

# 玉山县七一水库优化调度

刘德速 周丹 涂惠园

(江西省水利规划设计院)

**提 要** 本文主要阐述以七一水电站为骨干的小水电站群统一调度,对径流与灌溉资料系列进行了细致、严格推求,用马尔柯夫决策规划理论建立数学模型。研究突出了七一水库以灌溉为主特点,采用了平移频率曲线法及两个罚函数处理可靠性约束等新技术。

**关键词** 灌溉 优化调度 小水电站群 补偿调节 玉山县

## 一、基本情况及基本资料

### (一) 基本情况

玉山县位于江西省东北,信江上游,水力资源较丰富,目前已建成小型水电站 80 余座,装机容量约 1.3 万 kW,并以形成县电网,但绝大多数电站为径流式电站,且装机容量很小,供电保证率低,发电弃水量大。

七一水库坝址控制流域面积 324km<sup>2</sup>,有效库容 12500 万 m<sup>3</sup>,库容系数为 0.315,在本县是库容最大的多年调节水库。本水库是以灌溉为主结合发电、养鱼等多目标开发的水利工程,设计灌溉面积 19.92 万亩,已灌 13.92 万亩,其中从水库引水自流灌溉面积 8.1 万亩,利用发电尾水灌溉下施农田 5.82 万亩。七一水电站装机容量 7250kW,占全县已建电站总装机容量 50%以上,其发电效益在县电力系统中具有举足轻重作用,本电站下游还有两座水电站,其装机容量分别为 720kW、400kW,但均为日调节水电站。

七一水电站由于其装机容量在电力系统中占比重很大,且水库调节性能好,因此水库优化调度方案研制不仅要考虑其对本河流下游的 2 座水电站进行有水力联系的补偿调节,还应对邻近河流已接入县电力系统中的 8 座径流式电站进行无水力联系的跨流域电力补偿调节,以提高电力系统总保证出力、增加发电量及改善供电条件,这 8 座电站总装机容量为 3335kW。

七一水库由于其开发目标是以灌溉为主,优化调度方案研制时,必需在优先满足灌溉用水条件下,寻求县电力系统水电站群总保证出力与总发电量最大或接近最大,同时必需满足灌溉用水保证率  $P=90\%$ ,发电保证率  $P=85\%$  的要求。

### (二) 基本资料

1.径流系列资料插补延长 本流域七一水库坝址附近曾设置喷口水文站,具有 1957~1958 年两年实测径流资料,可直接应用。

1959~1978 年本流域水文站撤销,也难以找到邻近流域径流资料可以作参证站加以利用,但这几年本流域降水量等资料较全,故采用“超蓄产流”流域水文模型(数学模型)法,以降水量、蒸发量系列换算成径流量系列。

1979~1986 年邻近流域玉榔溪的峡口水文站有完整实测径流系列,玉榔溪与本流域

(金沙溪)同处怀玉山南麓,源头均为怀玉山,地理位置紧邻,其自然地理、气象、下垫面条件较一致,两者月降水量相关系数 $\gamma > 0.98$ ,故可采用水文比拟法将峡口水文站径流系列换算为七一水库径流系列。

经上述插补延长,七一水库径流系列共30年,其系列长度与资料精度均符合要求。

2.灌溉用水量系列推求 灌区作物共10种,其中主要作物为早稻与二晚,分别占耕地面积71.2%、73.6%。越冬作物主要为红花,占耕地面积50%左右,其他作物所占比重较小,作物复种指数为2.46。

灌溉用水制度是根据以往试验资料及本地区实践经验确定。灌溉用水量采用水量平衡法确定。

水稻耗水量计算公式为:

$$E_s = AE + S$$

式中 $E_s$ —各生长期每日耗水量(mm); $A$ —腾发系数;

$E$ —逐日蒸发量(mm); $S$ —渗漏率(mm/d)

$A$ 与 $S$ 值随各生长季节不同而异,参照省内外经验确定。

其他旱作物需水量计算公式为:

$$E = KTP / 100$$

式中 $E$ —需水量(mm); $K$ —换算系数; $T$ —生长期平均华氏温度(度);

$P$ —生长期日照占全年日照小时数百分比。

根据以上条件与计算公式,用电子计算机进行逐日计算,并求得1957~1986年共30年灌溉用水的系列资料。

3.其他资料 其他基本资料均按各电站设计报告中所采用资料数值。

## 二、基本理论

本课题主要任务是:在满足灌溉用水保证率 $P=90\%$ 及县电力系统供电保证率 $P=85\%$ 条件下,寻求县电力系统11座小水电站群联合调度方案补偿调节的总保证出力及总发电量最大或接近最大的双目标优化调度方案。

解决这一课题所引用的基本理论为动态规划与马尔柯夫过程理论,并用罚函数方法将发电保证率这一随机性约束转化为无约束的马尔柯夫决策规划的问题。水电站群水库优化调度问题由于涉及因素很多,问题相当复杂,电算方面也往往“维数成灾”,国内外学者及有关单位解决这一课题时几乎均进行了一定程度的简化,本课题也针对自身特点进行了一些简化。

### (一) 径流过程的描述

在不考虑径流多年波动趋势的前提下,径流过程是以年为周期的时间连续的随机过程,为了计算方便,将一年离散化为若干时段,时段长短取决于:径流描述有足够准确性;电站运行调度方便与实用;优化调度计算工作量较小等因素。

本水库由于相邻时段径流存在相关关系;各电站之间径流存在相关关系;水库来水与灌溉用水存在相关关系,因此径流描述本来是时间上(年内相邻时段)、空间(各电站之间)、来水与灌溉用水等多重马尔柯夫过程,为了简化计算,使优化调度理论在计算机上

能实现, 故仅考虑径流各相邻时段单马尔柯夫过程。各电站径流之间相关关系由于其一致性好, 按其一致性处理, 来水与灌溉用水相关关系, 另列计算方程式参与计算。

1. 各时段径流相关分析 相关分析主要是算出相邻时段径流的相关系数, 全年分 36 个时段, 算出 36 个时段, 算出 36 个相关系数以表示各相邻时段之间的相关关系。在相关分析的基础上, 在相邻时段的径流  $Q_n$ 、 $Q_{n+1}$  之间可以求出条件概率分布函数  $F(Q_n / Q_{n+1})$ 。

2. 条件概率参变数 设本时段径流量为  $Q(n)$ , 前一时段径流量为  $Q(n+1)$ , 则条件概率均值计算公式为:

$$\bar{Q}(n)_c = \bar{Q}(n) + \frac{\sigma(n)}{\sigma(n+1)} \cdot R(n) \cdot [Q(n+1) - \bar{Q}(n+1)]$$

变差系数计算公式为:

$$C_v(n)_c = C_v(n) [1 - R(n)^2]^{\frac{1}{2}}$$

偏差系数计算公式为:

$$C_s(n)_c = 2C_v(n)_c = 2C_v(n) [1 - R(n)^2]^{\frac{1}{2}}$$

式中  $\bar{Q}(n)_c$  — 当前一时段径流量为  $Q(n+1)$  时, 本时段来水的条件平均值。

$\bar{Q}(n)$  — 本时段来水无条件平均值

$\sigma(n)$  — 本时段均方差

$\sigma(n+1)$  — 前一时段均方差

$R(n)$  — 两时段径流相关系数

$\bar{Q}(n+1)$  — 前一时段径流无条件平均值

$C_v(n)$  — 本时段变差系数

$C_v(n)_c$  — 本时段条件变差系数

$C_s(n)_c$  — 本时段条件偏差系数

3. 转移概率 转移概率可采用条件概率的皮尔森 III 型曲线计算, 当前一时段来水为  $Q(n+1)$  条件下, 本时段来水  $Q(n)$  的概率分布曲线可由条件概率三个参数  $\bar{Q}(n)_c$ 、 $C_v(n)_c$  及  $C_s(n)_c$  确定皮尔森 III 型曲线。

条件概率模比系数  $KP' = \frac{Q(n)_c}{\bar{Q}(n)_c}$ ,  $KP'$  的皮尔森 III 型曲线条件概率密度函数为:

$$P = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \cdot (KP')^{\alpha-1} \cdot e^{-\beta \cdot (KP')}$$

式中  $\alpha = \frac{1}{C_v(n)_c^2}$   $\because \overline{KP'} (\text{均值}) = 1$

$$\therefore \beta = \frac{2}{KP' \cdot C_v(n)_c \cdot C_s(n)_c} = \frac{1}{C_v(n)_c^2} = \alpha$$

$\Gamma(\alpha)$  — 伽玛函数  $e$  — 自然对数

$$\Gamma(\alpha) = \alpha^{\alpha-1} \cdot e^{-\alpha} \cdot \sqrt{2\pi\alpha} \cdot \left(1 + \frac{1}{12\alpha}\right)$$

$$\begin{aligned} \therefore P &= \frac{\alpha^\alpha \cdot (KP')^{\alpha-1} \cdot e^{-\alpha \cdot KP'}}{\sqrt{2\pi\alpha} \cdot \left(1 + \frac{1}{12\alpha}\right) \cdot \alpha^{\alpha-1} \cdot e^{-\alpha}} \\ &= \frac{\alpha \cdot (KP')^{\alpha-1}}{\sqrt{2\pi\alpha} \cdot \left(1 + \frac{1}{12\alpha}\right) \cdot e^{\alpha \cdot (KP'-1)}} \end{aligned}$$

当前一时段来水为 J 个时, 本时段来水为 K 个的转移概率值可按上述方程式用梯形公式进行计算, 计算公式为:

$$\begin{aligned} PR(JK) &= \frac{\alpha \cdot D}{\sqrt{2\pi\alpha} \cdot \left(1 + \frac{1}{12\alpha}\right)} \cdot \left[ \left( \frac{A^{\alpha-1}}{e^{\frac{\alpha}{2}(A-1)}} + \frac{(A+4D)^{\alpha-1}}{e^{\frac{\alpha}{2}(A+4D-1)}} \right) \div 2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{(A+D)^{\alpha-1}}{e^{\frac{\alpha}{2}(A+D-1)}} + \frac{(A+2D)^{\alpha-1}}{e^{\frac{\alpha}{2}(A+2D-1)}} + \frac{(A+3D)^{\alpha-1}}{e^{\frac{\alpha}{2}(A+3D-1)}} \right] \end{aligned}$$

式中:

$$\begin{aligned} D &= \frac{KP'(K+1) - KP'(K-1)}{8\left\{1 + \frac{C_v(n)}{C_v(n+1)} \cdot [KP'(n+1) - 1]\right\}} \\ A &= \frac{KP'(K) - KP'(K-1)}{\left\{1 + \frac{C_v(n)}{C_v(n+1)} \cdot [KP'(n+1) - 1]\right\}} \end{aligned}$$

PR(J,K) 为转移概率

如果每一时段径流按大小划分为 M 级, 即 M 个状态, 当时段 n+1 的径流量为状态 i 时, 时段 n 径流量出现状态 j 的概率为 P<sub>nij</sub>, 则

$$P_{nij} = \begin{cases} P_{n11} & P_{n12} & \dots & P_{n1m} \\ P_{n21} & P_{n22} & \dots & P_{n2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{nm1} & P_{nm2} & \dots & P_{nmm} \end{cases} \quad \begin{matrix} (n = 1, 2, \dots, N; \text{即时段 } N \text{ 个状态}) \\ (j = 1, 2, \dots, m; \text{即径流 } m \text{ 个状态}) \end{matrix}$$

P<sub>nij</sub> 表示从时段 n+1 到 n 径流状态的转移概率, 其概率矩阵的每行的元素之和为 1。

$$\text{即 } \sum_{j=1}^m P_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

### (二) 水库优化调度的数学模型

以多年平均发电效益期望值最大的马尔柯夫决策规划的水库优化调度数学模型, 包括: 状态变量、决策变量、转移概率、报酬函数、目标函数及保证率约束等。

1. 状态变量 优化调度水电站所面临时段决策出力 N<sub>t</sub> 不仅与所处时段 t<sub>0</sub> 及时段初水库水位 Z<sub>0</sub> 有关, 而且还与面临时段入库流量 Q<sub>c</sub> 有关, 其函数关系式为:

$$N_t = N(Z_b, \bar{Q}_c, t_n)$$

将入库流量(径流)分 15 级、水库水位分 96 级, 则全年 36 个时段共有状态变量为 15 × 96 × 36 = 51840 种

2. 决策变量 当每一时段初水库水位及入库流量一定时, 需要决定时段末水库水位,

称决策变量, 每年有  $36 \times 96 = 3456$  种决策变量, 称决策变量集。

3. 状态转移概率 当第  $n$  时段初水电站处于状态  $i$ , 采用时段末决策水位, 则水库运行状态将转移到  $i_{n+1}$  状态, 运行状态转移的概率取决于径流的条件概率。

4. 报酬函数 当时段末水库决策水位已定, 水库运行状态转移的面临时段报酬函数为该时段在满足灌溉用水要求条件下的发电量及发电的其他效益, 如水电站群之间的补偿调节效益等。

5. 目标函数 在满足灌溉用水要求前提下, 以水电站群总发电效益期望值最大为目标函数, 目标函数以如下递推方程式表示:

$$X_{n+1ik} = \max E[Y_{n+1ikj} + \sum P_{n+1kl} \cdot X_{nj}]$$

$$X_{0j} = 0$$

式中  $X_{n+1ik}$  — 水库在  $n+1$  时段状态 ( $i$  种水位、 $k$  种来水) 时,  $n+1$  时段至  $1$  时段均采用最优决策时的总效益的期望值

$Y_{n+1ikj}$  —  $n+1$  时段效益值

$\sum P_{n+1kl} \cdot X_{nj}$  — 余留时期效益值

$X_{0j}$  — 开始计算时效益值, 其值为零。

6. 惩罚函数 为了求得符合水电站设计保证率  $P=85\%$  的水电站群总保证出力最大及总发电量数学期望值最大或接近最大, 必须在数学模型求解时引进惩罚函数、惩罚函数关系式为:

$$y_n' = y_n(N_n) - \alpha(N_F - N_n)^\gamma - (Q_G - Q_p)^\eta$$

式中  $y_n(N_n)$  — 未惩罚前水电站群所获得发电效益。

$y_n'$  — 惩罚后水电站群所获得发电效益

$\alpha(N_F - N_n)^\gamma$  — 发电惩罚项

$(Q_G - Q_p)^\eta$  — 灌溉惩罚项

$N_F$  — 水电站群总保证出力

$N_n$  — 水电站群第  $n$  时段出力

$Q_G$  — 七一水库下游灌溉流量

$Q_p$  — 七一水库发电下泄流量

$\alpha, \gamma, \eta$  — 分别为惩罚系数与惩罚指数

### 三、计算方法

#### (一) 入库流量频率曲线计算

每个时段均必须计算入库流量频率曲线, 由于要计算条件概率, 实际上每个时段有 15 条频率曲线族。

七一水库在枯水年、灌溉季节将天然来水流量减去水库直接引水灌溉流量称入库流量, 入库流量系列有些年份的数值为正值, 有些年份为负值, 不能用皮尔森 III 型曲线直接计算, 必须用间接方法进行换算, 换算采用平移频率线法, 计算方法与步骤为:

1. 将每个时段入库流量点绘经验频率点于频率格纸上。

2. 每个时段试算一条“平移频率线”，这条频率线必须满足如下要求。

(1) 采用  $C_s = 2C_v$ ，故其频率  $P = 100\%$  时，流量  $\Delta Q'_p = 0$ 。

(2) 将各频率流量  $\Delta Q'_p$  减去  $a_{on}$  值，即将  $\Delta Q'_p$  频率线平行下移  $a_{on}$  值，与经验频率点的适线良好，良好的标志为：理论频率线通过经验频率点的点群中心。

3. 按平移频率线计算条件概率及转移概率。

4. 按平移频率线查算  $\Delta Q'_n$  值，然后减去  $a_{on}$  值，将  $\Delta Q_n$  值，即为各频率实际入库流量值，再以  $\Delta Q_n$  值进行七一水电站出力计算。

## (二) 递推计算

水库优化调度图是以反时序方向进行递推计算，递推计算采用爬山法及变向探索法。

计算时应满足防洪限制水位、水轮机限制出力等约束条件要求。

计算开始时，假定初始余留效益  $NM = 0$ ，算完 36 个时段后，若  $NM > 0$ ，则以第一年末的  $NM$  当第二年初的  $NM$  再重新计算，经过 2~4 年计算后，可稳定和收敛到  $NM \approx$  常数。

## 四、水库优化调度效益

水库优化调度效益可以从两方面比较而计算。

(一) 水库优化调度与常规调度比较 水库优化调度与常规调度效益比较主要效益指标为增加县电力系统总保证出力与梯级水电站年发电量。至于无水力联系被补偿径流式电站增加年发电量问题，由于优化调度避免了各电站汛期“抢负荷”，实际上可增加这类电站年发电量，但由于这种效益不稳定性大，难于计算，故暂未予考虑。两种调度方法效益比较，见表 1。

表 1 两种调度方法效益比较

1	水库调度方案	常规调度	优化调度
2	径流描述	确定型	相关随机型
3	计算方法	时历法	马氏决策规划
4	供电保证率 (%)	85	85
5	径流调节方式	各自独立运行	补偿调节
6	水电站群总保证出力 (kW)	2777.1	3397.2
7	梯级水电站年发电量期望值 (万 kWh)	3167.8	3269.8

从上表可知：七一水电站及其补偿调节的水电站群总保证出力优化调度为 3397.2kW，而常规调度仅 2777.1kW，增加 620.1kW，即增加 22.33%；优化调度七一水电站等梯级水电站年发电量期望值为 3269.8 万 kWh，而常规调度方案为 3167.8 万 kWh，增加 102 万 kWh，即增加 3.2%。

(二) 优化调度与“经验调度”效益比较 由于原来七一水库等凭“经验调度”，未达到常规调度水平，故优化调度实际效益更大，仅以七一水库为例，1989 年 7 月起实行优化

调度, 1989年7月~1990年6月全年降水量1992.8mm, 而且降水量年内分布不均匀, 七一水电站发电量已达2258.2万kWh, 而其前一年即1988年7月~1989年6月流域平均降水量1842.9mm, 由于凭“经验调度”, 仅发电量1602.7万kWh, 折合相同条件, 优化调度比“经验调度”全年增加发电量386万kWh, 即增加发电量17.1%。在不增加设置与投资条件下, 优化调度直接经济效益较大。本县电力系统已新建小型火电厂一座, 其发电成本为0.43元/kWh; 而优化调度由于基本上不花投资, 其单位电能成本很小, 暂按0.05元/kWh计算, 则每度电节约县电力系统成本0.38元, 年仅七一水电站若以增加发电量386万kWh计, 则可节约县电力系统发电成本约147万元。此外还有其他电站增加发电效益, 例如可以提高县电力系统水电站群总保证出力620.1万kW, 若新建小型水电站要获得每kW保证出力, 一般需投资2万元以上, 若以2万元计, 则可节约县电力系统投资1240万元。

#### 参 考 文 献

- [1]张勇传主编: 优化理论在水库调度中的应用。湖南科学技术出版社, 1985年12月
- [2]秦寿康编著: 最优化理论和方法, 电子工业出版社, 1986年11月
- [3]邹海: 最优设计中的新算法, 新时代出版社, 1984年9月。
- [4]林延江等: 水利土木工程系统分析方法, 水利电力出版社, 1983年4月。
- [5]R·A 霍华特著, 李为政等译: 《动态规划与马尔柯夫过程》, 上海科学技术出版社, 1963.11.
- [6]Rodolfo J. Agnilar: Systems Analysis and Design in Engineering, Architecture, Construction and planning, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1973.

## Optimization Operation of Qiyi Reservoir in Yushan County

Liu Deqiu Zhou Dan Tu Huiyuan

(Jiang xi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute)

#### Abstract

The article elucidates the cenifide dispatching of hydropower station group, in which qiyi station is a mainstay, inquires into the data series of runoff and irrigation carefully and seriously, and sels up mathewatical model by means of Markovian decision theory. What is more, this paper makes a study on the characteristic of Qiyi reservoir teking, irrigation as the dominantfactor and introduces such new techniques as parallel translation frequency carre method and treating reliability restrain with two genalty function.

**Key Words** Irrigation Group of small hydropower station Compensating regulation  
Optimization dispatch