

珠江河口若干水利问题 探讨与研究

● 刘俊勇 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

珠江河口若干水利问题 探讨与研究

◎ 刘俊勇 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了珠江河口区河网与河口湾整体联解潮流、泥沙、盐度数学模型的建立过程,对河口区泄洪输沙纳潮体系及河网节点、汊道、主要节制闸、洪潮调蓄功能、洪潮遭遇等问题进行了研究探讨,并对河口区涉水项目防洪影响、泥沙、咸潮等工程性问题进行举例分析与论证。

本书可供从事河口治理与研究的相关技术、科研人员参考学习与借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

珠江河口若干水利问题探讨与研究 / 刘俊勇著. —
北京:中国水利水电出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-5170-3874-0

I. ①珠… II. ①刘… III. ①珠江—河口—水利工程—研究 IV. ①TV882.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第292650号

书 名	珠江河口若干水利问题探讨与研究
作 者	刘俊勇 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.25印张 266千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

在我国各江河中,与长江、黄河等比较,珠江河口特点显著:①雨多水丰:汛期长,洪水多峰、量大、集中、遭遇复杂;②多江汇聚:以西江为主干,多方向汇聚了流域西、北、东江等大中小河流,流量大,流势强;③入海河段分化成网:主要汉道 100 多条,纵横交错,交汇节点约 200 多个,分、汇流复杂,还有众多毛细河涌,形成复杂形态三角洲,河口范围大,拥有广州、佛山、中山、东莞、珠海等众多城市;④多口门出海:拥有虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门、崖门,各口门形态不同,动力各异,像八条巨龙喷吐宣泄着珠江洪水;⑤河口湾内切:伶仃洋、黄茅海两大河口湾,像两只巨蟹切入三角洲,将海洋与河流融为一体;⑥多种动力共存:洪潮共存,洪季洪水覆盖整个三角洲,枯季充满潮流,洪潮往复运动,是珠江河口的生命动力;⑦河口岸线长:从伶仃洋的九龙半岛九龙城,西到黄茅海的赤溪半岛鹅头颈,大陆岸线长 450 多 km,防洪困难,台风、暴潮影响显著。

以上特点可以概括为“多江汇流、河网密布、洪潮交汇、八口出海、洪潮复杂”。因为其复杂性,历来对珠江河口的治理与研究都是难题。本书侧重于对河口若干难点问题的探讨,从不同于以往角度分析认识河口,挖掘河口更复杂的问题,启发人们思考与探讨。

本书共分 10 章。第 1 章主要针对珠江河口河网、河口湾整体联动性,开发建立了珠江河口区整体数值模型,作为研究河口水流运动的主要技术手段;第 2 章研究分析了河口区河网主要汉道对河口泄洪输沙的作用贡献,及河口泄洪输沙纳潮体系的特点与作用;第 3 章针对河网交汇节点展开研究,分析了不同类型节点的组成、功能等,并提出了河网节点管理的建议;第 4 章选择河网典型汉道进行分类研究,分析了各汉道分布形态、作用动力和汉道分流规律;第 5 章以河网主要节制闸为研究对象,研究各水闸对邻近河网水道水动力的调控作用及在河口防洪体系中的地位、维护河网稳定的作用;第 6 章将珠江三角洲河网概化为水库,研究其对洪水的调蓄作用,并简单推算了库容参数;第 7 章采用矩阵组合法对流域干、支流洪水遭遇进行组合分析,并模拟分析其对河口区防洪潮与排涝的影响;第 8 章汇集了河网、河口湾等不同类型的涉水项目

防洪影响评价成果，供类似工程参考；第9章针对河口泥沙、咸潮等开展专题性研究，并解决有关工程问题；第10章对有关问题进行了总结与展望。

珠江河口的组成与动力条件都十分复杂，本书仅作初步探讨，也许只是一己之见，错误不足之处在所难免，欢迎读者批评指正。

作者

2015年9月

目录

前言

技 术 篇

第 1 章 珠江河口区整体数学模型开发建立	3
1.1 珠江河口水系组成	3
1.2 河口区潮流数学模型	4
1.3 河口区泥沙数学模型	16
1.4 河口区盐度数学模型	21
1.5 小结	28

基 础 篇

第 2 章 珠江河口区河网泄洪输沙体系研究	31
2.1 三角洲河网河性分析	31
2.2 三角洲河网动力成因分析	31
2.3 河网主要水道泄洪输沙作用模拟	33
2.4 小结	38
第 3 章 珠江河口区河网节点作用研究	39
3.1 河网节点分类	39
3.2 节点作用分析	41
3.3 河网节点角度下三角洲洪潮特点	47
3.4 节点管理维护与治理建议	49
3.5 小结	49
第 4 章 珠江河口区河网主要汊道分流规律研究	51
4.1 河网主要汊道概况	51
4.2 河网主要汊道分类	52
4.3 汊道分流规律研究	52
4.4 小结	59
第 5 章 珠江河口区河网主要节制闸作用研究	60
5.1 主要水闸概况	61

5.2	水闸运行模拟	61
5.3	综合分析	66
5.4	小结	67
第 6 章	珠江河口区河网洪潮调蓄能力研究	68
6.1	三角洲地形地貌概况	68
6.2	河网水库概念模型建立	69
6.3	库容变化对河口区防洪潮涝的影响分析	72
6.4	小结	73
第 7 章	江海洪潮遭遇及对河口区影响研究	74
7.1	基本情况	74
7.2	干支流洪水遭遇分析	75
7.3	洪峰与频率矩阵作用分析	81
7.4	三角洲洪水遭遇与归槽影响模拟研究	81
7.5	小结	84

应 用 篇

第 8 章	河口区涉河建设项目防洪影响案例分析	87
8.1	河网区大型涉水工程防洪影响典型案例分析	87
8.2	河口湾大型涉水工程防洪影响典型案例分析	99
8.3	涉水码头工程防洪补救措施典型案例分析	109
8.4	涉水桥梁工程防洪补救措施典型案例分析	116
第 9 章	河口其他专题研究	124
9.1	广州港南沙港区二期工程施工期截沙方案研究	124
9.2	广州港南沙港区水域取沙船挖沙对港区营运影响研究	146
9.3	虎门港长安港区规划方案对珠江河口潮汐动力影响研究	158
9.4	珠江河口口门整治工程对含氯度影响及施工期悬浮物输送研究	165
第 10 章	展望	171
	参考文献	172

技术篇

针对珠江河口区河网、河口湾潮流整体联动、洪潮动力交汇等特点,开发了珠江河口区大范围潮流运动一维、二维联解数值模型,可较好地模拟河口区潮流运动整体情况,是研究河口水系、治理河口的非常重要技术手段。

1.1 珠江河口水系组成

珠江河口水系组成非常复杂,不仅水网发达,多口门联通入海,还拥有伶仃洋、黄茅海两大河口湾,径、潮流槽道相互融合,环抱成网,河网、河口湾融为一体,河海不可分隔(图 1.1-1)。

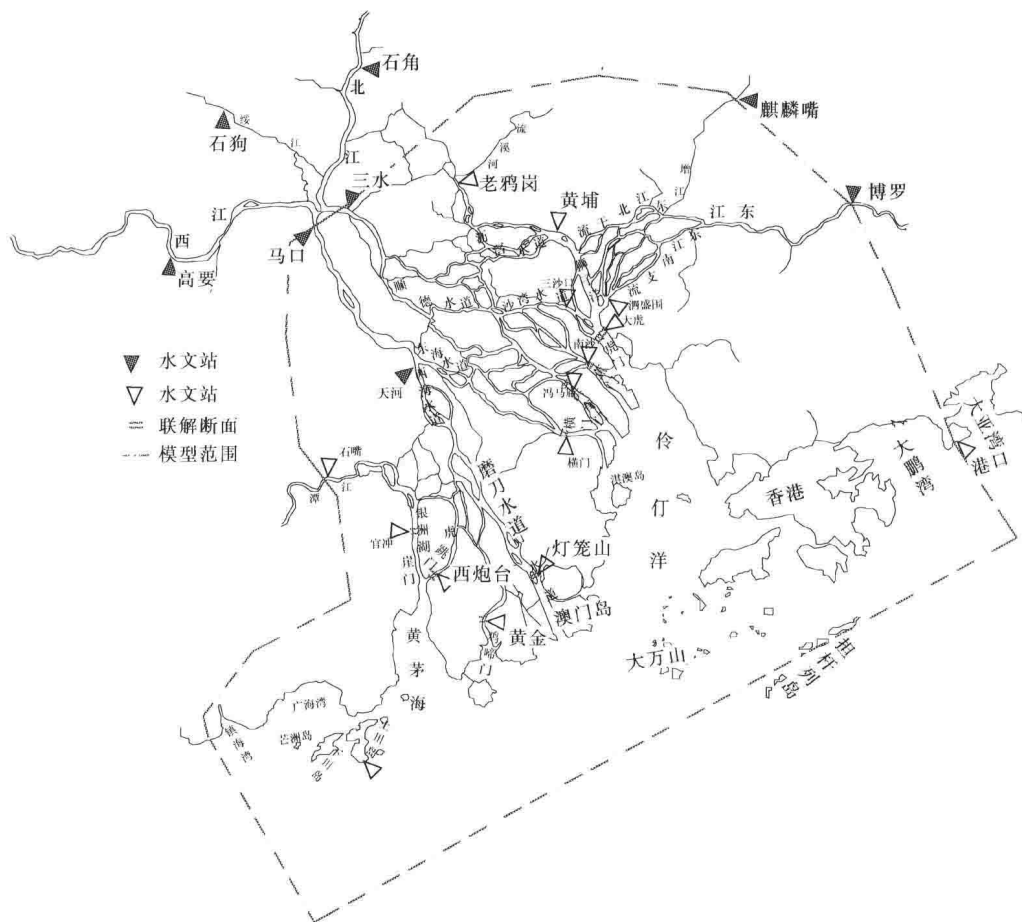


图 1.1-1 珠江河口区水系及模型研究范围

珠江三角洲河网主要包括西、北江思贤滘以下的西北江三角洲和东江石龙以下的东江三角洲,其中西、北江三角洲面积为 8370km^2 ,东江三角洲面积为 1380km^2 。

西江与北江流至广东省佛山市三水区的河口镇附近,通过长约 1.5km 的思贤滘水道相互沟通后,进入珠江三角洲网河区。两股水流汇合后在思贤滘下游又分为南、北两支,南支主流(习惯上叫西江干流)自思贤滘折向南流,在天河分为东海水道和西海水道,西海水道主流经磨刀门出海,沿程分出睦州水道和虎坑水道、石板沙水道等,经鸡啼门、虎跳门、崖门出海。东海水道自南华向东经容奇至板沙尾与北江下游顺德水道汇合,分别由蕉门、洪奇门、横门流入伶仃洋。

北支主流(习惯上叫北江干流)经过西南镇、小塘至紫洞分为两股:左股为佛山水道,右股为顺德水道,在三多附近分流潭州水道。顺德水道主流经沙湾水道汇入狮子洋,走虎门出海。佛山水道主流汇入南河道经沥滘水道和三枝香水道汇入狮子洋,也经虎门出海。潭州水道至登州头左侧分出平洲水道,后与槽尾滘、三尾冲、二尾冲、陈村水道、三枝香水道等相交,至大尾角,部分水流往北走南河道经广州市区,部分水流则流入沥滘水道经广州市区,经狮子洋出虎门流入伶仃洋。北江干流经潭州、平洲水道至广州,统称之为东平水道。

东江三角洲网河区自石龙开始,东江分为南北两大支,北支为东江主流,南支为东莞水道。两支水道之间又有中堂水道互相沟接,并一再分流,形成网河,自成体系,与西、北河网在狮子洋水域汇合。东江三角洲各水道水流最终均汇入狮子洋经虎门进入伶仃洋。

伶仃洋为珠江河口最大的河口湾,承泄珠江东四口门虎门、蕉门、洪奇门与横门的出海径流,河口湾延伸端伸入到三角洲中部的东平水道、广州片及东江三角洲区域;黄茅海河口湾承泄珠江崖门、虎跳门出海径流,河口湾延伸端基本局限在银洲湖水域;珠江的磨刀门、鸡啼门直通南海。

1.2 河口区潮流数学模型

珠江三角洲河道网状结构复杂,河道狭长,适合采用一维河网数学模型进行模拟,河口湾水域开阔,水深不大,适合采用二维数学模型模拟,而这两部分水体又是相互贯通、整体不可分割的,开发适用于珠江河口的一维、二维联解数学模型尤显必要。

1.2.1 模型范围

模拟范围包括河网主要水道 100 多条,及珠江八大出海口门与伶仃洋、黄茅海两大河口湾。综合考虑河口水系特点、水文(潮位)站分布与研究范围需要,模型上边界取至各江河控制水文(位)站:西江-马口站,北江-三水站,东江-博罗站,流溪河-老鸦岗站,增江-麒麟嘴站,潭江-石嘴站;下游开边界南取至外海 25m 等深线附近,即担杆列岛一线,西至镇海湾,东至大鹏湾港口站;一维、二维联解点设在出海口门控制断面:虎门大虎站,蕉门-南沙站,洪奇门-冯马庙站,横门-横门站,磨刀门-灯笼山,鸡啼门-黄金,虎跳门-西炮台,崖门-官冲,见表 1.2-1 及图 1.1-1。

表 1.2-1 整体数学模型范围及外边界选定

模型上边界						
江河名称	西江	北江	东江	流溪河	增江	潭江
水文站名称	马口	三水	博罗	老鸦岗	麒麟嘴	石嘴
一维、二维模型联解点						
口门名称	虎门	蕉门	洪奇门	横门	磨刀门	鸡啼门
潮位站名称	大虎	南沙	冯马庙	横门	灯笼山	黄金
模型下游开边界						
西开边界	镇海湾，以上川岛潮位控制					
东开边界	大鹏湾，以港口潮位控制					
南开边界	外海 25m 等深线，即担杆列岛一线，以大万山潮位控制					

1.2.2 一维潮流模型控制方程

1. 方程组

连续方程：
$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1.2-1}$$

动量方程：
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \tag{1.2-2}$$

式中： Z 为断面平均水位， m ； Q 为断面流量， m^3/s ； A 为过水面积， m^2 ； B 为水面宽度， m ； β 为动量修正系数； g 为重力加速度， m/s^2 ； S_f 为摩阻坡降，采用曼宁公式计算， $S_f = g/C^2$ ， $C = h^{1/6}/n$ ； h 为水深， m ； q 为旁侧入流， m^3/s ； x 为距离， m ； t 为时间， s 。

2. 汉口连接条件

网河区汉口点是相关支流汇入或流出点，汉口点水位、流量要满足下列连接条件：

流量连接条件：
$$\sum_{i=1}^m Q_i = 0 \tag{1.2-3}$$

水位连接条件：
$$Z_{i,j} = Z_{m,n} = \dots = Z_{l,k} \tag{1.2-4}$$

式中： Q_i 为流入汉口节点第 i 条支流流量，流入为正，流出为负； $Z_{i,j}$ 等表示汉口节点第 i 条支流输第 j 号断面的平均水位； m 为流入汉口的支流数。

3. 方程离散与求解

方程离散采用四点加权 Preissmann 固定网格隐式差分格式。沿河段布置变量，模型采用水位、流量同一网格布置法（即水位、流量点布置在同一点），如图 1.2-1 所示。

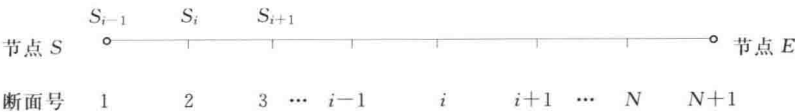


图 1.2-1 河段变量布置

以 S 代表流量 Q 和水位 Z ，则 S 在河段 Δx 、时段 Δt 内的加权平均量及相应偏导数表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} \approx \frac{S_{i+1}^{n+1} + S_i^{n+1} - S_{i+1}^n - S_i^n}{2\Delta t} \\ \frac{\partial S}{\partial x} \approx \theta \frac{S_{i+1}^{n+1} + S_i^{n+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{S_{i+1}^n - S_i^n}{\Delta x_i} \\ S_{i+1/2} = \frac{1}{4} (S_{i+1}^{n+1} + S_i^{n+1} + S_{i+1}^n + S_i^n) \end{cases} \quad (1.2-5)$$

式中: θ 为差分系数。

经推导, 一维潮流连续方程式 (1.2-1) 离散为

$$a_1 Z_i^{n+1} + b_1 Q_i^{n+1} + c_1 Z_{i+1}^{n+1} + d_1 Q_{i+1}^{n+1} = e_1 \quad (1.2-6)$$

式中: a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 为差分方程的已知系数。

一维潮流动量方程式 (1.2-2) 离散为

$$a_2 Z_i^{n+1} + b_2 Q_i^{n+1} + c_2 Z_{i+1}^{n+1} + d_2 Q_{i+1}^{n+1} = e_2 \quad (1.2-7)$$

式中: a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 、 e_2 为差分方程的已知系数。

略去未知数的上标 $n+1$, 就式 (1.2-6) 和式 (1.2-7) 求解变量 Z_i 与 Q_i 得

$$\begin{aligned} Z_i + A_1 Z_{i+1} + B_1 Q_{i+1} &= E_1 \\ Q_i + A_2 Z_{i+1} + B_2 Q_{i+1} &= E_2 \end{aligned} \quad (1.2-8)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{|AB|} (c_1 b_2 - c_2 b_1), & A_2 &= \frac{1}{|BA|} (c_1 a_2 - c_2 a_1) \\ B_1 &= \frac{1}{|AB|} (d_1 b_2 - d_2 b_1), & B_2 &= \frac{1}{|BA|} (d_1 a_2 - d_2 a_1) \\ E_1 &= \frac{1}{|AB|} (e_1 b_2 - e_2 b_1), & E_2 &= \frac{1}{|BA|} (e_1 a_2 - e_2 a_1) \\ |AB| &= -|BA| = (a_1 b_2 - a_2 b_1) \end{aligned}$$

设全河段有 i 个计算断面, 未知量共 $2i$ 个。每一计算河段上均有如式 (1.2-8) 的一对方程, 则共有 $2(i-1)$ 个方程, 加上两个边界方程 $Z_i = Z(t)$, $Q_i = Q(t)$ 或 $Z = f(Q)$, 其中 $Z(t)$ 、 $Q(t)$ 、 $f(Q)$ 为边界上的已知函数, 构成有定解的方程组, 用高斯消去法, 使系数化为上三角矩阵, 然后回代求出各变量。

1.2.3 二维潮流模型控制方程

1. 方程组

直角坐标系下潮流连续方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1.2-9)$$

直角坐标系下 u 、 v 向潮流动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{hc^2} = \nu_t \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (1.2-10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{hc^2} = \nu_t \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (1.2-11)$$

其中

$$\nu_t = ahfu_*$$

式中: x 、 y 为直角坐标; t 为时间; z 为水位, m; h 为水深, m; u 、 v 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向的分量, m/s; c 为谢才系数; ν_t 为紊动黏性系数; u_* 为摩阻流速, m/s; f 为摩阻系数, a 为综合系数, 与河道形态及水流条件等有关; g 为重力加速度, m/s²。

2. 曲线坐标转换技术

考虑模拟区域边界、地形的复杂性, 采用直角坐标系, 不但网格剖分困难, 边界也难以精确拟合, 计算工作量也大。为此, 采用坐标变换技术, 将直角坐标下的变量方程转换为贴体曲线坐标系下的方程, 即将物理坐标内计算域 D 的网格变换到计算域 D^* 的网格, 如图 1.2-2 所示。对于域 D , 变换函数可写为

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \xi(x, y) \\ \eta &= \eta(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (1.2-12)$$

式中: ξ 、 η 为独立变量; x 、 y 为因变量。

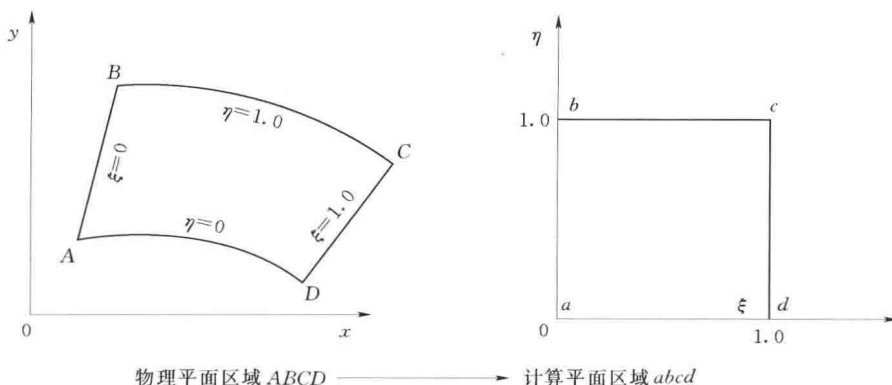


图 1.2-2 坐标变换示意

两种坐标系中变量之间的转换关系

$$\left. \begin{aligned} C_\eta x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + C_\xi x_{\eta\eta} + J^2(x_\xi P + x_\eta Q) &= 0 \\ C_\eta y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + C_\xi y_{\eta\eta} + J^2(y_\xi P + y_\eta Q) &= 0 \\ \beta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2-13)$$

其中 $C_\xi = x_\xi^2 + y_\xi^2$, $C_\eta = x_\eta^2 + y_\eta^2$, $\beta = x_\xi x_\eta + y_\xi y_\eta$, $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$

式 (1.2-13) 即为生成正交曲线网格的方程和控制函数。

经坐标变换为贴体曲线坐标系下的潮流控制方程组为

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial(C_\eta h u)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi h v)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1.2-14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \frac{v^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - f v + g u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h c^2} \\ = -\frac{g}{C_\xi} \frac{\partial h}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial(C_\eta \sigma_\xi)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi \sigma_\eta)}{\partial \eta} + \sigma_\eta \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \sigma_\xi \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \end{aligned} \quad (1.2-15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - f u + g v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h c^2}$$

$$= -\frac{g}{C_\eta} \frac{\partial h}{\partial \eta} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial(C_\eta \sigma_{\xi\eta})}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi \sigma_{\eta\eta})}{\partial \eta} + \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] \quad (1.2-16)$$

其中

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi\xi} &= 2\nu_t \left[\frac{1}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right], \quad \sigma_{\eta\eta} = 2\nu_t \left[\frac{1}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{u}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \\ \sigma_{\xi\eta} &= \sigma_{\eta\xi} = \nu_t \left[\frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{v}{C_\eta} \right) + \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u}{C_\xi} \right) \right] \\ C_\xi &= \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi} \right)^2}, \quad C_\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta} \right)^2} \end{aligned}$$

式中: C_ξ 、 C_η 为拉梅系数。

为了进行工程结构等小尺度模拟, 引进通度系数 θ 改进后二维模型连续方程

$$\frac{\partial \theta_c h}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial(C_\eta \theta_\xi H u)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi \theta_\eta H v)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1.2-17)$$

式中: θ_c 对应离散单元的面通度系数, 为网格中能够被流体通过的面积 (网格面积减去网格中固体或障碍物的面积) 与整个网格面积之比, 定义在网格中心; θ_ξ 、 θ_η 分别为对应于离散单元的 ξ 、 η 方向线通度系数, 为该方向上能够被流体通过的网格长度与该网格总长之比, 定义在网格边界上; 通度系数根据结构占据网格大小, 取值在 0 与 1 之间, 占满网格取 1, 不占网格取 0。

3. 离散方程

采用交替方向隐式法 (ADI 法), 基本方法是 (图 1.2-3): 设 Δt 、 Δx 、 Δy 分别为时间步长和 x 、 y 方向空间步长, n 、 i 、 j 分别为时层数和 x 、 y 的步长数, h 为实际水深, z 为水位; 在 $x-y$ 平面上采用交错网格, 并给定各变量 (h , u , v , z) 的计算点; 在时间上采用将 Δt 分成两个半步长, 计算采用隐、显格式交替隐、显

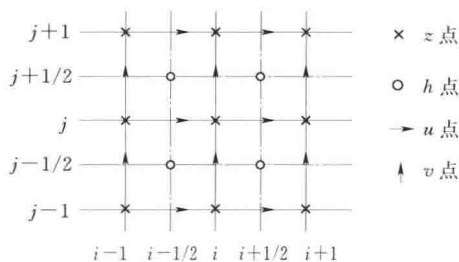


图 1.2-3 ADI 法网格分层与变量布置示意图

进行, 在 $n\Delta t \rightarrow (n+1/2)\Delta t$ 半步长上用隐格式离

散连续方程和 x 方向上的动量方程, 并用追赶法求得 $(n+1/2)\Delta t$ 时层上的 z 和 u , 对 y 方向上的动量方程则用显格式离散, 并求得 $(n+1/2)\Delta t$ 时层上的 v , 然后在 $(n+1/2)\Delta t \rightarrow (n+1)\Delta t$ 半步长上用隐格式离散连续方程和 y 方向上的动量方程, 并用追赶法求得 $(n+1)\Delta t$ 时层上的 z 和 v , 对 x 方向上的动量方程则用显格式离散, 并求得 $(n+1)\Delta t$ 时层上的 u 。

经推导, 前半个时间步长, 二维潮流连续方程式 (1.2-14) 离散如下:

$$A_i u_{i-1/2,j}^{n+1/2} + B_i z_{i,j}^{n+1/2} + C_i u_{i+1/2,j}^{n+1/2} = D_i \quad (1.2-18)$$

其中

$$\begin{aligned} A_i &= -\frac{(C_\eta h)_{i-1/2,j}^n \Delta t}{2}, \quad B_i = (C_\xi C_\eta)_{i,j}, \quad C_i = \frac{(C_\eta h)_{i+1/2,j}^n \Delta t}{2} \\ D_i &= (C_\xi C_\eta z)_{i,j}^n - \frac{[(C_\xi h v)_{i,j+1/2}^n - (C_\xi h v)_{i,j-1/2}^n] \Delta t}{2} \end{aligned}$$

二维潮流动量方程式 (1.2-15) 离散为

$$A_{i+1/2} z_{i,j}^{n+1/2} + B_{i+1/2} u_{i+1/2,j}^{n+1/2} + C_{i+1/2} z_{i+1,j}^{n+1/2} = D_{i+1/2} \quad (1.2-19)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{i+1/2} &= (C_\eta g)_{i+1/2,j} \\ B_{i+1/2} &= \frac{(C_\zeta C_\eta)_{i+1/2,j}}{\Delta t} + \frac{C_\eta}{2} [(1 + \alpha \cdot \text{ingu}) u_{i+3/2,j}^n - 2\alpha \cdot \text{ingu} \cdot u_{i+1/2,j}^n \\ &\quad - (1 - \alpha \cdot \text{ingu}) u_{i-1/2,j}^n] v_{i+1/2,j}^n (C_{\eta+1/2,j+1/2} - C_{\eta,j-1/2}) \\ &\quad + \left(\frac{C_\zeta C_\eta g}{hc^2} \right)_{i+1/2,j} \sqrt{(u_{i+1/2,j}^n)^2 + (v_{i+1/2,j}^n)^2} \\ C_{i+1/2} &= -(C_\eta g)_{i+1/2,j} \\ D_{i+1/2} &= \frac{(C_\zeta C_\eta)_{i+1/2,j}}{\Delta t} u_{i+1/2,j}^{n-1/2} + \frac{C_\zeta}{2} [(1 + \alpha \cdot \text{ingu}) u_{i+1/2,j+1}^n - 2\alpha \cdot \text{ingu} \cdot u_{i+1/2,j}^n \\ &\quad - (1 - \alpha \cdot \text{ingu}) u_{i+1/2,j-1}^n] \cdot v_{i+1/2,j}^n + (v_{i+1/2,j}^n)^2 (C_{\eta+1,j} - C_{\eta,j}) \\ &\quad + (C_\zeta C_\eta f v)_{i+1/2,j}^n + \{F_1(\xi, \eta)\}_{i+1/2,j}^n \end{aligned}$$

经推导, 后半段时间步长, 二维潮流连续方程式 (1.2-14) 离散如下:

$$A_j v_{i,j-1/2}^{n+1} + B_j z_{i,j}^{n+1} + C_j v_{i,j+1/2}^{n+1} = D_j \quad (1.2-20)$$

其中

$$\begin{aligned} A_j &= -\frac{(C_\zeta h)_{i,j-1/2}^{n+1/2} \Delta t}{2}, B_j = (C_\zeta C_\eta)_{i,j}, C_j = \frac{(C_\zeta h)_{i,j+1/2}^{n+1/2} \Delta t}{2} \\ D_j &= (C_\zeta C_\eta)_{i,j} z_{i,j}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2} [(C_\eta h)_{i+1/2,j}^{n+1/2} u_{i+1/2,j}^{n+1/2} - (C_\eta h)_{i-1/2,j}^{n+1/2} u_{i-1/2,j}^{n+1/2}] \end{aligned}$$

二维潮流动量方程式 (1.2-16) 离散为

$$A_{j+1/2} z_{i,j}^{n+1} + B_{j+1/2} v_{i,j+1/2}^{n+1} + C_{j+1/2} z_{i,j+1}^{n+1} = D_{j+1/2} \quad (1.2-21)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{j+1/2} &= (C_\eta g)_{i,j+1/2} \\ B_{j+1/2} &= \frac{(C_\zeta C_\eta)_{i,j+1/2}}{\Delta t} + \frac{C_\zeta}{2} [(1 + \alpha \cdot \text{ingv}) v_{i,j+3/2}^n - 2\alpha \cdot \text{ingv} \cdot v_{i,j+1/2}^n \\ &\quad - (1 - \alpha \cdot \text{ingv}) v_{i,j-1/2}^n] + u_{i,j+1/2}^{n+1/2} (C_{\eta+1/2,j+1/2} - C_{\eta-1/2,j+1/2}) \\ &\quad + \left(\frac{C_\zeta C_\eta g}{hc^2} \right)_{i,j+1/2} \sqrt{(u_{i,j+1/2}^{n+1/2})^2 + (v_{i,j+1/2}^n)^2} \\ C_{j+1/2} &= -(C_\eta g)_{i+1/2,j} \\ D_{j+1/2} &= \frac{(C_\zeta C_\eta)_{i,j+1/2}}{\Delta t} v_{i,j+1/2}^n + \frac{C_\eta}{2} [(1 + \alpha \cdot \text{ingu}) v_{i+1,j+1/2}^n - 2\alpha \cdot \text{ingu} \cdot u_{i,j+1/2}^n \\ &\quad - (1 - \alpha \cdot \text{ingu}) v_{i-1,j+1/2}^n] u_{i,j+1/2}^{n+1/2} + (u_{i,j+1/2}^n)^2 (C_{\eta,j+1} - C_{\eta,j}) + (C_\zeta C_\eta f u)_{i,j+1/2}^{n+1/2} \\ &\quad + \{F_2(\xi, \eta)\}_{i,j+1/2}^{n+1/2} \end{aligned}$$

将方程式 (1.2-18) 和式 (1.2-19) 联立可写成以下简单形式:

$$A_i u_{i-1/2,j}^{n+1/2} + B_i z_{i,j}^{n+1/2} + C_i u_{i+1/2,j}^{n+1/2} = D_i \quad (1.2-22)$$

$$A_{i+1/2} z_{i,j}^{n+1/2} + B_{i+1/2} u_{i+1/2,j}^{n+1/2} + C_{i+1/2} z_{i+1,j}^{n+1/2} = D_{i+1/2} \quad (1.2-23)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

式 (1.2-22) 和式 (1.2-23) 可用追赶法求得 $u^{n+1/2}$ 和 $z^{n+1/2}$ 。

同样, 将方程式 (1.2-20) 和式 (1.2-21) 式联立可写成以下简单形式:

$$A_j v_{i,j-1/2}^{n+1} + B_j z_{i,j}^{n+1} + C_j v_{i,j+1/2}^{n+1} = D_j \quad (1.2-24)$$

$$A_{j+1/2} z_{i,j}^{n+1} + B_{j+1/2} v_{i,j+1/2}^{n+1} + C_{j+1/2} z_{i,j+1}^{n+1} = D_{j+1/2} \quad (1.2-25)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

式 (1.2-24) 和式 (1.2-25) 可用追赶法求得 v^{n+1} 和 z^{n+1} 。

1.2.4 一维、二维模型联解条件

整体模型在一维、二维模型连接点上的水位、流量满足以下连接条件:

$$\text{水位连接条件:} \quad Z_1 = Z_2 \quad (1.2-26)$$

$$\text{流量连接条件:} \quad Q_1 = \int U_{\xi} h_{\xi} d\xi \quad (1.2-27)$$

式中: Z_1 为一维模型在内边界断面上的水位, m; Z_2 为二维模型在内边界上各节点的平均水位, m; Q_1 为一维模型在一维、二维模型连接断面上的流量, m^3/s ; U_{ξ} 为二维模型在一维、二维模型连接断面法向上的流速, m/s 。

一维、二维模型联解基本思想是一维模型以流量传递给二维模型, 二维模型以水位传递给一维模型。联解条件推导如下:

假设一维模型下边界 A 断面的流量为 Q_1 , 过水面积为 A_1 , 水力半径为 R_1 , 谢才系数为 C_1 , 水力坡降为 J_1 。按谢才公式, 有

$$Q_1 = A_1 C_1 \sqrt{R_1 J_1}$$

变换为如下形式:

$$\sqrt{J_1} = \frac{Q_1}{A_1 C_1 \sqrt{R_1}}$$

A 断面同时又是二维模型的上边界, 是一维、二维模型的连接断面, A 断面刚好是二维模型网格中的第 $i1$ 行, 一维模型和二维模型的网格搭接情况如图 1.2-4 所示。

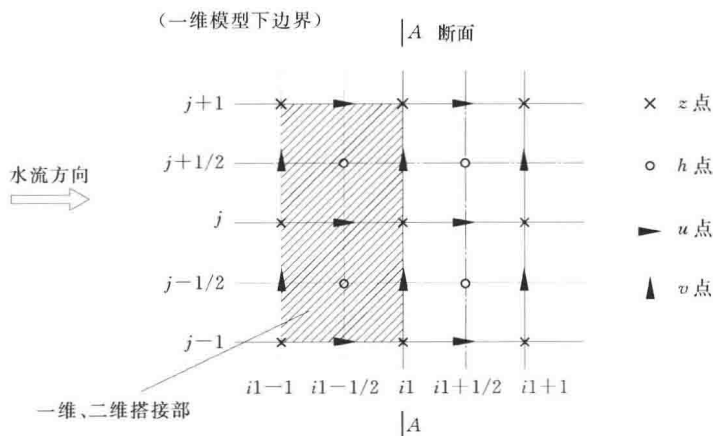


图 1.2-4 一维模型和二维模型的网格搭接示意

假设 A 断面上第 j 条垂线的流速为 $U_{i1-1/2,j}$, 谢才系数为 $C_{i1,j}$, 水力坡降为 J_2 , 水力半径为 $R_{i1,j}$, 按谢才公式, 有

$$U_{i1-1/2,j} = C_{i1,j} \sqrt{R_{i1,j} J_2}$$