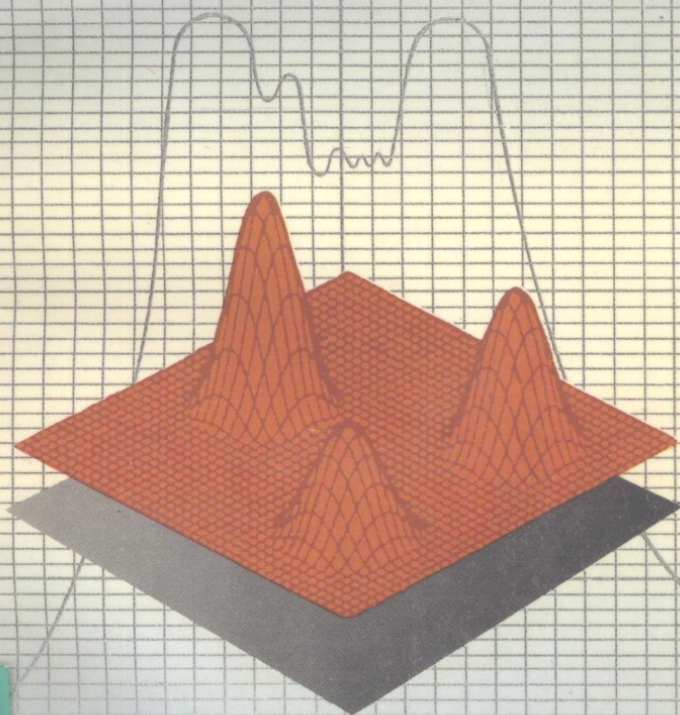


科学与工程计算丛书

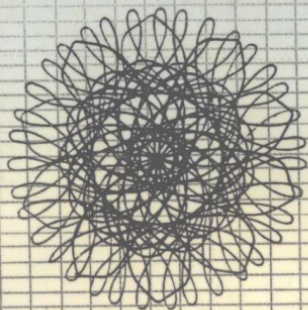
物理海洋数值计算

WULI HAIYANG SHUZHI JISUAN



冯士筭 孙文心 主编
河南科学技术出版社

SECS



SECS

责任编辑 袁 元

封面设计 黎隆安

ISBN7-5349-0881-7/T·73

定价

10元

科学与工程计算丛书

物理海洋数值计算

冯士筭 孙文心主编

河南科学技术出版社

豫新登字 02 号

科学与工程计算丛书
物理海洋数值计算

冯士侗 孙文心主编

责任编辑 袁元

河南科学技术出版社出版发行

国防科学技术大学印刷厂印刷

850×1168 毫米 32 开本 19.625 印张 495 千字

1992 年 2 月第 1 版 1992 年 2 月第 1 次印刷

印数:1-1000 册

ISBN 7-5349-0881-7 / T · 173

定价: 10 元

代 序

为促进我国科学与工程计算事业的发展,1988年7月,中国核学会计算物理学会在青岛举办了全国计算物理学术研讨会,会议期间,经有关专家商议,决定出版一套《科学与工程计算丛书》,得到了许多著名科学家的热情关心和支持,经过两年多的筹备,正式开始了这套丛书的编辑出版工作。

计算机是一种延伸、强化人的思维的工具。当世界上第一台计算机 ENIAC 诞生时,冯·诺伊曼就预言这一新工具所拥有的巨大潜力和对人类社会的深远影响,在过去的40多年里,计算机迅猛发展,其应用范围从国防尖端部门扩大到科学技术和国民经济建设的各个领域,计算机已经给人类社会带来了一场深刻的技术革命。计算机的发展和计算方法的进步极大地提高了人们的计算能力,从而引起了科学方法论上的巨大变革,使计算成为科学研究的第三手段,对研究的定量化起到了特殊重要的作用。“实验、理论、计算”三位一体是现代科学研究的基本模式,三者既相对独立,又互相补充,互相依赖。人们在计算机上可充分利用数值计算来模拟现实世界的各种过程,部分替代实验或作为实验的补充,检验理论模型的正确性,尤其是还能呈现现实生活中无法重复或无法进行实验的现象,或模拟耗资巨大的实验工程,探索新的奥秘。由于有了计算这一强有力的手段,大大增强了人们科学研究的能力,促进了不同学科之间的交叉渗透,缩短了基础研究到应用开发的过程,加速了把科学技术转化为生产力的进程。

在计算机的发展和数值计算的广泛应用的推动下,科学与工

程计算(简称科学计算)作为一门工具性、方法性和边缘交叉性的新学科,已经开始了自己的发展.它既包含了在各种科学与工程领域中逐步发展起来的计算性学科分支,如计算数学、计算物理、计算力学、计算化学以及计算地震学等计算工程学,又包括经济科学、医学、生物学和系统科学等发展中所需要的计算理论.计算方法则是它们联系的纽带和共性的基础.科学计算就其本质而言,是要解决现代科学与工程中提出的大规模、非线性、非均匀和几何形状非规则的复杂问题,是数学理论和计算艺术的高度结合,是复杂系统的数值计算或模拟.计算机的性能与算法水平的乘积是衡量计算能力高低的指标.

我国在科学与工程计算领域已有了一支较高水平的、能打硬仗的队伍.这支队伍在我国计算机水平相对落后的条件下,以其智力优势和拼搏精神为我国的国防建设和经济建设作出了重大贡献,积累了丰富的实践经验,急需加以总结、提高、推广和交流.编写《科学与工程计算丛书》,正是为了适应这种形势的需要,它的出版将会填补我国这方面的空缺.

这套丛书是采用“众人拾柴火焰高”的集资方式创办的.由于丛书的涉及面极广,故不设主编,由常务编委轮流担任执行主编.丛书作者都是奋战在教学和科研第一线的专家学者,他们为发展我国的科技事业不辞劳苦,呕心沥血,无私奉献.谨向他们表示崇高的敬意.

可以期望,《科学与工程计算丛书》的出版发行,必将有力地推动我国科学计算事业的发展.

《科学与工程计算丛书》编委会

1990年8月

前 言

冯士侗

《物理海洋数值计算》得以及时问世,并作为《科学与工程计算丛书》之一出版发行,对于我们实在是一种鼓励和鞭策.

编者邀请和组织了我国物理海洋与海洋气象界部分有造诣的中年教授和专家及其合作者撰写的这部专著,不仅展示了物理海洋学有关数值研究中的理论、模拟和预报方面的部分最新成果,也为那些对计算物理海洋学有兴趣的计算物理和计算数学界的专家和学者们抛出了一块引玉之砖.

海水运动在时空尺度上展现为一个广阔的谱,编者依运动的时间尺度由小至大的序列安排了以下诸章.

第一章“近代海浪数值模拟”,由国家海洋局第一海洋研究所袁业立教授及其合作者撰写.该章简要论述了与近代海浪数值模拟有关的海浪理论和实验研究的发展及主要成果,并详细地导出了海浪的各种守恒定理和波数谱能量平衡方程,建立了近代海浪数值模式严格的数学物理基础.本章第三节和第四节分别介绍了近代发展的两类海浪数值模拟方法:参数谱海浪数值模式与精确谱海浪数值模式.在第三节中首先介绍了参数谱数值模拟方法的一般基础——参数空间投影方程,随后以 Gunther 混合型模式为例对这种方法作了详细的说明. Gunther 模式以 JONSWAP 谱为工作参数谱,较好地解决了参数空间的投影和风浪涌浪转换问题,是一种发展较严密的第二代实用模式.在第四节中,以作者发展的 LAGFD-WAM 为例详细介绍了第三代海浪数值模拟方法的

细节. LAGFD-WAM 的主要特点是: 1) 波数谱能量平衡方程的严格导出; 2) 考虑不定常水深和海流背景场对海浪传播的作用, 发展了一套特征线嵌入网格的计算格式; 3) 引入了改进的破碎波能量耗散源函数和底摩擦耗散源函数; 4) 引入波-流相互作用源函数, 考虑了波与流之间的能量交换; 5) 给出了波数空间中波-波相互作用源函数的参数化计算框架; 6) 提出了 LAGFD-WAM 半隐式处理方法. 该节最后以 LAGFD-WAM 模式计算结果与实测资料的比较, 说明了它在理论上的正确性和应用上的适用性.

第二章“海洋流体动力学的一种三维数值模式”, 由中国科学院海洋研究所方国洪教授及其合作者撰写. 该章提出了一个正压海洋流体动力学三维数值模式. 为了使海洋中不同深度的区域都具有同样的层数, 模式在垂直方向采用了 σ 坐标. 铅垂涡动粘性系数根据混合长度理论导出, 因而可随流场的瞬间垂直结构而变化. 计算采用了全部交错的网格结构, 垂直粘性项采用了隐式格式. 采用本模式模拟了矩形海区中的潮波、风暴潮和风海流, 模式海区具有黄海的空间尺度, 水深取等深和中部较深两种情况, 计算结果满意地反映出实际海洋中潮波、风暴潮和风海流的许多重要特征.

第三章“三维浅海流体动力学的一种数值方法——流速分解法”, 由青岛海洋大学物理海洋研究所孙文心教授撰写. “流速分解模型”和“流速分解法”, 是作者及其合作者多年来在对浅海风暴潮、浅海潮波及其余流进行数值研究、数值模拟的基础上所形成的一种适用于数值求解三维浅海流体动力学问题的独特方法. 它具有所谓“二维半”的特点, 但比一般的谱方法简单多了, 并使有限的流速剖面具有了物理意义. 为了进行比较, 文中也介绍了三维浅海流体动力学通常采用的几种数值方法. 除了较系统地介绍“流速分解法”及其计算成果外, 还首次分析研究了几种参数化的浅海湍模式所造成的对各种物理效应(惯性效应、地转效应、

频散效应)的影响,以为数值模拟格式的设计提供参考.计算数学工作者也许会对这样一种差分-微分模型与方法产生一定的研究兴趣,希望他们能从理论上完善这一方法.

第四章“风暴潮数值预报”,由青岛海洋大学物理海洋研究所汪景庸教授撰写.该章通过对一次实际风暴潮(8114)的数值模拟,选用一个二维全流模型和一个三维模式,说明了风暴潮数值模拟与数值预报的一般方法.从数值模式的建立,差分网格、差分公式的给出到模式中所用的简化假设、各种参数的选取,文中都作了全面完整的论述.同时,还利用数值实验结果讨论了风暴潮的动力机制(主要是边缘波)以及风暴潮流的垂直结构.最后,对风暴潮数值预报的现状进行了简要评述,介绍了一个二维全流河-海结合模式和一个能量封闭三维数值模式,它们具有以下特征:1)在二维海洋模式中衔接一个一维河流模型,因而更加适用于较复杂的河口海区;2)该模式中具有大区和小区两个嵌套区域,较好地解决了计算时间与预报精度之间的矛盾;3)既可以单独进行二维或三维的计算,也可以将二维模式与三维模式结合起来共同使用.三维模式中由于采用湍能封闭模型而实现了雷诺应力的参数化,从而显著减少了选取湍应力系数的主观性.这样的模式可用于估计最大可能水位,计算风暴潮的三维结构,分析风暴潮动力过程以及风暴潮的业务预报.

第五章“海表温度短期数值预报”,由青岛海洋大学物理海洋与海洋气象系王赐震和苏育嵩两位教授撰写.海表温度(SST)的变化不仅与海水的水平平流、铅直运动、对流、湍流以及层化结构有关,而且与太阳辐射及大气环流的强迫场有直接关系.因此,海表温度的动力数值预报是一个难度较大有题目,特别是在大洋的西边界流区.该章探索性地以建立短期 SST 业务数值预报模式为目的:从中国海域的海洋学特征出发,给出了一个物理上合理、业务上可行的上混合层二维原始方程预报模式.这种初步研究在

许多方面 一不仅在模式的建立上,而且在海温初值场的客观分析、模式物理学方程的求解、云量诊断关系的建立、计算稳定性(包括水边界条件)的处理等 一都富有新意.该模式已用于业务化的试预报,仅就这一点而言(尽管还有这样那样的缺点),可以说该预报模式是 SST 数值预报迈出的重要的第一步.

第六章“海冰热力过程及其数值模拟”,由国家海洋局海洋环境预报中心吴辉碇教授及其合作者撰写.该章系统地研究了在海-气相互作用中海冰形成和演变的物理过程,研究了大气和海洋对海冰的热力强迫作用以及冰内的物理特性,并着重以大气边界层和海洋边界层的物理特性为依据,研究了大气-冰、冰-海水的相互作用,还讨论了水道和冰间湖的热力特征和参数化问题.最后,根据上述研究和讨论,作者提出了这些物理过程的数学处理方法和数值模式,并用该模式在中国渤海和黄海北部进行了模拟和预报试验,受到了用户的重视.

第七章“全动力油膜运动数值模式”,由袁业立教授及其合作者撰写.该章详细地介绍了迄今为止人们对油膜漂移的物理、化学和生物过程的认识,建立了一种新的漂油模型,它包括:1) 各种物理、化学和生物源函数的油膜运动学,2) 三维海流场等.在数值计算方面推出了两种三维海流计算的数值格式:直方网格计算格式和 σ 网格计算格式.考虑到漂油计算需要更高的分辨率,本文提出了一种自动跟踪细网格嵌套格式,能够计算出油膜的漂移、变形和扩展过程的细节,是一种既有理论价值又有实用价值的油膜漂移数值模式,计算结果能概括经验方法的结果.

第八章“陆架环流数值研究”,由国家海洋局第二海洋研究所袁耀初和苏纪兰两位教授撰写.该章主要叙述方法,而并不阐明陆架环流特性与物理规律等.首先提出常用的几种方程组形式.第二节介绍陆架环流数值模拟的单层模式,此模式有两种形式:其一是从定常方程组出发,考虑了斜压效应,采用流函数作为变

量;其二是从非定常方程组出发,通过数值求解,最后得到定态解.作者在这里介绍了两种方法:1) 二时间层次格式,2) 三时间层次格式.在作者的工作中,成功地完成了这一模型的两种形式下的数值格式.第三节以两层模式为例,讨论了陆架环流的多层模式,它对夏季陆架环流的模拟是有意义的.在其工作中改进了 Hurlburt 与 Thompson 数值格式,以适用于我国邻近陆架的浅水海域.在第四节陆架环流的诊断模式中,着重介绍了以水位高度作为辅助函数的模式,其中采用了有限元法与精确解相结合的方法以及有限差分方法与精确解相结合的方法.应该指出,在我国邻近海域,地转流的假定是不合适的,为此在作者的工作中解决了如何正确提出开边界条件的问题,发展了前人的工作.在数值方法上,也提出了成功的数值格式.第五节陆架环流的三维数值解,考虑了垂直涡动粘滞系数是铅垂坐标的函数,介绍了两种方法:一是对垂直坐标 z 作 σ 坐标变换,采用 Dabies 半隐式的差分格式,直接求解三维数值问题;二是把方程式化为 Galerkin 的形式.计算结果表明,该方法在所有深度上,流速的数值解的收敛是很快的.最后,对层化问题也作了讨论.第六节讨论了陆架环流的预报模式.

笔者撰写了最后一章“浅海环流物理及数值模拟”.上一章陆架环流集中介绍数值方法,本章则侧重于阐述环流物理学.本章第一节介绍了环流的研究背景,指出为什么要提出有关浅海环流问题的新概念;第二节建立了一个斜压浅海系统;第三节给出了浅海环流概念的物理构想;第四节导出了一组控制浅海环流的广义场方程;第五节探讨了环流的水平输运过程;第六节作了浅海环流的涡度分析;最后一节,以渤海夏季环流的数值试验为例,表明了理论的有效性和模型的可用性,并于末尾讨论并指出了这一浅海环流理论发展的可能前景.

在结束这篇前言之际,我想,本书的作者们一定愿意让笔者

代表他们,在此向我们的老师——我国著名的物理海洋学家、青岛海洋大学物理海洋研究所名誉所长文圣常教授表示衷心的感谢,感谢他的指导、关怀和支持!

《科学与工程计算丛书》编辑委员会

名誉主编: 冯 康

名誉编委: (按姓氏笔划为序)

于 敏	王 仁	冯 康	石钟慈	庄逢甘	曲钦岳
朱家骥	李德元	何祚麻	陈能宽	谷超豪	况蕙孙
郑哲敏	周毓麟	秦元勋	黄祖洽	曾庆存	符鸿源
程开甲	裴鹿成				

编委: (按姓氏笔划为序)

于万端	王宗皓	王政贤	王宝瑞	王肖钧	冯士祚
孙文心	历衡隆	石中岳	卢秀球	付德薰	付泽周
纪立人	纪楚群	刘 林	刘儒勋	向新民	朱允伦
李荫藩	李作新	吴江航	吴乃龙	吴辉碇	吴其芬
杜书华	杨清建	宋国乡	邱希春	陈健华	何延才
何锦昌	汪翼云	金时懋	郑邦民	周树荃	范新亚
宓国柱	罗吉庭	张立存	张志杰	张若棋	张锁春
胡乃雄	姚凯伦	浣 石	顾昌鑫	倪浩清	徐国华
常文蔚	常谦顺	赖定文	蒋伯诚	董绍静	鲍家駉

常务编委: (按姓氏笔划为序)

孙文心	刘儒勋	吴江航	何延才	金时懋	徐国华
蒋伯诚					

执行主编: 孙文心

编辑部成员: 蒋伯诚 张锁春 张立存 张志杰 周春生

杜慧娴 陈吉斌

目 录

第一章 近代海浪数值模拟	袁业立等(1)
1.1 历史回顾	(1)
1.2 海浪数值模拟的基本方程	(4)
1.3 参数谱海浪数值模式	(20)
1.4 精确谱海浪数值模式	(29)
参考文献	(62)
第二章 海洋流体动力学的一种	
三维数值模式	方国洪 朱耀华(65)
2.1 概述	(65)
2.2 正压海洋流体动力学的支配方程	(67)
2.3 有限差分格式	(75)
2.4 一些典型计算实例	(82)
参考文献	(98)
第三章 三维浅海流体动力学的一种	
数值方法——流速分解法	孙文心(100)
3.1 浅海——一个强耗散系统	(100)
3.2 三维浅海流体动力学数值方法	(115)
3.3 三维正压浅海的流速分解法	(131)
3.4 流速分解模型的数值方法	(148)
3.5 流速分解法的发展	(167)
附录 剖面函数(3.4.1)~(3.4.3)的几种数值解法	(177)
参考文献	(187)
第四章 风暴潮数值预报	汪景庸(196)

4.1	概述	(196)
4.2	模式的基本方程	(208)
4.3	海-河模式的有限差分方程	(223)
4.4	对模式适用性的讨论	(238)
4.5	模式应用举例	(255)
4.6	风暴潮数值预报的现状和问题	(293)
	参考文献	(294)
第五章	海表温度短期数值预报	王赐震 苏育嵩(296)
5.1	海温预报研究的意义与现状	(297)
5.2	建立模式的物理依据	(303)
5.3	预报模式	(314)
5.4	模式物理学方程	(328)
5.5	初始温度场的客观分析	(334)
5.6	时间积分	(344)
5.7	模式产品	(346)
5.8	模式的特色与改进方向	(352)
附录 1	多连通域中 Poisson 方程的数值解法	(354)
附录 2	动量方程的量级比较与简化	(356)
	参考文献	(357)
第六章	海冰热力过程及其数值模拟	吴辉碇 王志联(361)
6.1	海水冻结	(364)
6.2	大气的热力强迫作用	(366)
6.3	冰内热传导过程	(386)
6.4	海洋热通量	(395)
6.5	水道和冰间湖参数化	(405)
6.6	热力过程与动力过程的耦合	(410)
6.7	小结	(422)
	参考文献	(423)

第七章 全动力油膜运动数值模式	袁业立等(429)
7.1 油膜动力学与非动力学过程	(430)
7.2 油膜运动的全动力数值模式	(434)
7.3 三维海流数值模式	(439)
7.4 计算实例	(448)
参考文献	(472)
第八章 陆架环流数值研究	袁耀初 苏纪兰(474)
8.1 基本方程式和边界条件	(475)
8.2 陆架环流单层模式	(480)
8.3 陆架环流多层模式	(490)
8.4 陆架环流诊断模式	(494)
8.5 陆架环流三维数值解($\mu = \mu(z)$)	(501)
8.6 陆架环流预报模式	(522)
附录 修正的 Platzman 差分格式	(536)
参考文献	(537)
第九章 浅海环流物理及数值模拟	冯士筴(543)
9.1 研究背景	(543)
9.2 斜压浅海系统	(550)
9.3 浅海环流概念的基本构思	(561)
9.4 基本方程组	(570)
9.5 全流及其输运模型	(577)
9.6 涡度分析	(584)
9.7 渤海环流数值实验	(588)
参考文献	(602)

第一章 近代海浪数值模拟

袁业立 潘增弟 华锋 孙乐涛

(国家海洋局第一海洋研究所)

1.1 历史回顾

本章仅讨论建立在海浪动力学模型基础上的近代海浪数值模拟方法的发展,而不涉及与经验统计相关联的各种预测方法.

1.1.1 近代海浪数值模拟方法的发展

海浪是一种具有相当宽谱域分布的海面起伏运动,其含能谱段一般具有 50~100m 的特征空间尺度(波长)和 5~10s 的特征时间尺度(周期).当风吹过海面时,在海面激起波动,这种波动在其传播过程中,不断从大气中吸取能量而成长,直至出现诸如破碎等那样的强非线性现象,海浪趋于一种统计的平衡状态.

根据当今人们对这种过程的了解,可以归纳出如下几项风浪的生成和发展机制:

(1) 由于大气压力脉动场对海面的强迫作用,导致大气海波共振输入能量而使海波成长(O.M.Phillips, 1957).

(2) 由于海气界面附近大气海洋剪切流的不稳定性,导致海波从大气海洋的平均流动中吸收能量而成长(W.J.Miles, 1957).

(3) 由于海波本身的非线性不稳定性,导致邻频波从主频波