



· 生态学研究 ·

# 河道和近岸海域水动力 及物质输运数值模型的研究与应用

王 昆 艾丛芳 宋 伦 编著



科学出版社

# 河道和近岸海域水动力及物质运输 数值模型的研究与应用

王 昆 艾丛芳 宋 伦 编著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了河道及近岸海域，特别是河口、海湾区的水动力及物质输运问题的数值模拟研究方法与应用，详细讨论了以一维、二维和三维控制方程来描述的河道和近岸海域水流的运动输运问题。全书共分为六章，第一章主要介绍了一维、二维、三维水动力和物质输运模型的国内外发展现状及应用；第二、第三和第四章分别主要介绍了一维、二维、三维水动力和物质输运模型的控制方程形式、网格划分、离散格式及模型的验证与应用；第五章是对第二、第三和第四章的模型进行总结并提出几点展望；第六章主要为有关部门制定科学有效的河道和近岸海域的生态环境保护管理机制与政策提供参考性建议。

本书可供海洋环境动力学、河流动力学、海洋物理学、物理海洋学、河口生态学、环境科学、环境保护及从事 CFD 模拟等方面的科研人员、技术人员和大专院校的师生阅读与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

河道和近岸海域水动力及物质输运数值模型的研究与应用 / 王昆, 艾丛芳, 宋伦编著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061301-1

I. ①河… II. ①王… ②艾… ③宋… III. ①近海-水动力学-水流模型-研究 IV. ①P72

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第107783号

---

责任编辑: 朱谨 / 责任校对: 严娜

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

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>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年6月第一版 开本: B5(720×1000)

2019年6月第一次印刷 印张: 9 1/2

字数: 192 000

定价: 118.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 编著者名单

**主 编：**王 昆(辽宁省海洋水产科学研究院)

艾丛芳(大连理工大学)

宋 伦(辽宁省海洋水产科学研究院)

**副主编：**吴金浩(辽宁省海洋水产科学研究院)

刘 明(辽宁省海洋水产科学研究院)

杜 静(辽宁省海洋水产科学研究院)

姜恒志(国家海洋环境监测中心)

**编 委：**(按汉语拼音排序)

胡超魁(辽宁省海洋水产科学研究院)

李 楠(辽宁省海洋水产科学研究院)

李 爱(辽宁省海洋水产科学研究院)

刘桂英(辽宁省海洋水产科学研究院)

匙争锐(大连理工大学)

邵泽伟(辽宁省海洋水产科学研究院)

宋广军(辽宁省海洋水产科学研究院)

田 金(辽宁省海洋水产科学研究院)

王召会(辽宁省海洋水产科学研究院)

王志松(辽宁省海洋水产科学研究院)

杨 爽(辽宁省海洋水产科学研究院)

张玉凤(辽宁省海洋水产科学研究院)

赵海勃(辽宁省海洋水产科学研究院)

## 作者简介

王昆，女，1979年10月生，博士，研究员。《大连海洋大学学报》《海洋环境科学》《海洋工程杂志》《海洋技术学报》等杂志审稿人，辽宁省村级服务平台建设备案专家，2016年辽宁省第十批“百千万人才工程”千人层次人才。主要从事河流及海湾近岸水动力和海洋环境的数值模拟研究工作，包括海湾的环境容量模拟、海洋污染事故的鉴定与评估、海洋灾害预警



与风险评价及海洋环境保护与防治等研究。主持参与的与本书相关的项目有国家“十一五”科技支撑的重大海洋灾害预警专项、辽宁省自然科学基金项目、辽宁省博士启动基金项目、辽宁省海洋与渔业厅科研项目等20余项。获全国渔业生态监测优秀成果奖1项，海洋科学技术奖二等奖1项，辽宁省科技进步二等奖1项，辽宁省自然科学学术成果奖一等奖1项、二等奖1项、三等奖2项，大连市标准化资助奖励2项。作为第一作者曾在各级刊物发表主要学术论文20余篇(SCI/EI收录10篇)，主持、参与编写标准5项，参与编写专著2部，获得国家发明、实用新型专利7项。



艾丛芳，男，1980年9月生，博士，副教授。*Ocean Engineering*、*Coastal Engineering* 和 *Journal of Hydraulic Engineering* 等国际期刊审稿人。主要从事计算水力学、水动力学相关研究工作。主持或参与的科研项目包括国家重点研发子课题1项、国家重点研发专题项目1项、国家自然科学基金重点项目1项、国家自然科学基金面上项目1项、中央高校基本科研业务费专项资金项目科研专题1项及辽宁省重点实验室基础研究项目1项。作为第一作者发表学术论文20余篇(SCI收录10余篇)。

宋伦，男，1980年4月生，研究员，中国海洋发展研究会理事，辽宁省水产学会理事，中国生态学会海洋生态专业委员会委员，辽宁省应急管理专家，辽宁省海水健康养殖模式与病害防控技术创新团队岗位专家，辽宁省海洋水产科学研究院学术委员，辽宁省优秀科技工作者，辽宁省“百千万人才工程”千人层次人才，



大连市高层次人才创新支持计划“2015年大连市青年科技之星”。主要从事海洋生物生态与环境风险评价、海洋生态灾害研究等工作。获海洋科学技术奖二等奖1项、农业农村部渔业生态监测二等奖2项、辽宁省科技进步二等奖和三等奖各1项、辽宁海洋与渔业科技贡献奖一等奖1项，主持各级科研项目12项。以第一作者(或通讯作者)发表学术论文44篇(SCI/EI收录8篇)，主持编写标准7项，主编专著3部，获授权专利8项。

# 前 言

河流、海湾及近岸海域水流运动和物质输运问题的数值模拟一直是计算流体力学研究学者广泛关注的热点。水流运动问题水动力预测研究主要有 3 种方法：一是解析法，二是物理模型法，三是数值模拟法。解析法最为准确，但其仅能在比较理想的情况下使用，对于大部分的实际问题，很难用准确的解析式来进行表达，所以解析方法的应用范围相对局限；物理模型法发展早、技术成熟，但其从相似原理出发，试验场地面积大、费用高，试验周期长，其应用也受到一定的限制；与前两种方法相比，数值模拟法既没有严格的限制条件，也没有比尺要求，只要通过建立与实际问题相适应的偏微分方程组，对方程进行求解即可，比解析法应用范围广，与物理模型法相比具有费用低、试验周期短的优点。因此，本书采用数值模拟法，将实际问题中的非线性物理过程抽象成一定边界条件控制的水动力学方程组，即基于改进的时均化雷诺方程和标准  $k-\varepsilon$  紊流模型方程构建封闭模型方程组，利用水流具有自由表面、不可压缩等特点增加约束，建立一维、二维或三维的水动力数学控制模型。然后，对计算域进行网格划分，进而利用有限差分法 (finite difference method, 简称 FDM)、有限元法 (finite element method, 简称 FEM) 或有限体积法 (finite volume method, 简称 FVM) 进行离散求解，将非线性的偏微分方程组转化为线性代数方程组。最后，采用其符合的方程组特征数值迭代法进行求解。例如，三对角线性代数方程组以追赶法求解；五对角、七对角线性方程组采用共轭梯度法求解。在第二、第三和第四章后面部分均引入了具有解析解、实测值的实际算例，对模型进行验证、调参，并将精确、可靠的数值模型应用于工作中遇到的实际物理问题。本书的研究内容可为河流和近岸海域的水体水质保护及重大海洋灾害风险预警提供技术支撑，为有关部门制定科学有效的河道和近岸海域的生态环境保护管理机制与政策提供参考性建议。

本书是在辽宁省博士启动基金项目(20111071)“辽东湾海域多因素耦合影响水质预测预报模型研究”、辽宁省海洋与渔业厅科研项目(201419)“辽东湾海域冬季海冰期溢油风险预测模拟研究项目”、辽宁省自然科学基金项目(201710)“辽宁省海水养殖生态承载力与空间布局研究”等项目的研究基础上归纳总结相关研究成果，并借鉴和引用前人的部分研究成果系统集成的。

全书共分为六章。第一章为水动力学数值模型的发展，由王昆、艾丛芳、宋伦编著；第二章为一维水动力学模型及其应用，由匙争锐、艾丛芳编著；第三章为二维水动力模型及其应用，由王昆、匙争锐编著；第四章为三维水动力学模型

及其应用，由艾丛芳、王昆、匙争锐、姜恒志编著；第五章为水动力及物质输运数值模型的总结与展望，由王昆、刘明、邵泽伟、王召会、李爱、胡超魁编著；第六章为河流及近岸海域生态环境保护机制的建立，由吴金浩、李楠、刘桂英、张玉凤、宋广军、王志松编著。整书由王昆、艾丛芳、宋伦、杜静统稿、编校、完善而成。

本书从构思、撰写至成稿，历经整整 3 年，成稿后又经反复修改完善，倾注了编委的大量心血。在本书撰写过程中得到了大连理工大学金生教授和辽宁省海洋水产科学研究院王年斌研究员等专家学者的悉心指导和热情支持，在此表示衷心的感谢。

在本书撰写过程中，得到了辽宁省海洋与渔业厅、辽宁省海洋水产科学研究院、辽宁省海洋环境监测总站、大连理工大学等单位的大力支持，科学出版社为本书提出了宝贵的建设性意见，在此一并表示最诚挚的谢意。

作者在本书的科学性、系统性和实用性方面做了反复推导、多实例验证及悉心探讨，书中若有不足之处，敬请各位专家、学者给予谅解和指导。诚挚欢迎大家参与到河流和近岸海域水动力及水环境数值模拟的研究工作中，对数值模型进行不断地创新、充实与完善。

编著者

2018 年 6 月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 水动力学数值模型的发展</b> .....	1
第一节 模型理论概述.....	1
第二节 数值模型求解方法概述.....	2
一、网格生成技术.....	4
二、数值离散格式.....	5
三、源项的处理.....	7
第三节 三维水动力学数值模型研究现状及对流项的处理.....	9
一、三维水动力学数值模型研究现状.....	9
二、对流项的处理.....	11
参考文献.....	13
<b>第二章 一维水动力学模型及其应用</b> .....	15
第一节 控制方程.....	15
第二节 网格划分与离散格式.....	16
一、网格划分.....	16
二、离散格式.....	16
第三节 模型验证.....	21
一、静水流动问题.....	21
二、经典喉口混合流问题.....	22
三、干滩溃坝水流运动问题.....	25
四、水滴坍塌问题.....	25
第四节 模型应用.....	26
第五节 结论与分析.....	31
参考文献.....	31
<b>第三章 二维水动力学模型及其应用</b> .....	33
第一节 控制方程与边界条件.....	34
一、控制方程.....	34
二、边界条件处理.....	35
三、干湿动边界的处理.....	38

第二节 离散格式	40
一、有限体积法离散格式	40
二、界面数值通量的计算	41
三、源项的处理	42
四、高阶精度格式	46
第三节 模型验证	48
一、溃坝问题	49
二、超临界流倾斜水跃	58
三、大连旅顺口区附近海域水动力环境模拟	60
四、小凌河邻近海域水动力状况模拟	66
第四节 模型应用	71
一、新安江模型	71
二、英那河水库溃坝洪水研究	73
三、太平湾邻近海域工程对环境的影响问题	79
第五节 结论与分析	85
参考文献	85
<b>第四章 三维水动力学模型及其应用</b>	<b>88</b>
第一节 控制方程与边界条件	88
一、控制方程	88
二、边界条件	93
第二节 网格划分与离散格式	95
一、三维网格及变量定义	95
二、方程的离散格式	96
三、计算步骤与模型特征	108
第三节 模型验证	109
一、线性三维驻波运动问题	109
二、复合明渠流流动问题	111
三、规则的周期性入射波通过淹没潜堤的传播变形问题	112
四、连接丹麦和瑞典的厄勒海峡的潮流场模拟	114
第四节 模型应用	116
一、辽东湾海域水质预报	116
二、普兰店湾水体交换数值模拟	127
第五节 结论与分析	130
参考文献	131

---

第五章 水动力及物质输运数值模型的总结与展望.....	134
第一节 结论.....	134
第二节 展望.....	135
第六章 河道和近岸海域生态环境保护机制的建立.....	137

# 第一章 水动力学数值模型的发展

## 第一节 模型理论概述

流体流动现象大量存在于自然界及多种工程领域，在一些地形和边界复杂变化或特殊初值的流域内，往往会出现流态多变或产生间断，如溃坝、浅水涌潮、水跃等复杂的水流运动现象，所有这些流动过程都遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本物理定律。大多数情况下，水域宽广，水深与平面尺度相比较小，天然河流、河口和近岸海域的自由面水流运动均可以作为浅水流动问题来研究，浅水流动是地球表面上最常见的水流现象之一。符合以下条件的均匀流体的流动称为浅水流动。

(1) 有自由表面。

(2) 以重力为主要驱动力，以水流与固体边界之间及水流内部的摩阻力为主要耗散力，有时还存在水面气压场、风应力及地转柯氏力等的作用。

(3) 水平流速沿垂向近似均匀分布，不必考虑实际存在的对数或指数等形式的垂向流速分布。

(4) 水平运动尺度远远大于垂直运动尺度，水深方向上的物理量与平面上的量相比是小量，可以认为动量方程中水深方向上的所有加速度和应力项是微小量，忽略不计，动量方程中水深方向的方程蜕化为静水压强关系，水压力接近静压分布。

具有自由表面的浅水流动问题广泛存在于水利、海岸和环境等工程领域，在数学上均可以通过浅水方程的离散求解来获得人们需要的水力运动要素。虽然雷诺平均的纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes 方程，简称 NS 方程)足以用于计算浅水流动问题，但是受计算机条件及数值计算技术的限制，解决大尺度的实际工程问题还是颇费时间的。因此，在计算机性能并不完善的时期，基于浅水方程的数值模拟技术得到了长足的发展和广泛的应用，浅水流动数值模拟始于 20 世纪 50 年代，与人类的社会经济生活有着密切的联系。

浅水流动经历了从一维到二维再到三维的发展过程。最初，受计算机性能的制约，数值模型研究主要集中于一维、二维浅水模型。为了深入形象地对浅水流动问题进行模拟，逐渐涌现出了一些关于浅水流动的新型学科，这些学科可以统称为浅水动力学。浅水动力学历史悠久，其具体可分为理论浅水动力学、实验浅水动力学和计算浅水动力学。一维浅水方程即圣维南方程，是由圣维南(1797~

1886年)于1871年在《法国科学院汇刊》73卷的一篇论文中提出的,可作为近代浅水动力学奠基的里程碑。自那时起,这门学科长期处在力学理论分析、现场观测和室内水力学模型试验并举的局面,在实际工程问题时往往以物理和实际模型相结合的途径为主,配以简单的半经验性推理公式计算,但这些途径均有其自身的局限性。由于解析困难,理论分析只能处理十分简单的模型问题,物理模型法则受经费、时间、观测精度等的限制。其中,室内模型试验虽相对较经济、具有可重复性,但难以摆脱原型和模型之间不完全相似的困扰。鉴于以上几种方法的弊端,人们逐渐认识到了数值模型的重要性,进而凸显出计算浅水动力学这门学科在浅水计算中举足轻重的地位。20世纪50年代电子计算机的广泛应用,更给计算浅水动力学这门学科带来了广阔的前景与发展空间,它以数学和力学理论为基础建立数学模型,以物理模型提供的数据来率定、验证和完善数学模型,使其能够很好地重演和预测浅水流动。

目前已经进入21世纪的高科技时代,计算机的各方面配置有了大幅提高,对计算量的限制并没有那么苛刻了,同时随着人们对水流运动规律认识的不断深入,不仅要求了解流动要素沿平面的分布情况,还需要了解运动要素沿垂直水深方向的分布情况,这就需要借助于能给出详细模拟结果的三维模型。近年来自由面复杂水流运动问题的三维数值模拟逐渐成为计算流体界领域普遍研究的问题,其采用的控制方程大部分是基于流体流动原理的三维Navier-Stokes方程,随之也产生了此方程的多种数值离散格式。

可以从最基本的三维Navier-Stokes方程的角度出发来明确一下浅水方程的获得途径,其实浅水方程就是由三维Navier-Stokes方程在流体不可压缩和静水压强假设下沿水深方向积分平均得到的,三维Navier-Stokes方程是在连续介质力学范畴下流体力学的基本方程,经过静水压强假设就形成了控制方程中不含垂向动量方程(垂向动量方程简化为静水压强关系)的三维浅水方程。最初在做河口、海岸及近岸水流等自由面复杂水流三维模拟的时候,使用的大部分都是将三维Navier-Stokes方程简化后的三维浅水方程,原因是计算机计算条件达不到要求,而三维浅水方程具有便于数值离散求解、计算量小等优点,但凭着目前电子计算机的发展水平,这方面已构不成任何困难,直接用三维Navier-Stokes方程对自由面流动问题进行模拟的愿望得以实现,克服了三维浅水方程在处理短波高频问题时效果不太理想的局限性。

## 第二节 数值模型求解方法概述

由于浅水方程具有非线性的特性,一般情况下无法获得解析解,主要通过数值模拟法来求解。迄今为止,浅水方程的数值模拟技术已经趋于成熟,浅水流动

数值模拟中的无源项齐次浅水方程类似于气体动力学中的欧拉方程(Euler 方程),可直接移植空气动力学中的离散方法,并结合浅水流动的特殊性建立适合于模拟溃坝、涌潮等有间断存在的流动问题的数值模型。本书的模型控制方程是一维、二维浅水方程和三维 Navier-Stokes 方程,都是带源项的非齐次非线性的双曲型偏微分方程组,理论上是有真解(解析解)的,但由于所处理问题自身的复杂性,如计算域的几何形状和边界条件复杂等,导致很难获得方程的真解,即往往难以通过解析手段加以解决。因此,采用基于计算流体动力学(computational fluid dynamics, 简称 CFD)的数值模拟法进行求解是必不可少的有效途径,它不受物理模型和试验模型的限制,省钱省时,有较大的灵活性。只要模型方程固定,并给定河道的地形、糙率和初边值条件,就构成了独立的定解问题,可以通过各种不同的数值方法对控制方程进行离散求解。但是用数值方法求解不可能直接获得解在所有离散网格点上的信息,只能获得解在有限个离散网格点上的信息,再用其他手段,如插值方法,间接获得其他感兴趣的位置处的水力要素信息。因此,首先需要将在所有点上定义的偏微分方程用仅在有限点上定义的离散方程来逼近,即用离散量的方程来逼近连续量的方程,这也是 CFD 方法的主要思想,采用 CFD 方法对流体流动进行数值模拟,可以分为如下几个步骤。

(1) 建立反映工程问题或物理问题本质的数学模型。建立反映问题各个量之间关系的偏微分方程及相应的定解条件,这是数值模拟的出发点。没有正确完善的数学模型,数值模拟就毫无意义。流体的基本控制方程通常包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程及与这些方程相应的定解条件(初边值条件)。

(2) 首先,对计算域进行网格剖分,用网格线将连续的计算域划分为有限的离散点集,寻求高效率高准确度的计算方法,即建立针对控制方程的数值离散化方法,如有限差分法、有限元法、有限体积法等。将偏微分方程及其定解条件转化为网格节点上相应的代数方程组,即建立离散方程组,当然这里也包括边界条件的融入。其次,在计算机上求解离散方程组,获得有限个网格节点上的解,节点之间的近似解,一般认为光滑变化,可以应用插值方法确定,从而得到定解问题在整个计算域上的近似解。即用变量的离散分布近似解代替了定解问题精确解的连续数据,这种方法称为离散近似。可以预料,当网格节点很密时,离散方程的解趋近于相应偏微分方程的真解。最后,非齐次项处理是水流计算相对于气流计算而言所遇到的特殊问题,水流数值模拟实践表明,格式中非齐次项的处理对数值解精度有重要影响。如果简单地采用节点非齐次项的值常不能令人满意,会使格式的优点发挥不出来,浅水计算中非齐次项主要是指底坡源项和摩阻源项,为获得和谐、稳定、守恒的计算结果对源项的处理至关重要。这些是 CFD 的核心内容。

(3) 编制程序和进行计算。这部分工作包括初始条件与边界条件的输入、控制

参数的设定、程序的调试及运行等，是整个工作中花费时间最多的部分。由于求解的问题比较复杂，理论上数值求解方法也不是绝对完善的，因此首先需要通过解析解或实测值验证模型的准确性和适用性，然后才能确定模型对实际工程问题是否适用。

(4) 计算结果后处理及动画演示。当计算工作完成后，流场的图像显示是计算水动力学工作中不可缺少的部分。随着人们研究的流动问题日益深入和复杂，计算结果也更加纷繁浩瀚，难以把握，只有把数值计算的结果以各式各样的图像和曲线形式输出，即合理利用有效的可视化技术，才能有效判断结果的正确性，进而得出结论和获取需要的水力信息。所谓计算水动力学的可视化技术是利用计算机图像显示技术将数值模拟的结果展现出来，在计算机上重演和预报特定条件下的水力运动现象。在设计中，各种工程方案中水力运动现象的可视化可使工程师直接了解到设计的效果和存在的问题。随着计算机图像显示系统和相应软件的发展，流场数值的图像显示朝着快速及时、三维扫描、形象逼真等方向发展，提高了对数值结果的分析效率，为研究、设计和决策提供了方便。同时利用录放设备存储，显示动态过程，可以使数值模拟充分发挥数值试验的作用。

## 一、网格生成技术

网格是离散的基础，在对控制方程进行离散之前必须要先对计算域进行网格划分，网格节点是离散化物理量的存储位置，网格在离散过程中起着关键的作用。网格的形式和密度等对数值计算结果有着重要的影响。不同的离散方法对网格的要求和使用方式不一样，表面上看起来一样的网格布局，当采用不同的离散化方法时，网格单元和节点具有不同的含义和作用。例如，有限元法是将物理量存储在真实的网格节点上，将单元看作由周围节点及形函数构成的统一体；而有限体积法可以将物理量存储在网格单元的中心上，将单元看作围绕中心点的控制体积，这种方式称为 CC 方式的有限体积离散；在真实网格节点定义和存储物理量，而在节点周围构造控制体积，这种方式称为 CV 方式的有限体积离散。网格生成技术是计算流体动力学和计算水动力学成功实现数值模拟的关键前提之一，网格质量的好坏直接影响计算结果的收敛及精度。网格生成的实质是物理求解域与计算求解域的转换，在求解具有复杂几何形状的流场时，适当的网格生成是一个十分关键的问题。网格可分为结构化网格和非结构化网格两大类。节点排列有序，即给出一个节点的编号后，立即可以得出其相邻节点的编号，所有内部节点周围的网格数目相同，这种网格称为结构化网格(structured grid)。结构化网格是一种传统的网格形式，具有实现容易、生成速度快、网格质量好、数据结构简单的优点，网格自身利用了计算域几何体的规则形状。对于复杂的计算域，需要将网格划分细密一些，否则会导致计算域与实际区域形状有较大的几何差别，降低计算精度；

但是对于某些如波浪运动的问题,计算域较为简单,为了获得高精度的数值结果,采用结构化网格也是非常必要的。非结构化网格可以方便地剖分任意形状的计算域,在这种网格系统中节点的编号命名没有一定规则,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,与结构化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,非结构化网格表现出不规则无序的特点。这种网格虽然生成过程比较复杂,但却有着极大的适应性,尤其对具有复杂边界和地形的流场计算问题具有适应性好、局部加密灵活和便于自适应的优点,能很好地模拟自然边界及复杂的水下地形,提高边界模拟精度。非结构化网格在河流和近海区域的流动模拟计算中得到了广泛的应用,其生成方法一直以来也是计算流体动力学研究的一个热点。二维非结构化网格的生成技术已经趋于成熟,如 Delaunay 三角剖分法(Wasson, 1981)、Rebay(1993)的非结构化网格生成算法等,可以通过专门的程序或软件(Ansys, Gambit)的前处理功能来实现。本书采用面向对象的 C# 语言来编程实现,网格的输出文件便于控制,可以直接按照数值计算程序需要的网格数据结构进行输出,为数值模型的编程实现提供了方便。Delaunay 三角剖分法的优点是能得到尽可能等边的高质量三角形单元,比非结构化网格生成算法生成效率高。但由于节点的生成和连接是彼此孤立的,在连点过程中有可能破坏原有的边界,不能保证边界的完整性,因此必须在连点的过程中对边界实行保护,或在连点后对破坏的边界予以修复。非结构化网格生成之后还要进行一定的后处理,如局部加密和减疏。非结构化网格一旦生成,初期网格的疏密程度已经确定,在我们的实际计算和数值模拟过程中,由于随时间的推移,原来的网格疏密分布会逐渐不适应问题的特征,因而需要在局部插入内节点,即对原来的网格进行局部加密,或者为了节省不必要的计算内存,需要剔除某些节点,即局部减疏网格,这就是非结构化网格的自适应技术问题,在今后一些问题的研究中,可以对该方面进行详细的研究。总之,网格生成是流场数值模拟计算的一项很重要的任务,有时工作量甚至会占总工作量的 80%~90%。

## 二、数值离散格式

由于变量在节点或单元之间的分布假设及推导离散方程的方法不同,产生了有限差分法、有限元法和有限体积法等不同类型的离散化方法,这些方法应用于求解浅水方程各有所长,各具其适用性。

有限差分法(finite difference method,简称 FDM)是数值方法中最经典的方法。在计算流体力学中,该数值方法是最早用于求解浅水方程的数值方法。首先将求解计算域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域,然后将偏微分方程中的导数项用差商项代替,推导出含离散点上有限个未知量的差分方程组,该方程组的解就是偏微分方程定解问题的数值近似解,这是一种直接将偏微分问

题变为代数问题的近似数值解法。FDM 较多地用于求解双曲型和抛物型偏微分方程，其优点是发展较早，比较成熟，数学概念清晰、简单，便于编制计算程序。计算精度随差分格式的不同而不同，误差估计、收敛性和稳定性分析的理论已趋于完善和成熟，是应用较多且较为成功的一种离散方法。然而，该方法的局限性在于对计算域内复杂几何边界的处理通常需要进行阶梯化概化，致使计算边界难以精确而光滑地模拟实际边界，从而给计算精度带来较大的影响，尤其是针对椭圆型方程问题不如有限元法或有限体积法方便。水鸿寿(1998)在《一维流体力学差分方法》中对 FDM 做出了详尽而广泛的阐述。

有限元法也称有限单元法(FEM)，是广泛应用于各界的一种数值离散方法。该方法将一个连续的求解域任意分成适当形状的许多微小单元，并于各小单元分片构造插值函数，然后根据极值原理(变分或加权余量法)将问题的控制方程转化为所有单元上的有限元方程，把总体的极值作为各单元极值之和，即将局部单元总体合成，形成嵌入了指定边界条件的代数方程组，用 Gauss 消去法、Jacobi 迭代法、G-S 迭代法或共轭梯度法求解该线性代数方程组即可获得各节点上待求的函数值。FEM 的基础是极值原理和划分插值，它吸取了有限差分法中离散处理的内核，又采用了变分计算中选择逼近函数并对区域进行积分的合理方法，这是这两类方法相互结合、取长补短发展的结果。FEM 具有很广泛的适应性，特别适应于几何及物理条件比较复杂的问题，而且便于程序的标准化，尤其是对椭圆型方程问题有更好的适用性。特别是在固体力学分析中占绝对优势，几乎所有固体力学分析软件全部采用 FEM。但是，因其求解速度较有限差分法和有限体积法慢，编程比较复杂，存储量大，计算量大，只在二维计算中应用较多一些，在商用 CFD 软件中应用并不普遍。

有限体积法(FVM)是 20 世纪 70 年代由 Patankar 和 Spalding(1980)提出和发展起来的一种有效数值方法，是近年来发展非常迅速的一种离散方法。在过去的十余年中，该数值方法在计算流体力学的应用中得到了飞速的进步，新的数值处理方法不断出现，原有的方法也得到进一步充实和完善。诸多学者的理论研究和实践计算表明，在应用于流动问题数值计算的众多方法中，FVM 由于具有概念简明、实施过程简便、数值特性优良等特性，最大限度地保持了 FDM 的简单性，FVM 在导出离散方程过程中，需要对界面上的被求函数本身及其导数的分布作出某种形式的假定，这类似于 FEM，同时兼有 FEM 的精确性。FVM 还具有积分守恒性和易于处理边界控制体的特点，即 FVM 在一定程度上吸收了 FDM 与 FEM 的长处，并克服了其缺点。目前 FVM 在二维和三维数值计算中得到了广泛而成功的应用。FVM 从控制体的积分形式出发，对求解域的剖分同 FEM 一样具有单元特征，能适应复杂的求解区域，离散方法具有 FDM 的灵活性，并对间断解的适应性强，目前在 CFD 领域得到了广泛的应用，大多数商用 CFD 软件都采用这