

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0102

何素明, 谭乔凤, 雷晓辉, 等. 漓江实时补水优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 98-103. HE S M, TAN Q F, LEI X H, et al. Real time water supply optimal operation in Li River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 98-103. (in Chinese)

## 漓江实时补水优化调度研究

何素明<sup>1</sup>, 谭乔凤<sup>2</sup>, 雷晓辉<sup>3</sup>, 李宏亮<sup>1</sup>, 王旭<sup>3</sup>, 杨明祥<sup>3</sup>, 张珮纶<sup>3</sup>

(1. 广西水利电力勘测设计研究院, 南宁 530023; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065;  
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 以漓江三期补水工程体系为研究对象, 对漓江实时补水优化调度进行研究。首先基于马斯京根流量演算法建立了供水水库群放水和控制断面需水的定量响应关系, 在此基础上提出考虑河道水流演进滞时和生态需水要求的漓江水库群联合补水实时优化调度模型及相应的调度规则, 并通过约束处理技术使模型转化为能通过线性规划求解的问题。实时优化调度模型在漓江流域的应用结果表明: 斧子口、川江、小溶江、青狮潭、五里峡、思安江六库联合调度, 可以使特枯年份的供水日保证率达到94%以上。研究对维持漓江河道健康、提高通航保证率以及旅游经济效益具有重要的意义。

**关键词:** 实时调度; 优化调度; 马斯京根; 线性规划算法; 调度规则

**中图分类号:** TV 213    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0098-06

### Real-time water supply optimal operation in Li River Basin

HE Suming<sup>1</sup>, TAN Qiaofeng<sup>2</sup>, LEI Xiaohui<sup>3</sup>, LI Hongliang<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>3</sup>, YANG Mingxiang<sup>3</sup>, ZHANG Peilun<sup>3</sup>

(1. Guangxi Water and Power Design Institute, Nanning 530023, China;

2. College of Water Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Choosing the third phase water transfer project as the research object, we studied the real time water transfer optimal operation in Li River Basin. Firstly, we built the quantitative response relationship between the release of the water supply reservoirs and water demand of the control section based on Muskingum's flow algorithm. Then we proposed a real time water transfer optimal operation model and corresponding operating rules for the reservoirs group on Li River, which took into consideration the water flow evolution delay and the ecological water demand. Through constraint handling techniques, we transformed the model into a question which could be solved by linear programming. The application results showed that the joint operation of the six reservoirs on Li River (including Fuzikou, Chuanjiang, Xiaorongjiang, Qingshitan, Wulixia and Si'anjiang reservoirs) could raise the water supply daily assurance rate to above 94% in especially dry years. This study has important significance for maintaining a healthy river channel, increasing navigation assurance rate, and improving economic benefits of tourism on Li River.

**Key words:** real time operation; optimal operation; Muskingum; linear programming; operating rules

水库实时调度是一个“预报、决策、实施、再预报、再决策、再实施”的滚动向前过程, 不仅要顾及径

收稿日期: 2017-12-14    修回日期: 2018-05-20    网络出版时间: 2018-06-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180620.1828.004.html>

基金项目: 桂林市防洪及漓江补水水库群生态调度技术研究(GXZC2016-G3-2344 JH ZJ; 桂科 B16380313); 国家重点研发计划(2017YFC0405900)

**Funds:** Study on Flood Control in Guilin and Ecological Dispatching Technology of the Replenishment Reservoirs of Li River (GXZC2016-G3-2344 JH ZJ; Guike B16380313); National Key R&D Program of China (2017YFC0405900)

作者简介: 何素明(1968-), 女(壮族), 广西隆安人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程规划设计方面工作。E-mail: 545606374@qq.com

通讯作者: 谭乔凤(1991-), 女(土家族), 湖北恩施人, 博士研究生, 主要从事水文预报与水库调度方面研究。E-mail: qiaofengtan@126.com

流的长期变化规律,又要适应当前水情变化<sup>[1]</sup>。利用优化技术指导水库实时调度,一直是水资源管理者尝试突破的关键科学问题<sup>[2-34]</sup>。为了提高漓江流域供水效益:于晓<sup>[5]</sup>根据是否考虑森林蓄水工程对漓江补水的影响,对斧子口、川江和小溶江水库的月供水调度方案进行了研究;李平<sup>[6]</sup>采用HJHAT法确定了漓江流域的环境流量,并根据区域内耗水情况以及漓江补水目标,设置青狮潭、斧子口、川江和小溶江四库联合长期调度方案;李若男等<sup>[7]</sup>通过建立漓江流域水环境模型,模拟了青狮潭水库补水及非补水模式下,枯水期其下游河道内水环境变化情况。这些研究对漓江供水效益的提高具有重要的意义,但是大都集中于中长时间尺度及规划调度层面。

随着漓江三期补水工程体系逐渐形成,漓江水库调度研究需要逐渐从规划设计阶段向实时管理阶段过渡。实时补水调度中,由于补水距离长,补水断面不能对水库放水作出即时响应。受水流演进滞时影响,各补水水库的放水经过河道水流演进到达需水断面的流量可能远大于需求,而使水库水位降低,不利于后期补水效益发挥;也可能远小于需求,无法满足沿经河段的生态需水及漓江河段补水需求,而带来生态破坏以及旅游、航运等经济损失。因此,为了科学合理地利利用各水库的补水潜力,迫切需要建立一个能考虑河道水流演进滞时及生态需水要求的漓江水库群联合补水实时优化调度模型。

## 1 漓江补水工程体系

漓江补水分三期实施<sup>[10]</sup>:一期补水工程以青狮潭水库作为补水水源,通过减少灌溉用水、调整水库调度等方式向漓江补水,设计补水使枯水期流量达到 $30\text{ m}^3/\text{s}$ ;二期补水工程五里峡水库和思安江水库与青狮潭水库联合运用,设计补水使枯水期流量达到 $42\text{ m}^3/\text{s}$ ;三期补水工程需结合斧子口、小溶江、川江水库,与一、二期补水工程联合向漓江补水,以使枯水期流量达到 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 。各补水水库的主要特性参数见表1。

表1 漓江补水工程特性参数

Tab. 1 The properties of Li River water transfer project

补水水源	青狮潭 斧子口 小溶江 川江 思安江 五里峡					
	珠江(漓江)流域			湘江流域		
距桂林市里程/km	32	58	40	57	45	106
坝址以上流域面积/ $\text{km}^2$	474	314	260	127	135	340
多年平均年径流量/亿 $\text{m}^3$	8.45	5.99	4.95	2.59	1.31	3.56
总库容/亿 $\text{m}^3$	6.08	1.88	1.52	0.98	0.89	1.08
有效库容/亿 $\text{m}^3$	3.68	1.65	1.39	0.90	0.81	0.87
生态环境基流/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.00	2.24	2.00	1.20	0.20	0.50

漓江补水对象具体指桂林-阳朔河段共86 km的河段,以桂林水文站作为漓江补水的控制断面。斧子口、川江、小溶江、青狮潭和五里峡水库位于桂林断面以上,思安江水库位于桂林断面以下的支流上,其网络概化见图1。图中,斧子口、川江、小溶江和青狮潭水库放水至桂林断面的演进河段按照河道上下游关系编号。以斧子口水库为例,其放水要到达桂林断面,需要经过斧子口-大溶江河段(河段1)、大溶江-上支铺河段(河段3)、上支铺-汇合口河段(河段5)、汇合口-桂林河段(河段8)。五里峡水库为跨流域引水工程,通过干渠连接到漓江流域补水,而思安江水库位于桂林断面以下,桂林断面对于这两个水库的补水响应通过设计时采用的补水有效系数法表示,即有效补水量等于水库出库流量乘以补水有效系数。五里峡和思安江水库的补水有效系数分别为0.85, 0.65。

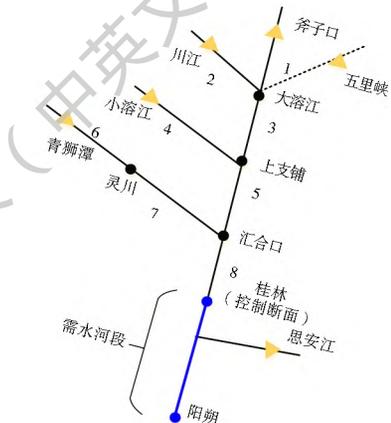


图1 漓江补水工程体系概化图

Fig. 1 The generalized map of Li River water transfer project

## 2 漓江实时补水优化调度模型

### 2.1 优化目标

以漓江三期补水工程体系为研究对象,综合考虑河道调蓄作用、库容和桂林断面需水等约束,以斧子口、小溶江、川江、青狮潭、五里峡、思安江水库群的总放水最小化为目标建立实时补水优化调度模型。目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^6 R_{i,t} \quad (1)$$

式中: $R_{i,t}$ 表示水库*i*在*t*时段的放水流量。该目标函数既能使水库以最小的放水量满足当前时段的流量需求,又能保证水库群的总蓄水量尽可能大以保证后期供水,能兼顾当前供水和将来供水,有利于供水保证率的提高。

### 2.2 约束条件

(1) 水库水量平衡约束。

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (Q_{i,in,t} - R_{i,t}) \Delta t \quad (2)$$

(2) 库容约束。

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max} \quad (3)$$

(3) 流量约束。

$$R_{i,t,\min} \leq R_{i,t} \leq R_{i,t,\max} \quad (4)$$

(4) 水位库容关系曲线。

$$Z_{i,t} = f(V_{i,t}); V_{i,t} = f^{-1}(Z_{i,t}) \quad (5)$$

(5) 马斯京根流量演进约束。

$$Q_{j,t} = C_{j,0} \times I_{j,t} + C_{j,1} \times I_{j,t-1} + C_{j,2} \times Q_{j,t-1} \quad (6)$$

$$C_{j,0} + C_{j,1} + C_{j,2} = 1 \quad (7)$$

(6) 桂林断面需水流量约束。

$$Q_{\alpha,t} \geq 60 \quad (8)$$

式中:  $V_{i,t}$ ,  $V_{i,t+1}$ ,  $V_{i,t,\min}$ ,  $V_{i,t,\max}$ , 为水库  $i$  在  $t$  时段的初始库容、末库容、最小以及最大库容约束;  $Q_{i,in,t}$ ,  $R_{i,t}$  为水库  $i$  在  $t$  时段的入库和出库流量;  $R_{i,t,\min}$ ,  $R_{i,t,\max}$  为水库  $i$  在  $t$  时段的最小和最大放水流量约束;  $\Delta t$  为调度时段;  $Z_{i,t}$  为水库  $i$  在  $t$  时段初始水位;  $C_{j,0}$ ,  $C_{j,1}$ ,  $C_{j,2}$  分别为河段  $j$  的马斯京根流量演进参数;  $I_{j,t}$ ,  $I_{j,t-1}$  分别为河道  $j$  上断面时段  $t$  和  $t-1$  流量;  $Q_{j,t}$ ,  $Q_{j,t-1}$  分别为河道  $j$  下断面时段  $t$  和  $t-1$  流量;  $Q_{\alpha,t}$  为时段  $t$  桂林断面流量。

### 2.3 约束处理

六库的放水需要一定的河道调蓄作用才能到达桂林断面。河道水流演进包括水力学方法<sup>[8-10]</sup>和水文学方法两种<sup>[11-15]</sup>。水力学方法严格基于圣维南方程组,能得到精细的演进过程,但是其对河道沿程断面数据要求较高;水文学方法以马斯京根法为代表,通过对圣维南方程组进行概化以简化计算过程。由于漓江流域六个水库至桂林断面的数据不支撑建立水动力学模型,本文采用马斯京根法进行河道水流演进。但马斯京根流量演进滞时特性<sup>[16-17]</sup>使得桂林断面对于水库放水不能得到即时响应,使实时补水调度变得尤为复杂。如果能建立考虑马斯京根流量演进滞时的水库出库和桂林断面需水的响应关系,问题能大大简化。下面将通过约束条件进行处理,实现这一目标。

(1) 约束条件(5)和(6)处理。

从马斯京根演进公式可以看出,桂林断面  $t$  时段的流量与各水库  $t$  时段的放水有关,还与各个水库从出库演进至桂林断面过程中,涉及到的各个演进断面  $t-1$  时段的流量状态有关。桂林断面的流量由各水库的演进流量和区间流量共同构成,约束条件(5)和(6)可以转化为下式:

$$\sum_{i=1}^6 A_i \times R_{i,t} + B_{i,t-1} + Q_{JGL,t} \geq 60 \quad (9)$$

式中:  $Q_{JGL,t}$  为时段  $t$  各水库至桂林断面的区间径

流;  $A_i$  为各水库  $t$  时段的放水量经马斯京根分段演进不断累积相乘的常数项系数,该系数只与水库  $i$  放水流经河段  $j$  的马斯京根参数  $C_0$  有关,具体的计算公式可表示为:

$$A_i = \prod_{j \in \Phi(i)} C_{j,0} \quad (10)$$

式中:  $\Phi(i)$  为水库  $i$  放水演进至桂林断面所经过的河段集合,  $C_{j,0}$  为河段  $j$  的马斯京根演进系数  $C_0$ ;  $B_{i,t-1}$  为马斯京根演进涉及到的  $t-1$  时段的流量演进至桂林断面的常数项,该常数项不仅与水库  $i$  放水流经河段  $j$  的马斯京根参数  $C_1$ 、 $C_2$  有关,还与各个演进断面  $t-1$  时段的流量状态有关,具体的计算公式可以表示为:

$$B_{i,t-1} = \sum_{j \in \Phi(i)} [ (C_{j,1} \times I_{j,t-1} + C_{j,2} \times Q_{j,t-1}) \times \prod_{k \in \Phi(j)} C_{k,0} ] \quad (11)$$

式中:  $I_{j,t-1}$ ,  $Q_{j,t-1}$  分别为河道  $j$  时段  $t-1$  上断面和下断面流量;  $\Phi(j)$  为河段  $j$  演进至桂林断面涉及到的下游河段的集合。  $\Phi(i)$  为水库  $i$  演进至桂林断面涉及到的河段的集合。  $j$  和  $k$  为河段编码。由于  $t-1$  时段的流量状态已知,所以  $B_{i,t-1}$  为常数项。

(2) 约束条件(2)和(3)处理。

在实时补水调度中,最高库容约束可转化为最小放水量约束,最小库容约束可转化为最大放水量约束。最终的流量约束为:

$$\underline{R}_{i,t} \leq R_{i,t} \leq \overline{R}_{i,t}$$

$$\underline{R}_{i,t} = \max(Q_{i,in,t} - (V_{i,t,\max} - V_{i,t}) / \Delta t, R_{i,t,\min}) \quad (12)$$

$$\overline{R}_{i,t} = \min(Q_{i,in,t} - (V_{i,t,\min} - V_{i,t}) / \Delta t, R_{i,t,\max})$$

考虑到各河段的最小生态环境流量需求,  $R_{i,t,\min}$  取各个水库的生态环境基流。

(3) 水库水量平衡约束和水位库容关系曲线,用于计算本时段的调度末状态,也即下一时段的调度初始状态,不作处理。

### 2.4 模型求解

约束条件经过处理之后,得到实时补水优化调度模型为:

目标函数。

$$\min \sum_{i=1}^6 R_i \quad (13)$$

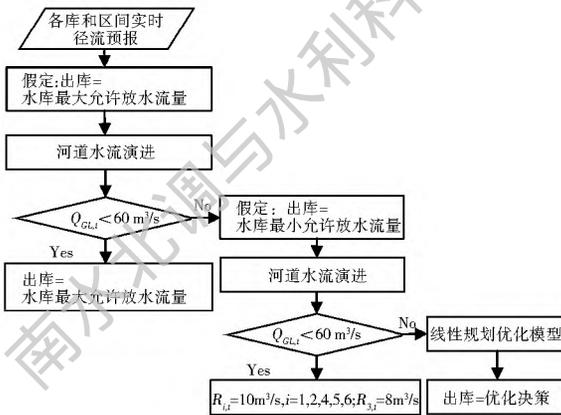
约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^6 A_i \times R_{i,t} + B_{i,t-1} + Q_{JGL,t} \geq 60 \\ A_i = \prod_{j \in \Phi(i)} C_{j,0} \\ B_{i,t-1} = \sum_{j \in \Phi(i)} (C_{j,1} \times I_{j,t-1} + C_{j,2} \times Q_{j,t-1} \times \prod_{k \in \Phi(j)} C_{k,0}) \\ \underline{R}_{i,t} \leq R_{i,t} \leq \overline{R}_{i,t}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \\ R_{i,t} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \end{array} \right. \quad (14)$$

从目标函数和约束条件可以看出,漓江实时补水优化调度是一个典型的线性规划<sup>[18]</sup>问题,可以采用线性规划模型进行实时补水优化调度。

### 3 实时优化调度规则

漓江实时优化调度规则见图2。



注:  $i=3$  为五里峡水库编号

图2 漓江水库群实时优化调度流程

Fig. 2 The flow chart of real time optimal operation of reservoirs group on Li River

(1) 输入各水库和各水库至桂林断面区间的实时径流预报信息,假定各水库按最大允许放水流量

放水,若演进至桂林断面的流量小于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ,则各水库按最大允许放水流量放水;否则,转入(2)。

(2) 假定各水库按最小允许放水流量放水,若演进至桂林断面的流量大于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此时各水库按最小放水流量放水即可满足当前时段桂林断面的流量需求。考虑到马斯京根流量演进的滞时特性,若当前时段各水库放水太小,河道中的流量衰减剧烈,下一时段需要很大的放水才能满足桂林断面的需水要求,会导致各水库出库和桂林断面的流量剧烈变化。因此,除了五里峡水库外,给定其余水库均按  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  放水。五里峡水库按其渠道最大输水能力  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  放水。当(1)和(2)均不能满足时,各水库放水存在优化空间,转入(3)。

(3) 通过线性规划模型得到最优放水决策。

### 4 调度结果

现收集到桂林水文站特枯年份1961年枯水期9月1日至次年2月28日的逐日径流资料,各水库入库径流资料和各库至桂林断面的区间径流资料通过流域面积比法求解。采用实时优化调度模型得到各水库的调度结果见表2。

表2 六库及桂林断面流量过程

Tab. 2 Flow process of six reservoirs and Guilin section

$\text{m}^3/\text{s}$

时段	斧子口		川江		小溶江		五里峡		青狮潭		思安江		桂林断面
	入库	出库	入库	出库	入库	出库	入库	出库	入库	出库	入库	出库	
1	5.72	2.24	2.31	1.20	4.81	15.98	6.20	8.00	8.64	50.00	2.47	0.20	60.00
2	5.10	2.24	2.06	1.20	4.29	2.00	5.52	8.00	7.70	40.72	2.20	0.20	60.00
3	5.26	2.24	2.13	1.20	4.42	2.00	5.69	8.00	7.93	31.01	2.26	0.20	60.00
4	5.41	2.24	2.19	1.20	4.55	49.31	5.86	8.00	8.17	50.00	2.33	0.20	60.00
5	5.56	10.00	2.25	10.00	4.68	10.00	6.03	8.00	8.40	10.00	2.40	10.00	111.53
6	2.32	2.24	0.94	1.20	1.95	49.89	2.51	8.00	3.50	50.00	1.00	0.20	60.00
7	4.88	10.00	1.97	10.00	4.10	10.00	5.28	8.00	7.37	10.00	2.10	10.00	104.54
8	7.44	2.24	3.01	1.20	6.26	27.91	8.06	8.00	11.23	50.00	3.21	0.20	60.00
9	10.00	2.24	4.05	1.20	8.41	2.00	10.83	8.00	15.10	8.51	4.31	0.20	60.00
10	6.62	2.24	2.68	1.20	5.57	44.11	7.17	8.00	10.00	50.00	2.85	0.20	60.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
169	2.70	26.92	1.09	1.09	2.27	2.27	2.92	8.00	4.07	4.07	1.16	1.16	60.00
170	2.88	50.00	1.16	1.16	2.42	2.42	3.12	8.00	4.35	4.35	1.24	1.24	59.35
171	3.06	50.00	1.24	1.24	2.57	2.57	3.31	8.00	4.62	4.62	1.32	1.32	58.45
172	3.24	2.24	1.31	1.20	2.73	2.73	3.51	8.00	4.89	4.89	1.40	0.85	60.00
173	3.42	50.00	1.38	1.50	2.88	2.88	3.71	8.00	5.17	5.17	1.47	2.02	22.95
174	3.60	2.24	1.46	1.20	3.03	2.00	3.90	8.00	5.44	2.52	1.55	0.20	60.00
175	9.32	50.00	3.77	4.03	7.84	8.87	10.09	8.00	14.07	16.99	4.02	5.37	45.39
176	15.04	2.24	6.08	1.20	12.65	2.00	16.29	7.74	22.71	0.00	6.48	0.20	60.00
177	20.76	2.24	8.40	1.20	17.45	28.10	22.48	8.00	31.34	50.00	8.95	11.82	60.00
178	26.48	2.24	10.71	1.20	22.26	2.00	28.67	8.00	39.97	7.95	11.41	0.20	60.00
179	32.20	2.24	13.02	1.20	27.07	34.94	34.86	8.00	48.60	50.00	13.87	0.20	60.00
180	37.92	2.24	15.34	1.20	31.88	2.00	41.05	8.00	57.24	10.35	16.34	0.20	60.00
181	43.63	2.24	17.65	1.20	36.69	34.24	47.25	8.00	65.87	50.00	18.80	0.20	60.00

从调度结果表可以看出, 桂林断面的实时流量分为以下三种情况。

(1) 桂林断面流量为  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表示满足进入实时优化调度模型的条件, 可通过线性规划模型得到各个水库的最优放水量。

(2) 桂林断面的流量大于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , 如时段 5 和时段 7。这主要是因为梯级水库的前一刻为了满足  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  的流量要求而使水库加大放水, 但由于马斯京根的后效性, 当前时刻桂林断面才对前一时段的放水作出响应, 使得水库按最小放水流量放水演进至桂林断面的流量仍然大于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。马斯京根的后效性使得桂林断面的流量存在波动, 当前时刻满足桂林断面  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  的需求, 可能导致下一时刻桂林断面的流量大于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 桂林断面流量小于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , 如时段 170、时段 173 等。此时水库已经按最大允许放水量下泄, 仍然不能满足  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  的流量需求。以缺水最严重的时段 173 为例: 小溶江、青狮潭已经达到死水位限制, 只能按出入库平衡进行放水; 思安江和川江水库的上一时段来水大于放水, 有一定的库存, 该时段按照来水加库存流量进行放水; 斧子口和五里峡水库已经按最大允许放水量和最大渠道过水能力进行放水。各个水库均按照自身的最大供水能力供水, 但是桂林断面的流量仍不足  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

图 3 为各库的出库流量过程。从调度过程可以看出青狮潭、小溶江、思安江、川江、斧子口的集中补水时段分别为 1 至 153、1 至 84、77 至 120、84 至 159 和 153 至 180。这五个水库距离桂林断面的距离分别为 32 km、40 km、45 km、57 km 与 58 km, 因此满足“就近补水”原则。值得注意的是: 虽然图 3 显示各库流量存在很强的波动, 但是调度时段为 1 日, 不存在闸门的频繁启闭, 且流量变幅已经考虑在最大和最小放水流量约束中, 各库的流量变幅控制在可接受的范围内。

图 4 为桂林断面的流量过程, 可以看出六库联合调度绝大多数情况下能使桂林断面达到  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  以上的补水要求。其中, 流量刚好等于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , 大于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  以及小于  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  的时段总数分别为 134、37、10。有 74.03% 的时段能使桂林断面流量刚好维持在  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , 满足  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  的供水日保证率为 94.48%, 超过设计阶段要求的补水目标 (90.08%)。另外, 从图 4 还可以看出, 缺水时段主要集中在时段 155–175。这主要是由于该时段范围内水库来水量小 (见表 2) 且余留水量已经不多, 受到最小库容约束, 使得最大允许放水流量大大减小, 水库按最大放

水流量决策仍然不能满足桂林断面的流量需求, 如表 2 中时段 170、时段 173 等。时段 176 以后各库的来水明显增加, 水库余留水量增多, 又能保证桂林断面的流量需求。

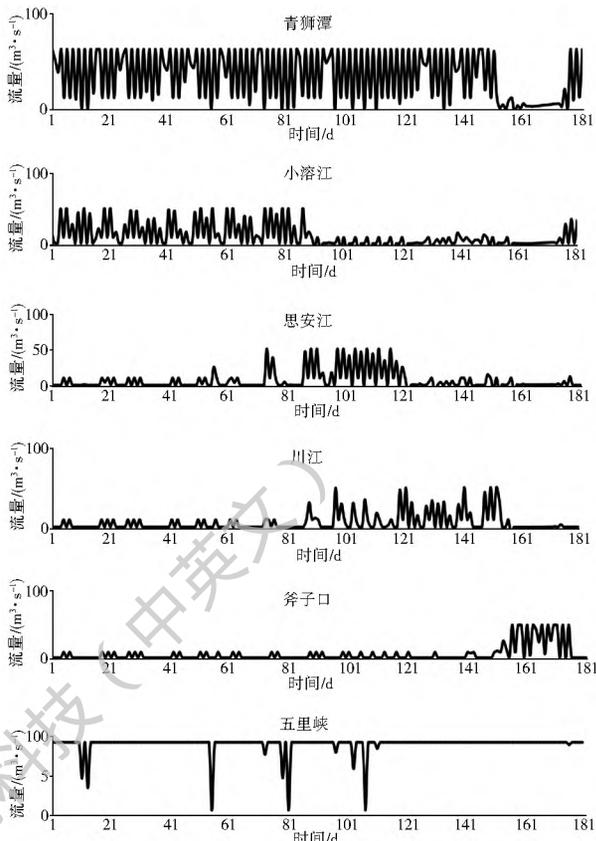


图 3 各库出库流量过程

Fig. 3 The discharge process of reservoirs

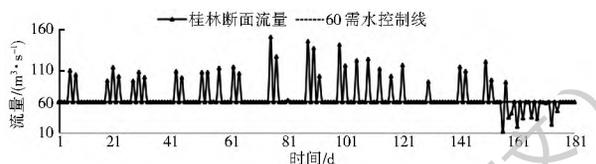


图 4 桂林实时流量过程

Fig. 4 Real time flow process of Guilin section

## 5 结论

本文针对漓江三期补水工程体系, 建立了考虑马斯京根演进滞时和生态环境基流的实时补水优化调度模型, 并提出了相应的实时补水调度规则。通过约束处理技术将模型转化成能用线性规划求解的问题。模型在漓江实时补水优化调度中的应用表明:

(1) 实时补水优化调度模型可以根据桂林断面流量情况实时确定水库的最优调度方案, 模型具有可行性和一定的优越性;

(2) 为了提高补水效益, 除跨流域引水工程五里峡水库以外, 其他水库应按距离桂林断面的距离, 按“就近原则”安排补水顺序;

(3) 实时优化调度模型能使特枯年份桂林断面流量有 74.03% 的时段刚好维持在  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , 满足需水要求的供水保证率为 94.4%。因此水库用尽可能少的放水量满足桂林断面的流量需求, 有利于漓江供水工程长期效益的发挥。

研究属于规划设计阶段的内容, 在制定实时调度规则的时候没有考虑径流预报的不确定性, 规则实际应用效果跟流域径流预报水平息息相关。提高漓江流域预报水平, 再辅以科学的调度手段, 漓江流域的缺水状况可得到有效的缓解。

#### 参考文献(References)

- [1] 邱林, 陈守煜. 水电站水库实时优化调度模型及其应用[J]. 水利学报, 1997(3): 74-77. (QIU L, CHEN S Y. Optimum model for real time hydroelectric power station reservoir operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(3): 74-77. (in Chinese))
- [2] 谢崇宝, 袁宏源, 郭元裕. 水库实时优化调度模糊随机模型[J]. 水电能源科学, 1994(3): 194-199. (XIE C B, YUAN H Y, GUO Y Y. The fuzzy stochastic model for a reservoir time optimal operation[J]. Water Resources and Power, 1994(3): 194-199. (in Chinese))
- [3] 李梅, 刘俊萍, 黄强, 等. 水库实时优化调度余留库容的云决策方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 238-244. (LI M, LIU J P, HUANG Q. Cloud decision making method for the remaining capacity of reservoir in real time optimal operation[J]. Journal of North West A & F University (Natural Science), 2007, 35(3): 238-244. (in Chinese))
- [4] 魏明华, 万芳, 杨鑫, 等. 水库群实时供水优化调度研究[J]. 人民黄河, 2013, 35(8): 56-59. (WEI M H, WAN F, YANG X. Study on the real time multi storage system water supply optimization dispatching[J]. Yellow River, 2013, 35(8): 56-59. (in Chinese))
- [5] 于晓. 变化环境下漓江流域上游水库群防汛抗旱调度研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2011. (YU X. The study of drought and flood prevention of the upstream reservoir group in Li River under the changing environment[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [6] 李平. 基于河流环境流量的漓江上游水库优化调度[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2009. (LI Ping. Reservoir optimal operation in the upstream of Li River based on river environmental discharge[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [7] 李若男, 陈求稳, 蔡德所, 等. 漓江枯水期水库补水对下游水环境的影响[J]. 水利学报, 2010, 39(1): 7-16. (LI R N, CHEN Q W, CAI D S. The impacts of flow recharge in dry season on the downstream aquatic environment of the Lijiang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 39(1): 7-16. (in Chinese))
- [8] 葛守西, 程海云, 李玉荣. 水动力学模型卡尔曼滤波实时校正技术[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 687-693. (GE S X, CHEN H Y, LI Y R. Real time updating of hydrodynamic model by using Kalman filter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 687-693. (in Chinese))
- [9] 张小峰, 穆锦斌, 袁晶. 一维非恒定水动力学模型的实时洪水预报[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(3): 400-404. (ZHANG X F, MU J B, YUAN J. Real time forecasting method based on 1 D unsteady channel flow [J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(3): 400-404. (in Chinese))
- [10] 刘海娇, 苑希民, 杨敏, 等. 基于二维水动力学模型的洪水演进数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2013(s1): 89-91. (LIU H J, YUAN X M, YANG M. Numerical modeling of flood routing based on two dimensional hydrodynamic model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(s1): 89-91. (in Chinese))
- [11] 袁晓辉, 张双全, 张勇传, 等. 非线性马斯京根模型参数率定的新方法[J]. 水利学报, 2001(5): 77-81. (YUAN X H, ZHANG S Q, ZHANG Y C. Parameter estimation of nonlinear Muskingum model using mixed genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(5): 77-81. (in Chinese))
- [12] 孙美云, 刘俊, 左君, 等. 分段马斯京根法在黄河龙潼河段洪水预报中应用[J]. 水电能源科学, 2012(8): 50-52. (SUN M Y, LIU J, ZUO J. Application of Muskingum segmentation algorithm in flood forecasting in Long Tong reach of the Yellow River [J]. Water Resources and Power, 2012(8): 50-52. (in Chinese))
- [13] 黄国如, 胡和平, 尹大凯. 马斯京根-康吉洪水演算方法的稳定性分析[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 206-209. (HUANG G R, HU H P, YI D K. Stability condition analysis of Muskingum-Cunge flood routing method [J]. Advances in Water Science, 2001, 12(2): 206-209. (in Chinese))
- [14] 张硕辅. 水库洪水演算方法探讨[J]. 水利水电技术, 1991(3): 4-9. (ZHANG S F. Discussion of reservoir flood routing method [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1991(3): 4-9. (in Chinese))
- [15] 许拯民. 马斯京根法应用研讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2005, 26(4): 1-3. (XU Z M. Application of Muskingum flood routing method [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2005, 26(4): 1-3. (in Chinese))
- [16] 赵人俊. 马斯京根法——河道洪水演算的线性有限差解[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1979(1): 46-58. (ZHAO R J. Muskingum method-Linear finite difference solution of river flood routing [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1979(1): 46-58. (in Chinese))
- [17] 张旺, 刘攀, 李泽君, 等. 基于 EDA 与 GA 算法的水库群短期防洪优化调度研究[J]. 水资源研究, 2015, 04(5): 395-403. (ZHANG W, LIU P, LI Z J, et al. The study of reservoir group short term flood prevention optimal regulation based on EDA and GA algorithms [J]. Water resources research, 2015, 04(5): 395-403. (in Chinese))
- [18] 黄平. 最优化理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009. (HUANG P. Theory and methods of optimization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese))