

文章编号:1001-4179(2013)20-0021-04

# 基于分区水文模型的大渡河梯级水库防洪调度

王甫志<sup>1,2</sup>, 马光文<sup>1</sup>, 陶春华<sup>2</sup>, 赵飞<sup>3</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610064; 2. 国电大渡河流域梯级电站集控中心, 四川 成都 610041; 3. 西华大学 能源与环境学院, 四川 成都 610039)

**摘要:**实施梯级水库防洪调度时,通常面临点多面广的问题,各防洪点往往同时需要较高的水情预报精度。从流域区域水文、水力学特征出发,借用有限元的概念,先将目标洪水的复杂计算问题离散为一系列简单的区域洪水进行计算,再利用系统工程方法将单元计算结果迭代演算为目标点的预报结果,可以有效解决上述问题。对已建梯级水库群的流域,应用上可先将其分类,然后对区域内子单元选用最适合的水文模型进行计算,提高其洪水预报精度,从而形成准确有效的综合洪水预报成果。

**关键词:**水文预报; 防洪调度; 分区水文模型; 大渡河梯级水库

中图法分类号: TV697 文献标志码: A

随着天然江河流域水资源的开发建设,流域内产流面及河道的自然完整性被肢解成许多相对分离的区域。这些变化使原来的流域预报方法误差进一步增大,其预报结果也无法再满足实际生产生活的要求,迫切需要在各离散区域内开展分区水文预报以提高预报水平。随着水情测报设备覆盖率的提高和计算技术的飞速发展,现在人们有条件通过开展小区域产汇流计算和多断面河道演算来实现分区洪水预报,再通过科学的分析计算以充分利用梯级水库的调洪能力,能很好地解决梯级水库的防洪调度需求。

以大渡河流域为例,该流域中下游地区已建及在建电站数量众多,区间被水库隔离成多个独立区域,同时沿河有成昆铁路、国家重点工业企业及城镇等多处目标的防洪任务需要梯级水库来承担。而一次洪水往往对多个防洪目标同时构成威胁,就对各区域洪水预报和水库群防洪调度提出了新的要求。

## 1 模型系统架构

分区洪水预报模型主要借用有限元理论的方法来对连续的洪水过程进行分散处理,这种处理方法既有利于产流面按区域特点选用最优模型,又便于对各个

处于分散位置的水库进行调洪演算,解决多区域的防洪问题。

### 1.1 理论依据

有限元法是用有限个单元将连续体离散化,通过对有限个单元作分片插值求解各种力学、物理问题的一种数值方法。将连续的求解域离散为一组单元组合体,用每个单元内假设的近似函数来分片地表示求解域上待求的未知场函数,近似函数通常由未知场函数及其导数在单元各节点的数值插值函数来表达。从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。

在流域梯级水库洪水调节实际问题中,特别是库尾变动回水区,一般不能得到洪水过程的精确解,这主要是由控制微分方程的复杂性、不同单元的差异性或边界条件和初始条件的不确定性所致。为解决这一问题,需要借助数值方法来近似求解,解析在任何点上的精确行为,而数值解则成为离散点上的近似精确解。有限元法把复杂结构的计算问题转化为简单单元的分析 and 集合问题,常见的数学近似方法及工程中所用的各种直接近似方法均属于有限元范畴,是一种将直接近似方法应用于离散系统的标准研究方法。

收稿日期:2013-06-17

作者简介:王甫志,男,工程师,硕士研究生,主要从事梯级电站水库调度工作。E-mail:chigau@163.com

## 1.2 系统目的

在一个梯级链中,将梯级水库作为控制单元对下游区间进行调洪,并通过区间河道的演算将各水库区连接起来,形成一个综合的预报、防洪系统。针对各区域,则可继续划分成细小的分布区分别开展水文特性演化分析,获得不同位置的洪水预测结果和水流变化情况。依据上游梯级水库的调节计算成果,多方案分析区间洪水预报偏差带来的风险,以求起到多点优化下游水库洪水预报和防洪的作用,提高梯级洪水预报精度和抗风险能力。

## 1.3 分区的划定

根据梯级水库及河道所形成的系统整体水文特性及分析方法,将整个系统按水库、河道和自然产汇流面分成3类区域,各区域又可划分成多个单元,根据各单元特点采用不同模型分别进行分析。

首先将瀑布沟水库、龚嘴水库和铜街子水库库区部分划分为一类区域,瀑布沟至龚嘴及龚嘴至铜街子之间河道划分为二类区域,自然产汇流状态较好的支流和上游区域划分为三类区域。接着将水库划分成多个调洪控制单元,河道划分为多个传导单元,天然产汇流区划为多个自然面单元。如:将水库按水位或入库流量划分成多个动库容;将河道按比降、糙率或其他河道因子的性质划分成多个断面;将自然面按产汇流性质划分成分布式的水文预报区等。最后对各单元分别采用相关模型进行分析,求得各单元出流参数,并通过系统工程进行优化叠加,形成一个综合预报调洪系统,以实现防洪目标洪水预报和调洪功能。其中,第三类自然产汇流面划分如图1所示。

## 2 分区模型的优化

各区域内的单元洪水预报和演算是整个预报系统的最基本工作,优化单元内的洪水预报对系统预报精度至关重要。因此,对各类单元的计算应根据其特性选用适宜的计算方法,提高预报精度。

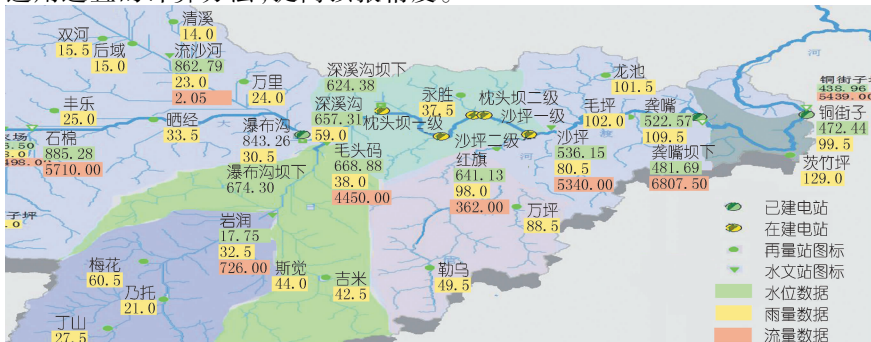


图1 第三类自然产汇流面划分

## 2.1 调洪控制区模型优化

水库的调洪演算主要方法是水量平衡法,其计算受入库洪水变形、起调水位和动库容等误差影响较大。入库洪水来临时河道水量急剧增加,由于回水区水面面积和深度的增大、糙率和比降减小,将显著地改变库区的水力条件,水流汇流规律变化较大。据实际观测资料显示,库区不同初始条件对洪水过程将产生较大影响,主要表现在以下几个方面。

(1) 汇流速度的变化。由于库区相对天然河道水深增加,库区水流波动大大加快,洪水波进入库区后迅速向四周传播,波形发生急剧变化,缩短了洪水传播时间。

(2) 洪峰流量的变化。入库洪峰流量一般比建库前洪峰流量大,峰现时间提前。这种变化随着暴雨中心的临近而越发明显。从2010年7月17日大渡河下游龚嘴和铜街子库区特大暴雨和其他一些分析资料显示,峰值增高一般都在20%~40%。

(3) 峰形的变化。从实测的建库前后的峰形对比发现,建库后峰形的涨水段变化陡、洪量大,高峰腰段更为尖瘦。

图2为流域龚嘴水库洪水入库前后洪峰流量对比曲线,从图中洪水过程对比可以看出,洪峰形态及汇流时间均表现出上述变化过程。

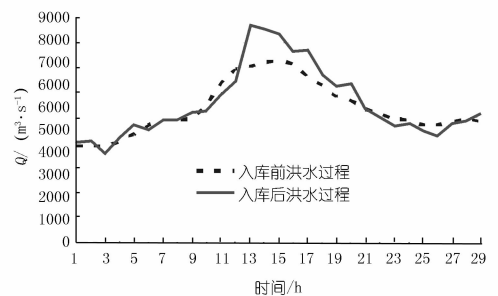


图2 龚嘴水库洪水入库前后洪峰流量对比

综上所述,采用历史资料的统计分析来对入库洪水进行多参数修正、优化现有模型,可以起到提高入库洪水预报精度的作用。另外,采用如有限元类模型与工程计算方法,将水库按水位或动库容划分为更多调洪单元模拟库区水体流态变化,从而掌握库区及边坡等防洪薄弱位置的洪水过程,有助于制定更有力的防洪措施。实际调洪过程中,为避免不确定因素带来的影响,还应考虑计算误差的大小并留有

余地。

## 2.2 传导区模型优化

一般情况下,水库能够起到对入库水量的再分配作用,而利用相邻水库间的河段槽蓄关系与水量平衡模型作为二类单元计算函数,演算相邻断面间的洪水出入过程,可以将上游水库的洪水分配过程在传导子单元内逐级演算成下游水库的入库流量过程。

由于河道受弯直、比降、糙率等多种因素的影响,将给上下游断面洪水演算造成一定影响。不同河段需要用不同的演算模型,因而针对各河段的子单元分别采用适宜模型进行洪水计算能降低上述因素带来的影响。应用中还可以通过对比演算,以选择最优模型。常用河道演算方法有如下方面。

(1) 槽蓄曲线法。将连续性方程简化为水量平衡式,将动力方程简化为槽蓄方程式。

(2) 水力学模拟法。如河网水力数值模拟模型<sup>[1]</sup>,明渠不定分离流数值模拟等<sup>[2]</sup>均属于水力学模拟方法。

(3) 其他数值计算法。随着计算机技术的发展,采用计算机进行数值迭代计算变得简单易行。常见的迭代法有牛顿迭代法、泰勒迭代法<sup>[3]</sup>,其他还包括最速下降法、共轭迭代法、变尺度迭代法、最小二乘法、线性规划、非线性规划、单纯型法、惩罚函数法、斜率投影法、遗传算法、模拟退火法等等。

在实际运用过程中,传导单元内汇流时间随流量的变化需重新估计。对于具备较长历史资料的天然河道,通过统计分析可获得较准确的汇流时间系列。

## 2.3 自然产汇流区模型优选

自然产汇流的水文预报带有明显的区域特性,需根据该区域的水文气象特征和相关资料丰富程度选用恰当的水文预报方法,可以采用相关经验法,也可以采用流域模型方法,或采用多种预报方法进行权重计算得出综合预报值。

大渡河应用预报系统主要采用多模型预报结果分权重组合来优化其洪水预报,然后与传统预报结果进行人工比选,获得最终的预报方案。

## 3 系统实际运用

下面以龚嘴水库至铜街子水库区间河道单元演算及几次梯级洪水调度为例,对该预报和调洪系统的运用进行模拟验证。

### 3.1 单元模拟验证

采用基本马斯京根河道演算法作逆向函数对大渡河龚嘴、铜街子区间河道某次来水过程进行验算(表

1)<sup>[4]</sup>,这一演算结果用于模块输出值的逆向误差统计。

表 1 推流计算( $C_0 = -0.057, C_1 = 1, C_2 = 0.057$ )

$t$ /时	$I$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$C_0 I_2$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$C_1 I_1$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$C_2 Q_1$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	演算的 $Q_2$ /实测的 $Q$ / ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
8	1500				1500 1500
9	1800	-103	1500	86	1483 1510
10	2100	-120	1800	103	1783 1815
11	2500	-143	2100	120	2077 2120
12	2800	-160	2500	143	2483 2550
13	2500	-143	2800	160	2817 2850
14	2200	-125	2500	143	2517 2530
15	2100	-120	2200	125	2206 2210
16	1700	-97	2100	120	2123 2110
17	1600	-91	1700	97	1706 1720
18	1500	-86	1600	91	1606 1620

表 1 中,  $C_0, C_1, C_2$  为利用河道参数计算的马斯京根基本参数,  $I$  为龚嘴坝下断面出流量,  $I_1$  为龚嘴坝下断面前一时段出流量,  $I_2$  为龚嘴坝下断面后一时段出流量,  $Q_1$  为前一时段铜街子断面入流量,  $Q_2$  为演算的铜街子断面入流量,  $Q$  为实测的铜街子断面入流量。

由于流量大小带来的河道比降、糙率、汇流速度及天然河道沿高程的变化等因素的影响,断面间汇流参数有较大变化,因此应根据历史资料编制不同条件下的汇流演算一系列参数,再根据实际情况进行选取拟合。退水期区间产流可根据径流分割加入部分基流。

从表中演算流量和实测流量的数值验证误差来看,单元函数的输出结果精度很高。因而合理的单元划分和选择适合该单元的水文模型或计算函数,对提高区域流量的预测精度有一定意义。

### 3.2 调洪成果验证

运用一系列的预报和演算方法,对大渡河流域 2010 年瀑布沟至龚嘴区间两次洪水的洪量进行了模拟验证,其成果如表 2 所列。

表 2 沙坪站模拟验证成果

时间/ (月.日.时)	实测洪量/ ( $\text{万 m}^3$ )	预测洪量/ ( $\text{万 m}^3$ )	实测洪峰流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	预测洪峰流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	洪量相对 误差/%	流量预报 精度/%
10.17.06~10.18.18	22640	23475	2010	2190	3.69	91.78
10.20.06~10.20.10	2432	2210	1590	1810	-9.12	87.85

由表 2 可知,对一般洪水,模拟验证成果基本令人满意,计算误差在水文情报预报规范允许范围内,说明相关模型基本代表了流域水情特性,可用于作业预报和洪水演算。

## 4 结论

根据大渡河梯级电站防洪运用需求,结合流域梯

级水库的发展状态,采用分区域的联合洪水预报模型进行洪水调度,能满足该流域的防洪需求。经多次模拟验证,初步得到以下结论。

(1) 在开展梯级水库洪水调度过程中,通过分区洪水模型预测天然来水过程,并对梯级水库进行系统分析、分区域控制,既保证了联合调度的科学有效性,又可根据实际情况迅速满足某一地区的洪水预报需求,防洪应用效果较好。

(2) 河道和水库洪水演进函数、模型众多,根据流域产汇流特性及河道水库特征选择适宜的预报方法尤其关键。计算过程中各区域单元运算需根据实际情况的变化选择合理的计算参数和计算模型,形成一套适合本流域的预报模型组合。

(3) 越是开发完善的流域,防洪目标越多,其梯级水库联合防洪实施过程中计算量越大。

采用分区洪水预报模式模拟梯级洪水的效果与各预报单元的物理参数方案、模拟区域、采用的资料、边界方案的选取有很大关系。从系统建设的角度来看,该模型对目前各梯级水电站联合防洪调度及自动化系统建设有一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 赖良魁. 河网水力数值模拟的追赶法模型的应用[J]. 东北水利水电, 2001, (10): 35-37.
- [2] 周建军, 王连祥, 林秉南. 明渠不恒定分离流数值模拟及试验验证[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 1993, 8(1): 28-34.
- [3] 郭建萍. 泰勒级数在数值法中的应用[J]. 华北矿业高等专科学校学报, 2001, 3(3): 35-36.
- [4] 郭丽君, 赵超. 马斯京根模型参数抗差估计方法风险分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3): 58-60.

(编辑: 胡旭东)

## Flood control operation of cascade reservoirs on Dadu River based on partition hydrological model

WANG Fuzhi<sup>1,2</sup>, MA Guangwen<sup>1</sup>, TAO Chunhua<sup>2</sup>, ZHAO Fei<sup>3</sup>

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Control Center of Dadu River Cascade Hydropower Stations, Chengdu 610041, China; 3. School of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Operation of cascade reservoirs for flood control often involves a wide range, and higher accuracy forecast is required for each flood control points at the same time. Starting from the characteristics of watershed hydrology and hydraulics and referring the concept of finite element method, we simplify the calculation of target flood as a series of regional flood calculation, then compose target flood by the calculated regional floods through iteration. For the river basin where cascade reservoirs have been constructed, we can divide the basin as some sub-basins and select the suitable hydrological model for each sub-basins to improve flood forecast accuracy of sub-basins and obtain more accuracy forecast result of target flood.

**Key words:** hydrological forecasting; flood control operation; partition hydrological model; cascade reservoirs of Dadu River

(上接第 12 页)

## Study on correction coefficient in expansion value calculation of expansive soil foundation

ZHANG Jiazhu

(Water Resources Research Institute, Huaihe River Water Resources Commission, Bengbu 233000, China)

**Abstract:** To obtain the correction coefficient for expansion value calculation of expansive soil foundation in a construction site, expansion test was carried out by simulating the in-situ soil moisture condition in the foundation, and the expansion values in different foundation depth were measured. This measured values and the calculated values by loading expansion ratio curve under the same initial soil moisture rate are compared, and their relation is established. Finally, the correction coefficient and correction formula for the expansion soil in construction site are proposed. The study results provide valuable references for calculating expansion values accurately.

**Key words:** expansive soil foundation; in-situ test; expansion value; correction coefficient