



信息与计算机科学丛书 — 82

水沙水质类水利工程问题 数值模拟理论与应用

李春光 景何仿 吕岁菊 著
杨程 赵文娟 郑兰香



科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

信息与计算科学丛书 82

水沙水质类水利工程问题 数值模拟理论与应用

李春光 景何仿 吕米
杨程 赵文娟 郑三



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者多年研究工作的累积,主要对一些典型水利工程问题数值模拟所涉及的数学模型、数值计算方法作了较为全面的介绍,并系统地介绍了作者在这方面的研究成果. 主要内容包括:天然河流水流运动、泥沙运移、河床变形的数值模拟,工业供水水库泥沙淤积的数值模拟,有压管道水锤的数值模拟,湖库水质的数值模拟,土壤水盐运移的数值模拟,河道或引水明渠冬季结冰问题的数值模拟等. 全书分上、下两篇,共计 10 章内容,其中上篇为基础理论篇,有 4 章,主要介绍了有关数学模型、数值计算方法及常用的数值模拟软件;下篇为实践应用篇,共 6 章,主要介绍了作者近年来在这些领域的一些研究成果.

本书可供计算数学、计算流体力学、水力学及河流动力学、环境科学与工程、农田水利工程等有关专业研究生、教师和科研人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

水沙水质类水利工程问题数值模拟理论与应用/李春光等著. —北京:科学出版社,2015.11

(信息与计算科学丛书; 82)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-046389-0

I. ①水… II. ①李… III. ①含沙水流-水利工程-水质模拟-数值模拟-研究 IV. ①TV135

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 274918 号

责任编辑:王丽平/责任校对:彭 涛

责任印制:肖 兴/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

*

2015 年 11 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2015 年 11 月第一次印刷 印张:25 3/4

字数:517 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息与计算科学丛书》序

20 世纪 70 年代末, 由已故著名数学家冯康先生任主编、科学出版社出版了一套《计算方法丛书》, 至今已逾 30 册. 这套丛书以介绍计算数学的前沿方向和科研成果为主旨, 学术水平高、社会影响大, 对计算数学的发展、学术交流及人才培养起到了重要的作用.

1998 年教育部进行学科调整, 将计算数学及应用软件、信息科学、运筹控制等专业合并, 定名为“信息与计算科学专业”. 为适应新形势下学科发展的需要, 科学出版社将《计算方法丛书》更名为《信息与计算科学丛书》, 组建了新的编委会, 并于 2004 年 9 月在北京召开了第一次会议, 讨论并确定了丛书的宗旨、定位及方向等问题.

新的《信息与计算科学丛书》的宗旨是面向高等学校信息与计算科学专业的高年级学生、研究生以及从事这一行业的科技工作者, 针对当前的学科前沿、介绍国内外优秀的科研成果, 强调科学性、系统性及学科交叉性, 体现新的研究方向. 内容力求深入浅出, 简明扼要.

原《计算方法丛书》的编委和编辑人员以及多位数学家曾为丛书的出版做出了大量工作, 在学术界赢得了很好的声誉, 在此表示衷心的感谢. 我们诚挚地希望大家一如既往地关心和支持新丛书的出版, 以期为信息与计算科学在新世纪的发展起到积极的推动作用.

石钟慈
2005 年 7 月

前 言

自 2003 年起, 北方民族大学数值计算与工程应用研究所以学校为依托, 以计算流体力学和工程数值模拟为手段, 以解决宁夏当地工农业生产中的实际工程问题为导向, 致力于研究黄河宁夏段水沙运移及河床变形问题、冬季凌汛和冰期供水问题、宁东工业供水水库泥沙淤积及水质问题、银北地区盐渍化土壤水盐运移问题, 取得了一些研究成果. 本书是十余年来团队主要研究成果的整理、总结和进一步发展.

宁夏地处我国西北部干旱少雨地区, 许多县市年均蒸发量是年均降水量的 6~8 倍. 水的问题已经成为制约当地经济社会发展和人民群众生活水平提升的关键问题. 黄河从黑山峡出甘肃流入宁夏, 至石嘴山出宁夏流入内蒙古, 在宁夏境内河段全长约 400km. 得益于黄河这条母亲河, 宁夏自古就有引黄灌溉的历史, 造就了万亩良田和一片片生机盎然的绿洲, 赢得了“塞上江南”的美誉. 宁夏境内 (除南部山区外) 大部分地区的水源都直接或间接来自黄河. 因此, 研究黄河宁夏段天然河道及周边一些典型水库的水沙运动、河床变形、水质变化、水盐运移等问题有着十分明显的应用背景和地域特色. 所取得的研究成果不仅具有一定的学术价值, 而且可直接为当地工农业生产和经济建设服务, 具有重要的应用价值.

全书分为基础理论篇 (上篇) 和实际应用篇 (下篇) 两大部分, 共 10 章内容. 其中, 第 1 章至第 4 章属于上篇, 第 5 章至第 10 章属于下篇.

第 1 章, 水利工程数值模拟概述. 简要介绍了水利工程数值模拟的研究内容、目标、任务, 以及该领域国内外研究现状和未来发展形势.

第 2 章, 水利工程中常用数学模型. 系统全面地给出了水利工程水沙水质类问题经常用到的数学模型, 即水动力学数学模型、泥沙运移数学模型、湖库水质数学模型、土壤水盐运移数学模型、水温及冰凌数学模型等. 部分数学模型和其中的重要参数, 作者结合实际问题进行了改进, 以提高数值模拟的精度.

第 3 章, 水利工程数值模拟有关数值计算方法. 详细总结了研究团队所用的主要数值方法. 内容包括网格生成技术、对流扩散方程的有限体积法, 以 SIMPLE 算法为代表的压力修正类算法及其理论分析、求解线性代数方程组的 TDMA 算法收敛性证明, 以及定解条件的确定和提高收敛速度的一些算法改进等内容.

第 4 章, 水利工程数值模拟常用应用软件. 介绍了几个有代表性的应用软件, 即 FLUENT、Delft3D、MIKE 等软件的功能、特点和应用范围.

下篇是研究团队主要科研成果的系统总结和提升.

第 5 章, 连续弯曲河道水沙运移及河床变形研究. 详细总结了团队在宁夏黄河沙坡头—大柳树河段, 进行野外实测数据分析, 对水流运动、泥沙运移、河床变形等方面的二维及三维数值模拟研究成果, 以及数值模拟结果与实测结果的比对分析等内容.

第 6 章, 抽水型水库泥沙淤积研究. 以宁夏宁东水洞沟水库为例, 给出了实地实测和二维、三维水沙运动数值模拟结果, 并就如何延长水库使用年限 (寿命) 给出了若干工程建议.

第 7 章, 抽水型水库水质数值模拟研究. 对水洞沟水库水质进行了实测和数值模拟、对比分析, 并对水库水质变化进行了数值模拟预测.

第 8 章, 引水明渠冬季输水数值模拟研究. 对宁夏吴忠金积工业供水工程冬季输水问题进行了数值模拟研究, 包括一维、二维水温分布数值模拟、结冰点位置的确定, 以及结冰后冰盖厚度的发展数值模拟等内容.

第 9 章, 抽水泵站水锤数值模拟研究. 重点对事故停泵水锤进行了数值模拟研究, 并对模拟结果进行了分析.

第 10 章, 土壤水盐运移数值模拟研究. 针对宁夏银北地区盐渍化较严重的一块区域进行了实测及一维、二维数值模拟, 得出了水盐运移的特征和区域性的水盐运移规律, 为该地区的盐渍化防治提供了一定的科学依据.

本书有如下几方面的特色: 一是在理论方面, 对一些模型方程进行了改进和修正. 例如, 在天然河道弯道处加入弯道离心力影响的源项, 改进了水动力学控制方程; 对一些重要参数, 如曼宁系数提出了更符合实际的自动调整取值的确定方法. 二是在数值计算方面有一些改进和创新. 对水流运动模块和泥沙运移模块提出了一种半耦合、分时段计算策略, 大大提高了计算效率; 对工程界应用广泛但缺乏严格理论证明的一些算法, 如 SIMPLE 类算法、TDMA 算法给出了其收敛性和稳定性的理论分析和证明, 从而为这些算法的应用提供了较为坚实的理论基础. 三是本书的研究与实际应用联系紧密, 书中的模型、算法和模拟实例大都是为了解决当地有关部门的实际问题而开展的研究工作. 此外, 本书研究的一个重点是黄河大柳树—沙坡头河段, 该河段由若干个连续弯道组成, 具有一定的代表性. 因此, 本书中的研究成果对于类似的蜿蜒型河流数值模拟也具有一定的参考价值.

研究团队近十年主持和承担多项科研项目. 本书的主要内容也得益于这些项目强有力的支撑. 团队成员主要承担的项目有国家自然科学基金项目“黄河宁夏沙坡头河段三维泥沙运移数值模拟研究”、“黄河上游大柳树河段三维泥沙运移及水温数值模拟研究”、“泥沙运移数值模拟中的几个典型算法与建模问题的研究”、“水沙运移中的格子 Boltzmann 方法研究”、“强蒸发抽水型水库水质和水动力耦合模拟研究——以宁夏鸭子荡水库为例”; 横向课题“宁夏吴忠金积供水工程冬季引水数值模拟研究”(委托单位: 宁夏回族自治区水利水电开发建设总公司)、“水

洞沟水库泥沙淤积测试与模拟数值”(委托单位:宁夏长城水务有限责任公司)、“山西中部引黄工程水锤防护措施研究”(委托单位:西安理工大学),以及两个宁夏自然科学基金项目(编号分别为NZ13086和NZ14110)、一个宁夏高等学校科研项目(编号为NGY2014005)和一个北方民族大学重点科研项目(2015KJ11)等。

作为团队研究成果的结晶,本书是由李春光组织带领团队成员,历时一年多时间认真撰写、反复修改完成的。原始材料整理及初稿撰写分别由景何仿(第1、第8章全部及第2~第5章部分)、吕岁菊(第9章全部及第2、第3、第5章部分)、杨程(第6章全部及第2~第5章部分)、赵文娟(第10章全部及第2、第3章部分)、郑兰香(第7章全部及第2、第3章部分)完成。经多次集体研讨,最终由李春光完成全书定稿。

在项目研究过程中,我们得到石钟慈院士、林群院士、崔俊芝院士、徐宗本院士的指导、帮助和关心,谨致谢忱!长期以来,黄艾香教授、李开泰教授、徐成贤教授、蒋耀林教授、何银年教授、侯延仁教授、陈绍春教授、石东洋教授、芮洪兴教授给予我们大力指导和帮助,我们表示深深的感谢!

十余年来,项目研究还得到宁夏回族自治区水利厅薛塞光总工、方树星总工、王昕华总工、刘华总工、刘军峰总工等几位高级工程师的大力协助;清华大学张红武教授,英国Aberdeen大学郭亚昆教授,华北水利水电大学孙东坡教授,宁夏大学田军仓教授、李星教授、张维江教授、孟云芳教授、姚青云教授给予长期关心和帮助,并进行过一些愉快的合作,在此一并致谢!

在项目研究过程中,北方民族大学部分教师和作者的学生也部分地参与了野外测量及数值模拟工作,他们是周炳伟、杨录峰、董建强、黄凌霄、吴砚婕、王兰香、王君超、姜艳艳、马宁、刘圣琬、王发利、李利芳、田懋、张玉环、程紫薇、田野、刘礼惠、陈晓花、马淼、杨君伟、马鸿林、杨艳娟、关鹏燕、杨洋、张晋、赵丽莎、欧阳鹏飞、侯振华、梁晨璟、蔡永军、万翠平、周芳、刘亚利、王子路、王立海、牛云霞、徐晓芳、刘鹏飞等,在此表示诚挚谢意!

最后,感谢科学出版社王丽平编辑为本书出版付出的细致劳动!

由于本书内容多、范围广,参与人员较多,受作者水平所限,书中难免存在不足之处,诚请各位同仁不吝批评指正!

作者

2015年5月

于北方民族大学

主要符号表

符号	含义	单位	备注
C	谢才系数	$\text{m}^{1/2}/\text{s}$	在土壤水盐运移中表示盐分浓度 (kg/m^3)
C_{mo}	土壤接受的大气凝结水量	m	
D_{50}	床沙中值粒径	mm	
$D(\phi)$	非饱和土壤扩散率	m^2/s	
J	Jacobi 行列式		
J_P	水力坡降	$\%$	
$K(\phi)$	非饱和土壤导水率	m/s	
P	降雨量	mm	
P_{SL}	第 L 组悬移质泥沙级配	$\%$	
P_{bL}	第 L 组床沙级配	$\%$	
P_{mL}	混合活动层床沙级配	$\%$	
$P_{\text{mL},0}$	初始床沙级配	$\%$	
R	水力半径	m	
S	垂线平均含沙量	kg/m^3	在土壤水盐运移中表示入渗量 (m)
S_L	第 L 组泥沙平均含沙量	kg/m^3	
S^*	水流挟沙力	kg/m^3	
S_L^*	第 L 粒径组悬移质泥沙水流挟沙力	kg/m^3	
S_v	体积含沙量 $S_v = S/\rho_s$	$\%$	
U, V	拟变流速分量	m/s	
U_c	泥沙的起动流速	m/s	
U_c'	泥沙的止动流速	m/s	
$\bar{U}$	垂线平均流速大小	m/s	
ΔZ_b	泥沙冲淤厚度	m	
d	泥沙粒径	mm	
d_{50}	泥沙中值粒径	mm	
d_m	泥沙平均粒径	mm	
g	重力加速度	m/s^2	
n	曼宁系数	$\text{s}/\text{m}^{-1/3}$	
$\bar{u}, \bar{v}$	ξ, η 方向流速 (协变流速分量)	m/s	
u, v	直角坐标速度分量	m/s	
Z_b	河床高程	m	
ξ, η	曲线坐标分量		
ζ	水位	m	

续表

符号	含义	单位	备注
k	紊动能	m^2/s^2	
ε	紊动能耗散率	m^3/s^4	在土壤水盐运移中表示垂直向的水量 交换强度 (m/s)
ν	运动黏性系数	m^{-4}/s	
η	动力黏性系数 ($\eta = \rho\nu$)	Ns/m	
η_t	紊动黏性系数	m^{-4}/s	
η_t	紊动动力黏性系数 ($\eta_t = \rho\nu_t$)	m^{-4}/s	
α_L	第 L 组悬移质泥沙恢复饱和系数		
κ	卡门常数		
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	泥沙紊动扩散系数		
ω	泥沙沉速	cm/s	
ω_0	清水中泥沙沉速	cm/s	
ω_L	第 L 组泥沙沉速	cm/s	
ω_s	群体泥沙沉速		
ρ	水的密度	kg/m^3	
ρ_s	泥沙密度	kg/m^3	

目 录

《信息与计算科学丛书》序

前言

主要符号表

上篇 基础理论篇

第 1 章	水利工程数值模拟概述	3
1.1	水利工程数值模拟的研究目标和研究内容	3
1.1.1	水利工程概述	3
1.1.2	数值模拟概述	5
1.1.3	水利工程数值模拟研究目标及研究内容	6
1.2	水利工程数值模拟国内外研究现状	8
1.2.1	紊流的数值模拟研究现状	8
1.2.2	水流运动的数值模拟研究现状	14
1.2.3	泥沙运移的数值模拟研究现状	16
1.2.4	冰凌问题的数值模拟研究现状	17
1.2.5	水质问题数值模拟研究现状	18
1.2.6	土壤水盐运移问题数值模拟研究现状	20
1.3	水利工程数值模拟研究发展趋势	21
第 2 章	水利工程中常用数学模型	24
2.1	水动力学数学模型	24
2.1.1	一维水动力学数学模型	24
2.1.2	三维水动力学数学模型	30
2.1.3	平面二维水动力学数学模型	37
2.1.4	垂向二维水动力学数学模型	45
2.2	泥沙运移数学模型	47
2.2.1	一维泥沙数学模型	47
2.2.2	二维泥沙数学模型	48
2.2.3	泥沙数学模型中关键问题的处理	50
2.3	湖库水质数学模型	61

2.3.1	湖库特点及水质影响因素	61
2.3.2	湖库水温模型	63
2.3.3	湖库水质数学模型	65
2.3.4	生态动力学模型	69
2.4	土壤水盐运移数学模型	71
2.4.1	土壤水盐运移理论研究	71
2.4.2	土壤水盐运移模型	73
2.4.3	土壤水盐模型关键参数的确定	76
2.5	水温及冰凌数学模型	80
2.5.1	水温数学模型	81
2.5.2	输冰数学模型	84
2.5.3	冰盖厚度发展的计算	86
第 3 章	水利工程数值模拟有关数值计算方法	93
3.1	常用数值计算方法简介	93
3.2	网格生成技术	95
3.2.1	概述	95
3.2.2	适体坐标变换	98
3.3	对流扩散方程的有限体积法	100
3.3.1	离散格式	101
3.3.2	二维问题的离散	107
3.4	SIMPLE 类系列算法及有关收敛性	109
3.4.1	SIMPLE 算法	110
3.4.2	SIMPLER 算法	114
3.4.3	SIMPLEC 算法	114
3.4.4	CLEAR 算法	115
3.4.5	IDEAL 算法	116
3.4.6	SIMPLE 类算法的矩阵形式	118
3.4.7	同位网格下 SIMPLE 类算法收敛性研究	123
3.5	TDMA 算法及其收敛性	135
3.5.1	TDMA 算法	135
3.5.2	TDMA 算法在二维水沙模型数值求解中的应用	136
3.5.3	TDMA 算法的收敛性	137
3.6	高分辨率组合格式构造	140
3.6.1	相关概念	141
3.6.2	高分辨率格式构造	143

3.6.3 算例	144
3.7 定解条件及有关算法改进	146
3.7.1 初始条件	146
3.7.2 边界条件	147
3.7.3 动边界处理	148
3.7.4 水流模块与泥沙模块的耦合问题	149
3.8 引水明渠冬季结冰问题数学模型求解方法	150
3.8.1 一维水力热力耦合模型方程的数值求解方法	150
3.8.2 冰盖厚度发展模型方程的数值求解方法	151
第 4 章 水利工程数值模拟常用应用软件	152
4.1 FLUENT	152
4.1.1 概述	152
4.1.2 FLUENT 软件构成	153
4.1.3 FLUENT 主要功能	153
4.1.4 FLUENT 计算模型	154
4.1.5 FLUENT 基本操作及应用实例	155
4.2 Delft3D	164
4.2.1 Delft3D 概述	164
4.2.2 Delft3D 主要模块	165
4.2.3 水动力模块 (FLOW) 简介	166
4.2.4 Delft3D 模型控制方程	168
4.3 MIKE	170
4.3.1 概述	170
4.3.2 MIKE 主要功能	171
4.3.3 MIKE 21 软件应用实例	173

下篇 实践应用篇

第 5 章 连续弯曲河道水沙运移及河床变形研究	185
5.1 主要测量仪器	185
5.2 黄河上游典型河段实测	188
5.2.1 沙坡头河段	188
5.2.2 大柳树河段	193
5.3 沙坡头河段平面二维数值模拟	206
5.3.1 初边界条件及网格剖分	206

5.3.2	水流运动数值模拟结果及分析	210
5.3.3	泥沙运移及河床变形数值模拟结果及分析	212
5.4	黄河沙坡头河段三维数值模拟	222
5.4.1	模拟区域及网格划分	222
5.4.2	数学模型及求解	223
5.4.3	沙坡头库区三维水沙运动模拟结果及分析	223
5.5	黄河大柳树河段三维数值模拟	235
5.5.1	模拟区域及网格划分	235
5.5.2	数学模型及求解	237
5.5.3	大柳树河段三维水沙运动模拟结果及分析	238
5.6	主要结论	253
第 6 章	抽水型水库泥沙淤积研究	256
6.1	水洞沟水库实测	256
6.1.1	水洞沟水库概况	256
6.1.2	测量仪器及测量方法	257
6.1.3	断面布设	258
6.1.4	实测结果及分析	259
6.2	数值模拟区域及初边界条件	265
6.2.1	模拟区域	265
6.2.2	边界条件及其处理方法	266
6.3	水流运动数值模拟	267
6.3.1	二维水沙运动数值模拟	267
6.3.2	不同工况水流运动模拟研究	273
6.3.3	三维水沙运动数值模拟	277
6.4	小结	284
第 7 章	抽水型水库水质数值模拟研究	287
7.1	水库水质样品采集及数据分析	287
7.1.1	水质采样点布设	287
7.1.2	水样采集及保存	288
7.1.3	测定指标及分析方法	288
7.1.4	水质数据分析	288
7.2	初边界条件及模型参数率定	290
7.2.1	水库地形的制作	290
7.2.2	上水时的初边界条件	291
7.2.3	不上水时的初边界条件	291

7.2.4	模型参数的率定	292
7.3	模拟结果分析	292
7.3.1	库区流场分布	292
7.3.2	COD 的浓度分布	293
7.3.3	NH ₃ -N 的浓度分布	294
7.3.4	垂向分布分析	295
7.3.5	实测值与模拟值对比分析	300
7.4	水洞沟水库水质模拟预测	301
7.4.1	上水时的模拟结果	301
7.4.2	不上水时的模拟结果	303
7.5	小结	304
第 8 章	引水明渠冬季输水数值模拟研究	306
8.1	宁夏吴忠金积供水工程简介	306
8.2	金积供水工程引水明渠一维水温分布数值模拟	307
8.2.1	模拟区域	307
8.2.2	模拟工况及初边界条件	307
8.2.3	引水渠 0~4km 小流量供水一维数值模拟结果及分析	308
8.2.4	引水渠 0~16.5km 大流量供水一维数值模拟结果及分析	310
8.3	金积供水工程引水明渠二维水温分布数值模拟	312
8.3.1	平面二维水温分布数值模拟结果及分析	312
8.3.2	立面二维水温分布数值模拟结果及分析	315
8.4	金积供水工程引水明渠冰盖厚度数值模拟	318
8.4.1	1997—2007 年冰盖厚度发展情况	318
8.4.2	数值模拟结果与经验公式的比较	320
8.5	小结	320
第 9 章	抽水泵站水锤数值模拟研究	322
9.1	抽水泵站工程概况	322
9.2	水泵正常运行工况点的确定	323
9.2.1	水泵性能曲线方程	323
9.2.2	单泵运行工况点的确定	323
9.2.3	并联运行水泵工况点确定	324
9.2.4	庄头支线泵站水泵运行工况点确定	324
9.3	特征线法离散水锤控制方程	325
9.4	定解条件	328
9.4.1	水泵端边界条件	328

9.4.2	初值条件和边界条件	333
9.5	事故停泵水锤数值模拟	336
9.5.1	事故停泵泵出口无蝶阀防护水锤数值模拟	336
9.5.2	事故停泵有蝶阀防护的水锤数值模拟	337
9.5.3	事故停泵泵出口蝶阀和进排气阀联合防护水锤数值模拟	338
9.5.4	模拟计算结果分析	339
9.5.5	主要结论	340
第 10 章	土壤水盐运移数值模拟研究	341
10.1	土壤水分特征曲线的测定	341
10.1.1	压力膜法	341
10.1.2	压力膜法试验结果	342
10.1.3	土壤水分特征曲线的拟合	343
10.2	宁夏银北试验区域概况	347
10.2.1	研究区自然地理条件	347
10.2.2	研究区土壤物理化学特性	350
10.3	宁夏银北试验区土壤水盐动态变化特征	351
10.3.1	监测区管网布置及实验设计	351
10.3.2	监测区土壤水盐变化特征	352
10.3.3	监测区有作物下的土壤水盐变化特征	354
10.4	宁夏银北试验区土壤水盐运移数值模拟结果及分析	355
10.4.1	试验区的土壤水分运动模拟研究	355
10.4.2	试验区纵向剖面水分运动模拟	356
10.4.3	土壤盐分运移方程定解条件	365
10.4.4	土壤盐分运移方程离散处理	369
10.4.5	土壤盐分模拟曲线及数据分析	369
10.5	结论	373
参考文献		375
索引		387
《信息与计算科学丛书》已出版书目		390

上篇 基础理论篇

