

核事故早期应急群决策模型研究

武良鹏, 邹树梁^①, 刘文君^②

(南华大学 经济与管理学院, 湖南 衡阳 421001)

[摘要] 有效快速的核事故早期应急决策,是核电站发生核事故后最后一道必要的屏障,因此决策的快速性与有效性至关重要。文章先构造效用函数,求出决策者的乐观系数,将决策判断矩阵中的区间值与模糊值精确化;在此基础上建立了个体与群体的决策模型,以提高决策的有效性。同时根据排序结果,构造群体与个体之间一致性判断矩阵,并根据判断矩阵进行交互与修改,使专家内部快速达成一致。最后通过算例说明方法的可行性。

[关键词] 核事故; 早期应急; 效用函数; 乐观系数; 一致性

[中图分类号] TL364 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-0755(2015)05-0006-08

当发生核电事故时,在事故的早期阶段,即从认识到可能对场外发生重大的放射性释放的时刻开始,到释放(如果发生的话)开始之后的前几个小时,由于可利用的时间是非常有限的,要使防护措施取得预想的结果,防护措施的启动和完成必须是快速和有效的。影响决策快速性和有效性的主要因素为:(1)如果用区间数直接进行计算,必将增大计算量,因此决策判断时如何将定性指标和区间数转化成精确数非常重要;(2)评价模型既要简单实用又必须准确无误;(3)个体决策如何有效地集结成群决策,且决策者们要快速达成一致,不能在决策时陷入争论,以至于决策结果迟迟不能生成。通过研究核事故应急方法:多属性效用分析^[1]、贝叶斯风险理论^[2]、模糊决策理论^[3]、层次分析法^[4]、属性约简^[5]等,可以发现这些方法有一定的优点,却也都是不完整的,例如文献[1-3,5],都是经过一次决策就得出结果,这与核应急决策中是在不断的信息交流的情况下生成的原则不符,而文献[4]虽然做了一致性分析,但方法复杂,且没有指出当不一致时该如何交互信息进行修改,文献[1,2,4,5]中的属性值都是确定值,这显然是不符合常理的,最主要的是这些方法都是单个决策者做出的决策,而现实却是一群决策者做出的决策。

因此,为了解决这些问题,文章的主要研究内容为:(1)通过求解乐观心态系数将不确定数转化成精确数;(2)建立两阶段偏差最小化个体决策模型;(3)在专家权重不确定信息太大的情况下,引入主观权重(这里的主观权重并不是人为打分,而是根据数据确定的)与客观权重,并利用相似度的概念将两者折衷。(4)建立交互模型,使决策者们的意见快速达成一致。

一 乐观心态系数的建立求解

(一)问题的描述

设指标集(Criteria set),记为 $C = \{c^1, c^2, \dots, c^n\}$;将所有方案集合形成的方案集(Alternative set)记为 $A = \{a^1, a^2, \dots, a^m\}$, m 为方案集的个数;决策专家集(Decision makers set)记为 $D = \{d^1, d^2, \dots, d^q\}$, q 为决策专家的数目。由此指标集和方案集组成 q 个 $m \times n$ 的决策矩阵,专家 l 对方案 i 在指标 j 下的评价自然属性值记为 m_{ij}^l ,而所有的自然属性值并不一定是确定的数值,且可能给出不同的偏好信息。构建如表1所示的决策矩阵:

通过给出这样的矩阵,将所有专家的意见统一,得出每个方案的比较值,选出最优决策方案。因此本文研究的问题可以总结为属性权重和专家权重未

[收稿日期] 2015-10-08

[基金项目] 湖南省社科基金项目“我国核电产业技术效率测度研究”资助(编号:12CJY013);湖南省社科基金项目“内陆核电厂非常规突发事件应急准备体系及其评估研究”资助(编号:14JD51);南华大学研究生科研创新项目资助(编号:2015XCX08);湖南省研究生科研创新项目资助(编号:2015SCX12);湖南省重点学科“管理科学与工程”资助

[作者简介] 武良鹏(1991-),江苏南京人,南华大学经济管理学院硕士研究生。

① 南华大学教授、博士生导师。② 南华大学经济管理学院副教授,博士。

知的混合多属性群决策问题。

表 1 多属性自然属性决策矩阵

		指标集			
		c^1	c^2	$\cdots$	c^n
方案集	a^1				
	a^2				
	$\vdots$				
	a^m	$\rightarrow$	$\rightarrow$	m'_{ij}	

(二)效用函数的确立

在进行决策时,并不能通过自然属性值直接进行计算,需要将自然属性通过函数映射成决策偏好值,效用函数是针对每一个属性指标建立的将自然属性值映射到 $[0,1]$ 区间上的函数。效用的概念最初是由 Bernoulli 提出来的,它是决策者在有风险的情况下对价值的衡量。经济学家用效用作为指标,来衡量人们对某些事物的主观意识、态度和倾向等不同的风险偏好和倾向等^[6]。马建等人提出了指数形式的效用函数,形式为 $U(x) = ax^b$ ^[7],指数形式的效用函数能用效用量化决策者对待风险的态度,即将一些难以量化的、有本质差别的因素折合为效用值,根据各方案的综合效用值选择最大效用值方案,同时根据曲线形状可以分辨出不同决策者的风险偏好。但是该形式认为收益为 0 时效用为 0,这与现实不符,有时决策者本身具备心理阈值,在没达到阈值之前的所有效用都为 0,所以本文对文献^[7]提出的效用函数做出改进。

不同的指标性质所建立的效用函数是有差异的,例如:对于效益型指标而言,风险喜好型的效用函数为单调递增的上凸函数,而对于成本型指标而言,风险喜好型的效用函数为单调递减的下凸函数,由此针对不同性质指标建立如下效用函数:

效益型指标: $U(x) = a(x + c)^b$ (1)

成本型指标: $U(x) = 1 - a(x + c)^b$ (2)

其中 a 为尺度参数、 c 为位置参数即决策者可能存在的心理门槛、 b 为形状参数,确定三个参数的值只需联立三个线性无关的方程便可解出。由于效益型指标和成本型指标的效用函数是可以相互转换的,所以两者对参数的解法是相同的,当效益最大时(记为 x^*),效用为 1;当效益最小时(记为 x_*),效用为 0。另一个方程根据 N - M 心理测验法求得,N - M 心理测验法是二战时期提出的基于心理测验的效用理论,通过给出两个可供选择的方案,让受试者回答孰优孰劣,再逐步建立各方案的量化效用值。对机会点(有概率 p 获得收益 x^* ,有概率 $1 - p$ 获得

收益 x_* 的方案)进行 N - M 心理测验得到无差异与机会点的收益值 $\bar{x}$,此时 $U(\bar{x}) = pU(x^*) + (1 - p)U(x_*)$,通常令 p 为 0.5,则概率分布均匀,受试者可感知性和有效性都会更高,由此得到的方程组为:

$$\begin{cases} a(x^* + c)^b = 1 \\ a(x_* + c)^b = 0 \\ a(\bar{x} + c)^b = 0.5 \end{cases}$$

则得出一般解:

$c = -x_*$ (3)

$b = \frac{\ln 2}{\ln(x^* - x_*) - \ln(\bar{x} - x_*)}$ (4)

$a = (x^* - x_*)^{\frac{\ln 2}{\ln(\bar{x} - x_*) - \ln(x^* - x_*)}}$ (5)

显然 $a > 0, b > 0$,公式(1)的一阶导数 $U'(x) = ab(x + c)^{b-1} > 0$,可知函数是单调递增的,而二阶导数为 $U''(x) = (b - 1)ab(x + c)^{b-2}$,当 $b < 1$ 时, $U''(x) < 0$,则函数是上凸函数;当 $b = 1$ 时, $U''(x) = 0$,则函数为直线函数;当 $b > 1$ 时, $U''(x) > 0$,则函数为下凸函数,其函数图像如图 1 所示:

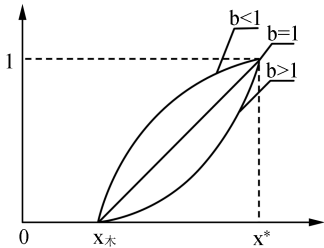


图 1 效益型指标效用函数图

同理可知,对于成本型效用函数的一阶导数为 $U'(x) = -ab(x + c)^{b-1} < 0$,所以函数是单调递减的,二阶导数 $U''(x) = (1 - b)ab(x + c)^{b-2}$,当 $b < 1$ 时, $U''(x) > 0$,则函数为下凸函数;当 $b = 1$ 时, $U''(x) = 0$,则函数为直线函数;当 $b > 1$ 时, $U''(x) < 0$,则函数为上凸函数,其函数图像如图 2 所示:

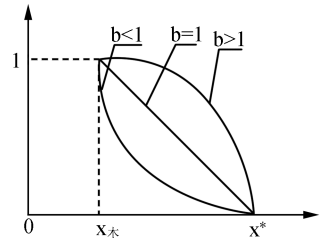


图 2 成本型指标效用函数图

(三)冒险系数与乐观心态系数求解

由于不同决策者对于无差异点的判断的不同,

导致形状参数 b 的不同,所以即使是同一类型的效用函数,其形状也是不同的,而形状的不同显示着决策者对决策问题的冒险的程度^[8],令效益型冒险系数为:

$$\alpha = \frac{0.5(x^* - x_*) - \int_{x_*}^{x^*} a(x+c)^b dx}{0.5(x^* - x_*)} \quad (6)$$

这表示的为曲线对直线的偏离程度,公式(6)

$$\text{中的 } \int_{x_*}^{x^*} a(x+c)^b dx = \frac{a}{b+1} [(x^*+c)^{b+1} - (x_*+c)^{b+1}] , \text{将公式(3)和公式(5)代入可得 } \int_{x_*}^{x^*} a(x+c)^b dx = \frac{x^* - x_*}{b+1}$$

从而

$$\alpha = \frac{0.5(x^* - x_*) - \int_{x_*}^{x^*} a(x+c)^b dx}{0.5(x^* - x_*)} = 1 - \frac{2}{b+1} \quad (7)$$

对于成本型效用函数,令冒险系数:

$$\beta = \frac{\int_{x_*}^{x^*} a(x+c)^b - a(x+c) dx}{\int_{x_*}^{x^*} 1 - a(x+c) dx} \quad (8)$$

将公式(3)和公式(5)代入公式(8)可得

$$\beta = \frac{\int_{x_*}^{x^*} a(x+c)^b - a(x+c) dx}{\int_{x_*}^{x^*} 1 - a(x+c) dx} = \frac{2}{(b+1)} - 1 \quad (9)$$

可以证明

$$\lim_{x \rightarrow x_*} \frac{\ln 2}{\ln(x^* - x_*) - \ln(\bar{x} - x_*)} = 0 ,$$

$$\lim_{x \rightarrow x^*} \frac{\ln 2}{\ln(x^* - x_*) - \ln(\bar{x} - x_*)} = +\infty ,$$

因此 $b \in (0, +\infty)$ 。

对于效益型指标而言:当 $b \rightarrow 0$ 时, $\alpha \rightarrow -1$, 说明此时决策者冒险系数为 -1 , 接近于完全保守;当 $b = 1$ 时, $\alpha = 0$, 说明决策者冒险系数为 0 , 处于完全中立的状态;而当 $b \rightarrow +\infty$ 时, $\alpha \rightarrow 1$, 说明决策者趋于完全冒险型。

对于成本型指标而言:当 $b \rightarrow 0$ 时, $\beta \rightarrow 1$, 说明

决策者趋于完全冒险型;而当 $b = 1$ 时, $\beta = 0$, 说明决策者冒险系数为 0 , 处于完全中立的状态;当 $b \rightarrow +\infty$ 时, $\beta \rightarrow -1$, 说明此时决策者冒险系数为 -1 , 接近于完全保守。

对于决策者而言,越是乐观,则对决策越是冒险,相反越悲观,则越保守。乐观心态系数 λ_i (λ_i 表示第 i 个指标乐观心态系数)是衡量决策者的乐观程度的变量,其取值在 0 到 1 之间,定义如下转化方式:

$$\lambda_i = 0.5(x_i + 1) \quad (10)$$

其中 x_i 表示决策者对第 i 个指标的冒险系数。

二 两阶段偏差最小化个体决策模型建立

(一) 区间数与模糊数的处理

由于不同的决策者可能给出不同的偏好信息,指标的属性值可能包括区间数和模糊语言,计算时将两种类型的数据转化为精确数则能提高直观性,由于模糊语言可以转化为相应的区间数:如梯形模糊数、三角模糊数、区间数,因此以最一般的梯形模糊数作为分析。

定义 2.1:另 $A = (a, b, c, d)$, 其中 $-\infty < a \leq b \leq c \leq d < +\infty$, 则称 A 为梯形模糊数。

当 $b = c$ 时,则梯形模糊数退化成三角模糊数;当 $a = b, c = d$ 时,梯形模糊数退化成区间数,由此三角模糊数和区间数可以视为梯形模糊数的特殊情况。

根据文献[9],可以知道梯形模糊数可以转化为实数,转化形式为:

$$\tilde{A} = \left(\frac{a+b+c+d}{4} \right) + (2\lambda - 1) \left(\frac{c+d-a-b}{4} \right) \quad (11)$$

将 $a = b, c = d$ 代入公式 11,则可将区间数转化为实数:

$$\tilde{A} = a + \lambda(d - a) \quad (12)$$

但是这仅仅是适用于效益型指标,由此还需要定义成本型指标的转化方法。

令

$$\tilde{A} = \left(\frac{a+b+c+d}{4} \right) + (1 - 2\lambda) \left(\frac{c+d-a-b}{4} \right) \quad (13)$$

将 $a = b, c = d$ 代入公式 13,则成本型区间数可转化为实数:

$$\tilde{A} = d - \lambda(d - a) \quad (14)$$

通过公式(11)至(14)将自然属性值转化为实数,再将实数代入公式(1)和(2),则整个决策矩阵

就转化为了人们更为熟悉的效用矩阵, 记为 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

(二) 个体决策模型的确立

由于受限于客观事物的复杂性和人类对事物认知的模糊性, 导致了难以给出明确的属性权重, 由此属性信息是不完全的, 记属性权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \in H$, H 是属性权重信息不完全的数学表达式的集合, 具体见文献[9]。

多属性决策择优问题一般是通过各方案的综合评价值来确定的, 综合评价值越大, 则方案越优, 不妨针对单个方案取最优时, 得到其对应的属性权重, 由此第一阶段建立以下模型:

$$\begin{aligned} (M-1) \quad & \max \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \\ s. t. \quad & w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \in H \\ & \sum_{j=1}^n w_j = 1 \end{aligned}$$

通过解此模型, 得到方案 a^i 的最优属性权重向量 $w^i = (w_1^i, w_2^i, \dots, w_n^i)^T$, 则所有方案的最优属性权重矩阵为:

$$W = \begin{bmatrix} w_1^1 & w_2^1 & \dots & w_n^1 \\ w_1^2 & w_2^2 & \dots & w_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1^m & w_2^m & \dots & w_n^m \end{bmatrix}$$

假设实际最优属性权重为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, 理想情况下实际的最优属性权重能使方案达到最优, 但现实情况下, 实际权重与个体方案得到最优时取得的属性权重有一定的偏差, 令实际权重与个体方案 a^i 得到最优时取得的属性权重的偏差为:

$d_i = [\sum_{j=1}^n (w_j - w_j^i)^2]^{\frac{1}{2}}$, 则第二阶段建立如下模型:

$$\begin{aligned} (M-2) \quad & \min \sum_{i=1}^m d_i \\ s. t. \quad & w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \in H \\ & \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i) w_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i w_i \\ & \sum_{j=1}^n w_j = 1 \end{aligned}$$

模型 2 中目标函数为总偏差最小, 第一个约束条件为属性信息不完全的数学约束, 第二个是乐观心态系数约束, 第三个为属性权重归一化约束。

由模型 2 解出权重之后进行加权运算便可得到个体 d^i 对方案的各方案的综合评价, 记为 $Z^{d_i} = (z_1^{d_i}, z_2^{d_i}, \dots, z_m^{d_i})$ 。

三 群体决策模型的建立

(一) 决策者权重计算

个体进行决策之后, 需要将不同的方案评价集合成一个总的方案评价, 由于决策者的经验、知识、能力和对决策问题的熟悉程度的不同, 导致不同的决策者在决策过程中所体现出的作用和影响也是不同的, 从而需要在完全不知道专家权重如何分配时, 根据客观数据计算出专家权重。

定义 3.1: 令 $disp(w^{d_i}) = - \sum_{j=1}^n w_j^{d_i} \ln w_j^{d_i}$, 则 $disp(w^{d_i})$ 称为决策者 d_i 在决策时每个数据在集结中被利用的程度^[10]。

根据第二节中的模型 2, 可以解除每个决策者不同的属性权重, 并代入 $disp(w^{d_i})$ 算子中, 便可得到不同的决策者在决策时对每个数据的利用程度。我们主观认为数据在集结中被利用的程度越高, 则决策者应该被赋予更高的权重, 将利用程度归一化得到每个决策者被主观认为赋予的权重 $w_s = (w_s^{d_1}, w_s^{d_2}, \dots, w_s^{d_q})^T$ 为:

$$w_s^{d_i} = \frac{disp(w^{d_i})}{\sum_{i=1}^q disp(w^{d_i})} \quad (15)$$

由于决策者的权重和数据在被集结中的利用程度是否呈线性关系还没有得到证明, 所以如果仅根据公式 15 给决策者赋权是不够的, 由此还得根据数据计算出各决策者应该被赋予的客观权重。

将所有的个体对方案的各方案的综合属性组成一个矩阵, 记为:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1^{d_1} & z_1^{d_2} & \dots & z_1^{d_q} \\ z_2^{d_1} & z_2^{d_2} & \dots & z_2^{d_q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_m^{d_1} & z_m^{d_2} & \dots & z_m^{d_q} \end{bmatrix}$$

假设决策者的客观权重为 $w_o = (w_o^{d_1}, w_o^{d_2}, \dots, w_o^{d_q})^T$, 则客观综合属性为所有决策者的综合属性值的加权值, 在确定客观权重时, 应使得所有方案的综合属性值应尽可能的大, 由此建立以下模型:

$$\begin{aligned} (M-3) \quad & \max (Z w_o)^T (Z w_o) \\ s. t. \quad & \frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q (q-i) w_o^{d_i} = \sum_{i=1}^q (\sum_{j=1}^n \lambda_j w_j) w_o^{d_i} \\ & \sum_{i=1}^q w_o^{d_i} = 1 \end{aligned}$$

其中第一个约束条件为群体乐观心态系数约束, 第二个为归一化条件约束。分析模型可知, 模型

3 可能如果权重的不确定信息太大,则可能解出权重为 0 的情况,这显然是不符合实际的,由此通过与客观权重的中和来避免这种情况的发生,这也说明了本文观点的正确性。

在求得了主观权重 $w_s = (w_s^{d_1}, w_s^{d_2}, \dots, w_s^{d_q})^T$ 和客观权重 $w_o = (w_o^{d_1}, w_o^{d_2}, \dots, w_o^{d_q})^T$ 之后需要将客观权重和主观权重集成最终权重 w_f , 且

$$w_f = \alpha w_o + (1 - \alpha) w_s \quad (16)$$

α 为折衷系数。

为了将折衷系数量化,引入相似度的概念,定义 3.2^[11]: 当满足下列条件时:

- (1) 非负性 $0 \leq s(x, y) \leq 1$;
- (2) 对称性 $s(x, y) = s(y, x)$;
- (3) $s(x, x) = 1$ 。

则称 $s(x, y)$ 为 x 与 y 之间的相似度。相似度的函数构造通常有如下几种方式:

$$(1) s(x, y) = \frac{1}{d(x, y) + 1} \quad (17)$$

其中 $d(x, y)$ 为两个向量之间的欧氏距离;

$$(2) s(x, y) = \frac{1 + \text{corr}(x, y)}{2} \quad (18)$$

其中 $\text{corr}(x, y)$ 为两个向量的相关关系。

当两个向量相似度为 1 时, α 取 0.5, 即认为客观权重与主观权重对最终权重的取值影响是一样的; 当相似度为 0 时, α 取 1, 即认为当两者完全不一样时, 最终权重的取值完全服从客观权重的取值, 则通过这两个原则构建折衷系数与相似度的线性转化方式:

$$\alpha = 1 - 0.5s(x, y) \quad (19)$$

将公式 19 代入到公式 16 则最终权重的取值公式为:

$$w_f = w_o - 0.5s(w_o, w_s)(w_o - w_s) \quad (20)$$

最后通过加权计算出每个方案最终的集成评价价值 $\tilde{Z} = (\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_m)$ 。

(二) 决策意见的交互

由于核应急决策的复杂性和不确定性, 这样大型的决策往往需要决策者们不断、反复地对决策信息进行交流, 以修改和校正决策意见。但核事故早期应急需要快速地做出决策, 若每一个环节都做一致性分析的话, 可能会影响决策的实效性, 由此本文提出在决策最后进行一致性分析, 这样既对意见进行了交互, 又大量地节省了时间。

由前所述可知决策者 d^i 对方案的各方案的综合评价价值和每个方案最终的集成评价价值分别记为 $Z^{d_i} = (z_1^{d_i}, z_2^{d_i}, \dots, z_m^{d_i})$ 和 $\tilde{Z} = (\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \dots, \tilde{z}_m)$ 。根据

徐泽水^[12]的定义: 方案的重要性之比等于方案的综合评价价值之比, 由此将方案两两比较构成互反判断矩阵(互反矩阵 C 中 c_{ij} 表示的是方案 a^i 对方案 a^j 的重要程度, 用 1-9 标度给出^[13], 且满足 $c_{ij} > 0$, $c_{ii} = 1$, $c_{ij}c_{ji} = 1$), 但发现实际算出的综合评价价值在 0 到 1 之间, 且综合评价价值之间相差很小, 很难达到三倍或者三倍以上, 构建出的互反矩阵很可能取不到 1-9 标度中 3 以上的值, 由此需要进行转换, 使得 1-9 标度中所有的值尽可能的取到。

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 + \frac{2(z_i - z_j)}{a}, & \text{当 } z_i > z_j \text{ 时} \\ \frac{a}{a - 2(z_i - z_j)}, & \text{当 } z_i < z_j \text{ 时} \end{cases} \quad (21)$$

其中 a 为常数, 表示的是决策者对评价价值的敏感程度, 由于要尽可能取到所有值, 因此令 c_{ij} 为 9, z_i 取集合中的最大值, z_j 取集合中的最小值, 便可确定 a 的值。显然当 $z_i = z_j$ 时, $c_{ij} = 1$; $c_{ij}c_{ji} = [1 + \frac{2(z_i - z_j)}{a}][\frac{a}{a - 2(z_i - z_j)}] = 1$, 满足互反矩阵的性质。

由于在进行交互时, 大部分方法都是建立在互补判断矩阵之上完成的, 因此需要将互反矩阵转化成互补矩阵, 而两者的转换方式为:

$$k_{ij} = 0.5 + \log_{81} a_{ij} \quad (22)$$

通过转化得到 q 个互补决策矩阵 $K^{d_i} = (k_{ij}^{d_i})_{m \times m}$ 和 1 个群体互补决策矩阵 $\widetilde{K}^{d_i} = (\widetilde{k}_{ij}^{d_i})_{m \times m}$ 。并引入单个元素之间的最大偏离值 $\delta^{(d_i)}$ 和整体偏离程度 $\sigma^{(d_i)}$ 这两个检验标准来检验个体与群体的一致性^[14], 其中:

$$\delta^{(d_i)} = \max \{ |k_{ij}^{d_i} - \widetilde{k}_{ij}^{d_i}| \} \quad (23)$$

$$\sigma^{(d_i)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{(k_{ij}^{d_i} - \widetilde{k}_{ij}^{d_i})^2}{n} \quad (24)$$

一般第一个标准阈值取 0.2, 第二个阈值取 0.1 较为合理, 当两个参数都小于或等于阈值时认为个体与群体是一致的, 则不需要修改; 但任何一个参数大于阈值时, 则认为个体与群体不一致, 需要将信息返回修改。考虑到一旦修改自然属性值则可能是属性权重发生改变, 从而后续的计算都需要变动, 因此本文提出, 当与群体决策不一致性的个体数达到一半以上时, 将 $\widetilde{K}^{d_i}$ 和 K^{d_i} 反馈给决策者 d_i 进行修改校正, 否则不需要改变。这样做减少了长时间校正, 同时避免了重大错误的产生。

综上所述, 本文的算法步骤为:

- (1) 决策者给出自己的自然属性判断矩阵;
- (2) 计算出决策者对每一个属性的效用函数;
- (3) 根据效用函数计算出决策者对每一个属性的乐观心态系数;
- (5) 根据乐观心态系数将自然属性中的区间值和模糊值转化为实数;
- (6) 在根据效用函数把步骤(5)中的实数转化为效用值, 形成效用矩阵;
- (7) 由效用矩阵为基础并根据模型 1 和 2 计算出每一个属性权重和决策者的个体评价价值;
- (8) 根据模型 3 及公式(15)和(16)计算出群决策中决策者的权重, 并将个体评价价值按加权方法集成为群体评价价值;
- (9) 进行一致性判断, 若一致性个体数超过决策人数的一半, 则用群体评价价值直接排序择优, 若不是则转步骤(1);
- (10) 结束。

四 算例

由于我国核电安全发展, 并没有发生严重的核事故, 而国外虽然发生过核事故, 但数据却难以获得, 由此本文只能应用文献[15]中的案例作为本文的算例, 已验证本文提出模型的有效性。

假设以大亚湾核电站 PWR5 为事故源项, 在 1.8m/s 东风情况下发生放射性物质泄漏, 通过预计剂量和可避免剂量的计算以及对 40km 内的人口数量统计, 使用核事故后果评价系统(MACCS 1.5 版本)初步形成 5 种应急备选方案:

- (1) 不采取任何措施;
 - (2) 在周围 25km 内实施隐蔽并发放碘片, 服食碘片和隐蔽总人数将达到 11.7 万人;
 - (3) 烟云到来前预防性撤离 11 km 之内的人群, 11 ~ 25km 的就地隐蔽, 并发放碘片。撤离人数为 1 万, 隐蔽、服碘人数达到 1 万;
 - (4) 隐蔽范围如(2), 发放碘片的范围包括所有受影响的地区, 隐蔽人数达到 12 万人, 服碘人数达到 70 万人;
 - (5) 先隐蔽, 在烟羽经过后, 撤离 20km 内的所有人, 在烟羽经过的过程中提供隐蔽和发放碘片, 撤离人数达到 7.4 万人, 影响人数达到 80 万人。
- 有四名决策者需要从这 5 个方案中根据 6 个指标选出最优的方案, 这 6 个指标分别为(1): 可避免个人最大剂量(m/Sv): 为效益型指标, 越大越好, 最小为 0, 2000 以上为理想状况;(2): 可避免集体剂量(10^4 m/Sv): 为效益型指标, 越大越好, 最小为 0, 160 以上为理想状况;(3): 社会心理正面影响: 为效益型指标, 越大越好;(4): 社会心理负面影响: 为成本型指标, 越小越好;(5): 经济代价(10^6 元): 为成本型指标, 越小越好, 最少为 0, 200 以上为最不理想状况;(6): 政治影响: 为成本型指标, 越小越好。

决策者们给出的权重的不完全信息为 $0.15 \leq w_1 \leq 0.2$, $w_2 - w_1 \geq 0.1$, $0.1 \leq w_3 \leq 0.15$, $0.05 \leq w_4 \leq 0.1$, $w_6 \geq 0.25$ 且 w_5 权重最小。由于计算方法一致, 本文以其中一个决策者为例进行计算, 假设这个决策者给出的初始判断矩阵如下:

表 2 决策者一的初始决策信息表

	可避免个人最大剂量 (m/Sv)	可避免集体剂量 (10^4 m/Sv)	社会心理正面影响 (0 - 100)	社会心理负面影响 (0 - 100)	经济代价 (10^6 元)	政治影响 (0 - 100)
方案 1	0	0	0	高	[0.1, 0.2]	高
方案 2	[800, 1000]	[55, 65]	高	很低	[2, 3.5]	一般
方案 3	[800, 1000]	[90, 120]	一般	一般	[30, 40]	很低
方案 4	[800, 1000]	[110, 140]	很低	一般	[3, 4.5]	很低
方案 5	[1000, 1400]	[80, 110]	很低	高	[160, 180]	一般

针对每个属性对决策者做 N - M 心理测验, 可以得到 6 个相对于机会点的无差异点, 假设这 6 个无差异点分别为 1100、100、40、40、100、60(以 1100 为例, 表示决策者认为如果一个方案有 0.5 的机会使可避免个人最大剂量达到最大值 2000, 有 0.5 的机会使可避免个人最大剂量达到最小值 0, 那么决策者认为这个方案无异于一定能使可避免个人最大剂量达到 1100 的一个方案), 则根据公式 3、4、5 计算出每个属性的效用函数。

可避免个人最大剂量效用函数:

- $U(x) = 0.00015 (x)^{1.16}$;
- 可避免集体剂量效用函数:
 $U(x) = 0.00058 (x)^{1.47}$;
- 社会心理正面影响效用函数:
 $U(x) = 0.03 (x)^{0.76}$;
- 社会心理负面影响效用函数: $U(x) = 1 - 0.03 (x)^{0.76}$;
- 经济代价: $U(x) = 1 - 0.005x$;
- 政治影响: $U(x) = 1 - 0.002 (x)^{1.36}$;
- 把效用函数中形状参数 b 的值代入公式(7)、

(9)、(10)可以得知:决策者对第一个属性的冒险系数为 0.0741,呈乐观态度,乐观系数为 0.537;对第二个属性的冒险系数为 0.19,呈乐观态度,乐观系数为 0.60;对第三个属性的冒险系数为 -0.14,呈悲观态度,乐观系数为 0.43;对第四个属性的冒险系数为 0.14 呈乐观态度,乐观系数为 0.57;对第 5 个属性冒险系数为 0,处于中立态度,乐观系数为 0.5;对第 6 个属性的冒险系数为 -0.15,呈悲观态度,乐观系数为 0.42。

将乐观系数代入公式 11 至公式 14,表 1 中的数据便转换为实数,在转换为实数时,须先将模糊语

言转化为相应的模糊数,本文采用梯形模糊数,具体转换方式如表 3:

表 3 模糊语言与梯形模糊数之间的转换关系	
模糊语言	梯形模糊数
很高	(80,90,90,100)
高	(60,70,70,80)
一般	(40,50,50,60)
低	(20,30,30,40)
很低	(0,10,10,20)

由此决策者的初始信息转化为实数表如表 4:

表 4 决策者的信息实数表

	可避免个人最大剂量 (m/Sv)	可避免集体剂量 (10 ⁴ m/Sv)	社会心理正面影响 (0-100)	社会心理负面影响 (0-100)	经济代价 (10 ⁶ 元)	政治影响 (0-100)
方案 1	0	0	0	89.3	0.15	90.8
方案 2	907	61	69.3	9.3	2.75	50.8
方案 3	907	108	49.3	49.3	35	10.8
方案 4	907	128	29.3	49.3	3.75	10.8
方案 5	1215	98	9.3	89.3	170	50.8

将实数代入上述求出的效用函数中得出效用矩阵如表 5:

表 5 决策者的效用信息表

	可避免个人最大剂量 (m/Sv)	可避免集体剂量 (10 ⁴ m/Sv)	社会心理正面影响 (0-100)	社会心理负面影响 (0-100)	经济代价 (10 ⁶ 元)	政治影响 (0-100)
方案 1	0	0	0	0.09	1	0.08
方案 2	0.4	0.24	0.75	0.84	0.99	0.58
方案 3	0.4	0.57	0.58	0.42	0.83	0.95
方案 4	0.4	0.73	0.39	0.42	0.98	0.95
方案 5	0.57	0.49	0.16	0.09	0.15	0.58

根据模型 1 和模型 2 解出决策者一的对属性的赋权为(0.178,0.278,0.123,0.056,0.028,0.337),方案的评价值为(0.06,0.5,0.67,0.69,0.46)并且可计算出决策者一总体乐观系数为 0.4942。同理可以计算出其余决策者对属性的赋权和对方案的评价值,假设:

决策者二对属性的赋权为(0.162,0.27,0.135,0.064,0.048,0.321),方案的评价值为(0.072,0.66,0.632,0.70,0.42),总体乐观系数为 0.5201。

决策者三对属性的赋权为(0.173,0.273,0.132,0.05,0.032,0.34),方案的评价值为(0.044,0.49,0.72,0.67,0.43),总体乐观系数为 0.4766。

决策者四对属性的赋权为(0.15,0.25,0.127,0.077,0.026,0.37),方案的评价值为(0.058,0.53,0.66,0.72,0.49),总体乐观系数为 0.5532。

根据公式 15 计算出决策者的主观权重为(0.247,0.257,0.248,0.247),并根据模型三计算出决策者的客观权重为(0,0.79,0,0.21)。利用公式(17)算出相似度后代入公式(19)则折衷系数为 0.

7,所以最终的决策者权重为(0.0741,0.6301,0.0744,0.2211),决策方案评价值为(0.066,0.61,0.647,0.7012,0.439)。

以决策者一为例,构建决策者自身的互补判断矩阵和群体互补矩阵:

$$K^1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.071 & 0.006 & 0 & 0.089 \\ 0.929 & 0.5 & 0.238 & 0.221 & 0.594 \\ 0.994 & 0.862 & 0.5 & 0.452 & 0.723 \\ 1 & 0.779 & 0.548 & 0.5 & 0.705 \\ 0.911 & 0.406 & 0.277 & 0.295 & 0.5 \end{bmatrix}$$
$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.031 & 0.018 & 0 & 0.105 \\ 0.969 & 0.5 & 0.413 & 0.326 & 0.761 \\ 0.982 & 0.587 & 0.5 & 0.381 & 0.793 \\ 1 & 0.674 & 0.619 & 0.5 & 0.832 \\ 0.895 & 0.239 & 0.207 & 0.168 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据公式(23)和公式(24)计算出单个元素之间的最大偏离值 $\delta^1 = 0.27$,整体偏离程度 $\sigma^1 = 0.047$,同理可以算出 $\delta^2 = 0.157, \sigma^2 = 0.014$; $\delta^3 =$

$0.225, \sigma^3 = 0.051; \delta^4 = 0.128, \sigma^4 = 0.024$ 。分析可知决策者二和决策者四与整体一致性高, 决策者一和决策者三与整体一致性较低, 但决策者一和决策者三的整体偏离度是在阈值之内, 且不一致个数未超过总人数的一半, 由此认为, 个体与群体之间具有一致性, 不需要重新反馈修改, 从而决策方案最终评价值为 $(0.066, 0.61, 0.647, 0.7012, 0.439)$, 因此群体一致认为方案 4 是最理想方案。

五 结论

本文在利用决策者的乐观心态系数, 将区间数和模糊值量化的基础上, 建立两阶段偏差最小化的个体决策模型, 求出了单个决策者属性的赋权和对方案的评价值; 紧接着将最大熵模型和综合属性值最大化模型结合求出决策者的主观权重与客观权重, 然后利用相似关系将两者折衷, 求出专家权重与群体决策评价值; 随之建立个体互补判断矩阵与群体互补判断矩阵, 做一致性检验以进行决策的交互; 最后将模型运用在核事故早期应急决策案例上, 说明了本文提出的模型是可靠、简单、易于上机的。

[参考文献]

[1] 徐志新, 奚树人, 曲静原. 核事故应急决策的多属性效用分析方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008(3): 448-451.
[2] 张锦, 蔡琦, 张帆, 陈玲. 基于贝叶斯风险决策理论的码头核应急决策模型[J]. 辐射防护, 2010(3): 155-159.
[3] 陆能枝, 张永兴, 曹希寿, 陈超峰. 模糊决策理论在核事故应急决策中的应用[J]. 核科学与工程, 2002(2): 152-156.

[4] 孔衍, 陈霖恒, 张锦, 任鑫, 马丽. 三标度 AHP 法在核应急决策中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2013(9): 109-114.
[5] 周书民, 温立, 叶志翔, 徐玮. 基于一种属性约简算法的核事故应急决策模型研究[J]. 辐射防护, 2011(2): 100-104.
[6] Bernoulli D. Exposition of a new theory on the measurement of risk[J]. Econometrica, 1954, 22(1): 22-36.
[7] 马健, 孙秀霞. 基于效用曲线改进的前景理论价值函数[J]. 信息与控制, 2011(4): 501-506.
[8] 安玉英, 李绍文. 效用函数与风险型损益值决策[J]. 统计研究, 1986(4): 69-76.
[9] 高岩, 刘晨琛. 模糊语言下的梯形模糊数心态指标群决策方法[J]. 计算机工程与应用, 2012(26): 206-209.
[10] Yager R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988(18): 183-190.
[11] Y S Son, J Baek. A modified correlation coefficient based similarity measure for clustering time-course gene expression data[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(3): 232-242.
[12] 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, 2004.
[13] Satty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 33-45.
[14] 徐泽水. 基于残缺互补判断矩阵的交互式群决策方法[J]. 控制与决策, 2005(8): 913-916.
[15] 陈迎锋, 王建龙, 林晓玲, 杨永新, 卢新城. 核事故应急决策的个体特征识别评价方法[J]. 原子能科学技术, 2014(2): 325-330.

Research on the Model of Group Decision Making for Nuclear Early Emergency Response

WU Liang-peng, ZOU Shu-liang, LIU Wen-jun
(University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: The rapid and effective early emergency response decision is the last necessary parclose after the nuclear accident, so the rapid and effective decision-making is the most important. Firstly, the utility function is proposed to calculate the optimistic coefficient of decision makers, then, turned the interval number and fuzzy value into real; After it, a decision model of individuals and groups will be established, in order to improve the effectiveness of decision-making; at the same time, according to the results of ranking, a judgment matrix will be employed to check out the consistency between group and individual, thereby the expert internal agreement will be improved; finally, a case is applied to demonstrate its feasibility.

Key words: nuclear accident; early emergency response; utility function; optimistic coefficient; consistency