

Optimal Scheme of Early Refill Operation for the Three Gorges Reservoir*

Yu Li, Shenglian Guo, Tianyuan Li, Yanlai Zhou

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: liyuwuhu@163.com

Received: Mar. 27th, 2013; revised: Apr. 12th, 2013; accepted: Apr. 21st, 2013

Copyright © 2013 Yu Li et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: A joint distribution function and conditional probability distribution of this samples using copula was built and inflow series in September were obtained by stochastic simulation method. Furthermore, a refill operation optimization model of the Three Gorges Reservoir was established in this paper to derive the optimal refill scheme. The results show that the optimal refill scheme depends on the reservoir inflow in late August. In the wet year, refill begins in late September with storage level reaching 166 m on September 30 linearly. Comparing with designed scheme, the scheme can generate extra about 1.57×10^8 kW·h electrical energy (by 1.46%) and save 10.72×10^8 m³ water resources (by 12.89%) annually without increasing the flood control risk; In the normal year, refill begins in middle September with storage level reaching 166 m on September 30 linearly. Comparing with designed scheme, the scheme can generate extra about 3.45×10^8 kW·h electrical energy (by 3.40%) and save 22.59×10^8 m³ water resources (by 34.19%) annually without increasing the flood control risk; In the dry year, refill begins in early September with storage level reaching 166 m on September 30 linearly by strengthening real-time monitoring. Comparing with designed scheme, the scheme can generate extra about 5.50×10^8 kW·h electrical energy (by 6.12%) and save 19.18×10^8 m³ water resources (by 51.89%) annually without increasing the flood control risk.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Early Refill; Refill Scheme; Optimal Selection

三峡水库提前蓄水方案的优化选择*

李 雨, 郭生练, 李天元, 周研来

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: liyuwuhu@163.com

收稿日期: 2013年3月27日; 修回日期: 2013年4月12日; 录用日期: 2013年4月21日

摘 要: 应用 Copula 函数构建了联合分布及条件概率分布, 通过随机抽样方法模拟得到三峡水库 9 月份随机入库流量序列。建立了提前蓄水方案优选模型, 计算并分析了 8 月下旬不同来水情景下, 三峡水库 9 月份提前蓄水方案的优化选择。研究表明: 若 8 月下旬来水为丰水, 则 9 月下旬起蓄, 月底均匀蓄水至 166 m, 较原设计方案, 在不增加防洪风险的前提下, 多年平均发电量可增加 1.57 亿 kW·h (1.46%), 弃水量减小 10.72 亿 m³ (12.89%); 若来水为平水, 则 9 月中旬起蓄, 月底均匀蓄水至 166 m, 较原设计方案, 在不增加防洪风险的前提下, 多年平均发电量可增加 3.45 亿 kW·h (3.40%), 弃水量减小 22.59 亿 m³ (34.19%); 若来水为枯水, 通过加强实时监测, 则可进一步提前至 9 月上旬起蓄, 月底均匀蓄水至 166 m, 较原设计方案, 在基本不增加防洪风险的前提下, 多年平均发电量可增

*基金项目: 国家自然科学基金(51079100)和国家十一五科技支撑计划(2009BAC56B02)项目资助。
作者简介: 李雨(1986-), 男, 河南周口人, 博士研究生, 主要从事水文及水资源方向的研究。

加 5.50 亿 kW·h (6.12%), 弃水量减小 19.18 亿 m³ (51.89%)。

关键词: 三峡水库; 提前蓄水; 蓄水方案; 优化选择

1. 引言

三峡工程规划设计阶段, 拟定的蓄水调度规则为: 每年10月1日从145 m起蓄, 10月31日蓄水至正常蓄水位175 m^[1]。然而随着长江上游一批大型梯级水库以及调水工程的建成, 蓄水期间水库的入库流量势必明显减少, 同时中下游地区工业、农业和生态等的用水需求也在呈不断增加的趋势, 三峡水库蓄水期间的供需矛盾日益凸显^[2], 因此汛末提前蓄水是提高水库综合利用效益的必然选择。

汛末提前蓄水的开始时间和蓄水方式的选择, 已成为水库蓄水策略研究的热点。彭杨等^[3]研究了不同蓄水方案下三峡水库的防洪风险、发电以及上下游航运效益的变化情况, 进行了三峡水库汛末蓄水时间与目标决策的研究; 李义天等^[4]提出了9月份分旬控制蓄水的方案, 试图找到一种既能提高水库的综合效益, 又能有效解决防洪安全问题的蓄水调度方式; 刘攀等^[5]建立了蓄水调度函数的神经网络模型, 从系统优化的角度对三峡水库运行初期的蓄水方式和蓄水时机选择进行了研究; 邓金运^[6]等计算了三峡水库的泥沙淤积, 认为考虑泥沙淤积的9月份分旬蓄水能进一步降低可能的防洪风险。刘心愿等^[7]采用三峡水库汛期分期方案, 将蓄水时间提前至汛末期, 综合考虑上下游防洪、发电、通航和蓄满率等要求, 建立了多目标蓄水调度模型; 以上研究从不同的角度对三峡水库汛末提前蓄水问题进行了深入细致的研究, 试图建立适应于所有来水情景下的蓄水调度规则、调度图或调度函数, 没能利用蓄水开始前已有的水情信息, 视来水情况灵活的制定提前蓄水方案。鉴于上述问题, 本文提出了一种新的提前蓄水方案优化选择方法, 即借助条件概率分布和随机抽样方法, 实现了已知8月下旬不同来水情景条件下, 9月份入库流量的随机生成, 并建立了提前蓄水方案优选模型, 通过考虑风险和效益的综合评价体系, 计算并分析了8月下旬不同来水情景下, 三峡水库9月份提前蓄水方案的优化选择。

2. 条件概率分析

《三峡水库优化调度方案》^[8](以下简称《优化方

案》)中规定, 水库开始蓄水的时间不早于9月15日, 9月30日视来水情况, 可蓄水至158.0 m。每年在制定面临年份的提前蓄水方案时, 提前蓄水期的来流过程是无法准确得知的, 但后汛期^[9]初期(8月下旬)的已知水情信息, 可以作为判断提前蓄水期来水大小的重要依据。研究思路为, 利用8月下旬的已知不同来水情景, 通过条件概率分布和随机抽样方法, 随机生成给定来水情景下蓄水期具有不同发生概率的入库流量过程, 从而为风险分析和控制提供数据支持。

2.1. 相关性检验

衡量事物之间或变量之间线性相关程度的强弱, 并用适当的统计指标表示出来, 这个过程就是相关分析。本文采用Pearson、Kendall和Spearman三种常用的方法计算相关系数 $r^{[10]}$ 。采用统计量 t 进行显著性检验, 计算公式如下:

$$t = \sqrt{n-2} \cdot r / \sqrt{1-r^2} \quad (1)$$

式中: n 为样本数。当统计量 t 的显著性概率 $p < 0.05$ 时, 说明两个变量间相关性显著, 用“*”表示; 当 $p < 0.01$ 时, 说明两个变量间相关性非常显著, 用“**”表示。

本文从三峡水库1882~2010年这129年历史入库流量资料中, 选择每年8月下旬洪量(w_8)和9月份洪量(w_9), 构成联合观测值系列并计算其相关性, 结果列于表1。从表1中可以看出, 对于8月下旬洪量和9月份洪量, 三种显著性检验方法均可通过, 二者具有非常显著的相关性, 故选择其构建联合分布是合理的。

Table 1. Test of significance for the flood volume in the last teen days of August and September
表1. 8月下旬和9月份洪量序列显著性检验

显著性检验	r 值	p 值
Pearson	0.39	0.000(**)
Kendall	0.27	0.000(**)
Spearman	0.40	0.000(**)

2.2. 基于 Copula 函数的联合分布

2.2.1. 二维 Copula 函数

Copula 函数是定义域为[0, 1], 均匀分布的多维联合分布函数。由 Sklar 定理, 设 X 、 Y 为连续的随机变量, 边缘分布函数分别为 F_X 和 F_Y , $F(x, y)$ 为变量 X 和 Y 的联合分布函数, 则存在唯一的函数 $C_\theta(u, v)$ 使得:

$$F(x, y) = C_\theta(F_X(x), F_Y(y)), \quad \forall x, y \quad (2)$$

式中: u 和 v 为随机变量的边缘分布函数; θ 为 Copula 函数的参数, 可由其与 Kendall 秩相关系数 τ 的关系求得:

$$\tau = (C_n^2)^{-1} \sum_{i < j} \text{sign}[(x_i - x_j)(y_i - y_j)] \quad (3)$$

式中: $\text{sign}(\cdot)$ 是符号函数, 当 $(x_i - x_j)(y_i - y_j) = 0$ 时, $\text{sign} = 0$; $(x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0$ 时, $\text{sign} = 1$; $(x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0$ 时, $\text{sign} = -1$ 。

在水文分析计算中, 常用的 Copula 函数有 Clayton、Frank 和 Gumbel-Hougaard, 为选择最合适的 Copula 函数, 采用离差平方和最小准则(OLS)来评价 Copula 方法的有效性, 并选取 OLS 最小的 Copula 作为联结函数^[11]。OLS 的计算公式如下:

$$\text{OLS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Pe_i - P_i)^2} \quad (4)$$

式中, n 为样本数; Pe_i , P_i 分别为经验频率和理论频率。

从表 2 可以看出, OLS 值最小的 Copula 函数为 Clayton 函数, 因此本文选取 Clayton Copula 作为联结函数。

2.2.2. 建立联合分布

我国规范假定洪水系列一般服从 P-III 分布^[12], 采用线性矩法估计上述参数, 得出 w_8 和 w_9 对应的常用统计特征参数 \bar{x} 、 C_v 和 C_s 的值, 见表 3。

计算 w_8 和 w_9 联合观测值的经验分布, 当经验分布与理论联合分布拟合效果最佳时, 求得参数 $\hat{\theta}$ 等于 0.75, 并将 $\hat{\theta}$ 作为 Clayton Copula 的参数 θ 的估计值。根据 Sklar's 定理, 可以得到 w_8 和 w_9 的联合分布函数 $F(w_8, w_9)$ 为:

Table 2. The result of optimization for Copula function
表2. Copula函数优选结果

Copula函数	θ 值	OLS 值
Clayton	0.75	0.0175
Frank	2.60	0.0217
Gumbel-Hougaard	1.37	0.0236

Table 3. The estimation of P-III parameter for the flood volume in the last teen days of August and September
表3. 8月下旬和9月份洪量系列的P-III型分布参数估计值

变量名称	参数		
	\bar{x}	C_v	C_s
w_8	281.18	0.31	0.62
w_9	676.81	0.26	0.52

$$F(w_8, w_9) = (u^{-0.75} + v^{-0.75} - 1)^{-1/0.75} \quad (5)$$

将 129 年的 w_8 和 w_9 的经验联合分布值与理论联合分布值点绘得到图 1, 其线性相关系数为 0.9958, 说明其经验分布和理论分布吻合的很好。图 2 以另外一种形式对联合观测变量的经验联合分布和理论联合分布进行了对比, 图中的序号是根据联合观测值的理论分布进行升序排序后的序号。图 1 和图 2 表明, 所建立的 w_8 和 w_9 的联合分布是合理可行的。

2.3. 条件概率分析

当已知 8 月下旬分别发生枯水[62.5%, 100%]、平水[37.5%, 62.5%]及丰水[0.0%, 37.5%], 即当给定 8 月下旬洪量 $X \leq x_k$ 、 $x_k < X < x_f$ 及 $X \geq x_f$ 时, 9 月份洪量 Y_i 的条件概率分布分别为:

$$F_{Y_i|X_k}(X, Y_i) = P(Y_i \leq y | X \leq x_k) = \frac{F(x_k, y)}{F_X(x_k)} \quad (6)$$

$$F_{Y_i|X_p}(X, Y_i) = P(Y_i \leq y | x_k \leq X \leq x_f) = \frac{F(x_f, y) - F(x_k, y)}{F_X(x_f) - F_X(x_k)} \quad (7)$$

$$F_{Y_i|X_f}(X, Y_i) = P(Y_i \leq y | X \geq x_f) = \frac{F_Y(y) - F(x_f, y)}{1 - F_X(x_f)} \quad (8)$$

图 3 绘出了 8 月下旬发生枯水、平水及丰水时,

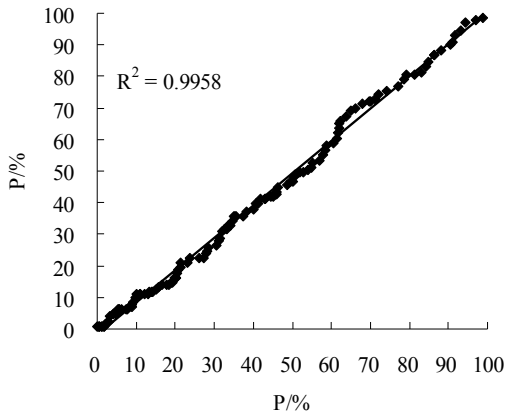


Figure 1. Correlation between the empirical and theoretical probability distributions of the observation values
图1. 联合观测值的经验分布和理论分布相关关系

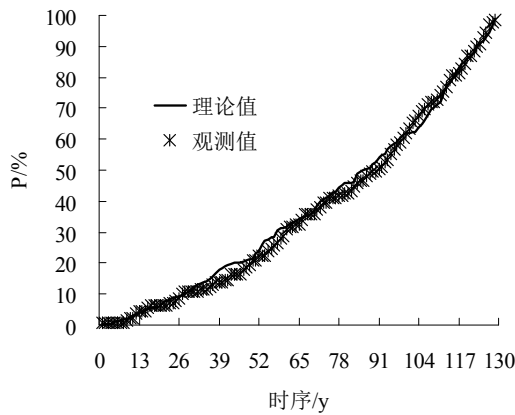


Figure 2. Comparison of the empirical and theoretical probability distributions of the observation values
图2. 联合观测值经验分布和理论分布比较

9月份洪量的条件概率分布。可以看出, 当8月下旬发生枯水和平水时, 9月份洪量小于250亿 m^3 以及大于1000亿 m^3 的概率已非常小, 而当8月下旬发生丰水时, 9月份的洪量小于450亿 m^3 已非常少见, 但发生1000亿 m^3 ~1300亿 m^3 这样的大洪水仍有一定程度的可能性, 这就能为提前蓄水方案的优选提供决策支持。

3. 径流过程随机模拟

借助联合分布函数和条件概率公式, 可以对存在相关性的水文统计量 w_8 和 w_9 进行随机抽样, 从而达到给定 w_8 时随机生成 w_9 以及相应的洪水过程线的目的。由于篇幅所限, 仅以8月下旬发生枯水时($X \leq x_k = 37.5\%$), 9月份入库流量过程的随机模拟为例, 具体步骤如下:

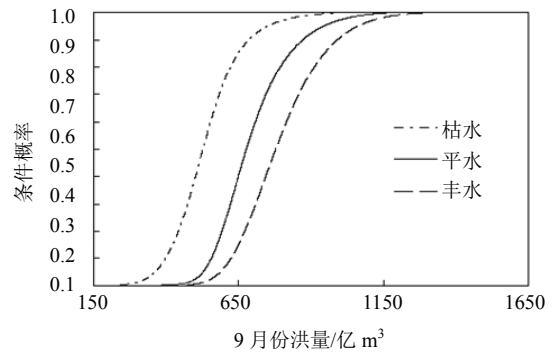


Figure 3. The conditional probability distribution of flood volume in September
图3. 9月份洪量的条件概率分布

- 1) 产生服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数 R_1 ;
- 2) 令 R_1 为 $w_8 \leq x_k$ 时 $w_9 \leq y$ 的条件概率值, 即 $R_1 = P(Y_i \leq y | X \leq x_k)$, 从而由公式(6)可以求得 $F(x_k, y) = P(Y_i \leq y | X \leq x_k) \cdot F_X(x_k) = R_1 \cdot F_X(x_k)$;
- 3) 假设一个初始值 y_0 ;
- 4) 由 x_k 值和 y_0 值, 通过联合分布函数可计算得到 $F_0(x_k, y_0)$, 如果 $|F_0(x_k, y_0) - F(x_k, y)| \leq e$ (收敛精度), 则转入步骤5; 否则 $y_0 = y_0 + \Delta y$, 转入步骤3; 其中 e 为收敛精度, Δy 为递增步长;
- 5) 令 $w'_9 = y_0$, 选取实测资料中9月份30天洪量(w_9)最接近 w'_9 的洪水过程作为典型洪水过程, 并计算其比值 $k = w'_9/w_9$, 利用总量倍比缩放法得到模拟的径流过程;
- 6) 重复步骤2至步骤5共 N 次, 可以模拟出 N 组径流过程。

4. 提前蓄水方案优选模型

水库提前蓄水期间, 调度决策者需要考虑两种不同类型的风险, 即由于蓄水进程过快或蓄水位过高引起的防洪风险和未达到调度期末蓄水目标的欠蓄风险。其风险源主要来自两方面: 一是提前蓄水期间来水的不确定性, 二是蓄水调度过程中决策的不确定性。虽然随着蓄水时间的提前, 可能会增加防洪风险, 但同时也可以降低欠蓄风险, 并且还能够减少弃水量以及增加发电量。因此通过科学合理的制定蓄水调度策略, 可以最大程度上抵消上述不确定性, 有效的规避风险, 实现蓄水调度综合效益的最大化。水库蓄水调度图无疑是一种最为直观和易行的调度策略。

4.1. 蓄水调度图

本文通过设置各旬防洪限制水位和蓄水调度线, 将原有的防洪库容划分为三个部分, 即 I 区、II 区和 III 区, 如图 4 所示。III 区为各旬防洪限制水位至防洪高水位这部分库容, 此部分库容是为调节原设计标准洪水(三峡水库为千年一遇标准)预留的防洪库容, 提前蓄水调度期间, 如果水库蓄水位高于该水位, 就占用了部分预留的防洪库容, 较原设计方案, 会因不能完全调节该频率设计洪水, 不同程度上增加下游地区的防洪风险, 该区属于防洪风险区; II 区为拟定的蓄水调度线至坝前最高安全水位之间的部分库容, 在蓄水调度过程中, 由于入库流量过程的不确定性以及控泄条件约束等因素的影响, 可能会出现水库水位暂时高于蓄水调度线的情况, 即水库水位在 II 区运行, 但由于此时仍预留有充足的防洪库容(III 区), 则认为此时不会存在防洪风险, 该区属于正常运用区; I 区为汛期限制水位 145 m 至拟定的蓄水调度线之间的部分库容, 在某些特枯年份, 在满足下游生产、生活以及生态用水的要求下, 由于没有足够的水量回蓄水库, 使得水库水位低于蓄水调度线运行, 未能达到既定的蓄水目标, 该区属于欠蓄风险区。

4.2. 蓄水调度方式

根据《优化方案》, 三峡水库蓄水期间总的调度原则为, 在保证防洪安全的前提下, 水库水位均匀上升, 当来水流量达到 35,000 m³/s 时, 水库暂停兴利蓄水, 按防洪要求进行调度。

又出于增加发电效益及提高蓄满率方面的考虑,

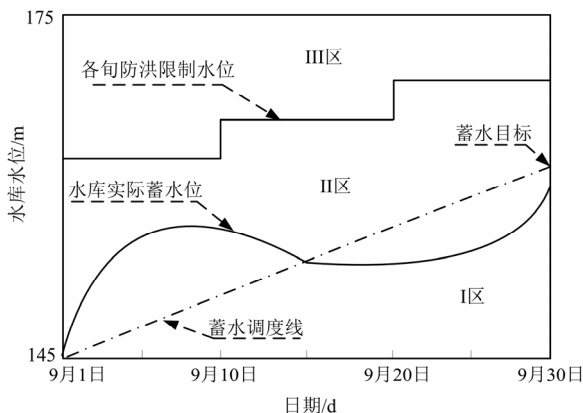


Figure 4. The operation chart of impounding water in advance
图4. 提前蓄水调度图

蓄水调度方式拟定为:

从起蓄日期的 145 m 至 9 月 30 日的目标蓄水位, 按照均匀蓄水的方式生成初始蓄水调度线。提前蓄水期间, 当三峡水库入库流量达到 35,000 m³/s 时, 水库暂停兴利蓄水, 转为防洪调度, 当洪峰过后且入库流量小于 35,000 m³/s 时, 库水位不再消落至初始蓄水调度线, 而是从当前水位均匀蓄水至目标蓄水位。

4.3. 方案优选评价指标

选用防洪风险率(以下简称风险率)、发电量和弃水量作为各蓄水方案优选的综合评价指标, 表述如下:

1) 风险率。将蓄水调度过程中, 蓄水位高于各旬防洪限制水位的事件作为非期望事件, 进行防洪风险分析, 即

$$R_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (9)$$

2) 发电量, 以调度期内年均累计发电量来表示, 即

$$B_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{i,j} \Delta t \quad (10)$$

3) 弃水量, 即

$$B_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M S_{i,j} \quad (11)$$

式中: N 为总的随机模拟次数; F_i 为0~1变量, 对于某次蓄水过程, 如果蓄水位高于各旬防洪限制水位则 $F_i = 1$, 否则 $F_i = 0$; M 为调度期长度; Δt 为日时段长; $P_{i,j}$ 分别为三峡电站第 i 次蓄水过程第 j 天的日均出力; $S_{i,j}$ 为三峡水库第 i 次蓄水过程第 j 天的日均弃水流量。

4.4. 约束条件

为保证蓄水期三峡水库的能正常运行, 调度计算中主要考虑以下限制条件:

1) 出力约束。2012年汛期前, 三峡工程设计的32台70万千瓦机组将全部实现并网发电, 按三峡水库投入32台发电机组推算, 最大出力为22,400 MW, 保证出力为4990 MW。

2) 下泄流量约束。根据三峡工程新增抗旱补水功能的要求, 9月份的最小下泄流量为10,000 m³/s。

3) 航运流量约束。葛洲坝水利枢纽下游最低通航水位应满足过坝船舶安全正常航行的要求, 现行船舶(队)按不低于39.0 m(采用庙嘴水位)控制。

4) 三峡库区地质灾害治理对水库蓄水的要求。考虑到三峡库区地质灾害治理的要求, 三峡库水位上升不超过3 m/d, 特殊情况下如需下降, 则降幅不超过0.6 m/d。

5. 结果分析

提前蓄水方案的优选需要考虑横向(起蓄时间)寻优和纵向(汛末蓄水目标)寻优两个方面, 为降低计算量, 在优化计算之前首先需要确定可行域范围。横向方面, 最小值为9月1日起蓄。出于地质灾害方面的考虑, 三峡水库每日最高蓄水位不能超过3 m, 为能尽可能的蓄水至目标水位, 最晚起蓄时间不应晚于9月

20日; 纵向方面, 《优化方案》规定9月底可蓄水至158 m, 而泥沙专家组认为9月30日水位蓄至166 m对水库淤积不会造成很大不利影响^[2], 因此分别将158 m和166 m作为纵向寻优的最小和最大值。

根据随机模拟得到的1万组径流过程以及所建立的提前蓄水方案优选模型, 在可行域内双向递增求解, 可以得到当8月下旬分别发生丰水、平水和枯水时, 不同起蓄日期蓄水至汛末不同蓄水目标的综合评价指标。调度结果的规律分布列于图5。因篇幅所限, 表4仅列出汛末蓄水目标为166 m时, 8月下旬发生各特征来水量时的部分蓄水调度结果。又因防洪限制水位不是本文的研究重点, 故选用文献[13]中的研究成果, 9月份上、中和下旬分别为166.6 m、168.8 m和172.0 m。

1) 风险率方面, 当8月下旬分别发生丰水、平水和枯水时, 同样的起蓄时间和蓄水目标下, 风险率依

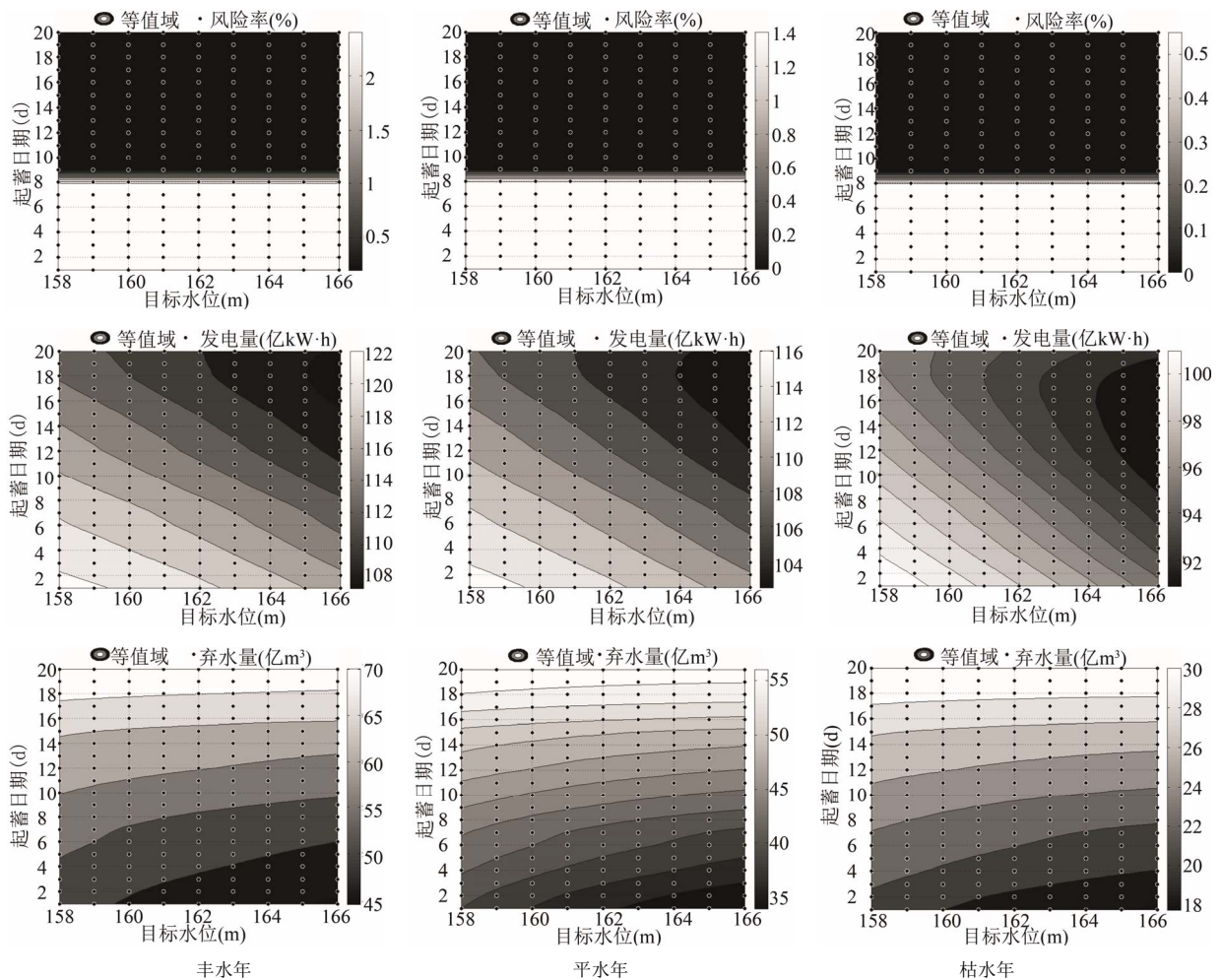


Figure 5. The results of statistical indicators for flood control risk and comprehensive utilization benefits
图5. 风险和效益统计指标的计算结果

Table 4. The scheduling results of different impounding water schemes for the target of refilling reservoir to 166 m
表4. 汛末蓄水目标为166 m时不同提前蓄水调度方式结果对比表

特征年	蓄水方案	风险率/%	发电量/亿 kW·h	弃水量/亿 m ³
丰水年	原方案	0.10	106.23	83.14
	9月1日起蓄	2.47	117.03	44.55
	9月10日起蓄	0.26	110.73	55.56
	9月20日起蓄	0.10	107.80	72.42
平水年	原方案	0.10	101.57	66.08
	9月1日起蓄	1.50	110.77	33.96
	9月10日起蓄	0.01	105.02	43.49
	9月20日起蓄	0.00	103.30	57.28
枯水年	原方案	0.10	89.81	36.96
	9月1日起蓄	0.59	95.31	17.78
	9月10日起蓄	0.00	91.50	23.59
	9月20日起蓄	0.00	92.33	31.63

次减少, 表现在图中为深色区域逐渐增加, 而浅色区域逐渐减少且数值也逐渐减小。丰水条件下, 无论何种提前蓄水方案, 均存在不同程度的防洪风险, 但9月20日以后起蓄, 9月底蓄水至166 m及以下, 风险率为0.1%, 与原方案设计标准相同; 平水条件下, 9月8日以后起蓄, 9月底蓄水至166 m及以下, 风险率仅为0.01%, 小于0.1%的设计标准。9月20日以后起蓄, 9月底蓄水至166 m及以下, 风险率均为0; 枯水条件下, 9月1日以后起蓄, 9月底蓄水至160 m及以下, 风险率为0.59%。9月8日以后起蓄, 9月底蓄水至166 m及以下, 风险率均为0。

2) 发电量方面, 当8月下旬分别发生丰水和平水时, 同样的起蓄时间和蓄水目标下, 发电量依次减少, 表现在图中为深色区域逐渐增加, 而浅色区域数值逐渐减小。从表4可以看出, 汛末蓄水目标为166 m时, 从9月1日到9月20日起蓄, 丰水条件下, 发电量从117.03亿kW·h逐渐减小到107.80亿kW·h, 较原设计方案, 9月20日起蓄方案, 多年平均发电量可增加1.57亿kW·h (1.46%); 平水条件下, 发电量从110.77亿kW·h逐渐减小到103.30亿kW·h, 较原设计方案, 9月10日起蓄方案, 多年平均发电量可增加3.45亿kW·h (3.40%); 但枯水条件下, 发电量从95.31亿kW·h逐渐减小到90.86亿kW·h后又逐渐升高到92.33亿kW·h, 其原因是, 当目标蓄水位一定时, 随着起蓄时间的推迟,

起蓄之前发电流量增加, 但开始蓄水后单位时间内所需蓄水量进一步增加, 发电流量则进一步减小, 入能、出能和蓄能相互影响与转化, 故发电量呈现出先减小后略有增加的趋势。较原设计方案, 9月1日起蓄方案, 多年平均发电量可增加5.50亿kW·h (6.12%)。

3) 弃水量方面, 当8月下旬分别发生丰水、平水和枯水时, 同样的起蓄时间和蓄水目标下, 弃水量依次减小, 表现在图中为浅色区域数值逐渐减小。主要因为随着起蓄时间的推迟以及目标蓄水位的提高, 所需的蓄水量逐渐增加, 故弃水量逐渐减少, 能量以蓄能的形式储存在水库中。从表4可以看出, 较原设计方案, 汛末蓄水目标为166 m时, 丰水条件下, 9月20日起蓄方案, 多年平均弃水量可减小10.72亿m³ (12.89%); 平水条件下, 9月10日起蓄方案, 多年平均弃水量可减小22.59亿m³ (34.19%); 枯水条件下, 9月1日起蓄方案, 多年平均弃水量可减小19.18亿m³ (51.89%)。

6. 结论

本文选取三峡水库8月下旬洪量与9月份洪量作为联合观测样本, 运用 Copula 函数构建了二者的联合分布及条件概率公式, 通过随机抽样方法模拟得到9月份随机入库流量序列, 为风险分析和控制提供数据支持。建立了提前蓄水时机优选模型, 并选用防洪风

险率、发电量和弃水量三种综合评价指标,对9月份提前蓄水方案进行优化选择,得到以下结论:若8月下旬来水为丰水,则9月下旬起蓄,月底均匀蓄水至166 m,较原设计方案,在不增加防洪风险的前提下,多年平均发电量可增加1.57亿kW·h(1.46%),弃水量减小10.72亿m³(12.89%);若来水为平水,则9月中旬起蓄,月底均匀蓄水至166 m,较原设计方案,在不增加防洪风险的前提下,多年平均发电量可增加3.45亿kW·h(3.40%),弃水量减小22.59亿m³(34.19%);若来水为枯水,通过加强实时监测,则可进一步提前至9月上旬起蓄,月底均匀蓄水至166 m,较原设计方案,在基本不增加防洪风险的前提下,多年平均发电量可增加5.50亿kW·h(6.12%),弃水量减小19.18亿m³(51.89%)。

参考文献 (References)

- [1] 郑守仁. 三峡工程设计水位175 m试验性蓄水运行的相关问题思考[J]. 人民长江, 2011, 42(13): 1-7.
ZHENG Shouren. Some considerations on related problems in pilot impoundment of TGP at design water level of 175 m. Yangtze River, 2011, 42(13): 1-7. (in Chinese)
- [2] 闵要武, 张俊, 邹红梅. 基于来水保证率的三峡水库蓄水调度图研究[J]. 水文, 2011, 31(3): 27-30.
MIN Yaowu, ZHANG Jun and ZOU Hongmei. Research on impounding schemes for the Three Gorges Reservoir based on inflow guaranteed frequency. Journal of Hydrology, 2011, 31(3): 27-30. (in Chinese)
- [3] 彭杨, 李义天, 张红武. 三峡水库汛末蓄水时间与目标决策研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 682-689.
PENG Yang, LI Yitian and ZHANG Hongwu. Study on the impounding time and objective decision of the Three Gorges Reservoir at the end of flood period. Advances in Water Science, 2003, 14(6): 682-689. (in Chinese)
- [4] 李义天, 甘富万, 邓金运. 三峡水库9月分旬控制蓄水初步研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 61-66.
LI Yitian, GAN Fuwan and DENG Jinyun. Preliminary study on impounding water of Three Gorges Project in September. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 61-66. (in Chinese)
- [5] 刘攀, 郭生练, 庞博, 等. 三峡水库运行初期蓄水调度函数的神经网络模型研究及改进[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 83-89.
LIU Pan, GUO Shenglian, PANG Bo, et al. A modified approach for deriving storage operating rules of the Three Gorges reservoir with artificial neural network. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2): 83-89. (in Chinese)
- [6] 邓金运, 李义天, 陈建, 等. 泥沙淤积对三峡水库9月分旬蓄水的影响[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 110-114.
DENG Jinyun, LI Yitian, CHEN Jian, et al. Preliminary study on impounding water of Three Gorges Project in September. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 27(3): 110-114. (in Chinese)
- [7] 刘心愿, 郭生练, 刘攀, 等. 考虑综合利用要求的三峡水库提前蓄水方案[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 851-856.
LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Scheme of impounding in advance for the Three Gorges Reservoir by considering the comprehensive utilization benefits. Advance in Water Science, 2009, 20(6): 851-856. (in Chinese)
- [8] 水利部. 三峡水库优化调度方案[R], 2009.
The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. Scheme of optimal operation for the Three Gorges Reservoir, 2009. (in Chinese)
- [9] 张娟, 张艾东, 蔡治国. 三峡水库汛期分期成因分析与模型计算[J]. 人民长江, 2008, 39(18): 4-5.
ZHANG Juan, ZHANG Aidong and CAI Zhiguo. Hydrological genetic analysis and model calculation of division of flood period for the Three Gorges Reservoir. Yangtze River, 2008, 39(18): 4-5. (in Chinese)
- [10] XIONG L. H., GUO S. L. Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station. Hydrological Sciences Journal 2004, 49(1): 99-112.
- [11] 肖义, 郭生练, 熊立华, 等. 一种新的洪水过程随机模拟方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(2): 55-60.
XIAI Yi, GUO Shenglian, XIONG Lihua, et al. A new random simulation method for constructing synthetic flood hydrographs. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(2): 55-60. (in Chinese)
- [12] 水利部. 水利水电工程水文计算规范 SL278—2002[S]. 北京: 水利水电出版社, 2002.
The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. Standard for hydrological information and hydrological forecasting (SL278—2002), 2002. (in Chinese)
- [13] 李雨, 郭生练, 郭海晋, 等. 三峡水库提前蓄水的防洪风险与效益分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 8-14.
LI Yu, GUO Shenglian, GUO Haijin, et al. Flood control risk and benefit of impounding water in advance for the Three Gorges Reservoir. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(1): 8-14. (in Chinese)