

Optimal Operation Methods of Baise Reservoir for Flood Control

Jingwen Zhang^{1,2}, Pan Liu^{1,2}, Xiaohui Lei³, Xizhen Chen^{1,2}, Wang Zhang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan

³China Institute of Hydropower and Water Resources, Beijing

Email: zhangjingwen91@126.com

Received: Jul. 18th, 2014; revised: Jul. 23rd, 2014; accepted: Jul. 29th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

There are mainly two difficulties in the process of solving a single reservoir operation, which are the possibility of un-optimal in the reservoir conventional operation and the complexity in the optimal operation. In order to solve these problems, a deterministic flood operation model was established, then a simplified two-dimensional dynamic programming method was used to resolve the difficulties of time-lag of the Muskingum method and find the optimal solution. Using the implicit stochastic method to analyze the optimal trajectory, forecasting reservoir capacity and storage outflow were applied. The operating rules of the Baise reservoir were derived by piecewise linear fitting. This Baise reservoir was selected as the case study. The results indicated that the simplified two-dimensional dynamic programming can reduce the computational complexity. The optimal operation made the mean value of reservoir maximum water levels 0.27 m lower than the conventional operating rules, and the optimal operation is superior to the conventional operation. The operating rules made the mean value of reservoir maximum water levels 0.27 m lower than the conventional operating rules, and the derived operating rules can optimize the process of the Baise reservoir flood storage.

Keywords

Flood Control Operation, Muskingum, Simplified Two-Dimensional Dynamic Programming, Operating Rules

百色水库防洪优化调度方法研究

张靖文^{1,2}, 刘攀^{1,2}, 雷晓辉³, 陈西臻^{1,2}, 张旺^{1,2}

¹武汉大学, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

³中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京

Email: zhangjingwen91@126.com

收稿日期: 2014年7月18日; 修回日期: 2014年7月23日; 录用日期: 2014年7月29日

摘要

针对单水库常规调度的非最优性, 以及优化调度模型求解的复杂性这两方面的问题, 建立了确定性防洪优化调度数学模型, 利用简化二维动态规划方法进行求解计算, 从而克服动态规划的无后效性与马斯京根法洪水演算的时滞性冲突; 运用隐随机方法分析最优轨迹, 利用预报库容和出库流量两个参数, 通过分段线性拟合提取出了防洪调度规则。百色水库实例研究表明, 简化二维动态规划方法可简化计算; 较常规调度, 确定性防洪优化调度的水库最高水位平均值降低了1.41 m, 优化调度明显优于常规调度; 调度规则的合理性检验表明: 较常规调度, 调度规则的水库最高水位平均值降低了0.27 m, 提高了百色水库防洪能力。

关键词

防洪调度, 马斯京根, 简化二维动态规划, 调度规则

1. 引言

洪水灾害是我国最严重的自然灾害之一, 水库防洪调度是解决洪涝灾害的重要措施。水库防洪调度根据调度原理和方法可以分为常规调度和优化调度, 常规调度方法简单直观, 优化法通过建立水库防洪调度的目标函数, 并拟定约束条件, 然后借助最优化方法求解模型。常用的模型求解方法有动态规划(DP)、离散微分动态规划(DDDP)、逐次渐近算法(POA)等, 但这些算法都存在结构复杂、求解困难等缺点。雷声隆[1]首先将自优化模拟技术应用到南水北调东线工程中, 邵东国[2]在数学论证的基础上给出了模拟自优化的最优性和收敛性准则, 薛青山[3]证明了单一水库调度自优化模拟技术决策域的最优性。相比于发电调度规则和供水调度规则, 防洪调度规则形式还不明确。本文以百色水库为研究背景, 求解确定性防洪优化调度模型, 再提取调度规则, 以此探讨水库防洪调度问题。

2. 防洪优化调度数学模型

2.1. 数学模型

2.1.1. 目标函数

已知入库洪水过程、区间入流过程、水库防洪库容、溢洪道泄洪能力及下游安全泄量等, 采用最大防洪安全保证准则[4](下泄流量控制模式), 在满足下游防洪控制断面安全泄量的条件下, 尽可能地多下泄, 从而留出更大的防洪库容, 以备调蓄后续可能发生的大洪水。其等价目标函数为:

$$Z_m^* \Leftrightarrow Vf_{\min} = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \{V(t) + [Q_{rk}(t) - Q_{ck}(t)] \Delta t\}^2 \right\} \quad (1)$$

式中：\$Z_m^*\$ 为水库最高水位最低值；\$V(t)\$ 为 \$t\$ 时刻水库库容；\$Q_{rk}(t)\$ 为 \$t\$ 时刻水库入库流量；\$Q_{ck}(t)\$ 为 \$t\$ 时刻水库出库流量；\$\Delta t\$ 为计算时段长度；\$T\$ 为总调度时段数。

2.1.2. 约束条件

1) 水量平衡约束

$$\frac{Q_{rk}(t) + Q_{rk}(t+1)}{2} \Delta t - \frac{Q_{ck}(t) + Q_{ck}(t+1)}{2} \Delta t = V(t+1) - V(t) = \Delta V(t) \quad (2)$$

2) 水库库容约束

$$V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max} \quad (3)$$

式中：\$V_{\min}\$ 为水库死库容；\$V_{\max}\$ 为水库总库容；

3) 下游河道安全泄量约束

$$Q_z(t) + Q_{qj}(t) \leq Q_{AN} \quad (4)$$

式中：\$Q_z(t)\$ 为 \$t\$ 时刻水库出流演算至下游防洪控制点的流量；\$Q_{qj}(t)\$ 为 \$t\$ 时刻区间入流；\$Q_{AN}\$ 为保证下游防洪控制点安全泄流量；

4) 水库泄流能力约束

$$q(t) \leq q_{\max}(t) \quad (5)$$

式中：\$q_{\max}(t)\$ 为 \$t\$ 时刻水库的下泄能力；\$q(t)\$ 为水库水位的函数；

5) 泄量变幅约束

$$|Q_{ck}(t) - Q_{ck}(t+1)| \leq \nabla Q_{ck} \quad (6)$$

式中：\$|Q_{ck}(t) - Q_{ck}(t+1)|\$ 为水库相邻时段下泄流量的变幅；\$\nabla Q_{ck}\$ 为变幅容许值；

6) 河道汇流约束

$$Q_z(t) = C_0 Q_{ck}(t) + C_1 Q_{ck}(t-1) + C_2 Q_z(t-1) \quad (7)$$

式中：\$C_0, C_1, C_2\$ 为马斯京根法洪水演进参数。

上述约束公式无法在优化调度数学模型的求解过程中直接应用，一般采用“惩罚函数法”，即对不满足上述约束条件的时段进行“惩罚”，此时第 \$t\$ 阶段的指标函数式应修改为

$$Vf(t) = \begin{cases} Vf_{\min} & Q_z + Q_{qj} \leq Q_{AN} \\ Vf_{\min} + V^2 + a(Q_z + Q_{qj} - Q_{AN})^B + a(q - q_{\max})^B & Q_z + Q_{qj} > Q_{AN} \end{cases} \quad (8)$$

式中：\$a, B\$ 为“罚系数”，是大于 0 的常数。

2.2. 模型求解

采用马斯京根法[5]进行洪水演算时，由于防洪控制点的流量不仅与上游水库当前时刻出库流量有关，还和水库前 \$N\$ 个时段的出库流量有关，导致模型不满足无后效性要求，故不能直接应用动态规划求解。可采用简化二维动态规划[6]方法进行求解。

2.2.1. 简化二维动态规划方法

简化二维动态规划[6]与动态规划相似，从系统状态转移角度，给定系统的初始状态 \$S_n\$ (水库蓄水量或

水位)和当前系统决策 d_n (水库泄流量), 系统下一个时刻状态 S_{n+1} 并不能唯一由 S_n 和 d_n 确定。从一般角度 S_{n+1} 可表示为

$$S_{n+1} = F(S_n, d_n, d_{n-1}, \dots, d_{n+1-m}), (n \geq m) \tag{9}$$

为了满足动态规划递推的无后效性[7]要求, 将 $d_n, d_{n-1}, \dots, d_{n+1-m}$ 视为状态变量, 形成新的状态变量 $S_n^* = (S_n, d_n, d_{n-1}, \dots, d_{n+1-m})$, 有 $S_{n+1} = f(S_n^*, d_n)$, 但这种处理方式易导致维数灾, 实际上不能求解。

简化二维动态规划方法是根据动态规划方法递推计算的结果, 即系统默认初始状态 S_0 到 S_n 中间存在的唯一一条最优轨迹, 以及相应的最优策略 $\{d_{n-1}^*, d_{n-2}^*, \dots, d_1^*\}$, 将前 n 个状态的最优策略看作状态一, d_n 看作状态二, 其中 d_n 为当前决策, 因此可以看作简化后的二维动态规划[6], 具体形式见图 1, 这种处理可以降低复杂度, 提高精度, 关系表达为

$$S_{n+1} = f(S_n^*, d_n) \tag{10}$$

2.2.2. 模型求解思路

简化二维动态规划算法中, 边界条件固定水库的始、末状态, 以时段为阶段变量, 以水库水位为状态变量, 以水库泄流量为决策变量, 将每个时段的水库水位进行离散。为实现预泄目的, 将初始水位设定为低于汛限水位, 末水位设定为汛限水位; 给定水库水位的离散步长, 当离散步长足够小, 便可得到近似的最优运行策略(最优调度线), 按顺时序计算调度过程, 并按逆时序算得最优路径, 从而输出优化调度后的结果。

求解过程的详细步骤如下:

- 1) 设定惩罚参数 a 、 B , 根据水库库容曲线得到初始库容与终止库容, 分别为

$$V(1) = V_c, V(T) = V_m。$$

- 2) 第一阶段: 将初始水位至防洪高水位进行离散, 根据各种约束条件依次计算第 $i(i=1, \dots, N)$ 个状态水位对应的时段平均泄流量和水库库容。

- 3) 任一阶段 $t (t=2, \dots, T-2)$: 利用简化二维动态规划思想, 将前 $n-1$ 阶段最优路径与当前阶段决策组合, 形成二维状态变量, 再计算 $T-3$ 个阶段对应时段平均出流量和水库库容, 以动用的防洪库容最小为优化目标进行递推计算。

- 4) 末阶段: 给定了水库末水位约束, 第 $T-1$ 阶段水库水位进行离散后对应的时段平均泄流量和水库库容, 与末阶段结合, 以动用的防洪库容最小为目标值找出第 $T-1$ 阶段对应的最优状态水库水位, 再回代计算, 可以依次递推出惩罚参数 a 、 B 下的最优水库蓄泄过程。

- 5) 根据所得水库库容过程可以计算出每个阶段的最优水位, 并统计水库出库流量、下游防洪控制点断面流量。

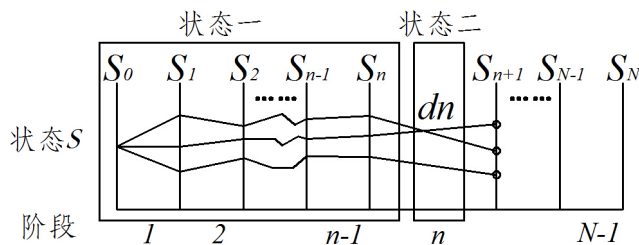


Figure 1. Simplified two-dimensional dynamic programming
图 1. 简化二维动态规划

3. 百色水库防洪调度研究

3.1. 概况

以广西省郁江流域的百色水库为研究对象,选定下游田东作为防洪控制点,百色水库特征值见表1,流域枢纽工程见图2。基于百色水库1962~2005年中所选取15场典型洪水放大所得200年一遇、100年一遇、50年一遇、30年一遇、20年一遇五种频率的设计洪水过程线,开展百色水库防洪优化调度研究,旨在减小洪灾损失。

3.2. 常规调度

已知百色水库来水径流,根据主汛期、非主汛期的防洪调度规则进行水库常规调度,主汛期的防洪调度规则见表2。

百色水库通过主汛期、非主汛期的常规调度规则进行调度计算,2001年典型洪水放大后所得200年一遇的常规调度结果见图3,图中可以看出,常规调度出库流量相比于入库流量,有明显的坦化作用,从而实现削峰作用,降低下游洪灾损失。

3.3. 确定性优化调度

百色水库以动用的防洪库容最小为目标,使用简化二维动态规划方法进行优化调度求解,得到单库优化调度结果。

模型求解中,水库水位被离散为0.05、0.01、0.005和0.001m;以百色水库2001年典型洪水放大到200年一遇为例,相对应的计算时间和目标函数值如图4所示。

由图4可知,水位离散步长减小[8],目标函数趋近于最优,程序计算时间增加,但水位离散步长减小到一定程度时,目标函数值改变不大,计算量大幅度增加,计算时间增长。水位离散步长由0.005m

Table 1. Parameters of the Baise reservoir

表1. 百色水库特征值

水库	汛限水位 /m	正常蓄水位 /m	设计洪水位 /m	校核洪水位 /m	防洪库容 /亿 m ³	总库容 /亿 m ³
百色	214.00	228.00	229.63	231.27	16.4	56.6



Figure 2. Project in drainage area

图2. 流域枢纽工程

Table 2. Flood control operating rules of the Baise reservoir in main flood season (5.20 - 8.10)
表 2. 百色水库主汛期防洪调度规则(5.20~8.10)

判断条件	控泄条件(m ³ /s)	控泄流量(m ³ /s)
左江崇左、南宁 涨水趋势	$Q_{崇左} \leq 6000$	3000
	$Q_{崇左} > 6000$, 且前 12 h 涨率 > 1000	1000
	$Q_{南宁} > 13900$, 且崇左前 12 h 涨率 > 2000	500
	$Q_{崇左} > 7800$, 且崇左前 12 h 涨率 > 3000 , 或南宁 24 h 涨率 > 2500	1000
	其它情况	2000
左江崇左、南宁 退水趋势	$Q_{崇左} \geq 7800$	1500
	$Q_{南宁} > 12000$	2300
	其它情况	3000
	库水位 ≥ 228 m	敞泄

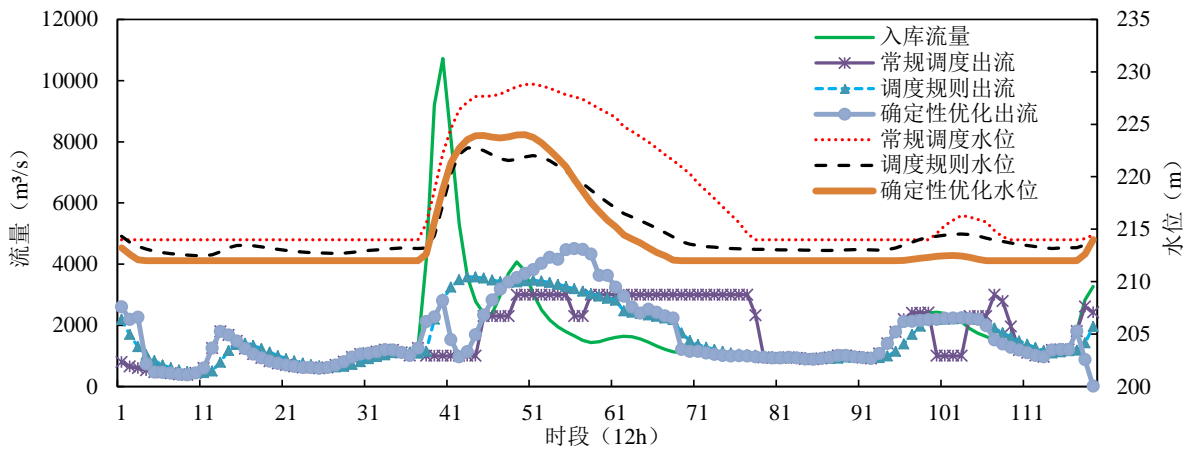


Figure 3. Comparison of the various operating models of 200 years in the Baise reservoir (2001)
图 3. 百色水库 200 年一遇不同调度方法结果对比(2001 典型年)

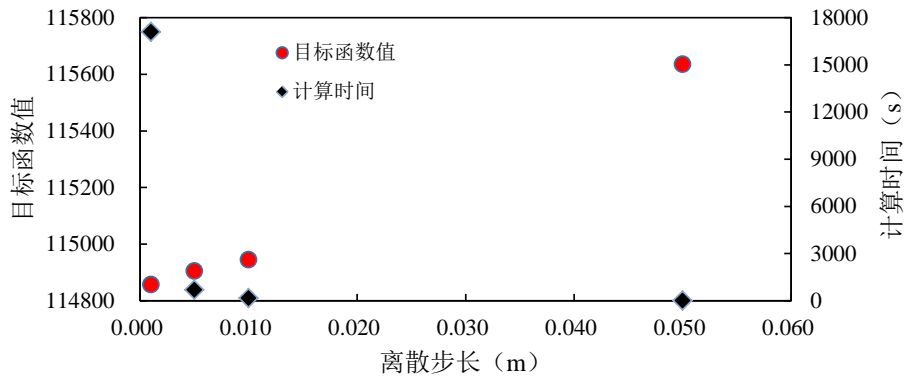


Figure 4. Objective function and computational time with various discrete steps
图 4. 离散步长变化对目标函数、计算时间的影响

减小至0.001 m时, 目标函数值只优化0.04%, 并趋于稳定, 而计算时间增加近24倍。因此百色水库确定性防洪优化调度中水位离散步长可取为0.005 m。

3.4. 对比分析

本文基于百色水库 1962~2005 年中所选取 15 场典型洪水放大所得 200 年一遇洪水过程,通过简化二维动态规划方法,求解百色水库防洪优化调度模型,可得出百色水库在优化调度的最优路径,确定性优化调度的最高水位和最大出流与常规调度结果对比见表 3。

从表 3 可以看出,确定性优化调度优于常规调度。1962~2005 年中所选取 15 场典型洪水放大所得 200 年一遇洪水中,每一年洪水都满足确定性优化的百色水库最高水位都低于常规调度水库最高水位,同时满足下游防洪控制点田东流量在安全泄量范围内,百色水库最高水位优化调度平均值相对于常规调度降低了 1.41 m,从而腾出更多的防洪库容,为后续洪水提供了更好的保障。

百色水库 2001 年典型洪水放大所得 200 年一遇洪水过程的常规与确定性优化调度结果对比见图 3,从图中可以看出,2001 年典型洪水放大所得 200 年一遇洪水,确定性优化调度与常规调度始末水位一致。相对于常规调度,确定性优化调度出库流量大于常规调度出库流量,优化调度水库最高水位均低于常规调度水库最高水位,实现了预泄功能,从而可以腾出更大的防洪库容。常规调度中百色水库水位为 228.81 m,优化调度中百色水库水位达 222.38 m,水位削减 6.43 m,腾出相对应的水库库容约达 8 亿 m^3 。

表 4 是表示百色水库 2001 年典型洪水放大所得五种频率洪水调度结果的比较,通过常规调度与确定性优化两栏结果可以看出,确定性优化均优于常规调度,200 年一遇时,水库最高水位削减最多为 6.43 m,20 年一遇时,水库最高水位削减最少为 3.62 m。由上述结果可知,百色水库确定性优化调度使用简化二维动态规划方法求解可明显降低水库最高水位,腾出更多的防洪库容。

Table 3. Comparison of the various operating models of 200 years in the Baise reservoir

表 3. 百色水库不同调度方式 200 年一遇结果比较

年份	常规调度			确定性优化调度			调度规则		
	水库最高水位/(m)	水库最大出流/(m^3/s)	田东最大流量/(m^3/s)	水库最高水位/(m)	水库最大出流/(m^3/s)	田东最大流量/(m^3/s)	水库最高水位/(m)	水库最大出流/(m^3/s)	田东最大流量/(m^3/s)
1962	215.36	3000	4580	214.57	2640	4580	216.02	2410	3970
1966	219.18	3000	4690	217.26	3780	4690	219.35	3120	4700
1968	218.89	3000	4900	217.33	3850	4900	219.29	3110	4960
1970	219.61	3000	3480	215.46	3070	3480	217.52	2880	3270
1974	215.62	2990	3710	214.00	2600	3710	215.40	2330	3050
1976	214.98	2840	3490	214.00	2610	3490	215.09	2290	2500
1978	218.56	3000	3700	217.19	3220	3700	219.21	3100	3740
1983	214.28	2610	2870	214.00	2610	2870	214.33	2190	2500
1988	214.14	2010	2230	214.00	2060	2230	214.14	2050	2240
1994	214.03	2610	2970	214.00	2610	2970	214.13	2410	2400
1996	214.57	2650	3960	214.00	2600	3960	215.09	2290	3630
1998	214.00	1200	1790	214.00	1620	1790	214.03	1960	2170
2001	228.81	3000	5220	222.38	4960	5220	222.76	3580	7700
2002	217.31	3000	5630	215.98	3300	5630	218.89	1990	5280
2005	214.00	1920	2730	214.00	2590	2730	214.07	2000	2410
平均值	216.89	2660	3730	215.48	2940	3730	216.62	2510	3640

Table 4. Comparison of operation results of five return period design floods using 2001 typical flood in the Baise reservoir
表 4. 百色水库 2001 年典型洪水对应五种频率洪水调度结果比较

调度方式	P = 0.5%		P = 1%		P = 2%		P = 3.33%		P = 5%	
	最高水位/ (m)	最大出流/ (m ³ /s)	最高水位/ (m)	最大出流/ (m ³ /s)	最高水位/ (m)	最大出流/ (m ³ /s)	最高水位/ (m)	最大出流/ (m ³ /s)	最高水位/ (m)	最大出流/ (m ³ /s)
常规调度	228.81	3000	228.22	3000	226.79	3000	225.97	3000	224.82	3000
调度规则	222.76	3580	222.11	3480	221.48	3390	221.02	3330	220.58	3280
确定性优化	222.38	4960	221.82	4670	221.94	4340	221.73	4030	221.20	3890

4. 防洪调度规则

4.1. 调度规则提取方法

水库优化调度结果分析主要有两类基本途径，显随机优化和隐随机优化。本文中主要应用隐随机优化方法[9]，利用确定性优化调度模型得出的水库优化调度结果即最优轨迹，从中总结规律，制定水库调度规则函数，指导水库进行蓄泄。

结果分析中，首先对水库预报库容与水库出库流量两个参数进行分析，求出相应的相关系数，与 0.3 和 0.7 区间分段点进行比较，确定线性相关程度，再使用一元线性回归方法与分段函数拟合法进行分析，从而可整理出调度函数。

4.2. 调度规则提取过程

本文制定了单库优化调度函数的“优化 - 拟合 - 验证”框架，即先建立水库优化调度模型，通过确定性简化二维动态规划优化得到最优样本[10]；然后采用一元线性回归分析最优样本得到调度函数；并基于模拟调度结果修正调度函数；最后采用历史径流系列进一步检验和评价调度函数。本文选取百色水库 1962、1966、1968、1970、1974、1976、1978、1983、1988、1994、1996、1998 年为调度规则函数参数率定期，2001、2002、2005 年为调度规则函数检验期。

调度规则提取过程的详细步骤如下：

1) 根据百色水库确定性防洪优化调度结果，找出最优路径，即百色水库逐时段对应的来水量、泄水量、水库水位等水库参数过程，从而根据各个时刻的水库水位，百色水库库容曲线得到各个时刻库容 V_i 。

2) 采用三个时段(36 h)洪水预报流量与当前时刻的库容对应转换叠加得预报库容。

$$V^* = V_i + (Q_{t+1} + Q_{t+2}) \times \Delta t \quad (11)$$

3) 将百色水库 1962、1966、1968、1970、1974、1976、1978、1983、1988、1994、1996、1998 年参数率定期对应的水库预报库容与水库当前时刻出库流量建立一一对应关系，共 1113 个数据点，并且按照预报库容升序排列，点绘于 *Matlab R2009a* 中 *Curve Fitting Tool (cftool)* 工具箱，并统计库容和流量不同区间的个数，库容与流量样本点分布表具体见表 5。

4) 去掉 1113 个数据点中的离群点，留下有效点。

5) 对有效点进行拟合[11]，调度函数明显可分为三段线性函数，划定区间，使用 *Matlab R2009a* 进行拟合得到分段函数，具体见图 5，即为调度函数：

$$Q_t = \begin{cases} 882.064V_t^* - 25944.8 & 21.90 < V_t^* \leq 31.81 \\ 125.578V_t^* - 1818.62 & 31.81 < V_t^* \leq 34.33 \\ 115.937V_t^* - 1206.55 & 34.33 < V_t^* \leq 48.00 \end{cases} \quad (12)$$

Table 5. Sample distributions of flow and reservoir
表 5. 库容与流量样本点分布

$Q(m^3/s)$ \ $V^*(亿 m^3)$	(29,30]	(30,31]	(31,32]	(32,33]	(33,34]	(34,35]	(35,36]	(36,37]	(37,38]	(38,39]	(39,40]	(40,41]
(0,500]	188	32	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
(500,1000]	17	346	25	4	0	0	0	0	0	0	0	0
(1000,1500]	3	114	72	17	1	0	0	0	0	0	0	0
(1500,2000]	1	5	52	9	3	1	0	1	0	0	0	0
(2000,2500]	4	10	32	40	23	12	9	3	1	1	2	1
(2500,3000]	0	4	4	5	10	11	4	3	3	0	1	2
(3000,3500]	0	0	0	0	0	1	8	8	2	5	3	1
(3500,4000]	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0	0
(4000,4500]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	213	511	188	76	37	25	21	16	9	7	6	4

1113

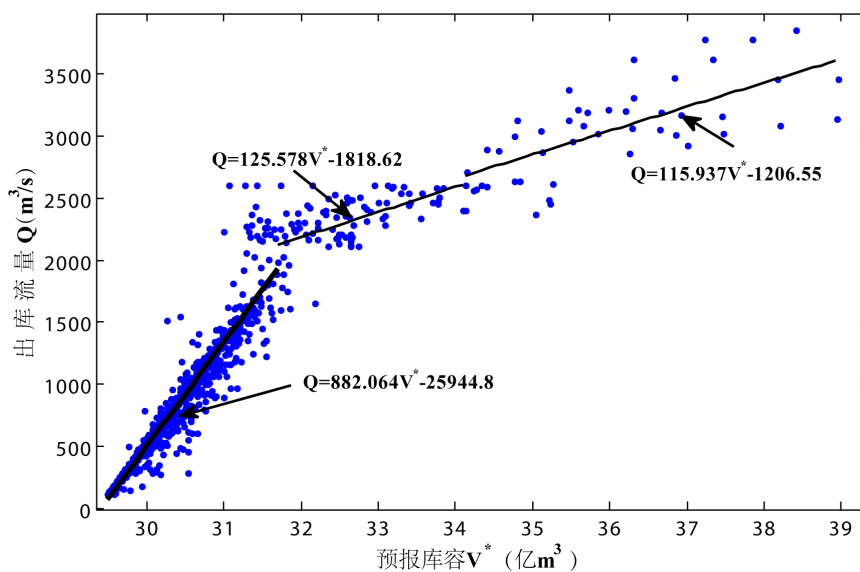


Figure 5. Piecewise fitting results of the Baise reservoir

图 5. 百色水库分段拟合结果

4.3. 调度规则的检验与分析

本文采用百色水库 2001、2002、2005 年典型洪水放大得到的 200 年一遇频率洪水作为检验期，由表 3 可知，百色水库常规调度最高水位平均值为 216.89 m，百色水库调度规则最高水位平均值为 216.62 m，水位削减 0.27 m，相比于常规调度，调度规则有效降低了百色水库水位，腾出了更大的防洪库容，为后续洪水提供了更好的保障，总体来说，调度规则产生的防洪效益比常规调度好，从而验证百色水库调度规则的可靠性。

根据表 3 中田东最大流量比较可知，根据调度规则和马斯京根法演算得到的田东断面最大流量基本小于常规调度和马斯京根法演算值，并均在田东安全流量范围内。需要指出的是，2001 年来流量较大，

调度规则得到的泄流量变动不大, 而区间入流大, 因此叠加后无法保证减小田东断面流量。

由图 3 可以看出, 2001 年典型洪水放大后的频率洪水中, 常规调度水库最高水位达 228.81 m, 调度规则水库最高水位达 222.76 m, 水位削减 6.05 m, 腾出相对应的水库库容约达 8 亿 m^3 。相对于常规调度, 调度规则实现了一定的预泄功能, 腾出更大的防洪库容, 降低水库水位, 因此调度规则出库流量在一定程度上大于常规调度出库流量, 调度规则水库最高水位基本上低于常规调度水库最高水位。

从表 4 可以看出, 百色水库 2001 年典型洪水放大得到的五种频率洪水过程中, 调度规则水库最高水位处于优化调度与常规调度之间, 即优化调度水库最高水位低于调度规则, 调度规则水库最高水位低于常规调度, 保证了优化调度优于调度规则, 调度规则优于常规调度, 完成了单库优化调度函数的“优化-拟合-验证”框架, 验证了单库防洪调度函数的正确性。

5. 结论

本文开展了百色水库防洪优化调度研究, 通过对优化调度结果分析, 提取了防洪优化调度规则, 主要研究成果和结论如下:

1) 建立了百色水库确定性防洪优化调度模型, 利用简化二维动态规划方法进行求解, 可克服动态规划的无后效性与马斯京根法洪水演算的时滞性冲突, 从而简化运算, 提高精度。结果表明: 2001 年典型洪水放大得到 200 年一遇洪水中, 优化调度中水库最高水位比常规调度水库最高水位削减 6.43 m, 可腾出近 8 亿 m^3 的防洪库容, 从而更好地指导百色水库进行防洪调度, 提高百色水库及上下游的防洪效益。

2) 提取了百色水库防洪调度规则, 使用隐随机方法分析确定性防洪优化调度最优轨迹, 通过分段线性拟合法提取防洪调度规则, 并对调度规则合理性进行了检验。结果表明: 1962~2005 年中所选取 15 场典型洪水放大所得 200 年一遇洪水中, 调度规则水库最高水位平均值比常规调度水库最高水位平均值削减 0.27 m, 证实了调度规则的合理性与实用性, 从而为防洪调度提供一定的参考。

如何优化已有防洪调度规则, 以及分析水文预报信息的不确定对规则的影响, 仍有待进一步研究。

基金项目

湖北省重大水利科研经费项目; 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0401); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201051); 中央分成水资源费项目(项目编号: 1261430210028)。

参考文献 (References)

- [1] 雷声隆, 覃强荣, 郭元裕, 宁远, 张静, 李燕. 自优化模拟及其在南水北调东线工程中的应用[J]. 水利学报, 1989, (5): 1-13.
LEI Shenglong, QIN Qiangrong, GUO Yuanyu, NING Yuan, ZHANG Jing and LI Yan. Self-optimization simulation and its application in the Project of South-to-North Water Transfer. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, (5): 1-13. (in Chinese)
- [2] 邵东国, 郭元裕, 沈佩君. 自优化模拟技术的最优性与收敛性[J]. 水利学报, 1995, (10): 15-22.
SHAO Dongguo, GUO Yuanyu and SHEN Peijun. The optimal and convergence of self-optimization simulation. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (10): 15-22. (in Chinese)
- [3] 薛青山, 罗强, 邵东国. 单一水库调度自优化模拟技术决策域的最优性[J]. 中国农村水利水电, 2009, (3): 1-3.
XUE Qingshan, LUO Qiang and SHAO Dongguo. The optimal decision region of self-optimization simulation in reservoir dispatching. China Rural Water and Hydropower, 2009, (3): 1-3. (in Chinese)
- [4] 陈森林. 水电站水库运行与调度[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
CHEN Senlin. Hydropower reservoir operation and operating. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese)
- [5] 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.
LUO Wensheng, SONG Xingyuan. Flood forecasting and operating. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)

- [6] 梅亚东. 梯级水库防洪优化调度的动态规划模型及解法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(5): 10-12.
MEI Yadong. Dynamic programming model and method of cascade reservoirs optimal operation for flood control. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric engineering, 1999, 32(5): 10-12. (in Chinese)
- [7] 刘肇祎, 胡铁松, 罗强, 洪林. 灌排工程系统分析[M]. 北京: 中国水利水电出版, 2010.
LIU Zhaoyi, HU Tiesong, LUO Qiang and HONG Lin. Irrigation and drainage systems analysis. Beijing: China Electric Power Press, 2010. (in Chinese)
- [8] 赵铜铁钢, 雷晓辉, 蒋云钟, 王浩. 水库调度决策单调性与动态规划算法改进[J]. 水利学报, 2012, 43(4): 414-421.
ZHAO Tongtiegang, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong and WANG Hao. Monotonicity in operation decision of reservoir and improved dynamic programming algorithm. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(4): 414-421. (in Chinese)
- [9] 陈洋波, 陈惠源. 水电站库群隐随机优化调度函数初探[J]. 水电能源科学, 1990, 8(3): 216-223.
CHEN Yangbo, CHEN Huiyuan. The preliminary approach of implicit stochastic optimal dispatching function for the hydro power station. Water Resources and Power, 1990, 8(3): 216-223. (in Chinese)
- [10] CHANG, F. J., CHEN, L. and CHANG, L. C. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms. Hydrological Processes, 2005, 19(11): 2277-2289.
- [11] HSU, N. S., WEI, C. C. A multipurpose reservoir real-time operation model for flood control during typhoon invasion. Journal of Hydrology, 2007, 336(3): 282-293.