

文章编号:1672-3031(2018)01-0037-08

## 基于洪水分级的两江电站洪水预报方案研究

李 匡<sup>1</sup>, 刘可新<sup>1</sup>, 刘建军<sup>2</sup>, 张 雷<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 北京中水科水电科技开发有限公司, 北京 100038;

2. 吉林省吉能电力集团有限公司 两江水力发电公司, 吉林 延边 133600)

**摘要:** 本文以两江电站为研究对象, 针对传统洪水预报方案中没有考虑洪水分级的问题, 将洪水分为大、中、小3个等级, 编制了基于洪水分级的洪水预报方案。方案中, 以泰森多边形对流域进行分块, 预报模型采用三水源新安江模型和实时校正算法; 采用人工经验与粒子群算法结合的方法, 利用2000—2015年的资料, 率定了不同类型洪水的模型参数。采用2016年洪水资料对预报模型和实时校正算法进行了验证。结果表明, 本文洪水预报方案优于洪水不分级方案, 率定出的模型参数适合不同等级的洪水, 采用的实时校正算法可以提高预报精度。

**关键词:** 两江电站; 洪水预报; 洪水分级; 新安江模型; 粒子群算法; 实时校正

**中图分类号:** TV121<sup>+</sup>.7

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.01.006

### 1 研究背景

洪水预报是重要的防洪非工程措施, 高精度的洪水预报可为水库安全度汛和水资源优化利用提供技术支持, 预报模型参数的准确性直接影响到洪水预报精度。水库对于不同类型洪水的调度策略是不同的, 对于大洪水, 考虑更多的是水库防洪安全, 更关心洪峰大小及峰现时间; 而对于中小洪水, 由于防洪压力相对较小, 考虑更多的是如何利用洪水多发电, 因此更关心洪量的大小。不同类型洪水对应的预报模型参数是不同的, 主要反映在汇流参数上, 洪水越大, 汇流时间越短, 峰现时间提前, 过程越尖瘦; 反之汇流时间越长, 峰现时间滞后, 过程越坦化。目前大多数的洪水预报方案是针对大洪水的<sup>[1-4]</sup>, 对中小洪水考虑较少, 编制的洪水预报方案的预报模型参数只有一套。显然, 只有一套预报模型参数的洪水预报方案是不合适的, 需要对洪水进行分级, 分别率定预报模型参数, 编制洪水预报方案。

本文以两江电站为研究对象, 研究了历史洪水的分级问题, 将洪水类型分为大、中、小洪水3个等级, 采用新安江模型和实时校正算法编制了基于洪水分级的两江电站洪水预报方案。

### 2 两江电站流域简介

两江电站位于吉林省安图县两江镇境内, 坝址以上控制流域面积2 970 km<sup>2</sup>。所在流域为二道松花江流域, 二道松花江发源于长白山天池, 流域内山岭纵横, 沟谷交错, 植被良好, 森林覆盖率达80%以上, 水土流失甚微。流域内人类活动影响较小, 有两座日调节电站即301电站和302电站。由于长白山火山喷发物的大量堆积, 致使本流域源头段覆盖层较厚, 下渗能力较强, 对洪水有一定滞蓄作用并形成丰富的泉水。

本流域属大陆性季风气候区, 以松江站为例, 多年平均降水量为682.4 mm, 为半湿润地区。降水主要集中在6—9月, 占全年的70%; 多年平均蒸发量1 227 mm; 多年平均气温2.2℃, 河流封冻期长达半年之久, 稳定封冻天数为100~150 d; 本流域洪水多由7—9月的暴雨形成, 以8月份出现

收稿日期: 2017-03-20

基金项目: 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(AU0145B402017)

作者简介: 李匡(1983-), 男, 山西运城人, 高级工程师。主要从事洪水预报系统开发研究。E-mail: likuang0000@163.com

的次数最多，量级最大。由于流域地处多雨的长白山脉深山峡谷区，河网比较发达，河道比降和坡面比降都较大，河槽下切深，致使江河洪水汇集较快，洪水集中，洪水过程有陡涨陡落的特点。

流域内布设有3个水位雨量站和6个雨量站，雨量站网密度为330 km<sup>2</sup>/个。图1为两江电站流域图。

3 洪水预报方案编制方法

两江电站洪水预报方案中，洪水预报模型采用三水源新安江模型，采用人工经验与粒子群算法率定新安江模型参数，采用实时校正方法对预报流量进行实时校正。

**3.1 新安江模型** 三水源新安江模型<sup>[5]</sup>由蒸散发、产流、分水源和汇流4个模块组成。模型各层次结构的功能、计算采用的方法和相应参数见表1。

表1 三水源新安江模型各层次结构功能、计算采用的方法和相应参数

| 层次 | 第一层次       | 第二层次    | 第三层次        | 第四层次  |       |         |
|----|------------|---------|-------------|-------|-------|---------|
| 功能 | 蒸散发计算      | 产流计算    | 水源划分        | 汇流计算  |       |         |
|    |            |         |             | 坡面汇流  | 河网汇流  | 河道汇流    |
| 方法 | 三层模型       | 蓄满产流    | 自由水蓄水库      | 线性水库  | 滞后演算法 | 马斯京根法   |
| 参数 | KC、UM、LM、C | WM、B、IM | SM、EX、KG、KI | CI、CG | CS、L  | Ke、Xe、n |

**3.2 粒子群算法(PSO)** 粒子群算法(PSO)是Kennedy和Eberhart于1995年提出的一种基于对鸟群捕食行为模拟的智能群集优化算法。目前已广泛应用于函数优化，神经网络训练，模糊系统控制等领域。本文采用文献[6]提出的标准粒子群算法进行新安江模型参数率定。

**3.3 实时校正算法** 洪水预报过程由预热期和预见期组成，预热期与预见期以预报时间分隔，预报时间之前为预热期，之后为预见期。预热期内的降水量和实测流量均为已知。以预热期的实测流量与预报流量的误差序列建立自回归模型，采用最小二乘法估计自回归模型的参数，然后预测出预报时刻之后的误差，叠加到预报流量上即得到校正流量<sup>[7]</sup>。

计算模型如下：

$$\hat{y}_i = \mu + \sum_{j=1}^p \varphi_j (y_{i-j} - \mu)$$

式中： $\hat{y}_i$ 为误差序列在*i*时刻的估计值； $\mu$ 为样本序列的均值；*P*为模型的阶数； $\varphi_j$ 为模型参数。

根据经验分析，模型阶数*P*可在 $[n/10, n/4]$ 之间取值(*n*为样本容量)<sup>[8]</sup>。实时校正能提高预报精度，但是由于预见期越长，校正的精度越低，甚至会起反作用，因此本文中只校正未来1个时段的预报流量<sup>[7]</sup>。

4 两江电站洪水预报

**4.1 资料收集与整理** 收集到两江水电站流域2000—2016年间雨水情资料。雨量资料为全年资料，时段长为3 h；流量资料为两江电站的3 h入库流量，为场次洪水资料；蒸发资料为松江水文站的日蒸发资料。

两江电站历史洪水统计表如表2所示。其中2013081611号洪水洪峰为2 456 m<sup>3</sup>/s，为200年一遇

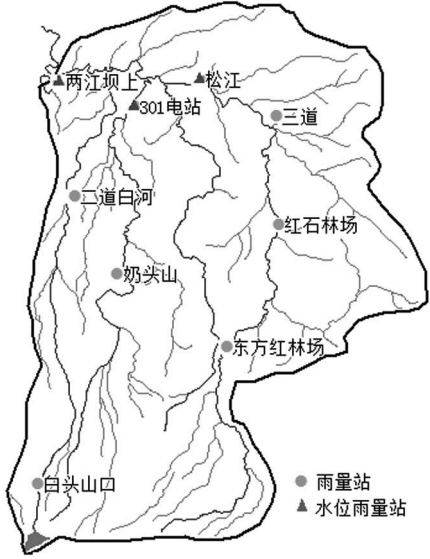


图1 两江电站流域图

特大洪水；2010072820号洪水洪峰为 $1\,370\text{ m}^3/\text{s}$ ，为33年一遇大洪水；2000091723号洪水洪峰为 $680\text{ m}^3/\text{s}$ ，为2~3年一遇中小洪水；2016083117号洪水洪峰为 $980\text{ m}^3/\text{s}$ ，为10年一遇中小洪水；其余场次洪水为1年一遇的小洪水，洪水统计见表2。由表2发现，小洪水的流域平均降水量在 $100\text{ mm}$ 以下，中小洪水的流域平均降水量在 $100\sim 130\text{ mm}$ ；大洪水的流域平均降水量在 $130\text{ mm}$ 以上。因此以降水量作为可能产生的洪水量级的分类条件，将洪水分为大洪水、中小洪水、小洪水，对应的降水量分别为 $>135\text{ mm}$ ， $100\sim 135\text{ mm}$ ， $\leq 100\text{ mm}$ 。由于每种类型的洪水对应的模型参数不同，因此对每种洪水分别率定模型参数，当流域发生降水时，以降水量为判别条件选择模型参数进行预报。

表2 两江电站洪水统计

| 洪水编号       | 起止时间               | 雨量/mm | 洪峰/( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 峰现时间         | 洪量/ $\text{万 m}^3$ | 洪峰频率 $P/\%$ | 洪水分类 |
|------------|--------------------|-------|------------------------------|--------------|--------------------|-------------|------|
| 2000091723 | 2000/9/15 8—9/22 8 | 124.1 | 680                          | 2000/9/17 23 | 16133.2            | 40          | 中    |
| 2004072005 | 2004/7/18 8—7/24 8 | 79    | 211                          | 2004/7/20 5  | 5301.99            | 99.99       | 小    |
| 2004072814 | 2004/7/26 8—8/3 8  | 67.9  | 289                          | 2004/7/28 14 | 8726.83            | 99.99       | 小    |
| 2005070505 | 2005/7/1 8—7/11 8  | 86.8  | 291                          | 2005/7/5 5   | 14304.27           | 99.99       | 小    |
| 2006062023 | 2006/6/20 8—6/22 8 | 21.3  | 195                          | 2006/6/20 23 | 1569.35            | 99.99       | 小    |
| 2007092111 | 2007/9/20 8—9/24 8 | 56.8  | 356                          | 2007/9/21 11 | 6718.41            | 99.99       | 小    |
| 2010072820 | 2010/7/26 8—8/4 8  | 140.8 | 1370                         | 2010/7/28 20 | 30298.3            | 3           | 大    |
| 2013081611 | 2013/8/14 8—8/20 8 | 177.8 | 2456                         | 2013/8/16 11 | 35072.78           | 0.5         | 大    |
| 2014061911 | 2014/6/17 8—6/21 8 | 49.5  | 330.3                        | 2014/6/19 11 | 6661.13            | 99.99       | 小    |
| 2015080502 | 2015/8/2 8—8/9 8   | 65.1  | 225.2                        | 2015/8/5 2   | 6107.69            | 99.99       | 小    |
| 2016083117 | 2016/8/29 8—9/3 8  | 117   | 980                          | 2016/8/31 17 | 16322.17           | 10          | 中    |

**4.2 流域分块** 考虑降水在面上分布的不均匀性，采用泰森多边形法将流域划分为多个块，通过权重计算面雨量。两江流域各块的分块图见图2，面积权重见表3。



图2 两江电站流域泰森多边形分块图

表3 各块的面积权重

| 序号                | 1     | 2     | 3    | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    |
|-------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 块名                | 东方红林场 | 红石林场  | 三道   | 松江    | 白头山口  | 奶头山   | 301电站 | 二道白河  | 两江坝上 |
| 面积/ $\text{km}^2$ | 563.3 | 521.4 | 366  | 242.4 | 392.5 | 414.2 | 217.4 | 161.5 | 91.3 |
| 权重                | 0.19  | 0.18  | 0.12 | 0.08  | 0.13  | 0.14  | 0.07  | 0.05  | 0.03 |

**4.3 参数率定** 新安江模型参数率定有客观优选法<sup>[9]</sup>及优化算法率定法。优化算法有SCE-UA<sup>[10]</sup>、遗传算法<sup>[11]</sup>、粒子群算法(PSO)<sup>[12]</sup>等，在采用优化算法率定时，可以选择对全局参数进行率定，也可选

择对部分参数进行率定。虽然文献[10, 12]均表明优化算法可以对模型的全部参数进行优化,但是对于可以人工确定的参数如汇流时间 $Ke$ 、河道分段数 $n$ 、不敏感参数等,没有必要进行优选。因为需要优选的参数越多,计算量也越大,同时会带来异参同效的问题。本文采用人工经验及优化算法率定结合对参数进行率定,先用人工经验确定出分段数 $n$ 及不敏感参数,再用粒子群算法(PSO)率定敏感参数。

本方案将流域划分为9块,应该对每块设置模型参数。但是,这样会造成参数率定的工作量极大,且无验证资料(需要获取每块出口的流量资料,而本文中只有两江电站的流量资料),鉴于两江电站流域内下垫面条件、河道类型相似,可认为相同类型洪水的每块模型参数相同,只是河道汇流中的洪水传播时间 $Ke$ 及河道分段数 $n$ 不同。

4.3.1 不敏感参数及河道分段数确定 新安江模型参数中,参数 $B$ 、 $C$ 、 $IM$ 、 $EX$ 为不敏感参数<sup>[13]</sup>,按一般经验定值即可;马斯京根法中的 $Ke$ 及 $n$ ,可通过分析场次洪水的传播时间得出。剩余参数 $KC$ 、 $UM$ 、 $LM$ 、 $WM$ 、 $SM$ 、 $KG$ 、 $KI$ 、 $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $L$ 、 $Xe$ 通过优选得到。

$B$ (张力水蓄水容量曲线指数的方次)决定于张力水蓄水条件分布的不均匀性,与流域面积、复杂程度有关。一般面积越大,越复杂, $B$ 值越大。两江流域以上面积为2 970 km<sup>2</sup>,流域内主要是植被覆盖良好的林区。综合考虑, $B$ 值取0.4;

$C$ (深层蒸散发系数)决定于深根植物的覆盖面积。据已有经验,在南方多林地区可达0.18,而北方半湿润地区则约为0.08。两江电站流域虽然位于北方半湿润地区,但其流域内植被覆盖良好,且深根植物众多(红松、白桦、云杉、山杨等),根系发达<sup>[14]</sup>。因此 $C$ 取值0.18;

$IM$ (流域不透水面积)在天然流域此值很小,约为0.01~0.02。两江流域植被覆盖良好,不透水面积很小,本方案中取0.01;

$EX$ (表层自由水蓄水容量曲线的方次)取决于表层自由水蓄水条件的不均匀分布,一般在1.0~1.5之间。本方案中取1.2。

统计11场洪水的雨峰到洪峰出现的时间为11.7 h,因此可认为两江电站流域的流域汇流时间为12 h。根据块出口的位置,估计各块出口到断面出口的传播时间 $Ke$ ,以 $\Delta t=3$  h时段长进行河道分段,分别设置每块出口到断面出口的分段数 $n=Ke/\Delta t$ ,根据实际情况对 $n$ 进行取整。利用 $Xe$ 、 $n$ ,计算出参数 $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ ,进而计算出河槽汇流系数 $P_{mn}$ ,在预报中采用河槽汇流系数将入流过程演算到出口断面<sup>[15]</sup>。各块出口到断面出口的河道分段数如表4所示。

表4 各块出口到断面出口的河道分段数表

| 块名      | 东方红林场 | 红石林场 | 三道 | 松江 | 白头山口 | 奶头山 | 301电站 | 二道白河 | 两江坝上 |
|---------|-------|------|----|----|------|-----|-------|------|------|
| $Ke$    | 6     | 4    | 3  | 3  | 9    | 3   | 2     | 2    | 0    |
| 分段数 $n$ | 2     | 1    | 1  | 1  | 3    | 1   | 1     | 1    | 0    |

4.3.2 其余参数确定 其余参数通过粒子群算法(PSO)来率定。率定时由于采用的是次洪资料,低水点据较多,为突出高水部分的作用,目标函数采用误差的绝对值为目标函数<sup>[13]</sup>,即

$$BO = \sum_{i=1}^N \left\{ |M(i) - Q(i)| \right\} / \sum_{i=1}^N M(i)$$

式中: $BO$ 为目标函数值; $M(i)$ 与 $Q(i)$ 为实测与计算的洪水流量过程。

在新安江模型中,具有结构性约束 $KG+KI=0.7$ ,因此只需要率定其中一个即可。

河网汇流滞后时间 $L$ 可近似取各块河道汇流时间的一半。根据流域分块的数量,位置及面积,各块中河道汇流时间可设置为3 h,因此 $L$ 取值应为1.5,取整 $L$ 取1或2,扩大 $L$ 的取值范围为0~3,最终确定时可通过模拟洪水时峰现时间来定。 $L$ 对峰现时间影响非常明显,实际预报中可通过对 $L$ 的调整来控制峰现时间。

为需要率定的模型参数设置取值范围,见表5所示。

粒子种群规模设置为70,粒子维数为需要率定的参数个数为11个,加速因子 $c_1$ 与 $c_2$ 均为2,位

表5 模型参数取值范围

| 参数  | $K$ | $UM$ | $LM$ | $WM$ | $SM$ | $KG$ | $CG$  | $CI$ | $CS$ | $L$ | $X_e$ |
|-----|-----|------|------|------|------|------|-------|------|------|-----|-------|
| 最小值 | 0.5 | 5    | 60   | 100  | 10   | 0.05 | 0.95  | 0.5  | 0    | 0   | 0     |
| 最大值 | 1.2 | 20   | 90   | 180  | 50   | 0.65 | 0.998 | 0.9  | 1    | 3   | 0.5   |

置与速度之间的限制系数 $k$ 为0.729, 惯性权重 $w$ 为0.5, 迭代终止条件设为两次迭代目标函数之差小于 $10^{-5}$ 。由于粒子群算法中初始例子(即模型参数)的取值为在取值范围之间随机选择, 而由于新安江模型存在异参同效的问题, 因而会存在每次优选出的参数不一致的问题。本文先进行10次优化计算, 然后挑选其中使目标函数值最小的一组参数。

由于场次洪水较少, 选择用10场洪水进行率定, 1场洪水进行实际验证。按照《水文情报预报规范(GB/T 22482-2008)》进行评定。在率定时, 参数 $B$ 、 $C$ 、 $IM$ 、 $EX$ 按照给定值不参与优选率定; 分段数 $n$ 按照表4给定; 参数 $K$ 、 $UM$ 、 $LM$ 、 $SM$ 、 $KG$ 、 $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $L$ 、 $X_e$ 参与优选, 取值范围按照表5给定,  $KI$ 不参与优选率定, 其值为0.7- $KG$ 。

大中小型洪水的蒸散发、产流、分水源参数均相同, 不同的是汇流参数。一般而言, 大洪水的退水较快、洪水传播时间短、峰型更尖瘦。先对10场洪水一起进行参数率定, 再根据率定的参数, 固定蒸散发、产流、分水源参数( $K$ 、 $UM$ 、 $LM$ 、 $SM$ 、 $KG$ ), 分别选择大、中小、小洪水进行汇流参数 $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $L$ 、 $X_e$ 的率定, 最终得到的各种类型洪水的模型参数。

率定出的洪水模型参数值见表6, 洪水模拟结果见表7。

表6 洪水分级模型参数值

| 参数   | $K$ | $UM$ | $LM$ | $C$  | $WM$ | $B$ | $IM$ | $SM$ | $EX$ | $KG$ | $KI$ | $CG$ | $CI$ | $CS$ | $L$ | $X_e$ |
|------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|
| 大洪水  | 0.7 | 14   | 84   | 0.18 | 112  | 0.4 | 0.01 | 55   | 1.2  | 0.3  | 0.4  | 0.95 | 0.5  | 0.72 | 0   | 0.38  |
| 中小洪水 | 0.7 | 14   | 84   | 0.18 | 112  | 0.4 | 0.01 | 55   | 1.2  | 0.3  | 0.4  | 0.98 | 0.92 | 0.82 | 2   | 0.35  |
| 小洪水  | 0.7 | 14   | 84   | 0.18 | 112  | 0.4 | 0.01 | 55   | 1.2  | 0.3  | 0.4  | 0.98 | 0.92 | 0.91 | 2   | 0.313 |

表7 洪水分级模拟结果

| 洪水类型 | 洪水编号       | 起止时间                 | 雨量<br>/mm | 模拟<br>洪峰<br>/(m <sup>3</sup> /s) | 实测<br>洪峰<br>/(m <sup>3</sup> /s) | 洪峰误差<br>/% | 模拟<br>洪量<br>×10 <sup>6</sup> /m <sup>3</sup> | 实测<br>洪量<br>×10 <sup>6</sup> /m <sup>3</sup> | 洪量<br>误差<br>/% | 峰现<br>误差<br>(时段) | 确定<br>性系数 | 是否<br>合格 |
|------|------------|----------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------|------------------|-----------|----------|
| 大洪水  | 2010072820 | 2010/7/26 08—8/4 08  | 141.3     | 1260                             | 1370                             | -8.03      | 318.087                                      | 302.983                                      | 4.99           | 0                | 0.9098    | 是        |
|      | 2013081611 | 2013/8/14 08—8/20 08 | 178.4     | 2620                             | 2456                             | 6.68       | 348.451                                      | 350.728                                      | -0.65          | 0                | 0.9035    | 是        |
| 中小洪水 | 2000091723 | 2000/9/15 08—9/22 08 | 123.7     | 772                              | 680                              | 13.53      | 140.022                                      | 161.332                                      | -13.21         | -3               | 0.8237    | 是        |
|      | 2004072005 | 2004/7/18 08—7/24 08 | 78.6      | 241                              | 211                              | 14.22      | 57.3318                                      | 53.0199                                      | 8.13           | -1               | 0.7409    | 是        |
|      | 2004072814 | 2004/7/26 08—8/3 08  | 67.7      | 156                              | 289                              | -46.02     | 75.195                                       | 87.2683                                      | -13.83         | 3                | 0.352     | 否        |
|      | 2005070505 | 2005/7/1 08—7/11 08  | 86.5      | 234                              | 291                              | -19.59     | 151.869                                      | 143.042                                      | 6.17           | -2               | 0.4725    | 是        |
| 小洪水  | 2006062023 | 2006/6/20 08—6/22 08 | 21.5      | 33                               | 195                              | -83.08     | 3.1698                                       | 15.6935                                      | -79.8          | 3                | 0.5143    | 否        |
|      | 2007092111 | 2007/9/20 08—9/24 08 | 56.8      | 315                              | 356                              | -11.52     | 66.987                                       | 67.1841                                      | -0.29          | 2                | 0.8644    | 是        |
|      | 2014061911 | 2014/6/17 08—6/21 08 | 49.7      | 269                              | 330.3                            | -18.56     | 72.8406                                      | 66.6112                                      | 9.35           | 0                | 0.6569    | 是        |
|      | 2015080502 | 2015/8/2 08—8/9 08   | 64.8      | 184                              | 225.2                            | -18.29     | 72.0576                                      | 61.0767                                      | 17.98          | 0                | 0.5168    | 是        |

可以看出, 对两场大洪水的模拟效果较好。洪峰、洪量、峰现时间、确定性系数等指标均符合较好, 参数 $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $L$ 、 $X_e$ 均反映出大洪水退水较快, 峰现时间早, 峰型尖瘦等特征; 对一场中小洪水的模拟洪峰、洪量、峰现时间误差均在合格范围之内, 与大洪水模型参数相比, 参数 $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $X_e$ 均有一定程度的增大,  $L$ 有两个时段的滞后; 对于小洪水, 以洪峰、洪量进行评定, 7场小洪水中有2场不合格, 且合格洪水的确定性系数均不高, 参数 $CS$ 、 $X_e$ 均进一步增大, 表明小洪水的坦化程度更高。小洪水模拟精度不高原因有两点: 一是小洪水受人类活动影响较大, 例如中小电站蓄放水、塘坝蓄水等, 造成洪水过程与天然过程不同; 二是实测流量自身的误差, 水库的入库流

量是反推计算得到的，在入库流量计算时需要用到库水位，而在小洪水时库水位的测量误差更大，导致计算出的入库流量过程误差更大。进一步观察表7，发现各场洪水洪量误差小于洪峰误差，这也是符合预期的，对于小洪水，水库更关心洪量预报的准确性。

为了检验洪水分级对洪水预报模拟精度是否有提高，不对洪水进行分级，进行参数率定，得到的结果如表8，表9所示。

表8 洪水不分级模型参数值

| 参数   | <i>K</i> | <i>UM</i> | <i>LM</i> | <i>C</i> | <i>WM</i> | <i>B</i> | <i>IM</i> | <i>SM</i> | <i>EX</i> | <i>KG</i> | <i>KI</i> | <i>CG</i> | <i>CI</i> | <i>CS</i> | <i>L</i> | <i>Xe</i> |
|------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| 所有洪水 | 0.7      | 14        | 84        | 0.18     | 112       | 0.4      | 0.01      | 55        | 1.2       | 0.3       | 0.4       | 0.98      | 0.68      | 0.8       | 1        | 0.32      |

表9 洪水不分级模拟结果

| 洪水类型 | 洪水编号       | 起止时间                 | 雨量/mm | 模拟                            | 实测                            | 洪峰     | 模拟                                        | 实测                                        | 洪量     | 峰现   | 确定          | 是否 |
|------|------------|----------------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|--------|------|-------------|----|
|      |            |                      |       | 洪峰                            | 洪峰                            | 误差     |                                           | 洪量                                        | 误差     | 误差   | 性系          |    |
|      |            |                      |       | <i>I</i> /(m <sup>3</sup> /s) | <i>I</i> /(m <sup>3</sup> /s) | %      | <i>Q</i> ×10 <sup>6</sup> /m <sup>3</sup> | <i>Q</i> ×10 <sup>6</sup> /m <sup>3</sup> | %      | (时段) | 数 <i>DC</i> | 合格 |
| 大洪水  | 2010072820 | 2010/7/26 08—8/4 08  | 141.3 | 1000                          | 1370                          | -27.01 | 274.5738                                  | 302.983                                   | -9.38  | 2    | 0.7529      | 否  |
|      | 2013081611 | 2013/8/14 08—8/20 08 | 178.4 | 2000                          | 2456                          | -18.57 | 292.7826                                  | 350.7278                                  | -16.52 | 1    | 0.8621      | 是  |
| 中小洪水 | 2000091723 | 2000/9/15 08—9/22 08 | 123.7 | 969                           | 680                           | 42.5   | 211.9501                                  | 161.332                                   | 31.38  | -4   | 0.4954      | 否  |
|      | 2004072005 | 2004/7/18 08—7/24 08 | 78.6  | 463                           | 211                           | 119.43 | 93.6522                                   | 53.0199                                   | 76.64  | -2   | -3.5114     | 否  |
|      | 2004072814 | 2004/7/26 08—8/3 08  | 67.7  | 243                           | 289                           | -15.92 | 104.0148                                  | 87.2683                                   | 19.19  | 2    | 0.5629      | 是  |
| 小洪水  | 2005070505 | 2005/7/1 08—7/11 08  | 86.5  | 245                           | 291                           | -15.81 | 132.975                                   | 143.0427                                  | -7.04  | -3   | 0.6535      | 是  |
|      | 2006062023 | 2006/6/20 08—6/22 08 | 21.5  | 115                           | 195                           | -41.03 | 14.1426                                   | 15.6935                                   | -9.88  | 1    | -0.5546     | 否  |
|      | 2007092111 | 2007/9/20 08—9/24 08 | 56.8  | 383                           | 356                           | 7.58   | 58.4496                                   | 67.1841                                   | -13    | -1   | 0.6336      | 是  |
|      | 2014061911 | 2014/6/17 08—6/21 08 | 49.7  | 272                           | 330.3                         | -17.65 | 63.6552                                   | 66.6112                                   | -4.44  | -1   | 0.867       | 是  |
|      | 2015080502 | 2015/8/2 08—8/9 08   | 64.8  | 209                           | 225.2                         | -7.19  | 72.5058                                   | 61.0767                                   | 18.71  | -1   | 0.4756      | 是  |

与表6相比，表8中的汇流参数*CG*、*CI*、*CS*、*L*、*Xe*介于表6中各类型洪水的取值之间，这使得表8中的汇流参数对于大洪水来说坦化偏大，对于中小洪水及小洪水来说坦化偏小。在表9中，与表7相比，两场大洪水的洪峰、洪量模拟结果均偏小，且有1场不合格，这是汇流参数取值造成的大洪水结果坦化偏大；与表7相比，中小洪水的洪峰模拟结果均偏大，且不合格，7场小洪水的洪峰模拟结果也均偏大，有2场不合格，这是汇流参数取值造成的中小洪水、小洪水结果坦化偏小。10场洪水中总共有4场不合格，高于表7中的2场。由此可以看出洪水分级是可以提高洪水模拟精度的。

**4.4 洪水预报验证** 以2016083117号洪水进行模拟预报验证。2016/8/29 8时到9/3 8时，两江电站流域平均降水量117 mm，形成十年一遇洪水，洪峰流量980 m<sup>3</sup>/s，峰现时间为8/31 17时，洪量为163.2217×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>。最大降水出现在白头山口站，为146 mm，最小降水出现在两江坝上站，为64 mm。降水分布由流域上游到中下游依次递减。雨量等值面图3如下：

其中主降水过程于8/31 8时结束，平均降水111.1 mm。以2016/8/31 08时为预报时间，预热期为48 h，

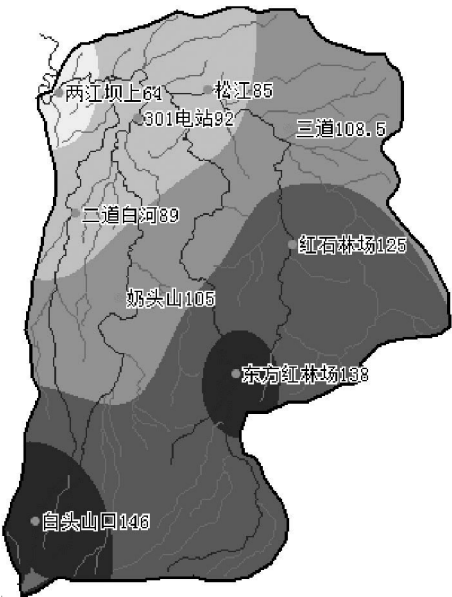


图3 2016083117号洪水雨量等值面

预见期为 72 h，输入预见期内的降水量进行模拟预报。根据降水量，选择中小洪水模型参数进行洪水预报，并采用实时校正方法对预报流量进行校正，成果统计如表 10 所示。需要注意的是，应当根据本场洪水的总降水量选择预报模型参数，而不是预报时间之前的雨量，因为在做预报时，往往降水还没有结束，用户需要根据天气预报情况输入预见期降水量。本场洪水降水量为 117 mm，因此选择中小洪水模型参数。

表 10 2016/8/31 8 时模拟预报成果统计

| 起止时间              | 实测洪峰<br>/(m <sup>3</sup> /s) | 预报洪峰<br>/(m <sup>3</sup> /s) | 洪峰误差<br>/% | 实测洪量<br>万/m <sup>3</sup> | 预报洪量<br>万/m <sup>3</sup> | 洪量误差<br>/% | 峰现误差<br>(时段) | 确定性系数<br>DC |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------|--------------------------|--------------------------|------------|--------------|-------------|
| 2016/8/29 8—9/3 8 | 980                          | 1030                         | 5.1        | 16122.17                 | 15749.27                 | -3.51      | 0            | 0.9891      |

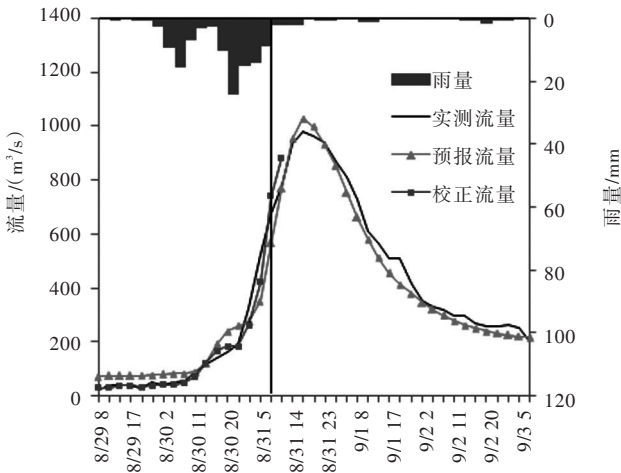


图 4 2016/8/31 8 时模拟预报成果

由表 10 和图 4 可以看出，本次洪水预报精度较高，提前 3 个时段预测出洪峰及峰现时间。其中洪峰误差为 5.1 %，洪量误差为 -3.51 %，确定性系数为 0.9891，峰现时间误差为 0。

为了验证实时校正模型对 2016/8/29 8 时—2016/9/3 8 时整场洪水的校正效果，采取从 2016/8/29 5 时—9/3 5 时，每个 1 个时段滚动预报的方法，取预报时间下一个时段的预报流量、校正流量组成预报流量序列，与实测流量进行比较。统计的误差成果如表 11 及图 5 所示。

表 11 2016083117 号洪水模拟预报成果统计

| 项目   | 洪峰/(m <sup>3</sup> /s) | 洪峰误差/% | 洪量万/m <sup>3</sup> | 洪量误差/% | 确定性系数 DC |
|------|------------------------|--------|--------------------|--------|----------|
| 预报流量 | 1030                   | 5.1    | 16182.18           | -8.58  | 0.9603   |
| 校正流量 | 1000                   | 2.04   | 16266.96           | -3.38  | 0.9814   |

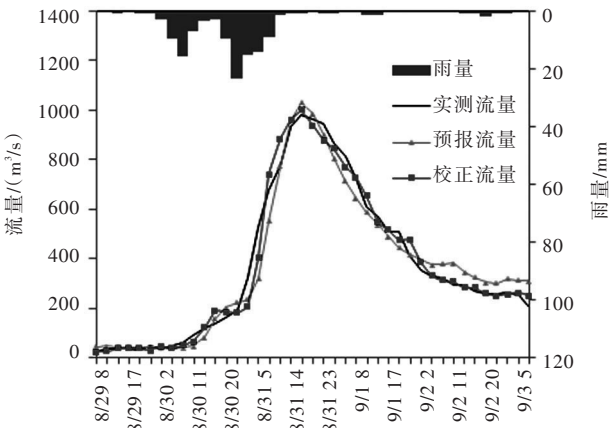


图 5 2016083117 号洪水模拟预报成果

由表 11 及图 5 可以看出,校正流量效果明显比预报流量好,表明本方案采用的实时校正算法是有效的,在实际运行中可以提高预报精度。

## 5 结论

本文将两江电站洪水分为大、中、小洪水 3 个级别,采用泰森多边形法进行流域分块,利用三水源新安江模型、实时校正算法编制了基于洪水分级的两江电站的洪水预报方案。方案中采用了人工经验和粒子群算法(PSO)相结合的方法率定了模型参数,预报时根据降水量自动选择模型参数。采用了 2000—2015 年洪水资料率定模型参数,采用 2016 年洪水资料对预报模型、实时校正算法进行了验证,主要结论为:

(1)从模拟效果上看,洪水分级预报方案中考虑了大、中、小洪水的汇流参数差异问题,模拟效果优于不分级的洪水预报方案;(2)大、中、小洪水对应的新安江模型的汇流参数有较大差异,随着洪水量级的减小,参数  $CG$ 、 $CI$ 、 $CS$ 、 $L$  增大,  $X_e$  减小;(3)本文采用的实时校正算法能有效提高洪水预报的精度。但在方案使用过程中,有两点需要注意:第一,流域发生的洪水量级不仅仅与降水量有关,也与流域前期土壤含水率、降水强度、流域水库蓄水情况等有关,而本文中仅以降水量作为洪水参数的选择条件,是否完全适用,在实际应用中还需进一步检验;第二,实时校正能提高预报精度,但是使用时需保证实测流量的准确性。电站的实测流量均为入库反推计算得到,由于水位测量误差不可避免的会出现锯齿现场,计算时段越短越严重。如果锯齿现象严重,则实时校正模型识别的参数不准确,导致校正效果变差。因此在使用实时校正时需观察实测流量的情况,如果锯齿现象严重,需对其进行平滑处理。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 张露,张佳宾,梁国华,等.基于 API 模型与新安江模型的察尔森水库洪水预报[J].南水北调与水利科技,2015,13(6):1056-1059.
- [ 2 ] 陈立华,冯世伟,邓芳芳.漓江流域上游洪水预报方案研究与应用[J].广西大学学报:自然科学版,2016,41(4):1298-1305.
- [ 3 ] 张云海.安康水电站入库洪水预报方案的研究[J].水力发电,2000(11):9-11.
- [ 4 ] 姜文,廖文凯.柳江柳州水文站洪水预报方案[J].人民珠江,2012(4):7-11.
- [ 5 ] 赵人俊.流域水文模拟-新安江模型与陕北模型[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [ 6 ] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization[C]//Proceeding of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Piscataway, NJ, IEEE Service Center, 1999.
- [ 7 ] 张恭肃,等.洪水预报系统[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [ 8 ] 汤成友,官学文,张世明.现代中长期水文预报方法及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [ 9 ] 赵人俊.流域水文模型参数的客观优选法[J].水文,1993(4):21-24.
- [ 10 ] 李致家,周轶,哈布哈奇.新安江模型参数全局优化研究[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(4):376-379.
- [ 11 ] 陆桂华,郦建强,赵鸣燕.水文模型参数优选遗传算法的应用[J].水利学报,2004(11):85-90.
- [ 12 ] 江燕,胡铁松,桂发亮,等.粒子群算法在新安江模型参数优选中的应用[J].武汉大学学报:工学版,2006,39(4):14-17.
- [ 13 ] 水利部水文局,长江水利委员会水文局.水文情报预报技术手册[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [ 14 ] 郭金忠,郑金萍,马元丹,等.长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态[J].生态学报,2006,26(9):2855-2862.
- [ 15 ] 雒文生,宋星原.洪水预报与调度[M].武汉:湖北科学技术出版社,2000.

(下转第 52 页)

- [ 8 ] 高学平,任庆钰.多层孔型取水口下泄水温试验研究[J].水力发电学报,2015(5):103-107.
- [ 9 ] 高学平,张少雄,刘际军,等.浮式管型取水口下泄水温试验研究[J].水力发电学报,2013(2):163-167.
- [ 10 ] HAN Y, GAO X. Similarity theory of withdrawn water temperature experiment[J]. The Scientific World Journal, 2015: Article ID 429781.

## Investigation on the response of discharged water temperature to operation mode of the temperature control curtain

GAO Xueping, SONG Qinglin, SUN Bowen

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A temperature control curtain could effectively mitigate the negative effects of discharged low temperature water on the river eco-environment downstream. However, the response of discharged water temperature to the operation mode of temperature control curtain and its formation mechanism are lacking. To investigate the effect of operation mode of temperature control curtain on the discharged water temperature, experiments were conducted based on a thermally stratified reservoir. Then, a 3-D numerical model was applied to analyze flow laws and explore the formation mechanism of discharged water temperature. The results indicated that the operation mode of surface overcurrent significantly improves the discharged water temperature. When running the operation mode of surface and bottom overcurrent, the high temperature water and low temperature water flowed from top and bottom of the curtain owing to the barrier effect of curtain, and thus the discharged water temperature depended on the mixing ratio of the high temperature water to the low temperature water. These findings are meaningful for the operation of temperature control curtain in thermal stratified reservoirs.

**Keywords:** thermally stratified reservoir; the operation mode of the temperature control curtain; discharged water temperature; experiment; numerical simulation

(责任编辑:李福田)

---

(上接第44页)

## Study on flood forecasting scheme of Liangjiang Hydropower Station based on flood classification

LI Kuang<sup>1</sup>, LIU Kexin<sup>1</sup>, LIU Jianjun<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Jilin Province Energy Power Group Co., Ltd. Liangjiang hydropower company, Yanbian 133600, China)

**Abstract:** According to the issue that the flood forecasting scheme has no consideration of flood magnitudes, taking the Liangjiang hydropower station as the example, this paper divides the flood into three grades: large flood, medium flood and small flood, and it adopts Xin'anjiang Model and real-time correction method to make the flood forecast scheme. Firstly, the Tyson polygon method is used to delineate the basin, and then the model parameters of different grades of floods are calibrated and verified using artificial experience and the particle swarm optimization method with the data of 2000-2016, and it also takes the average rainfall of the basin as the conditions of selecting model parameters. The results show that the parameters are suitable for different grades of floods, and the real-time correction method adopted can improve the prediction accuracy.

**Keywords:** liangjiang hydropower station; flood forecasting; flood classification; xin'anjiang model; PSO; real-time correction

(责任编辑:韩 昆)