

洪水预报水文水力学模型研究

张真奇 夏自强

(河海大学水文水资源及环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 针对平原地区洪水预报特点,建立了以水动力学方法为主的河道一维洪水预报水文水动力学模型以及无资料地区以水文学方法为辅的洪水预报水文水力学模型.模型中河道洪水演算采用基于圣维南方程组的差分解法,流域降雨径流预报采用新安江三水源模型.模型采用变动边界技术,将河网与两侧的地形联系起来,能准确计算出逐时段河网各断面的水位与流量.该模型在浙江省诸暨市城关至湄池河段洪水过程的模拟与预报结果表明,预报水位与实测水位吻合良好.

关键词 洪水预报 水文水力学模型 差分解

中图分类号:P338

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2002)05-0083-04

平原地区水系复杂,传统的水文学预报方法已难以满足实际防洪的需要,因此需开发流域洪水预报的水文水力学模型.这方面国内外有不少研究,但一般均侧重于流域洪水的模拟计算.本文针对平原地区洪水预报的特点,建立了洪水预报的水文水力学模型.该模型具有水文水力学模型的优点,并详细地考虑了无水文站控制地区的降雨径流预报、支流汇入、河道分汊及河道水工建筑物等对河道洪水波运动的影响.

1 模型建立

1.1 边界条件的预报

平原地区水系纵横交错,其水流模拟最好采用水动力学方法.而将水力学模型用于流域实时洪水预报时,需用流域降雨径流模型为其提供边界条件.因此模型中流域水文模型部分主要是解决河网水力学模型上、下边界的预报以及流域内区间降雨径流的预报问题.

对于河网上边界以及流域内区间降雨径流的预报,可根据具体情况采用相应的产汇流模型.新安江模型的大部分参数都有比较明确的物理意义,其参数有一定的区域规律^[1].我国东部沿海平原地区可采用新安江三水源模型.模型建立的难点在于解决无水文站控制地区的降雨径流预报问题.这部分能否很好地解决,对模型求解的精度起着至关重要的作用.一般而言,这部分径流往往受到干流的顶托,因此可以对这部分径流用一个线性水库加以调蓄.

对于河网下边界的预报,一般可采取两种途径:一是继续沿用水动力学的方法,即在计算区域下游选取某一有代表性的国家潮位站,由海洋潮汐运动规律作出河网下边界的预报.在实时预报时,可采用现时校正法考虑风暴潮的影响.二是采用水位流量关系.本次研究由于资料短缺,因此采用第2种方法.就一般情况而言,下边界出流过程易受下游洪潮顶托的影响,其水位流量关系不稳定.本次研究,预先制作出严重、中等、轻微顶托3条水位流量关系线,实时预报时,可根据实际情况选用不同的关系线,从而使模型下边界成为变动下边界,使该模型具备一定的“修正”功能.

1.2 河道洪水演算

描述河道一维非恒定水流运动的基本方程为圣维南方程组.取水位 Z 和流量 Q 为水力要素,该方程组可写为

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha Qu) + gA \frac{\partial Z}{\partial t} + g \frac{1}{C^2 AR} \frac{\partial Q}{\partial x} = qV_x \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q ——流量; Z ——水位; A ——过水断面面积; B ——河道水面宽度; S_f ——摩阻比降; u ——断面平均流速; x ——沿河长的距离; q ——单位河长均匀旁侧入流; α ——动量校正系数; C ——谢才系数; R ——水力半径; g ——重力加速度; V_x ——旁侧入流流速在主流方向上的分量。

对式(1)采用 Pressimann 4 点线性隐式差分格式进行离散,任取河道 K ,设河道 K 首断面号为 L_1 ,末断面号为 L_2 ,为书写方便,忽略上标 $n+1$,则有如下差分方程

$$\begin{cases} Q_{j+1} - Q_j + C_j Z_{j+1} + C_j Z_j = D_j \\ E_j Q_j + G_j Q_{j+1} + F_j Z_{j+1} - F_j Z_j = \Phi_j \end{cases} \quad (j = L_1 \dots, L_2 - 1) \tag{2}$$
$$C_j = \frac{B_{j+1/2}^n \Delta x_j}{2 \Delta t \theta} \quad D_j = \frac{q_{j+1/2} \Delta x_j}{\theta} - \frac{1-\theta}{\theta} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) + C_j (Z_{j+1}^n + Z_j^n)$$
$$E_j = \frac{\Delta x_j}{2 \theta \Delta t} - (\alpha u)^n + \left(\frac{g |u|}{2 \theta C^2 R} \right)_j^n \quad F_j = (g A)^n_{j+1/2}$$
$$G_j = \frac{\Delta x_j}{2 \theta \Delta t} + (\alpha u)^n_{j+1} + \left(\frac{g |u|}{2 \theta C^2 R} \right)_{j+1}^n \Delta x_j \quad \Phi_j = \frac{\Delta x_j}{2 \theta \Delta t} (Q_{j+1}^n + Q_j^n)$$

以首、末断面水位为基本未知变量,将各断面水位、流量表达为首末节点水位的线性关系,式(2)方程组可利用双追赶方程进行求解。由于任意河道首末节点水位亦即河道首末断面水位,通过递推关系,可以将首末断面的流量表达为

$$\begin{cases} Q_{L_1} = \alpha_{L_1} + \beta_{L_1} Z_{L_1} + \xi_{L_1} Z_{L_2} \\ Q_{L_2} = \eta_{L_2} Z_{L_2} + \gamma_{L_2} Z_{L_1} \end{cases} \tag{3}$$

式中: $\alpha_{L_1}, \beta_{L_1}, \xi_{L_1}, \eta_{L_2}, \gamma_{L_2}$ ——河道追赶系数; Z_{L_1}, Z_{L_2} ——河道首末断面水位。

1.3 堰闸水流模拟

堰闸水流,圣维南方程组不再适用,必须根据其水力特性作特殊处理。
以宽顶堰为例,关闸时 $Q_i = Q_{i+1} = 0$;自由出流时 $Q = mbh \sqrt{2gh_0}$,这里 m 为自由出流系数, b 是闸孔净宽, h 为计算过流水深, h_0 为上游水深, $h_0 = Z_i - Z_d$;淹没出流时 $Q = \varphi bh \sqrt{2g(Z_i - Z_{i+1})}$,这里 φ 为淹没出流系数。根据不同的流态采用相应的水力学公式,可将 Q 线性离散为 $Q = \alpha Z_{\text{上}} + \beta Z_{\text{下}} + \gamma$ 。其中: Q 为过闸流量; $Z_{\text{上}}, Z_{\text{下}}$ 分别为闸上、闸下水位。

对于其他堰型,其计算原理与宽顶堰一样。若把堰看作一条特殊的“河道”,显然过流公式已经把断面流量表达为“河道”首、末节点水位的线性组合。

1.4 节点水位方程

通过以上分析可知,只要节点水位已知,则每个断面的水位与流量以及通过堰、闸的流量均可求解,因此,必须建立节点水位方程。节点水位方程的建立依据水量平衡原理,即流进与流出某一节点的水量之和等于该节点蓄水量的变化:

$$\sum_{j=1}^m Q_i^j = A_i \frac{dZ_i}{dt} \tag{4}$$

式中: Q_i^j ——河道汇入与汇出节点 i 的流量,汇出的流量用负值; A_i ——节点 i 的水面面积; m ——汇入节点的河道数。

把流量与节点水位关系式代入式(4),得到与节点 i 相邻的节点水位为未知变量的线性代数方程为 $f(Z_{i,j}) = 0$ 。其中 $Z_{i,j}$ 为与节点 i 相邻节点水位的集合。对河网每一个节点,建立上述节点水位方程,形成以河网节点水位为基本未知变量的线性代数方程组。该方程组为一带状稀疏方程组,一般可采用优化节点编码方法进行求解,若优化编码难以实现,相应的可采用矩阵标识法^[2]进行求解。

2 应用实例

将该模型应用于浙江省诸暨市浦阳江流域。浦阳江发源于浦江县寿峰山,在萧山市闻家堰附近汇入钱塘江,诸暨境内的主流长 67.6 km,流域面积 2 213 km²,占全市总面积的 95.9%。研究河段从城关至湄池,水系概化如图 1 所示。研究区域内设有高湖分洪区,其最大分洪流量为 1 370 m³/s。

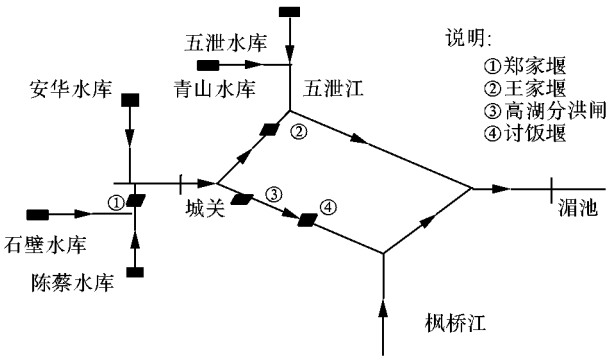


图 1 水系概化

Fig.1 Simplification of drainage system

根据计算河网水系特征,模型计算的流程可概括为:首先应用降雨径流模型计算得到安华水库、石壁水库、陈蔡水库 3 库库下至湍池区间流量过程,为河道洪水演算水力学模型提供上边界,湍池下边界的获得,采用变动水位流量关系线,将以上各边界条件代入河道洪水演算的水力学模型,可计算得到城关至湍池河段沿程各计算断面的水位流量过程.为了减小降雨径流模型的预报误差,采用了“反馈模拟实时校正”模型^[4]对城关站的水位流量过程进行实时修正.

取城关断面 1990~1999 年共 10 场次洪水进行预报计算,计算成果如表 1 所示.城关断面部分洪水模拟过程线如图 2 所示.从图 2 可见,计算与实测结果吻合良好.

表 1 城关断面实测与预报最高洪水位对照

Table 1 Comparison of measured and predicted maximum flood levels at Chengguan section

洪号	实测最高水位 /m	预报最高水位 /m	误差 /m
900901	14.32	14.79	-0.47
920626	12.64	12.66	-0.02
920704	13.31	13.61	-0.03
930702	12.85	12.83	0.02
930704	12.89	13.02	-0.13
940610	14.52	14.60	-0.08
950626	12.46	12.59	-0.13
970709	14.57	14.63	-0.06
980619	12.41	12.83	-0.42
990618	12.92	13.07	-0.15

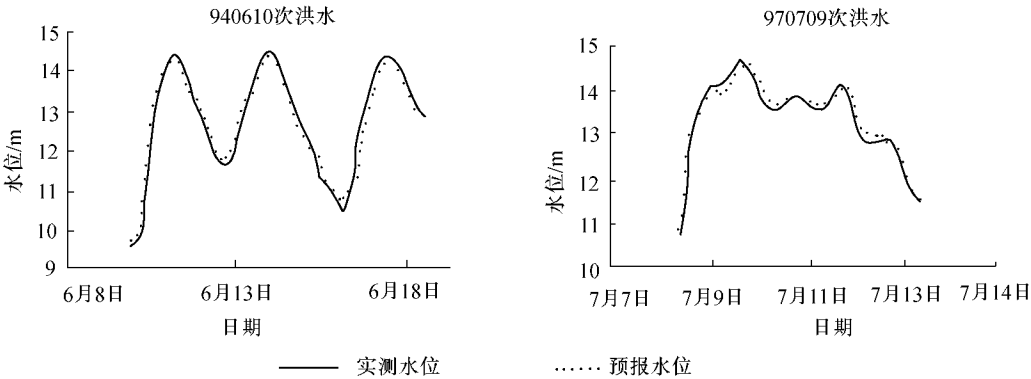


图 2 城关断面实测与预报洪水水位过程线

Fig.2 Predicted and measured water level hydrograph for Chengguan section

3 结 论

- a. 区间降雨径流模拟在湿润及半湿润地区可采用新安江三水源模型,河道洪水演算可采用基于圣维南方程组有限差分解的 Preissmann 隐式差分格式,将二者有机地结合起来,形成流域洪水预报水文水力学模型,其模拟与预报结果令人满意.模型与数据库技术结合,使得模型具有较强的通用性和实用性,适合于解决流域的防洪规划与河道整治,具有推广应用的价值.
- b. 对降雨径流模型加以改进,可考虑同一计算单元内不同下垫面因素对产流的影响,同时进一步增强预报模型的实时修正功能及水文学与水力学模型接口技术的研究.
- c. 考虑河段中断面和纵比降发生急剧变化时的影响,同时可以增加对行洪区的二维模拟.

d. 模型应用于诸暨市洪水预报和工程规划,效果较好.受时间的限制,还有大量分析工作没有完成,洪水过程线的模拟还有一定误差,糙率变化规律也有待进一步研究.应针对模型存在的问题进行改进,才能使模型具有更高的模拟精度.

参考文献：

[1] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.12~30.
[2] 王船海,李光炽.实用河网水流计算[M].南京:河海大学出版社,1997.21~28.
[3] 王船海,李光炽.流域水文模拟[J].水利学报,1996(3):35~38.
[4] 孙桂华.实用水文预报中反馈模拟实时校正的应用[J].水文,1991(1):22~24.

Research of hydrologic-hydraulic flood predicting model

ZHANG Zhen-qi , XIA Zi-qiang

(College of Water Resources and Environment , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : According to the characteristics of plain flood prediction , a hydrologic-hydraulic flood predicting model is established mainly based on the hydrodynamic method of 1-D channels and the hydrologic method for no-data areas . In the model , the differential method based on the Saint-Venant equations is used to calculate river floods , and the Xin'anjiang three water-source model is used to predict precipitation and runoff in river basins . With the variable-boundary technique and by connection of river networks with corresponding topography , the variation of the water level of and the discharge from each river section can be calculated accurately . The model is applied to the simulation and prediction of the flood process of the Chengguan-Meichi section in Zhuji City , Zhejiang Province , and the predicted and measured water levels are in good agreement .

Key words : flood prediction ; hydrologic-hydraulic model ; differential solution