

系泊浮体布链方式优劣的理论分析

陈徐均¹, 汤雪峰², 沈 庆², 孙芦忠²

(1. 上海交通大学船舶与海洋工程学院, 上海 200030; 2. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 理论推导了不同布链方式下锚链系统所提供横摇和首摇恢复力矩的表达式, 由此说明了锚链系统总是提供正的首摇恢复力矩, 同时也分析了锚链系统所提供的横摇恢复力矩大小及方向的不确定性. 对较有代表性的浮体及其锚链系统进行了计算分析, 给出了两种布链方式锚链系统横摇及首摇恢复力矩随锚固点变化的曲线.

关键词 浮体 布链方式 恢复力矩

中图分类号 U653.2 文献标识码 A 文章编号 1000-1980(2001)05-0084-04

随着海洋开发的日趋深入, 各类海上浮动平台、海上浮动机场和海上补给浮码头等应运而生. 这类海上浮动结构绝大部分要靠锚链系统的约束实现其定位. 根据不同的使用要求, 有多种布链方式可供选择. 对浮动结构而言, 图 1(a) 所示的‘八字型’布链方式为最有利布链方式, 图 1(b) 所示的‘人字型’和图 1(c) 所示的‘交叉型’布链方式则次之. 对于后两种布链方式的优劣, 一直是不同风格设计工程师争论的热点. 其主要原因有两个方面: 一是两种布链方式下, 锚链系统所能提供的恢复力(矩)的大小和方向受较多因素的制约, 难以定性地说出其优或劣; 二是衡量优与劣的主要因素是锚链所能提供的横摇和首摇恢复力矩的大小和方向(对于两种布链方式所提供的横荡、纵荡、垂荡恢复力和纵摇恢复力矩无明显区别), 而锚链横摇恢复力矩通常远小于静水横摇恢复力矩, 对浮体横摇不构成大的影响, 在实践中难以体现其效果, 所以也难以比较两种布链方式的优与劣. 本文避开锚链对浮体运动的实际影响而直接讨论锚链所提供的横摇和首摇恢复力矩的大小和方向, 分析影响它们的主要因素, 从而较定性地说出其优劣, 并通过实例计算说明理论的可信性.

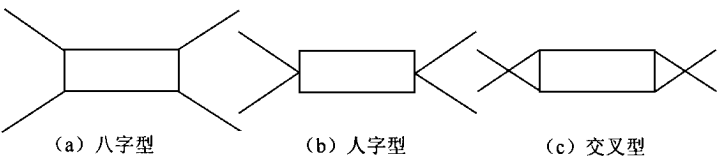


图 1 锚链布置方式
Fig.1 Disposition of mooring chains

1 锚链力增量的表述

为简单起见, 对锚链力增量作线性化假定, 即锚链单链坐标中的线性力增量可以用锚链与浮体的固定点(后简称锚固点)的位移来表示:

$$\begin{Bmatrix} \Delta H' \\ \Delta V' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{x'x'} & K_{x'z'} \\ K_{z'x'} & K_{z'z'} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x' \\ \Delta z' \end{Bmatrix} \tag{1}$$

式中 $\Delta H', \Delta V'$ —— 锚链力增量在水平方向和竖直方向的分量; $K_{x'x'}, K_{x'z'}, K_{z'x'}, K_{z'z'}$ —— 锚链线性刚度系数; $\Delta x', \Delta z'$ —— 单链坐标中锚固点水平方向和竖直方向的位移. (1) 式在整体坐标中则可以相应地表示为

$$\begin{Bmatrix} \Delta U \\ \Delta H \\ \Delta V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{Bmatrix} \tag{2}$$

其中锚链线性刚度系数矩阵为

$$\begin{Bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{x'x'} & K_{x'z'} \\ K_{z'x'} & K_{z'z'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $\Delta U, \Delta H, \Delta V$ ——整体坐标中锚链力增量在 x, y, z 三个方向的分量; θ ——同具有竖向轴的单链坐标系和整体坐标系的轴 x' 与 x 轴间的夹角.

2 锚链恢复力矩表达式的推导及讨论

2.1 “人字型”布链方式

假定浮体由图 2(a)平衡位置产生顺时针方向的微幅横摇到图 2(b)所示位置,横摇角为 α , 锚固点坐标

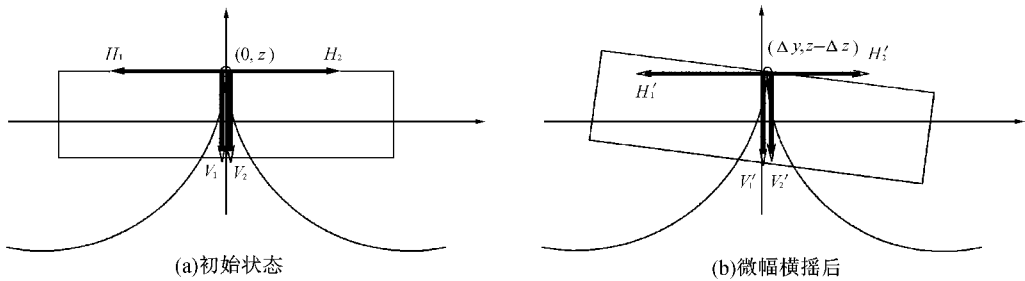


图 2 “人字型”布链方式锚链力
Fig.2 Forces for“ ^ ”type disposition

(取 yOz 平面,下同)由初始的 $(0, z)$ 变为 $(\Delta y, z - \Delta z)$,取对称的两根锚链进行讨论,则锚链力在水平和竖直方向的分量分别可表示为

$$\begin{cases} H'_1 = H_1 + K_{yy}\Delta y - K_{yz}\Delta z, & V'_1 = V_1 + K_{zy}\Delta y - K_{zz}\Delta z \\ H'_2 = H_2 - K_{yy}\Delta y - K_{yz}\Delta z, & V'_2 = V_2 - K_{zy}\Delta y - K_{zz}\Delta z \end{cases} \quad (4)$$

于是两根锚链所提供的横摇力矩为

$$M_a = (H'_1 - H'_2)(z - \Delta z) - (V'_1 + V'_2)\Delta y \quad (5)$$

(4)式代入(5)式并作 $H_1 = H_2 = H, V_1 = V_2 = V$ 和 $\Delta z = \Delta y\alpha = z\alpha^2$ 的代换得

$$M_a = 2K_{yy}z^2\alpha(1 - \alpha^2) - K_{zz}z^2\alpha^3 - 2Vz\alpha = 2(K_{yy}z - V)z\alpha + O(\alpha^3) \quad (6)$$

对锚链的首摇恢复力矩作类似的推导,可得锚链首摇恢复力矩为

$$M_\gamma = 2K_{yy}x^2\gamma(1 - \gamma^2) + K_{xx}x^2\gamma^3 + 2Ux\gamma = 2(K_{yy}x + U)x\gamma + O(\gamma^3) \quad (7)$$

式中: $O(\quad)$ ——括号中量的高阶小量; U ——锚链预张力在 x 轴方向的分量; γ ——微幅首摇角; x ——锚固点在 x 轴方向的坐标.

由(6)式可见,“人字型”布链方式下,锚链横摇恢复力矩的大小和方向与锚固点纵坐标 z 、竖直预张力 V 及整体坐标系中锚链水平刚度系数 K_{yy} (与单链坐标系中锚链水平刚度系数 $K_{x'x'}$ 和投锚角度 θ 有关,如(3)式所示)有关.当 z 为负值,即锚固点位于运动中心及其下方高度时,锚链均提供正的横摇恢复力矩,初张力越大(此时锚链刚度也大),横摇恢复力矩越大;当 z 为正值,即锚固点位于运动中心上方高度时,如果 z 值较小,即 $K_{yy}z < V$,锚链提供负的横摇恢复力矩,即锚链是“助摇”的,属不利情况,如果 z 值较大,即 $K_{yy}z > V$,锚链提供正的横摇恢复力矩,横摇恢复力矩随 z 值的增大而增大.

由(7)式可见,“人字型”布链方式下,锚链首摇恢复力矩总是正的,其大小随水平预张力 U 及整体坐标系中锚链水平刚度系数 K_{yy} 以及锚固点在 x 轴方向的坐标的增大而增大.

2.2 “交叉型”布链方式

假定浮体由图 3(a)平衡位置产生顺时针方向的微幅横摇到图 3(b)所示位置,横摇角为 α ,两锚固点坐标随浮体横摇发生了图示的变化,取对称的两根锚链($y_1 = y_2 = y, z_1 = z_2 = z$)进行讨论,则锚链力在水平

和竖直方向的分量可表示为

$$\begin{cases} H'_1 = H_1 + K_{yy}\Delta y_1 - K_{yz}\Delta z_1, & V'_1 = V_1 + K_{zy}\Delta y_1 - K_{zz}\Delta z_1 \\ H'_2 = H_2 - K_{yy}\Delta y_2 + K_{yz}\Delta z_2, & V'_2 = V_2 - K_{zy}\Delta y_2 + K_{zz}\Delta z_2 \end{cases} \quad (8)$$

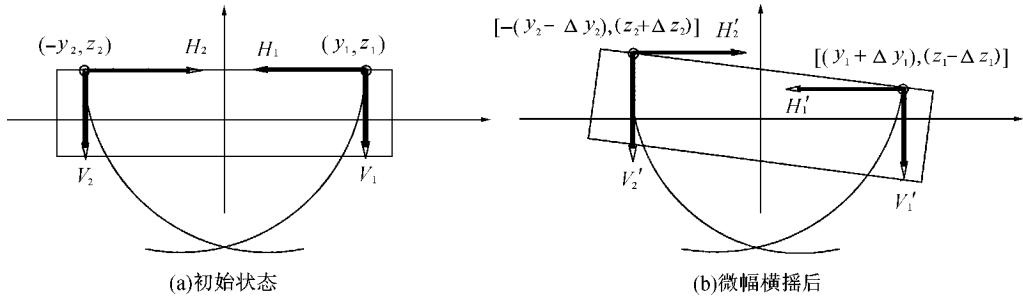


图3 “交叉型”布链方式锚链力

Fig.3 Forces for "X" type disposition

于是两根锚链所提供的横摇力矩为

$$M_\alpha = H'_1(z_1 - \Delta z_1) - H'_2(z_2 + \Delta z_2) + V'_2(y_2 - \Delta y_2) - V'_1(y_1 + \Delta y_1) \quad (9)$$

式中:

$$\begin{cases} \Delta y_1 = (z - y\alpha)\alpha, & \Delta z_1 = (y + z\alpha)\alpha \\ \Delta y_2 = (z + y\alpha)\alpha, & \Delta z_2 = (y - z\alpha)\alpha \end{cases} \quad (10)$$

将(10)式,(8)式代入(9)式并作 $H_1 = H_2 = H, V_1 = V_2 = V$ 的代换得

$$\begin{aligned} M_\alpha &= -2Hy\alpha + 2K_{yy}(z^2\alpha - z^2\alpha^3 + y^2\alpha^3) - 2K_{yz}(yz\alpha - 2z^2\alpha^3) - \\ &\quad 2Vz\alpha - 2K_{zy}(yz\alpha - 2yz\alpha^3) + 2K_{zz}(y^2\alpha - y^2\alpha^3 + z^2\alpha^3) \\ &= 2[K_{yy}z^2 + K_{zz}y^2 - yz(K_{yz} + K_{zy}) - Hy - Vz]\alpha + O(\alpha^3) \end{aligned} \quad (11)$$

对锚链的首摇恢复力矩作类似的推导,可得锚链首摇恢复力矩为

$$M_\gamma = 2(Hy + Ux)\gamma + 2(K_{yy}x^2 + K_{xx}y^2)\gamma + 2(K_{yx} + K_{xy})xy\gamma + O(\gamma^3) \quad (12)$$

由(11)式可见,“交叉型”布链方式的横摇恢复力矩表达式较复杂,与锚固点坐标、锚链各项刚度系数及初始预张力均有关($y=0$ 的极限情况即为“人字型”布链方式的锚链恢复力矩)。当 z 为负值时,锚链提供正的横摇恢复力矩,锚链刚度系数越大,其值越大。当 z 为非负值时,若 y 与 z 属同量级时,很难确定横摇恢复力矩的正负,若 $y \gg z$ 或 $z \gg y$ 则锚链一般提供正的恢复力矩。由(12)式可见,“交叉型”布链方式的首摇恢复力矩也总为正值,其大小随锚固点坐标、锚链各项刚度系数及初始预张力的增大而增大。

3 实例分析

假定现有浮体主尺度为 $80\text{ m} \times 14\text{ m} \times 2.8\text{ m}$,吃水深度为 1 m ,锚链长为 70 m ,单位长重为 813.4 N/m ,水深为 20 m ,初始预张力为 49 kN ,投锚角为 30° 。

根据悬链线理论^[1],利用多项式拟合法^[2]可求得单链坐标中锚链的线性刚度系数分别为 $K_{x'x'} = 10.22\text{ kN/m}$, $K_{z'x'} = 4.79\text{ kN/m}$, $K_{x'z'} = 3.31\text{ kN/m}$ 和 $K_{z'z'} = 4.79\text{ kN/m}$,锚链预张力在水平和竖直方向的分量分别为 31.43 kN 和 37.80 kN 。则由(3)式得整体坐标系中锚链的线性刚度和预张力在 y 轴和 z 轴方向上的分量分别为: $K_{xx} = 7.555\text{ kN/m}$; $K_{xy} = 4.425\text{ kN/m}$; $K_{xz} = 4.148\text{ kN/m}$; $U = 27.219\text{ kN}$; $K_{yx} = 4.425\text{ kN/m}$; $K_{yy} = 2.555\text{ kN/m}$; $K_{yz} = 2.398\text{ kN/m}$; $H = 15.715\text{ kN}$; $K_{zx} = 4.148\text{ kN/m}$; $K_{zy} = 2.398\text{ kN/m}$; $K_{zz} = 3.310\text{ kN/m}$; $V = 37.800\text{ kN}$ 。将其代入(6)式,得“人字型”布链方式下锚链横摇恢复力矩随锚固点纵坐标 z 的变化曲线,如图4曲线A所示;代入(7)式,得“人字型”布链方式下锚链首摇恢复力矩随锚固点坐标 x 的变化曲线,如图5曲线A所

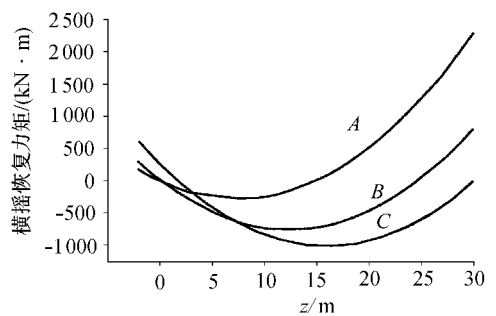


图4 横摇恢复力矩随 z 值的变化

Fig.4 Restoring roll moment vs. z

示,若取 $y = 5.25\text{ m}$,则(13),(14) 式代入(11) 式得“交叉型”布链方式下锚链横摇恢复力矩随锚固点纵坐标 z 的变化曲线,如图 4 曲线 B 所示. 图 4 中曲线 C 是 $y = 9.0\text{ m}$ 时的计算曲线. 代入(12) 式,得“交叉型”布链方式下锚链首摇恢复力矩随锚固点坐标 x 的变化曲线,如图 5 曲线 B 所示,若取 $z = 1.4\text{ m}$,则(13),(14) 式代入(11) 式,得“交叉型”布链方式下锚链横摇恢复力矩随锚固点横坐标 y 的变化曲线,如图 6 曲线所示. 图 6 中黑点为 $z = 1.4\text{ m}$ 时“人字型”布链方式下锚链横摇恢复力矩.

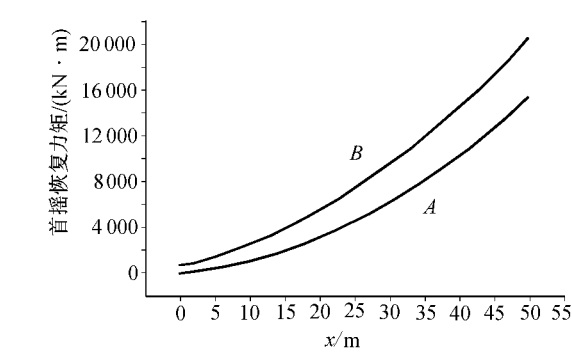


图 5 首摇恢复力矩随 x 值的变化
Fig.5 Restoring yaw moment vs. x

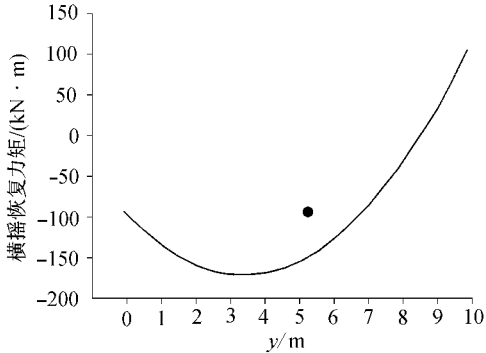


图 6 横摇恢复力矩随 y 值的变化
Fig.6 Restoring roll moment vs. y

4 结论与建议

由计算结果图 5 可见,在相同的投锚角及锚链预张力的情况下,不管锚固点的位置如何,“交叉型”布链方式所提供的首摇恢复力矩总大于“人字型”布链方式. 即如果以首摇运动为首要考虑因素时,采用“交叉型”布链方式较好. 如果以横摇为首要考虑因素,由图 4、图 6 可见,对于一定的锚固点纵坐标 ($z = 1.4\text{ m}$),在 y ($y < 6.8\text{ m}$) 值不是很大的情况下,“人字型”布链方式优于“交叉型”布链方式,当浮体较宽,可确保 y 较大 ($y > 6.8\text{ m}$) 的情况下,“交叉型”布链方式优于“人字型”布链方式.

对于给定的锚固点横坐标 y ($y = 5.25\text{ m}$) 的情况下,当锚固点纵坐标 $z > 0.4\text{ m}$ 时,“人字型”布链方式优于“交叉型”布链方式;当锚固点纵坐标为 $z < 0.4\text{ m}$ 时,“交叉型”布链方式优于“人字型”布链方式. 而当 $y = 9.0\text{ m}$ 时,则变成锚固点纵坐标 $z > 3.0\text{ m}$ 时,“人字型”布链方式优于“交叉型”布链方式;当锚固点纵坐标为 $z < 3.0\text{ m}$ 时,“交叉型”布链方式优于“人字型”布链方式.

如果综合考虑首摇和横摇,笔者认为采用“交叉型”布链方式较好,因为对于系泊浮体来说,锚链是控制首摇的主要因素,所以其恢复力矩的大小直接影响到首摇幅值的大小. 而对于横摇来说,除锚链横摇恢复力矩外,还有静水恢复力矩,且对于较大尺度浮体,一般情况下锚链横摇恢复力矩远小于静水恢复力矩,所以锚链不是控制横摇的主要因素,可以不必考虑其对横摇幅值的影响.

参考文献:

[1] Miao Q, Du S, Dong S, et al. Hydrodynamic analysis of a moored very large floating structure[A]. In: Ministry of Transport Science and Technology Agency[C]. Japan: International Workshop on Very Large Floating Structures VLFS 96, 1996. 201 ~ 208.
[2] 陈徐均,孙芦忠,沈庆,等. 海上浮体受系泊锚链系统影响的非线性处理[J]. 工程兵工程学院学报,1998, (1) 40 ~ 48.

Theoretical Analysis of Mooring Chain Disposition for a Float-Body

CHEN Xu-jun¹, TANG Xue-feng², SHEN Qing², SUN Lu-zhong²

- (1. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200031, China ;
2. Engineering Institute of PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract The equations of the restoring roll moment and yaw moment of a mooring system are derived theoretically. It is indicated that the restoring yaw moment is positive. The uncertainty of the value and direction of the restoring roll moment is analyzed. Two representative moored floating systems are studied, and calculation curves of the moments and the displacements of attachment points are presented.

Key words floating body; chain disposition; restoring moment