



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

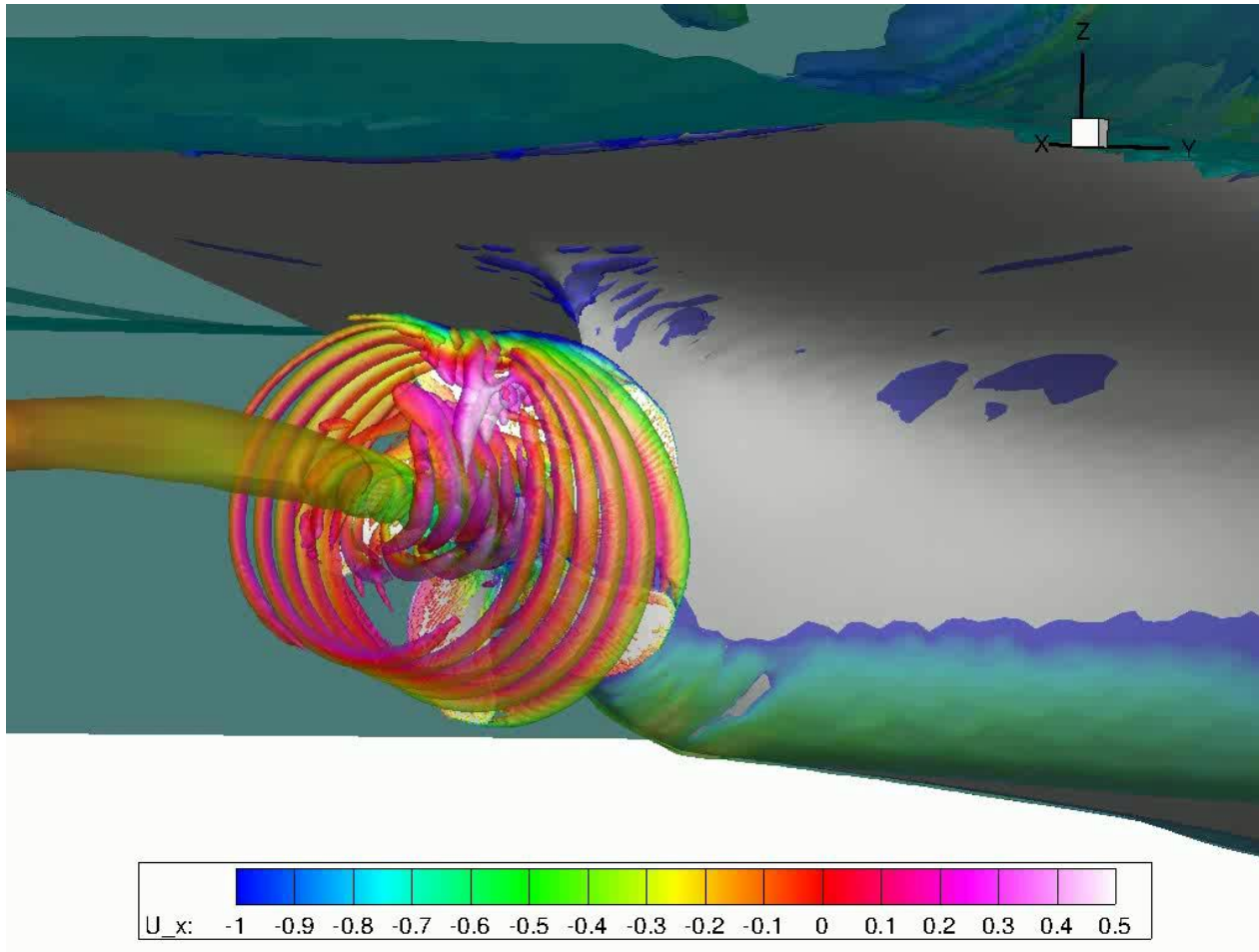
第五章

螺旋桨与船体相互作用





螺旋桨-船体相互作用



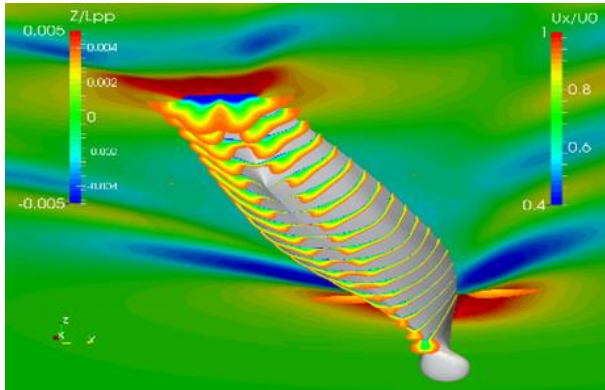
真实航行中的船舶必然是船体和螺旋桨作为一个整体进行工作运转。如何建立起螺旋桨和船体的联系？



前期知识基础

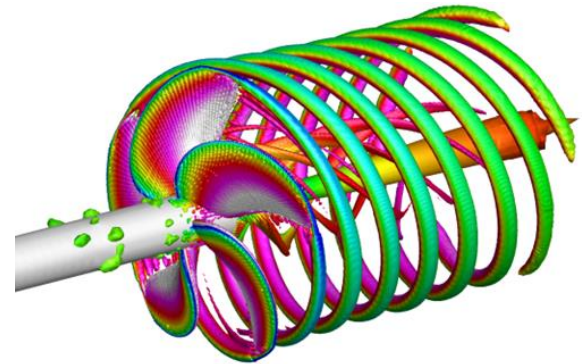
➤ 船舶阻力

(裸船体, 没有螺旋桨)



➤ 螺旋桨敞水性能

(没有船体)



如何建立联系 (假设)

➤ 螺旋桨是在船后的流场中单独工作

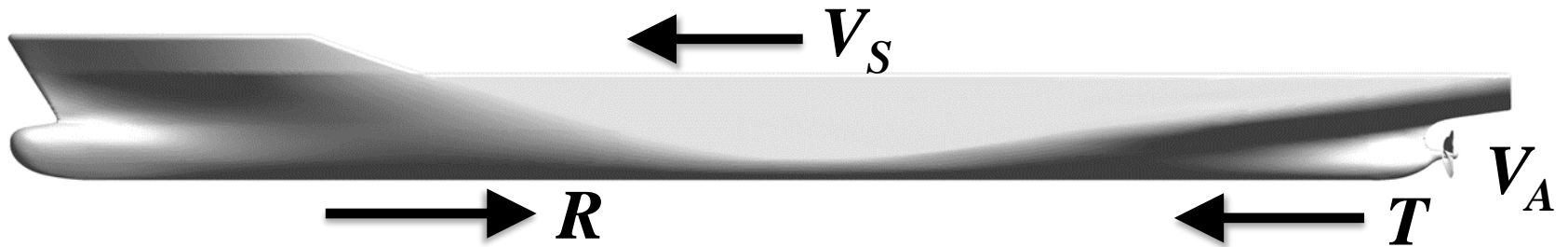
➤ 船体位于螺旋桨所影响的水流中运动

通过这种方式建立起孤立船体和孤立螺旋桨的相互作用联系, 进行船桨系统的整体分析



船体螺旋桨相互作用表现在

- 船后流动对螺旋桨进流产生影响 $V_A \neq V_S$
- 螺旋桨旋转导致船体流动变化 $T \neq R$
- 螺旋桨的转矩（功率）变化 $Q_B \neq Q_0$



真实关系

- 螺旋桨进流速度小于实际船速 $V_A < V_S$
- 实际所需推力大于裸船体阻力 $T > R$
- 船后桨转矩不等于同等推力下敞水桨转矩 $Q_B \neq Q_0$



由此，为了进行船后螺旋桨的设计，并且能够利用已有的船舶阻力试验和螺旋桨敞水试验的知识进行分析

我们需要建立船桨相互作用的关系式：

- 船速与螺旋桨进流速度 $V_A = V_S - u$
- 螺旋桨推力与船舶阻力 $T = R + \Delta R$
- 船后桨转矩与敞水桨转矩 $Q_0 = Q_B \eta_R$

通过上述方式建立起船桨相互作用关系，便于利用阻力试验和敞水试验的数据进行船后螺旋桨的设计和分析



5.1 船体伴流

船体伴流反应的是船体对螺旋桨的影响。

当船在水中以某一速度航行时，其周围的水体受船体运动影响会产生一股追随运动的水流，该水流称为**伴流 (wake)**。

由于伴流的存在，使得船后螺旋桨的进流速度与船速不同，依据之前建立的船速与螺旋桨进流的关系：

$$V_A = V_S - u$$

u 为伴流速度，定义伴流分数为 ω ：

$$\omega = \frac{u}{V_S} = \frac{V_S - V_A}{V_S}$$

由此可得：

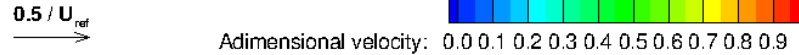
$$V_A = V_S(1 - \omega)$$

通过伴流分数 ω 建立了船速和螺旋桨进速的关系式



5.1 船体伴流

➤ 船后伴流速度大小和方向不同且分布



向不同且分布

$$u = u_a$$

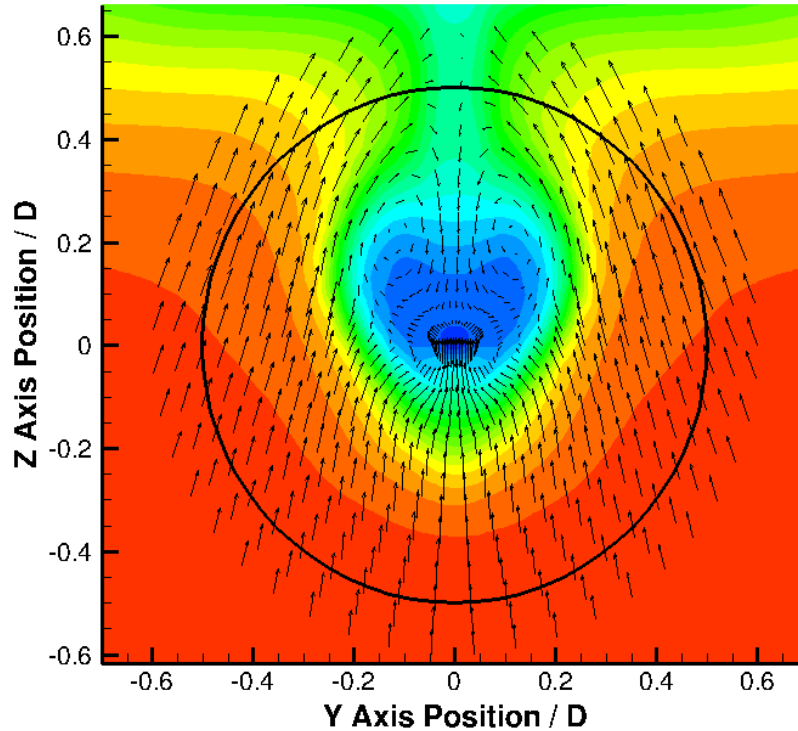
➤ 其中 u_a 是轴

后两者与轴

如无说明，

➤ 船舶推进中

➤ 伴流速度与船速同向则为正伴流、相反则为负伴流。



\vec{i}_r

可速度。

不计，



5.1 船体伴流

➤ 伴流的成因及成分

- 船身周围的流线运动（形式伴流potential wake）
- 水体粘性作用（摩擦伴流friction wake）
- 兴波作用（兴波伴流wave wake）

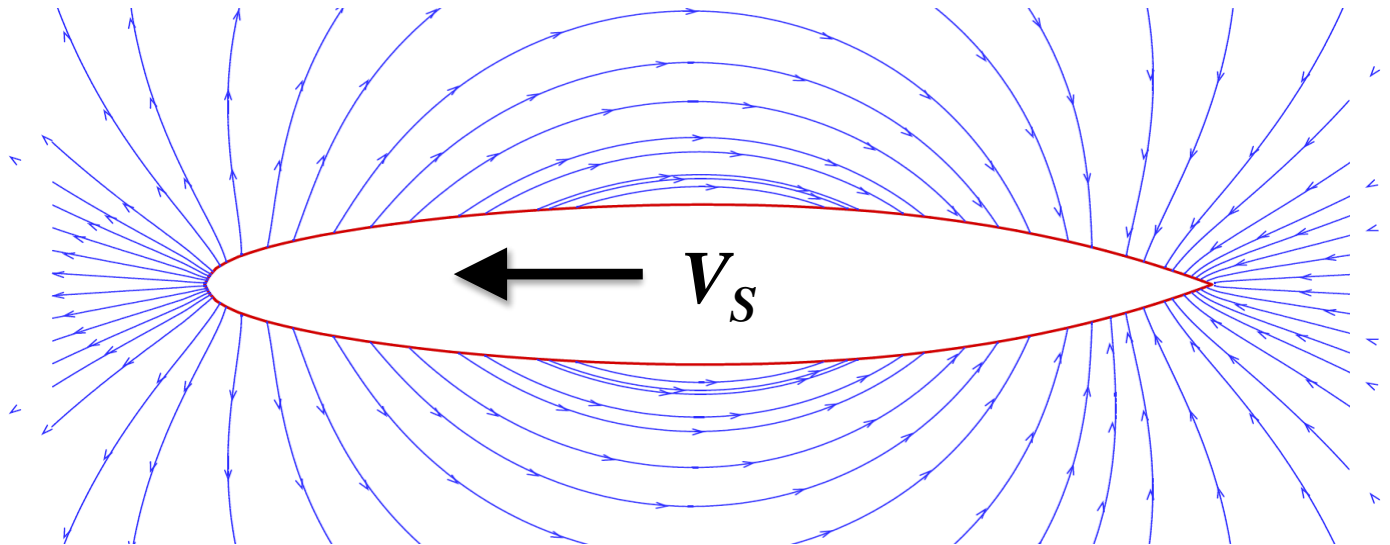


5.1 船体伴流

➤ 形势伴流 (u_p)

当船舶前进时，位于船首的水质点为船舶运动所推开，而船尾处所遗留的空间为附近的水流所补充，补充此空间的水流具有向前的速度，其流线分布如图所示。这种由于流线运动而引起的伴流称为形势伴流（势伴流）。

形势伴流与船体的首尾部形状及船速有关。

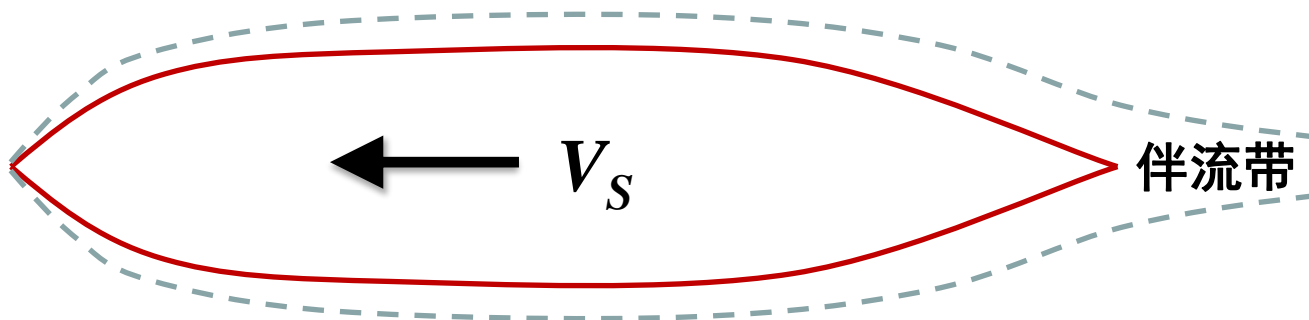




5.1 船体伴流

➤ 摩擦伴流 (u_f)

当船在运动时，因水具有粘性，沿着船体表面有一薄层水（边界层）被船带动向前运动，由于粘性的层层传递，在边界层内的水质点将以不同的速度随船前进。这种由于水的粘性而产生的伴流称为摩擦伴流。占总伴流中的主要成分。摩擦伴流大小与船体的形状、表面的粗糙度及螺旋桨在船后的位置等有关。



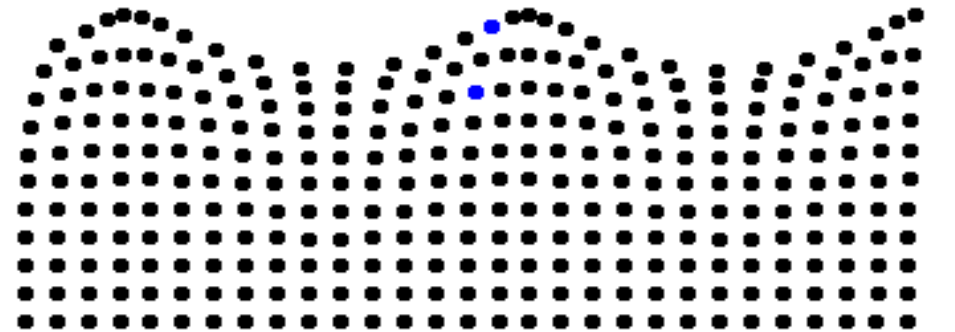
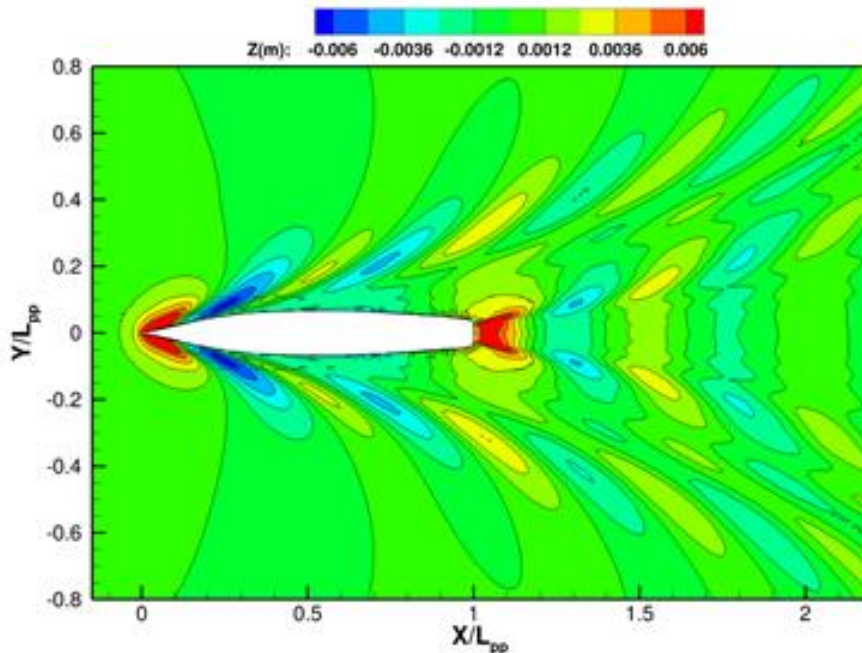


5.1 船体伴流

➤ 兴波伴流 (u_w)

船舶在航行时会产生自由面兴波，在水面形成波浪，在螺旋桨处，船舶兴波形成的伴流称为兴波伴流。

随水深增加衰减快，其数值常较前两种伴流要小。





5.1 船体伴流

➤ 综上，船舶总的伴流可以表示为三部分之和：

$$u = u_p + u_f + u_w$$

需要注意的是，三者均为**平均速度**， u_p 和 u_f 始终大于0，而 u_w 则可为负值。

伴流分数也可写成：

$$\omega = \omega_p + \omega_f + \omega_w$$

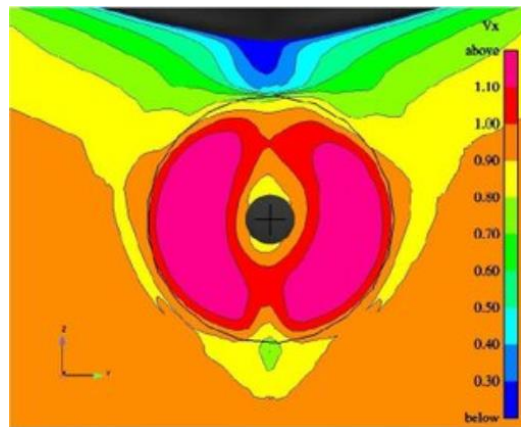
其中 ω_p 是形势伴流分数， ω_f 是摩擦伴流分数， ω_w 是兴波伴流分数



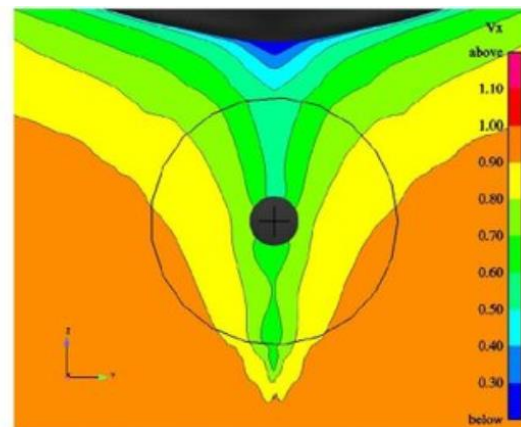
5.1 船体伴流

伴流的大小一般由试验测量，根据测量方法的不同可以分为以下两类：

- **标称伴流 (Nominal Wake)**：无安装螺旋桨的船后，用各种流速仪测量的桨盘面处的水流速度
- **实效伴流 (Effective Wake)**：船后螺旋桨试验或自航试验结果与螺旋桨敞水试验结果比较可得实效伴流



With Propeller



Without Propeller



标称伴流的测量:

- 采用毕托耙测量同心圆周上等距离点的水流轴向速度，在极坐标系下测得的流速为 $V_A(r, \theta)$ ，由船速 $V_S(r, \theta)$ 减去该处的局部进速即可得到标称伴流 $u(r, \theta)$
- 各半径处圆周上的平均伴流为:

$$u(r) = \frac{\int_0^{2\pi} u(r, \theta) r d\theta}{\int_0^{2\pi} r d\theta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(r, \theta) d\theta$$

整个桨盘面处的平均伴流为:

r_h 为桨毂半径

$$u = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{r_h}^R u(r, \theta) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_{r_h}^R r dr d\theta} = \frac{1}{\pi(R^2 - r_h^2)} \int_0^{2\pi} \int_{r_h}^R u(r, \theta) r dr d\theta$$



5.1 船体伴流

实效伴流的测量。 首先测量出船后螺旋桨的船速 V_S ，螺旋桨转速 n ，推力 T_B ，转矩 Q_B 。

下标0代表敞水，下标B代表船后桨的数值

➤ 等推力法

螺旋桨敞水试验，固定转速 n ，调节进速 V_A 使得推力等于 T_B ，此时实效伴流为 $u = V_S - V_A$ 。但是往往此时的转矩 $Q_0 \neq Q_B$ 。

➤ 等转矩法

固定转速，调节进速 V_A 使得转矩等于 Q_B ，此时实效伴流为 $u_1 = V_S - V_A$ 。但是此时 $T_0 \neq T_B$ 。

目前等推力法是实效伴流测量中广泛采用的。



伴流不均匀性

船后桨盘处各点的伴流速度大小和方向都不同，等推力法得到的转矩 $Q_0 \neq Q_B$ ，等转矩法得到的 $T_0 \neq T_B$ ，主要原因是两者的流动状态不同。

伴流的不均匀性通过以下系数表征：

不均匀性对推力的影响系数 $i_1 = \frac{T_B}{T_0}$

不均匀性对转矩的影响系数 $i_2 = \frac{Q_B}{Q_0}$

不均匀性对效率的影响系数 $i = \frac{i_1}{i_2}$ ，表征了船后桨效率

η_B 和敞水效率 η_0 的关系： $\eta_B = \eta_0 \frac{i_1}{i_2}$



相对旋转效率

由于目前广泛采用的是等推力法，因此 $T_0 = T_B$ ，即

$$i_1 = 1, \text{ 而 } Q_0 \neq Q_B, \quad i_2 = \frac{Q_B}{Q_0}。$$

由此，船后桨的效率为：

$$\eta_B = \eta_0 \frac{i_1}{i_2} = \eta_0 \frac{1}{i_2} = \eta_0 \eta_R$$

式中， $\eta_R = \frac{1}{i_2}$ 为相对旋转效率

相对旋转效率建立了敞水螺旋桨和船后螺旋桨的转矩（效率）的联系



推力减额反应的是螺旋桨对船体的影响。

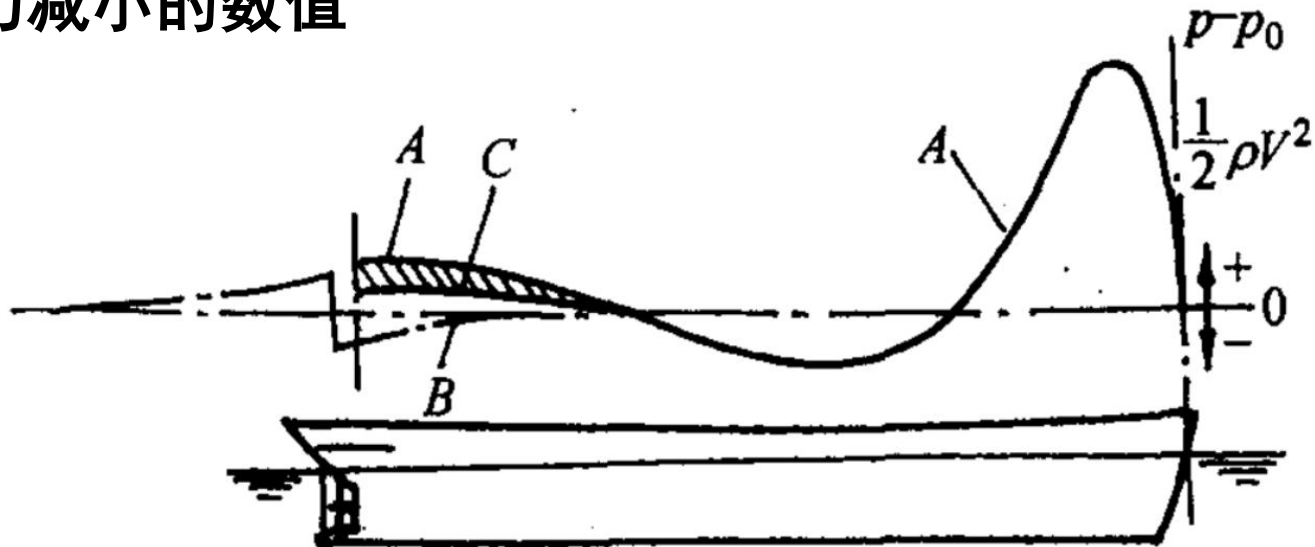
- **螺旋桨在船后工作时，由于抽吸作用，桨盘前方水流速度增大，有伯努利方程可知，周围流速增加区域的压力均减小，改变船体压力分布，导致阻力增加**
- **由于船尾流速增大，影响边界层内的流动状态，速度梯度增加，使得摩擦阻力增大，但数值上远小于压力影响**



5.2 推力减额

推力减额反应的是螺旋桨对船体的影响。

- 孤立船体的压力分布如曲线A所示，螺旋桨敞水的压力分布如曲线B所示，则螺旋桨船后工作时船体周围压力分布可视为两者的叠加，如曲线C所示，阴影部分则表征船尾压力减小的数值





5.2 推力减额

由于螺旋桨在船后工作时引起的船体附加阻力称为阻力增额。螺旋桨发出的推力 T ，一部分用于克服船体阻力 R （不考虑桨），另一部分用于克服**阻力增额** ΔR ，即：

$$T = R + \Delta R$$

由此可知，螺旋桨发出的推力中只有 $(T - \Delta R)$ 用于克服阻力 R 并推船前进，故称之为**有效推力** T_e 。

习惯上，通常将 ΔR 称为**推力减额**，并以 ΔT 表示。这样螺旋桨的总推力可以写为：

$$T = R + \Delta T$$

或者写成： $R = T - \Delta T$



推力减额分数

通常以推力减额分数来表征推力减额的大小，推力减额分数 t 的表达式如下：

$$t = \frac{\Delta T}{T} = \frac{T - T_e}{T} = \frac{T - R}{T}$$

由此可知， t 建立了船体阻力 R 和螺旋桨推力 T 之间的关系：

$$R = T(1 - t)$$

推力减额分数 t 的大小与船型、螺旋桨尺度、螺旋桨负荷以及船桨相对位置等因素有关。理论方法计算推力减额很困难，一般都是根据通过船模自航试验或经验公式来决定的。



推力减额与伴流的关系

推力减额与伴流间有密切关系，仿照伴流分数的划分方法，将推力减额分数 t 写为：

$$t = t_p + t_f + t_w$$

其中， t_p 为形势推力减额分数， t_f 为摩擦推力减额分数， t_w 为波浪推力减额分数。

螺旋桨工作时诱导速度所涉及的范围不大，由于水流速度增加导致的摩擦阻力很小， t_f 可忽略；

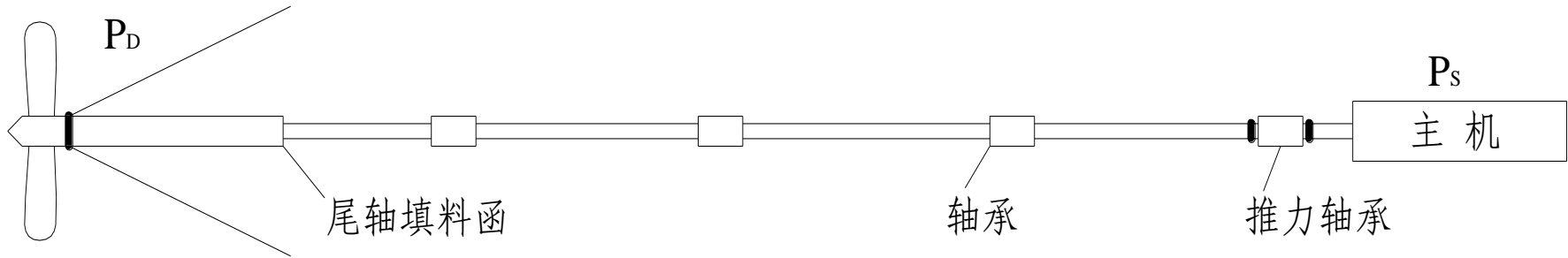
螺旋桨浸没工作时引起的波浪很小， t_w 可忽略不计；

t_p 占推力减额中的主要成分，且可认为： $t = t_p$



5.3 推进系数及效率的成分

知识回顾：



- 船舶主机发出的功率为机器功率 P_S
 - 主轴尾端与推进器连接处量得的功率为收到功率 P_D
 - 收到功率与机器功率之比为传送效率（或轴系效率）
- $$\eta_S = P_D / P_S$$
- 克服船体阻力 R 以速度 V 前进的有用功率为有效功率 P_E
 - 有效功率 P_E 与收到功率 P_D 之比为推进效率 η_D （QPC）

- 推进系数以 $P.C. = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_D} \times \frac{P_D}{P_S} = \eta_D \times \eta_S$



5.3 推进系数及效率的成分

知识点补充：

- 船后螺旋桨收到功率 $P_{DB} = 2\pi n Q_B$
- 船后螺旋桨收到功率 P_{DB} 后发出推力 T ，进速为 V_A ，故螺旋桨单位时间所做功定义为推功率： $P_T = TV_A$
- 推功率与收到功率之比为船后螺旋桨效率 η_B

$$\eta_B = \frac{P_T}{P_{DB}} = \frac{TV_A}{2\pi n Q_B} = \frac{TV_A}{2\pi n Q_0} \frac{Q_0}{Q_B} = \eta_0 \eta_R$$

- $\eta_0 \eta_R$ 分别为敞水效率和相对旋转效率，且 η_R 也可写为螺旋桨敞水收到功率 P_{D0} 和船后收到功率 P_{DB} 之比

$$\eta_R = P_{D0}/P_{DB}$$



5.3 推进系数及效率的成分

知识点补充：

- 船舶有效功率 P_E 与螺旋桨推功率 P_T 之比为船身效率 η_H

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{RV}{TV_A} = \frac{1-t}{1-\omega}$$

船身效率 η_H 表示伴流与推力减额之合并作用

- 综上所述，推进系数P.C可以表示为：

$$P.C = \frac{P_E}{P_S} = \frac{P_E}{P_T} \frac{P_T}{P_{D0}} \frac{P_{D0}}{P_{DB}} \frac{P_{DB}}{P_S} = \eta_D \eta_S = \eta_H \eta_0 \eta_R \eta_S$$



5.3 推进系数及效率的成分

推进系数P. C的各效率成分及功率传递

➤ 效率成分与功率关系：



- 反向推导，可以联系起孤立船体、敞水螺旋桨和主机。
- 大致流程：已知船速 V 时阻力 R ，先估计 ω 和 t ，设计或选择一个螺旋桨，要求在进速 $V_A = V(1 - \omega)$ 时发出推力 $T = R/(1 - t)$ ，假定敞水效率为 η_0 ，转速 n ，转矩 Q_0 ，估计相对旋转效率 η_R ，求出 Q_B 及 P_{DB} ，考虑到轴系效率 η_S 后可得到所需的主机功率 P_S



5.4 船桨相互影响系数及尺度效应

船桨相互影响系数的重要性

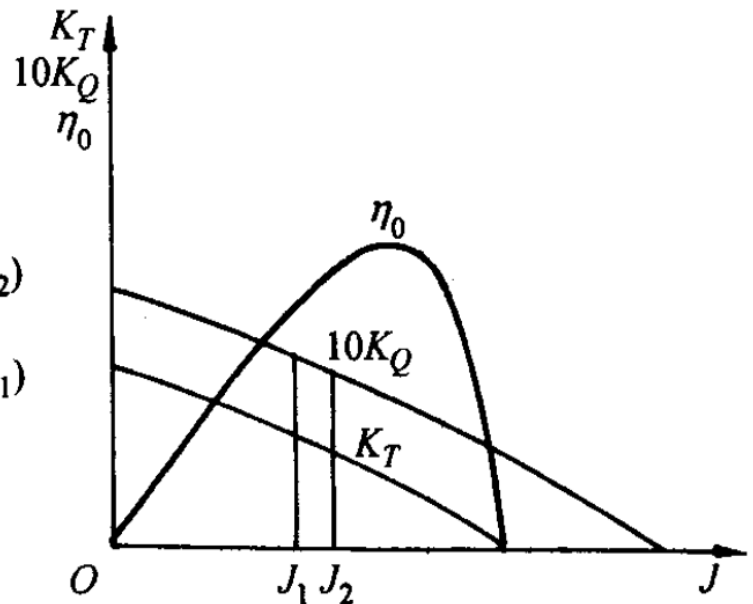
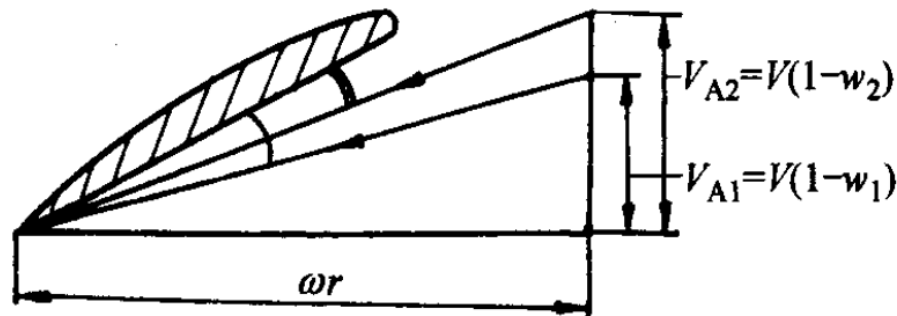
- 由前面知识可知，由伴流分数 ω 建立了船对桨的影响，由推力减额分数 t 建立了桨对船的影响，由相对旋转效率建立了敞水桨和船后桨的关系。
- 船桨相互影响系数 ω ， t ， η_R 的正确选取十分重要



5.4 船桨相互影响系数及尺度效应

船桨相互影响系数的重要性

- 举例说明：设计时选取 ω_1 , t , η_R , 实际的伴流分数为 w_1 , 且 $w_1 > w_2$, 则有 $V_{A1} < V_{A2}$, $J_1 < J_2$
- 实际的 $T_1 > T_2$, $Q_1 > Q_2$, 由此无法吸收实际的功率并发出要求的推力, 从而无法达到预定的航速, 螺旋桨处于轻载状态, 不能充分利用主机功率。反之则处于重载, 对主机不利。





伴流分数的尺度效应

- 船舶的伴流分数经验公式一般具有局限性，实际情况下实船的伴流分数明显小于模型结果，主要是由于雷诺数不同导致的尺度效应。

$$Re_s \gg Re_m \rightarrow \left(\frac{\delta}{L}\right)_s < \left(\frac{\delta}{L}\right)_m$$

由此实船螺旋桨处于摩擦伴流的区域减小，导致总体伴流分数显著减小，即

$$\omega_{fs} < \omega_{fm}$$



伴流分数的尺度效应修正

➤ 总的伴流分数为：

$$\omega = \omega_f + \omega_p + \omega_w$$

由于波浪影响很小， ω_w 可以忽略，而形势伴流分数 ω_p 与推力减额分数 t 大体相当，则可得到：

$$\omega_f = \omega - \omega_p \approx \omega - t$$

推力减额分数的尺度效应较小，可不予考虑，可由模型尺度结果得到，而摩擦伴流分数 ω_f 则可以认为与摩擦阻力系数 C_f 成正比，由此可以确定伴流分数的尺度效应



伴流分数的尺度效应修正

➤ 笹岛秀雄方法：

$$\omega_s = \omega_{pm} + (\omega_m - \omega_{pm}) \frac{C_{fs}}{C_{fm}}$$

其中， $\omega_{pm} = t_m$

➤ 勃拉特-奥赫公式：

$$\omega_s = \omega_{pm} + (\omega_m - \omega_{pm}) \frac{C_{fs}}{C_{fm}}$$

其中， $\omega_{pm} = \frac{t_m}{2} \left[(1 - \omega_m) + \sqrt{(1 - \omega_m)^2 + c_{Th}} \right]$

$$c_{Th} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_o}$$



伴流分数的尺度效应修正

➤ 1978ITTC推荐的伴流修正公式：

$$\omega_s = (t + 0.04) + [\omega_m - (t_m + 0.04)] \frac{C_{fs}(1 + K) + \Delta C_f}{C_{fm}(1 + K)}$$

其中K为形状因子。