

面向决策支持的复杂防洪系统多目标决策模型

杨侃,陈欣,张洪波,王兴泽

(河海大学水资源环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 以复杂的长江防洪系统联合调度问题为研究背景,应用大系统分解协调递阶求解原理和多目标权重方法,提出了子系统之间分解协调连接递阶结构的计算方法,建立面向决策支持的长江防洪系统的多目标联合调度模型.在考虑已建成的三峡水库及其他干支流水库的基础上,将边界定为从长江上中游干支流水库至汉口河段,并运用 1931 年、1935 年和 1954 年资料进行模拟仿真验证.研究表明,该模型不仅考虑了防洪系统的多目标性、系统的拓展性和防洪系统各个水库的可操作性,而且考虑了防洪系统整体目标,同时可调整有关目标函数权重参数进行各个目标的权衡分析,可以生成面向决策支持的长江防洪系统联合调度多方案.

关键词 防洪系统 分解协调 多目标 长江流域

中图分类号 P333 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)06-0622-05

长江中下游是长江流域洪灾最频繁、最严重的地区,该地区的洪灾情况取决于长江流域整个防洪系统联合调度决策,因此,研究长江防洪系统优化调度具有重要的意义.自国家“八五”攻关项目实施以来,出现了一些相关研究成果^[1~5],但许多问题需要进一步研究.长江防洪具有水系复杂、防洪目标多、在建和规划兴建的水库多等特点,用常规调度方法难以奏效.长江防洪系统联合调度问题实际上是一个特大系统多目标的决策问题.本文综合大系统分解协调递阶求解原理和多目标权重方法,以已有成果为基础,建立了面向决策支持的长江防洪系统的多目标联合调度模型.

本文研究的边界定为从长江上中游干支流水库至汉口河段^[1].除三峡水库外,上游考虑雅砻江的二滩水库、岷江的紫坪铺水库、嘉陵江的亭子口水库、乌江的构皮滩水库;中游考虑清江的隔河岩水库、沅江的五强溪水库、资水的柘溪水库、澧水的江垭水库、长江中游有关堤防和分蓄洪区.分洪区分为两片:一是荆江分洪区;二是城陵矶附近地区(包括洞庭湖分洪区和洪湖分洪区).

1 长江防洪系统联合调度数学模型

长江防洪系统联合调度运行的总体目标是在满足荆江防洪标准百年一遇、千年一遇洪水能安全行洪的前提下,使城陵矶附近地区分洪量尽量减少^[1].

1.1 系统总体目标函数

$$X = \min \left[A_1 \sum_{t=1}^n F_{1,t} + A_2 \sum_{t=1}^n F_{2,t} + A_3 \sum_{t=1}^n F_{3,t} + A_4 \sum_{t=1}^n F_{4,t} \right] \quad (1)$$

式中: A_1, A_2, A_3, A_4 ——荆江分洪区、洞庭湖分洪区、洪湖分洪区、武汉附近地区蓄洪量罚因子系数; $\sum F_{1,t}, \sum F_{2,t}, \sum F_{3,t}, \sum F_{4,t}$ ——荆江分洪区、洞庭湖分洪区、洪湖分洪区、武汉附近地区一次洪水过程中的累积分洪量.

1.2 各水库防洪目标函数

单个水库防洪优化调度,主要考虑两个方面:一是水利枢纽安全和尽量均匀泄洪,满足水库运行管理可操作性;二是最大限度地发挥水库防洪库容的作用,达到泄洪量最小,这样可达到最大削减洪峰的作用.防洪

收稿日期 2004-04-29

基金项目 国家自然科学基金资助项目(49701003);国家自然科学基金重点资助项目(50099620);河海大学科技创新基金资助项目(2003408143)

作者简介 杨侃(1965—),男,江苏苏州人,副教授,主要从事水资源规划管理研究.

系统内各水库的防洪目标函数为^[2]

$$Y_i = \min \sum_{i=1}^n \{ \varphi_i(t)^2 + \min [Q_{ai} - D_i(t)]^2 \}$$

(2)

式中： Q_{ai} ——第 i 水库的下游河道安全泄量； $D_i(t)$ ——第 i 水库的泄水量。各水库的运行约束条件见文献^[1]。

2 模型求解

由式(1)、(2)和各水库运行的约束条件等构成了长江防洪系统多目标防洪调度模型

$$Z = X + \sum_{i=1}^9 Y_i$$

(3)

可用权重法将多目标问题转化为单目标问题,构造成以下目标函数：

$$\begin{aligned} \min :L_R &= \gamma_1 \sum_{i=1}^4 A_i \sum_{t=1}^n F_i(t) + \gamma_2 \sum_{i=1}^9 \sum_{t=1}^n \{ \varphi_i(t)^2 + \min [Q_{ai} - D_i(t)]^2 \} \\ \min :L_R &= \sum_{i=1}^n (\gamma_1 \sum_{i=1}^4 A_i F_i(t) + \gamma_2 \sum_{i=1}^9 \{ \varphi_i(t)^2 + \min [Q_{ai} - D_i(t)]^2 \}) \\ \min :L_R &= \sum_{i=1}^n L_{Si} \end{aligned}$$

其中

$$L_{Si} = \gamma_1 \sum_{i=1}^4 A_i F_i(t) + \gamma_2 \sum_{i=1}^9 \{ \varphi_i(t)^2 + \min [Q_{ai} - D_i(t)]^2 \}$$

(4)

式中： γ_1, γ_2 ——权重系数， $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ ； n ——时段长。通过改变权重系数和蓄洪量罚因子系数，即可求出相应的协调解，这是多生成方案的基础。

2.1 求解思路

为便于求解问题,将长江防洪系统进行概化处理 and 系统分解,系统概况如图 1 所示,其中 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8$ 和 S_9 分别代表二滩水库、紫坪铺水库、亭子口水库、构皮滩水库、三峡水库、隔河岩水库、江垭水库、五强溪水库和柘溪水库； C_1, C_2, C_3 和 C_4 分别代表宜昌、沙市、城陵矶和武汉控制节点； F_1 和 F_2 分别代表荆江和城陵矶附近

分蓄洪区； H_1 代表洞庭湖区,长江流域三峡水库以上属上游段,三峡水库至武汉之间属中游段。

将三峡以上的 4 座水库作为一个子系统,简称子系统 1。将三峡水库和隔河岩水库(S_5, S_6) 看成一个子系统,简称子系统 2。将洞庭湖水系三库(S_7, S_8 和 S_9) 作为一个子系统,简称子系统 3。长江中下游比降平缓、河湖纵横、水系复杂,在现状情况下,当发生成灾特大洪水时,为了保证重要地区的防洪安全,在荆江分洪区、洞庭湖分洪区、洪湖分洪区、武汉附近地区一系列地区要分蓄超额洪量。客观地反映洪水在河湖中的演进以及分蓄洪区对洪水的吐纳十分困难。为了将洪水演进引入调度,进行快速计算实时决策,在长江中下游采用多年研究的大河段槽蓄曲线法成果,即从宜昌至武汉分为 3 段^[1]。将长江干流宜昌河段以下至武汉河段水流演进作为一个子系统,简称子系统 4。该系统包括各个分蓄洪区的流量计算。子系统 4 具有调节作用的协调变量主要是从子系统 2 和子系统 3 进入子系统 4 的入流。

在整个长江防洪系统内,子系统 1 和子系统 2 之间存在的调度结构具有子系统之间分解协调连接递阶结构,即子系统 1 和子系统 2 内的构件关联,因此系统比较复杂。文献^[3]对防洪系统分解协调方法进行了一定的研究和讨论,本文在此基础上,针对长江防洪调度系统,提出了子系统之间分解协调连接递阶结构的计算方法,并应用于长江防洪系统实例计算。

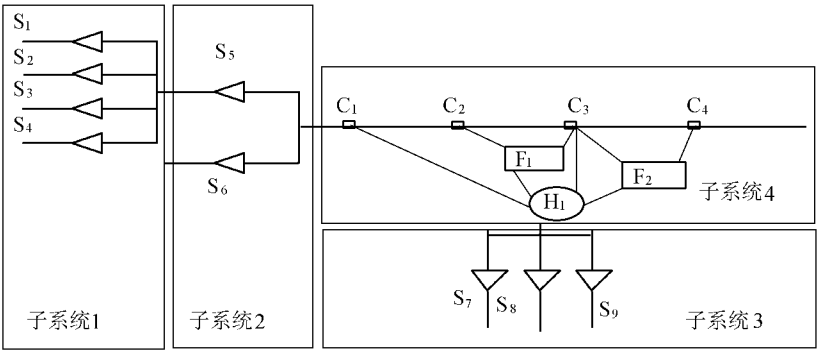


图 1 长江防洪系统简图

Fig.1 Sketch of Yangtze Rive flood control system

2.2 模型协调迭代求解方法

2.2.1 单库优化调度方式

长江防洪系统联合调度需要根据各子系统(或各水库)的入库洪水特性及相互遭遇情况,在假定历史洪水过程可能在未来重现的条件下,根据不同典型年各水库、河道区间的实际过程,先建立单一水库的防洪优化调度模型,求得满足各水库自身入库洪水特性和下游防洪安全出流的泄洪优化调度方式,然后再考虑长江防洪系统的总体防洪目标^[2].

2.2.2 整体协调层求解

在各水库优化调度方式已经初步计算的情况下,考虑长江防洪系统总体防洪目标的协调,整体协调层主要在子系统 4 中,即以长江干流宜昌河段以下至汉口河段水流演进子系统为整体协调层,以子系统 2 和子系统 3 的泄洪流量为协调变量,以子系统 4 的演进模型为基础,求得长江中下游各控制点的组合洪水过程,以及各分蓄洪区的分洪量,根据系统总体的防洪目标值进行迭代,并按一定规则进行反馈,重新修正子系统 2 和子系统 3 的泄洪约束.如此反复进行迭代,直至总体目标迭代满足一定的精度要求.

2.2.3 系统 2 的迭代方式

子系统 2 主要是由三峡水库和隔河岩水库组成并联水库系统,其系统的出流为子系统 4 的入流.经过三峡水库和隔河岩水库调节到达子系统 4 的流量,即流入 C_1 的流量为

$$q_{C_1}(t) = \sum_{k=1}^{w_{S_5,C_1}} Q_{S_5}(t - w_{S_5,C_1} + k) P_{S_5}(w_{S_5,C_1} - k + 1) + \sum_{k=1}^{w_{S_6,C_1}} Q_{S_6}(t - w_{S_6,C_1} + k) P_{S_6}(w_{S_6,C_1} - k + 1) + \sum_{k=1}^{w_{T_2,C_1}} Q_{T_2}(t - w_{T_2,C_1} + k) P_{T_2}(w_{T_2,C_1} - k + 1) \quad (5)$$

式中: q_{C_1} ——子系统 4 的入流量之一,即 C_4 的河段流量; Q_{S_5}, Q_{S_6} ——水库 S_5, S_6 的出库流量; Q_{T_2} ——由子系统 2 进入子系统 4 的其他区间入流; $P_{S_5}, P_{S_6}, P_{T_2}$ ——由 S_5, S_6 和 T_2 (子系统 2)至 C_4 (节点 4)的河道演算系数; $w_{S_5,C_1}, w_{S_6,C_1}, w_{T_2}$ ——河道演算时段.

由式(1),(2)和各水库运行约束条件等组成目标函数和约束条件,由此构成多目标问题,采用多目标权重法将多目标问题转化成单目标问题,设 $\lambda(t)$ 和 $\mu_k(t)$ 为朗格拉日乘子,从而构造朗格拉日函数.

$$L_g = L_R + \sum_{t=1}^n \lambda(t) \left[\sum_{j=S_5}^{S_6} \sum_{k=1}^{w_{j,C_1}} Q_j(t - w_{j,C_1} + k) P_j(w_{j,C_1} - k + 1) + \sum_{k=1}^{w_{T_2,C_1}} Q_{T_2}(t - w_{T_2,C_1} + k) P_{T_2}(w_{T_2,C_1} - k + 1) - q_{C_1}(t) \right] + \sum_{j=S_5}^{S_6} \sum_{t=1}^n \mu_j(t) \left[I_j(t) - Q_j(t) - \frac{V_j(t+1) - V_j(t)}{\Delta t} \right] \quad (6)$$

将 $\lambda(t)$ 和 $q_{C_1}(t)$ 作为协调变量,用协调计算可以确定其值,由式(6)可推导出以下分离格式:

$$L_g = L_R + \sum_{j=S_5}^{S_6} \left[\sum_{t=1}^n \lambda(t) \sum_{k=1}^{w_{j,C_1}} Q_j(t - w_{j,C_1} + k) P_j(w_{j,C_1} - k + 1) \right] + \text{常量}$$

子系统 2 内各水库有如下优化问题:

$$\min : L_{y,j} = L_{R,j} + \sum_{t=1}^n \lambda(t) \sum_{k=1}^{w_{j,C_1}} Q_j(t - w_{j,C_1} + k) P_j(w_{j,C_1} - k + 1)$$

因此将子系统 2 优化问题分解成 2 个子问题求解.在子系统 2 的协调级有

$$\frac{\partial L_g}{\partial \lambda(t)} = 0$$

得

$$q_{C_1}^{(k+1)}(t) = \sum_{j=S_5}^{S_6} \sum_{k=1}^{w_{j,C_1}} Q_j^{(k)}(t - w_{j,C_1} + k) P_j(w_{j,C_1} - k + 1) \quad (7)$$

根据

$$\frac{\partial L_g}{\partial q_{C_1}}(t) = \frac{\partial L_g^{(k)}}{\partial q_{C_1}^{(k)}}(t) - \lambda(t) = 0$$

得到

$$\lambda^{(k+1)}(t) = \frac{\partial L_g}{\partial q_{C_1}^{(k)}}(t) \tag{8}$$

式(7)和式(8)为协调变量 $\lambda(t)$ 和 $q_{C_1}(t)$ 的迭代格式. 从式(8)可以看出, $\lambda(t)$ 为单位下泄量所引起的目标函数的损失量, 将式(8)变换为差分格式以便于求解.

$$\lambda^{(k+1)}(t) = \frac{\Delta L_g}{\Delta q_{C_1}^{(k)}}(t) = \frac{L'_g - L_g^{(k)}}{q'_{C_1} - q_{C_1}^{(k)}} \tag{9}$$

迭代的收敛指标可以选用 $|L'_g - L_g^{(k)}| \leq \xi$, ξ 为计算精度.

2.2.4 子系统 1 的迭代方式

子系统 1 主要由二滩水库、紫坪铺水库、亭子口水库、构皮滩水库组成并联水库系统, 其系统的出流为子系统 2 的入流(即三峡水库入流). 经过子系统 2 调度进入子系统 4, 从而影响总体防洪目标. 经过 S_1, S_2, S_3 和 S_4 调节到达三峡水库的流量为

$$q_{S_5}(t) = \sum_{j=S_1}^{S_5} \sum_{k=1}^{w_{j,S_5}} Q_j(t - w_{j,S_5} + k) P_j(w_{j,S_5} - k + 1) + \sum_{k=1}^{w_{T_1,S_5}} Q_{T_1}(t - w_{T_1,S_5} + k) P_{T_1}(w_{T_1,S_5} - k + 1)$$

式中: q_{S_5} ——子系统 2 的入流量, 即三峡水库的入流量; $Q_{S_1}, Q_{S_2}, Q_{S_3}, Q_{S_4}$ ——水库 S_1, S_2, S_3 和 S_4 的出库流量; Q_{T_1} ——由子系统 1 进入子系统 2 的其他区间入流; $P_{S_1}, P_{S_2}, P_{S_3}, P_{S_4}, P_{T_1}$ ——由 S_1, S_2, S_3, S_4 和 T_1 (子系统 1) 至 S_5 的河道演算系数; $w_{S_1,S_5}, w_{S_2,S_5}, w_{S_3,S_5}, w_{S_4,S_5}, w_{T_1,S_5}$ ——河道演算时段.

根据同样原理, 可以得到下列协调方程, 并用同样方法进行求解.

$$q_{S_5}^{(k+1)}(t) = \sum_{j=S_1}^{S_5} \sum_{k=1}^{w_{j,S_5}} Q_j^{(k)}(t - w_{j,S_5} + k) P_j(w_{j,S_5} - k + 1), \lambda^{(k+1)}(t) = \frac{\partial L_g}{\partial q_{S_5}^{(k)}}(t) \tag{10}$$

2.2.5 子系统 3 的迭代方式

子系统 3 主要是由五强溪水库、柘溪水库、江垭水库组成并联水库系统, 其系统的出流为子系统 4 的入流(即洞庭湖入流之一). 经过子系统 3 调度进入子系统 4, 从而影响总体防洪目标. 经过 S_7, S_8 和 S_9 调节到达三峡水库的流量为

$$q_{H_1}(t) = \sum_{j=S_7}^{S_9} \sum_{k=1}^{w_{j,H_1}} Q_j(t - w_{j,H_1} + k) P_j(w_{j,H_1} - k + 1) + \sum_{k=1}^{w_{T_3,H_1}} Q_{T_3}(t - w_{T_3,H_1} + k) P_{T_3}(w_{T_3,H_1} - k + 1)$$

式中: q_{H_1} ——子系统 3 的出流量, 即洞庭湖的入流量之一; $Q_{S_7}, Q_{S_8}, Q_{S_9}$ ——水库 S_7, S_8 和 S_9 的出库流量; Q_{T_1} ——由子系统 3 进入子系统 4 的其他区间入流; $P_{S_7}, P_{S_8}, P_{S_9}, P_{T_3}$ ——由 S_7, S_8, S_9, T_3 至 H_1 的河道演算系数; $w_{S_7,H_1}, w_{S_8,H_1}, w_{S_9,H_1}, w_{T_3,H_1}$ —— $P_{S_7}, P_{S_8}, P_{S_9}, P_{T_3}$ 相应的演算时段. 同理, 可以得到下列协调方程, 并用同样方法进行求解.

$$\left\{ \begin{aligned} q_{H_1}^{(k+1)}(t) &= \sum_{j=S_7}^{S_9} \sum_{k=1}^{w_{j,H_1}} Q_j^{(k)}(t - w_{j,H_1} + k) P_j(w_{j,H_1} - k + 1) \\ \lambda^{(k+1)}(t) &= \frac{\partial L_g}{\partial q_{H_1}^{(k)}}(t) \end{aligned} \right. \tag{11}$$

2.2.6 多目标分解协调递阶结构计算过程

长江防洪系统联合调度决策模型的计算过程如图 2

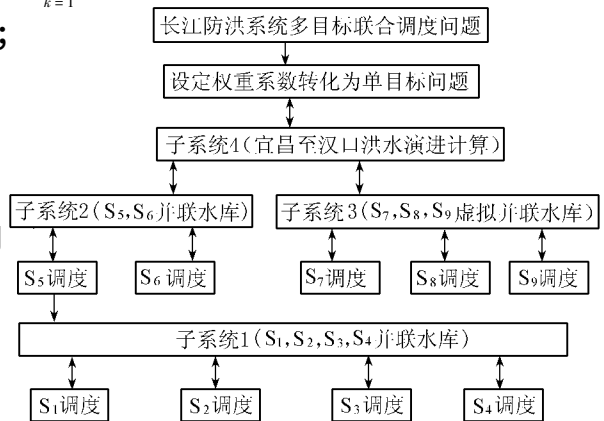


图 2 长江防洪系统的多目标分解协调递阶结构计算过程

Fig.2 Calculation diagram for multi-objective decomposition-coordination-recursion structure of Yangtze River flood control system

所示,根据需要设定几组权重值,权重的相对值可以确定分蓄洪区的补偿次序和各个水库的补偿次序.对某一组目标函数的权重用协调递阶结构计算模型求出协调解,单库寻优可以采用增量动态规划方法或 POA 方法进行求解,然后用模糊综合评判方法或纪录卡片法进行多方案选择^[4].

2.3 计算结果

根据上述算法,分别对 3 次完整的典型大洪水(1931 年、1935 年和 1954 年)进行模拟联合运行调度计算,由于篇幅关系,仅列出 1954 年一次调度过程的一个模拟方案的部分成果,如图 3 所示.该方案的条件是:将三峡水库防洪库容分为 3 部分^[1];上游支流水库防洪库容与其他水库一起,主要用于减小荆江地区和城陵矶附近地区的分洪量;三峡及其以下 4 库的防洪补偿顺序考虑三峡、隔河岩和洞庭湖 3 库.

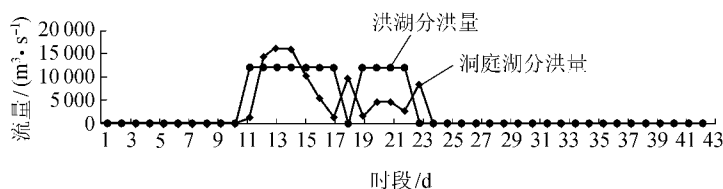


图 3 1954 年洪水模拟调度洞庭湖分洪区和洪湖分洪区分洪流量过程

Fig.3 Flood diversion hydrographs for Dongting Lake and Honghu Lake of 1954 by flood operation simulation

3 结 语

针对长江防洪调度系统的复杂性,提出了子系统之间分解协调连接递阶结构的计算方法,并应用于长江防洪系统实例计算.本文模型通过运用多目标权重法将多目标问题转化为单目标问题,通过改变权重系数和蓄洪量罚因子系数,可求出相应的协调解,根据权重的相对值可以确定分蓄洪区的补偿次序和各个水库的补偿次序,从而生成防洪调度多种方案,然后可用模糊综合评判方法或纪录卡片法进行多方案选择^[4],从而使模型面向长江防洪系统联合调度的决策支持,为长江防洪决策支持系统提供了一定的模型理论支持.

参考文献:

- [1] 《长江防洪系统实时调度研究》编委会. 长江防洪系统实时调度研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. 260—280.
- [2] 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): 58—63.
- [3] 黄志中. 流域防洪系统优化规划[D]. 南京: 河海大学, 1994.
- [4] 杨侃, 狄艳艳, 陈乐湘, 等. 流域防洪系统调度的多方案评价决策研究[J]. 水电能源科学, 2003, (2): 63—65.
- [5] 杨侃, 董增川, 张静怡. 长江防洪系统网络分析分解协调优化调度研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(3): 77—81.

Decision-making support-oriented multi-objective decision-making model for complex flood control system

YANG Kan, CHEN Xin, ZHANG Hong-bo, WANG Xing-ze

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract In consideration of the combined operation of the complicated Yangtze River flood control system, a calculation method was proposed for the decomposition-coordination-recursion structure between subsystems, and a decision-making support-oriented multi-objective combined operation model was developed for the Yangtze River flood control system. In the present study, the boundary of the studied area was determined from the reservoirs on the main and tributaries of the middle and upper Yangtze River to the Hankou section, with the Three Gorges Reservoir and other reservoirs having been built taken into account, and three typical large flood hydrographs (1931, 1935, and 1954) were used for simulation. The result shows that the model not only can take into account the characteristics of multiple objectives and expansibility of the flood control system, the maneuverability of each reservoir, and the integral objective of the flood control system, but also can perform tradeoff analysis for each objective by adjustment of weight parameters related, and formulate decision making support-oriented system regulation schemes.

Key words flood control system; decomposition and coordination; multiple objectives; Yangtze River Basin