

基于知识 - 信任网络的多属性群体共识决策方法

程一敏

江苏大学管理学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2024年4月25日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

文章针对决策者的知识交互与信任之间的复杂关系及其对共识形成过程的影响, 提出了基于知识 - 信任网络的多属性群体共识决策方法。首先, 考虑到决策者意见表达的不确定性, 采用犹豫模糊语言术语集表征决策者意见; 其次, 基于决策者的知识水平与决策者之间的信任关系, 构建决策者之间的知识 - 信任网络, 并确定决策者权重; 同时, 构建基于知识 - 信任网络的共识决策模型, 达成群体共识; 最后, 通过新能源汽车车身材料选择的算例, 验证本文所提共识方法的有效性。

关键词

多属性决策, 知识 - 信任网络, 群体共识

Multi-Attribute Group Consensus Decision Making Method Based on Knowledge-Trust Network

Yimin Cheng

School of Management, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Apr. 25th, 2024; accepted: Jun. 23rd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

Aiming at the complex relationship between knowledge interaction and trust of decision makers and its influence on the process of consensus formation, this paper proposes a multi-attribute group consensus decision-making method based on knowledge-trust network. Firstly, considering

the uncertainty of decision maker's opinion expression, the term set of hesitation fuzzy language is used to represent decision maker's opinion. Secondly, based on the knowledge level of decision makers and the trust relationship between decision makers, the knowledge-trust network among decision makers is constructed, and the weight of decision makers is determined. The consensus decision model based on knowledge-trust network is constructed to achieve group consensus. Finally, through the new energy vehicle body material selection example, to verify the effectiveness of the consensus model proposed.

Keywords

Multi-Attribute Decision Making, Knowledge-Trust Network, Group Consensus

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多属性群体共识决策是指多个决策者对根据备选方案的多个属性,对多个备选方案提出意见,然后选择合适备选方案的过程。由于决策者来自不同的领域,有不同的背景经验和知识,这可能会出现意见分歧。因此,在共识反馈过程中,决策者需要不断调整自己的意见,以促进群体达成共识。

多属性群体共识决策方法已被广泛应用到多个领域,如全生命周期可持续评价[1]、碳减排方案评估[2]、融资平台的选择[3]等。但并未有学者深入分析决策者间的信任网络和知识互动网络的关系,考虑其对共识的影响。针对知识水平对信任影响的共识决策研究,一些学者基于知识水平越高,决策者越受信任的假设,认为决策者的知识水平可以反映信任信息的可信度,构建了基于知识覆盖[4]、知识缺陷[5]的信任网络。然而,在意见交互过程中,决策者之间的信任关系是动态变化的,高知识水平的决策者不一定越受其他决策者信任。决策者的知识水平越高表明其自信水平越高,在意见修改时,可能与其他决策者意见相左,但因无人能与其进行有效沟通而拒绝修改意见,在这一过程中其信任程度可能会降低。针对信任对知识水平影响的共识决策研究,Zou等[6]考虑到了知识水平在意见反馈中的作用,从意见相似性出发,构建了基于知识交互网络的共识反馈机制。但其并未考虑信任对知识交互的影响。具有相似意见的决策者并不意味着彼此信任[7],决策者可能信任与其意见不一致的决策者,也可能对与自己意见相近的决策者持否定态度。实际上,决策者对意见的接受程度与相对应的决策者信任程度成正相关[4],且由于决策者的异质性,每个决策者有不同的信任阈值,只有在信任阈值范围内,决策者才会接受其信任的决策者意见[8]。

此外,决策者之间除有信任关系构成的信任网络外,还存在由知识交互关系构成的知识网络。知识交互是指决策者向知识水平最高或知识传播能力最高的决策者进行知识学习和意见交换的过程[9]。且信任可以影响决策者的个人意愿,促进决策者提供有效的知识交互[10],进而提高共识效率。因此,由决策者之间的信任关系构成的信任网络与知识交互关系构成的知识网络可共同呈现为一种多层网络结构,且网络层与层之间存在彼此影响的关系。在意见调整过程中,决策者之间的信任关系促进决策者之间的有效知识交互。若决策者接受的知识来源不受其信任,那么该建议可能会受到决策者的抵制[11]。而决策者的知识水平也可以反映信任信息的可信度,决策者的知识水平越高,自然也会越受信任。通过信任与知识的不断交互,影响意见变化与共识效率。

针对上述不足, 本文旨在构建基于知识 - 信任网络的共识决策模型, 并将其应用到汽车车身材料选择中。由于决策者的认知差异性, 决策者在表达不确定性意见时态度可能犹豫不决, 本文采用犹豫模糊语言表征决策者意见。首先, 从决策者的知识交互关系与信任关系出发, 构建知识 - 信任网络, 确定决策者权重。其次, 考虑决策者信任阈值对知识交互的影响, 构建基于知识 - 信任网络的共识反馈机制, 并探讨意见调整过程中决策者信任变化机制。最后将其应用到汽车车身材料选择中, 验证本文所提模型的有效性与可行性。

2. 预备知识

2.1. 犹豫模糊语言术语集

定义 1 [12]: 令 $S = \{s_\delta \mid \delta = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$ 为一个语言术语集, 犹豫模糊语言术语集 H_s 由一组连续语言术语 S 组成的有序子集构成, $H_s = \left\{ \left\langle x_i, h_{s(x_i)} \right\rangle \mid x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n \right\}$, 其中犹豫模糊语言元素 $h_{s(x_i)} = \left\{ s_{\delta_l}(x_i) \mid s_{\delta_l}(x_i) \in S; l = 1, 2, \dots, \#h_{s(x_i)} \right\}$, $\#h_{s(x_i)}$ 为语言术语的个数。

定义 2 [13]: 对于 $h_{s(x_i)} = \left\{ s_{\delta_l}(x_i) \mid s_{\delta_l}(x_i) \in S; l = 1, 2, \dots, \#h_{s(x_i)} \right\}$, 其犹豫度为

$$HD(h_s) = \frac{\#h_s \ln(\#h_s)}{(2\tau + 1) \ln(2\tau + 1)} \quad (1)$$

定义 3 [13]: 对于 $h_{s(x_i)} = \left\{ s_{\delta_l}(x_i) \mid s_{\delta_l}(x_i) \in S; l = 1, 2, \dots, \#h_{s(x_i)} \right\}$, 其得分函数为

$$E(h_s) = (1 - HD(h_s)) \cdot \left(\frac{1}{\#h_s} \sum_{l=1}^{\#h_s} \frac{\delta_l + \tau}{2\tau} \right) \quad (2)$$

2.2. 多层网络

$G_M = (g, U)$ 表示一个具有 M 层的多层网络, 由各网络层的集合 g 及层间连边的集合 U 组成。若第 ρ 层网络为 $G^\rho = (D_\rho, E_\rho, W_\rho)$, D_ρ 、 E_ρ 和 W_ρ 分别为第 ρ 层网络上的节点集、层内连边集以及权重向量集, 则多层网络的层集合为 $g = \{G_1, \dots, G_\rho, \dots, G_M\}$, $\rho = 1, 2, \dots, M$, 层间连边集 $U = \left\{ E^{[\alpha\beta]} \mid E^{[\alpha\beta]} \in V^{[\alpha]} \cdot V^{[\beta]} \right\}$ 为不同网络层的节点间连边的集合。

2.3. 社会网络分析

社会网络分析是以社会行动者的交互为基础, 用点表示决策者, 点和点之间的连线表示决策者之间的社会关系, 并对这些社会关系进行量化的一种方法。本文主要用以分析决策者之间的信任关系。信任网络可以用图 $G_\alpha = (D, E_\alpha, W_\alpha)$ 表示, 其中节点表示决策者 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 有向边 E_α 表示决策者之间的社会关系。 $(d_k, d_h) \in E$ 表示决策者 d_k 直接信任决策者 d_h 。权重向量 $W_\alpha = \{w_{\alpha}^{kj}\}$ 表示决策者 d_k 对决策者 d_h 的信任强度, 其中, $w_{\alpha}^{kj} \in [0, 1]$ 。

定义 4 [14]: 决策者 d_k 的信任值为

$$TD^k = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1, k \neq h}^m w_{kh} \quad (3)$$

3. 知识 - 信任双层网络的构建

3.1. 基于知识交互的知识网络构建

知识交互主要发生在意见调整过程中, 根据决策者的知识水平高低, 可以确定意见调整的方向。一

一般而言，高知识水平的决策者会向低知识水平的决策提供建议。知识网络表示为 $G_\beta = (D, E_\beta, W_\beta)$ ，其中节点集 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 表示决策者集合， W_β 表示决策者之间的意见相似度。根据决策者的知识水平大小确定连边集 E_β 的方向，即决策者之间知识交互的方向。

$$e_\beta^{kh} = \begin{cases} 1, & \overline{KA}^k > \varepsilon \wedge \overline{KA}^h < \varepsilon \\ 0 & \end{cases} \quad (4)$$

其中， \overline{KA}^k 和 \overline{KA}^h 分别代表决策者 d_k 和决策者 d_h 的知识水平。决策者的知识水平是调整意见和保证决策准确性的关键。决策者依据指标对备选材料进行评价时，决策者的知识水平越高，对备选方案评价时会更有信心，能够给出精确的语言值。否则，决策者在提供评价价值时会犹豫不决。因此，本文采用犹豫度刻画决策者的知识水平。犹豫度越大，决策者 d_k 的知识水平越低。

$$KA^k = 1 - \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^N \lambda_j \delta_{ij}^k \quad (5)$$

对其标准化，决策者 d_k 的知识水平为

$$\overline{KA}^k = \frac{KA^k - \min\{KA^k\}}{\max\{KA^k\} - \min\{KA^k\}} \quad (6)$$

根据决策者的知识水平大小，设定知识阈值 ε 将决策者划分为高知识水平的决策者 $d_k \in D^H$ 和低知识水平的决策者 $d_k \in D^L$ 。

权重向量 $W_\beta = \{w_\beta^{ij}\}$ 表示决策者 d_k 与决策者 d_h 之间的意见相似度。决策者之间的意见相似度主要由决策者给出的犹豫模糊语言评价矩阵获得，具体为

$$w_\beta^{kh} = 1 - \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^N \lambda_j |h_{kh}^i - h_{kh}^j| \quad (7)$$

3.2. 基于社会网络分析的信任网络构建

与量化的信任信息相比，决策者更偏好于语言术语表达对其他决策者的信任程度，如“非常信任”，“比较信任”。因此，本文引入语言术语集 $S = \{s_\delta \mid \delta = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$ 描述决策者之间的信任关系，借助社会网络分析构建决策者之间的信任网络。决策者之间的信任矩阵 $T = [t_{ij}]_{m \times m}$ 。决策者之间的信任网络可以用图 $G_\alpha = (D, E_\alpha, W_\alpha)$ 表示，其中决策者集合 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 表示节点，连边集 E_α 表示决策者之间的信任关系。 $(d_k, d_h) \in E$ 表示决策者 d_k 直接信任决策者 d_h 。权重向量 $W_\alpha = \{t_\alpha^{ij}\}$ 表示决策者 d_k 对决策者 d_h 的信任强度，其中， $t_\alpha^{ij} \in [0, 1]$ 。决策者 d_k 的信任值为

$$TD^k = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1, k \neq h}^m t_\alpha^{hk} = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1, k \neq h}^m \frac{\delta + \tau}{2\tau} \quad (8)$$

3.3. 知识 - 信任网络的构建

根据前文分析，知识 - 信任双层网络表示为 $G = (G_\alpha, G_\beta, E_{\alpha\beta}, ME_{\beta\alpha})$ ，其中， $G_\alpha = (D, E_\alpha, W_\alpha)$ 和 $G_\beta = (D, E_\beta, W_\beta)$ 分别表示一组决策者 D 的信任网络和知识网络， $E_{\alpha\beta}$ 表示意见调整过程中，决策者间信任关系对知识交互的影响，促进知识有效传播，进而提高共识效率。 $ME_{\beta\alpha}$ 表示意见调整过程中，决策者的知识水平对决策者间信任关系的影响，促使决策者间信任关系发生变化。具体如图 1 所示。

根据本文所构建的知识 - 信任网络可知，在意见调整过程中，决策者之间的信任关系影响决策者之间的知识交互与意见交流，具体在图 1 中用实线表示。同时，决策者的知识水平影响决策者之间的信任

关系, 在意见调整过程中, 知识水平越高的决策者一定程度上受信任程度会加强, 具体在图 1 中用虚线表示。

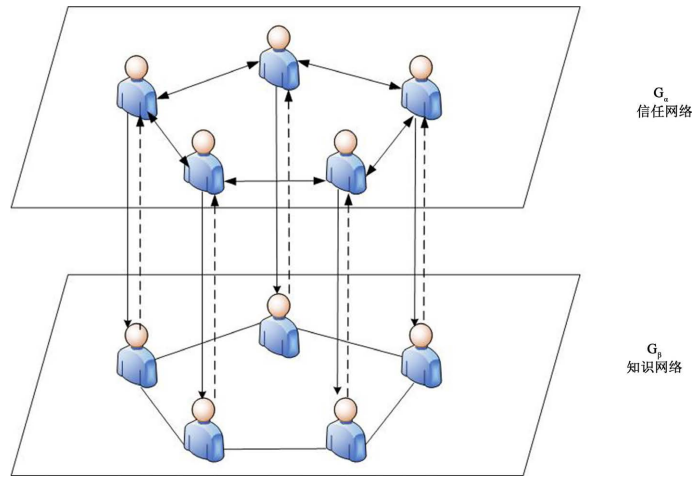


Figure 1. Knowledge-trust network
图 1. 知识 - 信任网络

3.4. 决策者权重确定

决策者的知识水平一定程度上可以反映决策者的影响力, 决策者的知识水平越高, 分配给决策者的权重也会越高。结合决策者的信任关系, 决策者 d_k 的权重确定为

$$\psi(d_k) = \chi TD^k + (1 - \chi) \overline{KA}^k \quad (9)$$

其中, $\chi \in [0, 1]$ 是控制 TD^k 和 \overline{KA}^k 权重的参数, 为不失一般性, 取值 0.5。

设 $\{\psi(d_1), \psi(d_2), \dots, \psi(d_m)\}$ 为决策者 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 的权重集合, 决策者 d_k 的归一化权重 w_k 为

$$\bar{w}(d_k) = \frac{\psi(d_k)}{\sum_{k=1}^m \psi(d_k)} \quad (10)$$

4. 基于知识 - 信任网络的共识决策模型构建

4.1. 共识测度

决策者根据自身知识水平对备选方案进行评价, 由于决策信息的复杂性, 决策者在给出评价时可能会在几个语言值之间犹豫不决。因此, 本文引入犹豫模糊语言术语集表征决策者对各备选材料的评价。决策者 d_k 的犹豫模糊语言评价矩阵为 $H_k = (h_{ij}^k)_{P \times N}$, 其中 h_{ij}^k 表示决策者 d_k 针对备选方案 A_i 在属性 f_j 上的犹豫模糊语言评价。

运用公式(2)将各决策者的犹豫模糊语言评价矩阵转化为得分矩阵 $H_{d_k} = (h_{ij}^{d_k})_{P \times N}$, 运用 WA 算子集结各决策者得分矩阵, 则群体评价矩阵为

$$H_g^k = (h_{ij}^g)_{P \times N} = WA(H_1^k, \dots, H_m^k) \quad (11)$$

决策者的个体共识水平一般定义为决策者的个体意见与群体意见之间的接近程度。决策者 d_k 的个体共识水平为

$$ICD^k = 1 - \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^N \lambda_j |h_{ij}^k - h_{ij}^g| \quad (12)$$

其中，决策者意见得分矩阵元素层次的共识水平为 $CDE_{ij}^k = 1 - |h_{ij}^k - h_{ij}^g|$ ，备选方案层次的共识水平为

$$CDA_i^k = 1 - \sum_{j=1}^N \lambda_j |h_{ij}^k - h_{ij}^g|。$$

集结得到群体共识水平

$$CD = 1 - \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \bar{v}_k \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^N \lambda_j |h_{ij}^k - h_{ij}^g| \quad (13)$$

由于决策者意见很难完全达成一致，故本文预先设定共识阈值 θ ，若群体共识水平 $CD \geq \theta$ ，说明群体形成一致意见，进入方案优选过程，否则，对不满足群体共识水平的决策者意见进行反馈调整，直至其共识水平高于预先设定的共识阈值。

4.2. 基于知识 - 信任网络的共识反馈机制

当群体共识水平未达到预先设定的共识阈值，进入基于知识 - 信任网络的共识反馈机制。首先，识别未达到共识阈值的决策者及决策者意见；其次，根据知识水平高低与信任阈值确定意见推荐的决策者集合；最后，根据意见调整系数，为共识水平未达到共识阈值的决策者生成个性化意见调整建议。具体步骤如下：

步骤 1: 识别未达到共识阈值的决策者 d_ζ 及决策者意见 h_{ij}^ζ 。当 $ICD_{d_\zeta} < CD$ 时，需要调整决策者 d_ζ 的意见。

步骤 2: 确定意见推荐的决策者集合 R_ζ 。不同决策者有不同的信任阈值。决策者倾向于接受信任的决策者意见，且只有决策者 d_ζ 对其他决策者 d_v 的信任值高于决策者 d_ζ 的信任阈值时，决策者 d_ζ 才会接受决策者 d_v 的意见。设决策者 d_ζ 的信任阈值 μ_ζ ，故决策者 d_ζ 的信任决策者集合为 $D_{\mu_\zeta} = \{d_v | w_{\zeta v} \geq \mu_\zeta\}$ 。

此外，由于决策者的知识水平不同，未达到共识阈值的决策者所属知识水平类别可能不同。分为以下三种情况讨论：

1) 若未达到共识阈值的决策者知识水平较低，即 $d_\zeta \in D_L$ ，根据知识传递方向，知识水平高的决策者为未达到共识阈值的决策者提供建议，即 $O_\zeta = \{d_v | d_v \in D_H\}$ ，此时意见推荐的决策者集合为 $R_\zeta = \{D_{\mu_\zeta} \cap O_\zeta\}$ 。

2) 若未达到共识阈值的决策者知识水平较高，即 $d_\zeta \in D_H$ ，此时决策团队中未能有决策者向其提供意见，故参考个体共识度最高的决策者 d_ζ^h 的意见，其中， $d_\zeta^h \in D^h$ 。同时考虑决策者 d_ζ^h 是否在决策者 d_v 的信任决策者集合内，若 $d_v^h \in D_{\mu_\zeta}$ ，意见推荐的决策者集合为 $R_\zeta = \{d_v^h | d_v^h \in D^h \wedge d_v^h \in D_{\mu_\zeta}\}$ 。

3) 在情况(2)的基础上，若 $d_v^h \notin D_{\mu_\zeta}$ ，说明决策者在决策团队内没有信任的人，且自身知识水平过高，也不可能接受其他决策者的意见。为了满足群体共识，故以群体犹豫模糊语言评价矩阵 H_g 为参考，确定意见推荐方向。

据此，确定意见推荐的决策者集合：

$$R_v = \begin{cases} D_{\mu_\zeta} \cap O_\zeta & d_\zeta \in D_L \\ d_v^h & d_v^h, d_\zeta \in D^H, d_v^h \in D_{\mu_\zeta} \\ d(H_g) & d_v^h, d_\zeta \in D^H, d_v^h \notin D_{\mu_\zeta} \end{cases} \quad (14)$$

步骤 3: 生成个性化调整意见 \tilde{h}_{ij}^ζ 。一般情况下，决策者不会完全接受其他决策者的意见，会保留自

己的部分意见。设决策者的意见调整系数为 ∂_ζ ，即决策者 d_ζ 保持自己意见不变的程度，决策者对其他人的信任程度越高，则其更倾向于与其他决策者保持意见一致，故第 $\kappa+1$ 轮调整的决策者意见为

$$\tilde{h}_{ij}^\zeta = \begin{cases} \partial_\zeta \cdot h_{ij}^v + (1 - \partial_\zeta) \cdot h_{ij}^\zeta & D_{\mu_\zeta} \cap O_\zeta, d_\zeta \in D_L \\ \partial_\zeta \cdot h_{ij}^v + (1 - \partial_\zeta) \cdot h_{ij}^\zeta & d_v^h, d_\zeta \in D^H, d_v^h \in D_{\mu_\zeta} \\ \partial_\zeta \cdot h_{ij}^g + (1 - \partial_\zeta) \cdot h_{ij}^\zeta & d_v^h, d_\zeta \in D^H, d_v^h \notin D_{\mu_\zeta} \end{cases} \quad (15)$$

其中，决策者的意见调整系数 $\partial_\zeta = \frac{1}{m-1} \sum_{\alpha=1, \alpha \neq \zeta}^m t_\alpha^{\zeta h}$

4.3. 知识 - 信任网络中信任关系的演化

共识反馈过程实际上也是决策者之间意见沟通与知识学习的过程。引入信任调整系数 $\pi = \frac{d(h_{ij}^k, h_{ij}^g)}{\|h_{ij}^g\|}$ ，反映决策者意见偏离群体意见的程度，用以更新决策决策者之间的信任关系强度。更新后的信任值为：

$$\widetilde{TD}_{hk}^{\kappa+1} = \begin{cases} (TD_{hk}^t, s_4) & d_k \in D^H, D^L \wedge d_h \in D_{\mu_k} \\ (1 - \pi)TD_{hk}^t & d_k \in D^H \wedge d_h \notin D_{\mu_k} \end{cases} \quad (16)$$

信任互动可以改变决策者之间信任网络的结构，进而改变决策者在网络结构中的重要程度。因此，根据 3.4 节中提出的决策者权重确定方法，更新决策者权重，重复上述共识反馈机制，直至决策群体达成共识。

4.4. 方案优选

当群体共识水平 $CD \geq \theta$ 或共识轮次 $\kappa = \kappa_{\max}$ 时，进入方案选择过程。基于决策者在共识过程中更新的决策者权重，得到群体意见，同时，根据备选方案属性权重，计算各备选方案的得分

$$Score(A_i) = \sum_{j=1}^m \lambda_j h_{ij}^g \quad (17)$$

对各备选方案的得分从高到低进行排序，得分最高的备选材料即为最佳方案。

5. 案例分析

某新能源汽车制造商试图推出一款新能源汽车车型，目前进行到车身材料选择过程。现假定决策者集合 $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$ ，备选材料集合 $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ ，备选材料属性集合为 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ ，备选材料属性权重集合为 $\lambda = (0.26, 0.26, 0.24, 0.24)^T$ 。运用犹豫模糊语言术语集对 4 种备选材料进行评价，并进行信任互评。预先设定 9 粒度语言术语集 $S = \{s_{-4}, s_{-3}, s_{-2}, s_{-1}, s_0, s_1, s_2, s_3, s_4\}$ ，分别代表“非常差”、“很差”“差”“稍微差”“一般”“稍微好”“好”“很好”“非常好”。设定共识阈值 $\theta = 0.9$ 。五位决策者的信任阈值为 $\mu_1 = s_2$ ， $\mu_2 = s_1$ ， $\mu_3 = s_2$ ， $\mu_4 = s_3$ ， $\mu_5 = s_2$ 。

5.1. 决策者意见表达

$$H_1^{(1)} = \begin{pmatrix} \{s_0, s_1\} & \{s_1\} & \{s_0\} & \{s_3\} \\ \{s_1\} & \{s_3\} & \{s_2\} & \{s_1\} \\ \{s_0\} & \{s_2\} & \{s_{-1}\} & \{s_{-1}\} \\ \{s_1\} & \{s_1\} & \{s_{-1}, s_0\} & \{s_0\} \end{pmatrix}, \quad H_2^{(1)} = \begin{pmatrix} \{s_{-1}\} & \{s_{-1}\} & \{s_{-1}\} & \{s_2\} \\ \{s_0\} & \{s_0\} & \{s_1\} & \{s_3\} \\ \{s_1, s_2\} & \{s_1\} & \{s_0\} & \{s_1\} \\ \{s_0\} & \{s_0, s_1\} & \{s_0\} & \{s_{-1}\} \end{pmatrix},$$

$$H_3^{(1)} = \begin{pmatrix} \{s_0, s_1\} & \{s_{-1}\} & \{s_1\} & \{s_0\} \\ \{s_{-2}\} & \{s_{-2}\} & \{s_1\} & \{s_3\} \\ \{s_1, s_2\} & \{s_{-2}\} & \{s_{-2}, s_{-1}\} & \{s_{-1}\} \\ \{s_{-2}\} & \{s_2, s_3\} & \{s_{-1}, s_0\} & \{s_{-2}\} \end{pmatrix}, H_4^{(1)} = \begin{pmatrix} \{s_{-1}, s_0\} & \{s_2\} & \{s_{-1}\} & \{s_0\} \\ \{s_{-1}\} & \{s_{-1}\} & \{s_{-1}, s_0\} & \{s_0\} \\ \{s_{-2}\} & \{s_{-2}\} & \{s_0, s_1\} & \{s_3\} \\ \{s_0\} & \{s_{-1}, s_0\} & \{s_{-1}\} & \{s_2\} \end{pmatrix},$$

$$H_5^{(1)} = \begin{pmatrix} \{s_{-2}\} & \{s_0\} & \{s_{-2}\} & \{s_{-2}\} \\ \{s_{-1}, s_0\} & \{s_0\} & \{s_{-2}\} & \{s_1, s_2\} \\ \{s_{-1}\} & \{s_2\} & \{s_{-1}, s_0\} & \{s_0, s_1\} \\ \{s_3, s_4\} & \{s_1, s_2\} & \{s_0, s_1\} & \{s_{-2}\} \end{pmatrix}$$

5.2. 知识 - 信任网络构建

步骤 1: 根据决策者之间的信任互评矩阵 $T = \begin{bmatrix} - & s_2 & s_1 & s_0 & s_1 \\ s_2 & - & s_1 & s_2 & s_2 \\ s_3 & s_2 & - & s_1 & s_0 \\ s_2 & s_2 & s_1 & - & s_1 \\ s_1 & s_2 & s_2 & s_0 & - \end{bmatrix}$, 借助式(8)确定决策者的信任值。

$$TD^1 = 0.781, TD^2 = 0.781, TD^3 = 0.656, TD^4 = 0.594, TD^5 = 0.656$$

步骤 2: 运用式(5)和式(6)计算决策者的知识水平并对其标准化, 可得:

$$\overline{KA}^1 = 1, \overline{KA}^2 = 0.985, \overline{KA}^3 = 0.387, \overline{KA}^4 = 0.597, \overline{KA}^5 = 0$$

设定知识阈值 $\varepsilon = 0.6$, 将决策者划分为 $D^H = \{d_1, d_2\}$, $D^L = \{d_3, d_4, d_5\}$

步骤 3: 根据式(4)确定知识网络有向边, 式(7)确定知识网络有向边权重, 结合决策者之间的信任互评矩阵, 构建知识 - 信任双层网络。具体如图 2 所示。

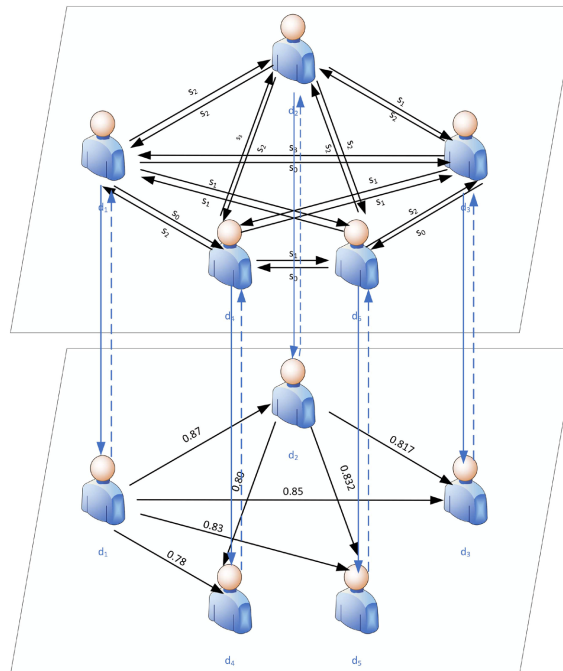


Figure 2. Knowledge-trust network of five decision makers
图 2. 五位决策者的知识 - 信任网络

步骤 4: 根据式(9)和式(10)确定决策者权重:

$$\bar{\psi}_1 = 0.277, \bar{\psi}_2 = 0.275, \bar{\psi}_3 = 0.162, \bar{\psi}_4 = 0.183, \bar{\psi}_5 = 0.102$$

5.3. 基于知识 - 信任网络的共识反馈机制

步骤 1: 共识测度。运用式(11)~式(13)计算决策者共识水平和群体共识水平:

五位决策者的共识水平分别为

$$ICD_1^1 = 0.90, ICD_2^1 = 0.91, ICD_3^1 = 0.83, ICD_4^1 = 0.85, ICD_5^1 = 0.86$$

群体共识水平为 $CD^1 = 0.88$ 。

本文预先设定的共识阈值为 $\theta = 0.9$, 现群体共识水平 $0.88 < 0.9$, 未达到群体满意的共识水平, 因此, 激活基于知识 - 信任网络的共识反馈机制, 进入意见调整过程。

步骤 2: 识别待调整决策者及决策者意见。具体如表 1 所示:

Table 1. Decision-making members to be adjusted and their opinions

表 1. 待调整决策成员及决策成员意见

待调整决策成员	待调整意见
d_3	$(A_3, f_2), (A_4, f_1), (A_4, f_2)$
d_4	$(A_2, f_4), (A_3, f_1), (A_3, f_2), (A_3, f_4)$
d_5	$(A_1, f_4), (A_4, f_1)$

步骤 3: 根据式(14)和式(15)生成推荐意见集合及个性化调整意见。具体如表 2 所示。

Table 2. Personalized adjustment recommendations

表 2. 个性化调整意见

待调整决策成员	待调整意见	参考成员	参考意见	意见调节系数	生成意见
d_3	(A_3, f_2)	d_2	h_{32}^2	0.688	0.508
	(A_4, f_1)		h_{41}^2		0.422
	(A_4, f_2)		h_{42}^2		0.596
d_4	(A_2, f_4)	$d(h_g)$	h_{24}^g	0.750	0.447
	(A_3, f_1)		h_{31}^g		0.413
	(A_3, f_2)		h_{32}^g		0.408
	(A_3, f_4)		h_{34}^g		0.631
d_5	(A_1, f_4)	d_2	h_{14}^2	0.656	0.578
	(A_4, f_1)		h_{41}^2		0.628

步骤 4: 信任更新。根据表 2, 运用式(16)更新信任值

$$\tilde{t}_{31}^2 = \{s_3, s_4\}, \tilde{t}_{52}^2 = \{s_2, s_3\}, \tilde{t}_{14}^2 = \{s_{-1}, s_0\}, \tilde{t}_{24}^2 = \{s_0, s_1\}, \tilde{t}_{34}^2 = \{s_0\}, \tilde{t}_{54}^2 = \{s_{-1}, s_0\}$$

运用式(8)重新计算决策者的信任值, 式(9)和式(10)更新决策者权重, 更新后的决策者权重为

$$\bar{\psi}_1^2 = 0.284, \bar{\psi}_2^2 = 0.286, \bar{\psi}_3^2 = 0.166, \bar{\psi}_4^2 = 0.159, \bar{\psi}_5^2 = 0.105$$

步骤 5: 重新计算群体共识水平。

$$ICD_1^2 = 0.91, \quad ICD_2^2 = 0.91, \quad ICD_3^2 = 0.86, \quad ICD_4^2 = 0.88, \quad ICD_5^2 = 0.89$$

此时, 群体共识水平 $CD^2 = 0.89 < \theta = 0.9$, 说明决策群体仍未达成共识, 进入新一轮共识反馈过程, 重复上述步骤, 并依据信任互动更新决策者权重。此时, 决策者权重为

$$\bar{\psi}_1^3 = 0.287, \quad \bar{\psi}_2^3 = 0.294, \quad \bar{\psi}_3^3 = 0.168, \quad \bar{\psi}_4^3 = 0.145, \quad \bar{\psi}_5^3 = 0.106$$

个体共识水平分别为

$$ICD_1^3 = 0.92, \quad ICD_2^3 = 0.94, \quad ICD_3^3 = 0.90, \quad ICD_4^3 = 0.91, \quad ICD_5^3 = 0.92$$

群体共识水平 $CD^3 = 0.91 > \theta = 0.9$, 说明决策群体达成共识, 意见分歧消除, 进入材料选择过程。

5.4. 材料优选

决策团队所达成的一致意见为:

$$H_{gd}^{(3)} = \begin{pmatrix} 0.442 & 0.489 & 0.421 & 0.728 \\ 0.458 & 0.503 & 0.634 & 0.745 \\ 0.503 & 0.53 & 0.458 & 0.501 \\ 0.536 & 0.516 & 0.442 & 0.421 \end{pmatrix}$$

运用式(17)计算各备选材料的综合得分:

$$SCORE(A_1) = 0.518, \quad SCORE(A_2) = 0.581, \quad SCORE(A_3) = 0.501, \quad SCORE(A_4) = 0.481$$

可以发现, 备选材料 A_2 得分最高, 故其为最佳备选材料。

5.5. 对比分析

由于当前围绕决策团队成员的知识水平与信任关系交互开展的共识决策模型研究较少, 预先设定对比模型进行结果比较, 以验证本文所提模型的可行性和有效性。模型 0 对应本文所提出的共识模型。设定的对比模型与本文所提模型的差异描述如下:

1) 模型 1: 不考虑决策团队成员存在意见分歧, 即不执行意见调整反馈机制, 仅集结各决策成员评价信息选择备选材料。

2) 模型 2: 基于知识 - 信任双层网络确定决策团队成员权重, 但在意见调整反馈过程中, 仅将集结各决策团队成员个体意见信息的群体决策信息作为待调整决策团队成员的推荐建议。

3) 模型 3: 不考虑决策团队成员的知识水平对共识反馈机制的影响, 基于决策团队成员之间的信任关系构建信任网络, 确定决策者权重, 在意见调整反馈过程中, 将决策成员最信任的决策团队成员意见作为待调整决策团队成员的推荐建议。

4) 模型 4: 仅考虑运用犹豫度表征决策成员的知识水平, 构建基于知识交互的知识网络, 不考虑决策团队成员之间的信任关系对决策团队成员权重以及意见调整反馈的影响, 将知识交互方向作为待调整决策团队成员的推荐建议。

各模型的最终决策结果如表 3 所示, 各对比模型得到的方案排序结果几乎完全一致。因此, 本文提出的知识 - 信任网络及其在共识反馈机制中的应用具有一定的有效性。

通过与上述设定模型比较分析, 可以发现模型 0 的共识迭代次数更少, 说明本文所提的共识模型促进群体共识达成的效率更高。这是因为本文在确定团队成员权重和执行共识反馈时不仅考虑了团队成员之间的信任关系, 还考虑了团队成员之间的知识交互的影响。团队成员的知识水平可以反映信任信息的

Table 3. The results of each model**表 3.** 各模型的最终结果

模型	迭代次数	方案得分向量	方案排序
0	2	(0.518, 0.581, 0.501, 0.481)	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
1	0	(0.504, 0.533, 0.484, 0.486)	$A_2 > A_1 > A_4 > A_3$
2	3	(0.520, 0.558, 0.499, 0.481)	$A_2 > A_1 > A_3 > A_4$
3	3	(0.498, 0.556, 0.498, 0.481)	$A_2 > A_1 = A_3 > A_4$
4	4	(0.504, 0.536, 0.506, 0.481)	$A_2 > A_3 > A_1 > A_4$

可信度，团队成员之间的知识交互关系也可反映群体意见的沟通一致程度。因此，综合考虑团队成员之间的信任关系与知识交互关系有利于提高群体的共识达成速率。此外，本文提出了基于知识 - 信任网络的动态共识反馈机制，为团队成员提供个性化调整建议。一方面，从团队成员的知识水平和不同信任阈值出发，根据意见相似度确定知识交互方向，同时以知识交互方向作为主要意见调整方向，在共识反馈过程中形成调整意见，由于提供个性化调整建议的团队成员共识度足够高，且大部分来源于对待调整团队成员影响程度较大的成员，这大大提高了团队成员接受意见调整的意愿，加快了群体共识达成速率。另一方面，本文考虑了意见调整过程中的信任动态变化，根据意见沟通情况合理分析团队成员之间的信任演化情况，不断更新团队成员之间的信任强度，进而更新团队成员权重，一定程度上也加快了群体意见达成一致的过程。

通过上述分析可以看出，本文在犹豫模糊语言环境下考虑决策团队的知识交互关系和信任关系的关联性，提出的多属性共识决策方法具有可行性和有效性。

6. 结语

本文提出了基于知识 - 信任网络的多属性群体共识决策方法。该方法考虑到决策者之间的知识交互关系与信任关系的复杂影响，从多层网络的角度构建了决策者之间的知识 - 信任网络，并从决策者的知识水平与信任值确定决策者权重。同时，考虑到决策者之间的信任关系对知识交互的影响和决策者之间知识交互对信任互动的影响，构建了基于知识 - 信任网络的共识决策模型，并动态更新决策者之间的信任强度。本文还将所提的共识决策方法应用到车身材料选择问题中，验证了方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] Zhou, M., Zheng, Y.-Q., Chen, Y.-W., Cheng, B.-Y., Herrera-Viedma, E. and Wu, J. (2023) A Large-Scale Group Consensus Reaching Approach Considering Self-Confidence with Two-Tuple Linguistic Trust/Distrust Relationship and Its Application in Life Cycle Sustainability Assessment. *Information Fusion*, **94**, 181-199. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.01.026>
- [2] Guo, J. and Liang, X. (2022) A Dynamic Trust Consensus Model Based on Personalized Adjustment Mechanism under Multi-Granular Probabilistic Linguistic Environment. *Kybernetes*, **52**, 5233-5268. <https://doi.org/10.1108/k-03-2022-0448>
- [3] 卢艳玲, 许叶军, 李梦琪. 社会网络环境下基于负面行为管理与改进的最小成本共识模型的大群体决策方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 327-335.
- [4] Liu, Y.J., Liang, C.Y., Chiclana, F. and Wu, J. (2021) A Knowledge Coverage-Based Trust Propagation for Recommendation Mechanism in Social Network Group Decision Making. *Applied Soft Computing*, **101**, Article 107005. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107005>
- [5] 徐选华, 刘尚龙. 社会网络环境下基于“信任-知识”模型的风险性大群体应急决策方法[J]. 运筹与管理, 2021, 30(2): 31-38.
- [6] Zou, W.-C., Wan, S.-P., Dong, J.-Y. and Martínez, L. (2023) A New Social Network Driven Consensus Reaching

-
- Process for Multi-Criteria Group Decision Making with Probabilistic Linguistic Information. *Information Sciences*, **632**, 467-502. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.01.088>
- [7] 徐选华, 黄丽. 基于复杂网络的大群体应急决策专家意见与信任信息融合方法及应用[J]. 数据分析与知识发现, 2022, 6(2): 348-363.
- [8] 海燕, 贾卫华, 刘志中. 动态信任感知的偏好演化模型研究[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(5): 1454-1459.
- [9] 郑江波, 成芳, 常家泰. 基于知识协调的知识异质性团队研发任务共识效率研究[J]. 科研管理, 2022, 43(9): 201-208.
- [10] Wu, T., Liu, X.W., Qin, J.D. and Herrera, F. (2022) Trust-Consensus Multiplex Networks by Combining Trust Social Network Analysis and Consensus Evolution Methods in Group Decision-Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **30**, 4741-4753. <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2022.3158432>
- [11] 杨雷, 杨洋. 决策要素动态变化的群体决策偏好演化过程[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(9): 2302-2311.
- [12] Rodriguez, R.M., Martinez, L. and Herrera, F. (2012) Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets for Decision Making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, **20**, 109-119. <https://doi.org/10.1109/tfuzz.2011.2170076>
- [13] Liao, H.C., Qin, R., Gao, C.Y., Wu, X.L., Hafezalkotob, A. and Herrera, F. (2019) Score-HeDLiSF: A Score Function of Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set Based on Hesitant Degrees and Linguistic Scale Functions: An Application to Unbalanced Hesitant Fuzzy Linguistic MULTIMOORA. *Information Fusion*, **48**, 39-54. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.08.006>
- [14] Dong, Y.C., Zha, Q.B., Zhang, H.J., Kou, G., Fujita, H., Chiclana, F., *et al.* (2018) Consensus Reaching in Social Network Group Decision Making: Research Paradigms and Challenges. *Knowledge-Based Systems*, **162**, 3-13. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.06.036>