

华祖林 刘东东 褚克坚 著
顾 莉 汪 靓

基于边界拟合下的水流与 污染物质输运数值模拟



科学出版社

013027655

X52
48

基于边界拟合下的水流与污染 物质输运数值模拟

华祖林 刘晓东 褚克坚 顾 莉 汪 靓 著



科学出版社

北 京



北航

C1637264

X52
48

008710010

内 容 简 介

本书对基于边界拟合下的水流及污染物质输运数值模拟进行了探讨,首先在正交曲线拟合网格生成中提出了一种微分表达式调节因子,建立正交曲线拟合网格下二维水流与物质输运数学模型;然后,探索性地建立了基于有序排列的三角形网格的交替方向隐式二维水流及污染物输运数值模式;构建了考虑底泥释放的无结构网格下二维水动力及污染物输运数学模型,并采用湖泊调水方案评价指标体系对浅水湖泊调水模式进行了评价;针对四叉树网格悬挂节点物理量计算的难点,通过设置虚拟单元实现了在不同尺寸网格的联立求解,提出四叉树网格下的 Godunov 型水流及污染物质输运数学模型,最后,对 POM 模型的外模式计算格式进行了改进,拓展了 POM 模式在河口、感潮河段等相对小尺度计算区域中的应用。

本书可供从事环境水利、水动力与水环境模拟等领域的科研人员阅读,也可供环境科学、环境工程、水利和水资源管理等专业的研究生和高校教师作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于边界拟合下的水流与污染物质输运数值模拟/华祖林等著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-036135-6

I. ①基… II. ①华… III. ①水污染物-输运过程-数值模拟 IV. ①X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 287119 号

责任编辑:周 炜 / 责任校对:胡小洁
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 3 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 3 月第一次印刷 印张: 13 3/4 插页: 8

字数: 267 000

定价: 66.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水流及污染物质输运数值模拟在水环境影响预测、水污染控制方案制定及水环境管理等领域有着举足轻重的作用。然而，河流、湖泊及近海等天然水域往往具有不规则的自然边界，为拟合不规则的边界，人们目前已经发展出各种对不规则边界进行拟合生成计算网格的方法，并取得了卓有成效的成果。

本书是在前人工作的基础上，总结与归纳了笔者与合作者近 20 年来在曲线拟合网格、无结构网格、四叉树网格等方面的研究成果。全书围绕基于边界拟合下的水流及污染物质输运数值模拟这条主线，首先针对强弯与不规则河道情形，在正交曲线拟合网格生成中，借助于自然界符合椭圆形函数关系的某些物理现象，提出了一种微分表达式调节因子，并建立了正交曲线拟合网格下二维水流与物质输运数学模型；然后，基于有序排列的三角形网格，探索性地建立了交替方向隐式有限差分格式的二维水流及污染物质输运数学模型；为适应湖泊天然边界与调水的实际状况，构建考虑底泥释放的无结构网格下二维水动力及污染物质输运有限体积法（finite volume method, FVM）数值计算模式，尝试性地建立了浅水湖泊调水方案评价指标体系，并进行了波浪与湖流共同作用下污染物内源释放数值模拟；针对四叉树网格悬挂节点物理量计算困难的问题，通过设置虚拟单元进而以三角形线性插值的方法，解决了不同尺度单元间通量计算的技术难点，并实现了在不同尺寸的网格联立求解，在此基础上，鉴于近岸海域覆盖面积大而污水排放形成混合区相对集中的特点，采用四叉树网格方式，分层次对不同研究区域按不同尺度网格对近海水域进行嵌套网格联合布置，加密网格，重点模拟了排放口附近污水排放形成的混合区范围，最后，改进了 POM 模型的外模式计算格式，拓展了 POM 模式在河口、感潮河段等相对小尺度区域中的应用。

本书的研究工作部分得到了国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418202)、国家科技支撑计划课题(2012BAB03B04)、国家水专项课题(2009ZX07103-006)、国家自然科学基金(51179052、50979026)以及水利部公益性行业科研专项经费项目(201001028)和江苏省六大人才高峰计划(08-C)等项目的资助,在此深表感谢。

本书虽然在边界拟合研究方面做了一些有益的探索,但是由于学识水平有限与时间仓促,再加上自然边界拟合本身和与之匹配的水流及污染物质输运数值模拟的复杂性,难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2012年10月于南京清凉山麓

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	6
第 2 章 正交曲线网格下二维水流与污染物质输运数学模型	8
2.1 引言	8
2.2 基于微分表达式调节因子的正交曲线网格的生成	9
2.2.1 微分形式调节因子的导出	12
2.2.2 调节因子适用性分析	13
2.2.3 正交曲线网格生成实例	15
2.3 正交曲线坐标下二维水流及污染物质输运数学模型	19
2.3.1 基本方程	19
2.3.2 边界条件	21
2.3.3 基本方程的离散及求解	21
2.4 应用案例	23
2.4.1 案例 1	23
2.4.2 案例 2	27
参考文献	35
第 3 章 基于有规则排列三角形网格的一种有限差分计算模式 ...	37
3.1 引言	37
3.2 三角形网格下二维水流及物质输运数学模型	38
3.2.1 基本方程及定解条件	38
3.2.2 基本方程中物理量布置方式及偏导数的求解方法	40
3.2.3 基本方程的交替方向隐式有限差分格式解法	45
3.3 应用实例	54
3.3.1 丁坝绕流数值计算	54

3.3.2	长江某河段水流水质计算实例	56
参考文献		61
第4章	基于非结构网格的湖泊引清调水模式研究	63
4.1	引言	63
4.2	控制方程及数值求解	65
4.2.1	控制方程	65
4.2.2	有限体积法离散方程	70
4.2.3	边界条件	73
4.3	湖泊调水的评价指标体系的建立	74
4.4	案例应用	76
4.4.1	案例1——玄武湖引清调水数值模拟与调水模式研究	76
4.4.2	案例2——龙湖调水置换率研究	85
参考文献		94
第5章	四叉树网格下二维水动力及污染物质输运数值模拟	98
5.1	引言	98
5.2	四叉树数据结构	100
5.3	四叉树网格的自动生成	102
5.3.1	主要数据结构	102
5.3.2	网格划分算法	103
5.3.3	网格“光滑”处理	104
5.3.4	计算区域外网格的查找	104
5.3.5	单元索引编码体系	105
5.3.6	四叉树网格自动生成的例子	107
5.4	基本方程及定解条件	108
5.4.1	基本方程	108
5.4.2	定解条件	108
5.5	四叉树网格下基本方程的数值求解	109
5.5.1	物理量布置方式	109
5.5.2	基本方程的有限体积法离散	110
5.5.3	相同级别单元间法向通量计算	111

5.5.4 不同级别单元间通量计算	112
5.5.5 数值稳定性	113
5.6 丁坝水流的数值试验	114
5.6.1 丁坝绕流物理试验情况	114
5.6.2 数值计算条件	114
5.6.3 结果验证	115
5.7 江苏海州湾近岸水域潮流场及浓度场实例计算	118
5.7.1 研究区域和计算条件	118
5.7.2 计算区域网格的布置	119
5.7.3 潮位流速验证计算结果	120
5.7.4 流场模拟分析	122
5.7.5 浓度场验证	123
5.7.6 入海排污量与混合区面积关系的计算	123
5.8 小结	125
参考文献	126
第6章 波流共同作用下浅水湖泊水流及污染物内源释放数值模拟 ——以太湖为例	128
6.1 引言	128
6.2 波流共同作用下的太湖水流物质输运数学模型	129
6.2.1 基于波流结合的二维浅水方程	129
6.2.2 数学模型的求解	133
6.3 太湖水流及物质输运的数值模拟	134
6.3.1 太湖概况	134
6.3.2 网格剖分	135
6.3.3 模型验证	136
6.3.4 盛行风场驱动下太湖水动力及污染物输运的模拟计算	140
参考文献	149
第7章 改进的 POM 模型及其在感潮河段水流与物质输运数值模拟 中的应用	151
7.1 引言	151

7.2 基本方程	152
7.2.1 外模式	152
7.2.2 内模式	153
7.2.3 边界条件与初始条件	155
7.3 方程的离散	158
7.3.1 内模式离散	158
7.3.2 外模式离散	162
7.3.3 内外模式的衔接	165
7.4 实例计算	166
7.4.1 实例 1	166
7.4.2 实例 2	175
参考文献	179
第 8 章 EFDC 模型在调水后巢湖湖区水环境质量变化模拟中的应用	181
8.1 引言	181
8.2 EFDC 的数值方法简介	182
8.2.1 控制方程	182
8.2.2 模型定解条件	190
8.2.3 方程的离散与求解	191
8.3 巢湖实例应用计算	195
8.3.1 巢湖概况	195
8.3.2 计算区域及网格划分	196
8.3.3 巢湖调水试验模拟计算	197
8.3.4 巢湖调水方案水质改善效果情景模拟	199
参考文献	212

彩图

第 1 章 绪 论

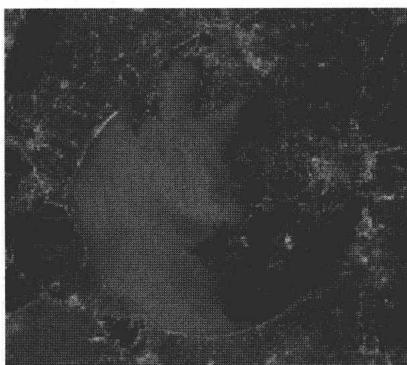
水污染问题是当前我国最为突出的环境问题之一，我国大多数河流、湖泊和近海水体已经受到不同程度的污染，严重影响了国民经济的可持续发展和人民的身体健康。为对污染日益加剧的河流、湖泊、近海等水体水环境质量的改善，就需要深入掌握污染物质进入水体后的输运规律，对水环境质量时空变化过程进行模拟、复演和预测，以便为控污措施提供科学依据与技术支撑。

数值模拟目前已经成为研究水流及污染物质输运规律的主要手段之一，其应用范围十分广泛，在水污染控制、水环境影响分析及水环境管理中发挥着举足轻重的作用。但是，天然水体如河流、湖泊及近海等往往具有复杂的不规则自然边界，图 1.1 中给出了几个典型的例子：(a) 为天然河流边界示意图；(b) 为湖泊边界示意图；(c) 为近海边界示意图。可见在自然界中无论是天然河流、湖泊，还是近海水域，均具有复杂的不规则边界，这给水流及污染物质输运的精细模拟带来困难。如果在水流与物质输运数值模拟中，采用矩形均匀网格对所研究的天然不规则区域进行剖分，那么真实的自然边界将被概化为阶梯形边界，如图 1.2 所示，造成离散的计算区域边界与实际区域边界不相吻合，当网格尺度较大时，会造成较大的边界计算误差，对于微分系统在邻近边界的地方有很大梯度的情况，甚至会改变解在边界附近的特性，导致流动失真^[1,2]。采用矩形均匀网格进行离散的另一个缺陷是当所求的物理量在计算区域中某一小部分区域内其尺度变化小于网格的格距时，将无法分辨出这一区域物理量的变化特性。如采用缩小网格间距的方法来克服以上缺陷，则计算量将会大大的增加^[3]。另外，计算区域内若有众多的岛屿，这些岛屿将需要较高的网格分辨率才能分辨出来，同样会造成计算量的大量增加^[2]。在三维模型中，除了会遇到岸边界处理问题，还会遇到底边界处理问题。因

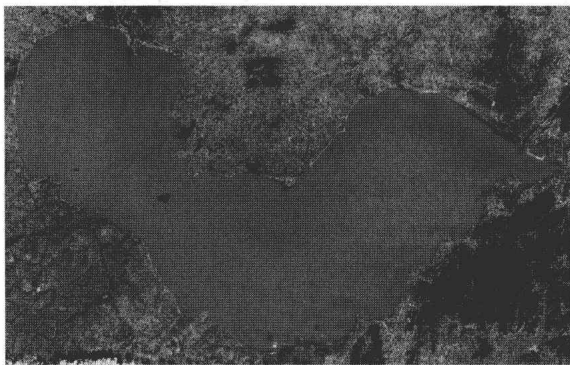
此, 对具有复杂的不规则边界的区域内水流与物质输运数值模拟如何提高其计算精度, 一直是水动力与水环境模拟研究的难点与热点之一。



(a) 天然河流



太湖



巢湖



玄武湖
(b) 湖泊



(c) 海湾

图 1.1 天然水体不规则边界举例

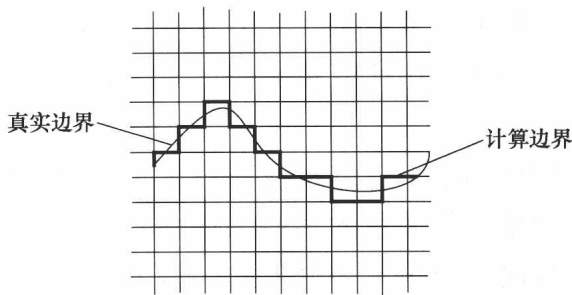


图 1.2 边界拟合

为拟合不规则区域的边界，人们目前已经发展出多种对不规则边界进行拟合生成计算网格的方法，可统称为边界拟合技术。这些边界拟合技术主要包括曲线拟合网格方法^[4~6]、非结构网格方法^[7~12]、二叉树网格方法^[13~17]等。曲线拟合网格的构造原理是通过坐标变换将实际几何平面上的计算区域变换到参数平面上的一个简单区域（如矩形区域或多个矩形所组成的区域），使得计算区域的边界与矩形区域的边界一一对应，这样各种数值方法如有限差分法、有限体积法等可直接在参数平面上进行计算，而无需考虑真实区域边界的形状。应用该网格能使计算在参数平面上的矩形网格系统上进行，并且其边界始终与真实的区域边界相重合，从而可以准确地表达边界，有效地克服

了矩形网格在边界上带来的误差。非结构网格 (unstructured grid) 是处理复杂计算边界的又一种有效方法, 又称无结构网格。所谓“非结构”, 就是在这种系统中节点的编号命名并无一定规则, 甚至是完全随意的, 而且每一个节点的邻点个数也不是固定不变的。与规则网格中节点排列有序、每个节点与邻点的关系固定不变的这种结构严密的情况相比, 非结构网格的这种不规则、无固定结构的特点使其对不规则边界有着十分灵活的适应能力。四叉树网格是近年来发展起来的又一种处理复杂边界的网格方法, 该网格是一种直角坐标系下的分层矩形网格, 网格结构可以用四叉树来表示, 这种方法在最大程度上保持直角坐标网格的生成简单、易于自动化的特点, 又能较好地模拟边界。

本书总结了笔者近 20 年来基于拟合边界下水流及污染物质输运数值模拟方面所取得的研究成果, 全书分为 8 章, 主要内容如下。

第 1 章绪论。简单介绍研究意义与水流及物质输运数值模拟中主要的边界拟合方法。

第 2 章正交曲线网格下二维水流与污染物质输运数学模型。借助于自然界符合椭圆型函数关系的某些物理现象, 视计算区域的网格曲线为流线簇与势线簇, 导出了微分形式的调节因子, 并对调节因子的适用性进行了分析, 建立曲线拟合网格下二维水流与物质输运数学模型, 进行了实际案例的应用计算。

第 3 章基于有规则排列三角形网格的一种有限差分计算模式。介绍三角形网格下控制变量一、二阶偏导数的求解过程, 基于有规则排列的任意三角形网格布置方式, 探索性地建立了交替方向隐式有限差分格式的二维水流及物质输运数学模型, 最后选择丁坝绕流试验流场和长江某河段的流场、浓度场作为具体案例, 进行实例计算应用。

第 4 章基于非结构网格的湖泊引清调水模式研究。针对浅水湖泊调水的实际情况, 构建考虑底泥释放的无结构网格下二维水动力及污染物质输运 FVM 数学模型, 以适应湖泊天然边界与调水的实际状况; 从水质改善、提供水生态适宜的水力要求以及调水经济性角度出发, 对调水模式评价指标做出探索, 尝试性地建立浅水湖泊调

水方案评价指标体系,并将其应用于浅水湖泊的调水方案评价中。

第5章二叉树网格下二维水动力及污染物质输运数值模拟。建立一种基于二叉树网格的 Godunov 型二维水流及物质输运数学模型,针对二叉树网格悬挂节点物理量计算困难的问题,通过设置“虚拟单元”进而以三角形线性插值的方法,解决了不同尺度单元间通量计算的技术难点,并实现了在不同尺寸的网格联立求解;采用丁坝物理模型试验结果验证了该数学模型的可行性;在此基础上,鉴于近岸海域覆盖面积大而污水排放形成混合区相对集中的特点,采用二叉树网格布置方式,分层次对不同研究区域按不同尺度网格对近海水域进行嵌套网格联合布置,以江苏海州湾近岸海域的排污为例,重点模拟污水排放形成的混合区范围,并进行江苏海州湾近岸海域纳污能力的研究。

第6章波流共同作用下浅水湖泊水流及污染物内源释放数值模拟——以太湖为例。以太湖为研究对象,在浅水方程中引入波浪辐射应力和波生底部切应力,并综合考虑湖泊底泥营养物释放作用,基于非结构网格建立了沿水深平均的二维波浪、湖流、营养物沉积释放与输移扩散耦合数学模型,对波浪与湖流共同作用下的太湖水动力特征和营养物释放输运规律进行模拟研究。

第7章改进的 POM 模型及其在感潮河段水流与物质输运数值模拟中的应用。对 POM 模型进行改进,在求解外模式过程中,采用稳定性好的交替方向隐式 ADI 方法,改善原有 POM 模型对时步长的严格限制,增加计算的稳定性,进一步拓展 POM 模型在计算区域整体范围与海洋相比相对要小的河口、感潮河段等水域中的应用。

第8章 EFDC 模型在调水后巢湖湖区水环境质量变化模拟中的应用。简要地介绍了 EFDC 模型及求解过程,以巢湖调水为实例,应用 EFDC 模型,对巢湖采用调水方式来改善湖区水质的变化过程进行模拟计算。

本书的研究成果可直接应用于污染物排放方案选择和排污口设置优化、水环境改善效果模拟、复演与预测、总量控制方案制定、区域水污染控制等方面,并为环境保护、水资源管理、规划与市政建设等

职能部门进行决策提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [2] 刘卓, 郭冬健, 朱江, 等. 长江口自适应网格的构造与水流和泥沙冲淤的数值模拟的初步研究. 海洋学报, 1999, 21(4): 96—105.
- [3] 刘卓, 曾庆存. 自适应网格在大气海洋问题中的初步应用. 大气科学, 1994, 18(6): 641—648.
- [4] Thompson J F. Numerical solution of flow problems using body-fitted coordinate systems // Computational Fluid Dynamics. Washington D C: Hemisphere Publishing Corporation, 1980: 1—98.
- [5] Thompson J F, Warsi Z U A, Mastin C W. Boundary-fitted coordinate systems for numerical solution of partial differential equations—a review. Journal of Computational Physics, 1982, 47(1): 1—108.
- [6] 华祖林, 卞华. 曲线网格生成调节因子选取研究. 河海大学学报, 1999, 27 (2): 40—44.
- [7] Anastasiou K, Chan C T. Solution of the 2D shallow water equations using the finite volume method on unstructured triangular meshes. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1997, 24(11): 1225—1245.
- [8] 刘智, 林秉南, 何少苓. 三角形网格在二维不恒定流计算中的应用. 水利学报, 1987, (9): 25—33.
- [9] 窦希萍, 李提来. 三角形网格生成法在海岸工程潮流数学模型中的应用. 水利水运科学研究, 1995, (1): 65—69.
- [10] 施勇, 胡四一. 无结构网格上平面二维水沙模拟的有限体积法. 水科学进展, 2002, 13(4): 409—415.
- [11] 谭维炎. 计算浅水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [12] 赵棣华, 戚晨, 庾维德, 等. 平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型. 水科学进展, 2000, 11(4): 368—373.
- [13] Yiu K F C, Greaves D M, Cruz S, et al. Quadtree grid generation: Information handling, boundary fitting and CFD applications. Computers & Fluids, 1996, 25 (8): 759—769.
- [14] Borthwick A G L, Cruz León S, Józsa J. Adaptive quadtree model of shallow flow hydrodynamics. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39(4): 413—424.
- [15] Borthwick A G L, Cruz León S, Józsa J. The shallow flow equations solved on adaptive quadtree grids. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2001, 37: 691—

719.

- [16] 刘晓东, 华祖林, 赵玉萍. 基于四叉树网格的 Godunov 型二维水流数值计算模式. 河海大学学报 (自然科学版), 2002, 30(6): 6—10.
- [17] 华祖林, 刘晓东, 王童远, 等. 嵌套叉树网格的 FDS 数值模式在近海水域污染混合区计算中的应用. 水科学进展, 2003, 14(3): 305—310.

第2章 正交曲线网格下二维水流与 污染物质输运数学模型

2.1 引言

在数值计算中进行自然物理边界拟合时,最理想的状况是建立坐标轴与所计算区域的边界一一相符合的坐标系,该坐标系是所计算区域的贴体坐标系 (body-fitted coordinate, BFC)。贴体坐标系又称为适体坐标系、附体坐标系等。直角坐标系是矩形区域的贴体坐标系,极坐标是环扇形区域的贴体坐标系。当没有现成的坐标系可以利用时,则可以通过构造曲线坐标系来贴合不规则区域,曲线坐标系下的网格即为曲线网格。在航空航天领域中为了使网格线与飞行器的边界贴合,最早开始使用了贴体曲线网格。在天然水域的水流与污染物输运问题模拟中,曲线网格由于具有能够贴合天然水域自然边界的独特优势而越来越多地被采用。网格拟合了天然水域特别是河道的不规则曲折岸边界,从而大大提高了数值模拟的计算精度。

在进行复杂区域数值模拟时,生成的曲线网格质量的好坏直接影响到数值模拟的难易程度和求解精度,甚至影响数值计算的收敛性。对于物理区域边界可以用一定函数关系表示的区域,可采用函数变换的方法构造曲线坐标系,例如, Davis^[1]通过复变函数的方法构造了曲线坐标系; Faghri 等^[2]应用代数法来构造曲线坐标求解了二维通道中的对流换热问题; Yang 等^[3]应用保角变换的方法,对三角翼翼身组合体进行了曲线网格的剖分等。上述方法均要求物理区域边界有较明确、简单的函数关系式,这在实际工程中很少遇到,难以应用到天然的河流、湖泊、近海等水体。因此,构造贴体坐标系作为一种更能广泛适用的生成方法,是通过求解微分方程的边值问题建立曲线坐标