

复杂防洪系统联合优化调度模型

贾本有¹, 钟平安^{1,2}, 陈娟¹, 吴业楠¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 建立以水库群系统安全度最大、行蓄洪区系统损失最小为目标函数, 将河道堤防安全行洪考虑为约束条件的复杂防洪系统多目标递阶优化调度模型(MoHOOM), 以行蓄洪区总分洪流量为协调变量, 将河道水流连续方程解耦, 基于大系统分解协调法建立协调层和基于粒子群算法求解底层子系统优化问题, 形成三级递阶分解协调结构和相应求解方法。以淮河中游防洪系统为背景进行了实例研究, 给出了水库群泄流和行蓄洪区分洪最优方案, 在相同初始计算条件下, 优化模型结果比实际调度降低了鲇鱼山和梅山水库 0.37 和 0.01 的安全度指标, 减小下游蒋家集和润河集河段超过安全泄量以上 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $720 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪峰流量, 启用南润段行洪区致损 1 256.1 万元; 比规则调度降低了鲇鱼山和梅山水库 0.24 和 0.21 的安全度指标, 减小下游蒋家集河段超过安全泄量以上 $750 \text{ m}^3/\text{s}$ 的洪峰流量, 避免南润段行洪区损失 341.6 万元。模型有利于挖掘上游水库群的防洪能力, 在保障河道堤防安全行洪条件下, 减少下游不必要的行蓄洪区分洪损失, 以系统全局寻优方式进行复杂防洪系统联合调度。

关键词: 防洪减灾; 联合优化调度; 水库群; 行蓄洪区; 分解协调法; 粒子群算法

中图分类号: TV697.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)04-0560-12

随着中国经济和社会的快速发展, 尤其是城市化进程的加快, 洪水灾害带来的损失愈加严重。水库是最有效的蓄洪和调洪工程, 河道堤防是洪水宣泄的天然通道, 行蓄洪区是洪水泛滥的临时场所, 这些水利工程建设本质是协调人与水之间和谐而又紧张的关系。如何科学合理地利用各种防洪工程调蓄洪水, 最大限度提升防洪效益, 是流域防洪减灾非工程措施研究的难点和热点。

国内外的诸多学者一直致力于流域防洪调度问题研究, 单一水库防洪调度最为普遍和成熟^[1-3]。Hsu 和 Wei^[4]研究台风区水库实时防洪优化调度, 结合气象预报和洪水预报的可利用决策信息支撑, 在最大削峰准则下指导水库防洪调度。智能算法在工程领域应用的兴起, Chang^[5]的惩罚遗传算法, He 等^[6]的混沌粒子群算法, Zhang 等^[7]自适应粒子群算法, 谢维等^[8]的文化粒子群算法, 王森等^[9]的启发式逐步优化方法, 都以单一水库防洪优化调度问题为研究实例。近年来, 在水文预报、计算机技术、通信技术等支撑下, 水库群联合调度成为热点, 钟平安等^[10]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优化计算, 模型实时应用性好; 谢柳青和易淑珍^[11]以澧水流域为背景, 建立了并联水库群防洪调度模型, 采用动态规划方法计算单一水库防洪优化模型, 在考虑洪水演进的后效性问题上并非实质的全局优化; 李安强等^[12]在分析不同区域洪水遭遇组合下, 再对设计洪水按规则调度, 动态调整长江上游三座控制性水库群的预留防洪库容方案。行蓄洪区调度方面, 刘云等^[13]提出的行蓄洪区调度方案的模糊优选模型和王艳艳等^[14]提出的行蓄洪区多目标情景分析模型, 具有决策参考价值, 但在指导实时防洪调度实践中时效性和简便性不够; 陈文龙等^[15]研究了防洪保护区的洪水演进数学模型, 巧妙地耦合一维和二维技术, 可为任意漫堤洪水和溃堤洪水提供模拟, 支撑了行蓄洪区洪水调度方案设计。至今, 耦合水库

收稿日期: 2014-10-17; 网络出版时间: 2015-07-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150714.1743.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179044); 中央高校研究生基本科研基金资助项目(2014B35214)

作者简介: 贾本有(1988—), 男, 安徽芜湖人, 博士研究生, 主要从事水资源规划与水库调度方面研究。

E-mail: andyhejude@gmail.com

通信作者: 钟平安, E-mail: pazhong@hhu.edu.cn

群-河道堤防-行蓄洪区的联合调度模型和方法研究相对较少。

本文尝试研究由水库群、河道堤防和行蓄洪区三类工程组成的复杂防洪系统的联合调度,通过建立以水库群系统安全度最大和行蓄洪区系统损失最小为目标函数,结合河道堤防安全行洪为约束条件的多目标递阶优化调度模型(Multi-objective Hierarchy Optimization Operation Model; MoHOOM);依据大系统分解协调思想,构建联合调度的三级递阶分解协调结构,降低问题的求解复杂度,同时保持全局寻优;采用粒子群算法求解底层子系统优化问题,具体给出模型的递阶求解方法,并结合淮河中游复杂防洪系统进行联合调度实例分析与对比。

1 多目标优化调度模型

对于由水库群、河道堤防、行蓄洪区等组成的流域复杂防洪体系,通过水库群与行蓄洪区联合防洪调度,结合河道槽蓄作用,保障河道安全行洪。在防洪作用上,水库群调蓄各自入库洪水过程,改变下泄流量过程,做到有效削减下游河道洪峰流量和洪量;河道堤防主要通过槽蓄作用坦化洪水波;行蓄洪区在洪水不可能被水库群和河道完全控制时,作为洪水临时存蓄的场所。不同防洪系统在防洪调度中的作用和意义不尽相同,因而,在复杂防洪系统联合优化调度中考虑的目标也有所区别。

复杂防洪系统联合调度考虑的主要目标包含3个方面:①最小化水库设计防洪库容的使用以保证大坝防洪安全;②保障河道堤防安全行洪;③最小化行蓄洪区分洪损失。将目标定量化表达建立目标函数和约束条件,在目标函数中考虑目标①和③,在约束条件中考虑目标②,得到具体的多目标优化调度模型。

1.1 目标函数

针对目标①,定义水库在设计防洪库容内的防洪安全度函数 $S_{R,i}$ (为方便表述,简称为安全度),用以指示水库大坝防洪安全。水库群系统优化,采用系统防洪安全度最大为目标,目标函数见下式:

$$\max S_R = \sum_{i=1}^n S_{R,i} \quad (1)$$

式中 S_R 为水库群系统防洪安全度; $S_{R,i}$ 为第 i 座水库防洪安全度; n 为水库座数。

水库大坝的防洪安全,主要受水库坝前水位影响,表现为水库由于调洪而蓄水多少。定义水库在防洪调度期内剩余的防洪库容占水库设计防洪库容的比例,为水库防洪安全度函数,则有

$$S_{R,i} = \left[V_{R,i}^{\text{des}} - \max_{t \in [1, T]} \{ V_{R,i}(t) \} \right] / V_{R,i}^{\text{des}} \quad (2)$$

式中 $\max_{t \in [1, T]} \{ V_{R,i}(t) \}$ 为第 i 座水库调度期内使用的防洪库容; $V_{R,i}^{\text{des}}$ 为第 i 座水库设计防洪库容; T 为调度期。

针对目标③,定义行蓄洪区分洪损失函数 $C_{D,i}$,用以指示行蓄洪区的分洪损失。行蓄洪区系统优化,采用系统分洪损失最小为目标,目标函数见下式:

$$\min C_D = \sum_{i=1}^m C_{D,i} \quad (3)$$

式中 C_D 为行蓄洪区系统分洪损失; $C_{D,i}$ 为第 i 个行蓄洪区的分洪损失; m 为行蓄洪区个数。

实际中,行蓄洪区分洪损失涉及社会、政治、经济等多方面因素,未实施分洪前损失难以全面评定和计量。根据历史分洪与损失统计资料,行蓄洪区分洪损失表示为通过对数函数拟合建立分洪水量与分洪损失的相关关系,则有

$$C_{D,i} = a_i + b_i \ln(W_{D,i}) \quad (4)$$

式中 $W_{D,i}$ 为第 i 个行蓄洪区的分洪水量; a_i 、 b_i 为第 i 个行蓄洪区分洪损失函数的拟合系数。

复杂防洪系统的联合调度,包括水库群和行蓄洪区两部分。目标式(1)和式(3)之间由于变量 S_R 和 C_D 的量级差异大,造成不可公度性,并且两个目标式之间相互竞争,造成联合优化调度具有多目标问题属性。采

用量纲一方法和权重法相结合处理, 建立复杂防洪系统总目标函数, 具体形式如下:

$$\min F = \alpha_R(-S_R/n) + \alpha_D(C_D/C_D^{\max}) \quad (5)$$

式中 $C_D^{\max}$ 为行蓄洪区理论最大分洪损失; α_R 、 α_D 分别为水库群和行蓄洪区目标权重系数。在给定的复杂防洪系统中, 决策者选定权重方案进行优化调度计算, 指导调度决策。

1.2 约束条件

1.2.1 水库约束条件

$$\text{调洪最低和最高水位约束: } Z_{R,i}^{\min} \leq Z_{R,i}(t) \leq Z_{R,i}^{\max} \quad (6)$$

$$\text{最小泄流和泄流能力约束: } q_{R,i}^{\min} \leq q_{R,i}(t) \leq q_{R,i}[Z_{R,i}(t)] \quad (7)$$

$$\text{出库流量变幅约束: } |q_{R,i}(t) - q_{R,i}(t-1)| \leq \Delta q_{R,i} \quad (8)$$

$$\text{水量平衡约束: } V_{R,i}(t) = V_{R,i}(t-1) + [Q_{R,i}(t) + Q_{R,i}(t-1) - q_{R,i}(t) - q_{R,i}(t-1)]\Delta t/2 \quad (9)$$

式中 $Z_{R,i}(t)$ 为第 i 座水库 t 时刻的水库水位; $Z_{R,i}^{\min}$ 、 $Z_{R,i}^{\max}$ 为第 i 座水库 t 时刻水库允许最低、最高水位, 一般分别为汛限水位、设计洪水位; $q_{R,i}(t)$ 为第 i 座水库 t 时刻的泄流量; $q_{R,i}^{\min}$ 为第 i 座水库 t 时刻允许最小泄流量, 一般为发电、供水、航运功能等流量; $q_{R,i}[Z_{R,i}(t)]$ 为第 i 座水库在相应 t 时刻相应水位 $Z_{R,i}(t)$ 的下泄能力; $|q_{R,i}(t) - q_{R,i}(t-1)|$ 为第 i 座水库时段末、初出库流量的变幅; $\Delta q_{R,i}$ 为第 i 座水库出库流量变幅的允许值; $Q_{R,i}(t-1)$ 、 $q_{R,i}(t-1)$ 分别为第 i 座水库 t 时段初入库流量、出库流量; $Q_{R,i}(t)$ 、 $q_{R,i}(t)$ 分别为第 i 座水库 t 时段末入库流量、出库流量; $V_{R,i}(t-1)$ 、 $V_{R,i}(t)$ 分别为第 i 座水库 t 时段初、末蓄水量; Δt 为计算时段长。

1.2.2 河道堤防约束条件

$$\text{河道堤防安全行洪约束: } \sum_{i=1}^n q'_{R,i}(t) - \sum_{i=1}^m q'_{D,i}(t) + Q_{\text{sec}}(t) \leq q_A \quad (10)$$

$$\text{河道洪水演算马斯京根法约束: } q_k(t) = C_0 q_{k-1}(t) + C_1 q_{k-1}(t-1) + C_2 q_k(t-1) \quad (11)$$

式中 $q'_{R,i}(t)$ 为第 i 座水库泄流在控制断面的响应过程; $q'_{D,i}(t)$ 为第 i 个行蓄洪区分洪流量在控制断面的响应过程; $Q_{\text{sec}}(t)$ 为大区间洪水流量过程; q_A 为控制断面安全泄量值; C_0 、 C_1 、 C_2 为相应河段马斯京根法参数; $q_k(t-1)$ 、 $q_k(t)$ 分别为相应 k 断面 t 时段初、末流量; $q_{k-1}(t-1)$ 、 $q_{k-1}(t)$ 分别为相应 $k-1$ 断面 t 时段初、末流量。

1.2.3 行蓄洪区约束条件

$$\text{设计分洪流量约束: } 0 \leq q_{D,i}(t) \leq q_{D,i}^{\text{des}} \quad (12)$$

$$\text{设计蓄洪容量约束: } 0 \leq V_{D,i}(t) \leq V_{D,i}^{\text{des}} \quad (13)$$

$$\text{行蓄洪区水量平衡约束: } V_{D,i}(t) = V_{D,i}(t-1) + [q_{D,i}(t) + q_{D,i}(t-1)]\Delta t/2 \quad (14)$$

式中 $q_{D,i}(t)$ 为第 i 个行蓄洪区 t 时段的计算分洪流量; $q_{D,i}^{\text{des}}$ 为第 i 个行蓄洪区设计分洪流量值; $V_{D,i}(t)$ 为第 i 个行蓄洪区 t 时刻蓄水量; $V_{D,i}^{\text{des}}$ 为第 i 个行蓄洪区设计蓄水量值; $V_{D,i}(t-1)$ 、 $V_{D,i}(t)$ 分别为第 i 个行蓄洪区时段初、末蓄水量; $q_{D,i}(t-1)$ 、 $q_{D,i}(t)$ 分别为第 i 个行蓄洪区时段初、末分洪流量。

2 三级递阶分解协调优化

2.1 多目标优化调度模型分解与协调

上述数学规划问题从数学上采用单一方法难以直接优化求解, 但其目标函数满足加性可分离形式, 可应用大系统分解协调法降低问题求解复杂度同时保证全局寻优, 关键步骤是解耦(解除耦合约束条件), 形成递阶结构和协调方法。约束条件式(10)涵盖了水库群和行蓄洪区联合调度的共同结果, 是体现两类防洪工程共同维护河道控制断面安全泄流的关联约束。

首先, 应用大系统分解协调法的模型协调法, 选定具有实际物理意义的行蓄洪区总分洪流量 $W_D(t)$ 为协

调变量, 将式(10)分解为水库群和行蓄洪区的系统关联约束方程:

$$\sum_{i=1}^n q'_{R,i}(t) + Q_{\text{sec}}(t) - q_A \leq W_D(t) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m q'_{D,i}(t) = W_D(t) \quad (16)$$

然后, 应用大系统分解协调法的目标协调法, 引入拉格朗日乘子向量 $\lambda_R(t)$ 和 $\lambda_D(t)$ 分别继续分解约束式(15)和式(16), 具体分解方法见水库群子协调模块和行蓄洪区子协调模块。

最后, 根据选定的协调变量(协调信息)和目标函数(反馈信息)在不同层级之间进行信息传递, 构成了三级递阶分解协调模型, 递阶模型结构如图1所示。

2.2 三级递阶分解协调结构组成

2.2.1 复杂防洪系统总协调模块

取关联变量 $W_D(t)$ 为协调变量, 根据复杂防洪系统总目标函数式(5)建立协调准则, 不断调整协调变量, 达到全局最优。问题可以看作以 $W_D(t)$ 为自变量的极值问题, 形成无约束的非线性规划问题, 即

$$\min F = \alpha_R(-S_R/n) + \alpha_D(C_D/C_D^{\max}) = F(W_D(t)) \quad (17)$$

考虑 $W_D(t)$ 的物理意义有 $W_D(t) \geq 0$, 采用梯度法建立协调准则, 见下式:

$$W_D^{k+1}(t) = \max \left[W_D^k(t) + \sigma^k \frac{dF(W_D^k(t))}{dW_D^k(t)}, 0 \right] \quad (18)$$

式中 k 为迭代计算次数; σ^k 为第 k 次计算步长。

由于 $F(W_D(t))$ 无法给出具体的函数形式, 所以不能进行求导计算, 采用下式的差分形式计算:

$$\frac{dF(W_D^k(t))}{dW_D^k(t)} = \frac{F^k - F^{k-1}}{W_D^k(t) - W_D^{k-1}(t)} \quad (19)$$

总协调层经过迭代计算, 满足条件 $|W_D^{k+1}(t) - W_D^k(t)| \leq \varepsilon$ (ε 为迭代精度), 认为目标函数到达全局最优。

2.2.2 水库群子协调模块

水库群系统的关联(耦合)约束为式(15), 采用目标协调法, 引入拉格朗日乘子向量 $\lambda_R(t)$, 将不等式关联约束并入水库群调度目标函数式(1)中, 构成水库群系统的拉格朗日函数, 舍去水库独立约束条件, 见下式:

$$L_R = \sum_{i=1}^n S_{R,i} + \sum_{i=1}^T \lambda_R(t) \left[\sum_{i=1}^n q'_{R,i}(t) + Q_{\text{sec}}(t) - q_A - W_D(t) \right] \quad (20)$$

根据对偶原理, 求解无约束非线性规划问题, 有最优解的必要条件为(偏)导数为0, 采用梯度法建立协调准则如下:

$$\lambda_R^{k+1}(t) = \lambda_R^k(t) + \sigma_R^k \left[\sum_{i=1}^n q'_{R,i}(t) + Q_{\text{sec}}(t) - q_A - W_D(t) \right] \quad (21)$$

由于式(15)为不等式“ $\leq$ ”约束, 按照对偶原理满足协调式 $\lambda_R(t) \geq 0$, 令 $\lambda_R^{k+1}(t) = 0$ 为满足约束的时刻点, 则协调准则的迭代格式如下式:

$$\lambda_R^{k+1}(t) = \max \left\{ \lambda_R^k(t) + \sigma_R^k \left[\sum_{i=1}^n q'_{R,i}(t) + Q_{\text{sec}}(t) - q_A - W_D(t) \right], 0 \right\} \quad (22)$$

式中 σ_R^k 为第 k 次计算步长。

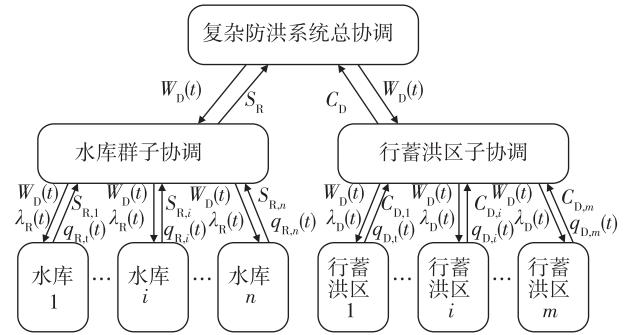


图1 复杂防洪系统三级递阶分解协调模型结构

Fig.1 Third-order hierarchical decomposition-coordination structure for complex flood control system

子协调层经过一定次数的迭代, 满足条件 $|\lambda_R^{k+1}(t) - \lambda_R^k(t)| \leq \varepsilon_R$ (ε_R 为迭代精度), 认为达到最优, 停止迭代计算。

2.2.3 行蓄洪区子协调模块

行蓄洪区系统的关联(耦合)约束为式(16), 采用目标协调法, 引入拉格朗日乘子向量 $\lambda_D(t)$, 将等式关联约束并入行蓄洪区系统调度目标函数式(3)中, 构成行蓄洪区系统的拉格朗日函数, 舍去行蓄洪区独立约束条件, 见下式:

$$L_D = \sum_{i=1}^m C_{D,i} + \sum_{t=1}^T \lambda_D(t) \left\{ \sum_{i=1}^m q'_{D,i}(t) - W_D(t) \right\} \quad (23)$$

根据对偶原理, 求解该无约束非线性规划问题, 有最优解的必要条件为(偏)导数为零, 采用梯度法建立协调准则如下:

$$\lambda_D^{k+1}(t) = \lambda_D^k(t) + \sigma_D^k \left\{ \sum_{i=1}^m q'_{D,i}(t) - W_D(t) \right\} \quad (24)$$

式中 σ_D^k 为第 k 次计算步长。

子协调层经过一定次数的迭代, 满足条件 $|\lambda_D^{k+1}(t) - \lambda_D^k(t)| \leq \varepsilon_D$ (ε_D 为迭代精度), 认为达到最优, 停止迭代计算。

2.2.4 单一水库优化调度模块

在子协调层给定 $\lambda_R(t)$ 和 $W_D(t)$ 时, 式(20)拉格朗日函数改写成加性可分离形式:

$$L_R = \sum_{i=1}^n \left\{ S_{R,i} + \sum_{t=1}^T \lambda_R(t) \left[q'_{R,i}(t) + \frac{Q_{\text{sec}}(t) - q_A - W_D(t)}{n} \right] \right\} \quad (25)$$

则第 i 座水库优化调度的目标函数, 消除常数项后, 如下式所示:

$$\max F_{R,i} = - \max_{t \in [1, T]} \{ V_{R,i}(t) \} + \sum_{t=1}^T \lambda_R(t) \left[q'_{R,i}(t) + \frac{Q_{\text{sec}}(t) - q_A - W_D(t)}{n} \right] \quad (26)$$

第 i 座水库优化调度考虑的约束条件为式(6)一式(9)和式(11), 该问题的优化计算是一个多阶段决策问题, 阶段变量为时间 t , 决策变量为出库过程 $q_{R,i}(t)$ 。由于目标函数式中的 $q'_{R,i}(t)$ 与 $q_{R,i}(t)$ 满足约束式(11)的马斯京根法的河道洪水演算关系, 使得该水库优化调度问题具有后效性、多维性和非线性的特点, 传统优化算法求解困难。粒子群算法(PSO)是基于群体智能启发的智能算法的典型代表, 尤其适用于处理高维、非线性和可行域复杂的优化问题, 并且以其快速的收敛速度和较少的算法参数受到推崇, 本文选用自适应粒子群算法求解此单一水库优化调度问题。

2.2.5 单一行蓄洪区优化调度模块

在行蓄洪区子协调层给定 $\lambda_D(t)$ 和 $W_D(t)$ 时, 式(23)拉格朗日函数改写成加性可分离形式:

$$L_D = \sum_{i=1}^m \left\{ C_{D,i} + \sum_{t=1}^T \lambda_D(t) \left[q'_{D,i}(t) - \frac{W_D(t)}{m} \right] \right\} \quad (27)$$

则第 i 个行蓄洪区优化调度的目标函数, 消除常数项后, 如下式所示:

$$\min F_{D,i} = b_i \ln(W_{D,i}) + \sum_{t=1}^T \lambda_D(t) \left[q'_{D,i}(t) - \frac{W_D(t)}{m} \right] \quad (28)$$

第 i 个行蓄洪区优化调度考虑的约束条件为式(12)一式(14)和式(11), 该问题的优化计算是一个多阶段决策问题, 阶段变量为时间 t , 决策变量为分洪过程 $q_{D,i}(t)$ 。由于目标函数式中 $q'_{D,i}(t)$ 与 $q_{D,i}(t)$ 满足约束式(11)的马斯京根法的河道洪水演算关系, 使得优化问题具有后效性, 同样采用与上述单一水库优化调度模型一致的自适应粒子群算法求解。在实际应用中, 由于行蓄洪区一般距离防洪点较近, 可以忽略洪水演进规律约束式(11), 即认为 $q'_{D,i}(t) = q_{D,i}(t)$, 此时无后效性问题, 可采用动态规划(DP)等其他方法计算。

2.3 三级递阶分解协调模型计算方法

2.3.1 计算流程图

综上所述,从多目标模型的建立、分解协调方法的推导、底层子系统优化方法的选定,得到复杂防洪系统联合优化调度模型的三级递阶求解方法,其计算流程如图2所示。

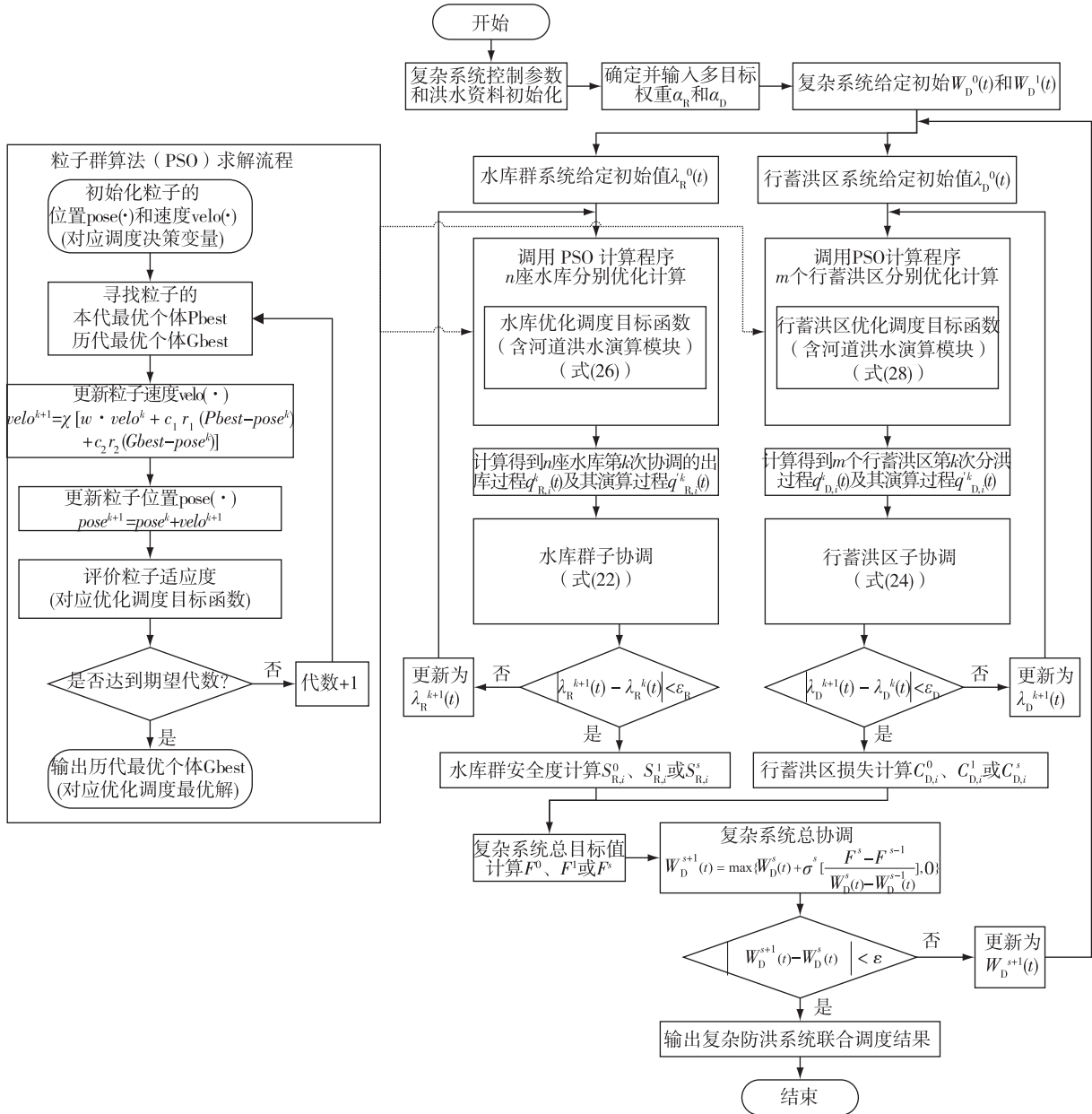


图2 多目标递阶优化调度模型求解流程

Fig. 2 Calculation flowchart of multi-objective hierarchy optimization operation model

2.3.2 参数确定

多目标递阶优化调度模型的优化求解过程中,涉及参数 α_R 、 α_D 、 $W_D^0(t)$ 、 $W_D^1(t)$ 、 $\lambda_R^0(t)$ 和 $\lambda_D^0(t)$ 共6个模型参数。其中,水库群安全度与行蓄洪区损失目标函数的权重参数 α_R 和 α_D 确定,直接影响防洪任务在水库群与行蓄洪区之间的分配结果,关系到是否启用行蓄洪区,需要探寻科学合理的定权方式; $W_D^0(t)$ 、 $W_D^1(t)$ 、 $\lambda_R^0(t)$ 和 $\lambda_D^0(t)$ 迭代参数初始值给定的优劣,直接影响模型计算速度和收敛性,是值得进一步深入研

究的部分；粒子群算法属于随机搜索算法范畴，其计算参数初始值给定的优劣，对模型计算速度和收敛性影响较小。

第一，有关模型权重参数的确定，可以从两方面展开工作：① 给定唯一的权重方案：将水库群安全度和行蓄洪区损失作为评价指标，采用合适的评价指标权重确定方法，诸如层次分析法、专家打分法、主成分分析法、模糊分析法等等，确定唯一的权重方案后带入模型进行优化计算，得到推荐的联合调度结果。② 枚举所有权重组合方案：将连续的权重系数进行离散化处理，枚举生成有限个涵盖所有可能权重组合的方案，再分别带入模型进行优化计算，生成多目标防洪联合调度的方案集(非劣解集)；然后进行联合调度方案的评价，构建方案评价属性集；最后采用多属性决策方法进行方案排序，推荐联合调度方案，其中，涉及多属性决策方法可同上述评价指标权重确定方法。此法可以反映不同目标权重对于决策的影响。

第二，本文给出上述模型中迭代参数初始值确定的一种简便方法以供参考，方法和步骤为：① 计算天然状态(无水库群和行蓄洪区调蓄作用)河道控制断面的超额洪水过程^[10]，记为 $Q_{ex}(t)$ ，计算公式为 $Q_{ex}(t) = \max\{\sum_{i=1}^n Q'_{R,i}(t) + Q_{sec}(t) - q_A, 0\}$ ，其中， $Q'_{R,i}(t)$ 为第 i 座水库入库洪水过程在控制断面的响应过程；② 总分洪流量参数初始值确定，计算公式为 $W_D^0(t) = \alpha Q_{ex}(t)$ ， $W_D^1(t) = \beta Q_{ex}(t)$ ，其中， $\alpha, \beta \in (0, 1)$ 且 $\alpha \neq \beta$ ；③ 水库群与行蓄洪区拉格朗日乘子向量初始值的确定，其计算公式为

$$\lambda_R^0(t) = \begin{cases} a, & Q_{ex}(t) > 0 \\ 0, & Q_{ex}(t) = 0 \end{cases} \quad a > 0 \quad (29)$$

$$\lambda_D^0(t) = \begin{cases} b, & Q_{ex}(t) > 0 \\ 0, & Q_{ex}(t) = 0 \end{cases} \quad b \neq 0 \quad (30)$$

3 应用实例

3.1 研究区概况

淮河流域介于长江、黄河之间，属暖温带半湿润季风气候区，具有大陆性气候特征，汛期暴雨频繁，雨区分布与淮河干流河道走向基本一致，常常发生大范围的流域性大洪水。在淮河中游，河道比降迅速降低，洪水宣泄缓慢。为了调控洪水，减少灾害，淮河中游修建了几座大型水库，巩固加强了河道堤防，开辟了众多行蓄洪区，是一个复杂的水库群、河道堤防、行蓄洪区防洪联合调度系统。



图 3 研究区域水库群、河道、行蓄洪区分布

Fig. 3 Distribution map of multi reservoirs, river channels and flood storage areas

本文研究选择淮河中游史灌河水系和淮河干流河段组成的区域，图 3 为研究区主要水库群、河道和行蓄洪区分布图。上游分布鲇鱼山和梅山两座大型水库，中游为史河、灌河和淮河干流，河流上有蒋家集、王家坝和润河集控制站，下游有南润段行洪区和城西湖蓄洪区，其分洪控制闸门均位于润河集站上游。

由图 3 的拓扑结构图和河道洪水的流向，将研究区划分为 5 个分区，分别为鲇鱼山库区、梅山库区、王家坝控制区、蒋家集区间和润河集区间。1983 年 7 月下旬淮河中游出现一场大洪水过程，淮河干流南岸的史灌河水系遭遇了一次强暴雨洪水过程，收集该场洪水下鲇鱼山和梅山水库的出库调度过程，王家坝、蒋家集和润河集的实测洪水过程，南润段和城西湖的启用情况以及各河段洪水演算参数，通过水量平衡方法进行天然洪水还原计算，得到鲇鱼山和梅山水库入库洪水过程，王家坝洪水过

程，王家坝、蒋家集和润河集的实测洪水过程，南润段和城西湖的启用情况以及各河段洪水演算参数，通过水量平衡方法进行天然洪水还原计算，得到鲇鱼山和梅山水库入库洪水过程，王家坝洪水过

程，蒋家集区间洪水过程和润河集区间洪水过程。

3.2 联合调度结果

实例中将水库群安全度和行蓄洪区损失作为评价指标，利用层次分析法(AHP)确定权重系数，拟定专家认为在该场洪水量级和分布条件以及工程系统基本情况下，行蓄洪区损失比水库群安全度的重要性位于稍微重要和明显重要之间，相应标度取值为4，采用根法^[16]确定权重分配结果为 $\alpha_R=0.2$ 、 $\alpha_D=0.8$ ，并通过一致性检验。

以1983年7月各分区还原的天然洪水为输入条件，选定蒋家集和润河集河道断面的保证水位33.24 m和27.10 m为控制安全阈值，依据涨水段水位流量关系曲线，对应的蒋家集安全泄量为3 800 m³/s，润河集安全泄量为7 500 m³/s，进而计算出润河集控制断面超额洪水过程，确定三级递阶优化迭代参数的初始值。

联合调度期长为10 d，计算时段间隔为1 h。采用本文提出的三级递阶分解协调模型进行复杂防洪系统的联合调度计算，同时与实际调度和规则调度对比，具体调度结果的评价指标见表1—表3，水文过程线见图4—图6。由于城西湖蓄洪区没有分洪，在图5的分洪调度结果过程图中未画出。

表 1 水库群系统防洪调度结果对比

Table 1 Results comparison for flood control operation in reservoirs

调度模式	水库名称	起调水位/ m	最高水位/ m	最大入库/ (m ³ ·s ⁻¹)	最大出库/ (m ³ ·s ⁻¹)	削峰率/ %	动用防洪库容/ 亿 m ³	设计防洪库容/ 亿 m ³	水库安全度	水库群系统安全度
实际调度	鲇鱼山	103.60	105.80	2 430	950	60.9	0.85	2.7	0.69	1.32
	梅山	125.30	130.40	6 490	620	90.4	3.15	8.6	0.63	
规则调度	鲇鱼山	105.80	108.50	2 430	500	79.4	1.18	2.7	0.56	1.39
	梅山	125.30	126.30	6 490	1 200	81.5	1.42	8.6	0.83	
联合调度	鲇鱼山	105.80	109.70	2 430	400	83.5	1.83	2.7	0.32	0.94
	梅山	125.30	130.60	6 490	570	91.2	3.28	8.6	0.62	

表 2 行蓄洪区系统调度结果对比

Table 2 Results comparison for flood control operation in flood storage basins

调度模式	行蓄洪区名称	设计流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	设计容量/ 亿 m ³	损失函数拟合参数		最大分洪流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	总分洪水量/ 亿 m ³	行蓄洪区损失值/ 万元	行蓄洪区系统损失值/ 万元
				a_i	b_i				
实际调度	南润段	2 600	1.1	1 675.2	367.8	0	0	0	0
	城西湖	6 000	29.5	21 005.7	4 943.3	0	0	0	0
规则调度	南润段	2 600	1.1	1 675.2	367.8	910	0.81	1 597.7	1 597.7
	城西湖	6 000	29.5	21 005.7	4 943.3	0	0	0	0
联合调度	南润段	2 600	1.1	1 675.2	367.8	420	0.32	1 256.1	1 256.1
	城西湖	6 000	29.5	21 005.7	4 943.3	0	0	0	0

表 3 河道控制断面调度结果对比

Table 3 Results comparison for flood control operation in rivers

调度模式	控制断面名称	安全泄量/ (m ³ ·s ⁻¹)	洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	超额洪峰流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	超额历时/ h	超额洪量/ 亿 m ³	河道系统总超额洪量/ 亿 m ³
实际调度	蒋家集	3 800	3 900	100	6	0.01	0.43
	润河集	7 500	8 220	720	33	0.42	
规则调度	蒋家集	3 800	4 550	750	30	0.44	0.44
	润河集	7 500	7 500	0	0	0	
联合调度	蒋家集	3 800	3 215	0	0	0	0
	润河集	7 500	7 500	0	0	0	

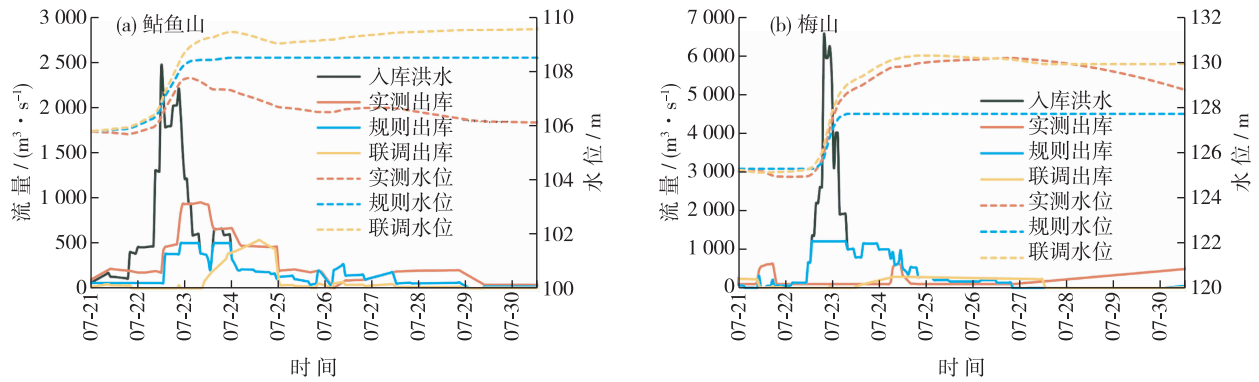


图 4 水库群系统防洪调度结果

Fig. 4 Results of flood control operation in multi reservoirs

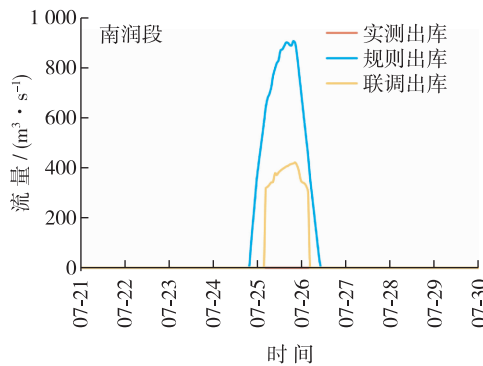


图 5 行蓄洪区系统分洪调度结果

Fig. 5 Results of flood control operation in flood storage areas

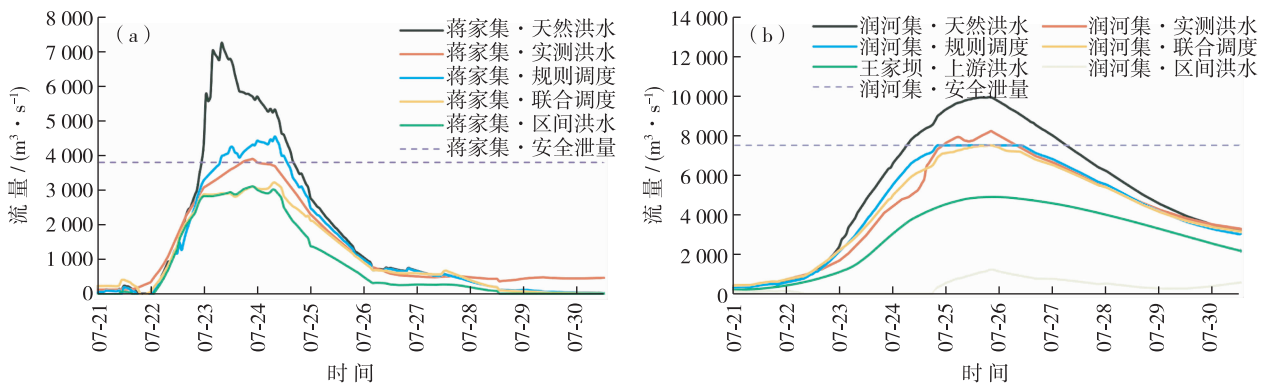


图 6 河道控制断面防洪调度结果

Fig. 6 Results of flood control operation in river channels

3.3 结果分析

(1) 由表 1 和图 4 可知, 针对该场特定入库洪水, 极限条件下, 鲇鱼山和梅山水库将洪水全部拦蓄而不泄洪, 计算得到安全度的理论最小值, 分别为 0.12 和 0.55, 表明该场入库洪水均没有达到两座水库的设计洪水标准, 同时在洪水量级频率上鲇鱼山入库洪水比梅山入库洪水高。历史实际调度, 鲇鱼山水库安全度为 0.69, 高于理论最小值的 0.12 较多, 同时高于规则调度的 0.56 和联合调度的 0.32, 表明鲇鱼山水库实际调度在复杂系统中没能充分发挥防洪作用; 梅山水库安全度为 0.63, 低于规则调度的 0.86, 约等于联合调度的 0.62, 表明梅山水库实际调度在复杂系统中作用显著。现行规则调度, 鲇鱼山和梅山水库安全度分别为

0.56 和 0.86, 高于联合调度值和理论最小值较多, 表明两座水库的规则调度在复杂系统中的防洪作用不明显。联合调度, 鲇鱼山和梅山水库的安全度分别为 0.32 和 0.65, 均向理论最小值靠近, 表明两座水库的联合调度在复杂系统中倾向于发挥水库群的防洪作用, 可进一步挖掘水库防洪蓄洪的空间。

(2) 由表 2 和图 5 可知, 历史实际调度, 南润段和城西湖均未启用分洪, 因而没有带来行蓄洪区的分洪损失, 其直接后果是造成润河集河段洪峰流量达 $8\,220\text{ m}^3/\text{s}$, 如表 3 数据, 高出保证水位以上 0.38 m 泄洪, 河道堤防防洪形势严峻。现行规则调度, 先启用行洪区后启用蓄洪区, 并按超保证水位以上分洪原则进行模拟计算, 由南润段行洪区实施分洪, 最大分洪流量为 $910\text{ m}^3/\text{s}$, 总分洪水量达 0.81 亿 m^3 , 相应损失值为 1 597.7 万元; 如果不启用行洪区, 直接后果是造成润河集河段洪峰流量达 $8\,410\text{ m}^3/\text{s}$, 如表 3 数据, 高出保证水位以上 0.46 m 泄洪, 在高水位压力下威胁河道堤防的安全。联合调度, 只需启用南润段行洪区进行分洪, 最大分洪流量为 $420\text{ m}^3/\text{s}$, 总分洪水量为 0.32 亿 m^3 , 相应损失值为 1 256.1 万元; 如果不启用行洪区, 直接后果是造成润河集河段洪峰流量为 $7\,920\text{ m}^3/\text{s}$, 如表 3 数据, 高出保证水位以上 0.21 m 泄洪, 低于实际调度的 0.38 m 和规则调度的 0.46 m。表明在以保障河道堤防安全行洪为约束的联合调度中, 优化了复杂系统的防洪效果, 在不启用行洪区的表现上比实际调度更优, 在启用行洪区的结果上比规则调度降低了分洪损失。

(3) 由表 3 和图 6 可知, 历史实际调度, 润河集断面超安全泄量 $720\text{ m}^3/\text{s}$, 相当于超保证水位 0.38 m 宣泄洪水, 同时超过历时高达 33 h, 超额洪量有 0.42 亿 m^3 , 河段堤防承载着巨大水力压力, 防洪形势严峻, 同时, 上游的蒋家集断面超安全泄量 $100\text{ m}^3/\text{s}$, 超过历时达到 6 h, 超额洪量有 0.01 亿 m^3 , 综合表明实际调度没能充分体现出上游水库群和下游行蓄洪区的防洪作用。现行规则调度, 造成蒋家集断面超安全泄量 $750\text{ m}^3/\text{s}$, 超过历时高达 30 h, 超额洪量有 0.44 亿 m^3 , 表明上游的鲇鱼山、梅山水库群现行防洪调度规则不利于下游防洪目标的实现; 润河集断面, 由于下游南润段行洪区的规则分洪作用, 如表 2 数据, 得以在保证水位以下宣泄洪水。联合调度, 在全局优化了上游水库群和下游行蓄洪区的共同防洪作用下, 实现了蒋家集和润河集断面在保证水位以下宣泄洪水, 保障了复杂系统中的河道堤防安全。

综上可知, 历史调度方面, 决策者受洪水预报、水流传播滞时等因素限制, 无法明确把握未来洪水发展情势, 仅从调度结果上看没能实现全局防洪效益的最大化; 规则调度方面, 不能考虑各区域洪水的组合特性, 缺乏内在联合机制, 仅从调度结果上看全局防洪效益一般, 尤其是鲇鱼山和梅山水库群联合防洪效果不显著; 联合调度方面, 在寻求复杂防洪系统全局最优目标控制下, 发挥了上游鲇鱼山和梅山水库有效削减洪峰和拦蓄洪水的能力, 在保障蒋家集和润河集河段安全行洪的条件下, 减少了下游南润段行洪区不必要的分洪损失, 多目标递阶优化调度模型取得了满意的效果。

4 结 论

本文构建了复杂防洪系统联合优化调度的多目标模型, 将水库群安全度和行蓄洪区损失作为联合调度的机制, 根据大系统分解协调法给出了模型三级递阶协调结构和全局优化计算方法, 探寻到解耦河道堤防安全行洪约束方式, 并应用于淮河中游防洪系统的调度分析与对比。

三级递阶分解协调优化将复杂防洪系统模型从工程的空间分布角度分解为若干子系统, 层次结构明确, 求解方法独立, 有效降低系统维数, 避免“维数灾”问题; 三级递阶分解协调优化的方式使得水库和行蓄洪区底层子系统优化模型不受寻优次序和方法的限制, 其求解方法可独立灵活选择, 为同类防洪系统的应用提供方便。

多目标递阶优化调度模型可有效计算出水库群优化泄流和行蓄洪区分洪策略, 同时保障河道安全泄流。与历史实际调度和现行规则调度相比, 模型充分利用了上游水库群的防洪潜力, 避免了下游不必要的行蓄洪区分洪损失, 同时兼顾保障河道堤防安全行洪, 最大限度获得了防洪减灾的整体效益。

参考文献:

- [1] LABADIE J W. Optimal operation of multi-reservoir systems: State-of-the-art review [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2004, 130(2): 93-111.
- [2] SEIBERT S P, SKUBLICS D, EHRET U. The potential of coordinated reservoir operation for flood mitigation in large basins: A case study on the Bavarian Danube using coupled hydrological-hydrodynamic models [J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 1128-1144.
- [3] BIANUCCI P, SORDOWARD A, PEREZ J I, et al. Risk-based methodology for parameter calibration of a reservoir flood control model [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2013, 13(4): 965-981.
- [4] HSU N S, WEI C C. A multipurpose reservoir real-time operation model for flood control during typhoon invasion [J]. Journal of Hydrology, 2007, 336(3/4): 282-293.
- [5] CHANG L C. Guiding rational reservoir flood operation using penalty-type genetic algorithm [J]. Journal of Hydrology, 2008, 354(4): 65-74.
- [6] HE Y Y, XU Q F, YANG S L, et al. Reservoir flood control operation based on chaotic particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(17): 4480-4492.
- [7] ZHANG Z B, JIANG Y Z, ZHANG S H, et al. An adaptive particle swarm optimization algorithm for reservoir operation optimization [J]. Applied Soft Computing, 2014, 18(5): 167-177.
- [8] 谢维, 纪昌明, 吴月秋, 等. 基于文化粒子群算法的水库防洪优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 452-457. (XIE Wei, JI Changming, WU Yueqiu, et al. Particle swarm optimization based on cultural algorithm for flood optimal scheduling of hydropower reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 452-457. (in Chinese))
- [9] 王森, 程春田, 李保健, 等. 防洪优化调度多约束启发式逐步优化方法[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 869-876. (WANG Sen, CHENG Chuntian, LI Baojian, et al. A multi-constrained heuristic progressive optimality algorithm for flood control operation [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 869-876. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 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, 33(6): 38-42. (XIE Liuqing, YI Shuzhen. Optimal flood dispatch model for multi-reservoir system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(6): 38-42. (in Chinese))
- [12] 李安强, 张建云, 仲志余, 等. 长江流域上游控制性水库群联合防洪调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 59-66. (LI Anqiang, ZHANG Jianyun, ZHONG Zhiyu, et al. Study on joint flood control operation for leading reservoirs in the upper Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(1): 59-66. (in Chinese))
- [13] 刘云, 李义天, 谈广鸣, 等. 蓄滞洪区洪水调度优化研究[J]. 长江科学院院报, 2010(7): 22-25. (LIU Yun, LI Yitian, TAN Guangming, et al. Optimization of flood control of storage and detention basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010(7): 22-25. (in Chinese))
- [14] 王艳艳, 刘树坤, 向立云. 蓄滞洪区综合利用多目标情景分析模型研究[J]. 自然资源学报, 2009(2): 209-217. (WANG Yanyan, LIU Shukun, XIANG Liyun. Study on the multi-objective and scenario analysis model for the integrative utilization of flood detention basin [J]. Journal of Natural Resources, 2009(2): 209-217. (in Chinese))
- [15] 陈文龙, 宋利祥, 邢领航, 等. 一维-二维耦合的防洪保护区洪水演进数学模型[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 848-855. (CHEN Wenlong, SONG Lixiang, XING Linghang, et al. A 1D-2D coupled mathematical model for numerical simulating of flood routine in flood protected zone [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 848-855. (in Chinese))
- [16] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100. (DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of analytic hierarchy process weight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100. (in Chinese))

Coordinated optimal operation model of complex flood control system *

JIA Benyou¹, ZHONG Ping'an^{1,2}, CHEN Juan¹, WU Yenan¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: Study of a coordinated optimal operation of complex flood control system which consists of multi reservoirs, river channels and flood storage areas, is one of the most complex tasks in flood disaster mitigation. This paper introduces a Multi-objective Hierarchy Optimization Operation Model (MoHOOM), which sets maximum multi reservoirs system safety and minimum flood storage areas system losses as two objective functions and uses safe river channel discharge capacity as a constraint. The MoHOOM theoretical background is established by decomposition and coordination approach of large scale system theory and particle swarm optimization, the optimal solution is derived for each level derived by a third-order hierarchical decomposition and coordination structure. The MoHOOM is applied to optimal operation of complex flood control system in middle reaches of Huaihe River basin of China. The results show that the MoHOOM can efficiently calculate outflow hydrograph of multi reservoirs system and flood diversion hydrograph of flood storage areas system. Meanwhile, under the same initial calculation conditions, optimal operation reduces the safety indicator by 0.37 and 0.01 in Nianyushan and Meishan reservoir respectively; lowers the peak flow upon safe discharge capacity by 100 m³/s and 720 m³/s at Jiangjiaji and Runheji channel respectively; leads to 12.56 million Yuan losses in flood storage area, when compared to actual operation. Optimal operation reduces the safety indicator by 0.24 and 0.21 in Nianyushan and Meishan reservoir respectively; lowers the peak flow upon safe discharge capacity by 750 m³/s at Jiangjiaji channel; reduces losses by 3.42 million Yuan at flood storage area, when compared to rule-based operation. The MoHOOM is in favor of excavating multi reservoirs flood control capacities, reduces unnecessary losses in flood storage area under condition of ensuring safe discharge capacity in river channels, and ensures global optimization to coordinated operation of complex flood control system.

Key words: flood control and disaster mitigation; coordinated optimal operation; multi reservoirs; flood storage area; decomposition and coordination approach; particle swarm optimization

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51179044).