

考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度研究

方国华¹,王海政²,吴承君³,黄显峰¹,王仲梅³

(1. 河海大学水利水电学院,江苏南京 210098; 2. 水电水利规划设计总院,北京 100120;
3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院,河南郑州 450003)

摘要:针对现有水电站弃水风险计算结果与实际情况存在较大偏差的问题,基于水量平衡原理,通过识别弃水风险因素,提出了耦合径流和负荷双重不确定性的梯级水库弃水风险量化方法;引入临界弃水概率的概念,提出了基于预警空报率和漏报率联合最小的梯级水库临界弃水概率确定方法以及基于临界弃水概率的梯级水库供水期末库水位消落控制方法;在此基础上,构建了考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度模型,并以乌江梯级水库群为对象开展了实例研究。结果表明:乌江梯级水库群弃水概率与弃水流量间存在显著的单调递增关系;耦合调度期和余留期的两阶段方案发电效益较常规优化调度方案增加了约0.51%,生态效益提高了约1.06倍。

关键词:弃水风险;梯级水库;临界弃水概率;发电调度;生态调度;多目标优化;乌江梯级水库群

中图分类号:TV697

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)06-0020-08

Study on mid- and long-term multi-objective optimal operation of cascade reservoirs considering water abandonment risk//FANG Guohua¹, WANG Haizheng², WU Chengjun³, HUANG Xianfeng¹, WANG Zhongmei³
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 3. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Aiming at the problem of significant deviation between the calculation results of abandoned water risk in existing hydropower stations and the actual situation, based on the principle of water balance, a cascade reservoir abandoned water risk quantification method coupling runoff and load dual uncertainties was proposed by identifying abandoned water risk factors. The concept of critical abandonment probability was introduced, and a method for determining the critical abandonment probability of cascade reservoirs based on the joint minimum of warning false alarm rate and missed alarm rate, as well as a method for controlling the water level drop of cascade reservoirs at the end of the water supply period based on the critical abandonment probability, were proposed. On this basis, a mid- and long-term multi-objective optimal operation model considering the abandoned water risk in cascade reservoirs was constructed, and a case study was conducted on the Wujiang cascade reservoir group. The results show that there is a significant monotonic increasing relationship between the abandoned water probability and the abandoned water flow rate in the Wujiang cascade reservoir group. The two-stage scheme of coupling operation period and residual period has increased the power generation efficiency by about 0.51% compared to the conventional optimized scheduling scheme, and the ecological efficiency has increased by about 1.06 times.

Key words: water abandonment risk; cascade reservoirs; critical abandonment probability; generation operation; ecological operation; multi-objective optimization; Wujiang cascade reservoir group

随着水电站建成和投运数量的急剧增加,受水雨情、电力系统不确定性影响,水电站弃水频发,降低了水能资源利用率,影响了水电站经济效益的发挥。准确量化水电站水库弃水风险,通过改变水电站调度策略以减少弃水是提高水能资源利用率的有效途径。目前国内外针对弃水风险的研究主要包括

定量分析和定性评价两方面。在定量分析方面,一方面通过长系列模拟调度,以弃水方案与总调度方案个数的比值表征弃水风险^[1-4],如张聪通等^[5]通过随机模拟生成多组入库流量方案,针对水电站进行定出力模拟,引入多个表征弃水风险的指标,实现了对弃水风险的量化;张鸿雪^[6]通过模拟随机生成

100 组径流序列,构建和求解发电量最大模型,统计计算了弃水风险指标值;曹璐等^[7]通过计算预报降雨等级与实际降雨等级之间的条件概率分布,基于水量平衡方程,量化了不同降雨预报信息下的水电站水库弃水风险。另一方面,有学者以水电站最大发电流量作为出库流量,通过计算起调水位与防洪限制水位间的可蓄水量,基于历史径流频率曲线插值确定临界来水频率,并以此表征弃水概率^[8-10]。此外,文旭等^[11]从电力电量消纳角度出发,通过考虑水电站出力的随机性,基于半绝对离差风险,以水电站月随机电量与月期望电量之差表征弃水风险。在定性评价方面,主要通过模拟优化调度,以弃水量间接表征弃水风险^[12-15],如朱锦干等^[16]以金沙江下游梯级水库作为研究对象,针对不同典型来水情况及库水位不同消落时机进行模拟调度,确定了可统筹兼顾水电站发电量和弃水量的优化调度方案;曹瑞等^[17]基于长系列日径流过程,通过计算蓄水期各月的弃水流量,从而表征弃水风险。

虽然国内外学者在水电站水库弃水风险表征方面进行了大量的研究,但在水库实际调度运行过程中,常用的水电站水库弃水风险计算方法未全面考虑来水不确定性及电站调峰、调频等影响,导致计算结果经常与实际情况存在较大偏差。鉴于此,本文基于水量平衡原理,通过识别梯级水库弃水风险因素,统筹考虑来水预报和电网负荷预测不确定性,基于 Gumbel-Hugaard Copula 函数,提出梯级水库弃水风险量化方法,引入临界弃水概率的概念,提出基于预警空报率和漏报率联合最小的梯级水库临界弃水概率确定方法和基于临界弃水概率的梯级水库供水期末库水位消落控制方法。在此基础上,以梯级水库发电效益和生态效益为目标,构建考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度模型,研究框架见图 1。

1 耦合径流和负荷双重不确定性的梯级水库弃水风险量化方法

1.1 梯级水库弃水风险因素识别

梯级水电站通过水库单元和区间河道单元的耦合,以流量为纽带,实现联合调度。针对中长期调度,根据水量平衡原理,水电站弃水流量、非首级水库入库流量、水电站发电流量计算公式为

$$Q_{a,i,t} = q_{i,t} + [V_{i,t}(Z_{i,t}) - V_{i,t+1}(Z_{i,t+1})]/\Delta t - Q_{g,i,t} \quad (1)$$

其中 $q_{i+1,t} = Q_{i,t} + q_{s,i+1,t}$ $Q_{g,i,t} = N_{i,t}(k_i h_{i,t})^{-1}$ 式中: $Q_{a,i,t}$ 、 $Q_{g,i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为第 i 级水库 t 时段的弃水流量、平均发电流量、出库流量; $q_{i,t}$ 、 $q_{i+1,t}$ 分别为

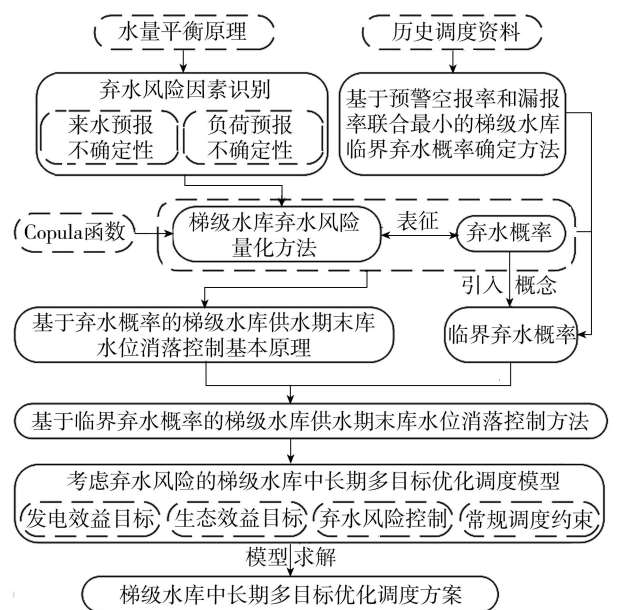


图 1 研究框架

Fig. 1 Research framework

第 i 级和第 $i+1$ 级水库 t 时段的平均入库流量; $V_{i,t}(Z_{i,t})$ 、 $V_{i,t+1}(Z_{i,t+1})$ 分别为第 i 级水库 t 时段初、末水位为 $Z_{i,t}$ 和 $Z_{i,t+1}$ 时对应的库容; Δt 为时间步长; $q_{s,i+1,t}$ 为第 $i \sim i+1$ 级水库 t 时段的平均区间入库流量; k_i 为第 i 级水电站综合出力系数; $h_{i,t}$ 为第 i 级水电站 t 时段的发电水头; $N_{i,t}$ 为第 i 级水电站 t 时段送出通道的电网出力。

水库弃水流量主要受入库流量、电网负荷要求和时段初、末库水位影响。根据水库调度规程,在不考虑水库提前预泄的前提下,只有在水库水位达到最高控制水位(汛限水位或正常蓄水位),且入库流量超过发电流量时,为保证大坝安全,水库才开始泄洪弃水。由于水库汛限水位和正常蓄水位是在规划设计阶段确定的水库特征指标,即 $V_{i,t+1}(Z_{i,t+1})$ 为已知的固定值,则水库是否弃水主要受入库流量、电网负荷要求和时段初库水位的影响。

1.2 梯级水库弃水风险量化方法

当水库存在弃水时,根据式(1)可知

$$\begin{cases} q_{i,t} > N_{i,t}(k_i h_{i,t})^{-1} - [V_{i,t}(Z_{i,t}) - V_{i,t+1}(Z_{i,t+1})]/\Delta t \\ N_{i,t} < \{q_{i,t} + [V_{i,t}(Z_{i,t}) - V_{i,t+1}(Z_{i,t+1})]/\Delta t\} k_i h_{i,t} \end{cases} \quad (2)$$

令

$$\begin{cases} q_{p,i,t} = N_{i,t}(k_i h_{i,t})^{-1} - \frac{[V_{i,t}(Z_{i,t}) - V_{i,t+1}(Z_{i,t+1})]}{\Delta t} - Q_{o,i-1,t} \\ N_{p,i,t} = \left\{ q_{i,t} + \frac{[V_{i,t}(Z_{i,t}) - V_{i,t+1}(Z_{i,t+1})]}{\Delta t} + Q_{o,i-1,t} \right\} k_i h_{i,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Q_{o,i-1,t}$ 为第 $i-1$ 级水库 t 时段的期望出库流

量,当 $i=1$ 时, $Q_{0,i-1,t}=0$; $N_{p,i,t}$ 为临界出力; 针对首级水库, $q_{p,i,t}$ 为临界入库流量, 针对非首级水库, $q_{p,i,t}$ 为临界区间入库流量。

针对首级水库, 设预报径流为 q , 预测负荷为 N , 则实际出现大于 $q_{p,i,t}$ 的径流或电站实际出力小于 $N_{p,i,t}$ 时, 水库将产生弃水。此时, 预报径流的相对误差为 $\varepsilon_q = (q_{p,i,t} - q) / q_{p,i,t}$, 负荷预测相对误差为 $\varepsilon_N = (N_{p,i,t} - N) / N_{p,i,t}$ 。采用 Gumbel-Hugaard Copula 函数进行表征, 水库的弃水概率 p 为

$$p = P(\varepsilon_q \geq x, \varepsilon_N \leq y) \quad (4)$$

式中 x, y 分别为径流预报误差和负荷预报误差自变量。

针对第 i 级非首级水库, 考虑生态流量约束, 根据水量平衡方程, 其上游第 $i-1$ 级水库出库流量为

$$Q_{i-1,t} = \begin{cases} q_{i-1,t} - (V_{i-1,t+1} - V_{i-1,t}) / \Delta t & q_{i-1,t} > Q_{e,i-1,t} + (V_{i-1,t+1} - V_{i-1,t}) / \Delta t \\ Q_{e,i-1,t} & 0 \leq q_{i-1,t} \leq Q_{e,i-1,t} + (V_{i-1,t+1} - V_{i-1,t}) / \Delta t \\ Q_{e,i-1,t} + (V_{i-1,t+1} - V_{i-1,t}) / \Delta t & \end{cases} \quad (5)$$

式中 $Q_{e,i-1,t}$ 为第 $i-1$ 级水库 t 时段的生态流量。

由式(5)可知, 第 $i-1$ 级水库的出库流量 $Q_{p,i-1}$ 为该级水库入库流量 $q_{i-1,t}$ 的单调函数, 令

$$Q_{p,i-1} = Q_{e,i-1,t} + (V_{i-1,t+1} - V_{i-1,t}) / \Delta t \quad (6)$$

根据随机变量函数分布的经典公式法, 存在:

$$Q_{0,i-1,t} = \int_0^{Q_{p,i-1}} Q_{e,i-1,t} g_{i-1}(q) dq + \int_{Q_{p,i-1}}^{+\infty} [q - (V_{i-1,t+1} - V_{i-1,t}) / \Delta t] g_{i-1}(q) dq \quad (7)$$

式中 $g_{i-1}(q)$ 为第 $i-1$ 级水库入库流量的概率密度函数。

通过计算上游水库的期望出库, 并将上游水库的期望出库作为固定入库^[18], 从而计算区间预报入库流量不确定性影响下的弃水概率。针对梯级水库中长期调度, 梯级水库弃水风险的量化主要针对具有季调节性能以上的水库开展, 针对日调节水库和径流式水库, 采用出入库平衡方式模拟调度。

2 基于临界弃水概率的梯级水库供水期末库水位消落控制方法

2.1 基于弃水概率的水库供水期末库水位消落控制基本原理及方法

弃水概率可根据风险预警时段初库水位和时段末最高水库控制水位, 结合径流和负荷预报误差分布规律分析确定, 计算公式为

$$p = F[Z_0, Z_{\max}, q_t, N_t, F_{X,Y}(x, y)] \quad (8)$$

式中: $F(\cdot)$ 为弃水概率计算抽象函数; Z_0 为预警

时段初库水位; Z_{\max} 为预警时段所在月份的水库兴利最高控制水位; q_t 为预警时段内预报平均径流; N_t 为预警时段内预报平均出力; $F_{X,Y}(x, y)$ 为径流和负荷预报误差的联合分布函数, X 为径流预报误差随机变量, Y 为负荷预报误差随机变量。

针对特定风险预警时段, 弃水概率主要受时段初库水位的影响。根据弃水概率计算原理, 通过拟定弃水风险控制指标, 可反推出风险预警时段初库水位:

$$Z_0 = F^{-1}[p, Z_{\max}, q_t, N_t, F_{X,Y}(x, y)] \quad (9)$$

式中 $F^{-1}(\cdot)$ 为弃水概率计算抽象函数的反函数。

根据水库水位在供水期消落、蓄水期蓄满的工作特性, 本文以水库蓄水期作为调度预警时段, 以临界弃水概率作为拟定弃水风险控制指标, 提出基于临界弃水概率的水库供水期末库水位消落控制方法。考虑临界弃水概率, 存在下列关系:

$$\begin{cases} Z_{ss,i} = F^{-1}[p_{\min,i,k}, Z_{\max,s,i}, q_t, N_t, F_{X,Y}(x, y)] \\ Z_{se,i} = Z_{ss,i} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $Z_{ss,i}$ 为第 i 级水库蓄水期初库水位; $Z_{se,i}$ 为第 i 级水库供水期末库水位; $Z_{\max,s,i}$ 为第 i 级水库蓄水期末最高库水位, 通常为正常蓄水位; $p_{\min,i,k}$ 为第 i 级水库临界弃水概率。

2.2 基于预警空报率和漏报率联合最小的梯级水库临界弃水概率确定方法

为便于运用弃水概率指导水库发布弃水预警, 并方便调度决策者运用弃水概率编制水库调度计划, 降低弃水概率设置的主观性, 本文引入临界弃水概率的概念, 即水电站在长系列调度模拟过程中, 使水电站弃水空报率和漏报率均较小时的弃水风险值。基于梯级水库历史调度过程, 运用弃水风险量化方法, 针对梯级水库进行逐时段弃水预警模拟, 以预警空报率和漏报率的联合最小为目标确定临界弃水概率。具体实现方法如下:

步骤 1 计算梯级水库长系列弃水预警模拟预警空(漏)报率。设第 i 级水库逐时段弃水概率为 $\{p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,t}, \dots, p_{i,T}\}$, 以 $p_{\min,i,0}$ ($p_{\min,i,0} \in (0, 1)$) 作为临界弃水预警值, 即当 $p_{i,t} \geq p_{\min,i,0}$ 时发出弃水预警, $p_{i,t} < p_{\min,i,0}$ 时不进行预警, 相应的模拟期内预警空报率和预警漏报率的计算公式为

$$e_{i,0} = \frac{M_{1,i,0}}{M_{2,i,0}} \times 100\% \quad (11)$$

$$m_{i,0} = \frac{M_{3,i,0}}{M_{4,i,0}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $e_{i,0}$ 为预警空报率; $m_{i,0}$ 为预警漏报率; $M_{1,i,0}$ 为预警空报次数(发出预警但未弃水的次数); $M_{2,i,0}$ 为预警总次数; $M_{3,i,0}$ 为漏报次数(未发出弃

水预警但有弃水产生); $M_{4,i,0}$ 为未预警总次数。

步骤2 构建临界预警值及预警空(漏)报率离散集合。遍历所有可能的临界弃水预警值 $p_{\min,i,k}$ ($k=0,1,2,\dots,n$), 其中 n 为可能的临界弃水预警值总个数, 本文以 0.01 作为遍历步长, 即 n 取值为 100, 并分别计算相应的弃水预警空报率 $e_{i,k}$ 和漏报率 $m_{i,k}$, 构建临界弃水概率及其相应的空报率、漏报率离散集合 $\{p_{\min,i,0}, p_{\min,i,1}, \dots, p_{\min,i,n}\}$ 、 $\{e_{i,0}, e_{i,1}, \dots, e_{i,n}\}$ 、 $\{m_{i,0}, m_{i,1}, \dots, m_{i,n}\}$ 。

步骤3 确定梯级水库临界弃水概率。为提高基于弃水概率的水库弃水预警准确度, 本文以预警空报率和漏报率的联合最小为目标确定临界弃水概率。令

$$r_{i,k} = e_{i,k}/\max(e_{i,0}, e_{i,1}, \dots, e_{i,n}) + m_{i,k}/\max(m_{i,0}, m_{i,1}, \dots, m_{i,n}) \quad (13)$$

则

$$r_{i,k_{\min}} = \min(r_{i,0}, r_{i,1}, \dots, r_{i,n}) \quad (14)$$

式中: $r_{i,k}$ 为预警空报率和漏报率集合标准化后的和; $r_{i,k_{\min}}$ 为预警空报率和漏报率集合标准化后求和的最小值; k_{\min} 为整数, $0 \leq k_{\min} \leq n$ 。

3 考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度模型

3.1 目标函数

针对以发电为主的梯级水库, 面向梯级水电站实际调度需求, 构建以梯级水电站调度期和余留期两阶段发电效益和生态效益为目标的多目标优化调度模型。

a. 发电效益目标。 水库调度在年上和年际间是一个连续性过程, 针对梯级水电站水库中长期发电优化调度, 从其经济运行的长远角度出发, 在梯级水库中长期发电计划制定过程中, 不仅注重对梯级水电站在调度期内的调度效益, 还关注其余留期发电效益。基于此, 本文以调度期和余留期两阶段发电效益最大为目标, 其中, 调度期发电效益以调度期内梯级水电站发电量进行表征, 余留期发电效益以余留期梯级水电站调度期末蓄能进行表征, 表达式为

$$E = \max \left[\left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^B A_i Q_{g,i,t} h_{i,t} \Delta t \right) / E_{0,\max} + \left(\sum_{i=1}^B \left\{ \sum_{k=1}^i [V(Z_{e,k}) - V(Z_{d,k})] \right\} / \sigma_{e,i} \right) / E_{1,\max} \right] \quad (15)$$

其中

$$E_{0,\max} = \sum_{i=1}^B \sum_{t=1}^T N_{\max,i,t} \Delta t$$

$$E_{1,\max} = \sum_{i=1}^B \left\{ \sum_{k=1}^i [V(Z_{n,k}) - V(Z_{d,k})] \right\} / \sigma_{nr,i}$$

式中, T 为调度期长度; B 为梯级水库个数; A_i 为第 i 级水库综合出力系数; $V(Z_{e,k})$ 为第 k 级水库调度期末库水位对应的库容; $V(Z_{d,k})$ 为第 k 级水库死水位对应库容, 即死库容; $\sigma_{e,i}$ 为第 i 级水库调度期末库水位下的耗水率; $E_{0,\max}$ 为调度期内梯级水库最大可发电量; $N_{\max,i,t}$ 为第 i 级水库 t 时段的最大出力; $E_{1,\max}$ 为梯级水库兴利控制条件下的最大蓄能值; $\sigma_{nr,i}$ 为第 i 级水库正常蓄水位时的耗水率; $V(Z_{n,k})$ 为第 k 级水库正常蓄水位对应库容。

b. 生态效益目标。 在满足梯级水库中长期调度生态流量约束的前提下, 本文以梯级水库下泄流量过程与梯级水库多年平均天然来水过程的匹配度表征梯级水库中长期调度的生态效益, 表达式为

$$K = \min \sum_{i=1}^B K_i / B = \min \sum_{i=1}^B \sum_{t=1}^T |Q_{i,t} - Q_{i,t-1} - Q_{n,i,t} + Q_{n,i,t-1}| / (TB) \quad (16)$$

式中: K 为梯级水库年内出库流量过程与多年平均天然来水流量间的匹配度; K_i 为第 i 级水库年内出库流量过程与其多年平均天然来水流量间的匹配度; $Q_{n,i,t-1}$ 、 $Q_{n,i,t}$ 分别为第 i 级水库 $t-1$ 时段和 t 时段的天然平均来水流量。

3.2 约束条件

水电站水库优化调度常规约束主要包括出力约束、发电流量约束、发电水头约束、水量平衡约束、出库流量约束、库水位约束, 表达式分别为

$$N_{\min,i} \leq N_{i,t} \leq N_{\max,i} \quad (17)$$

$$Q_{\min,g,i} \leq Q_{g,i,t} \leq Q_{\max,g,i} \quad (18)$$

$$(h_{i,t} - h_{\min,i,j})(h_{i,t} - h_{\max,i,j}) > 0 \quad (19)$$

$$q_{i,t} \Delta t + V_{i,t-1} = Q_{i,t} \Delta t + V_{i,t} + W_{d,i,t} + W_{e,i,t} \quad (20)$$

$$Q_{\min,i,t} \leq Q_{i,t} \leq Q_{\max,i,t} \quad (21)$$

$$Z_{d,i} \leq Z_{i,t} \leq Z_{\max,i,t} \quad (22)$$

式中: $N_{i,t}$ 为第 i 级水电站 t 时段的出力; $N_{\max,i}$ 、 $N_{\min,i}$ 分别为第 i 级水电站的最大和最小出力约束, 当不考虑检修等备用容量约束时, $N_{\max,i}$ 为第 i 级水电站机组装机容量或预想出力; $Q_{\max,g,i}$ 、 $Q_{\min,g,i}$ 分别为第 i 级水电站最大发电流量和最小发电流量约束; $h_{\max,i,j}$ 、 $h_{\min,i,j}$ 分别为第 i 级水电站第 j 个振动区的上限和下限水头; $W_{d,i,t}$ 、 $W_{e,i,t}$ 分别为第 i 级水库 t 时段的库区引水量和蒸散发水量; $Q_{\min,i,t}$ 为第 i 级水库 t 时段满足下游综合用水要求(如生态、航运等)的最小出库流量约束; $Q_{\max,i,t}$ 为第 i 级水库 t 时段水库最大出库流量约束; $Z_{\max,i,t}$ 为第 i 级水库 t 时段初的最高库水位约束, 当 t 为蓄水期的第 1 个时段时, $Z_{\max,i,t}$ 为第 i 级水库供水期末库水位上限约束。

3.3 模型求解

考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度模型求解是一个典型的高维、非线性、多约束优化求解问题。传统优化算法(如动态规划)在求解该模型时,存在“维数灾”和易陷入局部最优解的问题,而常用智能优化算法在求解该问题时存在易早熟收敛的缺陷。Wu 等^[19-20]针对入侵杂草算法(invasive weed optimization, IWO)寻优深度不足的缺陷,基于三角余弦函数的周期性质和高斯对角矩阵的各向异性空间扩散机制,提出了具有循环往复寻优特性和兼具搜索广度和深度的双层改进入侵杂草算法(two-layer improved invasive weed optimization, TIWIO),并利用多个具有无数极值点和震荡特性的测试函数和梯级水库调度模型计算实例,验证了 TIWIO 算法在求解高维、非线性、多约束优化问题时的高效收敛性能。基于此,本文采用 TIWIO 算法对模型进行求解。

4 实例分析

乌江梯级水电站是我国十三大水电基地之一,目前乌江流域中长期径流预报采用多元回归、神经网络等多种方法进行组合预测,预报结果基本满足调度运用要求。但受来水不确定性和电网电力电量不确定性影响,乌江梯级水电站弃水问题突出,造成大量的水能资源浪费。本文以乌江流域 11 级混联水库群为研究对象,开展实例应用研究。乌江梯级水库群特征参数及地理拓扑位置见表 1、图 2。

表 1 乌江梯级水库群特征参数

Table 1 Characteristic parameters of Wujiang cascade reservoir group

水库名称	调节性能	装机容量/MW	汛限水位/m
洪家渡	多年调节	600	1140
普定	季调节	84	1142
引子渡	季调节	360	1086
东风	不完全年调节	695	970
索风营	日调节	600	835
乌江渡	不完全年调节	1280	760
大花水	不完全年调节	200	868
格里桥	日调节	150	719
构皮滩	多年调节	3000	628
思林	日调节	1050	435
沙沱	日调节	1120	357

4.1 乌江梯级水库群弃水风险模拟

根据乌江梯级水库群长系列库水位调度过程,结合乌江首级水库和下游水库长系列预报入库径流和区间入库径流,对乌江梯级水库群进行长系列弃水概率模拟计算,结果如图 3 和表 2 所示。其中,针对日调节水库,由于其从放空到蓄满的周期为 1 d,

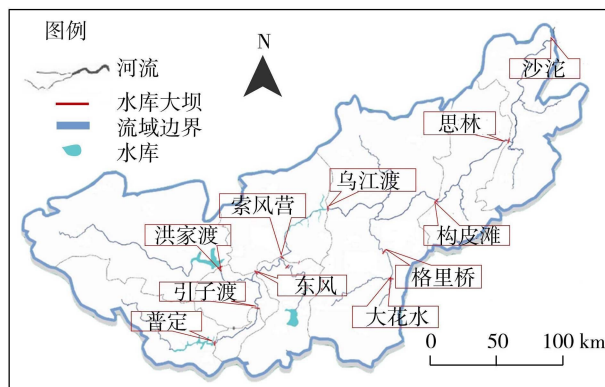


图 2 乌江梯级水库群地理拓扑位置

Fig. 2 Geographical topological location of Wujiang cascade reservoir group

因此对其采用出入库平衡方式进行模拟调度,不进行弃水概率的模拟计算。因篇幅限制,以洪家渡、普定水库为例展示弃水概率模拟结果。

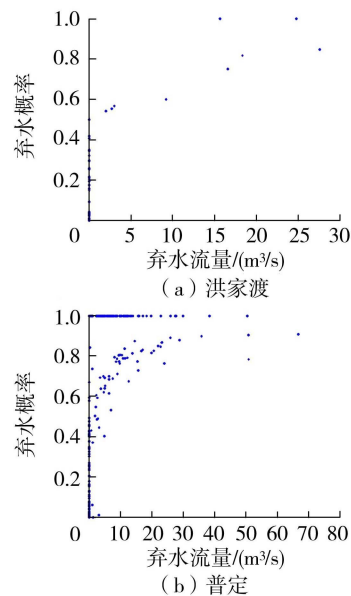


图 3 洪家渡和普定水库弃水概率模拟结果

Fig. 3 Simulation results of water abandonment probability of Hongjiadu and Puding reservoirs

由图 3 和表 2 可见,针对某一水库弃水流量相同的两个预警时段,当预警时段初库水位较高、预报入库流量较大时,受入库流量不确定性影响,其弃水概率亦较大。整体而言,针对不同的水库以及不同的弃水时段,弃水概率模拟结果虽有不同,但整体表现出弃水流量为 0 时,弃水概率均较小,并随弃水流量的增加,弃水概率计算结果逐渐增大的趋势,体现了本文提出的梯级水库弃水风险量化方法的合理性。此外,当普定水库实际弃水流量为 0 时,存在弃水概率计算结果为 1 的现象,这是由于在历史实际调度过程中,普定水库存在超高蓄水的情形,即实际调度库水位超过水库兴利控制水位上限,水库通过超高蓄水

表 2 普定水库部分预警时段弃水概率模拟结果

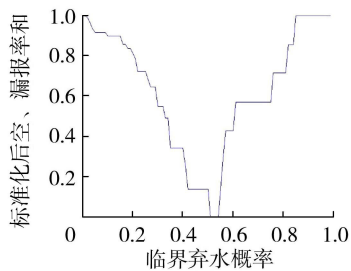
Table 2 Simulation results of water abandonment probability in partial early warning period of Puding Reservoir

时段初 库水位/m	预报入库 流量/(m ³ /s)	弃水流量/ (m ³ /s)	弃水概率
1 141.62	2233.04	66.72	0.91
1 141.17	2089.05	50.84	0.78
1 141.71	1845.79	50.75	0.91
1 142.33	1725.96	50.39	1
1 142.63	1 152.84	38.35	1
1 141.97	1260.52	35.79	0.90
1 143.41	1 124.04	29.90	1
1 141.72	1048.05	28.82	0.88
1 142.40	1062.80	27.65	1
1 142.60	958.56	27.37	1

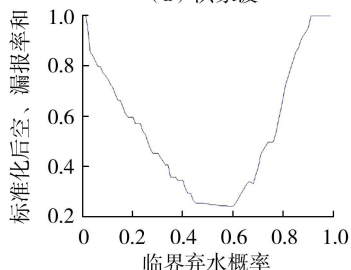
导致实际调度过程中预警时段弃水流量为 0;而在弃水风险模拟过程中,当水库水位超过其兴利控制水位上限时,即判定预警时段内将发生弃水,进而导致当实际弃水流量为 0 时而弃水概率为 1 的现象。

4.2 乌江梯级水库群供水期末库水位消落控制

根据乌江梯级水库群弃水概率模拟计算结果,通过计算不同临界弃水预警值下的空报率和漏报率,图 4 为洪家渡和普定水库标准化后预警空报率与漏报率之和随临界弃水概率的变化过程。以弃水预警空报率和漏报率联合最小为目标,计算乌江梯级水库群各水库临界弃水概率。基于临界弃水概率的梯级水库供水期末库水位消落控制方法,根据 2018 年乌江梯级水库蓄水期预报平均来水流量,计



(a) 洪家渡



(b) 普定

图 4 洪家渡和普定水库标准化后预警空报率与漏报率和随临界弃水概率的变化过程

Fig. 4 Change process of summary of standardizing false alarm rate and missed alarm rate of Hongjiadu and Puding reservoirs with critical abandonment probability

算得乌江梯级群各水库最优临界弃水概率和供水期末库水位上限见表 3。由表 3 可见,乌江流域具有季调节性能以上的水库,其临界弃水概率均大于或等于 0.5,在梯级水库实际调度运行过程中,可提供积极的指导作用,验证了本文所提出的弃水风险量化方法和临界弃水概率计算方法的合理性和可靠性。

表 3 各水库最优临界弃水概率和供水期末库水位上限

Table 3 Optimal critical abandonment probability and upper limit of reservoir water level at end of water supply period of each reservoir

水库名称	最优临界弃水概率	供水期末库水位上限/m
洪家渡	0.53	1 101.04
普定	0.60	1 126.99
引子渡	0.54	1 057.94
东风	0.87	953.00
乌江渡	0.65	725.02
大花水	0.50	852.25
构皮滩	0.80	618.00

4.3 乌江梯级水库群中长期多目标优化调度结果

采用 TIWO 算法对模型进行求解过程中,取初始种群为 30,最大种群为 100,最大生产种子数为 5,最小生产种子数为 2,标准差初值为 10,标准差终值为 0.001,迭代次数为 5000。基于 TIWO 算法对乌江梯级水库群多目标优化调度模型求得的 Pareto 最优解如图 5 所示。根据优化计算结果,采用逼近理想解排序技术进行方案优选,得到各方案的相对接近度指标如图 6 所示。

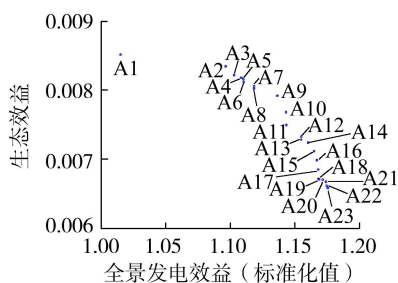


图 5 模型优化 Pareto 最优解

Fig. 5 Pareto optimal solution of model optimization

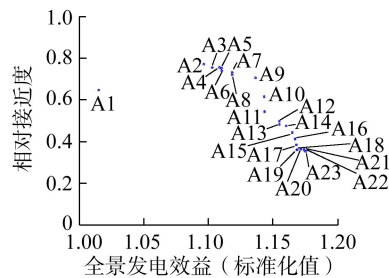


图 6 各方案的相对接近度

Fig. 6 Relative proximity of schemes

由图 6 可见,Pareto 最优解中 A2 方案的相对接

近度最大,表明该方案最逼近于理想解。A2方案的调度期发电量及调度期末蓄能分别为246.62亿kW·h和93.27亿kW·h,生态效益为0.00835。为便于比较,根据2018年乌江梯级水库实际来水过程,采用常规发电量最大模型作为常规优化调度方案计算得乌江梯级水库调度期发电量及调度期末蓄能分别为280.26亿kW·h和57.91亿kW·h,生态效益为0.00405。虽然A2方案的调度期发电量小于乌江梯级水库群常规优化发电量,但A2方案的调度期末梯级水库的总蓄能大于常规优化调度期末梯级总蓄能,且耦合调度期和余留期的两阶段发电效益较常规优化调度过程增加了约0.51%。同时,通过A2方案和常规优化调度过程的生态效益分析,前者的生态效益比后者提高了约1.06倍。A2方案中洪家渡和普定库水位调度过程及出库流量过程如图7、图8所示,其中水位为各月末值。

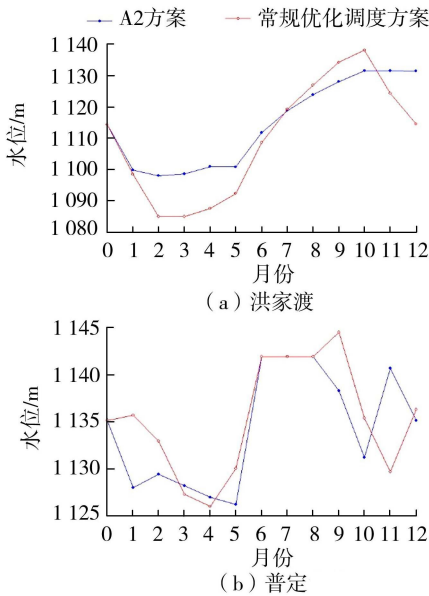


图7 洪家渡和普定水库两方案水位过程对比
Fig. 7 Comparison of water level process between two schemes of Hongjiadu and Puding reservoirs

由图7、图8可见,基于调度期和余留期两阶段发电效益最大目标,可显著提高多年调节水库调度期末库水位,增加多年调节水库调度期末蓄水量,提高梯级水库调度期和余留期两阶段发电效益。在蓄水期来临前,乌江梯级水库群各水库水位均可消落到供水期末控制水位以下,为应对汛期来水进行提前腾库,以降低汛期弃水风险,减少弃水。基于本文构建的模型并进行优化求解获得的调度方案,符合梯级水库调度规律,并可增加梯级水库的调度期和余留期两阶段发电效益和生态调度效益,验证了本文所提方法和所建模型的合理性和可靠性。

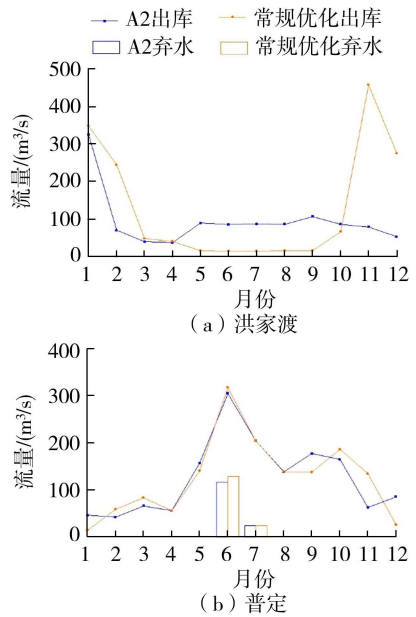


图8 洪家渡和普定水库两方案出库流量过程对比
Fig. 8 Comparison of outflow process between two schemes of Hongjiadu and Puding reservoirs

5 结论

- 基于水量平衡原理识别了梯级水库弃水风险因素,梯级水库是否发生弃水主要受入库流量、电网负荷和时段初库水位3个主要因素影响。
- 基于 Gumbel-Hugaard Copula 函数,提出了耦合径流和负荷双重不确定性的梯级水库弃水风险量化方法,通过乌江梯级水库群弃水概率模拟,结果表明整体上随水电站弃水流量的增加,水电站弃水概率呈递增趋势,体现了本文所提出的梯级水库弃水风险量化方法的合理性。
- 引入临界弃水概率概念,提出了基于预警空报率和漏报率联合最小的梯级水库临界弃水概率确定方法,通过乌江梯级水库群弃水预警模拟,结果表明各水库临界弃水概率均在0.5以上,证明本文所提出的弃水风险量化方法和临界弃水概率计算方法的合理性和可靠性。
- 以水库蓄水期作为调度预警时段,提出了基于临界弃水概率的水库供水期末库水位消落控制方法,通过与乌江梯级水库常规优化调度过程对比,体现了该方法的可行性。
- 统筹梯级水电站调度期和余留期两阶段发电效益和生态效益,构建了考虑弃水风险的梯级水库中长期多目标优化调度模型,在满足梯级水库供水期末库水位消落控制的条件下,可实现梯级水库调度期和余留期两阶段发电效益和生态效益的显著提升。

参考文献:

- [1] 李继清, 谢宇韬, 孙凤玲. 基于 Vine Copula 的梯级水库短期发电调度风险估计[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 17-26. (LI Jiqing, XIE Yutao, SUN Fengling. Risk estimation of short-term power generation operation of cascade reservoirs based on Vine Copula [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 17-26. (in Chinese))
- [2] 黄显峰, 周引航, 张启凡, 等. 基于云模型的水光互补清洁能源基地容量配置方案优选[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 44-51. (HUANG Xianfeng, ZHOU Yinhang, ZHANG Qifan, et al. Capacity allocation scheme optimization based on cloud model for a hydro-photovoltaic complementary clean energy base [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 44-51. (in Chinese))
- [3] 黄显峰, 颜山凯, 李大成, 等. 对水电效益影响最小的水光互补运行方式研究[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 15-20. (HUANG Xianfeng, YAN Shankai, LI Dacheng, et al. Research on hydro-photovoltaic complementary rules for minimum influence on hydropower benefit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 15-20. (in Chinese))
- [4] 高英, 苏华英, 于洁, 等. 乌江流域水光互补梯级蓄能调度图绘制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 56-64. (GAO Ying, SU Huaying, YU Jie, et al. Drawing of Hydro-PV complementary cascade energy storage dispatching diagram in Wujiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 56-64. (in Chinese))
- [5] 张聪通, 申建建, 程春田, 等. 基于起调水位上限优化策略的水库弃水控制方法[J]. 水资源研究, 2019, 8(4): 342-352. (ZHANG Congtong, SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, et al. Spillage control method based on optimization strategy of upper limit initial water level [J]. Journal of Water Resources Research, 2019, 8(4): 342-352. (in Chinese))
- [6] 张鸿雪. 考虑多重风险的澜沧江下游梯级水库多目标调度[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [7] 曹璐, 武新宇, 过团挺, 等. 基于 CFS 预报产品的水电站水库预泄决策方法[J]. 水电能源科学, 2016, 34(1): 53-56. (CAO Lu, WU Xinyu, GUO Tuanting, et al. Flood pre-discharge decision of hydropower station reservoir based on CFS forecasting [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(1): 53-56. (in Chinese))
- [8] 解阳阳, 王义民, 黄强. 龙羊峡水库年末水位控制与汛期弃水研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 223-227. (XIE Yangyang, WANG Yimin, HUANG Qiang. Year-end water level control and water discharge in flood season for Longyangxia reservoir [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(1): 223-227. (in Chinese))
- [9] 过团挺, 曹璐, 廖胜利. 基于弃水风险率控制的水库预泄调度方法[J]. 水利水电技术, 2016, 47(4): 88-92. (GUO Tuanting, CAO Lu, LIAO Shengli. Abandoned water risk ratio control-based reservoir pre-discharge control method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(4): 88-92. (in Chinese))
- [10] 丁紫玉, 方国华, 毛莺池, 等. 考虑发电与弃水风险的梯级水电站水库风险调度模型[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 100-106. (DING Ziyu, FANG Guohua, MAO Yingchi, et al. Risk dispatching model of cascade hydropower station reservoirs considering power generation and water abandonment risks [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 100-106. (in Chinese))
- [11] 文旭, 杨可, 毛锐, 等. 计及动态稳定限额的水电市场化外送消纳弃水风险管控模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 7-13. (WEN Xu, YANG Ke, MAO Rui, et al. A risk management and control model of transferring hydropower and water discharge considering dynamic stability limit in electricity market [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 7-13. (in Chinese))
- [12] 李继清, 龙健, 刘洋. 基于水光电力系统时序生产模拟模型的水光优化配比研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 1-10. (LI Jiqing, LONG Jian, LIU Yang. Study on optimal ratio of water and light based on time-series production simulation model of hydro-optical power system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(1): 1-10. (in Chinese))
- [13] 闻昕, 秦济森, 谭乔凤, 等. 基于余留期效益函数的水光互补随机优化调度方法[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 23-31. (WEN Xin, QIN Jisen, TAN Qiaofeng, et al. Research on stochastic optimal operation of hydro-photovoltaic complementary based on utility function of carryover stage [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 23-31. (in Chinese))
- [14] 白涛, 徐燕, 孙宪阁, 等. 官厅水库多目标调度规律与方案研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 101-108. (BAI Tao, XU Yan, SUN Xian'ge, et al. Study on multi-objective ecological operation of Guanting Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 101-108. (in Chinese))
- [15] 尹丽君, 许昌, 黄显峰, 等. 水光互补基地水库调度图绘制及应用策略[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 65-69. (YIN Lijun, XU Chang, HUANG Xianfeng, et al. Drawing and application strategy of dispatching diagram for water-light complementary base reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 65-69. (in Chinese))

(下转第 68 页)

- 2022,50(3):1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3):1-8. (in Chinese))
- [41] ZHU Yun, ZHANG Changzheng, FANG Junmin, et al. Paths and strategies for a resilient megacity based on the water-energy-food nexus [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 82:103892.
- [42] 朱洁, 冯建刚, 高玉琴, 等. 基于 BWM-CRITIC-TOPSIS 的幸福河湖综合评价模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6):8-14. (ZHU Jie, FENG Jiangang, GAO Yuqin, et al. Comprehensive evaluation model for happy rivers and lakes based on BWM-CRITIC-TOPSIS [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6):8-14. (in Chinese))
- [43] 邹秀清, 谢美辉, 肖泽干, 等. 基于熵权-TOPSIS 法的乡村发展评价及障碍因子诊断[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(10):197-206. (ZOU Xiuqing, XIE Meihui, XIAO Zegan, et al. Evaluation of rural development and diagnosis of obstacle factors based on entropy weight TOPSIS method [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(10):197-206. (in Chinese))
- [44] 赵佳慧, 许红师, 王田野, 等. 基于改进熵权-TOPSIS-灰色关联方法的都市洪涝风险评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10):58-73. (ZHAO Jiahui, XU Hongshi, WANG Tianye, et al. Improved entropy weight-TOPSIS-grey correlation method-based urban flood-waterlogging risk assessment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10):58-73. (in Chinese))
- [45] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8):51-61. (WANG Songmao, NIU Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2022, 42(8):51-61. (in Chinese))
- [46] 方叶林, 王秋月, 黄震方, 等. 中国旅游经济韧性的时空演化及影响机理研究[J]. 地理科学进展, 2023, 42(3):417-427. (FANG Yelin, WANG Qiuyue, HUANG Zhenfang, et al. Spatial and temporal evolution of tourism economic resilience and mechanism of impact in China [J]. Progress in Geography, 2023, 42(3):417-427. (in Chinese))
- [47] WANG Jinfeng, LI Xinqu, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1):107-127.
- [48] 孙克, 张信为, 聂坚, 等. 中国省域水资源利用绩效评价及空间分异和驱动因素分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(4):102-110. (SUN Ke, ZHANG Xinwei, NIE Jian, et al. Evaluation of provincial water resources utilization performance in China and its spatial differentiation and driving factor analysis [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4):102-110. (in Chinese))
- [49] 安树伟, 黄艳. 突发公共卫生事件对区域经济韧性的影响机制与应对: 来自中国新冠病毒感染疫情的证据[J]. 中国软科学, 2024(1):76-85. (AN Shuwei, HUANG Yan. Impact mechanism of public health emergencies on regional economic resilience and its response: evidence from the COVID-19 in China [J]. China Soft Science, 2024(1):76-85. (in Chinese))
- [50] 李连刚, 胡晓辉. 新冠肺炎疫情下中国区域经济韧性时空格局与影响因素分析[J]. 世界地理研究, 2023, 32(3):64-75. (LI Liangang, HU Xiaohui. Analysis on the spatial-temporal pattern and influencing factors of regional economic resilience in China under the COVID-19 pandemic [J]. World Regional Studies, 2023, 32(3):64-75. (in Chinese))

(收稿日期:2024-02-24 编辑:施业)

(上接第 27 页)

- [16] 朱锦干, 周建中, 张勇传. 金沙江下游梯级汛前联合消落控制方式研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(7):61-64. (ZHU Jingan, ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongchuan. Research on control method of cascade joint fading before flood in lower Jinshajiang River [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(7):61-64. (in Chinese))
- [17] 曹瑞, 程春田, 申建建, 等. 考虑蓄水期弃水风险的水库长期发电调度方法[J]. 水利学报, 2021, 52(10):1193-1203. (CAO Rui, CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, et al. Long-term optimal operation of reservoir considering the water spillage risk during the impoundment period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10):1193-1203. (in Chinese))
- [18] ZHANG Xinyi, FANG Guohua, YE Jian, et al. Risk control in optimization of cascade hydropower: considering water abandonment risk probability [J]. Sustainability, 2022, 14(17):10911.
- [19] WU Chengjun, FANG Guohua, LIAO Tao, et al. Integrated software development and case studies for optimal operation of cascade reservoir within the environmental flow constraints [J]. Sustainability, 2020, 12(10):4064.
- [20] FANG Guohua, WU Chengjun, LIAO Tao, et al. A two-layer improved invasive weed optimization algorithm for optimal operation of cascade reservoirs [J]. Water Supply, 2020, 20(6):2311-2323.

(收稿日期:2024-03-26 编辑:王芳)