

卡尔曼半自适应模型在复杂河道实时洪水预报和行蓄洪调度中的应用

李致家¹, 韩从尚², 翁明华³

(1. 河海大学水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210024; 2. 安徽省水文局, 安徽 合肥 230022;
3. 上海市南汇县水利局, 上海 南汇 201300)

摘要 针对行蓄洪区复杂河道的特点, 提出了行蓄洪区的计算与预报方法, 使得卡尔曼半自适应滤波模型可以用于复杂河道行蓄洪的调度和实时洪水预报. 将该模型用于淮河干流中游鲁台子—吴家渡河段的洪水预报和行蓄洪的调度, 取得了较高的预报精度.

关键词 洪水预报; 马斯京根法; 卡尔曼滤波; 半自适应滤波

中图分类号 P338 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2001)02-0107-03

马斯京根流量演算方法在国内外洪水预报中得到了广泛的应用. 从 70 年代起, 许多水文学家就开始研究卡尔曼滤波技术与该方法相结合进行实时洪水预报的方法^[1~3]. 文献[3]在前人工作的基础上提出了基于马斯京根流量演算的河道洪水实时预报半自适应滤波模型. 本研究在该模型的基础上, 针对有行蓄洪区复杂河道的问题, 提出了行蓄洪区的计算与预报方法, 使得半自适应滤波模型可以用于复杂河道行蓄洪的调度和实时洪水预报.

1 卡尔曼半自适应滤波模型简介

取河道流量为状态变量, 可以写出马斯京根流量演算方法的状态方程和量测方程并进而采用卡尔曼滤波. 把河道分为 n 个河段, 记 X_K 为状态变量 (n 维向量), Y_K 为量测变量 (m 维向量, 表示河道内实测水文站个数), W_K 为系统误差 (或模型误差) 向量, V_K 为量测误差向量. 假定 W_K 和 V_K 是相互独立的白噪声, $E[W_K] = 0$, $E[W_K W_L^T] = Q_K \delta_{KL}$, $Q_K \geq 0$, Q_K 为模型误差序列的协方差矩阵; $E[V_K] = 0$, $E[V_K V_L^T] = R_K \delta_{KL}$, $R_K > 0$, R_K 为量测误差序列的协方差矩阵. 如果 Q_K 和 R_K 已知, 可以得出一般的卡尔曼滤波递推方程^[4]. 由于水文模型误差系列是平稳的, Q_K 和 R_K 也是时变的, 所以应当研究如何实时地估计 Q_K 和 R_K , 即自适应滤波模型. 关于如何估计 W_K 和 V_K 的统计特性, 有很多的研究^[5], 其中有一个结论值得我们借鉴. 如果状态变量的维数 n 大于量测变量的维数 m , R_K 的统计特性可以全部实时地估计出来, 而 Q_K 的统计特性却不能全部估计出来. 如果 $n = m$, R_K 和 Q_K 的统计特性可以全部实时地估计出来. 实际上河道洪水预报采用马斯京根法, 一般是 $n > m$ (即要预报的断面多于有实测资料的断面), 所以对于在河道洪水预报中使用马斯京根法作为滤波的状态方程, 从理论上讲是无法把 Q_K 的统计特性全部估计出来的. 由于这个原因, 文献[1]模型称为半自适应的滤波的模型. 具体的递推计算模型参见文献[3].

2 行洪区、蓄洪区洪水预报模型及考虑行洪、蓄洪区的半自适应模型

大江大河的中下游一般处于丘陵或平原地区, 不适合于修建大型水库, 但其防洪任务很重, 所以往往在河道两侧开辟了许多行蓄洪区, 如淮河自中游王家坝到洪泽湖进口的河段共多达十七八个行蓄洪区, 所以需要研究具有行蓄洪区防洪系统的河道洪水演算方法. 本文提出的一种方法是: 行洪区, 蓄满之后的出流采用马斯京根法, 对于蓄洪区采用水量平衡法, 干流采用上面提出的模型.

状态方程中的外部输入项 $u_i = (d_i q_i^{K-1} - b_i q_i^K)$. 其中 q_i 是区间的集中出、入流, d_i, b_i 是参数^[3]. q_i 由两部分组成: 第一部分是支流的汇入或者汇出, 第二部分是于行蓄洪引起的河段流量的变化. 前者记为 q_{1i} , 后者记为 q_{2i} . 下面讨论行蓄洪区的洪水演算及 q_{2i} 的计算.

2.1 行洪区、蓄洪区洪水预报模型

行洪区的入流和流出处没有闸门, 一般做成堰或者临时破堤分洪. 蓄洪区的进出口都有闸门控制, 可以调节分洪. 行洪区蓄满之后水流可以回归干流也可以继续流向下一个行洪区. 根据这样的解释, 可以把一个典型河段概化成图 1. 对于河段 $[i, i+1]$, 在 i 段面干流河道入流是 Q_i , 在 $i+1$ 段面相应的出流是 Q_{i+1} . 假定左岸有一个行洪区 (有蓄洪区及右岸有行洪区也类似处理), 行洪区水流继续流向下一个行洪区的比例是 S_{fi+1} . 行洪区蓄满后才有出流. 左岸行洪区的演算方程为

$$QCF_{fi+1}^{j+1} = CF_{fi}^0(QF_{fi}^{j+1}\alpha_{fi}^{j+1} + S_{fi}^{j+1}QCF_{fi}^{j+1}) + CF_{fi}^1(QF_{fi}^j\alpha_{fi}^j + S_{fi}^jQCF_{fi}^j) + CF_{fi}^2QCF_{fi+1}^j \tag{1}$$

式中: $CF_{fi}^0, CF_{fi}^1, CF_{fi}^2$ ——左岸行洪区演算的系数; QF ——干流分到行洪区的流量; QCF_f ——行洪区演进的流量. 由于当行洪区未蓄满时没有出流, 故 $\alpha = 0.0$, 蓄满后 $\alpha = 1.0$.

对于蓄洪区内部, 不考虑洪水演进的问题, 只对蓄洪区内进行水量平衡计算, 求出蓄洪区内水位以判别是否进洪或者出洪.

2.2 考虑行洪、蓄洪区的半自适应模型

为了在具有行、蓄洪区的河道系统使用半自适应模型进行实时预报, 一个典型河段概化为图 2 的形式, 把由于行蓄洪区的使用而引起的河段流量的变化集中在河段的上个断面, 全部作为区间入流, 即

$$q_{2i} = -QF_{fi} - QF_{li} - QS_{fi} - QS_{li} + QH_{fi} + QH_{li} + QG_{fi} + QG_{li} \tag{2}$$

式中: QH_{fi} ——行洪区水流回归干流的流量, $QH_{fi} = (1 - S_{fi})QCF_{fi}$; QH_{fi}, QS, QG ——蓄洪区进洪和出流 (到干流) 的流量. QH_{fi}, QS, QG 可以用水力学公式进行计算.

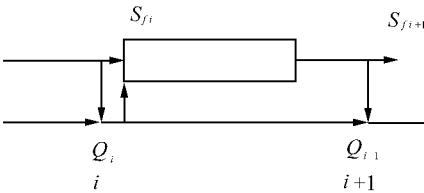


图 1 河段出入流概化图

Fig.1 A sketch of a typical channel

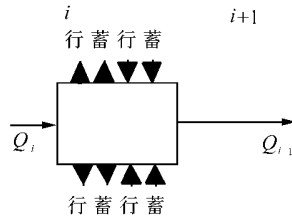


图 2 适用于半自适应模型的河段的概化图

Fig.2 A sketch of a typical channel used in the model

3 模型的应用

淮河下游鲁台子至蚌埠闸 (吴家渡) 主河道长 130 km. 在吴家渡有一个水文站. 区间有 3 条支流汇入, 其中茨淮新河上有上桥闸水文站, 涡河上有淮远水文站. 沿着河段两岸有 8 个行洪区, 其中 5 个在北岸, 3 个在南岸. 在南岸有一蓄洪区. 根据行、蓄洪区的位置及河道情况, 整个河道分为 21 个子河段. 从 1968 年至 1997 年的资料中挑选了 16 次洪水进行模型率定和检验, 计算时段为 6 h^①. 为了节省篇幅和说明问题起见, 本文仅以 1968 年 7 月 7 日 ~ 8 月 19 日的洪水为例. 实际上这次洪水在该河段多处行洪. 图 3 是蚌埠闸 1968 年洪水实测、不考虑行洪和考虑行洪预报的流量

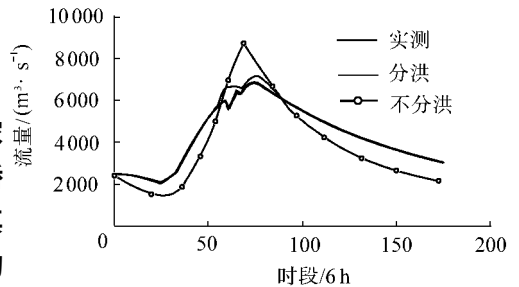


图 3 蚌埠闸 1968 年洪水考虑行洪的实时洪水预报调度过程线

Fig.3 Flow at Bengbu gate, recorded and forecasted with dividing and without diversion

①李致家, 等. 淮河干流鲁台子到蚌埠闸河道流量水位实时预报及行蓄洪调度模型研究. 南京: 河海大学, 1998.

过程线.由此可以看出,考虑了行洪后预报精度有很大的提高.

4 结 语

本文针对基于马斯京根流量演算法的河道洪水实时预报半自适应滤波模型在具有行蓄洪区的复杂河道中的应用问题进行了深入研究,提出了行蓄洪区蓄洪的计算与预报方法,使得半自适应滤波模型可以用于复杂河道行蓄洪的调度和实时洪水预报.通过淮河干流河段的验证说明了本模型的合理性和可靠性.今后应当通过更多的检验来进一步改进该模型.

参考文献：

[1] Cameron R J. An updaton version of the Muskingum-Cunge flow routing technique[A] . Proceedings of the Oxford Symposium, IAHS Publ. no. 129 [C] . 1980. 381 ~ 387.

[2] 朱华. 水情自动测报系统 [M] . 北京 水利电力出版社, 1993. 40 ~ 43.

[3] 李致家, 韩从尚, 朱先武, 等. 河道洪水演算和实时预报的半自适应模型 [J] . 水科学进展, 1998, 9(4) : 367 ~ 372.

[4] 章燕申. 最优估计与工程应用 [M] . 北京 宇航出版社, 1991. 406 ~ 420.

[5] Connell P E O², Todini E. Real-time hydrological forecast and control [A] . In : Proceedings of 1st International Workshop [C] . 1977. 71 ~ 75.

Application of Kalman Semi-Adaptive Updating Model in the Routing and Forecasting of Complicated Channel Flood

LI Zhi-jia¹, HAN Cong-shang², WENG Ming-hua³

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

2. Hydrologic Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China ;

3. Bureau of Water Resources of Nanhui County, Nanhui, Shanghai 201300, China)

Abstract:Based on previous research, a Semi-Adaptive Updating Model for complicated channel flood routing and forecasting is investigated. The flow routing for a complicated channel is considered in combination with flood diversion and flood retarding areas. An example of the Huaihe River, a typically complicated channel in China, is given to explain how the method works. The results show that the model is reasonable, effctive and highly accurate.

Key words flood routing ; Muskingum method ; kalman filter ; semi-adaptive method