

# 河网水流数值模拟方法研究

吴作平<sup>1</sup>, 杨国录<sup>1</sup>, 甘明辉<sup>2</sup>

(1. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖南省水利厅, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 讨论了河网概化的一般原则, 并在分析单一河段水流数学模型的基础上, 建立了可以适用于一般河网体系水流数值计算的数学模型, 并采用荆江—洞庭湖的相关资料进行了验证。结果表明, 模型的计算值与实测值吻合较好, 说明该模型具有较好的适用性。

**关键词:** 河网; 概化; 节点; 数值模拟

**中图分类号:** TV 133.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2003)03-350-04

我国大型湖泊众多, 如洞庭湖、鄱阳湖、太湖等。这些湖泊, 往往与许多河流交织在一起, 形成复杂的河网。例如洞庭湖, 北有松滋、藕池、太平三口分泄长江来水来沙, 西南有湘、资、沅、澧四水入汇, 入湖水沙经调蓄后, 由城陵矶注入长江。湖区内河道、湖泊众多, 有些河道, 中、小水时为河, 而大水时则与其它河道一起形成湖泊。河道相互交错, 在有的交汇处, 汇流河段多达 6 条(如南咀), 多数情况下为 3~4 条。交汇范围大小不一, 整个湖区形成一个复杂的河网体系。

由于河网中各河段纵横交错, 相互干扰, 在实测资料不足或难以取得的情况下, 对各单一河段的计算就显得较为困难。为了研究湖区的淤积情况, 以往通常采用地形图套绘的方法计算淤积分布, 或者根据进、出湖区的水沙过程计算总淤积量, 前者受到地形图资料不易取得及时间间隔长的影响, 后者则难以得到淤积分布情况。本文用数值模拟的方法, 力图建立一个适用于各种类型河网的水流计算的数学模型, 为湖区的水情预报、洪水调度以及淤积计算提供条件。

## 1 模型的建立

### 1.1 河网的概化

迄今, 任何模型都只能模拟经过概化的原型, 河流模型也不例外。对复杂河网的概化, 应注意两点:

(1) 河网的概化 在河网的概化中, 应根据地形条件及水流情况, 着重考虑主要的河道, 那些水量较小, 对整个河网影响不大的短小河段或不予考虑, 或与其它河道结合考虑。

(2) 节点的概化 河网模拟中, 节点的概化决定河网计算成果的准确程度。实际计算时可采用几何原则, 根据河道交汇范围的大小来定。当该范围大于某一数值时, 则将其视为堰泽或湖泊, 否则将其作节点考虑。

一般河网都可概化为如图 1 所示的网络, 图中的每条线既可代表单一河段, 也可代表湖泊, 而每个交汇点既可代表河网中的节点, 也可代表湖泊。需要说明的是, 图中线段的方向仅代表水流在初始时刻的方向, 在实际河网中可能出现的逆流、倒灌的反向流情形, 仍可用图 1 概化, 但在建立模型的过程中, 应考虑这种情况。

### 1.2 单一河段水流模型<sup>[1,2]</sup>

采用一维、非恒定、非均匀模型。

(1) 基本方程 水流连续方程 
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (1)$$

收稿日期: 2002-01-10; 修订日期: 2002-06-30

作者简介: 吴作平(1969-), 男, 湖北咸宁人, 武汉大学博士研究生, 主要从事流域水、沙、电调度和河流数值模拟方面的研究。E-mail: wzp710@sina.com

$$\text{水流运动方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(i_b - i_f) + u_l q_l \quad (2)$$

式中  $A$  为过水断面面积;  $Q$  为流量;  $h$  为断面水深;  $i_b$ 、 $i_f$  分别为河床比降及水力比降;  $q_l$ 、 $u_l$  分别为源汇流的单宽流量和流速;  $g$  为重力加速度。

(2) 差分格式与差分方程<sup>[3]</sup> 采用 Preissman 格式将水流连续方程和运动方程按格式离散并线性化<sup>[2]</sup>, 得:

$${}_j Z_{j+1} + b_j Q_{j+1} = c_j Z_j + d_j Q_j + t_j \quad (3)$$

$${}_j Z_{j+1} + b_j Q_{j+1} = c_j Z_j + d_j Q_j + t_j \quad (4)$$

式(3)和式(4)中,  $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$ 、 $d_j$ 、 $t_j$  和  $a_{j+1}$ 、 $b_{j+1}$ 、 $c_{j+1}$ 、 $d_{j+1}$ 、 $t_{j+1}$  为系数, 其值与第  $n$  时刻断面  $j$  和  $j+1$  的值有关。

河网计算中, 单一河道的计算不用单独提边界条件, 而是考虑每条河道的连接情况, 即河网内联结条件。

### 1.3 河网模型

在经过概化的河网中, 对每个内节点及边界节点, 应满足以下条件:

(1) 水流连续性条件 即进、出节点的水量相等, 可表示为

$$\sum_{i=1}^{l(m)} Q_i - Q_{cx} = Q_m \quad (5)$$

化为增量形式为

$$\sum_{i=1}^{l(m)} Q_i - Q_{cx} = Q_m \quad (6)$$

式中  $l(m)$  为某节点连接的河段的数目;  $Q_i$ 、 $Q_i$  为各河段进(或出)节点的流量及增量;  $Q_m$ 、 $Q_m$  为连结河段以外的流量(如源汇流等)及增量;  $Q_{cx}$  为节点槽蓄量;  $Q_{cx}$  为槽蓄量增量, 与节点的面积  $A_{jd}$ 、水位增量  $Z$  及时间步长  $t$  等因素有关, 可近似由式  $Q_{cx} = A_{jd} Z/t$  来计算, 当节点可以概化为几何点时,  $Q_{cx}$ 、 $Q_{cx}$  为 0。

(2) 动量守恒条件<sup>[4,5]</sup> 认为连接节点各河段的端点水位及增量与节点的水位及增量相同, 可采用下式表示:

$$Z_{i,1} = Z_{i,2} = \dots Z_{i,l(m)} = Z_i \quad (7)$$

$$Z_{i,1} = Z_{i,2} = \dots Z_{i,l(m)} = Z_i \quad (8)$$

式中  $Z_{i,1}$ 、 $Z_{i,1}$  分别为与节点相连的第 1 条河段近端点的水位及增量,  $Z_i$ 、 $Z_i$  分别为节点  $i$  的水位及增量, 其余符号意义类似。

联立求解差分方程(3)及方程(4), 通过内消元, 将未知量集中在各节点上, 结合河网各节点的流量和动量守恒条件, 可得到河网节点方程组:

$$A * Z = B \quad (9)$$

式中  $A$  为系数矩阵, 其各元素与递推关系的系数有关;  $Z$  为节点水位增量; 矩阵  $B$  中各元素与河网各河段的流量及其增量, 以及其它流量(如边界条件、源、汇等)及其增量有关。

边界条件的提法: 在河网计算中, 不对每一条单一河道单独提外边界条件。整个河网的外边界条件为: 进入河网的流量过程; 河网总汇出点的水位过程。

根据对河网边界条件分析可知, 河网总汇出点的节点方程中, 其未知量应为节点流量增量。而水位增量为已知条件。

求解式(9), 可求出河网各节点的流量、水位增量, 进而可推求出各河段各计算断面的流量和水位的增量。

## 2 模型的验证

为检验模型的正确性, 以长江中游荆江—洞庭湖水系为例。荆江洞庭湖河网概化图如图 1。

洞庭湖位于长江中游荆江南岸, 跨湘、鄂两省。湖区总面积约 18 780 km<sup>2</sup>, 它对调蓄长江洪水, 保护长江中游及武汉市起着十分重要的作用。

洞庭湖是一个复杂的水系，其北面依次有松滋、太平、藕池三口分泄长江来水来沙，西面和南面有湘、资、沅、澧四水入汇。另外，湖区周围还有汨罗江、新墙河等中小河流直接入湖。以上来水来沙经湖泊调蓄后，由城陵矶注入长江<sup>[6]</sup>。

由于洞庭湖来水来沙情况复杂多变，湖区内湖泊众多，河道交织。因此在数值计算时，首先要对其进行概化。概化过程中考虑的主要因素包括：地形条件，河流交汇情况及河网中各湖泊、堰泽的分布等。本文对湖区中有众多河道汇合的交汇处如杨家档、小河口、南咀、北景港等，由于交汇范围不大，故将其概化为节点(即不计交汇范围内的槽蓄、水位差及淤积等)，将七里湖、目平湖、南洞庭湖及东洞庭湖作为湖泊型河道考虑，如图2中虚线部分所示，其中目平湖、南洞庭湖和东洞庭湖又根据河道的入汇情况分为2~3段河道。

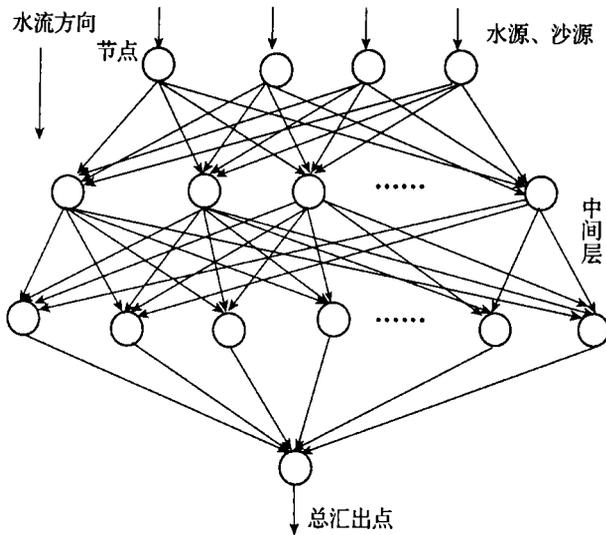


图1 河网网络示意图

Fig.1 Sketch of fluvial meshwork

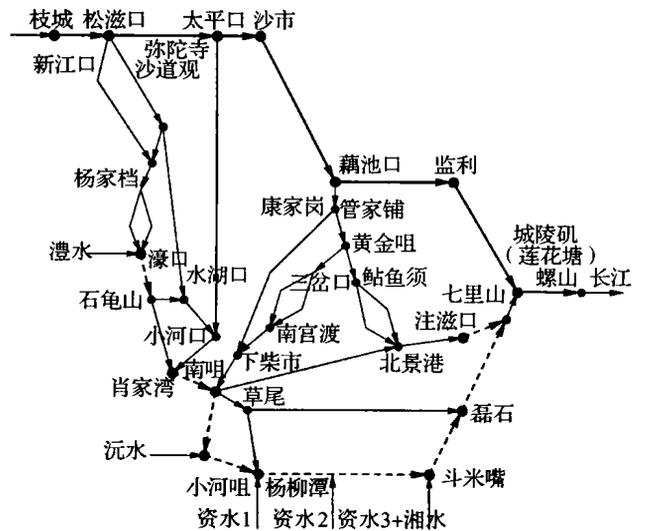


图2 荆江洞庭湖河网概化图

Fig.2 River system recapitulation of the Jingjiang-Dongting lake

洞庭湖区的河道和湖泊地形资料采用1995年的实测资料，荆江河段由于缺乏相应资料，枝城至沙市段采用1993年地形资料，沙市至螺山段采用1998年地形资料；进口中四水流量采用1997年6月15日至9月2日的实测值，由于缺乏枝城站实测资料，计算中用宜昌站同期实测流量资料代替(包括长江本年度最大的洪水过程)；出口(螺山站)控制水位则采用相应时段的实测值。长江干流各断面的糙率采用0.02，洞庭湖区各河段糙率相差较大，经率定和参考有关资料，除河段南嘴-注滋口、杨家档-七里湖采用0.04，七里湖-目平湖(即澧水洪道)、小河口-南嘴采用0.03外，其余均取0.025。

采用螺山站同期实测流量和监利站同期实测水位资料进行验证，其结果如图3、图4所示。

由图3、图4可看出，模型计算值与实测值吻合较好，其中监利站的计算水位与实测值的吻合更好；整个洪水过程，不管是流量还是水位，计算值与实测值的波形较为吻合，但是在流量(水位)的波峰及波谷处，模拟情况相对差一些，其中在波峰处计算值偏大，而在波谷处则相反；第1次洪峰的模拟情况稍差。同时在退水期(图4中第51~59d)，螺山站流量的计算值小于实测值，差值较大，而监利站水位在退水期的吻合情况相当好。分析其原因，主要由于洞庭湖区四大湖泊、堰泽、圩垸及河道对四水及长江入湖水流的调蓄作用在模型中尚未得到充分的体现。在退水期，螺山站流量由于洞庭湖调蓄作用的影响，洪水的退落速度，必然比没有湖泊调蓄时小。而监利站由于不受洞庭湖调蓄作用的影响，计算水位与实测值吻合较好。另外，地形概化及实测资料的不配套所带来的影响也不容忽视。在对洞庭湖进行数值模拟计算时，如何处理众多湖泊、堰泽、圩垸及河道调蓄作用的影响，是一个非常关键的问题。鉴于洞庭湖区域的复杂性，这方面的研究仍有待深入。

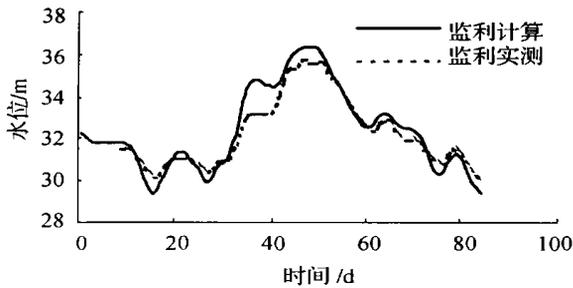


图3 1997年6月15日~9月2日监利站实测水位与计算值比较

Fig. 3 Comparison of calculated and observed level in Jianli in duration on June 15 ~ September 2 in 1997

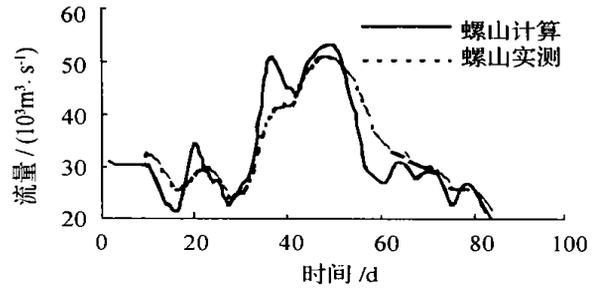


图4 1997年6月15日~9月2日螺山站实测流量与计算值比较

Fig. 4 Comparison of calculated and observed discharge in Luoshan in duration on June 15 ~ September 2 in 1997

### 3 结 语

从研究河网中各河段间的相互连接关系出发, 通过节点方程, 由单一河段的非恒定非均匀水流数值模型, 建立了可应用于整个河网的计算的数值模型, 并采用地形情况复杂的荆江—洞庭湖水系进行了验证, 计算结果与实测资料吻合较好。运用此模型, 在河网的外边界条件(即进入河网的流量过程和河网总汇出点的水位过程)已知的情况下, 即可计算出河网中各河段各计算断面的水流各要素, 在使用上较为方便, 可广泛应用于洪水预报、蓄滞洪区调度等领域。同时所建模型的理论基础和方法也是成熟和严谨的, 因此具有较好的适用性。

河网中河道交汇处的水沙条件是相当复杂的, 作为湖泊或堰泽考虑的交汇处, 采用二维模型与一维模型嵌套的方法计算更符合实际。

#### 参考文献:

- [1] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990. 8 - 15, 22 - 36.
- [2] 杨国录. 河流数学模型[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 115 - 123, 175 - 181.
- [3] 杨国录. 四点时空偏心 Preissmann 格式的应用问题[J]. 泥沙研究, 1991, 12(4): 88 - 98.
- [4] 李义天. 河网非恒定流隐式方程组的汉点分组解法[J]. 水利学报, 1997, (3): 49 - 51.
- [5] 吴寿红. 河网非恒定流四级组解法[J]. 水利学报, 1985, (8): 42 - 50.
- [6] 段文忠, 王明甫. 洞庭湖区水沙变化规律及三峡建坝后发展趋势略估[R]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1993.

## Flow numerical model for river systems

WU Zuo-ping<sup>1</sup>, YANG Guo-lu<sup>1</sup>, GAN Ming-hui<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hunan Water Resources Department, Changsha 410007, China)

**Abstract:** In this paper a normal principle of the river system is introduced. Based on the analysis of water-sediment model of single reach, a numerical model for calculation of normal river system is established and tested with the observed data of the Jingjiang River and the Dongting Lake. The result shows that the computed data and the observed data fits well, which indicates that it is suitable to describe the complex boundary of the Jingjiang-Dongting, and the model is applicable.

**Key words:** river system; sum; node; numerical model