

文章编号:1006-2467(2020)01-0060-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.01.008

基于改进质量源造波方法的非线性波数值模拟

马哲^{1,2}, 周婷², 孙家文^{1,3}, 房克照¹, 翟钢军^{1,2}

(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. 大连理工大学 深海工程研究中心, 辽宁 大连 116024;

3. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 传统的质量源造波方法在强非线性波浪模拟过程中精度不高,不同波况造波源区初始设置较为复杂,针对这些问题本文提出了改进方法.考虑质量源区双向质量输出(横向和垂向),改进质量源源强函数并进行理论推导;基于 OpenFOAM 开源程序开展网格和时间步长收敛性验证;讨论在不同相对水深以及不同非线性强度条件下,二阶 Stokes 波幅值和相位与文献中传统方法模拟结果的相对误差,并对孤立波的传播过程进行模拟分析.数值模拟结果表明,改进方法不仅能提高效率,而且能提高质量源造波在较强非线性范围的模拟精度,尤其在非线性强度参数为 0.2 时,波幅及相位误差相对于传统方法分别降低 21.7% 和 46.5%.

关键词: 质量源造波; 源区形状; 波浪非线性; OpenFOAM; 孤立波

中图分类号: TV 122

文献标志码: A

Numerical Simulation of Nonlinear Wave Based on an Improved Source Wave Method

MA Zhe^{1,2}, ZHOU Ting², SUN Jiawen^{1,3}, FANG Kezhao¹, ZHAI Gangjun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Deepwater Engineering Research Center, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 3. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: In the traditional mass source wave method, the accuracy is not high in the process of strong non-linear wave simulation, and the original setting of wave source area is complicated in different wave conditions. An improved method is proposed in this paper. Bidirectional quality outputs of the source area (lateral and vertical) are considered simultaneously, and the source function is improved and performed by theoretical derivation. The convergences of mesh and time step are verified based on the OpenFOAM program. The relative errors of second-order Stokes wave in amplitude and phase, comparing with traditional results, are discussed under different relative depths and different nonlinearity conditions. Then, a further simulation of the solitary waves propagation is performed. The numerical results show that the improved method can not only increase the efficiency but also improve the simulation accuracy of

收稿日期:2018-05-10

基金项目:国家自然科学基金(51651902), 辽宁省自然科学基金(201601056), 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT19JC47)资助项目

作者简介:马哲(1983-),男,辽宁省锦州市人,博士,讲师,研究方向为深海浮式结构概念设计及水动力性能分析.

通信作者:孙家文,男,副研究员,E-mail: sunjw84@126.com.

the mass source method in the high nonlinear range, especially when the nonlinearity parameter is 0.2, the amplitude error and the phase error are reduced by 21.7% and 46.5% respectively, compared to traditional ones.

Key words: mass source wave; source area shape; wave nonlinearity; OpenFOAM; solitary wave

基于计算流体力学(CFD)的数值造波方法是海洋工程领域的研究热点,常用的有推板造波法、速度入口法和源造波法.文献[1]基于速度入口法实现了二阶 Stokes 的数值模拟.文献[2-3]针对推板造波方法开展了相关研究,成功模拟了线性波和瞬时极限波.源造波法根据源项添加位置的不同可分为质量源和动量源两种^[4-5],作为一种新型造波方法,因能充分利用数值模拟的优势而受到越来越多的关注.以往研究^[5]表明,质量源造波较动量源法适用的水深范围更广,且可以实现线性波和非线性波等不同目标波浪的模拟,但源区形状会对目标波浪的模拟产生明显影响.文献[6]通过试算得出质量源造波源区的长度和宽度只有满足特定条件时才能达到比较理想的模拟效果;文献[7]在内域造波中通过多组波况的模拟分析拟合得到质量源长度和宽度的经验公式;文献[8]采用水平形式的质量源,考虑垂向质量输出,模拟了孤立波的行进过程;同样对孤立波传播进行数值模拟,文献[9]选择了垂向造波源,并指出以一个网格的水平长度 Δx 作为源区宽度可保证波浪模拟的精确性.然而,采用质量源进行数值造波得到的波高幅值往往小于理论值,仅仅依靠调节质量源的长度和宽度对模拟效果的改善存在局限性.文献[10]认为质量源在造波过程中的部分能量未能发挥作用,可以通过在源项表达式中乘一个放大系数以弥补损失的能量;文献[11]针对浅水情况,在源强方程中考虑了垂向源区上方的质量输出,避免了造波过程中源区上方水体高度值多次试算带来的不便.

为了改善质量源造波的效果,上述文献均对质量源形状进行了限制.质量源形状影响造波的主要原因是推导源强方程时没有完整地考虑质量输出在各个方向对造波所做的贡献,从而导致在一些情况下模拟值较理论解偏小.尤其在长宽比不满足条件时,仅考虑单方向质量输出不能满足精度要求,因此才有了使源项强度线性增大来弥补波能损失这一措施,但对于不同的波况,源强增大倍数也各有不同,每次都需要试算来确定显然费时费力.

基于上述问题,本文提出了一种无需限制源区形状的改进方法.首先从理论分析的角度,揭示了传统质量源造波法非线性波模拟出现波幅偏小的原

因,在此基础上修改源项方程,针对矩形质量源,充分考虑源区质量输出在各个方向对造波所做的贡献,得到了新的质量输出的源项函数.然后,利用改进方法模拟了不同相对水深、不同非线性条件下的 Stokes 二阶波和孤立波.在本文的模拟过程中,改进方法不依赖于源区形状的长宽比,因此对于不同的波况无需多次进行源区形状的调试工作,大大提高了工作效率.

1 数值模型

1.1 控制方程与数值求解方法

数值模型基于开源 CFD 类库 OpenFOAM 中不可压缩气液二相流求解器 interFoam^[12],采用 Volume of Fluid (VOF) 方法^[13-14]进行自由面的捕捉,控制方程为连续性方程、引入相体积分数 α 的动量方程以及 VOF 方程:

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u} + \rho \boldsymbol{\tau}) = C \kappa \nabla \alpha - g \mathbf{X} \nabla \rho - \nabla P_{\sigma X} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) + \nabla \cdot [\alpha(1 - \alpha) \mathbf{u}_r] = 0 \quad (3)$$

式中: \mathbf{u} 为平均速度; t 为时间; $\rho \boldsymbol{\tau}$ 为雷诺应力项,其中 $\boldsymbol{\tau}$ 表征由于脉动值引起的雷诺应力张量,为二阶对称张量; $C \kappa \nabla \alpha$ 为表面张力项, C 为表面张力系数,一般取 0.07 kg/s^2 , κ 为自由面曲率; g 为重力加速度; \mathbf{X} 为位置矢量; \mathbf{u}_r 代表相对速度,含有 \mathbf{u}_r 的项为人工压缩项^[15],只在二相交界面处起作用. ρ 和 μ 分别为二相流的平均密度和平均动力黏度:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (4)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2 \quad (5)$$

对控制方程的求解需要对时间和空间进行离散, OpenFOAM 采用有限体积法离散框架,时间积分项采用隐式欧拉格式,体积分中的对流项采用 Guass limitedLinearV 1 格式离散,黏性扩散项采用 linear corrected,其余用线性插值.速度压力场采用分离式(segregated)算法 PISO.离散后的线性方程组采用预处理共轭梯度法求解.

1.2 改进的质量源造波理论推导

为了实现质量源造波,需要在造波源区对式(1)

添加源项,如下所示.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = s(x, y, t) \quad (6)$$

式中: u 和 v 分别是质量源区内质点的水平和垂向速度; x 和 y 为位置, $s(x, y, t)$ 为质量源源强. 不同的目标波浪对应不同的源强表达式, 其推导过程如下:

$$\int_0^t \int_{\Omega} s(x, y, t) d\Omega dt = 2 \int_0^t c\eta(t) dt \quad (7)$$

式中: c 为目标波浪的相速度; $\eta(t)$ 为自由表面方程; Ω 为质量源所在的区域. 式(7)的意义为在某一时间段内, 质量源区质量的输出用于产生目标波浪^[16]. 右端系数 2 表示质量源区的质量输入向左右两边都产生了波浪. 简化式(7)可得

$$s(x, y, t) = \frac{2c\eta}{A} \quad (8)$$

式中: A 为质量源区的面积.

上述推导过程考虑了质量源在相速度方向的质量输出, 忽略了垂向, 而实际上源区的质量输出在 4 个方向同时存在. 基于此, 本文进行了如下改进.

在质量源区, 假设每个网格应该满足以下关系:

$$s(x_i, t)L_s H_s \Delta t = 2u(x_i, t)H_s \Delta t + 2v(x_i, t)L_s \Delta t \quad (9)$$

式中: L_s 和 H_s 分别是质量源的长和宽. 对式(9)进行化简可得

$$s(x_i, t) = \frac{2u(x_i, t)}{L_s} + \frac{2v(x_i, t)}{H_s} \quad (10)$$

根据文献[17], 质量源造波在原理上类似于水下爆炸, 爆炸瞬间质点向各个方向的运动速度相同, 质量源向外输出流体沿各方向的速度也相等, 即 $u = v$. 最终源强简化为

$$s(x_i, t) = 2u(x_i, t) \left(\frac{1}{L_s} + \frac{1}{H_s} \right) \quad (11)$$

为了保证数值的稳定性, 源强函数的初始值应为 0. 在源强中添加缓启动因子 (SSF), 定义在很短的初始时间段 t_0 内, 源强函数的值从 0 开始增加, 具体表达如下:

$$\text{SSF} = \begin{cases} 0.5 \left(1 - \cos \frac{\pi t}{t_0} \right), & t \leq t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases} \quad (12)$$

最终, 源强的表达式为

$$s^*(x, y, t) = s(x, y, t) \text{SSF} \quad (13)$$

由式(11)可见: 当 L_s 和 H_s 不在同等量级时, 以横向质量源 ($L_s \gg H_s$) 为例, 此时可以忽略式(10)右端第一项, 仅需要考虑质量源区垂向方向质量输出就能满足造波的精度, 所以利用式(8)推导出的

质量源源项在横向质量源中可以取得较好模拟结果; 同理, 竖向质量源 ($L_s \ll H_s$) 只需考虑横向质量输出也能达到数值造波的精度要求. 但当质量源的长宽比介于 0.1~10 时, 只考虑单方向质量输出时得到的数值结果普遍较差, 因为这种近似本身存在理论上的缺陷, 需要对质量源形状限制来弥补. 式(11)考虑了质量源区 4 个方向的质量输出, 其造波精度不依赖于矩形源区的形状变化, 提高了源区形状变化的灵活性.

1.3 消波方法

为了防止波浪反射对模拟效果的影响, 本文在数值水槽的左右两端分别添加阻尼层. 常用的阻尼消波方式有指数、线性、根号、平方等形式, 合理选择消波函数会对反射率产生影响^[18]. 本文算例均采用线性阻尼消波形式, 衰减系数取 8, 可取得较好的消波效果.

2 Stokes 二阶波的数值模拟

以二维情形为例进行模拟, 数值波浪水槽总长 8.46 m, 高 0.26 m, 水深 0.2 m, 水槽左右两端和底端为固壁边界类型, 上端为压力出口边界. 质量源区位于水槽中间, 根据文献[6]源区位置设置经验法则, 源区中心距静水面的距离设为 1/3 水深, 阻尼消波段首尾各为 1.21 m, 如图 1 所示.

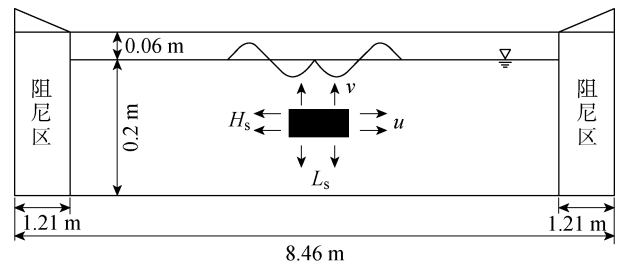


图 1 二维数值水槽示意图

Fig. 1 Diagram of 2D numerical wave tank

Stokes 二阶波的自由表面函数为

$$\eta = -\frac{A^2 k}{2 \sinh(2kd)} + \frac{A^2 k \cosh(kd(2 \cosh^2 kd + 1))}{4 \sinh^3(kd)} \cos(2(kx - \omega t)) \quad (14)$$

式中: k 为波数; d 为水深; ω 为圆频率. 将式(14)代入式(12), 得到 Stokes 二阶波的质量源源强表达式.

2.1 网格、时间步长对造波效果的影响

既往研究^[2]表明, 网格和时间步长尺度选取带

来的数值黏性对数值水槽的模拟效果具有重要影响.以 Stokes 二阶波为例,水深 $d=0.2\text{ m}$,波高 $H=0.04\text{ m}$,并定义无量纲参数 ϵ 表示波浪的非线性($\epsilon=H/d$).分别选取 3 组不同网格大小和 4 组不同时间步长的工况,对数值模拟结果的影响进行比较分析.

3 组不同网格的设置和模拟结果如表 1 所示

表 1 网格的验证
Tab.1 Verification of mesh

算例	垂向网格尺寸/m	网格总数	$\Delta t/T$	理论波高/m	模拟波高 $\times 10^2/\text{m}$	模拟误差/%
M1	0.010	18 330	0.002	0.04	3.716	7.10
M2	0.004	45 825	0.002	0.04	3.882	2.95
M3	0.002	91 650	0.002	0.04	3.890	2.76

4 组不同时间步长的设置和模拟结果如表 2 所示,时间步长对数值模拟的影响程度不大,当时间步长取 0.02 s 时,模拟结果与理论值的误差为 3.15% ,满足精度要求.算例 T1 和 T2 时间步长分别取 0.002 和 0.001 s ,同算例 T3 相比,误差改善效

表 2 时间步长的验证
Tab.2 Verification of time step effects

算例	网格总数	$\Delta t/T$	理论波高/m	模拟波高 $\times 10^2/\text{m}$	模拟误差/%
T1	91 650	0.001	0.04	3.905	2.37
T2	91 650	0.002	0.04	3.900	2.51
T3	91 650	0.020	0.04	3.874	3.15
T4	91 650	0.050	0.04	3.834	4.15

(其中 T 为波浪周期),横向网格始终保持为 0.012 m ,可见加密垂向网格有利于数值模拟精度的提高.从算例 M1 到算例 M2,数值模拟波幅与理论值的误差明显减小.从算例 M2 到算例 M3,网格数量翻倍,但误差结果相差不大.模拟结果证明 1 个波高内有 10 个网格时可实现理想的造波精度,因此采用 0.004 m 作为垂向网格的长度.

果不明显,但是计算时间大大增加.综合考虑后,选取时间步长为 0.02 s ,即为 $0.02\text{ }T$ 时,计算代价最小.

2.2 不同波高时二阶 Stokes 波的模拟

数值造波对非线性参数 ϵ 要求相对比较苛刻,对于非线性较强的波浪,往往模拟效果不理想^[19].为了检验改进后质量源造波方法的可行性和适用范围,本文探究了相同水深下不同波高时 Stokes 二阶波的模拟效果.设置时间步长为 0.02 s ,网格 0.004 m , $d=0.2\text{ m}$, $T=1\text{ s}$, $H=0.01,0.04,0.05\text{ m}$,相应 $\epsilon=0.05,0.2,0.25$.距离源区中心 1 倍波长处的自由液面高度随时间的变化过程以及与理论值对比如图 2~4 所示.

由图可见, $\epsilon=0.05,0.2$ 时,本文方法模拟效果

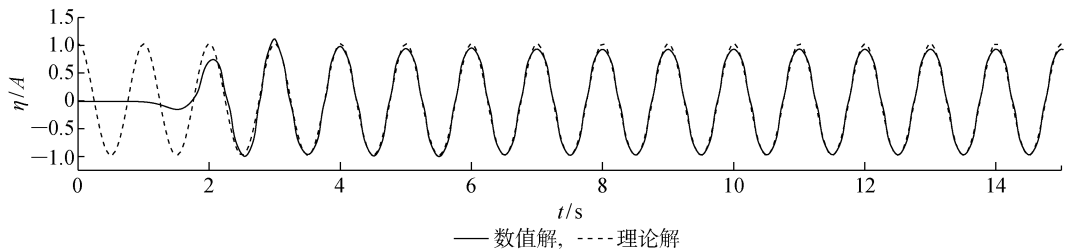


图 2 $\epsilon=0.05$ 时数值解和理论解的对比 ($H=0.01\text{ m}$)
Fig.2 Comparison of numerical results and theoretical analysis ($H=0.01\text{ m}$, $\epsilon=0.05$)

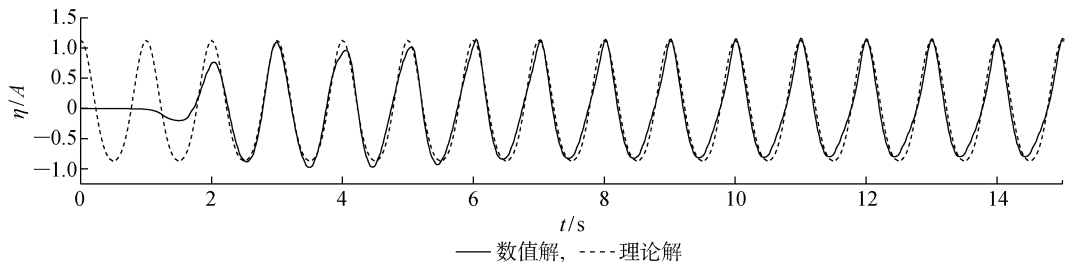


图 3 $\epsilon=0.2$ 时数值解和理论解的对比 ($H=0.04\text{ m}$)
Fig.3 Comparison of numerical results and theoretical analysis ($H=0.04\text{ m}$, $\epsilon=0.2$)

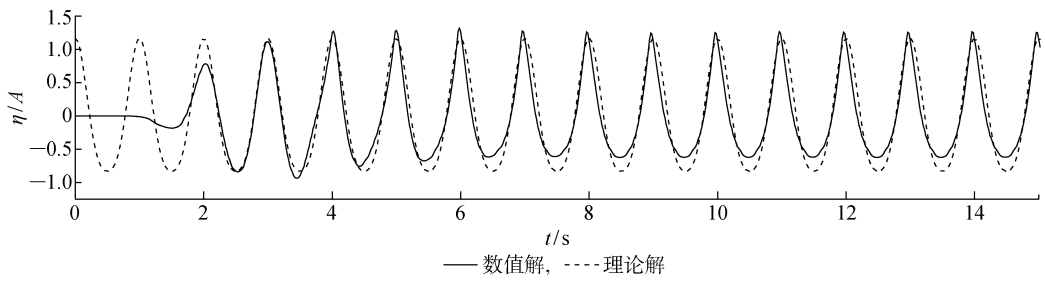


图 4 $\epsilon=0.25$ 时数值解和理论解的对比 ($H=0.05\text{ m}$)

Fig. 4 Comparison of numerical results and theoretical analysis ($H=0.05\text{ m}$, $\epsilon=0.25$)

比较理想. 虽然波谷处与理论波面存在微小误差, 但仍在精度范围内, 波峰与理论波面吻合很好, 整个波形的模拟效果非常理想. 当 $H/d=0.25$ 时, 波谷处数值解与理论波形的偏差增大, 且整个波形有上漂趋势. 因此, 本文方法对于 $\epsilon=0.05\sim 0.2$ 的 Stokes 二阶波模拟效果较好.

2.3 数值模拟精度的改善

ϵ 为衡量数值水槽造波能力的重要参数, 为了

验证本文方法对造波效果的改善作用, 以 ϵ 大小为标准与前人模拟结果进行了比较. 文献[20]基于质量源造波方法对 Stokes 二阶波进行了数值模拟, 波浪参数中 $H=0.1\text{ m}$, $d=1.8\text{ m}$, 文献[6]利用质量源造波方法模拟 Stokes 二阶波, 在源强推导中考虑了水平方向质量输出, 选取 H/d 为 0.2 和 0.3. 针对 3 种不同 ϵ 值, 本文的数值模拟结果与文献进行对比, 结果如图 5~7 和表 3 所示.

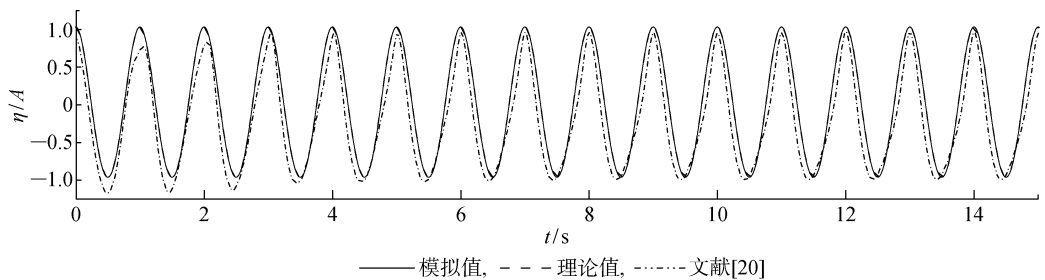


图 5 二阶 Stokes 波时历曲线 ($\epsilon=0.05$)

Fig. 5 Time history of second-order Stokes ($\epsilon=0.05$)

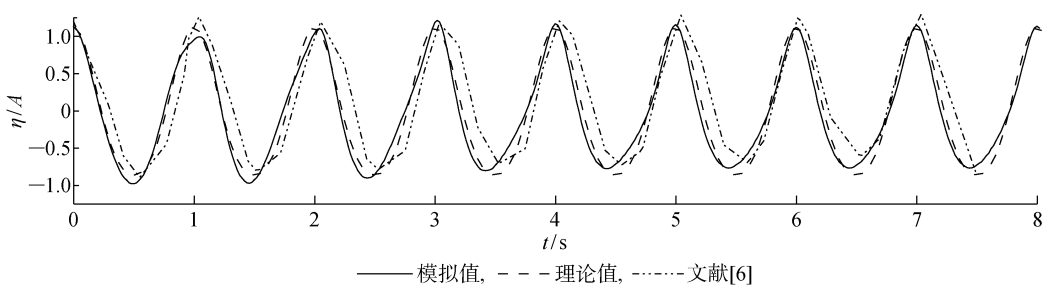


图 6 二阶 Stokes 波时历曲线 ($\epsilon=0.2$)

Fig. 6 Time history of second-order Stokes ($\epsilon=0.2$)

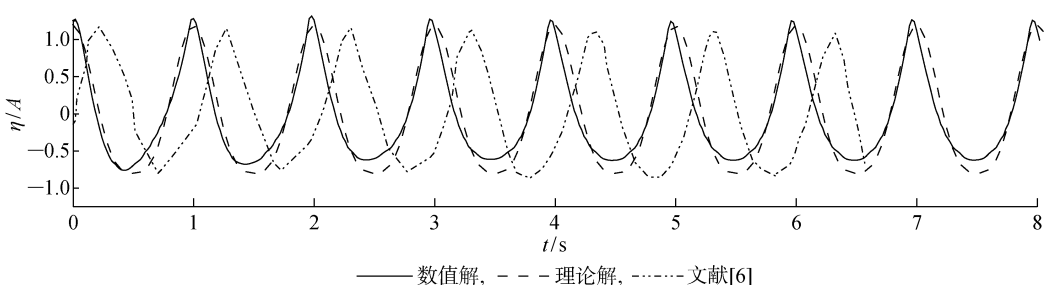


图 7 二阶 Stokes 波时历曲线 ($\epsilon=0.3$)

Fig. 7 Time history of second-order Stokes ($\epsilon=0.3$)

表 3 数值误差对比

Table 3 Comparison of numerical errors

ϵ	文献[20]		文献[6]		本文方法	
	波幅	相位	波幅	相位	波幅	相位
	误差/%	误差/%	误差/%	误差/%	误差/%	误差/%
0.05	2.43	1.57	—	—	1.19	1.04
0.20	—	—	3.41	6.20	2.67	3.32
0.30	—	—	2.87	15.38	3.04	5.60

由表 3 可见:本文改进后的方法在 $\epsilon=0.05\sim 0.20$ 时,对波幅误差有较好的改善效果;尤其在 $\epsilon=0.20$ 时,波幅误差及相位误差相对于传统质量源造波方法分别降低 21.7%和 46.5%;当 $\epsilon=0.30$ 时,

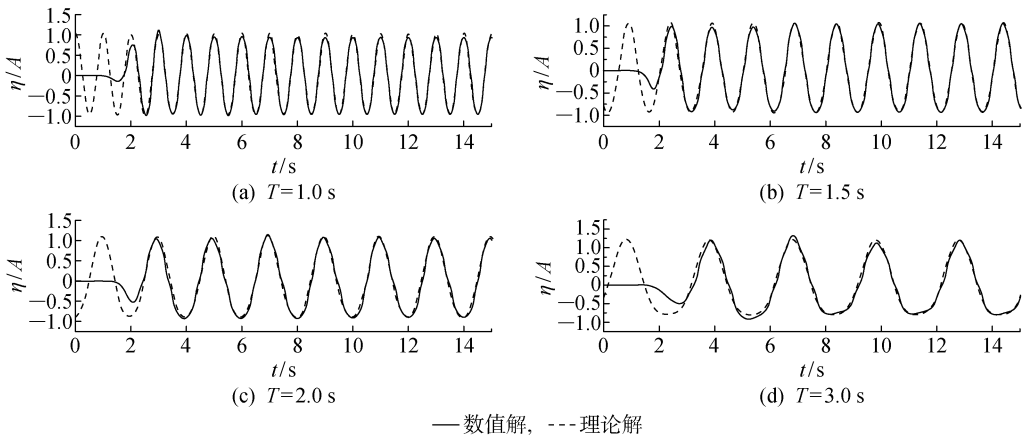


图 8 不同周期时数值解和理论解的对比

Fig. 8 Comparison of numerical results and theoretical analysis with different periods

深为 0.30~1.08 均适用,无需严格按照经验公式^[7]计算源区宽度,这证实本文方法不仅降低了造波时对源区形状的限制,并且能取得较好的模拟效果。

3 孤立波传播的数值模拟

为了验证本文方法的实用性,利用改进后的质量源方法对孤立波的传播进行模拟.孤立波的自由表面方程如下:

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left(\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - ct) \right) \tag{15}$$

将其代入式(12)即可得到孤立波对应的源强表达式。

3.1 单个孤立波的传播模拟

孤立波为一种浅水波,有其独特性.数值水槽尺寸如图 9 所示.时间步长为 0.001 s,水平网格边长为 0.02 m,垂向网格边长为 0.01 m。

左右两列孤立波 W1 和 W2 为镜像对称,因此选取任意 1 列作为研究对象即可.图 10 展示了不同时刻下 W2 的波面图, $H=0.005\text{ m}$,将模拟结果无

波幅误差与文献中模拟方法相比结果接近,但相位误差减小了 63.6%。

2.4 不同相对水深时二阶 Stokes 波的模拟

同前人工作类似,文献[7]通过设置多组波况拟合得到源区宽度的经验公式,不同的相对水深(kd)代入经验公式可得到不同的源区宽度,而本文在介绍改进的质量源源项推导过程时,发现改进方法的造波效果不依赖于源区形状.为了探究这一结论的正确性,本文设置 4 组波况,选取 $H=0.01\text{ m}$, $d=0.2\text{ m}$ ($\epsilon=0.05$), $T=1.0,1.5,2.0,3.0\text{ s}$,则距离源区中心 1 倍波长处的自由液面高度随时间的变化过程与理论值对比如图 8 所示。

由图 8 可知,改进的质量源造波方法在相对水

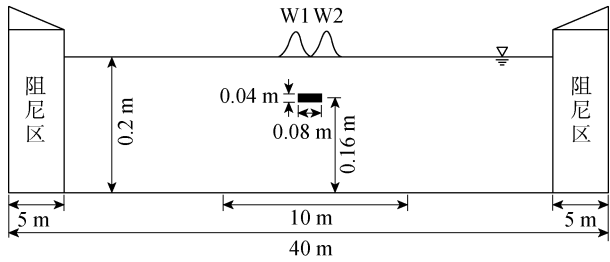


图 9 单源数值水槽示意图

Fig. 9 Diagram of a single-source numerical wave tank

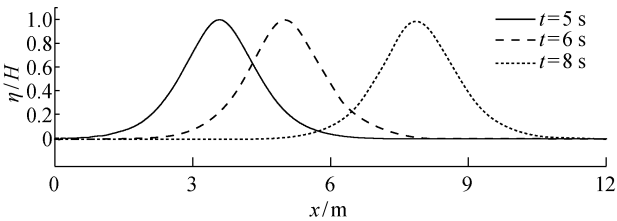


图 10 不同时刻下孤立波的波面

Fig. 10 Wave surface elevation of solitary waves

因次化,可见孤立波在传播过程中波形稳定且振幅衰减减小.

图 11 分别展示了在 $d=0.2\text{ m}$, $t=5\text{ s}$ 时 $H=0.005, 0.01, 0.04, 0.05\text{ m}$ 的孤立波波面曲线. 由图 11 可见, 3 种不同波高情况下基于本文方法得到的

波面与理论解吻合很好,随着 ϵ 的增大,波峰处误差逐渐增大,主要是由于两列孤立波中间出现了扰动,导致一部分能量损失,并且随着 ϵ 值的增大,扰动出现了增大趋势. 分析发现, ϵ 达到 0.2 时,模拟精度在可接受范围内.

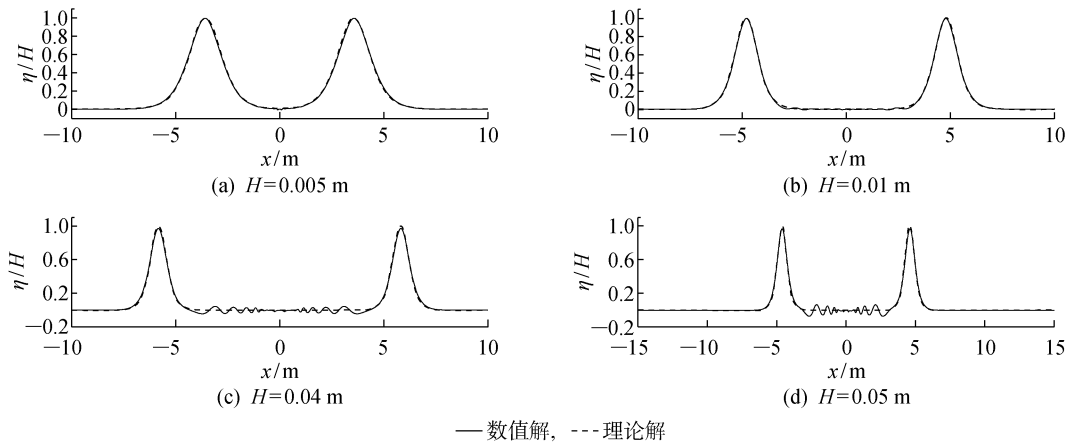


图 11 不同波高时孤立波的数值解与理论解的对比 ($t=5\text{ s}$)

Fig. 11 Comparison between numerical results and theoretical analysis with different wave heights ($t=5\text{ s}$)

3.2 孤立波“碰撞”过程的数值模拟

为了检验本文方法的有效性,选取两列孤立波相向运动及“碰撞”后演化过程作为数值算例. 为了产生两列相向运动的孤立波,在水槽中设置 2 个质量源区,数值水槽尺寸如图 12 所示.

左右设置的 2 个质量源区 S1 和 S2 都产生了沿左右传播的孤立波,左侧 S1 产生的波标记为 L1, L2,右侧 S2 产生的波标记为 R1, R2. 图 13 给出了孤立波产生和传播的过程. 当 $t=5\text{ s}$ 时, S1 和 S2 分别产生两列孤立波,在 $t=6\text{ s}$ 时, L2 和 R1 刚好重叠,此时能量达到最大.

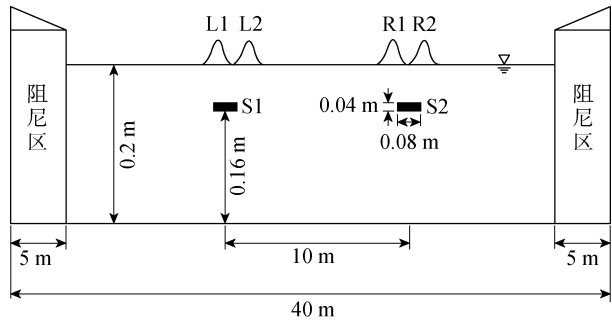


图 12 水槽布置示意图

Fig. 12 Layout of the numerical wave tank

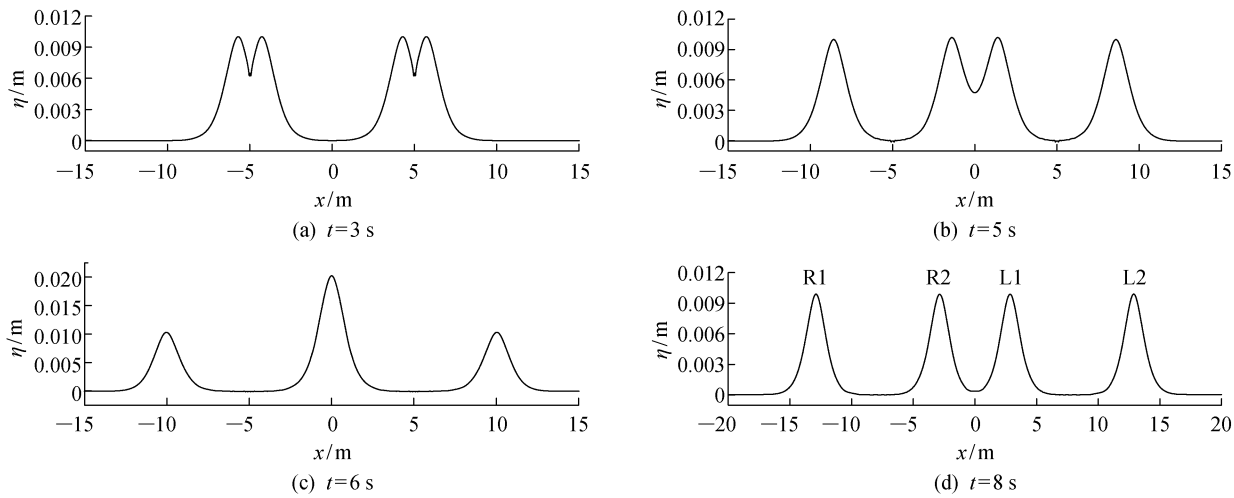


图 13 孤立波碰撞过程中不同时刻下的波面图

Fig. 13 Wave surface elevation at different time during the process of collisions in solitary waves

文献[21]通过理论推导,得出孤立波叠加的理论最大波高计算公式为

$$\eta_{\max} = H_1 + H_2 + \frac{H_1 H_2}{2} + \frac{3}{8} H_1 H_2 (H_1 + H_2) \quad (16)$$

式中:右侧第3项和第4项分别为2阶和3阶小量,在此忽略其量纲的贡献.本文取 H_1 和 H_2 都为0.01 m,计算得到理论最大波高为0.020 05 m,数值解和理论解的误差小于1%.因此本文方法同样适用于孤立波“碰撞”过程模拟.

4 结语

本文针对传统质量源造波法对强非线性波模拟效果不佳的问题,考虑双向质量输出,提出改进方法.通过理论分析与推导得出新的质量源源项函数,利用该源项公式对Stokes二阶波、孤立波传播过程进行数值模拟,计算结果表明:

(1) 质量源对于垂向网格尺寸比较敏感,1个波高内含10个网格时模拟效果较好;时间步长越短,数值黏性越小,取时间步长为 $0.02T$ 时,在保证造波精度的前提下减少了计算代价.

(2) 本文方法避免了对质量源区形状的过多限制(传统线形造波源长宽比小于0.1或大于10),省去了源区形状调试工作,提高了工作效率.

(3) 本文方法提高了对强非线性波浪的模拟精度,对于 $H/d=0.05\sim 0.3$ 的Stokes二阶波取得很好的模拟效果;尤其在 $H/d=0.2$ 时,波幅误差及相位误差相对于传统方法分别降低21.7%和46.5%.

(4) 对于 $H/d=0.025\sim 0.25$ 的孤立波,本文方法的数值解与理论解吻合很好,并且同样适用于孤立波碰撞叠加过程的模拟.

围绕质量源造波的相关问题还需要进一步开展相关研究,如改善质量源造波在强非线性范围的造波精度;参照前人的工作,将质量源造波方法与动量源造波方法进行比较和分析;在现有二维算例的基础上,拓展三维质量源造波方法,并开展斜向波的数值模拟.

参考文献:

[1] 刘霞,谭国焕,王大国.基于边界造波法的二阶Stokes波的数值生成[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,29(1):107-111.
LIU Xia, TAN Guohuan, WANG Daguo. Numerical simulation of second-order Stokes based on wave-generation method of defining inlet boundary condi-

tions[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2010, 29(1): 107-111.

[2] 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.
CHA Jingjing, WAN Decheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM[J]. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(3): 1-12.

[3] 万德成,缪国平.数值模拟波浪翻越直立方柱[J].水动力学研究与进展(A辑),1998,13(3):363-370.
WAN Decheng, MIAO Guoping. Numerical simulations of waves overtopping an erect quadrate column[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1998, 13(3): 363-370.

[4] CHOI J, YOON S B. Numerical simulations using momentum source wave-maker applied to RANS equation model[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(10): 1043-1060.

[5] LARA J L, GARCIA N, LOSADA I J. RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures[J]. *Coastal Engineering*, 2006, 53(5/6): 395-417.

[6] LIN P Z, LIU P L F. Internal wave-maker for Navier-Stokes equation models[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1999, 125(4): 207-215.

[7] 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.

[8] HAFSIA Z, HADJ M B, LAMLOUMI H, *et al.* Internal inlet for wave generation and absorption treatment[J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(9): 951-959.

[9] 李宏伟.造波理论与方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
LI Hongwei. The research on theory and method of wave-generating technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

[10] PERIC R, ABDEL-MAKSoud M. Generation of free-surface waves by localized source terms in the continuity equation[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 109: 567-579.

[11] 田正林,孙昭晨,梁书秀.浅水中质量源造波方法[J].水道港口,2017,38(4):325-329.
TIAN Zhenglin, SUN Zhaochen, LIANG Shuxiu. The method of mass source wavemaker in shallow water[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2017, 38(4): 325-329.

[12] 张恩臻.数值模拟两相流求解器interFoam的应用

- [J]. *科技视界*, 2015, 7: 5-6.
- ZHANG Enzhen. The application of two-phase flow solver interFoam in numerical simulation[J]. *Science & Technology Vision*, 2015, 7: 5-6.
- [13] 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*, 1996, 11(1): 93-103.
- [14] 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*, 2009, 24(1): 15-21.
- [15] WELLER H G. A new approach to VOF-based interface capturing methods for incompressible and compressible flow[R]. London: OpenCFD, 2008.
- [16] HA T, LIN P, CHO Y. Generation of 3D regular and irregular waves using Navier-Stokes equations model with an internal wave maker[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 76: 55-67.
- [17] BRORSEN M, LARSEN J. Source generation of nonlinear gravity waves with the boundary integral equation method[J]. *Coastal Engineering*, 1987, 11(2): 93-113.
- [18] TROCH P, ROUCK J D. Development of two-dimensional numerical wave flume for wave interaction with rubble mound breakwaters[C]// *26th International Conference on Engineering*. Reston, VA, USA: ASCE, 1998: 1638-1649.
- [19] 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 Dezhi, TENG Bin, TAN Li, *et al.* Numerical simulation of fully nonlinear focused wave groups[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 875-881.
- [20] 刘秀丽, 段梦兰, 高攀, 等. 基于 OpenFOAM 的数值波浪水槽研究[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2015, 54(3): 373-378.
- LIU Xiuli, DUAN Menglan, GAO Pan, *et al.* Development of numerical wave flumes based on OpenFOAM. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2015, 54(3): 373-378.
- [21] SU C S, MIRIE R M. On head-on collisions between two solitary waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1980, 98(3): 509-525.

(本文编辑:蒋霞)