第16卷 第2期 郑州工学院学报 Vol.16 No.2
1995年 6 月 Journal of Zhengzhou Institute of Technology Jun. 1995

水库模糊随机优化调度研究*

贺北方 涂 龙

(郑州工学院)

摘 要: 本文将径流过程的随机描述与模糊动态规划相结合，建立了水库优化调度的随机系统模糊动态规划模型（*SFDPM*）。因 *SFDPM* 的优选是在[0,1]数域内进行，所以它具有计算简便、占用计算机内存少、计算速度快等优点。

关键词: 模糊数学，动态规划，优化调度，随机系统.

中图分类号: TV697

1 径流过程描述

水库优化调度问题，很大程度上取决于径流过程的描述。径流过程描述可分为确定的、随机的、模糊的三种描述方法。

1.1 确定性描述

视径流过程为确定性过程，即假定某一确定时刻相应的径流量是一确定值，即

$$x_i = x(t_i), \qquad i = 0,\ 1,\ 2,\ \cdots n$$

这种描述径流的方法，未能反映径流变化的随机性和多变性。在目前尚无准确径流预报情况下，确定性径流描述所得到的优化调度成果往往偏大。求出的最优运行策略，还需通过统计分析建立决策变量倚状态变量的回归方程——最优调度函数，才能指导水库的调度运行。

1.2 随机性描述

视径流过程为以年为周期的随机过程。在水库优化调度中，径流过程的随机描述可采用:

① 独立随机序列

径流过程的任一时刻状态与任何其它时刻状态间互不影响，为相互独立的随机变量，其 n 维分布函数可表示为

* 收稿日期: 1994-02-23

$$F_n(x_1, x_2, \cdots, x_n; t_1, t_2, \cdots t_n) = \prod_{K=1}^{n} F_1(x_k, t_k)$$

② 马尔可夫过程

马尔可夫过程是一类无后效过程。若径流过程 x_t 在时刻 t_{n-1} 处于状态 x_{n-1} 的条件下，t_{n-1} 之后处于状态 x_n 的概率仅与 t_{n-1} 时刻的状态 x_{n-1} 有关，而与 t_{n-1} 以前系统所处状态无关，即

$$F_n(X_n, t_n | X_{n-1}, x_{n-2}, \cdots X_1; t_{n-1}, t_{n-2}, \cdots t_1) = F(X_n, t_n | x_{n-1}, t_{n-1})$$

③ 混合随机描述

这种随机描述是将相邻时段径流相关不显著的时段，作为独立随机序列，采用一维概率分布；对于相邻时段径流相关者，视为简单马尔可夫链，采用二维联合分布或条件概率分布描述。径流过程 x_t 是这两种不同性质的随机序列组成的随机过程。[3][4]

1.3 径流过程的模糊描述

径流过程形成的物理因素十分复杂，其变化不仅具有随机性，而且具有模糊性。通常所说的丰水年、中水年、枯水年，以及考虑年内各时段分配的典型年，均是模糊概念，因为这“丰”、“中”、“枯”以及“典型”年，没有明确的外延，轮廓界限是模糊的。因此，可将径流过程作模糊描述[1]

2 随机系统的模糊动态规划原理

在用模糊数学描述系统时，将不确定环境称为模糊环境。模糊环境下求最优决策的基本要素是：模糊目标 $\underset{\sim}{G}(x)$，模糊约束 $\underset{\sim}{C}(x)$，模糊决策 $\underset{\sim}{D}(x)$，相应的隶属函数为 $\mu_{\underset{\sim}{G}}(x)$，$\mu_{\underset{\sim}{C}}(x)$，$\mu_{\underset{\sim}{D}}(x)$。

模糊决策 $\underset{\sim}{D}(x)$，是同时满足模糊约束 $\underset{\sim}{C}(x)$ 和模糊目标 $\underset{\sim}{G}(x)$ 的决择，即

$$\underset{\sim}{D}(x) = \underset{\sim}{C}(x) \bigcap \underset{\sim}{G}(x)$$

或 $\mu_{\underset{\sim}{D}}(x) = \mu^{\underset{\sim}{C}}(x) \wedge \mu^{\underset{\sim}{G}}(x)$

模糊最优决策 $\mu_{\underset{\sim}{D}^*}(x)$，是在模糊决策 $\mu_{\underset{\sim}{D}}(x)$ 中取“并”运算，即

$$\mu_{\underset{\sim}{D}^*}(x) = \vee \mu^{\underset{\sim}{D}}(x) = \vee \{\mu^{\underset{\sim}{C}}(x) \wedge \mu_{\underset{\sim}{G}}(x)\}$$

水库优化调度问题是典型的多阶段决策问题。若径流过程采用随机性描述，则此系统为随机受控系统，记为

$$A = (X, U, P)$$

式中 $X = (x_1, x_2, \cdots x_t, \cdots x_n)$ 为状态集；$U = (u_1, u_2, \cdots u_t, \cdots u_n)$，为决策集或控制集合；$P = P\{x_{t+1} | x_t, u_t\}$ 为状态转移概率，它表示当 t 时刻状态为 x_t、输入为 u_t 时，下一时

刻 t+1 转移到状态 x_{t+1} 的条件概率。

该系统所要解决的问题是，在各阶段模糊约束为 $\underset{\sim}{C}_0$，$\underset{\sim}{C}_1$，$\underset{\sim}{C}_2$，$\cdots\underset{\sim}{C}_{n-1}$ 下，求时刻 n 的模糊目标 $\underset{\sim}{C}_n$ 的期望值最大的最优决策序列 u_0^*，u_1^*，$\cdots u_{n-1}^*$ 即

$$\mu_{\underset{\sim}{D}}(u_0^*,\ u_1^*,\ \cdots u_{n-1}^*|x_0=\max_{u_1^*\cdots u_{n-1}^*}\{\mu_{\underset{\sim}{C}}^0(u_0)\wedge\cdots\wedge\mu_{\underset{\sim}{C}}^{n-1}(u_{n-1})\wedge E\mu_{\underset{\sim}{G}}^n(x_n)\}$$

$$E\mu_{\underset{\sim}{G}}^n(x_n)=\sum_{u_{n-1}}P(x_n|x_{n-1},\ u_{n-1})\mu_{\underset{\sim}{G}}^n(x_n)$$

模糊动态规划递推方程为

$$\mu_{\underset{\sim}{G}}^{n-i}(x_{n-i})=\bigvee_{u_{n-i}}\{\mu_{\underset{\sim}{C}}^{n-i}(u_{n-i})\wedge E\mu_{\underset{\sim}{G}}^{n-i+1}(x_{n-i+1})\}$$

$$E\mu_{\underset{\sim}{G}}^{n-i+1}(x_{n-i+1})=\sum_{x_{n-i+1}}P(x_{n-i+1}|x_{n-i},\ u_{n-i})\cdot\ \mu_{\underset{\sim}{G}}^{n-i+1}(x_{n-i+1})$$

$$(i=1,\ 2,\ \cdots n)$$

式中 $\mu_{\underset{\sim}{G}}^{n-i}(x_{n-i})$ 是 $t=n-i$ 时的模糊目标 $\underset{\sim}{G}^{n-i}$ 的隶属函数，是由 $t=n-i+1$ 时的模糊目标推求而得，逐时段求解 FDP 递推方程，可求得各时段最优决策序列。

3 随机系统模糊动态规划调度模型SFDPM

视入库径流 x_t 为随机过程，则水库系统可描述为 FDP 意义下的随机系统 A，记为

$$A=(x,\ V,\ d,\ p)$$

式中 x 为水库入流状态，V 为水库蓄水状态，d 为水库放水量决策，p 表示状态转移概率。

3.1 取年内时段 t 为阶段变量，$t=1,\ 2,\ \cdots T$；视入库径流为以年为周期的独立随机序列，各时段的入库径流概率分布可求得，记为 $\Phi_t(m)$，$m=1,\ 2,\ \cdots 10$；

3.2 令 $V_t(l)$为时段初水库蓄水量，则系统状态为

$$S_t(i)=\{x_t(m),\ V_t(l)\}$$

$$l=1,\ 2,\ \cdots M_t;\quad m=1,\ 2,\ \cdots 10$$

3.3 取 t 时段水库放水量（水电站引水量）D_t 为决策变量，其决策空间为 $d_t=\{d_t(i)\}$；

3.4 水库蓄水状态的转移方程为水库水量平衡方程式，即

$$V_{t+1}(k)=V_t(l)+x_t(m)-d_t(i)-W_t(i)$$

式中 $W_t(i)$为 t 时段的可能弃水量，x_t 为净入库水量（已扣除水库水量损失）。可以证明，系统状态转移概率取决于入库径流 x_t 的概率分布，即.

$$p_t(i,\ k)=\begin{cases}\Phi_t(m) & \text{当 } V_{t+1}=V_t+X_t-d_t-W_t \\ 0, & \text{当 } V_{t+1}\neq V_t+X_t-d_t-W_t\end{cases}$$

3.5　目标函数与约束条件。在满足防洪安全、灌溉用水要求及其它约束条件下，使水电站的年期望发电量最大，即

$$G(d^*)=\max_{d\in D} G(d)$$

$$P(d^*)\geqslant P_{灌}$$

式中 $d^*=\{d_t^*(i)\}$ 为优化运行策略，$G(d)$ 为期望年发电量，$P_{灌}$ 为灌溉设计保证率。

约束条件为：

$$V'_t\leqslant V_t\leqslant V''_t$$

$$Q_{t灌}\leqslant Q_{t电}\leqslant N''_t/7.5(Z(\overline{V}_t)-77.0))$$

$$N'_t\leqslant N_t\leqslant N''_t$$

$$V_{t+1}=V_t+x_t-d_t-W_t$$

$$d_t\geqslant 0$$

式中 V'_t 和 V''_t 为水库允许的最小蓄水和最大蓄水容积，V'_t 一般为水库的死库容，V''_t 为 $Z_{汛}$ 或 $Z_{蓄}$ 对应的库容值。$Q_{t灌}$ 和 $Q_{t电}$ 为时段 t 的保证灌溉流量和发电流量，$Z(\overline{V}_t)$ 为相应于时段平均蓄水量 $\overline{V}_t$ 的库水位，N''_t 为水电站的预想出力，N'_t 为水电站可能最小出力。

3.6　模糊目标隶属函数与模糊约束隶属函数的确定。

各时段的约束已在各时段的 $V_t(l)$ 的离散中考虑了 V'_t 和 V''_t 的限制，由状态转移方程可知，当 $S_t(i)=\{V_t(l),\ x_t(m)\}$ 已知时，$d_t\in D_t$，即在可行决策域内取值时，必可求得相应于某一 $d_t(i)$ 的时段出力和时段发电量，即

$$N_t^{d_t}(i)=7.5[Z(\overline{V}_t)-77.0]Q_{t电}\qquad (KW)$$

或

$$r_t^{d_t}(i)=K[Z(\overline{V}_t)-77.0]d_t(i)\qquad (KWh)$$

定义各时段的模糊约束隶属函数为

$$\mu^t_{\underset{\sim}{C}}(i,\ d_t)=\begin{cases}N_t/N''_t, & \text{当} N_t<N''_t \\ 1, & \text{当} N_t\geqslant N''_t\end{cases}$$

式中 N_t 即 t 时段的出力 $N_t^{d_t}(i)$，N''_t 和 N'_t 为 t 时段的预想出力和可能最小出力。

模糊目标应与水电站年期望发电量最大相一致。现定义模糊目标隶属函数为

$$\mu^t_{\underset{\sim}{G}}(i,\ d_t)=\begin{cases}N_t/N''_t, & \text{当} N_t<N''_t \\ 1, & \text{当} N_t\geqslant N''_t\end{cases}$$

模糊决策 $\underset{\sim}{D}$ 是同时满足模糊约束 $\underset{\sim}{C}$ 和模糊目标 $\underset{\sim}{G}$ 的决择，即

$$\underset{\sim}{D} = \underset{\sim}{C} \cap \underset{\sim}{G}$$

或 $\mu_{\underset{-}{D}} = \mu_{\underset{-}{C}} \wedge \mu_{\underset{-}{G}}$

模糊最优决策为

$$\mu^{D^*} = \vee \mu_{\underset{\sim}{D}} = \vee(\mu_{\underset{\sim}{C}} \wedge \mu_{\underset{\sim}{G}})$$

将此推广到多阶段决策过程，则模糊动态规划可表达为

$$\mu_{\underset{\sim}{D}}(d_1^*, d_2^*, \cdots, d_T^* | V_1(l), x_1(m))$$

$$= \max_{d_t^* \in D_t} \{\mu_{\underset{-}{C}}(V_1(l), x_1(m), d_1(i)) \wedge \cdots \wedge \mu_{\underset{-}{C}}(V_T(l), x_T(m), d_T(i))$$

$$\wedge E\mu_{\underset{-}{G}}(V_T(l), x_T(m))\} E\mu_{\underset{-}{G}}(V_T(l), x_T(m))\}$$

$$= \sum_m \Phi_T(m) \cdot \mu_{\underset{-}{G}}(V_T(l), x_t(m))$$

3.7 模糊动态规划递推方程。若径流为独立随机序列时

$$\mu_{\underset{\sim}{G}}(V_t(l), x_t(m)) = \bigvee_{d_t(i)} \{\mu_{\underset{-}{C}}(V_t(l), x_t(m), d_t(t)) \wedge E\mu_{\underset{-}{G}}(V_{t+1}(k))\}$$

$$E\mu_{\underset{-}{G}}(V_{t+1}(k)) = \sum_n \Phi_{t+1}(n) \cdot \mu_{\underset{-}{G}}(V_{t+1}(k), x_{t+1}(n))$$

式中$\Phi_{t+1}(n)$为$t+1$时段径流的概率分布。

4 解法程序设计

4.1 计算各时段径流 x_t(t＝1, 2, …T, T＝22)的均值，离差系数 C_{vt}，采用配线法推求各时段径流的理论频率曲线，将各时段径流离散为 10 级，求其概率分布 $\Phi_t(m)$，m＝1, 2, …10, 供优化调度时应用。

4.2 进行年内逐时段逆序递推计算

对于首次迭代，令 $E\mu_{\underset{-}{G}}^{(0)}(V_{T+1}(k)) = 1$，作为迭代计算的初始值。按 FDP 进行逆序计算:

$$\mu_{\underset{-}{G}}(l, m) = \bigvee_{d_t} \{\mu_{\underset{-}{C}}((l, m, d_t) \wedge E\mu_{\underset{-}{G}}(k)\}$$

$$(t = T.\ T-1, \cdots 2, 1)$$

$$E\mu_G(l) = \sum_m \Phi_t(m) \cdot \mu_{\underset{-}{G}}(l, m)$$

计算方法与一般随机优化调度相似[2]，主要特点是:

① 在满足各种约束条件下，由 $d_t^k(i)$，$k = 1, 2, \cdots n_t$ 计算相应的时段发电效益 $r_t^{d_t}(i)$，或 $N_t^{d_t}(i)$，找出 N'_t 和 N''_t，$N'_t = min(N_t^{d_t}(i))$，$N''_t = (N_{装}$或$N_{预})$。由此可

求得 $d_t^k(i)$ 所对应的 $\mu'_{\underset{\sim}{C}}(d_t^k(i))$ 和 $\mu'_{\underset{\sim}{G}}(d_t^k(i))$

② 对 $d_t^k(i)$，按 FDP 递推方程优选出最优决策 $d_t^*(i)$。优选时，对某一 $d_t^k(i)$ 由 $\mu_{\underset{\sim}{C}}(d_t^*(i))\wedge E\mu_{\underset{\sim}{G}}(d_t^k(i))$ 进行“取小”运算，在不同 k 值对应的 $\{\mu_{\underset{\sim}{C}}(d_t^*(i))\wedge E\mu_{\underset{\sim}{G}}(d_t^k(i))\}$ 中“取大”，即 $d_t^*(i)=\max\limits_k\{\mu_{\underset{\sim}{C}}(d_t^*(i))\wedge E\mu_{\underset{\sim}{G}}(d_t^k(i))\}$—相应于隶属函数最大的某 k 种决策，即为最优决策。此种优选是在 [0,1] 数域内进行，加乘运算次数较少，计算速度快。

③ 将求得的最优决策 $d_t^*(i)$ 及相应的 $E\mu_{\underset{\sim}{G}}(l)$ 记入内存，后者可供下一时段递推计算时调用。

经年内逐时段逆序递推计算，可求得各时段的最优决策 $d_t^*(i)$，以及年初不同蓄水状态对应的累积发电效益的隶属函数值。

4.3 用逐次逼近法进行年际间状态效益稳定计算。

在逐年迭代演算时，需进行系统是否收敛的检验：

① 相邻两次迭代计算中，对应时段的最优决策不变；

② $|\triangle\mu''_{\underset{\sim}{G}}-\triangle\mu'_{\underset{\sim}{G}}|/(\triangle\mu''_{\underset{\sim}{G}}+\triangle\mu'_{\underset{\sim}{G}})\leqslant\varepsilon$

式中：
$$\triangle\mu''_{\underset{\sim}{G}}=\max_l(\triangle E\mu_{\underset{\sim}{G}}(l))$$
$$\triangle\mu'_{\underset{\sim}{G}}=\min_l(\triangle E\mu_{\underset{\sim}{G}}(l))$$
$$\triangle\mu_{\underset{\sim}{G}}(l)=E\mu^{(n)}_{\underset{\sim}{G}_1}(l)-E\mu^{(n-1)}_{\underset{\sim}{G}_1}(l)$$

第 n 次（年）迭代时，相应于 n 年初不同蓄水状态 l 所对应的状态效益的隶属函数为 $E\mu^{(n)}_{\underset{\sim}{G}_1}(l)$，$\triangle E\mu^{(n)}_{\underset{\sim}{G}_1}(l)=E\mu^{(n)}_{\underset{\sim}{G}_1}(l)-E\mu^{(n-1)}_{\underset{\sim}{G}_1}(l)$，表示年初、末对应状态隶属函数的差值。

若收敛，则系统已达稳态运行状态，输出最优决策 $d_t^*(i)$ 矩阵表 ($t=1, 2, \cdots T$，$i=\{l, m\}$)，以作为水库优化调度的依据。

否则，以 $E\mu^{(n)}_{\underset{\sim}{G}_1}(l)=E\mu^{(n+1)}_{\underset{\sim}{G}_T}(k)$ 作为下一次迭代的起始值，进行第 $(n+1)$ 年的迭代计算。

5 计算成果与分析

本文以鲇鱼山水库为实例，编制了计算机程序，在 Wang Vs-300 机上连续运行三年，系统已达到稳态运行状态。计算成果为 20 个时段（11 月和 12 月份水电站机组停机检修）的 20 张最优决策矩阵表，对任一时段来说，已知时段初库水位及面临时段的入库

径流预报[5][6]，便可查到该时段的最优发电流量和相应的水电站出力。

同时，以实测径流序列为样本，按SFDP推求的最优决策矩阵表进行长系列的模拟计算，可求得水电站多年平均发电量和供水保证率。

年发电量 $E_n = \sum_{t=1}^{22} K_t d_t^*(Z(\overline{V}_t) - 77.0)$

多年平均发电量 $\overline{E}_n = G(d^*) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} E_n$

供水保证率 $P = (1 - h/T) \times 100\%$

h—年正常供水破坏次数

本文将径流过程的随机描述与模糊动态规划相结合，建立了水库优化调度的随机系统模糊动态规划模型。文中，定义了模糊目标与模糊约束的隶属函数，应用值迭代法解决了综合利用水库优化调度问题，提供了鲇鱼山水库优化调度成果。本文在径流过程描述上，反映了径流过程的多变性和随机性；在优选决策时，应用了模糊动态规划原理，因决策优选是在[0,1]数域内进行，所以它具有计算简便，占用内存少，计算速度快等优点。同时，此SFDP模型，考虑了面临时段径流预报，增加了调度的灵活性和决策的针对性。

参 考 文 献

1 陈守煜.模糊水文学与水资源系统模糊优化原理.大连理工大学出版社.1990年.

2 贺北方.王海周.综合利用水库优化调度的随机模型.水利经济.1989年第2期.

3 贺北方，陈志远.贺建辉.综合利用水库随机优化运行研究.水能技术经济.1993年第3期。

4 贺北方.向光红.混合随机描述的马尔可夫决策规划模型.郑州工学院学报.1994年第1期.

5 贺北方.吕延年.月径流序列的季节性ARIMA模型.郑州工学院学报.1992年第3期.

6 贺北方.李梅华.月径流序列预报研究.水能技术经济.1994年第3期.

7 黄坚.颜竹丘.水电站水库随机优化调度.水能技术经济.1989年第2期.

Reasearch on the Optimal Operation of Fuzzy and stochastic for the Reservoir

He Beifang Tu Long

(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, a optimal operation model of fuzzy and stochastic for the reservoir (SFDPM) via the integration of fuzzy dynamic programming and stochastic description for the runoft process is founded. The advantage of the model is that th e algroithem is faster and more convenient.

Keywords: Fuzzy mathematics, dynamic programming, optimal operation, stochastical system