

海浪数值模式研究回顾与进展

闻 斌, 刘 俊

(总参气象水文中心 北京 100081)

摘 要: 本文简单介绍了海浪的生成、发展理论, 以及海浪数值模式的分类; 回顾总结了国内外在海浪数值模式研究方面取得的成果。

关键词: 海浪; 数值模式; 研究成果

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2006) 4 - 0076 - 06

1 引言

我国海岸线漫长, 海洋国土面积约 300 万平方公里, 南北跨度大, 覆盖了从赤道到中高纬度的广阔地区, 是世界上少数几个遭受多种海洋灾害的国家之一。海浪作为海洋中的重要运动现象, 对人类在海上和近岸活动有巨大的影响, 尤其在军事上, 在沿海与海岛登陆作战中攻守双方的成败与否和在海域附近的海浪情况有着密切的关系。21 世纪是海洋世纪, 保障我国海洋经济快速发展、维护国家安全与利益等, 对海浪的预报提出了新的、更高的要求。

要做好海浪预报, 就必须对海浪数值预报进行深入研究。海浪数值预报研究一般采用两种方法: 一是动力学方法, 二是统计学方法, 往往在研究中将这两种方法结合。海浪数值预报研究的主要内容是海浪的生成、成长、消衰及传播规律, 建立海浪数值模型, 依据给定的海面风场计算海浪场中各点的海浪要素, 进行海浪的模拟、后报与预报。

2 海浪理论

按 2005 年 8 月 9 日发布, 2006 年 2 月 1 日实施, 国家标准中海浪定义为: “海洋中由风产生的波浪, 包括风、浪及其演变而成的涌浪”。根据现有海浪理论的成果, 海浪的主要生成和发展机制包括:

(1) 由于大气压力脉动场对海面的强迫作用, 大气扰动与海面产生共振, 导致风浪随时间线性成长^[1]。

(2) 在海气界面附近, 平均风速近似呈对数分布, 随高度增大而增大, 由于剪切流的不稳定性, 导致海浪从大气的平均流动中吸收能量而成长^[2]。

(3) 由于海浪本身的非线性不稳定性, 导致邻频波从主频波吸收能量而成长^[3~4]。

(4) 成长起来的海浪,在波与波非线性相互作用下,发生频率空间中能量分布的调整^[5]。

(5) 随着海浪的不断成长,其非线性也不断增强。海浪破碎是最典型的海浪强非线性特征,它是导致海浪能量损耗和消衰的主要机制^[6]。

以上理论的发展,虽然揭示了海浪成长、消衰和传播的各主要方面的规律,是海浪数值模拟研究的基础,但并未能构成准确的海浪数值模式。联接海浪理论与海浪数值模式的关键环节,是关于海浪生成和发展过程的专门现场实验,其中最具代表性的应当是1981年 Snyder 的大气输入源函数的现场测定和1973年 JONSWAP (Joint North Sea Wave Project)^[7]的依赖于风区风时的风波谱的现场测定。

由于海浪具有随机性,在研究中将其视为随机过程,既可从海浪谱即海浪内部结构加以描述,也可从波要素统计分布即海浪对外表现特征加以描述。海浪的成长、消衰与传播可由统计意义上的谱传输方程或某种特征波的能量平衡方程加以描述,这个方程是准动力学方程,其源函数项需通过动力学方法或专门现场测定加以确定。

3 海浪数值模型概述

海浪的数值模型按照原理,一般分为三类^[8],一类是基于 Boussinesq 方程的计算模型,它直接描述海浪波动过程水质点的运动。第二类是基于缓坡方程的计算模型,它基于海浪要素在海浪周期和波长的时空尺度上缓变的事实,描述的是海浪波动能量、波高、波长、频率等要素的变化,即着眼于海浪宏观上的整体特征,而不涉及具体的水质点运动过程。第三类是基于能量平衡方程的计算模型,各种物理过程(如风生浪作用、底摩擦耗散、波浪破碎、波-波相互作用等,但不能考虑波浪的绕射作用)用不同的源函数表示。

Boussinesq 方程是一个二维非线性浅水波方程,它反映了色散性和非线性之间的平衡,有许多高阶的 Boussinesq 方程包括波浪的浅水变形、折射、绕射和反射机理,它对一个波长内的网格密度要求较高,只适用于较小水域,同时由于稳定性的原因,一般不适用于长时间尺度的计算。它最大的缺点就是计算量非常庞大。缓坡方程不涉及具体的水质点运动过程, Berkhoff 在缓坡条件假定下,用摄动展开的方法,推导出了二维线性的经典缓坡方程,用于描述波浪的折射、绕射、反射和浅水变形,随后又出现了许多扩展型缓坡方程,例如忽略波浪反射作用后得到的抛物线缓坡方程,引入非线性效应,提出的非线性缓坡方程等等,由于是椭圆方程,它只适用于很小的水域;另外,缓坡方程不适用于小尺度较急剧变化地形,而且不易反映底坡反射作用,因此,不适用在地形较复杂的小区域。能量平衡方程是对海浪谱进行描述,有效地简化了海浪场的动力学,同时它对时间步长和空间步长没有苛刻的要求,可适用于比较大的区域和长时间尺度的计算。

4 国外海浪数值模式研究回顾与进展

随着对海浪各种物理过程认识的深入,参数化的形式不同,海浪数值预报模式经历了从第一代到第三代的发展。1948 年英国 Baer 和 Ursell 对在英国沿岸所做的波浪计观测记录作了分析,得出了波浪谱,并研究了波浪谱和大西洋风暴之间的关系,展示了根据谱的概念作波浪预报的可能性。几乎同时,美国进行了利用谱概念作波浪预报的开发研究。1955 年提出了 PNJ (Pierson, WJ, Neumann, G., James, RW) 预报方法,该方法采用谱能量计算,将计算得到的波能转化成波高。1957 年,Phillips 和 Miles 相继提出了波浪发生成长的理论。Hasselmann 在 1960 年严格推导了组成波成长的普遍方程,1962 年详细研究了组成波之间的弱相互作用,指出了波-波间非线性相互作用在组成波间能量在分配中的重要性,为波浪数值模拟提供了一个较好的理论基础。自 1957 年起,法国以 Gelci 为首的研究小组完成了 DSA 波浪数值模式的开发研究工作。自 Gelci 等人的开创性工作之后,人们建立了采用二维海浪谱的基本传输方程的若干个海浪数值预报模式,1963 年美国采用 PNJ 法作波浪数值预报,并在电子计算机上开发了计算程序。Baer 后来在美国纽约大学继续作研究工作,1966 年提出了 Pierson, Tiek, Baer 模式;1968 年 Barnett 提出了基于 Hasselmann 理论的模式。上世纪六十年代和七十年代初期发展起来的第一代海浪模式避开了显式地模拟完全的能量平衡这一问题,这些模式通常假定波的各分量达到饱和状态时,突然停止增长。现在已公认最初 Phillips 提出的普适高频平衡谱形式并不存在。谱的高频区不仅依赖于白浪破碎的能量消衰过程,还依赖于局地风的能量输入以及通过非线性能量传输与其耦合的低频区域。第一代海浪模式还有一些基本的定量性的缺陷,过高地估计了风的能量输入,低估了非线性传输的强度,过高地估计和低估几乎差了一个数量级。

在上世纪七十年代,广泛的波浪成长试验以及风输入给波浪能量的直接观测,从根本上改变了作为第一代预报模式基础的谱能量平衡观点,从而导致了第二代海浪模式的发展。由于受计算机条件的限制,第二代海浪模式采用简化的参数化形式的非线性传输,其应用受到一定限制,在使用时需要给定高出峰值频率的那部分高频风浪谱的谱形。虽然从理论上可证实对于一般天气尺度的风场将波谱调整为准通用谱形这一做法是可行的,但是第二代海浪模式不能很好地模拟快速变化风场中产生的风浪,例如:飓风、小尺度强气旋或锋面,这些模式在处理风浪与涌浪传输时也遇到了一些基本的难题。在第二代海浪模式中,主要问题是在计算方面,而不是物理表达式问题。SWAMP 在 1985 年建议:海浪谱只能用积分基本谱传输方程来计算,事先并不对谱形加以任何限制。

海浪的数值模拟发展到 20 世纪末已达到比较成熟的阶段。西欧一些国家自 1985 年起着手开始了所谓第三代波浪数值预报的研究计划,成立了一个 WAM(Wave Modelling Group)小组。他们的目的是更全面地考虑能量平衡方程中的各个项,以包括更多的物理过程,开发一个全球的波浪数值预报模式。第三代海浪模式的特征是直接计算波-波非线性相互作用,通过积分作用力(能量)平衡方程,并且不对谱形预加任何约束,其改进归结为各源函数项的计算;第三代海浪模式的另一优点是能够处理风速、风向的骤然变化,而较早的模式无此能力。现在由 WAMDI 小组开发的海浪模式 WAM 已被国际上广

泛使用,许多国家将其作为业务化的运行模式发布区域或全球的海浪预报。但在近岸浅水区,由荷兰科学家开发的 SWAN (Simulating Wave Nearshore) 模式具有较好的海浪模拟精度。美国 NOAA/NCEP 环境模拟中心海洋模拟小组 (OCEAN MODELING BRANCH) 1996 年在 Delft 技术大学和美国航空航天局 Goddard 空间飞行中心分别开发的 WAVEWATCH 和 WAVEWATCH 的基础上,开发了一个全谱空间的第三代海浪数值模式 WAVEWATCH, 简称为 WWATCH, 该模型主要用于大尺度空间波浪传播过程,在传播过程中考虑了地形和海流空间变化导致的波浪折射作用、浅水变形作用和线性的波浪传播运动等。该模式对过去模式的控制方程、程序结构、数值和物理的处理方法等作了改进,使之不仅在考虑波流相互作用和风浪物理机制方面更加合理,而且利于采用并行计算技术,从而提高模式的性能和效率。

为改善 WWATCH 模式的计算结果,Tolman^[9]等人于 2000 年 3 月 1 日~2001 年 2 月 28 日期间,利用 ERS-2 卫星资料和 NDBC 的全球浮标资料对 WWATCH 模式进行一年的推算,测试了新版本 (V2.22) 模式的功能并与旧版本模式 (V1.18) 相互比较获得了很多改进空间。Wingert^[10]等人于 2001 年利用 WWATCH 模式进行全球海域海浪的推算,解决了模式中由于风区外低频成份的能量(涌浪)在风速微弱或逆风的情况下导致能量迅速消散的问题。2000 年 3 月 9 日,WWATCH 正式成为 NECP 的全球业务化预报模式。目前 NOAA 运用 WWATCH 模式分别建立了全球(分辨率为 1.25° 经度 $\times 1^{\circ}$ 纬度)和阿拉斯加、西北大西洋、东北太平洋、北大西洋飓风(区域模式的分辨率都为 0.25° 经度 $\times 0.25^{\circ}$ 纬度)等海浪预报系统,除北大西洋飓风海浪预报系统对外公开发布 126h 海浪预报外,其它预报系统都是发布 180h 海浪预报,业务化运行状态良好。

5 我国海浪数值模式研究回顾与进展

我国海浪理论及预报研究始于新中国成立后。海浪理论研究的开创者是中国科学院院士文圣常教授。他创立了我国物理海洋学的分支学科。上世纪 60 年代文圣常教授就将当时国际上盛行的能量平衡法和谱方法两种计算海浪的方法结合起来,导出了随风时或风区成长的普遍风浪谱,被誉为“文氏风浪谱”,在当年有关的国际科学进展评论中列为重要研究成果。文圣常等在我国“七·五”科技攻关项目成果中提出的一种新型混合型海浪数值模式,这是我国具有自主创新特点的模式。该模式的风浪部分基于有效波的能量平衡方程,将当时风浪能量计算中所有无法避免的经验成分集中于一项,并通过可靠的风浪成长经验关系予以确定。该模式有两个显著特点:一是可靠性,由于以可靠的风浪成长经验关系得到源函数取代通常逐项计算源函数,避免了复杂的、难以精确的计算手续,使模式的精度得到根本的保证;二是节约机时,由于综合性源函数避免直接计算波-波相互作用,节省大量的计算量,在相同条件下所用机时仅约为 WAM 模式的 1/60。此模式已经过大量各种天气形势下海浪的预(后)报检验,并已在国家和地区性海洋预报中心投入业务化应用。

我国在这方面的另一重要进展是袁业立院士等改进了国际盛行的 WAM 模式,发展

了在全新提法基础上的第三代海浪数值模式 LAGFD-WAM (Key laboratory of Geophysical Fluid Dynamics-WAM) 模式。该模式用理论导出的能量耗散源函数取代了 WAM 模式中的经验公式, 这一点使高海况下的计算结果有明显的改进。同时还在控制方程中引入了浪-流相互作用项, 考虑了非均匀和非定常流场的作用。在计算方案上, 引入了嵌入特征线方法, 不仅适于物理空间, 而且适于波数空间。潘增弟等还发展了基于此模式的区域性模式。迄今, 此模式已在我国海洋工程、海洋环境参数计算上得到了较好的应用。国家海洋局第一海洋研究所杨永增研究员等在 LAGFD-WAM 模式基础上, 建立了球坐标系下 MASNUM (key laboratory of MARine Science and Numerical Modeling) 海浪数值模式, 以便进行全球区域海浪数值模拟。

中国科学院海洋研究所尹宝树研究员等提出了 YE-WAM 海浪数值预报模式, 该模式在浅水考虑了深度限制引起的破碎能量耗散, 使之能更好地适合浅水; 中国科学院南海海洋研究所陈俊昌等人提出了适用于深、浅海的海浪数值预报模式, 还考虑了波-波间非线性能量转移, 而且包含了折射、底摩擦等浅水效应。

6 小结

现今的海浪数值模拟是在严格的海浪理论上建立起来的, 海浪的物理机制, 如风浪生成机制、小尺度海气相互作用、波浪破碎、底摩擦、波-波相互作用、波-流相互作用等的研究成果比较成熟, 人们基本了解海浪的成长与消衰过程, 海浪的数值模拟完全达到了业务化的要求。我们应充分利用现有的国内外海浪数值模式的研究成果, 开展海浪预报业务, 为我国经济发展及国防建设提供服务保障。

参考文献:

- [1] Phillips O M. On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of fluid of fluid Mechancis*. 1957, 2 : 417 ~ 445.
- [2] Miles J W. On the gnentration of surface waves by shear flows. *Journal of Fluid Mechancis*. 1957, 3 : 185 ~ 204.
- [3] Brooks Benjamin T. The instabillty of periodic wavetranis in nonlinear dispersive system. *Proc Roy Soc*, 1967, A299:59 ~ 75.
- [4] Yeli Yuan. On nonlinear waves in the growth process. *Scientia Sinica* 1986, B(8) : 638 ~ 650.
- [5] Hasselmann K. On the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part2 *Journal of Fluid Mechancis*, 1963, 15 : 273 ~ 281.
- [6] Hasselmann K. Grundg leichungen der Secgang svorhersage. *Schiffstrchnik*, 1960, 15 : 191 ~ 195.
- [7] JONSWAP. Measurmments of wind-wave growth and swell decay during the JONSWAP Project. *Dtsch Hybrogr Z*, 1973, A8 (12) : 95.
- [8] 冯 芒, 等. 近岸海浪几种数值计算模型的比较 [J]. *海洋预报*, 2003, 20 (1) : 52 ~ 59.
- [9] Tolman H L, D Chalikov. Testing of WAVEWATCH version 2.22 in NCEP 'S NWW3 ocean wave model suite. *Technology Note* 214, NOAA/NWS/NCEP/OMB, 2002, 99.
- [10] Wingart K M, W V O 'Reilly, T H C Herbers, P A Wittmann, R E Janssen, H L Tolman. Validation of Operational Global Wave Prediction Models with Spectral Buoy Data in B L Edge and J M Hemsley, editor. *Ocean Wave Measurement and Analysis*, 2001, 590 ~ 599.

Review of History and Prospect for Study of Sea wave Numerical Modeling

LIU Jun , WEN Bin

(Hydrometeorological center of the general staff, Beijing 100081 China)

Abstract : In this paper , sea wave 's originate and develop theory are briefly given, the sea wave numerical modeling sort are introduced. Review and summarize the achievement in the study of sea wave numerical modeling in world and in the new century .

Key words : sea waves ; numerical modeling ; achievement in the study