

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.05.002

双向波水位演算模型参数动态修正

张小琴^{1,2}, 包为民^{1,2}, 马德莲³

(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. 温州珊溪水利经济发展有限责任公司, 浙江 温州 325000)

摘要:基于由水量平衡方程和槽蓄方程推导出的水位演算基本方程建立感潮河段双向波水位演算模型, 将感潮河段预报断面的洪水过程视作上游洪水波和下游潮水波双向传播后的叠加. 通过分析感潮河段双向波水位演算模型参数, 提出了一种能同时考虑上下游水面比降对水位过程影响的参数动态修正方法. 将该模型结合参动态修正方法应用于富春江和曹娥江感潮河段, 取得了较好的水位模拟精度.

关键词:感潮河段 水位预报 双向波 参数动态修正

中图分类号: P338⁺.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)05-0484-05

受上游洪水和下游潮汐的双重作用, 感潮河段水流情势复杂. 预报感潮河段水位是一种非常重要的减灾手段, 受到了越来越多的关注^[1]. 目前, 感潮河段水位预报方法无论是经验方法^[2]、水力学方法^[3-4]、水文学方法^[5]、时间序列分析方法^[6]、基于神经网络^[7]及支持向量机^[8]的水位模型都是考虑洪潮一体化的影响. 这些方法用于断面冲淤严重、河床变化剧烈的河道, 精度尚不能满足要求. 预报感潮河段水位过程的关键在于考虑洪潮不同遭遇时间下的水流运动规律. 包为民等^[9]提出了感潮河段水位演算模型, 将预报断面的洪水过程分解为上游洪水波和下游潮水波双向运动的叠加, 该模型物理概念清楚, 对河道断面资料要求不高, 一些学者已经对其在感潮河段水位预报中的应用进行了研究^[10-13].

本文基于感潮河段水位演算基本方程, 采用洪水波演算至预报断面的水位过程加上潮水波演算至该断面的累积潮差过程构建双向波水位演算模型, 用于感潮河段的水位过程预报. 该模型部分参数非常敏感, 参数取值是保证计算精度的关键. 笔者从双向波水位演算理论出发, 分析模型参数对计算结果的影响, 简化参数率定, 提出了一种同时考虑上下游水面比降对水位过程影响的参数动态修正方法.

1 双向波水位演算模型

具有物理意义的水量平衡方程和槽蓄方程式为

$$\frac{dW}{dt} = I - Q \quad (1)$$

$$W = L\bar{B}\bar{H} \quad (2)$$

式中: W ——河段蓄水量; I ——上断面入流量; Q ——下断面出流量; L ——河段长; $\bar{B}$ ——河道平均河宽; $\bar{H}$ ——平均水深. 引入 1 个水深比重因子 x , 将式(2)写为:

$$W = L\bar{B}[xh + (1-x)H] \quad (3)$$

式中: h ——上断面水深; H ——下断面水深.

流量可表达为

$$I = a_1 h^{b_1} \quad Q = a_2 H^{b_2}$$

式中: a_1, a_2 ——上下游水深流量关系系数; b_1, b_2 ——上下游水深流量关系指数. 将流量表达式代入式(1),

收稿日期: 2009-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(50679024); “十一五”国家科技支撑计划(2008BAB29B08-02); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717)

作者简介: 张小琴(1983—), 女, 江苏宝应人, 博士研究生, 主要从事洪水预报调度及水流数值模拟研究. E-mail: zqxqinxx@hhu.edu.cn

并与式(3)联立求解,得河道水位演算的基本方程:

$$L\bar{B}_2(1-x)H_2 + \frac{a_2\Delta t}{2}H_2^2 = R \tag{4}$$

其中

$$R = \frac{a_1\Delta t}{2}(h_1^{b_1} + h_2^{b_1}) - \frac{a_2\Delta t}{2}H_1^2 + L\bar{B}_1[xh_1 + (1-x)H_1] - L\bar{B}_2xh_2$$

式中除 a_1, a_2, b_1, b_2 外,其他符号的下标 1 和 2 分别表示时段初和时段末.

若 $b_1 = b_2 = 1$,式(4)线性化为

$$H_2 = C_0h_2 + C_1h_1 + C_2H_1 \tag{5}$$

其中

$$C_0 = \frac{a_1\Delta t - 2L\bar{B}_2x}{2L\bar{B}_2(1-x) + a_2\Delta t} \quad C_1 = \frac{a_1\Delta t + 2L\bar{B}_1x}{2L\bar{B}_2(1-x) + a_2\Delta t} \quad C_2 = \frac{2L\bar{B}_1(1-x) - a_2\Delta t}{2L\bar{B}_2(1-x) + a_2\Delta t}$$

洪水波演算采用牛顿迭代法求解式(4),求得由洪水波演算至预报断面的水位 $Z_{C,t}$,潮水波演算采用式(5)进行潮位线性演算,求得由潮水波演算至预报断面的水位 H_t ,预报断面水位简化地由洪水波与潮水波直接叠加而得^[14]:

$$Z_t = Z_{C,t} + H_t - H_0 = Z_{C,t} + (H_t - H_{t-1}) + \cdots + (H_2 - H_1) + (H_1 - H_0) = Z_{C,t} + \sum_{i=1}^t \Delta H_i \tag{6}$$

式(6)可以理解为将洪水波演算至预报断面的水位与潮水波演算至该断面的累积潮差叠加得预报断面水位.所以,潮水波演算可直接采用式(5)进行潮差线性演算:

$$\Delta H_t = C_0\Delta h_t + C_1\Delta h_{t-1} + C_2\Delta H_{t-1}$$

式中 Δh_t 为下边界潮差过程($\Delta h_t = h_t - h_{t-1}$).

2 模型参数动态修正

2.1 参数讨论

由曼宁公式及谢才公式可推知, a_1 和 a_2 可以表达为糙率 n 、水面比降 j 和平均河宽 $\bar{B}$ 的关系: $\bar{B}\sqrt{j}/n$,此时 b_1 和 b_2 一般取 $5/3$. $\bar{B}$ 和隐含在 a_1 及 a_2 中的水面比降 j 都是相当敏感的参数.对于横断面变化剧烈的河道, $\bar{B}$ 的取值对于水位过程中峰形的影响很大,同样的增水量对于 2 个不同断面形状引起的水位变幅是不同的,如果仍按照 $\bar{B}$ 为常数计算,误差会很大.因此,可以根据实测断面资料建立 $\bar{B}$ 随河道平均水深变化的关系.

对于实际河段,由于上下断面河床特征及糙率差异,流量与水深的关系也有较大的差别.为了能充分反映实际河道情况,双向波水位演算模型中把 a_1, b_1, a_2, b_2 作为参数来确定.对于不受潮汐影响的断面,若水位流量关系单一,这些参数值均为常数;若关系非单一,参数值为非常数.洪水波演算中取 $b_1 = b_2 = 5/3$,参数简化为 $x_{上}, a_{1上}, a_{2上}$;潮水波潮差线性演算中 $b_1 = b_2 = 1$,参数简化为 $x_{下}, a_{1下}, a_{2下}$.参数 $x_{上}$ 和 $x_{下}$ 对计算水位整体过程的波动幅度有较大影响, $a_{1上}$ 和 $a_{2上}$ 反映上游洪水对预报断面的水位影响,参数 $a_{1下}$ 和 $a_{2下}$ 反映潮水对预报断面水位的顶托作用.

2.2 参数动态修正方法

若将 a_1, a_2 都率定为常数,对于河宽随水深变化不大、河床较为稳定,且水位涨落变幅不是很大的河流,能得到一个很好的结果.但是如果应用在一些具有明显河漫滩、河床变化剧烈,且涨落潮变幅较大的河流,则结果不理想.若将水面比降 j 视作常数,则高水时计算水位偏高,低水时计算水位偏低.因为洪水期水位变幅大,比降大;枯水期河道水位稳定,比降小.

由式(4)和式(5)易知, a_1 增大,计算水位增大; a_2 增大,计算水位减小.在参数调试过程中,发现上游参数较下游参数敏感,即调试上游参数 $a_{1上}, a_{2上}$ 对计算水位影响较明显.根据水面比降及 a_1, a_2 对水位的影响,提出利用上断面与预报断面的水面比降、预报断面与下断面的水面比降,分别对洪水波演算过程中的 $a_{1上}, a_{2上}$ 进行动态修正.结合考虑量级大小,修正公式为

$$a_{1上,t} = a_{1上} \sqrt{\frac{|Z_{U,t-1} - Z_{C,t-1}|}{L_u}} \times 100 \tag{7}$$

$$a_{2上,t} = \frac{a_{2上}}{2} \left(\sqrt{\frac{|Z_{U,t-1} - Z_{C,t-1}|}{L_u}} + \sqrt{\frac{|Z_{C,t-1} - Z_{D,t-1}|}{L_d}} \right) \times 100 \tag{8}$$

式中： $a_{1上,t}$ 、 $a_{2上,t}$ —— t 时刻修正后的参数值； $a_{1上}$ 、 $a_{2上}$ ——初始参数值； $Z_{U,t-1}$ —— $t-1$ 时刻上断面实测水位； $Z_{C,t-1}$ ——由洪水波演算至预报断面计算水位； $Z_{D,t-1}$ ——下断面实测潮位； L_u ——上断面至预报断面的河段长； L_d ——预报断面至下断面的河段长。

该修正方法考虑了上下游水面比降的影响,可以动态地减小由模型参数带来的误差.每个时刻修正参数后,仍采用原双向波水位演算模型计算,十分简便.结合 $a_{1上}$ 、 $a_{2上}$ 的初始参数值及其动态修正方法和潮差线性演算参数,通过试错法就可以率定出双向波水位演算模型参数.模型参数率定过程为:(a)先假定参数初值,固定其他参数不变,调试 $x_{上}$ 和 $x_{下}$;(b)固定其他参数不变,调试 $a_{1下}$ 和 $a_{2下}$;(c)固定其他参数不变,调试 $a_{1上}$ 和 $a_{2上}$. 重复(b)和(c),直至满足精度.

3 实例应用

3.1 模拟区域概况

富春江位于钱塘江上游,为钱塘江桐庐至萧山闻家堰段的别称.本文以桐庐站为上边界,富阳站为下边界,预报窄溪断面的洪水过程.桐庐断面至窄溪断面约 15.6 km,窄溪断面至富阳断面约 28.6 km(图 1).

曹娥江上游起源于浙江嵊州,下游汇同钱塘江干流来水,注入杭州湾.上游属山溪性河流,下游属潮汐河道.本文选取花山水文站为上边界,桑盆殿潮位站为下边界,预报百官断面的洪水过程.花山断面至百官断面约 49 km,百官断面至桑盆殿断面约 20 km(图 1).

富春江的数据采用 1986—1989 年的 10 场洪水,其中 1986—1988 年的 7 场洪水进行参数率定,1989 年的 3 场洪水进行检验;曹娥江的数据采用 1988—1990 年的 10 场洪水,其中 1988—1989 年的 7 场洪水进行参数率定,1990 年的 3 场洪水进行检验.

3.2 模拟结果

富春江的参数值为 $x_{上}=0.1$, $a_{1上}=0.69$, $a_{2上}=1.2$, $x_{下}=0.1$, $a_{1下}=0.5$, $a_{2下}=2.8$;曹娥江的参数值为 $x_{上}=0.1$, $a_{1上}=0.26$, $a_{2上}=0.63$, $x_{下}=0.1$, $a_{1下}=0.9$, $a_{2下}=2.3$. 富春江率定和检验结果见表 1,部分洪水模拟过程见图 2;曹娥江率定和检验结果见表 1,部分洪水模拟过程见图 3.

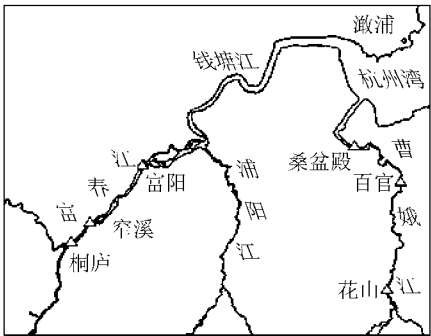


图 1 钱塘江流域示意图

Fig. 1 Qiantang River basin

表 1 富春江窄溪站及曹娥江百官站水位模拟结果

Table 1 Simulated results of water stages at Zhaixi in Fuchun River and at Baiguan in Cao'e River

富春江窄溪站								曹娥江百官站							
洪号	实测 洪峰 /m	计算 洪峰 /m	峰值 误差 /m	相对 误差 /%	峰时 误差 /h	误差 均方差 /m	确定性 系数	洪号	实测 洪峰 /m	计算 洪峰 /m	峰值 误差 /m	相对 误差 /%	峰时 误差 /h	误差 均方差 /m	确定性 系数
860501	8.79	8.68	0.11	1.2	2	0.195	0.930	880617	9.87	9.58	0.29	3.0	2	0.316	0.939
860617	8.39	8.68	-0.29	-3.5	3	0.235	0.866	880807	9.07	9.11	-0.04	-0.4	-1	0.280	0.935
860705	8.13	7.95	0.17	2.1	0	0.239	0.905	890411	8.56	8.61	-0.05	-0.6	1	0.062	0.993
870620	11.46	11.35	0.11	1.0	2	0.269	0.975	890521	9.00	8.89	0.11	1.3	0	0.156	0.966
870722	10.49	10.27	0.21	2.0	3	0.324	0.937	890616	8.64	8.68	-0.04	-0.4	3	0.216	0.940
880511	9.92	9.79	0.13	1.3	2	0.488	0.835	890627	9.23	9.33	-0.10	-1.0	3	0.261	0.943
880616	12.02	11.75	0.27	2.3	1	0.255	0.975	890911	9.78	10.07	-0.29	-3.0	0	0.357	0.935
890527	11.57	11.54	0.03	0.3	1	0.464	0.928	900531	7.41	7.50	-0.09	-1.3	2	0.066	0.973
890616	10.96	10.99	-0.04	-0.3	0	0.319	0.946	900614	7.32	7.35	-0.03	-0.4	3	0.082	0.954
890628	13.02	13.02	0	0	1	0.382	0.971	900830	11.39	11.25	0.15	1.3	-3	0.320	0.946

注 峰值误差与峰值相对误差两栏,-号表示计算偏大,+号表示计算偏小.峰时误差一栏中:-号表示计算洪峰滞后,+号表示计算洪峰提前.下同.

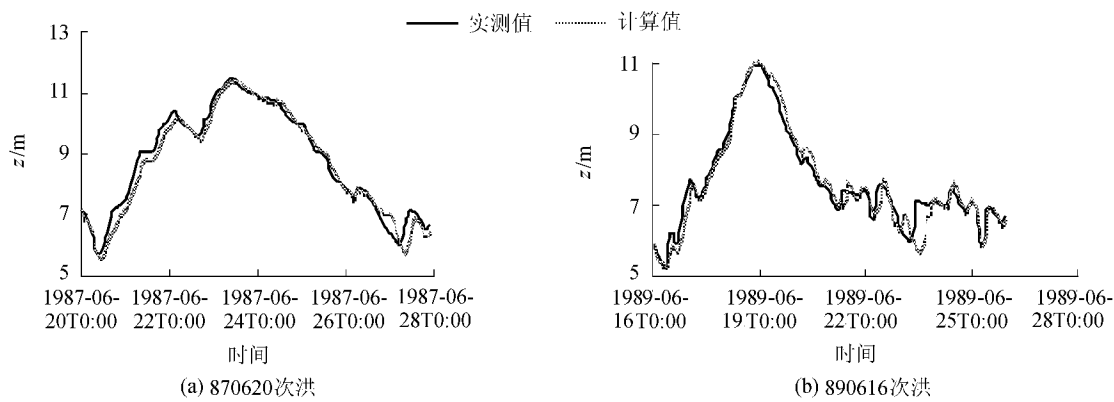


图 2 富春江窄溪站水位过程线
Fig. 2 Hydrographs of water stages Zhaixi in Fuchun River

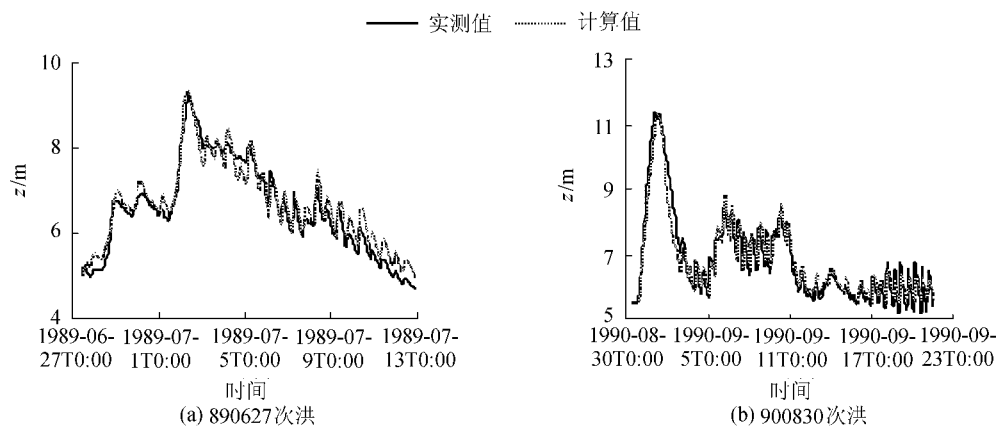


图 3 曹娥江百官站水位过程线
Fig. 3 Hydrographs of water stages at Baiguan in Cao'e River

由表 1 可知,富春江 10 场洪水中有 8 场的确定性系数达到了 0.9 以上(除 860617 和 880511),峰值误差都小于 30 cm,最大峰时误差为 3 h,最大误差均方差为 0.488 m. 由图 2 可见,洪水水位计算过程线与实测过程线整体拟合很好.

由表 1 可知,曹娥江 10 场洪水的确定性系数都大于 0.9,其中 4 场洪水的确定性系数达到了 0.95 以上. 峰值误差都小于 30 cm,最大峰时误差为 3 h,最大误差均方差为 0.357 m. 由图 3 可见,双向波水位演算模型结合参数动态修正方法较好地模拟了次洪 890627 和 900830 退水部分的波动情况.

4 结 论

- a. 双向波水位演算模型参数动态修正方法考虑了上下游水面比降对水位预报的影响,减小了模型参数带来的计算误差,取得了较好的模拟精度. 该修正方法不改变原模型的算法结构,可以直接附加到原模型计算程序中. 本文计算实例表明,结合参数动态修正的双向波水位演算模型计算简便,精度较高.
- b. 在模型修正技术中,应扩大信息利用量. 如,该参数动态修正方法还可以结合河宽随水位变化等信息. 此外,还应全面分析支流回水顶托、复式断面等复杂情况下的计算效果,使该法不断完善.

参考文献：

[1] 张小琴,包为民. 感潮河段水位预报方法浅析[J]. 水电能源科学,2009,27(3) 8-10. (ZHANG Xiao-qin,BAO Wei-min. Brief review on water level forecasting for tidal river[J]. Water Resources and Power,2009,27(3) 8-10. (in Chinese))

[2] 包为民. 水文预报[M]. 北京 中国水利水电出版社,2006 114-132.

[3] 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.

[4] 欧剑,马进荣,张行南,等. 大通至长江口整体水动力模型[J]. 河海大学学报 :自然科学版,2009,37(3) 258-262. (OU Jian,

- MA Jin-rong,ZHANG Xing-nan,et al. Overall hydrodynamic model of Datong—Yangtze River estuary[J]. Journal of Hohai University : Natural Sciences,2009,37(3) :258-262. (in Chinese))
- [5] FRANCHINI M,LAMBERTI P. A flood routing Muskingum type simulation and forecasting model based on level data alone[J]. Water Resources Research,1994,30(7) :2183-2196.
- [6] 芮孝芳,姜广斌,程海云. 考虑回水顶托影响的水位预报研究[J]. 水科学进展,1998,9(2) :124-129. (RUI Xiao-fang,JIANG Guang-bin,CHENG Hai-yun. Study of water level forecasting model with backwater effect[J]. Advances in Water Science,1998,9(2) :124-129. (in Chinese))
- [7] 宋立松,魏高峰. 感潮河段水位过程预报探讨[J]. 水科学进展,2000,11(3) :302-306. (SONG Li-song,WEI Gao-feng. Preliminary study on the water level forecast in the river with tidal effect[J]. Advances in Water Science,2000,11(3) :302-306 (in Chinese))
- [8] WU C L,CHAU K W,LI Y S. River stage prediction based on a distributed support vector regression[J]. Journal of Hydrology,2008,358 :96-111.
- [9] 包为民,卞毓明. 感潮河段水位演算模型研究[J]. 水利学报,1997(11) :34-38. (BAO Wei-min,BIAN Yu-ming. Study on stage routing model of tidal reach[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1997(11) :34-38. (in Chinese))
- [10] 王浩. 感潮河段水位预报模型研究[D]. 南京 :河海大学,2006.
- [11] 陈斌,包为民,瞿思敏,等. 双向线性回归法在椒江临海站水位预报中的应用[J]. 水文,2008,28(6) :45-48. (CHEN Bin,BAO Wei-min,QU Si-min,et al. Application of bidirectional propagation and multivariate linear regression method in stage forecasting at Linhai Station on Jiaojiang River[J]. Journal of China Hydrology,2008,28(6) :45-48. (in Chinese))
- [12] 包为民,张小琴,瞿思敏,等. 双向波演算模型验证[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑,2009,24(5) :583-590. (BAO Wei-min,ZHANG Xiao-qin,QU Si-min,et al. Theoretical verification of the bi-directional stage routing model[J]. Journal of Hydrodynamics :Ser A,2009,24(5) :583-590. (in Chinese))
- [13] BAO Wei-min,ZHAO Chao,WANG Hao,et al. Application of a bi-directional stage routing model in a tidal reach[C]//Methodology in Hydrology. Nanjing :IAHS Publication 311,2007 :46-52.
- [14] 包为民,张小琴,瞿思敏,等. 感潮河段双向波水位演算模型验证[J]. 水科学进展,2009,20(6) :794-800. (BAO Wei-min,ZHANG Xiao-qin,QU Si-min,et al. Verification of the bi-directional stage routing model for a tidal river[J]. Advances in Water Science,2009,20(6) :794-800. (in Chinese))

Dynamic correction of parameters for bi-directional stage routing model

ZHANG Xiao-qin^{1,2}, BAO Wei-min^{1,2}, MA De-lian³

(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. Wenzhou Shanxi Water Economy Development Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

Abstract : A bi-directional stage routing model for tidal rivers was established based on the fundamental stage routing equation derived from the storage equation and the water balance equation. The flooding process at a section in a tidal reach was considered as the superposition of bi-directional propagation of upstream floods and downstream tidal waves in this model. Based on the analysis and simplicity of model parameters, an approach of dynamic correction of parameters was proposed, which could consider the effect of upstream and downstream hydraulic gradients on the water stages. Application cases of Fuchun River and Cao 'e River show that the proposed bi-directional stage routing model with dynamic correction of parameters can achieve satisfactory precision for simulating water stages in tidal rivers.

Key words : tidal river ; stage forecast ; bi-directional wave ; dynamic correction of parameters