

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.010

平原区河网水流计算校正模型

吴晓玲^{1 2}, 向小华^{1 2}, 李菲菲³, 王船海^{1 2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 吉林省电力勘测设计院, 吉林 长春 130022)

摘要:为提高平原河网水流计算的精度,针对其中交错相连的复杂河网水流运动以及测点又相对较少的情况,提出以环状河网节点水位三级解法为基础、河段方程系数为载体的平原河网校正模型.将观测位置上的模型系统误差校正信息由测点向河网其他断面传播,修正相邻河道断面的水位、流量预报值.选择长江澄通段河网进行实例分析,选用 2004 年 9 月的水文资料进行演算.结果表明,该方法能在一定空间范围内有效地传播误差修正量,对提高河网水流预报精度具有实用意义.

关键词:水流计算;环状河网;平原区河网;校正模型;水动力学模型

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)01-0048-04

Correction model for flow calculation of plain river network

WU Xiao-ling^{1 2}, XIANG Xiao-hua^{1 2}, LI Fei-fei³, WANG Chuan-hai^{1 2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jilin Electric Power Survey & Design Institute, Changchun 130022, China)

Abstract: Complex water movement and fewer measuring points are the unfavorable factors in improving the accuracy of flow calculation of river networks. For this reason, a correction model for a plain river network was developed based on the three-step method in dealing with the water levels at key nodes of a looping river network, with the coefficients in the equation considered to be the media carrying the correction information. The correction information of the model errors at observation stations was transmitted to the other cross sections of the river network to correct the forecasted values of water levels and discharges at the cross sections of neighboring rivers. A case study was conducted in the river network of the Chengtong section of the Yangtze River. Hydrological data in September 2004 were selected for model calculation. The results show that the proposed model can effectively transmit the correction information of model errors in a certain spatial range and has practical significance in improving the accuracy of forecasts for river networks.

Key words: flow calculation; looping river network; plain river network; correction model; hydrodynamic model

应用水文与水动力学相结合的洪水预报技术解决单一河道以及树状河网的校正技术已日趋完善^[1-4],但对于下游平原地区环状河网的研究目前较少.对此河网类型进行水流运动模拟及预报校正会遇到一些困难.比如,受潮汐影响的河网水流运动状态复杂^[5-8],边界条件不易确定,河道彼此相连往往不易分割,计算对象水位、流量状态量的运算工作量十分巨大,下游河网中通常为潮位站提供水位信息而极少出现流量测站,平原河网地区测站分布密度较低^[9],常规测站即提供长时间序列水文资料的测点更少,能提供给系统状态量的

收稿日期:2011-02-25

基金项目:国家自然科学基金(51009045, 51079038, 40930635);国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB421105);中央高校基本科研业务费专项(2009B06614, 2010B00414);海洋公益性行业科研专项(200905013-8);水利部公益性行业科研专项(201101024)

作者简介:吴晓玲(1981—),女(满族),黑龙江牡丹江人,讲师,博士,主要从事洪水预报及其实时校正研究. E-mail: freebir7237@hhu.edu.cn

校正信息十分有限^[10-11]。本文针对上述问题提出了平原河网地区由点带线至面的洪水预报误差校正方式。

1 河网水流计算校正模型

河网按形状可分为树状和环状河网 2 种^[12]。树状河网中包括一系列分汊点,一级或多级分汊,其内部不形成环状。环状河网中河道可分为内河道和外河道 2 类,外河道的一端是边界条件已知的外节点,而另一端为水力要素未知的内节点,内节点变量需采用河网联解方式才能得到,本文采用以节点水位为基本未知量的三级解法^[13]。

1.1 内河道水流模拟

基于离散并线性化后的圣维南方程为

$$Q_1 = \alpha_1 + \beta_1 Z_{N_1} + \xi_1 Z_{N_2} \qquad Q_L = \theta_L + \eta_L Z_{N_2} + \gamma_L Z_{N_1} \tag{1}$$

式中:1,L——首、末断面编号;N₁,N₂——首、末节点编号;Q₁,Q_L——首、末断面流量;Z_{N₁},Z_{N₂}——首、末节点水位;α₁,β₁,ξ₁,θ_L,η_L,γ_L——首、末断面位置的离散系数。

由此,可以把各断面的流量写成由本断面水位与首、末断面水位组成的线性函数

$$\begin{cases} Q_i = \alpha_i + \beta_i Z_i + \xi_i Z_{N_2} \\ Q_i = \theta_i + \eta_i Z_i + \gamma_i Z_{N_1} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, L) \tag{2}$$

从而可以联立求解得到各断面的水位和流量。

1.2 校正信息的传递

平原河网地区一般仅有用以提供水位观测信息的潮位站,对于潮位站位于节点处的情况,水位测点的校正直接在节点水位方程中实现,而对于内河道中有潮位测站的情况,依据潮位观测过程更新系统状态量。

观测站处统计模型系统误差^[14]

$$\Delta Y_i = \frac{1}{N} \sum_{t=k-1}^{k-N} (\hat{Y}_{i,t} - Y_{i,t}) \tag{3}$$

式中:Ŷ_{i,t}——i 断面 t 时刻观测值;Y_{i,t}——i 断面 t 时刻计算值;N——用于统计的样本个数;ΔY_i——i 断面 k 个样本数统计出的模型系统误差;k——计算时刻累积样本数。

将观测位置得到的模型系统偏差校正量以修正河网水流计算模型系数(α,θ)的形式反映到校正河网计算中,进而达到修正相邻河道断面水位和流量的目的。

当 i 断面提供的是水位校正信息 ΔZ_i,由后向前递推 α,β,ξ 时,

$$Q_i = \alpha_i + \beta_i (Z_i - \Delta Z_i) + \xi_i Z_{N_2} \tag{4}$$

变换形式后

$$Q_i = \alpha'_i + \beta_i Z_i + \xi_i Z_{N_2} \tag{5}$$

将 i 断面的水位系统误差修正量向前传递到 j 断面时,α'_j = α_j|_{未修正前} + Δα_j,此时 α 的修正量

$$\Delta \alpha_j = \lambda_j \Delta Z_i \tag{6}$$

其中
$$\lambda_j = \frac{(F_j - C_j G_j)(F_{j+1} - C_{j+1} G_{j+1})}{W_j W_{j+1}} \dots \frac{(C_{i-1} G_{i-1} - F_{i-1}) \beta_i}{W_{i-1}} \quad (1 \leq j < i)$$

式中:λ_j——j 断面的影响系数;C_j,F_j,G_j,W_j——离散圣维南方程组过程中的离散系数^[12]。

同理,递推系数 θ,η,γ 接受 i 断面水位校正时,

$$Q_i = \theta'_i + \eta_i Z_i + \gamma_i Z_{N_1} \tag{7}$$

依次递推到某一断面(以 s 记)时,θ'_s = θ_s|_{未修正} + Δθ_s,则此时的 θ 系数修正量

$$\Delta \theta_s = \mu_s \Delta Z_i \tag{8}$$

其中
$$\mu_s = \frac{(C_{s-1} E_{s-1} - F_{s-1})(C_{s-2} E_{s-2} - F_{s-2})}{W_s W_{s-1}} \dots \frac{(F_i - C_i E_i) \eta_i}{W_{i+1}} \quad (i < s \leq L)$$

式中 s 为某断面编号,于是,接受水位校正后的断面水位、流量变成

$$Z_i = \frac{\theta'_i - \alpha'_i + \gamma_i Z_{N_1} - \xi_i Z_{N_2}}{\beta_i - \eta_i} \tag{9}$$

$$Q_i = \frac{\beta_i \theta'_i - \alpha'_i \eta_i + \beta_i \gamma_i Z_{N_1} - \xi_i \eta_i Z_{N_2}}{\beta_i - \eta_i} \tag{10}$$

1.3 模型求解

根据河道断面水位、流量 相应河道首、末节点水位的线性关系以及节点处水量平衡原理 ,建立节点水位方程

$$\sum_{j=1}^m Q_{ij} = A_i \frac{dZ_i}{dt} \tag{11}$$

式中 : Q_{ij} ——河道 j 汇入 i 节点的流量 ,流入为正 ,流出为负 ; A_i —— i 节点的汇合区面积 ,无调蓄节点 $A_i = 0$;
 Z_i ——节点 i 的水位 ; $\frac{dZ_i}{dt}$ ——汇合区水位变化率 ; m ——汇入节点 i 的河道数.

联立所有节点方程得到关于节点水位的线性方程组 ,从而得到各个节点的水位 .将所得各个节点的水位代入式 (9)和式 (10) ,更新由同一节点相连的各河道断面水位和流量 ,即可起到由点带线至面的系统误差校正效果 .

2 应用实例

为考察该环状河网校正模型的实用性 ,以长江下游澄通河段(图 1)为例进行验证计算 .本河段水流既受上游径流的影响又受长江口潮流上溯的影响 ,径流和潮流均为河口段主要水流动力因素 .长江下游澄通段固定水位测站有江阴、天生港和徐六泾 3 站 ,一般可以提供长序列的观测资料 ,而图 1 所示的其他水位站均为临时站 ,没有长序列水位资料 .本次实例验证以 2004-09-06T15 :00/2004-09-07T15 :00 期间的洪水过程进行演算 .

为了提高校正效果的对比度 ,采取所有测站全部参与校正的方式 ,以与无校正模拟进行时间段内 3 h 预报对比(图 2) .所谓无校正模拟是指所有观测点信息不参与模型误差校正的模拟情况 .

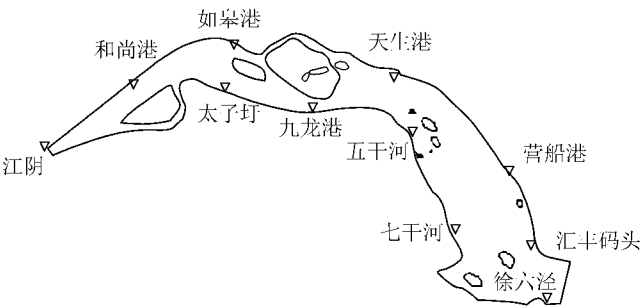


图 1 澄通河段水位测点分布
 Fig. 1 Distribution of water level observation stations along Chengtong section

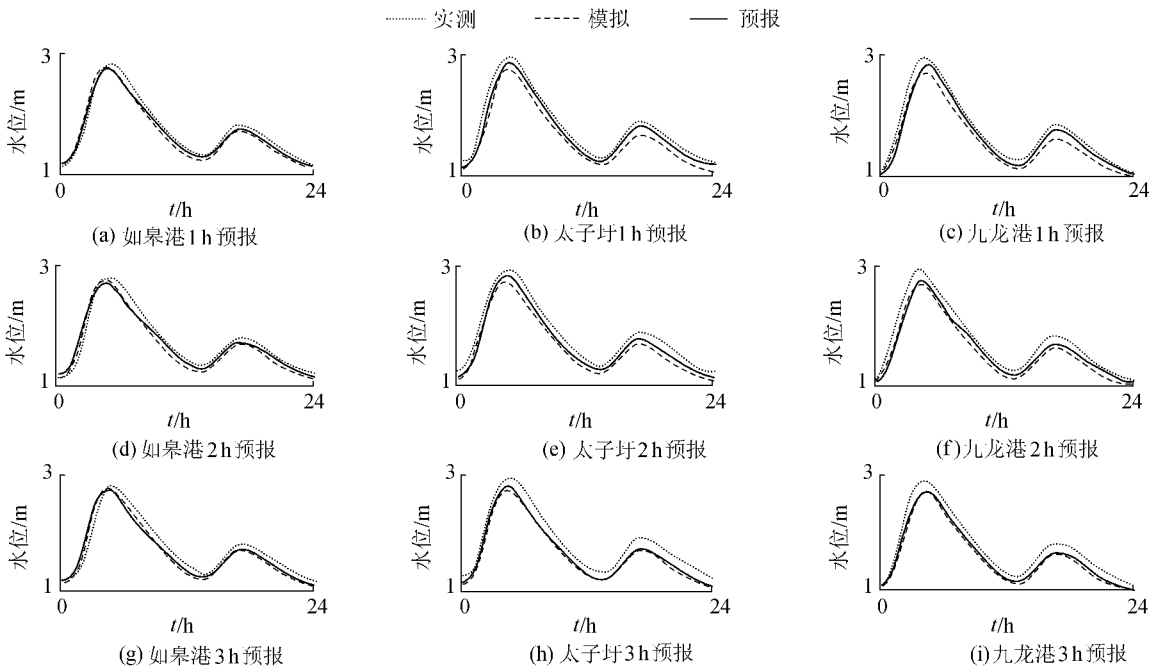


图 2 2004-09-06T15 :00/2004-09-07T15 :00 各个水位测点 1~3 h 外推预报与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of extrapolation forecast and observation results of one to three-hour water levels at observation stations during period from 15 :00 on September 6 , 2004 to 15 :00 on September 7 , 2004

与无校正模拟情况的对比结果表明,本文方法应用于下游平原河网水流计算,可以提高短期预报精度.

3 结 语

本文针对平原区环状河网实测点稀少、类型单一以及河网密度较大的情况,将测点处统计得到的系统误差,借助河网水流三级联解方法并以逐级衰减方式在方程系数中进行传递,再通过节点的链接,将该修正量传递到相邻河道中,扩大了测点校正量的传播影响范围,使更多断面能进行校正.

以长江下游澄通段河网为例,在水位测点位于河段内部情况下应用本文误差修正模型,调整预报初始状态,并将校正结果与无校正模拟情况进行比较,结果显示河网中系统误差校正效果明显,短期预报精度能得到提高.

参考文献:

[1] MADSEN H ,BUTTS M B ,KHU S T ,et al. Data assimilation in rainfall-runoff forecasting[C].//Hydro Informatics 2000 4th International Conference on Hydro informatics ,Cedar Rapids ,Iowa ,USA ,23-27 July. Washington ,D.C. [s. n.] 2000 :1-8.

[2] NEAL J C ,ATKINSON P M ,HUTTON C W. Flood inundation model updating using an ensemble Kalman filter and spatially distributed measurement[J]. Journal of Hydrology ,2007 ,336 :401-415.

[3] ROMANOWICZ R J ,YOUNG P C ,BEVEN K J. Data assimilation and adaptive forecasting of water levels in the river Severn catchment , United Kingdom[J]. Water Resources Research ,2006 ,42 :1-12.

[4] 孙志林,陈永明,夏珊珊,等. 基于混合模型的河网输水能力计算[J]. 河海大学学报:自然科学版,2010 ,38(2):144-148. (SUN Zhi-lin ,CHEN Yong-ming ,XIA Shan-shan ,et al. Calculation of water transport capacity of river networks based on mixed models [J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences ,2010 ,38(2):144-148.(in Chinese))

[5] 张红举,翟淑华. 平原河网纳污能力核算方法研究[J]. 水资源保护,2009 ,25(5):24-27. (ZHANG Hong-ju ,ZHAI Shu-hua. Research on calculation of carrying capacity of plain river network[J]. Water Resources Protection ,2009 ,25(5):24-27.(in Chinese))

[6] 辛小康,刘刚,张向东,等. 基于遗传优化的河网数学模型糙率参数反演[J]. 水利水电科技进展,2009 ,29(6):21-24. (XIN Xiao-kang ,LIU Gang ,ZHANG Xiang-dong ,et al. Investigation on parameter identification for river network model by using genetic algorithm[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources ,2009 ,29(6):21-24.(in Chinese))

[7] HSU M H ,FU J C ,LIU W C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River ,Taiwan [J]. Journal of Hydrology ,2003 ,283 :267-280.

[8] HSU M H ,FU J C ,LIU W C. Dynamic routing model with real-time roughness updating for flood forecasting[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,2006 ,132(6):605-619.

[9] MADSEN H ,SKOTNER C. Adaptive state updating in real-time river flow forecasting-a combined filtering and error forecasting procedure [J]. Journal of Hydrology ,2005 ,308 :302-312.

[10] KACHROO R K. River flow forecasting :part 1 :A discussion of the principles[J]. Journal of Hydrology ,1992 ,133 :1-15.

[11] KACHROO R K. River flow forecasting :part 2 :Algebraic development of linear modelling techniques[J]. Journal of Hydrology ,1992 ,133 :17-40.

[12] 王船海,李光炽. 实用河网水流计算[M]. 南京:河海大学出版社,2003 :61-72.

[13] 程文辉,王船海,朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京:河海大学出版社,2006 :71-77.

[14] 吴晓玲,王船海,向小华. 实时校正中的旁侧入流反演方法[J]. 水科学进展,2009 ,20(1):52-57. (WU Xiao-ling ,WANG Chuan-hai ,XIANG Xiao-hua. Inverse analysis of interval inflow in real-time correction[J]. Advances in Water Sciences ,2009 ,20(1):52-57.(in Chinese))