

文章编号: 1009-3443(2004) 06-0070-07

近海近岸海浪的研究进展

冯 芒, 沙文钰, 李 岩, 胡艳冰

(解放军理工大学 气象学院,江苏 南京 211101)

摘 要: 从海浪谱、风浪及涌浪的预报方法、卫星海洋学及资料同化在波浪计算中的应用、增减水和环境流对波浪相互作用 5 个方面对近海近岸波浪的研究成果进行了较为系统的归纳总结和评述。在此基础上分析了近海近岸海浪研究的发展趋势,提出今后的研究方向。
关键词: 海浪;近岸波浪;风浪;卫星观测
中图分类号: U416.216 **文献标识码:** A

Development of Study on Waves Offshore

FENG Mang, SHA Wen-yu, LI Yan, HU Yan-bing

(Institute of Meteorology, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China)

Abstract: Systemic summing-up and appraising of the achievements on waves offshore are presented from five aspects, wave spectrum, method of wind-wave and ground swell calculation, data assimilation applied in wave calculation, the effects of storm surge and current. Based on these work, development trends are analyzed and the research directions in the future are set forth.
Key words: wave; wave offshore; stormy wave; satellite observation

我国是一个海岸线较长的国家,经常遭受不同程度台风浪的袭击。据统计,每年仅台风向岸浪对我国海岸防护工程的破坏,对近岸海域船舶和海水养殖业的危害,经济损失就超过 7 亿元^[1],尤其是我国的台湾海峡及其邻近海域,灾害性风浪频频发生。通常灾害性海浪是指海上波高大于 6 m 的海浪,因为波高大于 6 m 的海浪对航行在世界大洋的大多数船只已构成威胁,它能掀翻船只,摧毁海上工程和海岸工程,给航海、海上施工、海上军事活动、渔业捕捞等带来灾害。许福祥^[2]指出:我国有海浪引发的海难年平均有 70 余次,损失约 1 亿元,死亡 500 人左右;1949~ 1982 年的 34 年里,仅被救助的船只就达 6 293 艘次,其中约 1 500 艘船的海难事故是狂风巨浪引起的。另外长江口及沿岸地区是我国东海沿岸遭受台风袭击的地段之一,从影响我国沿海台风发

生频率的统计资料表明,影响长江口及浙东沿海台风每年达 6.5 次,其中对长江口有影响的为 3.2 次。因此海浪在海洋学和海洋工程中都占有极为重要的作用,深入研究近海台风浪的生成、发展机制,对于台风浪高及其浪向的正确估计及预报,以及为海岸工程的修建提供有力的技术支持都很有帮助。
海浪向近岸传播过程中,受海底地形、岸界和环境流(沿岸流和潮流等)的作用显著,具有比深海和开阔陆架海域更复杂的演变规律和更快速的时空变化,目前对其研究和认识还不是很成熟。而近岸波浪是近岸海洋环境中最重要的动力因素之一,它威胁近岸建筑物的安全与稳定,引起海岸泥沙运动、海岸变迁和近岸水体交换。近岸波浪的计算对近岸工程设计、浅海生产作业、近岸环境保护等方面具有十分重要的意义^[3,4]。随着沿海地区社会经济的不断发展,人类在海岸带地区的活动日趋频繁,沿海工程项目的数量越来越多,投资规模越来越大,工程项目的风险性也越来越引起人们的高度重视,这些都对近

收稿日期: 2004-01-15.
基金资助: 总装科研基金资助项目 (40701010401).
作者简介: 冯 芒 (1976-),女,博士,讲师.
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

岸波浪等海洋环境要素的精确预测提出了更高的要求。因此,提供精确实用的近岸波浪计算方法,是近年海岸工程、海洋工程、海洋和海岸带资源研究及军事活动的一个迫切的任务。

1 海浪理论的研究

初观之下,海浪的波高低长短不一,此起彼伏,瞬息万变,似无规律可循。海浪具有明显的随机性,以确定的函数来描述是困难的。研究复杂而随机的海浪,现在海浪理论大体可分为两类:一类属于水波理论,将海浪运动视为确定的函数形式,通过流体动力学运动规律来描述;另一类可称为随机海浪理论,它将海浪运动视为随机过程(函数),通过随机过程理论分析给出各种情况下海浪运动的统计特征。前者的研究始于 19 世纪,总的趋势是由线性理论向非线性和湍流理论发展;后者的研究兴起于 20 世纪 50 年代,由于此类理论便于直接应用而迅速发展。在 50 年代初,人们已将多数振幅、频率、方向、位相不同的简单波动叠加起来以代表海浪,并规定组成波的振幅位相是随机量,从而叠加的结果为随机函数,它适于反映海浪的随机性。

近岸波浪源于深水中的海浪,变化莫测的海面风是它的主要原动力,海浪的不规则性可以从传播方向的不确定性和水面起伏的随机性得到反映。海浪自深水进入浅水海域,水深对它的影响变得越来越重要,从能量角度出发,这种影响大体可以分为 3 种形式:其一是地形引起的变浅作用,它通过水深变浅使波动能量积聚;其二是地形和水流引起的波浪折射、绕射和反射,它通过调整波浪的传播方向,使波动能量在水平空间上发生辐聚辐散。最后还有底摩擦与破碎作用,它在波动底部与内部损耗波动能量,导致波浪衰减。

2 风浪的研究

人们研究的风浪一般都是随机波浪形式,目前提出的海浪谱都以风场要素(如风向、风速和风区等)或波浪要素(如平均波高和平均周期等)为参量。从理论上导出海浪谱是困难的,这是因为作为其物理基础的海气耦合机制、波波相互作用机制、波浪破碎过程对谱的影响以及风向风速变化时波浪场的演化都是非常复杂而至今尚未深入了解的问题。从这个意义上讲,现有海浪模式都是经验的或半经验半理论的。

20 世纪 50 年代提出的 Neuman 谱和 B 谱曾在海浪数值预报和海浪工程设计上发挥过重要作用,但它们是由海浪表示波高与周期(或波长)关系导出的,与通常意义的(Fourier 谱)的定义不一致;20 世纪 60 年代和 20 世纪 70 年代提出的 P-M 谱和 JONSWAP 谱是由实测海浪记录估计的谱经分析和拟合得到的。虽是经验谱,但符合 Fourier 谱的定义,而且,由于其数据基础比较坚实(尤其是 JONSWAP 观测是至今最系统和精度较高的海浪观测),仍是最常用的海浪频谱模式。然而, P-M 谱仅是充分成长状态的谱, JONSWAP 谱虽是受限于风区的状态谱,但包含了 5 个参量,使用不够方便。文圣常等根据我国的实际需要,特别是海浪预报业务和海洋工程的需要,对海浪频谱模式进行了进一步研究,先后于 1988 年和 1994 年解析导出两种形式的海浪谱。这两种谱都给出普遍适用(各种海浪状态、深水和有限深水)的形式,与多种来源的数据符合较好,且只包含 3 个参量,便于使用。

目前,除了统计模型,风浪计算主要采用基于能量守恒原理的能量平衡方程波浪谱模型。它是各种物理过程考虑最完善,最少经验假定的波浪模型。该模型中考虑了水深变化、背景流和障碍物等对波浪传播的影响,同时考虑了包括风摄入波动能量^[5,6]、白浪耗散^[7]、水深变化导致的波浪破碎、底摩擦耗散、波-波非线性相互作用等物理过程。上述各物理过程用不同的源函数表示,有效地简化了波浪场的动力学过程,同时它对空间和时间步长没有苛刻的要求,可使用比较大区域和比较长时间的计算。随着对各种物理过程的深入认识,参数化的形式不同,模型经历了第 1 代到第 3 代的发展。WAM 波浪模型^[8]和 WAVEWATCH 波浪模型是目前国际上著名的第 3 代波浪模型,他们主要用于全球尺度的波浪计算。荷兰 Delft 理工大学针对近岸波浪计算的应用,总结了历年波浪能量的输入、耗散和转化的研究成果,对已有的第 3 代波浪模型进行了修改(特别是基于 WAM 模型),建立了适用于海岸、湖泊和河口地区的 SWAN 模型。SWAN 模型采用有限差分法求解,陈希、沙文钰^[9,10]利用曲线网格分别对台湾岛邻近海域台风浪和湛江港邻近海域台风浪的模拟计算,效果较好。但该模式不能反映由近岸海底地形和建筑物引起的波浪折绕射和反射效应,不利于提高局部区域波浪计算的精度。

于卫东、乔方利等^[11]利用 IAGFD-WIN 动力风场模式和 LAGFD-NWM 第 3 代近岸海浪模式对南海 Belty (8710) 台风过程进行了数值后报,取得了较

好的整体模拟效果,但是后报波高、周期在低风速区间上系统地低于观测值。对于台风海况,低风速对应着较强的阵发性和较年轻的波龄,二者的影响对风的能量输入有较大的增强作用。

徐德伦、赵猛、楼顺里^[12]借助 Hilbert 变换技巧,给出一种由波面记录计算波面包线的准确且简便的方法,并在线性海浪理论范围内,严格地再导波面包线的分布函数,最后还用导出的波面包线分布函数讨论了海浪波高分布问题。

杨春成等^[13]对西北太平洋、中国近海大于 20 m 深水区采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格新型混合海浪数值模式,而在南海和东海近海台风浪多发区内分成若干小区域,采用 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ 的细网格,分别嵌套浅水 WAM 模式,但其不足之处是网格分辨率太粗,而采用 WAM 模式,不能很好地考虑近岸海浪波-波相互作用、底摩擦作用、深度诱导波破碎作用等物理过程,显然这样的模式用来研究近岸的灾害性风浪具有局限性。

3 近岸波浪的研究

关于近岸海浪演变的理论模型和计算模型基本可分为两类。一类是直接描述海浪波动过程水质点的运动^[14]。这类模型把经典的纳维-斯托克斯方程简化处理成 Boussinesq 型方程,引进的假设和近似比较少,能较好地考虑非线性作用、摩擦耗散、底边界和岸边界条件。但是,近岸海浪水质点运动的波长一般只有几十米,周期几秒到十几秒,要描述水质点的波动特征,计算网格只能小于 10 m 或在 10 m 左右,时间步长不到 1 s,在高性能的大型工作站上也只适宜几公里范围的计算。要想用这种模型作近岸几十公里、数小时到几天的时空尺度计算,近期是极为困难的。另一种模型描述海浪波动能量、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。事实上,海洋(海岸)工程建设、海洋(海岸带)资源开发和保护、泥沙计算等关心的也是海浪各要素的大小,而不是具体的水质点运动过程。影响近岸海浪要素变化的因子主要包括海底地形、环境流、摩擦耗散和不同尺度海浪之间的非线性作用,海底地形、环境流、摩擦耗散等因子的时空变化尺度一般大于海浪水质点的时空变化尺度,即海浪要素相对于海浪波动本身来说是缓变的,可以用比较大的时空步长描述其变化。这类理论模型和计算模型现已不断完善,在理论上,可以用于大范围数值计算。Berkhoff 基于海浪要素

在海浪波长和周期时空尺度上缓变的思想,建立描述海浪要素的椭圆型缓坡方程,作了海浪折射-绕射联合计算。此后这类模型得到很大发展,并在实际海浪计算中得到比较广泛的应用。但是目前应用的各种缓坡方程都引进了比较多的假设和近似,实际计算时还有一定的应用范围局限和理论误差。基于现有的近岸海浪模型,拟采用弱化目前缓坡方程部分假设和近似,建立更完善的随机海浪计算模型,用来计算和描述波浪要素的变化,而不涉及具体的水质点运动。

根据海浪要素相对于海浪波长和周期缓变的思想,建立描述海浪变化的方程,不少学者开展这方面的研究工作^[15,16]。描述波浪要素变化的缓坡方程得到进一步发展,并且有具体的计算尝试^[17-19]。目前,缓坡方程及其计算应用成为海浪研究的热点,学者们利用变分原理、量级分析和多种尺度分析等方法,相继建立起了各种改进的缓坡方程理论模型和计算模型^[20-28]。

基于缓坡方程理论模型,学者们建立了多种类型的计算模型,这些模型主要在以下方面有不同程度的差别。① 采用的理论模型不一样。这些模型对影响海浪要素的因子有不同的处理(考虑的因子个数不同,或者对这些因子的处理形式不一样),或者有椭圆、抛物、双曲型等不同类型的差别,或者有规律波和随机波的差别。② 对含时间导数项的处理不同。有的模型仅考虑定常态下的海浪要素的空间变化,有的模型还考虑了海浪要素随时间的变化。③ 对边界的处理不同。④ 所采用的坐标有差别。围绕近岸大范围海浪计算的需要,目前对这些计算模型的改进主要着眼于 3 点:① 采用理论模型所考虑的动力因子是否完整、合理;② 边界处理是否方便、合理;③ 是否节省计算量,从而可用于大范围计算。这 3 个方面,前者可归于理论模型研究,后两者不但是理论问题,而且需作为计算问题深入研究。为了节省计算量,学者们从理论模型的角度研究比较多,把椭圆方程近似简化为抛物方程或双曲方程,把随时间变化的发展型方程化为定常方程。不过,这些简化处理对缓坡方程适用范围的限制值得注意。例如,尽管 Dallymple 和 Kirby 把抛物近似模型发展到能适用于波浪较大角度入射的情况,但是海浪在大范围海域中传播时,近岸或浅滩处波向会发生很大的变化,这种模型仍难应用,有些学者为达到节省计算量的目的,在实际大范围复杂海区计算时仍应用此类模型,似乎值得商榷。另外,在实际海区,环境流(例如潮流)处于比较强的变化中,在比较大的范围内考虑环

境流对海浪要素的影响,或者实际天气过程中边界入射处于强变动时计算海浪要素,采用定常方程也值得商榷。所以简化理论模型来节省计算量,其效果有限。事实上,仅靠这些处理,计算量的减小远远不能满足实际计算的需要。从理论上探讨海浪要素计算网格、时间步长和海浪波长、周期之间是否有必然联系,进一步从海浪要素演变的机制和时空尺度上寻找确定计算网格、时间步长的理论依据是很有意义的。除了采用动力分析的方法从理论上研究这个问题,数值方法也是一种有效的手段。因为过去人们没有重视计算网格和时间步长突破海浪波长、周期限制的可能性,通过数值计算来比较计算网格和时间步长对计算结果影响的工作并不多。有一些学者虽然作过计算比较^[28],但是由于他们采用的简化缓坡方程本身不适合采用较大的网格和时间步长,并没有把这个问题讨论清楚。笔者已经通过大量数值实验讨论了计算网格选取可以突破海浪波长的限制,下一步还要进一步讨论时间步长选取的制约因素^[29]。

自适应曲线网格是近年国际上近岸水动力计算中采用较多的先进技术。根据水动力特征本身变化的快慢或研究关注的程度不同,对不同区域采用不同大小的网格,既提高局部海域分辨率又减小计算量,即采用这种技术的目的和优势。但是按照现在普遍的观点,海浪要素计算网格受海浪波长限制,把自适应曲线网格引入海浪计算并不能发挥作用。因此这种技术在海浪计算中极少应用。国外 Kirby 领导的小组正在引进这种技术,但是他们采用的是抛物模型,波浪传播主方向的假设限制了其中一个曲线方向的走向,不能任意调整网格。国内冯卫兵等作过尝试,但他们所采用的曲线网格仍是线性变化的,并不是完整意义上的有较好正交性的自适应曲线网格,既不能任意调整网格疏密,也不易保证非定长模型计算的稳定性。在理论上确认海浪要素的计算网格、时间步长由海浪要素演变机制和时空变化尺度决定,建立自适应曲线网格海浪计算模型是很有帮助的,可以根据海浪要素变化的快慢来决定网格的疏密,即使网格分辨率和波浪要素尺度相符,不降低计算精度,又可以减少计算量。冯芒、沙文钰在确认近岸 Ebersol 型缓坡方程模型海浪计算的空间步长主要取决于地形变化尺度的基础上,建立了定常的自适应曲线计算模型,取得较好的模拟效果^[30]。

4 卫星海洋学及资料同化的研究

于费用高,很难大范围进行;其次,由于海上作业受天气的影响较大,波浪测量仪的布放、监测及回收都相当困难,使得资料往往无法定期获取;此外,对测量人员不易到达的海域,也难取得资料。星载合成孔径雷达 SAR(synthetic aperture radar)以其间接的、大范围的测量方式和全天候、全天时、高分辨率的测量能力,克服以上局限和困难,可以提供实时动态海面波浪场信息和二维海浪谱资料,成为弥补测量方法不足的新手段。

遥感测量海浪与传统的测站式海浪测量不同,具有高空间分辨率的合成孔径雷达能提供大面积海浪的二维波浪场特性,其使用的微波可穿透云层,因而测量不受恶劣天气的影响。杨劲松、周长宝、黄韦良在合成孔径雷达海浪成像机理的基础上建立了遥感测量二维海浪谱及相关海浪要素的模式和算法。从台湾东北部海域海浪的 ERS-1 SAR 图象中获得了二维海浪谱及海浪的波高、波长和波向等特征参数,与实测资料相比,其中波高、波向的误差分别为 0.2 m 和 2.0° ^[31]。

海洋资料同化基本上是借鉴气象资料同化而发展起来的,但由于研究的流体介质的不同性质,海洋资料同化的主要目的不象气象资料同化所面临的为全球尺度预报服务的目标。海洋资料同化应用的一个关键问题是如何从一个观测要素场(如海面高度、风应力等)确定那些不能直接观测的要素(如速度的 3 个分量、三维热通量等);另一个关键问题是如何利用某些海洋区域的资料来揭示其它区域的状况。这两个问题要求变量之间的动力耦合和流动在空间上对信息的准确传递这正是海洋数值模式所含动力学能够起到的关键作用。目前海洋资料同化的主要方法是多项式内插方法 PI(polynomial interpolation method)、最优插值法 OI(optimal interpolation)、反演法(inverse method)、调和与张弛法(blending and nudging methods)、卡曼滤波 KF(kalman filtering)和伴随法,其中 PI 与 OI 的应用较为常见,但较伴随法有局限。PI 的原理是寻找一个多项式所表示的曲面,来逼近网格点周围的要素值。这种方法最大的优点是简单方便。OI 是以气象和海洋的经验结构函数和相关函数的大量研究作依据,合理的确定权重系数,使得分析误差最小,这种方法的优点是可以处理大量的不同时刻的非常规资料,对于数值天气预报中某一固定时刻物理量的客观分析较实用,但其权重系数是独立于发展方程的时间变化的,它不是一种真正的四维同化方法^[32],OI 中有关垂直方向和水平方向的资料相关系数的离散假定是由数学上的

收敛要求,而没有物理上的依据^[33]。为了克服这些局限, Lewis和 Derber^[34], Le Dimet和 Talagand^[35]将变分法资料同化的伴随方法引进气象学中,应用伴随方法解决实际海洋问题则是由 Thacker和 Long^[36]首次提出。伴随方法允许在最小二乘法意义上最优地同化观测资料,且满足复杂海洋数值模式控制下的约束条件。

5 增减水、环境流与波浪相互作用

波、波、波流的相互作用及风暴潮、潮汐引起的增减水对波的作用不容忽视。在海面上的风的作用下,浪与流恒是同时出现的,这一现象越来越引起海洋学家的兴趣,因为加深对波、流相互作用的了解,可更好地阐释一些海洋现象,尤其对于海浪的发生和传播。流对传入其内的浪产生什么影响? Jonsson曾利用 Longuet-Higgins和 Stewart Phillips^[37]导出的波能通量守恒方程,以及 Bretherton和 Garrett^[38]得到的波动作用量守恒方程,进行了波流作用的研究。Kirby^[39]成功推导出了完全满足波作用量守恒要求考虑的水流作用的缓坡方程,奠定了当前研究波流相互作用的基础。对于有限深水中的实际波浪,波浪的折射和绕射是最突出的变形作用,水流、底摩擦的作用也是使波浪发生变形的重要因子,洪广文^[40]建立的一个带有耗散项的缓变流场、水深水域波浪折射绕射联合数学模型。其后洪广文、冯卫兵等^[41,42]在此基础上进行了不断的完善。李孟国、张大错结合近岸波浪的折射、绕射模型,提出了近岸复杂地形上波浪增水与近岸流的模型^[43]。白玉川等^[44]从多射线理论出发,研究了在流速和潮位变化同时作用下,波浪在近岸区的传播过程,得到了波向线及其散开因子在该情况下的修正方程,并根据波作用量守恒原则,求出了沿波向线波高变化的表达式。波浪从深水向浅水传播过程中,由于浅化变形,会在海岸附近发生波浪破碎。由于波浪破碎过程中将伴随大量的能量损失,导致波高等波要素发生很大的变化,从而在近岸区域出现明显的增减水现象。同样风暴潮、潮汐引起的增减水效应又反作用于波浪^[45-48]。近岸水域存在各种水流如沿岸流、裂流、潮流等,他们对波浪的运动有很大的影响。如波流同向时,波高减小,波长增大;波流逆向时,波高增大,波长减小;产生 Doppler 频移效应等虽然基于含水流体的 Boussinesq 型方程^[49]可以包含水流与非线性波的相互作用,但波浪与水流随时间、空间变化的尺度相差很大,故在目前的理论框架内进行波流完全耦

合模式的数值模拟并应用于工程实际难度极大。这种采用非耦合方式的计算方法,即先计算波浪及辐射应力,再计算它们引起的增水和近岸流。Liu Baiqiao和 Zhao Zidan通过数值实验表明,这种相互作用是显著的,特别是在增水与波浪本身之间,这种作用不容忽视,因为增水基本上发生在破碎线以内,水位的上升会显著改变波浪破碎的形式与程度,从而改变波浪和辐射应力空间分布,这又会产生增水影响。朱首贤、丁平兴等^[50]采用 WKBJ方法,初步建立了波浪演变的波包模型。丁平兴、朱首贤等^[51]对近岸海水作流、浪、湍流脉动 3种尺度分解,初步建立了波流共同作用的三维理论模型,揭示了浪和流的非线性相互作用过程。

6 结束语

要做好海浪的计算和预报,有两个方面的基础理论工作非常重要,一是近海近岸海浪演变机制的理论研究,建立合理的理论模型,二是建立合理的计算模型。这两个方面,目前国内外有不少研究工作。但是还有不少问题目前缺乏深刻的认识,所采用的计算模型还有很多局限性。

综合上面的分析,就近岸海浪数值模式而言,今后的研究目标是要建立一个综合考虑地形、环境流、摩擦耗散、波-波非线性作用的缓坡方程模型;作动力分析和数值实验研究海浪要素的时空变化尺度,从而确定计算模型的分辨率,并对该缓坡方程作曲线坐标变换,采用曲线网格拟合岸界和提高局部海域的分辨率,建立一个适合近岸大范围计算的计算模型;根据计算模型设计计算模式,作物理模型实验和实际海区计算验证;为了提高波浪计算的准确性,可利用 SWAN 计算结果提供的边界资料与 SAR卫星反演资料和观测资料做同化处理,为缓坡方程模式提供更合理的边界条件;利用波破碎波高概率分布及单个波的破碎模型建立的辐射应力计算方法,系统的讨论波浪与增水、近岸流之间的相互作用。

参考文献:

- [1] 苏育嵩,苏洁.一种台风浪的预报方法[J].海洋学报,1996,18(1): 1-12.
- [2] 许富祥.中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J].海洋预报,1996,13(2): 26-31.
- [3] CHEN J Y. Development of the Changjiang estuary and its submerged delta [J]. Continental Shelf Re-

- search, 1985, 4(1): 47-56.
- [4] FREDSON E J, DEIGAARD R. Mechanics of coastal sediment transport [M]. Singapore World Scientific, 1994.
 - [5] PHILLIPS O M. On the generation of waves by turbulent wind [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1957, 2: 417-445.
 - [6] MILES J W. On the generation of surface waves by shear flows [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1957, 3: 185-204.
 - [7] HASSELMANN K. On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping [J]. Bound-layer Meteor, 1974, 6(1): 107-127.
 - [8] WAMDI Group. The WAM model—a third generation ocean wave prediction model [J]. Journal of Physical Oceanography, 1998, 18: 1775-1810.
 - [9] 陈 希, 沙文钰. 台湾岛邻近海域台风浪的模拟研究 [J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 1-10.
 - [10] 陈 希, 沙文钰. 湛江港邻近海域台风浪的模拟研究 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 779-786.
 - [11] 于卫东, 乔方利, 袁业立. Betty(8710)台风近程风浪数值模拟 [J]. 海洋学报, 1997, 19(16): 27-37.
 - [12] 徐德伦, 赵 锰, 楼顺里. 海浪波面包线的计算及其分布函数的再推导 [J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 411-422.
 - [13] 杨春成. 一种台风浪的数值预报方法 [J]. 海洋学报, 1996, 18(1): 1-12.
 - [14] LIU P L F. Model equations for wave propagations from deep to shallow water [J]. Coastal and Ocean Engineering, 1995, 1: 125-158.
 - [15] LONGUET H M S, STEWARD R W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1960, 8(4): 565-583.
 - [16] WHIYHAM G B. Nonlinear dispersion of water waves [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1967, 27(4): 399-412.
 - [17] TUNG C C, HUANG N E. Combined effects of currents and waves on fluid Force [J]. Ocean Engineering, 1973, 2: 183-193.
 - [18] LIU P L F, MEI C C. Water motions on a beach in the present of break water [J]. Journal of Geophysical Research, 1976, 81: 3079-3084.
 - [19] RADDER A C. On the parabolic equation method for water-wave propagation [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1979, 95: 159-176.
 - [20] MEI C C, TUCK E O. Forward scattering by long thin bodies [J]. SIAM J Appl Math, 1980, 39: 178-191.
 - [21] KIRBY J T, DALRYMPLE R A. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1983, 136: 453-466.
 - [22] LIU P L F, TSAY T K. Refraction-diffraction model for weakly nonlinear water waves [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1984, 141: 265-274.
 - [23] DALRYMPLE R A, KIRBY J T. Models for very wide-angle water waves and wave diffraction [J]. The Journal of Fluid Mechanics, 1988, 192: 33-50.
 - [24] 蒋得才, 楼顺里, 刘百桥. 随机波折绕射的缓坡模型实验和数值计算 [J]. 海洋通报, 1992, 11(5): 1-8.
 - [25] 孔亚珍, 史峰岩, 丁平兴. 随机波辐射应力场的数值计算 [A]. 见: 第八届全国海岸工程学术研讨会暨海峡两岸港口及海岸开发研讨会文集(下) [C]. 北京: 海洋出版社, 1997.
 - [26] 陶建华, 韩 光, 龙 文. 浅水区大面积波浪场数值计算方法的研究 [A]. 见: 第九届全国海岸工程学术讨论会 [C]. 北京: 海洋出版社, 1999.
 - [27] 潘军宁, 左其华, 王红川. 一种高效的缓坡方程数值解法 [A]. 见: 第九届全国海岸工程学术讨论会 [C]. 北京: 海洋出版社, 1999.
 - [28] 冯卫兵. 波浪绕射折射数学模型及数值模拟 [D]. 南京: 河海大学, 1999.
 - [29] 冯 芒, 朱首贤, 沙文钰. 缓坡方程计算分辨率选取的数值研究 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2001, 2(3): 34-39.
 - [30] 冯 芒, 沙文钰, 朱首贤, 等. 广义曲线网格下的缓坡方程数值模型的建立及应用 [J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 50-57.
 - [31] 杨劲松, 周长宝, 黄韦良. 星载合成孔径雷达海浪遥感测量 [J]. 地球物理学报, 2001, 44(增刊): 22-27.
 - [32] GHIL M P, MALANALLE R. Data assimilation in meteorology and oceanography [J]. Advances in Geographies, 1991, 33: 141-266.
 - [33] CHAO W C, CHANG L P. Development a four-dimensional variational analysis system using the adjoint method at GLA, part I dynamics [J]. Mon Wea Res, 1992, 20: 1661-1673.
 - [34] LEWIS J M, DERBER J C. The use of adjoint equations to solve a variational adjustment problem with advective constraints [J]. Tellus, 1985, 37A: 309-322.
 - [35] LEDIMET F X, TALAGRAND O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations theoretical aspects [J]. Tellus, 1986, 38A: 97-110.
 - [36] THACKER W C, LONG R B. Fitting dynamics to data [J]. Geophysical Research, 1988, 93: 1227-1240.

[37] PHILLIPS O M. The dynamics of the upper ocean [D]. London: London Cambridge University Press, 1966.

[38] BRETHERTON F P, GARRETT C J. Wave trains in inhomogeneous moving media [J]. Proc Roy Soc, 1969, 302: 529-554.

[39] KIRBY J T. A note on linear surface wave current interaction [J]. Geophysical Research, 1984, 89: 745-747.

[40] HONG G W. Mathematical models for combined refraction-diffraction of waves on non-uniform current and depth [J]. China Ocean Engineering, 1996, 10(4): 433-454.

[41] HONG G W. High-order models of nonlinear and dispersive wave in water of varying depth with arbitrary sloping bottom [J]. China Ocean Engineering, 1997, 11(3): 243-260.

[42] FENG W B, HONG G W. Numerical modeling of wave diffraction-refraction in water of varying current and topography [J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(1): 45-58.

[43] 李孟国, 张大错. 浪致近岸水位变化及流场的数值计算 [J]. 海洋学报, 1996, 18(4): 96-113.

[44] 白玉川, 李大鸣, 王高毅. 流速和潮位变化对波浪在近岸区传播的影响 [J]. 海洋学报, 1996, 18(3): 92-99.

[45] VAN RIJN W R, WIJNBERG K M. One-dimensional modeling of individual waves and wave-induced long-shore currents in the surf zone [J]. Coastal Engineering, 1996, 28: 121-145.

[46] 郑永红, 沈永明. 结合抛物型缓坡方程计算波浪辐射应力 [J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 110-116.

[47] 包四林, 西村仁嗣. 近岸波生流数值计算的一种新方法 [J]. 海洋学报, 2000, 22(5): 115-123.

[48] 郑永红, 沈永明. 波浪增减水的使用数学模型及数值模拟 [J]. 海洋学报, 2002, 24(2): 121-126.

[49] 李玉成, 张永刚. 应用 Boussinesq 型方程对非线性波与流相互作用的理论研究 [J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(2): 205-211.

[50] ZHU S X, DING P X, KONG Y Z, SHA W Y. An primary study on sea wave packet equations on slowly varying topography [J]. Science in China (Series B), 2001, 44 (supp): 142-149.

[51] DING P X, ZHU S X, KONG Y Z. A paroclimic current model effected by wave [J]. Science in China (Series B), 2001, 44(supp): 42-44.

(责任编辑: 程 群)

简 讯

热烈祝贺解放军理工大学科研工作会议胜利召开

理工大学科研工作会议于 2004 年 12 月 7 日隆重召开。会议的主要任务是: 以邓小平理论和“三个代表”重要思想为指导, 总结、交流大学组建 5 年来科研工作取得的主要成绩和基本经验, 分析当前科研工作面临的形势和任务, 全面落实科学发展观, 部署和规划当前和“十一五”期间的科研工作, 努力开创科研工作新局面。

大会讨论了理工大学《科研工作管理规定》《“十一五”科研发展计划论证报告》和《学术道德规范》; 表彰了大学科研工作先进集体和先进个人。会后大学党委将作出《关于大力推进科研工作创新发展的决定》。

(解放军理工大学 科研部)