

船舶操纵性和控制及其 在船舶设计中的应用

野本谦作

中国船舶科学研究中心

一九八二年三月

船舶操纵性和控制及其在船舶设计中的应用

日本大阪大学教授野本谦作专题讲稿

徐 铨 胡相鸿
朱兴中 周林华 译校

中国船舶科学研究中心

出版说明

本书是根据日本大阪大学著名教授野本谦作于1980年9月在哈尔滨船舶工程学院讲学时所作的船舶操纵性专题讲稿整理、翻译而成。本书比较全面地介绍了船舶操纵性研究的理论、方法和有关的模型试验以及实船试验技术，回顾了研究船舶操纵性的历史，并介绍了最新的研究成果。对从事船舶操纵性研究、设计的科技人员，大专院校师生，航运部门船舶操纵驾驶人员，以及船舶建造师们，都有一定的参考价值和实用意义。

在整理、翻译过程中，中国船舶工程学会船舶力学学术委员会操纵性学组的负责同志，对本书的翻译出版给予了多方面的指导和支持。哈尔滨船舶工程学院教授陈厚泰同志，不仅热情支持本书的翻译，而且提供了不少方便和帮助。特在此致以深切的谢意。

本书由徐铨、周林华总校。

由于译者水平有限，译文中错误和不妥之处，望读者批评指正。

目 录

绪 言

第一章 水动力和运动方程

1.1	水惯性力和坐标系统	(7)
1.2	附加质量项的估算	(8)
1.3	水动力 X 、 Y 和 N 的估算	(12)
1.4	约束模型加数字模拟	(19)

第二章 操舵对偏航响应的线性分析

2.1	操纵运动线性方程	(24)
2.2	回转能力以及对操舵的快速响应	(26)
2.3	航向稳定性与航向保持性能	(27)
2.4	船舶横荡运动的几点说明	(28)
2.5	T_1 、 T_2 和 T_3 的补充讨论	(29)

第三章 船舶操纵性的 K - T 分析及其在船舶设计中的应用

3.1	K - T 分析的基本理论	(30)
3.2	Z形操纵试验的 K - T 分析	(32)
3.3	操纵性指数资料	(35)
3.4	操纵性指数预报图表	(37)
3.5	根据指数 K 和 T 的操纵性战略设计	(37)
3.6	K - T 分析的数学简化	(40)
3.7	K - T 和进距、战术直径、操舵速度及预报船舶航迹的关系	(43)
3.8	初始航向改变	(44)
3.9	首摇阻尼与 K - T 之间的关系	(45)
3.10	K - T 相关性: 回转性和稳定性之间的相关性	(47)
3.11	现代大型油船操纵性能的研究	(48)

第四章 控制理论在船舶操纵性中的应用

4.1	正弦操舵响应和频率响应	(56)
4.2	操纵性运动试验确定传递函数	(57)
4.3	自动操舵——自动驾驶仪	(58)

4.4	首摇引起的推进功率损失.....	(62)
4.5	手工操舵稳定性及其模拟研究.....	(63)
4.6	基础数学.....	(69)

第五章 操纵性的非线性分析

5.1	舵对首摇响应的三次方非线性模型.....	(75)
5.2	近似的速度方程.....	(77)
5.3	速度变化和主机控制对首摇响应的影响.....	(79)
5.4	从操纵试验确定响应特性——“系统辨识技术”.....	(79)
5.5	关于临界稳定船舶应用 $K-T$ 分析的一些注释.....	(82)

第六章 操纵试验：实船和无线电遥控模型；

操纵性尺度效应

6.1	回转试验.....	(86)
6.2	螺旋线试验 以及 $r'-\delta$ 特性.....	(86)
6.3	Z 形试验及其分析.....	(87)
6.4	回直试验.....	(90)
6.5	变航向试验.....	(90)
6.6	关于操纵性的尺度效应.....	(94)

参 考 文 献

附 录 “限制水道中的操纵性”

“限制水道中船舶操纵性的试验研究”(第一部分)。藤野正隆

绪 言

船舶的驾驶技术与船舶本身有同样古老的历史。在较早的年代,推进和驾驶是用单一的手段来完成的,即使用桨或橹(图0.1)。随着船舶尺度的增大,驾驶与推进分开了:驾驶用的橹叶逐渐移到船尾部,而推进的职能则由许多沿船舷排列的“推进”橹叶或帆来完成(图0.2、0.3、和0.4)。到中世纪时代,帆已成为驱动船舶的主要方法,船尾舵已被普遍采用(图0.5、0.6、0.7及0.8)。到十九、二十世纪,帆虽被蒸汽机和内燃机取代了,而舵仍保持其基本的形式(图0.9)。

几千年来,船舶驾驶和舵设计的技术,完全建立在经验的基础上,几乎没有作科学的研究,技术上的分析也是很少的。

在本世纪三十年代,魏勃伦(Weinblum)将飞艇的操纵理论引进到船舶操纵性上来[1],这是船舶操纵性的第一次成功的数学探讨。此后,许多科学家发展了这个方法[2]、[3]、[4]、[5],到本世纪五十年代初,已较好地确立了船舶操纵运动的数学分析原理。

这种方法采用了一组船舶的纵向、侧向和回转运动的联立方程,即:

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u} - (m+m_y)vr &= X(u,v,r,\delta,n) \\ (m+m_y)\dot{v} + (m+m_x)ur &= Y(u,v,r,\delta,n) \\ (I_z+J_z)\dot{r} &= N(u,v,r,\delta,n) \end{aligned} \right\} \quad (0.1)$$

式中

u, v, r ——船舶的纵向、侧向分速度和回转角速度,

m, I_z ——船舶的质量和惯性矩,

m_x, m_y, J_z ——附加质量和附加惯性矩,

X, Y, N ——作用在船舶(包括舵)上的水动力和力矩,每一个都是 u, v, r, δ, n 的函数,

δ, n ——舵角和螺旋桨转速。

给定了舵角 $\delta(t)$ 和螺旋桨转速 $n(t)$ (一般两者都是时间的函数),原则上可以从描述船舶操纵运动的方程(0.1)解得 u, v 和 r 。

求解方程(0.1)时,最首要的一步是要知道作用在船舶上的水动力 X, Y 和 N ,它们都是 u, v, r, δ 和 n 的函数。

用水动力学理论来估算 X, Y 和 N ,仍然是船舶水动力学的有争议的课题之一,至今尚无定论,其结果往往不够精确。

同时,从“约束模型”试验来预测水动力 X, Y 和 N ,可以达到相当的精度。旋臂装置、具有 $x-y$ 拖车的圆形运动机构(CMM)或平面运动机构(PMM)都是用于这种目的的。这样,从试验得到了以多项式形式表达的 X, Y 和 N ,然后代入方程(0.1),该方程进行数值积分,就得到某既定操舵运动所产生的船舶运动 u, v 和 r 。这方法称之为“约束模型加数字模拟”技术。

第一章将要概括地叙述水动力的理论和实验的估值法,然后介绍“约束模型加数字模拟”。

第二章将要作操纵运动的线性分析。线性分析常常为我们提供现象的较好物理解释,对船舶操纵性也不例外。其步骤是:(1)假设操纵强度是适中的,船的速度无明显变化,则我们只要把注意力集中在侧向和回转运动上;(2)再者,假设操纵适中,水动力 Y 和 N 可以用 v, r 和 δ 的线

性函数来表达; (3)最后, 我们得到描述船舶的首摇对舵的响应的线性微分方程, 即

$$T_1 T_2 \ddot{\psi} + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \psi = K \delta + K T_3 \dot{\delta} \quad (0.2)$$

其中, 定义 ψ 为首向角, δ 为舵角, T_1 、 T_2 、 T_3 和 K 是与船型、舵外形、船舶的尺度和速度有关的常数。

在此方程的基础上, 我们将讨论船舶的方向稳定性、对舵的快速响应和回转性。

在第三章中, 我们将要讨论操纵响应的一阶系统近似, 即“ $K-T$ 分析”, 及其在船舶设计上的应用。这里, 我们还将引进一些经验图谱, 以便从船舶的主要尺度和一些设计参数来估计船舶的操纵性。基本的响应方程是

$$T \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K \delta \quad (0.3)$$

这里, $T = T_1 + T_2 - T_3$ 。这是方程(0.2)的近似形式。

第四章叙述有关控制理论在船舶操纵性中的应用。基于方程(0.2), 引进船舶操纵的传递函数, 即

$$Y(s) = \frac{\dot{\psi}(s)}{\delta(s)} = \frac{K(1 + T_3 s)}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \quad (0.4)$$

其中, $\dot{\psi}(s)$ 和 $\delta(s)$ 分别表示 $\dot{\psi}(t)$ 和 $\delta(t)$ 的拉普拉斯变换, s 是拉普拉斯变换参数。

为了从无线电控制的自航模型试验得到船舶的操纵响应特性, 我们将要阐述频率响应法, 并将此法应用于实船的操纵性试验。

然后, 还将讨论自动操纵, 或称之为自动驾驶。同时也将研究其稳定性和由此产生的推进功率损失。

人工操纵的稳定性是更为复杂的课题, 然而也是安全航行的重要问题; 对较小的船只, 例如拖船、渔船、沿海和内河运输船, 尤为重要。我们将在控制理论的基础上, 并应用实时船舶操纵模拟器来研究这个问题。

在第五章中, 我们将要为船舶操纵性推导一个非线性分析法。在操纵运动中, 非线性的来源有两方面: 第一, 水动力 Y 和 N 本身是非线性的, 就是说, Y 和 N 并不是船舶运动参数 v 和 r 的精确的线性函数; 第二, 由于大舵角操纵引起的速度变化所产生。而且, 在某些情况下有意控制螺旋桨的转速 n , 自然使船速发生激烈变化, 因而在船舶运动中产生了不可忽视的非线性特性。对这样的操纵运动, 我们将推荐一个较为简单的非线性数学模型, 即

$$\dot{V} + a_{vv} V^2 + a_{rr} \dot{\psi}^2 + a_{\delta\delta} V^2 \delta^2 = a_{nn} n^2 + a_{nr} n V \quad (0.5)$$

$$\begin{aligned} T_1' T_2' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \ddot{\psi} + (T_1' + T_2') \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\psi} + \psi + \alpha' \left(\frac{L}{V}\right)^2 \dot{\psi}^3 \\ = K' g(s) \left(\frac{V}{L}\right) \left\{ \delta + T_3' \left(\frac{L}{V}\right) \dot{\delta} \right\} \end{aligned} \quad (0.6)$$

方程(0.5)是从方程(0.1)的纵向方程简化而得的。方程(0.6)在某种意义上是方程(0.2)的推广, 将在这一章中进一步阐述。

从自航模型试验, 甚至从实船试验去求出包括非线性在内的全部特征参数的过程是很有趣的, 也是很有用的, 这个问题也将在这一章中讨论。

许多实船操纵性试验及其分析的实际过程, 将在第六章中研究。其中提到了回转、螺旋线和逆螺旋线、Z形操舵、变航向及制动等试验方法, 也稍许谈了点操纵性的尺度效应问题。

最后, 将在附录中介绍藤野(M. Fujino)和哈塔勃(O. M. M. Khattab)关于在浅水和狭水道中的操纵运动和控制。也许这是目前在这个重要而棘手的课题上的最全面的研究。



图 0.1 中国山东出土的东汉石墓浮雕，建于公元 147 年。（伦敦科学博物馆藏）

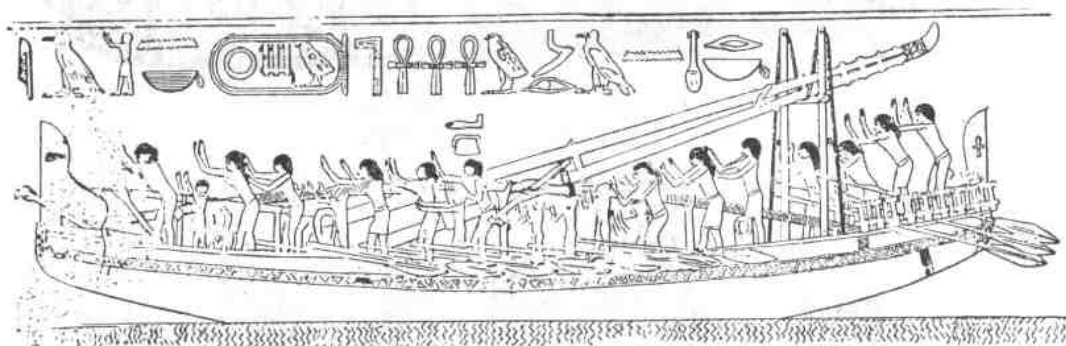


图 0.2 埃及海船(第V王朝)

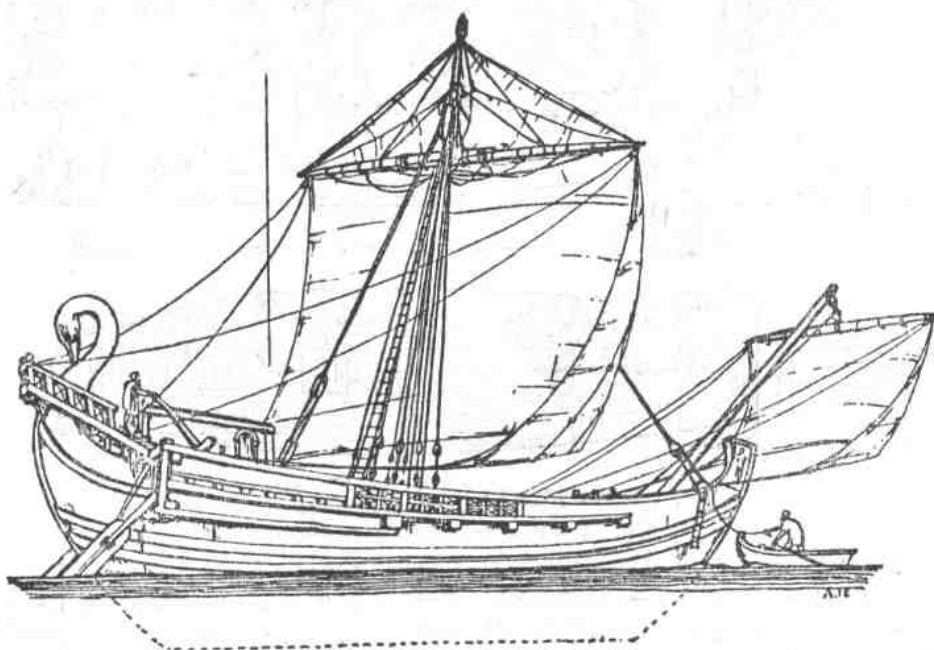


图 0.3 罗马帆船(公元二世纪)

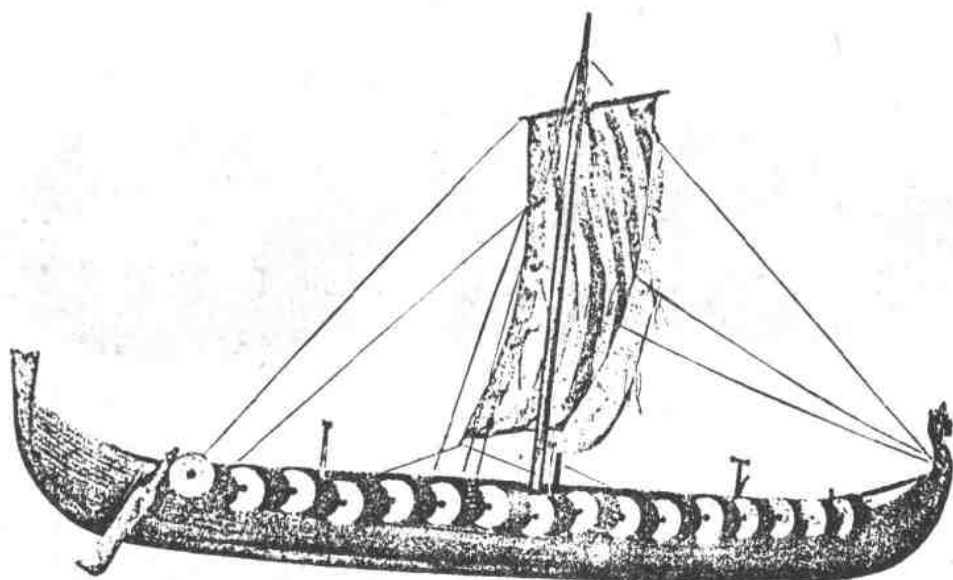


图 0.4 挪威海盗船(公元九世纪)

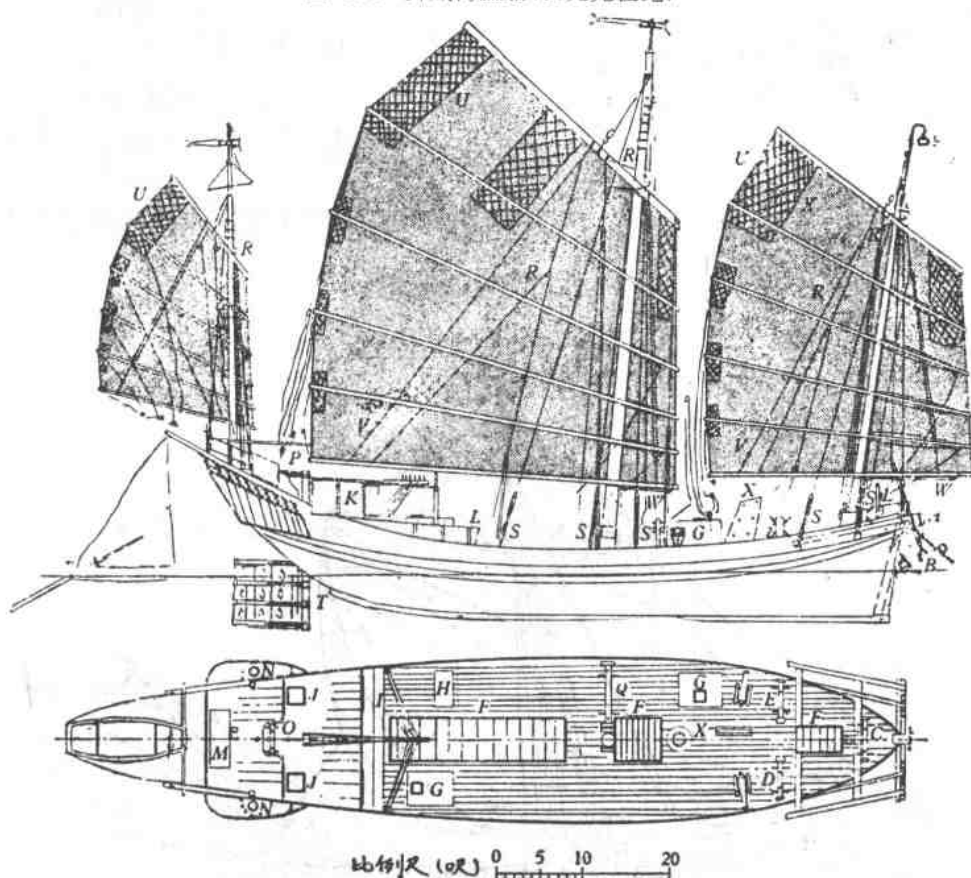


图 0.5 中国广东海船的部件(中世纪)

A——木锚, B——半外来锚, C——前帆卷扬机, D——木锚机, E——外来锚机, F——舱口, G——淡水箱, H——厨房, I——驾驶室舷梯, J——底舱舱口, K——防弹护板, L——可拆舷墙, M——神龛, N——厕所, O——舵机, P——操舵滑轮, Q——主吊索, R——顶桅吊索(直立在高处的部件), S——侧支索(仅在广东船上有), T——龙骨后端, U——防擦装置, V——套环和套索, W——吊杆桁架, X——中拔水板和围阱。

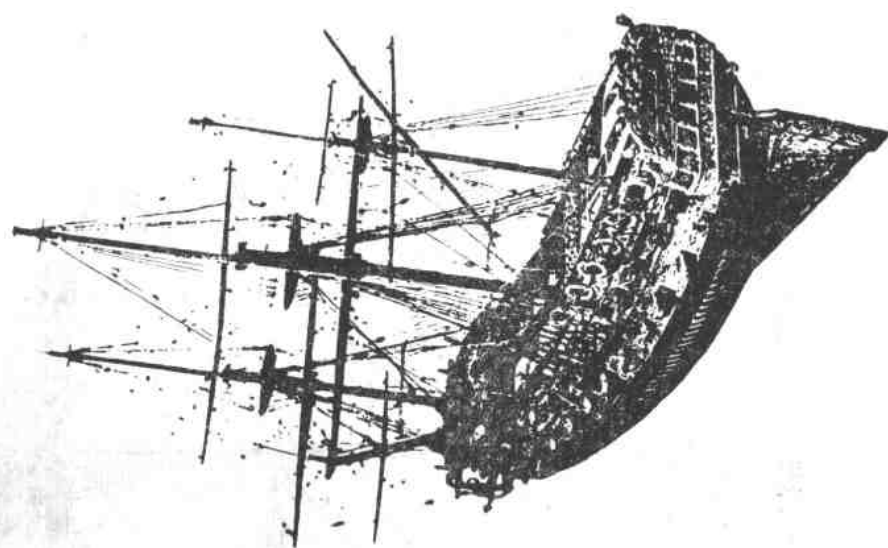


图 0.7 十七、十八世纪英国带帆战船。(伦敦科学博物馆藏)

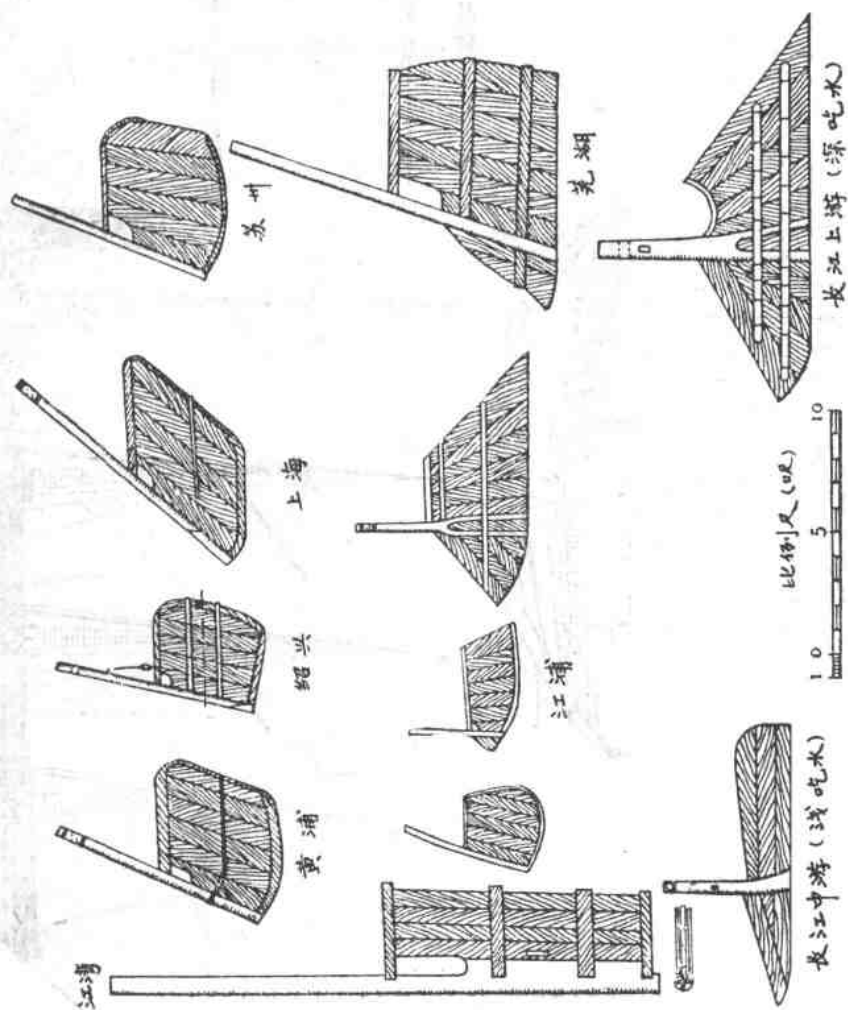


图 0.6 中国船舵说明了从大型海船到长江上游船的平衡舵的变迁。中世纪

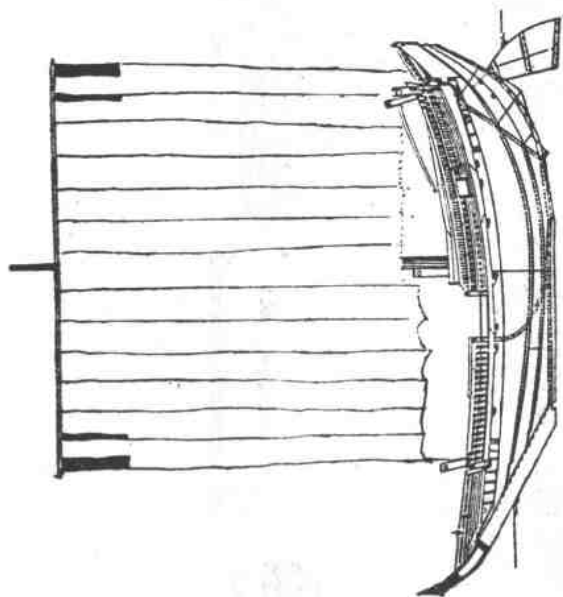


图 0.8 十八、十九世纪日本“BEZAI”型商船，约一百吨。

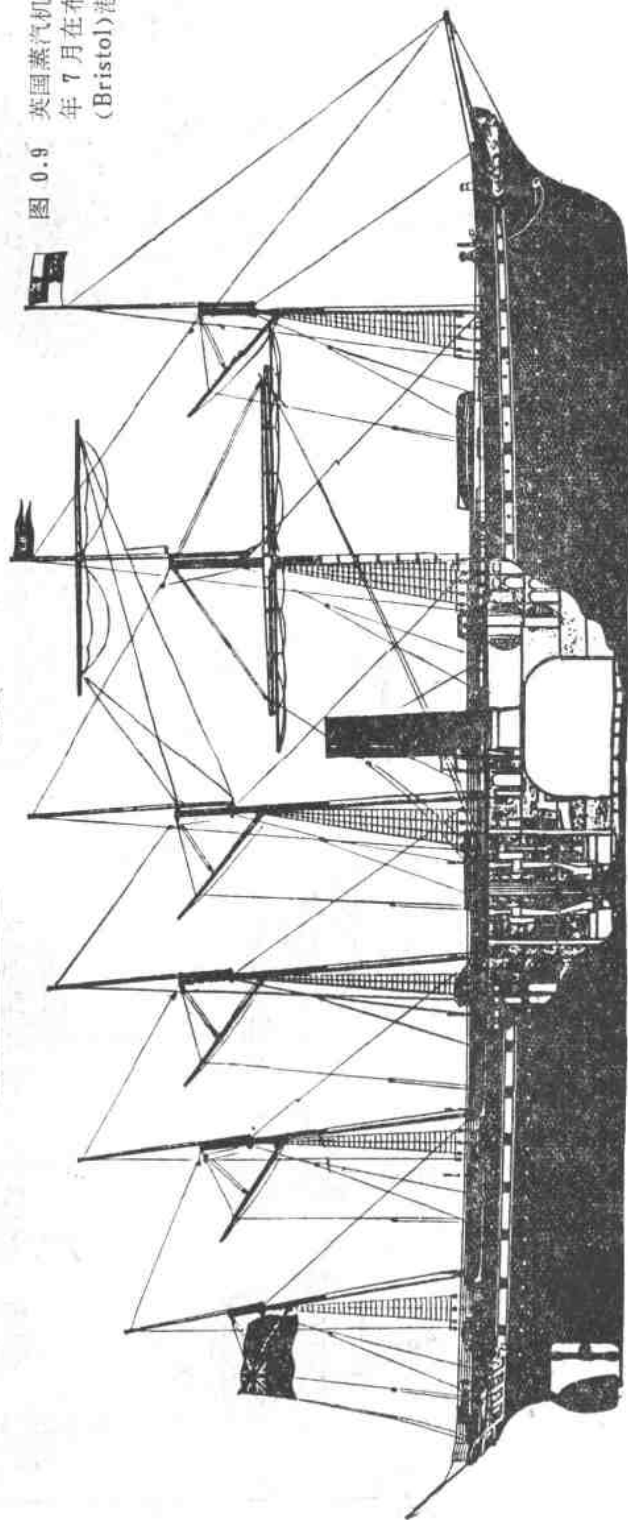


图 0.9 英国蒸汽机船，于 1843 年 7 月在布里斯托尔 (Bristol) 港下水

第一章 水动力和运动方程

1.1 水惯性力和坐标系

我们采用体坐标轴系(图 1.1)。这一坐标系统固连在船体上,而不是固连在空间。原点在船舶的重心处, X 轴为纵向, 向前为正, 正 Y 轴指向右舷, 而正 Z 轴向下。应用这样的坐标系统, 将水动力分解为 X 分量和 Y 分量, 船舶的速度和加速度也分解成 X 分量和 Y 分量。不过, 速度和加速度的测量并不是相对于这个坐标系统, 而是相对于空间来进行的。

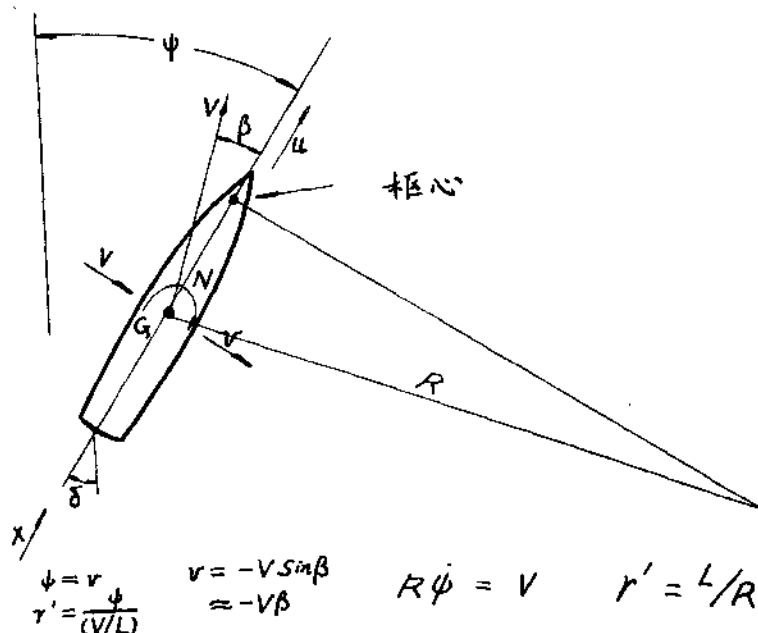


图 1.1 体坐标系

相对于空间来定义速度和加速度, 并将它们分解为体坐标系中的 X 和 Y 分量, 这很重要。例如, u 是船舶相对于地球(空间)的前进方向的速度分量(X 方向)。

应用其它的坐标系当然也是可以的, 然而这个坐标系更适宜, 它对左右对称的船舶很有方便之处, 可以用简洁的形式来描述水惯性力(附加质量)。因此, 目前已将这种坐标轴系统确立为船舶操纵性领域中惯用的一种坐标系。

水惯性力(熟知的附加质量)是被具有加速度的物体运动所加速的水的反作用力, 该力与加速度成正比, 加速度越大, 该力也越大, 其比例常数与物体的形状和运动的方向有关。

船舶在波浪中运动时, 水惯性力的频率相关性是重要的。然而, 在操纵性方面, 船舶的运动是很缓慢的, 因此频率相关性可以忽略, 我们能够放心地应用零频率的水惯性力系数[6]。

撇开水动力学教材中有关这个问题的数学描述[4], 让我们写出作用在操纵运动的船舶上的水惯性力。

采用体坐标轴系统, 并参考图 1.1;

$$\left. \begin{aligned} \text{船舶加速度的前进分量: } \dot{u} - vr \\ \text{船舶加速度的侧向分量: } \dot{v} + ur \\ \text{船舶加速度的首摇分量: } \dot{r} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

$\dot{u}$ 是由 X 方向的速度 u 变化产生的 X 方向的加速度, 而 $-vr$ 是由 Y 方向的速度 v 的方向改变产生的 X 方向的加速度。对 $\dot{v} + ur$ 也类似。加速度的第二部分, 即 $-vr$ 和 ur , 是值得注意的。

对应的水惯性力是:

$$\left. \begin{aligned} X \text{ 分量: } -m_x \dot{u} + m_y vr \\ Y \text{ 分量: } -m_y \dot{v} - m_x ur - l_{GG'} m_y \dot{r} \\ \text{首摇分量: } -J_z \dot{r} - l_{GG'} m_y \dot{v} \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

式中, m_x 、 m_y 和 J_z 是水惯性力的比例常数, $l_{GG'}$ 是从重心到侧向水惯性力 $m_y \dot{v}$ 的作用中心之间的距离, 以在重心前为正。 $l_{GG'}$ 与物体的水下部分的前、后不对称有关, 通常它非常小。

现在, 可由力学的基本定律——牛顿加速度定律确定操纵运动方程, 即:

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} - vr) &= -m_x \dot{u} + m_y vr + X(u, v, r, \delta, n) \\ m(\dot{v} + ur) &= -m_y \dot{v} - m_x ur - l_{GG'} m_y \dot{r} + Y(u, v, r, \delta, n) \\ I_z \dot{r} &= -J_z \dot{r} - l_{GG'} m_y \dot{v} + N(u, v, r, \delta, n) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

X 、 Y 和 N 是除了上述的水惯性力以外的、作用在船上的水动力。 X 、 Y 和 N 与 u 、 v 、 r 、舵角 δ 和螺旋桨转速 n 有关。

将水惯性力移到左边, 可得

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) vr &= X(u, v, r, \delta, n) \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) ur + m_y \dot{r} l_{GG'} &= Y(u, v, r, \delta, n) \\ (I_z + J_z) \dot{r} + m_y \dot{v} l_{GG'} &= N(u, v, r, \delta, n) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

通常的排水量型船大多是纵向对称的, 因此 $l_{GG'}$ 可以忽略(注意, 不对称情况除外)。则我们就得到了本文开头给出的方程(0.1)。

比较方程(1.4)和(1.3)可以看出, 在只有水动力 X 和 Y 的作用下, 水惯性力的作用犹如增加了船的质量, 其特性好比使 X 方向的质量为 $(m + m_x)$, Y 方向的质量为 $(m + m_y)$ 。因此, 我们称 $(m + m_x)$ 为纵向虚质量, $(m + m_y)$ 为侧向虚质量。那末, m_x 就称为纵向附加质量, m_y 为侧向附加质量。类似地, $(I_z + J_z)$ 称为虚质量惯性矩, J_z 为附加质量惯性矩。

不过我们应该小心, 这只是事物的表面, 并非物理上的本质。说一定量的水质量随船一起运动, 这并不完全确切, 从这个意义上讲, “附加质量”一词可能会引起误解。

1.2 附加质量项的估算

1.2.1 m_x

对一条给定的船型, 没有估算 m_x 的理论方法, 我们只能应用与船有相等比值 ∇/L^3 的椭球体的 m_x 。为此目的, 可利用图 1.2。

幸运的是 m_x 很小, 只占船舶质量 m 的很小百分比, 因此, 在实际应用中, 粗略地估计已感足够。

元良(Motora)在一系列巧妙的模型试验的基础上得到由船体的一些设计比例去估算 m_x 的图谱[8]。这些图谱(图 1.3、1.4 和 1.5)也许为确定 m_x 提供了最好的方法。

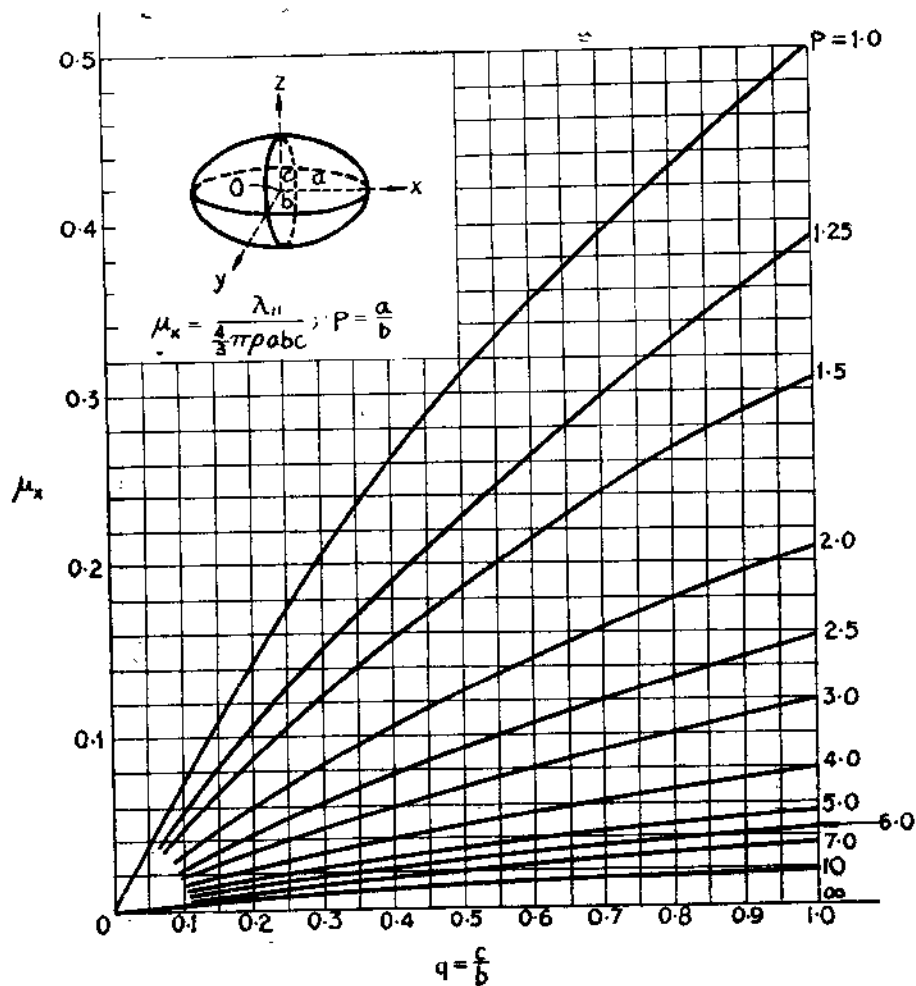


图 1.2 椭球的
 $\mu_x = m_a/m$

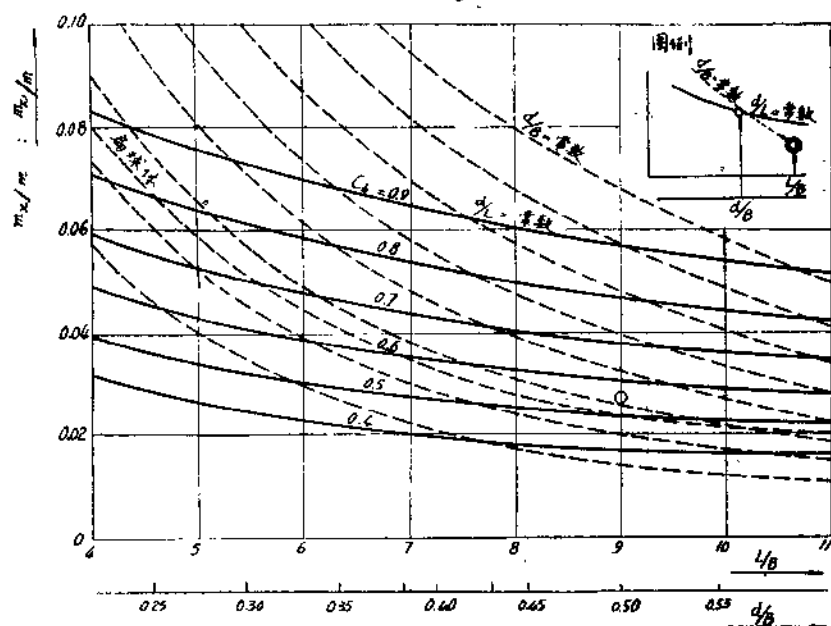


图 1.3 m_a/m
的元良图谱

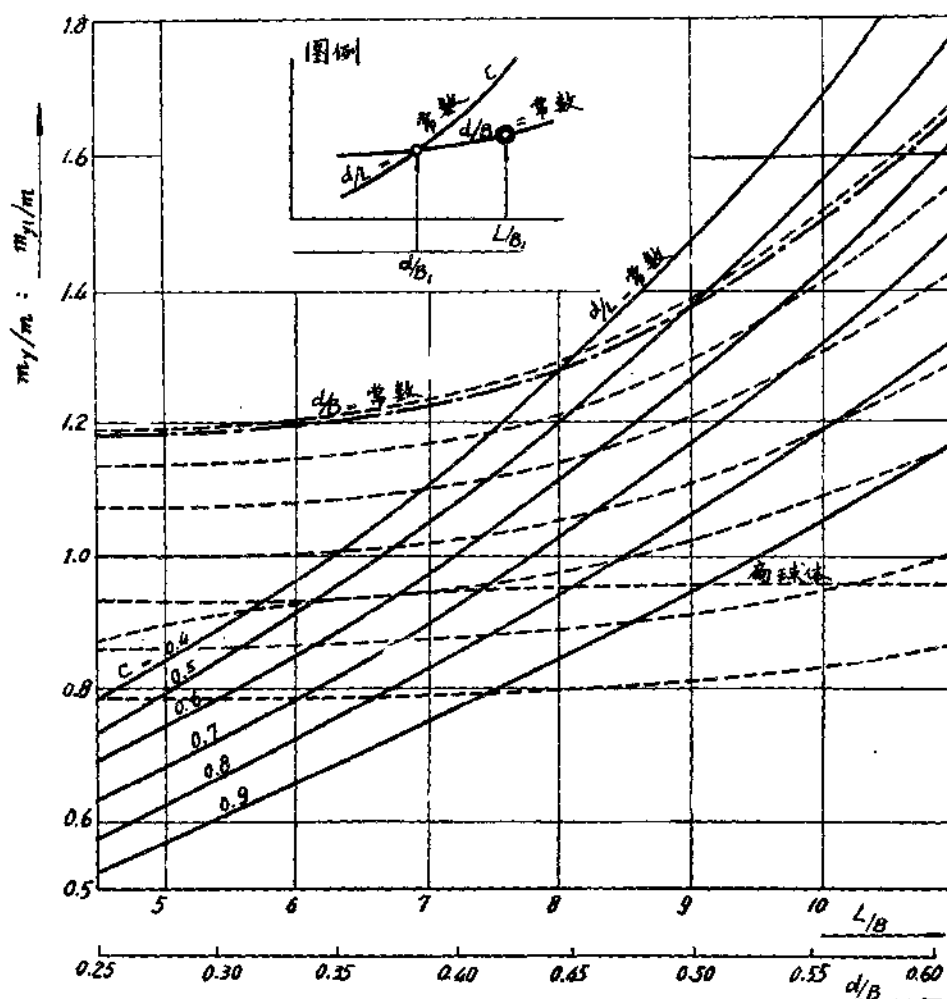


图 1.4 m_v/m 的元良图谱

1.2.2 m_v 、 J_z 和 $l_{GG'}$

(1) 用“切片法”来估算 m_v 、 J_z 和 $l_{GG'}$ ，已证明在理论上是成功的。其原理是先得到每一横截面处的二元侧向附加质量，然后从头至尾沿纵向积分。

刘易斯(Lewis)保角变换已被广泛用于计算横截面上的二元侧向附加质量。表 1.1 和图 1.6 表示一个任意截面上用这个方法得到的附加质量系数 C ，截面的宽度——吃水比 B/d 和面积系数 S/Bd 作为截面的形状参数。则得到

$$m_v = \frac{\rho}{2} \pi \int_{-L/2}^{L/2} C d^2(x) dx \quad (1.5)$$

$$J_z = \frac{\rho}{2} \pi \int_{-L/2}^{L/2} C d^2(x) x^2 dx \quad (1.6)$$

$$l_{GG'} = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} C d^2(x) dx}{m_v / \frac{\rho}{2} \pi} \quad (1.7)$$

这里， C 由表 1 (或图 1.6) 给出， ρ 是水的密度 ($104 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^{-3} \cdot \text{秒}^2$ ——海水)， L 是船长， $d(x)$ 指在 x 处的横截面的局部吃水。

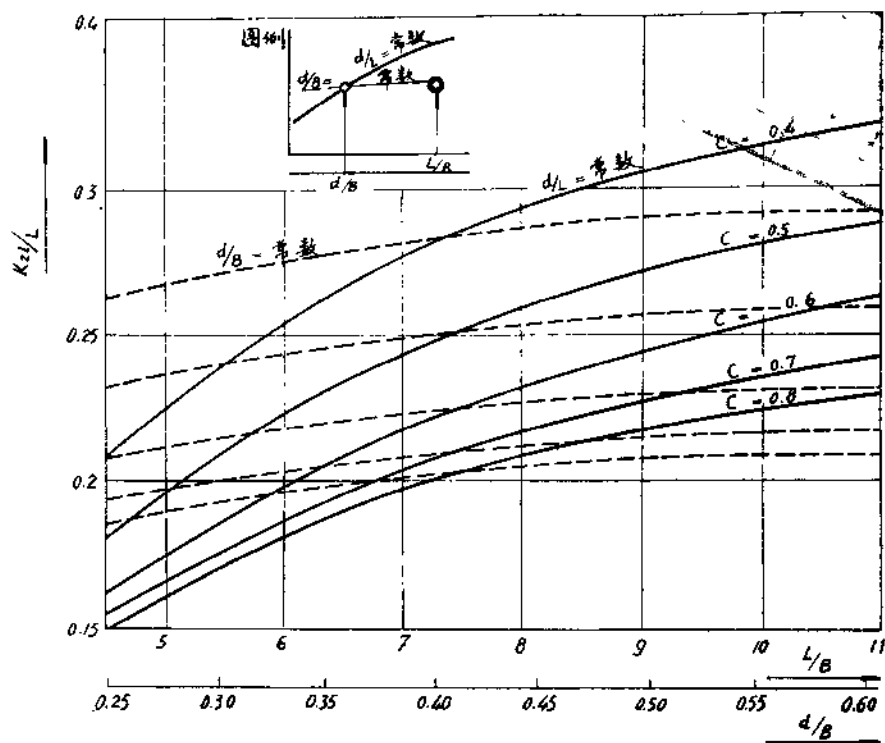


图 1.5 $K_{z1} = \sqrt{J_z/m}$ 的元良图谱

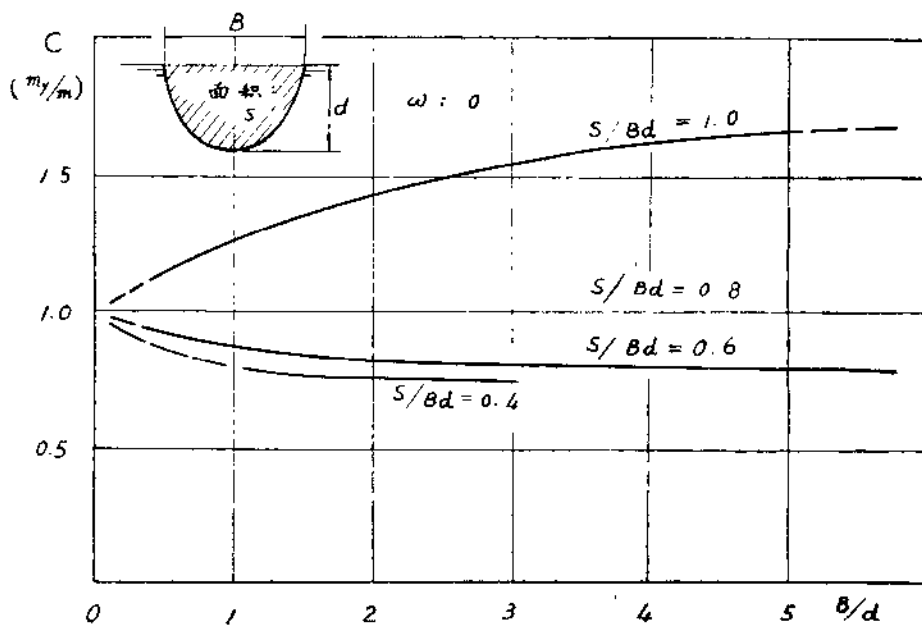


图 1.6 作为 B/d 和 S/Bd 的函数的附加质量系数 C

表 1.1 作为 B/d 和 S/Bd 的函数的附加质量系数 $C(\omega=0)$

B/d	0.4	1.2	2.0	2.8	4.0	5.6
S/Bd						
0.4		0.787	0.758	0.751		
0.6	0.931	0.865	0.833	0.831	0.795	0.782
0.8	1.006	1.015	1.000	1.022	1.025	1.027
1.0	1.108	1.299	1.427	1.520	1.605	1.673

(2) 元良根据实验确定了 m_y 和 J_z 的估算图谱[8]。这些图(图 1.3、1.4、1.5)是确定 m_x 和 J_x 的快速方法。一般地,它与切片法的计算结果很一致。

(3) 平面运动机构的拖曳试验可确定船型的 m_y 和 J_z , 即,由“纯横荡”试验给出 m_y ,“纯摇首”试验给出 J_z 。详见第 1.3.2—(3)节的叙述。

1.3 水动力 X 、 Y 和 N 的估算

1.3.1 力 X

显然,

$$X = T(1-t) - R_H - R_R \quad (1.8)$$

这里, T 为螺旋桨推力, t 为推力减额因子, R_H 为一般的船体阻力, R_R 为舵力的阻力分量。

对于一般的商船, R_H 与 V^2 成适当比例, 因此,

$$R_H = \frac{\rho}{2} L d V^2 X'_{Vr} \quad (1.9)$$

在功率计算中, R_H 通常以船的浸湿面积表示的,

如: $R_H = \frac{\rho}{2} S V^2 C_L$, S 是浸湿面积。则

$$X'_{Vr} = \frac{S}{Ld} C_L \approx 2C_L \quad (1.10)$$

舵阻力 R_R 近似等于(舵法向力) $\times \sin \delta$, 则参考 1.3.3 节,

$$R_R = \frac{\rho}{2} A_R V_R^2 \cdot \frac{6.1\lambda}{\lambda + 2.2} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \delta \quad (1.11)$$

其中, λ 表示舵的展弦比, 即舵高与弦长(剖面宽度)之比, A_R 为舵面积, V_R 为舵的迎流速度, α 为舵的迎流角。在适中的操纵中, 对单桨船(伴流和螺旋桨滑脱的影响彼此抵消), $\alpha \approx \delta$, $V_R \approx V$, 则得到

$$R_R = \frac{\rho}{2} A_R V^2 \cdot \frac{6.1\lambda}{\lambda + 2.2} \delta^2 = \frac{\rho}{2} L d V^2 \delta^2 X'_{\delta\delta} \quad (1.12)$$

其中, $X'_{\delta\delta} = \frac{A_R}{Ld} \cdot \frac{6.1\lambda}{\lambda + 2.2}$

最后, X 力的最主要部分也许是螺旋桨的推力。图 1.7 表示了作用在一条 4 米长的大型油船模型上的有效推力, 其螺旋桨滑脱是不同的。(1-t) T 是实际推动船舶的有效推力, n 是螺旋桨每秒钟转数, D 是螺旋桨直径, V 为船速, ρ 是水的密度。负的滑脱, 即 $J_s < 0$, 对应于带倒转螺旋桨的前进运动。从这样的水池试验数据, 我们可以近似地写为

$$T(1-t) \approx \rho n^2 D^4 \left(C_1 - C_2 \frac{V}{nD} \right), \quad J_s > 0 \quad (1.13)$$