

长江防洪系统网络分析分解协调优化调度研究

杨 侃,董增川,张静怡

(河海大学水文水资源及环境学院,江苏南京 210098)

摘要 针对复杂的长江防洪系统优化调度问题,将大系统分解协调原理和网络分析方法相结合,提出了长江防洪系统网络分析分解协调优化调度方法,并运用 1931 年、1935 年和 1954 年资料进行模拟仿真验证,计算结果表明,程序运算时间明显减少,更利于实时调度,通过不同方法比较分析,提出的方法在计算精度方面有所提高,适于处理三峡水库的分级控制调度问题。

关键词 防洪系统,网络分析,分解协调
中图分类号:P333 文献标识码:A 文章编号:1000-198X(2000)03-0077-05

长江中下游是长江流域洪灾最频繁、最严重的地区,研究长江防洪系统优化调度具有重要的意义。本系统在考虑三峡水库及其它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;长江中游考虑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)。其系统概化图见图 1。与本文有关的限制条件如下(按照长江水利委员会已有的工作成果):

- a. 长江防洪系统优化目标是在满足荆江防洪标准百年一遇,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。
- b. 长江中下游堤防有关地段的控制标准:以沙市 45.0 m,城陵矶 34.4 m,武汉 29.73 m 为安全防御水位。
- c. 三峡水库正常蓄水位为 175.0 m,防洪限制水位 145.0 m,下泄流量不得小于发电装机过水能力,防洪库容 221.5 亿 m³,其它水库防洪库容见表 1。
- d. 分级补偿:三峡水库建成后,荆江分洪区防洪标准达到百年一遇,百年一遇以下洪水不分洪。城陵矶附近分洪区运用标准相对较低,两者防洪标准不同。若遇到千年一遇或类似 1870 年的洪水,为保证荆江河段行洪安全,避免堤防溃决,不发生毁灭性灾害,须控制枝城泄量不大于 80 000 m³/s。由于三峡水库与分洪区之间有清江及洞庭湖的湘、资、沅、澧等支流汇入,因此在防洪调度时,须按不同防洪标准分级补偿。

表 1 水库防洪库容

Table 1 Flood prevention capacity of reservoirs

河流	雅砻江	岷江	嘉陵江	乌江	清江	沅江	资水	澧水
水库	二滩	紫坪铺	亭子口	构皮滩	隔河岩	五强溪	柘溪	江垭
库容/(亿 m ³)	9.0	2.9	13.0	2.0	5.0	13.6	6.2	7.4

1 网络分析分解协调模型

为了便于求解,本文将所研究的系统分解为两个子系统。宜昌以上作为第一子系统,宜昌以下作为第二子系统,以宜昌作为连接点,三峡水库的出流作为两个子系统的协调变量。

1.1 第一子系统网络结构

为了应用网络分析法研究优化调度,首先将实际防洪系统构造成抽象的拓朴网络图 $G(V,E,C,F)$ 其中

收稿日期:1998-09-16
基金项目:国家自然科学基金(49701003),河海大学科学基金(99538473),国家八五攻关课题。
作者简介:杨侃(1965—),男,江苏苏州人,副教授,博士,从事水资源规划管理研究。

V, E, C 和 F 分别为 G 图中节点、弧、弧流量和弧费用集合.假定网络图 G 中包含有 K 个节点, m 条弧,则可写成 $V=[v_1, v_2, \dots, v_k], E=[e_1, e_2, \dots, e_m], C=[c_1, c_2, \dots, c_m], F=[f_1, f_2, \dots, f_m]$ 为简明起见,先将图1中宜昌以上的第一子系统用网络表示,如图2所示.图2中弧 $(S, 1) \dots (S, 4)$ 上的流量 $f_{s,1} \dots f_{s,4}$ 分别代表二滩、...、构皮滩4座水库的入流, $f_{5,5}$ 代表4座水库以外,三峡以上地区汇入三峡水库的区间入流量.弧 $(5, T)$ 上的流量 $f_{5,T}$ 为三峡水库的出流.在第一子系统中(见图2)宜昌(13)处为虚拟汇 T ,在第二子系统中为虚拟源 S .图2中 $f_{5,T}$ 为三峡水库下泄至第二子系统的流量.由于防洪系统优化调度不仅需要对水量在地区上进行合理安排,而且要在时间上作适当调度,因此需要将网络图用时空结构表示.图3中 t 表示时间, $t=[1, 2, \dots, n]$ 表示一次洪水过程共有 n 个时段.处于同一时间的蓄水节点与非蓄水节点,它们之间若有弧连接,则可进行流量传输;处于不同时间的节点,蓄水节点本身可以有流量传输,非蓄水节点不存在流量传输.

图3中弧 $(1, 1)$ 上的流量 $f_{1,1}$ 为不同时间二滩水库的蓄水量,同理 $f_{2,2}, f_{5,5}$ 分别为紫坪铺水库、三峡水库的蓄水量.由于各库蓄水量是随着时间变化的,因此在图3中引入了时间参数 t .例如弧 (i, j, t) 表示 t 时刻 i 节点至 j 节点的弧.图3中 $(1, 5, 2)$ 弧上的流量 $f_{1,5,2}$ 为 $t=2$ 时,二滩水库到三峡水库的流量, $f_{5,5,1}$ 为 $t=1$ 时,三峡水库的蓄水量.

1.2 第二子系统网络结构

与第一子系统相似,第二子系统亦可以用网络表示(见图4).图4表示第二子系统各节点之间的连通关系.对于不同时间,可绘出与图3相似的时空网络图(略).

1.3 目标函数和约束条件

1.3.1 第一子系统

a. 目标函数

$$Z_1 = \min[a_5 \times f_{5,5, \max}] \tag{1}$$

$$f_{5,5, \max} = \max[f_{5,5,t}] \quad (t = 1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

式中: a_5 ——三峡水库蓄洪量单价; $f_{5,5, \max}$ ——一次洪水过程中三峡水库最大蓄洪量; $f_{5,5,t}$ —— t 时刻三峡水库的蓄洪量.

b. 约束条件

弧上容量约束

$$C'_{i,j} \leq f_{i,j,t} \leq C''_{i,j} \quad (t = 1, 2, \dots, n) \tag{3}$$

式中: $C'_{i,j}$ ——水库相应最小下泄流量(或发电装机流量); $C''_{i,j}$ ——水库下游河段允许最大下泄流量或水库

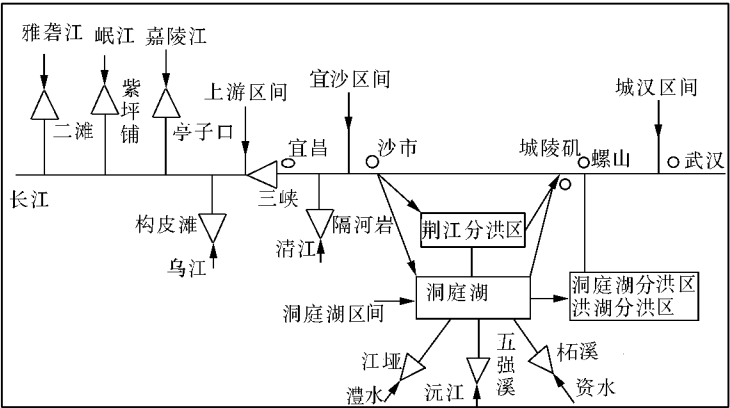


图1 长江防洪系统概化图

Fig.1 Generalized Changjiang flood system

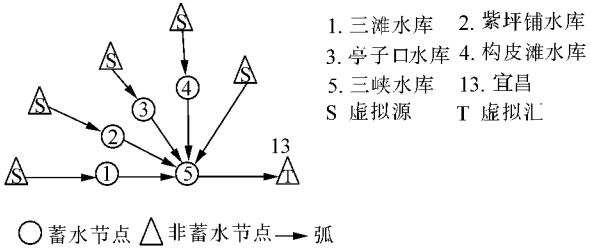


图2 第一子系统网络

Fig.2 No.1 subsystem network

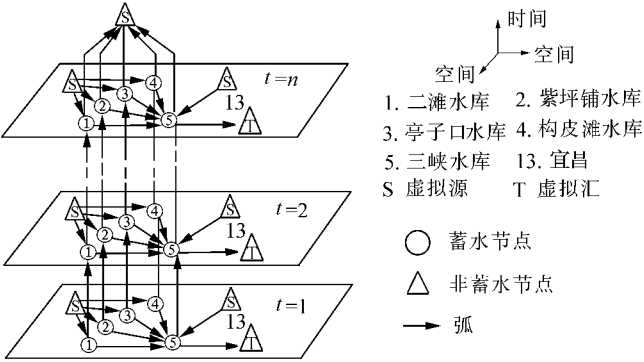


图3 第一子系统时空网络

Fig.3 No.1 subsystem time-space network

泄洪设备允许最大泄量。

蓄水节点库容约束

$$0 \leq f_{i,i,t} \leq C''_{i,i} (t = 1, 2, \dots, 5; i = 1, 2, \dots, n)$$
 (4)

式中： $C''_{i,i}$ —— i 水库防洪库容； $f_{i,i,t}$ —— t 时刻 i 水库蓄洪量。

蓄水节点和非蓄水节点均应满足的平衡条件：

$$\sum_j f_{i,j,t} - \sum_j f_{j,i,t} + \sum f_{i,i,t-1} - \sum f_{i,i,t} = \begin{cases} F_{i,t} & i = S \\ 0 & i \neq S, T \\ -F_{i,t} & i = T \end{cases}$$
 (5)

式中： $\sum f_{i,j,t}$ —— t 时刻以 i 为起点的弧上流量； $\sum f_{j,i,t}$ —— t 时刻以 i 为终点的弧上流量； $\sum f_{i,i,t-1}$ —— $t-1$ 时刻 i 蓄水节点的蓄洪量； $\sum f_{i,i,t}$ —— t 时刻 i 蓄水节点的蓄洪量； $\sum F_{i,t}$ —— t 时刻本系统流入点 S 或流出点 T 的流量。

1.3.2 第二子系统

a. 目标函数

$$Z_2 = \min [a_{11} \times \sum f_{11,11,t} + a_{12} \times \sum f_{12,12,t}]$$
 (6)

式中： a_{11}, a_{12} ——荆江分洪区、城陵矶附近分洪区蓄水量单价； $\sum f_{11,11,t}, \sum f_{12,12,t}$ ——荆江分洪区、城陵矶附近分洪区一次洪水过程中的累积分洪量。

b. 约束条件

第二子系统约束条件与第一子系统的约束条件式 (3)~(5) 类似。

2 求解方法

2.1 第一子系统

根据长江上游的具体情况，上游水系未考虑洪水变形的影响，该子系统目标函数为三峡水库最大蓄洪量最小（式 (1)）。由于系统中诸入流点入流过程为已知，而且一次洪水过程的总入流量为常量，显然，当第二子系统不分洪时，三峡水库总泄流量最大，等价于三峡水库蓄洪量最小。在这种情况下，通过求网络中最大流，即可使目标函数达到极小值。当第二子系统必须分洪时，需要通过调整网络流，在尽量减少分洪量的情况下，求网络中的最大流。

2.2 第二子系统

2.2.1 洪水演算

由于洪水变化直接影响着目标函数，所以非考虑不可。根据长江的具体情况，从宜昌至汉口分为三段：宜昌至沙市河段、沙市至城陵矶河段和城陵矶至汉口河段分别采用考虑下游顶托影响的槽蓄曲线法^[1]。

2.2.2 网络分析

第二子系统网络模型用最小费用最大流方法求解，计算时，取目标函数式 (6) 中荆江分洪区蓄水量单价 a_{11} 远大于城陵矶附近地区分洪量单价 a_{12} ，以达到荆江地区尽量不分洪的要求。两地区不同防洪标准通过三峡水库的库水位反映。

2.3 总系统协调

分解协调算法是大系统设计和优化中一种很有效的方法。把长江防洪系统分成两个子系统，构成两级结构优化问题。第一级是下级子系统，以解决各子系统的优化；第二级是上级协调器，以解决各子系统的相互耦合，从而实现总系统的优化。根据实际情况，把三峡水库的出流作为两个子系统的协调变量，计算步骤如下：

a. 对第一子系统进行求解，求出经过上游各支流水库调蓄后的三峡水库出库流量 Q_k （向量），三峡水库的库容约束为 $0 \leq f_{5,5,t} \leq C^k_{5,5}$ （ $k = 1, 2, 3$ ， k 为相应三峡水库库容分级数）：

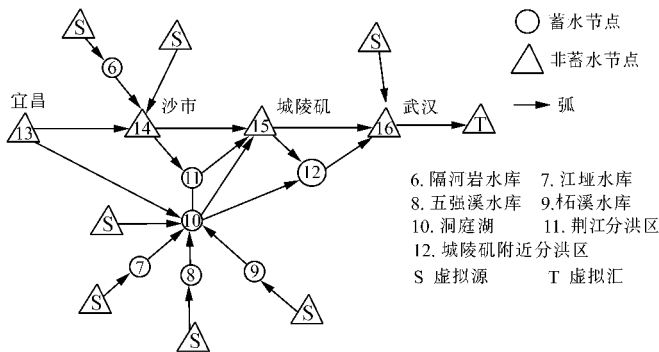


图 4 第二子系统网络图

Fig.4 No.2 subsystem time-space network

b. Q_1 作为第二子系统三峡水库的出流 ,对第二子系统进行求解 ,如果出现分洪 ,则假定摄动量 ΔQ_1 ,计算出可能减少的目标函数值 ΔW ;

c. 重新调整第一子系统联合调度方式 ,计算出 Q_2 ,求 $\Delta Q_2 = |Q_2 - Q_1|$,如果 $|\Delta Q_1 - \Delta Q_2| \leq e_1$ (误差阈值) ,则进入步骤 d ,否则进入步骤 b ;

d. 如果第二子系统可能减少的目标函数值 $|\Delta W| \leq e_2$ (误差阈值) ,则协调计算结束 ,否则进入步骤 b ,如此迭代计算 ,进行总体协调 ,以合理联合调度防洪系统.

3 计算成果

为了对防洪系统所建立的网络分析分解协调方法(以下简称方法 2)进行验证 ,本文首先对长江流域 1931 年、1935 年和 1954 年三次完整的洪水资料进行计算 ,然后与文献 [1] 方法(一般网络分析方法 ,没有应用分解协调原理 ,以下简称方法 1)的成果进行了比较.(a)三峡水库分级方案分为三种^[1] : A_1 ,同时考虑对城陵矶附近地区和荆江地区进行补偿的库容为 80 亿 m^3 ,用于一般洪水对荆江地区补偿的库容为 105.5 亿 m^3 ,用于千年一遇或类似 1870 年特大洪水对荆江地区补偿的库容为 36 亿 m^3 ; A_2 ,以上三种库容分别为 100 亿 m^3 , 85.5 亿 m^3 和 36 亿 m^3 ; A_3 ,以上三种库容分别为 130 亿 m^3 , 55.5 亿 m^3 和 36 亿 m^3 .(b)考虑将 9 座水库分为 4 组 ,即除三峡、隔河岩水库单独考虑外 ,上游 4 库分为一组 ,洞庭湖 3 库分为一组.(c)三峡及其以下 4 库的防洪补偿顺序考虑两种方案 : B_1 ,三峡、隔河岩、洞庭湖 3 库 ; B_2 ,洞庭湖 3 库、三峡、隔河岩.(d)计算成果分别见表 2 ,表 3 和表 4 ,表中第 8 栏“ 三峡水库增加蓄洪量 ”为第 6 栏减去第 4 栏 ,第 9 栏“ 城陵矶附近地区减少分洪量 ”为第 5 栏减去第 7 栏.

表 2 1931 年洪水计算结果

Table 2 Calculated results of flood 1931

方案	三峡水库分级 补偿方案	三峡以下补偿 水库补偿顺序	方法 1		方法 2		三峡水库增 加蓄洪量 /亿 m^3	城陵矶附近地 区减少分洪量 /亿 m^3
			三峡水库蓄洪 量/亿 m^3	城陵矶附近地 区分洪量/亿 m^3	三峡水库蓄洪 量/亿 m^3	城陵矶附近地 区分洪量/亿 m^3		
1	A_1	B_1	81.31	9.26	81.46	9.10	0.15	0.16
2	A_1	B_2	81.31	11.09	81.26	11.09	-0.05	0.00
3	A_2	B_1	100.32	6.80	100.53	6.50	0.21	0.30
4	A_2	B_2	100.53	11.04	100.43	10.90	-0.10	0.14
5	A_3	B_1	117.60	6.80	117.80	6.70	0.20	0.10
6	A_3	B_2	107.44	11.04	117.66	10.99	0.22	0.05

表 3 1935 年洪水计算结果

Table 3 Calculated results of flood 1935

方案	三峡水库分级 补偿方案	三峡以下补偿 水库补偿顺序	方法 1		方法 2		三峡水库增 加蓄洪量 /亿 m^3	城陵矶附近地 区减少分洪量 /亿 m^3
			三峡水库蓄 洪量/亿 m^3	城陵矶附近地 区分洪量/亿 m^3	三峡水库蓄洪 量/亿 m^3	城陵矶附近地 区分洪量/亿 m^3		
1	A_1	B_1	81.80	3.65	81.70	3.49	-0.10	0.16
2	A_1	B_2	81.60	18.66	81.99	18.46	0.33	0.20
3	A_2	B_1	100.63	1.75	100.63	1.45	0.00	0.30
4	A_2	B_2	86.48	18.31	86.48	18.17	0.00	0.14
5	A_3	B_1	103.73	1.44	103.53	1.33	-0.20	0.11
6	A_3	B_2	86.48	18.31	86.26	18.27	-0.22	0.04

表 4 1954 年洪水计算结果

Table 4 Calculated results of flood 1954

方案	三峡水库分级 补偿方案	三峡以下补偿 水库补偿顺序	方法 1		方法 2		三峡水库增 加蓄洪量 /亿 m^3	城陵矶附近 地区减少分洪量 /亿 m^3
			三峡水库蓄洪量 /亿 m^3	城陵矶附近地 区分洪量/亿 m^3	三峡水库蓄洪 量/亿 m^3	城陵矶附近地 区分洪量/亿 m^3		
1	A_1	B_1	139.71	210.88	139.52	210.50	-0.19	0.38
2	A_1	B_2	139.19	211.09	139.27	210.95	0.08	0.14
3	A_2	B_1	153.54	197.05	153.69	196.75	0.15	0.30
4	A_2	B_2	154.74	193.18	154.94	193.04	0.20	0.14
5	A_3	B_1	181.73	166.35	181.82	166.34	0.09	0.01
6	A_3	B_2	182.39	163.17	182.81	163.01	0.42	0.16

4 成果分析与总结

a. 由于三峡水库的 221.5 亿 m^3 防洪库容分为三部分 ,在方法 1 中 ,把三峡水库看作网络中的一个蓄水节点 ,经过调试分析 ,由于三峡水库的防洪分级特性 ,造成网络中节点弧流量约束条件的多级性 .在调整增广流时 ,会出现约束条件控制中的误差 ,导致计算结果中分洪量偏大 .采用了网络分析分解协调优化方法 ,以三峡水库出流作为第一子系统和第二子系统的协调变量 ,在协调级处理三峡水库补偿防洪要求 ,在子系统网络计算时 ,使每个节点弧流量的约束条件均为二级约束(即最大最小限制) ,从而提高了计算成果的精度 .

从计算结果中可以看出 ,对于三次典型大洪水 ,经过干支流水库群合理联合优化调度 ,不但可以保证荆江地区不分洪 ,而且显著减少了城陵矶附近地区的分洪量 ,通过方法比较说明 ,采用网络分析分解协调方法 ,计算精度有一定的提高 .

b. 本文从系统分析理论和长江流域具体情况出发 ,提出长江防洪系统的分解构想 ,对分解后的子系统分别用网络分析方法求解 ,然后在子系统之间进行总体协调和迭代计算 ,取得了较好的效果 .对于复杂流域防洪系统调度问题 ,本文采用大系统分解协调原理和网络分析模型相结合的研究方法 ,这是一种新的尝试 .采用分解协调原理 ,使子系统的变量及约束条件相对较少 ,从而减少计算机所需内存并缩短计算时间 .

长江防洪系统水系非常复杂 ,今后在以下方面还需进一步深入研究 ,以使长江防洪系统调度更具可操作性和灵活性 :研究分洪区与河系的水流交换对计算结果的影响 ;研究洪水预报出现较大误差时的补救应急措施 .

本文成果曾得到鲁子林教授的指导 ,在此表达深深的敬意 .

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 .

Decomposition-Coordination Network Analysis Method Used in Changjiang Flood Prevention System Optimal Operation

YANG Kan , DONG Zeng-chuan , ZHANG Jing-yi

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

Abstract : A decomposition-coordination network analysis method is presented and is applied to the optimal operation of the Changjiang flood prevention system , which is composed of the Three Gorges reservoir , other reservoirs , dikes and flood retention basins . The method has been verified with the 1931 , 1935 and 1954 hydrographs of Changjiang basin . The results show that the computer time is significantly reduced and the precision of results is improved , therefore , the present method is practicable .

Key words : flood prevention system ; network analysis ; decomposition coordination