

基于改进遗传算法的梯级水电站优化调度方法

费如君¹, 刘洋¹, 金新峰^{1*}, 尹华政², 余豪¹, 成良歌¹

¹中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙

²水电水利规划设计总院, 北京

Email: *258988544@qq.com

收稿日期: 2021年4月8日; 录用日期: 2021年5月20日; 发布日期: 2021年6月18日

摘要

梯级水电灵活性较强广泛应用于电网调峰、调频, 然而梯级水电站群约束众多, 是高度复杂的混合整数非线性规划问题, 求解难度较大。为此本文提出一种改进的遗传算法对梯级水电站进行优化求解, 针对遗传算法时效性差、容易陷入局部最优的缺点, 本文从初始解的产生、交叉变异概率选取、精英个体保存三个方面对遗传算法进行改进。以一个二级水电站为例进行验证, 结果表明, 改进后遗传算法收敛更快、求解效率更高, 只需要59.30 s, 即可得出结果; 在保证其它约束不变的情况下, 梯级水电多发45.56万kW·h。能有效满足梯级水电联合优化调度时效性与经济性的要求。

关键词

梯级水电, 遗传算法, 改进

Optimal Operation Method of Cascade Hydropower Stations Based on Improved Genetic Algorithm

Rujun Fei¹, Yang Liu¹, Xinfeng Jin^{1*}, Huazheng Yin², Hao Yu¹, Liangge Cheng¹

¹Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha Hunan

²China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing

Email: *258988544@qq.com

Received: Apr. 8th, 2021; accepted: May 20th, 2021; published: Jun. 18th, 2021

Abstract

Cascade hydropower has strong flexibility and is widely used in peak load regulation and frequency reg-

作者简介: 费如君, 出生于1984年7月, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为水文水资源、水电站水库调度、水环境等。

*通讯作者。

文章引用: 费如君, 刘洋, 金新峰, 尹华政, 余豪, 成良歌. 基于改进遗传算法的梯级水电站优化调度方法[J]. 水资源研究, 2021, 10(3): 305-311. DOI: 10.12677/jwrr.2021.103033

ulation of power grid. However, there are many constraints of cascade hydropower station group, which is a highly complex mixed integer nonlinear programming problem and difficult to solve. In this paper, an improved genetic algorithm is proposed to solve the problem of cascade hydropower stations. Aiming at the shortcomings of poor timeliness and local optimum of genetic algorithm, this paper improves the genetic algorithm from three aspects: the generation of initial solution, the selection of cross mutation probability and the preservation of elite individuals. Taking a two-stage hydropower station as an example, the results show that the improved genetic algorithm has faster convergence and higher efficiency, and it only takes 59.30 s to get the result; under the condition of keeping other constraints unchanged, the cascade hydropower station can generate 455,600 kW·h more. It can effectively meet the requirements of timeliness and economy of cascade hydropower joint optimal operation.

Keywords

Cascade Hydropower, Genetic Algorithm, Improvement

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国水能资源蕴藏丰富[1],理论上蕴藏量超过1万kW的河流超过3000条,装机容量可达5.4亿kW,年发电量可达6.1万亿kW·h。技术可开发年发电量达到2.5万亿kW·h。理论蕴藏量占全球理论蕴藏15%,技术可开发量占全球17% [2]。我国水能资源富集主要集中在大江大河干流,有助于流域梯级滚动开发,规模效益显著 [3]。目前我国形成的“十三大水电基地”,技术可开发量占全国总量51.4%。经过多年“流域开发”,我国西北、西南地区逐步形成了特大流域和干流的梯级水电站群[4]。已建好的梯级水电站群投产并网后,如何大范围优化水资源配置,发挥出最大经济效益,成为当前亟需解决的问题。

传统的优化算法一般以运筹学和最优理论为基础,较常用方法有:Lagrange 松弛法[5]、线性规划[6]、非线性规划[7]、混合整数规划[8]、动态规划算法[9] [10]等。其中动态规划算法能分阶段逐步优化,无需初始解,求解非线性、非凸问题可收敛至最优解,广泛应用于梯级水电站优化调度。但梯级水电站优化调度模型具有多阶段性、时滞性、非线性的特点,且随着电站数目的增加,为了获得更高精度的解而增加时段状态的离散数,会使计算时间层呈“指数”增加,“维数灾”的问题十分严峻[11]。

随着计算机技术的发展,为了应对“维数灾”,提高算法求解效率,部分学者采用遗传算法对梯级水电站进行优化求解[12] [13]。遗传算法模拟大自然中的生物进化规律和遗传学机理而提出的一种计算模型。通过模拟自然进化过程而寻求最优解方法。将待求解的数学问题转化为生物进化中的染色体基因的交叉、变异等过程,最终求得最优解。遗传算法在求解梯级水电站优化调度中取得了较好的结果。然而遗传算法易受初始解的影响,很容易陷入局部最优,为此本文提出了一种改进策略,对遗传算法进行改进,与改进前相比,改进后求解效率更高。

2. 求解方法与策略

2.1. 目标函数与约束条件

以梯级发电量最大为目标函数:

$$\max E = \max \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T K_m Q_{m,t} H_{m,t} \quad (1)$$

式中 T 表示调度时段个数, K_m 表示电站 m 的综合出力系数, $Q_{m,t}$ 为电站 m 在 t 时刻的发电流量, $H_{m,t}$ 为电站 m 在 t 时刻的水头。

水力约束:

一般来说, 梯级水电站具有很强的水力联系, 其上游出库流量, 直接影响到下游入库, 因此在考虑其水力约束时应当考虑其上下游水力联系, 此外还应当满足上下游水位库容约束、最大出力约束, 最大出库流量约束等。

$$\begin{cases} V_{m,t+1}^{sd} = V_{m,t}^{sd} + (Q_{m+1,t-\tau}^{ck} + Q_{m,t}^{qj} - Q_{m,t}^{ck} - Q_{m,t}^{zf} - Q_{m,t}^{sl}) \Delta t \\ Q_{m,t}^{ck} \leq Q_{m,t}^{ck} \leq \overline{Q_{m,t}^{ck}} \\ Z_{m,t} \leq Z_{m,t} \leq \overline{Z_{m,t}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V_{m,t}^{sd}$ 表示水电站 m 在 t 时刻的库容, $Q_{m+1,t-\tau}^{ck}$ 表示 m 的上游电站在 $t-\tau$ 时刻的出库流量; τ 为上游出库到达下游时间; $Q_{m,t}^{qj}$; $Q_{m,t}^{ck}$ 、 $Q_{m,t}^{zf}$ 与 $Q_{m,t}^{sl}$ 分别表示梯级水电站 m 在时刻 t 的区间入流、出库、蒸发、渗漏损失的水量; $\underline{Q_{m,t}^{ck}}$ 、 $\overline{Q_{m,t}^{ck}}$ 、 $\overline{Z_{m,t}}$ 、 $\underline{Z_{m,t}}$ 分别表示电站 m 出库下限、出库上限、水位上限、水位下限。

运行约束:

水电站在运行过程中需满足机组过流上下限约束、出力大小上下限约束:

$$\begin{cases} \max \{P_{m,i,t}^{sd}\} \leq P_{m,i}^{\max} \\ q_{m,i}^{\min} \leq q_{m,i} \leq q_{m,i}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $q_{m,i}^{\min}$ 、 $q_{m,i}^{\max}$ 表示机组 i 最小、最大过流; $P_{m,i,t}^{sd}$ 表示水电站 m 水电机组 i 在 t 时刻的出力。

2.2. 遗传算法改进策略

针对遗传算法易受初始值、交叉变异概率、精英种群的影响, 通过以下三个方面对遗传算法进行改进。

a) Logistic 映射提升初始种群质量

为了尽可能的提高种群搜索效率, 本文采取 Logistic 映射的方式初始化种群, 以提高种群的搜索效率。

$$x(t+1) = \mu x(t)(1-x(t)) \quad (4)$$

其中: $x(t)$ 为历经 t 次迭代产生的个体序列; μ 为正向可调参数。

研究表明, 为了使 Logistic 映射为混沌映射, $u \in (3.5, 4.0)$, 本文计算取 $u = 3.8$ 。由于生成的序列可能并不一定在原可行域中, 因此需要将生成种群, 限制在原可行域中, 可按式(5)对生成的种群序列进行约束。

$$y_n(1) = \underline{y} + x_n(\overline{y} - \underline{y}) \quad (5)$$

其中: \overline{y} 、 \underline{y} 分别表示原优化变量上限、下限; $y_n(1)$ 表示个体 n 的初始位置。

b) 交叉概率 P_c 与变异概率 P_m 的选取

交叉概率 P_c 的选取:

交叉概率 P_c 对新个体的产生至关重要, P_c 值过大会导致遗传算法产生的新个体结构破坏, P_c 值过小, 不易产生新个体, 遗传算法收敛速度较慢, 不易于算法的快速收敛。若在前期 P_c 值相对较大这样产生新个体的速度也就越快, 后期 P_c 值较小, 可避免前次计算最优结果遭到破坏, 为此本文提出一种自适应策略, 使得 P_c 能自适应改变。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f_{\max} - f^c)}{f_{\max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ P_{c1} & f \leq f_{avg} \end{cases} \quad (6)$$

式中 f^c 为要交叉的两个个体适应度较大的适应度值; f_{\max} 为种群中最大的适应度值; f_{ave} 为每代群体的平均适应度值; f^m 为要变异个体的适应度值; P_{c1} 、 P_{c2} 为正向可调参数, 取 $P_{c1} = 0.9$, $P_{c2} = 0.6$ 。

变异概率 P_m 的选取:

变异概率 P_m 偏小不容易产生新的个体, 偏大就变成了随机搜索。因此采用下述方式对 P_m 进行计算。

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{\max} - f^m)}{f_{\max} - f_{avg}} & f \geq f_{avg} \\ P_{m1} & f \leq f_{avg} \end{cases} \quad (7)$$

式中 f^c 为要交叉的两个个体适应度较大的适应度值; f_{\max} 为种群中最大的适应度值; f_{ave} 为每代群体的平均适应度值; f^m 为要变异个体的适应度值; P_{m1} 与 P_{m2} 为正向可调参数, 取 $P_{m1} = 0.1$, $P_{m2} = 0.001$ 。

c) 精英策略

为了不破坏适应度较高的个体, 在交叉过程中对精英个体遗传信息进行保护, 假设 M_1 ($M_1 = [m_{11}, m_{21}, \dots, m_{n1}]$) 为适应度较大的精英个体, 个体 M_1 与 M_2 交叉过程中采取如下策略:

$$\frac{M_2 \times M_1}{|M_2| \times |M_1|} \leq \left(1 - \frac{j}{m}\right)b \quad (8)$$

式中: m 为计算过程中总的迭代次数, j 为当前迭代的次数, b 为阈值。

式(8)成立则 M_1 与 M_2 执行交叉操作, 式(8)不成立则不进行交叉。

2.3. 求解流程

- 1) 编码: 采取实数编码的方式, 对梯级水电站的水位进行编码。
- 2) 初始种群的产生, 采用 Logistic 映射初始化种群。
- 3) 适应度评价, 对个体进行解码处理, 得到个体的表现型, 采用发电量最大的形式对种群的适应度进行评价。
- 4) 选择, 选择种群中适应度较高的个体, 淘汰种群中适应度较差的个体, 为了保持种群的规模一定, 淘汰的个体由交叉和变异产生的新个体替代。
- 5) 交叉, 交叉概率采用 2.2 提出的自适应策略, 对种群中的所有个体进行随机配对, 采用单点交叉的方式以概率 P_c , 随机交换个体中的部分染色体。
- 6) 变异, 采用轮盘赌的方式确定要变异的个体, 并在约束范围内随机改变梯级电站的水位。
- 7) 重复步骤 1)~6)直到迭代结束, 或最优解不再发生改变为止。

3. 算例分析

为了验证所提方法的有效性, 以天生桥一级电站(下文称电站 1)与天生桥二级电站(下文称电站 2)为例, 验证所提方法的有效性。其中电站 1 与电站 2 均以发电为主, 电站 1 位于上游, 装机容量为 1200 MW 的多年调节电站; 电站 2 位于下游装机为 1320 MW 的日调节电站。

在调度中, 梯级水电站各个参数设置如表 1 所示。采用改进前(下文称优化前)与改进后(下文称优化后)的遗传算法分别进行计算, 初始种群规模设置与发电量的关系如图 1(a)所示, 初始种群规模设置为过大, 求解过程中个别易主导全体解的进化方向, 求解效率低下, 规模过小收敛速度较慢, 故初始种群规模设置为 200; 迭代次数与耗水量之间的关系如图 1(b)所示, 当迭代次数达到 50 时, 算法已经收敛, 在计算过程中, 为了保证算法一定能够收敛, 将迭代次数设置为 500。所有仿真语言均采用 Python 语言进行编写, 运行环境主频 3.2 GHz、运行内存 16 GB、硬盘大小 500 GB、系统为 Window 系统的 ThinkPad。仿真计算 100 次, 最长计算时间 59.30 s, 可有效满足短期调度时效性要求。

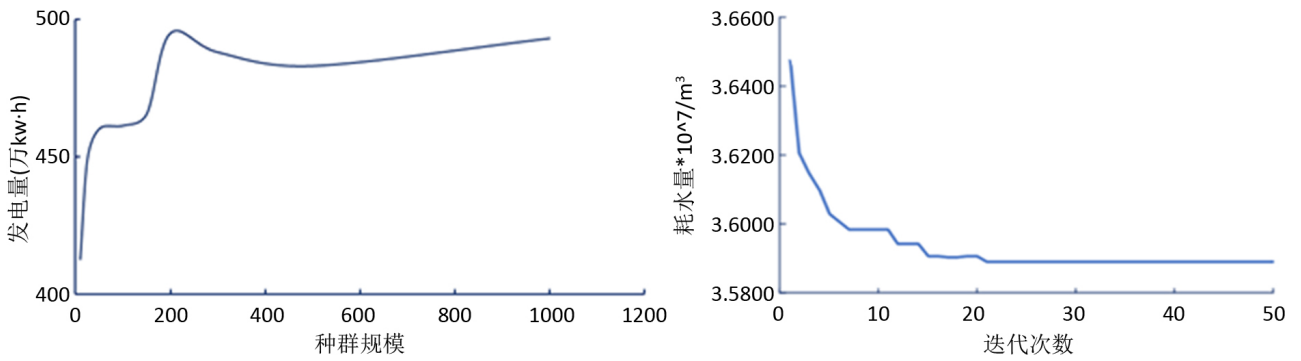


Figure 1. (a) Relationship between population size and power generation; (b) Relationship between iteration times and water consumption
图 1. (a) 种群规模与发电量的关系; (b) 迭代次数与耗水量的关系

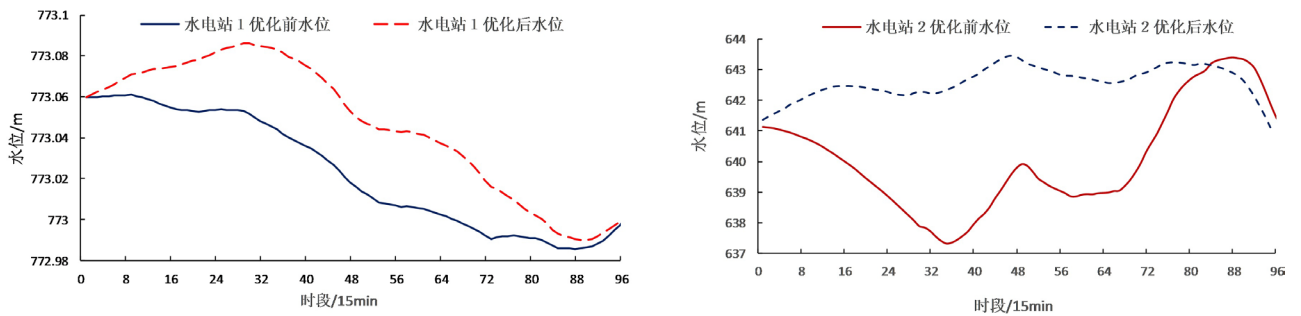


Figure 2. (a) Water level changes of Cascade Hydropower Station 1 before and after optimization; (b) Water level changes of Cascade Hydropower Station 2 before and after optimization
图 2. (a) 梯级水电站 1 优化前后水位变化情况; (b) 梯级水电站 2 优化前后水位变化情况

Table 1. Operation parameters of cascade hydropower stations
表 1. 梯级水电站运行参数

条件设置	日初水位(m)	区间流量(m ³ /s)	装机容量(MW)
水电站 1	772.06	310	1200
水电站 2	638.19	10	1320

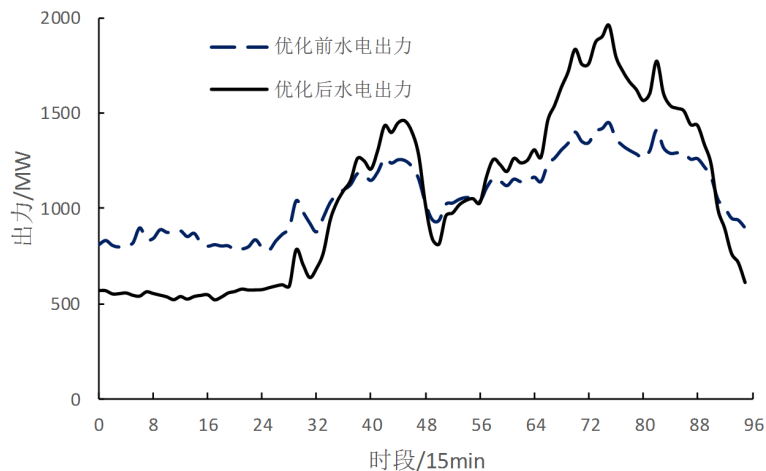


Figure 3. Output of cascade hydropower stations before and after optimization
图 3. 优前后梯级水电站出力情况

图 2 展示了优化前后梯级水电站的水位变化, 图 3 展示了梯级水电站出力变化情况, 由图 3 可知, 梯级水电站在优化前前期出力较大, 导致后期出力不足, 求解陷入局部最优; 优化后梯级水电站在前期发电量较小, 后期随着水位升高, 平均耗水率减少, 发电量增加。与优化前相比, 优化后水电多发 45.56 万 kW·h, 显著提高了发电效益。

基金项目

特别感谢“北京市水电水利规划设计总院水文气象及流域水电开发大数据平台第一阶段开发技术服务水利工程咨询项目”提供的资金支持。

参考文献

- [1] 李锐, 杜治洲, 杨佳刚, 等. 中国水电开发现状及前景展望[J]. 水科学与工程, 2019(6): 73-78.
LI Rui, DU Zhizhou, YANG Jiagang, *et al.* Present situation and prospect of hydropower development in China. *Water Science and Engineering Technology*, 2019(6): 73-78. (in Chinese)
- [2] 程春田, 武新宇, 申建建, 等. 亿千瓦级时代中国水电调度问题及其进展[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 112-123.
CHENG Chuntian, WU Xinyu, SHEN Jianjian, *et al.* Hydropower dispatching problems and its progress in China in the 100 MW era. *Journal of Water Conservancy*, 2019, 50(1): 112-123. (in Chinese)
- [3] 刘方, 张粒子. 流域梯级水电优化调度模型与方法研究综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 81-90.
LIU Fang, ZHANG Lizi. Review on optimal operation model and method of cascade hydropower in River Basin. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2017, 44(5): 81-90. (in Chinese)
- [4] 冯仲恺, 牛文静, 程春田, 等. 大规模水电系统优化调度降维方法研究 II: 方法实例[J]. 水利学报, 2017, 48(3): 270-278.
FENG Zhongkai, NIU Wenjing, CHENG Chuntian, *et al.* Study on dimensionality reduction method for optimal operation of large-scale hydropower system II: Method example. *Journal of Water Conservancy*, 2017, 48(3): 270-278. (in Chinese)
- [5] 李源, 初壮. 基于 GPU 的拉格朗日乘子优化动态经济调度[J]. 吉林电力, 2020, 48(5): 19-23.
LI Yuan, CHU Zhuang. GPU based Lagrange multiplier optimal dynamic economic dispatch. *Jilin Electric Power*, 2020, 48(5): 19-23. (in Chinese)
- [6] 陈诚. 基于随机线性规划的水库概率约束调度模型与方法[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
CHEN Cheng. Probabilistic constrained reservoir operation model and method based on stochastic linear programming. Ph.D. Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 王健. 水火电系统中长期非线性调度模型及方法研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2018.
WANG Jian. Research on medium and long term nonlinear dispatching model and method of hydro thermal power system. Ph.D. Thesis, Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [8] 申建建, 张秀飞, 王健, 等. 求解水电站日负荷优化分配的混合整数非线性规划模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 34-40.
SHEN Jianjian, ZHANG Xiufei, WANG Jian, *et al.* Mixed integer nonlinear programming model for optimal daily load distribution of hydropower stations. *Power System Automation*, 2018, 42(19): 34-40. (in Chinese)
- [9] 宋坤, 陈博, 余楷, 等. 基于动态规划算法的水电站机组组合问题求解[J]. 通信电源技术, 2017, 34(4): 133-134.
SONG Kun, CHEN Bo, YU Kai, *et al.* Solving unit commitment problem of hydropower station based on dynamic programming algorithm. *Communication Power Technology*, 2017, 34(4): 133-134. (in Chinese)
- [10] 虞青山. 水库发电调度的随机参考线方法研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
TUO Qingshan. Research on stochastic reference line method for reservoir power generation dispatching. Master's Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [11] 冯仲恺, 牛文静, 程春田, 等. 大规模水电系统优化调度降维方法研究 I: 理论分析[J]. 水利学报, 2017, 48(2): 146-156.
FENG Zhongkai, NIU Wenjing, CHENG Chuntian, *et al.* Study on dimensionality reduction method for optimal operation of large-scale hydropower system I: Theoretical analysis. *Journal of Water Conservancy*, 2017, 48(2): 146-156. (in Chinese)
- [12] 夏军, 叶超, 魏洁, 等. 计及供电成本的小水电群经济调度优化模型研究[J]. 水力发电, 2019, 45(11): 89-94.
XIA Jun, YE Chao, WEI Jie, *et al.* Study on economic dispatch optimization model of small hydropower group considering

power supply cost. *Hydropower*, 2019, 45(11): 89-94. (in Chinese)

- [13] 毕海英. 模拟退火遗传算法在水电工程施工资源均衡优化中的应用研究[J]. *水利技术监督*, 2018(5): 108-112.

BI Haiying. Study on the application of simulated annealing genetic algorithm in the construction resource balance optimization of hydropower projects. *Water Conservancy Technical Supervision*, 2018(5): 108-112. (in Chinese)