

# 波流作用下海上风机基础的水动力性能数值模拟

刘正浩, 彭耀, 万德成

(上海交通大学, 海洋工程国家重点实验室, 船舶海洋与建筑工程学院, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心,  
上海市东川路 800 号, 邮编: 200240)

**摘要:** 海上风机基础长期受到海流、波浪等环境荷载的交互作用, 作业难度较大, 研究风机基础的水动力特性可为其设计及应用提供重要参考。本文基于自主研发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对固定式高桩承台风机基础在波流作用下的水动力参数进行了数值模拟, 研究了波浪与海流同向时, 该风机基础在不同水深、不同波高条件下的受力、流场信息以及波面爬升现象, 计算结果展示了 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以很好地模拟波流联合作用下风机基础的水动力特性。

**关键词:** 高桩承台风机基础; 波流作用; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 水动力性能

## Numerical study for hydrodynamic performance of wind turbine foundation under wave-current combinations

Liu Zhenghao, Peng Yao, Wan Decheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University,  
Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Analysis of hydrodynamic performance is of great importance for the design and application of wind turbine foundation, for they are always under current, waves and other environmental loads interaction. In this paper, a CFD solver named naoe-FOAM-SJTU is applied to numerically simulate the hydrodynamic performance of a pile wind turbine foundation under wave-current combinations. The forces and the flow field of the pile wind turbine foundation under different water depths and wave heights are presented and analyzed. The result shows the naoe-FOAM-SJTU solver is applicable and reliable to study hydrodynamic performance of wind turbine foundation.

**Key words:** Pile wind turbine foundation, wave-current interaction, naoe-FOAM-SJTU solver, hydrodynamic performance

## 引言

近年来, 海上风力发电逐渐成为全球风电产业发展的新方向。在海洋工程中, 高桩承台风机基础由于具有抗弯强度高、施工周期短、适应性强、成本相对较低等特点, 从而得到了广泛应用。高桩承台风机基础由群桩和连接桩顶的承台组成, 其所受波流载荷对风机基础的安全性以及使用寿命有重要影响, 因此, 研究高桩承台风机基础的水动力特性对于工程应用具有重要意义。

目前, 研究海上风机基础水动力特性的方法主要有实地监测、理论分析、模型试验和 CFD 模拟等。实地监测所测得数据比较可靠, 可以作为检验依据, 但其通常是针对已有风机基础, 对新风机基础类型的设计与应用指导意义不大。模型试验一般是在海洋工程水池中进行的, Venugopal 等<sup>[1]</sup>通过实验分析了纯波及波流共同作用时, 风机基础惯性力系数和拽力系数的变化规律。国内兰雅梅

基金项目:

作者简介: 刘正浩, 男, 1989.10 生, 博士研究生。万德成, 教授, [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)。

等<sup>[2-3]</sup>对东海大桥桩基结构的波流力进行了模型试验研究,分析了不同水深下不规则波与均匀流共同作用于小尺度单桩以及群桩的水动力特征。雷欣欣等<sup>[4]</sup>针对不规则波中高桩承台进行了物理模型试验,较为系统地分析了此风机基础的群桩水动力特性,并研究了桩柱波浪力变化规律。理论分析在风机基础水动力特性研究中也有重要应用,刘珍等<sup>[5]</sup>利用采用时域高阶边界元法研究了波流与结构物的相互作用问题。姚文伟等<sup>[6]</sup>基于线性势流理论和 Morison 公式,研究了规则波中典型桩基承台结构的波浪力计算问题,并分析了承台对桩基波浪力的影响,以及水深、桩柱相对中心距离对承台效应系数的影响。

然而,随着研究不断地深入,理论分析方法受到了很大的限制,而模型试验和实地监测都需要较高成本,因此近年来 CFD 模拟方法得到飞速发展。Bredmose 等<sup>[7]</sup>在开源软件 Open FOAM 的基础上,利用 VOF (Volume of Fluid) 自由面处理技术研究了破碎波和垂向的波浪载荷对固定式海上风力机基座的影响。周胡等<sup>[8]</sup>利用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 软件研究了规则波和孤立波对东海大桥风机基础的水动力特性的影响。

本文应用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对一座固定式高桩承台基础在波流作用下的水动力性能作了数值模拟,研究了波浪与海流同向工况下,该风机基础在不同水深、不同波高下的受力、流场信息以及波面爬升现象。

## 1 数值方法

### 1.1 流体控制方程

对于非定常、不可压的黏性流体,采用流动的控制方程为 RANS 方程:

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla(\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma \quad (2)$$

式中  $U$  和  $U_g$  分别为流场速度和网格节点速度,  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  表示流场动压力,  $p$  是总压力,  $\rho$  是流体密度,  $\mu_{eff} = \rho(\nu - \nu_t)$  是动力黏性系数,  $f_\sigma$  为表面张力,只在界面处起作用,在非界面处为零,  $f_s$  是数值造波中消波区的源项,仅对消波区有效。

### 1.2 naoe-FOAM-SJTU 求解器

naoe-FOAM-SJTU 求解器<sup>[9]</sup>是基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器。该求解器包含数值造波与消波模块、六自由度运动模块等,通过求解流场和结构物六自由度运动方程,可以对海洋结构物<sup>[10-15]</sup>水动力性能进行有效的预报。

naoe-FOAM-SJTU 求解器中自由面的处理采用了 OpenFOAM 中自带的 VOF 法,VOF 法属于自由面追踪法。在对自由面的处理过程中,需要引入体积分数  $\alpha$ ,用来表示网格内流体占有体积与整个网格体积的比重。 $\alpha=0$  表示该网格内没有流体,  $0<\alpha<1$  表示自由面,  $\alpha=1$  表示该网格单元被流体充满。自由面边界的法向方向通过  $\alpha$  函数的梯度来表示,所以网格的  $\alpha$  函数值及其梯度值共同决定了网格单元中自由面的位置。

求解器采用可以处理任意多面体结构网格的有限体积法(FVM)离散控制方程,通过调用  $k-\omega$  SST、 $k-\varepsilon$  等湍流模式来封闭湍流方程;在求解过程中采用 PISO 算法实现速度场和压力场的耦合求解。

## 2 计算模型

### 2.1 模型及计算网格

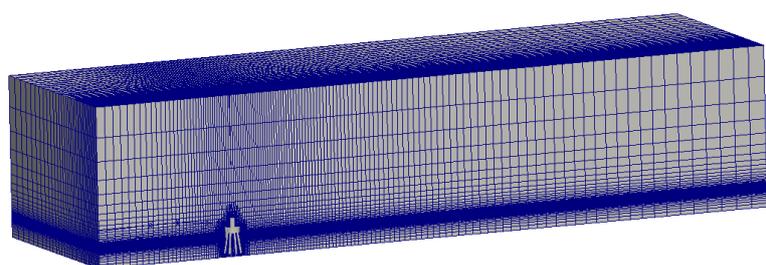
本文选取一座高桩承台风机基础作为研究对象,高桩承台结构主要由塔架,承台和 8 根桩柱组成。承台高程 9 m,直径 14.5 m,桩柱直径 1.2 m,在承台半径  $R=4.3$  m 的圆周上均匀分布,斜度为

6:1。采用 ProE 软件进行建模，模型的缩尺比为 1: 30，模型如图 1 所示。

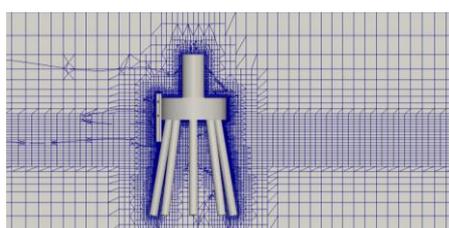


图 1 高桩承台风机基础模型  
Fig. 1 Grouped and high piles structure

网格的划分是利用 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh 工具实现的，首先运用 pointwise 软件绘制背景网格，再利用 snappyHexMesh 工具划分平台表面的网格，整个网格量大约为 200 万，不同水深情况下网格数量变化不大，如图 2 所示。数值水池左侧入口为入射波浪以及均匀流边界，右侧选取一段作为海绵消波区，用来抵消出口处的波浪反射，风机基础表面采用无滑移固壁。对自由液面以及风机基础表面部分进行局部细化，以便精确捕捉自由液面和处理基础表面边界层内速度等物理量的剧烈变化。



(a) 整体网格



(b) 局部网格



(c) 模型表面网格

图 2 高桩承台风机基础模型计算网格  
Fig. 2 Computational mesh of Grouped and high piles structure

## 2.2 计算工况

本文对高桩承台风机基础模型在波流同向载荷下进行了数值模拟，计算了 25.96、21.9 和 17.61 m 三种典型水深下风机基础的水动力特性，对应的模型尺度水深分别为 0.991、0.856 和 0.713 m。本文还计算了 25.96 m 水深下，波高分别为 8.7 和 6.37 m 时，波浪对风机基础的影响，对应的模型尺度波高为 0.29 和 0.212 m。模型尺度水流大小均为 0.316 m/s。工况具体参数如表 1 所示。

表 1 计算工况  
Table 1 Computation conditions

| 工况   | 水深 (m) | 模型尺度水深 (m) | 波高 (m) | 模型尺度波高 (m) | 模型尺度波浪周期 (s) |
|------|--------|------------|--------|------------|--------------|
| 工况 1 | 17.61  | 0.713      | 8.7    | 0.29       | 2.1          |
| 工况 2 |        |            | 6.37   | 0.212      | 1.86         |
| 工况 3 | 21.9   | 0.856      | 8.7    | 0.29       | 2.1          |
| 工况 4 |        |            | 6.37   | 0.212      | 1.86         |
| 工况 5 | 25.96  | 0.991      | 8.7    | 0.29       | 2.1          |
| 工况 6 |        |            | 6.37   | 0.212      | 1.86         |

为研究波浪载荷对高桩承台风机基础的砰击压力，在风机基础模型表面设置了 15 个压力测试点，这些压力探测点都相对固定在基础上，如图 3 所示。

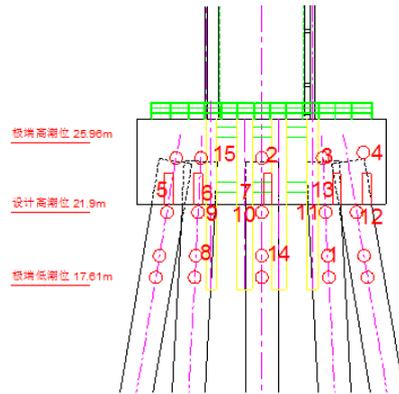


图 3 高桩承台风机基础模型压力传感器布置图

Fig. 3 Position of pressure gauges

### 3 结果分析

#### 3.1 水深对高桩承台水动力特性的影响

高桩承台风机基础受力在结构分析中十分重要，基础主要受海流载荷与波浪载荷的力。图 4 给出了高桩承台风机基础在不同水深下的受力情况的时历曲线。从图中可以看出，不同水深条件下风机基础所受到的 X 方向的正向力差别很小，因此，在浅水条件下，水深对风机基础的正向受力影响并不大，但是风机基础在 X 方向负向受力差别较大，且水深越深，风机基础所受到的负向力越大。由于浅水效应的影响，三种水深条件下，风机基础在 X 方向所受的正向力都比负向力大得多。当水深为 25.96 m 时，风机基础在 X 方向所受的力在波峰处的最大值是波谷处的最小值绝对值的 3.6 倍左右。

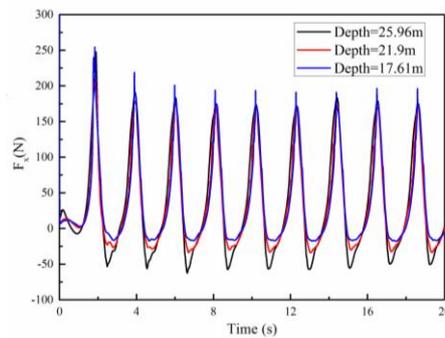


图 4 不同水深  $F_x$  的时历曲线

Fig. 4 Time history of wave forces  $F_x$  under different wave depths

上文提到，在进行数值计算时，风机基础表面布置了 15 个压力探测点。图 5 展示了不同水深条件下，三个典型位置（P1、P3、P11）的压力探测点的砰击压力情况。从图中可以看出，不同位置的压力探测点都受到了周期性的脉冲压力，并且不同位置的压力值也不相同，测压点的压力由下而上逐渐减小。对于最高位置的 P3 压力探测点，可以发现，在三种水深条件下都出现了周期性压力为零的情况，说明期间 P3 压力探测点在水面以上，并且水深越浅，P3 压力探测点在水面以上的时间越长。从 P1、P3、P11 三个压力探测点的砰击压力时历曲线还可以看出，水深越深，压力探测点的砰击压力越大。

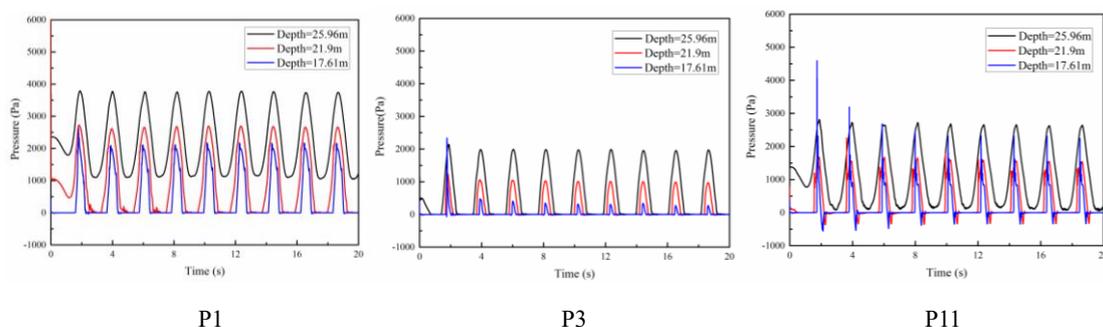


图 5 不同水深三个典型压力探测点砰击压力的时历曲线  
 Fig. 5 Time history of pressure for P1, P3, P11 under different wave depths

### 3.2 波高对高桩承台水动力特性的影响

图 6 显示了水深为 25.96 米时，不同波高条件下风机基础的受力情况。从图中可以看出，波高的改变对风机基础受到的 X 方向的正向力影响较大，波高较大的入射波对风机基础的所受正向力也更大。从图中还可以看出，波高的改变对风机基础受到的 X 方向的负向力影响并不大，这两个波高条件下，X 方向的负向力几乎相等。图 7 展示了不同波高条件下，三个典型位置（P1、P3、P11）的压力探测点的砰击压力情况。不同位置的压力探测点都受到了周期性的脉冲压力，波高越大，压力探测点所受的砰击压力越大。

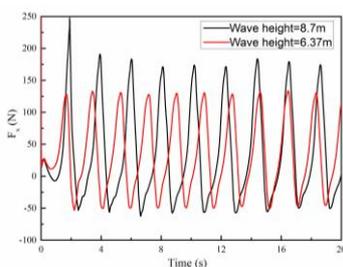


图 6 不同波高  $F_x$  的时历曲线  
 Fig. 6 Time history of wave forces  $F_x$  for different wave heights

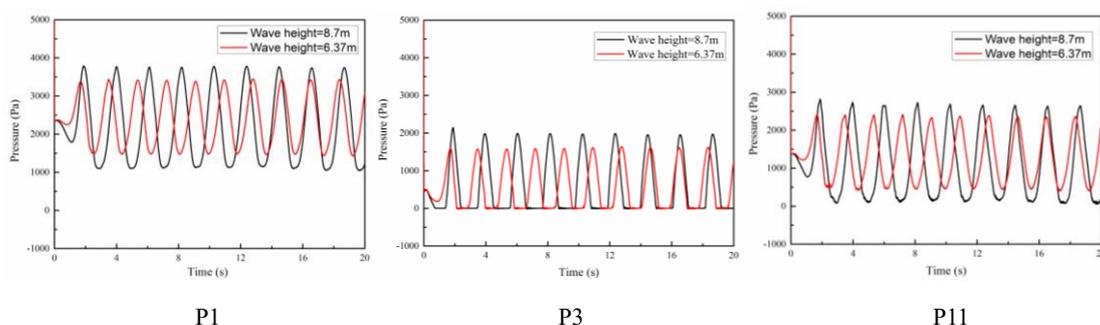


图 7 不同波高三个典型压力探测点冲击压力的时历曲线  
 Fig. 7 Time history of pressure for P1, P3, P11 for different wave heights

### 3.3 波浪爬高与表面压力

图 8 和图 9 分别为波高为 8.7 m 和 6.37 m 条件下一个波浪周期内四个不同时刻风机基础表面压力及自由面图。从图中可以观察到在两个波高条件下，风机基础都发生了上浪现象，并且波高越大，上浪现象越明显。由于风机基础对波浪存在反射作用，在图 8 和图 9 中均可以观察到明显的波浪破碎现象，并且波高越大，波浪破碎现象越严重，这也说明，波高越大，风机基础对波浪的反射作用越明显。从图中还可以看到，某些时刻承台会在水面之上，此时 P3 压力探测点测得的压力为零，这与图 7 中观察到的结果是一致的。

从图 8 和图 9 中还可以观察到一个周期内不同时刻风机基础表面压力变化情况。从图中可以看出，在一个周期内，风机基础表面压力与其被水淹没状态有关，当波峰到达风机基础表面时，风机基础的表面压力最大，当水脱离承台时，风机基础会受到一个负冲击压力的作用。

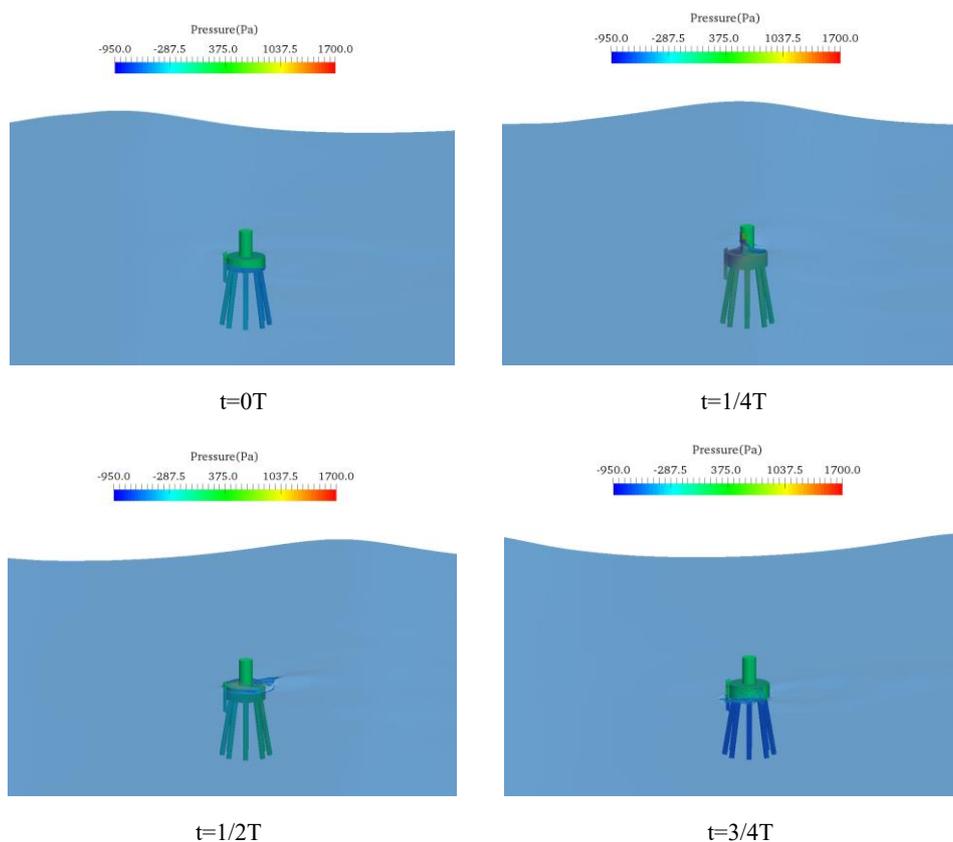
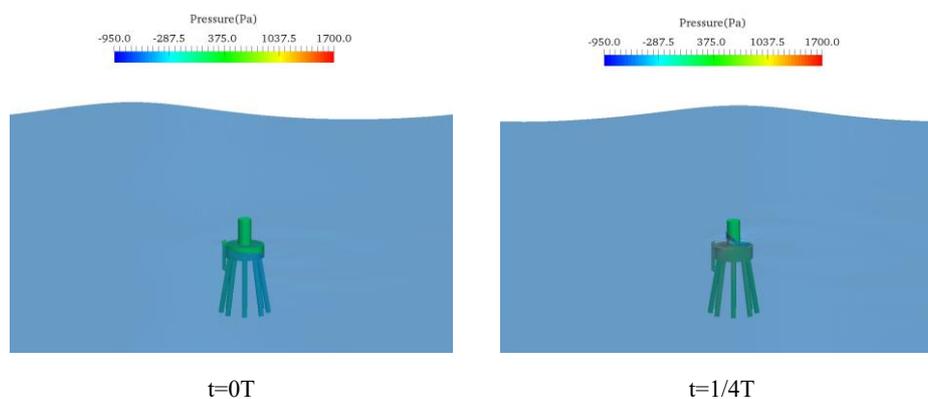


图 8 工况 5 条件下，四个不同时刻基础表面压力及自由面图  
Fig. 8 Surface pressure and free surface elevation, for computation condition 5



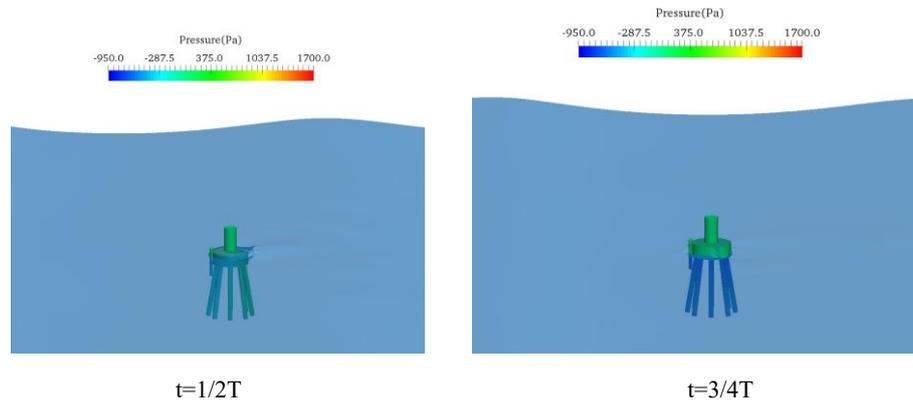


图9 工况6条件下,四个不同时刻基础表面压力及自由面图  
Fig. 9 Surface pressure and free surface elevation, for computation condition 6

## 4 结论

本文基于自主开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 数值模拟了一座固定式高桩承台风机基础在波流作用下的水动力特性。在波浪与海流同向的条件下, 研究了该风机基础在 25.96、21.9 和 17.61 m 三种典型水深条件下的受力和流场信息等, 研究发现, 三种水深对该风机基础水平方向的受力影响不大, 但是对砰击压力的影响很大, 水深越深, 风机基础受到的砰击压力越大。通过研究同一水深, 不同波高条件下风机基础的受力、表面压力等, 可以发现, 波高的改变对风机基础的受力等影响都很大, 并且波高越大, 观察到的波浪破碎现象越严重, 这也说明, 波高越大, 风机基础对波浪的反射作用越明显。本文计算结果展示了 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以很好地模拟波流联合作用下风机基础的水动力特性, 并提供一些有工程应用参考价值的分析结论。

## 参考文献

- [1] Venugopal V, Varyani K S, Westlake, P C. Drag and inertia coefficients for horizontally submerged rectangular cylinders in waves and currents[J]. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2009, 223(1): 121-136.
- [2] 兰雅梅, 薛雷平, 刘桦, 等. 东海大桥桥梁桩柱承台水动力模型试验研究—第一部分: 作用于单个小尺度桩柱上的波流力[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2004, 19(6): 753-758.  
Lan Yamei, Xue Leiping, Liu Ye, et al. Experimental studies on hydrodynamic loads on piles and slab of Donghai Bridge Part I: hydrodynamic forces on a single pile in wave-current combinations[J]. *Journal of Hydrodynamics, A*, 2004, 19(6): 753-758.
- [3] 兰雅梅, 薛雷平, 刘桦, 等. 东海大桥桥梁桩柱承台水动力模型试验研究—第二部分: 作用于群桩及承台上的波流力[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2005, 20(3): 332-339.  
Lan Yamei, Xue Leiping, Liu Ye, et al. Experimental studies on hydrodynamic loads on piles and slab of Donghai Bridge Part II: hydrodynamic forces on pile array and slab in wave-current combinations[J]. *Journal of Hydrodynamics, A*, 2005, 20(3): 332-339.
- [4] 雷欣欣, 孙大鹏, 徐雪蛟, 等. 作用在高桩承台上的不规则波波浪力试验研究[J]. *水道港口*, 2013, 34(4): 277-284.  
Lei Xinxin, Sun Dapeng, Xu Xuejiao, et al. Experimental study of irregular wave force loads on high rise pile platform[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2013, 34(4): 277-284.
- [5] 刘珍, 滕斌, 宁德志, 等. 波流与结构物相互作用的数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2010, 27(1): 82-87.  
Liu Zhen, Teng Bin, Ning Dezhi, et al. Time-domain simulation of the wave-current action on 3D bodies[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, 27(1): 82-87.
- [6] 姚文伟, 刘桦. 规则波中圆形承台对桩基波浪力的影响[J]. *力学季刊*, 2009, 30(3): 357-362.  
Yao Wenwei, Liu Ye. Effect of Circular Slab for Wave Loads on Piles in Regular Waves[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2009, 30(3): 357-362.
- [7] Bredmose H, Jacobsen N G. Breaking wave impacts on offshore wind turbine foundations: focused wave groups and CFD[C]. In *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, 2010-6-6-11. American Society of Mechanical Engineers, 2010: 397-404.
- [8] Zhou H, Cao H J, Wan D C. Numerical Predictions of Wave Impacts on the Supporting Structures of Shanghai Donghai-Bridge Offshore Wind Turbines[C]. In *The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference*, Anchorage, 2013-6.30-7.05. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013: 216-224.
- [9] Shen Z R, Cao H J, Wan D C. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[J]. *Journal of Shanghai Jiao*

Tong University, 2012.

- [10] Shen Z R, Wan D C. An Irregular Wave Generating Approach Based on naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. *China Ocean Engineering*, 2016, 30(2): 177-192.
- [11] Liu Y C, Xiao Q, Atilla I, et al. Investigation of the Effects of Platform Motion on the Aerodynamics of a Floating Offshore Wind Turbine[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, 28(1): 95-101.
- [12] Cao H J, Wan D C. RANS-VOF Solver for Solitary Wave Run-up on a Circular Cylinder[J] *China Ocean Engineering*, 2015, 29(2): 183-196.
- [13] Shen Z R, Wan D C, Pablo C. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 287-306.
- [14] 王建华, 万德成. 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2015, 30(2): 180-186.  
Wang Jianhua, Wan Decheng. Dynamic coupling analysis of the mooring system and floating pier in the South China Sea[J]. *Journal of Hydrodynamics, A*, 2015, 30(2): 180-186.
- [15] Shen Z R, Ye H X, Wan D C. URANS Simulations of Ship Motion Responses in Long-crest Irregular Waves[J] *Journal of Hydrodynamics*, 2014, 26(3): 436-446.