

## 海上光伏浮管基础极端波浪作用水动力特性

裴元义, 宋洋, 沈禹, 郭悬, 方庆贺

### Hydrodynamic characterization of extreme wave action on offshore photovoltaic floating pipes foundations

PEI Yuanyi, SONG Yang, SHEN Yu, GUO Xuan, FANG Qinghe

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240731003>

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 海上超长管道浮运受力和变形特性

Floating stress and deformation characteristics of ultra-long offshore pipelines

水利水运工程学报. 2023(6): 142 <https://doi.org/10.12170/20220813005>

##### 考虑冲刷深度的海上风机地震易损性研究

Seismic fragility of offshore wind turbine considering scour depth

水利水运工程学报. 2022(4): 123 <https://doi.org/10.12170/20210630001>

##### 竖缝式鱼道休息池水动力特性研究

A study of hydrodynamic characteristics of resting pools of vertical slot fishway

水利水运工程学报. 2020(1): 40 <https://doi.org/10.12170/20181130002>

##### 高桩承台基础波流荷载数值模拟

Numerical simulation of wave-current load on high pile cap foundation

水利水运工程学报. 2023(5): 56 <https://doi.org/10.12170/20220119002>

##### 规则波作用下桩基透空型防波堤的冲刷研究

Scouring study of pile foundation perforated breakwater under regular wave action

水利水运工程学报. 2024(5): 103 <https://doi.org/10.12170/20240327003>

##### 海上风电单柱复合筒型基础拖航性能研究

Investigation into the towing performance of single-column composite bucket foundations

水利水运工程学报. 2024(3): 99 <https://doi.org/10.12170/20230308004>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240731003

裴元义, 宋洋, 沈禹, 等. 海上光伏浮管基础极端波浪作用水动力特性 [J]. 水利水运工程学报, 2025(4): 24-32. (PEI Yuanyi, SONG Yang, SHEN Yu, et al. Hydrodynamic characterization of extreme wave action on offshore photovoltaic floating pipes foundations[J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(4): 24-32. (in Chinese))

# 海上光伏浮管基础极端波浪作用水动力特性

裴元义<sup>1</sup>, 宋洋<sup>2</sup>, 沈禹<sup>3</sup>, 郭悬<sup>4</sup>, 方庆贺<sup>2,5</sup>

(1. 三峡集团浙江能源投资有限公司, 浙江 杭州 310016; 2. 哈尔滨工业大学(威海) 海洋工程学院, 山东 威海 264209; 3. 浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310014; 4. 扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 5. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 近年来海上光伏成为新能源领域的快速增长点, 随着海上光伏开发逐渐走向深远海, 海上浮式光伏成为新的需求。浮管基础式浮式光伏结构体系在陆地水域中得到了广泛应用, 应用于海洋环境时, 需考虑极端海况中的波浪作用, 保证海上浮式光伏的结构安全。基于开源软件 OpenFOAM 建立浮管基础波浪水动力作用数值模型, 采用聚焦波模拟极端波浪, 利用物理试验结果验证数值模型的计算精度, 并基于验证后的数值模型分析浮式光伏浮管波浪荷载的影响因素及规律。结果表明, 所建立的数值模型能够准确模拟浮管受到的极端波浪作用; 浮管淹没深度对波浪荷载影响明显, 增加浮管淹没深度可明显降低浮管波浪荷载; 入射聚焦波的峰值频率和聚焦波波幅对浮管所受波浪荷载的影响较大, 在海上浮式光伏设计时需根据光伏项目开发海域波浪特征进行专项分析。研究结果对海上浮式光伏结构抗波浪作用设计具有理论意义。

**关键词:** 海上浮式光伏; 聚焦波; OpenFOAM; 浮管

中图分类号: TV139.2\*6

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2025)04-0024-09

海洋中的太阳能资源十分丰富, 成为近年来光伏发展建设的主要应用场景。中国近海地区拥有丰富的太阳能资源, 大力发展海洋光伏新能源将为中国能源结构转型提供重要支持。此外, 近海光伏开发可以在沿海经济发达地区就近消纳, 节约了工程造价、提高了能源利用效率。规模化开发海上光伏项目或将为沿海地区的能源供给提供新的发展思路。随着海上光伏由近海向深远海发展, 海上浮式光伏成为光伏领域发展的前沿。

浮式光伏(floating photovoltaic, 简称 FPV)系统主要包含浮式基础、光伏组件、支撑结构、锚固系泊系统及电气系统。FPV 系统中的浮式基础结构是整个系统的重要部分, 直接承受来自海洋环境的波浪力。海上浮式光伏尚无成熟的结构体系方案, 已有方案多参考了目前内陆水域所采用的浮式基础形式。然而, 与内陆水域不同的是, 海上浮式光伏结构要承受风、浪、流等外部环境动力荷载, 在台风等极端天气中还要抵御极端波浪等偶然荷载。因此, 确保浮式光伏系统在极端波浪环境中的稳定性是其安全运行的关键。本文针对这一问题开展研究, 重点探讨目前典型的“浮管+桁架”式浮式光伏系统中浮管基础所受极端波浪水动力作用问题。

从结构形式看, 浮管基础可以简化为悬浮于自由水面附近的圆柱结构物。针对圆柱结构所受的水动力作用, 在理论分析方面, 圆柱波浪力的计算按照其尺寸大小可采用两种计算方法: 对于直径为  $D$  的小直径圆柱( $D/L < 0.15$ ,  $L$  为波长), 主要采用 Morison 方程计算<sup>[1]</sup>; 对于大直径圆柱则采用 MacCany 和 Fuchs 所提出的绕射理论<sup>[2]</sup>。刘必劲等<sup>[3]</sup>通过改进的 Morison 方程分析了浅浸没水平圆柱的波浪力特性; 毛鸿飞等<sup>[4]</sup>通过

收稿日期: 2024-07-31; 修回日期: 2024-09-22; 接受日期: 2024-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178128); 山东省高等学校“青创团队计划”(2022KJ081); 双一流学科建设基金项目(2023SYLCB04)

作者简介: 裴元义(1992—), 男, 山西临汾人, 工程师, 主要从事光伏结构环境作用研究。

E-mail: pei\_yuanyi@ctg.com.cn 通信作者: 方庆贺(E-mail: qinghefang@hit.edu.cn)

分析入射波波幅和波频率对波浪力特征的影响,提出了考虑圆柱完全暴露于空气的改进 Morison 方程。

在物理试验方面,Contento 等<sup>[5]</sup>研究了低 KC 数(Keulegan-Carpenter)下规则波与水平圆柱体的相互作用,结果表明圆柱的淹没深度对高阶波浪力分量的影响比较显著,且二次和三次谐波项的大部分位于背浪侧;Oshkai 等<sup>[6]</sup>使用高图像密度粒子图像测速法研究了水平圆柱的涡旋类别,其观测结果表明,涡旋类别对其力系数的瞬时值有较大贡献,且淹没深度对涡旋的类别影响较大;Stachurska 等<sup>[7]</sup>通过物理试验研究了半潜式弹性支承柱体处于不同淹没深度时受不同波参数波浪作用的弹性响应,结果表明波浪特性对弹性柱体的振动有明显影响,低陡度入射波引起的结构响应中非线性分量占比较大;Jin 等<sup>[8]</sup>开展了大尺度物理模型试验,研究了规则波与水下水平圆柱体之间的相互作用,分析了高雷诺数下不同高度和周期的波浪中不同淹没深度下水下水平圆柱体的表面压力分布和总力;Shin 等<sup>[9]</sup>基于理论和试验手段研究了波浪引起的水平圆柱体振动,特别是当圆柱体接近自由表面时的情况,并引入了间隙比来考虑自由表面的影响,发现间隙比越小,自由表面的影响越大。

计算流体力学方法作为研究波浪-结构作用的有力工具,广泛应用于柱体波浪作用的研究。Lupieri 等<sup>[10]</sup>模拟了高 KC 数的规则波与浅浸没水平圆柱的相互作用,发现波浪力的一阶分量表现出黏性相关的非线性特征,但是受圆柱体浸没深度影响较小,第二和第三分量随浸没深度变化显著;Shahabi-Nejad 等<sup>[11]</sup>针对一种浮动水平圆柱体和振荡水柱构成的混合式陆上波浪能转换器进行数值模拟研究,分析了圆柱几何参数及吃水深度对波浪能转换效率的影响;Zeng 等<sup>[12]</sup>考虑双向流固耦合作用建立了单自由度圆柱体在不同间隙比下的波致振动,研究结果表明圆柱体波浪作用存在显著的非线性特性,但在相同波况下,间隙比不影响涡流脱落和振动的频率。

与水平柱体类似,直立圆柱作为海工结构中的常见构件,在波浪作用下的受力规律也得到了普遍研究。Taylor 等<sup>[13]</sup>研究了波浪作用在垂直圆柱上的力,并提出了新的变换 FNV(T-FNV)理论,用于计算波浪在有限水深条件下对垂直圆柱的总力,通过仅使用自由表面的非线性波浪特性来计算总力,简化了计算过程,并显示了高次谐波在计算波浪力时的重要性;陈浩民等<sup>[14]</sup>基于有限元方法探讨了两个非淹没直立圆柱周围的波高分布及圆柱间距的影响规律,结果表明上、下游圆柱之间的相互作用会使波高的波节和波腹交替出现;干桂轩等<sup>[15]</sup>使用三维水动力分析程序 DIFFRACT 对单个圆柱和双圆柱的波浪力进行了计算,指出多个大直径桩柱的水动力相互干涉作用会显著影响波浪力分布,致使桩群中各桩柱的受力明显不同于单桩柱波浪力;武昕竹等<sup>[16]</sup>基于 Fluent 平台建立了数值水槽,模拟了聚焦波浪对直立圆柱的冲击作用,分析了聚焦波波面和压力特征值之间的关系;Zhu 等<sup>[17]</sup>使用视觉技术测量大规模垂直圆柱体上的波浪力,通过跟踪圆柱体周围的动态水线,基于势理论,使用递归最小二乘法(RLS)实时识别波浪力。

综上所述,已有研究较多关注规则波浪对水平或竖直柱体的波浪作用,极端波浪对近自由水面处水平圆柱的波物作用研究较少。针对海上光伏近自由水面浮管基础受到的极端波浪冲击作用,本研究基于开源计算流体力学软件 OpenFOAM,通过 waves2Foam 求解器生成并观测聚焦波,采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型封闭控制方程,利用 VOF 法(volume of fluid)捕捉自由液面位置,从而构建浮管极端波浪作用数值模型;通过模型试验结果对所建立的数值模型进行验证,保证计算结果的准确性;基于已验证的数值模型模拟不同工况下淹没浮管受到的极端波浪作用,分析波浪特性和结构特征对波浪力的影响,为极端波浪作用下海上浮式光伏系统中水平圆形浮管的设计提供参考。

## 1 数值模型与验证

### 1.1 控制方程

结构物波浪作用的控制方程为不可压缩的雷诺平均的纳维-斯托克斯方程<sup>[18]</sup>,其连续方程和动量方程分别为:

$$\partial \bar{u}_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\rho \partial \bar{u}_i / \partial t + \rho \bar{u}_j \partial \bar{u}_i / \partial x_j = -\partial \bar{p} / \partial x_i + \mu \partial^2 \bar{u}_i / (\partial x_i \partial x_j) - \partial \overline{\rho u'_i u'_j} / \partial x_j \quad (2)$$

式中:下标  $i$  和  $j$  分别代表笛卡尔坐标系中  $x, y$  的方向;时间平均速度  $\bar{u}_i = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} u_i dt / \Delta t$ , 水体速度  $u_i$  由时间平均速度  $\bar{u}_i$  与波动速度  $u'_i$  组成, 即  $u_i = \bar{u}_i + u'_i$ ;  $\bar{p}$  为时间平均压强;  $\rho$  为水体密度;  $\mu$  为水体的动力黏度。

RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[19]</sup> 中雷诺应力、湍流动能及其耗散率由以下方程计算:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \nu_t \rho \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} k \rho \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{P_k}{\rho} - \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:  $P_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $\nu_t = C_\mu \frac{\varepsilon^2}{k}$ ; 参数  $C_{\varepsilon 1} = 1.42$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1.68$ ,  $C_\mu = 0.0845$ 。

VOF 法<sup>[20]</sup> 建立在有限体积法的离散格式之上, 针对波浪流体来说, 基于空气和水两种介质互不相溶, 可引入相体积分  $\alpha$  来考察每个网格中特定液体的体积分, 实现对计算域相间界面的追踪。在波浪模拟中, 一般定义  $\alpha = 0$  时网格内均为气相,  $\alpha = 1$  时网格内均为水相, 否则网格内的气液同时存在。

## 1.2 数值水槽及试验验证

考虑到海上光伏结构体系庞大, 浮管基础受到的极端波浪作用可简化为二维波浪-结构作用过程。本研究建立的数值水槽如图 1 所示, 水槽长 30.0 m, 高 1.0 m。将数值水槽左侧边界设置为速度入口造波边界, 并在水槽末端 5.0 m 长度范围设置消波段以消除水槽端壁的反射。浮管结构受到的极端波浪采用相速度法生成聚焦波模拟<sup>[21]</sup>, 消波采用 waves2Foam 求解器自带的松弛区功能实现。浮管模型位于距离造波入口下游 18.5 m 处, 浮管半径为  $D$ , 浮管顶部距离静水面的淹没深度为  $S$ , 浮管中心距离水槽底为  $d$ 。

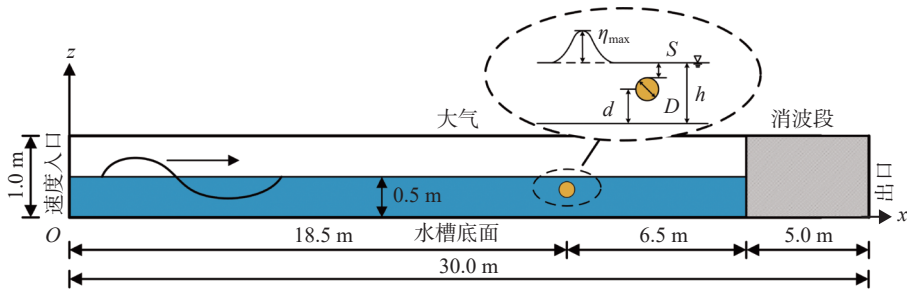


图 1 数值波浪水槽示意

Fig. 1 Schematic diagram of the numerical wave tank

验证试验在长为 30.0 m、高为 1.0 m、宽为 0.8 m 的水槽中开展。水槽的一端配备了液压伺服驱动的推板造波机, 另一端配备了斜坡式多层孔板搭配海绵箱的消波设施。如图 2 所示, 验证试验模型通过两块 8 mm 厚的钢板悬挂固定在测力架上, 模型受到的波浪作用力由 4 只三维测力天平测量。所有波高、波浪作用力均以电压信号的形式通过基于 PXI 的数字采集系统分别以 100 和 1 000 Hz 的采样频率进行记录。

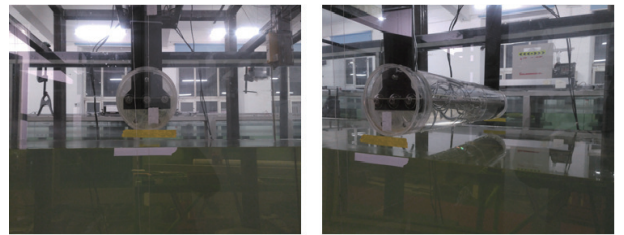


图 2 浮管模型

Fig. 2 Photos of the model of floating pipes

数值模拟的求解基于对流体域的离散处理, 计算结果受时间步长和网格尺寸等因素的影响。首先选择聚焦波波幅  $\eta_{\max} = 7.6$  cm, 峰值频率  $f_p = 0.6$  Hz 的聚焦波在不同网格尺寸和时间步长下进行无关性验证。

时间步长 1、2、3 分别为 0.05、0.02 和 0.01 s, 网格 1、2、3 的横向尺寸分别为 0.04、0.02 和 0.01 m。图 3 显示了不同时间步长和网格尺寸的无量纲化波面  $\eta/\eta_{\max}$  模拟结果对比, 其中  $\eta$  为数值模型观测到的模拟波面,  $\eta_{\max}$  为聚焦波最大波幅值。从图 3 可以看出, 随着时间步长的减小和网格的加密, 波面模拟结果已收敛。考虑到结果精度和计算资源的平衡性, 本文选择时间步长为 0.002 s, 横向网格尺寸为 0.02 m。

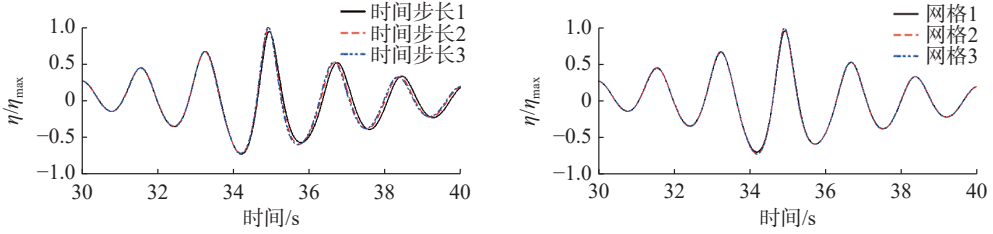


图 3 不同时间步长和横向网格尺寸下波高曲线

Fig. 3 Wave height curves under different time step lengths and transverse grid sizes

在数值波浪水槽中添加圆管结构建立起浮管基础波浪作用数值模型。在自由水面附近的 0.4~0.6 m 高度范围设置网格加密区, 沿水槽高度方向结构化网格尺寸分别为 0.02、0.01、0.02 m。模型水平方向, 在距离入口 18.5 m 两侧各设置 0.2 m 宽度的网格加密区, 从左到右网格尺寸分别为 0.02、0.01、0.02 m。在水平圆柱周围, 边界层网格加密, 尺寸为 0.001 25 m, 总网格数量为  $5.5 \times 10^4$ , 圆柱周围网格划分如图 4 所示。

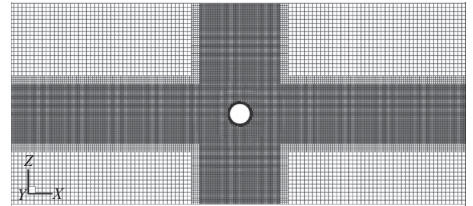


图 4 浮管周围网格划分

Fig. 4 Mesh distribution around a floating pipe

图 5 显示了聚焦波波幅  $\eta_{\max}$  为 4.0 cm、峰值频率为 0.6 Hz 的聚焦波作用在淹没深度  $S = 0$  cm、半径  $D = 10.0$  cm 的浮管上所产生的波浪力。从图 5 对比可见, 数值计算结果与试验数据吻合良好, 证明该数值模型能较准确模拟淹没水平浮管所受的波浪力。

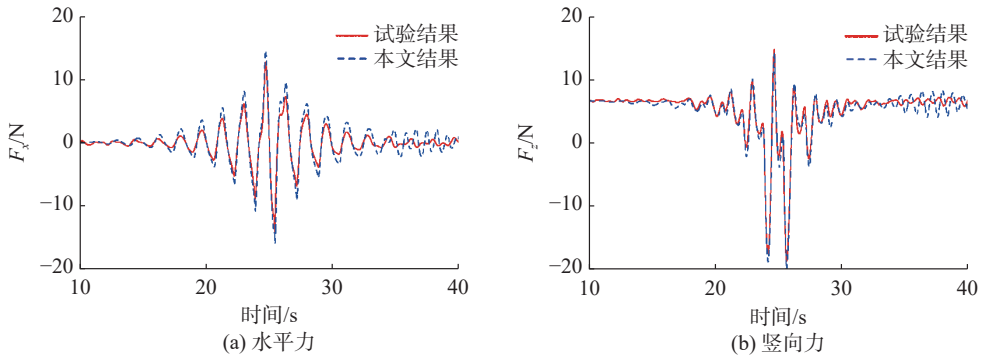


图 5 数值模型与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between numerical model and experimental results

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 工况设计

考虑实际工程中浮管所处的海洋环境特性, 分析聚焦波波幅、峰值频率和淹没深度这 3 个因素对水平浮管在聚焦波作用下水动力特性的影响。具体工况见表 1。

表 1 水平浮管聚焦波作用数值模拟工况

Tab. 1 Numerical simulation conditions of focused wave action on floating pipes

| 编号 | 波幅/cm | 静水深/m | 峰值频率/Hz       | 淹没深度/m | 浮管直径/m |
|----|-------|-------|---------------|--------|--------|
| 1  | 4     | 0.5   | 0.4, 0.5, 0.6 | 0, 0.1 | 0.1    |
| 2  | 5     | 0.5   | 0.4, 0.5, 0.6 | 0, 0.1 | 0.1    |
| 3  | 6     | 0.5   | 0.4, 0.5, 0.6 | 0, 0.1 | 0.1    |
| 4  | 7     | 0.5   | 0.4, 0.5, 0.6 | 0, 0.1 | 0.1    |
| 5  | 8     | 0.5   | 0.4, 0.5, 0.6 | 0, 0.1 | 0.1    |

## 2.2 数值结果处理

为使研究结果具有一般性,对水动力荷载进行了如下无量纲化处理:

$$F_x^* = F_x / (\rho g D L \eta_{\max}), F_z^* = F_z / (\rho g D L \eta_{\max}), H^* = D / (\eta_{\max} + S + D) \quad (6)$$

式中:  $F_x$  和  $F_z$  分别为极端波浪作用过程中浮管受到的水平和竖向波浪力;  $g$  为重力加速度,取  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;  $L$  为浮管长度,由于数值模型是二维结构,又为方便计算,因此取值为  $1 \text{ m}$ 。各参数的定义如图 1 所示。

## 2.3 浮管极端波浪水动力荷载

在淹没深度为  $0 \text{ m}$ 、峰值频率分别为  $0.4$ 、 $0.5$  和  $0.6 \text{ Hz}$ 、聚焦波波幅为  $6 \text{ cm}$  的聚焦波作用下,浮管受到的水平和竖向波浪力时程曲线如图 6 所示。从图 6 可见,浮管所受波浪力随聚焦波的波面变化而变化,水平向波浪力和竖向波浪力的最大值和最小值基本出现在同一时刻,竖向最大波浪力的值约为水平最大值的  $1.8$  倍。相同的聚焦波波幅下,峰值频率为  $0.6$ 、 $0.5$  和  $0.4 \text{ Hz}$  聚焦波所产生的波浪力峰值依次减小,这一变化趋势在竖向荷载上更明显。

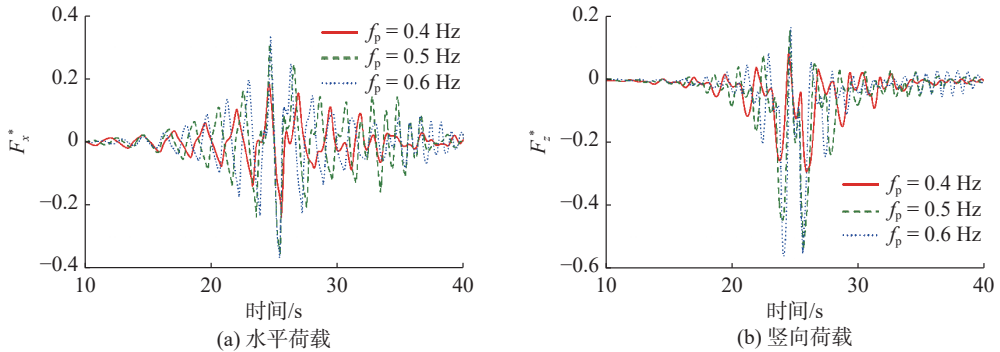


图 6 具有不同峰值频率的聚焦波产生的波浪力时程

Fig. 6 Time history of wave forces generated by focused waves with different peak frequencies

淹没深度分别为  $0$  和  $0.1 \text{ m}$  时,峰值频率  $0.6 \text{ Hz}$ 、波幅  $6 \text{ cm}$  的聚焦波作用下,浮管所受的波浪力时程曲线见图 7。

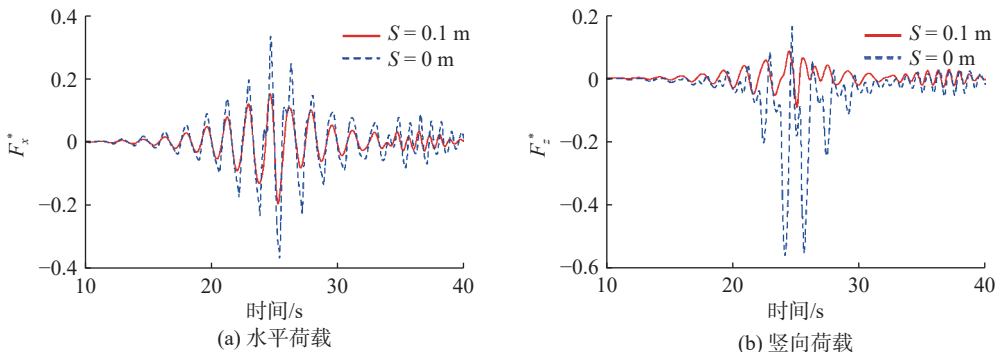


图 7 不同淹没深度下波浪力时程

Fig. 7 Time history of wave forces at different submergence depths

从图 7 可见, 浮管所受波浪力在相同的聚焦波波幅下, 淹没深度为 0 m 的浮管波浪力远比淹深为 0.1 m 的大, 且在竖向荷载上更明显。这是因为波浪的能量主要分布在自由水面附近, 随着淹没深度的增加, 波动压力降低, 浮管受荷减小。这也表明了浮管的淹没深度对竖向荷载影响较大, 在实际工程中可以考虑增加浮管的淹没深度来减轻波浪力的作用。

### 2.4 浮管极端波浪力影响因素

从结构安全的角度, 最为关心的是极端波浪作用过程中浮管结构受到的波浪力最大值。考虑到无论是水平波浪力还是竖向波浪力的正向力或负向力都可能引起结构的安全失效, 因此在后续分析中, 主要考虑极端波浪作用过程中浮管受到的水平波浪力  $F_x$  和竖向波浪力  $F_z$  绝对值的最大值:

$$F_{x\_max}^* = \max(|F_x^*|) \tag{7}$$

$$F_{z\_max}^* = \max(|F_z^*|) \tag{8}$$

如图 8(a) 所示, 最大水平荷载均随相对波高的增大呈现出单调增大的趋势, 且入射极端波浪的峰值频率越高, 最大水平荷载越大; 且水平浮管受到的最大水平荷载受淹没深度影响明显, 水平浮管越接近自由表面, 其受到的水平波浪荷载越大, 这是因为波浪运动能量主要集中在自由表面附近。图 8(b) 显示了浮管竖向荷载的变化趋势, 可以看出不同淹没深度浮管的竖向荷载较其水平荷载在不同峰值频率极端波浪作用下的变化趋势更为复杂。当淹没深度较小时, 浮管受到的低峰值频率极端波浪产生的竖向波浪荷载随相对波高的增大而增大, 而受到的较高峰值频率极端波浪产生的竖向波浪荷载随相对波高的增大而减小; 当淹没深度较大时, 相对波高较小的不同峰值频率的极端波浪产生的竖向波浪荷载差别不大, 相对波高为 0.37 ~ 0.42 时, 较高峰值频率极端波浪产生的竖向波浪荷载更大。从浮管竖向受力的角度来看, 应根据建设海域波浪特性对浮管淹没深度进行专项设计。

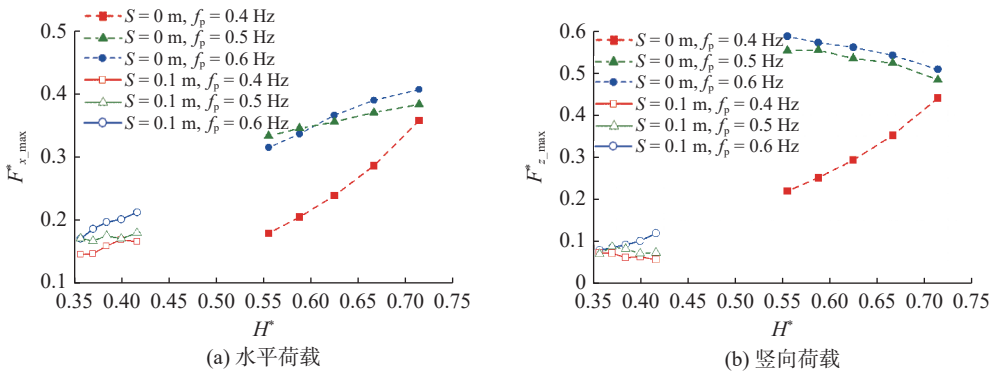


图 8 水平浮管所受最大水动力荷载值  
 Fig. 8 Maximum hydrodynamic load values on horizontal cylindrical floats

为探究水平浮管所受水动力荷载的作用机理, 对浮管波浪力时程进行了傅里叶变换, 结果如图 9 所示。浮管水平波浪力在频谱上可以分为位于入射波浪波谱范围的拟静力部分和约为 2 ~ 3 倍入射波浪波谱范围的砰击力部分。从图 9(a1) 可以看出, 随淹没深度减小, 水平波浪荷载中的高频砰击力占比增大。对比图 9(a1)、(a2) 和 (a3) 可见, 相同淹没深度条件下, 相同波高的 0.5 Hz 峰值频率极端波浪导致的浮管砰击占比最大, 相同峰值频率的大波高极端波浪产生的砰击力更大。结合图 7(a) 可见, 当淹没深度较大时, 水平波浪荷载以拟静力为主, 浮管所受最大水平波浪荷载由低频拟静力控制; 当淹没深度较小时, 波浪砰击现象显著, 浮管所受最大水平波浪荷载由高频砰击力控制。

图 9(b1)、(b2)、(b3) 显示了不同工况下浮管竖向波浪荷载的频谱特征。可见淹没深度为 0 的工况中, 竖向荷载除了具有入射波谱范围内的拟静力和高频的砰击力外, 还有一部分频率为 0 ~ 0.3 Hz 超低频竖向

力分量,这与浮管水平波浪荷载的频谱成分显著不同。竖向波浪荷载中的超低频分量主要源自极端波浪波峰传播经过浮管时所产生的静水浮力,这也可以从图7(b)所示的2种淹没工况竖向波浪力时程曲线的平衡位置对比中得到验证。从图9(b1)、(b2)、(b3)对比可以总结得出,淹没深度对浮管竖向波浪荷载频谱特征影响十分明显,这主要是因为较小淹没深度的浮管受极端波浪作用过程会伴随出现浮管结构的出水和入水过程,对浮管的静浮力影响明显。对于峰值频率为0.4和0.5 Hz的极端波浪产生的竖向波浪荷载,其高频砰击力分量与低频拟静力分量基本相当,这说明对淹没较浅浮管需特别注意波浪砰击导致的浮管结构疲劳问题。

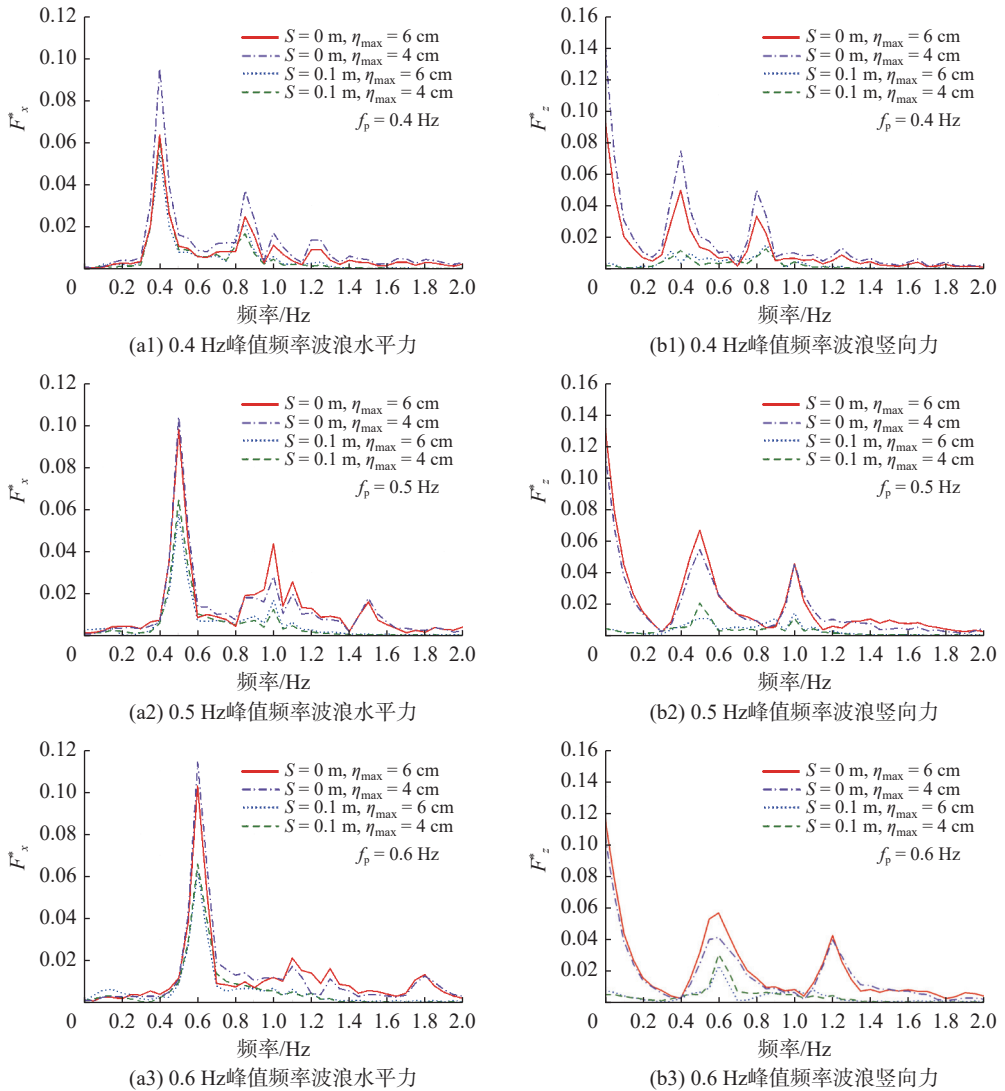


图9 水平浮管所受最大水动力荷载值傅里叶频谱

Fig. 9 Fourier spectrum of maximum hydrodynamic load values on horizontal cylindrical floats

### 3 结 语

本文基于计算流体力学方法,利用 waves2Foam 求解器研究了海上浮式光伏浮管基础极端波浪作用问题,分析了淹没深度和聚焦波参数对浮管基础波浪荷载的影响规律,并利用傅里叶变换对波浪荷载频谱进

行了分析,得出以下结论:

(1)浮管的淹没深度对竖向荷载影响较大,在实际工程中可以考虑适当增加浮管的淹没深度从而达到降低浮管结构波浪荷载的目的;

(2)聚焦波的波浪特性对浮管的波浪荷载影响较大,在海上浮式光伏设计时需着重考察海上光伏项目选址海域的极端波浪特性;

(3)波浪荷载可分为拟静力和砰击力两部分,在淹没深度较小的情况下,砰击力为波浪荷载变化的主要成分,淹没深度较大时则以动水压力导致的拟静力为主。

## 参 考 文 献:

- [1] MORISON J R, JOHNSON J W, SCHAAF S A. The force exerted by surface waves on piles[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, 2(5): 149-154.
- [2] MACCAMY R C, FUCHS R A. Wave forces on piles: a diffraction theory[R]. Washington: Corps of Engineers Washington DC Beach Erosion Board, 1954.
- [3] 刘必劲,傅丹娟,张友权,等. 浅浸没水平圆柱浮子波浪力计算研究[J]. *海洋工程*, 2019, 37(4): 54-62. (LIU Bijin, FU Danjuan, ZHANG Youquan, et al. Study on wave forces of partially immersed horizontal cylindrical float[J]. *The Ocean Engineering*, 2019, 37(4): 54-62. (in Chinese))
- [4] 毛鸿飞,赫岩莉,袁剑平,等. 近水面水平圆柱在波浪作用下的水动力系数[J]. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(4): 109-115. (MAO Hongfei, HE Yanli, YUAN Jianping, et al. Hydrodynamic coefficients of a horizontal circular cylinder near free surface under wave action[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, 40(4): 109-115. (in Chinese))
- [5] CONTENTO G, CODIGLIA R. Non-linear free surface induced pressure on a submerged horizontal circular cylinder at low Keulegan-Carpenter numbers[J]. *Applied Ocean Research*, 2001, 23(3): 175-185.
- [6] OSHKAI P, ROCKWELL D. Free surface wave interaction with a horizontal cylinder[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1999, 13(7/8): 935-954.
- [7] STACHURSKA B, SULISZ W, HEDZIELSKI B. Experimental investigations of wave interaction with semi-submerged horizontal rectangular cylinder of elastic bottom[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 277: 114269.
- [8] JIN R J, ZHAO X, LIU Y, et al. Large scale experimental study on waves and submerged horizontal cylinders[J]. *Water*, 2023, 16(1): 28.
- [9] SHIN D M, CHUNG J. Wave-induced vibration of a fully submerged horizontal cylinder close to a free surface: a theory and experiment[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2022, 17(8): 1843-1851.
- [10] LUPIERI G, CONTENTO G. On the wavy flow past a weakly submerged horizontal circular cylinder at low Keulegan-Carpenter numbers[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2017, 22(4): 673-693.
- [11] SHAHABI-NEJAD M, NIKSERESHT A H. A comprehensive investigation of a hybrid wave energy converter including oscillating water column and horizontal floating cylinder[J]. *Energy*, 2022, 243: 122763.
- [12] ZENG C, HU Y D, YIN Y R, et al. Numerical investigation on interaction between regular waves and a fully submerged horizontal cylinder[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2023, 35(6): 1101-1118.
- [13] TAYLOR P H, TANG T, ADCOCK T A A, et al. Transformed-FNV: wave forces on a vertical cylinder: a free-surface formulation[J]. *Coastal Engineering*, 2024, 189: 104454.
- [14] 陈浩民,倪云林. 非淹没双直立圆柱系统波浪爬升的数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2020(6): 42-47. (CHEN Haomin, NI Yunlin. Numerical analysis of wave run-up characteristics on dual non-submerged vertical cylinders system[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(6): 42-47. (in Chinese))
- [15] 干桂轩,孙亮,岳磊,等. 规则波对大直径群桩作用的数值模拟研究[J]. *水利水运工程学报*, 2020(6): 121-126. (GAN Guixuan, SUN Liang, YUE Lei, et al. Numerical simulations of the group effect of large-diameter columns in regular waves[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(6): 121-126. (in Chinese))
- [16] 武昕竹,柳淑学,李金宣. 聚焦波浪与直立圆柱作用的数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2015(6): 31-39. (WU Xinzhu, LIU

- Shuxue, LI Jinxuan. Numerical simulation of interactions of focusing wave with a vertical cylinder[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(6): 31-39. (in Chinese))
- [17] ZHU S J, LIU J B, GUO A X. Wave force measurement on a large-scale vertical cylinder using a visual technique[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 280: 114788.
- [18] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [19] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory[J]. *Journal of Scientific Computing*, 1986, 1(1): 3-51.
- [20] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [21] FANG Q H, LIU J B, GUO A X, et al. Methodology and experimental validation for generating periodic focused waves in a wave flume[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 210: 107394.

## Hydrodynamic characterization of extreme wave action on offshore photovoltaic floating pipes foundations

PEI Yuanyi<sup>1</sup>, SONG Yang<sup>2</sup>, SHEN Yu<sup>3</sup>, GUO Xuan<sup>4</sup>, FANG Qinghe<sup>2,5</sup>

(1. *China Three Gorges Zhejiang Energy Investment Group Co. Ltd., Hangzhou 310016, China*; 2. *School of Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, China*; 3. *College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014 China*; 4. *College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China*; 5. *Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** In recent years, offshore photovoltaics have become a rapidly growing sector in the field of renewable energy. Floating photovoltaics have become a new demand as offshore photovoltaic development moves towards deeper seas. The floating photovoltaic structure system with a floating pipe foundation has been widely used in inland waters. When applying floating pipe foundations to the marine environment, it is necessary to consider wave action under extreme sea conditions to ensure structural safety. This paper establishes a numerical model for the hydrodynamic action of extreme waves on floating pipes based on the open-source software OpenFOAM. Extreme waves are simulated using focused waves. The numerical model is validated by physical experimental results. With the verified numerical model, wave loads on floating pipes are analyzed. It is found that the established numerical model can accurately calculate the extreme wave action on floating pipes. The submergence depth of the floating pipe significantly influences wave loads. Wave loads on the floating pipe decrease with an increase in submergence depth. The peak frequency and maximum amplitude of the incident focused wave significantly impact the wave loads on the floating pipe. It is essential to conduct a specific analysis of wave loads on floating pipes based on the wave characteristics of the development sea area where the photovoltaic project is located. The research results have theoretical significance for the design of offshore floating photovoltaic structures' resistance to wave action.

**Key words:** offshore floating photovoltaics; focused waves; OpenFOAM; floating pipe