

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2017.01.001

# 海上固定式风机基础的波流载荷数值计算分析\*

彭耀<sup>1</sup>, 张笑通<sup>1</sup>, 万德成<sup>1</sup>, 郇彩云<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, Email: sjtupengyao@qq.com;  
2. 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

**摘要:** 该文以某3 MW海上风机基础为研究对象, 数值分析海上固定式风机基础在不同波流载荷作用下的高桩承台基础的波浪方向受力、水平方向总推力以及基础表面特征点压力变化情况, 同时探讨水深对高桩承台基础载荷性能的影响。本文的计算工具采用基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 数值分析的重点集中在风机基础载荷、压力分布以及基础周边的涡流场分布, 计算结果与对应的试验数据进行对比, 同时有相应的规范计算结果作为验证。该文主要处理关于波流夹角、入射波浪高度和水深对高桩承台基础影响的计算分析结果, 以及提供高桩承台基础受力的详细数据, 对海上固定式风机基础设计有实际指导意义。

**关键词:** 固定式基础; 高桩承台基础; 波流载荷; naoe-FOAM-SJTU 求解器  
中图分类号: O357 文献标识码: A

## Numerical study of wave-current loads acting on foundation of fixed offshore wind turbine

PENG Yao<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-tong<sup>1</sup>, WAN De-cheng<sup>1</sup>, HUAN Cai-yun<sup>2</sup>

(1. 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;  
2. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** In this paper, a series of numerical study of wave-current loads acting on the foundation of a 3MW fixed offshore wind turbine are carried out with the help of in-house CFD solver naoe-FOAM-SJTU, which is based on the open source toolbox OpenFOAM. The combined wave-current loads on the elevated pile foundation in time domain are calculated. The different dynamic characteristics of the elevated pile foundation under different flow direction, water depth and wave height are discussed. The numerical results are compared with the relative experimental results and existed specifications to be validated. The computed results in this paper could provide practical guidance for the designers of elevated pile foundation of fixed wind turbine.

**Key words:** fixed offshore wind turbine; elevated pile foundation; wave-current loads; naoe-FOAM-SJTU solver

\* 收稿日期: 2016-07-27(2016-12-02 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)和上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

作者简介: 彭耀(1992-), 男, 四川崇州人, 硕士研究生。

通信作者: 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: July 27, 2016 (Revised December 02, 2016)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51490675, 11432009, 51579145), the Chang Jiang Scholars Program (T2014099) and the Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

Biography: PENG Yao (1992-), Male, Master Candidate.

Corresponding author: WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

## 引言

新世纪以来,陆上风电场的大规模发展带动了近海风电场<sup>[1]</sup>的发展,有序、合理地开发利用海上风能可以改善我国的能源现状和环境现状都有很好的促进作用。风能可以认为是一种清洁的能源,经济、合理和有效地开发海上风能不仅进一步缓解新世纪能源紧张问题,还能促进我国建立环境友好型能源网络。目前阶段,我国对海上风能的利用主要集中在近海,工作主要载体是海上固定式风机。海上固定式风机为了保持正常的工作性能,需要有不同的支撑基础使得风机拥有保持工作位置的能力。对固定式风机基础受到的复杂的波流联合作用的预报有非凡的意义,它是风机基础设计的依据也是海上风机能够正常长久运行的可靠保障,传统的性能预报通常有模型试验方法、规范计算方法和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法。随着计算机技术和数值方法的飞速发展,计算流体力学方法正越来越多地被运用到风机基础的性能预测上来。由于该方法本身考虑了流体黏性的影响,因而可以求得精细的流场信息和比较精确的载荷。同时,与传统的物理模型试验相比,基于CFD的预报效率更高,经济投入也相对较小,能有效地满足大部分设计者的要求。

近年来,我国在海上固定式风机载荷相关领域进行了广泛的研究。王海龙等<sup>[2]</sup>采用非线性波浪时域耦合数值模型计算圆柱物体上的非线性波浪压力和流场波面的升高,并进行了圆柱波浪压力的物理模型试验以及验证了计算结果。祁德庆等<sup>[3]</sup>对不规则波作用下风机高桩承台基础机构响应进行了数值模拟,他们运用商业软件MATLAB和ANSYS,对高桩承台基础在不规则波浪载荷作用下的响应进行了分析。杨锋等<sup>[4]</sup>对近海风机基础的结构型式进行了研究,他们认为除了单桩式基础外,三桩柱式和四桩柱式基础比较适合我国设备的施工能力及东部近海的地质情况。刘贝贝<sup>[5]</sup>利用有限元软件ANSYS建立了一套带地基高桩承台基础模型,重点分析了高桩承台基础在水平载荷特别是地震载荷作用下的动力响应。郭健等<sup>[6]</sup>利用ANSYS软件对海上高桩承台的振动载荷特性进行了研究。

本文所用的求解器为基于开源平台OpenFOAM自主开发而来的naoe-FOAM-SJTU<sup>[7]</sup>求解器。数值求解器的模拟基于有限体积法(FVM),计算是基于雷诺时均纳维斯托克斯(Reynolds-averaged navier-stokes, RANS)控制方程,并采用SST  $k-\omega$ 作为湍流模型,该模型以湍流各向同性为基础,模型简单,易于收敛;针对三

维非定常不可压两相流RANS方程进行离散求解,可以处理任意形状多面体网格;采用流体体积函数(VOF)捕捉自由液面;使用PISO算法求解压力-速度耦合项。本次数值分析的重点集中在风机基础载荷、压力分布以及基础周边的涡流场分布。

本文选取一典型3 MW海上固定式风机的高桩承台基础作为研究对象,利用数值方法同时结合实验数据和规范设计的计算数据对该高桩承台基础在不同水深、不同入射波浪波高<sup>[8]</sup>和不同波流夹角作用的情况进行了数值模拟和探究,得到高桩承台基础在不同工况下的波流力载荷情况,以及典型位置的动压力变化情况,同时还可以得到基础周围的流场信息。本文的数值模拟结果经过与试验结果以及规范结果进行比较,发现本文的数值预报比较准确,验证了数值结果的可靠性,说明该naoe-FOAM-SJTU求解器可以有效预报风机基础的波流载荷性能<sup>[9-14]</sup>。通过研究高桩承台基础在不同波流夹角、不同水深和不同入射波浪波高作用下的力学特性,本文还得到了更多实用的结论,可以为风机基础的力学性能预报和高桩承台基础的设计提供依据。

## 1 基本理论

### 1.1 控制方程

对于不可压、黏性流体,naoe-FOAM-SJTU<sup>[7]</sup>求解器的控制方程为不可压RANS方程:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(U - U_g)U] = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho +$$

$$\nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s \quad (2)$$

式中:  $U$  为速度场;  $U_g$  为网格节点的速度;  $p_d = p - \rho g \cdot x$  为动压力场,由总压力减去静水压力得到。 $\rho$  为空气和水两项流体的混合密度;  $g$  为重力加速度;  $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu t)$  为有效动力黏性系数; 式中:  $\nu$  为运动黏性系数,  $\nu t$  为涡黏系数;  $f_\sigma$  为两相流模型中的表面张力项;  $f_s$  为源项,用于消波。控制方程采用PISO算法处理速度与压力的耦合。

### 1.2 自由面捕捉方法

本文采用边界可压缩的VOF方法来追踪和捕捉自由液面的变化。这种处理方式的好处是能有效地控制数值扩散,以较高的精度捕捉自由面。

VOF输运方程定义为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为体积分数, 是网格单元中流体所占的体积比, 其值介于 0 和 1 之间:

$$\begin{cases} \alpha = 0, & \text{空气中} \\ \alpha = 1, & \text{水中} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{自由液面上} \end{cases} \quad (4)$$

同时, 密度  $\rho$  和动力黏性系数  $\mu$  也可以由  $\alpha$  来表征:

$$\begin{cases} \rho = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g \\ \mu = \alpha\mu_l + (1 - \alpha)\mu_g \end{cases} \quad (5)$$

下标  $l$ 、 $g$  分别表示流体和气体。

### 1.3 湍流模型

本文通过 PISO (pressure-implicit-split-operator) 算法来求解 N-S 方程和连续性方程。PISO 意为压力的隐式算子分割法, 由 Issa 于 1986 年提出, 起初是针对非稳态可压流动的无迭代计算所建立的一种压力速度计算程序, 后来在稳态问题的迭代计算中也广泛使用。

### 1.4 速度压力耦合方程的求解

在本文中采用的是标准  $k-\omega$  湍流模型, 标准  $k-\omega$  模型是基于 Wilcox  $k-\omega$  模型, 为考虑低雷诺数、可压缩性和剪切流传播而修改的。Wilcox  $k-\omega$  模型预测了自由剪切流传播速率, 像尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流和放射状喷射, 因而可以应用于墙壁束缚流动和自由剪切流动。

### 1.5 离散方法

RANS 方程 (式 (1) 和式 (2)) 和 VOF 输运方程 (式 (3)) 都采用有限体积法来进行离散, 计算域离散成一系列小单元, 计算流场信息存储在网格单元中心, 再根据单元中心的值插值即可得单元面的值。最后根据 Gauss 理论, 把单元表面的值相加转化就可以得到单元体的体积积分。对不同的项采用不同的插值方法, 方程 (2) 中的对流项采用二阶 TVD 有限线性法, 扩散项采用二阶中心差分法, VOF 方程采用 Van Leer 离散方法, 时间项采用二阶向后插值方法。

## 2 计算模型

### 2.1 模型及工况

本文选取的计算模型是由某 3 兆瓦海上固定式风机高桩承台基础按缩尺比 1:30 转化而来。实尺度高桩承台主甲板直径为 14.9 m, 按缩尺比缩放后模

型尺度为 0.497 m。本文的所有计算都是基于高桩承台的模型尺度, 并将对应的海况作了相应的缩尺处理。相应的物理参数可以由工况表中模型尺度参数得知。高桩承台的模型如图 1 所示。

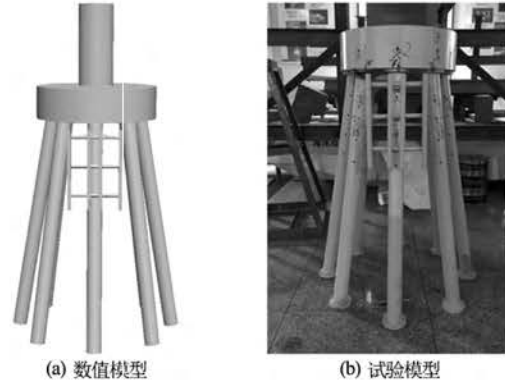


图 1 数值模型 (左) 与试验模型 (右)

Fig.1 Calculated model (left) and experimental model (right)

本文对于高桩承台基础, 考虑三种水深条件, 分别定义为:

- (1) 试验水深 3, 实际水深 25.7 m, 模型水深 0.857 m;
- (2) 试验水深 2, 实际水深 24.0 m, 模型水深 0.800 m;
- (3) 极端高潮位, 实际水深 22.2 m, 模型水深 0.740 m。

同时, 在数值模拟中, 模拟规则波海况。一共包含四个波流夹角, 分别为: 波流同向, 波流夹角为  $0^\circ$ ; 波流垂向, 波流夹角为  $90^\circ$ ; 波流斜向一, 波流夹角为  $22.5^\circ$ ; 波流斜向二, 波流夹角为  $45^\circ$ 。具体方向如图 2 所示。

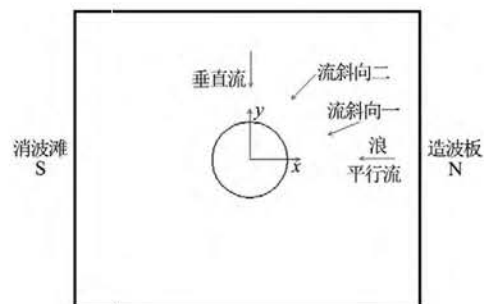


图 2 波流夹角示意图

Fig.2 Illustration of the wave and flow direction

波浪参数如表 1 和表 2 所示, 测压点布置如图 3 所示 (其中 5、6、7 和 13 号测压点位于甲板下方):

表 1 实尺度波浪参数表

Table 1. Wave parameters of full-scale foundation

海况编号	波高/m	周期/s	海流流速/m·s <sup>-1</sup>
规则波 1	7.78	10.95	1.73
规则波 2	5.52	9.5	1.73

表 2 模型尺度波浪参数表

Table 2. Wave parameters of model-scale foundation

海况编号	波高/m	周期/s	海流流速/m·s <sup>-1</sup>
规则波 1	0.259	2.000	0.316
规则波 2	0.184	1.734	0.316

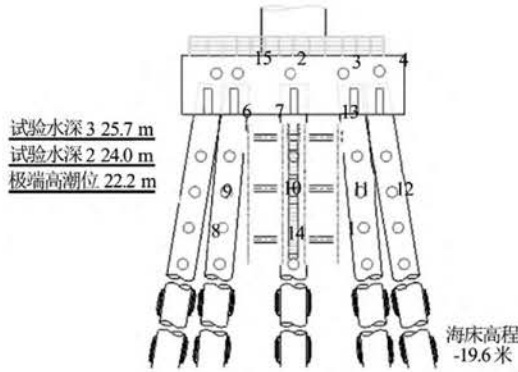


图 3 测压点示意图

Fig.3 Illustration of the pressure taps

工况编号如表 3、表 4 和表 5 所示，其中表 3 对应试验水深 3 即 25.7 m（模型尺度 0.857 m）的工况，表 4 对应试验水深 2 即 24.0 m（模型尺度 0.800 m）的工况，表 5 对应极端高潮位 22.2 m（模型尺度 0.740 m）的工况。

表 3 试验水深 3 工况表

Table 3. Working condition at extreme-high sea level

工况号	海况编号	波流夹角
B 1	1	波流同向
B 2	2	
B 3	1	波流垂直
B 4	2	
B 5	1	波流斜向一
B 6	2	
B 7	1	波流斜向二
B 8	2	

表 4 试验水深 2 工况表

Table 4. Working condition at designed sea level

工况号	海况编号	波流夹角
B 9	1	波流同向
B 10	2	
B 11	1	波流垂直
B 12	2	
B 13	1	波流斜向一
B 14	2	
B 15	1	波流斜向二
B 16	2	

表 5 极端高潮位工况表

Table 5. Working condition at extreme-low sea level

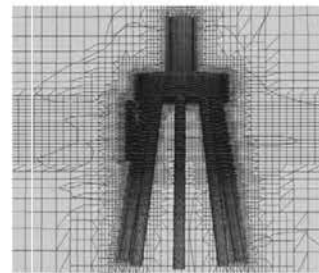
工况号	海况编号	波流夹角
B 17	1	波流同向
B 18	2	
B 19	1	波流垂直
B 20	2	
B 21	1	波流斜向一
B 22	2	
B 23	1	波流斜向二
B 24	2	

2.2 计算网格

网格的生成分为两步。首先采用 POINTWISE 软件生成计算域内的背景网格。再利用 OpenFOAM 提供的 snappyHexMesh 工具生成高桩承台基础周围的多面体网格并完成自由液面附近和高桩承台基础附近的网格加密。



(a) 局部网格



(b) 全局网格

图 4 局部网格与全局网格

Fig.4 Illustration of the numerical grids

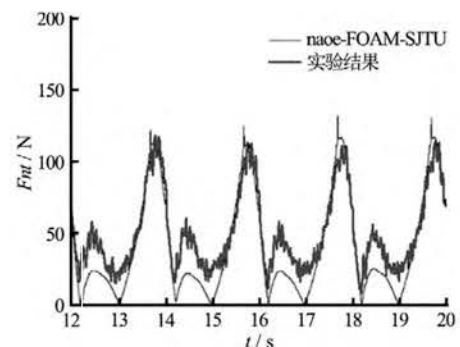


图 5 水平推力对比

Fig.5 Comparison of the horizontal force

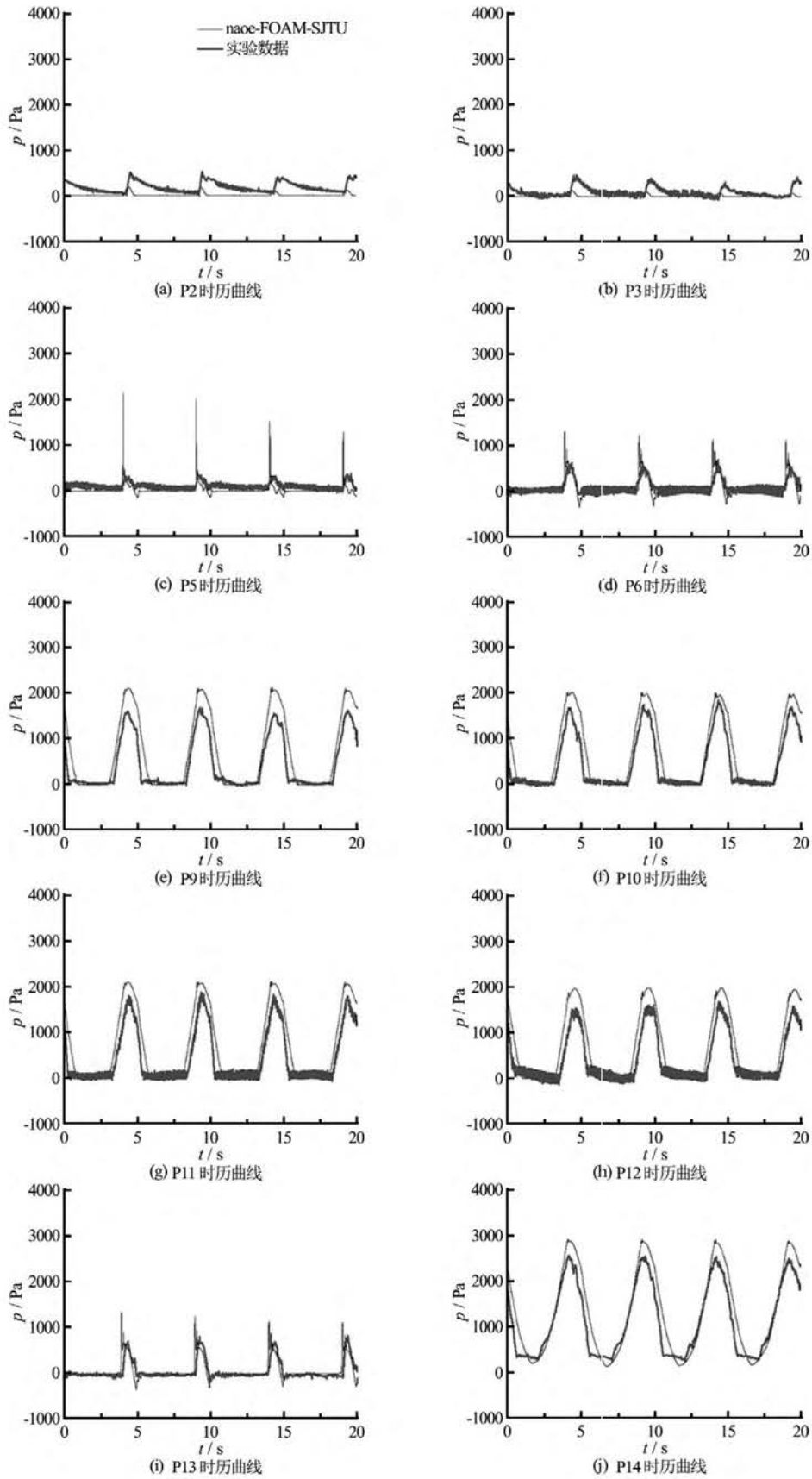


图6 测压点压力对比  
Fig.6 Comparison of the pressure

在每一个计算工况下，空间坐标轴  $x$  轴都落在初始自由水面上，坐标原点为高桩承台水线面的型心。整个计算域为一个长方体 ( $-5 \leq x \leq 20$ ,  $-7.5 \leq y \leq 7.5$ ,  $-h \leq z \leq 20$ ，其中  $h$  为对应工况的水深)。计算网格量在  $200 \times 10^4$  左右 (根据水深不同网格数量会有细微变化)。模型表面  $y^+$  控制在 50 左右。一个波高内模型网格  $z$  方向个数大于 20 个。附体包括防撞挡板也在建模和网格中充分体现。具体的网格示意图如图 4 所示。

### 2.3 边界条件

在速度边界条件方面，波浪和来流入口面选择 waveVelocity；水底和基础结构表面选择壁面条件：fixedValue，速度为 0；波浪和来流出口面选择 zeroGradient，0 梯度条件；计算域上表面 (空气中远场处) 选择 pressureInletOutletVelocity 条件。

在压力边界条件方面，波浪和来流入口面、水底和基础结构表面都选择通量为 0 条件，fixedFluxPressure 条件；计算域上表面 (空气中远场处) 选择 totalPressure 条件，总压力为 0；出口处选择 0 梯度条件，zeroGradient。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 计算结果及其与物理模型试验的对比

本节以最常用的试验水深 2、波流同向和海况 1 工况作为考察对象。对高桩承台基础受到的水平方向总推力  $F_{ht}$  (及水平方向  $x$  和  $y$  向的总合力的大小) 以及各个测压点的砰击力进行详细地对比分析。水平方向推力对比图如图 5 所示，抨击压力图如图 6 所示，测压点的布置请参照图 3，限于篇幅在本节及后面几节中，文章都选取富有代表性的几个压力点进行分析。

由图 5 可知，数值模拟结果与物模试验结果在水平方向总推力的对比上吻合的比较好，最大推力在 120 N 左右，同时对于数值模拟的结果，由于采样频率很高 (2 000 Hz)，能够捕捉到一定的瞬时砰击压力，这是物模试验 (采样频率 75 Hz) 并没有捕捉到的。事实上，在数据分析过程中，本文尝试将数值结果的采样频率降低至与试验差不多的水平，瞬时砰击压力现象消失，这意味着在物模试验模拟时，适当地提升设备的高频采样能力有助于我们捕捉更多的物理现象。

由图 6 可知，数模试验结果与物模试验结果在大多数测压点吻合得都比较好。对于处在承台主体上的测压点 2 和 3 而言，它们处在高桩承台的最高处，波浪在每个周期内都只有很少一段时间能够砰击到这些点，它们所在位置基本是本工况下波浪的



图 7 自由液面情况  
Fig.7 Illustration of free surface



图 8 基础表面动压力情况  
Fig.8 Illustration of free surface

极限爬高位置；对于处在承台甲板下方的 5、6 和 13 号测压点，它们在每个波浪周期内会有一段时间暴露在空气中，也会在一段时间内受到波浪砰击的强烈作用，它们的瞬时砰击压力很高，波浪砰击现象最为明显；对于分布在桩腿上的测压点 9、10、11 和 12 而言，它们在每个周期的一小段时间仍然会露出水面；对于最下方的 14 号测压点而言，它则长期处于自由液面以下，不会露出水面。同样值得指出的是，对于测压点 5、6 和 13，数值模拟 (采样频率 2 000 Hz) 能够捕捉到比较明显的砰击压力，除开这些瞬时砰击压力作用的时刻后，测压点 5、6 和 13 对应的数值结果和物模试验结果仍然是很好

的。由于 naoe-FOAM-SJTU 计算时保存全流场信息, 可以获得任意时刻的自由面流场图 (如图 7 所示) 以及物体表面的动压力图 (如图 8 所示)。

由图 8 和图 9 可知, 在试验水深 2、波流同向和波高 7.78 m 情况下, 波浪爬升的最高高度达到甲板上层立柱的三分之二处, 并且发生在波峰传递到的时候。与此同时, 高桩承台基础表面的动压力达到最大值, 动压力尤其集中在挡板附近以及面向来浪方向的位置, 模型尺度下最大压力超过 1 700 Pa。在波谷传来时, 整个甲板基本浮出水面, 物面动压力下降非常明显, 出现负压表示这些位置在波谷传来时表面的动压力小于初始静水面时受到的压力。

### 3.2 波流夹角对风机基础载荷特性的影响

本节探讨不同波流夹角对高桩承台基础受力  $F_x$  和砰击压力的影响, 以入射波为规则波 1、流速 1.73 m/s、水深 25.7 m (试验水深 3) 下入射波流夹角分别为  $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  作为研究对象。下面图 9、图 10 和图 11 分别给出  $x$  方向分力、水平方向总推力以及典型测压点处压力的时间历程曲线。

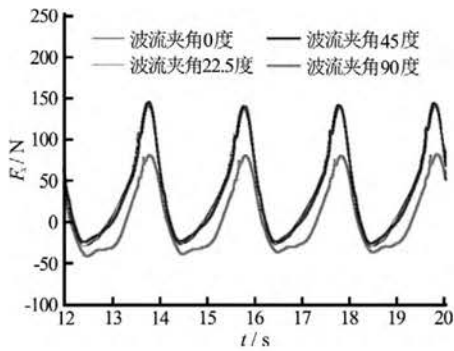


图 9 不同波流夹角水平推力  $F_x$  示意图  
Fig.9 Comparison of  $F_x$  in different flow directions

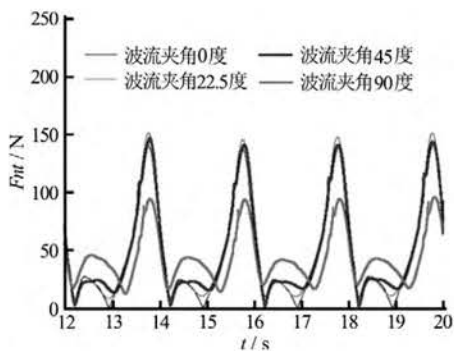
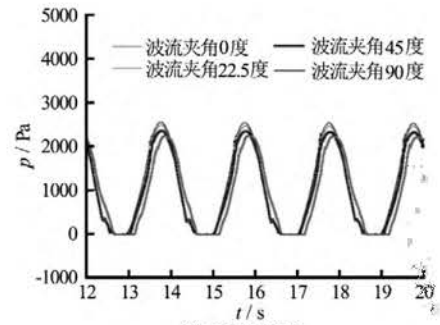


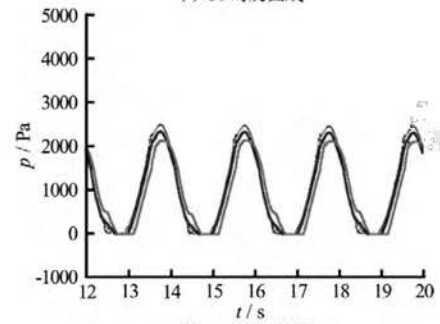
图 10 不同波流夹角水平总推力  $F_{ht}$  示意图  
Fig.10 Comparison of  $F_{ht}$  in different flow directions

由图 11 可知, 对于高桩承台的这个水深而言, 波流夹角的改变对平台的水平方向总推力  $F_{total}$  有一定的影响。可以看到, 随着波流夹角的增大, 平台受到的水平方向总推力  $F_{total}$  逐渐减小。在本次数值模拟结果中, 我们看到载荷最大点出现在波流

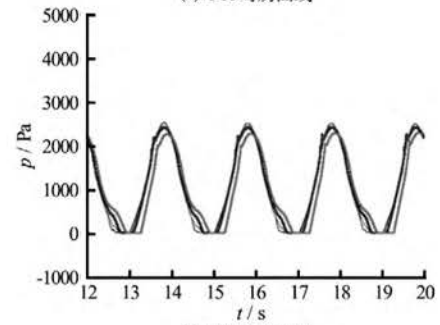
夹角为  $22.5^\circ$  时, 而随着波流夹角的继续增加, 载荷逐渐减小。



(a) P9 时历曲线



(b) P10 时历曲线



(c) P12 时历曲线

图 11 不同波流夹角压力变化示意图  
Fig.11 Comparison of pressure in different flow directions

观察测压点处压力值的变化, 我们可以发现, 当工况由波流同向转为波流有一定的夹角后, 靠近斜流来向的测压点 12 压力幅值有所增加, 而背离斜流来向的和面向波浪来向的 9 和 10 号测压点压力有所减小, 这与认知符合得较好。

### 3.3 入射波高对风机基础载荷特性的影响

本节探讨不同入射波高对高桩承台受力  $F_x$ 、 $F_{ht}$  和砰击压力的影响, 我们选定波流同向、水深 25.7 m (试验水深 3) 下入射波浪高度分别为 7.78 m (规则波 1) 和 5.52 m (规则波 2) 作为研究对象。下面图 12 和图 13 分别给出水平方向总推力以及各个测压点处压力的时间历程曲线。

由图 12、图 13 和图 14 可知, 对于高桩承台的这个水深而言, 波高的改变对平台的水平方向总推力  $F_{ht}$  及各个测压点处的压力值都有比较明显的影

响。总体而言，由于波高的改变致使波浪周期不同，进一步导致两种波浪作用在单桩基础上的  $F_{ht}$  压力变化的周期也不相同；波高较高的波浪对高桩承台产生更大的载荷（压力的也更大），同时波浪砰击的高度也越大。

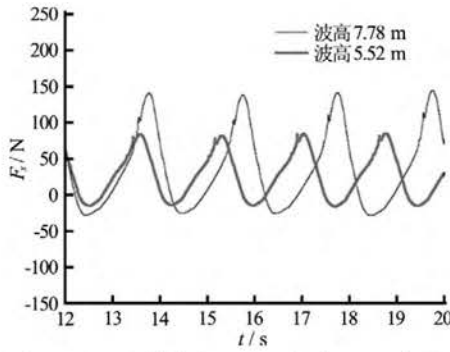


图 12 不同入射波高下水平推力  $F_x$  示意图

Fig.12 Comparison of  $F_x$  in wave of different wave heights

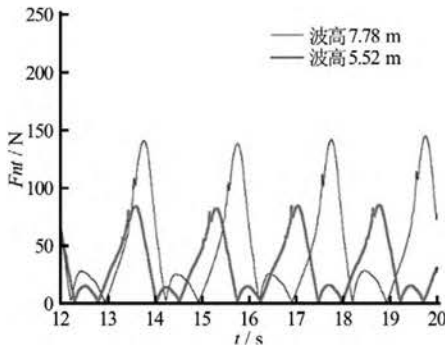


图 13 不同入射波高下水平总推力  $F_{ht}$  示意图

Fig.13 Comparison of  $F_{ht}$  in wave of different wave heights

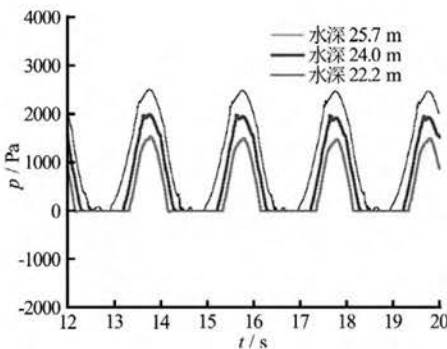


图 14 测压点 10 处压力变化曲线 P10

Fig.14 The time history curve of P10

### 3.4 水深对风机基础载荷特性的影响

本节探讨不同吃水深度对高桩承台受力  $F_x$ 、 $F_{ht}$  和砰击压力的影响，我们选定波流同向、规则波 1，水深分别是 25.7 m、24.0 m 和 22.2 m。图 15 和图 16 分别是高桩承台受到的水平  $x$  方向推力  $F_x$  以及总推力  $F_{ht}$  对比。

由图 15、图 16 和图 17 可知，对于高桩承台的这个波浪工况而言，水深的改变对高桩承台的总推力影响不大，而对各个测压点处的压力值则有明显

的影响，水深越深，波浪能抨击到的相对高度越高，同一个测压点处的压力值也越大。

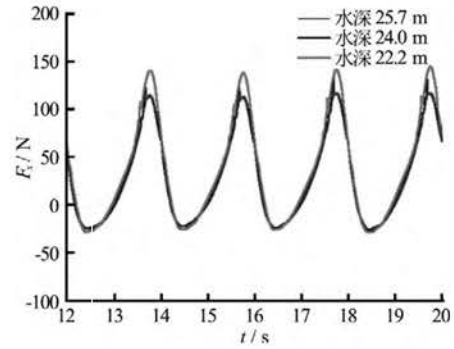


图 15 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力  $F_x$  对比

Fig.15 Comparison of  $F_x$  in different water depths

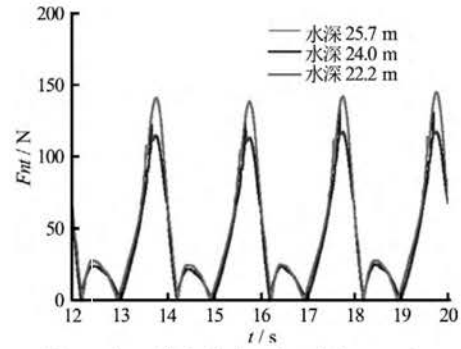
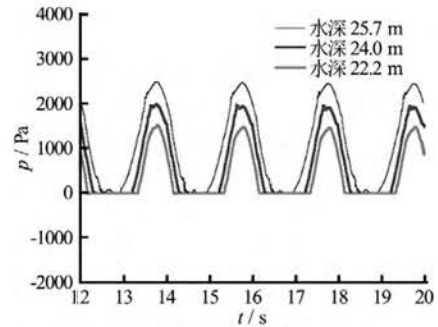
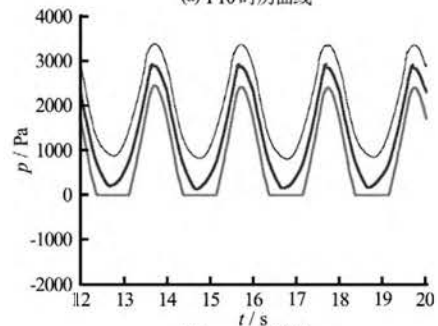


图 16 相同波流夹角、规则波 1，不同水深波浪方向推力  $F_{ht}$  对比

Fig.16 Comparison of  $F_{ht}$  in different water depths



(a) P10 时历曲线



(b) P14 时历曲线

图 17 相同波流夹角、规则波 1，不同水深压力对比示意图

Fig.17 Comparison of pressure in different water depths



### 3.5 数值模拟结果的综合分析及与物模结果和规范计算结果的比较

本节对高桩承台综合受力特性进行分析, 我们选取了所有工况下计算出的水平方向总推力进行比较和研究, 从总体上判断单桩基础的受力特性和趋势。

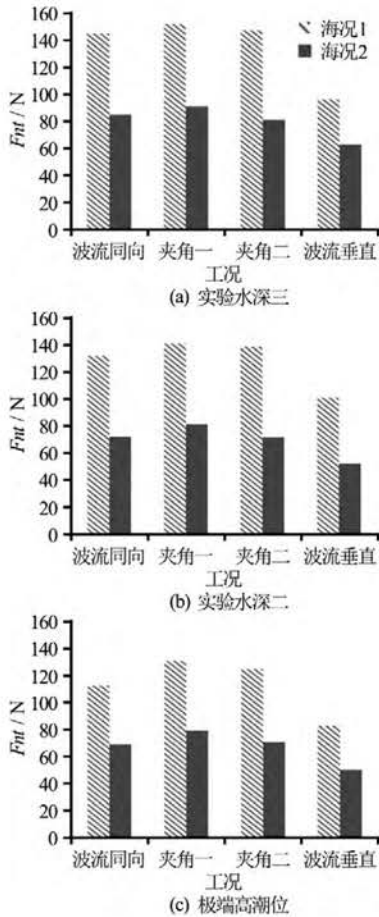


图 18 高桩承台水平方向总推力趋势图  
Fig.18 Comparison of  $F_{ht}$  in different wave conditions

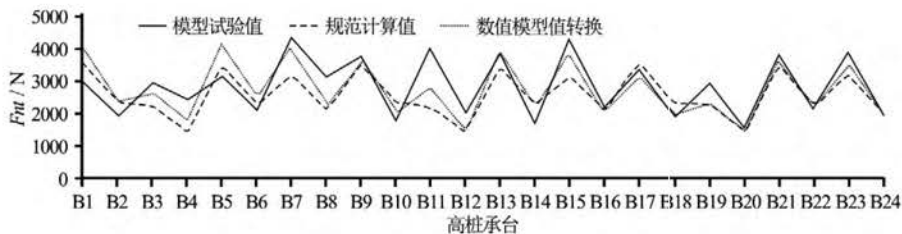


图 19 高桩承台水平总推力对比图  
Fig.19 Comparison of  $F_{ht}$  by numerical simulation, model experiment and design specification

由图 18 可知, 波高这一要素对高桩承台的总体载荷有十分明显的影响, 波高增加, 高桩承台的整体受力明显增加; 波流夹角对高桩承台的总体载荷影响比较复杂, 在数值模拟过程中我们发现波流夹角为  $22.5^\circ$  时高桩承台受到的载荷最大, 但总体而言变化幅度不大; 水深对高桩承台总体载荷的影

响要考虑两个因素, 一个是由于水深变化而导致的高桩承台总体受力面积的变化, 另一个是由于水深的变化而导致的高桩承台水线面附近空间几何形状的变化, 就本次试验结果而言, 水深对高桩承台的总体受力影响不大。

图 19 是高桩承台数值模拟结果、规范计算<sup>[15,16]</sup>结果和物模试验结果的对比, 由于物模试验结果只能算出实尺度对应的推力值, 故本文将数值模拟结果和物模结果都转化为实尺度结果进行比较 (其中规范值指规范计算结果; 模型值指物模试验结果换算成实尺度的值; 数值模型转换值指数值模拟结果转换成实尺度的值)。从图中可以看出, 从整体趋势而言, 数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合得较好。大多数工况下, 数值结果与物模试验结果的误差都在 5% 以内, 在个别工况如 B11 有 25% 左右的误差, 但考虑到整体的规律性以及规范的结果, 本文认为数值结果在这些工况仍然比较可靠, 误差可能由于试验偶然误差引起。

## 4 结论

本文选取一典型 3 MW 海上固定式风机的高桩承台基础作为研究对象, 利用数值方法同时结合实验数据和规范设计的计算数据对该高桩承台基础在不同水深、不同入射波浪波高和不同波流夹角作用的情况进行了数值模拟和探究, 得到高桩承台基础在不同工况下的波流力载荷情况, 以及典型位置的动压力变化情况。本文的数值模拟结果经过与试验结果以及规范结果进行比较, 发现本文的数值预报比较准确, 验证了数值结果的可靠性, 说明该 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以有效预报风机基础的波流载荷性能。通过研究高桩承台基础在不同波流夹角、不同水深和不同入射波浪波高作用下的力学

特性, 并且得出以下主要结论:

- (1) 波高这一要素对高桩承台的总体载荷有十分明显的影响, 波高增加, 高桩承台的整体受力明显增加。同时测压点处的撞击压力也相应增加。
- (2) 波流夹角对高桩承台的总体载荷影响比较复杂, 在数值模拟中我们发现波流夹角为  $22.5^\circ$  时

高桩承台受到的载荷最大,但总体而言变化幅度不大。这个规律在物模试验中同样有所体现,这提醒我们在工程设计中应该对此现象有所考虑。

(3) 水深对单桩基础总体载荷的影响要考虑两个因素,一个是由于水深变化而导致的单桩基础总体受力面积的变化,另一个是由于水深的变化而导致的单桩基础水线面附近空间几何形状的变化,就本次数值模拟的结果而言,水深对高桩承台的总体受力影响很小。

(4) 对于高桩承台,整体而言,数值结果、规范结果和物模结果的趋势吻合得较好。数值结果和物模试验结果在大多数工况下误差在 5%以内。在个别工况如 B11 工况,数值模拟结果、物模试验结果和规范结果差别较大,可能是由试验中的偶然误差引起。

综上所述,本文的计算结果充分验证了 naoe-FOAM-SJTU 对海上固定式风机基础波流载荷预报的可行性。在未来的工程实践中,可以进一步探讨小波流夹角下载荷的极值问题,也可以涉猎更广泛的极限海况问题,对固定式风机基础的波流载荷特性进行更充分的认识。

## 致谢

本文工作还得到工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献:

- [1] 张秀芝,徐经纬. 中国近海的风能资源[J]. 风能产业, 2013(07): 16-21.  
ZHANG Xiu-zhi, XU Jing-wei. Offshore wind energy in China[J]. Wind Energy Industry, 2013(07): 16-21.
- [2] 王海龙,邹志利,周亚龙,等. 波浪对圆柱作用的三维耦合计算模型[J]. 中国海洋平台, 2010, 25(5): 38-48.  
WANG Hai-long, ZOU Zhi-li, ZHOU Ya-long, et al. The three-dimensional coupled numerical model of non-linear wave acting on a circular cylinder[J]. China Offshore Platform, 2010, 25(5): 38-48.
- [3] 祁德庆,崩兴峰. 不规则波作用下风机单桩基础结构响应分析[J]. 力学季刊, 2012, 33(4): 657-664.  
QI De-qing, BENG Xing-feng. Analysis on the offshore wind turbine under wave load[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2012, 33(4): 657-664.
- [4] 杨锋,邢占清,符平,等. 近海风机基础结构型式研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(9): 35-38.  
YANG Feng, XING Zhan-qing, FU Ping, et al. Research on foundation structure for offshore wind turbine[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(9): 35-38.
- [5] 刘贝贝. 水平荷载作用下高承台桩基础的动力响应分析[D]. 燕山大学, 2011.  
LIU Bei-bei. Dynamic response analysis of elevated pile foundation under horizontal load[D]. Yanshan University, 2011.
- [6] 郭建,杨敏,王伟. 海上风机高桩承台基础模态建模分析研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 1172-1174.  
GUO Jian, YANG Min, WANG Wei. Modeling analysis of modals of high-pile cap foundation of offshore wind turbines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 1172-1174.
- [7] SHEN Z R, WAN D C. Manual of CFD solver naoe-FOAM-SJTU[R]. Technical Report No. 2012SR118110. Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [8] 查晶晶,万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 1-12.  
CHA Jing-jing, WAN De-cheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(3): 1-12.
- [9] CAN 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.
- [10] CAO H J, WANG X Y, LIU Y C, et al. Numerical prediction of wave loading on a floating platform coupled with a mooring system[C]. In the Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference. Anchorage, Alaska, USA, 2013: 582-589.
- [11] CAO H J, WAN D C. Development of multi-directional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 52-59.
- [12] CAO H J, LIU Y C, WAN D C. Numerical simulation of solitary wave impact on fixed offshore platform[C]. The 7th International Workshop on Ship Hydrodynamics, 2011, 138-143.
- [13] 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.
- [14] LIU Y C, XIAO Q, INCECIK A, 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.
- [15] 交通部. 港口与航道水文规范(s). JTS145-2015. 2016.
- [16] 交通部. 港口工程荷载规范(s). JTS144-1-2010. 2010.