

基于三阶斯托克斯波的谱估计及海浪数值模拟研究

薛亚东, 西文韬, 石爱国, 张新宇, 李 东

(海军大连舰艇学院 航海系, 辽宁 大连 116018)

摘要: 为了拓宽建立深水非线性海浪频谱模型的研究途径, 基于三阶斯托克斯波理论, 提出了以改进的三阶斯托克斯波为组成波, 以修正的自回归模型(AR)谱估计方法得到的估计谱(简称新谱)为靶谱的非线性海浪模型。通过基于模拟频谱和相位谱反演海浪波面高度时间序列(以下简称海浪时历反演方法)的谱比较方法验证了新谱的优越性, 为从根本上解决精确评估海浪谱提供了技术支撑, 对于增强未来掌控海战场具有重要意义。

关键词: 三阶斯托克斯波; 频谱; 海浪模型; 相位谱

中图分类号: U675.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)06-0092-06
DOI: 10.11759/hyxx20160904003

海浪研究通常分为两种途径: 一是从波动基本方程出发, 得到线性和非线性水波波动描述, 线性描述为我们所熟知的微幅波理论, 非线性波动则有斯托克斯波、摆线波、椭圆波、孤立波等; 近期, 邵钰清^[1]从流体力学理论出发, 介绍流函数波浪理论, 将流函数波浪理论计算得到的部分结果与线性波理论计算得到的结果进行比较, 结果表明流函数波浪理论很好地考虑了波浪的非线性; 周斌珍等^[2]基于势流理论, 并结合深水波质点运动从水面向下呈 e 指数衰减的特性, 建立了完全非线性数值变深水槽模型, 通过实时模拟活塞式造波机运动来产生波浪。二是把海浪视为随机过程, 采用概率统计理论方法研究。随机海浪研究是在四十年代因军事领域需要而兴起的一个研究领域。在当时的研究中, 将波动理论和观测资料结合起来, 因而带有较强的经验性。20 世纪 50 年代初, Pierson 最先将 Rice 关于无线电噪音的理论应用于波浪, 从此利用谱以随机过程描述波浪成为主要的研究途径。目前提出多种描述海浪的方式或所谓的海浪模型, 诸如朗盖脱-赫金斯(Longuet-Higgin)模型、皮尔逊(Pierson)模型, 均是线性波浪模型^[3]。

线性模拟方法在很多条件下是可以满足工程需求的, 也是海浪研究的主要方法。然而在微小振幅假定下得到的结果, 却无法解释诸如波浪越过突起地形时的波峰分裂及近岸波浪破碎等波动现象。一些实验室和海上观测发现, 实际的海浪振幅相对于波长不是小量, 波峰陡峭而高, 波谷平缓而浅, 这种关于平均波面的不对称, 线性理论是难以模拟出来的。

因此需要进行海浪的非线性研究。1959 年 Tick 首次提出了二阶功率谱的概念, 1963 年 Longuet-Higgins^[4]在线性模型的基础上提出了著名的非线性海浪模型, 同年 Hasselmann 等人将二阶谱应用于海浪研究, 获得了用水底压强表达的理论二阶谱。

在这些研究的基础上, 展开了基于随机过程的非线性海浪研究。我国学者也进行了探索: 丁平等^[5-6]在精确导出任意均匀水域上三维随机波动一阶解、二阶解的基础上, 更严密、更合理地重新推导了波面高度分布的偏度与二阶功率谱的理论表达式, 并首次给出了有限水深波面二阶谱的理论形式。Ning 等^[7]利用源造波技术对无限水深的完全非线性波浪进行了数值模拟研究。Bai 和 Taylor^[8-10]采用高阶边界元方法在数值波浪水槽中模拟造波板实时运动产生波浪, 分别对完全非线性规则波、聚焦波与垂直圆柱相互作用问题及完全非线性波浪对固定和漂浮结构物作用问题进行了模拟。

当前, 将两条途径研究成果相融合的研究方法方兴未艾。一些学者认为可以用非线性的有限振幅波代替微幅波作为组成波模拟波浪。王岚等^[11]通过采用基于 JONSWAP 谱的线性滤波并依据 B 分布特性进行非线性修正的方法对深水无破碎二维非线性

收稿日期: 2016-09-04; 修回日期: 2016-11-04

基金项目: 总装备部十二五装备预研项目(51314030101)

[Foundation: Equipment Research Project of 12th Five-year Plan of People's Liberation Army General Armaments Department, No. 51314030101]

作者简介: 薛亚东(1990-), 男, 硕士研究生, 山东宁阳人, 研究领域: 海浪环境仿真与数值建模, E-mail: haidaxyd@163.com

性海浪进行数值模拟; 焦甲龙等在正弦波的表达式中引入一些修正系数, 得到一种非线性水波自由面模型, 通过确定其修正系数可以快速高效地模拟非线性水波自由面^[12]。日本学者 Tsuchiya, Yasuda^[13]提出用孤立波作为子波模拟非线性不规则波, 并取得了良好的结果; 肖波等^[14]采用椭圆余弦波作为组成波建立了浅水不规则波的随机模型。

本文提出用改进的三阶斯托克斯波为组成波建立新的海浪模型, 以 AR 模型谱估计方法计算新谱, 并进行非线性能量修正, 通过实验证明方法的有效性。

1 三阶斯托克斯波理论

斯托克斯(Stokes)波是非线性重力波的一种波动解。这种波动是斯托克斯于 1847 年提出的。他发现了关键性的结论: 第一, 在非线性系统中, 上下不对称的周期波列是可能的, 第二, 弥散关系与振幅有关。瑞利自 1876 年以后, 采用将流场化成定常流场的复势函数方法, 通过逐级近似, 求得了各阶 Stokes 波弥散关系和波面函数, 形成了经典斯托克斯波理论。由于斯托克斯和瑞利并未给出存在性的证明, 这使得他们得到的近似解析解缺乏严格的依据直到 1925 年, 尼可拉索夫、列维-西维他、斯特拉伊克和戴维斯等人对这种波动的存在性才给出了严格的证明。这使得 Stokes 波——它是关于已被证明是存

$$\zeta = A \left[\left(1 + \frac{1}{8} k^2 A^2 \right) \cos(kx - \omega t) + \frac{1}{2} k A \cos 2(kx - \omega t) + \frac{3}{8} k^2 A^2 \cos 3(kx - \omega t) \right] + O(k^3 A^3) \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{gk} \left(1 + \frac{1}{2} k^2 A^2 \right) + O(k^3 A^3) \quad (4)$$

式中, O 表示无穷级数。该式指出: 精确到三阶, 斯托克斯波的速度势依然可以用线性结果表示, 而圆频率要进行修正。但是对于波幅修正, 在波陡较小的情况下不是特别明显。

沈正等^[18]1993 年给出了深水三阶托斯托克斯波的一种新的近似解, 得到了与经典三阶以上斯克斯波不同弥散关系和波面函数, 并且证明了与经典的复势解法相比逼近程度更优。与邹的波面相比, 波幅修正要显著一些。

$$\omega^2 = \frac{1}{2} gk (1 + \sqrt{1 + 4A^2 k^2}) \quad (5)$$

$$\zeta(\theta) = A \left(1 + \frac{5}{8} A^2 k^2 \right) \cos \theta + \frac{1}{2} A^2 k \cos 2\theta + \frac{3}{8} A^3 k^2 \cos 3\theta \quad (6)$$

$$\theta = kx - \omega t \quad (7)$$

本文将这种近似解析解称为改进的三阶斯托克

在非线性重力波的一种近似解析解逼近——有了严格的数学基础。此后, 由于应用方面的需要, 许多学者对这种波动进行了大量的研究, 其结果在海洋工程和海浪研究方面都取得了应用^[15-16]。

斯托克斯波理论发展至今主要有二阶斯托克斯阶波理论、三阶斯托克斯阶波理论、五阶斯托克斯阶波理论和高阶斯托克斯阶波理论。三阶斯托克斯波理论目前为止体系比较完备, 其表达方式也有多种。

文献[1]给出了深水三阶斯托克斯波波面:

$$\zeta = A \cos k(x - ct) + \frac{1}{2} k A^2 \cos 2k(x - ct) + \frac{3}{8} k^2 A^3 \cos 3k(x - ct) \quad (1)$$

其中 c 为波速, $c^2 = \frac{gL}{2\pi} \left(1 + \frac{4\pi^2 \beta^2}{L^2} \right) \approx \frac{gL}{2\pi} \left(1 + \frac{4\pi^2 A^2}{L^2} \right)$, A 为振幅, t 为时间。

由上式得出结论: 水质点的振动中不在静止水面上, 而是在水面以上 $\frac{1}{2} k A^2$ 处。

邹志利^[17]在《水波原理及其应用》一书中也给出了深水三阶斯托克斯波的速度势、波面方程和弥散关系, 即:

$$\phi = \frac{gA}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) + O(k^3 A^3) \quad (2)$$

斯波, 并不再加以说明的即采用这种形式。

2 基于三阶斯托克斯波的谱估计方法

2.1 非线性海浪模型的提出

经典的线性叠加原理将波浪视为多个(理论上为无限多)不同频率和不同初相位的余弦波相位叠加而成, 不同频率的组成波能量分布由频谱 $S(\omega_i)$ 决定^[16]。

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^M a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad (8)$$

$$\sum_{\omega}^{\omega+\delta\omega} \frac{1}{2} a_n^2 = S(\omega) \delta\omega \quad (9)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{\delta\omega} \sum_{\omega}^{\omega+\delta\omega} \frac{1}{2} a_n^2 \quad (10)$$

式中, $\zeta(t)$ 为相对于静水面的瞬时波面高度; a_i 为第 i 个组成波的振幅; k_i 、 ω_i 分别是第 i 个组成波的波数和圆频率; x 表示位置, t 表示时间; ε_i 是第 i

个组成波的初相位, 取 $(0, 2\pi)$ 范围内均匀分布的随机数, 称之为随机相位。 $\delta\omega$ 为频率间隔。

Tsuchiya、Yasuda 提出用孤立波作为子波模拟非线性不规则波, 并取得了良好的结果; 肖波等^[14]采用椭圆余弦波作为组成波建立了浅水不规则波的随机模型。受此启发, 提出用斯托克斯波作为组成波建立海浪模型。

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^M A_i \left(1 + \frac{5}{8} A_i^2 k_i^2 \right) \cos \theta + \frac{1}{2} A_i^2 k_i \cos 2\theta + \frac{3}{8} A_i^3 k_i^2 \cos 3\theta \quad (11)$$

$$\theta = k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i \quad (12)$$

2.2 谱修正方法

基于前一小节提出的非线性海浪模型, 给出谱估计的修正方法。如下:

- (1) 获取海浪时历(实测、模拟均可)。
- (2) 谱估计(传统谱估计或现代谱估计)得到线性粗谱 S_i 。
- (3) 根据三阶斯托克斯波近似解析解, 计算原始频率、二倍频、三倍频能量, 给出计算式:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} A_i^2 = S_i \delta\omega, \\ a_i^1 = A_i \left(1 + \frac{5}{8} A_i^2 k_i^2 \right), \\ a_i^2 = \frac{1}{2} A_i^2 k_i, \\ a_i^3 = \frac{3}{8} A_i^3 k_i^2, \\ S_i^m = \frac{1}{\delta\omega} \frac{1}{2} (a_i^m)^2. \end{cases}$$

其中 $\delta\omega$ 是频率间隔; $m=1, 2, 3$ 为阶数; $i=1, 2, \dots, N$, ω 为频率点数; k_i 为波数。

- (4) 将原始频率, 二倍频, 三倍频能量密度合并得到新的能量分布密度 $S_i^* = S_i^1 + S_i^2 + S_i^3$ 并将计算新的

频率分布: $\omega_i^* = \sqrt{\frac{1}{2} g k_i (1 + \sqrt{1 + 4 A_i^2 k_i^2})}$ 。

2.3 较低波高下的谱估计比较探究

选取某测量船 2012 年 5 月 24 日船载测波雷达系统实测的海浪频谱为靶谱, 有效波高 2 m, 在 fluent 软件中生成海浪环境。

具体波浪参数为: 流速 7.26 m/s, 谱峰频率 0.6849 rad/s, 有效波高 2.0 m, 波浪周期 8.72 s, 子波数 64。

计算域设置: 沿 X 正向, 前部为造波区, 长度 320 m; 后部分为消波区, 长度为 160 m; Y 方向水平面以上 20 m 为空气; 水深设置为 60 m。

网格划分: 采用结构网格进行计算域划分, 自由面加密网格为 0.2 m, 即有效波高的 1/10。

在数值水池 $x=30$ m 处设置监测点记录波高时历 x_n , 将记录结果同势流理论结果比对, 如图 1 所示, 两者吻合良好, 说明采用的模式是可信的。

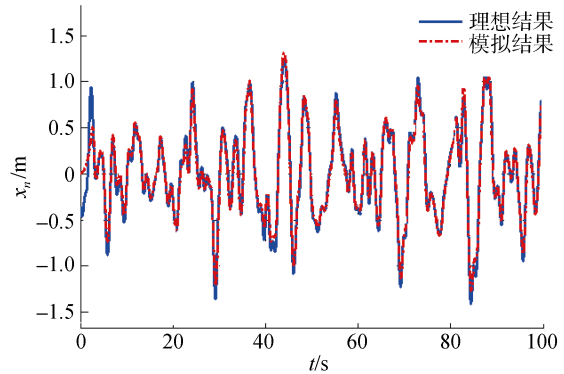


图 1 模拟结果与理想时历比对($x=30$ m)
Fig. 1 Comparison between simulation results and theoretical results

通过修正周期图法对模拟结果进行谱分析, 得到线性粗谱。然后基于三阶斯托克斯波进行频谱修正, 分别计算出二倍频和三倍频能量, 从而得到新谱。靶谱、线性粗谱和非线性修正谱对比如图 2。

如图 2 可看出, 线性谱与非线性修正谱在谱形上均与靶谱吻合良好。通过计算谱参数, 线性谱有效波高 1.953 8 m, 非线性修正谱有效波高 1.953 9 m。与目标值 2.0 m 的误差均在 2.5 % 以内, 且非线性修正谱精度略有提高。因此, 在一般海况下, 非线性谱修正的精度是可信的, 且略优于线性谱估计方法。

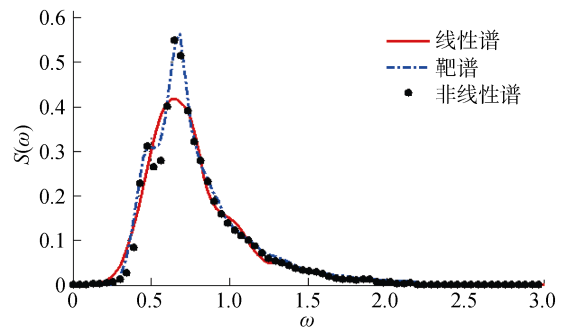


图 2 线性谱模拟谱、实测谱与非线性修正谱比对
Fig. 2 Comparison between simulated spectrum, measured spectrum, and nonlinear spectrum

2.4 大波高下的谱估计比较研究

采用合田改进的 JONSWAP 谱, 有效波高设置为 7.31 m(七级海况), 谱峰升高因子 $\gamma = 3.3$, 谱峰周期 4.5 s, 子波数 80 个, 频率范围 $f = 0 \sim 3f_p$ 。

JONSWAP 谱参数设置为: 有效波高 7.31 m, 谱峰升高因子 γ 为 3.3, 谱峰周期 4.5 s, 子波数 M 为 80, 最低频率 0 Hz, 最高频率 0.666 7 Hz。

基于势流理论, 生成波浪时历, 模拟时长 1 000 s, 对时历进行传统谱估计和非线性修正谱估计, 结果如图 3 所示。

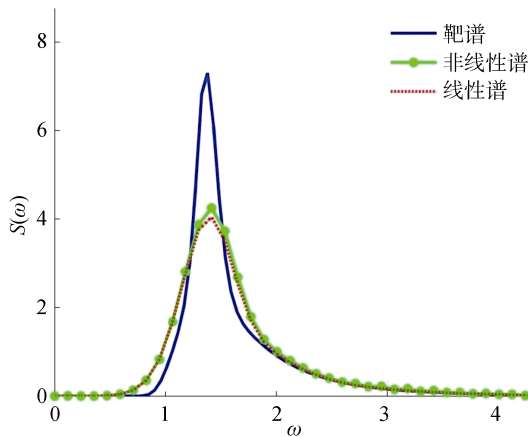


图 3 线性谱、修正谱与靶谱比对

Fig. 3 Comparison between simulated spectrum, measured spectrum, and nonlinear spectrum

如图 3 所示, 非线性修正谱峰值要高于线性谱, 谱形上更加近似与靶谱。经过计算谱参数, 线性谱有效波高 7.206 9 m, 相对于目标值偏小, 误差-1.41%; 非线性修正谱有效波高 7.374 3 m, 相对于目标值偏大, 误差为 0.88%。综合来看, 非线性修正谱优于线性谱。

3 基于海上实测数据的两种谱模式比较研究

3.1 数据来源

选取来源于西北太平洋的某段波浪时历, h 为波高, t 为时间, 时间步长 0.2 s, 数据长度 6 000, 有效波高为 3.831 1 m。

3.2 实验思路

先采用线性谱估计和非线性修正谱估计方法, 对海浪时历进行谱分析, 在已知相位谱的条件下, 生成不同的海浪时历。与实测时历比较, 评估何者更

优。这样直接和实测数据比较的评估结果, 更具有实践性, 客观性。

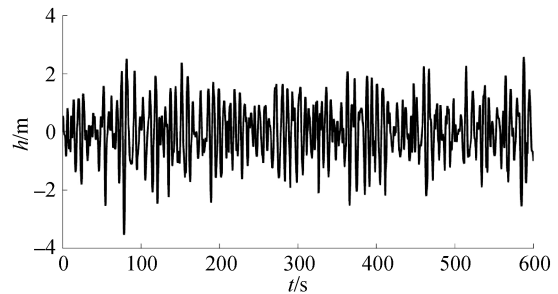


图 4 西北太平洋波浪实例片段

Fig. 4 Examples of the Pacific Northwest

3.3 实施步骤

采用模拟频谱和相位谱的方法反演时历, 并与原始时历比较, 评估不同模型的优劣。具体步骤如下:

(1) 获取实例 x 根据时历取求得相位谱 ϕ_i , 方法参考文献[14]。

(2) 通过传统谱估计方法(周期图法)得到线性谱 S_i 。

(3) 根据线性叠加模型, 计算模拟波面 x^1 。

(4) 通过现代谱估计方法(AR 谱)得到粗谱, 并在此基础上计算得到非线性修正谱。

(5) 根据本文提出的非线性海浪模型, 计算模拟波面 x^2 。

(6) 定义评估标准。

$\sigma = \sum |x^* - x|$, 即绝对误差和。其中 x^* 是模拟值, x 实测值, 分别求取两种海浪模型的 σ 值, 值越小模拟效果越好。

(7) 定义评估标准。

$\delta = |x^* \Delta t - x \Delta t|$, 即包络面积, 值越小模拟效果越好, 其中 x^* 是模拟值, x 为实测值, Δt 是时间步长。

3.4 实验结果

根据实验步骤分别利用线性模型和非线性模型反演实测海浪时历, 时间步长 0.2 s, 模拟时间 20 min。图 5 截取前 70 s 结果予以显示。

两种模型与实测数据均吻合较好, 可以证明反演方法是有效的。根据评估标准, 线性模型所得到的 σ 为 $1.000 1 \times 10^3$, 非线性模型所得到 σ 为 952.737 4, 因此非线性模型效果好, 提高约 5%;

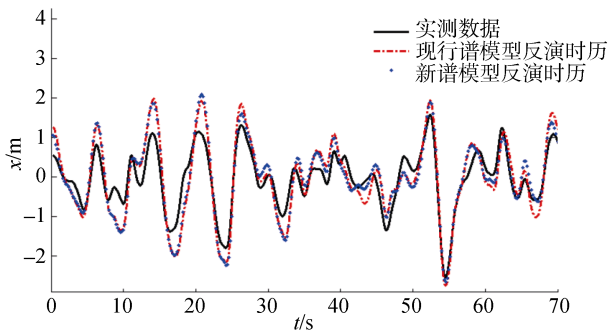


图5 实测数据、现行谱反演时历与新谱模型反演时历的对比

Fig. 5 Comparison of measured data, simulation value of current spectrum model, and new spectrum model

根据评估标准，线性模型所得到 σ 为 63.564，非线性模型所得到 δ 为 57.588 7，较线性模型提高约为 9.4%。综上所述，本文提出的非线性海浪模型优于传统的线性模型。

4 结束语

本文首次提出了以三阶斯托克斯波为组成波的海浪模型，并基于三阶斯托克斯波给出了谱估计修正方法。主要结论如下：(1)以微幅波为组成波的种种频谱，可视为线性谱，为更加精确地描述诸如大波陡的非线性海浪，提出了以改进的三阶 stokes 波为组成波，采用 AR 模型法进行谱分析的修正谱模式。(2)在非线性不强的条件下，线性估计谱与修正估计谱精度近似，修正谱略高于线性谱；当波陡变大时，非线性谱精度明显高于线性谱。通过实测数据比较研究，论证了这一结论的可信性。(3)本文提出了一种新的海浪频谱评估模式，即获取相位谱，通过频谱相位谱模拟反演海浪时历，与实测数据比较的评估方法，为海浪谱的研究提供了技术支撑。(4)关于非线性波动为组成波应用于叠加原理问题，文献[15, 19]给出了解释，即在窄谱情况下是可行的。

参考文献:

[1] 邵钰清, 许成顺. 基于流函数理论的波浪非线性及洋流作用下动力特性研究[J]. 中国海洋平台, 2014, 29(5): 21-28.
Shao Yuqing, Xu Chengshun. Study on wave nonlinearity and dynamic characteristics under currents on stream function theory [J]. China Offshore Platform, 2014, 29(5): 21-28.

[2] 周斌珍, 宁德志, 滕斌, 等. 完全非线性深水波的数值模拟[J]. 海洋学报, 2011, 33(1): 27-35.

Zhou Binzhen, Ning Dezhi, Teng Bin, et al. The numerical simulation of fully nonlinear deep-water waves[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(1): 27-35.

[3] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
Wen Shengchang, Yu Zhouwen, Wave Theory and Calculation Principle[M]. Beijing: Science Press, 1984.

[4] Longuet H. The effect of nonlinearities on statistical distributions in the theory of sea waves[J]. Fluid Mech, 1963, 17(3): 459-480.

[5] 丁平兴, 孙孚, 余宙文. 海浪二阶非线性特征量的研究. 理论推导[J]. 中国科学(B 辑), 1993, 23(3): 311-317.
Ding Pingxing, Sun Fu, Yu Zhouwen. Study on the nonlinear characteristics of wave I. theoretical derivation[J]. Science in China (Series B), 1993, 23(3): 311-317.

[6] 丁平兴, 孙孚, 余宙文. 二阶谱理论及其在海浪研究中的应用. 估计方法与应用[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(6): 649-655.
Ding Pingxing, Sun Fu, Yu Zhouwen. Study on the nonlinear characteristics of wave II. Estimation method and application[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(6): 649-655.

[7] Ning D Z, Teng B, Eatock T R, et al. Numerical simulation of nonlinear regular and focused waves in an infinite water-depth[J]. Ocean Engineering, 2008, 35: 887-899.

[8] Bai W, Eatock T R. Higher-order boundary element simulation of fully nonlinear wave radiation by oscillating vertical cylinders[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28: 247- 265.

[9] Bai W, Eatock T R. Numerical simulation of fully nonlinear regular and focused wave diffraction around a vertical cylinder using domain decomposition[J]. Applied Ocean Research, 2007, 29: 55-71.

[10] Bai W, Eatock T R. Fully nonlinear simulation of wave interaction with fixed and floating flares structures[J]. Ocean Engineering, 2009, 36: 223- 236.

[11] 王岚, 周霖仪, 聂卫东. 一种快速非线性海浪数值仿真方法[J]. 鱼雷技术, 2015, 04: 316-320.
Wang Lan, Zhou Linyi, Nie Weidong. A fast simulation method for nonlinear ocean wave[J]. Torpedo Technology, 2015, 04: 316-320.

[12] 焦甲龙, 孙树政, 任慧龙, 等. 一种非线性水波自由面模型及其海浪数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 89-92.
Jiao Jialong, Sun Shuzheng, Ren Huilong, et al. Model of free surface of non-linear water wave and its applications to unnumerical simulation of ocean waves[J]. Huazhong University of Science and Technology (Batural Science Edition), 2015, 43(4): 89-92.

- [13] Tsuchiya T, Yasuda T. A Dynamical Expression of Waves in Shallow Water[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 54(3): 361-388.
- [14] 肖波, 邱大洪, 俞聿修. 非线性不规则波的数值模拟[J]. *大连理工大学学报*, 1990, 30(2): 129-136.
Xiao Bo, Qiu Dahong, Yu Yuxiu. Unnumerical simulation of Nonlinear Irregular Waves[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1990, 30(2): 129-136.
- [15] 李远林, 陈加菁. 窄带非线性海洋波的 Stokes 波模型[J]. *中国造船*, 1990, 31(1): 9-16.
Li Yuanlin, Chen Jiaqing. Stokes wave model for narrow-band nonlinear irregular waves[J]. *Shipbuilding of China*, 1990, 31(1): 9-16.
- [16] 吴相忠, 张庆河. 基于二阶斯托克斯波理论的辐射应力垂向分布[J]. *海洋科学*, 2012, 36(8): 64-69.
Wu Xiangzhong, Zhang Qinghe. Vertical distribution of radiation stresses based on the second-order Stokes wave theory[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(8): 64-69.
- [17] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Zou Zhili. *Wave Theory and its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [18] 宋曙光, 沈正. 有限深水斯托克斯波的一种近似解析解[J]. *青岛海洋大学学报*, 1994, 3: 333-338.
Song Shuguang, Shen Zheng. An approximate analytical solution to stokes waves for finite depth [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1994, 3: 333-338.
- [19] 侯一筠. 非线性海浪波面与波高的统计分布[J]. *海洋与湖沼*, 1990, 21(5): 425-432.
Hou Yiyun. The statistical distribution of nonlinear wave front and wave height[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, 21(5): 425-432.

Spectral estimation and numerical simulation based on third-order Stokes Waves

XUE Ya-dong, XI Wen-tao, SHI Ai-guo, ZHANG Xin-yu, LI Dong

(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

Received: Sep. 4, 2016

Key words: third-order Stokes; spectrum; wave model; phase spectrum

Abstract: Based on the third-order Stokes wave theory, a nonlinear wave model is proposed, which uses a modified third-order Stokes wave as the component wave and a modified AR model spectrum estimation method as the target spectrum. It is a new way to establish the spectrum model of a deep-water nonlinear wave. The spectral comparison method, based on the time series of ocean wave height established from the simulated spectrum and phase spectrum, is used to verify the superiority of the new spectrum, which provides technical support for the fundamental estimation of the ocean wave spectrum and can help control the sea battlefield in the future.

(本文编辑: 刘珊珊)