

文章编号: 0427-7104(2013)05-0627-08

## 基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建 三维数值波浪水池

曹洪建, 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, 上海 200240)

**摘 要:** 利用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建三维数值波浪水池. naoe-FOAM-SJTU 求解器是基于开源程序库 OpenFOAM 开发的两相流求解器. 它以 Navier-Stokes 方程为控制方程, 采用 VOF 方法捕捉自由面. 所构建的数值水池具有完整的造波系统、消波系统以及波高探测系统, 可以实现不同类型波浪的模拟. 对所构建的三维数值波浪水池的原理和过程进行介绍, 对小幅线性波、Stokes 二阶波、斜向波以及不规则波进行了数值模拟, 并将数值结果与理论解进行了比较, 结果吻合的很好, 说明基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建的三维数值波浪水池具有较好的精度, 可以为海洋工程流体问题的数值模拟提供有效的波浪条件.

**关键词:** 三维数值波浪水池; naoe-FOAM-SJTU 求解器; OpenFOAM

**中图分类号:** U 661.1

**文献标志码:** A

数值波浪水池的研究对于预报船舶海洋工程流场和水动力性能具有重要意义, 受到国内外学界和工程界的广泛关注. 近年来, 近海岸防护、近海风电场、跨海桥梁、深海平台、船舶性能预报等工程应用的需要对数值波浪水池的构建提出了更高的要求. 基于计算流体力学 (Computational Fluid Dynamic, CFD) 技术构建的数值波浪水池 (Numerical Wave Tank), 可以实现各种类型波浪的模拟, 可以不受实验范围的影响, 容易改变波浪的方向, 可以对结构物的实尺度原型进行模拟, 相比物理实验水池而言, 数值波浪水池具有预报速度快, 信息量大, 可进行多方案比较进行设计优化的优势. 因此, 构建数值波浪水池和数值模拟波浪和结构物相互作用成为国内外的研究热点, 并广泛的应用于船舶海洋工程领域.

数值波浪水池的核心部分是其数学模型, 包括基本控制方程、数值离散方法等. 大多数数值波浪水池的基本控制方程为 Navier-Stokes 方程、Boussinesq 方程或 Laplace 方程, 常采用的数值离散方法有有限差分法 (Finite Difference Method, FDM)、有限元法 (Finite Element Method, FEM)、边界元法 (Boundary Element Method, BEM) 和有限体积法 (Finite Volume Method, FVM) 等<sup>[1]</sup>. 基于传统势流理论构建的数值水池, 在模拟波浪时可以得到较好的结果, 但由于其忽略了流体粘性的影响, 在应用于模拟波物相互作用时, 尤其是在发生波浪的破碎和翻卷时, 其结果并不理想. 而基于 Navier-Stokes 方程构建的数值水池, 在考虑了流体粘性影响的同时, 通常会结合已经比较成熟的自由面捕捉方法如 VOF (Volume of Fluid) 法, 可以较精确地模拟出自由面的发展演化过程, 以及波面的破碎和翻卷等现象, 具有更好的发展前景.

本文利用我们自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器<sup>[2]</sup> 构建三维数值波浪水池. naoe-FOAM-SJTU 求解器是基于开源程序库 OpenFOAM 开发的, 采用有限体积法 FVM 来离散 Navier-Stokes 方程或 RANS (Reynolds time-averaged Navier-Stokes) 方程, 采用 VOF 方法捕捉自由面. 目前所开发的数值波浪水池的造波系统提供了多种造波方式例如仿推板或摇板运动造波和设置入口边界输入式造波, 可以实现从线性波到高阶不规则波、瞬时极限波以及畸形波的模拟<sup>[3-6]</sup>. 数值水池系统中还集成了方向谱以及多种海浪谱如 P-M 谱、JONSWAP 谱等, 可以轻松实现斜向波以及多向不规则波的模拟. 数值水池具有有效的消波系统, 通过设置海绵层阻尼消波区的方式避免波浪在出口边界以及壁面边界形成反射. 本文利用基

收稿日期: 2013-06-09

基金项目: 国家自然科学基金 (11072154, 51009091, 51379125); 海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金 (CKZD010059); 上海东方学者人才计划基金 (2008007); 英国劳氏船级社基金会 (LRF) 教育基金资助

作者简介: 曹洪建 (1982—), 男, 博士研究生; 万德成 (1967—), 男, 教授, 通讯联系人, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn.

于 naoe-FOAM-SJTU 求解器开发的数值水池,对规则波浪、不规则波浪进行模拟,通过对数值模拟结果的分析、比较和验证,说明基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建的三维数值波浪水池的有效性.

## 1 数值模型

### 1.1 基本控制方程

在笛卡尔直角坐标系下,以 Navier-Stokes 方程为不可压缩粘性牛顿流体流动的基本控制方程:

$$\nabla \cdot \rho \vec{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) = -\nabla \vec{p}_d - \vec{f}_\sigma + \rho \vec{g} + \vec{f}_s, \quad (2)$$

其中:  $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$  为向量微分算子,  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  表示沿  $x, y, z$  坐标轴方向的单位向量;  $\vec{u}$  表示速度场;  $\vec{p}_d = \vec{p} - \rho \vec{g} \cdot \vec{x}$  表示动压力场,由总压力减去静水压力得到;  $\rho$  表示流体的密度;  $\vec{g}$  表示重力加速度;  $\mu$  表示动力粘性系数;  $\vec{f}_\sigma$  是两相流模型中的表面张力项;  $\vec{f}_s$  是用于消波区的源项.

### 1.2 自由面处理

基于粘性流体理论构建的数值波浪水池中,自由面的处理方法主要有 MAC(Marker and Cell)方法、Level Set 方法和 VOF 方法. 其中,VOF 方法最为流行,主要是因为 VOF 方法可以严格保证质量守恒,同时具有计算效率高和易于执行的特点. 因此本文采用 VOF 方法来捕捉自由面.

VOF 方法通过定义体积分数方程(3)来捕捉两项流体的自由面:

$$\alpha(x, t) = \begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气,} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由面,} \\ \alpha = 1 & \text{水,} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\alpha$  为体积分数,并满足输运方程:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) = 0. \quad (4)$$

本文采用的 VOF 方法结合了边界压缩技术<sup>[7]</sup>,这种处理方式的好处是能有效控制数值扩散,以较高的精度捕捉自由面. 主要通过在方程(4)中引入一个人工压缩项来实现对自由面的压缩:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) + \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha)\vec{u}_{rf}) = 0, \quad (5)$$

其中: 由于  $\alpha(1-\alpha)$  的存在,压缩项只在自由面处起作用;  $\vec{u}_{rf}$  为适用于压缩自由面的速度场,可以由下式得到:

$$\vec{u}_{rf} = \vec{n}_f \cdot \min\left(C_a \frac{|\phi|}{|S_f|}, \max\left(\frac{|\phi|}{|S_f|}\right)\right), \quad (6)$$

其中:  $S_f$  是单元表面的法向量;  $\phi$  是单元表面的体积流量;  $\vec{n}_f$  表示自由面处的单位法向量;  $C_a$  为控制压缩量的压缩系数,表示流体的可压缩性. 若  $C_a = 0$ ,则对自由面不产生任何影响;若  $C_a = 1$ ,则产生守恒的压缩.  $C_a$  的值越大界面越容易压缩,在程序中取 1.

由于自由面处两项流体的密度以及粘性系数是间断的,在求解时,将密度  $\rho$  和动力粘性系数  $\mu$  也表示为体积分数  $\alpha$  的权重函数:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_1 + (1-\alpha) \rho_2, \\ \mu &= \alpha \mu_1 + (1-\alpha) \mu_2, \end{aligned} \quad (7)$$

其中,下标 1 表示水,下标 2 表示空气.

### 1.3 数值离散方法

在求解过程中,使用有限体积法 FVM 对控制方程进行数值离散,采用 Rhie 和 Chow 提出的同位网格法<sup>[8]</sup>代替传统的交错网格法,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就可以得到单元体的体积积分.对控制方程中不同的项采用不同的离散格式和插值方法,对 Navier-Stokes 方程中的对流项采用带线性限制器的二阶 TVD 格式<sup>[9]</sup>,扩散项采用二阶中心差分格式;对 VOF 输运方程中的对流项采用 Van Leer 格式<sup>[10]</sup>,时间项采用隐式欧拉格式.求解过程中采用 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators)算法<sup>[11]</sup>实现速度和压力的耦合求解.

## 2 数值波浪水池

在数值波浪水池的构建中,造波方法和消波方法是两个十分重要的关键技术.目前造波的方法大致可以分为:给定入射边界上的波面和速度,模拟推板或摇板运动造波和源项造波法,其中源项造波的方法在势流理论模型中应用较多.本文构建的数值水池集成了前两种造波方式.同时,数值水池具有有效的消波系统,通过设置海绵层阻尼消波区的方式避免波浪在出口边界以及壁面边界形成反射<sup>[12]</sup>.在实验水池中,通常要设置波高探测仪记录特定位置的波幅变化情况,本文构建的数值波浪水池也同样具有波高探测功能,可以实时记录水池中多个位置的波面高程变化情况.图 1 所示为数值波浪水池的示意图.

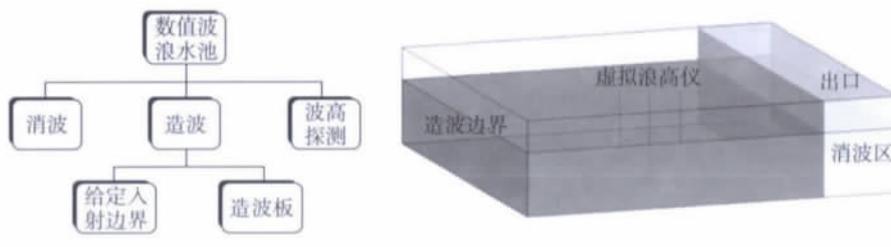


图 1 数值波浪水池结构示意图

Fig. 1 The schematic of the structure of the numerical wave tank

### 2.1 数值造波理论

许多研究者研究了如何通过给定准确的信号来控制造波板的运动实现造波,并提出了相应的造波板理论.运用造波板理论结合动网格技术,可以实现模拟造波板运动来造出需要的波浪.在 Ursell 和 Dean<sup>[13]</sup>提出的线性造波理论中,小振幅线性波的生成可以通过模拟推板的前后运动来实现,并给出了目标波高  $H$  与推板最大位移  $S$  的比值:

$$W = \frac{H}{S} = \frac{4\sinh^2(kd)}{2kd + \sinh(2kd)} = \frac{2(\cosh(2kd) - 1)}{2kd + \sinh(2kd)}. \tag{8}$$

因此,可以得到造波板的位移与速度:

$$x(t) = \frac{H}{2} \left( \frac{2kd + \sinh(2kd)}{4\sinh^2(kd)} \right) \sin(\omega t), \tag{9}$$

$$u(t) = \frac{H\omega}{2} \left( \frac{2kd + \sinh(2kd)}{4\sinh^2(kd)} \right) \cos(\omega t), \tag{10}$$

其中:  $t$  表示时间;  $k$  表示波数;  $d$  表示水深;  $\omega$  表示波的圆频率.根据(9)或(10)式给定造波板的运动参数,造波板运动时便可以生成线性波.

然而,考虑到应用线性造波板理论生成的波形在传播中含有高阶成分而不稳定,Madsen 对一阶造波理论公式进行了修正,提出了二阶造波板理论<sup>[14]</sup>.二阶造波板理论给出的推板位移为

$$x(t) = \xi_0 (\sin(\omega t) - \frac{a}{2hn_1} \left( \frac{3}{4\sinh^2 kh} - \frac{n_1}{2} \right) \sin(2\omega t)), \tag{11}$$

其中:  $\xi_0 = \frac{an_1}{\tanh(kh)}$ ,  $a$  为波幅,  $n_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sin(2hk)} \right)$ .

对应生成稳定的二阶 Stokes 波的波面为

$$\eta = a \cos(kx - \omega t) + a_{2p} \cos 2(kx - \omega t), \quad (12)$$

其中  $a_{2p} = \frac{ka^2(2 + \cosh(2kh)) \cosh(kh)}{4 \sinh^3 kh}$ .

对于不规则波的生成,通常以线性波浪理论为前提,认为不规则波是由  $N$  个不同波浪参数的线性波叠加而成,波面可以表示为

$$\eta = \sum_{i=1}^N A_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varphi_i), \quad (13)$$

其中  $A_i, k_i, \omega_i, \varphi_i$  分别为第  $i$  个组成波的波幅、波数、圆频率和初相位.  $A_i$  可以通过波浪谱密度公式得到:

$$A_i = \sqrt{2S(\omega_i) d\omega_i}, \quad (14)$$

其中  $S(\omega_i)$  为第  $i$  个组成波的波浪谱密度函数.

数值波浪水池中集成了大多数波浪谱可供使用,包括 P-M 谱, ITTC 一参数谱, ITTC 二参数谱和 JONSWAP 谱等.

在模拟造波板运动的过程中,要应用动网格技术. 计算网格的拓扑结构并不改变,造波板运动时,网格只是拉伸或者压缩,改变的只有网格节点之间的距离. 每一个时间步内,网格节点的位置是通过求解以位移为变量的拉普拉斯方程确定:

$$\gamma \nabla^2(x) = 0, \quad (15)$$

其中  $\gamma$  为方程的扩散系数.

采用造波板造波,可以得到较好的结果,但在模拟造波板运动时,需要求解网格的运动,因此降低了计算效率,尤其是在应用于模拟波浪与自由运动物体的相互作用时,要同时求解多个运动边界,计算效率将会更低.

因此,采用设置入口边界波面和速度的造波方式是较好的选择. 根据不同波浪理论<sup>[15]</sup>,给出入口边界处的波面和流体速度随时间的变化函数,随着计算时间的推进,在入口处生成的波浪将逐渐传播到水池中. 但在模拟高阶波的时候,需要对计算域内的流体进行质量修正来达到较好的模拟效果.

## 2.2 海绵层消波

数值模拟过程中,在计算域的出口采用的数值边界条件常常会形成波浪反射的现象. 目前还没有一个理论上较成熟的出口条件可以应用,而采用最多的消除反射的方法是在数值水池的末端设置一个消波区,又称作海绵层<sup>[12]</sup>,使波浪在海绵层内衰减,从而消除反射波. 在过去的工作中,将消波区用于数值计算中并取得了较好的成果<sup>[3-6]</sup>. 消波区的设置是通过在动量方程中增加一个源项  $\vec{f}_s$  实现的:

$$\vec{f}_s(x) = \begin{cases} -\rho\alpha_s \left( \frac{x-x_s}{L_s} \right)^2 (\vec{u} - \vec{u}_{ref}) & x_s \leq x \leq (x_s + L_s), \\ 0 & x < x_s, \end{cases} \quad (16)$$

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. 与传统的海绵层方法相比,在数值水池的出口处,方程中增加了一个参考速度  $\vec{u}_{ref}$ . 将参考速度设为入口流体速度可以保证整个计算域内的质量守恒.

## 3 数值模拟结果

为验证数值波浪水池的有效性,本文对小振幅线性波, Stokes 二阶波、斜向波和不规则波进行了数值模拟,并与理论解析解进行了比较.

### 3.1 线性波

图 2 为数值波浪水池计算模型,水池尺度为 20 m 长,0.42 m 高,初始时刻水深为 0.275 m.水池左侧边界为数值造波边界,水池右侧设置了长为 5 m 的海绵层消波区.入射波波高 0.020 3 m,周期为 1.0 s.采用结构化网格对计算域进行网格划分,为了更好地捕捉自由面,在自由面附近  $-0.03 \text{ m} \leq z \leq 0.03 \text{ m}$  的范围内对网格进行加密处理,垂向最小网格尺度为  $\Delta z = 0.002 \text{ m}$ ,整个计算域的总网格数为 10 500.

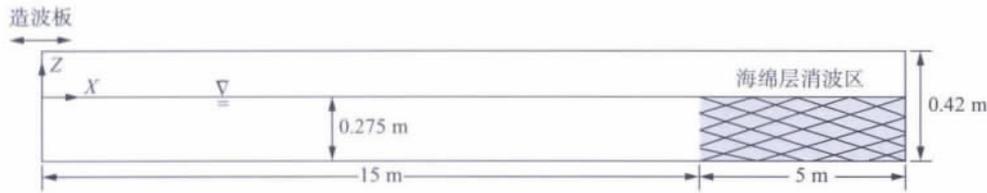


图 2 二维数值波浪水池计算模型

Fig. 2 Computational model of a two-dimensional numerical wave tank

图 3 为数值模拟的结果与解析解的比较,可以看到在水池中部,数值模拟得到的波形基本稳定,与线性波解析解吻合的很好.同时可以看到,右侧边界之前的消波区起到了很好的消波作用.图 4 所示为模拟得到的三维自由面情况.

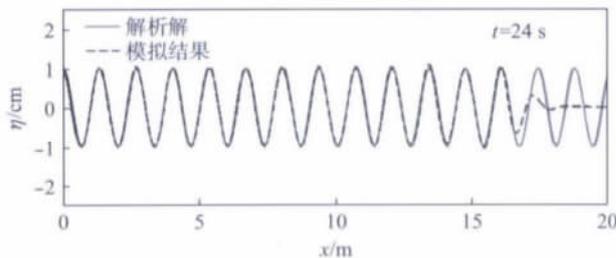


图 3 数值水池中的波面高程情况与解析解的比较 ( $t=24 \text{ s}$ )

Fig. 3 Comparison of the numerical results of wave elevation with analytical solution ( $t=24 \text{ s}$ )

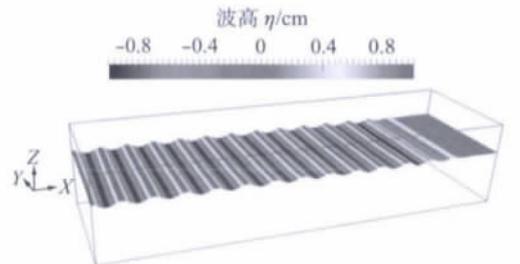


图 4 线性波三维波面的数值模拟结果

Fig. 4 Numerical results of the three-dimensional free surface of the linear wave

图 5 给出了数值水池中部不同位置处记录的波高变化时间历程,与线性波解析解依然吻合的很好,再次说明了在水池中部可以得到稳定的波形,并且具有较好的精度.

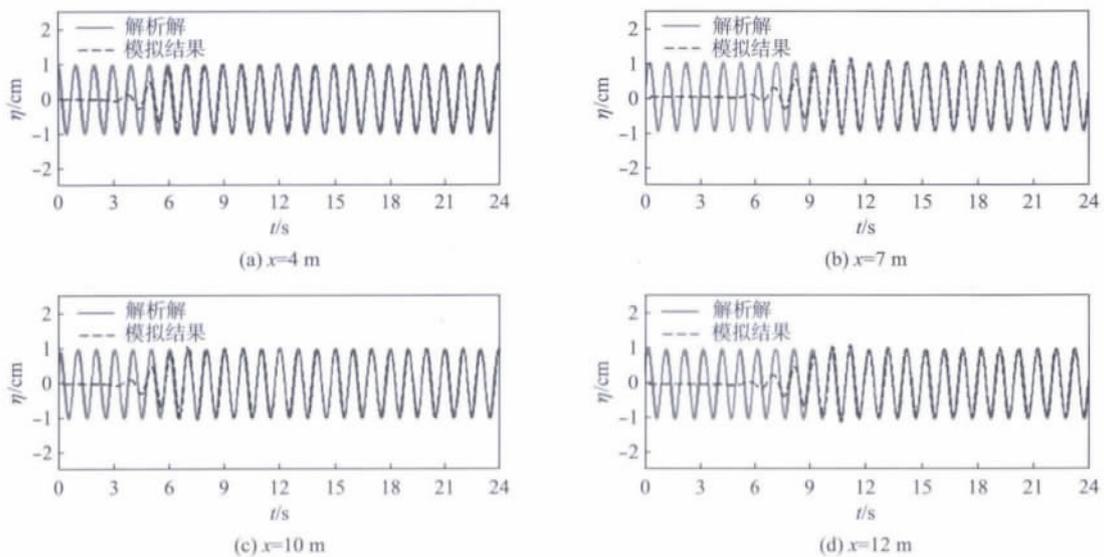


图 5 数值水池中不同位置处的波高变化时间历程 ( $x=4 \text{ m}, 7 \text{ m}, 10 \text{ m}, 12 \text{ m}$ )

Fig. 5 The time histories of the wave elevation at different position ( $x=4 \text{ m}, 7 \text{ m}, 10 \text{ m}, 12 \text{ m}$ )

### 3.2 Stokes 二阶波

在实际模拟过程中,当模拟波陡(波高与波长之比)较大的波时,采用线性波理论得到的结果并不准确,因此我们需要应用高阶波浪理论.图 6 为使用 Stokes 二阶波理论模拟得到的自由面波高的历时曲线与解析解的比较情况,波浪参数为波高  $H=0.05\text{ m}$ 、周期  $T=1\text{ s}$ ,可以看到两者吻合的较好.

从图 7 所示三维波面情况可以看到,采用 Stokes 二阶波浪理论得到的波形具有较平坦的波谷和陡峭的波峰.

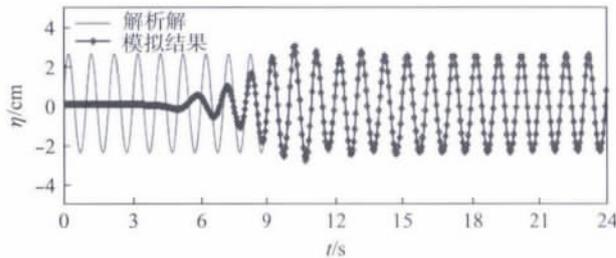


图 6 Stokes 二阶波的数值模拟结果与解析解的比较  
( $H=0.05\text{ m}$ ,  $T=1\text{ s}$ )

Fig. 6 Comparison of the numerical results of 2<sup>nd</sup>-order Stokes wave with corresponding analytical solution ( $H=0.05\text{ m}$ ,  $T=1\text{ s}$ )

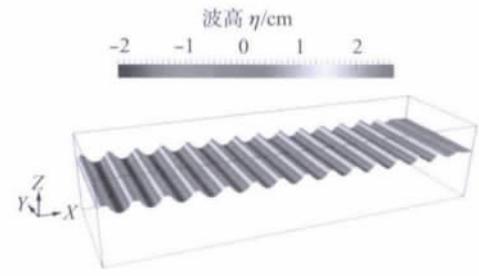


图 7 Stokes 二阶波三维波面的数值模拟结果

Fig. 7 Numerical results of the three-dimensional free surface of the 2<sup>nd</sup>-order Stokes wave

### 3.3 斜向规则波

三维数值水池中模拟斜向波时,需要将与入口边界相邻的边界也设置为造波边界来实现.斜向规则波的波面可以表示为

$$\eta(x, y, t) = a \cos(k(x \sin \theta + y \sin \theta) - \omega t), \quad (17)$$

其中:  $\theta$  为波浪传播方向与  $x$  坐标轴夹角( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ).

数值模拟过程中,与造波边界相对的两个边界前需要设置海绵层消波区以减小波的反射.图 8 为三维数值水池中模拟得到的斜向规则波的波面,波向角  $\theta=45^\circ$ .

### 3.4 不规则波

在自然界的真实海洋环境中,海浪实际上是此起彼伏、变化无常的不规则波.因此,在数值水池中实现对不规则波的模拟是十分必要的.

按照(6)式给定入口边界处入射波面条件和对应的速度,选择 JONSWAP 波浪谱,目标波的有义波高为  $H_s=0.02\text{ m}$ ,谱峰周期  $T_p=2\text{ s}$ .在数值模拟过程中,在水池中部  $x=7\text{ m}$  处探测波高变化的时间历程如图 9 所示,对时间历程曲线进行分析得到测量谱,图 10 给出了测量谱与目标谱的比较,两者吻合良好,模拟结果可以为海洋工程提供符合要求的波浪条件.图 11 给出了三维水池中的不规则波面情况.

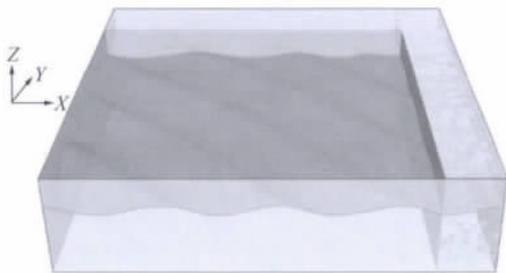


图 8 数值模拟得到的波向角  $\theta=45^\circ$  的三维斜向波波面

Fig. 8 Numerical results of the three-dimensional free surface of the oblique wave with  $\theta=45^\circ$

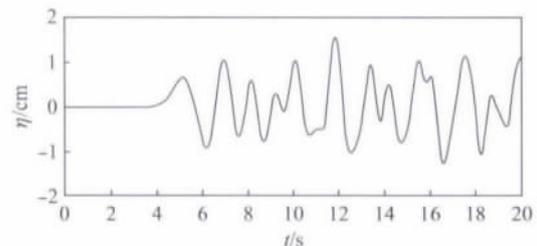


图 9 不规则波面变化历时曲线( $x=7\text{ m}$ )

Fig. 9 The time history of the irregular wave elevation at  $x=7\text{ m}$

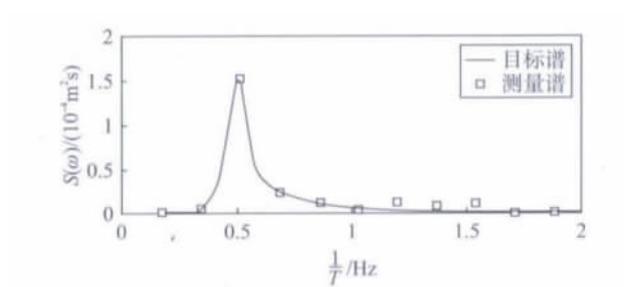


图 10 测量谱与目标谱的比较

Fig. 10 The comparison of the obtained wave spectrum with the target wave spectrum

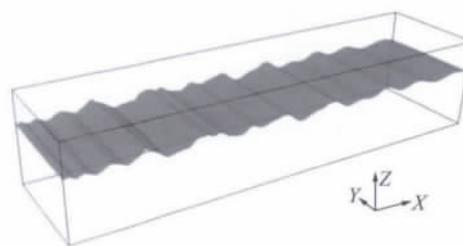


图 11 数值模拟得到的三维不规则波波面

Fig. 11 Numerical result of the three-dimensional free surface of the irregular wave

## 4 结 语

本文基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建的三维数值波浪水池,以 Navier-Stokes 方程为基本控制方程,使用 VOF 方法捕捉自由波面.在数值波浪水池中实现了对线性波、Stokes 二阶波、斜向波和不规则波的模拟,数值模拟结果与目标波或目标波谱吻合的很好,说明基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器构建的三维数值波浪水池具有较好的精度,可以为海洋工程流体问题的数值模拟提供有效的波浪条件,并易于扩展到对具有强非线性的波浪与固定或浮动海洋结构物相互作用问题的研究.

### 参考文献:

- [1] 陶建华. 水波的数值模拟[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.
- [2] Shen Z R, Cao H J, Ye H X, *et al.* Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: Naoe-FOAM-SJTU [R]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [3] 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.
- [4] Cao H J, Zha J J, Wan D C. Numerical simulation of wave run-up around a vertical cylinder [C]// Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, Hawaii, USA: ISOPE, 2011; 726-733.
- [5] Cao H J, Wan D C. Numerical investigation of extreme wave effects on cylindrical offshore structures [C]// Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: ISOPE, 2012; 804-811.
- [6] Shen Z R, Wan D C. RANS computations of added resistance and motions of ship in head waves [C]// Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece: ISOPE, 2012; 1096-1103.
- [7] Rusche H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions [D]. London: Imperial College of Science, Technology & Medicine, Department of Mechanical Engineering, 2002.
- [8] Rhie C M, Chow W L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation [J]. *AIAA Journal*, 1983, **21**(11): 1525-1532.
- [9] Sweby P K. High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws [J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1984, **21**(5): 995-1011.
- [10] van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. v. A second-order sequel to godunov's method [J]. *Journal of Computational Physics*, 1979, **32**(1): 101-136.
- [11] Issa R. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. *Journal of Computational Physics*, 1986, **62**(1): 40-65.
- [12] Larsen J, Dancy H. Open boundaries in short wave simulations—a new approach [J]. *Coastal Engineering*, 1983, **7**(3): 285-297.
- [13] Ursell F, Dean R, Yu Y. Forced small-amplitude water waves: A comparison of theory and experiment

- [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1960, 7(1): 33-52.
- [14] Madsen O. On the generation of long waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(36): 8672-8683.
- [15] Dean R, Dalrymple R. *Water wave mechanics for engineers and scientists*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1991.

## Three-Dimensional Numerical Wave Tank Based on naoe-FOAM-SJTU Solver

CAO Hong-jian, WAN De-cheng

(*State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract:** Three-dimensional numerical wave tank has been constructed based on the new developed solver naoe-FOAM-SJTU, which is a hydrodynamic solver developed based on the open source code library OpenFOAM. The Navier-Stokes equations are employed as the governing equations for the two-phase fluid and the volume-of-fluid (VOF) method are used for the free surface capturing. The present numerical wave tank has complete systems for wave generating, wave damping and virtue wave probes for collecting the wave elevations, and different types of wave can be modeled in this tank. The theories applied for construction of the numerical wave tank are introduced and the numerical simulation of the linear wave, the 2<sup>nd</sup>-order Stokes wave, oblique wave and irregular wave are carried out. The results are compared with corresponding analytical solution of wave theories. Good agreement implies the accuracy of the numerical wave tank, which can provide efficient incident wave condition for studying the hydrodynamic problems involved in ship and ocean engineering.

**Keywords:** three-dimensional numerical wave tank; naoe-FOAM-SJTU solver; OpenFOAM

(上接第 626 页)

## Application of MPS Method for 2D Liquid Sloshing

ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng

(*State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

**Abstract:** MPS(Moving Particle Semi-Implicit) method is applied to liquid sloshing in 2D rectangular tank and LNG tank which are subject to various motions with various excitation periods. The impact pressure and wave in the tank are analyzed, and numerical results are compared with experimental data to validate the reliability of MPS. It shows that MPS method is reliable in prediction of impact behavior in sloshing flow, the pressure evolutions predicted by MPS method are in good agreement with experimental and other numerical results. In addition, some complicated flow phenomena, such as overturning free surface, breaking wave and splashing water, are observed in simulation. The MPS method is robust and has a good flexibility in handling such violent free surface flow.

**Keywords:** liquid sloshing; Moving Particle Semi-Implicit(MPS); impact pressure; free surface flow