

水库实时优化调度余留库容的云决策方法研究*

李 梅^{1,2}, 刘俊萍³, 黄 强¹, 薛小杰¹, 佟春生^{1,4}

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 黄河水利委员会规划计划局, 河南 郑州 450003;

3 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 4 中北大学分校, 山西 太原 030008)

[摘 要] 针对水库(群)水资源系统实时优化调度中水库余留库容的决策问题, 讨论了来水预报信息与水库余留库容的模糊性和随机性, 并应用人工智能领域中的云模型给予综合描述; 通过挖掘历史沉积的知识(不确定推理规则), 构建并给出了基于预报期和余留期预报来水量的水库余留库容云模型决策模型及云模型决策方法。将该决策模型和方法应用于龙羊峡水库 2000 年水库余留库容的决策, 结果表明, 应以 77.3 亿 m^3 的余留库容来确定 2000 年该水库实时优化调度的经济蓄水线, 将多产生 1.48 亿 m^3 的发电效益, 优于实际调度的计算结果。

[关键词] 水库; 优化调度; 余留库容; 云决策

[中图分类号] TV 214

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)03-0238-07

Cloud decision making method for the remaining capacity of reservoir in real-time optimal operation

L I M ei^{1,2}, L U Jun-ping³, H U A N G Q iang¹, X U E X iao-jie¹, T O N G Chun-sheng^{1,4}

(1 Institute of Water Resources & Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 Department of Planning and Programming, YRCC, Zhengzhou, Henan 450003, China;

3 College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

4 Branch of North University of China, Taiyuan, Shanxi 030008, China)

Abstract: Aiming at the reservoir remaining capacity decision making in real-time optimal operation of water resources system, inflow forecasting information and the fuzzy and random characteristics of remaining capacity are discussed and described fully by using cloud model which is used in artificial intelligence field. By digging into history knowledge (uncertainty reasoning rules), cloud decision making model for remaining capacity is established, and cloud decision making method is given according to inflow which is forecasted based on forecasting period and remaining period. The model and method are applied to the remaining capacity decision-making of Longyangxia reservoir in 2000, which indicates that $77.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ remaining capacity of reservoir should be used to confirm economical storage line of real-time optimal operation in 2000, this will produce $1.48 \times 10^8 \text{ m}^3$ more power benefits than that in real operation.

Key words: reservoir; optimal operation; remaining capacity of reservoir; cloud decision making

随着社会经济的发展, 水库调度的地位和作用越来越突出, 如何最大限度地发挥水库效益, 一直是水库(群)调度研究的主要方向之一。水库实时优化调度就是根据时段初的水库蓄水状态和该时段的预报来水、用水信息, 不断向前作出时段放水等优化决

策的动态过程, 其目的就是为了在保证大坝自身安全的前提下, 既满足水库上、下游防洪渡汛要求, 又尽可能多发电。根据水库、电站的运行状态, 应用系统科学的方法, 建立一套方便、实用、科学合理的水库实时优化调度决策支持系统, 对充分发挥水库的

* [收稿日期] 2006-04-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40501011)

[作者简介] 李 梅(1963-), 女, 山东寿光人, 高级工程师, 在读博士, 主要从事水资源系统工程研究。

经济效益和社会效益具有十分重要的实际意义。

如何通过预报期内水库实时优化调度决策,使系统既能获得当前时段的最佳经济、社会和生态环境效益,又可通过预报期末水库余留库容(即水库预报期末须保持的水库蓄水量),在考虑余留期效益的基础上实现水库长系列优化调度效益,是 20 世纪 70 年代初以来国内外极为关注的问题之一,至今已在水资源系统实时优化调度模型与方法、水库余留效益函数等方面取得了许多创造性与实用性的成果^[1-5]。但如何合理确定实时优化调度中预报期末的水库余留库容,仍是水库(群)实时优化调度理论和生产实际中亟待深入研究解决的关键问题之一。

本研究从分析水库余留库容确定过程中存在的模糊不确定性和随机不确定性出发,针对水库实时优化调度过程需先从水库余留库容开始的现状,利用数据挖掘领域中的云理论,提出一种确定水库余留库容的云模型决策方法,并结合龙羊峡水库余留库容确定问题进行了实例计算与成果分析,以期为确定水库实时优化调度的经济蓄水区及提高水库发电效益提供一种有效的优化调度决策方法。

1 云理论^[6-7]

1.1 云的定义及数字特征

设 U 是一个普通集合 $U = \{u\}$, 称为论域。 T 是论域 U 上的概念。论域 U 中的元素 u 对 T 的隶属度 $\mu_T(u) \in [0, 1]$ 是一有稳定倾向的随机数。概念 T

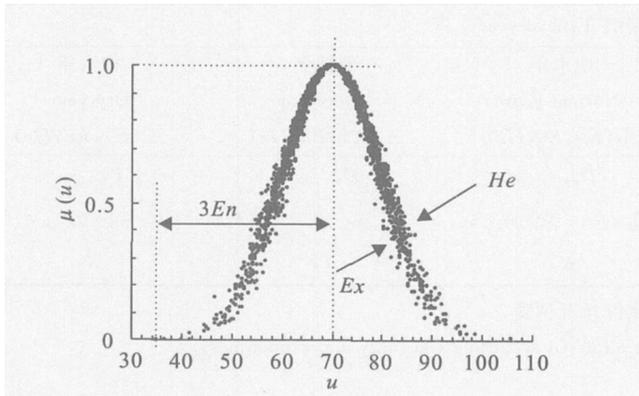


图 1 云及其数字特征

Fig. 1 Cloud and digital characteristics

正向云发生器(Forward Cloud Generator, CG)是根据已知正态云的 3 个数值特征 Ex, En, He , 形成合乎条件的 n 个云滴, 以此构成整个云, 从而将一个定性概念通过不确定性转换为云模型而定性地表示出来。其具体生成算法为: 生成以 Ex 为期望值 En 为标准差的正态随机数 x_i ; 生成以 En 为期望

的云模型是从论域 U 到区间 $[0, 1]$ 的映射, 有

$$\mu_T(u): U \rightarrow [0, 1], \forall u \in U, u \rightarrow \mu_T(u) \quad (1)$$

正态云, 是基于正态分布的云模型, 其可用 3 个参数来描述, 即 $T(Ex, En, He)$ 。其中期望值 Ex (Expected Value) 标定了云对象在论域中的位置, 即云的重心, 它完全属于概念 T 。熵 En (Entropy) 是概念不确定性的度量, 一方面反映了数域空间可被概念接受的范围, 即模糊度, 是定性概念亦此亦彼性的度量; 另一方面还反映了数域空间的点能够代表这个概念的概率, 表示定性概念的云滴出现的随机性。熵揭示了模糊性和随机性的关联性。由期望值和熵两个数字特征可以确定正态云的数学期望曲线 (Mathematical Expected Curve, MEC) 方程, 即

$$MEC \mu_T(u) = \exp\left(-\frac{(u - Ex)^2}{2En^2}\right) \quad (2)$$

超熵 He (Hyper Entropy), 也称为熵的熵, 是熵 En 的随机性度量, 它反映了概念偏离正态分布的程度。值得注意的是, 正态云的期望曲线方程与正态概率密度函数极其相似, 只是剔除了其系数, 保证了在加入随机性——超熵后隶属度仍然在 $[0, 1]$ 区间内 (图 1)。

1.2 云发生器

云发生器(Cloud Generator, CG)就是根据已知正态云的数值特征 Ex, En, He , 产生满足上述正态云分布规律的二维点 $Drop(x, \mu)$, 即云滴。云发生器分为正向云发生器和逆向云发生器两种 (图 2)。

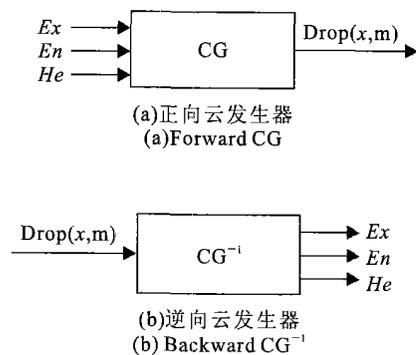


图 2 云发生器

Fig. 2 Cloud generator

值 He 为标准差的正态随机数 En_i ; 计算 $\mu_i = \exp[-(x_i - Ex)^2 / 2En_i^2]$; 令 (x_i, μ_i) 为云滴 $Drop(x_i, \mu_i)$ 。当给定 3 个数字特征值和特定的 $x = x_i$, 产生满足上述条件的云滴 $Drop(x, \mu_i)$ 的组合即为 X 条件云; 当给定 3 个数字特征值和特定的 $y = \mu_i$, 产生满足上述条件的云滴 $Drop(x_i, y)$ 的组合即为 Y

条件云。

逆向云发生器 (Backward cloud generator, CG^{-1}) 是由已知的云滴分布 $D_{rop}(x, \mu)$ 确定正态云的 3 个数字特征。即以给定的符合某一正态云分布规律的 1 组云滴作为样本, 产生描述云所对应的 3 个数字特征值, 从而完成定量到定性的转换。其算法为: (1) 取 x_i 的均值作为 Ex ; (2) 取 x_i 的标准差为 En ; (3) 计算 $En_i = \{- (x_i - Ex)^2 / (2 \ln(\mu_i))\}^{1/2}$, 取 En_i 的标准差为 He 。即得到正态云的 3 个数字特征值 Ex, En 和 He 。

2 水库余留库容的云决策模型

水库余留库容的高低, 主要受水库预报期和余留期的预测来水、用水多少等的影响, 考虑各种因素的作用效果, 可以认为水库余留期的预报来水丰、枯情况, 是影响水库余留库容高低的关键因素。

2.1 水库预报来水云模型描述

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。在水库实时优化调度过程中, 水库预报年来水信息可以用诸如“偏丰年”、“中水年”、“偏枯年”等描述, 而典型年的划分, 如中水年可采用频率为 50% 的年份, 也可采用频率为 47.5% 或 52.5% 的年份, 表明水库预报年来水

信息属于不确定性信息, 具有随机性和模糊性。

水库调度时段的初始库容和末库容通常用“高、中、低”来描述, 也具有随机性和模糊性。因此, 可用兼随机性和模糊性于一体的云模型来描述。现以年来水量频率 (p) 作为丰、枯程度的标准, 可用以下 5 个不确定概念描述水库预报年来水信息: 丰水年 $p = 10\%$, 偏丰年 $10\% < p < 40\%$, 中水年 $25\% < p < 75\%$, 偏枯年 $50\% < p < 90\%$, 枯水年 $p > 90\%$ 。其相应的云模型描述如图 3 和表 1 所示。

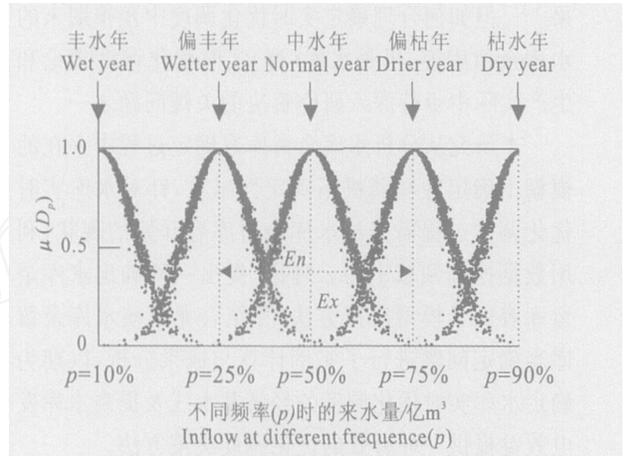


图 3 年来水量 5 个定性概念的云模型

Fig 3 Five qualitative concepts cloud models of annual inflow

表 1 典型年年来水量的云模型数字特征

Table 1 Cloud model digital characteristics of inflow in typical years

特征值 Character value	年型 Typical year				
	丰水年 Wet year	偏丰年 Wetter year	中水年 Normal year	偏枯年 Drier year	枯水年 Dry year
	$A_1(Ex, En, He)$	$A_2(Ex, En, He)$	$A_3(Ex, En, He)$	$A_4(Ex, En, He)$	$A_5(Ex, En, He)$
Ex	$D_{p=10\%}$	$D_{p=25\%}$	$D_{p=50\%}$	$D_{p=75\%}$	$D_{p=90\%}$
En	$(D_{p=10\%} - D_{p=25\%})/3$	$(D_{p=10\%} - D_{p=40\%})/6$	$(D_{p=25\%} - D_{p=75\%})/6$	$(D_{p=50\%} - D_{p=90\%})/6$	$(D_{p=75\%} - D_{p=90\%})/3$
He	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5

注: D_p 为频率 p 的年来水量; K_i 为常数, 可根据模糊性和随机性的实际情况调整。

Notes: D_p is inflow in frequency p year, K_i is constant, which can be adjusted according the fuzzy and randomness

2.2 预报期末水库余留库容的云模型描述

在水库实时优化调度过程中, 预报期末水库余留库容 (V) 的高低, 通常以水库最大兴利库容 (V_H) 作为标准, 根据水库长系列优化调度所得水库蓄水状态过程结果, 通过计算经验的归纳与分析判断, 分别得出与水库年来水量前丰后枯、前枯后丰、前后同丰、前后同枯等不同情况相对应的水库年末蓄水库容范围, 即可用以下 5 个不确定概念来描述: 余留

库容高, 即 $\frac{2}{3}V_H < V < V_H$; 余留库容偏高, 即 $\frac{1}{2}V_H < V < V_H$; 余留库容中, 即 $\frac{1}{3}V_H < V < V_H$; 余留库容偏低, 即 $\frac{1}{3}V_H < V < \frac{4}{5}V_H$; 余留库容低, 即 $\frac{1}{10}V_H < V < \frac{4}{5}V_H$ 。其相应的云模型描述如表 2 所示。

表 2 预报期末水库余留库容的云模型数字特征

Table 2 Cloud model digital characteristics of reservoir remaining capacity at the end of forecasting period

特征值 Character value	余留库容 Reservoir remaining capacity				
	高 High $C_1(E_x, E_n, H e)$	偏高 Higher $C_2(E_x, E_n, H e)$	中 Middle $C_3(E_x, E_n, H e)$	偏低 Lower $C_4(E_x, E_n, H e)$	低 Low $C_5(E_x, E_n, H e)$
E_x	0.83 V_H	0.75 V_H	0.66 V_H	0.56 V_H	0.45 V_H
E_n	0.05 V_H	0.08 V_H	0.11 V_H	0.07 V_H	0.11 V_H
$H e$	0.005 4 V_H	0.005 2 V_H	0.004 9 V_H	0.004 0 V_H	0.003 5 V_H

2.3 不确定推理规则

依据水库(群)系统水资源长系列优化调度所得的水库蓄水状态结果,并结合调度人员的实际经验,

整理后得到的不确定推理规则,可用关系矩阵 $\mu_{\text{余留库容}}$ 表示,即

$$\mu_{\text{余留库容}} = [\mu_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, 5] = \begin{matrix} & & & & & \text{预报期 2} \\ & & & & & B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 \\ \text{预} & & & & & & & & & & \\ \text{报} & A_1 & C_3 & C_3 & C_3 & C_1 & C_1 & & & & \\ \text{期} & A_2 & C_3 & C_2 & C_2 & C_1 & C_1 & & & & \\ \text{1} & A_3 & C_3 & C_2 & C_2 & C_1 & C_1 & & & & \\ & A_4 & C_4 & C_4 & C_4 & C_5 & C_5 & & & & \\ & A_5 & C_4 & C_4 & C_4 & C_5 & C_5 & & & & \end{matrix}$$

这些规则即为不确定云决策模型,其反映了不确定决策系统的特征:如果连续 2 年预报来水是前丰后枯(即丰- 枯、丰- 偏枯、偏丰- 偏枯、偏丰- 枯、中水- 偏枯或中水- 枯),为了有利于进行年际调节、实现长系列优化调度效益,预报期末应尽可能多蓄水,即预报期末的水库余留库容应高一些;如果连续 2 年预报来水是前枯后丰(枯- 丰、枯- 偏丰、枯- 中水、偏枯- 丰、偏枯- 偏丰、偏枯- 中水),为了保证预报期效益的实现,预报期末的水库余留库容可适当低一些,但不能太低,以免余留期初出现大规模供水不足而造成较大的余留效益损失;如果连续 2 年预报来水是前后同丰时(丰- 丰、丰- 偏丰、偏丰- 中水、偏丰- 丰、中水- 丰),则预报期末的水库余留库容以中等为好;如果连续 2 年均为中等偏丰年(偏丰- 偏丰、偏丰- 中水、中水- 偏丰、中水- 中水),为保证水库余留效益,预报余留库容应适当增加;如果连续 2 年预报来水是前后同枯(偏枯- 偏枯、偏枯- 枯、枯- 偏枯、枯- 枯),则需重点保证预报期效益,预报期末水库余留库容应以低些为宜。

3 云决策模型算法描述及其实现机制

对上述的每一条不确定规则,用 X 条件云(CGA_i, CGB_j)、 Y 条件云(CGC_i)、乘法器(MUL)、最大选择器($Max-selector, MaxSEL$)及逆向云发生器

(CG^{-1})来构造规则发生器。这样,当确定 2 个输入值 D_1 和 D_2 (预报期和余留期的预报来水量),就可以得到一个规律性的定性结果,即为决策结论。其算法描述及实现机制如图 4 所示,具体的基于云模型的决策过程如下:

- (1) 给定预报期来水丰、枯的云模型数字特征;
- (2) 对给定的某一特定的预报期预报来水量 D_1 和余留期预报来水量 D_2 , 分别调用 X 条件云发生器 CGA_i 和 CGB_j , 生成云滴 $Drop(D_1, \mu_{A_i})$ 和 $Drop(D_2, \mu_{B_j})$;
- (3) 通过选择器 $Drop(D_1, \mu_{A_i})$ 和 $Drop(D_2, \mu_{B_j})$, 选择出最大者 $Drop(D_1, \mu_{\max A_i})$ 和 $Drop(D_2, \mu_{\max B_j})$;
- (4) 计算 $\mu_{\max ij} = \mu_{\max A_i} \times \mu_{\max B_j}$, 生成云滴 $Drop(D_1, D_2, \mu_{\max ij})$, 即第 (i, j) 条定性规则被选中;
- (5) 运用 Y 条件云发生器 CGC_i , 随机生成云滴 $Drop(z_p, \mu_{\max ij})$;
- (6) 重复(2)~ (5)步,生成 1 组云滴 $Drop(z_p, \mu_{\max ij})$, $p = 1, 2, \dots, n$;
- (7) 运用逆向云发生器 CG^{-1} , 生成 $Drop(z_p, \mu_{\max ij})$ ($p = 1, 2, \dots, n$) 正态云的 3 个数字特征值 $E_x, E_n, H e$, 即为定性决策结果。

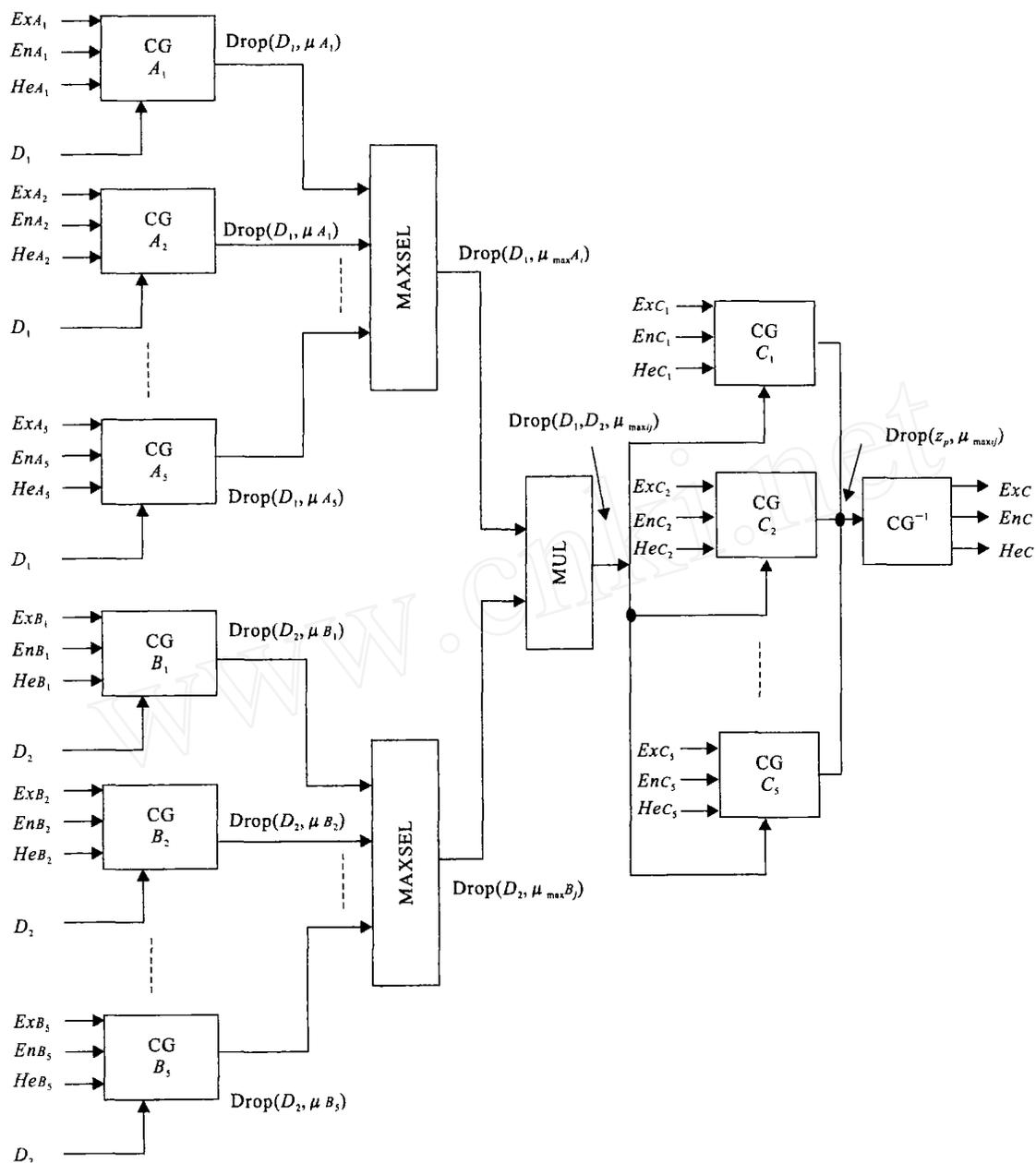


图 4 云决策模型算法描述及其实现机制

Fig 4 Cloud model method description and its realizing mechanism

4 实例研究

龙羊峡水库位于青海省境内,上距河源 1 630 km,集水面积 13.1 万 km²,多年平均天然径流量 203 亿 m³,占花园口天然径流量的 36.3%,水库总库容 247 亿 m³,调节库容(最大兴利库容)193.5 亿 m³,总装机 128 万 kW,是以发电为主,兼有防洪、灌溉、防凌、养殖、旅游等综合效益的大型水利枢纽,也是黄河上唯一一座具有多年调节能力的水库,同时也是黄河干流梯级开发的“龙头水库”。本文以 1919 ~ 1999 年水库径流长系列为样本,采用云决策模

型,以该水库预报期内经济蓄水线的起始余留库容确定问题为实例,来说明云决策模型算法的实现。已知:

- (1) 该水库对应于 $p = 10\%, 25\%, 40\%, 50\%, 75\%, 90\%$ 典型年的年来水量大小分别为 269.5, 234.0, 213.8, 198.5, 170.0 和 149.8 亿 m³。
- (2) 水库最大兴利库容为 $V_H = 193.5$ 亿 m³。
- (3) 该水库 2000, 2001 连续 2 年预报来水量为 $D_1 = 156.4$ 亿 m³, $D_2 = 137.8$ 亿 m³。

对上述水库余留库容云决策方法进行计算验证

(取 $n=10\ 000$), 有:

预报期末水库余留库容的云模型数字特征, 结果见表3和表4。

(1) 由表1和表2, 分别计算典型年年来水量和

表3 典型年年来水量的云模型数字特征

Table 3 Cloud model digital characteristics of inflow in typical year

亿 m^3

特征值 Character value	年型 Typical year				
	丰水年 Wet year	偏丰年 Wetter year	中水年 Normal year	偏枯年 Drier year	枯水年 Dry year
	$A_1(Ex, En, He)$	$A_2(Ex, En, He)$	$A_3(Ex, En, He)$	$A_4(Ex, En, He)$	$A_5(Ex, En, He)$
Ex	269.5	234.0	198.5	170.0	149.8
En	11.8	9.3	10.7	8.1	6.7
He	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2

表4 预报期末水库余留库容的云模型数字特征

Table 4 Cloud model digital characteristics of reservoir remaining capacity at the end of forecasting period 亿 m^3

特征值 Character value	余留库容 Reservoir remaining capacity				
	高 High	偏高 Higher	中 Middle	偏低 Lower	低 Low
	$C_1(Ex, En, He)$	$C_2(Ex, En, He)$	$C_3(Ex, En, He)$	$C_4(Ex, En, He)$	$C_5(Ex, En, He)$
Ex	160.6	145.1	127.7	108.4	87.1
En	9.7	15.5	21.3	13.5	21.3
He	0.3	0.5	0.6	0.4	0.6

(2) 依据该水库2000年预报期预报来水量 D_1 和余留期预报来水量 D_2 , 分别调用 X 条件云发生器 CGA_I 和 CGB_J 生成云滴, 并选择出最大者为 $Drop(D_1, \mu_{\max A_5})$ 和 $Drop(D_2, \mu_{\max B_5})$, 得 $\mu_{\max A_5} = [0.547, 0.667]$, $\mu_{\max B_5} = [0.142, 0.267]$, 表明该水库2000和2001年预报来水均属枯水年。

(3) 计算 $\mu_{\max 5.5} = \mu_{\max A_5} \times \mu_{\max B_5}$, 生成云滴 $Drop(D_1, D_2, \mu_{\max 5.5})$, 即 $\mu_{\max 5.5} = [0.078, 0.178]$,

规则 A_5 和 B_5 、 C_5 被激活(参见(3)式)。

(4) 运用 Y 条件云发生器 CGC_5 随机生成云滴 $Drop(z_p, \mu_{\max 5.5})$, 经逆向云发生器 CG^{-1} , 生成以 $Drop(z_p, \mu_{\max 5.5})$ ($p=1, 2, \dots, n$) 为云滴的正态云3个数字特征值 $(Ex_c, Enc, He_c) = (77.3, 17.5, 0.2)$, 即为最终的云决策结果。应用本方法对2000年龙羊峡水库优化调度进行了计算, 并与该年实际运行状况进行了对比, 其结果见表5。

表5 2000年龙羊峡水库优化调度云决策结果与实际运行状况比较

Table 5 Results of reservoir optimal operation cloud decision making and real operation of Longyangxia reservoir in 2000

亿 m^3

月份 Month	运行实况 Real operation		云决策 Cloud decision making	
	月初库容 Storage at the beginning of month	月末库容 Storage at the end of month	月初库容 Storage at the beginning of month	月末库容 Storage at the end of month
1	168.09	156.12	168.09	160.24
2	156.12	145.21	160.24	153.01
3	145.21	137.42	153.01	143.91
4	137.42	129.97	143.91	136.02
5	129.97	124.30	136.02	124.46
6	124.30	133.93	124.46	131.15
7	133.93	136.79	131.15	132.64
8	136.79	139.95	132.64	138.61
9	139.95	148.34	138.61	139.95
10	148.34	149.32	139.95	142.07
11	149.32	142.51	142.07	136.43
12	142.51	132.21	136.43	130.73

由表5可见, $Ex_c = 77.3$ 亿 m^3 , 即2000年该水库预报期末余留蓄水库容应为 77.3 亿 m^3 , 加上死

库容 53.43 亿 m^3 , 即以 130.73 亿 m^3 作为时段末的输出库容, 从这一余留库容开始, 采用逆时序模拟演算(年初库容用实际库容), 即可确定 2000 年龙羊峡水库的实时优化调度经济蓄水线。应用该经济蓄水线进行龙羊峡水库的实时优化调度模拟计算, 计算结果(表 5)表明, 2000 年龙羊峡年末库容计算值为 130.73 亿 m^3 , 实际值为 132.21 亿 m^3 , 计算增发库容 1.48 亿 m^3 , 亦即应用本方法可增加 1.48 亿 m^3 的发电效益。由此可知, 本研究所提出的水库余留库容云决策模型与方法合理的; 该方法既可保证预报期系统目标效益的实现, 又较好地考虑了系统余留效益, 有利于不断通过时段的实时优化调度决策实现长系列优化调度效益。

5 结 语

本研究针对水库(群)水资源系统实时优化调度中来水预报信息与水库余留库容的模糊性和随机性, 首次应用云理论研究了水库余留库容的云决策问题, 提出了基于预报期和余留期预报来水量的水库余留库容选择范围的云决策方法, 具体计算了 2000 年龙羊峡水库经济蓄水线的余留库容云决策问题, 并与该年实际运行状况进行了对比。结果表明, 应用云决策的计算结果优于实际运行结果。

本研究仅就水库余留库容的模糊性和随机性问题进行了研究, 对如何进一步优化逆时序模拟演算, 进而更加有效地指导水库的实时优化调度还有待于深入探讨。关于云模型的 3 个数字特征值, 目前主要采用专家经验法或统计法来确定, 而对如何由实际情况来确定云模型的 3 个数字特征值也有待于深入研究。

[参考文献]

- [1] 张勇传. 优化理论在水库调度中的应用[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1986
- [2] 郭元裕, 李寿声. 灌排工程最优规划与管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994
- [3] 陈佩煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994
- [4] 刘肇伟, 袁宏源, 谢崇宝. 多目标多年调节水库余留期效益函数探讨[J]. 水利学报, 1994, 25(1): 57-62
- [5] 邵东国, 郭元裕, 沈佩君. 水库实时优化调度余留库容模糊决策方法研究[J]. 系统工程学报, 1999, 14(3): 234-237, 242
- [6] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 16-21
- [7] 邱凯昌. 空间数据挖掘和知识发现[M]. 武昌: 武汉大学出版社, 2001