

文章编号: 1674-5566(2024)02-0509-11

DOI: 10.12024/jsou.20230504195

波流作用下平面网衣水动力特性数值模拟

李娜^{1,2}, 李昕^{1,2}, 施伟^{2,3}, 柳春光^{1,2}

(1. 大连理工大学 建设工程学部工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 大连理工大学 深海工程研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对固定在钢框架上的平面网衣水动力特性进行研究, 基于SACS, 采用有限元Member单元建立网衣水动力荷载计算模型, 利用参考文献中分别使用有限元Truss单元和Beam单元所建立模型的计算结果对该模型进行了验证。通过对比得出, 在SACS中所建立的平面网衣数值模型可以较为准确地计算网衣在波流下的水动力, 初步证明了在SACS中建立大型钢结构养殖网箱+固定式海上风力机融合结构模型的可行性。进一步采用该数值计算模型对不同波流工况下网衣结构的水动力荷载进行计算, 分析不同流速、波高和波周期下网衣受力的分布规律。由计算结果可知, 随着海流流速、波高的减小和波周期的增大, 网衣受到的水动力荷载呈现出逐渐减小的变化趋势, 其中波周期的影响尤为显著, 由于该参数的影响使得指定位置节点水动力荷载误差达80%; 另外, 波流作用下网衣结构受到的水动力荷载, 最大受力位于网衣顶端两侧位置, 波高对网衣上部受力影响更大。这些结果可为融合结构中网箱部分的设计提供参考。

关键词: 平面网衣; 水动力荷载; 波流作用; 有限元法; Morison模型

中图分类号: P 751

文献标志码: A

我国海洋资源丰富, 国家倡导大力发展海洋经济, 其中海洋牧场与海上风电作为海洋经济的重要组成部分得以快速发展。随着海域资源的不断开发, 不同产业用海矛盾日益突出, 提高海域资源利用率, 对海洋资源的持续、高效、绿色发展至关重要。为了节约用海、综合利用海洋空间, 海上风电和海洋牧场的融合发展模式被提出。2000年, 欧洲已实施了海上风电和海水养殖结合的试点研究, 为评估海上风电和多营养层次海水养殖融合发展潜力提供了典型案例^[1]。我国相关研究工作起步较晚, 国内首个海上风电与海洋牧场融合发展研究试验项目于2022年底顺利并网发电, 该项目将“深水网箱+海上风电”的融合发展模式作为主要试点工作之一^[2]。在融合发展的过程中, 养殖设施应具备抗台风等极端工况的能力, 且不断提升智能化水平。为应对深远海的复杂海况, 我国开发应用了一系列深远海网

箱, 其中大型钢结构养殖网箱制造技术发展尤为突出。2018年, “深蓝1号”大型全潜式深海养殖网箱在山东青岛建成交付, 该网箱为八边形钢制框架结构, 是我国首座自主研发的深远海渔业养殖装备^[3]。2019年, “长鲸1号”四边形钢制框架网箱在山东烟台完工启用, 是国内首座大型深水智能化坐底式养殖网箱^[4]。2020年, “经海系列”首批量产型固定式钢结构深远海智能养殖网箱在山东烟台开工建造, 是亚洲装备水平最高的海洋牧场“百箱计划”的开端^[5]。我国已具备批量建造该类养殖网箱的能力, 将其与逐渐大型化的固定式海上风电机组结构融合^[6], 相关设计研究工作将推进海上风电与海洋养殖融合模式的规模化进程。对于“大型钢结构养殖网箱+固定式海上风力机”融合结构, 网衣是其中主要的组成部分。在水流条件下, 网衣系统是影响网箱受力的主导因素, 进而将对融合结构整体受力产生影

收稿日期: 2023-05-25 修回日期: 2023-10-02

基金项目: 国家自然科学基金(51939002)

作者简介: 李娜(1989—), 女, 博士研究生, 研究方向为海上风机结构与养殖网箱融合。E-mail: linaxiaomi_19890614@mail.dlut.edu.cn

通信作者: 施伟, E-mail: weishi@dlut.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>

响,合理的网衣计算模型对结构的水动力特性数值模拟至关重要。

为研究网衣水动力特性,近年来主要采用两种数值模拟方法来模拟网衣合股线结构,分别为有限元法和集中质量点法。MOE等^[7]采用有限单元模拟合并简化的网衣网线,基于雷诺数相关经验曲线选取 Morison 模型相关水动力系数,进而计算网衣所受水动力。SIM等^[8]采用三角形单元模拟网衣结构,使用 Morison 模型计算网衣网线所受水动力,其中基于雷诺数相关经验公式计算相关水动力系数,并转换作用到三角形单元节点上,利用有限元求解器 FHSim 计算得到网衣水动力。崔勇等^[9-10]基于有限元软件 ANSYS,将管单元转换成缆索单元,用于模拟网衣结构,通过 Morison 方程计算网衣受力。CHENG等^[11-12]基于有限元方法,采用一维 Cable 单元建立网衣模型,基于网平面模型计算所划分网平面水动力,然后将受力转换到网衣单元节点上,利用有限元求解器 Code Aster 计算得到网衣水动力。LI等^[13]、LIU等^[14]采用 Morison 单元建立网衣的简化有限元模型,基于密实度相关经验公式计算水动力系数,使用网平面模型计算网衣水动力,并将受力等效作用于网衣单元,从而将网衣水动力荷载作用于整体结构。胡克等^[15]采用有限元法建立网衣结构模型,基于网平面模型编写了适合网衣水动力计算的子程序,从而求解出网衣水动力。陈天华等^[16-18]针对波流条件下桩柱式围网中的单片网衣,采用集中质量点法进行模拟,网目脚的水阻力采用 Morison 方程计算,并建立了网衣的运动响应数学模型,对其力学特性开展了分析研究。朱传之等^[19]针对水流作用下的全潜式网箱,采用集中质量点法建立网衣结构模型,使用 Morison 方程来计算网衣水动力,计算分析了网衣与四周刚性柱系缚方式对网衣受力特性以及周围流场的影响。张婧等^[20]采用软件 OrcaFlex,基于集中质量点法及 Morison 方程等理论,建立网衣模型,对波流作用下组合钢架式网箱的水动力性能展开分析研究。KRISTIANSEN等^[21]采用集中质量点法模拟网衣,使用网平面模型计算网衣水动力,计算分析水流作用下圆形网箱的水动力特性,并结合试验,为该数值模型提供了验证。CHENG等^[22]开展了基于 Morison 模型或网平面模型的 11 种数值模拟的网衣水动力

计算,经对比分析,为选取合适的水动力模型提供了参考依据。各国研究人员试图尝试不同的数值模型计算网箱平面网衣的水动力特性,为网衣的数值模拟提供了借鉴及理论参考。不过目前少有专门针对养殖网箱与海上风力机融合结构中平面网衣的相关研究,本文尝试在海洋工程结构分析设计软件 SACS 中建立平面网衣结构数值模型并验证其可行性,用于后续融合结构的设计分析。选用 SACS 软件的原因在于该软件拥有专门的海上风机设计计算模块,便于融合结构的整体建模且应用广泛,利于该模拟方法的推广应用。

本文基于 SACS,采用有限元法建立适用于计算网衣水动力的数值模型。其中,根据雷诺数选取水动力系数,计算波流作用下平面网衣的动力时程响应。然后,采用该模型计算不同波流工况下平面网衣受到的水动力荷载,分析海流流速、波高及波周期对网衣受力的影响。

1 计算理论

1.1 波浪荷载理论

本文针对波流作用下的平面网衣开展水动力计算,计算中有必要选取合适的波浪理论。本次研究中采用 Airy 波理论,Airy 波是一种经过简化的波动,其水面呈现简谐运动,水质点以固定的圆频率作简谐振动,同时波形以一定的波速向前传播,其波面方程为

$$\eta = 0.5H \cos(kx - wt) \quad (1)$$

式中: H 为波高; k 为波数, $k = 2\pi/L$, L 为波长; w 为波的圆频率, $w = 2\pi/T$, T 为周期; x 为水平位置; t 为时间。

Airy 波的速度势表达式为

$$\phi = \frac{gH}{2w} \frac{\cos k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - wt) \quad (2)$$

式中: d 为水深; z 为与波速垂直方向的坐标, $z = 0$ 为静止面位置。

水质点运动的水平速度和加速度为

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - wt) \quad (3)$$

$$a_x = \frac{du_x}{dt} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - wt) \quad (4)$$

1.2 水动力模型

对于平面网衣结构,计算水动力的模型主要有两种:Morison 模型和网平面模型。为验证

SACS中网衣数值模型的可行性,参照文献[23]中平面网衣参数及计算工况,建立平面网衣数值计算模型,开展网衣水动力计算,与文献中基于ABAQUS的数值模型的计算结果进行对比。关于水动力模型,前者使用Morison模型,而后者使用网平面模型。

1.2.1 Morison 模型

本文使用Morison模型开展网衣结构水动力荷载计算。将网衣结构中的网线看作独立的小尺度圆柱体,利用公式(1)所示Morison方程计算每根网线上的水动力荷载,将所有网线上的计算荷载叠加,得到网衣结构的水动力荷载。

$$F = 0.5\rho C_D A(u-v)|u-v| + \rho C_M V\dot{u} - \rho(C_M - 1)V\dot{v} \quad (5)$$

式中: u, \dot{u} 分别为水质点速度和加速度; v, \dot{v} 分别为构件速度和加速度; V, A 分别为构件体积和构件在流向的投影面积; ρ 为流体密度; C_D 为拖曳力系数; C_M 为惯性力系数,本次研究取值为2.0^[24], $C_M = 1 + C_m$,其中 C_m 为附加质量系数。

拖曳力系数 C_D 一般与雷诺数 Re 相关,雷诺数 Re 依据公式(6)计算可得^[23]。SCHLICHTING^[25]提出了圆柱体 C_D 与 Re 的相关曲线,如图1所示,FREDHEIM^[26],MOE等^[7]在网衣结构受力分析中均应用了该曲线,相关研究成果验证了该曲线数据的可靠性,本文网衣的 C_D 依据该曲线选取。

$$Re = u_{\max} d / \nu \quad (6)$$

式中: u_{\max} 为水质点的最大平均速度; d 为网衣结构的网线直径; ν 为流体的运动黏性系数。

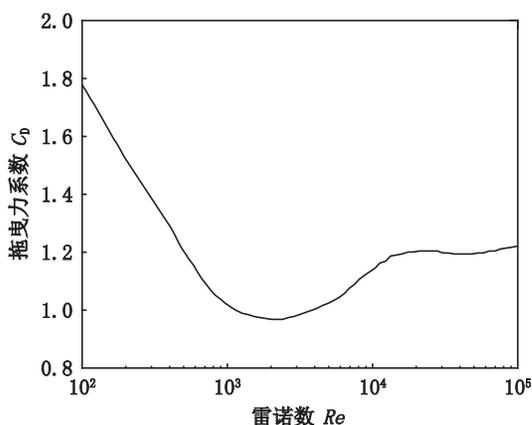


图1 圆柱体拖曳力系数 C_D 与雷诺数 Re 相关曲线
Fig. 1 Variation of cylinder drag coefficient with Reynolds number

1.2.2 网平面模型

参照文献[23]使用网平面模型开展计算。网平面模型中,将网衣结构上每个网目看作网平面,网平面上流向阻力 F_D 以及与阻力方向垂直的升力 F_L 计算公式如下:

$$F_D = 0.5\rho C_D^{\text{panel}} A_{\text{panel}} U^2 \quad (7)$$

$$F_L = 0.5\rho C_L^{\text{panel}} A_{\text{panel}} U^2 \quad (8)$$

式中: C_D^{panel} 和 C_L^{panel} 分别为阻力系数和升力系数; A_{panel} 为网平面面积,即单个网目面积; U 为水质点与结构的相对速度。

阻力系数和升力系数采用LØLAND^[27]经验公式进行计算:

$$C_D^{\text{panel}} = 0.04 + (-0.04 + 0.33S_n + 6.54S_n^2 - 4.88S_n^3)\cos\theta \quad (9)$$

$$C_L^{\text{panel}} = (-0.05S_n + 2.30S_n - 1.76S_n^3)\sin 2\theta \quad (10)$$

式中: S_n 为密实度,即网衣结构网线投影面积与网衣结构平面面积之比; θ 为来流攻角,即平面法向与流向夹角。该经验公式适用的密实度范围为0.13~0.32^[28]。

网衣会导致流速的衰减,需考虑流速折减率 r ,即网后流速与来流流速的比值。参考文献[27]中流速折减率,通过经验公式计算得到:

$$r = 1 - 0.46C_D^{\text{panel}} \quad (11)$$

1.3 网衣模型简化计算方法

网衣结构由大量网线构成,若采用独立单元对网线进行一一模拟,计算成本高昂,无法应用到工程实际,需要对网衣的计算模型进行简化。大型钢结构养殖网箱中的网衣四周固定在钢框架上,网衣变形较小,数值模拟中可忽略^[19]。本文忽略网衣变形,对于简化后的模型,应保持水动力和质量与简化前一致。参照MOE等^[7]提出的网衣简化方法,对文中网衣模型进行简化,具体做法为采用多个Member单元模拟网衣,每个Member单元代表若干相互平行的网线,Member单元的投影面积是所代表网线投影面积的总和。依据公式(12)和(13)可以保证原型网衣与模型网衣质量与密实度保持一致。同时,保持简化前后水动力系数不变,原型与模型水动力可保持一致。

$$d_{\text{model}} = nd_{\text{real}} \quad (12)$$

$$\rho_{\text{model}} = \rho_{\text{real}}/n \quad (13)$$

式中: d_{real} 和 ρ_{real} 分别为原型网线的直径和密度;

d_{model} 和 ρ_{model} 分别为简化后模型单元的直径和密度; n 为单个单元所等效的平行网线数量。

2 数值计算方法

2.1 几何参数

研究参照文献[23]中的平面网衣结构开展数值模拟方法及水动力特性研究。该网衣结构由外框架和网衣组成,结构底部高程为0 m,顶部高程为40 m,海平面高程为35 m,泥面高程为-65 m,如图2所示。所选用网衣为方形无结网衣,网衣材质为尼龙,网线直径 d 为2.7 mm,目脚长度 λ 为40 mm,密实度 $S_n = 2d/\lambda - (d/\lambda)^2 = 0.13$,外框架基本尺寸如表1所示,网衣和框架的材料参数见表2。

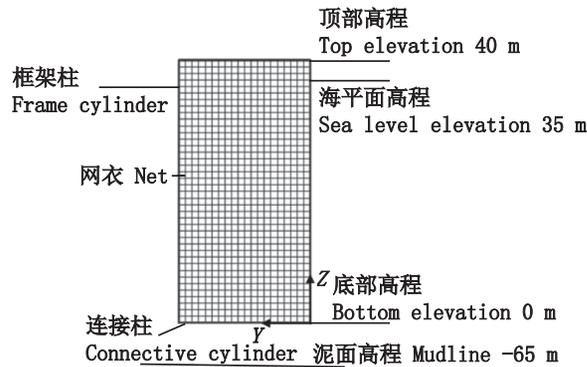


图2 平面网衣示意图

Fig. 2 Schematic of the plane net

表1 平面网衣结构框架尺寸
Tab. 1 Geometries of the plane net

柱体 Cylinders	直径 Diameter/m	长度 Length/m	数量 Number/根
框架柱 Frame cylinders	0.8	40	2
连接柱 Connective cylinders	0.3	20	2

表2 平面网衣结构材料参数
Tab. 2 Material parameters of the plane net

组件 Component	密度 Density/ (kg/m ³)	弹性模量 Elastic modulus/GPa	剪切模量 Shear modulus/ GPa
框架 Frame	7 849	210	80.8
网衣 Net	1 710	0.35	-

2.2 有限元模型

研究基于有限元法在SACS中开展平面网衣结构的数值模拟。其中,结构框架及网衣均采用

Member单元进行模拟,单个Member单元等效模拟若干根平行的横向或竖向网线。利用Morison方程公式(5)计算每个Member单元上的水动力荷载,叠加得到网衣结构所受水动力荷载。

文献[23]中同样采用有限元法,在ABAQUS中分别使用Truss单元和Beam单元建立了两种平面网衣模型。其中,网衣结构均由若干有限元单元构成,单个单元模拟一组网线。文献中基于网平面模型水动力计算公式(7)和(8)计算作用于网平面上的阻力和升力,然后将阻力和升力最终施加在有限元单元上。由公式(14)和(15)计算得到等效的拖曳力和惯性力系数,再依据公式(5)所示Morison方程计算得到单位长度单元上的平均水动力荷载,最终叠加得到整体网衣的水动力荷载。

$$C_D^{\text{truss/beam}} = C_D^{\text{panel}} A_{\text{equiv}} / D^{\text{truss/beam}} \quad (14)$$

$$C_M^{\text{truss/beam}} = N C_M^{\text{twine}} (D^{\text{twine}})^2 / (D^{\text{truss/beam}})^2 \quad (15)$$

$$A_{\text{equiv}} = \frac{N}{2} \lambda^2 \quad (16)$$

式中: A_{equiv} 为单位长度有限元单元所等效的网衣结构平面面积; $D^{\text{truss/beam}}$ 为等效单元直径; N 为单位长度独立有限元单元所等效的网线数量; C_M^{twine} 为网线的惯性力系数,取值为2; D^{twine} 为网线直径; λ 为目脚长度。

为验证本文数值模拟方法的可行性,参照文献[23]中的Beam单元模型的单元间隔,忽略网衣变形,在SACS中采用Member单元建立模型1,如图3a所示。文献[23]中的Truss单元模型和Beam单元模型分别对应模型2、模型3,如图3b和3c所示。文献[23]中首先采用Truss单元建立模型2,考虑了网衣变形,为了保证计算精度,单元间隔取值较小。进一步采用Beam单元建立模型3,忽略网衣变形,为了提高计算效率,将单元间隔扩大,然后开展水动力荷载敏感性分析,模型3的可靠性得以验证。图中3种模型的边界条件均为在模型框架角节点1~4处施加全约束,相应的模型参数见表3。其中,Member单元和Beam单元为一维线单元,同时具有平动和转动自由度,可以承受弯曲荷载,模拟中通过提高单元刚度来忽略网衣变形;Truss单元也为一维线单元,只具有平动自由度,仅能承受轴向载荷,模拟中考虑网衣变形。

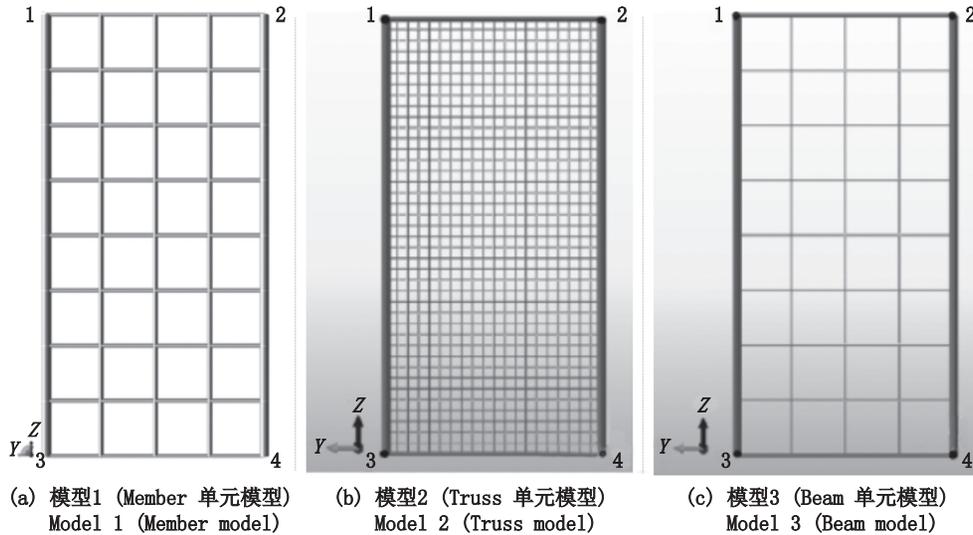


图3 平面网衣结构有限元模型

Fig. 3 Finite element models of the plane net

表3 网衣模型基本参数

Tab. 3 Parameters of net models

编号 Numbers	网衣单元类型 Net elements	单元直径 Diameter of elements/m		单元间隔 Distance of elements/m	单元截面类型 Cross-section type
		横向 Horizontal direction	竖向 Vertical direction		
模型1 Model 1	Member单元 Member elements	0.362	0.412	5	刚性
模型2 Model 2	Truss单元 Truss elements	0.065	0.065	1	柔性
模型3 Model 3	Beam单元 Beam elements	0.065	0.065	5	刚性

2.3 计算工况

基于文献[23]中的工况 EC1 开展本次研究, 计算工况如表4所示。表中工况 LC1 与工况 EC1 相同, 用于开展模型验证。另外, 改变工况 EC1 的波流参数, 确定工况 LC2-LC7, 并结合工况 LC1, 对比分析海流流速、波高及波周期对平面网衣所受水动力荷载的影响。计算工况中的波流方向为 0° , 均垂直于平面网衣入射, 即图2所示的 X 轴方向。

表4 波流作用计算工况
Tab. 4 The wave and current cases

工况 Load case (LC)	规则波 Regular waves		定常流流 速 Current velocity/ (m/s)	波流方向 Wave and current direction/ ($^\circ$)
	波高 Wave height/m	波周期 Wave period/s		
LC1	4	4	0.5	0
LC2	4	4	0.25	0
LC3	4	4	0	0
LC4	3	4	0	0
LC5	2	4	0	0
LC6	4	6	0	0
LC7	4	8	0	0

3 计算结果对比与分析

3.1 平面网衣模型验证

本次研究在 SACS 中基于 Member 单元模型 (模型1, 图3a) 展开工况 LC1 作用下平面网衣动力时程响应计算, 规则波模拟时长为 20 s, 步长为 0.002 s。将计算结果与文献[23]中结果进行对比, 图3中所示各个模型中节点2、节点4处 X 方向节点力时程响应见图4。文献[23]中指出 Beam 单元模型 (模型3, 图3c) 与 Truss 单元模型 (模型2, 图3b) 相比, 节点2处计算结果增大了约 10%, 其结果虽然被高估, 但是在对网箱进行动力分析时该偏差可以接受, 因此该文献采用了 Beam 单元模型对网箱的网衣水动力荷载进行计算。经对比发现, 在节点2处, Member 单元模型计算结果与文献中 Beam 单元模型计算结果变化趋势类似, 数值相近, 节点力谷值的绝对值均为 10 kN 左右, 峰值增大了约 5%; 在节点4处, 2种模型相应节点力峰值与谷值均相近, 差距均在 10% 以内。该偏差可接受, 因此本文所建 Member 单元模型可用于计算网衣结构的水动力荷载。

Member单元模型和Beam单元模型中单元为刚性,忽略网衣变形,而Truss单元模型中单元为柔性,考虑了网衣变形。由以上计算结果可知,

与采用柔性单元模型的平面网衣水动力计算结果相比,刚性单元模型的计算结果偏大,结果差距在10%以内,偏差在可接受范围内。

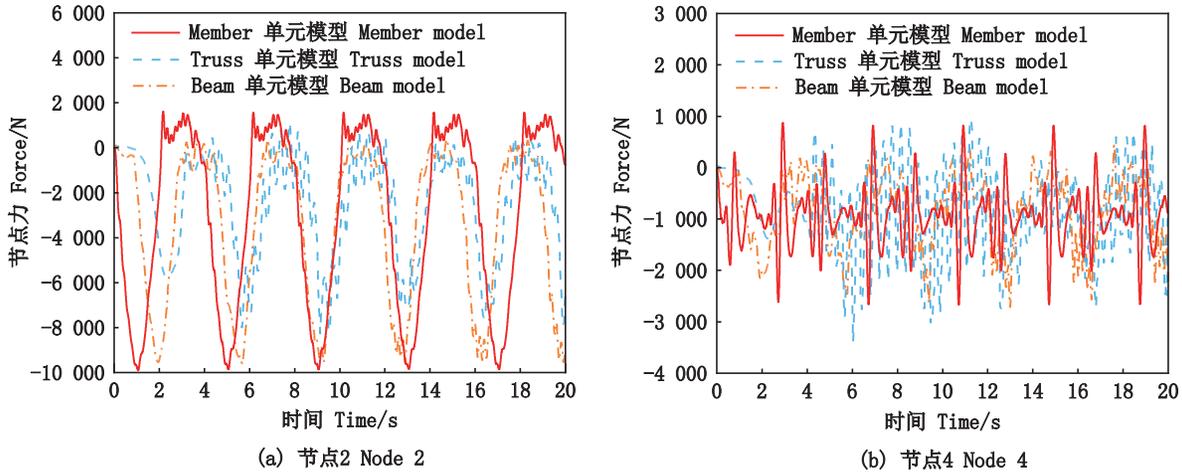


图4 3种模型节点2、4处X方向节点力时程对比

Fig. 4 Nodal force time history in X direction at node 2 and node 4 from member model, truss model and beam model

3.2 不同波流工况下平面网衣结构水动力特性对比分析

基于模型1开展工况LC2~LC7作用下平面网衣动力时程响应计算,并结合上述工况LC1相应结果,对比分析不同海流流速、波高及波周期对网衣结构水动力特性的影响。其中,工况LC1、LC2、LC3的波浪参数保持不变,相应海流流速依次减小,随着流速的降低,模型1节点2和节点4处的受力显著减小(图5),3种工况平面网衣动力时程响应结果的具体统计数据见表5。分析表中数据可知,与工况LC1相比,工况LC2相应节点2处X方向节点力谷值的绝对值减小了近20%,工况LC3相应结果减小了超35%;工况LC2相应节点4处X方向节点力峰谷值减小了约15%,工况LC3相应结果减小了近30%。工况LC3、LC4、LC5不考虑海流作用,波浪周期取4s,波高依次减小。图6中数据显示,随着波高的减小,网衣受力明显减小。由表5可知,相较于工况LC3,工况LC4、LC5相应节点2处X方向节点力谷值的绝对值分别减小了约40%、70%,相应节点4处X方向节点力峰谷值分别减小了约35%、65%。上述结果表明海流流速、波高对网衣受力产生显著影响,这是因为流速或波高的减小使得整个波流场水质点流速减小,从而导致网衣受到的水动力荷载减小。另外,图7中对比了不同波周期条件网衣受到的水平力时程曲线,工况LC3、LC6、LC7不

考虑海流作用,波高取4m,波周期依次增大。由图中数据可见,网衣受到的水平力随着波浪周期的增大而减小。同时对比表5中统计值,相较于工况LC3,工况LC6、LC7相应节点2处X方向节点力谷值的绝对值分别减小了约25%、47%,相应节点4处X方向节点力峰谷值分别减小了约69%、80%。这说明波周期的改变也对网衣受力产生明显影响。

3.3 波流作用下平面网衣结构受力分布特征

根据上述基于模型1开展的工况LC1作用下平面网衣动力时程响应计算所得结果,研究波流共同作用下平面网衣结构不同位置的受力情况。选取的模型1特征节点编号如图8所示,相应节点X方向节点力标准差如图9所示,具体数值见表6。经对比可知,网衣结构两侧框架柱受力大于中部网线,结构顶部连接柱两端受力最大。因此,有必要对网衣结构顶部两端的连接点进行加固。另外,经对比发现,网衣结构受力由顶端至底端呈减小趋势,结构下部受力远小于上部,如侧边框架柱下部节点K12处节点力仅为上部节点K10处节点力的1/5,网衣下部节点W5处节点力仅为上部节点W3处节点力的1/4。这是由于波浪能量随水深的增加而衰减,达到一定水深处将衰减至很小^[29],所以导致网衣结构下部受力均匀且显著小于上部。

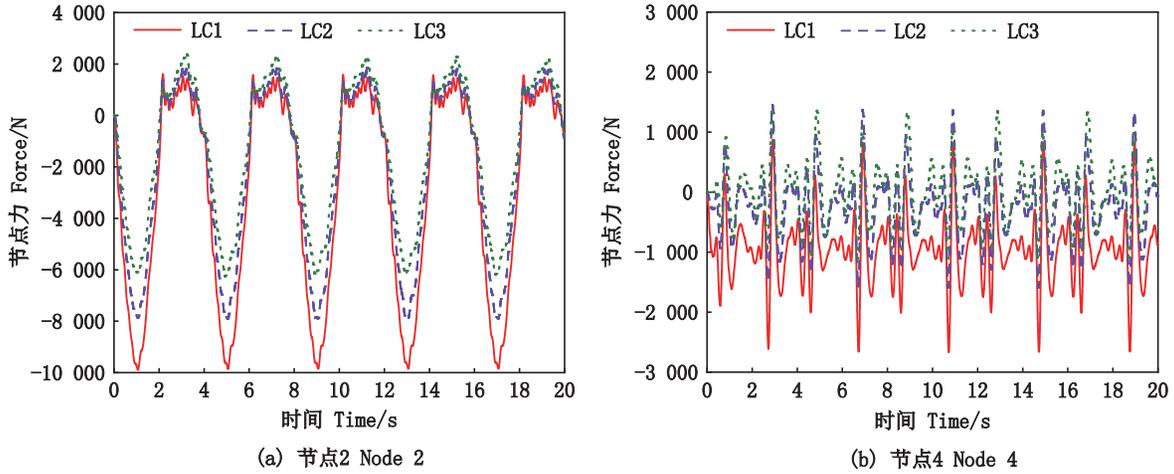


图5 不同海流流速下模型1节点2、4处X方向节点力时程对比

Fig. 5 Nodal force time history in X direction at node 2 and node 4 from member model under different current velocities

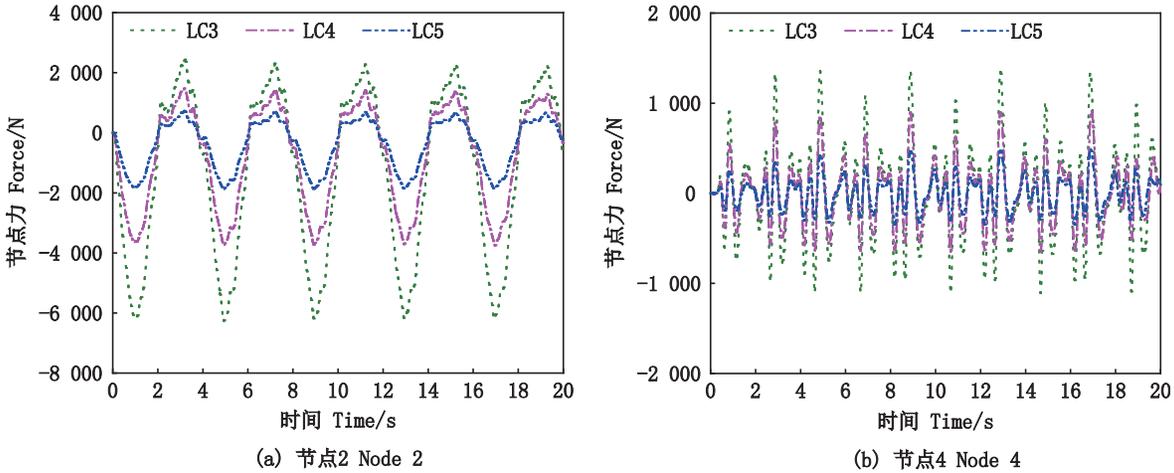


图6 不同波高下模型1节点2、4处X方向节点力时程对比

Fig. 6 Nodal force time history in X direction at node 2 and node 4 from member model under different wave heights

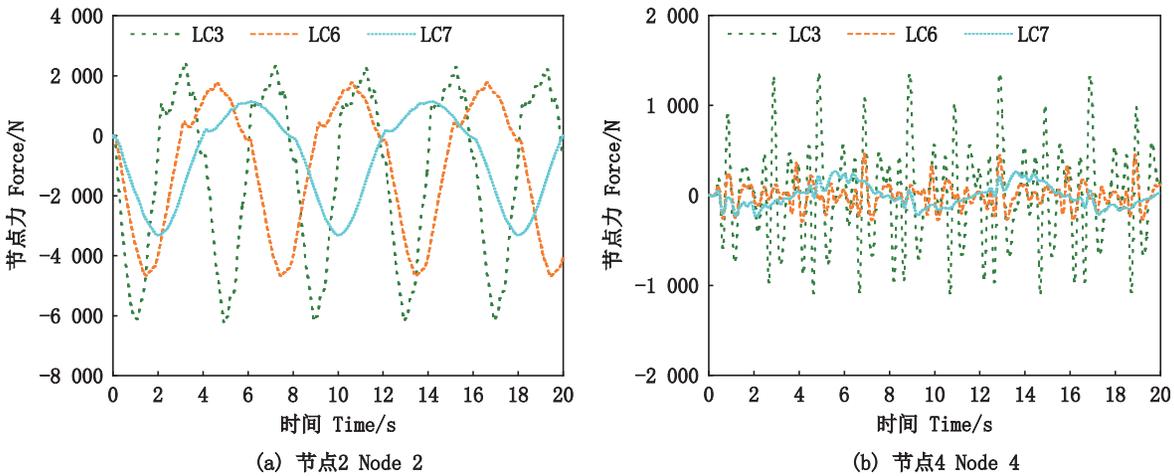


图7 不同波周期下模型1节点2、4处X方向节点力时程对比

Fig. 7 Nodal force time history in X direction at node 2 and node 4 from member model under different wave periods

表5 不同波流工况下模型1节点处X方向节点力

Tab. 5 Nodal force in X direction from member model under different wave and current conditions

工况 Cases	节点2 Node 2			节点4 Node 4		
	峰值 Max	谷值 Min	峰谷值 Max-Min	峰值 Max	谷值 Min	峰谷值 Max-Min
LC1	1 611	-9 894	11 505	875	-2 663	3 538
LC2	1 884	-7 904	9 788	1 455	-1 587	3 042
LC3	2 437	-6 253	8 690	1 357	-1 111	2 469
LC4	1 487	-3 754	5 241	919	-650	1 568
LC5	728	-1 888	2 616	489	-350	839
LC6	1 780	-4 685	6 465	464	-291	754
LC7	1 139	-3 326	4 465	266	-234	500

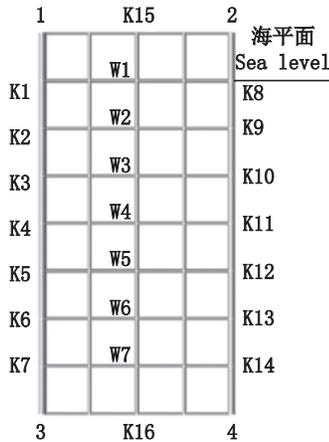


图8 模型1节点示意图

Fig. 8 Schematic of nodes from member model

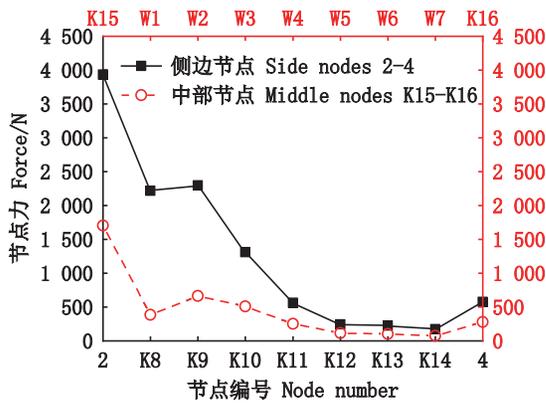


图9 工况LC1下网衣结构受力分布情况

Fig. 9 Force distribution of the plane net under LC1

根据上述基于模型1开展的工况LC3、LC4、LC5作用下平面网衣动力时程响应计算所得结果,研究不同波高下平面网衣结构的受力分布特征。图10给出了网衣结构受力分布受波高的影

响,不同位置节点X方向节点力标准差数值见表6。由图10可知,网衣结构受力分布规律基本不变,最大受力位置在顶部连接柱两端,不受波高的影响;网衣结构各处受力随波高的增大而增加,上部节点受力比下部节点增长更快,这说明波高对上部节点受力的影响比下部节点受力的影响更大。

4 结论

本文基于有限元法,采用Morison模型,在软件SACS中建立了一种平面网衣水动力荷载计算模型,并开展了多种波流工况下的网衣结构动力响应计算,经对比分析得出以下结论:

(1)与文献[23]中平面网衣动力时程响应结果相比,基于本文模型计算所得结果数值偏差在10%以内,表明该数值模型在模拟波流作用下平面网衣水动力特性方面是可行的。

(2)网衣所受水动力荷载随海流流速、波高或波周期的改变而显著变化,海流流速、波高和波周期是影响网衣受力的重要因素。

(3)网衣受力呈现由上至下的减小趋势,顶端两侧受力最大,位置不受波高的影响。网衣受力随波高的增大而增大,网衣上部受波高的影响较大,下部受波高的影响较小。

(4)后续研究计划将本文建立的平面网衣水动力计算模型用于“大型钢结构养殖网箱+固定式海上风力机”融合结构的数值模拟,从而开展融合结构的设计与校核。

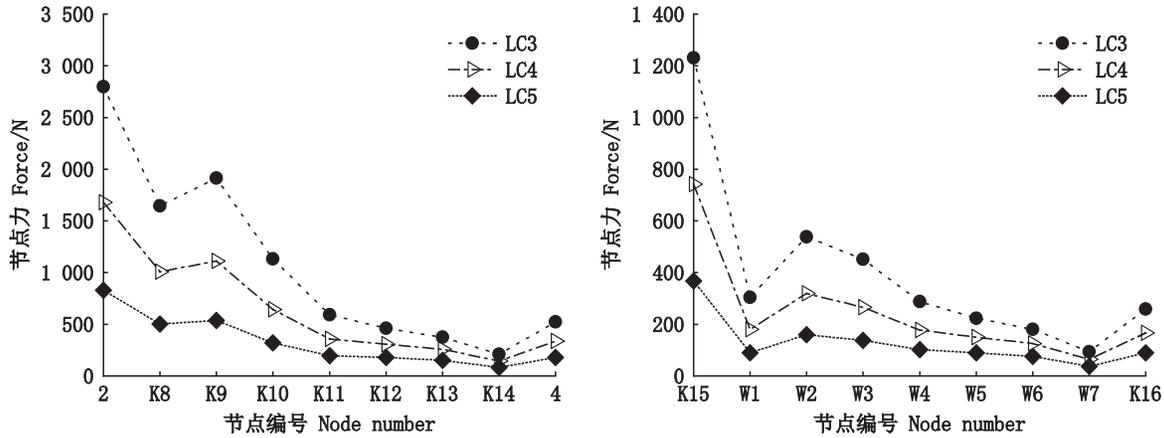


图 10 工况 LC3、LC4、LC5 下网衣结构受力分布情况

Fig. 10 Force distribution of the plane net under LC3, LC4 and LC5

表 6 波流作用下模型 1 不同位置节点处 X 方向节点力标准差

Tab. 6 Standard deviation of nodal force in X direction at different nodes from member model under wave and

工况 Cases	标准差 SD								
	2	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	4
LC1	3 939	2 220	2 306	1 328	588	274	235	174	574
LC3	2 799	1 646	1 915	1 132	591	461	376	210	523
LC4	1 679	1 007	1 111	645	358	305	258	144	336
LC5	830	504	537	320	198	177	151	82	178

工况 Cases	标准差 SD								
	K15	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	K16
LC1	1 709	388	671	519	271	138	113	80	279
LC3	1 231	304	538	451	288	223	181	94	259
LC4	742	180	319	266	178	150	126	64	167
LC5	368	89	160	137	102	90	75	37	89

参考文献:

[1] BUCK B H, LANGAN R. Aquaculture perspective of multi-use sites in the open ocean: the untapped potential for marine resources in the anthropocene [M]. Cham: Springer, 2017.

[2] 吴迪, 任重进, 韩荣贵, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展现状与实践探索[J]. 中国渔业经济, 2023, 41(3): 78-84.

WU D, REN Z J, HAN R G, et al. Exploration and practice of offshore wind power and marine ranching integration development technology[J]. Chinese Fisheries Economics, 2023, 41(3): 78-84.

[3] CHU Y I, WANG C M, PARK J C, et al. Review of cage and containment tank designs for offshore fish farming[J]. Aquaculture, 2020, 519: 734928.

[4] 吴元紧, 黄小华, 庞国良, 等. 潜浮式船型桁架结构深海养殖网箱避浪性能研究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 18-28.

WU Y J, HUANG X H, PANG G L, et al. Study on wave

resistance performance of a submersible deep-sea aquaculture cage with vessel-shaped truss structure [J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43(6): 18-28.

[5] 刘瑾, 曹红艳, 王金虎. 蔚蓝三问——山东烟台海洋经济发展调查(上)[J]. 走向世界, 2021(9): 24-27.

LIU J, CAO H Y, WANG J H. Three questions for the blue sea: Investigation of the development of marine economy in Yantai, Shandong (I) [J]. Openings, 2021(9): 24-27.

[6] 曾雨欣, 施伟, 张礼贤, 等. 10 MW 大型单桩式海上风机桩土作用研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(1): 1-12.

ZENG Y X, SHI W, ZHANG L X, et al. Research on pile-soil interaction of 10 MW large monopile offshore wind turbine[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(1): 1-12.

[7] MOE H, FREDHEIM A, HOPPERSTAD O S. Structural analysis of aquaculture net cages in current[J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(3): 503-516.

[8] SIM J, CHENG H, AARSÆTHER K G, et al. Numerical

- investigation on the cage-to-cage wake effect: A case study of a 4×2 cage array [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2021, 143(5): 051301.
- [9] 崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 基于有限元方法对鲆网箱耐流特性的数值模拟[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(6): 51-54, 60.
CUI Y, GUAN C T, WAN R, et al. Numerical simulation for the anti-current characteristic of flatfish cage based on FEM [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(6): 51-54, 60.
- [10] 崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 浮式鲆类网箱在波流场中动态响应的数值模拟[J]. *工程力学*, 2015, 32(3): 249-256.
CUI Y, GUAN C T, WAN R, et al. Numerical simulation of floating flatfish cage behaviour under waves and currents [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(3): 249-256.
- [11] CHENG H, ONG M C, LI L, et al. Development of a coupling algorithm for fluid-structure interaction analysis of submerged aquaculture nets [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 243: 110208.
- [12] CHENG H, LI L, ONG M C. Comparative study of five commonly used gravity type fish cages under pure current conditions [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 250: 110977.
- [13] LI L, JIANG Z Y, VANGDAL HØILAND A, et al. Numerical analysis of a vessel-shaped offshore fish farm [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2018, 140(4): 041201.
- [14] LIU H Y, CHEN M S, HAN Z L, 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.
- [15] 胡克, 耿宝磊, 赵旭, 等. 水流作用下的渔网水动力数值方法研究[J]. *水道港口*, 2019, 40(2): 199-205.
HU K, GENG B L, ZHAO X, et al. A numerical method for hydrodynamic loads of the net [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2019, 40(2): 199-205.
- [16] 陈天华, 潘昀, 孟昂, 等. 桩柱式围网单元网片在水流作用下的水动力特性研究[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2017, 32(4): 511-519.
CHEN T H, PAN Y, MENG A, et al. Study on the hydrodynamics of unit net panel of the column-type net enclosure in currents [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2017, 32(4): 511-519.
- [17] 陈天华, 孟昂, 桂福坤. 波浪高度及方向对桩柱式围网养殖系统网片水力特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 245-251.
CHEN T H, MENG A, GUI F K. Effect of wave height and direction on hydraulic characteristics of net of pile-column type net enclosure aquaculture system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(2): 245-251.
- [18] 陈天华, 潘昀, 冯德军, 等. 固定方式对水流作用下桩柱式围网网片力学特性的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(3): 452-460.
CHEN T H, PAN Y, FENG D J, et al. Effect on hydrodynamics of unit net of a column-type net enclosure aquaculture engineering in current by fixations [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(3): 452-460.
- [19] 朱传之, 杨永春, 黄六一, 等. 基于OpenFOAM的全潜式网箱网衣系缚方式研究[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(8): 1079-1090.
ZHU C Z, YANG Y C, HUANG L Y, et al. Study on fixing modes of netting for the fully submerged cage based on OpenFOAM [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(8): 1079-1090.
- [20] 张婧, 孙立文, 周游, 等. 组合钢架式网箱水动力性能分析[J]. *渔业现代化*, 2022, 49(6): 27-34.
ZHANG J, SUN L W, ZHOU Y, et al. Analysis of hydrodynamic performance of combined rigid frame cage [J]. *Fishery Modernization*, 2022, 49(6): 27-34.
- [21] KRISTIENSEN T, FALTINSEN O M. Modelling of current loads on aquaculture net cages [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 34: 218-235.
- [22] CHENG H, LI L, AARSÆTHER K G, et al. Typical hydrodynamic models for aquaculture nets: A comparative study under pure current conditions [J]. *Aquacultural Engineering*, 2020, 90: 102070.
- [23] SHI L H. Dynamic analysis of semi-submersible offshore fish farm operated in China East sea [D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2019.
- [24] LADER P, JENSEN A, SVEEN J K, et al. Experimental investigation of wave forces on net structures [J]. *Applied Ocean Research*, 2007, 29(3): 112-127.
- [25] SCHLICHTINGH. *Boundary-layer theory* [M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [26] FREDHEIM A. Current forces on net structure [D]. Norway: NTNU, 2005.
- [27] LØLAND G. Current forces on and flow through fish farms [D]. Norway: NTNU, 1991.
- [28] LADERP F, ENERHAUGB. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2005, 30(1): 79-84.
- [29] 竺艳蓉. *海洋工程波浪力学* [M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
ZHU Y R. *Wave mechanics for ocean engineering* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1991.

Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of the plane net under waves and currents

LI Na^{1,2}, LI Xin^{1,2}, SHI Wei^{2,3}, LIU Chunguang^{1,2}

(1. *Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*; 2. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*; 3. *Deepwater Engineering Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*)

Abstract: To conduct research on hydrodynamic characteristics of the plane net fixed on steel frame, a finite element model of the plane net was established with member elements to calculate hydrodynamic loads based on SACS. Comparing the previous calculation results of the truss model and those of the beam model, it is found that the simulation results are similar, which proves that the member model is accurate. This preliminary study proves the feasibility of simulating the integrated structure that consists of fixed offshore wind turbine and large steel aquaculture cage in SACS. Furthermore, the member model was used for hydrodynamic loads calculation of the plane net under wave and current. The results show that current velocity, wave height and wave period have a significant effect on the hydrodynamic loads on the plane net. Within the decrease of current velocity, wave height and the increase of wave period, the hydrodynamic load on the net decreases. The influence of wave period is particularly significant, with the certain nodal force difference of up to 80%. For the hydrodynamic load on the net under the action of wave and current, the maximum load appears on both sides of the top position of the plane net, and the wave height has a greater influence on the load at the upper position. These results are expected to provide theoretical basis and technical support for the design of large steel cage in the integrated structure.

Key words: plane net; hydrodynamic load; wave and current; finite element method; Morison model

上海海洋大学海洋生物资源与管理学院 向全球诚聘英才

上海海洋大学建于1912年,是多科性应用研究型大学。2017年9月入选国家“世界一流学科建设高校”。2022年2月入选第二轮“双一流”建设高校及建设学科名单。学校现有4个一级学科博士学位授权点、14个一级学科硕士学位授权点,4个博士后科研流动站。植物与动物科学、农业科学、环境/生态、工程学、生物学和生物化学5个学科进入ESI国际学科排名全球前1%。拥有我国第一艘远洋渔业资源调查船“淞航”号。

海洋生物资源与管理学院始于1912年的渔捞科,历史悠久,是水产一流学科的重要支撑学院。学院以“水域生物资源养护、开发、利用与管理”为主线,到2035年将建设成为现代渔业高质量发展的人才培养、科技创新、渔业治理与文化遗产,在国际上有重要影响力的研究型学院。

学院现有海洋渔业科学与技术、海洋资源与环境、社会工作三个本科专业,以及水产学一级学科博士点、海洋生物二级学科博士点,法学一级学科硕士点,公共管理专业学位硕士点和农业推广渔业领域专业学位硕士点。建有国家远洋渔业工程技术研究中心、大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室、农业农村部大洋渔业可持续利用重点实验室、中国远洋渔业数据中心、农业农村部远洋渔业培训中心、农业农村部长江水域生态环境保护战略研究中心、水产类国家教学示范中心等国家和省部级平台。

学院积极拓展对外合作,与美国、日本、挪威、澳大利亚、新西兰、韩国等国家(地区)的大学及联合国粮农组织、亚洲水产学会、南极生物资源养护委员会等国际组织有着密切交流与合作,与100多所海外高校、科研机构签订合作协议,为开展国际化交流、合作提供了平台。

为满足学科发展与“双一流”建设需要,上海海洋大学海洋生物资源与管理学院诚邀海内外优秀学者加盟,学校和学院将联手为您搭建一流教学科研平台,提供有竞争力的薪资待遇,保障优秀人才的事业发展。

1. 招聘岗位与研究方向:

拟招聘学术岗位如下:教授,副教授,讲师,博士后

主要研究方向如下:渔具渔法学,渔业工程装备,渔业声学,渔业资源评估与管理,渔业资源生物学,渔业(生物)海洋学,海洋法与渔业管理,渔业文化与社会,等。

2. 申请条件:

面向相关领域优秀中青年学术人才,基本要求如下:国内外知名大学海洋、渔业、法学、社会学等相关学科博士毕业、具有国内外科研单位或企业的研究/工作经历者优先;学术研究成果优良;身体健康,积极乐观,具备突出的学术创新精神与职业情怀;年龄原则上不超过40周岁,引进后应全职归国工作;以及境外知名大学刚退休的优秀学者全职来院工作。

3. 相关待遇:

对于入选者,我们将提供具有竞争力的薪资、科研启动费及住房补贴等,优先保障其学术发展空间。入选国家、市级人才的具体待遇面议。

网站:<https://rczp.shou.edu.cn/>

4. 应聘方式:

应聘者可向上海海洋大学海洋生物资源与管理学院提交个人简历与申请(含:教育经历、研究经历、主要学术成果介绍、自我学术评价、未来研究规划等等)。

联系人:李莹春老师

E-mail:ycli@shou.edu.cn