



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

# 第九章

# 实船推进性能



## 船模自航试验的重要性

前面章节的内容已经介绍了螺旋桨如何设计的问题，但由于采用大量经验公式或经验数据，得到的结果是否正确可靠，因此有必要进行专门的船模自航试验进行分析；船模自航实验的目的：

- 预估实船性能，给出主机功率、转速和船速之间的关系，预估实船航速，验证是否满足要求
- 判断螺旋桨、主机、船体之间的配合是否良好

此外，根据实船试航结果与相应的船模自航实验数据，进行船模及实船的相关分析，积累资料改进换算方法，使得船模试验预报实船性能更加正确可靠。



## 相似定律

➤ 几何相似

$$\frac{L_s}{L_m} = \frac{D_s}{D_m} = \lambda$$

➤ 运动相似（螺旋桨敞水试验）

$$J_s = J_m$$

➤ 动力相似（阻力试验）

$$Fr_s = Fr_m$$



## 相似定律

由动力相似  $Fr_s = Fr_m$  可得：

$$\frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} \Rightarrow V_m = V_s / \sqrt{\lambda}$$

由运动相似  $J_s = J_m$  可得：

$$\frac{V_{As}}{n_s D_s} = \frac{V_{Am}}{n_m D_m} \Rightarrow \frac{(1 - \omega_s) V_s}{n_s} = \frac{(1 - \omega_m) V_m}{n_m} \lambda$$

$$\Rightarrow n_m = n_s \sqrt{\lambda} \left( \frac{1 - \omega_m}{1 - \omega_s} \right) \Rightarrow n_m = n_s \sqrt{\lambda} \quad (\text{假定伴流无尺度})$$

效应)



## 相似定律

不考虑螺旋桨尺度效应的影响时：

$$J_s = J_m \Rightarrow K_{Ts} = K_{Tm}$$

$$\Rightarrow \frac{T_s}{\rho_s n_s^2 D_s^2} = \frac{T_m}{\rho_m n_m^2 D_s^2}$$

$$\Rightarrow T_m = T_s \frac{\rho_m}{\rho_s} \left( \frac{n_m}{n_s} \right)^2 \left( \frac{D_m}{D_s} \right)^4 = T_s \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{1}{\lambda^3}$$

$$n_m = n_s \sqrt{\lambda}$$



## 相似定律

同理可以得到模型桨与实桨的推力、转矩和收到功率间存在如下关系：

$$T_s = T_m \frac{\rho_m}{\rho_s} \lambda^3$$

$$Q_s = Q_m \frac{\rho_m}{\rho_s} \lambda^4$$

$$P_{Ds} = P_{Dm} \frac{\rho_m}{\rho_s} \lambda^{3.5}$$



## 相似定律

对于船桨系统来说，为了保证对应航速，需要保证：

$$\left. \begin{aligned} T_s(1 - t_s) &= R_s \\ T_m(1 - t_m) &= R_m \end{aligned} \right\}$$

由于  $T_s = T_m \frac{\rho_m}{\rho_s} \lambda^3$ ，假定  $t_s = t_m$ ，则上式成立的条件为：

$$R_s = R_m \frac{\rho_m}{\rho_s} \lambda^3 ?$$

但是，由船舶阻力部分内容可知，船模与实船在  $Fr$  相等时，两者总阻力不存在三次方关系。



## 摩擦阻力的修正

$$R_s = R_{rs} + R_{fs}; \quad R_m = R_{rm} + R_{fm}$$

When  $Fr_m = Fr_s$ ,  $\frac{V_m}{V_s} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$ ,  $C_{rm} = C_{rs}$

but  $C_{fm} > C_{fs}$ , as  $Re_m < Re_s$

$$\frac{R_{rm}}{R_{rs}} = \frac{C_{rm} \frac{1}{2} \rho_m V_m^2 S_m}{C_{rs} \frac{1}{2} \rho_s V_s^2 S_s} = \frac{C_{rm} \rho_m}{C_{rs} \rho_s} \frac{1}{\lambda} \frac{1}{\lambda^2} = \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{1}{\lambda^3}$$

$$\frac{R_{fm}}{R_{fs}} = \frac{C_{fm} \frac{1}{2} \rho_m V_m^2 S_m}{C_{fs} \frac{1}{2} \rho_s V_s^2 S_s} = \frac{C_{fm} \rho_m}{C_{fs} \rho_s} \frac{1}{\lambda} \frac{1}{\lambda^2} > \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{1}{\lambda^3}$$

$$\Rightarrow R_m > R_s \frac{\rho_m}{\rho_s} \frac{1}{\lambda^3}$$



### 摩擦阻力的修正

由上述分析可知，对于船桨系统来说，除了阻力之外，其他力之间都是存在三次方的比例关系。

而剩余阻力也是满足三次方关系的，只有摩擦阻力部分不满足这个关系。为了保证自航试验中各种力都存在缩尺比三次方关系，需对摩擦阻力进行修正，人为将其凑成三次方关系。



## 摩擦阻力的修正

摩擦阻力的修正值 $F_D$  (Skin Friction Correction, SFC)

$$F_D = R_m - \frac{\rho_m R_s}{\rho_s \lambda^3}$$

$$R_s = \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3 (R_m - F_D)$$

这样，在船模自航试验中，预先对船模施加一个拖曳 $F_D$ ，则螺旋桨模型发出的推力 $T_m$ 仅需克服阻力 $(R_m - F_D)$ ，此点即为**实船自航点**，即相当于实际螺旋桨发出的推力 $T_s$ 克服实船的总阻力 $R_s$ 。



## 摩擦阻力的修正

经过摩擦阻力的修正之后，船舶自航试验中的各种力便都存在 $\lambda^3$ 的关系了。假定 $t_s = t_m$ ，则有：

$$\frac{R_s}{1 - t_s} = \frac{R_m - F_D}{1 - t_m} \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3$$

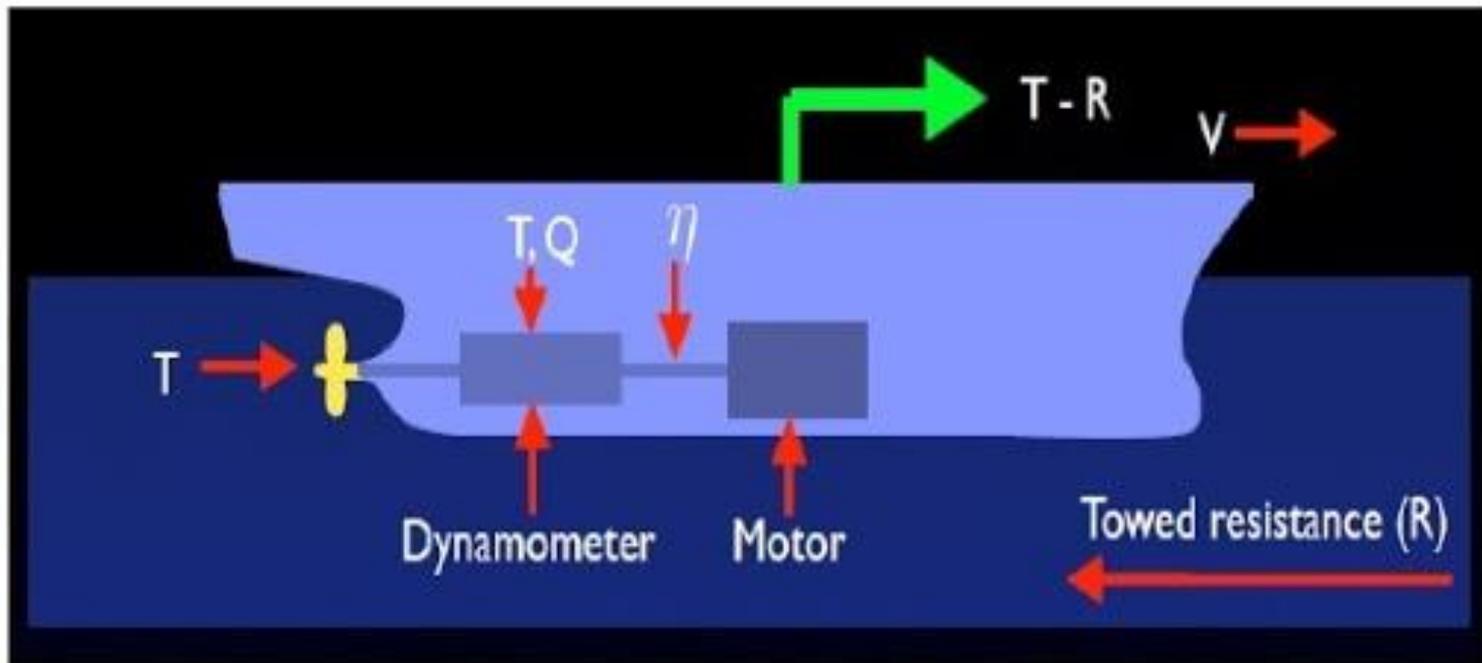
$$T_s = T_m \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3$$

进行摩擦阻力的修正，目的就是使模型桨的载荷与实船螺旋桨相当，这样才能根据船模自航试验的结果预估实船推进性能。



## 自航试验概述

船模自航试验一般是在阻力试验和敞水试验之后进行的，据此可以分析推进效率的各种成分。

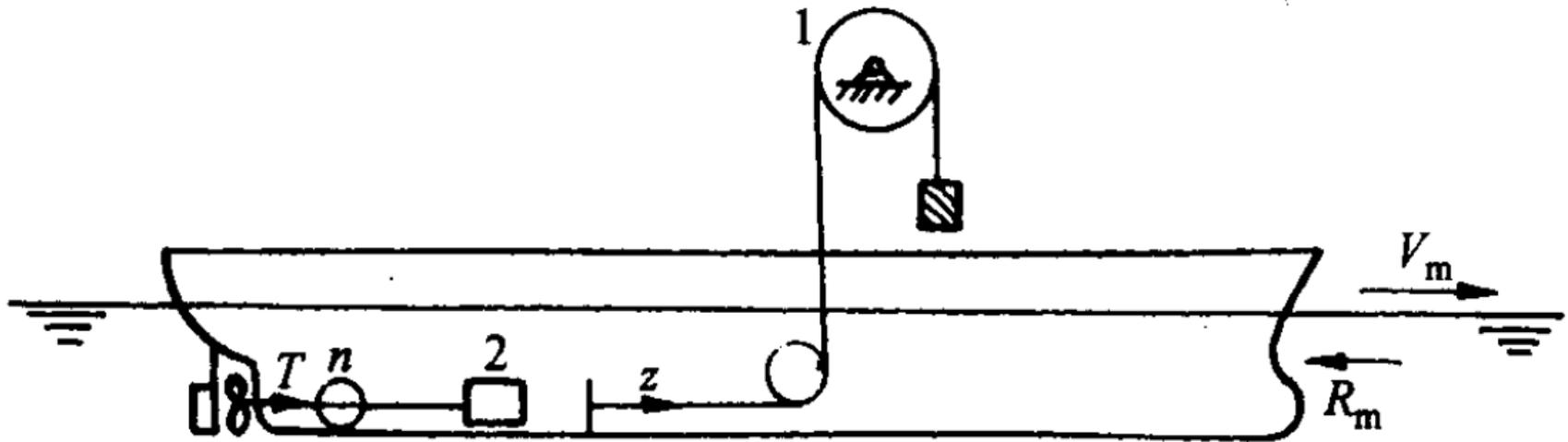




## 自航试验概述

船模在航速 $V_m$ 时阻力 $R_m$ 已由阻力试验测得，在自航试验中，桨模转速 $n$ ，推力 $T$ 及转矩 $Q_B$ 由动力仪2测得，强制力 $z$ 由阻力仪1测得，此时，等速航行的平衡必然满足：

$$T(1 - t_m) + z = R_m$$





### 自航试验概述

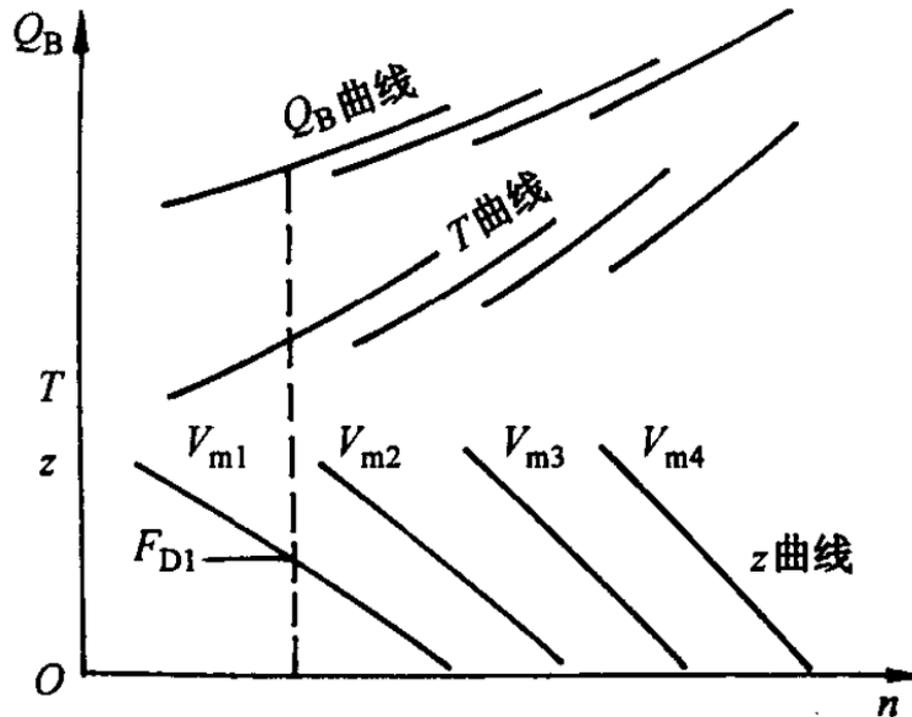
船模自航试验分为纯碎自航法（大陆法）和强制自航法（英国法）两种。

- 纯碎自航法，强制力等于SFC，调节螺旋桨转速达到平衡
- 强制自航法，船模固定在阻力仪上，强制力可以调节，螺旋桨推力和强制力共同作用下，与拖车保持相同的速度 $V_m$ ；对于选定的船模速度，一般需要施加5个强制力；并且一般进行4个航速的测试



## 强制自航法

5个强制力 $z$ 和4个航速的取值范围要能够囊括所需的区间，一般 $z_1=0$ ， $z_2=1/2F_D$ ， $z_3=F_D$ ，其余超过 $F_D$ ；速度方面，一般 $V_3$ 等于实船试航速度， $V_4$ 大一些。





### 船模推进效率成分的分析

根据船模阻力曲线、螺旋桨模型敞水性征曲线和船模自航试验曲线，根据表9-1和表9-2中的步骤进行相当于实船子航点的推进效率分析和推进效率成分的分析。



## 船模推进效率分析

试验的船模速度  $V_m$

相应的船速  $V_s = \sqrt{\lambda} V_m$

船模阻力(阻力试验值)  $R_m$

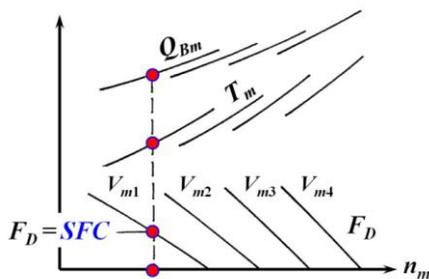
摩擦阻力修正值  $F_D$

据  $F_D$  在自航曲线上查出：

螺旋桨转速  $n$

推力  $T$

转矩  $Q_B$



依靠桨模推力克服之阻力  $R = R_m - F_D$

$$\text{推进效率 } \eta_D = \frac{R V_m}{2\pi Q_B n}$$

$V_{m1}$	$V_{m2}$	$V_{m3}$	$V_{m4}$
$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s3}$	$V_{s4}$
$R_{m1}$	$R_{m2}$	$R_{m3}$	$R_{m4}$
$F_{D1}$	$F_{D2}$	$F_{D3}$	$F_{D4}$
$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
$Q_{B1}$	$Q_{B2}$	$Q_{B3}$	$Q_{B4}$
$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
$\eta_{D1}$	$\eta_{D2}$	$\eta_{D3}$	$\eta_{D4}$



## 船模推进效率成分的分析

船后螺旋桨推力系数  $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$

船后桨的转矩系数  $K_{QB} = \frac{Q_B}{\rho n^2 D^5}$

据  $K_T$  用等推力法查敞水性征曲线,得:

进速系数

$J$

敞水转矩系数

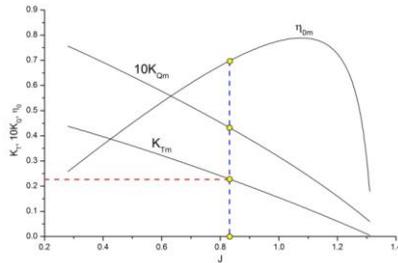
$K_{Q0}$

敞水效率

$\eta_{0m}$

相对旋转效率

$$\eta_{Rm} = K_{Q0} / K_{QB}$$



推力减额系数  $t_m = \frac{T-R}{T}$

伴流分数  $w_m = 1 - \frac{JnD}{V_m}$

船身效率  $\eta_{Hm} = (1-t_m)/(1-w_m)$

推进效率  $\eta_D = \eta_{0m} \eta_{Hm} \eta_{Rm}$

$K_{T1}$	$K_{T2}$	$K_{T3}$	$K_{T4}$
$K_{QB1}$	$K_{QB2}$	$K_{QB3}$	$K_{QB4}$
$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$
$K_{Q01}$	$K_{Q02}$	$K_{Q03}$	$K_{Q04}$
$\eta_{0m1}$	$\eta_{0m2}$	$\eta_{0m3}$	$\eta_{0m4}$
$\eta_{Rm1}$	$\eta_{Rm2}$	$\eta_{Rm3}$	$\eta_{Rm4}$
$t_{m1}$	$t_{m2}$	$t_{m3}$	$t_{m4}$
$w_{m1}$	$w_{m2}$	$w_{m3}$	$w_{m4}$
$\eta_{Hm1}$	$\eta_{Hm2}$	$\eta_{Hm3}$	$\eta_{Hm4}$
$\eta_{D1}$	$\eta_{D2}$	$\eta_{D3}$	$\eta_{D4}$



- 船模自航试验的重要性
- 船模自航试验相似定律
- 船模与实船的总阻力关系
- 摩擦阻力修正
- 自航试验的形式
- 纯粹自航和强制自航
- 推进效率和各成分的分析



### 采用备用螺旋桨模型进行自航试验

- 水池中库存的模型，选用大体合适的桨模可以提供船型系列有关的各推进效率成分资料
- 新设计的船舶来说，可以节省时间，并且备用桨模所得的试验结果可以满足工程需求
- 备用桨的选择原则：螺距比、叶数、盘面比尽可能与设计桨接近，即使有差别，问题也不大，但是务必保证直径与设计桨一致
- 利用备用桨的敞水性征曲线分析推进系数和各效率的成分



实船性能预报是指根据船模自航试验结果给出实船航速、螺旋桨转速和收到功率之间的关系。

实船性能预估的方法：

- 1966 ITTC推荐法  $(1+x)$ 、 $K_2$
- $\Delta C_T$   $\Delta \omega$ 法
- 1978 ITTC标准方法



1966 ITTC推荐的实船性能预估方法：

- $(1+x)$  表征实船阻力的尺度效应
- $K_2$  表征伴流的尺度效应

$$P_{Ds} = \frac{P_{Es}(1+x)}{\eta_{Dm}}$$

$$N_s = K_2 n_m / \sqrt{\lambda}$$

$$V_s = V_m \sqrt{\lambda}$$

由于该方法在分析中物理意义不清晰，后废弃不用。



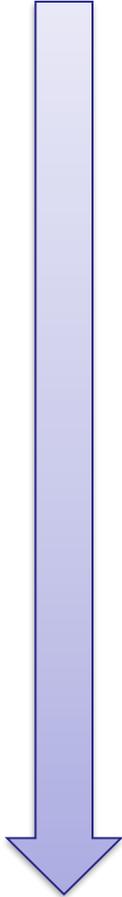
### $\Delta C_T$ $\Delta \omega$ （相关因子）法：

- $\Delta C_T$  表征实船阻力的尺度效应
- $\Delta \omega$  表征伴流的尺度效应
- 20世纪60-70年代，日本和北欧一些国家采用这种方法，是根据经验统计得到的修正数据
- 相对旋转效率 $\eta_R$ 和推力减额分数 $t$  不修正
- 敞水性征曲线有修正和不修正两种意见



## 9.2 实船性能预估

### $\Delta C_T$ $\Delta \omega$ (相关因子) 法预估步骤



$V_s = V_m \lambda^{1/2}$	$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s3}$	$V_{s4}$
$[C_{Ts}]_A = [C_{Ts}]_m + \Delta C_T$	...	...	...	...
$R_{Ts} = [C_{Ts}]_A \rho_s V_s^2 S_s / 2$	...	...	...	...
$T_s = R_{Ts} / (1 - t_m)$	...	...	...	...
$w_s = w_m + \Delta w$	...	...	...	...
$V_A = V_s (1 - w_s)$	...	...	...	...
$K_T / J^2 = T_s / (\rho_s V_A^2 D_s^2)$	...	...	...	...
<p>From <math>K_T / J^2</math> curve</p>	$\eta_{01}$	$\eta_{02}$	$\eta_{03}$	$\eta_{04}$
	$K_{Q1}$	$K_{Q2}$	$K_{Q3}$	$K_{Q4}$
	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$
$\eta_{Ds} = \eta_0 \eta_{Rm} (1 - t_m) / (1 - w_s)$	$\eta_{Ds1}$	$\eta_{Ds2}$	$\eta_{Ds3}$	$\eta_{Ds4}$
$N_s = V_A / (J D_s)$	$N_{s1}$	$N_{s2}$	$N_{s3}$	$N_{s4}$
$P_{Es} = R_{Ts} V_s$	...	...	...	...
$P_{Ds} = P_{Es} / \eta_{Ds}$	$P_{Ds1}$	$P_{Ds2}$	$P_{Ds3}$	$P_{Ds4}$

 $\Delta C_T \Delta \omega$  (相关因子) 法预估步骤

实船航速 $V_s = \sqrt{\lambda} V_m$	$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s3}$	$V_{s4}$
从船模换算所得实船阻力系数				
$[C_{Ts}]_m$	$[C_{Ts}]_{m1}$	$[C_{Ts}]_{m2}$	$[C_{Ts}]_{m3}$	$[C_{Ts}]_{m4}$
实船的实际总阻力系数				
$[C_{Ts}]_A = [C_{Ts}]_m + \Delta C_T$	$[C_{Ts}]_{A1}$	$[C_{Ts}]_{A2}$	$[C_{Ts}]_{A3}$	$[C_{Ts}]_{A4}$
实船的总阻力				
$R_{Ts} = \frac{1}{2} \rho S V_s^2 [C_{Ts}]_A$	$R_{Ts1}$	$R_{Ts2}$	$R_{Ts3}$	$R_{Ts4}$
要求螺旋桨发出的推力				
$T_s = \frac{R_{Ts}}{1 - t_m}$	$T_{s1}$	$T_{s2}$	$T_{s3}$	$T_{s4}$
船模伴流分数 $w_m$	$w_{m1}$	$w_{m2}$	$w_{m3}$	$w_{m4}$
实船伴流分数 $w_s = w_m + \Delta w$	$w_{s1}$	$w_{s2}$	$w_{s3}$	$w_{s4}$
螺旋桨进速 $V_A = (1 - w_s) V_s$	$V_{A1}$	$V_{A2}$	$V_{A3}$	$V_{A4}$
$K_T / J^2 = \frac{T_s}{\rho_s V_A^2 D_s^2}$	$(K_T / J^2)_1$	$(K_T / J^2)_2$	$(K_T / J^2)_3$	$(K_T / J^2)_4$

 $\Delta C_T \Delta \omega$  (相关因子) 法预估步骤

实桨的敞水效率	$\eta_0$	$\eta_{01}$	$\eta_{02}$	$\eta_{03}$	$\eta_{04}$
实桨的进速系数	$J$	$J_1$	$J_2$	$J_3$	$J_4$
实桨的敞水转矩系数	$K_Q$	$K_{Q1}$	$K_{Q2}$	$K_{Q3}$	$K_{Q4}$
实船推进效率	$\eta_{Ds} = \eta_0 \eta_{Rm} \frac{1-t_m}{1-w_s}$	$\eta_{Ds1}$	$\eta_{Ds2}$	$\eta_{Ds3}$	$\eta_{Ds4}$
实桨转速	$N_s = \frac{V_A}{JD_s}$	$N_{s1}$	$N_{s2}$	$N_{s3}$	$N_{s4}$
实船有效马力	$P_{Es} = \frac{R_{Ts} V_s}{75}$	$P_{Es1}$	$P_{Es2}$	$P_{Es3}$	$P_{Es4}$
实桨收到马力	$P_{Ds} = \frac{P_{Es}}{\eta_{Ds}}$	$P_{Ds1}$	$P_{Ds2}$	$P_{Ds3}$	$P_{Ds4}$



## $\Delta C_T$ $\Delta \omega$ (相关因子) 法预估步骤

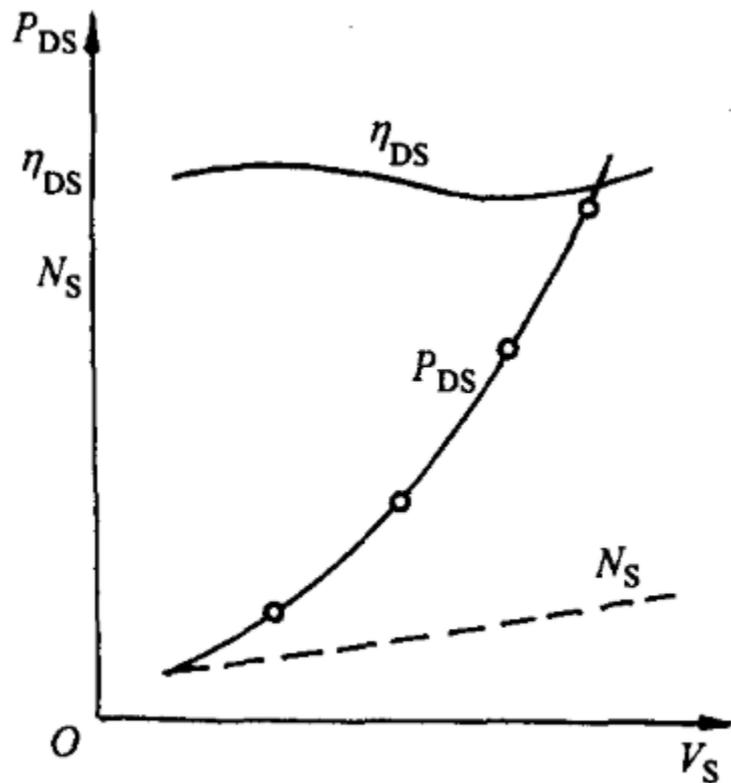


图 9-3 实船性能预估曲线



### 1978 ITTC 实船性能预估标准方法：

- 船模总阻力系数为： $C_{Tm} = (1 + K)C_{Fm} + C_{Rm}$
- 通过1957 ITTC公式计算摩擦阻力系数， $1+K$ 为形状因子，船模跟实船的剩余阻力系数相等
- 同时考虑了粗糙度的影响
- 舳龙骨的影响
- 空气阻力
- 敞水螺旋桨的性能修正方法参见9-4-2



### 1978 ITTC实船性能预估标准方法：

- 船模自航试验结果采用等推力法求出相当于实船自航点处的模型推进效率成分
- 实船伴流分数按下式计算：

$$\omega_s = (t_m + \omega_R) + [\omega_m - (t_m + \omega_R)] \frac{(1 + K)C_{Fs} + \Delta C_F}{(1 + K)C_{Fm}}$$

- 推力减额分数与相对旋转效率无尺度效应
- 实船性能的预估步骤与 $\Delta C_T$   $\Delta \omega$ 方法相同

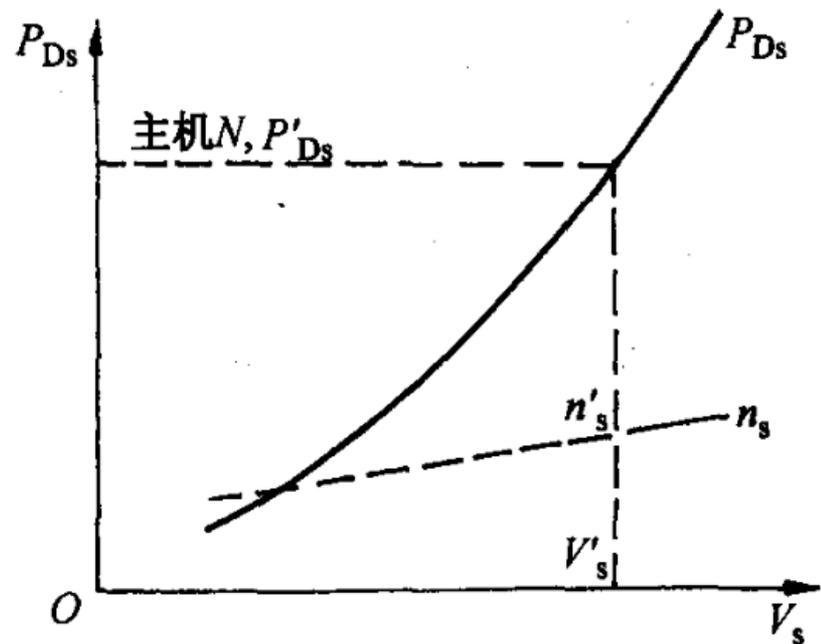


## 9.3 实船试航

### 实船试航的目的:

- 检测能否达到设计航速
- 检查船体-螺旋桨-主机的匹配是否良好

- $N = n'_s$  , 良好
- $N > n'_s$  , 负荷重
- $N < n'_s$  , 负荷轻





### 实船试航需要关注的事项：

- 实船装载条件
- 试航过程的海况条件
- 试航中需要记录船舶航速、功率、转速、风速、流速等信息
- 根据试航结果再进行修正