

文章编号:0559-9350(2009)12-1425-07

基于可拓学理论的防洪调度方案评价研究与应用

王丽萍,叶季平,苏学灵,李新武

(华北电力大学 可再生能源学院,北京 102206)

摘要:基于物元分析及可拓集合中的关联函数,建立了防洪系统可行调度方案综合评判的物元模型。根据防洪系统的实际情况,选取典型评价指标,构建物元矩阵,用信息熵方法确定各指标的权重系数,用“距离”的概念量化评价指标和评价标准之间的关联程度,最大限度地利用可行调度方案和专家经验,充分体现决策人员对调度方案的满意程度。通过实例研究,验证了本方法的合理性和有效性。

关键词:可拓学;物元;防洪调度;评价;决策

中图分类号:TV697

文献标识码:A

1 研究背景

防洪调度是一项复杂和责任重大的决策行为,它涉及社会、经济、技术和生态环境等多个相互联系又彼此制约的因素或目标^[1]。防洪调度决策中,存在许多不确定性,一旦做出决策并付诸实施,是不可逆转的。因此,科学地评价防洪调度方案,最大限度地利用已有的信息,就显得非常重要。目前常用的防洪决策评价方法有层次分析法^[2]和模糊综合评判法^[3]等,这些方法各有特点,层次分析法在遇到因素众多、规模庞大的问题时计算较为复杂;模糊综合评判法则容易遗失信息,且遗失信息随着评判因素的增加而增加。

可拓学是我国学者蔡文教授等^[4-5]在20世纪80年代创立的,是一种用形式化模型研究事物拓展的可能性的创新方法,可用于解决矛盾问题。在其理论发展过程中,可拓学以物元理论和可拓集合论为支柱,与其他领域的理论相结合,形成了一批特有的可拓方法,如物元可拓方法、物元变换方法和优度评价方法等,并产生了相应的可拓工程方法^[6],在水资源管理^[7]、岩土工程^[8]、土地利用规划^[9]、供应链管理^[10]和知识工程管理^[11]等方面得到了广泛的研究与应用。

鉴于可拓学在描述事物时能将不同形式表述的因素组合、并能够概括它们的全体特征的优点,本文运用可拓学基本理论对水库群防洪调度可行方案集进行评估分析,寻求满意实施方案,为决策服务。

2 可拓学描述事物的基本原理

可拓学的基本理论是可拓论,它以物元作为描述世界和各种关系的逻辑细胞^[12]。物元理论认为,客观世界中每一事物都有它一定的个体特征,每个具体特征总是具有相应的量值,因此,可以用若干主要特征和相应的量值来描述特定事物。将物元定义为一个有序三元组 R :

$$R = (N, C, V) \quad (1)$$

其中: N 为事物的名称, C 为事物的特征, V 为特征的量值,三者构成了物元的三要素。如果事物 N 用 n

收稿日期:2008-12-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579019);国家科技支撑计划项目(2006BAC05B03)

作者简介:王丽萍(1956—),女,云南昆明人,教授,从事水资源开发利用、风险管理与决策理论研究。E-mail:lpwang@ncepu.edu.cn

个特征 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 以及相应的量值 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 来描述, 则称 R 为 n 维物元:

$$R = (N, C, V) = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

当 N_α 为标准事物, 关于特征 c_i 的量值范围 $v_{\alpha i} = \langle a_{\alpha i}, b_{\alpha i} \rangle$ 时, 经典域和节域物元矩阵分别表示为:

$$R_\alpha = (N_\alpha, C, V_\alpha) = \begin{bmatrix} N_\alpha & c_1 & \langle a_{\alpha 1}, b_{\alpha 1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{\alpha 2}, b_{\alpha 2} \rangle \\ & & \dots \\ & c_n & \langle a_{\alpha n}, b_{\alpha n} \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_p = (N_p, C, V_p) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & & \dots \\ & c_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: R_α 为经典域物元(防洪调度方案在各个等级中的指标范围); R_p 为节域物元; $v_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 为节域物元关于特征 c_i 的相应标准扩大的量值范围, 有 $\langle a_{\alpha i}, b_{\alpha i} \rangle \subset \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle, i=1, 2, \dots, n$ 。

3 防洪调度方案的可拓学评价方法

可拓学评价方法是对研究对象从可行性和优化(满意程度)的角度来进行评估的, 实质上是一种多属性决策分析方法。它利用可拓集合的基本理论和物元的可拓性定性分析, 通过关联函数进行定量计算。该方法可以将各个评价指标的关系转化为一种相容的问题, 通过距离函数对点和区间之间的距离进行度量, 是一种新的评价方法^[13]。采用该方法可以对若干可行防洪调度方案进行评价, 得出每个方案的优先等级, 具体步骤如下。

(1) 根据防洪系统实际情况, 按照科学性、独立性、代表性和系统性等原则要求, 建立防洪调度方案评价指标体系, 用下列矩阵 x 表示:

$$x = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为第 $i (i=1, 2, \dots, m)$ 个方案第 $j (j=1, 2, \dots, n)$ 个指标的值, m 为方案数, n 为指标数。

(2) 为了消除不同物理量纲对计算结果的影响, 对可行调度方案以及调度方案评价标准中的指标进行归一化处理。

对于“越大越优”型指标:

$$x_i^l = \frac{x_i - \min\{x_i\}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

对于“越小越优”型指标:

$$x_i^l = \frac{\max\{x_i\} - x_i}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

对于固定型指标, 例如防洪调度期末水位, 越接近汛期水位越好。可采用如下公式:

$$x_i^l = 1 - \frac{x_i - \alpha}{\max_i |x_i - \alpha|} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中： α 为固定值

如，对 x 处理后得到：

$$x' = \begin{pmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1n} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & \cdots & x'_{mn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

(3)基于物元模型理论^[13]，根据防洪调度方案评价研究目的，构建物元矩阵(包括待评物元、经典域物元、节域物元)。

已知给定评价方案，则可以获得待评估物元：

$$R_j = (N_j, C, V_j) = \begin{pmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{pmatrix} \quad (10)$$

(4)采用基于信息熵^[14]的决策方法确定防洪调度方案评价指标体系中各个指标的权重系数。计算公式为：

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n x'_{ij} \ln x'_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{k=1}^m (1 - E_k)} \quad (12)$$

式中： E_j 为第 j 个指标输出的信息熵； w_j 为第 j 个指标的权重； m 为方案数， n 为指标数。

(5)运用关联函数计算防洪调度方案对于不同评价标准的关联度。评价方案中关于评价等级 t 的关联函数为：

$$K_{ij}(v_{it}) = \frac{\rho(v_{ij}, v_{oit})}{\rho(v_{ij}, v_{pi}) - \rho(v_{ij}, v_{oit})} \quad (13)$$

$$\rho(x, X_0) = \begin{cases} a - x & x \leq \frac{a+b}{2} \\ x - b & x \geq \frac{a+b}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式中： x 为点， $X_0 = (a, b)$ 为区间， $\rho(x, x_0)$ 为点到区间的距离， $k_{ij}(v_{it})$ 为第 j 个方案 N_j 的第 i 个特征指标关于标准物元等级 t 的关联度。对于每个特征指标 c_i 取权系数 w_i ，则调度方案 N_j 关于等级 t 的关联度 $k_{ij}(N_j)$ 为：

$$k_{ij}(N_j) = \sum_i w_i k_{ij}(v_i) \quad (15)$$

式中： $i=1, 2, \dots, m$ ； $j=1, 2, \dots, n$ ； $t=1, 2, \dots, T$ 为标准物元等级数。

(6)根据最大隶属度原则^[15]，确定防洪调度方案的优先等级(满意程度)。

$$k_{i^+}(N_j) = \max_i \{ k_{ij}(N_j) \} \quad (16)$$

则该方案属于第 t^+ ($t^+ \in T$)个优先级。

4 实例应用

我国南方某流域的防洪系统中，由 3 座水库承担主要的防洪任务，汛期洪水通过上游两条支流上的水库调节后，再汇入下游水库，下游水库的泄流必须符合相应防洪安全标准的要求，通过水库群的联合防洪调度，以确保下游防洪区域的安全(见图 1)。水库 1 为不完全年调节水库，设计洪水位、正常蓄水位及设计洪峰流量分别为 301m、290m 和 8760m³/s；水库 2 为一季调节水库，其相对于水库 1 的各参数分

别为 365.5m、356m 和 3120m³/s；水库 3 为年调节水库，直接承担下游保护区的防洪任务，其设计洪水位为 251m、正常蓄水位 225m、设计洪峰流量 9300m³/s、防洪高水位 247m 和下游安全泄量为 5500m³/s。

在防洪调度方案计算和制定中，根据不同的侧重点（如兼顾汛期期末综合利用要求）以及洪水预报结果，针对每一场洪水的特征、各个水库的当前蓄水状态，都会产生许多个可行的调度方案。通过本文建立的可拓学防洪调度方案评价模型与方法，可以科学、快捷地对各拟定的可行防洪调度方案进行评价和排序，为水库群防洪调度决策方案的选取提供必要的理论依据和方法支持。

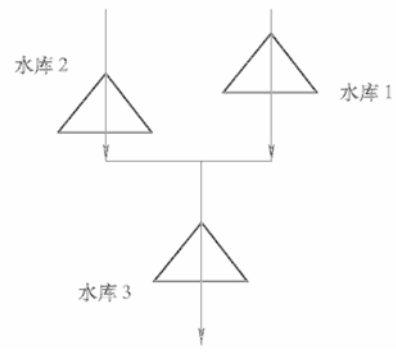


图 1 水库群系统概化

4.1 评价指标体系 基于可拓学评价方法对各拟定的可行防洪调度方案评价时，需要依据防洪调度评价指标体系进行，因此首先根据该防洪系统中当前水库群的实际情况，建立该水库群的防洪调度评价指标体系。

考虑到该防洪系统以及防洪保护区的实际情况，调度方案中不同水库的评价指标有所不同。对于水库 1、2，只考虑水库此次防洪调度过程中的最高坝前水位（简称“最高水位”）和防洪调度期末水库水位（简称“期末水位”），由于水库 3 直接对下游的防洪安全负责，因此，评价水库 3 不仅考虑最高水位和期末水位，还要考察其下游防洪断面最大流量（简称“下游流量”）。水库群防洪系统评价指标具有 3 层结构（见图 2）：第 1 层为整个防洪系统的调度方案；第 2 层为水库群中的 3 个防洪水库；第 3 层为各个水库的防洪调度方案评价指标，分别为水库 1 的最高、期末水位、水库 2 的最高、期末水位、水库 3 的最高、期末水位和水库 3 的下游流量（相应记为评价指标 c_1 、 c_2 、...、 c_7 ）。

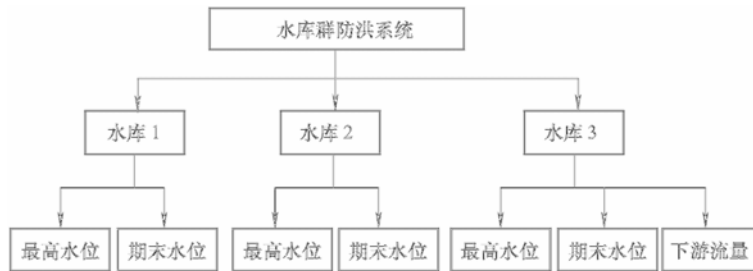


图 2 水库群防洪调度方案评价指标系统

4.2 调度方案评价等级 通过常规调度以及优化调度计算以及方案比选分析，最后得到需要决策评估的 6 个可行性方案，其各指标值见表 1。

表 1 水库群防洪调度可行方案指标

方案编号	水库 1		水库 2		水库 3		
	最高水位/m	期末水位/m	最高水位/m	期末水位/m	最高水位/m	期末水位/m	下游流量 (m ³ /s)
1	300.5	284.2	364.8	353.7	246.3	223.5	4 310
2	299.2	285.3	363.5	354.6	245.4	224.8	4 860
3	300.1	283.8	364.1	355.7	246.6	223.4	4 340
4	298.4	285.9	362.9	356.1	246.1	224.7	5 210
5	299.8	286.4	361.5	354.8	245.1	225.0	4 570
6	298.8	285.1	362.2	355.1	245.7	223.6	5 190

根据可行方案中评价指标的相对范围及调度方案的综合影响，经若干专家集体协商，确定各个指标的等级范围，以此作为评价调度方案优先级别（即相对满意程度）的依据。各评价指标的等级见表 2。

表 2 水库群防洪调度方案评价指标等级

等级	水库 1		水库 2		水库 3		
	最高水位 m	期末水位 m	最高水位 m	期末水位 m	最高水位 m	期末水位 m	下游流量 (m ³ /s)
I	298.5~297.0	286.0~287.0	362.0~361.0	356.5~357.0	245.5~244.0	225.0~225.5	4 450~4 300
II	299.0~298.5	285.5~287.5	363.0~362.0	356.0~357.5	246.0~245.5	224.5~226.0	4 900~4 450
III	300.0~299.0	285.0~288.0	364.5~363.0	355.5~358.0	246.5~246.0	224.0~226.5	5 200~4 900
IV	302.0~300.0	283.5~288.5	365.0~364.5	354.0~358.5	249.0~246.5	223.0~226.0	5 550~5 200

为了便于计算和结果分析,对指标进行归一化处理,表 1、表 2 中的数据处理后相应得到表 3 和表 4。

表 3 水库群防洪调度可行方案指标(归一化)

方案编号	水库 1		水库 2		水库 3		
	最高水位 m	期末水位 m	最高水位 m	期末水位 m	最高水位 m	期末水位 m	下游流量 (m ³ /s)
1	0.30	0.38	0.05	0.17	0.54	0.43	0.27
2	0.56	0.62	0.38	0.40	0.72	0.80	0.55
3	0.38	0.29	0.22	0.67	0.48	0.40	0.29
4	0.72	0.76	0.53	0.78	0.58	0.77	0.99
5	0.44	0.87	0.88	0.45	0.78	0.86	0.78
6	0.64	0.58	0.70	0.53	0.66	0.46	0.97

表 4 水库群防洪调度方案评价指标等级(归一化)

等级	水库 1		水库 2		水库 3		
	最高水位	期末水位	最高水位	期末水位	最高水位	期末水位	下游流量
I	0.70~1.00	0.78~1.00	0.75~1.00	0.88~1.00	0.70~1.00	0.86~1.00	0.88~1.00
II	0.60~0.70	0.56~0.78	0.50~0.75	0.50~0.88	0.60~0.70	0.71~0.86	0.52~0.88
III	0.40~0.60	0.33~0.56	0.13~0.50	0.13~0.50	0.50~0.60	0.29~0.71	0.28~0.52
IV	0~0.40	0~0.33	0~0.13	0~0.5	0~0.29	0~0.28	

4.3 待评物元 根据表 3,确定待评物元(防洪系统调度方案(1—6)) $R_1—R_6$ 为:

$$\begin{aligned}
 R_1 = & \begin{bmatrix} N_1 & c_1 & 0.30 \\ & c_2 & 0.38 \\ & c_3 & 0.05 \\ & c_4 & 0.17 \\ & c_5 & 0.54 \\ & c_6 & 0.43 \\ & c_7 & 0.27 \end{bmatrix}; R_2 = & \begin{bmatrix} N_2 & c_1 & 0.56 \\ & c_2 & 0.62 \\ & c_3 & 0.038 \\ & c_4 & 0.40 \\ & c_5 & 0.72 \\ & c_6 & 0.8 \\ & c_7 & 0.55 \end{bmatrix}; R_3 = & \begin{bmatrix} N_3 & c_1 & 0.38 \\ & c_2 & 0.29 \\ & c_3 & 0.22 \\ & c_4 & 0.67 \\ & c_5 & 0.48 \\ & c_6 & 0.40 \\ & c_7 & 0.29 \end{bmatrix}; \\
 R_4 = & \begin{bmatrix} N_4 & c_1 & 0.72 \\ & c_2 & 0.76 \\ & c_3 & 0.53 \\ & c_4 & 0.78 \\ & c_5 & 0.58 \\ & c_6 & 0.77 \\ & c_7 & 0.99 \end{bmatrix}; R_5 = & \begin{bmatrix} N_5 & c_1 & 0.44 \\ & c_2 & 0.87 \\ & c_3 & 0.88 \\ & c_4 & 0.45 \\ & c_5 & 0.78 \\ & c_6 & 0.86 \\ & c_7 & 0.78 \end{bmatrix}; R_6 = & \begin{bmatrix} N_6 & c_1 & 0.64 \\ & c_2 & 0.58 \\ & c_3 & 0.70 \\ & c_4 & 0.53 \\ & c_5 & 0.66 \\ & c_6 & 0.46 \\ & c_7 & 0.97 \end{bmatrix}。
 \end{aligned}$$

4.4 物元经典域与节域 根据表 4,防洪调度方案第 I ~ II 级指标对应的范围作为经典域 $R_{ot}, t=1,2,3,4$ 。

$$R_{o1} = \begin{bmatrix} N_{o1} & c_1 & \langle 0.70, 1 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.78, 1 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.75, 1 \rangle \\ & c_4 & \langle 0.88, 1 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.70, 1 \rangle \\ & c_6 & \langle 0.86, 1 \rangle \\ & c_7 & \langle 0.88, 1 \rangle \end{bmatrix}; R_{o2} = \begin{bmatrix} N_{o2} & c_1 & \langle 0.60, 0.07 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.56, 0.78 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.50, 0.75 \rangle \\ & c_4 & \langle 0.50, 0.88 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.60, 0.70 \rangle \\ & c_6 & \langle 0.71, 0.86 \rangle \\ & c_7 & \langle 0.52, 0.88 \rangle \end{bmatrix};$$

$$R_{o3} = \begin{bmatrix} N_{o3} & c_1 & \langle 0.40, 0.60 \rangle \\ & c_2 & \langle 0.33, 0.56 \rangle \\ & c_3 & \langle 0.13, 0.50 \rangle \\ & c_4 & \langle 0.13, 0.50 \rangle \\ & c_5 & \langle 0.50, 0.60 \rangle \\ & c_6 & \langle 0.29, 0.71 \rangle \\ & c_7 & \langle 0.28, 0.52 \rangle \end{bmatrix}; R_{o4} = \begin{bmatrix} N_{o4} & c_1 & \langle 0, 0.40 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 0.33 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 0.13 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 0.13 \rangle \\ & c_5 & \langle 0, 0.50 \rangle \\ & c_6 & \langle 0, 0.29 \rangle \\ & c_7 & \langle 0, 0.28 \rangle \end{bmatrix}。$$

节域是根据防洪调度方案指标的取值范围而定的,一般是指标等级的全体。

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_2 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_3 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_4 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_5 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_6 & \langle 0, 1 \rangle \\ & c_7 & \langle 0, 1 \rangle \end{bmatrix}$$

4.5 评价指标权系数 在防洪调度方案评价指标体系中,由于水库群之间的空间位置、各水库防洪指标特性和此次洪水的空间分布特性差异决定其权系数,具有三维特性。在此,因前两维固定,所以此次洪水的特性决定了选取指标的权重。表 3 列出的防洪调度方案指标反映了此次洪水的信息,因此,可以利用基于信息熵的决策方法做出此次洪水对各个指标的估计,来“提取”各个指标的权系数。

依据可行方案指标归一化后的表 3 建立决策矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.38 & 0.05 & 0.17 & 0.54 & 0.43 & 0.27 \\ 0.56 & 0.62 & 0.38 & 0.40 & 0.72 & 0.80 & 0.55 \\ 0.38 & 0.29 & 0.22 & 0.67 & 0.48 & 0.40 & 0.29 \\ 0.72 & 0.76 & 0.53 & 0.78 & 0.58 & 0.77 & 0.99 \\ 0.44 & 0.87 & 0.88 & 0.45 & 0.78 & 0.86 & 0.78 \\ 0.64 & 0.58 & 0.70 & 0.53 & 0.66 & 0.46 & 0.97 \end{bmatrix}$$

按式(11)计算每个指标 $C_j(j=1,2,\dots,7)$ 的信息熵得到: $E = (0.76, 0.91, 0.77, 0.92, 0.76, 0.91, 0.70)$

按式(12)计算属性权重向量:

$$\omega = (0.1901 \quad 0.0718 \quad 0.1816 \quad 0.0622 \quad 0.1885 \quad 0.0720 \quad 0.2338)$$

所以,评价系统指标 c_1, c_2, \dots, c_7 的权重依次为: 0.1901、0.0718、0.1816、0.0622、0.1885、0.0720、0.2338。

4.6 物元关联度 计算待评估调度方案对于不同优先级的关联度(见表 5)。由表 5 可知,调度方案 1、2、3、4、5、和 6 对各评价等级的关联度最大值分别为 0.021、0.063、0.109、0.020、0.101 和 0.036,优先级相应为 IV、III、III、II、I 和 II,因此,对于可行调度方案 1—6,其中方案 5 最接近评价等级 I,即综合调度结果最接近等级 I 的评价指标,可优先选择此调度方案作为满意方案。

表5 各调度方案关联度计算结果

方案序号	1	2	3	4	5	6
I	-0.623	-0.322	-0.277	-0.163	0.101	-0.199
II	-0.311	-0.059	-0.525	0.020	-0.542	-0.036
III	-0.043	0.063	0.109	-0.362	-0.219	-0.199
IV	0.021	-0.436	-0.217	-0.420	-0.002	-0.502

同时,结合各评价指标的权重,从各方案指标的原始数据与评价等级的各指标值范围对比来看,如果仅考虑水库3下游流量(权重最大的指标为0.2338),则方案1(4310m³/s)为最优方案,但在采用本文方法同时考虑其它指标的情况下,方案5的计算结果要优于其它方案,一定程度上反映了决策人员对各调度方案的综合满意程度,避免了仅从部分指标直观判断问题的片面性。

5 结论

根据防洪系统的实际情况和评价目的,本文运用可拓学理论进行防洪系统水库群调度方案优先等级的评价,并基于信息熵的决策方法做出此次洪水对各个指标的估计,来“提取”各个指标的权系数,能最大限度地合理利用可行调度方案信息和考虑洪水特性,使评价更切合实际。尤其是采用“距离”的概念量化了评价指标和评价标准之间的关联程度,很好地反映了待评估的调度方案对防洪系统的综合影响水平,能客观地综合体现决策人员对调度方案的满意程度,符合防洪调度方案决策过程的要求。该方法原理明确,计算方便快捷,是一种处理复杂的多属性决策问题的有效方法,通过在实际防洪调度的应用,也证明了其较好的实用性。

参 考 文 献:

- [1] 陈守煜. 防洪调度系统半结构性决策理论与方法[J]. 水利学报, 2001(11): 26—33.
- [2] 丁勇, 梁昌勇, 方必和. 基于D—S证据理论的多水库联合调度方案评价[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 591—597.
- [3] 王本德, 周惠成, 程春田. 梯级水库群防洪系统的多目标洪水调度决策的模糊优先[J]. 水利学报, 1994(2): 31—45.
- [4] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报, 1983(1): 83—97.
- [5] CAI Wen. Extension management engineering and applications[J]. International Journal of Operations and Quantitative Management, 1999(1): 59—72.
- [6] 蔡文, 杨春燕, 何斌. 可拓学基础理论研究的新进展[J]. 中国工程科学, 2003, 5(2): 80—87.
- [7] 张洪波, 黄强, 辛琛, 等. 水资源承载力可拓评价方法[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(s): 206—212.
- [8] 原国红, 陈剑平, 马琳. 可拓评判方法在岩体质量分类中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1539—1544.
- [9] 关涛, 余万军, 慎勇扬, 等. 基于可拓评价方法的土地开发整理项目立项决策研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 71—75.
- [10] 鞠红. 可拓数学方法在供应链管理中的应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2003.
- [11] 蔡卓恒. 基于可拓学的知识表示和策略生成的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2007.
- [12] 蔡文. 可拓学概述[J]. 系统工程理论与实践, 1998(1): 76—84.
- [13] 蔡文. 物元模型及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [14] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [15] 韩宇平, 解建仓. 模糊综合评判法在水库洪水调度方案评价中的应用[J]. 西北农林科技大学学报, 2002, 30(6): 198—200.

(下转第1439页)