

控制与决策

Control and Decision

考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法

胡英杰, 朱建军

引用本文:

胡英杰, 朱建军. 考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 4007–4016.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1315>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法](#)

Large-scale group DEMATEL decision making method under uncertain linguistic information

控制与决策. 2021, 36(8): 2023–2033 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1486>

[基于语言共识模型的电子商务信用风险评价方法](#)

An approach to E-commerce credit risk assessment based on linguistic consensus model

控制与决策. 2021, 36(6): 1465–1471 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1398>

[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>

[考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型](#)

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

[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>

考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法

胡英杰, 朱建军[†]

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 针对信任网络群决策环境下专家意见修正和协调者补偿成本的复杂问题, 提出一种考虑多来源参考路径信息干涉效应的信任网络群体共识决策方法. 首先, 针对非共识专家在意见修正过程中存在不愿调整其意见的情形, 建立考虑相对出度中心性指数和自信度的非共识专家调整意愿识别模型. 其次, 考虑非共识专家对信任专家意见的接受意愿以及协调者意见, 结合多来源参考路径信息以波函数形式在愿意调整非共识专家大脑中的干涉效应, 建立概率语言环境下考虑量子干涉的意见反馈机制. 基于此, 进一步考虑协调者补偿成本最小化和个体共识度提高的约束, 建立最小意见调整成本共识模型. 然后, 利用信任惩罚机制降低不愿调整意见的非共识专家对群体共识达成的影响, 同时考虑信任调整成本最小化和群体共识达成约束, 建立最小信任调整成本共识模型; 最后, 将所提方法应用于突发事件应急决策, 验证该方法的可行性.

关键词: 信任网络; 群体共识; 调整意愿; 量子干涉; 信任惩罚; 调整成本

中图分类号: C934

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyj.2023.1315

引用格式: 胡英杰, 朱建军. 考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(12): 4007-4016.

Group consensus decision-making method for trust networks considering quantum interference

HU Ying-jie, ZHU Jian-jun[†]

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: A trust network group consensus decision-making method considering the interference effect of multi-source reference path information is proposed to address the complex issue of expert opinion correction and moderator compensation costs in the trust network group decision-making environment. Firstly, in response to the unwillingness of non-consensus experts to adjust their opinions during the process of opinion revision, a non-consensus expert adjustment willingness recognition model is established, considering the relative out-degree centrality and confidence level. Secondly, considering the willingness of non-consensus experts to accept the opinions of trusted experts and the opinions of moderators, a feedback mechanism considering quantum interference in a probabilistic linguistic environment is established by combining multi-source reference path information in the form of a wave function to investigate the interference effect in the brain of non-consensus experts who are willing to adjust. Based on this, a minimum opinion adjustment cost consensus model is established by further considering the constraints of minimizing moderator compensation costs and improving individual consensus. Then, using a trust penalty mechanism to reduce the impact of non-consensus experts who are unwilling to adjust their opinions on group consensus reaching, while considering the minimization of trust adjustment costs and group consensus reaching constraints, a minimum trust adjustment cost consensus model is developed. Finally, the proposed method is applied to emergency decision-making for unexpected events, verifying its feasibility.

Keywords: trust network; group consensus; adjustment of willingness; quantum interference; trust punishment; adjustment cost

0 引言

我国是受台风等自然灾害影响相对较大的国家之一. 台风不仅导致了社会经济和人民的重大损失,

而且会引发一系列连锁反应. 因此, 在台风登陆前选择合适的应急预案, 进一步降低生命财产损失尤为重要. 应急预案选择通常由相关应急专家对一组备选

收稿日期: 2023-09-17; 录用日期: 2024-03-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071106).

责任编委: 唐万生.

[†]通讯作者. E-mail: zhujianjun@nuaa.edu.cn.

方案进行评价,通过不断交流协商达成群体共识,进而作出最优决策^[1].考虑到决策专家间的社会网络关系,应急预案选择问题可看成典型的社会网络群体共识决策问题.

目前,社会网络群体共识决策的研究成果较为丰富^[2-4],其中社会网络(尤其是信任网络)对意见反馈机制的影响是众多学者研究的热点.文献[5]根据方案偏好关系的一致性和相似测度识别非共识专家,构建了以其他专家意见为参考来源的反馈机制,对非共识专家意见进行修正以提高群体共识度;文献[6]构建了信任网络下以群体集结意见为参考来源的反馈机制.文献[5-6]均未考虑信任专家意见的影响.基于此,文献[7]构建了考虑专家信任度的个性化反馈机制,其中专家间的信任关系通过共识度进行刻画.考虑到共识度刻画信任关系的局限性,文献[8]进一步从专家共识度、判断矩阵的一致性程度以及专家间的亲密关系3个维度来刻画专家间的信任关系,构建了基于信任关系的个性化意见.上述研究存在两个局限性:1)未考虑非共识专家对其不一致意见的调整意愿.文献[9]提出相对出度中心性指数来刻画非共识专家的调整意愿,但未设计相应的识别模型去判断具体哪些专家愿意调整.在应急预案选择过程,应急专家可能存在不愿调整其意见的情况.2)较少考虑非共识专家的心理行为.实际上在对应急预案进行评估时,应急决策专家很难全部接受所有信任专家的参考意见,接受意愿、接受程度是需要关注的重要因素.此外,在应急预案选择过程中,协调者往往具有一定的地位和专业能力,其意见也不容忽视.

对于愿意调整意见的非共识专家,当其面临多来源参考信息时,如何合理分析多来源参考信息的叠加影响是复杂决策问题的关注点,目前主要通过经典概率论进行集结和分析,然而经典概率论无法反映人们认知和决策行为的不确定性和复杂性.研究表明人大脑中的意识表现为量子意识,其像波函数一样在大脑运作并遵循波运动规律^[10],由此发展的量子概率理论指出在决策路径未知和不确定的情况下,人对不同来源路径信息的主观信念会在大脑中相互碰撞和纠缠,以叠加态的形式表征人的认知状态进而产生干涉效应,解释了人在不确定或矛盾状态下的决策行为^[11-13].目前已有少部分学者将量子概率理论应用于解决多属性群决策问题,文献[12]考虑不同路径决策专家信息的集结过程,提出了一种量子贝叶斯网络对方案进行排序择优.基于此,文献[14]提出语言分

布评估环境下的量子贝叶斯网络,并将其应用于解决多准则群决策问题.文献[15]除了考虑量子贝叶斯网络,还将其拓展到群体共识过程,分析专家间的干涉效应对各专家对群体共识达成的贡献度的影响,进而更新专家权重.上述研究鲜有将量子概率理论应用于信任网络环境下群体共识达成过程的意见反馈阶段.基于此,本文结合现有信任网络共识研究的局限性,提出以信任专家可接受意见和协调者意见为参考来源的量子集结意见反馈机制.

对于不愿调整意见的非共识专家,主要通过权重惩罚降低其在决策过程中的影响^[16-17].然而专家间的信任关系对非共识专家不愿调整行为的管理存在重要的影响,文献[18]依据调整前后的专家意见识别非合作行为,并以主观假定的信任惩罚程度对其进行管理;文献[19]和文献[20]分别通过相同的信任惩罚、权重惩罚与信任惩罚相结合的管理方式对非合作行为进行治理.上述研究主要以信任惩罚的方式对专家调整行为进行管理,并未考虑信任惩罚过程中的成本问题,可能会导致不必要的成本产生,从而降低了协调者的满意度.基于此,本文提出一种最小信任调整成本优化模型以降低协调者的补偿成本.

综上所述,本文提出一种考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法,主要贡献如下:1)对于需要调整意见的非共识专家,建立考虑相对出度中心性指数和自信度的调整意愿识别模型,克服了由单一中心性指数刻画专家调整意愿的局限性;2)对于愿意调整意见的非共识专家,构建考虑量子干涉的最小意见调整成本共识模型,充分体现了信任专家可接受意见与协调者意见在非共识专家大脑中的干涉效应;3)对于不愿调整意见的非共识专家,建立考虑信任惩罚的最小信任调整成本共识模型,进一步降低协调者补偿成本,提高协调者满意度.

1 预备知识

1.1 概率语言术语集及其运算

定义1^[21] 设 $S = \{s_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, 2\tau\}$ 为语言术语集,则概率语言术语集(probabilistic linguistic term sets, PLTS)定义为

$$L(P) = \left\{ (s_\alpha, p^{(\alpha)}) \mid \alpha = 0, 1, \dots, 2\tau, \right. \\ \left. 0 \leq p^{(\alpha)} \leq 1, \sum_{\alpha=0}^{2\tau} p^{(\alpha)} \leq 1 \right\}. \quad (1)$$

其中:二元组 $(s_\alpha, p^{(\alpha)})$ 中 s_α 为语言术语, $p^{(\alpha)}$ 为语言术语 s_α 对应的概率值.式(1)中 $\sum_{\alpha=0}^{2\tau} p^{(\alpha)} \leq 1$,为便

于应用,文献[21]对其进行标准化,标准化后的概率语言术语集(normalized probabilistic linguistic term sets, NPLTS)为 $\dot{L}(P) = \{(s_\alpha, \dot{p}^{(\alpha)}) | \alpha = 0, 1, \dots, 2\tau\}$, 其中 $\dot{p}^{(\alpha)} = p^{(\alpha)} / \sum_{\alpha=0}^{2\tau} p^{(\alpha)}$. 为方便起见,本文统一用 NPLTS 表示.

定义2 [22] 设 $L_i(P) = \{(s_\alpha, p_i^{(\alpha)}) | \alpha = 0, 1, \dots, 2\tau, 0 \leq p_i^{(\alpha)} \leq 1, \sum_{\alpha=0}^{2\tau} p_i^{(\alpha)} = 1\}$ ($i = 1, 2$) 为两个 NPLTS, 则 $L_1(P)$ 与 $L_2(P)$ 的距离测度表示为

$$d(L_1(P), L_2(P)) = \frac{1}{2\tau + 1} \sum_{\alpha=0}^{2\tau} |p_1^{(\alpha)} - p_2^{(\alpha)}|. \quad (2)$$

1.2 社会网络分析

目前社会网络环境下专家间信任关系的研究较为热门[2-3],信任关系表征以矩阵法或图示法为主.在矩阵法中,专家间的信任矩阵 $T = (TD_{ij})_{n \times n}$, 其中 $TD_{ij}, i \neq j = 1$ 或 0 , 1 表示专家间存在信任关系, 0 表示专家间不存在信任关系.专家间的信任关系不仅仅是完全信任或者完全不信任两种方式,更多是介于完全信任和完全不信任间的有点信任、很信任、非常信任等.基于此, Liu 等[2]将专家间的 0-1 信任关系拓展到区间 $[0, 1]$ 的任意实数,以此表征专家间的信任程度.基于信任关系的社会网络(简称信任网络)被广泛应用于获取专家权重,可用下式表示:

$$w_j = \frac{TD_j}{\sum_{j=1}^K TD_j} = \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^K TD_{ij}}{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1, i \neq j}^K TD_{ij}}. \quad (3)$$

其中: TD_j 表示其他专家对专家 e_j 的信任值, $TD_{ij} \in [0, 1]$.

1.3 量子概率理论

与经典概率论相比,量子概率理论能够很好地解释人在不确定或矛盾状态下的决策行为[11],人的信念状态会以波函数的形式在大脑中相互碰撞和纠缠,并以叠加态表征人的认知状态,进而产生干涉效应.基于此, He 等[12]将量子概率理论与贝叶斯网络相结合,拓展到群决策过程中以表征决策者对不同专家在各方案下的选择概率,进一步对方案进行排序择优.设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 为备选方案集, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_K\}$ 为决策专家集,则选择方案 A_i 的概率 $P(A_i)$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 的表达式为

$$P(A_i) = \chi \left| \sum_{k=1}^K \phi_{E_k} \phi_{A_i|E_k} \right|^2. \quad (4)$$

其中: $\chi = 1 / \sum_{i=1}^m \left| \sum_{k=1}^K \phi_{E_k} \phi_{A_i|E_k} \right|^2$ 表示归一化系数, $\sum_{i=1}^m P(A_i) = 1$; $\phi_{E_k} = \sqrt{P(E_k)} e^{i\theta_{E_k}}$ 表示选择路径 E_k 的概率振幅, $P(E_k)$ 为相应的概率; $\phi_{A_i|E_k} = \sqrt{P(A_i|E_k)} e^{i\theta_{A_i|E_k}}$ 表示路径 E_k 上选择方案 A_i 的概率振幅, $P(A_i|E_k)$ 为相应的概率.当专家面临两条决策路径时,式(4)转化为

$$P(A_i) = \chi [P(E_1)P(A_i|E_1) + P(E_2)P(A_i|E_2) + 2\sqrt{P(E_1)P(A_i|E_1)P(E_2)P(A_i|E_2)} \cos \theta]. \quad (5)$$

其中: $\theta = \theta_{E_1} - \theta_{E_2}$ 表示选择路径 E_1 与 E_2 的相位角差值, $2\sqrt{P(E_1)P(A_i|E_1)P(E_2)P(A_i|E_2)} \cos \theta$ 表示决策专家在选择两条不同路径时所产生的干涉项.当 $\theta \in [0, \pi/2)$ 时,此时两条干涉路径呈现正向积极作用;当 $\theta = \pi/2$ 时,量子概率理论坍塌为经典概率论,两条路径未发生干涉效应;当 $\theta \in (\pi/2, \pi]$ 时,两条干涉路径呈现负向消极作用.

2 考虑量子干涉的信任网络群体共识决策模型

本文研究信任网络群决策环境下的共识成本问题,具体描述如下:设决策专家间的信任矩阵为 $T = (TD_{ij})_{K \times K}$, 决策专家 e_k 对 m 个方案的概率语言决策矩阵表示为 $L^k = \{L_1^k, L_2^k, \dots, L_m^k\}$. 当概率语言决策矩阵和信任矩阵给定后,由于专家间的差异性导致群体无法就决策问题达成一致意见,进而需要消除群体意见冲突以达成共识,进而作出最终决策.这类共识成本决策问题需要考虑决策专家间的信任关系、非共识专家的调整心理以及调整过程中非共识专家对多源参考信息的干涉效应对共识达成和调整成本的影响,因此,如何有效进行调整是共识过程亟需解决的问题.下面,分别对非共识专家的调整意愿、调整机制以及惩罚机制进行研究.

2.1 考虑相对出度中心性指数和自信度的专家调整意愿识别模型

群决策过程中由于专家意见的冲突导致群体共识无法达成,进而造成群体对决策结果不满意,甚至决策失败.因此需要识别非共识专家,并由协调者引导其修改不一致意见以提高群体共识度.本文参照文献[6]的共识性测度和识别方法,从专家、方案等维度对群体共识进行测度,并确定非共识专家.根据识别后的非共识专家,需要对其不一致意见进行修

正. 然而大多数研究未考虑专家的调整意愿^[6-7], 默认专家愿意修正不一致意见. 对非共识专家而言, 是否调整其不一致意见受相关因素的影响, 如文献[9]提出相对出度中心性指数 COD_k 来刻画专家对意见调整的意愿, 其表达式为

$$COD_k = \frac{TOD_k \times NOD_k}{\max(TOD_k \times NOD_k)}. \quad (6)$$

其中: $TOD_k = \sum_{h=1, h \neq k}^m T_{k,h}$ 表示专家 e_k 的信任出度 (trust out-degree, TOD). $NOD_k = \sum_{h=1, h \neq k}^m S_{k,h}$ 表示专家 e_k 的强度出度 (node out-degree, NOD). COD_k 表示专家 e_k 的相对出度中心性指数 (comprehensive relative out-degree centrality, COD), COD_k 越大, 专家 e_k 越愿意信任其他专家, 对其不一致意见的调整意愿越强, 越配合群体共识的达成; 反之, 越不配合意见修正. 基于此, 本文通过 $\overline{COD}_k = 1 - COD_k$ 来衡量非共识专家对其不一致意见的不愿调整程度, \overline{COD}_k 越大, 不愿调整程度越大.

COD_k 从信任网络角度对非共识专家调整意愿进行刻画, 维度相对单一, 无法综合反映专家复杂的调整心理. 事实上, 在群决策过程中, 非共识专家对于意见是否调整, 与其当时给出该决策信息的自信心理也有一定的关系, 文献[2]认为专家自信度 (self-confidence degree, SCD_k) 是衡量专家对自己观点的肯定程度, 自信度越高, 专家拥有的知识或经验可能越丰富, 对自己的观点越肯定. 当专家非常自信地给出评价信息时, 必定调整意愿不强; 否则, 调整意愿会相对强烈. 因此, 有理由相信非共识专家对其不一致意见是否愿意调整, 与其给出该决策信息时的自信度有关. 基于此, 本文从专家的相对出度中心性指数与自信度两个维度综合刻画非共识专家的调整意愿, 并通过阈值确定愿意调整 and 不愿调整的非共识专家. 调整意愿参数 ξ_k 表达式为

$$\xi_k = (\overline{COD}_k + SCD_k)/2. \quad (7)$$

若调整意愿参数与阈值之间满足 $\xi_k \leq \xi$, 则表明非共识专家 e_k 愿意调整, 否则不愿调整. 其中, 本文利用概率语言信息的犹豫度 (hesitancy degree, HD) 刻画专家 e_k 给出决策信息时的自信度如下:

$$SCD_k = 1 - HD(L_k(p)), \quad (8)$$

$$HD(L_k(p)) = \left(\sum_{k=1}^K p^{(k)} \cdot \log_2 p^{(k)} \right) / \log_2 \frac{1}{2\tau + 1}. \quad (9)$$

2.2 考虑量子干涉的最小意见调整成本共识模型

针对愿意调整意见的非共识专家, 现有意见反馈机制的参考意见来源主要为群体中心 (群体综合集结意见) 和个体中心 (信任专家集结意见). 群体中心未能反映个性化特征, 专家被迫接受所有专家的意见; 个体中心相较于群体中心更易被接受, 但是现有考虑个体中心的反馈机制均未考虑对信任专家意见的接受意愿, 默认接受所有信任专家的意见. 此外, 在传统的群决策过程中通常存在一个协调者, 其作用主要是收集各专家的偏好信息、计算群体共识度、设计意见反馈机制等. 现有意见反馈机制下非共识专家的参考来源不管是群体中心还是个体中心, 本质上都是决策专家的意见, 并非协调者自身的意见. 然而在实际决策过程中, 协调者往往具有一定的地位和专业能力, 对决策问题有自己的见解和判断, 其会根据自身的判断, 结合群体专家的集结意见等给出一个综合判断以供非共识专家参考. 基于此, 本文综合考虑信任专家可接受意见和协调者意见以生成参考意见.

信任专家可接受意见集的构造过程如下: 文献[23]将专家间的双向信任关系 (e_k 与 e_l 相互信任) 称为强关系 (strong relation, SR), 单向信任 (e_k 信任 e_l , e_l 不信任 e_k) 且专家间的意见偏差在有界置信水平 ε 内称为满意弱关系 (satisfied weak relation, SWR), 对于双向信任和单向有界信任的专家的意见更易接受. 基于此, 本文将文献[23]中 0-1 信任关系拓展到区间 $[0, 1]$, 给出信任专家可接受意见集如下所示.

与 e_k 存在强关系的专家的可接受意见集

$$L_k^{SR} = \{L_{l,i}(P) | TD_{kl} > 0, TD_{lk} > 0, k, l = 1, 2, \dots, K\}. \quad (10)$$

与 e_k 存在满意弱关系的专家的可接受意见集

$$L_k^{SWR} = \{L_{l,i}(P) | TD_{kl} > 0, TD_{lk} = 0, d(L_{k,i}(P), L_{l,i}(P)) < \varepsilon_k, k, l = 1, 2, \dots, K\}. \quad (11)$$

e_k 的信任专家可接受意见集

$$L_A = L_k^{SR} \cup L_k^{SWR}. \quad (12)$$

其中: TD_{kl} 表示专家 e_k 对专家 e_l 的信任值; $d(L_{k,i}(P), L_{l,i}(P))$ 表示非共识专家 e_k 和专家 e_l 下方案 A_i 的概率语言评估值的距离测度.

在信任网络决策过程中, 针对多来源参考路径信息 (信任专家可接受意见和协调者意见) 的集结, 考虑到经典概率论的局限性, 而量子概率理论在信息集结方面具有显著优势, 其能够很好地解释人在不确定或矛盾状态下的决策行为^[11], 本文引入量子框架对多来源参考信息进行集结, 如图1所示.

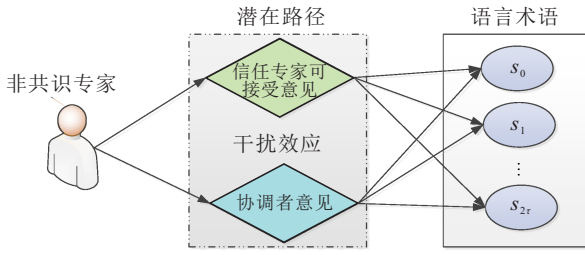


图1 基于量子干涉的参考信息集结

将非共识专家 e_k 关于方案 A_i 的参考意见表示为

$$L_{k,i}^r(P) = \left\{ s_\alpha (P_{k,i}^r(s_\alpha)) \mid s_\alpha \in S, \right. \\ \left. P_{k,i}^r(s_\alpha) \geq 0, \sum_{\alpha=1}^{2r} P_{k,i}^r(s_\alpha) = 1 \right\},$$

根据图1可将语言术语 s_α 的概率 $P_{k,i}^r(s_\alpha)$ 表示为

$$P_{k,i}^r(s_\alpha) = \phi [P(T) \cdot P_i(s_\alpha|T) + P(M) \cdot P_i(s_\alpha|M) + \\ 2\sqrt{P(T) \cdot P_i(s_\alpha|T) \cdot P(M) \cdot P_i(s_\alpha|M)} \cdot \cos \theta_{k,i}]. \quad (13)$$

其中: 信任专家可接受意见记为 T , 协调者意见记为 M .

基于式(13)进一步可得专家 e_k 关于方案 A_i 的反馈意见

$$\tilde{L}_{k,i}(P) = \delta L_{k,i}(P) \oplus (1 - \delta) L_{k,i}^r(P), \quad (14)$$

其中 δ 为反馈参数. δ 越大, 专家 e_k 的初始意见保留程度越大; 反之, 参考意见的保留程度越大.

综上所述, 本文将信任专家可接受意见和协调者意见作为非共识专家不一致意见的参考来源, 并通过量子概率理论对不同来源参考信息进行集结以生成反馈意见. 此外, 非共识专家希望反馈意见仍在其接受范围内, 同时考虑到非共识专家调整其意见需由协调者支付一定的补偿成本, 在保证意见调整后共识度提高的前提下, 协调者必定希望支付的调整成本尽可能的小. 基于此, 针对愿意调整其不一致意见的非共识专家, 提出考虑量子干涉的最小意见调整成本共识模型M1:

$$\min \sum_{e_k \in E_W} \sum_{i=1}^m c_k d(\tilde{L}_{k,i}, L_{k,i}). \quad (15)$$

$$\text{s.t. } 1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d(\tilde{L}_{k,i}, \hat{L}_{c,i}) \geq \gamma, \quad e_k \in E_W. \quad (16)$$

$$\tilde{L}_{k,i} = \delta L_{k,i}(P) \oplus (1 - \delta) L_{k,i}^r(P), \quad e_k \in E_W. \quad (17)$$

$$L_{k,i}^r(P) = \left\{ s_\alpha (P_{k,i}^r(s_\alpha)) \mid s_\alpha \in S, \right.$$

$$\left. P_{k,i}^r(s_\alpha) \geq 0, \sum_{\alpha=1}^{2r} P_{k,i}^r(s_\alpha) = 1 \right\}. \quad (18)$$

$$P_{k,i}^r(s_\alpha) = \Phi [P(T) \cdot P_i(s_\alpha|T) + P(M) \cdot P_i(s_\alpha|M) + \\ 2\sqrt{P(T) \cdot P_i(s_\alpha|T) \cdot P(M) \cdot P_i(s_\alpha|M)} \cos \theta_{k,i}]. \quad (19)$$

$$\hat{L}_{c,i} = \bigoplus_{k=1}^K \lambda_k \cdot \hat{L}_{k,i}, \quad e_k \in E. \quad (20)$$

$$\hat{L}_{k,i} = \begin{cases} \bar{L}_{k,i}, & e_k \in E_W; \\ L_{k,i}, & e_k \in E_{NW} \cup \overline{\text{EXPCH}}. \end{cases} \quad (21)$$

$$\overline{\text{EXPCH}} = E \setminus \text{EXPCH} = E \setminus (E_W \cup E_{NW}). \quad (22)$$

$$d(\bar{L}_{k,i}(P), L_{k,i}(P)) < \varepsilon_k, \quad e_k \in E_W. \quad (23)$$

$$0 < \theta_{k,i} < \pi, \quad e_k \in E_W. \quad (24)$$

目标函数 $\min \sum_{e_k \in E_W} c_k d(\tilde{L}_k, L_k)$ 表示所有愿意

调整意见的非共识专家调整成本最小化, 即协调者支付最小的成本, 假定专家调整的单位成本 $c_k = 1$, 此时 $\min \sum_{e_k \in E_W} c_k d(\tilde{L}_k, L_k) = \min \sum_{e_k \in E_W} d(\tilde{L}_k, L_k)$. 约束(16)表示非共识专家在意见调整后的共识度要在共识阈值之上. 约束(17)表示意见调整后的非共识专家意见, 包含需要调整和无需调整的意见. 约束(18)和(19)为考虑量子概率理论的参考意见生成模型. 约束(20)为群体集结意见的表达式. 约束(21)和(22)为愿意调整的非共识专家调整后的意见、不愿调整的非共识专家意见以及无需调整的共识专家意见. 其中: $\overline{\text{EXPCH}}$ 表示无需调整意见的共识专家集, E_W 表示愿意调整意见的非共识专家集, E_{NW} 表示不愿调整意见的非共识专家集. 约束(23)确定了愿意调整意见的非共识专家反馈意见的范围, ε_k 表示有界置信水平. 约束(24)为决策变量 $\theta_{k,i}$ 的取值范围, $\theta_{k,i}$ 表示专家 e_k 关于方案 A_i 的相位角差值. 9个约束中的 $P_{k,i}^r(s_\alpha)$ 和 $\tilde{L}_{k,i}$ 都是依据 $\theta_{k,i}$ 构造的表达式, 因此决策变量都为 $\theta_{k,i}$.

模型M1为非线性规划模型, 显然可行域非空有界, 在约束(16)与(24)不冲突的情况下, 必定存在最优解, 其最优解可通过Gurobi 10.0计算得到. 若冲突, 则模型M1无解, 此时可按照专家 e_k 在有界置信水平 ε_k 下所能达到的最大共识度对其意见进行调整.

2.3 考虑信任惩罚的最小信任调整成本共识模型

针对不愿调整意见的非共识专家, 文献[17-20]通过降低非共识专家的意见在群体中的比重, 以降低

其在共识达成的影响. 与意见调整类似, 为激励其他专家对其进行信任调整, 同样需要对其他专家进行相应的补偿, 然而现有信任网络群决策环境下研究信任惩罚对共识达成的影响, 主要通过假定或者依据某一规则设计信任惩罚程度^[17-19], 并未考虑到信任惩罚的成本问题, 可能存在信任过度惩罚的情形, 增加了协调者的补偿成本. 因此, 本文通过优化模型对信任调整成本进行优化以尽可能降低调整成本.

对协调者而言, 仍希望支付的成本最小, 此时为信任调整成本最小, 即信任变动产生的成本. 其中, 协调者最终支付的成本为意见调整成本与信任调整成本的总和. 通过对不愿调整意见的非共识专家实施信任惩罚, 协调者期望提高群体共识水平, 进一步达成共识以做出最终决策. 基于此, 本文提出一种考虑信任惩罚的最小信任调整成本共识模型M2:

$$\min \sum_{e_k \in E_{NW}} \sum_{z=1, z \neq k}^K c_z (TD_{zk} - \overline{TD}_{zk}). \quad (25)$$

$$\text{s.t. } 1 - \frac{1}{mk} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m d(\hat{L}_{k,i}, \hat{L}_{c,i}) \geq \gamma. \quad (26)$$

$$\hat{L}_{c,i} = \bigoplus_{k=1}^K \lambda_k \hat{L}_{k,i}, \quad i \in M. \quad (27)$$

$$\lambda_k = \frac{\sum_{z=1, z \neq k}^K \overline{TD}_{zk}}{\sum_{z=1}^K \sum_{k=1, k \neq z}^K \overline{TD}_{zk}}, \quad (28)$$

$$e_k \in E. \quad (28)$$

$$\overline{TD}_{zk} = \begin{cases} TD_{zk}, & e_k \in \overline{\text{EXPEH}} \cup E_W; \\ (1 - \eta_k)TD_{zk}, & e_k \in E_{NW}; \end{cases} \quad (29)$$

$$e_z \in E \setminus e_k. \quad (29)$$

$$0 < \eta_k < 1, \quad e_k \in E_{NW}. \quad (30)$$

$$0 < \lambda_k < 1, \quad e_k \in E. \quad (31)$$

目标函数 $\min \sum_{e_k \in E_{NW}} \sum_{z=1, z \neq k}^K c_z (TD_{zk} - \overline{TD}_{zk})$ 为其他专家对不愿调整意见的非共识专家进行信任惩罚的最小信任调整成本, 其中假定专家信任调整的单位成本 $c_z = 1$. 约束(26)表示信任惩罚后群体的共识度大于共识阈值, 即群体达成一致的约束条件; 约束(27)~(29)分别表示信任惩罚后的群体集结意见、专家权重以及信任惩罚模型, η_k 为不愿调整意见的非共识专家的信任惩罚系数; 约束(30)和(31)分别表示决策变量 η_k 和 λ_k 的取值范围.

模型M2为非线性规划模型, 显然可行域非空有界, 在约束(26)成立的条件下, 模型M2必定存在最优解, 其最优解同样可通过Gurobi 10.0计算得到. 否则,

模型M2无解, 此时可采取专家退出机制, 将不愿调整意见的非共识专家退出群决策过程, 由其余专家重新达成群体共识.

综上所述, 将考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法的决策步骤归纳如下.

step 1: 利用信任矩阵计算专家信任度, 进而结合式(3)获取专家权重.

step 2: 根据文献[6]识别非共识专家及方案, 并基于式(6)~(9)确定非共识专家的调整意愿.

step 3: 针对愿意调整意见的非共识专家, 基于式(10)~(12)确定信任专家可接受意见集 T , 进而利用量子概率理论, 结合式(13)计算参考意见下 s_α 的概率. 基于此, 利用式(14)和模型M1确定非共识专家关于各方案的相位角差 θ 、最小意见调整成本以及相应的反馈意见.

step 4: 针对不愿调整意见的非共识专家, 利用模型M2确定信任惩罚系数 η 以及最小的信任调整成本. 若模型M2有解, 则进一步对应急方案排序择优; 否则, 采取退出机制, 将不愿调整意见的非共识专家退出群决策过程, 由其余专家完成共识过程.

3 数值分析

3.1 算例背景

据应急管理部的数据显示, 2021年共生成22个台风, 其中有5个登陆我国, 造成直接经济损失132亿元, 因此有必要在台风登陆前采取应急预案, 最大程度降低居民的生命财产损失. 以2021年7月25日至26日在浙江舟山到玉环一带沿海登陆的第6号台风“烟花”为例, 现需有关部门采取应急预案, 筛选出3个应急备选方案供选择, 分别为 $\{A_1, A_2, A_3\}$. A_1 : 通过网络、道路广播等媒介提醒受影响区域居民提前做好防护措施和减少外出, 拆除高危建筑物、有安全隐患的道路广告牌等, 将居民转移到固定的避难所; 组成45人的应急机动小组负责整个区域的随机调配工作. A_2 : 以社区为单位, 实施台风登陆前的网格化管理, 由相关负责人一一上门提醒, 告知市民尽量不要外出, 并分发5天左右的食物; 由相关部门对高危建筑物、有安全隐患的道路广告牌等进行加固或拆除, 转移台风登陆影响较大的区域居民, 禁止相关居民出海作业; 组成30人的应急机动小组负责整个区域的随机调配工作. A_3 : 线上线下相结合的方式告知居民非必要不外出, 对由相关部门评估后的高危建筑采取必须转移的策略, 对非高危建筑的居民采取自愿的原则, 同时加固建筑物; 尽可能拆除或加固存在安全隐患的设施或搭建物, 禁止一切非必要的集会、露

天、教学等活动或作业;组成35人的应急机动小组负责整个区域的随机调配工作. 现邀请5位相关应急领域专家以概率语言术语集的形式对3个应急方案进行评估,进而筛选最优的应急方案. 其中,5位决策专家间的信任关系以模糊社会矩阵的形式表示为

$$T = \begin{bmatrix} - & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.5 \\ 0.6 & - & 0.6 & 0.8 & 0.5 \\ 0.2 & 0.7 & - & 0.6 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & - & 0.2 \\ 0.5 & 0.6 & 0.8 & 0 & - \end{bmatrix}.$$

step 1: 根据专家间的信任矩阵 T , 结合式(3), 可得各专家权重

$$w_1 = 0.168, w_2 = 0.225, w_3 = 0.247, \\ w_4 = 0.225, w_5 = 0.135.$$

step 2: 根据5位专家对3个应急方案的评估值, 结合文献[6]可得非共识专家集 $EXPCH = \{4, 5\}$; 专家 e_4 和 e_5 关于3个方案的共识度 CD 为

$$CD_{4,1} = 0.7789, CD_{4,2} = 0.7690, \\ CD_{4,3} = 0.7879, CD_{5,1} = 0.8005, \\ CD_{5,2} = 0.7730, CD_{5,3} = 0.7834.$$

进一步可得非共识方案集 $ALT = \{(4, 1), (4, 2), (4, 3), (5, 1), (5, 2), (5, 3)\}$. 此时, 需要对专家 e_4 和 e_5 的所有方案进行调整以提高群体共识度.

考虑到非共识专家对其意见的调整意愿, 结合式(7)可得 $\xi_4 = 0.56, \xi_5 = 0.44$. 假定 $\xi = 0.45$, 此时专家 e_5 愿意调整, 专家 e_4 不愿调整.

step 3: 对于愿意调整意见的非共识专家 e_5 , 假定有界置信水平 $\varepsilon_5 = 0.2$, 基于信任矩阵 T 可得, 专家 e_5 与专家 e_1, e_2 是强信任关系, 可接受其意见. 与专家 e_3 是单向信任关系, 此时需要判断专家 e_5 与专家 e_3 关于各方案评估的距离测度与 ε_5 的关系, 具体如下:

$$D_{A_1}^{5,3} = 0.28 > \varepsilon_5, \\ D_{A_2}^{5,3} = 0.2 = \varepsilon_5, \\ D_{A_3}^{5,3} = 0.24 > \varepsilon_5.$$

因此, 不接受专家 e_3 关于各方案的意见.

综上, 可得专家 e_5 的信任专家可接受意见为

$$T = \{ \{ (s_0, 0.1820), (s_1, 0.1635), (s_2, 0.2180), \\ (s_3, 0.1820), (s_4, 0.2545) \}, \{ (s_0, 0), \\ (s_1, 0.2455), (s_2, 0.2000), (s_3, 0.1910), \\ (s_4, 0.3635) \}, \{ (s_0, 0), (s_1, 0),$$

$$(s_2, 0.2545), (s_3, 0.4455), (s_4, 0.3000) \} \}.$$

考虑到协调者自身对于决策问题的综合判断, 在决策过程中协调者会根据自己的判断结合群体集结意见等, 提供一种综合评估值以供非共识专家参考, 即协调者意见 M 表示如下:

$$M = \{ \{ (s_0, 0.25), (s_1, 0.1), (s_2, 0.3), \\ (s_3, 0.15), (s_4, 0.2) \}, \{ (s_0, 0.1), \\ (s_1, 0.2), (s_2, 0.25), (s_3, 0.2), \\ (s_4, 0.25) \}, \{ (s_0, 0.05), (s_1, 0.15), \\ (s_2, 0.2), (s_3, 0.4), (s_4, 0.2) \} \}.$$

根据式(13)~(15), 取 $\delta = 0.5, P = 0.3$, 可得专家 e_5 关于各方案的相位角差以及意见调整成本: $\theta_{5,1} = 0^\circ, \theta_{5,2} = 0^\circ, \theta_{5,3} = 17.6^\circ, \min TC_o = 0.3128$, 进而可得各方案的反馈意见

$$\tilde{L}_5(P) = \{ \{ (s_0, 0.1116), (s_1, 0.1620), (s_2, 0.2338), \\ (s_3, 0.0816), (s_4, 0.4110) \}, \{ (s_0, 0.0188), \\ (s_1, 0.1118), (s_2, 0.4180), (s_3, 0.3010), \\ (s_4, 0.1504) \}, \{ (s_0, 0.1598), (s_1, 0.0295), \\ (s_2, 0.3661), (s_3, 0.3198), (s_4, 0.1247) \} \}.$$

反馈意见 $\tilde{L}_5(P)$ 保证了专家 e_5 的共识度得到提高, 即调整后的共识度 $\overline{CD}_5 > \gamma > CD_5$. 因此, 依据模型(15)进行意见调整是有效的.

step 4: 对于不愿调整意见的非共识专家 e_4 , 通过其他专家对其信任惩罚以降低其在群决策过程中的影响. 对于原本信任程度为0的情形, 保持信任度不变.

根据式(16)可得, 专家 e_4 的信任惩罚系数 $\eta_4 = 0.3886$, 最小信任调整成本 $\min TC_{id} = 0.7724$, 此时群体共识已达成, 进一步可得群决策矩阵

$$M_g = \{ \{ (s_0, 0.2109), (s_1, 0.0978), (s_2, 0.3256), \\ (s_3, 0.1671), (s_4, 0.1986) \}, \{ (s_0, 0.0630), \\ (s_1, 0.2236), (s_2, 0.2442), (s_3, 0.1786), \\ (s_4, 0.2906) \}, \{ (s_0, 0.0236), (s_1, 0.0947), \\ (s_2, 0.2190), (s_3, 0.4156), (s_4, 0.2470) \} \}.$$

根据群决策矩阵 M_g , 计算各方案的期望值

$$E(A_1) = 0.5112, \\ E(A_2) = 0.6025, \\ E(A_3) = 0.6919.$$

综上,可得方案排序为 $A_3 \succ A_2 \succ A_1$,最佳的应急方案为 A_3 . 说明在这种情况下,政府部门应当按照居民自愿的原则,采取相应的应急保障措施,不可一刀切对所有地区都采取强制措施. 下面,进一步分析有界置信水平 ε 、参考路径选择概率 P 对决策结果的影响,同时通过对比分析证明本文方法的可行性和优越性.

3.2 敏感性分析

3.2.1 有界置信水平 ε 的敏感性分析

本节主要分析愿意调整和不愿调整意见的非共识专家同时存在的情形,即假定调整意愿参数 $\xi \in (0.44, 0.56]$,此时专家 e_4 不愿调整,专家 e_5 愿意调整. 当调整意愿参数给定时,信任专家可接受意见 T 会随着有界置信水平 ε 的变化而变化.

考虑到专家 e_5 与专家 e_1, e_2 是强信任关系,因此专家 e_1, e_2 的意见可被专家 e_5 所接受,但是专家 e_5 与专家 e_3 是单向信任关系,即专家 e_5 信任专家 e_3 ,而专家 e_3 不信任专家 e_5 ,此时需根据有界置信水平进一步判断对专家 e_3 各方案意见的接受情况. 其中,专家 e_5 与专家 e_3 关于方案 A_1 的距离测度 $D_{A_1}^{5,3} = 0.2 \times 1.4 = 0.28$,类似地,可得 $D_{A_2}^{5,3} = 0.2 \times 1 = 0.2, D_{A_3}^{5,3} = 0.2 \times 1.2 = 0.24$. 当 $\varepsilon \in (0, 0.2]$ 时,此时 $D_{A_1}^{5,3} > \varepsilon, D_{A_2}^{5,3} \geq \varepsilon, D_{A_3}^{5,3} > \varepsilon$,因此均不接受专家 e_3 关于各方案的意见. 同理,当 $\varepsilon \in (0.2, 0.24]$ 时,专家 e_5 可接受专家 e_3 关于方案 A_2 的意见. 当 $\varepsilon \in (0.24, 0.28]$ 时,专家 e_5 可接受专家 e_3 关于方案 A_2 和 A_3 的意见. 当 $\varepsilon \in (0.28, 0.32]$ 时,专家 e_5 可接受专家 e_3 关于方案 A_1, A_2 和 A_3 的意见. 因此,不同的有界置信水平区间会对参考意见产生影响,进而影响反馈意见的生成与群体共识达成.

3.2.2 参考路径选择概率 P 的敏感性分析

以 $\xi \in (0.44, 0.56], \varepsilon = 0.2$ 为例,此时取 $P = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$,分析其对调整成本及各方案排序的影响,结果见表1. 概率 P 越大,表明选择信任专家可接受意见 T 的概率越大,选择协调者意见 M 的概率越低. 从表1可以看出,随着参考路径选择概率 P 的变化,最小观点调整成本 $\min TC_o$ 变化幅度不大,主要在 $[0.29, 0.32]$ 之间波动,而最小信任调整成本 $\min TC_{td}$ 变化幅度相对较大,主要在 $[0.7, 1.2]$ 之间波动. 在概率 P 较大时,信任调整成本较大. 当 $P = 0.7$ 时,群体共识达成失败,可采取退出机制进一步达成群体共识,由于专家 e_4 退出群决策过程后,其余专家无需调整即可达成共识,表1中未显示相应的调整成本. 当 $P = 0.4$ 时,总的调整

成本相对较低,此时 $TC = 1.0865$,因此,对于协调者而言,在不采取退出机制的情况下,将会建议此种情形的参考意见作为反馈意见的参考来源. 此外,从表1可以看出,随着选择概率 P 的变化,方案排序始终保持一致,最优方案均为 A_3 ,说明方案排序结果对概率 P 的选择并不敏感,即本文提出的方法是相对稳定的.

表1 不同参考路径的选择概率 P 变化对调整成本及方案排序的影响

P	$\min TC_o$	$\min TC_{td}$	η	TC	方案排序
0.1	0.3151	0.7804	0.3902	1.0955	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
0.2	0.3137	0.7790	0.3895	1.0927	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
0.3	0.3128	0.7772	0.3886	1.0900	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
0.4	0.3120	0.7745	0.3873	1.0865	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
0.5	0.3046	0.9142	0.4571	1.2188	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
0.6	0.2932	1.1368	0.5684	1.4300	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
0.8	0.2946	1.1793	0.5897	1.4937	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
0.9	0.2957	1.1042	0.5521	1.3999	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$

3.3 方法比较

将文献[6]的方法记为方法1,文献[11]的经典概率论信息集结方法与文献[18]直接降低信任度的惩罚方法相结合记为方法2,本文提出的考虑量子干涉的优化模型与文献[3]采取信任惩罚系数的惩罚方法相结合记为方法3,将本文方法的量子优化模型替换为经典概率论模型,信任惩罚方式不变记为方法4,分别与本文方法($P = 0.4$)进行对比分析,结果见表2.

表2 不同方法的结果对比分析

方法	参考意见	参考意见集结	TC_{td}	TC
方法1	TMO	单一参考源	—	1.5133
方法2	$T + M$	经典概率论	0.9000	1.2149
方法3	$T + M$	量子干涉	0.7762	1.0882
方法4	$T + M$	经典概率论	0.7810	1.0959
本文方法	$T + M$	量子干涉	0.7745	1.0865

与其他方法相比,本文方法具有的优势如下:

1) 从总调整成本和信任调整成本角度出发,本文提出的共识优化模型在调整成本上更有优势;与其他方法相比,本文方法的总调整成本最小;方法1未考虑决策过程中专家不愿调整的情形,未涉及信任惩罚过程,因此并未涉及信任调整成本,与实际复杂决策过程中专家的调整行为不太贴合.

2) 从参考意见来源及其集结方式和信任惩罚优化角度出发,方法1未考虑协调者意见的影响,同时未涉及信任专家意见的接受意愿,进而没有参考信息间的干涉效应;方法2和方法4根据经典概率论集结信任专家可接受意见和协调者意见两条路径信息,但

经典概率论无法处理决策路径未知的情形,对于决策专家而言,其认知状态本身就是不确定和未知的,对于两条决策路径可能并不确定要选择哪一条,这与经典概率论的确定性原则以及全概率公式本身是相违背的,因此利用经典概率论无法反映决策专家的不确定决策行为,当然也无法刻画两种参考信息在决策专家大脑中的干涉效应;方法3虽然考虑了两种参考信息间的干涉,但对不愿调整意见的非共识专家进行信任惩罚时未考虑成本优化问题,导致其总成本比本文方法要高。

4 结论

本文研究信任网络环境下专家调整意愿以及协调者补偿成本问题,提出了一种考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法,并通过突发事件应急决策问题验证了所提出方法的可行性。本文方法具备以下几个优点:

1) 建立了考虑相对出度中心性指数和自信度的调整意愿识别模型,考虑了非共识专家在共识过程中的调整意愿,与实际决策过程更为贴合;

2) 分析非共识专家对信任专家意见的接受意愿更符合决策专家的直观判断,提出考虑量子干涉的参考信息集结模型对信任专家可接受意见和协调者意见进行集结,充分考虑了非共识专家在参考不同来源信息时的复杂非理性行为特征;

3) 建立信任调整成本优化模型降低了协调者的补偿成本,提高了协调者满意度,同时避免了对不愿调整意见的非共识专家进行过度的信任惩罚。

此外,考虑到本文只针对不愿调整意见的非共识专家采取信任惩罚机制,未来可结合愿意调整意见的非共识专家的信任激励问题,进一步对比分析信任惩罚和信任激励同时存在与单独存在信任惩罚的共识度提高幅度问题。

参考文献(References)

- [1] Guo W W, Gong Z W, Zhang W G, et al. Minimum cost consensus modeling under dynamic feedback regulation mechanism considering consensus principle and tolerance level[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 306(3): 1279-1295.
- [2] Liu X, Xu Y J, Montes R, et al. Social network group decision making: Managing self-confidence-based consensus model with the dynamic importance degree of experts and trust-based feedback mechanism[J]. *Information Sciences*, 2019, 505: 215-232.
- [3] Liu B S, Jiao S X, Shen Y H, et al. A dynamic hybrid

trust network-based dual-path feedback consensus model for multi-attribute group decision-making in intuitionistic fuzzy environment[J]. *Information Fusion*, 2022, 80: 266-281.

- [4] 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.
(Lu Y L, Xu Y J, Li M Q. Large-scale group decision-making method based on negative behavior management and improved minimum cost consensus model in social network environment[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 327-335.)
- [5] Wu J, Chiclana F. A social network analysis trust-consensus based approach to group decision-making problems with interval-valued fuzzy reciprocal preference relations[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 59: 97-107.
- [6] 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(C): 39-50.
- [7] 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.
- [8] 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.)
- [9] Tan X, Zhu J J, Palomares I, et al. On consensus reaching process based on social network analysis in uncertain linguistic group decision making: Exploring limited trust propagation and preference modification attitudes[J]. *Information Fusion*, 2022, 78: 180-198.
- [10] Busemeyer J R, Wang Z, Lambert-Mogiliansky A. Empirical comparison of Markov and quantum models of decision making[J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2009, 53(5): 423-433.
- [11] 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.)
- [12] He Z C, Chan F T S, Jiang W. A quantum framework for modelling subjectivity in multi-attribute group decision making[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 124: 560-572.

- [13] 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.
(Cai M, Jian X L, Wang Y. Trust measure based on quantum interference in social network group decision making environment[J]. Control and Decision, 2024, 39(5): 1697-1706.)
- [14] Wu Q, Liu X W, Zhou L G, et al. A quantum framework for modeling interference effects in linguistic distribution multiple criteria group decision making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(6): 3492-3507.
- [15] Jiang J, Liu X W. A quantum cognition based group decision making model considering interference effects in consensus reaching process[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 173: 108705.
- [16] Chao X R, Kou G, Peng Y, et al. Large-scale group decision-making with non-cooperative behaviors and heterogeneous preferences: An application in financial inclusion[J]. European Journal of Operational Research, 2021, 288(1): 271-293.
- [17] Xiong K, Dong Y C, Zha Q B. A large-scale consensus model to manage non-cooperative behaviors in group decision making: A perspective based on historical data[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 214: 119163.
- [18] Zhang H J, Palomares I, Dong Y C, et al. Managing non-cooperative behaviors in consensus-based multiple attribute group decision making: An approach based on social network analysis[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 162: 29-45.
- [19] Gao Y, Zhang Z. Consensus reaching with non-cooperative behavior management for personalized individual semantics-based social network group decision making[J]. Journal of the Operational Research Society, 2022, 73(11): 2518-2535.
- [20] Li S L, Rodríguez R M, Wei C P. Managing manipulative and non-cooperative behaviors in large scale group decision making based on a WeChat-like interaction network[J]. Information Fusion, 2021, 75: 1-15.
- [21] Pang Q, Wang H, Xu Z S. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making[J]. Information Sciences: An International Journal, 2016, 369(C): 128-143.
- [22] Jin F F, Cao M, Liu J P, et al. Consistency and trust relationship-driven social network group decision-making method with probabilistic linguistic information[J]. Applied Soft Computing, 2021, 103: 107170.
- [23] Wu Z B, Zhou Q Y, Dong Y C, et al. Mixed opinion dynamics based on DeGroot model and Hegselmann-krause model in social networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(1): 296-308.

作者简介

胡英杰(1996—), 男, 博士生, 主要研究方向为决策理论与方法, E-mail: a17858955393@163.com;

朱建军(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为应急管理决策、智能决策与风险分析, E-mail: zhujianjun@nuaa.edu.cn.