

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20110911. 1132. 010

三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法

卢有麟¹, 周建中¹, 王浩^{1, 2}, 张勇传¹

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 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: 针对三峡梯级枢纽综合效益的充分发挥及其对长江流域典型生态系统修复及持续改善的科学需求, 通过分析发电效益与生态效益之间的制约竞争关系, 以发电量最大和生态缺水最小为目标建立了梯级电站多目标生态优化调度模型, 对三峡梯级枢纽多目标生态优化调度进行了研究。同时, 针对传统优化方法难以同时处理多个调度目标的固有缺陷, 提出一种改进多目标差分进化算法对所构建模型进行高效求解。该方法针对差分进化算法在多目标协同优化和全局寻优能力等方面的不足, 依据问题的特点重新设计了差分进化算法的进化算子, 同时设计了一种多目标混沌搜索策略以加强算法的局部搜索能力。最后, 依据多目标生态优化调度问题的特点设计了一种不需要设置惩罚因子的约束处理方法。通过三峡梯级枢纽多目标生态优化调度的实例应用, 验证了本文所构建模型的合理性以及所提出算法的有效性和工程实用性。

关键词: 生态调度; 多目标; 差分进化算法; 混沌序列; 约束处理; 三峡梯级

中图分类号: TV697 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)06-0780-09

三峡梯级枢纽工程在防洪、发电、供水和航运等方面起到了重要的作用, 产生了巨大的经济效益与社会效益, 但同时也影响了长江上游水流情势, 对流域生态系统造成了一定胁迫^[1]。传统的梯级电站群优化调度模式多单纯追求发电效益的最大化, 对生态效益解决水库群调度生产运行所面临的生态问题不够重视。近年来, 随着生态友好型水库群调度模式的提出, 大型梯级枢纽生态调度逐渐受到重视, 国内外学者针对如何转变水库优化调度方式, 均衡考虑电站群经济和生态效益, 实现兴利、生态、防洪等多个调度目标的协同优化开展了一系列研究, 并取得了比较丰富的研究成果。胡和平等^[2]以水电站年发电量最大为优化目标, 以生态方案为约束, 提出了基于生态流量过程线的水库优化调度模型; 梅亚东等^[3]根据雅砻江下游梯级水库水电站的布置和河道生态环境要求, 建立了考虑生态需水约束的梯级电站群长期优化调度模型, 并采用动态规划法进行求解。然而, 从建模角度而言, 以往生态调度研究多采用设置目标权重系数^[4], 或将生态目标作为约束^[3]等方式将多目标问题转化为单目标问题进行求解, 此类转化工作虽然有效降低了模型的求解难度, 但由于人为设定的权重向量和生态约束难以充分反映兴利、生态调度目标间的制约竞争关系, 导致此类模型难以实现多个目标的并行协同优化。从求解方式角度而言, 以往研究多采用单目标优化方法^[5]、人机互动决策方法^[4]对模型进行求解, 一次计算只能求得一个调度方案, 生成非劣调度方案集需要进行多次循环计算, 求解效率不高。同时, 若实际多目标最优前沿曲线非连续非凸, 上述方法多次计算结果无法保证非劣调度方案之间互为非劣, 限制了其工程应用价值。因此, 针对生态友好型水库调度面临的工程需求和科学问题, 亟需开展水库群多目标生态优化调度建模理论与优化技术等方面的研究。

差分进化(differential evolution, DE)算法由 Storn 和 Price 于 1995 年提出, 是一种采用浮点矢量编码的全

收稿日期: 2010-12-24; 网络出版时间: 2011-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110911.1132.010.html>

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAB29B08); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(200701008)

作者简介: 卢有麟(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事水电能源及其互联电力系统优化调度研究。

E-mail: youlin_lu@yahoo.cn

通信作者: 周建中, E-mail: jz.zhou@hust.edu.cn

局优化算法,其原理简单,受控参数少,可在连续空间内进行全局搜索^[6]。近年来,DE以其易用性、稳定性在多个领域得到广泛的应用^[7-9]。通过分析兴利调度模式和生态流量调控措施之间的互补性和竞争性,本文提出以发电量最大和生态缺水最小为目标的三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型,同时,针对多目标生态优化调度问题的特点,依据多目标协同优化思想对DE的进化算子进行了修正,提出一种改进多目标差分进化算法(modified multi-objective differential evolution algorithm, MMODE),最后以三峡梯级枢纽为工程应用实例,考虑多种来水情势,采用本文研究成果进行多目标生态优化调度建模,同时应用所提出算法对模型进行了高效求解,并对多目标调度结果进行了对比以及数值分析。

1 三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型

开展三峡梯级枢纽多目标生态优化调度研究,首要任务是明确生态调度目标,本文针对三峡梯级枢纽调度运行所面临的生态问题,以三峡水库下游河道内生态缺水最小作为三峡梯级枢纽的生态调度目标。河道内生态流量是维持流域生态系统可持续发展所需的流量,是开展水库生态调度研究首先需要解决的关键问题^[10]。作为一个“龙头电站”下接日调节径流式电站的梯级电站群,三峡梯级枢纽的最优兴利调度方式要求其龙头电站—三峡电站在枯水期尽量控制下泄以抬高平均水头,提高水量利用率,增发电量。然而,生态流量调控措施要求三峡电站在枯水期进行生态补水,使其下泄流量尽量满足河道的生态流量。综上所述,三峡梯级枢纽最优兴利调度模式仅仅追求发电效益最大化,往往忽视了下游河道生态需求,导致下泄流量可能难以满足下游河道生态流量的要求。因此,三峡梯级枢纽兴利、生态目标之间存在相互制约关系,很难同时优化,本文通过综合考虑梯级电站群的兴利效益和生态效益,建立了以下多目标生态优化调度模型。

1.1 目标函数

三峡梯级枢纽多目标生态优化调度主要体现在发电效益和生态效益两个方面。本文模型中,经济效益主要体现为梯级电站总发电量,生态效益主要体现为河道生态缺水最小。以梯级发电量最大和三峡电站下游河道生态缺水最小为目标建立三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型。

(1) 梯级发电量最大

$$\max f_1 = \max E = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T K_i Q_{f(i,t)} H_{f(i,t)} \Delta t = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{t=1}^T N_{i,t} \Delta t \quad (1)$$

式中 E 为梯级枢纽的总发电量; N_s 为梯级枢纽电站总个数; T 为调度时段总数; K_i 为第 i 个电站的出力系数; $Q_{f(i,t)}$, $H_{f(i,t)}$ 分别为第 i 个电站第 t 个时段的发电引用流量和平均水头; $N_{i,t}$ 为第 i 个电站第 t 个时段的出力; Δt 为单个时段长度。

(2) 三峡电站下游河道生态缺水最小

$$\min f_2 = \min W_Q = \sum_{t=1}^T | \min(0, (Q_{X(s,t)} - Q_{S(s,t)})) | \Delta t \quad (2)$$

式中 W_Q 为三峡下游河道生态缺水最小; $Q_{X(s,t)}$ 为三峡电站第 t 时段的下泄流量; $Q_{S(s,t)}$ 为第 t 时段三峡电站下游河道的生态流量。

1.2 约束条件

(1) 水位(库容)约束

$$Z_{\min(i,t)} \leq Z_{i,t} \leq Z_{\max(i,t)}$$

(2) 出力约束

$$N_{\min(i,t)} \leq N_{i,t} \leq N_{\max(i,t)}$$

(3) 流量约束

$$Q_{\min(i,t)} \leq Q_{X(i,t)} \leq Q_{\max(i,t)}$$

(4) 水量平衡方程

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

(5) 梯级电站间的水力联系

$$I_{G,t} = Q_{X(S,t-\tau)} + q_t$$

式中 $Z_{\min(i,t)}$ 、 $Z_{\max(i,t)}$ 分别为第 i 个电站第 t 个时段的水位约束(可用水位库容曲线转化为库容约束)的上下限,其值取水库自身水位上下限和调度规程所规定的时段水位上下限的交集; $N_{\min(i,t)}$ 、 $N_{\max(i,t)}$ 分别为第 i 个电站第 t 个时段的出力约束,其值取电站总装机容量、时段预想出力约束以及时段保证出力约束的交集部

分; $Q_{\min(i,t)}$ 、 $Q_{\max(i,t)}$ 分别为第 i 个电站第 t 个时段的流量约束, 其值取水库自身过流能力约束和调度规程所规定的水库时段下泄流量限制的交集; $V_{i,t}$ 、 $I_{i,t}$ 分别为第 i 个电站第 t 个时段的库容和来水; $I_{G,t}$ 为葛洲坝电站第 t 个时段的来水; $Q_{X(S,t-\tau)}$ 为三峡电站第 $t-\tau$ 时段的下泄流量; τ 为三峡电站至葛洲坝电站的流达时间; q_t 为第 t 个时段三峡至葛洲坝河段的区间入流。考虑到本文建模主要针对中长期多目标生态调度, 故水流时滞对调度结果的影响可忽略不计, 同时, 考虑到葛洲坝电站为日调节径流式电站, 本文依据调度规程在建模时对其做了一定概化, 使其枯水期按水位 65.0 m 运行, 汛期按水位 65.5 m 运行。

2 改进多目标差分进化算法设计

2.1 外部种群及其维护策略

多目标优化要解决的首要问题是有效保存算法在搜索过程中找到的最优非劣解, 并在保持它们分布多样性的同时将非劣解集的规模维持在一个合理界限内, 以精确的描绘出问题目标域 Pareto 最优前沿的离散形式。现阶段, 解决这一问题的主要手段是外部归档技术^[11], 因此, 本文构造了外部种群 $ArcSet()$ 用来保存算法求解过程中搜索到的非劣调度方案, 同时, 为维持 $ArcSet()$ 的规模并使各非劣调度方案分布尽量均匀, 本文采用如下策略对 $ArcSet()$ 进行维护: 设 $ArcSet()$ 的规模为 N_a , 算法的搜索迭代次数为 g , 将第 g 代种群中搜索到得非劣调度方案存放到一个临时的非劣解集 $NdSet(g)$ 中, 然后对 $NdSet(g)$ 中每个个体(这里以第 i 个个体 $n_{i,g}$ 为例) 执行如下操作:

(1) 若 $ArcSet()$ 为空, 则直接将 $n_{i,g}$ 加入到 $ArcSet()$ 中;

(2) 若 $ArcSet()$ 不为空, 则将 $n_{i,g}$ 与 $ArcSet()$ 中的个体进行向量对比, 若 $ArcSet()$ 中无任一个体 Pareto 支配 $n_{i,g}$, 则将 $n_{i,g}$ 加入到 $ArcSet()$ 中, 并删除 $ArcSet()$ 中被 $n_{i,g}$ 支配的个体;

(3) 若 $ArcSet()$ 规模超过了 N_a , 则需要实施截断操作来维持外部种群的规模。这里本文引入著名多目标优化技术 NSGA-II 所采用的拥挤距离法^[12] 对 $ArcSet()$ 进行维护, 裁去聚集密度较大个体, 维持非劣调度方案的多样性。

2.2 改进多目标差分进化算法

DE 的基本进化算子包括变异、交叉以及选择操作, 对父代种群中任一个体(以第 i 个个体 X_i 为例), DE 算法通过变异操作生成变异个体 V_i , 之后交叉操作通过个体重组生成实验个体 U_i , 最后选择操作通过比较 X_i 和 U_i 的优劣选出较优个体进入子代种群继续参与进化过程, DE 的详细操作可见文献 [6]。在多目标优化问题中, 各个体是通过 Pareto 支配来判定其优劣的, 故本文多目标优化问题的特点是重新设计 DE 的进化算子, 并针对 DE 易产生“早熟”的问题设计了一种基于多目标优化的混沌局部搜索策略并将其引入 DE 以提升算法的全局优化性能, 提出一种改进多目标差分进化算法 MMODE。

2.2.1 DE 变异操作及其修正

DE 有多种变异个体生成方法, 本文采用的变异操作如下:

$$V_i^{g+1} = X_{r_1}^g + F(X_{r_2}^g - X_{r_3}^g) \quad (3)$$

式中 V_i^{g+1} 为变异个体; F 为变异常数, 用来控制差分矢量的影响。在原始版本 DE 中, $X_{r_1}^g$ 、 $X_{r_2}^g$ 和 $X_{r_3}^g$ 是从父代种群中随机挑选的 3 个互不相同的个体。为提高算法求解多目标优化问题的效率, 本文对 DE 的变异操作进行了修正。从 2.1 节的描述可知, 外部档案归档技术的引入使得算法在搜索过程中所获取的最优多目标前沿信息可得到有效保存, 若能合理利用外部集中的精英解来指导种群进化, 算法的优化效率会大大提升。因此, 本文所提出 MMODE 从外部种群而非父代种群中选择 $X_{r_1}^g$ 、 $X_{r_2}^g$ 和 $X_{r_3}^g$, 以便于有效利用外部集中精英个体所携带的最优前沿信息和分布特性信息来指导种群个体进化, 提升算法效率。

2.2.2 DE 选择操作修正

DE 设计的初衷是用于求解单目标优化问题, 其选择策略面临矢量优选的难题无法适应多目标优化的需求, 需进行根据问题特点进行修正。因此, 本文针对上述问题, 对 DE 的选择算子进行了多目标修正, 在保

留原有“贪婪”策略的同时, 引入 Pareto 优化思想和考虑分布性的截断操作, 提出一种新的选择策略, 其具体操作如下:

(1) 首先生成一个临时群体用于存放需进行向量优选的个体, 其规模设置原种群大小 N_p 的 2 倍。

(2) 对算法原种群中任一个体 X_i^g , 将其与相应实验个体 U_i^{g+1} 进行 Pareto 支配比较, 若 X_i^g 支配 U_i^{g+1} 则 X_i^g 进入临时种群, 否则将 U_i^{g+1} 加入临时种群, 若 $X_i^g \sim U_i^{g+1}$, 则将两者同时加入临时种群。

(3) 当种群中所有个体执行上一步操作后, 将生产一个规模介于 N_p 和 $2N_p$ 之间的临时种群。为选择 N_p 个最优个体进入下一代参与继续进化, 需依据个体的分布性对所获得临时种群实施裁剪操作。本文采用 NS-GA-II 中基于拥挤距离的截断策略^[12]来选取临时种群分布性最优的 N_p 个个体组成子代种群, 以维持子代种群的多样性。

2.3 基于多目标优化的混沌局部搜索策略

进化算法早熟收敛的根本原因在于群体的多样性随着进化过程急剧下降^[13]。从 DE 角度而言, 其主要通过变异和交叉操作开辟新的寻优领域, 而变异操作又是其核心算子。从式(3)可以看出, 一旦群体多样性急剧下降, 则差分矢量($X_{r2}^g - X_{r3}^g$)将趋于零矢量, 此时算法基本失去继续寻优的能力。近年来的相关研究表明, 混沌序列因其具有内在随机性和遍历性等特点, 可显著提升进化算法在解空间中的寻优能力。因此, 本文基于 Pareto 优化理论以及混沌序列提出一种基于多目标优化的局部搜索策略对外部集中的精英个体实施有序扰动以提升方法全局优化性能的同时保持个体分布的多样性, 本文采用 Tent 混沌映射作为搜索的迭代方程, 其数学表达式如下所示^[14]:

$$c_i^{k+1} = \begin{cases} 2c_i^k & 0 \leq c_i^k \leq 0.5 \\ 2(1 - c_i^k) & 0.5 < c_i^k \leq 1 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, D; k = 1, 2, \dots, k_{\max} \quad (4)$$

式中 k 为混沌迭代次数; k_{\max} 为最大混沌迭代次数; c_i^k 为第 k 代混沌矢量的第 i 维, 其取值一般在 $[0, 1]$ 范围内。从式(4)可知, 若 $c_i^0 \in (0, 1) \wedge c_i^0 \notin \{1/4, 1/2, 2/3, 3/4\}$ 的初始条件能满足, Tent 映射的混沌决策变量 c_i^k 将会在 $(0, 1)$ 范围内进行混沌遍历。以 Tent 映射为基础, 对外部集中任一个体 q_{i_g} , 本文设计的多目标局部搜索策略如下:

步骤 1 将 q_{i_g} 设为局部搜索起始点 P_0 , 令混沌搜索次数 $k = 0$, 随机生成一个 D 维的混沌矢量, $c^k = (c_1^k, c_2^k, \dots, c_D^k)$ 。

步骤 2 将混沌矢量映射到优化变量空间得到搜索尺度 P_m :

$$P_{mj} = X_{j\min} + c_j^k (X_{j\max} - X_{j\min}), \quad j = 1, 2, \dots, D \quad (5)$$

式中 $X_{j\min}$ 和 $X_{j\max}$ 为优化变量第 j 维的取值上下限。

步骤 3 将局部搜索起始点和搜索尺度进行线性拟合以得到新的局部搜索点:

$$P_k = (1 - \varepsilon) P_m + \varepsilon P_0 \quad (6)$$

步骤 4 计算 P_k 的目标函数值, 若满足任意下述条件则停止混沌搜索, 将 P_k 作为混沌搜索的结果返回替换 q_{i_g} , 否则转步骤 5:

- (1) $P_k > P_0$;
- (2) P_k 和 P_0 相互非劣, P_k 的个体聚集密度小于 P_0 ;
- (3) $k > k_{\max}$ 。

步骤 5: $k = k + 1$, 采用 Tent 混沌映射迭代方程计算 $c^{k+1} = (c_1^{k+1}, c_2^{k+1}, \dots, c_D^{k+1})$, 转步骤 2 迭代继续。

2.4 算法流程

步骤 1 设置算法参数变异常数 F , 交叉系数 C_r 以及最大进化代数 g_{\max} , 将算法迭代次数 g 初始化为 0, 在决策空间可行域范围内随机生成初始种群 P^0 。

步骤 2 分别计算各调度方案的发电效益和生态效益, 并依据非劣支配关系和调度方案分布性将 P^g 中的 Pareto 最优解加入到外部种群 $ArcSet(g)$ 中, 并使用 2.1 节所述方法对 $ArcSet(g)$ 进行维护。

步骤 3 采用本文修正过后的 MMODE 进化算子对 P^g 实施进化操作, 并依据搜索过程中种群个体的约束违反状况采用适当的策略进行约束处理。

步骤 4 利用 2.3 节中设计的多目标混沌搜索策略对 $ArcSet(g)$ 进行二次搜索, 并对 $ArcSet(g)$ 进行维护。

步骤 5 判断 $g > g_{\max}$ 是否满足, 满足则停止搜索迭代过程并输出 $ArcSet(g_{\max})$ 作为最终最优非劣调度方案集, 否则 $g = g + 1$, 返回步骤 2 继续进行。

3 实例研究

以三峡梯级枢纽为实例研究对象, 建立了梯级电站多目标生态优化调度模型, 并应用本文提出的 MMODE 对模型进行求解。本文模型中下游河道生态需水以宜昌站逐月生态径流为参考, 其值采用 Tennant 法求得, 三峡梯级枢纽长期调度规程具体可见文献 [15]。

3.1 基于 Tennant 法的宜昌站生态径流计算

Tennant 法^[16]也叫蒙大拿(Montana)法, 是由 Tennant 等人于 1976 年提出的一种非现场测定类型的标准生态流量设定法。Tennant 法以多年平均流量百分数为划分标准, 将面向生态环境保护与修复的流域河道流量推荐值划分为 1 个高限标准、1 个最佳范围标准和 6 个低限标准。考虑到三峡流域实际水情和调度工情, 本文采用 6 个低限标准中的最高值(即极好状态值)作为三峡下游河道生态流量参考值, 其计算方式可参见文献 [17], 所求得的宜昌站生态径流序列如表 1 所示。

表 1 基于 Tennant 法的宜昌站生态径流序列

Table 1 Ecological runoff series of Yichang station based on Tennant method

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
生态径流/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	5704	5704	5704	5704	8556	8556	8556	8556	8556	8556	5704	5704

3.2 算法编码方式

为有效处理水量平衡、调度初末水位限制等复杂约束, 依据所求问题的特点, 以梯级电站时段水位序列作为决策变量进行编码。应用本文提出的 MMODE 方法求解梯级电站群多目标生态优化调度时, 种群中每个个体的决策向量以梯级电站水位序列 $X = (H_{0,T}, \dots, H_{0,T}, \dots, H_{i,T}, \dots, H_{1,T})$ 构成该问题的一个调度方案。

3.3 约束处理策略

梯级电站优化调度约束处理最常用的策略为惩罚函数, 但三峡梯级枢纽多目标生态优化调度约束条件众多且复杂, 确定一套合适的惩罚系数需要经过大量试算, 增加了问题求解的时间复杂度。因此, 本文依据三峡梯级枢纽实际调度生产运行的特点, 设计了基于约束转化的约束处理方法。三峡梯级电站优化调度主要包括水位(库容)、流量和出力 3 个方面的约束, 由于本文采用梯级电站水位作为决策变量, 水位约束与出力约束相比而言较处理好, 若时段水位违反了约束, 则视情况将其限定于可行域之内即可。

$$H_{i,t} = \begin{cases} H_{\min(i,t)} & , H_{i,t} < H_{\min(i,t)} \\ H_{\max(i,t)} & , H_{i,t} > H_{\max(i,t)} \end{cases} \quad , i = 1, 2, \dots, N_s; t = 1, 2, \dots, T \quad (7)$$

其次, 考虑到水电站生产运行的特点, 本文将时段流量约束 $[Q_{\min(i,t)}, Q_{\max(i,t)}]$ 通过水量平衡方程转化为时段水位约束 $[H_{\min(Qi,t)}, H_{\max(Qi,t)}]$ 。出力约束主要包括预想出力和保证出力限制, 前者在求解过程中通过判断时段出力与预想出力大小采用流量调整的方式较容易满足, 后者可在求解过程开始之前利用逐时段推求水位可行域的方法^[18]转化为时段水位廊道 $[H_{\min(Ni,t)}, H_{\max(Ni,t)}]$ 。最后, 将电站水库自身水位上下限和调度规程所规定的时段水位上下限 $[H_{\min(i,t)}, H_{\max(i,t)}]$ 和上文中求出的两个水位限制集 $[H_{\min(Qi,t)}, H_{\max(Qi,t)}]$, $[H_{\min(Ni,t)}, H_{\max(Ni,t)}]$ 取交集即得到本时段水位决策变量的可行域。经过约束转化后, 原问题众多的约束条件便转换为各调度时段各水库的水位限制, 处理起来较为简单。

3.4 考虑约束违反的个体优选方式

在实际调度计算过程中应用 3.3 节介绍的约束处理方法计算时段水位可行域时, 由保证出力计算出的时

段水位廊道 $[H_{\min(Ni,t)}, H_{\max(Ni,t)}]$ 与水库自身水位上下限和调度规程所规定的时段水位上下限 $[H_{\min(i,t)}, H_{\max(i,t)}]$ 的交集可能为空, 即此时水位限制和保证出力限制无法同时满足。考虑到水位约束的优先级最高, 此时采取的方式是允许该个体违反保证出力约束。针对上述问题, 采用如下策略对种群中两个体 X_1 和 X_2 进行优选:

- (1) 若 X_1 和 X_2 均未违反约束, 且两者之间存在 Pareto 支配关系, 则依据上文 2.2.2 节中提出的选择操作进行优选;
- (2) 若 X_1 和 X_2 均未违反约束, 且 $X_1 \sim X_2$, 则保留两者中分布性较好的个体;
- (3) 如果 X_1 和 X_2 均违反约束, 则违反保证出力限制程度较小的调度方案较优;
- (4) 若两个调度方案中一个违反约束, 一个无约束违反, 则可行调度方案较优。

3.5 目标适应度函数

三峡梯级枢纽多目标生态优化调度问题的发电效益和生态效益目标函数值为不同类型不同量纲的数据, 为便于个体分布指标计算, 须对两个目标函数值采用下式进行归一化处理:

$$f_E(x) = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}, f_W(x) = \frac{W_Q - W_{Q\min}}{W_{Q\max} - W_{Q\min}} \quad (8)$$

式中 E_{\max} 、 E_{\min} 、 $W_{Q\max}$ 、 $W_{Q\min}$ 分别种群所有调度方案梯级发电量以及生态缺水量的最大、最小值。

3.6 调度结果及对比分析

为更好凸现本文研究实际工程应用效果, 选取平水年的典型来水过程(来水频率为 50%) 和枯水年的典型来水过程(来水频率为 70%) 分别作为三峡梯级的入库流量, 构建了三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型, 并应用本文提出的 MMODE 对模型进行求解, 得到梯级发电量和下游河道生态缺水量的非劣调度方案集, 见于图 1 和图 2。同时, 为了验证本文研究工作的必要性和有效性, 采用未改进前的 MODE 作为对比算法对同一问题进行求解。经过多次试算, 不同算法的参数设置如下: MMODE 算法外部种群的规模 $N_a = 30$, 种群规模 $N_p = 100$, 变异常数 $F = 0.25$, 交叉率 $C_r = 0.15$, ε 取 0.9, k_{\max} 取 20, 算法迭代次数设定为 200; MODE 算法外部种群规模 $N_a = 30$, 种群规模 $N_p = 200$, 变异常数 $F = 0.25$, 交叉率 $C_r = 0.15$, 算法迭代次数设定为 300。不同来水情况下两种方法得到的非劣调度方案集分别示于图 1 和图 2, 表 2 给出图 2 中各调度方案的详细结果以便对比分析。

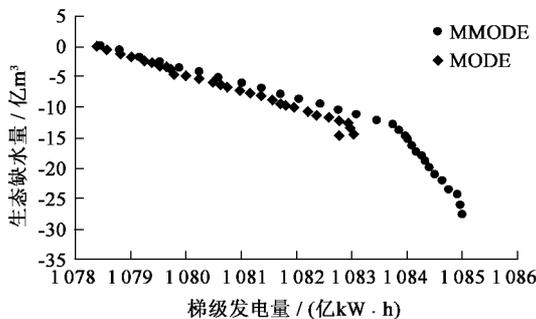


图 1 50% 来水多目标生态非劣调度方案集
Fig. 1 Pareto optimal schemes for the 50% inflow

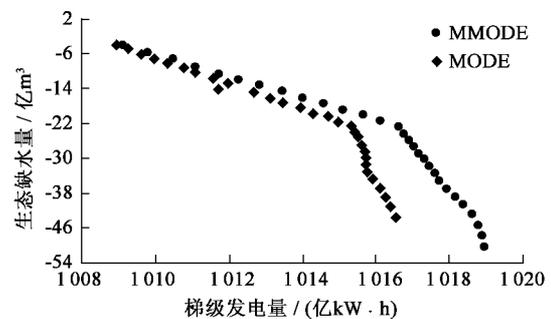


图 2 70% 来水多目标生态非劣调度方案集
Fig. 2 Pareto optimal schemes for the 70% inflow

从图 1 以及图 2 中可以看出, 在 50% 和 70% 频率来水情况下, 三峡梯级枢纽总发电量与下游河道生态水量成明显的反比关系, 两者相互竞争相互制约, 若要提高梯级发电效益, 则下游河道生态水量必随之提高, 反之, 若要尽量满足下游河道生态流量需求, 则必须以牺牲梯级总发电效益为代价。进一步, 选取表 2 中几个典型调度方案(方案 1、方案 15 和方案 30), 列出其龙头电站—三峡电站的出力过程和流量过程以便于数据对比分析, 见于图 3 以及图 4。从图 3 中可以清楚的看出, 各调度方案出力过程在汛期基本相同, 差别主要体现在枯水期。方案 30 采用上文所提及的发电最优调度模式, 在枯水期提高平均水头增发电量, 达

到发电效益最大化的目的。而较之方案30, 方案1和方案15在调度过程中均不同程度的考虑了下游河道生态流量需求, 枯水期加大了三峡电站的下泄流量, 使其下游河道生态缺水程度有所缓解, 但同时也牺牲了三峡电站水头效益, 降低了全年总发电量。

从图4可以看出, 方案1的流量过程较为符合流域生态调控措施, 其采用枯水期加大三峡下泄的调控方式进行下游河道生态补水, 在一定程度上解决了来水较枯情况下三峡下游河道生态缺水的问题, 但由于其水位削落过快, 使得全年平均水头较低, 无可避免地降低了其总发电量。而方案15和方案30较之更注重发电效益, 在枯水期更注重控制下泄, 在抬高调度期平均水头的同时降低了枯水期后期发电用水不足的风险。从上述数据分析可知, 较枯来水情况下三峡梯级枢纽的兴利和生态效益难以同时优化, 依据实际运行工情、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更符合工程实际需求。

表2 70%来水情况下三峡梯级枢纽非劣调度方案集

Table 2 Pareto optimal operation schemes obtained by MMODE for with 70% typical inflow

调度方案	目标函数值		调度方案	目标函数值		调度方案	目标函数值	
	$E/(亿 kW \cdot h)$	$W_Q/(亿 m^3)$		$E/(亿 kW \cdot h)$	$W_Q/(亿 m^3)$		$E/(亿 kW \cdot h)$	$W_Q/(亿 m^3)$
1	1009.09	-4.13	11	1014.58	-17.37	21	1017.46	-31.95
2	1009.13	-4.14	12	1015.13	-18.76	22	1017.60	-33.57
3	1009.82	-5.80	13	1015.66	-20.09	23	1017.74	-35.20
4	1010.47	-7.35	14	1016.12	-21.44	24	1017.94	-36.98
5	1011.10	-8.87	15	1016.61	-22.83	25	1018.16	-38.89
6	1011.74	-10.43	16	1016.76	-24.28	26	1018.36	-40.80
7	1012.28	-11.76	17	1016.89	-25.75	27	1018.58	-42.81
8	1012.85	-13.16	18	1017.04	-27.27	28	1018.76	-45.09
9	1013.45	-14.65	19	1017.17	-28.85	29	1018.85	-47.64
10	1014.02	-16.10	20	1017.32	-30.34	30	1018.94	-50.22

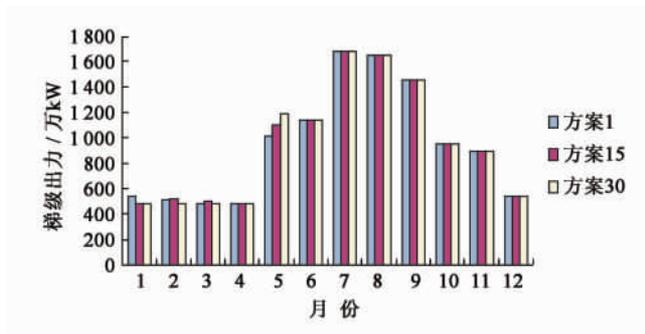


图3 部分典型方案三峡电站出力过程

Fig. 3 Outputs of Three Gorges hydropower station of typical schemes

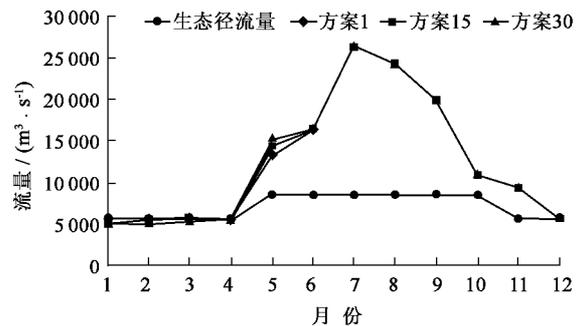


图4 部分典型方案三峡电站下泄流量过程

Fig. 4 Outflows of Three Gorges hydropower station of typical schemes

为验证本文算法改进工作的有效性, 图1和图2中列出不同算法求解三峡梯级枢纽多目标生态优化调度问题所获得的非劣调度方案集以便于数据分析对比。从图中可以看出, 未经改进的MODE在求解此问题时效率不佳, 其求得的非劣调度方案集散乱分布在多目标前沿上, 难以提供较好的调度决策信息。而本文提出的MMODE多目标优化性能较强, 所求得的非劣调度前沿较MODE而言更接近多目标最优前沿, 且调度方案分布较为均匀, 可为决策者提供更为充分的决策信息。最后, 50%和70%频率来水情况下应用MMODE求解三峡梯级枢纽多目标生态优化调度问题的平均计算时间为62s和68s, 表明了本文方法在实现多目标协同优化的同时保持了较高的计算效率, 因此, 在实际工程应用中, 本文算法可根据中长期水文预报修正信息进行优化调度滚动计算, 从而极大地增强了其工程实用性。

4 结 论

(1) 目前大型水库群多目标生态调度研究通常采用目标转化方法对原问题进行了一定程度的概化, 本文通过分析三峡梯级枢纽发电效益和生态效益之间存在的制约竞争关系, 以年发电量最大和下游河道生态缺水最小为目标建立了三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型。同时, 本文依据多目标优化的特点对差分进化算法的算子进行了改进和拓展, 提出一种新的并行优化方法—改进多目标差分进化算法。

(2) 采用 Tennant 法计算出三峡下游河道生态流量参考值, 构建了三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型, 并应用本文算法进行求解。应用结果表明: ① 在 50% 和 70% 频率来水情况下, 三峡梯级枢纽发电效益和生态效益成明显的反比关系, 很难同时优化; ② 本文算法可在短时间内生成一系列分布均匀、分布范围广泛的非劣调度集, 可为调度人员评选兴利生态综合效益最优的调度方案提供强有力的决策支持。

(3) 关于流域河道生态径流的计算方法尚存争论, 如何根据实际流域水文情势提出更为科学合理的生态环境需水量计算方法, 并在此基础上建立综合考虑防洪、兴利以及生态的流域梯级枢纽多目标优化调度模型, 是下一步需开展的研究工作。

参考文献:

- [1] 许可, 周建中, 顾然, 等. 面向生态的流域梯级电站调度研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(10): 119-123. (XU Ke, ZHOU Jian-zhong, GU Ran, et al, Eco-environmental effect-oriented cascade reservoir operation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(10): 119-123. (in Chinese))
- [2] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 325-332. (HU He-ping, LIU Deng-feng, TIAN Fu-qiang, et al, A method of ecological reservoir reoperation based on ecological flow regime [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 325-332. (in Chinese))
- [3] 梅亚东, 杨娜, 翟丽妮. 雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 721-725. (MEI Ya-dong, YANG Na, QU Li-ni, Optimal ecological sound operation of the cascade reservoirs in the lower Yalongjiang River [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 721-725. (in Chinese))
- [4] 廖四辉, 程绪水, 施勇, 等. 淮河生态用水多层次分析平台与多目标优化调度模型研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 14-19. (LIAO Si-hui, CHENG Xu-shui, SHI Yong, et. al, Study on ecological water use of Huaihe River with multi-level analysis platform and multi-objective optimization model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 14-19. (in Chinese))
- [5] 叶季平, 王丽萍. 大型水库生态调度模型及算法研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43(1): 65-67. (YE Ji-ping, WANG Li-ping. On reservoir ecological operation model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(1): 65-67. (in Chinese))
- [6] STORN R, PRICE K. Differential evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces [R]. Berkeley: University of California, 1995.
- [7] 黄强, 张洪波, 原文林, 等. 基于模拟差分演化算法的梯级水库优化调度图研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 13-17. (HUANG Qiang, ZHANG Hong-bo, YUAN Wen-lin, et al. Study of optimal operation chart of cascade reservoirs based on linking simulation with differential evolution algorithm [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 13-17. (in Chinese))
- [8] STORN R. Designing nonstandard filters with differential evolution [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(1): 103-106.
- [9] COELHO L, MARIANI V. Improved differential evolution algorithms for handling economic dispatch optimization with generator constraints [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(5): 1631-1639.
- [10] 郭文献, 夏自强, 王远坤, 等. 三峡水库生态调度目标研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 554-559. (GUO Wen-xian, XIA Zi-qiang, WANG Yuan-kun, et al. Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 554-559. (in Chinese))
- [11] 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. Multi-objective evolutionary algorithm and its application [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))

- [12] DEB K , PRATAP A , AGARWAL S , et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation* , 2002 , 6(2) : 182-197.
- [13] 覃晖, 周建中, 肖舸, 等. 梯级水电站多目标发电优化调度[J]. *水科学进展* , 2010 , 21(3) : 377-384. (QIN Hui , ZHOU Jian-zhong , XIAO Ke , et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations using strength Pareto differential evolution [J]. *Advances in Water Science* , 2010 , 21(3) : 377-384. (in Chinese))
- [14] TAVAZOEIA M , HAERI M. Comparison of different one-dimensional maps as chaotic search pattern in chaos optimization algorithms [J]. *Applied Mathematics and Computation* , 2007 , 187(2) : 1076-1085.
- [15] 长江水利委员会. 三峡-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程[S]. 长江水利委员会, 2007. (Changjiang Water Resources Commission. Operation regulation of Three Georges and Gezhouba cascade [S]. *Changjiang Water Resources Commission* , 2007. (in Chinese))
- [16] TENNANT D L. Instream flow regimes for fish , wildlife , recreation and related environmental resources [J]. *Fisheries* , 1976 , 1(4) : 6-10.
- [17] 郭利丹, 夏自强, 林虹, 等. 生态径流评价中的 Tennant 法应用[J]. *生态学报* , 2009 , 29(4) : 1787-1792. (GUO Li-dan , XIA Zi-qiang , LIN Hong , et al. Researches on application of the tenant method in ecological flow evaluation [J]. *Acta Ecologica Sinica* , 2009 , 29(4) : 1787-1792. (in Chinese))
- [18] 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 optimal regulation for cascade hydropower stations based on MOPSO and set pair analysis decision-making approach [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology , 2007. (in Chinese))

Multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms*

LU You-lin¹ , ZHOU Jian-zhong¹ , WANG Hao^{1 2} , ZHANG Yong-chuan¹

(1. *Huazhong University of Science and Technology , Wuhan 430074 , China;*

2. *China Institute of Water Resource and Hydropower Research , Beijing 100038 , China*)

Abstract: A multi-objective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations is proposed. The model considers the restrictive relationship between power generation and ecological restoration in Three Gorges , and balances the needs of competing interests of power generation and ecology. The objective functions are designed to maximize power generation while minimizing ecological water requirements , for which a multi-objective differential evolution (DE) algorithm is proposed. The evolutionary operators in the DE algorithm are modified according to the inherent nature of multi-objective optimization problems. A local chaotic search strategy is designed to perform multi-objective optimization , thus solving the problem of premature convergence in the DE algorithm. A non-penalty-based constraint handling algorithm is proposed to handle complicated problems in multi-objective optimization for ecological operation. The model is applied to the optimized ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations. The result demonstrates the effectiveness and practicality of the proposed model in engineering applications.

Key words: ecology operation; multi-objective; differential evolution algorithm; chaotic sequence; constraints handle; Three Gorges cascade hydropower stations

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2008BAB29B08) and the National Non-Profit Research Program of China (No. 200701008) .