

二、主机参数

型号	苏尔士6RLB56 柴油机
最大持续功率	8460 hp
转速	155 rpm
转向	右旋

三、推进因子

伴流分数	$w=0.35$
推力减额分数	$t=0.6w=0.21$
相对旋转效率	$\eta_R=1.0$
船身效率	$\eta_H=1.215$

四、最大航速的计算

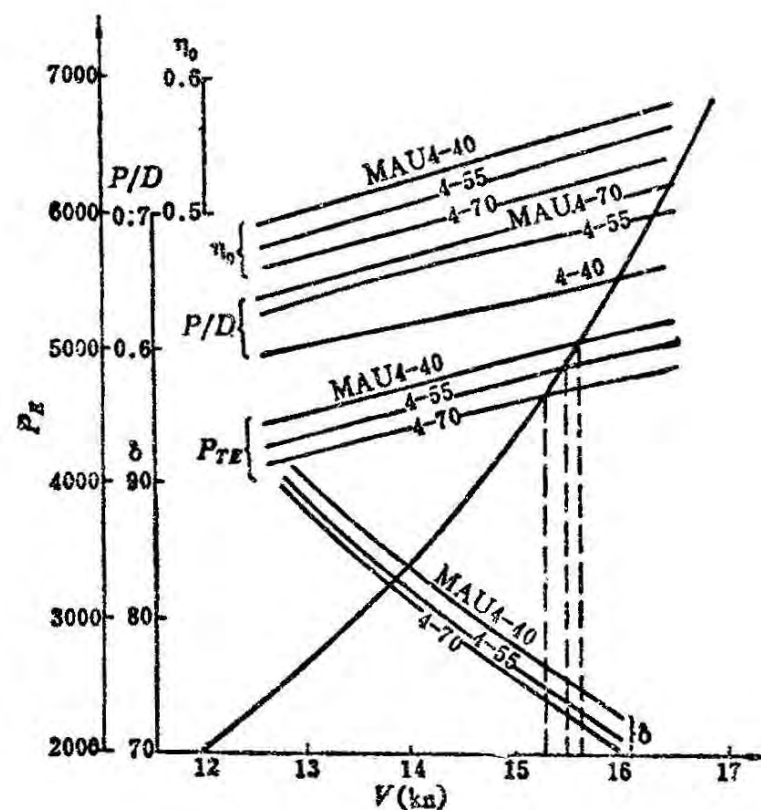
选用MAU4叶桨，取10%功率储备，轴系效率为 $\eta_s=0.97$ ，
敞水收到马力为：

$$P_D = 0.9 P_s \eta_s \eta_R = 8460 \times 0.9 \times 0.97 \times 1.0 = 7385.58 \text{ hp}$$

采用MAU4-40, MAU4-55, MAU4-70图谱列表计算

项 目		单 位	数 值			
假定航速 V		kn	13	14	15	16
$V_A = (1 - w)V$		kn	8.45	9.1	9.75	10.4
$B_p = NP_D^{0.5}/V_A^{2.5}$			64.177	53.324	44.876	38.189
$\sqrt{B_p}$			8.011	7.302	6.699	6.179
MAU 4-40	δ		90	83.5	77.8	72.7
	P/D		0.6	0.618	0.635	0.654
	η_0		0.503	0.527	0.55	0.572
	$P_{TE} = P_D \cdot \eta_H \cdot \eta_0$	hp	4517	4730	4941	5134
MAU 4-55	δ		88.6	81.8	76.2	71.2
	P/D		0.637	0.659	0.677	0.697
	η_0		0.485	0.51	0.533	0.556
	$P_{TE} = P_D \cdot \eta_H \cdot \eta_0$	hp	4354	4578	4784	4986
MAU 4-70	δ		87.7	81.1	75.3	70.3
	P/D		0.648	0.67	0.694	0.713
	η_0		0.47	0.492	0.514	0.534
	$P_{TE} = P_D \cdot \eta_H \cdot \eta_0$	hp	4219	4421	4614	4793

根据表格计算结果绘制各变量与航速的关系曲线，由 P_{TE} 与 P_E 曲线的交点，可确定不同盘面比的设计桨的参数



MAU	V_{max}	P/D	δ	D	η_0
4-40	15.62	0.647	74.6	4.886	0.564
4-55	15.48	0.686	73.6	4.778	0.544
4-70	15.28	0.698	73.8	4.792	0.519

五、空泡校核

利用伯利尔空泡限界线进行校核。

$$t = 15^{\circ}C, \quad p_v = 174 \text{ kgf} / m^2, \quad \rho = 104.63 \text{ kgf} \cdot s^2 / m^4$$

$$h_s = T - Z_p = 8.9 - 2.95 = 5.95 \text{ m}$$

$$p_0 - p_v = p_a + \gamma h_s - p_v = 1.330 + 1025 \times 5.95 - 174 = 16255 \text{ kgf} / m^2$$

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	$V_A = 0.5144 V_{\max} (1 - w)$	m/s	5.223	5.176	5.109
3	$(0.7\pi V D / 60)^2$	(m/s) ²	770.64	736.74	721.76
4	$V_{0.7R}^2 = V_A^2 + (3)^2$	(m/s) ²	797.9	763.53	747.87
5	$\sigma = (p_0 - p_v) / \frac{1}{2} \rho V_{0.7R}^2$		0.389	0.407	0.416
6	τ_c (查图6-20)		0.162	0.164	0.169
7	$T = P_D \cdot \eta_0 \cdot 75 / V_A$	kgf	59818	58218	56324
8	$A_F = T / \frac{1}{2} \rho V_{0.7R}^2 \cdot \tau_c$	m ²	8.855	8.887	8.518
9	$A_E = A_F / (1.067 - 0.229 P / D)$	m ²	9.637	9.767	9.391
10	$A_E / A_o = A_E / \frac{\pi}{4} D^2$		0.514	0.545	0.535

根据表格计算结果绘制各变量与盘面比的关系曲线，并绘出盘面比曲线，由需要的盘面比与盘面比曲线的交点，可确定不发生空泡的最小盘面比，及相应设计桨的参数。

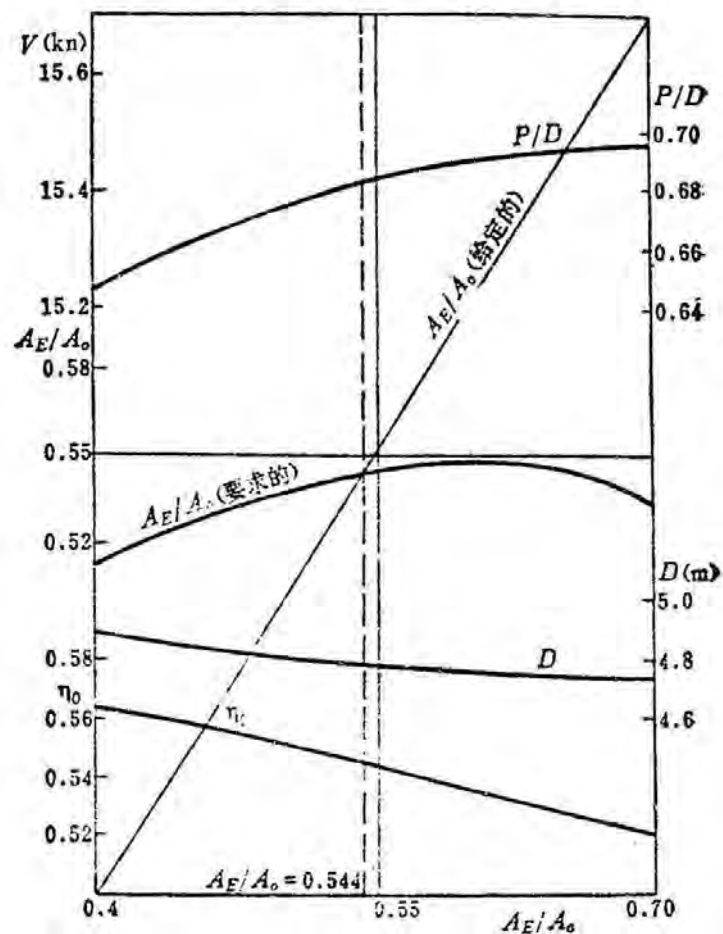
$$A_E / A_0 = 0.544$$

$$P / D = 0.684$$

$$D = 4.78 \text{ m}$$

$$\eta_0 = 0.545$$

$$V_{\max} = 15.48 \text{ kn}$$



六、强度校核

根据 83年《规范》，0.25R 和 0.6R 处的切面厚度应不小于下式计算的值

$$t = \sqrt{\frac{Y}{K - X}} \quad (mm)$$

$$Y = \frac{A_1 N_e}{ZbN}$$

$$X = \frac{A_2 G A_d N^2 D^3}{10^{10} Zb}$$

$$N_e = 8460 \times 0.97 = 8206.2 \text{ hp}, \quad N = 155 \text{ rpm}$$

$$\varepsilon = 8^\circ, \quad G = 7.6 \text{ gf} / \text{cm}^3$$

$$b_{0.66R} = 0.226D \frac{A_E / A_0}{0.1Z} = 0.226 \times 4.78 \times 0.554 / 0.4 = 1.4692 \text{ m}$$

$$b_{0.25R} = 0.7212 b_{0.66R} = 1.0596 \text{ m}$$

$$b_{0.6R} = 0.9911 b_{0.66R} = 1.4561 \text{ m}$$

项 目	单 位	数 值	
		0.25 <i>R</i>	0.6 <i>R</i>
弦长 <i>b</i>	m	1.0596	1.4561
$\left. \begin{array}{l} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{array} \right\} \text{查表7-2}$		634 250 1410 4	207 151 635 34
$A_1 = D/P(K_1 - K_2 D/P_{0.7}) + K_3 D/P_{0.7} - K_4$		2450	874.25
$Y = A_1 Ne/ZbN$		30603.7	7946.85
$\left. \begin{array}{l} K_5 \\ K_6 \\ K_7 \\ K_8 \end{array} \right\} \text{查表7-2}$		82 34 41 380	23 12 65 330
$A_2 = D/P(K_5 + K_6 \epsilon) + K_7 \epsilon + K_8$		1225	1024
材料系数 <i>K</i> (铝镍青铜)		1.179	1.179
$X = A_2 G A_d N^2 D^3 / 10^{10} Zb$		0.3137	0.1907
$t = \sqrt{Y/(K - X)}$	mm	188.063	89.67
MAU标准桨叶厚度 <i>t'</i>	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

可见MAU标准桨叶厚度不满足强度要求，实际取

$$t_{1.0R} = 0.0035D = 16.73 \text{ mm}$$

$$t_{0.25R} = 188.2 \text{ mm}$$

的连线，确定桨叶厚度分布

$$t_{0.2R} = 199.6 \text{ mm}, \quad t_{0.3R} = 176.8 \text{ mm}$$

$$t_{0.4R} = 153.9 \text{ mm}, \quad t_{0.5R} = 131.0 \text{ mm}$$

$$t_{0.6R} = 108.2 \text{ mm}, \quad t_{0.7R} = 185.3 \text{ mm}$$

$$t_{0.8R} = 62.4 \text{ mm}, \quad t_{0.9R} = 39.6 \text{ mm}$$

七、螺距修正

取 MAU 的毂径比 **0.18**，无需修正

设计桨的叶厚度比标准桨大，需进行修正

$$\frac{P}{D} = \left(\frac{P}{D}\right)_0 - \Delta\left(\frac{P}{D}\right) = 0.684 - 0.0015 = 0.6825$$

八、重量及惯性矩计算

根据剖面形状，用近似积分计算：

桨叶重量：

$$G_b = 5532.75 \text{ kgf}$$

桨毂重量：

$$G_h = 2874 \text{ kgf}$$

螺旋桨总重量：

$$G = 8406.75 \text{ kgf}$$

桨叶惯性矩：

$$I_b = 89453.4 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$$

桨毂惯性矩：

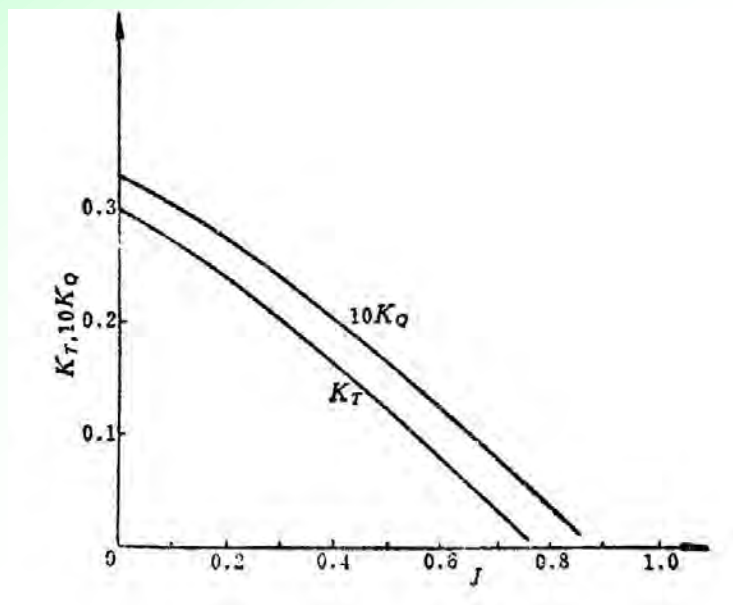
$$I_h = 8440 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$$

螺旋桨总惯性矩：

$$I = 97893.4 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$$

九、敞水性征曲线

由图谱敞水性征曲线内插求得



十、系柱特性

$$J = 0 \Rightarrow K_T = 0.295, \quad K_Q = 0.0321$$

$$Q = \frac{P_D \times 60 \times 75}{2\pi N} = \frac{8206.2 \times 60 \times 75}{2\pi \times 155} = 37917.8 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$T = \frac{K_T \cdot Q}{K_Q \cdot D} = \frac{0.295 \times 37917.8}{0.0321 \times 4.78} = 72900 \text{ kgf}$$

$$n = 60 \sqrt{\frac{T}{\rho D^4 K_T}} = 127.6 \text{ rpm}$$

十一、螺旋桨设计总结

螺旋桨直径

$D=4.78$ 米

螺距比

$P/D=0.6825$

桨型

MAU

叶数

$Z=4$

盘面比

$A_E/A_0=0.544$

纵倾角

$\varepsilon=8^\circ$

螺旋桨效率

$\eta=0.545$

设计航速

$V_{\max}=15.48$ 节

毂径比

$d_h/D=0.18$

旋向

右旋

材料

铝镍青铜

重量

8406.75 公斤

惯性矩

97893.4 公斤厘米秒²

Technical drawing of a rubber wheel (伸张轮) showing side, front, and cross-sectional views with dimensions and material specifications.

侧视图 (Side View): Shows the profile of the wheel with dimensions: 7, 11, 16, 25, 35, 45, 57, 69, 83, 96, 105, 110, 120, 136, 158, 171, 180, 197, 224, 233, 243, 252, 260, 275, 281, 296, 305, 316, 326, 333, 345, 355, 379, 403, 412, 428, 448, 458, 470, 488, 500, 512, 524, 536, 548, 560, 572, 584, 596, 608, 620, 632, 644, 656, 668, 680, 692, 704, 716, 728, 740, 752, 764, 776, 788, 800, 812, 824, 836, 848, 860, 872, 884, 896, 908, 920, 932, 944, 956, 968, 980, 992, 1004, 1016, 1028, 1040, 1052, 1064, 1076, 1088, 1100, 1112, 1124, 1136, 1148, 1160, 1172, 1184, 1196, 1208, 1220, 1232, 1244, 1256, 1268, 1280, 1292, 1304, 1316, 1328, 1340, 1352, 1364, 1376, 1388, 1400, 1412, 1424, 1436, 1448, 1460, 1472, 1484, 1496, 1508, 1520, 1532, 1544, 1556, 1568, 1580, 1592, 1604, 1616, 1628, 1640, 1652, 1664, 1676, 1688, 1700, 1712, 1724, 1736, 1748, 1760, 1772, 1784, 1796, 1808, 1820, 1832, 1844, 1856, 1868, 1880, 1892, 1904, 1916, 1928, 1940, 1952, 1964, 1976, 1988, 2000, 2012, 2024, 2036, 2048, 2060, 2072, 2084, 2096, 2108, 2120, 2132, 2144, 2156, 2168, 2180, 2192, 2204, 2216, 2228, 2240, 2252, 2264, 2276, 2288, 2300, 2312, 2324, 2336, 2348, 2360, 2372, 2384, 2396, 2408, 2420, 2432, 2444, 2456, 2468, 2480, 2492, 2504, 2516, 2528, 2540, 2552, 2564, 2576, 2588, 2600, 2612, 2624, 2636, 2648, 2660, 2672, 2684, 2696, 2708, 2720, 2732, 2744, 2756, 2768, 2780, 2792, 2804, 2816, 2828, 2840, 2852, 2864, 2876, 2888, 2900, 2912, 2924, 2936, 2948, 2960, 2972, 2984, 2996, 3008, 3020, 3032, 3044, 3056, 3068, 3080, 3092, 3104, 3116, 3128, 3140, 3152, 3164, 3176, 3188, 3200, 3212, 3224, 3236, 3248, 3260, 3272, 3284, 3296, 3308, 3320, 3332, 3344, 3356, 3368, 3380, 3392, 3404, 3416, 3428, 3440, 3452, 3464, 3476, 3488, 3500, 3512, 3524, 3536, 3548, 3560, 3572, 3584, 3596, 3608, 3620, 3632, 3644, 3656, 3668, 3680, 3692, 3704, 3716, 3728, 3740, 3752, 3764, 3776, 3788, 3800, 3812, 3824, 3836, 3848, 3860, 3872, 3884, 3896, 3908, 3920, 3932, 3944, 3956, 3968, 3980, 3992, 4004, 4016, 4028, 4040, 4052, 4064, 4076, 4088, 4100, 4112, 4124, 4136, 4148, 4160, 4172, 4184, 4196, 4208, 4220, 4232, 4244, 4256, 4268, 4280, 4292, 4304, 4316, 4328, 4340, 4352, 4364, 4376, 4388, 4400, 4412, 4424, 4436, 4448, 4460, 4472, 4484, 4496, 4508, 4520, 4532, 4544, 4556, 4568, 4580, 4592, 4604, 4616, 4628, 4640, 4652, 4664, 4676, 4688, 4700, 4712, 4724, 4736, 4748, 4760, 4772, 4784, 4796, 4808, 4820, 4832, 4844, 4856, 4868, 4880, 4892, 4904, 4916, 4928, 4940, 4952, 4964, 4976, 4988, 5000, 5012, 5024, 5036, 5048, 5060, 5072, 5084, 5096, 5108, 5120, 5132, 5144, 5156, 5168, 5180, 5192, 5204, 5216, 5228, 5240, 5252, 5264, 5276, 5288, 5300, 5312, 5324, 5336, 5348, 5360, 5372, 5384, 5396, 5408, 5420, 5432, 5444, 5456, 5468, 5480, 5492, 5504, 5516, 5528, 5540, 5552, 5564, 5576, 5588, 5600, 5612, 5624, 5636, 5648, 5660, 5672, 5684, 5696, 5708, 5720, 5732, 5744, 5756, 5768, 5780, 5792, 5804, 5816, 5828, 5840, 5852, 5864, 5876, 5888, 5900, 5912, 5924, 5936, 5948, 5960, 5972, 5984, 5996, 6008, 6020, 6032, 6044, 6056, 6068, 6080, 6092, 6104, 6116, 6128, 6140, 6152, 6164, 6176, 6188, 6200, 6212, 6224, 6236, 6248, 6260, 6272, 6284, 6296, 6308, 6320, 6332, 6344, 6356, 6368, 6380, 6392, 6404, 6416, 6428, 6440, 6452, 6464, 6476, 6488, 6500, 6512, 6524, 6536, 6548, 6560, 6572, 6584, 6596, 6608, 6620, 6632, 6644, 6656, 6668, 6680, 6692, 6704, 6716, 6728, 6740, 6752, 6764, 6776, 6788, 6800, 6812, 6824, 6836, 6848, 6860, 6872, 6884, 6896, 6908, 6920, 6932, 6944, 6956, 6968, 6980, 6992, 7004, 7016, 7028, 7040, 7052, 7064, 7076, 7088, 7100, 7112, 7124, 7136, 7148, 7160, 7172, 7184, 7196, 7208, 7220, 7232, 7244, 7256, 7268, 7280, 7292, 7304, 7316, 7328, 7340, 7352, 7364, 7376, 7388, 7400, 7412, 7424, 7436, 7448, 7460, 7472, 7484, 7496, 7508, 7520, 7532, 7544, 7556, 7568, 7580, 7592, 7604, 7616, 7628, 7640, 7652, 7664, 7676, 7688, 7700, 7712, 7724, 7736, 7748, 7760, 7772, 7784, 7796, 7808, 7820, 7832, 7844, 7856, 7868, 7880, 7892, 7904, 7916, 7928, 7940, 7952, 7964, 7976, 7988, 8000, 8012, 8024, 8036, 8048, 8060, 8072, 8084, 8096, 8108, 8120, 8132, 8144, 8156, 8168, 8180, 8192, 8204, 8216,

第九章 船模自航试验及实船性能预报

§ 9.1 船模自航试验

可解决的问题：1) 预估实船性能，即给出 P_s ， n 及 V 之间的关系，验证设计是否满足任务书航速要求；
2) 判断船—桨—机间的配合情况

一、相似定理

阻力试验：

$$F_{ns} = F_{nm} \longrightarrow \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}}$$

桨模敞水试验：

$$J_s = J_m \longrightarrow \frac{V_{Am}}{n_m D_m} = \frac{V_{As}}{n_s D_s}$$

自航试验应同时满足上两条件：

由几何相似条件：

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

则:

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

$$\frac{V_{As}}{n_s} = \frac{V_{Am}}{n_m} \lambda \longrightarrow n_m = n_s \sqrt{\lambda} \left(\frac{1 - w_m}{1 - w_s} \right)$$

如 $w_m = w_s$ 则 $n_m = n_s \sqrt{\lambda}$

由于在船后满足了进速系数相等的条件
故有

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

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

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

考虑到船桨间的影响:

$$T_s (1 - t_s) = R_s$$

$$T_m (1 - t_m) = R_m$$

如 $t_m = t_s$, 则从桨的结果看, 船体阻力应存在模型与实船间三次方的关系, 但在《船舶阻力》中知, $F_{ns} = F_{nm}$ 时, 这种关系不成立。

二、摩擦阻力的修正

自航试验中只有阻力中的摩擦阻力部分不满足三次方关系，摩擦阻力修正值为：

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

或

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

试验中，加一拖鞋力 F_D ，桨模推力克服 $R_m - F_D$ ，相当于实桨克服总阻力 R_s ，如 $t_m = t_s$ ，则：

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

修正的目的是使桨模与实桨的载荷相当，以便由自航试验结果估算实船推进性能。

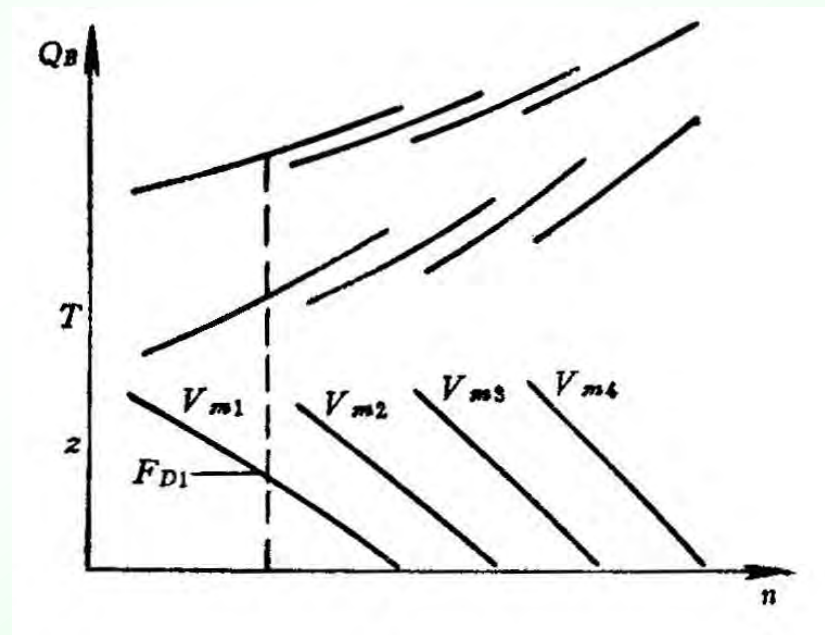
三、自航试验概述

试验中，对 V_m ， R_m 已由阻力试验测得， n_m ， T_m ， Q_B 由动力仪测得，强制力 Z 由阻力仪测得

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

两种试验方法：

- 1、纯粹自航法：使 $Z=F_D$ ，保持船模速度与拖车速度相等，但难于调整；
- 2、强制自航法：对某一航速加5个强制力， $Z_1=0$ ， $Z_2=0.5F_D$ ， $Z_3=F_D$ ， $Z_4>F_D$ ， $Z_5>Z_4$ ，在 V_m 下进行5次试验，记录 Z ， T ， Q_B ， n_m ，取多个航速进行试验。



思考题：进行螺旋桨自航试验时应满足什么条件？