长峰不规则波数值模拟的相关问题

石爱国,刘 可,李 理

(海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018)

摘要:针对波浪数值水池研究现状,提出了长峰不规则波数值波浪水池研究亟待解决的3个问题:海浪谱的拓展、波能衰减机理讨论及长峰不规则波数值模拟精度评价标准.基于黏性数值波浪水池技术,以文氏海浪谱为目标谱,对深水长峰不规则波进行了数值模拟;分析了数值模拟中波能衰减的主要原因,并提出了基于优化网格生成和离散格式的减小衰减的方法;根据《水面船模耐波性试验规程》对数值模拟结果进行了误差计算,并提出了适用于不规则波数值模拟评价标准的建议.

关键 词:海浪谱拓展;波能衰减;评价标准

中图分类号: TV139.2 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2012)03-0075-08

由于海洋工程、船舶工程以及军事方面的发展需求,海洋环境模拟已成为国内外水动力学研究的一个关注点.其中,海浪的模拟尤其受到重视.海浪模拟包括规则波、二维和三维不规则波、非线性非高斯海浪,以及基于白噪声波谱的海浪等诸多方面.海浪模拟途径有水池模拟和数值模拟.水池造波是比较成熟的技术;数值模拟(CFD)海浪,以其具有高效、精确、易于时空切换、节约资源等优势,近期得到了迅速发展,但仍存在不少迫切需要解决的问题^[1-2].以二维不规则波为例,目前多为基于 ITTC 双参数谱的海浪数值模拟,范围偏窄,而拓展研究的谱式,决不是简单的增加工作量问题.其次,影响模拟海浪用于船舶工程、海洋工程、船舶耐波性研究的关键是海浪衰减,如何减少基于黏性流的数值模拟海浪以及在传播过程中可能出现的非物理原因导致的严重衰减,同时不至于大量耗费计算机资源,已成为这一领域亟待解决的课题.另外,数值模拟海浪生成以后,如何评价其可信度,需要形成共识.本文就上述二维不规则波数值模拟中的3个问题进行了初步研究.

1 基于文氏海浪谱的数值模拟

1.1 文氏海浪谱^[3-4]

文氏海浪谱是文圣常院士等通过多年研究从理论上得到的一种海浪谱,它涵盖了深、浅水海浪的生成谱和 充分成长谱,特别适用于我国海域,已被交通部《海港水文规范》选作标准谱.其深水谱的表达公式如下:

$$(1) \stackrel{\text{d}}{=} 0 \leqslant f \leqslant \frac{1.05}{T_{s}} \text{H}^{1},$$

$$S_{\eta}(f) = 0.068 \ 7H_{1/3}^{2}T_{s}P \exp\left[-95\ln\frac{P}{1.522 - 0.245P + 0.002 \ 92P^{2}}(1.1T_{s}f - 1)^{12/5}\right]$$
(1)

$$\stackrel{\text{\tiny \pm}}{=} f > \frac{1.05}{T_{s}} \text{II}, \qquad S_{\eta}(f) = 0.082 \ 4 \ \frac{H_{1/3}^{2}}{T_{s}^{3}} (1.522 - 0.245P + 0.002 \ 2P^{2}) \ \frac{1}{f^{4}}$$
(2)

式中:f为自然频率(s⁻¹); $H_{1/3}$ 为有义波高,也即三一波高(m); T_s 为有效波周期(s);P为谱尖度因子,P=95.3 $\frac{H_{1/3}^{1.35}}{T^{2.7}}$,1.54 $\leq P \leq 6.77$.

收稿日期: 2011-10-20

作者简介:石爱国(1956-),男,吉林德惠人,教授,主要从事军事航海、舰船操纵性和耐波性研究. E-mail: agshi56@ yahoo. com. cn

(2) 当 0.5≥*H*^{*} = 0.626
$$\frac{H_{1/3}}{d}$$
>0.1 时,表达式有所不同,可参考文献[4].当 0≤*f*≤ $\frac{1.05}{T_s}$ 时,
 $S_{\eta}(f) = 0.068 7H_{1/3}^2T_sPexp\left\{-95\left[\ln\frac{P(5.813-5.137H^*)}{6.77-1.088P+0.013P^2(1.307-1.426H^*)}\right](1.1T_sf-1)^{12/5}\right\}$ (3)

式中:d 为水深(m).

1.2 波浪数学模型和数值模拟方法

1.2.1 波浪数学模型^[6] 描述波浪运动现象的数学模型,既可以从流体力学的基本方程出发,也可以从特定条件的波浪理论入手得到.本文描述二维空间的深水海浪的数学模型,包括描述波浪运动的基本微分方程 和初始条件及边界条件的控制方程.

1.2.2 基本方程^[7-8] 对于黏性流领域的自由面流动问题,流体不可压缩、流体的黏性系数为常数、控制方程为 *N*-*S* 方程的简化形式.使用欧拉直角坐标系,规定水平方向为 *X* 轴,垂直方向为 *Z* 轴. *u*,*w* 分别为 *x*,*z* 方向的速度分量;*ρ* 为流体密度;*p* 为流体压力;*v* 为流体的运动学黏性系数.

连续性方程为:
$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$
 (4)

动量方程为:
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]$$
(5)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right]$$
(6)

1.2.3 不规则波的数值模拟^[9-11] 对于不规则波的数值模拟,通常有两种方法:一种是仿物理造波,即仿照物理试验水池的造波机原理,比如活塞式造波机、摇板造波和柱式造波机等.它的原理简单,存在现实模型,容易得到检验,但缺点是数学模型相对复杂,数值模拟计算量大,难以模拟有相对流速的波浪,而且目前动网格技术的局限性对其造波精度也有影响.另一种是所谓的"纯数值造波技术",是利用数值模拟技术来模拟波浪的一种理想化造波方法,主要有设置边界条件造波和源项造波法.本文主要是采用边界条件造波法中线性叠加法对长峰波进行数值模拟.线性叠加法就是将海浪视为无限多个不同振幅、不同周期和不同随机相位的余弦波叠加而成.不规则波的波面高度和速度场分别为:

$$\eta = \sum_{i=1}^{N} A_{i} \cos(k_{i}x - \omega_{i}t + \varepsilon_{i}), \qquad \begin{cases} U = \sum_{i=1}^{N} \omega_{i}A_{i}e^{k_{i}\varepsilon}\cos(k_{i}x - \omega_{i}t + \varepsilon_{i}) \\ V = 0 \\ W = \sum_{i=1}^{N} \omega_{i}A_{i}e^{k_{i}\varepsilon}\sin(k_{i}x - \omega_{i}t + \varepsilon_{i}) \end{cases}$$
(7)

式中: η 为波动水面相对于静止水面的瞬时高度; A_i , k_i , ω_i 和 ε_i 分别为第i 个组成波的波幅、波数、圆频率和 初始相位; ε_i 是在(0,2 π)范围内随机相位. X 轴为波浪传播方向,U,V,W 分别为波浪 X 轴、Y 轴和 Z 轴的速度分量.

本文通过文氏谱来实现对海浪的数值模拟. 设目标谱(靶谱) $S_{\eta}(\omega)$ 的能量绝大部分分布在 $\omega_{L} \sim \omega_{H}$ 的范围内,其余部分可以根据精度要求进行取舍. 把所取的频率范围划分为 N 个区间,其间隔为 $\Delta \omega = \omega_{i} - \omega_{i-1}$, 设子波波高在 $\Delta \omega$ 区间内不变且相等,则取

$$\hat{\boldsymbol{\nu}}_i = (\boldsymbol{\omega}_{i-1} + \boldsymbol{\omega}_i)/2, \quad A_i = \sqrt{2S_\eta \hat{\boldsymbol{\omega}}_i \Delta \boldsymbol{\omega}}$$
(8)

将代表 N 个区间内波能的 N 个余弦波动叠加起来,即得到海浪的波面方程为:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{N} \sqrt{2S_{\eta}\hat{\omega}_{i}\Delta\omega}\cos(\widetilde{\omega}_{i}t + \varepsilon_{i})$$
(9)

式中: $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_i$ 为第 *i* 个组成波的代表频率.

采用文氏海浪谱数值模拟不规则波时,有两点值得注意:①有效波浪周期 T_a 用经验公式求解通常效果 不好,合理的做法是依据文献[5]给出的深水风浪要素计算图,综合考虑风速、风时、风区大小来获取 T_a,借 此求解 S_{η} . ②要恰当地确定 $\omega_L \sim \omega_H$ 范围里的子波数,子波数太多,数值模拟计算效率低;子波数太少,造波 精度难以满足要求. 经验取值以子波数 60 左右为宜.

1.3 数值计算^[12-14]

本文采用 FLUENT 软件,使用 VOF 方法,结合 RNG 的 k-e 湍流模型,通过求解 RANS 方程,对以文氏海 浪谱为目标谱的长峰波进行数值模拟研究.

1.3.1 网格划分 三维数值水槽的网格划分如图 1 所示,整个水槽的网格数为 2 011 200. 造波区水平方向 网格尺寸为 0.05 m,垂直自由面方向的网格尺寸取为有义波高的 1/20. 从自由面到水槽顶部网格按1 : 1.1 的比例等比分布;从自由面到水池底部网格按1 : 1.05 的比例等比分布. 网格基本上是离自由面越远尺寸越 大. 对于消波区的网格划分,垂直方向划分与造波区的一致,水平方向网格以造波区网格尺度为基准向右边 界逐渐扩大.



Fig. 1 Sketch map of the numerical wave tank

1.3.2 边界条件和初始条件 采用本文的方法造波,边界条件是数值波浪水池能否实现其造波功能的关键 因素.在 VOF 二相流模型中:将第1项设置为空气,第2项设置为水.自由面重构格式采用改进的 HRIC 格式,近壁区流动采用标准壁面函数法进行处理.在运行环境中设置参考压力值为101 325 Pa,并计重力的影响.设置工作流体密度为1.225 kg/m³,控制方程的扩散项采用中心差分格式离散,对流项按如下格式离散: 对于压力方程采用 Body force weight(加权体积力)格式,界面重构方法采用改进的 HRIC,对于动量方程采用 二阶迎风格式,压力速度耦合采用 PISO 算法.

1.3.3 算例描述 对于我国近海海浪的数值模拟,采用文氏谱为目标谱,首先根据海况条件确定有义波高 *H*_{1/3},然后依照深水风浪要素计算图,读取有效波周期 *T*_s.选取 3 种典型海况进行数值模拟,数值模拟的长峰 不规则波目标参数为:*H*_{1/3}取 200,128 和 80 mm,对应的有效波周期 *T*_s分别取 1.899,1.650 和 1.092 s.

1.3.4 长峰不规则波数值模拟结果 图 2 给出 3 种典型海况下长峰不规则波在数值波浪水池不同位置的 波面时历曲线.





2 波浪数值模拟衰减

波能衰减有物理模型衰减和数值衰减两个原因,物理模型衰减是指入口边界的速度及波浪传播过程中, 由于物理黏性导致的衰减,在短波程中(例如在船长范围内)影响非常有限,可视为小量.从数值模拟造波角 度着眼,波面方程是基于势流理论得到的,忽略了黏性影响;但因由水的黏性而引起的自然衰减在几个波长 范围内非常有限,所以物理模型近似误差也基本可以忽略.一般认为数值衰减是波能衰减的主要原因,可能 来源于以下几个方面:网格生成、离散格式、时间离散(迭代步长)、界面重构方法、代数方程组求解的迭代误 差及计算机的舍入误差.迭代误差及舍入误差同其他误差相比是小量,不是造成数值衰减的主要原因.因此, 网格生成、离散格式、时间离散及界面重构方法的选择是减少波能衰减的主要途径^[15-16].

2.1 网格生成

数值模拟计算的空间离散误差主要受网格尺寸及网格长宽比(网格最长边与最短边长度之比)的影响. 网格尺寸及长宽比越小,越有利于减小空间离散误差,从而减小波能损耗.

不规则波数值模拟使用的网格主要基于以下原则划分:

(1)垂向沿自由面附近,在1个有义波高内布设10~20个点,以保证足够精确地捕捉自由面的位置并减轻衰减.若将 VOF 的欠松弛因子增大至0.5,可以较大幅度地减少自由面附近的网格布设.沿波浪传播的方向,划分足够数量的网格,使其最小单位间距是垂向最小单位间距的2倍,以避免数值阻尼引起的波浪幅值衰减.

(2)不同区域进行网格划分时,必须保证区域网格尺度的均匀过渡;在尾端消波区,可适当拉大网格的 尺度,既节省计算时间,又可达到消波的目的.

(3)自由面附近网格划分较远场网格划分应细致一些,以提高计算的精度和刻画流场的局部信息.

2.2 离散格式

除了网格对空间离散误差产生影响外,离散格式的选取影响着数值模拟计算时间离散误差及空间离散 误差的大小.因此离散格式选取的恰当与否对波能衰减有直接的影响.离散格式就是在利用网格节点上的物 理量求解网格界面上的物理量及其导数时使用的差值方法,其中基本的一阶离散格式主要有中心差分格式、 一阶迎风格式、混合格式、指数格式、乘方格式等,基本的高阶离散格式主要有二阶迎风、QUICK格式等.二 阶迎风格式是在一阶迎风格式的基础上发展起来的,同一阶迎风格式一样,也是通过上游单元节点的物理量 来确定控制体积界面的物理量,但它不仅用到上游最近的1个节点,而且还要用到上上个节点,因此具有二 阶截差,在精度上要优于一阶迎风格式.

选取离散格式的目的是为了导出离散的代数方程组以便计算机求解.在选取离散格式时主要考虑实施

的便利以及使得形成的离散方程具有满意的数值特性,而不必 追求一致性,即对于控制方程中的各项并不需要采用一致的离 散格式.通常越高阶的离散格式能量损耗越小,但计算代价越 大.如二阶迎风格式在精度上要优于一阶迎风格式.

图 3 是在有义波高 $H_{1/3}$ = 0.08 m, 有效波周期 T_s = 1.092 s 的试验条件下, 离散格式分别采用一阶迎风和二阶迎风, 对长峰 不规则波数值模拟波面时历曲线谱分析与目标谱对比.

从对比来看,就减小波浪传播过程中的衰减而言,高阶离散格式优于低阶离散格式,尤其是在高频部分.因此,在效率准许的范围内,造波应尽可能地选取高阶差的离散格式.



2.3 时间离散

时间离散合理性主要取决于时间步长的选择.同网格尺度一样,时间步长越小越有利于减小时间离散误

差.为保证代数方程解的收敛性,时间步长应满足 Courant 数不 大于1的要求^[13],Courant 数定义如下:

$$C = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{10}$$

式中:C 为 Courant 数; Δt 为时间步长; Δx 为流动方向上的网格 尺寸.图4 为有义波高 $H_{1/3}$ =0.08 m,特征周期 T_s =1.092 s 的试 验条件下,时间步长分别选用 0.001 和 0.004 s,对长峰不规则 波数值模拟波面时历曲线谱分析与目标谱对比.

从对比结果来看,减小步长即减小 Courant 数有利于减少波 浪传播衰减,但功效不十分明显,可以考虑在0.001~0.004 s 之 间选择步长.



2.4 界面重构方法

界面重构方法是指在空间离散过程中对自由面的几何形状进行构造的方法.从目前研究来看,运用 Fluent 软件数值模拟波浪时,自由面处理多采用 VOF 方法,其定义体积分数 C_q 为网格单元内第 q 相流体所 占体积与总体积之比,即当 $C_q=0$ 时表示网格单元内没有该相流体; $C_q=1$ 时表示网格单元内充满该相流体; $0 < C_q < 1$ 时表示网格单元内存在自由面. C_q 的输运方程为:

$$\frac{\partial C_q}{\partial t} + \frac{\partial (u_i C_q)}{\partial x_i} = 0 \qquad (i = 1, 2, 3)$$
(11)

基于 VOF 法,可采用以下 3 种方法避免或减小不规则波浪数值衰减.

2.4.1 几何重构 几何重构可以在求解 C_q的基础上,对网格自由面进行几何重构,再进行各变量控制方程 的求解.这样可以使波面精确逼近物理波面,减少了求解 C_q和控制方程的误差,降低波面衰减.但是由于这 种方法在 Fluent 中只能用于显式条件下,对船模在数值波浪水池中耐波性试验造成一定的局限性.

2.4.2 优化平衡性 无论采用何种离散格式求解 C_q 输运方程,都会出现数值耗散或数值色散:如用逆风格式,会使波面平滑同时导致波面衰减;如采用顺风格式,虽有助于分辨率提高但会导致波速变化,关键是找到 优化的平衡方法. CICSAM 法就是一种较好的平衡方法:它基于网格自由面和底边交角的不同,如平行,则采 用耗散格式,如垂直,则采用色散格式,把格式的交替处理得十分平滑,从而既可有效控制波面衰减,又得到 了高的波面分辨率. 但是,CICSAM 法的缺点同几何重构一样,都只能用于显式条件下.

2.4.3 保持守恒性和有界性一致 C_q 不同于其他变量,其输运方程若处理不当,则可能出现不满足 $0 \leq 0$

 $C_q \leq 1$ 的现象(称为不符合有界性条件),产生非物理结果.用一般的 FVM 离散格式处理 C_q 输运方程,就可能出现非界性导致的波面衰减.如果选用能保证守恒性和有界性一致的离散格式,如 Donor-Acceptor 的差分逼近格式、改进的 HRIC 格式,可以避免这种衰减.综合考虑计算效率和船模试验局限性,本文推荐使用改进的 HRIC 格式.

图 5 为有义波高 $H_{1/3}$ = 0.08 m,特征周期 T_s = 1.092 s 的试 验条件下,界面重构方法分别采用 Geo-construct、HRIC 和 CICSAM 方法,对长峰不规则波数值模拟的波面时历曲线谱分 析与目标谱对比.



从图中不难得出波面重构格式的优选,对波浪传播衰减有重要的影响,尤其是在高频部分.因此,只要有可能,尽量选取几何重构格式,如果条件受限,应选取精度较高的格式,如改进的 HRIC 格式.

3 二维不规则波数值模拟精度评价

目前,不规则波数值模拟精度检验多采用谱分析方法来反推海浪谱,并同目标谱进行比较.本文参照 《水面船模耐波性试验规程》,从谱面积 m₀,谱峰频率 ω_p 和有义波高 H_{1/3}三方面的误差对不规则波数值模拟 精度进行了评价.

图 6 给出了根据波面时历,利用 FFT 进行频谱分析得到的模拟谱与目标谱的对比情况.对比表明,采用 FFT 对比频谱分析法检测造波效果是可行的,进而检验本文所提出的造波方法,在目标船模影响范围内,传 播衰减是有限的;但有效波高过小误差将增大.



图 6 长峰不规则波海浪谱

Fig. 6 Wave spectrum for long-crested irregular waves

表 2 给出了按本文建议的谱面积 m_0 , 谱峰频率 ω_p 和有义波高 $H_{1/3}$ 三方面的长峰不规则波数值模拟误差计算结果.

	有义波高 H _{1/3}			谱峰频率 ω_p			谱面积 m ₀		
序 号	目标值/	模拟值/	误差/	目标值/	模拟值/	误差/	目标值/	模拟值/	误差/
	mm	mm	%	$(\text{ rad } \boldsymbol{\cdot} \text{ s}^{-1})$	$(rad \boldsymbol{\cdot} s^{-1})$	%	$(m^2 \cdot rad^{-1})$	$(m^2 \cdot rad^{-1})$	%
1	80	73.5	8.13	4.46	4.38	1.79	0.000 39	0.000 31	20.5
2	128	125	2.34	3.45	3.47	2.32	0.001 01	0.000 83	17.8
3	200	191	4.5	3.03	2.934	3.17	0.002 48	0.002 11	14.92

表 2 长峰不规则波相关误差计算

Tab. 2 Relative errors for long-crested irregular waves

《水面船模耐波性试验规程》规定水池实测谱与目标谱的波谱形状相近,提出的检测标准为:①谱值 S(ω),在S(ω) > 0.1S(ω_p)时, $|\Delta S(\omega)/S(\omega)| < 20\%$;② 峰频 ω_p , $|\Delta \omega_p/\omega_p| < 5\%$;③ 有义波高 $H_{1/3}$, $|\Delta H_{1/3}/H_{1/3}| < 5\%$.本文认为① 项不易实施,③ 项适用于水池试验,而不太适合于数值模拟.为此建议在波浪数值模拟的检测中,将标准定为:① 谱面积 m_0 , $|\Delta m_0/m_0| < 20\%$;② 峰频 ω_p , $|\Delta \omega_p/\omega_p| < 5\%$;③ 在使用定义域末端,有义波高 $H_{1/3}/H_{1/3}| < 5\%$.

本文数值模拟了3种长峰波,其谱面积、谱峰频率及有义波高误差均在《水面船模耐波性试验规程》规 定范围之内,符合船舶行业计算要求,为CFD数值模拟水池替代船模水池试验提供了参考.

4 结 语

对不同海浪谱的数值模拟,要考虑到频谱的物理特点.例如,文氏海浪谱需要比较精确地计算有效周期 *T_s*并考虑谱形因子 *P*.数值造波有多种方法,就边界条件造波而言,其主要矛盾是波浪衰减问题.波浪衰减因 素中,体积分数 *C_a*的输运方程离散方法的选择占相当重要的地位.本文曾用 Geo-Reconstruct 和改进的 HRIC 方法进行比较,后者的衰减明显大于前者.数值波浪水池精度的评价标准应和水池试验评价标准有所不同, 需要给出权威的准则.

波浪的数值模拟是一个既有工程价值又有国防意义的研究领域.需要在三维不规则波、非线性海浪的数 值模拟方面继续做出努力.

参考文献:

- [1] 吴乘胜,朱德祥,顾民.数值波浪水池中船舶顶浪运动数值模拟研究[J].船舶力学,2008,12(5):692-696.(WU Cheng-sheng, ZHU De-xiang, GU Min. N-S CFD simulation of wave-induced ship motions in regular head waves[J]. Journal of Ship Mechanics, 2008, 12(5):692-696. (in Chinese))
- [2] 郭海强,朱仁传,缪国平,等.数值波浪水池中船舶水动力系数测试与分析技术[J].中国造船,2008,49(增刊):58-65. (GUO Hai-qiang, ZHU Ren-chuan, MIU Guo-ping, et al. Estimation of hydrodynamic coefficients of ship in numerical wave tank[J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(Suppl): 58-65. (in Chinese))
- [3] 周波. 舰船摇荡预报新模式及其在军事中的应用研究[D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2005. (ZHOU Bo. Study on new mode of ship motion forecast and its military application[D]. Dalian: Dalian Naval Academy, 2005. (in Chinese))
- [4] JTJ 213-1998, 海港水文规范[S]. (JTJ 213-1998, Code of hydrology for sea harbour[S]. (in Chinese))
- [5] 李忠胜, 段忠东. 二维规则波及不规则波的数值模拟[J]. 气体物理理论与应用, 2007, 2(4): 366-370. (LI Zhongsheng, DUAN Zhong-dong. Numerical simulation of 2D-irregular waves and irregular waves [J]. Theory and Application of Weather Atmosphere Scene, 2007, 2(4): 366-370. (in Chinese))
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 76. (WANG Fu-jun. Analysis of computational fluid dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 76. (in Chinese))
- [7] WILSON R V, CARRICA P M, STERN F. Unsteady RANS method for ship motions with application to roll for a surface combatant[J]. Computers & Fluids, 2006, 35: 501-524.
- [8] 李积德. 船舶耐波性[M]. 哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版社, 1992: 1-10. (LI Ji-de. Seakeeping[M]. Harbin: Harbin Engineering University Publishing Company, 1992: 1-10. (in Chinese))
- [9] PARK J C, UNO Y, SATO T, et al. Numerical reproduction of fully nonlinear multi-directional waves by a viscous 3D numerical wave tank[J]. Ocean Engineering, 2004, 31: 1549-1565.
- [10] LARSEN J, DANCY H. Open boundaries in short wave simulations-a new approach [J]. Coastal Engineering, 1983(7): 285-297.
- [11] MARSHALL L. Shape optimization of a defroster duct[J]. Fluent News, 2005(3): 20-21.
- [12] 李凌. 粘性流中水波与浮式结构物相互作用的数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学,2007. (LI Ling. The numerical simulation of interaction of water waves and floating structures in a viscous fluid[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [13] 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. (QI Peng, WANG Yong-xue. 3-D numerical wave tank technology and its application[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43 (6): 825-830. (in Chinese))
- [14] 杨波,李超,吴明. 三维舰船耐波性水池数值模拟研究[C]//大连海事大学航海学院,辽宁省航海学会.航海技术与航海教育论文集(2009).大连:大连海事大学出版社,2010. (YANG Bo,LI Chao,WU Ming. On numerical simulation of 3D ship's seakeeping tank[C]// Navigation College of Dalian Maritime University, Navigation Institute of Liaoning Province. Memoir Collected Papers of Seamanship and Nautical Education(2009). Dalian: Dalian Maritime University Press, 2010. (in Chinese))
- [15] 董志, 詹杰民. 基于 VOF 方法的数值波浪水池及造波、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 Jie-min. Comparison of existing methods for wave generating and absorbing in VOF-based numerical tank[J]. Journal of Hydrodinamics(SerA): 2009, 24(1): 15-21. (in Chinese))

[16] 迟卫, 蔡烽, 石爱国. 由船舶摇荡时历反推海浪方向谱[J]. 船舶工程, 2005, 27(1): 46-49. (CHI Wei, CAI Feng, SHI Ai-guo. Deducing directional spectrum of sea wave from ship motion time-history[J]. Ship Engineering, 2005, 27(1): 46-49. (in Chinese))

On numerical simulation of long-crested irregular waves

SHI Ai-guo, LIU Ke, LI Li

(Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Abstract: In view of the present status of numerical simulation of the wave tanke, three important problems of simulating long-crested irregular waves are presented in this paper: wave spectrum expansion, discussion on waves' attenuation mechanism and an evaluation criteria for numerical simulation accuracy of the long-crested irregalar waves. The Wen Shengchang spectrum is taken as a target. The long-crested irregular waves are reproduced by using the viscous numerical wave tank simulation technique. The main causes of waves' attenuation in numerical simulation are analyzed, and the factors affecting the attenuation are got in the study. The relative errors of numerical simulation are calculated by using the standard of CB/T 3675 – 1996. The evaluation criteria for simulating long-crested irregular waves are thus proposed.

Key words: expansion of sea wave spectrum; wave attenuation; evaluation criteria

