

# 梯级水电站优化调度的分形与混沌嵌套搜索算法

刘起方<sup>1</sup>, 马光文<sup>1</sup>, 刘群英<sup>2</sup>, 杨道辉<sup>1</sup>

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 考虑到梯级水电站水库联合优化调度模型的高非线性、强约束特点, 提出了分形分割与混沌嵌套搜索算法的求解方法。该算法利用嵌套结构把确定性搜索和随机搜索有机结合起来, 按照自身的运动规律, 直接在优化区间内通过逐步的插值映射来对被优化问题进行优化搜索。通过在南桠河梯级水电站联合优化运行中的成功应用, 显示该算法具有参数配置简单、普适性强、稳定性高、全局优化和易于编程等特点, 并取得了与 POA 算法一致的收敛精度且计算速度有优势, 从而为求解诸如水库优化调度等具有复杂约束条件的非线性优化问题提供了新的探索。

**关键词:** 梯级水电站; 优化调度; 嵌套搜索算法; 分形分割; 混沌

**中图分类号:** TV74; O224      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2009)02-0197-07

梯级水电站群联合优化调度属于高非线性、强约束的组合优化问题, 其调度的科学性、合理性对整个梯级的综合效益发挥至关重要。传统求解的方法有动态规划法(DP)<sup>[1]</sup>、线性规划(LP)、非线性规划法(NLP)、网络流法<sup>[2]</sup>、拉格朗日松弛法<sup>[3]</sup>等算法, 这些方法各有优缺点: DP 法存在“维数灾”问题; LP 法需要对约束条件和目标函数进行线性化处理, 会导致与原问题的偏差; NLP 法较符合实际问题, 但存在计算量偏大问题; 网络流法计算速度快, 但对约束条件的结构要求较严格; 拉格朗日松弛法其算子选择比较困难, 选择不当会使收敛速度缓慢甚至不收敛。此外, 国内外学者还提出了许多 DP 法的改进方法<sup>[4]</sup>, 如增量动态规划法(IDP)、离散微分动态规划法(DDDP)、逐次逼近动态规划法(DPSA)、逐步优化算法(POA)等, 但这些方法共同的局限是不能保证收敛到全局最优解。新近提出的水库优化调度方法有遗传算法(GA)<sup>[5]</sup>、蚁群算法(ACA)<sup>[6]</sup>、粒子群算法(PSO)<sup>[7]</sup>等智能优化算法, 这些算法收敛速度比较快, 但也存在易陷入局部最优、参数难以确定等局限。

本文提出的分形分割与混沌嵌套搜索算法, 基本思路是利用嵌套结构把确定性搜索和随机搜索结合起来, 有机综合了分形分割插值逼近算法的“遍历性”、“普适性”和混沌优化算法的“随机性”、“规律性”、“对初值敏感性”等特点。该算法在南桠河梯级水库联合优化调度中的成功应用, 表明了该算法的正确性和有效性。

## 1 分形分割与混沌嵌套搜索算法

### 1.1 混沌优化算法

混沌是非线性系统所特有且广泛存在的一种非周期运动现象, 具有极为复杂的动力学行为。利用混沌运动的遍历性、随机性、规律性、对初值敏感性等特点, 把混沌变量线性映射到优化变量的取值区间, 可以进行优化搜索。Logistic 方程<sup>[8,9]</sup>是模拟生物种群随时间演化的数学模型, 可利用 Logistic 映射来产生混沌变量:

$$x_{n+1} = r \cdot x_n(1 - x_n) \quad [0, 4], x_n \in [0, 1], n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中  $n$  为演化的代数;  $x_n$ 、 $x_{n+1}$  分别表示第  $n$  代、 $n+1$  代生物种群数目,  $r$  为生长率控制参数。

式(1)所表征的倍周期分岔如图 1 所示。由图 1 可见, 混沌轨道的形式决定于参数  $r$ , 当  $r > 3.569\ 945\ 672$  时, 系统进入混沌状态, 并表现出对初始条件的极端敏感性, 轨道中任意接近的点将逐渐分离而

收稿日期: 2008-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50539140)

作者简介: 刘起方(1971-), 男, 重庆万州人, 博士研究生, 主要从事水电优化管理研究。E-mail: lqf678@tom.com

变得仿佛毫不相关,当  $\alpha = 4$  时,形成  $[0, 1]$  区间的满映射。混沌优化算法本质与模拟退火、遗传算法等一样,属于某种具有随机性的优化方法,但混沌优化算法直接采用混沌映射进行寻优搜索,对被优化问题没有诸如连续性、可微性等条件要求,其搜索过程完全按照混沌运动自身的规律进行,其优化搜索更为简单、具有全局化特点。

### 1.2 分形分割插值逼近算法

自 Mandebrot 在 1975 年提出分形理论<sup>[10]</sup>以来,作为数学的一个前沿分支,已成为当前研究的热点之一。对于形如  $\{ \max f(x) | x \in [a, b] \}$  的优化问题,  $f(x)$  在可行域区间内有界,  $x^* = \arg \max f(x)$  即为函数  $f(x)$  在可行域区间上的全局最优解。分形分割插值逼近算法,就是对被优化函数  $f(x)$  在可行域区间进行逐步迭代的分形分割,即每次分割  $[x_{i-1}, x_i]$  是上次分割的仿射分割,并在每次分割上形成  $x_i = f(x_{i-1})$  的映射,比较计算各次  $f(x_i)$  值并逐步逼近最优值。这里在可行域区间  $[a, b]$  内采取类似 Cantor 集的分形分割,即在区间逐次进行自相似的两次分割插值,步骤为:首先取端点值,即  $x_1^0 = a, x_2^0 = b$  ( $x$  的上标表示分割轮数,下标表示逐步的插值点);第一轮插值点为  $x_1^1 = a + (b-a)/3, x_2^1 = a + 2(b-a)/3$ ,其中  $\alpha$  为分形分割系数,满足  $0 < \alpha < 1$ ;第二轮插值为在前面插值形成的 3 个分割区间内各自进行与第一轮插值相似的仿射插值,插值点分别为  $x_1^2 = a + \alpha(x_1^1 - a), x_2^2 = a + (1-\alpha)(x_1^1 - a), x_3^2 = x_1^1 + \alpha(x_2^1 - x_1^1), x_4^2 = x_1^1 + (1-\alpha)(x_2^1 - x_1^1), x_5^2 = x_2^1 + \alpha(b - x_2^1), x_6^2 = x_2^1 + (1-\alpha)(b - x_2^1); \dots$

分形分割插值过程如图 2 所示,其中取  $\alpha = (5-1)/2$ ,可行域区间为归一化区间。由图 2 可见,分形分割插值形成类似 Cantor 集的三分集,由一个可行域区间通过第一轮分割插值形成 3 个小区间,  $n$  轮分割后形成  $3^n$  个小区间。当  $\alpha = 1/2$  时,分形分割插值为对分插值(有重叠插值点),  $n$  轮分割后形成  $2^n$  个等分小区间,每个区间长度为  $1/2^n$ ,因  $\lim_{n \rightarrow \infty} 1/2^n = 0$ ,由此可证  $x$  可以逼近区间  $[a, b]$  内的任意实数;当  $1/2 < \alpha < 1$  时,  $n$  轮分割后形成  $3^n$  个小区间,第一轮分割后最大子区间的距离  $d_1 = \max |b_i - a_i| = (b-a) (i=1, 2, 3)$ ,第二轮分割后最大子区间的距离,  $d_2 = \max |b_i - a_i| = \alpha^2 (b-a) (i=1, 2, \dots, 3^2)$ ,第  $n$  轮分割后最大子区间的距离  $d_n = \max |b_i - a_i| = \alpha^n (b-a) (i=1, 2, \dots, 3^n)$ ,由于  $0 < \alpha < 1, \lim_{n \rightarrow \infty} d_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha^n (b-a) = 0$ ,由此可证  $x$  可以逼近区间  $[a, b]$  内的任意实数;当  $0 < \alpha < 1/2$  时,  $n$  轮分割后形成  $3^n$  个小区间,第一轮分割后最大子区间的距离  $d_1 = \max |b_i - a_i| = (1-\alpha)(b-a) (i=1, 2, 3)$ ,第  $n$  轮分割后最大子区间的距离  $d_n = \max |b_i - a_i| = (1-\alpha)^n (b-a) (i=1, 2, \dots, 3^n)$ ,由于  $0 < 1-\alpha < 1, \lim_{n \rightarrow \infty} d_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (1-\alpha)^n (b-a) = 0$ ,同样可证  $x$  可以逼近区间  $[a, b]$  内的任意实数。由此可证,当  $x_i (i=1, 2, \dots, 3^n + 1)$  为分形分割插值产生的分布于同一概率空间的点列,则  $f(x_i)$  必以概率 1 收敛于函数  $f(x)$  的全局最优值  $f(x^*)$ ,即当  $x^* = \arg \max_{x \in [a, b]} f(x)$ ,必然存在  $\{ x_i | x_i \in [a, b], P(\lim_{n \rightarrow \infty} x_i = x^*) = 1 \}$ 。从统计角度分析,待优化函数取得最值的点可能分布在可行域内的任何位置,分形分割插值逼近算法产生的点集以等概率逼近  $[a, b]$  区间内的任何值,加上该算法不要求被优化函数诸如连续、可微等条件要求,因而该算法具有高遍历性、强普适性等优点。

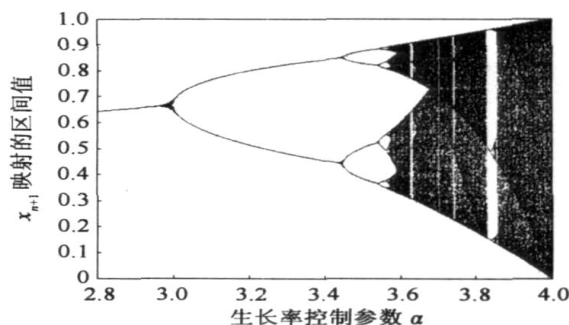


图 1 Logistic 的倍周期分岔混沌图

Fig. 1 Bifurcation diagram of Logistic

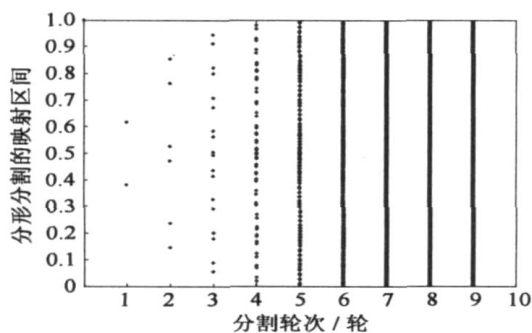


图 2 分形分割插值逼近算法迭代过程

Fig. 2 Iterative process of fractal division interpolation algorithm

### 1.3 分形分割插值逼近算法与混沌优化算法的比较分析

图 3 为 Logistic 当  $r=4$  时的混沌满映射分布图, 迭代步数为 6500 步, 产生的插值点为 6500; 图 4 为分形分割逼近算法的映射分布图, 其中  $r=0.618$ , 分割轮数为 8, 产生的插值点数为 6562。由图 3 可知, 混沌映射虽然在理论上可遍历映射区间的任何值, 但在有限迭代步数时其遍历性并不好, 其映射点在区间边缘处密度很高, 而在中央部位密度较低, 均匀性较差; 而由图 4 可知, 分形分割插值逼近算法映射的遍历性非常好, 整个可行域区间内插值点非常密集且分布匀称, 其达到同样映射密度时的迭代次数也比混沌优化算法少。另外, 分形分割插值逼近算法在迭代过程中如果能通过约束条件排除一些插值区间, 则可使计算时间大为缩短, 但不能排除也存在随着迭代次数的增加导致收敛速度变慢等局限。文中的嵌套搜索算法的基本思想, 就是利用分形分割插值逼近算法的高遍历性优点, 实现寻优的粗定位; 利用混沌优化算法对初始条件的极端敏感性, 实现寻优的局部细搜索。

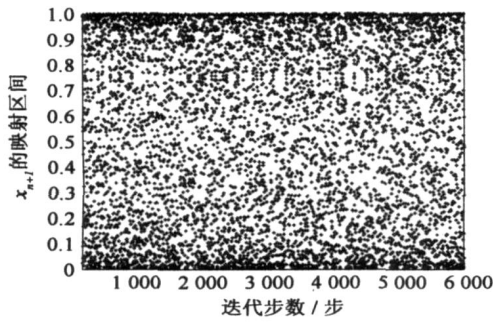


图 3 Logistic 在  $r=4$  时的混沌映射分布  
Fig. 3 Chaos mapping of Logistic at  $r=4$

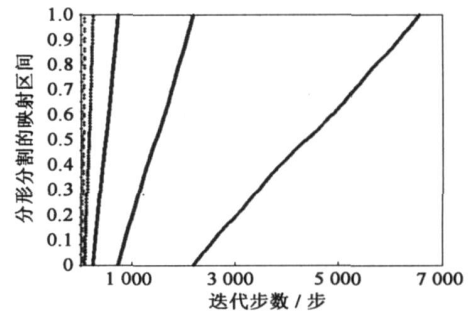


图 4 分形分割逼近算法的映射分布  
Fig. 4 Mapping of fractal division interpolation algorithm

## 2 梯级水电站水库联合优化调度模型

梯级水电站水库调度的目标函数模型有发电量最大模型、耗水量最小模型、调峰电量最大模型等。虽然目前国内电力市场改革推进缓慢, 但如分时上网电价等政策的执行仍有很强的价格因素。根据四川省的分时上网电价政策, 水电站枯水期的上网电价在平水期基础上上浮 50%, 丰水期在平水期基础上下浮 50%, 高峰电价在正常基础上上浮 33.5%, 低谷电价在正常基础上下浮 50%。由于分时电价政策的执行就是通过价格机制来鼓励水电多参与调峰, 在分时电价下收益最大化与高峰期出力最大化在本质上是一致的, 因而这里选择梯级水电站水库在整个调度期内总发电收益最大化作为优化调度目标, 其目标函数如下:

$$E = \max \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T (Q_i^t H_i^t P^t \Delta t) \quad (2)$$

式中  $E$  为梯级水电站的最大化发电收益;  $\alpha_i$  为第  $i$  个水电站综合出力系数;  $Q_i^t$  为第  $i$  个水电站在  $t$  时段的发电流量,  $m^3/s$ ;  $H_i^t$  为第  $i$  个水电站在  $t$  时段平均发电净水头,  $m$ ;  $P^t$  为  $t$  时段电价;  $\Delta t$  为第  $t$  时段时间长度;  $M$  为水电厂数目,  $T$  为计算时段数。其约束条件为: 水量平衡约束  $V_i^{t+1} = V_i^t + (q_i^t + Q_{i-1}^t - Q_i^t - S_i^t) \Delta t$ ; 库容约束  $V_{i\_min} \leq V_i^t \leq V_{i\_max}$ ; 电站出力约束  $N_{i\_min} \leq \alpha_i Q_i^t H_i^t \leq N_{i\_max}$ ; 流量约束  $Q_{i\_min} \leq Q_i^t \leq Q_{i\_max}$ 。其中  $V_i^t$  为  $t$  时段末水库  $i$  的存水量,  $V_{i\_max}$ 、 $V_{i\_min}$  为水库  $i$  蓄水的上下限;  $N_{i\_max}$ 、 $N_{i\_min}$  为水电站  $i$  的出力上下限;  $Q_{i\_max}$ 、 $Q_{i\_min}$  为水库  $i$  发电流量的上下限;  $\Delta t$  为上游水库到下游水库的水流滞时;  $S_i^t$  为水库  $i$  第  $t$  时段的平均弃水流量;  $q_i^t$  为水库  $i$  第  $t$  时段的平均入库(区间)流量;  $Q_{i-1}^t$  为第  $i-1$  电站第  $t$  时段的平均下泄流量。

### 3 分形分割与混沌嵌套搜索算法设计

式(2)表示的发电收益最大的目标函数,实质就是求 $Q_i^t$ 为决策变量的发电收益最大问题。由于发电流量 $Q_i^t$ 与 $V_i^t$ 互为函数,式(2)可转化为 $V_i^t$ 为决策变量的优化问题。由此将梯级水库由上到下按顺序排列,各水库各时段库容组合成梯级水库的调度线,组合 $V(V_1^1, V_1^2, \dots, V_1^T, V_2^1, \dots, V_i^1, V_i^{t+1}, \dots, V_M^{T-1}, V_M^T)$ 的连接称为路径。其优化流程示意如图5所示。

#### 3.1 粗定位

利用分形分割插值逼近算法的高遍历性特性,对梯级各水库各时段库容进行寻优,其算法步骤如下:

步骤1:令 $t=1, i=1$ ,分割轮次 $n=1$ ;并设 $E_{opt}, V_{i,opt}^t$ 分别为 $E$ 和 $V_i^t$ 优化过程中的优化值;

步骤2:将各水库库容约束值映射为优化区间值,即 $\Delta_i = V_{i,max} - V_{i,min}$ ,取梯级第1个水库该时段的库容初值为 $V_{1,opt}^1 = \Delta_1/2 + V_{1,min}$ ,其余水库依据约束条件依次推定初值,确定一条可行的初始调度线,并由式(2)计算目标值为 $E_{opt}$ ;

步骤3:依据分形分割插值逼近算法,在水库的库容约束区间 $[V_{i,min}, V_{i,max}]$ 取 $V_i^t$ ,并进行约束检验,凡未通过约束检验则依算法继续选取 $V_i^t$ ;

步骤4:依据式(2)计算目标值 $E$ ,比较 $E, E_{opt}$ ,若 $E > E_{opt}$ ,则令 $E_{opt} = E, V_{i,opt}^t = V_i^t$ ;

步骤5: $n = n + 1$ 。若分割轮次 $n > K1$ ( $K1$ 为迭代限值),跳转到步骤3,否则执行下一步;

步骤6: $t = t + 1$ 。若 $t > T$ ,令 $n = 1$ ,跳转到步骤3,否则执行下一步;

步骤7: $i = i + 1$ 。若 $i > M$ ,令 $n = 1, t = 1$ ,跳转到步骤3,否则执行下一步;

步骤8:如果 $|E_{opt} - E_{opt}| < \epsilon_1$ ( $E_{opt}$ 为上一阶段优化值, $\epsilon_1$ 为要求精度),则令 $n = 1, t = 1, i = 1$ ,跳转到步骤3。若 $|E_{opt} - E_{opt}| < \epsilon_1$ 或迭代次数超过最高限值 $K2$ (设定),则迭代结束。

#### 3.2 细搜索

将分形分割插值逼近算法的迭代结果带入Logistic映射,利用混沌轨道对初值的极端敏感性进行局部搜索。其算法步骤如下:

步骤9:令 $t=1, i=1, n=4$ ,任取 $[0, 1]$ 内一初值(但不能取Logistic方程的不动点 $0, 0.25, 0.5, 0.75, (2 + \sqrt{3})/4, 1$ );

步骤10:根据式(1),将Logistic变量映射到区间 $[-1, 1]$ ,即 $x_{n+1} = 2x_{n+1} - 1$ ,取 $V_i^t = V_{i,opt}^t + x_{n+1} \Delta_i$ (为搜索带宽控制系数,通常取值范围为 $0.001 \sim 0.1$ ),并进行约束检验;

步骤11:依据式(2)计算目标值 $E$ ,比较 $E, E_{opt}$ ,若 $E > E_{opt}$ ,则令 $E_{opt} = E, V_{i,opt}^t = V_i^t$ ;

步骤12:重复步骤10~12迭代搜索 $K3$ (设定值)次后,若 $|E_{opt} - E_{opt}| < \epsilon_2$ ( $\epsilon_2$ 为要求精度),则停止迭代,执行下一步,否则增大 $K3$ 值继续迭代;

步骤13: $t = t + 1$ 。若 $t > T$ ,跳转到步骤10,否则执行下一步;

步骤14: $i = i + 1$ 。若 $i > M$ ,跳转到步骤10,否则执行下一步;

步骤15:重复步骤10~15迭代搜索,若 $|E_{opt} - E_{opt}| < \epsilon_2$ ,则继续迭代;若 $|E_{opt} - E_{opt}| < \epsilon_2$ 或迭代次数超过最高限值 $K4$ (设定),则迭代结束。

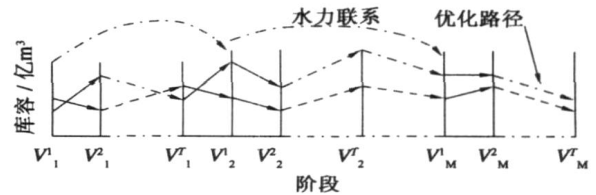


图5 以库容为决策变量的梯级水库优化过程示意

Fig. 5 Optimization process of reservoir by using the capacity as decision variable

## 4 算例分析

以南桎河梯级某日的数据进行分析计算。南桎河流域位于四川西南部,为大渡河中下游右岸一级支流。南桎河梯级规划为“一库六级”,目前运行有3个梯级电站,其中冶勒为具有多年调节能力的龙头水库,姚河坝和南瓜桥为日调节水库。其中,冶勒水库装机容量240 MW,正常蓄水位2650 m,死水位2600 m,最大过机流量 $47.24 \text{ m}^3/\text{s}$ ,电厂综合出力系数8.56;姚河坝水库装机容量132 MW,正常蓄水位1678 m,死水位1666 m,最大过机流量 $53.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ,电厂综合出力系数8.75;南瓜桥水库装机容量120 MW,正常蓄水位1369.5 m,死水位1363.5 m,最大过机流量 $53.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ,电厂综合出力系数8.03。

已知该日冶勒水库的入库流量为 $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,日初水位为2627.3 m;冶勒与姚河坝之间的区间入流为 $12.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ,姚河坝日初水位为1673.5 m;姚河坝与南瓜桥之间的区间入流为 $5.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ,南瓜桥日初水位为1365.0 m。根据四川省的分时上网电价政策,梯级该日各时段上网电价为:000~645为141元/MW,700~1045为376.47元/MW,1100~1845为282元/MW,1900~2245为376.47元/MW,2300~2345为141元/MW。由于该梯级各水电站都是混合式水电站,梯级电站之间的水流滞时很小故忽略不计。在给定冶勒电站日允许消落水位确定梯级日用水量,利用“分形分割与混沌嵌套搜索算法”(用MATLAB7.0编程实现),得到该日使梯级总收益最大化时的水电站优化结果如图6~图8所示。

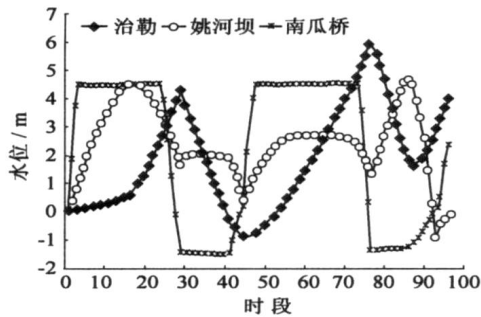


图6 梯级各水库该日水位变化过程

Fig. 6 Change process of cascade reservoir level

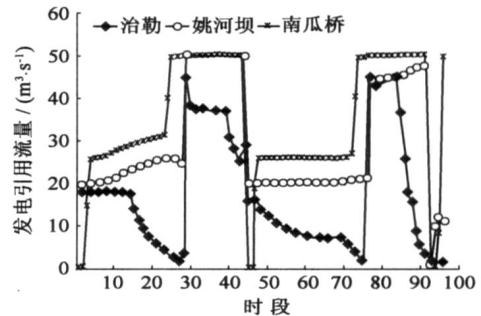


图7 梯级各水电站该日发电引用流量过程

Fig. 7 Power discharge of every hydropower station

图6为梯级水库水位在初始水位基础上的变化情况(其中冶勒变化尺度放大120倍,姚河坝放大5倍,南瓜桥不变)。由图6、图7可见,在总收益最大化目标下,各水库均在高峰时段(电价高)加大下泄流量,在低谷时段(电价低)下泄流量明显减少。从图8所示的梯级总出力情况分析,出力主要集中在高峰(高电价)时段,符合分时电价政策促进水电参与调峰的要求,同时也满足水电站的收益最大化。同时从图6可分析,冶勒水库充分发挥了龙头水库的作用,在电价低时通过少发电多蓄水来增加梯级总的蓄能量,合理调配了水量使姚河坝、南瓜桥均能在高电价时段加大出力,从而实现整个梯级的总收益最大化。此外,由于同样水量储存于上游龙头水库比储存于下游水库的能量更大,因而在水量调配上优先充分利用了姚河坝和南瓜桥的水量,显示了该算法在水量调配上的科学性和正确性。

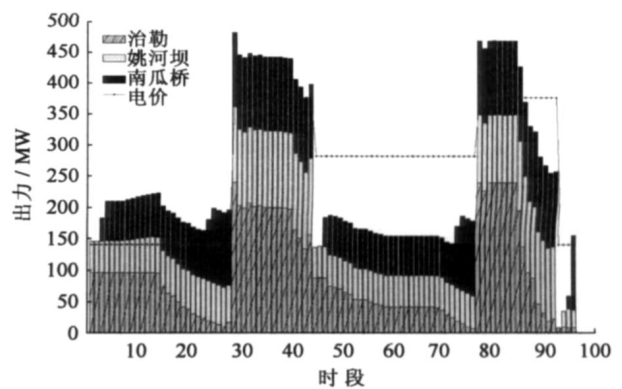


图8 梯级总出力曲线及电价曲线

Fig. 8 Optimization power curve of cascade hydropower stations and price curve

在同样条件下(硬件配置、软件平台和编程语言、目标及约束条件),嵌套算法与 POA 法以及单纯的分形分割插值逼近算法、混沌优化算法的比较见表 1。结果对比表明,只要通过试算配置好迭代参数后,嵌套搜索算法取得了比 POA 算法略好的计算结果,且计算时间有优势。单纯的分形分割算法虽然取得了一致的结果,但计算时间很长;单纯的混沌优化算法在计算时间上略有优势,但优化结果没有嵌套算法好。另外,在( $K1 = 7$ ,  $K2 = 5000$ ,  $K3 = 3500$ ,  $K4 = 5000$ )情况下该算法连续计算 10 次其结果的标准偏差小于 0.001,收敛一致精度高。由此可见,本文的嵌套算法是有效的、可行的。

表 1 分形分割与混沌嵌套搜索算法与其它算法计算比较

Table 1 Computing results of the nest searching algorithm comparing with other algorithm

分形分割与混沌嵌套搜索算法						POA 算法		分形分割插值算法		混沌优化算法	
K1	K2	K3	K4	计算时间/s	计算结果(总收益/元)	计算时间/s	计算结果(总收益/元)	计算时间/s	计算结果(总收益/元)	计算时间/s	计算结果(总收益/元)
5	5000	2000	5000	8.8	1807893.96						
6	5000	2500	5000	9.2	1808046.73						
7	5000	3000	5000	11.1	1808051.67	15.6	1808040.43	56.1	1808051.73	10.7	1807832.21
7	5000	3500	5000	12.3	1808051.67						

## 5 结 论

- (1) 参数配置简单,通过简单试算即可;
- (2) 在一致的收敛精度下,比 POA 算法计算时间略有优势;
- (3) 对被优化函数没有可微、连续性等条件要求,普适性强;
- (4) 没有“维数灾”问题,且具有全局优化特性;

(5) 算法结构易于编程实现。这些特点表明该算法具有较高的实用价值,可解决诸如梯级水库优化调度等复杂的非线性优化问题。

### 参考文献:

- [1] 张勇传. 水电系统优化调度[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993. (ZHANG Yong-chuan. Optimal operation of hydropower system [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [2] HABIBOLLAHZADEH H, BUBENKO J A. Application of decomposition techniques to short term operation planning of hydro-thermal power system[J]. IEEE Trans on PAS, 1986, 1(1): 41 - 47.
- [3] COHEN A, SHERKAT V. Optimization based methods for operations scheduling[J]. Proceedings of IEEE, 1987, 75(12): 1574 - 1594.
- [4] 万永华. 水电能源系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997. (WAN Yong-hua. Hydropower energy system planning[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997. (in Chinese))
- [5] 马光文, 王黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 275 - 280. (MA Guang-wen, WANG Li. Application of genetic algorithm to optimal operation of hydropower station[J]. Advances in Water Science, 1997, 8(3): 275 - 280. (in Chinese))
- [6] 徐刚, 马光文, 梁武湖, 等. 蚁群算法水库优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 397 - 400. (XU Gang, MA Guang-wen, LIANG Wu-hu, et al. Application of ant colony algorithm to reservoir optimal operation[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 397 - 400. (in Chinese))
- [7] 张双虎, 黄强, 吴洪寿, 等. 水电站水库优化调度的改进粒子群算法[J]. 水力发电学报, 2007, 26(1): 1 - 5. (ZHANG Shuang-hu, HUANG Qiang, WU Hong-shou, et al. A modified particle swarm optimizer for optimal operation of hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [8] JACKSON E A, HUEBLER A. Periodic Entrainment of Chaotic Logistic Map Dynamics[J]. Phys D, 1990, 44(3): 407 - 420.
- [9] 黄润生, 黄浩. 混沌及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005. (HUANG Run-sheng, HUANG Hao. Chaos theory and its application [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005. (in Chinese))
- [10] 李水根. 分形[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. (LI Shui-gen. Fractal[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese))

## Nested searching algorithm with fractal division interpolation and chaos optimization for optimal operation of cascade hydropower plants<sup>\*</sup>

LIU Qi-fang<sup>1</sup>, MA Guang-wen<sup>1</sup>, LIU Qun-ying<sup>2</sup>, Yang Dao-hui<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract :** Aiming at the optimal operation of the cascade hydropower plants with the characteristics of highly nonlinear and complicated constrain conditions, this paper presents the nested searching algorithm with the fractal division interpolation and chaos optimization. This algorithm uses the nested structure to unite determinate and stochastic searches, and can find out the global optimum according to its own regularity. The results of a practical example prove the nested algorithm's validity and practicability, and show it not only has many advantages such as strong ergodicity, simplified parameter configuration, high stability, global optimization, and easy programming, but also can get consistent convergence accurately and use less computing time compared with POA algorithm. Furthermore, the results also suggest the nested searching algorithm can solve the non-linear optimal problems in the complicated constraint conditions and lay a foundation in the future study.

**Key words :** cascade hydropower; optimal operation; nested searching algorithm; fractal division; chaos

---

## 《中国历史干旱》(1949 - 2000) 正式出版

南京水利科学研究院张世法、苏逸深、宋德敦、张璞玉、宋慧珠、顾颖编著和焦得生、张海仑、朱元生主审的《中国历史干旱》(1949 - 2000)已由河海大学出版社于2008年11月正式出版。

该专著在全国和各省(市、区)1949 - 2000年丰富的实测和调查统计的资料基础上,对中国农业旱情和灾情进行了全面系统的分析。

专著分上下两篇。上篇为中国历史干旱综合分析及评价篇;下篇为分年灾情、旱情统计分析篇。上篇分为八章,分析了全国、大区、大流域和省(市、区)干旱灾害的地区变化和多年、年、季的时间变化,干旱灾害形成的机制,以及干旱风险的地区分布。在干旱与灌溉、干旱与粮食生产关系的基础上,预估了干旱对未来粮食生产的影响。下篇在广泛收集和系统整理1949 - 2000年资料的基础上,比较详细分析了全国、大区、大流域、省(市、区)和地区(市、州、盟)灾情和旱情,对水文气象影响因子的时、空变异情况进行了分析和评价。

该专著是集资料统计整理和专题分析研究相结合的具有广泛参考和应用价值的一部专著。可供水利、农业、气象部门从事规划、设计、管理和科研工作的科技、决策人员以及高等院校的师生参考使用。

该专著共130.5万字,定价300元。欲订购者可与河海大学出版社发行部联系(电话:025 - 83722833)。

《水科学进展》编辑部

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 50539140).