



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403325

引用格式:郭宇,程世明,李阳,等.养殖工船外转塔单点系泊系统设计[J].科学技术与工程,2025,25(13):5351-5358.

Guo Yu, Cheng Shiming, Li Yang, et al. Design of the external turret single point mooring system of the vessel-shaped aquacultural farm[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5351-5358.

养殖工船外转塔单点系泊系统设计

郭宇¹, 程世明¹, 李阳¹, 刘晓雷²

(1. 中国船舶集团有限公司第七〇八研究所, 上海 200011;

2. 上海海事大学海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要 作为渔业转型升级和绿色发展的重要方向,养殖工船受到学术界和工业界的广泛关注。传统的多点系泊方式会导致鱼类生长环境较为恶劣,不利于其生长,因此养殖工船普遍采用单点系泊方式,但是现有研究主要关注其系泊方案优化和性能研究,对养殖工船单点系泊装置的设计研究较为罕见。基于尽可能减少改造主船体的要求,首先设计了某型养殖工船的外转塔单点系泊装置,详细阐述了系泊系统转塔装置、系泊装置、桁架结构、轴承装置等主要结构的工作原理。然后,采用三维势流理论结合水动力计算软件AQWA对养殖工船进行了水动力系数计算。最后,依据规范对风、浪、流的方向进行组合,采用船舶-系泊时域耦合动态算法对养殖工船及其单点系泊系统进行计算,得到了系泊完整作业和完整自存工况下的系泊缆张力、船舶六自由度运动。研究发现,风浪流非同向时养殖工船会产生较大的船摇、横荡和横摇运动,其值仍在合理范围内;在作业和生存工况下系泊缆张力是合理安全的,因此所设计的单点系泊系统具有良好的定位能力。

关键词 养殖工船; 外转塔单点系泊装置; 系泊缆张力; 定位能力; 设计

中图分类号 P751; 文献标志码 A

Design of the External Turret Single Point Mooring System of the Vessel-shaped Aquacultural Farm

GUO Yu¹, CHENG Shi-ming¹, LI Yang¹, LIU Xiao-lei²

(1. 708 Research Institute, Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011, China;

2. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

[Abstract] Recently, the vessel-shaped aquacultural farm has received much attention from the academia and industry because of its importance in promotion and sustainability of marine fishery. Polluted surroundings unsuitable for fish growth are always introduced by traditional multiple point mooring system. Therefore, single point mooring system is more suitable for the aquacultural farm. In recent years, mooring scheme optimization and performance assessment was frequently investigated in most existing literature, while studies on design of the single point mooring system are rare. Based on the requirement of reducing hull reconstruction, an external turret single point mooring system was proposed, which is composed of the turret device, the mooring anchor, the truss structure and the bearings. And their working principle were also clearly illustrated. Then, three dimensional potential theory was applied to obtain the hydrodynamic coefficients of the ship by use of the software AQWA. Finally, in order to verify the positioning ability of the mooring system under both operational and survival conditions, the direction of wind, wave and current was combined according to the rules, and time-domain coupling analysis of the farm-mooring system was carried out. From the numerical results, it can be seen that yaw, relatively large sway and roll motions will be induced due to different direction of the wind, current and wave. The mooring line tension is adequate and safe under all conditions, indicating that this proposed single point mooring system exhibits good positioning performance.

[Keywords] vessel-shaped aquacultural farm; external turret single point mooring device; mooring line tension; positioning capability; design

传统的海洋水产养殖装备主要是网箱,一般情况下网箱的活动区域较为固定,容易造成海洋环境污染,同时装备受环境载荷影响也较大。养殖工船是一种新型海上结构物,也是发展现代海

洋渔业养殖的一种重要装备,目前常见的结构型式有船型桁架式和船载舱式,与养殖网箱相比,养殖工船更便于移动,可有效改善工船周围的水体质量^[1]。

收稿日期: 2024-05-07 修订日期: 2025-01-10

基金项目: 国家工信部高技术船舶科研项目(MC-202015-H02)

第一作者: 郭宇(1993—),男,汉族,湖北荆门人,硕士,高级工程师。研究方向:船舶舾装工程与锚泊定位系统。E-mail:maric-guoyu@foxmail.com。

养殖工船系统设计研究是近年来学术界和工程界的热点,相关研究主要集中在以下4个方面。

(1) 养殖工船舱内流场和温度场研究。宋协法等^[2]采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法对养鱼舱内的温度场和流场进行了分析,并优化了舱室尺寸和形状。方舟等^[3]在前人研究基础上增加考虑了横摇和多液舱,发现横摇运动对舱内流场影响非常显著,多液舱的影响同样明显。崔铭超等^[4-5]的研究发现纵摇以及船体外形对流场的影响同样很大,并且呈正相关。赵玲菲等^[6]展开折角比对养殖工船舱内流场特性的影响研究,发现折角比控制在0.25~0.4范围内可有效提高养殖空间利用率。

(2) 基于耐波性和功能性要求的主船体设计研究。中国船级社的潘滢等^[7]提出,养殖工船不同于常规船型,在稳性、结构、锚泊、航行等方面设计时均需要考虑鱼类生活习性的要求。李志雨等^[8]采用模型试验和CFD相结合的方法对一艘养殖工船开展耐波性研究,发现舱内自由液面效应及载液量都会增大横摇固有周期,并减小横摇运动幅值,但是对养殖工船的纵摇运动影响较小。韩冰等^[9]、Tao等^[10]依托养殖工船实际设计项目,基于三维势流理论结合频域和时域仿真分析,研究发现1~5级海况下该船耐波性能表现良好,但是6级海况下船舶摇摆角度超出标准。

(3) 风电设备对养殖工船性能影响研究。由于养殖工船运营会消耗大量能源,因此在船体甲板加装风电设备是个可能的解决方案。张春涛等^[11]研究了加装风电设备的养殖工船稳性,发现采用传统经验公式计算得到的养殖工船横摇角度比直接计算结果小,安装风电后稳定性减小10%。Liu等^[12]在考虑了气动、风机的弹性变形以及网具弹性等因素基础上,研究了养殖工船动力响应与风机发电功率之间的相互影响,并论证其可行性。

(4) 养殖工船的系泊分析研究。传统的养殖网箱一般采用多点系泊形式,因此有一部分的养殖工船系泊研究仍然采用多点系泊。Wang等^[13]利用遗传算法和船舶-系泊耦合时域分析方法建立了一套养殖工船系泊优化模型,并对8点系泊方式优化与试验结果对比验证。Yu等^[14]基于势流理论和莫里森方程研究了8点系泊养殖工船的波流工况、漂浮工况和坐底生存工况下的系泊性能,发现钢链和纤维绳混合系泊缆可以显著降低系泊索张力。邓映雪^[15]研究发现桁架和网衣对养殖工船运动和系泊张力的影响在极端工况下超过20%,因此建模时需要得到重视。刘昌凤等^[16]还研究了缆间角对养殖

平台运动响应和系泊张力的影响,发现缆间角为22.5°时系泊性能最优。

为了提高养殖工船的应用海况等级、扩大可养殖海域、改善养殖鱼类的生长环境,学者们建议采用起源于海洋油气平台的单点系泊系统,利用其风标效应在风浪流作用下做360°全方位旋转^[17]。Li等^[18]研究发现,对于近海的单点系泊养殖工船,随着水深减小,船舶的波频运动会明显下降。吴元紧等^[19]针对某型船型桁架式养殖工船,对比了单点双侧“Y”字形系泊和“一”字形系泊方案的优劣势。张新昊等^[20]对比研究了深海船型桁架式养殖工船组式系泊和均布散射式系泊,发现深海作业时3×2组式系泊方案更优。Li等^[21]开展了6×1均布散射外转塔系泊优化研究,通过时域全耦合分析方法和优化算法结合,对系泊缆规格和系泊半径进行优化。Hoiland^[22]也基于SIMO-Riflex软件建立水下动力模型并开展了相关技术研究。

从上述研究可以发现,目前学术界对于养殖工船的研究主要关注在舱内流场和温度场研究、主船体设计研究、风能设备对养殖工船性能影响研究以及其系泊系统性能研究等。在系泊系统方面,现有研究主要关注多点系泊方案对比优化和单点性能研究,而对实现单点系泊的装置设计研究较少,这恰好是单点系泊养殖工船工程应用的关键点之一。

现重点研究单点装置的原理,根据养殖工船使用海域的海况条件、作业水深、船型特点、系泊定位要求等需求,设计一种外转塔式单点系泊系统,详细研究转塔装置、系泊装置、桁架结构、轴承装置等结构,进行时域耦合分析,并参照中国船级社相关规范对单点系泊系统完整作业工况和完整自存工况进行校核。

1 单点系泊系统方案设计

1.1 系泊方案设计

所研究的养殖工船采用一种简单、紧凑、经济的改进型外转塔式单点系泊系统,系统主要由系泊装置、桁架结构、转塔装置、锁紧装置、轴承装置等部件构成。外转塔式经济性单点系泊系统如图1所示。

1.2 系泊装置

系泊装置采用“无档锚链-钢缆-有档锚链-锚固”的系泊型式,共6根系泊缆(①~⑥),系泊装置布置图如图2所示。系统作业海域水深500 m,系泊半径1 500 m,锚泊装置采用3×2的型式,即3组系泊缆,每组两根。每组系泊缆间夹角为120°,每

组系泊缆中两根锚链夹角为 5° 。

系泊装置中每根系泊缆总长为 1 640 m, 分为 3 段, 第一段为长度 50 m、直径 92 mm 的无档锚链, 第二段为长度 500 m 直径、110 mm 的 6×19 股钢缆, 第三段为长度 1 090 m、直径为 92 mm 有档锚链, 系泊缆参数如表 1 所示。

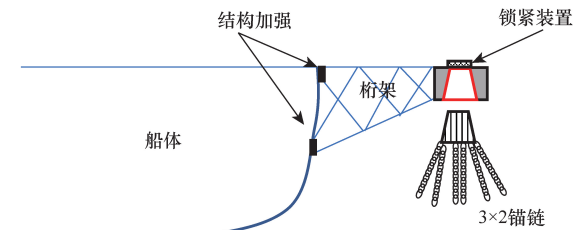


图 1 养殖工船外转塔式经济型单点系泊系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of external turret economical single point mooring system of aquacultural farm

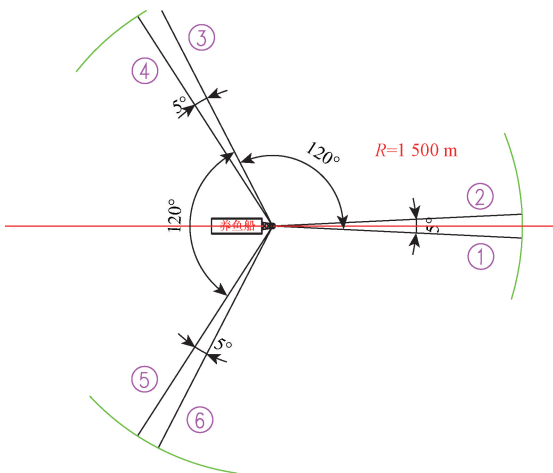


图 2 系泊装置布置图
Fig. 2 Mooring arrangement for the farm

表 1 系泊缆分段参数表

序号	第 1 段	第 2 段	第 3 段
类型	无档锚链	钢缆	有档锚链
长度/m	50	500	1 090
直径/mm	92	110	92
空气中质量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	168.4	48.3	185.4
水中质量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	146.9	42.1	161.2
刚度/MN	722.8	488.8	854.9
破断强度/kN	7 722	7 814	7 722
材质标准	R3	GB/T 33364—2016	R3

1.3 桁架结构

桁架结构起连接养殖工船与转塔浮筒的作用。桁架结构位于养殖工船船部, 采用圆管桁架式结构, 材料为海洋工程中常用的 Q355 低合金高强度结构钢。桁架结构的底端连接到养殖工船的船部, 并在节点位置进行局部结构加强, 桁架结构向船体

外伸出 20 m, 防止船艏底部与锚链刮碰; 在桁架顶端布置桁架平台, 桁架平台内部布置有锥形孔, 其形状与锥形浮筒外壳体契合, 桁架平台与锥形浮筒通过两列滚珠轴承连接接触。

桁架结构俯视图和侧视图如图 3 所示。

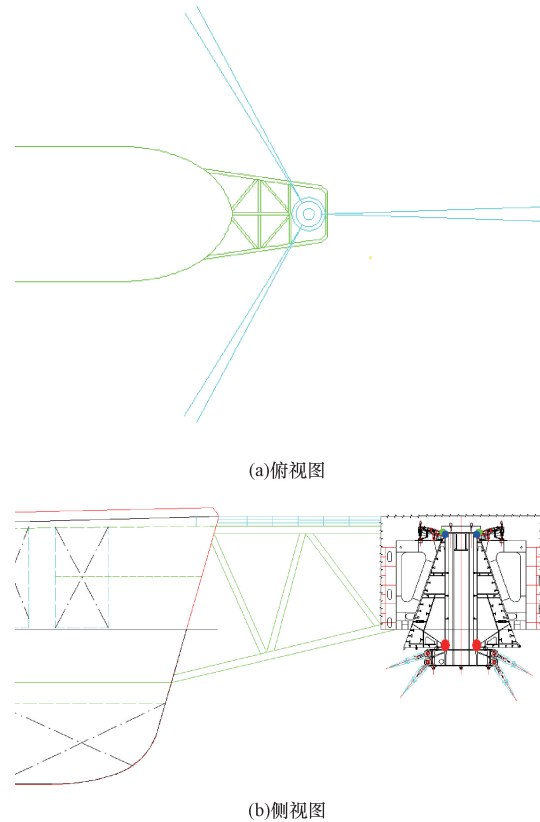


图 3 桁架结构图

Fig. 3 View of the truss structure

1.4 转塔装置

外转塔单点系泊系统的核心是转塔装置。转塔装置的轴芯转塔连接锚固系统, 转塔装置外壳通过锁紧装置与船体链接起来。通过轴承装置上下端的两组轴承, 转塔装置能够围绕转塔轴芯自由旋转。

转塔装置有两个主要特点: 一是作为系泊系统与养殖工船船体的连接, 而且可以设计成可解脱形式; 二是可以利用浮筒的浮力, 在安装时减少上拉力, 在养殖工船解脱后为转塔和锚系提供浮力。转塔装置如图 4 所示。

转塔装置高约 11.50 m, 其中与桁架平台链接高度约 8.00 m。上端与锁紧装置位置直径 3.50 m, 下端与桁架平台链接位置直径 9.00 m, 转塔轴心直径约 2.8 m。

1.5 轴承装置

转塔上端主旋转轴承采用两列滚柱式轴承, 滚柱轴承稳定可靠, 承受荷载能力强, 保养简单。转

塔下端采用滑动轴承,滑动轴承接触面间不需要其他结构,靠接触面间的相对滑动释放转动扭矩。本文方案滑动轴承为自润滑结构,轴承装置如图5所示。

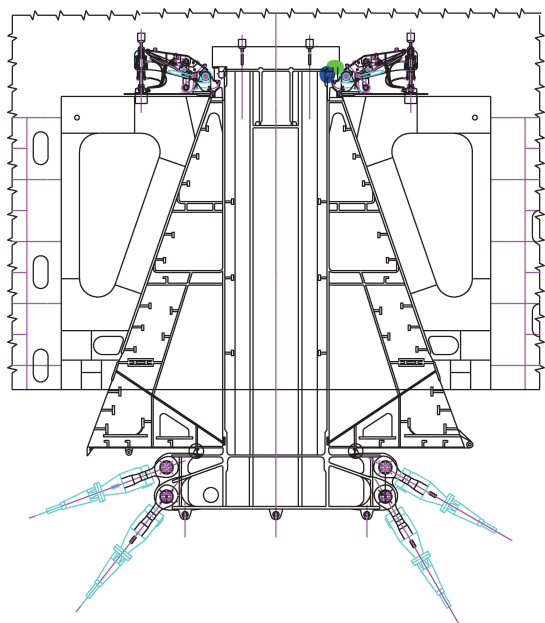


图4 转塔装置结构图

Fig. 4 Structure diagram of the turret device

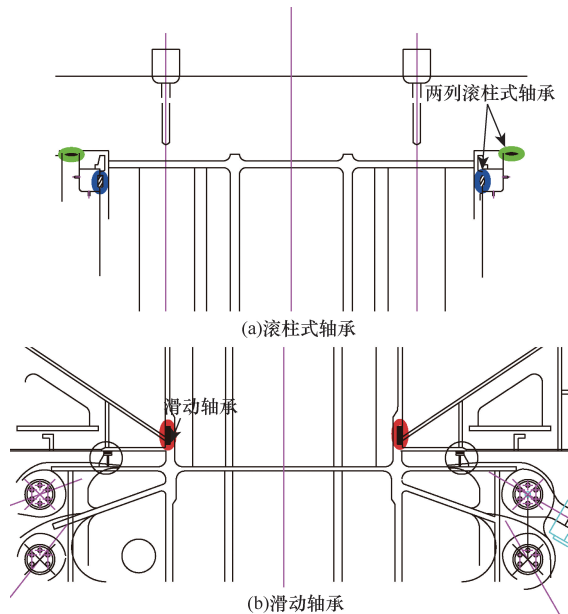


图5 转塔装置方案中轴承

Fig. 5 Bearings in the turret device scheme

1.6 锁紧装置

锁紧装置位于转塔装置的上端,由锁紧结构、液压驱动装置、连接管线、附属机械件等组成。在浮筒提升后,通过锁紧装置锁紧,并保持预定的拉力。锁紧装置如图5所示。

2 单点系泊时域耦合分析

2.1 养殖工船主尺度

养殖工船总长 258.2 m,型宽 44 m,型深 22.8 m,设计吃水 14 m,船中段左右各 8 个舱室,养殖工船的主要参数如表 2 所示。

采用 ANSYS 软件中的 AQWA Line 模块对养殖工船进行水动力计算,计算浪向 $0^\circ \sim 180^\circ$,每 15° 一个间隔,波浪周期取值范围为 4 ~ 40 s。AQWA Line 模块是利用基于自由液面格林函数^[23-24]的三维势流理论对浮体水动力进行求解,对养殖工船的湿表面用一系列微小面单元来表示。由于船体关于中纵剖面对称,为了提高计算效率,只对半船体进行了网格划分^[25-26],湿表面网格如图 6 所示。为了测试计算网格的收敛性,设置了 3 组网格密度(2.5、2 和 1.5 m)进行了计算,发现 2 m 和 1.5 m 网格的计算结果基本一致,误差小于 2%,因此研究后续均采用 2 m 的网格计算结果。

表 2 养殖工船主要参数

Table 2 Main parameters of aquacultural farm

序号	项目	实尺度
1	总长 L/m	258.2
2	垂线间长 L_{pp}/m	250.557
3	型宽 B/m	44
4	型深 H/m	22.8
5	设计吃水 T/m	14
6	重心坐标/ m	(125.31, 0, 11.78)
7	初稳性高 GM_0	7.12
8	自由液面修正后的初稳性高 GM/m	5.8
9	排水量 M/t	138 971.7
10	垂荡、横摇、纵摇固有周期/ s	(10.47, 13.31, 9.34)
11	惯性半径 $R_{xx}, R_{yy}, R_{zz}/m$	(13.679 7, 61.525 4, 62.327 4)
12	惯性半径 $R_{xy}, R_{xz}, R_{yz}/m$	(1.590 4, 5.209, 0.529 2)

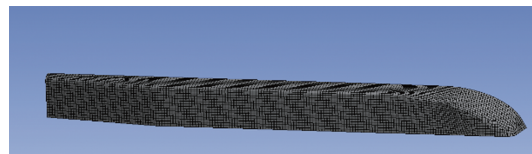


图6 半船体湿表面网格

Fig. 6 Meshes of wet surface of half hull

2.2 时域耦合分析

考虑船与单点系泊系统之间的耦合效应,采用时域耦合计算可以精确分析养殖工船在海洋环境荷载作用下运动幅值与锚链系泊力。养殖工船在不规则波中的运动可视为平稳随机过程,参考海洋工程浮式结构物的工况设定^[27-29],采用模拟时长为 3 h 的极值结果进行分析。在分析养殖工船的运动响应时,考虑的参数有船的质量、静水回复力、附加

质量与辐射阻尼、风浪流荷载等。根据船舶与单点系泊系统间的非线性耦合效应, 研究单点系泊系统在自身重力、流体拖曳力、边界约束条件及养殖工船在外力作用下的运动。

基于卡明斯方法^[30-31], 时域耦合分析中的运动方程如下。

$$(\mathbf{m} + \mathbf{A}_\infty) \ddot{\mathbf{x}}(t) + \int_0^t \mathbf{h}(t - \tau) \ddot{\mathbf{x}}(\tau) d(\tau) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式(1)中: \mathbf{m} 为养殖工船质量矩阵; \mathbf{A}_∞ 为无穷大频率的附加质量矩阵; $\mathbf{h}(\cdot)$ 为养殖工船考虑自由表面效应记忆的时延函数矩阵; \mathbf{K} 为养殖工船静水恢复力矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为养殖工船外力矩阵(环境力, 系泊力)。运动方程中养殖工船环境力有风、浪、流荷载和单点系泊系统的系泊力。其中养殖工船受到的风力与流力假定为定常力, 海浪为不规则波。

Orcaflex 软件是一款海洋工程动力学分析软件, 被广泛用于海洋工程缆索动力分析, 可解决系泊、系泊疲劳等问题^[32-34]。在 Orcaflex 软件中建立养殖工船与系泊系统的模型, 养殖工船采用船舶单元模拟, 通过添加风浪流环境条件实现环境载荷的模拟。系泊缆采用莫里森单元模拟, 一方面可以实现养殖工船的定位效果, 另一方面也可以准确求解系泊缆上的拖曳力和惯性力。养殖工船艏部的外延桁架外端设置与养殖工船固结的 6 自由度浮子模拟其重量及位置。利用另一个 6 自由度浮子模拟单点装置, 养殖工船与单点装置之间相互转动采用约束单元模拟, 从而实现整体系统的风标效应, 模型如图 7 所示。

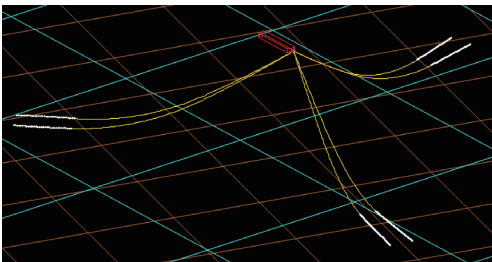


图 7 养殖工船与系泊系统耦合分析模型

Fig. 7 Coupling analysis model of farm and mooring system

2.3 工况组合

根据中国船级社《海上单点系泊装置入级规范》(2021), 对于带有快速解脱功能的定位系泊系统, 可以不计算破损自存工况, 因此主要对养殖工船系泊系统进行了完整作业和完整自存工况校核。

参考中国船级社《海上浮式装置入级规范》(2014) 的规定, 对依靠艏向控制具有风向标效应的浮式装置, 如果没有适用的方向分配场地数据, 则其风浪流方向组合可以用以下两种方法替代。

(1) 同向环境条件, 风浪流作用在同一方向, 作用方向与浮式装置艏向夹角为 15° 。

(2) 不同向环境条件, 浪作用方向和浮式装置艏向夹角为 0° , 风与浪夹角为 30° , 流与浪夹角为 45° , 且风和流在浮式装置的同侧。

对于完整作业工况, 考虑风、流、波浪与养殖工船大夹角的情况, 组合出一种同向工况和 4 种不同向工况, 每个工况模拟时长为 3 h, 波浪随机种子数为 5, 从后续结果分析可以看到当波浪方向为 180° 、风向为 150° 、流向为 135° 时(工况 4) 的养殖工船和系泊系统最危险, 因此完整自存工况(工况 5) 也选择该环境力方向组合。具体工况组合如表 3 所示。

表 3 系泊完整作业和完整自存工况风浪流组合海况

Table 3 Combined sea states of wind, wave, and current for intact operation and intact survival conditions

工况序号	波浪方向/ ($^\circ$)	有义波高/m	谱峰周期/s	风向/ ($^\circ$)	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^\circ$)	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
完整作业 1	180	5.8	12	180	20.7	180	1.5
完整作业 2	180	5.8	12	180	20.7	135	1.5
完整作业 3	180	5.8	12	150	20.7	180	1.5
完整作业 4	180	5.8	12	150	20.7	135	1.5
完整自存 5	180	7.5	13.1	150	28.0	135	2.0

2.4 系泊缆张力设计标准

参照中国船级社《海上单点系泊装置入级规范》(2021) 规定: 系泊缆张力安全系数取决于设计工况及所采用的系泊分析方法, 在分析时应考虑系泊缆的腐蚀裕量和磨损。

当采用动力分析法时, 对于完整作业工况和完整自存工况, 锚链或钢丝绳张力的安全系数应分别不小于 2.25 和 1.67。张力安全系数 F 规定为

$$F = P_B / T_{\text{Max}} \quad (2)$$

式(2)中: P_B 为系泊缆的最小额定破断负荷, kN; T_{Max} 为计算得到的系泊缆最大张力, kN。

2.5 养殖工船运动计算分析

对于完整作业工况和完整自存工况, 各工况养殖工船 6 自由度运动最大极值统计如表 4 所示。可以看到, 在完整作业工况中, 工况 4 的养殖工船运动最大, 纵荡、横荡、艏摇最大极值分别为 16.00 m、17.72 m、 10.69° , 这是因为风浪流作用方向都不一致, 引起养殖工船较大的艏摇运动, 进而引起较大的船舶横荡运动。另外非同向的环境载荷也会造成较大的船舶横摇运动。对于完整自存工况 5, 纵

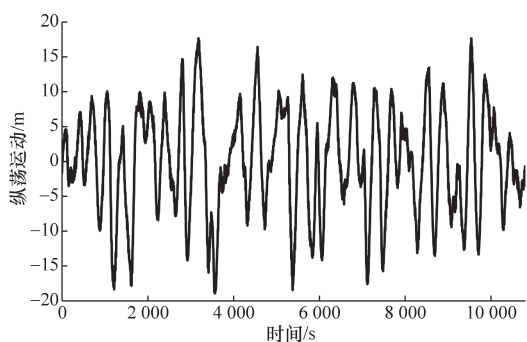
荡、横荡、艏摇最大极值分别为 25.73 m、21.22 m、13.42°, 远大于完整作业工况, 这是因为自存工况的环境条件更为恶劣。

养殖工船在完整自存工况 5 的纵荡、横荡和艏摇运动时历曲线如图 8 所示, 可以看到纵荡、横荡和艏摇的波动周期相对较大, 这是因为这 3 个方向运动的回复力主要由系泊系统提供。

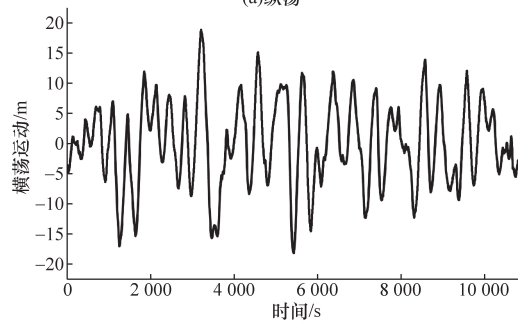
表 4 完整作业和完整自存工况养殖工船运动最大极值统计

Table 4 Statistics of maximum extreme value of movement of the ship under intact operation and intact survival conditions

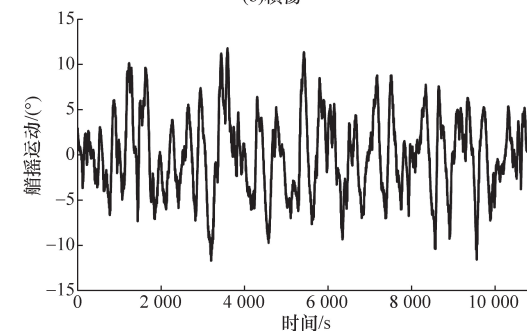
工况序号	纵荡/m	横荡/m	艏摇/(°)
完整作业 1	11.58	0.49	0.11
完整作业 2	15.53	14.54	9.72
完整作业 3	11.46	3.47	1.90
完整作业 4	16.00	17.72	10.69
完整自存 5	25.73	21.22	13.42



(a)纵荡



(b)横荡



(c)艏摇

图 8 养殖工船在完整自存工况 5 下的运动时历曲线

Fig. 8 Time history curve of motion of the ship under intact survival condition 5

2.6 顶部张力计算分析

各工况系泊缆的顶部张力极值如表 5 所示, 对于完整作业工况, 最大值 3 159.67 kN 出现在工况 4 的 1 号系泊缆上, 这是因为 1 号和 2 号系泊缆位于养殖工船的 0° 方向, 而环境载荷的主要作用方向是 180° 附近, 因此这两根系泊缆受力相对更大。相对应的安全系数为 2.44, 大于中国船级社《海上单点系泊装置入级规范》要求的 2.25。

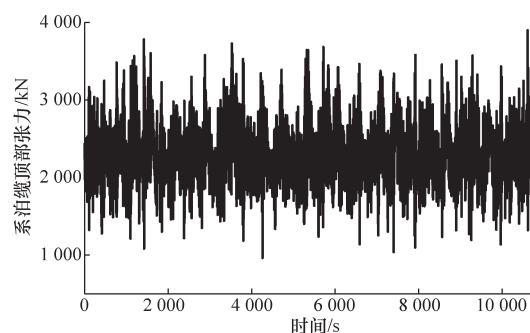
另外, 对于完整自存工况 5, 最大值 4 156.46 kN 也出现在 1 号系泊缆上, 对应的安全系数为 1.86, 大于规范要求的 1.67。因此系泊方案的系泊缆强度是足够的, 而且材料利用率较高。

完整自存工况 5 的 1 号和 2 号系泊缆顶部张力时历曲线如图 9 所示, 可以看到系泊缆顶部张力波动较大。图 10 给出了 1 号系泊缆张力功率谱密度,

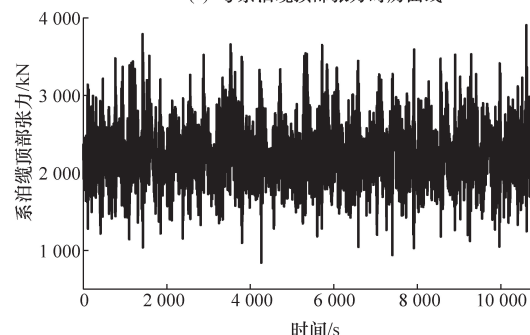
表 5 系泊缆最大顶部张力

Table 5 Maximum top tension of mooring lines

系泊缆序号	张力/kN				
	完整作业 1	完整作业 2	完整作业 3	完整作业 4	完整自存 5
1 号	2 985.73	3 121.62	2 979.33	3 159.67	4 156.46
2 号	2 998.44	3 108.75	2 982.25	3 142.89	4 089.44
3 号	2 280.28	2 345.30	2 262.47	2 319.36	2 759.29
4 号	2 266.55	2 319.26	2 250.21	2 294.66	2 720.14
5 号	2 320.26	2 772.72	2 358.75	2 869.11	3 477.44
6 号	2 342.89	2 850.04	2 385.09	2 946.66	3 576.59



(a)1号系泊缆顶部张力时历曲线



(b)2号系泊缆顶部张力时历曲线

图 9 完整自存工况 5 的系泊缆顶部张力时历曲线

Fig. 9 Time history curve of top tension of mooring lines of intact survival condition 5

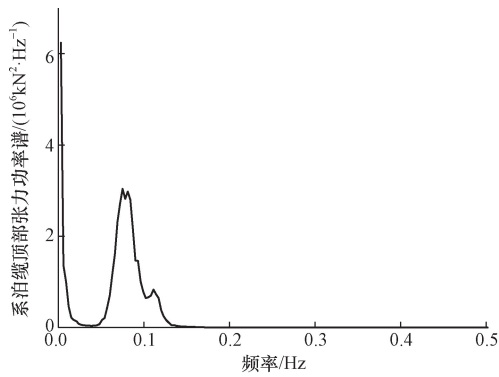


图 10 完整自存工况 5 的 1 号系泊缆顶部张力功率谱

Fig. 10 Spectral density of top tension of mooring lines 1 under intact survival condition 5

可以看到既有低频成分又有波频成分,其中低频张力是由养殖工船的纵荡、横荡和艏摇运动引起的,而波频张力是由养殖工船的垂荡、横摇和纵摇造成的。

3 结论

首先对养殖工船的单点系泊装置开展了设计研究。研究装置包括桁架结构、转塔装置、轴承装置、锁紧装置、系泊装置等,具备以下主要特性:通过桁架结构实现外转塔,不需要对主船体结构进行改造;转塔装置为可解脱浮筒,浮筒的浮力可减少安装拉力;转塔上端旋转轴承和下端滑动轴承实现外转塔 360° 旋转;锁紧装置可保证转塔与桁架结构的连接。

为了评估本文方案的系泊安全性能,依据规范对风、浪、流的方向进行组合,采用船舶-系泊时域耦合动态算法进行计算分析,研究结论如下。

(1) 对于船舶运动,风浪流非同向引起养殖工船较大的纵荡、横荡、艏摇运动极值分别为 25.73 m、21.22 m、13.42°,远大于风浪流同向的工况。

(2) 系泊缆顶部张力最大值也发生在风浪流非同向工况,在完整作业和自存工况下极值分别为 3 159.67 kN 和 4 156.46 kN,安全系数分别为 2.44 和 1.86,均满足规范要求。因此在设计养殖工船外转塔单点系泊系统时,尤其需要关注风浪流环境非同向的工况。

参 考 文 献

[1] Li L, Jiang Z, Ong M C, et al. Design optimization of mooring system: an application to a vessel-shaped offshore fish farm[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109363.

[2] 宋协法,郑书星,董登攀,等. 利用 CFD 技术对养殖工船养鱼水舱温度场和流场模拟及验证[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2018, 48(6): 37-44.

Song Xiefa, Zheng Shuxing, Dong Dengpan, et al. Simulation and verification of temperature field and flow field of fish tank of aqua-

culture ship using CFD technology[J]. *Journal of Ocean University of China: Natural Science Edition*, 2018, 48(6): 37-44.

[3] 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 Zhou, Xu Hongchang, Dai Jinyang. Numerical analysis of flow field characteristics of multi-tank tank of aquaculture vessels under roll motion[J]. *Marine Engineering*, 2021, 50(6): 41-45, 50.

[4] 崔铭超,王庆伟,张彬. 纵摇运动下船载养殖水体流场特性数值分析[J]. *船舶工程*, 2020, 42(10): 56-60, 132.

Cui Mingchao, Wang Qingwei, Zhang Bin. Numerical analysis of flow field characteristics of shipborne aquaculture water under pitching motion[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(10): 56-60, 132.

[5] 崔铭超,王靖,郭晓宇. 横摇运动下养殖工船水环境流场特性数值分析[J]. *中国造船*, 2020, 61(3): 204-205.

Cui Mingchao, Wang Jing, Gu Xiaoyu. Numerical analysis of flow field characteristics of water environment of aquaculture vessels under rolling motion[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(3): 204-205.

[6] 赵玲菲,薛博茹,赵云鹏. 折角比对养殖工船舱内流场特性的影响[J]. *渔业现代化*, 2024, 51(2): 22-31.

Zhao Lingfei, Xue Boru, Zhao Yunpeng. The influence of the bend ratios on the hydrodynamic characteristics in the tank of aquaculture vessel[J]. *Fishery Modernization*, 2024, 51(2): 22-31.

[7] 潘澄,陈新,田其. 海上可移动养殖工船设计要求浅析[J]. *中国船检*, 2020(8): 60-64.

Pan Ying, Chen Xin, Tian Qi. Analysis on the design requirements of offshore movable aquaculture vessels[J]. *China Ship Survey*, 2020(8): 60-64.

[8] 李志雨,郭卡佳,陶延武. 规则波作用下养殖工船的运动响应特性[J]. *船舶工程*, 2023, 45(5): 8-15.

Li Zhiyu, Gu Kajian, Tao Yanwu. Motion response characteristics of aquaculture vessels under the action of regular waves[J]. *Ship Engineering*, 2023, 45(5): 8-15.

[9] 韩冰,谌志新,崔铭超,等. 基于三维势流理论的深远海养殖工船耐波性能分析[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(6): 58-65.

Han Bing, Chen Zhixin, Cui Mingchao, et al. Analysis of seakeeping performance of deep-sea aquaculture vessels based on three-dimensional potential flow theory[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(6): 58-65.

[10] Tao Y, Zhu R, Gu J, et al. Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic response of an aquaculture vessel[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 279: 114505.

[11] 张春涛,蔡金延,丁仕风,等. 风电设备对系泊状态下养殖工船稳性的影响分析[J]. *江苏科技大学学报: 自然科学版*, 2021, 35(5): 1-7.

Zhang Chuntao, Cai Jinyan, Ding Shifeng, et al. Analysis of the influence of wind power equipment on the stability of aquaculture vessels under mooring[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2021, 35(5): 1-7.

[12] Liu H, Chen M, Han Z, et al. Feasibility study of a novel open ocean aquaculture ship integrating with a wind turbine and an internal turret mooring system[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(11): 1729.

[13] Wang L, Wang L, Cui M, et al. Design optimization of a mooring system for an offshore aquaculture platform[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(11): 2134.

- [14] Yu J, Cheng X, Fan Y, et al. Mooring design of offshore aquaculture platform and its dynamic performance[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 275: 114146.
- [15] 邓映雪. 桁架式养殖工船水动力及系泊系统优化分析[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2023.
Deng Yingxue. Optimization analysis of hydrodynamic and mooring system of truss aquaculture vessels [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2023.
- [16] 刘昌凤, 冯腾跃, 王子谦, 等. 系泊参数对半潜式养殖平台水动力特性的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(4): 698-706.
Liu Changfeng, Feng Tengyue, Wang Ziqian, et al. Influence of mooring parameters on hydrodynamic characteristics of a semi-submersible fish farm[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(4): 698-706.
- [17] 徐贺, 乔国瑞. 养殖工船养殖舱结构强度分析及优化设计[J]. *船海工程*, 2022, 51(6): 47-52.
Xu He, Qiao Guorui. Structural strength analysis and optimization design of breeding tank of aquaculture vessels[J]. *Marine Engineering*, 2022, 51(6): 47-52.
- [18] Li X, Yang J, Xiao L. Motion analysis on a large FPSO in shallow water[C]//ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference. Shanghai: ISOPE, 2003: ISOPE-I-03-034.
- [19] 吴元紧, 黄小华, 刘海阳, 等. 船型桁架结构网箱单点系泊受力试验研究[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(4): 118-125.
Wu Yuanjin, Huang Xiaohua, Liu Haiyang, et al. Experimental study on single-point mooring force of ship-type truss structure cages[J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(4): 118-125.
- [20] 张新昊, 窦培林. 单点系泊深海养殖工船水动力性能[J]. *中国海洋平台*, 2021(3): 40-45.
Zhang Xinhao, Dou Peilin. Hydrodynamic performance of single-point mooring deep-sea aquaculture vessels[J]. *China Offshore Platform*, 2021(3): 40-45.
- [21] Li L, Jiang Z, Ong M C, et al. Design optimization of mooring system: an application to a vessel-shaped offshore fish farm[J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109363.
- [22] Hoiland A V. Dynamic analysis of a vessel-shaped fish farm for open sea[D]. Norway: University of Stavanger, 2017.
- [23] Linton C M. Rapidly convergent representations for Green's functions for Laplace's equation[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1999, 455(1985): 1767-1797.
- [24] Liu Y, Iwashita H, Hu C. A calculation method for finite depth free-surface green function[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2015, 7(2): 375-389.
- [25] Liu Y, Cong P, Gou Y, et al. Enhanced Endo's approach for evaluating free-surface Green's function with application to wave-structure interactions[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 207: 107377.
- [26] Yang P, Gu X, Tian C, et al. Numerical study of 3D pulsating source green function of finite water depth[C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. San Francisco: American Society of Mechanical Engineers, 2014, 45516; V08BT06A061.
- [27] 韩旭亮, 段文洋, 谢彬. 深水浮式结构物系统时域耦合动力方法比较分析[J]. *中国造船*, 2016, 57(1): 149-159.
Han Xuliang, Duan Wenyang, Xie Bin. Comparative analysis of time-domain coupled dynamic methods for deep-water floating structure systems[J]. *Shipbuilding in China*, 2016, 57(1): 149-159.
- [28] 王兴刚. 深海浮式结构物与其系泊缆索的耦合动力分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
Wang Xinggang. Coupling dynamic analysis of deep-sea floating structure and its mooring cable[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [29] 张大朋, 郑锡巧, 朱克强. 深海单点系泊浮标的参数敏感性水动力分析[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(9): 1-6.
Zhang Dapeng, Zheng Xiqiao, Zhu Keqiang. Parameter sensitivity hydrodynamic analysis of deep-sea single-point mooring buoys[J]. *Mechatronics Engineering Technology*, 2023, 52(9): 1-6.
- [30] Cummins W E. The impulse response function and ship motions[J]. *Schiffstechnik*, 1962, 9: 101-109.
- [31] Chen X B. Hydrodynamics in offshore and naval applications-Part I[C]//Keynote Lecture at the 6th International Conference on Hydrodynamics. Perth: The University of Western Australia, 2004, 32(2): 211-253.
- [32] 魏行超, 刘统亮, 刘伟杰, 等. 多工况载荷作用下脐带缆终端承载能力计算研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(8): 3260-3271.
Wei Xingchao, Liu Tongliang, Liu Weijie, et al. Structural capacity calculation of umbilical termination head under multi-load[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(8): 3260-3271.
- [33] 高杰, 刘军鹏, 刘永波, 等. 运动监测装置对柔性立管整体性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(32): 13410-13416.
Gao Jie, Liu Junpeng, Liu Yongbo, et al. Effects of monitoring device on the global performance of flexible riser [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(32): 13410-13416.
- [34] 于超杰, 桑松, 石晓. 悬浮隧道管体运动对锚索涡激振动的影响规律[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(2): 807-815.
Yu Chaojie, Sang Song, Shi Xiao. Effects of monitoring device on the global performance of flexible riser [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(2): 807-815.