



不规则波浪在陡坡上 非线性传播变形的试验研究

于 博, 董国海, 马小舟

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过试验研究了不规则波浪在一陡坡(1:10)上的传播过程中的非线性特征。为达到研究目的, 在试验水槽中以JONSWAP谱为靶谱生成了两组随机波浪。试验结果显示, 在坡前常水深区域和坡顶, 两种波况下波高分布均符合瑞利分布; 但是在变浅区域两种波况的波高分布却不尽相同。应用基于小波变换的二阶相位谱来分析波浪在传播过程中的非线性相位耦合特征, 结果表明: 随着水深的变浅, 波浪的非线性逐渐增强并且参与非线性相互耦合的频率成份也越来越多。通过二阶相位谱发现: 随着水深的减小, 参与最强的非线性相位耦合频率向高频处移动。另外通过傅立叶频谱、二阶谱以及二阶频谱共同分析陡坡上两组波况下低频波浪的演化情况。

关键词: 不规则波浪; 变浅; 非线性相互作用; 波高分布; 小波二阶谱; 低频波浪

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0036-09

Laboratory study of nonlinear transformation of irregular waves over a steep slope

YU Bo, DONG Guo-hai, MA Xiao-zhou

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: This paper considers the nonlinear transformation of irregular waves propagating over a steep slope (1:10). Two experimental cases of random waves mechanically generated by JONSWAP spectra are used for this purpose. The results indicate that the wave heights in two cases obey the Rayleigh distribution both at the offshore location and on top of the slope, but, in the shoaling region, they behave different characteristic. The nonlinear phase coupling occurred within the irregular waves is investigated by the wavelet-based bicoherence. The bicoherence spectra reflect that, in the shoaling region, with the decrease of water depth, the number of frequency modes participated in the phase coupling increase, and the degree of the phase coupling enhances. In addition, the summed bicoherence shows that the frequency mode related to the local strongest nonlinear interactions shifts to higher harmonics with the decrease of water depth. This paper also investigates how the low frequency energy increases by the Fourier spectra, bicoherence spectra and summed bicoherence.

Key words: irregular waves; shoaling; nonlinear interactions; wave height distribution; wavelet bicoherence; low-frequency wave

当波浪传播至近岸地带, 由于非线性作用的影响, 波浪形态的改变非常明显。对近岸波浪特性的研究有助于提高港口工程的设计质量、改善评估体系, 并且利于进一步透彻研究泥沙输运和低频波生成一类的科研问题。

众所周知, 波高在深水中的分布符合瑞利分布^[1]。但是在浅水中, 情况要复杂得多。考虑到有限水深条件下的波浪破碎问题, Glukhovsikiy^[2]提出了一种浅水波高分布。之后, Klopman^[3]改进了Glukhovsikiy分布。但是改进的Glukhovsikiy分布过

收稿日期: 2012-11-01

作者简介: 于博(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事低频波浪生成机制研究。

低估了浅水中的波高较小的波浪,因此,Battjes等^[4]提出了一种复合Weibull分布来描述浅水中的波高分布。

波浪成分间的非线性相互作用在近岸波浪变形的过程中起到了很重要的作用^[5]。小波二阶谱被证明是时域内研究非线性相位耦合的有力工具。小波二阶相关谱理论最初由Milligen等^[6]提出并应用于等离子体湍流相位耦合。Chung等^[7-8]分别证明了小波二阶相关谱较傅立叶谱拥有更多的自由度。近期,董国海等^[9]成功地将此方法应用于曲线浅堤上的不规则波相互作用。马玉祥等^[10]将此方法应用于中等水深条件下聚焦波的非线性变形研究。

目前,只有很少的试验研究考虑到波高分布统计和陡坡上的三波相互作用。为了更好地理解陡坡上不规则波的演化变形特征,应该进行更多的物理模型试验研究。本文通过试验研究了两组不规则波在1:10的陡坡上的传播演化,探寻了波高分布的变化和不规则波在陡坡上的相位耦合。

1 试验介绍

1.1 波浪水槽

试验是在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的海洋环境水槽中完成的,水槽长50 m,宽3 m,本次工作水深为0.45 m。水槽一端装有液压伺服造波机,并令造波板的中心位置为 $x = 0$ m,水槽另一端设有消浪设施,以减少波浪反射。坡度的布置如图1所示,坡从 $x = 18$ m开始,到 $x = 21.5$ m结束。在坡顶处有一段水深为0.1 m且长度为6 m的浅水区域,采用这种断面的陡坡浅堤目的有二:一是为了获得波浪破碎之后的数据;二是为了减少浅堤上的反射。试验过程中通过22个电阻式浪高仪来采集波面过程线,浪高仪的采样时间间隔为0.025 s,采样次数为4 096。第一个浪高仪布置在 $x = 5$ m处,其他浪高仪的布置如图1所示。

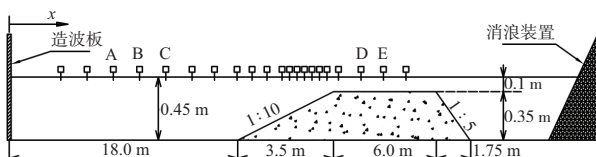


图1 试验布置

1.2 波浪参数

试验考虑2组基于JONSWAP谱(谱峰因子 $\gamma = 3.3$)的不规则波,它们具有不同的均方根波高 H_{rms} 和谱峰频率 f_p ,波况如表1所示,其中波高是对第一个测点 $x = 5$ m处的波面采用上跨零点法统计得到。试验采样间距为0.04 s,采样点总数为4 096,采样时间为163.84 s。试验采用二阶造波信号,该方法能够有效地消除造波板处产生的伪自由长波^[11]。

表1 波况

波况	f_p /Hz	H_{rms} /cm	初始破碎位置/m
J1	0.7	1.8	无破碎
J2	0.5	5.4	21 (卷破波)

注: H_{rms} 为 $x=5.0$ m处实测所得的均方根波高。

2 分析方法

2.1 波高分布统计

波高参数和分布对于工程设计和海岸地形的演化有着十分重要的作用。本节将陡坡上的实测波高分布与Rayleigh分布^[1]、改进的Glukhovskiy分布^[2]、复合Weibull分布^[4]进行比较。波高统计使用上跨零点法^[12]。其中波面方差 $\sigma_\eta^2 = \int \eta^2 dt$,有效波高 $H_s = 4\sqrt{\sigma_\eta^2}$,均方根波高 $H_{rms} = H_s/\sqrt{2}$ 。

1) Rayleigh分布。

此分布对于深水波浪是基本相符的,但随着水深的减小,实测波高的分布逐渐偏离Rayleigh分布,表达式为:

$$P_{cdf} = \exp\left[-2\left(\frac{H}{H_s}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中: P_{cdf} 为累积分布函数。

2) Glukhovskiy分布。

前苏联科学家Glukhovskiy^[2]系统观测并分析了浅水中的海浪波高分布,得出了与水深有关的经验累积率分布函数,表达式为:

$$P_{cdf} = \exp\left[-A\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^\kappa\right] \quad (2)$$

式中: $A = \left[\Gamma\left(\frac{2}{\kappa} + 1\right)\right]^{\frac{\kappa}{2}}$; $\kappa = \frac{2}{1 - \beta H^*}$, $H^* = H_{rms}/d$,

$\beta = 0.7$ 。

3) 复合Weibull分布。

Battjes和Groenendijk^[4]提出的累积分布函数表达式为:

$$P_{cdf} = \begin{cases} P_1(H) = \exp\left[-\left(\frac{H}{H_1}\right)^{k_1}\right] & (H \leq H_{tr}) \\ P_2(H) = \exp\left[-\left(\frac{H}{H_2}\right)^{k_2}\right] & (H > H_{tr}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_1 = 2$; $k_2 = 3.6$; $H_{tr} = (0.35 + 5.8\beta)h$; H_1 和 H_2 是尺度系数, 由变换波高 $\overline{H_{tr}} = H_{tr}/H_{rms}$ 表达, 在文献[4]中有详细表达。

2.2 频谱分析

通过频谱可以清楚地看到波浪能量在频域上的分布。在本文中, 通过快速傅里叶变换FFT来计算波浪的频谱, 然后通过汉宁窗对频谱进行平滑, 因此该频谱的自由度为6。

2.3 小波二阶谱分析

二阶谱, 它的正规化形式被称为二阶相关谱, 对于探求波浪成分之间非线性相互作用具有非常重要的作用^[13]。基于小波变换的二阶相关谱能够检测短时瞬态随机信号中的非线性相位耦合^[6], 因此能够用于水槽试验的数据分析^[9]。在本文中, 将小波二阶谱应用于不规则波在陡坡上传播演化时非线性相互作用。小波二阶谱的数学特征和算法在文献[6,14]中有详细介绍, 本文只对小波二阶谱做简要的介绍。

$WT(a, \tau)$ 是对序列 $x(t)$ 的连续小波变换, Torrence和Compo^[15]定义:

$$WT(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,\tau}^*(t) dt \quad (4)$$

式中: *代表复数共轭; $\psi(t)$ 代表母小波, 通过对母小波在尺度 a 上的缩放和在时间轴 τ 上的平移而得到的一系列的小波函数 $\psi_{a,\tau}(t)$; 尺度 a 是频率的倒数, 即 $f = 1/a$ 。 $\psi_{a,\tau}(t)$ 表达式为:

$$\psi_{a,\tau}(t) = |a|^{-0.5} \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (5)$$

目前在谐波分析中使用最为广泛的母小波是Morlet小波, 该小波是一个由高斯包络调制的复平面波, 表达式为:

$$\psi(t) = \pi^{1/4} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \exp(i\omega_0 t) \quad (6)$$

式中: ω_0 是小波的峰频, 通常情况取值 6.0 ^[16]。

小波二阶谱表达式为:

$$B(f_1, f_2) = \int_T WT(f_1, \tau) WT(f_2, \tau) WT^*(f, \tau) d\tau \quad (7)$$

其中 f_1, f_2 和 f 必须满足如下关系:

$$f = f_1 + f_2 \quad (8)$$

小波二阶谱值表示在时间 T 内信号 $x(t)$ 在 f_1 和 f_2 频率上的成分与在 f 上的成分之间的相互作用程度的量度^[6]。

为了更直接地得到相位耦合的程度, 采用平方小波二阶谱来表达, 它的表达式如下:

$$b^2(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{\left[\int_T |WT(a_1, \tau)|^2 d\tau\right] \left[\int_T |WT(a_2, \tau)|^2 d\tau\right] \int_T |WT(a, \tau)|^2 d\tau} \quad (9)$$

这个值在0~1。

二阶频谱的表达式如下:

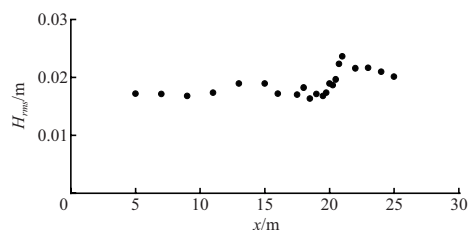
$$b_s^2(f) = \frac{1}{l(f)} \sum_{i=1}^{l(f)} b^2(f_i, f) \quad (10)$$

式中: $l(f)$ 是频率总数; $b_s^2(f)$ 可以用来量度整个波浪序列中的二阶非线性相互作用的分布情况。

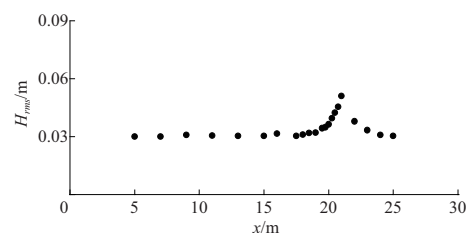
3 试验结果讨论

3.1 波高分布统计

图2中给出的是两组试验均方根波高沿 x 轴方向的变化。J1组波浪没有破碎, 随着水深的变浅均方根波高迅速增大, 在到达坡顶之后由于水深很小, 非线性相互作用非常强烈, 均方根波高变小; J2组在接近坡顶的位置发生了破碎, 同样随着水深的变浅均方根波高迅速增大, 在破碎之后迅速减小。



a) J1组



b) J2组

图2 均方根波高的沿程变化

J1组不规则波在不同水深的波高分布见图3。在坡前常水深区域波高分布与Rayleigh分布吻合得较好。但是在变浅区域,波高分布与瑞利分布吻

合得不是很好,与改进Glukhovskiy分布的吻合度要比Rayleigh分布和复合Weibull分布高。在坡顶的中部,波高分布恢复Rayleigh分布。

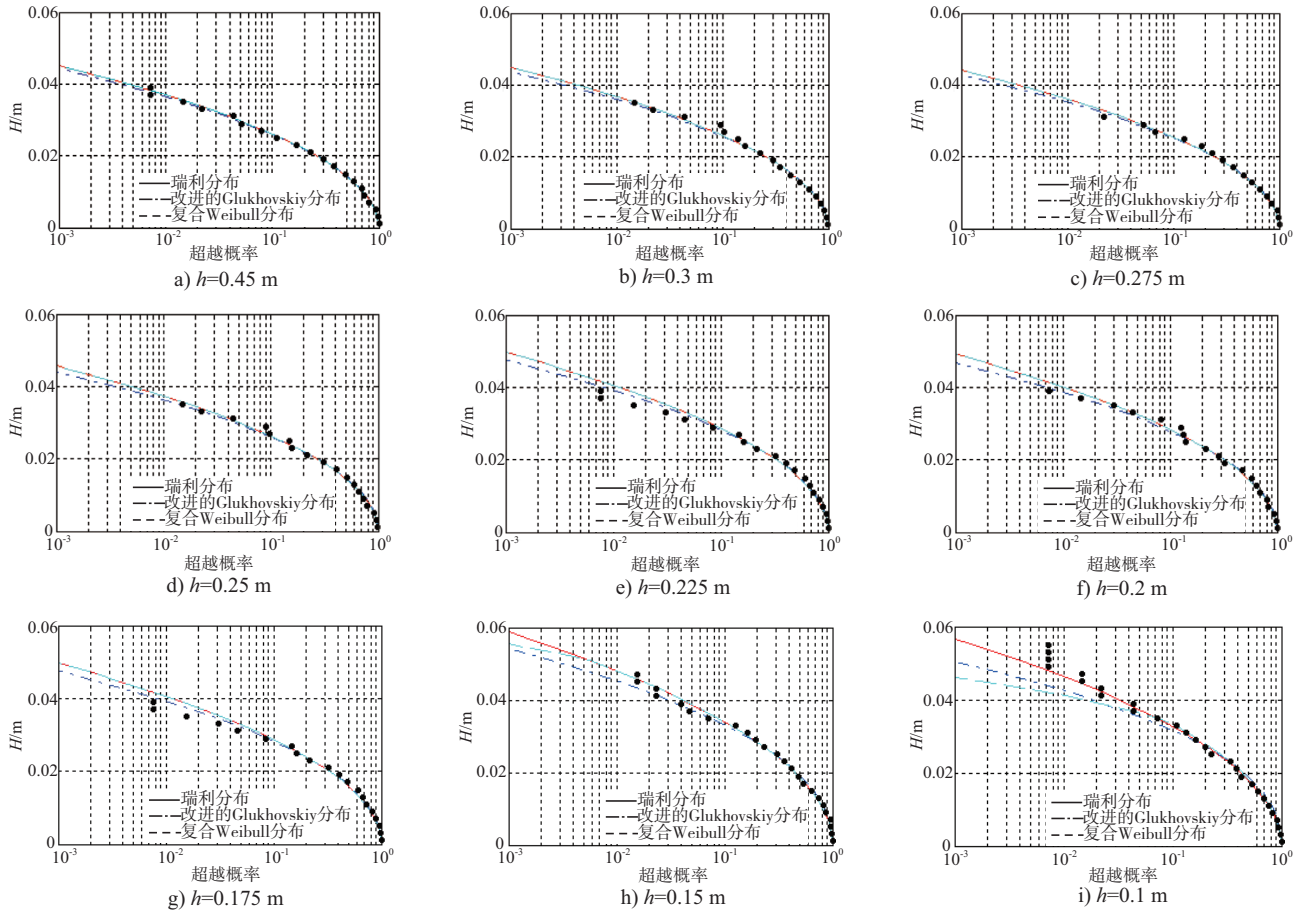
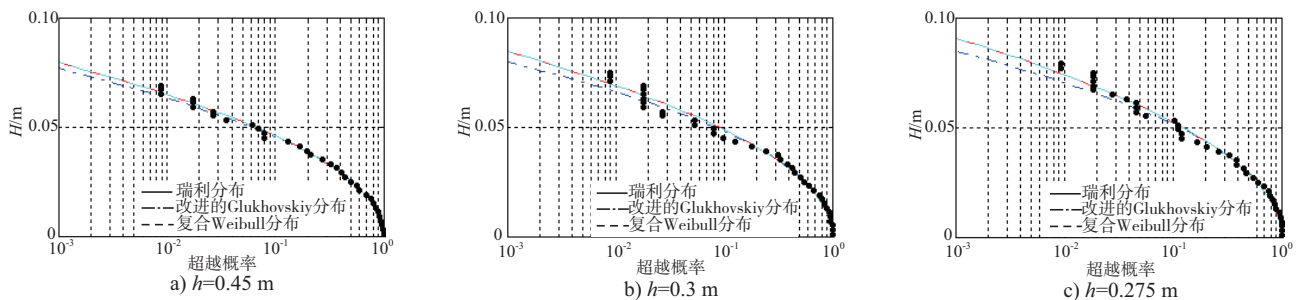


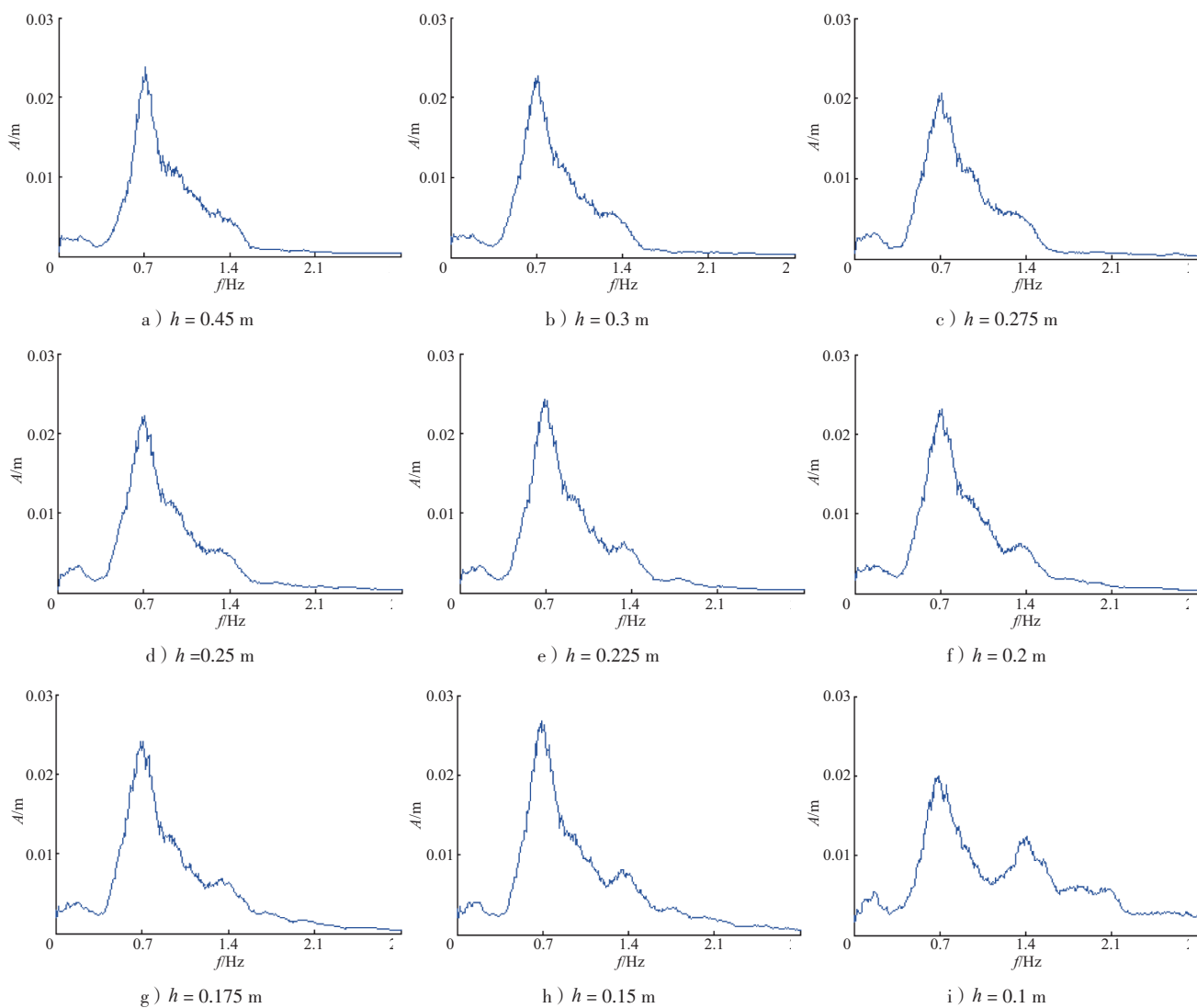
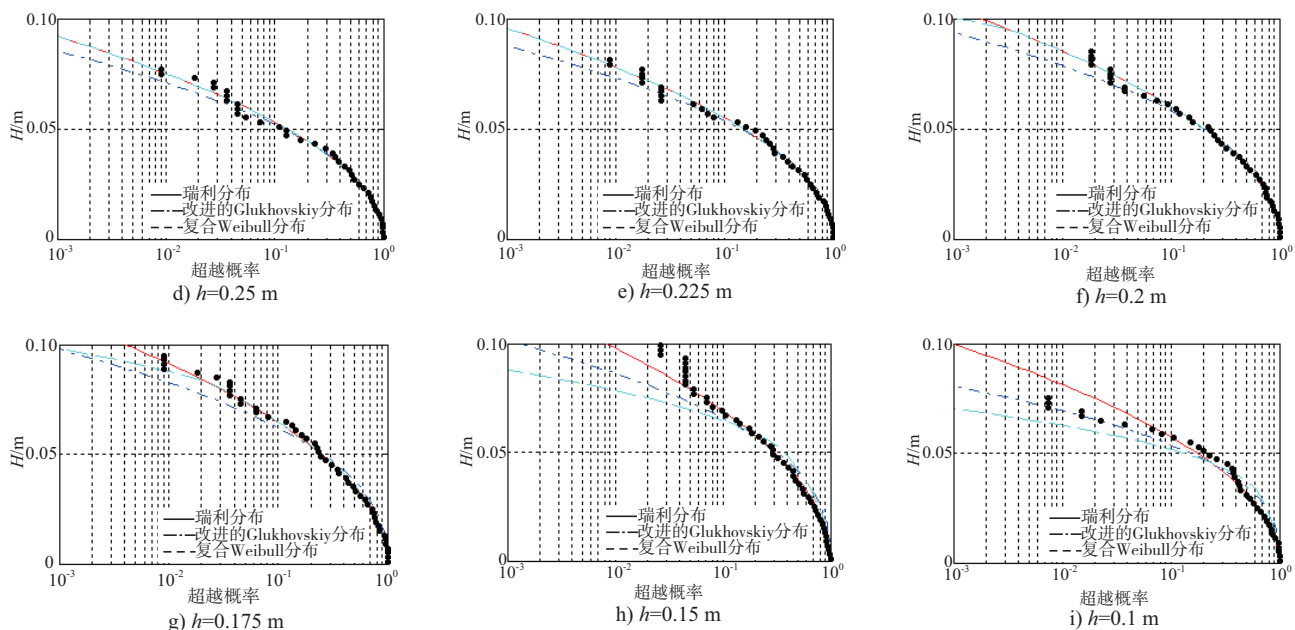
图3 J1组波高分布的沿程变化

对于J2组不规则波浪(图4),在坡前常水深区域波高分布与Rayleigh分布吻合得较好;在变浅区域,波高分布与改进Glukhovskiy分布吻合得良好;在波浪破碎之后,波高分布与Rayleigh分布一致;波浪破碎之后到达坡顶,波高分布恢复与改进Glukhovskiy分布一致。J1组试验和J2组试验对比说明随机波波高差别影响破碎与否,进而影响不规则波在陡坡变浅时的波高分布。

3.2 频谱演化

J1组能量谱如图5所示,J2组能量谱如图6所示。由图5可见,沿波浪传播方向9个不同水深处的傅立叶能谱,随着水深变浅,主波的高次谐波和低频谐波能量也没有明显的增强。分析其原因,波浪波幅较小,并且坡度变化突然,导致波浪对斜坡的感应不强烈。在坡顶处,由于水深非常小,高次谐波和低频波浪都有所增长。





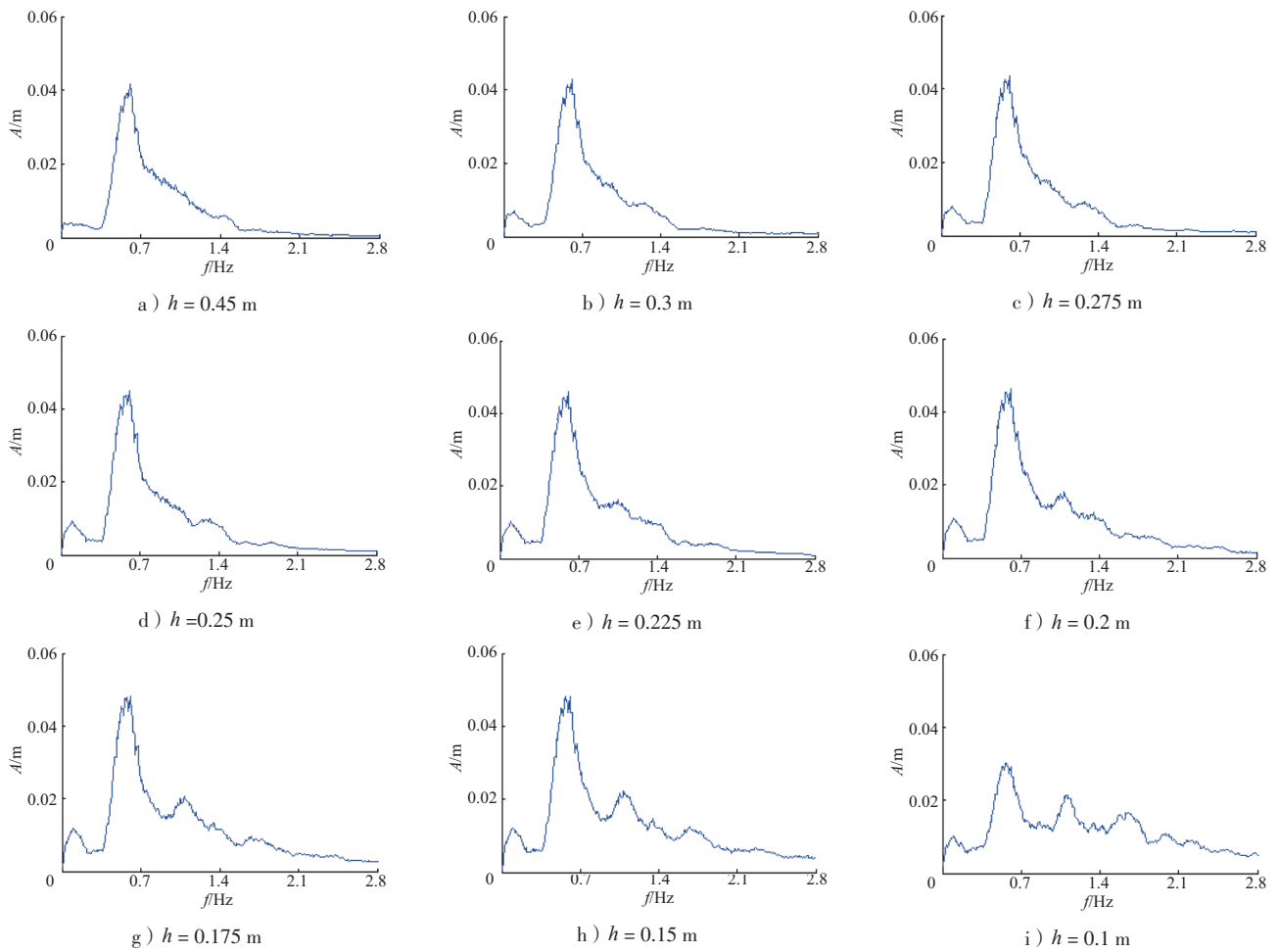


图6 J2组时间序列的能量谱

J2组波高较大,发生了破碎,此组试验波浪能量分布演化与J1组试验相似,但是能量向低频成分传递更加显著,向高频短波能量传递较未发生破碎的J1组也更充分。

3.3 二阶谱演化

波浪在传播过程中伴有谐波的增长,这个现象线性理论不能解释,但是许多数值波浪模型^[17-19]过程中都能模拟这个现象,下面将用平方的二阶相关谱来分析波浪的二阶非线性相互作用过程。

图7所示是J1组试验在9个代表水深处的平方小波二阶相关谱。图7a)中水深为0.45 m,只有少数波浪成分参与了微弱的二阶非线性相互作用,并且波浪成分之间的相互作用程度非常的微弱,例如 $b^2(0.7, 0.7) = 0.07$,说明此水深处频率为0.7 Hz (f_p)的波浪波成分自身之间发生非线性相互作用而产生了频率为1.42 Hz ($2f_p$)的波浪。波浪变浅的过程中,二阶相位耦合范围的增大和程度都能通过二阶相关谱图一目了然地得到。图7h)

中,水深为0.2 m, $b^2(0.7, 0.7) = 0.35$, $b^2(0.7, 1.0) = 0.62$ 。图7i)中,在二阶相关谱中可以清晰看到相位耦合程度稳定的增加,各个波浪成分之间的相位耦合范围更大, $b^2(0.7, 0.7) = 0.63$, $b^2(0.7, 1.4) = 0.68$, $b^2(0.7, 2.1) = 0.78$, $b^2(1.4, 1.4) = 0.6$,与此水深处 $f = 1.4$ Hz, $f = 2.1$ Hz 和 $f = 2.8$ Hz 的能量增长分别相对应,见图5i)。并且在此水深处,二阶相位耦合的程度较坡前常水深处增大很多。与此同时也注意到图7g)~i)中,可以看出波浪不破碎并且在陡坡上传播的情况下不利于低频波浪的产生。图8所示是J1组试验的二阶频谱。由图中可以看出,随着水深的变浅,非线性相互作用最强的部分向高频转移,这从另一个方面证明先前的结论,陡坡下非破碎波浪不容易产生低频波浪。

图9所示是J2组试验在9个代表水深处的平方小波二阶相关谱。图9a)中坡前常水深处,平方小波二阶相位耦合非常微弱;当波浪传播至斜坡上开始变浅,在水深变为0.225 m时,如图9e)所示,

更多的波浪成分参与到非线性相互作用中来。由 J2 组波列的二阶频谱 (图 10) 可见, 图 10 与图 8 相似性很高, 只不过 J2 组波浪在破碎之后, 能量向

低频成分的传递更加显著, 并且在波浪破碎后能量的耗散更强烈, 此结论与傅立叶能谱分析得出的结论相一致。

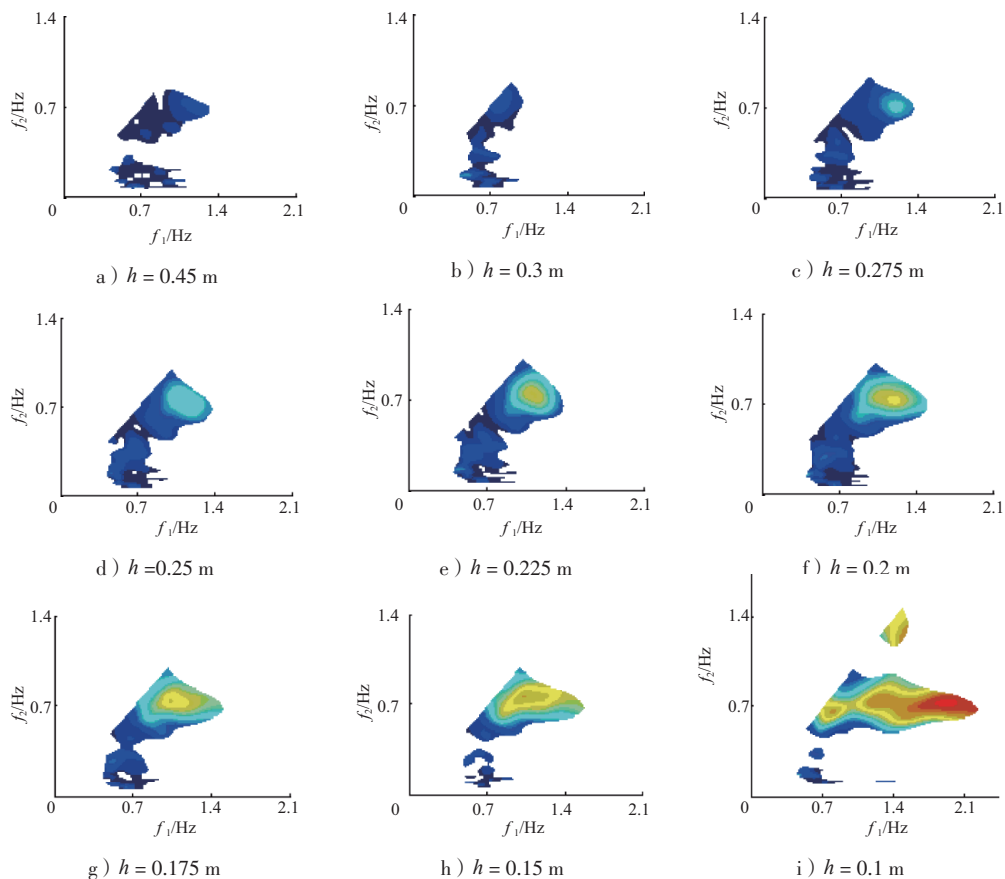


图 7 J1 组波浪序列代表水深处的平方小波二阶相关谱等高线

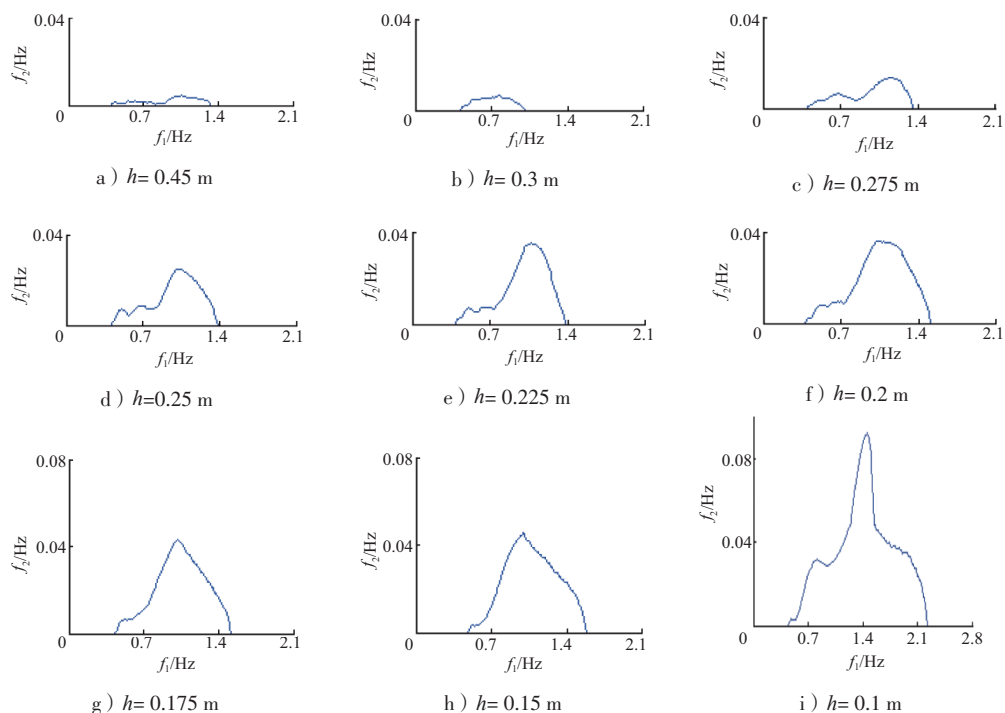


图 8 J1 组试验不同水深处的二阶频谱

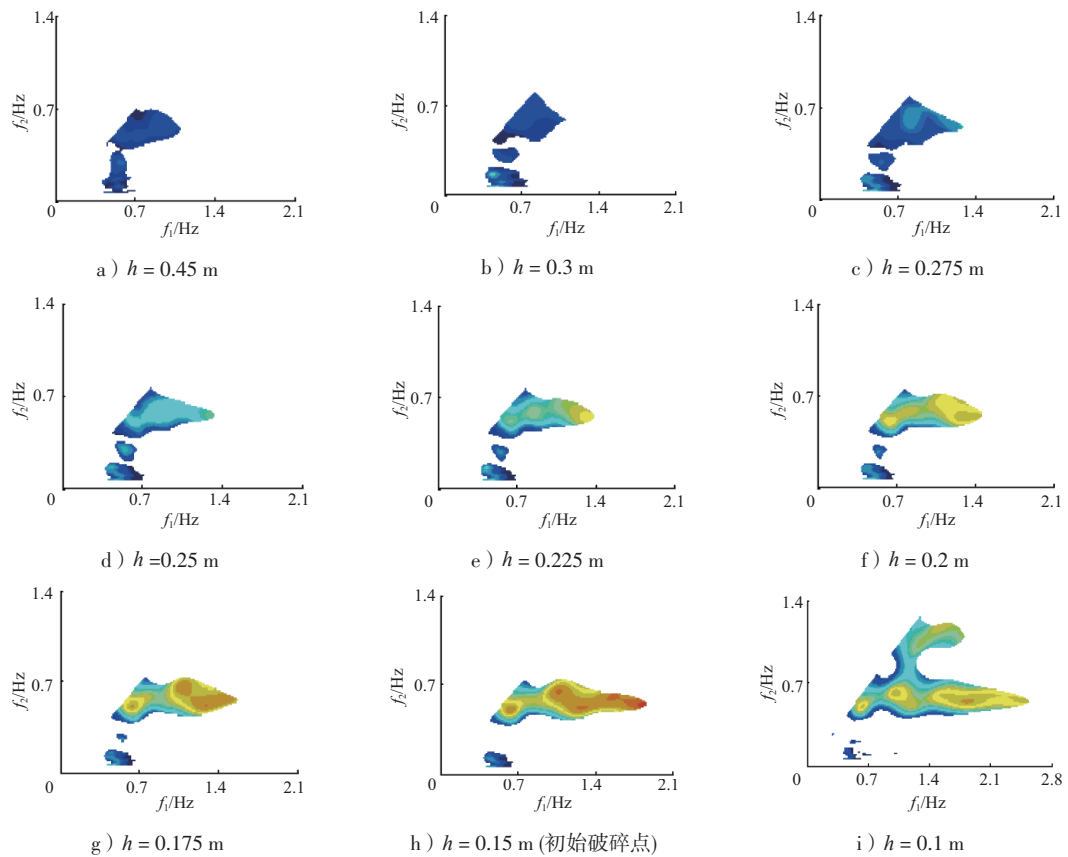


图9 J2组波浪序列代表水深处的平方小波二阶相关谱等高线

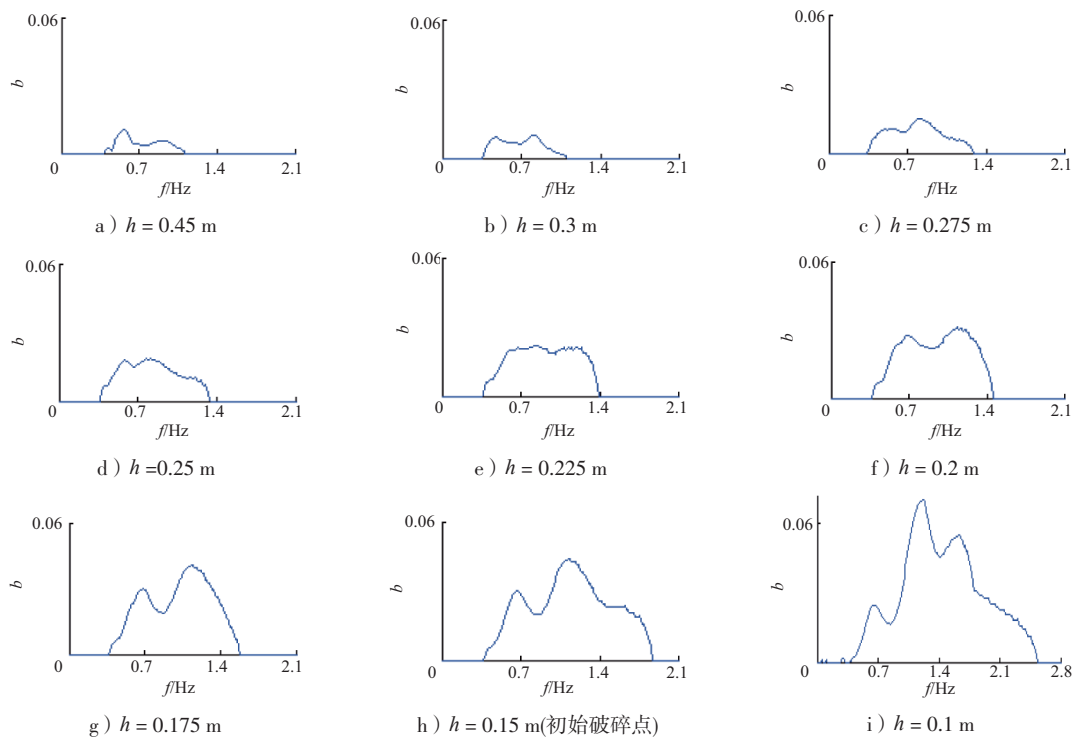


图10 J2组试验不同水深处的二阶频谱

4 结论

本文通过试验研究了不规则波在陡坡上的非线性传播变形特征。试验以JONSWAP谱为目标频

谱,生成两组具有不同谱峰频率和有效波高的不规则波,研究了波浪在陡坡上的波高分布的演化特征。结果显示,在陡坡条件下,在坡前常水深

区域波高分布与Rayleigh分布吻合得较好。但是在变浅区域,波高分布与Rayleigh分布吻合得不好,与改进Glukhovskiy分布吻合度要比Rayleigh分布和复合Weibull分布都高。

对陡坡上波浪非线性传播变形的研究采用小波二阶谱的方法。在陡坡条件下,小波二阶谱显示,在坡前常水深区域二阶相位耦合非常微弱,并且参与相互作用的波浪成分主要是具有谱峰频率的波浪成分。随着变浅作用,非线性相位耦合的范围和强度都有所增大。二阶频谱显示非线性最强的频率并不是谱峰频率,而是随着水深的变浅向高频转移。两组不规则波传播至陡坡之后,非线性作用的频率也略有不同,发生破碎的J2组试验,高频短波能量耗散更大,低频波浪能量增长明显;非破碎J1组波浪在变浅的过程中,能量传递较慢,不利于低频波浪的生成。

随机波在陡坡浅堤上的演化与工程实际联系紧密,试验研究的实际意义十分重大。

参考文献:

- [1] Longuet-Higgins M S. On the statistical distribution of heights of sea waves[J]. Journal of Marine Research, 1952 (11): 245-266.
- [2] Glukhovskiy B K. Investigation of sea wind waves (in Russian)[M]. Leningrad:Gidrometeoizdat Publisher, 1996.
- [3] Klopman G, Van Leeuwen P J. An efficient method for the reproduction of nonlinear random waves[C]. 19th International Conference on Coastal Engineering, 1990:724-740.
- [4] Battjes J A, Groenendijk H W. Wave height distributions on shallow foreshores[J]. Coastal Engineering, 2000, 40(3): 161-182.
- [5] Elgar S, Guza R T. Observations of bispectra of shoaling surface gravity-waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1985, 161: 425-448.
- [6] Milligen V B P, Sanchez E, Estrada T, et al. Wavelet bicoherence: A new turbulence analysis tool[J]. Physics of Plasmas, 1995(8): 3 017-3 032.
- [7] Chung J, Powers E J. The statistics of wavelet-based bicoherence[C]. Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 1998: 141-144.
- [8] Larsen Y, Hanssen A. Wavelet-polyspectra: principles and properties[C]. Signal Processing X Theories and Applications, Proceedings of EUSIPCO 2000, Tenth European Signal Processing Conference, 2000: 797-800.
- [9] Dong G, Ma Y, Perlin M, et al. Experimental study of wave-wave nonlinear interactions using the wavelet-based bicoherence[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(9): 741-752.
- [10] Ma Y, Dong G, Perlin M, et al. Laboratory observations of wave evolution, modulation and blocking due to spatially varying opposing currents[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 661: 108-129.
- [11] Schäffer H A. Second-order wavemaker theory for irregular waves[J]. Ocean Engineering, 1996, 23(1): 47-88.
- [12] Goda Y. Random Seas and Design of Maritime Structures[M]. New York: Columbia University Press, 1985: 320.
- [13] Hasselmann K, Munk W, MacDonald G. Bispectra of Ocean Waves, in Time Series Analysis[M]. New York: Rosenblatt, 1963: 125-139.
- [14] Ma Y X, Dong G H, Liu S X, et al. Laboratory study of unidirectional focusing waves in intermediate depth water[J]. Journal of Engineering Mechanics-Asce, 2010, 136(1): 78-90.
- [15] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
- [16] Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence[J]. Annal Review of Fluid Mechanics, 1992, 24: 395-457.
- [17] Madsen P A, Sørensen O R. Bound waves and triad interactions in shallow water[J]. Ocean Engineering, 1993, 20(4):359-388.
- [18] Madsen P A, Schäffer H A. Higher-order bossinesq-type equations for surface gravity waves: derivation and analysis[J]. Roy Soc of London Phil Tr A, 1998, A356: 3 123-3 184.
- [19] Gobbi M F, Kirby J T, Ge W. A fully nonlinear boussinesq model for surface waves; Part 2. Extension to $o(kh)^4$ [J]. J Fluid Mech, 2000, 405: 181-210.

(本文编辑 武亚庆)