

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.001

基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术

金桂中¹, 陈国灿², 赵兰兰³, 石朋⁴, 周玉良⁵

(1. 浙江省绍兴市上虞区水利局, 浙江 绍兴 312351; 2. 浙江省绍兴市上虞区水文站, 浙江 绍兴 312375;
3. 水利部信息中心, 北京 100053; 4. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
5. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为充分利用实测水位流量序列所蕴含的信息, 挖掘实测水位流量数据对洪水预报结果的实时在线校正作用以提高洪水预报精度, 提出了一种基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术, 该技术采用基于水文要素观测值的涨落差法和残差自回归模型构建多源误差信息源, 利用卡尔曼滤波技术进行多源误差序列融合来对洪水预报结果进行实时校正。浙江钱塘江流域实测资料验证结果表明: 基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术能够显著降低预报模型的流量模拟误差, 平均相对误差减小超过10%。

关键词: 多源误差融合校正; 洪水预报; 卡尔曼滤波; 误差自回归模型

中图分类号: P338

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)04-0001-04

Kalman filter correction technique based on multi-source forecast residuals

JIN Guizhong¹, CHEN Guocan², ZHAO Lanlan³, SHI Peng⁴, ZHOU Yuliang⁵

(1. Water Conservancy Bureau of Shangyu District, Shaoxing City, Zhejiang Province, Shaoxing 312351, China;
2. Hydrological Station of Shangyu District, Shaoxing City, Zhejiang Province, Shaoxing 312375, China;
3. Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;
4. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China;
5. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to improve the flood forecasting accuracy, the real-time online correction of the flood forecasting results by mining the measured water level and discharge data is used to make full use of the information contained in the measured sequences of water level and discharge. A Kalman filter correction technique is proposed based on multi-source forecast residuals. Corresponding rising difference model and autoregressive model were used to construct the multi-source error information source, and then Kalman filtering technology was used to fuse the multi-source error sequences for the real-time correction of flood forecast results. This paper selected the Qiantang River Basin of Zhejiang Province as the study area. The validation results show that the multi-source residual fusion correction technique based on Kalman filtering technology can significantly reduce the flow simulation error and the average relative error is reduced by more than 10%.

Key words: multi-source error fusion correction; flood forecasting; Kalman filtering; autoregressive model of error

洪水预报是洪水防御工作的重要非工程措施, 但受人类活动、气候变化等因素影响, 以及水文模型对实际水文过程的模拟和简化, 预报结果可能存在系统偏差或随机误差^[1]。实时校正技术作为提高洪水预报精度的重要手段受到国内外学者的广泛重视^[2-7]。目前常用的实时校正方法多依据当前实测信息对预报模型的参数、状态变量、输入向量或预报值进行识别和校正^[8-12]。在实际应用中, 一般以水文变量观测值代表真值, 采用观测值与模型计算值之间的残差大小评定模型精度。在真值以观测值代替的条件下, 对预报变量真值的估计可等效地表示为对观测值与预报模型计算值之间的残差推断。通过分析观测值和模型计算值间的

基金项目: 国家自然科学基金项目(52179011)

作者简介: 金桂中(1968—), 男, 教授, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利工程建设管理和防汛研究。E-mail: 2634180247@qq.com

通信作者: 周玉良(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: ZYL54600@163.com

引用本文: 金桂中, 陈国灿, 赵兰兰, 等. 基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 1-4.

JIN Guizhong, CHEN Guocan, ZHAO Lanlan, et al. Kalman filter correction technique based on multi-source forecast residuals[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 1-4.

残差^[13-14],可推断出预见期内的残差,然后结合预见期内预报模型计算值和推断的残差值,通常可获得比计算值更准确的预报校正值。但现有的洪水预报校正方法多对观测数据的依赖性较高,而预见期内缺乏实测数据,因此随着预见期的延长,校正效果明显下降。本文以新安江模型模拟结果为基础,通过涨落差法对预报时段的观测值进行估计,构建多源残差时间序列,应用基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术对模拟结果进行校正,以期提高洪水模拟精度。

1 模型原理

涨落差法预报模型原理见文献[13]。记涨落差法的预报时段数为 L ,预报模型的计算值序列为 $\{Q_{cal,i} \mid i=1,2,\cdots,t,\cdots,t+L\}$ 。以涨落差法的推断值作为实测值,其与模型预报计算值之差的期望值为 $y_i = \hat{Q}_{obs,i} - Q_{\Delta ave} - Q_{cal,i}$,其中 $\hat{Q}_{obs,i}$ 、 $Q_{\Delta ave}$ 分别为 i 时刻涨落差法的流量预报值、流量预报值与观测值之间的差值系列的均值,以 $\{y_i \mid i=1,2,\cdots,t,\cdots,t+L\}$ 序列的方差 σ_y^2 作为涨落差法的推断值代替实测值与 $Q_{cal,i}$ 之间残差的方差 R_i ,涨落差法的流量预报值与观测值之间残差一般可用正态分布 $N(y_i, R_i)$ 表示,为第一种残差信息源。参考文献[15],利用观测值与预报模型计算值之间的误差序列构建 p 阶误差序列自回归模型,即AR(p)模型,获得未来时刻误差的估计值作为第二种残差信息源。

融合多种信息的卡尔曼滤波技术^[16-17]是在无偏最小方差估计的基础上,对同一变量的不同信息源进行融合,以推断该变量的分布特征。在预报时段以水文预报模型的计算值为基础,以AR(p)模型和涨落差法推断值与预报模型计算值之差作为卡尔曼滤波模型的两种残差信息源。在预报时刻 $t+1$,AR(p)模型根据时刻 t 及其之前的实测值与计算值间的残差推求 $t+1$ 时刻的残差;涨落差法根据 t 和 $t-1$ 时刻实测值,推断 $t+1$ 时刻的观测值,并以该推断值与预报模型计算值之差作为涨落差法在该时刻的残差。基于上述两种残差,采用卡尔曼滤波获得残差的校正值, $t+2$ 之后的残差和校正的预报值可依次滚动进行。

2 模型验证

2.1 研究区域

钱塘江是浙江省最大河流,位于亚热带季风气候区,平均温度 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$,河长 588.73 km ,流域面积 $55\,058\text{ km}^2$ 。流域多年平均降水量为 $1\,600\text{ mm}$,多年平均径流量为 291 亿 m^3 。天然径流的年内分配很不均匀,4—6月梅汛期约占年总量的50%,最大洪峰流量达 $2.9\text{ 万 m}^3/\text{s}$ (1955年);枯季最小流量为 $15.4\text{ m}^3/\text{s}$ (1934年)。钱塘江主要支流有金华江、新安江、分水江、浦阳江、曹娥江等。本文以浙江钱塘江流域为研究区域,选择上游常山港常山站、金华江金华站、浦阳江诸暨站和曹娥江嵊州站为研究对象,采用2020年各站水文报讯资料,选取典型洪水场次对基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术进行验证分析,其中流量过程模拟采用新安江模型,模型参数采用历史洪水进行率定检验。预报断面基本情况见表1。

表1 研究区域预报断面基本情况

Table 1 Basic characteristics of forecast cross-sections in the study area

水文断面	河流	集水面积/ km^2	历史最高水位/m	历史最大流量/ (m^3/s)	警戒水位/m
常山	常山港	2 336	86.23(2011年6月)	5 470(2022年6月)	82.00
金华	金华江	5 953	37.23(1962年9月)	5 920(1962年9月)	35.50
诸暨	浦阳江	1 719	13.01(1956年8月)	1 490(1956年8月)	10.64
嵊州	曹娥江	2 280	20.76(1962年9月)		16.10

2.2 结果与分析

利用新安江模型对常山、金华、诸暨和嵊州4个重要控制站2020年典型洪水过程进行流量过程模拟,在模拟结果基础上采用本文提出的卡尔曼滤波校正技术进行校正,结果如图1和表2所示。

由图1可知,基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术可显著提高洪水流量(Q)过程和洪峰流量的模拟精度,校正后流量过程拟合程度明显好于新安江模型模拟结果。由表2可知,4个重要控制断面2020年6场典型洪水经过校正后的洪峰流量模拟相对误差明显减小,平均降低12.3%。经过校正后的洪峰流量模拟相对误差均小于10%,其中4场小于或等于5%,模拟精度提升明显。但从4个重要控制断面的6场洪水校正流量过程与实测过程相比,均呈现了滞后现象,滞后约1~2 h,主要原因是涨落差法采用当前时段和上

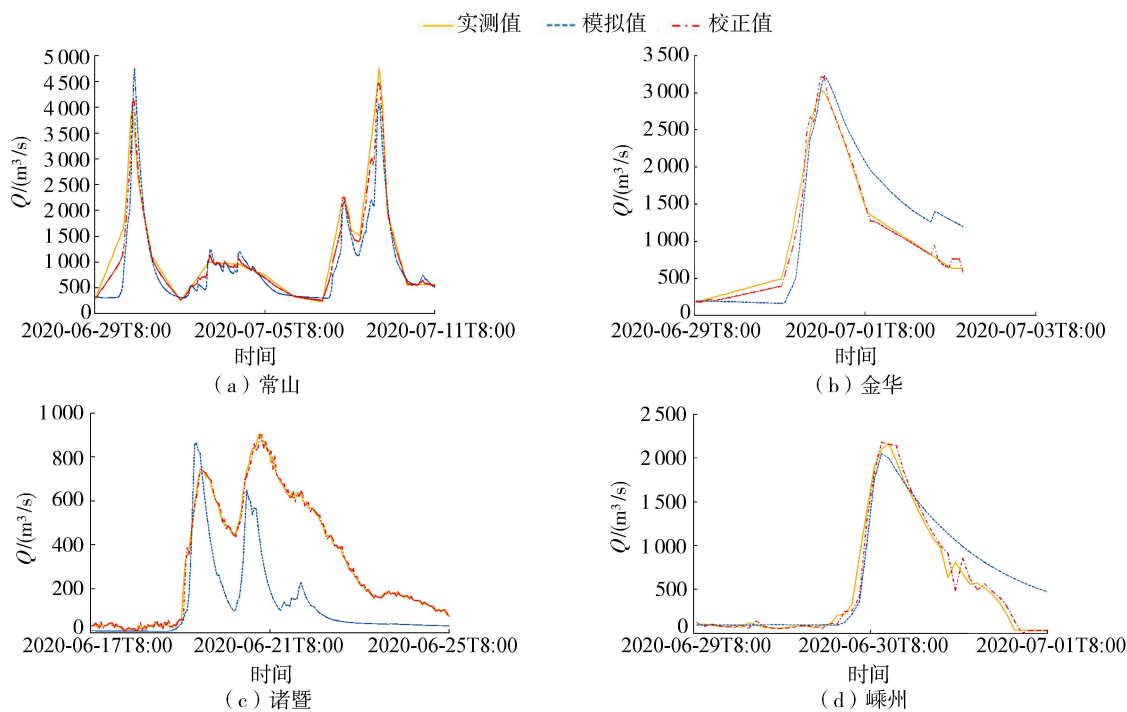


图 1 2020 年洪水流量过程对比

Fig. 1 Comparison of flood processes in 2020

表 2 洪峰流量误差

Table 2 Discharge error of flood peak

水文断面	洪水场次	实测洪峰流量/ (m^3/s)	新安江模型		卡尔曼滤波校正	
			模拟值/(m^3/s)	相对误差/%	校正值/(m^3/s)	相对误差/%
常山	20200630	3 960	4 750	20	4 160	5
	20200908	4 760	4 070	-14	4 470	-6
金华	20200630	3 030	3 230	7	3 210	6
诸暨	20200619	736	855	16	711	-3
	20200621	906	652	-28	879	-3
嵊州	20200630	2 170	2 050	-6	2 180	0

一时段的观测值估算下一时段的模拟值,估算模拟值的峰(谷)值滞后于实测值一个时段,因此基于涨落差法估算值的卡尔曼滤波校正值的峰(谷)值一般也滞后于实测值一个时段。

3 结 论

- a. 应用多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术可明显提升洪峰流量和洪水过程模拟精度,经过校正后的洪峰流量相对误差比模型初始模拟值减小,平均减小超过 10%,校正后的洪峰流量相对误差均小于 10%,模拟精度明显提升。
- b. 基于多源预报残差的卡尔曼滤波校正技术融合了涨落差法和最优误差分段的 $\text{AR}(p)$ 模型残差系列,在复杂水力条件下应用效果较好,但存在校正后的峰(谷)值滞后于实测值现象,在后期研究中需要加以研究改进。

参考文献:

[1] 包为民. 水文预报[M]. 4 版. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[2] 张旭旻,瞿思敏,李倩,等. 基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法[J]. 水资源保护,2022,38(6):88-95. (ZHANG Xumin,QU Simin,LI Qian,et al. Real-time correction method of flood forecasting for the upper Huaihe River Basin based on cointegration theory[J]. Water Resources Protection,2022,38(6):88-95. (in Chinese))

[3] 霍文博,高源,李致家,等. 改进的 KNN 实时校正方法在山区中小流域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51

- (4):27-32. (HUO Wenbo,GAO Yuan,LI Zhijia,et al. Application of improved KNN real-time correction method in small and medium-sized basins in mountainous areas[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):27-32. (in Chinese))
- [4] 霍文博,李致家,张珂,等. 分布式格林-安普特降雨径流模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):47-54. (HUO Wenbo,LI Zhijia,ZHANG Ke,et al. Study on the distributed Green-Ampt rainfall-runoff model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):47-54. (in Chinese))
- [5] 晁丽君,张珂,陈新宇,等. 基于多源降水融合驱动的 WRF-Hydro 模型在中小河流洪水预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):55-64. (CHAO Lijun,ZHANG Ke,CHEN Xinyu,et al. Applicability of WRF-Hydro model based by multi-source precipitation merging in flood forecasting for small and medium-sized watersheds[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):55-64. (in Chinese))
- [6] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35. (ZHANG Ke,NIU Jiefan,LI Xi,et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):28-35. (in Chinese))
- [7] 石朋,陆美霞,吴洪石,等. 不同优化算法在新安江模型参数率定中的效果评估[J]. 水资源保护,2023,39(4):19-25. (SHI Peng,LU Meixia,WU Hongshi,et al. Evaluation of different optimization algorithms in parameter calibration of Xin'anjiang model[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):19-25. (in Chinese))
- [8] 陈鑫,刘艳丽,张建云,等. 数据挖掘技术在洪水预报实时校正中的应用[J]. 水力发电学报,2022,41(8):54-62. (CHEN Xin,LIU Yanli,ZHANG Jianyun,et al. Application of data mining techniques in real-time correction of floodforecasts[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2022,41(8):54-62. (in Chinese))
- [9] 周梦,陈华,郭富强,等. 洪水预报实时校正技术比较及应用研究[J]. 中国农村水利水电,2018(7):90-95. (ZHOU Meng,CHEN Hua,GUO Fuqiang,et al. The application of real-time correction techniques for flood forecasting[J]. China Rural Water and Hydropower,2018(7):90-95. (in Chinese))
- [10] 黄一昕,王钦钊,梁忠民,等. 洪水预报实时校正技术研究进展[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):12-35. (HUANG Yixin,WANG Qinzha,LIANG Zhongmin,et al. Research advances on real-time correction methods for flood forecasting[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(1):12-35. (in Chinese))
- [11] 包为民,王浩,赵超,等. AR 模型参数的抗差估计研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(3):258-261. (BAO Weimin,WANG Hao,ZHAO Chao,et al. Robust estimation of AR model parameters[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2006,34(3):258-261. (in Chinese))
- [12] 瞿思敏,包为民,石朋,等. AR 模式误差修正方程参数抗差估计[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(5):497-500. (QU Simin,BAO Weimin,SHI Peng,et al. Robust estimation of parameters for AR model error correction equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2003,31(5):497-500. (in Chinese))
- [13] 覃光华,丁晶,赵英林,等. 改进的相应涨差模型及其在洪水预报中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2002,35(3):20-23. (QIN Guanghua,DING Jing,ZHAO Yinglin,et al. Improved corresponding rising difference model and its application to real-time flood forecasting[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2002,35(3):20-23. (in Chinese))
- [14] ANDERSON M G,BURT T P. Hydrological forecasting[M]. Chichester:Wiley,1985.
- [15] 冯翠莲,林金官. 具有 $AR(p)$ 误差的非线性模型异方差和相关性检验[J]. 东南大学学报(自然科学版),2007,37(6):1127-1131. (FENG Cuilian,LIN Jinguan. Testing for heteroscedasticity and autocorrelation in nonlinear models with $AR(p)$ errors[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2007,37(6):1127-1131. (in Chinese))
- [16] 李漫漫,石朋,尚艳丽,等. 基于集合卡尔曼滤波的新安江模型状态变量实时修正方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):209-214. (LI Manman,SHI Peng,SHANG Yanli,et al. Real-time updating method for the state variables of Xinanjiang model based on ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(3):209-214. (in Chinese))
- [17] 舒全英,王青青,郭磊,等. 基于集合卡尔曼滤波的实时校正技术在流域洪水预报中的应用[J]. 水电能源科学,2023,41(3):61-64. (SHU Quanying,WANG Qingqing,GUO Lei,et al. Application of real-time correction technology based on ensemble Kalman filter in basin flood forecasting[J]. Water Resources and Power,2023,41(3):61-64. (in Chinese))

(收稿日期:2023-07-28 编辑:刘晓艳)