

面向调度计划的水库优化调度模型

李燕茹^{1,2,3,4}, 林鹏飞⁴, 游进军⁴, 任政^{1,2,3}, 付敏⁴, 陶烨晟⁵

(1. 河北工程大学水利水电学院; 2. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室;

3. 河北工程大学水资源智慧调控与综合管理省部共建协同创新中心;

4. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室; 5. 北京大兴智慧城市科技有限公司)

摘要:针对水库调度计划管理中存在的调度过程不匹配问题,提出了面向调度计划的水库优化调度模型。该模型以用水户缺水最小以及发电计划偏离度最小作为目标函数,并运用粒子群算法对发电计划进行优化。采用该模型分析了三亚市大隆水库供水与发电过程匹配性、水库蓄水变化及发电量月度效益转移关系,在保障供水计划前提下,50%、75%、90%来水频率年下优化后发电计划偏离度分别由0.144、1.961、3.033减少为0.131、0.566、1.404,发电量分别增加了2万、560万、470万kW·h,表明通过调整发电与供水过程可以有效提升调度计划的合理性。

关键词:水库优化调度;调度计划;发电计划;供水计划;粒子群算法;大隆水库

A reservoir optimal operation model for scheduling plan//Li Yanru^{1,2,3,4}, Lin Pengfei⁴, You Jinjun⁴, Ren Zheng^{1,2,3}, Fu Min⁴, Tao Yesheng⁵(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering; 2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering; 3. Collaborative Innovation Center for Intelligent Regulation and Comprehensive Management of Water Resources, Hebei University of Engineering; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research; 5. Beijing Daxing Smart City Technology Co., Ltd.)

Abstract: Aiming at the mismatch problem in the operation process existing in reservoir scheduling plan management, a reservoir optimal operation model based on scheduling plans was proposed. This model takes the objective functions of minimizing water shortage for water users and minimizing deviation from power generation plans. The particle swarm optimization algorithm was used to optimize the power generation plan. The model was used to analyze the matching degree between the water supply and power generation processes, the change of reservoir storage capacity, and the monthly benefit transfer relationship of power generation capacity of the Dalong Reservoir in Sanya City. On the premise of ensuring the water supply plan, the deviation of the optimized power generation plan at 50%, 75%, and 90% inflow frequencies decreased from 0.144, 1.961, and 3.033 to 0.131, 0.566, and 1.404, respectively. The power generation increased by 0.02 million, 5.6 million, and 4.7 million kW·h, respectively. This indicates that adjusting the power generation and water supply processes can effectively improve the rationality of the scheduling plan.

Key words: reservoir optimal operation; scheduling plan; power generation plan; water supply plan; particle swarm optimization algorithm; the Dalong Reservoir

水库通常具有防洪、发电、城市供水、农业灌溉、保障河流生态流量等多类功能。随着经济社会发展和城镇化加快,区域水资源供需矛盾日益突出,如何协调水库多类功能成为调度运行的关键^[1-2]。制定水库调度计划^[3]是引导水库调度决策、提升水库综合效益的重要方式^[4]。

实行调度计划管理是贯彻落实“节水优先、空

间均衡、系统治理、两手发力”治水思路、推动水利高质量发展的重要举措^[5],也是提升流域及水利工程调度运行安全的重要手段^[6]。调度计划一般包括发电计划和供水计划,其中供水计划需考虑城市供水、农业灌溉及保障河流生态流量等多个任务。实际管理中,发电计划和供水计划通常由不同部门负责,前者通常由电网下达,后者由水行政主管部门

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3204601);国家自然科学基金项目(52079143);中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-202215)

作者简介:李燕茹(1999—),女,硕士研究生,主要从事水资源配置与调度研究。E-mail:2046290035@qq.com

通信作者:游进军(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水资源配置与调度研究。E-mail:yujj@iwhr.com

制定,难以全面考虑发电与供水之间的竞争关系。发电计划不合理可能使供水计划无法满足,从而导致调度计划的执行存在一定风险。因此,综合考虑发电和供水在用水总量及用水过程中的竞争关系,合理的水库调度计划十分重要。

水库优化调度对提升水库的运行效益至关重要,水库多目标优化调度属于复杂的动态非线性最优求解问题,需要根据水库运行要求和原则对入库流量进行合理调蓄和分配^[7]。目前,针对如何协调和统筹多目标间的竞争性以及如何提升多目标优化算法求解效率已有大量研究^[2]。例如:周建中等^[8]提出了多目标混合粒子群算法,以梯级水电站发电量最大和保证出力最大为目标,建立了梯级电站优化调度模型;韩军锋等^[9]建立了以火电厂运行成本最低、污染气体排放量最小和水电厂发电效益最大为目标的水火电短期多目标优化调度模型,采用基于反捕食粒子群算法的交互式模糊满意度多目标决策方法进行求解;杨光等^[10]将 PA-DDS 算法引入考虑供水和发电的多目标优化模型,并以供水效益最大和发电量最大为目标对水库调度图进行优化;王森等^[11]提出了基于 Fork/Join 多核并行框架的梯级水库群优化调度并行求解方法,并以离散微分动态规划方法并行化为例,给出了梯级水库群优化调度方法在 Fork/Join 框架下的并行化实现方式;马志鹏等^[12]提出了混合粒子群算法(HPSO),并以水库年发电量最大为目标求解了水库优化调度问题;Sun 等^[13]提出了以引水和发电量最大为目标的水库调度多目标优化模型,并采用基于自适应权向量调整分解的多目标进化算法进行求解;Ahmad 等^[14]在保障防洪目标和大坝安全的情况下实现了水电效益最大化;Suwal 等^[15]以发电量最大的同时最大限度地减少环境流量短缺为目标,建立了梯级水库的多目标优化调度模型;王丽萍等^[16]将调度期内两座梯级水库联合发电量最大作为目标函数建立了优化调度模型,并采用改进电子搜索算法进行求解;钟加星等^[17]以溪洛渡-向家坝梯级水库为例,以梯级总发电量最大和生态改变度最小为目标,建立了多目标优化调度模型;黄显峰等^[18]提出了改进廊道约束下的改进粒子群-主次逼近法,以发电量最大、生态保护程度最大为目标构建了目标函数集,综合考虑各种约束条件,对调度图进行了多目标优化;Sharifazaria 等^[19]采用纳什议价解方法,建立了水库调度的目标函数,并利用遗传算法和蚁群优化算法进行求解;王何予等^[20]使用高斯径向基函数拟合水库调度规则,以供水量、发电量和水文改变生态指标

为目标函数,在丹江口水库开展了多目标优化调度研究;王娟等^[21]以梯级水电站群发电效益最大为优化目标,采用改进的差分进化算法求解了优化调度模型;Rashid 等^[22]基于遗传算法优化规则曲线,实现了梯级水库水电及相关效益的最大化;周颖等^[23]以发电量、供水满足度最大和河道流量偏差函数值最小为目标,建立了水库群消落期多目标优化调度模型,采用非支配排序遗传算法求解,并针对湘江流域东江-双牌-涪天河水库群开展了实例研究;艾学山等^[24]以总发电量最大、最小出力最大和生态断面用水保证率最大为目标,建立了具有普适性的梯级水库群多目标优化调度模型;王峰等^[25]以东北第二松花江流域白山-丰满梯级水库水电站为例,提出了马尔可夫链随机径流降维描述模型,以调度期内发电量期望值最大作为优化调度模型的目标函数,解决了梯级水库随机优化调度模型求解的维数灾难问题;Hu 等^[26]以三峡-葛洲坝梯级水库为研究对象,构建了以总发电量最大和总生态溢缺水量最小为目标的生态调度优化模型,并利用 MOQPSO/D 算法进行求解;黄显峰等^[27]提出了改进 NSGA-II 算法,考虑防洪、发电、生态 3 个方面的目标,构建了梯级水库多目标优化调度模型;Ni 等^[28]将生态学的生态位理论创新性地应用于水库调度领域,提出了一种多目标水库运行状态关系测度分析方法,并对乌江流域梯级水库发电、供水和生态保护目标之间的关系进行了研究。总体而言,现有的水库多目标优化调度研究主要以如何发挥水库的最大效益为主,在满足防洪、生态等任务下使供水效益或发电效益达到最大,相关研究成果适用于水库工程规划以及调度规则制定阶段,但缺乏针对实际调度管理中如何协调发电计划和供水计划的研究。

工程调度计划的制定需要考虑流域、区域和电网的整体性与协调性,是一项复杂的系统性工作。国家电网实行区域联网电源发电计划管理制度,当某个电源的发电计划调整后,需要联网的其他电源进行相应调整。因此,水库发电计划的调整将引起电网内其他电源发电计划的调整,同样,供水计划的调整也需要协调其他水源供水计划。由于管理部门不同,发电计划与供水计划一般会存在不匹配性,因此,水库实际调度需尽量减少对调度计划的影响。基于此,本文以减少调度计划影响为目标,分析优化调度方式,以期提升发电计划与供水计划在用水总量与用水过程中的匹配性,支撑水库调度计划制定和实际运行等相关工作。

1 水库优化调度模型

1.1 建模思路

优化水库发电计划与供水计划的匹配性,需充分结合发电和供水的差异性和共性。在差异性方面,发电调度具有自主灵活性,以给定来水条件下获取最大发电效益为目标,水库偏向高水位运行,可通过较少的下泄水量实现较大的发电效益;而当水库蓄水量不足时,则需相应减少发电水量。而供水调度具有确定性目标,其供水过程由用户需水过程决定,根据需水要求供水以保障用水安全,主要是防止用户需水不能满足,超过需求供水不能获取额外效益。在共性方面,二者均需要控制水库蓄水过少或过多,一方面要考虑后续时段效应,避免蓄水过少导致后续时段供水短缺,另一方面要避免蓄水过多造成弃水,损失效益。因此,结合来水特性合理分配供水过程,使水库蓄水在调度期内合理消落,尽可能减少弃水和供水破坏是调度计划制定的核心。水库调度计划制定的难点在于如何综合考虑发电和供水过程的差异性和共性,协调两者在用水总量、用水过程及蓄水过程的关系。

水库发电与供水存在是否结合两种方式:不结合方式即发电与供水的输水系统相互独立,两者水量不存在重叠关系,彼此是完全竞争关系;结合方式即以发电尾水用于供水,效益具有共性,既竞争又协同。后者在调度计划制定实施上的协调关系更复杂,是本文的研究重点。

根据以上思路,按照“电调服从水调”原则分析发电计划与供水计划的匹配性,作为模型构建基础。当按照发电计划执行导致社会经济用水受到破坏时,需要对发电计划进行调整。协调发电与供水的关键在于调整发电过程,当供水计划无法满足时既可以调整本时段的发电计划,直接增加缺水时段下泄水量,也可以调整前序时段的发电计划,一方面减少前序发电用水量,增加后续时段的可供水量,另一方面可以维持一定水头差以减少发电效益损失,因此如何确定发电计划的调整时段及调整量是模型构建的关键。

基于以上分析,本文按照发电与供水结合模式设计计算流程,以供水破坏最低为优先目标,以发电量与发电计划偏离最小为次要目标,在满足其他防洪和工程运行安全约束条件下,构建优化模型。具体是以发电量为决策变量,设定发电量目标下的发电水量用于供水保障,发电尾水优先用于保障河道内生态流量,剩余尾水可用于城镇供水和农业灌溉,超过用水需求的发电水量不发挥效益。采用粒子群

算法对发电过程进行调整,并以用户缺水最小、发电计划偏离度最小为目标进行优化。

1.2 模型建立

1.2.1 优化准则

结合各任务的优先级及运行安全要求设计优化准则,具体内容如下:①按照“电调服从水调”的原则,应优先保障水库的供水任务;②按照“减少对电网稳定性影响”的原则,应尽量减少对发电计划的调整幅度;③遵循三级用水优先级,即优先保障生态基本需水,其次满足城镇供水,最后供给农业灌溉需水;④在优化过程中,应兼顾水库防洪、发电规模及供水规模约束,合理确定相应的约束条件。

1.2.2 目标函数

以生态、城镇、农业用户缺水最小以及发电计划偏离度最小为目标函数:

$$W_{De} = \min \sum_{t=1}^{12} \sum_{i=1}^3 (W_{demit} - W_{usit}) \quad (1)$$

$$R = \min \sum_{t=1}^{12} \frac{(N_t - E_t)^2}{E_t^2} \quad (2)$$

式中: W_{De} 为用水户的缺水量; i 为用水户分类编码,其中河道内生态用户为 1,城镇用户为 2,农业用户为 3; W_{demit} 为 i 用水户在 t 月的供水计划量; W_{usit} 为 i 用水户在 t 月的供水量; t 为月份; R 为发电计划偏离度; N_t 为 t 月的计算发电量; E_t 为 t 月的发电计划。

按照“电调服从水调”的原则,优化过程中优先比较缺水目标,当缺水目标相等时比较发电量目标。

1.2.3 约束条件

a. 水库水量平衡约束:

$$V_{t+1} = V_t + W_{int} - L_t - \max(Q_{Et}, \sum_{i=1}^3 W_{usit}) - Q_{Dr} \quad (3)$$

式中: V_{t+1} 为 $t+1$ 月的初始库容; V_t 为 t 月的初始库容; W_{int} 为 t 月入库水量; L_t 为 t 月水库的漏损水量; Q_{Et} 为 t 月发电量; Q_{Dr} 为 t 月水库弃水量。

b. 水库蓄水量约束:

$$V_{min} \leq V_t \leq V_{max} \quad (4)$$

式中: V_{min} 为死库容; V_{max} 为最大蓄水量,汛期时为水库防洪限制水位对应库容,非汛期时为水库正常蓄水位对应库容。

c. 水库下泄流量约束:

$$0 \leq Q_{Dr} \leq Q_{max} \quad (5)$$

式中: Q_{max} 为最大泄洪流量。

d. 发电量约束:

$$0 \leq Q_{Et} \leq Q_{Emax} \quad (6)$$

式中: $Q_{E_{\max}}$ 为电站水轮机最大过流流量。

e. 电厂输出约束:

$$0 \leq N_t \leq N_n \quad (7)$$

式中: N_n 为电站的装机容量。

f. 发电取水限制库容约束:

$$W_e = \begin{cases} V_t - V_{\min} & V_t > V_{\min} \\ 0 & V_t \leq V_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

式中: W_e 为可用于发电蓄水量; V_{\min} 为发电取水限制库容。

1.2.4 计算过程

按照发电和供水结合的方式设计发电、生态、城镇、农业的供水过程。

水库发电水量基于水库蓄水量和发电计划动态计算,将发电出力公式(式(9))转换为发电水量计算公式(式(10)和式(11)):

$$N_t = A Q_{E_t} H_t \quad (9)$$

$$Q_{E_t} = N_t / A H_t \quad (10)$$

$$Q_{E_t} = N_t / A [f(V_t) - g(Q_{E_t}) - \Delta h] \quad (11)$$

式中: A 为电站发电出力系数,可基于电站实际情况确定取值; H_t 为发电水头,根据水电站坝上水位、坝下水位与水头损失计算得出; $f(V_t)$ 为水库的水位-库容曲线,用于计算坝上 t 月水位; $g(Q_{E_t})$ 为水位-发电水量曲线,反映水库水位与对应时段内发电水量,用于计算坝下 t 月水位; Δh 为水头损失。

由式(11)可知,发电水量依赖于各时段的发电计划、水库蓄水量(水位)、库容曲线等多种因素。已知库容下的坝上水位采用牛顿插值法求解。

坝下水位为发电水量的函数,因此式(11)等号两边均有未知量发电水量。为求解高次方程,采用改进的 Powell 方法计算发电水量,计算步骤如下:

a. 初始化。选择一个合理的初始估计值 $Q_{E_{t0}}$ 对 Q_{E_t} 进行迭代计算;设置求解精度 ε ;选择方向向量 \mathbf{d} 的初始值为 $d_0 = -1$ 。 $Q_{E_{t0}}$ 为发电水量的初始估计值,可为水库可供水量。

b. 构建目标函数。定义目标函数 $F(Q_{E_{t(k+1)}})$:

$$F(Q_{E_{t(k+1)}}) = Q_{E_{t(k)}} - Q_{E_{t(k+1)}} \quad (12)$$

式中: $Q_{E_{t(k)}}$ 为 t 时段第 k 次迭代的发电水量; $Q_{E_{t(k+1)}}$ 为 t 时段第 $k+1$ 次迭代的发电水量。

c. 线性搜索。沿方向 d_k 进行一维搜索,找到新的点 $Q_{E_{t(k+1)}}$:

$$Q_{E_{t(k+1)}} = Q_{E_{t(k)}} + a d_k \quad (13)$$

$$Q_{E_{t(k)}} = \frac{E_t \Delta t}{A(f(V_t) - g(Q_{E_{t(k)}}) - \Delta h)} \quad (14)$$

式中: a 为搜索步长; d_k 为第 k 次迭代的搜索方向; Δt 为计算时段长度,本文为月。

d. 更新方向。计算新的函数值 $F(Q_{E_{t(k+1)}})$,

方向更新公式为:

$$d_k = \begin{cases} 1 & F(Q_{E_{t(k)}}) F(Q_{E_{t(k+1)}}) \geq 0 \\ -1 & F(Q_{E_{t(k)}}) F(Q_{E_{t(k+1)}}) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

e. 检查收敛。若 $F(Q_{E_{t(k+1)}}) < \varepsilon$,则停止迭代,输出 $Q_{E_{t(k+1)}}$ 作为解。

当水库蓄水量超过发电取水限制库容时,发电尾水按照下游生态流量、城镇生活及生产、农业灌溉的顺序依次保障;当水库蓄水量低于发电取水限制库容且用户存在缺水时,可进一步使用死库容以上的蓄水量进行供水。

1.2.5 优化方法

粒子群算法因其较为完备的理论结构、高效的全局寻优性能以及易于实现、可移植性强等特点在工程计算及科学研究的各个领域得到广泛的应用^[29]。该算法原理简单,易编程实现,占用计算机内存少,能以较快的速度收敛到全局最优解,是一种有效的搜索算法^[30]。因此本文以粒子群算法作为优化方法。

以发电量为决策变量,将水库供水过程与粒子群算法结合,求解步骤如下:

a. 选取决策变量。以 12 月的逐月发电量为决策变量,一组 12 月的发电量即为粒子群算法中的一个粒子。

b. 设置算法参数。粒子种群规模为 1 000, 50%、75%、90% 来水频率年的粒子迭代次数分别设为 300、400、500,惯性权重 w 取 0.8,学习因子 c_1 、 c_2 均取 0.5。

c. 确定初代粒子的初始位置和初始速度。根据水库发电装机容量,初代粒子以最大发电量为上限,以 0 为下限,在区间内随机生成。

d. 根据目标函数(式(1)和式(2))计算粒子适应度值,寻找粒子群中的全局最优粒子和个体最优粒子,对发电计划进行迭代更新,并进行约束条件判断,当超过区间约束值可取上限值或者下限值。

e. 判断是否达到跳出循环计算的条件。如果达到条件,则跳出循环,输出结果;如果未达到条件,则继续循环计算。模型运算流程见图 1。

2 实例分析

2.1 研究区概况

大隆水库位于海南省三亚市西部的宁远河中下游河段,是三亚市最重要的水资源调配工程,控制集水面积为 749 km²,占宁远河流域面积的 73.4%,多年平均入库水量为 6.33 亿 m³。大隆水库为大(2)型水库,总库容为 4.68 亿 m³,正常蓄水位为 70.0 m,正常库容为 3.93 亿 m³,防洪库容为

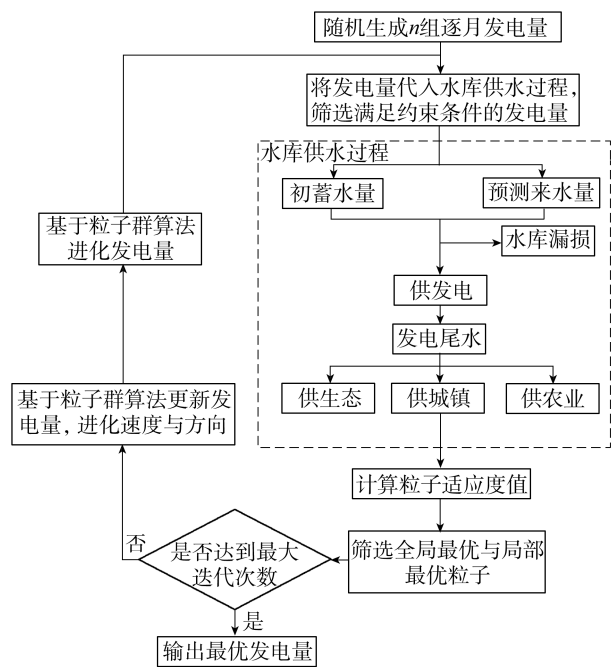


图1 模型运算流程

1.48 亿 m^3 。大隆水库的主要任务为防洪、供水、灌溉并结合发电。水库坝后设置 3 台机组,总装机容量为 7500 kW,当库水位低于 42.50 m 时,机组不运行,引水隧洞取水后经旁通管放水进入尾水池后分配水量,按需分别用于城市供水和农业灌溉。大隆水库近三年平均发电水量为 3.07 亿 m^3 ,发电尾水中用于城镇供水的量为 5143 万 m^3 ,用于农业灌溉的量为 8911 万 m^3 。目前,水库的供水、灌溉任务未达到设计标准,来水主要用于发电,随着供水任务加重,发电计划和供水计划的不匹配性增强,因此需要协调发电计划与供水计划在总量及过程上的匹配性,提高水库综合利用效益。

2.2 数据资料

大隆水库入库水量具有年际及年内变化大的特点,来水均集中在汛期(5—10月)。其中,50%、75%、90%来水频率年入库水量分别为 44 505 万、

38 028 万、29 819 万 m^3 。入库水量的不均衡性增加了水库调度计划的制定难度。大隆水库制定的 2023 年发电计划量逐月过程、大隆水库坝址处各月生态流量目标值、大隆水库的城镇供水逐月计划量以及大隆灌区逐月供水计划量见表 1。

2.3 方案设置

根据大隆水库调度任务及计算方式设置 4 组方案进行对比,并按照 50%、75%、90%来水频率年分别计算。F1、F2 与 F3 为模拟方案,F4 为优化方案。其中,方案 F1 和 F2 为单一模式,仅按照供水计划或者发电计划调度运行,分析对另一计划的保障情况;方案 F3 和 F4 为耦合模式,同时考虑发电计划与供水计划,比较不同调度效果。

方案 F1 仅考虑供水计划,按照供水发电,分析按供水计划调度运行对发电计划的影响。方案 F2 仅考虑发电计划,发电尾水用于供水,分析按发电计划调度对供水计划的影响。方案 F3 为模拟方案,综合考虑供水计划与发电计划,逐时段调度,当发电尾水不满足供水计划时,可增加相应时段水库供水量。方案 F4 为优化方案,当蓄水量位于发电取水限制库容以上时仅将发电尾水用于供水,当蓄水量位于发电取水限制库容以下时可用蓄水量增加供水量,通过调整所有时段的发电计划,提高发电计划与供水计划在供水总量和过程上的匹配性。

2.4 结果与分析

2.4.1 模拟方案

2.4.1.1 单一模式调度过程

对方案 F1 和 F2 进行计算,3 个来水频率年下两方案的农业用水供需平衡见表 2,逐月发电量与发电水量过程见图 2。

根据计算结果,在供水计划保障方面,方案 F1 按照供水计划调度,各来水频率年供水计划均可保障;方案 F2 按照发电计划调度,城镇、生态用户供水计划均可保障,但发电尾水在 50%、75%来水频率年

表 1 大隆水库相关数据

| 月份 | 入库水量/万 m^3 | | | 发电计划量/(万 kW·h) | 生态流量目标值/(m^3/s) | 城镇供水计划量/万 m^3 | 农业供水计划量/万 m^3 | | |
|----|--------------|-------|-------|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------|-------|
| | 50%频率 | 75%频率 | 90%频率 | | | | 50%频率 | 75%频率 | 90%频率 |
| 1 | 1279 | 1056 | 775 | 200 | 1.5 | 642 | 486 | 556 | 652 |
| 2 | 843 | 632 | 536 | 100 | 1.79 | 545 | 472 | 542 | 636 |
| 3 | 724 | 578 | 311 | 100 | 1.06 | 638 | 1546 | 1783 | 2091 |
| 4 | 478 | 697 | 508 | 150 | 1.65 | 596 | 1273 | 1468 | 1721 |
| 5 | 4471 | 897 | 3382 | 150 | 1.08 | 639 | 1069 | 1233 | 1446 |
| 6 | 1924 | 2001 | 1215 | 150 | 3.08 | 616 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 4943 | 3026 | 2762 | 260 | 1.95 | 600 | 664 | 766 | 898 |
| 8 | 9508 | 8382 | 4887 | 400 | 4.21 | 514 | 679 | 783 | 918 |
| 9 | 10087 | 7229 | 4048 | 400 | 6.7 | 495 | 118 | 136 | 159 |
| 10 | 4717 | 7230 | 7436 | 360 | 5.58 | 488 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 3046 | 3623 | 2685 | 330 | 6.05 | 522 | 488 | 562 | 660 |
| 12 | 2487 | 2678 | 1273 | 300 | 1.79 | 534 | 477 | 550 | 644 |

表 2 3 个来水频率年方案 F1 与 F2 的农业供需平衡结果

单位:万 m³

| 月份 | 供水量 | | | | | | 农业缺水水量 | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 50%频率 | | 75%频率 | | 90%频率 | | 50%频率 | | 75%频率 | | 90%频率 | |
| | 方案 F1 | 方案 F2 | 方案 F1 | 方案 F2 | 方案 F1 | 方案 F2 | 方案 F1 | 方案 F2 | 方案 F1 | 方案 F2 | 方案 F1 | 方案 F2 |
| 1 | 486 | 486 | 556 | 556 | 652 | 652 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 472 | 472 | 542 | 542 | 636 | 636 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1546 | 851 | 1783 | 903 | 2091 | 965 | 0 | 695 | 0 | 880 | 0 | 1126 |
| 4 | 1273 | 1273 | 1468 | 1468 | 1721 | 1721 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 1069 | 1069 | 1233 | 1233 | 1446 | 1446 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 664 | 664 | 766 | 766 | 898 | 898 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 679 | 679 | 783 | 783 | 917 | 917 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 118 | 118 | 136 | 136 | 159 | 159 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 488 | 488 | 562 | 562 | 659 | 541 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 119 |
| 12 | 477 | 477 | 550 | 550 | 644 | 87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 558 |
| 合计 | 7271 | 6576 | 8379 | 7499 | 9824 | 8022 | 0 | 695 | 0 | 880 | 0 | 1802 |

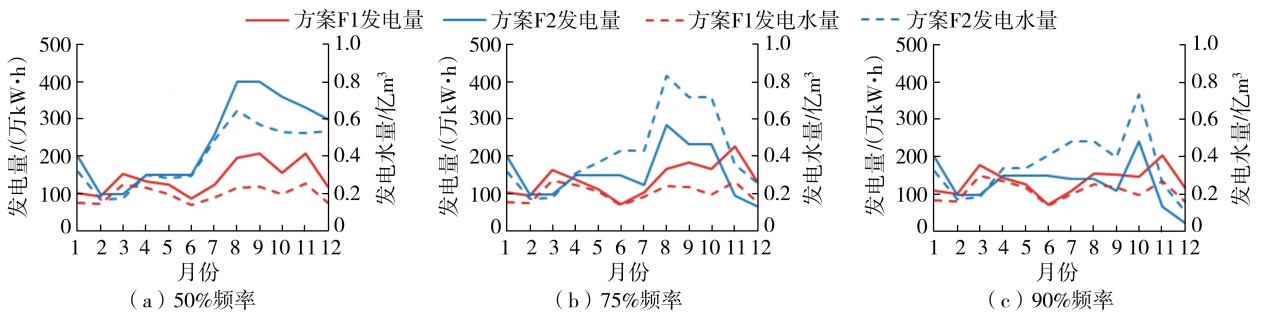


图 2 3 个来水频率年方案 F1 与 F2 发电量与发电水量过程

3 月未能保障农业供水计划,90%来水频率年 3 月以及 11—12 月未能保障农业供水计划。

在发电计划保障方面,50%、75%来水频率年方案 F1 发电效益远低于方案 F2,90%来水频率年入库水量不足,方案 F1 与 F2 年发电量仅相差 40 万 kW·h,与发电计划偏离量分别为 1278 万、1318 万 kW·h,偏离度分别为 3.061、2.718。可见,仅考虑某一项调度计划会对其他计划产生不利影响,尤其在枯水年份影响更为明显,因此提高发电计划与供水计划的过程匹配性十分必要。

2.4.1.2 耦合模式调度过程

方案 F3 的逐月发电量与发电水量见表 3。在供水计划保障方面,方案 F3 的用户供水计划均得到了保障,各用水户均无缺水情况。50%、75%、90%来水频率年下,3 月发电量由计划的 100 万 kW·h 分别增加至 138 万、146 万、156 万 kW·h,发电水量与方案 F2 相比分别增加了 710 万、890 万、1132 万 m³,保障了 3 月的农业供水计划量。对于方案 F2 在 90%来水频率年 11—12 月的缺水情况,由于方案 F3 水库蓄水量达到了发电取水限制库容,无法通过增加发电水量来保障供水情况,由此采用水库补水的方式保障这两个月的缺水,因此该部分供水量未增加发电效益。

表 3 方案 F3 发电量与发电水量过程

| 月份 | 发电计划量/ (万 kW·h) | 发电量/(万 kW·h) | | | 发电水量/万 m ³ | | |
|----|--------------------|--------------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|
| | | 50% 频率 | 75% 频率 | 90% 频率 | 50% 频率 | 75% 频率 | 90% 频率 |
| 1 | 200 | 200 | 200 | 200 | 3165 | 3191 | 3226 |
| 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 1691 | 1724 | 1754 |
| 3 | 100 | 138 | 146 | 156 | 2483 | 2715 | 3020 |
| 4 | 150 | 150 | 150 | 150 | 3025 | 3140 | 3389 |
| 5 | 150 | 150 | 150 | 150 | 2819 | 3695 | 3413 |
| 6 | 150 | 150 | 150 | 150 | 2973 | 4360 | 4122 |
| 7 | 260 | 260 | 123 | 142 | 4912 | 4329 | 4842 |
| 8 | 400 | 400 | 285 | 141 | 6467 | 8327 | 4832 |
| 9 | 400 | 400 | 234 | 112 | 5708 | 7174 | 3993 |
| 10 | 360 | 360 | 234 | 243 | 5292 | 7175 | 7381 |
| 11 | 330 | 330 | 97 | 68 | 5251 | 3568 | 2631 |
| 12 | 300 | 300 | 67 | 25 | 5355 | 2623 | 1100 |
| 合计 | 2900 | 2938 | 1938 | 1637 | 49142 | 52023 | 43704 |

在发电计划保障方面,75%、90%来水频率年下年发电量分别为 1938 万、1637 万 kW·h,均低于发电计划量,主要由于 7—12 月水库蓄水量达到水库的发电取水限制库容,限制了发电水量,导致年度发电计划偏差较大。

方案 F3 与方案 F1 和 F2 相比,在保障生态、城镇与农业供水计划的同时增加了发电效益,但发电过程与发电计划相比仍存在一定不合理性。因此,需要采用优化方法对发电计划所有时段进行整体调

整,在保障供水的同时减少发电计划的偏离程度。

2.4.2 优化方案

2.4.2.1 计算效率

以方案 F3 的年末库容作为约束条件对方案 F4 进行优化计算。为保证达到全局最优值,将 50%、75%、90% 来水频率年迭代次数上限分别设为 300、400、500。为分析优化模型的计算效率,各典型年均进行了 3 次计算,并以目标函数值最小的解为代表分析迭代结果(表 4、图 3)。50%、75%、90% 用户供水计划均得到满足,发电计划偏离度分别为 0.131、0.566、1.404。其中,50%、75%、90% 来水频率年分别在第 103、256、331 次迭代达到最优,计算时间分别为 365、374、385 s,表明模型具有较高的计算速率,且枯水年份达到最优的迭代次数较多。

表 4 模型优化部分迭代参数及结果

| 来水频率/% | 种群数/个 | 迭代次数 | 计算时间/s | 偏离度 |
|--------|-------|------|--------|-------|
| 50 | 1000 | 300 | 270 | 0.131 |
| | 1000 | 400 | 365 | 0.131 |
| | 1000 | 500 | 426 | 0.131 |
| 75 | 1000 | 300 | 277 | 0.569 |
| | 1000 | 400 | 374 | 0.566 |
| | 1000 | 500 | 457 | 0.568 |
| 90 | 1000 | 300 | 300 | 1.455 |
| | 1000 | 400 | 385 | 1.404 |
| | 1000 | 500 | 516 | 1.475 |

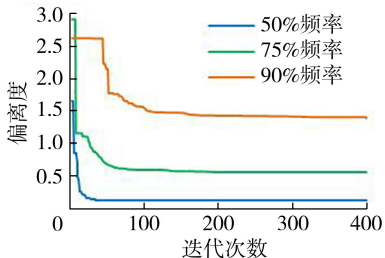


图 3 3 个来水频率年模型优化迭代过程

2.4.2.2 年度优化结果

优化后各来水频率年各用户的供水计划量均得到了满足,无缺水情况。方案 F3 与 F4 的年发电量与发电水量如表 5 所示,50%、75%、90% 来水频率年方案 F4 的总发电量较方案 F3 分别增加了 2 万、560 万、470 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,50% 来水频率年发电计划偏离度由 0.144 减少为 0.131,75% 来水频率年由 1.961 减少为 0.566,90% 来水频率年由 3.033 减少为 1.404,表明优化后发电计划更为合理。

表 5 方案 F3 和 F4 年发电量及发电水量

| 来水频率/% | 发电水量/ 万 m^3 | | 发电量/($\text{万 kW} \cdot \text{h}$) | | 偏离度 | |
|--------|----------------------|--------|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| | 方案 F3 | 方案 F4 | 方案 F3 | 方案 F4 | 方案 F3 | 方案 F4 |
| 50 | 49 142 | 49 305 | 2 938 | 2 940 | 0.144 | 0.131 |
| 75 | 52 023 | 51 722 | 1 938 | 2 498 | 1.961 | 0.566 |
| 90 | 43 704 | 43 462 | 1 637 | 2 107 | 3.033 | 1.404 |

2.4.2.3 月度优化结果

根据方案 F3 和 F4 的计算结果(图 4 和图 5),50% 来水频率年大隆水库发电量由 2 938 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 增加为 2 940 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,其中 3 月为了保障农业供水计划,通过调高发电计划增加了发电水量,提升了发电计划与供水计划的匹配性。

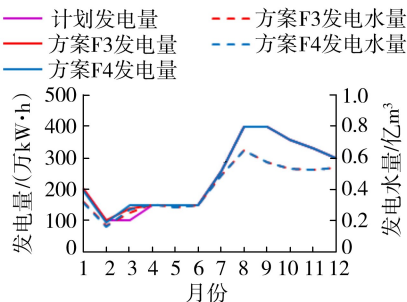


图 4 50%来水频率年方案 F3 和 F4 发电量及发电水量

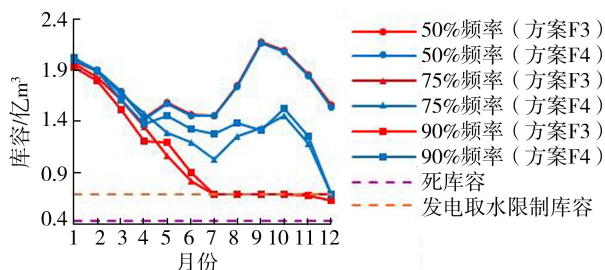


图 5 3 个来水频率年方案 F3 和 F4 逐月末库容

根据逐月末库容变化情况(图 5),75% 来水频率年方案 F4 的水库逐月蓄水量均高于方案 F3,因此虽然发电水量基本一致但发电量却明显提升,同时优化方案将非汛期末(6 月)的蓄水量由 0.82 亿 m^3 提高至 1.20 亿 m^3 ,减少了后续时段来水不足无法保障供水计划的风险。结合逐月发电量和发电水量(图 6)进一步分析,方案 F4 增加了 3 月的发电水量,既增加了发电效益,又避免了方案 F2 农业用水户出现缺水的问题。

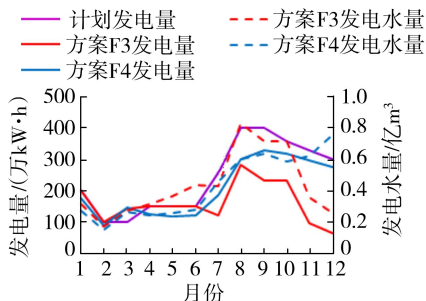


图 6 75%来水频率年方案 F3 和 F4 发电量及发电水量

从发电过程分析,虽然 1—2 月、4—6 月发电量有所下调,但增加了 7—12 月的发电量,从而减少了各时段发电量与发电计划的偏离程度。可见,优化方案的发电计划与供水计划匹配性更好。

根据逐月末库容变化情况(图 5),90% 来水频

率年方案 F4 的水库蓄水量均高于方案 F3,因此虽然发电水量基本一致但发电量有所提升,同时优化方案将非汛期末(6月)的蓄水量由 0.90 亿 m^3 提高至 1.33 亿 m^3 ,减少了后续时段来水不足、无法保障供水计划的风险。结合各时段发电量和发电水量(图 7)进一步分析,方案 F4 主要减少了 1—8 月和 10 月的发电水量,一方面维持了高水头差,另一方面节省的水量满足了 11 月与 12 月的供水计划,相较于方案 F3 在应对 11 月与 12 月的缺水情况时的策略,方案 F4 由于蓄水量高于发电取水限制库容,因此增加了供水量,发挥了发电效益。可见,优化方案的发电计划与供水计划匹配性更好。

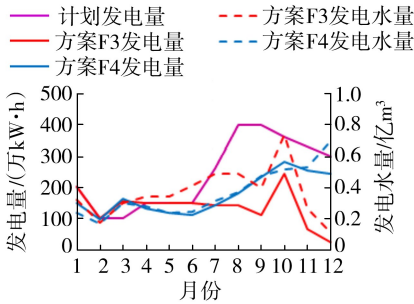


图 7 90%来水频率年方案 F3 和 F4 发电量及发电水量

2.4.3 效益转移

在与方案 F3 总下泄水量基本一致的情况下,方案 F4 通过优化发电过程不仅保证了供水计划,而且提升了发电效益。增加发电效益主要通过两个途径实现:①通过增加下泄水量直接增加发电量;②通过抬高蓄水水位间接增加发电量。优化不同月份的发电计划,实质是通过发电水量、蓄水量过程的调整实现年内不同月份效益转移。根据方案 F4 与 F3 各时段的蓄水位、发电水量等结果进一步分析发电效益转化情况。其中,发电水量相等时,因水头差异造成的发电量变化情况作为水头效益,而因额外增加或者减少发电水量造成的发电量变化作为水量效益。以 90%来水频率年优化结果为例进行分析。

2.4.3.1 年度发电效益

对年内发电的水头效益和水量效益进行分析,方案 F4 的水库蓄水量一直高于方案 F3,因此方案 F4 各时段的水头效益均为正值,全年累计水头效益为 581 万 $kW \cdot h$ 。9 月以及 11—12 月方案 F4 发电水量较方案 F3 增加,水量效益增加的发电量为 369 万 $kW \cdot h$;方案 F4 其余月份发电水量较方案 F3 减少,水量效益减少的发电量为 480 万 $kW \cdot h$,综合考虑,水量效益减少的总发电量为 111 万 $kW \cdot h$ 。因此增加的总发电效益为 470 万 $kW \cdot h$ 。

2.4.3.2 月度发电效益

各月份发电效益转移量见表 6。7—12 月方案

F4 的发电效益高于方案 F3,增加的发电量来自水头效益和水量效益两方面。以 11 月为例,方案 F3 与 F4 的发电量分别为 68 万、255 万 $kW \cdot h$,发电水量分别为 2631 万 m^3 、5269 万 m^3 。方案 F4 与 F3 的水头差分别为 20.51、10.89 m,根据式(10)计算得出在相同发电水量的情况下增加的发电量 60 万 $kW \cdot h$;同时,为了满足社会经济用水量,增加发电水量为 2638 万 m^3 ,根据式(10)计算得出增加的发电量为 127 万 $kW \cdot h$ 。综上所述,11 月水头效益增加的发电效益占比为 32%,水量效益增加的发电效益占比为 68%。

表 6 逐月发电效益转移量 单位:万 $kW \cdot h$

| 月份 | 水头效益 | 水量效益 | 总效益 |
|----|------|------|-----|
| 1 | 3 | -55 | -52 |
| 2 | 4 | -6 | -3 |
| 3 | 7 | 0 | 7 |
| 4 | 11 | -30 | -18 |
| 5 | 19 | -50 | -32 |
| 6 | 39 | -78 | -38 |
| 7 | 80 | -79 | 1 |
| 8 | 98 | -57 | 40 |
| 9 | 84 | 36 | 120 |
| 10 | 163 | -124 | 39 |
| 11 | 60 | 128 | 187 |
| 12 | 13 | 205 | 218 |
| 合计 | 581 | -111 | 470 |

同时,1 月及 4—6 月的发电量为减少趋势,从图 2~7 可以看出,虽然减少发电量造成了一定的发电损失,但方案 F4 提高了水头差以补充部分发电损失量。以 6 月为例,方案 F3 与 F4 的发电量分别为 150 万、112 万 $kW \cdot h$,发电水量分别为 4 122 万、2 428 万 m^3 。与方案 F3 相比,方案 F4 的发电水量减少了 1 694 万 m^3 ,造成发电量减少了 77 万 $kW \cdot h$ 。但方案 F4 与方案 F3 的水头差分别为 19.46、15.41 m,由于水头效益,方案 F4 的发电量增加了 39 万 $kW \cdot h$ 。因此,总体而言,方案 F4 较方案 F3 减少的发电量为 38 万 $kW \cdot h$,降低了发电水量减少带来的效益损失。

3 结论

a. 三亚市大隆水库调度计划中,与模拟方案相比,各来水频率年优化方案的总发电量均提高,发电计划偏离度均减少。同时,各用水户供水计划均可得到保障,表明经过优化后发电计划与供水计划的匹配性较为合理。

b. 采用生态、城镇、农业用水户计划缺水量最小以及发电计划偏离量最小作为目标函数,运用粒子群算法进行优化求解,模型在枯水年时进入最优

时的迭代次数更高,计算时间分别为 365、374、385 s,表明模型具有较高的计算速率与稳定性。

c. 在满足供水计划的前提下,可通过增加下泄水量、抬高蓄水位来直接或间接增加发电量,提高发电效益。调整发电计划时需对月度过程整体进行调整,通过对发电水量、供水量及蓄水量过程进行优化,实现月份间水头效益与水量效益的转移,从而提升发电计划与供水计划的匹配性。

参考文献:

[1] 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))

[2] 王敬,吴瑕,刘路广,等. 基于二层规划的水库主从目标调度模型及应用研究[J]. 水力发电,2021,47(10):71-74. (Wang Jing, Wu Xia, Liu Luguang, et al. Research on the optimization and application of multi-objective reservoir operation model based on bilevel programming [J]. Water Power, 2021,47(10):71-74. (in Chinese))

[3] 李想,魏加华,司源,等. 权衡供水与发电目标的水库调度建模及优化[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(5):973-979. (Li Xiang, Wei Jiahua, Si Yuan, et al. Modeling and optimizing reservoir operation for trade-off between water supply and power generation objectives [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015,13(5):973-979. (in Chinese))

[4] 彭方旭,汪妮,魏霞. 基于改进粒子群算法的多水库复杂联合供水优化调度研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022,33(3):143-148. (Peng Fangxu, Wang Ni, Wei Xia. Optimal operation of multi-reservoir complex joint water supply based on improved particle swarm optimization [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(3):143-148. (in Chinese))

[5] 李肇桀,张旺,王亦宁. 计划用水管理面临的问题及对策建议专题调研报告[J]. 水利发展研究, 2023, 23(11):18-22. (Li Zhaojie, Zhang Wang, Wang Yining. Special research report on the problems faced by planned water management and relevant measures [J]. Water Resources Development Research, 2023,23(11):18-22. (in Chinese))

[6] 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:在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1):1-10. (Li Guoying. Safeguarding water security in a comprehensive way to strive for a strong country and great

cause of national rejuvenation with Chinese path to modernization: speech at the 2024 National Working Conference on Water Resources [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24 (1): 1-10. (in Chinese))

[7] 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))

[8] 周建中,李英海,肖舸,等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010,41(10):1212-1219. (Zhou Jianzhong, Li Yinghai, Xiao Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations based on shuffled particle swarm operation algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010,41(10):1212-1219. (in Chinese))

[9] 韩军锋,程春萌,燕妮. 基于 APSO 算法的水火电力系统模糊多目标优化调度[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(4):65-71. (Han Junfeng, Cheng Chunmeng, Yan Ni. Multi-objective fuzzy optimal scheduling for hydro-thermal power system based on anti-predatory particle swarm algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University, 2012,39(4):65-71. (in Chinese))

[10] 杨光,郭生练,刘攀,等. PA-DDS 算法在水库多目标优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2016,47(6):789-797. (Yang Guang, Guo Shenglian, Liu Pan, et al. PA-DDS algorithm for multi-objective reservoir operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016,47(6):789-797. (in Chinese))

[11] 王森,马志鹏,李善综,等. 基于 Fork/Join 多核并行框架的梯级水库群优化调度[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2):48-54. (Wang Sen, Ma Zhipeng, Li Shanzong, et al. Optimal operation of cascaded reservoirs based on Fork/Join multi-core parallel framework [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(2):48-54. (in Chinese))

[12] 马志鹏,周耀强,王森,等. 混合粒子群算法在水库中长期发电优化调度中的应用[J]. 人民珠江, 2018, 39(9):82-86. (Ma Zhipeng, Zhou Yaoqiang, Wang Sen, et al. Application of hybrid particle swarm optimization in medium-long term optimal generation operation of reservoir [J]. Pearl River, 2018,39(9):82-86. (in Chinese))

[13] Sun Xiaomei, Luo Jungang, Xie Jiancang. Multi-objective optimization for reservoir operation considering water diversion and power generation objectives [J]. Water, 2018,10(11):1540.

[14] Ahmad S K, Hossain F. Maximizing energy production from hydropower dams using short-term weather forecasts

- [J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 1560-1577.
- [15] Suwal N, Huang Xianfeng, Kuriqi A, et al. Optimisation of cascade reservoir operation considering environmental flows for different environmental management classes[J]. *Renewable Energy*, 2020, 158: 453-464.
- [16] 王丽萍, 李宁宁, 阎晓冉, 等. 基于改进电子搜索算法的梯级水库联合发电优化调度[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 1916-1922. (Wang Liping, Li Ningning, Yan Xiaoran, et al. Cascade reservoirs' joint optimal operation of power generation based on improved electro-search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(8): 1916-1922. (in Chinese))
- [17] 钟加星, 董增川, 姚弘祎, 等. 梯级水库群多目标优化调度规则研究: 以溪洛渡-向家坝为例[J]. *水力发电学报*, 2021, 40(9): 46-54. (Zhong Jiaying, Dong Zengchuan, Yao Hongyi, et al. Multi-objective operation rules for cascade reservoirs. Case study of Xiluodu-Xiangjiaba cascade [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(9): 46-54. (in Chinese))
- [18] 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))
- [19] 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.
- [20] 王何予, 田晶, 郭生练, 等. 考虑水文改变生态指标的丹江口水库多目标优化调度[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2022, 20(6): 1041-1051. (WANG Heyu, TIAN Jing, GUO Shenglian, et al. Multi-objective optimal operation for Danjiangkou Reservoir considering ecological indicators of hydrologic alteration [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(6): 1041-1051. (in Chinese))
- [21] 王娟, 王冉旋, 王奕, 等. 考虑生态灌溉需求的梯级水电站群多目标优化调度研究[J]. *中国农村水利水电*, 2022(3): 221-226. (Wang Juan, Wang Ranxuan, Wang Yi, et al. Multi-objective optimal operation of cascade hydropower stations considering ecological and irrigation demands [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(3): 221-226. (in Chinese))
- [22] Rashid M U, Abid I, Latif A. Optimization of hydropower and related benefits through cascade reservoirs for sustainable economic growth [J]. *Renewable Energy*, 2022, 185: 241-254.
- [23] 周颖, 周研来, 郭生练, 等. 水库群消落期多目标智能优化调度研究[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(9): 70-78. (Zhou Ying, Zhou Yanlai, Guo Shenglian, et al. Multi-objective intelligent optimal drawdown operation of multiple reservoirs [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(9): 70-78. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 王峰, 王建平, 王亦宁, 等. 改进的显随机动态规划在梯级水库优化调度中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2023(8): 7-12. (Wang Feng, Wang Jianping, Wang Yining, et al. Application of the improved explicit stochastic dynamic programming model in the optimal operation of cascade reservoirs [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(8): 7-12. (in Chinese))
- [26] Hu Hu, Zuo Qiting, Li He, et al. Stochastic multi-attribute group decision-making for long-term comprehensive operation of cascade reservoirs under multiple uncertainties [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 53: 101758.
- [27] 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))
- [28] 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.
- [29] 刘宇, 许新宇, 李晓澜, 等. 水库发电优化调度改进粒子群算法应用[J]. *水力发电*, 2024, 50(1): 53-57. (Liu Yu, Xu Xinyu, Li Xiaolan, et al. Application of improved particle swarm optimization in reservoir scheduling optimization [J]. *Water Power*, 2024, 50(1): 53-57. (in Chinese))
- [30] 杨道辉, 马光文, 过夏明, 等. 粒子群算法在水电站优化调度中的应用[J]. *水力发电学报*, 2006, 25(5): 5-7. (Yang Daohui, Ma Guangwen, Guo Xiaming, et al. Application of particles swarm optimization technique to optimal operation of hydropower station [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(5): 5-7. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-11-07 编辑: 俞云利)