

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.01.008

# 规则波下半潜式平台波浪爬升数值模拟\*

杨晓彤, 赵伟文, 万德成

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院,  
上海 200240, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 在波浪与平台相互作用时, 波浪会沿平台立柱爬升, 甚至能爬升至平台下甲板的情况, 严重影响平台安全。该文应用基于 OpenFOAM 开源平台的 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 对固定的半潜式平台在规则波下的波浪爬升现象进行了数值模拟, 采用边界输入法进行造波, 并且在数值水池末端设置松弛区进行消波。该文重点聚焦在由于入射波浪和平台相互作用导致的波浪爬升, 以及入射波和反射波的叠加造成的波面非线性扰动特性, 对固定平台的波浪爬升和气隙响应进行了数值模拟, 并考察了固定平台立柱间距以及波浪浪向对波浪爬升的影响。

**关键词:** 波浪爬升; 固定平台; 规则波; naoe-FOAM-SJTU 求解器

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

## Numerical simulation of wave run-up of semi-submersible offshore platform under regular wave

YANG Xiao-tong, ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** When the wave interacts with the platform, the wave will climb along platform columns, and even climb to the platform deck, which seriously affects the safety of the platform. In this paper, the naoe-FOAM-SJTU solver based on the open source package OpenFOAM is used to numerically simulate wave run-up on the fixed semi-submersible platform under the regular wave, the boundary input method is used to generate the wave, and the sponge layer is provided at the end of the numerical wave tank to eliminate the wave. This article focuses on the wave run-up caused by the interaction between the incident wave and the platform, and the nonlinear disturbance characteristics of the wave surface caused by the superposition of the incident wave and the reflected wave. The numerical simulation of the wave run-up and air gap response of the fixed platform is

\* 收稿日期: 2020-11-15(2020-11-30 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金(51879159, 51909160)、长江学者奖励计划(T2014099)、国家重点研发计划项目(2019YFB1704200, 2019YFC0312400)、工信部数值水池创新专项课题(2016-23/09)

**作者简介:** 杨晓彤(1996—), 女, 山东人, 硕士研究生。

**通讯作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** November 15, 2020 (**Revised** November 30, 2020)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(51879159, 51909160), Chang Jiang Scholars Program(T2014099), National Key Research and Development Project(2019YFB-1704200, 2019YFC0312400), Innovative Special Project of Numerical Tank of Ministry of Industry and Information Technology of China(2016-23/09)

**Biography:** YANG Xiao-tong (1996—), Female, Master Candidate.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

carried out. And The effect of the distance between the platform columns and the wave direction on the wave run-up is also investigated.

**Key words:** wave run-up; fixed platform; regular wave; naoe-FOAM-SJTU

## 引言

半潜式平台在海洋工程中的应用广泛, 当其在作业海域作业时, 会受到波浪的冲击, 由于半潜式平台立柱群和下浮体的干扰, 波浪会沿着平台的立柱向上爬升, 会有强烈的非线性特性, 在极限海况下会出现波浪砰击平台下甲板的现象, 会对平台结构造成严重的破坏, 需要对平台各处上浪危险点进行局部加强, 因此研究半潜式平台的波浪爬升问题, 对平台设计工作有着重要意义。

有关平台波浪爬升的问题, 国内外许多学者进行了研究, 主要有实验方法和CFD方法, CFD方法又分为势流理论和黏流理论。实验方法中, S.A.Mavrakos等<sup>[1]</sup>实验研究了TLP平台与规则波的相互作用, 针对平台的固定状态和系泊状态, 讨论了入射波波频对波浪爬升的影响, 结果发现系泊状态下的平台波浪爬升要低于平台固定状态, 但是在平台的垂荡固有频率附近, 平台大的垂荡运动造成的辐射波对水面有严重扰动。Contento等<sup>[2]</sup>实验研究了固定多立柱周围的波浪爬升, 并监测了其所受的高阶波浪力, 实验发现, 由于波浪与立柱以及立柱间的相互干扰作用, 在平台立柱中间区域的波面易放大。Simos等<sup>[3]</sup>对半潜式平台的小型模型在固定和系泊状态下均进行了在规则波下的实验, 除了实验方法, 他们也使用CFD方法进行了研究, 使用势流软件WAMIT进行数值模拟, 并与实验值进行对比, 以进行初步的气隙估计。在规则波下的测试结果显示, 对于超过4%的波陡度下会发生明显的非线性影响, 尤其是在靠近立柱的区域由于波浪爬升现象造成的波面升高。Stansberg等<sup>[4]</sup>同样利用WAMIT 对该问题进行了数值模拟, 采用线性理论和二阶非线性方法计算了平台气隙, 得到了与Simos等<sup>[3]</sup>一致的研究结果, 即发现二阶非线性方法基本能较好地预报平台不同位置的波面升高, 但对于波陡较大的情况, 势流方法会低估立柱附近区域的波浪爬升。姜胜超等<sup>[5]</sup>使用边界元方法对四立柱在规则波下的近场干涉问题进行了研究。讨论了入射波频率对圆柱波浪爬升和圆柱所受的二阶漂移力造成的影响。

Iwanowski等<sup>[6]</sup>应用基于黏性流理论的Com-Flow 软件对该问题进行了理论研究, 该方法可以较好地模拟固定平台立柱周围的波浪爬升和平台气隙现象, 但平台运动状态下情形不能真实反映, 因为没考虑波浪和平台之间的非线性耦合运动。单铁兵等<sup>[7]</sup>使用FLUENT软件对刚性固定的半潜式

平台在规则波中的波浪非线性爬升问题进行了研究, 讨论了波陡对波浪爬升的影响, 着重研究了较大波陡的规则波对平台造成的强非线性现象, 文章采用的数值方法捕捉到了水体分离和波浪破碎等强非线性现象。Cao等<sup>[8]</sup>基于实验室内部求解器naoe-FOAM-SJTU自主开发了数值水池, 进行了规则波下单圆柱及四圆柱波浪爬升的数值模拟, 并将单圆柱波浪爬升的数值模拟结果与实验值进行对比分析, 数值模拟结果与实验值对比良好, 探讨了入射波参数对圆柱周围波浪爬升造成的影响, 验证了该求解器求解波浪爬升问题的可行性和准确性, 四立柱下波浪爬升的数值模拟结果显示立柱群间的干涉对波浪爬升的影响, 四立柱的波浪爬升大于单立柱的波浪爬升, 迎浪下的波浪爬升要大于斜浪下的波浪爬升。Wang等<sup>[9]</sup>详细介绍了基于CFD方法的OpenFOAM平台上开发的内部求解器的开发。首先说明了OpenFOAM中用于海洋流体动力学的基本功能。介绍了naoe-FOAM-SJTU中主要模块的实现, 包括波浪生成和吸收, 6DOF运动, 系泊系统, 动态重叠网格, 流固耦合和非稳态制动线模型。讨论了其在海洋水动力问题中的广泛应用, 重点讨论了其在解决波浪条件下船舶操纵性问题上的发展和优势, 相比于传统实验, CFD仿真不仅可以预测船舶运动, 也可以展现出船舶推进性能, 并给出细节的流场信息。

不同于实验方法和势流理论, 本文应用基于CFD方法的OpenFOAM平台上开发的内部求解器naoe-FOAM-SJTU进行了规则波与半潜式平台的相互作用的数值模拟, 本文选取的波浪波陡较大, 并且在数值模拟过程中出现了波浪破碎等强非线性现象。与多立柱问题不同在于本文考虑了平台立柱浮筒和横撑的影响, 主要关注最大波浪爬升高度到平台下甲板之间的距离。文章聚焦在入射波浪和平台相互作用导致的波浪爬升, 以及入射波和反射波的叠加造成的波面非线性扰动特性, 对比了前后立柱不同的波浪爬升现象, 以及距离立柱不同位置测点的波浪爬升情况, 讨论了来浪浪向和半潜式平台立柱间距对波浪爬升造成的影响, 并给出了相应的流场细节图。

## 1 数值方法

本文的计算使用的是OpenFOAM平台上自主开发的内部CFD求解器naoe-FOAM-SJTU<sup>[10]</sup>, 现对使用的该求解器中涉及的数值方法进行简单的介绍。

### 1.1 控制方程

对于气液两相不可压缩黏性流体使用RANS方程作为控制方程,如公式(1-2)所示

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla [\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}] = \\ -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla (\mu \nabla \mathbf{U}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为流体的速度;  $\mathbf{U}_g$  为网格节点的速度;  $\rho$  为气和水混合流体的密度;  $p_d$  为动压力,与总压力  $p$  的关系是  $p_d = p - \rho g z$ ;  $\mathbf{g}$  为重力加速度;  $\mu$  为气和水混合流体的动力学黏性系数。

离散方法使用的是有限体积法FVM(Finite Volume Method)。本文使用层流模型来处理流体的流动状态。速度压力的解耦使用的是PISO方法。

### 1.2 自由面捕捉

在本文中,自由面的捕捉使用的是结合了界面压缩技术的VOF(Volume of Fluid)方法<sup>[1]</sup>,首先定义代表了每个单元流体的性质的体积分数  $\alpha$ ,如公式(3)所示

$$\begin{cases} \alpha=1 & \text{水} \\ 0<\alpha<1 & \text{气和液混合流} \\ \alpha=0 & \text{空气} \end{cases} \quad (3)$$

定义  $\alpha=1$  表示为水,  $\alpha=0$  表示为空气,  $0<\alpha<1$  表示为气与水交界面。

对于气和水两相混合流体的  $\rho$  和  $\mu$ ,在VOF方法中的表示方法如公式(4)所示

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_w + \rho_a (1 - \alpha) \\ \mu = \alpha \mu_w + \mu_a (1 - \alpha) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\rho_w$  为水的密度,  $\mu_w$  为水的动力学黏性系数,  $\rho_a$  为空气的密度,  $\mu_a$  为空气的动力学黏性系数。

### 1.3 造波与消波

本文使用 OpenFOAM 工具箱 waves2foam<sup>[12-13]</sup> 进行造波和消波,通过直接在入口边界输入目标波的波形参数进行造波,使用 Stokes 一阶波。

为了避免波浪在出口边界反射,从而引起在计算域内部的反射而造成对计算结果的干扰或者造成解的发散,在计算域末端设置松弛区,松弛区的消波方式如公式(5)所示

$$\phi = \alpha_R \phi_{\text{computed}} + (1 - \alpha_R) \phi_{\text{target}} \quad (5)$$

式中:  $\phi$  为自由面速度或者流体液相参数,变量  $\phi_{\text{target}}$  为根据Stokes波理论得出的时空方程,  $\phi_{\text{computed}}$  为根据FVM计算得出的变量,加权系数  $\alpha_R$  在入口边界为0,在计算域的非松弛区域为1,在松弛区平稳地从1到0,如图1所示,这样就实现了造波和消波,并且避免了边界的波浪反射。

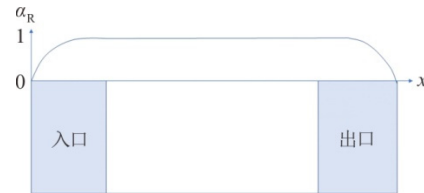


图1(网上彩图)  $\alpha_R$  在计算域的变化情况  
Fig.1 (Color online)  $\alpha_R$  in the computational domain

## 2 数值模拟收敛性分析

数值水池范围设置x方向为-6 m至6 m, y方向为-2 m至2 m, z方向为-3 m至1 m,水深为3 m,示意图如图2所示。为后续保证计算的数值收敛,需对空场造波进行数值收敛性验证。本文平台作用的规则波参数为:波高  $H = 0.104$  m,周期  $T = 1$  s,波陡参数  $KA = 0.21$ ,波浪散射参数  $KR = 0.42$ ,其中,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$  为波数, A为入射波幅,  $\lambda$  为入射波长, R为立柱的等效半径。

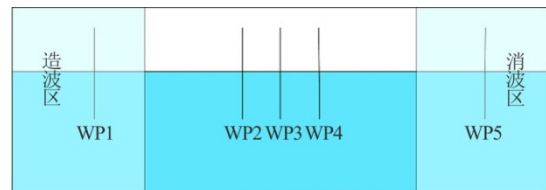


图2(网上彩图) 数值水池示意图  
Fig.2 (Color online) Schematic diagram of numerical wave tank

首先选取了两种不同的时间离散格式, Euler和CrankNicholson 0.95。网格划分同为一个波高范围内20个网格,一个波长范围内50个网格,时间步选择为0.002 5。两种不同的时间离散格式得到的规则波波高时历曲线如图3所示。

由图3可以看出,更高精度的Crank Nicholson0.95格式相较于Euler格式得到的波高更贴合设置所需的波高,衰减明显减小。

随后在 Crank Nicholson0.95 的时间离散格式下进行了网格收敛验证,选取了不同的网格划分方式,表1中给出了不同网格划分方式下自由面附近的网格尺寸,粗糙和中等网格选取的时间步为 0.002 5,

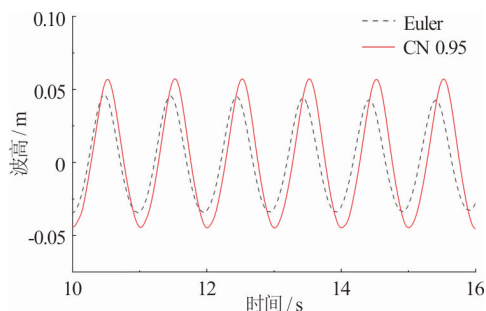


图3 (网上彩图) 不同时间离散格式的波高时历曲线对比图  
Fig.3 (Color online) Comparison chart of wave height and time history curves in different time discrete formats

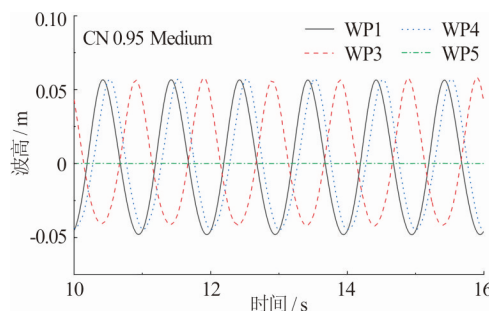


图5 (网上彩图) 不同测点位置的波高时历曲线对比图  
Fig.5 (Color online) Time history curves of wave surface elevations for different wave probes

表1 三种网格划分方式

Table 1 Three meshing methods

网格划分方式	网格数量
粗糙	10/H, 50/λ
中等	20/H, 100/λ
精细	40/H, 200/λ

精细网格下为保证库朗数  $Courant = \frac{u\Delta t}{\Delta x} < 1$  始终成立, 保证计算的稳定性, 选取的时间步为0.001。

三种不同的网格得到的规则波波高时历曲线与理论波形的对比如图4所示。由图中可以看出, 计算得到的规则波波峰相比理论波形要略尖瘦, 波谷相比理论波形平坦。

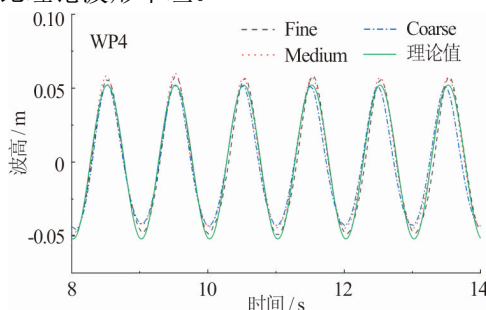


图4 (网上彩图) 三种网格划分方式的波高时历曲线与理论波形对比图

Fig.4 (Color online) Time history curves of wave surface elevations for three meshing methods and theoretical wave profile

粗糙网格中的规则波波高是0.093 8 m, 衰减约为9.9%, 中等网格演化的规则波波高是0.101 m, 衰减为3.4%, 精细网格演化的规则波波高是0.102 8 m, 衰减为1.14%。结合图4和数据可以看出, 中等网格和精细网格演化的规则波较为接近, 粗糙网格演化的规则波衰减较多。在保证计算精度的情况下为节省计算资源, 后续将选用中等网格来进行平台波浪爬升的数值模拟。

图5展示了计算域不同位置测点的波高时历曲线, 其中 WP1 位于造波区, WP5 位于消波区, WP3 位于计算域的中心位置, WP4 位于计算域靠后位置。由图可以看出, 计算域消波区消波显著, 避免了波浪反射。

### 3 数值模拟

#### 3.1 模型建立与网格划分

本文进行了深水半潜式平台在规则波下的波浪爬升数值模拟, 选取的模型参考了文献[14-15]中的半潜式平台, 平台主要有甲板, 四根立柱, 两个浮筒组成, 平台沿中纵剖面以及中横剖面对称。平台立柱长宽高为21 cm×21 cm×32.7 cm, 横截面带有6 cm的导角。半潜式平台模型参数如表2所示。

表2 半潜式平台模型参数

Table 2 Main parameters of semi-submersible platform model

参数	尺寸
总长	1.54 m
总宽	1.33 m
立柱长×宽×高	0.21 m×0.21 m×0.327 m
浮筒长×宽×高	1.36 m×0.24 m×0.13 m
初始吃水	0.26 m
初始气隙	0.197 m

为了考察平台的立柱间距以及波浪方向对波浪爬升的影响, 进行了3个算例的数值模拟, 如表3所示, 立柱间距为两立柱中心点之间的距离, 计算模型如图6所示。

表3 计算算例

Table 3 Cases of numerical simulation

Case	立柱间距	浪向
Case 1	0.45 m	迎浪 0°
Case 2	1.1 m	迎浪 0°
Case 3	1.1 m	横浪 90°

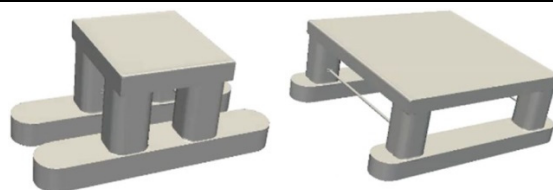


图6 (网上彩图) 半潜式平台计算模型

Fig.6 (Color online) Computational models of semi-submersible platform



计算域网格划分如图7所示。网格划分方式选取上文网格收敛性验证中的中等网格,自由面处的网格大小约为 $0.015\text{ m}\times 0.015\text{ m}\times 0.005\text{ m}$ ,总网格量为682万。

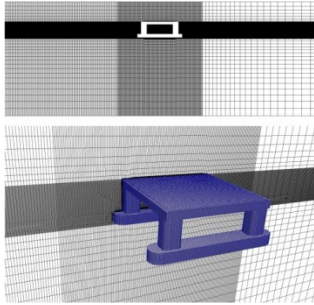


图7(网上彩图) 计算域网格划分  
Fig.7 (Color online) Computational domain meshing

### 3.2 浪高仪的设置

为了监测平台立柱附近的波浪爬升状况,在立柱周围设置了浪高仪,在迎着波浪来流方向的前立柱的前方设置了gauge\_A1, gauge\_A2, gauge\_A3和gauge\_A4四个浪高仪,距离立柱分别为 $0.006\ 25\ R$ ,  $0.2\ R$ ,  $0.6\ R$ 和 $1.0\ R$ ,其中 $R$ 为立柱的等效半径。在后立柱的前方同样设置了四个浪高仪gauge\_I1, gauge\_I2, gauge\_I3和gauge\_I4,与立柱间的距离同前立柱设置。另外设有多个浪高仪分别位于平台的中心gauge\_1,下浮体的中心gauge\_2,前立柱的侧面gauge\_B1、gauge\_D1、gauge\_C1、gauge\_G1,后立柱的侧面gauge\_F1、gauge\_H1和前立柱的背面gauge\_E1等用来测量相应的气隙分布,浪高仪设置如图8所示。

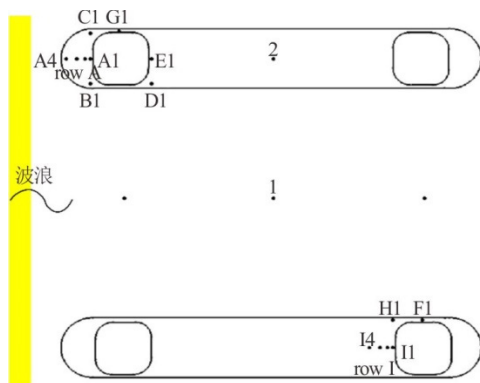


图8(网上彩图) 浪高仪位置图  
Fig.8 (Color online) Distributions of wave gauges

### 3.3 立柱周围的波浪爬升

当波浪与半潜式平台相遇后,将沿着平台立柱爬升,并在立柱间出现波浪反射和波浪叠加等非线性现象,并且不同的立柱间距以及不同的浪向会有不同的结果,本文将通过数值模拟结果展示该现象。浪高仪的数据均进行了无因次化处理,无因次化的波面升高可以表示为 $\xi/(H/2)$ ,无因次化的波浪爬

升程度可以表示为 $A_r/(H/2)$ ,其中, $\xi$ 为浪高仪实测的波面高度, $H$ 为入射波波高, $A_r$ 为波浪爬升的最高点到静水面之间的垂向距离。

图9展示了数值模拟case 1与实验的对比,图中展示了前立柱迎浪向的A4至A1点波浪爬升程度,可以看出,该结果与实验算例中结果的变化趋势一致,测波点距离立柱越近,波浪爬升数值越高。但是数值模拟结果还是要略小于实验结果,这是由于选取的波浪波陡较大,并且数值模拟精度不够造成的,数值模拟与模型实验设置的测波点位置等数值误差也会导致结果的差异。图10展示了数值模拟三种工况下前立柱迎浪向的A4至A1点波浪爬升程度的计算结果,由图可以看出,随着立柱间距的增大,波浪爬高明显下降,这是因为立柱间的波浪反射叠加的作用被削弱,而在波浪浪向为 $90^\circ$ 时,由于半潜式平台的浮筒迎着来浪方向,损耗了一部分的波浪能量,使得波浪爬升比浪向为 $0^\circ$ 时较弱。图11展示了立柱间距较大的半潜式平台在迎浪条件下前立柱测波点A4到A1的无因次化后的波高时历曲线,展示了波浪爬升随时间的周期性变化,并且波峰呈现逐渐减小的趋势。当波浪靠近前立柱,波面沿着立柱表面迅速爬升;测点与立柱间距越小,波浪爬升越高,波形越来越细长,非线性特征越显著。

图12展示了三种工况下后立柱附近的I4点至I1点波浪爬升峰值的变化曲线,图13展示了立柱间距较大的半潜式平台在迎浪条件下后立柱测波点I4

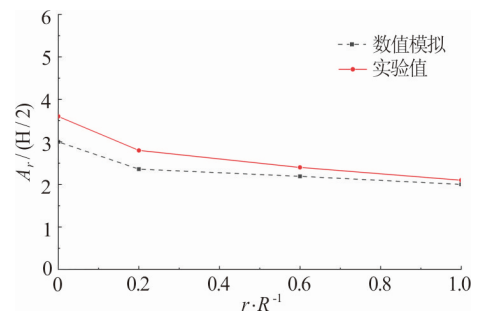


图9(网上彩图) 数值模拟结果与实验结果对比图  
Fig.9 (Color online) Comparison of numerical simulation and experiment

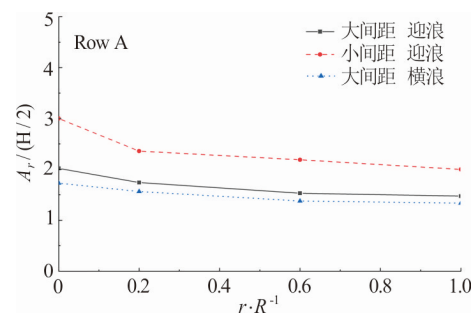


图10(网上彩图) 沿浪高仪组 Row A 的波浪爬升曲线  
Fig.10 (Color online) The normalised wave elevation around row A

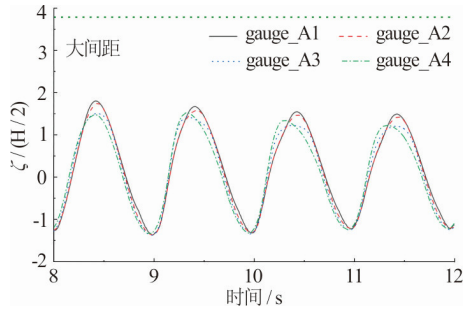


图 11 (网上彩图) 沿浪高仪组 Row A 的波面升高时历曲线  
Fig.11 (Color online) Time history curves of wave elevation around row A

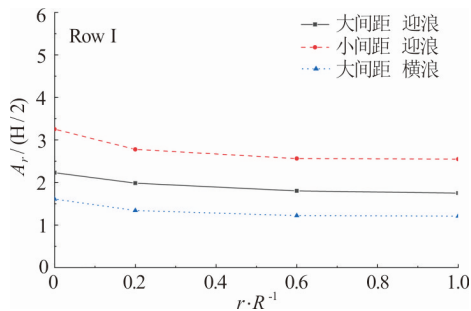


图 12 (网上彩图) 沿浪高仪组 Row I 的波浪爬升曲线  
Fig.12 (Color online) The normalised wave elevation around row I

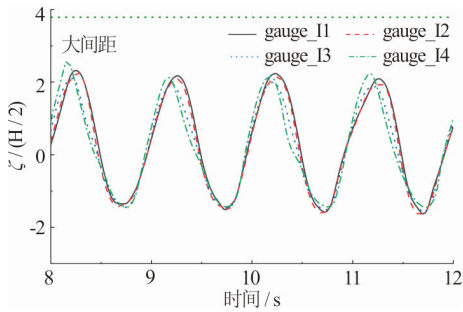


图 13 (网上彩图) 沿浪高仪组 Row I 的波面升高时历曲线(case2)  
Fig.13 (Color online) Time history curves of wave elevation around row I(case2)

到I1的无因次化后的波高时历曲线。同前立柱趋势基本一致, 当波浪传播至后立柱时, 波浪沿着立柱表面迅速爬升, 尤其是在平台立柱间距较小的情况下, 波浪爬升更为明显, 波浪的非线性特征较为强烈。而在波浪浪向为 $90^\circ$ 时, 其波浪爬升情况比浪向为 $0^\circ$ 时较弱。对比前立柱和后立柱的波浪爬升特性可知, 后立柱附近的波浪爬升较为剧烈, 波浪非线性特征更为显著。这是因为后立柱处于前立柱的流场影响范围内, 会受到前立柱流场的干扰。

图14展现了立柱间距较大的情况下, 前立柱迎浪点gauge\_A1, 以及立柱内前侧点gauge\_B1和立柱内后侧点gauge\_D1的波浪爬升时历曲线, 由图可以看出, 迎浪点gauge\_A1的波浪爬升最高, 前侧点gauge\_B1处由于在导角附近, 波浪爬升比

中心位置稍低, 后侧点gauge\_D1处由于立柱与波浪的相互作用, 出现了二次波峰, 非线性性较强。图15展现了立柱间距较小的情况下, 前立柱迎浪方向gauge\_A1, 以及立柱前外侧gauge\_C1和立柱中外侧gauge\_G1的波面升高时历曲线, 由图可以看出, 迎浪方向gauge\_A1的波浪爬升最高, 相比于间距较大的情况, 出现了二次波幅的情况, 说明立柱间距较小的情况下, 非线性特征越显著。前侧点gauge\_C1处在导角附近, 也出现了二次波幅的情形, 后侧点gauge\_G1处位于立柱的中间侧点, 出现了边波回荡的情形。图16展示了平台后立柱外侧的波浪爬升分布时历曲线, 由于平台侧面会出现边波回荡, 故gauge\_F1测点处出现多个小波峰的情况, 迎浪点以及前侧点gauge\_H1位置处也出现了二次波峰的情况, 后立柱的流场相比于前立柱的流场非线性更强。

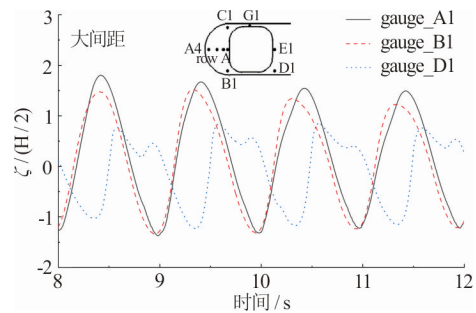


图 14 (网上彩图) 前立柱周围测点的爬升特性(case2)  
Fig.14 (Color online) The normalised wave elevation around front column(case2)

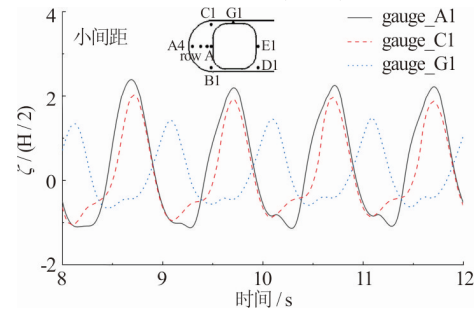


图 15 (网上彩图) 前立柱周围测点的爬升特性(case1)  
Fig.15 (Color online) The normalised wave elevation around front column (case1)

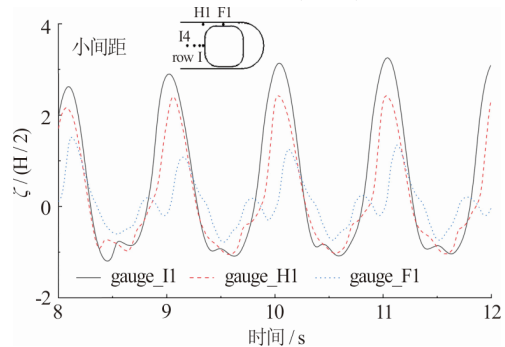


图 16 (网上彩图) 后立柱周围测点的爬升特性(case1)  
Fig.16 (Color online) The normalised wave elevation around back column (case1)

### 3.4 立柱周围的流场细节

规则波在数值水池中传播,当遇到半潜式平台时,波浪首先沿着两个前立柱向上爬升,随后波浪继续向前传播,并沿着立柱向两侧扩散回荡,向内扩散的波浪会在两个立柱中间叠加并形成新的波峰,如图17所示,当立柱间距较小时,由于立柱间距较小,叠加兴起的波峰明显高于大间距的情况。波浪继续向后传播,在前立柱周围回荡的边波向后传播,以及从两立柱中间向后传播的波浪,在立柱的背部攀升汇聚成脊状,如图18所示。如图18(b)所示,在前立柱背部形成的脊状波浪继续向后传播,传播过程中与两侧的水波汇聚又形成了小波峰。如图18(a)所示,由于立柱间距远小于波长,在前立柱背部形成的脊状波浪向后传播,直接沿着后立柱向上爬升,并可以看出由于立柱间距较小,在四立柱的中央位置汇聚成了一个明显的波峰。可以

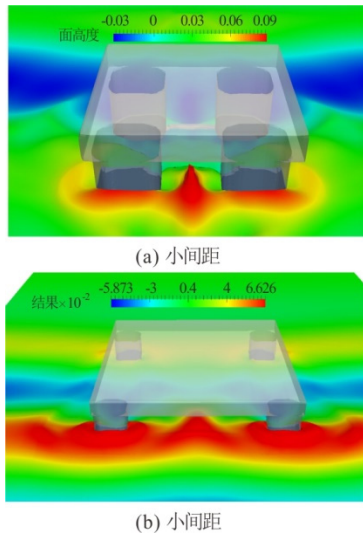


图 17(网上彩图) 前立柱之间的波浪叠加云图  
Fig.17 (Color online) Wave superposition of front columns

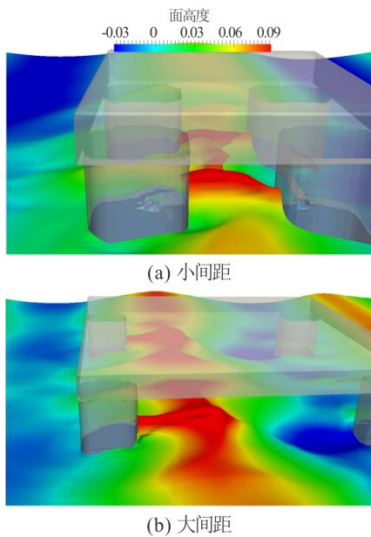


图 18(网上彩图) 前立柱背面的波浪抬升  
Fig.18 (Color online) Uplift of waves on the back of the front column

看出小间距平台之间的波浪场比大间距的非线性要更显著。

规则波流经前立柱之后,前立柱尾部爬升的波浪,以及前立柱周围回荡的边波,穿越立柱中间的波浪汇集在一起继续向后传播,沿着后立柱向上爬升,与前立柱情形相似,如图19所示。但是由于后立柱位于前立柱的流场影响范围内,波浪爬升更高。小间距平台后立柱的波浪爬升和后立柱中央形成的小波峰波高均高于大间距。由图20所示,在波浪经过平台横撑时,会产生波浪破碎的强非线性现象。

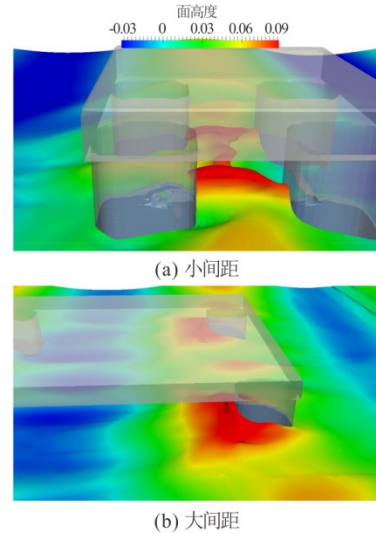


图 19(网上彩图) 后立柱前的波浪上涌  
Fig.19 (Color online) Wave run-up in the front of the back column

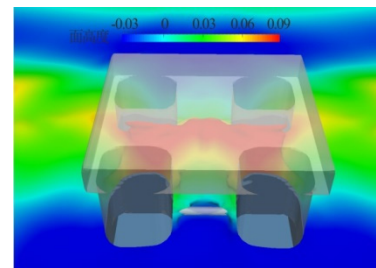


图 20(网上彩图) 波浪破碎  
Fig.20 (Color online) Wave breaking

## 4 结论

本文基于CFD开源平台OpenFOAM中实验室内部求解器naoe-FOAM-SJTU数值模拟了规则波与固定式半潜式平台间复杂的相互作用,揭示了波浪爬升的机理,分析了立柱间间距以及规则波浪向等因素对波浪爬升造成的影响。得出的结论如下:

- (1) 立柱周围的波高数值与变化趋势,数值模拟计算结果与实验基本一致;
- (2) 在波浪靠近立柱向上爬升过程中,迎浪位置的测波点距离立柱越近,波浪非线性越明显;在

立柱侧面的测波点可以看出由于边波回荡所产生的二次波峰的现象;

(3) 后立柱位于前立柱的尾流流场影响区域内, 现象比前立柱周围更为复杂, 波浪爬升更为剧烈;

(4) 迎浪情况下, 立柱间距较小的情况下, 波浪爬升现象更为显著; 横浪条件下, 由于浮筒的阻碍作用, 波浪爬升减弱。

本文进行了半潜式平台在规则波下的波浪爬升的数值模拟研究, 后期将继续开展聚焦波下半潜式平台的波浪爬升和平台气隙问题的研究, 深入探讨聚焦波参数, 如聚焦波聚焦位置和波陡等对波浪爬升和平台气隙的影响。

### 参 考 文 献:

- [1] MAVRAKOS S A, CHATJIGEORGIOU I K, GRI-GOROPOULOS G, et al. Scale experiment of motions and wave run-up on a TLP model, subjected to monochromatic waves[C]. 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 2004.
- [2] CONTENTO G, D'ESTE F, SICCHIERO M, et al. Run-up and wave forces on an array of vertical circular cylinders: Experimental study on the second order near trapping[C]. 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 2004.
- [3] SIMOS A N, FUJARRA A L C, SPARANO J V, et al. Experimental evaluation of the dynamic air gap of a large-volume semi-submersible platform[C]. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Hamburg, Germany, 2005.
- [4] STANSBERG C T, BAARHOLM R, KIRSTIANSEN T. Extreme wave amplification and impact loads on offshore structures[C]. Offshore Technology Conference, Houston, USA, 2005.
- [5] 姜胜超, 吕林, 滕斌, 等. 四柱结构在波浪作用下的近场干涉[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, (05): 546-554. JIANG Sheng-chao, LYU Lin, TENG Bin, et al. Hydrodynamic analyses for near-trapping of a four-cylinder structure under water waves[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, (05): 546-554.
- [6] IWANOWSKI B, LEFRANC M, WEMMENHOVE R. CFD simulation of wave run-up on a semi-submersible and comparison with experiment[C]. 28th International Conference on Offshore and Arctic Engineering Ocean, Honolulu, Hawaii, USA: ASME, 2009.
- [7] 单铁兵, 杨建民, 李欣, 等. 一种适用于陡波条件下研究半潜平台周围波浪非线性爬升效应的计算方法[J]. 船舶力学, 2013, 17(4): 346-359. SHAN Tie-bing, YANG Jian-min, LI Xin, et al. A numerical method to investigate non-linear wave run-up effects around semi-submersible in steep waves[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(4): 346-359.
- [8] CAO H, WAN D. Benchmark computations of wave run-up on single cylinder and four cylinders by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. Applied Ocean Research, 2017, 65: 327-337.
- [9] WANG J H, ZHAO W W, WAN D C. Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2019, 31(1): 1-20.
- [10] 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.
- [11] JACOBSEN N G. waves2Foam Manual[R]. 2017.
- [12] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSOE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam(R)[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70(9): 1073-1088.
- [13] SHEN Z, WAN D, WANG J, et al. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[R]. Technol Rep Solver Man, 2014.
- [14] 单铁兵. 波浪爬升的机理性探索和半潜式平台气隙响应的关键特性研究[D]. 上海交通大学, 上海, 中国, 2013. SHAN Tie-bing. Research on the mechanism of wave run-up and the key characteristics of air-gap response on semi-submersible[D]. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 2013.
- [15] 悦战刚. 半潜平台波浪爬升数值研究[D]. 中国海洋大学, 青岛, 中国, 2014. YUE Zhan-gang. Numerical investigation on wave run-up of semi-submersible platform[D]. Ocean University, Qingdao, China, 2014.