

文章编号: 1001-6791(2001)02-0232-05

基于多目标分析的库群系统分解 协调宏观决策方法研究

杨 侃¹, 刘云波²

(1. 河海大学水文水资源与环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 万安水电厂, 江西 赣州 341000)

摘要: 应用多目标和大系统分解协调方法对串联水库群水量宏观优化调度问题进行分析研究, 建立了基于多目标分析的库群系统分解协调宏观决策模型, 并进行了实例计算, 结果令人满意。

关键词: 多目标; 水库调度; 分解协调

中图分类号: O 224, TV 697.1⁺2 **文献标识码:** A

水库群的优化调度研究, 国内外应用动态规划方法较为广泛, 其原因在于动态规划法对目标函数和约束条件限制较少, 可求得全调度期内的最优解, 但动态规划存在“维数灾害”。对此, 人们不断探索其它方法, 其中应用大系统分解协调原理进行库群优化调度是一种有效的途径。目前, 国内外在这方面已取得了不少成果。本文主要针对串联水库系统, 研究大系统分解协调方法在库群系统水量调度宏观决策中的应用, 同时考虑系统的多目标特性和河道的水流传播影响。

1 基于多目标分析的库群系统分解协调宏观决策模型

串联水库群系统(图1), 由 n 个水库组成, 水库群系统有多重目标, 如供水、灌溉和发电等目标。图1中 QY_1 为水库1入流, QR_1 为水库1泄流, QA_1 为水库1供水流量, QB_1 为水库1灌溉流量, QD_1 为水库1至水库2区间入流量。

串联水库群系统有三个目标: 在整个调度期内满足供水要求、满足灌溉用水要求和总电能最大, 分别如式(1)、(2)、(3)所示:

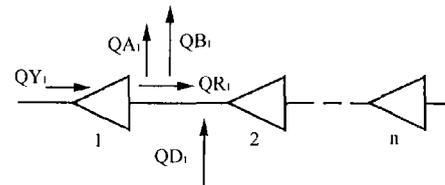


图1 串联水库群系统示意图
Fig. 1. Cascade reservoirs system

$$F^1 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m \left| \frac{R_{i,t}^1 D_{i,t}^1 - QA_{i,t}}{R_{i,t}^1 D_{i,t}^1} \right| \quad (1)$$

$$F^2 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m \left| \frac{R_{i,t}^2 D_{i,t}^2 - QB_{i,t}}{R_{i,t}^2 D_{i,t}^2} \right| \quad (2)$$

收稿日期: 2000-03-03; 修订日期: 2000-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(49701003); 河海大学科学基金(99538473)。

作者简介: 杨侃(1965-), 男, 江苏苏州人, 河海大学水文水资源及环境学院副教授, 博士, 主要从事水资源规划管理方面研究。

$$F^3 = \max \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m k_i QR_{i,t} h_{i,t} \Delta t \quad (3)$$

$$QY_{i+1,t} = a_i + b_i(QR_{i,t} - QA_{i,t} - QB_{i,t}) + QD_{i,t} \quad (\text{关联约束}) \quad (4)$$

$$Z_{i,t}^1 \leq Z_{i,t} \leq Z_{i,t}^2 \quad (\text{水库水位约束}) \quad (5)$$

$$QR_{i,t}^1 \leq QR_{i,t} \leq QR_{i,t}^2 \quad (\text{水库泄量约束}) \quad (6)$$

$$N_{i+1}^1 \leq k_i QR_{i,t} h_{i,t} \Delta t \leq N_{i,t}^2 \quad (\text{出力约束}) \quad (7)$$

$$V_{i,t+1} - V_{i,t} = (QY_{i,t} - QR_{i,t}) \Delta t \quad (\text{水量平衡约束}) \quad (8)$$

式中 i 为水库号； t 为时段号； m 为时段数； $R_{i,t}^1$ 为 i 水库 t 时段供水缩减系数； $D_{i,t}^1$ 为 i 水库 t 时段设计水平供水用水量； $QA_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段实际供水用水量； $R_{i,t}^2$ 为 i 水库 t 时段灌溉缩减系数； $D_{i,t}^2$ 为 i 水库 t 时段设计水平灌溉用水量； $QB_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段灌溉用水量； k_i 为 i 水库发电出力系数； $QR_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段泄流量； $h_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段水头； Δt 为时段长； a_i 和 b_i 为从 i 水库到 $i+1$ 水库河段水流传播系数（河段间水量建立线性相关关系）； $QD_{i,t}$ 为 t 时段从 i 水库到 $i+1$ 水库的区间入流； $Z_{i,t}^1$ 和 $Z_{i,t}^2$ 为 t 时段 i 水库最大最小库容约束； $QR_{i,t}^1$ 和 $QR_{i,t}^2$ 为 i 水库 t 时段最大最小泄流量约束； $N_{i,t}^1$ 和 $N_{i,t}^2$ 为 i 水库 t 时段最大最小出力约束。

由此可见，上述的水库群系统调度问题首先是一个多目标问题，然后是大系统问题。本文提出的基于多目标分析的库群系统分解协调宏观决策模型计算步骤如下：

(1) 根据多目标分层排序原理，按照各目标的重要程度，确定在整个调度期内目标重要性次序，现选择首先满足供水要求，然后满足灌溉用水要求，最后是总发电量最大。由此将多目标问题转化为单目标问题求解；

(2) 通过人机对话方式，确定供水缩减系数，满足供水目标，确定各河段供水流量过程；

(3) 通过人机对话方式，确定灌溉缩减系数，满足灌溉用水目标，由此确定灌溉流量过程；

(4) 最后求解水库群发电优化调度问题，同时满足相应约束条件。水库群发电优化调度的求解采用系统分解协调方法。计算后，如果相应约束条件满足，则计算结束；否则，重新调整供水缩减系数和灌溉缩减系数重复步骤(2)~(4)。

1.1 多目标分层排序方法

多目标分层排序方法是把一个多目标问题逐步转换成单目标问题，借助于单目标方法来求解，其基本思路是将诸目标函数按其重要程度排成一个次序，然后分别在求解前一个目标函数最优解的基础上，求解后一个目标函数的最优解。并把最后一个目标函数的最优解作为多目标问题的最优解。将目标函数按其重要程度排序： $F_1(x), F_2(x), \dots, F_p(x)$ 。先求第一个目标函数 $F_1(x)$ 在可行域 R 上的最优值，即

$$\min_{x \in R} F_1(x) = f_1^* \quad (9)$$

记其最优解集为 R_1^* ，则 $R_1^* = \{x \in R \text{ 且 } F_1(x) = f_1^*\}$ ，在 R_1^* 上求第二个目标函数 $F_2(x)$ 的最优值：

$$\min_{x \in R_1^*} F_2(x) = f_2^* \quad (10)$$

记其最优解集为 R_2^* ，则 $R_2^* = \{X \in R_1^* \text{ 且 } F_2(x) = f_2^*\} = \{X \in R \text{ 且 } F_j(x) = f_j^*, j = 1,$

2}

如此继续, 在第 $p-1$ 个目标函数的最优解集 R_{p-1}^* 上求第 p 个目标函数的最优值, 即

$$\min_{x \in R_{p-1}^*} F_p(x) = f_p^* \quad (11)$$

记其最优解集为 R_p^* , 则 $R_p^* = \{X \in R_{p-1}^* \text{ 且 } F_p(x) = f_p^*\} = \{X \in R \text{ 且 } F_j(x) = f_j^*, j = 1, 2, \dots, p\}$, 因此把 R_p^* 作为多目标问题在分层排序意义下的最优解。

通过人机对话, 确定供水和灌溉用水缩减系数, 可确定各河段供水和灌溉流量过程, 最后进行库群发电优化调度。

1.2 系统分解协调方法

文献 [1] 中推导了水库群发电优化调度的系统分解协调方法, 但没有考虑河道水量的传播影响, 本文在此基础上考虑河道水量传播的影响。

由于式(4)、(5)是等式约束方程, 因此可构造 Lagrange 函数。

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m k_i QR_{i,t} h_{i,t} \Delta t + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m \mu_{i,t} [QY_{i,t} - QR_{i,t} - (V_{i,t+1} - V_{i,t}) / \Delta t] \\ + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m \lambda_{i,t} [a_i + b_i(QR_{i,t} - QA_{i,t} - QB_{i,t}) + QD_{i,t} - QY_{i+1,t}] \quad (12)$$

用 $\lambda_{i,t}$ 和 $QY_{i+1,t}$ 作为协调变量, 去除常数项后, 得到(13)式。

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m k_i QR_{i,t} h_{i,t} \Delta t + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^m \lambda_{i,t} b_i QR_{i,t} \quad (13)$$

根据空间分解原则, 将每一个水库看作一个子系统, 则第 i 个子系统优化模型目标函数为

$$L_i = \sum_{t=1}^m k_i QR_{i,t} h_{i,t} \Delta t + \sum_{t=1}^m \lambda_{i,t} b_i QR_{i,t} \quad (\text{当 } i \neq n \text{ 时}) \quad (14)$$

$$L_i = \sum_{t=1}^m k_i QR_{i,t} h_{i,t} \Delta t \quad (\text{当 } i = n \text{ 时}) \quad (15)$$

对构造的 Lagrange 函数式(12) 求导以确定协调层的求解方式:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_{i,t}} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial QY_{i+1,t}} = \mu_{i+1,t} - \lambda_{i,t} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial QR_{i+1,t}} = k_{i+1} h_{i+1,t} + b_{i+1} \lambda_{i+1,t} - \mu_{i+1,t} = 0 \quad (18)$$

由式(16) 可得到: $QY_{i+1} = a_i + b_i(QR_{i,t} - QA_{i,t} - QB_{i,t}) + QD_{i,t}$ (19)

由式(17) 和式(18) 可得到: $\lambda_{i,t} = k_{i+1} h_{i+1,t} + b_{i+1} \lambda_{i+1,t}$ (20)

由式(20) 推导逆递推方程: $\lambda_{n,t} = k_{n+1} h_{n+1,t} + b_{n+1} \lambda_{n+1,t}$ (21)

$$\lambda_{n-1,t} = k_n h_{n,t} + b_n \lambda_{n,t} = k_n h_{n,t} \quad (22)$$

$$\lambda_{n-2,t} = k_{n-1} h_{n-1,t} + b_{n-1} \lambda_{n-1,t} = k_{n-1} h_{n-1,t} + b_{n-1} k_n h_{n,t} \quad (23)$$

$$\lambda_{n-3,t} = k_{n-2} h_{n-2,t} + b_{n-2}(k_{n-1} h_{n-1,t}) + b_{n-2} b_{n-1}(k_n h_{n,t}) \quad (24)$$

$$\lambda_{1,t} = k_2 h_{2,t} + b_2(k_3 h_{3,t}) + \dots + b_2 \dots b_{n-1}(k_n h_{n,t}) \quad (25)$$

因此, 水库群系统分解协调计算如图 2 所示, 各子系统优化调度模型的目标函数和约束条

件分别见式(14)、(15)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)。在协调层的计算见式(19)、(20)、(21)、(22)、(23)、(24)、(25),在协调层实际计算中的收敛条件如式(26)所示,式中 δ 为计算精度误差, w 为迭代次数。

$$\frac{\partial L}{\partial QR_{i+1,t}} = \frac{|L^{(w+1)} - L^{(w)}|}{|QR_{i+1,t}^{(w+1)} - QR_{i+1,t}^{(w)}|} < \delta \quad (26)$$

2 实例应用

目前黄河下游水资源供需矛盾突出,在这方面已取得不少研究成果^①。本文结合黄河下游三门峡和小浪底两个串联水库联合调度问题进一步深化研究。

需水部门目标考虑四个:(1)供水;(2)防凌;(3)灌溉;(4)发电。其中防凌方面由于黄河水利委员会经过几十年运行实践,总结出防凌的有效经验,因此防凌目标通过子系统约束条件控制。鉴于泥沙运行规律比较复杂,本次未列入目标,将水量调度中涉及的一些减淤问题,通过水量、流量和水位等指标在计算中考虑。本文水文系列选用4个典型年径流资料。根据典型年来水过程和需水资料(2000年水平)研究黄河下游三门峡、小浪底水库联合优化调度宏观决策模型。计算时段以旬为单位。

2.1 三门峡小浪底水库联合优化调度模型

根据需水部门目标的重要程度,确定系统目标的次序,首先满足供水目标,其次是满足灌溉用水,最后满足系统发电量最大。供水目标函数如式(1)所示;灌溉目标函数如式(2)所示;发电目标函数如式(3)所示。式(3)中 $i=1$ 表示三门峡水库, $i=2$ 表示小浪底水库, $m=36$ 表示调度期一年内有36个时段,时段长为旬。约束条件如式(4)、(5)、(6)、(7)、(8)所示,其中小浪底水库下泄流量同时考虑下游利津站的最小流量(大于 $50 \text{ m}^3/\text{s}$),以防止下游河段断流。三门峡和小浪底水库每年1~2月控制下泄量以保证防凌安全。三门峡水库至小浪底水库河段,小浪底水库至利津河段的水量传播关系利用已有成果^①,采用回归方程式(27)考虑河段间水量传播影响。

$$y = a + bx \quad (27)$$

式中 x 为上断面流量; y 为下断面流量; a 和 b 为相关线参数。

2.2 求解方法

(1) 多目标分析 对供水目标和灌溉用水目标均采用统一缩减系数的方法进行调整,缩减系数如果等于1,则表示不缩减,如果等于0.9,则表示缩减10%。

(2) 系统分解协调分析 在各河段供水流量过程和灌溉流量过程确定的情况下,将三门峡小浪底水库联合优化调度模型分解为两个子系统,通过大系统分解协调,三门峡水库发电优化调度子系统目标函数如式(28),约束条件同上,具体算法采用POA方法。

$$\max \sum_{t=1}^{36} k_1 QR_{1,t} h_{1,t} \Delta t + \sum_{t=1}^{36} \lambda_{1,t} b_1 QR_{1,t} \quad (28)$$

^① 黄河水利委员会, 淮海大学. 黄河干流水量宏观调度决策模型研究. 科研报告. 1996. 10.

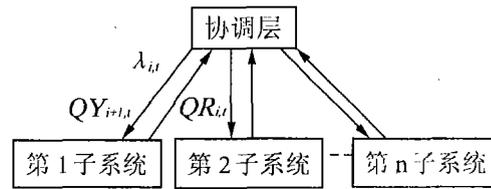


图2 系统分解协调计算示意图

Fig. 2. System Decomposition Coordination Calculation

小浪底水库发电优化调度目标函数子系统如式(29), 约束条件同上, 采用 POA 方法。

$$\max \sum_{t=1}^{36} k_2 QR_{2,t} h_{2,t} \Delta t \quad (29)$$

协调层方程如式(30)、(31)所示, 收敛算法如式(20)所示。

$$QY_{2,t} = a_1 + b_1(QR_{1,t} - QA_{1,t} - QB_{1,t}) + QD_{1,t} \quad (\text{关联约束}) \quad (30)$$

$$\lambda_{1,t} = k_2 h_{2,t} \quad (31)$$

采用 4 个典型年进行计算, 其结果如表 1 所示。

表 1 典型年计算结果

Table 1. Results of calculation

年 份	供水缩减系数	防凌目标	灌溉缩减系数	发电目标
1971	1	满足	1.00	满足
1972	1	满足	1.00	满足
1974	1	满足	0.80	满足
1977	1	满足	1.00	满足

2.3 小结和成果分析

(1) 将多目标分析和大系统分解协调方法相结合应用于串联水库群联合调度问题, 计算效果较好, 适用于较多串联水库组成的系统。对于只有两个串联水库的情况下, 在发电优化调度中采用系统分解方法的计算结果与采用轮换迭代方法的计算结果是一致的。在求解库群联合水量优化调度中考虑了水量的传播影响。

(2) 从实例应用来看, 小浪底水库和三门峡水库联合运用, 与常规调度成果相比, 调节能力显著提高。黄河下游水资源贫乏, 且年内、年际分配非常不均匀。尽管从水资源总量来看是够用的, 但从年内分配看, 有些月份来水多, 造成大量弃水, 有的月份来水太少, 甚至断流, 严重制约两岸的工、农业生产, 影响城乡生活用水。本数学模型能较好地反映其中用水的矛盾, 并进行水资源多目标优化分配。通过优化配水, 可减少断流天数, 使利津的流量基本维持在 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上, 从而保证了环境保护要求。

参考文献:

- [1] 李爱玲. 水电站水库群系统优化调度的大系统分解协调方法研究[J]. 水电能源科学, 1997, 15(4): 58-63.

System Decomposition-Coordination Macro-Decision Method for Reservoirs Based on Multi-Objective Analysis*

YANG Kan¹, LIU Yun-bo²

(1. Hydrological Water Resources and Environment College, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Wangan Hydraulic Power Plant, Ganzhou 341000, China)

Abstract: A system multiobjective decomposition-coordination macro-decision is presented and applied to the Yellow River downstream water quantity allocation. The results show that the method is practicable.

Key words: multiobjective; reservoir operation; decomposition Coordination

* The Project is Supported by National Natural Science Fund of China(49701003)