

长江防洪系统实时洪水调度仿真模型研究

杨 侃,董增川,陈乐湘

(河海大学水文水资源及环境学院,江苏 南京 210098)

摘要 根据长江流域防洪系统问题,以‘先泄、后蓄、再分洪’为洪水调度原则,进行实时调度仿真模拟,并以长江流域 1954 年洪水为实例进行模拟验证.模型应用结果表明:应用信息反馈技术实施防洪系统实时调度时,将网络调度模型中节点之间的传播时间融合到网络时空结构中,调整了网络结构,减少了迭代次数和算时,且在网络结构中便于考虑上下游水库蓄放水时间空间差异的协调配合.宜昌至汉口的洪水演进由原来 3 段分为 6 段,从而计算精度得到提高.

关键词 长江 防洪系统 网络分析 实时校正

中图分类号 P333

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2001)02-0015-06

为进行长江实时洪水调度模拟,本文在文献[1]的基础上对长江防洪系统优化调度网络分析模型作进一步研究.研究系统在考虑三峡水库及其他干支流水库已建成的基础上,将边界定为从长江上中游干支流水库至汉口河段.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,以及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分洪区(包括洞庭湖分洪区和洪湖分洪区).其系统概化如图 1 所示.

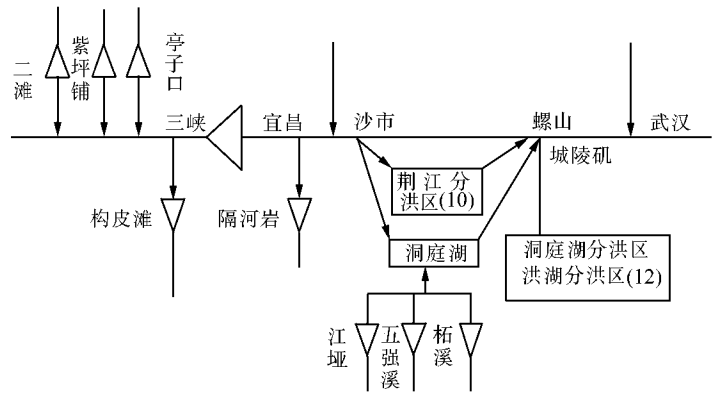


图 1 防洪系统计算范围

Fig.1 Range of flood prevention system

1 模型的总体设计

1.1 总体控制调度模型

以面临时段发布的各个站点的预报入流信息(如雅砻江二滩水库入流、岷江紫坪铺入流等)、防洪系统各个构件初始条件边界条件(如水库初始蓄量等)、卫星云图和气象信息、防洪系统确定的总目标、各水库分组补偿次序、防洪系统各构件约束(如水库水位变幅等)、三峡水库分级方案等作为系统总输入,调用防洪调度确定性模型库.在防洪调度确定性模型库中,选择网络分析优化调度模型软件或其他优化调度模型软件,通过优化调度模型和洪水演进模型的交互迭代计算,输出各防洪水库面临时段宏观决策、后期防洪效果、防洪系统洪水等级预估(由于三峡水库作为巨型水库,在整个防洪系统中作用举足轻重,所以将三峡水库规划方案在总体控制调度模型中一并考虑)、各分洪区宏观运作等方面的结果.

1.2 防洪系统个体构件的实时调度

由系统洪水等级预估确定三峡水库防洪调度方式,进行城陵矶水位预报和误差实时修正;根据防洪系统洪水等级预估确定沙市控制水位,从而计算确定枝江控制流量;由枝江控制流量根据水力学方法逆时序

演算确定三峡水库实时调度方式. 三峡水库预报入库流量的修正, 由系统洪水预估等级, 根据其他水库情况, 如果水库本身下游有局部防洪任务, 这时需要协调局部防洪目标和长江防洪系统总体防洪目标的关系, 按照类似补偿原理, 确定其他水库防洪调度方式, 进行水库预报入库流量的修正.

1.3 信息反馈

将三峡水库以及其他水库预报入库流量的修正信息和水库调度信息反馈到总体控制模型. 总体控制模型根据调整的结果, 作第 2 次计算. 如果计算结果与第 1 次结果基本吻合, 则进行下一时段调度计算; 反之, 则将计算结果宏观信息再反馈至各个体构件, 进行防洪系统构件的第 2 次计算, 调整面临时段的决策, 重复步骤 1.2 和 1.3, 采用多次信息反馈方法, 以处理当水文预报出现较大误差时的情况, 模型能自动提供应急情况处理方案.

整体系统构成了一个信息控制反馈系统(或称为闭环控制系统)(图 2).

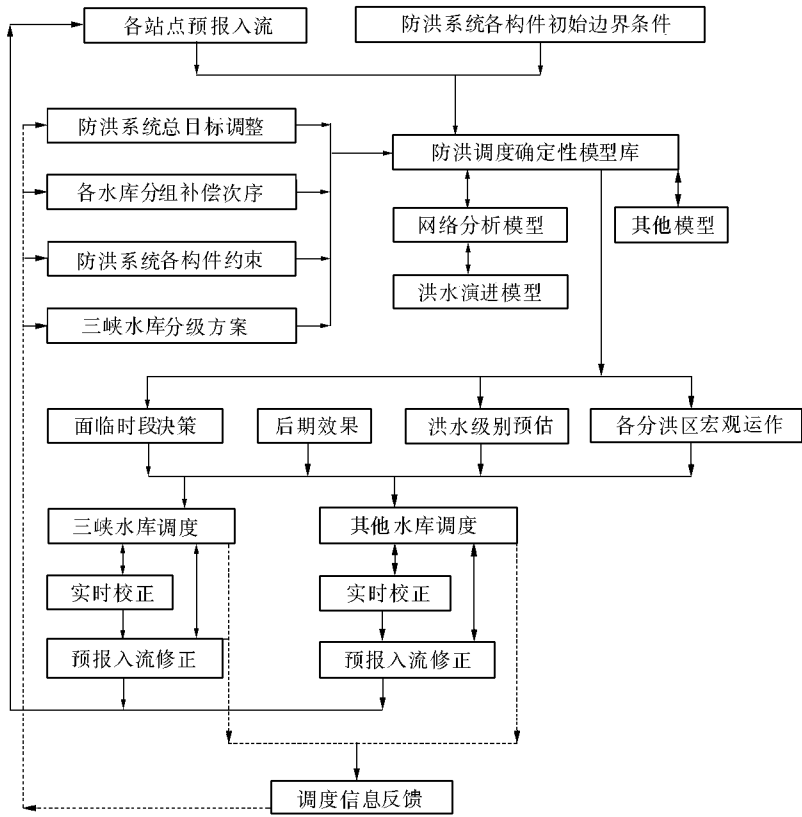


图 2 模型的总体设计
Fig.2 General design of the model

2 防洪系统优化调度模型的改进

2.1 网络分析模型的改进

2.1.1 长江流域防洪系统目标函数

$$Z = \min(A_{10} \sum_{t=1}^n F_{10,10,t} + A_{12} \sum_{t=1}^n F_{12,12,t}) \tag{1}$$

式中： A_{10}, A_{12} ——荆江分洪区和洞庭湖附近地区分洪区蓄洪量单价； $\sum F_{10,10,t}, \sum F_{12,12,t}$ ——荆江分洪区和洞庭湖附近地区分洪区一次洪水过程中的累积分洪量。

2.1.2 长江流域防洪系统约束条件

a. 弧上容量约束

$$C_{i,j}^1 \leq F_{i,j,t} \leq C_{i,j}^2 \tag{2}$$

式中： $C_{i,j}^1$ ——诸水库允许最小下泄流量(如发电装机容量)； $C_{i,j}^2$ ——诸水库下游河段允许最大泄量或水库泄洪设备允许最大下泄量。

b. 蓄水节点库容约束

$$0 \leq F_{i,i,t} \leq C_{i,i}^2$$

(3)

式中： $C_{i,i}^2$ —— i 水库防洪库容； $F_{i,i,t}$ —— t 时刻 i 水库蓄洪量。

c. 蓄水节点水量平衡

$$V_{j,t} - V_{j,t-1} = J_{j,t} + \sum_k Q_{k,t-\beta_k} - Y_{j,t}$$

(4)

式中： $J_{j,t}$ —— j 蓄水节点第 t 时段的预报入流； $Y_{j,t}$ —— j 蓄水节点第 t 时段的泄量； $V_{j,t}$ —— j 蓄水节点第 t 时段蓄量； $V_{j,t-1}$ —— j 蓄水节点第 $t-1$ 时段蓄量； $\sum_k Q_{k,t-\beta_k}$ ——所有在第 t 时段流到 j 蓄水节点的水量； β_k —— k 节点流达第 j 蓄水节点所需传播时间， k 为相应可行域。

图 3 是由长江防洪系统概化的网络时空结构图。图中每个方框对应于一个时段，每个方框中的弧流量就是河道的过水流量。这类弧称为过流弧。此外，由于水库的调蓄作用，时段初末水库状态可能发生变化。相邻方框间的弧流量则表示水库时段初末蓄水量的变化，这类弧称为蓄水弧。显然，非蓄水节点在不同方框间不存在流量。

在网络图中，相邻方框间相差一个时段，在以往建立的网络模型^[1~3]中，如果两个节点的传播时间有 N 个时段，那么非相邻方框间就存在弧。例如，如图 3 所示，如果相邻方框间时段相差 1 个时段，当 $t=1$ 时，如果从节点 5 至节点 9 的传播时间为 3 个时段，则第 1 层面 ($t=1$) 中的节点 5 与第 3 层面 ($t=3$) 中的节点 9 之间存在着弧联系。由此可见，以往网络模型结构中层面之间的联系颇为复杂，不仅存在相邻层面之间的弧，而且存在非相邻层面之间的弧。因此，在计算上造成诸多不便。为了克服上述不足之处，本文在原有模型^[1]基础上提出一种基于传播时间的网络分析防洪调度模型，即把传播时间融入网络层面中。该新网络分析防洪调度模型只存在相邻层面之间的弧，而不存在非相邻层面之间的弧。这样不仅网络结构概念更加明确，而且给计算带来方便。在建立基于传播时间的网络分析防洪调度模型之前，需要分析同一层面两两节点之间的传播时间，可以以该层面某一节点为基础，根据各节点之间的传播时间，推断出其余节点相对于基准节点的相对时间。因此，同一层面诸节点的绝对时间不同，但是相邻层面间时间差不变，由此构成一幅分层网络图。例如，以节点 9 为基准，可推算出其余各节点的相对时间。然后把库群运行的全过程用网络图表示出来。根据防洪调度原则，按照网络分析原理，将网络流取为流量或水量，网络图中，假想有一虚拟源和一虚拟汇，虚拟源与各时段(各层面)初始入流和第一时段各蓄水节点初始值相联，各时段层面出流和末了时段各蓄水节点与虚拟汇相联。如此一来，就把库群防洪系统调度问题转化为网络分析问题，即是研究如何把一定的流量（或水量）从虚拟源流向虚拟汇，在流入的过程中，需要满足各蓄水节点和非蓄水节点等约束条件，在调度期中使分洪损失减少到最小。

本文研究的防洪系统调度规则根据一般的库群防洪调度规程，当发生洪水时，首先尽可能通过河道下泄，然后运用水库防洪库容滞蓄洪水，最后在不得已的情况下，动用分蓄洪区蓄洪。将传播时间融入网络结构中，这样的网络空间结构较为清晰，在求解过程的迭代次数大为减少。当初始可行流给出后，逐点检查弧流量增广回路，最优性条件检验后，进行迭代求解，迭代的过程也是不断寻找新增广回路和退出旧的增广回路的过程。网络结构的改进为考虑上下游水库蓄放水时间空间差异的协调配合带来便利，因为网络分析模型迭代过程就是寻求上下游水库的联合决策以达到防洪系统的最佳防洪效果，计算流程如图 4 所示。

通过网络分析优化调度模型和洪水演进模型的交互计算迭代，输出各防洪水库面临时段宏观决策、后期防洪效果、防洪系统洪水等级预估结果、各分洪区宏观运作方案。显然，由于长江防洪系统中三峡水库为主

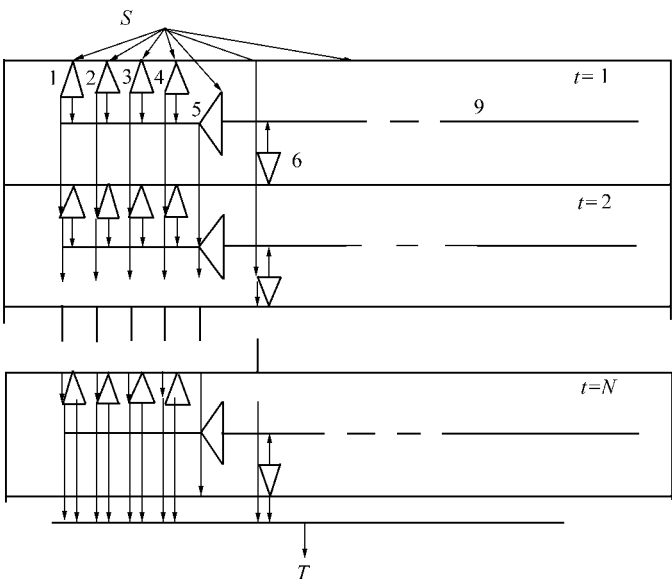


图 3 防洪系统网络时空结构
Fig.3 Network time-space structure
of flood prevention system

干巨型水库,库容很大,在荆江地区和城陵矶附近地区的防洪补偿中起到关键作用.其中防洪系统洪水等级预估根据长江水利委员会规划设计三峡水库成果(表 1),总体控制调度模型的计算可以确定三峡水库的计算最大蓄量,由此初步确定防洪系统的洪水频率等级和沙市控制水位.

表 1 典型洪水特征值

Table 1 Characteristics of typical flood			
<i>i</i>	洪水频率 /%	沙市控制 水位/m	三峡水库蓄 洪量/亿 m ³
1	5.0	43.5	123
2	5.0	44.5	123
3	1.0	44.5	123
4	1.0	45.0 - Δ	190
5	0.1	45.0 - Δ	221.5 - Δ

2.2 洪水演进模型的细化

洪水演进满足水量平衡和动力平衡,以圣维南方程组表示为

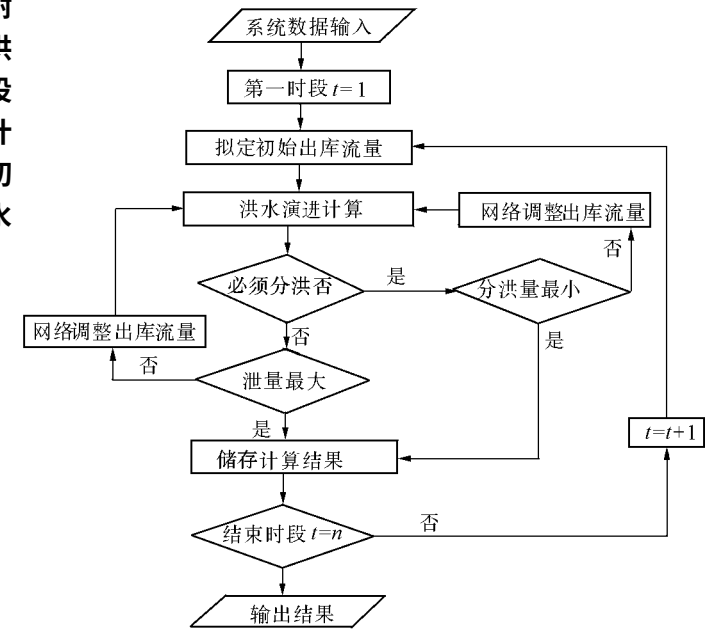


图 4 网络分析模型求解流程

Fig.4 Flow chart of network analysis

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{5}$$

$$i_0 - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{V^2}{C^2 R} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \tag{6}$$

本文模型采用水文学经验槽蓄曲线方法,即在一定的假定条件下,将连续方程(5)和动力方程(6)简化为河段的水量平衡方程(7)和槽蓄方程(8),寻求满足一定精度要求的近似解.

$$I dt - Q dt = dW \tag{7}$$

$$W = f(Q, I) \tag{8}$$

文献[1]将宜昌至汉口分为 3 段,即宜昌至沙市段、沙市至城陵矶段和城陵矶至武汉段.细化后的洪水演进模型将宜昌至汉口分为 6 段,即宜昌至枝城段、枝城至沙市段、沙市至新厂段、新厂至城陵矶段、洞庭湖区、城陵矶至武汉段.(a)宜昌至枝城段,河段长 58 km,区间汇流较小,按照槽蓄曲线方法计算洪水演进.(b)枝城至沙市段,河段长 88 km,区间有松滋和太平口两口分流入洞庭湖,沮漳河从左岸汇入,沙市水位流量关系以城陵矶水位为参数,松滋和太平口两口分流与沙市总出流相关性较好,建立其分流关系,按照槽蓄曲线方法计算洪水演进.(c)沙市至新厂段,河段长 67 km,区间无支流加入,新厂水位流量关系以城陵矶水位为参数,按槽蓄曲线方法计算洪水演进.(d)新厂至城陵矶段,河段长 225 km,右岸藕池口分流入洞庭湖,新厂流量与藕池口分流量关系以城陵矶水位为参数,按槽蓄曲线方法计算洪水演进.槽蓄曲线以总入流为参数,城陵矶水位流量关系以日水位涨率为参数,并考虑下游入流的顶托影响.(e)洞庭湖区,洞庭湖水网交错复杂,洞庭湖出流和下荆江出流汇合后在螺山河段下泄,螺山下泄流量以螺山水位流量关系和城陵矶水位与螺山水位关系作为下边界条件.(f)城陵矶至武汉段,河段长 240 km,河段内有陆水和汉江入流,采用槽蓄曲线法演算,武汉水位流量关系以日水位涨率为参数,并考虑下游入流的顶托影响.

2.3 确定性模型的实时应用分析

防洪系统优化调度模型属确定性模型,求解时入流过程为已知条件,然而将来实际运行中入流过程无法事先确知,即使有预报过程也是随着时间推移、信息增加,不断修正、不断变化的,模型似乎难以应用.其实优化调度和常规调度一样,也是随着时间的推移、水情的变化,不断滚动式前进、反复优化的,而且,它比常规调度考虑的方案更多,给出的优化结果更为及时.本文的具体做法是:(a)根据面临时刻($t = t_1$)系统实际情况及预估的入流过程,用确定性优化调度模型求解面临时段的最优决策和余留期的最优策略;(b)至 t_2 时刻($t_2 = t_1 + \Delta t$),系统的水情可能与计划的情况并不完全相符,由于 Δt 时段内新信息的增加,入流过程预估

值也有所变化 ;(c) t_2 时刻可根据新的系统情况和新的入流过程,再应用该模型求新的最优决策和新的最优策略 ;(d) 随着时间的推移、情况的变化,不断寻求新的优化结果,供决策者参考,以使调度逐步逼近最优.

3 三峡水库防洪实时调度

三峡水库是一座多目标水利枢纽工程,在防洪、发电、航运等方面具有巨大的综合利用效益,但其首要任务为防洪.长江中下游洪水灾害频繁,重点在荆江地区.荆江防洪区以沙市水位控制,沙市警戒水位为 43.0 m.当超过 43.0 m 时,荆江大堤就有不同程度的险情 ;沙市水位达到 45 m 时,防汛抢险非常紧张.根据长江水利委员会有关资料,荆江段防洪区按不同频率的洪水进行分级控制较为合适,其荆江河段规划方案如表 2 所示.由表 2 可以看出,枝江控制泄量主要取决于沙市控制水位和城陵矶水位,率定公式为

表 2 上荆江河道规划方案沙市水位与泄量关系
Table 2 Relationship of Shashi release and water level of upstream Jingjiang planning

沙市水位/m	枝江设计流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	城陵矶水位 34.40 m	城陵矶水位 33.95 m
45.0	60 600	61 700
44.5	55 700	56 700
44.0	50 800	51 700
43.5	45 900	46 800
43.0	41 000	42 000

注 设计泄量包括松滋口和太平口两口分流量.

$$Q(t) = 9800Z(i) - 2222G(t) - 309356$$

(9)

式中 : Q ——枝江泄量 ; Z ——沙市控制水位 ; G ——城陵矶水位 ; t ——时间 ; i ——等级.

因此三峡水库的实时调度不但需要确定沙市控制水位,还需要预报城陵矶水位,沙市控制水位由总体控制调度模型确定.三峡水库的实时调度计算步骤如下 : (a) 预报城陵矶水位.由于城陵矶水位位于洞庭湖与长江交汇处,城陵矶水位变化较为平缓,主要与洞庭湖水系关系较为密切,采用动态校正自回归模型^[4]. (b) 由防洪系统总体控制调度模型确定系统的洪水频率等级和沙市控制水位,由式(9)确定决策时段的枝江控制流量,并用同样方法进行校正. (c) 由枝江至三峡水库用一维非恒定流计算模型逆时序演算,推导出三峡面临决策^[4]. (d) 三峡水库采用动库容方法调洪演算. (e) 三峡水库预报入流的修正.如果预报三峡水库 T 时段末入库流量为 $QA_0(T)$,经调节计算求得 T 时段末三峡水库坝前水位为 $ZB_0(T)$,而实际出现的入流为 $QA(T)$ 、库水位为 $ZB(T)$,由此可求得随时段变化的预报入流的误差.根据其误差也可用同样的方法对预报入库流量过程进行实时校正. (f) 将三峡水库预报入库流量的修正信息和水库调度信息反馈到总体控制调度模型,确定是否进行反馈计算,待面临时段决策实施结束后进行下一时段的计算.

4 其他水库防洪实时调度

除三峡水库以外的水库在仿真模型初步开发研究中作较为简单的处理,考虑两种方式选择 :一是根据相应水库局部下游防洪控制点的安全泄量反推水库调度泄量,以确定面临时段的水库泄量 ;二是根据总体控制调度模型决策,服从防洪系统全局总的控制目标确定水库泄量.根据同样的原理,进行水库预报入库流量的修正,将相应水库预报入库流量的修正信息和水库调度信息反馈到总控模块,确定是否进行反馈计算,待面临时段决策实施结束后进行下一时段的计算.

5 小 结

在文献[1]的基础上,对长江防洪系统优化调度进行深入研究,对原有调度模型进行改进,用 1954 年洪水进行了防洪系统调度仿真模拟.从分洪总量和各水库调度结果来看,与原有成果^[1]基本一致.本文主要在以下方面作了改进 : (a) 文献[1]是将一场洪水当成确定性过程,确定防洪系统目标函数和约束条件,采用某种优化技术进行求解,由此开发研究的优化模型实际上是静态模型.本文的思路是实现面临时段‘预报、总控模型调度预案、个体构件调度预案、信息反馈、调整总控模型调度方案、调整个体构件调度方案、实施’的重复流程,演绎到洪水期末.首先以预报入流作为防洪系统的输入,调用静态优化模型进行总控求解,总控计算结果作为对面临时段的宏观指导和宏观控制,各个防洪水库以总控结果作为宏观指导,再结合具体水库调度规程,由坝前水位等参量进行预报入流的实时修正,向总控模型实时反馈预报入流的修正信息和即将进行面临时段决策的各个水库调度信息,由此调整总控模型中约束条件,重复调用总控模型,然后将计算信息反馈

给各个水库,由此确定面临时段的各个水库的调度操作方案.在下一时段中,根据同样方法进行操作.面临时段重复流程的思路:一是能够发挥静态优化调度模型的作用,并用于指导实时调度;二是通过预报入流的实时校正、信息反馈和重复计算,预备生成当洪水预报出现较大误差时的应急措施方案.(b)网络模型的改进.将网络模型中节点之间的传播时间融合到网络时空结构中,从而调整了网络结构,不仅计算迭代次数减少,计算时间减少,而且在网络结构中便于考虑上下游水库蓄放水时间空间差异的协调配合,用网络流思路模拟防洪调度,满足‘先泄、后蓄、再分洪’的一般洪水调度原则.(c)宜昌至汉口的洪水演进由原来3段分为6段,从而计算精度得到提高.

长江流域水系非常复杂,由于实时调度不但涉及水利工程管理、分蓄洪区运作、数据采集和通讯等软硬件设施,而且与社会、政治、经济均有密切的关系,因此本文的开发研究应该属于初级阶段.从模型分析的角度来看,在有关方面需进一步深化,如实时校正方法改进、分蓄洪区与河系间的吞吐关系细化等方面.

参考文献:

- [1] 杨侃,谭培伦,仲志余.三峡为中心的长江防洪系统优化调度网络分析法[J].水利学报,1997,(7):78~83.
- [2] 《长江防洪系统实时调度研究》编辑委员会.长江防洪系统实时调度研究[M].北京:中国水利水电出版社,1997.237~242.
- [3] 杨侃.网络分析与动态规划在水利系统规划管理中的应用研究[D].南京:河海大学,1995.
- [4] 鲁子林,杨侃.长江三峡防洪补偿调度实时校正模型[J].水利经济,1989,(4):26~30.
- [5] 陈惠源,陈森林,高似春.水库防洪问题的探讨[J].武汉水利电力大学学报,1998,13(1):42~45.

Imitation of Changjiang Flood Prevention System Real Time Flood Operation

YANG Kan,DONG Zong-chuan,CHEN Le-xiang

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

Abstract: According to the characteristics of the Changjiang flood prevention system and on the principle of flood operation the Changjiang real time flood operation is simulated. As tested by the 1954 flood, the results are reasonable.

Key words: Changjiang River; flood prevention system; network analysis; real time operation