

文章编号: 1674-5566(2025)04-0850-12

DOI: 10.12024/jso.20240804624

规则波浪作用下近海浮式光伏平台水动力特性数值模拟

束加庆¹, 贾广臣², 顾晓庆¹, 马超², 倪辉豪², 赵云鹏², 王芳³

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏南京 210036; 2. 大连理工大学 港口海岸及近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116081; 3. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306)

摘要: 为了加快太阳能光伏系统从陆地向海洋发展, 掌握波浪载荷作用下浮式光伏平台的水动力响应特性至关重要。本研究基于计算流体动力学方法(Computational fluid dynamics, CFD)研究了一种浮式光伏平台在规则波浪作用下的水动力响应特性, 并通过物理模型试验进行验证。结果显示, 在波高一定且波长为3~5 m条件下其纵荡运动和垂荡运动均随着波长的增大而增大。在小波高条件下随着波长的增大浮式光伏平台最大系泊力响应也呈现增大的趋势, 但增长趋势平缓, 而当波高为0.2 m且波长大于4.5 m时, 平台的系泊力响应明显激增。研究表明, 当波陡较大时, 入射波浪和浮体平台发生明显的砰击现象, 作用位置主要集中于浮体平台浮筒位置。本研究为海上浮式光伏的设计及优化提供了理论参考和数据支撑, 具有十分重要的科学意义和应用价值。

关键词: 海上浮式光伏; 计算流体动力学; 数值模拟; 规则波浪; 水动力响应

中图分类号: P 752 **文献标志码:** A

太阳能是一种清洁、无污染、易得的可再生能源, 太阳能光伏发电具有无噪音、无污染、建设周期短、安全可靠等优点, 近年来得到广泛应用。然而, 土地资源的紧缺限制了光伏产业的进一步发展^[1-2], 海上漂浮式光伏的出现是打破这一限制的有效手段^[3]。此外, 有研究^[4]表明, 相比等同容量的地面电站, 海上光伏发电量要高出13%左右, 这对延长光伏发电各类设施寿命、提高发电效率有着积极意义。与传统陆地浮式光伏不同, 近海环境下台风、风暴潮等极端灾害天气较为频繁, 因此, 现阶段陆上光伏系统结构设计规范未必能满足海上浮式光伏平台建设需求^[5]。国内外研发机构已研发出多种海上浮式光伏结构型式^[6-7], 如中集来福士研发的中国首个自主知识产权半潜式海上漂浮式光伏发电平台; 挪威Ocean Sun公司研发的一种弹性薄膜式浮式光伏平台; 德国SINPOWER公司于当地码头港湾建造的半潜式光伏平台; 荷兰Solar Duck公司研发的一种半潜式三角形光伏平台模块。上述以及其他现有的海上浮式光伏平台大部分安装于内湾海域,

风浪条件较为平稳, 其结构是否能够承受实际极端海况有待验证。通过物理模型试验或数值模拟方法, 模拟极端海况下浮式光伏平台水动力响应特性, 来评估结构设计的可靠性是一种比较有效的手段。

近些年, 许多国内外学者围绕各类海上浮式光伏平台开展了大量的物理模型试验和数值模拟研究。在海上浮式光伏水动力响应物理模型试验研究方面, SREE等^[8]通过物理实验研究了多模块漂浮式光伏平台(Floating photovoltaic, FPV)在波浪条件下的动态响应和关键连接部件的机械性能, 分析了波浪参数对各模块位移、最大应力应变分布和系泊力大小的影响。在海上浮式光伏水动力响应数值模拟研究方面, JIANG等^[9]利用数值模拟方法研究了一种由绳索软连接而成的FPV阵列结构。YAN等^[10]通过数值模拟方法研究了固定式和铰链式FPV阵列结构, 评估了极端海洋环境下连接器的强度和FPV平台的运动响应。袁万等^[11]基于有限元软件SAP2000建立了漂浮系统及光伏支架的三维整体模型, 开

收稿日期: 2024-08-30 修回日期: 2024-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(32373188); 中国能源建设股份有限公司重大科技项目(CEEC2022-ZDYF-04)

作者简介: 束加庆(1981—), 男, 副高级工程师, 研究方向为海上风电、海上光伏等海洋能源工程技术。E-mail: shujiaqing@jspd.com.cn

通信作者: 赵云鹏, E-mail: ypzhaoy@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.shhydxxb.com>

展了结构动力响应研究,得到了平台的运动响应曲线以及系泊力。夏国龙等^[12]基于静力学理论,对海上太阳能复合材料浮体系统进行了静载浮力、风力受力、浮体结构波浪浮力计算分析以及浮体系统强度校核;孔耀华等^[13]利用计算流体动力学数值模拟技术对不同来流角度下阵列漂浮式光伏电站进行了计算和分析,获得了流载荷的分布规律。ZHANG等^[14]采用非线性时域流体力学求解器研究了单个FPV模块的流体力学和多个模块的耦合效应,并总结更新了一些阻尼系数。SONG等^[15]利用线性势理论研究了张紧系泊线的初始配置和轴向刚度、FPV系统的布置角度以及浮筒尺寸对内港不规则波浪下结构动态响应的影响。对于更复杂的柔性光伏结构,XU等^[16]基于流体弹性梁理论研究了一种由柔性薄膜制成的浮动光伏平台。

综上所述,关于海上浮式光伏平台物理模型试验研究相对较少,其数值模拟方法相对比较成熟,主要基于势流理论或有限元方法。然而这两种数值方法无法描述波浪作用下浮式光伏平台周围的自由液面演化。在实际工程中,光伏组件一旦沾到海水,待海水蒸发后会产生盐渍,会对光伏组件产生遮挡,轻则影响光伏组件发电效率,重则引起光伏组件发热严重从而损坏。针对这一问题,本研究基于计算流体动力学方法(Computational fluid dynamics, CFD),结合流体体积法(Volume of fluid, VOF)捕捉波浪作用下浮式光伏平台周围的自由液面,数值研究了一种浮式光伏平台在波浪作用下的水动力响应特性,并通过物理模型水槽试验验证了该数值方法的有效性。

1 材料与方法

1.1 几何模型

本研究以一种近海浮式光伏平台单个模块作为研究对象,平台整体采用钢框架结构,并在框架底部安装有4个浮筒。单个平台长24 m、宽20 m、高6.5 m,平台净有效面积475 m²,平台总质量80 t,平台吃水深度2.5 m,设计水深20 m,且光伏平台采用4点悬链线式锚泊方式进行约束。单个平台安装有180套光伏组件,单套光伏组件发电功率为550 W,即单个平台装机容量约为100 kW。为验证本研究数值方法的有效性,需在

宽为4 m、水深为1 m的物理水槽中进行试验验证,考虑到模型比尺效应和水槽壁面反射问题,因此采用1:20的缩尺比。由于本研究仅考虑波浪载荷,光伏阵列组件由于在浮体平台顶部,一般仅受风荷载的作用,因此考虑到数值模拟的计算效率问题对不受波浪荷载的光伏组件进行了简化,简化后的计算模型如图1所示,具体模型参数如表1所示。

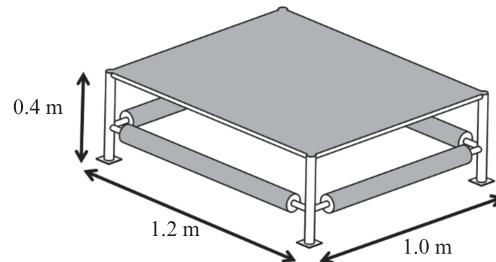


图1 简化后的计算模型
Fig. 1 Simplified calculation model

表1 计算模型的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of the calculation model

参数 Parameter	原型 Prototype	模型 Model
单个平台尺寸 Platform geometry size	24 m×20 m	1.2 m×1.0 m
平台高度 Platform height	6.5 m	0.325 m
框架吃水 Length on waterline	2.5 m	0.125 m
平台质量 Platform mass	80 000 kg	10 kg
锚链长度 Anchor chain length	62 m	3.1 m
锚链质量 Anchor mass	12 kg/m	30 g/m

1.2 数值方法

本研究基于计算流体动力学方法建立了波浪作用下近海浮式光伏平台水动力响应模型,计算求解器采用西门子公司研发的STRACCM计算流体动力学数值软件。不可压缩流动的连续性方程和动量方程表示如下^[17]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\mu + \mu_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + f_i \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\partial k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k & \quad (3) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\partial \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) + G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon & \quad (4) \end{aligned}$$

关于波浪作用下浮体平台周围自由液面描述,采用VOF模型可以准确描述由两种或两种以上不溶流体相互作用耦合而成的自由液面。在VOF模型中,流体密度和动力黏度定义为^[18]

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \nabla \cdot (U a) + \nabla \cdot [U_r a (1 - a)] = 0 \quad (5)$$

$$a = \begin{cases} 1 & 0 < a < 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho = a \rho_1 + (1 - a) \rho_2 \quad (7)$$

$$\mu = a \mu_1 + (1 - a) \mu_2 \quad (8)$$

式中: U 为流体速度矢量; U_r 为与界面附近的体积分数梯度等因素相关的速度修正项; ρ_1 和 ρ_2 分别为水和空气的密度; μ_1 和 μ_2 分别为水和空气的黏度; a 为水所占的体积分数, $1 - a$ 为空气所占的体积分数。

对于任意的刚性浮体,每个浮体的六自由度运动可以根据牛顿第二定律分别描述^[19]:

$$\frac{\partial v_f}{\partial t} = \frac{F_f}{m_f} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \omega_f}{\partial t} = I_f^{-1} \cdot (M_f - \omega_f \times (I_f \cdot \omega_f)) \quad (10)$$

$$F_f = \iint_S (pI + \tau) \cdot dS + F_{\text{mooring}} + m_f g + f^c \quad (11)$$

$$M_f = \iint_S r_{CS} \times (pI + \tau) \cdot dS + r_{CM} \times F_{\text{mooring}} + r_{CG} \times m_f g + r_{CF} \times f^c \quad (12)$$

式中: v_f 为浮体沿 x, y, z 方向的速度分量; ω_f 为浮体绕 x, y, z 轴旋转的角速度分量; F_f 为浮体受到合外力,包括锚绳力、波浪力、流体力等。 M_f 为各个作用力产生的力矩之和。

浮式光伏平台系泊系统采用4点悬链线式锚泊方法,锚链选取不锈钢链,悬链线方程如下^[20]:

$$h = \frac{T_h}{w} \left[\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right] + \frac{1}{2} \frac{W}{EA} l_s^2 \quad (13)$$

$$x = \frac{T_h}{w} \log \left[\frac{\sqrt{(T_h^2 + T_v^2)} + T_v}{T_h} \right] + \frac{T_h}{EA} l_s \quad (14)$$

式中: x 和 h 分别为导缆孔和锚点之间的水平距离和垂直距离; T_h 和 T_v 分别为锚绳张力的水平分量和垂直分量; α 为水平系泊夹角; w 为方向向量; W 为对应于单位系泊线长度在水中的常重; EA 为系泊链弹性刚度; l_s 为系泊线的长度。

关于数值造波方法,考虑到数值求解效率问题,采用了强制力消波方法,该方法与阻尼消波方法不同,可以选取较短的计算域实现数值造波。因此,本研究数值计算域设为长 9.0 m,宽 4.0 m,高 2.5 m 的长方体,如图 2 所示。在该计算域中,入口边界、出口边界以及两侧边界均设为速度入口边界,并在边界处设置力消波区域,区域长度为入射波长的 1.5 倍。计算域顶部设为压力出口边,浮式光伏平台以及计算域底部均设为无滑移壁面边界。

对于控制方程的求解,采用非结构化网格的有限体积法(Finite volume method, FVM)对偏微分方程进行数值网格离散,将计算区域划分为多面体网格(图 3)。这种数值网格可以描述计算域的特性,也可以进行变量的传递和计算。同时,考虑到浮式光伏平台大幅度运动的流体动力学问题,本研究采用重叠网格法将计算域划分为多个子网格,这些子网格可以独立地形成和移动,然后在需要的地方通过插值和传递信息的方式合并,从而模拟浮体平台的运动信息。为了保证数值求解的准确性,还需要对计算域进行网格加密处理。考虑到数值造波精度需求,一般沿波浪传播方向需满足 1 个波长划分为 80~100 个网格,沿着波高方向至少需要 20 个网格。此外,为了便于重叠网格在求解浮体运动过程中能良好地过渡,一般需要在重叠网格周围划分过渡区域,过渡区域与重叠网格区域网格量尽可能保持一致。为了保证计算的稳定性和收敛性,还需要定义数值模拟的收敛条件。数值模拟的收敛条件应根据库朗数(C_0)设定,库朗数应控制在 1 以下。库朗数可定义如下:

$$C_0 = \frac{|U_{\max}| \Delta t}{\Delta x_{\min}} \quad (15)$$

式中: U_{\max} 为流体最大速度; Δx_{\min} 为最小结构网格尺寸, $\Delta x_{\min} = 0.001$ m; Δt 为计算时间步长, $\Delta t = 0.0028$ s。

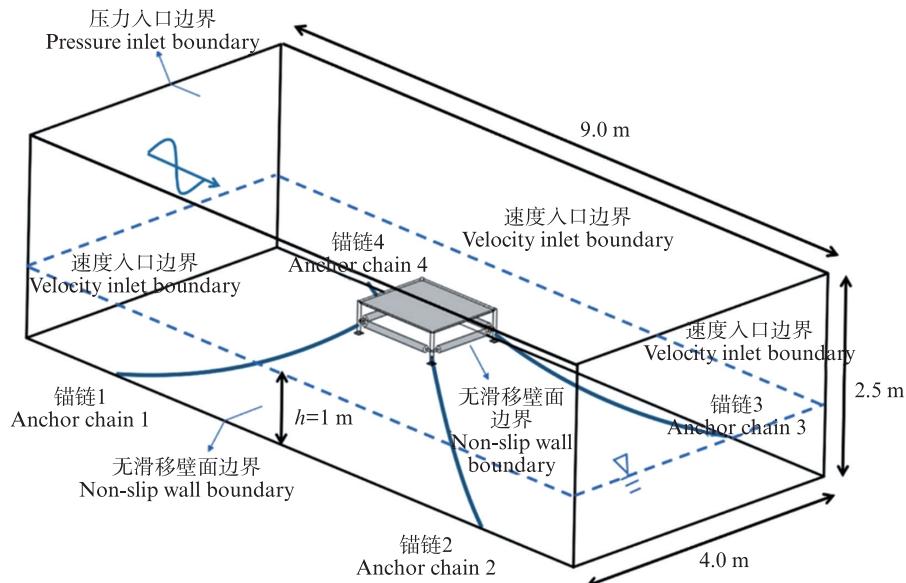


图2 计算域及边界条件示意图

Fig. 2 Calculation domain and boundary condition diagram

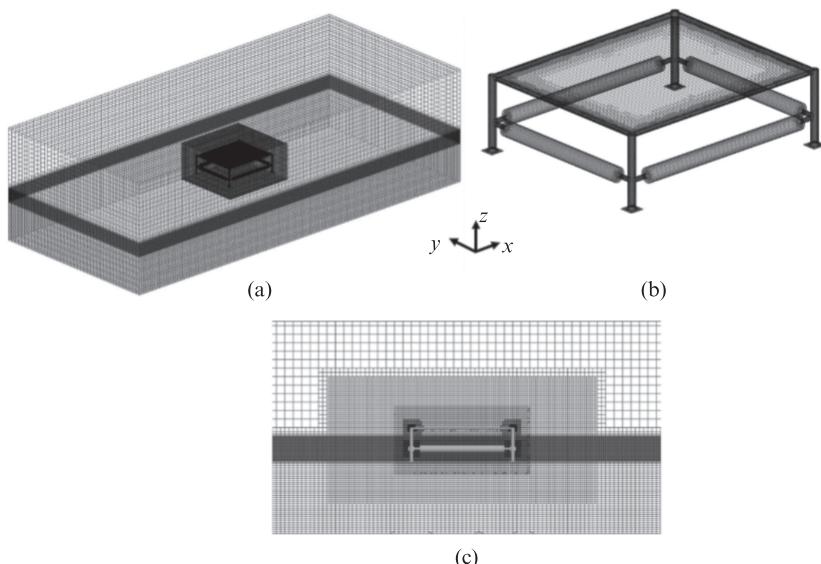


图3 网格示意图

Fig. 3 Grid diagram

此外,网格尺寸已被确定为影响数值结果精度的最重要因素之一。因此,为了进一步验证本研究采用数值模型的精度,研究了网格尺寸对数值结果精度的影响。研究选择了4种重叠网格尺寸,即网格1(5.0×10^{-2} m)、网格2(2.5×10^{-2} m)、网格3(1.0×10^{-2} m)和网格4(5.0×10^{-3} m),进行网格无关性验证。如图4所示,这4种网格的数值模拟结果基本一致,表明其网格数量满足收敛结果需求。因此,为了达到减少计算资源和保持较高计算精度,在后续的数值模拟中选择了 1.0×10^{-2} m的网格尺寸。

1.3 数值方法验证

为验证上述数值方法的有效性,在大连理工大学港口海岸及近海工程国家重点实验室非线性波浪4 m水槽开展浮式光伏物理模型验证试验。试验模型如图5a所示,试验模型长1.0 m,宽1.0 m,高0.2 m,吃水深度为0.1 m,具体模型参数如表2所示。试验仪器主要包括六自由度测量仪、拉力传感器等,其中六自由度测量仪(Optotrak Certus, NDI)是由加拿大NDI公司生产的Optotrak Certus光学运动捕捉系统,具体布置如图5b所示。在测量实验模型的六自由度运动

信息之前,需要将Optotrak Certus测量系统安装在物理模型斜上方。其测量原理是:物理模型的动态位置信息通过模式上的标记点反馈给测量

系统,测量系统再将采集的数据信息传递至采集的终端。

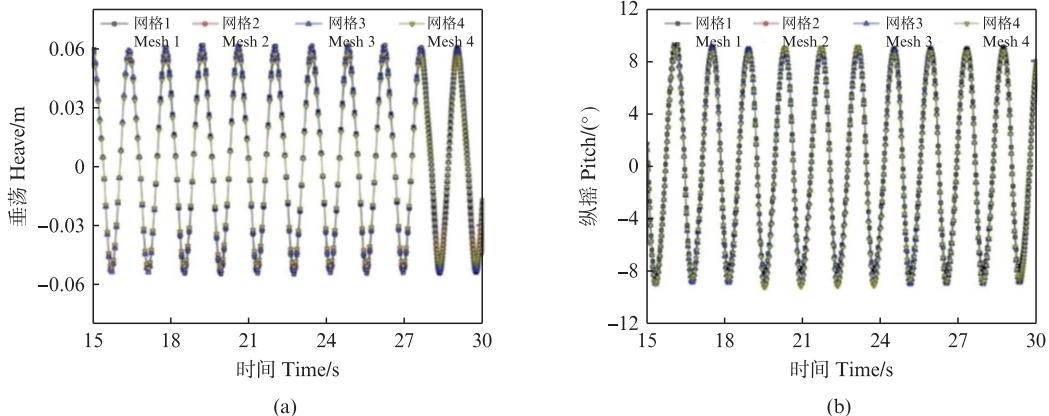


图4 网格无关性验证
Fig. 4 Grid independence verification

表2 验证试验模型参数
Tab. 2 Parameters verification of the experimental model

参数 Parameter	数值 Value
模型尺寸 Model size	1.0 m×1.0 m×0.2 m
试验水深 Water depth	1.0 m
模型质量 Model mass	6.5 kg
质心 Center of mass	(0, 0, 0.05)
转动惯量 Moment of inertia	(0.757, 0.757, 1.459)
锚链单位质量 Anchor chain unit mass	0.039 kg/m
锚链直径 Anchor chain diameter	1.5 mm

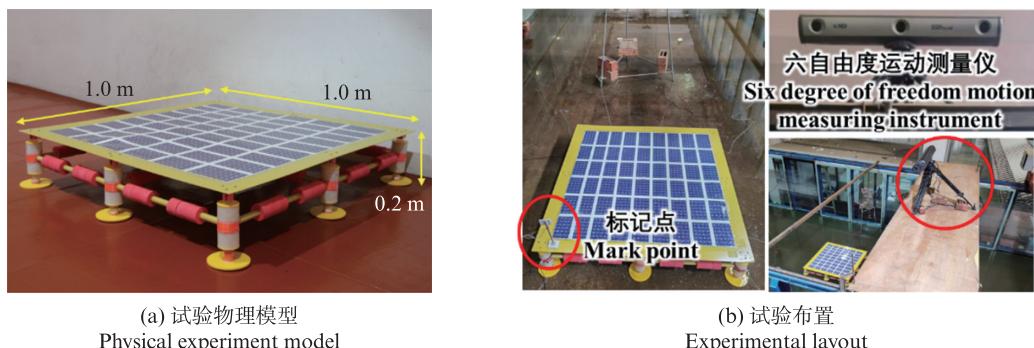


图5 物理模型试验示意图
Fig. 5 Physical model experiment schematic diagram

数值模拟与模型试验对比结果如图6所示,其中图6a为浮式光伏平台纵摇运动响应,图6b为浮式光伏平台垂荡运动响应,图6c为浮式光伏平台纵荡运动响应。从对比结果可以看出,试验结果和数值结果吻合良好,最大误差为10%,平均误差为5%,且最大误差主要出现在纵摇响应谷值附近,经分析,造成误差的主要原因可能是

系泊力响应求解采用的是悬链线方程,而试验中采用的是锚链,悬链线方程无法考虑锚链上各个不锈钢环之间的摩擦力和扭转。因此,试验测得的纵荡和纵摇数据峰值和谷值出现不对称,尤其是纵荡响应出现了非线性,导致了纵荡和纵摇响应误差相对较大,但整体误差较小。因此,可以说明上述数值模型准确可行。

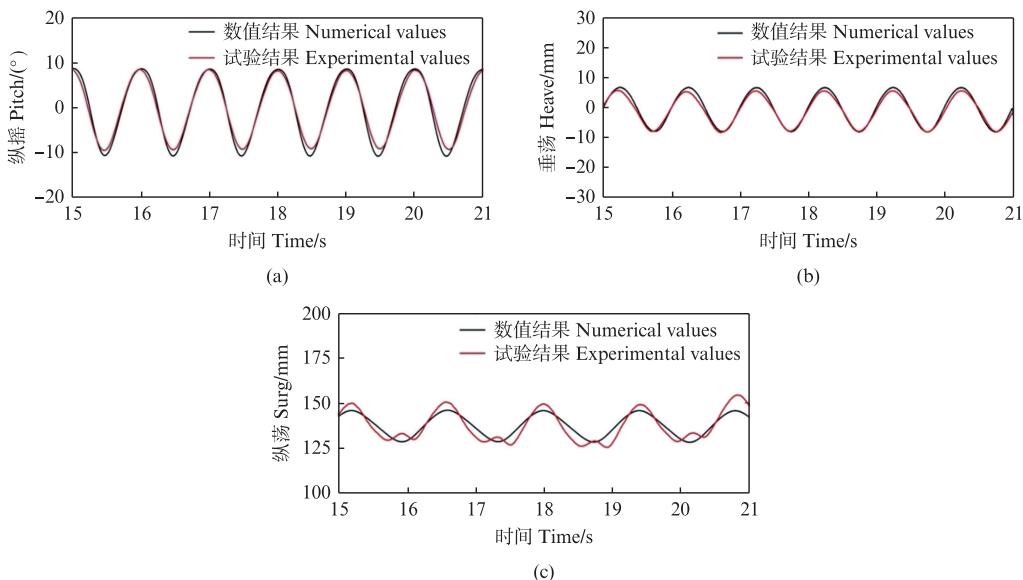


图6 模型试验与数值对比结果

Fig. 6 Comparison of physical model experiment and numerical simulation results

2 结果

2.1 计算工况

数值模拟工况选取渤海海域沿岸,渤海位于我国的东部地区,属于西太平洋的一部分,东西

宽度约为346 km,南北长度约为550 km,总面积约7.7万km²。渤海的平均深度仅有18 m,最深处也只有70 m左右。渤海沿岸的平均波周期2.0~4.5 s,极值波高1.8~4.0 m,详细工况设置如表3所示。

表3 数值模拟计算工况
Tab. 3 Numerical simulation calculation conditions

编号 Number	原型水深 Prototype water depth/m	模型水深 Model water depth/m	模型波高 Model wave height/m	模型波长 Model wave length/m	模型周期 Model wave period/s
1			0.20		
2			0.15	2.97	1.4
3			0.09		
4			0.20		
5			0.15	3.73	1.6
6			0.09		
7	20	1	0.20		
8			0.15	4.48	1.8
9			0.09		
10			0.20		
11			0.15	5.21	2.0
12			0.09		

2.2 规则波对浮式光伏平台响应的影响

图7为浮式光伏平台动力响应幅值,其中图7a为纵荡响应幅值,图7b为纵摇响应幅值,图7c为垂荡响应幅值,图7d为迎浪侧锚链最大系泊力响应,在本研究中响应幅值统计结果范围取计算稳定后的10个人射波周期,浮体运动响应幅值计算方法为浮体运动峰值减浮体运动谷值的差除以2。对于浮式光伏平台的运动响应幅值,可以明显看出在波

高一定且波长为3~5 m的条件下其纵荡运动和垂荡运动均随着波长的增大而增大,且增大的幅度随着波高的增大而明显增大,而纵摇运动则随着波长的增大而减小。对于浮式光伏平台的系泊力响应幅值,在小波高条件下,随着波长的增大,浮式光伏平台最大系泊力响应也呈现增大的趋势,但增长趋势平缓,而当波高为0.20 m且波长超过4.5 m时,平台的系泊力响应明显激增。

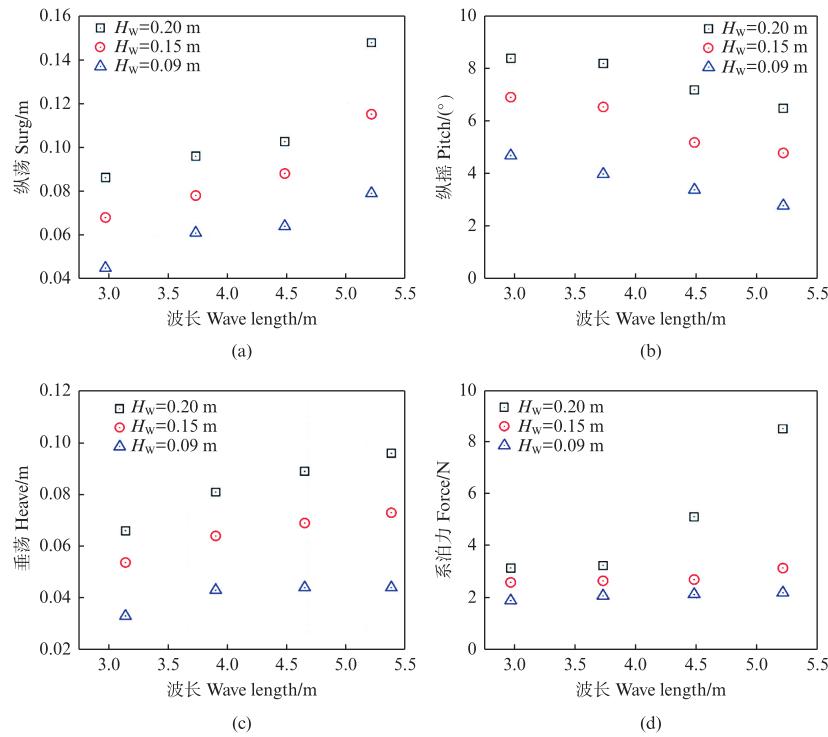


图7 浮式光伏平台动力响应幅值
Fig. 7 Motion response amplitude of FPV platform

在浮体的水动力响应研究中,考虑浮体的瞬态动力响应也尤为重要。图8为浮式光伏平台受规则波工况2、5、8、11作用下动力响应历时曲线。其中图8a为纵荡响应历时曲线,图8b为纵摇响应历时曲线,图8c为垂荡响应历时曲线,图8d为迎浪侧锚链系泊力响应历时曲线。可以看出浮式光伏平台在规则波浪作用下做周期性运动,且运动周期和入射波周期一致,说明浮式光伏的运动响应主要受入射波浪的影响。从图8a可以看出在不同入射波浪周期下浮式光伏平台的纵荡响应峰值差距较小,而谷值则随着波周期的增大差距愈发明显,因此运动响应幅值随着波周期的增大而增大。纵摇历时曲线上的峰值和谷值均随着波周期的增大而增大,而垂荡运动历时曲线与纵荡运动历时曲线规律基本完全一致。

2.3 浮式光伏平台对波浪场的影响

当波浪经过浮式光伏平台时,可能会与浮式平台发生碰撞产生上浪或者破碎波浪,使得光伏组件表面被海水浸湿。被海水浸湿的光伏组件被太阳晒干后会在其表面留下一层盐渍,若不及时清理,盐渍的遮挡可能会引起光伏组件热斑效应。热斑效应的主要危害包括降低光伏板的输出功率、缩短使用寿命,并在极端情况下可能导

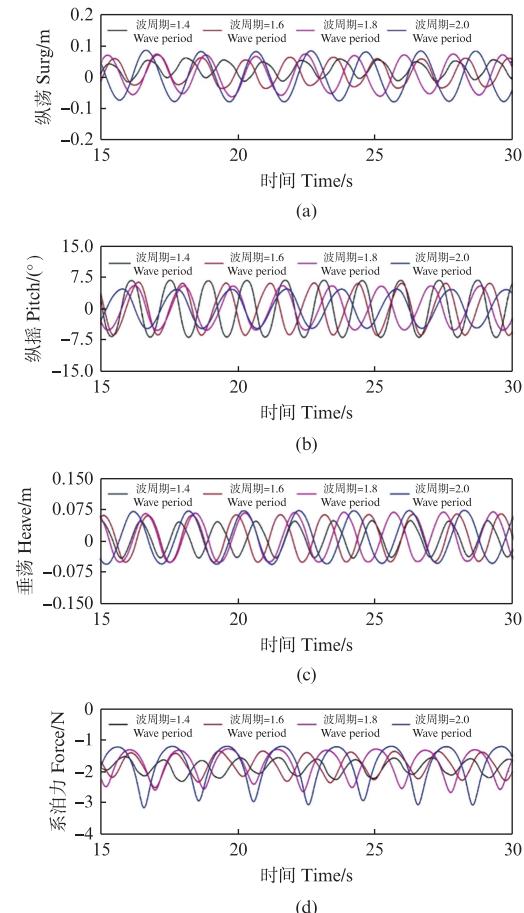


图8 浮式光伏平台运动响应历时曲线
Fig. 8 Motion response duration curve of FPV

致火灾。因此,十分有必要研究波浪作用下浮式光伏平台周围的波浪场。图9为入射波高为0.2 m时不同入射周期波浪作用下浮式光伏平台液相云图,图10为入射波高为0.2 m时不同入射周期波浪作用下浮式光伏平台周围自由波面图,计算结果取第10个人射波周期,分别为 $T/3$ 、 $T/2$ 、 T 。从图9和图10可以明显看出,当波陡较大时,入射波浪和浮体平台发生明显的砰击现象,作用位置主要集中于浮体平台浮筒位置,结合图7b中的纵摇响应幅值,随着波陡的增大,浮体的纵摇响应幅值也逐渐增大。同时,浮筒的淹没程度也随着波陡的增大而增大。随着波陡的进一步减小,这种砰击现象逐渐消失。这也说明了该浮式光伏平台在上述海况下光伏组件不会受上浪或破碎波浪的影响,相对安全。

为研究浮式光伏平台对其周围波浪场的影响,在距离光伏平台前后各1 m处分别施加了1个浪高监测探针L1和L2,如图11所示。

图12为入射波高为0.2 m时不同波浪周期条

件下光伏平台周围波浪历时曲线,从图中可以明显看出在波周期为1.4 s时,结构物前后的波高基本一致,仅在10~20 s时刻时出现差异,这是由于该时刻数值模拟还未稳定。从整体来看,随着波长的增大,浮式平台后方的波幅逐渐减小,波高也呈现减小的趋势。图13为不同入射波周期条件下浮式平台对入射波浪的衰减率影响结果,从图中可以看出在波高为0.2 m的条件下随着波长的增大,波浪衰减系数呈现先增大后减小的趋势。这与其他海上浮式平台类似,随着波长的增大,其消波性能逐渐减弱。

2.4 浮式光伏平台运动对光伏组件发电效率影响

有研究表明,光伏组件接收的光照辐射强度变化主要与光伏组件与太阳光的相对夹角有关,而光伏组件与太阳光的相对夹角受浮体纵摇响应运动的影响较大。根据文献[21]给出的光伏组件光照模型,可得到浮体平台纵摇运动响应与组件接收的辐射强度 S 关系表达式:

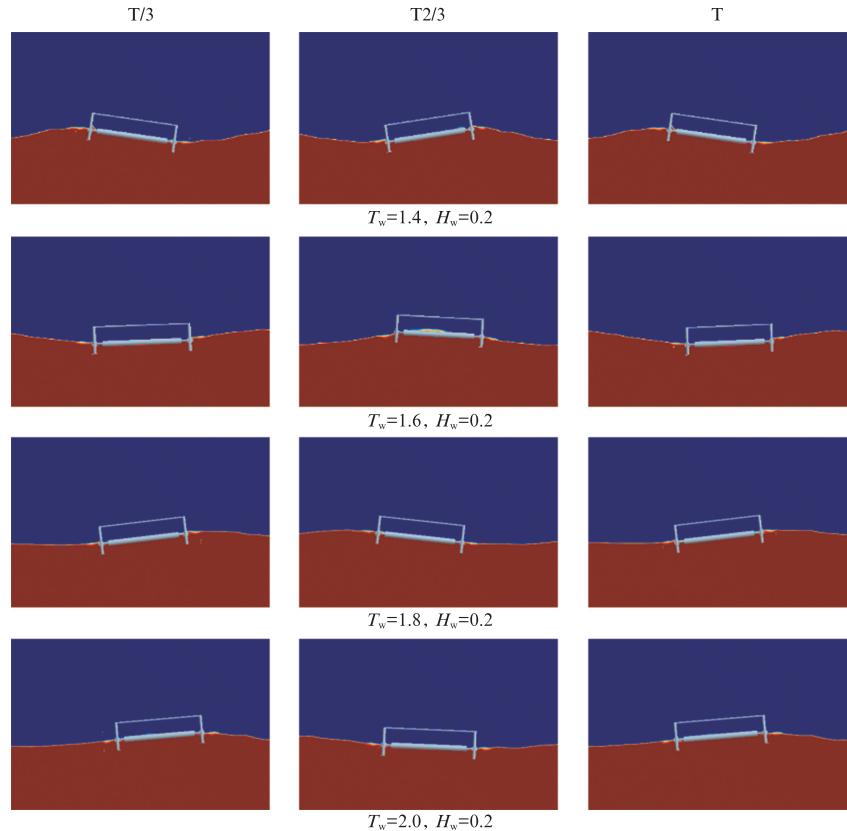


图9 浮式光伏平台液相图(T_w 为入射波周期, H_w 为入射波高)

Fig. 9 Liquid phase diagram of FPV platform (T_w is the period of incident wave, H_w is the height of incident wave)

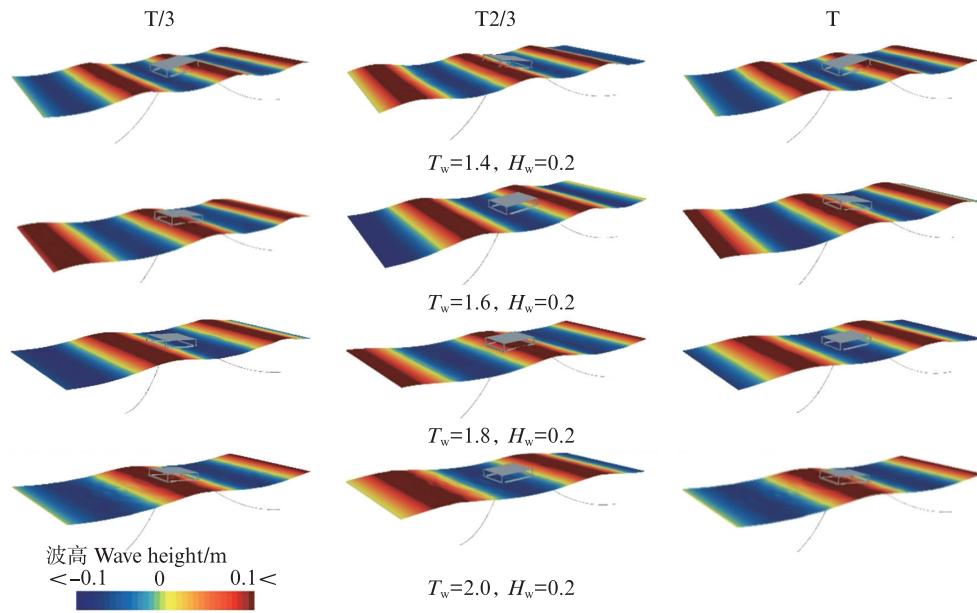
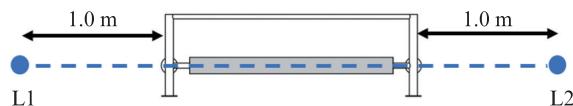
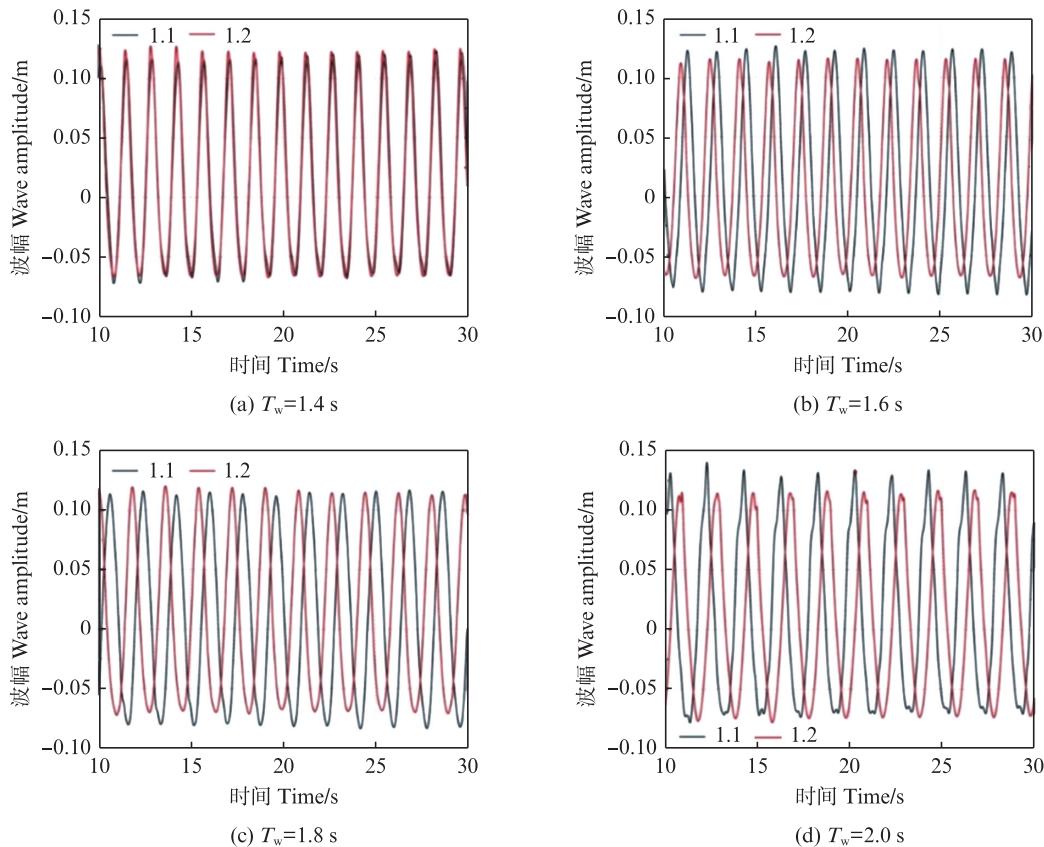
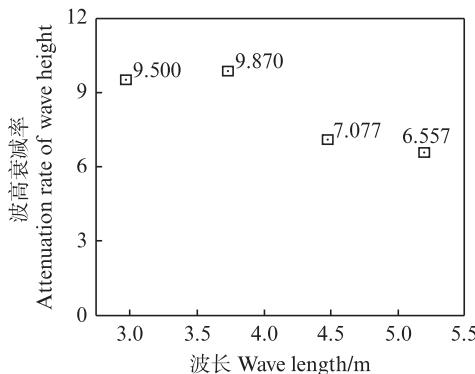
图10 浮式光伏平台波面示意图(T_w 为入射波周期, H_w 为入射波高)Fig. 10 Wave surface diagram of FPV platform (T_w is the incident wave period, H_w is the incident wave height)

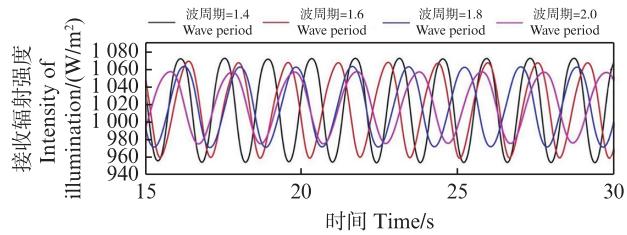
图11 波高监测点布置示意图

Fig. 11 Wave height monitoring point layout diagram

图12 不同入射波浪周期条件下光伏平台周围波浪历时曲线($H_w=0.2\text{ m}$)Fig. 12 Wave duration curves around FPV platform under different incident wave periods ($H_w=0.2\text{ m}$)

图 13 浮式平台对入射波浪的衰减率 ($H_w=0.2\text{ m}$)Fig. 13 Attenuation rate of incident wave by FPV platform ($H_w=0.2\text{ m}$)

$$S = S_0 (0.87 \cos \beta + 0.5 \sin \beta - 0.09 \cos^2 \frac{\beta}{2} + 0.24) \quad (13)$$

图 14 浮式平台运动对光伏组件发电效率影响 ($H_w=0.15\text{ m}$)Fig. 14 Influence of FPV motion on photovoltaic modules power generation efficiency ($H_w=0.15\text{ m}$)

3 结论

基于CFD计算流体动力学方法研究了一种浮式光伏平台规则波浪作用下的水动力响应特性,并通过物理模型水槽试验进行有效性验证,经验证研究建立的浮式光伏平台数值模型可准确描述浮式平台周围波浪场以及求解平台水动力响应。主要结论如下:

(1) 在波长为3~5 m的情况下光伏平台纵荡运动和垂荡运动均随着波长的增大而增大,而纵摇运动则随着波长的增大而减小。

(2) 在波高为0.09 m时随着波长的增大浮式光伏平台3个自由度方向的运动响应以及系泊响应变化较小。随着波高的进一步增大,平台运动和系泊响应明显激增。

(3) 当波陡为1/15时,入射波浪和浮体平台发生明显的砰击现象,作用位置主要集中于浮体平台浮筒位置,同时,浮筒的淹没程度也随着波陡的增大而增大。随着波陡的进一步减小,这种

式中:S为光伏组件接收的辐射强度; S_0 为当地太阳光照强度; β 为光伏板与水平面间的相对夹角,本研究考虑组件水平铺在浮体平台上,因此平台摇摆摆角也是光伏板与水平面间的相对夹角。

图14为入射波高为0.15 m时不同波浪周期条件下浮式平台纵摇响应运动对光伏组件发电效率影响曲线,可以看出光伏组件接收到的光照辐射强度是波动变化的,波动变化在10%左右,即正常天气状况时,光伏发电系统接受的光照强度保持在小范围内波动,输出功率也将有一定范围内保持平稳输出。若平台纵摇响应幅值进一步增大(输入波高增大),光伏发电系统的输出特性将在短时间内会发生剧烈波动,将严重影响平台发电效率。

撞击现象逐渐消失。

(4) 浮体平台纵摇响应是影响光伏组件发电效率的主要因素,在0.15 m波浪条件下其光照辐射强度波动变化在10%左右。

基于上述结论,浮式光伏平台在同等海域水深条件下可以选择波浪周期更大的区域,可有效避免结构上浪砰击问题,且浮体纵摇响应也会减小,可有效减少纵摇运动对光伏板倾角动态改变,导致光伏组件发电效率降低的问题。该研究为这类浮式光伏平台海域选址提供重要参考,具有重要的科学意义和工程价值。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] GORJIAN S, SHARON H, EBADI H, et al. Recent Technical Advancements, Economics and Environmental Impacts of Floating Photovoltaic Solar Energy Conversion Systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 124285.
- [2] 祖雷鸣. 加强河湖水域岸线空间管控保障河道行洪通

- 畅和河湖功能完好[J]. 中国水利, 2022(7): 3-5.
- ZU L M. Strengthening spatial control for shorelines of water bodies to ensure free discharge of floodwater and play functions of rivers and lakes [J]. China Water Resources, 2022(7): 3-5.
- [3] 达邵炜, 付世晓, 许玉旺, 等. 浮式联排光伏动力响应及其连接件特性研究[J/OL]. 海洋工程, 2024: 1-17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20240307.1012.002.html>.
- DA S W, FU S X, XU Y W, et al. Study on dynamic response of floating multi-photovoltaic and characteristic of connector [J/OL]. The Ocean Engineering, 2024: 1-17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20240307.1012.002.html>.
- [4] GOLROODBARI S Z, VAN SARK W. Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2020, 28(9): 873-886.
- [5] 吴继亮, 梁甜, 麋文杰, 等. 水上漂浮式光伏电站的发展及应用前景分析[J]. 太阳能, 2019(12): 20-23.
- WU J L, LIANG T, MI W J, et al. Development and application prospects analysis of floating PV powerplants [J]. Solar Energy, 2019(12): 20-23.
- [6] JIA G C, MA C, ZHAO Y P, et al. Numerical study on the sensitivity of photovoltaic panels to wind load on array layout [J]. Sustainable Horizons, 2024, 11: 100101.
- [7] SHI W, YAN C J, REN Z R, et al. Review on the development of marine floating photovoltaic systems [J]. Ocean Engineering, 2023, 286: 115560.
- [8] SREE D K K, LAW A W K, PANG D S C, et al. Fluid-structural analysis of modular floating solar farms under wave motion [J]. Solar Energy, 2022, 233: 161-181.
- [9] JIANG Z Y, DAI J, SAETTONE S, et al. Design and model test of a soft-connected lattice-structured floating solar photovoltaic concept for harsh offshore conditions [J]. Marine structures, 2023, 90: 103426.
- [10] YAN C J, SHI W, HAN X, et al. Assessing the dynamic behavior of multiconnected offshore floating photovoltaic systems under combined wave-wind loads: a comprehensive numerical analysis [J]. Sustainable Horizons, 2023, 8: 100072.
- [11] 袁万, 卢红前, 潘涛涛, 等. 风和波浪耦合作用下漂浮式光伏电站结构动力研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(S2): 7-13.
- YUAN W, LU H Q, PAN T T, et al. Research on the structural dynamics of floating photovoltaic (PV) system under the condition with wind and wave coupled [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54 (s2): 7-13.
- [12] 夏国龙, 方海, 韩娟, 等. 波浪荷载作用下水上太阳能复合材料浮体系统受力分析[J]. 复合材料科学与工程, 2022(3): 51-55, 65.
- XIA G L, FANG H, HAN J, et al. Force analysis of underwater solar composite floating body system under wave load [J]. Composites Science and Engineering, 2022(3): 51-55, 65.
- [13] 孔耀华, 肖福勤, 陈作钢, 等. 漂浮式光伏电站漂浮方阵流载荷数值计算研究[J]. 水动力学研究与进展, 2019, 34(2): 218-223.
- KONG Y H, XIAO F Q, CHEN Z G, et al. Numerical research on current load of floating square array in floating PV power station [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019, 34(2): 218-223.
- [14] ZHANG F, SHI W, WANG QQ. A study on the hydrodynamics and coupling effects of the multibody floating photovoltaic (FPV) concept [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(8): 1491.
- [15] SONG J H, KIM J, LEE J, et al. Dynamic response of multiconnected floating solar panel systems with vertical cylinders [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(2): 189.
- [16] XU P P, WELLENS P R. Fully nonlinear hydroelastic modeling and analytic solution of large-scale floating photovoltaics in waves [J]. Journal of Fluids and Structures, 2022, 109: 103446.
- [17] CHEN H F, HALL M. CFD simulation of floating body motion with mooring dynamics: coupling MoorDyn with OpenFOAM [J]. Applied Ocean Research, 2022, 124: 103210.
- [18] AKHLAGHI M, MOHAMMADI V, NOURI N M, et al. Multi-Fluid VoF model assessment to simulate the horizontal air - water intermittent flow [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 152: 48-59.
- [19] GATIN I, VUKČEVIĆ V, JASAK H, et al. Enhanced coupling of solid body motion and fluid flow in finite volume framework [J]. Ocean Engineering, 2017, 143: 295-304.
- [20] FALTINSEN O. Sea loads on ships and offshore structures [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [21] 刘浩洋. 漂浮式光伏发电系统最大功率追踪技术研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- LIU H Y. Research on maximum power tracking technology of floating photovoltaic power generation system [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.

Numerical simulation of hydrodynamic of offshore FPV platform under regular wave action

SHU Jiaqing¹, JIA Guangchen², GU Xiaoqing¹, MA Chao², NI Huihao², ZHAO Yunpeng², WANG Fang³

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210036, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, Liaoning, China;

3. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To accelerate the development of solar photovoltaic systems from land to sea, it is very important to master the hydrodynamic response characteristics of floating photovoltaic (FPV) under wave loads. In this research, the hydrodynamic response characteristics of a FPV under regular waves are studied based on computational fluid dynamics method(CFD), and verified by physical model experiment. The results show that the surge and heave motion increase with the increase of wavelength when the wave height is constant and the wavelength range is 3–5 m. The maximum mooring force response of the floating photovoltaic platform also shows an increasing trend with the increase of wavelength under the condition of wavelet height, but the growth trend is gentle. The mooring force response of the platform increases significantly when the wave height is 0.2 m and the wavelength exceeds 4.5 m. The research shows the incident wave and the floating platform have obvious attack phenomenon when the wave steepness is large, and the action position is mainly concentrated on the buoy position of the floating platform. This study provides theoretical reference and data support for the design and optimization of offshore floating photovoltaic, which has very important scientific significance and application value.

Key words: offshore floating photovoltaic; computational fluid dynamics; numerical simulation; regular waves; hydrodynamic response