

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241928

基于 NSGA-III 算法的黄河上游梯级水库多目标优化调度及方案优选

张红涛¹, 王逸飞^{1,2}, 李新杰^{2,3}, 李传利^{1,2,3}

(1. 华北水利水电大学电气工程学院, 河南 郑州 450045; 2. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 河南 郑州 450003; 3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 黄河上游龙羊峡水库和刘家峡水库具有年调节能力, 承担着黄河流域洪凌防治、供水灌溉、发电等综合利用任务, 需通过构建梯级水库多目标优化调度来实现多目标的协调一致。构建了以最大削峰率、发电总量和平均排沙比最大为目标的龙羊峡—刘家峡梯级水库多目标调度模型, 利用 NSGA-III 算法进行了模型求解, 并分析防洪、发电和排沙目标之间的竞争关系。基于构建的梯级水库多目标优化调度方案评价指标体系和 TOPSIS 法对调度方案集进行优选。结果表明, 发电与防洪目标之间存在明显竞争关系; 排沙与防洪目标无明显竞争关系; 排沙与发电目标存在一定竞争关系。通过对比优选方案和实际调度相关数据可知, 优选方案的防洪、发电和排沙效益较实际调度分别提高 20.89%、16.02%、3.61%。

关键词: 梯级水库; NSGA-III; 多目标调度; 方案优选

中图分类号: TV697.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)09-0212-04

1 引言

龙羊峡水库是黄河上游唯一的一座多年调节水库, 与刘家峡水库联合调度, 控制着黄河流域近一半的水量(图 1), 承担着黄河流域洪凌防治、供水灌溉、发电等综合利用任务, 各目标之间存在竞争关系, 需要通过构建梯级水库多目标优化调度来实现多目标协调一致, 因此水库调度模型求解和方案优选对黄河流域水资源高效利用和水库综合效益发挥具有重要意义^[1-2]。NSGA 系列算

法^[3]作为一种基于 Pareto 支配关系解决多目标优化问题的智能算法, 在黄河流域的龙羊峡、刘家峡和小浪底等水库多目标优化调度模型的建模和求解中得到了广泛应用^[4-6]。随着模型复杂程度的提高, NSGA-II 存在局部搜索能力弱、效率低等缺陷。为此, 本文采用 NSGA-III 算法对构建的龙羊峡—刘家峡梯级水库多目标优化调度模型进行求解, 探究防洪、排沙和发电效益之间的关系。在调度方案评价优选中, 各目标权重分配是否合理将直接影响评价结果的可靠性, 单一的主、客观权重赋值法存在一定局限性^[7]; 为提高优选方案的合理性, 结合 AHP 法、熵权法和最小相对熵原理确定指标的组合同权重, 采用基于组合同权重的 TOPSIS 法^[8]对调度方案进行优选, 以期为黄河上游梯级水库多目标优化调度方案制定提供决策依据。

2 梯级水库多目标优化调度模型

2.1 目标函数

(1) 最大削峰率最大。其表达式为:

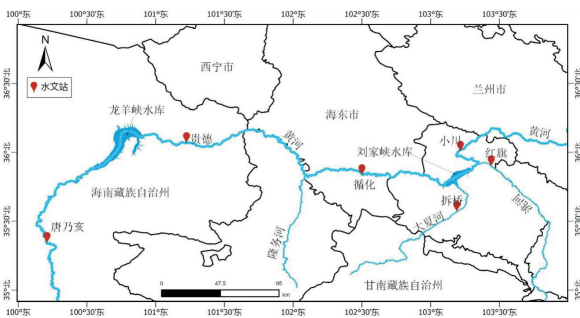


图 1 水库位置图

Fig. 1 Reservoir location map

收稿日期: 2024-10-13, 修回日期: 2024-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2243236, 52309091); 河南省重点研发与推广专项(232102110265)

作者简介: 张红涛(1977-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为智能控制, E-mail: 39583633@qq.com

通讯作者: 李新杰(1977-), 男, 博士、正高级工程师, 研究方向为水资源系统分析和水库优化调度, E-mail: xin_wd@163.com

$$\max F_1 = \max \left(\frac{Q_{1,t}^{\text{in}} - Q_{N,t}^{\text{out}}}{Q_{1,t}^{\text{in}}} \right) \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

式中, F_1 为防洪效益目标, $F_1 \in [0, 1]$; $Q_{1,t}^{\text{in}}$ 为第 1 座水库在第 t 时段的平均入库流量, m^3/s ; $Q_{N,t}^{\text{out}}$ 为第 N 座水库在第 t 时段的平均下泄流量, m^3/s ; N 为水库总数; T 为调度时段总数。

(2) 发电总量最大。其表达式为:

$$\begin{cases} \max F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (N_{i,t} \Delta t) & i = 1, 2, \dots, N \\ N_{i,t} = 9.81 \eta_i Q_{i,t}^g \Delta H_{i,t} \end{cases} \quad (2)$$

式中, F_2 为发电效益目标, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $N_{i,t}$ 为第 i 座水电站在第 t 时段的平均出力, kW ; Δt 为调度时段长度, h ; η_i 为第 i 座水电站水轮机的效率; $Q_{i,t}^g$ 为第 i 座水电站在第 t 时段的平均发电引用流量, m^3/s ; $\Delta H_{i,t}$ 为第 i 座水电站在第 t 时段的平均发电水头, m 。

(3) 平均排沙比最大。其表达式为:

$$\max F_3 = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{S_{i,t}^{\text{out}}}{S_{i,t}^{\text{in}}} \quad (3)$$

式中, F_3 为排沙效益目标, $S_{i,t}^{\text{out}}$ 、 $S_{i,t}^{\text{in}}$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段的平均出库、入库沙量, 10^4t 。

2.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。其表达式为:

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

式中, $V_{i,t}$ 、 $V_{i,t+1}$ 分别为第 i 座水库在第 t 、 $t+1$ 时段的初蓄水量, m^3 ; $Q_{i,t}^{\text{out}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{in}}$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段的平均下泄和入库流量, m^3/s 。

(2) 水位约束。其表达式为:

$$Z_{i,t}^{\text{min}} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\text{max}} \quad (5)$$

式中, $Z_{i,t}$ 为第 i 座水库在第 t 时段的平均水位, m ; $Z_{i,t}^{\text{max}}$ 、 $Z_{i,t}^{\text{min}}$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段的水位上、下限, m 。

(3) 下泄流量约束。其表达式为:

$$Q_{i,t}^{\text{min}} \leq Q_{i,t}^{\text{out}} \leq Q_{i,t}^{\text{max}} \quad (6)$$

式中, $Q_{i,t}^{\text{max}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{min}}$ 分别为第 i 座水库在第 t 时段的出库上、下限流量, m^3/s 。

(4) 出力约束。其表达式为:

$$N_{i,t}^{\text{min}} \leq N_{i,t} \leq N_{i,t}^{\text{max}} \quad (7)$$

式中, $N_{i,t}^{\text{max}}$ 、 $N_{i,t}^{\text{min}}$ 分别为第 i 座水电站在第 t 时段的出力上、下限, kW 。

(5) 梯级水库间的流量平衡约束。黄河上游龙羊峡以上河段来沙量甚微, 而刘家峡水库的泥沙主要源于龙羊峡至刘家峡河段中下游的干流及洮河等支流。因此, 可忽略龙羊峡以上河段来沙量, 不考虑梯级水库间的沙量关系, 仅考虑其水力

联系。其表达式为:

$$Q_{i+1,t}^{\text{in}} = Q_{i,t}^{\text{out}} + q_{i,t} \quad (8)$$

式中, $Q_{i+1,t}^{\text{in}}$ 为第 $i+1$ 座水库在第 t 时段的平均入库流量, m^3/s ; $Q_{i,t}^{\text{out}}$ 为第 i 座水库在第 t 时段的平均出库流量, m^3/s ; $q_{i,t}$ 为第 i 、 $i+1$ 座水库之间的河段在第 t 时段的区间流量, m^3/s 。

(6) 变量非负约束。式(4)~(8)所有变量均为非负变量。

3 NSGA-III 算法

NSGA-III 是在 NSGA-II 的基础上改变选择机制, 基于参考点对个体进行选择, 且保持了 NSGA-II 的大致框架, 其核心操作如下: ① 参考点设置。在 M 维目标空间中, 如果一个 $(M-1)$ 维超平面沿着每个目标进行 p 次划分, 则生成的参考点数 H 为:

$$H = \binom{M+p-1}{p} \quad (9)$$

② 标准化目标空间。首先计算种群对应每个目标函数的最小值 z_i^{min} , 构成理想点集 $(z_1^{\text{min}}, z_2^{\text{min}}, \dots, z_M^{\text{min}})$, 并将所有目标值 z_i 减去 z_i^{min} ; 然后计算出各个目标轴的截距; 最后通过理想点和截距完成标准化计算。③ 关联操作。在目标空间中, 将原点与参考点的连线定义为参考线; 然后计算个体到参考线的距离; 最后选取并关联距离各个体最近的参考线。

NSGA-III 的算法流程见图 2。

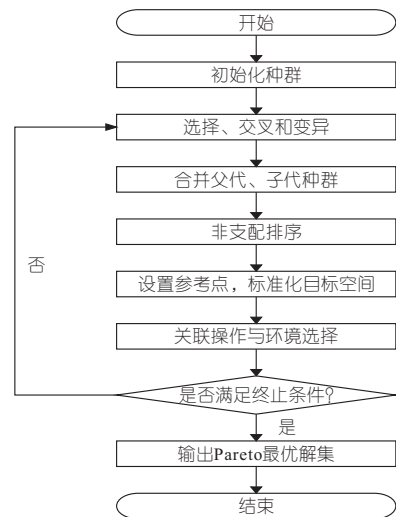


图 2 NSGA-III 算法流程图

Fig. 2 NSGA-III algorithm flowchart

4 计算结果与分析

选取 2019 年作为典型丰水年, 以 7 月 1 日至

8月31日为调度期,采用NSGA-III求解所建模型。NSGA-III参数设置种群大小为210,最大迭代次数为800,交叉、变异概率分别为0.8、0.2,交叉、变异分布指数均为20,并得到调度方案集。

在所得198个调度方案中,最大削峰率的最大值为0.8949,最小值为0.6053;发电总量的最大值为 $37.7783 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,最小值为 $36.9859 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$;平均排沙比的最大值为0.9874,最小值为0.9524。

绘制出Pareto散点图(图3)。由图3可知,最大削峰率、发电总量和平均排沙比存在一定竞争关系,即一个目标改变会导致其他两个目标的变化。

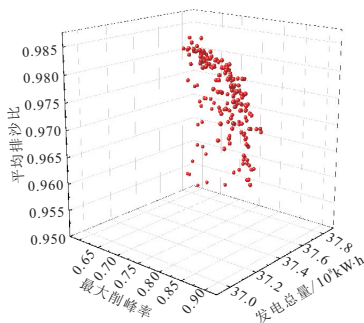


图3 Pareto散点图

Fig. 3 Pareto scatter plot

为进一步分析防洪、发电和排沙目标之间的竞争关系,将Pareto散点图投影至各坐标轴对应的二维平面,见图4。由图4(a)知,当平均排沙比一定时,随着最大削峰率的增加,发电总量呈现明显减少趋势,当最大削峰率从最小值0.6053增加到最大值0.8949时,发电总量从最大值 $37.7783 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 减小到最小值 $36.9859 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,因此发电与防洪目标之间存在明显竞争关系;由图4(b)知,当发电总量一定时,平均排

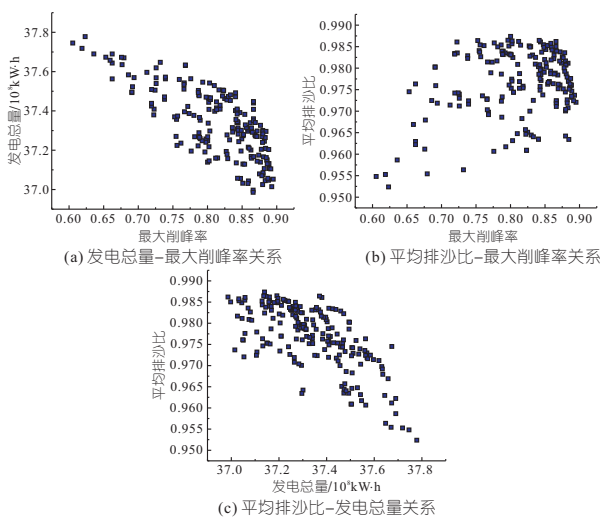


图4 各调度目标关系

Fig. 4 Relationships among various scheduling objectives

沙比与最大削峰率之间无明显线性关系,因此排沙与防洪目标无明显竞争关系;由图4(c)知,当最大削峰率一定时,随着发电总量的增加,平均排沙比呈现明显减小趋势,发电总量从最小值 $36.9859 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 增加到最大值 $37.7783 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 时,平均排沙比从最大值0.9874减小到最小值0.9524,因此排沙与发电目标存在一定竞争关系。

5 方案优选

基于最小相对熵原理,结合AHP法与熵权法,确定各指标的组合权重,并引入基于组合权重的TOPSIS法对方案集进行评价和优选。

5.1 TOPSIS法

TOPSIS法作为系统工程领域中一种常用的多标准决策分析技术,特别适用于有限方案下的多目标决策。其具体步骤如下。

步骤1 决策矩阵标准化。设有 n 个方案, m 个评价指标,待评价方案的原始决策矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$,标准化处理后的决策矩阵 $X = (x_{ij})_{n \times m}$ 。

效益型指标
$$x_{ij} = \frac{r_{ij} - \min(r_j)}{\max(r_j) - \min(r_j)} \quad (10)$$

成本型指标
$$x_{ij} = \frac{\max(r_j) - r_{ij}}{\max(r_j) - \min(r_j)} \quad (11)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个方案对应第 j 项指标的标准化数值; r_{ij} 为第 i 个方案对应第 j 项指标的数值。

步骤2 构建加权标准化决策矩阵。

$$q_{ij} = x_{ij} \omega_j \quad (12)$$

式中, ω_j 为第 j 项指标的组合权重。

步骤3 确定最优方案和最劣方案。

最优方案
$$P_j^+ = \max(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im}) \quad (13)$$

最劣方案
$$P_j^- = \min(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{im}) \quad (14)$$

步骤4 计算各待评价方案到最优方案和最劣方案的欧氏距离。

最优方案
$$T_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_j^+ - q_{ij})^2} \quad (15)$$

最劣方案
$$T_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (P_j^- - q_{ij})^2} \quad (16)$$

步骤5 计算相对接近度。

$$C_i = T_i^- / (T_i^+ + T_i^-) \quad 0 < C_i < 1 \quad (17)$$

C_i 越接近于1,表明对应待评价方案越接近最优方案。

5.2 方案优选评价指标体系

(1)建立评价指标体系。调度方案评价指标体系分为目标层、准则层和指标层,从防洪、发电、排沙三个准则层出发,制定出3个调度方案效益

型评价指标,见图 5。

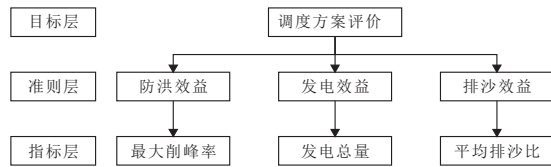


图 5 调度方案评价指标体系

Fig. 5 Evaluation index system of scheduling scheme

(2)计算权重。采用 AHP 法计算各指标的主观权重,采用熵权法计算各指标的客观权重。根据最小相对熵原理计算出各评价指标的组合权重,计算结果见表 1。

表 1 组合权重计算结果

Tab. 1 Calculation results of combined weights

准则层	指标层	主观权重 w'_j	客观权重 w''_j	组合权重 w_j
防洪	最大削峰率	0.633 3	0.239 8	0.447 1
发电	发电总量	0.106 2	0.530 3	0.272 2
排沙	平均排沙比	0.260 5	0.229 9	0.280 7

(3)调度方案优选结果。基于各评价指标的组合权重,采用 TOPSIS 法计算各调度方案的相对接近度 C_i , 相对接近度 C_i 的最大值为 0.732 6, 该方案即为优选方案。对比优选方案与实际调度相关数据,结果见表 2。由表 2 知,优选方案的最大削峰率较实际调度由 0.695 2 提高到 0.840 4, 提高了 20.89%; 发电总量较实际调度由 $32.238 7 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 提高到 $37.402 2 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 提高了 16.02%; 平均排沙比较实际调度由 0.946 1 提高到 0.980 3, 提高了 3.61%。

表 2 效益对比

Tab. 2 Benefit comparison

方案	最大削峰率	发电总量 / ($10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$)	平均排沙比
优选方案	0.840 4	37.402 2	0.980 3
实际调度方案	0.695 2	32.238 7	0.946 1

Multi-Objective Optimization Scheduling and Optimization for Cascaded Reservoirs in the Upper Yellow River Based on NSGA-III Algorithm

ZHANG Hong-tao¹, WANG Yi-fei^{1,2}, LI Xin-jie^{2,3}, LI Chuan-li^{1,2,3}

1. School of Electrical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;
2. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;
3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The Longyangxia and Liujiaxia Reservoirs in the upper reaches of the Yellow River have annual regulation capacity and undertake comprehensive utilization tasks such as flood control, water supply and irrigation, and power generation in the Yellow River Basin. The coordination and consistency of multiple objectives need to be achieved by constructing a multi-objective optimized dispatching system for cascade reservoirs. A multi-objective scheduling model has been established for the Longyangxia-Liujiaxia cascaded reservoirs, with the goals of maximizing the peak shaving rate, total power generation, and average sediment flushing ratio. The model is solved using the NSGA-III algorithm, and an analysis is conducted regarding the competitive relationships among the objectives of flood control, power generation, and sediment flushing. The established multi-objective optimization scheduling scheme is further evaluated through a developed indicator system, and the TOPSIS method is applied to optimize the set of scheduling solutions. The results show that there is a significant competitive relationship between the objectives of power generation and flood control; No significant competition exists between the objectives of sediment discharge and flood control, and there is some competition between the objectives of sediment discharge and power generation. Through a comparison of the optimal scheme and the actual scheduling data, it can be seen that the benefits of flood control, power generation, and sediment discharge in the optimal scheme increased by 20.89%, 16.02%, and 3.61%, respectively, compared to the actual scheduling.

Key words: cascade reservoirs; NSGA-III; multi-objective scheduling; scheme selection

6 结论

a. 利用 NSGA-III 在典型丰水年工况下,基于防洪、发电、排沙效益构建了刘—龙梯级水库多目标调度模型。

b. 发电与防洪存在明显竞争关系、排沙与防洪无明显竞争关系、排沙与发电存在一定竞争关系。

c. 优选方案的防洪、发电和排沙效益较实际调度分别提高 20.89%、16.02%、3.61%。

d. 由于水沙条件不确定,有待进一步研究水库各目标与参数间的响应规律。

参考文献:

- [1] LI X J, WANG Q, WANG Y J, et al. Multi-dimensional collaborative operation model and evaluation of cascade reservoirs in the middle reaches of the Yellow River[J]. Water, 2023, 15(19): 3523.
- [2] 田世民, 江恩慧, 王远见, 等. 基于黄河流域系统治理的水库多目标调度约束阈值研究[J]. 水利学报, 2024, 55(6): 631-642.
- [3] 茂果, 焦李成, 杨咚咚, 等. 进化多目标优化算法研究[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 271-289.
- [4] 哈燕萍, 白涛, 黄强, 等. 梯级水库群水沙联合调度的多目标转化研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(7): 23-33.
- [5] 李洁玉, 李航, 王远见, 等. 黄河水沙调控多目标协同模型构建及应用[J]. 水科学进展, 2023, 34(5): 708-718.
- [6] 李传利, 李新杰, 金祖凯, 等. 基于 SA-NSGA-II 算法的水库多目标优化调度研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(2): 183-187.
- [7] 周惠成, 张改红, 王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 100-106.
- [8] 颜山凯, 黄显峰, 方国华, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的梯级水电站补偿效益分摊模型研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 76-80, 28.