

供水水库优化模拟风险调度模式的研究

陶 涛, 刘遂庆

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

【摘要】 针对水库调度过程中的风险问题, 引入了供水水库调度的优化模拟风险管理模式。首先建立了供水水库群的优化调度模型, 然后对度量风险的可靠性、脆弱性、回弹性、事故周期等指标作了论述。在此基础上, 模拟水库调度过程中存在的风险, 并通过模拟与优化的反馈机制, 建立了供水水库优化模拟风险调度的总体模式。

【关键词】 供水水库; 优化; 模拟; 风险调度; 反馈机制; 水库; 供水

中图分类号: TV697

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860(2005)11-0008-04

Study on optimized and simulated risk operation mode for water supply reservoir

TAO Tao, LIU Sui-qing

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: So far as the risk during the operation of reservoir is concerned, the optimized and simulated risk management mode for water supply reservoir is introduced herein; in which the optimal operation model for a group of water supply reservoirs is developed at first, and then the indexes for the risk estimation, such as reliability, fragility, resiliency and the accident periods etc. are discussed. On the basis of this, the possible risks during the operation of reservoir are simulated, and furthermore, the general optimized and simulated risk operation mode for the reservoir is established based on the feedback mechanism of the simulation and the optimization concerned.

Key words: water supply reservoir; optimization; simulation; risk operation; feedback mechanism; reservoir; water supply

1 引言

优化与模拟是水资源系统供水工程中两个重要的技术手段。优化侧重于系统内部各因素之间的动态约束关系和期望条件下系统的发展结果, 而不考虑系统实际的运转过程。优化模型在理论上是严谨的, 但水资源系统是一个非结构化非平衡体, 数学描述难以做到恰如其分, 如问题的复杂性、多目标性及不确定因素等影响; 而对于模拟模型, 由于用户的多目标性、制约条件的多样性等影响, 其难以得到满意解, 但它有很强的经验性, 可通过对变量随时变化的观测推导出变量之间的关系, 而问题的解决过程也就是理解系统中各种关系的过程。模拟模型同时是应用过程也是模型自身不断完善的过程, 无论模型预测的精度如何, 都应经常重新评价模型的适应性, 任何时候都不应认为系统中所有的有关特性, 在模型中均充分恰当地考虑到。

因此在供水过程中, 优化模型和模拟模型必须紧密结合, 不可分割, 一方面是因为其中存在着许多随机因素, 使整个过程充满了不确定性, 优化可以从平均的概念出发来揭示这些不确定因素的影响, 而在实际操作过程中受随机因素的影响将会偏离决策目标, 偏离的程度如何, 用优化的方法来解答是困难的, 而采用优化与模拟技术相结合的方法则可以对决策目标给出更为详细的描述; 二是优化一般更侧重于宏观层次上的规划, 而对微观方面只进行适当的概化, 若要解答在一定的决策目标下微观层次上的关系则需要用

收稿日期: 2004-11-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(50409016), 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目资助(2004B012), 中欧科技合作第五框架项目资助(ICA4-2001-10182)。

作者简介: 陶 涛(1974—), 女, 重庆人, 副教授, 博士后研究员。

模拟的方法来解决。在模型中两种方法综合运用,对系统的运行过程以及不确定性和风险进行模拟,将模拟结果反馈给优化模型,修改其部分初始条件,再进行优化,给出当时状况下系统最优运行策略,如此反复进行,直到系统达到理论上最优,而又现实上可行的策略,这就是本文建立优化风险模拟模型的主要思路。因此,首先建立一个水库库群供水系统优化调度模型,在此基础上,建立水库调度风险模拟模型,两者结合建立了优化与模拟相结合的风险模拟优化模型。

2 供水水库优化调度模型

在此将建立一个以供水为主,兼顾防洪、发电、养殖、旅游等多功能的供水水库的优化调度模型,从而为下一节的模拟模型打下基础。水资源供水水库优化调度的目的,就是在尽量满足系统目标供水量的情况下,使系统弃水量最小,或在供水得不到保证的情况下,使系统缺水量最小。

在建立模型过程中,除已假定天然来水系列为确定已知的理想状况和需求预测量外,对水库蒸发渗漏损失、输水渠系河系水量损失均忽略不计,以简化计算工作量。设水资源系统中有水库 I 个。以 V 、 Q 、 s 、 q 分别代表各水库的库容、来水量、缺水量及对供水区的供水量,并定义 $J(i)$ 、 $K(i)$ 分别为与水库 i 有直接水力联系的上游水库集合和下游水库集合。用 $q_t^{j(i),i}$ 表示在 t 时段水库 i 的上游水库 $j(i)$ 对水库 i 的泄流量, $q_t^{i,k(i)}$ 表示在 t 时段水库 i 对下游水库的泄流量。

2.1 状态变量和决策变量

以时间 t 作为阶段变量,选择时段初蓄水库容 V_t 为模型的状态变量,时段供水量 q_t 为决策变量。

2.2 目标函数

一个水资源系统满足其约束条件限制的可行运行方式是无穷多的。为了从某一角度衡量这些可行运行方式的优劣,就需要制定某种评价的标准。通常在供水系统中,多采用弃水量或缺水量作为评价的准则,即采用供水不足时的缺水量最小或尽量满足系统供水量的前提下弃水量最小作为目标函数,在本节建立的优化模型中,考虑了总供水净效益最大为目标函数,目标函数的表达式如下

$$\max F = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I f(V_t^i, q_t^i) \quad (1)$$

$$\text{其中 } f(V_t, q_t) = \gamma_L q_{L,t} + \gamma_I q_{I,t} + \gamma_A q_{A,t} + \gamma_E q_{E,t} \quad (2)$$

式中, $q_{L,t}$ 、 $q_{I,t}$ 、 $q_{A,t}$ 、 $q_{E,t}$ 分别为第 t 时段水库供给生活、工业、农业和发电的水量; r_L 、 r_I 、 r_A 、 r_E 分别为衡量供给生活、工业、农业和发电的水的重要性所相

应的权重指标。

根据动态规划最优性原理,库群联合优化调度的递推公式可写为

$$F_t(V_t^i) = \max_{q_t^i \in \Omega_t} [F_t(V_t^i, q_t^i) + F_{t+1}(V_{t+1}^i)] \quad (3)$$

式中, $F_t(V_t^i)$ 为水库从时刻 t 的状态 V_t^i 出发,至水库运行的终了时刻 T 期间的目标函数值; $F_t(V_t^i, q_t^i)$ 为时刻 t 水库处于状态 V_t^i 和供水量为 q_t^i 时的面临时段效益期望值; $F_{t+1}(V_{t+1}^i)$ 为水库从时段 $t+1$ 的状态 V_{t+1}^i 出发至时段 T 期间各时段均采用最优决策时,所得的效益期望值; Ω_t 为决策变量 q_t^i 的可行域。

第 i 个水库的状态转移方程为

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + (Q_{i,t} - q_{i,t}) \Delta t \quad (4)$$

2.3 约束条件

库容约束

$$V_N^i \leq V_t^i \leq V_{\max}^i \quad (5)$$

式中, V_N^i 为水库 i 死库容或为满足需求所必须维持的最低蓄水量; $V_{\max}^i$ 为水库 i 在汛期防洪限制水位对应的水库蓄水量,在非汛期为正常蓄水位对应的水库蓄水量。

水库供水、引水能力约束

$$\begin{aligned} QD_t^i &\leq QX_t^i \\ I_t^i &\leq QY_t^i \end{aligned} \quad (6)$$

洪水控制的随机性目标约束

$$V_t^i \leq VF_t^i \quad (7)$$

其他目标约束,如养殖、旅游、环境等要求可统一写成

$$V_t^i \leq VE_t^i \quad (8)$$

非负约束,所有变量均为非负。

3 供水系统风险模拟

模拟模型主要是针对水库调度过程中所存在的风险而建立的,水库调度过程实际上是寻求水库运行的最优规则,在优化调度中,它所决定的运行规则是在满足约束条件下目标函数的最优,而此时的目标函数比较单一,并且在调度过程中所涉及的风险并没有得到考虑,重要的是以供定需的局面并没有得到改善。针对这些问题,在优化调度的基础上,建立了水库模拟风险调度模型^[1~3]。

在建立模拟优化模型之前,首先介绍模型中的风险指标。

3.1 可靠性

可靠性指标是在事故 μ 已明确的条件下,系统不处在模式 μ 的相对频率的估值。为确切起见,用

$\xi(\mu, j)$ 表示如下的示性函数

$$\xi(\mu, j) = \begin{cases} 1 & \text{时刻 } j \text{ 系统处于模式 } \mu \text{ 中} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $\sum_{j=1}^t \xi(\mu, j)$ 为系统处于事故模式中的总历时, 其中 t 为总的时段。

于是按定义, 关于模式的可靠性性能指标 P 为

$$P = 1 - \sum_{j=1}^t \xi(\mu, j) / t \quad (9)$$

3.2 回弹性

回弹性是指系统可能从失事状态恢复到正常状态的特性。如果系统处于事故状态时间很长并且恢复很慢, 那么其设计就有严重问题, 说明系统隐藏着严重后果。回弹性系数是衡量回弹性优劣的一种测度, 它表示系统平均的恢复率, 这些都可以用数学式表达。定义方法为: 令 b_i 表示系统从满意状态到不满意状态的一次转移, 即

$$b_i = \begin{cases} 1 & x_i \in S, x_{i+1} \in \mu \\ 0 & \end{cases} \quad (10)$$

式中, S 为正常状态, 它记录的是系统遭受破坏的次数, 尽管连续几个时段都产生破坏, 但只记录一次。这样在 n 个时段内, 系统由满意状态转移到不满意状态的总次数为 $\sum_{i=1}^n b_i$, 则此事件出现的概率为

$$\rho = P\{x_i \in S, x_{i+1} \in \mu\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i \quad (11)$$

回弹性用系数 R 表示为

$$\begin{aligned} R &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{\sum_{j=1}^N d(\mu, j) \sum_{i=1}^n b_i} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\sum_{j=1}^N d(\mu, j)} \times \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i / n} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\rho} \times \frac{1}{\sum_{j=1}^N d(\mu, j)} \end{aligned} \quad (12)$$

3.3 脆弱性

脆弱性是衡量事故平均严重程度的指标, 对于某些系统, 虽然破坏的历时不长, 但破坏的深度过大, 超过了系统承受的能力, 也就是通常所说的集中破坏的方式, 这同样会造成非常不利的后果。对于供水子系统来说, 第 n 个 m 类事故的等级是通过平均最小泄流量, 平均最大缺水量, 平均缺水量 $Q(m, n)$ 以及绝对最小出流量等几种方法测定, 因此对于小入流量, 平均缺水量法为

$$F = \sum_{j=1}^N Q(m, n) \xi(\mu, j) / \sum_{j=1}^N \xi(\mu, j) \quad (13)$$

3.4 事故周期

事故的周期是指两次进入模式 μ 之间的平均间隔

时间, 也叫平均重现期, 其数学定义为

$$C = \sum_{j=1}^N D(\mu, j) / N \quad (14)$$

式中, $D(\mu, j)$ 为两次进入模式 μ 之间的间隔时间。

对于一供水水库来说, 这些指标可以用来评价水库运行的优劣, 即对于不同的水库运行规则, 其风险指标值也不相同。

4 优化模拟风险模型

在优化模型的基础上建立风险模拟模型, 就是增加模拟模型到优化模型之间的反馈功能, 使风险模拟得出的结果经过目标辨识处理后反馈到优化模型, 进而对优化模型中各种假定的信息作一调整, 再通过风险模拟模型, 致使决策者能够直接面对, 参与进决策过程中来。其构成机制如图 1 所示。

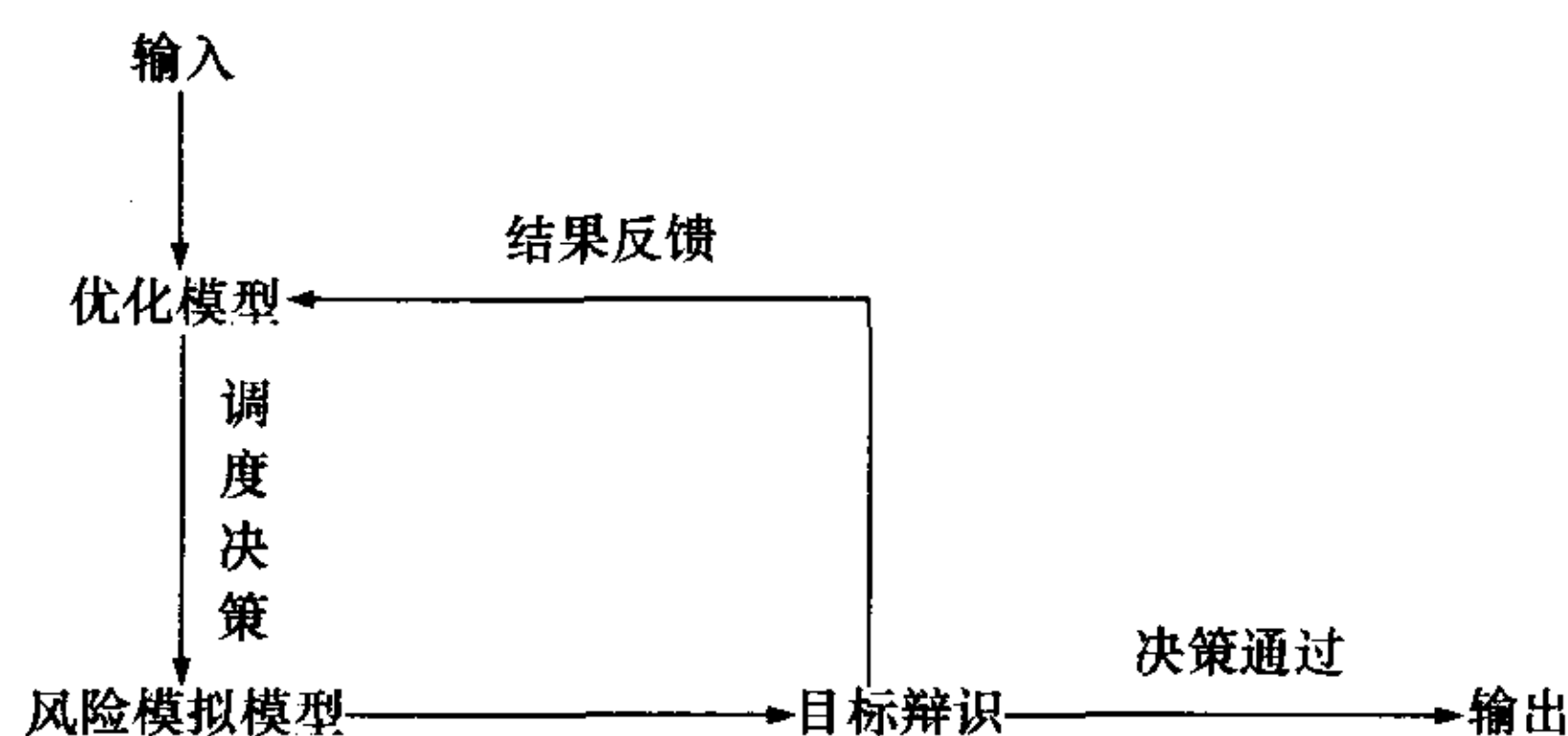


图 1 优化模拟反馈

根据优化模型的结果, 我们就可以通过模拟模型来模拟其过程中的风险带来的影响, 经过决策者目标辨识后, 再反馈到修正后的优化模型, 直到决策者满意为止。这样就使决策者根据自己的经验直接参与到模型中来, 从而使整个过程更加完善。

目标辨识主要是针对各个风险指标, 根据决策者的经验来判断。

对于供水可靠性 P 来说, 不同的用水部门其要求是不同的, 在城市供水中, 可靠性的要求是比较高的, 一般标准如下

$$P = \begin{cases} \leq 50\%, & \text{可靠性低} \\ 50\% \sim 75\%, & \text{可靠性较低} \\ 75\% \sim 90\%, & \text{可靠性较高} \\ \geq 90\%, & \text{可靠性高} \end{cases}$$

而相比较而言, 工业供水和农业供水的可靠性要求就要低一些, 但针对不同的区域其要求也不同, 因此决策者就要凭借自己的经验来进行判断, 从而使决策达到令人满意的地步。

和上述指标相比, 回弹性 R 、脆弱性 F 、事故周期 C 对于决策者的影响就要弱一些, 因为我们在供水

(下转第 19 页)

脊椎生物。采用较多的是“生物参数法”(Biotic Parameters)和“生物指数法”(Bioindicators),从2000年12月起执行的《欧盟水框架导则》具有代表性。《欧盟水框架导则》(EU Water Framework Directive)的定位是“在成员国开展河流生态状况评估的方法框架”,这个标准提出了较为完整的准则和方法^[7,8]。

5 结 语

建立河流健康评估体系时似应考虑以下原则:(1)重视生物群落的状况,建立生境因子与生物因子的相关关系。(2)河流健康是一个相对的概念,需要确定参照系统,所谓“参照系统”是选定健康的或较为健康的河流系统。在河流现状与参照系统比较的基础上,进行河流健康状况的评估。(3)明确水文条件、水质条件和栖息地质量是影响河流生态系统健康的三要素,与这三要素具有正相关关系的生物状况则是河流健康的主体。(4)评估体系应包含对于人类合理开发水资源的承认,力图在保护河流生态系统与开发利用水资源之间取得平衡。(5)河流生态系统演替是一个漫长的过程,需要建立完整的生物监测系统,进行长期监测和评估。(6)充分考虑我国各流域、各地区自然、社会、经济状况的巨大差异性,需要因地制宜地制定每一条河流的健

康评估标准,国外经验值得借鉴,但是绝对不可照搬。

参考文献:

- [1] 董哲仁. 河流健康的内涵[J]. 中国水利, 2005, (4).
- [2] 董哲仁. 河流形态多样性与生物群落多样性[J]. 水利学报, 2003, (11).
- [3] Cude C G. Oregon water quality index[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(1): 125-137.
- [4] Barbour M T. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable River: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish [M]. 2nd edn, EPA 841-B-99, USEPA. 1999.
- [5] Brinson M M, Hauer F R, Lee L C Nutter. A Guide-book for application of hydrogeomorphic assessments to river wetlands[R]. Technical Report WRP-DE-11, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 1995.
- [6] Environment Agency. River Habitat Survey: 1997 Field Survey Guidance Manual, Incorporating SERCON[R]. Center for Ecology and Hydrology, National Environment Research Council, UK. 1997.
- [7] Kallis G, Butler D. The EU Water Framework Directive: measures and directives[J]. Water Policy, 2001, (3): 125-124.
- [8] EUROPA. The EU Water Framework Directive-integrated river basin management for Europe[DB/OL]. The European Union Online. URL: http://europa.eu.int/comm/environment/water/water-framework/index_en.html, 2003.

(责任编辑 聂建平)

(上接第10页)

过程中首先要保证的是有水可供即决策风险率和供水可靠性,在这满足标准的条件下,回弹性、脆弱性和事故周期偏差不是很大,决策者就可以认为该决策是较优的,但如果三者之一偏差较大,则同样也会影响到供水的效果,另外针对不同的供水水库及供水地区,它们也没有一个完全统一的标准,因此这方面具体由决策者根据自己的经验来定。

通过目标辨识,对于那些不满足标准的决策,则就必须把结果反馈到优化模型,对优化模型进行修正。对于一优化模型来说,其结果对模型本身应该是最优解,但是由于在建模及计算过程中本身存在着许多假定条件,这些条件的不确定性就不可避免的会带来一定的风险,通过风险模拟模型,得出具体的风险过程,经过目标辨识后,对优化模型一些假定条件作一适当修正,得出水库群运行规则,再对其进行风险评估,如此反复,直到其结果令决策者满意为止。

5 小 结

水库调度作为水资源系统研究的一个重要分支,对

于风险决策以及水资源系统运行的风险分析这方面的研究目前还处于探索性阶段,如何将风险管理引入水库调度过程中,则是水资源工作者需研究的课题之一。本文在水库群优化调度模型的基础上,提出了水库调度风险管理模式,对水库调度过程中存在的风险因素,对优化调度模型中度量风险的可靠性、回弹性、脆弱性、事故周期等作了具体的阐述,建立了风险模拟模型;进一步将优化模型与风险模拟模型结合为风险模拟优化模型,从而将风险分析、风险评估及风险决策引入水库调度中,为水库调度的风险管理提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] Hashimoto J, Stedinger, Loucks D. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.
- [2] Richard M Vogel, Ralph A Bolognese. Storage-reliability-resilience-yield relations for over-year water supply systems [J]. Water Resources Research, 1995, 31(3): 645-654.
- [3] 陶 涛, 纪昌明. 可靠性、回弹性、脆弱性在水资源系统中的应用[J]. 水力发电学报, 2000, (1): 103-109.

(责任编辑 聂建平)