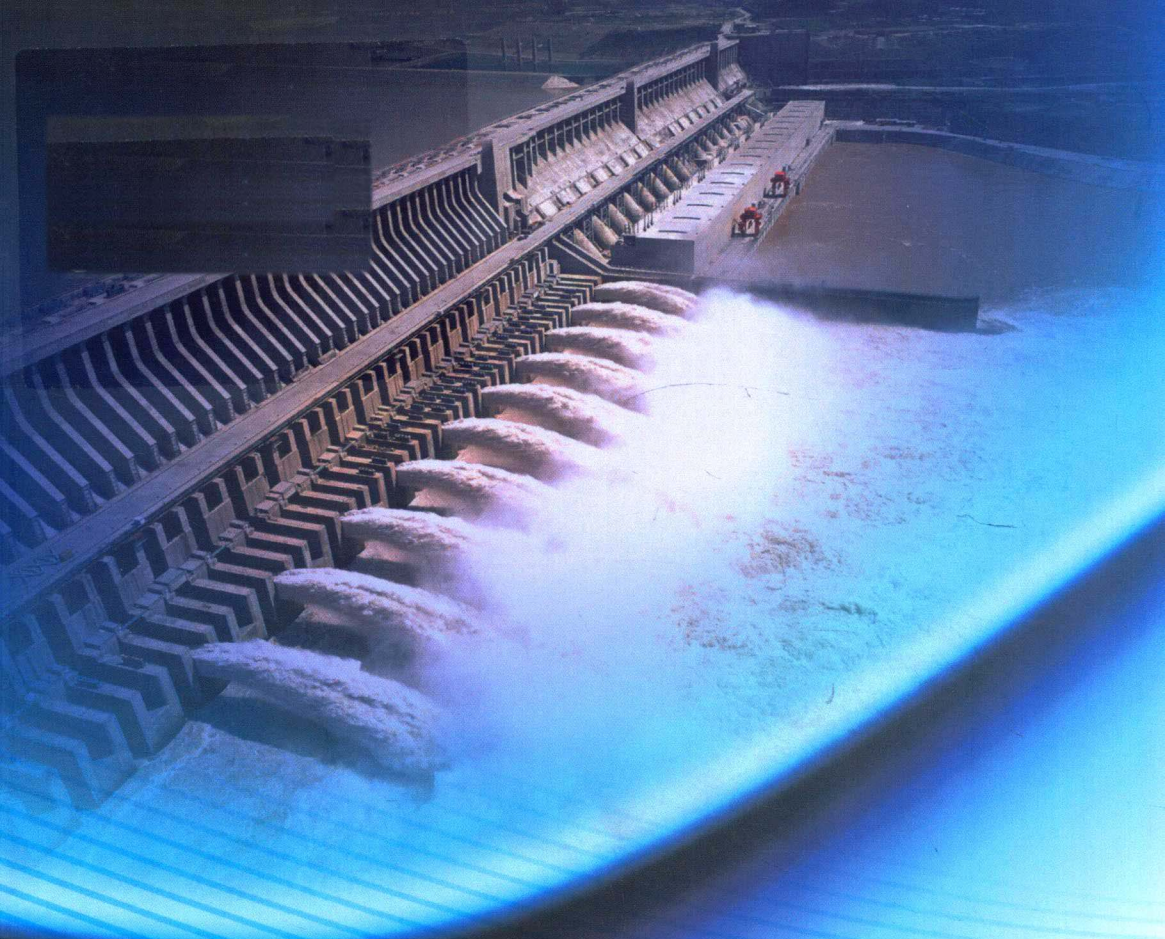




洪水预报误差系统 微分响应修正方法研究

司伟 包为民 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

洪水预报误差系统 微分响应修正方法研究

司伟 包为民 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书将流域水文模型概化为输入、输出、参数和中间变量之间的响应系统，并建立水文模型的系统响应函数，通过对系统响应函数进行微分计算，提出了流域水文模型系统微分响应理论，并将本书中提出的流域水文模型系统微分响应理论应用于实时洪水预报误差修正和水文模型系统响应研究中，解决了现有实时洪水预报误差修正方法存在的一些问题。本书中首先将此理论方法通过设置不同的理想模型分别对误差修正效果进行验证，验证结果显示该理论方法正确有效；然后又将此理论方法分别在具有不同地形、地貌特性和站点分布的流域进行应用检验，应用结果显示该方法能够有效地对实时洪水预报结果进行矫正和提高洪水预报精度。

本书适合从事实时洪水预报、水文模型误差修正、反演修正等领域的科技工作者和工程技术人员参考，也可供相关专业的学生和教学人员阅读。

图书在版编目（CIP）数据

洪水预报误差系统微分响应修正方法研究 / 司伟，
包为民著. — 北京：中国水利水电出版社，2018.7
ISBN 978-7-5170-6658-3

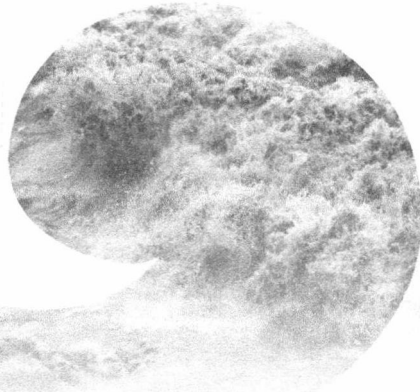
I. ①洪… II. ①司… ②包… III. ①洪水预报系统
—测量误差—校正—研究 IV. ①P338

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第170330号

书 名	洪水预报误差系统微分响应修正方法研究 HONGSHUI YUBAO WUCHA XITONG WEIFEN XIANGYING XIUZHENG FANGFA YANJIU
作 者	司 伟 包为民 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12印张 222千字
版 次	2018年7月第1版 2018年7月第1次印刷
定 价	58.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

洪水预报是一项预防洪水、提高洪水资源利用率、降低洪水风险的关键技术。在实际生产应用中，实时洪水预报的精度对于防洪安全和兴利都会有很大的影响。

流域水文系统是一个非常复杂的系统，在考虑模型结构时，通常要给予一系列的假设和结构简化近似，这在模型外延中会带来较大的误差。在模型参数确定中，由于历史水文资料的代表性不够，也会带来误差。实时洪水的预测与估计系统中误差更多，这就需要利用实时洪水预报误差修正技术来提高水文模型在实时洪水预报中的精度。

近年来，实时洪水预报误差修正技术得到了很大的发展，在实际流域洪水预报中也得到了广泛的应用，并取得了一定的效果。然而，现有的误差修正方法存在物理概念不清晰、损失预见期和使用条件受限制等缺陷，且现有的方法大都以模型计算实时误差系列为基本信息依据，往往将实测流量中的全部信息用于某一特定对象的修正，并未将实测流量中所包含的信息分类提取利用，而且大多数修正方法都是基于流量误差的统计分析。大多数传统的误差修正技术以及抗差技术都是针对降雨、流量、水位等单一水文要素系列进行分析，对研究要素的误差本身进行修正和同化，这些技术都是将研究要素的误差与模型本身分离。众所周知，实时洪水预报系统产生误差的原因很多，影响误差的机理非常复杂，模型计算的实时误差系列中虽然包含了所有的误差信息，但由于能区分利用的信息量太小，不足以达到对模型参数、输入等误差进行修正的目的。

鉴于此,本书根据水文系统输入、输出、参数和中间变量与系统输出之间的响应性,提出了水文系统微分响应理论,通过利用模型计算系列与实测系列之间的差值这一重要信息,对模型需要修正的变量进行逆向反馈修正,建立了一种基于系统微分响应理论的实时洪水预报误差修正方法。

鉴于传统洪水预报误差修正方法大都基于水文统计理论,本书首先从水文模型结构的本构关系出发,分析并建立了系统输入、参数和中间变量等与系统输出之间存在的微分响应关系,提出了水文系统微分响应理论,论证了该理论在洪水预报误差修正中的适用性。随后,本书以水文系统微分响应理论为基础,提出了线性汇流系统以单位线为响应关系的产流误差修正方法。单位线是一种常用的流域汇流方法,本书把单位线引入线性系统预报误差修正中,并将单位线以系统响应曲线的形式应用于预报误差修正中,建立一种向信息源头追溯的反馈修正模型。用实测值和计算值之间的差值作为信息源,对线性系统的重要输入项——产流量进行修正,并分别通过理想模型和实际流域应用检验,结果表明单位线方法结构简单,且不增加参数,物理概念清晰,对预报精度有较大提高。

鉴于大多数水文模型的产流计算模块具有高度非线性,本书又以新安江模型为例,提出了基于非线性系统的产流量动态系统响应曲线DSRC (Dynamic System Response Curve)。将动态系统响应曲线应用于洪水预报产流误差修正中,对时段产流量进行修正,再用修正后的产流量重新计算出流过程。该修正方法分别用理想案例和实际流域进行检验,结果证明,该方法能够有效提高预报精度,并且与传统的二阶自回归模型进行修正效果对比,在相同预见期下,此方法效果比传统二阶自回归模型有明显的提高,修正效果更加稳定。另外,本书中还对修正产流量的方法进行了改进,例如进行分水源修正、倍比因子的修正和基于产流平稳矩阵的修正研究。

此外,流域洪水预报过程中由于流域雨量站密度不足、雨量站单元划分不够灵活及雨量站遥测资料误差等因素,常常导致雨量站单元面平均雨量存在误差。鉴于此,本书又尝试将系统微分响应理论用于

修正面平均雨量误差,推求面平均雨量动态系统响应曲线,通过修正面平均雨量来提高实时洪水预报精度。本书通过理想模型和20个具有不同雨量站密度、气候特征和地形地貌特征的实际流域分别对面平均降雨误差动态系统响应曲线修正方法的可行性、合理性和效果进行了验证。此外,本书中也对降雨误差修正的方法进行了改进探讨,例如分雨量单元进行修正、考虑降雨阈值的修正改进以及岭回归估计改进研究。结果表明,该方法对于提高实时洪水预报精度具有明显效果,对于流域面积较大、雨量站密度较小的流域,其修正效果更加显著。

在当下复杂的工程地理系统中,以自然流域为基础发展起来的传统水文模型已经很难精确地描述和表达工程地理系统下的流域产汇流特性;近十几年发展起来的分布式水文模型在实际的应用中并未取得较好的效果,水文模型的实际应用效果受到了很大的制约,模型的发展遇到瓶颈,本书所提出的水文系统微分响应理论在水文模型的发展和应用效果方面取得了较大突破。

全书共分为8章,第1章论述了实时洪水预报误差修正的研究意义及国内外关于这一领域的研究进展;第2章详细介绍了水文模型系统微分响应理论的基本概念及系统微分响应误差修正方法的构建;第3章介绍了线性系统产流量误差修正方法与实例研究;第4章详细介绍了非线性系统中产流量误差的动态系统响应修正方法与技术;第5章介绍了产流误差系统响应方法的改进及其应用研究;第6章详细介绍了面平均降雨误差修正方法及其实例应用分析;第7章介绍了降雨误差微分响应修正方法的改进研究;第8章总结了全书的研究内容并对系统响应误差修正方法进行了展望。

本书的出版得到了国家自然科学基金“基于动态系统微分响应的水文模型关键要素信息提取及误差修正研究”(51709077)、“基于傅里叶级数的河段水流模型结构误差研究”(51279057)、国家博士后基金“基于系统微分响应的水文模型误差修正研究”(2017M611679)以及江苏省博士后基金“基于系统微分响应的面平均雨量误差修正研究”(1701019A)的资助。

在本书的编写过程中，得到了石朋教授、瞿思敏教授的极大帮助，刘可新硕士、杨姗姗硕士为第5章和第7章的撰写提供了大量数据和基本素材，在此致以深深的谢意。

由于作者学识水平有限及时间仓促，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

2018年7月

目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状和进展	2
1.3 本书主要内容	13
第 2 章 系统微分响应理论及误差修正方法	15
2.1 系统微分响应理论的提出	15
2.2 系统微分响应修正方法	21
第 3 章 线性系统产流量误差系统响应修正	29
3.1 线性系统微分响应误差修正模型构建	29
3.2 理想模型验证	31
3.3 实际流域应用研究	36
第 4 章 非线性系统中产流量系统微分响应修正研究	42
4.1 非线性系统的产流修正模型构建	44
4.2 产流系统响应曲线特性分析	48
4.3 理想模型验证	51
4.4 实际流域应用研究	54
第 5 章 产流误差系统响应方法的改进及实例应用分析	64
5.1 基于分水源误差修正的方法改进	65
5.2 基于产流误差倍比因子修正的方法改进	70
5.3 基于产流误差平稳矩阵的系统响应修正方法	77
5.4 实例应用分析	86

第 6 章	面平均降雨系统微分响应修正研究	97
6.1	面平均降雨误差修正模型构建	99
6.2	理想模型检验	103
6.3	实际流域应用检验	109
6.4	不同尺度多流域应用研究	117
第 7 章	降雨误差微分响应修正方法改进及实例应用分析	130
7.1	岭估计理论	130
7.2	理想模型概述	135
7.3	阈值修正效果研究	140
7.4	岭估计效果研究	143
7.5	流域平均微分响应与雨量单站微分响应	153
7.6	实例应用分析	162
第 8 章	总结与展望	168
8.1	总结	168
8.2	展望	169
参考文献		171

第 1 章

绪 论

1.1 研究意义

全世界范围内,洪水灾害正逐步加剧,就伤亡人数和经济损失而言,洪水灾害已位于自然灾害的前列^[1]。同样,洪水灾害也是威胁我国人民生命财产的最大自然灾害之一,据统计,我国由洪水造成的年平均损失居于自然灾害的首位。1998 年长江与东北大洪水给国民经济和人民生命财产带来了巨大的损失^[2]。近些年来,随着生态问题的不断加剧,极端天气的频次也与日俱增,洪水问题已成为制约我国经济发展的重要因素之一^[3]。为了减少洪旱灾害和提高水资源的利用率,一方面进行了大规模的水利基本建设;另一方面从非工程措施角度防治和减轻灾害损失,提高水资源利用率。非工程措施中流域实时洪水预报技术的应用对减少人员伤亡、保护财产安全、降低国民经济损失功不可没^[4]。因此为解决人类社会经济发展导致的水资源和水灾害问题,需要我们对流域水文机理有深入的研究和了解,才能对水资源短缺、水灾害和水环境恶化问题采取相应的措施,以科学发展的方式解决水资源和水灾害问题^[5]。因此,流域水文机理研究是解决水资源和水环境问题的理论基础。

洪水预报作为解决防洪减灾问题的重要非工程措施日益受到人们的重视^[6]。洪水预报技术是一项预防洪水灾害、提高洪水资源利用率、降低洪水风险^[7,8]、将洪水资源化的非常有效的非工程措施^[9]。在实际生产应用中实时洪水预报的精度对于防洪安全和兴利都会有非常大的影响^[10-12]。实时洪水预报是指对将发生的未来洪水在实际时间通过水文模型进行预报,就目前预报方法而言,实际时间是指观测降雨即时进入数据库的时间^[13]。现今,洪水预报大都采用水文模型^[14],应用范围最广泛、应用效果最好的是概念性水文模型^[15, 16],如新安江模

型^[17-19]、坦克模型^[20]、陕北模型^[21, 22]。流域水文模型主要研究的是时不变的离线系统, 习惯上基本都是采用观测到的历史水文资料, 先确定好模型参数, 然后用于未来的洪水预报中^[23]。由于水文模型是对流域产汇流特征的符号化表达, 在流域使用水文模型进行模拟的过程中存在诸多的简化和假设, 因此应用水文模型进行流域洪水预报往往存在误差, 而且误差来源于各个环节, 比如由于对水文规律概化简化引起的模型结构误差、由于设备故障引起的数据输入误差等^[6, 24]。流域水文系统是一个非常复杂的系统, 这在模型外延中会带来较大的误差。在模型参数确定中, 由于历史水文资料的代表性不够, 也会带来误差。实时洪水的预测与估计系统中误差更多, 这样的预报方案在实时在线洪水预报系统中, 常得不到满意的结果^[25, 26]。这就需要实时洪水预报误差修正技术来提高水文模型在实时洪水预报中的精度。

近年来, 实时洪水预报误差修正技术得到了很大的发展, 在实际流域洪水预报中也得到了广泛应用, 并取得了一定的效果^[27-32]。但由于传统水文技术和实验手段获取的流域水文信息量不足, 使得有效信息获取困难, 利用的实时信息量有限, 误差修正效果往往不太理想, 这在很大程度上影响了洪水预报精度, 使预报误差往往超出限制范围, 难以达到防洪要求^[33, 34]。

因此, 为进一步提高洪水预报精度, 更好地为社会生产和人民生活服务, 一种有效的实时修正方法是非常重要的。本书通过把水文模型进行系统概化, 提出水文模型的系统微分响应理论, 通过利用模型计算系列与实测系列之间的差值这一重要信息, 对模型需要修正的变量进行逆向反馈修正, 建立了一种基于系统微分响应理论的实时洪水预报误差修正方法, 并将此方法应用到实时洪水预报中, 为流域水资源和水环境管理提供技术支撑。

1.2 国内外研究现状和进展

1.2.1 单因素误差修正技术研究

所谓单因素误差修正即只针对模型中的某一个输入、输出、中间变量或者模型参数进行修正。最常见也是相对比较传统的单因素误差修正方法为自回归AR (Auto Regressive) 模型修正方法。自回归模型在水文学中有大量应用^[35-40]。AR (P) 自回归模型就是用已知的前期水文数据, 作出当前时刻的预报。它表示变量自身在不同时刻之间的相关关系。对于一个中心化的水文平稳序列 $\{X'_t\} : X'_1, X'_2, \dots, X'_n$, 可把 X'_t 表示为自身前一个时间间隔到前 P 个时间间隔的数据与相应的加权系数乘积之和, 其拟合误差为白噪声^[41]。数学模型为

$$\mathbf{X}'_t = \sum_{i=1}^P \varphi_i \cdot \mathbf{X}_{t-i} + a_t \quad (1-1)$$

假定 a_t 与以往的观测数据不相关, 即

$$\sum_{i=1}^P a_i \cdot \mathbf{X}'_i = 0$$

如果将 AR 模型应用于实时洪水预报流量误差修正时, 则通过模型的计算流量系列与观测流量系列之间的差值来预测未来下一时段的流量误差 (又叫残差系列)。默认残差系列之间具有相关性, 对模型残差系列 $\{e_1, e_2, \dots, e_t, \dots, e_{t+L}, \dots\}$ 进行预测修正, 采用如下残差自回归估计式:

$$e'_{t+L} = c_1 e_t + c_2 e_{t-1} + \dots + c_p e_{t-p+1} + \xi_{t+L} \quad (1-2)$$

那么预报结果的校正式为

$$QC(t+L/t) = QC(t+L) + e'_{t+L} \quad (1-3)$$

式中: e_t 为 t 时刻的模型计算误差, $e_t = Q(t) - QC(t)$; ξ_{t+L} 为 $t+L$ 时刻经实时校正后的预报系统残差; $c_1, c_2, \dots, c_p$ 为常数; p 为模型回归阶数; e'_{t+L} 为估计的 $t+L$ 时刻误差; $QC(t+L/t)$ 为经修正的预报流量。

采用最小二乘法求得 AR 模型的系数。AR 模型能很好地描述和预报平稳随机序列, 能自动地使模型实时地逼近随机序列, 它具有一定的自适应能力。AR 模型在水文学中误差修正研究方面有很多应用^[42~45]。

早在 1992 年李蝶娟等^[46]就曾采用自回归模型建立淮河王家坝站洪水预报方案和海河流域南运河水系洪水预报调度方案, 并指出自回归总径流线性响应模型与总径流线性响应模型加误差自回归实时校正模型的结构相同, 自回归计算简捷, 预报精度也有所提高。此后武汉大学郭磊等^[47]对自回归的实时洪水预报算法进行了研究, 根据三水源新安江模型洪水预报误差信息, 探讨了 3 种基于误差自回归模型的洪水实时预报校正算法, 即固定遗忘因子的递推最小二乘算法、可变遗忘因子的递推最小二乘算法和辅助变量法, 并将其应用于鲇鱼山水库的实时洪水预报。通过对 3 种实时校正方法进行分析比较, 认为具有可变遗忘因子的递推最小二乘算法效果最好。

瞿思敏等^[37]将抗差估计理论与 AR 模型相结合, 把抗差理论引入 AR 模型的参数估计中^[48], 利用抗差系统具有的抗差能力, 可以阻止非正常因素进入系统, 保证洪水预报精度。并且使用常用估计方案的抗差特征函数, 然后与传统的最小二乘法进行比较, 最后给出算例。算例表明: 对于正常观测值, 采用 Huber 法、多段分段法 IGG 及最小二乘法 LSM (Leasf Square Method) 均能取得比较满意的结果; 如观测值中存在粗差 (非正常值), 则用 LSM 法估计的结果就很不合理, 而用 Huber 法及 IGG 法能取得较好结果^[26]。包为民等将传统的自回归模型误差修正方法与系统响应误差修正方法在修正新安江模型自由

水蓄量^[49]、土壤含水量、降雨误差^[50]和时段产流量^[51]等方面做了大量的应用对比,结果显示 AR 方法对于修正效果都有一定的提高,只是在预见期和修正效果提高幅度等方面不具有优势^[52]。

误差自回归法是通过将输出的残差系列进行自回归分析,用前推若干个时刻的残差值作为实时校正系统的输入来推求当前时刻的输出误差,达到实时校正的目的。该法不涉及实时洪水预报模型本身的结构或数学表达式,仅从误差序列着眼进行校正,故可与任何实时洪水预报模型配合,有广泛的适应性,其校正效果主要取决于误差序列的自相关性,自相关密切则校正效果好,否则效果较差,而且当预报值与预报误差为同一量级时,实时校正的效果可能会大大下降。

对于单一因素的误差修正,除了传统常用的 AR 方法外,还有人工神经网络模型。Babovic V 等^[53]尝试将人工神经网络模型和观测值相结合,对于洪水预报过程进行修正,并且通过神经网络分析和预测误差。研究结果显示这种结合的模型对于河道流速修正有一定的效果。

Ju Q 等^[54]将人工神经网络和新安江模型相结合,来进行误差修正的研究。Komma J 等^[55]将人工神经网络和卡尔曼滤波技术结合应用到实时洪水预报误差修正中,研究结果表明通过对于土壤含水量的修正来提高洪水预报的精度是可行的。Dechant C M 等^[56]指出在水文模拟预报中数据同化技术被越来越多地用来提高精度,组合滤波技术和粒子滤波技术常常被用来估计模型参数和模型中间变量值,而研究指出这两种方法并没有取得预期的结果和修正效果。Madsen H 等^[57]和 Moradkhani H 等^[58]都曾将数据同化技术应用到水文预报与模拟中,前者是较早的将数据同化技术应用到了传统的降雨-径流模型计算中;而后者是将数据同化技术与粒子滤波-马尔科夫蒙特卡洛方法用来做流量测量的不确定性分析和估计。

Hasebe M 等^[59]早在 1989 年就将滤波分离和 AR 方法相结合用来做洪水预报的修正和模拟研究,研究分别建立使用降雨数据和不使用降雨资料的模型来对径流成分进行划分,划分为直接径流和地下径流两种成分,分别对两种成分进行修正,两种径流成分均按照线性的输入-输出关系来进行修正,并对此修正方法使用不同的水文模型进行对比研究。

1.2.2 滤波修正技术研究

自 1960 年卡尔曼^[60, 61]提出滤波方法以来,因其具有最小方差和无偏估计的性质,又采用多元线性的递推并且具有时变的维输入和输出特点,因而被称为最优的线性滤波方法^[62]。

卡尔曼滤波技术采用状态方程和量测方程对整个线性动态系统进行描述,其中状态方程用来描述系统中状态变量的时变规律,量测方程将系统状态变量和量测变量之间的关系采用函数关系式进行表达。其综合考虑系统存在的随机噪声与系统本身不完善带来的噪声以及量测变量受到噪声干扰的问题。卡尔曼滤波技术以状态空间模型为分析对象,以线性系统的协方差传播规律为理论基础,从而对系统状态变量做无偏最小方差的递推估计^[63]。按照对系统状态量估计的发生时间进行分类,卡尔曼滤波技术可分为滤波、内插和预报。“滤波”即是对系统状态现在时刻的值进行估计;“内插”即是对系统状态过去时刻的值进行估计;“预报”即是对系统状态将来时刻的值进行估计。卡尔曼滤波在估计的过程中,其递推公式不但可以得到滤波估计值而且可以得到误差的协方差矩阵,即可以对自身的误差进行分析。

正规卡尔曼滤波方法是卡尔曼滤波技术的基础,也是应用最为广泛的。其对模型观测噪声的统计特性做了相关假定,但在实际使用中仍然存在一些问题,这也使得各种滤波处理技术应运而生。如描述非线性系统的推广卡尔曼滤波和为克服滤波发散性问题的自适应滤波方法等^[64]。

采用正规卡尔曼滤波方法实时校正,其状态空间表达式如下。

状态方程:

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k|k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{G}_{k-1} \mathbf{U}_{k-1} + \mathbf{F}_{k-1} \omega_{k-1} \quad (1-4)$$

量测方程:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{v}_k \quad (1-5)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 、 $\mathbf{X}_{k-1}$ 分别为 k 、 $k-1$ 时刻的系统状态向量; $\Phi_{k|k-1}$ 为状态转移矩阵; $\mathbf{G}_{k-1}$ 为输入矩阵; $\mathbf{F}_{k-1}$ 、 ω_{k-1} 分别为模型噪声分配矩阵及模型噪声向量; $\mathbf{Z}_k$ 、 $\mathbf{H}_k$ 分别为观测向量和观测矩阵; $\mathbf{v}_k$ 为观测噪声向量。

利用卡尔曼滤波理论进行状态估计时,必须要知道噪声的统计特征值。一般是假设模型噪声序列 $\{\omega_k\}$ 和量测噪声序列 $\{\mathbf{v}_k\}$ 均为不相关的零均值白噪声序列。满足统计特征:

$$E\{\omega_k\} = 0; \text{cov}(\omega_k, \omega_j) = E[\omega_k, \omega_j^T] = \mathbf{Q}_k \delta_{kj} \quad (1-6)$$

$$E\{\mathbf{v}_k\} = 0; \text{cov}(\mathbf{v}_k, \mathbf{v}_j) = E[\mathbf{v}_k, \mathbf{v}_j^T] = \mathbf{R}_k \delta_{kj} \quad (1-7)$$

$$\text{cov}(\omega_k, \mathbf{v}_j) = E[\omega_k, \mathbf{v}_j^T] = 0 \quad (1-8)$$

式中: $\mathbf{Q}_k$ 为非负定阵; $\mathbf{R}_k$ 为半正定阵; δ_{kj} 为克罗内克 δ 函数。

20 世纪 70 年代,卡尔曼滤波技术因其严密和完整的理论体系而被引入水文学科中,并在水文预报和实时修正上取得很多成果。最早将卡尔曼滤波应用于水文预报研究的是日本学者 Hino^[65]。他提出将卡尔曼滤波技术应用于实时洪水预报的研究,并在 1973 年明确卡尔曼滤波理论在水文预报中的作用,对理想观

测值用卡尔曼滤波器将降雨径流的响应函数关系式进行递推估计,但其并未给出出流的全部预报。意大利学者 Todini 对卡尔曼滤波的研究卓有贡献。他在 1975^[66] 年提出了卡尔曼滤波,并在以后的研究中完善了应用系统参数动态估计结合状态实时估计并举的两段互相耦合技术和自适应滤波技术相结合的 MISP 实时预报方法^[67]。不过, MISP 算法在方法的收敛性和约束线性系统的适配性等方面存在不足之处。Chiu C L 等^[68] 在用自回归模型对水文预报进行模拟时,提出一个二阶马尔科夫模型。该模型可以单独对一个流量的时间序列进行模拟和预报,这也是对本站自身进行洪水预报的尝试。Wood E F 等^[69] 将使用卡尔曼滤波器对降雨径流的响应函数关系式的递推估计的部分研究工作完成。Cometon 将马斯京根-康吉的流量演算方程转换至状态空间,然后结合正规卡尔曼滤波进行实时预报。Ambrus 在对多瑙河进行实时洪水预报时引进了自修正预报器算法,并采用广义差分模型,可以在多瑙河布达佩斯巴加河段直接进行水位预报。该模型是直接建立水位预报模型的较早尝试。

从 20 世纪 80 年代至今,滤波在洪水预报中的应用得到进一步发展,主要的特点就是将算法直接引入科学研究中。Cooper D 等^[70] 在进行实时洪水预报的观测资料噪声处理时,提出模型的参数估计和系统识别可以采用卡尔曼滤波的方法来完成,并着重讨论了单输入的情况,同时还讨论了水文模型转化状态空间之后模型误差协方差和观测值误差协方差的估计问题。Kidanidis P K 等^[71] 在用 NWS (National Weather Service) 模型进行实时洪水预报时,首次对 NWS 模型进行了实时化处理。此后,研究学者在对 NWS 模型参数自动识别和滤波器使用中参数矩阵的确定等问题进行了一系列研究。Wood E F^[72] 在使用卡尔曼滤波技术对大流域进行研究时建议对其采用分区子系统的处理方法,用增补噪声的过程来补偿洪水预报误差,以便更好地处理子系统之间相互影响的难点。

Posada^[73] 将概念性降雨径流模型的自动参数估计方法推广到萨克门托模型中。研究将萨克门托模型改造为非线性的状态空间,模型状态变量由 8 个变量构成:上层张力水蓄量、下层张力水蓄量、下层快速自由水蓄量、下层慢速自由水蓄量、附加不透水面积蓄量、河槽蓄量、线性水库演算系数和出库断面实时流量。而系统状态向量采用滤波矫正的信息采集位于出口断面。其中状态转移矩阵表示状态变量随时间的变化关系,量测矩阵则代表状态变量和观测变量之间的关系。把其中属于非线性函数的部分用泰勒级数展开,转变为线性函数,再将扩展的卡尔曼滤波器应用到模型的实时洪水预报。在此研究基础上,许多学者对模型参数的自动识别和滤波器使用时参数矩阵的确定等问题进行了一系列的研究。Puente C E 等^[74] 在使用非线性滤波技术对河川

径流进行实时预报时,提出使用非线性滤波技术时可以采用一种向前或向后平滑处理的方法来降低非线性函数线性化带来的误差,称为迭代推广卡尔曼滤波器,并将此算法在伯德河进行应用,效果良好。Kraijenhoff D 等^[75]将一个随机噪声模型和确定性洪水演算模型相结合并用于莱茵河上的实时洪水预报。该模型采用卡尔曼滤波对修正向量进行实时估计,并以其作为修正系数来矫正预报结果。这项研究将卡尔曼滤波用于水动力学模型,对水动力学的实时校正研究有重要的意义。

葛守西^[76]和许剑华等^[77]在对实时洪水预报的线性汇流模型进行研究时,对于系统数学模型、参数动态识别、各种滤波技术的方法性能进行了试验比较,提出了一种用衰减记忆在线识别、衰减卡尔曼滤波和匹配法自我调整滤波联合运用的算法。其实际使用效果超过了 MISP 算法。在随后对蓄满产流的研究时建立了以土壤含水量为状态变量并应用卡尔曼滤波技术实时矫正的方法。这是国内外在概念性水文模型中实现实时修正的一次突破^[78]。葛守西等^[79]应用卡尔曼滤波技术对水动力学模型进行实时修正,此尝试在国内的研究中尚属首次。对水动力学模型的实时修正研究做了有益的尝试,研究分别建立了观测变量、糙率和综合变量为状态向量的卡尔曼滤波模型,并对滤波器参数的确定进行了试验,并提出了滤波器参数的最优结构形式和参数值。朱华等^[80]研究了大型水电实时洪水预报和调度模型,在黄河三花区间和鲁布格水库上进行应用。模型以分段马斯京根演算方程作为状态空间方程,以各个子河段出口断面流量作为状态变量,然后辅以单位阵作观测矩阵构造观测方程。使用正规卡尔曼滤波来矫正系统的状态变量,依据参数物理意义逐时段矫正矩阵方程的系数。

卡尔曼滤波技术大量应用于水文学、水动力学以及水质等方面的研究中^[68]。然而正规卡尔曼在应用时受制于线性系统,当系统的非线性较强时,卡尔曼滤波器容易引起滤波发散从而导致结果发散。为解决水文模型的非线性不满足卡尔曼线性系统的假设,扩展卡尔曼 EKF (Extended Kalman Filter) 应运而生,通过一阶泰勒级数展开得到的线性表达式来近似原始表达式。如果系统具有很强的非线性,通过泰勒级数展开的表达式不够准确,也会导致扩展卡尔曼的应用出现不稳定的结果。一个可行的方法是将系统中的每一个状态都转变为一个集合,基于蒙特卡洛法的集合卡尔曼法避免了线性化系统这一步,同时在更新系统状态时不再需要事先确定模型协方差,加之其在计算机上容易实现,迅速在众多水文模型中得到应用。

为了将卡尔曼滤波用于水文预报并得到优秀的预报结果,国内外研究学者做了大量的尝试和分析工作。Moradkhani 等^[67]认为洪水预报的结果更大程度上

取决于模型的参数和状态变量,研究将卡尔曼滤波用于水文模型的参数和状态变量的双耦合修正。Pauwels 等^[81]尝试通过实测流量来同化一定时间步长前模型土壤湿度来获取更加准确的流量预报值,称为回溯型集合卡尔曼。在降雨量较大和较小两种情景下进行模拟,模拟结果表明相较于原来的预报结果,这种方法能减少预报误差。另一种同样用蒙特卡洛的滤波方法——粒子滤波方法,被 Weerts A H 等^[82]用来与集合卡尔曼在水文模型状态修正研究中进行比较。比较结果表明在较少的粒子条件下,集合卡尔曼表现较优,并在实际流域的应用效果更佳。这说明集合卡尔曼是一种较为健壮的修正方法。Komma J 等^[55]选择使用分布式水文模型应用集合卡尔曼技术来修正土壤含水量。研究将土湿的不确定性归于降水和蒸发的不确定,然后使用修正的土壤湿度作为洪水预报的初值,明显减小了预报误差。

此外,Refsgaard J C^[83]曾经对 10 多种常用的水文模型和一些常用的误差修正方法展开对比研究,特别是对 NAMS11/MIKE11 和 NAMKAL 两个模型用基于扩展卡尔曼滤波的状态变量误差预测方法进行了交叉对比研究,研究结果表明在基本的模拟效果较好的前提下,使用扩展卡尔曼滤波的状态变量误差预测方法比一般的误差预测方法效果较好。王志臣等^[84]对流域汇流的分散叠加出流过程和总出流过程分别建立了修正公式,用相同的雨洪资料和单位线,应用 Kalman 滤波对修正系数进行了估计,实时校正出流预报结果证明 3 种模型都具有很高的校正预报精度。Madsen H 等^[32]将一种自适应状态修正的数据同化技术用于实时的河道流量预报,此研究方法是将组合滤波技术与误差预测模型相结合。将此技术应用在具有实测资料的一个断面。此方法能够用于线性或者非线性的误差预报模型,此修正方法在保证 24h 预见期的前提下具有明显的修正效果。

除了单独的卡尔曼滤波技术在水文学中的应用,也有专家学者对不同的卡尔曼滤波技术进行了应用对比。例如:Weerts A H 等^[82]分别将重要性顺序重采样滤波、残差重采样滤波和组合滤波技术与 HBV-96 水文模型结合,对预报进行修正对比研究。研究结果指出组合滤波在组合个数较小的时候修正效果最好,残差重采样滤波在高粒子数的情况下表现最好。并且指出在实测流量误差不太大和土壤含水量不太小的情况下,所有的滤波方法都有较好的表现。但是,Moradkhani H 等^[67]及 Vrugt J A 等^[85]也曾指出这些众多的滤波修正方法的使用,都是依赖于当地的观测资料,如土壤含水量、积雪量、流量,这些滤波方法的修正效果并没有达到预期的效果。

Komma J 等^[55]将组合滤波技术应用于土壤含水量的误差修正研究中,通过修正水文模型的初始值来提高实时洪水预报的精度,取得了一定的效果。