

基于前景理论和模糊理论的在线多属性采购拍卖 供应商选择决策

王世磊, 屈绍建[†], 马刚

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在线多属性采购拍卖已在工程招标、政府采购等诸多领域有着广泛应用. 由于在实际的采购拍卖活动中, 往往采购方对采购商品的相关属性指标存在不同程度的不确定性, 采购商在对采购品属性的描述及相应权重的确定上都存在困难, 进而导致采购商在面临供应商选择决策上难度增大. 为了解决这些问题, 从采购方利益角度出发, 考虑风险态度对决策者行为的影响, 引入前景理论, 研究 4 种模糊描述方式并存情况下的在线多属性采购拍卖的供应商选择决策问题; 在综合考虑主客观因素确定属性权重的情况下, 提出一种新的在线多属性采购拍卖供应商选择决策方法; 最后通过相关的算例分析与比较说明所提出方法的有效性.

关键词: 在线多属性采购拍卖; 不确定; 前景理论; 模糊理论; 供应商选择; 决策

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2018.1768

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王世磊, 屈绍建, 马刚. 基于前景理论和模糊理论的在线多属性采购拍卖供应商选择决策 [J]. 控制与决策, 2020, 35(11): 2637-2645.

Decision method of supplier selection for online multi-attribute procurement auction based on prospect theory and fuzzy theory

WANG Shi-lei, QU Shao-jian[†], MA Gang

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Online multi-attribute procurement auction has been widely used in many fields, such as project bidding, government procurement and so on. However, in the actual procurement auction, purchasers often have varying degrees of uncertainty about the information such as commodity related attributes. So it is difficult to describe related attributes and determine the corresponding weights, thereby increasing the difficulty of purchaser's decision on supplier selection. To deal with these problems, from the purchaser's interests, considering the influence of the risk attitude on decision-making behavior and introduce the prospect theory, we study the decision question of supplier selection for online multi-attribute procurement auction in the case of coexistence of four fuzzy description modes. Under the condition of comprehensive considering of the subjective and objective factors for determining the attribute weights, we propose a new decision method of supplier selection for online multi-attribute procurement auction. Finally, relevant example analysis and comparison illustrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: online multi-attribute procurement auction; uncertainties; prospect theory; fuzzy theory; supplier selection; decision

0 引言

随着互联网技术及电子商务的快速发展, 在线拍卖日益成为一种普遍且重要的市场交易方式, 它越来越多地应用于工业采购、供应链管理和电子商务等诸多领域. 如国外的知名拍卖平台 eBay 以及国内的易趣网、一拍网等拍卖网站相继出现, 而且在线拍卖的成交额不断增加, 使得在线拍卖成为当前拍卖领

域的一个研究热点^[1]. 然而, 早期的在线拍卖研究大多仅以价格确定中标者和拍品的分配, 像交货时间、产品质量、信用等级等重要的非价格因素往往缺乏考虑, 这从不同程度上影响了拍卖的最终效果, 从而促使了在线多属性拍卖的产生, 而它主要以在线多属性采购拍卖^[2]的形式应用于各个领域. 在线多属性采购拍卖从创建报价请求(RFQ)开始, 先通过RFQ描

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-02-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71571055).

[†]通讯作者. E-mail: qushaojian@163.com.

述买方的具体要求,然后邀请多个合格的供应商参与投标,最终建立一个完整的多供应商在互联网上相互竞价以试图赢得交易的拍卖过程.纵观文献[2-3]不难看出,在线多属性采购拍卖已经广泛应用于多个领域,其在经济社会发展中的重要作用日益增强.

在多属性采购拍卖的理论和应用研究方面, Che^[4]第一次较为系统地研究了多属性采购拍卖,并将其应用到美国国防部采购中,他还同时证明了二维情形下的收入等价原理,将一级和二级价格密封式拍卖推广到多属性采购拍卖领域;随后, David^[5]将多属性拍卖推广到多个属性的情形,不断完善和丰富相关的理论内容.与此同时, Bichler^[6]从实验经济学入手,对多属性拍卖与传统的单一价格拍卖进行了比较研究,结果表明多属性采购拍卖相比单一价格采购拍卖提高了采购商的效用水平.多属性采购拍卖的明显优点以及在线拍卖的便捷使得在线多属性采购拍卖成为当前拍卖领域的研究热点.

目前关于在线多属性采购拍卖供应商选择决策方法有定性方法、定量方法及两者相结合的方法,主要包括:数据包络分析(DEA)^[7]、层次交互式方法^[8]、逼近理想解的排序方法(TOPSIS)^[9]、模糊层次分析法(FAHP)^[10]、网络分析法(ANP)^[11]和偏好顺序结构评估法(PROMETHEE)^[12]等.本文主要从决策论方向研究采购方在在线多属性采购拍卖中对于供应商的选择决策方法.在实际采购活动中,由于采购方对整个市场所要采购产品的价格、质量等属性重要程度不能确切把握,而且有些属性不宜直接用精确数字进行描述,加之采购者对风险的偏好差异等模糊不确定因素的存在,使得采购方在确定属性权重和选择评价策略时难度加大.故在线多属性采购拍卖中采购方需要考虑如何选择合理的采购商品属性,如何确定合适的属性权重分配,以及如何构建能实现自身利益最优化的评价指标等问题.

目前关于模糊不确定情形下多属性决策问题的相关研究已比较丰富.例如:文献[13-14]研究了属性值均为三角模糊数表述的多属性决策方法,文献[15-16]研究了存在不确定语言变量情形下的风险型多属性决策方法,文献[17-18]等研究了同时存在精确数、区间数、三角模糊数、梯形模糊数和语义短语中的多种表述方式的多属性决策方法.但是,研究同时考虑区间数、三角模糊数、梯形模糊数、语义模糊术语4种模糊描述方式的混合不确定情形下的决策方法,并将其应用到在线多属性采购拍卖中供应商选择决策问题中的文献目前还鲜有报道.

为了拓展和完善在线多属性采购拍卖相关的研究内容,本文研究存在前述4种模糊描述方式的在线多属性采购拍卖关于供应商的选择决策问题,同时为了综合考虑采购方的风险态度,参考文献[18-21]引入前景理论相关知识,构建一种新的基于模糊理论与前景理论不确定情形下的在线多属性采购拍卖中竞胜供应商的选择决策方法,该方法相较于文献[17]方法更具一般性和适用性.

此外,在本文所提出决策方法参考点选取和属性权重的确定环节,为了避免许多文献由决策者直接给定参考点和属性权重等主观性过强带来的一些问题,以采购商投标信息为基础确定合理的参考点向量,并且综合考虑采购方心理预期(主观)和供应商投标属性信息(客观)两方面,将得到的主客观权重进行算术平均来确定最终属性权重,使得多属性采购拍卖供应商选择决策更加合理和有效.最后结合在线多属性采购拍卖的具体算例进行分析,验证了所提出方法的有效性.

1 模糊理论

由于采购拍卖实践中常存在各种不确定性,本文充分利用模糊数进行不确定性刻画的优势对采购商品的相关属性进行描述.下面主要介绍几种模糊数概念.

1.1 区间数定义

定义1^[19] 称 $\tilde{a} = [a^L, a^U] = \{a^L \leq a \leq a^U, a \in R\}$ 为一个区间数,其中 a^L 、 a^U 为区间数的上界和下界.

1.2 三角模糊数定义

定义2^[20] 称模糊数 $\tilde{a} = [a^L, a^M, a^U]$ 为三角模糊数,其中 $-\infty < a^L \leq a^M \leq a^U < +\infty$,且其具有如下隶属度函数:

$$\mu_{\tilde{a}} = \begin{cases} (x - a^L)/(a^M - a^L), & a^L < x \leq a^M; \\ (a^U - x)/(a^U - a^M), & a^M < x \leq a^U; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

1.3 梯形模糊数定义

定义3^[21] 称模糊数 $\tilde{a} = [a^L, a^M, a^N, a^U]$ 为梯形模糊数,其中 $a^L \leq a^M \leq a^N \leq a^U$,且其具有如下隶属度函数:

$$\mu_{\tilde{a}} = \begin{cases} (x - a^L)/(a^M - a^L), & a^L < x \leq a^M; \\ 1, & a^M < x \leq a^N; \\ (a^U - x)/(a^U - a^N), & a^N < x \leq a^U; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

1.4 模糊语义术语集

定义4^[16] 设H是模糊语义术语集,则其形式可表示为 $H = \{h_k | k = 0, 1, \dots, T\}$. 其中: h_k 表示第k+1个模糊语义术语,一般T取偶数,如 $T = 6$ 时, $H = \{h_0, h_1, \dots, h_6\}$,可以分别对应“非常差、很差、差、一般、好、很好、非常好”7种语义术语. 为了便于处理和计算,通常将模糊语义术语转化成三角模糊数的形式,具体方法^[20]如下:

$$h_k = \tilde{a}_k = \left\{ \max \left\{ \frac{K-1}{T}, 0 \right\}, \frac{K}{T}, \min \left\{ \frac{K+1}{T}, 1 \right\} \right\}. \quad (3)$$

2 前景理论

由于实际采购环境中存在各种信息不确定,必将给采购商的决策带来一些潜在的风险. 针对这种问题,引入Kahneman等^[22]于1979年提出的前景理论,可以较好地处理采购方面对风险时的决策问题. 前景理论主要根据前景价值的大小确定决策方案,而前景价值主要由前景价值函数 $\nu(x)$ 和概率权重函数 $\omega(P)$ 共同确定. 前景价值具体表达式为

$$U = \sum \omega(P)\nu(x). \quad (4)$$

2.1 前景价值函数

价值函数主要用于刻画属性值相对于参照点的损失和增益情况,可表示为

$$\nu(x) = \begin{cases} (\Delta x)^\alpha, & \Delta x \geq 0; \\ -\theta(-\Delta x)^\beta, & \Delta x < 0. \end{cases} \quad (5)$$

其中: Δx 表示属性值x与参考点的差值,大于0表示收益,小于0表示损失; $0 < \alpha, \beta < 1$ 分别表示收益与损失区域的价值函数的凹凸程度; $\theta > 1$ 表示损失规避系数,表明决策者对损失更加敏感.

2.2 概率权重价值函数

设 $\omega(P)$ 是决策权重函数,亦称为主观概率,其形式可表示为以下两种情形:

$$\omega^+(P) = \frac{p^\gamma}{(p^\gamma + (1-p)^\gamma)^{1/\gamma}}, \quad (6)$$

$$\omega^-(P) = \frac{p^\delta}{(p^\delta + (1-p)^\delta)^{1/\delta}}. \quad (7)$$

Tversky等^[23]通过实验研究得到 $\gamma = 0.61, \delta = 0.69$,也有学者研究得到略微不同的参数取值^[15],但总体上由于两者相差无几^[24],为了便于分析,常令 $\omega^+(P) = \omega^-(P) = \omega(P)$.

为了简化计算,本文假定 $\omega(P)$ 即为决策者的主观预期的属性权重 ω ;同时,考虑到决策者这种主观权重可能带来的弊端,结合市场客观属性信息(即供应商的投标属性值)综合确定属性的权重,使最终决

策结果更加合理有效.

3 在线多属性采购拍卖供应商选择决策问题描述

本文假设一个采购商以在线采购拍卖的方式采购某种所需商品,有m个符合规范的供应商参与竞标. 采购商在发布采购招标信息中说明了商品的各种属性要求(设总属性个数为n). 通过供应商的投标信息,按照一定的程序进行最优供应商的选择决策(为了便于研究,假定每种商品属性值用同一种模糊表述形式进行刻画). 用以下多元组简单描述整个在线多属性采购拍卖供应商选择决策过程: $(P, S, M, A, N, \omega, \omega', Q, \tilde{B}, E, V, U)$,具体符号含义如下:

- 1) P表示一个采购者,其在线发布所要采购商品的基本信息和关键评价属性.
- 2) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示供应商的集合, s_i 表示第i个供应商.
- 3) $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示供应商集合S的指标集.
- 4) A表示采购产品全部n个属性集合,不同属性可以用不同模糊描述形式进行表示,集合A表示为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\} = A^I \cup A^{Tri} \cup A^{Tra} \cup A^L = A^B \cup A^C$. 其中: $A^I, A^{Tri}, A^{Tra}, A^L$ 分别表示用区间数、三角模糊数、梯形模糊数和模糊语义术语描述的属性集合; A^B 表示效益型属性集合; A^C 表示成本型属性集合.
- 5) N表示所有商品属性的指标集合,可表示为 $N = \{1, 2, \dots, n\} = N_I \cup N_{Tri} \cup N_{Tra} \cup N_L = N_B \cup N_C$. 其中: N_I 表示集合 A^I 的指标集, N_{Tri} 表示集合 A^{Tri} 的指标集, N_{Tra} 表示集合 A^{Tra} 的指标集, N_L 表示集合 A^L 的指标集, N_B 表示集合 A^B 的指标集, N_C 表示集合 A^C 的指标集.
- 6) $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 表示采购方对各属性设置的主观预期权重向量, ω_j 表示第j个属性的预期权重.
- 7) $\omega' = (\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_n)$ 表示根据投标属性值信息按最大偏差法获得的市场客观属性权重向量, ω'_j 表示第j个属性的客观权重.
- 8) $Q = [\tilde{q}_{ij}]_{m \times n}$ 表示所有供应商提交的竞标属性值构成的评价矩阵,其中 \tilde{q}_{ij} 表示供应商i的投标对第j个属性的评估值.
- 9) $\tilde{B} = [\tilde{b}_{ij}]_{m \times n}$ 表示规范化评价矩阵,其中 \tilde{b}_{ij} 表示供应商i的投标对第j个属性的评估值.
- 10) $E = (\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_n)$ 表示参考点向量,其中 \tilde{e}_j

表示第 j 个属性的参考值.

11) $V = [\nu(\tilde{b}_{ij})]_{m \times n}$ 表示前景值矩阵, 其中 $\nu(\tilde{b}_{ij})$ 表示第 i 个供应商对第 j 个属性投标值的前景值.

12) U 表示各投标方案属性值的综合前景价值.

4 在线多属性采购拍卖供应商选择决策方法

本节重点介绍基于前景理论和模糊理论的4种不确定性描述方式并存情形下的在线多属性采购拍卖供应商的选择决策方法, 其具体过程如下.

4.1 在线发布采购商品信息

假设采购商基于公司实际需要, 结合相关部门意见, 确定出 n 种关键的评价采购商品的属性, 记为 $A_1 \sim A_n$, 并根据历史经验和自身利益需要, 初步设定这 n 种属性的预期权重为 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, 然后将上述采购商品信息进行在线发布, 进入在线采购的招标环节.

4.2 构建初始评价矩阵

采购商在线发布采购信息后, 合格供应商会根据相关要求和自身实际进行投标, 采购方在线收集汇总所有合格供应商在定期限内的投标信息, 构建初始评价矩阵 Q , 即

$$Q = [\tilde{q}_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{q}_{11} & \tilde{q}_{12} & \dots & \tilde{q}_{1n} \\ \tilde{q}_{21} & \tilde{q}_{22} & \dots & \tilde{q}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{q}_{m1} & \tilde{q}_{m2} & \dots & \tilde{q}_{mn} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

4.3 规范化评价矩阵

由于不同属性的刻画方式不同, 下面分类型对评价矩阵进行规范化处理.

1) 当属性值用区间数描述时, 相应的规范化公式为

$$\tilde{b}_{ij} = \begin{cases} \left[\frac{q_{ij}^L}{W_1}, \frac{q_{ij}^U}{W_1} \right], & i \in M, j \in N_B \cap N_I; \\ \left[\frac{1}{W_2 q_{ij}^U}, \frac{1}{W_2 q_{ij}^L} \right], & i \in M, j \in N_C \cap N_I. \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$W_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^m [(q_{ij}^L)^2 + (q_{ij}^U)^2]}, \quad (10)$$

$$W_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^m [(1/q_{ij}^L)^2 + (1/q_{ij}^U)^2]}. \quad (11)$$

2) 当属性值以三角模糊数描述时, 相应的规范化公式为

$\tilde{b}_{ij} =$

$$\begin{cases} \left[\frac{q_{ij}^L}{W_1}, \frac{q_{ij}^M}{W_1}, \frac{q_{ij}^U}{W_1} \right], & i \in M, j \in N_B \cap N_{Tri}; \\ \left[\frac{1}{W_2 q_{ij}^U}, \frac{1}{W_2 q_{ij}^M}, \frac{1}{W_2 q_{ij}^L} \right], & i \in M, j \in N_C \cap N_{Tri}. \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$W_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^m [(q_{ij}^L)^2 + (q_{ij}^M)^2 + (q_{ij}^U)^2]}, \quad (13)$$

$$W_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^m [(1/q_{ij}^L)^2 + (1/q_{ij}^M)^2 + (1/q_{ij}^U)^2]}. \quad (14)$$

3) 当属性值以梯形模糊数表述时, 相应的规范化公式为

$$\tilde{b}_{ij} = \begin{cases} \left[\frac{q_{ij}^L}{W_1}, \frac{q_{ij}^M}{W_1}, \frac{q_{ij}^N}{W_1}, \frac{q_{ij}^U}{W_1} \right], & i \in M, j \in N_B \cap N_{Tra}; \\ \left[\frac{1}{W_2 q_{ij}^U}, \frac{1}{W_2 q_{ij}^M}, \frac{1}{W_2 q_{ij}^N}, \frac{1}{W_2 q_{ij}^L} \right], & i \in M, j \in N_C \cap N_{Tra}. \end{cases} \quad (15)$$

其中

$$W_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^m [(q_{ij}^L)^2 + (q_{ij}^M)^2 + (q_{ij}^N)^2 + (q_{ij}^U)^2]}, \quad (16)$$

$$W_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^m [(1/q_{ij}^L)^2 + (1/q_{ij}^M)^2 + (1/q_{ij}^N)^2 + (1/q_{ij}^U)^2]}. \quad (17)$$

4) 当属性值用模糊语义术语表述时, 先将模糊语义术语按照定义4转化为对应的三角模糊数, 再按照三角模糊数规范化方法处理.

经过以上处理可得规范化的评价矩阵如下:

$$B = [\tilde{b}_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{b}_{11} & \tilde{b}_{12} & \dots & \tilde{b}_{1n} \\ \tilde{b}_{21} & \tilde{b}_{22} & \dots & \tilde{b}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{b}_{m1} & \tilde{b}_{m2} & \dots & \tilde{b}_{mn} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

4.4 确定参考点向量

为避免文献[20]直接给出采购者的期望参考点主观性过强, 本文从采购方利益角度出发, 以供应商的投标信息为客观基础, 以最大化采购方效益为出发点, 确定基本参考点向量 $E = (\tilde{e}_1, \tilde{e}_2, \dots, \tilde{e}_n)$, 该方法相比文献[17]的方法更简单易行, 该向量中元素为

$$\tilde{e}_j = \begin{cases} \max(\tilde{b}_{ij}), & i \in M, j \in N_B; \\ \min(\tilde{b}_{ij}), & i \in M, j \in N_C. \end{cases} \quad (19)$$

4.5 构建各供应商投标属性值的前景值矩阵

经过前几步处理后,本节主要介绍如何构建各供应商投标方案属性值的前景值矩阵,具体步骤如下.

4.5.1 比较 \tilde{b}_{ij} 与 \tilde{e}_j 的大小

1) 当属性值用区间数表述时,按文献[20]的比较方法比较大小,分别记

$$h(\tilde{b}_{ij}) = \frac{1}{2}(b_{ij}^L + b_{ij}^U), i \in M, j \in N_I;$$

$$h(\tilde{e}_j) = \frac{1}{2}(e_j^L + e_j^U), j \in N_I;$$

$$k(\tilde{e}_j) = \frac{1}{2}(e_j^L - e_j^U), j \in N_I.$$

① 当 $h(\tilde{b}_{ij}) \neq h(\tilde{e}_j)$ 时:若 $h(\tilde{b}_{ij}) > h(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} > \tilde{e}_j$; 若 $h(\tilde{b}_{ij}) < h(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} < \tilde{e}_j$.

② 当 $h(\tilde{b}_{ij}) = h(\tilde{e}_j)$ 时:若 $k(\tilde{b}_{ij}) > k(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} < \tilde{e}_j$; 若 $k(\tilde{b}_{ij}) = k(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} = \tilde{e}_j$; 若 $k(\tilde{b}_{ij}) < k(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} > \tilde{e}_j$.

2) 当属性值都用三角模糊数表述时,参考文献[24],利用模糊期望值方法比较大小,记

$$z(\tilde{b}_{ij}) = \frac{1}{6}(b_{ij}^L + 4b_{ij}^M + b_{ij}^U), i \in M, j \in N_{Tri};$$

$$z(\tilde{e}_j) = \frac{1}{6}(e_j^L + 4e_j^M + e_j^U), j \in N_{Tri}.$$

若 $z(\tilde{b}_{ij}) > z(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} > \tilde{e}_j$; 若 $z(\tilde{b}_{ij}) = z(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} = \tilde{e}_j$; 若 $z(\tilde{b}_{ij}) < z(\tilde{e}_j)$, 则 $\tilde{b}_{ij} < \tilde{e}_j$.

3) 当属性值用梯形模糊数表述时,类似三角模糊数比较方法进行大小比较,具体过程不在赘述.

4) 当属性值用模糊语义术语表述时,利用模糊语义术语集 H 中的两种基本算子结合进行大小比较[17].

① 否算子:若 $j = T - i$, 则 $\text{neg}(h_i) = h_j$;

② 比较算子:若 $i \geq j$, 则有 $h_i \geq h_j$.

4.5.2 计算投标属性值 \tilde{b}_{ij} 与参考点 \tilde{e}_j 的距离 d_{ij}

由基本的模糊数欧氏距离公式[17-21]计算供应商各投标属性值与对应参考点的距离如下:

$$d_{ij} = \begin{cases} \sqrt{\frac{(b_{ij}^L - e_j^L)^2 + (b_{ij}^U - e_j^U)^2}{2}}, & i \in M, j \in N_I; \\ \sqrt{\frac{(b_{ij}^L - e_j^L)^2 + (b_{ij}^M - e_j^M)^2 + (b_{ij}^U - e_j^U)^2}{3}}, & i \in M, j \in N_{Tri} \cup N_L; \\ \sqrt{\frac{(b_{ij}^L - e_j^L)^2 + (b_{ij}^M - e_j^M)^2 + (b_{ij}^N - e_j^N)^2 + (b_{ij}^U - e_j^U)^2}{4}}, & i \in M, j \in N_{Tra}. \end{cases} \quad (20)$$

4.5.3 构建投标属性值的前景值矩阵

基于前景理论:当 $\tilde{b}_{ij} > \tilde{e}_j$ 时,记 $\Delta x = d_{ij}$, 此时表示增益值;当 $\tilde{b}_{ij} < \tilde{e}_j$ 时,记 $\Delta x = -d_{ij}$ 为损失值. 然后根据下式计算任一供应商 i 投标方案的第 j 个属性的前景值 $\nu(\tilde{b}_{ij})$:

$$\nu(\tilde{b}_{ij}) = \begin{cases} (\Delta x)^\alpha, & \tilde{b}_{ij} \geq \tilde{e}_j, i \in M, j \in N; \\ -\theta(\Delta x)^\alpha, & \tilde{b}_{ij} < \tilde{e}_j, i \in M, j \in N. \end{cases} \quad (21)$$

最后构建各个供应商投标属性值的前景值价值矩阵 $V = [\nu(\tilde{b}_{ij})]_{m \times n}$.

4.6 确定采购商品的属性权重

属性权重的确定是多属性采购拍卖以及多属性决策的关键环节[25], 直接影响了最终的采购和决策效果[26]. 大多文献在设置属性权重时,多以采购者主观设定权重来实现自身利益最大化,但在实际的采购过程中,由于采购者对市场情况往往不能较好掌握,完全从主观角度设置采购商品的属性权重会带来一些不良的结果,可能因此将合适的供应商排除在最终的被选之列. 为此本文综合考虑采购商的主观追求的合理性以及市场客观投标信息能缩减预测误差的作用,提出一种综合的权重确定方法,具体步骤如下.

1) 首先采用类似文献[27]方法的最大偏差法计算属性权重 $\omega'_j (j = 1, 2, \dots, n)$, 属性值偏差越大,表明属性影响作用越大,该属性权重越大. 属性权重的计算公式为

$$\omega'_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m d(\tilde{b}_{ij}, \tilde{b}_{kj})}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m d(\tilde{b}_{ij}, \tilde{b}_{kj})}, i, k \in M, j \in N. \quad (22)$$

2) 将式(22)得到的属性权重向量 $\omega' = (\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_n)$ 与采购商在线发布的预期属性权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 进行加权平均,得到最终的权重向量 $\bar{\omega} = (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n)$. 其中: $\bar{\omega}_j$ 表示第 j 个属性的权重,其值由下式求得:

$$\bar{\omega}_j = \frac{1}{2}(\omega_j + \omega'_j), j \in N. \quad (23)$$

4.7 计算各供应商投标中属性的综合前景值

由第 4.5 节和 4.6 节得到的结果,根据前景理论,计算各供应商投标中属性的综合前景值如下:

$$U_i = \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_j \nu(\tilde{b}_{ij}), i \in M, j \in N. \quad (24)$$

综合前景值越大的投标对应的供应商排名越靠前,采购商将依据最终排名进行供应商的选择决策.

5 在线多属性采购拍卖供应商选择决策步骤

本节将在线多属性采购拍卖获胜供应商的选择决策步骤归纳概括如下。

step 1: 采购方在线发布采购商品的基本信息, 指明进行综合评价的 N 个关键属性, 并给出它们的初始预期权重向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$;

step 2: 符合规范的供应商根据自身实际和采购方需求, 在规定时间内在线提交各自标书;

step 3: 采购方以参与在线拍卖的供应商的投标信息为基础, 制定初始评价矩阵 Q ;

step 4: 将评价矩阵按照式(9)~(18)进行规范化处理, 得到规范评价矩阵 B ;

step 5: 由式(19)确定参考点向量 E ;

step 6: 基于规范化评价矩阵和参考点向量, 比较各投标属性值与参考点的大小关系, 并按照式(20)计算投标属性值 \tilde{b}_{ij} 与参考点 \tilde{e}_j 的距离 d_{ij} ;

step 7: 根据所求距离 d_{ij} , 结合式(21)计算每个供应商不同属性投标值的前景值, 并构建前景价值矩阵 V ;

step 8: 根据式(22)计算各属性的客观权重值, 组成权重向量 $\omega' = (\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_n)$;

step 9: 结合 step 8 所得客观权重向量与 step 1 的主观预期权重向量, 由式(23)计算得到最终的综合属性权重向量 $\bar{\omega} = (\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \dots, \bar{\omega}_n)$;

step 10: 由式(24)计算每个供应商的投标方案所有属性值的综合前景值 U_i ;

step 11: 采购方按投标方案综合前景值高低进行供应商的选择决策, 达成最终采购协议后采购拍卖结束。

6 算例分析

某一企业以在线拍卖方式采购某种所需商品, 其通过某拍卖网站在线发布相关招标信息, 对产品基本要求和关键评标属性进行了说明。现有4个符合规范的供应商参与在线投标, 假定各供应商投标相互独立, 相互之间不存在共谋现象。

采购商根据历史经验选取采购商品4种关键评标属性: A_1 为产品价格(成本型属性), A_2 为产品质

量评分(利益型属性), A_3 为交货延迟时间(成本型属性), A_4 为售后服务水平(利益型属性)。假设4种属性之间相互独立。采购商公布预期属性权重向量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = (0.3, 0.3, 0.2, 0.2)$ 。

关于4种关键商品评价属性的描述如下:

1) “产品价格”属性: 因为市场不确定因素较多, 可能存在交易前调整的情况, 价格可能在某一给定价位上下浮动, 所以采购商要求供应商投标用三角模糊数进行描述;

2) “产品质量评分”: 一般由企业根据权威第三方评价机构的评分得到(假定取值0~10), 考虑时间因素影响, 该属性值适合用梯形模糊数表述;

3) “产品交货延迟时间”: 表示产品交货可能的延迟天数, 该属性值适合用区间数表述;

4) “售后服务水平”: 由于不宜用具体数字刻画, 该属性值宜用模糊语义术语表述, 可分为“低、较低、中等、较高、高”5种模糊语义描述不同的等级水平。

根据本文给出的决策方法进行供应商选择决策, 具体过程如下。

step 1: 采购方在线发布采购商品的基本信息, 指明进行综合评价的4个关键属性, 并给出它们的初始预期权重向量

$$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_4) = (0.3, 0.3, 0.2, 0.2).$$

step 2: 符合规范的供应商按照采购商的相关要求和自身实际情况, 在规定时间内完成在线投标。

step 3: 采购方根据供应商的在线投标信息制定初始评价矩阵 Q , 即

$$Q = [\tilde{q}_{ij}]_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} [8, 9, 10] & [5, 6, 7, 8] & [1, 3] & \text{较高} \\ [6, 7, 8] & [6, 7, 8, 9] & [1, 4] & \text{中等} \\ [6, 7, 8] & [6, 7, 8, 9] & [1, 4] & \text{较高} \\ [9, 10, 11] & [4, 5, 6, 7] & [1, 3] & \text{中等} \end{bmatrix},$$

其中 \tilde{q}_{ij} 表示供应商 i 对第 j 个属性的评价值。

step 4: 将 Q 中第4列的语义模糊术语按照定义4转化成对应的三角模糊数, 分别为 $[0.5, 0.75, 1]$, $[0.25, 0.5, 0.75]$, $[0.5, 0.75, 1]$, $[0.25, 0.5, 0.75]$ 。

step 5: 按照式(12)~(19)对初始评价矩阵 Q 进行标准化得到规范化评价矩阵 B , 结果见表1。

表1 规范矩阵评价矩阵

B	A_1	A_2	A_3	A_4
S_1	[0.225 8, 0.250 8, 0.143 3]	[0.181 4, 0.217 6, 0.253 9, 0.290 2]	[0.159 9, 0.479 6]	[0.251 7, 0.323 5, 0.431 3]
S_2	[0.282 2, 0.322 5, 0.376 3]	[0.217 6, 0.253 9, 0.290 2, 0.326 5]	[0.119 9, 0.479 6]	[0.107 8, 0.215 7, 0.323 5]
S_3	[0.282 2, 0.322 5, 0.376 3]	[0.217 6, 0.253 9, 0.290 2, 0.326 5]	[0.119 9, 0.479 6]	[0.251 7, 0.323 5, 0.431 3]
S_4	[0.205 2, 0.225 8, 0.250 8]	[0.145 1, 0.181 4, 0.217 6, 0.253 9]	[0.159 9, 0.479 6]	[0.107 8, 0.251 7, 0.323 5]

step 6: 根据 4.5.1 节模糊数比较方法比较上述矩阵每列元素间大小, 从采购商角度出发, 由式 (19) 确定参考点向量 E 为 $([0.2822, 0.3225, 0.3763], [0.2176, 0.2539, 0.2902, 0.3265], [0.1599, 0.4796], [0.2157, 0.3235, 0.4313])$.

step 7: 按照式 (20) 计算每个投标属性值与参考点向量对应元素的距离 d_{ij} , 结果见表 2.

表2 属性值与参考点间距离

d_{ij}	A_1	A_2	A_3	A_4
S_1	0.0757	0.0363	0.0000	0.0000
S_2	0.0000	0.0000	0.0283	0.1078
S_3	0.0000	0.0000	0.0283	0.0000
S_4	0.1017	0.0726	0.0000	0.1078

step 8: 根据式 (21) 计算供应商投标属性值的前景值, 并构建前景值矩阵 $V = [\nu(\tilde{b}_{ij})]_{m \times n}$ (本文采用文献 [22] 的研究结果, 选定 $\alpha = \beta = 0.88, \theta = 2.25$), 结果见表 3.

表3 投标属性值对应的前景价值矩阵

V	A_1	A_2	A_3	A_4
S_1	-0.2322	-0.1216	0.0000	0.0000
S_2	0.0000	0.0000	-0.0977	-0.3169
S_3	0.0000	0.0000	-0.0097	0.0000
S_4	-0.3010	-0.2238	0.0000	-0.3169

step 9: 基于最大偏差法, 根据式 (22) 计算各属性的客观权重向量为

$$\omega' = (0.3230, 0.2152, 0.0960, 0.3658).$$

step 10: 结合 step 1 的初始预期权重向量 ω 与 step 9 的结果 ω' , 根据式 (23) 构成最终的权重向量

$$\bar{\omega} = (0.3115, 0.2576, 0.1480, 0.2829).$$

step 11: 基于式 (24) 计算各供应商的投标方案属性值的综合前景值 U_i , 结果见表 4.

表4 综合前景值

S_i	S_1	S_2	S_3	S_4
U_i	-0.1661	-0.0890	-0.0289	-0.1793

step 12: 由综合前景值大小关系 (值越大, 投标方案越好) 确定 4 个供应商的偏好顺序为

$$S_3 \succ S_2 \succ S_1 \succ S_4.$$

step 13: 采购方根据偏好排序及实际需求, 依次选择供应商, 并在线与拍卖胜出的供应商达成采购协

议, 整个在线采购拍卖结束.

由以上分析过程可以看出, 本文提出的在线多属性采购拍卖供应商选择决策方法在实际的采购拍卖中的确是可行的, 为了进一步说明该方法的有效性, 本文参考文献 [14] 的做法, 将所有模糊数全部转化为精确数, 再转化成特殊的三角模糊数, 然后用 TOPSIS 方法进行偏好排序. 以每个供应商投标方案接近正理想解方案同时远离负理想解的相对贴近度 V_i 为指标 (值越大表明投标方案越好), 结果见表 5.

表5 投标方案相对贴近度

S_i	S_1	S_2	S_3	S_4
V_i	-2.9576	-4.0180	-0.7533	-9.0284

由 TOPSIS 方法得到最终采购商针对供应商选择的偏好排序为

$$S_3 \succ S_1 \succ S_2 \succ S_4,$$

与本文存在一定的差异, 但最优供应商的选择结果一致, 表明本文方法对于处理模糊多属性采购拍卖供应商选择决策问题是有效的. 同时, 由于本文考虑了更多的实际因素影响, 所得结果更有参考价值.

下面分析仅考虑供应商投标评价主观权重或客观权重情况下, 本文第 6 节算例中采购商对供应商选择的偏好排序结果 (具体计算过程不再详述, 这里仅给出最终的排序结果):

1) 主观权重情形下

$$S_3 \succ S_2 \succ S_4 \succ S_1; \tag{25}$$

2) 客观权重情形下

$$S_3 \succ S_2 \succ S_1 \succ S_4. \tag{26}$$

由此可见, 仅考虑主观权重情形时, 排序结果和综合考虑主客观权重情况下的结果存在偏差, 当存在多个供应商投标或进行多源采购时会对采购商的效用产生较大的影响. 而单独考虑客观权重时, 虽然排序结果一样, 但具体计算的综合前景值变化较大, 当人数较多时误差就凸显出来, 而且不好顾及采购者对采购品特殊要求的实际诉求.

综合以上算例分析及不同方法、不同权重情形下的结果比较, 可以看出, 本文在多种不确定模糊刻画方式共存情形下, 综合考虑主客观因素对属性权重的影响以及采购者风险态度对决策行为的影响所提出的在线多属性采购拍卖供应商选择决策方法是可行、有效的, 且更能反映采购拍卖活动中存在的现实问题, 可为今后的在线多属性采购拍卖实践提供一定的理论指导和方法支持.

7 结论

在线多属性采购拍卖已经在国内外经济社会发展的诸多领域得到了广泛应用,而拍卖过程中最为关键的环节就是供应商的选择决策问题.本文考虑到采购方在多属性采购拍卖过程中对采购商品属性相关信息常存在一定程度的不确定性,从而引进模糊理论相关概念对采购品属性进行合理刻画,并利用模糊基本知识较好地处理相关计算和大小比较问题.同时考虑到采购者面对风险时的规避态度和有限理性行为,引入了前景理论相关知识进行决策分析.此外,在属性权重的确定上,综合考虑了采购商的主观预期和从供应商投标信息中获取的客观市场属性权重,将两者有机结合在一起进行最终属性权重的确定.

本文旨在提出一种更具一般性的不确定情境下的在线多属性采购拍卖供应商选择决策方法,而且通过数值算例也验证了所提出的方法的有效性.本文所做工作丰富了现有的研究成果,为未来的采购拍卖中供应商选择的决策提供了一种简明而且便捷的决策参考.然而,虽然当前越来越多的国内外企业都应用在线多属性采购拍卖来采购商品,但相关理论的研究仍然滞后.因此,有关在线多属性采购拍卖方面的理论与方法研究仍然是目前一个值得深入研究的热点.基于本文研究提出以下几点展望与思考:

1) 本文仅从理论方法层面进行了研究,能否将本文方法运用到实际的采购拍卖中取得好的效果,从实证分析角度进行研究是接下来需要做的工作;

2) 未来可以考虑属性权重也是模糊数进行描述的情形,结合模糊目标规划进行相关问题的求解分析;

3) 如何充分结合计算机网络技术,构建基于多主体的实时动态采购招标平台,从而来提高采购拍卖交易的效率、节约双方参与成本,将成为接下来的研究热点;

4) 如何将在线多属性在线采购拍卖和线下常规供应链渠道合理结合在一起,共同为企业的采购提供决策支持,也是值得进一步研究的话题;

5) 如何合理地将智能算法、模糊优化、多目标决策等与传统的拍卖理论结合起来,促进在线多属性采购拍卖理论发展,是值得深入研究的方向;

6) 当考虑包含多种商品属性以及供应商信誉、资质等多个层级属性要求时,针对混合不确定多级属性情形下的多属性采购拍卖问题,如何寻找好的供应商选择决策方法将值得未来研究.

参考文献(References)

- [1] 刘树林,王明喜. 拍卖基本理论与扩展[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-4.
(Liu S L, Wang M X. Basic theory and extension of auction[M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-4.)
- [2] Long P, Teich J, Wallenius H, et al. Multi-attribute online reverse auctions: Recent research trends[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 242(1): 1-9.
- [3] 刘树林,王明喜. 多属性采购拍卖理论与应用评述[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(1): 183-192.
(Liu S L, Wang M X. Multi-attribute procurement auction theory and application: A review with comments[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2009, 17(1): 183-192.)
- [4] Che Y K. Design competition through multidimensional auctions[J]. *Rand Journal of Economics*, 1993, 24(4): 668-680.
- [5] David E. Bidding in sealed-bid and English multi-attribute auctions[J]. *Decision Support System*, 2006, 42(2): 527-556.
- [6] Bichler M. An experimental analysis of multi-attribute auctions[J]. *Decision Support System*, 2002, 9(3): 249-268.
- [7] Liu S L, Lai K K, Wang S Y. Multiple criteria models for evaluation of competitive bids[J]. *Journal of Mathematics Applied in Business and Industry*, 2000, 11(3): 151-160.
- [8] 武刚. 层次交互式多属性电子拍卖中标人选择方法[J]. *管理科学*, 2007, 20(3): 55-60.
(Wu G. Hierarchical interactive winner bidder selection approach in multi-attribute e-auction[J]. *Journey of Management Science*, 2007, 20(3): 55-60.)
- [9] Ho W, Xu X, Dey P K. Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: a literature review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202(1): 16-24.
- [10] Chan F T, Kumar N. Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach[J]. *Omega*, 2007, 35(4): 417-431.
- [11] Gencer C, Gürpınar D. Analytic network process in supplier selection: A case study in an electronic firm[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2007, 31(11): 2475-2486.
- [12] 王建军, 杨德礼. 信息系统外包决策的 AHP/PROMETHEE 方法[J]. *管理学报*, 2006, 3(3): 287-291.
(Wang J J, Yang D L. Decision of outsourcing information systems based on AHP and PROMETHEE[J]. *Chinese Journal of Management*, 2006, 3(3): 287-291.)
- [13] 秦全德, 王晓晖, 李荣钧. 不完全偏好信息下国有企业并购多属性拍卖的模糊决策[J]. *管理工程学报*, 2012, 26(4): 169-175.

- (Qin Q D, Wang X H, Li R J. Fuzzy multi-attribute auction model used for merger and acquisition decisions of state-owned enterprises under incomplete preference information[J]. *Journal of Industrial Engineering & Engineering Management*, 2012, 26(4): 169-175.)
- [14] 陈晓红, 阳熹. 一种基于三角模糊数的多属性群决策方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(2): 278-282. (Chen X H, Yang X. Multiple attributive group decision making method based on triangular fuzzy numbers[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(2): 278-282.)
- [15] 刘培德. 一种基于前景理论的不确定语言变量风险型多属性决策方法[J]. *控制与决策*, 2011, 26(6): 893-897. (Liu P D. Method for multi-attribute decision-making under risk with the uncertain linguistic variables based on prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(6): 893-897.)
- [16] Liu Z, Liu P. Intuitionistic uncertain linguistic partitioned Bonferroni means and their application to multiple attribute decision-making[J]. *International Journal of Systems Science*, 2016, 48(5): 1-14.
- [17] Huang M, Qian X, Fang S C, et al. Winner determination for risk aversion buyers in multi-attribute reverse auction[J]. *Omega*, 2016, 59: 184-200.
- [18] 糜万俊, 戴跃伟. 基于前景理论的风险型混合模糊多准则群决策[J]. *控制与决策*, 2017, 32(7): 1279-1285. (Mi W J, Dai Y W. Risk mixed multi-criteria fuzzy group decision-making approach based on prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(7): 1279-1285.)
- [19] 王坚强, 孙腾, 陈晓红. 基于前景理论的信息不完全的模糊多准则决策方法[J]. *控制与决策*, 2009, 24(8): 1198-1202. (Wang J Q, Sun T, Chen X H. Multi-criteria fuzzy decision-making method based on prospect theory with incomplete information[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(8): 1198-1202.)
- [20] 龚承柱, 李兰兰, 卫振锋, 等. 基于前景理论和隶属度的混合型多属性决策方法[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(10): 122-128. (Gong C Z, Li L L, Wei Z F, et al. A method for hybrid multiple attribute decision making based on prospect theory and membership[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(10): 122-128.)
- [21] 张晓, 樊治平. 基于前景理论的风险型混合多属性决策方法[J]. *系统工程学报*, 2012, 27(6): 772-781. (Zhang X, Fan Z P. Method for risky hybrid multiple attribute decision making based on prospect theory[J]. *Journal of System Engineering*, 2012, 27(6): 772-781.)
- [22] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-292.
- [23] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [24] 郑君君, 韩笑, 邹祖绪. 引入前景理论的股权拍卖异质投标者竞价策略演化均衡研究[J]. *管理工程学报*, 2015, 29(4): 109-116. (Zheng J J, Han X, Zou Z X. Prospect theory embedded evolutionary stability analysis on bidding strategies of heterogeneous bidders in equity auction[J]. *Journal of Industrial Engineering / Engineering Management*, 2015, 29(4): 109-116.)
- [25] Liu Z, Liu P, Liang X. Multiple attribute decision-making method for dealing with heterogeneous relationship among attributes and unknown attribute weight information under q-rung orthopair fuzzy environment[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2018, 33(9): 1900-1928.
- [26] Wang Y M, Luo Y. Integration of correlations with standard deviations for determining attribute weights in multiple attribute decision making[J]. *Mathematical & Computer Modelling*, 2010, 51(1): 1-12.
- [27] 代文锋, 仲秋雁, 齐春泽. 基于前景理论和三角模糊 MULTIMOORA 的多阶段决策方法[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(3): 74-81. (Dai W F, Zhong Y Q, Qi C Z. Multi-stage decision making method based on prospect theory and MULTIMOORA in the triangular fuzzy environment[J]. *Operations Research and Management Science*, 2018, 27(3): 74-81.)

作者简介

王世磊(1987—), 男, 博士生, 从事拍卖理论、决策优化的研究, E-mail: ge_wangshilei@163.com;

屈绍建(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 从事多准则决策、优化理论方法及应用等研究, E-mail: qushaojian@163.com;

马刚(1993—), 男, 硕士生, 从事拍卖理论、决策优化的研究, E-mail: keytothe68@163.com.

(责任编辑: 闫妍)