

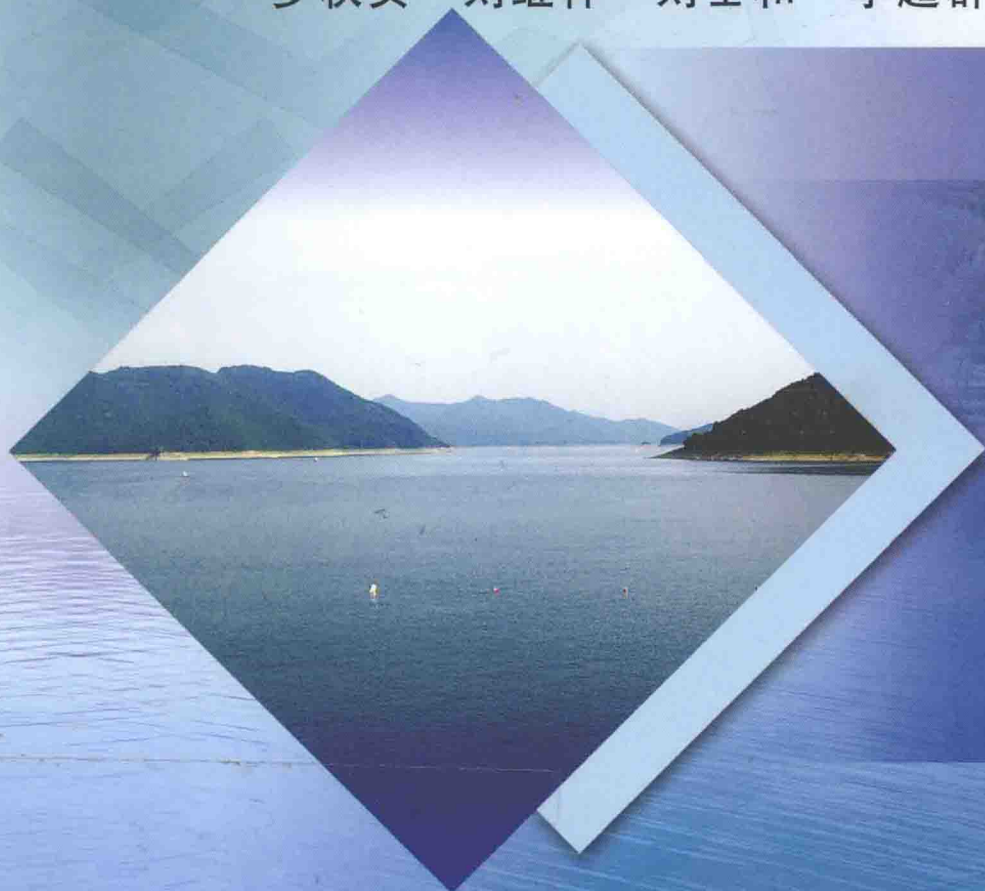


河南省博士后项目启动经费资助出版

黄河勘测规划设计有限公司博士后科研工作站资助出版

# 河流数值模拟技术及 工程应用

罗秋实 刘继祥 刘士和 李超群 著



黄河水利出版社

河南省博士后项目启动经费资助出版

黄河勘测规划设计有限公司博士后科研工作站资助出版

# 河流数值模拟技术及工程应用

罗秋实 刘继祥 刘士和 李超群 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书主要内容包括河流泥沙数值模拟的研究任务总结、研究现状和应用领域简介,河道水沙运动及河床冲淤变形机理及模拟技术探讨,河流泥沙数学模型基本方程构建;网格生成技术探讨,数学模型控制方程离散及求解,数值模拟误差来源与控制;河流数值模拟可视化系统开发,工程应用案例简介。

本书可作为水利院校有关学科的研究生教材,也可作为与此相关的设计与科研工作的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

河流数值模拟技术及工程应用/罗秋实等著. —郑州:黄河水利出版社,2012. 8

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0345 - 6

I. ①河… II. ①罗… III. ①河流泥沙 - 数值模拟 - 研究 IV. ①TV152

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 205693 号

策划编辑:李洪良 电话:0371-66024331 邮箱:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrep.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:郑州海华印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13

字数:300 千字

印数:1—1 000

版次:2012 年 8 月第 1 版

印次:2012 年 8 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

# 前 言

在水利、水运、水电工程的规划和设计中,常常会遇到与水流运动、泥沙输移、河床变形等相关的问题。此类问题对人类生产活动影响甚大,有必要作出预报来作为规划和设计的依据。河流模拟正是研究此类问题的重要手段,它包括物理模型试验和数学模型计算两部分。物理模型试验是根据模型和原型之间的相似准则,建立实体模型,研究水沙运动规律的方法。数学模型计算是根据水流及其输移物质运动的基本规律,构建数学模型,通过求解模型中未知变量,复演并预测水流及其输移物质运动过程的一种研究方法。河流数值模拟是指通过数值计算的方法,求解数学模型,获取计算域内有限个离散点的变量值来近似反映计算域内流动特征的一种研究手段,这和物理模型试验中通过测量有限个位置处的变量值来研究流体运动特性十分相似。河流数值模拟技术经过近几十年的发展,许多技术已趋于成熟,但是鉴于问题的复杂性,仍有一些方面的内容有待进一步的探讨。

本书探讨了河流数值模拟技术及其工程应用。全书分为 11 章:第 1 章为绪论,重点介绍了河流数值模拟的研究内容、研究现状和数值模拟工作的主要步骤;第 2 章为河道阻力及水流挟沙力,介绍了河道阻力和水流挟沙力的定义和计算方法,采用黄河流域实测资料对部分公式进行了检验;第 3 章为河道冲淤变形及模拟技术,介绍了河道在水流作用下垂向变形、侧向淘刷和岸滩崩塌的模拟技术;第 4 章为数学模型的基本方程,介绍了水沙两相流的基本方程,三维模型、平面二维模型和一维模型的基本方程;第 5 章为网格剖分及地形处理技术,介绍了网格分类、数值模拟对计算网格的要求,网格的适用性、生成方法,地形网格的生成技术以及基于实测大断面的三维地形生成技术;第 6 章为控制方程的离散及求解,介绍了基于非结构网格的控制方程离散技术;第 7 章为 RSS 河流数值模拟系统的开发,介绍了数值模拟可视化系统的开发需求、开发平台、结构设计、界面设计及功能设计等;第 8 章为数值模拟误差来源及控制,简要介绍了数值模拟误差来源,同时详细讨论了水沙过程概化引起的误差控制和非恒定流不完全迭代引起的误差控制;第 9 章重点介绍了一维水沙数学模型的开发及应用;第 10 章介绍了平面二维模型的开发及应用;第 11 章介绍了三维水沙运动数值模拟。

本书第 1、5、6、8、10、11 章由黄河勘测规划设计有限公司罗秋实执笔,第 2 章由黄河勘测规划设计有限公司罗秋实、王洪梅共同执笔,第 3 章由黄河勘测规划设计有限公司刘继祥执笔,第 4 章由武汉大学刘士和执笔,第 7 章由黄河勘测规划设计有限公司罗秋实、程冀、胡德祥共同执笔,第 9 章由黄河勘测规划设计有限公司李超群执笔。

本书由河南省博士后项目启动经费和黄河勘测规划设计有限公司博士后科研工作站联合资助出版。黄河勘测规划设计有限公司博士后工作站李斌主任对本书的出版给予了热情的支持和帮助,在此表示感谢。

限于作者水平有限,书中资料引用难免遗漏,甚至有不少不妥之处,衷心希望读者批评指正。

作 者

2012 年 7 月

# 目 录

## 前 言

第 1 章 绪 论 .....	(1)
1.1 河流数值模拟的研究内容 .....	(1)
1.2 河流数值模拟的研究现状 .....	(1)
1.3 河流数值模拟的主要步骤 .....	(11)
参考文献 .....	(11)
第 2 章 河道阻力及水流挟沙力 .....	(18)
2.1 河道阻力 .....	(18)
2.2 水流挟沙力 .....	(23)
参考文献 .....	(28)
第 3 章 河道冲淤变形及模拟技术 .....	(29)
3.1 河道冲淤变形的分类 .....	(29)
3.2 含沙水流的垂向冲淤 .....	(29)
3.3 近岸水流的侧向淘刷 .....	(29)
3.4 岸滩崩塌 .....	(30)
参考文献 .....	(34)
第 4 章 数学模型的基本方程 .....	(35)
4.1 水沙两相流的基本方程 .....	(35)
4.2 三维水沙数学模型的基本方程 .....	(37)
4.3 平面二维水沙数学模型的基本方程 .....	(39)
4.4 一维水沙数学模型的基本方程 .....	(43)
参考文献 .....	(44)
第 5 章 网格剖分及地形处理技术 .....	(45)
5.1 网格分类 .....	(45)
5.2 数值模拟对网格的要求 .....	(45)
5.3 网格适用性分析 .....	(47)
5.4 网格生成方法 .....	(49)
5.5 三维数字地形网格的生成技术 .....	(63)
5.6 基于实测大断面的三维地形生成技术 .....	(65)
参考文献 .....	(69)
第 6 章 控制方程的离散及求解 .....	(71)
6.1 离散方法概述 .....	(71)
6.2 控制方程的通用形式 .....	(72)

---

6.3	通用控制方程离散	(72)
6.4	流速场求解算法	(79)
6.5	数学模型基本方程离散	(81)
6.6	离散方程求解	(91)
	参考文献	(91)
<b>第7章</b>	<b>RSS 河流数值模拟系统的开发</b>	<b>(93)</b>
7.1	常用计算软件简介	(93)
7.2	系统功能需求分析	(95)
7.3	开发平台	(96)
7.4	系统设计及开发	(98)
	参考文献	(109)
<b>第8章</b>	<b>数值模拟误差来源及控制</b>	<b>(110)</b>
8.1	河流数值模拟误差来源	(110)
8.2	水沙过程概化的误差控制	(111)
8.3	不完全迭代误差的控制	(115)
	参考文献	(125)
<b>第9章</b>	<b>一维水沙数学模型的开发及应用</b>	<b>(127)</b>
9.1	控制方程及定解条件	(127)
9.2	数学模型补充方程	(128)
9.3	数值计算技巧	(129)
9.4	测试及验证	(132)
9.5	工程应用	(137)
	参考文献	(148)
<b>第10章</b>	<b>平面二维模型的开发及应用</b>	<b>(149)</b>
10.1	控制方程及定解条件	(149)
10.2	数值计算技巧	(153)
10.3	测试及验证	(156)
10.4	工程应用	(176)
	参考文献	(185)
<b>第11章</b>	<b>三维水沙运动数值模拟</b>	<b>(186)</b>
11.1	控制方程及定解条件	(186)
11.2	相关问题处理	(190)
11.3	模型验证	(193)
	参考文献	(201)

# 第1章 绪论

## 1.1 河流数值模拟的研究内容

在水利、水运、水电工程的规划和设计中,常常会遇到与水流运动、泥沙输移、河床变形相关的问题。此类问题对人类生产活动影响甚大,有必要对其作出预报作为规划和设计的依据。河流模拟正是研究此类问题的重要手段,它包括物理模型试验和数学模型计算两部分<sup>[1]</sup>。物理模型试验是根据模型和原型之间的相似准则,对原型流动进行缩小(或扩大),建立实体模型,研究水沙运动规律的方法。数学模型计算是根据水流及其输移物质运动的基本规律,构建数学模型,通过求解模型中未知变量,复演并预测水流及其输移物质运动过程的一种研究方法。

河流数值模拟是指通过数值计算的方法,求解数学模型,获取计算域内有限个离散点的变量值来近似反映计算域内的流动特征的一种研究手段,这和物理模型试验中通过测量有限个位置处的变量值来研究流体运动特性十分相像。河流数值模拟的研究内容包括如下几个方面:

- (1) 水流及其输移物质运动的基本规律;
- (2) 河道变形及模拟技术;
- (3) 网格剖分及地形处理技术;
- (4) 数学模型构建;
- (5) 数值计算方法;
- (6) 数值模拟可视化技术;
- (7) 数值模拟误差来源分析及控制;
- (8) 数学模型应用。

河流数值模拟是以水库、河道、湖泊、河口中大尺度水体为研究对象,主要服务于水利、水运、水电等行业,用于研究与水沙运动及河床冲淤变形有关的各种问题,如:水库工程规划设计过程中库区及下游河道泥沙冲淤问题<sup>[2-6]</sup>;涉水工程实施前后对河道行洪和河势稳定的影响<sup>[7]</sup>。近年来,随着模拟技术的发展,河流数值模拟的应用范围有所扩展,一些模型通过改进用于污染物输移模拟及生态指标预测,如:电站温排水<sup>[8]</sup>或沿河排污对河道水环境的影响<sup>[9]</sup>等。

## 1.2 河流数值模拟的研究现状

河流泥沙数学模型的研究起源于20世纪50年代,但是计算机和水沙运动计算相结合的现代河流水沙数学模型却发展于20世纪70年代后期,比许多学科的数学模型晚10~



20 年的时间,其主要原因有三:首先,人类对泥沙问题严重性的认识不足,其在国民经济发展中的地位不高;其次,泥沙数学模型的发展必须建立在水流数学模型的基础上,所以其发展必然是滞后于水流数字模型的发展且受水流数字模型发展的制约;最后,由于泥沙问题本身的复杂性,使得泥沙数学模型的发展受到很大的约束<sup>[3]</sup>。但是,近年来,尤其是 20 世纪 90 年代以后,河流水沙数学模型以其研究周期短、成本低、无比尺影响等优点,引起了广泛的重视,并得到了长足的发展。已有研究成果可以归纳为如下几个方面。

### 1.2.1 含沙水流输移规律

数学模型能否反映实际物理情况,计算结果是否可靠,在很大程度上取决于建立数学模型时所依赖的物理模式是否可靠。含沙水流输移规律的合理正确描述,对水沙数学模型构建及计算结果的可靠性起着至关重要的作用。从研究现状来看,不同的数学模型控制方程大体相同,差异主要在于阻力、水流及泥沙紊动黏性系数、挟沙力、非均匀沙分组挟沙力、推移质输沙率以及恢复饱和系数等问题的处理上。

#### 1.2.1.1 阻力

阻力是河道水流运动模拟中必须考虑的重要因素。对处于阻力平方区的河道水流而言,其阻力系数可以有多种不同的表达方式,如:谢才系数  $C$ 、曼宁糙率系数  $n$ 、达西 - 韦斯巴赫阻力系数  $f$  以及床面粗糙度等,它们之间可以相互转化<sup>[10-12]</sup>:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{H^{1/6}}{n\sqrt{g}} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{\bar{U}}{U^*}$$

河道阻力主要有两种确定方法:一种是按不同的阻力单元,如河床阻力、河岸阻力、河槽形态阻力等,分别计算其阻力系数,然后再叠加组合,该方法是在 Einstein 提出的阻力分割理论的基础上发展而来的,在机理上较为明确,各种因素的变化也可分别考虑,Engelund<sup>[13]</sup>、White<sup>[14-15]</sup>、王世强<sup>[16]</sup>等都是沿着这一途径计算河道阻力的;另一种是直接计算总阻力系数,该方法虽然未考虑阻力的形成机理,但是计算简单,在工程中应用较多,如钱宁<sup>[17]</sup>、李昌华<sup>[18]</sup>等曾基于谢才公式建立了河道糙率系数,秦荣昱等<sup>[19]</sup>曾基于对流速分布公式建立了床面糙率的综合表达式,赵连军等<sup>[20]</sup>曾基于挟沙水流流速分布公式建立了河床糙率与水沙因子之间的关系。虽然目前关于河道阻力问题的研究已取得不少成果,但是由于影响河道阻力的因素非常复杂,除床面沙粒和沙波阻力外,河道形态、滩地植被、水体含沙量、水温甚至河床渗透特性都有可能对河道阻力产生明显的影响<sup>[11,21]</sup>,因此完全从理论上确定河道阻力从目前来看是非常困难的,应用上更倾向于直接计算总阻力系数,其中最具代表性的成果是曼宁糙率系数  $n$ 。曼宁糙率系数  $n$  经过 100 多年的应用,已积累了大量的经验资料供参考。实践证明,该方法基本上可以满足工程要求的精度。

河流泥沙数学模型中的一维模型和二维模型均是采用曼宁糙率系数  $n$  表示河道阻力的。曼宁糙率系数是度量水流运动诸多复杂影响因素中除目前可以度量外的一个综合参数,一维模型和二维模型中糙率所度量的因素是有差别的,一维模型中糙率包含河床边界阻力、水流紊动、河床平面形态等因素对水流的综合影响;二维模型中由于数学模型基本方程已经考虑了水流紊动、河床平面形态对水流的影响,因此糙率度量的影响因素相对少一些,取值相对小点。由于糙率取值度量因素复杂,因此数学模型计算时一般先根据糙率

取值表或利用河道实测资料通过恒定非均匀流阻力公式确定初始糙率,然后根据实测资料进行验证计算,通过水位实测值和计算值的比较来分析糙率取值是否合理,再确定其最终取值。实践证明,该方法基本上可以满足工程要求的精度,但验证时注意验证资料的代表性,以反映河道阻力随水流运动和河床冲淤状态变化而变化的规律。

### 1.2.1.2 水流紊动

天然河道中水的流动多处于紊流运动状态,且多挟带泥沙。紊流是非常复杂的流动现象,悬移质泥沙的存在会影响水流的紊动结构,进一步增加了问题的复杂性。由于受量测手段的限制,挟沙水流紊动强度的实测资料十分有限,而且显示出很大的矛盾和不一致。一种观点认为挟沙水流的紊动减弱<sup>[21]</sup>,另一种观点则认为挟沙水流紊动增强<sup>[22-24]</sup>。鉴于问题的复杂性,目前多进行简化处理,一方面忽略泥沙存在对水流的影响,另一方面采用湍流模式理论封闭流动方程,目前用的比较多的是二阶矩模式和黏性模式,包括雷诺应力输移模式(RSM)、代数应力模式(ASM)、 $k-\varepsilon$ 湍流模式和零方程模式等。如:平面二维水沙数学模型大多采用零方程模式<sup>[25-26]</sup>,部分学者采用水深平均的 $k-\varepsilon$ 湍流模式<sup>[27]</sup>,个别学者采用其他模式<sup>[28]</sup>;已有的三维水沙数学模型大多在满足计算精度要求的前提下,考虑计算工作量的限制,采用 $k-\varepsilon$ 两方程模式封闭湍流方程。

河流泥沙数学模型中的紊动黏性项反映了水流中不同尺度涡体之间能量传递和消耗的综合影响,对水流流速分布具有明显影响,构建模型时应妥善处理水流紊动黏性项,尤其是具有回流、环流的复杂流动,必要时还需要采用高级湍流模型,进行精细模拟。

### 1.2.1.3 水流挟沙力

水流挟沙力是指在一定水流和泥沙综合条件(包括断面面积、水力半径、平均流速、水面比降、泥沙沉速和泥沙级配等水沙条件和边界条件)下,水流能够挟带的悬移质中的床沙质的临界含沙量<sup>[3,21]</sup>。水流挟沙力是泥沙数学模型中的关键变量,也是水沙运动基本理论研究中最为棘手的难题之一,长期以来,国内外的研究者通过各种手段对水流挟沙力问题进行了大量的研究,他们或者从理论分析入手,或者根据原型观测或试验资料,提出了很多理论的、半经验的或经验的水流挟沙力公式。其中最具代表性的成果是20世纪50年代,张瑞瑾以大量实测资料和水槽中阻力损失及水流脉动速度的试验成果为基础,在制紊假说的指导下,由能量平衡理论推导的水流挟沙力公式:

$$S^* = k \left( \frac{U}{gh\omega} \right)^m$$

式中: $S^*$ 为以质量计的水流挟沙力; $\omega$ 为泥沙沉速; $k$ 、 $m$ 分别为挟沙力系数和指数,对于不同的河道具有不同的取值,在计算时可根据实测资料确定。

由于张瑞瑾公式是基于能量平衡而推导的半经验公式,在量纲上是和谐的,并且经过了长江、黄河及若干水库、渠道及室内水槽等大量资料的验证,因此该公式具有坚实的理论和实践基础,是工程界普遍接受的挟沙力计算公式之一。

在张瑞瑾之后,也有不少学者对水流挟沙力进行了研究,如沙玉清<sup>[29]</sup>、Yang<sup>[30]</sup>、曹汝轩<sup>[31]</sup>、李昌华<sup>[32]</sup>、窦国仁等<sup>[33]</sup>也建立了自己的挟沙力公式。这些公式除窦国仁公式外,基本没有考虑含沙量对水流挟沙力的影响,而实际上对含沙量较大的水流,含沙量对水流挟沙力会产生较为明显的影响,为进一步提高含沙水流挟沙力的计算精度,张红武从能量

消耗和泥沙悬浮功之间的关系出发,考虑了泥沙存在对卡门常数和泥沙沉速的影响,给出了适用于不同含沙量的悬移质水流挟沙力公式<sup>[34]</sup>:

$$S_* = 2.5 \times \left[ \frac{(0.0022 + S_v) U^3}{\kappa \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} gh\omega} \ln\left(\frac{h}{6D_{50}}\right) \right]^{0.62}$$

式中: $S_v$  为挟沙水流的体积含沙量; $h$  为水深; $\kappa$  为卡门常数,其他相关参数的取值可参考文献<sup>[22]</sup>。

张红武公式自建立以来,已经过了长江、黄河、辽河及 Muddy 等国内外河流实测资料的验证,验证成果表明,该公式不但适用于一般挟沙水流,而且适用于高含沙水流<sup>[4]</sup>。此外,王光谦<sup>[4]</sup>、舒安平<sup>[35]</sup>、江恩惠<sup>[36]</sup>、陈力<sup>[37]</sup>、韦直林<sup>[38]</sup>等的研究也表明从实用的角度考虑,现阶段以该式的计算精度最高,不同水流挟沙力公式的比较见图 1-1。

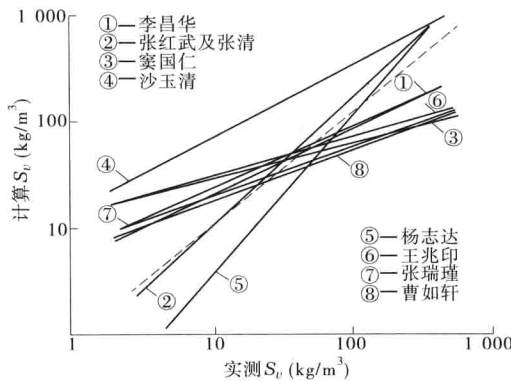


图 1-1 不同水流挟沙力公式的比较<sup>[23]</sup>

已有的挟沙力计算公式大多是以断面平均的水力要素为分析依据。对于平面二维水流挟沙力的计算,多是简单地借用一维挟沙力的研究成果,用垂线平均流速代替断面平均流速,用水深代替水力半径进行计算。李义天等<sup>[3]</sup>点绘了长江中游枝江、监利、石首等河段的实测资料和断面平均挟沙力与断面平均  $U^3/(gh\omega)$  关系,认为二者点群较为集中,相关关系好。但是点绘不同测点垂线平均流速和垂线平均  $U^3/(gh\omega)$  后,认为总体趋势基本合理,但点群分散,相关关系差。由此可见,基于断面平均水力要素建立的挟沙力公式推广应用于二维模型尚需进行研究。李义天<sup>[3]</sup>和杨国录<sup>[10]</sup>曾对平面二维水流挟沙力进行了研究,为二维水流挟沙力的确定提供了参考。

#### 1.2.1.4 非均匀沙分组挟沙力

含沙水流中的泥沙粒径有时候是很不均匀的,在一般情况下粗的可以达到 1 mm,细的可以到 0.001 mm 或更小<sup>[21]</sup>,因此挟沙力计算有必要考虑泥沙的非均匀性。最理想的方法是通过考虑不同粒径泥沙颗粒之间的相互影响,直接推求不同粒径组的挟沙力,然后将分组挟沙力求和得到总挟沙力。但是,由于目前在理论上对分组泥沙运动规律的认识还不清楚,直接推求分组挟沙力的计算结果往往不够理想<sup>[4]</sup>。目前,数值模拟计算中大量采用的方法是选用河床泥沙的某一特征粒径作为代表粒径,直接推求河流的床沙质挟

沙力,然后分别确定各粒径组的挟沙力级配,再确定分组挟沙力,该方法现有的研究成果可归为三类。

#### 1) 由悬移质级配求分组挟沙力

为计算非均匀沙的分组挟沙力公式,韩其为曾假定挟沙力级配等于悬移质泥沙级配<sup>[21,39,40]</sup>,即  $P_{i*} = P_{si}$ 。此外,韩其为认为现有的计算均匀沙的挟沙力公式可用于非均匀沙,关键在于代表沉速 $\bar{\omega}$ 的选择,并建议取  $\bar{\omega} = \left( \sum_{i=1}^m P_i \omega_i^m \right)^{1/m}$ 。该方法在接近输沙平衡时,计算误差不大,但是这种计算方法在冲淤变化极不平衡时,误差较大,如对于水库下游的冲刷计算,由于悬移质中粗颗粒泥沙的含量几乎为0,如果认为其挟沙力级配也为0,则粗颗粒泥沙永远也无法冲起。为了解决这个问题,韩其为于1987年发展了以前的模式<sup>[41]</sup>,并于1990年又对该模式进行了改进,建立了新的分组挟沙力级配计算方法<sup>[42]</sup>。

#### 2) 由床沙级配求分组挟沙力

美国陆军工程师兵团研制的 Hec-6 模型<sup>[5]</sup>中处理非均匀沙挟沙力的方法属于此类。其基本思想就是先求每一粒径组均匀泥沙的可能挟沙力,即全部床沙均为某种均匀泥沙的水流挟沙力  $S_{pi}$ ,再按照床沙级配曲线求这一粒径组在床沙中的含量百分比  $P_{bi}$ ,两者乘积即为这一粒径的分组水流挟沙力。

对于非均匀沙来说,挟沙力不仅与泥沙粒径和水流强度有关,而且与河床中该粒径的含沙量多少有关,因为河床中含量越多,泥沙悬浮交换的概率越大。对于  $\omega_i > \bar{\omega}$  的粒径,挟沙力级配才小于床沙级配;对于  $\omega_i < \bar{\omega}$  的粒径,挟沙力级配才大于床沙级配,这在定性上是合理的,但假定挟沙力级配等于床沙级配缺乏理论依据<sup>[3]</sup>。

#### 3) 由水沙条件和床沙级配求分组挟沙力

该方法首先建立平衡状态下的悬沙级配和床沙级配之间的函数关系,然后推求挟沙力级配,并计算分组挟沙力级配,如李义天方法<sup>[3]</sup>、杨国录方法<sup>[10]</sup>。

### 1.2.1.5 推移质输沙率

推移质是指随水流迁移过程中,沿河床床面滚动、滑动或跳跃前进的泥沙颗粒。推移质输沙率计算是河流泥沙数值模拟的重要任务之一,但是关于推移质的研究和应用水平远不及悬移质,其主要原因是天然河流推移质输沙资料测量非常困难,难以为科学研究提供较为丰富的验证资料,此外推移质运动机理也较为复杂,但尽管如此,也出现了不少有代表性的推移质输沙率公式,这些公式大致可以分为如下几类<sup>[4]</sup>:

(1) 以流速为主要参数的推移质输沙率公式,此类公式以沙莫夫<sup>[21]</sup>推移质输沙率公式为代表;

(2) 以拖曳力为主要参数的推移质输沙率公式,最具代表性的是梅叶-彼得公式<sup>[43]</sup>、恩格隆公式<sup>[44]</sup>和阿克斯-怀特公式<sup>[45]</sup>。

(3) 用能量守恒推导出来的推移质输沙率公式,以拜哥诺公式<sup>[46]</sup>为代表。

(4) 用数理统计的方法推求的推移质输沙率公式,以 Einstein 公式<sup>[47]</sup>为代表。

### 1.2.2 河床冲淤变形及模拟技术

在挟沙水流的作用下,河床总是处于不断的变化与发展之中,对于河床冲淤变化已经

有不少研究成果,将从如下几个方面对现有的部分成果进行说明。

### 1.2.2.1 河床变形的形式

现有的研究成果多将河床变形分为纵向变形和横向变形两种<sup>[48-49]</sup>,如图 1-2 所示。纵向变形主要是由含沙水流的纵向冲淤引起的变形,横向变形是指由于岸滩的淤长和侵蚀后退引起的河道平面形态变化。实际上,将河床变形划分为纵向变形和横向变形并不是绝对的,如纵向淤积可能引起岸滩的淤长,纵向冲刷可能会引起岸滩的后退。本书建议按照河床变形的原因将其划分为三类:由含沙水流的垂向冲淤引起的变形,由含沙水流侧向淘刷引起的岸滩变形,由岸滩崩塌引起的岸滩变形(包括由重力作用、渗流作用、冻融作用或人为因素引起的坍塌)。

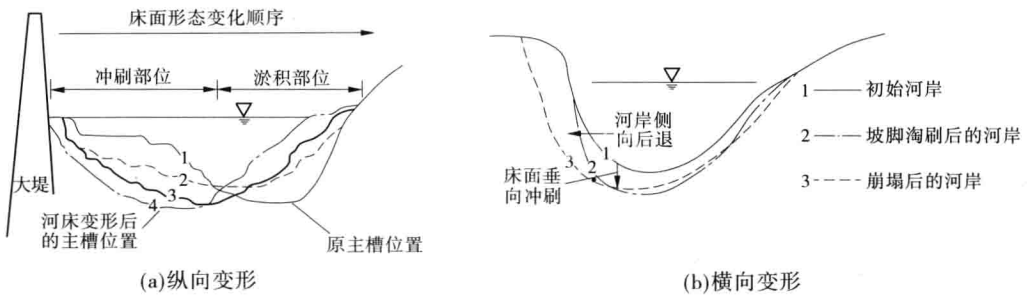


图 1-2 河床纵向冲淤变化示意图<sup>[35]</sup>

### 1.2.2.2 河床变形的机理研究

目前,对于含沙水流的垂向冲淤变形相关问题研究较多<sup>[50-51]</sup>,由于问题的复杂性对含沙水流侧向淘刷和岸滩崩塌所引起的变形机理研究较少,但也出现了一些非常有意义的研究成果,如匡尚富等<sup>[52]</sup>探讨了河岸岸脚淘刷机理与岸滩稳定性之间的关系,在分析岸滩泥沙起动特点和顺直河段剪切力分布的基础上,指出在同样的水流条件下,河岸泥沙比河底泥沙更容易起动和冲刷;夏军强<sup>[49,53-54]</sup>、王新宏<sup>[48]</sup>、王延贵<sup>[55]</sup>、Osman<sup>[56]</sup>、Thorne<sup>[57]</sup>、Pizzuto<sup>[58]</sup>等都对河岸坍塌变形机理进行了研究,其中王延贵通过试验研究,原型观测和理论分析相结合的手段对河岸坍塌的机理进行了较为系统的分析与试验,其成果对深入认识河岸坍塌机理具有重要的价值。

### 1.2.2.3 河床垂向冲淤变形的模拟技术

恢复饱和系数确定和床沙级配调整是河床垂向冲淤变形计算中较为重要的两个问题。此外,一维模型冲淤面积分配也是一个非常值得关注的重要问题。

#### 1) 恢复饱和系数

恢复饱和系数( $\alpha$ )是反映悬移质不平衡输沙时水体含沙量向挟沙能力接近的参数,它既与水流动力、泥沙条件有关,又与地形有关,河床冲淤量对恢复饱和系数的变化十分敏感。虽然有不少学者对其进行过探讨<sup>[59-66]</sup>,但是由于所涉及问题的复杂性,目前对恢复饱和系数的认识远远不足,对其取值仍存在一些争议。文献[1]和文献[62]提到,从理论上说恢复饱和系数总是大于1,但是在实际计算时根据实测资料推求的恢复饱和系数往往小于1,有的河流中有实测资料率定的恢复饱和系数甚至远小于1,如黄河下游 $\alpha$ 常

采用0.01。韩其为近些年来对恢复饱和系数进行了系统的研究,20世纪70年代通过分析实测资料,提出淤积时 $\alpha$ 取0.25,冲刷时取1,此经验值在不少数学模型中得到应用,90年代后期韩其为又根据泥沙交换的统计理论,深入地研究了非均匀悬移质不平衡输沙的规律,得出了理论公式及其数值计算结果<sup>[65-67]</sup>。

### 2) 床沙级配调整

目前,对非均匀沙床面冲刷后床沙级配调整计算大多引入“混合层”或“交换层”的概念来建立床沙级配方程,且多假设非均匀的床沙在交换层内是充分掺混的,床沙级配在交换层内是均匀的<sup>[68-73]</sup>。如以韦直林采用的分层模式为例:对于每一断面,可将断面可动层划分为表层、中间层和底层共三层。假定在计算时段内各层界面都固定不变,泥沙交换限制在表层内进行,中间层和底层暂时不受影响。在时段末,根据床面的冲刷或淤积往上或往下移动表层和中间层,保持这两层的厚度不变,而令底层随冲淤厚度的大小而变化,同时对表层和中间层的床沙级配进行调整,具体计算过程可见文献<sup>[73]</sup>。

### 3) 冲淤面积分配问题

一维模型能够给出各断面的总冲淤量和河段总冲淤量,要进一步了解冲淤沿纵向和横向的变化特性,还必须对冲淤量沿河宽方向进行分配。常用的方法有平均分配、按面积分配、按能量比分配和按水流含沙饱和程度分配等<sup>[68]</sup>。

#### 1.2.2.4 岸滩侧向淘刷及崩塌的模拟技术

当前在河流水沙数学模型中,用来模拟河岸冲刷过程的方法主要有三类。

##### 1) 经验模拟法

该方法是在分析大量实测资料的基础上,建立各种经验关系式来估计河宽变化的大小,进而分析河岸的冲淤变化,如:梁国亭、张仁<sup>[74]</sup>曾在黄河中用禹门口至潼关河段的数学模型中利用河相关系数来估计河宽变化;徐炯心建立了河宽变化与河岸土体抗冲指标之间的关系式;梁志勇<sup>[75]</sup>、周建军<sup>[76]</sup>等根据河岸土体起动切应力和水流切应力建立了水流侧向冲刷河岸速率公式:

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{C_l}{\gamma_s \gamma} (\tau_f - \tau_x) \tau_f$$

##### 2) 极值假说模拟法

该方法模拟河床冲淤变形是在现有的泥沙数学模型的基础上,引入一个附加方程来预测河宽变化,具体步骤就是先根据水流条件确定河宽的调整方向,再根据近岸水沙条件、河岸可冲刷程度确定河宽调整速率。极值假说模拟河床横向变形两个代表模型是张海燕<sup>[77]</sup>提出的 FLUVIAL-12 模型和美国垦务局开发的 GSTARS 模型<sup>[78]</sup>。

##### 3) 力学模拟技术

该方法主要采用水动力学模型计算河床冲淤变形,然后用土力学模型分析河岸稳定性。对于非黏性土河岸的数值模拟,以 Ikeda<sup>[79]</sup>、Pizzuto<sup>[58]</sup>和 Duan<sup>[80]</sup>方法为代表,其主要步骤就是先根据河床冲淤变形情况,分析河岸稳定性,将坍塌下来的土体按沙量守恒或输沙平衡法进行处理;对于黏性土河岸的力学模拟,以 Osman<sup>[56]</sup>和 Thorne<sup>[57]</sup>的方法为代表,该方法首先根据河岸冲刷速率经验公式计算河岸横向冲刷距离,然后分析河岸的边坡稳定性;对于混合土河岸冲刷过程的力学模拟以 Fukuoka<sup>[81]</sup>为代表。此外,夏军强<sup>[54,82]</sup>也



从力学分析的角度分析了不同土质河岸的冲刷过程。

### 1.2.3 数值计算方法

#### 1.2.3.1 网格生成

网格生成是二维(三维)河流数值模拟的重要研究课题之一。进行复杂河道二维数值模拟时,网格的形式和布置将会对计算精度产生一定的影响,同时在进行流场数值模拟的过程中,复杂而繁重的数据准备工作也将成为计算工作的瓶颈,因此网格生成技术在河流数值模拟中一直受到高度的重视。从现有研究成果来看,河流模拟中所采用的计算网格按其拓扑结构可以分为结构网格和非结构网格<sup>[83]</sup>。

结构网格是一种传统的网格形式,其节点与节点之间有着明确的相对位置关系。目前,河流模拟中常用的矩形网格、正(非)交曲线网格都属于结构网格。其中:矩形网格是河流模拟中最早使用的计算网格,这种网格不需要从物理空间到计算空间的转化,因而生成简单、省时,网格容易加密,可以提高计算精度。但其最大的缺点就是:在边界处不可能做到完全贴体,经常采用局部细化来减小误差;曲线网格是1974年由Thompson提出的一种网格生成方法<sup>[84]</sup>,它主要是通过坐标变换生成和计算区域边界比较吻合的网格,该网格可以适用于较为复杂的计算边界,因此在二维模拟中得到了非常广泛的应用,目前主要通过求解微分方程法生成(非)正交曲线网格<sup>[85-90]</sup>。

非结构网格是最近几年才发展起来的一种计算网格。相对于结构网格来说,非结构网格因舍弃了网格节点的结构性限制,节点和单元分布是任意的,易于控制网格单元的大小、形状及网格点的位置,对复杂外形的适应能力非常强,因而能较好地处理复杂边界。此外,非结构网格随机的数据结构非常利于进行网格自适应,并进行局部网格优化。非结构网格包括非结构三角网格、非结构四边形网格和非结构混合网格,非结构三角网格的生成方法较为成熟<sup>[93]</sup>,非结构四边形网格和非结构混合网格的网格生成还较为困难。目前,生成非结构三角网格的方法主要有阵面推进法<sup>[91-92]</sup>和Delaunay三角化法<sup>[92]</sup>,其中阵面推进法的优点是对区域边界拟合的比较好,所以在对区域边界要求比较高的情况下,常常采用这种方法;其缺点是进行阵面推进的每一步都必须对邻近节点或邻近阵元进行搜索并进行相交性判断,生成的速度比较慢。Delaunay三角化法的优点是速度快,网格的质量比较容易控制,能尽可能得到高质量的三角形单元;缺点是对边界的恢复比较困难,很可能造成网格生成的失败。Bowyer算法经过不断的改进已经成为生成Delaunay三角形比较成熟的算法之一<sup>[93-98]</sup>。

#### 1.2.3.2 控制方程的离散

一维泥沙数学模型的数值计算方法较为成熟,恒定流模型一般采用二分法进行求解<sup>[6,99]</sup>,非恒定流模型一般采用四点偏心隐格式进行求解<sup>[100-102]</sup>。

二维和三维模型常用的离散方法包括有限差分法(Finite Different Method,简称FDM)、有限元法(Finite Element Method,简称FEM)和有限体积法(Finite Volume Method,简称FVM)。其中:有限差分法是数值模拟中最早采用的离散方法,它主要是在网格节点上用函数的差商代替微商,进而对控制方程进行离散,该方法具有数学概念直观,表达简单等优点,但是守恒性较差;有限元法的基础是变分原理和加权余量法,其基本思想就是

把计算区域划分为有限个互不重合的计算单元,用单元基函数的线性组合来逼近单元中的真解,进而对控制方程进行离散求解,有限元法能够灵活地处理复杂边界,且计算精度较高,但是在计算急变流时容易出现速度坦化现象且计算量较大,因而在非恒定性较强的问题中没有得到广泛的应用;有限体积法是继有限差分法、有限元法之后发展起来的一种新的数值计算方法,该方法从水量和动量守恒的物理概念出发,将待解的微分方程在控制体上进行积分,进而得出一组离散方程,有限体积法也能够灵活地处理复杂边界,物理意义明确且能够保证变量的守恒性。此外,根据待求变量的处理方法不同,可以将离散格式分为显格式和隐格式:显格式将空间项的离散变量全部按照已知变量处理;隐格式将空间项的离散变量全部按照待求变量处理。显格式的优点是不必进行迭代即可计算出下一时间的变量值,因而程序编制简单,但是其稳定性受时间步长限制。隐格式的收敛性不受时间步长的限制,但是其需要迭代求解,程序编制比较复杂。

从现有研究成果来看,有限体积法在河流模拟中应用最为广泛。按照所采用的网格,又可以将有限体积法分为基于结构网格的有限体积法和基于非结构网格的有限体积法。基于结构网格的有限体积法发展的较早,也比较成熟<sup>[101-110]</sup>。基于非结构网格的有限体积法最初只是应用于求解 Euler 方程<sup>[111-112]</sup>,但是近年来,有不少学者采用基于非结构网格的有限体积法求解二维水沙数学模型,如:Anstasiou<sup>[113]</sup>和 Chan<sup>[114]</sup>曾建立了非结构网格上二阶迎风 Roe 格式;Zhao 等<sup>[115]</sup>曾基于 Osher 格式建立了基于非结构网格上的有限体积法。在 Harten-Lax-van Leer (HLL) 黎曼算子<sup>[116]</sup>提出之后,Hu 等<sup>[117]</sup>发展了 HLL 型 MUSCL 有限体积法;Wang 和 Liu 等<sup>[118]</sup>曾将非结构网格上的四种方法(Roe-MUSCL、Roe-Upwind、HLL-MUSCL 和混合有限体积法)的精度稳定性和计算速度等进行了比较,得出了非常有意义的结论;此后,Tae Hoon Yoon<sup>[26]</sup>利用 HLL 算子建立了二阶精度的 TVD 有限体积法并模拟了法国 Malpasset 坝的溃决;施勇等<sup>[25]</sup>建立了基于非结构网格上的平面二维水沙数学模型,并将模型应用于谭江樟州河段的河床变形计算。

### 1.2.3.3 水位和流速耦合关系的处理

水位和流速的耦合关系处理,目前最为流行的是 SIMPLE 系列算法<sup>[119-128]</sup>,这些算法都是利用连续性方程使假定的水位能够通过不断的迭代逼近真实解。但是,由于流速在连续性方程中、水位在动量方程中都是一阶导数项,如果简单地将各个变量置于同一套网格上,当水位出现“间跃式”(也称为“棋盘式”)分布时离散方程在求解过程中就无法检测出“间跃式”水位。为了避免在数值求解过程中出现“间跃式”水位,过去最常见的办法是采用交错网格把标量存储于网格节点上而把流速等向量存储于控制体界面上。虽然基于交错网格的 SIMPLE 系列算法较好地处理了连续性方程中速度一阶导数和运动方程中水位一阶导数的耦合关系,比较彻底地克服了波形压力场的存在,但是由于交错网格存储变量的位置不同,相应的也需要多套网格来适应编程的需要(在二维问题中需要 3 套网格,三维问题中需要 4 套网格),因而程序编制比较复杂,尤其是对于非结构网格上的水流运动计算交错网格的不便之处更是暴露无疑,因此几年来不少文献采用基于同位网格的 SIMPLE 算法处理水位和流速的耦合关系<sup>[104,116-128]</sup>。

### 1.2.3.4 动边界处理

由于天然河道水位变化较大,河道形态也颇为复杂,要精确反映边界位置的变化是比



较困难的。为体现不同水位条件下边界位置的变化,采用了动边界技术,处理动边界的方法很多,如窄缝法、最小水深法、冻结法等,其中冻结法运用较广。

#### 1.2.4 可视化系统开发

目前,国外已经开发了许多优秀的商用软件(如荷兰的 Delft3D、丹麦的 DHI 系列软件、美国的 SMS 和 CCHE 等),这些软件都具有独立的可视化界面,完善的前处理及后处理系统,且集成的数学模型能够适应不同的计算要求。如: Delft3D 可以采用直角坐标网格和正交曲线坐标网格模拟河道及河口海岸地区的水流<sup>[129]</sup>、水质<sup>[130]</sup>、波浪问题; DHI 系列软件(包括 MIKE11、MIKE21、MIKE3 等)是丹麦水力研究所推出的水流数值模拟系列软件之一,该软件具备比较友好的界面,主要用于模拟河流、湖泊、河口海岸以及海洋中的水流、波浪、泥沙及生态问题<sup>[131-132]</sup>; SMS 是由美国 Brigham Young University 等联合研制的一套自由表面水流数值模拟系统,该系统提供了一维、二维、三维的有限元和有限差分数值模型,能够生成非结构网格,对复杂边界适应能力较强,可用于河道以及径流、潮流、波浪共同作用下的河口和海岸的水沙数值模拟<sup>[133]</sup>; CCHE 为美国密西西比大学工程系研制的一个通用模型,该模型可采用三角网格及四边形网格,可用于河道、湖泊、河口、海洋水流及其输运物的一维、二维及三维数值模拟。

国内在河流数值模拟技术的应用与研究方面也做了大量的工作并开发了一些可视化系统,如:茅丽华等<sup>[134]</sup>尝试应用 Matlab 语言进行潮流数值计算结果的可视化研究,并对长江口三维数模计算结果进行了可视化显示;廖世智等<sup>[135]</sup>将 GIS 与二维水流泥沙数学模型进行集成,开发了二维水沙数学模型计算软件;王琦<sup>[136]</sup>利用 VC++ 语言开发了数值计算可视化系统,可用于实现地形、流场、浓度等标量场矢量场的二维可视化;曹为刚<sup>[137]</sup>和韩样<sup>[138]</sup>都曾利用 OpenGL 和 VC 的 MFC 技术实现了三维地形的可视化技术;张细兵等<sup>[139]</sup>曾采用 FORTRAN 和 VB、VC 语言建立了平面二维可视化数学模型及动态演示系统,该系统能实现计算全过程的可视化,能实现计算数据的 2D 和 3D 静态显示和动态演示,从而大大提高了用数学模型解决工程问题的效率;罗小峰<sup>[140]</sup>开发出了滨海河口波浪水流泥沙数学模型系统,可以实现计算结果的可视化显示;此外,由交通部天津水运工程科学研究所研制的海岸河口多功能数学模型软件包 TK-2D 是国内水运工程行业第一个拥有自主知识产权的软件包<sup>[141-142]</sup>,该软件是在长期数学模型研究的工作基础上,通过对海岸河口数学模型进行系统化、实用化、通用化而集成的,数学模型理论正确,模式和数值方法先进,边界处理合理,软件中的辅助模块中前处理系统和后处理系统操作简单、方便。实现了窗口菜单操作,网格处理技术成熟可行,系数和参数选取合理、恰当。

#### 1.2.5 数学模型应用

目前,国内外数学模型发展很快,在水利、水运、水电等行业中的应用越来越普遍,对于复杂泥沙运动计算经验也越来越多,如:三峡水库泥沙问题是世界性难题,在水库规划设计及运行过程中,河流泥沙数学模型作为一种重要的研究手段在研究库区泥沙淤积、下游河道冲刷以及库区变动回水区的通航问题等方面发挥了重要的作用;黄河等多沙河流上水流运动及泥沙冲淤相关问题的研究,也多采用数学模型;沿海大型港口建设、长江口