

# 基于时/频域势流理论的旋转型养殖平台 系泊系统耦合动力响应分析

孙倩<sup>1,2</sup>, 张晓莹<sup>1,2</sup>, 扈喆<sup>1,2</sup>, 郑国富<sup>1,3</sup>, 林国珍<sup>1,2</sup>, 郭军<sup>1,2</sup>, 李妍<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门市海上养殖装备重点实验室, 福建 厦门 361021;  
3. 福建省水产研究所, 福建 厦门 361012)

**[摘要]** 针对某旋转型养殖平台采用的“粗链+细链”新型系泊方式, 开展系泊系统动力响应特性研究。基于时/频域势流理论开展完整自存工况下的平台-系泊系统耦合动力响应分析, 得到该新型系泊方式下的平台运动响应、锚链拉力统计特性和平台漂移规律等。计算结果表明, “粗链+细链”新型系泊系统可有效限制平台运动, 各运动响应均满足使用要求, 并且锚链强度满足规范要求。研究发现, 在波流同向条件下, “粗链+细链”新型系泊系统的锚链动拉力近似服从正态分布, 且均值与静拉力相当。

**[关键词]** 养殖平台; 水动力性能; 系泊系统; 耦合动力响应; 时/频域势流

**[中图分类号]** U 661.2

## Coupled Dynamic Response of Rotating Aquaculture Platform Mooring System Based on Time-Domain/Frequency-Domain Potential Flow Theory

SUN Qian<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaoying<sup>1,2</sup>, HU Zhe<sup>1,2</sup>, ZHENG Guofu<sup>1,3</sup>, LIN Guozhen<sup>1,2</sup>, GUO Jun<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory of Marine Aquaculture Equipment of Xiamen, Xiamen 361021, China; 3. Fujian Fisheries Research Institute, Xiamen 361012, China)

**Abstract:** A study was conducted on the dynamic response characteristics of the mooring system for a rotating aquaculture platform using a new mooring method of “thick-and-thin chain”. Based on SESAM, frequency domain analysis of the platform under complete self-existing conditions and coupled time-domain dynamic response analysis of the platform mooring system were carried out, and the platform-motion response, chain-tension statistical characteristics, and platform drift under this novel mooring method were obtained. The calculation results indicate that the new mooring system of “thick-and-thin chain” can effectively constrain the platform motion, and all motion responses meet the usage requirements. The chain strength meets the specification requirements. Research has found that under the condition of wave and current in the same direction, the dynamic tension of the “thick-and-thin chain” mooring system follows a normal distribution approximately, and the mean is equivalent to the static tension.

**Keywords:** aquaculture platform; hydrodynamic performance; mooring system; coupled dynamic response; time-domain/frequency-domain potential flow

**[收稿日期]** 2023-06-13

**[基金项目]** 福建省自然科学基金项目(2022J01809, 2021J01840); 福建省科技计划引导性项目(2021N0035); 集美大学国家基金培育计划项目(ZP2023002)

**[作者简介]** 孙倩(1974—), 女, 副教授, 从事船舶与海洋结构物设计制造方向研究。通信作者: 张晓莹(1988—), 女, 讲师, 从事船舶与海洋工程结构与水动力方向研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

## 0 引言

目前我国水产养殖产量约占世界总产量的 65%<sup>[1]</sup>。福建等南方海域具有台风多、海洋环境恶劣等不利因素,为适应深、远海养殖的发展趋势,要求养殖装备必须具备更强的海况抵御能力<sup>[2]</sup>,因而稳定高效的系泊系统对保证养殖平台良好的耐波性能、保障养殖效益具有重要意义。

近几年关于平台系泊系统水动力分析方面的研究比较多。文献 [3-6] 采用频域和时域分析法分别对某驳船型养殖平台、DTP 平台、深水干树半潜平台和 Semi-Spar 式海上浮式平台的锚泊系统进行了水动力计算,对平台的运动响应、系泊系统性能等进行了研究。孔耀华等<sup>[7]</sup>和冯亮等<sup>[8]</sup>利用 SESAM 软件对养殖平台的单点系泊系统进行了时域耦合水动力分析。吴锦涛等<sup>[9]</sup>通过物理模型试验研究了 HDPE 圆形潜降式网箱在波浪作用下浮绳框深度和浮球体积对网箱水动力特性的影响。Duan 等<sup>[10]</sup>采用广义  $\alpha$  积分算法和牛顿迭代法求解水下生产平台-系泊系统的全耦合动力分析模型,分析了系泊系统的耦合效应和动态响应特性。Chuang 等<sup>[11]</sup>定量研究了半潜式采油平台在失去一根或几根定位系泊缆情况下的瞬态动力响应。Ma 等<sup>[12-13]</sup>、滕蓓等<sup>[14]</sup>、王朋超等<sup>[15]</sup>、刘传艺等<sup>[16]</sup>和黄硕等<sup>[17]</sup>利用三维势流理论,分别对船形和九模块浮式养殖平台、油气资源开发保障平台、养殖辅助工作船、半潜式起重平台和波浪能养殖平台系泊系统的水动力性能、平台的时域运动进行了数值研究。张松等<sup>[18]</sup>和陈旭东等<sup>[19]</sup>分别对船型桁架结构网箱和浮式风电平台的系泊方式、系泊缆索数量及预张紧力等参数进行了优化设计。综上所述,目前平台水动力性能和系泊系统可靠性主要是根据平台的结构特点采用三维势流理论和 Morison 方程进行评估。

旋转型养殖平台“粗链+细链”系泊系统是一种新型系泊设计方式,鲜见文献报道,相关动力特性尚不明确。本文拟通过 PATRAN\_Pre 建模,分别采用频域和时域分析方法,使用基于三维势流理论的 SESAM 软件计算平台的动力性能以及平台与系泊系统的耦合动力响应机制,以了解“粗链+细链”系泊方式是否可以提供良好的系泊效果,其水动力性能和锚链强度等是否满足规范要求,所得结果可为类似平台设计和性能评估提供有益参考。

## 1 养殖平台及系泊系统概况

旋转型养殖平台的主尺度参数:长度  $L=56$  m, 宽度  $B=26$  m, 型深  $D=3$  m, 吃水  $T=1.5$  m。该平台系泊系统采用粗链+细链组合的四角辐射形式,每个角采用 2 根细链接 1 根粗链,共 12 根锚链,锚链编号与布置如图 1 所示,其中 1~8 号为细链,9~12 号为粗链。1 号链与平台纵向水平夹角  $50^\circ$ 、水平投影长度 50 m、链长 68 m;2 号链与平台纵向水平夹角  $45.6^\circ$ 、水平投影长度 48 m、链长 66 m;9 号链与平台纵向水平夹角  $47.8^\circ$ 、水平长度 80 m、链长 80 m。其中 1、2 号锚链刚好触底,9 号锚链完全在海床上。其余 3 个方向的锚链对称布置。

细链选用 D42 有档锚链,粗链选用 D48 有档锚链。参考国标 GB/T 20848-2017《系泊链》<sup>[20]</sup>,D42 锚链参数为:公称直径 42 mm,破断强度 1599 kN,单位长度质量 38.64 kg/m,锚链刚度 22.38 MN;D48 锚链参数为:公称直径 48 mm,破断强度 2064 kN,单位长度质量 50.46 kg/m,锚链刚度 28.88 MN。

该平台作业水深为 30 m,属于无人驻守近岸养殖设施,所以强度设计标准为 50 a 重现期,设计寿命 20 a。本计算采用的工况是平台的完整自存工况,自存工况基于 50 a 一遇的恶劣海况<sup>[21]</sup>。由于正常作业工况条件优于自存工况,故本文不予考虑。根据统计资料计算,以当地 50 a 一遇最大风速

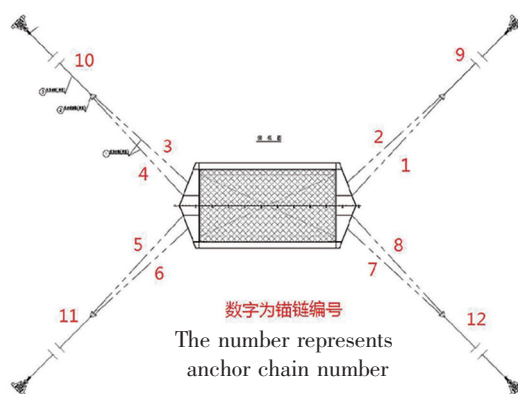


图 1 系泊布置示意图  
Fig.1 Mooring layout diagram

27.3 m/s, 基于《海上浮式装置入级规范》<sup>[21]</sup>第2篇5.3.3节的公式计算风载荷。最大有义波高5.06 m, 跨零周期为6.36 s, 最大流速为1.615 m/s。浪、流方向相同, 取0°、45°和90°三组方向, 计算工况分别记为: Dir0°、Dir45°和Dir90°。

## 2 计算模型及参数

采用右手螺旋法则, 原点  $O$  在水线面处平台中纵剖面和中横剖面的交点处,  $X$  正方向为艏方向,  $Y$  正方向为指向左舷方向,  $Z$  正方向朝上, 水面和水底  $Z$  向坐标分别为0 m和-30 m, 模型示意图如图2所示。

该平台水动力模型如图3所示, 包含面元模型和 Morison 模型两部分, 箱形主浮体结构采用面元模型, 旋转笼采用 Morison 模型。面元模型面元数5858, 节点数5868; Morison 模型单元数1872, 节点数1680。

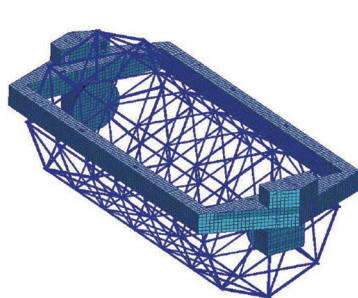


图2 模型示意图

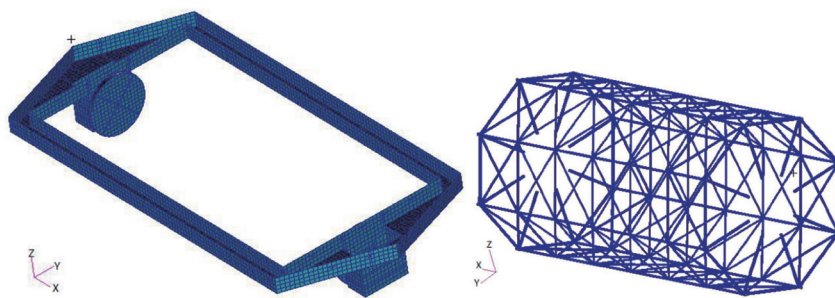


图3 平台水动力模型(左-面元模型,右-Morison模型)

Fig.2 Model schematic diagram Fig.3 Platform hydrodynamic model (left-shell model, right-morison model)

系泊系统结构模型如图4所示。锚链末端(即海底端部)设置为固定约束。每根锚链离散为锚链单元, 各单元仅受拉力, 弯曲刚度为0。根据 DNV 规范中的 DNVGL-OS-E301 Position mooring<sup>[11]</sup>, 系泊锚链拖曳系数  $C_{qx} = 1.4$ ,  $C_{qy} = 2.6$ 。

风谱采用 DNVGL-OS-E301 Position mooring 中建议的 NPD (norwegian petroleum directorate) 风谱, 波浪谱采用3参数 JONSWAP 谱<sup>[22]</sup>, 有义波高5.06 m, 跨零周期6.36 s。

海流作用力通过流系数设置。流系数采用 Morison 公式计算<sup>[23]</sup>, 计算时把平台水下部分简化为柱体, 网衣所荷载荷简化为养殖笼的拖曳力系数和附加质量系数增加, 增加方式为

$$F_{all} = \frac{1}{2}\rho U^2 C_{D\_cage} A_{cage} + \rho \dot{U} (1 + C_{a\_cage}) V_{cage} + \frac{1}{2}\rho U^2 C_{D\_net} A_{net} + \rho \dot{U} (1 + C_{a\_net}) V_{net}$$

$$= \frac{1}{2}\rho U^2 C'_{D\_cage} A_{cage} + \rho \dot{U} (1 + C'_{a\_cage}) V_{cage}。$$

其中:  $C_{D\_cage}$ 、 $C_{a\_cage}$ 、 $A_{cage}$ 、 $V_{cage}$  分别为养殖笼的阻力系数、附加质量系数、迎流面积、排水体积;  $C_{D\_net}$ 、 $C_{a\_net}$ 、 $A_{net}$ 、 $V_{net}$  分别为网衣的阻力系数、附加质量系数、迎流面积、排水体积;  $\rho$ 、 $U$ 、 $\dot{U}$  分别为流体的密度、速度和加速度;  $C'_{D\_cage}$ 、 $C'_{a\_cage}$  分别为考虑网衣载荷在内的等效养殖笼阻力系数和附加质量系数。

流系数计算结果见表1。表1中,  $C_1 \sim C_3$  为单位流速(1 m/s)下养殖平台所受的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向的

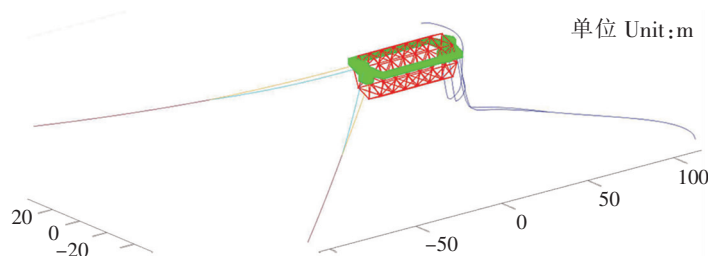


图4 系泊系统结构模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of mooring system structural model

力;  $C_4 \sim C_6$  为单位流速下养殖平台所受的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向的力矩。

表 1 流系数表

Tab. 1 Flow coefficients

流向角/(°) Current direction	$C_1/(\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$C_2/(\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$C_3/(\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-2})$	$C_4/(\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	$C_5/(\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	$C_6/(\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1})$
0	$2.73 \times 10^5$	$-3.25 \times 10^{-13}$	$-1.77 \times 10^{-13}$	$1.09 \times 10^{-11}$	$-1.43 \times 10^6$	$2.82 \times 10^{-3}$
15	$2.60 \times 10^5$	$5.55 \times 10^4$	$-1.35 \times 10^{-5}$	$2.90 \times 10^5$	$-1.37 \times 10^6$	$-1.99 \times 10$
30	$2.25 \times 10^5$	$1.26 \times 10^5$	$-2.98 \times 10^{-5}$	$5.95 \times 10^5$	$-1.20 \times 10^6$	$-7.42 \times 10$
45	$1.73 \times 10^5$	$2.01 \times 10^5$	$-4.56 \times 10^{-5}$	$8.71 \times 10^5$	$-9.53 \times 10^5$	$-1.48 \times 10^2$
60	$1.13 \times 10^5$	$2.67 \times 10^5$	$-5.40 \times 10^{-5}$	$1.08 \times 10^6$	$-6.55 \times 10^5$	$-2.22 \times 10^2$
75	$5.26 \times 10^4$	$3.12 \times 10^5$	$-5.31 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^6$	$-3.27 \times 10^5$	$-2.77 \times 10^2$
90	$1.01 \times 10^{-11}$	$3.28 \times 10^5$	$-5.08 \times 10^{-5}$	$1.27 \times 10^6$	$-8.00 \times 10^{-11}$	$-2.97 \times 10^2$

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 水动力性能频域分析

波浪角频率范围为  $0.05 \sim 2.50 \text{ rad/s}$ , 步长为  $0.05 \text{ rad/s}$ , 浪向为  $0^\circ \sim 90^\circ$ , 间隔  $15^\circ$ 。频域计算采用 SESAM. HydroD (2013 版) 完成。平台运动幅值响应算子 (response amplitude operator, RAO) 曲线如图 5 ~ 图 10 所示。

计算结果表明: 平台垂荡运动响应与浪向关系不大, 各方向响应趋势基本相同, 在角频率为低频 ( $0.05 \text{ rad/s}$ ) 时出现最大峰值, 该频率在常规波浪角频率范围之外, 超过  $0.05 \text{ rad/s}$  则响应幅值迅速下降。因此, 平台垂荡性能良好, 日常发生共振可能性小。由于平台本身结构的对称性, 纵摇和横摇、纵荡和横荡的运动响应趋势基本一致。平台的纵摇和横摇运动分别在角频率为  $0.8 \text{ rad/s}$  和  $1.2 \text{ rad/s}$  时出现最大峰值, 对应波浪周期为  $7.85 \text{ s}$  和  $5.24 \text{ s}$ , 与设计波周期接近, 不过这两个自由度响应均较小, 最大幅值只有  $0.04 \text{ rad}$  和  $0.11 \text{ rad}$ 。波浪为横浪即浪向角为  $90^\circ$  时, 平台主要表现为垂荡和横摇运动; 顺浪即浪向角为  $0^\circ$  时, 平台主要表现为纵荡、横荡和纵摇。在所选取频率范围内, 艏摇均较小, 最大响应幅值仅为  $0.03 \text{ rad}$ 。

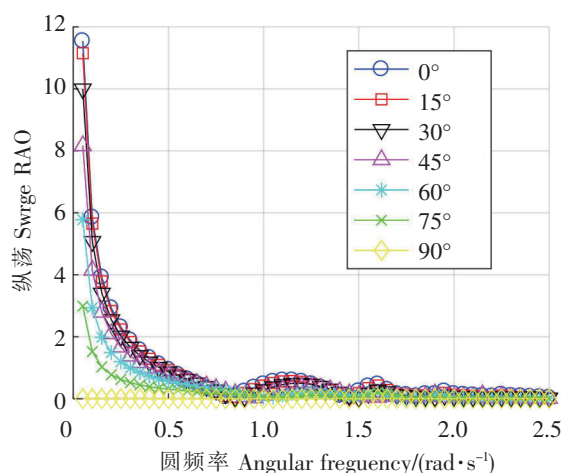


图 5 纵荡 RAO 曲线  
Fig.5 RAO curve of surge

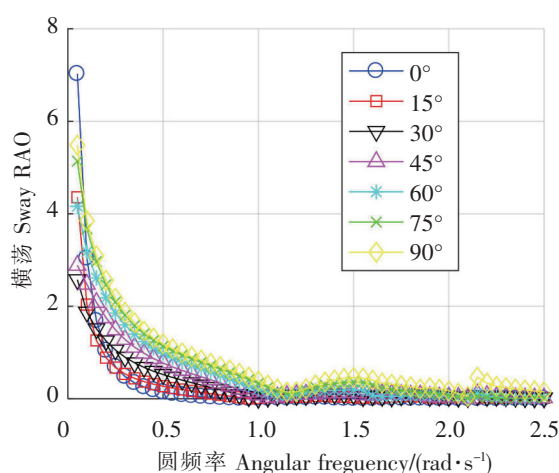


图 6 横荡 RAO 曲线  
Fig.6 RAO curve of sway



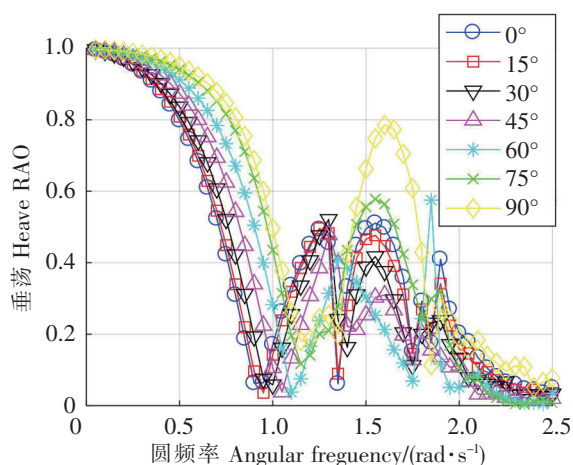


图7 垂荡 RAO 曲线  
Fig.7 RAO curve of sag

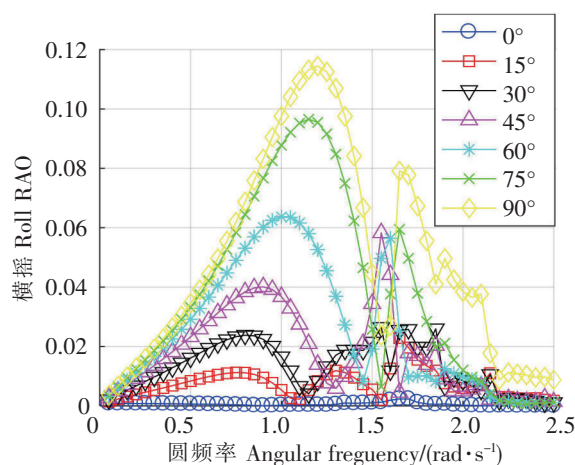


图8 横摇 RAO 曲线  
Fig.8 RAO curve of roll

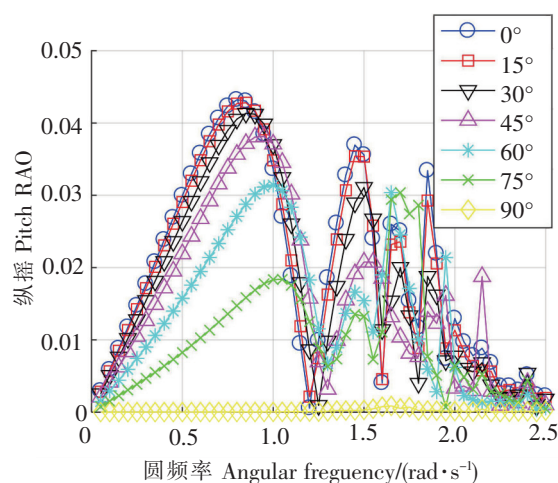


图9 纵摇 RAO 曲线  
Fig.9 RAO curve of pitch

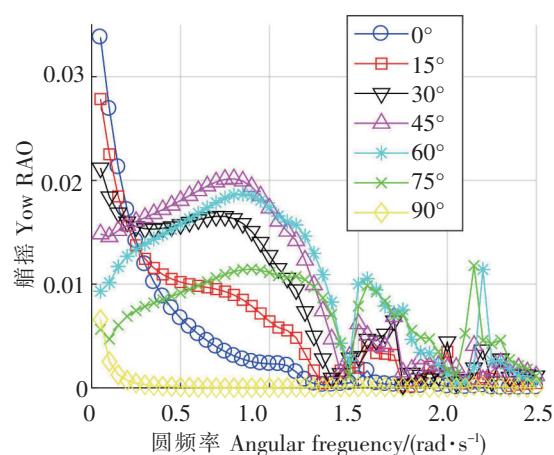


图10 艏摇 RAO 曲线  
Fig.10 RAO curve of yaw

### 3.2 系泊系统耦合动力响应分析结果

表2给出了在均匀海流下各锚链的静拉力,表3给出了完整自存工况下各锚链的最大动拉力,耦合动力分析采用 SESAM. DeepC (2013 版) 完成。

由表2和表3可知,在 $0^\circ$ 和 $45^\circ$ 工况下,锚链最大动拉力分别为静拉力的1.63倍和1.73倍,而在 $90^\circ$ 工况下为2.17倍。在 $0^\circ$ 工况下,最大动拉力发生在10号锚链;在 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 工况下,最大动拉力发生在11号锚链。参考中国船级社《海上浮式装置入级规范》<sup>[23]</sup>,锚链在完整自存工况下动力安全系数为1.67,可得D42锚链许用拉力为957 kN,D48锚链许用拉力为1235 kN。

由表3可知,1~8号锚链中最大拉力为898.1 kN,略小于D42锚链许用拉力957 kN,9~12号锚链中最大拉力为1200.7 kN,略小于D48锚链许用拉力1235 kN,因此各锚链均满足强度要求,且无较大冗余。

由表2可知,锚链拉力以水平分量为主,但在一定工况下也会产生一定量的垂直拉力,影响平台浮态和受力。增大锚链长度可减小垂直拉力,但会增加成本。以 $0^\circ$ 流向为例,若各锚链长度增加20%,则垂直拉力可减小约25%。

图11以Dir $45^\circ$ 工况11号锚链为例,给出锚链拉力随时间变化曲线。可见锚链拉力呈随机往复变化曲线,即便海况条件相同,计算时生成不同的随机相位也将导致拉力曲线发生变化,因此有必要分析拉力曲线的统计特性。图12~14给出了三个完整自存工况最大拉力对应锚链的拉力分布统计情况,

并采用正态分布对拉力分布进行拟合。由图 12 ~ 14 可见, 拟合效果良好, 最大锚链拉力可以近似用正态分布来描述。

表 2 不同流向海流下锚链静拉力汇总

Tab. 2 Summary of static tension of anchor chain under different current directions

单位 Unit: kN

锚链 编号 Chain number	0°流向 Current direction			45°流向 Current direction			90°流向 Current direction		
	最大拉力 Maximun tension	对平台垂直力 Vertical force on platform	对平台水平力 Horizontal force on platform	最大拉力 Maximun tension	对平台垂直力 Vertical force on platform	对平台水平力 Horizontal force on platform	最大拉力 Maximun tension	对平台垂直力 Vertical force on platform	对平台水平力 Horizontal force on platform
1	10.2	-10.1	1.6	9.7	-9.6	1.2	10.1	-10.0	1.5
2	10.0	-9.9	1.5	9.8	-9.8	1.2	9.9	-9.8	1.5
3	340.2	-95.5	326.5	18.9	-16.3	9.5	9.9	-9.8	1.5
4	156.4	-48.7	148.6	21.2	-17.6	11.9	10.1	-10.0	1.5
5	156.4	-48.7	148.6	79.7	-28.9	74.2	321.1	-87.8	308.9
6	340.2	-95.5	326.5	625.1	-156.6	605.1	236.9	-68.9	226.7
7	10.0	-9.9	1.5	33.2	-22.3	24.6	236.9	-68.9	226.7
8	10.2	-10.1	1.6	74.6	-38.4	63.9	321.1	-87.8	308.9
9	1.1	0	0	0.3	0	0	0.8	0	0
10	485.3	0	0	21.4	0	0	0.8	0	0
11	485.3	0	0	693.7	0	0	547.0	0	0
12	1.1	0	0	90.2	0	0	547.0	0	0

表 3 完整自存工况最大锚链拉力汇总

Tab. 3 Summary of maximum anchor chain tension under complete self-survival conditions

锚链编号 Chain number	最大锚链拉力 Maximun tension of anchor chain/kN			锚链编号 Chain number	大锚链拉力 Maximun tension of anchor chain/kN		
	Dir0°	Dir45°	Dir90°		Dir0°	Dir45°	Dir90°
1	47.4	36.3	13.9	7	35.2	67.6	549.2
2	36.2	40.5	24.4	8	46.1	276.4	644.0
3	497.7	80.9	24.5	9	12.3	4.7	5.8
4	299.0	81.9	13.8	10	790.6	34.6	5.8
5	293.0	329.7	644.3	11	787.2	1200.7	1189.0
6	499.4	898.1	549.7	12	11.2	325.9	1188.0

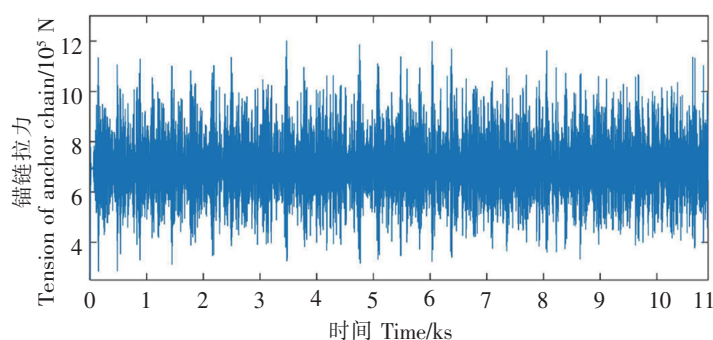


图 11 Dir45°工况 11 号锚链拉力变化曲线  
Fig. 11 Curve of tension change of No. 11 anchor chain under Dir45° working condition

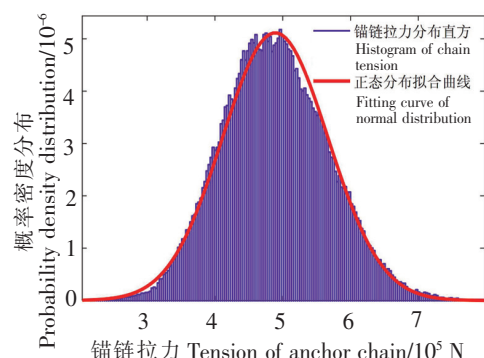


图 12 Dir0°工况 10 号锚链拉力分布曲线  
Fig. 12 Distribution curve of tension force of No. 10 anchor chain under Dir0° working condition

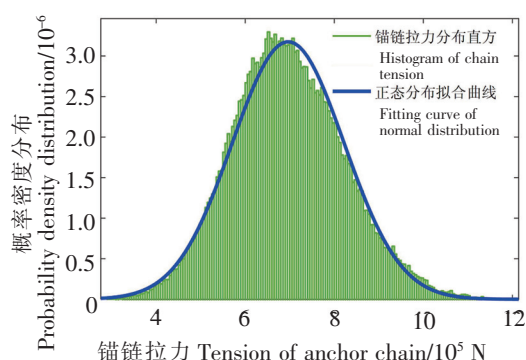


图 13 Dir45°工况 11 号锚链拉力分布曲线

Fig.13 Distribution curve of tension force of No.11 anchor chain under Dir45° working condition

表 4 给出拟合得到的分布参数,并在最后一列中给出该锚链在对应工况下的静拉力。可见正态分布的均值与该锚链静拉力高度接近,这表明动拉力以静拉力为中心做对称性的往复变化,此时若用频域方法计算锚链动拉力将会得到较可靠的结果。

表 5 给出在风浪流载荷作用下平台运动位移范围,作为对比,表 6 给出相同工况下基于 RAO 的平台运动最大范围短期预报结果。对于 Dir0°工况,系泊系统使平台纵荡和垂荡分别减小 50.3% 和 76.0%;对于 Dir45°工况,系泊系统使平台纵荡、横荡和垂荡分别减小 47.6%、54.4% 和 70.3%;对于 Dir90°工况,系泊系统使平台横荡和垂荡分别减小 31.7% 和 61.9%。可见本平台的系泊系统有效限制了平台运动,这种限制作用对平台垂荡运动尤其明显。

表 5 平台运动位移范围

Tab. 5 Displacement range of platform motion

单位 Unit: m

工况 Working condition	纵向位移 Longitudinal displacement		横向位移 Lateral displacement		垂向位移 Vertical displacement	
	最大值 Max	最小值 Min	最大值 Max	最小值 Min	最大值 Max	最小值 Min
Dir0°	25.2	22.1	-	-	0.95	-1.01
Dir45°	16.1	13.3	17.5	14.2	1.34	-1.44
Dir90°	-	-	25.1	18.5	1.99	-2.12

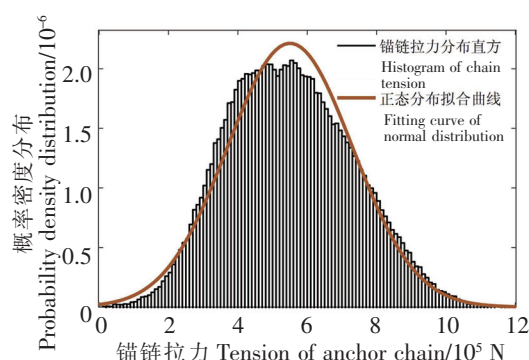


图 14 Dir90°工况 11 号锚链拉力分布曲线

Fig.14 Distribution curve of tension force of No.11 anchor chain under Dir90° working condition

表 4 锚链拉力正态分布拟合结果

Tab. 4 Normal distribution fitting results of anchor chain tension

单位 Unit: kN

工况 Working condition	锚链编号 Chain number	均值 Mean value	标准差 Standard deviation	锚链静拉力 Static tension of anchor chain
Dir0°	10	488.9	78.0	485.3
Dir45°	11	696.5	125.6	693.7
Dir90°	11	550.2	180.2	547.0

表 6 平台运动最大范围短期预报结果

Tab. 6 Short term forecast results of the maximum range of platform motion

单位 Unit: m

工况 Working condition	纵向位移 Longitudinal displacement		横向位移 Lateral displacement		垂向位移 Vertical displacement	
	最大值 Max	最小值 Min	最大值 Max	最小值 Min	最大值 Max	最小值 Min
Dir0°	3.12	-3.12	-	-	4.09	-4.09
Dir45°	2.67	-2.67	3.62	-3.62	4.69	-4.69
Dir90°	-	-	4.83	-4.83	5.40	-5.40

## 4 结论

本文通过 SESAM 软件对某旋转型养殖平台“粗链+细链”新型系泊方式进行了平台-系泊系统的耦合时域动力响应分析,得到如下结论:1)该旋转型养殖平台水动力性能良好;2)三种完整自存工况下各锚链的强度均符合规范相应要求;3)浪流同向时,锚链拉力分布符合正态分布,且拉力分布均值与锚链静拉力相当;4)该平台采用的粗链+细链式系泊系统可有效限制平台在波浪中的运动

幅度,具有良好的系泊效果。本文的研究成果可为后期平台在复杂海况下的动力学分析及算法改进打下良好基础。

### [参考文献]

- [1] 潘滢. 我国深远海养殖装备发展及设计要求[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 24-30.
- [2] 胡方珍, 盛伟群, 王体涛. 深远海养殖装备技术现状及标准化工作建议[J]. 船舶标准化工程师, 2021, 54(5): 6-12.
- [3] 林垚, 王靖. 远海养殖平台的锚泊定位能力分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(增刊2): 19-24.
- [4] 邓小康, 谢文会, 李阳, 等. 一种新型深水浮式平台及其系泊系统动力响应分析[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(5): 95-101.
- [5] 邓小康, 谢文会, 谢彬. 新型深水干树半潜平台水动力性能数值研究[J]. 中国造船, 2021, 62(2): 187-200.
- [6] 李秋辰. 一种新型 Semi-Spar 式海上风机平台及其系泊系统水动力特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [7] 孔耀华, 陈作钢, 谌志新. 舱养式深远海养殖平台的水动力及单点系泊特性[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 6-11.
- [8] 冯亮, 李昕, 史宏达, 等. 波浪能发电平台系泊系统耦合动力响应及水动力分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 171-178.
- [9] 吴锦涛, 崔勇, 关长涛, 等. 波浪作用下潜降式网箱及锚泊系统水动力特性研究[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 337-343.
- [10] DUAN Q Y, ZHEN X W, HUANG Y, et al. Experiment-based coupled dynamic analysis of submerged production platform-mooring system in internal solitary waves[J]. Ocean Engineering, 2022, 260: 112044.
- [11] CHUANG Z J, LIU S W, LI C Z, et al. Dynamic analysis of semi-submersible production platform under the failure of mooring lines[J]. China Ocean Engineering, 2021, 35(1): 84-95.
- [12] MA C, ZHAO Y P, BI C W. Numerical study on hydrodynamic responses of a dingle-point moored vessel-shaped floating aquaculture platform in waves[J]. Aquacultural Engineering, 2022, 96: 102216.
- [13] MA C, ZHAO Y P, BI C W, et al. Numerical study on dynamic analysis of a nine-module floating aquaculture platform under irregular waves[J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115253.
- [14] 滕蓓, 陆晔, 王新宇, 等. 油气资源保障平台系泊系统动力学与运动响应分析[J]. 船舶力学, 2022, 26(4): 529-537.
- [15] 王朋超, 谭睿, 何燕. 深海工作船系泊系统运动响应分析[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 111-118.
- [16] 刘传艺, 沈勇, 潘伟宸, 等. 非对称半潜式起重平台系泊系统特性研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(14): 98-103.
- [17] 黄硕, 梁诗琪, 盛松伟, 等. 半潜式波浪能养殖平台与系泊系统的耦合动力分析[J]. 太阳能学报, 2022, 43(8): 463-471.
- [18] 张松, 庞国良, 黄小华, 等. 船型桁架结构网箱系泊方式优选及影响参数分析[J]. 渔业现代化, 2022, 49(5): 97-105.
- [19] 陈旭东, 孔国照. 半潜式波浪能养殖平台与系泊系统的耦合动力分析[J]. 船海工程, 2023, 52(4): 43-46, 51.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 系泊链: GB/T 20848-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 中国船级社. 海上浮式装置入级规范[S]. 北京: 中国船级社, 2020.
- [22] DET NORSKE VERITAS. Position Mooring (DNVGL-OS-E301)[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2018.
- [23] MOUSSELLI A H. Offshore pipeline design, analysis and methods[M]. Tulsa, Oklahoma: Pennwell Corp, 1981.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 郑青榕)