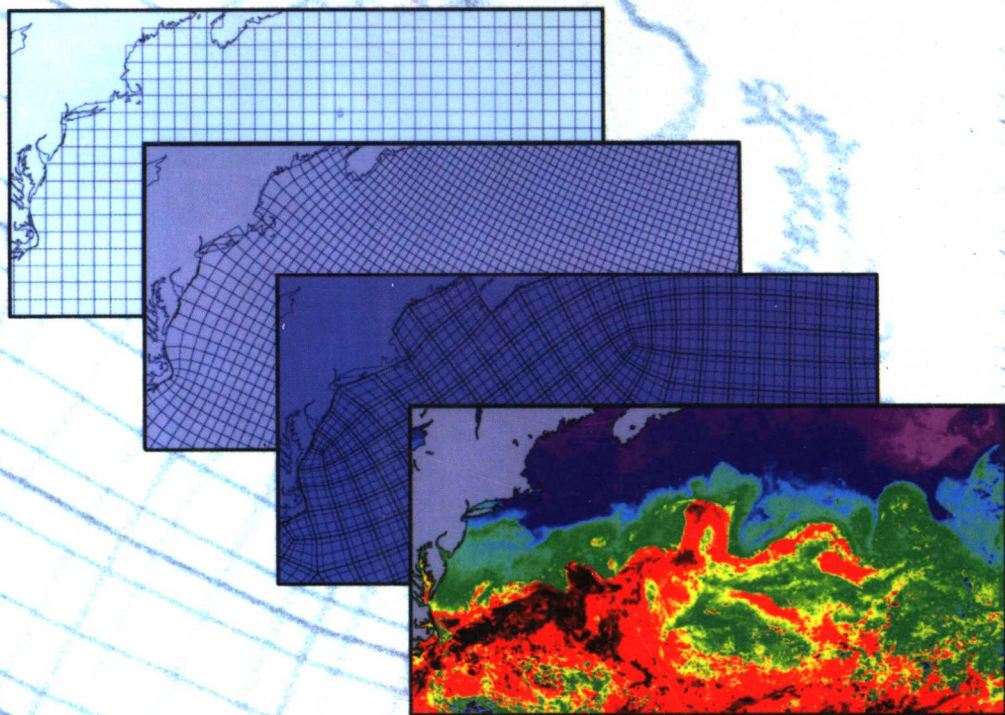


NUMERICAL OCEAN CIRCULATION MODELING

海洋环流数值模拟



Dale B. Haidvogel 著
Aike Beckmann

王东晓 宏 波 蔡树群 等译

气象出版社

NUMERICAL OCEAN CIRCULATION MODELING

海洋环流数值模拟

Dale B. Haidvogel Aike Beckmann 著

王东晓 宏波 蔡树群 等译



气象出版社

内 容 简 介

本书内容涵盖了海洋环流数值建模的若干重要方面,从基本守恒原理出发,探讨了风生和热盐环流模拟中的重要物理过程,对比了一系列重要海洋环流模式的性能,真正体现了数值模型与海洋物理现象的有机统一。

本书可供开展海洋数值模拟研究和应用的科技人员,尤其是部分研究单位的年轻海洋科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋环流数值模拟/(美)海德沃格尔著;王东晓等
译.—北京:气象出版社,2005.3
书名原文:Numerical Ocean Circulation Modeling
ISBN 7-5029-3943-1

I.海... II.①海...②王... III.大洋环流—数值模拟
IV.P731.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 025873 号
北京市版权局著作权合同登记:图字 01-2005-1529 号

原版出版者:英国帝国学院出版社

中译本出版者:气象出版社 地 址:北京海淀区中关村南大街 46 号

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn> 邮 编:100081

E-mail:qxcsbs@263.net 电 话:010-68407112

责任编辑:张锐锐 李太宇 终 审:章澄昌

封面制作:张建永

印刷者:北京金瀑印刷有限责任公司

装订者:三河市海龙装订厂

发行者:气象出版社 电话:010-62175925

开 本:787×1092 1/16 印 张:19 字 数:309 千字

版 次:2005 年 3 月第一版 2005 年 3 月第一次印刷

书 号:7-5029-3943-1/P·1412 印 数:1~1000 册

定 价:30.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

Published by

Imperial College Press
57 Shelton Street
Covent Garden
London WC2H 9HE

Distributed by

World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
P O Box 128, Farrer Road, Singapore 912805
USA office : Suite 1B, 1060 Main Street, River Edge, NJ 07661
UK office : 57 Shelton Street, Covent Garden, London WC2H 9HE

Library of Congress Cataloging-in-Publication Data

Haidvogel, Dale B.

Numerical ocean circulation modeling/Dale B. Haidvogel, Aike
Beckmann.

p. cm.--(Series on environmental science and management; vol. 2)

Includes bibliographical references and index.

ISBN 1-86094-114-1(alk. paper)

1. Ocean circulation--Mathematical models. I. Beckmann, A.
(Aike) II. Title. III. Series.

GC228.5.H35 1999

551.47'01'015118--dc21

99-19666

CIP

British Library Cataloguing-in-Publication Data

A catalogue record for this book is available from the British Library.

First published 1999

Reprinted 2000

Copyright©1999 by Imperial College Press

All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

For photocopying of material in this volume, please pay a copying fee through the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Danvers, MA 01923, USA. In this case permission to photocopy is not required from the publisher.

Printed in Singapore by Uto-Print

SERIES ON ENVIRONMENTAL SCIENCE AND MANAGEMENT

Series Editor: Professor J. N. B. Bell

Centre for Environmental Technology, Imperial College

Published

Vol. 1 Environmental Impact of Land Use in Rural Regions

P. E. Rijtema, P. Groenendijk and J. G. Kroes

Vol. 2 Numerical Ocean Circulation Modeling

D. B. Haidvogel and A. Beckmann

Forthcoming

Highlights in Environmental Research

John Mason (ed.)

作者简介

Dale B. Haidvogel 是近 20 年来海洋环流数值模式开发和应用领域的学术带头人。他于 1976 年在麻省理工学院—伍兹霍尔海洋研究所获得物理海洋学专业博士学位。研究领域包括海洋动力过程理想化研究及近岸和大洋真实海洋环境的数值模拟。目前他以 Professor II 身份就职于美国新泽西州罗格斯大学大洋与近岸海洋科学研究所。

Aike Beckmann 于 1984 年在德国基尔海洋研究所获博士学位。他长期从事海洋环流的数值模拟,研究领域包括海洋动力过程的高分辨过程研究和大尺度数值模拟,在海底地形的影响方面颇有造诣。目前他是德国不来梅港阿尔弗雷德·魏格纳研究所的高级研究员,与他带领的学术团体从事高纬度海洋和海冰的动力学研究。

译者的话

海洋数值模拟是研究海洋学的重要方法与手段之一。当前随着国家对海洋科学发展进步日益重视，国内开展海洋数值模拟研究和应用的科技人员不断增加，尤其是部分研究单位和年轻海洋科技人员正在致力于发展有自主知识产权的新一代海洋环流数值模式。我们很乐意向诸位同行翻译推荐由美国 Rutgers 大学 Dale Haidvogel 教授等人所著的《海洋环流数值模拟》一书。本书内容涵盖了海洋环流数值建模的若干重要方面，从基本守恒原理出发，探讨了风生和热盐环流模拟中的重要物理过程，对比了一系列重要海洋环流模式的性能，真正体现了数值模型与海洋物理现象的有机统一。

参加本书翻译的人员有宏波、杜岩、蔡树群、王东晓、谢强、徐洪周、刘长建等。全书由王东晓、宏波、詹杰民校对。感谢原书作者提供公式和图表的电子版。此书翻译过程中也得到中国科学院海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室周伟东博士、齐义泉博士等的支持，气象出版社李太宇先生和张锐锐女士为此书出版而多方积极努力，在此特表示衷心感谢。

本书翻译、出版得到了中国科学院知识创新试点工程方向性项目“西太平洋暖池动力过程与海气相互作用”、国家自然科学基金重点项目“热带太平洋年际与年代际海洋环流变异规律”和 863 计划“十五”探索课题“面向全球海洋同化计划 GODAE 的南海区域系统”的联合资助。

中文版序

近几十年来,海洋科学研究,尤其是海洋环流数值模拟研究已迅速发展成为一门跨学科跨国界的学术活动。海洋环流数值模拟过去曾一度被认为仅用于物理海洋学和海岸工程学领域,而今却已经作为一个基本工具被用来研究生物地球化学循环、生态系统动力学和渔业、沉积物输送的模拟、近岸海域的数值预报以及全球气候变化等等。随着这些研究及其它一些与海洋相关问题与社会发展的联系日益密切,这门学科的重要性将会在更多的领域得到体现并与时俱增。

值得庆幸的是,为了适应新的挑战,海洋环流数值模式的种类和模拟能力都在不断发展提高。自本书第一版出版以来,有一些领域已经取得了相当大的进步,如垂向混合坐标的应用,非均匀网格技术(包括有限元和有限体积算法),数据同化和逆方法等等。现在,想要获得达到最新技术发展水平的数值模式及其耦合子系统在任何地方都很容易实现。因此,随着计算机和互联网的运行速度及自身性能的提高,海洋环流数值模式及其使用方法都得到了前所未有的更广泛的应用。

这是一本入门性的教科书,我们抱着乐观的态度欢迎更多的读者能够看到它。我们也期待随着本书中文版的出版,将会激发海洋学科领域的学生和科研工作者在不久的将来开展国际合作。该书的译者为之付出了辛勤的劳动,我们在此致以诚挚的谢意,同时也向那些使此书中文版得以问世的所有工作人员表示感谢。

美国新泽西州罗格斯大学 Dale B. Haidvogal

芬兰赫尔辛基大学 Aike Beckmann

2005年4月

**Foreword to the Chinese edition of
“Numerical Ocean Circulation Modeling”**

Dale B. Haidvogel, Rutgers University, New Jersey, USA

& Aike Beckmann, University of Helsinki, Finland

April 2005

Over the past several decades, the Marine Sciences in general, and ocean circulation modeling in particular, have become an increasingly interdisciplinary and international activity. Once a specialized capability primarily limited to the fields of Physical Oceanography and Coastal Engineering, ocean modeling has now become a principal tool in studies of, for example, biogeochemical cycling, ecosystem dynamics and fisheries, sediment transport modeling, coastal ocean prediction, and global climate change. The importance of this subject can therefore only continue to expand, given the growing societal relevance of these and other ocean-related issues.

Fortunately, the variety and capabilities of the ocean circulation models available to the marine science community have continued to evolve to keep up with these new challenges. Since the initial publication of this textbook, substantial progress has been made in such areas as hybrid vertical coordinates, heterogeneous grid techniques (including finite element and finite volume algorithms), and data assimilation and inverse methods. State-of-the-art community models, as well as their coupled sub-systems, are now available world-wide. Given the accompanying increases in the speed and availability of computers and computer networking, therefore, ocean circulation models and the means to utilize them are now more widely accessible than ever before.

It is within this optimistic context that we welcome the wider audience of readers who may now have access to this introductory text. We look forward to (the) future international collaboration that this translation may inspire among students and practitioners of the Marine Sciences. Finally, we thank the translators of this volume for their painstaking efforts, and acknowledge all those who have worked to make this translation a reality.

序言

区域和海盆尺度海洋环流模式中因其算法的复杂性和多样性所带来的问题直到现在才基本得以解决。尽管计算流体力学在其他领域（包括与之有紧密联系的数值天气预报领域）取得了重大进展，但始于 20 世纪 60 年代末的海洋环流模式总体上还是依赖于一阶模型。在过去 10 年中，这种情况有了很大的改观。首先，系统化的开发使得可利用模式的数量大大增多。其次，对各种尺度海洋动力和预测兴趣的增强，以及高端工作平台和超级计算机的广泛应用，促使世界范围内的用户快速增长。因此，现有模式算法的丰富以及应用的精细化程度得到了很大提高。

在这样一个快速发展的领域，试图给所有模式及它们的应用领域一个确定性的评论是不明智的。我们将感兴趣的和较重要的内容编写成此书。我们着重探讨海洋环流模拟建立的基础及其工作原理，讨论并对比了涵盖当前所有算法的四种模式的设计和运行，最后从海盆尺度大洋环流的现实模拟和简化的二维理想化测试问题两个方面来探索和比较每个模式的局限性。

由于当今海洋模式的多样化，并且容易获取，很自然地就会问及对某一给定的应用问题哪个模式是最适用的。遗憾的是，一直没有对这些可利用的大尺度海洋环流模式进行过系统的比较。对现实海盆尺度环境的重复模拟是提供各种模式比较信息的一种手段。然而，对其进行控制和量化是昂贵而困难的。一种可替代的方法 - 发展一套相对便宜的、面向过程的测试方法。这种方法参考已知的和量化的标准来评估模式的性能，因而是获取模式性能和行为经验的一种重要和互补的方式。

尽管该书主要是面向海洋科学研究领域的学生和其他希望从事数值海洋环流模拟的读者，但其中心主题（运动方程的离散、次网格尺度过程的参数化、近似解程序以及定量的模式评价）对其他学科（例如气象学和计算流体力学）也是普遍适用的。本书适用于对应用数学和物理科学的理解具有本科水平的读者。

海洋模式的现状

当前, 在海洋环流模拟领域有四类数值模式实现了共同管理和参与的较高水准, 包括共享社区开发, 定期的用户交流以及软件和文件通过环球网络的迅速获取。这四类模式都具有各自的空间离散方法和垂直坐标处理方法。

第一个海洋普通环流模式(OGCM)是 20 世纪 60 年代末, 由地球物理流体动力学实验室(GFDL)的 Kirk Bryan 研究开发的。从此, GFDL 模式开始设计使用一种位势垂直坐标系, 并且利用低阶有限差分方法来离散运动方程。从 20 世纪 70 年代中期开始, 在 Mike Cox (GFDL) 和 Bert Semtner (现在在 Naval Postgraduate School) 的努力下, 这一模式开始发生重大进展(当今, 在这第一个海洋普通环流模式(OGCM) 的基础上发展出了很多模式, Harvard University (the Harvard Ocean Prediction System, HOPS), GFDL (the Modular Ocean Model, MOM), the Los Alamos National Laboratory (the Parallel Ocean Program, POP), the National Center for Atmospheric Research (the NCAR Community Ocean Model, NCOM), 以及其他一些研究机构)。

20 世纪 70 年代期间, 海洋模拟在垂向离散化和坐标系处理方面存在两种具有竞争力的方法。这两种方法分别以非混合层的垂向离散化(层化模式) 和随底垂向坐标(“sigma” 坐标模式) 为基础。前者把海洋想象成由一系列非混合的层次所构成, 它的界面位置作为动力学的一部分随时间不断调整; 后者假定坐标面不随时间变化, 但随底地形变化(并因此相对于非平底地形来说它不是重力位势面)。与 20 世纪 70 年代的算法思想风格相一致, 所有这些模式种类均使用(并继续使用) 低阶有限差分方案, 类似于那些基于 GFDL 程序代码的模式中所使用的。

当今, 存在一些层化模式和随底坐标模式的例子。属于前者类别的模式包括以下一些单位和研究机构设计并建构的模式: 美国海军研究实验室的层化海洋模式(NLOM)、迈阿密大学的等密度面坐标海洋模式(MICOM)、GFDL (the Hallberg Isopycnic Model , HIM)、德国汉堡的马克斯普朗科研究所、FRG (the OPYC model) 以及其他一些模式。属于后者类别的模式有: POM (普林斯顿海洋模式)、SCRUM (the S-Coordinate Rutgers University Model) 和 GHERM(the GeoHydrodynamics and Environmental Research Model), 在这一类别模式中最

广泛应用的就是以上这些。

最近, OGCM 的开发者已利用非传统的先进算法对该模式进行了改进。最重要的是这些模式在 Galerkin 有限元方案(例如: 三角形有限元编码 QUODDY(Dartmouth University)和光谱有限元编码 SEOM(Rutgers University))的基础上得到了进一步发展。这些最本质的区别在于求解运动方程的数值算法及采用自由(与有限制的相反)水平网格这两方面。

内容介绍

本书的目的是: 首先, 简要回顾数值海洋环流模拟所依据的基本原理; 其次, 给出当前使用中的海洋环流模式类别的延伸性描述; 第三, 探究关于一组可量化的并且便宜的测试问题的模式性能的比较研究; 最后, 说明这些原理和问题怎样出现在一个特定的海盆尺度的应用中。

我们关注的焦点是海盆尺度到全球尺度海洋环流的模拟, 包括风生环流和热盐环流现象的模拟, 在空间尺度上具有罗斯贝变形半径或更大尺度。小尺度过程(中尺度涡旋和环流、次中尺度涡、对流混合、湍流, 沿海的、表面和底部边界层)没有详细地阐述。假定从一开始对这些小尺度过程就进行了参数化以包含它们对大尺度运动的影响。

有关近似和参数化的相关概念是贯穿我们整个阐述过程的主题。正如我们所强调的那样, 按照惯例用于解决海洋行为的运动方程通过复杂的(但系统的)一系列动力学近似、物理的参数化和数值假定得到。任何一个或所有这些近似和参数化都可能对海洋模拟的质量产生重要影响。因此对于从事海洋普通环流模拟研究的新手来说, 知道解的敏感性和潜在问题的源头是十分重要的。我们针对每种情形提供了许多例子。

第一章对海洋的运动方程(流体静力学原始方程)的导出和各种常用的近似体系进行了简要介绍。从质量守恒、动量守恒、机械能守恒和热量守恒的传统方程出发, 说明这些方程的形式在旋转的球面坐标系中是怎样变化的。这些连续性方程有许多守恒性质, 这里主要讨论了角动量守恒、涡度守恒、能量及涡动拟能守恒。为了获得描述海洋运动的一般性方程, 许多近似是必须的, 并说明了惯例性的、包辛内斯克近似、流体静力学近似、不可压缩性假定以及这些近似和假定是怎样与诸如能量和角动量等守恒性质相联系的。最后, 介绍了额外的近似所产生的一些更为简化的体系, 这些体系包括: β 平面、准地转和浅水方程。

第二章探讨了为什么我们不能直接求解海洋运动方程组。相反，我们必须利用离散化的数值求解程序来寻求近似解。这其中包含了函数近似和方程近似两个级别的离散，每一种近似我们都给出了多种方法。离散化的运动方程的解有时可能与原始的连续性方程的解有显著差异。关于近似误差的来源，我们以一维的热量和波动方程为例进行了分析。对于时间差分我们也给出了几种可供选择的方法（如时间显式差分、时间隐式差分和半隐式差分）。

在寻求二维或更高空间维数解时，对其他数值方面的问题也做了考虑（第三章）。其中包括：紧凑的时间步长稳定性限制，椭圆边界值问题快速求解过程的需要，因变量水平交错网格的可能性。后者尤其重要，因为水平网格的不同选择对数值近似误差和离散后的守恒性质有直接的影响。作为这些影响的一个例子，我们通过几种传统的交错网格对多种波动现象（惯性重力波、行星波）的传播特征进行了研究，展示了可能出现的数值近似误差类型。

具有不同算法设计的四种比较成熟的海洋模式在第四章中进行了详细描述。在这当中，有一些利用不同垂直坐标（重力位势、等密度面和随底地形坐标），水平离散化（非交错网格、交错网格），近似方法（有限差分、有限元）和近似阶数（低阶、高阶）的例子。每个模式都给出了半离散化运动方程和模式具体设计特点的简要总结。

第五章叙述了从第一章得到的“完整”的运动方程为什么不是真正意义上的完整。由于被省略的已解决的和未解决的运动尺度之间的相互作用具有潜在的重要性，因此我们必须对这些未解决的现象进行具体参数化。所设计的参数化过程包括：表面和底部海洋边界的垂向混合、次网格尺度涡旋和湍流的侧向输运和混合、对流翻转和地形应力。此外还对这些参数化的来源和形式进行了回顾。

为了说明第四章中提到的四种模式在实际情形甚至在理想情形下的表现范围，我们在第六章中介绍了简单的二维检验问题。过程导向问题提出了一系列与大尺度海洋环流有关的过程，其中包括波的传播和相互作用（赤道罗斯贝孤立波）、风强迫（西边界流）、层化作用（垂向密度锋面的调整）、陡地形和层化的联合作用（下坡流，沿坡流）。说明了垂向坐标的选择、次网格尺度参数化及空间离散化方式对几种数值模拟结果的实质敏感性。

第七章分析了北大西洋无涡流解析模拟技术的研究现状。在对现有

的模拟方案和有效方法做了简单回顾后，我们介绍了三个近年来进行的项目，这些项目由多家科研机构共同合作完成，旨在寻求适合于北大西洋的模拟方案，并解释数值计算与模式的依赖关系。这些程序集合在一起为说明数值近似和物理参数化对建模的控制影响力提供了更加直观的例证。然而，通过模式验证与已有观测资料的对比，表明只要耐心、慎重，北大西洋海盆的数值模拟是能够达到相当高的水准的。

最后，第八章简要探讨了海洋环流数值模拟的发展方向，并对最新的空间近似处理方法做了特别介绍。

致谢

这本书的前几章是过去 20 年里在研究生课程中的“海洋动力学和模拟”这一课程基础上发展起来的讲稿的简化版。首先要感谢 Woods Hole 海洋研究所、海军研究生院、Johns Hopkins 大学和 Rutgers 大学的支持。第六章中检验性问题的描述得益于 Terri Paluszkiwicz 和太平洋西北国家实验室的鼓励和支持。感谢 Rutgers 大学的海洋和海岸科学研究所和德国 Alfred-Wegener-Institute 在完成此专著期间所给予的后勤和财政资助。在编写此书的过程中，与一些同事进行了讨论，获得一些有益的建议，提高了本书的质量。特别感谢 Claus Böning、Eric Chassignet 和 Joachim Dengg 所提出的有深刻见解的建议。最后，还要感谢 Kate Hedström、Hernan Arango 和 Mohamed Iskandarani 所作的许多技术上的贡献。

目 录

译者的话

中文版序

序言

致谢

第一章 连续性方程	1
1.1 质量守恒和动量守恒	1
1.2 能量守恒和热量守恒	5
1.3 地转效应	8
1.4 球坐标系下的方程组	12
1.5 无近似方程组的性质	14
1.5.1 角动量守恒	14
1.5.2 Ertel 定理	15
1.5.3 机械能守恒	16
1.6 流体静力原始方程组	17
1.6.1 Boussinesq 近似	18
1.6.2 不可压缩性	19
1.6.3 流体静力近似	19
1.7 初始边界条件和运动学边界条件	22
1.8 近似方程组	24
1.8.1 β 平面 (笛卡尔) 方程组	24
1.8.2 准地转近似	27
1.8.3 浅水方程	30
第二章 一维热量和波动方程组	34
2.1 函数的近似	34
2.1.1 泰勒级数	35
2.1.2 分段线性内插	35
2.1.3 傅里叶近似	36

2.1.4	多项式近似	41
2.2	方程组的近似	43
2.2.1	伽辽金近似法	43
2.2.2	最小二乘法和配置法	44
2.2.3	有限差分法	44
2.3	例子: 一维热量方程	46
2.4	收敛性、一致性和稳定性	50
2.5	时间差分	53
2.5.1	波动方程	55
2.5.2	摩擦方程	60
2.6	平流方程	61
2.7	平流方程的高阶格式	65
2.8	近似误差的来源	67
2.8.1	位相误差或衰减误差	70
2.8.2	频散误差和伪极值的产生	72
2.8.3	时间分裂“误差”	72
2.8.4	边界条件误差	73
2.8.5	混淆误差 / 非线性不稳定	73
2.8.6	守恒性质	76
2.9	差分格式的选取	79
2.10	多波过程	80
2.11	半隐时间差分格式	81
2.12	分数步方法	82
第三章	二维问题的研究	84
3.1	水平交错网格上波的传播	84
3.1.1	惯性重力波	86
3.1.2	行星(罗斯贝)波	91
3.1.3	外(正压)波	94
3.1.4	非等距网格, 非均匀分辨率	94
3.1.5	平流和非线性(混淆现象)	99
3.2	多维空间中的时间步进格式	99
3.3	半隐式浅水方程组	101