

实时洪水预报研究进展与展望

刘炜伟¹, 盖永伟², 管西柯³, 吴晓东¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局连云港分局, 江苏 连云港 222004; 2. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029;
3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:洪水预报是防汛指挥调度的重要依据,而实时洪水预报是提高洪水预报的重要技术手段,对提高防汛效率、保障防汛安全具有重要意义。针对实时洪水预报的复杂性和不确定性,提出了基于神经网络异联想记忆技术的综合修正方法和考虑降雨不确定性的概率预报模型等理论方法,通过误差反传、迭代计算和滚动预报等技术手段不断提高实时洪水预报的修正水平,取得了显著成效。通过分析研究关于实时洪水预报的相关理论成果,理清实时洪水预报发展现状,并提出了实时洪水预报未来研究的重点。

关键词:洪水预报;实时修正;概率预报

中图分类号:TV124

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2021)02-0055-04

Research progress and prospect of real – time flood forecasting

LIU Weiwei¹, GAI Yongwei², GUAN Xike³, WU Xiaodong¹

(1. Lianyungang Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Lianyungang 222004, China; 2. Water Resources Service Center of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Flood forecasting is an important basis for flood control and dispatching, and real – time flood forecasting is an important technical means to improve flood forecasting, which is of great significance to improve flood control efficiency and ensure flood control safety. In view of the complexity and uncertainty of real – time flood forecasting, a comprehensive correction method based on neural network heteroassociative memory technology and a probability forecasting model considering rainfall uncertainty was put forward, which continuously improved the correction level of real – time flood forecasting by means of error back propagation, iterative calculation and rolling forecasting, and achieved remarkable results. By analyzing and studying the related theoretical achievements of real – time flood forecasting, the development status of real – time flood forecasting was clarified, and the key points of future research on real – time flood forecasting was put forward.

Key words: flood forecasting; real time correction; probability forecasting

洪水预报是根据洪水形成和运动的规律,利用过去和实时水文气象资料,对未来一定时段的洪水发展情况的预测,而实时洪水预报是对将发生的未来洪水在实际时间进行预报,就目前的预报方法而言,实际时间是指观测降水量等水文要素即时进入

数据库的时间。常见的流域水文模型多采用时不变离线系统,而各种水文要素是随时间变化的,为降低水文要素随时间变化对模型计算的影响,根据实时更新的数据对洪水预报误差做实时修正是非常必要的。

收稿日期:2020-08-16

作者简介:刘炜伟(1986—),男,工程师,硕士,主要从事洪水预报和防洪调度工作。E-mail:614508162@qq.com

连云港市地处淮河流域沂沭泗河下游,主要由新沭河和新沂河承担上游流域面积约 7.8 万 km^2 的泄洪任务,是著名的“洪水走廊”。2020 年 1—7 月连云港市面平均降水量为 837.9 mm,较去年同期偏多 93.1%,较多年同期偏多 54.1%,本地水资源较丰富,河库水位较常年偏高。受 2020 年 8 月 13 日至 14 日山东沂南地区突发强降雨影响,沂河上游临沂水文站预报最大流量达到 10 000 m^3/s ,实测最大流量 10 900 m^3/s ,洪水预报为防汛指挥部门分沂入沭、沭水经大官庄闸东调、石梁河水库和骆马湖预泄等水工程调度提供了科学依据,降低了下游河道行洪压力,保障了下游河道行洪安全,减少了洪水造成的经济损失。

实时洪水预报理论是提高防洪减灾的重要技术手段,近年来实时洪水预报理论发展迅速,从 AR 模型到基于神经网络的综合修正,从最小二乘法到卡尔曼滤波,从误差反传到概率模型,都在实时洪水预报误差的修正过程中起到了重要的作用,并在实时洪水预报作业中广泛应用。传统的 AR 模型是基于误差自相关的假定设计的,但不能解决假定不成立情况下的水文预报问题,瞿思敏等^[1]通过引入神经网络异联想记忆技术,提出了综合实时修正方法,并用实例对比分析了 AR 模型和综合修正方法的修正效果,解决了实时修正信息量不足的问题,在不损失预见期的情况下能有效改进模拟的精度;近年来卡尔曼滤波技术广泛应用于水文预报领域,通过将卡尔曼滤波技术与水动力模型相结合^[2],对预报结果做实时校正;为延长洪水预报的预见期,陆桂华等^[3]使用加拿大区域性中尺度大气模式 MC2 和新安江模型单向耦合模型系统,通过滚动预报,精度不断提高;包为民等专家学者系统论述了实时洪水预报,对实时洪水预报建模和误差校正使用的理论方法、预报效果及各环节问题的处理都做了比较系统的研究分析。

随着相关交叉学科的快速发展和积极引入到水文预报领域,实时洪水预报在模型建立、实时修正理论方法等方面有了很大的提高。本文通过系统梳理近年的理论成果,对使用的模型和理论方法分类总结,并提出实时洪水预报未来研究的重点。

1 研究进展

1.1 建立实时洪水预报模型,开展预报方案编制

在一些大型、特大型流域上开展预报方案的编制,通过设置分级、分区、分单元的结构,采用滚动

预报的方式方法,对洪水预报结果实时校正。

施勇等^[4]通过模拟长江中下游实时洪水预报,提出基于水动力学的循环滚动计算模式和实时校正模式,实现了水文学实时校正方法和水动力学数学模型的耦合。并根据实时洪水预报的周期性,提出周期性的滚动循环预报模式,实现了整个预报区域各个河道断面的水位和流量过程的校正。

李春红等^[5]在三峡特大流域洪水预报方案中提出了多模型、多方案的组合预报,提出区间、子区间和单元的三层逐级预报模式,利用实测数据自上而下的逐级对模型的结构、参数和状态变量等实时校正。同时考虑未来降雨和基于遥测信息的预报校正,提高预报精度和增长预见期。

1.2 基于误差反传理论,实时修正模型参数

误差反传算法最早应用于多层神经网络训练,算法的基本思想是信号的正向传播与误差的反向传播,误差反传算法是实时洪水预报计算结果修正常用的算法。在处理模型变量和参数对结果的影响方面,包为民等基于新安江模型,对模型中的某个变量实时修正,从糙率、产流量、自由水蓄量、面平均雨量等变量入手,采用卡尔曼滤波、动态系统响应曲线、最小二乘法等理论方法对上述变量做实时校正,取得了良好的修正效果。

在洪水预报实践中,曼宁糙率系数在河道行洪计算中占有重要作用,包红军等^[6]通过河道断面概化,引入卡尔曼滤波理论,动态调整预见期内的河道糙率,将糙率反演模型和水动力学模型耦合进行河道洪水实时预报。

多数影响预报结果的因素都会影响产流量,包为民等^[7-8]针对产流量进行修正,将单位线和动态系统响应曲线引入实时洪水预报修正中,建立一种向信息源头追溯的反馈修正模型。所提方法物理概念清楚,结构简单合理,通过理想模型进行检验,并在实际的流域检验中效果明显。

针对土壤含水量和自由水蓄量,包为民等^[9-10]基于新安江模型,在考虑系统响应矩阵的误差和不考虑系统响应矩阵差值两种情况下,分别提出了最小二乘法建立误差源的反演修正模型和总体最小二乘平差理论,并在实例验证中与之前的方法做了比较分析。

通过分析发现面平均雨量是洪水预报的最重要输入项,基于洪水预报精度受到面平均雨量估计误差的严重影响,包为民等^[11]提出了一种基于降雨系统响应曲线洪水预报误差修正方法,通过此方法

估计降雨输入项的误差,从而提高洪水预报精度。利用实测流量和系统流量之间的差值系列,通过最小二乘法估计面平均雨量误差系列,使用修正后的面平均雨量系列重新计算流域出口断面的出流过程。

为校正模型状态变量,孙逸群等^[12]通过将无迹卡尔曼滤波方法引入集总式新安江模型,通过实时观测数据对洪水预报模型进行校正,为未来时刻模型预报提供更加准确的状态变量,从而提高预报精度。

1.3 引入不确定性理论,开展概率预报

根据不确定性理论,不可能同时知道一个粒子的位置和它的速度,而传统的洪水预报提供的是一种确定性的定值预报,无法对调度方案及防洪决策的可能风险做出客观评估,而从降雨、产流到汇流的整个水文过程同样存在不确定性,水文科技工作者通过研究洪水演变的不确定性,引入随机过程等不确定性理论开展洪水预报。

樊孔明等^[13]详细梳理了洪水概率预报的理论和方法,通过考虑降雨不确定性和模型不确定性两种预报模式,在新安江模型的基础上对两种预报方法作了比较,在考虑求解降雨概率分布和参数后验分布的联合分布具有较大难度的情况下,通过随机抽样的方法将两种不确定要素进行耦合。

针对河道洪水预报,徐兴亚等^[14]提出假定实时数据服从某种先验概率分布,通过数据同化方法将实时数据融入到洪水预报模型中,引入迭代的思想,结合不断更新的观测值,推求不同时刻状态变量的后验分布,模型不仅能直接校正水位,同时能有效校正流量和糙率,有效提高模型预报水位和流量的精度,并给出合理的概率预报区间。

2 存在问题

2.1 水文模型

通过对近年的研究成果梳理分析,多数的预报修正是建立在新安江模型等几个确定性模型之上。新安江模型是理论研究中应用较多的概念性模型,是河海大学赵人俊教授设计出的国内第一个流域水文模型,模型具有明确的物理成因机制,易于推广应用。但只有当假设条件与实际情况相近,概化合理时,预测效果较好。而随着城镇化进程的加快和水利工程的布局建设,下垫面状况发生较大变化,水利工程的调度改变了天然水系的联通,产汇流规律更加复杂多变,而分析发现在新安江模型基

础上做改进的研究较多,提出有应用价值的新模型较少。

分布式水文模型是将流域划分成网格,每个网格作为一个计算单元,以水动力学或水文学为理论基础,采用常微分方程组或偏微分方程组来描述降雨径流的形成过程,并用有限差分格式进行求解。目前分布式水文模型在研究中使用相对较少,而在实际的预报作业中很难得到实际应用,问题的关键在于数据量无法满足分布式水文模型计算的需要,影响预报效果。

2.2 误差修正

预报修正多以新安江模型为基础,采用最小二乘法和卡尔曼滤波对计算结果进行修正。最小二乘理论是1806年马里·勒让德提出的,是一种数学优化技术,主要适用于曲线拟合,通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,利用最小二乘法可以简便地求得未知的数据,并使得这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小;卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程,通过系统输入输出观测数据,对系统状态进行最优估计的算法,它仅适用于线性、离散和有限维系统。

水文模型中即使能够得到数学方程,也往往无法求解,只能对连续方程做离散化处理,连续方程离散化是处理此类问题常用的方式,但会带来误差的不断累积;卡尔曼滤波和最小二乘理论本身存在一定的局限性,且在使用时也会涉及较多的假定条件,这些同样限制了实时修正的效果。

3 研究方向

3.1 模型的建立和改进

目前常使用的水文模型只是原型的近似,不可能反映原型的一切特征^[15]。分布式水文模型是流域水文模型未来发展的趋势,目前存在的问题在于基础资料数据量不足,不能满足计算需要,但是随着地理信息系统技术、空间与测控技术和计算机技术的发展,未来可以很好地解决计算数据量的问题。分布式水文模型未来研究的重点是模型尺度问题,一方面为了便于认识、理解和推广,要求模型尽可能简单;另一方面为了全面描述水文过程,要求模型足够详细。

3.2 引入合理的修正理论

由于目前对水文过程的认识有限,降水预报和模型参数存在不确定性,模型本身结构也会造成误差,所以水文预报主要是一种不确定性预报。最小

二乘法理论主要适用于曲线拟合,而卡尔曼滤波仅适用于线性、离散和有限维系统。算法的局限性决定了其对于实时预报效果的作用有限。

对于水文过程这种不确定复杂系统,随机、模糊和混沌理论的引入研究会是未来研究的重要方向。随机过程,是依赖于参数的一组随机变量的全体,参数通常是时间,随机变量是随机现象的数量表现,其取值随着偶然因素的影响而改变;模糊理论是指用到了模糊集合的基本概念或连续隶属度函数的理论,它可分类为模糊数学、模糊系统、不确定性和信息、模糊决策、模糊逻辑与人工智能这5个分支;混沌是由确定性规律确定但具有随机性的运动,混沌理论是一种兼具质性思考与量化分析的方法,用以探讨动态系统中无法用单一的数据关系而必须用整体、连续的数据关系才能加以解释及预测的行为。

3.3 高科技成果利用

数据采集技术、云计算、数据库技术的发展进步,可以为实时洪水预报提供更全面丰富的水文数据以及更快的处理速度。地理信息系统是采集、分析各类空间数据及描述空间数据的属性的技术系统,通过地理信息系统技术可以获取流域下垫面因子复杂的空间分布;空间与测控技术的快速发展,可以有效获取大范围详细的空间信息和资料,包括降雨、土壤、植被、河流水系、蒸发等要素,为未来流域水文模型的计算提供丰富的数据;计算机处理技术和数据库技术的发展,可以有效提高信息的利用率,为分布式水文模型提取潜在的有价值的信息。高科技成果主要为流域水文模型提供更多的观测要素、更丰富的计算数据和更高效的计算能力,促进微观水文现象的基本理论研究,推动分布式流域水文模型的发展,为实时洪水预报修正提供支撑。

3.4 降雨预报、洪水预报和水工程联合调度

水文过程始于降雨,在产流、汇流后产生洪水,为保障行洪安全和洪水资源化利用,通过水工程调度将洪水放在合适的区域。降雨预报数据是水文模型的重要输入,从降雨、产生洪水到水利工程调度是水在时空变化的过程,所以应从理论上作为一个整体研究,并基于 Oracle 数据库等技术开发一套从降雨预报、洪水预报到水工程联合调度的系统。

4 结 语

模型研究和修正算法是实时洪水预报的基础,

应加强水文基本规律和算法基础理论的研究。高新技术成果可以为我们提供高质量的水文数据,可以有效提高我们对水文规律的认识。加强水文不确定性理论研究,开发降雨预报、洪水预报到水工程联合调度的系统,是实时洪水预报未来研究的重点。

参考文献:

- [1] 瞿思敏,包为民. 实时洪水预报综合修正方法初探[J]. 水科学进展, 2003, 14(2):167-171.
- [2] 葛守西,程海云,李玉荣. 水动力学模型卡尔曼滤波实时校正技术[J]. 水利学报, 2005, 36(6):687-693.
- [3] 陆桂华,吴志勇,雷 Wen 等. 陆气耦合模型在实时暴雨洪水预报中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(6):847-852.
- [4] 施勇,栾震宇,陈炼钢,等. 长江中下游实时洪水预报模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(6):847-852.
- [5] 李春红,王建平,王玉华,等. 三峡特大流域洪水预报方案运用与分析[J]. 水利学报, 2011, 42(5):624-630.
- [6] 包红军,赵琳娜. 基于 Kalman 滤波糙率反演模型的河道洪水实时预报研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3):59-64.
- [7] 包为民,司伟,沈国华,等. 基于单位线反演的产流误差修正[J]. 水科学进展, 2012, 23(3):317-322.
- [8] 司伟,包为民,瞿思敏. 洪水预报产流误差的动态系统响应曲线修正方法[J]. 水科学进展, 2013, 24(4):497-503.
- [9] 包为民,孙逸群,周俊伟,等. 基于总体最小二乘法的系统响应修正方法[J]. 水利学报, 2017, 48(5):560-567.
- [10] 包为民,阙家骏,赖善证,等. 洪水预报自由水蓄量动态系统响应修正方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):365-371.
- [11] 司伟,包为民,瞿思敏,等. 基于面平均雨量误差修正的实时洪水预报修正方法[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2):533-541.
- [12] 孙逸群,包为民,江鹏,等. 基于无迹卡尔曼滤波的新安江模型实时校正方法[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2):488-496.
- [13] 樊孔明,曹炎煦. 洪水预报不确定性分析及概率预报[M]. 南京:东南大学出版社, 2019.
- [14] 徐兴亚,方红卫,张岳峰,等. 河道洪水实时概率预报模型与应用[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):356-364.
- [15] 芮孝芳. 对流域水文模型的再认识[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(2):1-7.