

基于风险度均衡的混联水库群防洪联合调度 3 层递阶求解优化方法

李思昊¹, 蔡和荷², 刘 其¹, 朱非林¹, 本梦雪¹, 韩明宇¹, 宋子昕¹, 钟平安¹

(1. 河海大学水文水资源学院; 2. 水利部信息中心)

摘要:针对干支流防洪优化调度问题,建立了混联水库群防洪联合优化调度模型,以风险度均衡为目标,基于大系统分解协调理论,设计了系统总协调层、支流子系统协调层和单库优化调度层 3 层递阶求解架构,并分别提出相应的高效求解方法。对汉江流域防洪系统联合调度的实例模拟结果表明:该方法在各水库间实现了良好的风险均衡,各情景 4 座水库风险度变异系数均低于 6%;调度后丹江口水库削峰率为 39.68%~67.36%,皇庄断面模拟流量误差控制在 3% 以内;该方法计算效率高,所有情景的计算时间均在 6 s 以内。

关键词:混联水库群;防洪调度;风险度均衡;大系统分解协调;分段启发式优化算法;汉江流域

Three-level hierarchical solution optimization method for joint flood control operation of mixed-connected reservoir groups based on risk degree balance//Li Sihao¹, Cai Hehe², Liu Qi¹, Zhu Feilin¹, Ben Mengxue¹, Han Mingyu¹, Song Zixin¹, Zhong Pingan¹(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 2. Information Center, Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the problem of flood control optimization on the mainstream and tributaries, a joint optimal operation model for a mixed-connected reservoir group was established with the objective of risk degree balance. Based on the large-scale system decomposition-coordination theory, a three-layer hierarchical structure consisting of the system coordination layer, the tributary subsystem coordination layer, and the single-reservoir optimal operation layer was designed, and corresponding efficient solution methods were developed. A case study of joint operation of the flood control system in the Hanjiang River Basin demonstrates that the proposed method achieves good risk balance among reservoirs, with the coefficient of risk degree variation of four reservoirs below 6% in all scenarios. After operation, the peak reduction rate of Danjiangkou Reservoir reaches 37.68% to 67.36%, and the error of flow rate simulation at Huangzhuang Section is controlled within 3%. The proposed method has high computational efficiency, with the calculation time for all scenarios within six seconds.

Key words: mixed-connected reservoir group; flood control operation; risk degree balance; large-scale system decomposition-coordination; piecewise heuristic optimization algorithm; the Hanjiang River Basin

我国洪涝灾害频发且损失严重^[1],水库群联合调度作为提升流域防洪能力的关键非工程措施,其优化方法研究始终备受关 注^[2]。当前,国内外学者对水库群防洪优化调度的研究主要分为 3 类路径。第一类研究聚焦于模型构建与正向求解,如采用动态规划、大系统分解协调等方法构建调度模型^[3-4]或引入粒子群优化(PSO)算法和灰狼优化算法^[5-11]等智能优化算法进行求解。例如:He 等^[12]提出了一种融合多策略改进与自适应 ε 约束的海象优化算法,在复杂约束优化问题上表现出优越性能,但智能

算法求解结果稳定性不足与流量过程非物理性锯齿波动问题难以克服;这类方法虽体系成熟,但在处理混联结构时,常因决策变量维度激增而遭遇“维数灾”,导致计算效率低下。正向防洪调度模型求解需要在已知最高水位约束的条件下进行,无法在仅已知防洪控制断面安全流量约束条件情况下,反推出水库控制条件并进行防洪优化调度。第二类研究是将防洪问题视为需统筹上下游安全的多目标优化问题^[13-16],但计算量大、计算时间长,较难满足复杂混联系统的实时响应要求。第三类研究致力于超额

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202801);水利部重大科技项目(SKR2022075)
作者简介:李思昊(2001—),女,硕士研究生,主要从事水库群防洪调度研究。E-mail:lisihao24@hhu.edu.cn
通信作者:钟平安(1962—),男,教授,博士,主要从事水利系统优化调度研究。E-mail:pazhong@hhu.edu.cn

水量分配与补偿调度^[17-18],如钟平安等^[19]提出了水库群防洪补偿调度模型,依据下游超额水量进行防洪库容分配,再利用动态调节系数指导轮库补偿调度,模型实时应用性好,但仅适用于并联水库群;李颖等^[20]研究弱耦合条件下串联水库群的防洪调度模型,并使用“两步法”求解。随着流域防洪工程体系的完善与水库建设数量的增加,水库群结构愈加复杂^[21],单一并联、串联结构水库群优化调度模型难以有效解决混联系统中并联补偿与串联滞时相互交织的复杂补偿关系。

混联水库群在结构上同时具备串联与并联两种特性,其内部各水库间存在直接水力联系,同时又共同对下游防洪断面构成直接的水文影响。这种复合结构导致了其防洪调度过程异常复杂,需要通过分层协调计算,寻求满足整体防洪要求的调度方案。通过对混联水库群复杂水力关系进行3层划分,基于超额水量分配方法,可以有效降低计算维度,提升计算效率,从而获得可操作性强的调度方案。

本文针对干支流混联水库群防洪优化调度问题,以水库群风险度均衡为目标,建立防洪优化调度模型;基于大系统分解协调原理^[22-25],提出系统总协调层、支流子系统协调层和单库优化调度层的3层递阶求解优化方法,并结合汉江流域复杂防洪系统进行联合调度实例分析。

1 模型构建

1.1 混联水库群拓扑结构

图1为本文研究的混联水库群防洪系统拓扑结构概化图。图1中共有 n 条河流,第1条为干流,第2~ n 条为支流,第 i 条支流上有 m_i 个水库, $R_{i,j}$ 表示第 i 条支流上的第 j 个水库, $Q_{i,1,t}$ 为 t 时刻第 i 条支流第1个水库入库流量, $Q_{i,j,t}$ 为 t 时刻水库 $R_{i,j-1}$ 与 $R_{i,j}$ ($j=2,3,\dots,m_i$)之间的区间入流, d_i 为第 i 条支流私有防洪断面, D 为干支流公共防洪断面, $Q_{D,t}$ 为 t

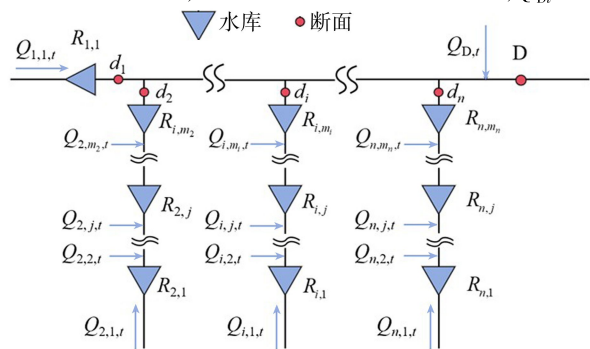


图1 混联水库群防洪系统拓扑结构

Fig.1 Topology of mixed-connected reservoir group for flood control

时刻 d_i 至 D 的区间入流。

1.2 混联水库群防洪联合优化调度模型

水库群防洪优化调度是通过设定防洪断面的调度目标和边界条件等,确定上游水库群的防洪调度方案。本文综合考虑水库上下游防洪安全,建立混联水库群防洪联合优化调度模型,在满足下游防洪断面安全流量要求的前提下,使得水库承担尽可能少的蓄洪量,并且各水库承担的风险尽可能均衡。

1.2.1 目标函数

以水库群风险度均衡为目标,定义风险度为调度期内水库最大蓄水量与设计防洪库容之比,目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} [w_{i,j} \max_{t \in T} (V_{i,j,t}) / V_{di,j}]^2 \quad (1)$$

式中: F 为各水库风险度加权平方和; $w_{i,j}$ 为水库 $R_{i,j}$ 的风险度权重系数; $V_{di,j}$ 为水库 $R_{i,j}$ 设计洪水位对应的库容; $V_{i,j,t}$ 为 t 时刻水库 $R_{i,j}$ 的蓄水量; T 为调度期,调度期内水库占用设计库容越少则水库越安全。

风险度越大,表明水库在当前调度期占用的防洪库容越多,越接近设计防洪能力上限,对大坝安全的潜在威胁也越大。本文以最小化各水库风险度加权平方和为目标,实质是推动各水库的库容占用程度趋向均衡,这种均衡分配有助于实现系统整体防洪风险共担,提高调度方案的工程可接受性。文中风险度是一个综合指标,既反映单库自身的相对蓄洪压力,也用于引导系统层面防洪责任的合理分摊,最终实现风险均衡与库容高效利用的统一。

1.2.2 约束条件

本文考虑水量平衡约束、水库上下限水位约束、泄流能力约束、流量变幅约束、调度期末水位约束,以及防洪断面安全流量约束等。

a. 水量平衡约束:

$$V_{i,j,t} = V_{i,j,t-1} + [(Q_{Ri,j,t} + Q_{Ri,j,t-1})/2 - (q_{i,j,t} + q_{i,j,t-1})/2] \Delta t \quad (2)$$

式中: $Q_{Ri,j,t}$ 为 t 时刻水库 $R_{i,j}$ 的入库流量; $q_{i,j,t}$ 为 t 时刻水库 $R_{i,j}$ 的出库流量; Δt 为时段长。

b. 水库间水量平衡约束:

$$Q_{Ri,j,t} = \sum_{j=1}^{M_i} q_{i,j,t} + Q'_{i,j,t} \quad (3)$$

式中: M_i 为第 i 条支流上与水库 $R_{i,j}$ 有直接水力联系的水库数; $Q'_{i,j,t}$ 为 t 时刻 M_i 中第 j 个水库的关联水库到第 j 个水库间的区间流量。

c. 水库上下限水位约束:

$$Z_{\min i,j,t} \leq Z_{i,j,t} \leq Z_{\max i,j,t} \quad (4)$$

式中: $Z_{i,j,t}$ 为 t 时刻水库 $R_{i,j}$ 的水位; $Z_{\min i,j,t}$ 、 $Z_{\max i,j,t}$ 分别为 t 时刻水库 $R_{i,j}$ 容许最低和最高水位。

d. 泄流能力约束:

$$q_{\min,i,j} \leq q_{i,j,t} \leq q_{Z,i,j,t} \quad (5)$$

式中: $q_{\min,i,j}$ 为水库 $R_{i,j}$ 允许最小泄量; $q_{Z,i,j,t}$ 为 t 时刻水库 $R_{i,j}$ 在水位 Z 下的泄流能力。

e. 期末水位约束:

$$Z_{ci,j} \geq Z_{ei,j} \quad (6)$$

式中: $Z_{ci,j}$ 为调度期末水库 $R_{i,j}$ 的计算水位; $Z_{ei,j}$ 为水库 $R_{i,j}$ 调度期末的控制水位, 该水位根据防洪或雨洪资源利用要求确定。

f. 出库流量变幅约束:

$$|q_{i,j,t} - q_{i,j,t-1}| \leq \Delta q_{i,j} \quad (7)$$

式中: $\Delta q_{i,j}$ 为水库 $R_{i,j}$ 相邻时段允许的最大出库流量变幅, 该约束反映泄流变化对下游堤防、码头和航运安全等影响。

g. 下游防洪断面安全流量约束:

$$\sum_{i=1}^n q'_{i,m_i,t} + Q_{Dt} \leq q_{at} \quad (8)$$

式中: $q'_{i,m_i,t}$ 为 t 时刻与下游公共防洪断面有直接水力联系的水库出库流量到公共防洪断面的演进流量; q_{at} 为 t 时刻公共防洪断面安全流量。

2 混联水库群联合调度 3 层递阶求解优化方法

针对混联水库群防洪联合调度的系统总协调层、支流子系统协调层和单库优化调度层, 本文提出 3 层递阶求解优化方法。混联水库群具有复杂的水力和水利联系, 兼具串联水库群系统由于传播滞时导致水力联系“弱耦合”的特点, 以及并联水库群多库直接补偿防洪断面的水利联系。本文引入大系统分解协调方法进行解耦, 分层处理优化问题, 统筹协调各层计算结果。

2.1 混联水库群系统分解

根据图 1 混联水库群结构特征, 将混联水库群分解为各支流并联水库群结构与单条支流串联水库群结构, 即将各支流上水库群概化为支流子系统 (若干流存在串联水库群结构, 则一样处理为子系

统), 将混联水库群分解为 3 层递阶结构, 如图 2 所示。图 2 中, W_{ci} 为支流 i 子系统蓄洪量, $q_{ci,t}$ 为 t 时刻第 i 条支流私有防洪断面 d_i 处的出流量, $W_{i,j}$ 为水库 $R_{i,j}$ 的蓄洪量。

系统总协调层将公共防洪断面超额洪量分配给各支流子系统, 在保证公共防洪断面安全的前提下, 使各支流子系统的风险尽可能均衡; 支流子系统协调层将支流子系统承担的蓄洪量进一步分配给各水库, 并使各水库风险尽可能均衡; 单库优化调度层则根据水库承担的蓄洪量, 以最大削峰准则为目标进行防洪优化调度。

2.2 系统总协调层

2.2.1 超额水量计算

公共防洪断面 D 的天然洪水过程超过安全流量的水量为超额水量, 系统总协调层负责将公共防洪断面 D 的超额水量分配给各支流子系统。 Q_t 为公共防洪断面在上游无水库调蓄作用下的天然洪水量, 当 Q_t 在调度期内存在大于 q_{at} 的流量过程时, 则下游防洪断面的超额水量为:

$$W_e = \sum_{t=t_1}^{t_2} (Q_t - q_{at}) \Delta t \quad (9)$$

式中: W_e 为超额水量; t_1 、 t_2 分别为 $Q_t > q_{at}$ 时的起始时间和终止时间。

W_{ri} 为 $[t_1, t_2]$ 时段内支流 i 来水演进到公共防洪断面 D 的水量, 反映支流 i 对断面 D 超额水量 W_e 的贡献, 也是支流 i 超额水量分配额的上限, 其计算公式为:

$$W_{ri} = \sum_{t=t_1}^{t_2} Q_{i,t} \Delta t \quad (10)$$

式中: $Q_{i,t}$ 为支流 i 来水演进到公共防洪断面 D 的流量。

2.2.2 超额水量分配

超额水量在各支流之间的分配遵循各支流风险尽可能均衡的基本原则。目标函数为:

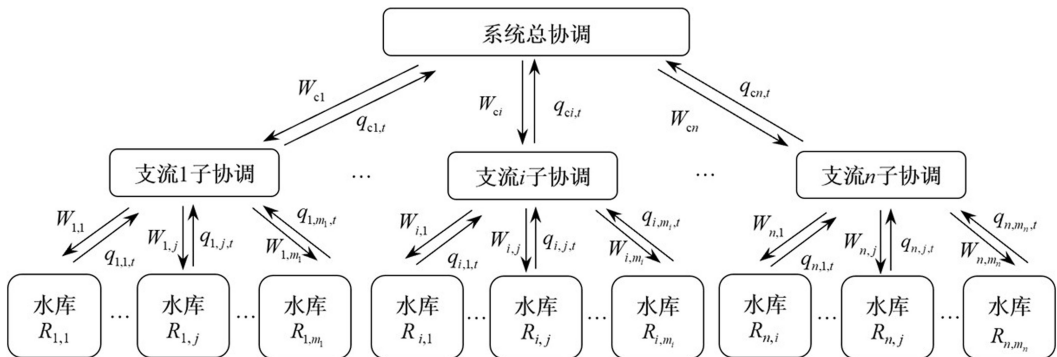


图 2 混联水库群系统分解协调的 3 层递阶结构

Fig. 2 Three-layer hierarchical structure of decomposition-coordination of mixed-connected reservoir group

$$\min F_e = \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j} + W_{ci} \right) / \sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j} \right]^2 \quad (11)$$

式中: F_e 为各支流风险度平方和; $V_{0i,j}$ 为调度期开始时水库 $R_{i,j}$ 蓄水量。

考虑的主要约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n W_{ci} = W_e \quad (12)$$

$$W_{ci} \leq \min \left(\sum_{j=1}^{m_i} (V_{di,j} - V_{0i,j}), W_{ri} \right) \quad (13)$$

引入拉格朗日乘子 λ , 构建拉格朗日辅助函数^[26-27], 将等式联合约束条件(式(12))并入目标函数, 并使用卡鲁什-库恩-塔克(KKT)条件^[28-29]将非等式约束条件(式(13))引入目标函数, 推导出满足约束条件的系统总协调层模型的初始理想最优解。构造的拉格朗日辅助函数为:

$$\begin{aligned} L(W_{c1}, W_{c2}, \dots, W_{ci}, \dots, W_{cn}, \lambda) = & \sum_{i=1}^n \left[\left(\sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j} + W_{ci} \right) / \sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j} \right]^2 + \\ & \lambda \left(\sum_{i=1}^n W_{ci} - W_e \right) + \sum_{i=1}^n \mu_i \left[W_{ci} - \right. \\ & \left. \min \left(\sum_{j=1}^{m_i} (V_{di,j} - V_{0i,j}), W_{ri} \right) \right] + \sum_{i=1}^n (-W_{ci} \gamma_i) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $L(\cdot)$ 为拉格朗日辅助函数; μ_i 为支流 i 超额水量分配额上限约束对应的 KKT 乘子; γ_i 为非负约束对应的 KKT 乘子。

KKT 最优条件包括拉格朗日梯度条件、原始可行性条件、互补松弛条件及乘子非负性条件, 其中拉格朗日梯度条件表达式为:

$$\partial L / \partial W_{ci} = 2 \left(W_{ci} + \sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j} \right) / \left(\sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j} \right)^2 + \lambda + \mu_i - \gamma_i = 0 \quad (15)$$

根据互补松弛条件, 将所有满足非等式约束条件(式(13))的支流子系统集合设为 I , 此时 $\mu_i = 0$, $\gamma_i = 0$, 代入式(15)计算可得:

$$W_{ci} = -\lambda \left(\sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j} \right)^2 / 2 - \sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j} \quad (16)$$

代入式(12), 可以计算得出 λ 的值:

$$\lambda = -2 \left(W_e + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j} \right) / \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j} \right)^2 \quad (17)$$

将 λ 再代入式(16), 求得支流 i 子系统蓄洪量:

$$\begin{aligned} W_{ci} = & \left[\left(\sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j} \right)^2 / \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j} \right)^2 \right] \cdot \\ & \left(W_e + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j} \right) - \sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j} \end{aligned} \quad (18)$$

检查 W_{ci} 是否满足边界条件 $0 \leq W_{ci} \leq$

$\min \left(\sum_{j=1}^{m_i} (V_{di,j} - V_{0i,j}), W_{ri} \right)$ 。对于 $i \in I$, 当 $W_{ci} < 0$ 时, 令 $W_{ci} = 0$, 并将对应的支流 i 子系统移出集合 I ;

当 $W_{ci} > \min \left(\sum_{j=1}^{m_i} (V_{di,j} - V_{0i,j}), W_{ri} \right)$ 时, 令 $W_{ci} =$

$\min \left(\sum_{j=1}^{m_i} (V_{di,j} - V_{0i,j}), W_{ri} \right)$, 也将对应的支流 i 子系统移出集合 I 。设 U 为不满足边界条件的支流子系统集合, 将不满足边界条件的支流子系统放入集合 U 中, 此时集合 I 中的支流子系统应承受的蓄洪量为:

$$W_I = \sum_{i \in I} W_{ci} + \Delta W_U \quad (19)$$

其中

$$\Delta W_U = \sum_{i \in U} (W'_{ci} - W''_{ci})$$

式中: W'_{ci} 为修正前支流 i 子系统分配的蓄洪量; W''_{ci} 为修正后支流 i 子系统分配的蓄洪量。

重复拉格朗日函数求解算法, 将 W_I 分配给集合 I 中的支流子系统, 且每次迭代时重置不满足边界条件的支流子系统集合 U , 直至所有支流子系统分配的蓄洪量 W_{ci} 均满足边界条件。然后, 将满足约束条件的支流子系统蓄洪量传递给支流子系统协调层, 进行下一步优化分配。

设第 k 次分配时, 支流 i 子系统向系统总协调层反馈的实际蓄洪量为 $W_{Ri,k}$, 若 $|W_{Ri,k} - W_{ci}| > \varepsilon$ (ε 为 0.1), 则表明支流 i 子系统实际蓄洪量与上层分配蓄洪量之间的偏差超过允许范围, 未能准确实现分配蓄洪目标; 令 $W_{ci} = W_{Ri,k}$, 将支流 i 子系统存入重置后的 U 集合, 重新分配蓄洪量差额后, 进入支流子系统协调层模型进行再次分配, 直至实际调度可准确消纳分配的蓄洪量。若 $|W_{Ri,k} - W_{ci}| \leq \varepsilon$, 则表明支流 i 子系统可以准确消纳分配的蓄洪量, 根据支流 i 子系统反馈的出流量 $q_{fi,k,t}$, 可以计算得出第 k 次分配时各支流子系统出库演进流量在断面 D 的总和 $Q_{k,t}$:

$$Q_{k,t} = \sum_{i=1}^n q'_{fi,k,t} + Q_{Dt} \quad (20)$$

式中: $q'_{fi,k,t}$ 为 $q_{fi,k,t}$ 到公共防洪断面的演进流量。

利用断面超额水量 W_{ek} 评价第 k 次分配的调度方案效果。若 $W_{ek} \leq \varepsilon$, 则终止迭代, 返回各水库最高水位控制条件; 若 $W_{ek} > \varepsilon$, 则协调修改 $W_{e(k+1)}$ 的值, 重新进行协调计算。 $W_{e(k+1)}$ 的计算公式为:

$$W_{e(k+1)} = W_{ek} + \sum_{t=t_1}^{t_2} (Q_{k,t} - q_{at}) \Delta t \quad (21)$$

2.3 支流子系统协调层

支流子系统协调层根据系统总协调层传递的支流子系统蓄洪量 W_{ci} , 以支流水库群风险均衡为目

标,计算水库 $R_{i,j}$ 应承担的蓄洪量 $W_{i,j}$ 。支流子系统由内部呈串联结构的水库群构成,这些水库共同承担系统协调分配给各支流的防洪任务。

支流子系统协调层目标函数为:

$$\min F_i = \sum_{j=1}^{m_i} [(V_{0i,j} + W_{i,j}) / V_{di,j}]^2 \quad (22)$$

式中: F_i 为第 i 个支流子系统的风险度平方和。

2.3.1 支流子系统蓄洪量分配的约束条件

支流子系统蓄洪量分配需要满足蓄洪量联合约束、水量平衡约束、子系统内各水库空闲防洪库容约束和协调变量非负约束:

$$\sum_{j=1}^{m_i} W_{i,j} = W_{ci} \quad (23)$$

$$W_{i,j} \leq \sum_{t=t_{1i}}^{t_{2i}} Q''_{i,j,t} \Delta t \quad (24)$$

$$W_{i,j} \leq V_{di,j} - V_{0i,j} \quad (25)$$

$$W_{i,j} \geq 0 \quad (26)$$

式中: t_{1i} 、 t_{2i} 分别为将 t_1 和 t_2 反推至 d_i 的时间点; $Q''_{i,j,t}$ 为水库 $R_{i,j}$ 的天然入流在 d_i 的响应流量。

2.3.2 支流子系统蓄洪量分配计算方法

支流子系统协调层模型和系统总协调层模型类似,同样采用构造拉格朗日辅助函数和 KKT 条件求解理想解 $W_{i,j}$:

$$W_{i,j} = \left(V_{di,j}^2 / \sum_{j=1}^{m_i} V_{di,j}^2 \right) (W_{ci} + \sum_{j=1}^{m_i} V_{0i,j}) - V_{0i,j} \quad (27)$$

设 J 为满足约束条件的水库集合, U_i 为支流 i 子系统内不满足约束条件的水库集合。依次检验理想解是否满足边界约束条件,将满足约束条件的解对应的水库 R_{ij} 存入集合 J 内,将不满足约束条件的解更新为边界值,并将对应水库 $R_{i,j}$ 存入集合 U_i 。通过迭代重新分配蓄洪量差额,直至所有 $W_{i,j}$ 均满足边界约束条件,并将 $W_{i,j}$ 传递给单库优化调度层。

根据第 k 次分配时单库优化调度层反馈的信息,即 t 时刻水库 $R_{i,j}$ 的水位过程 $Z_{i,j,k,t}$,可以计算出支流 i 子系统内水库 $R_{i,j}$ 实际承担的蓄洪量:

$$W_{Ri,j,k} = g(\max_{t \in T} (Z_{i,j,k,t})) - V_{0i,j} \quad (28)$$

式中: $g(\cdot)$ 为水库 $R_{i,j}$ 水位-库容关系函数。

若 $|W_{i,j} - W_{Ri,j,k}| \leq \varepsilon$,则实际调度情况可准确消纳分配的蓄洪量,计算第 k 次分配水库 R_{i,m_i} 出库流量 $q_{i,m_i,k,t}$ 在断面 d_i 的响应过程 $q_{i,k,t}$,并将断面 d_i 处的响应流量和支流 i 子系统实际蓄洪量 $W_{Ri,k}$ 作为支流 i 子系统的反馈信息传递给系统总协调层。

$$W_{Ri,k} = \sum_{j=1}^{m_i} W_{Ri,j,k} \quad (29)$$

若 $|W_{i,j} - W_{Ri,j,k}| > \varepsilon$,则实际调度受水库泄流

能力约束或上游实际放水影响,无法准确消纳分配的蓄洪量;令 $W_{i,j} = W_{Ri,j,k}$,将对应水库 $R_{i,j}$ 存入重置后的 U_i 集合,重新分配蓄洪量差额,传入单库优化调度层进行再次验证,直到实际调度可准确消纳分配的蓄洪量。

2.4 单库优化调度层

单库优化调度层根据支流子系统协调层分配的水库蓄洪量 $W_{i,j}$,计算对应水库最高水位控制条件,以最大削峰准则为目标,使用分段启发式优化算法^[30]计算得到各水库出库流量过程 $q_{i,j,t}$,并反馈给所在支流子系统协调层。

根据水库 $R_{i,j}$ 分配的蓄洪量 $W_{i,j}$,可以计算出水库 $R_{i,j}$ 调度期内的最高水位控制条件。根据 $V_{0i,j}$ 和 $W_{i,j}$ 计算各水库最大蓄水量 $V_{maxi,j}$:

$$V_{maxi,j} = V_{0i,j} + W_{i,j} \quad (30)$$

基于水库水位-库容曲线,插值得出 $V_{maxi,j}$ 对应的水库最高控制水位 $Z_{maxi,j}$:

$$Z_{maxi,j} = g^{-1}(V_{maxi,j}) \quad (31)$$

根据最大削峰准则,建立单库优化调度层目标函数:

$$\min F_b = \sum_{t=1}^T (q''_{i,j,t} + Q_{i,j+1,t})^2 \quad (32)$$

式中: F_b 为水库在下游控制节点各时段流量的平方和; $q''_{i,j,t}$ 为水库 $R_{i,j}$ 出库流量在水库 $R_{i,j+1}$ 的响应流量。

模型的约束条件见式(4)~(8),其中,式(4)中的最高控制水位更新为式(31)求得的最高控制水位。利用分段启发式优化算法,获得各水库出库流量 $q_{i,j,t}$ 和水位过程 $Z_{i,j,t}$,反馈给支流子系统协调层。

3 实例分析

3.1 研究区概况

汉江干流上的石泉、安康、丹江口 3 座水库呈串联布置,支流鸭河口水库与干流 3 座水库呈并联关系,因此 4 座水库构成了混联结构,共同承担下游皇庄断面的防洪安全保障任务^[31-33],其概化图如图 3 所示,4 座水库的基本参数见表 1。

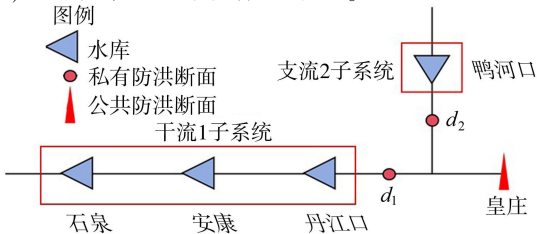


图 3 汉江水库群子系统划分概化图

Fig. 3 Schematic diagram of subsystem division of the Hanjiang River reservoir group

表 1 汉江混联水库群基本参数

Table 1 Basic parameters of mixed-connected reservoir system group on the Hanjiang River					
水库	设计洪水 位/m	防洪高 水位/m	死水位/m	设计防洪 库容/亿 m ³	死库容/ 亿 m ³
鸭河口	178.84	177.0	160	9.978 0	0.700
石泉	410.29	410.0	400	2.806 2	1.075
安康	333.10	330.0	305	28.476 4	11.130
丹江口	172.20	171.7	150	293.290 0	110.830

出库流量变幅、洪水演进参数采用水文部门率定的确定性参数;风险度权重系数反映各水库的重要性差异,文中 4 座水库的重要性接近,因此,风险度目标函数中的权重系数均为 1。

3.2 模拟情景设置

为验证方法的实用性和适应性,选择 2020—2025 年间汉江流域洪水量级和过程特征存在差异的两场洪水开展实例分析。其中,20230929 号洪水(洪峰 12 800 m³/s)接近 10 年一遇量级,洪水过程呈前峰较小、后峰较大的复峰特征;20240715 号洪水(洪峰 20 300 m³/s)接近 20 年一遇量级,属于峰值较高、过程起伏明显的复峰洪水。两场洪水过程线时间间隔均为 3 h,因此,模型计算时取 $\Delta t=3\text{ h}$ 。对每一场洪水在皇庄断面设置两个不同的安全流量,以测试不同工况下方法的适用性。

3.3 结果与分析

基于两场典型洪水过程,根据表 1 中各水库基本参数和防洪断面安全流量,求解混联水库群优化调度模型,选择不超过(或不低于)安全流量的 3% 作为迭代终止条件,得到各水库的蓄洪量、风险度和调度过程以及断面流量的响应过程。

表 2 各子系统和水库分配水量及相应风险度计算结果

Table 2 Water allocation and corresponding risk degree calculation results for each subsystem and reservoir							
洪水编号	皇庄断面 安全流量/(m ³ /s)	水库	分配水量/ (万 m ³)	子系统 风险度	子系统风险度 变异系数/%	水库 风险度	水库风险度 变异系数/%
20230929	10 000	鸭河口	3 856	0.617	1.99	0.617	4.91
		石泉	3 104	0.642		0.624	
		安康	1 460			0.697	
		丹江口	90 360			0.636	
	8 500	鸭河口	4 082	0.619	3.28	0.619	5.05
		石泉	3 608	0.661		0.641	
		安康	4 880			0.709	
		丹江口	149 590			0.657	
20240715	10 000	鸭河口	15 351	0.733	2.46	0.733	2.47
		石泉	7 611	0.770		0.783	
		安康	22 876			0.772	
		丹江口	480 450			0.770	
	8 000	鸭河口	15 351	0.733	4.93	0.733	4.18
		石泉	8 458	0.809		0.814	
		安康	31 313			0.802	
		丹江口	596 239			0.810	

3.3.1 风险均衡性

各子系统和水库对应的分配水量和风险度如表 2 所示。由表 2 可见,各子系统和各水库承担的风险基本均衡:

a. 4 种情景下,鸭河口水库子系统和汉江干流子系统风险度基本接近,鸭河口水库子系统的风险度略小于汉江干流子系统的风险度,主要是鸭河口水库入库洪水较少,分配的水量受超额水量分配额上限的制约。

b. 汉江混联水库群在 4 种情景下,水库风险度变异系数分别为 4.91%、5.05%、2.47% 和 4.18%,风险度分布离散性低,各水库蓄洪风险度均衡,系统通过协同调度实现了风险共担。

3.3.2 流量补偿效应

4 种情景下,皇庄断面流量响应结果如表 3、图 4 所示。由表 3、图 4 可见:

a. 各水库均表现出明显削峰作用,鸭河口水库 20230929 号、20240715 号洪水削峰分别超过 70% 和 96%;丹江口水库两场洪水削峰分别超过 39% 和 59%。

b. 各水库的最高水位满足上限水位约束,表明在调度过程中较好地落实了超额水量的分配结果;皇庄断面安全流量控制良好,皇庄断面最大流量与安全流量接近,满足 3% 的迭代终止条件。

c. 皇庄断面不仅峰值达到了补偿效果,补偿调度后的洪峰过程也较为平稳(图 4),流量过程无明显非物理锯齿波动,调度方案可操作性较好。

3.3.3 计算效率提升

选择 PSO 算法作为基准,对比本文提出的 3 层

表 3 水库群补偿调度结果

Table 3 Compensation operation results of reservoir group

洪水编号	皇庄断面 安全流量/(m³/s)	水库	最大入库 流量/(m³/s)	最大出库 流量/(m³/s)	水库 削峰率/%	水位控值/m	最高水位/m	皇庄断面 最大流量/(m³/s)
20230929	10 000	鸭河口	111	33	70.18	174.13	174.12	10 100
		石泉	1 620	1 190	26.54	404.94	404.94	
		安康	7 180	6 600	8.08	321.52	321.52	
		丹江口	12 600	7 600	39.68	160.83	160.83	
	8 500	鸭河口	111	19	83.15	174.16	174.16	8 510
		石泉	1 620	1 150	29.01	405.21	405.23	
		安康	7 180	5 860	18.25	322.03	322.04	
		丹江口	11 800	6 990	40.76	161.54	161.54	
20240715	10 000	鸭河口	860	29	96.65	175.74	175.74	10 100
		石泉	7 520	5 480	27.13	407.40	407.40	
		安康	12 600	7 910	37.22	324.63	324.63	
		丹江口	22 600	9 250	59.07	165.30	165.30	
	8 000	鸭河口	860	29	96.65	175.74	175.74	8 050
		石泉	7 520	5 510	26.73	407.83	407.83	
		安康	12 400	6 730	45.73	325.82	325.82	
		丹江口	22 700	7 410	67.36	166.53	166.51	

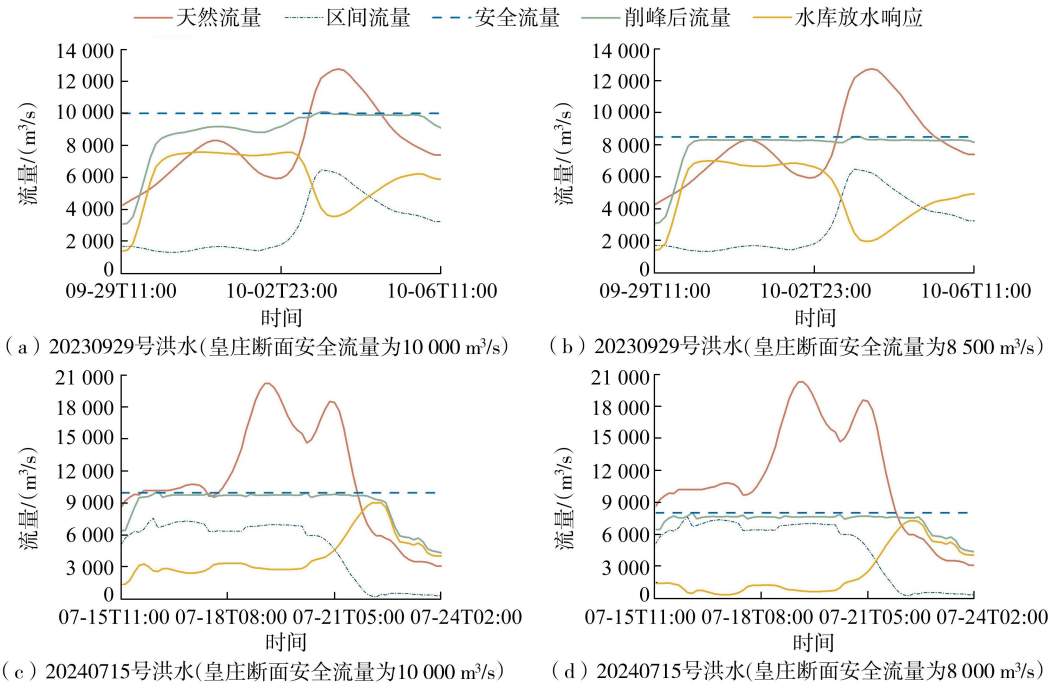


图 4 不同情景皇庄断面流量过程

Fig. 4 Hydrographs at Huangzhuang section in different scenarios

递阶求解优化方法在计算效率、风险均衡和满足安全流量约束方面的计算效果,二者计算均在一台配备 Intel Core i5-12500H 处理器和 16 GB 内存的计算机上完成,对比结果如表 4、图 5 所示。

a. 在计算效率方面,与 PSO 算法相比,本文方法具有显著优势。针对 20230929 和 20240715 两场次洪水,在两种不同安全流量约束下,本文方法总计算时长均在 6 s 以内,平均每次迭代耗时不足 1 s,而 PSO 算法在种群数 500,迭代次数 100 的情境下,总耗时普遍在数百至上千秒,平均单次迭代时间为

4.152~14.003 s。本文方法计算效率提升超过两个数量级,说明本文方法能极大缓解“维数灾”,具备突出的实时响应能力。

b. 在水库风险度均衡方面,本文方法的水库风险度变异系数多数低于 5%,显著低于 PSO 算法的结果,表明本文方法在库群间蓄洪量分配上更为均衡合理,有效实现了系统风险均衡的调度目标。此外,由皇庄断面流量响应过程对比可得,本文方法补偿洪峰过程比较平稳,PSO 算法则会出现锯齿状波动,表明本文方法更具有可操作性和工程可实施性。

表 4 3 层递阶求解优化方法与 PSO 算法对比结果

Table 4 Comparison results between three-layer hierarchical soltuion optimization method and PSO algorithm							
方法	洪水编号	皇庄断面	效率指标			效果指标	
		安全流量/(m ³ /s)	计算总时长/s	迭代次数	平均每次迭代时间/s	安全流量误差/%	水库风险度变异系数/%
3 层梯阶求解优化方法	20230929	10000	3.17	4	0.793	1.00	4.91
		8500	5.02	6	0.837	0.10	5.05
	20240715	10000	3.14	4	0.785	1.00	2.47
		8000	3.15	4	0.788	0.63	4.18
PSO 算法	20230929	10000	415.2	100	4.152	0.60	42.76
		8500	1076.3	100	10.763	1.09	42.00
	20240715	10000	1400.3	100	14.003	0.20	31.02
		8000	538.9	100	5.389	0.25	27.80

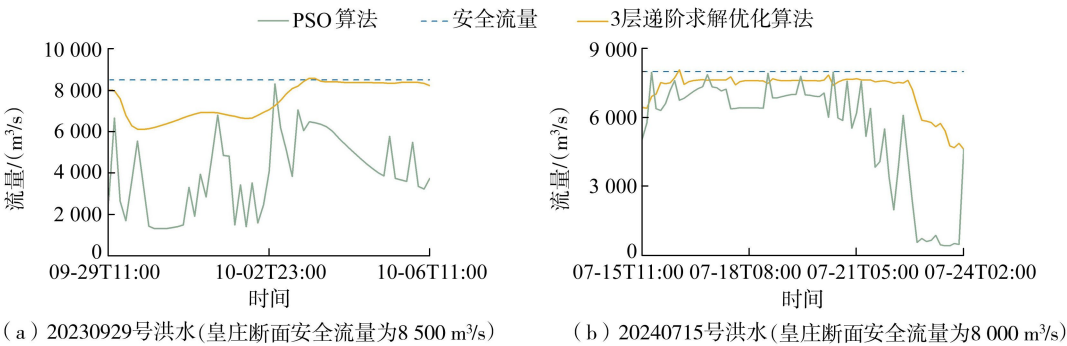


图 5 3 层递阶求解优化方法与 PSO 算法调度结果对比

Fig. 5 Comparison of scheduling results between three-layer hierarchical solution optimization method and PSO algorithm

4 结 语

本文针对复杂流域防洪需求,以水库群风险度均衡为目标,建立了混联水库群防洪联合优化调度模型,并基于大系统分解协调理论,设计 3 层递阶求解架构,以汉江流域典型混联水库群为例开展了多情景模拟调度。结果表明,模型在不同洪水量级、洪水峰型特征及防洪断面安全流量条件下均能得到符合预期的调度结果,反映了本文方法的稳定性。与 PSO 算法相比,3 层递阶求解优化方法缓解了水库群调度“维数灾”,所有情景的计算时间均在 6 s 以内。但本文实例中流域水库结构相对简单,只考虑了一级支流,未来将在水力联系更加复杂、水库结构更加多样的流域进行验证,以进一步提升模型的普适性。

参考文献:

[1] 高玉琴,王辰,谢梦瑶,等. 洪涝灾害人口生命损失风险动态评估[J]. 水资源保护,2025,41(5):79-88. (Gao Yuqin, Wang Chen, Xie Mengyao, et al. Dynamic assessment of population life loss risk due to flood disasters[J]. Water Resources Protection,2025,41(5):79-88. (in Chinese))

[2] 黄德春,朱宇昂,张修忠,等. 基于多理论视角的我国现代化水库运行管理矩阵建设研究[J]. 水利经济,2025,43(3):84-93. (Huang Dechun, Zhu Yuang, Zhang Xiuzhong, et al. Research on the construction of modern

reservoir operation and management matrix in China from multiple theoretical perspectives[J]. Journal of Economics of Water Resources,2025,43(3):84-93. (in Chinese))

[3] 谢柳青,易淑珍. 水库群防洪系统优化调度模型及应用[J]. 水利学报,2002(6):38-42. (Xie Liuqing, Yi Shuzhen. Optimal flood dispatch model for multi-reservoir system[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002(6):38-42. (in Chinese))

[4] 贾本有,钟平安,陈娟,等. 复杂防洪系统联合优化调度模型[J]. 水科学进展,2015,26(4):560-571. (Jia Benyou, Zhong Ping'an, Chen Juan, et al. Coordinated optimal operation model of complex flood control system[J]. Advances in Water Science,2015,26(4):560-571. (in Chinese))

[5] 翁志明,高玺炜,李晓英. 基于改进智能算法水库群防洪优化调度研究[J]. 人民黄河,2024,46(9):132-135. (Weng Zhiming, Gao Xiwei, Li Xiaoying. Research on optimal operation of reservoir group flood control based on improved intelligent algorithm[J]. Yellow River,2024,46(9):132-135. (in Chinese))

[6] 钟倩漪,钱谦,伏云发,等. 粒子群优化算法在关联规则挖掘中的研究综述[J]. 计算机科学与探索,2021,15(5):777-793. (Zhong Qianyi, Qian Qian, Fu Yunfa, et al. Survey of particle swarm optimization algorithm for association rule mining[J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology,2021,15(5):777-793. (in Chinese))

- [7] 张渊博,邹德旋,张春韵,等. 自适应惯性权重的粒子群优化算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 350-357. (Zhang Yuanbo, Zou Dexuan, Zhang Chunyun, et al. Particle swarm optimization algorithm with adaptive inertial weight[J]. Computer Simulation, 2023, 40(4): 350-357. (in Chinese))
- [8] Liu Chenye, Xie Yangyang, Liu Saiyan, et al. A modified multi-objective grey wolf optimizer for multi-objective flood control operation of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydrology, 2025, 658: 133162.
- [9] Liu Chenye, Xie Yangyang, Liu Saiyan, et al. An enhanced horned lizard optimization algorithm for flood control operation of cascade reservoirs[J]. Water, 2024, 16(17): 2458.
- [10] Qiu Hongya, Zhou Jianzhong, Chen Lu, et al. Multiple strategies based Salp swarm algorithm for optimal operation of multiple hydropower reservoirs[J]. Water, 2021, 13(19): 2753.
- [11] 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))
- [12] He Ji, Tang Yefeng, Guo Xiaoqi, et al. Research on hybrid reservoir scheduling optimization based on improved walrus optimization algorithm with coupling adaptive ε constraint and multi-strategy optimization[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 11981.
- [13] 钟加星,董增川,孟金玉,等. 基于机器学习的黄河上游梯级水库群多目标优化调度规则提取[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 30-37. (Zhong Jiaxing, Dong Zengchuan, Meng Jinyu, et al. Extracting multi-objective optimal operation rules of cascade reservoirs in upper reaches of Yellow River based on machine learning[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 30-37. (in Chinese))
- [14] 杨子桐,方国华,叶健,等. 统筹防洪、供水、生态的流域水资源系统优化调度研究[J]. 水资源保护, 2025, 41(4): 71-78. (Yang Zitong, Fang Guohua, Ye Jian, et al. Research on optimization and scheduling of watershed water resources system for integrated flood control, water supply, and ecology[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(4): 71-78. (in Chinese))
- [15] 马强,王浩雯,张珂健,等. 基于“23·7”特大洪水的永定河系数字孪生流域防洪模型构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 75-82. (Ma Qiang, Wang Haowen, Zhang Kejian, et al. Construction of flood control model for digital twin basin of the Yongding River System based on “23·7” catastrophic flood[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 75-82. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] Li Min, Han Xiaoye, Yao Yonggao, et al. Study on joint flood control and peak shaving optimization operation of reservoir groups based on flood operation phase division[J]. Water Resources Management, 2025, 39(12): 6669-6681.
- [18] Cao Huang, Li Weiqi, He Sizhong, et al. Development and application of reservoir operation method based on pre-release index for control of exceedance floods[J]. Water, 2024, 16(22): 3229.
- [19] 钟平安,谢小燕,唐林. 基于超额水量分配的水库群补偿调度模型[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1446-1450. (Zhong Ping'an, Xie Xiaoyan, Tang Lin. A compensative operating model for multi-reservoir based on the allocation of excess water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(12): 1446-1450. (in Chinese))
- [20] 李颖,王斌,徐孙钰,等. 串联水库群弱耦合条件下实时防洪调度方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(8): 63-69. (Li Ying, Wang Bin, Xu Sunyu, et al. Method of real-time flood control operation of cascade reservoirs under weak coupling conditions[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(8): 63-69. (in Chinese))
- [21] 查港. 长江上游大规模水库群联合防洪调度研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
- [22] Zhou Tao, Dong Zengchuan, Wang Wenzhou, et al. Study on multi-scale coupled ecological dispatching model based on the decomposition-coordination principle[J]. Water, 2019, 11(7): 1443.
- [23] 张云苹,徐征和,王昕,等. 基于大系统分解协调法的沾化县典型农业区水资源优化配置[J]. 中国农村水利水电, 2016(3): 60-63. (Zhang Yunping, Xu Zhenghe, Wang Xin, et al. Research on the optimal allocation of the typical area of zhanhua based on large system decomposition coordination[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(3): 60-63. (in Chinese))
- [24] 吴昊,纪昌明,蒋志强,等. 梯级水库群发电优化调度的大系统分解协调模型[J]. 水力发电学报, 2015, 34(11): 40-50. (Wu Hao, Ji Changming, Jiang Zhiqiang, et al. Large system decomposition-coordination model for optimal power-generation scheduling of cascade reservoirs[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(11): 40-50. (in Chinese))

(下转第 196 页)

A3C learning approach [J]. Computer Communications, 2020,151:485-494.

[30] Peng Xuebin, Abbeel P, Levine S, et al. DeepMimic: example-guided deep reinforcement learning of physics-based character skills [J]. ACM Transactions on Graphics,2018,37(4):143.

[31] 邹家祥,段存存,陈彬,等. 气候变化下基于经济损失量化的北京市内涝韧性评估[J]. 水资源保护,2024,40(6):85-94. (Zou Jiayang, Duan Cuncun, Chen Bin, et al. Assessment of waterlogging resilience in Beijing based on quantification of economic losses under climate change [J]. Water Resources Protection,2024,40(6):85-94. (in Chinese))

[32] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: an introduction[M]. Cambridge:MIT Press,1998.

[33] Arulkumaran K, Deisenroth M P, Brundage M, et al. A brief survey of deep reinforcement learning [J]. IEEE Signal Processing Magazine,2017,34(6):26-38.

[34] Mnih V, Badia A P, Mirza M, et al. Asynchronous methods

for deep reinforcement learning[C]//Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. New York:JMLR.org,2016:1928-1937.

[35] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 SWMM 和 InfoWorks ICM 的城市街区洪涝模拟与分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 87-94. (Ye Chenlei, Xu Zongxue, Lei Xiaohui, et al. Flood simulation and risk analysis on urban block scale based on SWMM and InfoWorks ICM [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 87-94. (in Chinese))

[36] Lian J J, Xu K, Ma C. Joint impact of rainfall and tidal level on flood risk in a coastal city with a complex river network :a case study of Fuzhou City, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2013,17(2):679-689.

[37] 陈奕. 福州市暴雨强度公式优化研究[J]. 给水排水, 2013,39(10):36-40. (Chen Yi. Optimization of rainstorm intensity formula for Fuzhou City[J]. Water & Wastewater Engineering,2013,39(10):36-40. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-10 编辑:施业)

+++++

(上接第 177 页)

[25] 高桂霞. 大系统分解协调在库群防洪优化调度中的应用[J]. 东北水利水电, 2007, 25 (3): 42-44. (Gao Guixia. Application of large system decomposition coordination in flood control optimization operation of reservoir group [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2007,25(3):42-44. (in Chinese))

[26] 董姗姗,齐雪. 辅助函数构造法证明微分中值定理及其应用[J]. 通化师范学院学报,2019,40(8):22-25. (Dong Shanshan, Qi Xue. The method of auxiliary function construction in certifications and applications of differential mean value theorem [J]. Journal of Tonghua Normal University,2019,40(8):22-25. (in Chinese))

[27] 高庆娴. 构造拉格朗日定理辅助函数的几种方法[J]. 吉林师范学院学报, 1996, 17 (12): 42-43. (Gao Qingxian. Several methods for constructing auxiliary functions for Lagrange ’ s theorem [J]. Journal of Jilin Teachers College,1996,17(12):42-43. (in Chinese))

[28] 欧阳龙. 基于龙格库塔优化算法的三级串联泵站优化调度分析[J]. 水利科学与寒区工程,2025,8(7):120-123. (Ouyang Long. Optimization scheduling analysis of three-stage series pumping stations based on the Runge-Kutta optimization algorithm[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering,2025,8(7):120-123. (in Chinese))

[29] 李贞蓉,张雷克,刘小莲,等. 基于龙格库塔算法的梯级泵站优化运行[J]. 水电能源科学,2024,42(4):164-167. (Li Zhenrong, Zhang Leike, Liu Xiaolian, et al. Optimal operation of cascade pumping station based on Runge-Kutta algorithm[J]. Water Resources and Power, 2024,42(4):164-167. (in Chinese))

[30] 王翌旭,刘强,钟平安,等. 低调节性能水库防洪优化调度分段试算法改进[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19 (3): 598-605. (Wang Yixu, Liu Qiang, Zhong Pingan, et al. Improved stage-wise trial-and-error method for optimal flood control operation of reservoirs with a low regulation capacity [JJ. South-to-North Water Transfers and Water Science &. Technology,2021,19(3):598-605. (in Chinese))

[31] 段唯鑫. 汉江流域控制性水库调度运行及影响研究 [D]. 武汉:武汉大学,2017.

[32] 董付强,丁洪亮,穆青青,等. 以丹江口水库为核心的汉江上游水库群联合调度初步实践与探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29 (6): 9-12. (Dong Fuqiang, Ding Hongliang, Mu Qingqing, et al. Preliminary practice and discussion on joint-dispatching of upper reaches of Hanjiang River with Danjiangkou Reservoir as the core [J]. China Flood & Drought Management,2019,29(6):9-12. (in Chinese))

[33] 胡维忠,王乐,刘佳明. 长江流域防洪工程体系能力提升建设思路[J]. 中国水利, 2022 (5): 31-34. (Hu Weizhong, Wang Le, Liu Jiaming. Ideas of capacity building for flood control engineering system in the Yangtze River Basin [J]. China Water Resources, 2022 (5): 31-34. (in Chinese))

(收稿日期:2025-11-10 编辑:施业)