

文章编号:0559-9350(2019)02-0209-09

水库实时防洪风险计算及库群防洪库容分配互用性分析

顿晓晗^{1,2}, 周建中^{1,2}, 张勇传^{1,2}, 陈 璐^{1,2}, 王权森^{1,2}, 戴 领^{1,2}

(1. 华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 数字流域科学与技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 水库防洪调度风险分析是实时防洪决策的重要环节和依据。为评估水库实时防洪风险, 本文提出一种基于长系列历史实测径流资料的防洪库容频率曲线推算方法, 以此为基础建立了水库实时防洪调度风险分析模型。进一步, 从三峡水库实际防洪调度需求出发, 分析了三峡水库汛期不同时段实时防洪风险, 研究了上游溪洛渡、向家坝水库配合三峡水库进行联合调度时防洪库容频率曲线的变化, 以及上下游水库间防洪库容分配及其互用性问题。研究表明, 推求的防洪库容频率曲线能帮助判断当前防洪情势, 合理利用防洪库容互用性可有效降低三峡水库防洪风险。

关键词: 防洪库容; 风险分析; 频率曲线; 联合防洪调度; 防洪库容分配与互用性

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20180828

1 研究背景

水库防洪调度风险分析对于水库安全运行及综合利用具有重要意义, 而水库调度受气象水文^[1]、河道汇流^[2]和水库运行等多种不确定性因素的影响, 并涉及到上下游之间和多功能之间的利害冲突, 是一个复杂的决策优化问题。现行的防洪调度风险分析主要研究调度过程中存在的预报误差、水位库容曲线和调度滞时等水文水力不确定性对防洪调度风险的影响, 以此帮助决策者更准确地判断当前面临的风险, 进而适时调整调度方案, 保证水库的安全运行和提高防洪效益。

刘艳丽等^[3]利用拉丁超立方体抽样方法研究了调度滞时和洪水预报误差多因素对于风险率的影响; Diao等^[4]研究了不同调度情景下水库防洪风险率的变化; 邹强等^[5]提出了在防洪过程中设定洪水资源利用调度的启用条件以及相机控制下泄流量等措施, 以提高水库防洪能力并降低风险。而由于水位库容曲线、调度滞时等不确定性主要由水力设备的系统误差和主观决策引起的, 很难予以较大改进, 因而预报不确定性逐渐成为研究的重点^[6]。姜树海等^[7]论证了水文预报精度对水库防洪预报调度风险率的影响; 钟平安等^[8]分析了洪水预报误差分布对风险率的影响; Chen等^[9]和Yan等^[10]研究了水文预报的不确定性对实时调度的影响; 李英海等^[11]结合洪水预报误差进行风险分析, 计算调度方案风险率; 刘招等^[12]提出水库防洪预报调度“实用风险”概念方法, 以水文不确定性作为显著风险因素研究风险率; 周如瑞等^[13]基于贝叶斯定理与洪水预报误差, 研究了汛期水位动态控制域上限的风险。

以上研究主要分析单一场次洪水或典型设计洪水过程中各种不确定性对防洪调度风险的影响, 而未从时间角度分析水库防洪调度风险在整个汛期的变化过程, 且未充分考虑水库群联合防洪调度对上下游水库防洪风险的影响。鉴于此, 本文在现有水库防洪调度风险定义及研究的基础上, 提出一种基于长系列历史实测径流的防洪库容频率曲线推算方法, 进而根据该曲线确定汛期实时防洪调

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91547208); 国家自然科学基金项目(51579107)

作者简介: 顿晓晗(1994-), 硕士生, 主要从事水电能源系统优化运行研究。E-mail: 1220892681@qq.com

通讯作者: 周建中(1959-), 教授, 博士生导师, 主要从事水电能源复杂系统优化先进理论与方法研究。

E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn

度风险或设计标准下所需实时防洪库容。结合三峡水库实际情况,建立三峡单库风险分析模型及溪洛渡、向家坝与三峡联合调度风险分析模型,分析三峡水库在汛期不同时段的风险,以及在不同的调度情境下所得库容频率曲线的变化情况,为水库防洪调度提供决策依据。

2 水库防洪调度风险分析模型

设6月1日—9月30日为汛期。以当前日期至汛期末为一调度期,即将汛期按照6月1日—9月30日,6月2日—9月30日等122个时段分别计算,根据下游安全泄量对各年份同一调度期洪水进行调洪演算,得到逐年所需拦蓄洪量数据,通过排频计算,绘制该调度期的防洪库容频率曲线并拟合相应的防洪库容系列分布函数,最终得到汛期122条曲线,从而进行防洪调度风险分析计算。对于以日为调度时段的水库,可提供实时风险的参考信息。本文只选取较具有代表性的6月1日—9月30日、7月1日—9月30日、8月1日—9月30日、9月1日—9月30日4个时段的库容频率曲线进行分析。

2.1 水库调洪计算 多功能运用水库总是以防洪安全为某一目标,防洪安全又以相应于调度规程的安全泄量和防洪标准为条件。若防洪控制点安全泄量表示为 Q_s ,则过流量大于等于 Q_s 的事件称为风险事件,防洪风险率 $p = \text{prob}(Q > Q_s)$ 。

考虑下游防洪安全,采用固定泄量调度方式对水库进行调洪模拟计算,其具体计算步骤如下:

(1)根据下游防洪控制点的防洪标准及区间来水过程求出上游水库下泄流量,即确定水库固定泄量 Q_s 。

(2)对水库 K 年历史径流资料汛期洪水过程以固定泄量为标准分别进行调洪模拟计算。若来水小于固定泄量 Q_s ,则按照来水下泄;若来水高于固定泄量,则按照固定泄量下泄,可得到整个汛期内水库拦蓄洪量,其中调度步长为6h,以日为单位计算拦蓄量。如图1所示,以水库第 j 年汛期来水序列($Q_{ij}, i=1, \dots, 122$)为例,水库固定泄量为 Q_s ,则从汛期1~122时段,各时段所需拦蓄的洪量为:

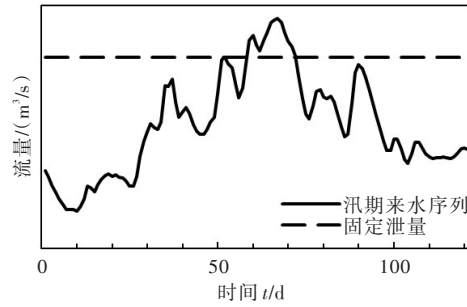


图1 固定泄量调度

$$v_{ij} = \begin{cases} 0, & Q_{ij} \leq Q_s \\ \frac{(Q_{ij} - Q_s) \times t \times 3600}{1 \times 10^8}, & Q_{ij} > Q_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, t 为每时段时长,单位为h。

(3)结合3d短期洪水预报结果,对入库洪水进行预泄,即提前加大下泄流量,腾出部分防洪库容。当前来水不超过 Q_s ,但短期预报洪水超过 Q_s 时,水库将超出的洪量提前下泄,预泄洪量值为 $v_{f,ij}$:

$$v_{f,ij} = \begin{cases} 0, & Q_{f,ij} \leq Q_s \\ \frac{(Q_{f,ij} - Q_s) \times t \times 3600}{1 \times 10^8}, & Q_{f,ij} > Q_s \end{cases} \quad i=1, \dots, 122; j=1, \dots, K \quad (2)$$

(4)以水库汛期来水系列为输入,当前时段至汛期末拦蓄洪量为输出,取122个时段计算拦蓄洪量。有代表性的4个时段所需拦蓄的洪量分别为:

$$V_{1,j} = \sum_{i=1}^{122} v_{ij} - \sum_{i=1}^{122} v_{f,ij} \quad (3)$$

$$V_{2,j} = \sum_{i=31}^{122} v_{ij} - \sum_{i=31}^{122} v_{f,ij} \quad (4)$$

$$V_{3,j} = \sum_{i=62}^{122} v_{ij} - \sum_{i=62}^{122} v_{f,ij} \quad (5)$$

$$V_{4,j} = \sum_{i=93}^{122} v_{ij} - \sum_{i=93}^{122} v_{f,ij} \quad (6)$$

式中, $V_{1,j}$ 、 $V_{2,j}$ 、 $V_{3,j}$ 、 $V_{4,j}$ 分别为保证下游安全情况下, 水库在第 j 年 6 月 1 日、7 月 1 日、8 月 1 日、9 月 1 日至汛末拦蓄的洪量。

(5) 以系列拦蓄洪量为参考, 认为各个时段所拦蓄洪量即为保证下游安全情况下水库在时段初期所需预留的防洪库容。对 K 年实测径流数据重复 (2) — (4) 步, 可得到 K 年 4 个时段的防洪库容数据系列 $V_{a,j}$, $a=1, \dots, 4$; $j=1, \dots, K$ 。

2.2 所需防洪库容频率曲线 根据上述计算得到了 K 年内 4 个时段水库所需防洪库容序列。对每个时段中 K 个数据从大到小排序并计算经验频率, 其中第 m 项经验频率为:

$$P_m = \frac{m}{n+1} \quad m=1, \dots, K \quad (7)$$

水文学中常用正态分布类、 Γ 分布类、极值分布类、Wakeby 分布类、Logistic 分布类和 Pareto 分布类^[14]等多种概率分布进行频率分析。对上述所得经验点据进行多种线型的适线分析, 经研究, 选择极值分布类中的 Weibull 分布^[15]进行曲线拟合, 并采用矩法、极大似然法进行参数估计, 拟合结果选用离差平方和最小准则 (OLS 准则) 与赤池信息准则 (Akaike Information Criterion, AIC)^[15]进行评价, 进而选择最优拟合方案。

Weibull 分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{a}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{a-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^a\right] \quad (8)$$

式中, $0 < x < \infty$; $a > 0$; $b > 0$ 。

Weibull 分布的分布函数由下式给出:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{b}\right)^a\right] \quad (9)$$

(1) 矩法估计参数。矩法是指利用样本矩代替 (或估计) 总体矩, 并通过矩和参数之间的关系式, 来估计频率曲线统计参数的一种方法^[16]。

Weibull 分布矩法估计参数方程为:

$$b = \bar{x} / \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{a}\right)\right] \quad (10)$$

$$\Gamma\left(1 + \frac{2}{a}\right) = \frac{S^2}{b^2} + \frac{\bar{x}^2}{b^2} \quad (11)$$

式中: $\bar{x}$ 为样本均值; S^2 为样本方差。

(2) 极大似然法估计参数。极大似然估计法^[16]原理是固定样本观测值, 挑选适当的参数使得样本出现的概率为最大。设 $X = (X_1, \dots, X_n)$ 系列是符合 Weibull 分布的容量为 n 的一个样本。Weibull 分布参数的极大似然估计方程组为:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{b}\right)^a \sum_{i=1}^n x_i^a - n = 0 \\ \frac{n}{a} + \sum_{i=1}^n \lg x_i - \left(\frac{1}{b}\right)^a \sum_{i=1}^n x_i^a \lg x_i = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解方程组 (12) 可得到参数 a 、 b 。

(3) 拟合优度评价。对上述方法得到的不同参数组合进行拟合优度评价, 判定 Weibull 分布函数与防洪库容数据趋势是否吻合。为选择更优的参数组, 选用我国水利水电设计洪水计算规范

(SL44-93)中的 OLS 准则及 Guide for Determining Flood frequency analysis 中的 AIC 准则, 进行线型拟合优度评价。其中 OLS 和 AIC 可以表达为:

$$OLS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ei} - p_i)^2} \quad (13)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ei} - p_i)^2 \quad (14)$$

$$AIC = n \ln(MSE) + 2m \quad (15)$$

式中: n 为样本容量; p_e 为上述库容序列经验频率; p 为库容序列对应的理论频率, 有 $p = 1 - F(x)$; m 为估计参数的数量。

2.3 时段防洪风险分析 以某一时段所需防洪库容频率曲线为例, 由上述内容确定最优参数组 $\{a, b\}$ 。风险率计算流程如图 2 所示, 可得水库此目标时段初预留防洪库容为 V_f 时下游防洪控制点的风险率:

$$p = 1 - F(V_f) = \exp \left[- \left(\frac{V_f}{b} \right)^a \right] \quad (16)$$

p 为 V_f 在库容频率曲线中对应的理论频率, 也称超过概率, 则相应的防洪安全保证率为 $R = 1 - p$ 。相对地, 按照水库设计标准的防洪安全保证率 R , 即对应风险率 p_s , 可在所需防洪库容频率曲线中查出需预留的防洪库容 V_f 。由图 3 可知, 若水库总防洪库容为 V_z , 则发电等其它部门可用库容为 $V_K = V_z - V_f$, 在实际运行过程中,

结合时段初期水库实际蓄水情况, 若此时水库剩余防洪库容为 V_1 , 对应的防洪风险率 p 高于规定设计标准的风险率 p_s , 即水库预留防洪库容偏小, 水库应适时加大下泄, 腾出部分防洪库容, 降低防洪风险率, 保证下游安全; 若此时水库剩余防洪库容为 V_2 , 对应的防洪风险率 p 低于设计标准的风险率 p_s , 结合发电、蓄水等要求, 水库可适当加大拦蓄量, 维持防洪风险率不高于 p_s 。

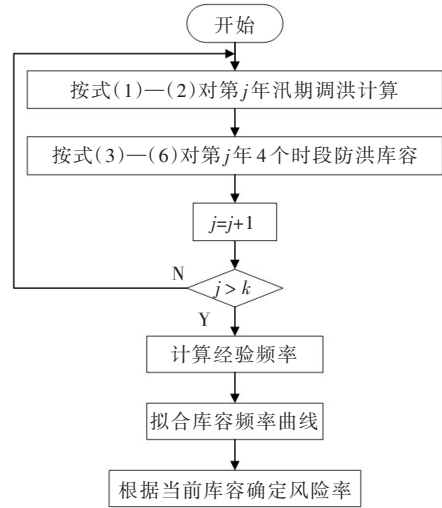


图2 风险率计算流程

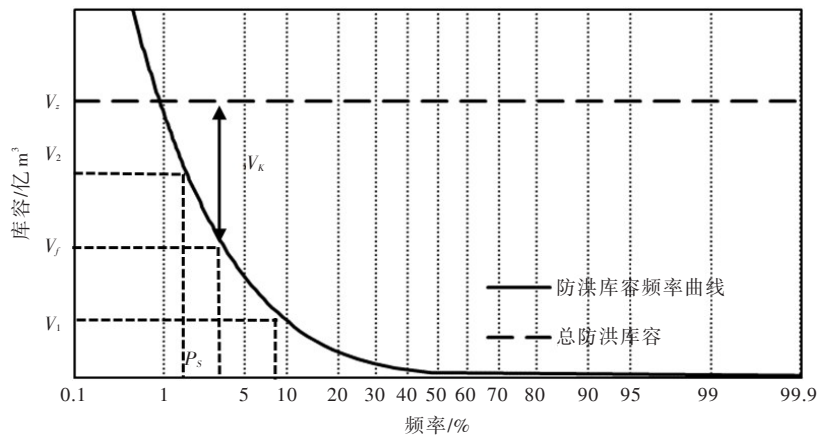


图3 实时风险率计算

2.4 时变防洪库容计算 理论上, 按照上述方法拟合 4 个时段所需防洪库容频率曲线如图 4。若汛期按同一安全保证率 R 预留防洪库容, 则随着调度期逐渐缩短, 所需预留库容 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 逐渐减少。

由上述分析可知, 随调度期缩短, 频率曲线逐渐下移, 理论上所需防洪库容逐渐减少, 不同时段所需防洪库容频率曲线对应同一频率的库容也随之减少。对于整个汛期而言, 防洪、发电及蓄水等时变需求使得水库在不同时期可能需要满足不同的安全保证率, 所需防洪库容是随时间实时变化的。

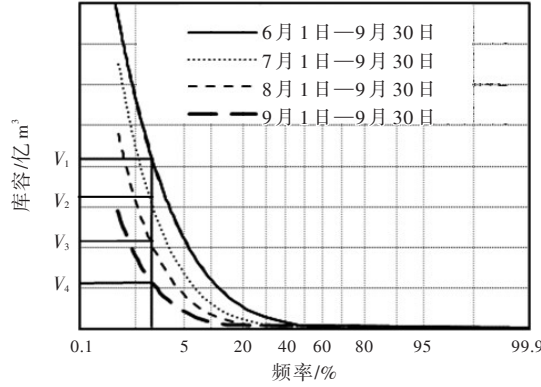


图4 4个时段所需防洪库容频率曲线

3 梯级水库联合防洪调度

梯级水库联合防洪调度在一定程度上可以减少下游水库防洪压力,降低水库防洪风险。综合考虑流域洪水发生规律、同步性、地区组成、防洪需求等,探究上游水库(群)与下游水库(群)之间防洪库容的互用性^[17],建立梯级水库联合防洪调度风险分析模型,进而分析梯级水库联合调度时下游水库风险形势变化情况。

3.1 联合调度模型 联合调度过程中,上游水库考虑各防洪控制点安全流量,按照不超过各控制点安全泄量的最大泄量控制下泄。按照先上游再下游

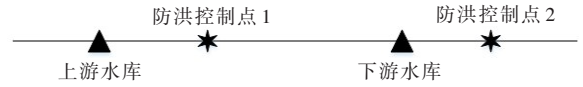


图5 梯级水库概化

的拦蓄原则,建立联合防洪调度体系。如图5所示,上游水库根据防洪控制点1的安全泄量控制下泄,拦蓄部分超额洪量,根据上游水库至下游水库的河道演进主要节点,将拦蓄量进行马斯京根演进至下游水库,下游水库的天然入流减去上游水库拦蓄量的马斯京根演进结果即为下游水库真实入流,再按照防洪控制点2的安全流量控制下泄即可得到时段内所需防洪库容。若上游水库拦蓄洪量为 $Q_S = [Q_{S,1}, Q_{S,2}, \dots, Q_{S,n}]$, Q_S 演进至下游水库后的结果为 $Q_{SX} = [Q_{SX,1}, Q_{SX,2}, \dots, Q_{SX,n}]$,下游水库天然来水为 $Q_X = [Q_{X,1}, Q_{X,2}, \dots, Q_{X,n}]$,则梯级水库联合调度时下游水库实际入流为:

$$Q'_X = [Q'_{X,1}, Q'_{X,2}, \dots, Q'_{X,n}] = [Q_{X,1}, Q_{X,2}, \dots, Q_{X,n}] - [Q_{SX,1}, Q_{SX,2}, \dots, Q_{SX,n}] \quad (17)$$

式中 n 为计算时段数。调洪演算时,分别计算各年份各梯级水库拦蓄洪量。

3.2 防洪库容的上移 梯级水库群联合调度时,实际是上游水库承担部分防洪任务,减轻下游防洪压力,可抽象为适度降低上游防洪标准,防洪库容部分上移。而受上下游洪水遭遇、洪水传播与流量演进等因素的影响,上游水库拦蓄洪量与下游水库减少的拦蓄洪量比例不一定为1:1,因此可进行梯级水库防洪库容互用性研究。防洪库容互用性是指若水库群有共同的防洪任务或目标,实时调度中,针对同一场洪水利用不同水库的防洪库容达到相同防洪效果的性质^[17]。相当于将下游水库部分防洪库容上移到上游水库,但上移比例还需深入研究。

将 K 年上下游同期径流系列按2.1节所述方案进行调洪计算,流量自上而下由上游水库经过各个节点演算至下游水库,以整个汛期作为调度期,第 k 年汛期时段内上游水库拦蓄洪量 ΔV_s^k ,下游水库拦蓄洪量 ΔV_{SX}^k ,不动用上游水库的防洪库容时下游水库按照天然来水调度需拦蓄洪量为 ΔV_{TX}^k ,则上游水库拦蓄后下游水库汛期时段内减少的拦蓄量为:

$$\Delta V_X^k = \Delta V_{TX}^k - \Delta V_{SX}^k \quad (18)$$

则上下游水库间的防洪库容互用比例系数为:

$$G_K = \frac{\Delta V_s^k}{\Delta V_X^k} \quad (19)$$

根据互用比例系数,可在保证上下游防洪安全的前提下使梯级水库防洪库容分配合理,对发

电、供水等部门也可以提供更好的优化空间。

3.3 联合防洪调度风险计算 图6为联合防洪调度风险率计算流程图。对上述 K 年实测径流数据调洪演算得到下游水库4个时段防洪库容序列 $V'_{a,i}$, $a=1, \dots, 4$, $i=1, \dots, K$ 。对 $V'_{a,i}$ 系列排频计算并进行曲线拟合, 与单库调度结果比较可得上游水库对下游的防洪风险削减率。

4 实例分析

4.1 研究对象概况 三峡水利枢纽是长江上游水库群最末一级, 坝址以上流域面积约100万 km^2 , 是长江流域防洪系统中关键性控制工程, 水库防洪库容221.5亿 m^3 。三峡工程的建成对于长江流域有效调控洪水、提高中游各地区防洪能力意义重大, 可使荆江河段达到100年一遇的防洪标准, 同时大幅减少城陵矶附近分蓄洪区的分洪几率和分洪量。

溪洛渡、向家坝是长江流域防洪体系中的重要工程, 两库联合防洪库容共计55.53亿 m^3 , 其拦蓄效果直接作用于三峡水库。综合考虑长江中上游各水库流域控制面积、地区组成、水库预留防洪库容等, 认为溪洛渡、向家坝梯级水库对三峡水库入库洪水过程具有持续、稳定的削减作用, 对长江中下游防洪形势有较大影响^[17]。选取三峡水库1882—2011年130年历史径流数据以及溪洛渡、向家坝、三峡梯级水库同期57年实测径流数据, 分别建立单库以及多库防洪调度模型, 计算得到防洪库容序列, 拟合防洪库容频率曲线, 进行风险分析, 其中三峡单库以1882—1991年数据建模, 1992—2011年数据验证。

4.2 三峡单库防洪调度结果分析 三峡水库在确保下游安全的情况下, 按照固定泄量调度。根据调度规程, 三峡调洪计算时需保证荆江安全。荆江河段的安全流量为56 700~60 600 m^3/s , 考虑区间来水, 应控制水库下泄流量最大不超过55 000 m^3/s 。调洪计算过程中洪峰流量和过程得到有效控制, 同时获得三峡水库4个时段所需防洪库容序列, 曲线拟合结果详见图7。其中, 实测序列中部分年份洪峰流量并未超过55 000 m^3/s , 拦蓄洪量为0。且随着调度期缩短, 调度期内拦蓄洪量大幅减少, 8月之后可拟合点数减少, 一定程度上影响了拟合的精度, 在历史径流数据系列足够长的情况下, 可提高精度。实测系列洪水洪峰大多发生在7月之后, 拦蓄洪量集中在7月和8月, 因此6月1日频率曲线与7月1日曲线相差不大, 这也侧面反映了在汛期前期水库需长期保留较大的防洪库容, 中期逐渐减少。

频率曲线中1%频率对应的防洪库容值分别为67亿、67亿、61亿和32亿 m^3 。这意味着按照当前所得库容频率曲线, 三峡水库在6月1日预留67亿 m^3 的防洪库容, 有1%的可能性当年所需拦蓄洪量会超过67亿 m^3 , 防洪风险率为1%。随着调度总时长减小, 所需预留防洪库容减少, 曲线可拟合点数减少, 但后期精度需求也逐渐降低, 因此, 本方法适用于具有长系列历史数据的流域, 数据序列越短, 精度越低。对于实测数据较短的流域, 若实测年份内发生过大洪水, 则可用于计算库容频率曲线, 所得曲线对汛期初期防洪调度较有参考价值。对三峡1992—2011年验证期数据调洪演算, 得到20年内4个时段所需最大的防洪库容分别为24.68亿、24.68亿、24.2亿和4.28亿 m^3 , 均小于1%频率对应的预留防洪库容值, 证明根据库容频率曲线得到的一定保证率下的预留防洪库容能够满足防洪要求。

水库根据汛限水位进行防洪调度时, 汛末可能面临无法蓄水至正常水位的困境。根据此研究结

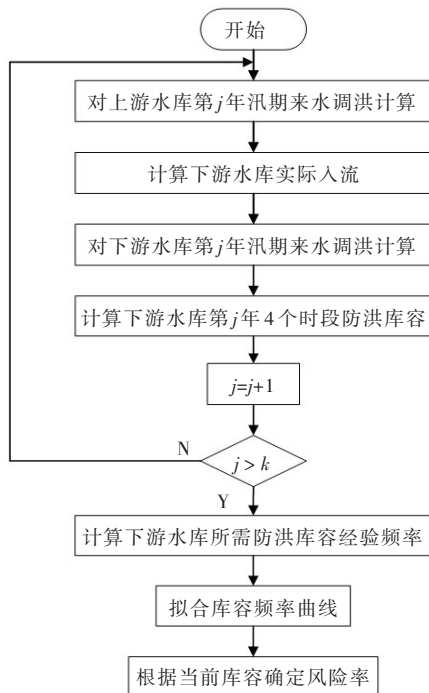


图6 联合防洪调度风险率计算流程

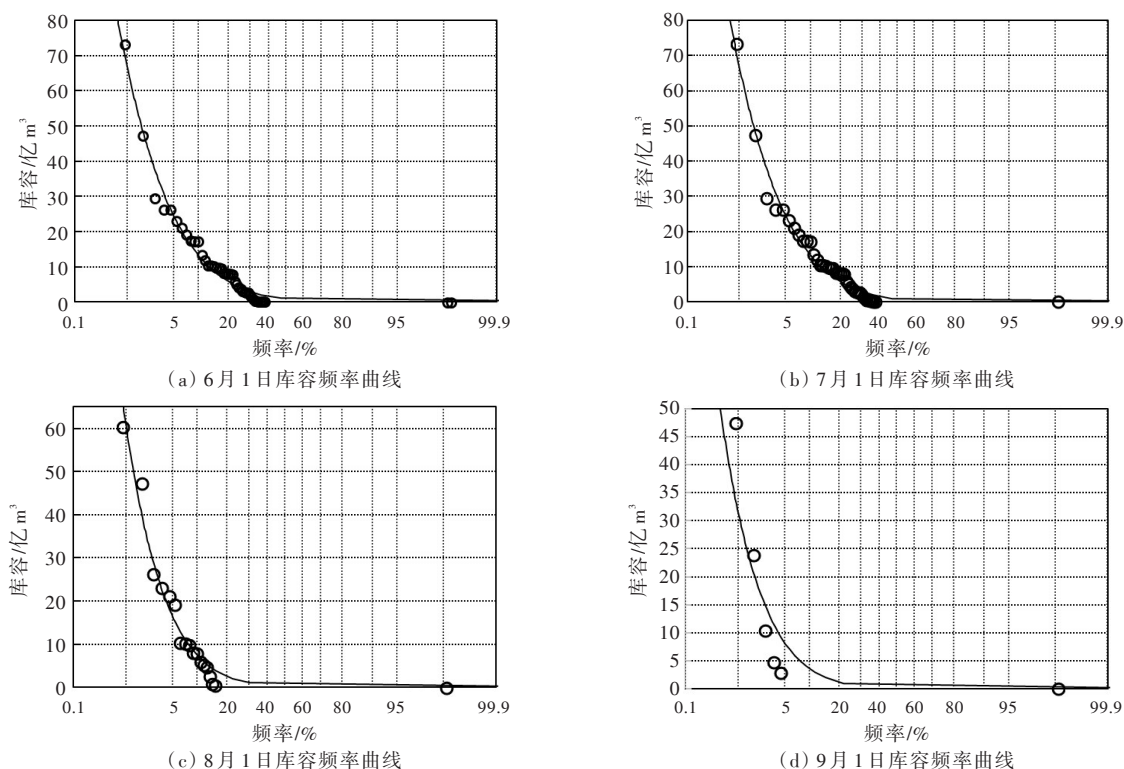


图7 各时段所需防洪库容频率曲线

果可适当调整汛期后期预留防洪库容以达到发电、蓄水等目的。所得库容频率曲线可用于实时防洪调度风险评估，根据得到的防洪库容频率曲线，由所要保证的频率，可查出在保证下游安全的前提下，当前时段理论上所需预留的防洪库容，与水库此时实际库容相比较，做出相应决策。同时，根据当前水库所剩余的防洪库容，可通过曲线查找对应的频率，进而为水库的防洪调度运行提供参考。

4.3 梯级水库防洪调度结果分析 对溪洛渡、向家坝、三峡 1954—2010 年共 57 年同期实测数据调洪计算，研究溪洛渡、向家坝水库与三峡水库防洪库容互用性及上游水库对三峡防洪风险的影响。根据长江中下游联合防洪调度方式，当长江中下游发生大洪水时，运用溪洛渡、向家坝水库适时拦洪错峰，控制李庄(宜宾防洪控制站)、朱沱(泸州防洪控制站)、寸滩(重庆防洪控制站)的洪峰流量不超过 51 000、52 600 和 83 100 m^3/s ，并加入三峡水库流量约束，上游水库群适时削减洪峰，拦蓄超额洪量，减轻三峡水库的防洪压力。调度得到溪洛渡、向家坝水库与三峡水库汛期拦蓄洪量系列数据，对二者进行防洪库容互用性分析见图 8(a)，比较不动用和动用溪洛渡、向家坝库容时三峡防洪风险的变化情况。其中部分年份拦蓄洪量小于 5 亿 m^3 ，数据误差较大，选择较有代表性的 7 年分别计算互用比例。不同调度方案下梯级水库拦蓄洪量见表 1，继而计算溪洛渡、向家坝梯级水库与三峡水库防洪库容互用比例见图 8(b)，总体上溪洛渡、向家坝水库与三峡水库防洪库容互用比例在 1.24 左右，类似 1998 年的多峰洪水互用比例更高，且互用比例与洪水级别、调度规则有关，不同的洪水过程所得比例会有所变化。说明上游水库对三峡入库洪水削减作用明显，能有效降低三峡水库防洪风险。

表 2、表 3 分别为三峡单库调度和梯级水库联合调度时三峡水库 6 月 1 日防洪库容频率序列。由于梯级水库同期实测径流系列较短，相对于三峡水库 110 年系列，此系列防洪库容值偏大，拟合频率曲线如图 9，图中，2% 频率对应的防洪库容分别为 66 亿和 14 亿 m^3 ，表明上游水库承担部分防洪任务

表 1 不同调度方案下梯级水库拦蓄洪量 (单位: 亿 m^3)

时间	1954	1966	1974	1981	1989	1998	2010
不动用上游水库时三峡拦蓄洪量	73.26	10.41	7.89	29.51	9.64	24.68	16.33
动用上游水库时三峡拦蓄洪量	18.13	0.26	0.76	14.18	0.70	1.82	6.14
溪洛渡、向家坝拦蓄洪量	61.34	14.69	9.50	17.71	11.66	48.38	12.53

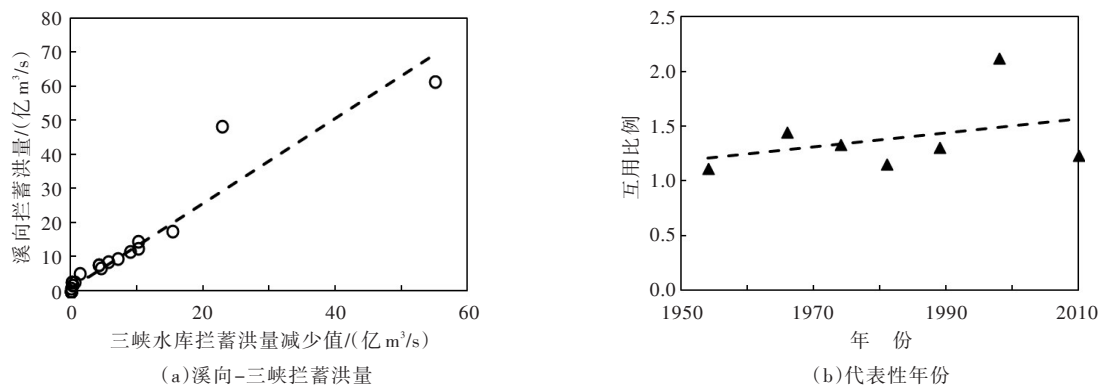


图8 溪洛渡、向家坝与三峡水库防洪库容互用比例

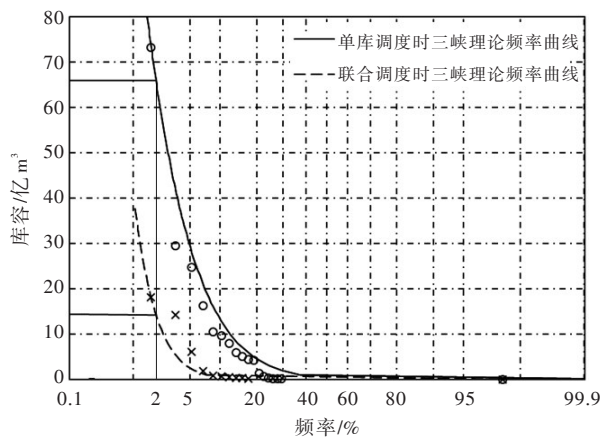


图9 6月1日库容频率曲线

后，三峡水库所需拦蓄洪量有所减少，三峡单库调度时98%保证率下所需防洪库容为66亿 m^3 ，联合调度时只需14亿 m^3 。同样的，若水库目前预留30亿 m^3 防洪库容，由图9可知，单库和联合调度时三峡水库风险率分别为0.049和0.012。梯级水库联合调度有效削减了下游三峡水库防洪风险率。

表2 单库调度时三峡防洪库容频率序列

库容/亿 m^3	频率/%	库容/亿 m^3	频率/%
73.26	1.72	4.31	17.24
29.51	3.45	4.28	18.97
24.68	5.17	1.40	20.69
16.33	6.90	0.64	22.41
10.41	8.62	0.28	24.14
9.64	10.34	0.21	25.86
7.89	12.07	0.18	27.59
5.98	13.79	0.09	29.31
5.01	15.52	0	98.28

表3 联合调度时三峡防洪库容频率序列

库容/亿 m^3	频率/%	库容/亿 m^3	频率/%
18.13	1.72	0.47	12.07
14.18	3.45	0.27	13.79
6.14	5.17	0.26	15.52
1.82	6.90	0.07	17.24
0.76	8.62	0	98.28

5 结论

本文提出了一种基于历史实测径流资料推求防洪库容频率曲线进而计算水库实时防洪风险率的方法,根据水库当前预留防洪库容对应的风险率,决策者可实时调整水库运行状态。以三峡水库防洪调度为例,推求了其防洪库容频率曲线,分析了其防洪风险;同时探究了上游溪洛渡、向家坝水库配合三峡水库联合调度防洪风险的不同响应。结果表明,溪洛渡、向家坝与三峡水库防洪库容互用性较强,其联合调度能有效降低三峡防洪风险,对下一步深入研究如何合理精确分配防洪库容有较强的应用价值。但是,由于本文以长系列历史实测数据为依据,资料越长越能反映洪水变化规律,则推求的防洪库容频率曲线和经验频率越具有代表性。若实测系列较短则防洪风险率偏大,规定的安全保证率越高时,求得的防洪库容误差将越大。此外,实测数据中未包含历史特大洪水导致计算的所需防洪库容偏小。因此,在下阶段工作中,可考虑引入洪水随机模拟以应对资料序列较短导致结果实用性较差的问题。

参 考 文 献:

- [1] ZHANG Y P, WANG G L, PENG Y, et al . Risk analysis of dynamic control of reservoir limited water level by considering flood forecast error [J] . Science China Technological Sciences, 2011, 54(7): 1888–1893 .
- [2] WU S J, YANG J C, TUNG Y K . Risk analysis for flood-control structure under consideration of uncertainties in design flood [J] . Natural Hazards, 2011, 58(1): 117–140 .
- [3] 刘艳丽,周惠成,张建云 . 不确定性分析方法在水库防洪风险分析中的应用研究[J] . 水力发电学报, 2010, 29(6): 47–53 .
- [4] DIAO Y F, WANG B D . Risk analysis of flood control operation mode with forecast information based on a combination of risk sources[J] . Science China Technological Sciences, 2010, 53(7): 1949–1956 .
- [5] 邹强,胡向阳,周曼 . 三峡水库洪水资源利用Ⅱ: 风险分析和对策措施[J] . 人民长江, 2018, 49(4): 12–16 .
- [6] 张太衡,武新宇,孙倩莹 . 基于径流模型参数不确定性的防洪风险分析[J] . 水力发电学报, 2017, 36(9): 31–39 .
- [7] 姜树海,范子武 . 水库防洪预报调度的风险分析[J] . 水利学报, 2004(11): 102–107 .
- [8] 钟平安,曾京 . 水库实时防洪调度风险分析研究[J] . 水力发电, 2008, 34(2): 8–10 .
- [9] CHEN L, SINGH V P, LU W, et al . Streamflow forecast uncertainty evolution and its effect on real-time reservoir operation [J] . Journal of Hydrology, 2016, 540: 712–726 .
- [10] YAN B, GUO S, CHEN L . Estimation of reservoir flood control operation risks with considering inflow forecasting errors[J] . Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2014, 28(2): 359–368 .
- [11] 李英海,周建中,张勇传,等 . 水库防洪优化调度风险决策模型及应用[J] . 水力发电, 2009, 35(4): 19–21 .
- [12] 刘招,席秋义,贾志峰,等 . 水库防洪预报调度的实用风险分析方法研究[J] . 水力发电学报, 2013, 32(5): 35–40 .
- [13] 周如瑞,卢迪,王本德,等 . 基于贝叶斯定理与洪水预报误差抬高水库汛限水位的风险分析[J] . 农业工程学报, 2016, 32(3): 135–141 .
- [14] 时芳欣,郝振纯,杨传国,等 . 黄淮海地区降水概率分布类型分析[J] . 水电能源科学, 2014, 32(9): 1–5 .
- [15] 肖可以 . 最大熵原理在水文频率分布模型中的应用研究[D] . 杨凌: 西北农林科技大学, 2010 .
- [16] 水文分析计算文集编辑委员会 . 刘光文水文分析计算文集[M] . 北京: 中国水利水电出版社, 2003 .
- [17] 周新春,许银山,冯宝飞 . 长江上游干流梯级水库群防洪库容互用性初探[J] . 水科学进展, 2017, 28(3): 421–428 .

(下转第 224 页)

Unsteady change of water and sediment processes downstream of cascade reservoirs in the Lower Jinsha River and its influence on navigation conditions

CHEN Xujian

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Laboratory of Hydraulics and Sediment Science and River Training of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: With the construction and application of cascade reservoirs in the Lower Jinsha River, the water and sediment processes downstream of the reservoirs are obviously changing and affecting navigation conditions. The analysis method of water and sediment unsteady process is proposed, and the unsteady characteristics of water level, discharge and sediment concentration downstream of Xiangjiaba reservoir and its influence on navigation conditions are analyzed. The results show that the variation coefficient of water level can reach 0.10~0.12, and the variation coefficient of discharge can be 0.20~0.40. Although the sediment concentration decreased significantly, the variation coefficient of sediment concentration could reach about 1.0. The annual average normalized water level and discharge in Xiangjiaba hydrologic station is about 1.0, and the navigation conditions of the montanic river channel downstream of Xiangjiaba reservoir are generally stable. It is beneficial to reduce the flood peak and increase low discharge to the navigation conditions of the river channel downstream the dam, but the daily regulation of the hydropower station, the reservoir water storage and the flood discharge increase the inconstancy of the flow and water level, which have some adverse effects on the navigable conditions.

Keywords: Lower Jinsha River; cascade reservoirs; water and sediment process; unsteady change; navigation conditions

(责任编辑: 李福田)

(上接第 217 页)

Real-time flood control risk estimation of reservoir and analysis on the interoperability of storage capacity of multi-reservoir regulation

DUN Xiaohan^{1, 2}, ZHOU Jianzhong^{1, 2}, ZHANG Yongchuan^{1, 2},

CHEN Lu^{1, 2}, WANG Quansen^{1, 2}, DAI Ling^{1, 2}

(1. School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Key Laboratory of Digital Valley Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The risk analysis of reservoir flood operation is an important link and basis for real-time flood control decision-making. In order to evaluate the real-time flood control risk of the reservoir, a method for calculating the frequency curve of reservoir capacity based on a long series of measured historical runoff data was presented in this paper. Based on this proposed method, the risk analysis model of real-time flood control operation was established. Furthermore, according to the actual flood control operation demand of the Three Gorges Reservoir, the flood control risk of reservoir in different periods of flood season was further analyzed. Meanwhile, the variation of the frequency curve of flood control capacity and the interoperability of storage capacity of multi-reservoirs were studied when the upstream cascade reservoirs cooperate with the Three Gorges Reservoir for joint operation. The study shows that the calculated frequency curve of reservoir flood control can be used to judge the current flood situation and effectively reduce the flood control risk of the Three Gorges Reservoir by using the interoperable performance of reservoir flood control reasonably.

Keywords: flood control storage capacity; risk analysis; frequency curve; joint flood control operation; flood storage capacity distribution and interoperability

(责任编辑: 王成丽)