文章编号: 1001-0920(2008)03-0267-06

基于λ模糊测度的变权关联多属性决策分析

章 玲, 周德群
(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016)

摘 要: 在传统变权理论和λ模糊测度理论的基础上,讨论变权关联多属性决策(VRMADM)理论. 首先定义 R-变权和 R-状态变权;然后基于 Marichal 熵理论讨论 VRMADM 问题中属性(集)权重的计算,并归纳出求解 VRMADM 问题的具体步骤;最后将 VRMADM 理论应用于企业电子商务建设的方案选择.

关键词: 多属性决策分析; λ模糊测度; 关联; 变权; Marichal 熵
中图分类号: N945.25　　**文献标识码**: A

Multi-attribute decision making with variable weight and relationship based on λ fuzzy measures

ZHANG Ling, ZHOU De-qun
(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China. Correspondent: ZHANG Ling, E-mail: pawlin @126. com)

Abstract: The theory of multi-attribute decision making with variable weight and relationship (VRMADM) is discussed based on the existing theories of λ fuzzy measures and variable weight. At frist, the concepts of R-variable weight and R-state variable weight are introduced. Then the weightes of the attributes and their coalitions are calculated based on Marichal entropy theory. The steps of solving the problems of VRMADM are summarized. Finally, VRMADM theory is applied to the developing alternatives of e-business web sites.

Key words: Multi-attribute decision making; λ fuzzy measures; Relationship; Variable weight; Marichal entropy

1 引 言

构建决策属性体系是求解多属性决策问题的关键. 一般而言,建立的决策属性体系应满足完备性、代表性和独立性,但在难以找到一组既独立又全面概括的决策属性时,往往不得不放松对决策属性独立性的要求[1]. 因此对基于关联的多属性决策分析(RMADM)问题进行探讨,具有重要的理论和现实意义.

RMADM 问题已引起了国内外学者的广泛关注. 考虑到属性间的关联破坏了属性权重的可加性(属性集的权重等于其包含属性的权重之和),无法用概率测度对属性的权重建模,Sugeno 提出了模糊测度的概念[2]. 由于一般模糊测度所需的资料量过于庞大,学者们常用λ模糊测度[1,3,4]代替一般的模糊测度,以减少在资料收集过程中的难度. 现有的 RMADM 理论研究主要集中在属性(集)权重的计算和 RMADM 理论在实际中的应用两个方面. 文献[4-6]探讨了决策方案评价值已知情形下,RMADM 问题中属性(集)权重的计算问题. 文献[6-8]将 RMADM 理论应用于信息融合、事物分类、预测和市场分析等领域.

考虑到常权决策会导致属性间的互补性太强[9,10],以及决策者不易给出决策方案的评价值,本文基于模糊测度理论和传统的变权理论,提出了变权 RMADM(VRMADM)理论. 首先定义 R-变权和 R-状态变权;然后讨论方案评价值未知情形下,VRMADM 问题中属性(集)权重的计算,并归纳出 VRMADM 问题的求解步骤;最后将 VRMADM 理论应用于电子商务网站建设的方案选择.

2 基础知识

收稿日期: 2006-12-02; **修回日期**: 2007-07-02.
基金项目: 国家自然科学基金项目(90510010,70702015); 教育部博士点基金项目(20050287026); 国家软科学计划研究项目(2006GXQ3B184); 江苏省软科学基金项目(BR2007013).
作者简介: 章玲(1979—),女,安徽肥东人,讲师,博士,从事复杂系统与评价的研究; 周德群(1963—),男,江苏建湖人,教授,博士生导师,从事复杂系统与评价等研究.

假设某 RMADM 问题的属性集为 $A = (a_1, \cdots, a_m)$，$P(A)$ 为 A 的幂集. 给定 $\lambda \in (-1, \infty)$，$g_\lambda: P(X) \to [0,1]$，满足如下条件:

1) $g_\lambda(A) = 1$;

2) $\forall M, N \in P(A)$，并且 $M \cap N = \phi$，则有

$$g_\lambda(M \cup N) = g_\lambda(M) + g_\lambda(N) + \lambda g_\lambda(M) g_\lambda(N);$$

3) g_λ 连续.

此时称 g_λ 为定义在 $P(A)$ 上的 λ 模糊测度. 对于 $\forall S \subseteq A$，$g_\lambda(S)$ 可解释为属性(集) S 的权重或重要程度. 如果 $\lambda = 0$，则说明属性间相互独立；如果 $-1 < \lambda < 0$，则说明属性间存在冗余关联作用；如果 $\lambda > 0$，则说明属性间存在补充关联作用.

对于 VRMADM 问题，属性 $a_i (a_i \in A)$ 在决策过程中所起的作用不能仅用 $g_\lambda(a_i)$ 描述，必须综合考察所有属性集 $S(\{S \mid a_i \in S, S \in PA)\})$ 的权重. 参考多人博弈中 Shapley 值的定义，Grabisch 定义了基于一般有限离散集模糊测度的属性 Shapley 值[2]. 假若 g_λ 为定义在 $P(A)$ 上的 λ 模糊测度，对于任意 $a_i \in A$，其 Shapley 值定义为

$$I(a_i) = \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(m-k-1)!k!}{m!} \times \sum_{T \subseteq A \setminus a_i, |T| = k} (g_\lambda(T \cup a_i) - g_\lambda(T)), \quad (1)$$

其中 $I(a_i)$ 表示属性 a_i 在决策中的贡献，$\sum_{i=1}^{m} I(a_i) = 1$.

如果集合 A 中所有属性相互独立，则易证 $g_\lambda(a_i) = I(a_i)$.

3 R- 变权和 R- 状态变权的定义和性质

对于 VRMADM 问题，属性间的可加性遭到破坏，原有的变权和状态变权的公理体系不再适用. 在 VRMADM 问题中，属性 Shapley 值 $I(a_i)(a_i \in A)$ 取代了属性权重，以描述决策属性 a_i 在决策中的综合贡献. 下面依据属性的 Shapley 值定义 R- 变权和 R- 状态变权.

设 $X = (x_1, \cdots, x_m)$ 为 VRMADM 问题的状态向量，g_λ 为定义在 $P(A)$ 上的 λ 模糊测度，$I(a_i)$ 为属性 $a_i (a_i \in A)$ 的 Shapley 值，则一组 m 维 R- 变权定义如下:

定义 1 如果 m 个映射 $I(a_i)(a_i \in A)$: $I(a_i)(0,1)^m \to (0,1)$，$(X) \mid \to I(a_i)(X)$，满足如下公理:

I1) 归一性: $\sum_{i=1}^{m} I(a_i)(X) = 1$;

I2) 连续性: $I(a_i)(X)$ 关于每个变元 $x_i (i = 1, \cdots, m)$ 连续;

I3) 惩罚性: $I(a_i)(X)$ 随着 $x_i (i = 1, \cdots, m)$ 的增加而下降.

则称 $(I(a_1)(X), \cdots, I(a_m)(X))$ 构成的属性 Shapley 值向量对应的属性(集) 权重为一组惩罚型 R- 变权向量.

若将 I3) 替换为 I3′) 激励性: $I(a_i)(X)$ 随着 $x_i (i = 1, \cdots, m)$ 的下降而上升，则称满足公理 I1) ～ I3′) 的属性 Shapley 值向量 $(I(a_1)(X), \cdots, I(a_m)(X))$ 对应的属性(集) 权重为一组激励型 R- 变权向量.

基于 R- 变权向量的概念，下面给出 R- 状态变权的公理化定义.

定义 2 给定映射 $T: [0,1]^m \to (0, \infty)^m$，如果向量 $T(X) = (T_1(X), \cdots, T_m(X))$ 满足如下公理:

T1) $x_i \geq x_j \Rightarrow T_i(X) \leq T_j(X)$，$i, j = 1, \cdots, m$;

T2) $T_i(X) (i = 1, \cdots, m)$ 对每个变元连续;

T3) 各属性的 Shapley 值满足定义 1 中的公理 I1) ～ I3)，即

$$I(X) = \frac{(I(a_1) T_1(X), \cdots, I(a_m) T_m(X))}{\sum_{i=1}^{m} (I(a_i) T_i(X))} = \frac{I \times T(X)}{\sum_{i=1}^{m} (I(a_i) T_i(X))}, \quad (2)$$

则称 $T(X)$ 为惩罚型 R- 状态变权向量.

若将 T1) 替换为

T1′) $x_i \geq x_j \Rightarrow T_i(X) \geq T_j(X)$，$i, j = 1, \cdots, m$，

并将 I3) 替换为 I3′)，则称 $T(X)$ 为激励型 R- 状态变权向量.

定理 1 如果属性间相互独立，则 R- 变权与不考虑关联的变权等价，R- 状态变权与不考虑关联的状态变权等价.

证明 设决策属性集为 $A = (a_1, \cdots, a_m)$，且属性间相互独立，则有如下等式成立:

$$\sum_{k=1}^{m} g_\lambda(a_i)(X) = 1, \; g_\lambda(a_i)(X) = I(a_i)(X).$$

将 $g_\lambda(a_i)(X)$ 记为 $w_i(X)$，并代入定义(1)，则有以下结论成立:

1) $\sum_{i=1}^{m} w_i(X) = 1$;

2) $w_i(X)$ 关于每个变元连续.

将上述结论代入式(1)，此时 R- 变权便退化为不考虑关联的变权(不考虑关联的变权定义参见文献[9,10]).

类似地，可证明如果属性间相互独立，则 R- 状

态变权与不考虑关联的状态变权等价. □

由定理1 得出:R-变权和R-状态变权是不考虑关联的变权和状态变权的一般形式,不考虑关联的变权和状态变权是 R-变权和 R-状态变权在属性(集)相互独立时的特例. 当属性(集)相互独立时,R-变权和 R-状态变权分别退化为不考虑关联的变权和状态变权.

定理 2　有限个 R-状态变权向量的正线形组合仍为 R-状态变权向量.

证明　假设 $T^i(X) = (T_1^i(X), \cdots, T_m^i(X))$ $(i = 1, \cdots, n)$ 为 m 维 R-状态变权向量, $P = (p^1, \cdots, p^n)$ 为任一正向量.

首先证明 $T(X)$ 满足非负性. 如果 $T^i(X)$ 为状态变权向量,则 $T^i(X) > 0$. 因为 P 为任一 m 维正向量,所以 $T(X) > 0$ 必然成立.

然后证明 $T(X)$ 满足连续性. 因为 $T_j^i(X)$ $(i = 1, \cdots, n, j = 1, \cdots, m)$ 对每个变元连续,正线形变换不改变函数的连续性,所以 $T_j(X)$ 对每个变元连续.

最后证明 $T(X)$ 满足规范性,有

$$I(X) = \frac{I \times T(X)}{\sum_{i=1}^{m}(I(a_i)\, T_i(X))} = \frac{I \times \sum_{h=1}^{n} p^h T^h(X)}{\sum_{i=1}^{m}\left[I(a_i)\left(\sum_{h=1}^{n} p^h T_i^h(X)\right)\right]}. \tag{3}$$

所以

$$\sum_{i=1}^{m} I(a_i)(X) = \sum_{i=1}^{m} \frac{I(a_i) \sum_{h=1}^{n} p^h T^h(X)}{\sum_{i=1}^{m}\left[I(a_i)\left(\sum_{h=1}^{n} p^h T_i^h(X)\right)\right]} = \frac{\sum_{i=1}^{m}\left(I(a_i) \sum_{h=1}^{n} p^h T^h(X)\right)}{\sum_{i=1}^{m}\left[I(a_i)\left(\sum_{h=1}^{n} p^h T_i^h(X)\right)\right]} = 1. \tag{4}$$

由此定理得证. □

定理 3　有限惩罚型 R-状态变权向量的正线形组合仍为惩罚型 R-状态变权向量,有限激励型 R-状态变权向量的正线形组合仍为激励型 R-状态变权向量.

证明　设 $T^i(X) = (T_1^i(X), \cdots, T_m^i(X))$ $(i = 1, \cdots, n)$ 为 m 维惩罚型 R-状态变权向量, $P = (p^1, \cdots, p^n)$ 为任一 m 维正向量. 这里只要在定理 2 的基础上证明 $T(X)$ 满足惩罚性即可.

假设 $T^i(X)$ 为惩罚性状态变权向量,即

$$x_i \geq x_j \Rightarrow T_i^h(X) \leq T_j^h(X),\ h = 1, \cdots, n.$$

因为 $p^h \geq 0$, $h = 1, \cdots, n$,所以

$$x_i \geq x_j \Rightarrow p^h T_i^h(X) \leq p^h T_j^h(X).$$

则有

$$x_i \geq x_j \Rightarrow \sum_{h=1}^{n} p_h T_i^h(X) \leq \sum_{h=1}^{n} p_h T_j^h(X),$$

即

$$x_i \geq x_j \Rightarrow T_i(X) \leq T_j(X).$$

所以当 $T^i(X)$ $(i = 1, \cdots, n)$ 为惩罚型状态变权向量时, $T(X)$ 满足惩罚性.

同理可证明有限激励型 R-状态变权向量的正线形组合仍为激励型 R-状态变权向量. □

4　VRMADM 中属性(集)权重的计算

4.1　属性 Shapley 值的确定

在求解属性(集)权重之前,首先确定常权情形下属性的 Shapley 值.

设定成对比较属性 Shapley 值的标度,在此基础上通过专家和决策者打分,确定常权情形下属性 Shapley 值的判断矩阵. 假设某标度下 VRMADM 问题决策属性 Shapley 值的判断矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1m} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2m} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ I_{m1} & I_{m2} & \cdots & I_{mm} \end{bmatrix}. \tag{5}$$

其中 I_{ij} $(1 \leq i, j \leq m)$ 表示属性 a_i 与 a_j $(a_i, a_j \in A)$ 的 Shapley 之比,显然 $I_{ii} = 1$.

参考 AHP 方法[11,12],判定矩阵 R 的一致性:如果 R 不满足一致性,则可通过与专家或决策者进行协商,修改判断矩阵,或参照文献[13,14]对矩阵 R 进行处理,使其满足一致性;如果 R 满足一致性,则依据矩阵 R 计算常权情形下各属性的 Shapley 值 $(I_1, \cdots, I_m)$,依据 R-变权和 R-状态变权的定义,确定不同状态下属性的 Shapley 值向量 $(I_1(X), \cdots, I_m(X))$.

4.2　属性(集)权重的计算

离散模糊测度是概率测度的一般形式[15,16], Marichal[16] 定义了模糊测度熵的概念,以度量模糊测度的不确定性,并证明 Marichal 熵具有类似于 Shannon 熵的特性,例如完备性、介质性等. 现给出λ模糊测度的 Marichal 熵公式如下:

$$H_M(g_\lambda) = \sum_{i=1}^{m} \sum_{S \subseteq A \setminus a_i} \gamma_S[m]\, h[g_\lambda(S \cup a_i)(X) - g_\lambda(S)(X)]. \tag{6}$$

其中

$$h(x) = \begin{cases} -x\ln x,\ x > 0 \\ 0,\ x = 0 \end{cases};$$

$$\gamma_S[m] = (m - |S| - 1)!\,|S|!/m!;$$

$|S|$ 为属性集 S 的势.

依据不同状态下决策属性的 Shapley 值向量、Marichal 熵的定义和性质、λ 模糊测度的定义和性质,可通过如下优化模型:

$$\max_{\lambda, g_\lambda} H_M(g_\lambda(X)),$$

$$\text{s.t.}\begin{cases} \sum_{k=0}^{m-1}\frac{1}{k+1}\sum_{T\subset A\backslash a_i, |T|=k}\lambda^k\sum_{S\subseteq T}\prod_{a_j\in S} g_\lambda(a_j)(X) = I(a_i)(X), \\ \lambda+1=\prod_{i=1}^{n}(1+\lambda g_\lambda(a_i)(X)), \\ \lambda > -1. \end{cases} \tag{7}$$

计算不同状态下属性(集)的权重.

模型(7)的优点在于:1) 结构清晰,便于计算机求解;2) 柔性良好,假若决策者或专家提供其他偏好信息,仅需对模型增加相应的约束条件便可得到相应的解.模型(7)的缺点是较难确定属性(集)权重的解析解,通常仅能确定其数值解.本文利用 Matlab 编程计算属性(集)权重的数值解,并用模糊积分[1]计算方案的评价值,依据方案的评价值对方案进行排序和选优.

5 VRMADM 问题的求解

VRMADM 问题建模和求解可归纳为以下几个步骤:

1) 确定 VRMADM 问题的属性体系,记为 $A=(a_1,\cdots,a_m)$.

2) 确定 R- 状态变权公式.

3) 确定可行方案,记为 $U=(u_1,\cdots,u_n)$.

4) 确定各可行方案在各属性下的取值,并构建初始决策矩阵 $T(T=[t_{ij}]_{n\times m})$.

5) 计算规范化决策矩阵 $Y(Y=[y_{ij}]_{n\times m})$:

如果 $a_j(a_j\in A)$ 为效益型属性,则

$$y_{ij}=t_{ij}/\max_{1\leq i\leq n}t_{ij},\ i=1,\cdots,n,\ j=1,\cdots,m; \tag{8}$$

如果 $a_j(a_j\in A)$ 为成本型属性,则

$$y_{ij}=\min_{1\leq i\leq n}t_{ij}/t_{ij},\ i=1,\cdots,n,\ j=1,\cdots,m. \tag{9}$$

其中 y_{ij} 表示 $u_i(u_i\in U)$ 在属性 $a_j(a_j\in A)$ 下的规范化取值.

6) 确定不同状态下属性(集)的权重.

7) 计算各方案的评价值并对方案进行排序.

通过上述求解 VRMADM 问题的步骤不难看出,确定 R- 状态变权向量是求解 VRMADM 问题的关键之一.在不考虑关联的变权多属性决策分析问题中,状态变权向量反映了属性权重随决策状态的变化规律.李德清等指出,对于不考虑关联的变权多属性决策分析问题,可通过构建均衡函数来确定状态变权向量[10,17].与不考虑关联的变权多属性决策分析问题类似,R- 状态变权向量反映了决策属性 Shapley 值随决策状态向量变化的规律,可参照文献[10,17]构建 VRMADM 问题中属性 Shapley 值的均衡函数,以此确定其 R- 状态变权向量.

6 算 例

随着经济全球化的推进,电子商务网站建设提到企业的日程.选择合适的电子商务网站建设方案,能推动企业的快速发展,帮助企业打开国内外市场;但若开发方案选择不当,也会给企业带来负面影响.

考虑企业电子商务网站开发方案的选择问题.首先确定决策属性为建设风险(a_1),预期经济效益(a_2),预期社会效益(a_3)和成本(a_4).其中 a_1 和 a_4 为成本型属性;a_2 和 a_3 为效益型属性.a_1 和 a_3 为定性属性,方案在 a_1 和 a_3 下的取值通过专家打分得到;a_2 和 a_4 为定量属性,方案在 a_2 和 a_4 下的取值通过专家估算得到.

某企业进行电子商务网站建设前有 3 种方案可供选择:企业自行开发(u_1),由软件公司定制开发(u_2),购买现成的软件包并进行改进(u_3).专家依据上述属性对 3 个候选建设方案进行评估,结果见表 1.试确定该企业电子商务网站建设的最佳方案.

表 1 决策矩阵

	a_1	a_2/ 万元	a_3	a_4/ 万元
u_1	0.15	200	0.70	100
u_2	0.11	175	0.90	150
u_3	0.13	187.5	0.75	135

(1) 计算规范化决策矩阵

利用式(8)和(9)对表 1 进行规范化处理,得到规范化决策矩阵,如表 2 所示.

表 2 规范化决策矩阵

	a_1	a_2	a_3	a_4
u_1	0.778	1.000	0.778	1.000
u_2	1.000	0.875	1.000	0.667
u_3	0.875	0.938	0.833	0.741

(2) 确定属性(集)的权重

用 Satty 提出的 1-9 标度构建决策属性 Shapley 值的判断矩阵.通过对专家和决策者的问卷调查,得到常权情形下决策属性 Shapley 值的判断矩阵

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 5/6 & 5/4 & 5/6 \\ 6/5 & 1 & 3/2 & 1 \\ 4/5 & 2/3 & 1 & 2/3 \\ 6/5 & 1 & 3/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

经检验矩阵 A 满足一致性.利用方根法处理判断矩阵 A,得到常权情形下属性的 Shapley 值向量

$$(I(a_1)\quad I(a_2)\quad I(a_3)\quad I(a_4)) = (0.238\quad 0.286\quad 0.190\quad 0.286).$$

电子商务是未来企业生存和发展的主流方式,为确保网站的成功开发,这里选择均衡度最高的 R-状态变权公式[10]

$$T_j(X) = a_j(X) / \sum_{i=1}^{4} a_i(X),\ j = 1,\cdots,4. \tag{10}$$

依据状态变权公理化定义(式(2))和表 2,可得不同状态下各属性的 Shapley 值. 在此基础上,依据模型(7)计算不同状态下属性的 λ 模糊测度和 λ 值,结果如表 3 所示.

表 3　不同状态下各属性的权重和 λ 值

	$g_\lambda(a_1)$	$g_\lambda(a_2)$	$g_\lambda(a_3)$	$g_\lambda(a_4)$	λ
u_1	0.022	0.055	0.016	0.055	46.883
u_2	0.026	0.030	0.015	0.015	104.294
u_3	0.162	0.217	0.120	0.165	1.722

表 3 中计算得到的 λ 值均为正,表示本 VRMADM 问题的决策属性间存在较强的补充关联. 依据表 3 和 λ 模糊测度的定义,不难计算不同状态下属性(集)的权重.

(3) 计算方案的评价值

依据表 2 和表 3 中的数据以及 Choquet 模糊积分(其计算公式参见文献[18]),计算各方案的评价值 $E(X)$. 其中: $E(u_1) = 0.803$, $E(u_2) = 0.756$, $E(u_3) = 0.833$. 因此 $u_2 \prec u_1 \prec u_3$. 企业既不能以风险为代价追求高收益,也不能承担过高的建设成本. 该企业购买现成软件包并进行改进,从而建立自身的电子商务网站较为合理.

如果该决策问题中属性间相互独立,则可证明 VRMADM 理论的计算结果与不考虑关联的变权多属性决策分析理论的计算结果完全一致;如果该决策问题状态变权向量中各分量均相等,则可证明 VRMADM 理论的计算结果与 RMADM 理论的计算结果完全一致. 这说明与不考虑关联的变权多属性决策分析理论和 RMADM 理论相比,VRMADM 理论更具一般性,而不考虑关联的变权多属性决策分析理论和 RMADM 理论只是 VRMADM 理论的特例.

7　结　论

工程、经济和管理中的诸多问题均可抽象为多属性决策分析问题. 本文首先在传统的变权理论、状态变权理论和模糊测度理论的基础上,构建了 R-变权和 R-状态变权理论;然后基于 Marichal 熵理论讨论了方案评价值未知情形下,VRMADM 问题中属性(集)权重的计算,并给出了 VRMADM 问题的求解步骤;最后用案例说明了 VRMADM 理论和模型在实际决策问题中的应用. 通过对 VRMADM 理论及其应用的研究,可得出以下结论:

1) 与 RMADM 问题和不考虑关联的变权多属性决策分析问题相比,VRMADM 问题更具一般性. 当 R-状态变权向量中各元素取值相等时,VRMADM 问题退化为 RMADM 问题;当属性间关联全部为零时,VRMADM 问题退化为不考虑关联的变权多属性决策分析问题.

2) 与 RMADM 问题和不考虑关联的变权多属性决策分析问题相比,VRMADM 问题更具优越性. 与 RMADM 理论相比,VRMADM 理论削弱了属性间的互补性;与不考虑关联的变权多属性决策分析理论相比,VRMADM 理论考虑到属性的关联,更符合决策实际,其决策结果更值得信赖.

3) VRMADM 理论的提出,不仅扩展了 RMADM 理论,而且扩展了变权多属性决策分析理论.

参考文献(References)

[1] 毕克新, 孙金花, 张铁柱, 等. 基于模糊积分的区域中小企业技术创新测度与评价[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(2): 40-46,61.
(Bi Ke-xin, Sun Jin-hua, Zhang Tie-zhu, et al. Measurement and evaluation of regional techno1ogica1 innovation in small and medium enterprises based on fuzzy integral[J]. Systems Engineering — Theory and Practice, 2005, 25(2): 40-46,61.)

[2] Grabidch M. k-order addtive discrete fuzzy measures and their representation[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 92(2):167-189.

[3] Chiou H K, Tzeng G H, Cheng D C. Evaluating sustainable fishing development strategies using fuzzy MCDM approach[J]. Omega, 2005, 33(3): 223-234.

[4] Tseng F M, Chiu Y J. Hierarchical fuzzy integral stated preference method for Taiwan's broadband servicemarket[J]. Omega, 2005, 33(1): 55-64.

[5] Combarro E F, Miranda P. Identification of fuzzy measures from sample data with genetic algorithms[J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(10): 3046-3066.

[6] Kojadinovic I. Estimation of the weights of interacting criteria from the set of profiles by means of information-theoretic functionals[J]. European J of Operational Research, 2004, 155(3): 741-751.

[7] Tseng F M, Yu C Y. Partitioned fuzzy integral multinomial logit model for Taiwan's internet telephony market[J]. Omega, 2005, 33(3): 267-276.

[8] Kwak K C, Pedrycz W. Face recognition: A study in information fusion using fuzzy integral [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(6): 719-733.

[9] 李德清, 崔红梅, 李洪兴. 基于层次变权的多因素决策[J]. 系统工程学报, 2004, 19(3): 258-263.
(Li De-qing, Cui Hong-mei, Li Hong-xing. Multifactor decision making based on hierarchical variable weight [J]. J of Systems Engineering, 2004, 19(3): 258-263.)

[10] 李德清, 李洪兴. 变权决策中变权效果分析与状态变权向量的确定[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1241-1245.
(Li De-qing, Li Hong-xing. Analysis of variable weights effect and selection of appropriate state variable weights vector in decision making[J]. Control and Decision, 2004, 19(11): 1241-1245.)

[11] Ramanathan R. Data envelopment analysis for weight derivation and aggregation in the analytic hierarchy process [J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(5): 1289-1307.

[12] 王建军, 杨德礼. 供应商选择的 AHP/ Promethee 决策方法[J]. 管理评论, 2006, 18(7): 57-61.
(Wang Jian-jun, Yang De-li. An AHP/ Promethee based method of selecting supplier [J]. Management Review, 2006, 18(7): 57-61.)

[13] 骆正清. AHP 中不一致性判断矩阵调整的新方法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(6): 84-92.
(Luo Zheng-qing. A new method for adjusting inconsistency judgment matrix in AHP systems [J]. Systems Engineering — Theory and Practice, 2004, 24 (6): 84-92.)

[14] 朱建军, 刘士新, 王梦光. 一种新的改进不一致判断矩阵的方法[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(11): 95-98, 110.
(Zhu Jian-jun, Liu Shi-xin, Wang Meng-guang. A new algorithm to improve the inconsistent comparison matrix systems[J]. System Engineering — Theory and Practice, 2003, 23(11): 95-98, 110.)

[15] Kojadinovic I, Marichal J L, Roubens M. An axiomatic approach to the definition of the entropy of a discrete Choquet capacity [J]. Information Sciences, 2005, 172(1/2): 131-153.

[16] Marichal J L. Entropy of discrete Choquet capacities [J]. European J of Operational Research, 2002, 137 (3): 612-624.

[17] 朱勇珍, 李洪兴. 状态变权的公理化体系和均衡函数的构造[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(7): 116-118, 131.
(Zhu Yong-zhen, Li Hong-xing. Axiomatic system of state variable weights and construction of balance functions [J]. Systems Engineering — Theory and Practice, 1999, 19(7): 116-118, 131.)

[18] Chiang J H. Choquet fuzzy integral-based hierarchical networks for decision analysis [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1999, 7(1): 63-71.

(上接第 266 页)

[4] Spognardi A, Di Pietro R. A formal framework for the performance analysis of P2P networks protocols. http://www.cecs.uci.edu/papers/ipdps06/pdfs/1568976643-HOTP2P-paper-1.pdf, 2006.

[5] Gaeta R, Sereno M. Model-based evaluation of search strategies in peer-to-peer networks. http://www.cecs.uci.edu/papers/ipdps06/pdfs/1568976692-HOTP2P-paper-1.pdf, 2006.

[6] Puterman M L. Markov decision processes: Discrete stochastic dynamic programming [M]. New York: Wiley, 1994.

[7] Cooper P R. Introduction to querying theory[M]. New York: Elsevier North Holland, 1981.

[8] Tang H, Xi H S, Yin B Q. Performance optimization of continuous-time Markov control processes based on performance potentials [J]. Int J of Systems Science, 2003, 34(1): 63-71.

[9] Fang H T, Cao X R. Potential-based on-line policy iteration algorithms for Markov decision processes[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(4): 493-505.

[10] Cao X R, Chen H F. Perturbation realization, potentials and sensitivity analysis of Markov processes [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42 (10): 1382-1393.

[11] Cao X R. The potential structure of sample paths and performance sensitivities of Markov systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(12): 2129-2142.

[12] Chong E K P, Ramadge P J. Stochastic optimization of regenerative systems using innitesimal perturbation analysis[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(7): 1400-1410.