

文章编号: 1674-5566(2023)05-1059-09

DOI: 10.12024/jsou.20230604257

基于海浪模拟的 30 万 t 级养殖工船单点锚泊系统设计的理论计算

张春涛^{1,2}, 王亮¹, 王侨³

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 2. 青岛海洋科技中心, 山东 青岛 266237; 3. 国信申船(青岛)海洋科技有限公司, 山东 青岛 266061)

摘要: 深远海养殖工船是一种可移动的海上养殖平台, 借助新型锚泊系统, 用于深远海鱼类养殖, 能够减少环境污染、提高水产品质量、躲避台风等自然灾害侵袭, 较好地解决了传统养殖业发展不可持续的问题, 是离岸养殖业发展的一个新方向。养殖工船的锚泊系统既不同于传统运输船舶临时锚泊系统, 也不同于海洋工程的定位锚泊系统, 并且与养殖工船的运营安全和成本控制密切相关, 因此, 对超大型养殖工船锚泊系统的设计和 optimization 分析非常必要。本研究基于 30 万 t 级超大型养殖工船项目, 开展单点锚泊系统设计及优化。通过 WRF 模式和三维变分同化系统(3DVAR)进行近岸风场模拟, 利用高分辨率的风场模式连续模拟 30 年序列的锚地区域的风速年最大极值, 基于 Weibull 型分布推算不同重现期的风速极值, 并利用风场模式进行 30 年的波浪预报, 采用有限体积三维全动力海流模型(FVCOM)进行水位和海流分析; 借助 Orcaflex 软件开展船体与锚泊系统的时域耦合动力分析, 输入海浪模拟结果, 开展养殖工船锚泊系统分析, 理论计算得到合适的锚链参数。结果表明: 针对 30 万 t 级养殖工船, 选取直径 122 mm 船用 3 级有档锚链, 长度 440 m, 能够在 6 级海况下进行锚泊养殖作业, 锚链张力安全系数大于 1.67, 是安全可行的, 为深远海养殖工船锚泊系统设计提供参考。

关键词: 养殖工船; 海浪模拟; 锚泊优化; 理论计算

中图分类号: S 953.2 **文献标志码:** A

随着我国近海渔业资源衰退, 水域污染严重, 国家对捕捞的严格管控, 涉海工程对渔业水域的占用等影响, 近岸养殖空间受到挤压, 可养水域有限, 水产品安全供给和水域环境的矛盾日益突出。而在深远海, 有优质的水源, 水交换率高, 污染物含量低, 因此向深远海海域发展养殖将明显减轻浅海养殖对近岸浅水区环境的影响, 有利于浅海生态系统的恢复和环境保护。向深海大洋索要空间, 是渔业发展突破生态环境和自然资源约束性挑战、培育新动能的重要战略方向。我国对于养殖设备的研究也逐渐向深远海领域发展^[1-2]。

目前, 我国的深海养殖设施主要为深海网箱和深远海养殖工船^[3]两种。相对于深海网箱而言, 养殖工船是一种可移动的海上养殖平台, 借助新型锚泊系统, 用于深远海鱼类养殖, 能够减少环境污染、提高水产品质量、躲避台风等自然

灾害侵袭, 较好地解决了传统养殖业发展不可持续的问题, 是离岸养殖业发展的一个新方向^[4-6]。深远海养殖工船作为一种新型的船型, 并未有针对于船体稳性衡准的明确规范^[7], 穆璟宝等^[8]基于 IMO 第二代完整稳性衡准对养殖工船的稳性衡准进行了计算; 方舟等^[9]分析了横摇运动下养殖工船在横摇运动下养殖舱内养殖环境的影响; HUANG 等^[10]对 1:30 缩尺比的半潜式近海渔场进行模拟, 研究了在不同单点系泊系统布置下波浪对于养殖系泊力的影响; MA 等^[11]利用 ANSYS 中的 Aqwa 软件, 在频域和时域计算中分析了单点系泊船形浮动水产养殖平台的水动力特性。养殖工船的单点锚泊系统具有运输船舶临时航行锚泊的一些特点: 可以自收放锚, 定位要求不高; 不同点在于抵御环境载荷的能力高于临时航行锚泊系统, 但又低于海工平台定位锚泊系统, 并

收稿日期: 2023-06-17 修回日期: 2023-08-17

基金项目: 青岛海洋科技中心山东省专项经费(2022QNL030001-3); 青岛海洋科技中心“问海计划”深远海养殖实验舱构建与中试验证(2021WHZZB1301)

作者简介: 张春涛(1980—), 男, 工程师, 研究方向为深远海养殖工船。E-mail: zhangchuntao@fmiri.ac.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

且与养殖工船的安全运营和成本控制密切相关。因此,对超大型养殖工船锚泊系统的设计和优化分析非常必要。

本文以新型30万t养殖工船为例,开展深远海养殖工船单点锚泊系统设计及优化。基于养殖工船作业海域的环境条件监测,借助SESAM/HydroD软件开展养殖工船水动力分析,获得结构的附加质量、势流阻尼、RAO、二阶慢漂力等参数,利用Orcaflex软件建立养殖工船-锚泊的耦合分析模型,开展新型养殖工船深远海养殖工况的锚泊系统分析,结合API RP 2SK和《海上单点系泊装置入级与建造》规范,选取合适的安全系数,获得最优锚链参数,为深远海养殖工船锚泊设计提供依据。

1 计算方法与数据来源

借助SESAM/GeniE建立船体湿表面和质量模型,通过HydroD软件进行船体水动力分析,获得船体水动力参数(势流阻尼、附加质量、RAO、一阶波浪力、二阶慢漂力),输入到Orcaflex软件中并建立船体-锚泊的耦合分析模型,探究锚链参数对船体运动的影响规律。

使用Orcaflex动力分析软件进行养殖工船与锚泊系统的耦合计算,迭代分析浮体与细长体结构的相互作用。时域耦合分析的空间离散动态平衡控制方程表达式为:

$$F^I(r, \ddot{r}, t) + F^D(r, \dot{r}, t) + F^S(r, t) = F^E(r, \dot{r}, t) \quad (1)$$

式中: F^I 、 F^D 和 F^S 分别为惯性力矢量、阻尼力矢量和相互作用力矢量; F^E 为外力矢量; r 、 \dot{r} 和 \ddot{r} 为浮体结构的位移矢量、速度矢量和加速度矢量。

惯性力矢量表达式:

$$F^I(r, \ddot{r}, t) = M(r)\ddot{r} \quad (2)$$

式中: M 为质量矩阵,包括结构质量、管内流体质量和附加质量。

阻尼力矢量表达式:

$$F^D(r, \dot{r}, t) = C(r)\dot{r} \quad (3)$$

式中: C 为系统的阻尼矩阵,包括结构阻尼和水动力阻尼。

外力矢量 $F^E(r, \dot{r}, t)$ 是基于单元瞬时应力结果进行计算。外载荷矢量主要来自结构重力、浮力、强制位移、环境力以及其他特定载荷。

养殖工船风力和风力矩计算公式:

$$F_{xw} = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 A_T \quad (4)$$

$$F_{yw} = \frac{1}{2} C_{yw} \rho_w V_w^2 A_L \quad (5)$$

$$M_{xyw} = \frac{1}{2} C_{xyw} \rho_w V_w^2 A_L L_{BP} \quad (6)$$

式中: F_{xw} 、 F_{yw} 分别为纵向风力和横向风力, N ; M_{xyw} 为艏摇风力矩, $N \cdot m$; C_{xw} 、 C_{yw} 、 C_{xyw} 分别为纵向风力系数、横向风力系数和艏摇风力矩系数,风力系数参考OCIMF资料中的图谱获得; ρ_w 为空气密度, kg/m^3 ; V_w 为海平面以上10米处的风速, m/s ; A_T 为正向受风面积, m^2 ; A_L 为侧向受风面积, m^2 ; L_{BP} 为垂线间长, m 。

流速采用幂函数(Power law function)模拟,即:

$$S = S_b + [(S_f - S_b) \times (Z - Z_b) / (Z_f - Z_b)]^{1/7} \quad (7)$$

式中: S_b 和 S_f 对应海底流速和表面流速; Z_b 为静水面高度; Z_f 为海底深度。

养殖工船流力和流力矩计算公式:

$$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c V_c^2 T B \quad (8)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c V_c^2 T L_{BP} \quad (9)$$

$$M_{xyc} = \frac{1}{2} C_{xyc} \rho_c V_c^2 T L_{BP}^2 \quad (10)$$

式中: F_{xc} 、 F_{yc} 、 M_{xyc} 分别为纵向流力、横向流力和艏摇流力矩; C_{xc} 、 C_{yc} 、 C_{xyc} 分别为纵向流力系数、横向流力系数和艏摇流力矩系数,流力系数参考OCIMF资料中的图谱获得; ρ_c 为海水密度, V_c 为流速; T 为船体吃水; B 为型宽。

2 数值计算

2.1 模型参数

计算模型为新型30万t养殖工船,该养殖工船设计为可随季节变更的深远海船型养殖结构,船舶用于移动式智慧渔业养殖,适用于中国近海海域。船体基本参数如表1所示,船体湿表面模型和质量模型由SESAM/GeniE建立,Panel模型和质量模型如图1所示。

2.2 环境工况

为满足养殖需求及避台风等恶劣海况,该养殖工船安装动力装置并可随时迁移。经前期论证探讨,该养殖工船根据不同季节的海况和台风的出现频率,设置4种类型的锚地状态,分别定义为锚地A、锚地B、锚地C和锚地D,各锚地停泊月份如表2所示。

各海域气象模式选用WRF(Weather Research Forecast)模式和三维变分同化系统

(3DVAR),设计并构建了循环3DVAR方案,运用该方案改进气象数值模拟初始场。风场模拟结

果利用锚地C和锚地D附近的2016年的浮标观测值进行对比,验证了数值模拟的可靠性。

表1 30万t养殖工船基本参数

Tab. 1 Basic parameters of 300000 ton aquaculture vessel

船体参数 Hull parameters	总长 Total length/m	型宽 Molded breadth/m	型深 Molded depth/m	设计吃水 Designed draft/m	满载排水量 Full load displacement/t	重心纵向位置 Longitudinal position of center of gravity/m	重心距基线高 Center of gravity height from baseline/m
数值 Numerical value	340	66	28	16.2	300 000	170	14.5

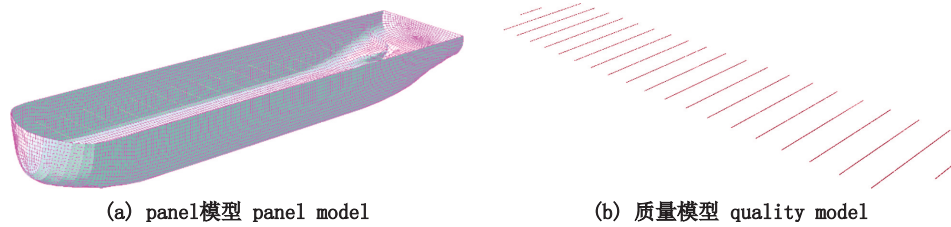


图1 养殖工船模型

Fig. 1 Model of aquaculture vessel

表2 养殖工船作业锚地

Tab. 2 Anchorage for aquaculture vessel operation

锚地 Anchorage	停泊月份 Mooring month
锚地 A Anchorage A	7、8、9月
锚地 B Anchorage B	6、10月
锚地 C Anchorage C	4、5、11月
锚地 D Anchorage D	1、2、3、12月

水位和海流模式采用有限体积三维全动力海流模型FVCOM,模式计算区域设计为117.5°E~122.3°E、37°N~41°N,计算网格设置在近岸海域进行了加密处理,水平分辨率约为200m。计算节点数约为50588个,计算网格数约为98136个。时间步长外模态为2.5s,内模态为25s,模式垂向平均分为3层。地形水深资料采用海军航保部的海图水深通过插值得到,精度相对较高,插值到计算网格点后的模型计算水深。模式采用M2、S2、O1、K1、N2、K2、P1、Q1八个分潮作为天文潮强迫,计算得到77个开边界点的振幅、迟角调和常数,作为开边界的潮汐输入。20年长度的逐时风场数据采用本项目WRF气象模式的后报结果,将其进行处理后作为输入条件叠加到海流模式中,得到在潮流和风场共同作用下的水位和海流模拟结果。

根据《海港水文规范》4.3.4节要求,计算利用风场模式进行30年的波浪后报模拟,并进行模式要素检验对比,提取各个区域范围内的每年有效

波高和跨零周期的最大值,并采用Weibull方法推算设计波要素。数值模式范围覆盖了西北太平洋和中国近海,并在近岸和岛屿附近加密。模式结果输出各格点逐时的有效波高、跨零周期和平均波向,用于模式验证和波要素统计。最后通过在各海域设置的浮标提取观测资料,将2016年各锚地位置停泊的浮标观测有效波高与FVCOM模型模拟结果进行对比,发现FVCOM模型可以较好地模拟各海区的波浪过程,特别是大浪过程。

利用高分辨率的风场模式连续模拟30年序列的4个锚地区域的风速年最大极值,并基于Weibull型分布推算不同重现期的风速极值,四锚地风速重现期推算结果如下表3所示。

波浪参数首先输入由风场模式计算的各天气过程中每小时网格点上的风向、风速,计算出相应时刻格点上的有效波高、对应的周期和浪向。而后统计30年的有效波高,跨零周期数据,选取锚地范围内每年的最大值作为极值波高和周期推算的样本数据。其中,锚地A统计7—9月,常浪向为SSE和SE,锚地B统计6月和10月,常浪向为ENE和S,锚地C统计4、5、11月,常浪向为ENE、NE和E,锚地D统计1—3月和12月,常浪向为ENE和NE。根据所列样本,用Weibull方法推算工程海域处的不同重现期的有效波高和跨零周期,波浪要素重现期如表4所示。

表 3 四锚地风速重现期推算结果
Tab. 3 Calculation results of return period of wind speed at four anchorages

锚地 Anchorage	要素 Element	重现期 Return period/year					
		1	5	10	20	25	50
锚地 A Anchorage A	风速 Wind speed/(m/s)	14.95	22.96	25	26.82	27.37	29
	常风向 Direction of prevailing wind	东北 NE					
锚地 B Anchorage B	风速 Wind speed/(m/s)	15.53	22.38	24.56	26.6	27.23	29.14
	常风向 Direction of prevailing wind	东北和东北北 NE and NNE					
锚地 C Anchorage C	风速 Wind speed/(m/s)	16.17	20.49	21.08	21.57	21.71	22.11
	常风向 Direction of prevailing wind	东北北和东北 NNE and NE					
锚地 D Anchorage D	风速 Wind speed/(m/s)	17.22	23.87	27.11	30.46	31.56	35.02
	常风向 Direction of prevailing wind	东北 NE					

注:风速为 10 分钟平均风速极值。

Notes: wind speed is maximum average wind speed in 10 minutes.

表 4 波浪要素重现期
Tab. 4 Return period of wave elements

锚地 Anchorage	要素 Element	重现期 Return period/a					
		1	5	10	20	25	50
锚地 A Anchorage A	有效波高 Significant wave height/m	2.36	3.79	4.27	4.69	4.82	5.2
	跨零周期 Cross zero cycle/s	5.97	7.50	7.93	8.29	8.40	8.71
锚地 B Anchorage B	有效波高 Significant wave height/m	2.63	4.03	4.62	5.20	5.38	5.93
	跨零周期 Cross zero cycle/s	5.93	7.45	7.9	8.27	8.38	8.7
锚地 C Anchorage C	有效波高 Significant wave height/m	2.71	3.61	4.01	4.40	4.52	4.90
	跨零周期 Cross zero cycle/s	6.67	7.54	7.88	8.19	8.29	8.57
锚地 D Anchorage D	有效波高 Significant wave height/m	3.70	4.16	4.27	4.36	4.39	4.46
	跨零周期 Cross zero cycle/s	7.04	7.35	7.43	7.49	7.51	7.56

计算海流要素,先对数据进行调和分析,把潮流和风海流等余流成分进行分离,然后分别计算最大可能潮流流速和多年一遇的余流流速,最

后进行叠加得到海流的极值参数。利用年极值样本采用 Weibull 方法推算工程海域处的各向不同重现期的流速。推算结果见表 5 所示。

表 5 各海域海流要素重现期
Tab. 5 Return period of current elements in each sea area

锚地 Anchorage	要素 Element	重现期 Return period/year					
		1	5	10	20	25	50
锚地 A Anchorage A	流速 Flow velocity/(m/s)	1.02	1.29	1.48	1.70	1.77	2.01
	常流向 Constant flow direction	东北东和西南西 ENE and WSW					
锚地 B Anchorage B	流速 Flow velocity/(m/s)	1.74	1.94	2.02	2.1	2.12	2.20
	常流向 Constant flow direction	东南南和西北北 SSE and NNW					
锚地 C Anchorage C	流速 Flow velocity/(m/s)	1.30	1.61	1.76	1.90	1.95	2.07
	常流向 Constant flow direction	东南东和西南西 ESE and WSW					
锚地 D Anchorage D	流速 Flow velocity/(m/s)	2.35	2.51	2.56	2.6	2.62	2.65
	常流向 Constant flow direction	西南和东北北 SW and NNE					

2.3 锚泊方式

30 万 t 养殖工船设计采用锚泊定位方式,为适应鱼类养殖环境条件,该养殖工船设计为多海域作业方式,随季节变更养殖海域,因此其系泊方式为

非永久性系泊,在台风等恶劣天气下可快速移动避险。为减小船体所受环境载荷,定位系泊拟采用单点系泊方式,因此该养殖工船能始终处于顶浪向作业工况,养殖工船锚泊布置如图 2 所示。海底采用



图2 养殖工船锚泊布置图

Fig. 2 Mooring layout of aquaculture vessel

大抓力锚定位,大抓力锚依靠养殖工船自身的锚机可进行起锚、抛锚作业,方便工船进行转场操作,锚

的具体类型和重量根据优化后的锚缆张力确定。

养殖工船锚链采用直径为 122 mm 的船用 3 级有档锚链,锚缆破断载荷为 9 990 kN,每 27.5 m 一节,锚链参数如表 6 所示。

2.4 规范要求

船体与锚泊的耦合动力分析主要限制条件为系泊缆张力、锚抓力以及船体的运动响应,由于船体的大幅长周期慢漂运动对船体、人员及作业限制较小,因此计算中系泊缆张力和锚抓力是主要关心的问题。

表 6 锚缆属性

Tab. 6 Anchor cable properties

锚缆属性 Anchor Cable Properties	缆长 Cable length/m	直径 Diameter/mm	空气中质量 Mass in air/(kg/m)	水中质量 Mass in water/(kg/m)	轴向刚度 Axial stiffness/N	破断拉力 Breaking force/kN
数值 Value	100~1500	122mm	32.6	28.3	1.5e9N	9990

锚缆最小安全系数参考 API RP 2SK 规范^[12]和《CCS 海上移动平台入级规范》规范^[13]要求,系泊缆张力必须满足一定的安全系数。系泊线破断载荷与最大设计张力的比值为安全系数(SF),即:SF=破断载荷/最大设计张力。本计算中所列出的结果均是考虑了动力放大系数之后的结果,属于动态计算,因此采用动态计算的正常作业工况最小安全系数为 1.67。

3 计算结果

3.1 船体 RAO

船体锚泊的耦合动力分析基于 Orcaflex 软件计算求解,计算中缆绳预张力约 10 t,其中波谱类型选取 JONSWAP 谱,并考虑风、浪、流环境力综合作用进行锚泊状态下的运动时域分析,得到锚缆的受力时历曲线,最后按照 3 h 回归周期获得锚缆的最大张力和船体运行响应。

由图 3 可知,纵荡和横荡对低频波浪较敏感,响应频率区间小于 0.6 rad/s 和 1.5 rad/s,其中迎浪和随浪工况对纵荡影响最大,横浪向影响几乎为零,而横浪工况对横荡影响最大,迎浪和随浪影响几乎为零。垂荡运动对于 90 度方向的波浪入射较敏感,其最大峰值出现在 0.52 rad/s。横摇、纵摇敏感频率约 0.5 rad/s,即船体横摇、纵摇运动周期在 10 s 附近,且横摇响应幅值远大于纵摇,横浪向对横摇运动影响较大,而侧向波浪对纵摇影响较大。对于首摇运动,迎浪和随浪向影响较

小,而对艏斜浪和尾随浪较敏感,敏感频率区间小于 1 rad/s,峰值出现在 0.4 rad/s。

船体 3 个平移运动自由度(横荡、纵荡及垂荡)的幅值响应算子远大于旋转运动 3 个自由度(横摇、纵摇及首摇)的幅值响应算子,因此可论证船体的平面运动响应为限制条件。

3.2 锚泊计算

计算环境条件依据上述环境条件数值模拟结果,并结合风浪等级情况选取。由模拟结果可知,重现期 5 年的最大环境载荷与 6 级海况相仿,因此计算中以 6 级海况作为输入条件,进行锚泊时域动态分析,具体计算条件如表 7 所示。

由于锚链长度对工程造价和锚链张力有较大影响,因此根据选用的 AM3-122 型锚缆,开展锚链长度优化计算,计算中以锚链安全系数为依据,获得最优锚链长度。由于环境条件数值模拟结果显示,风浪流环境方向多集中在 NNE、NE 和 ENE,因此计算中都选用 180 度环境入射,此时所受环境载荷合力最大,数值仿真中参考 API RP 2SK 规范规定计算 5 个波浪种子,计算锚链长度如表 8 所示。

由表 9 计算结果可知,随着锚链长度的增加,锚链张力均值逐渐减小,锚链的安全系数增大。结果表明,当锚链长度大于 440 m 时,锚链安全系数大于 1.67,而小于 385 m 时小于 1.67;而当锚链长度小于等于 385 m 时,躺地段长度为 0,即锚在该工况下均出现上拔力,因此结合锚链最大张力和躺地段长度结果,锚链长度选取 440 m 较合适。

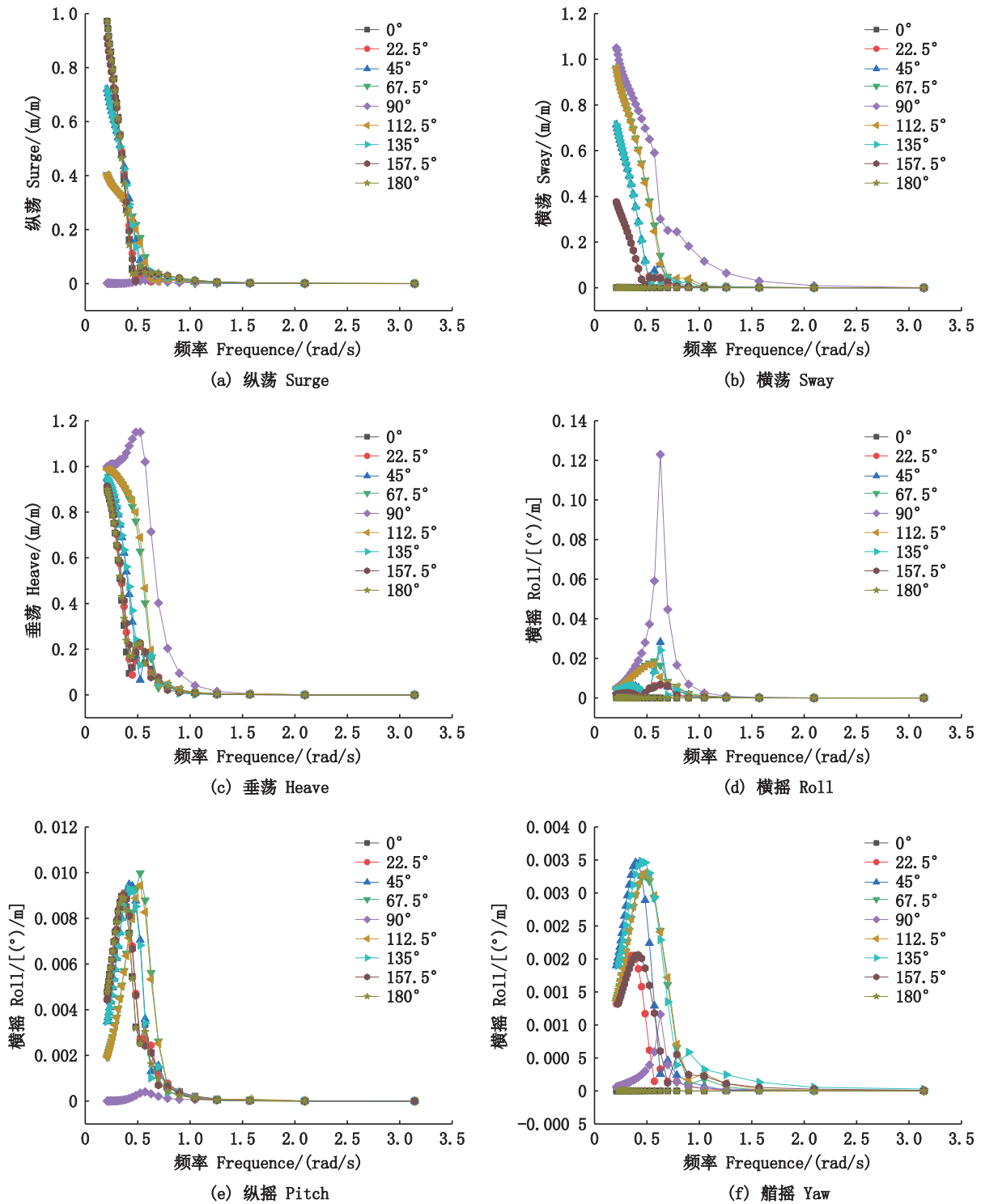


图3 船体运动幅值响应算子(RAO)
Fig. 3 Response amplitude operator (RAO)

表7 计算环境条件
Tab. 7 Calculate environmental conditions

环境要素 Environmental factor	平均风速 Average wind speed/(m/s)	有效波高 Significant wave height/m	谱峰周期 Spectral peak period/s	流速 Current speed/(m/s)	水深 Water depth/m
6级海况	20	4.5	9	2	70

表8 计算工况
Tab. 8 Calculated working condition

锚链长度 Chain length/m	880	715	660	550	495	440	385	330
工况 Working condition	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	LC7	LC8

表9 缆链张力最大值
Tab. 9 Maximum tension of cable chain

工况 Working condition	系泊链 Mooring chain/kN						安全系数 Safety factor
	种子1 Seed 1	种子2 Seed 2	种子3 Seed 3	种子4 Seed 4	种子5 Seed 5	均值 Mean value	
LC1	4 105	5 245	4 196	3 107	4 862	4 303	2.32
LC2	4 352	5 465	4 664	3 232	5 206	4 584	2.17
LC3	4 390	5 533	4 965	3 555	5 275	4 744	2.1
LC4	4 537	5 773	5 120	3 659	5 460	4 909	2
LC5	4 605	5 906	5 212	3 709	5 630	5 013	1.99
LC6	4 669	6 164	5 460	3 281	5 895	5 094	1.96
LC7	5 101	6 871	6 440	4 573	7 008	5 998	1.665
LC8	6 710	9 164	7 710	4 820	6 312	6 944	1.43

3.3 锚设计

根据地质资料,锚地A、锚地B、锚地C区域海底底质条件主要以淤泥为主;锚地D海底条件以泥沙混合为主。对于本船单点系泊系统,应选用大抓力锚为宜^[14]。参照API RP 2SK规范7.4.1节要求,采用动力分析时,移动锚泊的锚抓力安全系数取0.8。因此根据上节计算最大锚链张力为6 164 kN,锚抓力最小值为4 931 kN。

参考API RP 2SK规范(附录D拖曳锚设计图),由锚在淤泥(软泥)中的抓力系数曲线可知,该船选用史蒂夫帕瑞斯锚(Stevpris)最好,其他锚自重太大。以上计算锚抓力最小为4 931 kN,约503 t,锚重最小应为22.7 t,约22 700 kg。

4 结论

本文开展新型30万t深远海养殖工船锚泊系统设计及优化,通过各海域环境载荷模拟,利用Orcaflex软件建立养殖工船-锚泊的耦合分析模型,开展新型养殖工船深远海养殖工况的锚泊系统分析,结合API RP 2SK和《海上单点系泊装置入级与建造》规范,选择合适的锚链安全系数,获得最优锚链参数,计算获得:

(1)锚链长度对锚缆最大动态张力有较大影响,锚链长度越长锚链安全系数越大,平均最大张力越小。当锚链长度大于440 m时,锚链安全系数为1.96,躺地段长度大于0,均满足要求,因此该锚泊方案最优锚链长度为440 m。

(2)本设计中选用22.7 t史蒂夫帕瑞斯锚,锚抓力满足API RP 2SK关于移动平台动态载荷分析下的安全系数大于0.8的要求。

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): N14-N20.
PAN Y. Development and design requirements of deep-sea aquaculture equipment in China [J]. Ship Engineering, 2021, 43(4): N14-N20.
- [2] 刘敏. 大型养殖工船运营实践与展望[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): N8-N13.
LIU M. Operation and prospect of large aquaculture vessel [J]. Ship Engineering, 2021, 43(4): N8-N13.
- [3] 王芳芳. 船型桁架结构深海养殖渔场动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
WANG F F. Experimental study on dynamic characteristics of deep-sea aquaculture fishery with ship-type truss structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [4] 纪毓昭, 王志勇. 我国深远海养殖装备发展现状及趋势分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(s2): 1-4, 82.
JI Y Z, WANG Z Y. Analysis and trend of deep-sea aquaculture development in China [J]. Ship Engineering, 2020, 42(s2): 1-4, 82.
- [5] 徐皓, 刘晃, 徐琰斐. 我国深远海养殖发展现状与展望[J]. 中国水产, 2021(6): 36-39.
XU H, LIU H, XU Y F. Current situation and prospect of China's far-reaching marine aquaculture [J]. China Fisheries, 2021(6): 36-39.
- [6] 徐琰斐, 刘晃. 深蓝渔业发展策略研究[J]. 渔业现代

- 化, 2019, 46(3): 1-6.
XU Y F, LIU H. Research on development strategy of deep ocean fishery [J]. Fishery Modernization, 2019, 46(3): 1-6.
- [7] 韩冰, 谌志新, 崔铭超, 等. 深远海养殖工船稳性设计准则及校核方法[J]. 船舶工程, 2020, 42(s2): 30-35.
HAN B, CHEN Z X, CUI M C, et al. Stability design criteria and checking methods of deep-sea aquaculture platform[J]. Ship Engineering, 2020, 42(s2): 30-35.
- [8] 穆璟宝, 隋江华. 基于IMO第二代完整稳性的养殖工船稳性[J]. 船舶工程, 2022, 44(3): 1-6, 47.
MU J B, SUI J H. Stability of aquaculture vessel based on IMO second generation intact stability [J]. Ship Engineering, 2022, 44(3): 1-6, 47.
- [9] 方舟, 徐红昌, 戴锦阳. 横摇运动下养殖工船多液舱流场特性数值分析[J]. 船海工程, 2021, 50(6): 41-45, 50.
FANG Z, XU H C, DAI J Y. Numerical analysis of flow field characteristics in muti-tanks of aquaculture vessel under rolling motion [J]. Ship & Ocean Engineering, 2021, 50(6): 41-45, 50.
- [10] HUANG X H, LIU H Y, HU Y, et al. Hydrodynamic performance of a semi-submersible offshore fish farm with a single point mooring system in pure waves and current [J]. Aquacultural Engineering, 2020, 90: 102075.
- [11] MA C, ZHAO Y P, BI C W. Numerical study on hydrodynamic responses of a single-point moored vessel-shaped floating aquaculture platform in waves [J]. Aquacultural Engineering, 2022, 96: 102216.
- [12] API recommended practice 2SK. Design and analysis of station keeping systems for floating structures [S]. American Petroleum Institute, 2005.
- [13] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
China Classification Society. Classification standards for offshore mobile platforms [S]. Beijing: People's Communications Press, 2012.
- [14] 叶邦全. 海洋工程用锚类型及其发展综述[J]. 船舶与海洋工程, 2012(3): 1-7.
YE B Q. Review of ocean engineering anchor type and development [J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012(3): 1-7.

Design and theoretical calculation of single point mooring system for 300 000DWT aquaculture vessel based on ocean wave simulation

ZHANG Chuntao^{1,2}, WANG Liang¹, WANG Qiao³

(1. *Fishery Machinery and Instrument Research Institute of Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China*; 2. *Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, Shandong, China*; 3. *CONSON CSSC(Qingdao) Ocean Technology Co., Ltd., Qingdao 266061, Shandong, China*)

Abstract: Ultra-large aquaculture vessel is a new direction for the development of deep-sea aquaculture industry. With a new anchoring system, it can be used to reduce environmental pollution, improve the quality of aquatic products, avoid the attack of natural disasters such as typhoons, and solve the problem of unsustainable development of traditional aquaculture industry. The mooring system of aquaculture vessel is not only different from the temporary mooring system of transport ship, but also different from the positioning mooring system of ocean engineering, and is closely related to the operation safety and cost control of aquaculture vessel. Therefore, the design and optimization analysis of the mooring system of ultra-large aquaculture vessel is very necessary and important. Based on the project of 300 000 t large aquaculture vessel, the design and optimization of single point anchoring system were carried out. WRF model and 3DVAR system were used to simulate the wind field, and the wind field models were used to simulate the annual maximum wind speed of the anchorage area in a 30-year series. Wind speed extremes in different recurrence periods were calculated based on Weibull type distribution, and wind field models were used to forecast waves for 30 years. FVCOM model was used to analyze the current. The time-domain analysis of hull and mooring system was carried out with the help of Orcaflex software, and the mooring system analysis of aquaculture vessel was carried out with the input of wave simulation results. The appropriate anchor chain parameters were obtained by theoretical calculation. The results show that: For the 300 000 t aquaculture vessel, the grade-3 anchor chains with 122 mm diameter and 440 m length meet requirements of mooring under level 6 sea conditions, and the safety factor of anchor chain tension is greater than 1.67, which is safe and feasible. It provides a reference for the design of the single mooring system of ultra-large aquaculture vessel.

Key words: ultra-large aquaculture vessel; ocean wave simulation; mooring optimization; theoretical calculation