

基于鸟群算法的梯级水库群长期优化调度研究

唐红兵¹, 李崇浩¹, 黄巍¹, 王欢², 程春田²

¹中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州

²大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁 大连

收稿日期: 2022年10月12日; 录用日期: 2022年11月28日; 发布日期: 2023年2月9日

摘要

针对大规模梯级水电站群调度复杂、优化困难、求解耗时长等问题, 研究提出了一种基于鸟群算法(bird swarm algorithm, BSA)的梯级库群长期优化调度求解方法。该方法利用BSA平衡全局搜索和局部搜索的特点, 充分发挥其收敛速度快, 求解效率高的优势, 易于获得满足复杂约束的最优结果。在西南某流域梯级水电站不同典型年调度问题上的应用结果, 验证了该方法在梯级库群长期调度问题方面的求解精确性和高效性, 是一种实用性较强的有效算法。

关键词

梯级水电站, 长期调度, 全局搜索, 鸟群算法, 优化调度

Research on Long-Term Optimal Operation of Cascade Reservoir Group Based on Bird Swarm Algorithm

Hongbing Tang¹, Chonghao Li¹, Wei Huang¹, Huan Wang², Chuntian Cheng²

¹China Southern Power Grid Power Dispatching and Control Center, Guangzhou Guangdong

²Institute of Hydropower & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Received: Oct. 12th, 2022; accepted: Nov. 28th, 2022; published: Feb. 9th, 2023

Abstract

In order to solve the problems of complex operation difficulty in optimization and time-consuming solu-

作者简介: 唐红兵(1966-), 男, 硕士, 教授级工程师, 主要研究方向: 大规模水电系统经济运行, Email: tanghb@csg.cn

文章引用: 唐红兵, 李崇浩, 黄巍, 王欢, 程春田. 基于鸟群算法的梯级水库群长期优化调度研究[J]. 水资源研究, 2023, 12(1): 47-57. DOI: 10.12677/jwrr.2023.121006

tion of large-scale cascade hydropower station group, a method for long-term optimal operation of cascade reservoir group based on bird swarm algorithm (BSA) was put forward. This method utilizes BSA's characteristics of balancing global search and local search, and makes full use of its advantages of fast convergence, high efficiency of solution and easy to obtain optimal results satisfying complex constraints. The application results on different typical annual dispatching problems of cascade hydropower stations in a watershed in southwest China prove that the method is an effective and practical algorithm for solving long-term dispatching problems of cascade reservoirs.

Keywords

Cascade Hydropower Station, Long-Term Scheduling, Global Search, Bird Swarm Algorithm, Optimal Operation

Copyright © 2023 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

身蕴藏量巨大、调节性灵活等特点，在电网调峰中占据着越来越重要的地位；同时，梯级水电系统的开发能够充分地利用水电资源，对改善生态环境有着十分重要的意义。目前，随着水电资源的迅猛发展，我国已位居世界水电装机容量第一，不断增大的装机容量也使得梯级库群的优化调度求解问题变得更加的高维和复杂，求解过程变得十分艰难。如何精确高效求解大规模梯级库群的长期调度问题，保证水电系统的安全运行，已经成为一个重大难题[1]。

传统动态规划(DP)、线性规划(LP)可以有效获得高精度下的目标函数的最优解，但对于大规模水库调度问题，往往会导致求解速度缓慢，难以应用在实际调度问题中。动态规划的改进算法，如离散微分动态规划(DDDP)，随机动态规划(SDP)等，虽然对 DP 算法进行了一定程度上的改进，有效缓解了传统动态规划算法的维数灾问题，但还是难以满足实际库群调度的实时性需求。冯仲恺等人以逐步优化算法为基础，进行了算法上的改进，提出了均匀逐步优化算法，虽然有效地降低了求解的规模，一定程度避免了维数灾问题，但容易过早地陷入局部最优解[2]。除传统算法之外，智能算法由于结构简单、易于实现等特点，也被广泛地应用到梯级库群的优化调度中，如王建群等人提出狼群算法(WPS) [3]、纪昌明等人提出免疫蛙跳算法(ISFLA) [4]、徐刚等人提出了一种蚁群算法(ACO) [5]、王文川等人提出群居蜘蛛优化算法(SSO) [6]、向波等人提出了一种免疫粒子群算法(IA-PSO) [7]、钟平安等人提出了综合改进差分进化算法(UCG-MDE) [8]、明波等人提出改进布谷鸟算法(CS) [9] [10]、董亚迪提出了一种基于多 Agent 的人工鱼群算法(MAAFSA) [11]、王森等人提出了一种自适应混沌整体退火遗传算法(SCWAGA) [12] [13]等。但由于梯级库群优化调度是多维数、非线性、多阶段的优化组合问题，一般待优化的决策变量会达到百维甚至更高的高度，传统智能算法面对如此高维复杂的过程易于陷入局部最优解的情况，难以得到最优的目标值。鸟群算法(Bird Swarm Algorithm, BSA)是由 Xianbing Meng [14]等人于 2015 年提出的一种基于鸟群行为的新型生物启发式算法，其思想源于鸟群的飞行、觅食和警戒三个主要群体行为，通过鸟群之间的基本生物行为和觅食过程中的信息共享机制来完成对全局最优解的获取，该算法具有收敛速度快、鲁棒性强、收敛精度高的优势，已成功应用于多个水电调度领域，可用来改善梯级库群求解过程中维数过高、耗时过长等局限性[3]。以西南某流域大型水电基地中 7 座梯级水电站为例进行仿真模拟，以验证所提方法的合理性与有效性[4]。

2. 长期优化调度模型

2.1. 目标函数

$$\max E = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T P_{i,t} \Delta_t \quad (1)$$

$$P_{i,t} = A_i Q_{i,t} H_{i,t} \quad (2)$$

式中, E 为调度期内梯级各电站总发电量, kWh; $P_{i,t}$ 为电站 i 在 t 时段的平均出力, kW; Δ_t 为时段 t 的小时数, h; A_i 为电站 i 的出力系数; $Q_{i,t}$ 为电站 i 在时段 t 的发电流量, m^3/s ; $H_{i,t}$ 为电站 i 在时段 t 的发电水头, m; N 为梯级电站数; T 为调度时段总数, T 取 1 年; i 对应为梯级库群中的水电站序号; t 对应为调度期内的时段序号[14]。

2.2. 约束条件

1) 水量平衡方程

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + 3600 \times (Q_{i,t}^{\text{in}} - Q_{i,t}^{\text{FD}} - Q_{i,t}^{\text{q}}) \times \Delta_t \quad (3)$$

式中, $V_{i,t+1}$ 和 $V_{i,t}$ 分别为电站 i 在时段 $t+1$ 和时段 t 的初始库容, m^3 ; $Q_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{FD}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{q}}$ 分别为电站 i 在 t 时段的入库流量、发电流量、弃水流量, m^3/s , 正常情况下为了防止水力资源的浪费, 梯级库群的弃水均为 0。

2) 梯级间水力联系

$$Q_{i,t}^{\text{in}} = Q_{i,t}^{\text{area}} + Q_{i-1,t}^{\text{out}} \quad (4)$$

式中, $Q_{i,t}^{\text{area}}$ 为水电站 i 在时段 t 内的区间流量, m^3/s ; $Q_{i-1,t}^{\text{out}}$ 为水电站 $i-1$ 在时段 t 内的出库流量, m^3/s 。

3) 水库流量关系

$$Q_{i,t}^{\text{out}} = Q_{i,t}^{\text{FD}} + Q_{i,t}^{\text{q}} \quad (5)$$

式中, $Q_{i,t}^{\text{out}}$ 为水电站 i 在时段 t 内的出库流量, m^3/s 。

4) 水位约束

$$\underline{Z}_{i,t} \leq Z_{i,t} \leq \bar{Z}_{i,t} \quad (6)$$

式中, $Z_{i,t}$ 为电站 i 在时段 t 的初始水位, m; $\underline{Z}_{i,t}$ 、 $\bar{Z}_{i,t}$ 分别为电站 i 在时段 t 的水位上下限 m。

5) 始末水位控制约束

$$Z_{i,0} = Z_i^0, Z_{i,T} = Z_i^T \quad (7)$$

式中, $Z_{i,0}$ 为电站 i 的初始水位, m; Z_i^T 为电站 i 的调度期末水位 m。

6) 发电流量约束

$$\underline{Q}_{i,t}^{\text{FD}} \leq Q_{i,t}^{\text{FD}} \leq \bar{Q}_{i,t}^{\text{FD}} \quad (8)$$

式中, $\underline{Q}_{i,t}^{\text{FD}}$ 、 $\bar{Q}_{i,t}^{\text{FD}}$ 分别为电站 i 在时段 t 的发电流量上下限, m^3/s 。

7) 出库流量约束

$$\underline{Q}_{i,t}^{\text{out}} \leq Q_{i,t}^{\text{out}} \leq \bar{Q}_{i,t}^{\text{out}} \quad (9)$$

式中, $\underline{Q}_{i,t}^{\text{out}}$ 、 $\bar{Q}_{i,t}^{\text{out}}$ 分别为电站 i 在时段 t 的出库流量上下限, m^3/s 。

8) 电站出力约束

$$\underline{P}_{i,t} \leq P_{i,t} \leq \bar{P}_{i,t} \quad (10)$$

式中, $\underline{P}_{i,t}$ 、 $\bar{P}_{i,t}$ 分别为电站 i 在时段 t 的出力上下限, kW。

9) 梯级系统出力约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} \geq h_t \quad (11)$$

式中, h_t 为梯级系统在时段 t 的出力下限, kW。

10) 水位库容关系

$$Z_{i,t} = f_i^{ZV}(V_{i,t}) \quad (12)$$

式中, $f_i^{ZV}(V_{i,t})$ 为水电站 i 的水位库容函数关系。

11) 尾水位出库流量关系

$$Z_{i,t}^d = f_i^{ZQ}(Q_{i,t}^{out}) \quad (13)$$

式中, $Z_{i,t}^d$ 为水电站 i 在时段 t 的平均尾水位, m; $f_i^{ZQ}(Q_{i,t}^{out})$ 为水电站 i 的尾水位出库流量函数关系。

12) 水头计算公式

$$h_{i,t} = \frac{Z_{i,t} + Z_{i,t+1}}{2} - Z_{i,t}^d \quad (14)$$

式中, $h_{i,t}$ 为水电站 i 在时段 t 的水头, m。

13) 水头耗水率约束

$$r_{n,t} = f_{n,rh}(h_{n,t}) \quad (15)$$

式中, $f_{n,rh}(h_{n,t})$ 为水电站 n 的水头 - 耗水率函数关系。

3. 鸟群算法

3.1. 鸟群算法介绍

鸟群算法(bird swarm algorithm, BSA)是依据鸟群行为所提出的一种仿生智能优化算法, BSA 算法核心主要源于鸟群的飞行、觅食和警戒三个主要群体行为, 其中鸟群的飞行行为可以让 BSA 算法跳出局部最优进行全局搜索, 防止陷入局部最优的境地; 鸟群的觅食行为可以为 BSA 算法记录个体和群体最好的解, 鸟群觅食行为和警戒行为的随机切换可以让 BSA 算法去搜索当前局部的最优解, 而通过鸟群的飞行间隔来平衡算法全局搜索和局部搜索的能力。BSA 算法可以将规则简化描述:

1) 鸟群中的每只鸟可以在觅食和警戒行为之间随机切换。

2) 觅食期间, 每只鸟可以迅速记录与更新个体和群体之间最好的觅食经验, 这个经验将用于觅食, 群体信息将即刻共享于整个鸟群。

3) 保持警戒的时候, 每只鸟都试图向群体中心靠近, 而具有较高食物储量的鸟类更倾向于向群体中心靠近。

4) 鸟类可以周期性地向其他位置移动。当移动到另一个位置时, 鸟类一般要在生产者 and 乞讨者之间作出选择, 具有最高食物储量的鸟将成为生产者, 而具有最低食物储量的鸟将成为乞讨者, 其他鸟将随机选择成为生产者和乞讨者。

5) 生产者积极寻觅食物, 乞讨者随机跟随一个生产者寻找食物。

3.2. 基于梯级库群发电量最大模型的鸟群算法求解步骤

BSA 智能算法求解梯级库群的主要思想流程为: 以各时段水位为决策变量, 梯级发电量最大为目标函数, 鸟群在觅食和警戒下不断更新位置的行为可视为水库水位不断决策的过程, 每个位置点代表着不同时段下的水

位；将梯级库群长期优化调度中对应的各种约束以惩罚函数的形式表示[6]，鸟群在飞行过程中所记录的各个最优点就是水库水位最优离散点的组合。BSA 算法的求解流程[7]如图 1 所示：

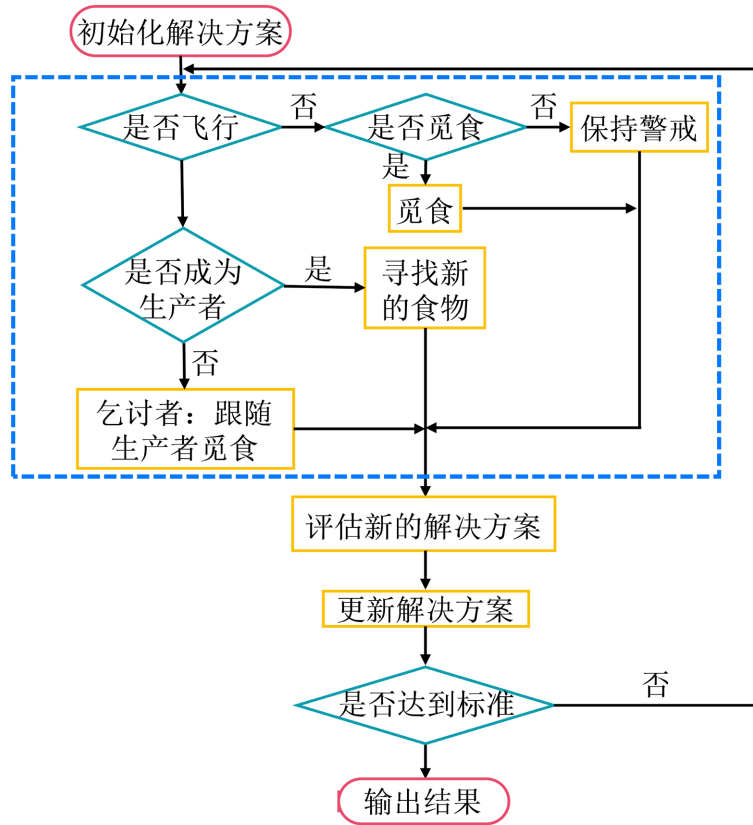


Figure 1. Solution flow of BSA algorithm
图 1. BSA 算法求解流程

4. 算例研究

4.1. 工程背景和参数设置

以我国西南地区某特大流域为背景进行研究。该流域的径流以降水量补给为主，以地下水和融雪补给为辅，每年的 6 月到 10 月为汛期，11 月到次年 5 月为枯期。同时，该流域的水电基地是集中技术力量开发的世界级的水电基地之一，在我国西电东送战略中占有着关键的席位。选择该流域电站 A、B、C、D、E、F、G，7 座梯级库群为研究对象，各电站的基本参数见表 1。这 7 座电站的总装机容量达 1234 万 kW，A、E、F 和 G 水电站属于季调节及以上的电站，调节性能较好，B 和 D 属于日调节水电站，在长期优化调度中固定发电水头，仅考虑其发电效益。

Table 1. Basic parameters of cascade reservoirs in a basin in southwest China

表 1. 西南某流域梯级库群基本参数

电站特性	正常蓄水位/m	死水位/m	保证出力/MW	装机容量/MW	最大发电流量/m ³ ·s ⁻¹	出力系数	调节性能
电站 A	1619	1586	110	1900	1638	8.5	季调节
电站 B	1477	1742	270	920	1656	8.95	日调节
电站 C	1408	1398	201	1400	1680	8.7	周调节

Continued

电站 D	1307	1303	151	900	1776	8.6	日调节
电站 E	1240	1166	1854	4200	2261	8.6	不完全多年
电站 F	994	988	788	1670	2131	—	不完全季
电站 G	899	887	—	1350	—	—	不完全季

本文采用 Python 语言编程来实现 BSA 算法在梯级库群中的长期优化调度的求解，以发电量最大为目标函数，计算参数设置如下：

- 1) 分别选择研究中梯级库群的典型枯水、平水、丰水年为调度周期，以月为计算时段；
- 2) 梯级库群上每个电站的水位约束上限为正常蓄水位，水位约束下泄为死水位；
- 3) 梯级库群上每个电站的发电流量约束上限为最大引用流量，约束下泄为 0；
- 4) 梯级库群上每个电站的出力约束上限为装机容量，出力约束下限为 0；
- 5) 模型计算中不考虑弃水作用，每个电站时段的弃水量为 0；
- 6) 长期优化调度中的发电量最大模型要求固定始末水位，不同典型年的始末水位不同。
- 7) 设置决策变量的规模 N 和维度 M；
- 8) 水位离差步长 $step = 0.1 \text{ m}$ 。

4.2. 计算结果分析

为了验证 BSA 算法的适用性，分别选取该流域梯级枯期中的典型枯水、平水、丰水年为调度周期进行模拟计算。将梯级库群多年径流的实际运行数据进行从小到大排序，按照 10%、50%、90% 的频率选取典型的丰水、平水、枯水年，最终分别选择 2019、2018、2020 为典型枯水、平水、丰水年，每个典型年份的起调水位和末水位按实际运行数据决定。由于 BSA 算法自身的寻优机制，对梯级库群长期优化调度求解时，计算过程包含一定的随机性，研究中将取 100 次的运行结果中的最大值为梯级库群的最优发电量，取 100 次的平均耗时为实际的计算耗时，这样可以有效地避免随机性对优化结果的影响[3]。最终各电站和总的发电量结果如表 2 所示，季调节以上的电站 A、电站 E、电站 F 和电站 G 的典型枯水、平水、丰水年的年内调度过程分别由表 3、表 4、表 5 所示。

Table 2. Power generation in different typical years

表 2. 不同典型年下的发电量

电站	电站 A	电站 B	电站 C	电站 D	电站 E	电站 F	电站 G	总和	求解时间
典型枯水年	77.49	47.28	65.95	45.61	218.74	75.25	72.51	602.83	26.61 s
典型平水年	84.09	52.37	73.13	51.07	240.13	82.07	79.22	662.08	25.17 s
典型丰水年	92.41	56.74	77.96	53.65	243.45	88.31	86.65	699.17	24.66 s

从表 2 中可得，BSA 算法对研究中流域上的梯级库群进行长期优化调度时，由于天然径流的大小不同，对应的典型枯水、平水、丰水年的发电量分别为 602.83 亿 kWh，662.08 亿 kWh，699.17 亿 kWh，与天然径流的大小相对应，符合该流域梯级库群实际的调度结果的[11]。BSA 算法在求解大规模梯级电站的长期调度问题时，不仅能够寻求到符合实际调度过程的全局最优值，而且寻求过程中的效率也是十分高的，从表 2 中可见三种典型年的求解耗时分别为 26.61 s，25.17 s，24.66 s，在面对如此复杂的梯级库群调度问题求解，求解效率也完全能够满足电站时效性的需求[12]。因此，无论是在求解精度还是求解效率方面，BSA 算法对于不同年份的梯级库群长期优化调度的求解都能够获得比较满意的结果，可以应用到电站的实际调度规划过程中[14]。

Table 3. Dispatching process in typical dry years
表 3. 典型枯水年电站调度过程

时段(月)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
电站 A	Z_t/m	1614.1	1619.0	1619.0	1619.0	1619.0	1619.0	1597.4	1619.0	1616.6	1619.0	1619.0	1597.3	1611.4
	P_t/MW	281.4	328.9	363.2	806.5	1076.1	1363.5	1492.3	1323.6	1518.3	984.7	822.9	230.9	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	259.4	301.0	333.0	753.0	1009.0	1368.9	1510.5	1251.3	1439.8	922.0	799.9	222.2	
电站 B	Z_t/m	1229.4	1234.5	1239.7	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1236.4	1215.4
	P_t/MW	2.0	0.0	999.8	2028.7	2738.3	3527.0	4097.6	3505.5	4081.1	2676.1	2719.0	3424.2	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	0.9	0.0	416.8	854.0	1161.0	1506.2	1759.1	1496.8	1751.8	1134.0	1174.9	1671.1	
电站 C	Z_t/m	991.57	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	991.33
	P_t/MW	0.0	15.8	348.1	690.4	922.0	1185.4	1379.7	1184.3	1369.2	909.7	940.1	1306.7	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	0.0	19.0	433.8	875.0	1177.0	1525.2	1786.1	1523.8	1771.8	1161.0	1200.9	1720.0	
电站 D	Z_t/m	894.83	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	897.12
	P_t/MW	9.6	43.2	354.2	666.1	859.4	1112.9	1342.7	1142.3	1322.5	883.4	900.4	1242.8	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	12.8	56.0	472.8	901.0	1178.0	1555.2	1892.1	1597.8	1861.8	1213.0	1237.9	1763.2	

Table 4. Dispatching process in typical normal water year
表 4. 典型平水年电站调度过程

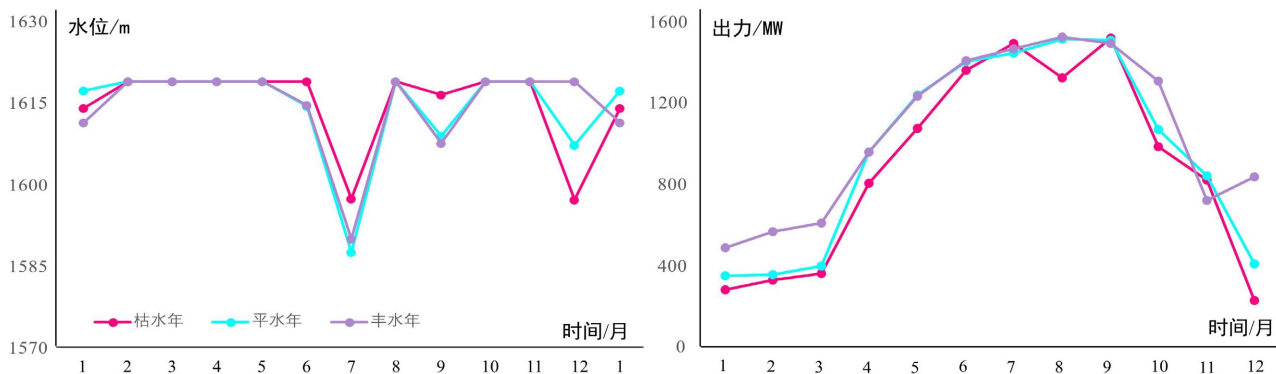
时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
电站 A	Z_t/m	1617.3	1619.0	1619.0	1619.0	1619.0	1614.5	1587.7	1619.0	1609.1	1619.0	1619.0	1607.4	1614.1
	P_t/MW	349.2	357.9	399.6	960.5	1237.7	1403.0	1443.4	1513.2	1508.1	1067.7	841.5	407.8	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	321.0	328.0	367.0	899.0	1173.3	1492.1	1502.8	1455.2	1450.1	1001.0	803.3	386.5	
电站 B	Z_t/m	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1237.9	1239.0	1240.0	1240.0	1240.0	1240.0	1229.4
	P_t/MW	912.7	992.5	1118.1	2459.7	3173.6	4059.7	3922.0	4033.5	4130.2	3004.6	2159.4	2818.1	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	379.4	413.0	466.0	1040.0	1350.9	1761.8	1709.0	1740.0	1773.7	1277.0	910.3	1263.8	
电站 C	Z_t/m	989.27	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	991.57
	P_t/MW	286.0	350.6	393.9	838.0	1072.4	1385.4	1352.4	1375.1	1398.7	1020.0	734.4	998.0	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	367.8	437.0	492.0	1067.0	1374.9	1793.8	1749.0	1780.0	1811.7	1306.0	932.3	1300.7	
电站 D	Z_t/m	895.26	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	894.83
	P_t/MW	276.1	349.9	386.8	800.9	1017.2	1301.2	1350.0	1350.0	1333.1	979.1	710.7	960.6	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	371.6	467.0	517.0	1095.0	1410.9	1829.8	1903.0	1903.0	1877.7	1354.0	964.3	1354.9	

Table 5. Dispatching process in typical wet years
表 5. 典型丰水年电站调度过程

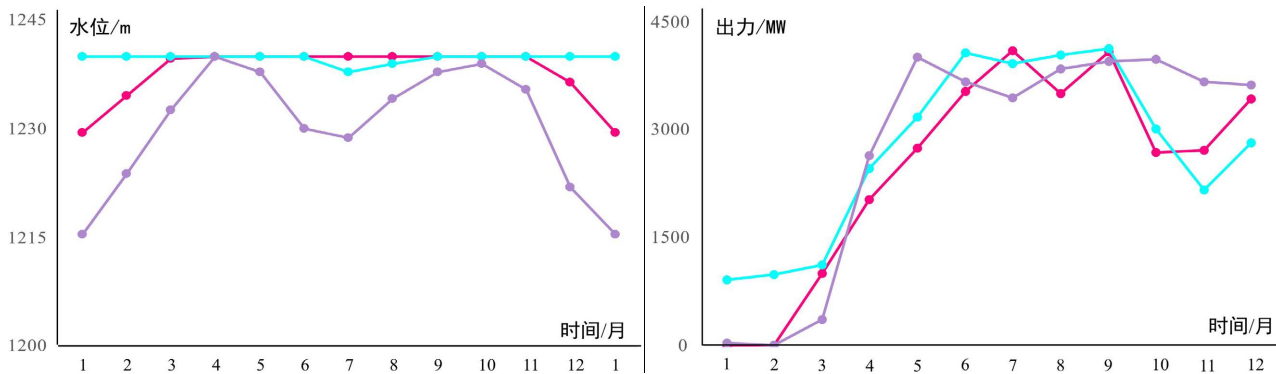
时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	
电站 A	Z_t/m	1611.4	1619.0	1619.0	1619.0	1619.0	1614.8	1590.1	1619.0	1607.8	1619.0	1619.0	1619.0	1605.4
	P_t/MW	486.5	570.2	611.1	960.5	1234.4	1409.7	1467.4	1522.9	1491.1	1310.2	720.7	839.5	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	455.2	528.0	567.0	899.0	1169.4	1477.6	1520.8	1468.1	1436.8	1233.0	672.0	804.3	

Continued

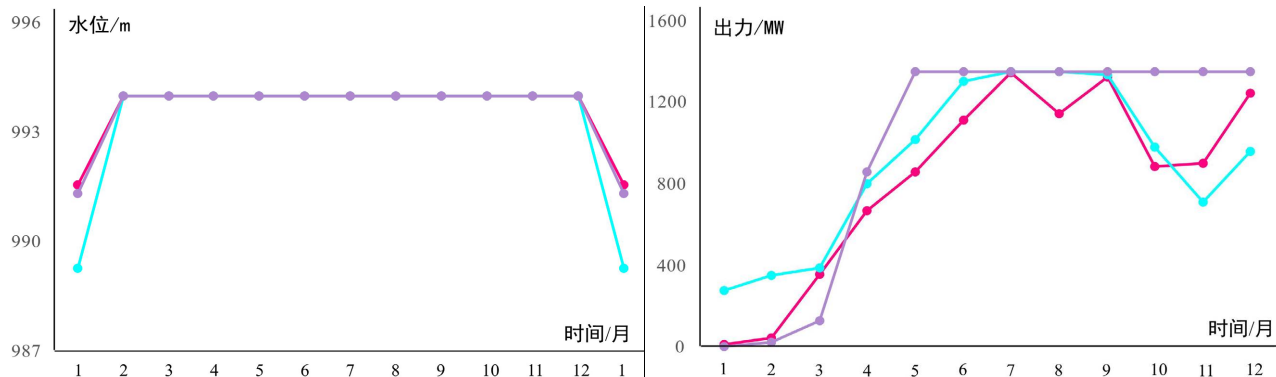
	Z_t/m	1215.4	1223.8	1232.6	1240.0	1237.9	1230.0	1228.8	1234.2	1237.8	1239.0	1235.4	1221.9	1206.4
电站 B	P_t/MW	27.1	0.2	355.9	2632.1	4005.6	3668.2	3436.5	3836.1	3951.4	3981.9	3660.9	3614.7	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	13.3	0.1	152.8	1127.3	1829.7	1747.0	1600.0	1713.9	1724.0	1759.0	1756.0	1826.7	
	Z_t/m	991.33	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	994.00	992.2
电站 C	P_t/MW	3.6	9.2	136.9	893.8	1428.6	1368.6	1272.4	1358.2	1364.2	1387.1	1383.3	1426.8	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	4.4	11.1	167.8	1140.3	1851.7	1771.0	1642.0	1756.9	1765.0	1796.0	1791.0	1870.5	
	Z_t/m	897.12	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	899.00	895.3
电站 D	P_t/MW	0.1	20.9	129.6	856.8	1349.8	1350.0	1350.0	1349.9	1350.0	1350.0	1350.0	1350.0	
	$Q^{FD}/m^3 \cdot s^{-1}$	0.1	27.1	169.8	1174.3	1902.7	1903.0	1903.0	1902.9	1903.0	1903.0	1903.0	1946.8	



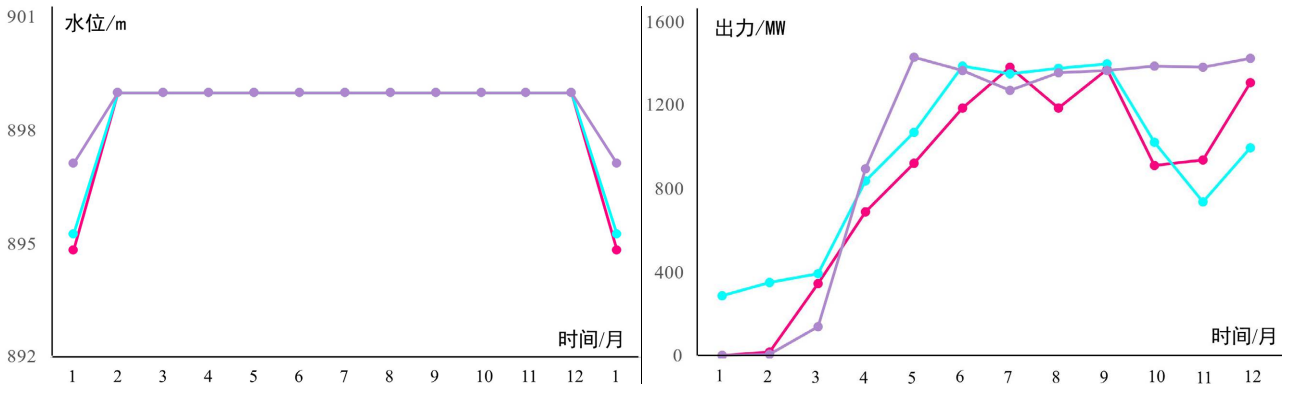
(a) 不同典型年下电站 A 的调度过程



(b) 不同典型年下电站 E 的调度过程



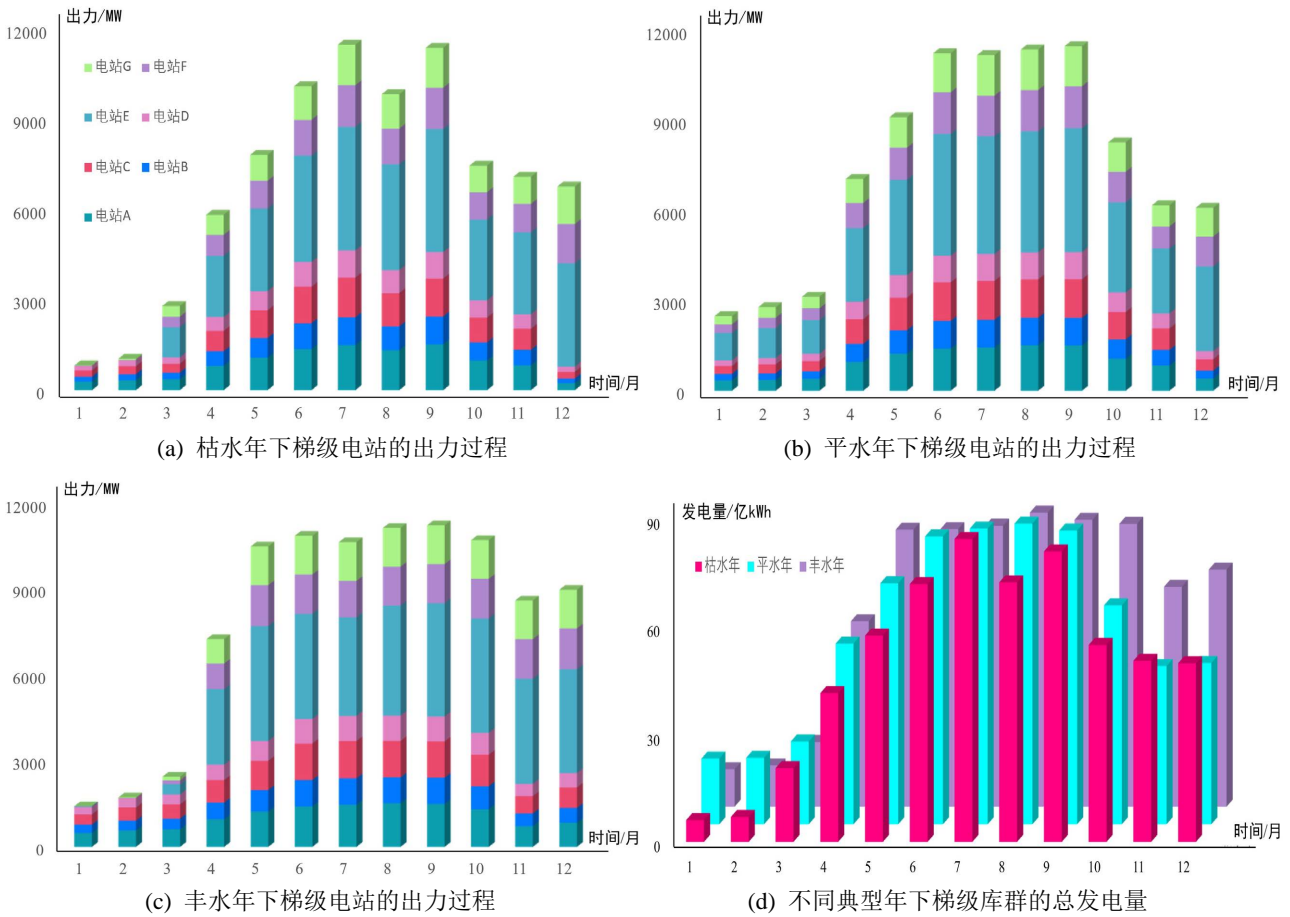
(c) 不同典型年下电站 F 的调度过程



(d) 不同典型年下电站 G 的调度过程

Figure 2. Dispatching process of hydropower power in different typical years

图 2. 不同典型年下各电站的调度过程



(a) 枯水年下梯级电站的出力过程

(b) 平水年下梯级电站的出力过程

(c) 丰水年下梯级电站的出力过程

(d) 不同典型年下梯级库群的总发电量

Figure 3. Output and power generation process of cascade reservoirs in different typical years

图 3. 不同典型年下梯级库群的出力 and 发电过程

图 2 展示 BSA 算法优化下的各梯级电站在不同典型年下的水位、出力和发电量的变化过程，从图 2 的过程中可以看出，季调节电站 A 作为本次研究中梯级库群的龙头电站，在平时保持高水头来执行发电任务之外，还需在汛期前腾空库容再蓄水，充分发挥发电站的调节能力，确保枯期时下游电站的正常运行；年调节电站 E，除了有大规模的发电机组，还有较好的调节性能，调度年份中，除了保持高水头进行发电外，在汛期，还会放

掉一部分库容,对来水进行调节,保证枯期梯级库群的正常发电;季调节电站 F 作为电站 E 的下一级,有着充足的来水流量发电,电站 G 作为本次研究中该流域梯级库群中的最后一级电站,调节性能也一般,因此,它将水头蓄满后,将来水都用来发电,整个调度期内始终以高水头的情况进行发电[3] [15] [16] [17]。图 3(a)~(c)为不同典型年下梯级库群在 BSA 算法优化下的各月出力过程,可以看出,在汛期,三种典型特征年下的梯级库群出力过程差别不大,但由于丰水年整体的天然径流量大,因此,在枯期的 10、11、12 月份,典型丰水年的出力是领先于平水年和枯水年的,是因为丰水年充分利用了天然径流的优势[18],将多余的来水流量变成了梯级库群的发电量。图 3(d)为不同典型年下梯级库群各月的总发电量[19],整个发电量过程与不同典型年下的梯级库群出力过程类似,首先在汛期三种年份的发电量相差不大,然后由于梯级水电站能够较好地利用丰水年的多余来水,因此,对应调度期内的枯期 10~12 月的总发电量也最大,对应的月份发电量也最大。

5. 结论

本文以年发电量最大作为梯级库群的目标函数,考虑梯级库群之间的复杂约束和水力耦合现象,建立了梯级库群的长期优化调度模型,并采用的 BSA 优化算法进行优化求解。结合西南某流域的 7 座梯级电站为实际工程案例,证明了 BSA 算法优化效果十分可佳,整个调度过程中梯级库群各电站的出力和水位过程始终满足要求,同时又以较高的求解效率达到了模型的目标函数,使得整个梯级年发电量增加的同时,发电效率也有一定的提高,证明了 BSA 算法的有效性和实用性,为了梯级库群长期优化调度问题的求解提供了一种有效的方法。

参考文献

- [1] 崔东文,金波.改进鸟群算法及其在梯级水库优化调度中的应用[J].三峡大学学报(自然科学版),2016,38(6):7-14.
CUI Dongwen, JIN Bo. Improved bird swarm Algorithm and its application in optimal operation of cascade reservoirs. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(6): 7-14. (in Chinese)
- [2] 冯仲恺,程春田,牛文静.均匀动态规划方法及其在水电系统优化调度中的应用[J].水利学报,2015,46(12):1487-1496.
FENG Zhongkai, CHENG Chuntian and NIU Wenjing. Uniform dynamic programming method and its application in optimal operation of hydropower system. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(12): 1487-1496. (in Chinese)
- [3] 王建群,贾洋洋,肖庆元.狼群算法在水电站水库优化调度中的应用[J].水利水电科技进展,2015,35(3):1-4.
WANG Jianqun, JIA Yangyang and XIAO Qingyuna. Application of wolf swarm algorithm in optimal operation of hydropower station reservoir. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 1-4. (in Chinese)
- [4] 纪昌明,李继伟,张新明,等.基于免疫蛙跳算法的梯级水库群优化调度[J].系统工程理论与实践,2013,33(8):2125-2132.
JI Changming, LI Jiwei, ZHANG Xinming, et al. Optimal operation of cascade reservoirs based on immune frog leaping algorithm. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8): 2125-2132. (in Chinese)
- [5] 徐刚,马光文,梁武湖,等.蚁群算法在水库优化调度中的应用[J].水科学进展,2005,16(3):397-400.
XU Gang, MA Guangwen, LIANG Wuhu, et al. Application of ant colony algorithm in reservoir optimal operation. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 397-400. (in Chinese)
- [6] 王文川,雷冠军,邱林,等.群居蜘蛛优化算法在水电站优化调度中的应用及其效能分析[J].水力发电学报,2015,34(10):80-87.
WANG Wenchuan, LEI Guangjun, QIU Lin, et al. Application of social spider optimization algorithm in optimal operation of hydropower station and its efficiency analysis. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(10): 80-87. (in Chinese)
- [7] 向波,纪昌明,罗庆松.免疫粒子群算法及其在水库优化调度中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2008(2):198-202.
XIANG Bo, JI Changming and LUO Qingsong. Immune particle swarm optimization algorithm and its application in reservoir optimal operation. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008(2): 198-202. (in Chinese)
- [8] 钟平安,张卫国,张玉兰,赵云发.水电站发电优化调度的综合改进差分进化算法[J].水利学报,2014,45(10):1147-1155.
ZHONG Pingan, ZHANG Weiguo, ZHANG Yulan and ZHAO Yunfa. Comprehensive improved differential evolution algorithm for optimal generation scheduling of hydropower stations. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10): 1147-1155. (in Chinese)

- [9] 明波, 黄强, 王义民, 等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3): 341-349.
MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Research on optimal operation of cascade reservoirs based on improved cuckoo algorithm. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3): 341-349. (in Chinese)
- [10] 明波, 黄强, 王义民. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库长期优化调度研究[J]. 水利水电快报, 2015, 36(4): 9-13.
MING Bo, HUANG Qiang and WANG Yimin. Study on long-term optimal operation of cascade reservoirs based on improved cuckoo algorithm. Express Water Resources & Hydropower Information, 2015, 36(4): 9-13. (in Chinese)
- [11] 董亚迪. 梯级水电站群中长期优化调度的多 Agent 进化算法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
DONG Yadi. Research on Multi Agent Evolutionary Algorithm for medium and long term optimal operation of cascade hydropower stations. Master's Thesis, Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] 王森, 程春田, 武新宇, 等. 自适应混沌整体退火遗传算法在水电站群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2014, 33(5): 63-71.
WANG Sen, CHENG Chuntian, WU Xinyu, et al. Application of adaptive chaotic global annealing genetic algorithm in optimal operation of hydropower stations. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 63-71. (in Chinese)
- [13] 李文武, 刘江鹏, 蒋志强, 等. 基于 HSARSA(λ)算法的水库长期随机优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 53-57.
LI Wenwu, LIU Jiangpeng, JIANG Zhiqiang, et al. Based on HSARSA(λ) study on long-term stochastic optimal operation of reservoirs based on algorithm. Water Resources and Power, 2020, 38(12): 53-57. (in Chinese)
- [14] MENG, X.-B., GAO, X. Z., LU, L. H., et al. A new bio-inspired optimisation algorithm: Bird swarm algorithm. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 2015, 28(4): 1-15.
- [15] 张伊, 张明华, 卢振鹏. 一种改进的梯级水电站多目标长期优化调度模型[J]. 通信电源技术, 2017, 34(4): 148-150.
ZHANG Yi, ZHANG Minghua and LU Zhenpeng. An improved multi-objective long-term optimal operation model for cascaded hydropower stations. Telecom Power Technology, 2017, 34(4): 148-150. (in Chinese)
- [16] 张宇航, 唐超, 姚李孝. 基于改进粒子群算法的梯级水电站长期优化调度研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(6): 59-63.
ZHANG Yuhang, TANG Chao and YAO Lixiao. Research on long-term optimal operation of cascade hydropower stations based on improved particle swarm optimization algorithm. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(6): 59-63. (in Chinese)
- [17] 余玉娇. 基于粒子群算法的水库调度函数的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
YU Yujiao. Research on reservoir operation function based on particle swarm optimization algorithm. Master's Thesis, Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [18] 汪明清, 牛文静, 廖胜利. 基于遗传-蚁群算法的库群长期优化调度[J]. 水电能源科学, 2013, 33(11): 49-52, 194.
WANG Mingqing, NIU Wenjing and LIAO Shengli. Long-term optimal scheduling of reservoir group based on genetic ant colony algorithm. Water Resources and Power, 2013, 33(11): 49-52, 194. (in Chinese)
- [19] 赵晓凤, 翁朝晖, 陈华. 基于改进肾脏算法的梯级水库长期发电优化调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(3): 179-185.
ZHAO Xiaofeng, WEN Chaohui and CHEN Hua. Research on long-term optimal operation of cascade reservoirs based on improved kidney algorithm. China Rural Water and Hydropower, 2021(3): 179-185. (in Chinese)