

浅水波浪数值模型 SWAN 的原理及应用综述

徐福敏, 张长宽, 陶建峰

(河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 概述了模拟海岸、河口的浅水波浪数值模型研究现状、存在的问题以及用能量平衡方程预报海浪的发展历史。介绍了基于当代最新波浪理论研究成果的第三代浅水波浪数值模型 SWAN 模型, 对模型的适用性、数值特性、功能及局限性进行了阐述。介绍动谱平衡方程数学模型、方程离散要求、边界条件的处理和源项(包括能量输入、损耗及波与波之间非线性相互作用)的处理方法, 重点介绍三相波非线性相互作用。模拟海安湾有效波高、波周期场, 并分析波与波之间非线性相互作用对波浪要素预报的影响, 最后对 SWAN 模型的应用前景和研究趋势进行了展望。

关键词: 浅水波; SWAN 模型; 动谱平衡方程

中图分类号: O353.2; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2004)04-0538-05

1 波浪数值预报的研究现状和存在问题

模拟海岸、河口波浪的浅水波浪数值预报模型主要有缓坡方程^[1]、Boussinesq 方程^[2]、Texel、Marsen 和 Arsole Spectrum(TMA) 谱预报法及能量平衡方程等。各模型在预报时对波浪的能量输入、耗散(包括底摩擦、渗透、白浪、破碎)、波与波之间非线性相互作用、折射、绕射、反射及浅化等机理各有侧重, 各有特色。折射—绕射数值模型基于线性理论, 所描述的是单频率波浪运动, 虽能计及波浪浅化、摩擦、折射、绕射等机制, 但由于其视波浪为规则波, 难于合理模拟风能输入、白浪和波与波之间非线性效应, 尤其在非线性作用剧烈的水域不适用; Boussinesq 方程由于在一个波长内计算网格密度要求较高和在长时间计算中的稳定性问题, 适用于较小水域; 动谱平衡方程数值模型^[3]视波浪为随机波, 虽较难考虑绕射效应, 但比其他模型更合理地计及随机波的能量输入、损耗及转换机理。本文根据基于动谱平衡方程的 Simulating Waves Nearshore (SWAN) 模型, 阐述其模型原理并进行应用研究探讨。

波浪数值研究存在的主要问题有: 缓坡方程和 Boussinesq 模型将波浪周期视为定值, 这与实际情况相悖, 组成波之间强烈的非线性相互作用导致能量的交换和转移是波周期变化的根本原因, 不考虑三相波、四相波非线性相互作用对于波浪能量分配的影响则无法解决这一问题。波周期失真会导致波高、波长、波陡等其它波要素的失真; 流速、水位对于波浪尺度的影响较大, 目前二维、三维水流模型已成熟, 对流速、水位的模拟已达到相当精度, 而在随时间、空间而变的流速、流向、水位作用下的波浪非定常数值模拟尚需进一步研究; 缓坡方程、Boussinesq 方程和动谱平衡方程等模型涉及的波浪机理各有侧重, 在预报海岸、河口、港湾和工程附近波浪要素时, 如何取各模型所长全面模拟波浪动力现象也是有待进一步研究的问题。

2 第三代浅水波浪数值模型 SWAN 概述

能量平衡方程预报浅水风浪始于 20 世纪 80 年代后期, 海浪模拟项目组 (Sea Wave Modeling Project SWAMP Group)^[4]将适用于深海的相平均谱波浪模型进行改进, 使其适用于近岸风浪预报; 法国 Michel BENOIT 等^[5]采用有限元法离散浅水计算区域, 提出了能合理拟合水底地形和海岸线的 TOMAWAC 波浪模型; Tolman 提出了基于动谱

收稿日期: 2003-04-28; 修订日期: 2003-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50279007)

作者简介: 徐福敏(1967-), 女, 天津人, 河海大学副教授, 博士, 主要从事海岸动力学研究。E-mail: xfm67@sohu.com

平衡方程的 WAVEWATCH 第三代波浪预报模型;“七·五”期间青岛海洋大学^[6]进行了海浪数值预报研究,将海浪分为风浪和涌浪两部分,采用有效波表示波浪能量平衡方程,由于未计及波与波之间非线性相互作用和水深变浅后的浅水折射,属于混合模式。R. C. Ris 等^[3]总结历年来波浪能量输入、损耗及转换的研究成果,研制出适用于海岸、湖泊及河口波浪的 SWAN 模型,全面考虑波浪浅化、折射、反射、底摩擦、破碎、白浪、风能输入及波浪非线性效应。N. Booij 等^[7]以波浪线性理论及现场观测资料对 SWAN 模型进行了验证。模型采用全隐式有限差分格式,无条件稳定,与采用显式有限差分格式的传统谱波浪模型相比,即使在很浅水域,其时间步长也可以很大(例如网格步长 100 m、水深 10 m 时时间步长可长达 30 min)。该模型已成功应用于海岸、河口及近海水域的波浪预报^[8,9]。

SWAN 模型的功能: 适用于海岸、湖泊、河口水域风浪、涌浪及混合浪的预报,在直角坐标和球坐标下以矩形网格进行嵌套计算、以曲线网格进行数值计算,适用于大、中、小水域; 模拟水底地形和流场的变化引起的波浪折射、浅化,逆流时波浪的反射和破碎,波浪遇到障碍物的透射及阻碍,波浪增水; 能预报计算域内波高、波周期、波长、波陡、波浪行进方向、近底水质点的运动速度、波能传播方向、能量耗散、单位水面所受波力等海岸工程所需的重要参数; 由于引入透射系数,该模型能预报防波堤、潜堤对计算域波场的影响。

SWAN 模型的局限性: 未将绕射效应计入,若在一两个波长的水平范围内波高变化太大,则模型计算结果将出现偏差,因此在障碍物附近及港湾内计算结果不理想,但大量研究表明,与规则波相比,不规则波的绕射效应远低于规则波,其影响约在一个波长范围内; SWAN 虽能模拟流场中的波浪场,却不能计算出波生流。

3 动谱平衡方程

SWAN 模型不是以二维能谱密度而是以二维动谱密度表示随机波,因在流场中,动谱密度守恒,而能谱密度不守恒,动谱密度 $N(\omega, \theta)$ 为能谱密度 $E(\omega, \theta)$ 与相对频率 ω 之比。在直角坐标系下,动谱平衡方程表示为

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \omega} C_\omega N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = S \quad (1)$$

式中 左边第 1 项为 N 随时间的变化率; 第 2 和第 3 项表示 N 在地理坐标空间 x 、 y 方向上的传播; 第 4 项为由于流场和水深所引起的 N 在相对频率 ω 空间的变化; 第 5 项为 N 在谱分布方向 θ 空间(谱方向分布范围)的传播; S 为以谱密度表示的源汇项,包括风能输入、波与波之间非线性相互作用和由于底摩擦、白浪、破碎等引起的能量损耗; C_x 、 C_y 、 C_ω 和 C_θ 分别代表在 x 、 y 、 ω 和 θ 空间的波浪传播速度。

3.1 方程的离散要求

取 Δt 、 Δx 、 Δy 、 $\Delta \omega$ 和 $\Delta \theta$ 为时间步长、地理空间 x 、 y 方向步长、谱空间相对频率 ω 和方向分布 θ 的步长; 由于谱的分布在 360° 范围内不同,绝大部分能量分布在 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$, 因此可在 θ_{\min} 和 θ_{\max} 之间将谱方向离散为等间距方向步长,风浪情形下方向步长可选大一些,约为 $5^\circ \sim 12^\circ$; 涌浪情形下方向步长需小一些,约在 $2^\circ \sim 5^\circ$; 离散频率定义在最低截断频率(如 0.04 Hz)和最高截断频率(如 1.0 Hz)之间。

3.2 边界条件的处理

计算域边界或是陆地或是水边界,陆地边界不生波,将入射波能吸收; 对水边界而言,边界条件能根据现场观测或其他波浪模型模拟得到。大多水边界均只有一个或两个迎浪边界,其迎浪边界条件能较准确地确定,而横向边界条件较难确定,此时,本模型假定没有波浪从其传入计算

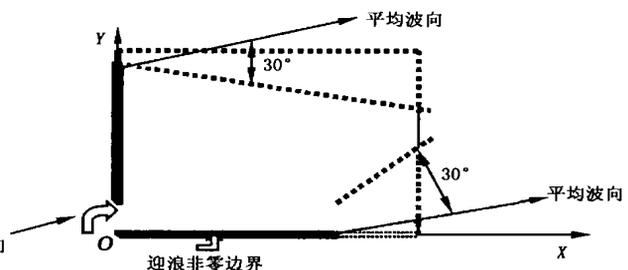


图1 错误的边界条件导致的计算失真区域示意图

Fig. 1 Disturbed regions in the computational area due to erroneous boundary conditions

域,但波浪能经横向边界自由离开计算域,此假定明显会将误差传入模型计算水域,因此,横向边界的选择距感兴趣区域应足够远,才能保证其结果精度。图1为风浪情形下模型计算域数值计算结果受扰动区域示意图,其中矩形代表计算水域,粗实线表示边界条件已知的迎浪边界,双细实线表示未知或错误的边界条件,点划线和双画线所围区域表示由本假定而致的模型结果受扰动区域。对于风浪情形,受扰动区域由已知错误波浪边界条件的顶点起,在域内和平均波向成 $30^\circ\sim 45^\circ$ 向岸边传播;对于涌浪情形,由于其方向分布范围较小,受扰动区域更少。

4 源项的处理

4.1 波浪能量输入、损耗项

风能输入根据 Caraleri 和 Malanotte-rizzoli^[10]、Komen 等^[11]的研究成果,可分为线性增长和指数增长两部分。底摩擦根据 JONSWAP、Collins^[12]和 Madsen 由 JONSWAP 实验、拖曳理论和涡粘理论分别得到的底摩擦模型,根据波浪的发展状态(成长或充分发展)、波浪类型(风浪、涌浪和混合浪)选择相应底摩擦模型。波浪在向浅水域行进时,由于水深变浅导致破碎,基于 Miche 准则, Battjes 和 Stive^[13]根据大量试验数据及现场资料,认为在浅水域,对于不同类型的地貌,随机波的最大破碎波高 H_m 与水深 d 的关系可表示为: $H_m = rd$; Nelson^[14]对大量室内试验及现场观测数据重新进行分析,认为 $H_m = f(d, \beta)$, β 为沿波浪前进方向的底面坡度,计算时根据水域具体地形特征选择适当破碎模型。白浪损耗根据 Hasselmann 等^[15]提出的脉动平均模型进行计算。

4.2 波与波之间非线性相互作用项

在深水情形下,四相波与波非线性相互作用起主要作用,谱能由谱峰处向低频转移(使得峰频变小)和向高频转移(高频处能量由于白浪而耗散掉),其计算采用 Hasselmann 等^[15]提出的离散迭代近似法;在浅水域,三相波与波之间非线性相互作用是主要影响因素,能量由低频向高频处转移。

Edeberky 和 Battjes^[16]基于大量试验观测数据,提出离散三相近似模型(DTA),经在风浪槽中长峰随机波沿水下沙坝和沙坝型海滩破碎衰减的试验证明:此模型模拟能量从谱峰向高频转移的机理相当成功,Edeberky 等对 DTA 法稍做修正,提出集合三相近似模型,其原理概述如下:

在每个谱方向上:

$$S_{n13}(\omega, \theta) = S_{n13}^-(\omega, \theta) + S_{n13}^+(\omega, \theta) \quad (2)$$

$$\text{其中 } S_{n13}^+(\omega, \theta) = \max\{0, \beta_B 2 c c_g J^2 / \sin(\theta) / [E^2(\omega/2, \theta) - 2E(\omega/2, \theta)E(\omega, \theta)]\} \quad (3)$$

$$S_{n13}^-(\omega, \theta) = -2S_{n13}^+(2\omega, \theta) \quad (4)$$

式中 β_B 为可调比例系数; $\beta = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{0.2}{U_r}\right)$; $U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}} \frac{H_s \bar{T}^2}{d^2}$; $\bar{T} = 2/\omega$ 。

三相波与波之间非线性相互作用的计算范围为: $10 > U_r > 0.1$ 。 J 的估算为

$$J = \frac{k^2/2(gd + 2c^2/2)}{k d \left[gd + \frac{2}{15} g d^3 k^2 - \frac{2}{5} \omega^2 d^2 \right]} \quad (5)$$

计算时,根据有效波高和平均周期得到相应 U_r 的值,以判断是否在三相波作用范围内。对 U_r 表达式进行转换,可得到三相波大约作用范围为: $0.04 \leq d/\bar{L} \leq 0.18$ 。

5 海安湾波浪要素模拟

海安湾位于雷州半岛南端中部,面对琼州海峡,湾口朝东南,其距离约 10 km。取湾口 - 20 m 线作为迎浪边界, - 20 m 水深有效波高为 2.56 m,平均波周期为 5.49 s,波向与迎浪边界间夹角 152° ,风速取 20.6 m/s,摩擦系数取 0.01,以 SWAN 模型计算得到湾内有效波高、平均波周期场如图 2、图 3 所示,其中细实线为海图水深等值线,粗实线为有效波高、平均波周期等值线。

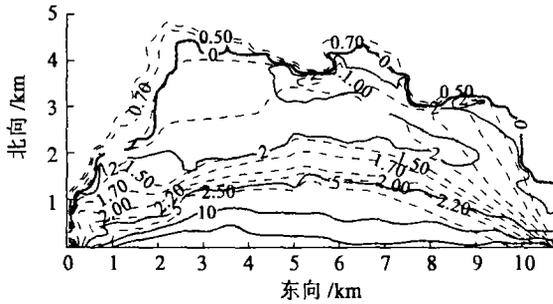


图2 海安湾有效波高等值线图
Fig.2 Significant wave height isolines

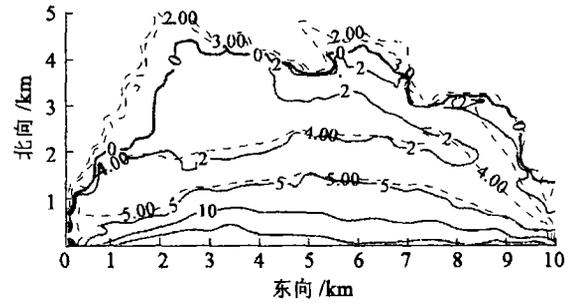


图3 海安湾平均波周期等值线图
Fig.3 Mean wave period isolines

由图2、图3可以看出:在 $-2 \sim -6$ m等深线之间,水深变化很大,有效波高和平均波周期变化剧烈,经计算,此区域的 Ursell 数为: $0.1 < U_r < 10$,因此在非线性作用中三相波相互作用为主要影响因素,能量由低频向高频转移,波周期由大变小;在 $-2 \sim 0$ m等深线之间,虽然水深很小,但 $U_r \in (0.1, 10]$,因此在非线性作用中四相波相互作用为主要影响因素,能量被摩擦、白浪及破碎作用损耗,有效波高、波周期变小趋势反而减慢。

6 展 望

海岸河口水域风、流、地形、浪型复杂,波浪非线性现象强烈,SWAN 模型能较好地模拟波浪浅化、摩擦、折射、反射、水深变浅引起的破碎、组成波之间能量的转移机理,将模型应用于海安湾波浪场模拟,其波浪要素尤其是波周期的变化规律得到合理解释,事实上波周期对于港湾、系泊等是非常重要的参数,克服了波浪折射——绕射模型不能复演波周期变化规律的缺点。

鉴于 SWAN 模型的局限性,在港湾、工程附近和地形变化剧烈的水域波浪绕射强烈,此时应以 SWAN 模型给出边界波浪条件,应用椭圆型缓坡方程或 Boussinesq 方程在局部范围内细化模拟波浪折射——绕射效应,则海岸、河口水域的波浪机理均能得到合理模拟;再者,波浪组成波非线性相互作用机理还需进一步研究;另外,潮流、波浪等海岸动力均是三维现象,无论是波浪数值模型、潮流数值模型还是波流相互作用模型,其垂向要素分布均需进一步研究。

参考文献:

- [1] Berkoff J C W. Computation of Combined Refraction-Diffraction[A]. Proc. Of the 13th Conference Coastal Eng[C]. 1972(1):471 - 490.
- [2] Nowgu O. An alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation[J]. J of Waterway, port, Coastal and Ocean Engineering, 1993, 119(6):618 - 638.
- [3] Ris R C, Holthuijsen L H, Booij N. A Spectral Model for Waves in the Near shore Zone[J]. Coastal Engineering, 1994, 68 - 78.
- [4] WAMDI Group. The WAM Model-A third generation ocean wave prediction model[J]. J Phys Oceanogr, 1988, 18(12):1775 - 1810.
- [5] Benoit M, Marcos F, Becq F. Development of a third generation shallow water wave model with unstructured spacial meshing[M]. Coastal Engineering, ASCE, 1996. 465 - 478.
- [6] 青岛海洋大学. 海浪数值预报研究报告. 七五国家重点科技攻关项目, 75-76-01-01 专题[R]. 1995.
- [7] Booij N, Holthuijsen L H, Ris R C. The "SWAN" Wave Model For Shallow Water[J]. Coastal Engineering, 1996, 1:668 - 676.
- [8] Xu Fumin, Yan Yixin. Wave Numerical Model for Shallow Water[J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(2):193 - 202.
- [9] 徐福敏, 张长宽. 一种浅水波浪数值模型的应用研究[J]. 水动力学研究与进展, 2000, A 辑, 5(4):429 - 434.
- [10] Cavaleri L, P Malanotte-Rizzoli. Wind wave prediction in shallow water: Theory and Applications[J]. J Geophys Res, 1981, 86(C11):10961 - 10973.
- [11] Komen GJ, Hasselmann S, Hasselmann K. On the existence of a fully developed wind sea spectrum[J]. J Phys Oceanogr, 1984, 14:1271 - 1

285.

- [12] Collins J I. Prediction of shallow water spectra[J]. *J Geophys Res* , 1972 , 77(15) :2693 - 2707.
- [13] Battjes J A , Stive MJ F. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves[J]. *J Geophys Res* , 1985 , 90(C5) : 9159 - 9167.
- [14] Nelson R C. Design wave heights on very mild slopes: An experimental study[J]. *Civil Eng Trans , Inst Eng Aust* , 1987 , 29:157 - 161.
- [15] Hasselmann S, Hasselmann K, Allender J H, *et al.* Computations and Parameterizations of the Linear Energy Transfer in a Gravity Wave Spectrum [J]. *J Phys Oceanogr* , 1985 , 15:1378 - 1391.
- [16] Eldeberky Y, Battjes J A. Parameterization of triad interactions in wave energy models[A]. *Proc Coastal Dynamics conf[C]*. 1995 , 140 - 148.

Mechanism and application of a third generation wave model SWAN for shallow water^{*}

XU Fu-min , ZHANG Chang-kuan , TAO Jian-feng

(*College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract : Research status and existing problems of wave numerical models for shallow water at the coastal and estuarine zone are generalized , the developing history of forecasting waves with energy balance equation is also discussed. The third generation wave model Simulating WAVes Nearshore (SWAN) , based on the most advanced wave study achievements , is described in great detail here. In addition , the applicability , numerical characteristic , functionality and limitation of the model are interpreted. The action balance equation , its discrete demand , the method dealing boundary condition , and source terms (the wind input , the energy dissipation and nonlinear wave-wave interactions) are detailed discussed , and special emphasis is put on the triad wave-wave interactions. The SWAN model is applied to simulate the significant wave height and average period at the Haian bay , and the influence of nonlinear wave-wave interaction term on the simulation results is analyzed. Finally , the application foreground and study tendency of the model is discussed , too.

Key words : shallow-water wave ; SWAN model ; action balance equation ; mechanism

* The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50279007) .