



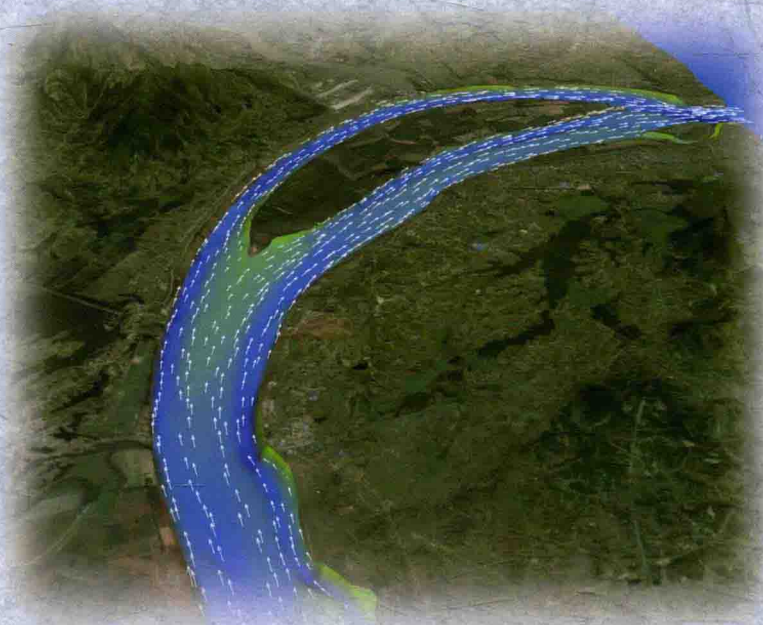
交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

张华庆 张明进 康苏海 著

河流水流泥沙运动

Numerical Simulation on
River Flow and Sediment Motion

数值模拟技术



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



配CD-ROM

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

Numerical Simulation on River Flow and Sediment Motion

河流水流泥沙运动数值模拟技术

张华庆 张明进 康苏海 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

河流水流泥沙运动数学模型是模拟河流在自然情况下或修建整治工程后河床演变过程的重要研究手段。本书系统介绍了交通运输部天津水运工程科学研究所成熟的数模软件 TK-2DC 的基本原理、数值方法、前后处理程序等,介绍了三维水流泥沙数学模型的基本原理、数值方法及典型的工程应用实例,并给出了 TK-2DC 计算程序核心代码。全书内容注重理论联系实际,包含作者及所在单位多年来在水沙数学模型研究中大量的研究成果。

本书可供水利、航运等部门的科研及设计人员阅读,也可供大专院校相关专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

河流水流泥沙运动数值模拟技术 / 张华庆, 张明进,
康苏海著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司,
2015. 8

(交通运输行业高层次人才培养项目著作书系)

ISBN 978-7-114-12347-4

I. ①河… II. ①张… ②张… ③康… III. ①河流泥
沙—泥沙运动—数值模拟—研究 IV. ①TV143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 132937 号

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系

书 名: 河流水流泥沙运动数值模拟技术

著 者: 张华庆 张明进 康苏海

责任编辑: 周 宇 张 森

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 9

字 数: 210 千

版 次: 2015 年 8 月 第 1 版

印 次: 2015 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12347-4

定 价: 35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

交通运输行业高层次人才培养项目著作书系
编审委员会

主任：杨传堂

副主任：戴东昌 周海涛 徐光 王金付
陈瑞生(常务)

委员：李良生 李作敏 韩敏 王先进
石宝林 关昌余 沙爱民 吴澎
杨万枫 张劲泉 张喜刚 郑健龙
唐伯明 蒋树屏 潘新祥 魏庆朝
孙海

书系前言

Preface of Series

进入21世纪以来,党中央、国务院高度重视人才工作,提出人才资源是第一资源的战略思想,先后两次召开全国人才工作会议,围绕人才强国战略实施做出一系列重大决策部署。党的十八大着眼于全面建成小康社会的奋斗目标,提出要进一步深入实践人才强国战略,加快推动我国由人才大国迈向人才强国,将人才工作作为“全面提高党的建设科学化水平”八项任务之一。十八届三中全会强调指出,全面深化改革,需要有力的组织保证和人才支撑。要建立集聚人才体制机制,择天下英才而用之。这些都充分体现了党中央、国务院对人才工作的高度重视,为人才成长发展进一步营造良好的政策和舆论环境,极大激发了人才干事创业的积极性。

国以才立,业以才兴。面对风云变幻的国际形势,综合国力竞争日趋激烈,我国在全面建成小康社会的历史进程中机遇和挑战并存,人才作为第一资源的特征和作用日益凸显。只有深入实施人才强国战略,确立国家人才竞争优势,充分发挥人才对国民经济和社会发展的重要支撑作用,才能在国际形势、国内条件深刻变化中赢得主动、赢得优势、赢得未来。

近年来,交通运输行业深入贯彻落实人才强交战略,围绕建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的战略部署和中心任务,加大人才发展体制机制改革与政策创新力度,行业人才工作不断取得新进展,逐步形成了一支专业结构日趋合理、整体素质基本适应的人才队伍,为交通运输事业全面、协调、可持续发展提供了有力的人才保障与智力支持。

“交通青年科技英才”是交通运输行业优秀青年科技人才的代表群体,培养选拔“交通青年科技英才”是交通运输行业实施人才强交战略的“品牌工程”之一,1999年至今已培养选拔283人。他们活跃在科研、生产、教学一线,奋发有为、锐意进取,取得了突出业绩,创造了显著效益,形成了一系列较高水平的科研成果。为加大行业高层次人才培养力度,“十二五”期间,交通运输部设立人才培养专项经费,重点资助包含“交通青年科技英才”在内的高层次人才。

人民交通出版社以服务交通运输行业改革创新、促进交通科技成果推广应用、支持交通行业高端人才发展为目的,配合人才强交战略设立“交通运输行业



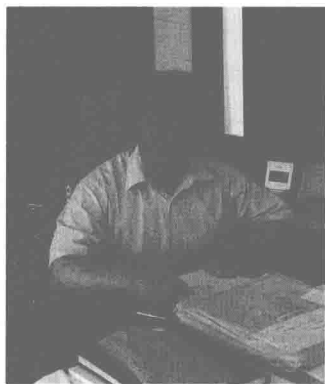
高层次人才培养项目著作书系”(以下简称“著作书系”)。该书系面向包括“交通青年科技英才”在内的交通运输行业高层次人才,旨在为行业人才培养搭建一个学术交流、成果展示和技术积累的平台,是推动加强交通运输人才队伍建设的重要载体,在推动科技创新、技术交流、加强高层次人才培养力度等方面均将起到积极作用。凡在“交通青年科技英才培养项目”和“交通运输部新世纪十百千人才培养项目”申请中获得资助的出版项目,均可列入“著作书系”。对于虽然未列入培养项目,但同样能代表行业水平的著作,经申请、评审后,也可酌情纳入“著作书系”。

高层次人才是创新驱动的核心要素,创新驱动是推动科学发展的不懈动力。希望“著作书系”能够充分发挥服务行业、服务社会、服务国家的积极作用,助力科技创新步伐,促进行业高层次人才特别是中青年人才健康快速成长,为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通做出不懈努力和突出贡献。

交通运输行业高层次人才培养项目
著作书系编审委员会
2014年3月

作者简介

Author Introduction



张华庆,交通运输部天津水运工程科学研究院副院长兼总工程师,主要从事港口及航道工程水流泥沙运动模拟研究。先后主持了“八五”攻关子课题“二维泥沙模型的改进”、省部级重大科技项目十多项和多项大中型水运工程关键技术研究,取得具有国际先进水平的科研成果8项,获省部级科技进步一等奖一项和二等奖两项;在《水利学报》《水动力学研究与进展》等刊物上以第一作者署名发表的研究论文三十多篇。现为国务院政府特殊津贴专家,“港口水工建筑技术国家工程实验室”主任,兼交通运输部“水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室”主任,交通运输部专家委员会委员,也是交通部新世纪“十百千”一层次人才,并于1998年、2001年和2004年分别获天津市“第五届青年科技奖”和交通运输部“交通青年科技英才”和天津市“港口航道泥沙授衔专家”等称号。

前 言

Foreword

目前国内外数学模型发展很快,采用数学模型研究河口海岸及大江大河港口航道工程中的水流和泥沙问题越来越普遍,对于复杂泥沙运动计算经验也越来越多,如沿海大型港口建设、长江口深水航道及长江中游航道整治等工程都运用数学模型进行了研究,这些实际工程问题的解决推动了数学模型技术进步。但就数值模拟技术水平和能力而言,河流水流泥沙模型不及河口海岸,在河口海岸模型方面,国内的交通运输部天津水运工程科学研究院已推出海岸河口多功能“五场”品牌化二维数学模型软件包 TK-2D;国外成熟商业软件有丹麦 MIKE21、美国 SMS、POM 等,而河流数学模型仍处于“百家争鸣”阶段,而且国内外基本处于同一水平,现有模型不具有通用性和普遍适用性。

河流水流泥沙模型发展相对缓慢,主要原因有以下几个方面:①研究区间较长,一般为数十公里,甚至达百公里以上,而河道平面形态弯曲多变、河床起伏很大,计算网格对复杂岸边界、河床和工程布置的适应性要求较高,存在网格适应性和节点多的困难;②河流在平面形态和地形上变化剧烈,网格自动生成技术困难;③研究系列较长,河床变形模拟时段通常以年计,存在计算量大的困难;④三维模型研究难度大,存在自由表面和底部临底含沙量边界条件给定的困难等。

鉴于此,交通运输部天津水运工程科学研究院开展了“河流水流泥沙运动数值模拟技术”研究工作,在河道二维水流泥沙数值模拟方面,建立了适应模拟内河河流的二维水沙数学模型通用化软件,并将之命名为 TK-2DC,其中字母“C”是取英文“Curvilinear Model”的首字母,表示正交曲线网格模型的意思。该软件具有完全的源程序代码,完全具有自主知识产权,是继 TK-2D 后,交通运输部天津水运工程科学研究院推出的又一自主品牌行业软件;在三维水沙数值模拟方面,开发了模拟内河水流泥沙的三维数模程序模块,该模块能较好地模拟内河水流泥沙的运动,在模型的数值离散格式、自由表面处理及含沙量的给定方面均做出了探索性的研究,模型本身具有一定的通用性与先进性。

本书共分 6 章:第 1 章介绍了河流正交曲线网格生成方法、二维及三维水流泥沙模拟现状、国内外水力学数学模型后处理研究现状;第 2 章介绍了复杂河段

计算网格自动生成技术,内容包括网格生成原理、正交曲线网格生成过程、网格特性、网格应用;第3章介绍了河流平面二维水沙数学模型软件化,内容包括TK-2DC数学模型原理、数学模型软件化、TK-2DC应用及扩展性研究。第4章介绍了三维水流泥沙数学模型,内容包括模型基本原理、边界条件、模型验证及工程实例应用。第5章介绍了模型后处理技术,包括二维标量场可视化、二维矢量场可视化、三维流场显示、集成二维和三维后处理模块及工程应用等内容。第6章对河流水流泥沙数值模拟前处理和二、三维数学模型软件计算研究及后处理进行总结,并提出展望。

由于水流泥沙运动的复杂性,以及现有泥沙理论不成熟性,许多问题均处于探索发展过程中,此书中难免有不妥之处,希望读者予以批评指正。

作者
2015年4月



目 录

Contents

前言	1
第1章 绪论	1
1.1 河流复杂河段计算网格生成	1
1.2 河道二维水沙数模软件化	2
1.3 河道三维水沙数模	2
1.4 数学模型后处理技术	4
第2章 河流复杂河段计算网格自动生成技术	6
2.1 网格生成原理	6
2.2 正交曲线网格的生成	7
2.3 网格特性	12
2.4 网格应用	15
第3章 河流平面二维水流泥沙数学模型软件化研究	16
3.1 TK-2DC 数学模型原理	16
3.2 TK-2DC 数学模型软件化	22
3.3 TK-2DC 应用	28
3.4 扩展性研究	28
第4章 三维水沙数学模型开发研究	30
4.1 模型基本原理	30
4.2 泥沙底部边界条件及比较	37
4.3 三维模型的检验	42
4.4 长江中游牯牛沙水道水流三维数值模拟	58
第5章 数学模型后处理技术研究	64
5.1 二维标量场可视化	64
5.2 二维矢量场可视化	68
5.3 三维流场可视化	70
5.4 工程应用	80
第6章 结论与展望	86
6.1 结论	86
6.2 展望	87

附录 I TK-2DC 软件源代码(FORTRAN90 程序)及部分变量说明	88
附录 II 应用举例	119
索引	125
参考文献	127

第1章 绪论

1.1 河流复杂河段计算网格生成^[1-13]

正交曲线网格以其良好的贴体性及较高成的计算精度而在水流泥沙数值模拟中得到广泛的应用。目前常用的生成网格的坐标系大致可分为两类:一类是代数坐标系(ACS),即直接应用已知的代数方程,如折线、二阶曲线等,网格生成较方便,但贴体性差、人为因素较大,仅适用于规则边界问题,对于实际流场的计算,有其不适之处;另一类是微分坐标系(DCS),即通过求解特定的微分方程来生成坐标系,其坐标生成较前类复杂,可以密切贴合边界,较合理地分配网格,在某些情况下能做到正交。不仅能简化工程问题的控制方程,还可以减少误差来源。

在通过求解椭圆形偏微分方程组来生成正交曲线坐标系的常用方法中,最为典型的方法是 Thompson 提出的求解带“合并”或“聚集”控制函数(packing function) P 、 Q 的泊松方程的方法,即 Thompson 方法。使用该方法,可通过构造不同的 P 、 Q 函数来调节网格线的疏密程度,但该方法也有不足之处:①物理坐标系中网格点的位置不能预先给定,而且 P 、 Q 函数中可调参数太多,当生成网格不理想而需改善网格时,很难确定应调节的参数;②网格疏密程度的调节是以一定数量的等 ξ 、 η 线为中心的,对于大面积水域,局部加密不够灵活;③如果在计算域某边界指定位置布置网格或布置按某种规律变换的网格,则采用该法就难以实现。

在贴体网格自动生成软件化方面,国外相关研究要强于国内。国外目前已有多个商业软件可以实现贴体网格的自动生成,其中包括荷兰的 Delft3D 软件、丹麦的 Mike21 软件等。在可操作性上,这些软件在贴体网格的生成方面均做到了界面化的操作,具有很好的人机对话界面;在接口的兼容性方面,上述软件均未做到与 CAD 或 GIS 的无缝接口。

国内对贴体网格生成研究也有一定的成果,但其成果大多为程序代码应用方面,目前尚没有可视化界面形式的贴体网格自动生成软件。正交曲线网格计算最常用的两种方法分别为:代数网格生成、微分方程网格生成。不同形状的物理区域可以采用不同或相同的方法,但至少应该满足:物理区域上的网格节点与计算区域上的网格节点一一对应;网格疏密便于控制;网格线尽可能正交。实践表明,对于河道中有多个小岛或复杂的海域而言,单一一种方法不能简单快速地完成网格计算,而简单快速高质是构建简单易用正交曲线网格计算软件的基础。

目前,在工程测量、测绘等方面,CAD 软件与 GIS 数据均得到了广泛的应用,水运工程数值计算工作迫切需要能与之相适应、相结合的网络自动生成软件。

目前国内水运工程行业急需具有独立知识产权的正交曲线网格自动生成软件,这也是本书要解决的问题之一。同时,工程研究实践要求新开发的正交曲线网格生成软件具有操作简单、形成快速和质量优良等特性,且能够与一些通用软件相兼容的特点。

1.2 河道二维水沙数模软件化^[10-12,14-19]

在河道水动力及泥沙冲淤模拟领域,目前国内没有一套成熟的商业软件,国内该领域的学者大都致力于计算格式及泥沙模拟手段、经验公式的研究,模型前处理、后处理大都借助于已有的专业软件如 CAD、Grapher、Surfer、Tecplot 等来完成,在模拟技术软件化方面没有足够的重视或投入力度不够,所以没有形成集前后处理于一体的河道水动力及泥沙冲淤模拟软件。

国外在该领域尤其是水动力数值模拟方面有几家较为成功的软件产品,包括丹麦 Mike21C、荷兰 Delft3D、美国 SMS,它们具有共同的特点,即对水流模拟较好、都具有相应的对模拟结果数据的后处理模块,可以较为灵活地表现计算结果。但由于这些软件开发时间较早,受当时数值技术限制,计算格式目前显得较为落后,尤其是泥沙问题的复杂性,没有一家软件可以很好地模拟河道泥沙冲淤,使得其应用受到限制。

交通运输部天津水运工程科学研究所长期致力于河道泥沙问题研究,科研人员通过多年实践与改进,研究开发了适应河道泥沙问题研究的数学模型,能够很好地模拟河道水流和泥沙冲淤,具有十分理想的模拟效果,而所欠缺的是模型前处理(网格生成)和对模拟结果数据的后处理没有独立的相适应的软件模块。改造现有河道数值模拟软件、开发相应的前后处理模块,形成集前处理、中间求解、后处理于一体的河道数值模拟软件 TK-2DC 是打破外国行业软件垄断、提高我国河道水动力及泥沙模拟技术的当务之急。

1.3 河道三维水沙数模

自 Leendertse^[20]开创三维水流模型以来,国外众多的学者发展了大量的浅水流动和输运三维数学模型,并逐渐完善形成商业性计算软件。比较有代表性的有美国普林斯顿大学的 POM 模型^[21]、美国陆军工程兵团的 CH3D 系列模型^[22]和荷兰 Delft 水力学实验室的 Delft 3D 模型^[23]。国内一些学者在这方面也做了大量的工作^[24-26],文献[27-29]评述了国内外水流数值模拟研究的进展情况,其中较大篇幅涉及三维模型。同国外相比,国内三维模型存在着程序、模块分散,缺少权威性等优点。

三维水流和泥沙输运的模拟研究中,其主要的发展体现在垂向空间离散坐标系的选择、泥沙近底边界条件的处理、自由表面的跟踪计算、紊流封闭问题和数值计算方法五个方面。

(1) σ 坐标变换

在三维数值模型中,模型垂向空间的离散大多数均在笛卡儿坐标系或 σ 坐标系下进行,并在此基础上进行改进提高^[20-31]。

浅水流动和输运三维数学模型垂向空间的离散中,不规则的床面地形在笛卡儿坐标系下可以对床面做阶梯化近似处理,但这样会使计算精度降低。此外,笛卡儿坐标下常采取垂向固定分层的做法,这种网格系统对高剪切应力的浅水区的分辨率不高,且在给定底边界和水面边界条件时会遇到很大困难。

为克服笛卡儿坐标的不足,浅水流动和输运三维数学模型多采用 σ 坐标变换。这样数值离散计算域在垂向可以分为相同的层数,带来了网格剖分和数值离散的方便。同时,在 σ 坐标下可以精确地给定床面和水面的边界条件,而在笛卡儿坐标下则几乎无法做到这一点。

(2) 泥沙近底边界条件

床面附近泥沙交换现象极其复杂,泥沙交换机理至今仍不十分清楚,因此即便是近底边界条件的提法也不尽相同,韩其为^[32]将其归纳为六类并进行了分析和对比。周建军^[33]则认为:在冲刷条件下应使用浓度型边界条件,淤积时应使用梯度型边界条件。

相应于 Dirichlet、Neumann 和混合边界条件,泥沙床面边界条件可分为浓度型、梯度型和通量型。由于沉降通量可以由泥沙的有效沉降速度和当地含沙量确定,该参数的计算无不强烈地依赖于各种经验或半经验方法。曹志先基于湍流猝发作用构造了床面泥沙上扬通量的理论模式,并在此基础上导出了平衡近底含沙浓度^[34],然而现有的床面泥沙上扬通量及平衡近底含沙浓度公式的验证仅局限于有限的水槽试验资料,其可靠性还有待于进一步的检验。距离床面的参考高度 a 的计算方法也是纯经验性的,大致可归纳为三类^[32-34]。一是认为 a 应取数倍的床沙粒径, Einstein 假定 a 在各种水流条件下,其值均为床沙粒径的两倍; Engelund 取 $a = d$;二是建立 a 与沙波高度或床面粗糙度之间的关系,譬如 Van Rijn 定义 a 为沙波高度的一半或者等于床面的糙度,且在任何情况下小于 0.01 倍的水深;三是建立与水深的联系,如 Garcia 取 0.05 倍的水深。不难看出,这些经验方法会造成 a 值差别很大。方法三中的 a 只是水深的函数,当水深较大而泥沙较细时可能会产生较大的误差,方法一的物理概念似乎更加直观,且比方法二使用方便。

(3) 自由表面的计算

现有的计算自由表面的方法主要有:①刚盖假定;②水位函数法;③MAC 法^[35];④Lagrangian 与 ALE 法^[36];⑤VOF 法^[37]五种。这些方法均各有优缺点。

在物理海洋学中,直接由垂直积分后的方程组(即二维的垂向积分方程组)来计算自由表面,再将计算后的自由表面赋给三维计算模块。在数值计算中,当将它们分开处理时,称前者为外模式,后者为内模式,而内、外模时间上分别积分的方法称为模式分离法。这种处理方式快速稳定,但对边界要求较高,一般数值离散格式容易计算发散。

(4) 紊流封闭问题

现有的紊流计算方法主要是基于涡黏性假设,涡黏性概念将紊流封闭问题转化为如何确定涡黏性在流场中的分布问题。有多种方法可用于计算涡黏性,然而,对于某一具体问题,选用何种程度的紊流封闭模型尚无统一的标准。以紊动输运项在基本方程中的相对重要性作为选择的物理依据,且综合考虑精度、效率及复杂性等实际因素的做法是合理的^[38-40]。对于很多大范围的浅水流动问题,动量方程的惯性项主要由压力梯度项或浮力项平衡,是否应用精细的紊流模型就显得并不重要。

当流动比较复杂或者需要考虑物质输运时,使用精细的紊流模型就显得非常必要。 $\kappa-\varepsilon$ 双方程模型是最简便的精细紊流模型,也是目前应用最广泛的紊流模型,并在相当广泛的范围内得到了充分的检验,证明是实用和有效的,很多三维流动和输运模型也都使用了该模型^[24,30]。然而,标准的 $\kappa-\varepsilon$ 模型假定涡黏性系数是各向同性的标量,即水平涡黏性与垂向涡黏性相等,而浅水流动通常表现出垂向紊动尺度小于水深和水平紊动尺度远大于水深的紊动结构,这种双重紊动结构以及强烈的各向异性导致水平和垂向扩散系数存在较大差异,因此标准的单尺度(single length scale) $\kappa-\varepsilon$ 模型将低估水平涡黏性系数。应力—通量方程模型、应力—代数模型以及两尺度(two-scale) $\kappa-\varepsilon$ 模型^[41]克服了单尺度 $\kappa-\varepsilon$ 模型的这一缺陷。

但由于计算烦琐,较少应用到大尺度水体的计算中,而且基于雷诺平均的紊流模型无法模拟水平大尺度漩涡的动态演化。

(5) 数值计算方法

浅水流动及输运三维数值计算方法在过去 20 多年的时间里取得了巨大的进展。在空间离散上,有差分法、有限元法和有限体积法;在适应物理域的复杂几何形状上,有贴体坐标变换及 σ 坐标变换;在时间积分上,有显式、隐式、半隐格式以及时间分步;在求解技术上,有 ADI 法、迭代法、多重网格法以及并行计算技术;在干湿、露滩动边界的处理上,有固定网格和动态网格技术;在悬沙输运重力沉降项的处理上,有源项化和对流化的做法;在提高精度上,有欧拉—拉格朗日法和差分有限元杂交法等。

总之,浅水流动和输运三维数学模型的发展离不开基本理论的发展和完善。紊流对物质的输移、特别是泥沙的起动和落淤起着决定性的作用,但由于问题的复杂性,目前对紊流的认识尚不十分清楚;悬移质泥沙的输移,其大部分成熟的理论还是建立在一维恒定均匀流的基础上,像糙率、挟沙力、恢复饱和系数等。悬沙等物质的运动和输移规律都是非常模糊而又亟待解决的问题。因此应加大对紊流运动和悬沙等物质输移规律的理论 and 试验研究。

同二维数值计算相比,浅水流动和输运三维数学模型对计算格式和求解方法要求更加苛刻。三维模型的结构复杂,计算工作量剧增,要求模型必须有较高的效率,而时间步长既要受表面浅水重力波快速传播的限制又要受垂向扩散项的制约,如何克服这一矛盾就显得非常重要。现有数值计算方法无论是模式分裂,还是只对水位梯度和垂向扩散项隐式积分的半隐格式,都很好地符合了浅水流动的物理本质。使模型具有较强的地形适应能力的贴体坐标和 σ 坐标变换技术已得到了相当广泛的应用,但是基于非结构化网格的离散方法和在真实物理域中求解基本方程的做法是一个重要的发展方向。为减轻三维模型所要求的大量的人工工作和减少差错,网格的自动生成、初边值条件的自动给定以及数据的图形化处理就显得尤为重要,与 CAD、GIS 等技术相结合是模型发展的一个重要趋势。

受计算机容量和速度的限制,大尺度浅水流动和输运问题的动态网格计算技术尚难实用,固定网格的具有较好守恒性的动边界处理技术需要进一步的研究。建立能够分辨长波与短波等不同空间尺度共存问题的合理的计算模型,以及开发基于并行计算的高效高精度的流动和输运模型是今后有待努力的方向。

1.4 数学模型后处理技术^[14-18,42-45]

计算机可视化研究在发达国家十分活跃,属于高新技术领域,具有极高的技术保密性,其技术水平逐步从后处理向实时跟踪和交互控制发展,并已经将超级计算机、光纤高速网、高性能图形工作站及虚拟现实四者结合起来,体现出这一领域的技术发展方向。

国内可视化研究始于 20 世纪 90 年代初,研究单位包括清华大学计算机系、中科院计算所、中科院软件所、浙江大学等,他们在气象、物探、空气动力学、核技术等领域进行了研究,近年来又开始在医疗领域得到应用,一批新开发软件如三维气象动态图像系统、石油地质数据可视化工具、颅脑断层图像三维重构及可视化等得到应用。

由于高端可视化软件(如 Tecplot 三维可视化图形引擎)属于保密性较强的技术成果,所以西方发达国家对中国等一些国家禁售,所以大力发展我国在该领域的技术,尽快取得一批

较好的成果具有十分重要的意义。

对于水动力数学模型数据的可视化,国外基本是配套其相应的模型计算机软件而使用的,如 Mike21、Delft3D 等,使用这些软件的后处理程序具有极大的局限性,因为它们没有通用的扩展接口供使用,同时它们各自的表现形式具有局限性,都受制于它们已有的可视化表现形式。

在流体数学模型后处理研究领域, Tecplot 公司处于业界国际领先地位,其产品 Tecplot Edge 可以为用户提供开发平台,在这个平台上,用户可以针对自己的特殊需求快速开发完成适合特殊需要的水流模拟结果展示软件。但是该软件被美国列为对华禁售产品,使得想通过已有平台较为容易地开发水流可视化程序的方式成为不可能。

从底层开发开始,建立自己独立的可视化系统体系是我们必须坚持的可视化软件开发道路。目前我国已有或正在进行的同类工作基本是这样进行的。

第2章 河流复杂河段计算网格 自动生成技术

河流复杂河段计算网格自动生成技术作为 TK-2DC 软件的前处理模块,提供网格、地形信息。

TK-2DC 前处理模块网格生成技术采用主流编程软件——Delphi 提供的 RAD (Rapid Application Development) 环境,建立高效率的 Windows 窗口应用程序,实现图形生成、修改、删除等编辑功能。

下面介绍贴体正交曲线网格自动生成原理、网格生成过程及在工程中的应用情况。

2.1 网格生成原理

正交曲线网格的生成,实际上就是在离散方程基础上的一个边值问题。一般的网格生成中,边界一般是以函数的形式给出,边界给定并不直观,网格生成效果直到最后输出才可以确定,然后再重新调整边界,优化网格。边界应用 GIS 已有的优点,对已给出的电子地图,只需选取要计算的区域,用鼠标点击沿岸及开边界即可录入相应的左、右、上、下边界;也可直接导入后缀名为“dxf”格式的图形边界文件作为边界。

由于正交曲线算法的限制,要将物理域对应到规则的矩形计算域,一般需要左、右边界的节点数相等,上、下边界的节点数相等。在边界节点的控制上只需在图形界面上定义边界点的个数和疏密。这样就保证了生成的网格在岸线弯曲程度较大的地方,节点应分布得相对密一些,这些工作对于生成一个较为理想的网格是十分有利的,避免了人为手动节点的录入。另外,由于边界点在图形界面上形成,可以直接观察到边界的效果,方便边界调整,使得网格生成效率更高。

所有边界节点布设完毕后,通过保角变换,将不规则物理计算区域转换为规则的计算区域,同时启动相关程序计算式的数值解,因为初始边界点的横纵坐标(经、纬度)已记录到数据库中,因此边界条件给出后,通过迭代求解,控制精度,可以得到收敛的解,即正交曲线网格生成,这也是差分算法的优点之一。另外,在网格生成数值求解前,图形界面下的初始网格边界较为理想,数值计算生成网格迭代的步数大大减少,可以在较短的时间内生成正交曲线网格。

该网格生成软件程序具体实现过程如图 2-1 所示,在绘制物理区域(边界条件)后,将物理区域划分成多个简单的单连通区域进行正交网格生成,最后将多个单连通区域网格拼接,得到整个物理区域的正交曲线网格。由此可知,在网格生成过程中,单连通区域网格生成是整个网格形成的基础,区域边界节点的定义与区域的划分可起到网格疏密控制的作用。