

一种考虑等级语义关联的证据推理决策方法

张美璟^{1,2} 王应明¹

(福州大学决策科学研究所 福州 350106)¹ (福建警察学院计算机与信息安全管理系 福州 350108)²

摘要 现有证据推理方法以证据理论为信息融合规则,并未考虑评估等级在语义上的关联关系,导致以正交求和方式进行信息融合时出现信息流失现象。从评估等级的语义和级别出发,提出一种基于等级语义关联的证据分类融合方法。基于新的证据融合模型,构建一个基于改进证据推理方法的多属性决策框架,并给出决策模型和决策流程。最后,通过一个案例演示了新方法的决策过程,并通过比较新旧方法在案例上的应用分析了新方法的特点。

关键词 证据推理,等级语义关联,多属性决策,信息融合

中图分类号 C934 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.12.026

Decision Making Approach Based on Evidential Reasoning Considering Semantic Relationship among Assessment Grades

ZHANG Mei-jing^{1,2} WANG Ying-ming¹

(Decision Sciences Institute, Fuzhou University, Fuzhou 350106, China)¹

(Department of Computer and Information Security Management, Fujian Police College, Fuzhou 350108, China)²

Abstract In the framework of evidential reasoning, assessment information is aggregated by Dempster-Shafer Theory, which will bring the disadvantage of information leak in the process of aggregation using orthogonal summation mode without considering the semantic relationship among assessment grades. From the viewpoint of semantics and degree of assessment grades, a new algorithm for separately aggregating information was proposed based on the relationship among assessment grades. An improved framework for evidential reasoning was established based on the new fusion algorithm, and relevant decision-making model and decision-making process were provided. At last, a complete numerical example was utilized to demonstrate the application of this approach. Compared with the application of new and old methods in the example, the feature of the new method was investigated.

Keywords Evidential reasoning, Semantic relationship among assessment grades, Multi-attribute decision making, Information fusion

1 引言

多属性决策分析(Multi-attribute Decision Analysis)是一种综合多项给定指标的评估信息以寻找最优方案的决策方法。一方面,为达到全面评估决策对象的目的,决策者通常需要从主观和客观两个角度对决策对象进行综合评价。另一方面,考虑到指标自身的特征,可能以定性或定量的方式评价评估信息。同时,受限于现实决策问题的复杂性和决策者主观认知的局限性,决策参数通常难以完整、准确地给出,可能含有不完全、含糊不清乃至完全未知的信息。因此,一种完善的多属性决策方法必须能够处理决策问题中的主观评价和客观评价、定性信息和定量信息兼有、确定信息和不确定信息混合及完全信息和不完全信息并存等问题。

目前,理想点法(Technique for Order Preference by Simi-

larity to an Ideal Solution, TOPSIS)^[1]、前景理论(Prospect Theory)^[2]、选择法(Elimination et Choice Translating Reality, ELECTRE)^[3]和层次分析法(Aalytic Hierarchy Process, AHP)^[4]等是多属性决策领域较为常用的方法,但是在处理含有定性信息、不确定信息和不完全信息的决策问题时仍存在局限性。1994年, Yang等提出了基于证据推理(Evidential Reasoning, ER)^[5]的多属性决策方法,较好地解决了上述问题。在满足相互独立且完全穷尽的评估框架上, ER方法采用分布式评估信度函数对决策对象按指标进行评估,将 Dempster-Shafer Theory(DST)作为评估信度的集结方法,通过引入等级效用函数反映了决策者的风险偏好,是一种优秀的多属性决策方法^[6]。

证据推理的核心环节主要包括决策信息融合和效用计算两个方面。其中,分布式等级评估信度的融合以 DST 为集结

到稿日期:2017-11-06 返修日期:2017-12-10 本文受国家自然科学基金项目(71371053),教育部人文社科青年项目(17YJC630213),福建省自然科学基金项目(2017J01514),福建省教育厅中青年骨干教师教育科研项目(JAT160548)资助。

张美璟(1981-),男,博士,讲师,CCF会员,主要研究方向为信息融合与决策分析,E-mail:zmjm2@163.com(通信作者);王应明(1964-),男,博士后,教授,博士生导师,主要研究方向为决策理论与方法、数据包络分析、规则库推理,E-mail:ywang@fzu.edu.cn。

规则,并扩展出多种改进的融合方法。Wang 等提出了证据推理方法的解析融合方法,提高了该方法的计算便捷性和易用性^[7]。陈圣群等提出了证据分组合成法,旨在提高证据融合的精确度并降低融合的运算量^[8]。傅仰耿等针对多层结构的属性合成问题提出了一种非递归方式的合成方法^[9]。Xu 等将区间等级概念引入证据推理方法,用于表示评估信息的不确定性,并基于 DST 提出了一对非线性规划模型对决策信息进行融合,奠定了区间型证据推理决策方法的基础^[10]。Wang 等基于 DST 提出了另一种非线性规划模型,有效解决了指标的评估信息中含有区间数的不确定信息融合问题^[11]。在此基础上,Zhang 等提出了区间型不确定条件下证据推理的解析集结公式,进一步扩展了证据推理方法在区间不确定决策领域的应用^[6]。柯小路等讨论了权重归一化对组合结果的影响,分析了证据推理规则在证据的重要性与可靠性表示上的不足,提出了一种改进的 ER 融合方法^[12]。Du 等从权重的角度提出了一种改进的折扣证据组合规则,提高了证据融合的合理性和有效性^[13]。Chen 等针对离散型分布式信度融合问题提出了一种改进的证据推理方法,扩展了证据推理方法的适用范围^[14]。

然而,在评估决策领域,基于 DST 的评估框架及其融合方法并未考虑评估等级在程度上的相互关联,致使信息在融合过程中出现流失现象,从而获得错误的方案排序并导致决策结果不合理。

通过分析评价等级在语义及程度上的关联,本文基于 DST 提出一种证据分类组合方法,并以此建立改进的证据推理决策框架,构建新的决策模型,给出决策步骤和计算公式。文中通过相关算例演示该方法的特点和决策过程,结果表明本文方法在决策评估领域具有更好的可行性和有效性。

2 证据推理方法概述

基于证据推理的决策方法将有序等级作为基本元素来构建评估决策问题的识别框架,指标体系中各个基础指标的性能采用分布式信度结构描述。决策问题的描述如定义 1 所示。

定义 1 设多属性决策问题有 M 个候选方案 $a_l (l=1, 2, \dots, M)$, L 个评价指标 $e_i (i=1, 2, \dots, L)$, 指标 e_i 对应的相对权重为 w_i , 且满足 $w_i \geq 0$ 和 $\sum_{i=1}^L w_i = 1$ 。有序等级序列 $H = \{H_x | H_x < H_{x+1}; x=1, 2, \dots, X\}$ 构成该决策问题的评估框架。方案 a_l 的指标 e_i 的分布式评估记为 $S(e_i(a_l)) = \{(H_x, \beta_{x,i}(a_l)), x=1, \dots, X; (H, \beta_{H,i}(a_l))\}$ 。各等级的效用记为 $U = \{U(H_x) | U(H_x) < U(H_{x+1}); x=1, 2, \dots, X\}$ 。则属性的基本概率赋值 (Basic Probability Mass, BPA) m 的计算如式(1)~式(4)所示,各等级的基本概率赋值的融合过程如式(5)~式(9)所示,集结后 BPA 的逆向转换计算如式(10)~式(11)所示,方案 a_l 的综合效用 $U(a_l)$ 表示为式(12)。

$$m_{x,i} = w_i \beta_{x,i}, i=1, 2, \dots, L, x=1, 2, \dots, X \quad (1)$$

$$\bar{m}_{H,i} = 1 - w_i, i=1, 2, \dots, L \quad (2)$$

$$\tilde{m}_{H,i} = w_i (1 - \sum_{x=1}^X \beta_{x,i}), i=1, 2, \dots, L \quad (3)$$

$$m_{H,i} = \tilde{m}_{H,i} + \bar{m}_{H,i} = 1 - w_i \sum_{x=1}^X \beta_{x,i} \quad (4)$$

$$m_{x,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} [\tilde{m}_{x,I(i)} m_{x,i+1} + m_{x,I(i)} m_{H,i+1} + m_{H,I(i)} m_{x,i+1}] \quad (5)$$

$$\tilde{m}_{H,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} [\tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1}] \quad (6)$$

$$\bar{m}_{H,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} [\bar{m}_{H,I(i)} \bar{m}_{H,i+1}] \quad (7)$$

$$m_{H,I(i+1)} = \tilde{m}_{H,I(i+1)} + \bar{m}_{H,I(i+1)} \quad (8)$$

$$K_{I(i+1)} = 1 - \sum_{x=1}^X \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq x}}^X m_{x,I(i)} m_{t,i+1}, i=1, 2, \dots, L-1 \quad (9)$$

$$\beta_x = \frac{m_x}{1 - \bar{m}_H} \quad (10)$$

$$\beta_H = \frac{\tilde{m}_H}{1 - \bar{m}_H} \quad (11)$$

$$U = \beta_x U(H_x) \quad (12)$$

3 基于等级关联的证据分类融合方法

3.1 DST 规则的缺陷

DST 方法以“封闭世界”假设 (Closed World Assumption, CWA) 为前提,使用 Dempster 组合规则融合证据^[15]。在 CWA 假设下,命题或假设集中有且只有一个为真,且空集“ \emptyset ”不赋予信度值^[16-17]。因此,在基于 DST 的评估框架下,评估等级集合由一序列满足相互排斥且完全有序的评估等级元素组合而成。令有序评估等级序列 $H = \{A, B, C\}$, $m_{A,i}(a_l)$ 表示方案 a_l 在第 i 个指标上被评为等级 A 的 BPA, $m_{B,i}(a_l)$ 表示方案 a_l 在第 j 个指标上被评为等级 B 的 BPA。如果 $A=B$,即待融合的 BPA 属于同一等级,此时评估信息不冲突,可利用 Dempster 组合规则计算出一个新的信度函数;反之,若待组合的评估信度属于不同等级,即 $A \neq B$,此种融合属于完全冲突情况,融合后的 BPA 为 0。

理论上,基于 CWA 的 DST 方法进行 BPA 融合并无问题。然而,在管理评估领域采用 Dempster 组合规则融合评估信度却存在一定的问题。例如,某决策问题的有序评估等级集合为 $H = \{\text{很差, 较差, 一般, 较好, 很好}\}$ 。按照 Dempster 组合规则,等级“较好”与等级“很好”属于不同的等级,即“较好” \cap “很好” $= \emptyset$,因此 $m_{\text{较好}}$ 与 $m_{\text{很好}}$ 融合后的 BPA 为 0。然而,上述现象与人们在现实生活中的直观感受并不相符。从语义角度理解,“很好”和“较好”属于同类(积极)评价,“很好”的程度比“较好”高。这表明,两者在语义上存在一定的关联,并非完全独立。因此,在管理评估领域直接采用 Dempster 组合规则对评估信度进行融合并不合理,不能简单地认为融合属于同类语义但不同程度的评价信度是一种完全冲突的信度融合,否则融合时将导致评估信息的流失。

3.2 改进的分类融合方法

为解决 DST 方法在管理评估领域应用中存在的信息流失问题,需要对现有 Dempster 组合规则进行修正。由等级的上下文语义关系可知,同类评价中的不同等级具有相同语义,但程度不同。同时,考虑到每个对象的评估结果是一个独立

的随机事件,根据中心极限定理可知指标评估结果的分布应遵循正态分布规律。因此,改进的评估信息融合规则需按等级的语义进行分类融合,在 Dempster 组合规则的基础上添加以下两条新规则:

1)同类评价中不同程度的评估信度融合时,高级别的同类评估等级的作用域应涵盖低级别的同类评估等级,集结后的 BPA 分配给低程度的评估等级,集结后的 BPA 为两者直和的结果;

2)不同类型的评估等级集结时,由于两者语义的不同,不论两者的级别差距多大,融合后的 BPA 应分配给空集。

综上所述,修正后的评估信度迭代融合规则如定义 2 所示。

定义 2 令决策问题的评估等级集合为 $H = \{H_{NC}, \dots, H_{N1}, H_A, H_{P1}, \dots, H_{PD}\}$ 。其中, H_{Nn} ($n=1, \dots, C$) 表示语义上为负面评价 N 的等级,且满足 $H_{Nn} < H_{Nn+1}$; H_{Pn} ($n=1, \dots, D$) 表示语义上为正面评价 P 的等级,满足 $H_{Pn} < H_{Pn+1}$; H_A 表示中性等级 A 。则改进后的分类 BPA 迭代融合规则描述如式(13)~式(19)所示:

$$H_e \cap H_f = H_e; \text{若 } E(H_e) = E(H_f) \text{ 且 } H_e < H_f \quad (13)$$

$$H_e \cap H_f = \emptyset; \text{若 } E(H_e) \neq E(H_f) \quad (14)$$

$$m_{x,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} \left[m_{x,I(i)} \sum_{t=x}^{\max(E(x))} m_{t,i+1} + m_{x,i+1} \sum_{t=x+1}^{\max(E(x))} m_{t,i} + m_{x,I(i)} m_{H,i+1} + m_{H,I(i)} m_{x,i+1} \right] \quad (15)$$

$$\tilde{m}_{H,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} \left[\tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} \right] \quad (16)$$

$$\bar{m}_{H,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} \left[\bar{m}_{H,I(i)} \bar{m}_{H,i+1} \right] \quad (17)$$

$$m_{H,I(i+1)} = \tilde{m}_{H,I(i+1)} + \bar{m}_{H,I(i+1)} \quad (18)$$

$$K_{I(i+1)} = 1 - \sum_{x \in H} \sum_{t \in H \text{ 且 } E(x) \neq E(t)} m_{x,I(i)} m_{t,i+1}, i=1, 2, \dots, L-1 \quad (19)$$

其中, $E(x)$ 表示等级 x 所属的语义类别; $\max(E(x))$ 表示等级 x 所属语义类别的最高等级。

3.3 改进的证据推理决策方法

基于证据分类融合方法,提出一种考虑等级语义关联的改进证据推理方法,如定义 3 所示。

定义 3 设多属性决策问题有 M 个候选方案 a_l ($l=1, 2, \dots, M$), L 个评价指标 e_i ($i=1, 2, \dots, L$), 指标 e_i 对应的相对权重为 w_i 。有序等级序列 $H = \{H_{NC}, \dots, H_{N1}, H_A, H_{P1}, \dots, H_{PD}\}$ 为该决策问题的评估框架。其中, H_{Nn} ($n=1, \dots, C$) 表示语义上为负面评价 N 的等级,且满足 $H_{Nn} < H_{Nn+1}$; H_{Pn} ($n=1, \dots, D$) 表示语义上为正面评价 P 的等级,满足 $H_{Pn} < H_{Pn+1}$; H_A 表示中性等级 A 。方案 a_l 的指标 e_i 的分布式评估信度结构记为 $S(e_i(a_l)) = \{(H_x, \beta_{x,i}(a_l)), x \in H; (H_x, \beta_{H,i}(a_l))\}$ 。各等级元素的效用记为 $U = \{U(H_x) | U(H_x) < U(H_{x+1}); x \in H\}$; 方案 a_l 的综合效用记为 $U(a_l)$ 。因此方案 a_l 的综合效用的计算过程如式(20)~式(33)所示:

$$m_{x,i} = w_i \beta_{x,i}, i=1, 2, \dots, L, x \in H \quad (20)$$

$$\bar{m}_{H,i} = 1 - w_i, i=1, 2, \dots, L \quad (21)$$

$$\tilde{m}_{H,i} = w_i (1 - \sum_{x \in H} \beta_{x,i}), i=1, 2, \dots, L \quad (22)$$

$$m_{H,i} = \tilde{m}_{H,i} + \bar{m}_{H,i} = 1 - w_i \sum_{x \in H} \beta_{x,i} \quad (23)$$

$$m_{x,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} \left[m_{x,I(i)} \sum_{t=x}^{\max(E(x))} m_{t,i+1} + m_{x,i+1} \sum_{t=x+1}^{\max(E(x))} m_{t,i} + m_{x,I(i)} m_{H,i+1} + m_{H,I(i)} m_{x,i+1} \right] \quad (24)$$

$$\tilde{m}_{H,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} \left[\tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} \right] \quad (25)$$

$$\bar{m}_{H,I(i+1)} = \frac{1}{K_{I(i+1)}} \left[\bar{m}_{H,I(i)} \bar{m}_{H,i+1} \right] \quad (26)$$

$$m_{H,I(i+1)} = \tilde{m}_{H,I(i+1)} + \bar{m}_{H,I(i+1)} \quad (27)$$

$$K_{I(i+1)} = 1 - \sum_{x \in H} \sum_{t \in H \text{ 且 } E(x) \neq E(t)} m_{x,I(i)} m_{t,i+1}, i=1, 2, \dots, L-1 \quad (28)$$

$$\beta_x = \frac{m_x}{1 - \bar{m}_H}, x \in H \quad (29)$$

$$\beta_H = \frac{\tilde{m}_H}{1 - \bar{m}_H} \quad (30)$$

$$U_{\max} = \sum_{x \in H} (\beta_x U(H_x)) + \beta_H U(H_{PD}) \quad (31)$$

$$U_{\min} = \sum_{x \in H} (\beta_x U(H_x)) + \beta_H U(H_{NC}) \quad (32)$$

$$U_{\text{avg}} = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} \quad (33)$$

将上述公式分成 4 个阶段进行操作。其中,式(20)~式(23)为第一阶段,用于将指标的分布式评估信度转换为对应的 BPA;式(24)~式(28)为第二阶段,即采用基于等级语义的分类融合公式对转换后的 BPA 进行迭代集结;式(29)~式(30)为第三阶段,用于将集结后的 BPA 转换为各等级下的分布式综合评估信度;式(31)~式(33)为第四阶段,用于将综合等级信度与等级效用结合,获得方案的综合效用。通过对各方案的综合效用即可获得决策问题的结果。

4 算例分析

4.1 问题描述

某信息安全技术公司受委托对 3 款云计算系统 a_1, a_2 和 a_3 的安全性能进行评估。经过同相关专家的讨论,公司从网络层面、硬件层面和应用层面制定出 6 项评估指标:访问控制机制 e_1 、网络环境安全 e_2 、主机安全 e_3 、自动化服务可靠性 e_4 、应用程序安全 e_5 和终端用户安全 e_6 。这 6 个指标均为效益型定性指标,3 个待测系统在各项指标上的评估结果及各指标的相对权重如表 1 所列。指标的评估序列分 5 个等级:“很差”VP、“较差”P、“一般”A、“较好”G 和“很好”VG。各等级的效用分别为 $U(VP) = -1, U(P) = -0.5, U(A) = 0, U(G) = 0.5, U(VG) = 1$ 。

将表 1 的分布式评估信度及指标权重代入式(20)~式(23)可得相应的 BPA,如表 2 所列。进一步,利用式(24)~式(28)对表 2 中的数据进行 5 轮迭代集结,可得融合后的综合 BPA,如表 3 所列。集结后的 BPA 通过式(29)~式(30)转换为综合评估信度,代入式(31)~式(33)可得待评估系统的综合效用分别为 $U(a_1) = 0.2454, U(a_2) = 0.2374, U(a_3) = 0.2372$ 。由 $U(a_1) > U(a_2) > U(a_3)$ 可知, a_1 系统的安全性在三者中最好, a_2 系统次之, a_3 系统最差。

表 1 3 款待测系统的评测结果

Table 1 Assessments results of three systems to be tested

指标	权重	a_1 系统	a_2 系统	a_3 系统
访问控制机制 e_1	0.16	$\{(G,0.7),(VG,0.3)\}$	$\{(G,0.7),(VG,0.3)\}$	$\{(G,0.6),(VG,0.4)\}$
网络环境安全 e_2	0.24	$\{(P,1)\}$	$\{(P,0.4),(G,0.6)\}$	$\{(P,0.4),(A,0.3),(G,0.3)\}$
主机安全 e_3	0.18	$\{(A,0.1),(G,0.9)\}$	$\{(P,0.3),(A,0.4),(G,0.2),(H,0.1)\}$	$\{(A,0.3),(G,0.4),(VG,0.3)\}$
自动化服务可靠性 e_4	0.12	$\{(A,0.4),(G,0.5),(VG,0.1)\}$	$\{(G,1)\}$	$\{(P,0.2),(A,0.6),(G,0.2)\}$
应用程序安全 e_5	0.15	$\{(P,0.4),(A,0.3),(G,0.2)\}$	$\{(VP,0.67),(G,0.33)\}$	$\{(A,0.9),(H,0.1)\}$
终端用户安全 e_6	0.15	$\{(A,0.06),(VG,0.94)\}$	$\{(G,0.5),(VG,0.4),(H,0.1)\}$	$\{(A,0.6),(G,0.2),(VG,0.2)\}$

表 2 转换后的 BPA

Table 2 BPAs transformed from belief structure

指标	a_1 系统	a_2 系统	a_3 系统
访问控制机制 e_1	$\{(m_G,0.112),(m_{VG},0.048),(\bar{m}_H,0.84)\}$	$\{(m_G,0.112),(m_{VG},0.48),(\bar{m}_H,0.84)\}$	$\{(m_G,0.096),(m_{VG},0.064),(\bar{m}_H,0.84)\}$
网络环境安全 e_2	$\{(m_P,0.24),(\bar{m}_H,0.76)\}$	$\{(m_P,0.096),(m_G,0.144),(\bar{m}_H,0.76)\}$	$\{(m_P,0.096),(m_A,0.072),(\bar{m}_H,0.76)\}$
主机安全 e_3	$\{(m_A,0.018),(m_G,0.162),(\bar{m}_H,0.82)\}$	$\{(m_P,0.054),(m_A,0.072),(m_G,0.036),(\bar{m}_H,0.018),(\bar{m}_H,0.82)\}$	$\{(m_A,0.054),(m_G,0.072),(\bar{m}_H,0.024),(\bar{m}_H,0.82)\}$
自动化服务可靠性 e_4	$\{(m_A,0.048),(m_G,0.06),(\bar{m}_H,0.012),(\bar{m}_H,0.88)\}$	$\{(m_G,0.12),(\bar{m}_H,0.88)\}$	$\{(m_P,0.024),(m_A,0.072),(\bar{m}_H,0.024),(\bar{m}_H,0.88)\}$
应用程序安全 e_5	$\{(m_P,0.06),(m_A,0.045),(m_G,0.03),(\bar{m}_H,0.015),(\bar{m}_H,0.85)\}$	$\{(m_{VP},0.1008),(m_G,0.0492),(\bar{m}_H,0.85)\}$	$\{(m_A,0.135),(\bar{m}_H,0.015),(\bar{m}_H,0.85)\}$
终端用户安全 e_6	$\{(m_A,0.092),(m_{VG},0.1408),(\bar{m}_H,0.85)\}$	$\{(m_G,0.075),(m_{VG},0.06),(\bar{m}_H,0.015),(\bar{m}_H,0.85)\}$	$\{(m_A,0.09),(m_G,0.03),(\bar{m}_H,0.03),(\bar{m}_H,0.85)\}$

表 3 新方法得到的各系统的分布式综合 BPA

Table 3 Distributed integrated BPAs of three systems obtained by new method

系统	m_{VP}	m_P	m_A	m_G	m_{VG}	\bar{m}_H	\bar{m}_H
a_1	0	0.1687	0.0604	0.2533	0.1032	0.0072	0.4072
a_2	0.0479	0.0902	0.0347	0.3713	0.0526	0.0155	0.3879
a_3	0	0.0648	0.2532	0.1922	0.0774	0.0072	0.4053

4.2 结果分析

相比于经典的 DST 融合规则,本文提出的分类组合方法充分考虑了等级在语义上的关联,充分利用了评估信息。图 1—图 3 展示了新方法和经典 DST 方法对本例的评估信息进行迭代融合时产生的无效信息的情况。由图可知,新方法在迭代过程中产生的无效信息量少于经典的 DST 方法,表明新方法在管理决策领域具有更好的信息融合能力,结果更具合理性。分别以新方法和 DST 为规则,采用证据推理方法对本例进行决策,结果如表 4 所列。由表 4 可知,同一系统在采用新方法评价后获得的评估效用均优于经典方法,且产生了完全不同的效用排序结果。这是由于新方法考虑了等级的语义关联后充分利用了评估信息的结果,证明了本文方法的有效性和创新性。

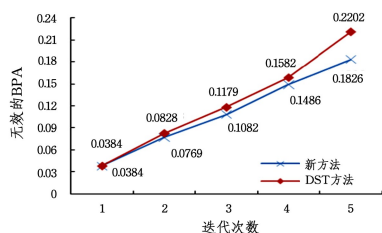


图 1 a_1 系统的 BPA 在迭代融合过程中产生的无效 BPA

Fig. 1 Invalid BPA generated in iterative process of aggregating BPAs of a_1

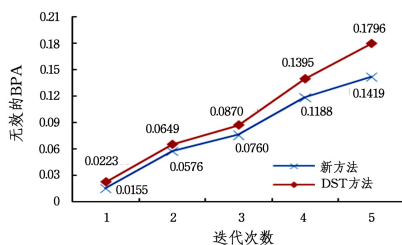


图 2 a_2 系统的 BPA 在迭代融合过程中产生的无效 BPA

Fig. 2 Invalid BPA generated in iterative process of aggregating BPAs of a_2

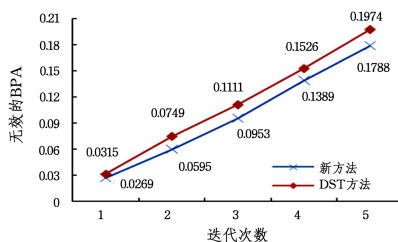


图 3 a_3 系统的 BPA 在迭代融合过程中产生的无效 BPA

Fig. 3 Invalid BPA generated in iterative process of aggregating BPAs of a_3

表 4 基于新方法和 DST 方法所得各系统的综合效用

Table 4 Aggregated utilities of three systems obtained by new method and DST method

方法	a_1 系统		a_2 系统		a_3 系统	
	效用	排序	效用	排序	效用	排序
新方法	0.2454	1	0.2374	2	0.2372	3
DST 方法	0.2240	3	0.2340	1	0.2269	2

- [14] ZHU L M. Strategy research on artificial intelligence heuristic search[J]. *Electronic Design Engineering*, 2013, 21(16): 61-64. (in Chinese)
朱龙梅. 浅论人工智能启发式搜索策略的研究[J]. *电子设计工程*, 2013, 21(16): 61-64.
- [15] BAUDRY G, MACHARIS C, VALLÉE T. Range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis; A combined method of Multi-Actor Multi-Criteria Analysis and Monte Carlo simulation to support participatory decision making under uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 264(1): 257-269.
- [16] WANG Y J, WANG X Y, QIU H K, et al. A Case Design of Program Design Course based on Enstein[J]. *Computer Education*, 2012(18): 75-77. (in Chinese)
王亚杰, 王晓岩, 邱虹坤, 等. 基于爱恩斯坦棋的程序设计课程教学案例设计[J]. *计算机教育*, 2012(18): 75-77.
- [17] ZHANG J J, WANG X, YAO L, et al. Modified UCT Algorithm with Risk Dominance Methods in Imperfect Information Game [C]//International Conference on Intelligent Manufacturing and Computational Technology. Hong Kong: AMM Press, 2013: 367-376.
- [18] LI X J, WANG X L, WU L, et al. Game tree generation algorithm based on local-road scanning method for connect 6[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2015, 10(2): 267-272. (in Chinese)
李学俊, 王小龙, 吴蕾, 等. 六子棋中基于局部“路”扫描方式的博弈树生成算法[J]. *智能系统学报*, 2015(2): 267-272.
- [19] GUO X Y, LI C, MEI Q Z. Deep Learning Applied to Game[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2016, 42(5): 676-684. (in Chinese)
郭潇道, 李程, 梅俏竹. 深度学习在游戏中的应用[J]. *自动化学报*, 2016, 42(5): 676-684.

(上接第 169 页)

结束语 本文从评估等级的语义出发,分析了语义关联对信息融合的影响,以证据推理方法为基础提出了一种考虑等级语义关联的证据分组融合方法,并依此构建了一个改进的多属性决策框架,提出了一种新的多属性决策方法。文中通过一个案例演示了该方法的决策过程,算例结果表明了新方法不但可以有效集结分布式评估信息,而且能够减少融合过程中的信息流失。对比两种方法在本文算例中的应用结果可以发现,新方法可得到一个与经典方法完全不同的决策结果,在管理决策领域具有一定的研究价值。后续的研究工作将进一步探索新方法的融合机制,设计一个更为高效和简洁的决策信息融合算法,并提出一个更合理、完善的多属性决策方法。

参 考 文 献

- [1] WALCAZAK D, RUTKOWSKA A. Project rankings for participatory budget based on the fuzzy TOPSIS method[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 260(2): 706-714.
- [2] REN P, XU Z, HAO Z. Hesitant Fuzzy Thermodynamic Method for Emergency Decision Making Based on Prospect Theory[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 47(9): 2531-2543.
- [3] YU X, ZHANG S, LIAO X, et al. ELECTRE Methods in Prioritized MCDM Environment[J]. *Information Sciences*, 2018, 424: 301-316.
- [4] AHN B S. The analytic hierarchy process with interval preference statements[J]. *Omega*, 2016, 67: 177-185.
- [5] YANG J B, SINGH M G. An evidential reasoning approach for multiple attribute decision making with uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1994, 24(1): 1-18.
- [6] ZHANG M J, WANG Y M, LI L H, CHEN S Q. A general evidential reasoning algorithm for multi-attribute decision analysis under interval uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257(3): 1005-1015.
- [7] WANG Y M, YANG J B, XU D L. Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 174(3): 1885-1913.
- [8] CHEN S Q, WANG Y M. Grouping method for combining evidence[J]. *Control and Decision*, 2013, 8(4): 574-578. (in Chinese)
陈圣群, 王应明. 证据的分组合成法[J]. *控制与决策*, 2013, 8(4): 574-578.
- [9] FU Y G, YANG L H, WU Y J. Evidential Reasoning Approach for Solving Complex Evaluation Models[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2014, 27(4): 313-326. (in Chinese)
傅仰秋, 杨隆浩, 吴英杰. 面向复杂评价模型的证据推理方法[J]. *模式识别与人工智能*, 2014, 27(4): 313-326.
- [10] XU D L, YANG J B, WANG Y M. The evidential reasoning approach for multi-attribute decision analysis under interval uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 174(3): 1914-1943.
- [11] WANG Y M, YANG J B, XU D L, et al. The evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis using interval belief degrees[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 175(1): 35-66.
- [12] KE X L, MA L Y, LI Z Y, et al. Property Research and Approach Modification of Evidential Reasoning Rule[J]. *Information and Control*, 2016, 45(2): 165-170. (in Chinese)
柯小路, 马荔瑶, 李子懿, 等. 证据推理规则的性质研究及方法修正[J]. *信息与控制*, 2016, 45(2): 165-170.
- [13] DU Y W, WANG Y M. Evidence combination rule with contrary support in the evidential reasoning approach[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017, 88: 193-204.
- [14] CHEN S Q, WANG Y, SHI H L, et al. Evidential reasoning with discrete belief structures[J]. *Information Fusion*, 2018, 41: 91-104.
- [15] 段新生. 证据决策[M]. 北京: 经济科学出版社, 1996.
- [16] WANG Y M, YANG J B, XU D L, et al. On the combination and normalization of interval-valued belief structures[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(5): 1230-1247.
- [17] CHEN P, HE K, YU X S. Non-Subjective Approximation Algorithm Based on Evidential Levels [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science)*, 2018, 32(9): 137-143, 156. (in Chinese)
陈鹏, 何凯, 余肖生. 基于证据等级的非主观近似算法[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2018, 32(9): 137-143, 156.