

Optimization of Parallel Reservoirs for Flood Control Based on the Aggregation-Decomposition Method

Xizhen Chen^{1,2}, Pan Liu^{1,2}, Suming He³, Wang Zhang^{1,2}, Zejun Li^{1,2}, Jingwen Zhang^{1,2}

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

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

³Guangxi Water and Power Design Institute, Nanning Guangxi

Email: chenxizhen15@163.com

Received: Feb. 2nd, 2015; accepted: Feb. 9th, 2015; published: Feb. 16th, 2015

Copyright © 2015 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

The optimal operating rules for parallel reservoirs were built based on the aggregation-decomposition method. The relationship between the total release of the reservoirs and the aggregation reservoir storage could be expressed by piecewise-linear operating rules in the aggregation step, and the release was decomposed to each parallel reservoir according to its ratio of inflow in the decomposing procedure. Then the optimization model of parallel reservoirs was built, and its key parameters were calibrated by the Genetic Algorithm. Three parallel reservoirs (the Baise, Longtan and Qingshitan reservoirs) of the Xijiang River in China were selected for a case study. The optimal flood operating rules were compared with the conventional operating rules, and the flood peak of reference station for flood control could be decreased by 970 m³/s and 1320 m³/s in calibrated and validation periods, respectively. Thus, this method is beneficial for the reservoir's real-time operation to decrease the flood disasters.

Keywords

Piecewise-Linear, Parallel Reservoirs, Aggregation-Decomposition, Genetic Algorithms, Schedule Function

基于聚合 - 分解的并联水库群防洪优化调度研究

陈西臻^{1,2}, 刘攀^{1,2}, 何素明³, 张旺^{1,2}, 李泽君^{1,2}, 张靖文^{1,2}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉

³广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院, 广西 南宁

Email: chenxizhen15@163.com

收稿日期: 2015年2月2日; 录用日期: 2015年2月9日; 发布日期: 2015年2月16日

摘要

基于聚合 - 分解框架, 构建了并联水库群防洪调度函数: 在聚合步骤中, 将总出库流量表示为聚合水库库容的分段线性函数; 在分解步骤中, 按各水库来水量比例分解总出库流量, 得到各水库出库流量。从而构建了并联水库群防洪优化调度模拟模型, 采用遗传算法进行模拟优化, 识别分段线性函数的关键参数。以广西西江流域百色、龙滩、青狮潭三个并联水库为实例开展研究, 计算结果表明, 较常规调度, 优化调度在率定期(共10场次洪水)和检验期(共5场次洪水)分别能使下游防洪控制点梧州站平均多削峰 $970 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1320 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此, 提出的方法对指导水库群防洪优化调度有一定价值。

关键词

分段线性, 并联水库, 聚合 - 分解, 遗传算法, 调度函数

1. 引言

洪水是我国最严重的自然灾害之一, 通过科学的水库防洪优化调度可以有效地减轻灾害损失。对于大流域并联水库群的防洪优化调度问题, 由于洪水的时滞性增加了时间维数, 水库个数增加了空间维数, 优化调度的求解存在维数灾难。梅亚东[1]提出了考虑后效性的梯级水库群动态规划解法, 陈炯宏等[2]用聚合分解求解了梯级水电站群发电优化调度问题。本文以广西百色、龙滩、青狮潭三个现有防洪水库为实例, 基于聚合 - 分解, 采用分段线性函数作为聚合水库的调度函数型式, 得到总出库流量, 以各水库来水量比例分配各水库出库流量进行决策分解, 用遗传算法识别函数参数, 并验证调度函数的合理性。

2. 研究方法与步骤

在水库群隐随机调度中, 可采用“优化 - 拟合 - 验证”框架编制水库群联合调度函数, 即建立水库群防洪优化调度模型, 通过确定性优化调度得到最优样本, 再采用多元线性回归或其他方法分析最优样本得到调度函数, 并基于模拟调度验证调度函数的合理性[3]。本文采用常用的水库防洪调度函数型式, 优化并识别调度函数参数, 合并“优化”和“拟合”两个步骤, 直接得出最优样本的调度函数, 并用历史资料验证该调度函数的合理性。

2.1. 聚合 - 分解模型

聚合 - 分解模型的示意图如图 1 所示，用分段线性表示聚合水库的调度函数，并因此得到总出库流量，再通过分解模块得到各水库出库流量。

2.1.1. 聚合模型

基于大系统聚合分解思想，建立水库群联合优化调度模型[4]，如图 1 所示，将所研究的水库虚拟为一个“聚合水库”，该聚合水库防洪库容与入库流量分别由各水库防洪库容和入库流量叠加得到，即

$$V_i = \sum_{j=1}^m V_{i,j}^* \quad (1)$$

$$I_i^* = \sum_{j=1}^m I_{i,j} \quad (2)$$

式中： V_i 为 i 时段聚合水库的库容； $V_{i,j}$ 为 i 时段 j 水库的库容； I_i^* 为 i 时段聚合水库的入库流量； $I_{i,j}$ 为 i 时段 j 水库的入库流量； m 为水库个数。

由于线性调度函数[5]具有简明、易于实施的特性，已广泛应用到水库的实际调度中。本文采用分段线性函数作为聚合水库的调度函数型式。水库的防洪调度规则曲线如图 2 所示，基于不确定性分析[6]，由 n 个时段洪水预报流量与当前时刻的库容对应转换叠加得到预报库容，即 V_i^*

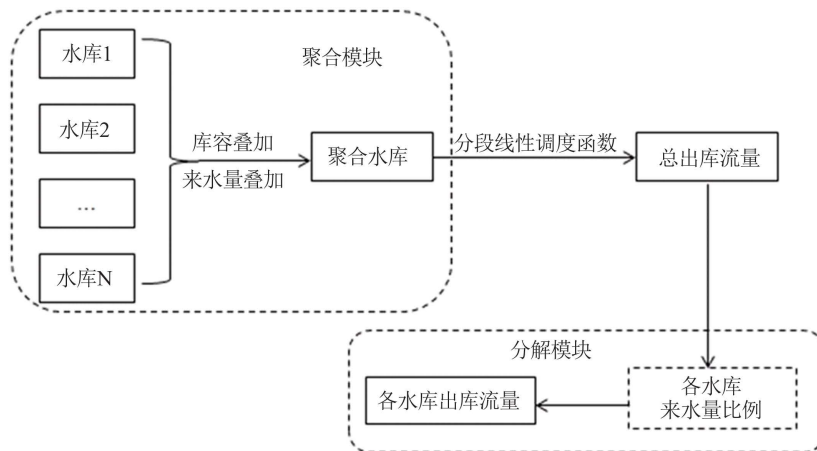


Figure 1. Schematic diagram: aggregation-decomposition of reservoirs
图 1. 水库群聚合 - 分解示意图

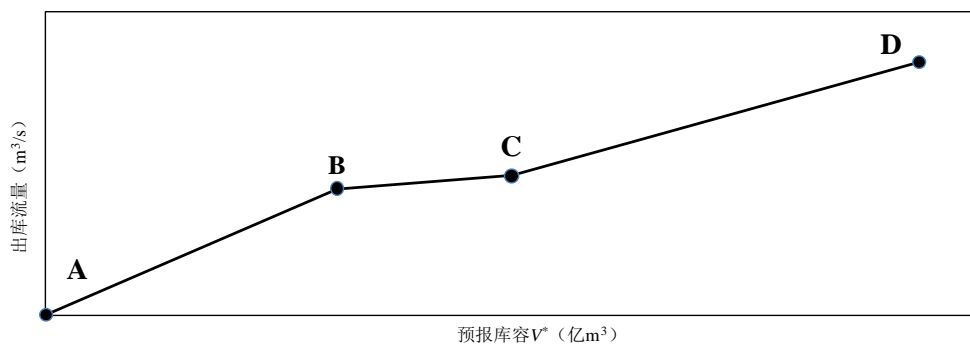


Figure 2. Piecewise-linear operating rules
图 2. 分段线性调度函数

$$V_i^* = V_i + \sum_{j=1}^m \sum_{t=0}^n I_{i+t,j} \times \Delta t \quad (3)$$

式中：\$V_i\$ 为 \$i\$ 时段聚合水库的库容；\$O_{i+t,j}\$ 为 \$i\$ 时段 \$j\$ 水库第 \$t\$ 个预报时段的来水流量；\$m\$、\$n\$ 分别为水库个数和预报时段个数；\$\Delta t\$ 为时段长度。

如图 2 所示，当调度函数的四个参数 \$A\$、\$B\$、\$C\$、\$D\$ 纵横坐标确定时，调度函数随之确定。水库的预报库容 \$V_i^*\$ 与出库流量存在一一对应关系，求得当前时段的预报库容即可确定水库的出库流量，即

$$O_i^* = f(V_i^*) = \begin{cases} a_1 \times V^* + b_1, & 0 < V^* \leq V_B^*; \\ a_2 \times V^* + b_2, & V_B^* < V^* \leq V_C^*; \\ a_3 \times V^* + b_3, & V_C^* < V^*. \end{cases} \quad (4)$$

式中：\$O_i^*\$ 为 \$i\$ 时段聚合水库的流量；\$f(V_i^*)\$ 为预报库容与出库流量的函数关系，即调度函数。

2.1.2. 分解模型

在分解阶段，可根据各水库来水量比例分解出库流量。即

$$O_{i,j} = O_i^* \times \left(\frac{\sum_{t=i}^{i+n} I_{t,j}}{\sum_{j=1}^m \sum_{t=i}^{i+n} I_{t,j}} \right) \quad (5)$$

式中：\$O_{i,j}\$ 为 \$i\$ 时段 \$j\$ 水库的出库流量；\$\sum_{t=i}^{i+n} I_{t,j}\$ 为 \$j\$ 水库从时段 \$i\$ 算起的 \$n\$ 个时段的预报流量；\$\sum_{j=1}^m \sum_{t=i}^{i+n} I_{t,j}\$ 为聚合水库 \$n\$ 个时段的预报流量；\$m\$ 为水库个数。

2.2. 模拟优化模型

2.2.1. 目标函数

采用最大削峰准则[7]使防洪控制站点最大流量最小。该准则就是在控制水库动用的最大防洪库容的前提下，以下游防护点的最大流量 \$q_{\max}\$ 最小作为防洪调度方案最优性的评判标准。

$$\min(q_{\max}^*) \Leftrightarrow \min \left\{ \sum_{i=1}^T \left[\sum_{j=1}^m O_{i,j} + Q_{qj,i} \right]^2 \right\} \quad (6)$$

式中：\$q_{\max}^*\$ 为下游防护点的最大流量的最小值；\$O_{i,j}\$ 为出库流量经河道调蓄后演算到下游防洪控制站点的流量；\$T\$ 为时段数，\$m\$ 为水库个数。

2.2.2. 约束条件

1) 水量平衡约束：

$$V_{i+1,j} = V_{i,j} + (I_{i,j} - O_{i,j}) \Delta t + \Delta \varepsilon \quad (7)$$

式中：\$V_{i+1,j}\$ 为 \$i+1\$ 时段初 \$j\$ 水库的库容；\$V_{i,j}\$ 为 \$i\$ 时段初 \$j\$ 水库的库容；\$I_{i,j}\$ 为 \$i\$ 时段 \$j\$ 水库的入库流量，\$m^3/s\$；\$O_{i,j}\$ 为 \$i\$ 时段 \$j\$ 水库的出库流量；\$\Delta \varepsilon\$ 为蒸发、渗漏等损失水量，可不计。

2) 库容约束：

$$VL_{i,j} \leq V_{i,j} \leq VU_{i,j} \quad (8)$$

式中：\$VL_{i,j}\$ 为 \$i\$ 时段 \$j\$ 水库的最小库容；\$VU_{i,j}\$ 为 \$i\$ 时段 \$j\$ 水库的允许达到的最大库容。

3) 库容曲线约束：

$$Z_{i,j} = f_{zv}(V_{i,j}) \quad (9)$$

式中： $Z_{i,j}$ 为*i*时段*j*水库的坝前水位， m ； $f_{zv}(\cdot)$ 为水位库容曲线函数。

4) 水库出库流量约束：

$$OL_{i,j} \leq O_{i,j} \leq OU_{i,j} \tag{10}$$

式中： $OL_{i,j}$ 为*i*时段*j*水库的最小出库流量，一般由下游灌溉航运、供水或者航运要求提出，在本次防洪调度研究中，不予考虑； $OU_{i,j}$ 为*i*时段*j*水库的最大出库流量，一般根据下游防洪要求、水库最大泄流能力等给出。

5) 河道汇流约束：

$$O_{i,j}^z = C_0 O_{i,j} + C_1 O_{i-1,j} + C_2 O_{i-1,j}^z \tag{11}$$

式中： C_0 、 C_1 、 C_2 为水库到下游控制点的马斯京根河道汇流系数； $O_{i,j}^z$ 为*i*时段*j*水库出库流量经演算至下游断面的流量。

2.3. 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm)是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。该方法按照择优汰劣的法则，将适者生存与自然界基因变异、繁衍等规律相结合，采用随机搜索，以种群为单位，根据个体的适应度进行选择、交叉及变异等操作，最终可收敛于全局最优解[8]。遗传算法已经在水库调度领域中得到了广泛的应用[9]。本文采用在标准遗传算法的基础上经过优化的精英保留策略(Elitist Strategy) [10] [11]，主要计算步骤如下：

- 1) 确定模型的目标函数、个体的适应值、适应度表达方式；
- 2) 随机产生初始群体，每个个体包含点 B、C、D 的横纵坐标，共 6 个优化变量；
- 3) 计算每个个体的适应值、适应度，记录最佳个体，按精英保留策略复制个体基因；
- 4) 产生随机数，当达到交叉、变异概率后个体之间实行交叉或变异，从而产生新一代种群；
- 5) 计算新一代种群个体的适应值、适应度；
- 6) 重复步骤 3)、4)、5)直到满足终止条件为止。

综上所述，可以得出模型[12]的求解过程，如图 3 所示。

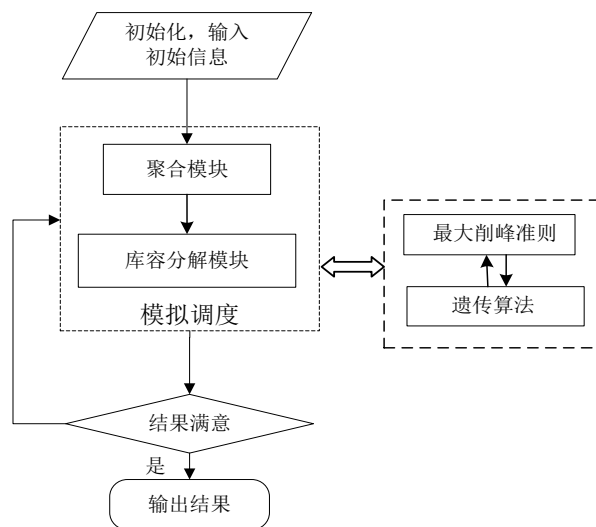


Figure 3. Flow chart of the simulation-based optimization model
图 3. 模型优化求解流程图

3. 实例研究

3.1. 西江流域水库群

西江属珠江流域干流，跨越滇、黔、桂、粤四省及越南，广西属珠江流域西江水系的面积为 202,082 km²，占全区总面积的 85.39%。目前广西境内的西江流域面临着比较严峻的防洪形势。西江流域属于亚热带华南季风气候区，受季风气候影响，降雨时空分布不均匀，降雨量年际变化大，汛期(4~9 月)降雨量占全年总降雨量的 70%~85%，个别年份最多达到 90%。修建水库及提防是有效的防洪措施。如图 4 所示，西江流域目前投入运行的防洪水库主要有郁江上游的百色水库、红水河上游的龙滩水库和柳江上游的青狮潭水库。三个水库的主要参数如表 1 所示。

3.2. 常规调度

百色水库防洪库容为 16.4 亿 m³，按现有调度规则运行的防洪任务为：使下游南宁市的防洪能力从 20 年一遇提高至 50 年一遇，使郁江中下游区防洪能力从 10 年一遇提高至 20 年一遇，同时减轻右江沿岸洪水灾害。龙滩水库防洪库容为 50 亿 m³，现有防洪调度规则为：1) 在梧州涨水期，龙滩水库下泄流量不大于 6000 m³/s，当其入库流量超过 25,000 m³/s 时，龙滩泄量不超过 4000 m³/s；2) 在梧州退水期，当其流量在 42,000 m³/s 以上时，龙滩水库仍按不大于 4000 m³/s 下泄；如梧州站流量小于 42,000 m³/s，则龙滩按入库流量下泄；3) 当龙滩水库蓄满时，龙滩水库按入库流量下泄。青狮潭水库防洪库容 0.541 亿 m³，青狮潭水库的防洪任务为：将桂林市 30 年一遇洪水降至 20 年一遇(防洪堤安全泄量 4870 m³/s) 以下。

对于 1962、1966、1968、1970、1974、1976、1978、1983、1988、1994、1996、1998、2001、2002、2005 共 15 场经放大后得到的百年一遇洪水，经百色、龙滩、青狮潭三个水库常规调度后梧州站调洪结果如表 2 和表 3 所示，梧州站百年一遇洪水洪峰流量平均削减 753 m³/s，其中最高削峰流量 3800 m³/s，能将梧州站百年一遇洪水降低至 44 年一遇，削峰效果最差的年份是 1996 年，梧州站洪峰流量比设计值增大 600 m³/s。

3.3. 优化调度

输入 1970、1974、1976、1978、1983、1988、1994、1996、1998、2001 共 10 场放大得到的 1% 设计洪水作为率定期识别调度函数参数，选取 1962、1966、1968、2002、2005 共 5 场放大得到的 1% 设计洪



Figure 4. Project in the Xi Jiang River
图 4. 西江流域节点概化图

Table 1. Parameters of the Baise, Longtan and Qingshitan reservoirs
表 1. 三库主要参数

水库	汛限水位(m)	防洪高水位(m)	防洪库容(亿 m ³)	洪水传播至梧州时间(h)
百色	214	228	16.4	132
龙滩	359.3	376	50	120
青狮潭	224.2	226	0.514	55

Table 2. Results of the three reservoirs and Wuzhou point in calibration period
表 2. 率定期百年一遇洪水三库及梧州站调度结果

年份	百色流量(m ³ /s)			龙滩流量(m ³ /s)			青狮潭流量(m ³ /s)			梧州流量(m ³ /s)		
	设计	常规	优化	设计	常规	优化	设计	常规	优化	设计	常规	优化
1970	4310	3000	3630	18,800	13,300	12,900	1070	1090	1040	52,700	52,000	50,900
1974	4560	3000	2410	17,700	12,700	13,000	1980	1860	1650	52,700	50,200	52,000
1976	4010	2830	1060	14,900	12,000	13,000	1990	1990	1650	52,700	52,600	53,500
1978	6310	3000	4190	12,600	10,600	11,400	1940	1940	1650	52,700	52,700	52,500
1983	2980	2660	1010	19,100	11,500	18,800	1400	1400	1410	52,700	52,700	52,300
1988	1960	1960	830	20,900	12,000	11,700	1020	936	836	52,700	51,200	48,800
1994	2670	2610	1120	12,300	8300	4500	1660	1660	1550	52,700	52,700	49,800
1996	2930	2690	1440	15,600	11,600	9900	1440	1440	1350	52,700	53,300	52,800
1998	1140	1140	544	8400	5200	4230	2010	2010	1650	52,700	52,700	50,300
2001	11100	3000	4140	20,800	15,500	20,800	349	349	222	52,700	48,900	46,400
平均	4200	2590	2040	16,100	11,300	12,000	1490	1470	1300	52,700	51,900	50,900

Table 3. Results of the three reservoirs and Wuzhou point in verification period
表 3. 检验期百年一遇洪水三库及梧州站调度结果

年份	百色流量(m ³ /s)			龙滩流量(m ³ /s)			青狮潭流量(m ³ /s)			梧州流量(m ³ /s)		
	设计	常规	优化	设计	常规	优化	设计	常规	优化	设计	常规	优化
1962	3630	2880	1310	11,500	6000	8310	963	1060	792	52,700	51,300	49,700
1966	6310	3000	2400	18,200	18,200	18,700	727	727	636	52,700	52,600	51,800
1968	7030	3000	3370	21,400	21,400	20,200	1500	1100	1130	52,700	51,600	48,800
2002	4370	3130	3450	20,500	12,700	12,900	1470	1220	1310	52,700	52,700	52,600
2005	1830	1830	1360	7860	5500	3810	1027	935	694	52,700	52,000	50,700
平均	4630	2770	2380	15,900	12,800	12,800	1140	1010	912	52,700	52,000	50,700

水作为检验期检验调度函数的合理性。用遗传算法独立运算 10 次，每次计算 100 代，取交叉概率 0.6，变异概率 0.08，得到最优解，即四点坐标为：A (151.342, 0); B (187.887, 4591); C (188.237, 4620); D (189.178, 4625)。率定期和检验期梧州站百年一遇设计洪水调度结果如表 2 和 3 所示。

如表 2 和表 3 所示，经三库优化调度后：

1) 在率定期和检验期共十五场洪水中, 梧州站洪峰削峰流量最高可达 $6300 \text{ m}^3/\text{s}$, 能将百年一遇洪水降到 24 年一遇左右。

2) 在率定期平均削减梧州站洪峰流量 $1770 \text{ m}^3/\text{s}$, 较常规调度削减 $970 \text{ m}^3/\text{s}$; 能将百年一遇洪水平均降到 63 年一遇左右; 检验期平均削减洪峰流量 $1980 \text{ m}^3/\text{s}$, 较常规调度削减 $1320 \text{ m}^3/\text{s}$, 使洪水平均降到 60 年一遇左右。

青狮潭入库流量和防洪库容较小, 对梧州站洪峰流量影响不大, 龙滩入库流量较大, 对梧州站影响较大, 2005 年百年一遇洪水龙滩和梧州调度结果如图 5 和图 6 所示。由于龙滩水库入流洪峰与梧州洪峰出现时间不同步, 为了起到削峰作用, 在入库流量较小时, 龙滩水库出库流量比入库流量小。为了找出使梧州削峰效果最明显的调度函数参数, 聚合水库的出流量越小越好, 这很容易导致出现水库水位上升, 防洪库容提前用完, 洪峰过后水库水位没有回落的情况。可在洪水结束之后腾空水库。

4. 结论

本文以广西西江流域百色、龙滩、青狮潭三个水库为例, 建立了基于聚合-分解的并联水库群防洪优化调度模型, 采用分段线性调度函数模拟聚合水库调度函数型式, 并按各水库来水量比例分解聚合水库出库流量。输入 10 场百年一遇设计洪水并用遗传算法识别函数参数, 用 5 场百年一遇洪水验证调度函数的合理性。结果表明, 该方法较能有效削减下游防洪控制点的洪峰流量。本次研究采用的是 3 段线性调度函数模拟聚合调度函数型式, 下一步研究将考虑其他形式的调度函数型式[13], 并适当增加流域混联式水库个数以及应用不同的优化算法识别调度函数参数。

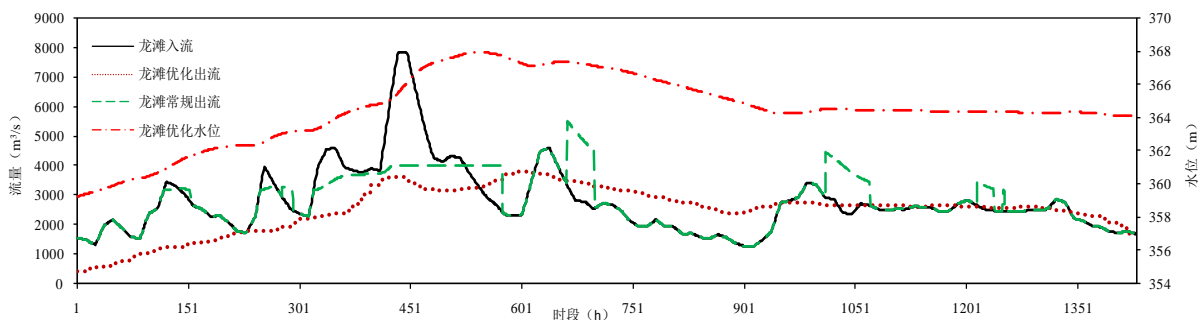


Figure 5. Optimal operation results of 100 years in the Longtan reservoir (2005)

图 5. 龙滩水库 1%设计洪水调度过程(2005 年)

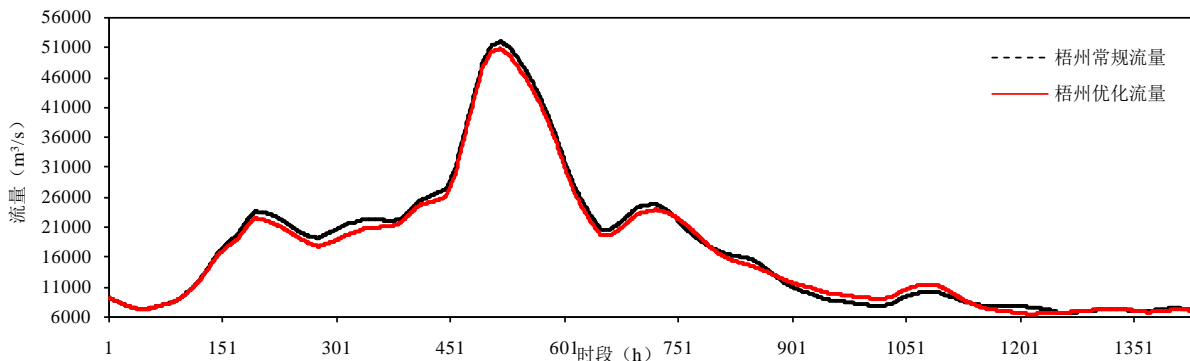


Figure 6. 100 years stream flow with the optimal operation at the Wuzhou station (2005)

图 6. 梧州站 1%设计洪水调度结果(2005 年)

基金项目

优秀青年科学基金(51422907); 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] 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)
- [2] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀, 郭富强, 李雨. 三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 78-84.
CHEN Jionghong, GUO Shenglian, LIU Pan, GUO Fuqiang and LI Yu. Joint operation of the Three Gorges cascade reservoirs and the Qingjiang cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 78-84. (in Chinese)
- [3] 刘攀, 郭生练, 张文选, 肖义, 高仕春. 梯级水库群联合优化调度函数研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 816-822.
LIU Pan, GUO Shenglian, ZHANG Wenxuan, XIAO Yi and GAO Shichun. Derivation of optimal operating rules for cascade reservoirs. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 816-822. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] LIU, P., CAI, X. and GUO, S. Deriving multiple near-optimal solutions to deterministic reservoir operation problems. Water Resources Research, 2011, 47(8): W08506.
- [6] LI, X., GUO, S., LIU, P., et al. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. Journal of hydrology, 2010, 391(1): 124-132.
- [7] 陈森林. 水电站水库运行与调度[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008, 87-90.
CHEN Senlin. Hydropower reservoir operation and operating. Beijing: China Electric Power Press, 2008, 87-90. (in Chinese)
- [8] 金菊良, 丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002.
JIN Juliang, DING Jing. Water resources systems engineering. Chengdu: Sichuan Science and Technology Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [9] 刘攀, 郭生练, 李玮, 易松松. 遗传算法在水库调度中的应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 78-83.
LIU Pan, GUO Shenglian, LI Wei and YI Songsong. A review of application of genetic algorithm to reservoir operation. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 78-83. (in Chinese)
- [10] LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(2): 93-111.
- [11] 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.
- [12] LIU, P., GUO, S., XU, X. and CHEN, J. Derivation of aggregation-based joint operating rule curves for cascade hydropower reservoirs. Water Resources Management, 2011, 25(13): 3177-3200.
- [13] OLIVEIRA, R., LOUCKS, D. P. Operating rules for multireservoir systems. Water Resources Research, 1997, 33(4): 839-852.