远处 S_∞ 平面之间无能量损失。

流量（一定） $dQ = v_s dA_0 = u_\infty dA = u_1 dA_1$

动量差 $\rho dQ(v_s - u_\infty) = \rho u_\infty dA(v_s - u_\infty) = \rho u_1 dA_1(v_s - u_\infty)$

这一动量差就是粘性阻力

$$dR_v = \rho dA u_\infty (v_s - u_\infty)$$

$$R_v = \rho \iint_S u_\infty (v_s - u_\infty) dA = \rho \iint_{S_1} u_1 (v_s - u_\infty) dA_1$$



根据伯努利定律（忽略S1和S ∞ 之间的粘性影响）

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = G$$

$$\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 = G - p_0 \quad G_1 \quad u_\infty = \sqrt{\frac{2G_1}{\rho}}$$

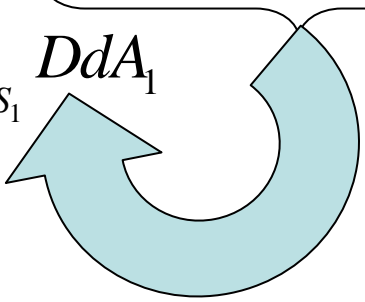
$$\underbrace{(p_1 - p_0)}_{P_1} + \frac{1}{2} \rho u_1^2 = G - p_0 = G_1 \quad u_1 = \sqrt{\frac{2(G_1 - P_1)}{\rho}}$$

另设

$$G_0 = \frac{1}{2} \rho v_s^2$$

$$v_s = \sqrt{\frac{2G_0}{\rho}}$$



$$\begin{aligned} R_v &= \rho \iint_{S_1} u_1 (v_s - u_\infty) dA_1 \\ &= \rho v_s^2 \iint_{S_1} \frac{u_1}{v_s} \left(1 - \frac{u_\infty}{v_s} \right) dA_1 = \frac{1}{2} \rho v_s^2 \iint_{S_1} 2 \frac{u_1}{v_s} \left(1 - \frac{u_\infty}{v_s} \right) dA_1 \\ &= \rho v_s^2 \iint_{S_1} \sqrt{\frac{G_1 - P_1}{G_0}} \left(1 - \sqrt{\frac{G_1}{G_0}} \right) dA_1 \\ &= G_0 \iint_{S_1} 2 \sqrt{\frac{G_1 - P_1}{G_0}} \left(1 - \sqrt{\frac{G_1}{G_0}} \right) dA_1 \\ &= G_0 \iint_{S_1} D dA_1 \end{aligned}$$




测量什么？

- a. 测量 S_1 处各点的 P_1 , G
- b. 测量来流 P_0 , G_0

Pitot排、毕托管

在船后较近处（约半船长处）的侧量平面 S_1 中某一深度上横向布置一组毕托管，在远离物体的地方再放一组毕托管测量来流。毕托管随船模一起前进过程中，既可求出各点的相对总压力 G_1 和相对静压力 P_1 。改变毕托管的深度，求出该平面各点 G_1 和 P_1 ，然后计算出 D 。通过二次积分求出粘性阻力。

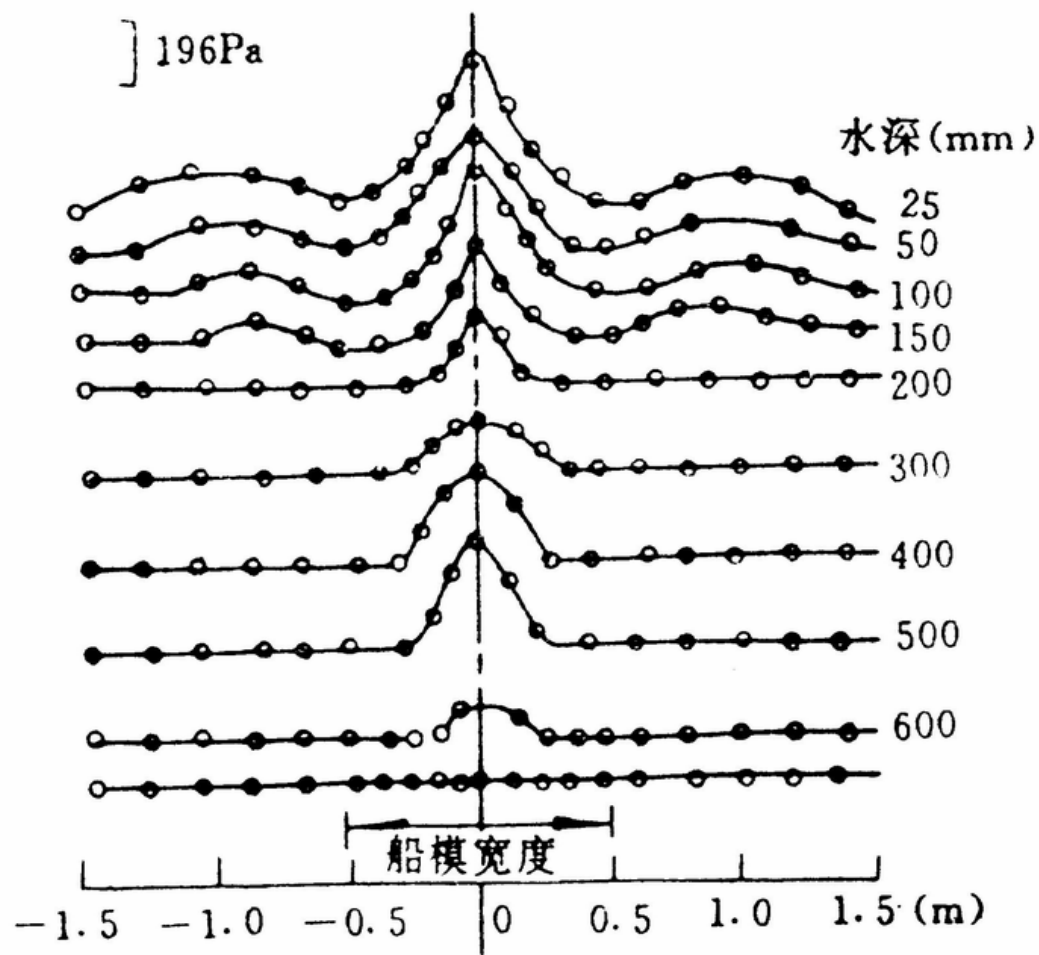


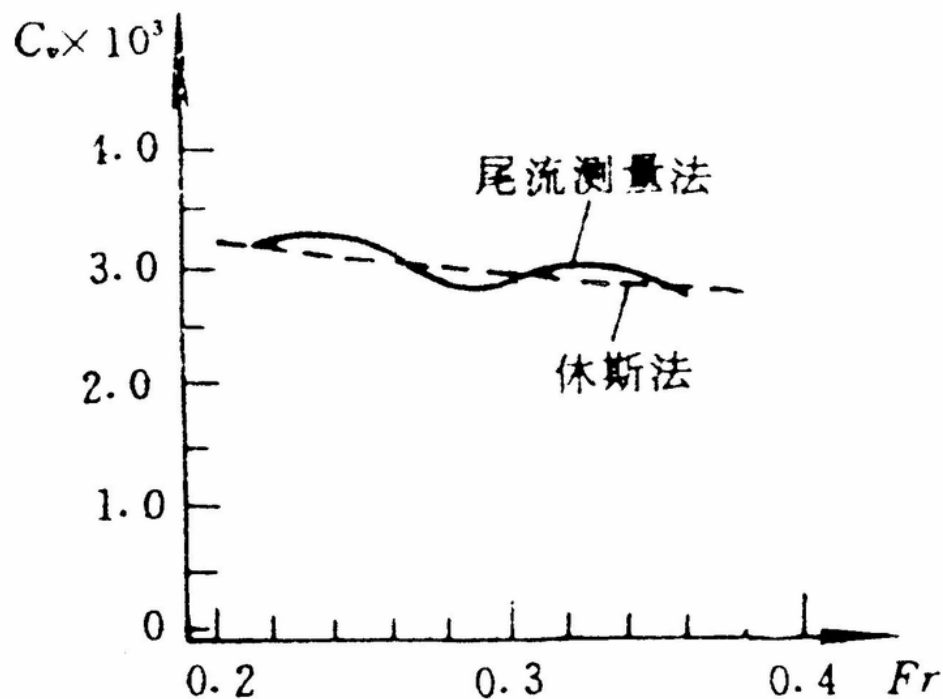
图 4-12 尾流压力的测量结果($Fr=0.24$)



C_v : 尾流测量与 $(1+k)C_{fp}$ 的比较

a) 尾流测量 $C_v = F(F_n)$

b) 平均值接近 $(1+k)C_{fp}$





2-9 船舶粘性阻力理论计算概述

- 边界层理论计算概述

二维、三维边界层
积分法，微分法

- N-S (RANS) 方程理论计算概述

叠模（不考虑自由表面）

层流 N-S方程

湍流 RANS方程（需用湍流模式进行封闭）