

基于改进人工鱼群-粒子群算法的梯级水库群 多目标优化调度算法

张侃侃^{1,2}, 赵海峰³, 王兆才^{1,3}

(1. 水能资源利用关键技术湖南省重点实验室; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司; 3. 上海海洋大学信息学院)

摘要:为解决梯级水库群优化调度中高维度、非线性的复杂优化问题,提出了一种两阶段多目标改进人工鱼群-粒子群(TMIAFS-PSO)算法。该算法采用分段映射扩展初始种群的搜索空间,通过调整自适应步长和引入多样化移动策略来增强局部和全局搜索能力;采用两阶段过滤策略,保留符合约束条件的粒子,并加入改进人工鱼群优化策略,进一步扩大粒子搜索范围。金沙江下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝梯级水库群实例验证结果表明,相较于其他算法,TMIAFS-PSO 算法的帕累托解集表现出更好的收敛性和均匀性,体现了该算法的优越性,并通过分析 TMIAFS-PSO 算法所生成调度方案的水位变化,总结出该梯级水库群相对稳定的优化调度方案。

关键词:梯级水库群优化调度;改进人工鱼群-粒子群算法;帕累托解集;多目标优化算法

A multi-objective optimal operation algorithm of cascade reservoirs based on improved artificial fish swarm-particle swarm optimization algorithm//Zhang Kankan^{1,2}, Zhao Haifeng³, Wang Zhaocai^{1,3} (1. Hunan Provincial Key Laboratory of Hydropower Development Key Technology; 2. POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited; 3. College of Information, Shanghai Ocean University)

Abstract: To address the high-dimensional and nonlinear complex optimization problems in the optimal operation of cascade reservoirs, a two-stage multi-objective improved artificial fish swarm-particle swarm optimization (TMIAFS-PSO) algorithm was proposed. This algorithm employs segmented mapping to expand the search space of the initial population, and enhances local and global search capabilities by adjusting the adaptive step size and introducing a diversified movement strategy. Additionally, the algorithm adopts a two-stage filtering strategy to retain particles that meet the constraint conditions and incorporates an improved artificial fish swarm optimization strategy to further expand the particle search range. A case study was conducted on the cascade reservoir group consisting of Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba in the lower reaches of the Jinsha River. The results indicate that, compared to other algorithms, the Pareto solution set of the TMIAFS-PSO algorithm exhibits better convergence and uniformity, demonstrating the superiority of this algorithm. By analyzing the water level variations of the operation schemes generated by the TMIAFS-PSO algorithm, a relatively stable optimal operation scheme for this cascade reservoir group is summarized.

Key words: optimal operation of cascade reservoirs; improved artificial fish swarm-particle swarm optimization algorithm; Pareto solution set; multi-objective optimization algorithm

梯级水库群优化调度是指在多个相邻且相互影响的水库之间,通过优化决策达到整体水利效益最大化^[1]。梯级水库群的合理调度可提高水资源的利用效率^[2],有效预防和减轻洪涝干旱等灾情造成的不利影响^[3],有助于实现水电资源利用的最大化,满足社会对清洁能源的需求^[4]。同时,梯级水库群优化调度可以维持水生生态系统的需水流量,对保护水生

态环境、促进生态文明建设有着重要意义^[5]。梯级水库群优化调度需要综合考虑各种约束条件和优化目标,是一项复杂的、多目标的经济和技术问题^[6]。随着梯级水库数量增加,决策变量呈指数级增长,引发“维数灾”困境,因此必须采用合适的优化算法和调度策略。水库调度问题作为一类优化问题,受到学者的广泛关注,其求解方法已从最初的

基金项目:水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金面上项目(PKLHD202304);教育部人文社科规划基金项目(24YJAZH167);国家自然科学基金项目(11701363)

作者简介:张侃侃(1985—),男,高级工程师,博士,主要从事智能水利研究。E-mail:kkzhang68@163.com
通信作者:王兆才(1979—),男,副教授,博士,主要从事水文预报和梯级水库优化调度研究。E-mail:zcwang@shou.edu.cn

线性规划发展到非线性规划、动态规划等^[7]。近年来,随着智能优化算法的不断发展和完善,其在水库调度问题中的应用日益广泛。相比传统的优化算法,智能优化算法具有更强的适应性和鲁棒性,能够更好地处理多目标、多约束和高维度问题,也能够更有效地应对水库调度问题中的复杂性挑战^[8-10]。例如:王奇等^[11]关注多水库水电系统的最优策略选择问题,采用改进的智能水滴(IWD)算法研究梯级水库群调峰调度,验证了算法的高效性;许婷婷^[12]改进了遗传算法(GA),并将其应用于洪水季节的水库调度,以加强洪水控制能力并确保地区安全;汪涛等^[13]利用粒子群(PSO)算法确定了水库系统对洪水排放的初始解决方案,有效满足了水库的防洪泄洪和安全管控需求。串并联水库群调度是一种具有高维度、非线性、多目标等特性的复杂优化问题,无法简单地采用常规的优化算法求解,不少学者提出了多目标智能优化算法^[14-15],如刘百灵等^[16]的第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)、金文婷等^[17]的多目标粒子群(MPSO)算法、王福岭^[18]的差分演化算法(DEMO)、吴芸^[19]的帕累托储存式动态维度搜寻(PA-DDS)等。

大规模的梯级水库群调度问题的复杂性远超传统的单一水库调度,它涉及多个目标、约束和维度,且决策变量数量随水库规模扩大呈指数级增长。在面对如此复杂的问题时,简单地引入一种智能优化算法往往难以满足多目标优化的需求。为有效应对该问题,本文提出了两阶段多目标改进人工鱼群-粒子群(TMIAFS-PSO)算法,并以金沙江下游梯级水库群为研究对象,将该算法与传统的单一优化算法进行比较,以期更好地兼顾多个目标之间的平衡,提高梯级水库调度问题的解决效率和准确度。

1 模型和方法

1.1 梯级水库群优化调度模型

梯级水库群优化调度模型的目标函数包括梯级水库总发电量最大、梯级电站最小出力最大、最小下泄流量最大,其函数形式分别为:

$$F_1 = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I K_i Q_{it} H_{it} \Delta t \quad (1)$$

$$F_2 = \max \left(\min_i \sum_{i=1}^I K_i Q_{it} H_{it} \right) \quad (2)$$

$$F_3 = \max(\min_i q_{it}) = \max[\min_i (Q_{it} + Q_{Ait})] \quad (3)$$

式中: T 为调度时段的总数量; I 为电站的总数量; K_i 为电站 i 的输出系数; Q_{it} 为电站 i 在时段 t 的发电流量; H_{it} 为电站 i 在时段 t 的发电水头(水位); Δt 为计算时间步长; q_{it} 为电站 i 在时段 t 的排水流量;

Q_{Ait} 为电站 i 在时段 t 的弃水流量。

采用综合方法,以水量平衡、水位、下泄流量、电站输出、上下游梯级水库流量关系和非负约束等6个条件作为限制因素。

a. 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{it} + (Q_{lit} - Q_{it} - Q_{Ait}) \Delta t \quad (4)$$

式中: V_{it} 为电站 i 在时段 t 的水库储量; Q_{lit} 为时段 t 内流入电站 i 的流量。

b. 水位约束:

$$Z'_{it} \leq Z_{it} \leq Z''_{it} \quad (5)$$

式中: Z_{it} 为电站 i 在时段 t 的水库水位; Z'_{it} 、 Z''_{it} 分别为电站 i 在时段 t 的水库水位的下限和上限,其中下限通常对应死水位,上限通常对应正常蓄水位或洪水限制水位。

c. 下泄流量约束:

$$Q'_{it} \leq Q_{it} + Q_{Ait} \leq Q''_{it} \quad (6)$$

式中: Q'_{it} 、 Q''_{it} 为电站 i 在时段 t 的最小和最大下泄流量。

d. 电站输出约束:

$$N_{imin} \leq K_i Q_{it} H_{it} \leq N_{imax} \quad (7)$$

式中: N_{imin} 、 N_{imax} 分别为电站 i 的保证输出和装机容量。

e. 上下游梯级水电站流量约束:

$$q_{it} = Q_{i-1,t-1} + Q_{Ai-1,t-1} + Q_{lit} \quad (8)$$

f. 非负约束:

式(1)~(8)中的所有变量均为非负数。

1.2 改进人工鱼群-粒子群(IAFS-PSO)算法

人工鱼群(AFS)算法基于鱼群行为模型,通过鱼群的觅食行为来求解优化问题。本文将人工鱼的位置向量(对应梯级水库调度的决策变量,如水位、下泄流量)代入梯级水库多目标函数计算得到适应度值,其值越高表示对应调度方案的综合效益越优。由于AFS算法局部搜索能力较强,但全局探索能力不足,为此本文通过与具有全局搜索能力的PSO算法进行融合,并对AFS算法引入自适应步长、多样化移动策略,形成“AFS局部精细搜索与PSO全局快速探索”的协同框架,提升算法的寻优效果。

1.2.1 自适应步长策略

引入自适应步长策略,使步长能够根据迭代次数动态调整。算法在初期使用较大的步长以加快全局搜索速度,而在后期使用较小的步长以精细调节搜索过程,从而提高搜索的有效性和收敛性,步长计算公式为:

$$\gamma_h = \gamma_{min} + (\gamma_{max} - \gamma_{min}) (h_{max} - h) / h_{max} \quad (9)$$

式中: γ_h 为当前迭代的步长; γ_{min} 为最小步长; γ_{max}

为最大步长; $h_{\max}$ 为最大迭代次数; h 为当前迭代次数。

1.2.2 多样化移动策略

引入多样化移动策略,使鱼群在搜索过程中具有更多的移动选择,而不局限于朝向邻居鱼移动或随机移动,从而增加搜索的多样性,有助于避免陷入局部最优解,提高算法的全局搜索能力,鱼群的位置更新公式为:

$$X_i = X_i + \gamma \delta \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (10)$$

式中: X_i 为第 i 条鱼的位置; γ 为步长; δ 为移动方向; p 为种群数量。在移动时,根据邻居鱼的适应度决定移动方向,如果邻居鱼的适应度更高,则朝向邻居鱼移动一定的步长;否则,随机选择一个方向移动一定的步长,以增加搜索的多样性。

1.2.3 考虑邻居鱼的适应度

在更新个体行为时,根据邻居鱼的适应度决定是否朝向邻居鱼移动。这样可以使得鱼群更加倾向于向适应度更高的方向移动,从而增强搜索的导向性,有助于更快地发现更优的解决方案,鱼群的位置更新公式为:

$$X_i = X_i + \gamma \delta \theta_i \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (11)$$

式中: θ_i 为第 i 条鱼的舒适度因子。在这种情况下,舒适度因子可以根据鱼的个体特征和周围环境进行计算,以影响其移动方向和步长,可以使得鱼在移动时更加智能化和适应环境。

1.2.4 与 PSO 算法融合

PSO 算法是一种常用的智能优化算法^[19],具有较好的全局搜索能力,能够在解空间中高效搜索,快速定位潜在最优解。而 AFS 算法则擅长局部搜索,能够在已知解附近进行精细调节。由于两种算法在搜索过程中采用了不同的搜索策略和更新规则,结合起来可以在解空间中形成更丰富的搜索路径,有助于克服局部最优解陷阱,增加算法的全局搜索能力,并且提高算法的鲁棒性,其流程见图 1。

1.3 TMIAFS-PSO 算法

尽管 IAFS-PSO 算法在解决某些问题方面表现出了非常好的优化效果,但是梯级水库问题通常涉及多个目标的优化。如果将原始算法直接应用于多目标优化问题,结果可能会偏向于单一目标的最优值,导致其他目标值处于不稳定状态。为了解决这个问题,本文提出了 TMIAFS-PSO 算法。TMIAFS-PSO 算法是在 IAFS-PSO 算法基础上,针对梯级水库多目标优化(发电、防洪、生态等)与强约束条件(水量平衡、水位、流量限制等)的特殊性,通过两阶段过滤策略(第一阶段处理约束违规解,第二阶段扩展可行解搜索范围)和帕累托解集构建,将单目标优化算法扩展至多目标场景。

第一阶段的重点是寻找不符合约束条件的解决方案。这些解决方案可能会违反水位、流量或功率输出等约束条件。为解决这个问题,时间段被分为两部分:前一个月的水位和后一个月的水位。根据式(12)~(14)的描述,有一定概率会增加前一个月的水位或减少后一个月的水位。

若 $r_1 \leq 0.4$:

$$X_u^{(k)} = X_u^{(k)} + r_2(X_{\max} - X_u^{(k)}) \quad (12)$$

若 $0.4 < r_1 \leq 0.6$:

$$X_u^{(k)} = X_u^{(k)} + r_2(X_{\max} - X_u^{(k)})$$

$$X_{i+1,t}^{(k)} = X_{i+1,t}^{(k)} - r_3(X_u^{(k)} - X_{\min}) \quad (13)$$

若 $r_1 > 0.6$:

$$X_{i+1,t}^{(k)} = X_{i+1,t}^{(k)} - r_3(X_u^{(k)} - X_{\min}) \quad (14)$$

式中: r_1, r_2, r_3 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; $X_u^{(k)}$ 为第 i 个粒子在第 k 次迭代期间的位置,此时为第 t 个月; $X_{\max}, X_{\min}$ 分别为当前粒子位置的最大值和最小值。

在第二阶段,为了扩大可行解的探索范围,首先选择一个随机分割点将解向量分成前部和后部两部分;然后按一定随机概率,以相同的值增加或减少前部或后部的水位;接着计算目标函数,如果得到了更好的解决方案,则用新的解决方案替换原始解决方

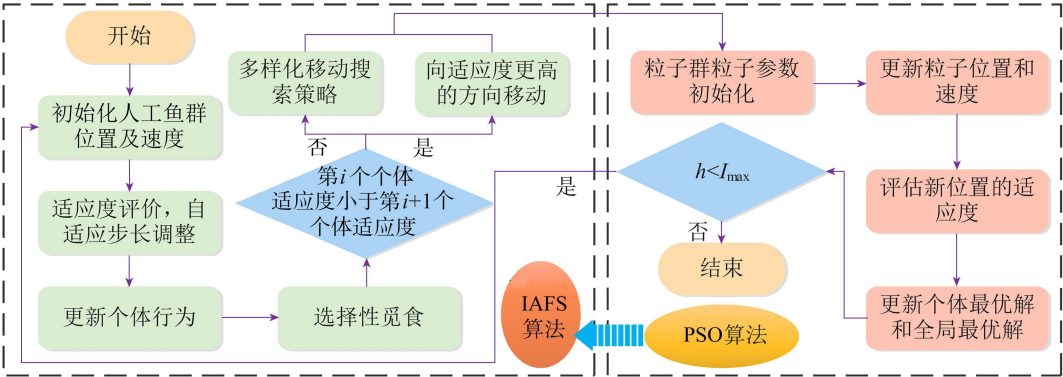


图 1 IAFS 算法与 PSO 算法融合的流程

案,否则保持不变。计算过程为:

$$C = \begin{cases} (C_1^1, C_2^1, \cdots, C_{n-1}^1, C_n^1, C_{n+1}^0, \cdots, C_N^0) & r_4 < 0.5 \\ (C_1^0, C_2^0, \cdots, C_{n-1}^0, C_n^1, C_{n+1}^1, \cdots, C_N^1) & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

$$Y_i = \begin{cases} Y_i - r_5 C(X_{\max} - X_{\min}) & r_6 < 0.5 \\ Y_i + r_5 C(X_{\max} - X_{\min}) & r_6 \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

式中: r_4, r_5, r_6 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; C_k^1, C_k^0 分别表示数字 1 和 0; Y_i 为第 i 个粒子的解向量。

1.4 多目标优化算法性能比较

帕累托解集是多目标优化问题中独有的概念,它是指在多个决策目标的情况下,不能再通过优化任何一个目标来进一步改进解的同时,没有进一步降低其他目标。因此,帕累托解集质量是评价多目标优化算法性能的重要指标。本文通过以下 3 个指标对算法的帕累托解集质量作出评价:

- a. 超体积指标 (HV), 用于衡量个体所占据的空间范围,以全面评估解集的收敛性和多样性^[20]。
- b. 多次运行所得的目标函数最优值的平均值,以有效消除由于随机性引起的波动影响,从而提供对算法稳定性和一致性的评估。
- c. 解集覆盖指标,用于识别解集之间的差异性和相似性,通过比较不同算法生成的解集之间的重叠程度,评估这些算法在探索解空间时的多样性和全面性^[21]。

2 实例验证

2.1 研究区概况

金沙江位于长江上游,长约 3 500 km,沿途落差高达 5 100 m,占据了长江主流落差的 95% 以上,因而金沙江流域拥有极为丰富的水力资源。目前金沙江下游依次建设了乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝

4 个大型水电站,总装机容量接近 5 000 万 kW,形成了一个庞大且复杂的梯级水电系统。对该梯级水库群的优化调度,既可以提高水电能源的利用效益,也可以降低水涝干旱灾害带来的不利影响,同时也能保障通航能力以及生态环境的安全。

2.2 优化结果

2.2.1 帕累托解集对比评价

基于 GB/T 22482—2008《水文情报预报规范》,计算 1979—2022 年金沙江下游屏山站年径流距平百分率 (P),选取 1990 年 ($P = 22.7\%$, 丰水年)、1996 年 ($P = -2.8\%$, 平水年)、2011 年 ($P = -22.3\%$, 枯水年) 作为典型年份。所选年份涵盖高、中、低来水条件,且年内径流分配符合金沙江“汛期集中、枯季平稳”的特性(汛期径流量占比 72%~78%),以全面验证算法在不同水文场景下的调度性能。表 1 为本文建立的 TMIAFS-PSO 算法与常见的多目标算法(遗传算法 (GA)、非支配排序遗传算法 (NSGA-II)、IAFS-PSO 算法)在丰水年、平水年和枯水年寻优的帕累托解集结果。

较大的 HV 值对应更完整的帕累托前沿,表明解集的收敛性和分布更好。由表 1 的 HV 值可知,在丰水年, TMIAFS-PSO 算法实现了 8.28×10^{10} 的 HV 值,总体表现良好,而 NSGA-II 的 HV 值为 6.53×10^{10} ,表现较差;在平水年, TMIAFS-PSO 算法实现了 7.02×10^{10} 的 HV 值,同样表明总体表现良好,而 GA 的 HV 值为 4.25×10^{10} ,表现较差。在这两年中, TMIAFS-PSO 算法都优于其他算法。在枯水年, IAFS-PSO 算法实现了 3.64×10^{10} 的 HV 值,总体表现良好,并且与 TMIAFS-PSO 算法的值非常接近。这是因为在枯水年,可调节流量大大减少,导致调节空间有限,并且水位相对接近,从而导致数值差异较小。

2.2.2 梯级水库调度模型目标值分析

由表 1 中不同算法下的目标函数值可知,

表 1 不同算法下的 HV 和目标函数最优值

水平年	算法	HV/ 10^{10}	平均最优值		
			总发电量/(亿 kW·h)	最小出力/MW	最小下泄流量/(m^3/s)
丰水年	GA	8.04	2 076.31	14 597.90	2 655.62
	NSGA-II	6.53	2 080.58	13 474.91	2 315.42
	IAFS-PSO	7.35	2 073.23	15 011.81	2 692.39
	TMIAFS-PSO	8.28	2 085.45	15 692.81	2 863.17
平水年	GA	4.25	1 882.09	12 441.69	1 815.78
	NSGA-II	5.64	1 884.38	13 985.26	2 143.01
	IAFS-PSO	6.74	1 883.24	14 731.41	2 461.64
	TMIAFS-PSO	7.02	1 890.15	15 775.28	2 628.03
枯水年	GA	2.73	1 631.24	11 314.11	1 481.03
	NSGA-II	2.85	1 628.71	11 573.43	1 513.91
	IAFS-PSO	3.64	1 631.35	12 384.61	1 792.94
	TMIAFS-PSO	3.57	1 636.07	13 224.97	1 896.11

注:各目标最优值为帕累托解集中单一目标的最大值;所有数值均为 20 次独立运行的平均值,标准差小于 5%。

TMIAFS-PSO 算法一直优于其他 3 个算法。同时,随着径流量的减少,梯级水库总发电量也相应减少,减少幅度均在 200 亿 kW · h 左右。梯级水库最小出力在丰水年和平水年保持相对稳定,但在枯水年下降显著。这是因为减少的径流导致各机组无法以全负荷运行。最小下泄流量目标函数总体上也在逐渐减小。然而,由于算法性能和变化幅度不同, TMIAFS-PSO 与 IAFS-PSO 算法接近,明显高于 GA 和 NSGA- II 算法。总之, TMIAFS-PSO 算法获得的解集比其他算法获得的解集更接近真实的帕累托前沿,并且表现出良好的收敛性和均匀分布性。

表 2 展示了不同算法之间的解集覆盖情况。在丰水年、平水年和枯水年中, TMIAFS-PSO 算法获得的非支配解集与 GA、NSGA- II 和 IAFS-PSO 算法获得的非支配解集之间的覆盖率值均在 0. 738 和 1 之间。这意味着尽管其他 3 种算法中的某些解可能对 TMIAFS-PSO 算法中的某些解来说是非支配的,但大多数情况下, TMIAFS-PSO 算法中的解都能够支配其他 3 种算法中的解。这表明,相较于 GA 和 NSGA- II 算法, IAFS-PSO 算法获得的非支配解集的质量更高。

表 2 不同算法的解集覆盖率

水平年	算法	GA	NSGA- II	IAFS-PSO	TMIAFS-PSO
丰水年	GA		0. 881	0. 260	0
	NSGA- II	0. 081		0. 291	0
	IAFS-PSO	0. 482	0. 143		0
	TMIAFS-PSO	0. 840	0. 738	0. 812	
平水年	GA		0	0	0
	NSGA- II	1		0. 253	0. 009
	IAFS-PSO	0. 851	0. 286		0. 009
	TMIAFS-PSO	1	0. 738	1	
枯水年	GA		0. 014	0	0
	NSGA- II	0. 429		0	0
	IAFS-PSO	1	1		0
	TMIAFS-PSO	1	1	0. 745	

从上述评价指标结果可以看出, TMIAFS-PSO 算法相较于原始的 IAFS-PSO 算法有所改进,提升了非支配解集的质量,并且能够提供更准确的结果。这种改进主要体现在约束处理和精度方面,使得 TMIAFS-PSO 算法在解决多目标优化问题时更加可

靠。因此,综合考虑各算法的性能和适用性, TMIAFS-PSO 算法在处理复杂的多目标优化问题时表现更好,它能够更快地收敛到全局最优解,产生的解集更均匀,覆盖的解空间更广泛,是解决梯级水库群调度等实际问题的有效工具。

2.3 优化调度结果

为进一步分析水库调度过程的特点,进行了各种方案的比较,包括总发电量最大、最小出力最大、最小下泄流量最大以及三目标平衡方案。具体的方案分配细节见表 3。图 2~4 分别展示了不同方案下丰水年、平水年、枯水年各个水库对应的水位变化过程。

由图 2~4 可知,平水年和枯水年的水位变化模式与丰水年类似。相比丰水年,溪洛渡和向家坝水库的水位变化幅度减小。进一步观察到,在丰水年,总发电量最大值为 2085. 45 亿 kW · h,最小出力最大值为 15692. 81 MW,最小下泄流量最大值为 2863. 17 m³/s。在平水年,总发电量最大值为 1890. 15 亿 kW · h,最小出力最大值为 16038. 18 MW,最小下泄流量最大值为 2511. 50 m³/s。而在枯水年,总发电量最大值为 1636. 07 亿 kW · h,最小出力最大值为 13224. 97 MW,最小下泄流量最大值为 1896. 11 m³/s。此外,不同方案下每个水库的水位变化存在差异。总体而言,平衡方案下的水位变化相对缓慢,趋势明显。

在水位变化方面,虽然每个水库和不同方案的水位整体上呈现同步的增长和下降趋势,但是它们的水位变化幅度存在一定的差异。以乌东德水库为例,从 1 月初到 4 月初,各方案水位变化基本相似,但到了 4 月,不同方案之间出现差异,随后在 7 月初到 12 月初又重新同步。类似地,向家坝水库在各方案下的趋势基本相似,但在 1 月初到 5 月初的水位变化幅度明显不同。另外,就水位变化的频率而言,最小下泄流量最大方案的水位变化更为频繁,与其他方案有明显区别。

综合分析显示,平衡方案在考虑了所有 3 个目标的情况下,可能无法达到每个单独目标的最大值,

表 3 不同方案下的目标函数值

方案	丰水年			平水年			枯水年		
	总发电量/ (亿 kW · h)	最小出力/ MW	最小下泄流 量/(m ³ /s)	总发电量/ (亿 kW · h)	最小出力/ MW	最小下泄流 量/(m ³ /s)	总发电量/ (亿 kW · h)	最小出力/ MW	最小下泄流 量/(m ³ /s)
总发电量最大	2085. 45	10215. 37	2745. 94	1890. 15	12135. 55	1792. 30	1636. 07	9823. 40	1246. 10
最小出力最大	2064. 43	15692. 81	1250. 26	1875. 84	15182. 11	1965. 36	1620. 40	13224. 97	1462. 69
最小下泄流量最大	2069. 34	14613. 23	2863. 17	1883. 10	14954. 79	2511. 50	1627. 05	11373. 01	1896. 11
平衡方案	2081. 22	15265. 92	2803. 67	1884. 59	16038. 18	2457. 85	1629. 75	12632. 00	1783. 50

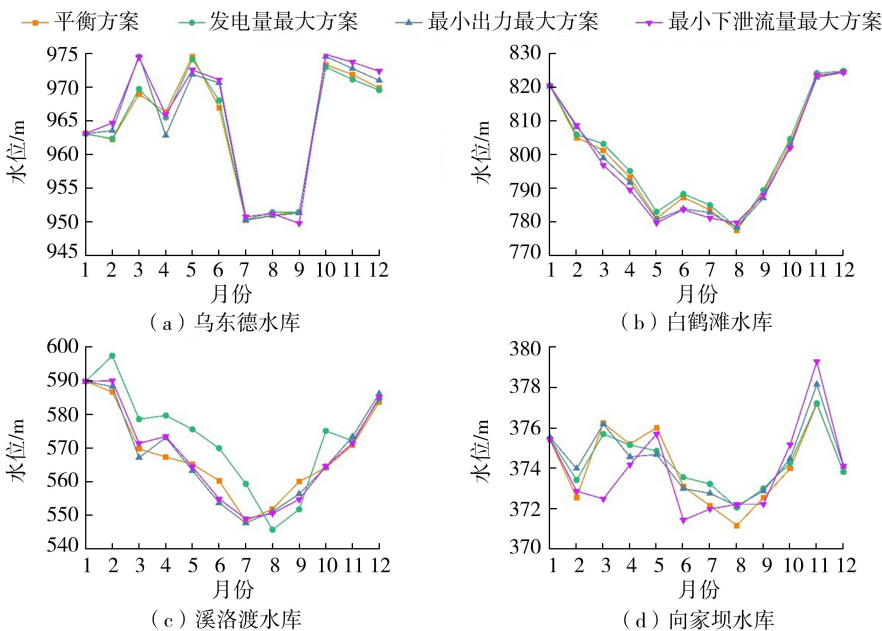


图2 丰水年不同方案下各水库的水位变化

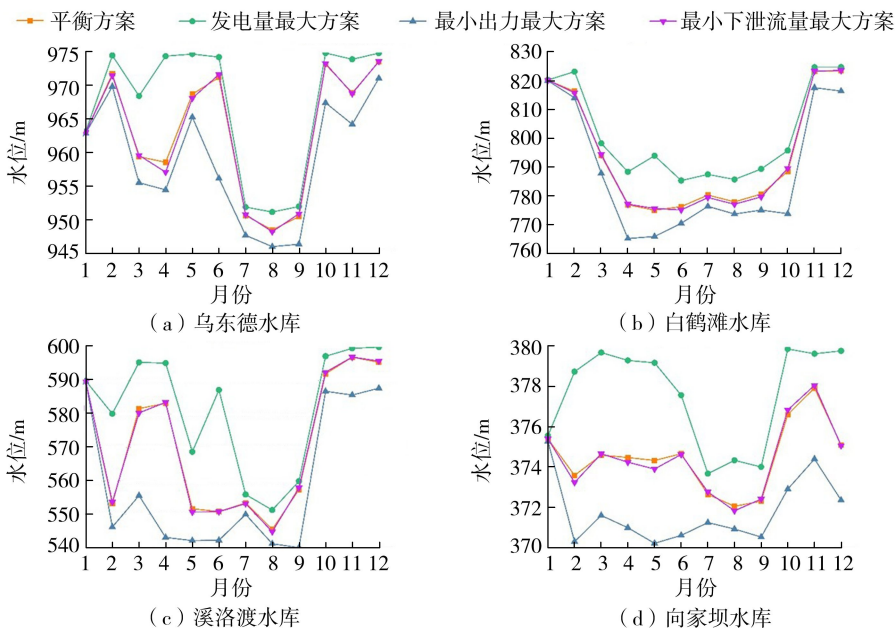


图3 平水年不同方案下各水库的水位变化

但会相对平衡地考虑所有目标,从而产生相对较好的结果。在丰水年、平水年和枯水年,总发电量、最小出力和最小下泄流量呈现递减趋势。丰水年的目标值普遍高于平水年,而平水年的目标值则高于枯水年。这表明水位变化与水资源的利用密切相关,对水库的调度和管理具有重要意义。

总体而言, TMIAFS-PSO 算法在应对复杂的多目标水库调度问题时表现出了较高的适应能力,超过了 NSGA-II 和 IAFS-PSO 等其他算法。这一结果反映了 TMIAFS-PSO 算法在优化过程中具有更有效地探索解空间、更好地平衡多个竞争性目标的能力。与传统的单目标最大化方法相比, TMIAFS-PSO 算

法能够在考虑多个目标时提供更全面的解决方案,克服了单目标最大化方法在满足其他目标时可能出现的不足。

值得注意的是,在多目标优化中,常常存在着目标之间的权衡和折中。尽管单目标最大化方法可以在特定目标上取得最佳结果,但往往会忽视其他目标的影响,导致在整体效益上可能并不理想。相反,采用平衡方案时,虽然不能将每个目标最大化,但能够更好地综合考虑多个目标,以达到整体效益的最优化。这种平衡和折中的思想是多目标优化中的关键,也是 TMIAFS-PSO 等算法成功应对复杂问题的重要原因之一。

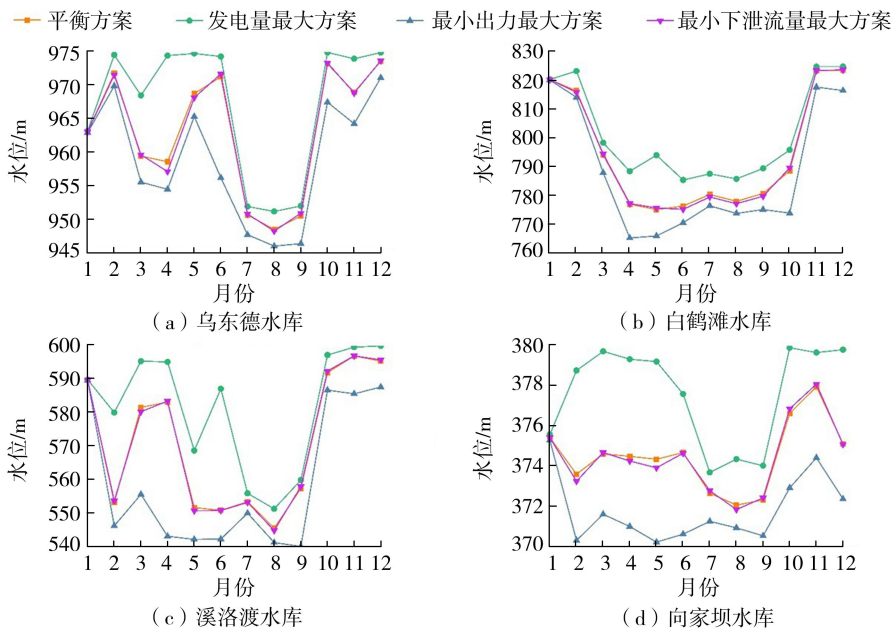


图4 枯水年不同方案下各水库的水位变化

3 结 语

本文针对梯级水库群建立了多目标联合调度模型,并提出了两阶段多目标改进人工鱼群-粒子群(TMIAFS-PSO)算法,该算法结合了AFS算法和PSO算法的优势,以应对梯级水库系统的复杂性和多目标性。金沙江下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝梯级水库群实例验证结果表明,TMIAFS-PSO算法在解集分布、收敛性和解集质量等方面,相较于其他算法均取得了显著的改进,可为梯级水库系统的优化调度提供更可靠、更有效的解决方案。

参考文献:

[1] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 1-3. (Li Guoying. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization[J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(3): 1-3. (in Chinese))

[2] 黄何骄龙, 刘兵, 杨广, 等. 基于二层规划的玛纳斯灌区山区-平原水库群联合调度[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(2): 209-216. (Huang Hejiaolong, Liu Bing, Yang Guang, et al. Joint operation of mountainous-plain reservoirs group based on bilayer programming in Manas River Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(2): 209-216. (in Chinese))

[3] 艾学山, 郭佳俊, 穆振宇, 等. 梯级水库群多目标优化调度模型及CPF-DPSA算法研究[J]. 水利学报, 2023, 54(1): 68-78. (Ai Xueshan, Guo Jiajun, Mu Zhenyu, et al.

Research on multi-objective optimal operation model of cascaded hydropower system and CPF-DPSA algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(1): 68-78. (in Chinese))

[4] Ni Xiaokuan, Dong Zengchuan, Jia Wenhao, et al. A novel method for measuring interaction among multiple objectives in reservoir operation using niche theory[J]. Water Science and Engineering, 2025, 18(1): 78-89.

[5] Sharifazari S, Sadat-Noori M, Rahimi H, et al. Optimal reservoir operation using Nash bargaining solution and evolutionary algorithms [J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(4): 260-268.

[6] 黄显峰, 吴志远, 李昌平, 等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 1-7. (Huang Xianfeng, Wu Zhiyuan, Li Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 1-7. (in Chinese))

[7] 孙平, 王丽萍, 蒋志强, 等. 两种多维动态规划算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1327-1335. (Sun Ping, Wang Liping, Jiang Zhiqiang, et al. Application of two multi-dimensional dynamic programming algorithms in optimization of cascade reservoirs operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1327-1335. (in Chinese))

[8] 唐红兵, 李崇浩, 黄巍, 等. 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. (Tang Hongbing, Li Chonghao, Huang Wei, et al. Research on long-term optimal operation of cascade reservoir group based on bird swarm algorithm[J]. Journal of Water Resources Research, 2023, 12(1): 47-57. (in Chinese))

[9] 黄显峰,王宁,刘志佳,等. 基于改进 NSGA-Ⅱ算法的梯级水库多目标优化调度[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):51-58. (Huang Xianfeng, Wang Ning, Liu Zhijia, et al. Multi-objective optimal operation of cascade reservoirs based on improved NSGA-Ⅱ algorithm [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(4):51-58. (in Chinese))

[10] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等. 考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J]. 水利水电科技进展,2025,45(4):67-75. (Zhao Ziwei, Yang Zhe, Zhang Quanwang, et al. Joint optimal operation of cascade reservoirs considering forecast uncertainty [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025,45(4):67-75. (in Chinese))

[11] 王奇,邢龙,简铁柱,等. 基于改进智能水滴算法的梯级水库群调峰调度研究[J]. 水电能源科学,2023,41(4):97-101. (Wang Qi, Xing Long, Jian Tiezhu, et al. Research on peak shaving scheduling of cascade reservoir groups based on improved intelligent water drop algorithm [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(4):97-101. (in Chinese))

[12] 许婷婷. 梯度交叉实数编码遗传算法及其在梯级水库优化调度中的应用[D]. 武汉:华中科技大学,2021.

[13] 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. (Wang Tao, Xu Yang, Liu Yaxin, et al. Optimal operation of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River to the Three Gorges based on multi-group gravitational particle swarm algorithm [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023,40(12):30-36. (in Chinese))

[14] 夏燕. 梯级水库群发电-生态协同调度混合量子粒子群算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.

[15] 乔英. 梯级水库群多目标优化调度研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2020.

[16] 刘百灵,李仓水,刘芳业. 基于 NSGA-Ⅲ的黄河上游梯级水库多目标调度研究[J]. 人民黄河,2022,44(4):140-144. (Liu Bailing, Li Cangshui, Liu Fangye. Study on multi-objective operation of cascade reservoirs in the upper reaches of the Yellow River based on NSGA-Ⅲ [J]. Yellow River,2022,44(4):140-144. (in Chinese))

[17] 金文婷,王义民,畅建霞,等. 黄河中下游水资源多目标利益对古贤水库运行的响应[J]. 水利水电科技进展,2024,44(1):52-59. (Jin Wenting, Wang Yimin, Chang Jianxia, et al. Response of water resources multi-objective interests in middle-lower Yellow River to Guxian Reservoir operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024,44(1):52-59. (in Chinese))

[18] 王福岭. 基于协同差分演化算法的梯级水库短期发电优化调度研究[J]. 中国农村水利水电,2013(6):145-148. (Wang Fuling. Research on the application of co-differential evolution algorithm to the optimal operation of cascade reservoirs in a short time [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(6):145-148. (in Chinese))

[19] 吴芸. 实值优化问题的元启发式优化算法研究与应用[D]. 武汉:武汉大学,2021.

[20] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance assessment of multiobjective optimizers: an analysis and review [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003,7(2):117-132.

[21] 周颖,周研来,鲁圆圆. 基于碳减排的梯级水库消落期多目标水碳调度研究[J]. 水生态学杂志,2024,45(1):18-25. (Zhou Ying, Zhou Yanlai, Lu Yuanyuan. Multi-objective water-carbon operation of cascaded reservoirs in the drawdown period based on carbon emission reduction [J]. Journal of Hydroecology, 2024,45(1):18-25. (in Chinese))

(收稿日期:2025-03-13 编辑:俞云利)

(上接第 37 页)

[14] 党发宁,刘云贺,陈军强,等. 浑水渗流理论及其工程应用[J]. 中国科学: E 辑 技术科学,2006(9):1029-1036. (Dang Faning, Liu Yunhe, Chen Junqiang, et al. Muddy water seepage theory and its application [J]. Science in China: Series E Technological Sciences, 2006(9):1029-1036. (in Chinese))

[15] 王霜,陈建生,钟启明. 多层堤基结构管涌动态发展的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2021,41(6):39-45. (Wang Shuang, Chen Jiansheng, Zhong Qiming. Numerical study on dynamic development process of piping in multi-stratum dike foundations [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(6):39-45. (in Chinese))

[16] 高俊,党发宁,丁九龙,等. 考虑初始固结状态影响的软基固结计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3189-3196. (Gao Jun, Dang Faning, Ding Jiulong, et al. Research on soft soil consolidation calculation method considering the impacts of initial consolidation state [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1):3189-3196. (in Chinese))

[17] Xue Haibin, Dang Faning, Li Yanlong, et al. Development of piping analysis method for embankment including time-dependent change in permeability coefficient [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(6):40210901-40210906.

[18] 刘杰,温彦锋,谢定松,等. 土石坝渗流控制基本原理与反滤层设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2022:17. (收稿日期:2025-03-04 编辑:熊水斌)