

金沙江下游梯级与三峡梯级多目标联合防洪优化调度研究

欧阳硕¹, 周建中¹, 张睿¹, 王学敏¹, 王浩^{1, 2}

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 武汉 430074;

2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 针对金沙江下游梯级及三峡梯级水库群联合防洪调度这一大规模水库群多目标防洪调度问题, 均衡考虑水库群大坝安全及上下游不同防护区防洪要求等多个目标, 建立了梯级水库群多目标防洪优化调度模型, 并提出了一种自适应多目标仿电磁学算法。该算法采用仿电磁学算法实现可行解集的进化, 并根据水库群多目标防洪优化调度问题的特点构建了外部档案集, 同时引入了基于个体聚集密度的外部档案集更新方法, 保证了非劣调度方案的多样性; 在此基础上, 加入一种自适应的扰动因子对算法的局部随机搜索操作进行修正, 改善了算法的全局寻优能力。工程实例验证以及不同情景的调度方案的对比分析结果表明, 联合调度方案在保证三峡坝前水位不变的前提下, 进一步减少水库群最大下泄流量, 增强梯级水库群的防洪能力。

关键词: 联合防洪; 多目标; 仿电磁学算法; 梯级水库群

中图分类号: TV697

文献标识码: A

Study on optimal scheduling of multi-objective joint flood control for lower Jinsha River cascade reservoirs and Three Gorges reservoir

OUYANG Shuo¹, ZHOU Jianzhong¹, ZHANG Rui¹, WANG Xuemin¹, WANG Hao^{1, 2}

(1. School of Hydropower and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074; 2. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038)

Abstract: This paper develops an optimization model of multi-objective flood control for cascaded reservoirs to solve scheduling problem of large-scale reservoirs on the middle and upper Yangtze River. This is a synthetic model considering the requirements by various factors such as dam safety, flood control over the upstream area and flood control over the downstream protected area. To solve the model, we formulate an adaptive algorithm of multi-objective electromagnetism-like mechanism (MOEM) for evolution of the feasible solution sets. This algorithm adopts an update method of external archive set to ensure the diversity of pareto optimal set based on individual crowding-density. It also uses an adaptive disturbance factor to correct the random local search operator for improvement of its global optimization ability. A case study of practical project was tested and scheduling calculations in different situations were compared. The results show that, at the same water stage in the Three Gorges reservoir, the joint scheme can reduce the maximum discharge volume from the reservoirs and their flood control capacity can be improved.

Key words: joint flood control; multi-objective; electromagnetism-like mechanism algorithm; cascade reservoirs

0 研究背景

水库防洪调度是优化流域水资源配置和实现洪水资源优化利用的一项重要研究内容, 传统的防洪优化调度建模方法简单、模型驱动因子较少, 无法定量描述防洪调度的目标边界和条件约束关系。针对上述问题, 许多学

收稿日期: 2012-04-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51239004); 高等学校博士学科点专项科研基金(20100142110012)

作者简介: 欧阳硕(1988-), 男, 博士生, E-mail: Shuo_Ouyang@126.com

通信作者: 周建中(1959-), 男, 教授, 博导, E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn

者从不同角度展开了研究。李响等^[1]在分析三峡水库洪水季节性变化规律的基础上,根据不同分期的来水情况分别拟定防洪调度规则,并采用预报预泄方法确定主汛期水库水位控制方案;吴成国等^[2]将三角模糊数理论引入水库防洪调度风险分析研究领域,利用 α -截集技术将水库防洪调度风险识别指标模糊化,进而提出了基于三角模糊数的水库防洪调度模糊综合风险分析模型。防洪调度模型的传统求解方法主要包括线性规划法^[3]、动态规划^[4]以及逐次优化方法^[5]等,但这些方法多基于数学规划技术,将选定目标外其余目标转化为约束条件,或对多个目标进行加权组合成为单一目标,这种处理虽然简化了问题复杂度,但存在陷入局部最优等方面限制,所得方案往往与真实最优方案相差较远,且一次计算只能得到一个可行方案,限制了其实际应用价值。文献[6]提出一种基于自适应柯西变异的多目标差分进化算法,求解水库多目标防洪调度数学模型,但研究仅针对单个水库多目标防洪调度问题,未涉及流域水库群多目标联合防洪调度建模和模型高效求解技术等更具工程实用性的研究。随着长江中上游金沙江梯级的筹建和运行,长江流域防洪优化调度不再单独以三峡梯级防洪效益最大为目标,而需要综合考虑金沙江下游梯级和三峡梯级的整体防洪效益,均衡梯级水库群防洪任务及其自身防洪安全等多个目标。为此,本文研究并改进仿电磁学算法,将其应用到水库群多目标防洪优化调度中。仿电磁学算法^[7](Electromagnetism-like Mechanism, EM)原理简单、鲁棒性强、易于实现,具有全局收敛性及有效求解非凸非线性问题等优点,在众多优化问题中取得了良好效果^[8,9]。为有效求解水库群联合多目标防洪优化调度问题,本文以金沙江梯级与三峡梯级水库群为例,在综合考虑水库群上游出库流量、下游航运等约束的前提下,以流域上下游不同防护区防洪要求及水库群自身防洪安全为目标,建立了水库群联合多目标防洪优化调度模型,并提出一种基于自适应的多目标仿电磁学算法,根据多目标优化特点对EM算子进行了修正,引入自适应局部搜索策略,有效避免搜索过程陷入局部极小,同时引入外部档案技术^[10],加快了算法收敛速度。最后应用本文算法对流域典型历史洪水进行了水库群多目标防洪优化调度问题的求解,对不同调度方式的调度结果进行分析,比较不同调度方式对流域防洪安全的影响,并对不同决策情景进行方案评价和优选,结果表明,金沙江下游梯级能在保证自身防洪及下游川江防洪安全的同时拦蓄洪水,有效削减下游三峡梯级汛期入库径流及洪量,从而使联合调度方案在保证三峡坝前水位不变的前提下,进一步减少水库群最大下泄流量,增强梯级水库群的防洪能力。

1 水库群多目标防洪调度模型

目前,广泛采用的防洪优化调度规则有两种^[11]:一是水库防洪效益最大或费用最小;二是水库下泄洪峰流量最小。其中,大型水库在汛期防洪调度目标可分为3类^[12]:大坝自身安全要求、库区防洪要求和承担下游保护区防洪任务。前两类目标一般通过坝前最高水位、末水位和上游高水位历时体现,期望水库保持汛限水位运行,以保证大坝及库区防洪安全;下游防洪要求主要与枢纽最大下泄流量及河道高水位历时有关,期望水库最大化削峰,多拦蓄洪水,保障下游防洪对象安全。上下游防洪目标存在一定冲突。

结合以上防洪调度规则,本文综合考虑金沙江梯级和三峡梯级分别承担重庆宜宾和荆江防护区防洪安全,以水库群坝前最高水位和汛末水位作为大坝自身安全及上游防洪的优化目标,以金沙江梯级和三峡梯级最大下泄流量作为梯级水库对应下游防洪优化目标,建立水库群多目标防洪优化调度模型。

1.1 目标函数

1) 水库群自身安全及上游防洪目标 三峡水库作为长江流域最下级大型防洪控制性水库,水库汛期应保持低水位运行,故本文以三峡水库坝前最高水位最低 F_1 为主要优化目标,减轻三峡水库上游淹没损失,降低坝前水位,降低对大坝和流域防洪安全的威胁。其具体表述如下所示:

$$\min F_1 = \min\{\max(Z_t^{sx}) \quad t = 1, 2, \dots, T\} \quad (1)$$

式中, Z_t^{sx} 第 t 时段的坝前水位, T 为调度时段总数。

同时为保证三峡上游金沙江梯级水库自身防洪安全,选取向家坝水库坝前最高水位最低为水库群自身安全及上游防洪的次要优化目标 F_2 ,其具体表达式如下:

$$\min F_2 = \min\{\max(Z_t^{xjb}) \quad t = 1, 2, \dots, T\} \quad (2)$$

式中, Z_t^{xjb} 为向家坝水库第 t 时段的坝前水位。针对水库自身安全及上游防洪目标,在比较调度方案之间优劣关系时,优先比较目标 F_1 ,若两方案在目标 F_1 上的取值相当,则通过比较 F_2 判定其优劣。

2) 水库群中下游防护区防洪目标 本文以三峡、向家坝最大下泄流量最小作为流域防护区的主要优化目标 F_3 、 F_4 ,使得洪峰流量得到尽可能大的削减,以保证流域防护区防洪安全,该目标函数的描述如下:

$$\min F_3 = \min\{\max(Q_t^{sx}) \quad t = 1, 2, \dots, T\} \quad (3)$$

$$\min F_4 = \min\{ \max(Q_t^{\text{sjb}}) \quad t = 1, 2, \dots, T \} \quad (4)$$

式中, Q_t^{sx} 、 Q_t^{sjb} 分别表示第 t 时段三峡、向家坝的下泄流量。同时, 由于向家坝下泄流量与三峡下泄流量分别影响到重庆宜宾和荆江防护区防洪安全, 在比较调度方案在下游防护区防洪目标的优劣关系时, 比较目标 F_3 , 而比较调度方案在流域中上游防洪安全, 则通过比较 F_4 判定其优劣。

1.2 约束条件

上述模型约束条件为如下:

1) 库容(水位)上下限约束:

$$Z_{t, \min}^i \leq Z_t^i \leq Z_{t, \max}^i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (5)$$

式中: $Z_{t, \min}^i$ 、 $Z_{t, \max}^i$ 及 Z_t^i 分别表示蓄水期第 i 个水库 t 时段允许的最低水位、最高水位及面临时段水位。

2) 水库水量平衡约束:

$$V_t^i = V_{t-1}^i + (I_t^i - Q_t^i) \Delta t \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (6)$$

式中: V_t^i 、 I_t^i 、 Q_t^i 分别为蓄水期第 i 个水库 t 时段的水库库容、入库流量、出库流量。

3) 水库下泄能力约束:

$$Q_{\text{out}, t}^i \leq Q_{\max}^i(Z_t^i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{out}, t}^i$ 为蓄水期第 i 个水库 t 时段的下泄流量, $Q_{\max}^i(Z_t^i)$ 为对应水位下该水库的最大下泄能力。

4) 出库流量约束:

$$Q_{\text{out}, t}^i \geq Q_{\min}^i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (8)$$

$$|Q_{\text{out}, t}^i - Q_{\text{out}, t-1}^i| \leq \Delta Q^i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (9)$$

式中: $Q_{\text{out}, t}^i$ 为调度期第 i 个水库 t 时段的出库流量, Q_{\min}^i 为该水库的最小下泄能力, ΔQ^i 为对应水库日下泄流量最大变幅。

5) 满足梯级水库群各库防洪调度规程要求及流域防洪标准。

2 多目标仿电磁学算法

2.1 仿电磁学算法

2003 年美国北卡罗莱纳州立大学博士 Birbil 提出一种新型的随机全局优化算法——仿电磁学算法。文献 [7] 中详细描述了 EM 的实现细节。该算法通过模仿电磁学理论中吸引和排斥机理, 使用电荷模拟的方法描述每个种群个体与当前代最优个体之间的接近程度, 采用记忆和反馈机制指导搜索过程, 从而确保优化问题种群的多样性和搜索空间的完整性, 并提高搜索效率。EM 算法的基本操作为: 种群初始化、局部搜索、总矢量力计算、种群移动。

1) 种群初始化(*Initialize()*) 算法初始化首先确定种群规模、决策变量维度及初始解边界条件; 其次, 根据决策变量各维上下边界, 采用均匀随机方法从可行域中产生一组初始种群, 通过目标函数计算种群个体目标值, 并搜索初始种群中最优个体, 初始化操作的表达式如下:

$$X_k^i = L_k + \lambda \cdot (U_k - L_k) \quad i = 1, 2, 3, \dots, N; \quad k = 1, 2, 3, \dots, D \quad (10)$$

式中: N 、 D 分别为种群个体数和个体决策变量维度; X_k^i 为第 i 个体的第 k 维决策变量; U_k 和 L_k 分别是决策变量第 k 维的上下边界, λ 为均匀分布随机数, 用来控制各维决策变量变化步长。

2) 局部搜索(*LocalSearch()*) EM 通过局部搜索来提高算法的收敛精度和保证算法的种群多样性, 算法采用等概率的方式对种群个体决策变量的值的变化方向进行选择, 同时通过设置不同的迭代次数 *LocalNum* 等局部收索参数, 来满足不同对象需求, 其操作方程如下:

$$X_k^i = \begin{cases} X_k^i + \lambda_1 (\delta \max(U_k - L_k)) & \text{if } \text{rnd}() > 0.5 \\ X_k^i - \lambda_1 (\delta \max(U_k - L_k)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\text{rnd}()$ 和 λ_1 是 $[0, 1]$ 之间均匀分布随机数; δ 为步长系数, 其大小决定着算法的局部搜索步长。

3) 总矢量力计算(*CalcF()*) EM 算法通过计算种群个体 X^i 的总矢量力 F^i , 来确定种群移动的方向和程度, 在一定程度上影响着算法的全局搜索范围, 其数学模拟模型为:

$$F^i = \sum_{j \neq i}^N \left\{ \begin{array}{ll} (X^j - X^i) \frac{q^i q^j}{\|X^j - X^i\|^2} & \text{if } f(X^j) < f(X^i) \\ (X^i - X^j) \frac{q^i q^j}{\|X^j - X^i\|^2} & \text{if } f(X^j) \geq f(X^i) \end{array} \right\}, \forall i \quad (12)$$

式中: $f(X^i)$ 为个体 X^i 的目标函数值; q^i 为个体 X^i 的带电荷量。其计算表达式如下:

$$q^i = \exp\left(-D \frac{f(X^i) - f(X^{\text{best}})}{\sum_{k=1}^N (f(X^k) - f(X^{\text{best}}))}\right), \forall i \quad (13)$$

由上式可知, EM 采用电荷模拟来描述个体 X^i 与当前代最优个体 X^i 之间的距离, 其带电量 q^i 越大表明距离最优个体越近。

4) 种群进化($Move()$) EM 算法根据计算获得的个体 X^i 总矢量力 F^i , 对种群个体 X^i 进行移动进化, 其种群进化数学模拟模型为:

$$X^i = X^i + \lambda \frac{F^i}{\|F^i\|} \quad \lambda \in U(0, 1); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

式中: $U(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 之间均匀随机数产生函数。

2.2 自适应多目标仿电磁学算法

1) 外水部档案集(External archive) 本文引入外部档案集机制及基于个体聚集密度的外部档案集更新方法^[10], 用于保存算法在进化过程中产生的历史最优解。由于计算资源的限制, 外部档案(记为 Q) 的大小取固定值, 记为 M 。为保证 Q 中非劣解集的多样性, 需对 Q 进行更新维护, 使其中种群个体分布均匀。其具体操作为: ①若 Q 为空集, 则将新的非劣个体直接加入到 Q 中; ②若该个体不被 Q 中任何一个个体支配, 则将该个体加到 Q 中, 同时删除 Q 中受该个体支配的个体; ③当 Q 中个体数目大于指定大小 M 时, 采取截断操作剔除多余的个体, 即计算 Q 中所有个体的拥挤距离^[9], 剔除拥挤距离最小的个体。

2) EM 算子修正 $LocalSearch()$ 算子对种群所有个体执行局部搜索, 搜集种群进化信息, 提高算法求解精度, 并避免算法陷入局部最优解。在此基础上, 本文依据水库群多目标防洪优化调度问题的特点, 加入一种自适应的扰动因子, 对算法局部搜索的进化步长进行修正, 其实现数学公式如下所示:

$$X_k^i = \begin{cases} X_k^i + \lambda \cdot \text{decaypara}(g) \cdot (\max(U_k - L_k)) & \text{if } \text{rnd}() > 0.5 \\ X_k^i - \lambda \cdot \text{decaypara}(g) \cdot (\max(U_k - L_k)) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\text{decaypara}(g)$ 为第 g 代自适应扰动算子, 其计算表达式为:

$$\text{decaypara}(g) = \begin{cases} \delta \cdot \exp(-\alpha \cdot \text{count} \cdot g/G) & \text{if } \text{count} > r \\ \delta \cdot \exp(-g/G) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式中: G 为算法总进化代数; α 为自适应参数; count 和 r 分别为算法停滞代数及其阈值。

考虑 MOEM 使用了外部档案集, 且针对多目标无法得到单个全局最优解得问题, 本文引入 $Aprox()$ 函数计算种群个体距 Pareto 最优解集的距离。在对种群个体带电荷量 q^i 计算时, 采用下式进行计算

$$q^i = \exp\left(-D \frac{Aprox(X^i) - Aprox(X^{\text{best}})}{\sum_{k=1}^N (Aprox(X^k) - Aprox(X^{\text{best}}))}\right) \quad (17)$$

式中: $Aprox(X^i)$ 为目标空间中个体 X^i 距非劣解集 Q 的最近距离, X^{best} 为目标空间中种群距 Q 距离最近个体, 其数学表达式分别如下式所示:

$$Aprox(X^i) = \min_{X \in Q} (\|f(X^i) - f(X)\|) \quad (18)$$

$$X^{\text{best}} = \arg \min (Aprox(X^i)), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

对于计算个体 X^i 的总矢量力 F^i 的 $CalF()$ 算子, 两个个体 X^i 与 X^j 可能存在支配关系, 可能互为非劣, 不能简单确定哪个个体更优。因此, 需要对总矢量计算操作进行修正。判断依据: ①若 $Aprox(X^j) < Aprox(X^i)$, 则个体 X^i 被 X^j 吸引; ②若 $Aprox(X^j) > Aprox(X^i)$, 则个体 X^i 被 X^j 排斥。 F^i 的数学计算式如下:

$$F^i = \sum_{j \neq i}^N \left\{ \begin{array}{ll} (X^j - X^i) \frac{q^i q^j}{\|X^j - X^i\|^2} & \text{if } Aprox(X^j) < Aprox(X^i) \\ (X^i - X^j) \frac{q^i q^j}{\|X^i - X^j\|^2} & \text{if } Aprox(X^j) > Aprox(X^i) \end{array} \right\} \quad (20)$$

2.3 算法流程

Step 1: 初始化: 执行 $Initialize()$ 操作, 初始化群体空间及算法参数, 置进化代数 $g = 0$;

Step 2: 更新维护外部档案集, 将种群中的 Pareto 最优解加入外部档案集 Q 中;

Step 3: 执行 EM 的各算子进行种群进化

- ①局部搜索: 执行 $LocalSearch()$ 操作, 进而对种群所有个体执行局部搜索操作, 更新种群信息;
- ②总矢量力计算: 执行 $CalF()$ 操作, 计算所有种群个体的带电电荷 q^i , 进而得到总矢量力 F^i ;
- ③种群进化: 执行 $Move()$ 操作, 对种群按照式(14)进行进化移动, 得到新的种群;

Step4: 终止条件判断。若 $g \geq G$, 其中 g_{\max} 为算法的最大迭代次数, 输出信念空间中的 $Pareto$ 解集作为最终非劣调度方案集; 否则 $g = g + 1$, 转 Step 2。

3 调度结果分析及方案优选

针对金沙江梯级与三峡梯级水库群, 本文建立了水库群多目标防洪优化调度模型, 并采用本文提出的 MOEM 进行求解, 同时, 本文采取基于 TOPSIS 和主观偏好的多属性决策方法对本文算法所求得调度方案集进行优选, 以获得不同调度情景下满足决策者偏好、综合效益最优的梯级水库联合调度实施方案。金沙江及长江下游流域防洪调度任务主要分别为“对川江防洪”和“对荆江防洪”, 本文研究主要针对川江的宜宾、泸州、重庆以及荆江的沙市等防洪控制站点, 其具体规程如下:

对于川江防洪: ①20 年一遇以下洪水, 控制金沙江梯级拦蓄流量不超过 $3000\text{m}^3/\text{s}$; ②50 年一遇以下洪水, 控制金沙江梯级拦蓄流量不超过 $9500\text{m}^3/\text{s}$; ③100 年一遇以下洪水, 控制金沙江梯级拦蓄流量不超过 $11000\text{m}^3/\text{s}$ 。

对荆江防洪: ①100 年一遇以下洪水, 控制三峡梯级下泄流量不超过 $55000\text{m}^3/\text{s}$; ②100 年一遇以上至 1000 年一遇洪水, 在水库达到 100 年一遇洪水的蓄洪水位后, 控制三峡梯级下泄流量不超过 $78000\text{m}^3/\text{s}$; ③洪水超过 1000 年一遇或水库水位已达 175m, 则以保证大坝安全为原则, 水库按泄流能力下泄, 不再考虑下游防洪要求。

3.1 目标函数归一化

在模型求解过程中, 需对具有不同量纲的目标进行算术运算, 针对不同目标之间存在量纲不同的问题, 本文采取归一化的方法^[7]对目标空间标准化, 使其取值范围在 $[0, 1]$ 之间, 以避免数量对算法求解产生影响, 其规范化方式如下式所示:

$$f^k(X^i) = \frac{f^k(X^i) - f_{\min}^k}{f_{\max}^k - f_{\min}^k}, \quad k = 1, 2, \dots, N_o \quad (21)$$

式中: $f^k(X^i)$ 为个体 X^i 第 k 维目标值; f_{\max}^k 和 f_{\min}^k 分别为第 k 维目标最大、最小值; N_o 为目标空间维度。

3.2 调度成果及对比分析

为比较金沙江梯级对流域防洪的影响, 文本针对三峡梯级单独调度和金沙江梯级及三峡梯级联合调度 2 种方式, 以金沙江及长江中下游 1981 年 500 年一遇及 1998 年 200 年一遇的典型洪水为预报来水, 在相同参数条件下, 采用 MOEM 算法进行梯级水库群多目标防洪优化调度计算。

其中, 参数设置如下: MOEM 算法外部种群 Q 的规模 $M = 30$, 种群规模 $N = 50$, 局部搜索参数 $\delta = 0.01$, 自适应参数 $\alpha = 0.8955$, 算法停滞代数阈值 $r = 5$, 算法迭代次数设定为 1000, 局部搜索次数定为 10; 不同场景得到关于最高上游水位和最大下泄流量非劣调度方案集的空间分布如图 1 和图 2 所示。表 1 列出图 1 中联合防洪优化调度的各非劣调度方案的具体数据。图 3 绘制出图 2 部分典型调度方案的入库和下泄流量过程曲线。

从表 1 中可以看出, 各调度方案三峡坝前最高水位与最大下泄流量成反比关系, 两者相互冲突, 相互制约。降低水库下泄洪峰, 其坝前最高水位必然增高, 反之亦然。对于相同频率来水而言, 由于金沙江四库梯级的调蓄作用, 向家坝水库最大下泄流量为 $16708 \sim 21401\text{m}^3/\text{s}$, 约占三峡水库入库流量的 24%, 与无上游四库调蓄相比, 约减少了 13.3%, 削减洪峰为 $12000\text{m}^3/\text{s}$ 左右。对于近似三峡水库坝前最高水位, 随着金沙江梯级下泄流量的增大, 三峡水库最大下泄流量同步增大。由此可见, 金沙江四库及三峡汛期调蓄方式对三峡水库汛期防洪影响较大, 金沙江四库梯级汛期拦蓄洪水, 在满足自身防洪任务需求同时, 并通过削峰错峰调节配合下游三峡梯级对长江中下游防洪区进行防洪调度, 降低下游三峡梯级入库洪峰, 有益于三峡梯级汛期防洪。

此外, 为了比较梯级联合防洪和三峡梯级单独运用的流域防洪效果, 本文设置了三峡梯级单独防洪调度和金沙江梯级与三峡梯级联合防洪调度这两种情景。由图 1 和图 2 可以看出, 在相同典型年来水条件下, 相比于三峡梯级单独调度, MOEM 求出的金沙江梯级及三峡梯级联合调度方案在相同的坝前最高水位所对应的最大下泄流量更小, 使流域整体下泄洪峰及洪量减小的同时降低了三峡调度期末水位, 保护了水库自身安全, 增强了梯级水库群汛期防洪能力。同时, 从图 3 可以看出, 各调度方案集对相应频率入库洪水都能起到不错的削峰作用, 其中, 金沙江梯级对下游洪水具有明显的拦蓄作用, 减少下游三峡梯级入库洪量和洪峰; 同时, 金沙江梯级和三峡梯级

均可在大洪峰来临之前将坝前水位降低以避免漫坝灾害的发生,进一步验证了联合优化调度方案的可行性和合理性。由此可见,金沙江梯级在汛期能在保证自身防洪及下游川江防洪安全的同时,拦蓄洪水基流,有效削减下游三峡梯级汛期入库径流及洪量。

表1 1981年500年一遇典型洪水联合优化调度的非劣调度方案集

Table 1 Pareto optimal operation schemes obtained by MOEM for the flood in 1981

调度方案	目标函数值				调度方案	目标函数值			
	F_1/m	F_2/m	$F_3/m^3 \cdot s^{-1}$	$F_4/m^3 \cdot s^{-1}$		F_1/m	F_2/m	$F_3/m^3 \cdot s^{-1}$	$F_4/m^3 \cdot s^{-1}$
方案1	148.52	379.24	72977	20980	方案16	160.98	380	54165	18774
方案2	149.14	380	71804	20982	方案17	161.99	380	52891	18279
方案3	149.61	380	70764	21401	方案18	163.02	380	52018	18035
方案4	150.58	380	69533	20898	方案19	163.87	379.93	50597	17713
方案5	151.27	380	68521	20865	方案20	164.68	380	49733	18071
方案6	152.08	380	66854	21236	方案21	165.54	380	48317	17171
方案7	152.87	380	65130	19661	方案22	166.57	380	47447	17421
方案8	153.76	380	63851	19631	方案23	167.45	380	46236	17101
方案9	154.56	380	62776	20567	方案24	168.42	380	44999	17026
方案10	155.19	380	61450	19957	方案25	169.42	380	43765	16968
方案11	156.18	380	60376	19527	方案26	170.73	380	42432	16880
方案12	157.03	380	59230	19487	方案27	171.81	380	40833	16848
方案13	157.89	380	57883	19242	方案28	172.75	380	39450	16709
方案14	158.97	380	56469	19148	方案29	173.74	380	38160	16708
方案15	159.99	380	55300	18920	方案30	174.92	380	36068	16709

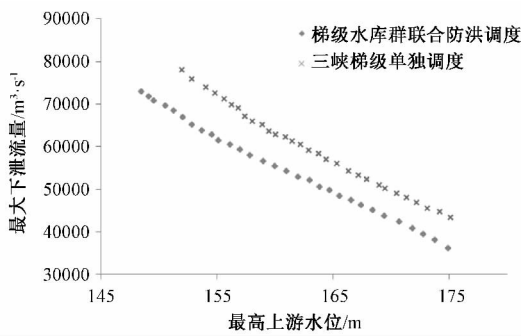


图1 1981年500年一遇典型洪水非劣调度方案集
Fig. 1 Pareto optimal schemes for the flood in 1981

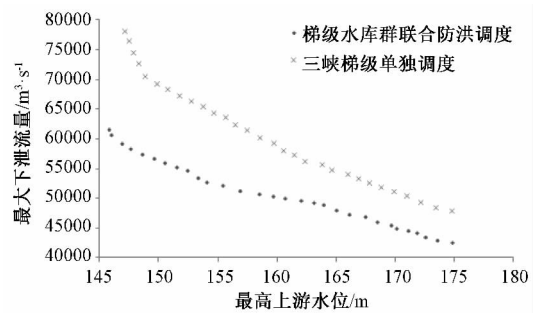


图2 1998年200年一遇典型洪水非劣调度方案集
Fig. 2 Pareto optimal schemes for the flood in 1998

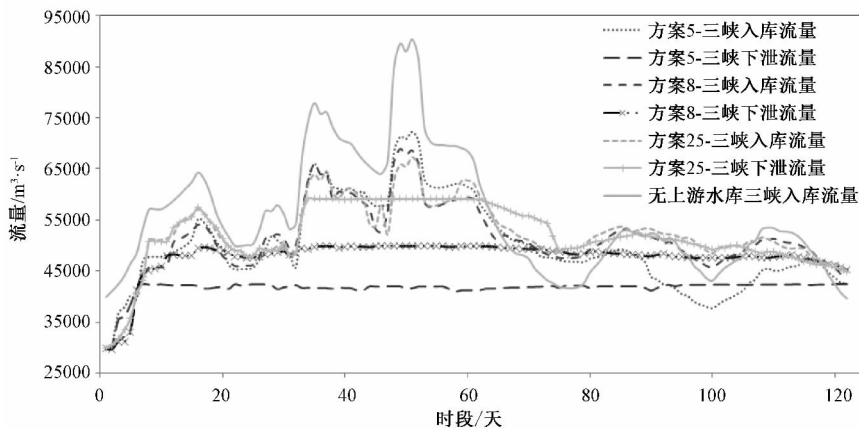


图3 1998年洪水部分调度方案下泄流量过程
Fig. 3 Discharge processes for the flood in 1998 calculated by different schemes

3.3 联合防洪调度方案优选

针对 MOEM 算法求解所得库群联合防洪优化调度方案集优选问题,本文在防洪调度方案决策优选中设置了侧重川江、宜宾防洪目标和侧重荆江流域防洪目标二种决策情景,以上节优化调度得到的非劣调度方案集为备选方案,详细数据如表 1 所示。决策所涉及属性主要包括模型的四个调度目标,其均为成本型指标,值越小越好。

针对这二种不同决策情景,专家对各属性进行了重要性评价:①侧重川江、宜宾防洪目标 $\omega_1 = (0.21 \ 0.09 \ 0.12 \ 0.58)^T$;②侧重荆江防洪目标 $\omega_2 = (0.10 \ 0.69 \ 0.10 \ 0.11)^T$ 。根据改进熵权^[13]计算各属性客观权重为: $\omega_h = (0.33 \ 0.42 \ 0.06 \ 0.19)^T$ 。将主观和客观权重集成,得到不同决策偏好下的综合权重:①侧重川江、宜宾防洪目标 $\omega = (0.27 \ 0.25 \ 0.09 \ 0.39)^T$;②侧重荆江防洪目标 $\omega = (0.22 \ 0.55 \ 0.08 \ 0.15)^T$ 。

结合上述综合权重,采用 TOPSIS 的多属性决策方法对表 1 中所列出方案进行评分和排序,排序结果如表 2 所示。

表 2 方案集排序优选结果

Table 2 Sequencing optimization results of scheme set

决策情景	排序
侧重川江、宜宾防洪	28 > 29 > 30 > 27 > 26 > 25 > 24 > 23 > 21 > 22 > 19 > 18 > 20 > 17 > 1 > 16 > 15 > 14 > 13 > 12 > 11 > 8 > 7 > 10 > 9 > 5 > 4 > 2 > 6 > 3
侧重荆江防洪	30 > 29 > 28 > 27 > 26 > 25 > 24 > 23 > 22 > 21 > 20 > 19 > 18 > 17 > 16 > 15 > 14 > 13 > 12 > 11 > 10 > 9 > 8 > 7 > 1 > 6 > 5 > 4 > 3 > 2

从表 2 可知,当决策过程侧重川江、宜宾防洪目标时,方案的评价优选会更加侧重于考虑向家坝下泄流量,最优方案至最劣方案的排序与向家坝下泄流量的变化趋势基本一致,当向家坝下泄流量取值一样时三峡坝前水位较低的方案较优;当决策侧重荆江防洪目标时,决策过程会更加侧重于考虑三峡下泄流量,此情景下方案的优劣排序结果与上述主观偏好具有一致性,最优方案至最劣方案的排序与三峡下泄流量的变化趋势基本一致,三峡下泄流量较小的方案最优。上述结果分析可以表明,本文所得联合防洪优化调度方案能充分的考虑评价专家的主观偏好及非劣调度方案中所包含的客观决策信息,可为实际调度运行方案的会商决策提供技术支持。

4 结论

针对长江中上游流域水库群联合防洪调度的实际工程需求,本文构建了一种水库群多目标防洪优化调度模型来综合考虑三峡上游宜宾、泸州、重庆等川江防护区、下游荆江防护区及水库群大坝防洪安全等多方安全因素以确保综合洪水风险最小,并提出了一种基于自适应的仿电磁学算法对该模型进行求解。该算法采用 EM 算子实现可行解集的进化,同时根据水库群多目标防洪优化调度问题的特点引入并构建了外部档案集,在此基础上,加入一种自适应的扰动因子对原 EM 算子的局部随机搜索操作进行修正,改善了算法的全局寻优能力。本文以金沙江下游梯级及三峡梯级水库群联合防洪调度为实例应用 MOEM 进行多目标防洪优化调度问题的求解,所得不同情景下的调度方案对比分析表明:相比于三峡梯级单独调度,金沙江下游梯级及三峡梯级联合调度方案在相同的坝前最高水位所对应的最大下泄流量更小,使流域整体下泄洪峰及洪量减小的同时降低三峡调度期末水位,在保护水库自身安全前提下,增强梯级水库群汛期防洪能力。同时对所得库群联合防洪优化调度方案集优选进行优选,分析并给出了不同侧重目标下的方案集排序,为实际调度运行方案的会商决策提供强有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 李响,郭生练,刘攀,等.三峡水库汛期水位控制运用方案研究[J].水力发电学报,2010,2(29):102-107.
LI Xiang, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Schemes of storage level control of Three Gorges reservoir during flood seasons [J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2010, 2(29): 102-107. (in Chinese)
- [2] 吴成国,王义民,金菊良,等.基于三角模糊数的水库防洪调度模糊综合风险分析[J].水力发电学报,2011,4(30):30-35.
WU Chengguo, WANG Yimin, JIN Juliang, et al. Comprehensive risk analysis based on triangular fuzzy number for reservoir flood control operation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering 2011, 4(30): 30-35. (in Chinese)
- [3] Windsor J S. Optimization model for reservoir flood control [J]. Water Resour Res, 1973, 9(5): 1219-1226.

(下转至第 56 页)

- [2] 丁晶, 邓育仁, 侯玉, 等. 水库防洪安全设计时设计洪水过程线适用性的探讨 [J]. 水科学进展, 1992, 3(1): 45-52.
DING Jing, DENG Yuren, HOU Yu, et al. The study on applicability of "design flood hydrograph" for the design of reservoirs safety withstanding flood [J]. Advances in Water Science, 1992, 3(1): 45-52. (in Chinese)
- [3] 丁晶, 朱宏江. 对现行设计洪水过程线方法适用性的统计试验研究 [J]. 四川水力发电, 1990, (1): 17-24.
DING Jing, ZHU Hongjiang. Stochastic experiment research on applicability of current design flood hydrograph derivation method [J]. Sichuan Water Power, 1990, (1): 17-24. (in Chinese)
- [4] 肖义, 郭生练, 刘攀, 等. 基于 Copula 函数的设计洪水过程线方法 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(4): 13-17.
XIAO Yi, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Derivation of design flood hydrograph based on Copula function [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(4): 13-17. (in Chinese)
- [5] Nelsen R B. An introduction to Copulas (Second edition) [M]. Springer, New York, 2006.
- [6] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展 [J]. 水文, 2008, 28(3): 1-7.
GUO Shenglian, YAN Baowei, XIAO Yi, et al. Application of Copula functions in multivariate hydrological analysis and estimation [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 1-7. (in Chinese)
- [7] Yue S, Quarda T B M J, Bobée B, Legendre P, Bruneau P. The Gumbel mixed model for flood frequency analysis [J]. Journal of Hydrology, 1999, 226: 88-100.
- [8] Chebana, F, and Quarda, T B M J. Multivariate quantiles in hydrological frequency analysis [J]. Environmetrics, 2011, 22: 441-455.
- [9] 金蓉玲. 隔河岩水利枢纽暴雨洪水分析及设计洪水计算 [J]. 人民长江, 1992, 23(2): 26-30.
JIN Rongling. Storm flood and design flood analysis for Geheyan water control project [J]. Yangtze River, 1992, 23(2): 26-30. (in Chinese)

(上接第49页)

- [4] 许自达. 动态规划在整体防洪优化调度中的应用 [J]. 水力发电学报, 1998, 1: 12-26.
XU Zida. Application of dynamic programming for the optimal regulation of the integrated flood protection measures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1998, 1: 12-26. (in Chinese)
- [5] 傅湘, 纪昌明. 防洪系统最优化调度模型及应用 [J]. 水利学报, 1998, (5): 49-53.
FU Xiang, JI Changming. The optimum operation model of flood control system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (5): 49-53. (in Chinese)
- [6] 覃晖, 周建中, 王光谦, 等. 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): 71-76.
QIN Hui, ZHOU Jianzhong, WANG Guangqian, et al. Multi-objective optimization of reservoir flood dispatch based on multi-objective differential evolution algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(5): 71-76. (in Chinese)
- [7] Birbil S I, Fang S H. An electromagnetism-like mechanism for global optimization [J]. Journal of Global Optimization, 2003, (25): 263-282.
- [8] Tsou C S, Kao C H. Multi-objective inventory control using electromagnetism-like meta-heuristic [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(46): 3859-3874.
- [9] Alikhani M G, Javadian N, Tavakkoli Moghaddam R. A novel hybrid approach combining electromagnetism-like method with Solis and Wets local search for continuous optimization problems [J]. Journal of Global Optimization, 2009, 2(44): 227-234.
- [10] Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm [R]. Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloriastrasse 35, CH-8092 Zurich, Switzerland, 2001.
- [11] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望 [J]. 水科学进展, 2010, 4(21): 496-503.
GUO Shenglian, CHEN Jionghong, LIU Pan, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems [J]. Advances in Water Science, 2010, 4(21): 496-503. (in Chinese)
- [12] 黄志中, 周之豪. 防洪系统实时优化调度的多目标决策模型 [J]. 河海大学学报, 1994, 22(6): 16-21.
HUANG Zhizhong, ZHOU Zhihao. A multi-objective decision making model for real-time optimization of flood control systems [J]. Journal of Hohai University, 1994, 22(6): 16-21. (in Chinese)
- [13] 李英海, 周建中. 基于改进熵权和 Vague 集的多目标防洪调度决策方法 [J]. 水电能源科学, 2010, 6(28): 32-35.
LI Yinghai, ZHOU Jianzhong. Modified entropy method and vague set based multi-objective flood control decision making approach [J]. Water Resources and Power, 2010, 6(28): 32-35. (in Chinese)