

基于风险分析的流域防洪系统调度决策模型研究

杨侃¹,张洪波¹,陈欣¹,黎健松²

(1.河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098;2.茂名市水务局,广东 茂名 525000)

摘要 在已有成果的基础上,以长江流域为背景,将防洪系统联合调度模型和风险分析相结合,提出考虑入流洪水地区组成不确定性的防洪调度决策风险模型.该模型采用 AR 模型方法进行流量预报,对于预报误差,用一定置信水平下 t 分布估计误差的方差,从而求出流量过程误差的上下限,计算出未来发生的多种来水过程,为实时调度的贝叶斯决策和风险分析提供计算基础.在某联合调度方案下,可以进行风险分析计算,将一个复杂的随机调度决策问题转化为确定性调度决策问题.结果表明,该模型的计算工作量较一般随机生成模拟模型的计算工作量小得多,同时可以计算并保存可能大洪水情况下的调度应急方案.

关键词 风险分析 防洪系统 分洪决策 AR 模型

中图分类号 P333 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)05-0496-04

流域防洪系统除了考虑多维、多阶段、多目标、实时性等特点之外,还必须考虑不确定性和风险等因素.20 世纪 70 年代初,国内外开始将风险分析的概念和方法引入水资源管理,国内在这方面已经取得初步成果^[1~5],但用于水利调度分析的理论和方法国内外都还不成熟.进行长江流域防洪系统风险调度决策研究,不仅在 实际生产运行中迫切需要,而且可以结合实际问题对理论进行探讨和完善.

防洪调度决策受到众多不确定性因素的影响,存在许多风险因子,如水文因子、工程因子、社会经济因子、人为因素等.本文在文献^[1,2]的基础上主要研究长江全流域联合调度条件下由水文因子引起的防洪风险决策问题.

1 长江防洪系统调度风险分析模型

1.1 长江防洪系统运行目标

未来长江防洪系统联合调度运行目标^[1]如下:在满足荆江防洪标准百年一遇,千年一遇洪水能安全行洪的前提下,使城陵矶附近地区分洪量尽量减少;长江中下游有关地区堤防安全防御控制水位沙市为 45.0 m,城陵矶(莲花塘)为 34.4 m,武汉(汉口)为 29.73 m.长江流域防洪决策的中心问题是对分蓄洪区是否启用进行决策,本文研究主要涉及荆江分洪区、洞庭湖分洪区、洪湖分洪区、武汉附近地区分洪区.因为随着长江流域经济的发展,一旦进行分洪,无论启用哪一个分蓄洪区都将造成较大的经济损失.如果出现大洪水,需要在 t_0 时刻做出是否启用分洪区的决策,在 t 时刻($t > t_0$)进行分洪,以便在一段时间 D 内($D = t - t_0$)可以有足够时间进行人员和财产的转移,因此,长江防洪风险决策中的风险描述有三类情况^[1].第一类风险:在某一时刻 t_0 ,决策人员准备在 t ($t > t_0$)时刻启用分洪区,如果 t 时刻以后,在不启用分洪区的情况下,出现的实际水位小于相应控制站安全控制水位 H_{safe} 情况的可能性 P_1 .第二类风险:在某一时刻 t_0 ,决策人员准备在 t ($t > t_0$)时刻启用分洪区,但在 D 时间内,控制站水位超过安全控制水位 H_{safe} ,即出现提前分洪情况的可能性 P_2 .第三类风险:在 t_0 时刻,做出不分洪的决定,在 D 时间内,控制站水位出现超过安全控制水位 H_{safe} 情况的可能性 P_3 ^[1].

1.2 风险分析原理

1.2.1 基于 AR 模型预报的风险分析原理

本文主要研究防洪系统内各站入流洪水地区组成的不确定性.以各站入流洪水流量过程作为水库入流

收稿日期 2004-04-29
基金项目 国家自然科学基金资助项目(49701003);国家自然科学基金重点资助项目(50099620);河海大学科学创新基金资助项目(2003408143)
作者简介 杨侃(1965—),男,江苏苏州人,副教授,主要从事水资源规划管理研究.

量过程,经防洪系统联合调度计算,得出各控制站的水位或流量过程.由于各站的入流洪水流量具有不确定性,所以经过联合调度后计算的各控制站水位或流量也具有不确定性.本文主要研究考虑入流洪水地区组成不确定性的防洪调度决策风险模型.

在水文中常用的预测模型是 p 阶纯自回归模型,记为 $AR(p,0)$

$$x_t = \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \varphi_3 x_{t-3} + \cdots + \varphi_p x_{t-p} + a_t \tag{1}$$

式中 a_t 为白噪声,模型参数的估计可采用带有遗忘因子的最小二乘估计^①.该方法的模型具有反馈作用,当实测值与计算值不同时,可进行及时反馈计算,从而达到自动跟踪动态数据的能力. a_t 是一个重要的因子,为了合理地进行预报计算,有必要研究 a_t 对预报值的影响,通过 a_t 值反映预报值 x_t 的理想上下限,从而估计出未来径流量最可能出现的区间,为风险分析提供依据.如果 t_0 时刻以前各站入流洪水流量过程已知,以各站 t_0 时刻以前的实测资料为基础,随机模拟出各站 t_0 时刻以后的入流过程,选定随机模型的阶数为 3^[2].

$$\begin{cases} \hat{Q}_{i,t_0+1} = A_1 Q_{i,t_0} + A_2 Q_{i,t_0-1} + A_3 Q_{i,t_0-2} + E_{i,1} & \hat{Q}_{i,t_0+2} = A_1 Q_{i,t_0+1} + A_2 Q_{i,t_0} + A_3 Q_{i,t_0-1} + E_{i,2} \\ \hat{Q}_{i,t_0+3} = A_1 Q_{i,t_0+2} + A_2 Q_{i,t_0+1} + A_3 Q_{i,t_0} + E_{i,3} & E_{i,1} = Q_{i,t_0+1} - \hat{Q}_{i,t_0+1} \\ E_{i,2} = Q_{i,t_0+2} - \hat{Q}_{i,t_0+2} & E_{i,3} = Q_{i,t_0+3} - \hat{Q}_{i,t_0+3} \end{cases} \tag{2}$$

式中: $\hat{Q}_{i,t_0+1}, \hat{Q}_{i,t_0+2}, \hat{Q}_{i,t_0+3}$ ——预测流量; $Q_{i,t_0+1}, Q_{i,t_0+2}, Q_{i,t_0+3}$ ——实测流量; $E_{i,1}, E_{i,2}, E_{i,3}$ ——预测流量和实测流量的误差.

根据已有的实测历史资料计算出误差的平均值 $\overline{E}_{i,1}, \overline{E}_{i,2}, \overline{E}_{i,3}$ 以及样本方差 $S^2_{E_{i,1}}, S^2_{E_{i,2}}, S^2_{E_{i,3}}$.

$$\overline{E}_{i,j} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_{m,j} \quad S^2_{E_{i,j}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (E_{m,j} - \overline{E}_{i,j})^2 \quad (j = 1, 2, 3) \tag{3}$$

由于预报时段入流误差一般服从高斯分布,其均值可以求出,但误差的方差是未知的,因此采用一定置信水平下用 t 分布估计误差的方差,从而求出误差的上下限^①.

设

$$T(i,j) = (\overline{E}_{i,j} - \mu_{\overline{E}_{i,j}}) / S_{E_{i,j}} \quad S_{E_{i,j}} = S_{E_{i,j}} / \sqrt{M} \tag{4}$$

T 服从自由度为 $(M-1)$ 的 t 分布,根据 t 分布表可以求得满足式(5)的上下限 T_1 和 T_2 .

$$P\{T_1 \leq T = (\sqrt{M}(\overline{E}_{i,j} - \mu_{\overline{E}_{i,j}}) / S_{E_{i,j}}) < T_2\} = 1 - \alpha \tag{5}$$

满足以上分布的 T_1 和 T_2 有无限多种组合,其中区间长度最短的一组满足

$$P\{T < T_1\} = P\{T \geq T_2\} = \frac{\alpha}{2} \tag{6}$$

由于 t 分布对原点分布是对称的,即 $t_{\frac{\alpha}{2}, M} = -t_{1-\frac{\alpha}{2}, M}$, 有

$$P\{-t_{\frac{\alpha}{2}, M-1} < (\sqrt{M}/S_{E_{i,j}})(\overline{E}_{i,j} - \mu_{\overline{E}_{i,j}}) < t_{\frac{\alpha}{2}, M-1}\} = 1 - \alpha \tag{7}$$

经过变换有

$$P\{\overline{E}_{i,j} - t_{\frac{\alpha}{2}, M-1}(S_{E_{i,j}}/\sqrt{M}) < \mu_{\overline{E}_{i,j}} < \overline{E}_{i,j} + t_{\frac{\alpha}{2}, M-1}(S_{E_{i,j}}/\sqrt{M})\} = 1 - \alpha \tag{8}$$

由此得到置信水平为 α 误差均值的上下限

$$(\overline{E}_{i,j} - t_{\frac{\alpha}{2}, M-1}(S_{E_{i,j}}/\sqrt{M}), \overline{E}_{i,j} + t_{\frac{\alpha}{2}, M-1}(S_{E_{i,j}}/\sqrt{M})) \tag{9}$$

其中 $t_{\frac{\alpha}{2}, M-1}$ 根据 t 分布查得,因此,根据误差的上下限值可以求得未来入流的上下限值.

在实际运行过程中,可以进行有限天数的预报分析,现以 3 d 预报为例,见图 1.考虑在短期内预报有一定可信度,如果使用文献[2]中随机生成模型,可以生成上万模拟结果,再加上各站的遭遇情况组合,模拟情况更多,在实时联合调度决策中就会受到限制.本文通过 AR 模型预报和随机模型相结合,将各站时段预报入流分为上限值、预报值和下限值,大大减少了入流过程数目,使问题相对简单.如果时段为 1 d,每天有 3 种可能值,共有 3^3 种可能的入流组合过程,如果有 n 站点参加防洪系统联合运行调度,则有 3^{3n} 入流组合过程.

通过上下限预报,计算出在一定置信度下未来发生的多种来水过程,为实时调度的贝叶斯决策和风险分析提供计算基础.在某联合调度方案下,就可以进行联合调度风险分析计算,将一个复杂的随机调度决策问题转化为确定性调度决策问题.一定置信度下未来发生的多种来水过程,从理论上讲,并不是真正意义上的随机

① 叶秉如,吴浩云.三峡水库实时调度研究.河海大学,1989.

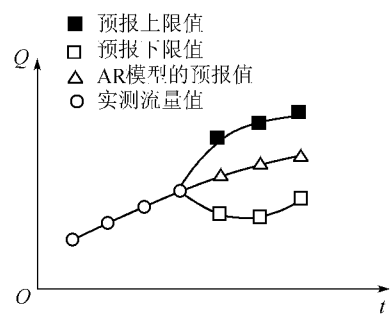


图1 入流的上限值、预报值和下限值

Fig.1 Three values of inflow
决策具有的风险为

模拟过程,而一种准随机模拟过程,是基于某一置信度下有限的模拟过程,是以实时决策为目的的。

根据以上确定的风险分析方法,对于长江流域防洪系统而言,各站 t_0 时刻以前实测入流过程与 t_0 时刻以后随机生成的入流过程组合成整个系统各站的多种入流过程,经过防洪系统某一联合调度方案^[6]计算,求出各种组合情况下各控制站点的水位过程或流量过程。

如果采用随机模拟方法模拟防洪系统内各站点的入流,根据防洪系统某一联合调度方案,计算出的各控制点某时刻的水位也具有随机性,且是具有某种分布的变量^[2]。设某控制点 t 时刻的水位概率密度函数为 $f(H_t)$,如果在 t_0 时刻做出某控制站 t 时刻不分洪的决策,则该

$$P_3 = \int_{H_{\text{safe}}}^{H_{\text{max}}} f(H_t) dt \tag{10}$$

如果在 t_0 时刻做出某控制站 t 时刻分洪的决策,则该决策具有的风险为

$$P_1 = 1 - \int_{H_{\text{safe}}}^{H_{\text{max}}} f(H_t) dt \tag{11}$$

式中 $H_{\text{max}}, H_{\text{safe}}$ 分别为某控制站 t 时刻的最大可能水位和安全水位(在该水位以下,不会出现分洪情况)。

事实上,在实时调度决策中,很难计算出概率密度函数 $f(H_t)$,但可以通过近似的方法加以简化计算^[2],本文采用基于某一置信度下有限的模拟过程代替随机模拟过程,即如果各站 t_0 时刻以前实测入流过程与 t_0 时刻以后随机生成的入流过程组成的整个系统入流过程共有 N 个,在某一联合调度方案下,计算出某控制站 t 时刻 N 个反映不同入流洪水地区组成情况的水位值或流量值。如果在 t_0 时刻做出分洪决定,计算后有 n_1 个水位超过 H_{safe} ,第一类风险为 $P_1 = 1 - n_1/N$;在 D 时间内,出现提前分洪的情况有 n_2 种,第二类风险为 $P_2 = n_2/N$;在 t_0 时刻做出不分洪的决定,第三类风险为 $P_3 = n_1/N$ 。

1.2.2 基于水文预报模型的风险分析原理

上述入流预报采用 AR 模型,但目前水文预报大多采用流域水文预报模型或产汇流计算模型,但由于流域特性和降雨分布的复杂性和多变性,有时使用水文预报模型或河道汇流模型做出的流量序列预报,可能出现的误差较大,由此引起调度决策的结果存在一定的风险。可使用本文的误差分析方法统计出预测流量和实测流量的误差 $E_{i,1}, E_{i,2}, E_{i,3}$,采用同样方法进行防洪调度的风险分析。防洪系统联合调度风险决策流程见图 2。

2 模型应用

长江流域防洪系统风险决策的关键问题,在于考虑干支流水库联合调度^[6]情况下是否启用分蓄洪区,以及启用次序。根据上述风险分析模式,主要考虑的控制站有沙市站

水位、城陵矶站水位和武汉站水位,这 3 个控制站水位值可以参考,以决策是否启用荆江分洪区、洞庭湖分洪区、洪湖分洪区、武汉附近地区分洪区。某联合调度方案下, t_0 时刻决定不启用荆江分洪区、洞庭湖分洪区、洪湖分洪区、武汉附近地区分洪区,沙市站、城陵矶站和武汉站在不同时刻 $t(t > t_0)$ 超过相应控制站点安全水位的风险(第三类风险)为

$$P_{3,t}^x = P_{3,t}^x \{H_t^x \geq H_{\text{safe}}^x\} \quad P_{3,t}^y = P_{3,t}^y \{H_t^y \geq H_{\text{safe}}^y\} \quad P_{3,t}^z = P_{3,t}^z \{H_t^z \geq H_{\text{safe}}^z\} \tag{12}$$

相应的第二类风险分别为

$$\begin{cases} P_{2,t_m}^x = P_{2,t_m}^x \{H_{t_m}^x \geq H_{\text{safe}}^x, t_0 < t_m < t\} \\ P_{2,t_m}^z = P_{2,t_m}^z \{H_{t_m}^z \geq H_{\text{safe}}^z, t_0 < t_m < t\} \end{cases} \quad P_{2,t_m}^y = P_{2,t_m}^y \{H_{t_m}^y \geq H_{\text{safe}}^y, t_0 < t_m < t\} \tag{13}$$

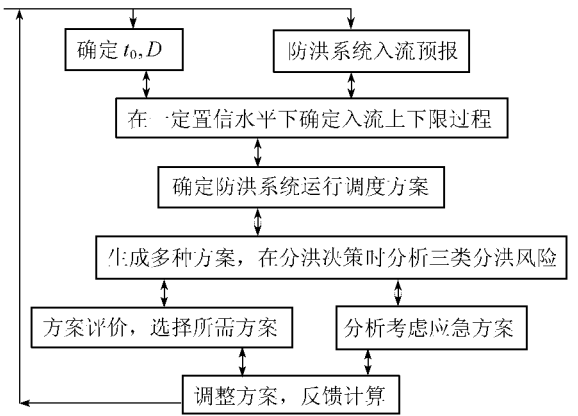


图2 防洪系统联合调度风险决策流程
Fig.2 Flow chart for risk analysis of combined operation decision-making for flood control system

相应的第一类风险分别为

$$P_{1,t}^x = 1 - P_{1,t}^x \{H_t^x \geq H_{\text{safe}}^x\} \quad P_{1,t}^y = 1 - P_{1,t}^y \{H_t^y \geq H_{\text{safe}}^y\} \quad P_{1,t}^z = 1 - P_{1,t}^z \{H_t^z \geq H_{\text{safe}}^z\} \quad (14)$$

式中 $H_{\text{safe}}^x, H_{\text{safe}}^y, H_{\text{safe}}^z$ 分别为沙市站、城陵矶站和武汉站的安全水位。

为了对本文防洪系统风险调度模型进行验证,采用 1954 年洪水资料进行分析。完整的风险分析实时调度计算,应该是对系统范围内所有入流预报资料均采用上述方法进行分析。虽然每时段采用 3 个值,即预报值、上限值和下限值,但随着预报天数的增加,其组合数量较多,例如,取 $D = 3 \text{ d}$,对 8 个水库入流站点进行分析,其组合数达到 $3^3 \times 8$ 。如果进一步简化,各站点采用 3 组入流过程,即预报值入流过程、上限值入流过程和下限值入流过程,组合数也将达到 3^8 。但在实际计算时,可以采用筛选法计算,即将组合数进行分类,每一类依次从大到小进行计算,在计算到临界点时(分洪区均不出现分洪),可以停止计算,这样计算工作量可以大大减少。为了验证模型,在缺乏资料的条件下,对有关参数进行假定,确定 t_0 ,风险分析时刻为 $t = t_0 + 8$ 。在各组合洪水较小,即不存在分洪的情况下,不必进行分洪风险分析,只有在出现大洪水的关键时刻,才进行分洪决策的调度风险分析。每一个联合调度方案均可进行风险分析。通过比较不同调度方案下启用各分洪区的三类风险,即通过风险值的相对值比较,可以确定某一调度方案,从而进行合理决策。

3 结 论

本文将防洪系统联合调度模型和风险分析相结合,在已有成果的基础上,提出了考虑入流洪水地区组成不确定性的防洪调度决策风险模型,在某联合调度方案下,进行了联合调度风险分析计算,将一个复杂的随机调度决策问题转化为确定性调度决策问题,其计算工作量较一般随机生成模拟模型的计算工作量小得多,同时可以计算并保存可能大洪水时的调度应急方案。

参考文献:

[1] 《长江防洪系统实时调度研究》编委会. 长江防洪系统实时调度研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997. 11.
[2] 李琼芳. 长江中下游防洪决策与风险[D]. 南京:河海大学,1993.
[3] 杨侃,王鸿杰. 支流防洪库容对防洪区的洪灾风险影响研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(3): 115—118.
[4] 王道席,朱元生,侯传河. 黄河下游水量调度风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(2): 71—74.
[5] 黄振平,朱元生. 降水预测在防洪决策风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(3): 7—10.
[6] 杨侃,谭培伦,仲志余. 三峡为中心的长江防洪系统优化调度网络分析法[J]. 水利学报,1997,(7): 78—83.

Risk analysis-based decision-making model for operation of river basin flood control system

YANG Kan¹, ZHANG Hong-bo¹, CHEN Xin¹, LI Jian-song²

(1. College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Water Service Bureau of Maoming City, Maoming 525000, China)

Abstract On the basis of the achievements from former study, a risk analysis-based combined decision-making model for operation of flood control system was presented for the Yangtze River Basin with the indetermination of inflowing floods from different areas taken into account. In this model, the AR model (or hydrological model) was adopted for flood forecast. The variance of the error was estimated with the t distribution under a certain degree of confidence, and the upper and lower limits of the forecast error of the discharge hydrographs could be obtained. The calculated results of different water inflowing processes under a certain degree of confidence, which might occur in future, provided a basis for Bayes decision-making and risk analysis for real-time operation. The model changes the decision-making for stochastic operation into that for determinable operation, thus the risk analysis for combined operation can be realized. The advantage of the method is the small workload of calculation as compared with that of the general stochastic operation method, meanwhile, the model can calculate and preserve emergency operation scheme for large floods that might occur.

Key words risk analysis ; flood control system ; decision-making for flood diversion ; AR model