

Joint Operation of Flood Control and Hydropower Generation for the Multi-Reservoir System*

Shenglian Guo, Yu Li, Jionghong Chen

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan
Email: slguo@whu.edu.cn

Received: Nov. 2nd, 2011; revised: Nov. 18th, 2011; accepted: Dec. 1st, 2011

Abstract: Joint operation of flood control and hydropower generation for the Three Gorges cascade and Qingjiang cascade reservoirs in China was studied in this paper. The flood control and hydropower generation models were established for individual and joint operation of the cascade reservoirs. The models have considered reservoir flood prevention storage and electric compensation benefits among cascade reservoirs and were solved by the progressive optimality algorithms. Four typical years of 1954, 1981, 1982 and 1998 of the Yichang hydrological stations were selected to derive the design flood hydrographs. The results show that the average of Jingjiang River flood control standards can be raised to and 150-year and 168-year return periods respectively. The daily inflow data of consecutive hydrological years of 1982-1987 were used to test the models. Compared with the design operation rules, the joint operation of the multi-reservoir system can generate 5.992 billion kWh of extra power annual or an increase of 5.37% by the objective function of maximum hydropower generation. Through reservoir storage compensation, the spilled water of the Three Gorges and Qingjiang cascade reservoirs was decreased by 57.741 and 5.384 billion m³, respectively.

Keywords: Multi-Reservoir System; Flood Control Standard; Joint Operation; Storage Compensation; Hydropower Generation; Progressive Optimality Algorithm

巨型水库群防洪发电联合优化调度研究与应用*

郭生练, 李 雨, 陈炯宏

武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉
Email: slguo@whu.edu.cn

收稿日期: 2011 年 11 月 2 日; 修回日期: 2011 年 11 月 18 日; 录用日期: 2011 年 12 月 1 日

摘 要: 针对三峡和清江梯级巨型水库群防洪发电补偿联合调度问题, 分别建立了梯级单独和水库群联合防洪优化调度数学模型, 以发电量最大为目标的水电站群联合调度模型, 采用 POA 算法分别计算两个梯级单独运行和梯级联合运行在不同准则下的防洪标准和电力补偿效益。选取长江宜昌站 1954、1981、1982 和 1998 年为典型年推求设计洪水过程线, 梯级单独和水库群联合调度分别可使荆江河段的防洪标准提高到 150 年 168 年。选择 1982~1987 连续水文周期年的日径流资料进行计算, 与设计方案相比, 三峡梯级和清江梯级联合调度后的弃水量分别减少了 577.41 亿 m³ 和 53.84 亿 m³, 年平均发电量增加了 59.92 亿 kW·h, 即增加了 5.37%, 发电补偿效益十分显著。

关键词: 巨型水库群; 防洪标准; 联合调度; 库容补偿; 水力发电; POA 算法

*基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAC56B02, 2009BAC56B04)。

作者简介: 郭生练, (1957-), 男, 福建龙岩人, 武汉大学教授、博士生导师, 主要研究水文预报和防洪减灾技术、水资源评价和优化配制、水库规划设计和运行管理等领域。

1. 引言

三峡工程是开发和治理长江的关键性世纪工程, 其主要功能为防洪、发电、航运、供水等。原设计方案使长江荆江河段的防洪标准由建库前的约 10 年一遇提高到 100 年一遇^[1]。清江梯级水库在规划设计时, 为长江防洪错峰预留了 10 亿 m³ 库容^[2]。随着举世瞩目的三峡工程、清江水布垭电站的竣工和投入正常运行, 三峡梯级(三峡 - 葛洲坝)与清江梯级(水布垭 - 隔河岩 - 高坝洲)形成了一个地理位置靠近、处于同一地理气候区、总装机容量约 2800 万 kW、年均发电量达 1100 亿 kW·h、分属国家电网和华中电网调度管理、世界上最大的巨型混联水电站群。这些水库的特征值见表 1, 其中葛洲坝和高坝洲水库是日调节水库, 没有预留防洪库容。

高仕春等^[3]以发电量最大和保证出力最大为目标, 建立了梯级单独调度和系统联合调度二个数学模型并优化求解; 万飏等^[4]建立了三峡梯级与清江梯级联合运行模型并计算求解, 对比分析表明两梯级联合运行后可显著提高发电量和保证出力; 刘宁^[5]从发电优化调度的角度, 对三峡梯级与清江梯级所组成的混联式水电站群进行联合调度研究, 寻求出了最佳的组合调度方式; 陈炯宏等^[6]针对三峡梯级和清江梯级的混联水库群, 建立并求解了以梯级发电量最大为目标的水电站群联合优化调度模型, 分析了梯级间的电能补偿效益。

本文以三峡梯级与清江梯级水库组成的巨型水库群为研究对象, 开展防洪和发电联合优化调度研究, 探讨荆江河段的防洪安全标准和水电站群的发电效益。

Table 1. Three Gorges and the eigen-value of Qinjiang's cascade reservoir

表 1. 三峡和清江梯级水库特征值

水库	控制面积	汛限水位	正常蓄水位	设计洪水位	校核洪水位	防洪库容	总库容
	/10 ³ km ²	/m	/m	/m	/m	/亿 m ³	/亿 m ³
三峡	1005.5	145.0	175.0	175.0	180.4	221.5	393.0
葛洲坝	1008.7	-	66.0	66.0	67.0	-	15.8
水布垭	10.86	391.8	400.0	402.1	404.5	5.0	43.5
隔河岩	14.43	193.6	200.0	203.1	204.6	5.0	31.2
高坝洲	15.65	-	80.0	80.0	82.9	-	3.6

2. 水库群联合调度原则和模型

2.1. 联合调度的基本原则

对以防洪为主的水库群, 应采用补偿方式调度, 一般以梯级水库的上游水库或距防洪保护区较远的并联水库先行补偿, 使控制洪水比重较大、对洪水的调节能力较高、距下游防洪保护区较近的水库最后控制泄量; 对以灌溉及供水为主的水库群, 以总弃水量最小拟定各库蓄放水次序, 梯级水库上游水库应先蓄水后供水, 库群中如有调节能力高、汛期结束较早的水库应先蓄水, 在供水期按总供水要求进行补偿调节; 对于以发电为主的水库群, 在满足系统正常供电要求的前提下, 以总发电量最大拟定各库蓄放水次序, 梯级水库上游水库一般应先蓄水后供水; 对并联水库则需采用一些方法(如判别式法、库容效率指数法), 根据各库具体情况判别来确定最佳蓄放水次序^[7]。

2.2. 水库群防洪调度目标函数

采用防洪优化调度中最常用的最大削峰准则为目标函数, 由于该水库群系统的组成方式为混联式, 故将目标函数分为两种情况。

1) 梯级单独优化调度, 首先利用梯级上游水库的防洪库容削减洪峰, 使出库流量趋于均匀, 然后再利用梯级下游水库削减区间洪峰和上游水库不能调蓄的部分洪量, 发挥梯级水库间的库容补偿作用, 使得梯级水库的防洪库容得到充分利用, 出库流量更加均匀。即在梯级最下游水库处应用最大削峰准则:

$$\min q = \min \sum_{t=1}^T \sum_{n1=1}^{N1} (q_t^{n1} + \Delta q_t)^2 \quad (1)$$

2) 水库群联合优化调度, 将两个梯级视为一个整体, 以发挥系统内水库群之间的库容补偿调节作用, 从而充分利用各自的防洪库容削减洪峰, 以减轻下游防护对象的防洪压力, 提高整体的防洪效益。即在下游共同防洪对象处应用最大削峰准则:

$$\min q = \min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{n2=1}^{N2} q_t^{n2} + \Delta q_t \right)^2 \quad (2)$$

式中: q_t^{n1} 为梯级内 t 时刻第 $n1$ 个水库的出库流量; q_t^{n2} 为 t 时刻第 $n2$ 个梯级的下泄流量; T 为调度时段总数; $N1$ 为梯级水库个数; $N2$ 为梯级个数; Δq_t 为 t 时刻区间入流。

2.3. 水库群发电调度目标函数

这5座水库之间不仅存在径流联系和水力联系, 而且还有电力联系。在保证出力一定的情况下, 提高系统的多年平均发电量, 它反映了系统的电力补偿效益。在调度周期内来水量一定的条件下, 以梯级水电站发电量最大为目标函数, 考虑水量平衡、水库水位约束、电站出力约束以及梯级各电站之间的电力联系和水力联系等因素, 建立梯级水库优化调度数学模型, 优化两个梯级5座水库的放水发电过程, 寻求最优运行策略。

为了体现水库群联合调度的电力补偿在能量上的效益, 在一定保证出力的基础上建立水电站群多年平均发电量最大模型; 同时为了便于与各梯级单独运行时在发电量上的对比分析, 采用系统最小出力为各梯级单独运行时最大保证出力之和来计算联合运行后的总发电量。其目标函数为:

$$\text{Max } E = \sum_{t=1}^T P_t \cdot \Delta t, \quad P_t = \sum_{i=1}^n 9.81 \cdot \eta_{i,t} \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \quad (3)$$

式中, T 为计算期的总时段数; n 表示水电站个数; P_t 为第 t 时段梯级电厂的总出力; Δt 为计算时段长; $\eta_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段的出力系数, $Q_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段的引水流量; $H_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段的平均发电净水头。

2.4. 约束条件

约束条件常用上下游水位、水头、水电站出力、额定用水、入库和下泄流量等指标组成等式或不等式表示。

1) 水量平衡约束

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (Q_{i,t} - q_{i,t}) \Delta t \quad (4)$$

2) 水库库容约束

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad (5)$$

3) 下游河道安全泄量约束

$$\left(\sum_{m=1}^M q_t^m + \Delta q_t \right) \leq q_{\text{安}} \quad (6)$$

4) 水库泄流能力约束

$$q_{i,t} \leq q(z_{i,t}) \quad (7)$$

5) 泄量变幅约束

$$|q_{i,t} - q_{i,t-1}| \leq \Delta q_i \quad (8)$$

6) 水库之间的水力联系

$$I_{i+1,t} = O_{i,t} + Q_{i,t} \quad (9)$$

7) 电站出力约束

$$NL_{i,t} \leq N_{i,t} \leq NU_{i,t} \quad (10)$$

8) 下游综合利用水要求

$$QL_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq QU_{i,t} \quad (11)$$

9) 边界条件约束

$$V_{i,1} = V_{i,b}, \quad V_{i,T} = V_{i,e} \quad (12)$$

式中: $Q_{i,t}$ 和 $q_{i,t}$ 分别为 t 时刻第 i 个水库的入库和下泄流量; Δt 为计算时段长度; $V_{i,t}$ 、 $V_{i,\min}$ 和 $V_{i,\max}$ 分别为 t 时刻第 i 个水库的蓄水量、最小和最大允许蓄水量; $\sum_{m=1}^M q_t^m$ 为与下游控制河段具有直接水力联系的 m 个并联梯级水库的下泄流量之和; M 为并联梯级的个数; $q_{\text{安}}$ 为下游河道的安全泄量; $Z_{i,t}$ 和 $q(z_{i,t})$ 分别为 t 时刻第 i 个水库的水位和该水位对应 $Z_{i,t}$ 的下泄能力; Δq_i 为第 i 个水库出库流量的最大变幅; $O_{i,t}$ 表示 t 时段上水库 i 与下游水库 $i+1$ 区间流量; $N_{i,t}$ 为第 i 水电站第 t 时段出力, $NL_{i,t}$ 表示第 i 水电站第 t 时段出力下限; $NU_{i,t}$ 表示第 i 水电站第 t 时段出力上限, 综合考虑机组额定出力、受阻容量、振动区及调峰要求等确定; $Q_{i,t}$ 为第 i 水库第 t 时段出库流量, $QL_{i,t}$ 表示第 i 水库第 t 时段放水量下限, $QU_{i,t}$ 表示水库放水量上限, 一般根据下游防洪要求、水库最大泄流能力等给出; $V_{i,b}$ 和 $V_{i,e}$ 分别为第 i 个水库调度期初起调水位对应的库容和调度期末应回落到水位对应的水位对应的库容。

2.5. 模型求解和优化算法

三峡和清江梯级五库联合优化调度属于多维多阶段优化问题, 而且一般不考虑水库之间水流时滞影响, 决策具有无后效性。针对多维动态规划问题, 为了避免计算中的“维数灾”现象, 可采用各种动态规划的改进算法, 如离散微分动态规划法、逐次逼近法、遗传算法等^[7]。本文采用较为成熟的 POA 算法进行优化计算。其优点在于对数学模型中的状态变量和决策变量不需要进行离散, 而是直接按连续变量求解, 这样可避免因状态变量离散化而引起的“维数灾”问题。

POA 算法将多阶段问题转化为多个两阶段问题, 每次都只对多阶段决策中的两个阶段的决策进行优化调整, 将上次优化结果作为下次优化的初始条件, 再进行下一轮寻优, 如此逐时段进行, 反复循环直至收敛^[8]。

3. 水库群防洪调度结果分析

3.1. 推求设计洪水过程线

本文选取 1954、1981、1982 和 1998 四个典型年, 按同期同频率地区组成放大法推求设计洪水过程线, 依据对荆江进行防洪补偿调度的方式^[1], 建立了梯级单独和水库群联合防洪优化调度两种数学模型, 运用加速收敛的逐次渐进优化算法, 遵循“优化-验证-调整”的算法流程, 研究探讨三峡和清江梯级水库群实施联合调度后, 荆江河段的设计防洪标准。

选用上述四个典型年, 根据不同洪水重现期, 按同期同频率地区组成放大法推求设计洪水过程线, 并作为模型的输入。由于篇幅限制, 图 1 仅给出三峡水库各典型年实测、100 年一遇、200 年一遇设计洪水过程。

3.2. 常规防洪调度

常规防洪调度是按现有的设计规程进行调度^[1],

简要介绍如下:

1) 三峡水库对荆江防洪补偿调度方式以控制沙市水位为调度目标, 当遇 100 年一遇及其以下洪水, 三峡水库按控制枝城流量不超过 56,700 m³/s 与宜昌-枝城区间洪水进行补偿调度, 使沙市水位不超过 44.5 m。

2) 水布垭水库为长江预留防洪库容 5 亿 m³, 每年 6、7 月坝前水位按汛期限制水位 391.8 m 控制; 5 月下旬至 8 月上旬, 以 20 年一遇洪水的回水末端在恩施城区以下为条件, 坝前水位按 397 m 控制; 其余时间坝前水位按正常蓄水位 400 m 控制。

3) 隔河岩水库为长江预留防洪库容 5 亿 m³, 当水库水位位于 201.3 m 水位以下时, 控制出库流量小于或者等于 11,000 m³/s; 在上述控制条件下, 如果隔河岩出库流量与三峡出库流量之和大于 56,700 m³/s, 则补偿下游枝城流量不超过 56,700 m³/s。

3.3. 防洪优化调度

分别以式(1)和(2)作为梯级单独优化调度和水库群联合优化调度模型优化求解的目标函数, 按照“优化-验证-调整”的算法流程迭代求解, 计算最大洪水重现期及相应的梯级单独优化调度结果。

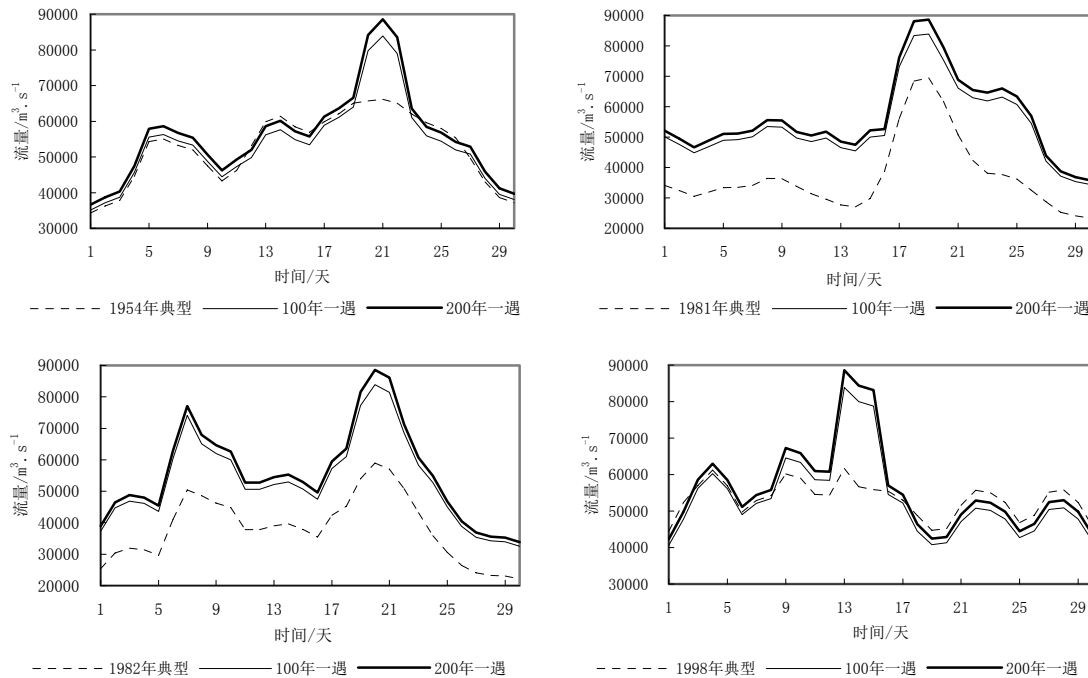


Figure 1. Different typical year design flood hydrograph in Three Gorges Reservoir
图 1. 三峡水库不同典型年的设计洪水过程线

调度过程按以下控制条件进行控制: 1) 各水库均满足相应的单库约束条件; 2) 控制三峡水库各时段水位均不高于 166.9 m^[1], 即三峡水库百年一遇设计洪水水位; 3) 控制长阳流量不超过 11,000 m³/s; 4) 控制枝城流量不超过 56,700 m³/s。

防洪常规调度、梯级单独优化调度和水库群联合优化调度可抵御各典型年设计洪水的最大重现期如表 2 所示。

从表 2 中可以看出: 1) 不同典型年的防洪调度结果差异较大, 双峰且主峰靠后的 1982 典型年设计洪水, 可抵御洪水最大重现期的值最小; 2) 从不同调度方式的防洪效果看: 防洪优化调度优于常规调度, 水库群联合优化调度优于各梯级单独优化调度; 3) 三峡和清江梯级单独优化调度可以将荆江地区的防洪标准至少提高到 118 年一遇, 联合优化调度可以将荆江地区的防洪标准至少提高到 136 年一遇(采用 1982 典型年); 4) 若取四个典型年调度结果的平均值, 则三峡和清江梯级水库常规调度、单独优化调度和联合优化调度, 可抵御的最大重现期洪水分别达到 125、150 和 168 年。

4. 水库群发电调度结果分析

为了充分考虑水库调度期末蓄能价值, 本文选取

连续的水文周期, 该周期中丰、平、枯水年交错出现, 以 1982~1987 年为例, 以日为时段进行计算。为了便于比较, 文中也给出了各电站常规调度设计方案^[1,2]和梯级水库单独优化调度的计算结果, 见表 3。

由表 3 可知, 以发电量最大为目标函数的梯级联合调度后, 系统多年平均发电量较原设计方案和各梯级单独优化调度分别增加了 59.92 亿 kW·h 和 21.58 亿 kW·h, 增加率分别为 5.70% 和 1.98%。对比各梯级单独优化调度, 梯级联合优化调度增加的电量中, 清江梯级增加了 0.95 亿 kW·h, 三峡梯级增加了 20.63 亿 kW·h。与梯级单独调度相比, 联合调度后由于清江梯级的调峰作用, 使三峡梯级在汛期的弃水得到利用, 系统弃水总量减少了 201.46 亿 m³, 其中清江梯级减少弃水 3.58 亿 m³, 三峡梯级减少弃水 197.88 亿 m³。由此可见联合调度后水量利用率显著提高, 补偿效益比较显著。

Table 2. Typical year design flood return period which three scheduling approach can withstand (years)
表 2. 三种调度方式可抵御各典型年设计洪水的最大重现期(年)

调度方式	1954 年	1981 年	1982 年	1998 年	平均值
常规调度	143	127	106	123	125
梯级单独调度	164	161	118	158	150
水库群联合调度	185	178	136	173	168

Table 3. Annual generating capacity (100 million kW·h) and volume of discarded water (100 million m³) based on the calculation of maximum generating capacity criteria
表 3. 发电量最大准则计算的年均发电量(亿 kW·h)和弃水量(亿 m³)

		清江梯级			小计	三峡梯级		小计	总计	总效益 (亿元)
		水布垭	隔河岩	高坝洲		三峡	葛洲坝			
①常规调度	发电量	41.42	34.09	9.22	84.73	834.86	130.97	965.83	1050.56	263.36
	弃水量	8.99	18.60	43.40	71.00	485.01	1545.65	2030.66	2101.66	
②梯级调度	发电量	44.20	36.65	10.97	91.81	845.07	152.02	997.09	1088.90	272.29
	弃水量	3.51	4.60	12.63	20.74	467.20	973.93	1441.13	1461.86	
③联合调度	发电量	44.06	37.48	11.22	92.77	861.68	156.04	1017.72	1110.48	277.50
	弃水量	3.48	4.53	9.14	17.16	381.84	861.41	1243.25	1260.40	
②、①对比	发电量增加值	2.78	2.56	1.75	7.08	10.21	21.05	31.26	38.34	8.93
	增加率	6.70%	7.51%	18.96%	8.36%	1.22%	16.07%	3.24%	3.65%	3.39%
②、①对比	弃水量增加值	-5.48	-14.00	-30.78	-50.26	-17.81	-571.72	-589.53	-639.80	
	增加率	-60.97%	-75.27%	-70.91%	-70.79%	-3.67%	-36.99%	-29.03%	-30.44%	
③、①对比	发电量增加值	2.64	3.39	2.00	8.04	26.82	25.07	51.89	59.92	14.14
	增加率	6.38%	9.96%	21.68%	9.48%	3.21%	19.14%	5.37%	5.70%	5.37%
③、①对比	弃水量增加值	-5.51	-14.07	-34.26	-53.84	-103.17	-684.24	-787.41	-841.25	
	增加率	-61.32%	-75.63%	-78.93%	-75.84%	-21.27%	-44.27%	-38.78%	-40.03%	
③、②对比	发电量增加值	-0.14	0.83	0.25	0.95	16.61	4.02	20.63	21.58	5.21
	增加率	-0.31%	2.28%	2.29%	1.04%	1.97%	2.64%	2.07%	1.98%	1.91%
③、②对比	弃水量增加值	-0.03	-0.07	-3.48	-3.58	-85.36	-112.52	-197.88	-201.46	
	增加率	-0.88%	-1.43%	-27.58%	-17.27%	-18.27%	-11.55%	-13.73%	-13.78%	

5. 结论

本文分别建立了水库群联合防洪、发电调度模型, 运用加速收敛的 POA 算法, 采用优化、验证、调整三个模块迭代求解。分别采用常规调度、梯级水库单独调度和水库群联合调度三种模式, 得出如下主要结论:

1) 按照单峰、双峰、多峰三种情况选择 4 个典型年, 按照同期同频率地区组合法, 推求三峡和清江梯级水库群各典型年设计洪水过程线, 既可保证入库设计洪水的主要组成部分的峰量设计标准, 同时又可避免枝城处不同典型的洪水造成设计峰量的重大差别, 从而使总的入库设计洪水成果符合设计标准。

2) 选择最不利的 1982 年为典型年, 梯级单独优化调度可将荆江河段的防洪标准提高到 118 年一遇; 水库群联合优化调度可提高到 136 年一遇设计洪水。若取 4 个典型年的调度结果平均值, 则单独优化调度和联合优化调度可抵御的最大重现期设计洪水分别达到 150 和 168 年。

3) 建立了水库群联合发电调度数学模型, 分别对两梯级单独调度和联合调度两种情况下的发电补偿效益进行了分析探讨。水库群联合调度和梯级单独调度的多年平均发电量, 与原设计方案相比分别增加了 59.92 亿 kW·h 和 21.58 亿 kW·h, 即分别增加了 5.70% 和 1.98%。

参考文献 (References)

- [1] 长江水利委员会. 三峡工程综合利用与水库调度研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
Changjiang Water Resources Commission. Three Gorges project utilization and reservoir operation. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)
- [2] 李玮, 郭生练, 刘攀, 郭富强. 梯级水库汛限水位动态控制模型研究及应用[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 22-28.
LI Wei, GUO Shenglian, LIU Pan and GUO Fuqiang. Dynamic flood prevention storage control model for Qingjiang cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(2): 22-28. (in Chinese)
- [3] 高仕春, 万飏, 梅亚东, 等. 三峡梯级和清江梯级水电站联合调度研究[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 504-507.
GAO Shichun, WAN Biao, MEI Yadong, et al. Study of joint operation of Three Gorges cascade and Qingjiang cascade reservoirs. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4): 504-507. (in Chinese)
- [4] 万飏, 高仕春, 陶自成, 等. 三峡梯级和清江梯级联合运行影响分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 1-4.
WAN Biao, GAO Shichun, TAO Zicheng, et al. Impact analysis of Joint operation Three Gorges cascade and Qingjiang cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 1-4. (in Chinese)
- [5] 刘宁. 三峡 - 清江梯级电站联合优化调度研究[J]. 水利学报, 2008, 38(3): 264-271.
LIU Ning. Unified optimal operation of Three Gorges cascade and Qingjiang cascade hydropower system. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 38(3): 264-271. (in Chinese)
- [6] 陈炯宏, 郭生练, 刘攀, 等. 三峡梯级 - 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, et al. Joint operation of the Three Gorges cascade reservoirs and the Qingjiang cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 78-84. (in Chinese)
- [7] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 李雨. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 85-92.
GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. Review of optimal operation of multireservoir systems. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 85-92. (in Chinese)
- [8] HOWSON, H. R., SANCHO, N. F. C. A new algorithm for the solution of multi-state dynamic programming problems. Mathematical Programming, 1975, 8(1): 104-106.