

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.01.010

基于势流理论和 OpenFOAM 的 耦合模型对多向不规则波浪的模拟

季新然^{1,2}, 柳淑学¹, Bo T. PAULSEN^{2,3}, Harry B. BINGHAM²

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 丹麦技术大学机械学院, 灵比 2800; 3. 代尔夫特三角洲研究中心, 代尔夫特 2629HD)

摘要: 基于势流理论的数值水池可以快速计算波浪的传播及其对建筑物的作用, 但是势流理论是基于波浪的无黏性假设的, 而在工程中, 通常需要在固体边界及波浪破碎的区域考虑黏性效应。针对基于求解 Navier-Stokes 方程的黏性水池计算量较大、速度较慢的缺点, 采用耦合的方法模拟多向不规则波浪的传播, 即在外域通过基于势流理论的数值水池产生多向不规则波浪, 内域采用求解 Navier-Stokes 方程和流体体积法 (VOF 方法) 对自由表面进行追踪, 通过外域所提供的边界波浪, 内域计算可以在较小区域进行计算, 从而达到减少计算量、提高计算效率的目的。

关键词: 势流理论; OpenFOAM; 耦合; 多向不规则波浪

中图分类号: O353.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)01-0088-12

随着高性能计算机的发展和数值模拟技术日趋成熟, 数值水池成为海岸及海洋工程中波浪问题的重要研究手段。根据解决问题的不同, 一般将水池分为两种: 一种是基于无旋、无黏假设的完全非线性势流理论 (fully nonlinear potential flow model); 另一种是基于考虑黏性的 Navier-Stokes 方程。

势流理论建立的数值水池是基于无旋、无黏的势流假设, 一般采用边界元法离散拉普拉斯方程和非线性的自由面边界条件, 采用混合欧拉-拉格朗日方法来更新自由面的运动。这类水池一般计算量比较小, 理论和数值技术比较成熟。Tanizawa 等^[1]在数值水池中模拟了波浪、船和抗摇舱内水体间的耦合运动, 将实验、理论分析和数值模拟 3 种手段相结合, 以优化抗摇舱的设计。Grilli 等^[2]建立了高精度的三维数值水池, 并模拟了孤立波的爬升翻卷, 还利用势流理论水池和黏性流体水池各自的优点, 结合边界元法 (BEM) 模型和流体体积法 (VOF 方法) 研究了波浪的破碎^[3]。Bai 和 Taylor^[4]建立了高阶边界元模型, 采用混合的欧拉-拉格朗日法对数值波浪水槽内直立圆柱与非线性规则波浪和聚焦波作用时波浪的绕射及传播进行了研究。房克照和邹志利^[5]建立了基于高阶 Boussinesq 水波方程的一维波浪破碎数值模型, 对波浪在均匀海岸上的浅化以及破碎过程进行了模拟。Ma 等^[6-7]、Wang 和 Wu^[8]采用有限元的方法建立了完全非线性的数值水池, 模拟了非线性波浪与圆柱的作用。Engsig-Karup 等^[9]将 Bingham 和 Zhang^[10]提出的二维变阶有限差分方法的完全非线性势流波浪模型扩展至三维 (OceanWave3D), 该模型不对水深作任何限定, 如果网格选取得当, 可以捕捉到除波浪破碎外的任何非线性特性。宁德志等^[11-13]基于无旋、不可压的势流理论, 利用高阶边界元法建立了一种可应用于无限水深的无黏三维完全非线性数值波浪水槽, 并在水池中产生了不同波陡的聚焦波, 数值计算结果和物理模拟结果吻合较好。

另一种是基于 Navier-Stokes 方程或雷诺平均方程建立起来的黏性数值水池。由于速度压力耦合算法 SIM-

收稿日期: 2015-05-27; 网络出版时间: 2016-01-22

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160122.2248.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51579038; 51490672)

作者简介: 季新然 (1986—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事港口、海岸和近海工程研究。

E-mail: jixinran2005@gmail.com

通信作者: 柳淑学, E-mail: liusx@dlut.edu.cn

PLE、PISO 和界面捕捉方法标记网格法(MAC)、VOF 方法的发展,黏性数值水池得到了较快的发展。文献 [14-15] 基于有限解析法的数值模式求解了二维的 Navier-Stokes 方程,获得了更精确的自由表面的速度,模拟了推板造波。Park 等^[16-18]采用有限差分法和改进的 MAC 算法开发出了三维非线性黏性水池,对波浪与建筑物作用时的爬高进行了研究,并在数值水池中产生了多向波浪。

基于 Navier-Stokes 方程的 OpenFOAM 是一个应用于计算连续介质力学的 C++类库,是目前强大的开源计算流体力学(CFD)软件包。由于其包含数据预处理、后处理和自定义求解器,并且具有很好的可扩展性,因此常被用于计算流体力学领域。Morgan 和 Zang^[19]采用 OpenFOAM 模拟了聚焦波浪与直立圆柱的作用,计算结果与实验结果较为吻合。Jacobsen 等^[20]在 OpenFOAM 的基础上,开发了 waves2Foam 求解器。该求解器可以很好地模拟波浪的传播及其与建筑物的作用。Jensen 等^[21]在 waves2Foam 求解器的基础上开发了求解波浪与透空介质作用的求解器,并计算了波浪与二维和三维透空防波堤的作用。Paulsen 等^[22]通过求解两相不可压缩 Navier-Stokes 方程,数值研究了有限水深时波陡较大的规则波与直立圆柱的作用,并对 ringing 现象和影响它的条件进行了讨论。Cao 和 Wan^[23]在 OpenFOAM 的基础上开发了两相不可压缩流体求解器 naoe-FOAM-SJTU 用来求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程,并对孤立波与圆柱作用时的爬高进行了研究。蒋昌波等^[24]基于 OpenFOAM 中的不可压缩气液两相流求解器 interFOAM 模拟了孤立波与单排圆柱间的相互作用,对圆柱附近的三维流动特性进行了研究。由于求解 Navier-Stokes 方程相关算法的限制,基于 OpenFOAM 的数值水池一般计算量较大,目前只适合于在空间和时间上的小范围计算模拟。但是由于 OpenFOAM 良好的可扩展性、支持大型并行计算,并可考虑波浪的完全非线性以及黏性,这也使得越来越多的研究者对此种水池进行开发。

实际的海浪是多向不规则波浪,其能量不仅分布在一定的频率范围内,而且分布在相当宽的方向范围内。在物理水池和数值水池中产生多向不规则波浪时,受波浪生成边界宽度的限制,多向波的有效区域受限于波浪的最大波向角度^[25],尤其是对方向分布较宽的波浪来说,水池的有效区域较小。为了增大多向波浪的有效区域,需要扩大计算范围,使得采用 OpenFOAM 来模拟多向不规则波浪及其与建筑物作用时的计算量大大增大。鉴于势流理论和 OpenFOAM 两种波浪水池的优缺点,本文采用耦合的方法,在耦合模型的外域采用完全非线性势流波浪模型 OceanWave3D 快速地模拟多向不规则波浪,为内域 OpenFOAM 模型提供边界波浪,把相对范围较小的内域设定在多向不规则波浪的有效区域内,在外域的波浪场稳定后进行耦合,即可在 OpenFOAM 中产生所需要的目标波浪,在保证计算精度的前提下,可以减小计算量,提高计算效率。

1 基于势流理论的 OceanWave3D 数学模型

1.1 控制方程

假设在笛卡尔坐标系中,水深为 $h(x, y)$,自由水面为 $z = \eta(x, y, t)$ 。基于势流理论的流体无黏、无旋假设,流体的速度可以表示为

$$(u, w) = (u, v, w) = (\nabla \phi, \partial_z \phi) \quad (1)$$

式中: $\nabla = (\partial_x, \partial_y)$; u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 向的速度。

完全的非线性自由表面条件可表示为下列形式:

$$\partial_t \eta = -\nabla \eta \cdot \nabla \tilde{\phi} + \tilde{w} (1 + \nabla \eta \cdot \nabla \eta) \quad (2)$$

$$\partial_t \tilde{\phi} = -g\eta \cdot \nabla \tilde{\phi} - \frac{1}{2}(\nabla \tilde{\phi} - \tilde{w}^2(1 + \nabla \eta \cdot \nabla \eta)) \quad (3)$$

式中: $\tilde{\phi}$ 为自由表面上的速度势, $\tilde{\phi} = \phi(x, y, \eta, t)$; $\tilde{w} = \partial_z \phi|_{z=\eta}$ 。为了求得时域未知量 $(\eta, \tilde{\phi})$, 需要确定自由表面处的垂向速度 \tilde{w} , 速度势 ϕ 可以通过求解 Laplace 方程得到:

$$\phi = \tilde{\phi} \quad z = \eta \quad (4)$$

$$\nabla^2 \phi + \partial_{zz} \phi = 0 \quad -h \leq z < \eta \quad (5)$$

$$\partial_z \phi + \nabla h \cdot \nabla \phi = 0 \quad z = -h \quad (6)$$

对于固壁上的速度势，非流动边界条件为

$$\mathbf{n} \cdot (\nabla, \partial) \phi = 0 \quad (x, y, z) \in \partial\Omega \quad (7)$$

其中， $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ 为固壁边界上的法向向量。

垂向坐标采用 σ 坐标变换：

$$\sigma = \frac{z + h(x, y)}{\eta(x, y, t) + h(x, y)} = \frac{z + h(x, y)}{d(x, y, t)} \quad (8)$$

这使得计算由物理域坐标 (x, y, z) 映射到计算域坐标 (x, y, σ) 。需要指出的是，对于式(8)， σ 坐标变换只在自由水面 η 有唯一值时才有效，因此对于波浪破碎问题并不适用。

在 σ 坐标下，Laplace 问题变换成如下公式：

$$\phi = \tilde{\phi} \quad \sigma = 1 \quad (9)$$

$$\nabla^2 \Phi + \nabla^2 \sigma (\partial_\sigma \Phi) + 2 \nabla \sigma \cdot \nabla (\partial_\sigma \Phi) + (\nabla \sigma \cdot \nabla \sigma + (\partial_z \sigma)^2) \partial_{\sigma\sigma} \Phi = 0 \quad 0 \leq \sigma < 1 \quad (10)$$

$$(\partial_z \sigma + \nabla h \cdot \nabla \sigma) (\partial_\sigma \Phi) + \nabla h \cdot \nabla \Phi = 0 \quad \sigma = 0 \quad (11)$$

其中， $\Phi(x, y, \sigma, t) = \phi(x, y, z, t)$ 。

在 σ 坐标中，固壁边界条件可写为

$$\mathbf{n} \cdot (\nabla, \partial_z \sigma \partial_\sigma) \phi = 0 \quad (x, y, \sigma) \in \partial\Omega \quad (12)$$

在 σ 坐标下，通过求解相关的方程和边界条件可以得到 Φ ，那么流体的运动学参数可通过以下公式得到：

$$\mathbf{u}(x, z) = \nabla \phi(x, z) = \nabla \Phi(x, \sigma) + \nabla \sigma \partial_\sigma \Phi(x, \sigma) \quad (13)$$

$$w(x, z) = \partial_z \phi(x, z) = \partial_\sigma \Phi(x, \sigma) \partial_z \sigma \quad (14)$$

在模型的开边界设置两个松弛区域分别进行造波和消波，并定义松弛参数 $c_r(x, y)$ ($0 \leq c_r(x, y) \leq 1$)

及求解得到的 $(\eta_e, \tilde{\phi}_e)$ 。每次对时间积分以后，松弛区的波浪为

$$\eta(x, y, t) = [1 - c_r(x, y)] \eta(x, y, t) + c_r(x, y) \eta_e(x, y, t) \quad (15)$$

$$\tilde{\phi}(x, y, t) = [1 - c_r(x, y)] \tilde{\phi}(x, y, t) + c_r(x, y) \tilde{\phi}_e(x, y, t) \quad (16)$$

该模型精度可根据分层层数的不同精确到任意高阶，这比传统的具有二阶精度的固定网格有明显的优势。在竖直方向上将流体分层形成与自由水面及海底地形平行拉升的网格，因此特别适合模拟复杂海底地形的波浪传播及波浪与结构物之间的相互作用问题。关于 OceanWave3D 数学模型更详细的介绍可参考 Engsig-Karup 等^[9]。

1.2 多向不规则波浪的模拟方法

本文将采用 OceanWave3D 作为耦合模型的外域，产生多向不规则波浪，与内域的两相不可压缩 Navier-Stokes/VOF 求解器进行耦合。多向不规则波面的合成方法是基于单向不规则波浪叠加方法进行拓展的。对于多向不规则波，波浪的叠加方法有双叠加法、单叠加法和频率方向对应法等^[25]。为避免波浪的“锁相”现象，本文采用单叠加法，波浪频谱采用 JONSWAP 谱，多向不规则的波面方程满足：

$$\eta(x, y, t) = a \sum_{m=1}^M \cos[(\omega_m t - k_m(x \cos \theta_m + y \sin \theta_m) + \varepsilon_m)] \quad (17)$$

式中： a 为组成波振幅； ω_m 和 k_m 分别为组成波的圆频率和波数； θ_m 为组成波的传播方向。由式(17)知，合成的波面内的组成波是一个频率对应一个方向， a 值可以采用等分能量法来求得：

$$a = \sqrt{\frac{2m_0}{M}} \quad (18)$$

式中： m_0 为 JONSWAP 波面谱的零阶矩。多向波的方向谱 $S(f, \theta)$ 表示为波浪谱 $S(f)$ 和方向分布函数 $G(f, \theta)$ 的乘积。

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \tag{19}$$

$$\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} G(f, \theta) d\theta = 1 \tag{20}$$

其中, $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ 为波浪的方向分布范围, 本文取 $\theta_{\min} = -\frac{\pi}{2}$, $\theta_{\max} = \frac{\pi}{2}$ 。考虑到式(19)和式(20)可把方向分布函数看作一类似的概率密度函数, 则其累积频率为

$$P(\theta) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta} G(f, \theta) d\theta, \quad 0 \leq P(\theta) \leq 1 \tag{21}$$

对于任一频率 f_m , 其方向角 θ_m 可随机选取, 但其分布应满足 $G(f, \theta)$ 。计算中对于每一个 f_m , 均匀选取 $P(\theta_m)$, 由式(21)通过数值迭代即可确定 θ_m , 这样选取的 θ_m 比较集中在主波向的附近, 见图 1。

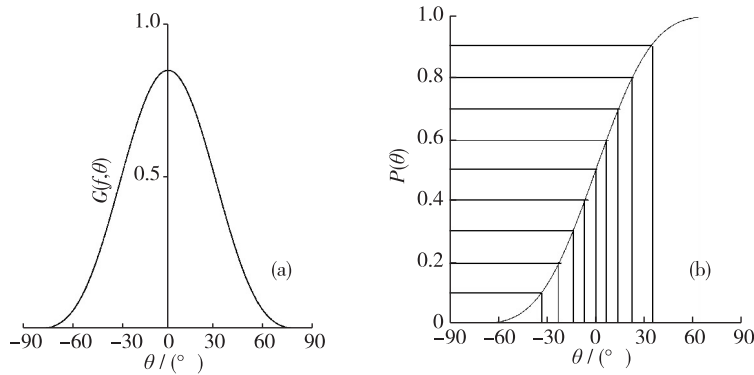


图 1 组成波方向选取示意

Fig. 1 Sketch to calculate the direction of the component wave

本文的目标方向分布函数采用光易型方向函数^[26], 即

$$G_0(s) = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) d\theta \right]^{-1} \tag{22}$$

其中, θ_0 为波浪的主方向; s 为方向分布集中度, 用来描述多向不规则波浪能量在方向范围内分布的集中程度, s 越大, 能量分布的范围越窄, 当取无穷大时 ($s = \infty$), 则为单向不规则波浪。

1.3 基于 OceanWave3D 的多向不规则波浪模拟结果

为了验证使用 OceanWave3D 模拟多向不规则波浪的有效性, 对多向不规则波浪在平底水池中的传播进行了模拟。数值水池的布置如图 2 所示, 水池长为 15 m, 宽度为 15 m, 坐标原点设在水池的左下角, 水深 $d = 0.5$ m。波浪的主波向为 0° (沿 x 方向), 造波区域固定在水池的左侧。为了消除水池边界反射的影响, 在其余三侧设置消波层, 其中迎浪面的消波层宽度为 3.0 m, 两侧向的消波层宽度为 1.0 m。多向不规则波浪的谱峰周期 $T_p = 1.0$ s, 有效波高 $H_{1/3} = 0.04$ m 时, 方向分布集中度参数 s 分别取为 5、20 和 80。

图 3 所示为 3 种方向分布集中度参数 $s = 5$ 、20 和 80 的多向不规则波浪, 在 $t = 90$ s 时刻计算区域的瞬时波面图。从图 3 可以明显地看出, 当 s 较小时 ($s = 5$), 波浪能量方向分布范围较宽, 波面的波峰线较短, 随着方向分布集中度参数 s 的增大, 波浪的能量分布范围逐渐变窄, 波浪的波峰线变长, 波面逐渐接近单向不规则波浪的传播情况。另外, 可以看出在数值水池的消波层可以很好地消除波浪的反射等问题, 从而保证了波浪场中波浪的有效性。

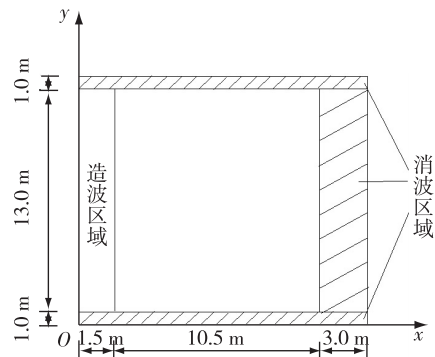


图 2 数值水池布置示意

Fig. 2 Layout of the numerical wave basin

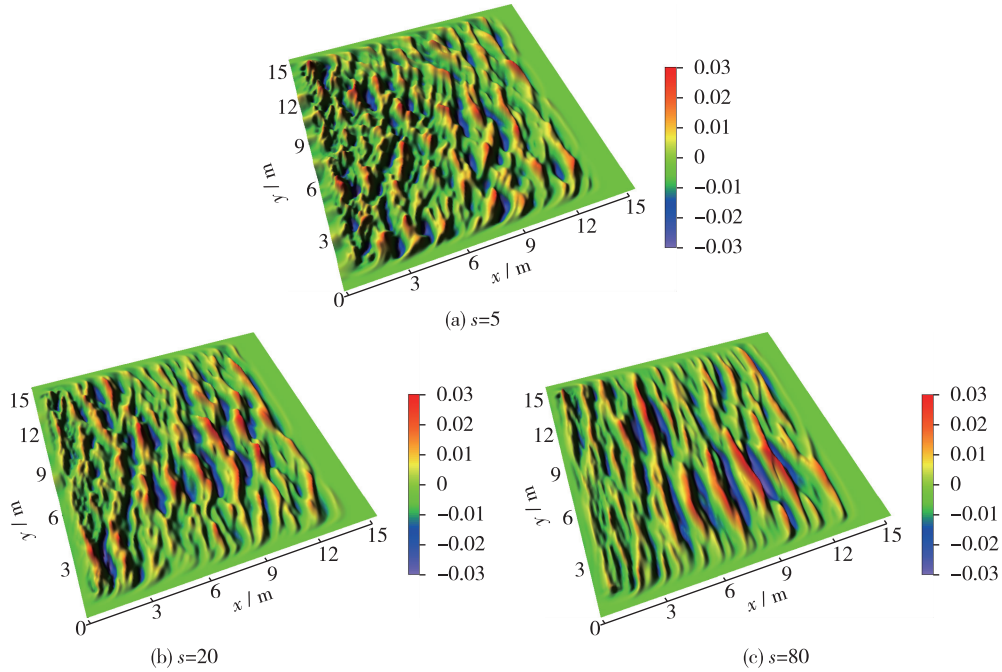


图 3 不同方向分布集中度参数 s 的情况下，在 $t=90$ s 时刻的瞬时波面

Fig. 3 Perspective view of wave surface elevation for different directional spreading parameter s at $t=90$ s

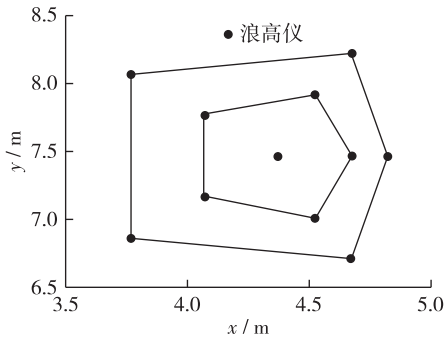


图 4 浪高仪阵列布置

Fig. 4 Layout of wave gauge array

为了分析在数值水池中产生的多向不规则波浪的频谱和方向分布函数，在波浪水池的有效区域内布置如图 4 所示的浪高仪阵列来记录波面的时间过程线。波浪采样频率为 41.5 Hz (时间间隔 $\Delta t = 0.024$ s)，共采集 8 192 个数据点。

图 5 为模拟波浪计算分析所得多向不规则波浪的频谱和方向分布函数与目标波浪的频谱和方向分布函数的对比。通过分析模拟的多向不规则波浪所得到的频谱和方向分布与目标谱基本吻合，说明本文中采用 OceanWave3D 产生的多向不规则波浪有效。

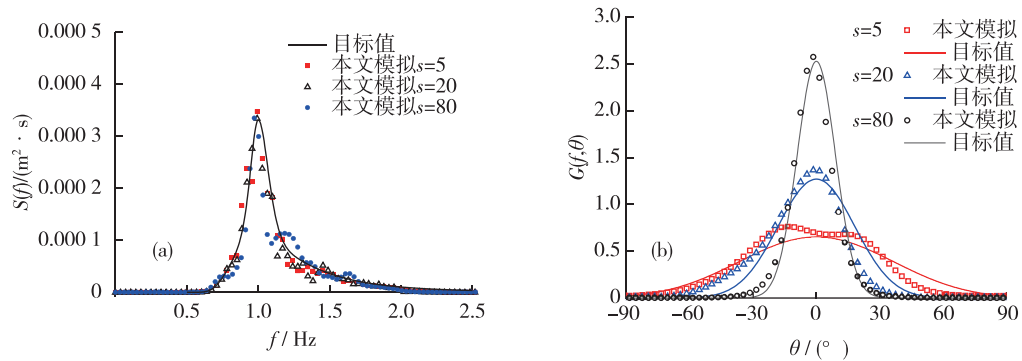


图 5 不同方向分布集中度参数 s 时，模拟得到的频谱、方向分布函数与目标值的对比

Fig. 5 Comparison of the simulated wave spectra and directional spreading functions the targets for different values of s

2 基于 OceanWave3D 和 OpenFOAM 的耦合模型及其模拟结果

2.1 两相不可压缩 Navier-Stokes/VOF 求解器

在实际中, 通常需要在固体边界及波浪破碎的区域考虑黏性效应, 为了更精确地模拟波浪的传播及其对建筑物的作用, 越来越多的研究者通过求解 Navier-Stokes 方程来开发数值波浪水池。本文采用由 Jacobsen 等^[20]基于 OpenFOAM 采用雷诺平均 Navier-Stokes 方程结合流体体积法求解自由表面牛顿流的求解器 waves2Foam 作为内域求解器, 通过与外域 OceanWave3D 相耦合, 在内域中即可获得目标波浪。

在欧拉坐标系中, 对于两相不可压缩流体, 质量和动量守恒的控制方程可写为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{u}^T = -\nabla p^* - (g \cdot x) \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \quad (24)$$

式中: $\nabla = (\partial_x, \partial_y, \partial_z)$ 为三维梯度算子; $\mathbf{u} = (u, v, w)$; g 为重力加速度; p^* 为附加压力, 与总压力 p 的关系为

$$p^* = p - \rho g \cdot x \quad (25)$$

在气液两相流体中使用 VOF 方法时, α 代表体积分函数, $\alpha = 1$ 代表液体, $\alpha = 0$ 代表气体, $0 < \alpha < 1$ 时表示两种流体的界面区域。

在建立运动方程时, 将两种流体作为一种混合流体来考虑, 那么该混合流体的密度和动力黏性系数为:

$$\rho = \alpha \rho_w + (1 - \alpha) \rho_a \quad (26)$$

$$\mu = \alpha \mu_w + (1 - \alpha) \mu_a \quad (27)$$

式中: ρ_w 和 ρ_a 分别为液体和气体的密度; μ_w 和 μ_a 分别为液体和气体的动力黏性系数。

体积分函数 α 需满足:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} \alpha + \nabla \cdot \mathbf{u}_i \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (28)$$

式中: 向量 \mathbf{u}_i 为相对速度。式(28)中左边第 3 项只对气液交界面区域产生影响。

在 OpenFOAM 中采用有限体积法离散框架, 将计算域离散成单元体后, 所有物理量离散分布在单元体中心上。方程的离散即是对微分形式的控制方程在各个单元体上进行时间空间上的积分, 以保证质量和动量守恒, 在这里时间积分采用隐式欧拉格式。然后将单元体上的积分方程转化为用单元体中心上的物理量表示代数方程, 最后求解得到方程组的数值解。在数值计算中, 体积分函数方程(28)中的对流项采用 Gauss MUSCL 格式, 为构造界面而添加的一项采用 Gauss interface Compression 格式。速度压力场采用 PISO 算法求解; 离散后的线性方程组采用预条件双共轭梯度法求解。关于 waves2Foam 求解器更详细的介绍、模型验证和使用可参考 Jacobsen 等^[20]、Paulsen 等^[22]和 Gadelho 等^[27], Paulsen 等^[22]对 waves2Foam 中网格划分对数值结果的收敛性进行了讨论, 本文在水平方向上每个波长取 80 个网格, 在竖直方向上每个波高划分 15 个网格, 在计算过程中限定柯朗数 Co 小于 0.25。

2.2 基于 OceanWave3D 和 OpenFOAM 的耦合模型

为充分发挥势流理论和 Navier-Stokes 方程两种方法建立的数值波浪水池的优点, 本文将建立二者的耦合模型。耦合模型示意如图 6 所示, 图中斜线阴影部分为势流求解器 OceanWave3D 的造波区和消波区, 横线阴影部分为 OpenFOAM 与 OceanWave3D 的耦合区域, 在耦合模型的外域采用完全非线性势流理论 (OceanWave3D) 产生目标波浪, 耦合区域可视为内域数值造波时所使用的松弛区, 通过耦合区域将基于势流理论产生的波浪信号传递至基于 OpenFOAM (waves2Foam) 建立的内域数值模型, 以考虑波浪的黏性等特点, 更真实地模拟波浪的传播。该耦合模型可以减小计算速度较慢的 OpenFOAM 水池的计算区域, 从而提高计算效率。

常见的耦合方法有两种：单向耦合和双向耦合。本文将采用单向耦合的方法在耦合区域进行耦合，这使得内域 OpenFOAM 只接受来自外域的波浪信号，而不会对外域波浪场产生干扰。

在耦合区域中，流体速度(u, v, w)和体积分函数 α 在每个时间步都根据下式进行计算：

$$\psi = \chi(\delta)\psi_{\text{target}} + [1 - \chi(\delta)]\psi_{\text{com}} \quad \psi \in \{u, v, w, \alpha\} \quad (29)$$

式中： ψ_{target} 为势流求解器得到的在不同空间不同时间步的目标解； ψ_{com} 为在 OpenFOAM 中通过求解式(23)、式(24)和式(28)得到的数值解。权重因子 χ 定义为

$$\chi(\delta) = 1 - \frac{\exp(\delta^\beta) - 1}{\exp(1) - 1} \quad (30)$$

其中， $\delta \in [0, 1]$ 为局部坐标，且

$$\delta = \begin{cases} 0 & \text{外域边界} \\ 1 & \text{内域边界} \end{cases} \quad (31)$$

β 为耦合区域强度的形状因子，可取 $\beta=3.5$ ，事实上， β 的取值对耦合区域内模拟结果效果的影响很小。需要指出的是，对于两相流体中的气相，由于在势流求解器中目标解未知，因此假定该部分流体静止，即 $\psi_{\text{target}}=0$ 。

通过式(30)和式(31)，可以确保在势流求解器外域边界的目标解 $\psi=\psi_{\text{target}}$ 。内域的反射和散射波在向外域边界传播的过程中逐步衰减至目标波浪，从而避免了外域边界处的二次反射，保证了波浪的有效性。

需要指出的是，由于基于势流理论的 OceanWave3D 网格尺寸较大，而 OpenFOAM 的网格相对较小，因此在 OceanWave3D 和 OpenFOAM 耦合的边界上对由势流理论计算得到的流体速度(u, v, w)和体积分函数 α 进行插值，从而得到 OpenFOAM 边界接口上的入射波浪信号，然后再基于式(29)进行计算。

2.3 单向波在耦合模型中传播的模拟

为了研究耦合模型的有效性，首先模拟了单向波浪在水槽中的传播。耦合模型的设置如图6所示，OpenFOAM 计算区域长 8.0 m，水深 $d=0.5$ m。斜线阴影区域为外域 OceanWave3D 的松弛区域，横线阴影区域为内域和外域之间的耦合区域。

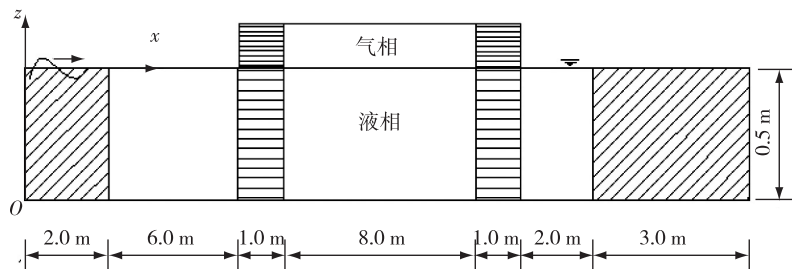


图6 模拟单向波传播的耦合模型示意

Fig. 6 Sketch of the coupling model to compute the propagation of unidirectional wave

图7和图8分别为规则波(波高 $H=0.05$ m, 周期 $T=2.0$ s)和单向不规则波浪(有效波高 $H_{1/3}=0.04$ m, 谱峰周期 $T_p=1.0$ s, 波浪频谱采用 JONSWAP 谱)在耦合模型中传播时, 分别在测点 $x=9.77$ m、11.28 m、13.53 m 和 15.78 m 处测得由外域和内域模型计算所得的波面对比图。可以发现, 波浪在 OpenFOAM 和 OceanWave3D 中的传播一致, 说明耦合模型可以很好地模拟出外域基于势流理论模拟得到的波浪。

2.4 基于耦合模型多向不规则波浪传播模拟结果

基于上述耦合模型, 对多向不规则波浪的传播进行了模拟。模拟多向不规则波浪传播的耦合模型布置示意图如图9所示, 外域水池长 15 m, 宽 15 m, 造波、消波层分别为 2 m 和 3 m, 水深 d 为 0.5 m; 内域 OpenFOAM 水池布置在外域多向不规则波浪水池的有效区域内(图9中虚线圆所示区域即为外域水池的有效区域), 内域水池长 5.6 m, 宽 6 m。图10为 $t=39$ s 时刻, 有效波高 $H_{1/3}=0.04$ m, 谱峰周期 $T_p=1.0$ s, 方向分布集中度参数 $s=5$ 和 80 时的多向不规则波浪在耦合模型的内域中(布置情况见图9)模拟所得波浪传播情况。

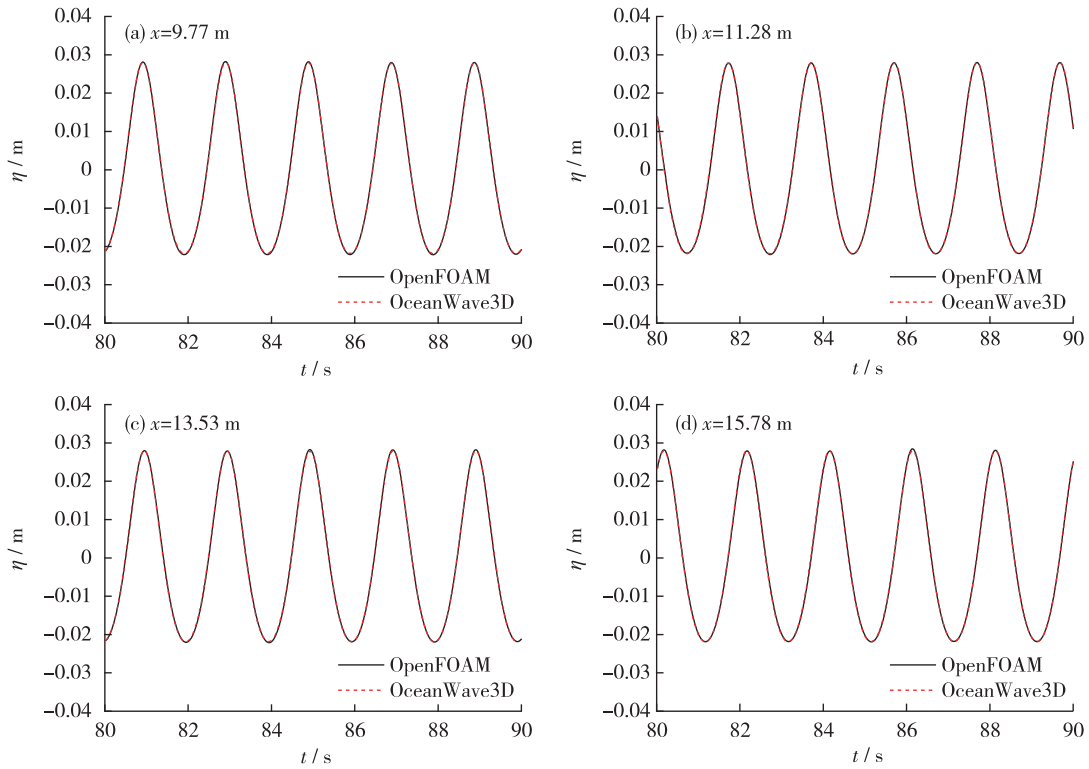


图 7 规则波传播时, 内域和外域模型计算所得相同测点处的波面对比情况

Fig. 7 Regular wave surface elevation in different points for OpenFOAM and OceanWave3D

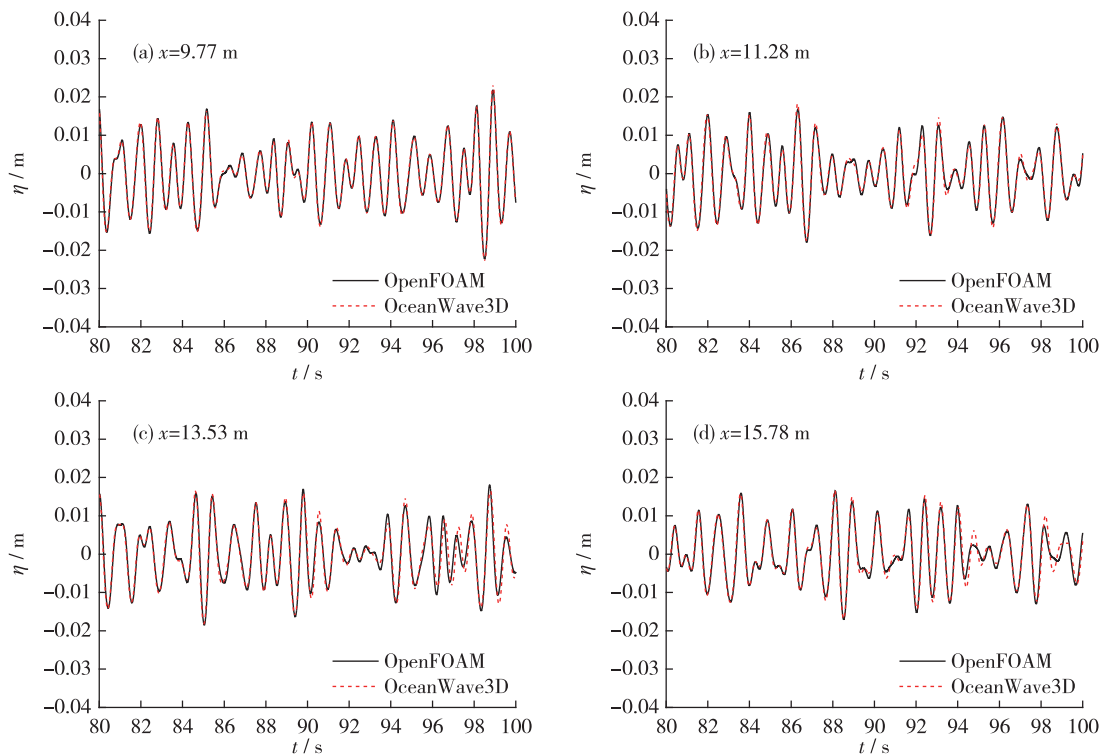
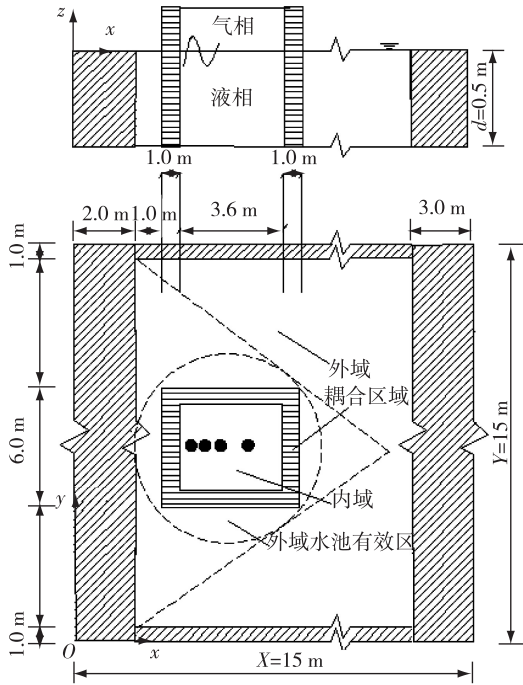


图 8 单向不规则波传播时, 内域和外域模型计算所得相同测点处的波面对比情况

Fig. 8 Unidirectional random wave surface elevation at the same points in the inner and outer domain



(斜线阴影区域为外域 OceanWave3D 的松弛区域，
横线阴影区域为内域和外域之间的耦合区域，
为沿水池中心线布置的测点)

图 9 模拟多向不规则波浪传播的耦合模型示意

Fig. 9 Layout of the coupling model for multidirectional irregular wave

可以看出在内域中模拟得到的波面与图 3 中采用 OceanWave3D 得到的不同方向分布集中度参数所对应的波面类似，当 $s=5$ 时，波面的波峰线较短，随着方向分布集中度参数 s 的增大，波浪的波峰线变长；当 $s=80$ 时，波面逐渐接近单向不规则波浪的传播情况。

为验证耦合模型在模拟多向不规则波浪时的有效性，在计算水池中布置一系列测点，如图 9 所示。在模拟多向不规则波浪与建筑物作用时，一般将建筑物设置在水池有效区域的中心位置，因此在这里将测点布置在沿水池中心线上，测点坐标分别为 $(4.3719, 7.4623)$ 、 $(4.8241, 7.4623)$ 、 $(5.5779, 7.4623)$ 和 $(6.6332, 7.4623)$ 。图 11 和图 12 分别为在模拟有效波高 $H_{1/3}=0.04$ m、谱峰周期 $T_p=1.0$ s、方向分布集中度参数 $s=5$ 和 $s=80$ 的多向不规则波浪在耦合模型中传播时，由外域模型和内域模型计算的沿水池中心线上测点处的波面时间过程线的对比图。可以看出，内域中采用 OpenFOAM 模拟得到的波面与外域中采用基于势流理论 OceanWave3D 计算的波面吻合较好。内域和外域模拟得到的有效波高 $H_{1/3}$ 相差 1.7%，有效周期 $T_{1/3}$ 相差小于 1.0%，因此，采用本文中所建立的耦合模型可以很好地模拟多向不规则波浪的传播。

需要说明的是，对于多向不规则波浪水池，受波浪生成边界宽度的限制，多向波的有效区域受限于波浪的最大波向角度^[25]，尤其是对较小的方向分布集中度参数的波浪

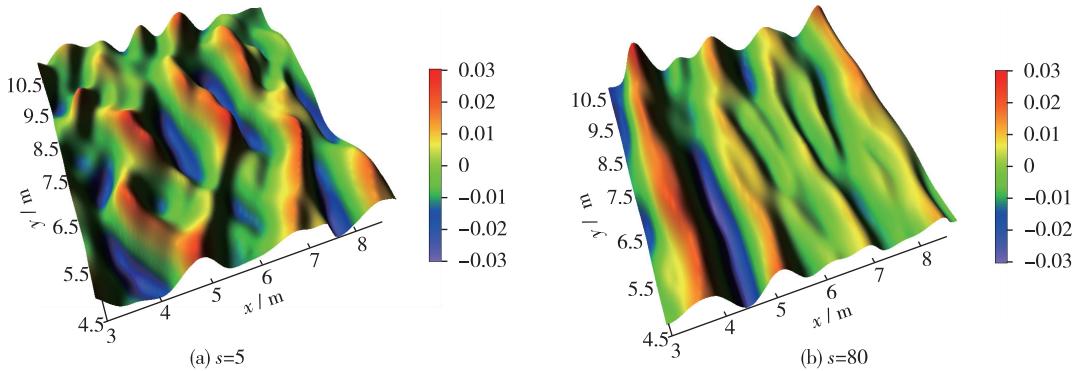


图 10 在 $t=39$ s 时刻，多向不规则波浪在耦合模型内域中的波面

Fig. 10 Perspective view of multidirectional irregular wave propagates in the inner domain of the coupling model at $t=39$ s

来说，水池的有效区域较小。为了增大多向波浪的有效区域，需要扩大计算范围，使得采用 OpenFOAM 来模拟多向不规则波浪及其与建筑物作用时的计算量大大增加。在耦合模型中，只需把相对范围较小的内域设定在由 OceanWave3D 产生的多向不规则波浪的有效区域内，由外域模型提供边界波浪，可在 OpenFOAM 中产生所需要的目标波浪，进而可以较快地模拟波浪的传播及其与结构物的作用。事实上，多向不规则波浪的传播是一个三维问题，在本例中的内域水池中的网格数量为 574 万。若不使用耦合方法而直接在 OpenFOAM 中产生所需要的多向不规则波浪，OpenFOAM 水池则需涵盖整个外域计算的区域，网格数量会成倍增加，使得计算成本极高。

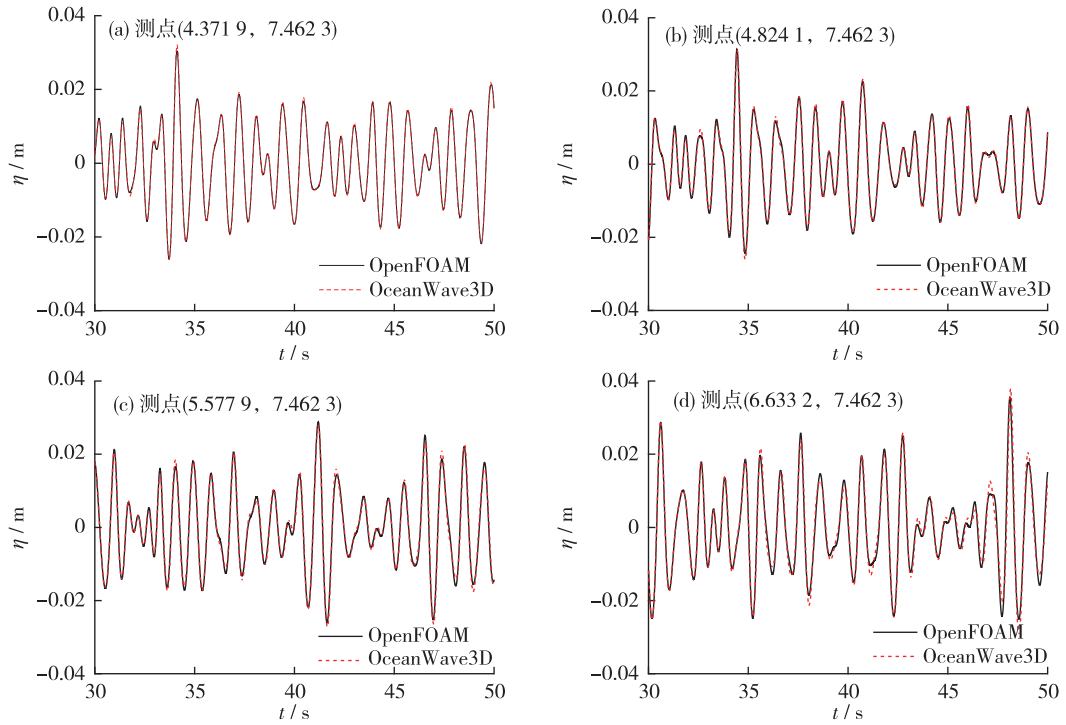


图 11 耦合模型中, 外域和内域沿水池中心线上不同测点处测得的波面时间过程线对比 ($s=5$)

Fig. 11 Comparisons of the wave surface elevation from the outer and the inner domain in the coupling model at different points ($s=5$)

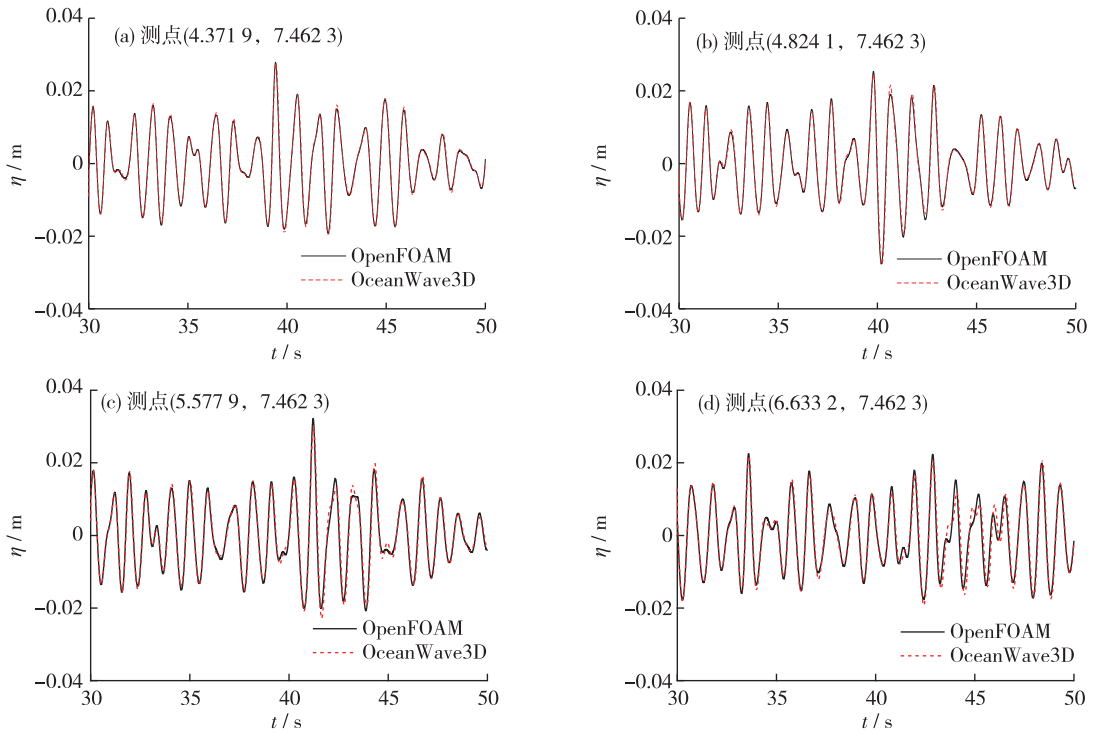


图 12 耦合模型中, 外域和内域沿水池中心线上不同测点处测得的波面时间过程线对比 ($s=80$)

Fig. 12 Comparisons of the wave surface elevation from the outer and the inner domain in the coupling model at different points ($s=80$)

3 结 论

为了克服基于 Navier-Stokes 方程的黏性水池计算量大、速度较慢的缺点,本文基于势流理论和考虑黏性的 Navier-Stokes 方程建立了耦合模型。在耦合模型的外域,通过基于完全非线性势流理论数值模型模拟多向不规则波浪,计算速度较慢的内域 OpenFOAM 水池设置在外域多向不规则波浪水池的有效区域内。耦合区域可视数值造波时所使用的松弛区,通过耦合区域将基于势流理论产生的波浪信号传递至内域模型。在外域中采用基于势流理论的 OceanWave3D 和内域中采用 OpenFOAM 模拟得到的波面吻合较好,内、外域模拟得到的有效波高 $H_{1/3}$ 相差 1.7%,有效周期 $T_{1/3}$ 小于 1.0%。耦合模型相比于单纯的 OpenFOAM 模型,可以减小 OpenFOAM 模型的计算区域,从而减小计算量。

参考文献:

- [1] TANIZAWA K, TAGUCHI H, SAWADA H. Application of NWT to the design of ART [C]//Proc of the 13th International Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003: 307-314.
- [2] GRILLI S, GILBERT R, LUBIN P, et al. Numerical modeling and experiments for solitary wave shoaling and breaking over a sloping beach [C]//Proc of the 14th International offshore and polar engineering conference IGARSS. Toulon: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004: 306-312.
- [3] LACHAUME C, BIAUSSER B, GRILLI S T, et al. Modeling of breaking and post-breaking waves on slopes by coupling of BEM and VOF methods [C]//Proc of the 13th Offshore and Polar Engineering Conference. Honolulu: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003: 353-359.
- [4] BAI W, TAYLOR R E. Numerical simulation of fully nonlinear regular and focused wave diffraction around a vertical cylinder using domain decomposition [J]. Applied Ocean Research, 2007, 29(1/2): 55-71.
- [5] 房克照, 邹志利. 应用二阶完全非线性 Boussinesq 方程模拟破碎波浪[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 96-103. (FANG K Z, ZOU Z L. Simulation of breaking waves using a second-order fully nonlinear Boussinesq-type model[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 96-103. (in Chinese))
- [6] MA Q W, WU G X, TAYLOR R E. Finite element simulation of fully non-linear interaction between vertical cylinders and steep waves: Part 1: methodology and numerical procedure [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2001, 36(3): 265-285.
- [7] MA Q W, WU G X, TAYLOR R E. Finite element simulations of fully non-linear interaction between vertical cylinders and steep waves: Part 2: numerical results and validation [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2001, 36(3): 287-308.
- [8] WANG C Z, WU G X. Interactions between fully nonlinear water waves and cylinder arrays in a wave tank [J]. Ocean Engineering, 2010, 37(4): 400-417.
- [9] ENGSIG-KARUP A P, BINGHAM H B, LINDBERG O. An efficient flexible-order model for 3-D nonlinear water waves [J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(6): 2100-2118.
- [10] BINGHAM H B, ZHANG H. On the accuracy of finite-difference solutions for nonlinear water waves [J]. Journal of Engineering Mathematics, 2007, 58(1/2/3/4): 211-228.
- [11] 宁德志, 滕斌, 勾莹, 等. 无限水深内完全非线性数值波浪水槽建立[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(6): 937-943. (NING D Z, TENG B, GOU Y, et al. Foundation of fully nonlinear numerical wave tank in an infinite water-depth [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(6): 937-943. (in Chinese))
- [12] 宁德志, 滕斌, 谭丽, 等. 完全非线性聚焦波浪的数值模拟[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 875-881. (NING D Z, TENG B, TAN L, et al. Numerical simulation of fully nonlinear focused wave groups [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 875-881. (in Chinese))
- [13] NING D Z, TENG B. Numerical simulation of fully nonlinear irregular wave tank in three dimension [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2007, 53(12): 1847-1862.
- [14] DONG C M, HUANG C J. Generation and propagation of water waves in a two-dimensional numerical viscous wave flume [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering-Asce, 2004, 130(3): 143-153.

- [15] HUANG C J, ZHANG E C, LEE J F. Numerical simulation of nonlinear viscous wavefields generated by piston-type wavemaker [J]. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*, 1998, 124(10): 1110-1120.
- [16] PARK J C, KIM M H, MIYATA H. Fully non-linear free-surface simulations by a 3-D viscous numerical wave tank [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1999, 29(6): 685-703.
- [17] PARK J C, KIM M H, MIYATA H, et al. Fully nonlinear numerical wave tank (NWT) simulations and wave run-up prediction around 3-D structures [J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(15): 1969-1996.
- [18] PARK J C, UNO Y, SATO T, et al. Numerical reproduction of fully nonlinear multi-directional waves by a viscous 3-D numerical wave tank [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(11/12): 1549-1565.
- [19] MORGAN G C J, ZANG J. Using the RasInterFoam CFD Model for non-linear wave interaction with a cylinder [C]//Proc of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2010: 418-423.
- [20] 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.
- [21] JENSEN B, JACOBSEN N G, CHRISTENSEN E D. Investigations on the porous media equations and resistance coefficients for coastal structures [J]. *Coastal Engineering*, 2014, 84: 56-72.
- [22] PAULSEN B T, BREDMOSE H, BINGHAM H B, et al. Forcing of a bottom-mounted circular cylinder by steep regular water waves at finite depth [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2014, 755: 1-34.
- [23] 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.
- [24] 蒋昌波, 邓涯, 姚宇, 等. 孤立波作用下排柱附近流动特性数值分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(8): 1441-1447. (JIANG C B, DENG Y, YAO Y, et al, Numerical analysis of flow characteristics around piles under solitary waves[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(8): 1441-1447. (in Chinese))
- [25] 俞聿修, 柳淑学. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011: 257-266. (YU Y X, LIU S X. *Random wave and its applications for engineering* [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2011: 257-266. (in Chinese))
- [26] LONGUET-HIGGINS M S, CARTWRIGHT D E, SMITH N D. Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of floating buoy [C]//Proc of the Conference in Ocean Wave Spectra. Englewood Cliffs: Prentice-hall Inc, 1963: 111-136.
- [27] GADELHO J F M, LAVROV A, GUEDES SOARES C. Modeling the effect of obstacles on the 2-D wave propagation with OpenFOAM: developments in maritime transportation and exploitation of sea resources-Guedes Soares López Pena(eds) [Z]. London: Taylor & Francis Group, 2014: 1057-1065.

Numerical research on multidirectional waves progresses on the coupling model based on the potential theory and OpenFOAM*

JI Xinran^{1,2}, LIU Shuxue¹, Bo T. PAULSEN^{2,3}, Harry B. BINGHAM²

(1. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 2. *Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, 2800, Denmark*; 3. *Deltares, Delft 2629HD, Netherlands*)

Abstract: The numerical wave tank based on the potential theory simulates the wave progression and wave-structure interaction quickly, but it is based on the assumption of non-viscous. In reality, viscous effects are always considered at solid boundaries and wave-broken areas. For the viscous numerical wave basin based on solving the Navier-Stokes equation, however, it has the insufficient of large amount of calculation. Currently, the coupling method is used to simulate wave progression to reduce the amount of calculation and enhance the efficiency. In the outer domain, multidirectional irregular waves are generated from potential theory, and in the inner domain, the Navier-Stokes equation is solved in combination the VOF method to track the free surface.

Key words: potential theory; OpenFOAM; coupling model; multidirectional irregular wave

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51579038; No. 51490672).