



高等学校统编教材

节能船型设计

李干洛 罗淮龙 编
谭政生 李洁雅

国防工业出版社

U 661.32

L24

425307

节能船型设计

李干洛 罗淮龙 编
谭政生 李洁雅



00425307

国防工业出版社

田宝荣

内 容 简 介

本书较系统、全面地介绍了各种节能船型的基本原理、主要特点、应用效果及发展动态，并对船舶推进节能技术和风帆推进与翼帆设计作了较详细的阐述。

本书可作为高等院校船舶工程专业的教学用书，也可供广大船舶工程技术人员及其它有关部门的科技人员参考。

节 能 船 型 设 计

李干治 罗准龙

谭政生 李浩雅

国防工业出版社

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张10¹/₂ 239千字

1990年4月第一版 1990年4月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

ISBN 7-118-00628-9/U·53 定价：2.15元

出版说明

根据国务院国发〔1978〕23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会（小组）是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《〈1986年——1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划〉》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会（小组）评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会（小组）复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

本书是根据 1986 年中国船舶工业总公司船舶工程教材委员会通过的《节能船型设计》大纲编写而成的，主要用作船舶工程专业本科生及研究生的选修教材，也可供广大船舶工程技术人员及其它有关人员参考。

节能船型是当前船舶发展的重要方面，国内外都在进行积极的研究，并取得了许多被工程实践证明是行之有效的成果。本书根据编者多年来从事节能船型教学和科研工作的实践，收集国内外的新资料，对各种节能船型作了较系统、全面的介绍，并对船舶推进节能技术和风帆推进与翼帆设计作了较详细的阐述，使读者对节能船型的发展和应用有一个较完整的概念。本书在内容方面尽量结合工程实际，并附有较丰富的模型试验及实船应用资料，在文字方面力求通俗易懂，便于读者自学。

本书共分四章，参加编写人员如下：

第一章，李干洛；第二章，罗淮龙；第三章，李洁雅；第四章，谭政生；全书统稿，谭政生。在本书编写过程中，得到各兄弟院校的热情支持与帮助，特别是上海交通大学潘伟文教授主审了本书的初稿，并提出了许多宝贵的意见，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平和时间所限，本书的缺点与错误在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

于华南理工大学

目 录

第一章 阻力理论在船型设计中的应用	1
§ 1-1 阻力理论和二次规划技术在船型优化设计中的应用	1
§ 1-2 线性兴波阻力理论与母型船变换相结合的船型设计方法	14
§ 1-3 粘性阻力理论在船型设计中的应用	27
§ 1-4 合理选择船型及主尺度优化计算	39
参考文献	49
第二章 节能船型设计	51
§ 2-1 概述	51
§ 2-2 隧道船型	52
§ 2-3 球鼻首船型	58
§ 2-4 球尾船型	64
§ 2-5 尾端球船型	69
§ 2-6 双尾船型	71
§ 2-7 不对称尾船型	77
§ 2-8 浅吃水船型	78
§ 2-9 纵流船型	79
§ 2-10 双体船型	81
§ 2-11 最佳纵倾节能技术	90
参考文献	93
第三章 船舶推进节能技术	94
§ 3-1 前置导管	94
§ 3-2 进流补偿导管	100
§ 3-3 舵附推力鳍	102
§ 3-4 反应鳍	108
§ 3-5 导轮推进装置	112
§ 3-6 翼型推进器	117
§ 3-7 尾导流鳍和水平首鳍	120
§ 3-8 船舶减速航行节能技术	125
参考文献	126
第四章 风帆推进与翼帆设计	128
§ 4-1 风帆船发展概述	128
§ 4-2 翼帆与传统风帆对比分析	131
§ 4-3 翼帆主要元素的选择	135
§ 4-4 翼帆推力及功率增益计算	140
§ 4-5 翼帆减摇效果及翼帆船横摇角计算	142
§ 4-6 翼帆船稳性校核	144
§ 4-7 帆-机-桨船的优化匹配	147

§ 4-8 翼帆材料的选择.....	150
§ 4-9 翼帆操纵系统.....	151
§ 4-10 翼帆助推的经济性分析	153
§ 4-11 抽气筒形帆简介	157
参考文献	161

第一章 阻力理论在船型设计中的应用

提高船舶快速性是船型设计中首先要考虑的问题。通常，船型设计是按任务书要求设计若干个方案进行船模试验，根据试验的结果最后选定船型。这种方法一般来说对船舶的性能是有保证的，但也有其局限性，因为船模试验要耗费大量的时间和财力，因而并不是在所有情况下都能进行船模试验。

近十多年来，随着计算技术的发展和电子计算机的逐渐普及，尤其是微型计算机的广泛应用，使许多船舶设计和研究部门都致力于用理论方法进行船型的优化设计。虽然目前各种阻力理论均作了一些假定，这些假定与实际情况有一定出入，导致了理论计算与试验结果存在差距。但是在定性上，这些理论可为开拓新船型和改进旧船型指出方向，而且经过理论预测和筛选，可减小模型试验的工作量，因此用理论方法进行船型的优化设计，是当前计算机辅助船型设计的研究方向之一。本章着重介绍应用线性兴波阻力理论和粘性阻力理论进行船型设计的基本方法。

§ 1-1 阻力理论和二次规划技术在船型优化设计中的应用

此方法是熊继昭教授⁽¹⁾⁽²⁾首先提出的，他在船舶诸阻力成份中，只考虑兴波阻力和摩擦阻力，兴波阻力采用线性兴波阻力理论的米歇尔 (Michell) 积分计算，摩擦阻力采用国际船模试验池会议 (ITTC) 所推荐的公式计算。此方法的特点是引入一组单位“帐篷”函数 (tent function) 来逼近船体函数，这样就可以把兴波阻力和摩擦阻力计算公式简化为用船体型值表示的标准二次型，将型值作为设计变量，另外附加一组约束条件，用二次规划技术解此标准二次型，就可获得阻力最小的船型。下面介绍具体设计方法。

一、米歇尔积分化为用型值表达的标准二次型

取坐标系如图 1-1 所示，设船速为 v ，则计算兴波阻力的米歇尔积分可表示为⁽¹²⁾

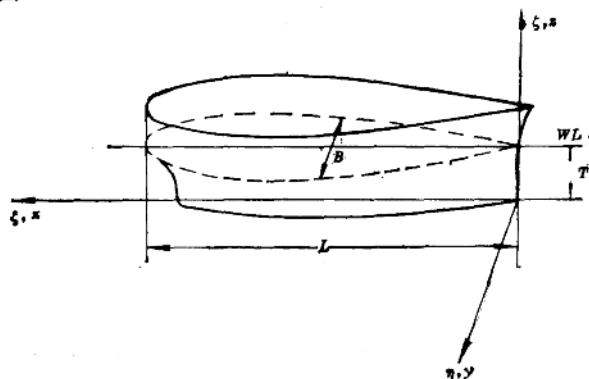


图1-1 坐标系

$$R_w = \frac{4g^2 \rho}{\pi v^2} \int_1^\infty \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)^{1/2}} [I^2(\lambda) + J^2(\lambda)] d\lambda \quad (1-1)$$

$$I(\lambda) = \int_0^T \exp \left[-\frac{g}{v^2} \lambda^2 (\zeta - T) \right] \left[\int_0^L H_1(\xi, \zeta) \cos \left(\frac{g}{v^2} \lambda \xi \right) d\xi \right] d\zeta$$

$$J(\lambda) = \int_0^T \exp \left[-\frac{g}{v^2} \lambda^2 (\zeta - T) \right] \left[\int_0^L H_1(\xi, \zeta) \sin \left(\frac{g}{v^2} \lambda \xi \right) d\xi \right] d\zeta$$

$$\lambda = \frac{1}{\cos \theta}$$

式中 $H(\xi, \zeta)$ ——船体函数，即船体表面方程式；

$$H_1 = \frac{\partial H}{\partial \xi} \text{——船体斜率函数；}$$

L ——船长；

B ——船宽；

g ——重力加速度；

ρ ——水的密度；

$$b = \frac{B}{2}。$$

为了方便起见，引入下列无因次变量：

$$x = \xi / L, \quad y = \eta / b, \quad z = \zeta / T \quad (1-2)$$

令无因次船体函数

$$h(x, z) = \frac{1}{b} H(\xi, \zeta)$$

无因次船体斜率函数

$$h_x(x, z) = \frac{L}{b} H_1(\xi, \zeta)$$

无因次波数

$$\gamma_0 = \frac{gL}{2v^2} = \frac{1}{2Fr^2}$$

式中 Fr ——傅汝德数。

于是，无因次兴波阻力系数 C_w 可写成

$$C_w = R_w / \left(\frac{8\rho g}{\pi} \cdot \frac{B^2 T^2}{L} \right) = \frac{\gamma_0}{4} \int_1^\infty \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)^{1/2}} [P^2(\lambda) + Q^2(\lambda)] d\lambda \quad (1-3)$$

$$P(\lambda) = \int_0^1 \exp \left[-2\lambda^2 \gamma_0 \left(\frac{T}{L} \right) (1-z) \right]$$

$$\cdot \left[\int_0^1 h_x(x, z) \cos(2\lambda \gamma_0 x) dx \right] dz$$

$$Q(\lambda) = \int_0^1 \exp \left[-2\lambda^2 \gamma_0 \left(\frac{T}{L} \right) (1-z) \right]$$

$$\cdot \left[\int_0^1 h_x(x, z) \sin(2\lambda \gamma_0 x) dx \right] dz$$

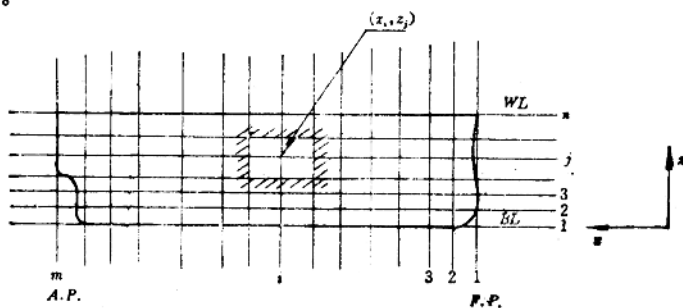
分析 (1-3) 式可知，在 $\lambda = 1$ 处是奇点，为了便于数值计算必须加以消除。为此，要进行变量置换，引入 $\lambda = u^2 + 1$ ，代入 (1-3) 式经运算整理后可得：

$$C_u = -\frac{\gamma_0}{2} \int_0^\infty \frac{(u^2 + 1)^2}{(u^2 + 2)^{1.5}} [\bar{P}^2(u) + \bar{Q}^2(u)] du \quad (1-4)$$

$$\bar{P}(u) = \int_0^1 \exp \left[-2\gamma_0 \left(\frac{T}{L} \right) (1-z)(u^2 + 1)^2 \right] \cdot \left[\int_0^1 h_x(x, z) \cos(2(u^2 + 1)\gamma_0 x) dx \right] dz$$

$$\bar{Q}(u) = \int_0^1 \exp \left[-2\gamma_0 \left(\frac{T}{L} \right) (1-z)(u^2 + 1)^2 \right] \cdot \left[\int_0^1 h_x(x, z) \sin(2(u^2 + 1)\gamma_0 x) dx \right] dz$$

对 (1-4) 式进行数值计算的关键是要已知船体函数表达式。通常, 船体表面是用型值来表达的, 为此, 我们用一定数量的水线和站号线将船体表面划分为许多矩形网格, 如图 1-2 所示。



站号 $i = 1, 2, \dots, m$; 水线号 $j = 1, 2, \dots, n$ 。

图1-2 网格结构

在布置站号线和水线时, 将第一站号线放在船体的最前端, 最后一条站号线放在船体最后端, 而第一条水线是基线, 最后一条水线是设计水线。在 (x_i, z_j) 网格点处的矩形单元是由第 $(i-1)$ 、 $(i+1)$ 站号线和第 $(j-1)$ 、 $(j+1)$ 水线所构成的。现在我们定义一单位“帐篷”函数, 如图 1-3 所示, 该函数在网格点 (x_i, z_j) 处等于 1, 在单元边界上等于 0。

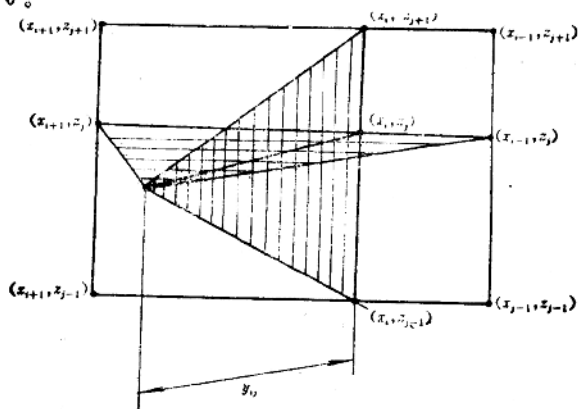


图1-3 单位“帐篷”函数

与 (x_i, z_j) 有关的单位“帐篷”函数 $h^{(i,j)}(x, z)$ 可写成

$$h^{(i,j)}(x, z) = \begin{cases} \left(1 - \frac{x_i - x}{x_i - x_{i-1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j-1}}\right) & x_{i-1} < x < x_i, \quad z_{j-1} < z < z_j \\ \left(1 - \frac{x_i - x}{x_i - x_{i-1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j+1}}\right) & x_{i-1} < x < x_i, \quad z_j < z < z_{j+1} \\ \left(1 - \frac{x_i - x}{x_i - x_{i+1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j-1}}\right) & x_i < x < x_{i+1}, \quad z_{j-1} < z < z_j \\ \left(1 - \frac{x_i - x}{x_i - x_{i+1}}\right) \cdot \left(1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j+1}}\right) & x_i < x < x_{i+1}, \quad z_j < z < z_{j+1} \\ 0, & \text{在其它地方} \end{cases} \quad (1-5)$$

分析 (1-5) 式可知, 虽然单位“帐篷”函数 $h^{(i,j)}(x, z)$ 不是线性函数, 但在一个单元的每一个象限内, 对于固定的 z , 则 $h^{(i,j)}(x, z)$ 是 x 的线性函数, 或对于固定的 x , 则 $h^{(i,j)}(x, z)$ 是 z 的线性函数。根据“帐篷”函数的这个特性, 可用“帐篷”函数族与船体型值一起构成一个函数来近似表达船体表面。如果在 (x_i, z_j) 处的船体型值为 y_{ij} , 则我们可定义近似船体函数 $\hat{h}(x, z)$ 为

$$\hat{h}(x, z) = \sum_i \sum_j y_{ij} h^{(i,j)}(x, z) \quad (1-6)$$

根据“帐篷”函数性质可知, 在网格点处 $h^{(i,j)}(x, z) = 1$, 所以

$$\hat{h}(x_i, z_j) = y_{ij} \quad (1-7)$$

或

$$\hat{h}(x_i, z_j) = h(x_i, z_j)$$

于是, 我们可以用 (1-6) 式来逼近 (1-3) 式中的船体函数, 其逼近的程度与网格划分的大小有关。图 1-4 表明在一个矩形单元内“帐篷”函数族近似表达船体表面的情况, 从该图可以看出, 网格点 (x_i, z_j) 和附近网格点 (x_{i-1}, z_j) 、 (x_i, z_{j+1}) 、 (x_{i+1}, z_j) 、 (x_i, z_{j-1}) 之间都是以直线来近似表达这部分船体表面的水线和站号线, 所以网格划分得越小, 用 (1-6) 式表达船体表面就越精确。

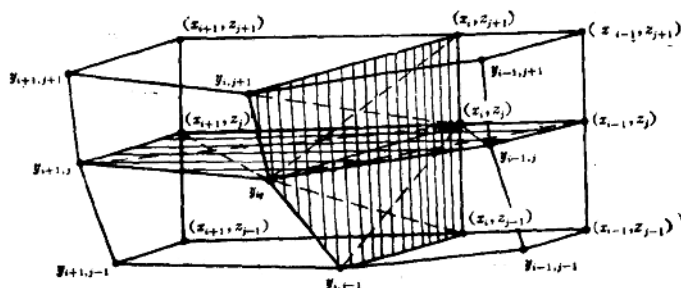


图1-4 “帐篷”函数族构成的船体部分

将 (1-6) 式代入 (1-3) 式, 经过运算整理后可得,

$$\begin{aligned}
 P(\lambda) &= \sum_i \sum_j y_{ij} \iint_{\Delta S_{ij}} h_i^{(ij)}(x, z) \cos(2\lambda \gamma_0 x) \\
 &\quad \cdot \exp[-\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1-z)] dx dz \\
 &= \sum_{i,j} y_{ij} \left\{ \frac{1}{x_i - x_{i+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \cos(2\lambda \gamma_0 x) dx \right. \\
 &\quad + \frac{1}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \cos(2\lambda \gamma_0 x) dx \Big\} \\
 &\quad \cdot \left\{ \int_{z_i}^{z_{i+1}} \exp[-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1-z)] \cdot \left[1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j+1}} \right] dz \right. \\
 &\quad + \left. \int_{z_{j-1}}^{z_j} \exp[-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1-z)] \cdot \left[1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j-1}} \right] dz \right\} \\
 &= \sum_{ij} y_{ij} \cdot C_i(\lambda, \gamma_0) \cdot E_j(\lambda, \gamma_0, T/L) \quad (1-8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中 } C_i(\lambda, \gamma_0) &= \frac{1}{x_i - x_{i+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \cos(2\lambda \gamma_0 x) dx + \frac{1}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \cos(2\lambda \gamma_0 x) dx \\
 &= -\frac{1}{2\gamma_0 \lambda} \left[\frac{1}{x_{i+1} - x_i} (\sin 2\lambda \gamma_0 x_{i+1} - \sin 2\lambda \gamma_0 x_i) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{x_i - x_{i-1}} (\sin 2\lambda \gamma_0 x_i - \sin 2\lambda \gamma_0 x_{i-1}) \right] \\
 E_j(\lambda, \gamma_0, T/L) &= \int_{z_j}^{z_{j+1}} \exp[-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1-z)] \\
 &\quad \cdot \left[1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j+1}} \right] dz + \int_{z_{j-1}}^{z_j} \exp[-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1-z)] \\
 &\quad \cdot \left[1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j-1}} \right] dz \\
 &= \frac{1}{(2\lambda^2 \gamma_0 (T/L))^2} \cdot \left\{ \frac{1}{z_{j+1} - z_j} [\exp(-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)) \right. \\
 &\quad \cdot (1 - z_{j+1})) - \exp(-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1 - z_j))] - \frac{1}{z_j - z_{j-1}} \\
 &\quad \cdot [\exp(-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1 - z_j)) \\
 &\quad \left. - \exp(-2\lambda^2 \gamma_0 (T/L)(1 - z_{j-1}))] \right\}
 \end{aligned}$$

同理可得到

$$Q(\lambda) = \sum_{ij} y_{ij} S_i(\lambda, \gamma_0) \cdot E_j(\lambda, \gamma_0, T/L) \quad (1-9)$$

$$\begin{aligned}
 \text{式中 } S_i(\lambda, \gamma_0) &= \frac{1}{x_i - x_{i+1}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sin(2\lambda \gamma_0 x) dx \\
 &\quad + \frac{1}{x_i - x_{i-1}} \int_{x_{i-1}}^{x_i} \sin(2\lambda \gamma_0 x) dx \\
 &= \frac{1}{2\gamma_0 \lambda} \left[\frac{1}{x_{i+1} - x_i} (\cos 2\lambda \gamma_0 x_{i+1} - \cos 2\lambda \gamma_0 x_i) \right.
 \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{x_i - x_{i-1}} (\cos 2\lambda Y_{0i} x_i - \cos 2\lambda Y_{0i} x_{i-1}) \Bigg\}$$

并且

$$\left. \begin{aligned} P^2(\lambda) &= \sum_{ij} \sum_{kl} y_{ij} y_{kl} C_i C_k E_i E_l \\ Q^2(\lambda) &= \sum_{ij} \sum_{kl} y_{ij} y_{kl} S_i S_k E_i E_l \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

将 (1-10) 式代入 (1-4) 式, 经过整理后可得到兴波阻力系数为

$$C_w = \sum_{ij} \sum_{kl} y_{ij} y_{kl} \left(\frac{Y_0}{2} \int_0^\infty \frac{(u^2 + 1)^2}{(u^2 + 2)^{1/2}} [(C_i C_k + S_i S_k) E_i E_l] du \right) \quad (1-11)$$

为了书写方便, 我们再定义一阻力函数

$$d_{ijkl}(Y_0, T/L) = \frac{Y_0}{2} \int_0^\infty \frac{(u^2 + 1)^2}{(u^2 + 2)^{1/2}} [(C_i C_k + S_i S_k) E_i E_l] du \quad (1-12)$$

分析 (1-12) 式可知, 此函数与船体的型值无关, 仅与傅汝德数、吃水和船长之比有关。

将 (1-11) 式写成为二次型⁽¹⁾:

$$C_w = \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n d_{mn} y_m y_n \quad (1-13)$$

船体型值 y_i , 是对应于 y_m , $d_{ijkl} = d_{mn}$ 。

将 (1-13) 写成矩阵形式:

$$C_w = y^T \cdot \hat{D} \cdot y \quad (1-14)$$

式中 y ——型值的纵列矢量;

y^T —— y 的转置;

$\hat{D}$ ——兴波阻力函数矩阵。

因此, 只要附加一定的约束条件, 解 (1-13) 式便可获得兴波阻力最小的优化船型。

二、摩擦阻力化为用型值表达的标准二次型

我们知道, 摩擦阻力的计算公式为⁽²⁾:

$$R_f = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_f(Re)$$

式中 S ——船体湿表面积,

Re ——雷诺数,

$$C_f = 0.075 / (\lg Re - 2)^2$$

$$Re = \frac{vL}{\nu}$$

式中 ν ——水的运动粘性系数。

要把 R_f 化为二次型, 关键是把湿表面积 S 化为用型值表达的二次型。由上所述, 船体表面方程为

$$\eta = H(\xi, \zeta)$$

船体的湿表面积可用下式计算⁽²⁾:

$$S = 2 \iint_{S_0} [1 + H_\xi^2(\xi, \zeta) + H_\zeta^2(\xi, \zeta)]^{1/2} d\xi d\zeta \quad (1-15)$$

式中 S_0 ——纵中剖面面积,

H_ξ, H_ζ ——对 ξ 和 ζ 的船体斜率函数。

根据韦伯斯特 (Webster) 和威豪森 (Wehausen) 的建议, (1-15) 式可用下式逼近,

$$S = 2 \iint_{S_0} \left[1 + \frac{1}{2} H_\xi^2 + \frac{1}{2} H_\zeta^2 \right] d\xi d\zeta \quad (1-16)$$

如上一样, 引入无因次变量 x, z , 则无因次船体函数可写为

$$h(x, z) = (2/B) H(\xi, \zeta)$$

对于 ξ, ζ 的斜率函数为

$$\left. \begin{aligned} H_\xi(\xi, \zeta) &= \frac{B}{2L} h_1(x, z) \\ H_\zeta(\xi, \zeta) &= \frac{B}{2T} h_2(x, z) \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

将 (1-2) 式和 (1-17) 代入 (1-16) 式, 得

$$S = 2LT \int_0^1 \int_0^1 \left[1 + \frac{1}{8} \frac{B^2}{L^2} h_1^2 + \frac{1}{8} \frac{B^2}{T^2} h_2^2 \right] dx dz \quad (1-18)$$

利用“帐篷”函数 (1-5) 式, 把上式近似地表达为

$$S \approx 2LT \int_0^1 \int_0^1 \left[1 + \frac{1}{8} \frac{B^2}{L^2} \hat{h}_1^2(x, z) + \frac{1}{8} \frac{B^2}{T^2} \hat{h}_2^2(x, z) \right] dx dz \quad (1-19)$$

从 (1-6) 式求得其斜率函数, 可将上式展开为

$$\int_0^1 \int_0^1 \hat{h}_1^2(x, z) dx dz = \sum_i \sum_j y_{ij} \left\{ \int_0^1 \int_0^1 \left[\sum_k \sum_l y_{kl} h_z^{(k,l)}(x, z) \right] \cdot [h_z^{(i,j)}(x, z)] dx dz \right\} \quad (1-20)$$

$$\int_0^1 \int_0^1 \hat{h}_2^2(x, z) dx dz = \sum_i \sum_j y_{ij} \left\{ \int_0^1 \int_0^1 \left[\sum_k \sum_l y_{kl} h_z^{(k,l)}(x, z) \right] \cdot [h_z^{(i,j)}(x, z)] dx dz \right\} \quad (1-21)$$

根据“帐篷”函数的性质, 经过详细的推导^[2], 可将 (1-20) 式和 (1-21) 式表示为二次型, 于是, 船体湿表面积用型值表达的二次型可写成

$$S = C_0 + C_1' \cdot y + y' \cdot A_1 \cdot y \quad (1-22)$$

式中 C_0 ——常数项,

C_1 ——线性项系数纵列矢量,

A_1 ——表面积函数矩阵。

摩擦阻力系数为

$$C_f = R_1 / \left(\frac{8\rho g}{\pi} \frac{B^3 T^3}{L} \right) = C_f F_r^3 S / \left[\frac{16}{\pi} \left(\frac{BT}{L} \right)^3 \right] \quad (1-23)$$

将 (1-22) 式代入 (1-23) 式, 可得用型值表达的标准二次型的摩擦阻力系数为

$$C_f = C_{f0} + C_{fi} \cdot y + \frac{1}{2} y^T D_f y \quad (1-24)$$

式中 C_{f0} ——常数项;

C_{fi} ——线性项系数纵列矢量;

D_f ——摩擦阻力函数矩阵, 它的各元素是雷诺数、长宽比及宽度吃水比的函数。

将 (1-14) 式和 (1-24) 式结合起来, 便可得用型值表达的标准二次型的总阻力系数 C_t 为:

$$C_t = C_w + C_f = C_{t0} + C_{ti} \cdot y + \frac{1}{2} y^T \cdot D_t \cdot y \quad (1-25)$$

式中 C_{t0} ——常数项;

C_{ti} ——线性项系数纵列矢量;

D_t ——总阻力函数矩阵。

分析 (1-25) 式可知, 由于对所有的 y 值, $y^T D_t y \geq 0$, 矩阵 D_t 是半正定的, 所以二次型函数 $C_t(y)$ 是凸函数。

如果在 (1-24) 式中, y 是 n 维未知矢量, C_{fi} 是 n 维已知矢量, D_f 为 $n \times n$ 的已知矩阵, 则附加如下的约束:

$$Ay \geq b, \quad y \geq 0 \quad (1-26)$$

式中 y —— n 维型值矢量;

A —— $m \times n$ 维约束矩阵;

b —— m 维常数矢量。

解 (1-25) 式优化船型问题, 可简化为下列二次规划问题:

$$\text{最小化} \quad C_{ti} y + \frac{1}{2} y^T D_t y \quad (1-27)$$

附加条件

$$A \cdot y \geq b, \quad y \geq 0$$

求解 (1-27) 式, 即可得到总阻力最小的优化船型。显然, 合理选取约束条件是非常重要的。如果约束条件选得不当, 则 (1-27) 式的最后解有可能出现负的值, 这显然是不合理的。

三、约束条件表达式

1. 已知作为船体下界的型值 $\tilde{y}_{ij}$, 则

$$y_{ij} \geq \tilde{y}_{ij}$$

2. 已知作为船体上界的型值 $\tilde{y}_{ij}$, 则

$$y_{ij} \leq \tilde{y}_{ij}$$

3. 所有无因次型值小于或等于最大半宽, 即

$$y_{ij} \leq 1$$

4. 水线斜率小于或等于 $\text{tg} \tilde{\theta}$, 即

$$y_{i+1,j} - y_{i,j} \leq (x_{i+1} - x_i) (2L/B) \text{tg} \tilde{\theta}$$

5. 剖面角 (即剖面线切线与基线的夹角) ϕ 大于或等于下限角 $\tilde{\phi}$, 即

$$y_{i+1,j} - y_{i,j} \leq (z_{i+1} - z_i) (2T/B) \text{ctg} \tilde{\phi}$$

6. 水线面系数等于预定值, 即在 j 水线处的水线面系数 C_{wpl} 为

$$C_{wpl} = \frac{A_j}{BL} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m-1} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1,j} - y_{i,j})$$

式中 m —— 总站号数,

A_j —— 第 j 号水线面积。

7. 横剖面面积等于预定值, 即在第 i 站处的横剖面面积 A_i 为

$$A_i = \frac{BT}{2} \sum_{j=1}^{n-1} (z_{j+1} - z_j)(y_{i,j+1} + y_{i,j})$$

式中 n —— 水线总数。

因此, 舢剖面面积系数可写成

$$C_M = \frac{A_M}{BT} = 1/2 \sum_{j=1}^{n-1} (z_{j+1} - z_j)(y_{i,j+1} + y_{i,j})$$

式中 A_M —— 舢剖面面积。

8. 满足预定的排水量要求, 或满足预定的方形系数要求。

为此, 可以利用“帐篷”函数计算排水量。在 (i, j) 节点处的单元“帐篷”的体积, 可分成如下四部分进行计算:

$$\begin{aligned} \nabla_{0I} &= \int_{x_{i-1}}^{x_i} \int_{z_{j-1}}^{z_j} y_{ij} \left(1 - \frac{x_i - x}{x_i - x_{i-1}} \right) \cdot \left(1 - \frac{z_j - z}{z_j - z_{j-1}} \right) dx dz \\ &= \frac{y_{ij}}{4} (x_i - x_{i-1})(z_j - z_{j-1}) \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad z_{j-1} \leq z \leq z_j \\ \nabla_{0I} &= \frac{1}{4} y_{ij} (x_i - x_{i-1})(z_{j+1} - z_j) \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad z_j \leq z \leq z_{j+1} \\ \nabla_{0II} &= \frac{1}{4} y_{ij} (x_{i+1} - x_i)(z_j - z_{j-1}) \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad z_{j-1} \leq z \leq z_j \\ \nabla_{0N} &= \frac{1}{4} y_{ij} (x_{i+1} - x_i)(z_{j+1} - z_j) \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad z_j \leq z \leq z_{j+1} \end{aligned}$$

叠加上述四部分体积, 即得到第 (i, j) 单元“帐篷”的体积:

$$\nabla_{0IJ} = \nabla_{0I} + \nabla_{0I} + \nabla_{0II} + \nabla_{0N} = BLT \cdot \frac{1}{8} y_{ij} (x_{i+1} - x_{i-1})(z_{j+1} - z_{j-1})$$

必须注意, 在船的端部实际上只有半个“帐篷”单元, 所以要作如下处理:

$$\text{对于 } j = 1 \quad \nabla_{0I} = BLT \cdot \frac{y_{i1}}{8} (x_{i+1} - x_{i-1})(z_2 - z_1)$$

$$\text{对于 } j = n \quad \nabla_{0In} = BLT \cdot \frac{y_{in}}{8} (x_{i+1} - x_{i-1})(z_n - z_{n-1})$$

全船总排水体积 ∇ 为

$$\nabla = \frac{1}{4} BLT \sum_{i=2}^{m-1} \left\{ (x_{i+1} - x_{i-1}) \left[(z_2 - z_1) y_{i1} \right. \right.$$

$$+ \sum_{j=1}^{n-1} (z_{j+1} - z_{j-1}) \cdot y_{jn} + (z_n - z_{n-1}) y_{ln} \Bigg\}$$

于是, 方形系数 C_s 和棱形系数 C_p 可分别写成:

$$\begin{aligned} C_s &= \nabla / BTL = 1/4 \sum_{i=2}^{m-1} \left\{ (x_{i+1} - x_{i-1}) \cdot \left[(z_i - z_1) \cdot y_{1i} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{j=1}^{n-1} (z_{j+1} - z_{j-1}) y_{ji} + (z_n - z_{n-1}) y_{ln} \right] \right\} \\ C_p &= \nabla / A_M L = 1/2 \sum_{i=2}^{m-1} \left\{ (x_{i+1} - x_{i-1}) \left[(z_i - z_1) y_{1i} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sum_{j=2}^{n-1} (z_{j+1} - z_{j-1}) y_{ji} + (z_n - z_{n-1}) y_{ln} \right] \right\} / \\ &\quad \sum_{j=1}^{n-1} (z_{j+1} - z_j) (y_{Mj+1} + y_{Mj}) \end{aligned}$$

附加了这些约束条件后, 则可避免在船型优化过程中出现负的值。

熊继昭教授选取陶德 60 系列 $C_s=0.60$ 船型作为母型船, 如图 1-5 所示。他在优化

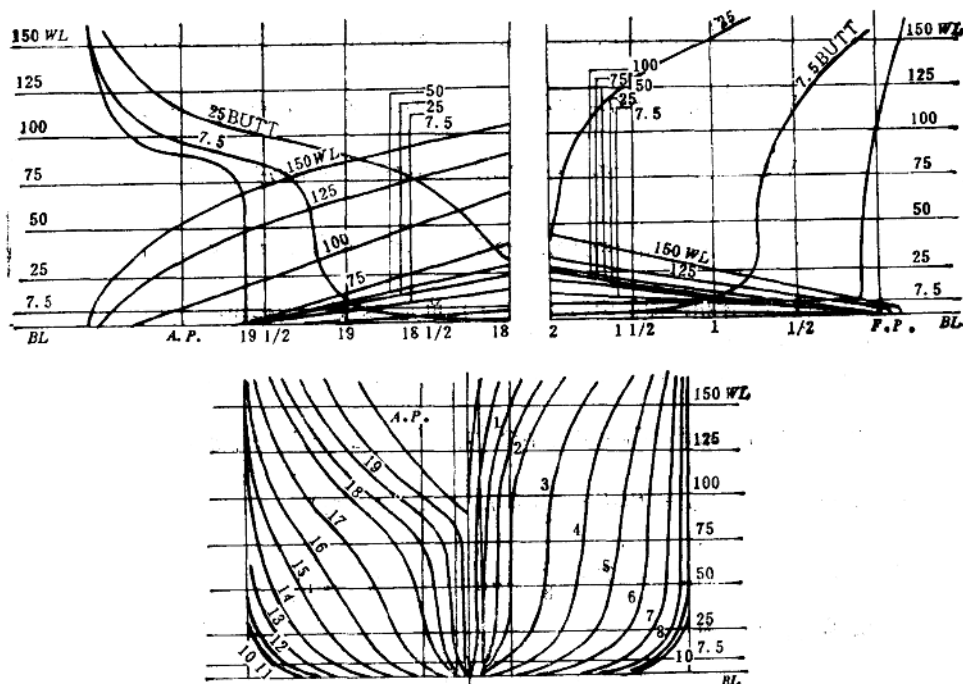


图1-5 陶德60系列船模线型