

文章编号: 1674-5566(2023)05-1036-12

DOI: 10.12024/jsou.20230604214

近岛礁海域多体浮式渔场平台的动力响应分析

赵德辉¹, 解斯达², 马超², 贾广臣²

(1. 长海县海洋与渔业综合行政执法队, 辽宁 大连 116599; 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)

摘要: 近岛礁海域距离大陆较远, 风浪较小, 已经成为发展水产养殖业的重点区域。研究发现, 岛礁附近强烈的波浪反射会导致波浪能量的相对集中, 进而造成养殖结构破坏。目前, 有关养殖结构动力响应的研究大多集中在平坦海床海域, 针对近岛礁海域的研究相对较少。为此, 本文通过物理模型试验研究了一种布置在岛礁附近的铰接式多体浮式渔场平台在自存工况下的动力响应。结果表明: 在自存工况下, 岛礁地形增大了渔场平台的纵荡运动, 其功率谱峰值相比平坦海床增加 61.78%; 平台迎浪侧系缆力的有效值增大为平坦海床的 2.03 倍。同时, 岛礁地形引起的波浪反射使平台垂荡运动最大的位置由迎浪侧网箱转移至中间网箱, 平台整体的纵摇运动减弱, 但中间网箱与两侧网箱的相对转动增大。研究结果为近岛礁海域养殖设施及其系泊系统的设计提供理论参考。

关键词: 岛礁地形; 多体浮式渔场平台; 动力响应; 物理模型试验; 不规则波

中图分类号: S 969 **文献标志码:** A

水产养殖是保障人类粮食和营养安全的重要方式, 随着世界人口的持续增长, 预计到 2030 年, 人们对水产品的需求将达到 1.8 亿 t^[1]。然而, 近年来, 近海海域高密度的网箱养殖导致水产品质量不断下降, 环境污染逐渐加剧, 严重制约了水产养殖业的可持续发展。2023 年 6 月, 农业农村部等 8 部门联合下发了《关于加快推进深远海养殖发展的意见》, 鼓励在低潮位水深不小于 20 m 或离岸 10 km 以上的海域发展水产养殖。相比近海海域, 深远海海域恶劣复杂的环境条件导致近海养殖结构很难应用, 而远海岛礁由于天然的地形掩护, 其附近海域风浪较小, 已成为发展深远海养殖的重点区域。目前已形成龟龄岛、万山列岛、南澳岛、汕尾遮浪角、南麂岛等多个国家级海洋牧场示范区^[2]。但岛礁地形在遮蔽外海风浪的同时, 也会引起强烈的波浪反射, 进而造成养殖结构破坏。因此, 分析岛礁地形对养殖结构动力响应的影响十分必要。

重力式网箱是目前海水养殖中广泛应用的养殖结构, 通常以网箱群组的形式布置于近海

海域。这种布置形式不仅有利于提高从业人员的管理效率, 更有助于降低养殖过程中的生产成本。然而, 与单体网箱不同, 网箱群组内部不同位置网箱的运动和系泊必然存在着相互干扰, 进而影响整体的安全与稳定。为解决上述问题, 国内外学者进行了大量研究。LØLAND^[3]将矩形网箱群组视为垂直和平行水流方向的网片组合, 基于模型试验结果提出了一种计算恒定水流作用下网箱群组受力的公式, 并针对网箱位置、网衣变形、网箱群组的布置方式等方面给出建议。FREDRIKSSON 等^[4]基于简化的控制体积法建立数值模型, 计算了 4×5 布置的网箱群组在清洁和污损网衣条件下网箱内外流速和系缆力, 并与现场试验结果进行比较。XU 等^[5]基于集中质量法和刚体运动学原理讨论了波浪入射方向对不同布置形式网箱群组系泊力的影响。MARTIN 等^[6]提出了一种非线性隐式方法, 用于求解网箱附近流场, 以及波浪和水流作用下网箱群组的变形。除了水动力研究外, 网箱群组由于自身结构尺度较大, 其对养殖海域波

收稿日期: 2023-06-11 修回日期: 2023-08-07

基金项目: 大连市科技创新基金项目(2020RJ02)

作者简介: 赵德辉(1971—), 男, 研究方向为海洋牧场研究与管理。E-mail: 875883588@qq.com

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>

浪场的影响也不容忽略。SELVAN 等^[7]使用特征函数展开法和最小二乘法讨论了波浪与网箱群组的相互作用,通过计算远场波浪的功率耗散、反射波幅和透射波幅等物理量,论证了网箱群组作为防波堤的可行性。

上述研究主要集中于传统的重力式网箱群组,这类结构较难适应深远海海域恶劣的环境条件。同时,随着海洋工程技术的不断发展,通过系泊缆连接的重力式网箱群组逐渐向大型深远海养殖平台转型。例如,挪威 NORDLAKS 公司生产的 JOSTEIN ALBERT、中船重工武船集团建造的深蓝 1 号和山东海洋集团投资建造的耕海 1 号等。围绕大型深远海养殖平台的水动力问题,国内外学者也进行了大量研究。LI 等^[8]采用商业软件 WADAM 计算了一种单点系泊的船型渔场平台在不同波流条件下的运动响应和系缆力,并比较了水流作用下采用刚性和柔性网衣模型的计算结果。黄小华等^[9]基于模型试验结果讨论了不同波况条件下系泊方式和压载条件对半潜式桁架结构渔场平台动力特性的影响。BI 等^[10]等通过静水衰减和规则波试验研究了多模块水产养殖平台的运动响应,并得到了平台的自振周期、阻尼系数以及系泊系统在静水中的水平刚度。MA 等^[11-15]结合边界元法和集中质量模型研究了波浪参数,连接方式对多模块水产养殖平台运动响应,系缆力和连接件受力的影响,并基于模型试验结果讨论了养殖平台附近的波浪场。

综上,国内外学者在养殖结构的动力响应、网衣变形以及结构附近波浪场等方面进行了大量且深入的研究,但关于海床地形对养殖结构水动力影响的研究目前较少。随着近海优良养殖区域的逐渐饱和,围绕远海岛礁等非平坦海床地区开展水产养殖已经成为现实。另外,数值计算常用的近岸水波模型中引入了多种假定和经验系数导致部分计算结果准确度欠佳。例如,射线理论假设无能量跨越波向线,当海底坡度较大,地形复杂时,会出现焦散和盲区现象。为解决上述问题,本文采用物理模型试验研究了不规则波作用下近岛礁海域多体浮式渔场平台的动力响应。研究结果可为后续数值计算积累试验数据,同时也为近岛礁海域养殖结构及其系泊系统的设计提供理论参考。

1 试验设置

1.1 试验设备与仪器

物理模型试验是在大连理工大学宁波研究院波流综合模拟水槽中进行,如图 1 所示。水槽全长 30 m,宽 2 m,最大工作水深 1 m,配备伺服电机驱动式造波机,可模拟规则波和常见波谱的不规则波。渔场平台 3 个浮框上各布置有 2 个 LED 灯泡作为 GL-JR-5 型 CCD 工业相机的跟踪点,采样频率 25 Hz,运动数据通过对图像后处理提取。系缆力采用 GF-1CU 型水下拉力传感器测量,传感器量程 50 N,采样频率 100 Hz,仪器温度特性,水密性良好。试验总时长 180 s,选取波浪稳定段(20~170 s)试验数据进行分析讨论。



图 1 大连理工大学宁波研究院波流水槽

Fig. 1 Wave-current flume at the Ningbo Institute of Dalian University of Technology

1.2 物理模型设计

多体浮式渔场平台由 3 个通过铰链连接的单体网箱组成,如图 2 所示。对于网箱串联连接的渔场平台,铰接能够更有效地消除纵向弯矩对结构运动的影响^[11]。渔场平台以四点锚碇的形式固定在水槽中,采用悬链线式系泊,系泊缆由顶端的尼龙锚绳和底部钢制锚链共同组成。多组分的系泊缆兼顾了系泊系统的刚度和质量。系泊系统的水平恢复力主要由水中的锚链悬挂段和水底卧链段重力提供。对于试验比尺,波浪模型试验中常用的比尺为 1:10~1:100^[16],结合试验水槽和物理模型的实际尺寸,为尽可能减弱边壁效应,试验中使用的模型比尺 $\lambda_1=1:60$ 。试验中保证原型与模型之间的 Froude 数和 Strouhal 数相等,即满足两者的重力和惯性相似,试验水深 0.7 m。



图2 多体浮式渔场平台

Fig. 2 Multi-body floating aquaculture platform

渔场平台由框架系统、网衣系统、配重系统和系泊系统等4个部分组成,模型主要参数见表1。框架系统是渔场平台承受波浪荷载的主要构件,由于原型渔场平台整体采用钢结构制作,其变形较小。试验中忽略了原型框架与模型的弹性相似,使用刚度较大的有机玻璃制作模型。对于网衣系统,由于原型网衣的网线直径和网目尺寸较小,制作严格遵循几何相似的模型网衣十分困难。为此,本文基于李玉成等^[17]和桂福坤等^[18]提出的变尺度重力相似准则模拟原型网衣,如图3所示,其中变尺度主要指网衣的长度和高度采用与平台其他构件相同的比尺 $\Lambda_1=1:60$,而对于网目大小和网线直径则采用另一模型尺度 $\Lambda_2=1:5$,从而减小模型网衣对水流流态的改变和试验中雷诺数的大幅变化,保证水动力相似和网衣模型制作的可行。另外,由于变尺度重力相似准则与田内相似准则的根本差异在于

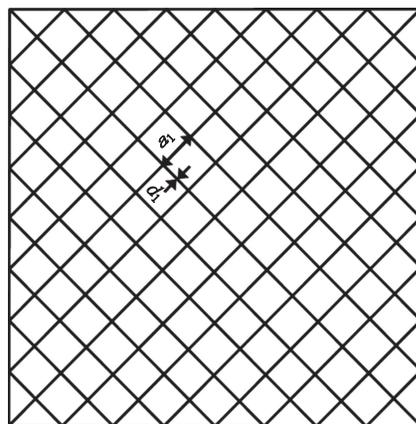
网衣质量^[18],为满足重力相似条件,在试验过程中需对模型网衣的质量进行修正,计算公式如下。模型网衣的质量修正通过调整渔场平台配重进行。试验模型的其他参数可参考文献^[19]。

$$\Delta W = (\Lambda_2 - \Lambda_1) \times \left(\frac{\pi d_1^2}{4 a_1 \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \times (\rho_n - \rho) \times q \times S_{net} \quad (1)$$

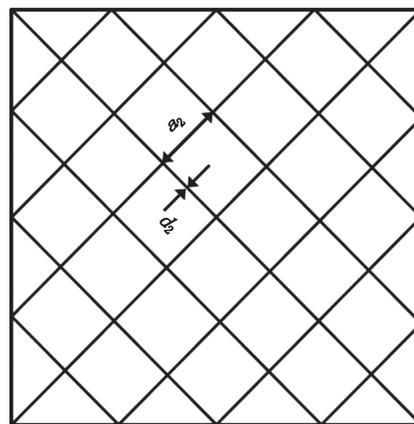
式中: ΔW 为模型网衣的修正质量; a_1 为原型网目边长; d_1 为原型网线直径; μ_1 、 μ_2 为网目水平和垂直缩结系数; ρ_n 为网线密度; ρ 为水密度; q 为网线填充率; S_{net} 为模型网衣的缩结面积。

表1 网箱的物理模型参数
Tab. 1 Structural parameters of the cage

组件 Component	模型值 Model value	原型值 Prototype value
框架长度 Length/m	0.60	36.00
框架高度 Height /m	0.05	3.00
框架吃水 Draft/m	0.03	1.80
框架质量 Mass/kg	2.93	631 800
网衣长度 Length/m	0.50	30.00
网衣高度 Height /m	0.25	15.00
网目边长 Mesh size/mm	5.00	25.00
网线直径 Twine diameter/mm	1.00	5.00
锚链长度 Chain length/m	1.35	81.00
锚链直径 Chain diameter/mm	1.50	90.00
锚链质量 Chain mass/(kg/m)	0.04	147.60
锚绳长度 Nylon length/m	0.40	24.00
锚绳直径 Nylon diameter/mm	0.56	33.60



(a) 原型网衣 Prototype net



(b) 模型网衣 Model net

图3 网衣系统的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the net system

1.3 试验布置及工况

定义渔场平台迎浪侧网箱为网箱1,中间网

箱为网箱2,背浪侧网箱为网箱3。参考NING等^[20]和柳淑学等^[21]的研究,采用斜坡来简化岛礁

附近变化的海床,如图4所示。斜坡的水平长度为4.00 m,垂直高度为0.8 m,斜坡倾角的正切值为0.2。同时,基于国家海洋局珠海中心站水文资料,选取二十年一遇海况作为渔场平台的自存工况,讨论岛礁地形对结构动力响应的影响。试验中采用GODA^[22]改进的JONSWAP谱作为波浪谱,具体参数见表2。图5为入射波浪的波浪谱。

波浪谱 $S(f)$:

$$S(f) = \beta_1 H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-1.25 (T_p f)^{-4} \right] \cdot \gamma^{\exp \left[-(f/f_p - 1)^2 / 2\sigma^2 \right]} \quad (2)$$

参数 β_1 :

$$\beta_1 = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1} \cdot (1.094 - 0.01915\ln\gamma)} \quad (3)$$

式中: T_p 为谱峰周期; $H_{1/3}$ 为有效波高; f 为波浪频

率; f_p 为谱峰频率; σ 为峰形参数, $\sigma=0.07(f < f_p)$, $\sigma=0.09(f \geq f_p)$; γ 为谱峰因子,第15届国际船舶试验池会议(ITTC)建议采用JONSWAP的平均波谱($\gamma=3.3$)作为有限风区的波浪谱^[23]。

2 数据处理与误差分析

2.1 数据处理方法

采用上跨零点法和直接周期图法分别计算不规则波作用下渔场平台运动响应,系缆力的统计值及其对应的功率谱密度函数,计算公式如下:

表2 不规则波参数

Tab. 2 Irregular Wave Parameters

原型波高 H_s/m	原型周期 T_p/s	模型波高 H_s/cm	模型周期 T_p/s	工况 Condition	重现期 Recurrence period/y
6.00	11.23	10	1.45	自存	20

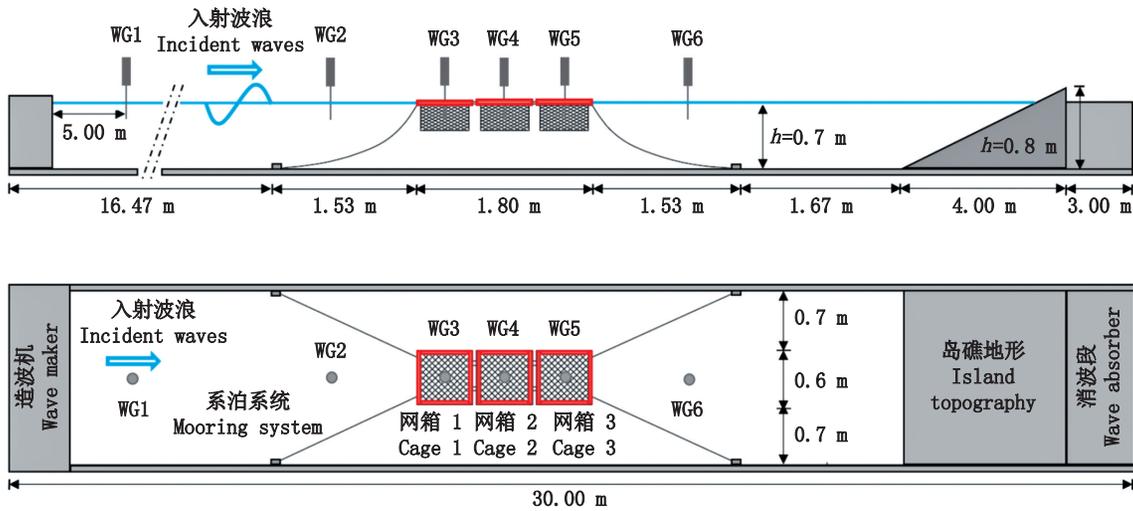


图4 试验布置图

Fig. 4 Schematic view of the experimental setup

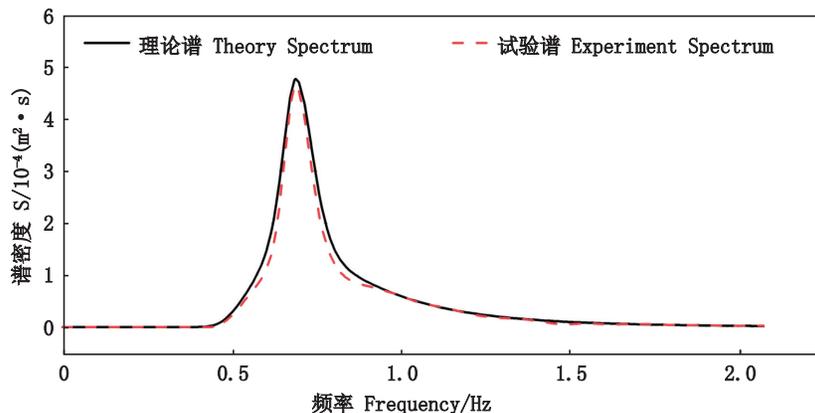


图5 入射波浪的波浪谱

Fig. 5 Wave spectrum of incident wave

$$Z(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \xi(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \xi(i) e^{-j\omega(i\Delta t)}$$

$$-\infty < \omega < \infty \quad (4)$$

式中: $\xi(t)$ 为试验采集到的时域信号; $Z(\omega)$ 为 $\xi(t)$ 对应的傅里叶变换。

将 $Z(\omega)$ 的实部和虚部分开, 可写作:

$$Z(\omega) = C(\omega) - jQ(\omega) \quad (5)$$

式中:

$$C(\omega) = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \xi(i) \cos(\omega i \Delta t) \quad (6)$$

$$Q(\omega) = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \xi(i) \sin(\omega i \Delta t) \quad (7)$$

功率谱密度函数 $S(\omega)$ 为

$$S(\omega) = C^2(\omega) + Q^2(\omega) \quad (8)$$

2.2 试验误差分析

为减小系统误差, 在试验正式开始前, 首先对拉力传感器进行严格标定。同时, 由于结构运动图像所在坐标系与试验参考的大地坐标系不同, 需测量模型在静水中处于平衡位置的运动数据, 作为坐标系转换的参考^[23]。另外, 在电压波动、环境温度和湿度变化等不稳定因素的影响下, 试验数据中必然会引入随机误差。本文采用SAVITZKY-GOLAY低通滤波器^[24]消除数据中的高频不规则振荡。最后, 基于波浪模型试验规程^[25]的规定, 每组试验重复3次, 取其平均值作为代表值。为避免各组试验相互干扰, 每次试验完成后需等待10~20 min左右, 再进行下一组试验。

3 结果分析

渔场平台在自存工况下表现出波频和低频两种运动特征, 其中波频运动指平台在波频荷载作用下产生的运动, 波频荷载量级最大, 能量范围最广; 低频运动指平台在差频波浪引起的二阶波浪荷载作用下产生的运动。另外, 由于试验中波浪的入射方向与结构的长度方向相同且保持不变, 渔场平台的运动主要存在于纵荡、垂荡和纵摇方向。

3.1 纵荡运动分析

表3为自存工况下渔场平台纵荡方向运动响应的统计值。由表3可知, 自存工况下岛礁地形增大了平台的纵荡运动。图6a和6b分别为平坦海床和岛礁地形影响下渔场平台纵荡运动的历

时曲线。从图6可以看出, 平台内部3个网箱纵荡运动的历时曲线基本重合。上述现象产生的原因在于本文研究的多体浮式渔场平台各模块通过单向铰链连接, 铰链的存在限制了网箱的相对平动, 使3个网箱的纵荡运动十分接近^[13]。

由于平台3个网箱的纵荡运动十分接近, 选取距离岛礁地形最近的网箱3作为代表, 讨论近岛礁海域渔场平台纵荡运动的频域特性, 如图7所示。由图7可知, 渔场平台的纵荡运动主要集中在低频区域。相比平坦海床, 岛礁地形对平台纵荡运动的功率谱宽度影响不大, 功率谱峰值增大61.78%。因此, 对于布置在近岛礁海域的渔场平台, 应注意防范自存工况下纵荡方向低频运动增大对系泊系统的影响。

3.2 垂荡运动分析

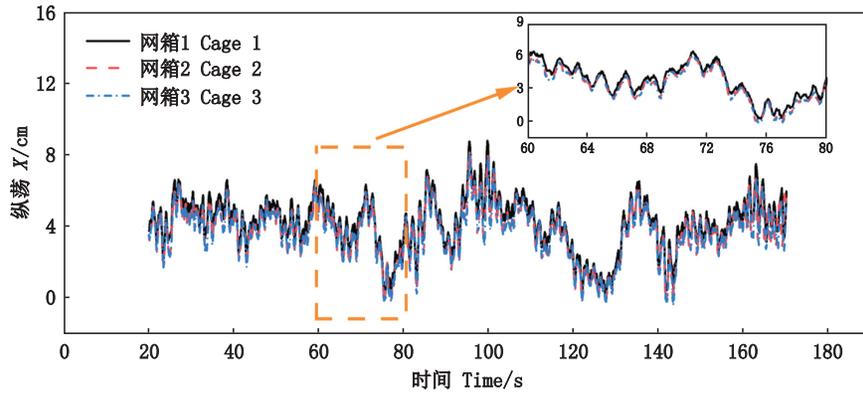
表4和图8分别为自存工况下渔场平台垂荡运动的统计值和功率谱密度函数图像。结合图表中的数据可知, 自存工况下渔场平台的垂荡方向仅存在波频运动。相比平坦海床, 岛礁地形引起的波浪反射使网箱1垂荡运动的有效值减小0.69 cm, 谱峰值降低19.52%; 网箱2垂荡运动的有效值增大0.29 cm, 谱峰值增大27.56%; 网箱3垂荡运动的有效值减小0.04 cm, 谱峰值降低6.07%。同时, 比较平台不同位置网箱的垂荡运动可知, 如图9所示, 在自存工况下, 当海底为平坦海床时, 网箱1的垂荡运动最大, 网箱2和网箱3的谱峰值相对于网箱1分别降低29.15%和32.16%, 这与网箱1直接受到波浪作用有关。当平台布置于近岛礁海域时, 结构垂荡运动最大的位置由网箱1转移至网箱2, 网箱1和网箱3的谱峰值相对于网箱2分别降低10.95%和29.42%。因此, 对于近岛礁海域渔场平台, 应适当提高其中间网箱的结构强度。

3.3 纵摇运动分析

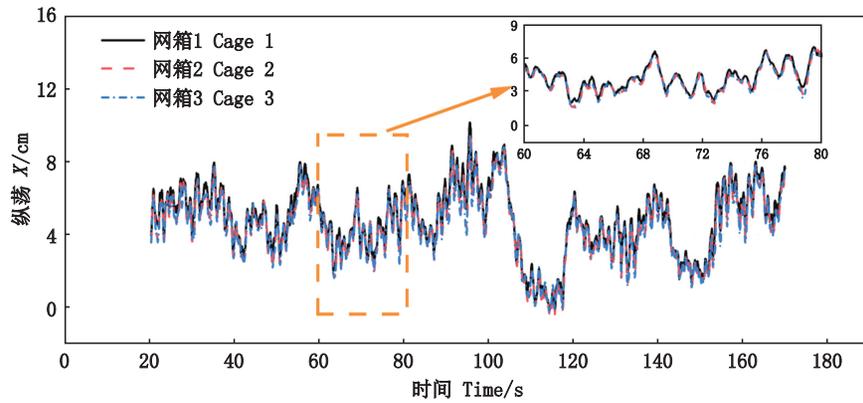
表5和图10分别为自存工况下渔场平台纵摇运动的统计值和功率谱密度函数图像。结合图表中的数据可知, 自存工况下渔场平台的纵摇方向仅存在波频运动。岛礁地形降低了结构的纵摇运动, 其中, 网箱1对应的谱峰值降低26.77%, 网箱2降低6.11%, 网箱3降低27.14%。同时, 比较平台不同位置网箱的纵摇运动可知, 如图11所示, 当平台位于平坦海床附近时, 网箱2和网箱3的纵摇运动接近, 网箱1的纵摇运动最

表 3 渔场平台纵荡运动统计值
Tab. 3 Statistical values of surge motion of aquaculture platform

位置 Position	地形 Topography	最大值 Maximum value/cm	平均值 Mean value/cm	有效值 Significant value/cm	最小值 Minimum value/cm
网箱 1 Cage 1	平坦海床	8.79	4.14	7.46	-0.17
网箱 2 Cage 2	岛礁地形	10.15	4.77	8.66	-0.32
网箱 3 Cage 3	平坦海床	8.22	3.72	7.44	-0.34
网箱 3 Cage 3	岛礁地形	9.68	4.47	8.67	-0.41
网箱 3 Cage 3	平坦海床	8.10	3.68	7.42	-0.38
网箱 3 Cage 3	岛礁地形	9.46	4.44	8.65	-0.28



(a) 平坦海床 Flat seabed



(b) 岛礁地形 Island topography

图 6 渔场平台纵荡运动的历时曲线

Fig. 6 Time history curves of surge motion of the platform

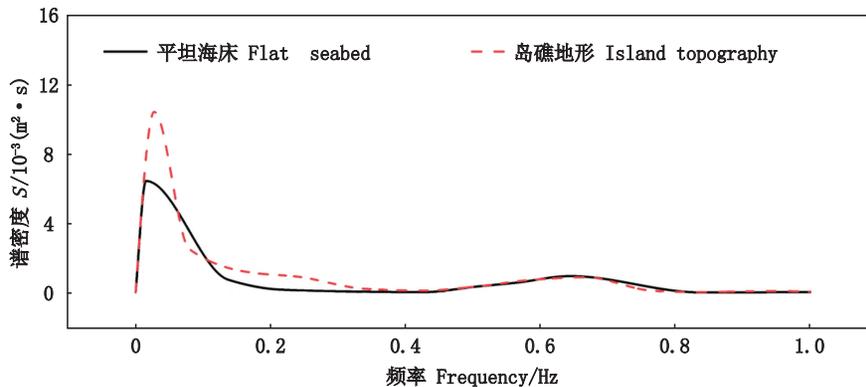


图 7 网箱 3 纵荡运动的功率谱密度函数图像

Fig. 7 Power spectral density of surge motion of the cage 3

表 4 渔场平台垂荡运动统计值
Tab. 4 Statistical values of heave motion of aquaculture platform

位置 Position	地形 Topography	最大值 Maximum value/cm	平均值 Mean value/cm	有效值 Significant value/cm	最小值 Minimum value/cm
网箱 1 Cage 1	平坦海床	5.66	0.03	8.95	-7.85
	岛礁地形	5.36	0.04	8.26	-6.85
网箱 2 Cage 2	平坦海床	5.96	0.02	8.25	-7.32
	岛礁地形	6.36	0.03	8.54	-7.62
网箱 3 Cage 3	平坦海床	6.68	0.02	8.09	-6.79
	岛礁地形	6.74	0.03	8.05	-7.21

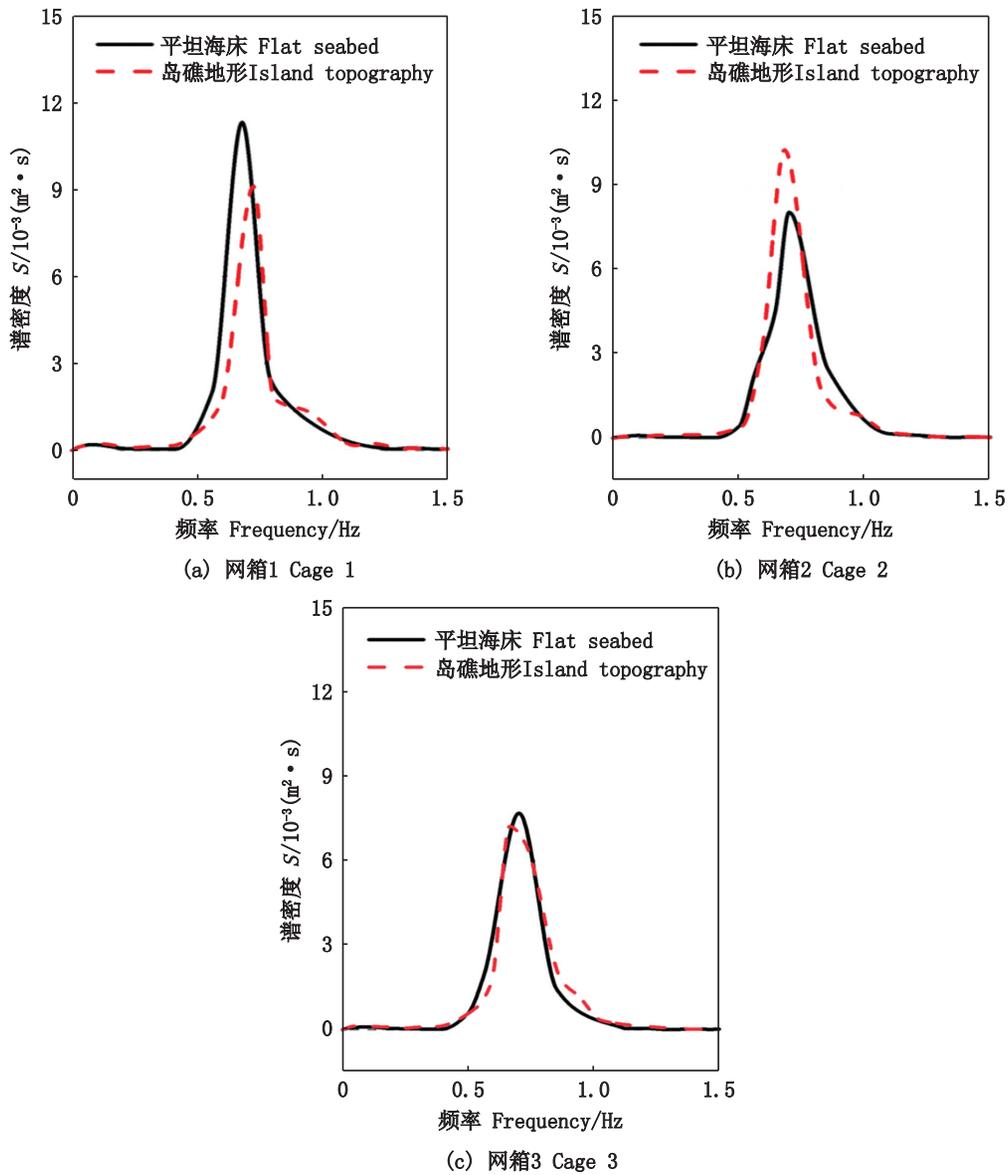


图 8 渔场平台垂荡运动的功率谱密度函数图像

Fig. 8 Power spectral density of heave motion of the platform

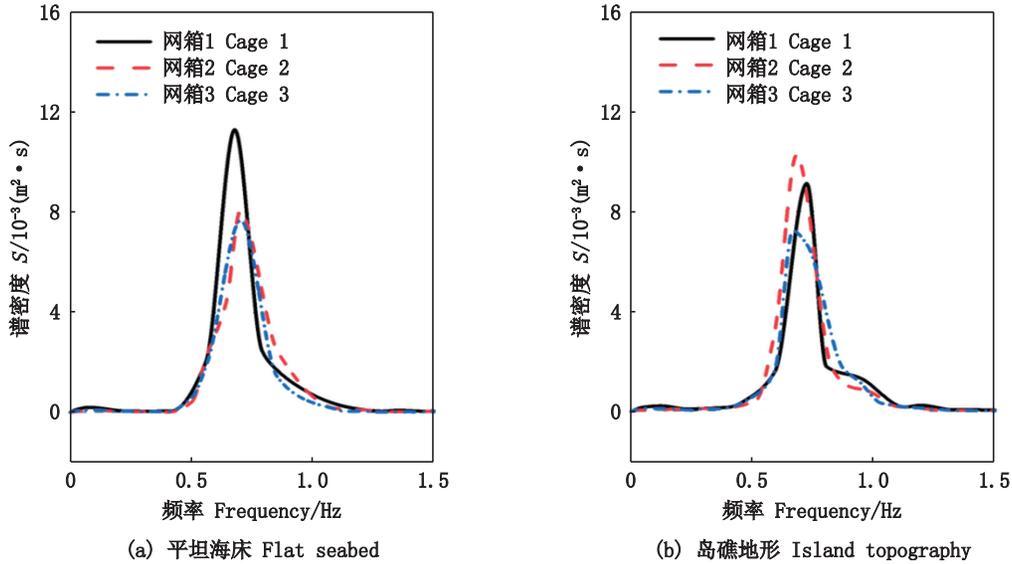


图9 渔场平台不同位置网箱垂荡运动的功率谱密度函数

Fig. 9 Power spectrum density of heave motion of cages at different locations on the platform

表5 渔场平台纵摇运动统计值

Tab. 5 Statistical values of pitch motion of aquaculture platform

位置 Position	地形 Topography	最大值 Maximum value/(°)	平均值 Mean value/(°)	有效值 Significant value/(°)	最小值 Minimum value/(°)
网箱1 Cage 1	平坦海床	10.59	0.02	12.67	-7.89
	岛礁地形	11.32	0.03	12.07	-8.76
网箱2 Cage 2	平坦海床	12.79	0.02	13.76	-10.16
	岛礁地形	13.20	0.02	13.52	-10.28
网箱3 Cage 3	平坦海床	11.69	0.03	13.88	-12.16
	岛礁地形	11.70	0.04	13.35	-12.90

小。相比网箱2,网箱1纵摇运动的有效值减小1.09°,谱峰值降低22.20%,网箱3纵摇运动的有效值增大0.12°,谱峰值增加4.24%。当平台布置在近岛礁海域时,网箱2与两侧网箱的相对转动增大,在数值上表现为网箱2与两侧网箱纵摇运动的差值更大,其中,网箱1和网箱3的纵摇运动的有效值相比网箱2分别降低1.45°和0.17°,谱峰值分别降低39.29%和19.08%。因此,对于近岛礁海域渔场平台,应加强结构两侧的铰链强度,尤其是网箱1和网箱2的连接处。

3.4 系缆力分析

由表6可知,自存工况下岛礁地形增大了平台两侧的系缆力。以有效值为例,近岛礁海域渔场平台迎浪侧系缆力增大为平坦海床的2.03倍,背浪侧系缆力增大38.10%。同时,比较平台两侧的系缆力可知,迎浪侧系缆力的有效值为背浪侧系缆力的7~10倍(平坦海床6.76倍,近岛礁海域9.93倍),即迎浪侧系缆力始终是决定系

泊系统安全稳定的主要因素。由图12可知,自存工况下平台系缆力主要集中在低频和波频范围内。对于迎浪侧系泊系统,岛礁地形显著提高了其低频和波频范围内的系缆力,其中,系缆力低频部分的谱峰值增大为平坦海床的4.46倍,波频部分的谱峰值增大为平坦海床的5.34倍。结合3.1节的讨论可知,系缆力低频部分谱峰值的显著增长与岛礁地形影响下平台纵荡方向较大的低频运动有关。另外,相比波频,低频部分的系缆力对迎浪侧系泊系统的影响更大,系缆力低频部分的谱峰值为波频部分的2~3倍(平坦海床2.86倍,近岛礁海域2.61倍)。对于背浪侧系泊系统,岛礁地形的影响主要集中在波频范围内,其波频部分的谱峰值增大为平坦海床的2.27倍。因此,对于近岛礁海域渔场平台,应提高其迎浪侧系泊系统的强度,并注意防范迎浪侧低频系缆力增大对于系泊系统的影响。

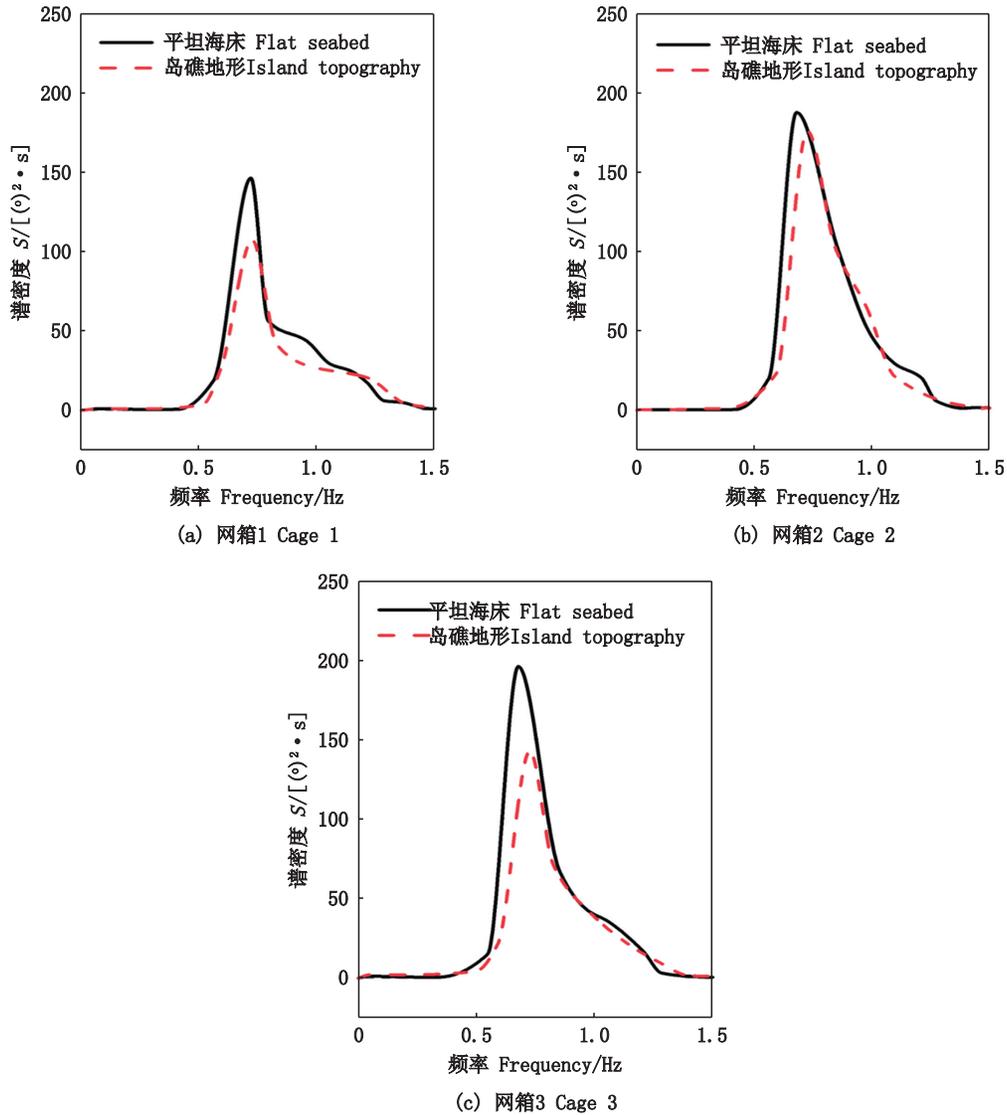


图 10 渔场平台纵摇运动功率谱密度函数图像

Fig. 10 Power spectral density of pitch motion of the platform

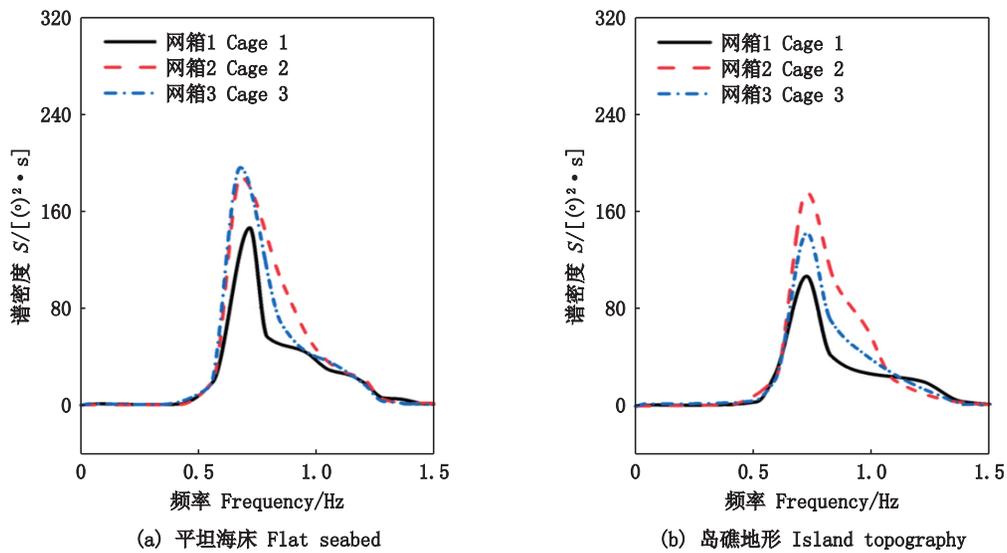


图 11 渔场平台不同位置网箱纵摇运动的功率谱密度

Fig. 11 Power spectrum density of pitch motion of cages at different locations on the platform

表 6 渔场平台系缆力统计值
Tab. 6 Statistical values of cable force of aquaculture platform

位置 Position	地形 Topography	最大值 Maximum value/N	有效值 Significant value/N
迎浪侧 On the windward side	平坦海床	5.08	1.42
	岛礁地形	7.15	2.88
背浪侧 On the back wave side	平坦海床	0.41	0.21
	岛礁地形	0.56	0.29

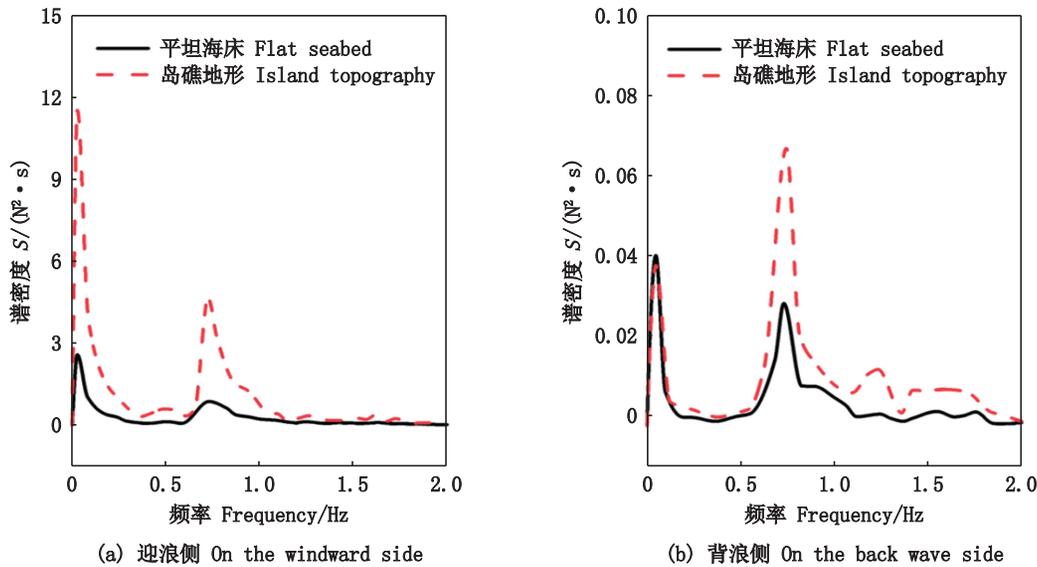


图 12 渔场平台系缆力的功率谱密度函数图像

Fig. 12 Power spectral density of cable force of the platform

4 结论

本文基于物理模型试验结果从时域统计分析和频域谱分析两方面讨论了自存工况下近岛礁海域多体浮式渔场平台的动力响应,得到的主要结论如下:

(1) 渔场平台在中间铰链的约束下,其不同位置网箱的纵荡运动十分接近。渔场平台的纵荡运动主要集中在低频范围内。在自存工况下,岛礁地形显著增大了结构的纵荡运动,其功率谱峰值相比平坦海床增加 61.78%。因此,对于布置在近岛礁海域的渔场平台,应注意防范自存工况下纵荡方向低频运动增大对系泊系统的影响。

(2) 渔场平台的垂荡方向仅存在波频运动。在自存工况下,岛礁地形引起的波浪反射使平台内垂荡运动最大的位置由迎浪侧网箱 1 转移至中间网箱 2。因此,在近岛礁海域布置渔场平台时,应适当提高网箱 2 的结构强度。

(3) 与垂荡类似,渔场平台的纵摇运动集中

在波频范围内。在自存工况下,岛礁地形降低了平台整体的纵摇运动,但增大了网箱 2 与两侧网箱的相对转动,尤其是网箱 1。因此,对于近岛礁海域渔场平台,应加强连接网箱 1 和网箱 2 位置处的铰链强度。

(4) 在自存工况下,渔场平台迎浪侧系缆力始终是决定其系泊系统安全稳定的主要因素。岛礁地形使迎浪侧系缆力的有效值增大为平坦海床的 2.03 倍,低频部分的谱峰值增大为平坦海床的 4.46 倍。因此,对于近岛礁海域渔场平台,应提高迎浪侧系泊系统强度,并注意防范迎浪侧低频系缆力增大对于系泊系统的影响。

综上,本文基于物理模型试验结果分析了岛礁地形对多体浮式渔场平台动力响应的影响。研究结果可为近岛礁海域养殖设施及类似海工结构的设计提供理论参考。另外,受篇幅所限,本文仅讨论了不规则波作用下岛礁地形对平台动力响应的影响,但在近岛礁海域养殖结构的水动力特性方面,仍有大量值得深入研究的内容。例如,岛礁形状及表面植被对养殖结构动力响应

的影响、复杂地形条件下养殖结构的系泊系统设计以及养殖结构对岛礁附近波流场的影响等。

参考文献:

- [1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2018-meeting the sustainable development goals [R]. Rome: FAO, 2018.
- [2] 许强, 刘维, 高菲, 等. 发展中国南海热带岛礁海洋牧场: 机遇、现状与展望[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(5): 173-180.
- XU Q, LIU W, GAO F, et al. Development of marine ranching at tropical island area in South China Sea: Advantages, status and prospects[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(5): 173-180.
- [3] LØLAND G. Current forces on, and water flow through and around, floating fish farms[J]. Aquaculture International, 1993, 1(1): 72-89.
- [4] FREDRIKSSON D W, DECEW J C, TSUKROV I, et al. Development of large fish farm numerical modeling techniques with in situ mooring tension comparisons[J]. Aquacultural Engineering, 2007, 36(2): 137-148.
- [5] XU T J, DONG G H, ZHAO Y P, et al. Numerical investigation of the hydrodynamic behaviors of multiple net cages in waves[J]. Aquacultural Engineering, 2012, 48: 6-18.
- [6] MARTIN T, BIHS H. A non-linear implicit approach for modelling the dynamics of porous tensile structures interacting with fluids [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 100: 103168.
- [7] SELVAN S A, GAYATHRI R, BEHERA H, et al. Surface wave scattering by multiple flexible fishing cage system[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(3): 037119.
- [8] 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.
- [9] 黄小华, 王芳芳, 刘海阳, 等. 系泊和压载方式对半潜式渔场平台动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 48-53.
- HUANG X H, WANG F F, LIU H Y, et al. Effects of mooring systems and ballast status on dynamic behaviors of semi-submersible offshore fish farm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15): 48-53.
- [10] BI C W, MA C, ZHAO Y P, et al. Physical model experimental study on the motion responses of a multi-module aquaculture platform [J]. Ocean Engineering, 2021, 239: 109862.
- [11] MA C, BI C W, XU Z J, et al. Dynamic behaviors of a hinged multi-body floating aquaculture platform under regular waves [J]. Ocean Engineering, 2022, 243: 110278.
- [12] MA C, ZHAO Y P, XU Z J, et al. Experimental investigation on the wave performance with the interference of floating aquaculture cages in single and tandem arrangements [J]. Ocean Engineering, 2022, 262: 112255.
- [13] 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.
- [14] MA C, XIE S D, BI C W, et al. Nonlinear dynamic analysis of aquaculture platforms in irregular waves based on Hilbert - Huang transform [J]. Journal of Fluids and Structures, 2023, 117: 103831.
- [15] 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.
- [16] CHAKRABARTI S K. Offshore structure modeling [M]. Singapore: World Scientific, 1994.
- [17] 李玉成, 桂福坤, 张怀慧, 等. 深水养殖网箱试验中网衣相似准则的应用[J]. 中国水产科学, 2005, 12(2): 179-187.
- LI Y C, GUI F K, ZHANG H H, et al. Simulation criteria of fishing nets in aquiculture sea cage experiments [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(2): 179-187.
- [18] 桂福坤, 李玉成, 张怀慧. 网衣受力试验的模型相似条件[J]. 中国海洋平台, 2002, 17(5): 22-25.
- GUI F K, LI Y C, ZHANG H H. The proportional criteria for model testing of force acting on fishing cage net [J]. China Offshore Platform, 2002, 17(5): 22-25.
- [19] ZHAO Y P, XIE S D, MA C. Experimental investigations on the hydrodynamics of a multi-body floating aquaculture platform exposed to sloping seabed environment [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 1049769.
- [20] NING D Z, LIANG C, CHEN L F, et al. Numerical investigation on the propagation and evolution of focused waves over a sloping bed [J]. Ocean Engineering, 2022, 250: 111035.
- [21] 柳淑学, 胡书义, 李金宣, 等. 斜向和多向波浪的破碎指标研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2017, 32(4): 423-432.
- LIU S X, HU S Y, LI J X, et al. Study on the breaker indices of oblique and multidirectional waves [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics (A), 2017, 32(4): 423-432.
- [22] GODA Y. A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum [J]. Coastal Engineering Journal, 1999, 41(1): 1-20.
- [23] 杨建民, 肖龙飞, 盛振邦. 海洋工程水动力学试验研究

- [M]. 上海:上海交通大学出版社, 2008.
- YANG J M, XIAO L F, SHENG Z B. Marine engineering hydrodynamics experimental research [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2008.
- [24] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8): 1627-1639.
- [25] 中华人民共和国交通部. JTJ/T 234-2001 波浪模型试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2002.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTJ/T 234-2001 Wave model test regulation [S]. Beijing: China Communication Press, 2002.

Dynamic response analysis of multi-body floating aquaculture platform deployed in the sea near islands

ZHAO Dehui¹, XIE Sida², MA Chao², JIA Guangchen²

(1. *Changhai Marine and Fishery Comprehensive Administrative Enforcement Team, Dalian 116599, Liaoning, China*; 2. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*)

Abstract: Due to the long distance from the coastline and mild environmental conditions, the sea near islands has become a key area for the development of aquaculture. It is found that violent wave reflections near islands can lead to a relative concentration of wave energy, which easily causes structural damage to aquaculture facilities. Most of the studies on the dynamic response characteristics of aquaculture facilities have been focused on the flat seabed areas, while there are fewer studies on the sea near islands. To solve this problem, the dynamic response of a hinged multi-body floating aquaculture platform deployed in the sea near islands in the survival condition are studied in this paper by means of physical model experiment. The results show that the presence of island increases the surge motion of the platform and the maximum value of power spectrum density increases by 61.78% compared with that of the flat seabed. The significant value of the cable force on the windward side of the platform increases by 2.03 times compared with that of the flat seabed in the survival condition. At the same time, the wave reflection caused by the island topography has transferred the position of the platform with the largest heave motion from the cage on the windward side to the middle cage. The pitch motion of the platform has been decreased, but the relative rotation between the middle cage and other cages has been increased. The results provide a theoretical reference for the design of aquaculture facilities and mooring system deployed in the sea near islands.

Key words: island topography; multi-body floating aquaculture platform; dynamic response; physical model experiment; irregular wave