

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2024.04.015

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式: 闫建文, 田婷, 任劼, 吴向男, 刘一凡. 基于直觉模糊集修正 Shapley 值法的全过程工程咨询利益分配机制[J]. 西安理工大学学报, 2024, 40(4): 584-593.

YAN Jianwen, TIAN Ting, REN Jie, WU Xiangnan, LIU Yifan. Benefit allocation mechanism for whole process engineering consulting by the intuitionistic fuzzy set modified Shapley value method[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024, 40(4): 584-593.

基于直觉模糊集修正 Shapley 值法的全过程工程咨询利益分配机制

闫建文, 田婷, 任劼, 吴向男, 刘一凡

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对全过程工程咨询联合体参与者之间的利益分配问题, 综合考虑风险分担、资源投入、合同执行力、创新能力和技术水平等五个影响因子, 采用直觉模糊集对 Shapley 值法进行一次修正; 纳入业主单位的满意度, 运用熵权-TOPSIS 法对前者的修正值进行调整, 提出了基于直觉模糊集修正 Shapley 值法的全过程工程咨询利益分配机制。案例分析表明, 与 Shapley 值初始解相比, 最终利益分配解更符合工程的实际情况, 验证了所提模型的可行性和公平合理性, 可为全过程工程咨询联合体的利益分配提供参考。

关键词: 全过程工程咨询; 利益分配; Shapley 值; 直觉模糊集; 熵权-TOPSIS 法

中图分类号: F282

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2024)04-0584-10

Benefit allocation mechanism for whole process engineering consulting by the intuitionistic fuzzy set modified Shapley value method

YAN Jianwen, TIAN Ting, REN Jie, WU Xiangnan, LIU Yifan

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: For the interest allocation among the participants in the full process engineering consulting joint venture, taking into account the five influencing factors of risk allocation, resource input, contract execution, innovation ability and technical level, the Shapley value method is modified by using intuitionistic fuzzy sets for the first time. The satisfaction degree of the owner unit is taken into account, and the modified value is adjusted by using the entropy weight-TOPSIS method, thus proposing a full process engineering consulting interest allocation mechanism by the intuitionistic fuzzy set modified Shapley value method. The case analysis shows that the final interest allocation solution is more in line with the actual situation of the project than the initial solution of Shapley value, verifying the feasibility and fairness and rationality of the proposed model, which can provide reference for the interest allocation of the full process engineering consulting joint venture.

Key words: full process engineering consultancy; benefit distribution; Shapley value; intuitionistic fuzzy set; entropy-TOPSIS method

收稿日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2024-05-09

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20240509.0918.003>

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2021JQ-472); 陕西省教育厅自然科学基金专项项目(20JK0793)

第一作者: 闫建文, 男, 硕士, 副教授, 研究方向为建设工程管理。E-mail: yjnwn@xaut.edu.cn

通信作者: 田婷, 女, 硕士生, 研究方向为全过程工程咨询。E-mail: tiant110213@163.com

2017年至2020年,国务院办公厅、住房城乡建设部、国家发展和改革委员会等部门发布的《国务院办公厅关于促进建筑业持续健康发展的意见》《国务院办公厅关于推进全过程工程咨询服务发展的指导意见》《全过程工程咨询服务合同示范文本(征求意见稿)》等政策文件提出,培育发展全过程工程咨询。同时,随着基础建设规模的日益扩大和建筑需求模式的多样化,传统的工程咨询逐渐无法满足现阶段的工程需求。因此,全过程工程咨询成为工程建设组织模式发展的必然趋势,对提高建设工程质量具有重要意义。

目前,全过程工程咨询服务模型主要分为独立体经营和联合体经营两大类,独立体经营企业没有

与外部关联的利益划分,只有内部部门间的利益分配;而联合体经营涉及的单位众多(见图1),若不考虑综合因素对利益分配的影响,对联合体成员做出的贡献评价就会有失偏颇,在这个过程中,难免会出现“搭便车”行为,造成参与单位的付出与收入不相符,出现利益分配不均的情况,引发利益相关者不满,降低联合体成员的积极性,从而影响建设单位和联合体的收益。在实际工程项目中,联合体常常因为利益分配不合理导致合作分崩离析,例如,某条道路设施施工队罢工或某项工程停滞不前等。因此,利益如何分配是其面临的一个难题,为了探寻一种合理公正的利益分配方法,学者们对其开展了大量研究。

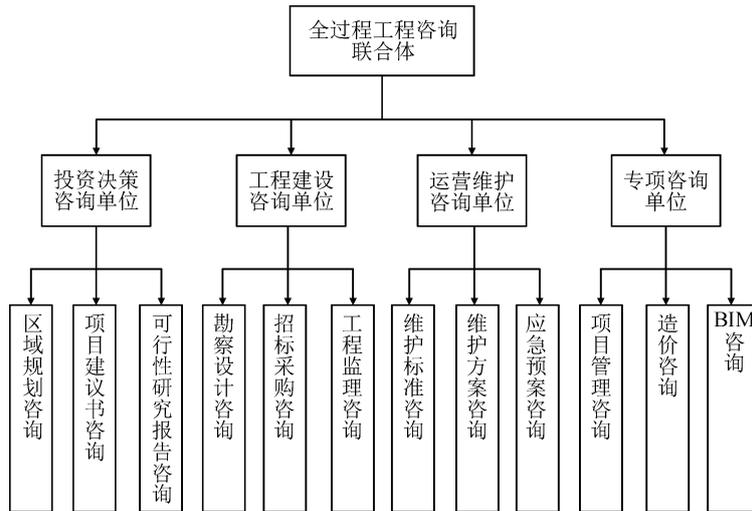


图1 全过程工程咨询联合体服务内容

Fig.1 Service content of the whole process engineering consultancy consortium

针对利益分配问题,诸多学者从不同角度、运用不同理论与方法开展研究分析和实践探讨,形成了丰富的研究成果。

1) 博弈论。Xu等^[1]利用博弈论方法分析了上下游资源型供应链的总利润,建立了集中式市场收益分配机制的理论模型,并利用MATLAB进行数值分析,得到直观结果。熊华平等^[2]构建了动态演化博弈模型,分析了利益相关者在不同情况下的进化稳定策略,建立了利益相关者参与的增量收益分享机制。刘则成等^[3]构建了基于不对称Nash谈判模型的全过程工程咨询联合体利益分配模型,修正了其利益平均分配的缺陷。

2) Shapley值及影响因子。胡盛强等^[4]在研究四级供应链利益分配问题中,考虑了Shapley值法的缺点和其他因素对利益分配的影响,并将影响因素与Shapley值法相结合。徐光灿等^[5]综合考虑了业务能力、投资额和风险量对企业利益分配的影响,提出了Shapley值综合修正利益分配模型,使利益

分配更加符合实际情况。李维乾等^[6]利用梯形模糊数确定各地区权重的方法对Shapley值解进行改进,克服了Shapley值经典解的局限性。许茂增等^[7]考虑了投资、时间和风险因素对收益分配的影响,提出了基于中转站共同配送模式的利益分配Shapley值综合修正模型。王雪等^[8]尝试在分配方案中引入资源投入因素,用改进的Shapley值法模型方案解决利润分配问题。周业付^[9]综合考虑风险、合作意愿与质量投入等因素,引入综合修正因子,建立了改进Shapley值法的利益分配模型,并应用到农产品供应链中。Liu等^[10]通过引入风险、投入、努力因素来修正Shapley值,其节水工程案例验证了这种改进的期望值可以有效增进合作关系。

3) 综合模型。郑晨昕等^[11]提出一种基于改进Shapley值的风电波动成本分摊策略,用于解决波动成本分摊问题。在考虑影响因素的基础上,衍生出多种评价方法与Shapley值法相结合的方法。Guo等^[12]采用基于TOPSIS法的Shapley值解决

联盟成员的利益分配问题;张羽等^[13]将云重心法与 Shapley 值法相结合,提高了三方合作的积极性;孙琳琳等^[14]通过构建分配因素的修正测度值,采用模糊综合评价法对 Shapley 值进行修正。

综上所述,层次分析法(AHP)、逼近理想解排序(TOPSIS)、云重心和模糊综合评价等方法在利益分配问题中能够对相关参数做出客观评价,推动了利益分配的相关研究。但在修正 Shapley 值法时,上述方法只能得到属性权重,而忽略了专家权重,没有运用专家权重来检验所得属性权重的正确性;其次,上述文献考虑的影响因素较少,而全面考虑潜在的收益因素有助于实现利益的合理分配;此外,业主满意度可以反向印证参与者所提供咨询服务的优劣程度,满意度与奖罚程度密切相关,对利益分配有重要的参考价值,上述文献也没有考虑业主单位满意度对利益分配产生的影响。

为此,本文整理了近 20 篇文献中的影响因子,对其进行归纳汇总,综合考虑创新能力、资源投入、风险分担、合同执行力和技术水平五个影响因子,借助直觉模糊集对 Shapley 值法进行修正。其中,创新能力是衡量联合体成员对项目进行创新优化、创造经济价值的指标;资源投入衡量联合体成员投入成本的比例;风险分担衡量联合体成员在项目全生命周期中承担风险的部分;合同执行力用来衡量联合体成员在规定期限内完成阶段性业务的效率;技术水平则是衡量联合体成员的基础生产能力。纳入业主单位满意度,采用熵权-TOPSIS 法对 Shapley 值法进行二次修正,旨在为全过程工程咨询单位提供一种公平合理的利益分配方案。

1 基于直觉模糊集-熵权 TOPSIS 的全过程工程咨询利益分配模型

1.1 传统 Shapley 值模型

设全过程工程咨询联合体是由 n 个主体组成的合作联盟 $A(A=\{1,2,\dots,n\})$,这 n 个主体有不同的组合方式 B ,每种组合产生的收益不同, $\forall B \in A$,每种收益对应的收益函数为 $v(B)$,且满足下列条件:

$$v\emptyset=0 \tag{1}$$

$$v(B_1 \cup B_2) \geq v(B_1) + v(B_2) \tag{2}$$

$$\begin{cases} \sum_{i \in B} \varphi_i(v) \geq v(B) \\ \sum_{i \in A} \varphi_i(v) = v(A) \end{cases} \tag{3}$$

式中: $\varphi_i(v)$ 表示联盟 A 的总收益中第 i 位成员获得的利益。

Shapley 值法是一种解决 n 人合作对策问题利

益分配的方法,其公式为:

$$\varphi_i(v) = \sum_{B \in A} \omega(|B|) [v(B) - v(B/\{i\})] \tag{4}$$

$$\omega(|B|) = \frac{(|B|-1)!(n-|B|)!}{n!} \tag{5}$$

式中: $i=1,2,3,\dots,n$; $|B|$ 为集合 B 元素的个数; $\omega(|B|)$ 为加权因子; $v(B/\{i\})$ 表示子集 B 去掉 i 位成员后获得的收益; $v(B) - v(B/\{i\})$ 为成员 i 在其参与的合作中所做出的贡献。

Shapley 值法是基于边际贡献对全过程工程咨询联合体的成员进行利益分配,它参考了成员对联合体总目标的贡献程度,在一定程度上避免了平均分配主义,体现了这种分配方式的合理性和公平性。但是这种利益分配方式在设计之初没有充分考虑成员间的风险分担情况,认为各成员对风险的承担以及其他因素的影响均占 $1/n$,然而,各参与主体有其擅长的领域,其在全过程工程咨询服务中的每个阶段的贡献程度有所差异,这就忽略了资源投入和风险分担等因素对利益分配的影响。因此,本文利用直觉模糊集对 Shapley 值进行修正,使联合体各成员间的利益分配更贴近实际,更趋于公平合理。

1.2 直觉模糊集及其相关定义

1.2.1 直觉模糊集^[15]

定义 1 设 X 是一个非空集合,则 X 上的一个直觉模糊集为:

$$A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle \mid x \in X \}$$

记作 $A = (\mu_A(x), \nu_A(x))$, $\mu_A(x)$ 、 $\nu_A(x)$ 分别表示 X 中元素 x 的隶属度和非隶属度,且满足 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x) \leq 1, x \in X, \pi_A(x)$ 为 X 属于 A 的犹豫度。

1.2.2 直觉模糊熵^[16]

定义 2 设 $A = \{ \langle x_i, \mu_A(x_i), \nu_A(x_i) \rangle \mid x_i \in X \}$ 为论域 X 上的一个直觉模糊集,对于 $\forall p, q > 0, p, q$ 为直觉模糊熵系数,则直觉模糊集 A 的广义直觉模糊熵为:

$$E_{p,q}(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - |\mu_A(x_i) - \nu_A(x_i)|^p) \times \ln[e + |\mu_A(x_i) - \nu_A(x_i)|^p (1 - \mu_A(x_i) - \nu_A(x_i))^q] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - |\mu_A(x_i) - \nu_A(x_i)|^p) \times \ln[e + |\mu_A(x_i) - \nu_A(x_i)|^p \pi_A^q(x_i)]$$

p, q 的大小决定熵值。熊升华等^[16]研究发现,直觉模糊熵系数 p, q 的大小能反应决策者的风险态度,当 p 偏小且 q 偏大时,决策者是厌恶风险的,当 p 偏大且 q 偏小时,决策者是偏好风险的,当决策

者风险中立时,提取直觉模糊集不确定信息的能力较强,因此,选取 $E_{p,q}(A)=0.5$ 时所对应的 p,q 值,根据实验结果, p 取 0.50, q 取 0.09。

1.3 基于直觉模糊集-熵权 TOPSIS 的 Shapley 值法的利益分配模型

本文基于直觉模糊集对 Shapley 值初始解进行修正。采用直觉模糊熵确定权重时,能够避免只有属性权重信息的孤岛性以及无法从理论上验证属性权重是否正确等问题,它可同时获得影响因子和决策者的权重,并通过决策者的权重验证所得影响因子的正确性。项目结束后,提供全过程工程咨询服

务的联合体以各成员的实际付出为依据,进行利益分配,业主作为咨询服务的接受者,对咨询内容的评价拥有足够的发言权,没有纳入业主满意度的利益分配结果是有所欠缺的,甚至在某些情况下,成员会对评判结果产生严重不满,进而损失未来的合作机会。为了消除这种消极影响,将业主单位对全过程工程咨询服务的满意度纳入联合体利益分配体系中,相较于合同既定目标下的满意度,业主单位对联合体利益分配的评价信息更具有客观性与说服力。因此,本文纳入业主满意度,利用熵权-TOPSIS 法对 Shapley 值进行再次修正,具体流程如图 2 所示。

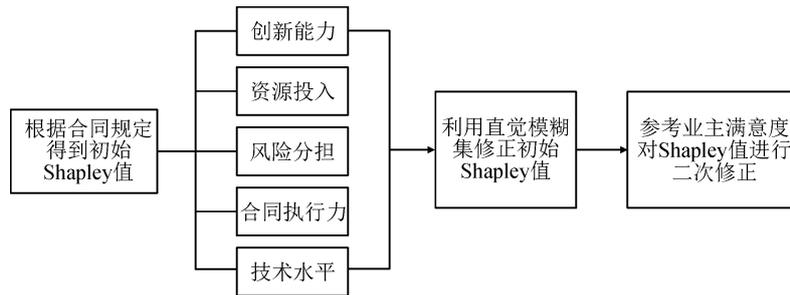


图 2 利益分配流程图
Fig. 2 Flowchart of benefit distribution

以项目的总目标为前提,在达到质量、成本、进度目标后,以全过程工程咨询服务水平为评价目标层,

以影响因子为评价准则层,以提供的咨询内容为评价指标层,建立全过程工程咨询评价体系,如图 3 所示。

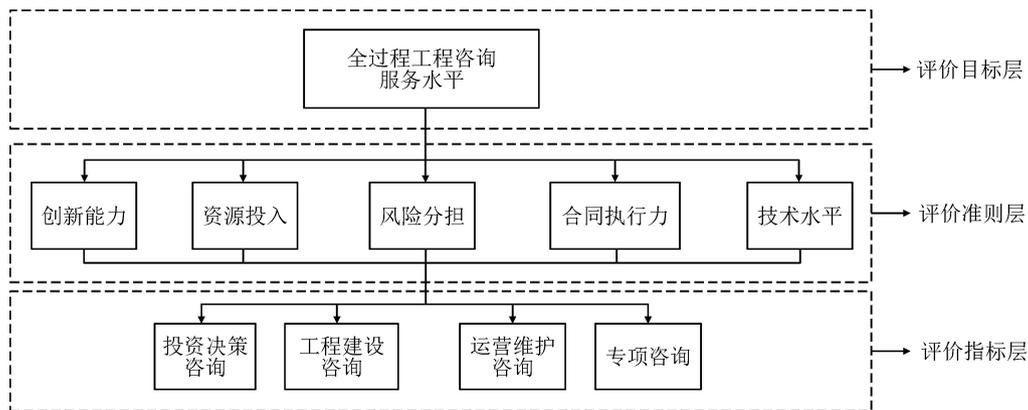


图 3 全过程工程咨询评价层次
Fig. 3 Levels of evaluation for whole process engineering consultancy

从全过程工程咨询行业的从业人员、建筑施工人员、建筑类科研人员、咨询人员中选取 $M = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_s\}$ 位受邀代表,在工程项目目标 $T = \{Q_u, C, S_c\}$ 下(Q_u 为质量目标, S_c 为安全目标),根据影响因子 $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$,依据单位资质及目标在动态管理下的偏差,对联合体成员 $N = \{N_1, N_2, N_3, \dots, N_m\}$ 提供的咨询内容采用直觉模糊数 $(\mu_A(x), \nu_A(x))$ 进行评估, $\mu_A(x), \nu_A(x) \in [0, 1]$,重要程度和不重要程度属于 $[0, 1]$ 。由此, M 位决策者可以构建 s 个决策矩阵 $\mathbf{X}^k, \mathbf{X}^k =$

$$[x_{ij}^k]_{m \times n} (k \in s)。$$

基于熵权-直觉模糊集的 Shapley 法的具体步骤如下。

步骤 1:决策者 M 根据影响因子 $C_j (j \in n)$ 对联合体成员 N 的动态管理偏差结果做出判断 $A_j^k (k \in s), A_j^k = x_{ij}^k, (i \in m)$ 。

步骤 2:采用广义直觉模糊熵公式计算直觉模糊熵 $E_{p,q}(A_j^k)$,得到综合直觉模糊熵矩阵 $\mathbf{E} = [E_{p,q}(A_j^k)]_{s \times n}$ 。

步骤 3:设初始迭代次数 $t=0$,误差限 $\epsilon > 0$,给

定初始影响因子权重和初始决策者权重:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{(0)} = [\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \theta_3^{(0)}, \dots, \theta_n^{(0)}]^T \\ \boldsymbol{\delta}^{(0)} = [\delta_1^{(0)}, \delta_2^{(0)}, \delta_3^{(0)}, \dots, \delta_s^{(0)}]^T \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\theta_j^{(0)} \geq 0$, 且 $\sum_{j=1}^n \theta_j^{(0)} = 1$; $\delta_j^{(0)} \geq 0$, 且 $\sum_{j=1}^s \delta_j^{(0)} = 1$.

步骤 4: 令 $t = t + 1$, 进行迭代运算。依据影响因子权重 $\theta^{(0)}$, 利用熵权法取得决策者的权重 $\delta^{(1)}$, 再依据决策者的权重 $\delta^{(0)}$, 取得影响因子权重 $\theta^{(1)}$, 依次类推, 分别计算影响因子权重和决策者权重。当 $\Delta < \varepsilon$ 时, 停止迭代运算, 得出影响因子权重 $\boldsymbol{\theta}^{(t)}$ 和决策者权重 $\boldsymbol{\delta}^{(t)}$:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}^{(t)} = [\theta_1^{(t)}, \theta_2^{(t)}, \theta_3^{(t)}, \dots, \theta_n^{(t)}]^T \\ \boldsymbol{\delta}^{(t)} = [\delta_1^{(t)}, \delta_2^{(t)}, \delta_3^{(t)}, \dots, \delta_s^{(t)}]^T \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta = \|\boldsymbol{\theta}^{(t)} - \boldsymbol{\theta}^{(t-1)}\|_2 + \|\boldsymbol{\delta}^{(t)} - \boldsymbol{\delta}^{(t-1)}\|_2 \quad (8)$$

$$\begin{cases} \theta_j^{(t)} = \frac{1 - \sum_{k=1}^s \boldsymbol{\delta}^{(t-1)} E_{p,q}(A_j^k)}{n - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^s \boldsymbol{\delta}^{(t-1)} E_{p,q}(A_j^k)} \\ \delta_j^{(t)} = \frac{1 - \sum_{j=1}^n \boldsymbol{\theta}^{(t-1)} E_{p,q}(A_j^k)}{s - \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n \boldsymbol{\theta}^{(t-1)} E_{p,q}(A_j^k)} \end{cases} \quad (9)$$

步骤 5: 在得到 $\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}$ 之后, 将 $\boldsymbol{\theta}$ 作为修正系数的参数值, $\boldsymbol{\delta}$ 作为参考因子, 反向反馈 $\boldsymbol{\theta}$ 的合理性。

$$R_i = \boldsymbol{\theta} \times \boldsymbol{P} \quad (10)$$

式中: \boldsymbol{P} 为各个联合体成员的贡献在影响因子中所占的比重; R_i 为利益分配系数。

$$\boldsymbol{P} = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_m]^T \quad (11)$$

步骤 6: 计算利益分配修正系数 ΔR_i , 由此得到利益分配修正值 $\varphi'_i(v)$:

$$\Delta R_i = R_i - \frac{1}{m} \quad (12)$$

$$\varphi'_i(v) = \varphi_i(v) + \Delta R_i \times v_i(B) \quad (13)$$

将业主对第 j 位成员在 i 指标下的满意度记为 x_{ij} , 满意度初始评价矩阵记为 $\boldsymbol{X} = [x_{ij}]_{m \times n}$ ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$), 将矩阵 \boldsymbol{X} 归一化得到矩阵 $\boldsymbol{Y} = [y_{ij}]_{m \times n}$, 则第 j 个指标下第 i 位成员的指标比重 Z_{ij} 、第 j 个指标的熵值 E_j 和熵权 W_j 分别为:

$$\begin{cases} Z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \\ E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m Z_{ij} \ln Z_{ij} \\ W_j = \frac{(1 - E_j)}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \end{cases} \quad (14)$$

步骤 7: 构建加权矩阵, 根据正、负理想解, 确定最优、劣距离。

$$\begin{cases} \boldsymbol{V} = [v_{ij}]_{m \times n} = [(\boldsymbol{W}_j)(y_{ij})]_{m \times n} \\ v_j^+ = \{v_{ij}\}_{\max} \\ v_j^- = \{v_{ij}\}_{\min} \\ d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \end{cases} \quad (15)$$

步骤 8: 计算逼近度 c_i , 并经归一化处理得到 γ_i 。

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (16)$$

步骤 9: 重新计算基于业主满意度的利益分配系数 $\Delta R'_i$:

$$\Delta R'_i = \gamma_i - \frac{1}{m} \quad (17)$$

由此, 重新分配的利益结果为:

$$\varphi''_i(v) = \varphi'_i(v) + \Delta R'_i \times v_i(B) \quad (18)$$

2 案例分析

以某建设用地拆迁安置项目为例, 项目总占地约 120 亩(1 亩 $\approx 666.67 \text{ m}^2$), 总建筑面积约 95 万 m^2 , 总投资约 67 320 万元, 项目采用平行发包模式, 参建单位多、协调管理难度大。建设单位公开招标咨询单位对项目提供全过程工程咨询服务, 招标结果是提供全过程工程咨询服务的联合体 A(由投资决策咨询单位 N_1 、工程建设咨询单位 N_2 、运营维护咨询单位 N_3 、专项咨询单位 N_4 组成) 中标。受建设单位委托, 由联合体 A 对前期决策阶段(编制项目建议书 N_{11} 和可行性研究报告 N_{12})、施工阶段(勘察设计咨询 N_{21} 、招标采购咨询 N_{22} 和工程监理咨询 N_{23})、运营维护阶段(维护方案咨询 N_{31} 和维护标准咨询 N_{32}) 进行全过程工程咨询, 合同内容还包含建筑信息模型(building information modeling, BIM) 咨询 N_{41} 和项目管理 N_{42} 的工作。

根据全过程工程咨询的取费标准, 在合同规定的基础收益外, 合作创新优化的利润估值约为 5 000 万元。在四家单位单独运营的情况下, 考虑到咨询方自身的资质以及项目的规模, 无法承揽此项目, 因此四家单位单独运营的情况不存在, 收益为 0; 假设四家单位两两组合, 其收益分别为 $v(N_1 \cup N_2) = 650$ 万元、 $v(N_1 \cup N_3) = 500$ 万元、 $v(N_1 \cup N_4) = 600$ 万元、 $v(N_2 \cup N_3) = 900$ 万元、 $v(N_2 \cup N_4) = 800$ 万元、 $v(N_3 \cup N_4) = 560$ 万元; 假设三个单位组

合,其收益分别为: $v(N_1 \cup N_2 \cup N_3) = 1\ 000$ 万元、 $v(N_1 \cup N_2 \cup N_4) = 2\ 000$ 万元、 $v(N_1 \cup N_3 \cup N_4) = 1\ 500$ 万元、 $v(N_2 \cup N_3 \cup N_4) = 1\ 800$ 万元。

2.1 传统 Shapley 值法的计算收益

通过案例分析,根据式(4)、(5)计算出各参与单位的 Shapley 值收益, N_1 单位的收益如表 1 所示。

表 1 N_1 单位基于 Shapley 值法的收益

Tab.1 N_1 unit gain by Shapley's value method

单位:万元

B_{N_1}	N_1	$N_{1,2}$	$N_{1,3}$	$N_{1,4}$	$N_{1,2,3}$	$N_{1,2,4}$	$N_{1,3,4}$	$N_{1,2,3,4}$
$v(B)$	0	650	500	600	1 000	2 000	1 500	5 000
$v(B/N_1)$	0	0	0	0	900	800	560	1 800
$v(B) - v(B/N_1)$	0	650	500	600	100	1 200	940	3 200
$ B $	1	2	2	2	3	3	3	4
$\omega(B)$	1/4	1/12	1/12	1/12	1/12	1/12	1/12	1/4
$\omega(B)[v(B) - v(B/N_1)]$	0	54.17	41.67	50	8.33	100	78.33	800

表 1 最后一行值之和是 N_1 单位参与合作优化创新的收益,即 $\varphi_{N_1}(v) \approx 1\ 132.50$ 万元;同理可得, $\varphi_{N_2}(v) \approx 1\ 332.51$ 万元、 $\varphi_{N_3}(v) \approx 1\ 100.84$ 万元、 $\varphi_{N_4}(v) \approx 1\ 431.17$ 万元。由收益分配结果可知,四家单位组成联合体的收益远大于单独、两两联合或三单位联合的收益,且同时实现了联合体和参与单位收益的最大化。

2.2 纳入影响因子 C,基于直觉模糊集-熵权 TOPSIS 法的收益修正

选择 $M\{M_1, M_2, M_3, M_4\}$ 位决策者。所选专家分别来自具有丰富项目管理经验的从业人员、具有丰富施工经验的人员、建筑业科研老师和具有丰富咨询经验的人员。

步骤 1:决策者做出判断,得到判断矩阵 A_j^k ,四位决策者的评价信息如表 2~5 所示。

表 2 M_1 决策者的评价矩阵 X^1

Tab.2 Evaluation matrix X^1 for M_1 decision maker

咨询服务	创新能力 C_1	资源投入 C_2	风险分担 C_3	合同执行力 C_4	技术水平 C_5
N_{11}	(0.35, 0.59)	(0.13, 0.28)	(0.66, 0.09)	(0.51, 0.31)	(0.50, 0.21)
N_{12}	(0.23, 0.71)	(0.25, 0.31)	(0.55, 0.23)	(0.36, 0.42)	(0.43, 0.36)
N_{21}	(0.73, 0.09)	(0.78, 0.09)	(0.72, 0.12)	(0.67, 0.23)	(0.64, 0.25)
N_{22}	(0.71, 0.27)	(0.69, 0.12)	(0.76, 0.02)	(0.73, 0.15)	(0.76, 0.10)
N_{23}	(0.81, 0.17)	(0.73, 0.11)	(0.92, 0.01)	(0.68, 0.12)	(0.81, 0.09)
N_{31}	(0.32, 0.65)	(0.19, 0.26)	(0.17, 0.21)	(0.43, 0.49)	(0.29, 0.33)
N_{32}	(0.29, 0.66)	(0.29, 0.66)	(0.20, 0.65)	(0.13, 0.23)	(0.36, 0.19)
N_{41}	(0.65, 0.13)	(0.62, 0.28)	(0.77, 0.12)	(0.65, 0.32)	(0.89, 0.01)
N_{42}	(0.91, 0.01)	(0.86, 0.06)	(0.91, 0.01)	(0.72, 0.12)	(0.76, 0.22)

表 3 M_2 决策者的评价矩阵 X^2

Tab.3 Evaluation matrix X^2 for M_2 decision maker

咨询服务	创新能力 C_1	资源投入 C_2	风险分担 C_3	合同执行力 C_4	技术水平 C_5
N_{11}	(0.32, 0.38)	(0.50, 0.12)	(0.56, 0.21)	(0.11, 0.76)	(0.50, 0.32)
N_{12}	(0.39, 0.46)	(0.65, 0.33)	(0.67, 0.31)	(0.25, 0.60)	(0.51, 0.32)
N_{21}	(0.72, 0.21)	(0.89, 0.11)	(0.90, 0.05)	(0.50, 0.12)	(0.73, 0.22)

表 3(续)

咨询服务	创新能力 C_1	资源投入 C_2	风险分担 C_3	合同执行力 C_4	技术水平 C_5
N_{22}	(0.65,0.22)	(0.76,0.21)	(0.85,0.11)	(0.65,0.23)	(0.82,0.03)
N_{23}	(0.87,0.07)	(0.82,0.15)	(0.76,0.03)	(0.39,0.43)	(0.79,0.12)
N_{31}	(0.21,0.36)	(0.56,0.03)	(0.32,0.12)	(0.55,0.32)	(0.22,0.19)
N_{32}	(0.19,0.60)	(0.49,0.46)	(0.33,0.35)	(0.46,0.33)	(0.21,0.11)
N_{41}	(0.86,0.03)	(0.89,0.09)	(0.75,0.23)	(0.65,0.22)	(0.56,0.12)
N_{42}	(0.79,0.11)	(0.91,0.02)	(0.80,0.12)	(0.54,0.31)	(0.71,0.06)

表 4 M_3 决策者的评价矩阵 \mathbf{X}^3 Tab. 4 Evaluation matrix \mathbf{X}^3 for M_3 decision maker

咨询服务	创新能力 C_1	资源投入 C_2	风险分担 C_3	合同执行力 C_4	技术水平 C_5
N_{11}	(0.34,0.60)	(0.68,0.12)	(0.62,0.34)	(0.21,0.56)	(0.45,0.23)
N_{12}	(0.41,0.56)	(0.72,0.10)	(0.47,0.43)	(0.33,0.43)	(0.62,0.16)
N_{21}	(0.56,0.23)	(0.86,0.09)	(0.65,0.23)	(0.65,0.13)	(0.69,0.03)
N_{22}	(0.62,0.33)	(0.19,0.56)	(0.59,0.19)	(0.55,0.42)	(0.72,0.14)
N_{23}	(0.59,0.22)	(0.39,0.60)	(0.62,0.11)	(0.45,0.32)	(0.81,0.02)
N_{31}	(0.35,0.55)	(0.29,0.43)	(0.65,0.10)	(0.12,0.76)	(0.55,0.21)
N_{32}	(0.51,0.32)	(0.32,0.51)	(0.72,0.17)	(0.08,0.67)	(0.51,0.19)
N_{41}	(0.68,0.23)	(0.76,0.01)	(0.55,0.32)	(0.75,0.02)	(0.85,0.09)
N_{42}	(0.54,0.23)	(0.52,0.21)	(0.15,0.65)	(0.82,0.10)	(0.72,0.12)

表 5 M_4 决策者的评价矩阵 \mathbf{X}^4 Tab. 5 Evaluation matrix \mathbf{X}^4 for M_4 decision maker

咨询服务	创新能力 C_1	资源投入 C_2	风险分担 C_3	合同执行力 C_4	技术水平 C_5
N_{11}	(0.35,0.24)	(0.21,0.53)	(0.23,0.56)	(0.35,0.56)	(0.73,0.21)
N_{12}	(0.56,0.34)	(0.35,0.62)	(0.36,0.49)	(0.55,0.35)	(0.65,0.33)
N_{21}	(0.68,0.22)	(0.72,0.11)	(0.63,0.23)	(0.76,0.11)	(0.92,0.03)
N_{22}	(0.72,0.13)	(0.83,0.09)	(0.72,0.12)	(0.71,0.10)	(0.65,0.21)
N_{23}	(0.79,0.17)	(0.65,0.23)	(0.69,0.18)	(0.65,0.17)	(0.76,0.10)
N_{31}	(0.32,0.65)	(0.65,0.33)	(0.19,0.67)	(0.19,0.35)	(0.35,0.62)
N_{32}	(0.43,0.53)	(0.70,0.12)	(0.53,0.32)	(0.32,0.56)	(0.43,0.53)
N_{41}	(0.72,0.16)	(0.77,0.10)	(0.67,0.23)	(0.23,0.63)	(0.69,0.13)
N_{42}	(0.69,0.21)	(0.82,0.13)	(0.75,0.12)	(0.34,0.59)	(0.95,0.02)

步骤 2:由决策矩阵计算直觉模糊熵,得到综合直觉模糊熵矩阵 \mathbf{E} 。

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.46 & 0.32 & 0.53 & 0.46 \\ 0.44 & 0.34 & 0.38 & 0.53 & 0.47 \\ 0.52 & 0.42 & 0.46 & 0.43 & 0.34 \\ 0.46 & 0.35 & 0.43 & 0.49 & 0.35 \end{bmatrix}$$

步骤 3:选取影响因子初始权重、决策者初始权重。

$$\boldsymbol{\theta}^{(0)} = [0.2200, 0.2100, 0.2300, 0.1800, 0.1600]^T$$

$$\boldsymbol{\delta}^{(0)} = [0.2100, 0.2400, 0.2500, 0.3000]^T$$

步骤 4:令 $t=1, \epsilon=10^{-5}$,进行迭代运算,迭代过程如表 6 所示。

表 6 迭代运算结果
Tab. 6 Results from iterative operations

t	θ^T	δ^T	Δ
0	(0.2200, 0.2100, 0.2300, 0.1800, 0.1600)	(0.2100, 0.2400, 0.2500, 0.3000)	
1	(0.1927, 0.2132, 0.2082, 0.1767, 0.2093)	(0.2539, 0.2495, 0.2434, 0.2532)	0.125 9
2	(0.1947, 0.2118, 0.2103, 0.1759, 0.2073)	(0.2509, 0.2481, 0.2462, 0.2549)	0.008 6
3	(0.1945, 0.2119, 0.2101, 0.1760, 0.2075)	(0.2511, 0.2481, 0.2460, 0.2548)	0.000 59
4	(0.1945, 0.2119, 0.2101, 0.1760, 0.2075)	(0.2510, 0.2481, 0.2460, 0.2548)	0.000 09
5	(0.1945, 0.2119, 0.2101, 0.1760, 0.2075)	(0.2510, 0.2481, 0.2460, 0.2548)	0.000 005

由迭代结果可知,迭代到第 4 次时, Δ 已经足够小,但是仍不满足 $\Delta < \epsilon$;至第五次时,满足 $\Delta < \epsilon$,此时 $\theta^T = (0.1945, 0.2119, 0.2101, 0.1760, 0.2075)$, $\delta^T = (0.2510, 0.2481, 0.2460, 0.2548)$ 。

由 $C_2 > C_3 > C_5 > C_1 > C_4$ 可知,资源投入、风险分担、技术水平的权重相对较大。实际工程案例中,投入和风险对收益的影响最大,因此结果是可信的。由 $X^4 > X^1 > X^2 > X^3$ 可知,决策者属性里,咨询方代表的权重最大,建筑业科研老师的权重最小,这是因为老师相对咨询方而言,经验较少。决策者的权重同样具有可信度,决策者的权重信息反向验证了所得影响因子权重的正确性。

步骤 5、6:根据联合体成员的贡献所占的比重,得出 ΔR_i :

$$\{R_i\} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.25 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.25 & 0.5 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.25 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0.25 & 0.5 \end{bmatrix} \times \theta^T = \begin{bmatrix} 0.1267 \\ 0.4155 \\ 0.1057 \\ 0.3522 \end{bmatrix}$$

$$\{\Delta R_i\} = \begin{bmatrix} -0.1233 \\ 0.1655 \\ -0.1444 \\ 0.1022 \end{bmatrix}$$

由此, $\varphi'_{N_1}(v) \approx 516.00$ 万元、 $\varphi'_{N_2}(v) \approx 2\ 160.01$ 万元、 $\varphi'_{N_3}(v) \approx 378.84$ 万元、 $\varphi'_{N_4}(v) \approx 1\ 942.17$ 万元。

项目结束后,业主单位就工作内容的满意程度进行打分:

$$\begin{bmatrix} 7.5 & 9.5 & 8.2 & 7.2 & 7.0 \\ 8.0 & 9.2 & 8.5 & 6.5 & 7.2 \\ 8.5 & 9.3 & 7.1 & 8.6 & 7.1 \\ 7.6 & 9.1 & 6.5 & 8.0 & 7.5 \end{bmatrix}$$

归一化后,得到矩阵 Y :

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0.85 & 0.33 & 0 \\ 0.5 & 0.25 & 1 & 0 & 0.4 \\ 1 & 0.5 & 0.3 & 1 & 0.2 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0.71 & 1 \end{bmatrix}$$

根据式 (14), $\{W_j\} = (0.2486, 0.1926, 0.1738, 0.1676, 0.2174)$ 。

步骤 7、8、9:计算基于业主满意度的利益分配系数 $\Delta R'_i$, 得到最终的利益分配值。

$$\{c_i\} = (0.3736, 0.3790, 0.4922, 0.3628)$$

$$\{\gamma_i\} = (0.2324, 0.2357, 0.3062, 0.2257)$$

纳入业主满意度后,利益分配的最终修正值为 $\varphi''_{N_1}(v) \approx 428.00$ 万元、 $\varphi''_{N_2}(v) \approx 2\ 088.51$ 万元、 $\varphi''_{N_3}(v) \approx 659.84$ 万元、 $\varphi''_{N_4}(v) \approx 1\ 820.67$ 万元(见表 7)。

表 7 利益分配对比分析

Tab. 7 Comparative analysis of benefit distribution

咨询单位	φ /万元	φ' /万元	φ'' /万元
N_1	1 132.50	516	428
N_2	1 332.51	2 160.01	2 088.51
N_3	1 100.84	378.84	659.84
N_4	1 431.17	1 942.17	1 820.67

由表 7 可知,初步改进的利益分配向量为(516, 2160.01, 378.84, 1942.17),最终改进的利益分配向量为(428, 2088.51, 659.84, 1820.67),与传统的 Shapley 值法(1132.50, 1332.51, 1100.84, 1431.17)有所不同。可以看出,充分考虑创新能力、资源投入、风险分担、合同执行力和技术水平后, N_2 和 N_4 单位的利润在增加, N_1 和 N_3 单位的利润在减少,在实际施工过程中, N_2 和 N_4 单位提供的咨询服务覆盖整个工期,时间长、范围广,消耗的资源更多,承担的各类风险较大,上述利润转移符合实际情况。在考虑业主单位的满意度后,业主单位对 N_3 单位的满意程度最高,因此 N_1 、 N_2 和 N_4 单位的利润少量减少,减少的利润转移给了 N_3 单位,参与方利益的分配发生了微弱的变化。综上,在综合考虑影响因子及决策者权重后,修正的利益分配值更加公平合理、科学可信,利益分配结果满足个体理性和

集体理性,能够保证参与成员在联合体合作中的积极性和稳定性,有利于促进项目的顺利实施。

3 结 语

利益分配的合理性是全过程工程咨询联合体成员能否成功合作的关键。本文基于 Shapley 值法研究了全过程工程咨询联合体成员所得的利益分配额,避免了均分主义,考虑了创新能力、资源投入、风险分担、合同执行力和技术水平五个因素的影响,利用直觉模糊集确定影响因子和决策者的权重,并通过决策者的权重从理论上反向验证了影响因子权重的正确性,打破了以往只能获得属性权重信息而无法从理论上验证其是否正确的局限,证明了直觉模糊集在权重确定方面的可行性和合理性。基于此,对 Shapley 值原始解进行初次改进,初次改进结果主要考虑了联合体成员的贡献程度。之后,纳入业主单位满意度(此时作为咨询服务的接受者,每个项目只存在业主一位“决策者”,不存在决策者权重),采用熵权-TOPSIS 法客观分析业主单位的评价信息(避免成员为展示技术水平而忽视项目目标,增加项目成本),再次调整联合体的利益分配额,为全过程工程咨询联合体成员合理分配利益提供了一种新的方法。

本文研究了全过程工程咨询联合体的利益分配问题,并通过案例验证了所提模型的合理性,这为联合体调整利益分配和维护各参与单位的利益提供了依据。科学合理的利益分配模型可以提高各参与方的满意度,这对推进全过程工程咨询服务业的快速发展具有一定的实践意义。

由于项目建设的实际情况更复杂、数据难以统计,在实际的利益分配中,还存在以下几个问题有待解决:1)对于采取全过程工程咨询服务的大型项目,其面临的风险与挑战更大,因此,需要根据项目实际情况进行增添或取舍;2)全过程工程咨询服务中,应将某些贡献的认定标准抽象化,当获得联合体成员的精准数据后,利益分配将会更加公平、准确。

参考文献:

- [1] XU Z, PENG Z, YANG L, et al. An improved Shapley value method for a green supply chain income distribution mechanism[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(9): 1509-1516.
- [2] 熊华平, 严子璇, 王卫来, 等. 基于演化博弈的老旧小区改造项目利益分配研究[J]. *建筑经济*, 2023, 44(12): 73-80.
- [3] 刘则成, 初建宇, 马丹祥, 等. 基于不对称 Nash 谈判模型的全过程工程咨询联合体利益分配研究[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(4): 46-51, 67.
- [4] 胡盛强, 张毕西, 关迎莹. 基于 Shapley 值法的四级供应链利润分配[J]. *系统工程*, 2009, 27(9): 49-54.
- [5] 徐光灿, 宋乾坤. 城市交通能源共同配送与利益分配研究[J]. *应用数学和力学*, 2020, 41(11): 1250-1258.
- [6] 李维乾, 解建仓, 李建勋, 等. 基于改进 Shapley 值解的流域生态补偿额分摊方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(1): 255-261.
- [7] 许茂增, 周翔, 崔利刚, 等. 低配送密度区域快递共同配送模式及利益分配[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(1): 181-190.
- [8] 王雪, 张培文, 孙宏. 基于资源投入的供应链联盟利益分配方案研究[J]. *统计与决策*, 2018, 34(11): 55-59.
- [9] 周业付. 基于改进 Shapley 值模型的农产品供应链利益分配机制[J]. *统计与决策*, 2017, 33(23): 52-54.
- [10] LIU X, WANG X, GUO H, et al. Benefit allocation

- in shared water-saving management contract projects based on modified expected Shapley value[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(1): 39-62.
- [11] 郑晨昕, 江岳文. 基于改进 Shapley 值的风电波动成本分摊策略 [J]. *电网技术*, 2021, 45 (11): 4387-4394.
ZHENG Chenxin, JIANG Yuewen. Wind power fluctuation cost allocation based on improved Shapley value [J]. *Power System Technology*, 2021, 45 (11): 4387-4394.
- [12] GUO B, HAO S, CAO G, et al. Profit distribution of liner alliance based on Shapley value[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 41(4): 5081-5085.
- [13] 张羽, 唐颖, 焦柳丹, 等. 基于改进 Shapley 值法的老旧小区改造三方合作利益分配研究[J]. *工程管理学报*, 2022, 36(1): 65-70.
ZHANG Yu, TANG Ying, JIAO Liudan, et al. Benefit distribution of tripartite cooperation in old community reconstruction based on improved Shapley value method [J]. *Journal of Engineering Management*, 2022, 36(1): 65-70.
- [14] 孙琳琳, 赵允, 刘丽佳. 基于修正 SHAPLEY 值的全过程工程咨询利益分配研究 [J]. *工程管理学报*, 2022, 36(2): 41-45.
SUN Linlin, ZHAO Yun, LIU Lijia. Research on interest distribution of engineering consulting in the whole process based on modified SHAPLEY value[J]. *Journal of Engineering Management*, 2022, 36(2): 41-45.
- [15] ATANASSOV K T. Intuitionistic fuzzy sets [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 20(1): 87-96.
- [16] 熊升华, 吴胜, 陈振颂, 等. 广义直觉模糊熵及其在权重确定中的应用[J]. *控制与决策*, 2017, 32(5): 845-854.
XIONG Shenghua, WU Sheng, CHEN Zhensong, et al. Generalized intuitionistic fuzzy entropy and its application in weight determination[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(5): 845-854.

(责任编辑 周 蓓)