

Application of Multi-Objective Particle Swarm Algorithm in Joint Flood Control Operation of Cascade Reservoirs*

Bao Li, Jianzhong Zhou[#], Shuo Ouyang

College of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan
Email: [#]jz.zhou@hust.edu.cn

Received: Apr. 17th, 2012; revised: Apr. 29th, 2012; accepted: May 15th, 2012

Abstract: Focusing on the multi-objective problem of joint flood control operation for the Jinsha River downstream cascade reservoirs and the Three Gorges cascade reservoirs, a multi-objective optimization model of the joint flood control operation for Cascade Reservoirs was established, considering the objectives of flood control safety of cascade reservoirs and upstream and downstream protection zones. The model was solved by the proposed multi-objective particle swarm algorithm. Meanwhile, the set of external files to save the non-inferior solutions in the solution process was constructed, based on the clustering distance of the particle which maintains the distribution of the external file set. Finally, the solution distributes of a wide range set of the non-inferior scheduling programs offering to policy makers for evaluation and selection. 1981 and 1998 were selected as the typical years, a joint control optimization scheduling under design flood has been done at different frequencies in the typical flood year. And cases study results has shown that, compared with a separate run in the Three Gorges cascade, the joint flood control of cascade reservoirs can effectively reduce the Three Gorges Cascade storage peak flow and the highest water level of the dam in Three Gorges, meanwhile, enhance the flood control capacity of the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: Jinsha River Downstream Cascade; Three Gorges Cascade; Joint Flood Control; Multi-Objective Particle Swarm Algorithm; External File Set

多目标粒子群算法在梯级水库联合防洪调度中的应用研究*

李 豹, 周建中[#], 欧阳硕

华中科技大学水电与数字化工程学院, 武汉
Email: [#]jz.zhou@hust.edu.cn

收稿日期: 2012年4月17日; 修回日期: 2012年4月29日; 录用日期: 2012年5月15日

摘 要: 针对金沙江下游梯级与三峡梯级联合防洪调度中的多目标优化问题, 综合考虑各水库坝身防洪安全及上下游防护区安全等目标, 建立了梯级水库联合防洪多目标优化调度模型, 提出多目标粒子群算法对模型进行优化求解, 构造外部档案集来保存求解过程中的非劣解, 并基于个体聚集距离来维持外部档案集的粒子分布性, 得到了分布均匀且范围广的非劣调度方案集供决策者评价优选。分别选取1981年和1998年为典型洪水年, 对各典型年不同频率下的设计洪水进行了联合防洪优化调度, 实例研究结果表明, 相比于三峡梯级单独运行, 梯级水库联合防洪调度可有效削减三峡梯级的入库洪峰流量, 降低三峡坝前最高水位, 提高长江中下游的防洪能力。

*基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号: 20100142110012); 国家科技支撑计划课题(项目编号: 2008BAB29B0806)。

[#]通讯作者。

作者简介: 周建中(1959-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水资源高效利用研究。

关键词: 金沙江下游梯级; 三峡梯级; 联合防洪; 多目标粒子群算法; 外部档案集

1. 引言

随着金沙江一批在建和拟建骨干性水库逐步建成投产, 其综合利用对长江流域防洪体系的作用日益凸显。金沙江下接川江河段, 其下游梯级水库具有控制洪水比重大, 距防洪对象近的特点, 金沙江下游梯级与三峡梯级预留的防洪库容将极大地改善川江及长江中下游的防洪能力。长江中下游防洪不再单独以三峡梯级的防洪效益最大为目标, 而要考虑具有水力、水文联系的梯级水库进行联合防洪调度, 最大限度地减少洪灾损失, 保护国家和人民的生命财产安全^[1]。

针对梯级水库联合防洪调度问题, 学术和工程界进行了相关研究。杨春华等^[2]对金沙江下游 4 个水库及三峡水库的汛期运行方式进行了探讨, 采用不同防洪补偿方式对不同典型设计洪水进行调洪演算, 并对梯级水库联合防洪调度效果进行了分析, 但是借助已有调度规则的常规调度方法, 没有涉及到防洪优化调度方面的研究。李雨、郭生练等^[3]针对三峡和清江梯级巨型水库群联合防洪补偿调度问题, 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, 并采用改进的逐次渐进优化算法进行了模型求解, 但其主要考虑在下游共同防洪对象处应用最大削峰准则建模, 减轻了下游防护对象的防洪压力, 并未研究梯级水库联合防洪的多目标优化调度。因此, 针对梯级水库联合防洪面临的工程实际和科学问题^[4,5], 亟需开展梯级水库多目标防洪调度建模理论与优化方法等方面的研究。

本文以金沙江下游梯级与三峡梯级联合防洪调度问题为对象, 建立梯级水库多目标联合防洪调度模型, 采用多目标粒子群算法对模型进行优化求解, 一

次求解得到分布均匀且范围广泛的非劣调度方案集, 并与三峡梯级单独调度情景进行结果对比分析, 证明了本文算法在梯级水库联合防洪调度中的可行性和有效性。

2. 梯级水库联合防洪调度模型

根据长江防洪的总体安排, 金沙江下游乌东德、白鹤滩水库的主要防洪任务是配合三峡实现长江中下游防洪, 达到大幅度削减洪水流量和提高中下游防洪标准的目的; 溪洛渡、向家坝水库离金沙江下游防洪控制点近, 将承担对川江防洪和分担长江中下游防洪的双重任务。

三峡梯级地理位置优越, 控制了长江上游所有来水, 又距防洪控制点最近, 成为长江中下游防洪的控制枢纽, 是长江中下游防洪的关键工程, 按照长江防洪规划和三峡梯级的设计, 应达到以下防洪要求: 1) 对上游大洪水进行调节, 减轻荆江河段和洞庭湖区的防洪负担, 减少使用荆江分洪区的机会, 提高荆江河段防洪标准; 2) 对发生在上游的特大洪水(如 1870 年洪水)进行控制和调节, 配合运用荆江分洪区, 避免荆江河段(江汉平原和洞庭湖区)发生毁灭性灾害; 3) 对全流域和中下游大洪水进行补偿调节, 减少中游平原湖区的分蓄洪量。金沙江下游梯级与三峡梯级水库特征数据见表 1。

结合金沙江下游梯级与三峡梯级联合防洪要求, 以三峡水库坝前最高水位最低作为三峡梯级自身安全及上游防洪的优化目标^[6], 以向家坝和三峡水库的最大下泄流量最小作为对川江以及长江中下游防洪的优化目标, 建立梯级水库联合防洪多目标优化调度模型。

Table 1. Characteristic data of the Jinsha River downstream cascade reservoirs and Three Gorges cascade reservoirs
表 1. 金沙江下游梯级水库与三峡梯级水库特征数据

水库	正常蓄水位/m	汛限水位/m	最大下泄流量/(m ³ /s)	最小下泄流量/(m ³ /s)
乌东德	975	962.5	49,400	1830
白鹤滩	820	790	49,700	1300
溪洛渡	600	560	43,700	1500
向家坝	380	367	49,800	1500
三峡	170	145	98,800	4500
葛洲坝	66.5	63	10,000	4500

2.1. 目标函数

2.1.1. 三峡梯级自身安全以及上游防护目标

以三峡水库坝前最高水位最低 Obj_1 作为三峡梯级自身安全及上游防护目标, 目标函数描述为:

$$\min Obj_1 = \min \left\{ \max \left(Z_t^s \right), t = 0, 1, 2, \dots, T \right\} \quad (1)$$

式中: Z_t^s 为时段 t 三峡水库坝前水位。

2.1.2. 下游防洪目标

以三峡水库下泄流量最小 Obj_2 作为长江中下游防护区的优化目标, 使得洪峰流量尽可能的被削减, 目标函数描述为:

$$\min Obj_2 = \min \left\{ \max \left(Q_t^s \right), t = 1, 2, \dots, T \right\} \quad (2)$$

同时根据金沙江下游梯级水库承担的双重防护任务, 以向家坝水库的下泄流量最小 Obj_3 作为川江以及长江中下游防洪的优化目标, 目标函数描述为:

$$\min Obj_3 = \min \left\{ \max \left(Q_t^x \right), t = 1, 2, \dots, T \right\} \quad (3)$$

式中: Q_t^s 和 Q_t^x 分别为第 t 时段三峡和向家坝的下泄流量。

2.2. 约束条件

在实际调度中, 上述目标函数的约束条件如下:

1) 各水库水位约束:

$$Z_{t,\min}^i \leq Z_t^i \leq Z_{t,\max}^i \quad (4)$$

2) 各水库下泄流量约束:

$$Q_{t,\min}^i \leq Q_t^i \leq Q_{t,\max}^i \quad (5)$$

3) 上下游水库间的水量耦合约束:

$$q_t^{i+1} = Q_t^i + \Delta q_t^{i+1} \quad (6)$$

4) 各水库水量平衡约束:

$$V_t^i = V_{t-1}^i + (q_t^i - Q_t^i) \Delta t \quad (7)$$

式中: $Z_{t,\min}^i$ 、 $Z_{t,\max}^i$ 及 Z_t^i 分别表示汛期第 i 个水库 t 时段允许的水位上下限及面临时段水位; $Q_{t,\min}^i$ 、 $Q_{t,\max}^i$ 及 Q_t^i 分别表示汛期第 i 个水库 t 时段允许的最小下泄流量、最大下泄流量及该时段的实际下泄流量; q_t^{i+1} 为第 $i+1$ 个水库第 t 时段的入库流量, Δq_t^{i+1} 为第 $i+1$ 个水库 t 时段与上游水库之间的区间入库流量; V_t^i 、

q_t^i 、 Q_t^i 分别为汛期第 i 个水库 t 时段的水库库容、入库流量、出库流量, Δt 是时段长度。

5) 满足各个水库防洪调度规程要求及流域梯级水库联合防洪标准。

3. 模型优化求解算法

3.1. 自适应权重粒子群优化算法

3.1.1. 标准粒子群优化算法

粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)模仿鸟群的觅食行为, 每个粒子在搜索空间通过分享信息来寻找优化问题的解, 进而用于求解复杂优化问题^[7]。设群体规模为 N , 搜索空间是 d 维, 用 $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d}]$ 表示第 i 个粒子的位置, 粒子的速度用 $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d}]$ 表示, 粒子在 t 时刻的个体最优位置($pBest$)记为 $P_i^t = [p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,d}]$ 以及全体最佳位置($gBest$)记为 $P_g^t = [P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gd}]$, 并按照如下公式迭代更新粒子的速度和位置:

$$v_{i,j}^{t+1} = \omega v_{i,j}^t + c_1 r_1 [p_{i,j}^t - x_{i,j}^t] + c_2 r_2 [p_{g,j}^t - x_{i,j}^t] \quad (8)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = v_{i,j}^{t+1} + x_{i,j}^t \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (9)$$

式中: c_1 , c_2 为正的加速参数; r_1 , r_2 是 0~1 之间均匀分布的随机数, ω 为惯性权重。另外, 每个粒子的速度和位置都有相应的区间范围 $[v_{\min}, v_{\max}]$, $[x_{\min}, x_{\max}]$ 来对粒子的移动进行适当的限制, 防止跳出最优解。

3.1.2. 粒子群优化算法的自适应权重

Shi 和 Eberhart 研究了惯性权重 ω 对算法优化性能的影响, 当 ω 较大时便于跳出局部极值点寻找全局最优, 而 ω 较小时则有利于加速算法收敛^[8]。在梯级水库联合防洪优化调度的寻优过程中, 考虑到实际多目标问题的高维特性, 希望初始时 ω 能够较大, 便于寻找到一个存在的合适最优解区域, 然后随着搜索次数的增加, 使其减小以加速在最优解区域的收敛, 可快速精确地寻找到最优方案。为此, 自适应权重 ω 可以由公式(10)来确定:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) * l}{L_{\max}} \quad (10)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为 ω 的取值上下限; l 、 L_{\max} 分

别为当前搜索次数和最大搜索次数。

3.2. 多目标粒子群优化算法

3.2.1. 基于 Pareto 的外部档案集机制

本文引入外部档案集机制及基于个体聚集距离的外部档案集更新方法,用于保存算法在更新过程中产生的历史非劣解^[9]。外部档案集(记为 S)的大小取固定值 M 。为保证 S 中非劣解集的多样性,需对 S 进行更新维护,使种群具有更好的分布性。其具体操作为^[10]: 1) 若 S 为空集,则将新的非劣个体直接加入到 S 中; 2) 对新加入的个体同原来 S 中的个体进行基于 pareto 的支配比较,即若个体不被 S 中任何一个个体支配,则将该个体加到 S 中,同时删除 S 中受该个体支配的个体; 3) 当 S 中个体数目大于指定 M 时,采取截断操作剔除多余的个体,即计算 S 中所有个体的聚集距离,剔除聚集距离最小的个体。

3.2.2. 多目标粒子群优化算法流程

本文提出的基于聚集距离的多目标粒子群优化算法(MOPSO)具体步骤如下:

步骤 1: 随机初始化种群中各粒子的位置和速度,并置外部档案集为空。

步骤 2: 评价种群中所有粒子,将当前各粒子(第 0 代种群)的位置和目标值存储于各粒子的 $pBest$ 中,将 $pBest$ 中的粒子按照目标值进行基于 pareto 支配原则的排序,寻找非劣解加入外部档案集 S 中。此时,比较非劣解的个数与 S 的规模 M 的大小,对外部档案集 S 进行基于个体聚集距离的裁剪操作。

步骤 3: 从外部档案集 S 中选择聚集距离最大的个体作为全局最优解 $gBest$,按照公式(10)更新粒子速度的权重 ω ,按照公式(8)和(9)更新各个粒子的速度和位置。

步骤 4: 评价种群中的所有粒子。

步骤 5: 比较种群中每个粒子当前目标与 $pBest$ 中每个目标的支配关系,若当前粒子非劣于 $pBest$,则用粒子的当前位置和目标值更新其 $pBest$ 。

步骤 6: 比较当前所有 $pBest$ 和外部档案集 S 中非劣解的支配关系,按照 pareto 支配原则和聚集距离的大小进行外部档案集 S 的更新操作。

步骤 7: 若满足终止条件,则输出外部档案集 S 并停止算法,否则转向步骤 3。

4. 多目标粒子群算法在梯级水库联合防洪调度中的实现

以金沙江下游梯级与三峡梯级水库联合防洪多目标优化调度问题为研究对象,建立相应的梯级水库多目标防洪优化调度模型,并运用提出的 MOPSO 进行求解。金沙江下游梯级水库承担对川江防洪和分担长江中下游防洪的双重任务。三峡梯级的防洪对象为长江中下游,主要防洪任务是调控长江上游洪水,使荆江地区防洪标准达到 100 年一遇;当遇到 1000 年一遇或类似 1870 年洪水时,控制枝城泄量不大于 $80,000 \text{ m}^3/\text{s}$,并在荆江分蓄洪区的配合运用下保证荆江河段行洪安全,避免坝堤溃决发生毁灭性灾害;同时,还要兼顾城陵矶河段分洪量有明显的减少。

本文重点选取川江的宜宾和荆江的沙市等防洪控制站点为研究对象,结合防洪规程进行梯级水库联合防洪多目标优化调度。

4.1. 编码方案及约束处理方式

针对提出的 MOPSO 优化算法,以各水库下泄流量作为决策变量进行编码^[11]。由公式(7)可知,已知水库上一时段库容和本时段入库流量、下泄流量,可确定该时段末库容,而由水库水位库容曲线可获得相应时段末水位,所以,在水库流量与水位之间存在对应关系。采用 MOPSO 进行求解时,每个粒子的位置以一个流量序列 $Q_{\text{out}}^i = \{q_{1,1}^i, q_{1,2}^i, \dots, q_{s,t}^i, \dots, q_{s,T}^i\}$ 表示,其中 $q_{s,t}^i$ 为第 i 粒子 s 水库 t 时段的下泄流量, S 和 T 分别表示梯级水库总个数和调度总时段数,每个粒子的流量序列均满足相应水库相应时段的下泄流量约束。同时,根据经验设置每个粒子的速度变化范围为 $[v_{\min}^s, v_{\max}^s]$ 。

4.2. 目标函数归一化

在对外部档案集的非劣解进行聚集距离计算的过程中,需对水位和流量这两种具有不同量纲的目标进行运算。针对多个目标之间存在不同量纲的问题,本文采取归一化的方法对目标空间标准化^[12],使其取值范围在 $[0,1]$ 之间,以避免由于量纲不同而对算法求解产生影响,其归一化方法如下:

$$Obj^k(X^i) = \frac{Obj^k(X^i) - Obj_{\min}^k}{Obj_{\max}^k - Obj_{\min}^k}, \quad k = 1, 2, \dots, D \quad (11)$$

式中: $Obj^k(X^i)$ 为个体 X^i 的第 k 维目标值, Obj_{\max}^k 和 Obj_{\min}^k 分别第 k 维目标值的最大、最小值, D 为目标空间维度。

4.3. 调度成果及对比分析

为检验基于聚集距离的 MOPSO 算法在梯级水库联合防洪多目标优化调度中的可行性, 同时比较金沙江梯级配合三峡梯级联合防洪调度和三峡梯级单独调度对长江流域防洪的影响, 以 1981 年 100 年一遇及 1998 年 100 年一遇的典型洪水为预报来水, 采用该算法进行梯级水库多目标联合防洪多目标优化调

度求解。其中, MOPSO 算法外部档案集 S 的规模 $M=30$, 粒子群规模 $N=30$, 迭代次数 $L_{\max}=1000$, 惯性权重上下限分别为 $\omega_{\max}=0.9$ 和 $\omega_{\min}=0.4$, 速度限制上下限分别为 $v_{\min}=-10$ 和 $v_{\max}=10$, $[x_{\max}, x_{\min}]$ 为每个水库汛期下泄流量上下限, 见表 1。

表 2 列出了针对 1998 年 100 年一遇典型洪水应用基于聚集距离的 MOPSO 求解得到的外部档案集中各调度方案的具体数据; 图 1 和图 2 是针对 1981 年 100 年一遇典型洪水应用 MOPSO 求解推求的部分调度方案所绘制的三峡水库下泄流量和坝前水位过程线。

Table 2. Pareto optimal operation schemes obtained by MOPSO for the flood in 1998
表 2. 1998 年典型洪水非劣调度方案集

方案号	Obj_1 (m)	Obj_2 (m ³ /s)	Obj_3 (m ³ /s)	方案号	Obj_1 (m)	Obj_2 (m ³ /s)	Obj_3 (m ³ /s)
1	146.11	78,401	32,286	16	157.69	45,656	25,476
2	146.15	72,988	29,791	17	158.61	46,725	24,109
3	146.97	57,688	27,350	18	149.63	50,891	25,539
4	147.15	52,994	24,887	19	150.28	49,889	30,591
5	156.02	47,577	19,592	20	161.52	44,692	23,558
6	161.69	43,575	20,507	21	148.81	51,407	24,647
7	164.88	40,843	20,088	22	150.77	49,441	28,978
8	160.17	44,708	22,801	23	155.60	46,924	25,132
9	163.00	42,309	20,120	24	151.19	49,275	27,896
10	168.14	40,727	20,951	25	152.90	48,827	26,271
11	169.64	40,060	20,794	26	156.47	46,493	25,983
12	171.26	39,305	19,801	27	148.04	52,184	25,390
13	172.55	38,761	21,628	28	153.74	48,546	25,628
14	173.19	38,488	21,628	29	159.68	45,041	26,371
15	154.69	46,695	26,174	30	151.86	48,647	29,995

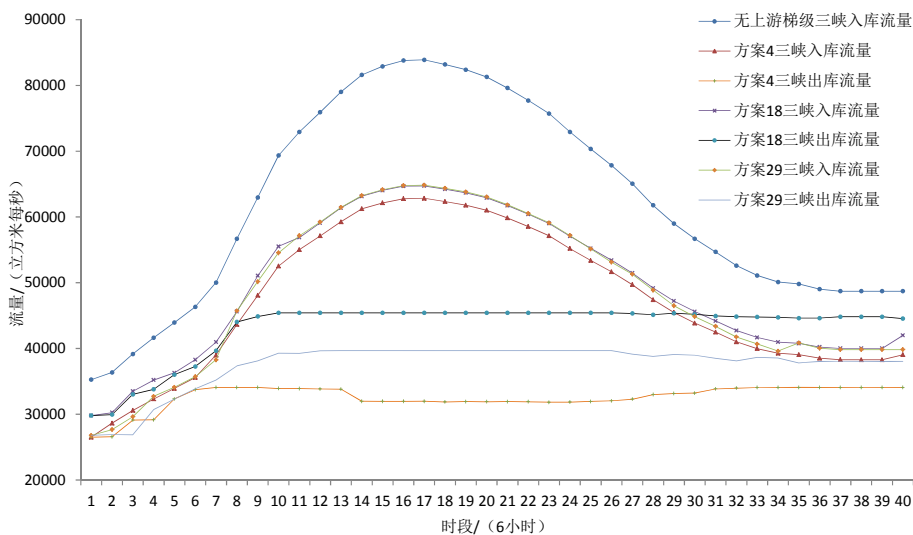


Figure 1. Discharge processes of schemes for the flood in 1981 of frequency 0.01 in Three Gorges reservoir
图 1. 1981 年 100 年一遇洪水部分调度方案三峡水库流量过程

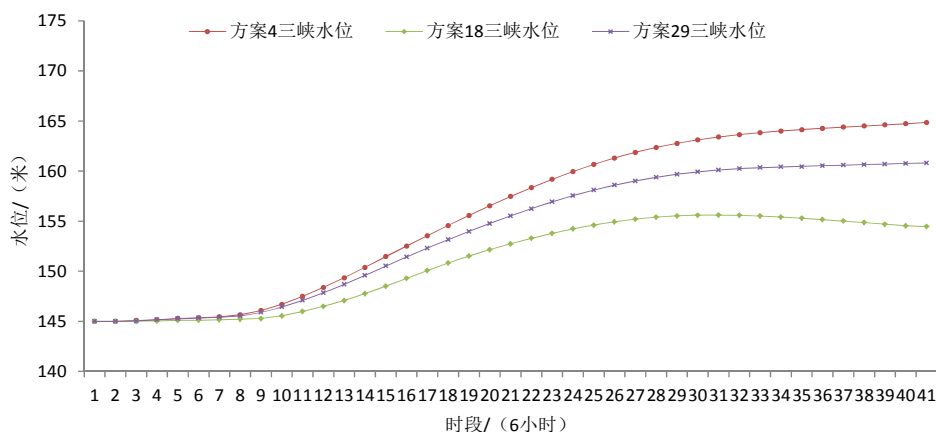


Figure 2. Water level processes of schemes for the flood in 1981 of frequency 0.01 in Three Gorges reservoir
图 2. 1981 年 100 年一遇洪水部分调度方案三峡水库水位过程

从表 2 可以看出: 1) MOPSO 在求解梯级水库联合防洪多目标优化调度模型时能够得到一组分布均匀, 范围广泛的方案集, 可满足调度运行人员根据实际情况进行决策; 2) 从各调度方案中可以看出目标 1 与目标 2 成反比关系, 即三峡水库为满足大坝安全需要的最高坝前水位最低与为满足长江中下游防洪需要的最大下泄流量最小两目标相互冲突, 需要决策人员根据实际运行工况、水情从多目标非劣调度方案集中选取综合效益最大的调度方案。降低三峡水库的最高坝前水位, 其下泄流量必然增大, 反之亦然; 3) 由于金沙江梯级配合三峡梯级联合防洪的调蓄作用, 向家坝水库最大下泄流量为 19,000~33,000 m³/s, 有效实现了对下游三峡梯级入库流量的错峰削峰。

从图 1 和图 2 可以看出: 1) 金沙江梯级与三峡梯级联合防洪调度与三峡梯级单独调度相比, 三峡梯级入库洪水坦化过程显著, 降低三峡梯级的入库洪量和洪峰, 增强水库的防洪能力, 提高长江中下游的防洪标准; 2) 各个水库均可在流域汛期洪峰来临之前联合调整水库水位和下泄流量, 既满足各个水库的自身防洪安全, 又满足梯级水库承担的多重防洪任务需要, 证明了 MOPSO 在求解梯级水库联合防洪多目标优化调度问题中的可行性和有效性。

5. 结论

1) 针对金沙江下游梯级配合三峡梯级联合防洪调度的实际工程需求, 建立了梯级水库群联合防洪多目标优化调度模型, 提出了多目标粒子群算法对该模型进行求解, 改善了标准粒子群算法的收敛性和多样

性。

2) 应用 MOPSO 对金沙江下游梯级与三峡梯级水库联合防洪多目标优化调度问题进行了求解, 计算结果表明: a) 本文算法可生成分布均匀、范围广泛的非劣调度解集, 为调度决策人员提供多个候选方案; b) 较三峡梯级单独运行, 金沙江下游梯级配合三峡梯级水库联合防洪调度可有效削减三峡梯级的入库洪水, 降低三峡坝前最高水位, 增强了汛期三峡梯级的自身安全性, 提高长江中下游的防洪能力。

3) 流域梯级水库联合优化运行需要综合考虑防洪、发电、抗旱、供水、航运和生态需水等多个不可公度的调度目标。本文主要针对梯级水库的联合防洪多目标优化调度问题进行研究, 研制综合考虑防洪、发电以及生态的流域梯级枢纽多目标优化调度模型, 是下一步需深入开展的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] 刘冀, 王丽学. 水库群防洪联合调度研究现状与展望[J]. 水电能源科学, 2004, 22(2): 30-32.
LIU Ji, WANG Li-Xue. Status quo and prospect of flood control operation of multi-reservoir. Water Resource and Power, 2004, 22(2): 30-32. (in Chinese)
- [2] 杨春花, 许继军, 董玲燕. 金沙江下游梯级水库配合三峡水库联合防洪调度效果分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 5-9.
YANG Chun-hua, XU Ji-jun and DONG Ling-yan. Effect of flood control joint operation of Jinshajiang downstream cascade reservoirs and Three Gorges Reservoir. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(10): 5-9. (in Chinese)
- [3] 郭生练, 李雨, 陈炯宏. 巨型水库群防洪发电联合优化调度研究与应用[J]. 水资源研究, 2012, 1(1): 1-6.
GUO Sheng-lian, LI Yu and CHEN Jiong-hong. Joint operation of flood control and hydropower generation for the multi-reservoir system. Journal of Water Resources Research, 2012, 1(1):

- 1-6. (in Chinese)
- [4] 邓坤, 张璇, 杨永生. 流域水资源调度研究综述[J]. 水资源研究, 2011, 4(1-3): 20.
DENG Kun, ZHANG Xuan and YANG Yong-sheng. Review of water resource operation for entire watershed. Journal of Water Resources Research, 2011, 4(1-3): 20. (in Chinese)
- [5] 刘丹雅. 三峡及长江上游水库群水资源综合利用调度研究[J]. 人民长江, 2010, 41(15): 5-9.
LIU Dan-ya. Water resource utilization and operation for Three Gorges Reservoir and reservoirs in downstream of Yangtze River. Yangtze River, 2010, 41(15): 5-9. (in Chinese)
- [6] 覃晖, 周建中, 王光谦, 张勇传. 基于多目标差分进化算法的水库多目标防洪调度研究[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 513-519.
QIN Hui, ZHOU Jian-zhong, WANG Gaung-qian and ZHANG Yong-chuan. Multi-objective optimization of reservoir flood dispatch based on multi-objective differential evolution algorithm. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 40(5): 513-519. (in Chinese)
- [7] KENNEDY, J., EBERHART, R. C. Particle swarm optimization. Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks, Perth, 1995, 4: 1942-1948.
- [8] SHI, Y., EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 1998: 69-73.
- [9] ZITZLER, E., LAUMANN, M. and Thiele, L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. Zurich: Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2001.
- [10] 郑金华. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHENG Jin-hua. Multiple objective evolutionary algorithms and its applications. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [11] 杨俊杰. 基于 MOPSO 和集对分析决策方法的流域梯级联合优化调度[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
YANG Jun-jie. Joint operation for cascade reservoirs based on MOPSO and set pair analysis. Wu Han: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 程春田, 王本德. 启发式与人机交互相结合的水库防洪模糊优化调度模型[J]. 水利学报, 1995, 26(11): 71-76.
CHENG Chun-tian, WANG Ben-de. Fuzzy optimization for flood control operation based on heuristic and human-computer iteration. Journal of Hydrologic Engineering, 1995, 26(11): 71-76. (in Chinese)