

基于 FOWGA 算子的建设工程交易模式决策研究

刘 迅¹, 王卓甫²

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 河海大学工程管理研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 选择恰当的交易模式是决定一个工程项目是否取得成功的关键因素之一。将模糊集理论引入到建设工程交易模式的决策中, 通过利用模糊有序加权几何平均算子在一定程度上降低了判断信息集结过程中的丢失, 提高了群决策的客观公正性的特点, 提出了建设工程交易模式的决策方法和步骤, 并对提出的工程交易模式选择方法进行演示。结果表明, 该方法克服了当前工程建设交易模式选择方法中存在的主观性大的不足, 较好地解决了决策专家信息在集结过程中的丢失问题, 能够客观地反映工程交易模式的排序, 提高群体决策的效率。

关键词: 工程交易模式; 有序加权平均算子; 三角模糊数; 决策方法

中图分类号: F284

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)01-0056-08

建设工程, 特别是大中型建设工程, 采用不同的交易模式, 将对建设工程管理水平和工程投资效益产生重要的影响。工程交易模式, 不仅定义了建设工程项目的发包范围、参与各方的角色和责任, 确定了业主的支付方式和项目风险在参与各方之间的分配, 同时也为建设工程项目的实施提供了框架, 工程交易模式在很大程度上决定了项目的建设进度、成本、工程质量和合同管理方式, 选择恰当的交易模式是决定一个工程项目是否取得成功的关键因素之一^[1-2]。

目前, 许多学者对工程交易模式选择的问题进行了有益的探索, 文献[3-5]通过鉴于建设工程交易模式对于工程项目绩效的重要影响, 讨论了各种交易模式的适用条件, 探求不同建设工程交易模式对工程项目绩效的影响程度, 提出建议靠专家经验来选择工程交易模式。文献[6-8]讨论了影响建设工程交易模式选择的相关因素, 并利用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 建立了相应的决策模型, 虽然学者对 AHP 方法进行了不断的改进, 能够在一定的程度上克服 AHP 方法本身存在的主观性, 但是由于 AHP 层级递阶结构以及指标本身选取方法具有较强的主观性, 因此造成了所建立的模型不够准确。文献[9-10]运用综合模糊评判的方法建立了工程项目交易模式的决策模型, 虽然取得了一定的研究成果, 但在实际应用中, 这一方法在模型中使用的“权重”过于依赖专家的主观判断和经验, 有时难以令人信服, 不能在评标过程中充分发挥专家组的集体智慧。针对这些不足之处, 本文通过引进模糊有序加权几何平均算子 (Fuzzy Ordered Weighted Geometric Averaging, FOWGA) 的概念, 利用 FOWGA 算子在一定程度上降低了判断信息集结过程中的丢失, 提高了群决策的客观公正性的特点, 能够较好地处理影响工程交易模式评价中的模糊型指标, 以消除由于个人判断偏好而产生的判断偏差, 使得最终的排序结果反映的是决策群组的概念, 而不是个体专家的意愿, 以促使决策结果更加符合客观实际。

1 模糊有序加权几何平均算子

在工程交易模式决策过程中, 群组成员根据自己的知识和经验对备选方案的重要性进行评价。由于影响工程交易模式决策的因素众多, 而且多是模糊的、难以量化的定性指标, 再加上人类思维的模糊性, 用数值标度通常不能够有效地、准确地反映决策者的偏好, 而引入模糊集理论, 利用语言变量表示决策者的主观判断可以较好地解决决策过程中所遇到的内涵明确、外延不明确的模糊不确定性问题, 可有效地集成各评审专家的经验知识。

1.1 三角模糊数及其运算

定义 1: 称 $\tilde{p} = (l, m, u)$ 为三角模糊数, 如果它的隶属函数为 $f_{\tilde{p}(x)} : R \rightarrow [0, 1]$, 即

收稿日期: 2013-09-30 修改稿日期: 2014-01-25

基金项目: 国家社会科学基金项目(06BJY085); 江南大学青年基金项目(JUSRP1031)

作者简介: 刘迅 (1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事建设工程管理研究。E-mail: liuxun8127@163.com

$$f_{\tilde{p}(x)} = \begin{cases} 0 & x \leq l \\ \frac{x-l}{m-l} & l < x \leq m \\ \frac{x-m}{u-m} & m < x \leq u \\ 0 & x > u \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, $x \in R$, $l \leq m \leq u$, $u-l$ 表示模糊程度, $u-l$ 越大表示模糊程度越高, 反之, $u-l$ 越小表示模糊程度越低; 当 $l=m=u$ 时, \tilde{p} 蜕化为非模糊数.

任意两个三角模糊数 $\tilde{p}_1 = (l_1, m_1, u_1)$, $\tilde{p}_2 = (l_2, m_2, u_2)$, 根据扩展原理^[11], 相应的模糊运算规则如下:

- (1) $\tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2)$;
- (2) $\forall \lambda > 0$, $\lambda \tilde{p}_1 = \lambda(l_1, m_1, u_1) = (\lambda l_1, \lambda m_1, \lambda u_1)$;
- (3) $\tilde{p}_1 \otimes \tilde{p}_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2)$, $l_1, l_2 > 0$;
- (4) $\tilde{p}_1^{-1} = (l_1, m_1, u_1)^{-1} = (1/u_1, 1/m_1, 1/l_1)$;
- (5) $\tilde{p}_1^\lambda = (l_1, m_1, u_1)^\lambda = (l_1^\lambda, m_1^\lambda, u_1^\lambda)$.

定义 2: 设 $\tilde{p}_1 = (l_1, m_1, u_1)$, $\tilde{p}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ 是 2 个三角模糊数, 则 $\tilde{p}_1 \geq \tilde{p}_2$ 的可能性程度为^[12]:

$$p(\tilde{p}_1 \geq \tilde{p}_2) = \lambda \max \left\{ 1 - \max \left[\frac{u_2 - l_1}{u_1 - l_1 + u_2 - l_2}, 0 \right], 0 \right\} + (1 - \lambda) \max \left\{ 1 - \max \left[\frac{u_2 - m_1}{u_1 - m_1 + u_2 - m_2}, 0 \right], 0 \right\} \quad (2)$$

式 (2) 中, λ 值的选择取决于决策者的风险态度. 当 $\lambda > 0.5$ 时, 称决策者是风险偏好型; 当 $\lambda = 0.5$ 时, 称决策者是风险中立型; 当 $\lambda < 0.5$ 时, 称决策者是风险厌恶型. 特别是, 当 $\lambda = 1$ 时, 称 $p(\tilde{p}_1 \geq \tilde{p}_2)$ 为 $\tilde{p}_1 \geq \tilde{p}_2$ 的悲观可能度; 当 $\lambda = 0$ 时, 称 $p(\tilde{p}_1 \geq \tilde{p}_2)$ 为 $\tilde{p}_1 \geq \tilde{p}_2$ 的乐观可能度.

定义 3: 三角模糊数 \tilde{p} 大于 k 个三角模糊数 $\tilde{p}_i (i=1, 2, \dots, k)$ 的可能性程度被定义为:

$$p(\tilde{p} \geq \tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_k) = \min_{i=1, 2, \dots, k} p(\tilde{p} \geq \tilde{p}_i)$$

1.2 模糊有序加权几何平均算子及其应用步骤

有序加权平均 (Ordered Weighted Averaging, OWA) 算子是由美国著名学者 Yager 于 1988 年引进的介于最大与最小算子之间的多属性决策信息的集结方法. 近年来, 有关该算子的理论研究已引起人们的极大关注, 并广泛应用于决策、神经网络、数据库系统、模糊逻辑控制器、专家系统、市场研究、数学规划、图像压缩等诸多领域. 本研究试图运用 OWA 算子理论来解决判断信息为三角模糊数判断矩阵形式的决策方案排序问题, 利用该算子对群组 AHP 中以三角模糊数判断矩阵形式给出的判断信息进行集结.

定义 4^[12]: 设 $f: R^n \rightarrow R$, 若 $f(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n w_j b_j$, 其中 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 是与 f 相关联的加权向量, $w_j \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 且 b_j 是一组数据 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 中第 j 个大的元素, 则称函数 f 为 n 维 OWA 算子.

由上述定义易知: 对数据 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 按从大到小的顺序重新进行排序并通过加权集结, 而且元素 a_i 与 w_i 没有任何联系, w_i 只与集结过程中顺序的第 i 个位置有关, 因而可以事先给定. 这样, 不同的加权向量就对应着不同的 OWA 算子.

定义 5^[13]: 设 $f: D^n \rightarrow D$, 若 $g(a_1, a_2, \dots, a_n) = \prod_{j=1}^n b_j^{v_j}$, 其中 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ 是与 g 相关联的加权向量, $v_j \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n v_j = 1$, 且 b_j 是以三角模糊数形式给出的一组数据 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ 中第 j 个大的元素, 则称函数 g 为 n 维模糊有序加权几何平均算子 (Fuzzy Ordered Weighted Geometric Averaging, FOWGA).

FOWGA 算子 in 应用过程中一般可按以下几个步骤进行.

- (1) 由下列公式^[14]计算加权向量 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$.

$$v_j = Q\left(\frac{j}{n}\right) - Q\left(\frac{j-1}{n}\right) \quad j \in N \quad (3)$$

式(3)中模糊语义量化算子 Q 由下式给出.

$$Q(r) = \begin{cases} 0 & r < a \\ \frac{r-a}{b-a} & a \leq r \leq b \\ 1 & r > b \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 $a, b, r \in [0, 1]$. 对应于模糊语义量化准则: “大多数”、“至少半数”、“尽可能多”的算子 Q 中的参数对分别为 $(a, b) = (0.3, 0.8)$ 、 $(a, b) = (0, 0.5)$ 、 $(a, b) = (0.5, 1)$.

(2) 对于以三角模糊数形式给定的一组数据 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$, 对它们进行两两比较, 建立模糊互补判断矩阵 $P = (p_{ij})_{n \times n}$, 其中 $p_{ij} = p(a_i \geq a_j)$. 然后, 由模糊互补判断矩阵排序的一个简化公式^[15], 如式(3), 求得排序向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 再按 w_i 的大小对数 a_i 进行排序, 得到 $b_j (j \in n)$.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

(3) 根据算子 $g(a_1, a_2, \dots, a_n) = \prod_{j=1}^n b_j^{v_j}$ 计算结果.

2 建设工程交易模式的群组决策过程

2.1 建立工程交易模式评价的指标体系

按照建设工程交易模式评价指标体系设计的系统性、科学性、可比性和可操作性原则和标准, 根据工程交易模式影响因素问卷调查的结果, 本文将建设工程交易模式的评价指标归纳为工程项目特性、业主方的管理能力、要求与偏好和工程项目建设环境3个方面, 每个方面又包含若干指标, 如图1所示.

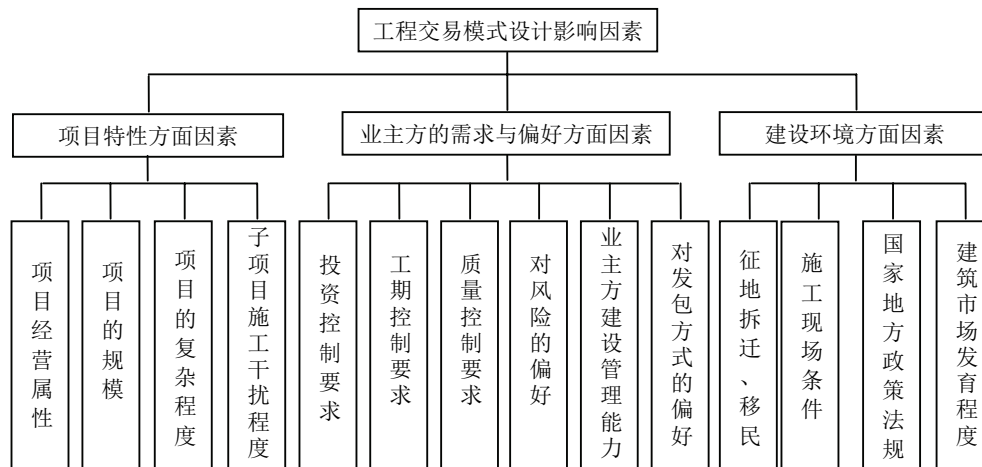


图1 工程交易模式评价指标体系

Fig.1 Evaluation indicator system of project delivery model

2.2 确定各评价指标的权重

针对具体项目的特性和项目业主的要求与偏好, 通过对因子进行两两比较建立成对比较矩阵, 并运用模糊综合程度值, 确定各影响因素的权重 $\{\theta(1), \theta(2), \dots, \theta(14)\}$. 其中, $\theta(j) \in [0, 1]$, $\sum \theta(j) = 1$.

定义6: 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是一个对象集, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 是一个目标集, 则第 i 个对象满足 m 个目标要求的程度值为 $M_{E_i}^1, M_{E_i}^2, \dots, M_{E_i}^m$, 那么, “权重和”型的模糊综合程度值为:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{E_i}^j \otimes [\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{E_i}^j]^{-1}, i = 1, 2, \dots, n.$$

利用定义 6, 求出该层次每一个因素同所有因素相比较的综合重要程度值 S_i . 并令: $d'(A_i) = p(S_i \geq S_k, k = 1, 2, \dots, n, k \neq i)$, 其中 A_i 表示第 i 个因素, 那么我们可得到权重向量: $w' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$, 经过归一化处理, 则 n 个因素 A_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的排序向量为: $w = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))$.

2.3 确定成员 d_k 对工程交易模式 x_i 的综合属性值

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为备选的工程交易模式集合; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{14}\} = \{\text{项目的经济属性, 项目的规模, 项目的复杂程度, 子项目施工干扰程度, 投资控制要求, 工期控制要求, 质量控制要求, 对风险的偏好, 建设管理能力, 对交易模式的偏好, 征地、拆迁与移民, 施工现场条件, 建筑市场发育程度}\}$ 为指标集; $\theta = \{\theta(1), \theta(2), \dots, \theta(14)\}$ 为指标权重向量; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 为群组成员集合; 第 k 位成员 d_k 根据自己的知识和经验给出备选工程交易模式 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 在属性 A_j ($j = 1, 2, \dots, 14$) 下的属性值 e_{ij}^k (e_{ij}^k 为与自然语言标度相对应的三角模糊数), 从而构成三角模糊数评估矩阵 $E^k = (e_{ij}^k)_{n \times 14}$ ($k = 1, 2, \dots, m$).

利用模糊加权几何平均 (Fuzzy Weighted Geometric Averaging, FWGA) 算子对评估矩阵 E^k 中第 i 行的模糊属性值进行集结, 得到成员 d_k 对备选工程交易模式 x_i 的综合属性评估值为:

$$e_i^k = f(e_{i1}^k, e_{i2}^k, \dots, e_{i14}^k) = \prod_{j=1}^{14} (e_{ij}^k)^{\theta(j)} \quad (6)$$

2.4 确定备选工程交易模式 x_i 的群组综合属性值

利用 FOWGA 算子对 m 位群组成员给出的工程交易模式 x_i 的综合属性评估值 e_i^k ($k = 1, 2, \dots, m$) 进行集结, 得到备选工程交易模式 x_i 的群组综合属性评估值为:

$$e_i = g(e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^m) = \prod_{j=1}^m (b_j)^{v(j)} \quad (7)$$

式 (7) 中, v_j 是与 g 相关联的权重, 可由式 (1) 求得; b_j 是数据集 $(e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^m)$ 中按降序排列的第 j 个元素, 可由式 (3) 求得.

2.5 备选工程交易模式的排序和择优

由备选工程交易模式 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 的群组综合属性值 e_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 组成三角模糊数集合 $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 利用式 (2) 对它们进行两两比较, 建立模糊互补判断矩阵 $P = (p_{ij})_{n \times n}$, 其中 $p_{ij} = p(a_i \geq a_j)$. 然后, 由模糊互补判断矩阵排序公式 (3), 求得排序向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 再按 w_i 的大小对 e_i 进行排序, w_i 值最大所对应的备选工程交易模式为最优交易模式.

3 算例

某工程在实施策划阶段, 业主聘请五位专家按照图 1 所示的建设工程交易模式评价指标进行评判, 拟从分项发包模式+单价合同业主+自主管理 (即 DBB+UPC+IM)、分项发包模式+单价合同+项目管理 (即 DBB+UPC+PM)、总承包模式+单价合同业主+自主管理 (即 GC+UPC+IM)、总承包模式+单价合同+项目管理 (即 GC+UPC+PM) 中选择最适合本项目的交易模式, 其分析计算步骤如下:

Step1: 聘请五位专家依据图 1 所示的建设工程交易模式评价指标体系, 进行两两比较确定评价指标的权重.

首先, 通过五位专家对第一层的评价指标项目的特性 B_1 、业主方的需求与偏好 B_2 、建设环境 B_3 进行两两比较得到模糊判断矩阵如表 1, 取平均值后如表 2, 然后利用模糊综合程度值对模糊判断矩阵进行排序, 得到第一层评价指标的权重. 具体计算如下:

表 1 模糊判断矩阵
Tab.1 Fuzzy judgment matrix

	B_1	B_2	B_3
B_1	(1,1,1)	(0.80, 0.95, 1.15); (0.75, 0.95, 1.20) (0.90, 1.20, 1.45); (0.65, 0.83, 1.05) (0.80, 0.95, 1.10)	(0.90, 1.10, 1.30); (1, 1.20, 1.40) (0.90, 1.10, 1.30); (0.8, 1, 1.20) (1, 1.20, 1.40)
B_2	(0.87, 1.05, 1.25); (0.83, 1.05, 1.33) (0.69, 0.83, 1.11); (0.95, 1.2, 1.53) (0.91, 1.05, 1.25)	(1,1,1)	(0.80, 1.10, 1.40); (1, 1.20, 1.40) (1.10, 1.30, 1.60); (0.90, 1.10, 1.30) (1.10, 1.25, 1.45)
B_3	(0.77, 0.91, 1.11); (0.71, 0.83, 1) (0.77, 0.91, 1.11); (0.83, 1, 1.25) (0.71, 0.83, 1)	(0.71, 0.91, 1.25); (0.71, 0.83, 1) (0.63, 0.77, 0.91); (0.77, 0.91, 1.11) (0.69, 0.80, 0.91)	(1,1,1)

表 2 取平均值后的模糊判断矩阵
Tab.2 Fuzzy judgment matrix of mean number

	B_1	B_2	B_3
B_1	(1,1,1)	(0.78, 0.98, 1.19)	(0.92, 1.12, 1.32)
B_2	(0.85, 1.04, 1.29)	(1,1,1)	(0.98, 1.19, 1.43)
B_3	(0.76, 0.90, 1.09)	(0.70, 0.84, 1.04)	(1,1,1)

1) 计算模糊综合程度值

$S_1 = (2.70, 3.10, 3.51) \otimes (\frac{1}{10.36}, \frac{1}{9.07}, \frac{1}{7.99}) = (0.26, 0.34, 0.44)$

$S_2 = (2.83, 3.23, 3.72) \otimes (\frac{1}{10.36}, \frac{1}{9.07}, \frac{1}{7.99}) = (0.27, 0.36, 0.47)$

$S_3 = (2.46, 2.74, 3.13) \otimes (\frac{1}{10.36}, \frac{1}{9.07}, \frac{1}{7.99}) = (0.24, 0.30, 0.39)$

2) 计算 $d'(B_i)$

$d'(B_1) = p(S_1 \geq S_2, S_3) = \min(0.41, 0.67) = 0.41$

$d'(B_2) = p(S_2 \geq S_1, S_3) = \min(0.58, 0.75) = 0.58$

$d'(B_3) = p(S_3 \geq S_1, S_2) = \min(0.33, 0.25) = 0.25$

3) 计算第一层评价指标的权重向量

$w' = (0.41, 0.58, 0.25)^T$ 经归一化处理得: $w = (0.33, 0.46, 0.21)^T$

其次, 利用同样的方法计算五位专家对于第二层评价指标的判断矩阵和权重向量, 这里略去计算过程, 结果见表 3.

表 3 C_1, C_2, \dots, C_{14} 权重表
Tab.3 Weights of C_1, C_2, \dots, C_{14}

	C_1	C_2	C_3	C_4	W		
C_1	(1,1,1)	(0.81,1.09,1.39)	(0.72,1,1.34)	(0.5,0.61,0.73)	0.19		
C_2	(0.72,0.92,1.23)	(1,1,1)	(1.27,1.64,1.91)	(0.95,1.24,1.53)	0.33		
C_3	(0.75,1,1.39)	(0.52,0.61,0.79)	(1,1,1)	(0.45,0.57,0.68)	0.11		
C_4	(1.37,1.64,2)	(0.65,0.81,1.05)	(1.47,1.75,2.22)	(1,1,1)	0.37		
	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	W
C_5	(1,1,1)	(0.85,1.3,1.8)	(0.95,1.5,2.1)	(1.3,2,2.8)	(1.1,1.85,2.5)	(1.37,1.8,2.23)	0.45
C_6	(0.56,0.77,1.18)	(1,1,1)	(0.85,1.17,1.56)	(0.8,1.4,1.9)	(0.9,1.25,1.7)	(0.83,1.23,1.63)	0.17
C_7	(0.48,0.67,1.05)	(0.64,0.85,1.17)	(1,1,1)	(0.7,1.2,1.6)	(0.8,1.1,1.4)	(1.12,1.5,1.93)	0.14
C_8	(0.36,0.5,0.77)	(0.53,0.71,1.25)	(0.63,0.83,1.43)	(1,1,1)	(0.6,0.75,1.12)	(0.85,1.17,1.56)	0.08
C_9	(0.4,0.54,0.91)	(0.59,0.8,1.11)	(0.71,0.91,1.25)	(0.89,1.34,1.66)	(1,1,1)	(0.67,0.9,1.14)	0.08
C_{10}	(0.45,0.56,0.73)	(0.61,0.81,1.2)	(0.52,0.67,0.89)	(0.64,0.85,1.17)	(0.88,1.11,1.49)	(1,1,1)	0.07
	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	W		
C_{11}	(1,1,1)	(0.89,1.34,1.76)	(0.74,1.1,1.49)	(0.83,1.05,1.35)	0.38		
C_{12}	(0.57,0.75,1.12)	(1,1,1)	(0.67,0.9,1.14)	(0.90,1,1.20)	0.18		
C_{13}	(0.67,0.91,1.35)	(0.88,1.11,1.49)	(1,1,1)	(0.87,1.05,1.15)	0.25		
C_{14}	(0.74,0.91,1.20)	(0.83,1,1.11)	(0.87,0.95,1.15)	(1,1,1)	0.19		

最后, 确定第二层评价指标相对于总目标的权重.

$$w_1' = (0.19, 0.33, 0.11, 0.37, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

$$w_2' = (0, 0, 0, 0, 0.45, 0.17, 0.14, 0.08, 0.08, 0.07, 0, 0, 0, 0)^T$$

$$w_3' = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.38, 0.18, 0.25, 0.19)^T$$

$$W' = (w_1', w_2', w_3')$$

则第二层评价指标相对于总目标的权重向量为:

$$W = W'w = (0.063, 0.109, 0.036, 0.122, 0.207, 0.078, 0.064, 0.037, 0.037, 0.032, 0.080, 0.038, 0.053, 0.040)$$

Step2: 聘请五位专家依据图 1 所示的建设工程交易模式评价指标体系和自然语言标度集 $S = \{\text{非常好}(S_1), \text{很好}(S_2), \text{好}(S_3), \text{中等}(S_4), \text{差}(S_5), \text{很差}(S_6), \text{非常差}(S_7)\}$, 对各个备选方案在评价指标下的满意度进行评判, 得出各备选方案的自然语言评估矩阵, 如下所示.

$$E^1 = \begin{bmatrix} S_3 & S_2 & S_4 & S_5 & S_3 & S_4 & S_3 & S_4 & S_5 & S_4 & S_3 & S_5 & S_3 & S_2 \\ S_2 & S_3 & S_5 & S_2 & S_3 & S_5 & S_3 & S_2 & S_5 & S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_3 \\ S_3 & S_4 & S_2 & S_4 & S_2 & S_3 & S_4 & S_3 & S_2 & S_5 & S_4 & S_2 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_3 & S_2 & S_3 & S_4 & S_2 & S_3 & S_3 & S_4 & S_2 & S_3 & S_2 & S_4 & S_5 \end{bmatrix}$$

$$E^2 = \begin{bmatrix} S_4 & S_3 & S_4 & S_2 & S_3 & S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_4 & S_2 & S_4 & S_2 & S_2 \\ S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_2 & S_3 & S_5 & S_4 & S_4 & S_2 & S_4 & S_5 & S_2 & S_3 \\ S_2 & S_4 & S_3 & S_2 & S_4 & S_2 & S_5 & S_2 & S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_4 & S_4 \\ S_3 & S_2 & S_3 & S_4 & S_4 & S_3 & S_4 & S_3 & S_2 & S_3 & S_2 & S_4 & S_4 & S_5 \end{bmatrix}$$

$$E^3 = \begin{bmatrix} S_4 & S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_5 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_4 & S_3 & S_2 & S_3 \\ S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_4 & S_4 & S_5 & S_4 & S_3 & S_4 & S_5 & S_2 & S_3 & S_4 \\ S_2 & S_2 & S_3 & S_5 & S_3 & S_2 & S_5 & S_4 & S_3 & S_2 & S_3 & S_4 & S_3 & S_4 \\ S_4 & S_3 & S_4 & S_2 & S_3 & S_4 & S_3 & S_2 & S_5 & S_3 & S_5 & S_3 & S_3 & S_5 \end{bmatrix}$$

$$E^4 = \begin{bmatrix} S_4 & S_5 & S_3 & S_4 & S_5 & S_3 & S_4 & S_5 & S_3 & S_2 & S_4 & S_2 & S_2 & S_3 \\ S_3 & S_4 & S_4 & S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_4 & S_5 & S_4 & S_3 & S_3 & S_4 & S_4 \\ S_4 & S_2 & S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_2 & S_3 & S_4 & S_2 & S_3 & S_2 & S_3 & S_4 \\ S_3 & S_5 & S_3 & S_4 & S_3 & S_5 & S_2 & S_4 & S_3 & S_3 & S_4 & S_3 & S_4 & S_4 \end{bmatrix}$$

$$E^5 = \begin{bmatrix} S_2 & S_5 & S_3 & S_2 & S_4 & S_5 & S_4 & S_3 & S_2 & S_5 & S_4 & S_3 & S_2 & S_3 \\ S_4 & S_2 & S_4 & S_3 & S_3 & S_4 & S_4 & S_3 & S_5 & S_4 & S_3 & S_3 & S_4 & S_4 \\ S_2 & S_3 & S_4 & S_3 & S_3 & S_5 & S_3 & S_2 & S_4 & S_3 & S_5 & S_4 & S_2 & S_5 \\ S_3 & S_4 & S_2 & S_4 & S_4 & S_3 & S_4 & S_5 & S_3 & S_4 & S_3 & S_3 & S_4 & S_5 \end{bmatrix}$$

Step3: 将专家对各个备选方案的自然语言评估矩阵转化成模糊评判矩阵. 其中, 每个自然语言标度对应的三角模糊数为 $S_1=(0.83, 1, 1)$ 、 $S_2=(0.67, 0.83, 1)$ 、 $S_3=(0.5, 0.67, 0.83)$ 、 $S_4=(0.33, 0.5, 0.67)$ 、 $S_5=(0.17, 0.33, 0.5)$ 、 $S_6=(0, 0.17, 0.33)$ 、 $S_7=(0, 0, 0.17)$.

Step4: 利用 FOWGA 算子计算各位专家对备选交易模式的综合属性评价价值. 现以第一位专家 d_1 对备选交易模式 x_1 的综合属性评价价值 e_1^1 为例, 依据 Step3 中的数据, 利用式 (4) 和三角模糊数运算法则可得:

$$e_1^1 = (0.3925, 0.5712, 0.7432)$$

同理, 第一位专家 d_1 对其他备选交易模式的综合属性评价价值为:

$$e_2^1 = (0.4581, 0.6362, 0.8074); \quad e_3^1 = (0.4357, 0.6117, 0.7842); \quad e_4^1 = (0.4563, 0.6305, 0.7998);$$

类似地, 可得其它 4 位评审专家分别对各备选交易模式的综合属性评估值为:

$$\begin{aligned} e_1^2 &= (0.5112, 0.6823, 0.8498); & e_2^2 &= (0.4321, 0.6096, 0.7826); \\ e_3^2 &= (0.4208, 0.5968, 0.7704); & e_4^2 &= (0.4196, 0.5942, 0.7654); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
e_1^3 &= (0.4108, 0.5587, 0.7577); & e_2^3 &= (0.3748, 0.5514, 0.7238); \\
e_3^3 &= (0.4247, 0.6042, 0.7773); & e_4^3 &= (0.4120, 0.5899, 0.7608); \\
e_1^4 &= (0.3098, 0.4873, 0.6623); & e_2^4 &= (0.4362, 0.6105, 0.7802); \\
e_3^4 &= (0.4830, 0.6556, 0.8254); & e_4^4 &= (0.3637, 0.5408, 0.7121); \\
e_1^5 &= (0.3708, 0.5500, 0.7257); & e_2^5 &= (0.4272, 0.6012, 0.7692); \\
e_3^5 &= (0.4044, 0.5834, 0.7549); & e_4^5 &= (0.3654, 0.5393, 0.7092).
\end{aligned}$$

Step5: 利用 FOWGA 算子计算各备选工程交易模式的群组综合属性值. 现对五位专家给出的备选交易模式 x_1 的综合属性评价值 $e_1^k (k=1, 2, \dots, 5)$ 进行集结, 说明群组综合属性值的集结过程.

首先, 计算 FOWGA 算子 g 相关联的加权向量 v . 在对专家意见进行集结时, 遵循专家多数的原则, 与此相对应的是“模糊多数”原则, 即参数对 (a, b) 的取值为 $(0.3, 0.8)$. 由式 (3), 式 (4) 计算加权向量 v .

$$\begin{aligned}
v_1 &= Q\left(\frac{1}{5}\right) - Q\left(\frac{1-1}{5}\right) = 0; & v_2 &= Q\left(\frac{2}{5}\right) - Q\left(\frac{2-1}{5}\right) = 0.2; & v_3 &= Q\left(\frac{3}{5}\right) - Q\left(\frac{3-1}{5}\right) = 0.4; \\
v_4 &= Q\left(\frac{4}{5}\right) - Q\left(\frac{4-1}{5}\right) = 0.4; & v_5 &= Q\left(\frac{5}{5}\right) - Q\left(\frac{5-1}{5}\right) = 0.
\end{aligned}$$

因此, FOWGA 算子 g 相关联的加权向量 $v = (0, 0.2, 0.4, 0.4, 0)$.

其次, 建立备选交易模式 x_1 的模糊互补判断矩阵 $P^1 = (p_{ij})_{5 \times 5}$, 其中 $p_{ij} = p(e_1^i \geq e_1^j)$. 假设决策者的风险偏好是中性的, 即 $\lambda = 0.5$, 由式 (2) 知: $p_{12} = 0.2580$

同理, 对五位专家给出的备选交易模式 x_1 的综合属性评价值 $e_1^k (k=1, 2, \dots, 5)$ 进行两两比较, 建立的模糊互补判断矩阵为:

$$P^1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.2580 & 0.4869 & 0.6769 & 0.5417 \\ 0.7420 & 0.5 & 0.7173 & 0.8907 & 0.7821 \\ 0.5131 & 0.2827 & 0.5 & 0.6817 & 0.5528 \\ 0.3231 & 0.1093 & 0.3183 & 0.5 & 0.3661 \\ 0.4583 & 0.2179 & 0.4472 & 0.6339 & 0.5 \end{bmatrix}$$

再次, 利用式 (5) 计算排序向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_5)^T$.

$$w_1 = \frac{(0.5 + 0.2580 + 0.4869 + 0.6769 + 0.5417) + 5 \div 2 - 1}{5 \times (5 - 1)} = 0.1982$$

同理, $w_2 = 0.2566$; $w_3 = 0.2015$; $w_4 = 0.1558$; $w_5 = 0.1879$.

按 w_i 的大小对数 $e_1^k (k=1, 2, \dots, 5)$ 进行排序, 得到 $b = (e_1^2, e_1^3, e_1^1, e_1^5, e_1^4)$.

最后, 利用式 (7) 计算备选交易模式 x_1 的群组综合属性值.

$$e_1 = (0.3872, 0.5601, 0.7390)$$

类似地, 可得其它各备选交易模式的群组综合属性值为:

$$e_2 = (0.4309, 0.6064, 0.7767); \quad e_3 = (0.4253, 0.6027, 0.7759); \quad e_4 = (0.3934, 0.5706, 0.7418).$$

Step6: 备选交易模式排序.

首先, 利用式 (2) 对各备选交易模式的群组综合属性值 $e_i (i=1, 2, \dots, 4)$ 进行两两比较, 建立的模糊互补判断矩阵 P , 略去计算过程具体结果如下:

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4107 & 0.4168 & 0.4872 \\ 0.5893 & 0.5 & 0.5056 & 0.5778 \\ 0.5831 & 0.4944 & 0.5 & 0.5717 \\ 0.5127 & 0.4221 & 0.4283 & 0.5 \end{bmatrix}$$

其次, 利用式 (5) 计算排序向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_4)^T$.

$$w_1 = \frac{(0.5 + 0.410\ 7 + 0.416\ 8 + 0.487\ 2) + 4 \div 2 - 1}{4 \times (4 - 1)} = 0.234\ 6$$

同理, $w_2 = 0.264\ 4$; $w_3 = 0.262\ 4$; $w_4 = 0.238\ 6$.

由 $w_2 > w_3 > w_4 > w_1 \Rightarrow e_2 > e_3 > e_4 > e_1$

因此, 该 4 个备选交易模式的排序结果为: $x_2 > x_3 > x_4 > x_1$

所以最优方案为 DBB+UPC+PM, 即该工程最优的交易模式是发包方式采用分项发包, 合同类型选用单价合同, 业主方管理方式采用委托管理.

4 结论

针对由于影响工程交易模式决策的因素众多, 而且多是模糊的、难以量化的定性指标, 再加上人类思维的模糊性, 用数值标度通常不能够有效地、准确地反映决策者的偏好, 而引入模糊集理论, 通过利用模糊有序加权几何平均算子, 并将其引入到建设工程交易模式的决策中来, 提出了建设工程交易模式的决策方法和流程. 该决策方法在一定程度上降低了判断信息集结过程中的丢失, 提高了群决策的客观公正性的特点, 能够较好地处理影响工程交易模式评价中的模糊型指标, 以消除由于个人判断偏好而产生的判断偏差, 使得最终的排序结果反映的是决策群组的概念, 而不是个体专家的意愿, 以促使决策结果更加符合客观实际. 本方法的算例结果表明, 该方法克服了当前工程建设交易模式选择方法中存在的主观性大的不足, 较好地解决了决策专家信息在集结过程中的丢失问题, 能够客观的反映各个工程交易模式的优劣, 提高群体决策的效率.

参考文献 References

- [1] 陈勇强, 焦俊双. 工程项目交易方式与支付方式对项目成本的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011, 39(9): 1407-1412.
CHEN Yongqiang, JIAO Junshuang. Influence of project delivery system and payment method on project cost performance [J]. Journal of Tongji University:Natural Science, 2011, 39(9):1407-1412.
- [2] 陈勇强, 张雯. 工程项目交易方式生产效率比较研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 309-316.
CHEN Yongqiang, ZHANG Wen. Comparison of project production efficiency between DBB and DB delivery system on production frontier [J]. Journal of Tongji University : Natural Science, 2013, 41(02): 309-316.
- [3] KENT D, BECERIK-GERBER B. Understanding construction industry experience and attitudes toward integrated project delivery[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136(8): 815-825.
- [4] SWARUP L, KORKMAZ S, RILEY D. Project delivery metrics for sustainable, high-performance buildings[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(12): 1043-1051.
- [5] MOLLAOGLU-KORKMAZ S, SWARUP L, RILEY D. Delivering sustainable, high-performance buildings: influence of project delivery methods on integration and project outcomes[J]. Journal of Management in Engineering, 2013, 29(1): 71-78.
- [6] ALHAZMI T, MCCAFFER R. Project procurement system selection model[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2000, 126(3): 176-184.
- [7] Mahdi I M, Alreshaid K. Decision support system for selecting the proper project delivery method using analytical hierarchy process (AHP) [J]. International Journal of Project Management, 2005, 23(7): 564-572.
- [8] MAFAKHERI F, DAI L, SLEZAK D, et al. Project delivery system selection under uncertainty: multicriteria multilevel decision aid model[J]. Journal of Management in Engineering, 2007, 23(4): 200-206.
- [9] CHAN Caroline T W. Fuzzy procurement selection model for construction projects[J]. Construction Management and Economics, 2007, 25(6): 611-618.
- [10] MOSTAFAVI A, KARAMOUM M. Selecting appropriate project delivery system: fuzzy approach with risk analysis[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136(8): 923-930.
- [11] KAUFERNAN A, GUPTA M M. Introduction to fuzzy arithmetic: theory and application[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [12] 徐泽水. 一种 FOWG 算子及其在模糊 AHP 中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2002(7): 31-33, 36.
XU Zeshui. A fuzzy ordered weighted geometric operator and its application in fuzzy AHP [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002(7): 31-33, 36.

(下转第 70 页)

Reflection cracks maintenance technology evaluation of composite pavement based on improved fuzzy hierarchical method

ZHANG Chi¹, ZHOU Bowen¹, YU Huijiang²

(1.Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2.Henan YUEXIU Transport Infrastructure Company Limited Xuchang 461000 China)

Abstract: There are many kinds of reflection cracks maintenance technologies at home and abroad, but there is not solutions for instructing the worker the conservation decisions. It is important the evaluate to these maintenance technologies based on cost, lifetime, efficiency and so on. There are some defects with the existing maintenance technology evaluation methods subjectivity, unreasonable index and other factors. This paper took into account six index for economic benefit and user experience, it evaluate the three kinds of maintenance technologies using the Fuzzy-mathematics, entropy method and statistics based on the frame structure form Analytic Hierarchy Process, and achieved a final result.

Key words: road engineering; composite pavement; reflection cracks; maintenance technology; improved analytic hierarchy process; entropy method; Fuzzy-mathematics

(本文编辑 吴海西)

(上接第 63 页)

- [13] YAGER R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1988;18(1): 183-190.
- [14] HERRERA F, HERRERA-VIDEIRA E, CHICLANA F. Multiperson decision-making based on multiplicative preference relations[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129(2): 372-385.
- [15] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵排序的一种算法[J]. 系统工程学报, 2001(4): 311-314.
XU Zeshui. Algorithm for priority of fuzzy complementary judgement matrix[J]. Journal of Systems Engineering, 2001(4): 311-314.

Research on project delivery systems decision method based on FOWGA operator

LIU Xun¹, WANG Zhuofu²

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Institute of Construction Project Management, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Appropriate transaction model is one of the key factors affecting a project success. This paper presents the fuzzy set theory. The judgment information loss can be reduced to a certain extent by using the fuzzy ordered weighted geometric averaging operator. Considering the characteristic of the operator that can improve the objectivity and fairness of group decision-making, this paper applies the operator into the decision methods of project delivery. Also, this paper proposes the method and procedure for the decision methods of project delivery and the mode selection method is demonstrated. Numeric examples are introduced to illustrate the application of the method, which has shown that the method can overcome the current drawback of subjectivity of the project delivery decision method, and reflect objectively the priority of the project delivery systems which help improve the efficiency of the group decision.

Key words: project delivery systems; OWA operator; triangular fuzzy number; decision method

(本文编辑 桂智刚)