

SHUIHUANJINGDONGLIMOXING  
JIGONGCHENGYINGYONG

# 水环境动力模型 及工程应用

刘玉玲 编著

陕西出版集团  
陕西科学技术出版社

# 水环境动力模型及工程应用

刘玉玲 编著

陕西出版集团  
陕西科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书详细介绍了水流与水质的数值计算模型及其工程应用。首先介绍了紊流模拟理论、数值计算方法和数值计算中的关键性技术,然后介绍了以此为基础建立的水流与水质的数值计算模型及其应用。该书既有理论,又有工程算例,理论与实践紧密结合,可作为水利、水运、水电和环境工程专业的研究生及工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

水环境动力模型及工程应用 / 刘玉玲编著. —西安:  
陕西科学技术出版社, 2009. 12

ISBN 978 - 7 - 5369 - 4424 - 4

I. 水… II. 刘… III. 水环境—水动力学—数学模型—研究 IV. X143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 179623 号

---

**出版者** 陕西出版集团 陕西科学技术出版社

西安北大街 131 号 邮编 710003

电话(029)87211894 传真(029)87218236

<http://www.snstp.com>

**发行者** 陕西出版集团 陕西科学技术出版社

电话(029)87212206 87260001

**印 刷** 陕西雨润印刷物资有限公司

**规 格** 787mm × 960mm 16 开本

**印 张** 8.5

**字 数** 150 千字

**版 次** 2009 年 12 月第 1 版

2009 年 12 月第 1 次印刷

**定 价** 16.00 元

---

版权所有 翻印必究

# 前 言

环境污染与环境保护是当今世界所面临的重大问题之一。由于工业的发展,大量有害于人类和其他生物的工业废物(废水、废气、废渣)和生活污水、农业废水排入河流、湖泊、水库与大海,使天然水体受到严重的污染。为了保护环境,防止污染的危害,必须了解这些污染物质的扩散输移规律,也就是要探求当污染物投放于水体后,由于扩散、输移所造成的污染物浓度随空间和时间的变化规律。本书基于现代紊流理论、现代数值计算方法,建立了适合描述水利工程中紊流规律的非线性数值模型,即曲线坐标系下的多层紊流水动力模型,旨在提高紊流精细模拟的实用性,以求有效地解决水利工程中的水流和输运现象的实际问题。因此,该研究既具有理论意义,又具有工程实用价值。

全书共分6部分。第1部分对水流与水质数值模拟发展的现状进行了系统的分析和评述;第2部分介绍了现代紊流理论和数值计算方法;第3部分对紊流数值计算中的关键性技术问题(离散方法、自由表面位置的确定问题、复杂边界的处理方法等)进行了详细的综述,特别研究了曲线网格生成技术;第4部分基于直角坐标系,研究了一种模拟三维非恒定明渠紊流的沿层积分数值模型;第5部分在直角坐标系三维非恒定明渠紊流的沿层积分数值模型的基础上,发展了曲线坐标系下的多层紊流水动力模型;第6部分对曲线坐标系下的多层紊流水动力模型进行了曲率修正,计入曲率效应的影响,并应用于实际工程中。

本书第1部分、第3至6部分由西安理工大学刘玉玲撰写,第2部分由西安理工大学魏文礼撰写;刘玉玲还负责了全书的统稿和绘图工作。

应当指出,本书并不是一部完善的著作,在水流与水质数值模拟领域中的许多研究成果和新的方法都没有包括进来,只是将其中一部

分内容作为参考文献列在书后。特别是本书所论述的理论与方法,许多都正在发展中,我更期待着该方面更有好的著作能够出版。

本书出版得到陕西省重点学科建设专项资金资助,在此表示感谢!

由于作者水平所限,书中错误在所难免,敬请各位读者批评指正。

刘玉玲  
2009年9月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 水环境动力模型的研究进展和现状分析 .....	2
1.2 研究问题的提出 .....	9
1.3 本书的内容 .....	9
<b>2 紊流模型理论及控制方程</b> .....	11
2.1 守恒定律 .....	11
2.2 时均流方程及其封闭问题 .....	12
2.3 紊动黏性系数模型 .....	18
2.4 紊流直接数值模拟 .....	29
2.5 紊流的大涡模拟 .....	29
2.6 小结 .....	32
<b>3 数值模拟关键性技术研究</b> .....	34
3.1 数值离散方法 .....	34
3.2 自由表面的追踪 .....	36
3.3 不规则边界的处理 .....	39
3.4 边界拟合坐标变换法 .....	41
3.5 边界处正交的曲线网格生成方法 .....	50
3.6 小结 .....	54
<b>4 直角坐标系下的多层紊流水动力模型</b> .....	55
4.1 引言 .....	55
4.2 水流的控制方程 .....	56
4.3 沿层积分方程 .....	57
4.4 方程的统一形式 .....	60
4.5 统一形式控制方程的数值离散与水深校正方法 .....	61
4.6 模型验证——明渠丁坝绕流紊动特性数值模拟 .....	67
4.7 小结 .....	70

---

<b>5</b>	<b>曲线坐标系下的多层紊流水动力模型</b> .....	<b>72</b>
5.1	引言 .....	72
5.2	曲线坐标系下的多层紊流水动力模型 .....	72
5.3	模型验证 .....	86
5.4	小结 .....	90
<b>6</b>	<b>曲线坐标系下多层紊流水动力模型的曲率修正</b> .....	<b>91</b>
6.1	引言 .....	91
6.2	曲线坐标系下多层紊流水动力模型的曲率修正 .....	93
6.3	模型验证 .....	95
6.4	工程应用 .....	101
6.5	小结 .....	117
	<b>参考文献</b> .....	<b>118</b>

# 1

## 绪 论

---

环境污染与环境保护是当今世界所面临的重大问题之一。由于工业的发展,大量有害于人类和其他生物的工业废物(废水、废气、废渣)和生活污水、农业废水排入河流、湖泊、水库与海湾,使天然水体受到严重的污染。为了保护环境,防止污染的危害,必须了解这些污染物质的扩散输移规律,也就是要探求当污染物投放于水体后,由于扩散、输移所造成的污染物浓度随空间和时间的变化规律。

在水利建设和国民经济建设的许多领域中,研究水流和伴随着水流的热输运、物质输运都具有极其重要的意义。江、河、湖、海以及地下的水体昼夜不停地运动,携带着热量、泥沙、盐分 and 各类污染物质,改变着我们的生活环境。为了兴水利、除水害,作为水资源综合利用的第一步,就是必须探明水流运动的规律和伴随水流发生的热输运、物质输运的规律。为了建设水流枢纽,必须预测建造水工建筑物以后上、下游水流的运动规律、泥沙的运动规律等,进而选择最好的设计方案。为了防治水污染,必须预测河流、湖泊中的水流规律和污染物的运动规律。只有对水流和输运现象进行预测,工程设计人员才能从大量的方案中选取最优设计方案,并保证其设计得以实现;工程管理人员才能安全、有效地运营水工建筑物和水利设备。准确地预测水流和输运现象,还能帮助我们预报乃至控制一些潜在的灾祸,如水体污染、洪水、潮汐等。

预测的实质,是在给定的物理条件下,求出控制着物理过程的若干变量在空间的分布和随时间的演变。对于水流和输运现象,比较重要的变量有流速、压力、温度、浓度等。预测的方法,基本上可分为两类:实验研究和理论计算。

理论计算方法是采用数学模型,预测所需要的结果。水流和输运现象的数学模型,通常由一组微分方程组成。电子计算机技术和数值计算方法的发展,给理论计算提供了必要的条件。目前,数学模型的发展水平已足以求解大多数关



于水流和输运现象。与实验研究相比,理论计算有下列优点:

1) 花费少。预测同样的物理现象,计算机运行的费用通常比相应实验研究的费用少几个数量级;对于规模巨大,机理复杂的物理现象,该比例更高。而且,实验费用是趋于提高的,而计算机和计算机运行的价格却日趋下降。

2) 速度快。设计人员可以在一天之内研究几百个建筑物体型并选定最优设计,而同样的工作采用模型实验则可能花费好几年。

3) 信息完整。数学模型的计算结果,可提供各有关变量在整个计算区域内的分布和随时间的演变。在计算过程中,没有不可达到的位置,也没有测头(传感器)对水流的干扰。在实验研究中,不可能做1次实验就量测到所有变量在整个区域内的分布。

4) 模拟能力强。在理论计算中,可以很容易地模拟高温、高压、低温、低压、失重等状态;不需要任何附加的设备,只需改变计算中的参数。对于一些理想化的模式,在模型实验中无法真正实现,只有在教学模型中才能实现。

毫无疑问,理论计算也有其缺点和局限性。理论计算的基础是描述水流和输运现象的数学模型。理论计算的最终成果,既取决于计算方法,也取决于数学模型本身。如果数学模型的描述不够精确,甚至不恰当,即便是极其令人满意的计算技术也会得出毫无价值的结果。

理论计算和实验研究各有优缺点,又相互依赖、互为补充。实验是研究新的基本现象的唯一方法,必须以大量观测资料为基础;数学模型是否正确可靠,也必须用实测(原型或模型)资料进行验证。另一方面,预先进行理论计算,往往可以减少大量的实验,有助于设计实验装置。

本书基于现代紊流理论、现代数值计算方法,建立了适合描述水利工程中紊流规律的非线性数值模型,即曲线坐标系下的多层紊流水动力模型,旨在提高紊流精细模拟的实用性,有效地解决水利工程和环境工程中的水流和输运现象的实际问题。因此,该研究既具有理论意义,又具有工程实用价值。

## 1.1 水环境动力模型的研究进展和现状分析

具有自由表面的水流运动问题广泛地存在于水利、环境和海岸等工程领域中。水流运动在数学上可以由一组微分方程来描述,若给定适当的边界条件,则构成独立的定解问题,可以进行数值求解。其数学模型可分为一维、二维和三维模型。一维模型的研究在理论和工程应用方面已经相当成熟,因此,这里主要讨论二维、三维模型。二维模型常采用沿整水深积分的二维模式,三维模型常采用

多层积分模式(multi-layer model 或 multi-level model)、完整的三维模式。

### 1.1.1 二维模型研究进展和现状分析

整水深积分的二维模式是将三维水流运动方程沿垂向积分后得到的,因此,二维模式又称积分模式或全流模式。它是由 Hensen(1956)首先提出的,用于计算浅水海域的水位变化过程及潮流。随后,Leedertes(1967)开发了能计算河口、海域水流流态的二维模型,Gallagher、Liggett 等(1973)又建立了二维风生环流的数学模型。近几十年来,国内外学者对二维模式也做了大量研究。

由 Falconer(1980,1986)<sup>[1-2]</sup>建立,后来又经过改进的沿深度积分的二维潮汐循环模型(DIVAST),已经被广泛地应用到 UK 的一部分地区和海外河口、沿海的河口、海岸水体的计算中<sup>[3-5]</sup>(Falconer & Chen,1991; Li & Falconer,1995)。Shankar 等(1990,1997)<sup>[6-7]</sup>和 Cheong 等(1992)<sup>[8]</sup>建立的二维水利模型已经应用到新加坡的一些水利工程中,这种模型可以预测海水各层水力参数不同时段的变化和水流的水平运动趋势。这些模型主要采用差分法求解。为了求解浅水方程,研究人员还改进了一些有限元方法<sup>[9-13]</sup>。大多数的方法是方法的推导,这些方法对强烈变化的水流是稳定的。就像文献<sup>[11]</sup>中所述,对于高程和流速,应用等阶近似区域浅水方程的标准有限元离散可以导致局部假振动,对这个问题的解决方法是用二阶水力波浪连续方程代替一阶的水力高程方程。该方法曾经成功应用到很多情况。这种近似,为很多的有限元研究也提供了基础<sup>[14-26]</sup>,且这种方法的误差估计的早期研究也已经在文献<sup>[27-29]</sup>中推导出来了。上面提到的有限元方法是基于连续假定空间基础上的。波浪连续方程来源于原始连续方程,在离散情况下,原来的方程形式已经不再适用。近年来,人们越来越多地研究了应用于不连续近似区域的用来求解基本浅水方程的有限元方法<sup>[29-32]</sup>。文献<sup>[33]</sup>还根据耦合的不连续和连续 Galerkin 方法,研究了二维整体水深浅水方程的近似数值解法。

在理论研究方面,金忠青等<sup>[34]</sup>采用正交曲线拟合坐标来克服天然河道复杂的边界给有限差分法带来的困难,利用物理分步法求解水流的控制方程,应用“动边界”技术追踪在非恒定流时因水位引起的计算区域的变化,建立了天然河道非恒定流的计算模式。王船海、程文辉<sup>[35-37]</sup>提出了天然河道二维非恒定流速场的通用数学模型,该模型在正交曲线坐标系下建立,克服了天然河道边界形状复杂、长宽尺度相差悬殊以及由于水位波动引起的计算边界变化等困难、周建军、林秉南、王连祥<sup>[38]</sup>应用破开算子法原理,将平面二维非恒定流基本方程按不同的物理意义,破成对流、扩散和传播 3 个子方程;对对流方程,采用特征线的迭

代二维恒定水流运动方程。刘晓东、华祖林、赵玉萍<sup>[42]</sup>建立了基于四叉树网格的二维水流数学模型,其控制方程采用有限体积法对守恒变量进行离散,应用 Godunov 型通量差分格式计算边界上的法向数值通量。李光炽、周晶晏、张贵寿<sup>[43]</sup>在用数值模拟方法研究高桩码头对河道流场影响的基础上,为确保流场模拟精度,采用正交边界拟合坐标变换,应用二维全隐式耦合联解模型离散控制方程,利用矩阵追赶法求解代数方程;同时,引入过水率和修正糙率的概念,并提出了间接等效模拟高桩码头对流场影响的方法。邓家泉<sup>[44]</sup>以 BGK(波尔兹曼方程)为基本方程,利用有限体积法,建立了满足熵原理的二维明渠非恒定水流的 BGK 数值模型。胡四一、谭维炎<sup>[45]</sup>提出了在无结构网格上建立有限体积高性能格式族的统一框架,通过引入跨单元界面法向数值通量的逆风解法,将一维 Osher、TVD 两种通量分裂格式自然地推广至二维浅水方程组。王如云、张东生、张长宽、朱寿峰<sup>[46]</sup>针对水动力学中的涌波现象,导出了二维曲线坐标系下的守恒型方程,然后利用算子分裂法和 TVD 差分格式思想构造出计算格式,在此基础上建立起由实际流场域至方形计算区域的全局同胚映射,对急流过缩窄河道产生的涌波结构进行数值模拟。邵颂东、王光谦、费祥俊<sup>[47]</sup>在分析总结有关 LE 法、MAC 法及 PIC 法等优越性的基础上,建立了适合于计算类似分洪区水流运动的平面二维 LE 法的数值模型。程永光、索丽生<sup>[48]</sup>根据二维浅水波方程的特点,应用由格子 Boltzmann 方程展开的多尺度方程,建立了一个能模拟二维明渠非恒定流的格子 Boltzmann 模型。魏文礼、沈永明<sup>[49]</sup>等采用基于 MacCormack 预测-校正技术的隐式数值格式,求解控制水流运动的二维浅水方程,建立了模拟大坝瞬间全溃或局部溃倒所致的洪水演进过程数学模型。金忠青、王玲玲、魏文礼<sup>[50]</sup>通过数值求解二维浅水方程组,模拟了三峡工程大江截流过程中的流场,获得了任一口门宽度下的全域流场信息。汪德瑾、陈新建、杨艳艳<sup>[51-52]</sup>利用二维隐式差分格式和二维特征差分格式,对长江口南支流进行了流场模拟计算。河海大学的金忠青<sup>[53]</sup>针对坝下效能工紊流的特点,建立了曲线坐标系下带自由表面、强紊动水流的数学模型,并编制了坝下效能工树枝实验室的大型软件包,可以灵活地修改模型或原型的形状和参数,方便地进行一系列试验或不同方案的比较,为泄水建筑物效能工的方案选择和设计提供足够精细和准确的数据。吴时强、吴修锋、周辉<sup>[54]</sup>利用平面二维水流数学模型,对淮河入海水道淮安地涵枢纽下游河道连接段水流进行了计算研究。赵志舟、周华君、兰波、杨胜发<sup>[55]</sup>在平面二维数值模拟计算的基础上,再进行河工模型试验,比较分析了各防洪整治方案下潼南河段水流条件的变化,及其对上游防洪、河道、大桥、电站、航运、河势等的影响,并提出了合理可行的涪江潼南河段防洪整治工程方案。麻荣永、梁军

贤、梁红飞<sup>[56]</sup>通过一维水位计算和二维水流流态计算,对比分析了桂江三桥建设前后桥位附近河段的水位、流态的变化情况,论证了大桥建设后对梧州市防洪工程的影响及对策。魏文礼等<sup>[57]</sup>利用正交曲线坐标系下的二维水流数学模型,预测了白石窑水利工程截流的水流流态。南京大学吴吉春、薛禹群等<sup>[58]</sup>建立了平面二维区域地下水渗流模型,用于描述柳林泉域的地下水渗流,据此模型预报了柳林电厂水源地投入使用后对区域地下水流场的影响,以及对柳林泉的影响。聂杰、傅宗甫<sup>[59]</sup>用二维浅水有限单元法对邵仙水利工程多建筑物的河道水流进行了数值模拟。张细兵、余新明、金琨<sup>[60]</sup>采用 Simple 算法求解河道平面二维水流数学模型,针对桥渡壅水问题,提出了 2 项措施来进行桥墩的概化:①局部地形修正,主要通过增加桥墩所在节点的河底高程来反映桥墩对河道过水面积的压缩效果;②局部糙率修正,主要通过加糙来反映桥墩的阻水作用。选取赣江神岗山至井冈山拟建的阳明大桥长约 7.5km 的河段作为计算河段,计算结果较好地反映了建桥前后桥墩附近水位流场的变化情况。徐祖信、尹海龙<sup>[61]</sup>基于二维浅水化水动力学方程组,运用伽辽金加权余量法导出适用于黄浦江干流的有限元公式,对计算区域采用四边形单元剖分,利用有限元数值计算模型模拟黄浦江干流动态、水文动态变化过程,然后开发了黄浦江干流实时二维水动力模型。

在计算实践中发现,原始浅水方程的二维水动力模型在计算弯道水流时误差大,起因于弯道水流存在明显的三维水力特性。水流通过弯道时,液体质点除受重力作用外,同时还受到离心惯性力的作用。在这两种作用力的作用下,水流除有纵向流速(指垂直于过水断面的流速)外,还存在径向流速。由于几个方向的流速交织在一起,在横断面内产生一种次生的水流,也称二次流。由于弯道处横向环流<sup>[62]</sup>的存在,使原始浅水方程的二维水动力模型已不适合描述这类水流。自 1870 年 Thompson 在实验中发现了弯道水流同时存在着纵向和横向流动以后,很多学者便致力于这一问题的研究。

波达波夫、马卡维耶夫、罗辛斯基、库兹明、罗索夫斯基等<sup>[62]</sup>外国学者,在弯道环流的研究中作了大量的工作。我国黄河水利委员会水利科学研究所的张红武<sup>[37]</sup>,对弯道水流的特性进行了系统的实验研究,得出了弯道环流流速垂线分布的通用公式。河海大学的宋志尧<sup>[63]</sup>,针对罗索夫斯基弯道环流公式推导过程中存在的问题,在其模型方程中,增加了底床不可滑动条件,耦合求解得到了弯道环流公式和水面横比降公式,并应用数值逼近方法,对弯道环流公式进行了简化,以便于弯道环流的理论计算和工程应用。王平义、蔡金德、方铎、吴持恭<sup>[64]</sup>以弯道水流运动方程作为分析的基础,根据弯道水流纵向流速沿垂向分布在凸岸区域服从对数分布,在凹岸区域服从抛物分布的规律,导出了分区域变曲率动

床弯道水流纵向垂线平均流速计算公式,并从理论上对河湾纵向垂线平均流速的横向分布和沿程变化规律进行了分析,同时给出了适用于定半径弯道的纵向垂线平均流速平面分布公式的简化形式。重庆交通学院的彭凯<sup>[65]</sup>,运用新近的解析-数值势流理论方法,生成正交数值网格,用差分法计算出平面二维流场,然后按将水力半径分为河床阻力水力半径和河岸阻力水力半径的方法和对数流速分布公式,计算垂向流速分布,将平面二维流场计算和垂线流速分布计算很好地结合起来,形成了特殊的渠道三维流场计算方法。陈国祥、金海生<sup>[66]</sup>建立了极坐标下模拟弯道水流水深平均运动特性的数学模型,该模型考虑了横向环流的影响,并求解了水深平均的动量方程及连续方程。

河口潮汐的范围很大,而且地理地形非常复杂。在实际工程应用中,采用浅水方程可以求解工程领域中的许多宽浅水域水流问题,并且有了很多经验。特别是在处理水平对流项、扩散项、河床应力、自由表面应力以及涨落潮和溶质输运方程等问题上,我们获得了许多宝贵的经验。但在实际操作中发现,对于有些复杂边界的水流问题,当三维特性明显时,二维数学模型尽管有多种修正的模型,但还是求解误差较大,比如弯道水流问题。这主要是由于浅水方程本身不能描述像有流向弯曲水流的水力特性。

二维模式的不足之处是不能描述速度的垂向分布,对水流表面风应力及底部摩擦项常用半经验关系。因此,本书在研究二维模式的同时,也研究了三维模式,比如完整的三维模式、多层模式(multi-layer model 或 multi-level model)等。

### 1.1.2 三维模型研究进展和现状分析

近年来,随着计算机技术的快速发展,三维非恒定流的数值模拟已经从理论研究转向实际应用,特别是在网格尺寸普遍较大的河口和海岸等领域中的应用更为广泛。

从理论上讲,可以从 RANS 方程(Reynolds Averaged N-S equations)出发,建立三维水动力数学模型。尽管有各种湍流模式或大涡模拟(LES)技术可用,但是由于受计算机容量和速度的限制,对这类大水体的运动进行精细的三维数值模拟,在目前看来仍是困难的。

对于水平空间尺度远大于垂直空间尺度的水流,水质点运动的垂直加速度比重力加速度要小得多,垂直方向的流体运动方程便退化为静压方程,即所谓的静压假定。这样,我们可以用水位变量  $F(x, y, t)$  代替压力变量,得到三维浅水方程,使得需求解的数学问题得到简化。

在过去的 30 年里,研究人员已经建立了一些三维非恒定流的数值模

型<sup>[67-81]</sup>。因为河口和海岸水流的物理过程非常复杂,人们不得不在这些三维模型上做许多近似,例如:水平对流,底部摩擦,密度,紊流模型,坐标系,以便于对水平和垂直变量的处理和对涨潮与落潮的处理<sup>[81]</sup>(Cheng 与 Smith,1989)。不同精度的近似必然导致预测模型的精度不同。

在三维非恒定流模型中,各种参数(如 Eddy 黏性)沿垂直方向变化的描述方式和垂直坐标系的选择非常重要。基于解析解或半解析解的物理变量沿垂直方向分布的假设将大大减少计算的时间,因此也被广泛地运用于三维模型<sup>[82]</sup>(Davies,1993)里。

基于三维浅水方程的模型,Leendertse (1973)<sup>[83]</sup>的工作具有开创性,他在垂直方向采用固定分层法,即将计算水域划分为固定的多层,在每层中沿水深积分使之成为二维问题,并用 ADI 格式进行数值离散。基于垂直方向采用固定分层的思想,Jin 和 Kranenburg(1993)<sup>[84]</sup>建立了具有固定网格的垂直有限差分模型。Kim(1994)<sup>[85]</sup>应用固定分层方法建立了海湾三维潮流、盐度模型。他们是目前常被采用的比较流行的模型。

矩形固定网格的局限性是比较难于解决复杂的地理特征问题,而且在河底不规则的浅水区域中,在垂直方向上的分辨率常常受到一定的限制。为了更好地模拟河床地形的变化,人们将 Philips(1957)<sup>[86]</sup>提出的  $\sigma$ -坐标变换应用到河口与海岸三维模型中<sup>[87-100]</sup>。为了较严格地确定涡黏性系数和扩散系数,湍流模式理论也在潮流模型中得到了应用。在过去的研究中,基于  $\sigma$ -坐标变换的垂直有限差分模型<sup>[72]</sup>(shen,1987),或在水平面进行曲线坐标变换,垂直方向进行  $\sigma$ -坐标变换的有限差分模型,用来连续追踪不断改变的水域边界和水面的运动<sup>[89-90]</sup>(Blumberg and Mellor,1983;Kowalik and Murty,1993)。

使用  $\sigma$ -坐标变换的主要优点在于:网格能够贴合水面和河底(在这些边界区域中分辨率会提高),其计算区域的垂直层数是一个常数,而且我们可以在一个固定的网格上进行计算。然而, $\sigma$ -坐标变换在描述河口流动时也存在一定的缺陷:在把弯曲的物理区域变换成矩形计算区域时,控制方程和溶质的输运也被进行了变换,这样就会使描述物理变量变化的方程变得更加复杂。因为  $\sigma$ -坐标变换不是正投影的,故变换后的控制方程会产生一些交叉派生的附加项。在使用  $\sigma$ -坐标变换时,层的厚度是与水深成比例的。当河底面不规则时,甚至尽管网格在浅水区非常小,但层的厚度可能会大到不能精确地描述三维特征。另外,这可以增加 CPU 的运行时间和计算机的存储容量,并且增加计算的不确定性<sup>[81]</sup>(Cheng and simth,1989)。

为了弥补这些不利影响,在最近几年,许多学者还是把注意力集中在三维

multi-layer 模型和 multi-level 模型的研究和改进上,且改进的模型被迅速地研制出来<sup>[101-107]</sup>(Kawahara 等,1983;Cao and Zhang,1987;Kim and Lee,1994 等)。在这类模型中,自由水面边界条件很容易处理,因为三维模型结构中沿层叠加着很多深度平均的水力模型。分层模式作为一种三维模式的简化,与二维模式相比,具有 2 个优点:①它是二维模式数值方法和计算程序的推广,比较简单;②适用于实际分层流的计算。

Xiaobo Chao(1999)<sup>[104]</sup>研究了一种三维多层紊流模型,并应用于新加坡海岸潮汐运动的计算中。在计算时,把水域分为多层,而且速度沿着水深积分。其紊动黏性系数和扩散系数由 Prandtl 混合长假设方法给出<sup>[105]</sup>(Rodi, 1980)。采用这种计算方法,得到了不同水深物理参数的变化规律和水面的运动规律。

Q. Y. Zhang(2000)<sup>[106]</sup>研究了一种三维多层紊流模型,此模型应用两步欧拉预测-校正运算法则来预测和校正水面的高程,控制方程是在非均匀交错网格系统中进行显式和隐式有限差分离散的,各方向上的速度分量可以直接求得。这种模型已经应用于新加坡的港口和周围的水域,预测结果和实际测量结果一致。

B. Lin(1997)<sup>[107]</sup>对模拟三维非恒定流沿层积分数值模型作了详细的论述,并在现有研究的基础上,提出了一种三维非恒定流沿层积分数值模型,建立了适合描述水利工程中湍流规律的非线性数值模型,使其能够准确地模拟复杂水流的三维特性。模型在垂直平面内运用了非结构有限差分网格来改善自由表面与切应力的表达式。模型还运用了模式分离机制和 ADI 算法,且用通过对每层平均速度积分得到的沿深度的平均速度求解出压力梯度项,这就使得沿深度积分的二维方程组首先被求解解决;接着用压力梯度项来求解出新一层的平均速度,这样,这个沿层积分的三维方程组也可以求解出来。此外,双层混合模型已被用于 eddy 黏性项的计算。

multi-layer 模型在层分界面结构上与 multi-level 模型是不同的。在 multi-layer 模型中,层分界面在垂直方向上不断地被替换来满足连续,在层分界面上没有质量输移,应用 multi-layer 模型模拟潮汐时,需要对层分界面的边界条件进行严格的描述。在实际情况下,这种状态很难获得。但是,这些困难在 multi-level 模型中却可以克服,因为多层水平面模型假定:层分界面在空间中却是固定的,并且通过层之间的质量输移是连续的。

上述三维 multi-layer 模型和 multi-level 模型,在较大的河口和海岸等领域中的非恒定流数值模拟中皆获得了广泛应用<sup>[101-107]</sup>。

## 1.2 研究问题的提出

从理论上讲,三维数学模型可以做到精确模拟;但在实际操作中,有许多具体问题仍然没被解决,比如精确模拟三维水流的自由表面问题等。因此,应用三维数学模型模拟复杂的边界水流问题还有待作进一步研究。

三维 multi-layer 模型和 multi-level 模型,在较大的河口和海岸等领域中的非恒定流数值模拟中获得广泛应用<sup>[101-107]</sup>,但人们在实际操作中发现,对于有些复杂边界的水流问题,三维特性明显时,还是求解误差较大。所以为了实际工程应用,建立一个能够模拟这种三维水力特性明显的水流模型就显得尤为迫切了。

鉴于此,本书在对三维非恒定流数值模型的研究现状做详细综述的基础上,提出了一种三维非恒定流沿层积分的数值模型,即在曲线坐标系下计入曲率效应的沿层积分紊流水动力模型,使其能够准确地模拟水利工程中复杂水流的三维水力特性。

## 1.3 本书的内容

1)对水流与水质数值模拟发展的现状进行了系统的分析和评述,并提出将研究的问题。

2)对现代紊流理论、数值计算方法进行了详细的综述、归纳和总结,并提出本书采用的模型与方法;对紊流数值计算中的关键性技术问题(离散方法、自由表面位置的确定问题、复杂边界的处理方法等)进行详细的综述和研究。

3)基于直角坐标系和非交错的网格系统,研究一种模拟三维非恒定明渠紊流的沿层积分数值模型。通过对渠道的计算结果和实验结果进行比较可以看出,多层模型辅助标准深度平均模型,可以很好地预测明渠中的时匀量和紊动量。水深校正方法可以用来获得自由表面形状,避免了“刚盖”假定,排除了非交错网格系统带来的计算振荡。

4)提出了一种生成边界处正交曲线网格的新方法,该方法收敛速度快,在复杂边界流场区域的数值计算中,有很大的实用价值。

5)为了克服复杂几何边界给数值计算带来的困难,提高通用性以及水流的预测精度,本书采用上述网格生成技术,在直角坐标系三维非恒定明渠紊流的沿层积分数值模型的基础上,发展了曲线坐标系系统的多层紊流水动力模型。一般的曲线坐标和非交错网格系统的应用,增强了模型计算复杂边界的三维流动



的能力。

6) 为了提高模拟具有自由表面、受显著曲率壁面影响的弯曲明渠水流的能力, 本书对曲线坐标系下的多层紊流水动力模型进行了曲率修正, 计入了曲率效应的影响, 并在一定程度上考虑了紊流的各向异性效应, 是一种很有工程实用价值的模型。

7) 在上述紊流模型的基础上, 建立了三维的水质模型。

8) 采用实例来验证本书所建立的三维非恒定沿层积分数值模型, 并应用于实际工程中。