

# 控制与决策

Control and Decision

基于灰熵模型的区间型指标和权重的不确定多属性决策方法及其应用

刘人境, 高曦含, 张光军

引用本文:

刘人境, 高曦含, 张光军. 基于灰熵模型的区间型指标和权重的不确定多属性决策方法及其应用[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 657–666.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0543>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于概率犹豫模糊熵的多属性决策方法

Multi-attribute decision method based on probabilistic hesitant fuzzy entropy

控制与决策. 2019, 34(4): 861–870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1374>

### 基于改进符号距离的权重未知犹豫模糊决策方法

Hesitant fuzzy decision making method with unknown weight information based on an improved signed distance

控制与决策. 2018, 33(1): 186–192 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1474>

### 基于前景理论的区间直觉模糊双向投影决策方法

Bidirectional projection method with interval-valued intuitionistic fuzzy information based on prospect theory

控制与决策. 2016, 31(6): 1143–1147 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0590>

### 基于改进的TODIM方法的区间灰数多属性决策模型

Multiple attribute decision-making model with interval grey number based on improved TODIM method

控制与决策. 2016(2): 261–266 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1419>

### 基于区间梯形二型犹豫模糊数的多准则决策方法

Multi-criteria decision making method based on trapezoidal interval type-2 hesitant fuzzy number

控制与决策. 2015, 30(5): 780–788 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0220>

### 基于相对熵的残缺语言判断矩阵群排序方法

Group ranking based on relative entropy with incomplete linguistic judgment matrices

控制与决策. 2015(3): 479–484 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1761>

### 基于TOPSIS的区间直觉模糊数排序法

Ranking method of interval-valued intuitionistic fuzzy numbers based on TOPSIS

控制与决策. 2015, 30(11): 2014–2018 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1433>

### 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

A group grey target decision making method with three parameter interval grey number based on prospect theory

控制与决策. 2015(1): 105–109 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1641>

# 基于灰熵模型的区间型指标和权重的 不确定多属性决策方法及其应用

刘入境, 高曦含<sup>†</sup>, 张光军

(西安交通大学 管理学院, 西安 710049)

**摘 要:** 区间型属性值及权重多属性决策问题的难点在于不确定权重信息的精确化和区间数的排序问题. 灰熵模型中运用与理想解均衡接近的贴近度对方案排序的思想, 不仅可以使多属性决策避开繁重的模糊数据精确化步骤, 还可以有效解决方案排序时的点关联倾向问题. 考虑到传统灰熵模型只适用于精确实数和指标权重缺失的缺陷, 将灰关联熵引入传统灰熵模型, 构建区间型权重属性值的灰熵模型, 解决不确定数据精确化的难题. 针对区间数排序难的难题, 基于 TOPSIS 方法应用衍生变量接近度、均衡度再次逼近理想解的思想计算改进灰熵模型的均衡接近度对方案进行排序. 最后, 通过 SG 激光装置项目选择某种非标元器件供应商的算例验证了所提出模型的有效性.

**关键词:** 多属性决策; 灰熵模型; 不确定信息; TOPSIS 法; 区间型指标; 区间型权重

中图分类号: C931

文献标志码: A

## The uncertain multi-attribute decision making methods and application based on grey entropy model with interval-type attribute values and weights

LIU Ren-jing, GAO Xi-han<sup>†</sup>, ZHANG Guang-jun

(College of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The difficulties of multi-attribute decision making with interval-type attribute values and weights lie in the precision work of uncertain weight information and the ordering of interval numbers. The idea of using the approach degree to approach the ideal solution in the grey entropy model can not only avoid the troublesome steps of precisifying fuzzy data in multi-attribute decision making, but also can effectively solve the problem of local correlation. Considering that the traditional grey entropy model is only applicable to the situation where the attribute values are all exact real numbers and index weights are lacked, the grey relation entropy is introduced into the traditional grey entropy model to construct the grey entropy model with interval weights and attribute values, which successfully solves the problem of precisifying uncertain data. In order to solve the difficult problem of ordering interval numbers, this model makes the two derived variables approach the ideal solution again based on the TOPSIS method to calculate the degree of balance and approach to sort the solution. Finally, the effectiveness of the model is verified by the example of SG laser device project in selecting a non-standard component supplier.

**Keywords:** multi-attribute decision making; grey entropy model; uncertain data; TOPSIS method; interval values; interval weights

## 0 引 言

多属性决策方法的实质是利用已有的决策信息通过一定的方式对一组有限备选方案进行排序与择优的过程<sup>[1]</sup>. 目前, 对于完全信息下多属性决策问题的研究已趋完善. 层次分析法(AHP)和网络层次分析法(ANP)是在完全信息条件下最常用的多属性决策分析方法. 如, Chan 等<sup>[2]</sup>(2007)提出了一种基于

层次分析法的供应商多属性选择问题求解方法, 基于 14 个标准对潜在供应商进行评价. 这类方法往往需要决策者掌握大量完备信息, 在未知因素多且数据精确性较差的决策环境下并不适用.

现实环境下的大型决策问题, 经常存在信息缺失、数据模糊、与真实数据间有偏差等不确定因素, 因此完备信息下的多属性决策问题往往不能对现实

收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-09-27.

基金项目: 国家社会科学基金项目(15XGL001); 国家社会科学基金项目(15BGL082).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: 15809230841@163.com.

环境作出有效指导. 这一现实原因, 催生出不确定条件下多属性决策问题的研究, 而决策数据的不确定性常由区间灰数表示. 不确定条件下的多属性决策问题, 按照对象形式可以分为属性值不确定而属性权重已知的多属性决策问题、属性权重不确定而属性值已知的多属性决策问题以及属性值与属性权重均不确定的多属性决策问题. 本文研究的问题属于第3种. 关于属性值与属性权重均不确定的问题, 研究难点主要在于将不确定多属性决策问题转化为确定型多属性决策问题和解决区间灰数的排序问题. 为了将不确定多属性决策问题中的区间灰数转化为确定的数值, 减少决策的难度和不确定性, 有学者作过以下研究: 徐泽水<sup>[3]</sup>提出求解精确属性权重可通过相离度来解决, 并利用区间数的可能度公式对决策方案进行排序; 郭清娥等<sup>[4]</sup>引入风险偏好因子使权重信息精确化, 再利用平均交叉评价价值做最终决策; 王鹏飞等<sup>[5]</sup>建立了基于极大熵和灰距离熵的组合赋权双目标模型, 从而将区间型权重转化为点值权重, 达到减少不确定因素的目的. 然而, 以上这种解决不确定多属性决策问题的思路, 经常会导致精确化后的数值存在实际偏差, 区间数排序计算困难复杂.

灰熵模型的均衡接近思想, 通过寻找模糊解中最接近理想解的决策方案, 可以有效避免进行模糊数据的精确化导致的实际偏差, 如将区间灰数引入灰熵模型, 很好地解决了不确定多属性决策中存在的问题. 灰熵定义最早由张岐山等<sup>[6]</sup>在其灰关联熵分析方法中提出, 是一种结合熵理论与灰色理论描述灰色系统均衡程度的数学量, 由此衍生出的决策方法称为灰关联分析方法, 该方法通过定义灰关联熵, 比较两个灰内涵序列形态相近的均衡程度来选择最强关联序列. 之后, 张岐山等<sup>[7]</sup>在灰关联分析方法的基础上, 创新了均衡接近度灰关联分析方法. 此方法同时考虑指标内部的均衡度和外部与理想值的接近度, 用于排序的均衡接近度能最大限度地减少不确定性因素对决策结果的影响. 很多学者开始将灰熵理论应用于多属性决策中: 房亚东等<sup>[8]</sup>建立了完整的灰熵模型, 结合灰色关联度和均衡度, 给出灰熵综合评价步骤, 但属性值应用范围仍局限于精确实数; Li等<sup>[9]</sup>定义了三参数区间灰数的区间距离、负理想点距离等变量, 建立使极大熵与负理想点距离总和最小的线性规划模型求解权重, 再通过赋权后的负理想点距离排序进行不确定多属性决策, 但依托客观计算确定的权重, 不能很好地作为对指标的现实重要程度的反应, 同时用于决策的最终变量也未体现灰熵模型中所

求解均衡接近理想方案的思想; Quan等<sup>[10]</sup>利用极大熵思想将权重引入灰熵模型中, 很好地解决了灰关联分析的点关联倾向问题, 但是通过极大熵思想确定的各属性权重表面上消除了不确定多属性决策方法中权重的不确定性, 但其与实际权重间仍存在偏差, 利用此方法确定的权重直接替代实际权重过于草率.

针对灰熵模型现有研究的不足, 引入灰距离熵改进应用于精确实数的传统灰熵模型, 使模型结构既继续适用于精确属性值的情况, 又可拓展到区间型不确定多属性决策问题; 引入形式为区间数的权重和属性值, 构造加权接近度和均衡度, 表现各指标的相对重要程度; 基于引入区间灰数的情况, 采用TOPSIS逼近理想解的方法对接近度和均衡度两个指标进行排序, 使方案的均衡度和接近度二次贴近理想解, 化区间数排序为单一实数指标的排序问题. 对传统灰熵模型做此改进, 既能使其适用范围扩展到属性值、权重均不确定的区间型多属性决策问题中, 解决模糊数据的精确化带来的实际偏差问题, 又能使传统灰熵模型权重信息丢失、由接近度和均衡度相乘作为区间数排序指标过于草率的问题得到解决. 最后, 通过算例展现改进灰熵模型在大科学非标设备供应商评价领域中的应用, 验证了模型的有效性, 并可为大科学工程非标设备供应商的评价与选择提供指导, 具有较为重要的理论价值和现实意义.

## 1 实数型权重及属性值的灰熵模型的基本思想

### 1.1 灰熵定义

**定义1** 设有限离散序列  $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $\forall i, x_i \geq 0$  且  $\sum_{i=1}^n x_i = 1$ , 称序列  $X$  的灰熵为函数  $H(X)$ , 有

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i, \quad (1)$$

其中  $x_i$  为属性信息, 当  $x_i = 0$  时,  $x_i \ln x_i = 0$ . 任何使  $x_1, x_2, \dots, x_i$  趋于均等的变动, 都会导致灰熵的增加, 当序列为常数列, 即序列中各元素最为均衡时,  $H(X)$  取到最大值  $\ln n$ . 经证明, 灰熵具有对称性、非负性、可加性、上凸性、极值性<sup>[6]</sup>.

### 1.2 灰熵模型

灰熵模型是一种主要分析多因素系统中各个因素的关联程度以及对系统影响大小的系统因素分析法<sup>[11]</sup>. 它以均衡接近度(即将离散序列均衡程度的测度均衡度和参考序列与比较序列的接近程度的测度接近度相乘得到的综合指标)作为决策依据, 既测度

了与理想序列的接近程度,又防止出现关联测度大的点决定总体关联程度的情况. 因此,灰熵模型综合评价模型的核心步骤是,首先计算接近度和均衡度,然后基于接近度和均衡度计算均衡接近度,最后根据均衡接近度的大小对评价结果进行排序. 由此可知,灰熵模型的核心变量是接近度、均衡度和均衡接近度.

1) 接近度.

接近度表示为参考序列与比较序列的接近程度,通常采用灰色关联度进行计算. 称  $\xi_i(k)$  为序列  $v_o(k)$  与  $v_i(k)$  的关联系数,有

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k d_{oi}(k) + \rho \max_i \max_k d_{oi}(k)}{d_{oi}(k) + \rho \max_i \max_k d_{oi}(k)}. \quad (2)$$

其中:  $d_{oi}(k)$  为序列中  $v_o(k)$  与  $v_i(k)$  的关联系数;  $v_o(k)$  为参考序列的第  $k$  个值,  $v_i(k)$  为第  $i$  个比较序列的第  $k$  个值;  $\rho$  为分辨系数,取值范围为  $[0, 1]$ .

下面对  $\rho$  的取值进行讨论<sup>[12]</sup>. 对比较序列进行初始化处理后,  $d_{\min} = 0$ . 式(2)可化为

$$\xi_i(k) = \frac{\rho d_{\max}}{d_{oi}(k) + \rho d_{\max}}.$$

上下同除以  $d_{\max}$ , 得到

$$\xi_i(k) = \frac{\rho}{\theta + \rho}, \quad \theta = \frac{d_{oi}(k)}{d_{\max}}.$$

当  $\theta$  取 0 时,  $r(x_0(k), x_i(k))$  取恒定上限 1; 当  $\theta$  取 1 时,  $r(x_0(k), x_i(k))$  的下限随  $\rho$  的变化而改变.

表 1 为  $\rho$  的取值对  $r(x_0(k), x_i(k))$  的下限影响. 由表 1 可知,随着  $\rho$  取值的增加,  $r(x_0(k), x_i(k))$  的上限不断增加,  $r(x_0(k), x_i(k))$  的取值范围变小. 当参数  $\theta$  的变化范围较大,即序列不是很平稳时,  $\rho$  的取值应减小,以减弱  $\rho$  对公式结果的支配,增加  $r(x_0(k), x_i(k))$  的分布区间. 反之,当参数  $\theta$  的变化范围较小,即序列较平稳时,  $\rho$  的取值应增大,使  $\theta$  的微小变化能引起关联度的较大变化.

表 1  $\rho$  的取值对  $r(x_0(k), x_i(k))$  的下限影响

$\rho$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\xi_i(k)$ 的下限	0.091	0.167	0.231	0.286	0.333
$\rho$	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\xi_i(k)$ 的下限	0.375	0.412	0.444	0.474	0.5

称  $\gamma_i$  为参考序列与第  $i$  个比较序列的灰色关联度,有

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k). \quad (3)$$

参考序列与比较序列的灰色关联度即为比较序列的接近度,接近度越大,比较序列与参考序列越接近. 定义当比较序列与理想序列相等时,该序列的接近度为 1.

2) 均衡度.

定义 2 称  $H(X)$  为有限离散序列  $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  的灰关联熵,有

$$H(x) = - \sum_1^n p_i(k) \ln p_i(k), \quad (4)$$

其中  $P_i = \{p_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$  为有限离散序列  $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  的灰关联系数分布密度序列,  $p_i(k) = \xi_i(k) / \sum_1^n \xi_i(k), k \in 1, 2, \dots, n, \xi_i(k)$  由式(2)得到<sup>[6]</sup>.

根据灰熵定理,灰熵是有限离散序列  $X$  与理想序列接近均衡程度的测量,灰熵越大,序列  $X$  与理想序列接近越均衡<sup>[6]</sup>.

比较序列  $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  的均衡度  $E$  表示为

$$E = H(X) / H_m. \quad (5)$$

其中:  $H(X)$  为有限离散序列  $X$  的灰关联熵;  $H_m$  为  $H(X)$  在约束条件  $\sum_{k=1}^n p_i(k) = 1$  下的极大值,能取到的最大值为  $\ln n$ .

序列  $X$  的均衡度  $E$  越大,序列越均衡. 定义当比较序列与理想序列相等时,该序列的均衡度为 1.

3) 均衡接近度.

目前,大多数学者采用均衡度与接近度乘积的形式构造均衡接近度  $\omega$ , 计算公式如下:

$$\omega = B \times \gamma. \quad (6)$$

## 2 区间型权重及属性值的灰熵决策模型

在传统灰熵模型的基础上,构建属性权重和属性值均为区间数的灰熵模型. 引入区间数属性值和权重后,改进灰熵模型的接近度和均衡度结果均不是传统模型中的实数结果,而是两个区间数. 故在此基础上,进一步引入 TOPSIS 思想,通过考察接近度和均衡度逼近理想解的情况计算均衡接近度来选择出最优方案.

设多属性决策问题有  $m$  个被评估对象组成的决策方案集  $M = \{m_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ ,  $n$  个属性组成指标集  $P = \{P_j | j = 1, 2, \dots, n\}$ , 方案  $m_i$  对指标  $p_j$  的属性值为  $v_{ij} = [v_{ij}^L, v_{ij}^U] (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$ .  $W = \{w_j | j = 1, 2, \dots, n\}$  为指标权重矩阵,其中  $w_j = [w_j^L, w_j^U]$  表示为区间形式.

### 2.1 区间数运算法则<sup>[13]</sup>

- 1)  $[a, b] + [c, d] = [a + c, b + d]$ .
- 2)  $[a, b] - [c, d] = [a - d, b - c]$ .
- 3)  $[a, b] \times [c, d] = [p, q]$ , 其中  $p = \min(ac, ad, bc,$

$bd)$ ,  $q = \max(ac, ad, bc, bd)$ .

4)  $[a, b] \div [c, d] = [a, b] \times [1/d, 1/c], 0 \notin [c, d]$ .

5)  $k[a, b] = [ka, kb], k \geq 0$ , 当  $k = 0$  时,  $k[a, b] =$

0.

## 2.2 区间型灰熵模型的接近度计算

### 2.2.1 计算原理

在传统灰熵模型中,接近度的计算原理是采用灰色关联法计算参考序列与比较序列的接近程度.灰色关联法是研究事物之间、因素之间关联性的一种方法,是一种分析灰色动态发展态势的方法.它根据事物或因素的时间序列曲线的相似程度判断其关联程度,若两条曲线的形状彼此相似,则关联度大,反之关联度小.在计算两列区间数序列的接近度时,引入区间数的 Euclidean 距离表示区间数差异.

1) 区间数间的距离计算.

为了计算两个区间数之间的距离,引入标准 Euclidean 距离  $d(a_1, b_1)$ <sup>[14]</sup>.

定义3 设  $a_1 = [a^L, a^U], b_1 = [b^L, b^U]$ , 令

$$d^2(a_1, b_1) = \frac{(a^L - b^L)^2 + (a^U - b^U)^2}{2},$$

称

$$d(a_1, b_1) = \sqrt{d^2(a_1, b_1)} = \sqrt{\frac{(a^L - b^L)^2 + (a^U - b^U)^2}{2}} \quad (7)$$

为区间数  $a_1$  与  $b_1$  之间的标准 Euclidean 距离.

2) 区间数间的灰色关联度计算.

设  $X = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$  为灰关联因子集,  $x_0$  为参考序列,  $x_i$  为比较序列,  $x_0(k)$  和  $x_i(k)$  分别为  $x_0$  和  $x_i$  的第  $k$  个元素.

定义4 区间数  $x_0(k)$  与  $x_i(k)$  的灰色关联系数为

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{d_{\min} + \rho d_{\max}}{d_{0i}(k) + \rho d_{\max}}. \quad (8)$$

其中  $d_{\max} = \max_i \max_k d_{0i}(k)$ ,  $d_{\min} = \min_i \min_k d_{0i}(k)$ ,  $d_{0i}(k)$  为  $x_0(k)$  与  $x_i(k)$  之间的 Euclidean 距离. 区间数模型的灰色关联系数公式结构与实数模型的一样, 分辨系数  $\rho$  的取值分析见式(2)<sup>[14]</sup>.

传统灰熵模型中序列  $x_0$  与  $x_i$  的灰色关联度按照文献[7]提出的计算公式如下:

$$r(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)). \quad (9)$$

此式计算序列的灰色关联度时,认为每个属性的关联系数对序列总体的关联度贡献一样多,因此对序列的所有指标的关联系数求平均.本文对每个供应商指标赋予取值为区间数的权重,对于各指标

权重矩阵  $W = \{w_k | k = 1, 2, \dots, n\}$ , 有约束条件  $0 < w_j^L < w_j^U < 1, 0 < \sum_{j=1}^n w_j^L < 1 < \sum_{j=1}^n w_j^U$ , 定义如下加权灰色关联度即为最终序列  $x_0$  与  $x_i$  的接近度:

定义5 称  $r_i$  为权重和属性值均为区间数时比较序列和理想序列的加权灰色关联度.

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k r(x_0(k), x_i(k)). \quad (10)$$

其中:  $r(x_0(k), x_i(k))$  为第  $i$  个比较序列在第  $k$  个属性下的区间属性值与参考序列的区间理想值的灰色关联度,  $w_k$  为第  $k$  个属性的区间型权重.

同时,定义对于各指标均为理想值的序列,其序列的接近度为1.

### 2.2.2 区间型灰熵模型接近度的计算步骤

Step 1 确定各比较序列的参考对象  $M_0$ .

理想方案序列  $M_0 = \{M_{0j} | M_{0j} = A_{ij}\}$ . 其中  $A_{ij}$  表示  $\max v_{ij}$  或  $\min v_{ij}$  指标下实际的理想区间数元素,  $\max v_{ij} = [\max_{1 \leq i \leq m} v_{ij}^L, \max_{1 \leq i \leq m} v_{ij}^U]$ ,  $\min v_{ij} = [\min_{1 \leq i \leq m} v_{ij}^L, \min_{1 \leq i \leq m} v_{ij}^U]$ .

Step 2: 指标数值的预处理.

为了防止不同的物理纲对决策结果产生影响,利用式(11)和(12)将由原始数据构成的决策矩阵  $V = (v_{ij})_{m \times n}$  转化为规范化矩阵  $Q = (q_{ij})_{m \times n}$ , 其中  $q_{ij} = [q_{ij}^L, q_{ij}^U]$  为规范区间数.

效益型属性为

$$\begin{cases} q_{ij}^L = v_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij}^U)^2}, \\ q_{ij}^U = v_{ij}^U / \sqrt{\sum_{i=1}^m (v_{ij}^L)^2}. \end{cases} \quad (11)$$

成本型属性为

$$\begin{cases} q_{ij}^L = (1/v_{ij}^U) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/v_{ij}^L)^2}, \\ q_{ij}^U = (1/v_{ij}^L) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/v_{ij}^U)^2}. \end{cases} \quad (12)$$

Step 3: 计算各比较序列与参考序列的区间数距离.

以  $M_0$  为参考序列,先由式(7)计算各比较序列每个指标下对应的区间数属性值与理想区间数属性值的距离,得到区间数距离矩阵  $D$ , 有

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix},$$

其中  $d_{ij}$  为第  $i$  个方案在第  $j$  个指标下的区间数属性

值与理想区间数的距离.

**Step 4:** 计算各比较序列与参考序列对应指标属性的关联系数.

由式(8)计算各比较序列每个指标下对应的区间数属性值与理想区间数属性值的关联系数,得到关联系数矩阵  $G$ ,有

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & g_{mn} \end{bmatrix}.$$

**Step 5:** 对各指标下的关联系数进行加权.

最后由式(10)得到各比较序列与参考序列的加权灰色关联度矩阵  $R$ ,求得的加权灰色关联度即为各供应商方案与理想方案间的接近度,有

$$R = G \times W = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & g_{mn} \end{bmatrix} \times [w_1, w_2, \dots, w_n]^T = [(r_1^L, r_1^U), (r_2^L, r_2^U), \dots, (r_m^L, r_m^U)]^T. \quad (13)$$

其中:  $W = \{w_j | j = 1, 2, \dots, n\}$  为指标权重矩阵,  $w_j = [w_j^L, w_j^U]$  为区间形式,  $w_j^L$  为第  $j$  个属性权重的下限,  $w_j^U$  为第  $j$  个属性权重的上限.

### 2.3 区间型灰熵模型的均衡度计算

#### 2.3.1 区间型灰熵模型均衡度的计算原理

**定义6** 称  $H(X)$  是有限离散序列  $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  的加权灰关联熵,有

$$H(x) = - \sum_{k=1}^n w_k p_i(k) \ln p_i(k), \quad (14)$$

其中  $P_i = \{p_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$  为有限离散序列  $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  的灰关联系数分布密度序列,  $p_i(k) = \xi_i(k) / \sum_{k=1}^n \xi_i(k), k \in 1, 2, \dots, n, \xi_i(k)$  由式(2)得到.

根据灰熵定理,灰熵是有限离散序列  $X$  与理想序列接近均衡程度的测量,灰熵越大,序列  $X$  与理想序列接近越均衡<sup>[15]</sup>.

**定义7** 序列  $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$  的均衡度  $B$  表示为

$$e_i = H_i(X) / H_m. \quad (15)$$

其中:  $H_i(X) = - \sum_{k=1}^n w_k p_i(k) \ln p_i(k)$  为序列  $X$  的加权关联系数熵,  $W = \{w_k | k = 1, 2, \dots, n\}$  为指标权重矩阵,  $\sum_{k=1}^n w_k = 1, w_k = [w_k^L, w_k^U]$  为区间形式,  $w_k^L$  为第  $k$  个属性权重的下限,  $w_k^U$  为第  $k$  个属性权

重的上限.  $H_m = \max \left\{ - \sum_{k=1}^n w_k p_i(k) \ln p_i(k) \right\}$  表示

$H(X)$  在约束条件  $\sum_{k=1}^n p_i(k) = 1$  下的极大值.

应用拉格朗日极值法,有

$$H_i(x) = - \sum_{k=1}^n w_k p_i(k) \ln p_i(k) + \lambda \left( \sum_{k=1}^n p_i(k) - 1 \right).$$

两边同时对  $p_i(k)$  求导,得到  $p_i(k) = e^{\lambda-1}$  为一个常数,又知  $\sum_{k=1}^n p_i(k) = 1$ ,故当  $p_i(k) = \frac{1}{n}$  时,  $H_i(x)$  取

最大值  $H_m = \frac{1}{n} \ln n \sum_{k=1}^n w_k$ ,为一区间常数.  $e_i = H_i(X) / H_m$  的计算将根据区间数除法运算法则(4)进行运算. 序列  $X$  的均衡度  $e_i$  越大,序列越均衡.

同时,定义对于各指标均为理想值的序列,其序列的均衡度为1.

同时,定义对于各指标均为理想值的序列,其序列的均衡度为1.

#### 2.3.2 区间灰熵模型均衡度的计算步骤

**Step 1:** 计算各比较序列与参考序列的区间数距离.

以参考序列  $M_0$  为参考序列,各供应商在各指标下对应的区间数数值组成的区间数序列为比较序列,先由式(7)计算各比较序列每个指标下对应的区间数属性值与理想区间数属性值的距离,得到区间数距离矩阵  $D$ ,有

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}.$$

其中  $d_{ij}$  为第  $i$  个方案在第  $j$  个指标下的区间数属性与理想区间数范围的距离.

**Step 2:** 计算各比较序列与参考序列对应指标属性的关联系数.

由式(8)计算各比较序列每个指标下对应的区间数属性值与理想区间数属性值的关联系数,得到关联系数矩阵  $G$ ,有

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{m1} & \cdots & g_{mn} \end{bmatrix}.$$

**Step 3:** 将各方案的关联系数序列归一化,得到各个方案的灰关联系数分布密度序列

$$P_i = \{p_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\},$$

其中  $p_i(k) = \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^n g_{ik}}, i = 1, 2, \dots, n.$

Step 4: 计算加权灰色关联熵.

根据式(14),加权灰色关联熵

$$H(X) = - \sum_{k=1}^n w_k p_i(k) \ln p_i(k),$$

$w_k = [w_k^L, w_k^U]$  为区间形式的属性权重.

Step 5: 计算均衡度.

均衡度为

$$e_i = H_i(X)/H_m. \quad (16)$$

其中:  $H_i(X) = \sum_{k=1}^n w_k p_i(k) \ln p_i(k)$  为序列  $X$  的加权灰色关联系数熵,  $w_k = [w_k^L, w_k^U]$  为区间形式的指标权重,  $H_m = \frac{1}{n} \ln n \sum_{k=1}^n w_k$  为  $H_i(X)$  的极大值. 各方案与理想方案接近的均衡程度表示为  $E = \{e_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ .

同时,定义对于各指标均为理想值的序列,其序列的均衡度为1.

## 2.4 基于TOPSIS的均衡接近度综合评价

传统的灰熵模型大多采用均衡度与接近度乘积的形式计算均衡接近度. 在属性值和权重均为区间数的改进灰熵模型中,均衡度和接近度均为区间数形式,相乘的计算方式不再适用. 为此,本研究将TOPSIS方法引入到均衡接近度的计算过程中.

### 2.4.1 基于区间数的TOPSIS排序基本思想

TOPSIS法是一种逼近理想解的排序方法,其基本的思想是,通过检测评价对象与最优解的相对贴近度进行排序,若评价对象最靠近最优解,同时又最远离最劣解,则为最好<sup>[16]</sup>.

采用TOPSIS排序的思想,对于前述每一方案的接近度和均衡度,都有最优解和最劣解. 分别计算每个供应商方案的接近相对贴近度和均衡相对贴近度,则最终用于决策的均衡接近度为两个贴近度的乘积.

### 2.4.2 基于均衡度和接近度的TOPSIS排序步骤

采用以上所述TOPSIS思想,将方案的均衡度  $e_i$  和接近度  $r_i$  作为两个指标,并乘以权重系数向量  $(\theta, 1-\theta)$ ,得到加权规范化向量序列,分别计算其与绝对最优解(1,1)、绝对最劣解(0,0)的距离,最后根据式(8)求出每个方案均衡度和接近度与理想均衡度、接近度的相对贴近度  $c_i$ . 具体操作步骤如下.

Step 1: 建立决策矩阵.

设方案集为  $M = \{m_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ , 属性集为  $F = \{f_1, f_2\}$ ,  $f_1$  代表接近度,  $f_2$  代表均衡度. 属性的权向量为  $\omega = (\theta, 1-\theta)$ , 则初始的决策矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ ,  $n = 2$ , 有

$$A = \begin{bmatrix} (r_1^L, r_1^U) & (e_1^L, e_1^U) \\ \vdots & \vdots \\ (r_m^L, r_m^U) & (e_m^L, e_m^U) \end{bmatrix}.$$

Step 2: 将决策矩阵规范化.

将由区间型接近度、均衡度构成的决策矩阵  $A$  转化为规范化矩阵  $S = (s_{ij})_{m \times n}$ , 其中  $s_{ij} = [s_{ij}^L, s_{ij}^U]$  为规范区间数.

效益型属性为

$$\begin{cases} s_{ij}^L = a_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^U)^2}, \\ s_{ij}^U = a_{ij}^U / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^L)^2}. \end{cases}$$

成本型属性为

$$\begin{cases} s_{ij}^L = (1/a_{ij}^U) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij}^U)^2}, \\ s_{ij}^U = (1/a_{ij}^L) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij}^L)^2}. \end{cases}$$

Step 3: 构造加权决策矩阵.

构造加权规范化决策矩阵  $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ . 其中  $z_{ij} = \omega_j s_{ij}$ ,  $i \in M, j \in N, M = \{1, 2, \dots, m\}$  为方案的下标集,  $N = \{1, 2\}$  为指标的下标集.

Step 4: 确定正、负理想解.

确定正理想解  $z_j^+$  和负理想解  $z_j^-$ . 其中:  $z_j^+ = [\max_i z_{ij}^U, \max_i z_{ij}^U]$ ,  $z_j^- = [\max_i z_{ij}^L, \max_i z_{ij}^L]$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Step 5: 计算方案间的距离.

计算各方案分别与正理想解和负理想解的Euclidean距离  $d_i^+$  和  $d_i^-$ , 有

$$d_i^+ = \|z_i - z_j^+\| = \sqrt{\sum_{j=1}^2 \frac{(z_{ij}^L - \max_i z_{ij}^U)^2 + (z_{ij}^U - \max_i z_{ij}^U)^2}{2}}, \quad (17)$$

$$d_i^- = \|z_i - z_j^-\| = \sqrt{\sum_{j=1}^2 \frac{(z_{ij}^L - \min_i z_{ij}^L)^2 + (z_{ij}^U - \min_i z_{ij}^L)^2}{2}}, \quad (18)$$

其中  $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{in})$  为加权规范化决策矩阵  $Z = (z_{ij})_{m \times n}$  的第  $i$  行.

Step 6: 计算贴近度.

计算各方案与正理想解的相对贴近度  $C_i^+$ , 有

$$C_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, \quad i \in M. \quad (19)$$

当  $C_i^+$  趋近于1时, 方案  $A_i$  接近  $A^+$

Step 7: 方案排序.

按  $C_i^+$  的大小将方案排序,  $C_i^+$  越大, 方案越应排在前面.

### 3 实例分析

#### 3.1 背景介绍

在当前的国际形势下, 大科学工程已经成为提高国家竞争力的重要措施. 大科学工程是指需要巨额投资建造、运行和维护大型研究设施的“工程式”的科学研究项目<sup>[17-18]</sup>, 具有建设周期长、多学科交叉、规模复杂且事关国家利益等特点, 存在不可预测的探索创新性和变动性<sup>[19]</sup>.

大科学工程的科学探索性使得采用大量非标设备成为必然, 没有设计标准、不可控因素多、需求急且少、数据严格保密、创新要求高的非标设备供应大大提高了采购风险, 成为决定大科学工程能否成功实施的关键. 要解决非标设备的供应问题, 一个合格的供应商必须满足供应质量优良、保密性高、供货周期短以及双方可以共同研发设计等要求. 因此, 建立一个科学、客观的供应商综合评价模型已成为大科学工程采购中一个亟待解决的现实问题. 大科学工程因其供应商选择不确定性强、数据模糊程度高和不可控因素多等特点, 需要采用权重与属性值均为区间灰数的多属性决策方法. 本研究以我国典型大科学工程——SG激光装置项目为研究对象, 采用前文所述的区间型灰熵模型多属性决策方法解决其非标设备供应商评价问题.

#### 3.2 评价指标体系构建

由于SG激光装置项目在实施过程中采用大量的非标设备, 在其供应商选择过程中必定与普通产品有所不同<sup>[20]</sup>. 就质量要求而言, 大科学工程需要供应商提供的非标设备的质量达到较高水平, 且需要在某种程度上提供定制服务; 就项目特性而言, 大科学工程涉及国家机密, 需要非标设备供应商具有一定的保密资质; 就供货能力而言, 大科学工程需要在规定的期限内完成建设, 因此需要非标设备供应商必须在规定的期限内实现供货, 并需要具有较强的供应柔性; 就采购成本而言, 大科学工程由国家出资建设, 资金来源稳定有保障, 价格因素可不作为重要因素考量供应商.

基于上述4点特性, 结合一些军工企业设备供应商评价指标, 选择5个因素作为大科学工程非标设备供应商评价指标, 如表2所示. 权重信息由专家通过德尔菲法给出, 出于对专家主观因素的考量, 权重信息均为区间数形式.

表2 大科学工程非标设备供应商评价指标体系

指标名	权重
质量水平 $C_1$	[0.25, 0.32]
技术水平 $C_2$	[0.24, 0.30]
供应水平 $C_3$	[0.10, 0.16]
价格水平 $C_4$	[0.08, 0.12]
综合素质 $C_5$	[0.19, 0.25]

#### 3.3 SG激光装置项目非标设备供应商选择评价过程

##### 3.3.1 数据收集与处理

以SG激光项目购置某种非标元器件为例, 待评价的3个供应商在各二级指标下的原始数据如表3所示.

表3 SG激光项目供应商评价数据原始值

指标	供应商A	供应商B	供应商C
$C_1$	[8.84, 8.85]	[8.54, 9.00]	[7.59, 8.01]
$C_2$	[7.53, 7.93]	[7.78, 7.81]	[5.71, 6.36]
$C_3$	[6.00, 8.00]	[6.00, 8.00]	[7.60, 8.00]
$C_4$	[680, 700]	[680, 700]	[650, 720]
$C_5$	[8.90, 9.10]	[8.90, 9.10]	[7.30, 7.50]

对原始数据根据式(11)和(12)进行指标预处理, 消除量纲的影响, 结果如表4所示.

表4 预处理以后的供应商评价决策数据

指标	供应商A	供应商B	供应商C
$C_1$	[0.591, 0.613]	[0.571, 0.623]	[0.508, 0.555]
$C_2$	[0.587, 0.648]	[0.607, 0.638]	[0.446, 0.520]
$C_3$	[0.433, 0.702]	[0.433, 0.702]	[0.548, 0.702]
$C_4$	[0.552, 0.600]	[0.552, 0.600]	[0.537, 0.628]
$C_5$	[0.598, 0.625]	[0.598, 0.625]	[0.490, 0.515]

##### 3.3.2 灰熵综合评价步骤

Step 1: 计算各供应商在各指标下的接近度.

Step 1.1: 确定各指标下的参考序列.

由于所有指标已全部转化为效益型指标, 选取每个指标下各供应商区间数下限的最大值作为此指标参考值的下限, 各供应商区间数上限的最大值作为此指标参考值的上限. 由以上方法得到参考序列

$$M_0 = ([0.591, 0.623], [0.607, 0.648], [0.548, 0.702], [0.552, 0.628], [0.598, 0.625]).$$

Step 1.2: 计算评价指标与参考对象指标序列的接近度.

由式(7)、(8)、(10)得到各评价指标与参考对象的接近度如下: 供应商A的接近度为[0.759, 1.000], 供应商B的接近度为[0.758, 1.000], 供应商C的接近度为[0.510, 0.701]

Step 2: 计算各供应商在各指标下的均衡度.

Ste 2.1: 由式(7)计算供应商各评价指标与参考对象各指标区间数距离, 得到区间数距离序列如下:

供应商 A 的区间数距离序列为 (0.007, 0.014, 0.082, 0.020, 0.000);

供应商 B 的区间数距离序列为 (0.014, 0.007, 0.082, 0.020, 0.000);

供应商 C 的区间数距离序列为 (0.076, 0.146, 0.000, 0.011, 0.109).

Step 2.2 由式 (8) 计算各比较序列与参考序列对应指标属性的关联系数如下:

供应商 A 与参考序列的关联系数序列为 (0.936, 0.880, 0.560, 0.842, 1.000);

供应商 B 与参考序列的关联系数序列为 (0.880, 0.936, 0.560, 0.842, 1.000);

供应商 C 与参考序列的关联系数序列为 (0.577, 0.416, 1.000, 0.906, 0.489).

Step 2.3 将各方案的关联系数序列归一化, 得到各个方案的灰关联系数分布密度序列如下:

供应商 A 的灰关联系数分布密度序列为 (0.222, 0.209, 0.133, 0.200, 0.237);

供应商 B 的灰关联系数分布密度序列为 (0.209, 0.222, 0.133, 0.200, 0.237);

供应商 C 的灰关联系数分布密度序列为 (0.170, 0.123, 0.295, 0.267, 0.144).

Step 2.4: 计算加权灰色关联熵.

由式 (14) 计算各供应商的加权灰色关联熵如下:

供应商 A 的加权灰色关联熵为 [0.279, 0.372];

供应商 B 的加权灰色关联熵为 [0.279, 0.372];

供应商 C 的加权灰色关联熵为 [0.255, 0.344].

Step 2.5: 计算均衡度.

由式 (15) 计算得各供应商方案的均衡度如下:

供应商 A 的均衡度为 [0.868, 1.155];

供应商 B 的均衡度为 [0.868, 1.155];

供应商 C 的均衡度为 [0.791, 1.067];

由于均衡度的上限为 1, 各供应商方案的均衡度如下:

供应商 A 的均衡度为 [0.868, 1];

供应商 B 的均衡度为 [0.868, 1];

供应商 C 的均衡度为 [0.791, 1].

Step 3: 基于 TOPSIS 法计算各供应商的均衡接近度.

Step 3.1: 建立初始化决策矩阵

$$\begin{bmatrix} [0.759, 1] & [0.868, 1] \\ [0.758, 1] & [0.868, 1] \\ [0.510, 0.701] & [0.791, 1] \end{bmatrix}.$$

其中: 列依次代表指标接近度、均衡度, 行依次代表 3

个供应商.

Step 3.2: 决策矩阵规范化处理.

采用向量规范化对决策矩阵进行处理, 得到规范化决策矩阵

$$\begin{bmatrix} [0.481, 0.842] & [0.501, 0.685] \\ [0.480, 0.842] & [0.501, 0.685] \\ [0.323, 0.590] & [0.457, 0.685] \end{bmatrix}.$$

Step 3.3: 构造加权规范化决策矩阵.

基于规范化决策矩阵, 应用权重调节系数  $\theta$  构造加权规范化决策矩阵. 其中权重调节系数  $\theta$  可以根据实际情况进行调整, 此例取值为 0.5, 即权重向量为 (0.5, 0.5). 得到加权规范化决策矩阵

$$\begin{bmatrix} [0.240, 0.421] & [0.251, 0.342] \\ [0.240, 0.421] & [0.251, 0.342] \\ [0.162, 0.295] & [0.228, 0.342] \end{bmatrix}.$$

Step 3.4: 确定正、负理想解.

选择绝对理想解 (即正理想解) 为均衡度和接近度最理想的值, 负理想解为均衡度和接近度取最不希望的值, 因此, 正理想解为 ([0.421, 0.421], [0.342, 0.342]), 负理想解为 ([0.162, 0.162], [0.228, 0.228]).

Step 3.5: 计算方案间的距离.

采用式 (17) 和 (18) 计算 3 个供应商分别与正理想解、负理想解之间的距离如下:

供应商 A:  $d^+ = 0.143, d^- = 0.208$ ;

供应商 B:  $d^+ = 0.143, d^- = 0.208$ ;

供应商 C:  $d^+ = 0.219, d^- = 0.124$ .

Step 3.6: 计算均衡接近度.

由式 (19) 计算各供应商方案的均衡接近度, 得到供应商 A 的均衡接近度为 0.593; 供应商 B 的均衡接近度为 0.592; 供应商 C 的均衡接近度为 0.362.

由于  $0.593 > 0.592 > 0.362$ , 根据以上指标对供应商的排序应为  $A > B > C$ .

### 3.3.3 灰熵综合评价与其他方法的比较

1) 与基于 TOPSIS 的区间型属性和权重的多属性决策方法的比较.

灰熵综合评价的思想本质是一种基于逼近理想解的方案排序思想. 而 TOPSIS 则是理想解排序法中最为经典的方法. 将本文的灰熵综合评价方法与文献 [13] 基于 TOPSIS 的区间型属性和权重的多属性方法对比, 具体步骤如下.

Step 1: 将原始数据转化为规范化决策矩阵.

Step 2: 确定权重. 根据 TOPSIS 方法计算区间型权重的相对贴近度并归一化得到各属性的实数型权重:  $w_1 = 0.300, w_2 = 0.282, w_3 = 0.115, w_4 = 0.080$ ,

$w_5 = 0.224$ .

Step 3: 计算各方案的加权综合属性值如下: 方案1为  $[0.5701, 0.6348]$ , 方案2为  $[0.5698, 0.6350]$ , 方案3为  $[0.4932, 0.5588]$ .

Step 4: 计算各方案的相对贴进度并进行排序: 方案1为 0.61297, 方案2为 0.61294, 方案3为 0.51778. 排序得: 供应商  $A > B > C$ , 与上文灰熵综合评价得出结果完全一致.

对两个方法最后用于排序的最终指标相对贴进度做折线, 如图1所示. 可以看出, 灰熵综合评价明显使得3个方案的贴进度相差更大, 从而易于区分各方案. 同时灰熵综合评价无需将区间权重转化成精确型权重, 避免了精确化导致的与实际权重的偏差.

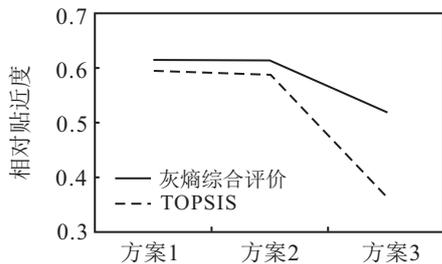


图1 两种方法相对贴进度对比

2) 与无权重信息的灰熵模型比较.

若算例中未给出区间形式的权重, 则根据式(7)~(9)得出供应商  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的接近度为 0.844, 0.844, 0.678. 由式(4)和(5)计算得出供应商  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的均衡度为 0.989, 0.989, 0.964. 供应商  $A$  和  $B$  接近度和均衡度的分值完全一样, 此种情况下运用均衡接近度作为最终排序指标, 无法选择出最优大科学工程供应商. 而在上文给出了权重信息的情况下, 得以区分出  $A$ 、 $B$  两个供应商, 遴选出最优者.

3) 与应用于实数领域的灰熵模型比较.

传统灰熵模型也通过求解接近度、均衡度和均衡接近度3个重要变量进行比较.

对于接近度和均衡度, 传统灰熵模型的结果为两个实数, 而本文的改进模型结果为两个有一定容错范围的区间数. 对于均衡接近度, 传统灰熵模型的做法是直接将近似度和均衡度相乘, 而本文基于 TOPSIS 方法计算二次贴进度用以表示均衡接近度, 更具有实际应用意义.

## 4 结论

为了解决灰熵模型现有研究存在的不足, 使得灰熵模型能应用于不确定条件下的决策环境中, 并且考虑到指标重要程度的差别, 在模型层面, 引入区间数形式的属性值、权重和 TOPSIS 法, 构建了基于改进灰熵模型的大科学工程非标设备供应商评价模型;

在计算层面, 考虑了区间数属性及权重后, 进一步引入标准 Euclidean 距离和灰距离熵, 并定义加权灰色关联度和加权灰关联熵改进灰熵模型接近度和均衡度的计算, 采用 TOPSIS 方法基于逼近理想解的思想计算改进灰熵模型的均衡接近度. 此种方法具有以下几点优势:

1) 建立了属性值和权重均为区间数的灰熵模型, 充分考虑了数据的计量误差和事物的不确定性;

2) 采用均衡接近的思想, 综合考虑与理想方案的接近与接近的均衡程度, 避免了传统理想解方法可能产生的点关联倾向的问题;

3) 用于排序的均衡接近度, 实质为指标与理想值的均衡度和接近度的二次贴近, 代表了方案贴近理想方案的综合效果, 因此排序结果相较传统多属性决策方法的打分结果更有决策现实意义.

此外, 本文以 SG 激光项目购置某种非标元器件为例进行了算例分析, 验证了该评价模型的有效性, 为大科学工程非标设备供应商的评价与选择提供了科学、有效的标准, 降低了大科学工程非标设备的采购风险. 通过算例也证实了这种方法在解决例如大科学工程这样信息完备性不高、应急情况下的多属性决策问题, 具有通用的应用意义.

## 参考文献(References)

- [1] Ho W, Xu X, Dey P K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review[J]. European J of Operational Research, 2010, 202(1): 16-24.
- [2] Chan FT S, Chan H K, Ip R W L, et al. A decision support system for supplier selection in the airline industry[J]. Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J of Engineering Manufacture, 2007, 221(4): 741-758.
- [3] 徐泽水. 求解不确定型多属性决策问题的一种新方法[J]. 系统工程学报, 2002, 18(2): 177-181.  
(Xu Z S. New method for uncertain multi-attribute decision making problems[J]. J of Systems Engineering, 2002, 18(2): 177-181.)
- [4] 郭清娥, 苏兵, 陈光会. 部分权重信息下考虑风险偏好的不确定多属性决策方法[J]. 统计与决策, 2016, 32(5): 46-48.  
(Guo Q E, Su B, Chen G H. Uncertain multi-attribute decision making method considering risk preference under partial weight information[J]. Statistics and Decision, 2016, 32(5): 46-48.)
- [5] 王鹏飞, 李畅. 不确定多属性决策双目标组合赋权模型研究[J]. 中国管理科学, 2012, 20(4): 104-108.  
(Wang P F, Li C. Research on dual objective combination

- weighting model for uncertain multi-attribute decision making[J]. Chinese J of Management Science, 2012, 20(4): 104-108.)
- [6] 张岐山, 郭喜江, 邓聚龙. 灰关联熵分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 16(8): 8-12.  
(Zhang Q S, Guo X J, Deng J L. Grey relation entropy method of grey relation analysis[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1996, 16(8): 8-12.)
- [7] 张岐山, 邓聚龙, 邵勇. 均衡接近度灰关联分析方法[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(11): 94-98.  
(Zhang Q S, Deng J L, Shao Y. Grey relation method of grey relation analysis based on the degree of balance and approach[J]. J of Huazhong University of Science and Technology, 1995, 23(11): 94-98.)
- [8] 房亚东, 李改, 杜来红. 基于灰熵的城际轨道交通系统决策评价方法[J]. 系统工程, 2015, 33(2): 152-158.  
(Fang Y D, Li G, Du L H. Decision-making evaluation method for regional rail transit system based on grey entropy[J]. Systems Engineering, 2015, 33(2): 152-158.)
- [9] Li Y, Zhu S, Guo S. Multi-attribute grey target decision method with three-parameter interval grey number[J]. Grey Systems, 2016, 6(2): 270-280.
- [10] Quan J, Zeng B, Wang L. Maximum entropy methods for weighted grey incidence analysis and applications[J]. Grey Systems, 2018, 8(2): 144-155.
- [11] Hou J, Su D. EJB-MVC oriented supplier selection system for mass customization[J]. J of Manufacturing Technology Management, 2007, 18(1): 54-71.
- [12] 范凯, 吴皓莹. 灰色系统关联度中一种新的分辨系数确定方法[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(7): 86-88.  
(Fan K, Wu H Y. A new method for determining the resolution coefficient in grey system correlation[J]. J of Wuhan University of Technology, 2002, 24(7): 86-88.)
- [13] 周珍, 邢瑶瑶, 孙红霞, 等. 政府补贴对京津冀雾霾防控策略的区间博弈分析[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2640-2648.  
(Zhou Z, Xing Y Y, Sun H X, et al. Interval game analysis of government subsidy to the control strategy of beijing-tianjin-hebei Smog[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2017, 37(10): 2640-2648.)
- [14] 谭吉玉, 朱传喜, 张小芝, 等. 一种新的基于TOPSIS的区间数排序法[J]. 统计与决策, 2015, 31(1): 94-96.  
(Tan J Y, Zhu C X, Zhang X Z, et al. A new TOPSIS-based interval number ordering method[J]. Statistics and Decision, 2015, 31(1): 94-96.)
- [15] 商丽媛, 谭清美. 基于灰熵模型的应急物流供应商评价[J]. 统计与决策, 2013, 29(3): 45-47.  
(Shang L Y, Tan Q M. Emergency logistics supplier evaluation based on grey entropy model[J]. Statistics and Decision, 2013, 29(3): 45-47.)
- [16] Dadeviren M, Yavuz S, Klnç N. Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(4): 8143-8151.
- [17] 聂继凯, 危怀安. 大科学工程的实现路径研究——基于原子弹制造工程和载人航天工程的案例剖析[J]. 科学学与科学技术管理, 2015, 36(9): 3-10.  
(Nie J K, Wei H A. Research on the realization path of big science engineering—A case study based on atomic bomb manufacturing engineering and manned space engineering[J]. Science of Science and Management of S&T, 2015, 36(9): 3-10.)
- [18] 聂继凯, 危怀安. 大科学工程中政府角色及其作用机理研究——基于5个大科学工程案例[J]. 科技进步与对策, 2015, 32(4): 6-10.  
(Nie J K, Wei H A. Research on the role of government and its mechanism in large scientific engineering—Based on five major scientific engineering cases[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2015, 32(4): 6-10.)
- [19] 王成程, 马尊武, 武艺, 等. 神光-激光装置建设项目范围与组织模式管理分析[J]. 项目管理技术, 2014, 12(5): 58-62.  
(Wang C C, Ma Z W, Wu Y, et al. Analysis of the scope and organization mode management of Shenguang-III laser device construction project[J]. Project Management Technology, 2014, 12(5): 58-62.)
- [20] 王成程, 何伟, 郑万国, 等. 神光-III项目外协合作联盟的建立与管理实践[J]. 项目管理技术, 2016, 14(7): 98-101.  
(Wang C C, He W, Zheng W G, et al. The establishment and management practice of the Shenguang-III project alliance[J]. Project Management Technology, 2016, 14(7): 98-101.)

### 作者简介

刘人境(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事企业战略、群体智能、多属性决策及其应用等研究, E-mail: renjingl@mail.xjtu.edu.cn;

高曦含(1997—), 女, 本科生, 从事大科学工程管理、多属性决策的研究, E-mail: 15809230841@163.com;

张光军(1968—), 男, 博士生, 从事项目群管理、采购管理及其应用的研究, E-mail: 1198275318@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)