

Comparison of Two Methods of Wave Generating in 3-D Numerical Wave Tank*

Zhipeng Wang¹, Guoxiang Hou¹, Yang Yu¹, Sheng Xu², Yumei Zhu²

¹Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

²China Ship Design and Research Center, Wuhan

Email: kongkongshan@sina.cn

Received: Oct. 14th, 2013; revised: Oct. 20th, 2013; accepted: Oct. 23rd, 2013

Copyright © 2013 Zhipeng Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Wave-generating technology is becoming more and more mature with the development of the computer technology. Compared with physical experiment, it is easier for implementation and lower at cost. The numerical wave tanks are the frontiers of the shipbuilding and ocean engineering hydrodynamic fields in these days. Velocity-inlet boundary wave generating and mass source wave generating are the common methods. In this paper, both of the two methods are used for the simulation of numerical wave tank and the results are satisfactory. High precision and low attenuation are the merits of mass source wave generating, while velocity-inlet boundary wave generating has the advantage of easy implementation and good algorithm convergence. In general, mass source wave generating is better. Research in this paper can serve as a foundation for the simulation of numerical waves in structure-wave problems.

Keywords: Numerical Wave Tank; Linear Wave; Irregular Wave; Source Generation of Waves

两种三维数值造波方法的对比研究*

王志鹏¹, 侯国祥¹, 余洋¹, 许晟², 祝玉梅²

¹华中科技大学船海学院, 武汉

²中国舰船研究设计中心, 武汉

Email: kongkongshan@sina.cn

收稿日期: 2013年10月14日; 修回日期: 2013年10月20日; 录用日期: 2013年10月23日

摘要: 数值造波技术随着计算机技术的发展越来越成熟, 其与物理实验相比具有易实现、低成本的优点, 是研究船舶与海洋工程水动力学的前沿课题。速度入口边界造波和质量源造波是两种比较常见的造波方法, 本文分别采用这两种方法对波浪进行了模拟, 结果表明, 两种方法均得到预期的数值波浪, 质量源造波技术的精度高, 波浪传播过程衰减减小, 而设置边界造波实施简单和易于收敛, 总的来说质量源造波效果优于设置边界造波技术。为研究结构物在波浪中响应时数值造波方法的选取提供参考。

关键词: 数值波浪水池; 线性波浪; 不规则波; 源造波

1. 引言

数值波浪水池的目的是尽可能的接近物理波浪水池, 通过数值模拟和物理实验的对比分析, 既能推

动理论研究的进行, 也能为工程问题的解决提供很好的方案。数值波浪水池的建立最直观的方式是模拟物理推板造波机的运动^[1-3]。随着造波理论研究的深入, 引入动量方程^[4]、速度入口边界造波等方法推动的数

*基金项目: 自然科学基金(50975103)。

值造波技术的发展。人工阻尼消波^[5]多孔介质消波^[6]等消波技术使数值波浪水池更加完善,在海洋工程领域的应用更为普遍。

2. 控制方程

对于粘性不可压流体,其连续性方程和 N-S 方程为控制方程:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \\ & f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ & = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ & f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ & = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ & f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \\ & = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: μ 为流体的动力粘性系数,是流体本身的固有属性; P 为流体内部压强,速度和压强是流场的两个关键变量; ρ 为流体密度;自由液面采用 VOF 方法追踪,即:

$$\left\{ \begin{aligned} & \rho = \sum_{q=1}^2 \rho_q \alpha_q, \quad \sum_{q=1}^2 \alpha_q = 1 \\ & \frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial(u\alpha_q)}{\partial x} + \frac{\partial(v\alpha_q)}{\partial y} + \frac{\partial(w\alpha_q)}{\partial z} = 0 \quad q=1,2 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

数值波浪模拟是通过求解 N-S 方程来实现的。N-S

方程组是相互耦合的二阶非线性偏微分方程,其解析解是难以得到的,湍流模型的提出和发展,使得粘性 N-S 方程组可以进行数值求解。本文计算模型(图 1)选取 RNG 雷诺时均模型进行计算求解,数值水池中产生的波浪比较贴近理论值。

3. 数值造波

3.1. 速度入口边界造波

在自由液面以下造波边界上流体质点的速度按照所造波对应的波浪理论解设定,即在左边界给定流场的入口速度,通过控制入口速度的变化达到数值波浪的模拟效果。侧壁定义零剪应力边界,其余边界定义标准壁面函数。

3.1.1. 规则线性波

根据波浪理论,有限水深中规则波速度为:

$$\left\{ \begin{aligned} & u(x, y, z, t) = A\omega \frac{\cosh k(y+h)}{\sinh kh} \cos(kx - \omega t) \\ & w(x, y, z, t) = A\omega \frac{\sinh k(y+h)}{\sinh kh} \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

波面方程:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad (4)$$

3.1.2. 不规则波

根据线性叠加原理,不规则波的速度为:

$$\left\{ \begin{aligned} & u(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \omega_i A_i e^{k_i z} \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \\ & v(x, y, z, t) = 0 \\ & w(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \omega_i A_i e^{k_i z} \sin(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \end{aligned} \right. \quad (5)$$

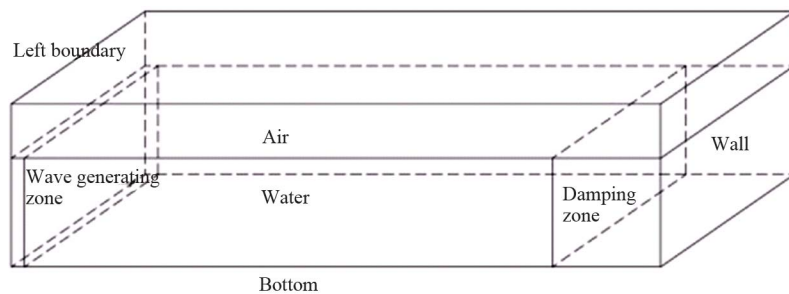


Figure 1. Diagram of the numerical wave tank
图 1. 数值波浪水池示意图

A_i 、 ω_i 、 k_i 、 ε_i 分别为第*i*组波的波幅、圆频率、波数、初相位， ε_i 是随机生成的。

本文以 ITTC 双参数谱为目标谱，其一般形式为：

$$S_{\xi}(\omega) = \frac{173\bar{\xi}_{w/3}^2}{T_1^4\omega^5} \exp\left(-\frac{691}{T_1^4\omega^4}\right) \quad (6)$$

靶谱的能量绝大部分在 ω_1 到 ω_2 范围内，把这个频率范围分成 n 个区间，取：

$$\bar{\omega}_i = \omega_1 + (i-0.5) \times \frac{\omega_2 - \omega_1}{n} \quad (7)$$

$$A_i = \sqrt{2S_{\xi}(\bar{\omega}_i) \frac{\omega_2 - \omega_1}{n}} \quad (8)$$

波面方程为：

$$\eta = \sum_{i=1}^N A_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (9)$$

其中 $\bar{\xi}_{w/3}$ 为三一波高， T_1 为平均周期， ω 为圆频率。

3.2. 质量源造波

对于粘性不可压流体，其连续性方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

在质量源作用的区域，控制方程改写为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q(x, y, z, t) \quad (11)$$

质量源的强度为 $q(x, y, z, t)$ ，

$$q(x, y, z, t) = \begin{cases} q_s(y, z, t) & x = x_s \\ 0 & x \neq x_s \end{cases} \quad (12)$$

x_s 为质量源的水平位置。在流域边界一层网格作为造波区域，假设质量源项所引起的流体质量的增减全部用来产生入射波浪，因质量源造波产生的是传播方向相反的两列波，所以：

$$q(y, z, t) = \frac{2 \times u(x, y, z, t)}{\Delta x} \quad (13)$$

通过 udf 将造波源强加载到造波区，空气部分设置压力进口和压力出口边界，侧壁设置零剪应力边界条件，其余设置标准壁面函数。

4. 消波方法

通过在造波水池末端至少一个波长范围内设置

消波区域，采用阻尼消波技术^[2]进行消波，消波区域的动量方程改写为：

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \mu(x)u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \mu(x)v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g - \mu(x)w \end{cases}$$

其中 $\mu(x)$ 在消波区线性增大，通过 udf 将消波源项加载到消波区，从消波结果来看，能够很好的达到消波的目的，边界没有出现反射情况。

5. 造波结果比较

5.1. 规则波

本文采用三维数值水池进行造波模拟，水池长 60 m，宽 15 m，水深 10，波长 8 m，周期 2.513 s，波高 0.3 m (图 2~图 4)。

根据幅值误差分析，质量源造波方法在规则波的模拟上优于速度边界造波方法，如表 1。

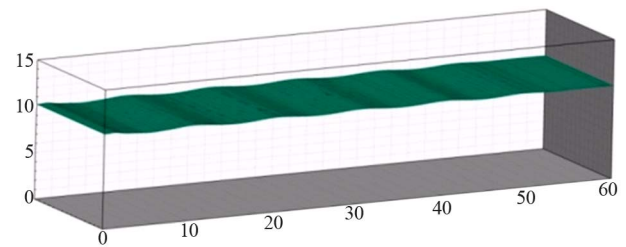


Figure 2. Wave contour of the numerical wave tank
图 2. 数值水池波面截图

Table 1. Comparison of amplitude error
表 1. 幅值误差对比表

测点位置	X/L = 1	X/L = 2
源造波	1.07%	5.70%
边界造波	5.92%	12.01%

两种三维数值造波方法的对比研究

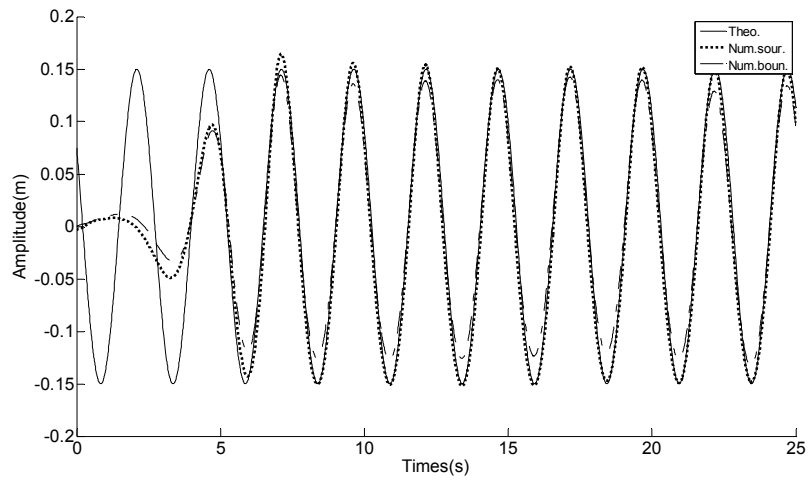


Figure 3. Time series of simulated wave elevation at $x/L = 1$
图 3. $x/L = 1$ 处的波面时间历程

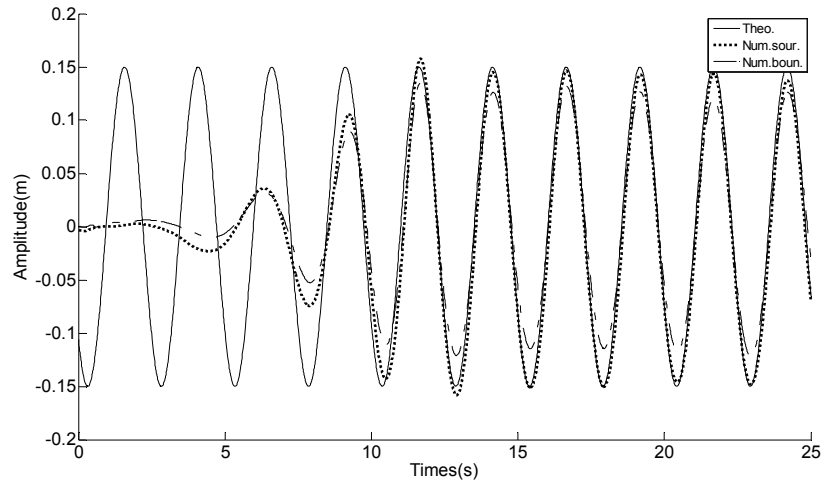


Figure 4. Time series of simulated wave elevation at $x/L = 2$
图 4. $x/L = 2$ 处的波面时间历程

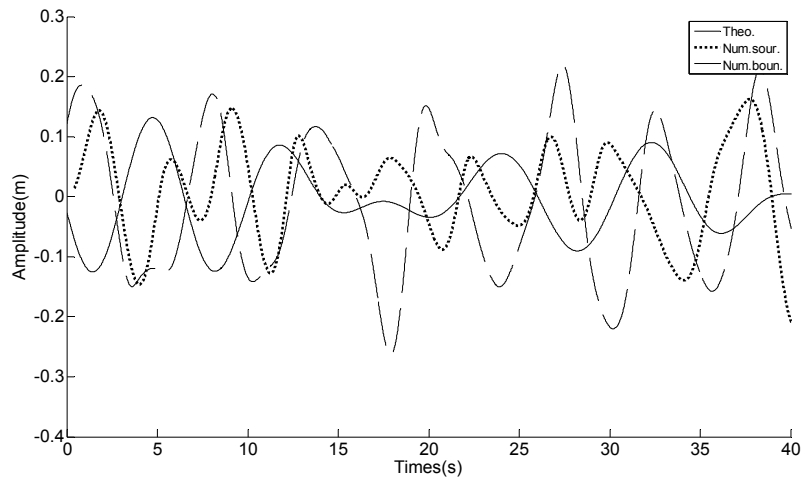


Figure 5. Time series of simulated wave elevation at $x = 2$ m
图 5. $x = 2$ m 处波面历程

5.2. 不规则波

本文模拟的不规则波参数： $\bar{\xi}_{W/3} = 0.15$ m，平均周期 $T_1 = 6$ s，目标谱为 ITTC 双参数谱(图 5~图 8)。

根据两种造波方法不规则波波谱对比，质量源造波波谱更接近理论波谱，仿真过程中发现，质量源造波区域沿波浪传播方向宽度越小，不规则波模拟效果

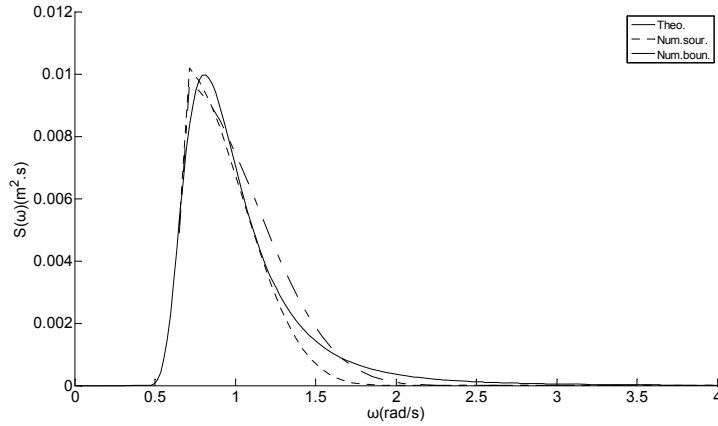


Figure 6. Comparison of spectrums at $x = 2$ m
图 6. $x = 2$ m 处波谱比较

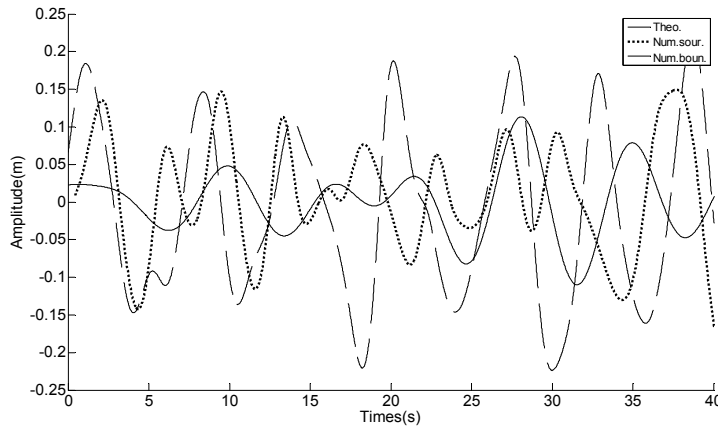


Figure 7. Time series of simulated wave elevation at $x = 4$ m
图 7. $x = 4$ m 处波面历程

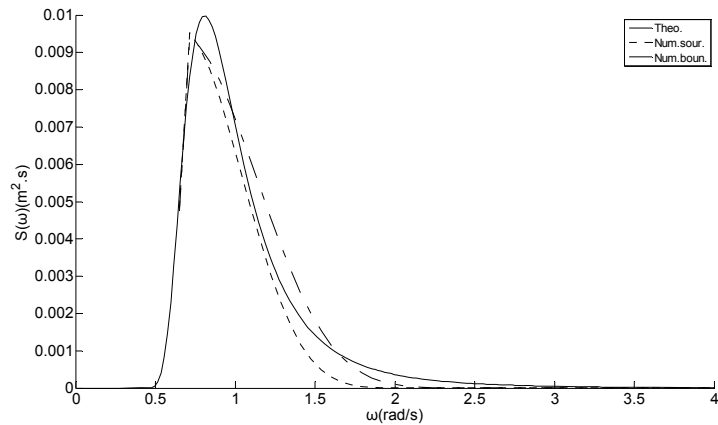


Figure 8. Comparison of spectrums at $x = 4$ m
图 8. $x = 4$ m 处波谱比较

越理想。

从对比结果上看,数值解和理论解都能比较好的吻合,随着波浪的传递,能量出现损耗,波动出现减小趋势,在数值水池的尾端,由于阻尼消波的作用,波动减小至零。两种造波技术在数值水池中的应用都是有效的,质量源造波技术的精度高,波浪传播过程衰减小,质量源造波效果优于设置边界造波技术,由于设置边界造波技术的简单和易收敛性,采用适当的改进精度会有所提高。

参考文献 (References)

- [1] 齐鹏,王永学. 三维数值波浪水池技术与应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(6): 825-830.
- [2] 管陈,董国祥,金允龙. 三维数值波浪水池造波技术研究[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2013, 36(2): 11-15.
- [3] 李宏伟. 数值水池造波方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2009.
- [4] 吴乘胜,朱德祥,顾民. 数值波浪水池及顶浪中船舶水动力计算[J]. 船舶力学, 2008, 12(2): 168-179.
- [5] J. Larsen and H. Dancy. Open boundaries in short wave simulations—A new approach. *Coastal Engineering*, 1983, 7(3): 285-297.
- [6] 韩朋,任冰,李雪临等. 基于 VOF 方法的不规则波数值波浪水槽的阻尼消波研究[J]. 水道港口, 2009, 30(1): 9-13.