

基于 PSO 的梯级水库联合防洪调度

郭 武, 黄 兵, 李 玲

(湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 在分析梯级水库联合防洪调度、上下游水库及防洪保护对象之间复杂的水文水力联系和水库群对防洪保护对象防洪补偿调度方式的基础上,建立了梯级水库联合防洪补偿调度模型,并提出了一种基于粒子群算法的模型求解方法。以湖南省资水流域上柘溪与金塘冲水库为例,根据不同典型年的地区洪水组合,通过模型求解拟定了梯级水库联合补偿调度原则。分析研究结果表明,这种基于 PSO 的梯级水库联合防洪调度原则是合理的,该模型能在一定程度上简化梯级水库联合防洪补偿调度的复杂性,为解决梯级水库联合防洪补偿调度提供了一条简洁有效的途径。

关 键 词: 梯级水库; 防洪调度; 补偿调度; 粒子群算法

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)02-0043-05

在梯级水库防洪调度中,不仅需要综合考虑单库调度中水库大坝与库区防洪安全、下游防护区防洪安全及汛末兴利蓄水等各目标之间的协调问题,还需考虑上下游水库间的水文水力联系、上游水库调度方式对下游水库调度方式与防洪安全的影响及协调等问题。如何优选梯级水库间防洪调度原则,已成为防洪调度研究中的热点和难点问题。目前,用于梯级水库防洪调度研究的方法主要有动态规划^[1-2]、非线性规划^[3-4]、大系统分解协调^[5-6]、人工神经网络^[7-8]和遗传算法^[9-10]等。本文针对库群和下游堤防组成的防洪系统,提出了基于粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的梯级水库联合防洪补偿调度模型,通过对不同频率设计洪水进行优化调度制定库群联合调度原则,并以湖南省境内资水流域上的柘溪(已建)和金塘冲(未建)水库为例阐述模型的可行性和实用性。

1 梯级水库联合防洪补偿调度模型

在梯级水库防洪调度中,假设在入库洪水和区间洪水已知的情况下,各库在满足本身大坝防洪安全和下游防洪对象安全的前提下,为给后期防洪预留防洪库容,要求各库在调度时所占用的防洪库容越小越理想。因此,以各库联合调洪所需防洪库容最小为优化准则寻求联合防洪调度方式,具体计算模型如下:

$$\text{目标函数: } \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_1} \max_{0,1,\dots,T} (V_{ij}(t)) \right\} \quad (1)$$

式中: $V_{ij}(t)$ 为水库 i 对第 j 场洪水调洪过程中所使用的防洪库容; N_1 为参与调洪计算的洪水场数, N_2 为水库数目; T 为洪水过程历时。约束条件如下:

$$\text{梯级水库水量平衡方程: } \frac{Q_{i,t} + Q_{i,t+1}}{2} \Delta t - \frac{q_{i,t} + q_{i,t+1}}{2} \Delta t = V_{i,t+1} - V_{i,t} \quad (2)$$

$$\text{水位约束: } Z_{i,t} \leq Z_{i\max}; \quad Z_{i,t} \geq Z_{i0} \quad (3)$$

收稿日期: 2013-09-23

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(澧水流域防洪与生态调度关键技术研究); 湖南省水利科技项目(省水利科技(2010)2010-05)

作者简介: 郭 武(1975-),男,湖南湘阴人,高级工程师,主要从事水能及水资源等方面的研究。

E-mail: 569358970@qq.com

泄洪设施泄量约束:考虑泄洪设施最大泄洪能力和下游控制点的安全泄流。

$$q_{i,t+1} \leq q_i^* \quad (4)$$

$$q_{i,t+1} + Q_{i,\text{区间}} \leq q_{i,\text{安}} \quad (5)$$

$$\text{满发流量约束:汛期两水库的下泄流量至少大于满发流量,即} \quad q_{i,t+1} \geq q_{i,\text{满}} \quad (6)$$

水库调度规则约束:在一定标准来水的情况下,泄流量不能超过初始调度规则允许的最大下泄流量。

式中: $Q_{i,t}, Q_{i,t+1}, q_{i,t}, q_{i,t+1}$ 分别为水库 i 第 $t, t+1$ 时刻入库和出库流量; $V_{i,t}, V_{i,t+1}$ 分别对应为水库 i 第 $t, t+1$ 时刻末库容; Δt 为时段长; $Z_{i,t}$ 为水库 i 第 t 时刻的水位; Z_{i0} 为水库 i 的汛限水位; $Z_{i\max}$ 为水库 i 的允许最高水位; $q_{i,\text{安}}$ 为水库 i 下游防洪保护对象对应的安全泄量; q_i^* 为水库 i 的泄流能力; $Q_{i,\text{区间}}$ 为区间洪水流量; $q_{i,\text{满}}$ 为水库 i 的满发流量。

2 基于粒子群算法的模型求解方法

本文借助 PSO 解上述梯级水库联合防洪模型,PSO 是根据鸟类扑食的原理提出来的一种进化计算方法,先初始化一群随机粒子(随机解),然后通过迭代找到最优解。在每一次迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。第一个就是粒子本身所找到的最优解,这个解叫做个体极值 pBest;另一个极值是整个种群目前找到的最优解,这个极值是全局极值 gBest。在找到这两个最优值时,粒子根据如下的公式来更新自己的速度和新的位置:

$$\begin{cases} V_i = wV_i + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_i - X_i) + c_2 \cdot r_2 \cdot (G - X_i) \\ X_i = V_i + X_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_i 为第 i 个粒子更新速度; X_i 为第 i 个粒子位置; w, c_1, r_1, c_2, r_2 为公式参数; P_i 为第 i 个粒子目前找到的个体最优解; G 为粒子群目前找到的全局最优解。

粒子群算法通过假定多种初始调度规则,对不同频率、不同组合的设计洪水分别进行优化调度,求得各调度规则下的水库下泄流量过程,通过比较分析,不断更新各调度规则,直至找到相对最优的调度原则。基于 PSO 的具体模型求解方法见图 1。

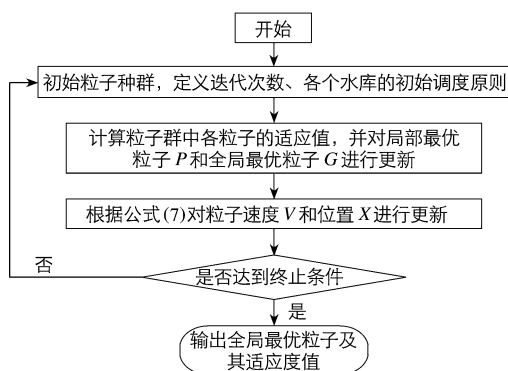


图 1 基于粒子群算法的模型求解流程

Fig. 1 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

3 应用实例

柘溪水库为资水干流控制性枢纽工程,坝址控制流域面积 22 640 km²,水库总库容 35.7 亿 m³,正常蓄水位 169.0 m,相应库容 29.4 亿 m³,主汛期汛限水位 162.0 m,防洪高水位 170.0 m,防洪库容 10.52 亿 m³。金塘冲水库为资水流域规划水库,工程位于资水干流下游桃江县境内,坝址下游距桃江县城约 50 km,下距马迹塘镇 5 km,坝址控制流域面积 25 600 km²,正常蓄水位 78 m,总库容 2.49 亿 m³,主汛期汛限水位 71.0 m,防洪高水位 79.27 m。根据《资水流域规划》,柘溪和金塘冲水库的防洪重点保护对象均为资水下游尾间地区,即金塘冲水库建成后,将与柘溪水库联合调度,使资水下游尾间地区堤垸防洪标准从 10 年一遇提高到 30 年一遇。针对防洪保护对象,本次设计选择位于资水下游地区的益阳断面作为控制断面,30 年一遇洪水安全泄流为 9 400 m³/s。柘溪、金塘冲水库联合防洪调度问题概化如图 2 所示。

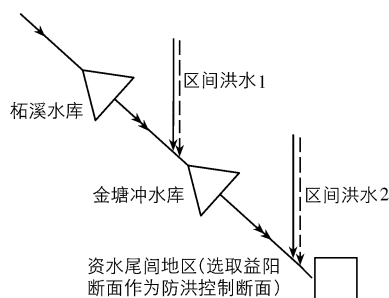


图 2 柘溪、金塘冲水库联合防洪问题概化

Fig. 2 Schematic diagram of flood control for Zhexi and Jintangchong reservoirs

在金塘冲水库原设计中,柘溪、金塘冲水库的联合调度方式为:当流量小于或等于下游河道允许泄量 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 时,柘溪和金塘冲水库原则上不拦洪,利用下游堤防防洪,预计下游河道超过允许泄量 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 时,先由柘溪水库拦洪,当区间洪水较大或柘溪水库已基本蓄满,下游河道流量超过 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 时,金塘冲水库为下游拦洪。该防洪调度方式的防洪压力基本上由柘溪水库承担,只有当柘溪水库不能控制洪水时,金塘冲水库才开始参与防洪调度,无法充分发挥2个水库的防洪功能。

3.1 柘溪、金塘冲水库联合防洪调度方式

实例研究中,针对不同典型年(1954年、1995年和1998年)、不同地区组成(柘溪设计、金塘冲设计,区间设计、金塘冲设计和金塘冲相应)的30年一遇的设计洪水过程,为安全起见,减小由于预报精度问题而影响下游防洪安全,工程设计时取区间水叠加系数1.05,即将预报区间洪水过程乘以系数1.05,然后参与防洪调度原则拟定。应用上述模型进行调洪计算,优选合理的联合调度原则,得到柘溪、金塘冲两库联合防洪调度原则如下。

柘溪水库调度原则:①当柘溪水库水位低于167.5 m时,柘溪水库按照 $7\,170\text{ m}^3/\text{s}$ 对金塘冲水库补偿调节,即金塘冲水库入库流量不超过 $7\,170\text{ m}^3/\text{s}$,但当来流量大于满发流量时,下泄流量必须大于满发流量;②当柘溪水库水位在167.5~170.0 m之间时,若柘溪、益阳区间流量不超过 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$,柘溪水库按 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 对益阳断面进行补偿调节;若柘溪、益阳区间流量超过 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$,则柘溪水库按照 $8\,730\text{ m}^3/\text{s}$ 对金塘冲水库进行补偿调节;③当柘溪水库水位达到170 m时,此时柘溪水库按照来流下泄,但下泄流量不大于本次洪峰流量。其中柘溪、益阳区间对应图2中区间1和区间2之和,金塘冲、益阳区间对应图2中区间2。

金塘冲水库调度原则:①当金塘冲水库水位在71.00~79.27 m时,金塘冲水库控制下泄流量,按照 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量对益阳进行补偿调节;②当金塘冲水库水位不低于79.27 m时,金塘冲水库按照来流下泄,但下泄流量不大于本次洪峰流量。

3.2 结果合理性分析

经过模拟调度,采用联合调度原则模拟不同典型年、不同地区组成的设计洪水调洪结果见表1。从表1可见:①柘溪水库调洪最高水位为169.81 m,比防洪高水位170.00 m降低了0.19 m,金塘冲水库调洪最高水位为78.99 m,比防洪高水位79.27 m降低了0.28 m;②益阳控制断面30年一遇设计洪水的最大洪峰流量为 $18\,392\text{ m}^3/\text{s}$,经两库联合调度后,在考虑区间水叠加系数为1.05的情况下,益阳断面最大下泄流量为 $9\,400\text{ m}^3/\text{s}$,减少了45%,有效地保证了资水下游尾间地区的防洪安全。

表1 柘溪、金塘冲水库联合防洪调度结果

Tab.1 Results of flood control compensation operation

设计 典型年	洪水组合	柘溪水库			区间1天然			金塘冲			区间2天然			益阳断面		
		天然流量/	最大下泄/	最高水位/	洪峰流量/	最大下泄/	最高水位/	洪峰流量/	最大下泄/	最高水位/	洪峰流量/	天然流量/	最大下泄/	天然流量/	最大下泄/	最高水位/
		($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	m	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	m	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	m	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	m	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	m
1954	柘溪设计、金塘冲设计	13 900	9 240	169.81	2 650	8 730	72.32	1 285	17 454	9 400						
	区间设计、金塘冲设计	13 070	6 370	168.75	7 120	8 190	78.89	3 010	17 717	9 400						
	柘溪设计、金塘冲相应	13 070	6 560	168.47	5 830	7 980	78.99	4 850	17 598	9 400						
1995	柘溪设计、金塘冲设计	13 900	8 710	168.78	3 550	8 730	72.46	2 750	17 618	9 400						
	区间设计、金塘冲设计	11 720	8 640	168.20	7 120	8 730	75.90	2 600	17 678	9 400						
	柘溪设计、金塘冲相应	11 720	8 650	168.06	5 120	8 730	76.90	4 890	17 678	9 400						
1998	柘溪设计、金塘冲设计	13 900	8 730	168.40	4 390	8 730	72.82	3 090	18 392	9 400						
	区间设计、金塘冲设计	10 730	8 230	167.69	7 120	8 730	77.82	2 750	17 254	9 400						
	柘溪设计、金塘冲相应	10 730	8 230	167.60	5 170	8 730	78.23	4 900	17 254	9 400						

图3以1954年柘溪和金塘冲的设计洪水为例,给出了上述调度原则下益阳控制断面流量过程。从图3中可见,本次洪水由1个大洪峰和2个小洪峰过程组成,采用上述调度原则模拟本次洪水时,水库在洪峰来

临时,能够起到明显消峰作用,洪峰过后,水库迅速腾空防洪库容,以迎接下次洪峰。

由此可见,采用上述联合防洪调度原则进行防洪调度,在保证柘溪、金塘冲水库自身防洪安全的前提下,可使资水下游尾闾地区抵御 30 年一遇洪水,说明基于 PSO 的梯级水库联合防洪补偿调度模型提取的调度原则是合理的。

4 结 语

本文提出了基于 PSO 的梯级水库联合防洪补偿调度模型,并将该模型用于柘溪、金塘冲水库联合防洪调度中,结果表明,该模型能够在一定程度上简化梯级水库联合防洪补偿调度的复杂程度,为梯级水库优选防洪调度原则提供了一条有效途径。

参 考 文 献:

- [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 Ya-dong. Dynamic programming model and method of cascade reservoirs optimal operation for flood control[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1999, 32(5): 10-12. (in Chinese))
- [2] 张晋新, 吴萍. 水电站水库防洪优化调度的模型与方法[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(2): 92-94. (ZHANG Jin-xin, WU Ping. Hydropower reservoir flood optimal scheduling model pragmatic approach[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2008, 14(2): 92-94. (in Chinese))
- [3] UNVER O I, MAY S L. Models for real-time optimal flood control operation of a reservoir system[J]. Water Resources Management, 1990, 4(1): 20-45.
- [4] 钟平安, 李兴学, 张初旺, 等. 并联水库群防洪联合调度库容分配模型研究与应用[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(6): 51-54. (ZHONG Ping-an, LI Xing-xue, ZHANG Chu-wang, et al. A model and its application of reservoir storage allocation of parallel multi-reservoir united regulation for flood control[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(6): 51-54. (in Chinese))
- [5] 黄志忠, 周之豪. 水库群防洪调度的大系统多目标决策模型研究[J]. 水电能源科学, 1994, 12(4): 237-245. (HUANG Zhi-zhong, ZHOU Zhi-hao. A study of the large-scale and a multi-objective decision making model of multireservoir systems for real-time flood operation[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1994, 12(4): 237-245. (in Chinese))
- [6] 田峰巍, 解建仓. 用大系统分析方法解决梯级水电站群调度问题的新途径[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(5): 112-117. (TIAN Feng-wei, XIE Jian-cang. A new way to solve cascade hydropower reservoirs operation with large scale system analysis[J]. System Engineering Theory & Practice, 1998, 18(5): 112-117. (in Chinese))
- [7] WEI C C, HSU N S. Multireservoir flood-control optimization with neural-based linear channel level routing under tidal effects[J]. Water Resources Management, 2008, 22(11): 1625-1647.
- [8] NIEWIADOMSKA-SZYKIEWICZ E. Computer simulation of flood operation in multireservoir systems[J]. Simulation, 2004, 80(2): 101-116.
- [9] 张改红, 王国利, 张静, 等. 确定梯级水库联合防洪预报调度方式优化方法研究[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(1): 123-130. (ZHANG Gai-hong, WANG Guo-li, ZHANG Jing, et al. Optimal method to establish joint flood control operation rules with flood forecast information for cascade reservoirs[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(1): 123-130. (in Chinese))
- [10] 叶季平. 混联水库群防洪调度管理理论与方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009. (YE Ji-ping. The management theory and methods of flood control operation for mixed reservoirs[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009. (in Chinese))

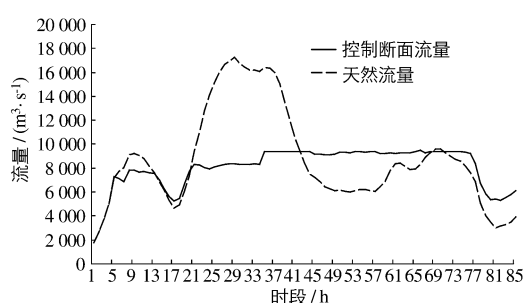


图3 1954 年柘金两库联合防洪益阳控制断面流量过程

Fig.3 Hydrograph for Yiyang section under the conditions of joint flood control operation of Zhexi and Jintangchong reservoirs

Flood control compensating operation of cascade reservoirs based on particle swarm optimization algorithm

GUO Wu, HUANG Bing, LI Ling

(*Hunan Hydropower Design Institute, Changsha 410007, China*)

Abstract: Based on the analysis of complex hydrological and hydraulic relationship between cascade reservoirs, a multi-reservoir flood control compensation model is developed in this paper. And the particle swarm algorithm approach is used for deriving flood control compensation rules. The flood control operation of the Zhexi and Jintangchong reservoirs on Zishui basin in Hunan Province is taken as an example for examining this model. For protecting Yiyang city which is the flood control protected object of these two reservoirs, the flood control compensation rules for these cascade reservoirs is derived based on nine floods of different typical years and different types, and the natural flood peak discharge of Yiyang city can be reduced to the safety discharge. Analysis results show that this principle of the flood control compensation regulation of cascade reservoirs based on the Particle Swarm Optimization algorithm (PSP) is reasonable, and can be used as a reference for the design of Jintangchong reservoir. This model can simplify the complexity of the flood control compensation regulation of the cascade reservoir group. In the case study, it is found that the proposed method is a usable approach for solving the flood control operation of cascade reservoirs.

Key words: cascade reservoir; joint operation of flood control; compensating operation; particle swarm optimization algorithm