水　利　学　报
2023 年 5 月　　SHUILI　XUEBAO　　第 54 卷　第 5 期

文章编号：0559-9350(2023)05-0507-12

梯级水库汛期运行水位协同浮动调度模型方法

周研来，郭生练，王　俊，熊立华，刘　攀，陈　华
（武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北 武汉　430072）

摘要：水库汛期运行水位协同浮动旨在不增加防洪风险前提下，挖掘中小洪水利用潜力，提升流域水资源利用水平和供水保障能力，已成为防洪与水资源高效利用领域的研究热点和难点。从防洪库容置换与风险防控出发，基于动态预见期和预泄能力约束，嵌套运用预泄预蓄法和库容补偿法，解析了梯级水库汛期运行水位协同浮动关系；考虑帕累托最优解集和最优前沿的动态变化特性，建立了面向动态多目标的梯级水库汛期运行水位协同浮动调度模型；把环境变化检测、随机再生种群和基于参考点的帕累托前沿预测策略引入智能算法，提出求解调度模型的动态多目标智能算法，基于风险效益评价指标以评估调度方案，为梯级水库汛期运行水位协同浮动运用提供技术支撑。

关键词：汛期运行水位；协同浮动；风险防控；动态多目标算法
中图分类号：TV122　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20220460

1　研究背景

因受季风气候影响，我国降水时程分布不均，水资源供需矛盾十分突出，水库汛期弃水与汛后缺水现象频发，针对中小洪水(重现期小于等于 20 年一遇)实施水库汛期运行水位协同浮动是提升流域水资源利用水平和供水保障能力的关键非工程措施之一[1]。水库汛期运行水位协同浮动是指水库在汛期，根据水雨情预报成果，在不降低防洪标准的前提下，按照科学论证的汛期运行水位方案对水库水位进行协同浮动的调度过程[2-3]。当前单一水库汛期运行水位浮动调度的研究成果甚多，较具代表性方法有预报调度法[4-5]、预泄预蓄法[6]、综合信息推理模式法[7]、预泄能力约束法[8]、风险决策分析法等[9-11]。

因水库群中各水库的水文补偿和库容补偿作用，梯级水库汛期运行水位协同浮动调度相比单一水库调度挖潜空间更大，研究的理论与应用价值更高[12-13]。近年来国内学者在梯级水库汛期运行水位协同浮动调度方面取得了突破性进展，较具代表性的成果有：冯平等[14]应用下游水库富余防洪库容对上游水库进行反调节，可挖掘上游水库汛期运行水位浮动空间，提高了上游水库兴利效益。李玮等[15]基于预报调度和库容补偿作用，构建了梯级水库汛期运行水位动态控制调度模型，采用逐次逼近动态规划算法求解了调度模型，在不增加防洪风险的前提下，显著提高了梯级水库发电效益和洪水资源利用率。李菡等[16]考虑上游水库富余防洪库容对下游水库补偿调节，可有效抬高下游水库汛期运行水位浮动值，提高了梯级水库的蓄水与发电效益。郭生练等[17]应用大系统聚合分解理论，建立了梯级水库汛期运行水位联合动态控制模型，采用逐次优化算法求解了该模型，汛期运行水位优化调度方案，相比原汛限水位调度方案，可显著提高梯级水库综合利用效益。钟平安等[18]构建了基于库容补偿的梯级水

收稿日期：2022-06-13；网络首发日期：2023-01-18
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20230116.1630.005.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2021YFC3200303)；国家自然科学基金联合基金重点项目(U20A20317)
作者简介：周研来(1985-)，教授，主要从事水库群调度研究。E-mail：yanlai.zhou@whu.edu.cn
通讯作者：郭生练(1957-)，挪威工程院外籍院士，主要从事水文水资源研究。E-mail：slguo@whu.edu.cn

库防洪库容置换模型，从防洪有利和蓄水有利角度出发，模拟分析了梯级水库汛期运行水位浮动关系。谭乔凤等[19]从设计洪水不确定性角度出发，提出了基于库容补偿作用的梯级水库汛期运行水位浮动量计算方法，为规划设计阶段科学合理确定汛期运行水位浮动量提供了技术支撑。洪水预报为开展水库汛期运行水位协同浮动调度提供重要基础支撑。水库洪水预见期是指入库洪水被提前预测的时间长。对于不同的场次雨洪，由于其降雨强度、降雨时空分布、暴雨中心位置及水流速度都是变化的，每一场洪水的预见期都是不同的，进而水库洪水预见期是不同的，呈现动态预见期特征。现有的梯级水库汛期运行水位“动态控制”或“协同浮动”调度存在以下不足：①考虑水文补偿的静态作用为主，忽略了洪水预报动态预见期对梯级水库汛期运行水位协同浮动的动态影响；②考虑库容补偿为主，忽略了在设计洪水情景下水库需在调度期末将库水位预泄至汛限水位的调度约束。

本文从防洪库容置换与风险防控出发，基于动态预见期和预泄能力约束，嵌套运用预泄预蓄法和库容补偿法，以解析梯级水库汛期运行水位协同浮动关系；考虑帕累托最优解集和最优前沿的动态变化特性，构建面向动态多目标的梯级水库汛期运行水位协同浮动调度模型；将环境变化检测、随机再生种群和基于参考点的帕累托前沿预测策略引入智能算法，提出动态多目标智能算法以高效求解调度模型，建立风险效益评价指标以评估调度方案(图 1)，为水库调度风险决策和运行管理提供科学依据。

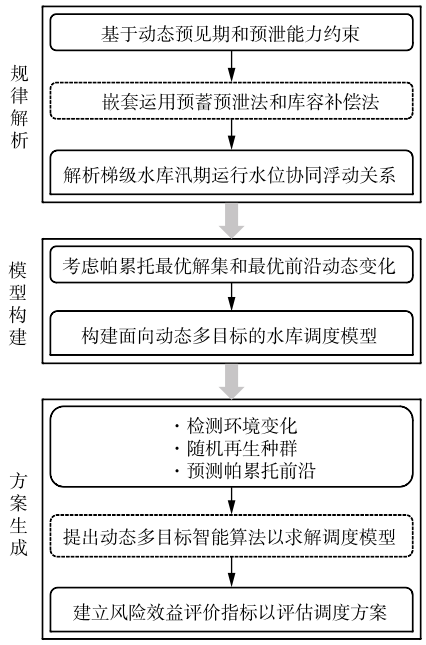


图 1　模型方法流程图

2　动态多目标优化问题

动态多目标优化问题是指目标函数、约束条件、决策变量及相关参数等随时间变化的多目标优化问题[20]。不失一般性，以最小化为例，动态多目标优化问题的数学表达式描述如下

$$\begin{cases} \min \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x},\ t)=f_1(\boldsymbol{x},\ t),\ f_2(\boldsymbol{x},\ t),\ \cdots,\ f_M(\boldsymbol{x},\ t) \\ \text{s.t. } g_i(\boldsymbol{x},\ t)\leqslant 0,\ i=1,\ 2,\ \cdots,\ p \\ \quad\ h_j(\boldsymbol{x},\ t)=0,\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ q \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\min \boldsymbol{F}(\cdot)=f_1(\cdot),\ f_2(\cdot),\ \cdots,\ f_M(\cdot)$ 是 M 维最小化问题的目标函数向量；t 为时间变量；$\boldsymbol{x}=(x_1,\ x_2,\ \cdots,\ x_m)$ 是 m 维决策变量，相应的定义域为 Ω；$g_i(\boldsymbol{x},\ t)\leqslant 0$ 为第 i 个不等式约束($1\leqslant i\leqslant p$)；$h_j(\boldsymbol{x},\ t)=0$ 为第 j 个等式约束($1\leqslant j\leqslant q$)。

多目标优化问题涉及三个基本概念：帕累托(Pareto)支配、Pareto 最优解集和 Pareto 最优前沿。

(1)Pareto 支配：设 I 和 J 是种群中任意两个个体，当且仅当 $f_i(I)\leqslant f_i(J),\ \forall i=1,\ 2,\ \cdots,\ M$ 且 $\exists j=1,\ 2,\ \cdots,\ M$ 满足 $f_j(I)\leqslant f_j(J)$ 时，个体 I 将支配个体 J，表示为 $f(I)\prec f(J)$。

(2)Pareto 最优解集 POS：设 $\boldsymbol{x}$、Ω 和 $\boldsymbol{F}(\cdot)$ 分别为决策变量、决策空间、目标函数，则 Pareto 最优解集 POS 定义为

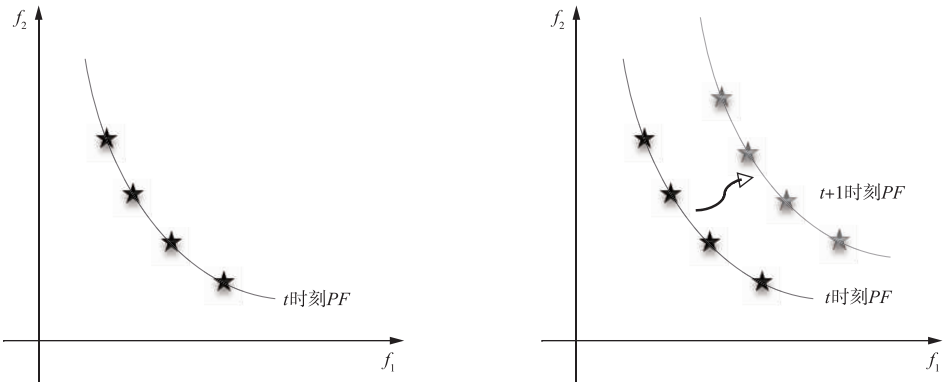
$$\{POS=\boldsymbol{x}\in\Omega \mid \exists \boldsymbol{x}^*\in\Omega,\ \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}^*)\prec\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x})\} \tag{2}$$

(3)Pareto 最优前沿 PF：相应的 Pareto 最优前沿 PF 定义为

$$PF=\{\boldsymbol{y}=\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}) \mid \boldsymbol{x}\in POS\} \tag{3}$$

图 2 展示了一个动态双目标优化问题的 PF 动态变化图，其中图 2(a)呈现了 t 时刻 PF 状态，图 2(b)呈现了 PF 从 t 时刻到 $t+1$ 时刻变化过程。根据 POS 和 PF 是否随时间变化，Farina[21]将动态多目标优化问题划分为以下四类：第一类，POS 随时间变化，而 PF 不随时间变化；第二类，POS 和 PF 均随时间变化；第三类，POS 不随时间变化，而 PF 随时间变化；第四类，POS 和 PF 均不随时间变化，而

目标函数或约束条件随时间变化。此外，面临复杂的实际调度情况时，上述几种变化类型在调度期内可能会同时发生，但研究中一般仅考虑前三种变化类型。



(a) t时刻PF　　(b) t+1时刻PF

图 2　动态两目标优化问题示意图

3　防洪库容置换

梯级水库中相邻水库防洪库容置换遵循的基本原则：在保证梯级水库的总防洪库容不变前提下，当上库水位低于其汛限水位时，可将其富余的防洪库容置换至下库，结合洪水预报成果，通过上库预蓄水量，以减少下库入流，在满足预泄能力约束下，对下库实施汛期运行水位上浮调度；反之，当下库水位低于其汛限水位时，可将其富余的防洪库容置换至上库，结合洪水预报成果，通过上库预泄水量，在满足预泄能力约束下，对上库实施汛期运行水位上浮调度。以两个相邻(编号 A 和 B)梯级水库及其防洪对象为例(图 3)，简述防洪库容置换方法和计算步骤。

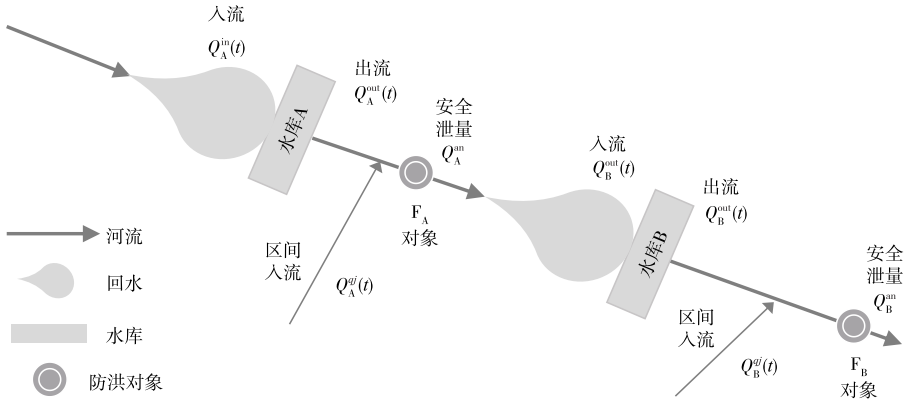


图 3　梯级水库及其防洪对象位置示意图

3.1　防洪约束　梯级水库在有效预见期 T_y 内实施汛期运行水位协同浮动，需满足水量平衡(式(4))、有效预见期区间(式(5))、水力联系(式(6))、泄流能力(式(7))和安全泄量(式(8))约束：

$$\begin{cases} \int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y} \hat{Q}_A^{in}(t)\,dt - \int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y} Q_A^{out}(t)\,dt = \varphi_A(Z_A^0) - \varphi_A(Z_A(t_0)) \\ \int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y} \hat{Q}_B^{in}(t)\,dt - \int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y} Q_B^{out}(t)\,dt = \varphi_B(Z_B^0) - \varphi_B(Z_B(t_0)) \\ \hat{Q}_A^{in}(t) = (1+\theta_A)\cdot Q_A^{in}(t) \end{cases} \tag{4}$$

$$T_{min} \leqslant T_y \leqslant T_{max} \tag{5}$$

$$\begin{cases}\hat{Q}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{in}}(t)=M_{\mathrm{A}}(Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{qj}(t)\\ \hat{Q}_{\mathrm{A}}^{qj}(t)=(1+\eta_{\mathrm{A}})\cdot Q_{\mathrm{A}}^{qj}(t)\end{cases}\tag{6}$$

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t)\leqslant q_{\mathrm{A}}^{\max}(Z_{\mathrm{A}}(t))\\ Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{out}}(t)\leqslant q_{\mathrm{B}}^{\max}(Z_{\mathrm{B}}(t))\end{cases}\tag{7}$$

$$\begin{cases}M_{\mathrm{A}}(Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t))\leqslant Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{an}}-\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{qj}(t)\\ M_{\mathrm{B}}(Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{out}}(t))\leqslant Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{an}}-\hat{Q}_{\mathrm{B}}^{qj}(t)\end{cases}\tag{8}$$

式中：$\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t)$、$Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t)$和$Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t)$分别为水库 A 的 t 时刻入流预报值、入流实测值和出流；$\hat{Q}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{in}}(t)$和$Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{out}}(t)$分别为水库 B 的 t 时刻入流预报值和出流；$\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{qj}(t)$和$Q_{\mathrm{A}}^{qj}(t)$分别为水库 A 下游区间入流的预报值和实测值；$\varphi_{\mathrm{A}}(\cdot)$和$\varphi_{\mathrm{B}}(\cdot)$分别为水库 A 和水库 B 的水位与库容转换函数；t_0和T_y分别为调度起始时刻和洪水预报预见期，为简便计，后文提及各级水库的调度起始时刻和洪水预报预见期均采用这两个符号表示；θ_{A}和η_{A}分别为水库 A 入流和下游区间入流的预报误差；$T_{\min}$和$T_{\max}$分别为洪水预报有效预见期的最小值和最大值，本文假定洪水预见期为一个区间，考虑洪水预见期的动态变化；$q_{\mathrm{A}}^{\max}(\cdot)$和$q_{\mathrm{B}}^{\max}(\cdot)$分别为水库 A 和水库 B 的泄流能力函数；$Z_{\mathrm{A}}^0$和$Z_{\mathrm{B}}^0$分别为水库 A 和水库 B 的汛限水位(或分期汛限水位)；$Z_{\mathrm{A}}(t_0)$和$Z_{\mathrm{B}}(t_0)$分别为水库 A 和水库 B 的 t_0时刻汛期运行水位；$M_{\mathrm{A}}(\cdot)$和$M_{\mathrm{B}}(\cdot)$分别为水库 A 和水库 B 的出流过程演算到下游防洪控制断面流量过程的计算方法，有时滞影响时，采用马斯京根法进行演算，否则直接叠加；$Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{an}}$和$Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{an}}$分别为水库 A 和水库 B 的下游防洪控制断面安全泄量；$\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{qj}(t)$和$\hat{Q}_{\mathrm{B}}^{qj}(t)$分别为防洪对象 A 和防洪对象 B 的上游区间入流预报值。

3.2　将上库防洪库容置换至下库　在洪水预见期 T_y内，当上库 A 的防洪库容富余时，可将上库 A 的防洪库容置换至下库 B，得到下库 B 的汛期运行水位上浮值$\Delta Z_{\mathrm{B}}(t)$。

计算上库相应于汛期运行水位$Z_{\mathrm{A}}(t)$的富余防洪库容$\Delta V_{\mathrm{A}}(t)$：

$$\begin{cases}\Delta V_{\mathrm{A}}(t)=\varphi_{\mathrm{A}}(Z_{\mathrm{A}}^0)-\varphi_{\mathrm{A}}(Z_{\mathrm{A}}(t))\\ Z_{\mathrm{A}}(t)<Z_{\mathrm{A}}^0(t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y)\end{cases}\tag{9}$$

式中$\Delta V_{\mathrm{A}}(t)$为水库 A 的汛期运行水位$Z_{\mathrm{A}}(t)$对应的防洪库容。

从一场完整的洪水过程来看(图 4)，水库将在洪水起涨阶段(峰现前水库入流小于等于中小洪水指标)采用预泄调度；将在正常防洪调度阶段采用原设计防洪调度规则进行防洪调度；将在退水阶段(峰现后水库入流来水小于等于中小洪水指标)进行预蓄调度。当上游水库 A 存在富余防洪库容，且洪水预见期内水库 A 和 B 的入流预报值均小于等于中小洪水指标时，水库 A 预蓄调度，减少下游水库 B 的入流：

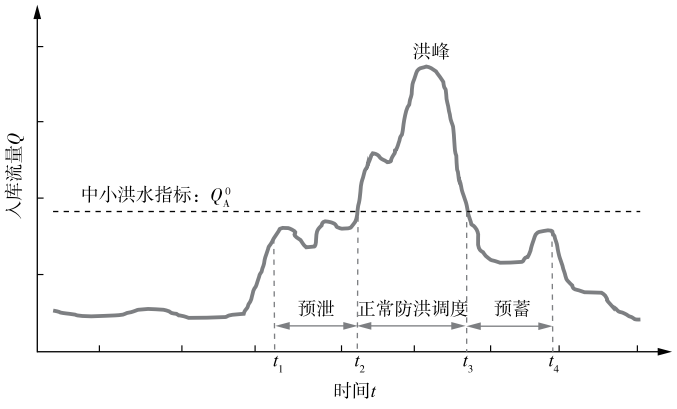


图 4　水库预泄和正常防洪调度及预蓄调度

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t)=\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t)+\theta_{\mathrm{A}}(\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t_0+T_y)-\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t))-\dfrac{\Delta V_{\mathrm{A}}(t)}{T_y}\\ \hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t)\leqslant Q_A^0(t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y)\\ \hat{Q}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{in}}(t)\leqslant Q_{\mathrm{B}}^0(t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y)\end{cases}\tag{10}$$

式中：$\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t_0+T_y)$为水库 A 入流的 t_0+T_y时刻预报值；Q_{A}^0和Q_{B}^0分别为水库 A 和水库 B 入流的中小洪水指标。式中$\theta_{\mathrm{A}}(\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t_0+T_y)-\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t))$反映了预见期 T_y的流量预报精度 θ_{A}对出库流量的影响[20]；$\dfrac{\Delta V_{\mathrm{A}}(t)}{T_y}$

反映了在预见期 T_y 内将水库 A 富余防洪库容的对应水量进行预蓄调度。

考虑区间入流，采用洪水演进方程计算下游水库入流：

$$\hat{Q}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{in}}(t)=M_{\mathrm{A}}(Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{qj}(t)\ (t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{11}$$

根据下游水库入流，采用原汛限水位方案，经调洪演算得到下游水库 B 出流及防洪库容 $\Delta V_{\mathrm{B}}^{k}(t)$，因下游水库入库减少，$\Delta V_{\mathrm{B}}(t)$ 必将小于原设计防洪库容。

考虑防洪高水位约束，推求下游水库的汛期运行水位：

$$\varphi_{\mathrm{B}}(ZF_{\mathrm{B}}(t))\leqslant\varphi_{\mathrm{B}}(Z_{\mathrm{B}}^{\max})-\Delta V_{\mathrm{B}}(t)\ (t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{12}$$

式中：$ZF_{\mathrm{B}}(t)$ 为水库 B 在防洪高水位约束下 t 时刻的汛期运行水位；$Z_{\mathrm{B}}^{\max}$ 为水库 B 的防洪高水位。

考虑预泄能力约束，推求下游水库的汛期运行水位：

$$\int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y}Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{out}}(t)\,\mathrm{d}t-\int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y}\hat{Q}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{in}}(t)\,\mathrm{d}t=\varphi_{\mathrm{B}}(ZY_{\mathrm{B}}(t_0))-\varphi_{\mathrm{B}}(Z_{\mathrm{B}}^{0}) \tag{13}$$

式中 $ZY_{\mathrm{B}}(t_0)$ 为水库 B 在预泄能力约束下 t_0 时刻的汛期运行水位。

联立式(7)(8)(11)和(13)，可得到：

$$\begin{cases}\varphi_{\mathrm{B}}(ZY_{\mathrm{B}}(t_0))\leqslant M_{\mathrm{B}}^{-1}(Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{an}}-\hat{Q}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{qj}}(t))\cdot T_y-[M_{\mathrm{A}}(Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{qj}}(t)]\cdot T_y+\varphi_{\mathrm{B}}(Z_{\mathrm{B}}^{0})\ (t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y)\\ Q_{\mathrm{B}}^{\mathrm{out}}(t_0)\leqslant q_{\mathrm{B}}^{\max}(ZY_{\mathrm{B}}(t_0))\end{cases} \tag{14}$$

综合防洪高水位(式(12))和预泄流能力(式(14))约束，确定下游水库的汛期运行水位：

$$Z_{\mathrm{B}}(t)=\min[\varphi_{\mathrm{B}}^{-1}(ZF_i(t)),\ \varphi_{\mathrm{B}}^{-1}(ZY_{\mathrm{B}}(t_0))]\ (t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{15}$$

进而得到下库的汛期运行水位浮动量：

$$\Delta Z_{\mathrm{B}}(t)=Z_{\mathrm{B}}(t)-Z_{\mathrm{B}}^{0}(t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{16}$$

式中 $\Delta Z_{\mathrm{B}}(t)$ 为水库 B 的 t 时刻汛期运行水位浮动量。

3.3 将下库防洪库容置换至上库 在洪水预见期 T_y 内，当下库 B 的防洪库容富余时，可将下库 B 的防洪库容置换至上库 A，得到上库 A 的汛期运行水位上浮值 $\Delta Z_{\mathrm{A}}(t)$。

计算下库相应于汛期运行水位 $Z_{\mathrm{B}}(t)$ 的富余防洪库容 $\Delta V_{\mathrm{B}}(t)$：

$$\begin{cases}\Delta V_{\mathrm{B}}(t)=\varphi_{\mathrm{B}}(Z_{\mathrm{B}}^{0})-\varphi_{\mathrm{B}}(Z_{\mathrm{B}}(t))\\ Z_{\mathrm{B}}(t)<Z_{\mathrm{B}}^{0}(t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y)\end{cases} \tag{17}$$

式中 $\Delta V_{\mathrm{B}}(t)$ 为水库 B 的汛期运行水位 $Z_{\mathrm{B}}(t)$ 对应的防洪库容。

当上游水库 B 存在富余防洪库容，且洪水预见期内水库 A 和 B 的入流预报值均小于等于中小洪水指标时(见式(10))，水库 A 将执行预泄调度，增加下游水库 B 的入流：

$$Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t)=\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t)+\theta_{\mathrm{A}}(\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t_0+T_y)-\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t))+\frac{\Delta V_{\mathrm{B}}(t)}{T_y}\ (t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{18}$$

根据上游水库出流，考虑上库 A 的泄流能力和上库 A 下游防洪对象的安全泄量约束，对上库 A 重新进行调洪计算，得到需要的防洪库容 $\Delta V_{\mathrm{A}}(t)$。

考虑防洪高水位约束，推求上游水库 A 的汛期运行水位：

$$\varphi_{\mathrm{A}}(ZF_{\mathrm{A}}(t))\leqslant\varphi_{\mathrm{A}}(Z_{\mathrm{A}}^{\max})-\Delta V_{\mathrm{A}}(t)\ (t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{19}$$

式中：$ZF_{\mathrm{A}}(t)$ 为上游水库 A 在防洪高水位约束下 t 时刻的汛期运行水位；$Z_{\mathrm{A}}^{\max}$ 为水库 A 的防洪高水位。

考虑预泄能力约束，推求上游水库 A 的汛期运行水位：

$$\int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y}Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t)\,\mathrm{d}t-\int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y}\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t)\,\mathrm{d}t=\varphi_{\mathrm{A}}(ZY_{\mathrm{A}}(t_0))-\varphi_{\mathrm{A}}(Z_{\mathrm{A}}^{0}) \tag{20}$$

式中 $ZY_{\mathrm{A}}(t_0)$ 为水库 A 在预泄能力约束下 t_0 时刻的汛期运行水位。

联立式(7)(8)(19)和(20)，可得到

$$\begin{cases}\varphi_{\mathrm{A}}(ZY_{\mathrm{A}}(t_0))\leqslant M_{\mathrm{A}}^{-1}(Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{an}}-\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{qj}(t))\cdot T_y-\int_{t=t_0}^{t=t_0+T_y}\hat{Q}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{in}}(t)\,\mathrm{d}t+\varphi_{\mathrm{A}}(Z_{\mathrm{A}}^{0})\\ Q_{\mathrm{A}}^{\mathrm{out}}(t_0)\leqslant q_{\mathrm{A}}^{\max}(ZY_{\mathrm{A}}(t_0))\end{cases} \tag{21}$$

综合防洪高水位(式(19))和预泄流能力(式(21))约束，确定上游水库 A 的汛期运行水位：

$$Z_{\mathrm{A}}(t)=\min\left[\varphi_{\mathrm{A}}^{-1}(ZF_{\mathrm{A}}(t)),\ \varphi_{\mathrm{A}}^{-1}(ZY_{\mathrm{A}}(t))\right](t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{22}$$

进而得到上库 A 的汛期运行水位浮动量 $\Delta Z_{\mathrm{A}}(t)$：

$$\Delta Z_{\mathrm{A}}(t)=Z_{\mathrm{A}}(t)-Z_{\mathrm{A}}^{0}(t_0\leqslant t\leqslant t_0+T_y) \tag{23}$$

式中 $\Delta Z_{\mathrm{A}}(t)$为水库 A 的 t 时刻的汛期运行水位浮动量。

式(16)和式(23)为基于防洪库容置换得到的两个相邻(编号 A 和 B)梯级水库汛期运行水位浮动量。为降低洪水预报的不确定性影响和水流时滞的后效性影响，以阻断防洪风险链式传递，假设防洪库容置换仅仅在相邻水库间展开，即上游水库的富余库容仅被置换至下游相邻水库，因上游水库泄流能力和安全泄流约束限制而未被置换的富余防洪库容，仍保留在上游水库中。对于多级(水库数目 $n\geqslant 3$)梯级水库，既可依从上至下顺序，基于防洪库容置换和预泄能力约束推求相邻水库的汛期运行水位浮动量(图 5(a))；也可依从下至上顺序，基于防洪库容置换和预泄能力约束推求相邻水库的汛期运行水位浮动量(图 5(b))。为安全考虑计，取两者中的较小值作为各级水库的汛期运行水位浮动量。汛期运行水位浮动量为接下来的调度模型提供汛期运行水位约束。

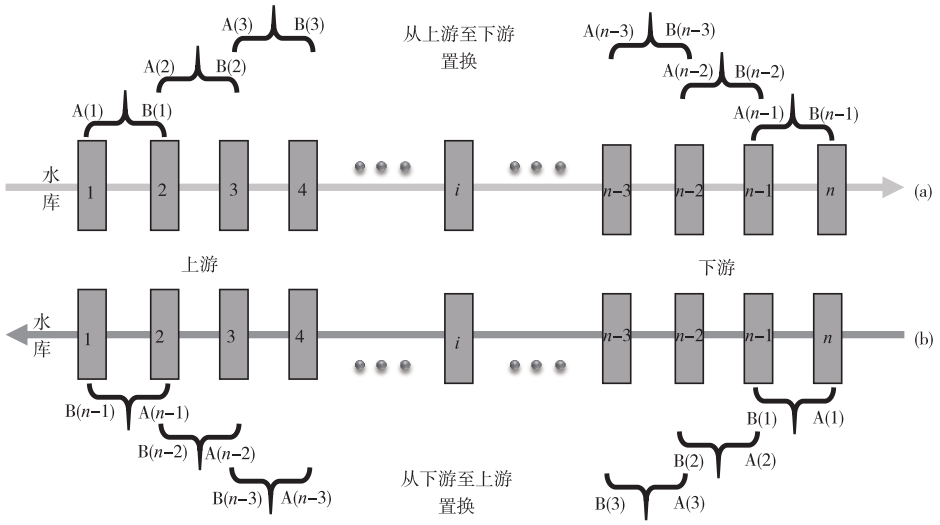


图 5　推求多级($n\geqslant 3$)水库的汛期运行水位浮动量的示意

本研究将基于不同频率(20%、10%、5%、1%、0.2%、0.1%)设计洪水情景，计算水库在设计洪水调度期末预泄至汛限水位(含分期汛限水位)的概率，以各级水库在设计洪水调度期末预泄至汛限水位的概率等于 100%为约束，验证汛期运行水位(式(15)和(22))的可靠性。

4　调度模型

4.1　目标函数　水库汛期运行水位协同浮动，在不降低原有防洪标准的前提下，不仅要实现“中小洪水减压”目标，而且要实现“洪水资源化”目标。从防洪角度考虑，在洪水预见期内($t_0\leqslant t\leqslant T_y$)遇中小洪水时，满足下游防洪控制断面安全泄量的条件下，控制水库最高水位的前提下，使得下游防洪控制断面的最大流量最小，即遵循控制断面最大削峰准则。从洪水资源化角度考虑，遵循安全调度场次洪水时水库发电量或洪水资源利用率最大准则。以承担防洪、发电任务为主的 n 个梯级水库为例，说明调度目标函数表达式。

(1)遵循控制断面的最大削峰准则，以实现中小洪水减压调度目标：

$$f_1(Q_i^{\mathrm{out}}(t))=\min\left\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{t=t_0}^{t=t_0+T_y}\left[M_i(Q_i^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_i^{qj}(t)\right]^2\right\} \tag{24}$$

式中：$f_1(\cdot)$为减压调度目标函数，其中决策变量 $Q_i^{\mathrm{out}}(t)$为第 i 个水库 t 时刻出库流量；$\hat{Q}_i^{qj}(t)$为第 i 个

水库至防洪控制断面间 t 时刻的区间入流预报值；n 为水库数目；$M_i(\cdot)$为将第 i 个水库出库流量过程演算到下游水库或下游防洪控制断面的流量过程计算方法，有时滞影响时，采用马斯京根法进行演算，否则直接叠加。若采用动态规划类算法求解模型时，需考虑决策变量的有后效性影响；若采用仿生进化算法求解模型时，需考虑水流时滞对下游水库入库或下游防洪控制断面的流量过程的影响。

(2)遵循安全调度场次洪水时水库发电量最大准则，实现洪水资源化目标：

$$\begin{cases} f_2(Q_i^{\text{out}}(t)) = \max \sum_{i=1}^{n} \sum_{t=1}^{T_y} (\eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q_i^{\text{fd}}(t) \cdot H_i^{\text{fd}}(t) \cdot \Delta t) \\ Q_i^{\text{out}}(t) = Q_i^{\text{fd}}(t) + Q_i^{\text{spill}}(t) \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y) \end{cases} \tag{25}$$

式中：$f_2(\cdot)$为发电调度目标函数；η、ρ 和 g 分别为机组发电效率系数、水密度和重力加速度；$Q_i^{\text{fd}}(t)$和 $Q_i^{\text{spill}}(t)$分别为第 i 个水库 t 时刻的发电流量和弃水流量；$H_i^{\text{fd}}(t)$为第 i 个水库 t 时刻的发电水头；Δt 为计算时段长。

4.2 约束条件 在洪水预见期内($t_0 \leqslant t \leqslant T_y$)，水库群汛期运行水位协同浮动需满足水量平衡、水力联系方程、最大泄流能力、出力约束、下游防护点安全泄量和汛期运行水位浮动约束条件，各约束条件分述如下：

(3)水量平衡约束

$$\left[\frac{\hat{Q}_i^{\text{in}}(t) + \hat{Q}_i^{\text{in}}(t-1)}{2} - \frac{Q_i^{\text{out}}(t) + Q_i^{\text{out}}(t-1)}{2} \right] \cdot \Delta t = V_i(t) - V_i(t-1) \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y) \tag{26}$$

式中 $\hat{Q}_i^{\text{in}}(t)$和 $V_i(t)$分别为第 i 个水库 t 时刻入库流量预报值和库容。

(4)水力联系方程

$$\begin{cases} \hat{Q}_1^{\text{in}}(t) = (1+\theta_1) \cdot Q_1^{\text{in}}(t) \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y) \\ \hat{Q}_i^{\text{in}}(t) = M_{i-1}(Q_{i-1}^{\text{out}}(t)) + \hat{Q}_{i-1}^{\text{qj}}(t) \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y,\ i \geqslant 2) \\ \hat{Q}_{i-1}^{\text{qj}}(t) = (1+\eta_{i-1}) \cdot Q_{i-1}^{\text{qj}}(t) \end{cases} \tag{27}$$

式中：θ_1和 $Q_1^{\text{in}}(t)$分别为第 1 个水库入流的预报误差和实测值；η_{i-1}、$\hat{Q}_{i-1}^{\text{qj}}(t)$和 $Q_{i-1}^{\text{qj}}(t)$分别为第 $i-1$ ($i \geqslant 3$)个水库下游区间入流的预报误差、预报值和实测值。

(5)最大泄流能力

$$Q_i^{\text{out}}(t) \leqslant q_i^{\max}(Z_i(t)) \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y) \tag{28}$$

式中 $Z_i(t)$为第 i 个水库 t 时刻的库水位；$q_i^{\max}(\cdot)$为第 i 个水库库水位对应的最大泄流能力。

(6)出力约束

$$\begin{cases} P_i^{\min} \leqslant P_i(t) \leqslant P_i^{\max} \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y) \\ P_i(t) = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q_i^{\text{fd}}(t) \cdot H_i^{\text{fd}}(t) \end{cases} \tag{29}$$

式中：$P_i(t)$为第 i 个水库 t 时刻的出力；$P_i^{\min}$和 $P_i^{\max}$分别为第 i 个水库出力的下限和上限。

(7)下游防护点安全泄量

$$M_i(Q_i^{\text{out}}(t)) \leqslant Q_i^{\text{an}} - \hat{Q}_i^{\text{qj}}(t) \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y) \tag{30}$$

式中 Q_i^{an}为第 i 个水库下游防护点的安全泄量。

(8)汛期运行水位浮动约束

$$\begin{cases} Z_i^d \leqslant Z_i(t) \leqslant \Delta Z_i(t) + Z_i^0,\ \hat{Q}_i^{\text{in}}(t) \leqslant Q_i^0 \\ Z_i^d \leqslant Z_i(t) \leqslant Z_i^0,\ \hat{Q}_i^{\text{in}}(t) > Q_i^0 \end{cases} \quad (t_0 \leqslant t \leqslant t_0 + T_y) \tag{31}$$

式中：$\Delta Z_i(t)$为第 i 个水库 t 时刻的汛期运行水位上浮值；Q_i^0为第 i 个水库入流的中小洪水指标；Z_i^d和 Z_i^0分别为第 i 个水库的死水位和汛限水位(或分期汛限水位)。

考虑到各水库入流的洪水预见期 T_y(式(5))、预报值 $\hat{Q}_i^{\text{in}}(t)$(式(27))和可行域(式(31))皆随时间变化，会导致优化模型的 POS 和 PF 均随时间变化。故本文提出的梯级水库汛期运行水位协同浮动模型属于第二类动态多目标优化问题。

5 求解方法

5.1 动态多目标优化算法 从改善种群多样性和算法收敛速度入手，利用进化优化算法可求解动态多目标优化问题。这些策略或方法总体上可划分为：多样性保持策略、多种群并行策略、基于记忆存储的方法和基于 Pareto 前沿预测方法等[21-23]。如 Deb 等[22]通过引入种群多样性保持策略，以提高动态非支配排序遗传算法-Ⅱ(DNSGA-Ⅱ)算法对环境变化的适应性，并将其应用于求解面向需求动态变化的水电站与火电站联合调度模型。Liu 等[23]基于差分算子的多样性保持策略，对比分析了 NSGA-Ⅱ和 DNSGA-Ⅱ算法在实时防洪调度中的效果，结果表明 DNSGA-Ⅱ算法带来的防洪效益更为显著。Gupta 等[24]基于支持向量机的 Pareto 前沿预测方法和 NSGA-Ⅲ算法[25]，求解面向动态多目标的旅行商最短回路问题，结果表明该方法能更好地追踪环境变化下的 Pareto 前沿轨迹。

多种群并行策略旨在解决多模型的多个最优解跟踪问题，基于记忆存储的方法旨在解决具有周期特性的动态多目标优化问题。考虑到算法的有效性和适用性，本研究提出的动态非支配排序遗传算法-Ⅲ(DNSGA-Ⅲ)，通过充分利用历史信息指导算法进化，以均衡动态优化过程算法的收敛速度与种群多样性。DNSGA-Ⅲ算法包括 4 个关键组件：NSGA-Ⅲ算法、环境变化检测、随机再生种群、基于参考点的 Pareto 前沿预测。当检测到环境发生变化时，首先通过随机再生种群以响应环境变化；若参考点关联样本数小于指定的训练样本数，则执行 NSGA-Ⅲ常规操作，包括基于交叉和变异算子的子代更新、适应度评价、基于快速非支配排序合并种群、基于参考点个体选择和精英策略更新父代种群；若参考点关联样本数大于等于指定的训练样本数，则引入基于参考点的 Pareto 前沿预测策略，利用各参考点关联的历史个体信息预测 Pareto 前沿动态变化，以提高种群的多样性和加快算法的收敛速度。

5.2 模型求解步骤 将提出的 DNSGA-Ⅲ算法应用于求解调度模型，计算流程如图 6 所示：

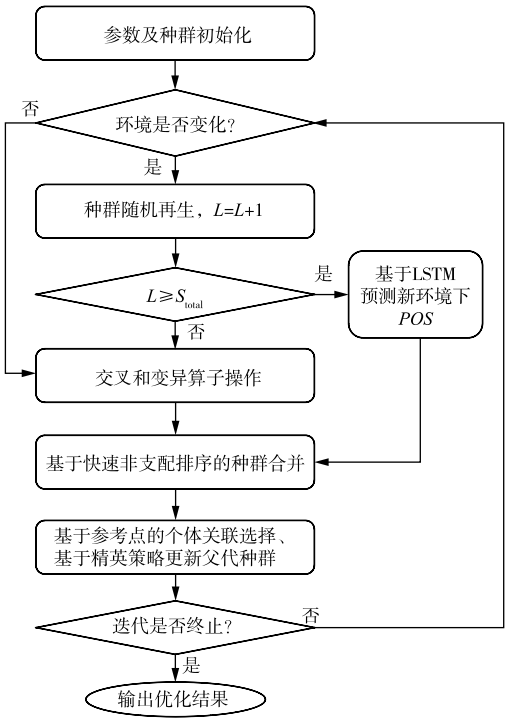


图 6 调度模型求解的计算流程

①参数及种群初始化。设置种群规模 N_{pop}、最大迭代次数 G_{max}、交叉概率 P_c、变异概率 P_m、检测阈值 ε、种群随机再生的占比 $\theta(\%)$、神经网络样本数 S_{total}，以出库流量为决策变量，采用实数编码方式初始化种群。

②环境变化检测。为提高算法对环境的适应性，采用基于参考点选择的检测函数[24]，识别环境是否发生变化。当检测函数值大于阈值 ε 时，则判定环境发生变化，进入步骤③，否则跳转至步骤④。检测函数表达式如下

$$\varphi(t)=\frac{\dfrac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\|f(x_t^i)-f(x_{t-1}^i)\|}{\max\limits_{i=1,2,\cdots,r}\|f(x_t^i)-f(x_{t-1}^i)\|} \tag{32}$$

式中：$\varphi(t)$为环境 t 时刻检测函数；r 为取样的参考点数目；x_t^i为环境 t 时刻第 i 个参考点关联的个体；$f(\cdot)$为个体的多目标函数值。$\|\cdot\|$为个体的多目标函数范式。

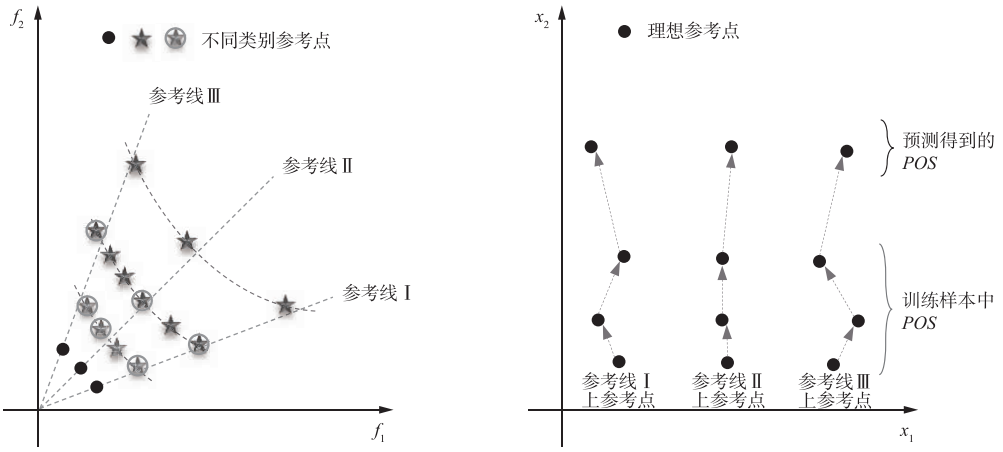
③种群随机再生。当判定环境发生变化后，可随机生成一定比例(如占种群规模的 $\theta\%$)的初始种群(L 为生成次数)，以提高种群的多样性。将目标函数空间内与参考线垂直距离最小的个体关联至相应的参考点，形成参考点关联样本集，若参考点关联样本数(L)小于指定的神经网络样本数(S_{total})，则进入步骤④，否则跳转至步骤⑤。

④NSGA-Ⅲ常规操作。操作包括基于交叉和变异算子的子代更新、适应度评价、基于快速非支配排序的种群合并、基于参考点的个体关联选择和基于精英策略更新父代种群。

⑤Pareto 前沿预测。将参考点关联样本集作为神经网络样本集(样本数 $=S_{total}$)，针对不同的参考

线，构建相应的 LSTM 神经网络[26]，以预测下一时刻不同参考线上的个体关联点，产生新环境下的种群 *POS*(图 7)，可提高算法对新的 Pareto 前沿的跟踪效率。

⑥终止准则判断。判定是否达到最大迭代数，如果是则计算结束，否则返回至步骤③，继续更新当前环境下的种群。



(a) 目标函数空间　　(b) 解的可行域

图 7　Pareto 前沿预测示意

5.3　评价指标　用以下几个评价指标，以综合评估梯级水库汛期运行水位协同浮动方案的风险与效益。指标包括防洪风险率、控制断面最大流量、防洪库容动用率、调度期末预泄至汛限水位的概率、发电量(式(25))、弃水量和洪水资源利用率，指标计算式描述如下。

(1)防洪风险率

$$\begin{cases} e_i^1=\dfrac{\sum\limits_{j=1}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}\lambda_{i,j}(t)}{N\cdot T}\times 100\% \\ \lambda_{i,j}(t)=\begin{cases}1, & M_i(Q_{i,j}^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_{i,j}^{qj}(t)>Q_i^{\mathrm{an}}\\ 0, & M_i(Q_{i,j}^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_{i,j}^{qj}(t)\leqslant Q_i^{\mathrm{an}}\end{cases} \\ E_1=\dfrac{\sum\limits_{j=1}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}r_{i,j}(t)}{N\cdot T}\times 100\% \\ r_j(t)=\begin{cases}1, & M_n(Q_{n,j}^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_{o,j}^{qj}(t)>Q_o^{\mathrm{AN}}\\ 0, & M_n(Q_{n,j}^{\mathrm{out}}(t))+\hat{Q}_{o,j}^{qj}(t)\leqslant Q_o^{\mathrm{AN}}\end{cases}\end{cases} \tag{33}$$

式中：e_i^1和 E_1分别为第 i 个水库和梯级水库的防洪风险指标；T 为调度期的时段数；$\lambda_{i,j}(t)$为第 i 个水库在第 j 场洪水 t 时刻的防洪控制站流量超过下游安全泄量的计数器；$r_j(t)$为梯级水库最后一级在第 j 场洪水 t 时刻的防洪控制站流量超过下游共同防护对象的安全泄量的计数器；$Q_{o,j}^{qj}(t)$为梯级水库最后一级在第 j 场洪水 t 时刻的区间总入流；Q_o^{AN}为梯级水库下游共同防护对象的安全泄量。

(2)控制断面最大流量

$$\begin{cases} e_i^2=\max\limits_{t=1}^{T}[M_i(Q_{i,j}^{\mathrm{out}}(t))+Q_{i,j}^{qj}(t)]\ (i=1,\ 2,\ \cdots,\ n-1;\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ N) \\ E_2=\max\limits_{t=1}^{T}[M_i(Q_{i,j}^{\mathrm{out}}(t))+Q_{i,j}^{qj}(t)]\ (i=n;\ j=1,\ 2,\ \cdots,\ N)\end{cases} \tag{34}$$

式中：e_i^2和 E_2分别为第 i 个水库和梯级水库最后一级的控制断面流量指标；$Q_{i,j}^{\mathrm{out}}(t)$和 $Q_{i,j}^{qj}(t)$分别为第 i 个水库在第 j 场洪水 t 时刻的出流和下游区间入流。

(3)防洪库容动用率

$$\begin{cases} e_i^3 = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{j=1}^{N}\dfrac{V_{i,j}^{\max}-V_i^0}{V_i^f-V_i^0}\times 100\% \\ E_3 = \dfrac{1}{n\cdot N}\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{j=1}^{N}\dfrac{V_{i,j}^{\max}-V_i^0}{V_i^f-V_i^0}\times 100\% \end{cases} \tag{35}$$

式中：e_i^3和 E_3分别为第 i 个水库和梯级水库的防洪库容动用率；$V_{i,j}^{\max}$为第 i 个水库在第 j 场洪水历时内调洪最高水位对应的库容；V_i^f和 V_i^0分别为第 i 个水库的防洪高水位和汛限水位对应的库容，两者之差为防洪库容。

(4)设计洪水调度期末预泄至汛限水位的概率

$$\begin{cases} e_i^4 = \dfrac{\sum\limits_{j=1}^{N} n_{i,j}}{N}\times 100\% \\ n_{i,j} = \begin{cases} 1, & Z_{i,j}^{\mathrm{T}} \leqslant Z_i^0 \\ 0, & Z_{i,j}^{\mathrm{T}} > Z_i^0 \end{cases} \end{cases} \tag{36}$$

$$\begin{cases} E_4 = \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{j=1}^{N} N_{i,j}}{n\cdot N}\times 100\% \\ N_{i,j} = \begin{cases} 1, & Z_{i,j}^{T} \leqslant Z_i^0 \\ 0, & Z_{i,j}^{T} > Z_i^0 \end{cases} \end{cases} \tag{37}$$

式中：e_i^4和 E_4分别为第 i 个水库和梯级水库在调度期末预泄至汛限水位的概率；$n_{i,j}$和 $N_{i,j}$分别为第 i 个水库和梯级水库在第 j 场洪水调度期末预泄至汛限水位的计数器；$Z_{i,j}^{T}$为第 i 个水库在第 j 场洪水调度期末水位；N 为洪水场数。

(5)发电量

$$\begin{cases} e_i^5 = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{j=1}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}(\eta\cdot\rho\cdot g\cdot Q_{i,j}^{\mathrm{fd}}(t)\cdot H_{i,j}^{\mathrm{fd}}(t)\cdot\Delta t) \\ E_5 = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{j=1}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T}(\eta\cdot\rho\cdot g\cdot Q_{i,j}^{\mathrm{fd}}(t)\cdot H_{i,j}^{\mathrm{fd}}(t)\cdot\Delta t) \end{cases} \tag{38}$$

式中：e_i^5和 E_5分别为第 i 个水库和梯级水库在调度期末预泄至汛限水位的概率；$Q_{i,j}^{\mathrm{fd}}(t)$和 $H_{i,j}^{\mathrm{fd}}(t)$分别为第 i 个水库在第 j 场洪水 t 时刻的发电流量和发电水头。

(6)弃水量

$$\begin{cases} e_i^6 = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{j=1}^{N}\sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{spill}}(t)\cdot\Delta t \\ E_6 = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{j=1}^{N}\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{spill}}(t)\cdot\Delta t \end{cases} \tag{39}$$

式中：e_i^6和 E_6分别为第 i 个水库和梯级水库的弃水量；$Q_{i,j}^{\mathrm{spill}}(t)$为第 i 个水库在第 j 场洪水 t 时刻的弃水流量。

(7)洪水资源利用率

$$\begin{cases} e_i^7 = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{j=1}^{N}\left[\dfrac{\sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{in}}(t)\cdot\Delta t - \sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{spill}}(t)\cdot\Delta t}{\sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{in}}(t)\cdot\Delta t}\right]\times 100\% \\ E_7 = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{j=1}^{N}\left[\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{in}}(t)\cdot\Delta t - \sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{spill}}(t)\cdot\Delta t}{\sum\limits_{i=1}^{n}\sum\limits_{t=1}^{T} Q_{i,j}^{\mathrm{in}}(t)\cdot\Delta t}\right]\times 100\% \end{cases} \tag{40}$$

式中：e_i^7和E_7分别为第i个水库和梯级水库的洪水资源利用率；$Q_{i,j}^{\text{in}}(t)$为第i个水库在第j场洪水t时刻的入流。

6 结语

（1）针对承担下游防洪任务的梯级水库，基于洪水预报和风险防控，在满足预泄能力约束和总防洪库容不变前提下，通过预蓄预泄和库容补偿调度，解析了动态预见期下梯级水库汛期运行水位协同浮动关系；（2）剖析了动态多目标优化问题的基本特征，构建了面向动态多目标的梯级水库汛期运行水位协同浮动调度模型；（3）将环境变化检测、随机再生种群和基于参考点的 Pareto 前沿预测策略引入 NSGA-Ⅲ算法，提出了动态多目标调度模型的高效求解算法，建立了调度方案的风险效益评价指标，为梯级水库汛期运行水位协同浮动运用提供了技术支撑。

梯级水库汛期运行水位协同浮动运用旨在不降低防洪标准前提下，实现中小洪水的综合效益最大化，在方案实施过程存在很大的不确定性，如下问题有待进一步完善解决：（1）在技术研发层面，需考虑洪水预报与水库调度的互馈关系，评估梯级水库汛期运行水位协同浮动调度的不确定性；（2）汛限水位是面向防洪安全的规划设计概念，汛期运行水位是面向中小洪水利用的实时调度概念，需加强实时条件下水库汛期运行水位协同浮动运用的技术突破和应用实践。

参 考 文 献：

[1] 丁伟，周惠成. 水库汛限水位动态控制研究进展与发展趋势[J]. 中国防汛抗旱，2018(6)：6-10.

[2] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 水库汛限水位动态控制试点工作意见[R]. 北京：国家防汛抗旱总指挥部，2005.

[3] 邱瑞田，王本德，周惠成. 水库汛期限制水位控制理论与观念的更新探讨[J]. 水科学进展，2004，15(1)：68-72.

[4] 周惠成，张改红，王本德，等. 基于防洪预报调度调整水库汛限水位的研究[J]. 水力发电，2006，32(5)：14-17.

[5] DIAO Y F，WANG B D. Risk analysis of flood control operation mode with forecast information based on a combination of risk sources[J]. Science China Technological Sciences，2010，53(7)：1949-1956.

[6] 李响，郭生练，刘攀，等. 考虑入库洪水不确定性的三峡水库汛限水位动态控制域研究[J]. 四川大学学报(工程科学版)，2010，42(3)：49-55.

[7] ZHANG Y P，WANG G L，PENG Y，et al. Risk analysis of dynamic control of reservoir limited water level by considering flood forecast error[J]. Science China Technological Sciences，2011，54：1888-1893.

[8] 王国利，梁国华，王本德，等. 基于预报信息和泄流能力约束的库水位动态控制方法与应用[J]. 水力发电学报，2010，29(4)：28-31.

[9] DIAO Y F，WANG B D. Scheme optimum selection for dynamic control of reservoir limited water level[J]. Science China Technological Sciences，2011，54：2605-2610.

[10] 李晓英，张琰，童泽淳. 水库汛限水位控制多目标协同决策研究[J]. 水力发电学报，2022，41(2)：31-42.

[11] 张艳平，张双虎，周惠成，等. 水库汛限水位实时动态控制方案优选研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2019，17(1)：9-15.

[12] 王本德，周惠成. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2006.

[13] 王宗志，王银堂，胡四一，等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨 I：定量解析[J]. 水利学报，2017，48(8)：883-891.

[14] 冯平，陈根福，卢永兰，等. 水库联合调度下超汛限蓄水的风险效益分析[J]. 水力发电学报，1995，49(2)：9-16.

[15] CHEN J，GUO S，LI Y，et al. Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for cascade reservoirs[J]. Water Resources Management，2012，27(3)：749-763.

[16] 李菡，彭勇，彭兆亮，等. 基于库容补偿分析确定葖窝水库汛限水位研究与应用[J]. 南水北调与水利科

技，2011，9(3)：39-42.
[17] ZHOU Y，GUO S，LIU P，et al. Joint operation and dynamic control of flood limiting water levels for mixed cascade reservoir Systems[J]. Journal of Hydrology，2014，519：248-257.
[18] 钟平安，孔艳，王旭丹，等. 梯级水库汛限水位动态控制域计算方法研究[J]. 水力发电学报，2014(5)：36-43.
[19] 谭乔凤，雷晓辉，王浩，等. 考虑梯级水库库容补偿和设计洪水不确定性的汛限水位动态控制域研究[J]. 工程科学与技术，2017，49(1)：60-69.
[20] 周研来. 梯级水库群联合优化调度运行[M]. 武汉：长江出版社，2016.
[21] FARINA M，DEB K，AMATO P. Dynamic multiobjective optimization problems：test cases，approximations，and applications[J]. IEEE Transactions Evolutionary Computation，2004，8(5)：425-442.
[22] DEB K，RAO N U B，KARTHIK S. Dynamic multi-objective optimization and decision-making using modified NSGA-Ⅱ：A case study on hydro-thermal power scheduling[J]. Evolutionary Multi-Criterion Optimization，2007：803-817.
[23] LIU X，LUO J. A dynamic multi-objective optimization model with interactivity and uncertainty for real-time reservoir flood control operation[J]. Applied Mathematical Modelling，2019，74：606-620.
[24] GUPTA R，NANDA S J. Solving dynamic many-objective TSP using NSGA-III equipped with SVR-RBF kernel predictor[C]//2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)，2021.
[25] DEB K，JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach，part Ⅰ：solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions Evolutionary Computation，2013，18(4)：577-601.
[26] KAO I F，ZHOU Y L，CHANG L C，et al. Exploring a long short-term memory based encoder-decoder framework for multi-step-ahead flood forecasting[J]. Journal of Hydrology，2020，583：124631.

Methodology on synergetic control of flood operating water levels of cascade reservoirs

ZHOU Yanlai，GUO Shenglian，WANG Jun，XIONG Lihua，LIU Pan，CHEN Hua
(*State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science*，*Wuhan University*，*Wuhan* 430072，*China*)

Abstract：Synergetic control of reservoir flood operating water levels is aimed at developing the potential of small-medium flood magnitudes，meanwhile improving water resources efficiency and water supply security of a river basin without increasing flood risk. Such synergetic control is becoming one of the research hotspots and fronts in flood control operation and efficient use of water resources. The three-fold scheme in this paper was executed step by step：(1) from the perspectives of flood capacity reallocation and risk prevention，integrating reservoir storage complementarity and the pre-refilling and pre-releasing method by considering dynamic forecast horizons and pre-releasing capacity constraints to analyze the synergetic relationship of flood operating water levels of cascade reservoirs；(2) establishing a synergetic control model of flood operating water levels of cascade reservoirs for meeting dynamic multi-objective needs by considering dynamic changing characteristics in the Pareto optimal set and optimal front；and (3) fusing environmental change detection，randomly re-generated population and reference point-based prediction strategy of the Pareto front into the intelligent algorithm to develop a dynamic multi-objective intelligence algorithm for optimizing the synergetic control model，meanwhile applying risk-benefit evaluation indicators to assess operation solutions and providing technical support for achieving synergetic control of flood operating water levels of cascade reservoirs.

Keywords：flood operating water level；synergetic control；risk prevention；dynamic multi-objective algorithm

(责任编辑：耿庆斋)