



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION

社交网络群决策环境下基于量子干涉的信任测度

蔡玫, 简兴莲, 王雅

引用本文:

蔡玫, 简兴莲, 王雅. 社交网络群决策环境下基于量子干涉的信任测度[J]. *控制与决策*, 2024, 39(5): 1697–1706.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1497>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于云模型和多层权重求解的多粒度语言大群体决策方法](#)

Multi-granularity linguistic large group decision-making based on cloud model and multi-layer weight determination

控制与决策. 2021, 36(9): 2257–2266 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0102>

[考虑社会网络邻接关系的群体判断矩阵决策方法](#)

Group preference relations decision making approach based on social network adjacency relations

控制与决策. 2021, 36(4): 983–992 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0817>

[考虑社会网络邻接关系的群体判断矩阵决策方法](#)

Group preference relations decision making approach based on social network adjacency relations

控制与决策. 2021, 36(4): 983–992 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0817>

[社会网络视角下允许弃权的群决策权力分布](#)

Power analysis of voting games with abstention based on social networks

控制与决策. 2020, 35(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0346>

[专家交互情境下不完备群组DEMATEL决策方法](#)

Incomplete group DEMATEL decision-making method under expert interaction context

控制与决策. 2020, 35(12): 3066–3072 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0353>

社交网络群决策环境下基于量子干涉的信任测度

蔡玫[†], 简兴莲, 王雅

(南京信息工程大学 管理工程学院, 南京 210044)

摘要: 针对已有的信任测度模型中信任源出现的冗余以及之间的干扰未被考虑的缺点, 提出一种基于干扰效应的社交网络信任测度的决策模型. 该模型在计算决策者之间的信任值时, 通过简化信任源类型可避免部分信任源的重复出现, 同时增加了信任源之间的干扰项. 首先, 根据社会关系与背景对信任的决定性, 将决策者之间信任关系的来源划分为“决策者之间的亲近关系”和“决策者的客观背景”; 其次, 提出“亲疏度”和“专业度”的概念作为这两个信任源的测度, 在保证信任源完整的前提下, 克服信任关系冗余的缺陷; 然后, 进一步设计考虑干扰效应的信任值量化方法, 所求的信任值能够综合体现两个信任源的个体决定程度和整体影响程度; 最后, 将决策者的信任值转化为权重聚集决策者偏好, 以解决实际群决策问题. 数值和理论结果表明, 所提出考虑干扰效应的信任测度方法能够作为提高信任关系的准确性以及解决社交网络群决策问题的工具, 具有广泛的应用前景.

关键词: 信任源; 信任测度; 干扰效应; 概率语言术语集; 量子概率论; 社交网络

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1497

引用格式: 蔡玫, 简兴莲, 王雅. 社交网络群决策环境下基于量子干涉的信任测度 [J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1697-1706.

Trust measure based on quantum interference in social network group decision making environment

CAI Mei[†], JIAN Xing-lian, WANG Ya

(School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In view of the redundancy of trust sources and the fact that the interference between them is not considered in the existing trust measure models, a decision model based on trust measure considering interference effect in a social network is proposed. When calculating the trust value between decision-makers, this model simplifies the types of trust sources, avoids the overlapping of some trust sources, and increases the interference item between trust sources. Firstly, the sources of trust between decision-makers are divided into “close relationships between decision-makers” and “objective backgrounds of decision-makers” according to the determination of social relationship and background on trust. Secondly, the concepts of “closeness degree” and “professionalism” are proposed as the measures of these two trust sources to ensure that the defect of redundancy can be overcome on the premise of integrity of trust sources. Then, a trust value quantification method considering the interference effect is further designed. The trust value can comprehensively reflect the individual decision degree and the overall influence degree of trust sources. Finally, the trust values of decision-makers are transformed into weights to aggregate the preferences of decision-makers to solve the actual group decision-making problem. Numerical and theoretical results show that the proposed trust measure method considering the interference effect can be used as a tool to improve the accuracy of trust relations and solve the group decision-making problems in social networks, which has a broad application prospect.

Keywords: trust source; trust measure; interference effect; probabilistic linguistic term set; quantum probability theory; social network

收稿日期: 2022-08-21; 录用日期: 2023-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871121).

责任编委: 徐泽水.

[†]通讯作者. E-mail: caimei@nuist.edu.cn.

0 引言

传统的群决策往往假设决策者之间没有任何联系,他/她们是相互独立的个体,而这往往不符合实际的决策情境^[1-2]. 随着社会进入信息化时代,互联网的高速发展加快了全球化的进程. 人们通过微信、QQ、微博等社交软件来分享自己的想法、观点和偏好,不得不对以往的共识达成过程进行新的思考. 社交网络的群体决策问题中,决策者之间往往是相互联系的^[3-5],他/她们通过社交网络构建的信任关系被认为是共识达成过程中的关键影响因素^[6]. 信任是决定决策者信息交换的重要依据,也是形成联盟的基础. 目前,考虑信任关系的群决策研究可以分为4个方面^[7-9]: 1)信任关系网络中信任的传递和集结方法; 2)信任关系驱动的决策者偏好聚合方法; 3)基于信任关系的偏好信息缺失值估计方法; 4)信任关系引导的共识模型.

信任可以从社会学、心理学、经济学等多方面进行解释,它是一种具有主观特征的可能性期望,同时也是市场营销、企业管理、产品运营等众多工作领域中的重要概念^[10]. Gong等^[11]认为,社交网络成员之间互动的丰富程度是其社会资本. 在社交网络背景下,信任来源于社会资本,并称之为社会信任^[12]. 一个成功的社交网络取决于信任关系是否联通,只有在稳定的信任网络下,才能提供深度的合作与交流,传播更多可靠的信息,从而形成一个良好的互动网,促进共识的达成. 因此,如何在社交网络群决策中准确地测度决策者之间的信任已成为一个重要的研究课题,而人与人之间信任关系的复杂性与不确定性无疑为信任的测度增加了难度. 针对信任的模糊性,Liu^[13]等和Wu等^[14]选择将模糊集与语言变量相结合使得对社交网络中信任/不信任关系的表示通畅起来. 这种方法虽有一定可取之处,但也有“过分主观化”的嫌疑. Matinfar^[15]则利用模糊聚类的方法对用户之间的多种信任关系进行聚合,为信任测度的研究提供了新的思路. 目前,已有大量文献^[16-19]对信任度量做了系统地分析,信任建模的研究已从概率、模糊分析、云建模和机器学习等角度进行了深入探讨,开辟了多种途径.

传统概率理论的决策模型已在决策领域取得了很大的成功,但不能很好地解释人在不确定或矛盾状态下的决策行为. 量子概率论(quantum probability theory, QPT)来源于“概率论”与“量子力学”的结合,研究发现人类在决策路径未知的情况下,行为结果会违背经典概率中的确定性原则以及全概率定

理^[20]. 量子干涉(quantum interference, QI)描述的是同一个量子系统中若干个不同态叠加成一个纯态的情况. 它指的是粒子与自己的干涉,与粒子之间的相互作用无关. QI在不确定的情况下才有可能发生,当关于路径确定的信息有可能被人获知时,干涉就会消失^[21],这为不确定情况下的决策行为提供了新的启发. 在经典概率中,人的信念是在确定状态下的跳转,而人的认知和决策行为本质上就具有不确定性,很容易受到外界的影响^[22]. QPT综合考虑了决策过程中主客观性,通过波函数对信念进行建模. 当多个信念同时出现在人的头脑时,这种叠加态会造成不同方向的波相互碰撞,从而产生干扰效应. 近年来, QPT在各个领域中的应用层出不穷^[23-25],因此,针对信任来源之间的干扰现象, QPT无疑成为一个有力的解释工具.

目前,社交网络群决策环境下还有一些问题没有解决: 1)群体成员的信任源之间可能存在重复累加,即信任源的冗余问题; 2)未考虑信任源为同步发生的波函数时,它们相互干扰对群决策结果的影响. 本文在现有的信任测度方法的基础上,提出基于干扰效应的社交网络信任测度的决策模型,所求出的信任值可以实现对多个信任源的个体决定性与整体影响性的综合衡量. 与已有的信任测度方法相比,该方法从量子干涉的全新视角出发,简化了信任源的类型,避免了部分信任源的重复出现,增加了信任源之间的干扰项. 本文提出的信任测度可以为基于社交网络的群决策问题确定决策者权重提供更加可靠的量化数据.

1 基础知识

本节主要介绍量子概率和概率语言术语集的基本定义.

1.1 量子概率

研究认为,人类的思维本质上并不符合以传统概率论为基础的方式,而是以一种类似量子的方式进行着^[26-27]. 量子方式让人类在做出重要决策时面对不确定性,即使只有有限的精神资源,仍要面对复杂的问题. 在量子概率论中,所有基本事件都是由希尔伯特空间中的子空间表示.

定义1^[28] 希尔伯特空间是欧几里德空间的一个推广,其不再局限于有限维的情形. 设 H 是一个实的线性空间,如果 H 中的任何两个向量 x 和 y 都对应着一个实数,记为 (x, y) ,且满足下列条件,则称 (x, y) 为 H 上的一个内积,而 H 称为内积空间:

1) 对于 H 中的任何两个向量 x, y ,有 $(x, y) =$

(y, x);

2) 对于 H 中的任何 3 个向量 x, y, z 以及实数 α, β , 有 $(\alpha x + \beta y, z) = \alpha(x, y) + \beta(y, z)$;

3) 对于 H 中的一切向量 x , 均有 $(x, x) \geq 0$, 且 $(x, x) = 0$ 的充分必要条件是 $x = 0$.

量子概率论中, 由态叠加原理可知, 所有可能的事件状态构成一个 Hilbert 复杂空间 H_{\dagger} , 其中 H_{\dagger} 为每个 Hilbert 子空间的张量积, 即 $H_{\dagger} = H_1 \otimes H_2 \otimes \dots \otimes H_n$ ($H_1, \dots, H_n \in H_{\dagger}$). 事件的每一个状态对应于 Hilbert 空间中的一个矢量, 称其为态矢量. 将态矢量记为 $|\psi\rangle$, Hilbert 空间中的矢量可通过该空间上的一组标准正交基的线性组合来表示.

定义 2^[29] 量子态即一组量子表征, 用来表示事件的叠加状态. 对于决策中的任一量子态可以展开为

$$|S\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} a_n |\psi_n\rangle, \tag{1}$$

其中 $a_n = \langle \psi_n | S \rangle$ 为 $|\psi_n\rangle$ 的波函数, 即概率幅^[30].

根据波恩法则, 将任意一个事件概率表示为概率幅的平方^[31], 即

$$P_r(\psi_n) = \|a_n |\psi_n\rangle\|^2 = \|a_n\|^2 = |\varphi_{\psi_n} e^{i\theta_{\psi_n}}|^2. \tag{2}$$

其中 $P_r(\psi_n) = |\varphi_{\psi_n} e^{i\theta_{\psi_n}}|^2 = \varphi_{\psi_n} e^{i\theta_{\psi_n}} * (\varphi_{\psi_n} e^{i\theta_{\psi_n}})^* = \varphi_{\psi_n} e^{i\theta_{\psi_n}} * \varphi_{\psi_n} e^{-i\theta_{\psi_n}} = \varphi_{\psi_n}^2$, 并且概率幅的平方和必须等于 1.

1.2 概率语言术语集

定义 3 设 $S = \{s_{\alpha} | \alpha \in [-\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau]\}$ 为一个有限离散语言的集合, 其中 s_{α} 表示语言变量的可能值, 且对于任意的 $s_{\alpha}, s_{\beta} \in S$ 满足下列条件, 则称 $S = \{s_{\alpha} | \alpha \in [-\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau]\}$ 为语言术语集:

- 1) 有序性: $s_{\alpha} > s_{\beta}$ 当且仅当 $\alpha > \beta$;
- 2) 负算子: $\text{Neg}(s_{\alpha}) = s_{\beta}$, 其中 $\alpha + \beta = 0$;
- 3) 最大算子: $\max\{s_{\alpha}, s_{\beta}\} = s_{\alpha}$, 当且仅当 $\alpha \geq \beta$;
- 4) 最小算子: $\min\{s_{\alpha}, s_{\beta}\} = s_{\beta}$, 当且仅当 $\alpha \geq \beta$.

定义 4 设 $S = \{s_{\alpha} | \alpha \in [-\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau]\}$ 是一个语言术语集, 则基于 S 的概率语言术语集 (probabilistic linguistic term set, PLTS) 被定义为

$$L(p) = \left\{ l^{(k)} p^{(k)} \mid l^{(k)} \in S, p^{(k)} \geq 0, \right. \\ \left. k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1 \right\}. \tag{3}$$

其中: $l^{(k)}(p^{(k)})$ 表示 PLTS 中的第 k 个语言术语 $l^{(k)}$, $l^{(k)}$ 的概率是 $p^{(k)}$, 且满足 $0 \leq p^{(k)} \leq 1; \#L(p)$ 表示 $L(p)$ 中所有语言术语的个数.

2 基于量子干涉的信任建模

2.1 问题描述

在该决策问题中, 设决策者的集合为 $E = \{e^1, e^2, \dots, e^m\}$, 决策者之间由于直接或间接交集会产生一定的关联, 本文将这种原有的社会关系的亲近程度定义为亲疏度, 而将决策者因为知识水平、受教育程度等社会背景获得的权威性程度定义为专业度. 影响决策者专业度的因素集合为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_h\}$, 其中各个因素的模糊测度为集合 $G = \{g(a_1), g(a_2), \dots, g(a_h), g(a_1 a_2), \dots, g(a_1 a_2 a_3), \dots, g(a_1 a_2 \dots a_{h-1}), \dots, g(a_1 a_2 \dots a_h)\}$. 决策者 e^i 与 e^j 之间的亲疏度表示为 $CD(e^i, e^j)$, 决策者 e^i 的专业度得分为 $F^i(L_h^i(p))$, 其中 $L_h^i(p)$ 为 e^i 对影响因素 a_h 的 PLTS. e^i 对 e^j 的信任值为 $\text{Pr}^{ij}(t)$ 且 $\text{Pr}^{ij}(t) \neq \text{Pr}^{ji}(t)$, 决策者的权重集为 $W = \{w^1, w^2, \dots, w^m\}$, 决策方案集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. 决策者 e^i 针对方案 x_v 的评价值为 o_v^i , 其中 $o_v^i \in [0, 1]$.

2.2 方法框架

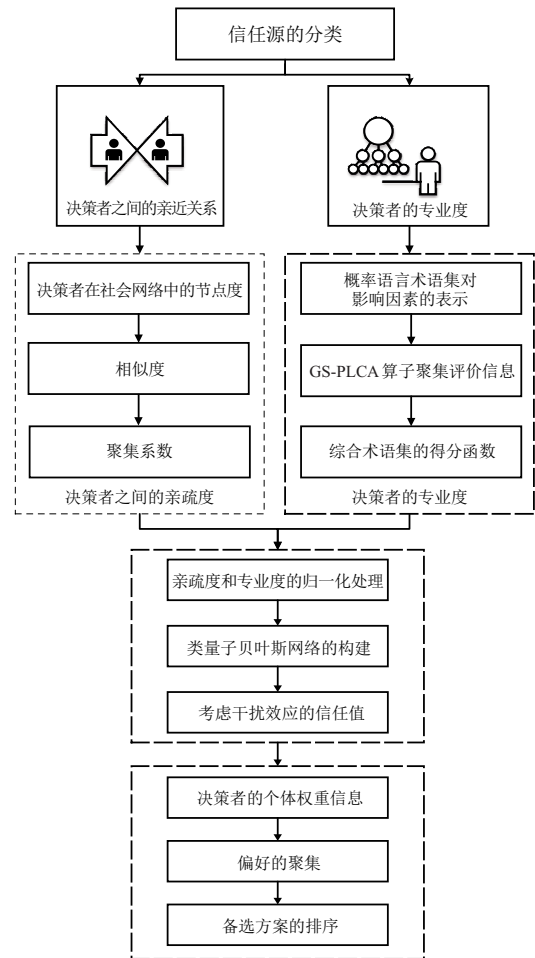


图 1 基于量子干涉的信任测度的社交网络群决策框架

本文提出的考虑干扰效应的信任关系的决策模型步骤归纳如下.

step 1: 通过已知的社交网络连接关系, 计算决策

者之间的亲疏度;

step 2: 使用 PLTSs 评价 $\{a_1, a_2, \dots, a_h\}$, 利用广义 Shapley 概率语言 Choquet 平均 (GS-PLCA) 算子^[32] 将各个因素的评价信息进行聚合, 然后计算 PLTSs 的综合得分并作为决策者的专业度指标;

step 3: 计算考虑干扰效应的信任值;

step 4: 根据信任值计算个体权重;

step 5: 完成方案的排序.

2.3 亲疏度

在社交网络中, 决策者之间可能会因为预先存在的交际圈产生一定的亲近关系, 而这种关系的亲疏往往会触发人们之间的信任. 因此, 本文将“决策者之间的亲近关系”确定为信任源之一, 并提出亲疏度的定义作为该信任源的测度.

1) 决策者 e^i 的度.

在社交网络中, 决策者 e^i 的度是指与该决策者存在任何联系的决策者的数量之和, 即

$$k(e^i) = \sum_{e^j \in E} v_{ij}, \quad i \neq j. \quad (4)$$

其中: E 为网络中决策者的集合; $V = \{v_{ij}\}$ 为邻接矩阵, 即决策者 e^i 与 e^j 连接时, $v_{ij} = 1$, 否则为 0.

2) (e^i, e^j) 之间的相似度.

研究表明^[33], 在无标度网络中, 将节点 x 添加到新边中的概率与节点 x 的度成正比, 而对于任意两个节点 x 和 y 而言, 如果有可能产生新边将两个节点 x 与 y 连接, 则这一可能性是与两个节点的度数乘积呈正相关的. 优先选择算法 (priority algorithm, PA) 是基于节点度的相似性索引, 本文使用 $S_{i,j}^{PA}$ 来表示决策者对 (e^i, e^j) 之间的 PA 相似性指标, PA 相似度 $S_{i,j}^{PA}$ 的计算公式如下:

$$S_{i,j}^{PA} = k(e^i) \times k(e^j), \quad (5)$$

其中 $k(e^i)$ 、 $k(e^j)$ 分别表示决策者 e^i 和 e^j 的度.

3) (e^i, e^j) 之间的亲疏度. 有

$$CD(e^i, e^j) = \frac{S_{i,j}^{PA} + 1}{\min\{k(e^i) - 1, k(e^j) - 1\}}. \quad (6)$$

当 $k(e^i) = k(e^j) = 1$ 时, 若 (e^i, e^j) 之间存在联通边, 则 $CD(e^i, e^j) = 1$, 否则为 0.

在图论中, 集聚系数可以描述一个点的邻接点之间相互连接的程度, 因此, 将其作为决策者之间亲疏度的指标. 因为亲疏度满足交换性, 所以 $CD(e^i, e^j) = CD(e^j, e^i)$.

2.4 专业度

针对不同的决策问题, 决策者了解的程度是有限的, 通常与一个人的受教育水平、经验以及知识涉猎

范围等因素呈正相关. 因此, 本文将决策者的客观背景确定为另一信任源, 并提出专业度的定义作为该信任源的测度.

1) 影响因素的 PLTSs 的表示.

在决策问题中, 主持人对决策者 e^i 的专业度影响因素 a_h 的评价可以通过 PLTS 表示为

$$L_h^i(p) = \left\{ l_h^{i(k)}(p_h^{i(k)}) \mid l_h^{i(k)} \in S, p_h^{i(k)} \geq 0, \right. \\ \left. k = 1, 2, \dots, \#L_h^i(p), \sum_{k=1}^{\#L_h^i(p)} p_h^{i(k)} \leq 1 \right\}.$$

2) 评价信息的集合.

考虑到影响因素之间并非相互独立的, 因此, 通过 GS-PLCA 算子来聚集决策者 e^i 的专业度评价信息, 即

$$PL = GS - PLCA(L_1^i(p_1), L_2^i(p_2), \dots, L_h^i(p_h)) = \\ \bigoplus_{n=1}^h (\varphi_{\xi(n)}(g, \xi) - \varphi_{\xi(n+1)}(g, \xi)) L_n^i(p_{(h)}). \quad (7)$$

其中: $\xi(n) = \{L_{(n)}(p_{(n)}), L_{(n+1)}(p_{(n+1)}), \dots, L_{(h)}(p_{(h)})\}$; $n = 1, 2, \dots, h$; $\xi_{(h+1)} = \phi$; $L_{(1)}(p_{(1)}) \leq L_{(2)}(p_{(2)}) \leq \dots \leq L_{(h)}(p_{(h)})$; $\varphi_{\xi(n)}(g, \xi)$ 是关于模糊测度 g 的 $\xi(n)$ 的广义 Shapley 值.

3) 专业度得分.

通过 GS-PLCA 算子聚集决策者 e^i 关于影响因素集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_h\}$ 的 PLTSs 之后, 根据得分函数来判定决策者 e^i 的专业度得分, 有

$$F^i(L_h^i(p)) = \bar{\alpha} - \frac{\sum_{k=1}^{\#L_h^i(p)} p^{(k)} (r^{(k)} - \bar{\alpha})^2}{\text{var}(S) \sum_{k=1}^{\#L_h^i(p)} p^{(k)}}. \quad (8)$$

其中: $\bar{\alpha} = \frac{\sum_{k=1}^{\#L_h^i(p)} r^{(k)} p^{(k)}}{\sum_{k=1}^{\#L_h^i(p)} p^{(k)}}$, $\bar{\alpha}$ 代表平均得分, PLTS 的平均得分越大, 偏离度越小, 则 PLTS

表现出的优势度越大; $\text{var}(S) = \frac{\sum_{k=-\tau}^{\tau} (k-0)^2}{2\tau+1} = \frac{\tau(\tau+1)}{3}$; $r^{(k)}$ 是语言术语 $l^{(k)}$ 的下标.

2.5 考虑干扰效应的信任值

一般来说, 专业度越高的人将会在社会网络中获得越多的信任. 但是, 决定对一个人最终的信任值往往需要将两个信任源结合考虑. 而考虑到在不确定决策行为下, 决策者在聚合信任源的信息时, 通过波函数对信任源进行建模, 当两个及以上的信任源同时出现在人的头脑时, 这种叠加态会造成不同方向的波相互碰撞, 从而产生干扰效应. 因此, 针对上述情况本

文提出如下的信任值计算方法.

1) 亲疏度和专业度的标准化处理.

为了方便量子概率的计算, 需要把得到的亲疏度和专业度的得分分别进行如下标准化处理:

$$\overline{CD}(e^i, e^j) = \frac{CD(e^i, e^j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m CD(e^i, e^j)}, \quad (9)$$

$$\overline{F^i}(L_h^i(p)) = \frac{F^i(L_h^i(p))}{\sum_{i=1}^m F^i(L_h^i(p))}. \quad (10)$$

2) 基于量子干涉的信任值.

首先, 创建信任问题的类量子贝叶斯网络表示, 如图2所示.

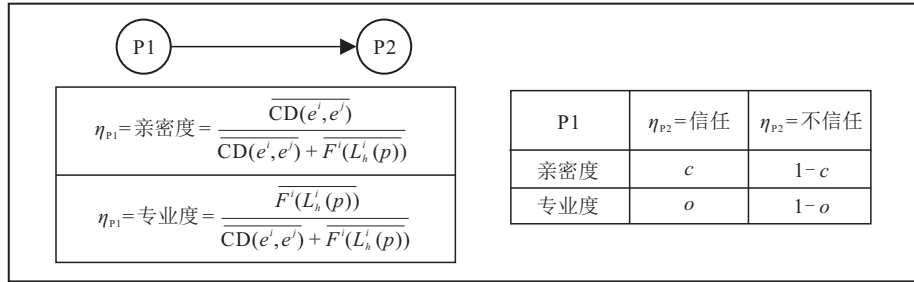


图2 贝叶斯网络示意图(P1和P2代表确定信任关系的两个阶段)

在考虑“决策者之间的亲近关系”和“决策者的客观背景”两个信任源相互干扰的情况下, 将经典概率转变为量子概率, 得到决策者 e^i 对 e^j 的信任值, 即

$$\begin{aligned} Pr^{ij}(t) = & \alpha_1 \left| \sqrt{\frac{\overline{CD}(e^i, e^j)}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * c + \right. \\ & \left. \sqrt{\frac{\overline{F^i}(L_h^i(p))}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * o \right|^2 = \\ & \alpha_1 \left(\frac{\overline{CD}(e^i, e^j)}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))} * c + \right. \\ & \left. \frac{\overline{F^i}(L_h^i(p))}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))} * o + \right. \\ & \left. 2 \sqrt{\frac{\overline{CD}(e^i, e^j)}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * c * \right. \\ & \left. \sqrt{\frac{\overline{F^i}(L_h^i(p))}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * o * \cos \theta \right). \quad (11) \end{aligned}$$

其中 α_1 为标准化因子. 干涉效应为

$$\begin{aligned} \text{interference} = & 2 \sqrt{\frac{\overline{CD}(e^i, e^j)}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * c * \\ & \sqrt{\frac{\overline{F^i}(L_h^i(p))}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * o * \cos \theta. \end{aligned}$$

同理, 得到不信任值为

$$Pr^{ij}(d) =$$

$$\begin{aligned} & \alpha_1 \left| \sqrt{\frac{\overline{CD}(e^i, e^j)}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * (1-c) + \right. \\ & \left. \sqrt{\frac{\overline{F^i}(L_h^i(p))}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * (1-o) \right|^2 = \\ & \alpha_1 \left[\frac{\overline{CD}(e^i, e^j)}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))} * (1-c) + \right. \\ & \left. \frac{\overline{F^i}(L_h^i(p))}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))} * (1-o) + \right. \\ & \left. 2 \sqrt{\frac{\overline{CD}(e^i, e^j)}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * (1-c) * \right. \\ & \left. \sqrt{\frac{\overline{F^i}(L_h^i(p))}{CD(e^i, e^j) + \overline{F^i}(L_h^i(p))}} * (1-o) * \cos \theta \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

当 $\theta = \pi/2$ 时, 量子概率坍塌, 即重新变为经典概率; $\theta \in [0, \pi/2]$ 时, 干涉效应为正; $\theta \in [\pi/2, \pi]$ 时, 干涉效应为负. 针对不同的决策者的个性, 可以给图2中的概率赋予不同的值. 由式(11)可知, 干涉效应会随着不同的 θ 发生变化. 在决策过程中, 需要提供聚集偏好时的权重系数, 因此, 本文提出如下的个体权重计算方法, 以消除决策方案排序时未知的比重参数.

2.6 决策者的个体权重

决策者的受信任程度越高, 代表着他的意见越具代表性, 因此, 在偏好聚集时, 信任值是核心指标. 通过2.5节可以得到考虑干扰效应的信任值, 再通过下式将其转化为个体权重, 作为群决策聚集偏好时的权

重系数:

$$w^i = \frac{\sum_{j=1}^m \text{Pr}^{ji}(t)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i \neq j=1}^m \text{Pr}^{ji}(t)}, \quad (13)$$

其中 $w^i \in [0, 1]$. w^i 的值越大, 代表决策者 e^i 的偏好在聚集过程中占的比重越大.

3 算例分析与对比

下面通过一个具体的案例来展示所提出的基于量子干涉的信任测度的决策过程.

3.1 算例

某日用品生产公司为了提高生产率, 决定选址新建一个厂房, 经过预评估, 筛选出5个备选地 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$. 为了选择最合理的工厂建设地, 召集5位决策者对方案进行评估, 分别为 $E = \{e^1, e^2, e^3, e^4, e^5\}$. 在评估之前, 需要对决策者之间的信任关系进行建模以保证决策结果的完整性. 经过调查, 决策者之间的社会连接关系如图3所示.

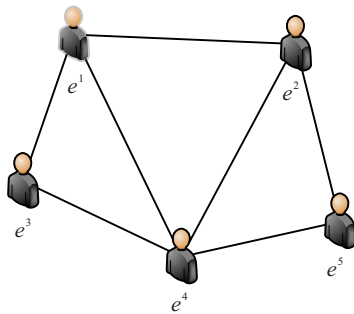


图3 决策者之间的连接关系

step 1: 计算决策者之间的亲疏度.

1) 由图3可知, 每个决策者的节点度为 $k(e^1) = 3, k(e^2) = 3, k(e^3) = 2, k(e^4) = 4, k(e^5) = 2$;

2) 通过式(6) 求出决策者之间的亲疏度为 $CD(e^1, e^2) = 5, CD(e^1, e^3) = 7, CD(e^1, e^4) = 13/2, CD(e^1, e^5) = 6, CD(e^2, e^3) = 6, CD(e^2, e^4) = 13/2, CD(e^2, e^5) = 7, CD(e^3, e^4) = 9, CD(e^3, e^5) = 4, CD(e^4, e^5) = 9$.

step 2: 计算每个决策者的专业度得分.

1) 利用 PLTSs 表示影响因素的评价信息.

已知该决策环境下, 专业度的影响因素包括 a_1 (教育水平); a_2 (累积经验); a_3 (专业知识储备程度); a_4 (个人兴趣). 本文采用5粒度语言术语集 $S = \{s_1 = \text{“一般”}, s_2 = \text{“良好”}, s_3 = \text{“较好”}, s_4 = \text{“好”}, s_5 = \text{“非常好”}\}$, 可以得到表1.

因为这5个标准是同一类型的, 所以可以省略评价信息的标准化. 从表1可以发现一些 PLTSs 的概率分布是不完整的, 因此, 必须考虑到 PLTSs 的标准化. 表1标准化结果如表2所示.

关于专业度的影响因素并非是相互独立的, 因此, 通过查阅相关文献, 本文设定在分类过程中影响因素之间的交互作用的模糊测度为

$$\begin{aligned} g(a_1) &= 0.25, g(a_2) = 0.15, g(a_3) = 0.1, \\ g(a_4) &= 0.2, g(a_1, a_2) = 1, g(a_3, a_4) = 0.2, \\ g(a_1, a_3) &= 1, g(a_2, a_4) = 0.2, \\ g(a_1, a_4) &= 1, g(a_2, a_3) = 0.15, \\ g(a_1, a_2, a_3) &= 1, g(a_1, a_3, a_4) = 1, \\ g(a_1, a_2, a_4) &= 1, g(a_2, a_3, a_4) = 0.2. \end{aligned}$$

表1 影响因素的5粒度语言术语集表示

	a_1	a_2	a_3	a_4
e^1	$\{l_2(0.163), l_3(0.116), l_4(0.257), l_5(0.464)\}$	$\{l_2(0.231), l_3(0.387), l_4(0.211)\}$	$\{l_1(0.089), l_2(0.112), l_3(0.187), l_4(0.274), l_5(0.338)\}$	$\{l_1(0.154), l_2(0.189), l_3(0.253), l_4(0.211), l_5(0.193)\}$
e^2	$\{l_1(0.096), l_2(0.160), l_3(0.240), l_4(0.288), l_5(0.216)\}$	$\{l_1(0.089), l_2(0.145), l_3(0.286), l_4(0.153)\}$	$\{l_2(0.160), l_3(0.240), l_4(0.288), l_5(0.312)\}$	$\{l_1(0.076), l_2(0.114), l_3(0.236), l_4(0.196), l_5(0.178)\}$
e^3	$\{l_1(0.107), l_2(0.128), l_3(0.197), l_4(0.282), l_5(0.286)\}$	$\{l_1(0.121), l_2(0.263), l_3(0.325), l_4(0.128)\}$	$\{l_1(0.079), l_2(0.135), l_3(0.212), l_4(0.237), l_5(0.337)\}$	$\{l_1(0.172), l_2(0.156), l_3(0.213), l_4(0.195), l_5(0.164)\}$
e^4	$\{l_2(0.135), l_3(0.197), l_4(0.282), l_5(0.386)\}$	$\{l_2(0.276), l_3(0.281), l_4(0.262)\}$	$\{l_1(0.036), l_2(0.098), l_3(0.233), l_4(0.319), l_5(0.314)\}$	$\{l_1(0.064), l_2(0.174), l_3(0.221), l_4(0.223), l_5(0.227)\}$
e^5	$\{l_1(0.209), l_2(0.357), l_3(0.189), l_4(0.245)\}$	$\{l_1(0.312), l_2(0.216), l_3(0.211), l_4(0.261)\}$	$\{l_1(0.373), l_2(0.232), l_3(0.113), l_4(0.127), l_5(0.155)\}$	$\{l_1(0.213), l_2(0.221), l_3(0.189), l_4(0.201)\}$

表 2 标准化的PLTSs表示

	a_1	a_2	a_3	a_4
e^1	$\{l_1(0), l_2(0.163), l_3(0.116), l_4(0.257), l_5(0.464)\}$	$\{l_1(0.034), l_2(0.266), l_3(0.421), l_4(0.245), l_5(0.034)\}$	$\{l_1(0.089), l_2(0.112), l_3(0.187), l_4(0.274), l_5(0.338)\}$	$\{l_1(0.154), l_2(0.189), l_3(0.253), l_4(0.211), l_5(0.193)\}$
e^2	$\{l_1(0.096), l_2(0.160), l_3(0.240), l_4(0.288), l_5(0.216)\}$	$\{l_1(0.154), l_2(0.211), l_3(0.352), l_4(0.218), l_5(0.065)\}$	$\{l_1(0), l_2(0.160), l_3(0.240), l_4(0.288), l_5(0.312)\}$	$\{l_1(0.116), l_2(0.154), l_3(0.276), l_4(0.236), l_5(0.218)\}$
e^3	$\{l_1(0.107), l_2(0.128), l_3(0.197), l_4(0.282), l_5(0.286)\}$	$\{l_1(0.154), l_2(0.294), l_3(0.358), l_4(0.161), l_5(0.033)\}$	$\{l_1(0.079), l_2(0.135), l_3(0.212), l_4(0.237), l_5(0.337)\}$	$\{l_1(0.192), l_2(0.176), l_3(0.233), l_4(0.215), l_5(0.184)\}$
e^4	$\{l_1(0), l_2(0.135), l_3(0.197), l_4(0.282), l_5(0.386)\}$	$\{l_1(0.036), l_2(0.312), l_3(0.318), l_4(0.298), l_5(0.036)\}$	$\{l_1(0.036), l_2(0.098), l_3(0.233), l_4(0.319), l_5(0.314)\}$	$\{l_1(0.082), l_2(0.192), l_3(0.239), l_4(0.242), l_5(0.245)\}$
e^5	$\{l_1(0.209), l_2(0.357), l_3(0.189), l_4(0.245), l_5(0)\}$	$\{l_1(0.312), l_2(0.216), l_3(0.211), l_4(0.261), l_5(0)\}$	$\{l_1(0.373), l_2(0.232), l_3(0.113), l_4(0.127), l_5(0.155)\}$	$\{l_1(0.248), l_2(0.256), l_3(0.224), l_4(0.236), l_5(0.036)\}$

通过广义 Shapely 的定义可以得到如下所示的 Shapely 值:

$$\begin{aligned} \varphi(a_1) &= 0.6792, \varphi(a_2) = 0.1042, \\ \varphi(a_3) &= 0.0875, \varphi(a_4) = 0.1292, \\ \varphi(a_1, a_2) &= 0.8833, \varphi(a_1, a_3) = 0.8750, \\ \varphi(a_1, a_4) &= 0.9083, \varphi(a_2, a_3) = 0.1750, \\ \varphi(a_2, a_4) &= 0.2083, \varphi(a_3, a_4) = 0.2, \\ \varphi(a_1, a_2, a_3) &= 0.9, \varphi(a_1, a_2, a_4) = 0.95, \\ \varphi(a_1, a_3, a_4) &= 0.925, \varphi(a_2, a_3, a_4) = 0.475, \\ \varphi(a_1, a_2, a_3, a_4) &= 1. \end{aligned}$$

利用 GS-PLCA 算子, 计算得到综合的概率语言术语集

$$[PL] = \left[\begin{aligned} &\{l_1(0.0277), l_2(0.1620), l_3(0.1596), \\ &\{l_1(0.0930), l_2(0.1635), l_3(0.2502), \\ &\{l_1(0.1123), l_2(0.1436), l_3(0.2122), \rightarrow \\ &\{l_1(0.0139), l_2(0.1439), l_3(0.2152), \\ &\{l_1(0.2731), l_2(0.2702), l_3(0.2003), \\ &\{l_4(0.2571), l_5(0.3935)\} \\ &\{l_4(0.2802), l_5(0.2132)\} \\ \leftarrow &\{l_4(0.2656), l_5(0.2664)\} \\ &\{l_4(0.2884), l_5(0.3386)\} \\ &\{l_4(0.2494), l_5(0.0069)\} \end{aligned} \right].$$

2) 根据 PL 集合, 计算每个决策者的专业度得分, 有

$$\begin{aligned} F^1(L_h^1(p)) &= 3.68, F^2(L_h^2(p)) = 3.20, \\ F^3(L_h^3(p)) &= 3.26, F^4(L_h^4(p)) = 3.67, \\ F^5(L_h^5(p)) &= 2.31. \end{aligned}$$

step 3: 计算基于量子干涉的信任值.

1) 亲疏度和专业度标准化 3.

对亲疏度进行标准化, 得到表 3.

表 3 标准化后的亲疏度

$\overline{CD}(e^1, e^2) = 0.076$	$\overline{CD}(e^1, e^3) = 0.106$
$\overline{CD}(e^1, e^4) = 0.098$	$\overline{CD}(e^1, e^5) = 0.091$
$\overline{CD}(e^2, e^3) = 0.091$	$\overline{CD}(e^2, e^4) = 0.098$
$\overline{CD}(e^2, e^5) = 0.106$	$\overline{CD}(e^3, e^4) = 0.136$
$\overline{CD}(e^3, e^5) = 0.061$	$\overline{CD}(e^4, e^5) = 0.136$

对专业度进行标准化, 有

$$\begin{aligned} \overline{F^1}(L_h^1(p)) &= 0.23, \overline{F^2}(L_h^2(p)) = 0.20, \\ \overline{F^3}(L_h^3(p)) &= 0.20, \overline{F^4}(L_h^4(p)) = 0.23, \\ \overline{F^5}(L_h^5(p)) &= 0.14. \end{aligned}$$

2) 信任值的计算.

在亲疏度和专业度的影响下, 决策者的信任概率分布为 $c = 0.56, o = 0.63$, 由此可得表 4.

表4 决策者之间的信任值

$Pr^{12}(t) = \alpha_1(0.611 + 0.53 \cos \theta_1)$	$Pr^{21}(t) = \alpha_2(0.613 + 0.51 \cos \theta_2)$
$Pr^{13}(t) = \alpha_3(0.606 + 0.57 \cos \theta_3)$	$Pr^{31}(t) = \alpha_4(0.608 + 0.55 \cos \theta_4)$
$Pr^{14}(t) = \alpha_5(0.609 + 0.54 \cos \theta_5)$	$Pr^{41}(t) = \alpha_6(0.609 + 0.54 \cos \theta_6)$
$Pr^{15}(t) = \alpha_7(0.603 + 0.58 \cos \theta_7)$	$Pr^{51}(t) = \alpha_8(0.610 + 0.54 \cos \theta_8)$
$Pr^{23}(t) = \alpha_9(0.608 + 0.55 \cos \theta_9)$	$Pr^{32}(t) = \alpha_{10}(0.608 + 0.55 \cos \theta_{10})$
$Pr^{24}(t) = \alpha_{11}(0.609 + 0.54 \cos \theta_{11})$	$Pr^{42}(t) = \alpha_{12}(0.607 + 0.56 \cos \theta_{12})$
$Pr^{25}(t) = \alpha_{13}(0.600 + 0.59 \cos \theta_{13})$	$Pr^{52}(t) = \alpha_{14}(0.606 + 0.57 \cos \theta_{14})$
$Pr^{34}(t) = \alpha_{15}(0.603 + 0.57 \cos \theta_{15})$	$Pr^{43}(t) = \alpha_{16}(0.602 + 0.58 \cos \theta_{16})$
$Pr^{35}(t) = \alpha_{17}(0.609 + 0.55 \cos \theta_{17})$	$Pr^{53}(t) = \alpha_{18}(0.614 + 0.50 \cos \theta_{18})$
$Pr^{45}(t) = \alpha_{19}(0.813 + 0.79 \cos \theta_{19})$	$Pr^{54}(t) = \alpha_{20}(0.604 + 0.57 \cos \theta_{20})$

step 4: 决策者权重的计算.

在本例中设 $\cos \theta = 0$, 由此可以确定决策者之间的信任值, 并计算得到决策者的权重

$$w^1 = 0.198, w^2 = 0.197, w^3 = 0.197,$$

$$w^4 = 0.196, w^5 = 0.212.$$

step 5: 各个备选地的评价排序.

通过评估, 决策者对各个备选地的偏好矩阵为

$$O = \begin{matrix} e^1 \\ e^2 \\ e^3 \\ e^4 \\ e^5 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.8 & 0.7 \\ 0.5 & 0.8 & 0.7 & 0.7 & 0.6 \\ 0.7 & 0.7 & 0.8 & 0.7 & 0.7 \\ 0.7 & 0.6 & 0.6 & 0.9 & 0.8 \\ 0.7 & 0.5 & 0.6 & 0.8 & 0.9 \end{bmatrix}.$$

利用加权平均算子将偏好聚合, 可以得到备选地的最终排序结果为 $x_1 \prec x_2 \prec x_3 \prec x_5 \prec x_4$.

3.2 对比分析

将本文方法分别与其他文献中的权重确定方法进行对比, 所得结果如表5所示.

为了说明在计算权重时考虑信任源之间干涉效应的必要性, 本文对不同的权重进行了比较和讨论. 从表5的计算结果可以看出, 应用4种不同的权重可以得到不同的结果. 虽然在4种情况下, 使用不同的权重得到的最好方案都是 x_4 , 但后续方案的排序有了差别. 入度中心性权重和利用BUM函数计算的权重满足了个性化的性质, 对不同的决策者提出了不同的重要程度, 比普通权重更加符合决策情境. 但上述两种权重计算方法只考虑了决策者之间的信任关系, 而忽略了信任源之间的干扰效应. 本文提出的权重完善了构建决策者之间的信任关系时应考虑的信息项, 增加了信任值的准确性, 从而提高了权重信息的全面性.

表5 方法对比结果

权重类型	个性化	是否考虑信任	是否信任源之间的干涉效应	权重值	备选方案的排序结果
普通权重	×	×	×	(0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)	$x_2 \prec x_1 \prec x_3 \prec x_5 \prec x_4$
入度中心性权重	√	√	×	(0.19, 0.23, 0.31, 0.03, 0.24)	$x_2 \prec x_1 \prec x_3 \prec x_5 \prec x_4$
利用基本单元-区间单调(BUM)隶属函数计算的权重	√	√	×	(0.13, 0.17, 0.46, 0.02, 0.22)	$x_2 \prec x_3 \prec x_1 \prec x_5 \prec x_4$
本文提出的权重	√	√	√	(0.198, 0.197, 0.197, 0.196, 0.212)	$x_1 \prec x_2 \prec x_3 \prec x_5 \prec x_4$

如图4和图5所示, 选取不同的参数 θ 会影响最终决策者之间的信任关系. 通过图4可以发现, 不同决策者之间信任值随着 $\cos \theta$ 值的增加而增加, 当 $\theta = 0$ 时, $\cos \theta = 1$, 决策者之间的信任值最大; 当 $\theta = \pi$ 时, $\cos \theta = -1$, 决策者之间的信任值最小. 而决策者之间的不信任值则与 $\cos \theta$ 的值成反比关系(见图5). 从而可知, 决策者之间的信任值越大, 不信任值就越小, 二者呈反方向变化.

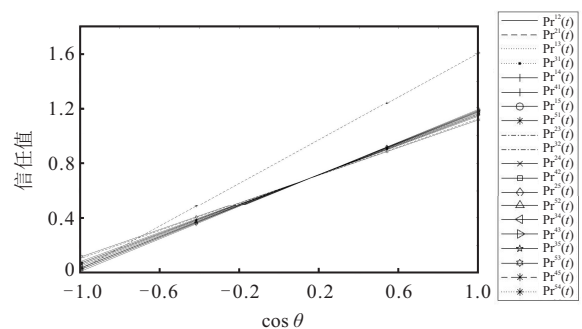


图4 参数 $\cos \theta$ 的调整对信任值的影响

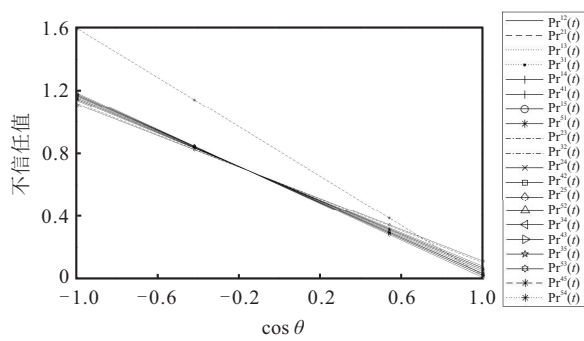


图 5 参数 $\cos \theta$ 的调整对不信任值的影响

同样,随着 θ 的变化,其对信任关系产生影响后,对决策者的权重也会产生影响.当决策者受到的信任程度越高时,决策者的权重就会越大,因此,提高 $\cos \theta$ 的值,会同时加强决策者之间的信任关系和决策者的属性权重.在决策过程中,为了加强决策者之间的信任关系,提高信任网络的稳定性,可以减小决策者之间的干涉角度的大小,即增加 $\cos \theta$ 值的大小,以提高决策过程的效率,减少因未达成共识而不断修改决策者偏好造成的成本的增加.当 $\theta = 0$ 时,决策者之间的信任值最大,此时,决策者针对决策问题达成共识所需的时间和成本最低,需要通过反馈机制修改偏好的次数最少;当 $\theta = \pi$ 时,决策者之间的不信任值最大,此时,信任关系不稳定性最高,大大增加了决策者之间由于不信任造成的偏好调整成本,降低了共识达成效率.一般情况下,可以选择 $\theta = 0$ 作为构建信任关系的最优参数.

4 结 论

随着信息化的发展,在社会网络群决策问题中,信任关系显得愈加重要.而关于信任测度的方法也层出不穷,但对于信任源的研究仍有待优化.许多信任源之间存在冗余,导致信任值往往与实际信任值有所偏差.为了提高所构建信任关系的准确性,本文设计了基于干涉效应的社会网络信任测度方法,该方法能够简化信任源的类型,避免部分信任源重叠出现.本文所提出的信任测度方法不仅仅是信任源的单纯聚合,也是一种新的设计理念,一种新的信任测度构造方法.首先,从决策者的社会关系和背景为出发点,对信任源进行了归纳分类,将其划分为决策者之间的“亲近关系”和“决策者的客观背景”两类,提出“亲疏度”和“专业度”的概念作为这两个信任源的测度.然后利用图论中的聚集系数计算决策之间的亲疏度,客观反映了节点之间相互连接的程度;而PLTS作为处理不确定决策信息描述的有力工具,可以有效处理主持人提供的专业度影响因素的评价信息,避免评价信息的丢失.最后,考虑到在确定信任

值时信任源之间的干涉效应,本文以量子概率为基础理论,对之间的干涉进行了刻画.相较于经典概率,量子概率的灵活性与随机性更符合对人类行为的描述.在未来的研究中,可以增加群体决策者的规模,考虑决策者个性对信任关系的影响.

参考文献(References)

- [1] Pérez L G, Mata F, Chiclana F. Social network decision making with linguistic trustworthiness-based induced OWA operators[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2014, 29(12): 1117-1137.
- [2] 李胜利, 魏翠萍, 宋燕红. 基于信任关系和互补判断矩阵的群决策方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(5): 1240-1246.
(Li S L, Wei C P, Song Y H. Group decision making method for fuzzy complementary judgement matrices based on trust relationships[J]. Control and Decision, 2020, 35(5): 1240-1246.)
- [3] Alonso S, Pérez I J, Cabrerizo F J, et al. A linguistic consensus model for Web 2.0 communities[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(1): 149-157.
- [4] Pérez L G, Mata F, Chiclana F, et al. Modelling influence in group decision making[J]. Soft Computing, 2016, 20(4): 1653-1665.
- [5] Wu J, Chiclana F, Fujita H, et al. A visual interaction consensus model for social network group decision making with trust propagation[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 122: 39-50.
- [6] 徐选华, 王兵, 周艳菊. 基于信任机制的不完全信息大群体决策方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 577-585.
(Xu X H, Wang B, Zhou Y J. Method for large group decision making with incomplete decision preference information based on trust mechanism[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 577-585.)
- [7] Dong Y C, Zha Q B, Zhang H J, et al. Consensus reaching in social network group decision making: Research paradigms and challenges[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 162: 3-13.
- [8] Urea R, Kou G, Dong Y, et al. A review on trust propagation and opinion dynamics in social networks and group decision making frameworks[J]. Information Sciences, 2018, 478: 461-475.
- [9] 姚升保, 古淼. 移情关系影响下的群体共识决策模型研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 203-214.
(Yao S B, Gu M. A consensus model for group decision making under the influence of empathy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(11): 203-214.)
- [10] Gefen D, Karahanna E, Straub D W. Trust and TAM in online shopping: An integrated model[J]. MIS Quarterly, 2003, 27(1): 51-90.
- [11] Gong Z W, Wang H, Guo W W, et al. Measuring trust in social networks based on linear uncertainty theory[J]. Information Sciences, 2020, 508: 154-172.

- [12] Sherchan W, Nepal S, Paris C. A survey of trust in social networks[J]. *ACM Computing Surveys*, 2013, 45(4): 1-33.
- [13] Liu Y J, Liang C Y, Chiclana F, et al. A trust induced recommendation mechanism for reaching consensus in group decision making[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 119: 221-231.
- [14] Wu J, Xiong R Y, Chiclana F. Uninorm trust propagation and aggregation methods for group decision making in social network with four tuple information[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 96: 29-39.
- [15] Matinfar F. A computational model for measuring trust in mobile social networks using fuzzy logic[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2020, 17(6): 812-821.
- [16] Deng S G, Huang L T, Xu G D. Social network-based service recommendation with trust enhancement[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(18): 8075-8084.
- [17] Herrera-Restrepo O, Triantis K, Trainor J, et al. A multi-perspective dynamic network performance efficiency measurement of an evacuation: A dynamic network-DEA approach[J]. *Omega*, 2016, 60: 45-59.
- [18] Dorri N, Nagoorani S, Jalili R. TIRIAC: A trust-driven risk-aware access control framework for grid environments[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2016, 55: 238-254.
- [19] 蒋伟进, 吕斯健. 移动agent系统安全问题的动态信任计算模型[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 499-505.
(Jiang W J, Lv S J. Mobile Internet mobile agent system dynamic trust model for cloud computing[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(2): 499-505.)
- [20] Wang Z, Busemeyer J R. Interference effects of categorization on decision making[J]. *Cognition*, 2016, 150: 133-149.
- [21] 辛潇洋, 徐晨虹, 陈宏玉, 等. 一种新决策模型——量子决策模型[J]. *心理科学进展*, 2018, 26(8): 1365-1373.
(Xin X Y, Xu C H, Chen H Y, et al. Quantum models for decision making[J]. *Advances in Psychological Science*, 2018, 26(8): 1365-1373.)
- [22] Asano M, Basieva I, Khrennikov A, et al. Quantum-like generalization of the Bayesian updating scheme for objective and subjective mental uncertainties[J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2012, 56(3): 166-175.
- [23] Anshu A, Høyer P, Mhalla M, et al. Contextuality in multipartite pseudo-telepathy graph games[J]. *Journal of Computer and System Sciences*, 2020, 107: 156-165.
- [24] Wang Y H, Liu Y M. Bayesian entropy network for fusion of different types of information[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020, 195: 106747.
- [25] Yearsley J M, Busemeyer J R. Quantum cognition and decision theories: A tutorial[J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2016, 74: 99-116.
- [26] Khrennikova P, Haven E, Khrennikov A. An application of the theory of open quantum systems to model the dynamics of party governance in the US political system[J]. *International Journal of Theoretical Physics*, 2014, 53(4): 1346-1360.
- [27] Moreira C, Wichert A. Are quantum-like Bayesian networks more powerful than classical Bayesian networks?[J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2018, 82: 73-83.
- [28] Khrennikov A. Quantum-like model of cognitive decision making and information processing[J]. *Biosystems*, 2009, 95(3): 179-187.
- [29] Rosenbrock H H, MacFarlane A G J. State-space and multivariable theory[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1972, SMC-2(2): 295-296.
- [30] Schrödinger E, Shearer J F, Deans W M. *Collected papers on wave mechanics*[M]. London: Blackie & Son limited, 1928: 208.
- [31] Lipovetsky S. Quantum paradigm of probability amplitude and complex utility in entangled discrete choice modeling[J]. *Journal of Choice Modelling*, 2018, 27: 62-73.
- [32] Teng F, Liu P D. A large group decision-making method based on a generalized Shapley probabilistic linguistic Choquet average operator and the TODIM method[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 151: 106971.
- [33] 吕琳媛. 复杂网络链路预测[J]. *电子科技大学学报*, 2010, 39(5): 651-661.
(Lv L Y. Link prediction on complex networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2010, 39(5): 651-661.)

作者简介

蔡玫(1980—), 女, 教授, 博士生导师, 从事模糊决策分析、应急协同决策等研究, E-mail: caimei@nuist.edu.cn;

简兴莲(1998—), 女, 硕士生, 从事群体决策分析的研究, E-mail: 1535085631@qq.com;

王雅(1998—), 女, 硕士生, 从事群体决策分析的研究, E-mail: xwy18100@163.com.