

供水库群的聚合分解协调模型

王德智 ,董增川 ,丁胜祥

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 ,江苏 南京 210098)

摘要 :针对供水库群联合调度的多水源多用户水资源配置问题 ,选择供水过程均匀为系统目标函数 ,基于大系统聚合分解理论 ,设计了一种对供水水库群聚合分解协调的算法 .在此基础上 ,为了充分发挥库群的联合调度能力 ,使库群的调度过程具有可控性 ,提出了一种基于优先度的调度方案 .与经典的分解协调法相比 ,聚合分解协调法具有较强的实用性 .

关键词 :水资源系统 ;供水库群 ;聚合分解 ;联合优化调度 ;合理配置

中图分类号 :TV697.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)06-0622-05

对于多水源、多用户的供水库群水资源合理配置 ,运用经典的分解协调法 ,存在计算速度、收敛性以及初值敏感性等方面的不足 ,由于实际库群系统规模的复杂性 ,往往不能达到满意的效果^[1] .

因此 ,建模时既要考虑降低模型的复杂度 ,又要使模型的收敛具有鲁棒性 ,且易编制通用程序 .鉴于此 ,本文根据大系统聚合分解协调理论^[2-4] ,对供水库群优化调度模型目标及其求解与调度过程进行了相应的研究 .

1 供水库群水资源调配模型

1.1 单个供水水库概化

考虑独立供水水库 i ,所辖供水片区总数为 j ,相应编号为 k ($k = 1, 2, \dots, j$) 的水源有当地水 x_{0kt} 、需水 d_{kt} 以及水库的供水 x_{kt} .将该水库所辖多个供水片区聚合为一虚拟供水片区 ,相应的当地聚合水资源量为 X_{0it} ,聚合需水量为 D_{it} .其中聚合既包括不同供水片区间的聚合 ,又包括同一供水片区中生活、生产、生态不同部门间的聚合 .

对库 i 而言 ,其状态描述方程为

$$V_{it} = V_{it-1} + Q_{it} + R_{it} - S_{it} - X_{it} \quad (t = 1, 2, \dots, T) \tag{1}$$

式中 : R_{it} —— t 时刻 i 水库的天然入流 ; X_{it} —— t 时刻 i 水库对所辖供水片区的聚合供水量 ; S_{it} —— t 时刻 i 水库的损失水量 ; Q_{it} —— t 时刻 i 水库的外部水源入流 ; V_{it}, V_{it-1} —— i 水库 t 时段初、末库容 ; T ——供水时段数 .

对于单库优化调度 ,选取计算时段 T 内 ,供水过程比较均匀作为水库供水目标函数 ,即满足“ 时间上的公平性 ” ,描述为

$$\min_i \max_t |L_{it} - L_{it+1}| \tag{2}$$

其中 $L_{it} = (D_{it} - X_{0it} - X_{it}) / D_{it}$, $t = 1, 2, \dots, T-1$.同时要遵循“ 有弃水无缺水 ,有缺水无弃水 ” 的原则 .若水库还有防洪、航运等综合利用功能 ,可在约束中进行考虑 .这样单库时间上的水资源分配模型概化为

$$\begin{cases} \min_i \max_t |L_{it} - L_{it+1}| & (t = 1, 2, \dots, T-1) \\ \text{s. t.} & V_{it} = V_{it-1} + Q_{it} + R_{it} - S_{it} - X_{it} \\ & V_{it-1}, V_{it}, Q_{it}, R_{it}, S_{it}, X_{it} \geq 0 \end{cases} \tag{3}$$

1.2 单库供水过程求解

该问题的本质属于单个水库调度,本文根据这一特点,设计了一种二时段滑动比较的算法(为了简化叙述,只考虑库容约束)。

设水库的库容限制过程为 $\{V_{it\min}|t=1,2,\dots,T\}$ 和 $\{V_{it\max}|t=1,2,\dots,T\}$ 。

a. 给定一组可行的初始供水过程 $\{X'_{it}|t=1,2,\dots,T\}$,供给原则为按需供应,其优点是在滑动比较时只需考虑向后滑动,而无需考虑前向滑动。满足如下关系:

$$\begin{cases} X'_{it} = \min\{D_{it} - X_{0it}, V_{it-1} + Q_{it} + R_{it} - V_{it\min} - S_{it}\} \\ \text{s.t.} \quad V_{it\min} \leq V_{it-1} + Q_{it} + R_{it} - X'_{it} - S_{it} \leq V_{it\max} \end{cases} \quad (4)$$

b. 逐时段调整。由给定初值,可得到各时段缺水率的初始值:

$$L_{it} = (D_{it} - X_{0it} - X'_{it})/D_{it} \quad (5)$$

若 $L_{it} \geq L_{it+1}$,则不需要调整,继续下一步;若 $L_{it} < L_{it+1}$,则需要调整,取其平均值:

$$L'_{it} = L'_{it+1} = \frac{D_{it} + D_{it+1} - X_{0it} - X_{0it+1} - X'_{it} - X'_{it+1}}{D_{it} + D_{it+1}} \quad (6)$$

$t, t+1$ 时段供水及相应水库库容需重新计算, $t=1,2,\dots,T-1$ 。

c. 重复上述步骤,直至整个供水过程不变为止。

实践检验表明,该算法收敛速度快,计算结果合理。若需要进一步考虑算法的稳健性和收敛速度,可以考虑三时段或多时段滑动算法。

1.3 单库供水空间合理分配

对于特定的时段 t 而言,水库聚合供水量为 X_{it} ,需要对该聚合量进行空间上的分解,即满足“空间上的公平性”。从而可得到供水片区空间上分配的子问题

$$\begin{cases} \min \sum_k [\alpha_k (d_{kt} - x_{0kt} - x_{kt})/d_{kt}] \\ \text{s.t.} \quad \sum_k x_{kt} = X_{it} \end{cases} \quad (0 \leq x_{kt} \leq d_{kt} - x_{0kt}) \quad (7)$$

其中 $0 \leq \alpha_k \leq 1$ 为规一处理后的子区间相对重要性系数,可以运用层次分析法,根据各供水片区的水资源利用的效益而定。

该问题是一个典型的约束二次规划问题,常用二次规划的解法求解,由于实际情形的复杂性,其通用性能比较差。本文采用先解等式约束的子问题,再复核不等式约束的策略进行求解,从而得到问题的解。具体解法如下:

a. 等式约束的拉格朗日乘法。考虑式(8),显然式(7)的约束强于式(8),如果式(8)的最优解满足原问题的不等式约束,则两者同解。

$$\begin{cases} \min \sum_k [\alpha_k (d_{kt} - x_{0kt} - x_{kt})/d_{kt}] \\ \text{s.t.} \quad \sum_k x_{kt} = X_{it} \end{cases} \quad (8)$$

由拉格朗日乘法,可得到该问题的最优解

$$x_{kt} = d_{kt} - x_{0kt} - \lambda^* d_{kt}^2 / 2\alpha_k^2 \quad (9)$$

其中 λ^* 为拉格朗日乘子($\lambda^* \geq 0$)。

b. 复核约束条件。由求解过程知,原问题的不等式约束为 $0 \leq x_{kt} \leq d_{kt} - x_{0kt}$ 。上限显然能够满足,但是下限,即分配值的非负性未必能满足,所以必须对非负性进行检验。产生非负性的原因是由于各供水片区的当地水源分布不均匀所致。

设供水量分配值 x_{kt} 为负的供水区域的编号集合为 Ω ,则要重新考虑问题

$$\begin{cases} \min \sum_{k \notin \Omega} [\alpha_k (d_{kt} - x_{0kt} - x_{kt})/d_{kt}] \\ \text{s.t.} \quad \sum_{k \notin \Omega} x_{kt} = X_{it} \end{cases} \quad (10)$$

同理可以求解。重复步骤a、b,直至满足非负性为止,这样就可以得到各个供水片区各个时段合理优化的分

配水量.

1.4 供水库群的聚合分解协调

在研究单库聚合分解的基础上,研究两库 $i, i+1$ 串联的情形,且相应的供水片区数为 m_i, m_{i+1} ,且水力联系为 $i \rightarrow i+1$. x_{ijt} 和 x_{ilt} ($j=1, 2, \dots, m_i; l=1, 2, \dots, m_{i+1}$) 是 i 水库 t 时段对其直接供水片区和间接供水片区(库 $i+1$ 的直接供水片区)的供水量, x_{i+1lt} ($l=1, 2, \dots, m_{i+1}$) 为 $i+1$ 水库 t 时段对其直接供水片区的供水量. 初始 $x_{ijt}=0, x_{ilt}=0, x_{i+1lt}=0, k=1, k$ 为迭代次数. 具体如下(省略约束条件):

a. 对库 $i+1$ 优化调度, 目标函数为

$$\begin{cases} \min_{i+1} \max_t [(D_{i+1t} - X_{i+1t}^k - X_{0i+1t}^k) \vee D_{i+1t}] \\ \min \sum_{l=1}^{m_{i+1}} [\alpha (d_{lt} - x'_{0lt} - x_{ilt}^{k-1} - x_{i+1lt}^k) \vee d_{lt}] \end{cases} \quad (11)$$

其中 $X_{0i+1t}^k = \sum_{l=1}^{m_{i+1}} (x'_{0lt} + x_{ilt}^{k-1})$.

b. 对库 i 优化调度, 目标函数为

$$\begin{cases} \min_i \max_t [(D_{it} + D_{i+1t} - X_{it}^k - X_{0it} - X_{0i+1t}^k) \vee (D_{it} + D_{i+1t})] \\ \min \sum_{j=1}^{m_i} [\alpha (d_{jt} - x_{0jt} - x_{ijt}^k) \vee d_{jt}] + \sum_{l=1}^{m_{i+1}} [\alpha (d_{lt} - x'_{0lt} - x_{ilt}^k - x_{i+1lt}^k) \vee d_{lt}] \end{cases} \quad (12)$$

其中: $X_{0i+1t}^k = \sum_{l=1}^{m_{i+1}} (x'_{0lt} + x_{ilt}^k); X_{0it} = \sum_{j=1}^{m_i} x_{0jt}$.

c. 至 $|x_{ilt}^{k-1} - x_{ilt}^k| \leq \epsilon$ 或相应的供水过程不变为止, 否则 $k=k+1$ 转步骤 a.

上述算法本质上是一种轮库迭代算法^[4-7], 故是收敛的. 显然, 上述聚合分解协调思路可以推广到一般库群的情形, 具有一定的普遍性.

1.5 供水库群联合调度

一般来说, 水库调度研究较多的是如何得到合理配置的结果. 然而, 各个水库如何蓄水, 从而实现合理配置, 也是一个值得研究的问题^[2, 8]. 本文在充分考虑库群联合调度能力的基础上, 提出了优先度概念.

所谓优先调度是指在遵循水资源优化配置方案的前提下, 就库群中的某一水库而言, 把单库所辖供水片区的需水按一定的优先程度提前调入该库中, 达到预蓄的目的. 定义仅仅按配置方案调度, 优先度为 0; 按最大可能调度, 优先度为 1. 记优先度为 α , 一般情况下 $0 \leq \alpha \leq 1$. 优先度是一个相对的概念, 体现每个水库蓄水的优先程度. 就库 i 而言, $\alpha_i=0$; 则对库 $i+1$ 而言, $\alpha_{i+1}=1$.

考虑水库 i , 一般而言, 输入输出项共有 4 项: (a) 水库的天然来水 R_{it} (扣除损失); (b) 其他水源的入流 Q_{it} ; (c) 水库 i 调度给水库 $i+1$ 的水量 Q'_{it} ; (d) 该水库的供水量 $X_{it}, t=1, 2, \dots, T, T$ 是计算时段数.

对水库 $i, i+1$ 而言, 仅有调度水量 Q'_{it} 的过程是可变的. 根据优先度的概念, 水库的蓄水过程有 2 个极限状态, 一个是多余的水量尽可能蓄在库 i 中, 另一个是多余的水量尽可能蓄在库 $i+1$ 中. 这样对两库而言就有 2 个可行调度区间.

根据上述思路, 可以设计相应的算法. 决策者通过控制优先度 α , 可以合理分配单库的蓄水量.

2 实例分析

为了验证上述算法的可行性, 以某城市的 2 个串联供水水库 1 年的长期优化调度为例, 记该 2 个水库分别为 1, 2, 且水力联系为 $1 \rightarrow 2$. 设该 2 个水库的死库容分别为 66 万 m^3 和 6 万 m^3 , 且水库的初末库容相等, 分别为 2450 万 m^3 和 845 万 m^3 , 正常蓄水库容分别为 4900 万 m^3 和 1690 万 m^3 , 其中 1 库的入流过程中包括外部调水, 且 1 库没有当地水源.

针对上述实例, 用本文设计的聚合分解协调法进行计算, 结果见表 1.

由表 1 可知, 供水区域时空上的供水率基本上相当, 满足“时空上公平”的原则. 与此相对应, 可采用经典的分解协调算法来优化该问题, 选择相对缺水率最小为目标函数, 将该 2 库联合优化调度问题运用拉格朗日乘子法分解为 2 个单库独立优化调度问题, 子问题采用动态规划法进行寻优, 建立二层递阶关系. 将用两种

方法计算的供水率过程进行比较,如图 1 所示(ADC 表示本文算法,DC 表示经典分解协调法)。

表 1 2 个串联供水水库优化调度结果

月份	水库 1				水库 2			
	需水 W_D /万 m^3	当地水 W_P /万 m^3	水库供水 W_O /万 m^3	供水率 W_S /%	需水 W_D /万 m^3	当地水 W_P /万 m^3	水库供水 W_O /万 m^3	供水率 W_S /%
1	1039.9	0	951.8	91.528	1475.2	66.9	1283.2	91.520
2	855.7	0	783.2	91.527	1213.9	55.1	1055.9	91.523
3	1027.9	0	940.8	91.526	1458.2	98.6	1235.8	91.510
4	1031.9	0	944.4	91.520	1463.9	339.7	1000.1	91.523
5	1144.0	0	1047.0	91.521	1622.5	376.5	1108.5	91.525
6	1112.0	0	1017.7	91.520	1577.6	365.8	1078.0	91.519
7	1217.5	0	1114.2	91.515	1727.1	400.2	1180.2	91.506
8	1261.5	0	1154.5	91.518	1789.6	414.5	1223.1	91.506
9	1198.8	0	1097.0	91.508	1700.6	393.8	1162.4	91.509
10	1220.1	0	1116.6	91.517	1730.8	400.7	1183.3	91.518
11	1124.0	0	1028.6	91.512	1594.5	369.1	1090.2	91.521
12	1116.0	0	1021.3	91.514	1583.1	366.4	1082.4	91.517

由图 1 可知,本文设计算法所计算的供水率时空上的差异性明显小于经典分解协调法的结果。其主要原因如下 (a)虽然两者都有协调过程,但动态规划的方法本质上是离散空间的组合寻优,而本文所设计的算法是连续空间中的解析寻优,更能逼近真正的最优解 (b)两者的目标函数不一致,本文算法是时空中最大的缺水率最小,而经典分析协调法是累计的相对缺水率最小,虽然可以控制每个时段的供水量的上下限,但由于该目标是时空上的一个累积量,目标虽最小,却在某些情况下,时空中各个时段的供水率还是有所差异的,并不能收敛到本文设计算法的优化结果。

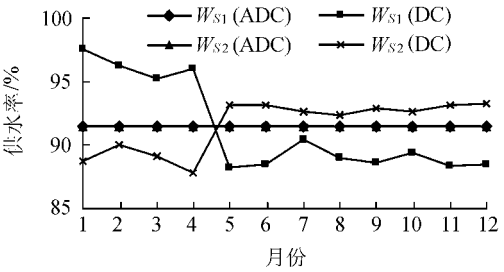


图 1 供水率过程比较

Fig.1 Comparison of process of water supply ratio

如上所述,在获得 2 库最终优化调度结果后,各个单库的蓄水过程是值得研究的。根据本文提出的优先度思想,可以得到相应的两个可行调度区间,如图 2 所示。显然,这两个调度区间也是随实时水情信息动态变化的。决策者可以选择合适的优先度,合理分配单库的蓄水量,这比仅仅获得两条调度曲线更为合理,更具有可操作性。

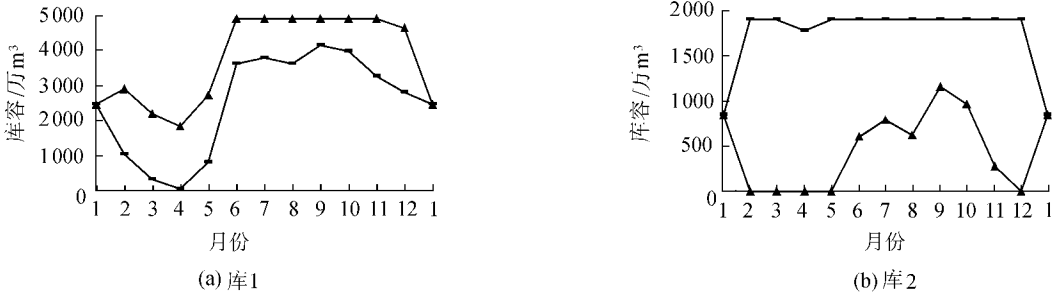


图 2 基于优先度的 2 个水库调度区间

Fig.2 Operation intervals of two reservoirs based on priority

3 结 论

为了使基于库群联合调度的水资源配置模型具有较简单的结构且有良好的收敛性,本文选择供水过程

相对均匀作为整个库群系统的目标函数,设计了相应的时间和空间分解算法,并提出了一种基于优先度的联合调度方案.实证分析结果表明,本文设计的模型和方案具有较强的可行性和实用性.

参考文献:

[1] 冯尚友.水资源系统工程[M].武汉:湖北科学技术出版社,1991:54-66.
[2] 叶秉如.水资源系统优化规划和调度[M].北京:中国水利水电出版社,2001:209-216.
[3] 董增川,叶秉如.水电站库群优化调度的分解方法[J].河海大学学报,1990,18(6):70-78.
[4] 钟平安,王会容,刘静楠,等.深圳市水资源系统优化调度模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):616-620.
[5] 杨侃.水库调度中逐次优化算法的收敛性研究[J].河海大学学报,1996,24(1):104-107.
[6] 袁宏源,邵东国,郭宗楼,等.水资源系统分析理论与应用[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,2000:147-181.
[7] 金菊良,丁晶.水资源系统工程[M].成都:四川科学技术出版社,2002:13-17.
[8] 陈惠源,万俊.水资源开发利用[M].武汉:武汉大学出版社,2001:153-168.

Research on aggregation-decomposition-coordination model
of feeding reservoir group

WANG De-zhi , DONG Zeng-chuan , DING Sheng-xiang

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The study is performed to deal with the problem of water resources allocation in joint operation of feeding reservoir group with multiple users and multiple water sources. With a uniform water supply process taken as the objective function , a water resources allocation model was developed based on the theory of aggregation and decomposition of large-scale system , which provided a new hierarchical aggregation-decomposition-coordination algorithm for feeding reservoir group. A joint operation scheme was proposed based on priority to make full use of the storage of feeding reservoir group and to make the operation process controllable. A case study performed for comparison of the conventional decomposition-coordination method with the aggregation-decomposition-coordination method shows that the present method is of high applicability.

Key words :water resources system ; feeding reservoir group ; aggregation and decomposition ; joint optimal operation ; rational allocation