

围网渔船作业时的起网力矩及横摇计算

胡明埭 何其淦 董初生 蒋念涵

(上海水产大学, 200090)

摘要 本文在实船测试的基础上, 将渔船绞纲起网时的括纲视作一种呈悬链线状的柔索, 由此求解产生于绞纲结束阶段的最大倾侧力矩和张力的方向角, 同时考虑力的作用点位置等因素, 推导出较为简化的最大倾侧力矩公式。起网时的横摇计算, 应用了脉冲响应法求解横摇运动方程。在作计算修正时, 还引入了横摇质量惯性矩 I_x 的修正系数 C_1 和网具尺度比的修正系数 C_2 。实例计算结果颇为满意。最后作者指出在风浪扰动力矩作用下, 绞纲起网时, 横摇幅值有成倍数的增加, 甚至出现危险情况。起网力矩和横摇角的公式计算法, 对研究和设计围网渔船及其稳性校核很重要, 并有益于进一步修订渔船稳性规范。

关键词 围网渔船, 起网力矩, 横摇, 稳性, 计算

围网渔船作业时, 由于其网具尺度大, 绞纲起网时力的大小、方向及作用点变化较大, 由此引起的倾侧力矩、倾侧角度的变化远比拖网渔船复杂, 加之甲板上众多的渔捞机械和装备以及在航次后期船舶往往处于“三空”(油、水近于用完, 舱内无渔获物) 状态, 这些因素均对稳性不利。而现行的稳性规范中, 还缺少有关适合围网渔船的外力矩核算的状态和计算方法。为配合国际海事组织(IMO)载重线、稳性和渔船安全委员会制定渔船稳性规范, 要求各国提供有关实测数据、试验资料和计算方法。为此, 上海渔船检验处受船舶检验局渔船分局委托, 要求上海水产大学、上海海洋渔业公司等单位进行围网渔船起网时外力的实测工作并提出分析报告。在此基础上, 我们作了进一步的理论探讨, 提出了起网时外力矩及横摇角的计算公式。

一、计 算

(一) 起网时外力矩计算

根据“8201”型围网渔船“沪渔391”起网时受力的实测和分析, 在绞收括纲阶段的末尾, 外力为最大。由此而引起的最大倾侧力矩为 $529.2\text{kN}\cdot\text{m}$ 。若计及灯船的拖带力矩影响, 则最大倾侧力矩为 $475\text{kN}\cdot\text{m}$ [胡明埭等, 1991]。为便于对不同船型使用不同规格的网具以及在不同水深条件下的起网力矩计算, 可把括纲绞收时在水中所呈状态看作为一种柔索, 其曲线形状可用悬链线方程来表示。除网具不着底情况外, 悬链深度随着作业水深而变化。且在绞收括纲过程中, 括纲吊柱受力点处括纲张力的作用线即悬链线切线的斜率 α' 是变化的, 可由悬链线方程求得, 见图1。当底环最后串挂在括纲吊柱力时, 此时括纲张力线基本上呈垂直状态。在绞纲结束前1~1.5分钟, 此时所产生的力及其引

起的倾侧力矩为最大值。通过列出不同水深时悬链线方程的计算程序, 求出使力矩 $M(M_{左} + M_{右})$ 为最大的 α 值 (括纲张力线和垂直轴的夹角, $\alpha = 90^\circ - \alpha'$), 并绘制成曲线(图 2)。

绞纲阶段末尾所产生的最大倾侧力矩, 其力臂与张力的作用方向及括纲吊柱受力点的位置 (即与计算状态时船舶重心间的距离) 有关, 计算式为:

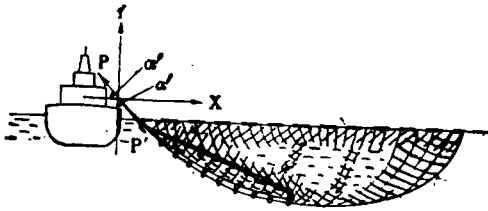


图 1 绞收括纲时, 其形态及张力方向示意图

Fig. 1 The form of purse-line and tension direction during the hauling

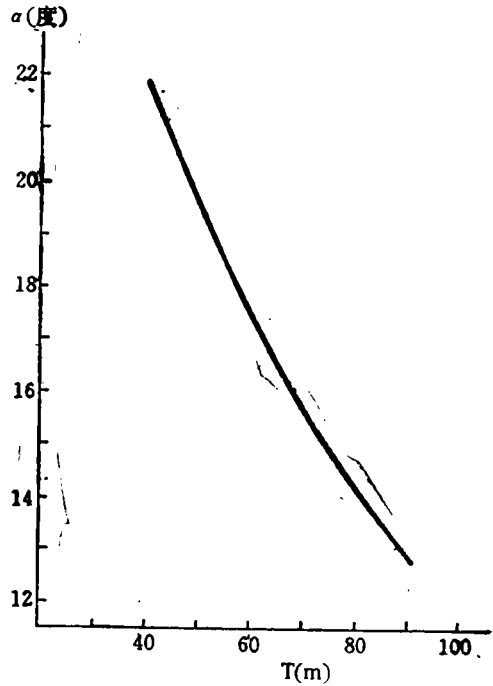


图 2 括纲吊柱力点处, 括纲张力作用线夹角 α 与水深 T 的关系曲线

Fig. 2 The relationship between the angle α of the tension line of purse-line and the T of water depth at the point of application on purse-line davit

$$M = P \cdot \sqrt{l_1^2 + l_2^2} \sin \left(\arctan \frac{l_1}{l_2} + \alpha \right) \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (1)$$

式中, P 为括纲张力, kN 。由左、右括纲张力曲线中, 取同一时刻张力相加最大的值 [胡明培等, 1991], 然后分别以 $P_{左}$ 、 $P_{右}$ 代入上式, 可得 $M_{左}$ 、 $M_{右}$, $M = M_{左} + M_{右}$ 。 l_1 为括纲吊柱上括纲受力点 (取滑轮外缘或滑轮中心点) 至该计算状态时船舶重心间的垂直距离, m 。 l_2 为括纲吊柱上括纲受力点至重心间的水平距离, m 。 α 为括纲吊柱上括纲受力点处, 括纲张力作用线与垂直轴之间的夹角, $\alpha = 90^\circ - \alpha'$, 可由图 2 根据作业水深求得。

举例如下表, 测试船的数据, 网具 $866 \times 215m$, 作业水深 $63m$ 。

	绞纲速度 $V(\text{m/s})$	$P(\text{kN})$	$l_1(\text{m})$	$l_2(\text{m})$	$\alpha(^{\circ})$	$M_{左或右}$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	$M_{max} = M_{左} + M_{右}$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
左括纲	0.84~0.74	63.01	3.20	3.65	16.96	278.95	510.19
右括纲	1.30~0.80	53.21	2.93	3.65		231.24	

计算结果, 最大倾侧力矩 $M_{max} = 510.19 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 与实测值 ($529.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$) 相比, 相差 3.59%。

(二) 起网时渔船横摇计算

1. 横摇运动计算 围网渔船在绞纲起网过程中遭受到较短时间不规则的确定性的外力矩作用将会激起横摇。在最大外界倾侧力矩作用下,产生最大的横倾角。

受外力矩作用下,船舶横摇运动方程〔勃拉哥维辛斯基, 1959年中译本〕

$$I_x \ddot{\phi} + 2N\dot{\phi} + \Delta(r-a)\phi = M(t) \quad (2)$$

式中, I_x ——横摇质量惯性矩

$2N$ ——横摇阻尼力系数

Δ ——船的排水量

r ——稳心半径

a ——重心与浮心的间距

$M(t)$ ——横摇扰动力矩

ϕ ——相对横摇角

运用脉冲响应法〔冯铁城, 1983; 冯铁城等, 1989〕求解上述方程,可把作用在船上的外力矩看作是在 $t=0$ 时作用于船上的单位脉冲 $\delta(t)$, 则船产生横摇响应 $\phi(t)$ 即为单位脉冲响应函数 $h(t)$, 由此可得:

$$I_x \ddot{h}(t) + 2N\dot{h}(t) + \Delta(r-a)h(t) = \delta(t) \quad (3)$$

根据脉冲函数的性质,当 $t>0$ 时, $\delta(t) = 0$ 。同时令: $2\nu = 2N/I_x$ ——横摇衰减系数, $n = \sqrt{\Delta(r-a)/I_x}$ ——横摇固有频率。则(3)式可简化为:

$$\ddot{h}(t) + 2\nu\dot{h}(t) + n^2h(t) = 0 \quad (4)$$

此方程式为二阶齐次线性微分方程式。

若在 $t=0$ 时, 有一横向脉冲力矩 M 作用于船上, 则船将产生横摇角速度 \dot{h}_0 , 根据动量矩定理有

$$Md(t) = I_x \dot{h}_0 \quad (5)$$

由于时间很短, 可以认为没有初始横摇角, 故在单位脉冲力矩 $M=1$ 作用下的初始条件为: $t=0$ 时, $h_0=0$, $\dot{h}_0 = \frac{1}{I_x}$ 。则(4)式的解为:

$$h(t) = \frac{1}{I_x \omega} e^{-\nu t} \sin \omega t \quad (6)$$

式中, $\omega = \sqrt{n^2 - \nu^2}$ 为横摇运动的圆频率。

$h(t)$ 为横摇脉冲响应函数, 它表明了船舶对单位脉冲力矩作用下的横摇瞬态响应, 也即自终止扰动的瞬时起, 一直到船舶重新恢复到静平衡为止的整个过程中的横摇动态特性。若把任意形式的外力矩 $M(t)$ 看作是相互连接起来的一系列脉冲扰动之和, 利用线性迭加原理把所有的瞬时响应迭加起来, 就可得到任意外力矩 $M(t)$ 作用下的横摇时间历程〔Breslin, 1964; Thomson, 1972〕:

$$\phi(t) = \int_0^t M(\xi) h(t-\xi) d\xi \quad (7)$$

式中, $M(\xi)d\xi$ 为时间 $t=\xi$ 处脉冲强度(冲量矩), 它在时间 t 的响应, 取决于经过的时间

间隔 $(t-\xi)$,可以写为 $M(\xi)h(t-\xi)d\xi$ 。(7)式是一种卷积的形式。

在外力矩能表示成时间的简单关系或是具有复杂的不规则变化形式、但用数值积分时,且积分步长取得足够小,如 $\Delta T = \Delta\xi = 0.1s$,则(7)式是可以计算的,其误差值也不会太大[陶尧森,1985]。

用上述方法的电算程序,对测试条件下的“沪渔391”围网渔船进行了横摇计算,其要素如下表。在绞纲阶段末尾,船受左、右绞纲力所形成的倾侧力矩和灯船拖带力矩作用下随时间变化的横摇曲线见图3。所得最大横摇幅值 $\phi_{max} = 14.26^\circ$ 与实测值 $\phi_{max} \approx 12 \sim 14^\circ$ (上海水产大学,1988)相当接近。

船的排水量 $\Delta(t)$	重心高度 $Z_g(m)$	初稳心高度 $h(m)$	横摇固有周期 $T_\phi = 0.58 \sqrt{\frac{B^2 + 4Z_g^2}{h}}$ (s)	横摇无因次 衰减系数 $\mu = \frac{K_1}{2} \cdot \frac{LB^4}{D(B^2 + H^2)} \cdot \phi \Delta$	横摇质量惯性矩 $I_x = \frac{\Delta}{12g} (B^2 + 4Z_g^2)$ ($t \cdot m \cdot s^2$)	最大横 摇幅值 ϕ_{max} ($^\circ$)
384	2.80	0.616	6.799	0.0715	276	14.26

注: $K_1 = 0.055 \sim 0.060$, $\phi_A = 0.5 \sim 0.6$ 弧度, μ 已计及艇龙骨的影响。

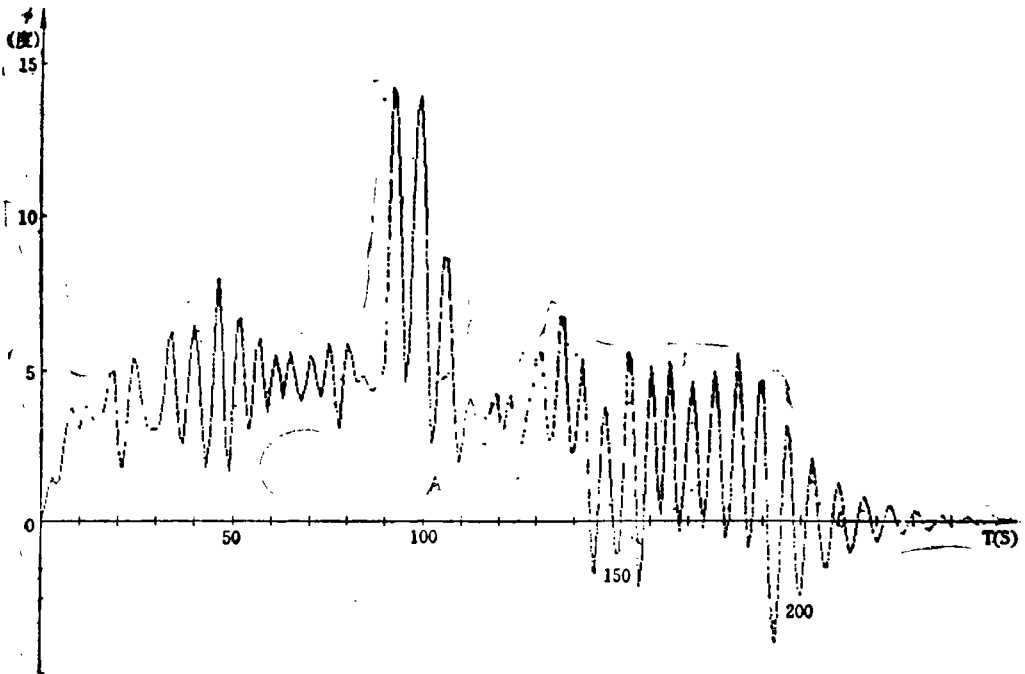


图3 “沪渔391”船绞纲时横摇历时曲线

Fig. 3 Rolling curve on time series of “Huyu 391” during the hauling

2. 不同尺度围网渔船的横摇计算 不同船型的围网渔船,在使用同规格网具时,当其绞纲机的功率及速度一致时,其绞纲力矩相同,但横摇质量惯性矩及固有周期不同,因

(1) 上海水产大学,1988。围网渔船起网时外力实测报告。

而横摇幅值及横摇历时曲线的相位有所变化。现选取的渔船计算要素为：

- 横摇质量惯性矩 $I_x = 250 \sim 370 t \cdot m \cdot s^2$
- 横摇固有周期 $T_\phi = 6 \sim 7.5 s$
- 横摇无因次衰减系数 $\mu = 0.0715$

这里横摇无因次衰减系数 μ 假定不变，计算表明阻尼对起网力矩引起的横摇角影响很小。

计算的部份结果用图 4 表示。由图 4(a)可见，当横摇质量惯性矩 I_x 保持不变，而改变横摇固有周期 T_ϕ 时，横摇曲线幅值随着 T_ϕ 而加大，且相位也异。图 4(b)表明，当 T_ϕ 不变，而改变 I_x 时，横摇曲线幅值随着 I_x 的增大而减小，但相位不变。两组曲线表明，当起网力矩消失后，船绕正浮位置作衰减横摇，约经 9~10 次摇荡(历时一分钟)后完全衰减。

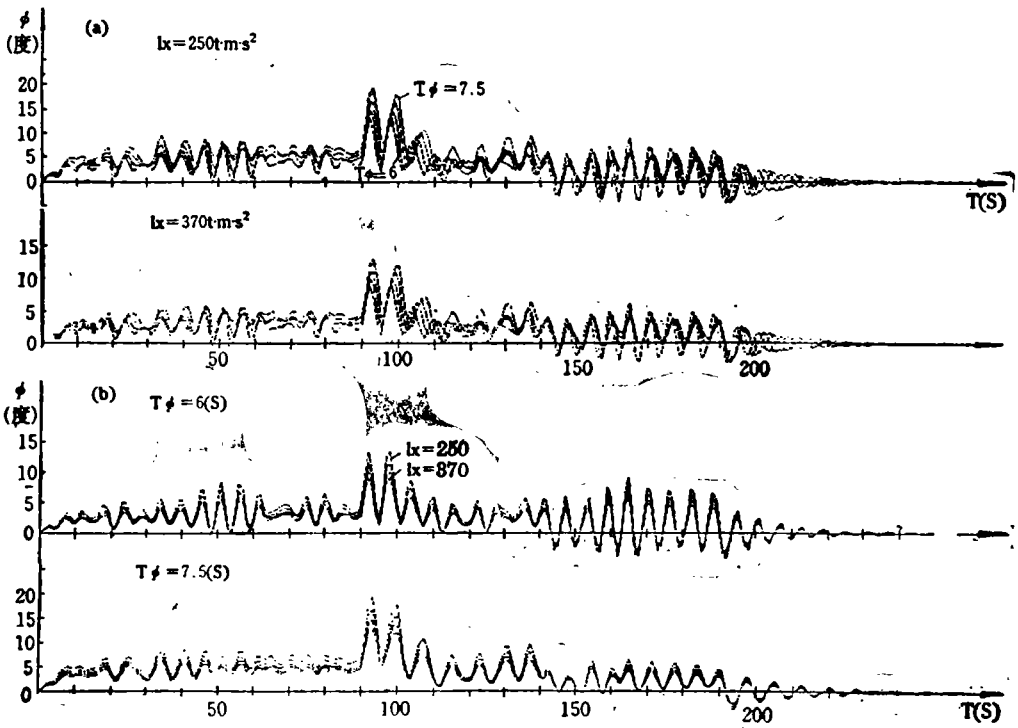


图 4 横摇历时随 T_ϕ 变化曲线(a)和随 I_x 变化曲线(b)

Fig. 4 Rolling curve with varied T_ϕ . (a) and with varied I_x (b)

图 5 为由上述计算，以横摇固有周期 T_ϕ 为横坐标、横摇质量惯性矩 I_x 为参数的横摇最大倾角 ϕ 曲线。经回归后可得

$$\phi_{max}^0 = (39.587 - 11.337T_\phi + 1.040T_\phi^2) \cdot C_1 \tag{8}$$

式中， C_1 ——横摇质量惯性矩 I_x 的修正系数，由图 6 查取。

3. 不同网具尺寸时的横摇计算 根据动力相似理论，各种围网尺寸下的阻力尺度比

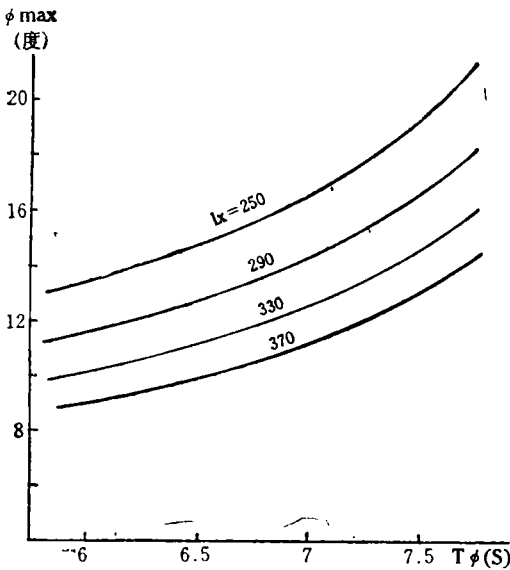


图5 最大横摇角与 I_x 、 $T\phi$ 的关系曲线

Fig. 5 The relationship between maximum inclining angle of rolling and I_x , $T\phi$

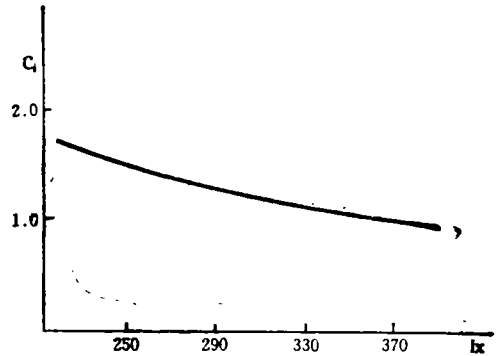


图6 横摇质量惯性矩修正系数

Fig. 6 Adjustment coefficient of vessel's inertia moment of the mass of rolling

C_R 为:

$$C_R = \frac{C_d}{C_a} \cdot C_i^2 \cdot C_v^2 \cdot C_K \cdot C_p \tag{9}$$

- 式中, C_d = 网线直径尺度比
- C_a = 网目大小尺度比
- C_i = 网主尺度比
- C_v = 绞纲速度比
- C_K = 雷诺修正系数
- C_p = 水密度比, $C_p = 1$

实测工况为水深 55~63m, 围网尺度为长×高 = 866m × 215.2m、网目 35mm, 缩结系数 $u_1 = 0.70$ 、 $u_2 = 0.74$, 绞纲速度 $v_{右} = 0.8 \sim 1.3$ m/s、 $v_{左} = 0.84 \sim 0.74$ m/s、最后 2 分钟时为 0.5m/s。实测网具的缩结高为 $215.2 \times 0.714 = 153.64$ m, 实测水深 < 63m, 由力学模拟实验可知, 约有 50% 网衣贴底、未充分展开, 该部份网衣仅有与海底相对运动的摩擦阻力而无水阻力。当两顶网具的结构、网线材料、线径、网具尺寸相同时, 则 $C_d = C_a = 1$, 同时网具的缩结系数 u_1 、 u_2 相同, 且绞机型号不变、绞纲速度相同, 则 $C_v = 1$ 。根据几何相似原理, 当网具主尺度在 $L \times H = (900 \sim 1200\text{m}) \times (200 \sim 300\text{m})$, 缩结系数 $u_1 = 0.70$ 、 $u_2 = 0.71$, 作业水深 < 85m 时, 仍可认为以网线直径为特征长度时, 雷诺数 R_N 在自动模型区, 也即 C_R 与 R_N 无关、 $C_K = 1$, 则在弗汝德数 F_N 相同时, 符合动力相似条件〔国家水产总局东海水产研究所, 1978〕(周应祺, 1986), 式(9)可写为:

(2) 周应祺, 1986. 渔具力学讲义, 4(7-22), 上海水产大学。

$$C_R = C_i^2 \quad (10)$$

在上述相似范围内的网具，当作业水深 < 85m 时，渔船绞纲时其受力（或力矩）可用(10)式的比例来换算， $P' = P \cdot C_R$ 或 $M' = M \cdot C_R$ 。其 $C_R = f(L \cdot H)$ 的图形见图 7。

根据线性叠加原理，当绞纲力矩（或力）由 M 变为 M' ，且 $M' = M \cdot C_R$ 时，则由该力矩所产生的横摇角 $\phi' = \phi \cdot C_R$ ，故(8)式可写为：

$$\phi_{max}^0 = (39.587 - 11.337T_\phi + 1.040T_\phi^2) \cdot C_1 \cdot C_R \quad (11)$$

(11)式可应用于因网具尺寸改变而产生不同绞纲力矩时，船舶横摇的响应（这里假定拖带力矩同时成比例增减）。(11)式的计算结果有待模型试验或实测来进一步验证。

4. 风浪扰动下的横摇计算 实测起网力是在 2~3 级风及 2 级小涌（目测）情况下得到的，可以认为风浪扰动影响较小。而实际围网作业时，在 7~8 级风情况下，还有起网作业的可能。在风浪扰动力矩作用下，渔船绞纲起网时，横摇幅值有较大的增加，甚至会出现危险情况。为了有利于网、船分离及减小横摇角，通常起网作业均在上风一侧进行。现计算了在 8 级风、6 级浪海况下渔船绞纲阶段的横摇，其横摇运动方程式(2)变为：

$$I_x \ddot{\phi} + 2N\dot{\phi} + \Delta(r - a)\phi = M_{l,r} + M_s + M_f + M_w \quad (12)$$

式中， $M_{l,r}$ ——左、右绞纲时的力矩

M_s ——拖带力矩

M_f ——风倾力矩

M_w ——波浪扰动力矩， $M_w = K_1 \cdot K_\phi \cdot \alpha_0 \cdot \cos \omega t \cdot \Delta \cdot h$

风倾力矩 M_f ，根据稳性规范（中华人民共和国船舶检验局，1986）计算测试状态时为 180.81kN·m。拖带力矩 M_s 为 54.2kN·m [胡明培等，1991]，其它计算要素如下表。计算结果，最大横倾角可达 33°（为原来的 2 倍多）；随着 I_x 的增加，横倾角减小；随着 T_ϕ 的增加，横倾角也增加，但有一极值（在固有周期与波浪周期相近时）。由于波浪扰动力矩为余弦函数，故线性叠加时有相位差，其最大横倾角的变动幅度在 5° 之内。

波长 λ (m)	波高 $\xi_{w/3}$ (m)	不规则波系数 K_1	有效波倾系数 $K_\phi = 0.13 + 0.60 \frac{Z_g}{d}$	表面波倾角 $\alpha_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\xi_{w/3}}{2}$ (rad)	波浪频率 $\omega \approx \frac{2\pi}{0.8\sqrt{\lambda}}$ (s ⁻¹)
80	4	0.70	0.74	0.25	0.878

二、结 语

(1) 运用柔索理论，把括纲受力所引起的最大倾侧力矩纳入公式化计算范畴。其结果与实测数值颇为接近。

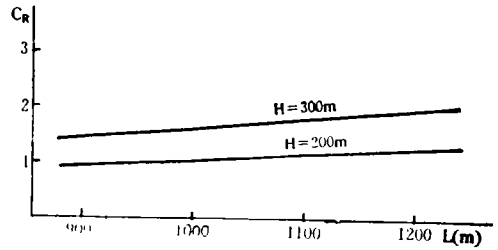


图 7 相似网形阻力尺度比修正系数
Fig. 7 The resistance scale of nets for similar shape

(2) 运用脉冲响应法,求解横摇运动方程,得出了任意外力矩作用下的船舶横摇历程计算公式。并应用电算程序,从而较为方便地计算了在外界扰动力矩作用下的船舶动倾角,比目前在稳性校核中应用静平衡原理来计算静倾角更为合理和正确。

(3) 考虑到船舶尺度的不同及使用网具规格的变化将引起横摇幅值的改变,分别推导、计算和绘制了它的影响系数和曲线,以供实际计算中应用。

(4) 为计算和校核围网渔船的稳性,提供了有效的方法,并为修订稳性规范提供了实测数据和可靠依据。

(5) 计算方法和公式的实际应用,还有待更多船舶的进一步验证;稳性标准的制定,有待进一步的研讨。

本文得到周应祺教授的审阅和指点,特表谢意。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国船舶检验局,1986。海船稳性规范,6—8。人民交通出版社(京)。
- [2] 冯铁城,1983。在冲击外力矩作用下的横摇运动,船舶工程,(4):8—10。
- [3] 冯铁城等,1989。船舶操纵与摇荡,86—108。国防工业出版社(京)。
- [4] 国家水产总局东海水产研究所,1978。渔具模型试验,6—29。农业出版社(京)。
- [5] 胡明增等,1991。围网渔船起网时受力的实测与分析。水产学报,15(1):17—25。
- [6] 陶尧森,1985。船舶耐波性,123—138。上海交通大学出版社。
- [7] 勃拉哥维辛斯基, C. H.(魏东升等译),1959。船舶摇摆,211—234。高等教育出版社(京)。
- [8] Breslin, J. P. *et al.*, 1964. Deterministic evaluation of motion of marine craft in irregular seas. *Ship Motion and Drag Reduction 5th Symposium on Naval Hydrodynamic*, 470—497. Office of Naval Research Department of Navy, ACR—112, Washington, D. C.
- [9] Thomson, W. T., 1972. *Theory of Vibration with Applications*, 332—361. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs. New Jersey.

THE CALCULATION FOR HAULING MOMENT AND ROLLING OF PURSE SEINER DURING THE PROCEDURE

Hu Mingyu, He Qiyu, Dong Chusheng and Jiang Nianhan

(Shanghai Fisheries University, 200090)

ABSTRACT Based on the data of realtime records the tensile directions namely the angle between the tension line and the vertical line, while the inclining moment is up to the maximum which normally occurs in the end of hauling, are analyzed, when and the purse-line is supposed as a suspended flexible wire in the water during hauling. On account of the amount and the point of tension and other factors, a simplified formula of maximum inclining moment is derived. The rolling of seiner is calculated with the impulse response method according to the rolling equation. For different size of vessels and net specifications, the adjustment coefficients, C_1 and C_2 , are introduced into vessel's inertia moment.

of the mass for rolling and for net specifications respectively in the calculation. In practice, the results from calculation are satisfactory. In this paper, it has indicated that rolling amplitude will increase many times if the fishing vessels are effected by the moments caused by wind and/or wave during hauling, and the vessels might be in danger. The calculation as mentioned above is practically significant in the designing of purse seiner and the checking of its stability. This method provides a basis for the further modification and adjustment of the Rules for stability of fishing vessels.

KEYWORDS purse seiner, hauling moment, rolling, stability, calculation