

文章编号: 1001-4179(2022)12-0219-09

引用本文: 杨悦, 张绪进, 马光文, 等. 岷江梯级水库群航运-发电多目标协调调度研究[J]. 人民长江, 2022, 53(12): 219-227.

岷江梯级水库群航运-发电多目标协调调度研究

杨悦¹, 张绪进², 马光文¹, 陈仕军¹, 黄炜斌¹

(1. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400074)

摘要: 随着长江经济带战略的实施和黄金水道建设的推进, 长江干线航运飞速发展, 上游主要支流航道等级提升迫在眉睫, 但传统航道整治工程受环境保护制约难以实施。为探索利用长江上游逐渐形成的大型水库群的调节库容提升长江上游的通航能力, 建立了一种兼顾航运需求和发电效益的梯级水库群多目标协调调度模型, 研究了该模型求解的 PSO-POA 改进算法。结合岷江流域梯级水库群的历史径流数据进行实例仿真计算, 并传统梯级发电量最大优化调度模型的计算结果进行对比分析。结果表明: 建立的航运-发电多目标协调调度模型在丰、平、枯典型年下能够将岷江下游河道的年内最小通航流量分别提升 27.57%、22.78% 和 18.98%, 而梯级水电站群的发电电量仅分别减少 0.66%、0.50% 和 0.53%。研究成果可为长江上游各流域梯级水库群航运-发电协调调度提供技术支撑, 有利于提升长江上游水库群的调度管理水平, 助力长江经济带高质量发展。

关键词: 梯级水库调度; 航运-发电效益; 最小通航流量; 总发电量; PSO-POA 改进算法; 岷江流域

中图分类号: TV697

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.12.033

0 引言

根据中共中央、国务院在《交通强国建设纲要》^[1] 中有关交通强国建设战略部署, 为推动内河航运高质量发展, 2020 年 5 月 29 日交通运输部印发了《内河航运发展纲要》^[2], 指出内河航运对促进流域经济发展的重要作用, 明确要强化东西水运大通道, 提升中西部地区主要支流航道, 形成长江干线横向通道。航运能力的拓展对长江经济带、西部大开发新格局、“一带一路”、成渝地区双城经济圈等重大国家发展战略实施具有深远的影响。面对经济社会的快速发展, 船舶大型化、标准化趋势明显, 船舶载重量增加, 吃水随之增大, 现有的大部分库区航道等级已不能满足航运需求。目前提升航道等级、挖掘航运能力的途径可分为工程措施和非工程措施。但在长江“共抓大保护、不搞大

开发”“生态优先、绿色发展”的大背景下, 传统的航道整治工程措施受到环境保护的制约不可能大规模实施。因此, 通过梯级水库群联合调度等非工程措施, 增加河道通航流量、改善河道通航条件显得十分迫切和重要^[3]。

目前, 制约中长期航道等级提升的关键问题在于枯季流量小、水位低, 从而造成许多大型船舶因河道航深不能满足而无法通行, 只能集中在汛期运输, 造成货物积压, 不利于经济发展。但是要满足枯季的航运补水需求意味着需要调整水库消落方式, 可能会对水电站发电量造成影响, 进而影响发电企业的收益。为协调航运与发电二者之间的矛盾, 相关学者进行了研究。刘俊萍等^[4]以梯级水电站群多年平均发电量最大为优化目标, 详细分析了考虑和不考虑航运需求下的优化结果, 讨论了发电和航运效益之间的相互影响关系。

收稿日期: 2022-02-10

基金项目: 交通运输部长江航务管理局三峡后续工作科研项目(SXHXGZ-2020-1)

作者简介: 杨悦, 女, 硕士研究生, 研究方向为梯级水库智能运行管理。E-mail: 932611047@qq.com

通信作者: 马光文, 男, 教授, 博士, 主要从事水电运行管理及电力市场研究。E-mail: magw8158@163.com

赵云发等^[5]以三峡水电站为研究对象,分析计算其航运和发电效益。结果表明枯季流量补偿能够增加三峡水电站航电的综合效益;张继顺等^[6]对三峡水库蓄水发电后的枯季航运流量补偿效益进行分析,提出三峡水库的枯期库容使用规则;王学敏^[7]以累计滞留载货作为航运的评价标准,建立了汛期航运-防洪多目标优化模型和蓄水期航运-生态-发电多目标优化模型;周建中等^[8]将航运效益通过下泄流量与通航保证率间的映射关系来量化,建立了汛期水库多目标优化调度的模型,提升了汛期通航保证率和发电量;黄旭^[9]通过对比分析广西主要水电航运枢纽在枯期和汛期的运行规律,提出基于保证通航效率的汛末水库蓄满率建议;张先平等^[10]以三峡-葛洲坝梯级水库群为例,通过拟定不同的航运控泄流量、控制水位指标和调峰幅度等,对兼顾航运需求的水库群调度方案进行研究,并提出应开展长江上游梯级水库联合调度对枯期补水能力的研究;吴文凤等^[11]利用岷江上游水库总调节库容,计算联合调度理论上可以增加的枯期流量,结合平面二维水流模型给出了要满足航道标准所需要的最小通航流量;田锐^[12]研究了以总发电量最大、生态溢缺水量最小和通航破坏深度最小的流域水库群多目标优化调度模型,以提升水库群综合兴利效益。上述研究大多以累计滞留载货或下泄流量变幅最小、通航破坏深度最小等指标作为航运目标,鲜有考虑流域下游航道冬春枯期航运补水需求、提高枢纽枯期下泄流量的研究,且针对流域大规模梯级水库群的航运与发电协调调度研究较少。

为充分发挥长江上游大型水库群调节库容的作用,提升长江上游主要支流航道的通航能力,本文研究了一种兼顾航运需求和发电效益的梯级水库群多目标协调调度模型及其高效求解的 PSO-POA 改进算法,并以岷江流域梯级水库群为例进行仿真模拟分析,进一步验证本文所构建模型及其求解算法的合理性和可行性。研究成果对指导流域通过梯级水库群多目标协调调度来改善航道通航条件,缓解因航运和发电对水库蓄放水需求不一致造成的矛盾具有重要意义。

1 梯级水库群航运-发电多目标协调调度模型

结合河道冬春枯期航运补水的需求,为协调梯级水库群中长期调度中枯期发电效益与航运需求之间的矛盾,本文以提高下游河道枯期通航流量为航运目标、以总发电量最大化为发电目标建立梯级水库群航运-发电多目标协调调度模型,充分利用大型水库的调节库容和梯级水库群联合调度空间实现综合利用效益最大化。

1.1 目标函数

(1) 航运目标。为了尽可能提高下游河道的通航流量,以控制断面最小通航流量尽可能大,即年内最小通航流量最大化为目标,目标函数可以写成:

$$\max f_1 = \max Q^* = \max \min \{Q_{\text{未}1}, Q_{\text{未}2}, \dots, Q_{\text{未}T}\} \quad (1)$$

式中: Q^* 为控制断面最小通航流量最大化的计算指标, m^3/s ; $Q_{\text{未}t}$ 为梯级最末一级电站在第 t 时段的出库流量与该电站至控制断面第 t 时段的区间流量之和, m^3/s ; T 为调度期总时段数。

(2) 发电目标。为了充分利用梯级水库群水电能源资源,给电网提供尽可能多的清洁可再生的电量,以梯级水电站群年发电量最大化为目标,其函数表达式可以写成:

$$\max f_2 = \max E = \max \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N (K_i q_{ij} H_{ij} M_t) \quad (2)$$

式中: E 为梯级水电站群的全年总发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; K_i 为第 i 个电站的出力系数; q_{ij} 为第 i 个电站在第 t 时段的发电流量, m^3/s ; H_{ij} 为第 i 个电站在第 t 时段的平均发电水头与水头损失之差, m ; M_t 为第 t 时段的小时数, h ; N 为梯级水电站个数。

1.2 约束条件

(1) 水量平衡约束。梯级水库群运行时应遵循水量平衡方程。

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

式中: $V_{i,t+1}$ 为第 i 个电站在第 t 时段末的水库蓄水量, m^3 ; $V_{i,t}$ 为第 i 个电站在第 t 时段初的水库蓄水量, m^3 ; $S_{i,t}$ 为第 i 个电站在第 t 时段的入库流量, m^3/s ; $I_{i,t}$ 为第 i 个电站第 t 时段的弃水流量, m^3/s 。

(2) 水库水位约束。为保证梯级水库群正常运行,水电站的汛期运行水位应在汛限水位和死水位之间,平水期和枯水期的运行水位应在正常蓄水位和死水位之间。

$$Z_{i,t}^{\text{下}} \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^{\text{上}} \quad (4)$$

式中: $Z_{i,t}$ 为第 i 个电站在第 t 时段初的水库水位, m ; $Z_{i,t}^{\text{下}}$ 、 $Z_{i,t}^{\text{上}}$ 为第 i 个电站在第 t 时段初的水位下、上限, m 。

(3) 水库下泄流量约束。为保障水电站自身安全、机组安全和梯级水库综合利用需求,水电站下泄流量要满足最小下泄流量和最大下泄流量的要求。

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

式中: $q_{i,t}^{\text{min}}$ 为第 i 个电站在第 t 时段的最小过机流量和生态流量中的较小值, m^3/s ; $q_{i,t}^{\text{max}}$ 为第 i 个电站在第 t 时段的最大过机流量, m^3/s 。

(4) 电站出力约束。水电站出力应在允许的上限和下限范围内。

$$N_i^{\min} \leq K_i q_{i,t} H_{i,t} \leq N_i^{\max} \quad (6)$$

式中: N_i^{\min} 为第 i 个电站允许的最小出力 kW ; N_i^{\max} 为第 i 个电站的装机容量 kW 。

(5) 水量联系约束。梯级水电站上下游间的流量传递, 应满足上下游流量平衡。

$$S_{i,t} = q_{i-1,t-1} + I_{i-1,t-1} + O_{i,t} \quad (7)$$

式中: $q_{i-1,t-1}$ 为第 $i-1$ 个电站(第 i 个电站的上游电站)在 $t-1$ 时刻(前一时刻)的发电流量 m^3/s ; $I_{i-1,t-1}$ 为第 $i-1$ 个电站(第 i 个电站的上游电站)在 $t-1$ 时刻(前一时刻)的弃水流量 m^3/s ; $O_{i,t}$ 为第 t 时刻第 $i-1$ 个电站到第 i 个电站的平均区间入流 m^3/s 。

(6) 非负条件约束。以上所述所有变量均应为非负变量(≥ 0)。

2 模型求解算法

目前水库群协调调度领域广泛应用的算法主要分为数学规划方法和智能算法两类。前者经过较长的发展和实际应用, 算法较为成熟, 但在处理大规模问题时易陷入维数灾^[13-15]。后者解决非凸、非线性的大规模复杂优化问题具有计算速度快、算法原理简单、程序易实现等优势, 是目前研究的热点, 但由于随机性较强而难以找到稳定的可行解, 算法的应用还处在探索阶段^[16-19]。因此, 使用单个算法存在局限性, 目前许多学者研究多种算法嵌套的方法, 以获得较好的求解算法^[20-21]。数学规划方法中的

POA 算法收敛性好且能有效减少规划方法的高维数^[22], 在协调调度中应用广泛。该算法实质上是以某个初始轨迹的一端为起点进行的渐进优化求解算法, 因此其初始轨迹和步长的选取显得十分重要, 不但影响求解速度和精度, 还决定着会不会陷入局部最优、能否找到全局最优解。为此, 本文对 POA 算法进行改进, 采用粒子群算法(PSO)的飞行策略得到较优的初始解集, 并通过变步长方法平衡全局和局部搜索能力。本文将 PSO-POA 改进算法应用于梯级水库群航运-发电效益多目标协调调度模型的求解计算, 图 1 为 PSO-POA 改进算法的基本计算流程图。该算法的具体求解流程如下:

(1) 确定 PSO 算法的飞行策略, 即粒子速度和位置状态的更新公式:

$$v_{k,j}^{g+1} = \omega v_{k,j}^g + c_1 r_1 (p_{k,j}^g - x_{k,j}^g) + c_2 r_2 (p_{g,j}^g - x_{k,j}^g) \quad (8)$$

$$x_{k,j}^{g+1} = x_{k,j}^g + v_{k,j}^{g+1} \quad (9)$$

式中: g 为粒子的循环次数 $g \in [1, G]$, G 为总循环次数; k 为粒子的序号 $k \in [1, n]$, n 为粒子种群数; j 为维度序号 $j \in [1, d]$, d 为粒子所处空间维数; $v_{k,j}^g$ 表示第 k 个粒子在第 g 次循环过程中的第 j 维速度, 为控制收敛速度 $v_{k,j}^g \in [v_{\min}, v_{\max}]$; $x_{k,j}^g$ 表示第 k 个粒子在第 g 次循环中的第 j 维坐标; ω 为惯性权重因子; c_1 为认识学习因子, 反映粒子本身记忆的影响; c_2 为社会学习因子, 反映粒子间相互信息传递的有效性; r_1 和 r_2 为在 $[0, 1]$ 间的随机数; $p_{k,j}^g$ 为第 k 个粒子在第 g 次循环时个体最优位置的第 j 维坐标; $p_{g,j}^g$ 为所有粒子在第 g 次循环中全局最优位置的第 j 维坐标。

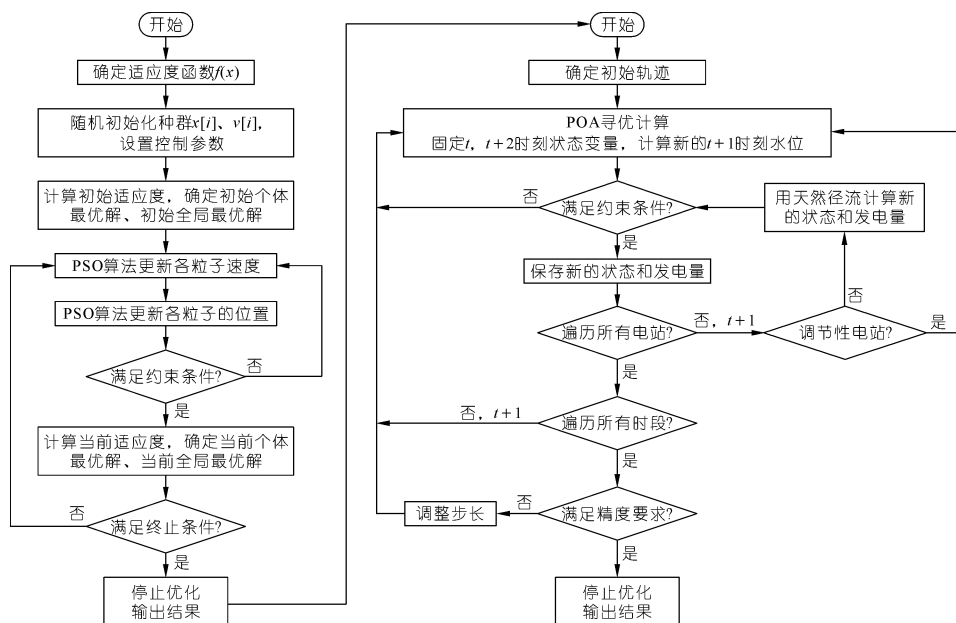


图 1 PSO-POA 改进算法计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart of improved PSO-POA algorithm

(2) 确定适应度函数, 随机初始化种群, 并设置基本参数。本文所建模型为多目标问题, 为求解便利, 将目标函数式(1)转化为约束, 并加入目标函数式(2)中作为惩罚项, 转化后模型的目标函数, 即适应度函数为

$$\max E = \max \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N K_i q_{i,t} H_{i,t} - \varphi_t A \sum_{i=1}^N K_i H_{i,t} (\varepsilon - q_{i,t}) \right] M_t \quad (10)$$

式中: A 为惩罚因子, ε 为假定的年内最小通航流量最大化后的最小值。根据控制断面的年内最小通航流量计算结果动态调整 φ_t 定义为

$$\varphi_t = \begin{cases} 0, & Q^* > \varepsilon \\ 1, & Q^* \leq \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

(3) 根据适应度函数式(10)计算粒子的初始适应度, 确定初始全局极值 pg_j^g 和初始个体极值 $p_{k,j}^g$ 。

(4) 依据公式(8)~(9)对粒子位置和速度进行更新, 并计算更新后的适应度值, 与历史个体极值和全局极值进行比较, 确定当前个体最优位置和当前全局最优位置。

(5) 再重复步骤(4), 直到达到最大迭代次数, 输出得到的结果作为 POA 算法较优的初始轨迹。

(6) 确定逐步优化算法的参数, 依照梯级电站的顺序, 首先固定第一级电站的第 0 时刻和第 2 时刻的水位不变, 然后调整第 1 时刻的水位(分别取在原水位的基础上减少 1 步长、不变和增加 1 步长 3 种情况), 计算各方案的第 0 到 1 时刻和第 1 到 2 时刻这两个两阶段的目标函数, 比较分析后选择目标函数最优的方案作为该电站第 1 时段的新水位, 并更新水位轨迹。同样的方法, 逐次推后一个时段, 固定两端, 对中间时刻的水位进行调整, 直到遍历所有电站和所有时段, 完成一次循环。将本次循环计算的各时段末的新水位, 作为下一次寻优计算的新的初始轨迹。

(7) 重复步骤(6), 随着目标值的变化范围缩小(逐渐收敛), 相应的减小步长, 直到新值与历史最大值的绝对差值在要求精度内, 即 $|E - \max E| \leq 0.1$ 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 输出本次计算得到的梯级水库群最优运行方案。

3 实例研究

四川省素有“千河之省”之称, 拥有长江、岷江、嘉陵江、渠江等水运通道, 因其丰富的运能资源以及地处西部内陆和长江上游的特殊地理位置, 在国家的航道布局中具有重要地位。其中岷江航道是国家高等级航道之一, 对运输川西、川南物资运输和促进区域对外交流具有十分重要的作用^[23]。随着社会经济的发展, 岷

江航道已难以满足货物运输的规划要求, 需大力提升其水运能力^[24]。根据《长江干线航道总体规划纲要》, 岷江下游乐山至宜宾 160 km 段航道将提高至Ⅲ级航道标准, 中游彭山至乐山 115 km 段航道提高至Ⅳ级航道标准。但因该区域涉及长江上游珍稀特有鱼类保护区, 工程整治措施受限, 且岷江流域河川径流主要为降雨补给, 年内分配不均, 枯期流量很小, 往往难以满足航运需求。而随着岷江流域上游梯级水库群逐渐形成, 为通过梯级水库群联合优化调度增大下游枯水期流量, 提高航道水深, 提升枯水期航道运输能力创造了有利条件。因此, 本文以岷江流域为研究对象, 利用上游大金水文站的实测径流资料选出丰、平、枯典型年(2017、1998、1977 年), 开展梯级水库群航运-发电多目标协调调度实例研究, 验证所建模型的合理性和所提算法的可行性。

3.1 基本资料与参数设置

本文以岷江流域上游双江口水库至下游犍为水电站的“4 库 16 级”梯级水库群为实例进行研究, 各个水电站的正常蓄水位、死水位、装机容量、出力系数等特征参数如表 1 所列。

表 1 岷江梯级水电站特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of cascade hydropower stations in Minjiang River Basin

水电站	死水位/ m	正常蓄 水位/m	汛限水位/ m	装机容量/ 万 kW	出力 系数	最大过机流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最小过机流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
双江口	2420.00	2500.00	2480.00	200	8.5	1064	121
猴子岩	1802.00	1842.00	1835.00	170	8.5	1473	160
长河坝	1650.00	1690.00	1685.00	260	8.5	1458	166
黄金坪	1472.00	1476.00	-	85	8.5	1335	168
泸定	1375.00	1378.00	-	92	8.9	1616	184
大岗山	1120.00	1130.00	-	260	8.5	1834	165
龙头石	952.00	955.00	-	70	8.5	1788	102
瀑布沟	790.00	850.00	836.20~841.00	360	8.3	2772	327
深溪沟	655.00	660.00	-	66	8.4	2619	327
枕头坝一级	618.00	624.00	-	72	8.3	2697	327
沙坪二级	550.00	554.00	-	35	8.5	2751	345
龚嘴	520.00	528.00	-	77	8.5	1876	345
铜街子	469.00	474.00	-	65	8.5	2225	345
沙湾	425.00	432.00	-	48	8.5	2203	17
安谷	397.00	398.00	-	77	8.5	2641	150
犍为	334.00	335.00	-	50	8.5	4428	756

其中, 双江口、猴子岩、长河坝和瀑布沟 4 座水库具有季及以上调节能力, 其他水电站仅具有日及以下调节能力, 在梯级水库群中长期协调优化调度时仅考虑其作为径流电站参与联合调度的发电效益。本文以岷江下游高场站断面的通航流量为模型中航运目标的控制对象, 利用岷江流域丰、平、枯 3 个典型年的实测径流资料进行实例计算。经软件测试, 得到 PSO-POA 算法的最优参数如表 2 所列。

表 2 PSO-POA 算法参数设置
Tab. 2 Parameter setting of PSO-POA algorithm

参数	数值	参数	数值
种群数量 n	100	最大循环次数 G	200
惯性权重 ω	0.9	惩罚因子 A	10
加速因子 c_1	2	步长	0.1~5
加速因子 c_2	2	精度(亿 kW·h)	≤ 0.1
速度边界 $[v_{\min}, v_{\max}]$	$[-0.5, 0.5]$		

3.2 优化结果及分析

结合岷江流域梯级水库群的实际资料,运用 PSO-POA 改进算法对丰、平、枯典型年梯级水库群航运-发电多目标协调调度进行实例计算。同时为便于开展航运目标和发电目标的结果分析,将传统的仅以梯级发电量最大化目标的梯级联合优化调度模型(以下称“模型 2”)进行计算,并与本文所建立的航运-发电多目标协调调度模型(以下称“模型 1”)进行对比分析。图 2 给出了模型 1 在丰、平、枯典型年下非劣前沿计算结果和模型 2 的计算结果。

由图 2 可知,年内最小通航流量最大化与梯级总发电量两个目标的非劣解集的分布趋势呈反比,当岷江下游高场站断面的通航流量增加时,梯级电站群总发电量随之降低,证明该河段航运效益与发电效益存在相互制约的关系。由非劣前沿呈凸函数形式可以看出,当最小通航流量增加到一定值时,发电量会显著

下降,而通航流量的增加不大。分析原因是由于最小通航流量在增加初期,不满足需求的旬数较少,因此需要调整的流量少,梯级水库可以通过互补调节同时满足发电效益和航运效益,但在提高到一定值后,不满足需求的旬数增多,流量需求随之增加,若继续提高通航流量,会引起发电量显著下降。因此选取该点作为航运-发电多目标协调调度模型(模型 1)的均衡方案,与梯级发电量最大化目标的梯级联合优化调度模型(模型 2)进行比较,两个模型计算结果中通航流量与原天然径流三者的对比见图 3,两个模型的发电量结果对比见图 4,各目标值对比见表 3。

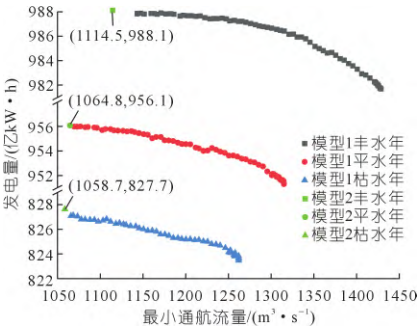


图 2 不同典型年下模型 1 与模型 2 非劣前沿计算结果
Fig. 2 The calculation results of pareto front of model 1 and model 2 under different typical years

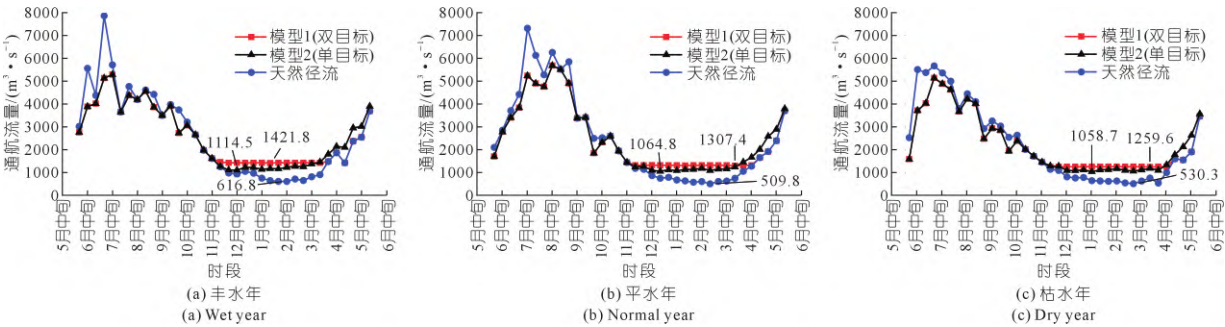


图 3 高场断面通航流量过程对比
Fig. 3 Comparison of navigation flow process at Gaochang section

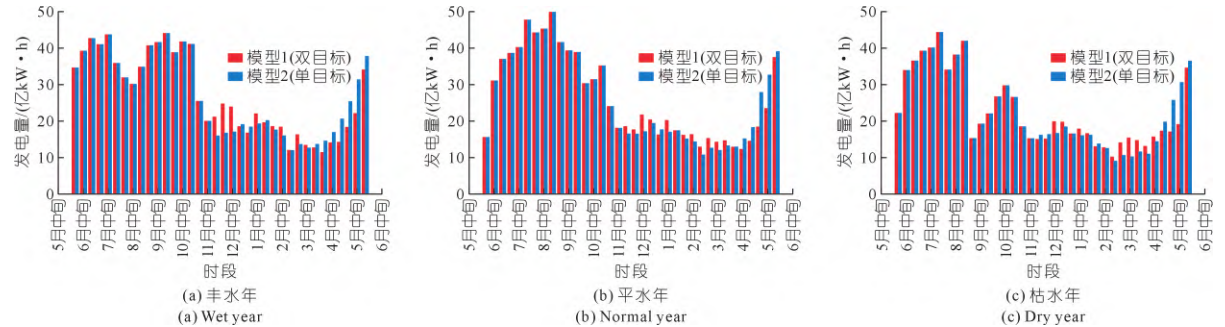


图 4 梯级水电站群年总发电量对比
Fig. 4 Comparison of annual total power generation of cascade hydropower stations

表 3 丰平枯典型年下各目标值对比
Tab. 3 Comparison of target values in typical years

典型年	航运目标				发电目标		
	模型 1 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	天然径流/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模型 1 相对于 天然通航流量 提升率/%	模型 2 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模型 2 相对于 天然通航流量 提升率/%	模型 1 发电量/ (亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$)	模型 2 发电量/ (亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$)
							发电量/ 损失率/ %
丰水年	1421.8	616.8	130.51	1114.5	27.57	981.6	988.1
平水年	1307.4	509.8	156.45	1064.8	22.78	951.3	956.1
枯水年	1259.6	530.3	137.53	1058.7	18.98	823.3	827.7

由图 3 和表 3 可知,与天然径流相比,模型 1 显著提高了枯期 12 月至次年 4 月的河道通航流量,将丰平枯典型年下年内最小旬天然径流 616.8、509.8 m^3/s 和 530.3 m^3/s 分别提高至 1421.8、1307.4 m^3/s 和 1259.6 m^3/s ,年内最大提升率分别为 130.51%、156.45%、137.53%。可见在不同典型年下,当枯期天然来水流量很小、航运补水需求强烈时,模型 1 对枯期下游河道的流量提升效果十分突出,可有效缓解枯期河道航运压力。与模型 2 相比,模型 1 对枯期的河道通航流量也有明显提升,年内最大提升率分别为 27.57%、22.78%、18.98%,这是因为模型 2 为了增加发电量,需要尽可能保持水库高水头运行,在汛末尽可能不消落水位,将水库蓄水量集中于枯水期末消落放水,而枯期前几个月通航流量偏小,不利于保障航运用水需求。总之,在模型 1 下,梯级水库群的枯期出库流量得到均化,使得航道的水流条件相对平稳,将水库的蓄水量相对均匀地用于补给枯水期河道流量,增加航道通航水深,更有利于船舶通行。

由图 4 和表 3 可知,与模型 2 相比,模型 1 对发电量的影响主要在枯期,这是因为模型 1 下梯级水电在枯期降低水头增加下泄流量以提高枯期通航流量,牺牲了部分发电效益,其中模型 2 仅以发电量最大化为目标,丰平枯典型年下年总发电量分别为 988.1 亿、956.1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 和 827.7 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,模型 1 同时以发电量最大化和控制断面年内最小通航流量最大为目标,丰平枯典型年下年总发电量分别为 981.6 亿、951.3 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 和 823.3 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,发电量损失率分别仅为 0.66%、0.50% 和 0.53%。

从整体来看,模型 1 能够以较小发电效益损失实现对梯级水库群下游枯期通航流量的较大提升,可以兼顾梯级水库群的发电效益和通航效益。可见航运效益与发电效益并不是完全冲突的关系,从通航流量提高的内在机理分析原因是由于发电效益主要受发电流量和水头影响。传统调度方式下枯期初期尽可能维持高水位,以水头效益增加发电量,在枯期末期快速消落水位,以流量效应增加枯期末期的发电量。在航运-发电多目标协调调度方式下,经过梯级水库补偿调节,

枯期增加下泄流量以满足通航需求,虽然较传统调度方式降低了运行水头,但是用于满足通航需求的这部分下泄流量也用于发电,增加了流量效益,使得发电效益只有小幅度减少。

为剖析在兼顾发电效益和通航效益目标下梯级水库群和大中型水库在丰、平、枯典型年的运行调度方式,将模型 1 与模型 2 中双江口、猴子岩、长河坝、瀑布沟水库的水位过程进行对比分析,如图 5 所示。

由图 5 可知,模型 1 和模型 2 中各水库电站水位变化的不同主要在枯期,即不同目标下汛末水库消落水位控制方式不同。从整体来看,在丰、平、枯典型年梯级各水库的水位变化趋势整体较为接近,模型 2 中各水库在枯期尽可能保持高水位运行以获得较高的水头效应,增加梯级总发电量;而模型 1 下各水库提前消落水位,以增加下游电站的枯期出库流量,使下游河道在枯期 12 月至次年 4 月均能有较大且稳定的通航流量。

通过横向对比发现,在 3 个典型年下双江口水库总是最先开始消落,这是因为按照梯级水库的流量和水头传递规律,在相同的出库流量下,相比于先消落下游电站,优先消落上游电站水位可以提高下游电站的水头,使得梯级总水头增加,以增加梯级总发电效益。通过纵向对比发现随着枯期天然来水流量的逐渐减少,双江口水库在不同模型下的消落水位趋势逐渐接近,主要是由于作为流域的龙头调节性水库,其消落方式对梯级发电效益有较大影响,当来水流量级变小,所需要的梯级总调节库容变小,上游水库将以发电量最大为主要目标控制消落方式。对于猴子岩和长河坝水库,通过横向和纵向对比发现,在不同模型下两个水库的水位消落方式均有较大差异,分析原因是由于猴子岩和长河坝水库受调节性能的限制,对在发电量最大化目标基础上增加的航运目标比较敏感,面对枯期较大的补水需求通过提前消落水头来实现。对于瀑布沟水库,通过横向和纵向对比发现,在不同典型年下大致都是从 12 月枯期开始一直消落到次年 4 月枯期结束,在整个枯期起到比较好的调节和补水作用。因此兼顾航运与发电效益的梯级水库群调度要依据流域梯级水库电站的上下游关系、调节性能差异等特点科学消落水位,重点利用好靠近补水需求断面的大型水库的调节库容,可以有效改善河道通航条件,缓解枯期航运需求与发电效益的矛盾。整体来看,各水库水位消落的起始时间和消落期长度符合梯级间水量传递关系,反映了水库的调节性,进一步验证了调度方案的合理性和科学性。

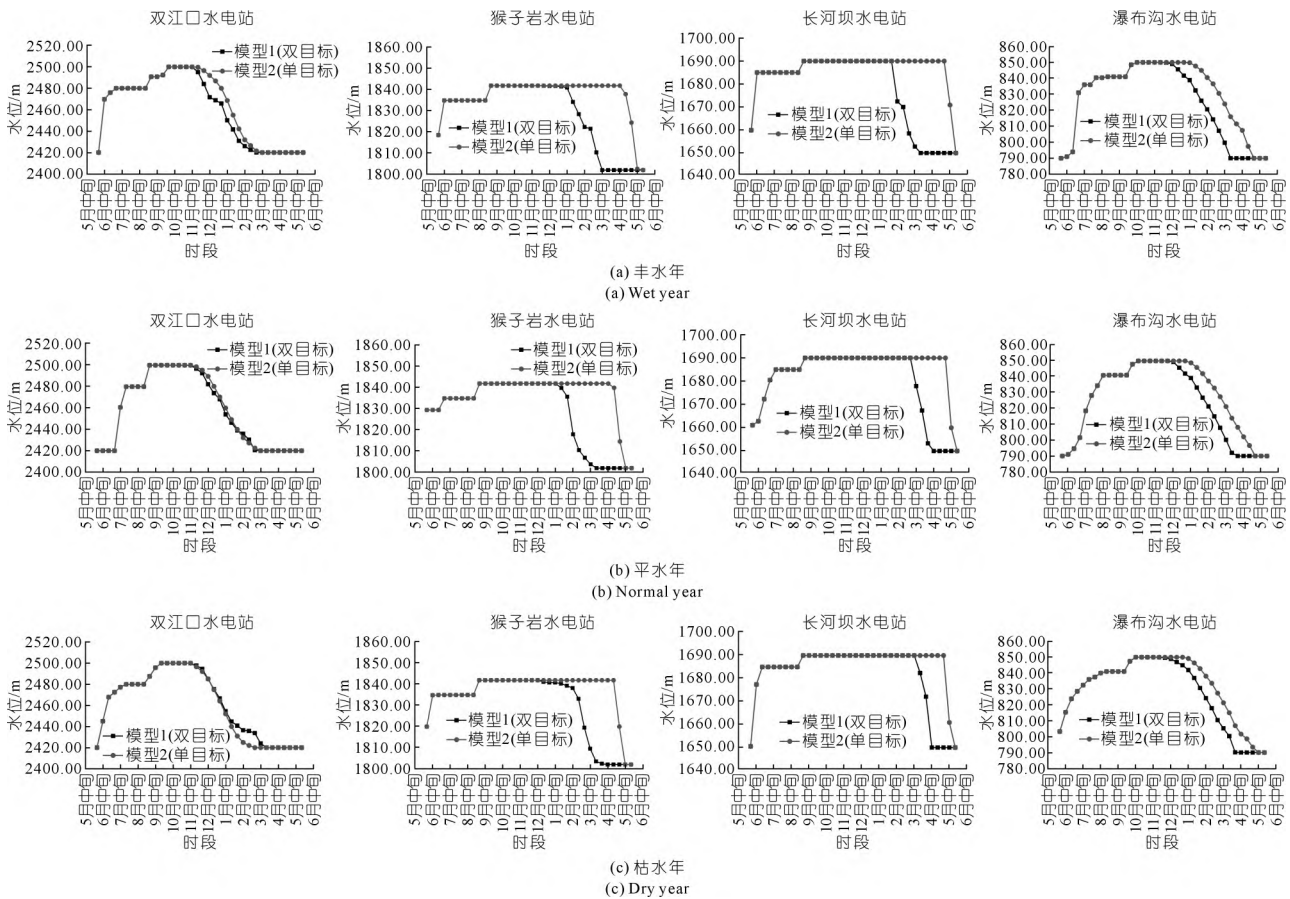


图 5 梯级各水库水位过程对比

Fig. 5 Comparison of water level process of cascade reservoirs

为对比文中所提 PSO – POA 改进算法的合理性和时效性,分别采用 PSO 算法和 POA 算法对平水年进行实例计算,其中 PSO 算法循环次数设置为 2 000 次,POA 算法以水库水位均匀蓄满和消落作为初始水位,其余参数与 PSO – POA 改进算法中参数设置相同,优化结果如表 4 所列。可以看出在相近的计算时长下 PSO 算法因其随机性较强难以仅通过一次计算就找到多目标问题的非劣解。在相同的精度要求下,POA 算法易陷入局部最优,且在没有合适的初始轨迹下寻优用时更久。由此可知 PSO – POA 改进算法能够综合 PSO 算法全局搜索能力强和 POA 算法鲁棒性好的优点,在求解精度和速度方面具有优势。

表 4 不同计算方法下优化结果对比

Tab. 4 Comparison of optimization results under different calculation methods

算法	最小通航流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	发电量/ 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$	计算时间/ s
PSO 算法	1291.6	950.8	47.38
POA 算法	1283.2	951.82	63.65
PSO – POA 改进算法	1307.4	951.3	45.76

4 结论

本文基于航运对水库调度的补水需求,以充分发

挥梯级水库群的发电与航运综合效益为出发点,建立了以最小通航流量最大化和总发电量最大化为目标的梯级水库群多目标协调调度模型;研究了适用于多目标协调调度模型求解的 PSO – POA 改进算法,克服传统 POA 算法初始轨迹选择困难和易陷入局部最优的问题,以及随机算法 PSO 优化结果不稳定的问题;最后,通过岷江梯级水库群丰、平、枯典型年的实例仿真进行计算。结果表明:在兼顾航运与发电效益的多目标梯级水库群联合调度下,不同代表年的岷江下游高场站断面的最小通航流量分别为 1 421.8,1 307.4 m^3/s 和 1 259.6 m^3/s ,梯级水电站群年发电量分别为 981.6 亿 951.3 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 和 823.3 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,与仅考虑梯级水电站年发电量最大的单目标模型的计算结果相比,实现了对丰、平、枯 3 个代表年最小通航流量的有效提升,提升率分别为 27.57%,22.78% 和 18.98%,而梯级年发电量损失率分别仅为 0.66%,0.50% 和 0.53%。

总而言之,本文所提模型和求解方法有效缓解了发电效益与航运效益的矛盾关系,在提高河道通航流量以满足航运需求的同时,又能较好地保证梯级水电站群的总发电量,得到的岷江梯级水库群联合调度方

案可为实际调度和航道扩能提升方案决策提供参考。另外,本文所建模型可以求解流域通过梯级水电协调调度能够提高的最大通航流量,对未来各梯级水库调度时下泄通航流量的控制指标具有重要参考意义,能够为流域航道规划设计提供科学依据。所提模型和算法亦能应用在其他需要兼顾发电效益和通航效益的梯级水库群,具有较大的推广应用价值,研究工作对促进梯级水库群综合效益的发挥具有重要意义和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 中共中央国务院印发《交通强国建设纲要》[N]. 人民日报, 2019-09-20(4).
- [2] 交通运输部印发《内河航运发展纲要》[N]. 中国水运报, 2020-06-07(2).
- [3] 钟德钰, 王永强, 吴保生, 等. 梯级水库群联合航运关键问题研究 I: 水陆耦合集散交通系统的概念和框架[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(10): 1080-1088.
- [4] 刘俊萍, 黄强, 田峰巍, 等. 汉江上游梯级发电与航运的优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2001(4): 8-17.
- [5] 赵云发, 张继顺. 三峡水库 135m 运行期枯季补偿航运效益分析[J]. 水力发电, 2003(12): 34-36.
- [6] 张继顺, 鲍正风, 刘志武. 三峡水库航运流量补偿调度效益[J]. 水利水电技术, 2011, 42(12): 93-96.
- [7] 王学敏. 面向生态和航运的梯级水电站多目标发电优化调度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [8] 周建中, 李纯龙, 陈芳, 等. 面向航运和发电的三峡梯级汛期综合运用[J]. 水利学报, 2017, 48(1): 31-40.
- [9] 黄旭. 广西水电航运枢纽调度运行规律分析与研究[J]. 红水河, 2018, 37(3): 12-14, 20.
- [10] 张先平, 鲁军, 邢龙, 等. 三峡-葛洲坝梯级水库兼顾航运需求的调度方式[J]. 人民长江, 2018, 49(13): 31-37.
- [11] 吴文凤, 李家世, 刘晓帆. 枢纽下游航道整治设计最小通航流量研究[J]. 水运工程, 2020(10): 133-137.
- [12] 田锐. 基于 NSGA-III 的水库群发电-生态-航运优化调度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [13] 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.
- [14] ZHAO T T G, ZHAO J S, YANG D W. Improved dynamic programming for hydropower reservoir operation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(3): 365-374.
- [15] ZENG X, HU T S, CAI X M, et al. Improved dynamic programming for parallel reservoir system operation optimization[J]. Advances in Water Resources, 2019, 131: 103373.
- [16] DARIANE A B, MONTAHEN S. Optimization of multireservoir systems operation using modified direct search genetic algorithm[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 135(3): 141-148.
- [17] HOSSAIN M S, EL-SHAFIE A. Intelligent systems in optimizing reservoir operation policy: a review[J]. Water Resources Management, 2013, 27: 3387-3407.
- [18] 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.
- [19] MAHSA J T, OMID B H, HUGO A L. A review of applications of animal inspired evolutionary algorithms in reservoir operation modeling[J]. Water and Environment Journal, 2020, 35(2): 628-646.
- [20] 王渤权, 沈笛, 赵珂, 等. 基于 POA-GA 嵌套算法的小浪底-西霞院水库联合优化调度[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 242-247.
- [21] 王丽萍, 吴月秋, 张验科, 等. 改进和声搜索算法在梯级水库群优化调度中的应用[J]. 人民长江, 2021, 52(2): 192-196.
- [22] 岳华, 马光文, 杨庚鑫. 梯级水库群超标洪水的协同应急调度研究[J]. 水利学报, 2019, 50(3): 356-363.
- [23] 余曲波. 四川内河港口发展问题与对策[J]. 中国港口, 2021(5): 7-10.
- [24] 吴立功. 岷江流域规划若干问题的思考与对策[J]. 人民长江, 2013, 44(24): 9-12.

(编辑: 谢玲娴)

Study on multi-objective coordinated dispatching of navigation and power generation of cascade reservoir group in Minjiang River Basin

YANG Yue¹, ZHANG Xujin², MA Guangwen¹, CHEN Shijun¹, HUANG Weibin¹

(1. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: With the implementation of the Yangtze River Economic Belt strategy and the promotion of the construction of the golden waterway, the navigation of the Yangtze River trunk line is developing rapidly, however the upgrading of the main tributary channels in the upper reaches is imminent. In order to explore how to use the regulation capacity of the large reservoir group gradually formed in the upper reaches of the Yangtze River to improve the navigation capacity, a multi-objective coordinated operation model of cascade reservoirs group considering both navigation demand and power generation efficiency is established, and an improved PSO-POA algorithm for solving the model is studied. Finally, an example simulation calculation is carried out based on the historical runoff data of cascade reservoir group in Minjiang River Basin, and the calculation results are compared with the traditional optimal dispatching model for maximizing cascade generation. The results show that the proposed multi-objective coordinated dispatching model can increase the minimum navigable discharge of the lower reaches by 27.57%, 22.78% and 18.98%.

respectively in different typical years ,and the reduction of power generation of cascade hydropower stations is only 0.66% ,0.50% and 0.53% respectively. The research results can provide technical support for the coordinated operation of navigation and power generation of cascade reservoirs ,improve the operation and management level of reservoirs in the upper reaches of the Yangtze River and help the high – quality development of the Yangtze River Economic Belt.

Key words: cascade reservoirs operation; navigation and power generation benefit; minimum navigable discharge; total power generation; improved PSO – POA algorithm; Minjiang River Basin

(上接第 218 页)

Prediction of blast – induced air overpressure using GRA – GWO – LSSVM model

CHEN Zi ,LIANG Fuzhi

(*School of Industrial Automation ,Guangdong Polytechnic College Zhaoqing 526100 ,China*)

Abstract: In order to control the harm of air overpressure (AOP) caused by blasting to environment and safety ,a prediction model of blasting AOP based on GRA – GWO – LSSVM was proposed. Firstly ,the key factors affecting the AOP were determined by grey relation analysis (GRA) to effectively eliminate the interference of redundant factors and reduce the complexity of the prediction model. Then the grey wolf algorithm (GWO) was used to optimize the penalty parameters and kernel function parameters of the least squares support vector machine (LSSVM) ,which improved the learning ability and generalization ability of the prediction model. Taking the dam foundation blasting project of Xiaohebian Reservoir in Xingyi City ,Guizhou Province as an example ,the GRA – GWO – LSSVM model ,GWO – LSSVM model and PSO – LSSVM model were established respectively ,and the prediction results of AOP were compared and analyzed. The results showed that the root mean square error (RMSE) ,mean absolute error (MAE) and determination coefficient (R^2) of the model were 3.31 ,3.15 and 0.93 ,respectively. Compared with the other two models ,this model had better generalization ability and higher prediction accuracy.

Key words: air overpressure (AOP) ; blasting; grey relation analysis (GRA) ; grey wolf algorithm (GWO)