

# 综合利用水库最优调度函数研究\*

马细霞 贺北方 马竹青 赵 阳

(郑州工学院) (郑州水利学校) (河南省农科院)

**摘 要:** 本文首先采用确定性动态规划方法, 对一以防洪、灌溉为主结合发电的综合利用水库进行求解, 得出最优轨迹, 然后采用多元回归的方法制定出一年内每个时段的调度函数, 并以此为基础对实测资料进行了长系列模拟运行, 通过与其它优化调度方法的成果及实际运行结果的对比分析, 验证了本文所采用的技术路线是成功的。

**关键词:** 隐性随机优化, 数学模型, 优化调度, 调度函数

**中图分类号:** TV697

水库群随机优化调度基本有两种方法: 显性随机优化法和隐性随机优化法。显性随机优化方法由于其“维数灾”很难有大的发展; 隐性随机优化法是从总结水库的运行规律入手来考虑问题, 因此, 在未来的一段时间内, 将会显示出强大的生命力。本文拟采用隐性随机优化方法, 对以防洪、灌溉为主结合发电的综合利用水库的优化调度进行初步探讨。

隐性随机优化方法的基本思想, 就是通过对水库大量可能出现的径流过程, 运用确定性优化方法求解, 求出相应的水库优化决策, 然后对这些运行决策进行统计分析, 寻找水库的优化决策规律 (最优调度函数), 以此制定水库的最优调度规则, 指导水库的实际运行。

隐性随机优化法是通过随机生成径流来反映径流的随机特性, 并通过对生成径流优化计算成果的统计分析来体现径流的随机特性, 故称之为隐性随机优化法。做为方法的初步探讨, 本文采用简化方法, 即以长期实测资料为样本来反映水库可能出现的径流过程, 因此, 本文的研究思路是: 采用确定性动态规划方法对实测径流资料进行长期优化调度, 获得水库的最优运行轨迹; 然后采用多元回归方法制定出一年内每个时段的调度函数, 并以此为基础, 再用实测径流资料进行长系列模拟运行, 以验证调度函数的合理性。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 水库概况

---

\* 收稿日期: 1995-01-06

鲇鱼山水库位于淮河支流灌河上, 控制流域面积  $924\text{km}^2$ , 占灌河流域面积的 56%, 多年平均降水量  $1200\text{mm}$ , 坝址处有 1932 年~1987 年的 56 年径流资料, 其中 1951 年以前的径流资料由间接相关求得。该水库是以防洪、灌溉为主结合发电的综合利用的多年调节水库, 总库容  $V_{\text{总}}=8.5 \times 10^8\text{m}^3$ , 其中  $V_{\text{兴}}=4.96 \times 10^8\text{m}^3$ ; 灌溉面积 143 万亩, 灌溉设计保证率为  $P_{\text{灌}}=79\%$ ; 水电站装机四台,  $N_{\text{装}}=3 \times 3000+1600=10600\text{KW}$ , 设计年平均发电量  $E_{\text{年}}=2100 \times 10^4\text{KWh}$ 。

## 1.2 动态规划模型的建立

### 1.2.1 阶段变量和状态变量

将年内离散时段  $j$  取为阶段变量,  $j=1, 2, \dots, T$ , 全年划分为 22 个时段 (灌溉期 5~9 月以旬为单位, 其余以月为单位), 以水库蓄水量  $V_p(i, j, k)$  为状态变量,  $i$  表示年,  $j$  表示时段,  $k$  表示状态离散点。

$$V_p(i, j, k) = \begin{cases} 0 & K=1 \\ (2K-3) \cdot \Delta V / 2 & K=2, 3, \dots, m_{j-1} \\ V & K=m_j \end{cases} \quad (1)$$

上述蓄水状态的离散采用了萨瓦林斯基方法。取  $\Delta V=15 \times 10^6\text{m}^3$ , 将兴利库容  $V_{\text{兴}}=496 \times 10^6\text{m}^3$ , 离散为  $m-2=33$  等分 ( $m=35$ , 是相应于  $Z_{\text{蓄}}$  时  $m_j$  的最大值)。其中  $V_p(i, j, 1)=0.0$ , 代表下边界的库空点; 上边界  $V_p(i, j, m_j)$  对应的是库满点或  $Z_{\text{限}}$  相应的库容值, 其状态离散序数  $m_j$  视防洪或兴利水位的限制而采用不同值。

汛 期: 6 月 15 日~9 月 30 日,  $Z_{\text{限}}=106\text{m}$ ,  $m_j=32$ 。

非汛期:  $Z_{\text{限}}=107\text{m}$ ,  $m_j=35$ 。

其它中间状态  $k$  代表的状态值域为  $(K-2)\Delta V \sim (K-1)\Delta V$ 。

### 1.2.2 决策变量

取水电站各时段的发电流量  $Q_p(i, j, k)$  为决策变量。

### 1.2.3 状态转移方程

当时段初水库蓄水状态处于  $V_p(i, j, k)$ , 采取决策  $Q_p(i, j, k)$  后, 水库蓄水状态将转移到终了状态  $V_p(i, j+1, k')$ 。

$$V_p(i, j+1, k') = V_p(i, j, k) + Q(i, j) - Q_p(i, j, k) \cdot \Delta t - W(i, j, k) \quad (2)$$

式中  $Q(i, j)$  为第  $i$  年第  $j$  时段的入库流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $W(i, j, k)$  为时段  $j$  可能发生的弃水量。

### 1.2.4 报酬函数

伴随水库蓄水状态的转移, 水电站面临时段发电量:

$$r(i, j, k) = C \cdot Q_p(i, j, k) \cdot \bar{H}(i, j, k) \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中  $r(i, j, k)$  为水库蓄水状态从  $V_p(i, j, k)$  转移到  $V_p(i, j+1, k')$  时的时段发电量,  $\bar{H}(i, j, k)$  表示时段平均水头。

### 1.2.5 目标函数

鲇鱼山水库是以防洪、灌溉为主结合发电的综合利用水库, 选择多年平均发电量最大为目标函数, 将防洪安全及灌溉用水要求作为约束条件处理, 即:

$$f = \max_k \left[ \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{22} \gamma(i, j, k) \right] \quad (4)$$

### 1.2.6 动态规划的递推方程

设  $F(i, j, k)$  为水库蓄水状态从  $V_p(i, j, k)$  出发, 未来时段均采用最优策略, 连续运行所得的电效益。此时可由动态规划最优化原理逆时序递推求得局部最优策略, 递推方程如下:

$$F(i, j, k) = \max_{k'} [\gamma(i, j, k) + F(i, j+1, k')] \quad (5)$$

### 1.2.7 约束条件

#### ① 水位约束

$$\left. \begin{array}{l} \text{防洪约束 } Z(i, j, k) \leq Z_{\text{限}} \quad (\text{汛期}) \\ \text{兴利约束 } Z_{\text{死}} \leq Z(i, j, k) \leq Z_{\text{蓄}} \quad (\text{非汛期}) \end{array} \right\} \quad (6)$$

式中  $Z(i, j, k)$  为时段  $j$  的平均库水位。

#### ② 流量约束

$$Q_g(i, j) \leq Q_p(i, j, k) \leq Q_T \quad (7)$$

$$Q_p(i, j, k) \leq \frac{N''}{C \cdot \bar{H}(i, j, k)} \quad (8)$$

式中  $Q_g(i, j)$  为第  $i$  年第  $j$  时段的灌溉流量;  $Q_T$  为水电站的最大过水能力;  $N''$  为水电站的预想出力, 其最大值为水电站装机容量, 当机组定期计划检修时应扣除检修机组容量。

#### ③ 出力约束

$$N(i, j, k) \leq N'' \quad (9)$$

$N(i, j, k)$  为水库蓄水状态从  $V_p(i, j, k)$  转移到  $V_p(i, j+1, k')$ , 采用决策  $Q(i, j, k)$  的电站出力。

#### ④ 可靠性约束

满足灌溉设计保证率  $P_{\text{灌}} = 79\%$  的要求

$$\text{即: } P_{\text{计}} \geq P_{\text{灌}} \quad (10)$$

## 2 动态规划模型的求解

2.1 求各年各时段各状态的局部最优目标值。在这一过程中, 采用动态规划逆时序解法递推, 依次循环状态变量和阶段变量, 在水位、流量、出力等约束条件下, 应用递推方程进行递推, 求得与局部最优目标值相应的出力、发电流量、水位、库容等。

在求解过程中, 若水库放水量小于零或水库蓄水量小于  $V_{\text{死}}$ , 则此时段该决策不予考虑。为保证发电与灌溉用水尽可能结合, 引入罚系数, 若水库放水小于灌溉用水, 则以罚系数予以惩罚, 使此决策尽量不被最优策略所选取。根据水库实际情况, 11、12 月份 (第 21、22 时段) 电站机组全部检修, 故在逐时段递推过程中, 此两时段水库蓄水量按水

量平衡方程递推求得。

## 2.2 寻求最优决策序列

此过程采用顺时序法, 依次逐时段找出最优决策以及与该决策相应的出力、发电量、水位、库容等, 由此得出水库运行的最优轨迹。

## 3 最优调度函数及其检验

一般调度函数可用线性方程, 非线性方程, 指数方程, 三角函数方程等形式描述。由于各时段的用水条件及来水规律的多变性, 致使任何一种形式的方程都不可能适应所有时段的线型。如果对每个时段都采用各自的方程形式, 就会显得过于繁杂。因此, 在当前对调度函数的研究还不够完善的条件下, 以及为了使用方便, 我们初步采用多元线性方程来确定调度函数, 其数学表达式为:

$$Q_p(t) = a_0 + a_1 Q(t) + a_2 V_p(t) \quad t = 1, 2, \dots, 20 \quad (11)$$

式中,  $Q_p(t)$ ~水库在  $t$  时段的下泄流量;

$Q(t)$ ~ $t$  时段天然入库流量;

$V_p(t)$ ~ $t$  时段初水库蓄水量;

$a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ ~为  $t$  时段调度函数中的三个参数。

待定参数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ , 是根据最优调度结果运用回归统计方法确定的。

对任一时段  $t$ , 线性回归方程的矩阵形式为:

$$Y = X \cdot B \quad (12)$$

其中

$$Y = \begin{bmatrix} Q_{p1} \\ Q_{p2} \\ \dots \\ Q_{p22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & Q_1 & V_{p1} \\ 1 & Q_2 & V_{p2} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & Q_{22} & V_{p22} \end{bmatrix}$$

$Q_{p1}$ 、 $Q_{p2}$ ... $Q_{p22}$  为  $t$  时段各年的最优下泄流量;  $Q_1$ 、 $Q_2$ ... $Q_{22}$  为  $t$  时段各年的天然入库流量;  $V_{p1}$ 、 $V_{p2}$ ... $V_{p22}$  为  $t$  时段各年的最优水库蓄水量;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  为  $t$  时段最优调度函数中的三个待定参数。

由极值原理可以推得:

$$\hat{B} = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (13)$$

利用  $B$  的估计式即可求出任一时段  $t$  的调度函数中的三个参数  $\hat{a}_0$ 、 $\hat{a}_1$ 、 $\hat{a}_2$ ，并由此得出  $t$  时段的最优调度函数。

为检验最优调度函数的可行性，我们以最优调度函数为基础，用实测资料进行了长系列模拟运行检验，其运行结果见 4。

## 4 计算成果及分析

4.1 运用确定性动态规划方法对鲇鱼山水库进行了长期优化调度计算，得到了最优决策序列（各年各时段最优放水量）、各时段初水库最优蓄水量、各时段平均出力等，多年平均期望发电量为 2896 万 KWh，灌溉保证率为 90.1%。

4.2 经过回归分析，得出各时段最优调度函数，以实测资料对最优调度函数进行了检验，多年平均期望发电量为 2735 万 KWh，灌溉保证率为 77%。

4.3 鲇鱼山水库的优化调度，采用不考虑径流预报的马氏决策规划模型，其最优调度结果为：多年平均期望发电量是 2953.6 万 KWh，灌溉保证率为 79.8%。

4.4 鲇鱼山水库设计多年平均发电量  $E$  为 2100 万 KWh，灌溉设计保证率为 79%，实际运行多年平均发电量 2535 万 KWh。

由以上结果对比分析可以发现，运用最优调度函数模拟运行的结果，与其它优化调度方案的结果比较接近，其多年平均发电量及灌溉保证率超过或基本能达到设计要求，而且最优调度函数更便于使用，因而本文所寻求的最优调度函数是可信的，它对水库的实时调度将起到较好的指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 万俊等.综合利用小水库群优化调度研究.水利学报.1992年第10期.
- 2 董子敖编著.水库群调度与规划的优化理论与应用.山东科学技术出版社.1989年
- 3 贺北方等.综合利用水库优化调度的策略迭代法.水电能源科学.1992年第1期
- 4 陶谦坎主编.运筹学.西安交通大学出版社.1990年

## The Optimal Decision Function of Multipurpose Reservoir

Ma Xixia He Beifang Ma Zhuqing Zhao Yang

(Zhengzhou Institute of Technology) (Zhengzhou School of Hydraulic Engineering)

**Abstract:** An optimal operating policy of a multipurpose reservoir has been derived by using dynamic programming optimal method. Then, the decision functions at every period of a year have been formulated by using multielement linear regression analysis. Based on the above mentioned decision functions, the simulation of observational streamflow has been conducted. Calculation results show that the technical approach is successful.

**Keywords:** recessive stochastic optimal method, mathematical model, optimal operation, decision function