

文章编号: 1674-5566(2023)05-1048-11

DOI: 10.12024/jsou.20230604246

海洋牧场组合式无人监测船设计与试验

李俊¹, 李怀进¹, 汪振华², 林军², 张锦飞¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306)

摘要: 随着海洋牧场建设向纵深发展, 对海洋生态环境、渔业资源进行动态监测和评估变得尤为重要, 移动式自主监测是可行方案之一。针对现有监测方式效率低、灵活性差、成本高、运输投放困难等问题, 提出了可搭载多类型监测设备的组合式无人监测船。进行了船体结构设计和监测仪器安装机构设计, 考虑船体吃水载重及平稳性进行了配重机构设计; 基于计算流体力学方法对船体阻力性能进行仿真计算并完成了水下推进器选型, 对无人船连接桥结构受到浪高海况的影响, 进行了静力学强度有限元分析, 船体结构强度能够抵抗 4 级海浪。对样机开展了试验验证, 试验结果表明: 无人监测船各机构工作运行稳定无干涉, 设计吃水深度 0.25 m, 航速达 2.5 m/s, 能够胜任海洋牧场工作海况; 监测设备搭载后工作稳定, 可实时监控水下渔业资源、勘探水底地形、监测水体 pH、温度和溶解氧等数据。该研究为海洋动态、实时监测及数字化提供了技术支撑, 为海洋牧场组合式无人监测船的设计研究提供了一种低成本高可靠的实施方案。

关键词: 组合式; 无人船; 水环境监测; 框架结构; 设计试验

中图分类号: S 959 **文献标志码:** A

随着海洋牧场建设向纵深发展, 对海洋生态环境和渔业资源进行动态监测和评估、对特定海洋灾害进行预警, 变得尤为重要; 海洋环境要素的监测和渔业资源的统计与监控可以让管理者对海洋过去和当前的状况有较好的认识和把握, 构建海洋监测平台是必然的发展趋势^[1-2]。

由于具有动态性、复杂性和不确定性等特点, 海洋渔业资源和环境监测一直是技术难点之一^[3]。现有的监测方式多以实验室监测、浮标监测及设置固定监测站点监测为主^[4], 存在工作效率低、维护成本高、设备部署工程量大、灵活性差、自动化程度低等问题^[5-7]。无人船搭载监测设备的移动式监测技术, 可以有效应对以上问题。相对于实验室监测, 无须乘船人工取样, 具有更高的时效性与准确性; 相对于浮标监测及设置固定监测站点监测, 可以实现移动监测, 无须搭建大量设备, 监测范围更广, 大大降低监测工作的时间、人力、物力成本, 具有更高的作业效率、更

高的灵活性, 可以进入海况更加复杂的区域, 能在不适宜人工作业的恶劣水域进行监测工作, 降低作业风险。

美国、英国及意大利等国家均研发过用于水环境监测领域的无人船装备。美国 UOV 公司研发了利用太阳能、风能等新能源型的无人监测船, 可实现长时间续航^[8]; 意大利海洋机器人实验室研制出可进行水质采样和实时监测的小型无人船, 该船对螺旋桨进行了防水草设计^[9]。我国对于监测无人船技术也做了相关研究, 赵同强等^[10]将 ESM30 型采样监测无人船应用于城市内河水质监测, 蒋星宇^[11]基于无人船设计了一种采集浊度、溶解氧、酸碱度、电解质和氨氮含量的水质监测系统。

海洋牧场多选址于海湾近海区域, 水深范围为 0~20 m, 只在常规天气进行监测工作, 最大风力 3 级, 平均风速 3.8 m/s, 最大风速 5.4 m/s, 最高流速 0.8 m/s^[12], 最大海浪 2 级, 以微波与小波为

收稿日期: 2023-06-15 修回日期: 2023-08-11

基金项目: 国家重点研发计划“海洋牧场资源增殖与目标种管护技术”项目(2019YFD0901303); 上海市水产动物良种创制与绿色养殖协同创新中心项目(2021 科技 02-12)

作者简介: 李俊(1982—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为渔业工程装备。E-mail: junli@shou.edu.cn

通信作者: 张锦飞, E-mail: jf-zhang@shou.edu.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>

主,一般波高0~0.6 m,最大波高1.0 m。现有无人监测船主要有小型监测船和大型监测船两种,小型监测船船体强度小、动力不足且不易安装大型监测设备,不能应用于海洋牧场;大型监测船模具大、生产成本低,船体吊装、运输和投放困难,近海作业难度大,监测工作机动性受到很大影响。在海洋牧场监测工作中,亟需一款成本低、方便运输投放且具有多种监测功能的无人监测船;甲板结构能够安装多种监测设备,吊装中小型监测设备,纵向监测深度20 m;强度及动力性能适应海洋牧场海况,航行姿态稳定,抵抗3级风力和2级海浪。

本文针对海洋牧场环境监测需求,以实现多种监测功能、提高监测效率、增强无人监测船机动性为目标,结合无人船技术与监测技术,设计了一种船体可拆分组装,便于运输投放,便于安装多种监测设备的海洋牧场组合式无人监测船,并进行了性能测试与应用试验。

1 总体结构设计

1.1 总体方案设计

结合无人船技术与监测技术,设计一种船体及监测设备可拆分组装的海洋牧场组合式无人监测船。组合式设计既指船体组合式设计,又指监测船各机构模块化设计,除方便监测船运输、投放和增强其机动性外,还可以加速研究进程,降低研究经费,增加监测船的使用功能^[13-14]。无人监测船的设计与功能实现包括船体结构设计、推进器装置设计及监测设备的搭载等,提出以下设计方案:

(1)船体结构设计。综合海洋牧场工作环境及设备运输投放等问题,采用双体船结构形式,船体浮体分段式设计,配置浮体安装框架及连接桥结构。采用有限元分析软件对船体结构强度进行校核。

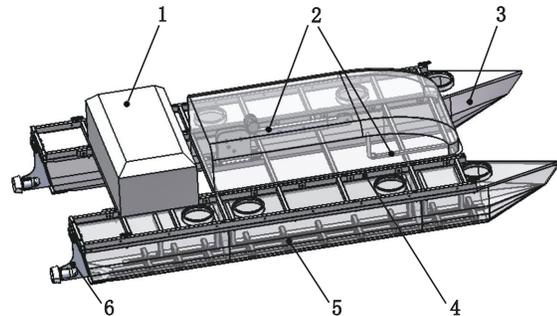
(2)推进装置设计。基于计算流体力学方法对船体阻力性能进行仿真计算,并以此为重要参

考依据进行水下推进器选型。根据推进器外形尺寸设计安装结构,并进行船体动力性能测试。

(3)监测机构设计。根据不同监测设备的外形尺寸及应用需求设计搭载范围可调节的升降机构;为工作方式不同的特殊监测设备设计旋转机构。无人船搭载监测设备进行监测机构适用性测试。

(4)配重机构设计。设计配重机构用于调节搭载不同设备时可能会产生的重心偏移及航行姿态不稳等问题。

基于以上设计方案,组合式无人监测船总体结构设计如图1所示。



1. 控制箱; 2. 监测装置; 3. 船体浮体; 4. 连接框架; 5. 配重机构; 6. 推进器装置。

1. Control box; 2. Monitoring device; 3. Hull float; 4. Connection frame; 5. Counterweight mechanism; 6. Propulsion device.

图1 组合式无人监测船结构图

Fig. 1 Combined unmanned monitoring vessel

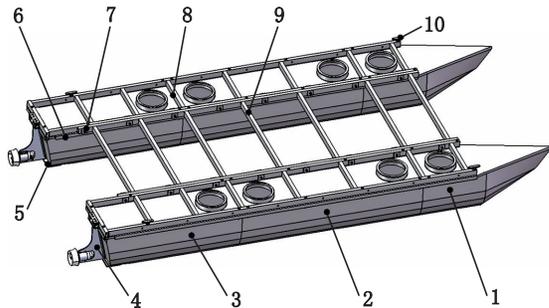
1.2 船体结构设计

无人船采取的结构形式对其耐波性、行驶阻力、运动稳定性等性能有很大影响,一般有单体船、双体船两种形式。双体船作为一种高性能船舶,相比常规单体船具有优良的横稳性、耐波性以及阻力性能^[15]。并列排布的两片体通过连接桥连接的结构形式既能降低模块单元体积又能提供足够大的甲板面积,为了便于安装控制箱及多种监测设备,并兼顾生产成本,本文采用双体船结构作为无人监测船船体。综合无人船工作环境、搭载设备体积与质量等因素,船体设计主尺度如表1。

表1 船体主尺度
Tab. 1 Hull main scale

项目 Project	总长 Overall length	总宽 Overall width	型深 Type depth	片体中心距 The center distance of the sheet	片体宽 Sheet body width	设计吃水 Design draft
尺寸 Size	4.2	1.9	0.45	1.5	0.4	0.25

图2为组合式无人船结构示意图。船体浮体由己烯和乙烯共聚物材料滚塑工艺加工而成,在冲击强度、刚度和抗外界应力龟裂性等方面具有出色的性能。每个片体由船首浮体、增浮浮体和船尾浮体前后拼接组合而成,每一段浮体均为单独密闭体,不会因为某一处破裂而失去整体浮力导致沉船,具有很高的抗沉性能;浮体分段设计,运输便利,同时减小模具体积,大大降低生产成本;船首圆弧型结构,浮体两侧流线型结构,可以减小水流阻力。这种组合式设计,使船体有很强的可扩展性。增加增浮浮体数量,可增加船体片体长度,配备对应框架,构建更大尺寸的无人船船体;去除增浮浮体,可以构建小型无人船船体。



1. 船首浮体; 2. 增浮浮体; 3. 船尾浮体; 4. 推进器装置; 5. 船底连接龙骨; 6. 飞边增强框; 7. 螺栓连接组件; 8. 船体连接架; 9. 连接桥框架; 10. 系泊羊角。

1. Bow float; 2. Increased floating float; 3. Stern float; 4. Propulsion device; 5. Bottom connecting keel; 6. Flash enhancement box; 7. Bolted connection assembly; 8. Hull connecting frame; 9. Connecting bridge frame; 10. Mooring horn.

图2 组合式无人船示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a combined unmanned ship

船体框架均采用6061-T6铝合金材料,质量轻、韧性高且抗腐蚀性能好,此外铝合金材料没有磁性,能够减少船体对电子罗盘和探测仪等设备的磁场干扰。船体框架装配细节如图3所示,船底连接龙骨通过螺栓与浮体底部螺栓预埋件相连,飞边增强框卡装于浮体侧面飞边,两种部件将三段浮体连接为一个整体片体;船体连接架通过螺栓与浮体及飞边增强框相连接,其中首尾外侧两螺栓处各配置一个系泊羊角,船体靠岸时用于栓接绳索;推进器装置设有腹板与船尾贴合,装置上端连接于船尾框架,装置下端连接于船底龙骨,水下推进器通过一对抱箍抱夹在装置内;连接桥框架搭置在飞边增强框之上,再通过螺栓连接组件与左右两船体连

接架相连,从而组合为双体船。双体船通过左右一对水下推进器正反转及差速旋转控制船体前进后退及转向。

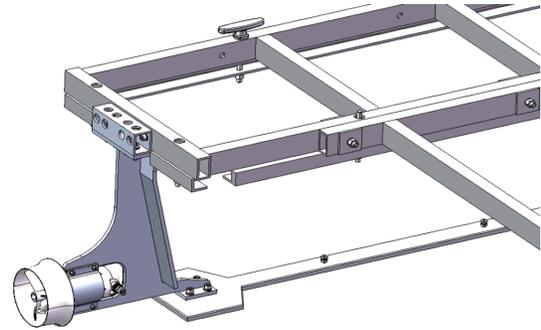


图3 框架装配细节图

Fig. 3 Frame assembly detail

1.3 监测机构设计

监测海洋牧场环境和生物资源是海洋牧场的重要工作,是维持海洋牧场可持续发展的基本前提,对于深入研究海洋牧场环境变化和生产力评估具有重要意义^[16]。海洋牧场常用的监测设备有声学多普勒流速剖面仪、自容式温盐深剖面仪、溶解氧传感器、PH传感器、温度传感器和声呐探测仪等仪器。

1.3.1 升降机构设计

声学多普勒流速剖面仪和自容式温盐深剖面仪等传感器设备用于测量指定深度分层水流的剖面信息。通过升降机构吊装监测设备,定长控制设备上升与下降的方式,能够满足此类型设备的工作需求。

升降机构(图4)主要由支撑架、电机、支撑杆和惰轮等部件组成。为每种监测设备配备相应尺寸的连接框架,连接框架与钢丝绳相连接,钢丝绳通过惰轮导向并缠绕在电机驱动轮上;通过控制电机的正反转实现释放或收缩钢丝绳长度,从而升降监测设备;监测设备上升或下降深度 H 通过控制电机驱动轮转动圈数实现。升降深度设计需求为20 m,升降速度设计需求为5~7 m/min,所搭载最重监测设备为30 kg。

深度 H 计算公式为

$$H = 2n\pi R \quad (1)$$

式中: n 为驱动电机转动圈数; R 为驱动轮半径,m。

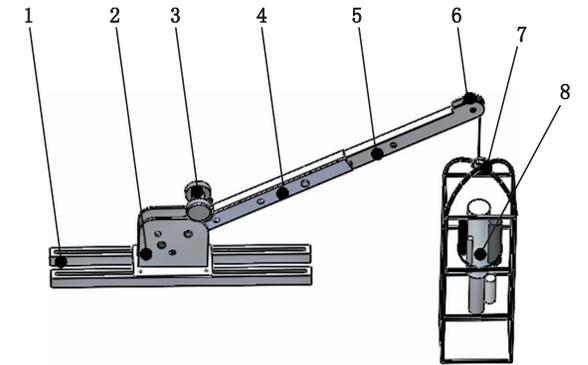
电机扭矩与监测设备质量关系计算公式为

$$T = mR \quad (2)$$

式中: T 为电机扭矩, $\text{kg}\cdot\text{cm}$; R 为驱动轮半径, cm ; m 为监测设备质量, kg 。

取监测设备质量 m 为 30 kg ,驱动轮半径设计为 5 cm ,代入公式(2),得电机所需扭矩为 $150\text{ kg}\cdot\text{cm}$ 。电机选取 $12\text{ V}/90\text{ W}$ 的 GPG 直流减速电机,扭矩为 $250\text{ kg}\cdot\text{cm}$,输出转速为 $18\text{ r}/\text{min}$,满足升降机构扭矩需求。取转速 $18\text{ r}/\text{min}$ 代入公式(1),得升降速度约为 $5.65\text{ m}/\text{min}$,满足升降机构速度设计需求。

升降机构设有不同挡位满足不同搭载设备的质量和体积。其中:支撑座、支撑杆及延长杆均设有多个销钉孔位,调节支撑座与支撑杆孔位配合可改变支撑杆俯仰角度;调节支撑杆与延长杆孔位配合可改变支撑杆吊装长度。两者配合最大可吊装高度为 1.5 m 的监测仪器。支撑座通过螺栓组安装在滑轨支撑杆上,安装位置可以前后移动,用于解决设备下降时与连接桥横梁产生干涉的问题。



1. 滑轨支撑杆; 2. 支撑座; 3. 电机; 4. 支撑杆; 5. 延长杆; 6. 惰轮; 7. 传感器连接架; 8. 监测设备。
1. Slide rail support rod; 2. Support base; 3. Motor; 4. Support rod; 5. Extension rod; 6. Idler; 7. Sensor connection frame; 8. Monitoring equipment.

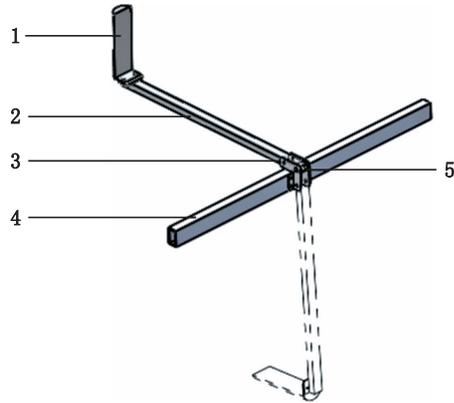
图 4 升降机构
Fig. 4 Lifting mechanism

1.3.2 旋转机构设计

CHIRP 声呐探测仪工作时探测仪工作面须浸没于水面之下,工作面垂直水面竖直向下探扫,本文设计了旋转机构配合 CHIRP 声呐探测仪工作。

图 5 为旋转机构示意图,其中实体为探测仪未工作时的待机状态,虚体为旋转后探测仪工作状态。声呐探测仪通过连接板与连接杆刚性连接,旋转架固定在船体横梁之上。旋转架开设 3 个销钉孔,连接杆末端开设 2 个销钉孔,连接杆末

端孔通过销钉与旋转架的销钉孔配合作为旋转轴。当探测仪待机时,连接杆旋转至上方孔位,通过销钉锁住,探测仪置于船体平面;当探测仪工作时,连接杆旋转至下方孔位,通过销钉锁住,此时探测仪浸没于水面之下,工作面竖直向下进行探扫工作。



1. CHIRP 声呐探测仪; 2. 连接杆; 3. 旋转架; 4. 无人船连接桥; 5. 销钉。
1. CHIRP Sonar detector; 2. Connecting rod; 3. Rotating frame; 4. Unmanned ship connection bridge; 5. Pin.

图 5 旋转机构
Fig. 5 Rotating mechanism

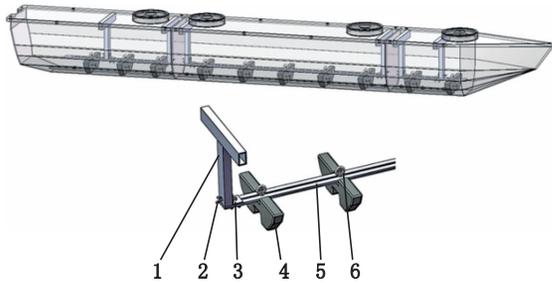
1.4 配重机构设计

当无人船搭载不同监测设备时,可能产生重心偏移,将导致无人船航行姿态不良或推进器吃水不足,设置配重机构可以有效避免这些问题。

如图 6 所示为配重机构示意图。三段浮体上方均设有圆形孔并配有孔盖,用于向浮体舱内安装配重机构,配重机构主要由压载铅块、限位连接架、铅块安装横杆构成。压载铅块由铅金属浇筑而成,单个铅块质量约为 10 kg ,底部造型与浮体底部形状适配,顶部开有螺栓孔通过环形螺栓组件固定在横杆上;横杆与限位连接架配合,防止铅块在浮体内活动。通过改变压载铅块的数量与位置调节船体吃水及航行姿态。

2 无人船动力计算及推进器选配

推进器推力是水下推进器选型时的重要参考条件,在无人船匀速行驶时,推进器推力与无人船阻力数值相等。本文基于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法对船体阻力进行仿真计算,并以此作为重要参考依据进行水下推进器选型。



1. 限位连接架; 2. 蝶形螺母组件; 3. 端部连接件; 4. 压载铅块; 5. 铅块安装横杆; 6. 环形螺母组件。
1. Limit connection frame; 2. Butterfly nut assembly; 3. End connection; 4. Ballast lead block; 5. Lead block mounting crossbar; 6. Ring nut assembly.

图6 配重机构
Fig. 6 Counterweight mechanism

2.1 控制方程与湍流模型

水是不可压缩的黏性流体, 雷诺平均 (Reynold-averaged Navier-Stokes, RANS) 方程是黏性流体运动学的普适性控制方程, 采用雷诺平均方程作为船体阻力仿真的控制方程, 其运动表达式如下^[17-18]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; ν 为流体运动黏性系数, m^2/s ; p 为流体压力, N/m^2 ; f_i 为质量力, m/s^2 ; u_i, u_j 为时均速度, m/s ; u_i', u_j' 为脉动速度, m/s 。

湍流模型选择重整化群两方程模型 (Re-normalization group $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$), 其湍流动能和耗散率的控制方程^[17-18]为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

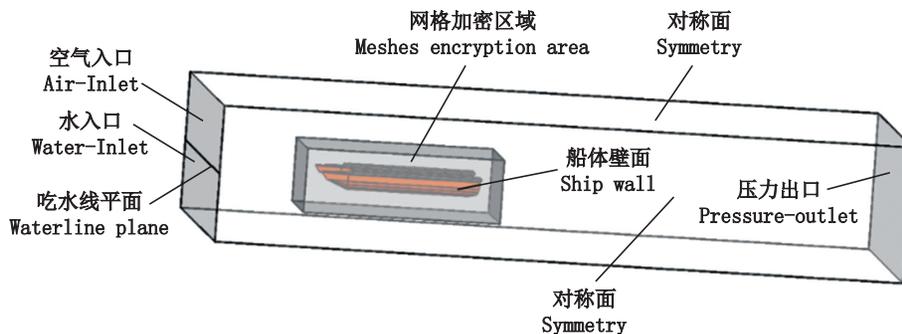


图7 计算域和边界条件
Fig. 7 Computational domain and boundary conditions

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \cdot \\ C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k 为湍流动能, J ; ε 为湍流耗散率; G_k 为由层流速度梯度引起的湍流动能, J ; μ 为动力黏性系数; μ_t 为湍流黏性系数; $C_{1\varepsilon}^*$ 是 $C_{1\varepsilon}$ 的修正值, 常量 $C_{1\varepsilon}=1.42, C_{2\varepsilon}=1.68; \sigma_k=\sigma_\varepsilon=0.7179$ 。

2.2 船体阻力性能计算

在保留原有特征主尺寸的情况下, 对组合式无人船进行适当简化, 建立无人船及其外流场模型, 计算域及边界条件如图7所示。为了更准确地模拟船体流场情况, 计算域长度为船长5倍, 宽度为船宽3倍, 高度为船高2倍; 以船体吃水线所在平面作为气液分界面, 分界面以上为气相, 以下为液相。选择多流相模型进行求解, 两相分别为水和空气, 速度入口为空气速度入口和水速度入口, 船体模型表面和计算域底面为壁面, 计算域左右两侧面与顶面设定为对称面^[17]。选择四面体网格划分, 剖面如图8所示, 船体模型周围进行加密处理, 并进行了网格无关性验证, 验证结果如表2所示, 当网格密度达到中网格时, 输出结果趋于稳定。组合式无人船在船速2.5 m/s、满载吃水0.25 m时船体阻力求解收敛情况如图9所示, 阻力值约为306 N, 船体阻力后处理压力云图如图10所示。

2.3 推进器选配

船体在匀速行驶时, 其阻力 f 与推进器推力 F 数值相等, 功率计算公式为

$$0.6P = fV \quad (7)$$

式中: P 为推进器功率, W ; f 为船体阻力, N ; V 为船体最大设计速度, m/s ; 0.6 为推进器效率系数。

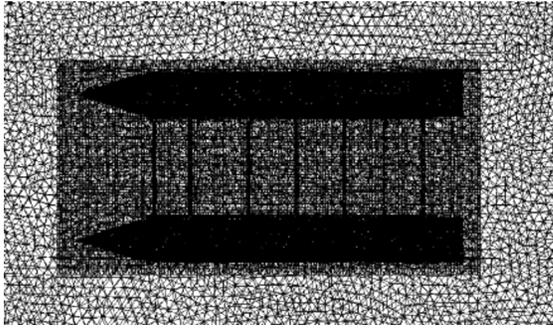


图8 计算域网格剖面图

Fig. 8 Profile of computational domain meshes

表2 网格无关性验证

Tab. 2 Meshes independence verification

网格类型 Type of meshes	网格数量 Number of meshes	阻力计算结果 Resistance calculation results/N
粗网格 Coarse mesh	3 095 071	308.47
中网格 Mid mesh	5 919 013	306.15
细网格 Fine mesh	11 041 266	306.03

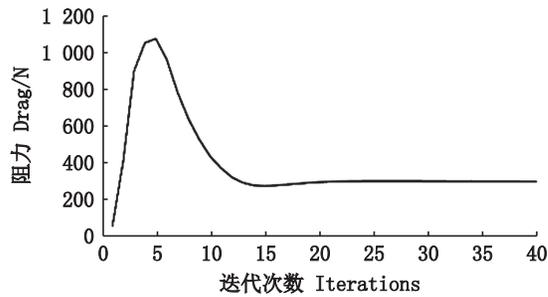


图9 船体阻力收敛图

Fig. 9 Resistance convergence chart

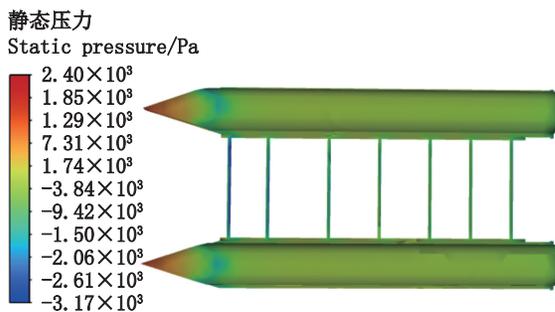


图10 船底阻力后处理压力云图

Fig. 10 Bottom resistance post-processing pressure cloud diagram

取阻力 f 为 306 N, 船速 V 为 2.5 m/s, 代入公式(7), 可得 $P=1\ 275\ W$, 即一对推进器总功率应不小于 1 275 W。

综合考虑水下推进器外形尺寸、功率、电压、推力和控制方式等因素, 选择 AQ1020 水下推进器; 其额定功率为 960 W, 额定电压为 48 V, 最大

转速 3 000 r/min, 最大向前推力 200 N, 最大向后推力 160 N。一对推进器总功率为 1 920 W, 最大推力为 400 N, 满足本无人船使用需求。

3 连接桥强度有限元分析

本文采用双体船形式作为监测船船体结构, 与单体船相比拥有更好的耐波性与稳定性, 但其特殊的结构形式导致船体受到的波浪载荷更为复杂, 由于左右两片体之间的跨度较大, 且片体又窄又长, 在横浪和斜浪中会产生较大横向弯矩和扭矩, 而这些载荷主要由连接桥结构承担, 因此双体船连接桥结构的强度问题特别突出^[19-20]。

连接桥是双体船结构中最薄弱部分, 决定着船体的整体强度, 而无人船连接桥结构主要由连接桥框架和螺栓组件构成。其中连接桥框架为 6061-T6 铝合金材料, 屈服应力为 280 MPa; 螺栓选型为内六角圆柱头高强度螺钉 M10×90 (GB/T 70.1—2008), 性能等级 8.8 级, 屈服应力为 640 MPa。参照中国船级社 (China classification society, CCS) 规范, 铝合金结构作为船舶杆、梁时许用应力为 0.73 倍屈服应力, 钢结构作为杆、梁时许用应力为 0.67 倍屈服应力^[19]; 即连接桥框架许用屈服应力为 204.4 Mpa, 螺栓许用屈服应力为 428.8 Mpa。

3.1 船体有限元建模

采用 ANSYS 静态结构模块对无人船进行静态结构分析。由于组合式无人船形状较为复杂, 在保留原有特征主尺寸的情况下, 对其进行适当简化: ①设定框架材料与船体材料为各向同性, 其密度分布均匀。②除连接桥外, 框架各梁上的装配孔均忽略不计。采用 ANSYS 软件进行网格划分后无人船有限元模型如图 11 所示。

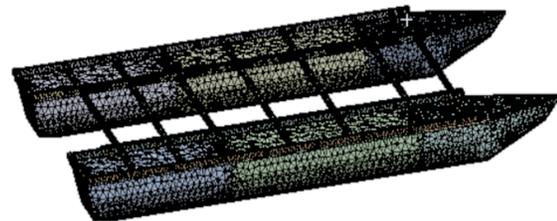


图11 船体有限元模型

Fig. 11 Hull finite element model

3.2 工况分析及载荷计算

根据本船尺度, 参照 CCS《水上无人艇检验指南》《小型海船入级规范》及《海上高速船入级与

建造规范》相关规范,该船体强度需满足最大横向弯矩及纵摇扭矩^[21-23]。

3.2.1 横向弯矩

双体船在航行中遇到横浪时,两片体间易产生浮力差,为了达到平衡状态,船体产生横摇运动,此时连接桥上将产生横向弯矩^[20]。本文参考CCS《水上无人艇检验指南》计算公式进行此横向弯矩的计算^[21],计算公式如下:

$$a_{cg} = \frac{1}{426} \left(\frac{V_H}{\sqrt{L}} \right)^{14} \left(\frac{H_{1/3}}{B_{WL}} + 0.07 \right) (50 - \beta) \left(\frac{L}{B_{WL}} - 2 \right) \frac{B_{WL}^3}{\Delta} g \quad (8)$$

$$M_t = C_1 \Delta a_{cg} b \quad (9)$$

式中: a_{cg} 为双体船重心处的垂向加速度, m/s^2 ; g 为重力加速度,取 $9.81 m/s^2$; V_H 为在有义波高 $H_{1/3}$ 的波浪中航速, kn ; $H_{1/3}$ 为有义波高, m ; L 为艇长, m ; B_{WL} 为满载水线处的艇宽, m ; β 为艇体重心处横剖面的艇底升角; M_t 为横向弯矩, $kN \cdot m$; Δ 为满载排水量, t ; C_1 为航区系数,根据实际航区取近海航区值 0.155 ; b 为双体船两片体中心线间的距离, m 。

横向弯矩对船体的作用可以通过横向对开力来模拟,横向对开力的计算公式如下:

$$F_y = \frac{M_t}{y + d/4} \quad (10)$$

式中: F_y 为横向对开力, kN ; M_t 为横向弯矩, $kN \cdot m$; y 为连接桥中和轴至水线的距离, m ; d 为吃水, m 。

近海无人船设计最小有义波高为 $2 m$ ^[22],以 $0.5 m$ 为跨度,逐步进行横向弯矩强度计算。其中:航速 V_H 为 $2.5 m/s$,艇长 L 为 $4.2 m$,满载水线处的总艇宽 B_{WL} 为 $0.8 m$,艇体重心处横剖面的艇底升角 β 为 30° ,满载排水量 Δ 为 $0.623 2 t$;航区系数 C_1 取近海航区 0.155 ,两片体中心线间的距离 b 为 $1.5 m$ 。

3.2.2 纵摇扭矩

双体船在航行中遇到斜浪时,由于重力和浮力的不均匀分布,两片体易产生相对纵摇运动,此时连接桥将产生扭矩^[24]。本文按照CCS相关规范公式计算此扭矩,计算公式如下:

$$M_p = 0.125 \Delta a_{cg} L \quad (11)$$

式中: M_p 为扭矩, $kN \cdot m$; Δ 、 a_{cg} 的含义与公式(9)相同; L 为双体船的水线长, m 。

3.2.3 边界条件

使用6个位移分量约束限制全船模型的空间刚体运动,而不影响船体各部分的相对变形^[25]。

3.3 结果分析

承受横向弯矩时,连接桥框架受力总体呈现中垂状态,应力主要集中在横梁及螺栓连接处(图12);螺栓受力呈现一侧弯曲状态(图13)。承受扭矩时,船体整体反对称扭转,受力及变形由船中向首尾放大(图14)。如表3所示,框架应力在波高 $4 m$ 以下时均小于许用屈服应力,满足强度要求。螺栓应力在波高 $2.5 m$ 以下时,小于许

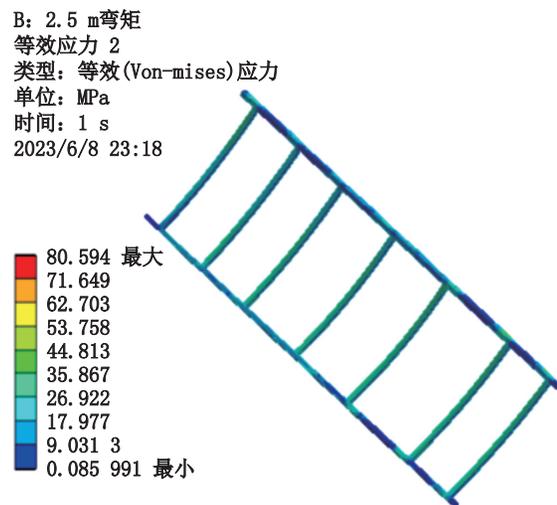


图12 框架承受弯矩应力云图
Fig. 12 Diagram of the bending moment stress of the frame

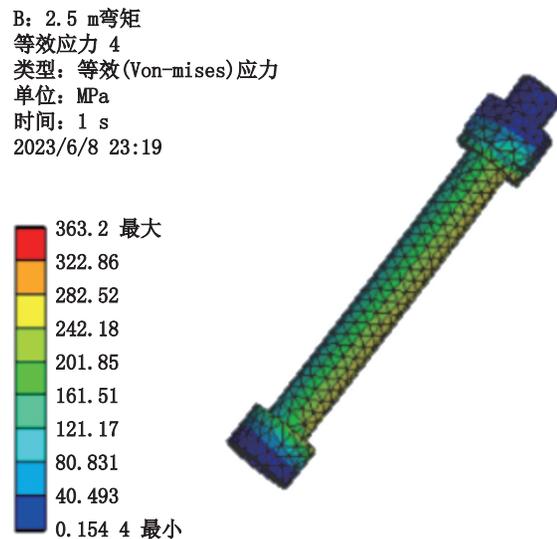


图13 螺栓承受弯矩应力云图
Fig. 13 Diagram of bending moment stress of bolts conditions

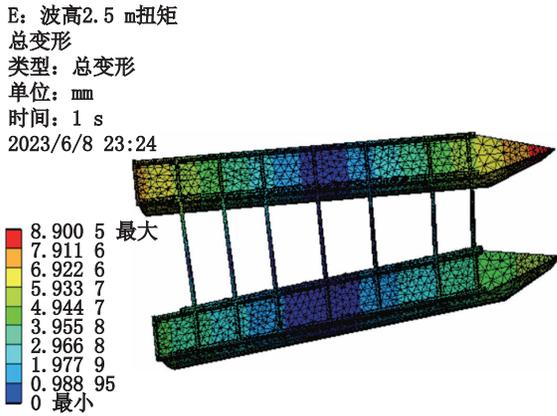


图 14 无人船承受扭矩变形云图

Fig. 14 Torque deformation diagram of unmanned ships

用屈服应力;当波高 3 m 时,超出许用屈服应力,当波高 4 m 时,超出屈服应力。综合两种部件应力情况,连接桥强度能够承受 2.5 m 以下波高所产生的横向弯矩。

此时再验证 2.5 m 波高时扭矩强度满足条件即可,2.5 m 波高时连接桥所承受的扭矩情况结果显示,框架应力、螺栓应力均小于许用屈服应力,满足强度要求。海洋牧场监测船工作时最大波高为 1.0 m,而 2.5 m 为 4 级海浪时最大波高,因此,连接桥结构强度能够胜任海洋牧场工作,且最高能够抵抗 4 级海浪。

表 3 连接桥强度分析表

Tab. 3 Connection bridge frame strength analysis table

工况 Working conditions	波高 Wave height/m	载荷 Load/(kN·m)	框架应力 Frame stress/MPa	螺栓应力 Bolt stress/MPa	总变形 Total deformation/mm	结果 Outcome
横向弯矩 Transverse bending moment	2	1.26	64.34	291.35	13.72	合格
	2.5	1.59	80.59	363.20	17.32	合格
	3	1.92	99.64	456.80	21.64	危险
	3.5	2.24	112.06	515.89	24.52	危险
	4	2.55	127.31	590.71	28.11	不合格
纵摇扭矩 Scribble torque	2.5	4.75	68.96	190.49	8.90	合格

4 样机性能测试与试验

为了检验组合式无人监测船实际应用效果,制作组装试验样机(图 15),于上海海洋大学镜湖内进行船体性能试验及监测机构应用性试验,风浪情况:风力 3~4 级,微波。



图 15 组合式无人监测船

Fig. 15 Combined unmanned monitoring vessel

4.1 船体性能试验

船体不同负载下,船体吃水、航行速度及推进器的工作参数是重要的考量对象^[26],推进装置的稳定工作是进行海洋牧场监测工作的前提。

为了验证本装备的船体工作性能,对无人船

在负载 0~280 kg,共 7 种载重情况进行了测试,主要对不同负载下,船体的吃水线与船速,船体航姿稳定性,水下推进器电压及功率等情况进行了试验,测试结果如表 4 所示。当无人船空载时,水下推进器吃水不足,推进器功率较低,船速仅为 1.93 m/s,航行时船体有轻微颤动;负载 80 kg 时,推进器吃水充足,航姿稳定,航速稳定在 2.5~2.6 m/s;负载达到 160 kg 时,推进器功率稳定在 1 600 W;负载 280 kg 时,船体吃水接近设计满载吃水线,推进器功率依然稳定在 1 600 W,船体航速保持在 2.5 m/s 以上。

分析试验结果可知,该型水下推进器提供动力达到设计标准,船速达到 2.5 m/s,验证了通过船体阻力进行推进器选型的可行性。当吃水线接近仿真吃水线 0.25 m 时,测得航速为 2.53 m/s,仿真设置航速为 2.5 m/s,误差率为 1.2%。当吃水线接近设计满载吃水线 0.25 m,航速接近 2.5 m/s 时,试验阻力为 335.6 N,仿真阻力为 306 N,误差率为 8.8%。由于样机试验受测试环境及仪器设备等因素的影响,产生误差无法避免,但误差率

在10%以下,仿真计算结果可信。

综合海洋牧场工作海况与试验情况,船体载重余量充足,最低负载80 kg,最高负载280 kg,航行姿态稳定,动力充沛,航速稳定在2.5~2.6 m/s,船体性能满足海洋牧场无人监测船现场使用需求。

表4 船体性能试验情况
Tab. 4 Hull performance test

负载 Load/ kg	吃水线 Waterline/ cm	电压 Voltage/V	功率 Power/W	航速 Speed/m/s	阻力 Drag/N
0	13.25	50.12	913.0	1.93	241.3
80	15.75	49.40	1 253.2	2.56	249.6
120	17.65	48.95	1 397.2	2.52	282.7
160	19.75	48.43	1 636.2	2.61	319.7
200	21.10	47.65	1 654.8	2.54	332.2
240	23.20	47.34	1 687.8	2.56	336.2
280	24.50	47.24	1 665.2	2.53	335.6

4.2 监测机构应用性试验

旋转机构搭载CHIRP声呐探测仪进行应用性能试验。图16为测试过程中探测仪成像输出图,

可以根据声呐信号反馈判断生成鱼的图像,可探测水深、水温、鱼群深度和水底环境等水下信息。

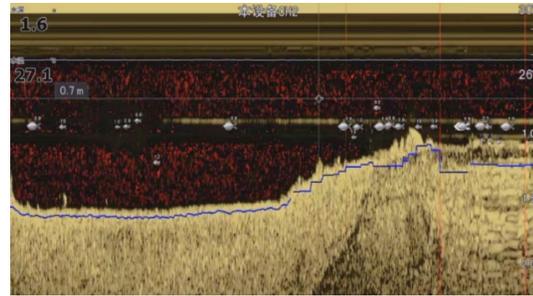


图16 CHIRP声呐探测仪成像图

Fig. 16 CHIRP Sonar detector imaging

升降机构搭载AP-2000多参数水质传感器进行应用性能试验。首先对升降机构升降速度进行测试,实际升降速度约5.8 m/min。选取上海海洋大学镜湖3个点位不同深度进行水质监测,监测结果如表5所示。

综合试验表明,船体航行姿态稳定,监测机构与监测设备适配,各模块工作正常,各部件无明显信号干涉,满足实际应用需求。

表5 水质监测数据
Tab. 5 Water quality monitoring data

监测点 Monitoring points	深度 Depth/m	温度 Temperature/°C	PH	DO/(mg/L)	EC μ s/cm	TDS/(mg/L)
湖边 Lakeside	0.5	26.5	7.45	6.99	1 191	773
	1.0	26.5	7.41	6.87	1 192	776
桥下 Under the bridge	1.0	26.3	7.44	6.70	1 198	779
	1.5	26.2	7.40	6.33	1 195	778
湖心 Centre of the lake	1.5	26.4	7.30	6.79	1 191	773
	2.0	26.3	7.30	6.18	1 199	780

5 讨论

针对海洋牧场环境监测需要,设计了船体可拆分组合,可搭载多类型监测设备的组合式无人监测船。基于计算流体力学方法对船体阻力性能进行了仿真计算,并依据计算结果完成水下推进器选型。对无人船连接桥结构受到浪高海况,进行了静力学强度有限元分析,分析结果表明连接桥结构强度能够胜任海洋牧场工作环境,且最高能够抵抗4级海浪。船体性能试验表明,船体载重余量充足,最低负载80 kg,最高负载280 kg,航速稳定在2.5~2.6 m/s。监测机构应用性试验表明,船体航行姿态稳定,监测机构结构设计适配性强,各部件无明显信号干涉,可实时探测水下渔业资源、水底环境信

息、检测水体pH、温度和溶解氧等数据。

浮体分段设计,便于运输,同时可减小模具体积,大大降低生产成本。每一段浮体均为单独密闭体,不会因为某一段浮体破裂而失去整体浮力导致沉船,具有很高的抗沉性能。组合式设计,使船体有很强的可扩展性,可依据实际应用场景增加增浮浮体数量,从而增长船体片体长度,配备对应框架,构建更大尺寸的无人船船体;去除增浮浮体,也可以构建小型无人船船体,适用于岛礁区及浅水区等水域。

该组合式无人监测船,运输投放较容易,可按需搭载多种类型传感器,适应监测场景多,灵活性较高,为海洋牧场监测提供了一套低成本的解决方案,具有较好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 杨红生. 我国海洋牧场建设回顾与展望[J]. 水产学报, 2016, 40(7): 1133-1140.
YANG H S. Construction of marine ranching in China: reviews and prospects [J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(7): 1133-1140.
- [2] 林承刚, 杨红生, 陈鹰, 等. 现代化海洋牧场建设与发展: 第 230 期双清论坛学术综述[J]. 中国科学基金, 2021, 35(1): 143-152.
LIN C G, YANG H S, CHEN Y, et al. Construction and development of modern marine ranching: Academic review of the 230th Shuangqing forum [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35 (1): 143-152.
- [3] 李忠义, 林群, 李娇, 等. 中国海洋牧场研究现状与发展[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1870-1880.
LI Z Y, LIN Q, LI J, et al. Present situation and future development of marine ranching in construction China [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1870-1880.
- [4] 李俊, 陈普坤, 陈雷雷, 等. 水质监测与采样一体化无人船设计与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(2): 405-416.
LI J, CHEN P K, CHEN L L, et al. Design and experiment of water quality monitoring and sampling integrated unmanned boat [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(2): 405-416.
- [5] ZHANG M F, LI D L, WANG L Z, et al. Design and development of water quality monitoring system based on wireless sensor network in aquaculture [C]//Proceedings of the 4th IFIP TC 12 International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture IV. Nanchang: Springer, 2010: 629-641.
- [6] CHENG J H, SUN W T, LIN G Y. Automated monitoring system for the fish farm aquaculture environment [C]//2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Hong Kong, China: IEEE, 2015: 1161-1166.
- [7] RAJU K R S R, VARMA G H K. Knowledge based real time monitoring system for aquaculture using IoT [C]//2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference. Hyderabad: IEEE, 2017: 318-321.
- [8] RIVKIN B S. Unmanned ships: navigation and more [J]. Gyroscopy and Navigation, 2021, 12(1): 96-108.
- [9] SHIPUNOV I, NYRKOV A, KATORIN Y, et al. On the issue of building sea convoys from unmanned ships [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 244: 08013.
- [10] 赵同强, 韩超, 徐玉良, 等. 无人船技术应用于城市内河水质监测[J]. 中国给水排水, 2021, 37(7): 71-77.
ZHAO T Q, HAN C, XU Y L, et al. Application of unmanned surface vehicle in urban river water quality monitoring [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(7): 71-77.
- [11] 蒋星宇. 一种水质监测无人船系统的设计与实现[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018: 61-65.
JIANG X Y. Design and implementation of a water quality monitoring unmanned ship system [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018: 61-65.
- [12] 王云龙, 李圣法, 姜亚洲, 等. 象山港海洋牧场建设与生物资源的增殖养护技术[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1972-1980.
WANG Y L, LI S F, JIANG Y Z, et al. Marine ranching and fishery stock enhancement in the Xiangshan Bay [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(9): 1972-1980.
- [13] 李宁, 张海宽, 刘宇. 潜艇模块化设计与建造技术探讨[J]. 中国修船, 2006, 19(s1): 19-22.
LI N, ZHANG H K, LIU Y. Technological probe of model design and shipbuilding for submarine [J]. China Shiprepair, 2006, 19(s1): 19-22.
- [14] 金碧霞. 一种模块化水下机器人的设计[J]. 机械与电子, 2014(4): 75-77.
JIN B X. Design of a modular underwater robot [J]. Machinery & Electronics, 2014(4): 75-77.
- [15] 王骏. 高性能船舶研究现状及发展趋势[J]. 船舶物资与市场, 2020(8): 7-9.
WANG J. Research status and development trend of high performance ships [J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2020(8): 7-9.
- [16] 王成成, 焦聪, 沈珍瑶, 等. 中国水产养殖尾水排放的影响与防治建议[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 89-98.
WANG C C, JIAO C, SHEN Z Y, et al. Effect of wastewater discharge of aquaculture and its prevention & treatment suggestion in China [J]. Pearl River, 2020, 41(1): 89-98.
- [17] 李俊, 朱逸凡, 陈雷雷, 等. 蟹塘双体投饵船行驶阻力分析及船型优化[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 269-277.
LI J, ZHU Y F, CHEN L L, et al. Analysis of driving resistance and optimization of boat type for crab pond catamaran bait boat [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(1): 269-277.
- [18] 陈雷雷, 任万川, 李俊, 等. 蟹塘投饵船螺旋驱动装置设计与水动力性能分析[J]. 渔业现代化, 2022, 49(3): 27-35.
CHEN L L, REN W C, LI J, et al. Design and performance analysis of spiral drive device of crab pond bait boat [J]. Fishery Modernization, 2022, 49(3): 27-35.
- [19] 杨平, 黄乐华. 双体船结构的直接计算分析[J]. 船海工程, 2006, 35(5): 4-7.
YANG P, HUANG L H. Direct calculation for a catamaran's structure [J]. Ship & Ocean Engineering, 2006, 35(5): 4-7.
- [20] 程相如. 双体船结构强度计算[D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 44-46.

- CHENG X R. Calculation of the structural strength of the catamaran [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012: 44-46.
- [21] 中国船级社. 无人水面艇检验指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018: 1, 28-44.
China Classification Society. Surface unmanned boat inspection guide [S]. Beijing: People's Communications Press, 2018: 1, 28-44.
- [22] 中国船级社. 小型海船入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021: 9, 14-16.
China Classification Society. Classification specifications for small seagoing vessels [S]. Beijing: People's Communications Press, 2021: 9, 14-16.
- [23] 中国船级社. 海上高速船入级与建造规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022: 7, 46-51.
China Classification Society. Offshore high-speed ship classification and construction specifications [S]. Beijing: People's Communications Press, 2022: 7, 46-51.
- [24] 岳兴华, 毛斌峰, 赵经玲, 等. 小水线面双体船结构有限元分析[J]. 广东造船, 2020, 39(2): 29-32.
YUE X H, MAO B F, ZHAO J L, et al. Finite element analysis of structural strength for SWATH [J]. Guangdong Shipbuilding, 2020, 39(2): 29-32.
- [25] 张波, 赵陈, 李永顺, 等. 双体趸船波浪载荷与结构强度分析[J]. 中国水运, 2023, 23(1): 1-3.
ZHANG B, ZHAO C, LI Y S, et al. Analysis of wave load and structural strength of catamaran barge [J]. China Water Transport, 2023, 23(1): 1-3.
- [26] 钱华, 李志鹏, 陈辰, 等. 有刷直流电机真空应用研究[J]. 炭素, 2020(2): 20-23.
QIAN H, LI Z P, CHEN C, et al. The research of brush motors used in vacuum [J]. Carbon, 2020(2): 20-23.

Design and test of marine ranching combination-type unmanned monitoring vessel

LI Jun¹, LI Huaijin¹, WANG Zhenhua², LIN Jun², ZHANG Jinfei¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: With the in-depth development of marine ranching construction, dynamic monitoring and assessment of marine ecological environment and fishery resources have become particularly important, and mobile autonomous monitoring is one of the feasible solutions. Aiming at the problems of low efficiency, poor flexibility, high cost and difficult transportation and delivery of existing monitoring methods, a combined unmanned monitoring ship equipped with multiple types of monitoring equipment was proposed. The hull structure design and monitoring instrument installation mechanism design were carried out, and the counterweight mechanism design was carried out considering the hull draft load and stability. Based on the computational fluid dynamics method, the hull resistance performance was simulated and calculated, and the underwater thruster selection was completed, and the static strength finite element analysis was carried out on the unmanned ship connecting bridge structure in high waves, and the strength of the hull structure could resist the 4th level wave. The test results show that the unmanned monitoring vessel has stable operation without interference, the design draft is 0.25 m, the speed is 2.5 m/s, and it can be competent for marine ranching work sea conditions. The monitoring equipment works stably after being installed, and can monitor underwater fishery resources, explore underwater terrain, monitor water pH, temperature and dissolved oxygen in real time. This study provides technical support for ocean dynamic, real-time monitoring and digitalization, and provides a low-cost and reliable implementation scheme for the design and research of marine ranching combined unmanned monitoring vessels.

Key words: combination type; unmanned ships; water environment monitoring; frame structure; design experiments