

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.005

基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化

曾 诚¹, 尹雨然¹, 周 婕², 邱 斐¹, 白一墨¹, 王玲玲¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 基于 CFD 开源软件包 OpenFOAM, 建立了基于 Navier-Stokes 方程的二维数值波浪水槽模型。模型采用体积函数 (VOF) 法捕捉自由水面, 采用 $k-\omega$ SST 紊流模型封闭控制方程。针对不同波陡 ($i=0.01 \sim 0.06$) 的 Stokes 二阶波, 分别采用速度边界法或推板造波法进行造波, 采用阻尼消波法、辐射边界法或松弛区域法进行消波; 通过对不同造波和消波方法组合方式计算结果的比较, 分析了数值波浪水槽在不同波陡工况下的消波效果和造波效果。模拟结果表明: 对于小波陡 ($i=0.01 \sim 0.03$) 工况, 采用速度边界造波和松弛区域法消波的组合方式具有较高的模拟精度; 对于大波陡 ($i=0.04 \sim 0.06$) 工况, 采用推板造波法造波和基于平方形式阻尼函数的阻尼消波法消波的组合方式具有较高的模拟精度。

关键词: 数值波浪水槽; Stokes 二阶波; 阻尼消波; 波陡; OpenFOAM

中图分类号: TV139.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)04-0033-08

Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves

ZENG Cheng¹, YIN Yuran¹, ZHOU Jie², QIU Fei¹, BAI Yimo¹, WANG Lingling¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In this study, a two-dimensional numerical wave tank (NWT) was developed by solving the Navier-Stokes equations with the open-source CFD library OpenFOAM. The volume of fluid (VOF) method was adopted for the free surface capture and the $k-\omega$ SST model was used for the closure of governing equations. While the velocity profile method and the piston type wavemaker were tested separately for the wave generation, the artificial damping condition, Sommerfeld radiation condition and relaxation zone method were tested respectively to absorb the wave in the simulations of Stokes 2nd waves with different wave steepness ($i=0.01 \sim 0.06$). According the comparisons between the numerical results and the analytical solutions, the performance of the model settings with different wave generation and absorption methods were analyzed. For the numerical simulations of 2nd order regular waves, the optimal setting is velocity profile method and relaxation zone method for cases with small wave steepness ($i=0.01 \sim 0.03$), and the piston type wavemaker and the artificial damping condition with squared damping function for cases with large wave steepness ($i=0.04 \sim 0.06$).

Key words: numerical wave tank; Stokes 2nd waves; wave adsorption by damping; wave steepness; OpenFOAM

近年来,随着海洋资源的不断开发,海岸和近海工程受到社会各界的广泛关注。波浪作为海洋环境中的重要因素,对海洋工程结构的强度和稳定性具有重要影响。数值模拟作为一种研究手段,在工程应用中得到了越来越多的重视^[1]。目前,波浪研究中较为常用的数值模型是基于 Navier-Stokes 方程的黏性流数值波浪水槽^[2]和基于光滑粒子流体动力学的数值波浪水槽^[3]。与物理波浪水槽^[4]相比,数值波浪水槽具有成本低、信息完整和模拟能力强等优点。

数值造波和消波技术是数值波浪水槽构建的关键技术。常用的造波方法包括速度边界法^[5]、推板造波法^[6]和质量源造波法^[7]等,消波方法主要包括辐射边界法、阻尼消波法和松弛区域法等。数值造波技术方

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202605);江苏省水利科技项目(2022061)

作者简介: 曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: czeng@hhu.edu.cn

通信作者: 周婕(1981—),女,讲师,博士,主要从事流体力学研究。E-mail: zhoujie@hhu.edu.cn

引用本文: 曾诚,尹雨然,周婕,等. 基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 33-40.

ZENG Cheng, YIN Yuran, ZHOU Jie, et al. Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 33-40.

面,徐刚等^[8]采用速度边界法建立了数值波浪水槽,研究了波浪衰减特性,并对数值波浪水槽的模拟精度和波浪衰减问题进行了分析。Higuera 等^[9]利用 OpenFOAM 建立了三维多推板数值波浪水槽,成功模拟生成了二维和三维聚焦波。Prasad 等^[10]采用推板造波法建立了数值波浪水槽,并对波能转换器的性能进行了研究。Machado 等^[11]将推板和摇板 2 种造波方法进行了对比,认为推板造波法更准确。Lin 等^[12]将源造波法运用到基于 Navier-Stokes 方程的数值波浪水槽中,通过使用不同的源函数,产生各种波序列。为消除波浪水槽边界产生的反射波,保证水槽内波浪稳定,前人提出了多种消波方法。Milgram^[13]在 1970 年最早提出了主动吸收造波理论。William 等^[14]在水槽末端设置斜坡来达到消波目的。Kim 等^[15]采用网格逐渐稀疏的消波方法建立了三维数值波浪水槽,产生了较好的消波效果。另外,还可采用出流边界使波浪完全透射出流边界,从而避免发生波浪反射,其中 Sommerfeld 辐射边界^[16]具有较好的消波效果。Clément^[17]对 Sommerfeld 辐射边界条件进行了研究,指出由于该条件在时间和空间上是局部的,因此仅限于频率已知的规则入射波和长波情况,而不适用于完全非定常入射波情况。邹志利等^[18-19]也对 Sommerfeld 辐射边界条件进行了研究,发现单独采用该条件的消波效果并不理想。Israeli 等^[20]提出了阻尼消波法,分析了消波系数对消波效果的影响,并尝试通过辐射边界条件和阻尼区消波相结合的方法提高消波效果。Baker 等^[21]在其二维边界元模式中引入阻尼消波法,其主要思想是在消波区域对自由面边界条件或动量方程添加一阻尼耗散项,从而达到消波的目的。随着阻尼消波法的不断发展和完善,该方法成为了数值波浪水槽研究中广泛运用的消波方法。Clément^[17]指出,通过阻尼消波能够有效消除高频短波,但是对于低频长波消波效果不太理想,需要延长阻尼区域,增加计算成本。Méndez 等^[22]针对阻尼消波法进行了研究,结果表明阻尼消波区设置不合理会导致平均水位的缓慢抬升。韩朋^[23]基于 VOF 方法针对不规则波的数值模拟进行了阻尼消波研究,给出了不同波要素组合情况下阻尼系数的经验取值范围。王国玉等^[24]基于 OpenFOAM 求解器 interDyMFoam,开发了数值波浪水槽,并将计算结果与试验测量数据进行对比,验证了数值造波和消波方法的可靠性。另外,Tian 等^[25-26]给出了阻尼项的不同表达形式。近年来,Jacobsen 等^[27]提出了松弛区域法,在波浪水槽前后端设置松弛区域,通过合理分配计算值和理论值之间的权重实现数值解与解析解之间的过渡,从而达到消波效果。田康等^[28]基于 OpenFOAM 建立数值波浪水槽,并通过二次开发引入松弛区域法,取得了较好的消波效果。

基于上述文献综述,前人对非线性波模拟的数值波浪水槽优化设置研究较少,本文基于 CFD 开源软件包 OpenFOAM 建立了二维黏性流数值波浪水槽,综合考虑不同波陡工况下($i=0.01 \sim 0.06$) Stokes 二阶波的模拟精度和计算成本,从造、消波方式选择、网格划分、紊流模型选择等方面对数值波浪水槽进行全面优化,以期提高非线性波模拟的精度和效率。

1 数学模型

1.1 基本两相流控制方程

基本两相流控制方程主要包括不可压缩流体的连续性方程(式(1))、动量守恒方程(式(2))以及基于体积函数(volume of fluid,VOF)法的相方程(式(3))。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{U} \boldsymbol{U}) - \nabla \cdot \boldsymbol{\mu} \nabla \boldsymbol{U} = - \nabla p + \rho \boldsymbol{g} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \boldsymbol{U} \cdot \nabla \alpha = 0 \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{U}=(u,w)$ 为笛卡尔坐标系下的流速场; ρ 为整个流场的密度; $\boldsymbol{\mu}$ 为动力黏滞系数; $\boldsymbol{g}=(0,-9.81)$ 为重力加速度; p 为压力场; α 为水的体积分数。

当 $\alpha=1$,表示网格单元内全部为水,当 $\alpha=0$,表示网格内全为空气,当 $0<\alpha<1$,代表该网格单元内存在自由液面。通过对 α 的迭代求解,可根据式(4)进一步确定网格单元内其他的特性参数。

$$\varphi = \alpha \varphi_{\text{w}} + (1 - \alpha) \varphi_{\text{A}} \tag{4}$$

式中: φ 为网格内其他参数,如密度、分子黏性系数等;下标 w 表示水,A 表示空气。

本文采用 $k-\omega$ SST 紊流模型封闭控制方程,采用 PIMPLE 算法进行速度-压力解耦。其中,时间项采用一阶隐式格式离散,对流项和黏性项采用二阶迎风格式离散,压力项、紊动能和耗散率项采用二阶中心差分格

式进行离散。

1.2 造波方法

1.2.1 推板造波法

在数值波浪水槽中采用推板造波法时,推板冲程 S 与目标波高 H 的关系为

$$\frac{H}{S} = 2[\cosh(2kd) - 1]/[\sinh(2kd) + 2kd] \tag{5}$$

其中 $k = 2\pi/L$

式中: k 为波数; L 为波长; d 为初始水深。

本文模拟的波浪中包括深水(水深大于波长一半)和有限水深(水深和波长关系为 $0.5 > h/L > 0.05$) 条件下的有限振幅波,因此采用 Stokes 非线性波理论。根据 Madsen^[29] 造波理论,采用修正后的推板位移公式产生稳定的 Stokes 二阶波:

$$x_p = -S_0 \left\{ \cos(\omega t) + \frac{H}{4dn_1} \left[\frac{3}{4 \sinh^2(kd)} - \frac{n_1}{2} \right] \sin(2\omega t) \right\} \tag{6}$$

其中 $\omega = 2\pi/T$ $n_1 = \frac{1}{2}[1 + 2kd/\sinh(2kd)]$ $S_0 = Hn_1/2\tanh(kd)$

式中: x_p 为推板冲程; ω 为圆频率; T 为波浪周期; t 为时间。

本文理论解采用 Stokes 二阶波波面方程:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H}{8} \left(\frac{H}{L} \right) \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} [\cosh(kd) + 2] \cos(2kx - 2\omega t) \tag{7}$$

式中 x 为沿波浪传播方向的坐标。

1.2.2 速度边界法

采用速度边界法造波时,通过控制边界处的水平和垂向速度产生目标波形,水平速度 u 和垂向速度 w 分别为

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(kz + kd)}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H}{T} \left(\frac{H}{L} \right) \frac{\cosh(2kz + 2kd)}{\sinh^4(kd)} \cos(2kx - 2\omega t) \tag{8}$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh(kz + kd)}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H}{T} \left(\frac{H}{L} \right) \frac{\sinh(2kz + 2kd)}{\sinh^4(kd)} \sin(2kx - 2\omega t) \tag{9}$$

式中 z 为沿水深方向坐标,向上为正。

1.3 消波方法

1.3.1 阻尼消波法

阻尼消波的原理为在动量方程中加入阻尼项,在数值水槽消波段实现动量衰减,从而消除边界上的反射波,在式(2)中加入阻尼项 $\rho\theta U$ 后,动量方程如下:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) - \nabla \cdot \mu \nabla U + \rho\theta U = \rho g - \nabla p \tag{10}$$

其中 $\theta = \begin{cases} \theta_1 \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)^r & x_0 \leq x < x_1 \\ 0 & 0 < x < x_0 \end{cases}$

式中: x_0 为消波段起点; x_1 为消波段终点; θ 为阻尼函数,常用的阻尼函数形式包括线性形式($r=1$) 和平方形式($r=2$); θ_1 为阻尼系数; r 为阻尼项指数。

1.3.2 辐射边界法

在水槽末端施加适当的辐射条件,能使波浪在出口边界处无干扰或干扰很小的传播出去。Sommerfeld 辐射边界条件的定义如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + C_u \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial w}{\partial t} + C_w \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \end{cases} \tag{11}$$

式中 C_u 、 C_w 分别为 u 和 w 在出口边界处的值。

1.3.3 松弛区域法

在数值波浪水槽首端设置松弛区域可以有效消除计算区域内部的波浪反射对入口的影响,在水槽末端设置松弛区域能够防止出口边界产生反射波,对研究区域产生影响。松弛区域法消波原理是在松弛区域内引入一个消波因子 α_R :

$$\alpha_R = 1 - (e^{X_R^{3.5}} - 1)/(e - 1) \quad (0 \leq X_R \leq 1)$$

(12)

式中 X_R 为消波因子的局部坐标。

X_R 轴正方向始终指向计算域外,这样使得消波因子在靠近流体内部一侧的变化非常缓慢,从而达到减少反射的目的。在松弛区域内,流速和体积分数等物理量(φ)由计算值(φ_c)和解析解(φ_a)加权得到:

$$\varphi = \alpha_R \varphi_c + (1 - \alpha_R) \varphi_a$$

(13)

2 模型建立

2.1 模型区域设置

本文建立的二维数值波浪水槽计算区域、计算边界及松弛区域内松弛因子分布如图 1 所示。水槽模型长度为 6 倍波长以上,其中造波区长度为 5 m,研究区长度为 4~5 倍波长,消波区为 1~2 倍波长,采用松弛区域法消波时,进口松弛区域长度为 5 m,根据初步模拟结果,出口松弛区域为 1 倍波长较为合理。模型顶部设置为大气边界,左侧边界为造波边界,水槽底部设置为无滑移壁面,出口边界根据消波方法的不同分别设置为无滑移壁面或辐射边界。

2.2 网格无关性分析

为保证模拟精度,本文选取三套网格进行网格无关性分析,具体网格参数见表 1。目标波高设置为 $H=0.1$ m,波长 $L=5.03$ m,采用推板造波,基于平方形式的阻尼函数消波。三套网格的计算结果如图 2 所示。由图 2 可知,mesh1 的模拟值与理论值相差较大,模拟精度较低,而 mesh2 和 mesh3 的模拟结果相近,并且十分接近理论值,都能达到较高的模拟精度。为保证模拟精度的同时还节省计算资源,后续计算采用 mesh2 的网格设置方式,并且在波面附近进行网格加密,以达到更好的模拟效果。三套网格及后续模型的计算时间均为 $20T$,计算时间步长取 $T/1\,000$ 。

2.3 紊流模型对比

为比较紊流模型对黏性流数值波浪水槽计算结果的影响,本文对比分析了目前比较常用的 $k-\varepsilon$ 紊流模型和 $k-\omega$ SST 紊流模型,模拟的波浪参数及采用的造波、消波方法与第 2.2 节相同。由图 3 可知, $k-\omega$ SST 紊流模型的模拟精度更接近理论值,而 $k-\varepsilon$ 紊流模型的计算结果与理论值的偏差相对较大,波浪衰减较为明显。因此,本文后续计算中均选择 $k-\omega$ SST 模型。

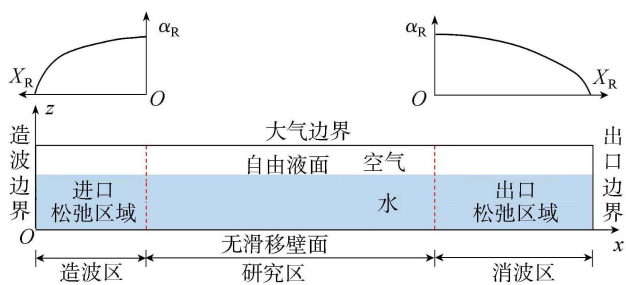


图 1 数值波浪水槽示意图

Fig. 1 Schematic map of NWT

表 1 网格参数

Table 1 Mesh parameters

网格	Δz	Δx	网格总数/ 10^4
mesh1	0.05H	0.003L	120
mesh2	0.1H	0.006L	30
mesh3	0.5H	0.012L	1.2

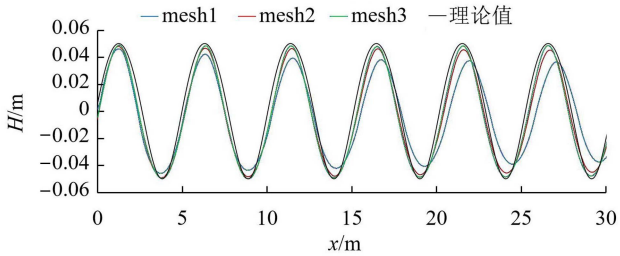


图 2 不同网格下的沿程波面

Fig. 2 Surface elevations with different mesh settings

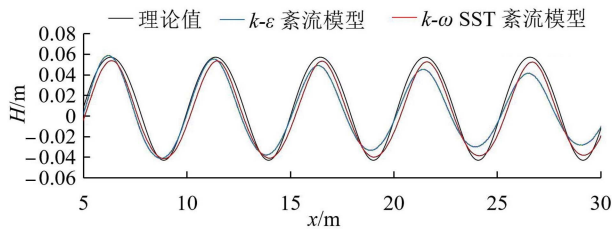


图 3 不同紊流模型的沿程波面模拟结果

Fig. 3 Simulation results of surface elevation with different turbulence models

3 计算结果分析

3.1 工况设置

本文对 6 种不同波陡的 Stokes 二阶波进行模拟计算,波陡范围为 0.01 ~0.06。各工况的波浪参数及模拟计算中采用阻尼消波法时的 θ_1 见表 2。由表 2 可知, θ_1 随着 i 的增大而增大。

3.2 消波效果

对表 2 中所示不同波陡工况,采用推板造波法产生 Stokes 二阶波,分别采用辐射边界法、阻尼消波法和松弛区域法进行模拟计算,对其消波效果进行对比分析。其中,在采用阻尼消波法时,对采用线性形式阻尼函数($r=1$)和平方形式函数($r=2$)的消波效果进行对比分析。本文采用 Ursell 等^[30]提出反射系数定量评价消波效果,一般认为反射系数在 5% 以内可以满足消波要求。

由表 3 可知,阻尼消波的 2 种阻尼函数形式的反射系数均在 5% 以内,都具有较好的消波效果,但是随着波陡的增加,平方形式的阻尼函数优势变得更加明显。而采用辐射边界法的消波效果仅仅在波陡较小的情况下($i=0.01$ 和 $i=0.02$),反射系数才满足要求,而在其他波陡情况下($i=0.03 \sim 0.06$),反射系数均大于 5%,采用松弛区域法计算得到的反射系数均保持在较小的水平,但是在大波陡工况下,松弛区域法不如平方形式的阻尼函数优势明显。在不同波陡情况下,线性形式和平方形式的阻尼函数能够保证较好的消波效果,而平方形式的阻尼函数相较于线性形式,消波效果上更有优势,并且从阻尼在消波区域内的分布来看,平方形式的阻尼函数更有利于保证研究区域内的模拟精度,阻尼分布更加合理。后续进行造波效果分析时,消波方法均采用基于平方形式阻尼函数的阻尼消波法。

3.3 造波效果

为对模型造波效果进行对比分析,对表 2 中所示不同波陡工况分别采用推板造波法和速度边界法进行 Stokes 二阶波的模拟计算,消波方法均采用基于平方形式阻尼函数的阻尼消波法。针对不同工况计算结果,由于所计算的工况波高差距较大,为了得到更合理的误差分析结果,首先将计算值与理论值通过 min-max 标准化方法进行归一化处理,再分别计算不同工况下的均方根误差,计算结果见表 4。

由表 4 可知,在波陡较小的情况下,波浪的非线性较弱,利用速度边界法具有较高的模拟精度,在波陡为 0.01 的情况下,速度边界法的模拟精度高于推板造波法。但是随着波陡的增加,波浪的非线性逐渐增强,速度边界逐渐变得不适用,模拟精度逐渐低于推板造波法。在波陡为 0.05 和 0.06 时,2 种造波方法产生的波浪与理论值的均方根误差相差较大,在模拟精度上推板造波法的优势较为明显。

本文的模拟计算在河海大学高性能计算平台上进行,每个工况利用 48 核心并行计算,CPU 类型为 2 颗 Intel Xeon 6240R(24 核 2.4GHz)。虽然推板造波能够产生较为精确的波形,但是在计算时间方面,采用推板造波法的计算耗时是速度边界法的 5 ~8 倍,尤其是在波陡较大,所需网格数量较多的情况下,计算耗时的差别会更加明显(表 4)。

表 2 波浪参数
Table 2 Wave parameters

工况	H/m	L/m	T/s	d/m	i	θ_1
W1	0.06	6.06	2.65	1.0	0.01	3.5
W2	0.10	5.21	2.00	1.0	0.02	4.0
W3	0.30	10.00	2.59	3.0	0.03	4.3
W4	0.35	8.75	2.40	3.5	0.04	4.6
W5	0.40	8.01	2.27	4.0	0.05	5.0
W6	0.50	8.25	2.30	5.0	0.06	5.3

注: i 为波陡。

表 3 反射系数计算结果
Table 3 Results of reflection coefficient

工况	反射系数/%			
	辐射 边界法	阻尼消波法		松弛 区域法
		$r=1$	$r=2$	
W1	3.51	3.20	2.95	0.43
W2	3.28	3.22	3.43	0.69
W3	5.56	1.11	0.68	0.81
W4	6.59	0.78	0.35	0.62
W5	9.06	0.46	0.38	0.75
W6	8.16	0.42	0.16	0.85

表 4 均方根误差及计算耗时

Table 4 Results of root-mean-square error and computing time

工况	均方根误差		计算耗时/min	
	推板造波法	速度边界法	推板造波法	速度边界法
W1	0.071 0	0.066 1	4	0.57
W2	0.101 6	0.100 1	5	0.66
W3	0.055 6	0.045 3	48	8
W4	0.045 7	0.053 0	62	9
W5	0.058 5	0.077 4	85	13
W6	0.095 6	0.184 5	151	29

图 4 为 6 种波陡工况下,采用 2 种造波方法的沿程波面计算结果与理论值的对比。波陡过小或过大都不容易产生与理论值吻合程度较高的结果。在小波陡工况(W1 和 W2)下,虽然计算值与理论值的均方根误差表现较小,但是在波形方面,2 种造波方法所产生的波浪与理论值都存在一定的偏差,而此时速度边界法所产生的波形在精度方面较有优势。在大波陡工况(W5 和 W6)下,波浪非线性较强,速度边界法的优势不明显,推板造波法具有较高的精度。此外,在 W3 和 W4 工况下,2 种造波方法所产生的波形与理论值吻合较好,采用速度边界法和推板造波法均能达到较高的模拟精度。

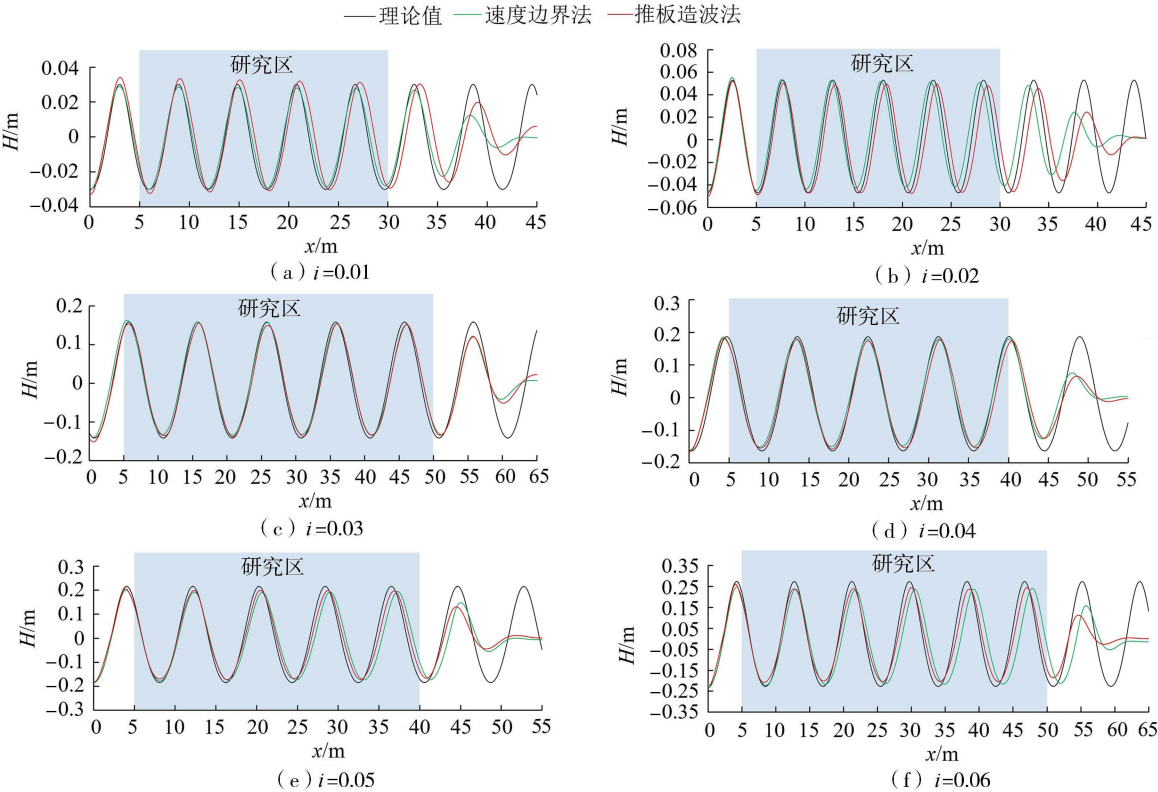


图 4 不同波陡条件下水槽内波高
Fig. 4 Wave height in tank under different wave steepness

为分析推板造波法和速度边界法所产生的波浪随时间变化的情况,在距离水槽造波边界 2 倍波长处设置监测点,监测波高随时间变化的情况。图 5 为采用 2 种造波方法达到稳定波高的时间序列(15 s 后)与理论值的比较情况。由图 5 可知,采用 2 种造波方法时监测点处波面历时曲线与理论值基本吻合,表现为小波陡工况(W1、W2 和 W3)下吻合程度较高,大波陡工况(W4、W5 和 W6)下吻合较差,误差主要体现在波峰处。另外,随着计算时间的增长,采用速度边界法和阻尼消波法的组合方式时出现了较为明显的水面抬升现象,如图 5(b)~(f)所示。波陡越大,水面抬升越明显,在 W6 工况($i=0.06$)下,波面最大约抬升了波高的 10%。出现水面抬升现象的原因是由于大波陡工况下,波浪的非线性较强,在一个波浪周期内边界上输入与抽取的速度不等,会引起质量守恒方面的问题,随着计算时间的增加,就产生了波面抬升问题^[31]。然而,采用推板造波法和阻尼消波法的组合方式时,在各个波陡工况下,均能保持波面稳定,没有出现水面抬升现象。

在进一步的模拟研究中发现,模拟非线性较强波浪时,如采用速度边界法造波,则必须采取相应的修正措施。例如,采用松弛区域法,在数值水槽的前后端添加松弛区,既能保证质量守恒又消除了二次反射波。图 6 为大波陡工况($i=0.06$)下采用速度边界法造波时,分别采用阻尼消波法和松弛区域法消波的计算结果与理论值的波面历时曲线对比,从图 6 可看出,松弛区域法能够有效避免波面抬升现象,模拟结果与理论值符合较好。

4 结 论

a. 消波效果方面,采用基于平方形式阻尼函数的阻尼消波法具有较好的消波效果。采用松弛区域法可

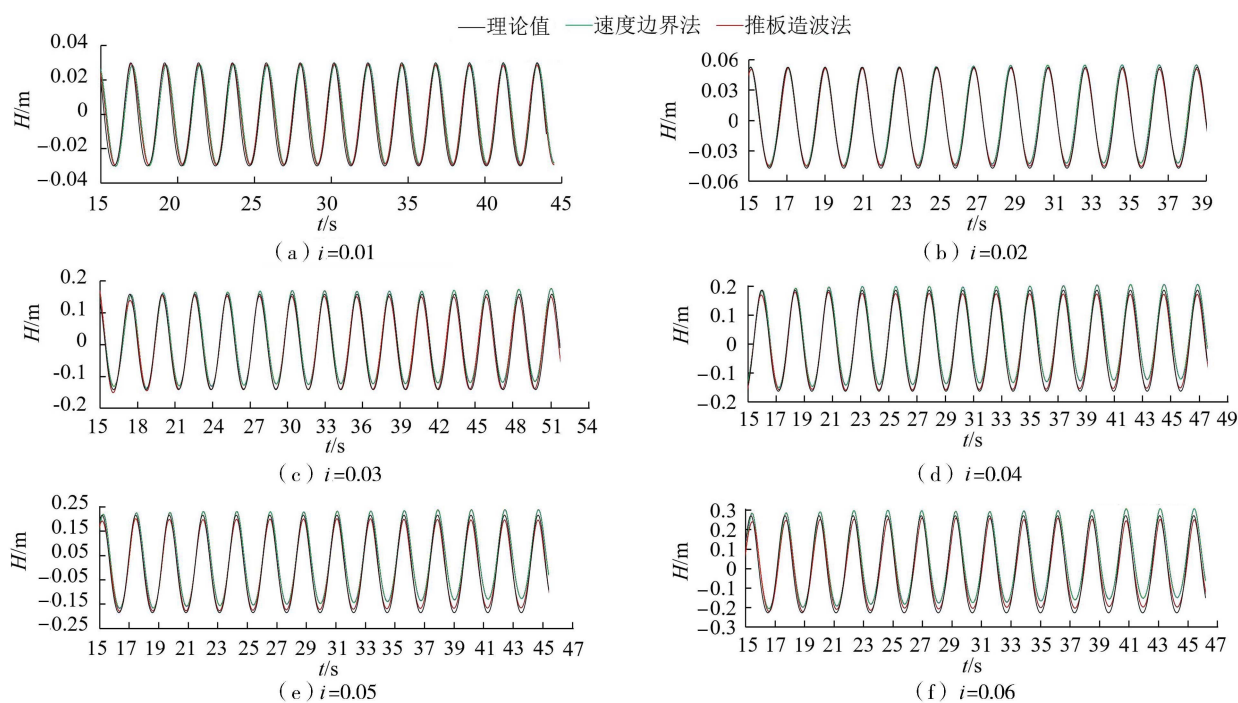


图 5 不同波陡条件下 $x=2L$ 处波面历时曲线

Fig. 5 Time histories of surface elevations at $x=2L$ with different wave steepness

有效消除大波陡工况下采用速度边界法导致的水面抬升现象。

b. 造波效果方面,速度边界法在小波陡工况下模拟精度较高,计算耗时较少。推板造波法在大波陡工况下模拟精度较高,波形稳定性较好。

c. 根据本文二阶规则波的数值模拟计算结果,对于小波陡($i=0.01 \sim 0.03$)工况采用速度边界法造波和松弛区域法消波的组合方式具有较高的模拟精度,对于大波陡($i=0.04 \sim 0.06$)工况采用推板造波法和基于平方形式阻尼函数的阻尼消波法消波的组合方式具有较高的模拟精度。

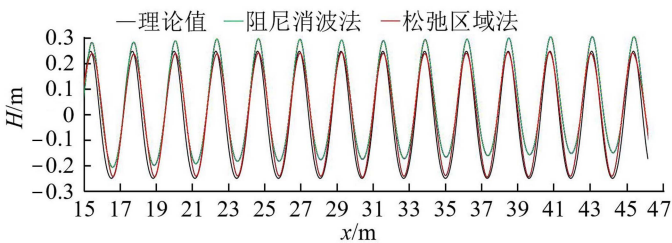


图 6 大波陡工况 ($i=0.06$) 时速度边界法修正效果对比
Fig. 6 Correction effects of velocity profile method in case with large wave steepness ($i=0.06$)

参考文献:

[1] 李蒙,徐振山,陈永平. 横流环境下振荡射流三维数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):54-60. (LI Meng, XU Zhenshan, CHEN Yongping. Three-dimensional numerical simulation of oscillating jet in cross flow environment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 54-60. (in Chinese))

[2] CHEN L F, ZANG J, HILLIS A J, et al. Numerical investigation of wave-structure interaction using OpenFOAM[J]. Ocean Engineering, 2014, 88: 91-109.

[3] 李雪临,路宽,韩林生,等. 基于 SPH-ALE 方法的波浪水槽数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2016,36(6):39-43. (LI Xuelin, LU Kuan, HAN Linsheng, et al. Numerical simulation of wave flume based on SPH-ALE method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(6): 39-43. (in Chinese))

[4] 张继生,钱方舒,童林龙,等. 细砾质斜坡海床上波浪的传播特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):150-157. (ZHANG Jisheng, QIAN Fangshu, TONG Linlong, et al. Experimental study on wave propagation over fine gravel slope seabed[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 150-157. (in Chinese))

[5] WANG D, GUI J, SUN J, et al. The 3-D numerical simulation of wave impact on a horizontal plate[C] //The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco: International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2017: ISOPE-I-17-312.

[6] HU Z Z, GREAVES D, RABY A. Numerical wave tank study of extreme waves and wave-structure interaction using open foam [J]. Ocean Engineering, 2016, 126: 329-342.

- [7] LIU X, LIN P, SHAO S. ISPH wave simulation by using an internal wave maker[J]. Coastal Engineering, 2015, 95: 160-170.
- [8] 徐刚, 卢通, 赵丽刚, 等. 数值水池中波浪衰减特性分析[J]. 船舶工程, 2019, 41(增刊2): 9-13. (XU Gang, LU Tong, ZHAO Ligang, et al. Wave attenuation analysis of numerical wave tank[J]. Ship Engineering, 2019, 41(Sup2): 9-13. (in Chinese))
- [9] HIGUERA P, INIGO J L, JAVIER L L. Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries[J]. Coastal Engineering, 2015, 101: 35-47.
- [10] PRASAD D D, AHMED M R, LEE Y H, et al. Validation of a piston type wave-maker using numerical wave tank[J]. Ocean Engineering, 2017, 131: 57-67.
- [11] MACHADO F M M, LOPES A M G, FERREIRA A D, et al. Numerical simulation of regular waves: optimization of a numerical wave tank[J]. Ocean Engineering, 2018, 170: 89-99.
- [12] LIN P, LIU P L F. Internal wave-maker for Navier-Stokes equations models[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1999, 125(4): 207-215.
- [13] MILGRAM J H. Active water-wave absorbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 42(4): 845-859.
- [14] WILLIAM F, JAMIE G. Numerical simulation of linear water waves and wave-structure interaction[J]. Ocean Engineering, 2012, 43: 23-31.
- [15] KIM S Y, KIM K M, PARK J C, et al. Numerical simulation of wave and current interaction with a fixed offshore substructure[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016, 8(2): 188-197.
- [16] HATAYAMA S. Comparison of effectiveness of four open boundary conditions for incompressible unbounded flows[R]. Tokyo: Technical Report of National Aerospace Laboratory, 1998.
- [17] CLÉMENT A. Coupling of two absorbing boundary conditions for 2D time-domain simulations of free surface gravity waves[J]. Journal of Computational Physics, 1996, 126: 139-151.
- [18] 邹志利, 邱大洪, 王永学. VOF 方法模拟波浪槽中二维非线性波[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1996, 11(1): 93-103. (ZOU Zhili, QIU Dahong, WANG Yongxue. Numerical simulation of nonlinear wave generated in wave flume by VOF technique[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser. A, 1996, 11(1): 93-103. (in Chinese))
- [19] 刘海青, 赵子丹, 张庆河. 台阶地形上波浪运动的数值研究[J]. 水利学报, 1998, 29(10): 8-13. (LIU Haiqing, ZHAO Zidan, ZHANG Qinghe. Numerical model for transformation of wave passing over a step[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(10): 8-13. (in Chinese))
- [20] ISRAELI M, ORSZAG S A. Approximation of radiation boundary conditions[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 41(1): 115-135.
- [21] BAKER G R, MEIRON D I, ORSZAG S A. Generalized vortex methods for free surface flow problems. II: Radiating waves[J]. Journal of Scientific Computing, 1989, 4(3): 237-259.
- [22] MÉNDEZ F J, LOSADA I J, LOSADA M A. Wave-induced mean magnitudes in permeable submerged breakwaters[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2001, 127(1): 7-15.
- [23] 韩朋. 基于 VOF 方法的不规则波阻尼消波研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [24] 王国玉, 顾新红, 秦世杰, 等. 基于 OpenFOAM 的挡板透空式防波堤水动力特性数值分析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 63-69. (WANG Guoyu, GU Xinhong, QIN Shijie, et al. Numerical simulation on hydrodynamic performance of baffle type breakwater based on OpenFOAM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 63-69. (in Chinese))
- [25] TIAN Xiaojie, WANG Qingyang, LIU Guijie, et al. Numerical and experimental studies on a three-dimensional numerical wave tank[J]. IEEE Access, 2018, 6: 6585-6593.
- [26] 董志, 詹杰民. 基于 VOF 方法的数值波浪水槽以及造波、消波方法研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24(1): 15-21. (DONG Zhi, ZHAN Jiemin. Comparison of existing methods for wave generating and absorbing in VOF-based numerical tank[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser. A, 2009, 24(1): 15-21. (in Chinese))
- [27] JACOBSEN N G, FUHRMAN D R, FREDSE J. A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012, 70: 1073-1088.
- [28] 田康, 张尧, 李金龙, 等. 基于 OpenFOAM 几何流体体积方法的波浪数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(1): 1-10. (TIAN Kang, ZHANG Yao, LI Jinlong, et al. Numerical wave simulation using geometrical VOF method based on OpenFOAM[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(1): 1-10. (in Chinese))
- [29] MADSEN O S. On the generation of long waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76(36): 8672-8683.
- [30] URSELL F, DEAN R G, YU Y S. Forced small-amplitude water waves: a comparison of theory and experiment[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1960, 7(1): 33-52.
- [31] WANG D X, SUN J W, GUI J S, et al. A numerical piston-type wave-maker toolbox for the open-source library OpenFOAM[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(4): 800-813.