

# 增量动态规划在小浪底水利枢纽优化调度中的应用

覃谷昌

(水利部黄河小浪底水利枢纽建设管理局,河南 济源 454681)

**摘要:**基于优化理论,运用增量动态规划原理,研究并建立了小浪底水利枢纽的优化调度数学模型,对模型进行了系统分析和求解,应用结果通过验证比较满意。

**关键词:**小浪底水利枢纽;优化调度;增量动态规划

中图分类号:TV632.63

文献标识码:A

文章编号:1008-486X(2004)01-0004-04

## Application of Incremental Dynamic Planning to Xiaolangdi Reservoir Optimized Operation

QIN Gu-chang

(Ministry of Water Resources Xiaolangdi Reservoir Construction  
and Administration Bureau Jiyuan 454681, Henan, China)

**Abstract:** On the basis of optimization theory, by using the principles of incremental dynamic planning, we studied and set up an optimized operation model for Xiaolangdi multipurpose dam project, and obtained satisfactory results from the computation.

**Key words:** Xiaolangdi reservoir; optimized operation; incremental dynamic planning

## 0 引言

1957年,美国数学家 R. E. Bellman 等人提出求解多阶段决策过程的动态规划方法(DP),得到了广泛的应用。DP法在解决实际问题时存在“维数灾”,各国学者提出了许多对DP法进行改进的方法。动态规划及其改进方法在水库调度上得到广泛应用。上世纪70年代,美国 Hall W. A, Dracup J. A, Buras N, Biswas A. k, Haimes Y. Y, Heidari 等人系统研究了水资源系统问题,其中包括水库优化调度的理论和方法。苏联对水库优化调度的理论和方法进行了深入研究。上世纪80年代以来,我国在水库优化调度研究和引用方面取得了很大成果。

增量动态规划(IDP)是一种改进的动态规划方法。增量动态规划法克服了迭代收敛速度较快,计算量较小的问题。

小浪底水利枢纽作为以防洪、供水、灌溉为主的综合利用水库的优化调度问题,存在某些特殊性。本文根据增量动态规划原理,建立了小浪底水利枢纽的优化调度数学模型,并对模型进行了求解。

## 1 小浪底水利枢纽的基本情况

小浪底水利枢纽是黄河干流上的大型骨干控制工程之一,由拦河大坝、泄洪排沙建筑物、引水发电系统等组成。水库总库容126.5亿 $m^3$ 。装机容量 $6 \times 30$ 万kw。开发目标是:以防洪、防凌、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电。具体如下:

(1)防洪。每年7~9月之间,是黄河主汛期,水库调度方式十分复杂。当入库流量小于 $400m^3/s$ 时,泄流量为 $400m^3/s$ 。当入库流量大于 $2600m^3/s$ 且调节库容达到预设值时,以入库流量下泄,并控制下游平滩流量。当入库流量大于 $2600m^3/s$ ,未达到调节库容时,下泄流量为 $600 \sim 800m^3/s$ 。当入库流量处在 $400 \sim 600m^3/s$ 之间时,下泄流量为 $400m^3/s$ 。当入库流量处在 $600 \sim 2600m^3/s$ 之间时,下泄流量 $600 \sim 800m^3/s$ 。

(2)防凌。每年12月至翌年2月是冬季防凌期,根据下游河道结冰、解冻情况控制下泄流量在 $300 \sim 500m^3/s$ 之间。

(3)减淤。水库拦蓄部分泥沙,水量允许时,下泄 $2600m^3/s$ 的人造洪峰冲沙。

(4)供水、灌溉。在不同时段供水,保证灌溉流

收稿日期:2003-07-28

作者简介:覃谷昌(1963-)男,四川射洪人,高级经济师,华中科技大学在职研究生,主要从事水利工程管理研究。

量。

(5)发电。根据水量调度和电网调度发电。全年一台机组检修,5台机组可调。

## 2 水库优化调度增量动态规划原理

水库优化调度计算的基本课题是,在一定的约束条件下,寻求一个最优决策 $X$ ,使优化系统由初始状态 $Y_1 = Y(t_1)$ 过渡到终了状态 $X_{T+1} = Y(t_{T+1})$ 的目标函数 $F$ 达到极值,即 $F = F(X, Y)$ 。其中 $Y, X$ 分别为状态变量和决策变量。

增量动态规划是对动态规划的改进。其方法是在可行域选择一条初始调度线,事先确定增量 $\Delta V_i$ ,在初始调度线除起点、终端两点以外的每个时段 $i$ 的始、末迹点上下,各取2~3个增量,形成寻优“廊道”。在廊道范围内,利用动态规划递推公式进行寻优计算。

将水库调节期划分为 $m$ 个时段, $i = 1, 2, \dots, m$ ,取每个时段水库蓄水量 $V_i$ 为状态,面临时段水库泄流 $q(V_i)$ 为第 $i$ 时段的决策变量, $Q_i$ 表示第 $i$ 时段水库入流, $\Delta t_i$ 为时段长度,则水库的状态转移方程为

$$V_{i+1} = V_i + (Q_i - q_i) \Delta t_i \quad (1)$$

取发电量为效益指标,任一时段 $r_i$ 的发电量为

$$r_i = r_i(V_i, q_i) \quad (2)$$

整个调节期的总效益指标函数为

$$R_i(V_i) = \sum_{i=1}^m r_i = \sum_{i=1}^m r_i(V_i, q_i) \quad (3)$$

则,最优目标函数 $R^*$ :

$$R_i^*(V_i) = \text{opt} \sum_{i=1}^m r_i(V_i, q_i) \quad (4)$$

用动态规划寻求 $R_i^*$ 的逆时序递推公式为

$$R_i^*(V_i) = \max \{ r_i(V_i, q_i) + R_{i+1}^*(V_{i+1}) \} \\ i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$R_i^*(V_i)$ ——第 $i$ 时段至 $m$ 时段的总发电量最大值,即从 $i$ 时段初的水库蓄水 $V_i$ 出发,面临 $i$ 时段及余留时期各自最大发电量的累加值;

$r_i(V_i, q_i)$ ——面临时段在其时段初蓄水为 $V_i$ 条件下,取决策 $q_i$ 时的时段发电量,它隐涵有时段最大发电量值;

$R_{i+1}^*(V_{i+1})$ ——余留时期,在其初始蓄水为 $V_{i+1}$ 条件下的出力最大值。

约束条件一般有几项:

$$Z_s \leq Z_i \leq Z_{\max} \quad (6)$$

$$V_s \leq V_i \leq V_{\max} \quad (7)$$

$$N_s \leq N_i \leq N_y \quad (8)$$

$$q_{\min} \leq q_i \leq q_{\max} \quad (9)$$

$Z_s, V_s$ ——分别为水库死水位及相应的水库库

容;

$N_s, N_y$ ——水电站的保证出力和预想出力;

$q_{\min}, q_{\max}$ ——水轮机的最大和最小过水能力;

$Z_{\max}, V_{\max}$ ——最高兴利水位及相应库容。

增量动态规划求解的过程是:在寻优廊道内求得新的优化调度线。比较新调度线与上次寻优计算的结果,若新结果优于上次的结果,则以新调度线作为实验轨迹建立寻优廊道,直到新优化结果与上一次的相对误差小于预先规定的允许误差时,便减小增量 $\Delta V_i$ 。如此迭代下去,并再三地减小整个系统的增量,直到 $\Delta V_i$ 小于某个规定值,而且前后两轮迭代的最优解的相对误差也小于允许误差,便求得一条最优调度线。

## 3 小浪底水利枢纽的优化调度增量动态规划模型

由于枢纽采用分阶段抬高运用水位方式,在不同阶段有不同的约束条件和库容水位关系,本文仅述及初期优化调度的有关情况,以便验证。

### 3.1 时段的确定

小浪底水利枢纽的调节期为当年7月1日至翌年6月30日。本文取一个月为一个时段,调节期可分为12个时段,令 $i$ 代表阶段变量。即: $i = 1, 2, \dots, 12$ 。时刻 $t_i \sim t_{i+1}$ 为面临时段 $i$ ,时刻 $t_{i+1} \sim t_{i2+1}$ 为余留时期,时刻 $t_1 \sim t_i$ 为过去时期。

### 3.2 状态变量

取水库不同时段的蓄水位为状态变量。任一时段 $i$ 初、末的状态变量,分别以 $V_i$ 和 $V_{i+1}$ 表示, $V_{i+1}$ 也是第 $i+1$ 时段的初始状态。

### 3.3 决策变量

在任一面临时段 $i$ 时段初的 $V_i$ 为某值条件下选择的泄水量 $q(V_i)$ ,定义为第 $i$ 时段的决策变量,简记为 $q_i$ 。

### 3.4 状态转移方程

水库水量平衡方程即为其状态转移方程。考虑水库蒸发、渗漏损失为 $2\text{m}^3/\text{s}$ ,则有状态转移方程:

$$V_{i\text{末}} = V_{i\text{初}} + (Q_{i\text{入}} - q_{i\text{泄}} - 2) \times \\ 730 \times 3600 (\text{汛期}) \quad (10)$$

### 3.5 效益指标函数

该水利枢纽兼有防洪、防凌、减淤、供水、灌溉、发电六项功能,其优化调度是一个多目标优化问题。增量动态规划主要用于解决单一目标规划,为此须将小浪底水利枢纽的多目标表示为单一目标。考察该枢纽的六项目标,可以发现,除发电目标外,其余目标均表现为对下泄流量的某种约束,所以本文选择发电量作为优化调度的效益指标,而将其他目标转化为对发

电目标的约束。

小浪底水电站综合出力系数为 8.2，额定水头 112m，单机额定出力为 300MW。

水库在任一时段  $i$  采取某个决策  $q_i$  时的效益指标函数记为

$$E_i = 8.2 q_{ij} H_i \Delta t_i \quad (11)$$

式中： $q_{ij}$ ——发电引流；

$H_i$ —— $i$  时段平均发电水头；

$\Delta t_i$ —— $i$  时段历时。

整个调节期的总效益指标函数  $E$  为

$$E = \sum_{i=1}^{12} E_i = \sum_{i=1}^{12} 8.2 q_{ij} H_i \Delta t_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 12 \quad (12)$$

式中： $q_{ij}$ ——发电引流；

$H_i$ —— $i$  时段平均发电水头；

$\Delta t_i$ —— $i$  时段历时。

水库调度期的优化调度目标函数记为

$$E^* = \text{opt} \sum_{i=1}^{12} 8.2 q_{ij} H_i \Delta t_i \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, 12$$

$q_{ij}$ ——发电引流；

$H_i$ —— $i$  时段平均发电水头；

$\Delta t_i$ —— $i$  时段历时。

### 3.6 寻优递推公式

利用动态规划法寻求  $E_i^*$  的逆时序递推公式为

$$E_i^* = \max \{ E_i + E_{i+1}^* \} \quad (14)$$

式中： $E_i^*$ ——第  $i$  时段至第 12 时段的总发电量最大值；

$E_i$ ——面临时段  $i$  在其时段初始状态为  $V_i$  时，取决策  $q_i$  时的时段发电量；

$E_{i+1}^*$ ——余留时期在初始状态为  $V_{i+1}$  时的发电量最大值。

### 3.7 约束条件

#### (1) 最小泄流量限制

取  $\Delta V_i = 2\text{m}$ ，当多次迭代，不再增优后，缩小步长至  $\Delta V_i = 0.5\text{m}$ ，再缩小步长至  $\Delta V_i = 0.1\text{m}$ 。

#### 4.4 寻优廊道

取初拟调度线正负 3 个增量为寻优廊道。

#### 4.5 水库泄流与发电引流的关系

当出库流量  $q_i \leq 400 \text{ m}^3/\text{s}$  时，发电流量  $q_{ij} = q_i$ ，排沙流量  $q_p = 0$ ；

$$(23) \quad \text{式中：} q_i \text{——出库流量；}$$

表 1 正常年份的最小流量约束

月份	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
流量	400	400	400	400	400	400	400	300	636	643	400	473

$$q_i \geq q_i', \quad i = 1, 2, \dots, 12 \quad (15)$$

$q_i'$ —— $i$  时段下游所需水量；

$q_i$ —— $i$  时段泄流量。

#### (2) 水位限制

$$215 \leq H_i \leq 265, \quad i = 9, 10, 11, 12, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (16)$$

$$215 \leq H_i \leq 230, \quad i = 7, 8$$

$$215 \leq H_i \leq 262, \quad i = 1$$

#### (3) 泄流限制

当  $600 \leq Q_i \leq 2600 \text{ m}^3/\text{s}$  时， $600 \leq q_i \leq 800 \text{ m}^3/\text{s}$

$$i = 7, 8, 9 \quad (17)$$

当  $400 \leq Q_i \leq 600 \text{ m}^3/\text{s}$  时， $q_i = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ，

$$i = 7, 8, 9 \quad (18)$$

当  $Q_i \leq 400 \text{ m}^3/\text{s}$  时， $q_i = Q_i$ ， $i = 7, 8, 9 \quad (19)$

$$300 \leq q_i \leq 500 \text{ m}^3/\text{s}, \quad i = 1, 2 \quad (20)$$

$q_i$ —— $i$  时段下泄流量；

$Q_i$ —— $i$  时段入库流量。

## 4 模型求解

### 4.1 库容水位、下游流量水位关系拟合

为计算方便，水库库容曲线和下游水位流量关系曲线一般可用代数多项式逼近，本文采用三次抛物线拟合。

拟合的运行初期库容水位关系曲线为：

$$V = 541.82 - 6.0966 H + 0.01858 H^2 - 8.582310^{-6} H^3 \quad (21)$$

拟合的下游流量水位关系曲线

$$H = 132.9 + 1.952410^{-3} q - 3.562110^{-7} q^2 + 2.690910^{-11} q^3 \quad (22)$$

### 4.2 根据入流过程拟定初始调度线

在不发生弃水的情况下，水头的最优利用反映为库水位愈高愈好。最优调度线的位置常可大致估出。

### 4.3 寻优步长

表 2 入流过程及初拟调度线

月份	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
入库流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1169	1810	1720	1217	926	547	516	537	538	552	582	525
初拟调度线(初期)	225	235	245	250	252	256	260	262	258	245	230	220

取  $\Delta V_i = 2\text{m}$ ，当多次迭代，不再增优后，缩小步长至  $\Delta V_i = 0.5\text{m}$ ，再缩小步长至  $\Delta V_i = 0.1\text{m}$ 。

#### 4.4 寻优廊道

取初拟调度线正负 3 个增量为寻优廊道。

#### 4.5 水库泄流与发电引流的关系

当出库流量  $q_i \leq 400 \text{ m}^3/\text{s}$  时，发电流量  $q_{ij} = q_i$ ，排沙流量  $q_p = 0$ ；

当  $400 \text{ m}^3/\text{s} < q_i \leq 600 \text{ m}^3/\text{s}$  时， $q_{ij} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ，

$$q_p = q_i - q_{ij} \quad (24)$$

当  $600 \text{ m}^3/\text{s} < q_i \leq 22300 \text{ m}^3/\text{s}$  时， $q_{ij} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ ，

$$q_p = q_i - q_{ij} \quad (25)$$

当  $q_i > 2230 \text{ m}^3/\text{s}$  时  $q_{ij} = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ，

$$q_p = q_i - q_{ij} \quad (26)$$

式中： $q_i$ ——出库流量；

$q_{jt}$ ——发电流量；  
 $q_p$ ——排沙或泄洪流量。

4.6 求解步骤

本文直接在 excel 电子表格上编程进行计算。

4.7 历次迭代结果记录

该优化调度成果与以新水文条件、新运用方式计算的发电量 38.53 亿 kWh 接近，但优于设计计算电量。

表 3 运用初期月末水位优化调度迭代过程

月份	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	累计发电量			
调度线	222.1	230	230	246.5	255	257.2	258.8	260.8	253.8	246.8	237.1	220				
初始调度线	226.0	228	230	242.0	252	256.0	256	260.0	255.0	245.0	228.0	220	35.859600			
步 长	1.5	0	221.5	230	230	246.5	255	256.0	257.5	260.0	252.0	243.5	232.5	220	38.148120	
		1	221.5	230	230	246.5	255	256.0	257.5	260.0	253.5	246.5	237.0	220	38.243189	
		2	221.5	230	230	246.5	255	256.0	258.5	260.0	253.5	246.5	237.0	220	38.243189	
	0.5	迭代	1	222.0	230	230	246.5	255	257.0	258.5	260.5	253.5	246.5	237.0	220	38.567081
		2	222.0	230	230	246.5	255	257.0	258.5	260.5	253.5	246.5	237.0	220	38.567081	
	0.1	1	221.1	230	230	246.5	255	257.2	258.8	260.8	253.8	246.8	237.1	220	38.632876	
		2	222.1	230	230	246.5	255	257.2	258.8	260.8	253.9	246.7	237.1	220	38.633033	
		3	222.1	230	230	246.5	255	257.2	258.8	260.8	253.9	246.7	237.1	220	38.633033	

4.8 实际验证

以 2001 ~ 2002 年调节期的来水过程、调度条件对模型进行验证。

在 2001 ~ 2002 年调度期,由于 2001 年 5 月、6 月间黄河流域严重干旱,下游旱情十分严重,小浪底水库水位降至最低发电水位以下,7 月至 8 月末停止发电。2002 年春夏季节,电网用电形势较好,水库弃水很少,调度期发电 27 亿 kWh。

我们根据水库运行的实际情况,对运算条件进行部分调整:

$$q_i \geq 90, i = 7, 8 \quad (27)$$

$$E_i = 0, i = 7, 8 \quad (28)$$

$$q_{jt} = 0.95 q_j, i = 3, 4, 5, 6 \quad (29)$$

优化调度迭代结果为 27.46 亿 kWh。优化调度的结果比实际情况优,但优化调度电量与实际发电量相比增加值不大。出现这种情况的原因是:小浪底水利枢纽的调度原则包含了优化调度思想。上述验证结果,说明了优化调度模型的正确性。

5 结语

本文建立了小浪底水利枢纽优化调度模型,对水库调度进行了优化计算。计算结果与设计值和实际运行情况相比较为优。说明本文的建模思路和模型本身是正确的,且对大型综合利用水库优化调度有借鉴意义。

参考文献:

[1] 水利部长江流域规划办公室,河海大学,水利部丹江口水利枢纽管理局.综合利用水库调度[M].北京:水利电力出版社,1990.  
 [2] 李钰心.水资源系统运行调度[M].北京:中国水利水电出版社,1996.  
 [3] 王勤香,张治,朱鸿庆.小浪底水库异重流特点分析[J].黄河水利职业技术学院学报,2003,(1):23-25.

[责任编辑 杨道富]