

浮体锚泊系统计算分析

肖 越, 王言英*

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 利用数值方法研究了锚泊浮体在风、浪、流联合作用下的运动响应和锚链线张力变化规律。采用的数学模型主要包括三维锚链线静力模型和浮体频域运动模型。在数值计算中, 分别采用有限差分法和频域格林函数法求解三维锚链线静力模型和浮体频域运动模型, 得到锚泊系统的总体刚度和浮体的水动力参数, 据此求解锚泊浮体运动方程, 得到锚泊浮体的运动响应和锚链线上的张力变化。对一锚泊半潜式海洋平台的实际校核应用证明, 本方法可以提供具有工程精度的锚泊性能预报。

关键词: 频域法; 运动方程; 锚泊系统

中图分类号: U 662; P752 **文献标识码:** A

0 引言

船舶与海洋结构物的锚泊问题是当今船舶与海洋工程中的重要问题之一。目前对于锚泊浮体的计算, 大多采用悬链线方法。该方法是一种简单的解析方法, 但是由于其采用了过多的假设, 造成了计算结果精度偏低。为了锚泊系统的安全, 锚泊系统设计者不得不在计算结果上乘以一个较大的权数, 以保证实际锚泊系统达到设计要求。

本文采用一种考虑锚链线各种受力并允许锚链弹性变形的计算模型。在频域内, 通过与浮体运动的耦合分析, 计算锚泊浮体的运动与受力, 采用数值方法计算锚链线模型, 并通过一个实际算例的计算与分析来验证本方法在工程实际中的应用。

1 数学模型

1.1 浮体运动模型

1.1.1 坐标系 为了便于表示和分析浮体在波浪上的运动, 采用如图1所示的坐标系。

在图中引入两个坐标系: 参考坐标系 $O-xyz$ 和随体坐标系(动坐标系) $O-x'y'z'$ 。在参考坐标系 $O-xyz$ 中, 坐标面 Oxz 位于静水

面; Ox 轴指向船首, 同时 Oy 轴垂直水面向上。而在随体坐标系 $O-x'y'z'$ 中, 坐标面 $Ox'z'$ 位于静水面; Ox' 轴指向船首, 同时 Oy' 轴垂直水面向上, 且该坐标系固定于浮体上并与浮体一起运动。

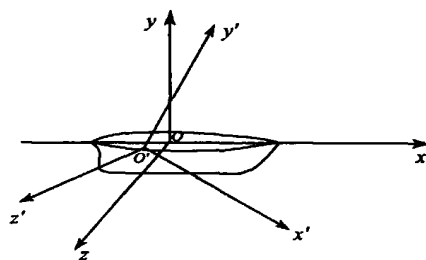


图1 浮体运动坐标系示意图

Fig.1 The sketch of motion coordinates for a floating-body

1.1.2 运动模型 在波浪中运动的锚泊浮体所受的载荷有重力、浮力、风力、流力、锚泊力和波浪力(一阶和二阶)。其中浮力分为静水浮力和浮体运动时产生的静水恢复力。各种外载荷共同作用, 引起浮体的运动, 根据准静态结构分析原理, 当假定浮体处于瞬态静止时, 作用在浮体上的外力不是一个平衡力系, 其不平衡力由浮体运动加速度引起的浮体惯性力来平衡。浮体所受的一阶

波浪力、静水恢复力、惯性力和锚泊力是相互联系并随时间变化的, 需要通过求解运动平衡方程得到:

$$M \ddot{\mathbf{x}} + C \dot{\mathbf{x}} + K \mathbf{x} = \mathbf{F}_w^1 \quad (1)$$

式中: M 为附加质量矩阵; C 为阻尼系数矩阵; K 为静水恢复力系数矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 \mathbf{x} 分别为广义加速度列阵、广义速度列阵、广义位移列阵; \mathbf{F}_w^1 为一阶波浪力

1.2 锚链线模型

1.2.1 坐标系 在锚泊系统的计算中, 引入如图2所示的2个坐标系: 总体坐标系和局部坐标系

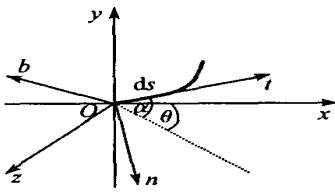


图2 锚泊系统坐标系示意图

Fig. 2 The sketch of the coordinates for a mooring line

在图2中, 总体坐标系 $O-xyz$ 为右手笛卡儿坐标系, 其坐标原点 O 位于锚点, 而局部坐标系 tbn 的坐标原点位于锚链线上的任意一点, t 轴指向锚链线的切线方向, n 轴指向锚链线的法线方向, b 轴指向锚链线的次法线方向

1.2.2 运动模型 运动模型如下:

$$W_c \cos \alpha + F(1 + \epsilon) - T \partial \alpha / \partial s = 0 \quad (2)$$

$$-W_c \sin \alpha + G(1 + \epsilon) + \partial r / \partial s = 0 \quad (3)$$

$$H(1 + \epsilon) + T \cos \alpha \cdot \partial \theta / \partial s = 0 \quad (4)$$

$$\partial \alpha / \partial s = (1 + \epsilon) \cos \alpha \cos \theta \quad (5)$$

$$\partial y / \partial s = (1 + \epsilon) \sin \alpha \quad (6)$$

$$\partial z / \partial s = (1 + \epsilon) \cos \alpha \sin \theta \quad (7)$$

$$\epsilon = T / A E \quad (8)$$

式中: W_c 为单位长度锚链在水中的质量; ϵ 为单位长度锚链的应变; H 、 F 、 G 分别为 b 、 n 、 t 方向上锚链受到的流体作用力; α 为锚链线沿长度方向的倾角; θ 为锚链线与 x 轴的夹角; T 为锚链线上的张力; A 为横截面面积, E 为弹性模量

在式(2)~(7)中, 有6个未知量 α 、 θ 、 T 、 x 、 y 、 z , 而方程的个数也为6个, 所以方程组是封闭的

1.2.3 边界条件 锚链线下点边界条件(忽略锚链线在海底平铺部分, 即锚的位置):

$$x = y = z = 0 \quad (9)$$

锚链线上点边界条件($s = l$):

$$x = x_b, y = y_b, z = z_b \quad (10)$$

其中 x_b 、 y_b 、 z_b 分别为浮体在锚泊点处的位移坐标

1.3 锚泊浮体运动模型

锚泊浮体的运动模型如下:

$$M \ddot{\mathbf{x}} + C \dot{\mathbf{x}} + K \mathbf{x} = \mathbf{F}_w^1 + \mathbf{F}_w^2 + \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_{wd} + \mathbf{F}_c \quad (11)$$

式中: \mathbf{F}_w^2 为二阶波浪力; \mathbf{F}_{wd} 为风力; \mathbf{F}_c 为流力; \mathbf{F}_m 为锚泊力

2 数值方法

2.1 水动力系数的计算

采用频域格林函数法计算 M 、 C 、 K

2.1.1 定解条件 流场连续条件 $[L]$ 、自由表面条件 $[F]$ 、海底不可穿透条件 $[B]$ 、物面边界条件 $[S]$ 以及远方辐射条件 $[R]$ 构成了在不可压缩无粘无旋流场中绕流物体辐射问题的定解条件, 如式(12)所示:

$$\begin{cases} \nabla^2 \Phi = 0 & [L] \\ \frac{\partial \Phi}{\partial z} + g \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 & [F] \\ \frac{\partial \Phi}{\partial n} = U_j n_j & [S] \\ \lim_{y \rightarrow \infty} \nabla \Phi = 0 & [B] \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial R} - ik \Phi \right) = 0 & [R] \end{cases} \quad (12)$$

式中: n 为物面外法线方向上的单位矢量; L 为波长; $R = (x^2 + z^2)^{1/2}$; Φ 为流场速度势

2.1.2 格林函数法 首先在浮体的平均湿表面 S_0 上剖分网格, 根据下两式计算网格单元上的源强 σ 和流场的速度势^[1,2]:

$$\mathcal{Q}(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_0} f(Q) G(P, Q) dS \quad (13)$$

$$\frac{\partial \mathcal{Q}(P)}{\partial n} = \frac{1}{2} \sigma(P) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_0} f(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} dS \quad (14)$$

其中 $G(P, Q)$ 为已知的格林函数

由于格林函数具有一阶奇异性, 并且在奇点附近具有高频震荡性, 对于格林函数的数值计算一般采用纽曼提出的分区级数法^[3,4].

2.2 二阶波浪力的计算^[5]

采用 Pinkster 公式计算二阶波浪力

$$F_w^2 = -\frac{1}{2}\rho g \int_{w_1} (\eta^{(1)})^2 n d l - \iint_{s_0} \frac{1}{2}\rho |\nabla \Phi^{(1)}|^2 n d S - \iint_{s_0} \rho (\bar{x}^{(1)} \cdot \nabla \Phi^{(1)}) n d S + x_s^{(1)} \cdot m \ddot{X}_{3g} \quad (15)$$

式中: $\eta^{(1)}$ 为流场的一阶波面升高; $\Phi^{(1)}$ 为流场的一阶速度势; $\bar{x}^{(1)}$ 为湿表面上一点的一阶线性位移; $x_s^{(1)}$ 为浮体的一阶纵摇角; \ddot{X}_{3g} 为浮体重心的垂荡加速度

2.3 锚链线模型的计算

采用数值方法, 将连续锚链线离散为 n 段离散后的锚链线模型为^[6-13]

$$W_c \cos \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2\Delta S} \right) + F_i (1 + \epsilon) - T_i \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2\Delta S} \right) = 0 \quad (16)$$

$$- W_c \sin \left(\frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{2\Delta S} \right) + G_i (1 + \epsilon) + \frac{T_{i+1} - T_i}{2\Delta S} = 0 \quad (17)$$

$$T_i \cos \alpha_i \left(\frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{2\Delta S} \right) + H_i (1 + \epsilon) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{x_{i+1} - x_i}{2\Delta S} = (1 + \epsilon) \cos \alpha_i \cos \theta_i \quad (19)$$

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{2\Delta S} = (1 + \epsilon) \sin \alpha_i \quad (20)$$

$$\frac{z_{i+1} - z_i}{2\Delta S} = (1 + \epsilon) \cos \alpha_i \sin \theta_i \quad (21)$$

$$\epsilon = \frac{T_i}{EA_i} \quad (22)$$

根据式(16)~(21), 方程组具有 $6n+6$ 个变量, 而仅有 $6n$ 个方程, 因而必须增加 6 个附加方程才能使方程组封闭。根据边界条件得到如下 6 个附加条件:

$$x_0 = y_0 = z_0 = 0 \quad (23)$$

$$x_n = x_b, y_n = y_b, z_n = z_b \quad (24)$$

2.4 锚链浮体系统耦合计算

由于风力、流力、二阶波浪力相对于一阶波浪力而言可视为定常力, 二阶波浪力、风力和流力最终由锚泊力的水平分力平衡, 可将其加入锚链的预张力中^[14]。

在计算锚泊浮体运动时, 首先, 根据经验公式或规范计算风力和流力, 而二阶波浪力由格林函数法计算, 以便确定锚链的初始预张力^[15]; 其次, 根据式(1)计算浮体在自由状态时的位移量; 第

三, 由浮体在自由状态时的位移量, 根据式(2)~(8)计算锚链中的张力(注: 预张力可由第一步中的计算结果得到); 第四, 在考虑锚泊力的情况下, 计算式(11), 可得到浮体的位移量, 本次得到的位移量是考虑了锚泊系统后的位移量; 第五, 根据第四步得到的位移量, 采用式(2)~(8), 计算锚链中的张力; 第六, 重复第四步和第五步, 直到前后两次计算得到的浮体位移量在工程精度许可的范围内。在各次循环中, 必须检验锚链的张力是否超过锚链的许用强度。

对于锚泊系统的要求是: 在保证锚链不发生断裂的情况下, 锚泊浮体的位移量越小越好。基于这一原则, 如果在结束循环后, 发现锚链并没有断裂, 可考虑增加锚链的预张力, 再次按上述的计算步骤计算。如锚链还没有断裂, 则继续增加预张力, 直到锚链发生断裂。取最后一次锚链没断裂时的预张力为设计预张力。

如果在上述计算步骤中, 锚链发生断裂, 可以考虑改变工作海况或改变锚链型号和直径, 再次计算, 直到满足要求。

3 数值算例

3.1 海况参数

设计波的波高为 32 m, 周期为 18 s。最大风速为 51.5 m/s, 最大流速为 2.3 m/s。

3.2 平台参数

根据给定的质量和装载资料, 平台在自存状态和作业状态的排水量、空船质量和可变载荷见表 1。

表 1 平台参数

Tab. 1 Platform parameters

项目	自存状态	作业状态
吃水 /m	21.0	23.75
排水量 /t	49 526	52 331
空船质量 /t	23 240	23 240
空船重心距基线 /m	24.327	24.327
甲板可变载荷 /t	6 700	6 700
甲板可变载荷重心距基线 /m	42.3	42.3

3.3 布锚方式及锚链参数

采用辐射状八锚方式布锚, 各根锚链与 x 轴间的夹角 β 见表 2。布锚方式的示意图如图 3 所示。

锚链采用 3 级直径为 92 mm 的有挡锚链。

表2 锚链线与x轴间的夹角

Tab. 2 The angles between mooring lines and x axis

No.	$\beta/(^\circ)$	No.	$\beta/(^\circ)$
1	- 30	5	150
2	- 70	6	110
3	- 110	7	70
4	- 150	8	30

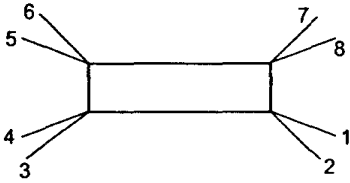


图3 八锚布锚方式示意图

Fig. 3 The layout of 8 mooring lines

3.4 计算结果

在平台湿表面上划分1344个四边形常数单元,建模时不考虑浮体和立柱边角的圆角。根据本文的方法,计算结果如图4~7所示。

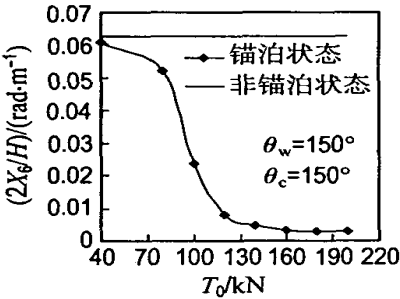


图4 艏摇幅值示意图

Fig. 4 The sketch of yaw amplitude

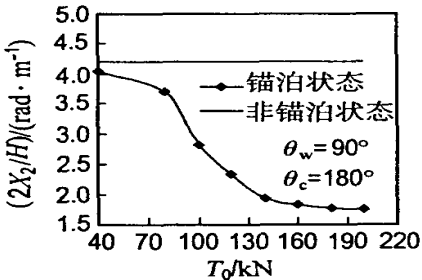


图5 横荡幅值示意图

Fig. 5 The sketch of sway amplitude

图4~6分别给出锚泊半潜式平台在不同波浪入射角 θ_w 和来流入射角 θ_c 条件下,艏摇幅值 X_6 、横荡幅值 X_2 和纵荡幅值 X_1 随预张力 T_0 的变化关系。图7(a)~(c)分别给出No.4锚链的张力 T 随预张力 T_0 的变化关系。从图中可见,锚泊平台运动幅值 X_i ($i=1, 2, 6$)随着 T_0 的增大而减小,而锚链张力 T 却增大。当 T_0 大于130kN(阈

值)时,运动幅值 X_i 的变化很小但锚链张力却更加显著地增大直到锚链断裂。在工程实际应用中,应将预张力定为130kN以下,以保证锚泊系统的安全。

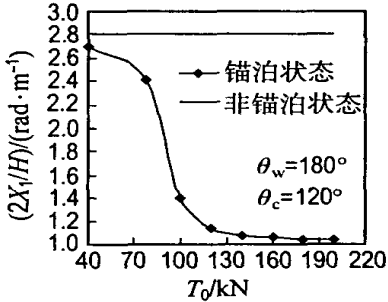
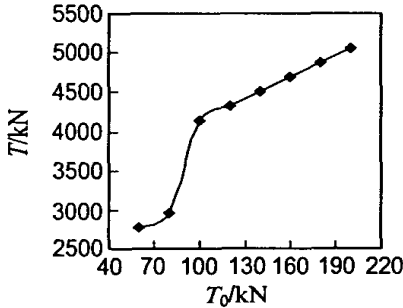
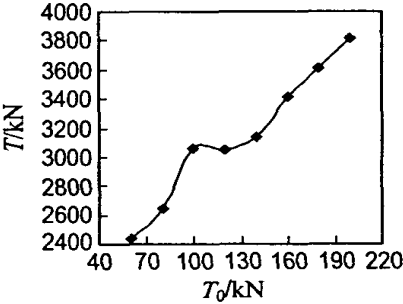


图6 纵荡幅值示意图

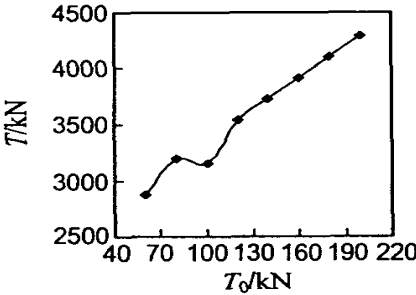
Fig. 6 The sketch of surge amplitude



(a) $\theta_w = 150^\circ; \theta_c = 150^\circ$



(b) $\theta_w = 90^\circ; \theta_c = 180^\circ$



(c) $\theta_w = 180^\circ; \theta_c = 120^\circ$

图7 No. 4 锚链张力值示意图

Fig. 7 The sketch of the tension on the No. 4 mooring line

4 结 论

采用三维锚链线静力模型与频域浮体运动模型耦合求解的方法,可以得到锚链浮体运动响应和锚链线张力变化。算例计算结果表明当预张力大于阈值时,浮体运动幅值变化不大而锚链线张力却显著增加。

参考文献:

- [1] 王言英, 李 芳. 浮式结构物在波浪中的运动响应计算[J]. 水动力学研究与进展, 1995, 10(6): 572-580.
- [2] 王言英, 朱仁传, 苗 杰. 波浪中航行浮体设计载荷与运动计算[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(4): 338-340.
(WANG Yan-ying, ZHU Ren-chuan, MAO Jie. Computation of design load and motion for floating structures navigating in waves [J]. J Dalian Univ Technol, 1998, 38(4): 338-340.)
- [3] 范 菊, 黄祥鹿. 锚泊线的动力分析[J]. 中国造船, 1999, 40(1): 13-20.
- [4] 刘应中, 缪国平, 李宜乐, 等. 系泊系统动力分析的时域方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(11): 7-12.
- [5] 谢 楠, 郜焕秋. 浮标-缆-物体综合系统动力学二维时域分析[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 18(2): 202-213.
- [6] 朱新颖, 黄祥鹿. 深海锚泊浮标的二阶动力分析[J]. 海洋工程, 2002, 22(2): 74-78.
- [7] 范 菊, 陈小红, 黄祥鹿. 锚泊线一阶运动响应对二阶锚链阻尼的影响[J]. 船舶力学, 2000, 4(6): 20-27.
- [8] 范 菊, 陈小红, 黄祥鹿. 三阶摄动对锚泊线动力分析的影响[J]. 船舶力学, 2000, 4(1): 1-9.
- [9] 黄祥鹿, 陈小红, 范 菊. 锚泊浮式结构波浪上运动的频域算法[J]. 上海交通大学学报, 2001, 45(10): 1470-1476.
- [10] 陈小红, 黄祥鹿. 随机振荡法测量锚泊线动力的双频率响应函数[J]. 上海交通大学学报, 1995, 29(5): 13-19.
- [11] 范 菊, 纪亨腾, 黄祥鹿. 浮式塔的动力计算[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 117-123.
- [12] 陈小红, 黄祥鹿. 单点系泊海洋资料浮标的动力分析[J]. 中国造船, 1995, 36(3): 1-13.
- [13] 李远林, 吴家明. 多锚链系泊浮筒非线性漂移运动的时域模拟[J]. 海洋工程, 1990, 10(1): 25-33.
- [14] QIAN K, WANG Y Y. Analysis of wave loads on a semi-submersible platform [J]. China Ocean Eng, 2002, 16(3): 395-406.
- [15] 冯 刚, 吴海帆, 黄洪钟, 等. 工程船舶锚泊移位系统的最优控制及拟静力分析[J]. 海洋工程, 2001, 19(4): 1-4.

Computational analysis of moored floating-body

XIAO Yue, WANG Yan-ying*

(School of Naval Architect, Dalian Univ. of Technol, Dalian 116024, China)

Abstract: The motion and tension responses of a moored system due to combined wind-wave-current action are numerically studied. The mathematical model is composed of 3D mooring-line static model and floating-body motion model in frequency domain. In the study, the stiffness of a moored system and the hydrodynamic coefficients of a floating-body are calculated separately by finite difference method (FDM) and the Green function method. Based on coupling the above methods, the response and tension variation of the moored system is analyzed. As a numerical example, a moored semi-submerged platform is adopted. The calculation results show that the method is reliable and feasible for predicting the moored system.

Key words: frequency-domain method; motion equation; moored system