

控制与决策

Control and Decision

基于改进电子搜索算法的梯级水库联合发电优化调度

王丽萍, 李宁宁, 阎晓冉, 张验科, 纪昌明

引用本文:

王丽萍, 李宁宁, 阎晓冉, 等. 基于改进电子搜索算法的梯级水库联合发电优化调度[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 1916–1922.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1688>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

求解区间数分布式流水线调度的混合离散果蝇优化算法

A hybrid discrete fruit fly optimization algorithm for distributed permutation flowshop scheduling with interval data

控制与决策. 2020, 35(4): 930–936 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1274>

基于总加权完成时间的可重入混合流水车间调度问题

Reentrant hybrid flowshop scheduling problem based on total weighted completion time

控制与决策. 2018, 33(12): 2218–2226 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0907>

混流装配线物料配送机器人协同调度方法

Co-scheduling of mobile robots in mixed-model assembly lines

控制与决策. 2018, 33(11): 1959–1966 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0794>

全局竞争和声搜索算法

Global competitive harmony search algorithm

控制与决策. 2016(2): 310–316 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1742>

改进型细菌觅食算法及多货叉仓库调度应用

Improved bacterial foraging algorithm and application of warehousing scheduling with multi-shuttles

控制与决策. 2015(2): 321–327 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1436>

基于改进电子搜索算法的梯级水库联合发电优化调度

王丽萍[†], 李宁宁, 阎晓冉, 张验科, 纪昌明

(华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206)

摘 要: 为解决梯级水库联合优化调度求解时间较长的问题, 提出一种改进的电子搜索算法 (IESA). 改进算法在原算法的基础上, 首先采用新的参数自适应方法, 同时保证运算前期向优秀个体的迁移速度以及运算后期较强的局部搜索能力; 然后, 针对梯级水库联合优化调度强约束性的特点, 提出可行域内搜索策略, 使核周围产生的电子和迁移后的原子核均满足水库调度的各项约束, 避免可行域外的无效搜索, 提高搜索效率. 运用改进后的电子搜索算法求解李仙江流域两座水库联合发电优化调度问题, 结果表明, 所提出的方法较传统的动态规划和遗传算法, 能同时保证算法的收敛速度和所得结果的质量, 具有推广价值.

关键词: 启发式算法; 电子搜索算法; 水库联合调度; 参数自适应; 可行域内搜索策略

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

Cascade reservoirs' joint optimal operation of power generation based on improved electro-search algorithm

WANG Li-ping[†], LI Ning-ning, YAN Xiao-ran, ZHANG Yan-ke, JI Chang-ming

(College of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An improved electro-search algorithm (IESA) is proposed to solve the problem of long computing time in the process of joint optimal operation of reservoirs. Based on the electro-search algorithm, the proposed algorithm adopts a new parameter adaptive method to accelerate the migration speed to the global optimal solution in the early stage of operation and has strong local search ability in the later stage of operation. At the same time, according to the characteristics of strong constraints of joint optimal operation of cascade reservoirs, two search strategies of searching in feasible region are proposed to make the electrons generated around the core and the migrated nuclei satisfy the feasible region constraints, avoiding the invalid optimization caused by random optimization exceeding the feasible region, and improving the search efficiency. The improved electro-search algorithm is used to solve the optimal operation problem of joint power generation of two reservoirs in Lixianjiang River Basin. The results show that the calculation results of this method are similar to those of the dynamic programming method and are superior to the genetic algorithm, especially in the speed of calculation, which is worth popularizing.

Keywords: heuristic algorithm; electro-search algorithm; joint operation of reservoirs; parameter self-adaptation; search strategies of searching in feasible region

0 引 言

水电是一种清洁的可再生能源, 充分开发利用水电能源是解决化石燃料短缺的重要手段, 也是实现可持续发展的要求. 梯级水库优化调度是一个高维多重约束强耦合作用下的复杂非线性优化问题. 经典的多阶段优化算法——动态规划法可以得出给定离散精度下的全局最优解, 但随着梯级水库规模的增加, 算法计算量和内存占用量均呈指数级增长. 黄守信等^[1]提出通过“同步蓄放”原则将三库优化问题简

化为两库优化问题, 并采用随机动态规划求解. 赵志鹏等^[2]采用离散梯度逐步优化算法开展了五库优化调度研究, 该方法减轻了传统逐步优化算法的“维数灾”问题, 但初始解和离散步长对计算结果有一定程度的影响. 纪昌明等^[3]提出了基于可行域搜索映射的并行动态规划算法, 该方法能在保证解全局收敛性的前提下减少计算耗时, 但无法解决“维数灾”问题. 可见, “维数灾”是限制传统最优化算法在多库调度中应用的主要原因.

收稿日期: 2018-12-11; 修回日期: 2019-04-01.

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0402208); 国家自然科学基金项目(51709105); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019QN056).

责任编辑: 李勇建.

[†]通讯作者. E-mail: lpwang@ncepu.edu.cn.

启发式算法不同于传统最优化算法,其采用随机寻优的方式,不依赖于目标函数的梯度信息,尤其适合处理最优化方法较难解决的复杂高维非线性问题^[4],因此是求解梯级水库联合优化调度的有效方法之一。王丽萍等^[5]将改进的遗传算法应用到梯级水库优化调度中,计算结果与动态规划的结果较为接近,但遗传算法中的交叉变异等操作具有随机性,导致算法后期容易陷入早熟。Reis等^[6]提出了一种利用遗传算法(GA)和线性规划(LP)确定整个规划期内水库运行策略的方法,该方法容易实现,提取有用参数的可能性更大,但无法避免参数选择的随机性。杨旺旺等^[7]采用了改进的萤火虫算法,该方法虽然计算结果精度较高,但参数的确定缺少依据,且计算时间较长。沈艳军等^[8]将改进型花朵授粉算法应用到水火电优化调度中,该方法具有较强的全局搜索和局部搜索能力,但同样存在计算结果受参数影响严重的问题。可见,大多数启发式算法在求解优化调度这一复杂问题时存在收敛速度慢、参数确定缺少依据等问题。越来越多的方法,如杂草入侵优化算法(IWO)^[9]、蜜蜂交配优化算法^[10]、水循环算法^[11]、狼群算法^[12]、鱼群算法^[13]等被用来求解水电站水库系统优化调度问题。水库优化调度有助于获得更好、更可靠的调度规则,从而在水资源和能源短缺的情况下进一步提高社会和经济效益,因此,寻找具有巨大潜力的算法来解决复杂的水库调度问题是非常重要的。

电子搜索算法(electro-search algorithm, ESA)^[14]是2017年由Tabari等提出的一种新型启发式算法,并通过数值实验表明了该方法在求解大多数测试函数最优值方面的表现优于多种传统的启发式算法。本文在ESA基础上,针对水库调度问题的特点,基于参数自适应方法和可行域内搜索策略,提出一种改进电子搜索算法(improved electro-search algorithm, IESA),并将其应用到李仙江流域的崖羊山-石门坎梯级水库联合发电优化调度问题求解中,通过与动态规划、遗传算法的计算结果进行对比,表明该方法具有寻优能力强、计算时间短等显著优点,可以为设计更加复杂的梯级水库系统优化调度方法提供理论支持。

1 梯级水库联合发电优化调度模型

1.1 目标函数

梯级水库联合发电优化调度模型是以各水库运行参数、调度期初末水位(库容)和各时段来水情况为已知条件,求解调度期内总发电量最大的优化问题,目标函数为

$$E = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M K^i \cdot qe_t^i \cdot H_t^i \cdot \Delta t / 3600. \quad (1)$$

其中: E 为梯级水库调度期内联合发电量(kWh), i 为水库序号, M 为水库总数, t 为时段序号, T 为总时段数, K^i 为第 i 座水库的出力系数, qe_t^i 为第 i 座水库在第 t 时段的发电引用流量(m^3/s), H_t^i 为第 i 座水库在第 t 时段的净水头(m), Δt 为时段长(s)。

1.2 约束条件

1) 库容限制

$$V_{t,\min}^i \leq V_t^i \leq V_{t,\max}^i. \quad (2)$$

其中: V_t^i 为第 i 座水库在第 t 时段末的库容(m^3), $V_{t,\min}^i$ 、 $V_{t,\max}^i$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段末允许达到的最小库容和最大库容(m^3)。

2) 水量平衡方程

$$q_t^i = (V_{t-1}^i - V_t^i) / \Delta t + I_t^i + q_t^{i-1}. \quad (3)$$

其中: q_t^i 为第 i 座水库在第 t 时段下泄流量(m^3/s), V_{t-1}^i 为第 i 座水库在第 t 时段初的库容(m^3), I_t^i 为第 i 座水库在第 t 时段的区间入库流量(m^3/s), q_t^{i-1} 为第 $i-1$ 座水库在第 t 时段下泄流量(m^3/s)。

3) 出力限制

$$N_{t,\min}^i \leq N_t^i \leq N_{t,\max}^i. \quad (4)$$

其中: N_t^i 为第 i 座水库在第 t 时段的出力值(kW), $N_{t,\min}^i$ 、 $N_{t,\max}^i$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段允许的最小出力值和预想出力值(kW)。

4) 水头损失限制

$$\Delta H_{t,\min}^i \leq \Delta H_t^i \leq \Delta H_{t,\max}^i, \quad (5)$$

其中 $\Delta H_{t,\min}^i$ 、 $\Delta H_{t,\max}^i$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段的水头损失下限和上限(m)。

5) 泄流能力限制

$$q_{t,\min}^i \leq q_t^i \leq q_{t,\max}^i, \quad (6)$$

其中 $q_{t,\min}^i$ 、 $q_{t,\max}^i$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段下泄流量的下限和上限(m^3/s)。

6) 非负限制

上述所有变量均不小于0。

7) 边界条件

$$V_0^i = V_{\text{begin}}^i, V_T^i = V_{\text{end}}^i. \quad (7)$$

其中: V_0^i 为第 i 座水库在调度期初的库容值(m^3), V_T^i 为第 i 座水库在调度期末的库容值(m^3)。

2 电子搜索算法

电子搜索算法的提出是基于波尔原子理论。在ESA中,可行解的域类似于分布着不同原子的分子

空间. 围绕原子核转动的电子改变它们的轨道, 以达到最高能级的状态, 这类似于特定目标函数的最佳点. 电子搜索算法由原子扩散、电子轨道跃迁、原子核迁移这3个阶段构成, 下面进行简单介绍.

2.1 原子扩散

在原子扩散阶段, 可行解随机分布在搜索空间上. 一个原子代表一个初始解, 由一个被电子轨道围绕的原子核组成, 如图1所示. 电子被限制在核周围特定的轨道上, 通过吸收或发射特定的能量在轨道间迁移.

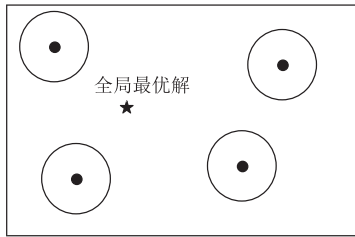


图1 原子扩散示意

2.2 电子轨道跃迁

在轨道跃迁阶段, 每个核周围的电子移动到具有更高能级的轨道上. 这种轨道跃迁受到氢原子的量子化能级概念的启发, 对于每个原子核周围的电子可表示为

$$e_{i,j} = N_i + (2 \times \text{rand}(0, 1) - 1) \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot R, \quad n \in \{2, 3, 4, 5\}. \quad (8)$$

其中: $e_{i,j}$ 为第 i 个原子核周围第 j 个电子; N_i 为第 i 个原子核; n 为能级, 决定了电子可以到达的核附近位置; R 为原子轨道半径, 第1次迭代是随机设置的, 之后由后面的式(9)中的 D_k 计算得到. 一旦电子占据新的轨道, 每个核周围具有最高能量级(即最佳适应度函数值)的电子被选为最佳电子(e_{best}). 这一特定电子被标记, 用作下一阶段中原子位置迁移过程中的最佳电子, 如图2所示.

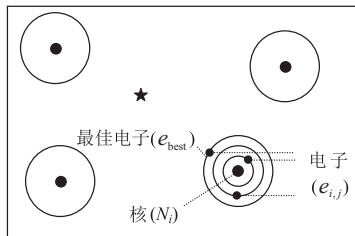


图2 电子轨道跃迁示意

2.3 原子核迁移

根据 Rydberg 公式, 原子核新的位置是基于两个原子之间的能级差决定的. 每个原子核的迁移公式用向量表示如下:

$$D_k = e_{i,\text{best}} - N_{\text{best}} + \text{Re}_k \otimes \left(\frac{1}{N_{\text{best}}^2} - \frac{1}{N_k^2} \right), \quad (9)$$

$$N_{\text{new},k}^2 = N_k + \text{Ac}_k \times D_k. \quad (10)$$

其中: 在第 k 次迭代时, 每个核的迁移距离 D_k 是由当前全局最佳核位置 N_{best} 、围绕着每个原子核的最佳电子 $e_{i,\text{best}}$ 、Rydberg 能量常数 Re_k 和原子核当前位置 N_k 共同决定; 迁移后的原子核的位置 N_{new} 根据其原位置和计算出的迁移距离确定, 并受到加速系数 Ac_k 的影响; 符号 \otimes 表示向量的元素与元素之间的乘法. 通过这一过程, 所有原子逐渐向全局最优点方向迁移, 如图3所示.

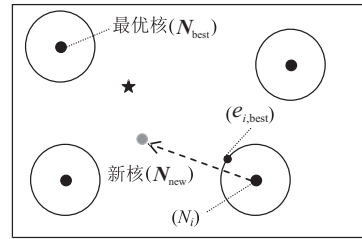


图3 原子核迁移示意

这一位置改变的收敛速度取决于算法的参数 Re 和 Ac , 这两个参数在第1次迭代时随机设置. 在随后每一次的迭代中通过下式改变数值:

$$\text{Re}_{k+1} = \text{Re}_k + \left(\text{Re}_{\text{best}} + \sum_{i=1}^m \frac{\text{Re}_i / f_{N_i} |\text{Re}_i}{1 / f_{N_i} |\text{Re}_i} \right) / 2, \quad (11)$$

$$\text{Ac}_{k+1} = \text{Ac}_k + \left(\text{Ac}_{\text{best}} + \sum_{i=1}^m \frac{\text{Ac}_i / f_{N_i} |\text{Ac}_i}{1 / f_{N_i} |\text{Ac}_i} \right) / 2. \quad (12)$$

其中: m 为原子个数, Re_i 和 Ac_i 为每个原子核相应的算法系数, f 为原子核的适应度函数值, Re_{best} 、 Ac_{best} 为当前全局最佳核位置 N_{best} 所对应的算法系数, Re_{k+1} 和 Ac_{k+1} 分别为第 $k+1$ 代 Rydberg 常数和第 $k+1$ 代的加速系数.

3 改进的电子搜索算法

3.1 可行域内搜索策略

ESA 在搜索过程中可能出现个体超出可行域的现象, 主要体现在两个方面: 一是原子半径由迁移距离 D_k 得到, 在原子半径的不同“能级”上随机产生的电子可能会超出可行域; 二是根据全局最优原子核和原子的最优电子确定的迁移后原子核的位置可能超出可行域. ESA 允许原子和电子在优化过程中跳出可行域, 这可能影响寻优结果且会将有限的计算资源浪费在无效的搜索计算中. 一般通过对适应度函数值添加惩罚项^[15-17]以吸引个体在可行域范围内活动, 但这种方法需设置合理的惩罚因子, 对于许多实

际工程问题而言, 惩罚因子的选取十分困难, 且该方法并不包含将可行域外的个体修正至域内的具体策略. 这样, 每次搜索就会有多个个体因为不满足约束而被惩罚掉, 使可行解减少. 如果补充新的可行解, 则又增加了一次搜索中的计算量, 因此, 超出可行域的搜索过程是影响算法收敛速度的重要因素.

针对梯级水库联合优化调度强约束的特点, 本文提出两种可行域内搜索策略. 策略1: 限制原子半径使核周围产生的电子满足约束条件, 即在调度期的当前入流条件下, 将水库满蓄所能达到的最大库容与库容下限的差值作为有效原子半径; 策略2: 将迁移导致的可行域外的原子核修正至域内, 即将违反库容约束的值设置为库容约束的边界值. 两个策略的数学表述如下:

策略1

$$\begin{cases} e_{t+1,UL} = I_t \times \Delta t + e_t; \\ \text{if } e_{t+1,UL} > V_{t+1,max}, \text{ then } e_{t+1,UL} = V_{t+1,max}; \\ R = e_{t+1,UL} - V_{t+1,min}. \end{cases} \quad (13)$$

策略2

$$\begin{cases} \text{if } N_t > V_{t,max}, \text{ then } N_t = V_{t,max}; \\ \text{if } N_t < V_{t,min}, \text{ then } N_t = V_{t,min}. \end{cases} \quad (14)$$

式(13)和(14)中: $e_{t+1,UL}$ 为电子在 t 时段末计算得到的最大库容上限 (m^3), I_t 为时段 t 内的平均入库流量 (m^3/s), $V_{t+1,max}$ 为 t 时段末的库容约束上限值, R 为满足约束条件的原子半径, N_t 为原子在 t 时段初的库容值, $V_{t,max}$ 为 t 时段初的库容约束上限值, $V_{t,min}$ 为 t 时段初的库容约束下限值.

本文提出的可行域内搜索策略能够保证每次迭代时所有原子和电子都能满足给定的水库调度约束, 每次移动都是可行域范围内的有效搜索, 避免随机寻优的弊端, 提高计算效率.

3.2 逐步收敛的参数自适应方法

计算新核的位置 N_{new} 需要 Rydberg 能量常数 Re_k 和加速系数 Ac_k , 第1次迭代的初始参数是随机产生的, 随后迭代中 ESA 的参数 Re 和 Ac 通过式(11)和(12)随着迭代进行调整. 但对于水库优化调度的实际问题, 存在参数值逐渐增大的问题, 不利于算法后期的收敛. 针对这一问题, 本文提出一种逐步收敛的参数自适应方法, 如下式所示:

$$Re_{k+1} = (Re_k + (Re_{best} + e^{-f_{N_i}|Re_i})/2)/2, \quad (15)$$

$$Ac_{k+1} = (Ac_k + (Ac_{best} + e^{-f_{N_i}|Ac_i})/2). \quad (16)$$

Re 和 Ac 的设置主要依据适应度函数值. 由于算法的系数 Re 和 Ac 可通过自适应方法进行调整, 这样便可减小参数初始值选取对算法性能的影响, 提高算法的鲁棒性. 参数 Re 和 Ac 的改进将直接影响迁移距离 D_k , 保证前期迁移距离较大, 使原子核快速朝优秀个体的方向移动. 随着迭代进行, 迁移距离逐渐缩小, 从而保证算法的局部寻优能力并加快收敛速度.

3.3 算法步骤

改进电子搜索算法的详细步骤如下.

step 1: 初始化参数值. 包括原子个数 n 、电子个数 m 、终止循环迭代次数、Rydberg 能量常数 Re 和加速系数 Ac .

setp 2: 原子扩散. 针对梯级水库联合优化调度问题, 每个原子核和电子均代表一条水位过程线, 由若干个时段组成. 原子核每个时段的水位值均在水位上下限之间随机产生.

setp 3: 电子轨道跃迁. 根据式(13)计算每个原子的有效原子半径, 并在有效半径内根据式(8)生成位于不同“能级”轨道上的 m 个电子. 即在原子核水位过程线有效原子半径范围内产生不同轨道上的电子水位过程线. 初始种群规模 $N = n \times (1 + m)$.

setp 4: 计算所有原子核和电子的适应度值. 即在给定各时段入库径流的条件下, 计算原子核水位过程线和电子水位过程线的相应调度期内总发电量, 所有原子核过程线中发电效益最大的作为最佳原子核, 每个原子核周围的电子过程线中发电效益最大的作为每个原子的最佳电子, 每次迭代得到最优原子核过程线1条, 每个原子的最优电子过程线 n 条.

setp 5: 原子核迁移. 根据式(9)和(10)计算每个原子核的迁移距离, 产生新的原子核水位过程线. 对于超出可行域的部分应根据式(14)进行调整, 使其满足约束条件. 计算迁移后原子核的适应度值, 即原子核水位过程线相应的调度期内总发电量.

setp 6: 比较迁移前后原子核的适应度值, 如果迁移后的新原子核的适应度值大于迁移前的原子核的适应度值, 则令新原子核代替旧原子核, 否则保留旧原子核. 保持原子总数不变.

setp 7: 判断是否满足循环终止条件. 如果不满足终止条件, 则根据式(15)和(16)更新参数 Re 和 Ac , 重复 step 2 ~ step 7, 进入下一次迭代过程, 随着迭代进行, 原子核过程线逐渐向全局最优过程线移动; 如果满足终止条件, 则输出当前最佳原子核及其适应度值, 终止计算过程.

算法流程如图4所示.

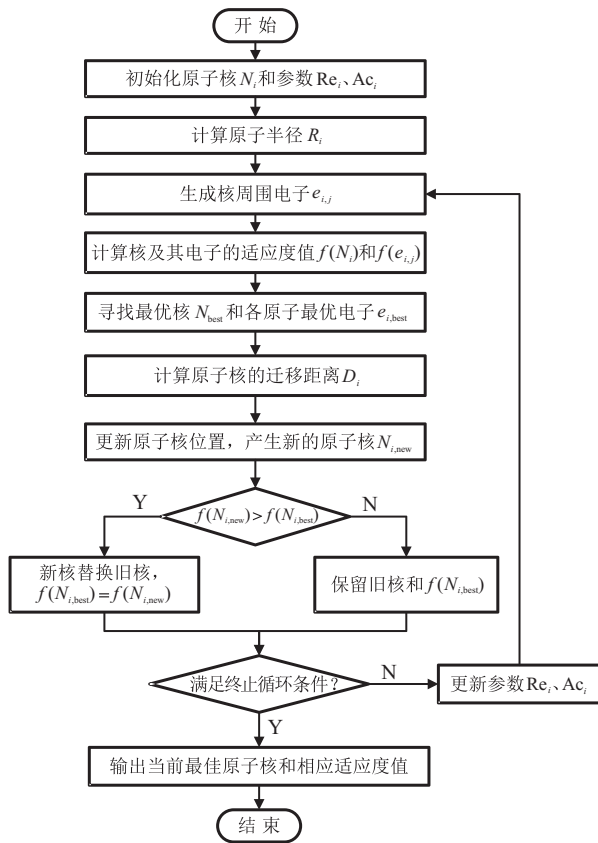


图4 IESA 流程

4 实例分析

以李仙江流域的崖羊山、石门坎两座梯级水电站组成的系统为研究对象,两个电站的主要参数如表1所示。

表1 电站主要参数

	崖羊山电站	石门坎电站
死水位 /m	818	740
正常蓄水位 /m	835	756
总库容 / 亿 m ³	3.08	1.75
保证出力 /MW	23.2	33.5
出力系数	8.3	8.3

以月为调度时段,对两库进行中长期联合发电优化调度. 程序通过 Visual C#2010 编译工具实现,采用的计算平台为联想 Think Centre M8600t-D066, CPU 类型为 Inter (R) Core (TM) i7-6700@3.40 GHz, 内核数为4核, RAM为16.0 GB.

首先研究不同参数设置情况对计算结果和时间的影 响. IESA 涉及到的参数有原子个数 n 、每个原子周围的电子个数 m 、Rydberg 能量常数 Re 、加速系数 Ac . 其中 Re 和 Ac 随机生成,并随着迭代自适应变化,因此仅对参数 n 和 m 进行分析. 在每组参数设置条件下算法运行 10 次,每次迭代次数为 500,选取各方案的发电量最大值、最小值和平均值进行分析. 方案设置及结果如表2所示。

表2 不同算法参数及相应计算结果

序号	n	m	发电量 / 亿 kWh			时间 /s
			max	min	avr	avr
1	10	2	12.958	12.430	12.735	0.996
2	10	5	13.295	12.978	13.105	1.395
3	10	10	13.329	13.114	13.230	2.075
4	20	2	12.991	12.541	12.747	1.489
5	20	5	13.358	12.944	13.176	2.304
6	20	10	13.397	13.208	13.319	3.677
7	30	2	13.081	12.675	12.854	1.998
8	30	5	13.412	13.067	13.318	3.217
9	30	10	13.487	13.307	13.389	5.245
10	40	2	13.178	12.799	12.925	5.631
11	40	5	13.440	13.124	13.356	8.437
12	40	10	13.487	13.324	13.396	13.974

从表2的计算结果可以看出,在相同迭代次数的情况下,随着原子数和电子数的增加,计算结果的发电量也相应增加,更多的原子意味着全局搜索能力更强,而更多的电子意味着局部搜索能力更强. 与此同时,每次迭代适应度值的计算量也随之增加,计算时间的增幅十分明显. 因此,在有限的迭代次数里,原子和电子越多,搜索能力越强,得到的结果越好,计算时间越长。

当原子数相同,电子数从2增加到5时,计算出的平均发电量增幅相比于从5增加到10时更为显著,且后者的计算时间增长得更多,因此建议将电子数设置为5;电子数相同时,随着原子数增加,发电量稳步增长,但当原子数从30个增加到40个时,对于相同电子数,平均发电量的增幅仅约为0.5%左右,计算时间却增加了200%以上,说明原子增加能获得更优的计算结果,但过多原子对计算结果的优化带来的收益远小于消耗时间所造成的损失,因此建议将原子数设为30个。

为验证 IESA 的可行性和优越性,从计算结果和计算时间两方面将 IESA 与动态规划法 (DP)、遗传算法 (GA)、传统电子搜索算法 (ESA) 进行对比. 动态规划法^[18]的离散点数越多,越无限接近全局最优解,但当离散点数过多时可能出现“维数灾”问题,无法获得运算结果,故本文将离散点数设置为50个. 遗传算法^[19]是一种较为成熟的启发式算法,相关的研究成果丰硕,本文设置初始种群含有100个个体,交叉率0.6,变异率0.1. 设置 ESA、IESA 的原子数为30个,每个原子有5个电子,迭代500次停止计算. 以丰水年、平水年和枯水年3个典型年的径流作为输入,用4种算法分别计算3种径流下的两座水库联合发电量. 根据以上设置的参数,3种算法在相同条件下分别独立运算10次并取其平均值,结果对比如表3所示。

表3 3种典型年的计算结果对比

典型年	指标	DP	GA	ESA	IESA
丰水	发电量指标/亿 kWh	14.113	13.968	13.987	14.061
	时间/s	95.75	54.88	10.25	7.30
平水	发电量/亿 kWh	11.634	11.474	11.525	11.596
	时间/s	68.65	56.81	8.47	6.02
枯水	发电量/亿 kWh	9.260	9.025	9.183	9.210
	时间/s	33.45	54.96	7.64	4.16

从表3的计算结果可以看出: 丰水年的计算时间 > 平水年的计算时间 > 枯水年的计算时间, 原因在于丰、平、枯的入库径流差距大, 丰水年入库径流大, 水位上限相应增大, 相当于增加了可行域范围, 所以计算时间也相应增加; ESA 的计算结果优于 GA, 说明 ESA 的寻优能力比 GA 强; IESA 的发电量和时间都明显优于 GA 和 ESA, 与 DP 最为接近, 体现出了 IESA 改进后的优越性. 这主要是因为电子在满足可行域约束的有效半径内生成, 且原子核的迁移也控制在可行域内, 使每次局部搜索、迁移都在可行域内进行, 每次搜索都是有意义的, 提高了搜索的效率; 而 GA 中交叉、变异等操作和 ESA 中电子跃迁、核迁移等操作的随机性容易导致局部越限, 操作无效, 所以 IESA 在节省搜索时间方面具有很大优势.

在天然来水较少的年份, 发电任务容易遭受破坏, 选取特枯来水年进行发电优化调度研究将更有意义^[7], 因此以枯水年为例, 对 DP、GA、IESA 三种算法得到的两座水库最优水位调度过程线进行分析, 如图5所示. 从图5中可以看出, DP 优化出的最优水位过程是将水头尽可能蓄至最高, 这符合出力计算公式中出力与水头成正比的关系. 显然, IESA 优化出的过程线在转折点、线形等方面与最优过程线更为接近, 且保持较高水头, 符合发电要求.

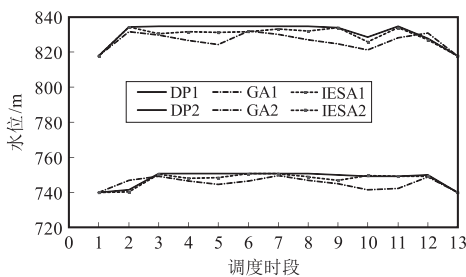


图5 3种算法优化后的水位过程线对比

由本文实例可以看出, 仅两座水库 DP 的运算时间就超过了 1 min, 随着梯级水库数量增加, 计算规模将呈指数级增长. 究其原因: 一方面, 计算时间长导致算法实际可运用性不强; 另一方面, 随着水库数量增加会产生“维数灾”问题. 这无疑限制了 DP 在实际工

程问题中的应用. 虽然启发式算法一般很难达到最优优化方法的计算结果(全局最优解), 但启发式算法不存在“维数灾”问题, 增加一座水库仅增加了若干个时段的出力计算, 计算量呈线性增长, 因此, 在实际水库调度中具有更大的应用价值. 相较于其他智能算法在求解水电站优化调度问题时随机搜索可能导致解超出可行域, 从而产生大量无效解的问题, IESA 的搜索过程均限制在可行域内, 避免了无效搜索, 提高了计算效率. 对于更加庞大的梯级水库群, 该算法的优越性将会更加明显.

5 结论

ESA 是一种具有良好全局搜索能力的启发式优化算法, 本文在此基础上提出了 IESA. 该算法一方面通过采用可行域内搜索策略, 使每次搜索产生的个体都满足约束条件, 增强了算法搜索的有效性; 另一方面采用“初大末小”的参数自适应方法, 增强了算法前期收敛速度和后期局部搜索能力. 将 IESA 应用到李仙江流域两座梯级水库联合发电优化调度问题求解中, 验证了该方法的寻优能力优于 GA, 不仅能得出与 DP 的全局最优解十分接近的高质量计算结果, 而且计算时间远远小于 DP 和 GA. IESA 具有良好的应用前景, 为求解梯级水库优化调度问题给出了一个新的解决途径.

IESA 中的原子和电子在计算适应度函数值时相互独立, 故算法具有良好的可并行性. 将计算任务分配给不同内存或不同计算机上同时处理, 理论上可以大幅缩减计算时间.

参考文献(References)

- [1] 黄守信, 方淑秀, 林耕, 等. 多库联合优化调度的多维随机动态规划数学模型[J]. 水利学报, 1988, 19(8): 1-8. (Huang S X, Fang S X, Lin G, et al. Multi-dimensional stochastic dynamic programming mathematical model for multi-reservoir joint optimal dispatch[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 19(8): 1-8.)
- [2] 赵志鹏, 廖胜利, 程春田, 等. 梯级水电站群中长期优化调度的离散梯度逐步优化算法[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1243-1253. (Zhao Z P, Liao S L, Cheng C T, et al. Discrete gradient gradient step-by-step optimization method for medium and long term optimal dispatching of cascade hydropower stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1243-1253.)
- [3] 纪昌明, 马皓宇, 李传刚, 等. 基于可行域搜索映射的并行动态规划[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 649-661. (Ji C M, Ma H Y, Li C G, et al. Concurrent dynamic planning based on feasible region search mapping[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018,

- 49(6): 649-661.)
- [4] 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, 21(4): 496-503.
(Guo S L, Chen J H, Liu P, et al. Research progress and prospect of joint optimal operation of reservoirs[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 496-503.)
- [5] 王丽萍, 王渤权, 李传刚, 等. 基于均匀自组织映射遗传算法的梯级水库优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(4): 1072-1079.
(Wang L P, Wang B Q, Li C G, et al. Optimal operation of cascade reservoirs based on uniform self-organizing mapping genetic algorithm[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(4): 1072-1079.)
- [6] Reis L F R, Walters G A, Savic D, et al. Multi-reservoir operation planning using hybrid genetic algorithm and linear programming (GA-LP): An alternative stochastic approach[J]. *Water Resources Management*, 2005, 19(6): 831-848.
- [7] 杨旺旺, 白涛, 赵梦龙, 等. 基于改进萤火虫算法的水电站群优化调度[J]. 水力发电学报, 2018, 37(6): 25-33.
(Yang W W, Bai T, Zhao M L, et al. Optimal dispatch of hydropower stations based on improved firefly algorithm[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(6): 25-33.)
- [8] 沈艳军, 杨鑫, 刘允刚. 考虑需求响应的水火电优化调度改进型花朵授粉算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(8): 1645-1653.
(Shen Y J, Yang X, Liu Y G. Improved flower pollination algorithms for hydropower optimal dispatch considering demand response[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(8): 1645-1653.)
- [9] Azizipour M, Ghalenoei V, Afshar M H. Optimal operation of hydropower reservoir systems using weed optimization algorithm[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(11): 3995-4009.
- [10] Haddad, Omid Bozorg, Abbas Afshar, et al. Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization[J]. *Water Resources Management*, 2006, 20(5): 661-680.
- [11] Haddad, Omid Bozorg, Mojtaba Moravej, et al. Application of the water cycle algorithm to the optimal operation of reservoir systems[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2014, 141(5): 04014064.
- [12] 薛俊杰, 王瑛, 李浩, 等. 一种狼群智能算法及收敛性分析[J]. 控制与决策, 2016, 31(12): 2131-2139.
(Xue J J, Wang Y, Li H, et al. A wolf swarm intelligence algorithms and convergence analysis[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(12): 2131-2139.)
- [13] 李晓磊, 邵之江, 钱积新. 一种基于动物自治体的寻优模式: 鱼群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(11): 32-38.
(Li X L, Shao Z J, Qian J X. An optimization model based on animal autonomy: fish swarm algorithm[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2002, 22(11): 32-38.)
- [14] Tabari A, Ahmad A. A new optimization method: Electro-search algorithm[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, 103: 1-11.
- [15] 吴聪, 陈侃松, 姚静. 基于改进自适应遗传算法的物流配送路径优化研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(2): 236-240.
(Wu C, Chen K S, Yao J. Logistics distribution routing optimization based on improved adaptive genetic algorithm[J]. *Computer Measurement and Control*, 2018, 26(2): 236-240.)
- [16] 赵伟, 蔡兴盛, 曲慧雁. 一种基于惩罚函数和新信息素更新方式的蚁群算法[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(3): 103-107.
(Zhao W, Cai X S, Qu H Y. Ant colony algorithm based on penalty function and new pheromone updating method[J]. *Computer Engineering and Science*, 2013, 35(3): 103-107.)
- [17] 廖国琼, 黄志伟. 基于事件社会网络中考虑约束全局推荐策略[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2018, 54(1): 11-22.
(Liao G Q, Huang Z W. Global recommendation strategy considering constraints in event-based social networks[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Science*, 2018, 54(1): 11-22.)
- [18] 胡理嫚, 李志伟, 刘雪垠, 等. 基于动态规划的装配线物料搬运节能调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(9): 2424-2433.
(Hu L M, Li Z W, Liu X Y, et al. Energy-saving scheduling method for material handling on assembly line based on dynamic programming[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2018, 38(9): 2424-2433.)
- [19] 马光文, 王黎, Walters G A. 水电站优化调度的FP遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 16(11): 78-82.
(Ma G W, Wang L, Walters G A. FP genetic algorithm for optimal dispatch of hydropower stations[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1996, 16(11): 78-82.)

作者简介

王丽萍(1956—), 女, 教授, 博士生导师, 从事水(能)资源系统规划与管理、风险分析与决策等研究, E-mail: lpwang@ncepu.edu.cn;

李宁宁(1994—), 女, 博士生, 从事水资源系统工程、水(能)资源系统规划与管理的研究, E-mail: hdpaperLnn@ncepu.edu.cn;

阎晓冉(1992—), 女, 博士生, 从事水(能)资源系统规划与管理、风险分析与决策的研究, E-mail: yanxiaoran1014@163.com;

张验科(1983—), 男, 讲师, 博士, 从事水(能)资源系统规划与管理、风险分析与决策的研究, E-mail: zhangyk@ncepu.edu.cn;

纪昌明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事水(能)资源系统规划与管理、风险分析与决策等研究, E-mail: cmji@ncepu.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)