

# 波流联合作用下浅海导管架平台载荷仿真 和分析\*<sub>1</sub>

夏可, 彭耀, 万德成\*\*<sub>2</sub>

(上海交通大学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: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn))

**摘要:** 本文应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器—naoe-FOAM-SJTU, 对一浅海风机基座导管架平台在复杂波流场环境中所受的波流载荷进行了仿真分析。本文首先计算了极限海况下该导管架平台的总体受力, 同时对一些结构上较为危险点的抨击压力进行了监测, 并将仿真结果与上海交通大学海洋工程国家重点实验室的模型试验结果进行对比验证; 其次, 改变流场中波浪与海流的传播方向夹角, 从而分析不同的波流夹角的联合作用下导管架平台的整体载荷情况以及局部点的抨击压力。计算过程中可以给出波浪爬高、压力分布、流场形态以及平台周边的涡流场分布等详细信息, 从而为冲刷、局部强度等问题提供指导。

**关键词:** 浅海; 导管架平台; 波流夹角; naoe-FOAM-SJTU

## Simulation and Analysis of the Loads on Jacket Platform in the Waves and Current in Shallow Water

Xia Ke, 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:** In this paper, numerical simulation of the jacket platform is conducted to research the loads that induced by the waves and current in the shallow water. The problems are performed by the CFD solvers, naoe-FOAM-SJTU, which is developed based on the open source tool libraries of OpenFOAM. Firstly, the forces of the platform and the slamming pressure of some dangerous joint of the jacket platform are calculated, and the results were verified by comparing with the experimental results that conducted by the State Key Laboratory of Ocean Engineering of Shanghai Jiao Tong University. Subsequently, different angles that between the wave direction and current direction are considered to investigate the influence on the flow field and loads on the platform. Wave run up, pressure distribution, parameter of flow field and distribution of vortex can be given out in the research and all the results can be instructive to the practical engineering problems.

**Keywords:** shallow water; jacket platform; the angle between flow and waves; naoe-FOAM-SJTU

---

\* 收稿日期:

作者简介: 夏可 (1993-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为海洋平台运动性能及载荷预报。

E-mail: [xiakee@sjtu.edu.cn](mailto:xiakee@sjtu.edu.cn)。

\*\*通信作者: 万德成, Email: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)。

# 1 引言

随着国家的日益发展,能源问题日益凸显,因此对于风能等可再生能源发展的需求也随着增长,很多国家建立了较为完善的风电场来进行风电的开发,我国除了逐步建立陆上的完备风电场之外,也开始进行海上风电场的建设,以避免用地矛盾并追求更多更稳定的风能<sup>[1]</sup>。

而进行海上风电的开发与陆上风电开发最大的区别就在于海上风机需要平台作为其基础,根据水深情况,这些基础可分别采用浮式与固定式平台,而本文则主要针对东海某近海风机的导管架基础的载荷情况进行研究。

导管架平台在整个风力发电系统中起着极为重要的作用,一方面它可以为风力发电机提供稳定的基础,另一方面它可以将整个风力发电机系统所受的载荷传递到桩基周围的海底环境中<sup>[2]</sup>。而浅海的波浪环境也较为复杂,除了有较为明显的海流以外,由于浅水海底边界对于波浪的影响,波浪在向浅水传播的过程中会出现一系列的变化,波浪的波高会变大,且波峰升高,波谷也升高,呈现明显的尖峰坦谷的形状,波浪由线性波演化为坦谷波<sup>[3]</sup>。对于这种波浪,其对于结构物的抨击力较之线性波更强,波浪更容易发生翻卷和破碎<sup>[4]</sup>,因此在近结构物处的海况也更为复杂,对之的研究和模拟的难度也越大。

关于平台在波流联合作用下性能的研究很多,董艳秋<sup>[5]</sup>主要分析了波流联合作用下张力腿涡激非线性振动情况,建立了数学模型,既考虑了平方流体阻尼项,也计及中心激振情况。姜雪亮<sup>[6]</sup>主要运用三维势流软件 AQWA 对于波流联合作用下经典 Spar 平台的非线性运动以及系泊张力进行了计算,并分析了各自由度相互耦合的影响。姜邵云<sup>[7]</sup>则进行了波流联合作用下导管架平台装机冲刷的试验研究,给出了导管架平台桩基冲刷在粘土条件下最大深度非线性回归公式。Chang 和 Jeng<sup>[2]</sup>则主要进行了数值分析手段,对于一近海重力式平台在不同波高、周期波浪作用下的载荷性能以及在相应波浪中底部桩基冲刷情况的研究。目前为止,利用 CFD 手段对于浅水波流联合作用下平台载荷情况进行预报分析的研究较少,对于波流联合作用下不同波流夹角对波流相互耦合影响的研究也较少。

本文主要利用基于开源平台 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程 CFD 求解器—naoe-FOAM-SJTU<sup>[8]</sup>对于某近海风机导管架基础在波流联合作用下的载荷情况,与上海交通大学海洋工程国家重点实验室的实验结果进行对比,并主要针对不同的波流夹角进行讨论,分析波流夹角对于导管架平台受力、抨击压力等的影响,从而为工程提供指导意见。

## 2 数值计算方法

### 2.1 控制方程

对于不可压、粘性流体,其控制方程为:

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

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

式中,  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{U}_g$  分别表示流场速度和网格节点速度;  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$  为流场动压力,等于总压力减去静水压力;  $\mathbf{g}$ 、 $\rho$  和  $\mu$  分别为重力加速度、流体的密度和动力粘性系数。

计算中,采用有限体积法(FVM)对控制方程进行离散;利用 PISO 算法对于速度压力方程进行解耦求解;采用标准  $k-\omega$  湍流模型对于分离涡进行仿真,对于近壁面则采用壁面函数进行计算;对于自由面的捕捉,采用流体体积法(VOF);同时,为了求解物体运动,计算中还用了动网格技术。

### 2.2 造波理论

造波通过改变速度入口边界条件，从而产生波浪，并在计算域出口设置消波区，从而保证了整个计算域内的流体质量守恒。由于水深影响，波浪在传播到浅水过程中已经发生一系列演化，因此波浪已呈现明显的非线性，若按照传统的线性波理论进行造波，波浪难以正常传播，有可能出现翻卷破碎等情况，因此根据既定海况的色散关系，此处造波运用斯托克斯五阶波理论。公式(3)为根据摄动关系展开的五阶波的波形表达式， $\varepsilon$  为波数  $k$  以及波幅  $a$  的乘积。消波则是在  $N-S$  方程的源项上添加一项人工消波项  $f_s$ ，如公式(4)所示，该源项表达式如公式(5)(6)所示，其中， $x_s$  是消波区的起始位置； $L_s$  是消波区的长度； $\alpha_s$  是一个无因次化的人工粘性系数，用于控制消波强度。

$$\eta = \eta_1 + \varepsilon \eta_2 + \varepsilon^2 \eta_3 + \varepsilon^3 \eta_4 + \varepsilon^4 \eta_5 + \dots \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_0) \cdot \mathbf{U}) = \rho \nabla g - x \rho \nabla \cdot \mathbf{U} + \mu \nabla^2 \mathbf{U} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} + \mathbf{f}_s \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_s = -\rho \mu_s \mathbf{U} \quad (5)$$

$$\mu_s(x) = \begin{cases} \alpha_s \left( \frac{x-x_0}{L_s} \right)^2, & x > x_0 \\ 0, & x \leq x_0 \end{cases} \quad (6)$$

### 3 数值模型及实验布置

#### 3.1 计算模型及试验模型

导管架平台的数值模型如图 1(a)所示，其试验模型如图 1(b)所示，实际平台高 33m，顶部平台长宽均为 40m。计算模型以及实验模型均为模型尺度，缩尺比为 1:30，计算中所有参数均按照该缩尺比进行设置，该实验由上海交通大学海洋工程国家重点实验室完成。

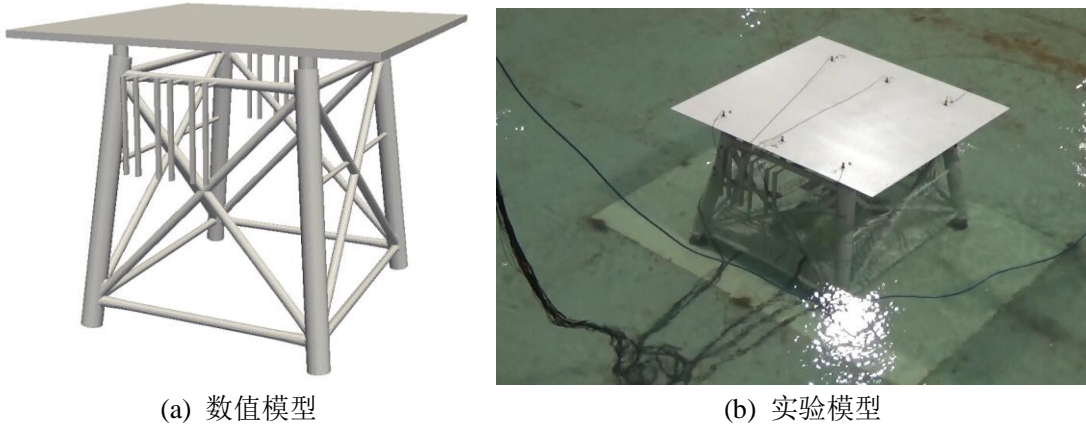


图 1. 导管架平台计算模型及试验模型

#### 3.2 计算网格以及计算域设置

本文仿真所用的网格利用 OpenFOAM 的网格求解器 snappyHexMesh<sup>[9]</sup>通过背景网格加密并提取结构物表面网格模型从而生成，网格量 200 万左右，计算步长为 0.001s，平台网格以及局部网格如图 2 所示。从图中可以看到，网格在物面处较为精细，可以清楚地捕捉平台上各种尺度的构建。此外，网格也保证了一个波高范围内有 20 个网格。

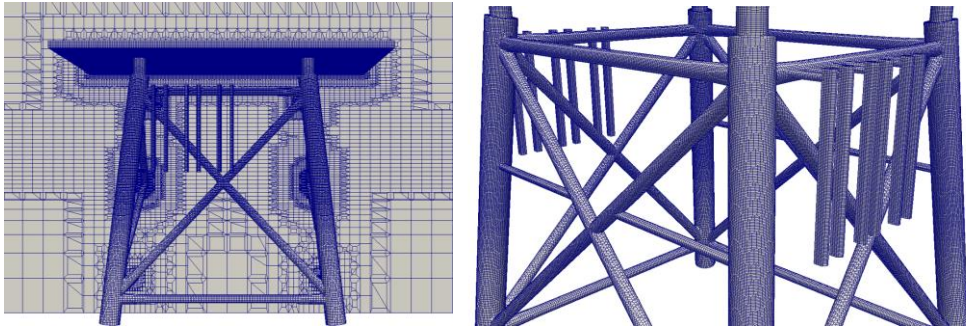


图 2. 导管架平台总体网格以及局部网格

图 3 所示则是此次计算的计算域的主要尺度，图上标注均为按照 1:30 进行缩放后的数值，平台中心布置在  $x$  与  $y$  方向零点位置，此计算网格保证了平台前部有一个波长的长度，后面有两个波长的长度，从而保证了波浪可以充分演化。图 4 则给出了计算域的坐标系设置以及波流传播方向示意图，图中可以看到，波浪与流的传播方向有一夹角，该夹角的改变在后续的分析中为主要分析因素。

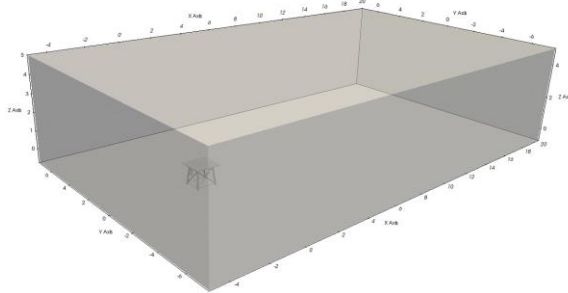


图 3. 计算域主尺度

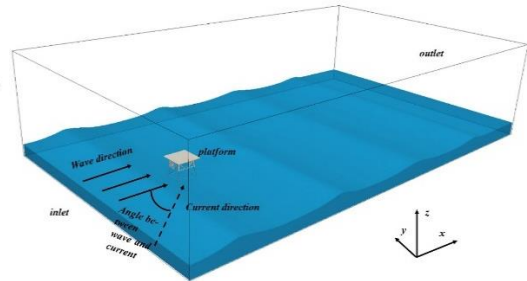


图 4. 计算域设置及坐标系

### 3.3 主要计算工况

表 1. 导管架平台主要计算工况

海况编号	波流夹角	水深编号	水深	波高(m)	周期(s)	流速
3	波流同向	极端高水位	22.5	8.7	11.5	1.73
4	波流同向			5.63	9.8	1.73
	波流垂直			5.63	9.8	
	波流夹角 22.5°			5.63	9.8	
	波流夹角 45°			5.63	9.8	

本文涉及的计算工况如上表所示，主要计算了在极端高水位情况下，遭遇较大波高即 8.7m 波高以及 1.73m/s 流速的海流时导管架平台所受的载荷，并与实验结果相对比进行验证。其后，选取波高较小的波浪，并进行不同波流夹角的计算，从而考察不同波流夹角对于平台所受载荷的影响。

### 3.4 主要计算参数及测压点布置

在针对导管架平台的分析计算中，主要分析平台的波浪传播方向的受力  $F_x$  以及力矩  $M_y$ ，同时还需要对于导管架结构上的危险点位置的表面压力进行提取。平台表面的压力点布置如图 5 所示，共针对导管架导管接头处等位置设置了 15 组压力点。

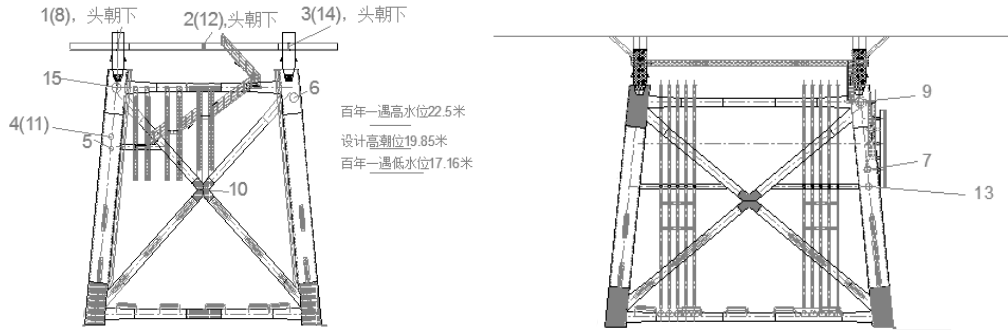


图 5. 导管架平台测压点布置正视图与侧视图

### 3.5 主要边界条件设置

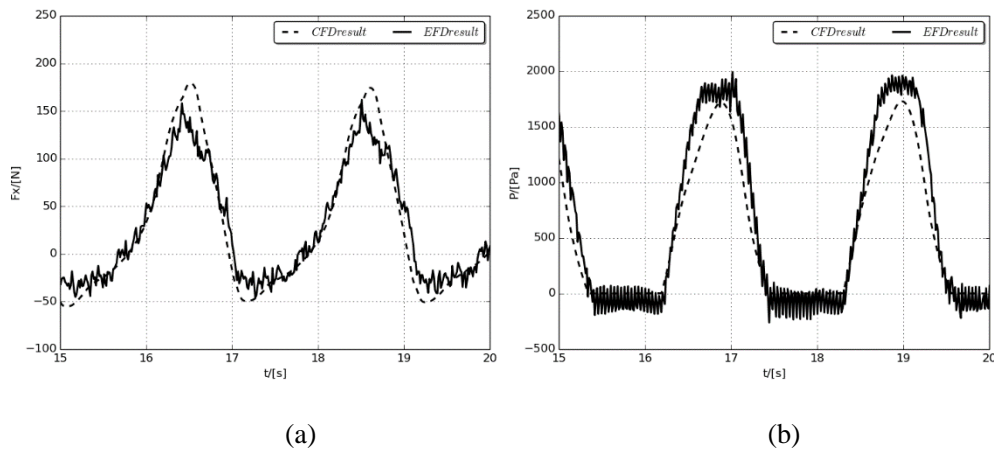
数值计算的边界条件是数值计算过程中最重要的影响因素,直接影响着计算结果的正确性和可靠性,此次计算模拟设置的边界条件如下:

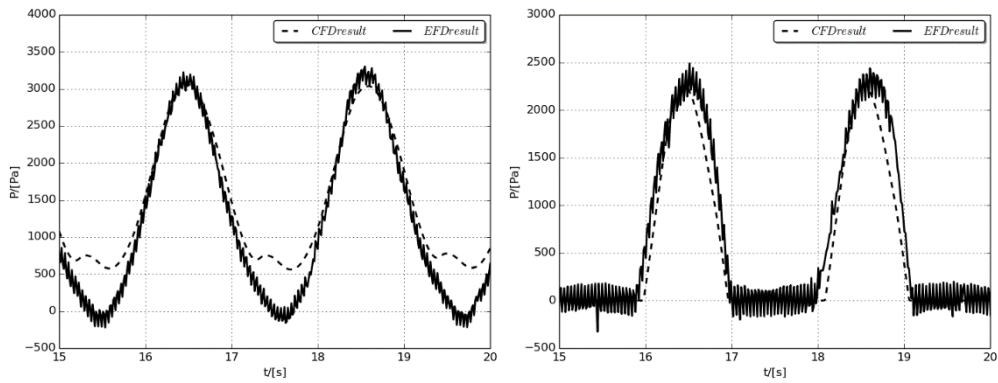
- (1) 在入口边界处 (inlet), 因为涉及到造波, 所以速度条件采用波浪入口, 压力条件则采用则是 Neumann 边界条件, 压力梯度为零。
- (2) 在出口边界处 (outlet) 速度条件采用第三类混合边界条件 (inletOutlet), 压力条件设定的 Dirichlet 边界条件。
- (3) 在计算域的上下边界处 (top, bottom), 上边界压力与速度条件采用的第一类边界条件, 下边界的速度压力条件采用的都是可滑移的边界条件, 因为计算网格仅仅只是到了水下 224m, 并未覆盖到实际海底。
- (4) 在计算域的左边界处 (sidewall1,sidewall2) 边界条件定义为 symmetryPlane, 其含义即垂直于边界的方向导数为零。
- (5) 模型物面处, 采用的则是固壁面的边界条件。

## 4 分析结果

### 4.1 波流同向下平台数值计算结果验证

对于该导管架平台, 选择极限高潮位作为主要分析工况, 水深 22.5m, 选取分析的实际海况波高 8.7m, 波浪周期 11.5s, 流速为 1.73m/s。利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对于模型尺度实验进行仿真, 并与模型试验结果进行对比, 时历结果如下图所示:





(c)

(d)

图 6. 导管架平台 x 方向受力与测压点受力计算与实验对比图 (a. 平台 x 方向受力 b. 测压点 7 压力时历 c. 测压点 10 压力时历 d. 测压点 11 压力时历)

波浪同向部分计算结果如上图所示，虚线为 CFD 计算结果，实线为实验的记录结果，从上述的平台总体受力以及局部测压点所受压力可见，计算结果与实验结果吻合较好，关于载荷最大值以及载荷周期性变化的捕捉与试验相比较为精确。从而可以验证计算结果的可靠性以及计算程序的准确性。此外，CFD 计算的一大优势是可以清晰地记录一些试验中难以记录的细节，如波浪爬高、涡流场演化以及流场变化等情况。

如下图所示，图 7 为一个周期中平台导管架周围波面变化情况，其中  $T$  为波浪周期。从图中可以清晰地看到波面在平台周围的演化情况，自由面对平台导管的碰击情况，以及波浪在导管架周围的爬高情况，可以有助于设计人员全面地认识到平台的工作情况以及碰击较大的位置，从而优化设计。

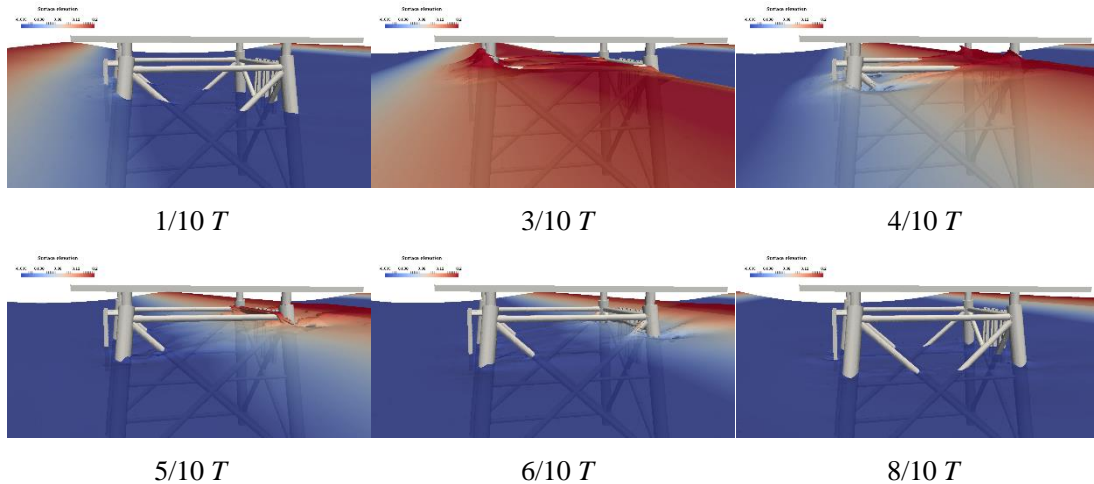


图 7. 一个周期内导管架平台周围波面情况

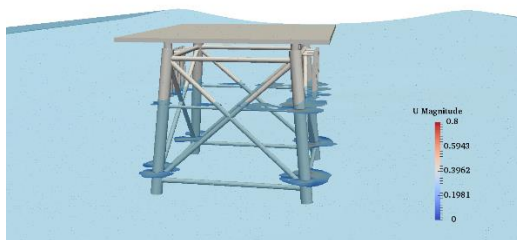


图 8. 导管架平台周围涡量分布

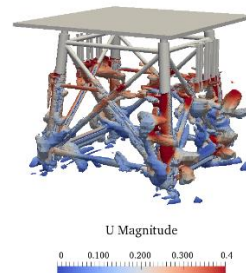


图 9. 平台周围涡演化

此外,为了研究导管架周围涡流场对于基础的冲刷情况,在计算中可以给出平台周围涡流场的演化情况,图8给出了导管架周围的某一时刻涡量分布情况,图9则给出了某一时刻导管架周围的涡演化和脱落情况。在实际的应用中,CFD计算可以给出各个时间不同位置的涡流场发展情况,从而有很重要的现实意义。

#### 4.2 波流夹角情况下载荷特性分析

而在实际的工作海况中,由于近海的复杂海况,通常情况下会出现不同的波向与流向,从而会形成不同的波流夹角,而不同的波流夹角也会使得二者之间出现不同的耦合、叠加,从而形成不同的波流场,本节将针对四中不同的波流夹角进行研究,研究在不同波流夹角情况下,平台的总体载荷情况以及流场情况。本文研究的波流夹角主要有 $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 以及 $90^\circ$ ,而关于波浪和流的实际方向,计算中与实验中设置一致,即固定波浪方向不动,而不断改变流的方向,从而形成波流夹角。此外关于波流夹角的考察,在计算分析中选取了较小波高的波浪进行分析,从而可以更明显的分析不同方向的流动对于波浪演化的影响。

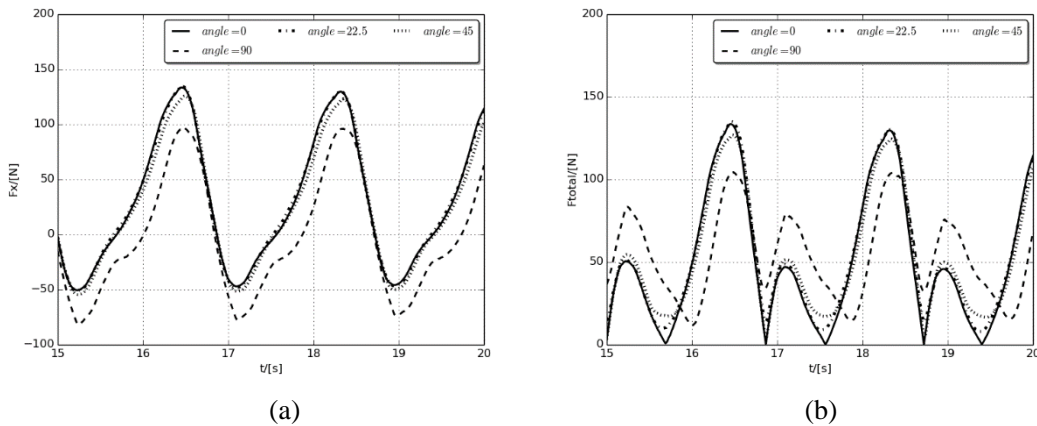


图 10.不同波流夹角下平台 x 方向受力(a)及 xy 方向受力合力对比(b)

上图为四种不同波流夹角情况下平台 x 方向受力以及 xy 方向受力合力的对比图。由于 x 方向受力为平台的主要受力,同时也直接关系到平台在环境载荷作用下关于桩基的力矩,因此,在实际的工程中对该方向受力比较关注。从图中可以清晰地看到,随着波流夹角逐渐变大, x 方向的受力明显减小。当波流同向时,  $F_x$  最大,而当波流垂向的时候,  $F_x$  最小。而仔细分析图(a)可以发现,实际上波流不同夹角对应的  $F_x$  的振荡幅值基本一致,这是由于力的振荡主要由波浪引起,流力更趋向于一个稳定的值,因为波流夹角为改流向不改浪向,因此导致了这一现象。此外,为了更全面的研究波流夹角对平台水平方向受力的影响,在本文的研究中,将 x 方向与 y 方向的受力求取了合力,如图 10(b),从合力的结果也可以明显看出,随着波流夹角越大,合力最大值逐渐减小,而合力最大值也恰恰是工程中最为关注的一个参数。而在合力的第二个峰值点上,合力峰值则随着波流夹角的增大而增大,这个现象主要与受力方向的定义有关。

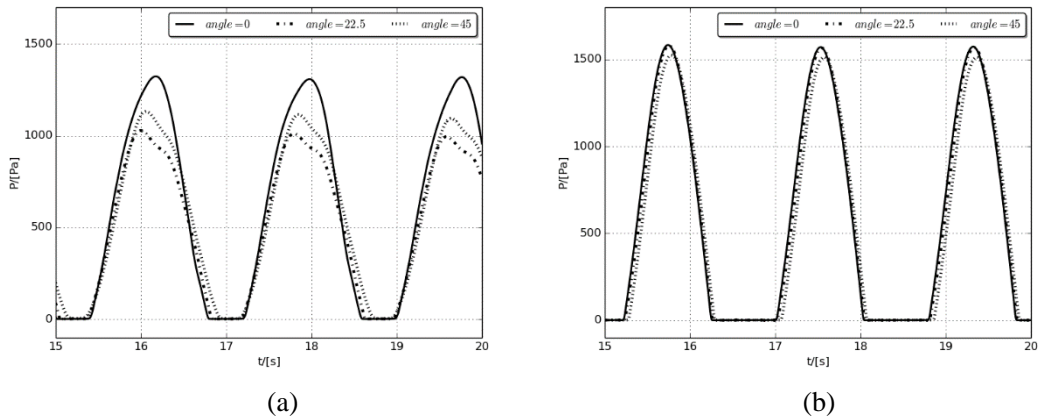


图 11.不同波流夹角下平台测压点 7(a)和测压点 11(b)压力对比图

上图为测压点 7 以及测压点 11 在不同的波流夹角中的监测压力对比图，从图中也可以清晰的发现，不同的波流夹角对于一些导管节点冲击压力明显不同，从上图的趋势中可以看出，当波流同向时，砰击压力最大，而当波流夹角越大，砰击压力越小。这都是不同波流夹角对应的波流叠加不同所导致的。

为了更进一步地分析不同波流夹角对于波流叠加的实际影响，本文做了如下深入分析。如图 12(a)所示，在平台中心沿  $x$  轴前后各 1.5m 水平面位置布置 200 个测压点，其布置范围如图中红色杆件所示范围，测压点纵贯了 12(b)所示的数组防撞挡板。计算中记录了该 200 个测压点的动压力数据，并将 17.7s 时刻的压力记录数据给出在图 13 中。

从图中同一时刻不同波流夹角的动压力记录对比可以发现，不同的波流夹角对应的波浪在同一时刻处在不同的位置，随着波流夹角的减小，波浪的波峰越向  $x$  正方向移动，这也就意味着，随着波流夹角的减小，在波流耦合的作用下，流会增大波浪的波速，从而呈现了图中所示的不同波峰位置。此外还可以发现，随着波流夹角的增大，忽略压力振荡点，动压力的峰值会减小，这说明在波浪传播方向投影的流动速度越大，波浪与流动的叠加越明显。这也是浅水波浪实验的一大特征，即流动的存在会使波浪的波峰位置有一定的上升。通过图中曲线还可以发现，在平台前后各 0.5m 左右各会出现一个压力振荡点，这是由于该位置为平台前后的防撞挡板夹缝，波浪在此处存在明显的爬高和破碎。最后，通过波形的观察可以发现，在平台附近，对于同一个波浪，前方波浪的动压力明显小于平台后方的波浪动压力，即波浪未打到平台的部分的动压力比已经通过平台的部分的动压力大，动压力波形呈现左高右低的形态。

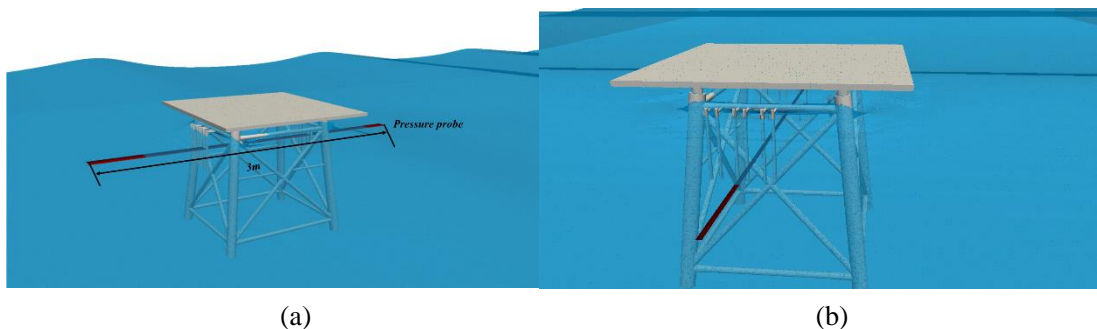


图 12.平台附近压力监测点布置示意图 (a)侧视图 (b)正视图



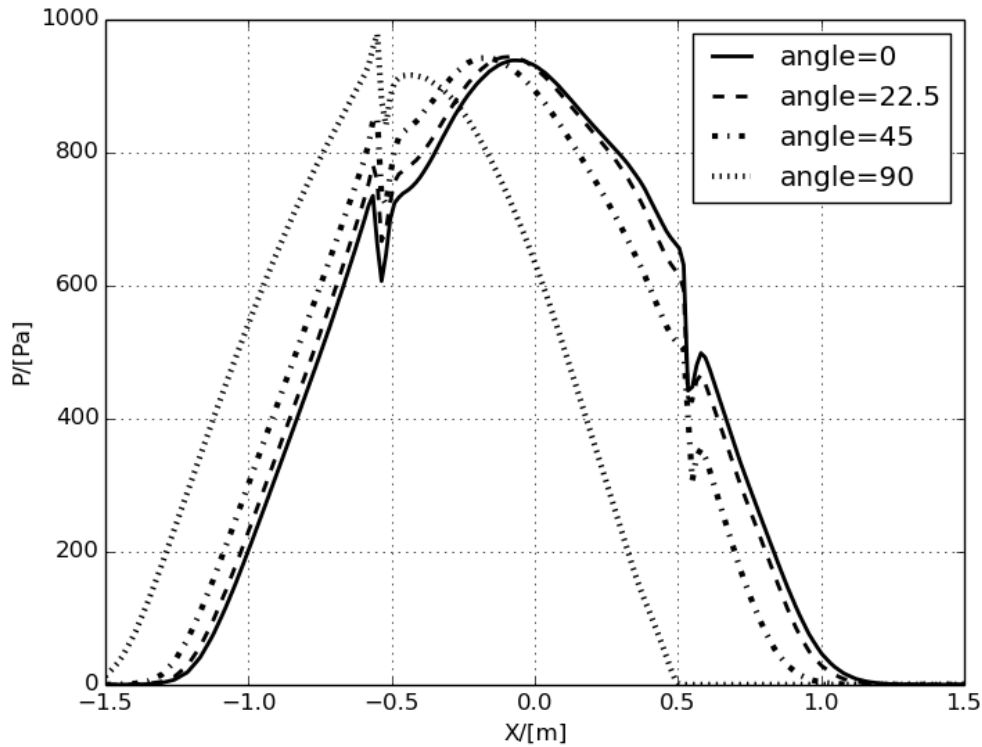


图 13. 17.7s 时刻时不同波流夹角动压力监测对比

## 5 结论

本文主要利用了本课题组自主开发的船舶与海洋工程求解器 naoe-FOAM-SJTU 对一浅海导管架风机平台在波流联合作用下的载荷状况进行了研究。本文首先对极限高水位下较大波高的工况进行计算和分析，并将计算结果与实验结果进行对比。通过对比可以发现，利用该求解器所计算的结果与实验结果较为吻合，在平台的总体受力以及局部压力的计算上，与实验结果较为接近。其次，本文针对较小波高不同的波流夹角情况下平台的载荷状况进行了分析，通过平台受力以及压力点的监测对比可以看出，平台所受载荷随着波流夹角的增大而减小，这主要因为不同的波流夹角会形成不同的波流耦合，并叠加成不同形态的波流场。为了进一步分析不同的波流夹角对于平台周围波流场的影响，本文还在平台周围的自由面处设置了一系列的测压点，并对记录的测压点数据进行分析，并得到了一系列波流夹角对波流叠加影响的结论。本文的研究对于波流夹角对于结构物的耦合作用进行了比较深入的分析，并得到了一些结果，可以对工程实际应用提供一些指导。此外，由于计算均采用规则波，而实际海况下平台的工作环境均为不规则波，因此在后续的研究中，可以进一步分析不规则波作用下，平台的受力和载荷情况。

## 参考文献

- [1] HU Ya-qi, HE Er-ming, ZHANG Yang. Optimization Design of TMD for Vibration Suppression of Offshore Floating Wind Turbine. International Journal of Plant Engineering and Management[J]. 2015. 1(20): 13-27.
- [2] Kun-Tan Chang, Dong-Sheng Jeng, Numerical study for wave-induced seabed response around offshore wind turbine foundation in Donghai offshore wind farm, Shanghai, China. Ocean Engineering[J]. 2014 ,85: 32-43.

- [3] 田超,丁军,杨鹏. 岛礁波浪环境下浮式结构物的动响应预报[J]. 船舶力学,2014,11:1284-1291.
- [4] 丁军,田超,王志东,凌宏杰,李志伟. 近岛礁波浪传播变形模型试验研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2015,02:194-200.
- [5] 董艳秋. 波、流联合作用下海洋平台张力腿的涡激非线性振动[J]. 海洋学报(中文版),1994,03:121-129.
- [6] 姜雪亮. 波流作用下经典 Spar 平台非线性运动稳定性研究及系缆张力计算[D].中国海洋大学,2012.
- [7] 姜绍云,李志刚,段梦兰,齐俊林,马殿滨. 波流作用下导管架平台桩基冲刷试验研究[J]. 石油机械,2012,09:57-61.
- [8] Shen, Z. R., Zhao, W. W., Wang, J. H. and Wan, D. C. 2014. "Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU." Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University.
- [9] OpenFOAM. Mesh generation with the snappyHexMesh utility. 2013. Available from: <http://www.openfoam.org/docs/user/snappyHexMesh.php#x26-1510005.4>.