

可变模糊决策理论及其在水库防洪调度决策中应用

陈守煜^{*1}, 袁晶瑄¹, 郭瑜^{1,2}

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

2. 珠江水利委员会 水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 首先建立可变模糊决策(优选)理论, 提出以对立模糊集概念为基础的可变模糊决策模型与方法. 其特点是模型及模型中的参数权向量可以变化以提高系统决策的可靠性. 其次, 根据水库调度决策中汛期各阶段目标重要性的不同, 应用非结构性决策模糊集分析的二元比较法确定水库防洪调度目标的经验权重(主观权重). 最后, 将可变模糊决策模型与方法用于丰满水库洪水调度, 实例表明, 该方法科学实用, 能够提高水库防洪调度决策支持系统的决策可靠性.

关键词: 可变模糊决策; 对立模糊集; 水库防洪调度; 目标权重

中图分类号: TV697 **文献标志码:** A

0 引言

1998年长江发生全流域大洪水, 松花江、嫩江出现特大洪水, 洪涝灾害的直接经济损失估计达2 500亿元. 洪涝灾害不仅造成了巨大的经济损失, 而且危及人民的生命安全及社会的稳定. 国务院为了进一步提高我国防御洪涝灾害的能力, 提出“积极采用现代化技术, 实行科学防洪…尽快建成全国防汛指挥系统, 实现防汛指挥调度现代化”的重要措施.

全国防汛指挥系统由信息采集、通信、计算机网络和决策支持4个分系统组成, 其中决策支持分系统是整个系统的核心. 它基于其他分系统搜集和传输的雨情、水情、工情、险情等防汛实时信息, 结合历史资料及决策者、专家的经验, 全过程地为防汛指挥提供决策支持, 提高防汛指挥的实时性、前瞻性和科学性.

防洪调度决策是决策支持分系统的关键, 涉及到自然、社会、经济、技术、生态环境等多个复杂的相互联系但又彼此制约的目标, 属于复杂的多目标决策问题. 目前在防洪调度决策的模型与方法中, 基本上按单一的多目标决策问题求解. 为了

进一步提高水库防洪调度决策支持系统决策的可靠性, 本文在多目标模糊优选理论的基础上, 建立可变模糊决策理论, 提出以对立模糊集概念为基础的可变模糊决策模型与方法, 既考虑优选决策模型的变化, 也根据权重灵敏度的要求, 考虑多目标权重的变化.

1 可变模糊决策(优选)理论

1.1 优劣对立模糊集概念

根据对立统一的辩证唯物论原理, 文献[1、2]赋予对立双方的性质分别为 $\underline{A}$ (吸引性质)和 $\underline{A}^c$ (排斥性质), 将事物 u 关于性质 $\underline{A}$ 的相对隶属度表示为 $\mu_{\underline{A}}(u)$, 关于性质 $\underline{A}^c$ 的相对隶属度表示为 $\mu_{\underline{A}^c}(u)$, 事物发生渐变式质变的概念为事物 u 对性质 $\underline{A}$ 的相对隶属度 $\mu_{\underline{A}}(u)$ 与对性质 $\underline{A}^c$ 的相对隶属度 $\mu_{\underline{A}^c}(u)$ 达到动态平衡, 即 $\mu_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}^c}(u)$. 将 $\underline{A}$ 与 $\underline{A}^c$ 分别代表优与劣, 则可变模糊决策关于优劣的对立模糊集概念在数学上表示如下:

设论域 U 上的对立模糊概念, 以 $\underline{A}$ 与 $\underline{A}^c$ 分别表示优与劣, 对 U 中的任意元素 u , 即 $u \in U$, 在参考连续统区间 $[1, 0]$ (对 $\underline{A}$)和 $[0, 1]$ (对 $\underline{A}^c$)上的

收稿日期: 2006-01-19; 修回日期: 2008-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779005); 水利部科技创新项目(SCXC 2005-01).

作者简介: 陈守煜^{*}(1930-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: chensycc1@yahoo.com.cn.

任一点, 优与劣的相对隶属度分别为 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 、 $\mu_{\tilde{A}^c}(u)$, 且 $\mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}^c}(u) = 1$. 令

$$\tilde{A} = \{u, \mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{A}^c}(u) \mid u \in U\} \quad (1)$$

满足

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}}(u) \leq 1, \quad 0 \leq \mu_{\tilde{A}^c}(u) \leq 1 \quad (2)$$

$\tilde{A}$ 称为 U 上的优劣对立模糊集.

1.2 优与劣可变模糊集合

令

$$\tilde{V} = \{(u, U) \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) + \mu_{\tilde{A}^c}(u) = 1,$$

$$\mu \in [0, 1]\} \quad (3)$$

$$A_+ = \{u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}^c}(u)\} \quad (4)$$

$$A_- = \{u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}^c}(u)\} \quad (5)$$

$$A_0 = \{u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}^c}(u)\} \quad (6)$$

设 C 是可变因子集,

$$C = \{C_A, C_B, C_C\} \quad (7)$$

式中: C_A 为可变模型集; C_B 为可变权重集, C_C 为除模型及权重外的可变其他因子集.

令

$$A^+ = C(A_-) =$$

$$\{u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}^c}(u), \\ \mu_{\tilde{A}}(C(u)) > \mu_{\tilde{A}^c}(C(u))\} \quad (8)$$

$$A^- = C(A_+) =$$

$$\{u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}^c}(u), \\ \mu_{\tilde{A}}(C(u)) < \mu_{\tilde{A}^c}(C(u))\} \quad (9)$$

$$A^{(+)} = C(A_{(+)}) =$$

$$\{u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) > \mu_{\tilde{A}^c}(u), \\ \mu_{\tilde{A}}(C(u)) > \mu_{\tilde{A}^c}(C(u))\} \quad (10)$$

$$A^{(-)} = C(A_{(-)}) =$$

$$\{u \mid u \in U, \mu_{\tilde{A}}(u) < \mu_{\tilde{A}^c}(u), \\ \mu_{\tilde{A}}(C(u)) < \mu_{\tilde{A}^c}(C(u))\} \quad (11)$$

定义式(3)~(11)称为以相对隶属度函数表示的优劣模糊可变集合 $\tilde{V}$. A_+ 、 A_- 、 A_0 分别称为优劣模糊可变集合的优(为主)域、劣(为主)域和优劣渐变式质变界.

1.3 可变模糊决策(优选)模型

根据陈守煜在文献[1、2]中导出的可变模糊集模型为

$$v_{\tilde{A}}(u)_j = \frac{1}{1 + (d_{gj}/d_{bj})^\alpha} \quad (12)$$

式中: $v_{\tilde{A}}(u)_j$ 为决策集($j = 1, 2, \dots, n$; n 为决策

数)综合相对优属度; α 为优化准则参数, $\alpha = 1$ 为最小一乘方准则, $\alpha = 2$ 为最小二乘方准则. d_{gj} 为决策 j 的距优距离; d_{bj} 为决策 j 的距劣距离.

$$d_{gj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - \mu_{\tilde{A}}(u)_{ij})]^p \right\}^{1/p} \quad (13)$$

$$d_{bj} = \left\{ \sum_{i=1}^m (\omega_i \mu_{\tilde{A}}(u)_{ij})^p \right\}^{1/p} \quad (14)$$

式中: ω_i 为目标 i 的权重; $\mu_{\tilde{A}}(u)_{ij}$ 为决策 j 目标 i 的相对优属度; p 为距离参数, $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧氏距离. 模型(12)中 α 、 p 可有4种搭配:

$$\alpha = 1, p = \begin{cases} 1 \\ 2 \end{cases}; \quad \alpha = 2, p = \begin{cases} 1 \\ 2 \end{cases} \quad (15)$$

(1) 当 $\alpha = 1, p = 1$ 时, 式(12)变为

$$v_{\tilde{A}}(u)_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \mu_{\tilde{A}}(u)_{ij} \quad (16)$$

式(16)相当于模糊综合评判模型, 是一个线性模型, 它是可变模糊决策模型的一个特例.

(2) 当 $\alpha = 1, p = 2$ 时, 式(12)变为

$$v_{\tilde{A}}(u)_j = \frac{d_{bj}}{d_{bj} + d_{gj}} \quad (17)$$

式(17)相当于理想点模型, 它是可变模糊决策(优选)模型的又一个特例.

(3) 当 $\alpha = 2, p = 1$ 时, 式(12)变为

$$v_{\tilde{A}}(u)_j = \frac{1}{1 + [(1 - d_{bj})/d_{bj}]^2} \quad (18)$$

式(18)为 sigmoid 型函数, 可用以描述神经网络系统中神经元的激励函数^[3].

(4) 当 $\alpha = 2, p = 2$ 时, 式(12)变为

$$v_{\tilde{A}}(u)_j = \frac{1}{1 + (d_{gj}/d_{bj})^2} \quad (19)$$

此时可变模糊决策模型变为模糊优选模型^[4].

应用模型(16)~(19), 分别计算决策集对1级(即优级)的综合相对隶属度矩阵 $v_{\tilde{A}}(u)$, 简称决策相对优属度矩阵:

model

$$v_{\tilde{A}}(u) = \begin{pmatrix} v_{\tilde{A}}(u)_{11} & v_{\tilde{A}}(u)_{12} & \cdots & v_{\tilde{A}}(u)_{1n} \\ v_{\tilde{A}}(u)_{21} & v_{\tilde{A}}(u)_{22} & \cdots & v_{\tilde{A}}(u)_{2n} \\ v_{\tilde{A}}(u)_{31} & v_{\tilde{A}}(u)_{32} & \cdots & v_{\tilde{A}}(u)_{3n} \\ v_{\tilde{A}}(u)_{41} & v_{\tilde{A}}(u)_{42} & \cdots & v_{\tilde{A}}(u)_{4n} \end{pmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} = \begin{matrix} (v_{\tilde{A}}(u)_{qj}); q = 1, 2, 3, 4 \end{matrix} \quad (20)$$

2 可变模糊决策(优选)模型中权重与目标相对优属度

2.1 二元比较法确定水库防洪调度目标的经验权重

由文献[3]可知,对于决策方案集,把目标的重要性作为模糊概念,然后对目标集的各个目标作二元比较,得到各目标的定性排序一致性标度矩阵,再进行数学检验,使得到的矩阵符合排序一致性标度矩阵的3条规则,由此给出目标集在满足排序一致性条件下关于重要性的排序。

则由文献[3]给出的表1可以简捷地得到目标对重要性的相对隶属度即非归一化目标权重,归一化后得到目标的经验权重向量。

表1 语气算子与模糊标度值、相对隶属度间的关系^[3]

Tab.1 Relationships between operator and relative membership degree of quantitative scale

语气算子	模糊标度值	相对隶属度
同样	0.50	1
稍微	0.55	0.818
略微	0.60	0.667
较为	0.65	0.538
明显	0.70	0.429
显著	0.75	0.333
十分	0.80	0.250
非常	0.85	0.176
极其	0.90	0.111
极端	0.95	0.053
无可比拟	1	0

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0.20 & 0.50 & 0.80 & 1.00 & 0.58 & 0.75 & 0.88 & 0.97 & 1.00 & 0.93 \\ 0 & 0.28 & 0.70 & 0.97 & 0.69 & 0.84 & 0.98 & 1.00 & 0.93 & 0.90 & 0.99 \\ 1.00 & 0.80 & 0.50 & 0.20 & 0 & 0.40 & 0.30 & 0.22 & 0.17 & 0.15 & 0.20 \end{bmatrix} = (r_{ij})$$

$$i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, \dots, 11$$

利用二元比较法,经过认真考虑3个防洪调度目标的重要性后,认为1991-07-28水库正处于主汛期,水库预留防洪库容最重要,它比调洪末库水位“明显重要”,它与弃水量相比较“显著重要”,应用表1则经验权重向量为 $\mathbf{w}^0 = (1 \quad 0.429 \quad 0.333)$,归一化后为 $\mathbf{w} = (0.568 \quad 0.243 \quad 0.189)$ 。

先采用式(12)中参数 $\alpha = 1, p = 1$ 的线性

2.2 确定水库防洪调度各个目标的相对优属度

设在洪水调度中,考虑的目标数为 m ,经过洪水调节计算,拟定的可行决策数为 n , n 个决策组成的集合 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$,其决策矩阵可表示为 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$, x_{ij} 是 $A_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的第 i 个目标值。

多目标决策的目标通常分为特征值越大越优、越小越优与中间型三类。越大越优、越小越优与中间型的目标相对优属度公式分别可采用^[5]

$$r_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (21)$$

$$r_{ij} = (x_{\max} - x_{ij}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (22)$$

$$r_{ij} = 1 - \frac{|x_{ij} - x_i|}{\max |x_{ij} - x_i|} \quad (23)$$

式中: r_{ij} 为决策 j 目标 i 的相对优属度; $x_{\max} = \bigvee_{j=1}^n x_{ij}$ 为决策集目标 i 的最大特征值; $x_{\min} = \bigwedge_{j=1}^n x_{ij}$ 为决策集目标 i 的最小特征值; x_i 为决策集目标 i 的中间最优值。由式(21)、(22)、(23)把目标特征值矩阵 $\mathbf{X}$ 变换为目标相对隶属度矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

3 应用实例

以丰满水库1991-07-28的实际洪水为例^[5],用文献[5]所列11种调度方案,洪水调度考虑了3个防洪目标:(1)预留防洪库容,用调洪最高库水位来反映,主要考虑大坝防洪安全;(2)调洪末库水位,主要考虑本次洪水与下次洪水的衔接及汛后水库兴利效益的发挥;(3)弃水量,用泄流量和发电用水量之差来反映,主要考虑发电与防洪结合程度。根据11种方案的特征值矩阵,利用式(21)~(23)可得到目标相对隶属度矩阵

模型,即 $v_{\Lambda}(u) = \sum_{i=1}^m w_i \mu_{\Lambda}(u)_i$,解得11个方案的综合相对隶属度 $v_{\Lambda}(u)$,列于表2第2列。

对模型进行变换,取模型参数 $\alpha = 1, p = 2$ 的非线性模型,应用式(12)作类似的求解,解得11个方案的综合相对隶属度 $v_{\Lambda}(u)$,列于表2第3列。

根据方案相对优属度(平均值)最大,可优选方案10为水库防洪调度决策方案。

表 2 方案相对优属度计算表
Tab.2 Relative optimal membership degrees of schemes

方案	模型参数				方案相对隶属度平均值	排序
	$\alpha = 1, p = 1$	$\alpha = 1, p = 2$	$\alpha = 2, p = 1$	$\alpha = 2, p = 2$		
1	0.189	0.234	0.052	0.086	0.140	11
2	0.333	0.292	0.199	0.145	0.242	10
3	0.549	0.528	0.596	0.556	0.557	9
4	0.728	0.731	0.877	0.880	0.804	6
5	0.736	0.744	0.886	0.894	0.815	5
6	0.626	0.605	0.737	0.701	0.668	8
7	0.721	0.717	0.870	0.865	0.793	7
8	0.784	0.774	0.930	0.922	0.853	4
9	0.809	0.790	0.947	0.934	0.870	2
10	0.815	0.789	0.951	0.934	0.872	1
11	0.807	0.788	0.946	0.933	0.868	3

4 结 语

本文根据陈守煜在 2005 年建立的可变模糊集理论,提出可变模糊决策(优选)理论、模型与方法,并将其应用于丰满水库防洪调度方案优选,全面地考虑了模型及其参数的变化(模型的变化、目标权重的变化),提高了优选决策的可信度.此理论、模型与方法不仅能用于水库防洪调度决策支持系统的方案优选,也可应用于其他系统的优选决策.

参考文献:

[1] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法

[M]. 大连:大连理工大学出版社,2005

[2] 陈守煜. 可变模糊集合理论——兼论可拓学的数学与逻辑错误[J]. 大连理工大学学报,2007,47(4): 618-624

(CHEN Shou-yu. Variable fuzzy theory-And mathematical mistakes and logic errors in extenics theory[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(4):618-624)

[3] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998

[4] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连:大连理工大学出版社,1994

[5] 陈守煜. 复杂水资源系统优化模糊识别理论与应用[M]. 长春:吉林大学出版社,2002

Variable fuzzy decision-making theory and its application to decision-making supporting system for reservoir flood control operation

CHEN Shou-yu^{*1}, YUAN Jing-xuan¹, GUO Yu^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Pearl River Hydraulic Committee, Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Variable fuzzy decision-making (optimization) theory is established. Based on the conception of opposed fuzzy set, the variable fuzzy decision-making model and corresponding method are proposed. One characteristic of the model is that it can heighten the reliability of decision-making system by variability of model and its parameters. And the other is that it can apply method of pair-wise comparison of unstructured decision-making fuzzy set analysis to confirm experiential weights (subjective weights) of objects of reservoir flood control operation. Finally, the model and corresponding method are applied to flood operation of Fengman reservoir. The case study shows that the model and corresponding method are scientific and practical, and can heighten decision-making reliability of the decision-making supporting system for reservoir flood control operation.

Key words: variable fuzzy decision-making; opposed fuzzy set; reservoir flood control operation; weights of objects