# 长江中下游河湖洪水演进的数值模拟

## 胡四一,施勇,王银堂,吴永祥

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:以长江中下游(宜昌-大通)防洪系统为对象,在水文、河道及湖盆地形现状条件下,建立 了一个能适应各种复杂条件的一二维非恒定流模型,来进行长江干流、河网、湖泊、分蓄洪区 垸及水库的洪水演进和调度仿真。所建模型的洞庭湖部分采用无结构网格二维非恒定有限体积 格式,以适应湖区复杂的边界形状和保持水量平衡。河网区部分采用一维非恒定流显隐结合的 分块三级算法,以准确实现河网汊点流量的自动分配和往复流动。为了提高模拟精度和扩展模 拟功能,在水流数值模拟的范围内侧重讨论了内外动边界处理、分蓄洪运用及阻力项计算等环 节,提出了合理可行的数值处理方法。采用 20 世纪 80 年代至 90 年代共 6 年汛期洪水资料对所 建模型进行了严格的率定和检验,高精度的模拟结果证实了模型的合理性和有效性。

**关 键 词**:长江防洪系统;河网非恒定流;模拟;河湖洪水演进;二维有限体积法 中图分类号:TV 122.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-6791(2002)03-278-09

在国家"八·五"科技攻关计划期间,针对以三峡水库为中心的长江防洪系统的实时调度 问题,曾对长江中游防洪系统的洪水演进和洪水调度的水流仿真进行了系统的研究,建立了长 江中游-洞庭湖防洪系统一二维非恒定流模拟模型<sup>[1,2]</sup>。然而,限于时间和当时的认识水平, 所建模型还存在一些不尽完善的地方,要完全达到实用尚有一定距离,主要表现在以下三个方 面:(1)原模型的河网算法采用一维守恒型 TVD 显格式,难以准确实现河网汊点流量的自动 分配,不得不采用流量平差处理,影响了汊点以及河网水流的计算精度和数值稳定性,同时内 外边界条件的处理以及动边界算法还有待进一步改进;(2)为增强模型的实用性,模型的模拟 功能需进一步扩充和完善,主要包括三口分流的自动计算、分蓄洪运用的模拟、汉江和鄱阳湖 的调蓄计算、三峡水库的调度模拟等;(3)针对有些站点水位流量以及洞庭湖局部流场模拟精 度欠佳,尤其是中低水部分模拟精度不高的问题,有必要采用更为详细的河湖地形资料,提高 河道和湖泊单元概化对水流模拟细节的分辨能力,同时进一步改进水流阻力计算方法,以使模 拟的局部水流更合理,精度更高。

在原有模型的基础上,经改进、完善和应用,目前已建立基于 GIS 电子地图图形操作的图 形用户界面、以洪水演进整体模型为内核、功能丰富和应用方便的长江中下游洪水模拟系统,

收稿日期: 2001-06-25; 修订日期: 2001-12-28

**基金项目**:国家杰出青年科学基金项目(59825118);国家自然科学基金重大项目(50099620);国家自然 科学基金委员会和长江水利委员会联合资助

作者简介:胡四一(1954-),男,四川天全人,南京水利科学研究院教授级高级工程师,主要从事水文水资源、防洪规划、水利信息系统及计算水力学研究。

在洞庭湖综合治理规划和长江中下游防洪规划中发挥了重要的作用。本文主要介绍模型算法改进、模拟功能扩充以及提高模型实用性和有效性方面的进展,关于模型应用,将另文介绍。

## 1 模型概述

模型计算的范围,上始宜昌下迄大通,包括长江干流河段、洞庭湖河网、汉江和其它主要 支流以及鄱阳湖区,系统河网湖泊概化如图1所示。洞庭湖四水尾闾河段以控制站断面作为入 流边界,包括:澧水津市以下入七里湖,沅水桃源以下入目平湖,资水桃江和湘江长沙以下入 南洞庭湖。洞庭湖区内河网尽量包括所有通水河道,诸如松滋河、虎渡河、藕池河、澧水洪道 及草尾河等。汉水包括沙洋以下含汉南、杜家台分蓄洪区的部分。鄱阳湖包括湖泊与五水入 汇。为了分蓄长江中下游洪水的超额洪量,系统内包括长江中下游的分蓄洪区。



图 1 模拟系统总概化

Fig. 1 Sketch map of the middle-lower Yangtze River flood control system

根据长江中下游河网的空间分布结构和洪水演进机制,将河道、分蓄洪区、堤垸、湖泊连 接起来进行模拟。整个模型划分为相对独立又相互关联的5个一维模块和1个二维模块,它们 分别是:(1)长江干流宜昌至螺山河段模块;(2)长江干流螺山到大通河段模块(包括汉江、鄱 阳湖及五水入汇);(3)松虎水系河网模块,它以松滋口、太平口为上边界,七里湖和目平湖为 下边界,主要包括松滋河(东、中、西支)、虎渡河、澧水洪道;(4)藕池河水系河网模块,它以藕池 口和调弦口(目前已堵闭)为上边界,南洞庭和东洞庭为下边界,主要包括藕池河(包括东、中、 西支)、华容河等;(5)洞庭湖四水尾闾模块;(6)洞庭湖二维模块,包括目平湖和东、南洞庭 湖。

在模块划分后,根据河道和湖盆近期实测地形资料进行一维河网的断面划分和二维湖泊的 单元剖分。河网共设断面1008 个,组成 77 个河段,节点(分流口和汊点)数为 69 个。平均断



#### 图 2 洞庭湖湖泊计算网格单元划分 Fig. 2 Grid for the Dongting lake

面间距 1.5~4.0 km。目平湖和东、南洞庭湖作 为二维块处理,其中东、南洞庭合成一块,目 平湖与南洞庭南端相连河道采用二维单元衔接, 共划分为 244 个单元和 306 个节点(见图 2)。洞 庭湖河网中与洞庭湖相连的河段有 14 个,其中 新墙河和汨罗江作为旁侧入流汇入东洞庭湖。 此外,还有 10 个河段和 45 个河段分别与分蓄 洪区及 24 个蓄洪垸相连。

对于河网模块采用一维非恒定流隐式差分 格式求解,模块间采用显式衔接。这种算法一 方面充分利用了四点隐式差分稳定性好、求解 速度快以及准确实现河网汊点流量自动分配的 优点;另一方面模块之间的显式连接能够降低 矩阵规模,提高计算效率,并有利于规划方案

模拟的数据组织。对于湖泊,采用无结构网格二维非恒定流高性能有限体积格式,以适应湖泊 水体复杂的边界形状,并保证水量完全守恒。考虑到洞庭湖水位变化涨落缓慢,一维和二维模 型采用显式连接。

## 2 模型算法

模型算法包括一维显隐结合的分块三级河网隐式差分算法和二维有限体积高性能差分算法。本文主要介绍一维算法的改进,二维算法不再赘述,见文献 [3~5]。

对于基于圣维南方程组的一维非恒定流模拟,四点隐式差分因其数值稳定性和守恒性好以 及可显式求解计算效率高等优点,成为成熟实用的主流算法。一维河网算法的发展始终是围绕 如何降低节点系数矩阵的阶数,以提高运算效率这一主线而展开的,目前广泛采用三级算法, 具体算法细节可参考文献 [6,7]。现将显隐结合分块三级河网算法的原理概述如下:

首先将河段内相邻两断面之间的每一微段上的圣维南方程组离散为断面水位和流量的线性 方程组(直接求解称为一级算法),通过河段内相邻断面水位与流量的线性关系和线性方程组的 自消元,形成河段首、末断面以水位和流量为状态变量的河段方程(其求解称为二级算法);再 利用汊点相容方程和边界方程,消去河段首、末断面的某一个状态变量,形成节点水位(亦可流 量)的节点方程组,对其求解称之为河网三级算法。通过模型分块及模块之间的显式衔接,最终 就形成了一维显隐结合的分块三级河网算法。

#### 2.1 控制方程

采用完全圣维南方程组描述一维河道洪水波的运动:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} Q^2 \\ A \end{bmatrix} + gA \begin{bmatrix} \frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \end{bmatrix} = 0$$
(2)

式中 Z、Q、A、B 分别为水位、流量、过水面积、水面宽度; 为动量修正系数;  $S_i$  为摩 阻坡降,采用曼宁公式计算; q 为旁侧入流。上述方程中,水位和流速是断面平均值,当水流 漫滩时,平均流速与实况有差异,为使水流漫滩后计算断面过水能力逼近实际过水能力,需引 进动量修正系数 ,  $=\frac{A}{K^2}\sum_{i}\frac{K_i^2}{A_i}$ ,其中  $A_i$ 为断面第 i 部分面积, A 为断面过水面积,  $A = A_1 + A_2 + ... + A_n$ ;  $K_i$ 为第 i 部分的流量模数,  $K_i = \frac{1}{n}A_iR_i^{2/3}$ , n为曼宁系数,  $K = K_1 + K_2 + ... + K_n$ 。 2.2 **Preissmann 隐式差分格式及离散方程** 

采用四点加权 Preissmann 隐式差分格式

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1} - f_{i+1}^n - f_i^n}{2 t}$$
(3)

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}}{x_i} + (1 - 1) \frac{f_{i+1}^n - f_i^n}{x_i}$$
(4)

$$f = (f_{i+1}^{n+1} + f_i^{n+1} + f_{i+1}^n + f_i^n)/4$$
(5)

式中 为权重系数,可取 0.5 < <1.0。将上述差分格式(3) ~ (5) 代入控制方程(1) 和(2),整 理后可得离散方程为

$$- Q_i^{n+1} + C_i Z_i^{n+1} + Q_{i+1}^{n+1} + C_i Z_{i+1}^{n+1} = D_i$$
(6)

$$E_{i}Q_{i}^{n+1} - F_{i}Z_{i}^{n+1} + G_{i}Q_{i+1}^{n+1} + F_{i}Z_{i+1}^{n+1} = i$$
(7)

式(6)和(7)中 *C<sub>i</sub>、D<sub>i</sub>、E<sub>i</sub>、F<sub>i</sub>、G<sub>i</sub>、 i均为系数,可由水位和流量的已知值 Z<sub>i</sub>和 Q<sub>i</sub>计算。如上所述,对于某一河段,通过消去中间断面的水力要素可以得到河段方程,即将河段首末断面流量表示为首末断面水位的线性函数,以此作为形成节点方程组的基本构件。* 

#### 2.3 **汉点连接方程**

汊点的连接条件为水流满足质量和动量守恒方程。若忽略汊点蓄量变化,则有水量连续条件,即进出每一汊点的流量代数和为零:

$$\sum Q_i = 0 \tag{8}$$

汊点各汊道断面的水位和流量与汊点平均水位的水力联系,必须符合动力衔接条件。若忽略汊点的局部损失,则可根据伯努利方程,要求各断面之间的能头 Ei 应相等;

$$Z_i + u_i^2/2g = Z_j + u_j^2/2g = \dots = Z + u_j^2/2g$$
(9)

式中 Z为水位; u为断面平均流速。如进一步忽略各汊道流速水头,则式(9)可简化为

$$Z_i = Z_j = \dots = Z \tag{10}$$

如前所述,通过对汊点河段逐断面的变量代换和自消元,可以得到以汊点河段首末断面水 位表示的首末断面流量的递推方程,结合汊点连接方程(9)和(10)进一步消去流量变量,就形成 了汊点的节点水位方程。

2.4 边界河段方程

与边界节点相联的河段称为外河段。外河段中各微段离散方程结合边界已知入流条件,通 过消元和替代形成河段追赶方程,称边界河段方程。通过追赶方程得到该河段末断面的水位与 流量关系式,当末断面的水位求得后,再次利用追赶方程回代,解出该河段各断面的水位与流 量值。若以水位为边界,则将水位边界设置在节点位置上并代入节点水位方程,参加水位节点 方程组联解。

#### 2.5 动边界的处理

当计算域内存在随洪水涨落变化淹没露滩交替的河床动边界时,要求模型在维持河网结构 不变的前提下,能够通过数值算法来自动模拟计算域内的动边界。具体算法实现概述如下:即 当水位低于河道某断面河底高程时河道不过流,假设在干河床存在一个极薄的水层(一般可取 0.01 m),再在河网方程组中增加一组流量为零的河段方程,将该组河段方程嵌入到河网节点方 程组中参与河网联解计算,这样就可将一个动边界问题转化为固定边界问题来处理。当河道水 位高于河底高程时,河段过流量不为零,自动回复到河道过流的正常算法。

## 3 若干环节的处理

下面主要讨论建模过程中内、外边界条件的处理、分蓄洪运用、水文调蓄块的处理、水流 阻力计算以及模型数据自动生成等问题,强调这些环节与模型基本算法的耦合在复杂水流处理 中的重要作用。

3.1 内、外边界条件的处理

为了适应防洪规划和防洪调度的要求,模型为若干关键环节处的内、外边界提供了多种处 理方法和多种边界类型以供选择。例如,对于荆江三口分流,既可以通过模块联解,直接求得 三口断面的水位和流量;亦可采用经验的三口分流关系;还可直接嵌入外部提供的三口流量过 程,求解水位。再如,螺山站既可以作为宜螺河段模块的下边界,其边界条件类型有水位、流 量过程或水位流量关系可供选择;又可作为长江中游系统的内边界,由模块衔接计算求得水位 和流量,因而可以直接计算城螺河段的泄洪能力,使分蓄洪运用的模拟得以摆脱对螺山水位流 量关系的依赖。

对于河网内的闸、堰、桥、泵等各类工程,可设置为内边界节点,通过给定相应的堰闸公 式或其它过流关系,嵌入河网算法中联解。

3.2 **分蓄洪运用** 

荆江分洪区、洞庭湖 24 个蓄洪垸、洪湖分蓄洪区及武汉附近分蓄洪区承担了分蓄长江中 游超额洪水的任务,为了模拟分洪过程及评价分洪效果,模型应具有分蓄洪模拟的功能。具体 实现如下:当与某分洪口门相邻的河段水位达到分洪控制水位时,假设堤防瞬间按预定宽度全 部溃决,或在一定时间内决口线性扩展达到预定最大宽度,按平底宽顶堰自由或淹没出流计算 流入或流出分蓄洪区或蓄洪垸的流量过程。在每一时间步,在确定决口流量后对溃决的分蓄洪 区和蓄洪垸进行一次水库式调蓄计算,确定时段末的垸内水位。对于有多个口门的堤垸,逐个 口门计算堤垸与外河道的交换流量、堤垸内蓄洪量及水位。在计算过程中,以前一个口门调蓄 计算后的垸内蓄洪量及水位作为下一个口门调蓄计算的起始条件。

#### 3.3 水文调蓄块的处理

对某些环节作适当简化,采用恰当的方法,合理地描述实际问题,而不过分追求高深的数 学处理,有利于获得有意义的结果。对于汉江和鄱阳湖,模拟重点在于反映汉江洪水调度,特 别是杜家台分洪区的运用,以及鄱阳湖调蓄及江湖相互作用对整个中游防洪系统的影响,故可 采用水文学调蓄计算来取代对洪水演进过程的精细模拟。汉江块水文学调蓄的具体计算方式 为:首先根据沙洋来流(考虑新城安全泄量限制),利用东荆河与仙桃分流线,确定东荆河与汉 江干流的分流量;然后根据汉口水位与汉江下游下泄流量的泄洪能力关系确定仙桃以下河道的 安全泄量;当仙桃来流大于安全泄量时,启用杜家台分蓄洪区,如果分洪量超过进洪闸的进洪 能力,则启用汉南分蓄洪区;当杜家台分蓄洪区蓄满有效库容 16 亿 m<sup>3</sup> 时,则考虑分蓄洪区上 吞下吐,吐洪入江流量在汉口与长江干流模块衔接。

为了研究长江中游防洪系统上、下游河段以及防洪区域之间的相互作用和影响,必须在模型中恰当地考虑鄱阳湖的防洪作用。为简便起见,可将鄱阳湖作为蓄水湖泊处理,不进行湖内的洪水演进,但考虑江湖交换、五水入汇以及湖泊的调蓄作用。

此外,为分析三峡水库防洪作用,在模型中考虑了两种三峡水库防洪调度运行方式,即荆 江河段补偿调度方式和城陵矶分级补偿调度方式的静库容调蓄计算。

#### 3.4 水流阻力项计算

在原模型中采用曼宁公式计算阻力项,而 n 值采用不随水流和河道特征变化的固定值, 影响了模型对于不同类型和量级的洪水过程的适应性,具体反映在洪水过程中低水部分模拟精 度欠佳。就长江中下游而言,河道水流阻力的主要影响因素有洪水量级和涨落变化、回水影响 以及河床冲淤变化。为了恰当地反映这些因素对水流阻力的影响,关键在于把握区域影响水流 阻力的主要因素的变化规律,建立它们与 n 值的相关关系。具体来说,以长江干流为例,要 求至少有两场不同类型和量级的实测洪水资料,通过模型率定建立曼宁 n 值与宜昌站流量、 流量涨落率以及城陵矶水位的相关关系;对于松滋河和虎渡河水系,需建立松滋河和虎渡河流 量、南洞庭湖水位以及澧水流量与曼宁 n 值的关系,其他模块处理类同。模拟实践表明,一 旦获得这种关系,再将它应用于其他不同类型和量级的洪水过程,模型显示出很好的适应性和 稳定性,模拟精度也显著提高,充分说明这种曼宁 n 值关系很好地反映了长江中下游河湖水 流阻力的宏观规律。就具体数值而言,河道糙率的变化范围为 - 0.008~+0.008,湖泊糙率的 变化范围为 - 0.0015~+0.003。

## 4 模型的率定与检验

为了论证所建模型基本算法和数值处理的合理性和有效性,采用 20 世纪 80 年代至 90 年 代共 6 年汛期实测洪水资料对模型进行了严格的率定和检验<sup>[1]</sup>,下面将概述率定检验的主要结 果。

#### 4.1 **模型率定**

采用 1989 年汛期沙市、监利、螺山、武汉、九江、汇口、官垸、新江口、沙道观、弥陀 寺、小河嘴、杨柳潭和莲花塘等站 45 d 实测洪水资料对整个模型进行了率定<sup>[1]</sup>。率定的河道 糙率平均值为 0.024 8,变化范围为 0.018 ~ 0.032,这与长江中游洪水演进糙率分析的经验是相 符的。率定结果表明,模拟与实测洪水过程,峰谷相应,吻合甚好,河网汊点流量分配准确, 双向流精确重现(汇口、官垸站),见图 3,反映了长江中游干流河段、洞庭湖区复杂河网以及各湖 泊的主要流动特征(见图 4 和图 5)。从总体上说,22 个流量站洪峰流量率定的相对误差一般小 于 10 %,33 个水位站的洪峰水位率定误差小于 0.30 m。其中小于 0.10 m 有 18 个站(占 33 个站 总数的 55 %),小于 0.15 m 有 24 个站(占 73 %),小于 0.20 m 有 29 个站(占 88 %),大于 0.20 m 小于 0.30 m 仅有 4 个站(占 12 %)。对于长江干流及洞庭湖主要控制站沙市、监利、莲花塘、 南咀、七里山、汉口和九江,洪峰水位误差在 0.17 m 以内,其中七里山、莲花塘洪峰水位误 差小于 0.04 m。此外,洞庭湖二维计算的水位和流量的空间分布趋势也是合理的。



图 3 汇口和官垸双向流过程





图 4 1989 年长江中游干流主要站水位检验过程

Fig. 4 Comparison of simulated and observed water levels of 1989 along the main stream of the Yangtze River

4.2 模型检验

模型检验,是指在不再对模型率定过程中已确定了的断面、地形资料、糙率系数以及各种 算法和处理作进一步改变和调整的前提下,仅利用其它场次洪水的入流过程、边界条件以及初 始水位分布作为模型输入,对模型的适应性、稳定性和有效性进行检验。基于上述考虑,选用

285





Fig. 5 Comparison of simulated and observed water levels of 1991 in the river-lake network

1981 年、1983 年、1991 年和 1995 年 4 年主汛期实测洪水资料对模型进行检验 。限于篇幅, 此处只列出 1991 年洪水部分结果,见图 5。从 1991 年和 1995 年实测洪水检验结果看,水位站 洪峰水位检验误差小于 0.30 m,亦具有与率定结果类似的误差分布;流量站洪峰流量相对误 差一般小于 10%,尤其是荆江三口分流、东洞庭出口河段、城螺河段、西南洞庭连接河段, 其洪峰流量误差均小于 6%;而上述长江干流及湖泊主要控制站水位误差除南咀为 0.26 m 外, 其余在 0.16 m 以内。高精度的模拟结果证实了模型的合理性和有效性。

### 参考文献:

[1] 谭维炎, 胡四一, 等. 长江中游洞庭湖防洪系统水流模拟 ——I 建模思路和基本算法[J]. 水科学进展, 1996, 7(4): 336 - 344.

水利部南京水文水资源研究所,长江水利委员会.长江中游宜昌至湖口(包括洞庭湖区)洪水演进模 拟模型研究报告 [R]. 1998,5.

- [2] 谭维炎. 计算浅水动力学 ——有限体积法的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1998, 62-76.
- [3] 谭维炎, 胡四一. 二维浅水流动的一种普适的高性能格式 有限体积 Osher 格式[J]. 水科学进展, 1991, 2(3): 154 161.
- [4] 谭维炎, 胡四一. 浅水流动计算的一阶有限体积 Osher 格式的实现[J]. 水科学进展, 1994, 5(4): 262 270.
- [5] 胡四一, 谭维炎. 无结构网格上二维浅水流动的数值模拟[J]. 水科学进展, 1995, 6(1): 1-9.
- [6] 张二骏, 张东生, 等. 河网非恒定流三级联合算法[J]. 华东水利学院学报. 1982, 1.
- [7] Cunge J A, et al. Practical aspects of computational river hydraulics[M]. Pitman Advanced Publishing Program, 1980. 420.

# Numerical modeling of flood routing for the middle-lower Yangtze River system

HU Si-yi, SI Yong, WANG Ying-tan, WU Yong-xiang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract : In order to study flood management problems of the middle-lower Yangtze River system, a 1D-2D combined unsteady flow model is developed for simulating complex flood routing behaviors in the riverlake coupled system. A finite-volume method for computing 2D unsteady flows on an unstructured mesh is used to fit the complex configuration of the Dongting lake and to preserve mass balance; a 1D explicit-implicit-three-level difference scheme is applied to simulate branched and looped river network flows for accurately realizing automatic allocation of discharges at channel junctions and reversing flows. To increase modeling accuracy and extend modeling capacity, some essential problems arisen in the process of model building, including treatments of interior and exterior boundary conditions, flooding storage-discharge effects, and calculations of variable resistance terms, are discussed. Finally, the model is calibrated and verified against five flood events observed during 1954 - 1991 for illustrating excellent performances of this model.

**Key words :** Yangtze River flood management system; river network unsteady flow; simulation; flood routing of river-lake coupled system; 2D finite volume method