

风浪中锚泊渔船的锚链系泊张力的分析研究*

周崇庆

刘士光 李天匀

(中国水产科学研究院, 北京 100039) (华中理工大学交通科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要 渔船在风浪冲击下锚泊时, 其锚链的动力负荷会受到影响。通过非线性方程的求解, 着重分析二阶波浪力导致的高系泊力。结果证明, 在不同水深及风、浪、流的作用下, 电焊锚链和钢丝绳所能承受的系泊拉力相差较大, 从而为渔船锚泊规范制订提供了理论基础。

关键词 渔船, 钢丝绳, 电焊锚链, 系泊张力

锚泊设备是渔业船舶上的重要设备之一, 其性能优劣直接关系到渔船的安全性和操作性。以往渔船锚泊设备配备皆按钢质渔船建造规范的相关要求进行, 但多年实践中渔船丢锚断链事故不断发生, 其主要原因是规范中仅考虑静力作用影响。迄今尚未见到渔船锚泊时在风、浪、流作用下承受动力冲击负荷的研究报道。为了保证受风浪冲击的渔船锚泊安全, 必须对锚泊的动力负荷进行分析研究。

1 渔船纵向水平阻力计算

风阻力主要由粘压阻力产生:

$$F_1 = \frac{1}{2} C_a \rho_a V_a^2 A \quad (1)$$

式中: C_a 为空气阻力系数; ρ_a 为 15°C 时的空气密度; V_a 为相对风速; A 为水上部分在横剖面上的投影面积。对于拖网渔船来说, C_a 可取为 $0.8^{[1]}$ 。

水流的纵向阻力主要由摩擦引起, 可以用类似估算船体静水阻力的方法来计算海流的作用力^[2]:

$$F_2 = \frac{1}{2} C_h \rho_h V_h^2 S \quad (2)$$

式中: $C_h = \frac{0.075}{(\log R_n - 2.0)^2}$, 为摩擦系数 (8th

ITTC 公式); $R_n = \frac{V_h L_{wl}}{\gamma}$, 为雷诺数; V_h 为流速; L_{wl} 为船体水线长; γ 为海水的运动粘性系数; ρ_h 为海水密度; S 为船体湿面积。

水面的流速由两部分组成:

①潮流速度 V_0 ; ②由风浪引起的表层流速, 可由尼克曼公式求出^①:

$$V_1 = \frac{0.0127 V_a}{\sqrt{\sin \theta}} \quad (3)$$

式中: θ 为渔船锚泊海域的纬度。

船体的湿面积可由荷兰瓦根宁船池推荐的民用船舶湿面积公式计算^[3]。

$$S = [3.4 \nabla^{\frac{1}{3}} + 0.5 L_{pp}] \nabla^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: ∇ 为渔船排水体积; L_{pp} 为渔船垂线间长。

近年来, 上海交通大学船舶流体力学研究室对我国比较典型的渔船船模进行了耐波性试验, 采用 Jinkine 和 Ferdinander 方法进行回归分析, 给出了计算不规则波浪中阻力平均增值的近似公式^[4]。

以上部分的外力可认为是定常力。

2 锚链受冲击时的数学模型

为求解方便, 合理假设系统为二维问题^①。建立如图 1 所示的平面直角坐标系:

s - 锚链长度;

θ - 微元右端切线与 x 轴的夹角, 也即微元右端切线与流体流动方向的夹角;

收稿日期: 1998-10-26

* 农业部重点科研项目 (渔 95-E96-09-03-04)

1) 张子俊, 深海大型资料浮标锚链系统, 华中理工大学硕士学位论文, 1989

T - 微元右端面受到的张力;
 F_1 - 微元受到的切向水动力;
 F_w - 微元受到的法向水动力;
 W_w - 单位长度锚链在水中的重量 ($=0.87W_a$);
 V - 微元的切向振动速度;
 U - 微元的法向振动速度。

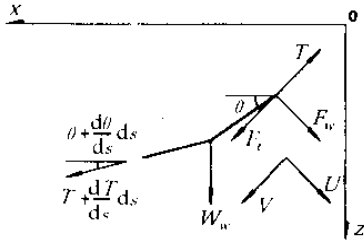


图1 直角坐标系及锚链微元受力分析

Fig.1 System of rectangular coordinates and stressed analysis for microelement of anchor cable

根据 Morison 公式^[4]:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2} \rho_b C_T D_{eq} (V_t - V)^2 \\ F_w &= \frac{1}{2} \rho_b C_w D_{eq} (V_w + U)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $D_{eq} = \sqrt{4W_a/\pi\rho_a g}$ 为等效锚链直径; W_a 为单位长度锚链在空气中的重量; C_T 、 C_w 分别是切向系数和法向系数^[5]; V_t 、 V_w 分别是潮流速度的切向分量和法向分量。

锚链微元的平衡微分方程为^[6]:

$$\left. \begin{aligned} M_u \frac{\partial U}{\partial s} - M_v V \frac{\partial}{\partial s} &= -T \frac{\partial}{\partial s} + F_u(1+\epsilon) + W_w \cos\theta \\ M_v \frac{\partial V}{\partial s} + M_u U \frac{\partial}{\partial s} &= \frac{\partial T}{\partial s} - F_w(1+\epsilon) + W_w \sin\theta \\ \frac{\partial U}{\partial s} &= -(1+\epsilon) \frac{\partial}{\partial s} - V \frac{\partial}{\partial s} \\ \frac{\partial V}{\partial s} &= \frac{\partial}{\partial s} + U \frac{\partial}{\partial s} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\epsilon = 4T/\pi E D_{eq}^2$, 为微元在张力作用下产生的应变; E 为锚链材料的杨氏模量; $M = M + \pi D_{eq}^2 c_m/4$, 为微元的法向质量(包括附连水质量), $M_v = M + \pi D_{eq}^2 c_v/4$, 为微元的切向质量(包括附连水质量), M 为锚链单位长度质量; C_m 、 C_v 分别是法向和切向附连水质量系数。

3 非线性动力方程求解

将式(5)的力函数 F_1 、 F_w 对有关时域变量展开为 Taylor 级数, 并取其首项, 可推出一阶摄动方程。

Kaplan 等^[6]曾经在研究浮标的系泊状态下的运动问题中应用了频率域的解法。他们对于某一给定频率的振荡, 得到频率域的锚泊线动力方程, 并应用两点边值问题的解法, 提出了求解的步骤。这一方法完全适合本研究。通过以上分析和变量展开可以把式(6)简化整理为如下形式:

$$\begin{Bmatrix} \frac{d\theta}{ds} \\ \frac{dT}{ds} \\ \frac{dU}{ds} \\ \frac{dV}{ds} \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} \theta \\ T \\ U \\ V \end{Bmatrix} \quad (7)$$

式(7)表示以 s 为变量的齐次线性方程组, 在锚链线的上下端点处给定了边界条件, 这就是常微分方程组的边值问题, 它不同于初值问题。在本研究中, 认为海底上的锚链固定, 而上端点的运动与渔船的运动互相耦合, 即所谓的两点边值问题, 可通过 Goodman-Lance 方法求解(即打靶法)。

渔船纵荡运动中受到二阶波浪慢变力的谱密度为^[2]:

$$S_d(\omega_k) = 2(B\rho g)^2 \int_0^\infty S(\omega) S(\omega + \omega_k) R^4(\omega + \omega_k/2) d\omega \quad (8)$$

式中: $S(\omega)$ 为 ITTC 双参数波浪谱。

假定船体在纵荡运动中附加质量不受波浪的影响, 并取本身质量的 5%, 则在单位力扰动下渔船的纵荡方程为: $1.05\rho_b \nabla \ddot{x} + B_x \dot{x} + k_1 x = e^{i\omega t}$ (9)

式中: k_1 为锚泊系统的复原力系数; B_x 为渔船纵荡的阻尼系数。

从纵荡方程(9)出发可得到单位扰动力的传递函数 $H(\omega)$ 。根据谱分析理论, 渔船二阶慢变运动谱应等于二阶慢变力谱乘以力传递函数模的平方, 即:

$$S_f(\omega_k) = |H(\omega)|^2 S_d(\omega_k) \quad (10)$$

二阶慢变运动的方差等于谱密度曲线下的面积:

$$\begin{aligned} \sigma &= \int_0^\infty S_f(\omega_k) d\omega_k \\ &= \int_0^\infty \frac{2(qB\rho g)^2}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + (\gamma\omega)^2} d\omega \int_0^\infty S(\omega + \omega_k) \\ &\quad \cdot R^4(\omega + \omega_k/2) d\omega_k \end{aligned} \quad (11)$$

若假定二阶慢变运动幅值符合瑞利分布, 那么可以方便地确定出二阶慢变运动的统计特征值。例如纵荡运动的有义值为: $x_{1/3} = 2.00\sqrt{\sigma}$ (12)

根据图1所示的坐标系, 在锚链上端点存在以下关系式:

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{1/3} \\ \dot{z}_{1/3} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式中: $\dot{z}_{1/3} = 0$ 。在锚链下端点处, 其边界条件为:

$$U = 0; V = 0 \quad (14)$$

这就是式(7)的边界条件。通过数值积分即可得到在风浪冲击下系泊锚链的最大系泊张力。

4 计算结果

表1列出某一渔船抛锚时在不同水深、不同海况

下计算得到的有档锚链最大系泊张力。此时锚链直径为22 mm, 链长200 m, 拉断负荷为200.0 kN。

同一渔船抛锚时在不同水深、不同海况下计算得到钢丝绳最大系泊张力(表1)。锚链直径为20.5 mm, 链长300.0 m(至少是有档锚链长的1.5倍), 最小破断拉力为241.13 kN。

表1 抛锚时有档锚链与钢丝绳最大系泊张力及相关条件(流速5kn)

Table 1 Max mooring tensile force for studded chain and wire rope under different anchoring conditions (flow speed 5kn)

项目 item	水深/m depth of water								
	45			60			80		
风速/(m·s ⁻¹) speed of wind	28.4	32.6	37.0	28.4	32.6	37.0	28.4	32.6	37.0
波浪周期/s wave period	14.7	17.0	18.0	14.7	17.0	18.0	14.7	17.0	18.0
有义波高/m significant wave height	25.30	35.36	40.00	25.30	35.36	40.00	25.30	35.36	40.00
有档锚链最大系泊张力/kN max mooring tensile force for studded chain	123.19	179.21	231.40	124.29	178.44	227.18	128.16	183.11	232.43
钢丝绳最大系泊张力/kN max mooring tensile force for wire rope	60.84	115.25	170.43	61.65	117.04	171.77	63.31	118.31	174.58

参 考 文 献

- 1 李世漠. 船舶阻力. 北京: 人民交通出版社, 1989
- 2 冯铁成, 刘应中. 单点系泊油轮随机纵荡的工程计算方法. 海洋工程, 1987, 5(2): 12-19
- 3 邵世明, 赵连恩, 朱念昌. 船舶阻力. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 4 陶尧森. 船舶耐波性. 上海: 上海交通大学出版社, 1996
- 5 黄祥鹿, 陆鑫森. 海洋工程流体动力学及结构动力响应. 上海: 上海交通大学出版社, 1992
- 6 Kaplan P, Goodman T R. Static and dynamics analysis of a moored buoy system. NDBCM 6113.1, Report of NDBC, 1972

Analysis of chain tension for fishing vessel anchoring in rough water

Zhou Chongqing

(Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100039)

Liu Tuguang Li Tianyun

(Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract When fishing ships are mooring in rough water, the dynamic loads on the cables will be affected by the wind, wave and current. By finding solution to the nonlinear dynamic equation of cables, the high mooring force, caused by second-order wave force, is analyzed specially. The results show that there exists a great difference of bearable mooring forces between welded chain and wire rope under different water depth, wind, wave and current. Under the sea conditions of wind speed 37.0 m/s, wave period 18.0 s, flow speed 5 kn, significant wave height 40.0 m and water depths 45, 60 and 80 m respectively, the welded chain will be broken but the wire rope will not under the same sea conditions. This analysis lays a theoretical foundation for making standard of anchoring for fishing ships.

Key words fisheries ship, wire rope, welded chain, mooring tensile force