

文章编号: 1000-4882 (2022) 02-0030-11

# 基于势流-黏流双向耦合模型的数值造波

钟文杰, 陈 帆, 万德成\*

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL) 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

## 摘 要

采用开源程序 OceanWave3D 和 OpenFOAM 提出了一种势流-黏流双向耦合数值造波方法。为提高数值稳定性, 在势流域内的重叠区域内建立松弛区域。松弛区域的波高从黏流域直接插值获取, 而速度势则根据水面边界条件方程用速度插值间接计算。基于 4 阶 Runge-Kutta 算法实现时间推进, 并通过线性波、非线性波和不规则波, 包括波浪正向、反向传播和二维、三维数值模拟的算例进行验证。计算结果表明, 论文的势流-黏流双向耦合模型准确高效, 可应用于实际海洋工程波浪的模拟。

**关键词:** 势流模型; 黏流模型; 数值造波; 非线性波; 不规则波

**中图分类号:** U661.1

**文献标志码:** A

## 0 引 言

波浪运动数值模拟是海洋工程领域的研究热点。准确高效的数值造波需要兼顾数值精度和计算效率。数值造波有两种实现方式, 即单一模型和多模型耦合。采用单一模型生成的波浪通常不能在数值精度和计算效率方面均取得理想效果。例如, 势流模型计算效率高, 可应用于变水深波浪传播、波浪-结构物相互作用等的计算, 然而势流理论假设流体无黏无旋, 不能反映真实流体旋涡, 也不能准确模拟波浪破碎。黏流模型能体现和模拟流体的非线性特征, 若配合自由水面模型, 能充分捕获或跟踪水面运动, 因此获得广泛的研究和应用<sup>[1-6]</sup>。但是, 黏流模型的求解精度与网格数量直接相关, 因而对计算资源要求较高。

多模型耦合, 如势流-黏流耦合, 可发挥势流模型的效率优势和黏流模型的精度优势, 是近年来数值造波研究的重要方向。势流-黏流耦合通过流场或计算域分解来实现。流场分解, 即谱波显式纳维尔-斯托克斯方程 (spectral wave explicit Navier-Stokes equations, SWENSE) 法, 将波浪场分解为入射场和扰动场, 分别由势流模型和黏流模型求解, 首先是按单相流问题进行数值模拟<sup>[7-8]</sup>。两相流 SWENSE 法起初仅用于速度场的分解<sup>[9]</sup>, 不能充分发挥入射波浪场的网格无关性。用于流场完全分解的两相流 SWENSE 法则需要引入修正的欧拉方程<sup>[10]</sup>。SWENSE 法的优点是, 采用势流模型计算的入射波浪场不受网格分辨率影响, 因此, 在远场可采用稀疏网格而仅在结构物附近的剧烈扰动区域采用密集网格, 以显著提高计算效率。与流场分解相比, 通过计算域分解实现势流-黏流耦合的研究得到更为广泛的应用。计算域分解的出发点是, 在波浪-结构物相互作用中, 剧烈的波浪运动仅发生在结构物附近, 而在远离结构物的大部分区域内波浪运动较为缓和, 近似满足势流理论中的无黏无旋假设。因此, 仅在结

收稿日期: 2021-10-08; 修改稿收稿日期: 2022-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52101324, 52101366, 52131102, 51879159); 国家重点研发计划项目(2019YFB1704200, 2019YFC0312400)

构物周围建立黏流域而在其他区域采用势流模型, 以实现准确高效的数值造波。势流-黏流耦合可分为单向耦合<sup>[11-14]</sup>和双向耦合<sup>[15-18]</sup>, 分别采用单向和双向数据传递。Iafrafi 等<sup>[15]</sup>采用势流-黏流耦合模型沿垂向分解计算域, 研究水底结构物的绕流问题。计算域上部为自由水面黏流域, 下部为结构物所在的势流域。对比了重叠和非重叠区域两种耦合方式。这两种耦合方式均可得到满意的计算结果, 其中重叠区域的耦合方式数值误差更小。计算域垂向分解存在一个弊端, 即对各子域都要设置入口边界和出口边界。Zhang 等<sup>[16]</sup>提出了水平分解计算域的非重叠区域势流-黏流耦合, 即计算子域仅通过单一界面连接。研究表明, 对于非重叠区域的势流-黏流耦合, 采用匹配交界面波面高度的隐式时间格式这样的强耦合形式相比于采用显示时间格式的弱耦合形式, 其计算精度更高。Colicchio 等<sup>[17]</sup>研究了水平分解计算域中重叠区域的势流-黏流耦合, 并给出了数据传递和变量转换方式, 以匹配接收子域。研究发现重叠区域方式相比于非重叠区域方式, 其数值稳定性更好。Kim 等<sup>[18]</sup>给出了一种简明的沿水平方向分解计算域的重叠区域势流-黏流耦合模型, 并指出重叠区域的宽度对计算结果影响较小, 建议重叠区域的宽度取为波长的 10%到 15%。

上述研究表明, 现有的势流-黏流耦合方法大多采用闭源边界元 (BEM) 程序作为势流模型<sup>[16-18]</sup>。本文采用开源程序 OceanWave3D<sup>[19]</sup>和 OpenFOAM-V2012 分别模拟势流和黏流, 提出一种新的重叠区域势流-黏流耦合模型, 用重叠区域方式连接势流域和黏流域。基于 OceanWave3D 程序的虚拟点 (ghost point) 方法, 建立黏流域向势流域反馈数据的接口。为提高势流模型的数值稳定性, 在势流域内的重叠区域中建立松弛区域。松弛区域的波面高度从黏流域直接插值获取, 速度势则根据自由水面的动力学边界条件间接计算获得。计算结果表明, 本文提出的势流-黏流双向耦合模型准确高效, 可应用于波浪运动和波浪-结构物相互作用的数值模拟。

## 1 数学模型

### 1.1 势流模型

采用 OceanWave3D 程序求解非线性势流方程组。式 (1) ~ 式 (5) 是笛卡尔坐标系下的拉普拉斯方程及其边界值和边界条件。其中速度势  $\varphi(x, y, z, t)$  和波高  $\eta(x, y, t)$  是待求变量。  $z = 0$  平面位于静水面,  $z$  轴垂直向上,  $x$  轴指向波浪传播方向。

$$\nabla_{\text{H}}^2 \varphi + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad -h(x, y) \leq z < \eta \quad (1)$$

$$\varphi = \tilde{\varphi}, \quad z = \eta \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \nabla_{\text{H}} h(x, y) \cdot \nabla_{\text{H}} \varphi = 0, \quad z = -h(x, y) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla_{\text{H}} \eta \cdot \nabla_{\text{H}} \tilde{\varphi} + \tilde{w}(1 + \nabla_{\text{H}} \eta \cdot \nabla_{\text{H}} \eta) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2}(\nabla_{\text{H}} \tilde{\varphi} \cdot \nabla_{\text{H}} \tilde{\varphi} - \tilde{w}^2(1 + \nabla_{\text{H}} \eta \cdot \nabla_{\text{H}} \eta)) \quad (5)$$

式中,  $\tilde{\varphi}$  和  $\tilde{w}$  分别为自由水面上的速度势和垂向速度,  $h(x, y)$  为静水深度, 符号  $\nabla_{\text{H}} = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)$ 。

为使势流计算域的上边界不随时间变化, 采用式 (6) 对变量作  $\sigma$  坐标转换。式 (7) ~ 式 (9) 为变换后的拉普拉斯方程及其边界值, 其中,  $\varphi(x, y, z, t)$  变换为  $\Phi(x, y, \sigma, t)$ 。从而, 式 (7) ~ 式 (9) 和式 (4) ~ 式 (5) 共同构成了封闭的势流模型。

$$\sigma = \frac{z + h(x, y)}{\eta(x, y, t) + h(x, y)} \quad (6)$$

$$\nabla_H^2 \Phi + \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \nabla_H^2 \sigma + 2 \nabla_H \sigma \cdot \nabla_H \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \right) + \left( \nabla_H \sigma \cdot \nabla_H \sigma + \left( \frac{\partial \sigma}{\partial z} \right)^2 \right) \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \sigma^2} = 0, \quad 0 \leq \sigma < 1 \quad (7)$$

$$\Phi = \tilde{\varphi}, \quad \sigma = 1 \quad (8)$$

$$\left( \frac{\partial \sigma}{\partial z} + \nabla_H h(x, y) \cdot \nabla_H \sigma \right) \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} + \nabla_H h(x, y) \cdot \nabla_H \Phi = 0, \quad \sigma = 0 \quad (9)$$

用有限差分法 (finite difference method, FDM) 进行数值离散, 并用 4 阶 Runge-Kutta (R-K) 算法求解。在 FDM 中, 对于内部点, 用对称形式离散和满足拉普拉斯方程 (式 (7)); 对于边界点, 因为边界外没有离散点信息, 用非对称形式离散和满足边界条件 (式 (9))。研究表明, 边界处离散形式的变换易引起数值振荡<sup>[20]</sup>。在 OceanWave3D 程序中, 为了能在边界离散点求解拉普拉斯方程, 在边界外引入虚拟点, 如图 1 所示。图中黑点表示方程离散的网格点, 白点表示参与方程离散的相邻网格点, 虚线点表示计算域外引入的虚拟点。如图 1(b) 所示, 随着虚拟点的引入, 在边界点可以采用对称形式离散和求解拉普拉斯方程, 而虚拟点的变量值可通过图 1(a) 所示的离散边界条件计算。对于一个边界点而言, 实际参与方程求解的 FDM 离散点分布如图 1(c) 所示。这样的处理方式可以看作是将边界条件隐式地纳入拉普拉斯方程的离散求解中, 并可在线性代数方程的系数矩阵中得到对角线系数占优的效果。

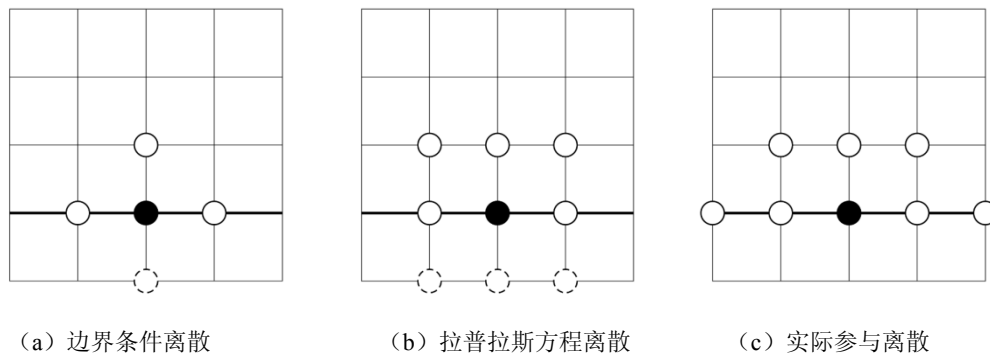


图 1 OceanWave3D 程序中虚拟点布置和边界点 FDM 离散

## 1.2 黏流模型

自由水面采用流体体积 (volume of fluid, VOF) 模型捕获。在 VOF 模型中, 通过体积分数  $\alpha$  确定自由水面。体积分数定义为网格单元中水相分的占比。体积分数的输运方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_r \alpha) + \nabla \cdot (\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)) = 0 \quad (10)$$

式中,  $\alpha$  为体积分数; 方程左侧第三项是人工压缩项, 以获得精确的自由水面;  $\mathbf{u}_r$  为压缩速度, 用水和空气的相对速度计算。

为了保证压缩方向垂直于水面, 将压缩速度表示为体积分数梯度的函数。密度和黏度分别由式 (11) 和式 (12) 计算:

$$\rho = \alpha\rho_w + (1 - \alpha)\rho_a \tag{11}$$

$$\mu = \alpha\mu_w + (1 - \alpha)\mu_a \tag{12}$$

式中,  $\rho_w$  和  $\rho_a$  分别为水和空气的密度,  $\mu_w$  和  $\mu_a$  分别为水和空气黏度。

在势流-黏流耦合中, 黏流模型应用在势流理论假设不能适用的区域, 即在结构物附近发生波浪破碎、旋涡脱落等现象的区域。用 OpenFOAM 程序作为黏流域的两相流程序。对于黏性不可压缩两相流, 质量和动量守恒方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot \left( \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right) + \sigma_w \kappa \nabla \alpha \tag{14}$$

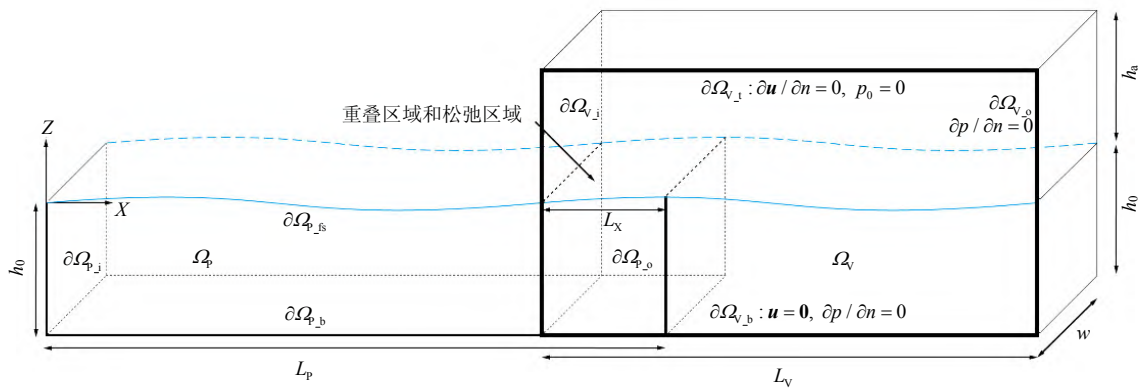
式中, 速度向量  $\mathbf{u}$  和压强  $p$  为待求变量;  $\sigma_w$  为表面张力系数;  $\kappa$  为自由水面的平均曲率;  $\rho$  为重力加速度;  $\mathbf{x}$  为位移矢量;  $p_d$  为动压力,  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ , 此处采用  $p_d$  形式以简化压力边界条件的设置; 自由水面张力引起的压力梯度由式 (14) 右侧第 4 项考虑。

OpenFOAM 程序基于同位网格, 采用有限体积法 (finite volume method, FVM) 进行数值离散, 在每个时间步依次求解式 (10)、式 (13) 和式 (14), 其中速度-压强耦合由 PIMPLE 算法求解<sup>[21-22]</sup>。

## 2 势流-黏流双向耦合方法

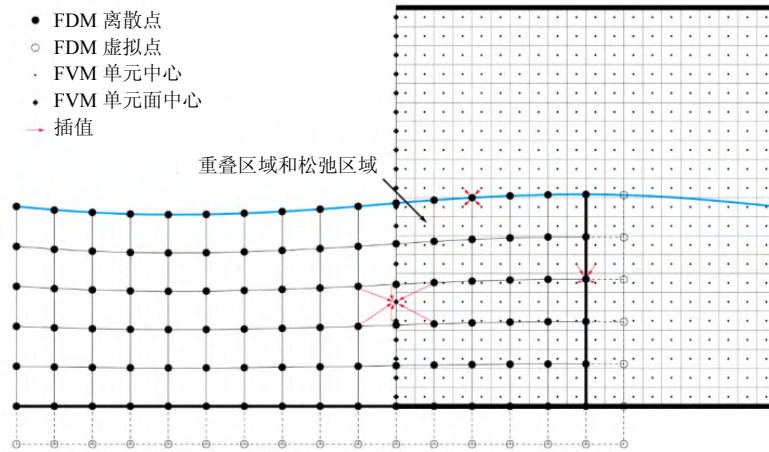
### 2.1 耦合策略

图 2 所示为势流-黏流双向耦合示意图。假定计算域底面为平整底面, 计算域上游为势流域  $\Omega_p$ , 下游为黏流域  $\Omega_v$ , 势流域长  $L_p$ , 黏流域长  $L_v$ , 重叠区域长  $L_x$ , 计算域宽  $w$ , 势流域水深  $w$ 。波浪在  $\Omega_p$  入口边界  $\partial\Omega_{p_i}$  产生, 而剧烈的波浪运动发生在  $\Omega_v$ , 在出口边界  $\partial\Omega_{v_o}$  外主动消波。波浪在势流域和黏流域之间的入射和反射通过在边界  $\partial\Omega_{p_o}$  和  $\partial\Omega_{v_i}$  之间的重叠区域内构建双向耦合来实现。计算子域底边界  $\partial\Omega_{p_b}$  和  $\partial\Omega_{v_b}$  光滑连接, 势流域上边界  $\partial\Omega_{p_s}$  与黏流域中 VOF 模型捕获的自由水面衔接。黏流域上边界  $\partial\Omega_{v_t}$  为空气边界。



(a) 计算域全局图

图 2 势流-黏流双向耦合示意图



(b) 重叠区域局部图

图 2 续 势流-黏流双向耦合示意图

双向耦合数据传递发生在重叠区域。图 2(b) 所示为  $\partial\Omega_{p_o}$  和  $\partial\Omega_{v_i}$  附近 FDM 离散点和 FVM 离散单元示意图。在 OceanWave3D 程序中默认的离散点间距比 OpenFOAM 程序中的离散单元尺寸大。当波浪从  $\Omega_P$  传播到  $\Omega_V$  时, OpenFOAM 程序计算  $\partial\Omega_{v_i}$  单元边界中点的波高和速度, 用 OceanWave3D 程序对  $\partial\Omega_{v_i}$  附近 FDM 离散点的波高和速度势插值计算。

当反射波从  $\Omega_V$  传播到  $\Omega_P$  时, 基于 OceanWave3D 程序的虚拟点方法在重叠区域内的松弛区域进行数据传递。虚拟点作为拉普拉斯方程 FDM 离散的参与者, 其速度势根据边界条件计算。对于势流域的侧向边界, 在构建线性代数方程的子程序中, 虚拟点存储的是速度势的空间导数而不是速度势。此外, 为了提高势流模型的数值稳定性, 在势流域重叠区域内也建立松弛区域。在松弛区域内, OceanWave3D 程序中的波面高度和速度势根据 OpenFOAM 程序中的流场信息计算。其中, 波高由探针函数在 OpenFOAM 程序中直接获取, 而速度势需要根据在 OpenFOAM 程序中获取的速度通过间接计算方式获取。

采用 4 步骤 R-K 算法求解。在每一步骤中, 首先求解边界条件式 (4) 和式 (5)。在式 (4) 和式 (5) 右侧代入速度势的空间导数、垂向速度和波高, 得到左侧的波高和速度势的时间导数, 然后乘以时间步长计算变化量, 以更新边界条件。接着, 在新的水面边界条件下求解式 (7) ~ 式 (9), 计算势流域内的速度势和水面的垂向速度, 并用更新的流场进入下一时间步边界条件的计算, 依次循环。在计算速度势时间导数时, 式 (5) 右侧各项中均含有速度。在势流-黏流耦合中, 速度信息可从 OpenFOAM 程序中获取。该方法的思路是, 当速度势时间导数是根据目标值计算时, 那么在某一确定时间步长下, 时间推进后的速度势也是预定的目标值。在松弛区域内, 变量值采用如下公式<sup>[4]</sup>计算:

$$\phi = (1 - \lambda)\phi_{o1} + \lambda\phi_{o2} \quad (15)$$

式中,  $\phi$  为参数, 可替换为波高和速度;  $\phi_{o1}$  为 OceanWave3D 程序中的参数;  $\phi_{o2}$  为 OpenFOAM 程序中的参数;  $\lambda$  为权重, 由下式计算:

$$\lambda = 1 - x^{3.5} \quad (16)$$

式中,  $x$  为计算点到  $\partial\Omega_{p_o}$  的距离和松弛区域宽度之比。

### 2.2 算法

势流-黏流双向耦合基于 R-K 算法并采用强形式, 耦合算法的流程如图 3 所示。在 OceanWave3D 程序中 R-K 算法的每一阶段, 根据 OpenFOAM 程序的流场计算结果更新松弛区域内的波高和速度势, 通过 4 个子步骤完成势流模型的时间推进, 并将波高和速度信息输入到 OpenFOAM 程序中。在 OpenFOAM 程序中, 按更新的边界条件计算黏流域, 其中速度-压强耦合由 PIMPLE 算法求解<sup>[21-22]</sup>。

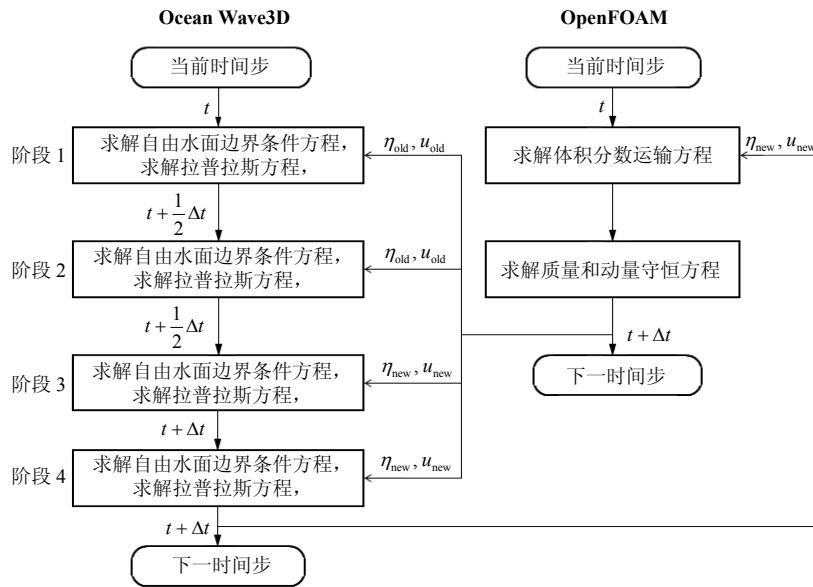


图 3 势流-黏流双向耦合算法流程

### 3 计算结果

用线性波、非线性波和不规则波等 3 类算例对势流-黏流双向耦合模型进行验证。其中, 线性波和非线性波算例包括波浪的正向和反向传播, 以验证耦合模型正向、反向传递数据的有效性。算例设置如表 1 所示。波浪参数如表 2 所示。

表 1 算例设置

波浪类型	计算域类型	势流域长 $L_p/m$	黏流域长 $L_v/m$	重叠区域长 $L_x/m$	计算域宽 $w/m$	水深 $h_0/m$	黏流域高 $(h_0 + h_a)/m$
线性波	二维	22.5	20.0	2.5	—	0.600 0	1.2
非线性波	二维	22.5	20.0	2.5	—	0.404 6	0.8
非线性波	三维	22.5	20.0	2.5	0.8	0.404 6	0.8
不规则波	二维	450.0	400.0	50.0	—	50.000 0	75.0
不规则波	三维	450.0	400.0	50.0	10.0	50.000 0	75.0

表 2 波浪参数

波浪类型	波高 $H/m$	水深 $h_0/m$	波长 $L/m$	周期 $T/s$
线性波 (Stokes I)	0.050 0	0.600 0	6.950 0	3.000
非线性流函数波	0.151 7	0.404 6	6.283 2	3.017
不规则波 (Jonswap 谱)	4.000 0	50.000 0	—	9.000

### 3.1 线性波

首先用线性波进行数值模拟,包括波浪正向和反向传播两个算例。在  $x = 10.0\text{ m}$  和  $x = 30.0\text{ m}$  处布置两个测点。

图 4 所示为线性波模拟的波高时程。图 4(a) 所示为波浪正向传播算例,在  $x = 30.0\text{ m}$  的测点处,双向耦合模型与 OpenFOAM 程序计算的结果基本一致,但它们与理论值相比均过高预测了波高。已有的研究表明,OpenFOAM 程序模拟的波浪运动受数值耗散、虚假空气速度等影响<sup>[2]</sup>。另外,在 OpenFOAM 程序中模拟的自由水面除了波浪运动外还发生小幅低频运动。这可能与计算域的尺度效应、因消波不完全而引起的部分反射等因素有关,导致局部水面整体偏高。这里采用的线性波高为  $0.05\text{ m}$ ,因此小幅度低频起伏运动的影响明显。图 4(b) 所示为线性波浪反向传播的算例,波浪信息有效地反向传递到势流域,并与理论值匹配较好。相比较而言,OpenFOAM 程序因数值模拟本身的原因,局部波面整体略微抬高。

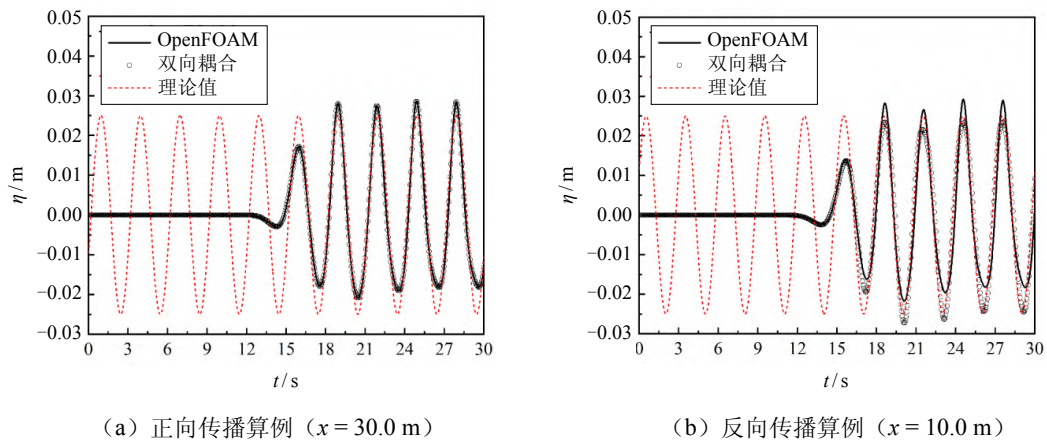


图 4 线性波模拟的波高时程

### 3.2 非线性波

非线性波算例参数见表 1 和表 2。布置了  $x = 10.0\text{ m}$  和  $x = 30.0\text{ m}$  两个测点。图 5 所示为数值模拟的波高时程结果。由图 5(a) 可以看到,双向耦合模型与势流模型的计算结果吻合较好,而 OpenFOAM 程序模拟略微高估水面高度且波浪相位略微提前。对于波浪反向传播算例,双向耦合模型与 OpenFOAM 程序的结果吻合较好。图 6 所示为流函数波正向传播算例的可视化图。

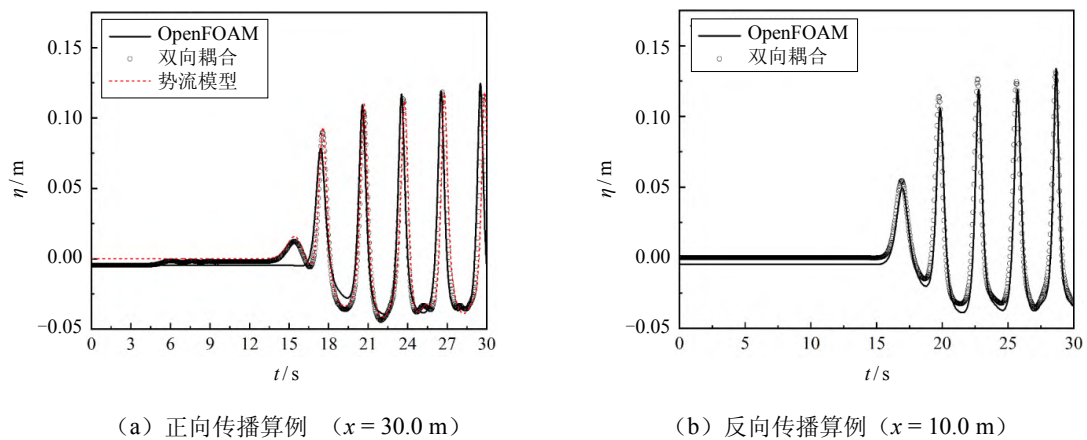


图 5 非线性波模拟的波高时程



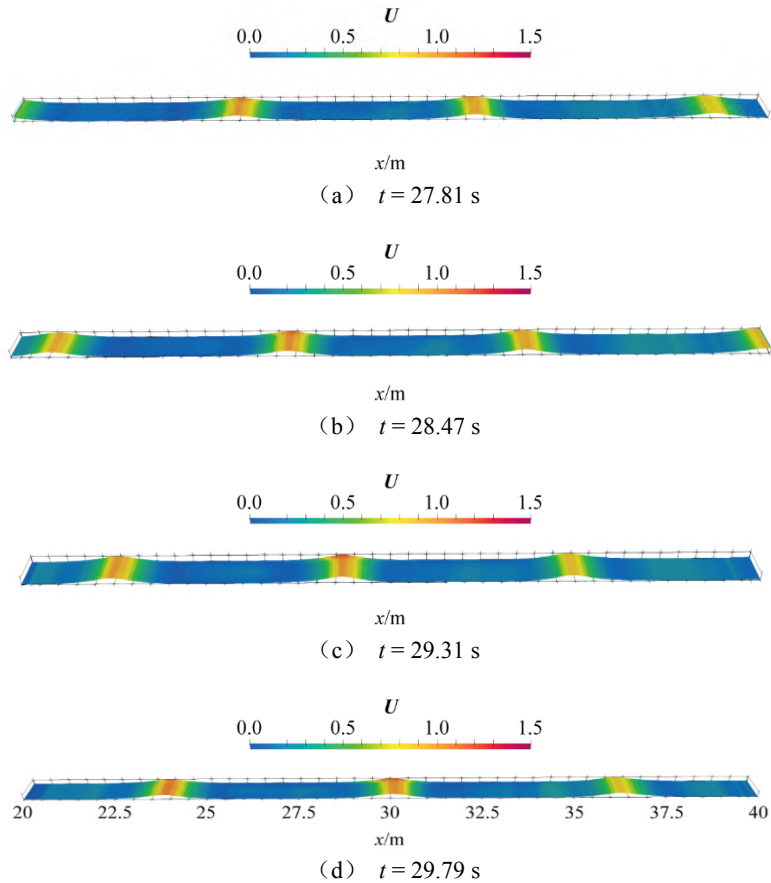


图 6 非线性波模拟的可视化

### 3.3 不规则波

对不规则波采用 Jonswap 谱, 有义波高和峰值周期分别取 4.00 m 和 9.00 s。参数设置如表 1 和表 2 所示。在  $x = 300.0$  m、 $x = 400.0$  m 和  $x = 500.0$  m 位置处布置 3 个测点。图 7 所示是 3 个测点的波高时程。可以看到, 双向耦合模型和势流模型的计算结果基本一致。在双向耦合模型中, OpenFOAM 程序可在 OceanWave3D 程序计算一段时间后, 等到波浪传播到黏流域入口边界附近时才开始计算。也就是说, 在数值模拟开始的一段时间内, 仅用势流模型模拟波浪运动。这样可节省大量时间, 特别适合于三维数值造波。图 8 所示为不规则波三维数值模拟的可视化图。

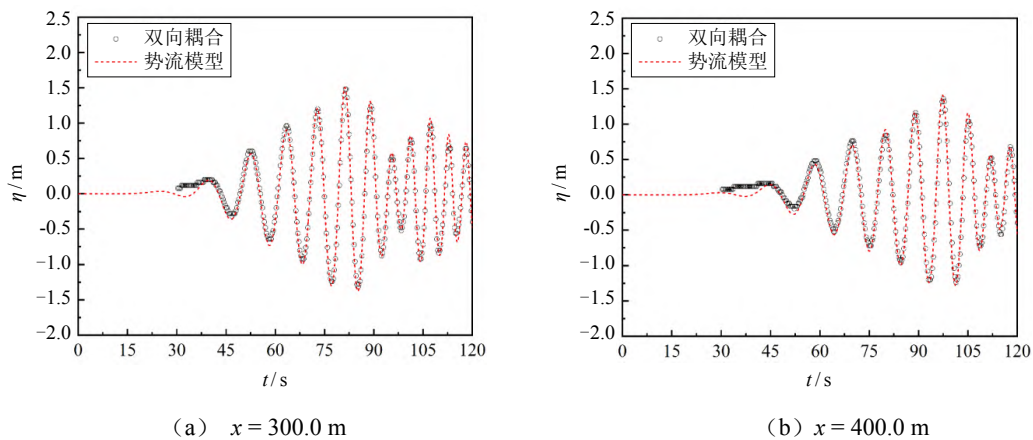


图 7 不规则波模拟的波高时程



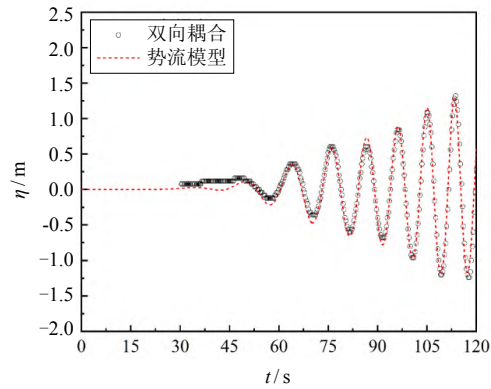
(c)  $x = 500.0 \text{ m}$ 

图 7 续 不规则波模拟的波高时程

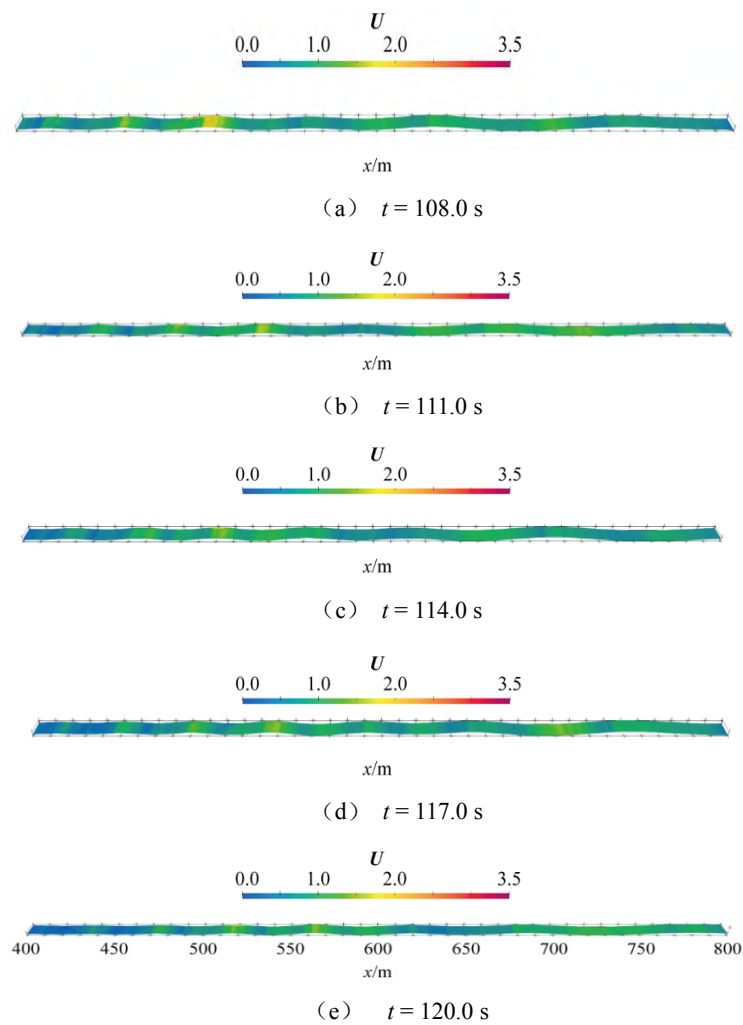


图 8 不规则波模拟的可视化

## 4 结 语

本文应用开源程序 OceanWave3D 和 OpenFOAM 提出了一种势流-黏流双向强耦合数值造波方法。双向耦合模型基于 OceanWave3D 程序的虚拟点方法, 从黏流域向势流域反馈反射波的信息, 并在势流

域重叠区域内建立松弛区域, 以提高势流模型的数值稳定性。松弛区域的波面高度从黏流域直接插值获取, 而速度势则以自由水面边界条件为基础由插值得到的速度间接地计算。通过线性波、非线性波和不规则波, 包括波浪正向、反向传播和二维、三维数值模拟等算例, 验证了势流-黏流双向耦合模型的准确性。与 OpenFOAM 程序计算相比, 本文的耦合模型计算可以节省大量时间, 可推广应用于海洋工程领域中波浪运动和波浪-结构相互作用的三维数值模拟。

## 参 考 文 献

- [1] CHEN Y L, HSIAO S C. Generation of 3D water waves using mass source wavemaker applied to Navier-Stokes model[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 109: 76-95.
- [2] HIGUERA P, LARA J L, LOSADA I J. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 71: 102-118.
- [3] HIGUERA P, LOSADA I J, LARA J L. Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 101(101): 35-47.
- [4] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSOE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam®[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2012, 70(9): 1073-1088.
- [5] XIE Zhihua, LU Lin, STOESEER T, et al. Numerical simulation of three-dimensional breaking waves and its interaction with a vertical circular cylinder[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(5): 800-804.
- [6] WANG Jianhua, ZHAO Weiwen, WAN Decheng. Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(1): 1-20.
- [7] FERRANT P, GENTAZ L, ALESSANDRINI B, et al. A potential/RANSE approach for regular water wave diffraction about 2-D structures[J]. *Ship Technology Research*, 2003, 50(4): 165-171.
- [8] GENTAZ L, LUQUET R, ALESSANDRINI B, et al. Numerical simulation of the 3D viscous flow around a vertical cylinder in non-linear waves using an explicit incident wave model[C]// 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 1, Parts A and B, 2004: 157-163.
- [9] VUKCEVIC V, JASAK H, MALENICA S. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part I: Computational method[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 37-46.
- [10] LI Zhaobin, BOUSCASSE B, GENTAZ L, et al. Progress in coupling potential wave models and two-phase solvers with the SWENSE methodology[C]// Honoring Symposium for Professor Bernard Molin on Marine and Offshore Hydrodynamics, Volume 9: Offshore Geotechnics, 2018.
- [11] CHOI Y, BOUSCASSE B, SENG S, et al. Generation of regular and irregular waves in Navier-Stokes CFD solvers by matching with the nonlinear potential wave solution at the boundaries[C]// ASME 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Madrid, Spain, 2018.
- [12] GATIN I, VUKCEVIC V, JASAK H. A framework for efficient irregular wave simulations using higher order spectral method coupled with viscous two phase model[J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2017, 2(4): 253-267.
- [13] PAULSEN B T, BREDMOSE H, BINGHAM H B. An efficient domain decomposition strategy for wave loads on surface piercing circular cylinders[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 86(17): 57-76.
- [14] ZHUANG Yuan, WAN Decheng. Parametric study of a new HOS-CFD coupling method[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, 33(1): 43-54.
- [15] IAFRATI A, CAMPANA E F. A domain decomposition approach to compute wave breaking (wave-breaking flows)[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2003, 41(4): 419-445.
- [16] ZHANG Yi, PESZYNSKA M, YIM S C. Coupling of viscous and potential flow models with free surface for near and far field wave propagation[J]. *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, 2013, 4(3): 256-82.

- [17] COLICCHIO G, GRECO M, FALTINSEN O M. A BEM-level set domain-decomposition strategy for non-linear and fragmented interfacial flows[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(10): 1385-1419.
- [18] KIM S H, YAMASHIRO M, YOSHIDA A. A simple two-way coupling method of BEM and VOF model for random wave calculations[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(11): 1018-1028.
- [19] ENGSIG-KARUP A P, BINGHAM H B, LINDBERG O. An efficient flexible-order model for 3D nonlinear water waves[J]. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(6): 2100-2118.
- [20] BINGHAM H B, ZHANG Haiwen. On the accuracy of finite-difference solutions for nonlinear water waves[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2007, 58(1): 211-228
- [21] ZHONG Wenjie, YIM S C, DENG Lu. Vortex shedding patterns past a rectangular cylinder near a free surface[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 200: 107049
- [22] ZHONG Wenjie, YIM S C, DENG Lu. Reynolds-number effect on flow past a rectangular cylinder in the presence of a free surface[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 107865.

## Development of Numerical Wave Model Based on Potential-Viscous Flow Coupling Method

ZHONG Wenjie, CHEN Fan, WAN Decheng\*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

### Abstract

The widely used open source OceanWave3D and OpenFOAM are used in the present research, and a novel overlapping two-way coupling strategy is developed. To enhance computational stability, a relaxation zone used for damping at the outlet and data transfer is built over the overlapping region. Free surface elevation in the relaxation zone is directly probed while the velocity potential is indirectly built upon its temporal variation which is calculated under the free surface boundary condition. Strong coupling is achieved based on the fourth-order Runge-Kutta algorithm. Linear waves, nonlinear waves, and irregular waves are selected for the validation tests, where positive and negative propagation cases and numerical modeling in 2D and 3D are conducted. Results show that the proposed model is accurate and efficient, which can be applied in real wave simulation.

**Key words:** potential flow model; viscous flow model; numerical wave generation; nonlinear waves; irregular waves

### 作者简介

钟文杰 男, 1990年生, 博士后。主要从事船舶与海洋工程计算水动力学、海上浮式风机耦合模拟的研究。

陈帆 男, 1990年生, 博士后。主要从事船舶与海洋工程计算水动力学的研究。

万德成 男, 1967年生, 长江学者特聘教授, 博士研究生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、计算流体力学、船舶与海洋工程水动力学 CAE 软件、高性能计算等的研究。

\*通讯作者: 万德成