

基于改进模糊Borda法的直觉模糊组合多属性群决策方法

张洋铭^{1†}, 陈云翔¹, 王 攀¹, 刘 念²

(1. 空军工程大学 装备管理与安全工程学院, 西安 710051; 2. 94188 部队, 西安 710051)

摘 要: 总结比较 5 种广泛应用的直觉模糊决策方法, 发现针对同一问题, 运用不同的决策方法可能得到不同的决策结果. 针对这一现象, 借鉴明确集范畴内的组合评价思想, 提出基于改进模糊 Borda 法的直觉模糊组合多属性群决策方法, 并对权重信息完全未知的直觉模糊组合决策问题进行研究, 提出解决思路. 将所提方法应用于多机种保障预案决策这一实际问题中, 发现组合决策结果符合一致性检验要求, 说明该方法具有一定的适用性, 可以为直觉模糊决策提供一种新的思路和方法.

关键词: 改进模糊 Borda; 直觉模糊组合; 多属性; 群决策

中图分类号: C93

文献标志码: A

Intuitionistic fuzzy combination multi-attribute group decision-making method based on improved fuzzy Borda method

ZHANG Yang-ming^{1†}, CHEN Yun-xiang¹, WANG Pan¹, LIU Nian²

(1. Equipment Management & Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. 94188 Army, Xi'an 710051, China)

Abstract: When comparing five intuitionistic fuzzy methods used widely in decision-making, it can be found that utilizing different methods could get different results. Therefore, this paper uses combination evaluation sets to present the intuitionistic fuzzy combination multi-attribute group decision-making method based on the improved fuzzy Borda method, and studies the problem of unknown weight combination decision-making. This method is applied to pre-arranged plans decision-making, and it is found that the result of combination decision-making is in accord with the examination requirements, which proves the applicability of this method and that it can present a new idea or method to intuitionistic fuzzy decision-making.

Keywords: improved fuzzy Borda method; intuitionistic fuzzy combination; multi-attribute; group decision-making

0 引 言

直觉模糊集理论的出现^[1-2]推动了不确定环境下多属性决策问题的研究和发展. 近年来, 研究决策信息为直觉模糊集的多属性决策问题层出不穷, 通过查阅大量文献, 发现其中采取的决策方法主要有以下 5 种: 1) 基于 TOPSIS 理想解法, 比较相对贴近度进行决策^[3-6]; 2) 基于得分函数、精确函数以及改进的得分函数概念进行决策^[7-9]; 3) 基于灰色关联系数, 比较相对关联度进行决策^[10-11]; 4) 基于多准则妥协解排序 (VIKOR), 利用折衷评价值进行决策^[12-14]; 5) 基于证据理论, 利用 mass 函数进行决策^[15-16].

上述方法都被单独应用于工程实践、运筹管理等多个方面, 解决了许多多属性决策问题. 但是, 仅

针对文献[5]中所提的白酒质量评价问题, 分别采用文献[5]中的 TOPSIS 方法和文献[8]中已被证明有效的改进得分函数方法, 通过仿真比对发现, 决策结果迥异. 这说明面对同一直觉模糊问题, 采用不同决策方法有可能得到不同的决策结果, 产生群体决策差异.

针对这一问题查阅相关文献, 发现在明确集范畴内已有学者对类似决策差异现象进行了研究^[17-20], 文献[17]提出了基于组合评价方法的农业产业化综合评价模型; 文献[18]提出了多种决策评价方法的集成办法; 文献[19]对组合决策评价的有效性进行了深入探讨, 论证了组合决策的有效性和实用性; 文献[20]和文献[22]对几种组合评价算法进行了比较分

收稿日期: 2016-11-04; 修回日期: 2017-02-27.

基金项目: “十二五”国防预研基金项目(513300102).

作者简介: 张洋铭(1988—), 男, 博士生, 从事装备发展战略与管理决策的研究; 陈云翔(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事装备发展战略与管理决策等研究.

†通讯作者. E-mail: 352186390@qq.com

析,论证得出模糊 Borda法相对于其他组合算法有明显优势,并成功应用模糊 Borda法解决了长三角城市基础设施投资绩效的组合评价问题.基于此,本文提出一种基于改进模糊 Borda法的直觉模糊组合多属性群决策方法,为直觉模糊决策提供一种新的思路.

1 直觉模糊基础理论简介

1.1 直觉模糊集及基本运算

直觉模糊集是对 Zadeh 模糊集的一种扩充和发展,Zadeh 模糊集是直觉模糊集的特殊情形,直觉模糊集的一般定义如下:

定义1 设 X 为一给定的论域,则 X 上的一个直觉模糊集定义为

$$\tilde{A} = \{ \langle x, \mu_{\tilde{A}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x) \rangle | x \in X \}.$$

其中: $\mu_{\tilde{A}}(x_i) : X \rightarrow [0, 1]$ 和 $\nu_{\tilde{A}}(x_i) : X \rightarrow [0, 1]$ 分别代表 \tilde{A} 的隶属函数和非隶属度函数,且对于 \tilde{A} 上的所有 $x \in X, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) + \nu_{\tilde{A}}(x) \leq 1$ 成立.将 $\pi_{\tilde{A}} = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) - \nu_{\tilde{A}}(x)$ 称作 \tilde{A} 中元素 x 的犹豫度,将 $\tilde{A}^c = \{ \langle x_i, \nu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{A}}(x) \rangle | x \in X \}$ 称为 \tilde{A} 的补集.

定义2 若 \tilde{A} 和 \tilde{B} 是论域 X 上的2个直觉模糊集, $\delta > 0$ 是任意实数,则直觉模糊集的基本运算法则如下:

1) 直觉模糊集的和为

$$\tilde{A} + \tilde{B} = \{ \langle x, \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \mu_{\tilde{A}}(x)\mu_{\tilde{B}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x)\nu_{\tilde{B}}(x) \rangle | x \in X \}; \quad (1)$$

2) 直觉模糊集的积为

$$\tilde{A}\tilde{B} = \{ \langle x, \mu_{\tilde{A}}(x)\mu_{\tilde{B}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x) + \nu_{\tilde{B}}(x) - \nu_{\tilde{A}}(x)\nu_{\tilde{B}}(x) \rangle | x \in X \}; \quad (2)$$

3) 直觉模糊集的数乘为

$$\delta\tilde{A} = \{ \langle x, 1 - (1 - \mu_{\tilde{A}}(x))^\delta, \nu_{\tilde{A}}(x)^\delta \rangle | x \in X \}; \quad (3)$$

4) 直觉模糊集的乘方为

$$\tilde{A}^\delta = \{ \langle x, 1 - (1 - \mu_{\tilde{A}}(x))^\delta, (1 - \nu_{\tilde{A}}(x))^\delta \rangle | x \in X \}. \quad (4)$$

定义3 直觉模糊集欧几里得距离为

$$d_2(\tilde{A}, \tilde{B}) = \left[\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n [(\mu_{\tilde{A}}(x_j) - \mu_{\tilde{B}}(x_j))^2 + (\nu_{\tilde{A}}(x_j) - \nu_{\tilde{B}}(x_j))^2 + (\pi_{\tilde{A}}(x_j) - \pi_{\tilde{B}}(x_j))^2] \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

如果不同元素具有不同的权重,则需要使用加权直觉模糊距离.

定义4 直觉模糊得分函数^[8]为

$$S_{\tilde{A}} = \mu_{\tilde{A}}(x) + \frac{(\mu_{\tilde{A}}(x) - \nu_{\tilde{A}}(x))\pi_{\tilde{A}}}{1 - (\mu_{\tilde{A}}(x) - \nu_{\tilde{A}}(x))\pi_{\tilde{A}}}. \quad (6)$$

定义5 表征直觉模糊集模糊程度的直觉模糊熵^[9]为

$$E_{\tilde{A}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1 - |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - \nu_{\tilde{A}}(x_i)| + \pi_{\tilde{A}}(x_i)}{1 + |\mu_{\tilde{A}}(x_i) - \nu_{\tilde{A}}(x_i)| + \pi_{\tilde{A}}(x_i)}. \quad (7)$$

定义6 为了研究直觉模糊群决策问题,需要对决策群体的决策信息进行集结,直觉模糊集加权集结算子 IFWA 为

$$\text{IFWA}(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n) = \left\langle 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_j)^{\lambda_j}, \prod_{j=1}^n \nu_j^{\lambda_j} \right\rangle, \quad (8)$$

其中 $\lambda_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 是决策者的权重向量.

1.2 直觉模糊决策方法

直觉模糊 TOPSIS 决策. 直觉模糊 TOPSIS 决策方法首先确定各属性正理想解和负理想解,计算群体决策矩阵中方案与正负理想解的距离,比较相对贴近度 C_i 进行决策,贴近度越大越好.

直觉模糊得分函数决策. 直觉模糊得分函数决策方法由来已久,很多学者对得分函数进行改进,在不同的改进型得分函数基础上进行决策,计算群体决策矩阵的得分函数矩阵,得到综合决策值 F_i ,比较 F_i 的大小进行决策, F_i 越大越好.

直觉模糊灰色关联决策. 直觉模糊灰色关联决策是在已知理想解的基础上,计算每个方案与理想方案的关联度,通过比较相对关联度 ξ_i 进行决策, ξ_i 越大越好.

直觉模糊 VIKOR 决策. 直觉模糊 VIKOR 决策是一个求解折衷决策值 Q_i 的过程,折衷决策值 Q_i 越小越好.

直觉模糊证据决策. 直觉模糊和证据理论在处理模糊和冲突信息时有各自的优势和缺陷,将二者有机结合可以很好地解决模糊和冲突问题,直觉模糊证据决策是在群体决策矩阵基础上利用证据合成的 Mass 函数进行决策, M 越大越好.

2 直觉模糊组合决策方法

假设有某一多属性决策问题需要解决, $d = \{d_1, d_2, \dots, d_k\}$ 为决策者群体集合; $D = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ 为第 k 个决策者的决策矩阵;决策者的权重为 $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$;利用直觉模糊集结算子 IFWA 进行信息集结后的群体决策矩阵为

$$D' = [r_{ij}]_{m \times n} = [\langle \mu'_{ij}, \nu'_{ij} \rangle]_{m \times n},$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n;$$

$N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 为属性集; $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 为方案集;属性权重为 $w = \{w_1, w_2, \dots,$

w_n }. 其中: K 为决策者个数, m 为方案个数, n 为属性指标个数.

2.1 直觉模糊组合决策模型建立

由文献 [22-26] 可知, 影响直觉模糊决策结果的因素主要包括集合算子、决策方法和排序规则. 也就是说, 当不同种类的直觉模糊决策方法导致决策差异现象出现时, 在集合算子不变的情况下, 可以从排序决策角度出发, 将决策结果相一致的决策方法进行组合, 实施组合决策. 基于此, 借鉴明确集范畴内组合评价的思想和流程^[27-31], 可以实施直觉模糊组合决策的方法步骤如下.

Step 1: 基于单一直觉模糊决策方法分别进行决策, 若决策结果完全一致, 则该决策结果为理想决策结果, 无需进行组合决策; 若决策结果出现差异, 则需要组合决策.

Step 2: 针对单一直觉模糊方法的决策结果实施组合前的一致性检验, 通过一致性检验的那几种方法才可以进行组合, 不能通过的方法将被剔除.

Step 3: 运用组合决策算法对通过一致性检验的决策方法进行组合决策, 可以采用诸如 Borda 法、模糊 Borda 法等组合算法.

Step 4: 进行组合后的一致性检验, 若通过一致性检验, 则说明与理想决策结果接近, 否则重新选取组合算法进行决策.

Step 5: 选取最优决策结果.

直觉模糊组合决策流程如图 1 所示.

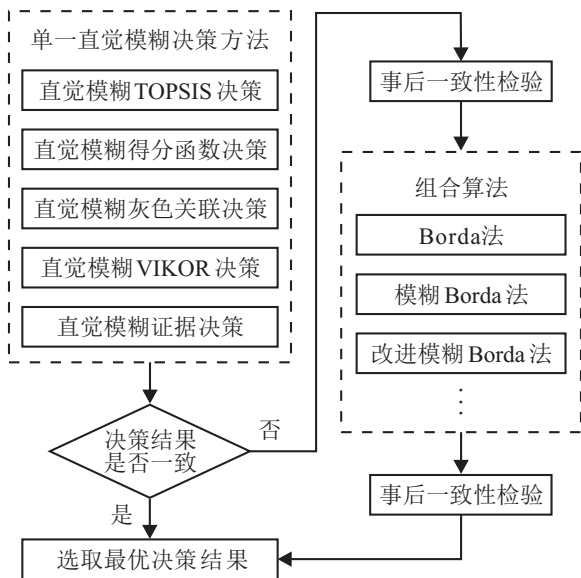


图 1 直觉模糊组合决策模型

2.2 Kendall-W 事前一致性检验

根据文献 [20] 中的分析, Kendall-W 系数可以对多种方法的决策结果进行一致性检验, 其目的是构造

一个统计量 $X^2 = g(m - 1)W$. 其中

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^m r_i^2}{g^2 m(m^2 - 1)} - \frac{3(m + 1)}{m - 1}, \quad (9)$$

$r_i = \sum_{j=1}^g y_{ij}$, m 为方案数, g 为方法数, y_{ij} 为第 i 个方案在第 j 种方法的排序.

检验 X^2 服从自由度为 $m - 1$ 的 X^2 分布, 给定显著性水平 α , 若查表得 $X^2 > X_{\alpha}^2(m - 1)$, 则认为各种决策方法在显著性水平 α 上具有一致性. 通过该方法对各单一决策方法进行一致性检验, 选取决策结果一致的几种方法进行组合决策.

2.3 Spearman 事后一致性检验

对于组合决策后的结果, 需要通过 Spearman 系数进行事后一致性检验^[21], 其目的是构造统计量 $t_k = \rho_k \sqrt{\frac{m - 2}{1 - \rho_k^2}}$, $\rho_k = \frac{1}{g} \sum_{j=1}^g \rho_{jk}$, $k = 1, 2, \dots, p$. 其中

$$\rho_{jk} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^f (y_{ik} - y_{ij})^2}{m(m^2 - 1)}, \quad j = 1, 2, \dots, g, k = 1, 2, \dots, p, \quad (10)$$

p 为组合算法种类, y_{ik} 为第 i 个方案在第 k 种组合方法的排序. t_k 服从自由度为 $m - 2$ 的 t 分布, 若查表得 $t_k > t_{\alpha}(m - 2)$, 则说明组合算法与单一决策方法结果是一致的. 同时, t_k 最大的算法为最佳组合算法.

3 改进模糊 Borda 组合直觉模糊决策算法

3.1 Borda 法

Borda 组合算法的基本思想是通过比较不同决策方法中决策方案或对象的排序值, 确定对象的 Borda 分, 从而进行排序决策.

3.2 模糊 Borda 法

模糊 Borda 法认为 Borda 法中所谓“序关系”实质上是一种定性排序, 应按照不同方法中决策值进行定量的比较, 即根据每个方案在不同决策方法下的决策值计算直觉模糊隶属优度, 根据隶属优度比较确定模糊 Borda 分数, 如此进行排序.

3.3 改进模糊 Borda 法

由文献 [31-34] 可知, 对于这种排序问题, 不仅要考虑顺序值, 也要考虑不同方法的决策值. 而且, 由于不同方法的决策值属性不同, 有“效益型”和“成本型”的差异, 不能一概而论. 因此, 本文提出改进的模糊 Borda 法, 设计一种转化机制, 将定性序关系与定量

决策关系相结合,其步骤如下所示.

Step 1: 计算隶属优度

$$\mu_i^j = \begin{cases} \frac{z_i^j}{\max(z_1^j, z_2^j, \dots, z_m^j)}, & z_i^j \text{ 为效益型决策值;} \\ 1 - \frac{z_i^j}{\max(z_1^j, z_2^j, \dots, z_m^j)}, & z_i^j \text{ 为成本型决策值;} \end{cases} \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq g. \quad (11)$$

其中 z_i^j 为第 i 个方案在第 j 种方法中的决策值.

Step 2: 计算第 i 个方案出现第 h 个名次的模糊频数

$$f_{ih} = \eta_i \mu_i E = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{im})_{1 \times m}^T, \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq h \leq m. \quad (12)$$

其中: $\mu_i = \text{diag}(\mu_i^1, \mu_i^2, \dots, \mu_i^g)$; $E = (1, 1, \dots, 1)_{1 \times g}^T$; $\eta_i = [\eta_{ih}^j]_{m \times g}$. 如果第 i 个方案在第 j 种方法中的排序是第 h 名, 则记 $\eta_{ih}^j = 1$, 其余的 $\eta_{il}^j = 0, l \neq h$.

Step 3: 计算名次 h 的转化分数

$$Q_h = m - h + 1. \quad (13)$$

Step 4: 计算改进的模糊Borda得分

$$GFB_i = \sum_{h=1}^m f_{ih} Q_h. \quad (14)$$

根据 GFB_i 的大小对决策结果进行调整.

可以发现,与以往的组合算法相比,改进的模糊Borda法不仅考虑不同决策方法下的排序值,而且融合不同方法的决策值,更能反映出不同方法对决策结果的直接影响.

3.4 改进模糊Borda法有效性实验

采用文献[13]中决策信息,即决策矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} \langle 0.603, 0.265 \rangle & \langle 0.768, 0.203 \rangle & \langle 0.602, 0.242 \rangle \\ \langle 0.582, 0.183 \rangle & \langle 0.485, 0.127 \rangle & \langle 0.382, 0.404 \rangle \\ \langle 0.638, 0.200 \rangle & \langle 0.653, 0.174 \rangle & \langle 0.781, 0.187 \rangle \\ \langle 0.800, 0.127 \rangle & \langle 0.712, 0.100 \rangle & \langle 0.520, 0.263 \rangle \end{bmatrix},$$

属性权重为 $w = (0.31, 0.44, 0.25)$, 分别采用直觉模糊TOPSIS、得分函数、灰色关联、VIKOR以及Borda法排序、模糊Borda法和改进模糊Borda法实施决策和组合决策,可得决策排序结果如表1和表2所示.

表1 模糊Borda法有效性分析

方法	$M_4 > M_3 > M_1 > M_2$	$M_4 > M_3 > M_2 > M_1$	$M_3 > M_4 > M_1 > M_2$
TOPSIS			✓
得分函数		✓	
灰色关联	✓		
VIKOR	✓		
Borda	✓		
模糊Borda	✓		
改进模糊Borda	✓		

表2 直觉模糊组合算法结果比较

组合算法	M_1	M_2	M_3	M_4
Borda	1	0	2	3
模糊Borda	2.115	0.055	12.283	14.703
改进模糊Borda	5.600	2.378	12.168	14.703

由文献[15]可知,一致程度越高的决策排序越接近于理想决策.从表1可以看出,模糊Borda法的决策排序结果与理想决策结果是一致的,而且可以直观地看出,采用不同决策方法确实有可能得到不同的决策结果,但是通过组合决策排序方法可以得到更理想的决策结果.

由表2可以发现3种组合算法的差异: Borda法单纯考虑了整合多种决策方法的排序结果,模糊Borda法只考虑决策值结果的隶属优度问题,并且没有考虑到决策值的“效益属性”或“成本属性”,这两种方法都可能“过奖”或“过贬”决策结果,而改进的模糊Borda法可以充分考量排序结果和决策值的双

重影响,得到更加理想的决策结果.

4 考虑权重信息完全未知的直觉模糊组合多属性群决策

前文已经介绍了直觉模糊组合多属性决策的方法步骤,对于个体决策者,只需要收集其对各属性指标的直觉模糊决策信息,便可以进行方案决策.但是,对于群体决策而言,不仅涉及到决策信息的集结问题,还要考虑群体决策权重,而且往往出现群体专家决策权重和属性权重信息完全未知的情况,需要另外对这样一类权重信息完全未知的直觉模糊组合多属性群决策问题进行研究.

4.1 基于投影法的专家权重确定和信息集结

文献[31-34]中对专家权重问题的阐释认为,在属性权重未知的情况下,想要准确判断专家权重比较困难,因此应该从侧面入手,利用投影法^[30]确定第 k 个专家针对方案 M_i 关于属性 C_j 的专家权重 λ_{ij}^k 来集

结 k 个专家的决策信息, 最终形成综合决策矩阵. 直觉模糊集的投影表示为

$$P_{rjBA} = \frac{\sum_i^m (\mu_{\alpha i} \mu_{\beta i} + \nu_{\alpha i} \nu_{\beta i} + \pi_{\alpha i} \pi_{\beta i})}{|B|}, \quad (15)$$

其中 αi 和 βi 分别为直觉模糊集 A 和 B 的分量. 投影越大, 则 A, B 越接近, 对于同一方案的同一属性而言, 专家决策信息越接近各专家平均值说明越能得到大家的支持, 越应赋予较大的权重, 因此求 k 个专家的平均决策矩阵^[32] 为

$$\bar{D} = (\langle \bar{\mu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij} \rangle)_{m \times n}. \quad (16)$$

其中: $\bar{\mu}_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mu_{ij}^k, \bar{\nu}_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \nu_{ij}^k.$

由式(15)得到第 k 专家评判第 i 个方案的第 j 个属性对专家平均决策信息的投影^[33-34] 为

$$P_{rj\langle \bar{\mu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij} \rangle \langle \mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k \rangle} = \frac{\mu_{ij}^k \bar{\mu}_{ij} + \nu_{ij}^k \bar{\nu}_{ij} + \pi_{ij}^k \bar{\pi}_{ij}}{|\langle \bar{\mu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij} \rangle|}, \quad (17)$$

则有

$$\lambda_{ij}^k = P_{rj\langle \bar{\mu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij} \rangle \langle \mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k \rangle} / \sum_{k=1}^K P_{rj\langle \bar{\mu}_{ij}, \bar{\nu}_{ij} \rangle \langle \mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k \rangle}. \quad (18)$$

在得到所有专家针对某一方案和某一属性的权重之后, 则可以依次集结得到综合决策矩阵

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1n} \\ I_{21} & I_{22} & \cdots & I_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{m1} & I_{m2} & \cdots & I_{mn} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中 $I_{ij} = \sum_{k=1}^K \lambda_{ij}^k \langle \mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k \rangle.$

4.2 基于直觉模糊熵的属性权重确定方法

利用 4.1 节中介绍的专家权重确定方法可以集结决策信息得到综合决策矩阵 I , 由式(7)可以计算得到综合决策矩阵的熵矩阵 E_I , 归一化得到

$$E_I = \begin{bmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & \cdots & \bar{E}_{1n} \\ \bar{E}_{21} & \bar{E}_{22} & \cdots & \bar{E}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{E}_{m1} & \bar{E}_{m2} & \cdots & \bar{E}_{mn} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

其中 $\bar{E}_{ij} = \frac{E_{ij}}{\max\{E_{1j}, E_{2j}, \dots, E_{mj}\}}.$
计算属性权重为

$$w_j = \frac{1 - \theta_j}{n - Z}. \quad (21)$$

其中: $\theta_j = \sum_{i=1}^m \bar{E}_{ij}, Z = \sum_{t=1}^n \theta_t.$

确定了群体专家权重和属性权重之后, 再按照图 1 所示步骤进行组合决策, 可以解决这类较为复杂的组合多属性群决策问题.

5 应用分析

随着多机种综合保障基地的建设和发展, 同一机场往往同时面临多种机型的保障任务, 需要针对任务制定详细的保障预案. 现在为圆满完成保障任务, 保障部门经过研究, 制定了 M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 和 M_6 六个保障预案, 特邀请来自上级机关、飞行人员、保障分队和科研院所的甲、乙、丙、丁 4 位专家对保障预案进行评估决策, 主要从保障预案的安全性、任务完成率、经济性、和高效性 4 个方面入手进行分析. 为体现对各领域专家的充分尊重, 上级并未直接给出专家权重和属性权重信息, 4 位专家的决策信息如下:

$$D_1 = \begin{bmatrix} \langle 0.6100, 0.2300 \rangle & \langle 0.2500, 0.5600 \rangle \\ \langle 0.1100, 0.8100 \rangle & \langle 0.2500, 0.6200 \rangle \\ \langle 0.5100, 0.4200 \rangle & \langle 0.3000, 0.6000 \rangle \\ \langle 0.3900, 0.5400 \rangle & \langle 0.5500, 0.3300 \rangle \\ \langle 0.7300, 0.1200 \rangle & \langle 0.1300, 0.5900 \rangle \\ \langle 0.4900, 0.2400 \rangle & \langle 0.5900, 0.2400 \rangle \\ \langle 0.4700, 0.4500 \rangle & \langle 0.1900, 0.7700 \rangle \\ \langle 0.3800, 0.4900 \rangle & \langle 0.2000, 0.7100 \rangle \\ \langle 0.2600, 0.5300 \rangle & \langle 0.1800, 0.7300 \rangle \\ \langle 0.4500, 0.5100 \rangle & \langle 0.8000, 0.1200 \rangle \\ \langle 0.3900, 0.5400 \rangle & \langle 0.1900, 0.7400 \rangle \\ \langle 0.2900, 0.6400 \rangle & \langle 0.5900, 0.3400 \rangle \end{bmatrix},$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} \langle 0.5400, 0.2700 \rangle & \langle 0.2200, 0.6200 \rangle \\ \langle 0.2600, 0.6300 \rangle & \langle 0.2500, 0.5700 \rangle \\ \langle 0.3900, 0.5400 \rangle & \langle 0.7900, 0.1300 \rangle \\ \langle 0.4900, 0.3500 \rangle & \langle 0.5500, 0.3600 \rangle \\ \langle 0.6500, 0.3200 \rangle & \langle 0.3500, 0.5200 \rangle \\ \langle 0.5500, 0.3200 \rangle & \langle 0.6500, 0.3400 \rangle \\ \langle 0.5100, 0.4100 \rangle & \langle 0.3900, 0.4800 \rangle \\ \langle 0.3200, 0.3500 \rangle & \langle 0.5300, 0.3400 \rangle \\ \langle 0.7300, 0.2200 \rangle & \langle 0.1900, 0.6500 \rangle \\ \langle 0.6400, 0.2600 \rangle & \langle 0.4500, 0.4200 \rangle \\ \langle 0.4800, 0.4200 \rangle & \langle 0.2500, 0.4200 \rangle \\ \langle 0.7500, 0.2200 \rangle & \langle 0.6500, 0.2200 \rangle \end{bmatrix},$$

$$D_3 = \begin{matrix} \rightarrow \\ \left[\begin{array}{ll} \langle 0.4300, 0.5300 \rangle & \langle 0.1800, 0.6500 \rangle \\ \langle 0.2600, 0.7100 \rangle & \langle 0.2300, 0.6600 \rangle \\ \langle 0.3300, 0.5900 \rangle & \langle 0.4200, 0.3900 \rangle \\ \langle 0.2500, 0.6200 \rangle & \langle 0.4600, 0.4200 \rangle \\ \langle 0.5600, 0.4200 \rangle & \langle 0.7600, 0.2200 \rangle \\ \langle 0.4600, 0.4600 \rangle & \langle 0.5400, 0.3900 \rangle \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{ll} \langle 0.4300, 0.3900 \rangle & \langle 0.2400, 0.7300 \rangle \\ \langle 0.2500, 0.5900 \rangle & \langle 0.1800, 0.7400 \rangle \\ \langle 0.4700, 0.5200 \rangle & \langle 0.1200, 0.6800 \rangle \\ \langle 0.2900, 0.5900 \rangle & \langle 0.3300, 0.6100 \rangle \\ \langle 0.6900, 0.2700 \rangle & \langle 0.4600, 0.4100 \rangle \\ \langle 0.5700, 0.3000 \rangle & \langle 0.3600, 0.5200 \rangle \end{array} \right] \\ \leftarrow \end{matrix}$$

$$D_4 = \begin{matrix} \rightarrow \\ \left[\begin{array}{ll} \langle 0.3600, 0.4100 \rangle & \langle 0.6500, 0.1800 \rangle \\ \langle 0.5600, 0.1100 \rangle & \langle 0.2900, 0.5600 \rangle \\ \langle 0.2300, 0.5500 \rangle & \langle 0.5100, 0.3500 \rangle \\ \langle 0.6300, 0.3500 \rangle & \langle 0.5500, 0.2500 \rangle \\ \langle 0.4300, 0.5500 \rangle & \langle 0.4500, 0.5300 \rangle \\ \langle 0.5300, 0.3700 \rangle & \langle 0.6300, 0.2500 \rangle \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{ll} \langle 0.5400, 0.3300 \rangle & \langle 0.3400, 0.6300 \rangle \\ \langle 0.2600, 0.5900 \rangle & \langle 0.4700, 0.4600 \rangle \\ \langle 0.2700, 0.5800 \rangle & \langle 0.3400, 0.5600 \rangle \\ \langle 0.4400, 0.5300 \rangle & \langle 0.6400, 0.2300 \rangle \\ \langle 0.7300, 0.2500 \rangle & \langle 0.5900, 0.2700 \rangle \\ \langle 0.1800, 0.6900 \rangle & \langle 0.4100, 0.5200 \rangle \end{array} \right] \\ \leftarrow \end{matrix}$$

首先利用式(15)~(19)可以得到群体决策矩阵

$$D' = \begin{matrix} \rightarrow \\ \left[\begin{array}{ll} \langle 0.4943, 0.3540 \rangle & \langle 0.2762, 0.5513 \rangle \\ \langle 0.2239, 0.6892 \rangle & \langle 0.2537, 0.6054 \rangle \\ \langle 0.3618, 0.5289 \rangle & \langle 0.5398, 0.3371 \rangle \\ \langle 0.4414, 0.4664 \rangle & \langle 0.5294, 0.3383 \rangle \\ \langle 0.6083, 0.3311 \rangle & \langle 0.4329, 0.4624 \rangle \\ \langle 0.5090, 0.3488 \rangle & \langle 0.6054, 0.3033 \rangle \end{array} \right. \\ \left. \begin{array}{ll} \langle 0.4893, 0.3951 \rangle & \langle 0.2758, 0.6733 \rangle \\ \langle 0.2977, 0.5219 \rangle & \langle 0.3092, 0.6013 \rangle \\ \langle 0.4382, 0.4619 \rangle & \langle 0.1983, 0.6628 \rangle \\ \langle 0.4537, 0.4754 \rangle & \langle 0.5978, 0.3013 \rangle \\ \langle 0.5978, 0.3492 \rangle & \langle 0.3579, 0.4871 \rangle \\ \langle 0.4480, 0.4635 \rangle & \langle 0.5128, 0.3899 \rangle \end{array} \right] \\ \leftarrow \end{matrix}$$

利用式(20)和(21),可以计算得到属性权重为

$$w = (0.2486, 0.2371, 0.3117, 0.2026),$$

进而运用各种单一直觉模糊决策方法对问题进行求解,可以得到直觉模糊TOPSIS相对贴度为

$$C = (0.4497, 0.1224, 0.4321, 0.6951, 0.6724, 0.7381);$$

直觉模糊得分函数决策值为

$$F = (0.1510, 0.0924, 0.1466, 0.2024, 0.1997, 0.2079);$$

直觉模糊灰色相对关联度为

$$XDGLD = (0.4717, 0.2911, 0.4667, 0.6010, 0.6334, 0.6192);$$

直觉模糊折衷决策值为

$$Q = (0.4856, 1.0000, 0.4386, 0.1668, 0, 0.1350);$$

直觉模糊Mass函数为

$$M = (0.0798, 0.0614, 0.0678, 0.1196, 0.1063, 0.1119).$$

因此,单一直觉模糊方法的决策结果如表3所示.其中,方法1~方法5分别指直觉模糊TOPSIS、直觉模糊得分函数、直觉模糊灰色、直觉模糊VIKOR、直觉模糊证据方法.

表3 单一直觉模糊方法决策结果

	方法1 排序	方法2 排序	方法3 排序	方法4 排序	方法5 排序
M_1	0.4497 4	0.1510 4	0.4717 4	0.4856 5	0.0798 4
M_2	0.1224 6	0.0924 6	0.2911 6	1.000 6	0.0614 6
M_3	0.4321 5	0.1466 5	0.4667 5	0.4386 4	0.0678 5
M_4	0.6951 2	0.2024 2	0.6010 3	0.1668 3	0.1196 1
M_5	0.6724 3	0.1997 3	0.6334 1	0 1	0.1063 3
M_6	0.7381 1	0.2079 1	0.6192 2	0.1350 2	0.1119 2

下面对多种方法决策结果进行事前一致性检验,由式(9)可得在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时,有

$$X^2 = 22.029 > X_{\alpha=0.01}^2(5) = 15.086.$$

因此上述方法是符合事前一致性检验的,可以进行组合决策.

利用改进的模糊Borda法(11)~(14)可得改进模糊Borda法得分为

$$FB = (9.2139, 2.5833, 6.5038, 20.0381, 17.0419, 22.2404).$$

根据得到的改进模糊Borda法对决策结果重新排序,并通过式(20)进行事后一致性检验,有

$$t = 4.3500 > t_{\alpha=0.01}(4) = 3.7469.$$

因此,文中利用改进模糊Borda法进行的直觉模糊组

合决策方法与原始的单一决策方法结果是一致的,改进模糊Borda法是可行的,根据组合决策得到的最终决策方案为

$$M_6 > M_4 > M_5 > M_1 > M_3 > M_2,$$

“>”代表“优于”。因此,经过专家群体决策,保障预案 M_6 最优, M_4 次之, M_2 最差,应该选取保障预案 M_6 进行保障, M_4 可以作为备选预案。

6 结论

直觉模糊决策方法已经得到广泛应用,但是经过相应的仿真计算发现,采用不同的决策方法有可能对决策结果造成差异。本文针对单一直觉模糊决策方法可能出现决策差异这一现象,借鉴明确集范畴内的组合评价思想,融合单一直觉模糊决策方法,提出了直觉模糊组合多属性群决策方法及其流程步骤。特别是对于权重信息未知的直觉模糊组合多属性群决策问题进行研究,给出了解决思路。将所提直觉模糊组合决策方法应用于实际决策中,对多机种保障预案决策问题进行了应用分析,决策结果经过一致性检验,符合验证要求,说明所提方法对此类问题有一定的适用性,能够对直觉模糊决策问题提供一种新的思路。下一步可以从组合动态角度出发,对直觉模糊组合动态决策问题进行深入研究。

参考文献(References)

- [1] Atanassov K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [2] Abbas S E. On intuitionistic fuzzy compactness[J]. *Information Sciences*, 2005, 173(1/3): 75-91.
- [3] 王毅, 雷英杰, 陆艳丽. 基于直觉模糊集的多属性模糊决策方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, 29(12): 2060-2063.
(Wang Y, Lei Y J, Lu Y L. Multiple attribute decision making method based on intuitionistic fuzzy sets[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, 29(12): 2060-2063.)
- [4] 谭春桥. 基于区间值直觉模糊集的TOPSIS多属性决策[J]. *模糊系统与数学*, 2010, 24(1): 92-97.
(Tan C Q. TOPSIS multiple attribute decision making based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2010, 24(1): 92-97.)
- [5] 唐润, 王海燕. 基于直觉模糊-TOPSIS群决策方法的白酒质量评价[J]. *系统工程*, 2012, 30(8): 97-100.
(Tang R, Wang H Y. Liquor quality evaluation based on intuitionistic fuzzy-topsis group decision method[J]. *Systems Engineering*, 2012, 30(8): 97-100.)
- [6] 王超, 陈云翔, 蔡忠义. 基于TOPSIS的直觉模糊集多属性群决策方法[J]. *火力与指挥控制*, 2015, 40(9): 11-15.
(Wang C, Chen Y X, Cai Z Y. Method on intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision-making based on TOPSIS[J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(9): 11-15.)
- [7] 王坚强, 王佩. 基于直觉模糊熵的直觉语言多准则决策方法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(11): 1694-1698.
(Wang J Q, Wang P. Intuitionistic linguistic fuzzy multi-criteria decision-making method based on intuitionistic fuzzy entropy[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(11): 1694-1698.)
- [8] 吴冲, 刘千, 万翔宇. 基于改进得分函数的直觉模糊多属性决策方法[J]. *统计与信息论坛*, 2014, 29(1): 3-8.
(Wu C, Liu Q, Wan X Y. Intuitionistic fuzzy multi-criteria decision-making approach based on prospect score function[J]. *Statistics & Information Forum*, 2014, 29(1): 3-8.)
- [9] 孙贵玲, 张建华. IVIFS环境下基于模糊熵和得分函数的多准则决策方法[J]. *模糊系统与数学*, 2013, 27(1): 113-117.
(Sun G L, Zhang J H. Decision-making method based on fuzzy entropy and score function under IVIFS environment[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2013, 27(1): 113-117.)
- [10] 李小林, 张力娜. 基于灰色关联分析的直觉模糊集多属性Web服务选择[J]. *河南师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(6): 152-157.
(Li X L, Zhang L N. Intuitionistic fuzzy multiple attribute web service selection based on grey correlation analysis[J]. *J of He'nan Normal University: Natural Science Edition*, 2015, 43(6): 152-157.)
- [11] 杨红军, 董礼. 基于直觉模糊集多属性决策的灰色关联分析法[J]. *微电子学与计算机*, 2011, 28(9): 155-157.
(Yang H J, Dong L. Method of grey relational analysis for multiple attribute decision making based on intuitionistic fuzzy sets[J]. *Microelectronic & Computer*, 2011, 28(9): 155-157.)
- [12] 杨山亮, 王鹏, 李革. 基于直觉模糊VIKOR方法的装备优选群决策模型[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(9): 2169-2175.
(Yang S J, Wang P, Li G. Group decision making for weapon selection using extended VIKOR method under intuitionistic fuzzy environment[J]. *J of System Simulation*, 2015, 27(9): 2169-2175.)
- [13] 张市芳. 直觉模糊多属性决策的VIKOR方法[J]. *西安工业大学学报*, 2015, 35(3): 182-185.
(Zhang S F. VIKOR method for intuitionistic fuzzy multi-attribute group decision making[J]. *J of Xi'an Technological University*, 2015, 35(3): 182-185.)
- [14] Tong L, Chen C, Wang C. Optimization of multi-response process using the VIKOR method[J]. *Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 31(11/12): 1049-1057.
- [15] Zhong L Y, Yu Y J. A group decision making model with hybrid intuitionistic fuzzy information[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2015, 87: 202-212.

- [16] 江红莉, 何建敏, 庄亚明. 基于直觉模糊集和证据理论的群决策方法[J]. 控制与决策, 2012, 27(5): 752-756.
(Jiang H L, He J M, Zhuang Y M. Approach to group decision making based on intuitionistic fuzzy sets and evidence theory[J]. Control and Decision, 2012, 27(5): 752-756.)
- [17] 史超, 程咏梅, 潘泉. 基于直觉模糊和证据理论的混合型偏好信息集结方法[J]. 控制与决策, 2012, 27(8): 1164-1168.
(Shi C, Cheng Y M, Pan Q. Method to aggregate hybrid preference information based on intuitionistic fuzzy and evidence theory[J]. Control and Decision, 2012, 27(8): 1164-1168.)
- [18] 王刚, 黄丽华, 高阳. 基于方法集的农业产业化综合评价模型[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(4): 162-168.
(Wang G, Huang L H, Gao Y. Comprehensive evaluation model of agriculture industrialization based on model set[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2009, 29(4): 162-168.)
- [19] 陈国宏, 李美娟. 基于方法集的综合评价方法集化研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(1): 102-106.
(Chen G H, Li M J. The research on the comprehensive evaluation method integration based on method set[J]. Chinese J of Management Science, 2004, 12(1): 102-106.)
- [20] 郭亚军, 马赞福, 张发明. 组合评价方法的相对有效性分析及应用[J]. 中国管理科学, 2009, 17(2): 125-130.
(Guo Y J, Ma Z F, Zhang F M. Validity analysis of several kinds of combination evaluation methods[J]. Chinese J of Management Science, 2009, 17(2): 125-130.)
- [21] 程敏, 李晋. 基于组合评价的长三角城市基础设施投资绩效研究[J]. 运筹与管理, 2013, 22(2): 207-212.
(Cheng M, Li J. Research on the infrastructure investment performance of yangtze river delta based on combination evaluation method[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(2): 207-212.)
- [22] Wan S P, Wan F, Dong J Y. A preference degree for intuitionistic fuzzy values and application to multi-attribute group decision making[J]. Information Sciences, 2016, 370/371: 127-146.
- [23] Wan S P, Wang F, Dong J Y. A novel group decision making method with intuitionistic fuzzy preference relations for RFID technology selection[J]. Applied Soft Computing, 2016, 38: 405-422.
- [24] Wan S P, Wang F, Lin L L, et al. An intuitionistic fuzzy linear programming method for logistics outsourcing provider selection[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 82: 80-94.
- [25] Wan S P, Xu G L, Dong J Y. A novel method for group decision making with inter-valued Atanassov intuitionistic fuzzy preference relations[J]. Information Sciences, 2016, 372: 53-71.
- [26] Wan S P, Wang F, Dong J Y. A novel risk attitudinal ranking method for intuitionistic fuzzy values and application to MADM[J]. Applied Soft Computing, 2016, 40: 98-112.
- [27] Yang H. Comprehensive evaluation of online peer-to-peer lending on the province-level regions in china based on generalized principle component analysis[J]. Open J of Business and Management, 2016, 4: 171-176.
- [28] Xu X M, Niu D X, Qiu J P. Comprehensive evaluation of coordination development for regional power grid and renewable energy power supply based on improved matter element extension and TOPSIS method for sustainability[J]. Sustainability, 2016, 8(2): 1-17.
- [29] 刘敏霞, 柯家伟, 谢剑. 基于改进模糊Borda法的工作疲劳评价应用[J]. 科技导报, 2012, 30(25): 58-62.
(Liu M X, Ke J W, Xie J. Application of evaluation on working fatigue based on improved fuzzy borda method[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(25): 58-62.)
- [30] 苏为华, 陈骥. 模糊Borda法的缺陷分析及其改进思路[J]. 统计研究, 2007, 24(7): 58-64.
(Su W H, Chen J. The defects of fuzzy borda method and it's improvement[J]. Statistical Research, 2007, 24(7): 58-64.)
- [31] 张英俊, 马培军. 属性权重不确定条件下的区间直觉模糊多属性决策[J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 220-228.
(Zhang Y J, Ma P J. Multi-attribute decision making with uncertain attribute weight information in the framework of interval-valued intuitionistic fuzzy sets[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 220-228.)
- [32] 赵萌, 任嵘嵘. 基于直觉模糊熵的专家权重确定方法及其验证[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1233-1239.
(Zhao M, Ren R R. Experts' weights method and computational experiment analysis based on intuitionistic fuzzy entropy measures[J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1233-1239.)
- [33] 曾守桢, 苏为华. 基于直觉模糊信息的综合评价问题研究[D]. 杭州: 浙江工商大学统计与数学学院, 2013: 66-70.
(Zeng S Z, Su W H. Study on the comprehensive evaluation technology based on intuitionistic fuzzy information[D]. Hangzhou: School of Statistics and mathematics, Zhejiang Gongshang University, 2013: 66-70.)
- [34] 陈志旺, 陈琳. 用区间直觉模糊集方法对属性权重未知的群求解其多属性决策[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(8): 1025-1033.
(Chen Z W, Chen L. Interval-valued intuitionistic fuzzy set method for group multi-attribute decision-making with unknown attribute weights[J]. Control Theory & Applications, 2014, 31(8): 1025-1033.)

(责任编辑: 齐 霖)