

中国造船工程学会

第三届船舶耐波性及波浪载荷学术讨论会

论文集

·1983·

厦 门

船舶力学学术委员会

《中国造船》编辑部

第三届船舶耐波性和波浪载荷学术讨论会论文集

目 录

第一部份 耐波性

1. 三维源汇分布法 上海交通大学	钟爱贞 刘应中 缪国平 (1)
2. 最优耐波性船型的设计方法 中国船舶科学研究中心	益其乐 汪 镇 戴仁元 (10)
3. 有限基本解法中的曲面高阶单元 大连工学院	周树信 沈 华 (23)
4. 流函数波浪理论的渐近解 天津塘沽海洋石油开发研究院	刘书攻 李彦彬 韩洁芬 (30)
5. 具有初始倾角的船舶的横向运动 上海交通大学	缪国平 杨 驰 刘应中 鲍伟光 (43)
6. 减摇鳍设计及其流体动力问题 哈尔滨船舶工程学院	戴遗山 李积德 蒋小雄 黄锡荣 (53)
7. 横摇阻尼估算与横向运动预报 中国船舶科学研究中心	冯学智 蒋强强 (65)
8. 船舶非线性横摇阻尼的试验分析 武汉海军工程学院	彭英声 徐德嘉 (84)
9. 非对称横摇阻尼试验分析 上海船舶运输科学研究所 船舶检验局上海办事处	林洪波 高家镛 周耀宗 时燕昌 胡 威 (94)
10. 渔船不规则波中阻力增值的预报 上海交通大学	陶尧森 周向阳 (106)
11. 渔船波浪中的自航要素和失速预报 上海交通大学	陶尧森 周向阳 钱章义 (120)
12. 确定实船海浪谱的另一途径 中国船舶及海洋工程设计研究院	鄂明川 (133)
13. 起重船在波浪中的运动特性 中国船舶科学研究中心	胡启庸 (142)
14. 驱逐舰的排水量、船型、尺度、重量分布及附件 对其不规则海浪中横向运动的影响 中国船舶科学研究中心	蒋强强 冯学智 (159)
15. 围裙变形响应对全垫升气垫船耐波性的影响 中国船舶及海洋工程设计研究院	周伟麟 马 涛 (177)

／ 6. 随机减量法在实船上的应用 —— 从船舶的随机运动

信号直接分析得到衰减曲线

中国船舶科学研究中心

李柏林 (176)

／ 7. 首气封对侧壁气垫船纵向耐波性能影响之模型试验研究

中国船舶及海洋工程设计研究院

俞忠德 袁胜洪 (188)

／ 8. 船舶耐波性中随机时间序列的自回归预报与谱估计

上海交通大学

吴善勤 冯铁城 周兴邦 (203)

第二部份 波浪载荷

／ 1. 快艇在海浪中的运动, 弯矩及压力

哈尔滨船舶工程学院

宋竞正 戴仰山 李维扬 (210)

2. 用落体试验测定 2 毫米厚薄壳球首声纳罩结构的水冲击压力及其承载能力

上海交通大学

郑学祥 钱仍勤 (227)

3. 船体梁抗弯能力的计算

上海交通大学

桑国光 龚 恢 (238)

4. S-175 集装箱船舶波浪载荷的船模试验与线性切片理论计算的比较

中国船舶科学研究中心

徐能兹 沈进威 陈瑞章 (250)

5. 关于波浪的长期极值统计

天津大学

刘德辅 王 超 (261)

6. 内河大开口驳散货扭矩的概率分布和推断计算

武汉水运工程学院

陈宗良 严仁军 万守杰 杨国威 (272)

7. 双体船总体弯—扭强度的计算

上海交通大学

王美娟 (278)

8. 关于大舱口船舶船体剖面扭转强度的计算问题

上海船舶运输科学研究所

江影影 (290)

9. 浅吃水万吨散货船的结构设计

中国船舶及海洋工程设计研究院

陆尔康 (302)

／ 0. 矩形水仓振荡时水动力特性的试验及制荡措施的探讨

上海交通大学

陈德康 顾树华 戴李民 (309)

／ 1. 船底砰击计算

上海船舶运输科学研究所

周如钰 (326)

／ 2. 多闭域剖面船体梁两向弯曲合成剪应力计算及程序

武汉水运工程学院

王文标 (334)

／ 3. 船体纵强度的简易估算法

沪东造船厂

杜忠仁 (341)

三维源汇分布法

钟爱贞 刘应中 缪国平

(上海交通大学)

提 要

本文移植了 Garrison (1) 的三维源汇分布法程序, 可以计算任意形状的物体在波浪中的运动和受力, 包括压力分布。水深可以是有限的, 但流体限于理想的, 流动是无旋的, 且限于线性理论。经过两个典型例子的试算, 证明程序移植是成功的。

(一) 引 言

在与离岸工程有关的流体力学问题中, 尤其非线性效应不占主导地位的情形下, 理论计算具有十分重要的地位。有些设计人员甚至完全依赖计算机进行预测, 或者只进行少量的模型试验, 以验证计算机预测的可靠性。对于小型构件, 常用 Morison 公式估算流体动力; 对于大型构件, 则用绕射理论进行计算。在船舶流体力学中, 切片理论广泛用来估计波浪载荷, 流体动力系数和船舶的运动响应。因为切片理论建立在二维势流理论的基础上, 只适用于细长物体。海洋工程中许多结构并不细长, 故要求用直接的三维算法。其中三维源汇法, 又称格林函数法, 又称边界积分方程法是最常用的一种。过去十年中, 先后有多个程序出现, 如 (1)~(7)。在我国, 702 所孙伯起也编制了类似的程序。本文则是 Garrison 程序的移植, 经过几个典型例子的试算, 表明移植是成功的, 可以进行实际结构的计算, 也可在此基础上进行改编, 使具有更广泛的功能。

(二) 基 本 方 程

浮体微幅周期性摇荡可用下式表示:

$$X_j = \operatorname{Re} \{ X_j^0 e^{-i\omega t} \} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

其中 X_j^0 ($j=1, 2, 3$) 表示纵荡、垂荡和横荡的复振幅, X_j^0 ($j=4, 5, 6$) 表示

横摇、首摇和纵摇的复振幅。按照线性理论的基本假设，波浪与浮体相互作用的复数速度势 $\phi(X, Y, Z)$ 可分解为：

$$\phi = \alpha (\phi_0 + \phi_7) + \sum_{j=1}^6 X_j \phi_j \quad (2)$$

其中 α = 来波的波幅。

ϕ_0 = 单位波幅的来波速度势：

$$\phi_0 = \frac{g}{i\omega} \frac{\cosh(K(Y+h))}{\cosh(Kh)} e^{ik(x \cos \beta + Z \sin \beta)} \quad (3)$$

ϕ_2 = 单位波幅的来波遇到物体时产生的绕射速度势，这时物体可视为固定的。

$\phi_j (j = 1, \dots, 6)$ 是物体运动引起的幅射势。

上述各个速度势都只是空间坐标的函数，一般是复数，他们与真正速度势的关系是：

$$\phi_i(X, Y, Z, t) = \operatorname{Re} \left\{ \phi_i(X, Y, Z) e^{-i\omega t} \right\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, 7$$

每一个复数速度势满足拉普拉斯方程：

$$\nabla^2 \phi_i = 0 \quad i = 0, 1, \dots, 7 \quad (4)$$

和池底条件：

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial Y}(X, -h, Z) = 0 \quad (5)$$

和线性自由面条件：

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial Y}(X, 0, Z) - \frac{\omega^2}{g} \phi_i(X, 0, Z) = 0 \quad (6)$$

在物体表面上：

$$\frac{\partial (\phi_0 + \phi_7)}{\partial n} \Big|_{S_0} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} \Big|_{S_0} = -i\omega n_j \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

这里 n_j 定义如下：

$$n_j = [n_1, n_2, n_3, (y+d)n_3 - n_2Z, Zn_1 - Xn_3, Xn_2 - (d+y)n_1]$$

其中 n_1, n_2, n_3 是静止物体湿面积 $S_0(X, Y, Z)$ 的单位外法线， d 是物体重心的潜深，此外 $\phi_j (j = 1, 2, \dots, 7)$ 还要满足幅射条件。

$$\lim_{R_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{R_1} \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial R_1} - Ki \phi_j \right) = 0 \quad R_1 = \sqrt{X^2 + Z^2} \quad (9)$$

上述边值问题可用格林函数法解之，表示为：

$$\phi_j(X, Y, Z) = \frac{1}{4\pi S_0} \int \sigma_j(\xi, \eta, \zeta) G(X, Y, Z; \xi, \eta, \zeta) d\sigma \quad (10)$$

$j = 1, 2, \dots, 6$ 。其中 $G(X, Y, Z, \xi, \eta, \zeta)$ 是格林函数，取为三维脉动源的解(12)。

$$G = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_2} + 2P_1 V_1 \int_0^\infty \frac{(\mu + \nu) e^{-\mu h} \cosh(\mu(\eta + h)) \cosh(\mu(Y + h))}{\mu \sinh(\mu h) - \nu \cosh(\mu h)} J_0(\mu R) d\mu \\ + i \frac{2\pi(K^2 - \nu^2) \cosh(K(\eta + h)) \cosh(K(Y + h))}{K^2 h - \nu^2 h + \nu} J_0(KR) \quad (11)$$

其中：

$$r = ((X - \xi)^2 + (Y - \eta)^2 + (Z - \zeta)^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$r_2 = ((X - \xi)^2 + (Y + 2h + \eta)^2 + (Z - \zeta)^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$R = ((X - \xi)^2 + (Z - \zeta)^2)^{\frac{1}{2}}$$

波数 K 满足：

$$\nu = \frac{\omega^2}{g} = K \tanh(Kh)$$

$P, \dot{V}$ ，表示积分主值。在程序中当 KR 大于某一极限值时，则用 G 的级数形式以节约机时：

$$G = \frac{2\pi(\nu^2 - K^2)}{K^2 h - \nu^2 h + \nu} \cosh(K(\eta + h)) \cosh(K(Y + h)) (Y_0(KR) - iJ_0(KR)) + \\ 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + \nu^2)}{\mu_k^2 h + \nu^2 h - \nu} \cos(\mu_k(Y + h)) \cos(\mu_k(\eta + h)) K_0(\mu_k R) \quad (12)$$

式中 J_0 和 Y_0 分别是第一和第二类另阶 Bessel 函数， K_0 是另阶第二类 Modified Bessel 函数， M_k 是下述方程的正根。

$$\mu_k \tan(\mu_k h) + \nu = 0 \quad (13)$$

式(12)中对应不同 ϕ_j 的是源强 σ_j ，它由物面条件(7)或(8)决定：

$$-\sigma_j + \frac{1}{2\pi} \int_{S_0} \sigma_j \frac{\partial G}{\partial n} ds = 2g_j \quad (j = 1, 2, \dots, 7) \quad (14)$$

其中：

$$g_j = -i\omega n_j \quad (j = 1, 2, \dots, 6)$$

$$g_7 = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \Big|_{S_0}$$

将(14)式离散化，得到确定源强的线性代数方程组。一旦源强已知，势函数由式(12)决定。

物体引起的动压强幅值:

$$P^r = \rho i \omega \sum_{j=1}^6 X_j \phi_j \quad (15)$$

相应的力幅值:

$$F_k^r = - \int_{S_0} P^r n_k ds = \sum_{j=1}^6 T_{kj} X_j \quad (16)$$

其中:

$$T_{kj} = -\rho i \omega \int_{S_0} \phi_j n_k ds = -\omega^2 (M_{ij} + \frac{i}{\omega} N_{ij}) \quad (17)$$

M_{ij} 和 N_{ij} 分别是附加质量和阻尼系数。

波浪对固定物体产生的压强幅值:

$$P^d = \rho i \omega (\phi_0 + \phi_7) \quad (18)$$

相应的力叫波浪干扰力(矩), 其幅值:

$$F_k^d = \int_{S_0} P^d n_k ds = -\rho i \omega \int_{S_0} (\phi_0 + \phi_7) n_k ds \quad (19)$$

而物体的运动方程是:

$$\sum_{j=1}^6 (-\omega^2 (M_{ij} + m_{ij}) - i\omega N_{ij} + K_{ij} + C_{ij}) X_j = F_i^d \quad (20)$$

其中:

$\{m_{ij}\}$ 是物体的惯性矩阵, K_{ij} 是线性系泊力系数, C_{ij} 是线性回复力系数。

(三) 试算结果

第一个例子〔13〕是直立的圆柱, 直径是吃水的四倍, 水深与圆柱半径之比等于 1.0, 重心位于静止水面上, 惯性半径为圆柱半径的 0.691。圆柱表面被划分为 72 个矩形网格, 每个网格上源强认为是常数。在 ACOS4 机器上计算, 一个频率需要 15—17 分钟。图 1—4 是 Garrison 的计算曲线和本文计算结果的比较。因计算费用昂贵, 本文只算了 $\varepsilon a = \omega^2 a/g = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 等四个点。从图知, 虽然网格数量较少, 但就实用角度而言, 精度已经足够了。

第二个例子是海洋工程中经常遇到的箱形船, 取自文献〔8〕、〔9〕、〔10〕。箱形船的长宽比 $L/B = 1.0$, 长度吃水比 $L/d = 5$, 水深吃水比 $H/d = 9.40$ 。图 5—8 是无量纲流体动力系数的比较。结果表明, 除横摇阻尼、横摇和横荡耦合项外, 其它各系数符合程度是良好的。特别是原文选取网格 130 个, 而本文只用

了7.5个网格。从图3来看,本文所用的a42和b42与原文相差一个符号,这与所选的坐标不尽一致有关。至于数量上的差异,可归结为本文网格数取得较少,而横摇和横荡耦合项的绝对值又较小的缘故。

图9-14是干扰力系数的比较,图15-20是运动幅值的比较。可以认为,本文的计算结果是令人满意的。图16中关于横摇响应只给出了两个点子,其余两个点子差别较大,因为原文给出的横向惯性半径是 $K_{xx}/I = 0.265$,其实应该是 $K_{xx}/B = 0.265$,当发现时,两个点已经计算过了。

四 结 论

1. 对于大型海洋结构,其形状是相当复杂的,往往不能用切片理论计算。在国际上三维源汇法已经相当普遍,其中Garrison程序是比较成熟的一个,它在线性范围内,还能计及水深有限的影响。把它引进来,相信会对我们的工作有所帮助。

2. 根据两个典型例子的试算,可以认为结果是满意的,移植是成功的,可以进行实际结构的计算,也可在此基础上进行改编,以适应更广泛的需要。

3. 在海洋工程中,多个物体的流体动力干扰有时也是重要的。我们曾对

Garrison程序加以改编,使能计算多个浮体在波浪上的运动(14),浮体可以是各自独立的,也可以相互间具有线性的约束,以模拟系泊系统的作用。

4. Garrison程序的其它扩展工作,如横摇和纵摇中的粘性阻尼,规则波中的漂流力等都在进行,今后将于适当的时候予以发表。

参 考 文 献

(1) Garrison, C.J. "Hydrodynamics of Large Objects in the sea, Part I-Hydrodynamic analysis", Journal of Hydronautics, Vol.8, 1974.

(2) Garrison, C.J. "Hydrodynamics of Large Objects in the sea, Part II-Motion of Free-Floating bodies", Journal of Hydronautics, Vol.9, 1975.

(3) Oortmerssen, G. van, "The motions of a moored ship in waves", NSMB Publication, 510, 1976.

(4) Loken, A.E. and Olsen, O.A., "Diffraction theory and statistical methods in predicting wave induced motions and loads for large structures" OTC paper 2502, Houston, 1976.

5) Hogben, N. and Standing, R.G., "Wave loads on large bodies", Proc. Int. Symp. on Dynamics of marine vehicles and structures in waves, University College London, 1974.

6) Nojiri, N., "A study of hydrodynamic pressures and wave loads on three dimensional floating bodies", JSNA, Vol. 148, 1980

[7] Sugiyama, M., "Some calculations of hydrodynamic forces on semi-submersible bodies by singularity distribution method" JSNA, Vol. 164, 1977.

[8] 岡本 洋, 山上順雄, 坂田隆司: "箱型浮体に働く流体力とその運動について"——(第1報)強制揺試験——关西造船協会誌, 第172号, 1979.

[9] 同上, (第2報)三次元模型試験及び理論計算——关西造船協会誌, 第173号, 1980.

[10] 同上, (第3報)実用推定法——关西造船協会誌, 第183号, 1981.

[11] 刘应中, "船舶在波浪上的运动理论" (讲义), 上海交通大学船舶与海洋工程系, 1982年.

[12] Wehausen, J.V. and Laitone, E.V. "Surface waves", Encyclopedia of Physics, Vol. 9, Springer-Verlag, Berlin, 1960.

[13] Garrison, C.J., "Hydrodynamic Loading of Large Offshore structures: Three dimensional source distribution methods", Numerical methods in offshore engineering, 1976.

[14] J. Duncan, Y.Z., Liu, V. Ankudinov, "The motions of multi-bodies on waves", Presented at The Int. Conf. on Ocean Eng. Norway, 1981.

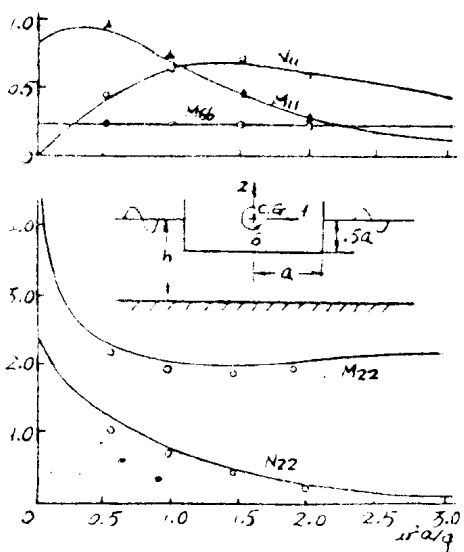


图1. 附加质量和阻尼系数 ($h/a = 1.0$)

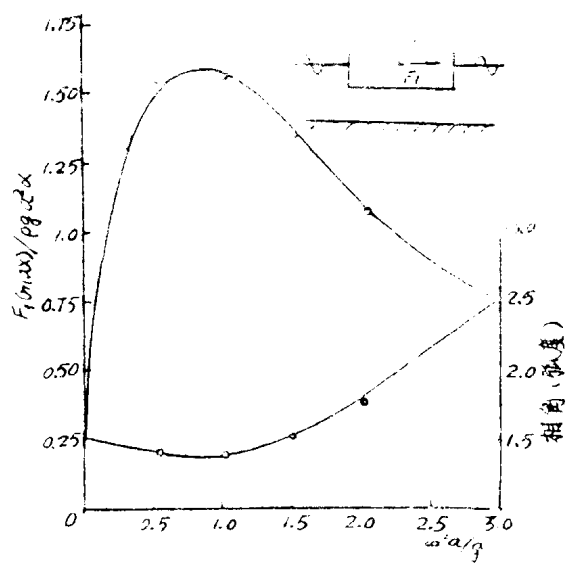


图2. 水平力系数 ($h/a = 1.0$)

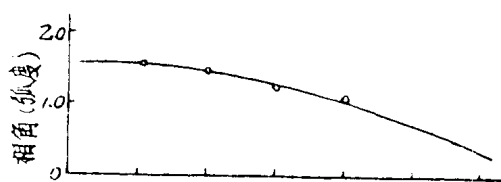


图3. 纵荡响应

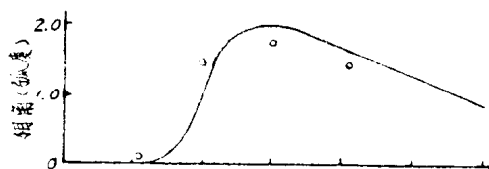


图4. 升沉响应

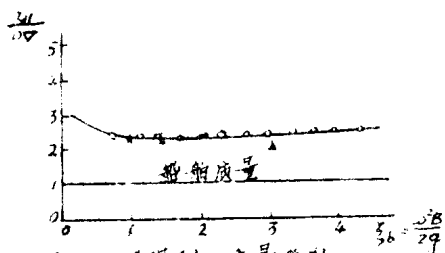


图 5a. 升沉附加质量系数

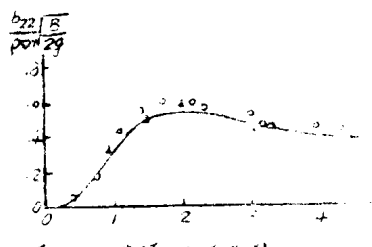


图 6b. 横逆阻尼系数

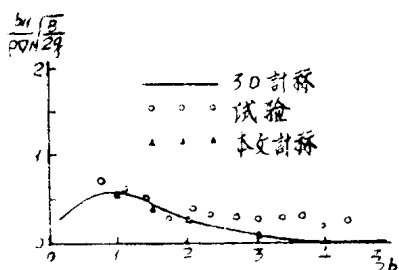


图 5b. 升沉阻尼系数

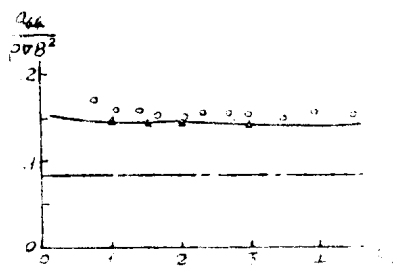


图 7a. 横摆附加惯性力矩系数

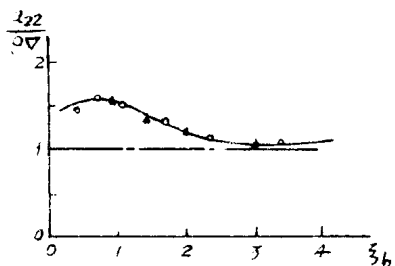


图 6a. 横逆附加质量系数

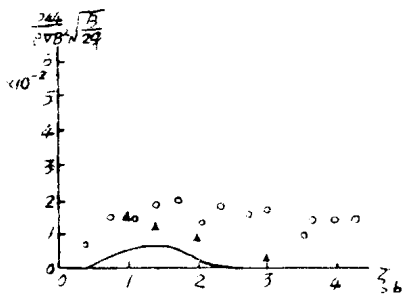


图 7b. 横摆阻尼力矩系数

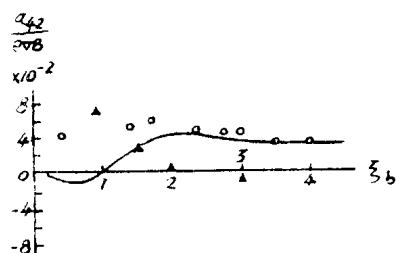


图 8a. 横摆对横逆的耦合惯性系数

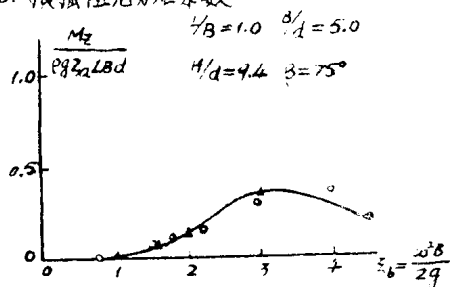


图 9. 首摇力矩幅值

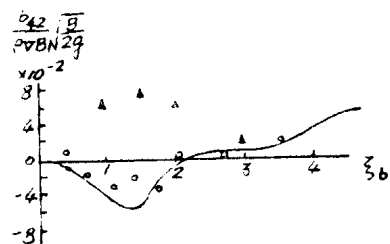


图 8b. 横摆对横逆的耦合阻尼系数

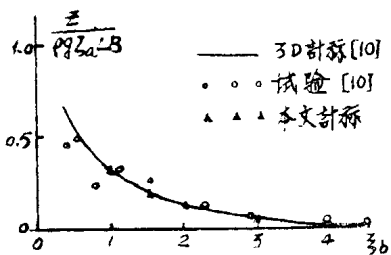


图 10. 升沉力幅值

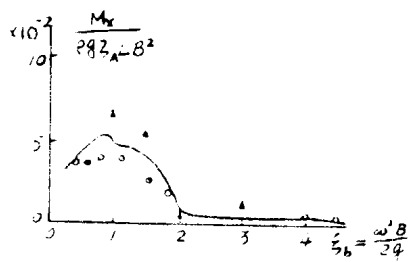


图11 横摆力矩幅值

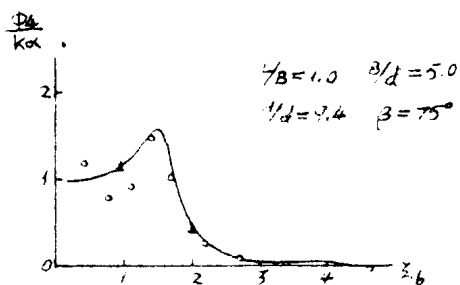


图16 横摆幅值

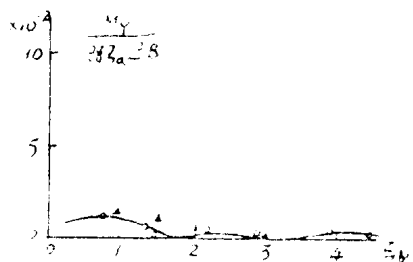


图12 纵摆力矩幅值

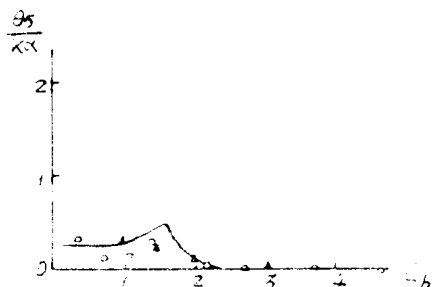


图17 纵摆幅值

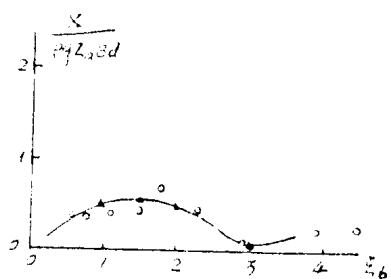


图13 纵摆力幅值

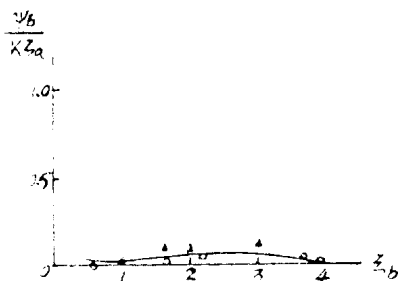


图18 首摆幅值

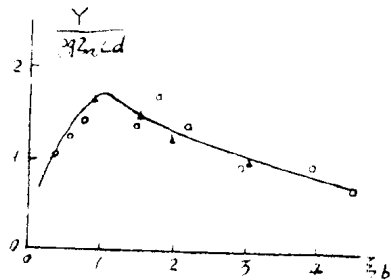


图14 横摆力幅值

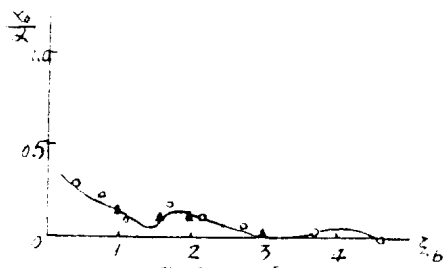


图19 纵摆幅值

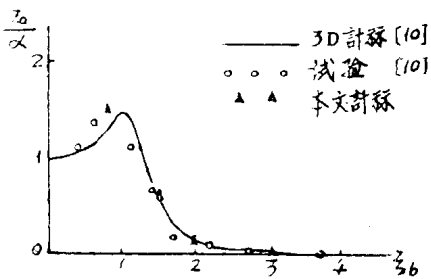


图15 升沉幅值

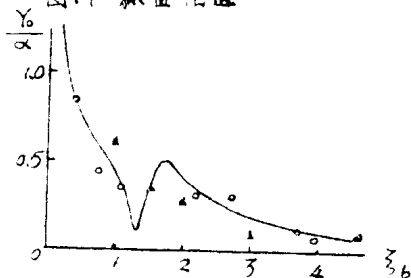


图20 横摆幅值

最优耐波性船型的设计方法

益其乐 汪 璜 戴仁元
(中国船舶科学研究中心)

提 要

本文在耐波性预报及评价的基础上提出了一种最优耐波性船型的设计方法。该方法以船体几何尺度要素为设计变量,以船舶在指定海域中能运行的平均极限波高为性能指标,采用“可变罚因子”法将有约束的优化问题化为一个无约束问题求解。文中建立了设计变量与 Lewis 船型之间的关系,给出了性能指标的设计方法,介绍了最优化的数学模型和寻优方法。最后给出了最优设计的实例,其效果是令人满意的。本方法为船舶设计提供了一个有效的工具。

(一) 前 言

在现代船舶设计中,片面追求快速性的做法正在被摒弃,“耐波性设计”的概念已开始受到重视,设计出在实际海浪环境中性能优良的船舶已成为船舶设计师追求的目标。

目前,船舶耐波性预报技术日益完善,〔1〕~〔2〕耐波性评价方法也已得到广泛应用〔3〕~〔5〕船舶设计师能够在船舶设计初期就直接应用这些成果对若干方案进行比较,从中选择优者。但是,由于供选方案有限,仍难保证得到优秀的设计。为此, Bales〔6〕在耐波性理论和评价的基础上,将最优化方法成功地应用到驱逐舰船型耐波性设计中来。它能够在允许的船型参数范围内选出耐波性最优的船型。鉴于该方法只能适用于驱逐舰船型,本文提出一个新的最优化设计方法。本方法与 Bales 方法相比,有如下特点:

- 1、它基于直接数值计算,因而不受船型种类的限制,适用范围广。
- 2、考虑了实际海域并根据使命选择评价标准,因而针对性强。
- 3、在优化过程中增加了一些合乎实际的约束条件,因而其结果更实用。

本文就最优设计的三大要素——设计变量的选择、性能指标的计算和最优化设计方法——分别作了介绍,并给出了计算实例。

(二) 设计变量的选择

设计变量从船型参数中选取。为建立设计变量与性能指标间的关系,借助于简单实用的 Lewis 船型最合适。为此先介绍从船型参数确定 Lewis 船型的方法,然后再从中选择设计变量。

1、水线面形状的确定

假定水线半宽曲线如图 1 所示,由四段曲线组成。它可由船长(L),船宽(B),船中前和船中后的水线面面积(A_{WF} , A_{WA}), 0 站和 20 站的半宽值($y(0)$ 、

$\gamma(20)$), 水线半进角(θ_e), 水线去流角(θ_A), 以及特征站号(X_e 、 X_{m1} 、 X_{m2})等11个参数确定。曲线段 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 取为四次多项式, 其系数可根据曲线两端点的值和导数的连续条件, 以及曲线所围的面积来确定。

2. 横剖面面积曲线的确定

假定横剖面面积曲线如图2所示。它可以根据一条参考的横剖面面积分布曲线通过两个变换来求得。首先, 将参考曲线线性变换成两个端值和最大剖面位置满足要求的新曲线, 然后再将此新曲线按抛物线规律作横向移动, 使曲线下的面积满足要求。确定横剖面面积曲线的参数有: 船长(L), 船宽(B), 吃水(T), 船中前和船中后的排水体积(V_F , V_A), 特征站号(X_{m1} , X_{m2}), 最大横剖面面积系数(C_m)以及首尾站面积与最大剖面面积之比(C_{00} 、 C_{20})。参考曲线预先选定, 它的选择可反映设计者对船型特点的某种考虑。

3. 纵中剖面形状曲线的确定

此曲线借用参考曲线, 仅通过线性变换调整尾部的龙骨截止点位置。

至此, Lewis船型已确定。上述过程中用到的船型参数为数不少, 但我们仅选择下列八个主要的船体几何尺度要素作为设计变量^{*}:

船长	L
船宽	B
吃水	T
首垂线至龙骨截止点的距离	C
船中前水线面面积	A_{WF}
船中后水线面面积	A_{WA}
船中前排水体积	V_F
船中后排水体积	V_A

*) 其它的几何尺度要素在优化过程中取为不变的参考值。

(三) 性能指标的计算

我们选定极限波高 H_{Lim} 作为耐波性优化的性能指标。极限波高系指船在指定海域中以某航速正常运行(即各耐波性因素均不超过极限标准)时所能经受的最大波高平均值。它的具体计算步骤如下:(5)

1. 根据船舶设计要求选定下列事项: 优化航速; 所要考虑的各种浪向 β_m 及其相对重要性 W_m ; 船在各海区 L 中可能航行的时间百分率 S_1 ; 参与评价的各种耐波性因素 K 及其相应的极限标准 C_K^* 。)

2. 海浪用以有义波高 H_i 和谱峰周期 T_j

*) 在本方法中, 可供选择的耐波性因素有12个, 它们是垂荡, 纵摇, 横摇, 晕船率, 船舶纵向任一位置上的垂向位移、垂向速度及垂向加速度, 主观感受的运动幅值(S_M 值)抨击概率, 甲板淹湿次数, 螺旋桨出水次数和声纳搜索成功率。

为参数的 ITTC 波谱表示。它在 L 海区的发生概率为 $P_{ijl}(H_i, T_j)$ 。将它按 S_l 加权平均，可求得船舶运行的等效海洋环境波浪发生概率

$$P_{ij}(H_i, T_j) = \sum_l S_l P_{ijl}(H_i, T_j) \quad (1)$$

3. 在选定的优化航速下，就浪向 β_m ，用 Gerritsma 的修正切片理论计算规则波中的五自由度的船舶运动响应，(1)(7)* 再应用迭加原理计算长峰不规则波中的各个耐波性因素，进而计算出在不同谱峰周期 T_j 的情况下相应于耐波性标准 C_k 的限制波高 H_{jkm} 。

*) 在计算规则波中船舶运动响应时，采用了 Lewis 剖面表达船型。二次流体动力系数根据预先算好的基本数据用插值法求得，基本数据的计算按文献(8)、(9)进行。

4. 求取相应于全部耐波性标准的限制波高 H_{jm}

$$H_{jm} = \text{Min} \left\{ H_{jkm} \right\} \quad (2)$$

同时找出最无受到限制的耐波性因素。

5. 对限制波高 H_{jm} 以波浪发生概率加权平均，求出某浪向 β_m 下的平均极限波高

$$H_m = \sum_j \left\{ \left(\frac{w_j}{\sum_j w_j} \right) H_{jm} \right\} \quad (3)$$

其中 w_j 可按(4)或(5)式计算。

$$w_j = \sum_i P_{ij}(H_i, T_j) \quad (4)$$

它是周期为 T_j 的波浪的发生概率。

$$w_j = P_{ij}(H_{jm}, T_j) \quad (5)$$

6. 对各种浪向 β_m 下的极限波高 H_m 按 w_m 加权平均，便最后得到性能指标——平均极限波高 H_{Lim}

$$H_{Lim} = \sum_m \left\{ H_m \cdot \frac{w_m}{\sum_m w_m} \right\} \quad (6)$$

(四) 最优设计的数学模型和优化方法

1. 数学模型

综上所述，船舶耐波性的性能指标 H_{Lim} 是一组设计变量的函数：

$$H_{Lim} = H_{Lim}(L, B, T, C, A_{WF}, A_{WA}, V_F, V_A) \quad (7)$$

如果用矢量 X 表示这组设计变量

$$\begin{aligned} X &= (x_1, x_2 \dots x_8)^T \\ &= (L, B, T, C, A_{WF}, A_{WA}, V_F, V_A)^T \end{aligned} \quad (8)$$

那末最优耐波性船型的设计问题可以表达为：寻找

$$X^* = (L^*, B^*, T^*, C^*, A_{WF}^*, A_{WA}^*, V_F^*, V_A^*)^T$$

使得

$$H_{Lim}(X^*) = \text{Max} \left\{ H_{Lim}(x) \left| \begin{array}{l} h_i(x) = 0, \quad i=1 \dots p \\ g_j(x) \geq 0, \quad j=1 \dots q \end{array} \right. \right\} \quad (9)$$

其中 X^* 表示问题的最优解。设计变量 X 的等式约束条件 ($h_i(x)=0, i=1 \dots p$)

和不等式约束条件 ($g_j(x) \geq 0, j=1 \dots q$) 描述了各种具体的设计要求。问题的约束条件可由以下约束条件的任意一种组合组成：

(1) 排水量约束：最优设计在排水量不变的前提下进行，即

$$W=W_0 \quad (10)$$

(2) 船体几何尺度要素约束：

$$(X_1)_1 \leq X_1 \leq (X_1)_2 \quad \text{或} \quad X_1 = (X_1)_0 \quad i=1 \dots 8. \quad (11)$$

(3) 船型系数约束：

$$\begin{array}{ll} \text{船中前水线面系数} & (C_{WF})_1 \leq C_{WF} \leq (C_{WF})_2 \\ \text{船中后水线面系数} & (C_{WA})_1 \leq C_{WA} \leq (C_{WA})_2 \\ \text{吃水船长比} & (T/L)_1 \leq T/L \leq (T/L)_2 \\ \text{截止比} & (C/L)_1 \leq C/L \leq (C/L)_2 \\ \text{船中前竖梭形系数} & (C_{VPF})_1 \leq C_{VPF} \leq (C_{VPF})_2 \\ \text{船中后竖梭形系数} & (C_{VPA})_1 \leq C_{VPA} \leq (C_{VPA})_2 \end{array} \quad (12)$$

(4) 静水阻力约束：

$$R_{es}(X) \leq (1+P_{CR}) R_{eso} \quad (13)$$

R_{eso} 是初始参考船的静水阻力， P_{CR} 表示可以允许的静水阻力增加百分率。

(5) 浮心纵向位置约束：

$$(L_{CB})_1 \leq L_{CB}(X) \leq (L_{CB})_2 \quad (14)$$

(6) 初稳性高约束：

$$GM(X) \geq GM_{min} \quad (15)$$

式中足标1、2分别表示约束的下限和上限，0表示指定值。浮心位置和初稳性高由静力计算求得，静水阻力采用(10)提供的方法计算，或按其它方法估算。

2. 优化方法

(9)式提出的是一个具有等式约束和不等式约束的最优化问题，可以用序列无约束极小化方法(SUMT法)将它化成一系列的无约束问题迭代求解，但计算工作量很大。为此，我们提出了一个直接求介的方法，它将有约束的优化问题变成一个无约束问题求解。

首先构成优化的目标函数：

$$F(X, M) = (12 - H_{Lim}(x)) + M \cdot S(X) \quad (16)$$

其中 $S(X)$ 为约束函数；(在优化程序中假定最大的极限波高为12米)

$$S(X) = \sum_{i=1}^P h_i^2(X) - \sum_{j=1}^q \left[\text{Min}(g_j(X), 0) \right]^2 \quad (17)$$

于是在上述优化问题变为求目标函数 $F(X, M)$ 的极小值。 $F(X, M)$ 的寻优采用 $M-M$ 单纯形法(11)(12)。在寻优过程中 M 按下式取值

$$M = \text{Max} \left\{ M_0, \text{Entier} \left[1/\left(\alpha \cdot \frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \|X^j - \bar{X}\| \right) \right] \right\} \quad (18)$$

称 M 为可变罚因子，其中 M_0 为它的初值。 X^j 是单纯形的顶点， $\bar{X}$ 是单纯形的形心， n 为矢量 X 的维数。 α 称为调节因子，用来控制 M 值的大小及其增长速度。在 $F(X, M)$ 的寻优过程中，随着单纯形逐渐缩小， M 不断增加，当 $\frac{1}{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \|X^j - \bar{X}\|$

$\rightarrow 0$ 时， $M \rightarrow \infty$ ，从而找到满足约束条件的最优解 X^* 。

上述“可变罚因子无约束极小化”方法简称为“可变罚因子”法，采用这一方法避免了用迭代的方法求介一系列的无约束问题，减少了计算工作量，提高了寻优速度。

(五) 最优设计实例

上述最优设计方法是否有效，从根本上来说，要看它能否在重重的约束下导致令人满意的耐波性改进。下面介绍两个优化设计实例。*)

1. 高速圆舢舨的纵向优化**)

设计要求如下：

航行海区：中国南海
优化航速：32节
优化浪向：迎浪(180°)

*) 这二例用(3)和(4)式计算极限波高。

**) 认为该艇的横摇运动是可以通过附体设计适当控制的。

耐波性因素及标准：纵摇(单幅有义值4.8°)、3站处的垂向加速度(单幅有