

文章编号: 1007-7249(2003)05-0021-07

极限海况下浮标运动及锚链受力估算

缪泉明, 顾民, 杨占明, 刘楚学

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要:本文首先利用三维势流理论计算了自由浮标体的附加质量、阻尼系数以及运动响应, 然后通过卡明斯六自由度运动方程, 对极限海况下两个水深的三锚系统的浮标运动及锚链受力进行了数值模拟估算, 可以为浮标及锚链设计提供参考。

关键词:势流理论; 浮标运动; 锚链张力

中图分类号: U675.92

文献标识码: A

1 前言

本文所讨论的浮标系统是由一个直径 10m 的圆盘浮标和三根夹角为 120°的锚链组成, 浮标的运动以及其可靠性和安全性对仪器仪表能否正常工作, 甚至是否损坏仪器仪表设备等非常重要。如何限制浮标运动, 特别是在极限条件下能否保证浮标的稳定性在设计 HY 系统以前都必须全面考虑。另外, 系统系统的锚链在极限(生存)环境条件下是否会破断也是一个非常重要的问题。

本文通过数值方法模拟了混合锚链在不同水深(30m 和 35m)在生存环境条件下的浮标运动以及锚链张力。

2 自由浮标体的运动响应

三锚系统是由一个直径 10m 的圆盘, 3 根成 120°夹角的锚链组成的三锚系统, 圆盘浮标结构图及主要尺寸、静水力性能见表 1。

表 1 主要尺度

Tab.1 Principal characteristics

直径 (m)	10.000	排水量 (kg)	60000
型深 (m)	2.200	排水体积 (m ³)	58.537
吃水 (m)	1.056	估算重心高 (m)	1.468
梁拱 (m)	0.200	浮心高 (m)	0.600
水线面积 (m ²)	78.54	稳心高 (m)	9.035
惯性矩 (kg/m ²)	4.44×10 ⁵		

自由浮标体的运动主要是由于海洋波浪直接作用引起的波频运动, 在船舶与海洋工程中, 波频运动广泛采用三维势流理论^[1]计算, 其正确性已经得到普遍确认。基于该方法的普遍性, 自由浮标体的波频运动响应也根据此方法计算。

收稿日期: 2003-05-04

作者简介: 缪泉明(1965-), 男, 中国船舶科学研究中心高级工程师。

在本计算中, 坐标系为坐标原点放在静止水面与圆盘中心垂向轴线的交点, Z 轴垂直向上为正的右手坐标系。

圆盘浮标湿表面被划分 $189 \times 4 = 765$ 个面元, 网格三维显示参见图 1, 由于圆盘有两个对称面, 所以计算时只需用 189 个面元进行求解。

图 2 和图 3 分别给出了 30m 水深和 35m 水深时随波浪频率变化的附加质量和阻尼系数曲线, 图 4 给出了 30m 水深和 35m 水深、浪向角为 180° 时浮标频域运动响应曲线。

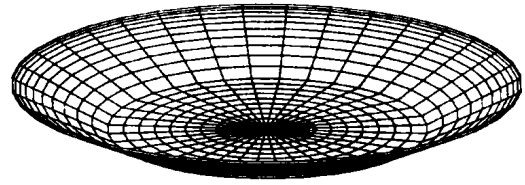


图 1 圆盘浮标湿表面网格三维显示
Fig.1 3-D show of the wetted buoy surface

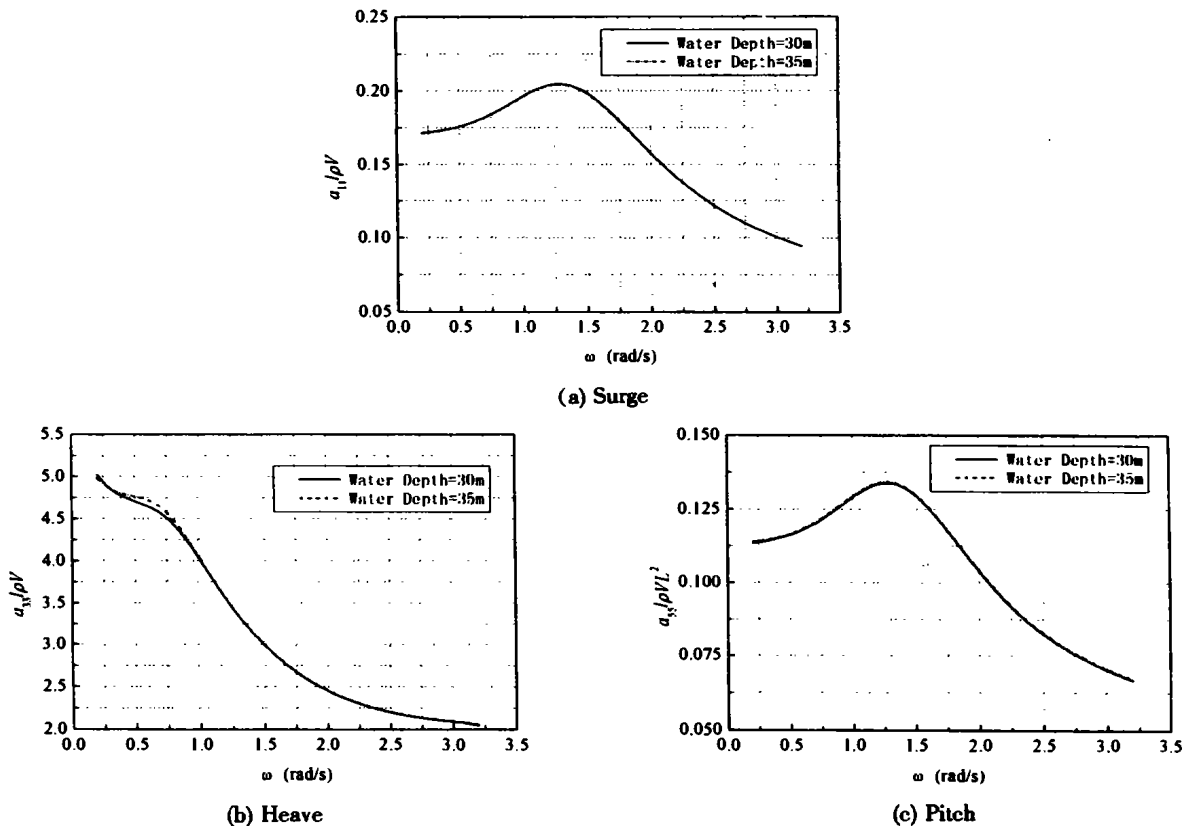


图 2 浮标随频率变化的附加质量系数
Fig.2 Added-mass coefficients of the buoy

从图 2~图 4 可以看到只有在低频时水深 30m 和 35m 的附加质量、阻尼系数和运动响应曲线有微小差别以外, 其他的结果基本一致, 这说明在 30m 和 35m 水深时水深对浮标的流体动力影响没有多大差别。

3 三锚系统在生存条件下的浮标运动、锚链力估算

3.1 锚链力的计算

作用在锚链上的力包括水动力、重力和张力等等, 具有很强的非线性特性, 要完全评估锚链系统,

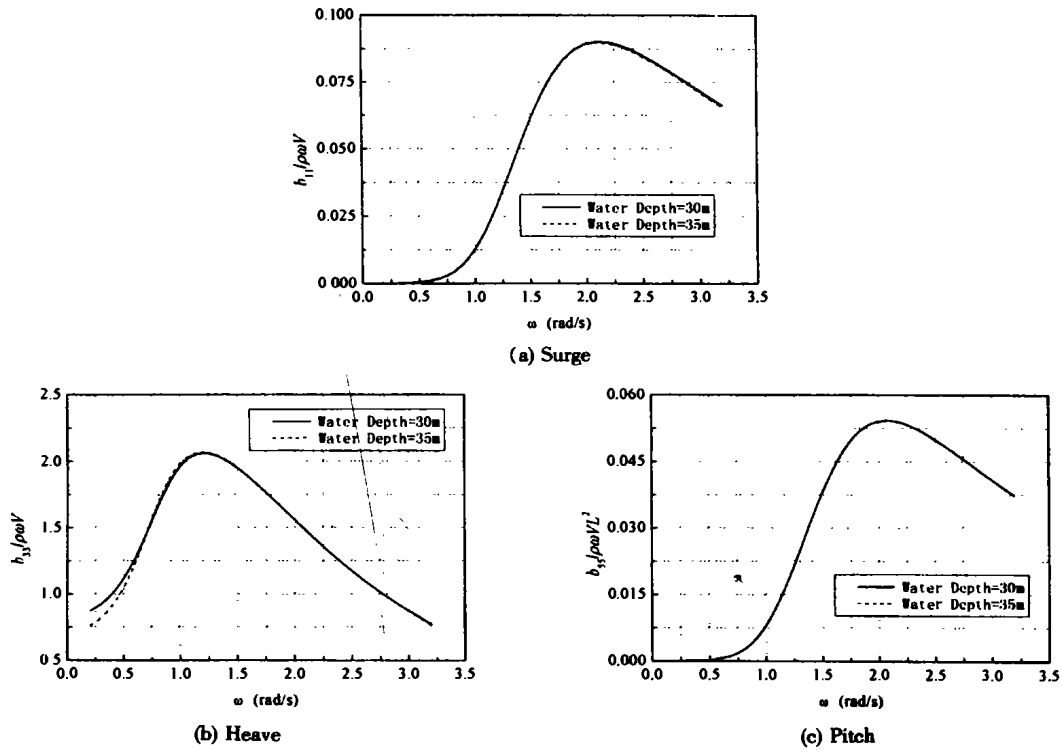


图3 浮标随频率变化的阻尼系数
 Fig.3 Damping coefficients of the buoy

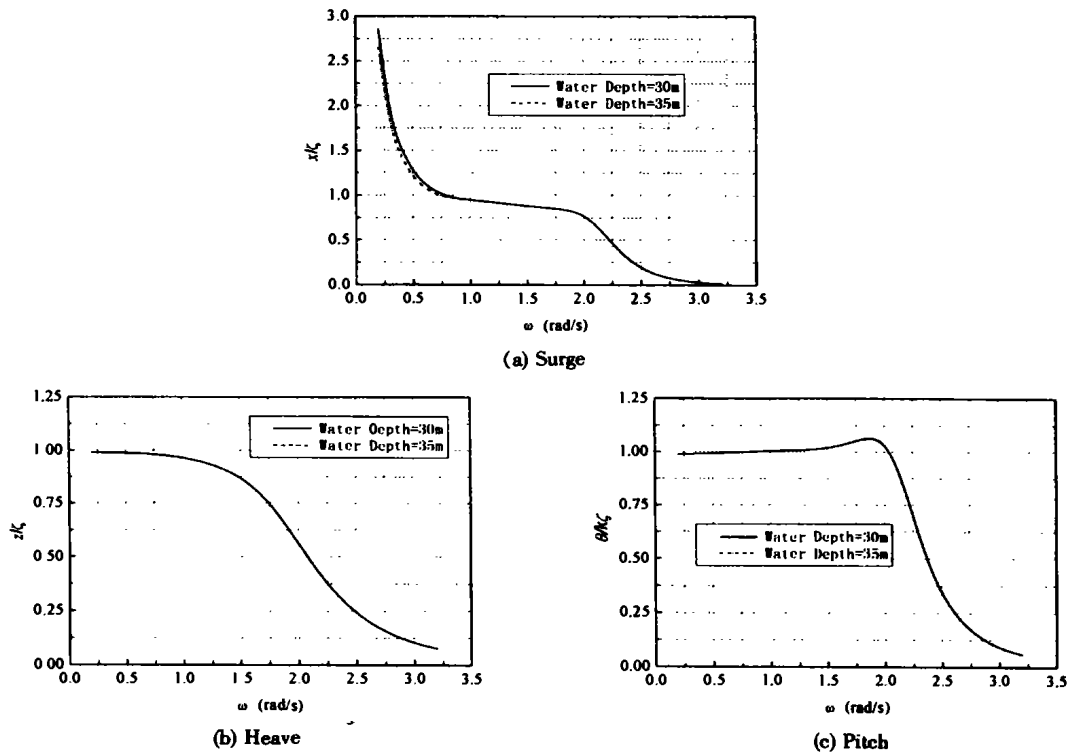


图4 波浪中浮标运动响应曲线
 Fig.4 Motion responses of the buoy

必须对每一根锚链进行动力分析。由于对锚链动力分析进行数值计算时需要很长的计算时间,因此,在一般方案设计阶段,这种很详细的动力分析是没有必要的,往往作一些简化,以快速得到系统的运动和受力特性,供设计参考。

如果忽略作用在锚链上的流体动力,整个锚链成悬链线形式,锚链力则可以通过悬链线方程求得。对于每一根锚链,当浮标上系缆点位置固定以后,根据瞬时时刻浮标的运动姿态,该锚链的悬链线方程就可以确定,据此就能求得锚链作用在浮标上的力,再根据作用点位置,就可以把该锚链力转换到作用在浮标重心上的力和力矩。把作用在浮标重心上的锚链力线性叠加起来,最终就可得到所有锚链对浮标的作用力。

3.2 系泊系统运动求解方法简介

系泊系统的浮标在波浪中的运动响应由基于脉冲响应的卡明斯^[2]运动方程来描述。这种方法可以考虑任意的外力,比如非线性缆力、护舷反力等,具体计算步骤描述如下^[3-5]:

- (a) 利用三维势流理论^[2]计算浮标的随波频变化的流体水动力、波浪力;
- (b) 利用傅里叶变换求得流体水动力、波浪力的脉冲响应函数^[6];
- (c) 给定锚链参数以及选定波浪(或波浪记录)。对于波浪记录的产生考虑水深以及流速的影响;
- (d) 利用龙格库塔法求解在风、流以及波浪作用下系泊系统浮标的运动以及锚链张力。其中风流力的计算参照文献[7],锚链张力的计算参与文献[8,9];
- (e) 对模拟结果进行统计分析,得到运动、锚链张力的最大值、平均值、最小值以及方差、有义值等。

极限(生存)海况的资料如下:风速:60.0m/s;表面海流:5kns(相当于2.57m/s);潮差:5m;波高:11m;浮标布防海区的水深:30m。波浪周期取16.0s,波谱采用15届ITTC推荐的JONSWAP波浪谱。

在数学模拟计算时,时间步长取0.25s,模拟时间取3000.0s,取750s以后的记录进行统计分析。

3.3 选定锚系参数全锚链的浮标运动、锚链力估算

在本文模拟计算中,锚链长度取306.687m(相当于预张力为49.05kN),锚链直径取46mm,在空气中单位长度重量为48.4kg/m时,水深取30m和35m。三根锚链之间的夹角为120°。锚链系缆点坐标见表2。在模拟计算时,忽略了流对锚链的锚链力以及锚链运动时的流体动力,但在纵荡阻尼中作了一些补偿。

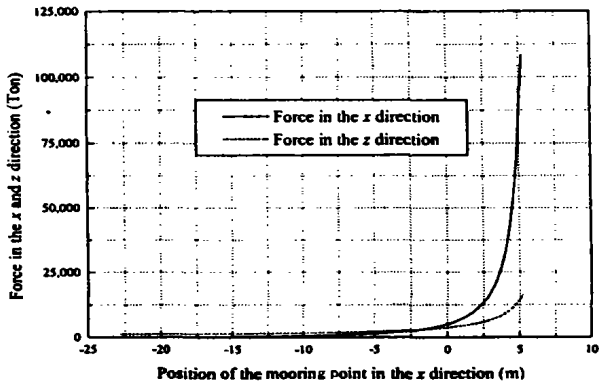
表2 锚链系缆点坐标

Tab.2 Coordinates of attached points and anchor points

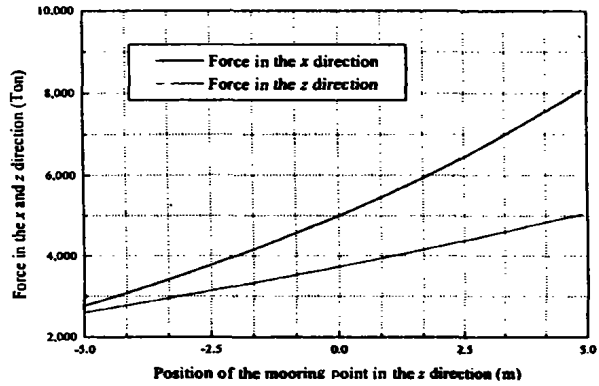
水深	位置	锚链1			锚链2			锚链3		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z
30m	浮标	4.1	0.0	-0.5	-2.1	3.6	-0.5	-2.1	-3.6	-0.5
	海底	304.1	0.0	-30.0	-152.1	263.4	-30.0	-152.1	-263.4	-30.0
35m	浮标	4.1	0.0	-0.5	-2.1	3.6	-0.5	-2.1	-3.6	-0.5
	海底	304.1	0.0	-35.0	-152.1	263.4	-35.0	-152.1	-263.4	-35.0

30m水深和35m水深锚链张力与锚链在浮标上、系缆点在水平方向(x方向)以及垂直方向(z方向)位移的关系曲线见图5。从图中可以看到,锚链张力与浮标垂向位移基本上成线性关系,而与浮标水平位移成强烈的非线性,当锚链提起到一定程度,很小的浮标水平位移会引起锚链张力比较大的变化,因此要尽可能避免出现锚链绷紧情况。

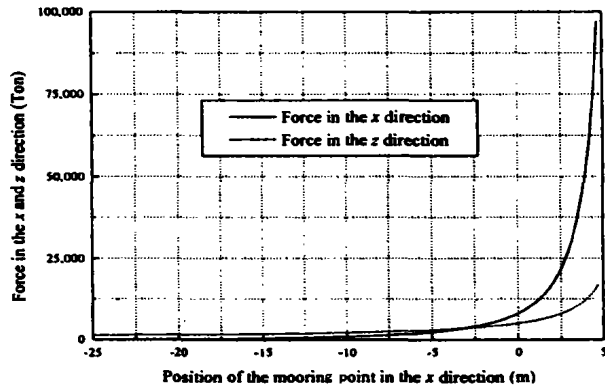
对于整个系统我们可以估算得到纵荡平均固有周期在30m水深大约为9.72s,35m水深大约为7.75s。



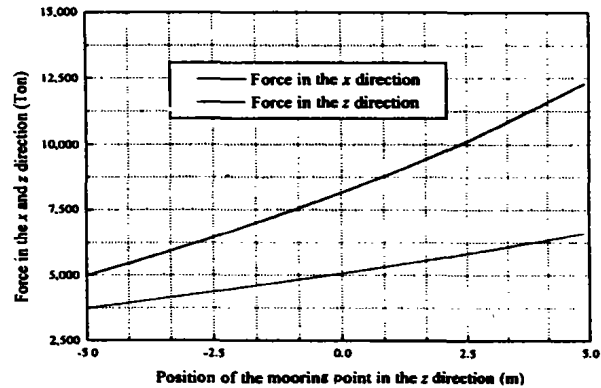
水平方向位移对锚链张力的影响
 Effect of the horizontal displacement on mooring forces
 (a) 30m 水深 (Water depth=30m)



垂直方向位移对锚链张力的影响
 Effect of the vertical displacement on mooring forces



水平方向位移对锚链张力的影响
 Effect of the horizontal displacement on mooring forces
 (b) 35m 水深 (Water depth=35m)



垂直方向位移对锚链张力的影响
 Effect of the vertical displacement on mooring forces

图5 锚链长为 306.7m, z=-0.5m 时锚链张力与浮标系统点的位移关系图
 Fig.5 The curves of mooring forces versus the displacement of the attached point
 (Length of the mooring line=306.687m, z=-0.5m)

表3 30m 和 35m 水深生存条件下浮标运动和锚链力统计值(单幅值)

Tab.3 Statistic values of motions and mooring forces in the extreme sea state

		水深 30m				水深 35m			
		最大值	最小值	平均值	有义值	最大值	最小值	平均值	有义值
波浪	(m)	11.60	-9.68	0.00	5.55	9.52	-13.06	0.00	5.57
纵荡	(m)	3.95	-5.00	-1.67	2.85	3.80	-4.97	-1.23	2.37
垂荡	(m)	10.74	-9.21	-0.15	5.45	9.15	-13.12	-0.20	5.45
纵摇	(°)	24.87	-20.15	-0.19	11.74	19.07	-20.37	-0.25	10.81
锚链 1	(kN)	747.2	41.1	119.8	127.1	858.7	43.9	149.2	121.5
锚链 2	(kN)	246.2	16.3	53.6	44.7	225.5	18.6	83.9	56.8
锚链 3	(kN)	246.2	16.3	53.6	44.7	225.5	18.6	83.9	56.8
锚 1 夹角	(°)	79.30	43.22	61.89	12.36	78.95	43.94	63.56	9.31
锚 2 夹角	(°)	69.22	28.79	48.80	11.99	68.32	31.64	55.05	8.92
锚 3 夹角	(°)	69.22	28.79	48.80	11.99	68.32	31.64	55.05	8.92

表3给出了30m、35m水深时在极限(生存)环境条件下浮标运动、锚链张力统计值,从表中我们可以看到:

(a) 在涨潮时,也即35m水深时,纵荡运动、纵摇运动的单幅有义值以及最大值、最小值都比落潮(30m水深)时相应的幅值小,说明在涨潮时,浮标的耐波性能有所提高。

(b) 但另一方面,在涨潮时,尽管锚链1、锚链2和锚链3的张力有义值(表3中平均值+有义值)以及锚链1的最大张力比落潮时相应的锚链张力要大,但说明涨潮时锚链的张力有所增加。但两种情况最大张力(30m水深时747.2kN,35m水深时858.7kN)都比46mm锚链破断力(M2级为1167kN, TM3级1677.51kN)小,不会出现断缆情况;

(c) 另外,在浮标上系缆点锚链与垂直方向的夹角最大值达到 79° ,而最小值也达到了 28° ,因此不会出现锚链相互缠绕现象。

以上说明,在涨潮时(即35m水深),浮标运动性能有所改善,但锚链平均张力也相应地增加,而最大张力也略有增加。这主要是当锚链长度不变时,涨潮实际上相当于增加锚链的预张力,计算结果显示30m水深预张力为49.05kN,而在35m水深时变为98.1kN左右,预张力增加了大约49.05kN。上述我们已经讨论过增加预张力一方面可以约束浮标运动,另一方面增加预张力也增加了锚链的刚性,从而减小了整个三锚系统的固有周期,这又可以避免由于系统频率与低频二阶力的频率相接近而引起的大幅低频运动。

图6给出了30m水深三锚系统在极限环境条件下的波浪、运动及锚链张力的模拟计算结果,从图中可以看到在模拟时间内的波浪幅值、运动幅值以及锚链张力随时间的变化过程。

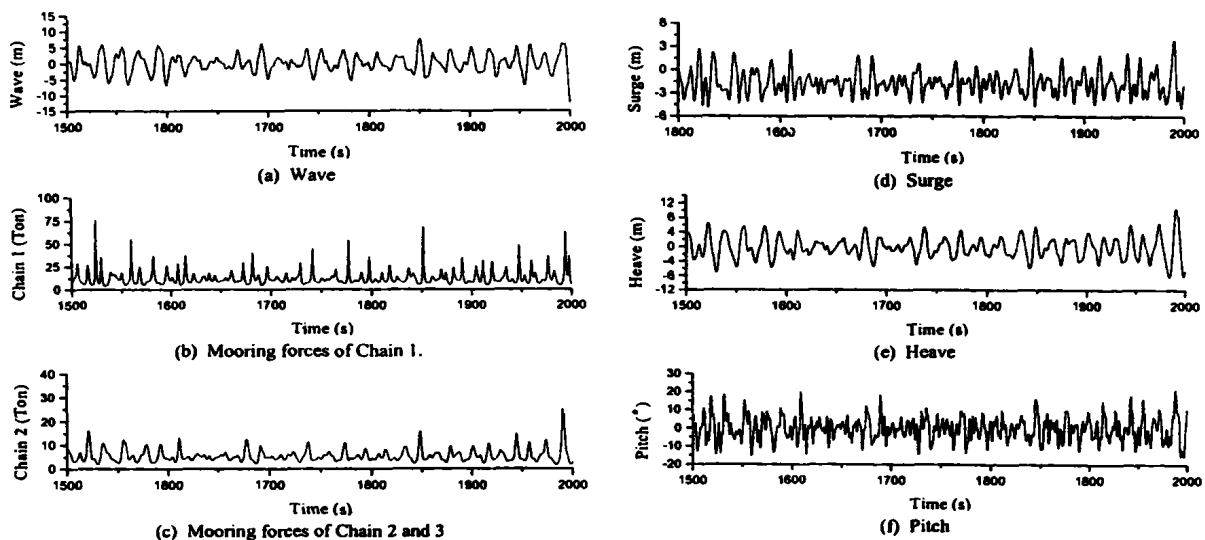


图6 30m水深,锚链长为306.7m,预张力为49.05kN, $z=-0.5$ m三锚系统在生存环境条件下浮标运动、锚链力时域模拟结果

Fig.6 Time history of buoy motions and mooring forces in the extreme sea state

4 结论

通过上述模拟计算结果的分析,我们可以得到:

- (a) 本文所用方法可以用来预报系泊系统浮体运动以及锚系的受力分析、估算;
- (b) 对于相同的锚链,浮标系统的浮标运动在涨潮时有一定的改善,但锚链最大张力略有增加;

(c) 当有一定预张力时,全锚链的三锚系统不会出现缠绕现象。

值得注意的是,本文给出的结果是通过数学模型和理论方法而得到的,在进行数值计算时必然存在一定的假设和简化,因此尽管在定性上是可信的,但在具体计算结果与实际量值上会有一些的差别。

参 考 文 献:

- [1] 孙伯起,董慎言,达荣庭等. 不规则波浪中任意三元零航速物体的二阶力计算[J]. 水动力研究与发展,1984(1).
- [2] Cummins W E. The impulse response function and ship motion[R].DTMB Report 1661,1962.
- [3] 刘应中,缪国平.船舶在波浪中的运动理论[M].上海:上海交通大学出版社,1987.
- [4] 缪泉明.码头边系泊船在波浪中的运动理论[D].中国船舶科学研究中心硕士论文,1989.
- [5] Miao Quanming, Du Shuangxing, Wu Yousheng, Dong Shenyan. Hydrodynamic analysis of a moored very large floating structure[R].CSSRC report,1997.
- [6] Ogilvie T F.Recent progress towards the understanding and prediction of ship motions[A].Fifth Sym.on Naval Hydrodynamics[C],Bergen,1964.
- [7] 李润培,王志农.海洋平台强度分析[M].上海:上海交通大学出版社,1992.
- [8] Nakamura M,Koterayama W,Kyozuka Y.Slow drift damping due to drag forces acting on mooring lines[J]. Ocean Engineering, 1991,18(4):283-296.
- [9] Winkler R S, Seidl L H, Riggs H R, Ertekin R C, Wilkins G A. The design and analysis of very large floating structures (VLFS)[R].Design.Rep.No.UHMOE-90105,Dept.of Ocean Engng.,Univ.of Hawaii,1990,1.
- [10] 吴秀恒,张乐文,王仁康编著. 船舶操纵性与耐波性[M].北京:人民交通出版社,1988.

Estimation of Buoy Motions and Chain Forces in Extreme Sea State

MIAO Quan-ming, GU Min, YANG Zhan-ming, LIU Chu-xue
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Firstly, the added-mass, damping coefficients and motion responses of a buoy are calculated by the three-dimensional potential theory. And then the motions of the buoy and the forces of the chain of both water depths under the extreme sea state are simulated in the time domain in terms of the Cummins' equations of six-degree. It is useful for the design of the buoy and the mooring chains.

Key words: potential theory; motion of a buoy; chain forces