

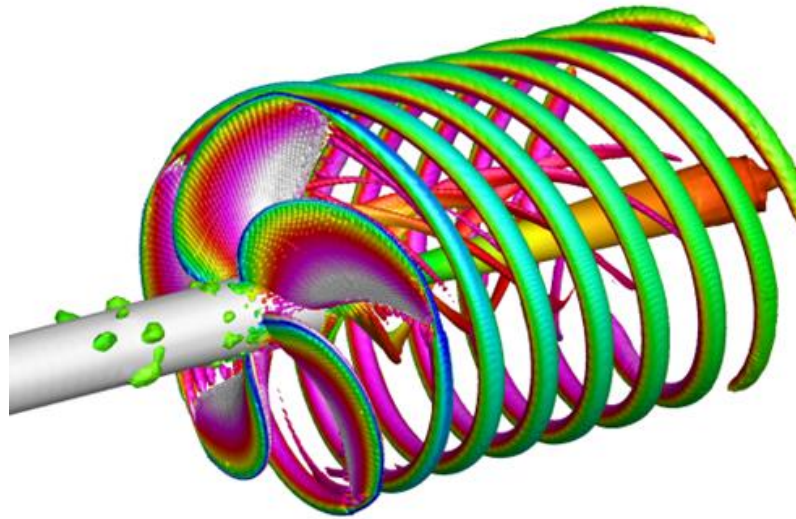


上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

第四章

螺旋桨模型的敞水试验





敞水试验：螺旋桨模型单独地在均匀水流中的试验。

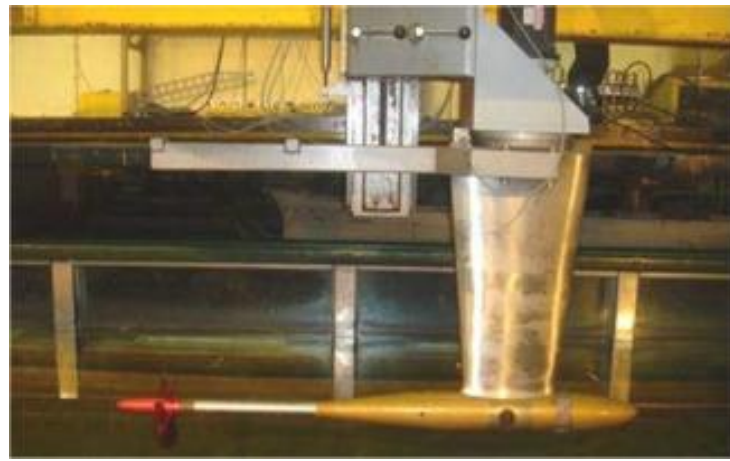
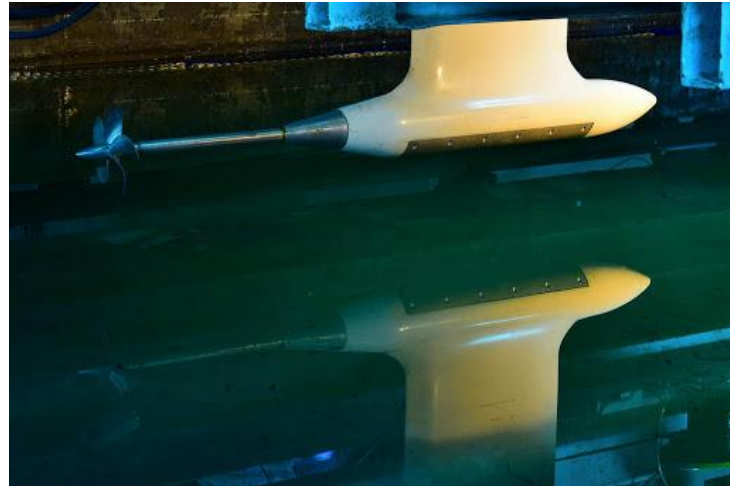
进行螺旋桨敞水试验的目的：

- 进行系列试验，绘制图谱供螺旋桨设计使用；
- 根据系列试验结果系统分析螺旋桨各主要几何参数对性能的影响，供设计选择正确参数，并为改进优化提供方向；
- 校核和验证理论方法的可靠性；
- 配合自航试验，分析推进效率成分，比较优劣，便于选择最佳的螺旋桨。



螺旋桨敞水试验的常见方式：

- 拖曳水池试验
- 循环水槽
- 空泡水筒





4.1 螺旋桨相似定律

模型螺旋桨结果怎么应用于实尺度螺旋桨？

- 螺旋桨相似理论（量纲分析）
- 需要满足几何相似？运动相似？动力相似？
- 尺度效应



影响螺旋桨水动力性能的因素

- 螺旋桨几何（直径 D ）
- 运动物理量（进速 V_A ，转速 n ）
- 流体物理量（密度 ρ ，运动粘性系数 ν ）
- 重力加速度 g

由此可得推力和以上各物理量的关系式：

$$T = f_1(D, n, V_A, \rho, \nu, g) = kD^a n^b V_A^c \rho^d \nu^e g^f \quad (4-1)$$



4.1 螺旋桨相似定律

将4-1中的变量以基本量（长度L，质量M，时间T）来表示，可得

$$\frac{ML}{T^2} = kL^a \left(\frac{1}{T}\right)^b \left(\frac{L}{T}\right)^c \left(\frac{M}{L^3}\right)^d \left(\frac{L^2}{T}\right)^e \left(\frac{L}{T^2}\right)^f$$
$$\Rightarrow \left. \begin{array}{l} M: \quad \quad \quad 1 = d \\ L: \quad 1 = a + c - 3d + 2e + f \\ T: \quad -2 = -b - c - e - 2f \end{array} \right\} \quad (4-2)$$

$$\Rightarrow \left. \begin{array}{l} d = 1 \\ a = 4 - c - 2e - f \\ b = 2 - c - e - 2f \end{array} \right\} \quad (4-3)$$



4.1 螺旋桨相似定律

将4-3带入4-1中可得:

$$\begin{aligned} T &= kD^{4-c-2e-f} n^{2-c-e-2f} V_A^c \rho^1 \nu^e g^f \\ &= k\rho n^2 D^4 \left(\frac{V_A}{nD}\right)^c \left(\frac{nD^2}{\nu}\right)^{-e} \left(\frac{n^2 D^2}{gD}\right)^{-f} \\ &= \rho n^2 D^4 f_1\left(\frac{V_A}{nD}, \frac{nD^2}{\nu}, \frac{n^2 D^2}{gD}\right) \end{aligned}$$

其中, $\frac{V_A}{nD}$, $\frac{nD^2}{\nu}$, $\frac{n^2 D^2}{gD}$ 均为无因次化参数, 分别表征不同的物理含义。



4.1 螺旋桨相似定律

也可写成无因次化关系式：

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} = f_1\left(\frac{V_A}{nD}, \frac{nD^2}{v}, \frac{n^2 D^2}{gD}\right)$$

同理：

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} = f_2\left(\frac{V_A}{nD}, \frac{nD^2}{v}, \frac{n^2 D^2}{gD}\right)$$

$$\eta_0 = \frac{K_T}{K_Q} \frac{J}{2\pi} = f_3\left(\frac{V_A}{nD}, \frac{nD^2}{v}, \frac{n^2 D^2}{gD}\right)$$

式中 f_1 、 f_2 和 f_3 与螺旋桨的形状相关，几何相似则上述函数关系就一致，如果再满足动力相似则函数内的各无因次数也相同。



4.1 螺旋桨相似定律

无因次化关系式中各项的物理意义：

- $\frac{V_A}{nD}$ 为进速系数J，表征运动相似；
- $\frac{nD^2}{\nu}$ 为雷诺数Re，即雷诺数相似，表征动力相似中的粘性力相似；
- $\frac{n^2 D^2}{gD}$ 相当于Froude数 ($Fr = \frac{\pi n D}{\sqrt{gD}}$)，表征重力相似，代表兴波对性能的影响，说明与桨浸没深度有关，一般桨轴沉没深度 $h_s > 0.625D$ 时，可忽略不计。



4.1 螺旋桨相似定律

综上，当桨轴沉没较深时，水动力性能只与进速系数J和雷诺数Re相关：

- 几何相似，即 $\frac{D_s}{D_m} = \lambda$ ；
- 进速系数相似，即 $\frac{V_{Am}}{n_m D_m} = \frac{V_{As}}{n_s D_s} \Rightarrow \frac{V_{Am}}{V_{As}} = \frac{n_m}{n_s} \cdot \frac{1}{\lambda}$ ；
- 雷诺数相似，即 $\frac{n_m D_m^2}{\nu_m} = \frac{n_s D_s^2}{\nu_s}$ ，由于模型尺度和实尺度下的运动粘度系数差别很小，近似 $\nu_m = \nu_s$ ，则上式变为

$$\frac{n_m}{n_s} = \frac{D_s^2}{D_m^2} = \lambda^2。$$



4.1 螺旋桨相似定律

如果要保持桨模和实桨进速系数 J 和雷诺数 Re 都相等，则必须满足：

$$\left. \begin{aligned} \frac{n_m}{n_s} &= \lambda^2 \\ \frac{V_{Am}}{V_{As}} &= \frac{n_m}{n_s} \cdot \frac{1}{\lambda} = \lambda \end{aligned} \right\}$$

- 此时， $T_m = K_T \rho n_m^2 D_m^4 = K_T \rho n_s^2 \lambda^4 \cdot \frac{D_s^4}{\lambda^4} = T_s$
- 即桨模发出的推力 T_m 将等于实桨发出的推力 T_s 。显然无法同时满足（转速和进速都将过大，推力太大也无法测量）
- 因此通常情况下，敞水试验只需满足进速系数相同，雷诺数则只需要求超过临界值。



临界雷诺数

由于模型试验中无法保证雷诺数相似，若试验中雷诺数过低，桨叶切面上的流动状态与实桨不同，则无法得到真实的性能，因此必须保证模型桨敞水试验中的最低雷诺数，即临界雷诺数。

1978年ITTC（国际船模水池试验会议）规定，螺旋桨的雷诺数以0.75R处叶切面的弦长及其合成速度来表示，即：

$$Re = \frac{b_{0.75R} \sqrt{V_A^2 + (0.75\pi nD)^2}}{\nu}$$

临界雷诺数 $Re_{cr} = 3 \times 10^5$ ，当前ITTC对于临界雷诺数的规定是越高越好。



尺度效应

由于模型试验中雷诺数不相等（桨模雷诺数范围 $Re_m \approx 10^5 \sim 10^6$ ，实桨雷诺数一般在 $Re_s \approx 10^7 \sim 10^9$ ），导致粘性力存在差别，出现桨模与实桨水动力性能的差别，由于雷诺数不同导致的水动力差别称为尺度效应（Scale Effect）。

一般情况下，雷诺数对升力影响不大，对由于粘性导致的阻力系数影响较大，由此，螺旋桨推力的尺度效应较小，而扭矩的尺度效应较为明显。

在同一进速系数下，桨模和实桨的水动力性能差别如下：

$$\left. \begin{array}{l} K_{Tm} < K_{Ts} \\ K_{Qm} > K_{Qs} \\ \eta_{0m} < \eta_{0s} \end{array} \right\}$$



尺度效应的修正方法

- **不修正**，认为尺度效应主要影响阻力，实桨有粗糙度，而光滑桨模的阻力系数可抵消由于实桨粗糙增加的阻力成分；
- **只修正 K_Q** ，认为尺度效应对 K_T 的影响可以忽略，修正方

式为：
$$\frac{K_{Qm}}{K_{Qs}} = \left(\frac{Re_m}{Re_s} \right)^{-2.58} ;$$

- **1978 ITTC推荐修正方法**，结合了经验、半经验半理论的修正方法，对推力系数和扭矩系数均进行修正。



4.2 临界雷诺数及尺度效应

ITTC尺度效应修正公式

$$\begin{cases} K_{Ts} = K_{Tm} - \Delta K_T \\ \Delta K_T = -0.3 \Delta C_D \left(\frac{P}{D}\right) \left(\frac{b}{D}\right) Z \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_{Qs} = K_{Qm} - \Delta K_Q \\ \Delta K_Q = 0.25 \Delta C_D \left(\frac{b}{D}\right) Z \end{cases}$$

其中， Z 为桨叶数， P/D 为0.75R处螺距比， b/D 为0.75R处切面的弦长直径比， ΔC_D 为桨模与实桨在0.75R处切面的阻力系数之差： $\Delta C_D = C_{Dm} - C_{Ds}$ 。



4.2 临界雷诺数及尺度效应

阻力系数的修正公式

$$C_{Dm} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{b} \right) \left(\frac{0.044}{Re^{1/6}} - \frac{5}{Re^{2/3}} \right)$$

$$C_{Ds} = 2 \left(1 + 2 \frac{t}{b} \right) \left(1.89 + 1.62 \log \frac{b}{K_p} \right)^{-2.5}$$

其中， t/b 为0.75R处切面的厚度比， K_p 为实桨的表面粗糙度，一般可取 $K_p = 3 \times 10^{-5} m$ 。

一般情况下，推力系数的影响可以忽略，转矩系数的影响为1%左右。



4.2 临界雷诺数及尺度效应

一般情况下，推力系数的影响可以忽略，转矩系数的影响为1%左右。

表 4-1 “风光”轮螺旋桨敞水性征曲线修正前后的数值

J	K_T		$10K_Q$	
	修正前	修正后	修正前	修正后
0.10	0.3726	0.3728	0.5127	0.5100
0.20	0.3381	0.3385	0.4732	0.4700
0.30	0.3014	0.3018	0.4312	0.4270
0.40	0.2623	0.2627	0.3862	0.3820
0.50	0.2209	0.2214	0.3379	0.3340
0.60	0.1773	0.1777	0.2857	0.2820
0.70	0.1316	0.1319	0.2294	0.2260
0.80	0.0836	0.0840	0.1684	0.1650



螺旋桨敞水试验方法

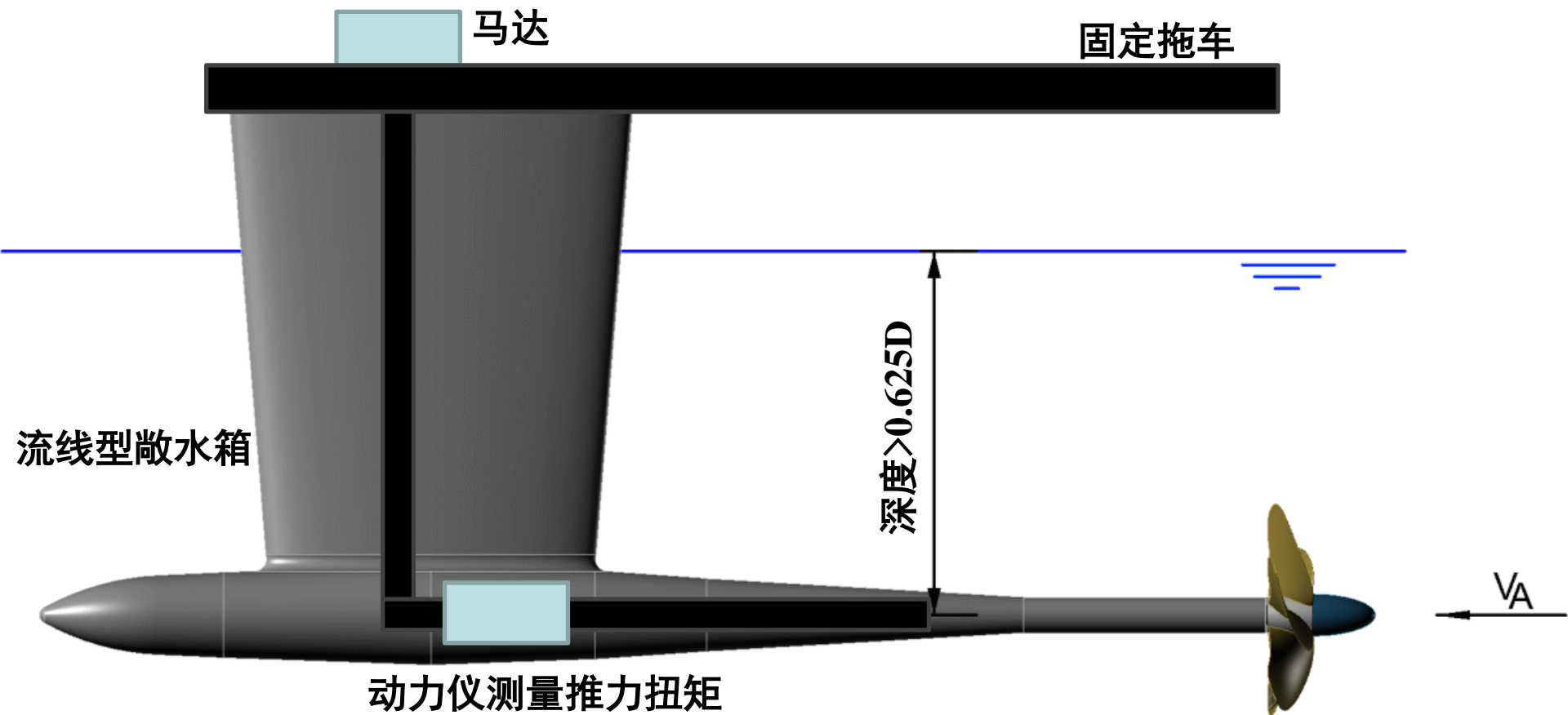
敞水试验为了获得螺旋桨的水动力性能，需要进速系数 J 有足够大的变化范围，目前主要采用如下两种方法得到不同的 J 值：

1. 保持桨模转速 n 不变，改变不同的进速 V_A ，通常在拖曳水池中完成；
2. 保持桨模的进速 V_A 不变，改变螺旋桨转速 n ，通常在空泡水筒中完成，无法得到系柱状态（ $J=0$ ），且转速不可能无限大， J 的变化范围受限。



4.3 敞水试验及数据分析表达

螺旋桨敞水试验（拖曳水池试验）





螺旋桨敞水试验

试验工况设计的要求：

1. 满足几何相似；
2. 满足进速系数相等；
3. 桨轴浸没深度越大越好；
4. 桨模的流动状态需要满足大于临界雷诺数的要求

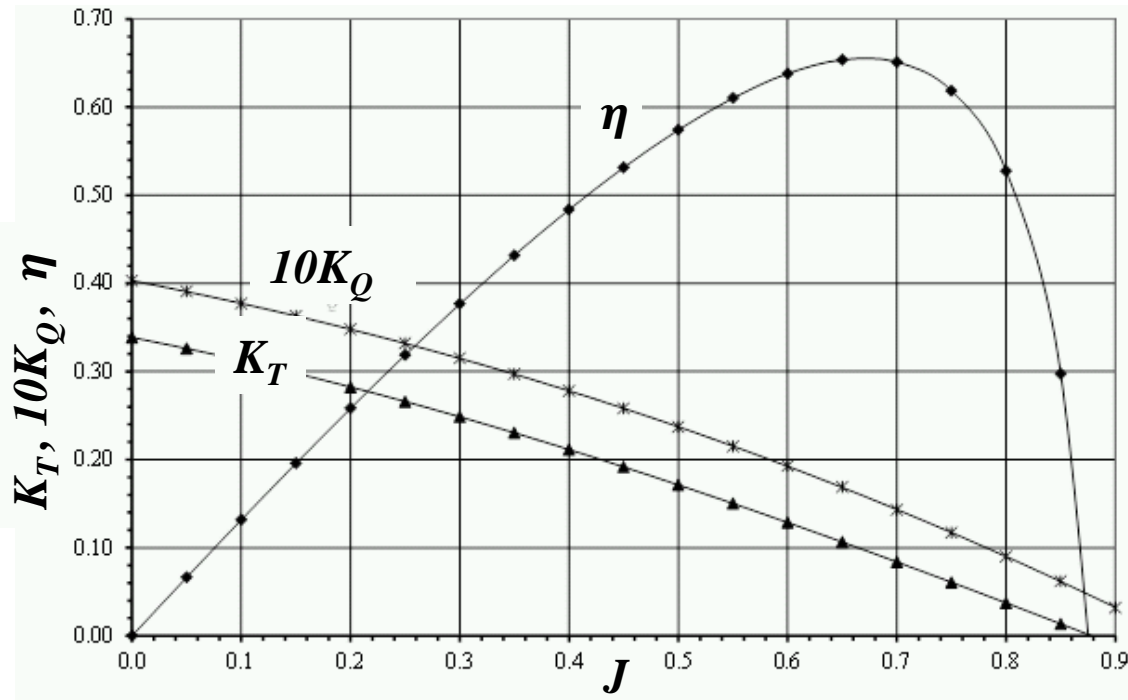
试验准备的注意事项：

1. 根据几何尺寸、拖车的最大速度和临界雷诺数计算桨模的最小转速；
2. 估算系柱状态 $J=0$ 工况下的最大推力和吸收的转矩，用于选择量程合适的动力仪。



螺旋桨敞水试验的数据表达

根据试验中测量得到的进速 V_A 、转速 n 及其对应的推力和扭矩换算成无因次系数 J 、 K_T 、 K_Q 、 η ，然后绘制以进速系数 J 为横坐标的敞水特性曲线。





螺旋桨模型系列试验

敞水试验的重要任务之一是进行螺旋桨模型的系列试验，并将结果绘制成专门图谱，以供设计和分析使用；

所谓螺旋桨系列是指一定类型的螺旋桨按照一定次序变更某些主要参数，以构成一个螺旋桨系列，同一系列螺旋桨的特征如下：

- 桨叶数和盘面比相同；
- 螺距比不同，一般5-6个为一组。



螺旋桨模型系列试验

通常将一组螺旋桨的敞水特性曲线绘制在一张图中；

为了便于螺旋桨设计，还需将系列试验结果绘制成专用的螺旋桨设计图谱（详细内容第8章进行介绍）。

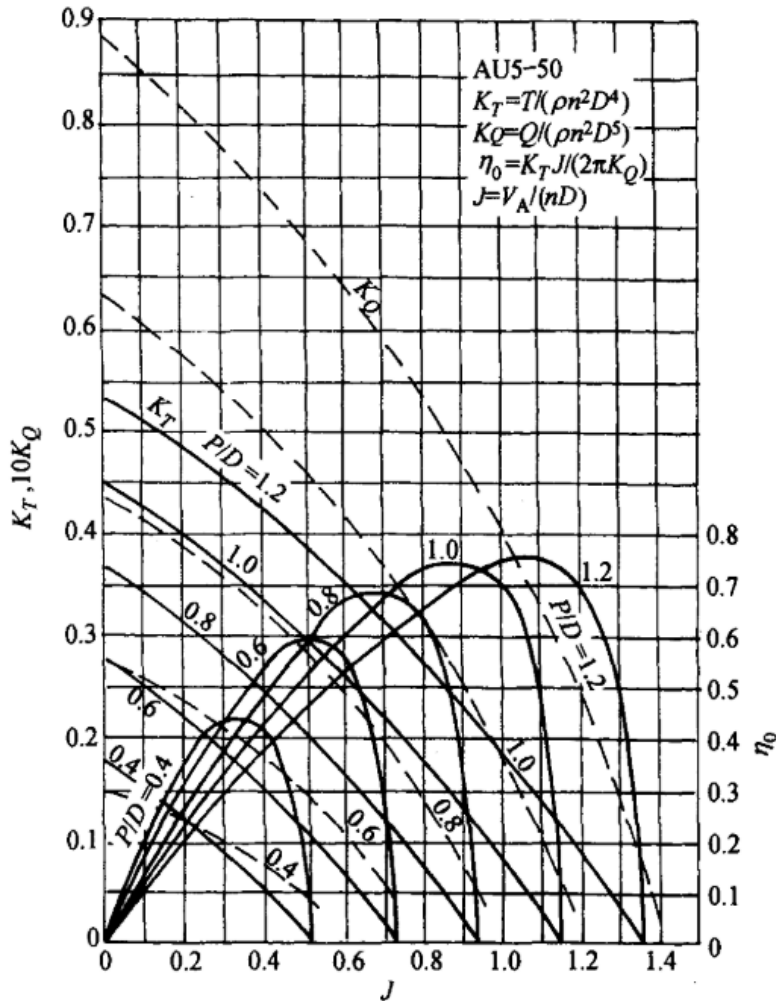


图 4-4 AU5-50 螺旋桨敞水性征曲线组



螺旋桨模型系列试验

- 进行快速和可靠的螺旋桨设计；
- 设计一个螺旋桨系列试验花费大量的时间和成本；
- 成熟的螺旋桨系列在20世纪中叶设计完成，并且无法直接用于大侧斜螺旋桨的设计。

现有的性能优良的螺旋桨系列

- 荷兰B型螺旋桨、日本AU型螺旋桨，适用于商船；
- 英国高恩螺旋桨（Gawn Series），适用于水面高速舰船。