

基于蚁群算法的电站水库优化调度分析

李国栋 程亚伟

山西水务集团建设投资有限公司，山西省太原市，030006；

摘要：梯级水库的优化调度是电站水库优化调度领域中最困难的问题之一。本文以根据梯级水库效益要求和相关约束条件建立了梯级水库的优化调度模型。计算方法为改进蚁群算法，其原理为利用遗传算法对蚁群算法进行改进。利用改进算法对锦屏一级、锦屏二级水库的调度进行计算，以说明优化调度模型和改进算法的可行性与合理性，并对相关工作提供参考。结果表明，模型和算法对结果的求解都有一定的合理性。

关键词：梯级水库；多目标；优化调度；蚁群算法；遗传算法

Analysis of optimal operation of power station reservoir based on ant colony algorithm

Li Guodong, Cheng Yawei

Shanxi Water Conservancy Group Construction Investment Co., Ltd., Taiyuan City, Shanxi Province, 030006;

Abstract: The optimal operation of cascade reservoirs is one of the most difficult problems in the field of operation. In this paper, the optimal operation model of cascade reservoirs is established according to the benefit requirements of cascade reservoirs. The calculation method is improved ant colony algorithm, and its principle is to use genetic algorithm to improve ant colony algorithm. The results show that the model and algorithm have certain rationality for the solution of the results.

Keywords: Cascade reservoirs; Multi-objective; Optimize scheduling; Ant colony algorithm; Genetic algorithm

DOI: 10.69979/3029-2727.24.05.020

引言

梯级水库的优化调度是电站水库优化调度领域中最困难的问题之一。主要难点为水资源一定而要求调度期内的收益最大，并且满足水位、流量、水头以及电机出力等要求。目前，常见的水库调度方法是根据调度图来进行的，该方法操作简单且安全性高。但是，该方法无法保证电站的发电效益最大化。国内外一些学者^[1-5]将智能算法应用于水库优化调度，并取得了较好的效果。在这些算法中，蚁群优化算法具有灵活性好且效率较高等优点，而在水库调度研究中被广泛应^[6-8]。

本文以根据梯级水库效益要求和相关约束条件建立了梯级水库的优化调度模型。计算方法为改进蚁群算法，其原理为利用遗传算法对蚁群算法进行改进。利用改进算法对锦屏一级、锦屏二级水库的调度进行计算，以说明优化调度模型和改进算法的可行性与合理性，并对相关工作提供参考。

1 调度模型

合理安排调度方式，以不同时段(丰、平、枯)不同电量类型约束(计划电量、市场电量、超发电量等)，不同电价(计划电价、市场电价、超发电价)为基础，最大限度地增加年发电量。它的优化调度模式是这样的：

1.1 目标函数

(1) 最大化收益

$$E_{eco}(\max) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij} \cdot \bar{u}_{ij} \quad (1)$$

式中： E_{eco} 为年收益； E_{ij} 为 i 电站 j 时段发电量， \bar{u}_{ij} 为 i 电站 j 时段的电价。

(2) 电量分配

$$E_{ecol}(\max) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^T (P_{ij} \cdot u_{ij}) \quad (2)$$

式中： E_{ecol} 为总收益； u_{ij} 为 j 时段 i 类型电价； P_{ij} 为 u_{ij} 电价的电量； M 为电价量； T 为时段数。

1.2 约束条件

(1) 水量平衡

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (q_{i,t} - Q_{i,t} - S_{i,t}) \Delta t \quad (3)$$

式中： $V_{i,t+1}$ 为 i 电站 t 时段末蓄水； $V_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段初蓄水； $q_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段入库流量； $S_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段弃水量； Δt 为时长。

(2) 水库蓄水量

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max} \quad (4)$$

式中： $V_{i,t,\min}$ 为 i 个电站 t 时段最小蓄水； $V_{i,t}$ 为 i 电站 t 时段蓄水； $V_{i,t,\max}$ 为 i 电站 t 时段最大蓄水量。

(3) 下泄流量

$$\begin{cases} Q_{i,t,\min} \leq q_{i,t} \leq Q_{i,t,\max} \\ S_{i,t} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Q_{i,t,\min}$ 为 i 电站 t 时最小下泄流量; $Q_{i,t,\max}$ 为 i 电站 t 时最大下泄流量。

(4) 电站机组水头

$$H_{i,\min} \leq H_{i,t} \leq H_{i,\max} \quad (6)$$

式中: $H_{i,\min}$ 和 $H_{i,\max}$ 为最小和最大水头。

(5) 电站出力

$$N_{i,\min} \leq A_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad (7)$$

式中: $N_{i,\min}$ 为最小出力; $N_{i,\max}$ 为装机容量。

2 改进遗传算法

2.1 遗传算法

遗传算法 (genetic analysis, GA) 是在达尔文进化论的启发下, 借鉴生物进化提出的启发式搜索算法。它的主要特点是直接对结构对象进行操作, 不限制目标函数能否求导和是否连续, 利用概率优化方法自动获得和指导优化的搜索空间自适应地调整搜索方向, 而不需要一定的规则。

GA 是以种群遗传机制为基础, 以自然选择为基础的检索算法。在解决 GA 问题时, 所有可能的解决方案满足目标函数都被编码为一个“染色体” (chromosome), 也就是个体, 几个个体组成一个群体 (所有可能的解决方案)。算法开始时会随机生成一个初始解, 根据目标函数评估每个个体, 并给出一个适应度函数, 根据评估结果。以适应度函数为基础, 选择部分适应性较好的个体生成下一代, 选择操作体现“适者生存”原则, 用“好”个体培育下一代, 淘汰“坏”个体。通过交叉算子和突变算子将选择的个人进行重组, 从而产生新一代的个人。上代的优良特质由此代的个人所继承, 所以上代的表现比新世代逊色, 族群也逐渐往最好的方向发展。

GA 算法的基本步骤是这样的:

Step1: 群体初始化。若干梯级每个电站的水位序列随机生成, 并在可行域范围内被选定为初始种群。

Step2: 对群体进行评估。适应度函数的选择采用惩罚函数的方法, 将当前种群中最优秀的个体用排序法保存为最优化的搜索解法。

Step3: 自选动作。根据个体在种群中的适应程度, 在种群中选择适应度较高的个体, 通过排序法, 受选择概率阈值的控制。

Step4: 十字交叉进行。选择的个体受到交叉概率阈值的控制, 从而判断是否使用均匀算术交叉产生新的交叉个体。

Step5: 变盘操作。对个体的某些基因是否进行非均匀变异操作, 用概率阈值进行控制。

Step6: 判断终止。如果不满足终止条件, 则返回 2, 反之则终止算法。

2.2 蚁群算法

蚁群算法是以蚂蚁个体仅仅根据周围的局部环境做出反应并产生相应的影响为基础, 通过信息素来完成在自然界中蚂蚁群体的觅食行为过程的模拟; 根据自身内部运行方式决定个体对环境的反应, 本质上是反应型的适应主体——蚂蚁基因的适应性表现; 根据环境进行独立选择的蚂蚁个体, 其单独的个体行为是随机的, 而通过自组织的过程, 整个蚂蚁群体形成的群体行为是高度有序的。

基本蚁群算法的求优, 根据上述假设, 反映了适应和协作两个行为要点。前者主要根据信息素不断调整自身结构, 这条路径越容易被选择, 因为通过的蚂蚁在路径上越多, 信息素的浓度越大; 反过来, 信息素浓度越低, 选择这一路径的可能性就越小; 后者与主要通过信息交流来产生更优解的学习自动机的学习机制类似。群集智能特性表现为信息正向反馈和随机全局查找, 确保了蚁群算法的有效性和先进性。尽管可能会在最优化的搜索过程中出现偏差, 但最终总会有更优化的替代方案出现, 这是随机全局搜索与扩大了蚂蚁活动范围的信息素增强蒸发之间的互动, 让蚂蚁可以接触到更多的解, 避免搜索过程过早地陷入局部优化, 而信息素的蒸发则让更糟糕的路径逐渐被抛弃。最终, 更优路径积累的信息素强度越来越大, 信息正反馈的特征就显现出来了。算法最初是用来解决旅行商问题的, 其基本步骤主要有两个: 解决蚂蚁路径构建问题和更新路径信息素, 在路径构建中, 通过局部搜索蚂蚁路径来实现路径优化的目的。

2.3 改进遗传算法

在蚁群算法计算的早期阶段, 由于初始种群建设所需的时间过长而导致信息素缺乏, 从而增加了计算的难度。因此, 可以用基因算法生成初始种群, 而不是原来的蚁群算法的输入, 指导蚁群优化方向的初始信息素也可以生成。同时, 蚁群算法在搜索后期容易陷入局部最

优解法，因此在蚁群算法完成一次迭代时，通过遗传算法的选择、交叉和变异操作来增加解法在生成的解集上的多样性，从而避免算法陷入局部收敛状态。GA-ACO 算法可以有效提高运算速度与精确度，避免过早收敛，并在全局范围内拥有强大的求优能力。改进基于遗传算法的多目标蚁群算法的求解步骤如下：

Step1：梯级电站的特征曲线和基本参数的初始化 GA 算法参数、梯级电站的初始化、末段水位的初始化、计算时段长度等。目标函数用 GA 求解，生成一组更优的解集，判断这个解集是否满足约束，否则不满足约束的个体被排除，新的解集就会产生；

Step2：对 ACO 算法参数进行初始化，将一个较优的 GA 生成解集作为 ACO 的输入，生成一个初始种群的禁忌表；

Step3：利用转移概率计算公式，应用局部信息素更新，在禁忌表格中记录下每只蚂蚁的转移概率并选择下一个节点；

第 4 步：判断一只蚂蚁的路径是否完整。如果用 ACO 得到的全局最优解作为 GA 的输入，选择，交叉，变异运算；若不能，则转入第 3 步；

Step5：利用选定的适应度函数计算遗传操作后的解集，保留目前最好的适应度解集；

第 6 步：判断迭代次数是否达到 GA 的最大值或收敛条件是否达到 GA。如果，则对全局的最优解法进行更新，对全局的信息进行清空禁忌表、更新；如果没有，就转移到第 4 步；

Step7：判断是否达到最大迭代次数的 ACO。如果是，输出的解性最好；如不能，则转入步骤 3；

第 8 步：收敛状态的输出得到满足。

3 实例计算^[9]

研究对象为具有年调节能力的下游梯级补偿调节效益显著的锦屏一级(360 万千瓦)、锦屏二级(480 万千瓦)电站，其中锦屏一级为该河段控制性水库。锦屏 II 级是一座日调节动力装置。锦屏一级电站水库正常蓄水位为 1880 米，死水位为 1830 米，引用流量最大为 2024 立方米/秒，电站综合出力系数为 8.5，锦屏二级电站水库正常蓄水位为 1646 米，死水位为 1640 米，引用流量最大为 1860 立方米/秒，电站综合出力系数为 8.65。利用算法求解出优化调度计算结果，如表 1 所示。

表 1 中长期优化调度计算结果

电站	时间	入流量/(m ³ ·s ⁻¹)	月末水位/m	发电流量/(m ³ ·s ⁻¹)	弃水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	平均出力/MW
锦屏一级电站	1月	251	1784.3	1818.34	0	721.7
	2月	286	1770.6	1807.88	0	1311.156
	3月	375	1751.22	1788.09	0	1655.775
	4月	906	1721.12	1757.36	0	2491.335
	5月	1530	1710	1746	0	2461.734
	6月	380	1773	1810.33	0	3186.612
	7月	1900	1776.55	1813.95	0	3564
	8月	2062	1786	1823.6	0	3564
	9月	1283	1785.98	1823.58	30.57	2687.652
	10月	687	1785.99	1823.59	0	1451.34
	11月	447	1786	1823.6	0	948.024
	12月	247	1783.1	1820.64	0	722.7
锦屏二级电站	1月	0	613.7	626.62	0	757.9
	2月	0	613.7	626.62	0	935.946
	3月	0	1563.7	1596.62	0	1760.517
	4月	0	613.7	626.62	0	2400.651
	5月	0	1563.7	1596.62	0	4115.133
	6月	0	1563.7	1596.62	0	4644.288
	7月	0	1563.7	1596.62	106.55	4752
	8月	0	1563.7	1596.62	38.87	4752
	9月	0	1563.7	1596.62	6.92	4752
	10月	0	1563.7	1596.62	0	3473.514
	11月	0	1563.7	1596.62	0	1872.585
	12月	0	613.7	626.62	0	1221.165

表1所示,各电厂水位变化过程是对应的,都是在汛期来临前加大泄量,在汛期结束后的一段时间进行蓄水。发挥龙头水库优势,锦屏一级电站在汛期将死水位降低到1800米,并通过蓄放水库将弃水降到最低限度。二滩电站入库流量过程因锦屏一级电站调蓄作用减缓,消落深度降低。锦屏二级电站在月末水位保持正常蓄水位不变的情况下,为日调节电站。模型和算法对结果的求解都有一定的合理性。

4 结论

本文通过改进蚁群算法求解梯级水库群优化调度问题的研究,以节约梯级水资源,增加梯级发电收入为目的,通过设计更有效的初始解获取方法,提高优化速度,通过引入邻域与禁忌搜索机制,精细化搜索空间,提高搜索质量,通过基于可行性的目标函数比较规则设计,使得算法趋向于在获取可行的解基础上寻找最优解,以有效处理约束。通过实例验证,算法为解决高维、多约束条件下梯级水库群优化调度问题,提供更高质量的优化调度结果提供一个新的思路。

参考文献

- [1]熊曦,黄绪臣.上下库水位重叠梯级水库优化调度研究[J].水科学与工程技术,2023,(06):8-10.
 - [2]汪涛,徐杨,刘亚新等.基于多种群引力粒子群算法的金沙江下游—三峡梯级水库群优化调度[J].长江科学院院报,2023,40(12):30-36+58.
 - [3]周金江,李远军.乌江干流梯级水库群基于动态因子的生态调度管理[C]//中国水力发电工程学会梯级调度控制专业委员会.中国水力发电工程学会梯级调度控制专业委员会2023年年会论文集.贵州乌江水电开发有限责任公司集控中心;,2023:8.
 - [4]金文婷,王义民,王学斌等.梯级水库群多目标协同均衡调控研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(05):1-11.
 - [5]周小青,屈星.考虑多控制断面最小流量需求的湘江流域水库群多目标联合优化调度研究[J].小水电,2023,(04):18-23+29.
 - [6]林志杭.基于改进蚁群算法的梯级水库群优化调度研究[J].通讯世界,2016,(11):162-163.
 - [7]马黎,冶运涛.梯级水库群联合优化调度算法研究综述[J].人民黄河,2015,37(09):126-132+139.
 - [8]童晓霞,孙宁宁,李亚龙.动态蚁群算法在梯级水库优化调度中的应用[J].中国农村水利水电,2014,(06):86-89.
 - [9]徐刚,邵朋昊.蚁群算法求解梯级电站短期优化调度改进研究[J].水利水电技术,2014,45(02):135-139.
- 作者简介:李国栋,1983.05,汉族,忻州市忻府区,副高职称,科技创新中心主任,太原理工大学研究生,研究方向:水库河道清淤,固废资源生态转化。
万家寨水务控股集团有限公司科技研发项目(SWJT-2022-4):智慧水务调峰节能控制系统研究。