



上海交通大学

Shanghai Jiao Tong University

第八章

螺旋桨图谱设计



8.1 螺旋桨设计方法

螺旋桨设计是船舶设计中的一个重要组成部分

- **根据阻力试验可以得到有效功率曲线**
- **在此基础上，需要设计匹配的最佳性能的螺旋桨**
- **既能达到最大航速，又使主机消耗的功率最小**

根据螺旋桨设计的问题，大致可以分为两类：一种是新设计的船舶根据任务航速要求设计合适螺旋桨，然后反推出主机功率；一种是主机型号已经选定，需要求得所能达到的最大航速和螺旋桨尺寸。



螺旋桨的初步设计

- 已知船速 V ，有效功率 P_E ，根据选定的螺旋桨直径 D ，确定螺旋桨的最佳转速 n 、效率 η_0 、螺距比 P/D 和主机功率 P_S ；
- 已知船速 V ，有效功率 P_E ，根据给定的转速 n ，确定螺旋桨的最佳直径 D 、效率 η_0 、螺距比 P/D 和主机功率 P_S



8.1 螺旋桨设计方法

螺旋桨的终结设计

针对一般的船舶设计，最后选定的主机功率与转速往往与初步设计不同。

- 已知主机功率 P_s 、转速 n 和有效功率曲线，确定所能达到的最大航速 V 、螺旋桨直径 D 、螺距比 P/D 和效率 η_0 ；

在造船实践中，一般采用标准机型，所以实际设计中，大多数都是这类设计问题。



8.1 螺旋桨设计方法

目前螺旋桨的设计方法

- 图谱设计法
- 环流理论设计法

本章重点讲解船舶螺旋桨的图谱设计方法，说明设计的基本原理。



8.1 螺旋桨设计方法

图谱设计法

- 利用系列螺旋桨敞水试验绘制成专用图谱；
- 计算方便，易于掌握，选取合适图谱的设计结果精度较好，应用广泛；
- 不能考虑到尾流不均匀性的影响；
- 受到系列桨型的限制，无法对大侧斜等特殊螺旋桨形式进行设计



环流理论设计法

- 包括升力线设计方法、升力面设计方法、面元设计方法等；
- 能够考虑到尾流不均匀性的影响，设计出各半径处适宜的螺距和切面形状；
- 不受系列桨型的限制，可以对大侧斜等特殊螺旋桨形式进行设计；
- 基于势流理论，无法精确考虑粘性作用

目前随着计算流体力学CFD方法的飞速发展，采用CFD技术模拟螺旋桨水动力及复杂流动可以很好的进行螺旋桨性能预报和优化设计。



螺旋桨系列

- 螺旋桨系列是具有几何特征相似的一组螺旋桨构成
- 同一系列螺旋桨具有相同的径向弦长分布、纵斜、侧斜、螺距；
- 切面特征，包括拱度、厚度分布都是固定的；
- 桨叶数目、盘面比、螺距比是变化的。

知名的螺旋桨系列

- 荷兰楚思德B型螺旋桨
- 日本AU型螺旋桨
- 英国高恩系列螺旋桨（高速船）



8.2 螺旋桨图谱及其应用

螺旋桨系列

TABLE 6.3 Fixed Pitch, Non-ducted Propeller Series Summary

Series	Number of Propellers in Series	Range of Parameters			D(mm)	r_h/R	Cavitation Data	
		Z	A_E/A_O	P/D			Available	Notes
Wageningen B-series	≈ 120	2–7	0.3–1.05	0.6–1.4	250	0.169	No	Four-bladed propeller has non-constant pitch distribution
Au-series	34	4–7	0.4–0.758	0.5–1.2	250	0.180	No	
Gawn-series	37	3	0.2–1.1	0.4–2.0	508	0.200	No	
KCA-series	≈ 30	3	0.5–1.25	0.6–2.0	406	0.200	Yes	
Ma-series	32	3 and 5	0.75–1.20	1.0–1.45	250	0.190	Yes	
Newton–Rader series	12	3	0.5–1.0	1.05–2.08	254	0.167	Yes	
KCD-series	24	3–6 (mainly 4)	0.587 principal 0.44–0.8	0.6–1.6	406	0.200	Yes	Propellers not geosyms
Meridian series	20	6	0.45–1.05	0.4–1.2	305	0.185	Yes	Propellers not geosyms



AU型螺旋桨设计图谱

- 由日本运输技术研究所发展的螺旋桨系列，叶数包括3~6叶。
- 系列螺旋桨图谱是由敞水曲线组获得
- 由于螺旋桨设计中，一般螺旋桨直径 D 和转速 n 不可能同时给定，因此需要讲敞水曲线绘制成专门的图谱， $B - \delta$ 图谱是最为常用的一种

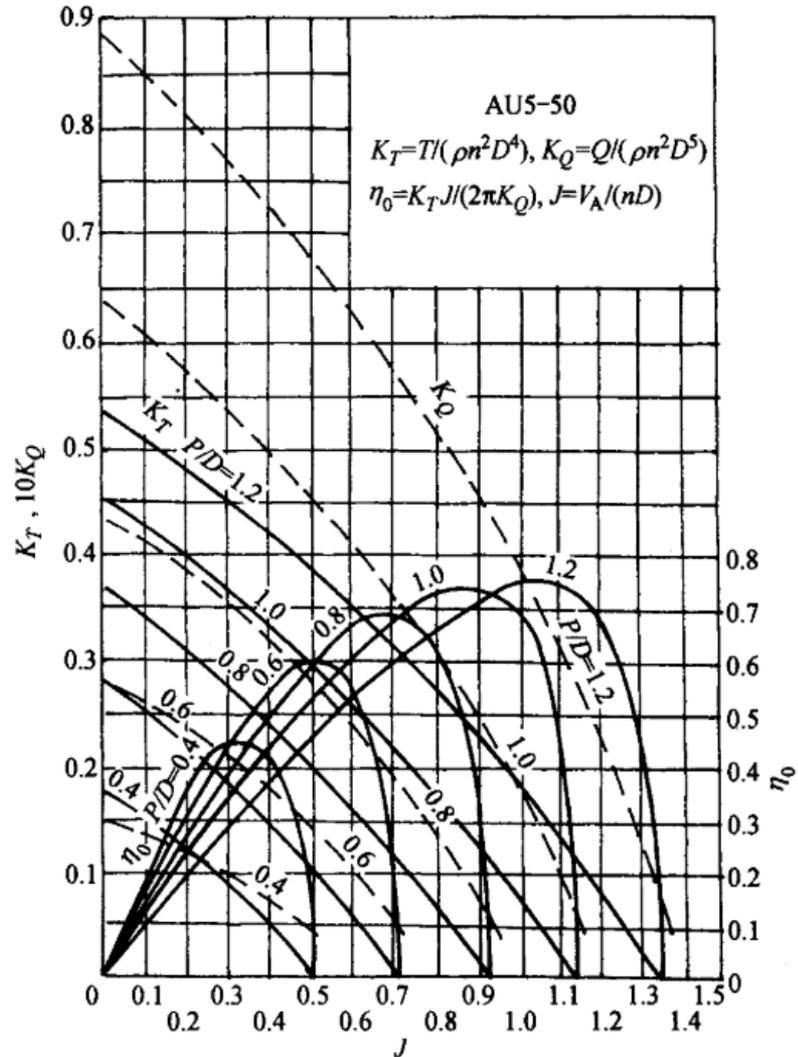
本节将以AU型图谱为例详细介绍图谱的生成方法



8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU型螺旋桨设计图谱

- AU5-50敞水曲线组
- 敞水曲线中包含J, 即同时有直径D和转速n, 因此需要通过敞水曲线进行转换





8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU型螺旋桨设计图谱

- 针对终结设计来说，已知主机功率和转速，因此计算中不应包含未知量D。（采用工程制单位）

$$Q = K_Q \rho n^2 D^5 = \frac{75 P_D}{2\pi n}$$

$$D = V_A / (nJ)$$

$$\rightarrow K_Q \rho n^2 \left[\frac{V_A}{nJ} \right]^5 = \frac{75 P_D}{2\pi n}$$

$$\rightarrow \frac{2\pi \rho K_Q}{75 J^5} = \frac{P_D n^2}{V_A^5}$$

$$\rightarrow \sqrt{\frac{2\pi \rho K_Q}{75 J^5}} = \frac{P_D^{1/2} n}{V_A^{2.5}}$$



8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU型螺旋桨设计图谱

- 针对终结设计来说，已知主机功率和转速，因此计算中不应包含未知量D。

$$\sqrt{\frac{2\pi\rho K_Q}{75J^5}} = \frac{P_D^{1/2} n}{V_A^{2.5}}$$

其中 P_D 单位为公制马力 (hp)， V_A 单位m/s，转速单位r/s，若 V_A 以节 (kn)，转速以N(r/min)代替，则上式可以写为：

$$B_P = \frac{NP_D^{0.5}}{V_A^{2.5}} = 33.30 \frac{K_Q^{0.5}}{J^{2.5}}$$

B_P 就是B型图谱所采用的计算系数，称为收到功率系数，或简称功率系数。



AU型螺旋桨设计图谱

- 功率系数 B_P

$$B_P = \frac{NP_D^{0.5}}{V_A^{2.5}} = 33.30 \frac{K_Q^{0.5}}{J^{2.5}}$$

- 引入直径系数 δ

$$\delta = \frac{ND}{V_A} = \frac{30.86}{J}$$

B_P 和 δ 是螺旋桨设计中最基本的计算系数，其中的参数意义和单位如下：

N 为螺旋桨转速 (r/min)， P_D 为螺旋桨敞水收到功率 (hp)， V_A 为螺旋桨进速 (kn)， D 为螺旋桨直径 (m)
通过敞水特征曲线组可以得到 $B-\delta$ 图谱



8.2 螺旋桨图谱及其应用

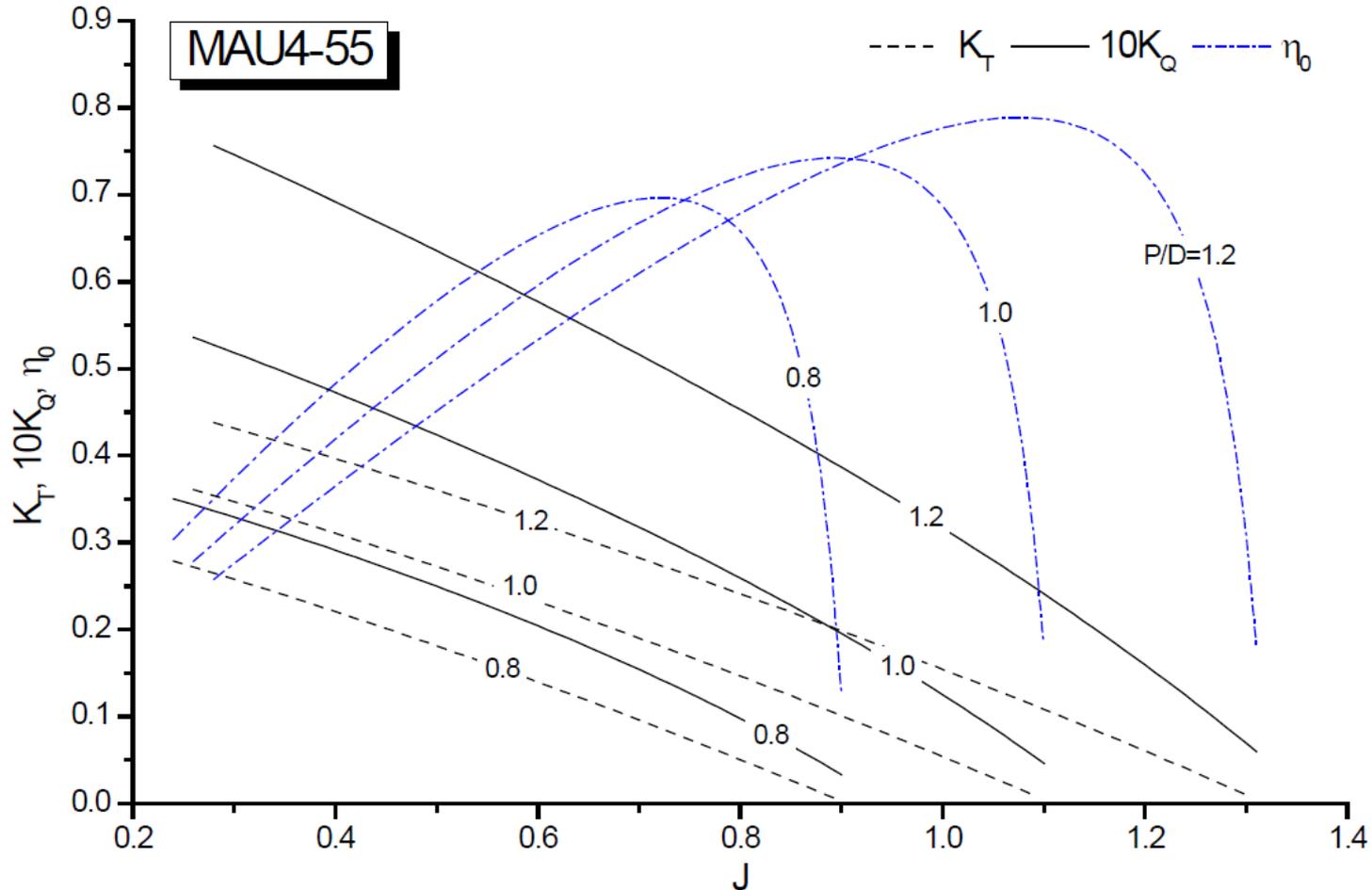
AU型螺旋桨设计图谱的生成

叶数Z	盘面比 A_E/A_0	螺距比P/D
4	0.40	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	0.55	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	0.70	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	...	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
5	0.50	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	0.65	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	0.80	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	...	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
6	0.55	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	0.70	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	0.85	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4
	...	0.5, 0.6, 0.7, ..., 1.4



8.2 螺旋桨图谱及其应用

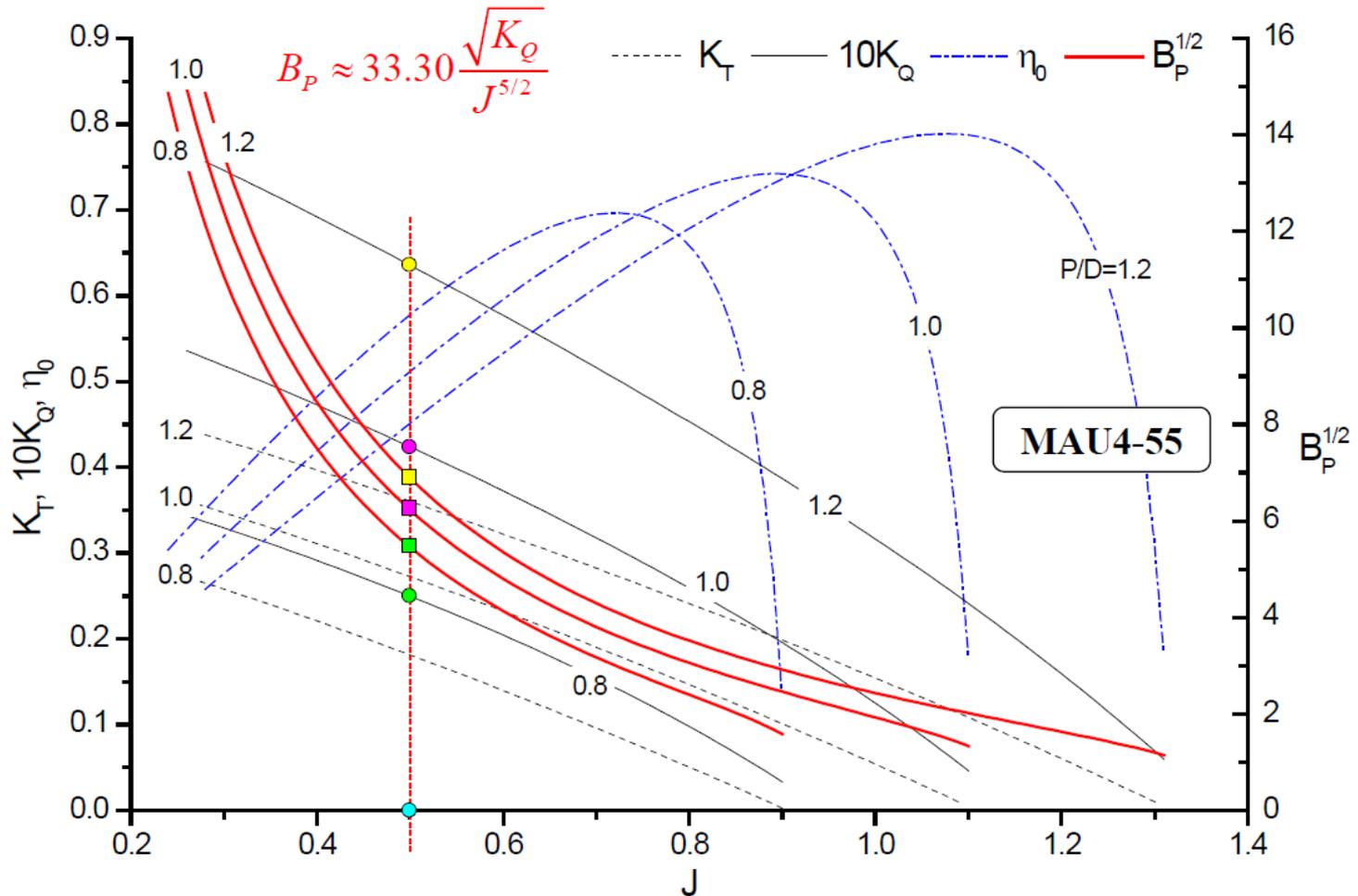
AU型螺旋桨设计图谱的生成(敞水特征曲线组)





8.2 螺旋桨图谱及其应用

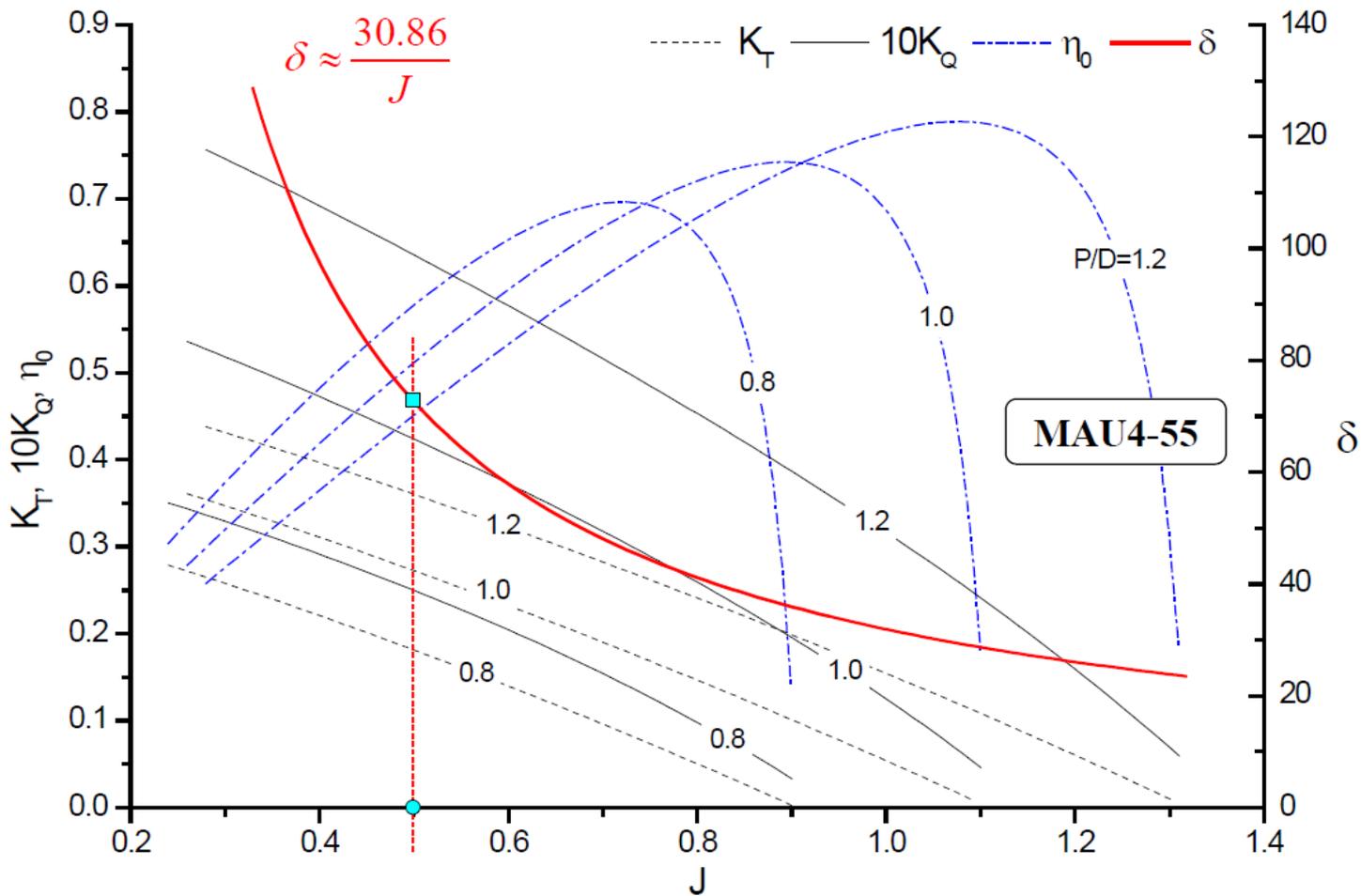
AU型螺旋桨设计图谱的生成(敞水特征曲线组)





8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU型螺旋桨设计图谱的生成(敞水特征曲线组)





AU型螺旋桨设计图谱的生成

对单个螺旋桨来说

- 进速系数 J 与功率系数 $\sqrt{B_P}$ 一一对应
- 每个功率系数 B_P 对应于一个效率 η_0 和一个直径系数 δ ，即 η_0 和 δ 可以看作 $\sqrt{B_P}$ 的函数

对于一个螺旋桨系列来说（同样叶数和盘面比情况）

- η_0 和 δ 可以看作以 $\sqrt{B_P}$ 和螺距比 P/D 为变量的函数

$$\eta_0 = \eta_0 \left(\sqrt{B_P}, \frac{P}{D} \right)$$

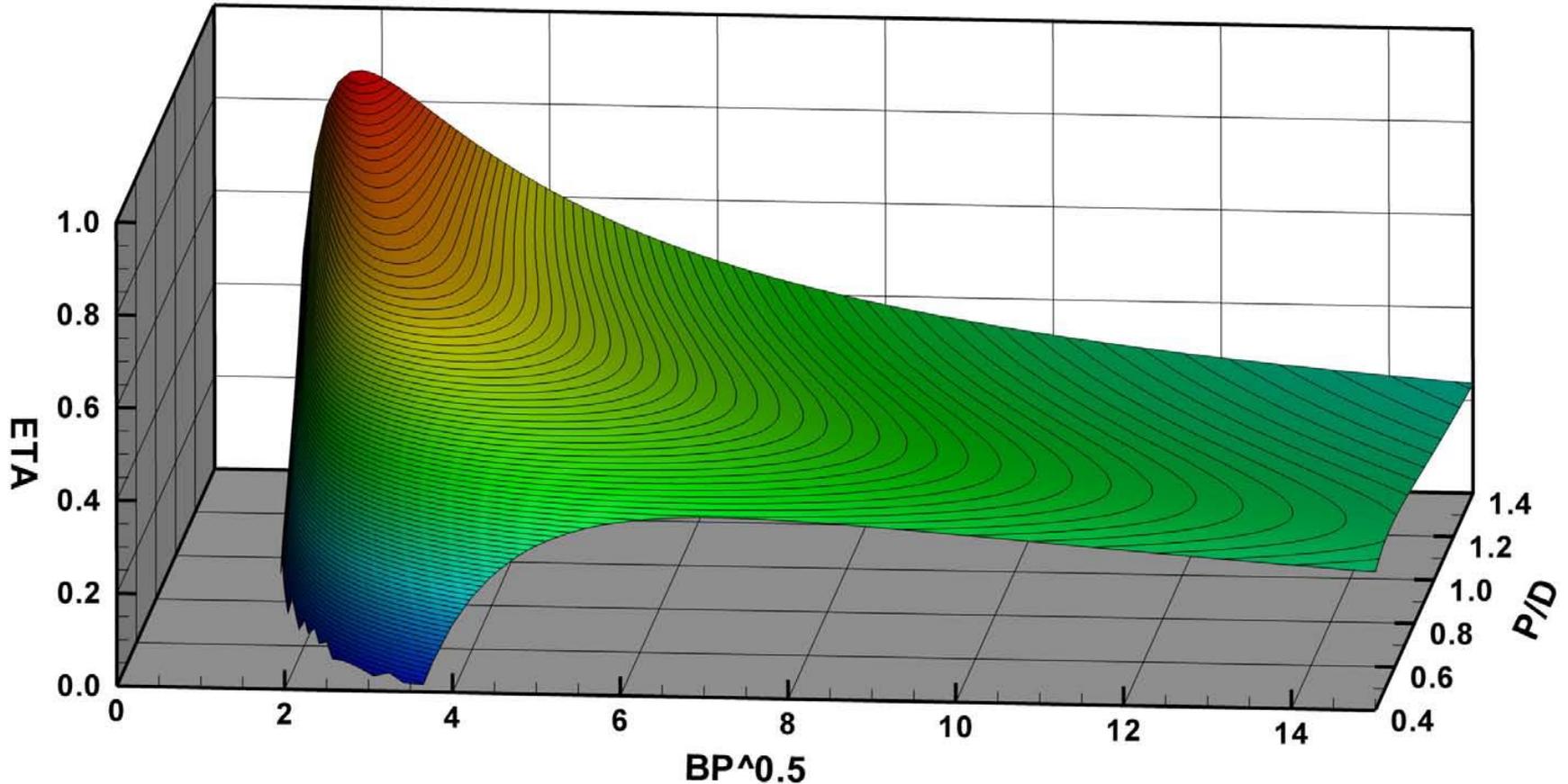
$$\delta = \delta \left(\sqrt{B_P}, \frac{P}{D} \right)$$



8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU型螺旋桨设计图谱的生成 (η_0 可以看作以 $\sqrt{B_P}$ 和螺距比 P/D 为变量的函数, 对应的等值面)

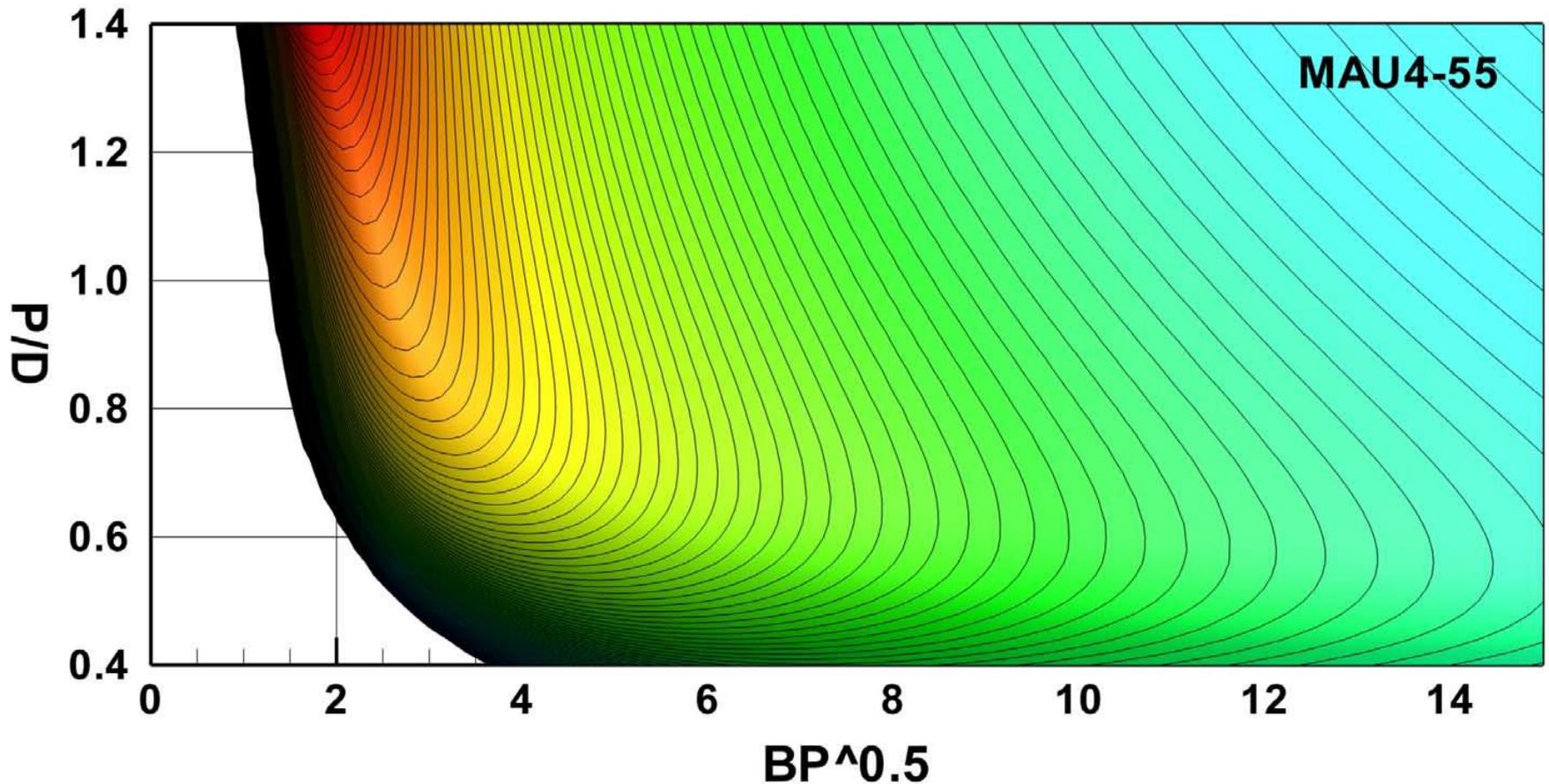
MAU4-55





8.2 螺旋桨图谱及其应用

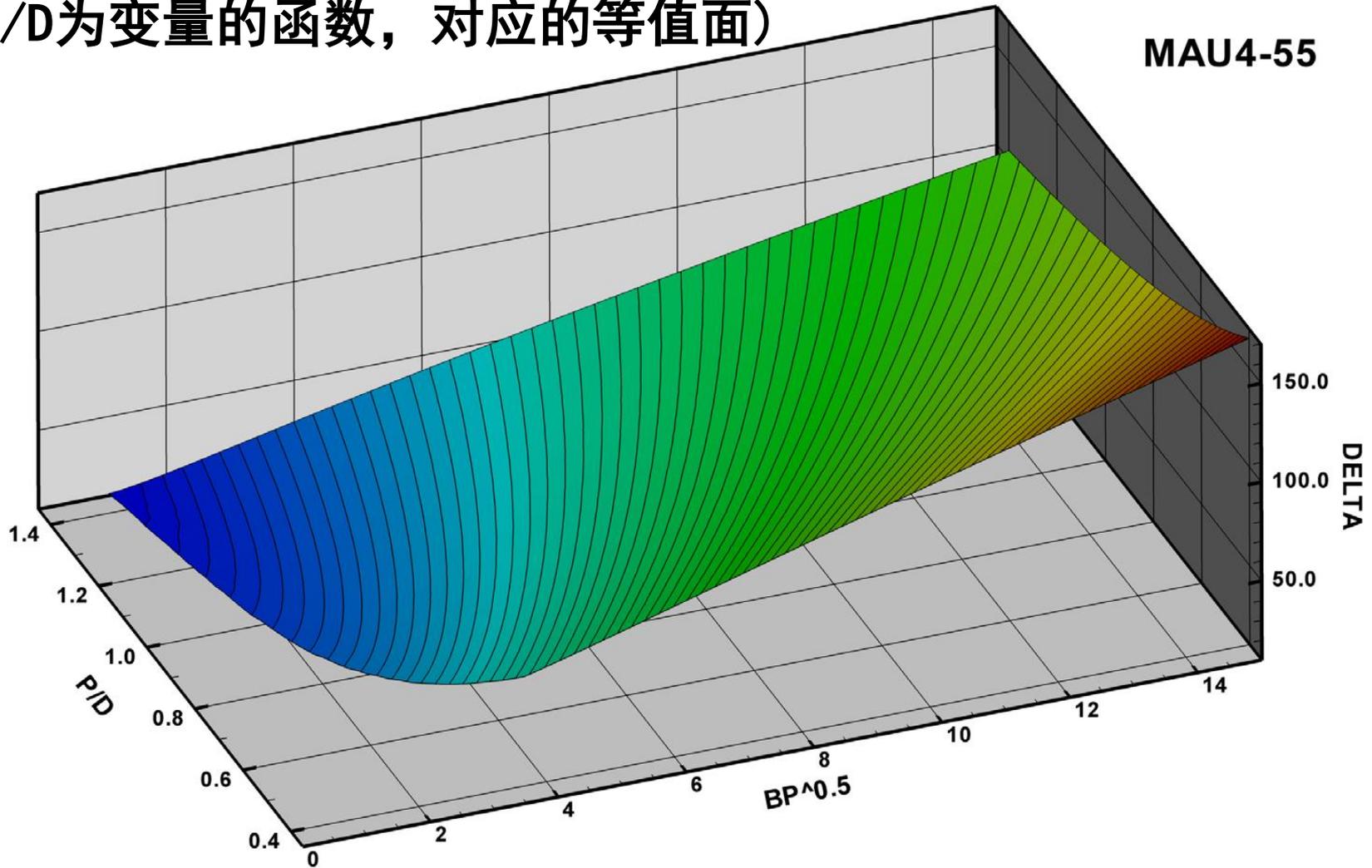
AU型螺旋桨设计图谱的生成 (η_0 投影到 $\sqrt{B_P}$ 和 P/D 平面)





8.2 螺旋桨图谱及其应用

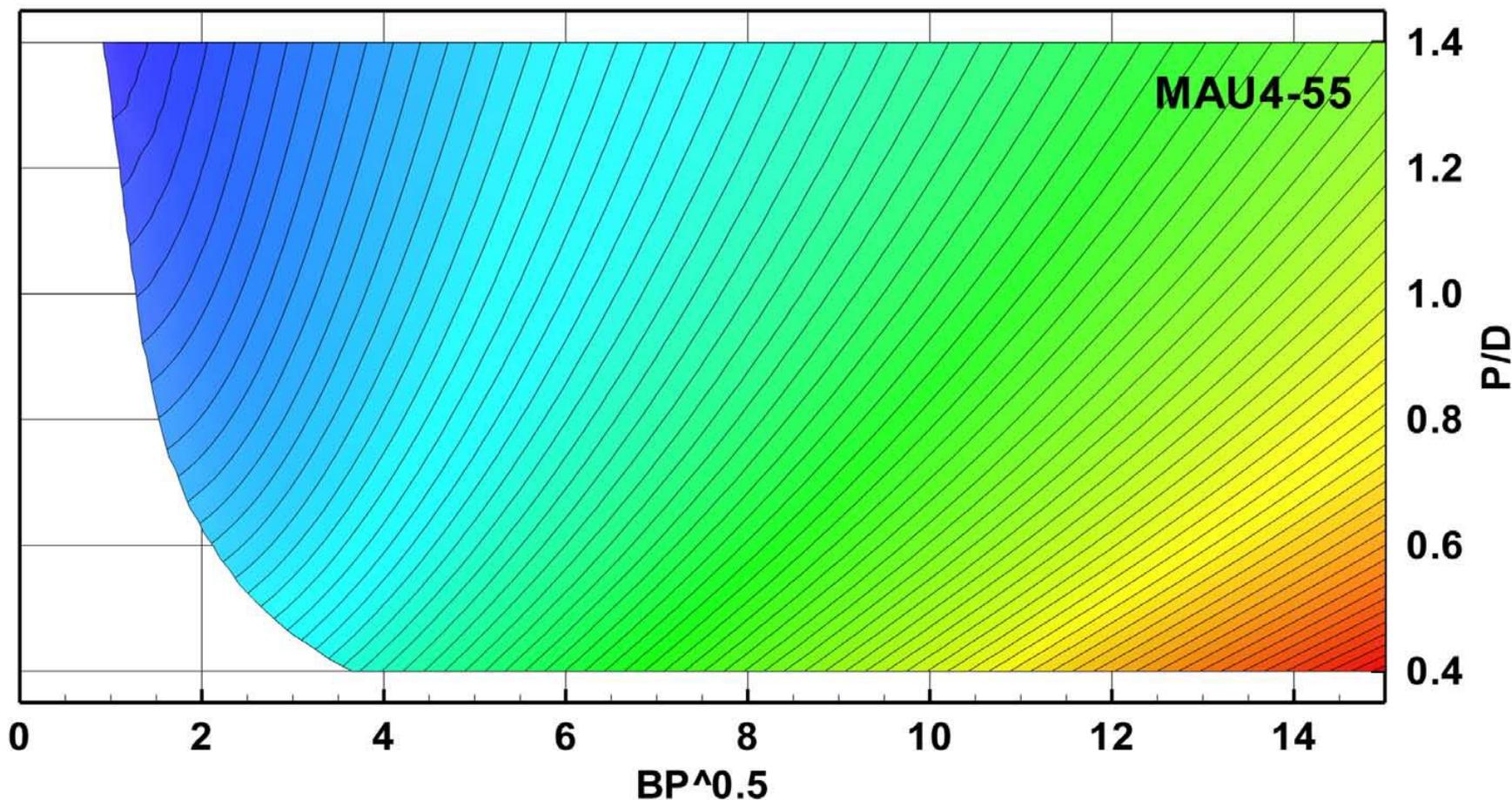
AU型螺旋桨设计图谱的生成 (δ 可以看作以 $\sqrt{B_P}$ 和螺距比 P/D 为变量的函数, 对应的等值面)





8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU型螺旋桨设计图谱的生成 (δ 投影到 $\sqrt{B_p}$ 和 P/D 平面)

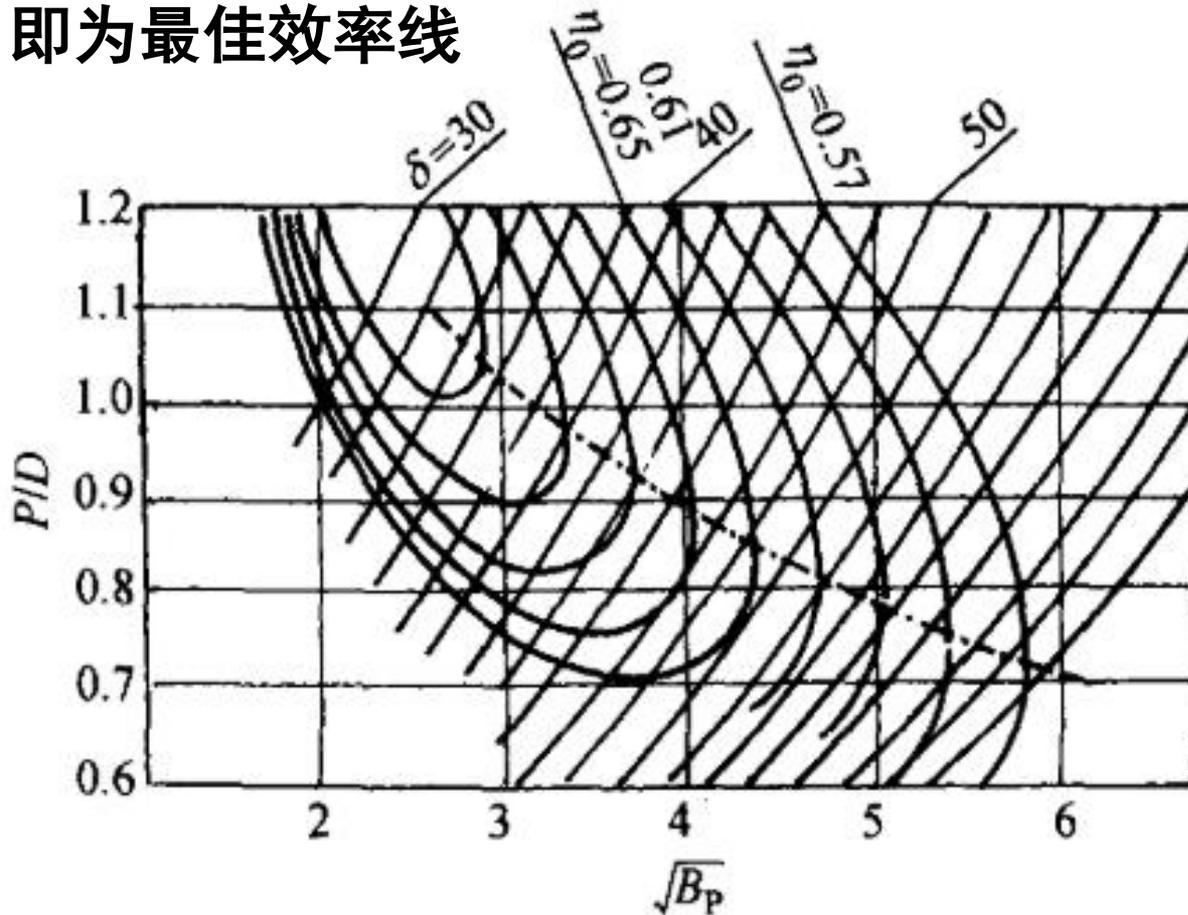




8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU型螺旋桨设计图谱的生成

- 连接 $\sqrt{B_p}$ 为常数时效率最高的点得到的光滑曲线即为最佳效率线





螺旋桨图谱设计

- 设计问题：初步设计和终结设计
- 设计方法：图谱设计法，环流理论设计法
- 螺旋桨系列：B型，AU型，Gawn系列
- $B - \delta$ 图谱的生成
- 敞水曲线到 $\sqrt{B_p} - P/D$ 的图谱
- 最佳效率线



AU型螺旋桨形式

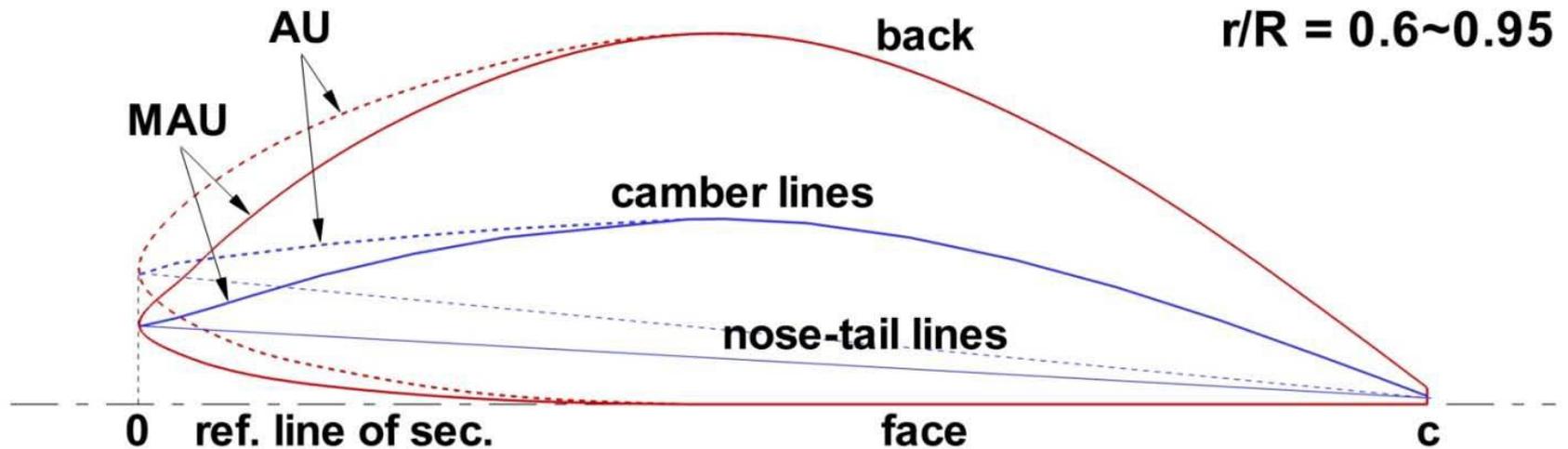
- AU型螺旋桨的原型：初始阶段发展的模型，为部分5叶和6叶桨所采用；
- 改进AU型，也叫MAU型：对叶梢部分前缘进行修正，为4叶型AU桨的形式；
- AU_w型：对桨叶切面的后缘部分修正，为6叶型桨所采用。



8.2 螺旋桨图谱及其应用

MAU型螺旋桨形式

- AU原型空泡裕度过大，因此需要少量减小切面前缘的高度，降低面空泡的裕度，增大叶背的抗空泡性能；
- 表现为增大拱度，减小攻角。计算表明AU原型桨和MAU型桨的水动力性能是接近的，可以用原型图谱进行设计

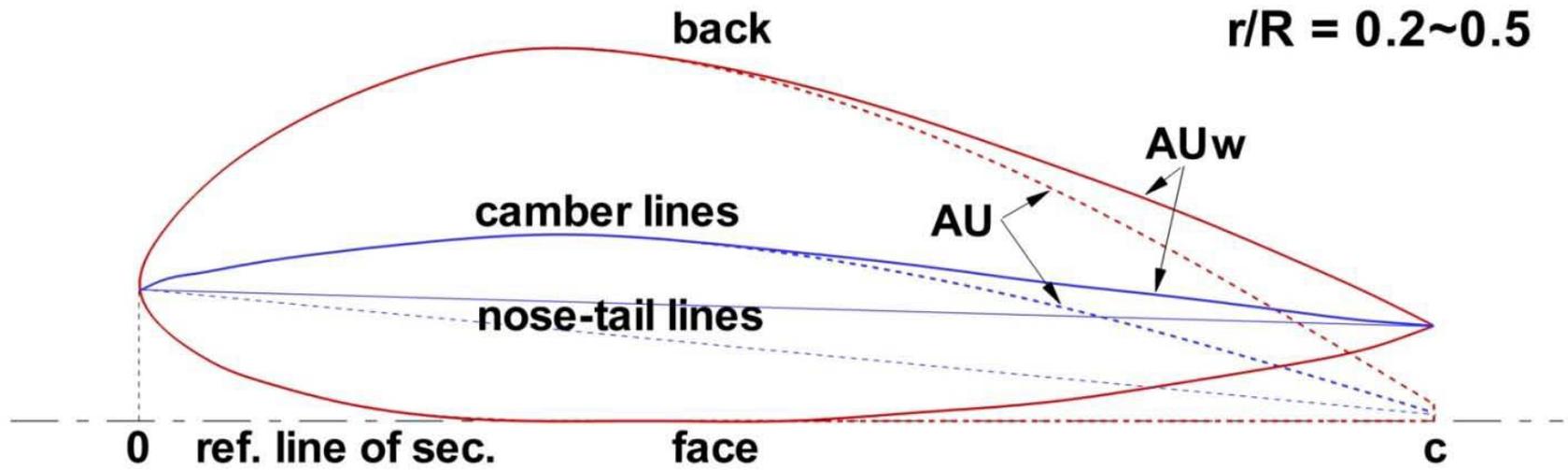




8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU_w型螺旋桨形式

- 桨叶切面后缘具有一定的翘度，可以有效改善叶根部叶间干扰





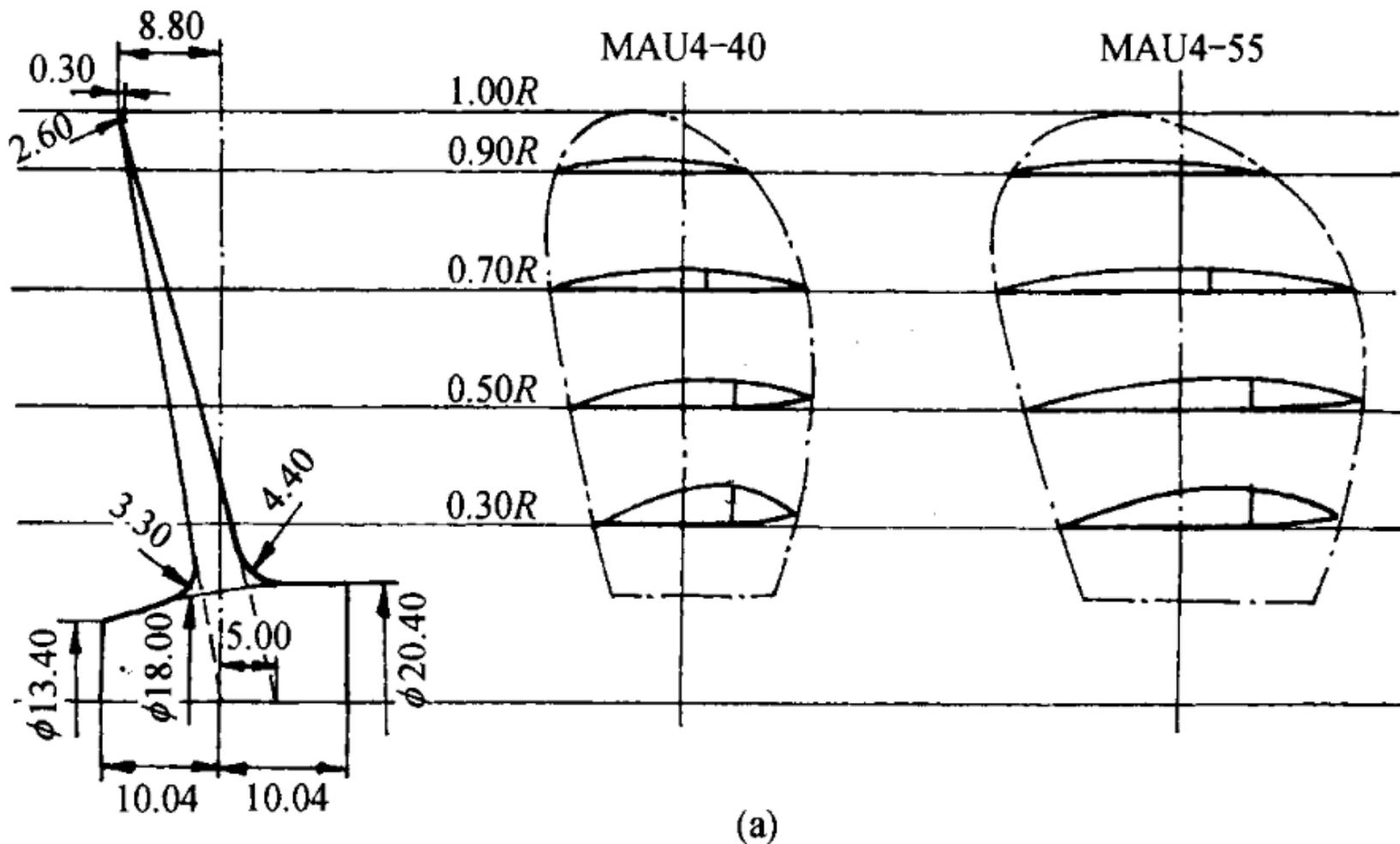
AU/MAU型螺旋桨的几何特征

- 螺距比 P/D 是固定不变的
- 毂径比：0.18
- 叶厚比：0.05
- 后倾角： 10°
- 叶面轮廓：部分侧斜
- 桨叶数量：3-6
- 盘面比：3叶，0.35、0.5；4叶，0.4、0.55、0.7；5叶，0.5、0.65、0.8；6叶，0.55、0.7、0.85



8.2 螺旋桨图谱及其应用

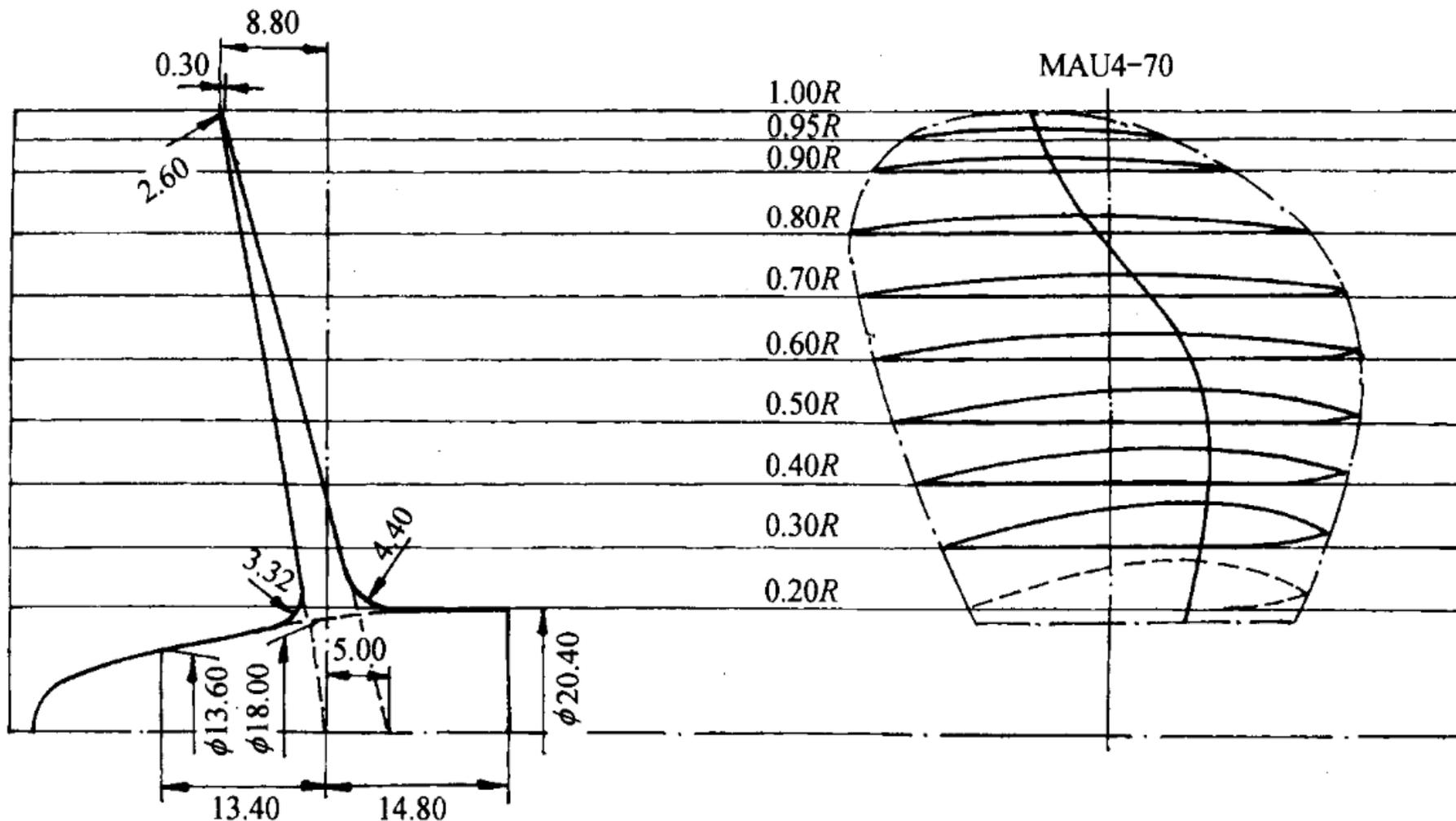
AU/MAU型螺旋桨的几何特征





8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU/MAU型螺旋桨的几何特征





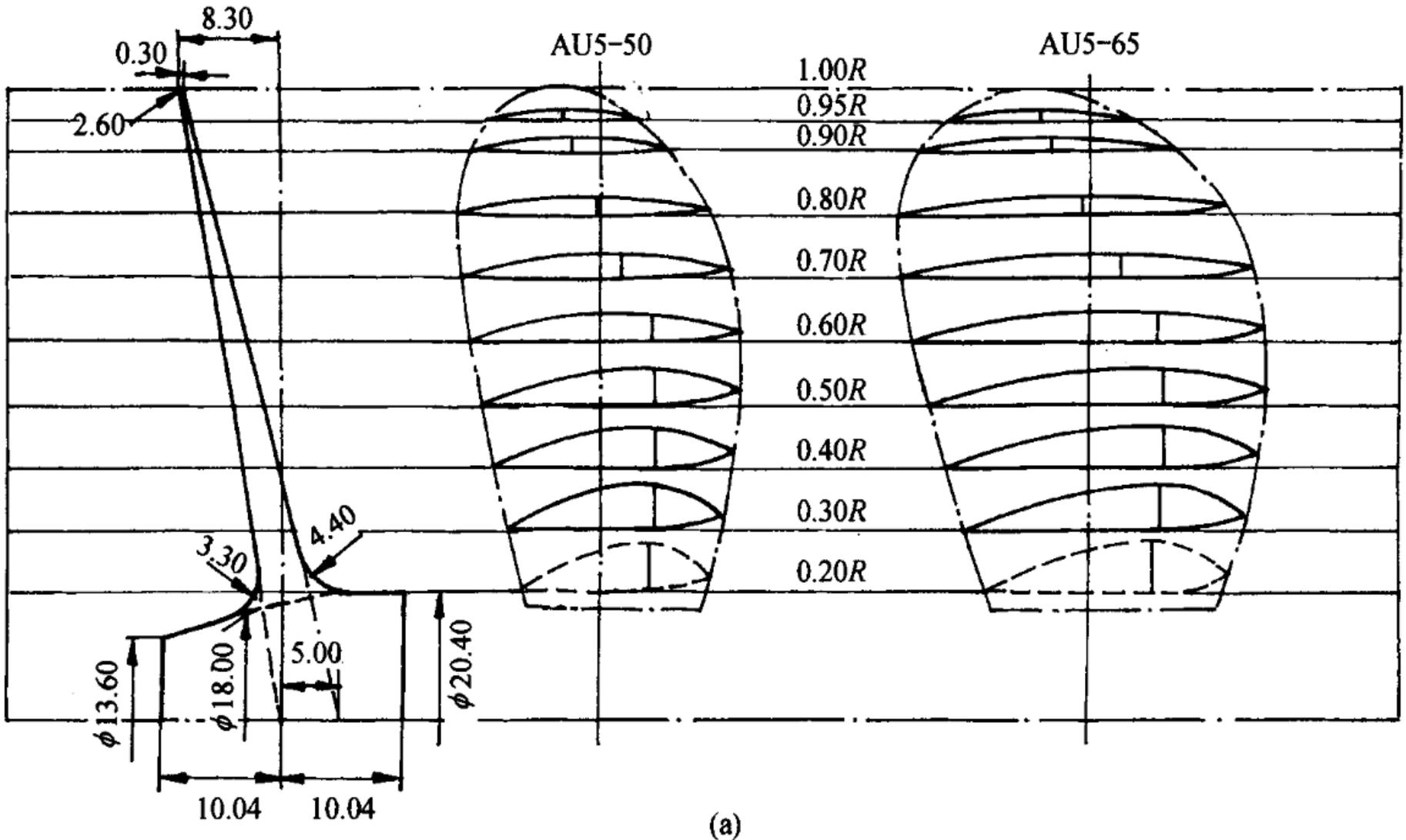
AU/MAU型螺旋桨的几何特征

表 8-1 4 叶模型螺旋桨要素表

	MAU4-40	MAU4-55	MAU4-70
直径/m	0.250	0.250	0.250
毂径比	0.180	0.180	0.180
盘面比	0.40	0.55	0.70
最大叶宽比	0.226	0.311	0.398
平均叶宽比	0.192	0.263	
叶厚比	0.050	0.050	0.050
后倾角/(°)	10	10	10

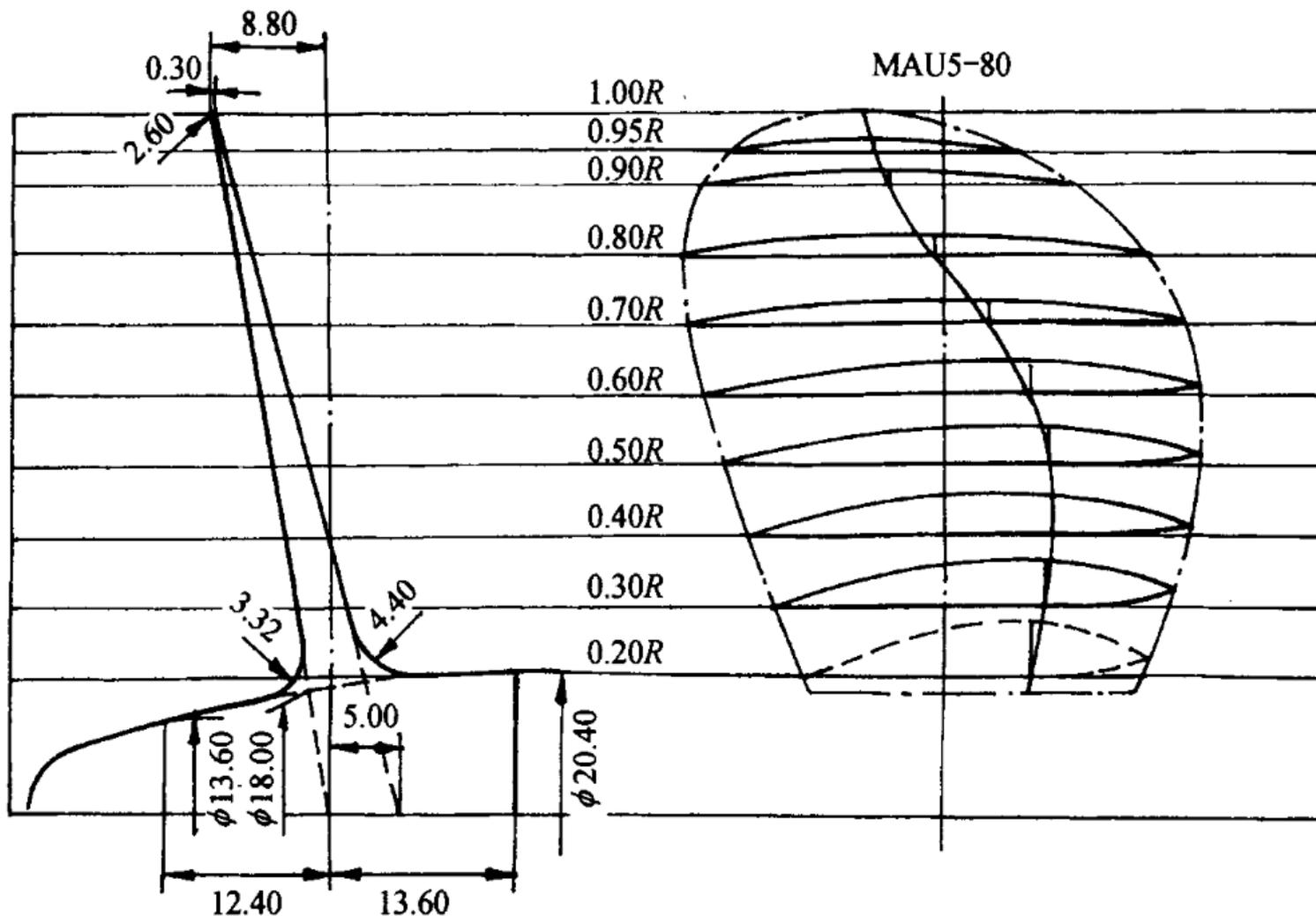


AU/MAU型螺旋桨的几何特征





AU/MAU型螺旋桨的几何特征





AU/MAU型螺旋桨的几何特征

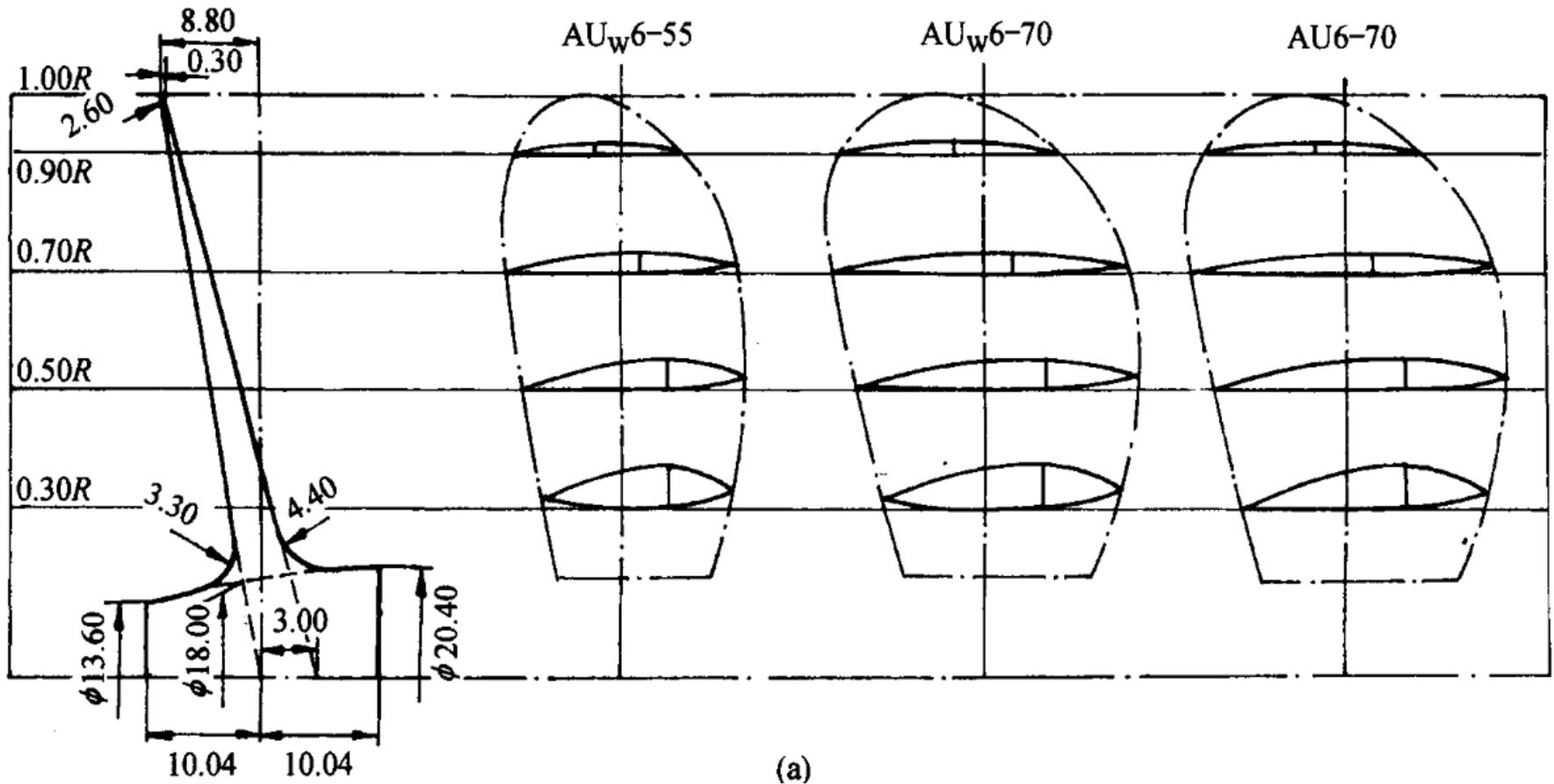
表 8-2 5 叶模型螺旋桨要素表

	AU5-50	AU5-65	MAU5-80
直径/m	0.250	0.250	0.250
毂径比	0.180	0.180	0.180
盘面比	0.500	0.650	0.800
最大叶宽比	0.226	0.294	0.364
叶厚比(叶厚分数)	0.050	0.050	0.050
后倾角/(°)	10	10	10



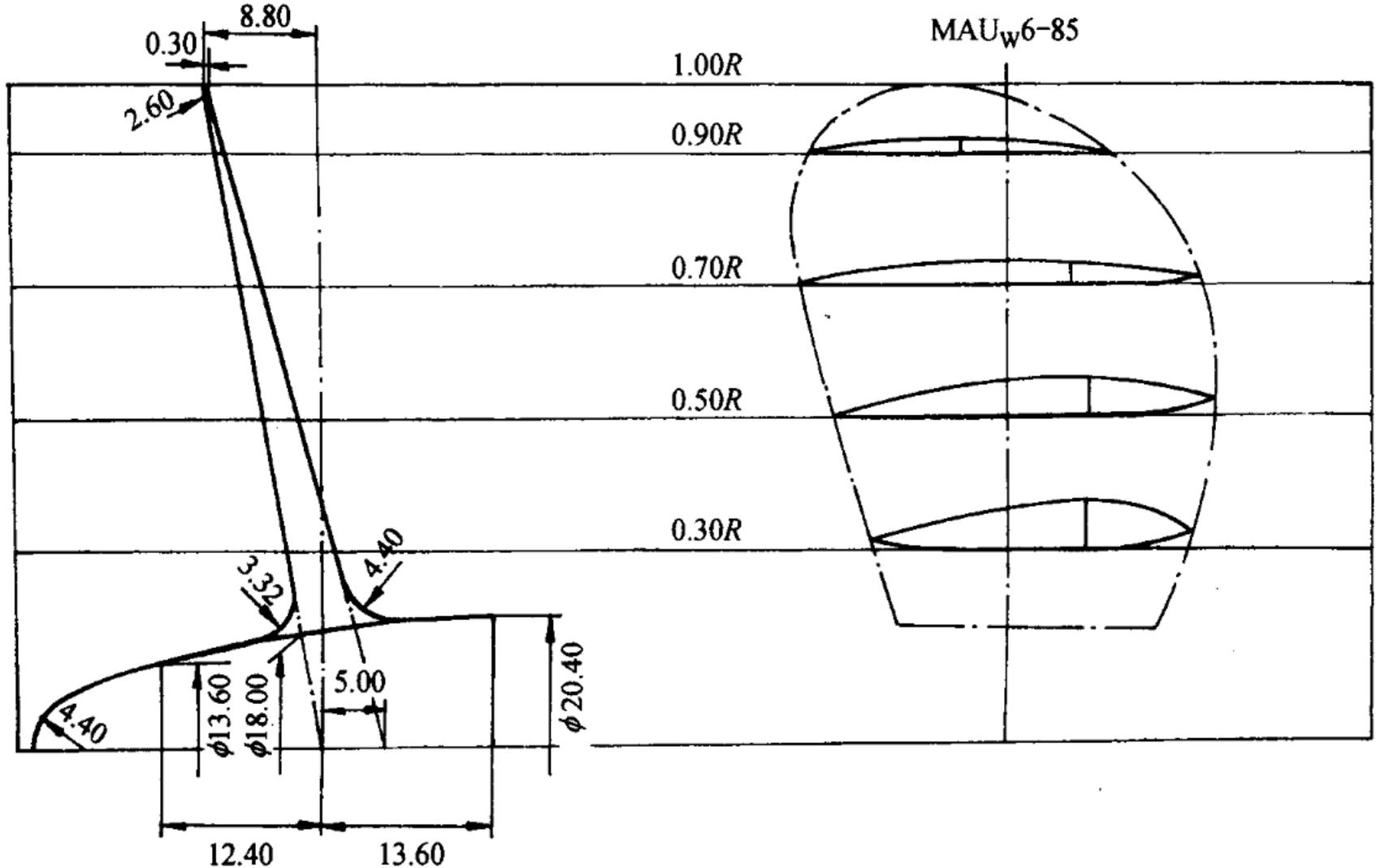
8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU/MAU型螺旋桨的几何特征





AU/MAU型螺旋桨的几何特征





AU/MAU型螺旋桨的几何特征

表 8-3 6 叶模型螺旋桨要素表

	AU _w 6-55	AU _w 6-70	AU6-70	MAU _w 6-85
直径/m	0.250	0.250	0.250	0.250
毂径比	0.180	0.180	0.180	0.180
盘面比	0.55	0.700	0.700	0.850
最大叶宽比	0.208	0.264	0.264	0.322
叶厚比	0.050	0.050	0.050	0.050
后倾角/(°)	10	10	10	10
叶片剖面后缘有一定翘度	有	有	无	有



8.2 螺旋桨图谱及其应用

AU/MAU型螺旋桨的几何特征

表 8-4 AU 螺旋桨桨叶轮廓尺寸表

	r/R	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.66	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0	
叶片宽度, 以最大叶片宽度的%表示	从母线到叶片随边的距离	27.96	33.45	38.76	43.54	47.96	49.74	51.33	52.39	48.49	42.07	17.29	叶片最大宽度在 $0.66r/R$ 处 $=0.226D \frac{a_E}{0.1Z}$, D 为螺旋桨直径; a_E 为盘面比; Z 为叶数
	从母线到叶片导边的距离	38.58	44.25	48.32	50.80	51.15	50.26	48.31	40.53	25.13	13.55		
	叶片宽度	66.54	77.70	87.08	94.34	99.11	100.00	99.64	92.92	73.62	55.62		
叶片厚度用 D 的%表示		4.06	3.59	3.12	2.65	2.18	1.90	1.71	1.24	0.77	0.54	0.30	叶片最大厚度在螺旋桨轴线处 = $0.05D$
以叶片宽度%表示的从导边至最厚点的距离		32.0	32.0	32.0	32.5	34.9	37.9	40.2	45.5	48.9	50.0		



螺旋桨图谱设计的基本原则

- 螺旋桨的推力等于船舶阻力
- 螺旋桨所需的功率等于主机提供的功率
- 设计中一般采用国际单位制
- 选用合适的图谱



螺旋桨图谱的应用

- 首先需要确定伴流分数 ω ，推力减额分数 t ，相对旋转效率 η_R 和传送效率 η_S

对于螺旋桨的初步设计问题：

- 确定螺旋桨形式，例如MAU4-55
- 再根据选定桨型，选取对应 $\sqrt{B_P} - \delta$ 图谱
- 假设一组 N （或 D ）来进行具体的计算
- 根据计算结果确定最终的最佳 N 或者 D





螺旋桨图谱的应用（初步设计）

表 8-9 初步设计确定最佳转速的计算

序号	名称	单位	数据			
1	螺旋桨直径 D (给定)	m				
2	$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$					
3	$V_A = V(1-w)$	kn				
4	P_E (给定)					
5	假定一组转速 N	r/min	N_1	N_2	N_3	N_4
6	直径系数 $\delta = \frac{ND}{V_A}$		δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
7	查 MAU4-55 图谱, 由 δ 等值线与最佳效率曲线的交点得到 P/D η_0 $\sqrt{B_P}$		$(P/D)_1$ η_{01} $\sqrt{B_{P1}}$	$(P/D)_2$ η_{02} $\sqrt{B_{P2}}$	$(P/D)_3$ η_{03} $\sqrt{B_{P3}}$	$(P/D)_4$ η_{04} $\sqrt{B_{P4}}$
8	$P_D = \frac{B_P^2 V_A^5}{N^2}$		P_{D1}	P_{D2}	P_{D3}	P_{D4}
9	主机马力 $P_S = \frac{P_D}{\eta_S \cdot \eta_R}$		P_{S1}	P_{S2}	P_{S3}	P_{S4}
10	计算螺旋桨能克服的有效马力 $P_{TE} = P_D \cdot \eta_0 \cdot \eta_H$		P_{TE1}	P_{TE2}	P_{TE3}	P_{TE4}



8.2 螺旋桨图谱及其应用

螺旋桨图谱的应用（初步设计）

- 有效功率 P_E 曲线与 P_{TE} 曲线相交，此点即为所求的螺旋桨，读出对应的 N 、 P_S 、 P/D 、 η_0

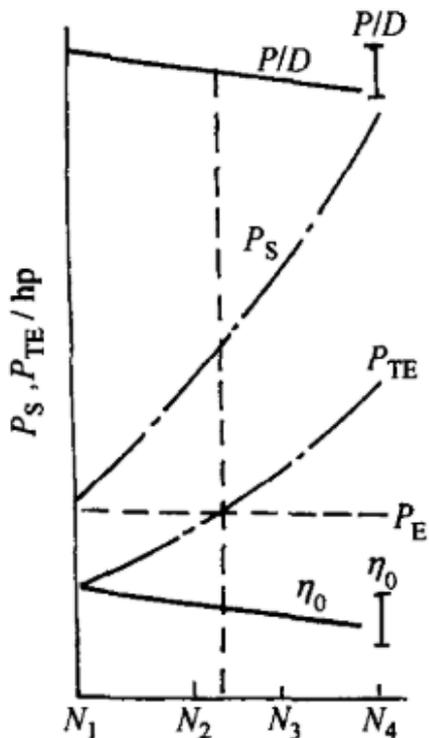


图8-7 确定转速的计算结果

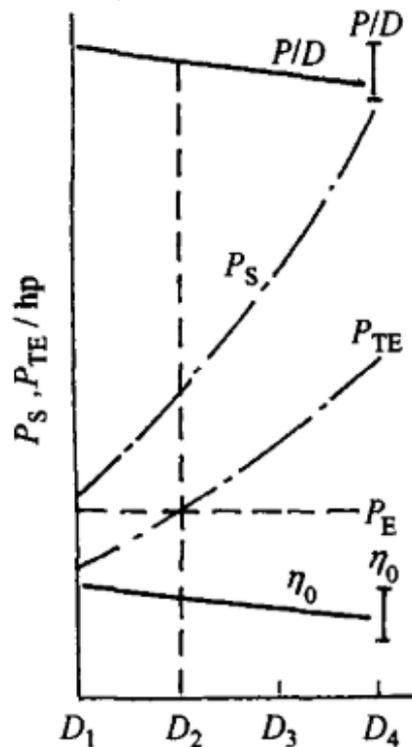


图 8-8 确定直径的计算结果



螺旋桨图谱的应用（终结设计）

- 已知 N 和 P_s ，确定所能达到的最大航速 V 以及螺旋桨的尺度（ $D, P/D$ ）与效率 η_0
- 空泡校核
- 强度校核
- 螺距修正
- 质量及惯性矩计算
- 确定敞水特征曲线
- 系柱特性计算
- 航行特性计算
- 螺旋桨计算总结



最大航速计算

- 根据给定的数据，包括 ω , t , η_R , N , P_S 以及船舶的主要尺度和有效功率开展计算
- 根据估计的 η_S 计算螺旋桨敞水收到效率 P_D

$$P_D = \eta_S \eta_R P_S$$

- 进一步计算船身效率 η_H

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - \omega}$$

- 根据选定的桨型进行图谱设计



8.2 螺旋桨图谱及其应用

最大航速计算

表 8-12 终结设计的计算表

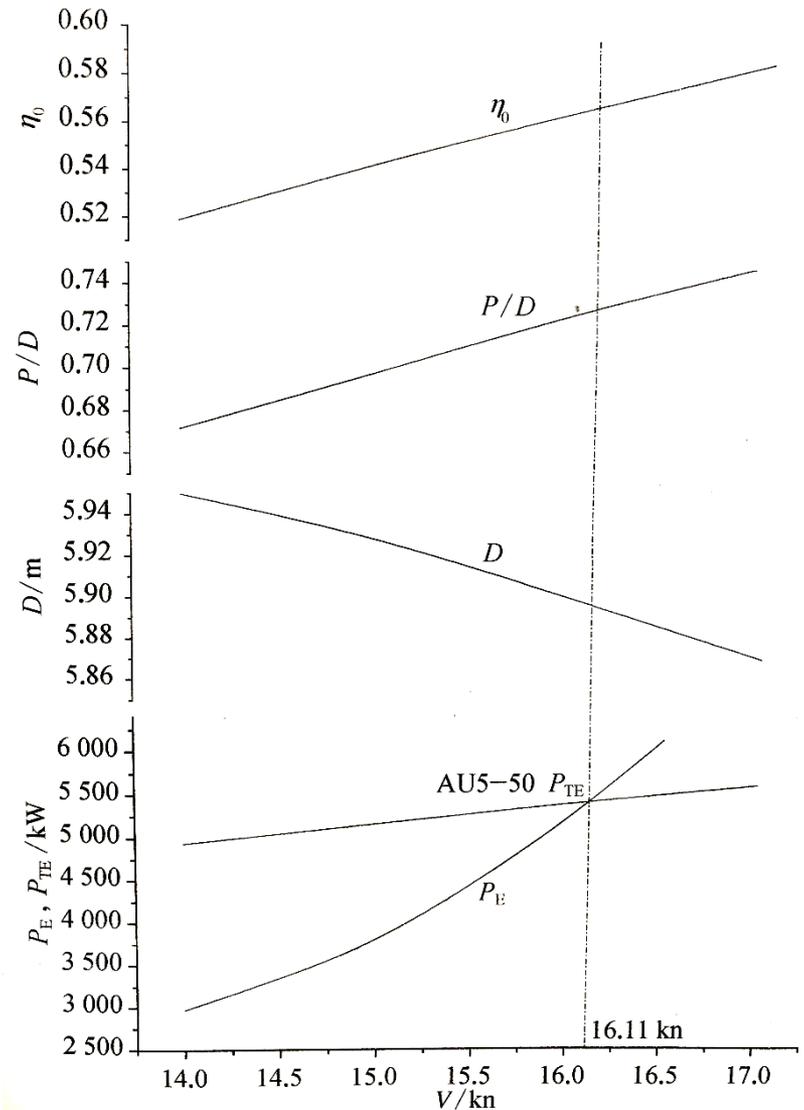
假定若干船速 V	kn	14	15	16	17	
$V_A = V(1-w)$	kn	9.23	9.90	10.56	11.22	
$P_D^{1/2}$		107.4	107.4	107.4	107.4	
$V_A^{2.5}$		259	308.5	362	422	
N		118.5	118.5	118.5	118.5	
$B_P = \frac{NP_D^{1/2}}{V_A^{2.5}}$		49.2	41.3	35.2	30.2	
$\sqrt{B_P}$		7.02	6.43	5.93	5.50	
查 AU5-50 图谱 从 $\sqrt{B_P}$ 与最佳效率线交点得	δ		76.5	71.0	66.2	62.0
	η_0		0.519	0.544	0.567	0.588
	P/D		0.672	0.700	0.728	0.752
	D	m	5.95	5.93	5.90	5.87
	$P_{TE} = P_D \eta_0 \eta_H$		6720	7040	7340	7615



8.2 螺旋桨图谱及其应用

最大航速计算

- 同样取 P_E 和 P_{TE} 的交点
- 最大航速点
- 读取对应的尺寸和效率





空泡校核

- 柏利尔限界线（根据统计资料提出的校核空泡的限界线），以0.7R处切面的空泡数 $\sigma_{0.7R}$ 为横坐标，单位投射面积上的平均推力系数 τ_c 为纵坐标

$$\sigma_{0.7R} = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_{0.7R}^2}$$

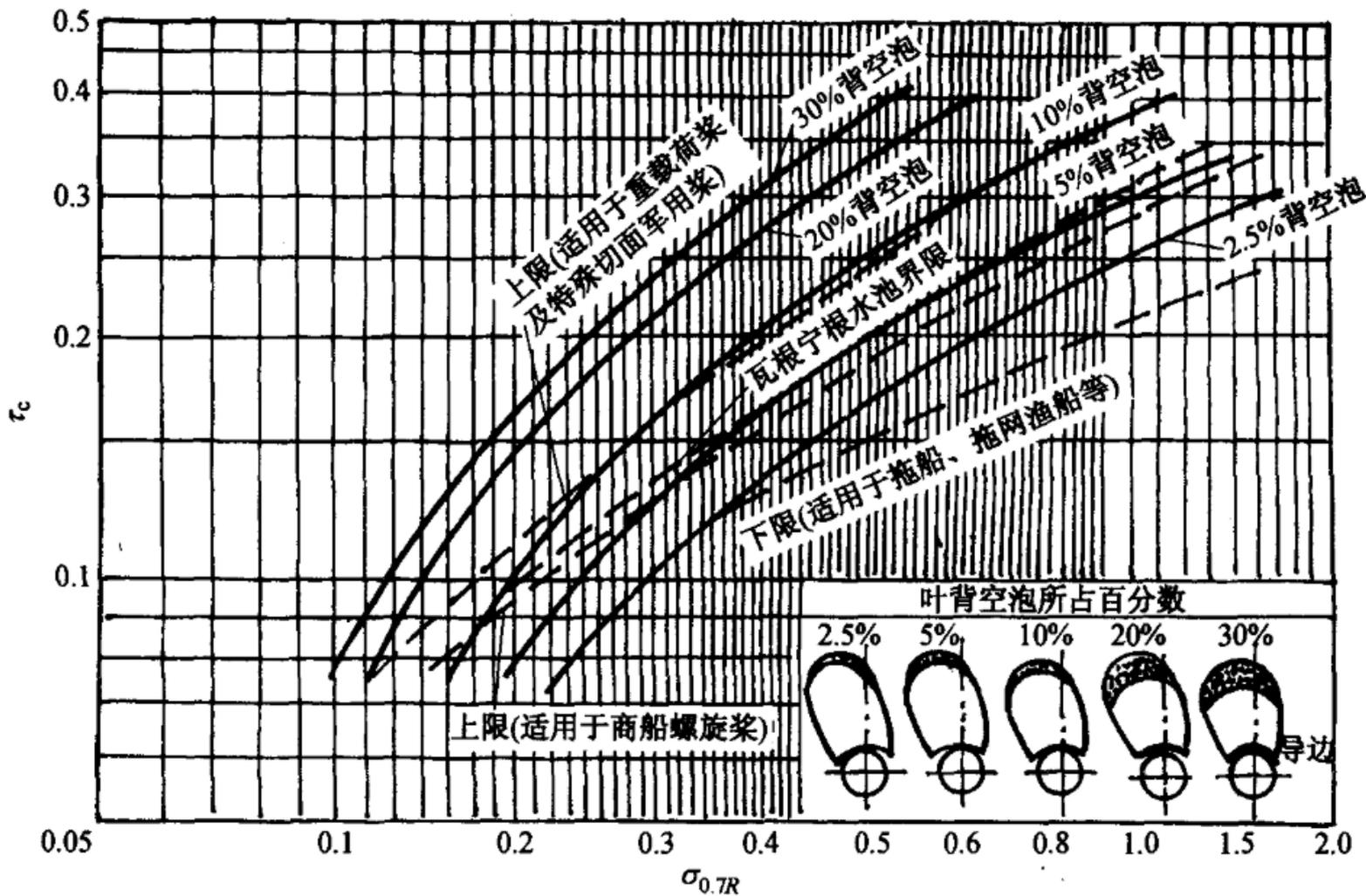
$$\tau_c = \frac{T/A_P}{\frac{1}{2} \rho V_{0.7R}^2}$$

其中 $V_{0.7R}$ 为合速度， A_P 为桨叶的投射面积（经验公式计算）



8.2 螺旋桨图谱及其应用

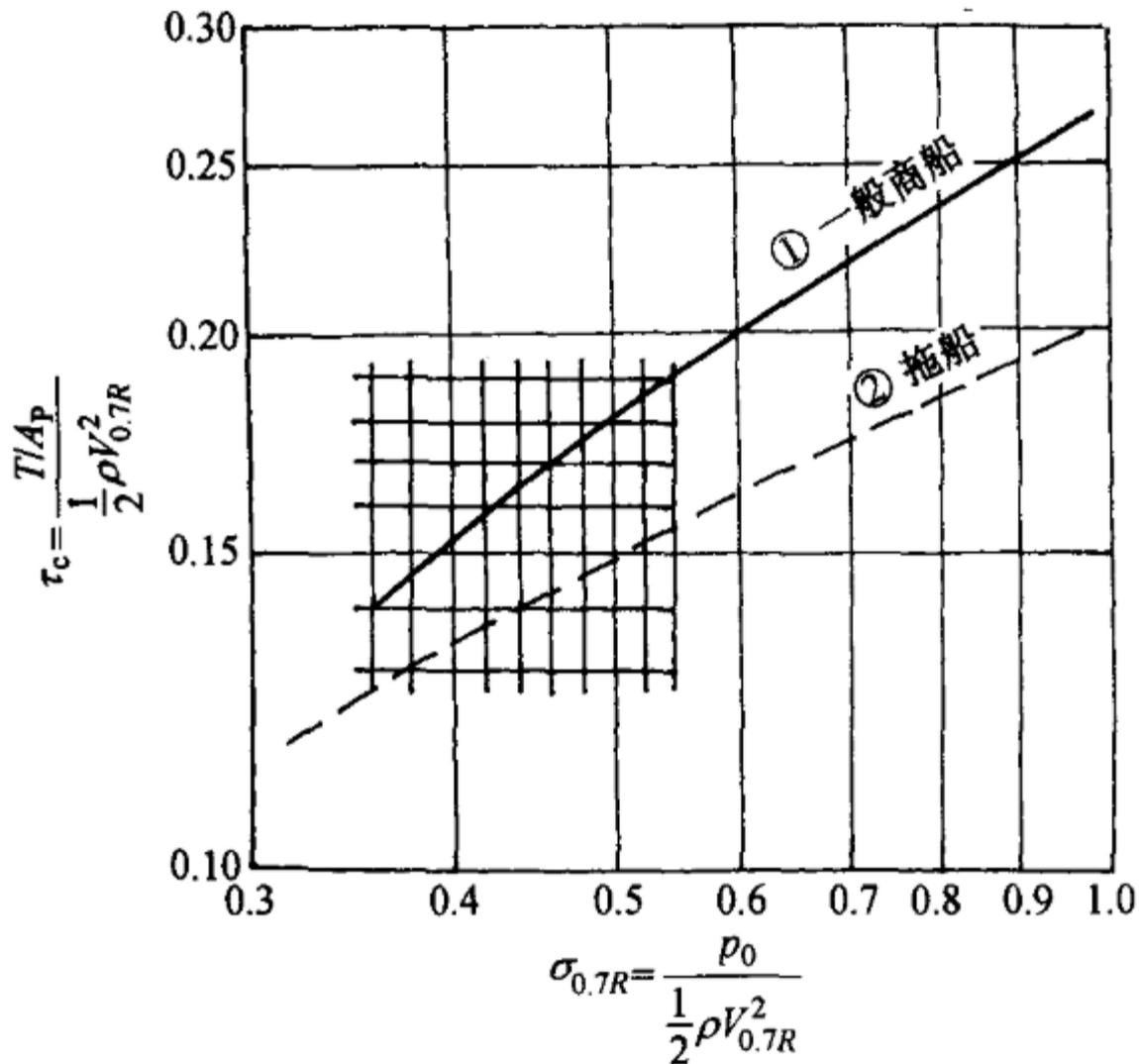
空泡校核 (柏利尔限界线)





8.2 螺旋桨图谱及其应用

空泡校核（柏利尔限界线）





空泡校核步骤

- 利用柏利尔空泡限界线中的商船上限线，计算不发生空泡的最小展开面积比
- 根据桨轴深度和温度计算压差
- 依据不同盘面比的结果计算不发生空泡的最小盘面比和对应的最佳螺旋桨参数



8.2 螺旋桨图谱及其应用

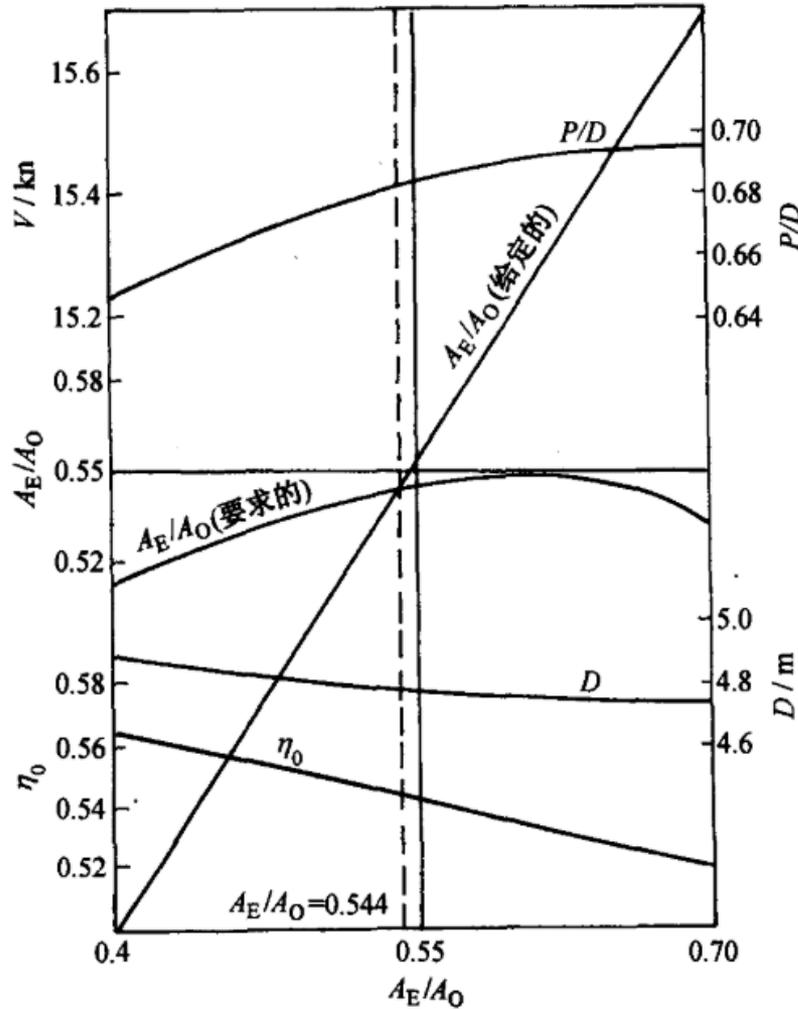
空泡校核步骤

表 8-29 空泡校核计算结果

序号	项 目	单 位	数 值		
			MAU4-40	MAU4-55	MAU4-70
1	V_{\max}	kn	15.62	15.48	15.28
2	$V_A = 0.5144V_{\max}(1-w)$	m/s	5.223	5.176	5.109
3	$(0.7\pi ND/60)^2$	$(\text{m/s})^2$	770.64	736.74	721.76
4	$V_{0.7R}^2 = V_A^2 + (3)^2$	$(\text{m/s})^2$	797.9	763.53	747.87
5	$\sigma = (p_o - p_v) / \frac{1}{2} \rho V_{0.7R}^2$		0.389	0.407	0.416
6	τ_c (查图 6-20)		0.162	0.164	0.169
7	$T = P_D \eta_0 \cdot 75 / V_A$	N	586 216	570 536	551 975
8	$A_P = T / \frac{1}{2} \rho V_{0.7R}^2 \tau_c$	m^2	8.855	8.887	8.518
9	$A_E = A_P / (1.067 - 0.229P/D)$	m^2	9.637	9.767	9.391
10	$A_E / A_o = A_E / \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right)$		0.514	0.545	0.535



空泡校核





强度校核

项 目	单位	数 值	
		0.25R	0.6R
弦长 b	m	1.0596	1.4561
K_1 K_2 K_3 K_4	查表 7-2	634	207
		250	151
		1410	635
		4	34
$A_1 = D/P(K_1 - K_2 D/P_{0.7}) + K_3 D/P_{0.7} - K_4$		2450	874.25
$Y = 1.36A_1 N_e / (Zbn_e)$		30603.7	7946.85



强度校核

项 目	单位	数 值	
		0.25R	0.6R
K_5 } K_6 } 查表 7-2 K_7 } K_8 }		82	23
		34	12
		41	65
		380	330
$A_2 = (D/P)(K_5 + K_6 \epsilon) + K_7 \epsilon + K_8$		1225	1024
材料系数 K (铝镍青铜)		1.179	1.179
$X = A_2 GA_d N^2 D^3 / 10^{10} Zb$		0.3137	0.1907
$t = \sqrt{Y/(K-X)}$	mm	188.063	89.67
MAU 标准桨叶厚度 t'	mm	183	104.2
校核结果		不满足要求	满足要求
实取桨叶厚度	mm	188.2	108.2