

基于 CFD 方法近岛礁地形波浪演化及半潜式平台运动性能的数值分析

夏可, 万德成*

(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)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 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, 对一座浅水工况下带锚泊系统的浮式平台在规则波作用下的运动性能以及相应地形下波浪演化特性进行了数值模拟。首先对于该地形下不同周期的波浪进行了空场造波演化研究, 发现所有波浪除了达到计算要求的工况外, 都发生了不同程度的演化现象, 呈现出明显的高阶特性。其次对于平台在规则波中运动性能进行了计算, RAO 的计算结果与实验结果吻合良好, 同时计算中还发现了运动的多种频率特性, 并对运动曲线进行频谱分析, 进一步探索各频率对应的分量。同时计算中还给出了次生波浪及爬高的强非线性现象, 从而进一步阐释了近岛礁平台的非线性性能原因。

关键词: 近岛礁地形; 波浪演化; 平台运动性能; 非线性; naoe-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

随着对于海洋资源的快速开发, 越来越多的注意力被海洋中的岛礁所吸引。在海洋资源的开发和海洋主权的维护中, 岛礁体现出越来越重要的战略作用。为了更好地保障资源开发及岛礁建设, 在近岛礁附近建立一个浮式保障平台就是一个极佳的选择。

近岛礁波浪环境与深海波浪环境区别非常明显, 波浪环境趋于复杂, 由于受到底部边界条件影响, 波浪脱离线性波范围而趋于高阶波, 呈现明显的坦谷波形。由于浅水复杂的地形环境, 波浪在岛礁附近会发生折射、绕射、衍射等, 由于水深变浅, 波浪除了趋于高阶外, 随着波陡的增大, 会最终出现破碎的强非线性现象^[1]。因此, 近岛礁浮体水动力特性与深水浮体有明显区别, 为了更好地对于近岛礁浮体的运动性能进行预报, 对于其浅水波浪演化及浮体水动力特性研究显得尤为必要。

目前关于浮式平台的研究非常多, 国内外的大量学者为了研究平台水动力性能提出了

诸多理论。Morison^[2]在 1950 年提出了一个可以用于计算海洋工程结构物波浪力的半经验公式，平台的波浪力可以归纳为拖曳力和惯性力两个部分。该公式被广泛应用于截面形状较为简单的海洋工程小尺度构建的计算。Maeda 等^[3]1992 年对于规则波中半潜式浮式平台的运动性能进行了研究，研究发现当波浪频率在平台慢漂运动固有频率附近黏性对于平台运动影响较大，只有较好地考虑黏性时才能够得到与实验一致的结果。史琪琪^[4]对于某深水锚泊钻井平台的运动性能和动力特性进行了研究，并给出了参数敏感性分析结果，ZHU Hang 以及 OU Jinping^[5]运用势流的方法对于深水情况下风波联合作用下平台运动性能进行了分析。与深水浮式结构物问题相比，浅水情况下的浮式结构物水动力性能的计算相对较少。Tajali 和 Shafieefar^[6]分析了柔性或刚性连接的多体浮式码头在入射波浪下的水动力及结构物运动。刘远传^[7]基于 OpenFOAM 进行系泊系统程序的编写，并利用 CFD 的方法，对一浮式码头运动性能进行了分析，计算中平台周围出现了波浪爬高、破碎等强非线性现象。田超和丁军等^[8]用了试验以及 AQWA 分别对浅水近岛礁浮式平台的性能和波浪场演化的问题进行了分析，试验中波浪在礁坪上由于波浪演化剧烈，波陡过大，波浪出现了破碎的现象。

现阶段对于浮式结构物的计算大部分都基于三维势流理论，然而针对浅水波浪问题，由于波浪环境复杂，局部非线性强烈，势流理论对于黏性、漩涡的影响无法完全考虑，波浪翻卷、破碎、抨击、爬高等现象又恰恰是一个气液两相相互耦合、黏性以及有旋流动所导致的^[9]，对于浅水波浪问题，由于水深较浅因此还将产生波生流的流动现象，流场进一步复杂，因此本文采用一种更为直接的数值方法 CFD 对于近岛礁浮式结构物以及波浪问题进行仿真。本研究采用基于开源平台 OpenFOAM 开发的 naoe-FOAM-SJTU 进行浅水近岛礁浮式平台的运动性能计算以及相应的波浪环境模拟。文章计算平台的自由衰减运动及对应工况的规则波中的 RAO，并与田超^[9]等人在江苏科技大学的实验结果进行对比，其后对不同的波陡情况下平台的运动性能以及波浪演化情况进行了详细分析。

2 数值方法

2.1 控制方程

本文的仿真基于不可压、黏性流体，其控制方程为：

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

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

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} 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力黏性系数。计算采用有限体积法 (FVM) 对控制方程进行离散；计算采用 laminar 模型；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，计算中采用了动网格技术。

2.2 造波理论及方法

波浪对于海洋工程结构物是至关重要的环境因素之一，因此在数值计算中，造波就显得尤为重要，本文的造波采用的是基于 OpenFOAM 开发的开源代码包 waves2foam^[10]进行求解。造波方式为通过改变速度入口边界条件，从而产生波浪。计算波浪均为 Stokes 二阶波，二阶波的波面高程公式如下：

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 + \eta_2 \\ \eta_1 &= \frac{H}{2} \cos \omega t \\ \eta_2 &= \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} (2 + \cosh 2kd) \cos 2\omega t \end{aligned} \quad (3)$$

其中 η 是自由表面高程， H 为波高， k 为波数， d 为相应位置处的水深。在该造波模块中，松弛区的概念被提出并应用在求解器中。松弛区的控制方程如式(4)，式中 α_R 为松弛因子，其值随距离参数 χ_R 而变化，具体的变化趋势如图 1 所示。从式 (5) 松弛因子 α_R 的变化将直接影响 ϕ 的值， ϕ 在求解器中主要为自由面速度 u 或者流体相参数 γ 。从图 1 可以看出，在 inlet 松弛区中，波浪强度会从零增大并趋于稳定，而在 outlet 松弛区中波浪强度会从大变小并趋于零。实际上该松弛区承担了数值水池的造波区和消波区的作用。

$$\alpha_R(\chi_R) = 1 - \frac{\exp(\chi_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } \chi_R \in [0, 1] \quad (4)$$

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

2.3 系泊系统求解方法

为了模拟系泊系统与浮体耦合作用，课题组基于 openFOAM 开源平台开发了系泊系统求解模块。本研究的系泊系统求解采用的是即分段外推法 (PEM)，该方法计及系泊线变形以及当地位置处的流体的作用力。系泊线被分为数段，其分段的典型受力如图 2 所示，该系泊系统的实现通过将上一时刻系泊力添加到六自由度运动方程中，实现下一时刻的浮体速度和位移的求解^[11]。本系泊方法求解由本课题组刘远传等人开发，并经过严格验证^[12]。

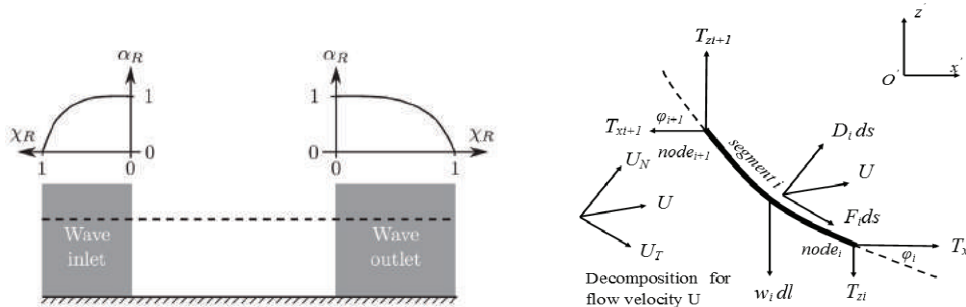


图 1 松弛因子在入口及出口松弛区中分布

图 2 系泊线分段受力示意图

3 计算设定

本研究主要计算一近岛礁半潜式平台的运动性能以及近岛礁地形下的波浪演化特性。本文的计算模型主要参考田超等^[9]在江苏科技大学所做的实验。平台的实验模型以及计算模型如图 3 所示，平台的系泊系统分布如图 4 及图 6 所示，平台的主要参数如表 1。

表 1 半潜式平台主要参数

Primary parameter	Unit	Value
$L \times B \times D$	m	$50 \times 25 \times 9.7$
Draft below SWL	m	5
Displacement	m^3	2970
Center of mass location above SWL along platform center line	m	1.01
Platform roll inertia about center of mass (CM)	$Kg \cdot m^2$	7.67×10^8
Platform pitch inertia about center of mass (CM)	$Kg \cdot m^2$	2.29×10^8
Platform yaw inertia about platform centerline	$Kg \cdot m^2$	8.73×10^8

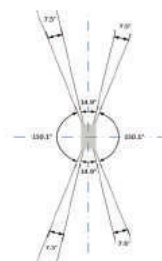
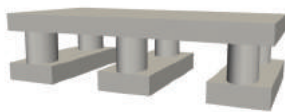


图 3 平台实验模型（左）及平台数值模型（右）

图 4 系泊系统布置

本研究的主要工作是计算近岛礁环境下波浪特性以及演化特征，因此对于近岛礁地形的模拟就显得尤为重要，选取了一块与实验地形类似的近岛斜底地形，地形坡度约为两度，平台所处位置处水深约为 10m，计算域与地形相对位置如图 5，将实际地形的一部分提取出来作为计算域的底部边界条件来模拟海底。计算域内部布置包括系泊系统、平台位置、消波区、波浪来向等如图 6 所示。

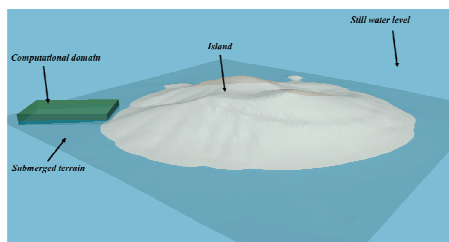


图 5 计算域及地形相对位置示意图

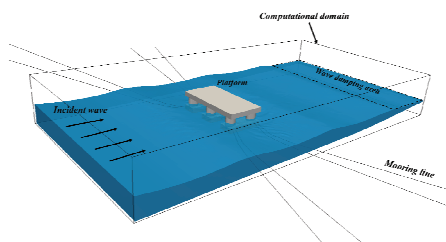


图 6 计算域布置示意图

计算网格如图 7 所示，计算域网格如图 7 (a) 所示，为一斜底边界条件下的计算域，从地形模型中提取出的底部边界条件如图 7 (b) 所示，地形的纵向形状可从计算域侧面图 7 (c) 观察，图 7 (d) 则给出了平台附近的网格情况。本文的网格基于 OpenFOAM 自带的 snappyHexMesh^[13]求解器生成，通过对背景网格加密并捕捉出计算所需的物面边界条件，可以在较短时间内生成质量较高的网格。所用的含平台的计算网格为 150 万左右，无平台的空场造波的计算网格约为 160 万左右，计算的时间步长为 0.005s。



图 7 计算网格, (a) 计算域网格, (b) 地形网格, (c) 网格侧视图, (d) 平台位置局部网格

主要研究波浪问题，因此波浪的参数也决定了研究结果的核心，为方便后文运动结果对比，本文波浪工况的选取参考田超^[9]等人的文章中的实验设定工况。波浪工况如表 2 所示。所有的波浪工况都属于 Stokes 二阶波的范畴。

表 2 计算主要波浪工况

计算工况	波浪高度 (m)	波浪周期 (s)
Case1	2	4.38
Case2	2	5.66
Case3	2	8
Case4	2	10.526
Case5	2	12
Case6	2	14

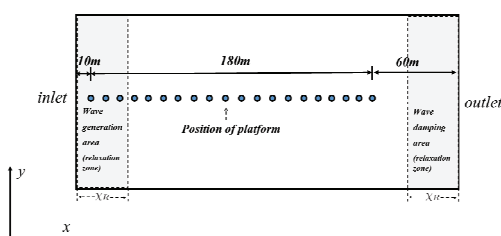


图 8 测波点在计算域中布置示意图

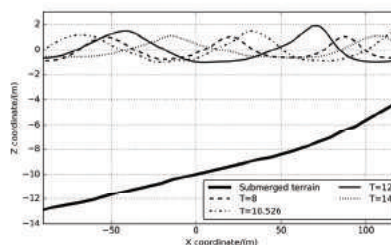


图 9 波浪沿传播方向演化情况

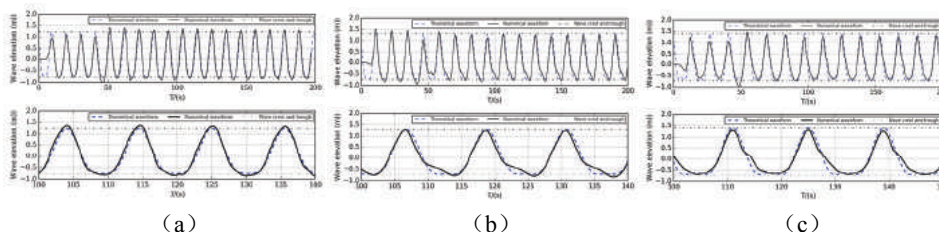


图 10 不同工况测波点 10 波高时间历程, (a) Case4, (b) Case5, (c) Case6

4 波浪演化及平台水动力性能计算

对于平台在波浪中的水动力性能计算中, RAO 是一个至关重要的参数, RAO 是浮体运动幅值比上波浪幅值的无因次参数, 可以用来评估平台对于波浪响应的频率特性。本文首先对于平台在七个工况下的运动性能进行了计算, 并针对前六个与实验相同的工况进行了 RAO 的计算, 并与实验结果进行了对比。为了进行 RAO 的计算, 首先要确保所造波浪是计算所需要的波高和频率, 因此首先进行了空场(无结构物)测波实验, 测波点在计算域中布置如图 8 所示, 在计算域中轴线位置布置了 20 个测波点, 其中第 10 个测波点即为平台所在的位置处的波浪, 本文计算要求平台位置处波浪的波高与周期达到给定工况。

首先对波浪数据进行分析, 图 10 给出了三种不同工况下测波点 10 处的波浪高程时间历程, 其中实线为数值仿真结果, 虚线为该位置处所需的波高和频率下 Stokes 二阶波的理论波形, 点画线为二阶理论波形的波峰波谷线, 每张图分为上下两部分, 下图为上图的其中一段稳定后的时间历程。从图中可以发现: ①波浪在平台位置处达到相应所需波高及频率要求, 可以用于平台规则波中 RAO 的计算。②本文造波理论为 Stokes 二阶波, 但波浪演化到平台位置处, 波形与给定波高、频率的 Stokes 二阶波有了较明显的区别, 且波形区别随着波浪周期的增大而明显。③波浪周期越大, 平台位置处的波浪不对称性越强, 波形的非线性成分越明显, 波浪的周期越小, 波浪的对称性越好, 且与二阶波波形越接近。

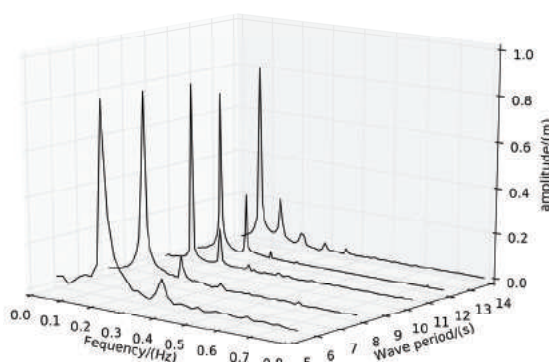


图 11 Case2-6 不同周期的波浪时历频谱分析

对于 Case2 到 Case6 五种波浪工况, 波浪周期从 5.66~14s 的波浪进行了频谱分析, 结果如图 11 所示, 从图中可以明显的看到, 当波浪演化到平台位置处, 除了非常明显的二阶分量, 随着波浪周期的增大, 波浪的高阶谐波越来越明显, 在波浪周期为 14s 时, 波浪呈现了明显的五阶分量。为了进一步分析波浪演化特征, 本文进行了进一步分析。图 9 为空场测波计算中某一时刻四种不同周期的波浪工况下, 数值水池中纵剖面上, 波面沿波浪传播方向的空间分布情况。图中加粗黑色实线为海底地形剖面线, 其他四条曲线分别为 Case3、4、5、6 对应的波形, 其中平台实际位置位于 $x=0$ 附近。从图中可以明显捕捉到波浪的演

化现象，以 $T=10.526s$ 该工况下的波浪为例，随着波浪传播，水深逐渐减小，波浪由原始的横向较对称的尖峰坦谷波形逐渐演变为不对称波形，波浪前缘速度不断变慢，后缘速度大于前缘速度，波浪逐渐向前缘堆积，波高变大，波长变短，能量向上聚积，波形不断演变从低阶趋于高阶，从而形成了较强的非线性波浪。根据浅水的波浪色散关系，波浪的波长与水深有直接关系，周期越大，波长越长，同样波高情况下能量越大，则在演化过程中，波长的变化量就越大，波高的变化量也就越大，波浪演化现象越明显，更容易出现高阶的非线性现象。

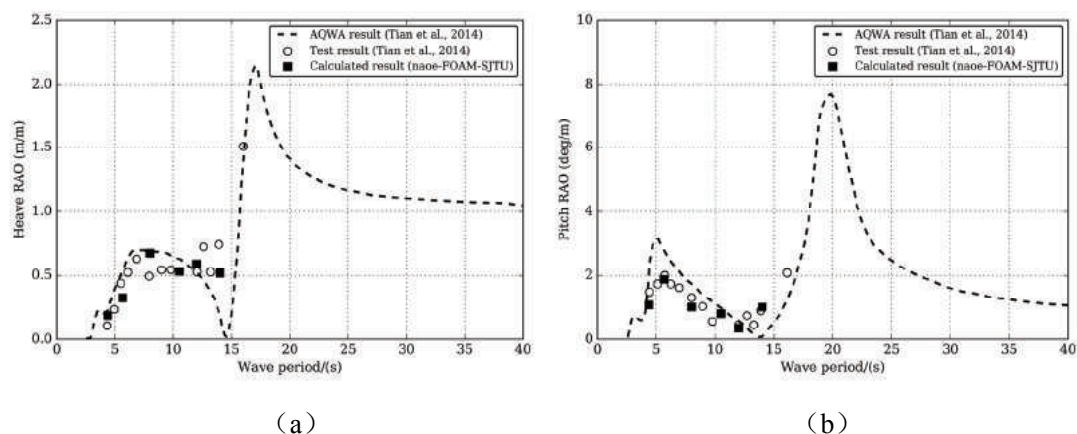


图 12 CFD 计算结果与实验结果及 AQWA 结果对比，(a) 升沉运动，(b) 纵摇运动

波浪达到了预定的波幅和频率后，开始进行平台 RAO 的计算，根据 ITTC 规定^[14]，进行规则波实验需要有 10 个以上的稳定周期，因此，计算时常均为 400-600s，确保了计算结果的相对稳定性。并取后半段运动结果进行分析，对于相对稳定的时间历程进行运动幅值统计，并求出运动幅值的平均值，除以波幅平均值，从而得到对应工况的 RAO。将计算及结果与田超等^[9]的实验结果以及其利用 AQWA 的计算结果进行了对比，对比结果如图 12 所示。从 RAO 对比结果可以发现，对于浅水近岛礁浮式平台的运动性能问题，CFD 的计算结果与实验结果吻合良好，特别在纵摇低频峰值及垂荡运动在波浪周期 15s 处的谷值处，CFD 的结算结果与实验结果完全吻合，比田超等人的 AQWA 结果更为准确。由此验证了求解器的准确性以及结果的可信度，同时也可以说明，对于近岛礁波浪工况中浮式结构物的预报，由于非线性较强，平台周围波浪易破碎且易出现边波等二次波情况，CFD 的数值计算比势流方法更有优势。

为了更好地分析平台的运动性能，给出了 Case2 即波浪周期为 5.66s 情况下平台的运动时间历程。从图中可以出，平台的升沉运动及纵摇运动较为规则，运动的频率成分较为集中，而平台的纵荡运动体现出了明显的非线性，运动明显出现了多个频率成分，为了进一步分析该工况下的运动机理，对三个自由度运动均进行了 FFT 变换，其频谱分析如图 14 所示。从纵荡运动分析，可以发现，纵荡运动有明显的三个频率成分，一阶主频率为波频

运动，二阶频率为低频运动，三阶谐频为波浪的二阶波浪力导致的运动成分。其中对于该低频运动，认为是由于波频与平台固有频率相差较大而导致的平台慢漂运动。为了证实这一观点，对平台进行了纵荡自由衰减的计算如图 15，通过分析，该纵荡固有周期为 33s，频率约为 0.3Hz，恰好为纵荡运动的二阶峰值的频率。因此可以确定平台纵荡运动的二阶成分为平台的纵荡的慢漂运动，其次，对于升沉运动的频谱分析可以看到，平台运动较为线形，其二阶频率峰值相对于一阶运动较小。纵摇运动的二阶峰值也出现在低频位置，且低频位置处有两个峰值，第一个峰值分析应由于浅水波浪较为复杂，造成了运动不稳定而导致的 FFT 分析中低频无效的信号，而第二个峰值经过分析，频率为 0.5Hz 左右，恰好与平台的纵摇固有频率一致，三阶峰值极小对运动贡献较小。

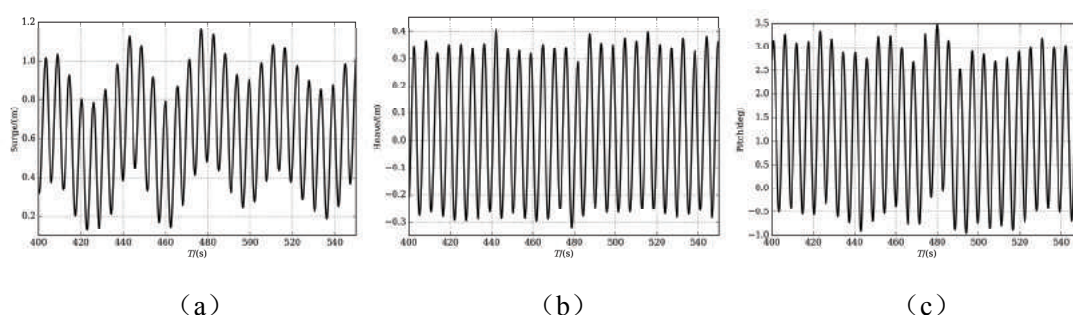


图 13 Case2 计算结果时历曲线，(a) 纵荡运动，(b) 升沉运动，(c) 纵摇运动

此外，从平台该工况下纵荡运动可以看到明显的漂移，运动的平衡位置约在 0.6m 左右，这是典型的波浪的二阶平均漂移力的作用，使得平台收到一个始终沿着 X 方向的作用力，迫使平台出现平均位移，相对于同尺度结构物，随着波长变小，平均漂移力会增大。在计算中，还可以发现波浪的非线性对于其他自由度运动的影响，如图 16 为平台的横荡运动，在迎浪的工况下，平台横荡会出现不规则的运动特性，这些是由于在波浪不对称绕射、爬升以及砰击等作用下导致的横向作用力而产生，如图 17 是波浪作用下平台周围产生的次生边波，这些作用的存在导致了横向力的不对称性，同时该现象的存在也是平台高阶力以及运动产生的原因之一。

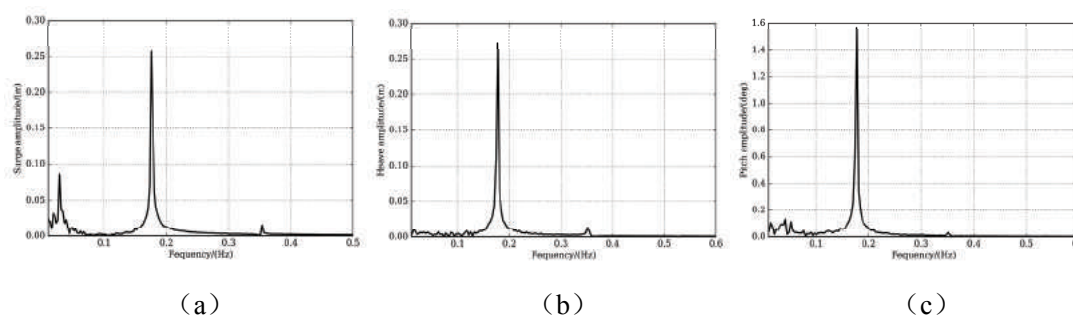


图 14 Case2 计算结果频谱分析，(a) 纵荡运动，(b) 升沉运动，(c) 纵摇运动

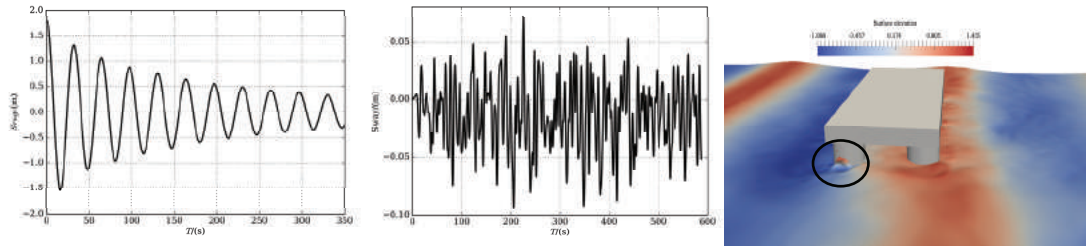


图 15 半潜式平台纵荡自由衰减运动 图 16 平台横荡运动时间历程 图 17 半潜式平台计算中波浪次生波

5 结论

本研究利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对于一近岛礁地形下半潜式平台运动性能以及相应的波浪演化特性进行了研究。首先进行了不同周期的波浪在该地形下的演化研究，发现波浪在经过演化之后趋向于高阶的非线性状态，波浪周期越大演化现象越明显。其次对于平台的运动性能进行了研究，对于平台 RAO 的计算结果表明，CFD 对于近岛礁非线性、黏性影响较强的问题求解较好，比传统的三维势流软件的计算结果更为准确。随后本文对平台具体的运动形式进行了分析，分析了平台某工况下各运动的频谱分析，对每个运动各频率成分的成因进行了分析。计算中还发现了慢漂作用、平均漂移力、次生边波及爬高等二阶或高阶非线性现象，进一步体现了 CFD 方法在该问题中的优越性。由于篇幅限制，本文还未对其他各工况进行分析，对于平台运动的特性随着波浪工况的变化还未进行分析，同时对于波浪演化现象的细节分析还未尽述，这些将在后续工作中研究。

致谢

本工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)，上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)，上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)，上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11)，以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Takikawa, K, Yamada, F, Matsumoto, K. Internal characteristics and numerical analysis of plunging breaker on a slope. *Coast. Eng.*, 1997, 31: 143-161.
- 2 Morison, JR, Johnson, JW, Schaaf, SA. The force exerted by surface waves on piles. *J. Pet. Technol.*, 1950, 2(5): 149-154.
- 3 Maeda, H, Jo, HJ, Miyajima, S. Effects of directional waves on the low-frequency motions of moored floating structures. *Proc. 2nd Int. Offshore Polar Eng. Conf., ISOPE, Golden, CO, 1992, 3: 489-495.*
- 4 史琪琪, 杨建民, 肖龙飞. 深水锚泊定位半潜式钻井平台性能数值与试验研究. *海洋工程*, 2011, 04: 29-36+42.

- 5 ZHU Hang,OU Jinping. Dynamic Performance of a Semi-Submersible Platform Subject to Wind and Waves. *J. Ocean Univ. Chin.*, 2011, 02: 127-134.
- 6 Tajali Z, Shafieefar M. Hydrodynamic analysis of multi-body floating piers under wave action. *Ocean Eng.*, 2011, 38(17-18): 1925-1933.
- 7 刘远传. 锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算. 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议文集(上册).2013.
- 8 田超,丁军,杨鹏. 岛礁波浪环境下浮式结构物的动响应预报. *船舶力学*, 2014,11:1284-1291.
- 9 田超,丁军,吴有生. 近岛礁浮式平台水动力模型试验研究.第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会论文集——D水动力学实验和测试技术[C]. 2014.
- 10 Jacobsen, NG, Fuhrman DR and Fredsøe. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam. *Int. J. Numer. Method Fluid.* 2012, 70:1073-1088.
- 11 Shen, Z, Zhao, W, Wang, J and Wan, D.. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU. Technol. Rep. Solver Man., Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- 12 Liu, Y, Peng Y and Wan D, Numerical Investigation on Interaction Between a Semi-Submersible Platform and its Mooring System, Proc. ASME 2015 34th Int. Conf. Ocean Offshore Arctic Eng., May 31-June 5, 2015, St. John's, Newfoundland, Canada, 2015: 412948.
- 13 OpenFOAM. Mesh generation with the snappyHexMesh utility, 2013. Available from: <http://www.openfoam.org/docs/user/snappyHexMesh.php#x26-1510005.4>.
- 14 ITTC. ITTC Recommended Procedures – Sea Keeping Experiments. 2002: 4.

Numerical solution of hydrodynamic stability equation of unbounded domain flow with coordinate transform

XIA Ke, WAN De-cheng*

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

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: In the present study, a 3D viscous flow solver (naoe-FOAM-SJTU) is employed to simulate the wave evolution characteristics and hydrodynamic properties of semi-submersible platform in the corresponding wave environment in shallow water with submerged terrain near island. The validation work was done by comparing the RAO (Response Amplitude Operator) of numerical results with experimental test data conducted by Tian et al. (2014) which shows great correlation. The wave evolution characteristic was investigated in this paper and some high-order components can be captured in the analysis. The motion performance of the platform was researched in detail and some strong nonlinear phenomenon was obtained in the work.

Key words: Wave evolution; semi-submersible platform; submerged terrain; nonlinear; naoe-FOAM-SJTU solver.