



文章编号:1001-9081(2017)05-1376-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2017.05.1376

直觉模糊环境下考虑有限理性特征的决策方法

邓达平*, 谢小云, 郭子璇

(江西理工大学 应用科学学院, 江西 赣州 341000)

(*通信作者电子邮箱 dengdp1974@163.com)

摘要:针对决策者具有有限理性的心理特征且属性权重和自然状态发生概率完全未知的直觉模糊多属性决策问题,提出了一种基于前景理论和证据理论的多属性决策方法。首先,利用证据理论得到各自然状态发生的概率,进而确定自然状态的决策权重函数;其次,运用正态分布概率密度函数设计直觉模糊决策参考点,并依据属性值与决策参考点之间的差异计算价值函数矩阵,从而获得前景价值矩阵;以综合前景价值最大化为准则构建最优化模型用以确定属性权重,并依据各方案的综合前景价值进行优劣排序。最后,将所提方法应用于对游戏产品的选择开发实例中。对比实验表明,运用所提方法得到的决策结果合理可靠,且更能体现决策者的原始决策信息。

关键词:直觉模糊集; 前景理论; 证据理论; 多属性决策

中图分类号: TP273.4 文献标志码:A

Decision-making method with bounded rationality under intuitionistic fuzzy information environment

DENG Daping*, XIE Xiaoyun, GUO Zixuan

(College of Applied Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: Considering the intuitionistic fuzzy multi-attribute decision-making problem that the decision makers with bounded rationality psychological characteristics and attribute weights and probability information of situation are completely unknown, a multi-attribute decision-making based on the prospect theory and Dempster-Shafer theory was proposed. Firstly, the probabilities of the states were calculated by Dempster-Shafer theory, and the decision-making weight functions of the states were determined. Then, the normal distribution probability density function was utilized to construct the intuitionistic fuzzy reference point. Based on the difference between the attribute value and the reference point, the value function matrix and the prospect value matrix were obtained. In addition, an optimization model was developed to derive the attribute weights with the principle of maximizing the comprehensive prospect value, and all the alternatives were further ordered. Finally, the proposed approach was applied to a numerical example about the selection of game products. The experimental results show that the decision-making results are reasonable and reliable, and the actual situation can be reflected.

Key words: intuitionistic fuzzy set; prospect theory; Dempster-Shafer theory; multi-attribute decision-making

0 引言

随着大数据、云计算等新信息技术的发展,越来越多的数据信息呈现出一定的复杂性和不确定性。在多属性决策问题中,运用实数来表达属性信息已经越来越不能满足实际决策问题的需要。1965年,Zadeh^[1]首次提出模糊集的概念,其将精确数学理论与应用的研究领域拓展到模糊数学领域。模糊集理论的核心思想是把取值为1和0的特征函数扩展到可在闭区间[0,1]中取任何值的隶属函数。基于模糊集的决策理论与方法已经获得了众多的研究成果,并广泛地应用于各个领域^[2-5]。但是模糊集在描述决策信息时只考虑某一元素相对于某个集合的隶属程度,而没有考虑到该元素相对于这个集合的非隶属程度,从而造成决策信息刻画的不准确。为此,Atanassov提出了模糊集的广义形式,即直觉模糊集^[6],其中的每个元素均由隶属度和非隶属度构成。

多属性决策问题是将有限个备选方案在多个属性下进

行优劣排序,然后决策者依据每个方案的综合属性值选择出最优的方案。针对多属性决策问题,主要有两大类决策分析方法。一类是基于期望效用理论的决策方法,该方法是假设决策者是具有完全理性的心理特征,即决策者对决策问题发生的概率、事件可能产生的状态以及存在哪些决策结果等信息能够完全掌握,且决策者在行为上是追求效用最大化^[7]。目前,关于多属性决策问题的研究成果大多是以这类期望效用理论为基础得到的,这类方法主要包括:信息集成算子、序关系模型以及多时点的动态决策方法等^[8-10]。Xu^[11]在直觉模糊环境下提出了一系列的信息集成算子,并将这些算子应用于多属性群决策问题中,但是在运用这些算子处理决策问题之前需要获取属性权重和自然状态发生概率的相关信息,因此在属性权重信息和状态发生概率未知的情况下,运用文献[12]中的决策方法得到的决策结果不一定合理可靠。

随着行为决策理论的发展,另一类决策方法考虑决策者的心理特征是有限理性的,这类决策过程与实际情况更加符

收稿日期:2016-10-28;修回日期:2016-12-11。 基金项目:江西省教育厅教育改革项目(JXJC-15-36-1)。

作者简介:邓达平(1974—),男,江西抚州人,讲师,硕士,主要研究方向:智能决策、软件工程、信息安全; 谢小云(1978—),男,江西赣州人,讲师,硕士,主要研究方向:嵌入式系统、信息安全; 郭子璇(1996—),女,江西南昌人,主要研究方向:软件工程。



合,从而使得考虑不完全理性行为特征的多属性决策方法逐渐成为研究热点。考虑到决策者在实际决策过程中的有限理性,由 Kahneman 等^[12]于 1979 年首次提出的前景理论认为决策者在决策过程中并非追求效用最大的目标,而是选择综合价值最满意的决策方案。刘云志等^[13]基于前景理论处理具有单一和组合指标期望的多指标决策问题,并将其应用于企业人才招聘过程中,但是该方法将决策者给出的指标期望视为决策参考点,这将使得决策过程受到较多主观因素的影响。针对属性信息为灰数且权重信息不完全确定的多属性决策问题,王坚强等^[14]运用前景理论构建前景价值矩阵,并通过最优化模型确定属性权重,进而得到一组备选方案的优劣排序。Liu 等^[15]针对区间概率条件下且属性信息为不确定语言信息的风险决策问题,基于前景理论提出了一种多属性决策方法。在区间直觉模糊环境下,高建伟等^[16]利用前景理论构建前景决策矩阵,建立以综合前景值最大化为目标函数的最优化模型求解属性权重完全未知和部分已知的多准则决策问题,然而,文献[16]中的决策方法将决策者提供的所有决策矩阵通过得分函数转化为实数矩阵进行决策,这个过程实际上已经导致了一些原始决策信息的丢失,因此得到的决策结果不一定可靠。为了考虑到多阶段决策过程中决策者的风险偏好,文献[17]结合前景理论研究了一种基于动态参考点的多阶段随机多准则决策方法。基于前景理论,闫书丽等^[18]建立了的三参数区间灰数型群体灰靶决策模型。王玮等^[19]针对信息化条件下编队指挥所的作战指挥决策问题,运用前景理论研究了定下作战决心的风险决策问题。王肖霞等^[20]将有限理性的心理特征考虑到尾矿坝风险评估方法中,使得新的评估方法更能体现人们的心理行为。文献[21]在犹豫模糊环境下构建了一种基于前景理论的多属性群决策方法,但是该方法首先将原始的犹豫模糊信息转化为得分函数矩阵,以期望得分函数值为决策参考点,然后计算前景价值综合矩阵,而这个整个决策过程中基本没有直接利用原始决策矩阵进行计算,因此可以视为一个间接的计算过程,且随着矩阵维数的增加,会导致原始决策信息丢失。在实际的决策中,由于客观世界复杂性和决策者自身能力的限制,使得决策者给出的属性信息不仅仅只包括方案在属性下的隶属度,通常还包括方案在属性下的非隶属度。同时考虑到实际决策过程中决策者具有有限理性的心理特征以及各自然状态发生概率的不确定性,设计一种直觉模糊环境下基于前景理论和证据理论^[21]且尽可能直接运用原始决策信息的多属性决策方法具有一定的必要性和研究意义。然而,相关研究未见报道。鉴于此,本文将前景理论和证据理论相结合,提出一种直觉模糊多属性决策方法。该方法运用证据理论计算各个自然状态发生的概率,进而得到状态发生的决策权重函数。同时,依据原始的决策信息设计一种新的直觉模糊决策参考点以构建前景价值矩阵,获得各方案的综合前景价值,并对各方案进行优劣排序。最后通过对比分析实验说明提出的决策方法的有效性。

1 预备知识

本章主要介绍一些基本的概念理论,包括直觉模糊集、前景理论和证据理论等。为方便起见,记 $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $T = \{1, 2, \dots, l\}$ 。

1.1 直觉模糊集

定义 1^[6] 假设 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 为论域, 定义在 X 上的直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Set, IFS)可表示为 $A = \{\langle X_i, u_A(X_i), v_A(X_i) \rangle \mid X_i \in X\}$, 其中 $u_A: X \rightarrow [0, 1]$, $v_A: X \rightarrow [0, 1]$ 分别表示元素 $X_i \in A$ 的隶属度和非隶属度, 且满足对任意的 $X_i \in X$, 有 $u_A(X_i) + v_A(X_i) \leq 1$ 。

为了计算的方便, 称 $\alpha = \langle u, v \rangle$ 为一个直觉模糊数(Intuitionistic Fuzzy Value, IFV)。直觉模糊数 α 的补为 $\alpha^c = \langle v, u \rangle$ 。

定义 2^[11] 设 $\alpha = \langle u, v \rangle$ 为一个 IFV, 则 α 的得分函数定义为 $s(\alpha) = u - v$ 。对于两个 IFV α_1, α_2 , 若 $s(\alpha_1) \geq s(\alpha_2)$, 则有 $\alpha_1 \geq \alpha_2$ 。

1.2 前景理论

现有的决策方法大部分是基于期望效用理论提出的,即假设决策者在决策过程中是完全理性的。然而,由于现实决策的复杂性和人类自身的局限性,导致决策者在决策过程中往往表现出有限理性的行为特征。1979 年,由 Kahneman 等^[12]提出的前景理论考虑了决策者的心理行为特征,其认为决策者在决策过程中并非追求效用最大的目标,而是选择综合价值最满意的决策方案。前景理论中的前景价值函数^[12]为:

$$V = \sum_{i=1}^l \omega(p_i)v(x_i)$$

其中: $\omega(p_i) = \frac{p_i^\xi}{(p_i^\xi + (1-p_i)^\xi)^{1/\xi}}$ 表示决策权重函数;
 $v(x_i) = \begin{cases} x_i^\delta, & x \geq 0 \\ -\lambda(-x_i)^\sigma, & x < 0 \end{cases}$ 为价值函数, 表示备选方案 x_i 相对于决策参考点的收益和损失, 其中 ξ, δ, σ 均为风险态度系数, λ 为损失规避系数。

1.3 证据理论

作为一种不确定性的推理方法, 证据理论能够为处理不确定信息问题提供一种非线性决策信息的融合方法^[22]。假设 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l\}$ 为某一决策问题的所有可能出现的状态, 集合 Θ 的所有子集构成了幂集 2^Θ , 则易知 2^Θ 中共有 2^l 个元素。

定义 3^[22] 令 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l\}$ 为某一决策问题的所有可能出现的状态集合, 若存在映射 $f: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 使得 $f(\varphi) = 0$, $\sum_{A \subseteq \Theta} f(A) = 1$, 则称 f 为定义在集合 Θ 上的基本信度分配函数。

当基本信度分配函数 f 仅仅定义在单点子集上时, 其将转化成概率形式, 即把子集上的基本信度分配函数赋值在单个元素上。现在很多方法将基本信度分配函数转化为概率的方法, 其中文献[23]提出了如下 Pignistic 概率转换方法:

$$p(\theta) = \sum_{\theta \in E} \frac{f(\theta)}{|E|}$$

其中: θ 是集合 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_l\}$ 中的元素, E 是 2^Θ 中包含元素 θ 的子集。

2 设计直觉模糊决策参考点

针对某一多属性决策问题, 本章主要基于决策者给出的直觉模糊决策矩阵 $D = (\alpha_{ij})_{m \times n}$, 利用直觉模糊数和区间模



糊数之间的关系,将直觉模糊决策矩阵转化为区间模糊决策矩阵,然后依据概率中的正态分布概率密度函数求解出直觉模糊数发生的概率,进而构建直觉模糊决策参考点。

因为直觉模糊数 $\alpha_{ij} = \langle u_{ij}, v_{ij} \rangle$ 由隶属度 u_{ij} 和非隶属度 v_{ij} 组成,余下的部分称为犹豫度 $\pi_{ij} = 1 - u_{ij} - v_{ij}$,其可以理解为隶属度不确定的部分,于是直觉模糊数 α_{ij} 可用隶属度的下界和上界进行表示,即 $[u_{ij}, u_{ij} + \pi_{ij}]$ 。而 $u_{ij} + \pi_{ij} = 1 - v_{ij}$,因此,直觉模糊数 $\alpha_{ij} = \langle u_{ij}, v_{ij} \rangle$ 可转化为区间数 $\beta_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}] \triangleq [u_{ij}, 1 - v_{ij}]$,于是直觉模糊决策矩阵 $D = (\alpha_{ij})_{m \times n}$ 可转化为区间模糊决策矩阵 $B = (\beta_{ij})_{m \times n}$ 。

基于得到的区间模糊决策矩阵 $B = (\beta_{ij})_{m \times n}$,同一属性 C_j 下所有方案的区间信息构成一个区间值序列 $\{\beta_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}] \mid i \in M\}$,然后将该区间值序列划分为两个左右端点值序列 $\{a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj}\}$ 和 $\{b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{mj}\}$,于是这两个数值序列的均值和方差分别计算如下:

$$\begin{aligned}\bar{a}_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{ij} \\ c_j^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (a_{ij} - \bar{a}_j)^2 \\ \bar{b}_j &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_{ij} \\ d_j^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (b_{ij} - \bar{b}_j)^2\end{aligned}$$

在实际决策过程中,正态分布是最常见的概率分布之一。因此,当属性 C_j 下的属性信息值 x 服从正态分布时,其概率密度函数可表示为:

$$f_j(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_j} \exp\left(-\frac{(x-\theta_j)^2}{2\zeta_j^2}\right) \quad (1)$$

其中: $\theta_j = (\bar{a}_j + \bar{b}_j)/2$, $\zeta_j = (c_j + d_j)/2$ 。

对于区间模糊决策信息 β_{ij} ,由于区间数来源于随机采样的结果,且由于实际的属性值在区间属性 $[a_{ij}, b_{ij}]$ 上进行随机取值,因此在假定区间属性 $[a_{ij}, b_{ij}]$ 固定时,属性 C_j 下的属性信息分布就服从正态分布,于是采用正态分布对属性 C_j 下区间数 $\beta_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$ 的概率进行分析具有较高的准确率。假设属性 C_j 下属性值 x 的概率密度函数式(1)中的 $f_j(x)$,那么区间属性 $[a_{ij}, b_{ij}]$ 发生的概率可表示为:

$$P_{ij} = \int_{b_{ij}}^{a_{ij}} f_j(x) dx = \int_{v_{ij}}^{1-v_{ij}} f_j(x) dx$$

考虑到随机变量的特征,令

$$\bar{P}_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{i=1}^m P_{ij}}; i \in M, j \in N$$

于是得到属性值 α_{ij} 的标准化概率 \bar{P}_{ij} ,满足 $\sum_{i=1}^m \bar{P}_{ij} = 1$ 且 $\bar{P}_{ij} \geq 0 (i \in M)$,从而得到直觉模糊决策矩阵 $D = (\alpha_{ij})_{m \times n}$ 对应的概率矩阵 $\bar{P} = (\bar{P}_{ij})_{m \times n}$ 。

因此,基于决策者给出的直觉模糊决策矩阵 $D = (\alpha_{ij})_{m \times n}$ 以及得到的概率矩阵 $\bar{P} = (\bar{P}_{ij})_{m \times n}$,可计算出属性 C_j 在各备选方案下的直觉模糊决策参考点 $\alpha_j = \langle U_j, V_j \rangle$,其中

$$U_j = \sum_{i=1}^m \bar{P}_{ij} \cdot u_{ij}; j \in M$$

$$V_j = \sum_{i=1}^m \bar{P}_{ij} \cdot v_{ij}; j \in M$$

3 直觉模糊决策方法

3.1 直觉模糊多属性决策问题描述

考虑属性值为直觉模糊信息的多属性决策问题。假设现有备选方案集 $X = \{X_i \mid i \in M\}$; $C = \{C_j \mid j \in N\}$ 为属性指标集,属性权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^\top$ 的信息完全未知, w_j 为属性指标 C_j 的权重,且满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0 (j \in N)$; 自然状态集为 $\Theta = \{\theta_t \mid t \in T\}$, p_t 为第 t 种自然状态 θ_t 发生的概率,满足 $\sum_{t=1}^l p_t = 1$ 且 $p_t \geq 0 (t \in T)$,在复杂的直觉模糊信息环境下,每种自然状态发生的概率信息完全未知,因此可以运用证据理论中的 Pignistic 概率转换方法计算自然状态发生概率。在决策过程中,决策者需要给出在自然状态 θ_t 下每个方案 X_i 相对于属性 C_j 的偏好信息 $\alpha_{ij}^t = \langle u_{ij}^t, v_{ij}^t \rangle$,其中 u_{ij}^t 和 v_{ij}^t 分别表示自然状态 θ_t 下方案 X_i 关于属性 C_j 的隶属度和非隶属度。于是在自然状态 θ_t 下的方案集 X 关于属性集 C 的属性信息构建的直觉模糊决策矩阵 $D^t = (\alpha_{ij}^t)_{m \times n} (t \in T)$ 。

3.2 直觉模糊多属性决策模型

针对决策信息为直觉模糊数的多属性决策问题,由于客观世界和决策者们自身的主观影响,使得无法事先获得每个自然状态发生的概率和各属性的权重大小,同时考虑到决策者在决策过程中的有限理性特征,本节将首先运用证据理论计算决策问题中各自然状态发生的概率,然后基于前景理论和最优化模型构建直觉模糊多属性决策方法,最后选择综合前景价值最大的备选方案。

基于前景理论和证据理论,构建如下直觉模糊多属性群决策方法,具体计算步骤如下:

步骤1 对各自然状态下的决策矩阵进行标准化,根据属性 C_j 的类型对属性信息 α_{ij}^t 进行如下标准化处理:

$$\tilde{\alpha}_{ij}^t = \begin{cases} \alpha_{ij}^t = \langle u_{ij}^t, v_{ij}^t \rangle, & C_j \text{ 为效益型属性} \\ (\alpha_{ij}^t)^c = \langle v_{ij}^t, u_{ij}^t \rangle, & C_j \text{ 为成本型属性} \end{cases}$$

从而 $\tilde{D}^t = (\tilde{\alpha}_{ij}^t)_{m \times n} (t \in T)$ 为标准化的直觉模糊决策矩阵。

步骤2 计算自然状态 θ_t 发生的概率 p_t 。依据证据理论中的 Pignistic 概率转换方法,计算每个自然状态 θ_t 发生概率 p_t 的计算公式如下:

$$p_t = \sum_{\theta_t \in B} \frac{f(\theta_t)}{|B|}; t \in T \quad (2)$$

其中: θ_t 是集合 $\Theta = \{\theta_t \mid t \in T\}$ 中的元素, B 是幂集 2^Θ 中包含自然状态 θ_t 的子集。

步骤3 前景价值矩阵的构建。

首先,基于上一步中计算得到的状态发生概率 p_t 确定状态 θ_t 下的决策权重函数为:

$$\omega(p_t) = \frac{p_t^\xi}{(p_t^\xi + (1-p_t)^\xi)^{\frac{1}{\xi}}} \quad (3)$$

然后,根据第2章中直觉模糊决策参考点的设计方法,求得在自然状态 θ_t 下属性 C_j 在各备选方案下的直觉模糊决策参考点 $\alpha_j^t = \langle U_j^t, V_j^t \rangle$,其中:

$$U_j^t = \sum_{i=1}^m \tilde{P}_{ij}^t \cdot u_{ij}^t; j \in M, t \in T \quad (4)$$



$$V_j^t = \sum_{i=1}^m P_{ij}^t \cdot v_{ij}^t; j \in M, t \in T \quad (5)$$

所以,在自然状态 θ_t 下,各备选方案针对属性 C_j 相对决策参考点 α_j^t 的价值函数为:

$$v(\alpha_{ij}^t) = \begin{cases} (d(\alpha_{ij}^t, \alpha_j^t))^{\delta}, & s(\alpha_{ij}^t) \geq s(\alpha_j^t) \\ -\lambda(d(\alpha_{ij}^t, \alpha_j^t))^{\sigma}, & s(\alpha_{ij}^t) < s(\alpha_j^t) \end{cases} \quad (6)$$

其中: $d(\alpha_{ij}^t, \alpha_j^t) = (|u_{ij}^t - U_j^t| + |v_{ij}^t - V_j^t|)/2$, 从而得到自然状态 θ_t 下的价值函数矩阵 $V^t = (v(\alpha_{ij}^t))_{m \times n}$ 。

最后,综合自然状态 θ_t 下决策权重函数 $\omega(p_t)$ 和价值函数 $v(\alpha_{ij}^t)$, 构建前景价值矩阵 $V = (V_{ij})_{m \times n}$, 其中:

$$V_{ij} = \sum_{t=1}^l \omega(p_t) v(\alpha_{ij}^t) \quad (7)$$

步骤4 基于最优化模型确定属性权重向量

由前景价值矩阵 $V = (V_{ij})_{m \times n}$ 可知,则备选方案 X_i 的综合前景价值为 $V_i = \sum_{j=1}^n w_j V_{ij}$ 。由决策理论可知,每个备选方案的综合前景价值越大越好,因此,以各方案的综合前景价值最大化作为目标函数,建立如下最优化模型确定属性权重:

$$\max Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_j V_{ij} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^n w_j = 1; w_j \geq 0, j \in N$$

求解模型(8),可以得到属性的权重向量 $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$ 。

步骤5 计算备选方案的综合前景价值。

基于前景价值矩阵 $V = (V_{ij})_{m \times n}$ 和属性权重向量 $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$, 计算每个方案的综合前景价值 $V_i (i \in M)$, 其中:

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j^* V_{ij}, i \in M \quad (9)$$

步骤6 按照综合前景价值的大小对各备选方案进行优劣排序,综合前景价值越大的决策方案越能够使得决策者满意。

4 案例分析

某一网络游戏公司准备将一笔资金用于新游戏的开发,假设现有5种新游戏 $\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$ 可供选择投资开发。为了客观科学的进行决策,该公司邀请相关专家分别在收益率 C_1 、游戏产品开发成功系数 C_2 、投资安全系数 C_3 以及产品替代性 C_4 这4个属性指标下对上述5种游戏产品进行综合评估,并且4种属性 $C_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 的权重向量 $w = (w_1, w_2, w_3, w_4)^T$ 完全未知。在投资开发期间,未来的市场环境存在三种可能的自然状态:好(θ_1)、中(θ_2)、差(θ_3),且这三种自然状态发生的概率分别为 p_1, p_2, p_3 。在复杂的多属性决策环境下,每种自然状态发生的概率未知,但是依据专家们的意见可以得到自然状态集 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$ 的基本信度分配为: $f(B_1) = 0.2, f(B_2) = 0.4, f(B_3) = 0.25, f(B_4) = 0.15$, 其中 $B_1 = \{\theta_1\}, B_2 = \{\theta_1, \theta_2\}, B_3 = \{\theta_2, \theta_3\}, B_4 = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$, 且 2^{θ} 的其他子集的基本信度分配均为0。专家依据自己所掌握的信息,在不同自然状态下以直觉模糊信息的形式给出了每种游戏在属性指标下的评估值,并构建了表

1~3 的直觉模糊决策矩阵 $D^t = (\alpha_{ij}^t)_{5 \times 4} (t = 1, 2, 3)$ 。

表1 市场环境好时的决策矩阵 D^1

Tab. 1 Decision-making matrix D^1 under the better market environment

游戏	C_1	C_2	C_3	C_4
X_1	$\langle 0.5, 0.5 \rangle$	$\langle 0.3, 0.5 \rangle$	$\langle 0.6, 0.2 \rangle$	$\langle 0.5, 0.5 \rangle$
X_2	$\langle 0.3, 0.2 \rangle$	$\langle 0.4, 0.3 \rangle$	$\langle 0.8, 0.2 \rangle$	$\langle 0.4, 0.4 \rangle$
X_3	$\langle 0.4, 0.3 \rangle$	$\langle 0.5, 0.5 \rangle$	$\langle 0.8, 0.1 \rangle$	$\langle 0.7, 0.3 \rangle$
X_4	$\langle 0.4, 0.4 \rangle$	$\langle 0.7, 0.3 \rangle$	$\langle 0.5, 0.2 \rangle$	$\langle 0.9, 0.1 \rangle$
X_5	$\langle 0.6, 0.1 \rangle$	$\langle 0.6, 0.2 \rangle$	$\langle 0.7, 0.1 \rangle$	$\langle 0.8, 0.2 \rangle$

表2 市场环境中时的决策矩阵 D^2

Tab. 2 Decision-making matrix D^2 under the general market environment

游戏	C_1	C_2	C_3	C_4
X_1	$\langle 0.2, 0.6 \rangle$	$\langle 0.3, 0.5 \rangle$	$\langle 0.7, 0.3 \rangle$	$\langle 0.2, 0.5 \rangle$
X_2	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$	$\langle 0.8, 0.2 \rangle$	$\langle 0.3, 0.2 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$
X_3	$\langle 0.7, 0.3 \rangle$	$\langle 0.4, 0.5 \rangle$	$\langle 0.8, 0.1 \rangle$	$\langle 0.7, 0.2 \rangle$
X_4	$\langle 0.4, 0.4 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$	$\langle 0.8, 0.2 \rangle$	$\langle 0.5, 0.1 \rangle$
X_5	$\langle 0.7, 0.2 \rangle$	$\langle 0.5, 0.1 \rangle$	$\langle 0.8, 0.2 \rangle$	$\langle 0.9, 0.0 \rangle$

表3 市场环境差时的决策矩阵 D^3

Tab. 3 Decision-making matrix D^3 under the bad market environment

游戏	C_1	C_2	C_3	C_4
X_1	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$	$\langle 0.2, 0.8 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$	$\langle 0.1, 0.7 \rangle$
X_2	$\langle 0.2, 0.4 \rangle$	$\langle 0.5, 0.4 \rangle$	$\langle 0.4, 0.4 \rangle$	$\langle 0.7, 0.1 \rangle$
X_3	$\langle 0.1, 0.7 \rangle$	$\langle 0.2, 0.5 \rangle$	$\langle 0.9, 0.0 \rangle$	$\langle 0.6, 0.4 \rangle$
X_4	$\langle 0.4, 0.6 \rangle$	$\langle 0.5, 0.3 \rangle$	$\langle 0.6, 0.2 \rangle$	$\langle 0.3, 0.1 \rangle$
X_5	$\langle 0.6, 0.0 \rangle$	$\langle 0.7, 0.3 \rangle$	$\langle 0.8, 0.0 \rangle$	$\langle 0.8, 0.1 \rangle$

接下来,运用本文构建的直觉模糊多属性决策模型遴选出最适合投资开发的游戏产品。

步骤1 因为4种属性 $C_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 均为效益型属性,因此不需要对决策矩阵进行标准化处理。

步骤2 运用式(2)得到三种自然状态发生的概率分别为 $p_1 = 0.450, p_2 = 0.375, p_3 = 0.175$ 。

步骤3 依据文献[18]中的参数取值,令 $\delta = 0.89, \sigma = 0.92, \lambda = 2.25, \xi = 0.74$, 那么运用式(3)可得三种自然状态的决策权重函数分别为: $\omega(p_1) = 0.4347, \omega(p_2) = 0.4377, \omega(p_3) = 0.2299$ 。

然后根据直觉模糊决策参考点的设计方法以及式(4)~(6),得到三种自然状态下的价值函数矩阵分别为:

$$\mathbf{V}^1 = \begin{pmatrix} -0.2391 & -0.3072 & 0.2231 & -0.2063 \\ 0.0011 & -0.1007 & 0.3707 & -0.0950 \\ 0.0254 & 0.0708 & 0.4861 & 0.1088 \\ -0.3184 & 0.3315 & 0.0455 & 0.4117 \\ 0.2106 & 0.2477 & 0.3997 & 0.2918 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V}^2 = \begin{pmatrix} -0.3005 & -0.2484 & 0.2354 & -0.1994 \\ -0.0249 & -0.0645 & 0.3449 & -0.0467 \\ 0.0124 & 0.1225 & 0.4200 & 0.2154 \\ -0.3966 & 0.4002 & 0.1321 & 0.3226 \\ 0.1994 & 0.2978 & 0.3457 & 0.3008 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V}^3 = \begin{pmatrix} -0.2061 & -0.2858 & 0.1849 & -0.1949 \\ 0.0509 & 0.0445 & 0.3228 & -0.1005 \\ 0.1032 & -0.0112 & 0.4678 & 0.1254 \\ -0.3311 & 0.2241 & -0.0221 & 0.4066 \\ 0.1666 & 0.3050 & 0.3799 & 0.2888 \end{pmatrix}$$



于是,依据式(7)可以构建出前景价值矩阵为:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} -0.2829 & -0.0905 & 0.2425 & -0.2218 \\ 0.0013 & -0.0618 & 0.3863 & -0.0848 \\ 0.0402 & 0.0818 & 0.5027 & 0.1704 \\ -0.3881 & 0.3708 & 0.0725 & 0.4137 \\ 0.2171 & 0.3082 & 0.4124 & 0.3249 \end{pmatrix}$$

步骤4 在上述获得前景价值矩阵的基础上,以综合前景价值最大化为目标函数构建最优化模型(8),运用 Matlab 或 LINGO 软件进行求解,得到属性权重分别为: $w_1^* = 0.1011, w_2^* = 0.3039, w_3^* = 0.4137, w_4^* = 0.1813$ 。

步骤5 基于上述得到的前景价值矩阵和属性权重,根据式(9)计算出五种游戏产品的综合前景价值分别为: $V_1 = 0.0043, V_2 = 0.1258, V_3 = 0.2678, V_4 = 0.1788, V_5 = 0.3449$ 。

步骤6 由于 $V_5 > V_3 > V_4 > V_2 > V_1$,那么这五种游戏产品的满意度排序为: $X_5 > X_3 > X_4 > X_2 > X_1$,因此最适合该网络游戏公司进行投资开发的游戏产品为 X_5 。

对于上述选择最合适的游戏产品进行投资开发的直觉模糊多属性决策问题,为了说明本文方法的优良性能,接下来将运用文献[11]和[21]中算法处理上述决策问题,确定最合适的游戏产品,并与本文方法进行对比分析。

Xu 在文献[11]中首先运用直觉模糊信息集成算子将不同自然状态下的决策矩阵进行集结,融合成一个综合的直觉模糊决策矩阵,然后再次运用信息集成算子将每种游戏产品在不同属性下偏好信息进行集成,进而通过得到的综合偏好信息对游戏产品进行优劣排序。具体步骤如下:

步骤1~2 由于各自然状态发生概率未知,因此求解方法同上述步骤1~2,得到概率 $p_1 = 0.450, p_2 = 0.375, p_3 = 0.175$ 。

步骤3 运用文献[11]中的式(12):

$$\alpha_{ij} = IFWA(\alpha_{ij}^1, \alpha_{ij}^2, \alpha_{ij}^3) = \left\langle 1 - \prod_{t=1}^3 (1 - u_{ij}^t)^{p_t}, \prod_{t=1}^3 (v_{ij}^t)^{p_t} \right\rangle \quad (10)$$

将直觉模糊决策矩阵 $\mathbf{D}^1, \mathbf{D}^2$ 和 \mathbf{D}^3 集结成为一个综合直觉模糊决策矩阵 $\mathbf{D} = (\alpha_{ij})_{5 \times 4}$:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \langle 0.40, 0.51 \rangle & \langle 0.28, 0.57 \rangle & \langle 0.63, 0.26 \rangle & \langle 0.34, 0.54 \rangle \\ \langle 0.37, 0.28 \rangle & \langle 0.62, 0.28 \rangle & \langle 0.61, 0.24 \rangle & \langle 0.50, 0.32 \rangle \\ \langle 0.46, 0.19 \rangle & \langle 0.61, 0.15 \rangle & \langle 0.72, 0.20 \rangle & \langle 0.49, 0.21 \rangle \\ \langle 0.38, 0.11 \rangle & \langle 0.59, 0.17 \rangle & \langle 0.66, 0.25 \rangle & \langle 0.53, 0.46 \rangle \\ \langle 0.63, 0.17 \rangle & \langle 0.62, 0.21 \rangle & \langle 0.78, 0.14 \rangle & \langle 0.87, 0.08 \rangle \end{pmatrix}$$

步骤4 由于决策问题中的属性权重未知,因此依据文献[11]中的直觉模糊平均算子对矩阵 \mathbf{D} 中的每一行进行集成,得到五种游戏产品对应的综合信息值分别为: $\alpha_1 = \langle 0.4301, 0.4495 \rangle, \alpha_2 = \langle 0.5836, 0.1860 \rangle, \alpha_3 = \langle 0.5352, 0.2786 \rangle, \alpha_4 = \langle 0.5511, 0.2153 \rangle, \alpha_5 = \langle 0.7482, 0.1414 \rangle$ 。

步骤5 因为 $s(\alpha_5) > s(\alpha_2) > s(\alpha_4) > s(\alpha_3) > s(\alpha_1)$,所以这五种游戏产品的优劣排序为 $X_5 > X_2 > X_4 > X_3 > X_1$,即最适合该网络游戏公司进行投资开发的游戏产品为 X_5 。

运用文献[21]的算法时,首先计算每种自然状态下的得分函数矩阵,然后依据期望得分函数值构造方法计算各种自然状态下的价值函数矩阵,从而得到前景价值综合矩阵,并依

据价值偏差确定属性权重,最终获得每种游戏产品的综合前景价值,并进行优劣排序。运用文献[21]的算法处理上述游戏产品选择问题,具体步骤如下:

步骤1' 计算得分函数矩阵 $s(\mathbf{D}^t)$ ($t = 1, 2, 3$) 如下:

$$s(\mathbf{D}^1) = \begin{pmatrix} 0 & -0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.6 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.7 & 0.4 \\ 0 & 0.4 & 0.3 & 0.8 \\ 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.6 \end{pmatrix}$$

$$s(\mathbf{D}^2) = \begin{pmatrix} -0.4 & -0.2 & 0.4 & -0.3 \\ 0.2 & 0.6 & 0.1 & 0.2 \\ 0.4 & -0.1 & 0.7 & 0.5 \\ 0 & 0.2 & 0.6 & 0.4 \\ 0.5 & 0.4 & 0.6 & 0.9 \end{pmatrix}$$

$$s(\mathbf{D}^3) = \begin{pmatrix} 0.2 & -0.6 & 0.2 & -0.6 \\ -0.2 & 0.1 & 0 & 0.6 \\ -0.6 & -0.3 & 0.9 & 0.2 \\ -0.2 & 0.2 & 0.4 & 0.2 \\ 0.6 & 0.4 & 0.8 & 0.7 \end{pmatrix}$$

步骤2' 依据文献[21]中的期望得分函数值构造方法以及式(7)和(8),取 $\delta = 0.89, \sigma = 0.92, \lambda = 2.25, \xi = 0.74$,得到三种可能市场环境下的价值函数矩阵如下:

$$\mathbf{V}'^1 = \begin{pmatrix} -0.2017 & -0.2998 & 0.2174 & -0.3346 \\ 0.0907 & -0.1702 & -0.0318 & -0.1004 \\ 0.0419 & -0.2066 & 0.5300 & 0.1032 \\ -0.0864 & 0.3115 & 0.1895 & 0.4516 \\ 0.3415 & 0.2518 & 0.4441 & 0.1916 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V}'^2 = \begin{pmatrix} -0.2202 & -0.3014 & -0.1992 & 0.2879 \\ 0.0013 & -0.1364 & -0.1110 & -0.0708 \\ 0.1121 & -0.0956 & 0.4152 & 0.2121 \\ -0.0964 & 0.3800 & 0.1801 & 0.3998 \\ 0.4312 & 0.2111 & 0.3749 & 0.2100 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{V}'^3 = \begin{pmatrix} -0.1885 & -0.3007 & 0.2216 & -0.2413 \\ 0.1107 & 0.0648 & -0.1778 & -0.0964 \\ 0.1238 & -0.0816 & 0.3984 & 0.1241 \\ -0.0699 & 0.2365 & 0.2143 & 0.4420 \\ 0.1788 & 0.3102 & 0.3005 & 0.3118 \end{pmatrix}$$

步骤3' 方法同步骤2~3,计算得到3种自然状态的决策权重函数分别为: $\omega(p_1) = 0.4347, \omega(p_2) = 0.4377, \omega(p_3) = 0.2299$ 。

步骤4' 利用文献[21]中的式(10),得到前景价值综合矩阵 $\mathbf{V}' = (v'_{ij})_{5 \times 4}$ 为:

$$\mathbf{V}' = \begin{pmatrix} -0.2274 & -0.3314 & 0.0583 & -0.0749 \\ 0.0654 & -0.1188 & -0.1033 & -0.0968 \\ 0.0957 & -0.1504 & 0.5037 & 0.1662 \\ -0.0958 & 0.3561 & 0.2105 & 0.4729 \\ 0.3783 & 0.2732 & 0.4262 & 0.2469 \end{pmatrix}$$

步骤5' 依据文献[21]中的式(11)和(12)求得属性权重分别为 $w_1 = 0.1338, w_2 = 0.3015, w_3 = 0.2779, w_4 = 0.2868$ 。

步骤6' 计算5种游戏产品的综合前景价值分别为 $V'_1 = -0.1356, V'_2 = -0.0835, V'_3 = 0.1551, V'_4 =$



$0.2887, V'_5 = 0.3222$ 。由于 $V'_5 > V'_4 > V'_3 > V'_2 > V'_1$, 于是这五种游戏产品的优劣排序为: $X_5 > X_4 > X_3 > X_2 > X_1$, 因此最适合该网络游戏公司进行投资开发的游戏产品为 X_5 。

运用上述3种决策方法得到的决策结果见表4。

表4 不同决策方法得到的决策结果

Tab. 4 Decision-making results with different methods

决策方法	游戏产品优劣排序	最优的游戏产品
本文方法	$X_5 > X_3 > X_4 > X_2 > X_1$	X_5
文献[11]方法	$X_5 > X_2 > X_4 > X_3 > X_1$	X_5
文献[21]方法	$X_5 > X_4 > X_3 > X_2 > X_1$	X_5

分析表4可知,虽然运用本文方法得到的游戏产品排序结果与利用文献[11]和[21]中的决策方法得到的游戏产品排序结果稍有不同,但是最适合进行投资开发的游戏产品均为 X_5 , 这说明了本文提出的决策方法是可行的。同时,本文方法相对于文献[11]和[21]中的决策方法存在以下优点:

1) 运用文献[11]中的方法时,需要预先知道各种自然状态发生的概率以及属性权重的大小,这在决策环境和过程日益复杂的背景下很难实现;而本文方法可以通过证据理论和最优化模型确定自然状态发生概率以及属性权重,计算过程中是基于原始数据信息,因此本文方法更为有效。

2) 运用文献[21]的决策方法时,首先需要设计期望得分函数值确定决策参考点,然后利用直觉模糊数的得分函数计算价值函数矩阵和前景价值综合矩阵,所以决策过程没有直接利用直觉模糊决策矩阵进行计算,因此可以视为一个间接的计算过程,并且随着矩阵维数的增加,会导致更多的原始决策信息丢失。本文提出的决策方法中决策参考点是依据直觉模糊数和区间模糊数之间的包络关系以及正态分布密度函数得到属性值发生的概率,从而求得直觉模糊决策参考点,因此本文的计算方法更加合理可靠。

3) 本文的决策方法运用证据理论处理自然状态发生的概率未知的不确定状况,使得决策结果更能反映实际情况。

4) 在决策计算过程中,以综合前景价值最大化为目标函数构建最优化模型求得的属性权重具有一定的理论基础,这符合人们在决策过程中存在有限理性的心理行为特征。

5) 分析原始的直觉模糊决策矩阵 D^1, D^2 和 D^3 中的信息可知,游戏产品 X_3 在所有属性下的偏好信息大体上高于游戏产品 X_4 的偏好信息,游戏产品 X_4 在所有属性下的偏好信息大体上高于游戏产品 X_2 的偏好信息。因此,由原始决策信息可以得到 $X_3 > X_4 > X_2$, 这与运用本文方法得到的排序结果一致。

5 结语

由于前景理论和证据理论能够有效处理不确定信息且考虑决策者有限理性的心理特征,使得它们在模糊决策领域得到迅速的发展和应用。本文首先基于证据理论计算不同自然状态发生的概率,从而得到状态发生的决策权重函数;然后依据正态分布概率密度函数构建直觉模糊决策参考点,并计算各自然状态下的价值函数矩阵,进而确定前景价值矩阵;紧接着,以综合前景价值最大化为目标函数构建最优化模型求解

属性权重,得到各备选方案的综合前景价值,并对方案进行优劣排序,遴选出最满意的决策方案。通过选择最适合的游戏产品进行投资开发的实例表明提出的决策方法的可行性和有效性。在今后研究中,将对决策信息为直觉模糊语言变量的决策问题进行研究,同时将对前景价值理论中风险态度系数和损失规避系数的选择方法和灵敏度分析进行深入研究。

参考文献 (References)

- [1] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965, 8(3): 338 – 356.
- [2] KACPRZYK J, ORLOVSKI S A. Optimization models using fuzzy sets and possibility theory[M]// Theory and Decision Library. Berlin: Springer, 2013: 33 – 35.
- [3] 汪峰,毛军军,黄超.基于熵和协相关度的直觉模糊多属性决策方法[J].计算机应用,2015,35(12):3456 – 3460. (WANG F, MAO J J, HUANG C. Multi-attribute decision-making method of intuitionistic fuzziness based on entropy and co-correlation degree[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35(12): 3456 – 3460.)
- [4] DUBOIS D J, PRADE H, YAGER R R. Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems[M]. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2014: 101 – 105.
- [5] 金飞飞,倪志伟.基于犹豫模糊偏好关系的雾霾影响因素评价[J].模式识别与人工智能,2015,28(9):839 – 847. (JIN F F, NI Z W. Factors evaluation of fog-haze weather based on hesitant fuzzy preference relations [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2015, 28(9): 839 – 847.)
- [6] ATANASSOV K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87 – 96.
- [7] MARIA A G. A note on the connection between fuzzy numbers and random intervals [J]. Statistics & Probability Letters, 1992, 13(2): 311 – 319.
- [8] 梁燕华,郭鹏,朱煜明,等.基于区间数的多时点多属性灰靶决策模型[J].控制与决策,2012,27(10):1527 – 1536. (LIANG Y H, GUO P, ZHU Y M, et al. Multi-period and multi-criteria decision-making model of grey target based on interval number[J]. Control and Decision, 2012, 27(10): 1527 – 1536.)
- [9] LIU P D. A weighted aggregation operators multi-attribute group decision-making method based on interval-valued trapezoidal fuzzy numbers [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1): 1053 – 1060.
- [10] KUO M S, LIANG G S. A soft computing method of performance evaluation with MCDM based on interval-valued fuzzy numbers [J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(1): 476 – 485.
- [11] XU Z S. Intuitionistic fuzzy aggregation operators [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2007, 15(6): 1179 – 1187.
- [12] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk [J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263 – 292.
- [13] 刘云志,樊治平.基于前景理论的具有指标期望的多指标决策方法[J].控制与决策,2015,30(1):91 – 97. (LIU Y Z, FAN Z P. Multiple attribute decision-making considering attribute aspirations: a method based on prospect theory[J]. Control and Decision, 2015, 30(1): 91 – 97.)
- [14] 王坚强,周玲.基于前景理论的灰色随机多准则决策方法[J].系统工程理论与实践,2010,30(9):1658 – 1664. (WANG J Q, ZHOU L. Grey-stochastic multi-criteria decision making approach based on prospect theory[J]. Systems Engineering – Theory and Practice, 2010, 30(9): 1658 – 1664.)

(下转第 1401 页)



- mation Processing Systems. New York: Curran Associate Inc, 2008: 1257 – 1264.
- [5] ZHANG Y, KOREN J. Efficient Bayesian hierarchical user modeling for recommendation system[C]// Proceedings of the 30th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York: ACM, 2007: 47 – 54.
- [6] PHAM T A N, LI X, CONG G, et al. A general graph-based model for recommendation in event-based social networks[C]// Proceedings of the 2015 IEEE 31st International Conference on Data Engineering. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 567 – 578.
- [7] BOKDE D, GIRASE S, MUKHOPADHYAY D. Matrix factorization model in collaborative filtering algorithms: a survey [J]. Procedia Computer Science, 2015, 49(1): 136 – 146.
- [8] YUAN T, CHENG J, ZHANG X, et al. Recommendation by mining multiple user behaviors with group sparsity[EB/OL]. [2016-10-11]. <http://www.aaai.org/ocs/index.php/AAAI/AAAI14/paper/download/8267/8424>.
- [9] HUANG J, ZHANG T. The benefit of group sparsity[J]. The Annals of Statistics, 2010, 38(4): 1978 – 2004.
- [10] 郑秋中,徐军.一种基于群稀疏特征选择的图像检索方法[J].计算机应用研究,2014,31(9):2867 – 2872. (ZHENG Q Z, XU J. Group sparse based feature selection for image retrieval [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(9): 2867 – 2872.)
- [11] 陈蕾,杨庚,陈正宇,等.基于结构化噪声矩阵补全的Web服务QoS预测[J].通信学报,2015,36(6):49 – 59. (CHEN L, YANG G, CHEN Z Y, et al. Web services QoS prediction via ma-
- trix completion with structural noise [J]. Journal on Communications, 2015, 36(6): 49 – 59.)
- [12] FREY B J, DUECK D. Clustering by passing messages between data points[J]. Science, 2007, 315(5814): 972 – 976.
- [13] BREESE J S, HECKERMAN D, KADIE C. Empirical analysis of predictive algorithms for collaborative filtering[C]// Proceedings of the 14th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1998: 43 – 52.
- [14] LIN Z, CHEN M, MA Y. The augmented lagrange multiplier method for exact recovery of corrupted low-rank matrices[EB/OL]. [2016-10-11]. <https://arxiv.org/pdf/1009.5055v3.pdf>.

This work is partially supported by the Scientific Research Foundation of Education Department of Yunnan Province (2014Y145), the Philosophical and Social Science Program of Yunnan Province (QN2015067), the Doctoral Research Starting Foundation of Yunnan Normal University (01000205020503064).

SHENG Wei, born in 1988, M. S. candidate. His research interests include recommender system.

WANG Baoyun, born in 1977, Ph. D., lecturer. His research interests include machine learning.

HE Miao, born in 1990, M. S. candidate. Her research interests include machine learning.

YU Ying, born in 1965, M. S., associate professor. Her research interests include network communication.

(上接第1381页)

- [15] LIU P D, JIN F, ZHANG X, et al. Research on the multi-attribute decision-making under risk with interval probability based on prospect theory and the uncertain linguistic variables [J]. Knowledge-Based Systems, 2011, 24(4): 554 – 561.
- [16] 高建伟,刘慧晖,谷云东.基于前景理论的区间直觉模糊多准则决策方法[J].系统工程理论与实践,2014,34(12): 3175 – 3181. (GAO J W, LIU H H, CU Y D. Interval-valued intuitionistic fuzzy multi-criteria decision-making method based on prospect theory [J]. Systems Engineering – Theory & Practice, 2014, 34(12): 3175 – 3181.)
- [17] 郝晶晶,朱建军,刘思峰.基于前景理论的多阶段随机多准则决策方法[J].中国管理科学,2015,23(1): 73 – 81. (HAO J J, ZHU J J, LIU S F. A method for multi-stage stochastic multi-criteria decision making concerning prospect theory [J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(1): 73 – 81.)
- [18] 吴利丰,刘思峰,吴利丰.一种基于前景理论的三参数区间灰数型群体灰靶决策方法[J].控制与决策,2015,30(1): 105 – 109. (YAN S L, LIU S F, WU L F. A group grey target decision making method with three parameter interval grey number based on prospect theory [J]. Control and Decision, 2015, 30 (1): 105 – 109.)
- [19] 王玮,叶强,谢春思,等.基于前景理论的编队作战决心方案优选研究[J].系统工程与电子技术,2015,37(2): 331 – 335. (WANG W, YE Q, XIE C S, et al. Research on method of operational plan optimization for the warship formation based on prospect theory [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(2): 331 – 335.)
- [20] 王肖霞,杨风暴,史冬梅.基于前景理论的尾矿坝风险评估[J].安全与环境工程,2015,22(3): 122 – 125. (WANG X X, YANG F B, SHI D M. Research on the model of tailing dam risk evaluation based on the prospect theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(3): 122 – 125.)
- [21] 马庆功.基于前景理论的犹豫模糊多属性群决策方法[J].计算机工程与应用,2015,51(24):249 – 253. (MA Q G. Hesitant fuzzy multi-attribute group decision-making method based on prospect theory [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(24): 249 – 253.)
- [22] ZADHE L A. A simple view of the Dempster-Shafer theory of evidence and its implication for the rule of combination [J]. AI Magazine, 1986, 7(2):85 – 90.)
- [23] SMETS P, KENNES R. The transferable belief model [J]. Artificial Intelligence, 1994, 66(2): 191 – 234.

This work is partially supported by the Education Reform Project of Jiangxi Province Education Department (JXJG-15-36-1).

DENG Daping, born in 1974, M. S., lecturer. His research interests include intelligent decision making, software engineering, information security.

XIE Xiaoyun, born in 1978, M. S., lecturer. His research interests include embedded system, information security.

GUO Zixuan, born in 1996. His research interests include software engineering.