

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.04.004

水库防洪补偿调节线性规划模型及应用

陈森林^{1,2}, 李 丹², 陶湘明², 黄宇昊³

(1. 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072;
3. 广西水利电力勘测设计研究院, 广西 南宁 530023)

摘要: 防洪补偿调节是水库防洪规划和实时调度的基本原理, 构模方法及后效性是制约水库洪水优化补偿调节数学模型求解的关键问题。对于一个水库和一个防洪控制点所组成的基本防洪系统, 基于水库调度阶段划分及流出上界分析引入水库出流上下界约束, 将水库防洪库容最小目标转换为累计蓄水量最小的等价目标, 建立了水库防洪补偿调节线性规划模型(RFCR-LP), 实现了水库调度决策和下游河道水流演进的完全耦合, 避免了常规多阶段决策优化方法的后效性。该模型不仅具有结构简单、易于求解等显著特点, 而且实现了水库防洪规划与实时调度优化数学模型的统一, 基本形成了覆盖水库全周期的多功能洪水优化补偿调节模型, 为构建水库群防洪优化补偿调节模型提供了一种解决方案。实例验证了 RFCR-LP 的适用性、灵活性及稳定性。

关键词: 补偿调节; 线性规划; 后效性; 耦合; 全局最优解

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2017)04-0507-08

当水库与防洪控制断面之间的区间来水不可忽略时, 水库根据防洪控制断面的安全泄量考虑区间来水进行防洪补偿调节, 在最大限度发挥防洪控制断面行洪能力的同时, 以确保防护控制点安全行洪且尽量减免分洪损失和防护区的洪水灾害。水库防洪补偿调节中, 考虑区间河道的槽蓄作用和洪水演进影响, 可以提升水库的防洪效益, 对实现洪水精准调控也具有重要价值。同时, 在中国防洪实践中, 一般根据具体情况分别采用(分级)固定泄量、错峰调度及等蓄量调度等简化补偿调度方式, 但缺乏选用依据。因此, 基于补偿调节原理和稳定可靠的整体优化方法, 构建通用的水库防洪补偿调节优化数学模型, 同时规避简化防洪调度方式的选择, 对于水库防洪规划和实时调度具有重要的理论价值和生产应用价值。

水库(群)防洪优化规划和实时调度数学模型一般具有非线性、多目标和多阶段等特点, 建模求解过程相当复杂^[1]。近年来, 国内外很多学者在此领域开展了卓有成效的工作, 建立了具有不同针对性的补偿模型, 艾学山和陈森林^[2]通过计算防洪系统的超载水量及调整水库群拦蓄与预泄策略的方法构建了水库群洪水补偿调度的通用模型; 钟平安等^[3]提出了动态调节系数, 建立了水库轮库补偿模型; 李玮等^[4]提出基于预报及库容补偿的水库群防洪补偿联合调度逐次渐进协调模型, 推求水库汛期防洪库容动态控制方案; 贾本有等^[5]建立以水库群系统安全度最大和行蓄洪区系统损失最小的复杂防洪系统多目标递阶优化调度模型; 王森等^[6]建立了基于最大削峰准则的水库下游组合流量平方和最小模型; 谢柳青和易淑珍^[7]建立了并联水库群防洪调度模型; 李安强等^[8]提出了动态调整长江上游 3 座控制性水库群的预留防洪库容模型; 陈文龙等^[9]耦合一维和二维技术研究了防洪保护区的洪水演进数学模型; 邹强等^[10]建立梯级水库出库流量过程平方和最小模型。在优化算法方面, 多种传统 DP 变形算法和智能算法得到了应用, 如 DDDP 法^[7]、大系统分解协调法^[8]、并行混沌量子粒子群算法^[10]、逐次渐近优化算法^[11]、多维逐步优化算法^[12]、结合数理惩罚遗传算法^[13]、逻辑图形的改进粒子群算法^[14]及自适应粒子群算法^[15]等。此外, 针对补偿调度中经典图解法方法并没有考虑河道调蓄作用的问题, 国内学者研究了由防洪控制断面流量过程反演推求水库出流过程方法^[16-17], 即通过构建上游流量、反演系数、下游流量三者之间的矩阵关系, 推求河道洪水反演系数。

收稿日期: 2016-10-25; **网络出版时间:** 2017-06-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20170626.1624.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479141); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402709)

作者简介: 陈森林(1963—), 男, 湖北孝感人, 教授, 主要从事水文及水资源研究。E-mail: csl_csl@263.net

综上所述,围绕水库防洪规划与实时调度问题的现行研究方法主要包括两类途径,一是先确定水库出流决策过程,后根据水库约束和防洪控制断面合成流量过程判断其可行性,再通过比较各可行决策的目标函数值优劣得到近似最优解;二是以防洪控制断面安全泄量为依据反推水库出流过程。由于不同的水库出流过程可能得到下游防洪断面相同的流量响应(实实验证),给水库调度决策带来了很大困难,为了保证多解背景下水库泄流过程具有可操作性,目前的常用做法是将水库决策与河道洪水演进分开考虑(其中以探索稳定的河道逆流演算方法最为典型),无法实现整体最优。究其原因,水库洪水补偿调节虽然属于多阶段决策问题,但由于下游河道洪水演进等约束引起的后效性,导致成熟多阶段决策优化方法难以应用,也使得各种智能算法无法证明得到最优解。因此,本文以一个水库和下游单个防洪控制点所组成的基本防洪系统为对象,通过建立具有整体优化作用的水库防洪补偿调节的线性规划模型(RFCR-LP),以实现调度方法层面的水库调控决策和河道洪水演进完全耦合,同时避免应用层面的补偿调度方式选择,并达到提高水库防洪补偿优化调度数学模型的普适性、避免后效性及确保模型求解方法最优性和稳定性的目的。

1 水库调度阶段划分及出流上界分析

当入库洪水和区间洪水过程已知时,不考虑水库的调控作用,通过河道演算可以得到防洪控制点的流量过程(或已知的天然洪水流量过程,如图1所示),防洪控制点流量过程超过安全泄量的起讫时间分别对应

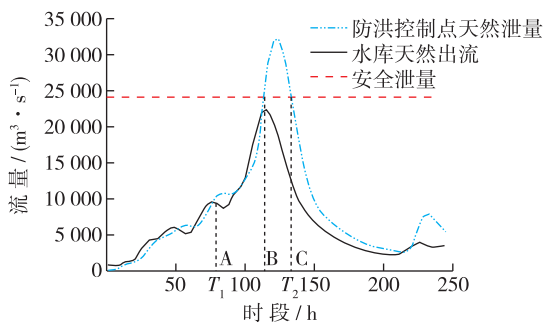


图1 亭子口水库坝址和防洪控制点天然洪水流量过程线

Fig. 1 Process of natural flood discharge at Tingzikou Reservoir and flood control station

B、C点。设水库出流至防洪控制点的河道演算汇流系数个数为 n ,则B点往前推 $n-1$ 个时段,即为水库可能需要补偿调节的最早起始时刻A点。

分别记水库补偿起讫时刻为 T_1 (对应A点)和 T_2 (对应C点),基于此时间特征点,可将水库的控泄决策划分为3个相连的阶段:①起涨段(洪水起涨至 T_1),水库入流较小,且水库出流对防洪控制点超载时段没有影响;②补偿段(T_1 至 T_2),水库入流洪峰前后,库水位逐步升高(有预泄时先降后升),水库出流过程决定了防洪控制点是否超载;③消落段(T_2 至洪水结束),水库入流处于退水段,库水位一般逐步回落,水库出流只对库水位回落过程快慢有影响,合适的泄流决策对防洪控制点

超载时段没有影响。由此可见,补偿段决定了防洪控制点的补偿效果,起涨段和补偿段出流过程决定了(占用)水库防洪库容的大小,而消落段只影响水库兴利效益。

针对以上3个阶段的划分,可以确定水库出流决策的部分或全部上界:

(1)起涨段和补偿段:防洪规划与实时调度的最大不同,就在于后者考虑了洪水预报进行预泄,而前者为了最大限度保证防洪安全并给后者留有余地,一般采取两种控泄措施:①下游不需要补偿时按入库流量控泄(起涨段);②下游需要补偿时控制出库流量不大于入库流量(补偿段)。因此,构建水库洪水补偿优化规划模型时,可以限制出库流量不超过入库流量。

(2)消落段:如果同样限制出库流量不超过入库流量,优化计算的水库出流势必将等于入流,水库水位会维持最高水位不变。对于防洪规划模型,这种结果不影响防洪库容的大小;而对于实时调度模型,也不影响占用防洪库容的大小,至于水库消落过程,可以根据兴利要求、考虑泄流设施运用限制,采用兴利优化生成或交互方法拟定。因此,为方便表达RFCR-LP模型的目标函数,消落段也可以入库流量作为出库流量的上界。

2 水库防洪补偿调节线性规划模型(RFCR-LP)

2.1 目标函数

对于一个水库和下游单个防洪控制点所组成的基本防洪系统,可采用(占用)水库防洪库容最小为准则

的目标函数, 即

$$V_{\min}^* = \min \{ \max \{ V_2, V_3, \dots, V_{T+1} \} \} \quad (1)$$

式中: V_{\min}^* 为水库洪水调节所需(占用)最小防洪库容, m^3 ; T 为洪水过程总时段数; $V_{t+1} (t=1 \sim T)$ 为 t 时段末水库蓄水量, m^3 。

基于以上水库出流决策上界确定方法, 可以将式(1)转换为以下等价目标函数:

$$V_{\min}^* = \min \left\{ \Delta t \sum_{t=1}^{T+1} [I_t - O_t] \right\} \quad (2)$$

式中: Δt 为时段长, s ; I_t 、 O_t 分别为 t 时段初水库的入库和出库流量, m^3/s 。

由此可见, V_{\min}^* 为入库、出库流量过程所包围的最小面积(预泄时段面积为负值)。式(2)较式(1)的优越之处在于可以避免目标函数引起的后效性、易于采用常规多阶段优化技术求解数学模型。

2.2 约束条件

(1) 水库水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + [I_t - O_t] \Delta t \quad (\forall t) \quad (3)$$

(2) 出库流量可操作性约束 需要避免出库流量过程剧烈振荡或出流变幅过大, 以保障水库泄流设施安全运行和下游河道冲刷威胁堤防安全时, 可设置如下约束:

$$|O_{t+1} - O_t| \leq \Delta O \quad (\forall t) \quad (4)$$

式中: ΔO 为任一时段水库出流的最大允许变幅, m^3/s 。

(3) 水库补偿时效性(调度灵活性)约束 对于任意一场洪水, 水库补偿调节历时与补偿期间最小出库流量成正比。因此, 通过设置水库补偿调节期间最小出库流量(可调参数)约束, 可以控制水库调洪效果:

$$O_t \geq O_{\min} \quad (t \in T_{o_{\min}} \sim T_2) \quad (5)$$

式中: O_{\min} 为补偿段水库最小出库流量, m^3/s ; $T_{o_{\min}}$ 为控制最小出库流量起始时间(初始可设为 T_1)。

(4) 水库泄流能力约束 对于实时洪水调度的起涨段和补偿段, 水库出流量应满足泄流能力约束, 并代入式(3):

$$O_t \leq f_{sl}(V_t) \quad (t = 1 \sim T_2) \quad (6)$$

式中: $f_{sl}(\cdot)$ 为水库泄流能力曲线。

(5) 相对入流的出库流量约束

$$O_t \leq I_t \quad (\text{实时调度: } t = T_2 \sim T + 1; \text{ 防洪规划: } t = 1 \sim T + 1) \quad (7)$$

(6) 防洪控制点安全泄流约束

对于脉冲入流的河道洪水演算方法, 具有如下约束:

$$Q_t = \tilde{\alpha}^0 \tilde{O}_t^T + \sum_{k=1}^K \tilde{\alpha}^k (\tilde{q}_t^k)^T + q_t \leq Q_{\text{an}} \quad (\forall t) \quad (8)$$

式中: Q_{an} 、 Q_t 分别为防洪控制点的安全流量和 t 时段初合成流量, m^3/s ; $\tilde{O}_t = (O_t, O_{t-1}, \dots, O_{t-n_o+1})$ 、 $\tilde{\alpha}^0 = (\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_{n_o}^0)$ 分别为水库出流向量及水库出流演算至防洪控制点的河道汇流系数(个数为 n_o)向量; $\tilde{q}_t^k = (q_t^k, q_{t-1}^k, \dots, q_{t-n_k+1}^k)$ 、 $\tilde{\alpha}^k = (\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_{n_k}^k)$ 分别为第 $k (= 1 \sim K)$ 支流控制站流量向量及相应演算至防洪控制点的河道汇流系数(个数为 n_k)向量; q_t 为无控制站的其他区间入流量, m^3/s 。

对于其他入流演算方法, 河道汇流系数应转换成脉冲入流的河道汇流系数。

(7) 非负约束

$$V_t, O_t \geq 0 \quad (\forall t) \quad (9)$$

2.3 优化模型组建方法

以式(2)为目标函数, 式(8)、式(9)为基本约束, 通过以上其他约束条件的组合, 可以组建不同情形下的水库洪水补偿调节数学模型, 以适应水库防洪规划与实时调度各阶段所需, 主要包括:

- (1) 针对防洪规划或实时调度不同, 增加式(7)并确定相应时域;
- (2) 如果具有泄流能力曲线, 增加式(3)、式(6)约束; 如果无泄流能力曲线或泄流能力足够大(即不必考虑泄流能力约束)时, 可以去掉式(9)中 $V_i \geq 0$ 约束(即不必计算水库蓄水量 V_i , 而由最优解 O_i^* 计算得到);
- (3) 当水库出流过程振荡或变幅过大, 可增加式(4)约束;
- (4) 希望生成多种防洪规划或实时调度方案时, 可增加最小出库流量约束式(5), 因为 O_{\min} 越大, 水库补偿控泄起始时间越早, 越有利于采取预报偏小的补救措施, 因此, 防洪调度越安全。

由此可见, RFCR-LP 不仅实现了水库防洪规划与实时调度优化数学模型的统一, 而且基本形成了覆盖水库全周期(防洪规划各阶段及实时调度)、适应可操作性(可调参数 ΔO)和灵活性(可调参数 O_{\min})要求的洪水优化补偿调节模型。

2.4 优化数学模型求解方法

对于水库出流决策可行域, 可通过上、下边界进行分析:

- (1) 下边界: 式(9)中 $O_i \geq 0$ 形成其下边界, 如果增加约束式(5), 则合成为阶梯状的下边界。
- (2) 上边界: 式(7)是消落段的上边界, 同时也是防洪规划问题起涨段和补偿段的上边界; 如果包含式(6), 则由式(7)与其他约束耦合形成联动的动态上边界, 从式(8)可以看出, t 时刻防洪控制点合成流量 Q_t 均与前期水库泄流过程有关, 而从式(4)可知, 当前时段决策与前后相连时段决策有关, 因此, 出库流量可操作性和河道洪水演进约束是造成水库洪水补偿调节多阶段决策优化算法(除线性规划外)后效性的直接原因, 从而导致现有构模方法难以实现全局最优。

如果包含水库泄流能力约束可进行线性化处理^[18], 则以上各种情形下的优化数学模型就是典型的线性规划模型, 具有得到全局最优解且算法稳定的 LP 求解方法(可应用 Matlab 等软件)。由于没有水库蓄水量上限约束, 只要区间入流未超出防洪控制点安全泄量且水库补偿调节期间最小出库流量 O_{\min} 给定合适, 就一定存在最优解, 理由在于:

- (1) 如果区间入流已经造成防洪控制点超载, 水库只能起到减少洪灾损失的作用; 否则, 由于没有水库蓄水量上限约束, 水库很少泄流或不泄流都是数学模型的可行解;
- (2) 当给定最小出库流量 O_{\min} 约束时, 在起涨段和补偿段的部分时段可能造成式(5)与式(6)、式(7)之间形成矛盾约束(可行域为空集)。对于给定的 O_{\min} , 如果出现无解的情况, 可以推迟 $T_{O_{\min}}$ 。

3 实例研究

如上所述, 本文建立的 RFCR-LP 适应情形很多, 这里仅以亭子口水库防洪库容推求为例, 进行模型的应用研究。

3.1 系统概况

亭子口水库控制了嘉陵江中游地区洪水的主要来源, 提高嘉陵江中下游地区防洪能力是亭子口水库重要的工程任务之一, 其坝址控制流域面积为 61 089 km², 占防洪控制点南充以上流域面积的 81.4%。亭子口至南充 449 km 河段可分为二段, 亭子口至南部区间面积为 6 605 km², 区间较大支流东河从左岸汇入; 南部到南充区间面积为 8 119 km², 区间较大支流西河从右岸汇入, 如图 2 所示。南充市防洪标准为 50 年一遇, 安全泄流量为 25 100 m³/s, 水库出流和支流入流的河道汇流演算方法采用长办汇流曲线^[19]。

该防洪系统具有水库和区间不同遭遇组合的 3 种典型设计洪水: 峰高量大的“56.6”型洪水、全流域峰高尖瘦(量不是很大)的

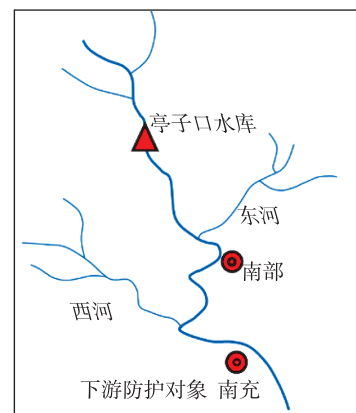


图 2 亭子口水库防洪系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of flood control system of Tingzikou Reservoir

“81.7”型洪水及水库以上来水较小、区间入流较大的“73.9”型洪水(表 1 所示)。

3.2 亭子口水库防洪库容推求

以南充市为防洪对象, 根据以上 3 种典型设计洪水推求亭子口水库的防洪库容属于典型的防洪规划问题, 因此, 这里不考虑水库泄流能力和可操作性约束, 首先只考虑式(7)、式(8)及式(9)的 $O_i \geq 0$ 约束, 应用 RF-CR-LP 可推求亭子口水库相应的最优防洪库容、出流过程及南充合成流量过程, 并与固定泄流调度方式进行对比(如表 2、图 3 所示)。

表 1 各典型洪水的洪峰流量组成 m^3/s

Table 1 Flood peak flow of different typical flood

洪型	南充	亭子口	亭子口—南部区间	南部—南充区间
“56.6”	31 530	22 370	10 980	6 080
“73.9”	32 790	20 290	17 630	7 520
“81.7”	32 170	25 300	9 020	5 990

表 2 3 种典型设计洪水调洪计算结果

Table 2 Results of three typical design flood routing

洪型	防洪调度方式	最大下泄流量/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	最大削峰/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	控制点洪峰/ $(m^3 \cdot s^{-1})$	防洪库容/亿 m^3
“56.6”	补偿调节	21 300	1 090	25 100	5.595
	固定泄流	12 400	9 970	25 000	7.226
“81.7”	补偿调节	24 700	577	25 100	6.057
	固定泄流	13 700	11 600	25 100	7.238
“73.9”	补偿调节	16 500	3 800	25 100	7.773
	固定泄流	6 200	14 100	25 000	11.74

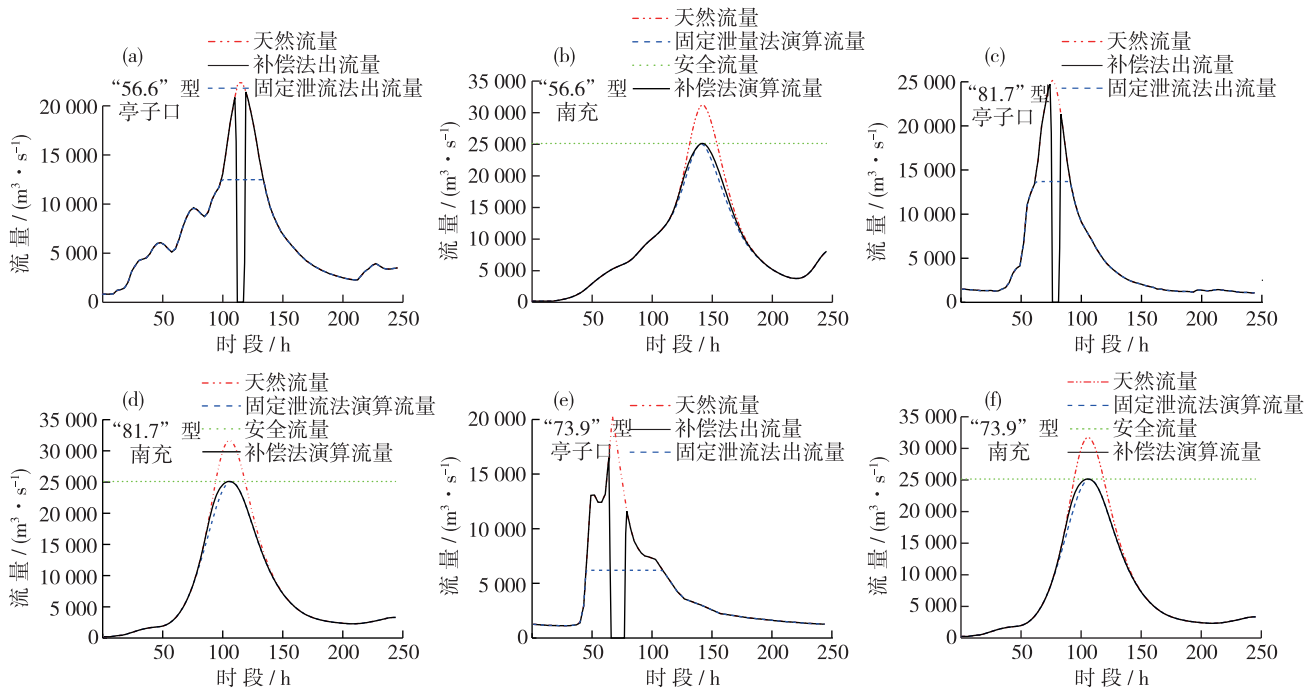


图 3 3 种典型洪水的亭子口水库出入库流量和南充流量过程

Fig. 3 Inflow and outflow of Tingzikou Reservoir and flow process at Nanchong station of three typical flood

对于 3 种典型设计洪水, 亭子口最优泄流决策均为补偿期间采取不泄流的错峰调度方式。由此可见, 该模型为生产实践中常用的错峰调度方式找到了科学依据。为了探讨错峰调度方案的多样性, 以“56.6”洪水为例, 再增加式(5)约束, 可以研究补偿时间和所需防洪库容随出流下限的变化规律。在补偿调节最小控泄流量(0)和固定泄流控泄流量($12 400 m^3/s$)之间, 选取若干流量作为出流下限流量, 求解结果如图 4—图 6 所示。

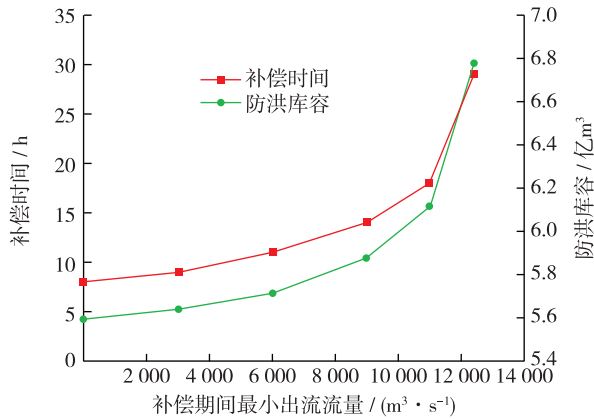


图4 不同出库流量下限约束的补偿时间和防洪库容
Fig. 4 Compensative time and flood-control volume with different lower limit on outflow

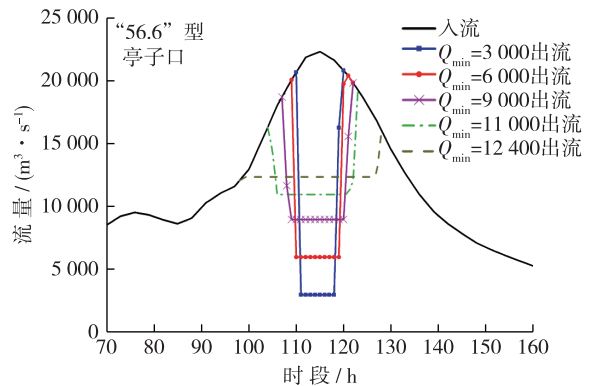


图5 不同出库流量下限约束的亭子口出库流量过程
Fig. 5 Outflow process of Tingzikou Reservoir with different lower limit on outflow

如果增加式(4)的可操作性约束, 水库出流过程(图5)将呈现为流量增减不超过 ΔO 的阶梯状过程, 限于篇幅, 这里不再讨论。

针对实例防洪系统, 计算成果揭示了如下规律:

(1) 补偿(错峰)调度具有无穷多种方案。各方案的防洪库容是在不同限制条件(最小出库流量)下的最优解, 不能直接比较防洪库容的大小, 而属于方案评价研究范畴。

(2) 水库对防洪控制点的补偿效果随出库流量下限的变化不敏感。从图5可见, 不同下限流量之间的水库出流过程差别很大, 但在防洪控制点形成的流量过程十分接近(图6), 即防洪控制点非常近似的流量过程可以对应水库差别很大的不同出流过程, 由此验证了反推方法难以推求水库出流过程的缺陷。

(3) 随着出库流量下限的增加, 防洪库容和补偿时间逐步增大(且固定泄流方式是错峰调度方式的上界), 但起调流量(开始泄流时对应的入库流量)逐步降低, 这有利于提高实时防洪调度安全性(图4和图5)。

由此可见, 实例防洪系统显现的补偿(错峰)调度方案多样性, 对于综合制定多典型设计洪水的水库防洪调度规则提供了有利条件。

4 结 论

(1) 针对水库防洪调度实际, 合理进行水库调度决策阶段划分, 通过引入水库出流上下界约束构建了RFCR-LP, 其结构和求解计算简单, 易于实现, 具有较强的通用性、可操作性及灵活性。

(2) RFCR-LP不仅实现了水库防洪规划与实时调度优化数学模型的统一、避免了生产实践中常规简化调度方式的选择难题, 而且基本形成了覆盖水库全周期的多功能水库洪水优化补偿调节模型。

(3) RFCR-LP借助于线性规划模型求解方法的优越性, 实现了水库调控决策和河道洪水演进的完全耦合, 避免了常规多阶段决策优化方法后效性问题, 保证了水库防洪补偿调节模型求解的全局最优。

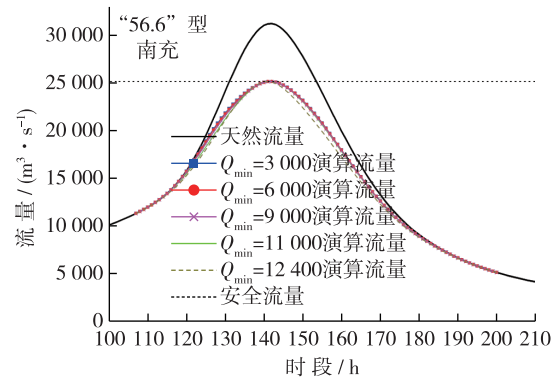


图6 不同出库流量下限约束的南充流量过程
Fig. 6 Outflow process of Nanchong station with different lower limit on outflow

(4) 实例系统多典型设计洪水的应用均取得了预期效果,表明该模型对于不同典型洪水均具有适用性和稳定性;在不具备补偿调节条件(水库距防洪断面远,区间汇流快)时,本模型也能获得合理有用的结果。

(5) RFCR-LP 为复杂防洪系统洪水优化补偿调节提供了一种行之有效的解决方案。

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: 93-111.
- [2] 艾学山,陈森林. 水库群洪水补偿调度的通用模型研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2002, 35(3): 17-19. (AI X S, CHEN S L. Study on universal model of flood control compensative dispatching for reservoir group[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002, 35(3): 17-19. (in Chinese))
- [3] 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, 40(12): 1446-1450. (ZHONG P A, XIE X Y, TANG L, et al. A compensative operating model for multi-reservoir based on the allocation of excess water[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 40(12): 1446-1450. (in Chinese))
- [4] 李玮,郭生练,郭富强,等. 水电站水库群防洪补偿联合调度模型研究及应用[J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 826-831. (LI W, GUO S L, GUO F Q, et al. Real time dynamic compensated storage control model for cascade reservoirs[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(7): 826-831. (in Chinese))
- [5] 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 B Y, ZHONG P A, CHEN J, et al. Coordinated optimal operation model of complex flood control system[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 560-571. (in Chinese))
- [6] 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算法[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 869-876. (WANG S, CHENG C T, LI B J, 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))
- [7] 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 L Q, YI S Z. Optimal flood dispatch model for multi-reservoir system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(6): 38-42. (in Chinese))
- [8] 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 A Q, ZHANG J Y, ZHONG Z Y, 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))
- [9] 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 W L, SONG L X, XING L H, 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))
- [10] 邹强,王学敏,李安强,等. 基于并行混沌量子粒子群算法的梯级水库群防洪优化调度研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(8): 967-976. (ZOU Q, WANG X M, LI A Q, et al. Optimal operation of flood control for cascade reservoirs based on parallel chaotic quantum particle swarm optimization [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(8): 967-976. (in Chinese))
- [11] YI J, LABADIE J, STITT S. Dynamic optimal unit commitment and loading in hydropower system[J]. *Water Resources Planning Management*, 2003, 129(5): 388-398.
- [12] 杨斌斌,孙万光. 改进 POA 算法在流域防洪优化调度中的应用[J]. *水电能源科学*, 2010, 28(12): 36-39, 115. (YANG B B, SUN W G. Application of modified progressive optimality algorithm to river basin flood control [J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(12): 36-39, 115. (in Chinese))
- [13] KUMAR D N, BALIARSINGH F, RAJU K S. Optimal reservoir operation for flood control using folded dynamic programming[J]. *Water Resource Management*, 2010, 24(6): 1045-1064.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 鲁子林. 水库防洪补偿调节流量反演方法探讨[J]. *水利经济*, 1992(2): 65-69. (LU Z L. Research on the inversion method of reservoir flood control compensation flow[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 1992(2): 65-69. (in Chinese))

- [17] 钟平安, 张慧, 邴建平, 等. 河道洪水反流向演算过程迭代方法[J]. 水文, 2007, 27(2): 37-39. (ZHONG P A, ZHANG H, BING J P, et al. The process iteration method of flood inverse routing in river channel[J]. Journal of China Hydrology, 2007, 27(2): 37-39. (in Chinese))
- [18] 吴杰康, 郭壮志, 秦砺寒, 等. 基于连续线性规划的梯级水电站优化调度[J]. 电网技术, 2009(8): 24-29. (WU J K, GUO Z Z, QIN L H, et al. Successive linear programming based optimal scheduling of cascade hydropower station[J]. Power System Technology, 2009(8): 24-29. (in Chinese))
- [19] 李心铭, 罗钟毓. 论多点入流线性汇流方法[J]. 水利学报, 1986(3): 42-50. (LI X M, LUO Z Y. Multi-spots inward flow linear afflux method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986(3): 42-50. (in Chinese))

Development and application of a compensative regulation linear programming model for reservoir flood-control *

CHEN Senlin^{1,2}, LI Dan², TAO Xiangming², HUANG Yuhao³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Guangxi Water & Power Design Institute, Nanning 530023, China)

Abstract: Flood compensative regulation is the fundamental principle of reservoir flood-control planning and real-time operation, while the solution to the flood compensative regulation mathematical model is heavily restricted by the modeling methods and the aftereffect. In a basic flood control system consisting of a reservoir and a flood control station, the objective function transforms from minimizing the flood control volume to minimizing the cumulative water storage. The transformation is based on the stage division of operation and the analysis of outflow limits upon which a linear programming model of Reservoir Flood Compensative Regulation (RFCR-LP) has been established. This model couples the operational decisions and downstream routing methods, which avoids the aftereffect accompanying conventional methods for a multi-stage decision. The RFCR-LP is a simple structure that is easy to solve, and it unifies the optimal mathematical model between flood-control planning and real-time operation, which forms a multi-function and full-cycle model for reservoir flood-control compensative regulation. The proposed model promotes an efficient solution for complex system modeling. The feasibility, flexibility and stability of the RFCR-LP has been verified by the case study.

Key words: compensative regulation; linear programming; aftereffect; couple; global optimum

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51479141) and the National Key R&D Program of China(No.2016YFC0402709).