黄河流域水库群多目标运行控制协同方法研究*

畅建霞 黄 强 王义民 彭少明

(西安理工大学水利水电学院水资源研究所, 西安 710048)

摘要 依据协同学原理, 提出了水库多目标运行控制的方法, 该方法能够综合考虑水资源利用过程中相互冲突的供水、防洪、发电等目标. 应用序参量构建了描述水资源子系统协调程度的有序度模型, 并结合信息熵原理, 建立了有序度熵, 作为判定系统是否向协调有序方向演化的根据. 对水库运行方式进行调控时, 首先用模拟的方法获得初始方案, 然后根据有序度和有序度熵对初始方案进行调控. 应用该方法对黄河流域水库群的调控进行了研究.

关键词 水库群 运行控制 协同学 有序度 有序度熵

水库的运行要满足城镇供水、工农业用水、防洪、发电以及水质和娱乐等的需求. 目前, 多目标分析是水资源领域研究的热点, 尤其是当涉及到环境问题时, 多目标已成为主要研究趋势. 由于上述目标有些是相互冲突的, 因此, 实际运行中不可能找到一个使全部目标都达到最优的解, 管理人员只能根据自己的经验来寻求一个满意解[1]. 这样, 如何在水库实时调度中快速地产生并选择合理、有效的操作方案就显得非常重要. 本文提出一种基于协同学理论的多目标水库系统运行方案的调控方法, 阐明了将人机交互和自动模拟相结合的程序算法, 给出了具体公式和求解过程, 并对黄河流域水库群的调控进行了研究.

1 黄河流域水资源概况

黄河流域水资源多年平均径流量为 580×10^8 m^3, 主要用来满足沿途各省区生活、工业、农业用水和发电, 维持生态平衡. 黄河干流已建成 9 座梯级电站, 上游包括龙羊峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、大峡和青铜峡水电站, 其中, 龙羊峡

2004-01-15 收稿, 2004-05-08 收修改稿
* 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043608)资助

是一个多年调节水库电站，刘家峡为年调节，其余的为径流式．下游主要有两个电站，三门峡和小浪底，它们都是年调节电站．水库的主要参数如表 1 所示．图 1 为黄河流域图．

表 1 水库主要特性

水库	多年平均径流 /$m^3 \cdot s^{-1}$	总库容 /m^3($\times 10^8$)	正常蓄水位/m	防洪限制水位 /m	电站装机 /kW ($\times 10^4$)
龙羊峡	650	247	2600	2594	128
刘家峡	877	57	1735	1726	116
三门峡	1911	18.4	330	325	25
小浪底	1340	126.5	275	250	180

图 1 黄河流域图

由于经济的发展和人们生活水平的提高，黄河流域用水需求在逐年增加，导致水资源供需失衡，缺水断流日趋严重．因此，目前流域水资源管理显得非常重要，主要包括确定水库的合理运行方式，把有限的水资源在不同用水部门之间进行分配，以减少缺水造成的损失，防止洪水发生，并协调各目标之间的关系[2]．

2 水库运行控制的协同方法

应用该方法时，决策者首先设定约束条件，通过计算机模拟获得水库运行备选方案，然后应用协同理论进行评价．如果评价结果不能满足评价准则，那么模型将根据评价结果自动调整参数，对水库的运行进行调控，产生另一个备选方案，直到满足要求，并且调度人员满意为止．

2.1 人机交互模拟产生备选方案

模拟模型是建立在水库时段水量平衡方程基础上的，图 2 为一个典型的水库

系统, 对于第t时段第i 个水库, 水量平衡方程表示为[3]:

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + I_{i,t} - P_{i,t} - W_{i,t} - G_{i,t} - EV_{i,t} + \sum_{k=1}^{m} A_{i,k} D_{k,t}, \tag{1}$$

式中, $V_{i,t}$ 为时段 t 末水库 i 蓄水量, $I_{i,t}$, $P_{i,t}$, $W_{i,t}$ 和 $EV_{i,t}$ 分别为时段 t 水库电站 i 的入库径流、发电水量、供水量和蒸发量, $G_{i,t}$ 为洪水期 t 时段水库 i 通过溢洪道的泄流量, $D_{i,t}$ 为时段 t 上游水库 i-1 的下泄水量. 如果水库 k 有下泄水量进入水库 i, 那么 $A_{i,k}$ =1 否则 $A_{i,k}$ ＝0 , m 为系统中水库总数.

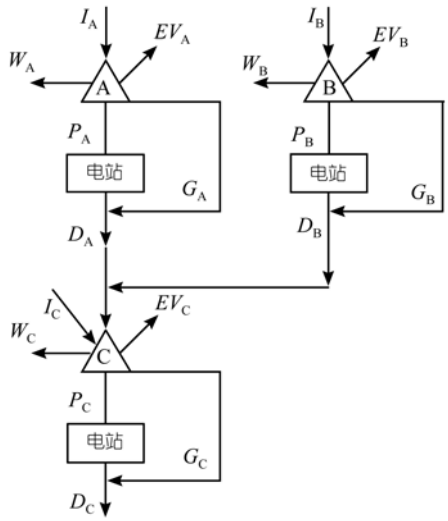

图 2　水库系统示意图

根据(1)式, 就可以模拟水库的运行. 对黄河流域水库群系统, 为研究方便, 将流域用带有节点和箭头的网络图表示, 每个节点都表示一个水库或重要的水资源利用断面, 影响流域流量的活动, 如生活、工农业供水、水库蓄水和放水、自然入流和支流汇流、流域外引水等都发生在节点上, 如图 3 所示[4,5].

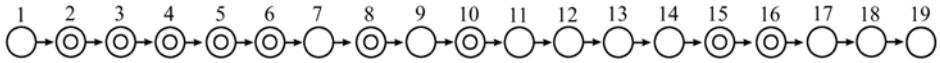

图 3　黄河流域节点图

1. 龙羊峡以上, 2. 龙羊峡水库, 3. 李家峡水库, 4. 刘家峡水库, 5. 盐锅峡水库, 6. 八盘峡水库, 7. 兰州, 8. 大峡, 9. 下河沿, 10. 青铜峡水库, 11. 石嘴山, 12. 河口镇, 13. 龙门, 14. 潼关, 15. 三门峡水库, 16. 小浪底水库, 17. 花园口, 18. 高村, 19. 利津

根据黄河流域水资源利用的特点, 确定模拟模型的运行规则如下: (1) 流域内供水的优先次序为: 生态用水、生活和工业用水、农业用水、发电用水; (2)水库的时段放水首先要满足防洪和防凌的要求. 冰凌洪水通常发生在上游的宁夏、内蒙河段, 以及下游花园口河段, 这样, 刘家峡水库在 11 月到次年 3 月, 以及小浪底水库从 12 月到次年 4 月的放水必须满足防凌约束; (3) 龙羊峡、刘家峡水库负责满足黄河上中游从刘家峡到三门峡水库之间的用水, 以及上游梯级电力要求. 三门峡到利津断面的生活、工农业用水, 以及下游生态用水由三门峡与小浪底水库的联合运行满足; (4) 为满足下游生态基流, 在枯水时段, 上游需给下游补水, 这样, 河口镇断面的流量应保证基流用水, 要求刘家峡水库在非汛期放水要大于某一临界值.

在模拟运行过程中，首先由操作人员根据知识和经验，通过人机交互来确定约束条件，如凌汛期流量限制、生态基流等，然后水库的运行状态就可以通过模型运行来获得[6~8].

2.2 方案评价

在不同约束条件下，水库的运行方式是不同的，因此，需要在众多方案中找出满意的运行方式. 近几年来，各种系统科学理论已逐渐应用到水资源领域，并且获得了较好的应用成果. 系统科学中的协同学理论主要是关于系统有序演化和子系统协调发展的理论，而水库运行控制的目标就是要协调各用水部门的关系，使水资源系统向有序方向演化. 因此，本文把协同学理论引入水资源领域，应用该理论控制水库运行，以寻求合理的操作方式.

协同学理论指出，系统处于相变点处的变量可分为快、慢弛豫两类变量，慢弛豫变量也称为系统的序参量，它主宰着整个系统演变的方向，决定系统的协调有序状态. 系统由无序走向有序的机理，关键在于系统内部序参量之间的协同作用，这样，序参量就可以作为控制器，而且其组成应该根据调控目标确定. 流域水资源系统包括三部分，经济子系统、社会子系统和生态子系统. 对水库运行进行控制就是要提高 3 个子系统的协同性. 根据黄河流域水资源的特点，以及选择序参量的方法，研究确定经济子系统的序参量为流域供水量 W、梯级出力 N(或发电量 E)；社会子系统序参量为凌期兰州和花园口断面流量 $Q_{\text{lan}}Q_{\text{hua}}$、龙羊峡水库调度期末水位 Z_{long}；生态子系统序参量为非汛期生态基流 $W_{\text{non-flood}}$、汛期冲沙水量 W_{flood}. 不同水库运行方案，这些序参量的值是不同的.

对于任何一个方案，序参量取值应该位于一定区间，即：大于临界最小值而小于临界最大值，这样才能保证水资源系统的协调有序演化. 为此，引入有序度这一概念来衡量子系统之间协同作用. 考虑第 i 个子系统的第 j 个序参量 x_{ij}，其值应在临界阈值区间. 如果 x_{ij} 在阈值区间的取值越大，子系统的有序程度越高，其取值越小，子系统的有序程度越低，有序度采用(2)式，否则应用(3)式；如果 x_{ij} 在阈值区间越接近于临界值的平均值，子系统有序度越高，则采用(4)式.

$$u_{ij}(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - x_{ij\min}}{x_{ij\max} - x_{ij\min}}, \tag{2}$$

$$u_{ij}(x_{ij}) = \frac{x_{ij\max} - x_{ij}}{x_{ij\max} - x_{ij\min}}, \tag{3}$$

$$u_{ij}(x_{ij}) = 1 - \frac{\left| x_{ij} - (x_{ij\min} + x_{ij\max})/2 \right|}{x_{ij\max} - x_{ij\min}}, \tag{4}$$

式中，$u_{ij}(x_{ij})$为第 i 个子系统第 j 个序参量 x_{ij} 的有序度，$x_{ij\min}$, $x_{ij\max}$ 分别为序参量 x_{ij}

的最小和最大临界阈值.

对于黄河流域水资源系统的序参量, W, N, Z_{long}, $W_{non\text{-}flood}$ 和 W_{flood} 在临界阈值区间内取值越大, 对相应子系统的有序贡献也越大, 所以 $u_{11}(x_{11})$ $u_{12}(x_{12})$ $u_{23}(x_{23})$ $u_{31}(x_{31})u_{32}(x_{32})$按(2)式计算. 根据长期运行经验, 凌期控制断面流量 Q_{lan} 和 Q_{hua} 如果接近于阈值均值更有利于防凌, 所以 $u_{21}(x_{21})$ $u_{22}(x_{22})$按(4)式计算. 这样, 有序度 $u_{ij}(x_{ij})$就可以作为控制反馈因子. 如果所有序参量 x_{ij} 的取值在临界阈值区间, 即 $u_{ij}(x_{ij})\in[0,1]$, 那么有利于水资源系统的有序发展, 说明水库运行方案是可行的, 否则就需要进行调控. 得出序参量的有序度以后, 子系统的有序度可通过 $u_{ij}(x_{ij})$ 的集成来实现, 如(5)式所示:

$$r_i=\sum_{j=1}^{n}\lambda_j u_{ij}(x_{ij}),\ \lambda_j\geqslant 0,\ \sum_{j=1}^{n}\lambda_j=1, \tag{5}$$

式中, r_i 称为第 i 个子系统的有序度, λ_j 为序参量 x_{ij} 的权系数, 其含义是第 j 个目标在保持子系统 i 有序运行中所起的作用.

从(5)式可以看出, 不同方案经济子系统有序度 r_1、社会子系统有序度 r_2 和生态子系统有序度 r_3 的值是不同的, 而且由于特定时段水资源量的有限性, 各子系统的有序度不可能同时增加, 某一个子系统有序度的提高, 可能会导致其他子系统有序度的降低, 但是整个系统的有序度如何变化却无从确定. 这样如果两个备选方案各序参量都位于临界阈值之间, 但子系统有序度不同, 如何进行选择. 本文应用信息熵来解决这一问题, 根据信息熵的概念和公式, 建立如(6)式所示的有序度熵函数. 耗散结构的熵理论指出, 系统熵减少, 协调有序性增强, 熵增大, 有序性减弱. 水资源系统是一耗散结构, 因此对于上述问题, 如果方案 A 的有序度熵比方案 B 的有序度熵小, 那么, 方案 A 应该是较优方案:

$$s=\sum_{i=1}^{3}\frac{1-r_i}{3}\log\frac{1-r_i}{3}. \tag{6}$$

2.3　调控过程

从以上分析可知, 有序度和有序度熵贯穿了整个控制过程. 首先, 通过计算机模拟获得第 1 个水库运行备选方案, 为了保证系统的协调有序, 该方案每个子系统序参量应在临界阈值之间, 即$u_{ij}(x_{ij})\in[0,1]$, 因此, 水库的运行首先应由反馈因子$u_{ij}(x_{ij})$来调控. 如果$u_{ij}(x_{ij})$不满足上述条件, 那么在原备选方案的基础上, 与序参量x_{ij}有关的约束限制条件将以很小的步长自动进行调整, 重新模拟计算, 直到满足上述要求, 获得第 2 个备选方案, 这是第 1 次调控过程. 由于特定时段内水资源量的有限性, 经济、社会、生态子系统之间存在着相互竞争, 各序参量的有序度不可能同时增加. 例如: 如果生活、工农业供水量(r_1)加大, 那么在龙羊峡、刘家峡水库运行方式不变的情况下, 生态供水量(r_3)就会减少, 这样, 在方案序参

量都满足阈值要求的前提下，需要依据有序度熵进行调控. 如果第 2 个备选方案的有序度熵比原方案增加，那么同样调整约束条件进行模拟计算，得到第 3 个备选方案，这是第 2 次调控过程. 循环上述两个调控程序，直到有序度和有序度熵都满足要求[9~12].

综上所述，当水库的运行方案通过模拟方法得到后，调控将根据有序度和有序度熵进行. 调控结束后，如果决策人员对结果不满意，可以通过人机交互改变约束重新求解.

3 应用实例

应用上述方法与模型，结合黄河流域水资源特点，研究了黄河流域典型枯水年水库群的运行方式. 该年度花园口天然径流为 515.6×10^8 m^3，龙羊峡、刘家峡、三门峡和小浪底水库的起调水位分别为 2560, 1710, 300 和 230 m. 各断面城市和工农业需水量见表 2.

表 2 各断面需水量 (单位: $m^3(\times10^8)$)

断面	龙羊峡以上	刘家峡	兰州	下河沿	石嘴山	河口镇	潼关	三门峡	花园口	高村	利津	总计
需水量	4.0	14.4	36.2	24.8	20.4	54.8	81.2	26.4	32.0	23.5	90.0	407.6

3.1 序参量的临界阈值

序参量 x_{ij} 的临界值 $x_{ij\min}$, $x_{ij\max}$ 对于有序度及评价结果影响很大，所以在调控之前首先应该确定其值，根据黄河流域水资源利用的特点以及多年运行经验，各临界值的取值如下.

(ⅰ) 供水量阈值. 1998 年国务院分水方案可作为流域内正常来水年份(花园口天然径流为 560×10^8 m^3)时省区配水、实施总量控制的依据. 该方案中各省区的分配水量如表 3 所示. “各省区年度用水量实行同比例丰增枯减”是黄河水量分配中规定的一个条款. 因此，对于其他来水年份，各省区都应按同一比例打折计算，该比例计算公式如:

$$\beta=\frac{W_{花}}{560}. \tag{7}$$

表 3 黄河流域分水方案 (单位: $m^3/a(\times10^8)$)

省份	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙	山西	陕西	河南	山东	河北	总计
分水量	14.1	0.4	30.4	40.0	58.6	38.0	43.1	55.4	70.0	20.0	370.0

对于花园口天然径流量小于 $560\times10^8 m^3$ 的年份($\beta<1$)，各省区供水量的阈值如(8)式，否则采用(9)式进行计算:

$$W_{i\min} = Y_i \times \beta, \qquad W_{i\max} = Y_i, \tag{8}$$

$$W_{i\min} = Y_i, \qquad W_{i\max} = Y_i \times \beta, \tag{9}$$

式中, $W_{i\min}$ 和 $W_{i\max}$ 为计算年份第 i 个省区供水量阈值的最小值和最大值, Y_i 为国务院分水方案中(正常年份)第 i 个省区的可供水量.

(ii) 发电量阈值. 对发电量的评价通常用设计多年平均电量这一指标来衡量, 根据黄河梯级电站的实际运行情况, 年发电量阈值取为:

$$E_{\min} = 0.8 \times E_{设} = 242.2 \times 10^8\ \text{kWh}, E_{\max} = 1.2 \times E_{设} = 363.3 \times 10^8\ \text{kWh}. \tag{10}$$

(iii) 凌期兰州和花园口断面流量阈值. 根据长期运行经验, 为防止发生冰凌洪水, 凌期兰州和花园口断面流量阈值按表 4 所示的数据.

表 4　凌期兰州和花园口断面流量阈值　　(单位: m^3/s)

断面	时段	12 月	1 月	2 月	3 月
兰州	最大值 $Q_{兰\max}$	700	700	700	500
	最小值 $Q_{兰\min}$	500	400	550	100
花园口	最大值 $Q_{花\max}$		600	400	
	最小值 $Q_{花\min}$		500	300	

(iv) 水库年末库容阈值. 龙羊峡是一多年调节水库, 其调度期末库容的大小将决定在未来年份给下游的补偿作用. 调度期末(即 6 月底)水库水位最小应为死水位,最大可为防洪限制水位.

$$Z_{龙\min} = 2530\ \text{m}, Z_{龙\max} = 2594\ \text{m}. \tag{11}$$

(v) 非汛期生态基流和汛期冲沙水量阈值. 据黄河流域水资源利用情况, 其阈值如下式:

$$W_{生非\min} = 50 \times 10^8\ \text{m}^3, \quad W_{生非\max} = 100 \times 10^8\ \text{m}^3,$$

$$W_{生汛\min} = 110 \times 10^8\ \text{m}^3, \quad W_{生汛\max} = 160 \times 10^8\ \text{m}^3. \tag{12}$$

3.2　第 1 个备选方案的约束条件

进行第 1 次模拟计算时, 操作人员需要依靠自己的经验确定约束条件: (1) 表 4 为凌期防凌约束; (2) 表 5 为利津断面生态需水要求; (3) 为满足电力需求, 上游梯级电站非汛期出力最小值为 2000 MW, 汛期为 2200 MW.

表 5　利津断面生态需水要求　　(单位: m^3/s)

月份	7	8	9	10	11	12	2	3	4	5	6
流量	800	1000	1000	1500	300	200	50	300	300	400	300

3.3　模拟结果

模型运行后得出, 该典型枯水年城市、工农业和生态总供水量为 401.68×

$10^8 m^3$，其中生态供水为 $172.13\times10^8 m^3$，上、下游梯级电站总发电量为 265.25×10^8 kWh. 表 6 为序参量值，表 7 为序参量有序度和有序度熵. 可以看出，序参量供水量的有序度大于 1，该年份花园口天然径流量为 515.6×10^8 m^3，小于正常年份的天然径流 560×10^8 m^3. 按照国务院分水方案及由其确定的供水阈值，供水量的最大阈值为 370×10^8 m^3，而计算结果为 397.05×10^8 m^3，大于最大阈值，因此，调控时总供水量应降低. 其他序参量的有序度都位于 0 和 1 之间，但生态子系统的有序度偏低. 由于经济子系统有序度大于 1，系统有序度熵失去意义.

表 6 各方案的序参量值

序参量				第 1 个备选方案	第 2 个备选方案	第 3 个备选方案
经济子系统	供水量 /m^3($\times10^8$)			401.68	364.50	364.50
	梯级发电量 /kwh($\times10^8$)			265.25	267.21	267.62
社会子系统	凌期控制断面流量/$m^3\cdot s^{-1}$	兰州	12 月	651.2	654.1	654.1
			1 月	658.1	657.8	657.8
			2 月	564.3	568.4	568.4
			3 月	470.9	478.5	478.5
		花园口	1 月	506.3	504.4	506.6
			2 月	306.1	305.4	305.4
生态子系统	龙羊峡水库调度期末水位/m			2548	2548	2548
	非汛期生态基流/m^3 ($\times10^8$)			56.88	58.49	62.55
	汛期冲沙水量 /m^3 ($\times10^8$)			115.24	121.50	121.50

表 7 各方案的序参量有序度及有序度熵

	第 1 个备选方案	第 2 个备选方案	第 3 个备选方案
供水量有序度	2.10	0.81	0.81
梯级发电量有序度	0.38	0.382	0.384
经济子系统有序度	**1.24**	**0.596**	**0.597**
凌期断面流量有序度	0.60	0.60	0.60
龙羊峡末水位有序度	0.29	0.29	0.29
社会子系统有序度	**0.44**	**0.44**	**0.44**
非汛期生态基流有序度	0.14	0.16	0.25
汛期冲沙水量有序度	0.10	0.23	0.23
生态子系统有序度	**0.12**	**0.20**	**0.24**
有序度熵		**0.396**	**0.394**

3.4 调控后结果

减少生活、工农业用水需求，其他约束不变，运行模拟模型，可获得第 2 个备选方案. 调控后，供水量的有序度位于 0 和 1 之间，生态子系统的有序度从 0.12 提高到 0.2，水资源系统的有序度熵为 0.396. 但是和其他子系统有序度相比，生态子系统的有序度偏低，因此，第 2 次调控加大生态环境需水. 结果表明，生态子系统有序度提高了 0.04，而经济和社会子系统有序度不变，这主要是由于小浪底水库的供水量有所加大，图 4, 5 为不同方案刘家峡水库和小浪底水库的水位变

化过程线. 第 3 个备选方案水资源系统的有序度熵为 0.394, 比第 2 个方案的低 0.002, 这表明第 3 个方案能更好地协调水资源各部门关系, 有利于系统向有序方向演化, 为推荐方案.

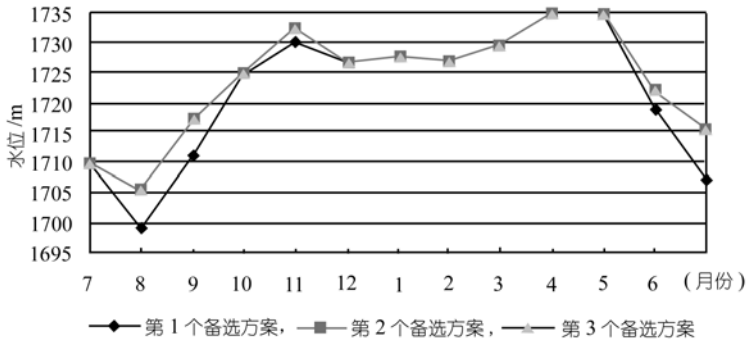

图 4　刘家峡水库水位变化图

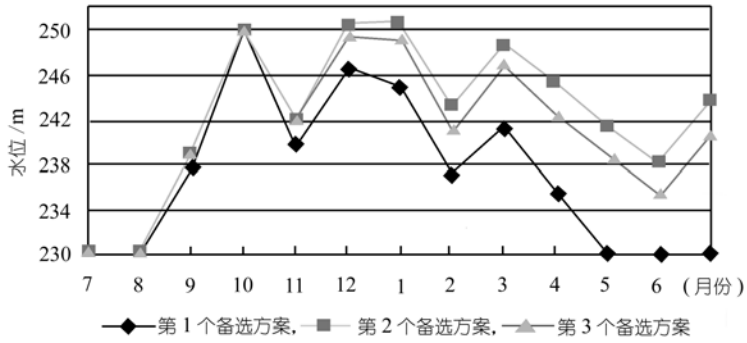

图 5　小浪底水库水位变化图

4　结论

水库运行控制是水资源领域研究的热点之一. 本文介绍了一种多目标水库运行控制的方法, 该方法的创新之处在于将模拟和协同论相结合, 通过模拟首先确定各时段水库的状态, 获得备选方案, 然后依据协同论建立有序度和有序熵, 通过这两个参数来评价该备选方案, 并调控水库的运行. 最后应用该方法对黄河流域水库群的调控进行了研究.

参　考　文　献

1　Simonovic S P. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. Journal of Water Resources Planning and Management, 1992, 118(3): 262~280

2　Sharad K J, Manmohan K G, Pushpendra K A. Reservoir operation studies of sabarmati system, Iindia.

Journal of Water Resources Planning and Management, 1998,124(1): 31~37

3 Kucaera G, Diment G. General water supply system simulation model. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(4): 365~382

4 Sigvaldason O T. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. Water Resources Research, 1974, 12(2), 263~278

5 Yeh W W G. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. Water Resources Research, 1985,21(12): 1797~1818

6 Wurbs R A. Reservoir-system simulation and optimization models. Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, 119(4): 455~472

7 Andreu J, Capilla J, Sanchis E. Aquatool, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. Journal of Hydrology, 1996,177(3): 269~291 [DOI]

8 Elizabeth A E,Timothy M, Edith Z,et al. Goal programming decision support system for multiobjective operation of reservoir systems. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127(2): 108~120

9 Florian T B, Dragan A S, Godfrey A W. Water reservoir control with data mining. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129(1): 26~34 [DOI]

10 Makinde-Odusola B A, Marino M A. Optimal control of ground water by the feedback method of control. Water Resources Research, 1989, 25(5): 1341~1352

11 McLaughlin D, Velasco H L. Real-time control of a system of large hydropower reservoirs. Water Resources Research, 1990, 26(4): 623~635 [DOI]

12 Oliveira R, Loucks D P. Operating rules for multireservoir systems. Water Resources Research, 1997, 33(4): 839~852 [DOI]