

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.05.003

考虑供水权重系数的水库群联合供水调度

周 芬 ,郑雄伟 ,马 俊 ,钟名军

(浙江省水利水电勘测设计院 浙江 杭州 310002)

摘要 :建立了多水库联合运用情况的水库联合供水模拟模型。该模型以系统年总供水量最大为目标 ,以日为计算时段 ,以水库日供水量为决策变量 ,以水库库容、可供水量、供水保证率等为约束条件 ,采用模拟法对模型进行求解 ,重点对水库群联合供水权重系数的计算方法进行探讨。

关键词 :水库群 ;联合供水 ;补偿调节 ;供水权重系数

中图分类号 :TV21 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)05-0011-03

Joint water supply operation of reservoir group considering weight coefficient of water supply //ZHOU Fen , ZHENG Xiong-wei , MA Jun , ZHONG Ming-jun (Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power , Hangzhou 310002 , China)

Abstract : A model for the joint water supply operation of multiple reservoirs was established. The model aimed to maximize the annual total water supply of the system , with the day regarded as the calculation interval , the daily water supply of the reservoirs as the decision variable , and the reservoir capacity , available water supply and guarantee rate of water supply as the constraint conditions. The model was solved by means of the simulation method. The method to calculate the weight coefficient of the joint water supply of the reservoirs was highlighted.

Key words : reservoir group ; joint water supply ; compensation adjustment ; weight coefficient of water supply

随着经济社会的发展和城乡居民生活水平的提高 ,浙江省区域性水资源供需矛盾较为突出。新建供水水库和跨流域调水工程是解决区域性水资源供需矛盾的有效措施 ,但是 ,新建工程面临着政策处理、资金投入、跨区域协调等方面的问题 ,往往从项目立项、前期审批、施工建设到投入运行需要较长时间。浙江省河流水系众多 ,已建水库 4 000 多座 ,存在水力或水利联系的水库群由于水库水文特性、调节性能等方面的差别 ,在某一功能上为同一对象服务时 ,通过“水文补偿”(即利用水库水文条件的差别来进行补偿)和“库容补偿”(即利用水库调节性能的差异来进行补偿)可以更充分地利用水资源 ,提高水库群的兴利能力^[1-2]。因此 ,在有条件的地区进行水库群的联合供水调度是缓解水资源供需矛盾的另一个有效途径。

目前 ,许多学者对多水库联合调度方法进行了研究 ,采用的方法大多为线性规划法、动态规划法、神经网络法、遗传算法、大系统优化法以及上述优化方法的耦合法等^[3-9]。这些方法的优点是考虑的因素多 ,有的可进行实时优化 ,但存在的问题是求解麻

烦 ,需要根据建立的模型编制专用程序 ,特别是当 2 个以上水库联合调度运用动态规划时会出现“维数灾” ,使求解较为困难。模拟模型法是一种建模容易、求解方便、实用性强的求解方法。笔者采用基于规则的模拟模型法进行水库群联合供水调度求解 ,重点对水库群联合供水权重系数的计算方法进行探讨。

1 水库群联合供水调度模拟模型

1.1 模型框架

1.1.1 目标函数

以水库群供水量最大为系统目标 :

$$\max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{i,j,t}$$

式中 : $x_{i,j,t}$ 为 i 水库 t 时段向 j 用户的供水量 ; M 为水库个数 ; N 为用水户个数 ; T 为计算时段数。

1.1.2 约束条件

a. 系统可供水总量约束 :

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{i,j,t} \leqslant WG_t$$

b. 单个水库可供水量约束 :

作者简介 :周芬(1978—) ,女 ,湖北武汉人 ,工程师 ,硕士 ,从事水利规划工作。E-mail :zhouf@zjwater.gov.cn

$$\sum_{j=1}^N x_{i,j,t} \leq W_{i,t} \quad \sum_{i=1}^N x_{i,j,t} \leq D_{j,t}$$

c. 水库水量平衡约束：

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (W_{ini,t} - W_{outi,t} - W_{si,t})$$

d. 水库库容约束：

$$V_{mini,t} \leq V_{i,t} \leq V_{maxi,t}$$

e. 水库供水水量非负约束：

$$x_{i,j,t} \geq 0$$

f. 系统供水保证率约束：

$$p_{life} \geq 95\% \quad p_{irr} \geq 90\%$$

式中： WG_t 为水库群系统 t 时段的可供水量； $W_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的可供水量； $D_{j,t}$ 为 j 用户 t 时段的需水量； $V_{i,t+1}$ 、 $V_{i,t}$ 分别为 i 水库 t 时段末和时段初的蓄水量； $W_{ini,t}$ 、 $W_{outi,t}$ 、 $W_{si,t}$ 分别为 i 水库 t 时段入库水量、出库水量和损失水量； $V_{mini,t}$ 、 $V_{maxi,t}$ 分别为 i 水库 t 时段允许的最小和最大蓄水量； p_{life} 、 p_{irr} 分别为重点供水和一般供水保证率。

1.2 模型求解

由于水库群是一个复杂的串并联模式，模型计算非常复杂。以运筹学为基础的水库群优化调度方法是进行水库群联合调度模型求解的有效途径。目前普遍采用的方法有模拟模型法和优化法。在系统目标和约束都较为清晰且规模不是十分庞大时，优化模型可以得到较满意的结果。但由于水资源系统本身的复杂性，难以完全采用目标函数和约束一次性构建完整的规划模型，且容易出现规模过大模型难以求解或优化结果的过程难以与实际对应的情况。模拟模型根据对系统实际过程的深入分析，模仿实际系统的各种效应，对系统输入给出预定规则下的响应过程。对于水库群联合调度，模拟模型的基本思路就是按照符合实际流程的逻辑推理对水资源存蓄、供给等进行定量分析和计算。下面给出模拟模型求解过程必须遵循的基本规则：①时段划分规则。以长系列模拟计算为基础，按日划分时段。本次水文系列选用 1962—2007 年共计 46 年资料。②安全运行规则。有防洪任务的水库，供水时调度运行原则应与防洪调度运行原则相协调，在台汛期、梅汛期和非汛期按不同的水位进行控制，超过限制水位则产生弃水。③用水户设定及计算目标。用水户包括重点用水户（城乡居民生活、重要工业、城镇公共等）和一般用水户（工业自备、农灌及林牧渔等），重点用水户供水保证率为 95%，一般用水户供水保证率为 90%。④用水户优先用水原则。有综合利用任务的水库，按照用水户在社会经济中的地位，采用分级供水制度，即首先满足确保用户需水，然后满足一般用户需水。⑤水库群供水规则。多个

水库同时向 1 个用水户供水时，按各时段每个水库的供水权重系数进行供水。

2 水库群联合供水权重系数

在进行水库群联合供水计算时，当出现多个水库能同时满足某一用水户需水时，从满足水资源需求量的角度来说，无论哪个水库供水至需水户，只要总量满足即可。但是，对于各水库的运行结果，由于不同水库调节性能、当前蓄水状况及下时段的来水情况等不同，则存在哪个水库优先供水和时段供水多少的问题。为确定水库供水优先顺序和时段供水量，给定供水权重系数 λ ， λ 计算公式如下：

方法 1：

$$\lambda_i = \frac{VP_{i,t}}{\sum_{i=1}^n VP_{i,t}} \quad (1)$$

方法 2：

$$\lambda_i = \frac{\frac{VP_{i,t}}{\alpha_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{VP_{i,t}}{\alpha_i^2}} \quad (2)$$

方法 3：

$$\lambda_i = \frac{\frac{R_{i,t+1}}{VK_{i,t}}}{\sum_{i=1}^n \frac{R_{i,t+1}}{VK_{i,t}}} \quad (3)$$

式中： $VP_{i,t}$ 为第 i 个水库当前时段的可供库容； n 为水库个数； α_i 为第 i 个水库的库容系数； $R_{i,t+1}$ 为第 i 个水库下一时段的来水量； $VK_{i,t}$ 为第 i 个水库当前时段的未蓄库容。

3 种供水权重系数计算方法的基本比较如下：

方法 1 权重系数根据水库当前时段可供库容确定，水库供水权重系数与当前时段可供库容成正比。方法 1 仅考虑了水库当前时段的蓄水量，一定程度上反映了水库间的“库容补偿”特性，但未能充分反映水库水文特性和调节性能等。式 (1) 在规划设计阶段和实际供水调度操作中，水库当前时段的可供库容是一个确定值。

方法 2 权重系数根据水库当前时段可供库容和水库库容系数确定，水库供水权重系数与当前时段可供库容成正比，与库容系数成反比。方法 2 考虑了水库当前时段的蓄水量和水库调节性能，可以通过水库调节性能差异更好地进行水库间的库容补偿。式 (2) 在规划设计阶段和实际供水调度操作中，水库当前时段的可供库容和水库库容系数均为确定值。

方法 3 权重系数根据水库下一时段来水量和水库当前时段未蓄库容确定，水库供水权重系数与

下一时段来水量成正比,与水库当前时段末蓄库容成反比。方法3考虑了水库当前时段的蓄水量和水库水文特性,可以通过水库水文特性和调节性能差异充分进行水库间的水文补偿和库容补偿。式(3)在规划设计阶段时水库当前时段的末蓄库容和水库下一时段来水量均为确定值,但在实际供水调度操作中,水库下一时段的来水量则具有不确定性。

从3种供水权重系数计算方法的基本比较可以看出,方法3能更有效地提高水库群的供水能力。

3 实例研究

3.1 水库群特性

浙北苕溪流域属天目山脉,为浙江省的暴雨中心之一,降雨丰沛,水资源量较丰。苕溪水系主要支流上均建有水库,水库之间的布置以并联形式为主。本次以该水系的5座大中型水库为例开展水库群联合调度研究^[10]。5座水库中有大型水库3座、中型水库2座,上述水库的基本特性参数见表1,水库群空间分布及联合供水见图1。

表1 研究区域水库群基本特性参数

水库编号	集雨面积/ km ²	总库容/ 万 m ³	正常库容/ 万 m ³	兴利库容/ 万 m ³	灌溉面积/ hm ²	水库集水区径流深/ mm	多年平均入库径流/ 万 m ³	库容系数
A库	110.0	9966	7207	6813	329.3	790.1	8691	0.78
B库	258.0	11500	5370	4000	1400.0	817.9	21102	0.19
C库	331.0	21800	10250	8900	6466.7	771.6	25540	0.35
D库	39.5	2112	1772	1638		898.7	3550	0.46
E库	235.0	11420	5313	4916		640.1	15042	0.33

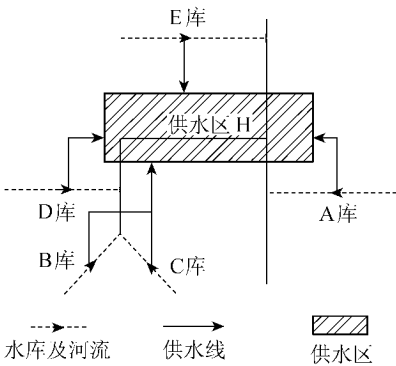


图1 水库群空间分布及联合供水示意图

从水库库容特性来看,2座中型水库调节性能高于3座大型水库,A库调节性能最强,其次是D库,调节性能最差的是B库;A库比B库的库容系数大0.59。

从水库水文特性来看,5座水库均位于浙北苕溪流域,基本处于同一水文分区,但是,由于水库所在的支流不同,水文特性仍有所差别。A库、B库和C库集水区径流深基本一致,B库和C库入库径流过程具有一定的同步性;D库集水区径流深明显高于其他4座水库,E库集水区径流深则是所有水库中最小的。

从上述水库的库容特性和水文特性来看,5座水库组成的水库群具备库容补偿和水文补偿的条件,库容补偿比水文补偿条件好。

3.2 成果比较

规划考虑上述5座水库联合向同一城镇供水区H供水。联合调度计算时各水库在满足其灌区灌溉供水要求的前提下,通过模拟优化计算水库群联合向H供水区所能提供的最大供水量。计算方案如下:

方案0 水库单独供水调度计算。本方案计算各水库在满足其灌区灌溉供水保证率的前提下,各水库单独提供的城镇供水量。

方案1 水库群联合供水调度计算,供水权重系数采用式(1)计算。

方案2 水库群联合供水调度计算,供水权重系数采用式(2)计算。

方案3 水库群联合供水调度计算,供水权重系数采用式(3)计算。

上述方案计算成果汇总于表2。从计算成果可以看出:①水库群联合供水调度的日均供水能力比水库单独供水调度多3万~13万m³/d,水库群的水量利用率也较水库单独供水调度提高了2%~7%。②考虑了库容补偿的方案2系统供水量比方案1约多2900万m³,考虑库容补偿和水文补偿的方案3系统供水量比方案2多725万m³。③由于本区域基本处于同一水文分区,水库群库容补偿效果优于水文补偿。实例研究证明,水库群联合调度比水库单

表2 水库群联合供水调度计算成果表

水库编号	方案0		水量利用率/%	方案1		水量利用率/%	方案2		水量利用率/%	方案3		水量利用率/%
	日均供水能力/(万 m ³ ·d ⁻¹)	多年平均供水量/万 m ³		多年平均供水量/万 m ³	水量利用率/%		多年平均供水量/万 m ³	水量利用率/%		多年平均供水量/万 m ³	水量利用率/%	
A库	17.4	6351	73	6888	79	2565	30	4485	52			
B库	20.0	7252	34	6657	32	13475	64	12138	58			
C库	32.0	11654	46	12379	48	12618	49	13033	51			
D库	4.0	1461	41	2085	59	1479	42	2662	75			
E库	16.6	6053	40	5839	39	6599	44	5143	34			

注:方案1~3的水库日均供水能力分别为93万m³/d,101万m³/d和103万m³/d。(下转第22页)

不确定度,由此得到 $u(\bar{V}) = 0.0025 \text{ m/s}$ 。仪器误差引起的不确定度采用 B 类评定,即基于经验或其他信息假定的概率分布的估计方法,由流速仪检定结果知 $\Delta V = 0.01\bar{V}$, $V = 0.2278 \text{ m/s}$,得 $\Delta V = 0.0023 \text{ m/s}$ 。取正态分布(置信概率为 99.73%)时包含因子 $k = 3$,则 $u(\Delta V) = \Delta V/3 = 0.00076 \text{ m/s}$ 。

流速检测不确定度评定结果表明,流速测量引起的分量不确定度 $u(\bar{V})$ 为 0.0025 m/s ,旋桨流速仪仪器误差引起的分量不确定度 $u(\Delta V)$ 为 0.00076 m/s ,合成标准不确定度为 0.0026 m/s ,扩展不确定度为 0.0052 m/s 。所测水体流速不稳定和测点位置误差造成的不确定度占总不确定度的比例很大,故影响流速检测结果的主要因素为流速脉动和测点位置。

3 结 语

将测量不确定度评定与水工模型试验结合起来,对水工模型测量参数进行不确定度分析,既有利于模型制作中主要参数精度的控制,也有利于试验手段、方法的改善,提高水工模型试验所测数据的准确度。针对水工模型试验常见的 2 种检测参数(流

量和流速)进行不确定度评定,得到以下结论:①流量不确定度贡献最主要的参数是堰上水头,其次是堰宽和堰高。试验中应特别注意量水堰测针的控制及测读,量水堰制作过程中应重点注意堰宽的精度控制。②引起流速检测不确定度最主要的参数是水体脉动及位置误差。由于水流脉动的不可控性,流速检测时应特别注意每次测量测点位置的控制。

参考文献:

[1] 南京水利科学研究院.水工模型试验[M].北京:水利电力出版社,1985.
[2] 中国合格评定国家认可委员会.化学分析中不确定度的评估指南[M].北京:中国计量出版社,2006.
[3] 国家质量技术监督局计量司.测量不确定度评定与表示指南[M].北京:中国计量出版社,2000.
[4] 李慎安.JJF1059—1999《测量不确定度评定与表示》讨论之二:A、B 两类标准不确定度[J].工业计量,2005,15(6):33-37.
[5] 范巧成.Excel 在复杂数学模型测量不确定度评定中的应用[J].计量学报,2002,26(4):380-383.
[6] SL155—1995 水工(常规)模型试验规程[S].
(收稿日期:2011-01-25 编辑:高建群)

(上接第 13 页)

独调度具有明显的优越性,采用式(3)计算的供水权重系数最有利于提高水库群的系统供水量。

4 结 语

建立了多水库联合运用情况的水库联合供水模拟模型,采用模拟法对模型进行求解,重点对水库群联合供水权重系数的计算方法进行探讨。

a. 考虑了库容补偿和水文补偿的水库群联合供水调度较水库单独供水调度能显著提高水资源利用率,提高水库群的系统供水量。

b. 水库群联合供水权重系数计算方法的选择对于提高系统供水量的影响是显著的,就提高系统供水量来说,本次给出的供水权重系数计算公式(3)优于公式(1)、公式(2)。

c. 从实际供水调度操作来看,供水权重系数计算公式(2)更便于水库群的实际调度运行,这是因为公式中涉及的水库当前可供库容较容易计算得到,而水库的库容系数也是一个相对稳定的数值,供水权重系数计算公式(3)中关于水库下一时段的来水量分析预测存在一定难度,尤其是枯水季节更难把握,因此在一定程度上影响了水库群调度运行的准确性。

参考文献:

[1] 周之豪,沈曾源,施熙灿,等.水利水能规划[M].北京:中国水利水电出版社,1997.
[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.
[3] 游进军.水资源系统模拟理论与实践[D].北京:中国水利水电科学研究院,2005.
[4] 黄彤,许文斌,郑建青.多水源多用户大型水资源系统优化模型[J].水利学报,2002,33(3):91-96.
[5] 刘卫林,董增川,王德智.混合智能算法及其在供水水库群优化调度中的应用[J].水利学报,2007,38(12):1436-1443.
[6] 甘治国,蒋云钟,鲁帆,等.北京市水资源配置模拟模型研究[J].水利学报,2008,39(1):91-95.
[7] 周玉琴,王丽萍,张保生,等.深圳市东部水库群联合供水调度模型探讨[J].水电能源科学,2005,23(2):25-28.
[8] 谷媛媛,矫振宽,朱红玉,等.区域多水源联合调配供水研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2008,25(4):69-72.
[9] 王德智,董增川,丁胜祥.供水库群的聚合分解协调模型[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(6):622-626.
[10] 浙江省水利水电勘测设计院.杭嘉湖地区水利综合规划[R].杭州:浙江省水利水电勘测设计院,2010.
(收稿日期:2010-11-04 编辑:方宇彤)