

# 控制与决策

Control and Decision

## 移情网络下有序回归残缺值估计和应急决策共识建模

夏璇, 巩在武

引用本文:

夏璇, 巩在武. 移情网络下有序回归残缺值估计和应急决策共识建模[J]. *控制与决策*, 2025, 40(7): 2203-2212.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.1274>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于观测器的网络化多智能体预测控制

Observer-based networked multi-agent predictive control

控制与决策. 2021, 36(9): 2290-2296 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1801>

#### 基于策略权重的模糊多属性决策方法

Strategic weight manipulation in fuzzy multiple attribute decision making

控制与决策. 2021, 36(5): 1259-1267 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0542>

#### 考虑效率和公平的跨区域协同应急救援路径选择

Routing optimization of cross-regional collaborative emergency rescue considering efficiency and fairness

控制与决策. 2021, 36(2): 483-490 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0919>

#### 大群体应急决策中考虑属性关联的偏好信息融合方法

Preference information fusion method of large groups emergency decisionmaking based on attributes association

控制与决策. 2021, 36(10): 2537-2546 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0117>

#### 社会网络环境下利益抗争的群策略研究

Group strategy in struggling for interests under social network

控制与决策. 2021, 36(1): 206-215 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0497>

# 移情网络下有序回归残缺值估计和应急决策共识建模

夏璇<sup>1,2,3</sup>, 巩在武<sup>1,2,3†</sup>

- (1. 南京信息工程大学 管理工程学院, 南京 210044;
2. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044;
3. 南京信息工程大学 风险治理与应急决策研究院, 南京 210044)

**摘要:** 突发事件应急决策过程中, 决策者常因判断矩阵信息缺失而对其他决策者偏好产生移情效应, 且个体间偏好信息冲突阻碍共识达成. 针对残缺判断矩阵群决策问题, 现有方法往往忽略了挖掘高质量的额外信息来辅助决策, 有限的信息降低了决策结果的可靠性. 此外, 传统研究中矩阵补全与共识达成过程相互独立, 且反馈机制中难以识别出决策个体的冲突偏好, 影响共识达成效率. 为了克服以上问题, 提出一个移情网络下同步实现矩阵补全和共识达成的群决策框架. 该框架首先有效整合间接偏好信息与移情偏好信息, 构建有序回归共识判别模型; 其次, 通过设计冲突反馈机制, 分别构建冲突信息最小成本剔除和调整共识模型, 该方法不仅能够深入挖掘有效的隐性信息, 而且可以促进残缺值补全、共识达成与加性一致性实现的有机融合, 提升应急决策过程中估计值的可信度和共识达成效率; 最后, 通过台风灾害应急案例、仿真和对比分析验证了所提出框架的有效性.

**关键词:** 应急决策; 移情网络; 残缺判断矩阵; 有序回归; 间接偏好信息; 共识

中图分类号: C934 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.1274

引用格式: 夏璇, 巩在武. 移情网络下有序回归残缺值估计和应急决策共识建模 [J]. 控制与决策, 2025, 40(7): 2203-2212.

## Incomplete values ordinal regression estimation and consensus modeling for emergency decision-making under empathetic network

XIA Xuan<sup>1,2,3</sup>, GONG Zai-wu<sup>1,2,3†</sup>

- (1. School of Management Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. The Research Institute for Risk Governance and Emergency Decision-Making, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In emergency decision-making, decision-makers often empathize with other experts' preferences due to lacking information, and preferences conflicts hinder the achievement of consensus. For group decision-making problems involving incomplete preference relations, existing methods often neglect to mine high-quality additional information as assistance, and limited information reduces the reliability of decision results. In traditional research, preference completion and consensus achievement are separate, making conflict identification in feedback hard and reducing consensus efficiency. To overcome these issues, a group decision-making framework is proposed to simultaneously achieve completion and consensus under an empathetic network. This framework first fuses indirect preferences and empathetic preferences to construct an ordinal regression consensus discrimination model. Then, we design a feedback mechanism to accurately identify conflicts and construct cost-effective consensus models. This method not only deeply mines implicit information but also promotes the integration of missing values completion, consensus achievement, and consistency realization, enhancing the credibility of estimates and the efficiency of consensus reaching. Finally, the effectiveness of the proposed framework is verified through typhoon disaster case, simulation, and comparison.

**Keywords:** emergency decision-making; empathetic network; incomplete preference relations; ordinal regression; indirect preference information; consensus

收稿日期: 2024-10-31; 录用日期: 2025-02-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72371137); 江苏省研究生科研创新计划项目 (KYCX23\_1280).

责任编辑: 徐泽水.

†通信作者. E-mail: zwgong26@163.com.

## 0 引言

近年来,地震、火灾和极端天气等突发事件频发,给社会带来了巨大人员伤亡和经济损失.此类事件发生后,高质量的应急决策过程可以有效减少潜在的不利影响<sup>[1-2]</sup>.突发事件应急群决策过程中,由于信息缺失、专家认知局限和个体间偏好冲突等因素影响,决策者往往难以提供准确且完整的决策信息,且在决策过程中难以达成群体共识<sup>[3]</sup>.因此,如何发掘新的可用信息辅助决策,并解决个体内部和个体间信息冲突,以形成一个缺失值估计和共识达成的整体框架,成为应急决策研究中的关键问题.

应急决策过程中,构造判断矩阵是评估备选方案优劣的常用方法<sup>[4-5]</sup>.其中模糊判断矩阵因其实用性和易用性被广泛采用.受客观环境和决策者认知能力的限制,决策者通常利用残缺模糊判断矩阵表达自己的观点<sup>[6]</sup>.例如,当发生洪涝灾害时,专家可通过构造残缺模糊判断矩阵来选择最优方案.然而,信息的有限性、决策步骤的分离以及专家间偏好冲突等因素都会影响共识达成效率和质量.此外,洪涝灾害的突发性导致决策者难以给出方案比较的精确值,但他们可以提供相对粗糙的偏好信息,比如方案A优于方案B,但优于程度未知.这类信息的优势在于它对决策者的能力要求相对较低,从而更容易被决策者所提供.因此,通过发掘这类信息的潜在优势和价值,对提升应急决策质量具有重要的现实意义.

传统的应急群决策研究大多建立在决策者相互独立假设基础上.然而,社会网络中,决策者间的社交联结能够增强节点之间的互动<sup>[7-8]</sup>.近年来,社会网络分析方法在移情网络研究中得到广泛应用<sup>[9-10]</sup>.Salehi-Abari等<sup>[11]</sup>在群决策问题中首次提出将个体效用分解为内在效用与移情效用.基于此研究,包含置信度指数的移情中心性被提出,并作为引导因素来收集决策意见<sup>[12]</sup>.此外,Song等<sup>[13]</sup>和姚升保等<sup>[9]</sup>构建了移情偏好共识模型,分析了移情关系对共识达成的影响.随后,为了将移情关系引入到残缺判断矩阵补全研究中,提出了考虑移情间接偏好信息的有序回归单个矩阵补全模型<sup>[14]</sup>.应急群决策过程中,决策者对缺失值的判断更易受到对其他决策者移情影响,通过移情关系挖掘新的有用信息用于决策过程,有利于群体偏好更加符合群体的整体意愿,从而促进共识达成.

现有残缺判断矩阵群决策方法大多是将判断矩阵补全和共识达成作为两个独立的环节,残缺值补全主要依赖于迭代和优化两类方法<sup>[15-16]</sup>.针对共识达

成研究,相关专家考虑一致性和诱导混合加权算子构建群体共识模型<sup>[17]</sup>,然后进一步拓展到其他类型残缺判断矩阵的应急决策共识模型<sup>[18]</sup>.然而,这些研究需建立在矩阵完整性的基础之上,且过程中需要进行一致性改进,耗时较长.此外,现有补全方法多依赖已有信息<sup>[19-20]</sup>,决策依据不足易导致偏好不一致.因此,本文开发新的间接和移情偏好信息,研究一种能够同时完成残缺值修复、共识达成和一致性实现的应急决策方法显得尤为重要.

应急决策过程中可能会存在冲突协调成本过高的问题.为了提高共识效率和降低共识成本,Gong等<sup>[21]</sup>研究了基于最小成本和最大补偿共识模型.Cheng等<sup>[22]</sup>考虑了非对称成本下容忍和有限妥协行为对共识达成的影响.针对影响共识效率和水平的因素,基于共识原则、容忍度及共识度的最小成本共识模型被提出<sup>[23]</sup>.以上基于优化共识规则的模型普遍采用对偏好进行统一调整的方法,然而这种方法未能精确识别所有冲突信息.此外,决策者在面对冲突信息时的容忍意愿各不相同,但这一重要因素在已有研究中并未得到充分考虑.为了弥补上述不足,本文在融合额外信息的基础上,根据决策者意愿构建最小成本剔除模型和最小成本调整模型以有效解决偏好冲突问题.

上述文献虽然对残缺判断矩阵群体共识决策进行了相关研究,但对基于移情关系和间接偏好的群共识研究还未充分展开,仍存一些研究空白,包括:1)决策者间移情效应未融入判断矩阵补全与共识达成过程;2)已知信息的有限性影响共识达成质量;3)调整反馈机制未能准确识别出冲突信息.

本文的间接偏好信息是针对方案两两比较的粗糙判断,移情偏好信息是根据间接偏好和移情网络而获得的额外信息.由于复杂群决策普遍存在认知有限和知识异质性问题,易导致决策者更倾向给出关于残缺值示例性间接偏好信息<sup>[24]</sup>.从多元化信息中去推断决策模型的方法称为偏好解聚方法<sup>[25]</sup>,可有效融合精确信息和粗糙信息,其采用有序回归技术,是一种偏好学习方法,可以深度挖掘隐性信息<sup>[26]</sup>.有序回归方法对本文研究具有较强的适用性.

基于以上分析,本文提出移情网络下新的共识达成模型.主要创新点包括以下几点:1)开发用于多元信息融合的整体化结构,通过此结构实现对已有信息、间接偏好信息以及移情偏好信息的高效利用.2)提出残缺判断矩阵有序回归偏好学习模型,该模型可还原决策者的间接偏好信息和移情偏好信息.3)构建冲突消解共识模型.

## 1 预备知识

### 1.1 模糊判断矩阵及其一致性

令群成员集合为  $D = \{d^l | l \in M\}$ ,  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ , 方案集为  $X = \{x_i | i \in N\}$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ .  $x_i \succ x_j$  表示方案  $x_i$  优于方案  $x_j$ ,  $x_i \succeq x_j$  表示方案  $x_i$  不劣于方案  $x_j$ ,  $x_i \sim x_j$  表示方案间无差异,  $(x_i, x_j)$  表示方案  $x_i$  优于方案  $x_j$  的程度.

**定义 1**<sup>[27]</sup> 对于两两比较矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$ , 若满足  $r_{ii} = 0.5$ ,  $r_{ij} + r_{ji} = 1$ ,  $\forall i, j \in N$ , 则称矩阵为模糊判断矩阵.

**定义 2**<sup>[27]</sup> 对于模糊判断矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$ , 若其中元素都满足  $r_{ik} + r_{kj} = r_{ij} + 0.5$ ,  $i, j, k \in N$ , 则称矩阵具有加性一致性.

**定义 3**<sup>[28]</sup> 如果模糊判断矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  中含有残缺元素, 且对任意的非残缺元素  $r_{ij}$  满足  $r_{ij} = 0.5$ ,  $r_{ij} \geq 0$ ,  $r_{ij} + r_{ji} = 1$ ,  $\forall i, j \in N$ , 则称  $R$  为残缺模糊判断矩阵.

**定义 4**<sup>[28]</sup> 若残缺模糊判断矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times n}$  中, 对任意的非残缺元素满足  $r_{ik} + r_{kj} = r_{ij} + 0.5$ ,  $i, j, k \in N$ , 则称矩阵  $R$  具有加性一致性.

### 1.2 残缺值移情转化

存在移情关系的决策者之间可构成移情网络. 根据移情权重可得到移情邻接矩阵  $W = (w_{ij})_{m \times m}$ . 决策者  $d^l (k = 1, 2, \dots, m)$  对应的残缺判断矩阵为  $R^l = (r_{ij}^l)_{n \times n}$ , 如果元素  $r_{ij}^l$  缺失, 则依据文献 [14], 此时存在两种情况: 一是其他决策者在  $r_{ij}^l$  相同位置上的值都是非残缺的; 二是多个决策者在相同位置  $r_{ij}^l$  上缺少判断信息. 若是第 1 种情况, 则缺失元素所对应的移情偏好信息可通过其他决策者缺失位置的直接偏好信息进行移情转化; 若是第 2 种情况, 则考虑其所提供的间接偏好信息进行移情转化.

假设  $r_{ij}^{l*}$  为残缺值  $d^l$  的局部移情偏好信息,  $w_{ll}$  为  $d^l$  的自循环权重,  $w_{lz}$  为  $d^l$  对  $d^z$  的移情权重,  $r_{ij}^z$  为其他决策者在  $r_{ij}$  位置上的判断信息. 局部移情偏好为  $r_{ij}^{l*} = \sum_{t=1}^m w_{lt} r_{ij}^t$ . 全局移情偏好为  $r_{ij}^{l**} = w_{ll} r_{ij}^{l*} + \sum_{z=1, l \neq z}^m w_{lz} r_{ij}^{z*}$ , 可转化为  $r_{ij}^{l**} = \sum_{z=1}^m n_{lz} r_{ij}^z$ , 其中  $\sum_{z=1}^m n_{lz} = 1, 1 \leq z \leq m$ ,  $d^l$  的移情偏好以矩阵  $N$  的第  $l$  行向量为权重<sup>[14]</sup>.

## 2 间接偏好信息及共识模型范式

本文中, 直接偏好信息为模糊判断矩阵中一个方案优于另一个方案的程度值, 决策者提供的关于方案优劣关系的不精确表达称为间接偏好信息. 假

设  $r_{ij}, r_{uv}$  为矩阵中的两个不同的残缺值, 间接偏好信息示例类型以及其对应数学表达式为:

$$1) \quad x_i \succ x_j, x_i \succeq x_j, x_i \prec x_j, x_i \preceq x_j (r_{ij} > 0.5, r_{ij} \geq 0.5, r_{ij} < 0.5, r_{ij} \leq 0.5).$$

$$2) \quad (i, j) = [h, t] (h \leq r_{ij} \leq t, 0 < h < t < 1).$$

假设  $d^l$  的残缺值为  $r_{ij}^l, r_{uv}^l$ , 此处引入参数  $\varepsilon$  将约束条件中的严格不等式转化为弱不等式. 将上述间接偏好信息转化为含有参数  $\varepsilon$  的约束, 记为  $E_A^l$ , 有

$$E_A^l \begin{cases} r_{ij}^l \geq 0.5 + \varepsilon, i \succ j; \\ r_{ij}^l + \varepsilon \leq 0.5, i \prec j; \\ r_{ij}^l \geq h + \varepsilon, r_{ij}^l + \varepsilon \leq t, 0 < h < t < 1, \\ (i, j) = [h, t]; \\ l \in M, i, j \in N. \end{cases}$$

令  $E_B^l$  是  $d^l$  的直接偏好信息、一致性条件和判断矩阵定义构成的约束集合,  $E_C$  是共识达成条件,  $E_D^l$  是残缺值局部或全局移情偏好信息. 为检验信息间的兼容性, 构建以下有序回归共识判别模型:

$$\begin{aligned} & \max \varepsilon; \\ & \text{s.t. } E_A^l, E_D^l, E_B^l, E_C, l \in M. \end{aligned} \quad (1)$$

若  $\varepsilon > 0$ , 则表明模型 (1) 可以复现决策者的间接和移情偏好信息补全判断矩阵并达成共识. 若该模型无可行解或  $\varepsilon < 0$ , 则意味着此时存在冲突信息阻碍判断矩阵的补全及共识偏好的获取.

若存在冲突信息, 则需研究如何识别冲突偏好信息. 引入 0-1 变量  $\delta_r$ <sup>[29]</sup>, 将间接和移情偏好信息写成相应的约束条件. 例如  $i \succ j$  对应的约束条件为  $r_{ij} - 0.5 + M\delta_r > 0$ , 其中  $M$  是大于 1 的正数. 若  $\delta_r = 0$ , 则该约束对应的信息与其他信息不冲突; 若  $\delta_r = 1$ , 则该条约束所对应的信息是冲突的.

转化后的间接和移情偏好信息构成的集合分别记作  $\overline{E}_A^l, \overline{E}_D^l$ . 冲突信息识别 0-1 整数规划模型为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{r=1}^n \delta_r. \\ & \text{s.t. } \overline{E}_A^l, \overline{E}_D^l, E_B^l, E_C, l \in M; \\ & \quad \delta_r \in \{0, 1\}, r \in N. \end{aligned} \quad (2)$$

若存在  $\delta_r = 1$ , 则表明是偏好信息冲突导致共识模型不兼容. 若无冲突信息, 则是由于共识度低引起. 如果存在冲突信息, 且决策者  $d^l$  不能忍受冲突, 则对冲突信息进行剔除; 若能忍受冲突, 则对其进行调整<sup>[30]</sup>. 假设  $d^l$  兼容的含有  $\varepsilon$  的间接和移情偏好信息分别构成集合  $E_F^l, E_G^l$ , 构建共识模型如下:

$$\begin{aligned} & \max \varepsilon; \\ & \text{s.t. } E_F^l, E_G^l, E_B^l, E_C, l \in M. \end{aligned} \quad (3)$$

### 3 共识框架

#### 3.1 群体偏好集结与群体共识水平测度

假设  $w^l$  为  $d^l$  的权重,  $R^c = (r_{ij}^c)_{n \times n}$  为群体偏好,  $R^l = (r_{ij}^l)_{n \times n}$  为个体偏好, 群偏好集结公式为

$$R^c = (r_{ij}^c)_{n \times n} = \sum_{l=1}^m w^l r^l = \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w^l r_{ij}^l.$$

本文基于个体偏好与群体偏好之间的距离测度共识水平, 计算如下:

$$d(R^l, R^c) = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n |r_{ij}^l - r_{ij}^c|.$$

群体共识水平可由  $GCI = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m [1 - d(R^l, R^c)]$  获得, 其中  $0 \leq GCI \leq 1$ . 群决策中, 通常需要先确定群体共识水平的阈值  $\alpha$ , 当  $GCI \geq \alpha$  时, 表示群体共识达成; 否则, 表明决策者之间的意见存在分歧.

#### 3.2 有序回归共识判别模型

根据构建的共识模型范式, 构建以下有序回归共识判别模型:

$$\begin{aligned} & \max \varepsilon. \\ & \text{s.t. } E_A^l; \\ & r_{ij}^{l*} = \sum_{z=1}^m w_{lz} r_{ij}^z; \\ & r_{ij}^{l**} = \sum_{z=1}^m n_{lz} r_{ij}^z; \\ & M_1 \begin{cases} r_{ij}^l = r_{ik}^l + r_{kj}^l - 0.5, i < k < j; \\ R^c = \sum_{l=1}^m w_l R_l = \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_l r_{ij}^l; \\ \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m [1 - d(R^l, R^c)] \geq \alpha; \\ 0 \leq r_{ij}^l \leq 1; \\ l \in M, M = 1, 2, \dots, m, i, j, k \in N; \end{cases} \\ & \varepsilon > 0. \end{aligned} \quad (4)$$

其中:  $E_A^l$  为间接偏好信息约束集合,  $r_{ij}^{l*}$  和  $r_{ij}^{l**}$  分别为残缺值局部和全局移情偏好信息,  $M_1$  中的约束分别为模糊判断矩阵的一致性条件、群偏好集结条件、共识达成条件、残缺值取值范围及  $l, i, j, k$  所属集合. 若存在  $\varepsilon > 0$ , 则表明能补全所有残缺判断矩阵并获得共识偏好.

由于判断矩阵中的两两对比值满足区间  $[0, 1]$ ,  $E_A^l$  中的数学表达式都可以转化为相应的区间形式. 例如,  $r_{ij} > 0.5$  可以转化为  $(0.5, 1]$ , 这种转化有利于

后面的移情偏好计算和模型求解.

### 3.3 冲突消解共识模型

#### 3.3.1 冲突信息反馈方法

针对造成模型 (4) 不兼容的原因, 即偏好信息冲突或共识度低, 分别构建冲突消解共识模型.

首先考虑存在冲突偏好信息的情况. 由于间接偏好信息的主观性, 调整时更易与决策者沟通并考虑其意愿, 当决策者不能忍受冲突时, 则对冲突信息进行最小成本剔除; 若能接受冲突, 则对其进行最小成本调整. 冲突移情偏好信息是考虑决策者间移情关系计算出的残缺值参考信息, 以促进残缺值预测质量. 因此, 针对冲突的移情偏好信息选择直接剔除.

##### 1) 最小成本剔除共识模型.

基于模型 (2), 引入  $\delta_r$  识别冲突信息,  $\overline{E}_A^l$  和  $\overline{E}_D^l$  分别为  $d^l$  含有  $\delta_r$  的间接和移情偏好信息集合. 为使冲突信息数量最少, 构建冲突信息识别模型

$$\begin{aligned} & \min \sum_{l=1}^m \sum_{r \in \overline{E}_A^l, \overline{E}_D^l} \delta_r. \\ & \text{s.t. } \overline{E}_D^l, \overline{E}_A^l; \\ & \delta_r^l \in \{0, 1\}, r \in \overline{E}_A^l, \overline{E}_D^l; \\ & M_1. \end{aligned} \quad (5)$$

模型 (5) 中, 由于移情偏好信息为区间形式, 引入  $\delta_r$  后的形式与  $\overline{E}_A^l$  相同.

令  $g_z^l$  表示  $d^l$  第  $z$  条间接偏好信息的重要性, 满足  $\sum_{z \in I^l} g_z^l = 1$ ,  $I^l$  为  $d^l$  的间接偏好信息集合,  $w^l$  为决策者重要性,  $w^l g_z^l$  为  $d^l$  移除第  $z$  个信息项所需的补偿. 令 0-1 变量为  $\delta_z^l, z \in \overline{E}_A^l, l \in M$ . 冲突的局部或全局移情偏好信息集记为  $CE_D^{l*}$ . 基于此, 构建如下最小成本冲突间接偏好信息剔除模型:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{l=1}^m \sum_{z \in \overline{E}_A^l} w^l g_z^l \delta_z^l. \\ & \text{s.t. } E_D^l \setminus CE_D^{l*}, \overline{E}_A^l; \\ & \delta_z^l \in \{0, 1\}, z \in \overline{E}_A^l; \\ & M_1. \end{aligned} \quad (6)$$

若存在  $\delta_z^l = 0$ , 则相应约束条件需剔除. 由模型 (6), 所有需消除的间接偏好信息可构成集合  $CE_F^l, l \in M, E_D^l \setminus CE_D^{l*}$  和  $E_A^l \setminus CE_F^l$  分别为无冲突移情偏好信息和间接偏好信息. 冲突信息剔除共识模型为

$$\begin{aligned} & \max \varepsilon. \\ & \text{s.t. } E_D^l \setminus CE_D^{l*}, E_A^l \setminus CE_F^l; \\ & \varepsilon > 0; \\ & M_1. \end{aligned} \quad (7)$$

2) 最小成本调整共识模型.

当决策者能够忍受冲突时, 本节对冲突的直接偏好信息和间接偏好信息进行调整. 对于冲突移情偏好信息, 与上一节一样依然进行剔除.

$d^l$  可接受的调整偏差通常需要在一定的妥协范围  $\delta^l$  内. 假设  $\theta_{xy+}^l, \theta_{xy-}^l, \theta_{ij+}^l, \theta_{ij-}^l, \theta_{ij+}^{l*}, \theta_{ij-}^{l*}$  为已知直接偏好信息  $r_{xy}$ 、残缺值冲突间接偏好信息  $r_{ij}$  以及局部和全局移情偏好信息  $r_{ij}^*, r_{ij}^{**}$  调整的正负偏差, 通过最小化冲突信息调整量, 构建最大妥协模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{l=1}^m \sum_{x,y,i,j \in N} (\theta_{xy+}^l + \theta_{xy-}^l + \theta_{ij+}^l + \theta_{ij-}^l + \theta_{ij+}^{l*} + \theta_{ij-}^{l*}). \\ \text{s.t. } & r_{xy}^l = r_{xy}^{l_0} + \theta_{xy+}^l - \theta_{xy-}^l; \\ & E_S^l \begin{cases} r_{ij}^l > 0.5 + \theta_{ij+}^l - \theta_{ij-}^l; \\ r_{ij}^l < 0.5 + \theta_{ij+}^l - \theta_{ij-}^l; \\ h < r_{ij}^l + \theta_{ij+}^l - \theta_{ij-}^l < t; \end{cases} \\ & r_{ij}^{l*} = \sum_{z=1}^m w_{lz} r_{ij}^z + \theta_{ij+}^{l*} - \theta_{ij-}^{l*}; \\ & r_{ij}^{l**} = \sum_{z=1}^m n_{lz} r_{ij}^z + \theta_{ij+}^{l**} - \theta_{ij-}^{l**}; \\ & M_2 \begin{cases} \theta_{xy+}^l, \theta_{xy-}^l, \theta_{ij+}^l, \theta_{ij-}^l, \theta_{ij+}^{l*}, \theta_{ij-}^{l*} \geq 0; \\ \theta_{xy+}^l, \theta_{xy-}^l, \theta_{ij+}^l, \theta_{ij-}^l \leq \delta^l; \\ \sum_{x,y,i,j \in N} (\theta_{xy+}^l + \theta_{ij+}^l) \leq \xi_l^1; \\ \sum_{x,y,i,j \in N} (\theta_{xy-}^l + \theta_{ij-}^l) \leq \xi_l^2; \\ \xi_l^1, \xi_l^2 \geq \delta^l; \end{cases} \\ & M_1. \end{aligned} \tag{8}$$

其中:  $r_{xy}^l$  和  $E_S^l$  为已知直接偏好信息以及间接偏好信息与正负向偏差之间的关系,  $r_{xy}^{l_0}$  为未调整前的直接偏好信息,  $r_{ij}^{l*}$  和  $r_{ij}^{l**}$  分别为局部和全局移情偏好信息与正负偏差之间的关系.  $M_2$  中约束分别表示所有正负偏差的约束条件, 冲突直接偏好和间接偏好可妥协的调整范围, 上调总量或下调总量需在一定偏差范围  $\xi_l^1, \xi_l^2$  内, 上调或下调的调整量不能低于单个信息调整量的妥协极限. 识别出有冲突的移情偏好信息后并删除后, 再求解模型 (8) 即可得到所有冲突直接和间接偏好的调整量和调整方向.

在实际决策中, 说服一个人放弃一个单位的利润比接受一个单位的利润更难<sup>[22]</sup>. 假设  $c^U$  和  $c^D$  分别表示说服决策者向上和向下改变意见的单位成本,  $M_H^l$  和  $M_L^l$  分别为所有需要上调和下调的间接偏好信息集合. 构建冲突信息最小成本调整共识模型为

$$\begin{aligned} \min & \sum_{l=1}^m \sum_{x,y,i,j \in N} \left( \sum_{M_H^l} c^U (\theta_{xy+}^l + \theta_{ij+}^l) + \sum_{M_L^l} c^D (\theta_{xy-}^l + \theta_{ij-}^l) \right). \\ \text{s.t. } & M_H^l, M_L^l, E_D^l \setminus CE_D^{l*}; \\ & M_1, M_2. \end{aligned} \tag{9}$$

**定义 5** 对于求得的共识判断矩阵, 决策者对共识的满意度为

$$Q(l) = \frac{1 - \sum_{x,y,i,j \in N} (\theta_{xy+}^l + \theta_{xy-}^l + \theta_{ij+}^l + \theta_{ij-}^l)}{\sum_{x,y \in N} (r_{xy}^{l_0} + \theta_{xy+}^l - \theta_{xy-}^l) + \sum_{i,j \in N} (r_{ij}^l + \theta_{ij+}^l + \theta_{ij-}^l)}; \tag{10}$$

其中  $Q(\cdot)$  衡量的是单个决策者所做的意见调整占其整体意见的比例.

3.3.2 共识度提升模型

当共识度低而造成模型 (4) 不兼容时, 可以通过调整决策者偏好来提升群体共识度. 假设  $c_l$  表示  $d^l$  改变其偏好的单位成本,  $\gamma$  为专家调整的妥协极限,  $\varphi_l^+$  和  $\varphi_l^-$  表示信息调整的正负偏差,  $R_l$  和  $\bar{R}_l$  为单个决策者调整前和调整后的偏好,  $\bar{R}^c$  为调整后的集体偏好. 构建最小成本调整共识度提升模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \text{TC} = \sum_{l=1}^m c_l |R_l - \bar{R}_l|. \\ \text{s.t. } & \bar{R}^c = \sum_{l=1}^m w_l \bar{R}_l = \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{lj} \bar{R}_{ij}^l; \\ & |\bar{R}_l - \bar{R}^c| \leq \gamma; \\ & \text{GCI} \geq \alpha; \\ & i, j \in N, l \in M. \end{aligned} \tag{11}$$

$|\bar{R}_l - \bar{R}^c| \leq \gamma$  指调整后的决策者偏好与调整后群体偏好的偏差需在妥协极限内. 求解时将模型 (10) 转化为其线性形式. 移情网络下残缺判断矩阵群决策流程如图 1 所示.

4 针对“杜苏芮”台风灾害的应急决策案例分析

2023 年 7 月 28 日, 台风“杜苏芮”登陆福建省晋江市沿海, 是 2023 年登陆我国大陆最强的台风, 造成的直接经济损失为 149.5 亿元, 数百万人受灾. 为了减少灾害造成的损失, 应急管理部门立即启动应急响应, 根据灾区实际情况迅速确定了 5 个初步应急方案  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ . 4 位应急专家  $d^1, d^2, d^3, d^4$  需要在有限的时间内选择出最优方案. 4 位专家的初始残缺模糊残缺判断矩阵  $R_1, R_2, R_3, R_4$ 、移情

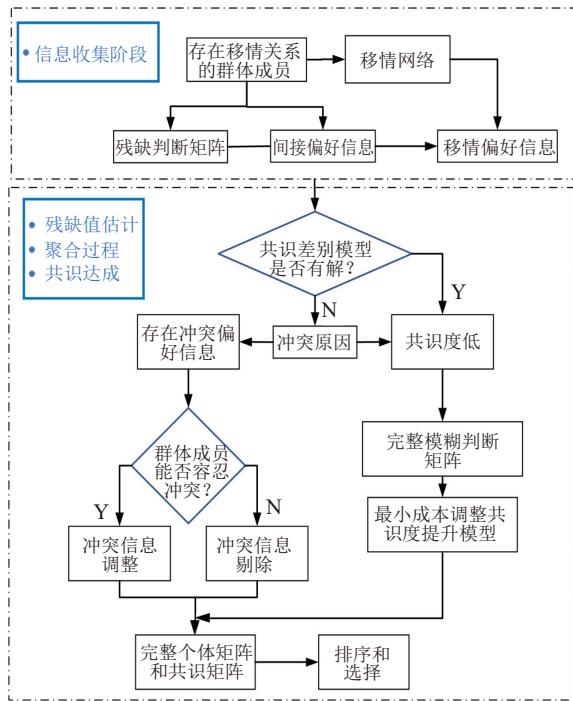


图1 决策流程

邻接矩阵  $W$  如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.3 & 0.4 & r_{15}^1 \\ 0.4 & 0.5 & 0.2 & 0.3 & r_{25}^1 \\ 0.7 & 0.8 & 0.5 & 0.6 & r_{35}^1 \\ 0.6 & 0.7 & 0.4 & 0.5 & r_{45}^1 \\ r_{51}^1 & r_{52}^1 & r_{53}^1 & r_{54}^1 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & r_{13}^2 & r_{14}^2 & r_{15}^2 \\ 0.2 & 0.5 & r_{23}^2 & r_{24}^2 & r_{25}^2 \\ r_{31}^2 & r_{32}^2 & 0.5 & 0.7 & 0.6 \\ r_{41}^2 & r_{42}^2 & 0.3 & 0.5 & 0.4 \\ r_{51}^2 & r_{52}^2 & 0.4 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & r_{13}^3 & 0.7 & 0.9 \\ 0.2 & 0.5 & r_{23}^3 & 0.4 & 0.6 \\ r_{31}^3 & r_{32}^3 & 0.5 & r_{34}^3 & r_{35}^3 \\ 0.3 & 0.6 & r_{43}^3 & 0.5 & 0.7 \\ 0.1 & 0.4 & r_{53}^3 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.5 & r_{12}^4 & r_{13}^4 & r_{14}^4 & r_{15}^4 \\ r_{21}^4 & 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.3 \\ r_{31}^4 & 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ r_{41}^4 & 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.2 \\ r_{51}^4 & 0.7 & 0.9 & 0.8 & 0.5 \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.2 & 0.5 & 0.1 \\ 0.4 & 0.1 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.6 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

4 位专家间接偏好信息为

$$d^1 : x_1 \succ x_5, x_2 \succ x_5, x_3 \prec x_5, x_4 \succ x_5;$$

$$d^2 : x_1 \succ x_3, x_1 \prec x_4, x_1 \prec x_5, x_2 \succ x_3, \\ x_2 \prec x_4, (x_2, x_5) = [0.2, 0.7];$$

$$d^3 : x_1 \prec x_3, x_2 \prec x_3, x_3 \succ x_4, x_3 \prec x_5;$$

$$d^4 : x_1 \succ x_2, x_1 \succ x_3, x_1 \succ x_4, \\ (x_1, x_5) = [0.1, 0.6].$$

以上每条间接偏好信息对应的权重分别为

$$d^1 : 0.2, 0.4, 0.15, 0.25,$$

$$d^2 : 0.1, 0.35, 0.05, 0.2, 0.1, 0.2,$$

$$d^3 : 0.1, 0.3, 0.5, 0.1,$$

$$d^4 : 0.3, 0.15, 0.25, 0.3.$$

根据决策者间全局移情权重、直接偏好信息及间接偏好信息, 可得每位专家残缺值移情偏好信息.

令共识度阈值  $\alpha = 0.8$ ,  $w_1 = 0.3$ ,  $w_2 = 0.2$ ,  $w_3 = 0.1$ ,  $w_4 = 0.4$ . 求解模型 (4) 得知无可行解, 故利用模型 (5) 进行冲突识别. 若专家们不能够忍受冲突, 则通过模型 (6) 求得冲突间接偏好信息最小剔除成本为 0.815. 随后求解模型 (7), 求得  $\varepsilon = 0.0115$ , 表明剔除完所有冲突信息后可获得完整个体矩阵和群共识矩阵. 此时群体共识度为  $\alpha = 0.94$ , 5 个应急方案排序为  $x_5 \succ x_1 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$ . 若专家们能够忍受冲突, 则对冲突信息进行调整. 令  $\xi_1^1 = \xi_2^1 = \xi_3^1 = \xi_4^1 = 1$ ,  $\xi_1^2 = \xi_2^2 = \xi_3^2 = \xi_4^2 = 1$ , 且  $\delta^1 = \delta^2 = \delta^3 = \delta^4 = 0.5$ . 通过模型 (8) 求得总的调整量为 2.5135. 剔除冲突移情偏好信息后再次求解模型 (8), 求得关于冲突直接和间接偏好信息的最小总调整量为 1.3, 此时识别出只需下调部分偏好信息, 包括  $r_{12}^{20}, r_{34}^{20}, r_{35}^{20}, r_{25}^1, r_{35}^1, r_{14}^2, r_{23}^2, r_{13}^3, r_{35}^3$ . 令每个决策者的下调成本为  $(c_1^D, c_2^D, c_3^D, c_4^D)^T = (3, 4, 2, 5)^T$ , 求解模型 (9), 得到最小调整成本为 4.1, 共识度为 0.87. 此时冲突信息调整量受调整成本的影响发生变化, 最后可获得 5 个可选方案排序为  $x_5 \succ x_1 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$ , 与模型 (7) 结果相同.

为了验证模型 (10), 以最小剔除成本共识模型求解的完整模糊判断矩阵为例. 当共识度阈值设置为 0.95 时, 该模型无解, 模型中不存在冲突信息, 这是由于共识度低于共识阈值. 假设每位专家调整成本为 2, 求解模型 (10) 得到最小调整成本为 8.5442. 求得群体共识矩阵为

$$R^c = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7073 & 0.4495 & 0.5495 & 0.6206 \\ 0.2927 & 0.5 & 0.2482 & 0.3482 & 0.4193 \\ 0.5505 & 0.7518 & 0.5 & 0.6 & 0.6711 \\ 0.4505 & 0.6518 & 0.4 & 0.5 & 0.5711 \\ 0.3794 & 0.5807 & 0.3289 & 0.4289 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

此时应急方案排序为  $x_3 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_5 \succ x_2$ , 建议选择应急方案  $x_3$ .

### 5 仿真与对比分析

#### 5.1 仿真分析

##### 5.1.1 移情偏好信息和间接偏好信息的影响

从决策者偏好角度考虑, 移情偏好信息的加入首先影响残缺值区间, 进一步影响判断矩阵的补全结果和共识偏好. 基于此, 本节探讨共识模型中决策者额外信息结构对共识的影响, 主要包括对本文构建的模型 (7)、(9) 和 (10)(分别记为 A, B, C) 中共识水平、信息剔除量或调整量以及方案排序的影响. 具体内容如表 1 所示. 由表 1 可知, 模型 (7) 融入移情

偏好信息后, 共识水平得到有效提升. 此外, 间接信息剔除的数量也增加了一条, 这是由于新信息的加入使得间接信息需要与其兼容, 约束条件的增多增加了冲突信息数量. 不同信息集下最优方案从  $x_1, x_3$  变为  $x_5$ . 在模型 (9) 中, 移情偏好对共识水平、调整量及方案排序并未产生显著影响. 此时方案排序虽不变, 但矩阵中每两个方案的对比值发生了变动. 这是因为冲突调整共识模型需要删除冲突的移情偏好. 当不存在移情偏好时, 也就意味着不存在冲突移情信息. 针对共识度低引起的不兼容问题, 同时考虑两类信息可减少冲突信息调整量, 并提升共识达成效率.

表1 移情偏好信息和间接偏好信息对共识模型的影响

信息结构	共识水平			调整量			剔除量			方案排序		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
仅含间接偏好信息	0.92	0.87	0.95	—	1.3	10.24	5	—	—	$x_1 \sim x_3 \succ x_4 \succ x_5 \succ x_2$	$x_5 \succ x_1 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$	$x_3 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_5 \succ x_2$
含有两类信息	0.94	0.87	0.95	—	1.3	8.54	6	—	—	$x_5 \succ x_1 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$	$x_5 \succ x_1 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$	$x_3 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_5 \succ x_2$

##### 5.1.2 残缺值数量的影响

本节通过增加第 4 节应急案例中每个判断矩阵中残缺值的数量, 分析缺失值数量增加对本文所构建模型的影响. 当决策者可以忍受冲突时, 通过模型 (8) 和 (9) 进行仿真, 比较结果如表 2 所示. 表 2 中的残缺值数量指的是 4 个矩阵中残缺值的总和. 可以看出, 缺失值的增加使冲突信息也随之增多, 进而导致最小调整量变大. 最小调整成本却呈现出减少的趋势, 这是因为调整成本的差异导致系统倾向于选择成本较小的信息进行调整. 在这种情况下, 共识度的提升表明, 尽管缺失信息增多, 引入间接和移情偏好信息后, 通过有效的冲突调整, 仍然能够提升整体的共识水平.

表2 残缺值数量变化的影响

残缺值数量	调整量	共识度	调整成本	方案排序
18	1.3	0.87	4.1	$x_5 \succ x_1 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$
30	1.12	0.91	3.3	$x_5 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_2 \succ x_3$

当决策者不能忍受冲突时, 通过模型 (5) 求出冲突信息总量由 12 条增加为 16 条. 此外, 共识水平由原来的 0.9395 下降到 0.8766, 这是由于直接偏好信息的减少使得偏好更加不确定, 信息剔除数量增加导致群体共识度降低. 同时, 群体共识偏好的变化影响了方案排序结果.

##### 5.1.3 参数敏感性分析

1) 参数  $\delta, \xi$  对共识水平和总调整量的影响.

影响结果如图 2 和图 3 所示. 此处设定每个决策者的  $\delta, \xi$  值相同. 随着参数  $\delta, \xi$  值的增大, 偏好信息总的调整量会和共识水平都呈现下降趋势, 这是由于妥协极限越大使得可供调整冲突信息的选择增多, 同时调整量的变大会提升共识水平. 当所有决策者的  $\xi$  在  $0.605 \leq \xi \leq 0.625$  逐渐增加时, 总的调整

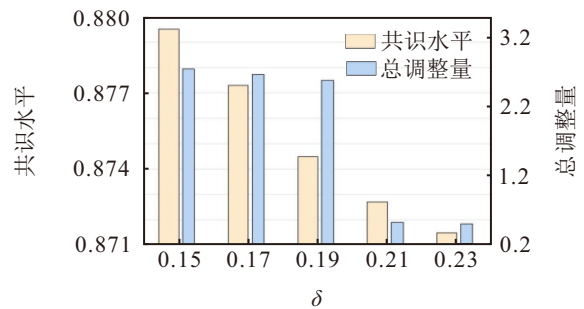


图2  $\delta$ 对共识水平和总调整量的影响

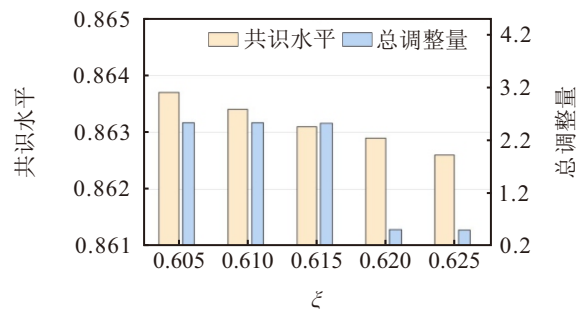


图3  $\xi$ 对共识水平和总调整量的影响

量下降,直到某个特定值.当 $\xi$ 较小时,决策者会选择向上调整自己的意见以减少总调整量;而调整空间相对大时,决策者会选择向下调整自己的意见.此外,还发现, $\delta, \xi$ 增大使冲突移情偏好剔除量呈下降趋势,这是由于妥协范围的增大使得总调整量下降.

2) 参数 $\delta, \xi$ 对单个决策者满意度的影响.

影响结果如图4和图5所示.由图4可以看出, $\delta$ 的增大对 $d^4$ 的个体满意度未产生影响,这是因为 $d^4$ 在不同 $\delta$ 下无冲突信息而无需进行调整,但 $d^1, d^2, d^3$ 的个体满意度呈上升趋势,这是由于随着 $\delta$ 的增大使得其调整量减少. $\xi$ 的变化对 $d^1, d^3, d^4$ 个体满意度没有影响,但 $d^2$ 的个体满意度随之增加.以上分析表明, $\delta, \xi$ 的变化可能只会对部分决策者的个体满意度产生影响.

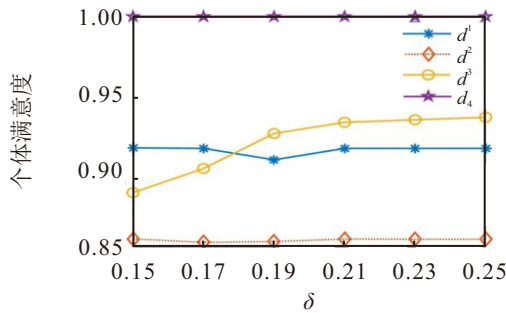


图4  $\delta$ 对个体满意度的影响

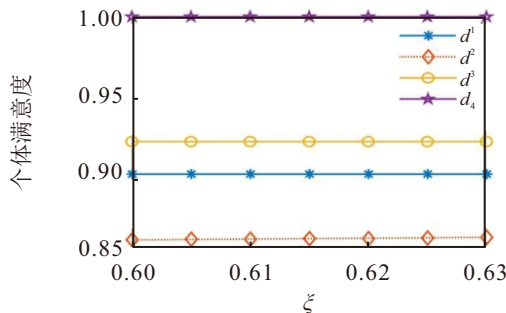


图5  $\xi$ 对个体满意度的影响

5.2 对比分析

将本文方法与文献[15-16]方法进行定量比较.为获得更加直观的比较结果,以文献[15]中的 $P^1, P^2, P^3, P^4$ 为初始判断矩阵,此处假设决策者间的移情网络以及参数假设与本案例相同.4个判断矩阵中的残缺值间接偏好信息数学表达式为 $p_{14}^1 > 0.5, p_{24}^1 > 0.5, p_{34}^1 < 0.5, p_{13}^3 < 0.5, p_{24}^3 > 0.5, p_{14}^4 < 0.5$ .由于初始矩阵中的已知值不满足加性一致性,可通过本文的最小成本调整模型进行计算.文献[15]方法与本文方法对比结果如表3所示.

由表3可看出,文献[15]通过多次对单个矩阵进行一致性迭代来获得符合一致性指数阈值的完整个体矩阵.而本文研究方法在充分考虑额外信息的

表3 对比结果

文献	一致性迭代次数	一致性指数	共识度	方案排序
文献[15]	4	$CI^1 = 0.95$ $CI^2 = 0.89$ $CI^3 = 0.95$ $CI^4 = 0.89$	0.92	$x_2 \succ x_1 \succ x_4 \succ x_3$
本文方法	—	完全一致	0.96	$x_2 \succ x_1 \succ x_3 \succ x_4$

基础上,将加性一致性融入共识达成过程,不需要多次迭代,且可有效提升群体共识度.此外,本文方法适用于初始矩阵满足或不满足加性一致性两种情况.

为了进一步凸显本文在处理不一致和信息缺失方面的优势,以本案例中的 $R_1$ 为例,利用文献[16]的方法对其进行补全.该方法推导出的方案权重转换形式为

$$\begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 2.5 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 2.5 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 2.5 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 2.5 \\ 2.5 & 2.5 & 2.5 & 2.5 & 2.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.8 \\ 1.4 \\ 2.6 \\ 2.2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

通过求解线性方程组,5个应急方案权向量为 $w = (0.18, 0.14, 0.26, 0.22, 0)$ .然而求得的残缺值 $r_{35}^1, r_{45}^1$ 不在区间 $[0, 1]$ 内,假设 $r_{ij} = g_{ij} + 1$ ,最后可得完整矩阵.以上计算过程也表明,当缺失值结果超过 $[0, 1]$ 时,缺失值的调整方法更加主观.本文方法包含了反应决策者自身偏好的间接偏好信息以及考虑移情关系的移情偏好信息,使得缺失值的估计更加可靠.除了以上定量分析,不同研究方法定性比较结果如表4所示.

表4 不同方法对比

方法	缺失值估计方法	额外信息挖掘	过程结合	冲突识别
文献[19]	提出新的充分条件	×	×	×
文献[7]	利用决策者权重	×	×	×
文献[17]	构建目标规划模型	×	×	×
文献[20]	提出基于优先值的算法	×	×	×
文献[15]	对单个矩阵一致性迭代	×	√	×
本文方法	有序回归估计	√	√	√

已有研究主要基于一致性条件构建补全模型,忽视了决策者间的社会网络关系、额外信息挖掘以及共识框架的整体性.本文方法不仅弥补了信息量不足,还将矩阵补全与共识达成相结合,使补全后的个体和共识判断矩阵符合加性一致性,避免进行多次一致性校正.此外,针对传统研究中冲突反馈机制的不足,本文提出一个结合最小成本剔除和调整共识模型的新共识框架,实现了与决策者的有效互动.

## 6 结论

在突发事件应急决策过程中, 针对信息不足的残缺判断矩阵群决策问题, 本文考虑决策者间的移情关系, 在融入间接偏好信息和移情偏好信息的基础上, 提出了将残缺值估计与共识达成相结合的应急决策方法. 这种基于有序回归的偏好学习方法考虑所有决策者信息构成的整体偏好结构, 将一致性控制贯穿整个过程, 提升了应急决策质量和效率. 针对共识达成过程中的冲突信息, 通过提出冲突信息剔除和冲突信息调整两种反馈策略, 准确识别了需剔除的信息或冲突信息的可调整的上下偏差, 有效考虑了决策者意愿并降低了共识成本.

本文所提出方法仍存在一定的局限性. 本文提供的间接偏好示例信息有限, 因此可以进一步探索间接偏好的多样化形式, 并将其应用于本文共识模型范式中. 其次, 本文未能识别更具稳定性的信息, 未来研究可加入鲁棒有序回归的思想, 以获得更具兼容性的决策结果.

### 参考文献 (References)

- [1] Chang K H, Wu Y Z, Su W R, et al. A simulation evacuation framework for effective disaster preparedness strategies and response decision making[J]. *European Journal of Operational Research*, 2024, 313(2): 733-746.
- [2] 王彪, 薛源, 陈萍萍, 等. 基于前景理论的多阶段多情景多部门应急决策的矩阵方法研究[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 655-664.  
(Wang B, Xue Y, Cheng P P, et al. Matrix approach for multi-stage, multi-scenario, and multi-department emergency decision-making based on prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(2): 655-664.)
- [3] Chang K H. Combining subjective and objective weights considerations to solve the emergency location selection problems under spherical fuzzy environments[J]. *Applied Soft Computing*, 2024, 153: 111272.
- [4] Saaty T L. *The analytic hierarchy process*[M]. New York: McGraw, 1980.
- [5] Zhu Y C, Xu X H, Pan B. A method for the dynamic collaboration of the public and experts in large-scale group emergency decision-making: Using social media data to evaluate the decision-making quality[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 176: 108943.
- [6] Chen X Y, Gong Z W, Wei G. On incomplete matrix information completion methods and opinion evolution: Matrix factorization towards adjacency preferences[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 133: 108140.
- [7] 楚俊峰, 刘议聪, 王应明. 考虑社会网络邻接关系的群体判断矩阵决策方法[J]. *控制与决策*, 2021, 36(4): 983-992.  
(Chu J F, Liu Y C, Wang Y M. Group preference relations decision making approach based on social network adjacency relations[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(4): 983-992.)
- [8] 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.  
(Hu Y J, Zhu J J. Group consensus decision-making method for trust networks considering quantum interference[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(12): 4007-4016.)
- [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] Chen J Z, Liu B, Zhang D L, et al. Social decision-making in a large-scale MultiAgent system considering the influence of empathy[J]. *Applied Intelligence*, 2023, 53(9): 10068-10095.
- [11] Salehi-Abari A, Boutilier C, Larson K. Empathetic decision making in social networks[J]. *Artificial Intelligence*, 2019, 275: 174-203.
- [12] Meng M J, Wang Y M. Evaluation model of environmental governance capacity based on social network in language environment[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022, 31(2): 1757-1768.
- [13] Song H H, Gong Z W, Forrest J Y, et al. Social network utility consensus model with empathic and fuzzy interactions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2023, 175: 108904.
- [14] 夏璇, 巩在武. 移情网络下考虑间接偏好的残缺判断矩阵有序回归建模研究[J]. *系统科学与数学*, <https://link.cnki.net/urlid/11.2019.O1.20240820.1124.012>.  
(Xia X, Gong Z W. Research on ordinal regression modeling of incomplete preference relations considering indirect preferences in empathetic network[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, <https://link.cnki.net/urlid/11.2019.O1.20240820.1124.012>.)
- [15] Fan S, Liang H M, Pedrycz W, et al. Integrating incomplete preference estimation and consistency control in consensus reaching[J]. *Information Fusion*, 2024, 106: 102268.
- [16] Wang D Y, Huang J, Xu Y J, et al. Water-Energy-Food nexus evaluation using an inverse approach of the graph model for conflict resolution based on incomplete fuzzy preferences[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 120: 108703.
- [17] Meng F Y, Chen X H. A new method for group decision making with incomplete fuzzy preference relations[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 73: 111-123.
- [18] Wu S W, Zhang G Q. Incomplete interval-valued probabilistic uncertain linguistic preference relation in group decision making[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 243: 122691.

- [19] Herrera-Viedma E, Chiclana F, Herrera F, et al. Group decision-making model with incomplete fuzzy preference relations based on additive consistency[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, Cybernetics*, 2007, 37(1): 176-189.
- [20] Ma Z M, Xu Z S, Fu Z W, et al. Deriving priorities based on representable uninorms from fuzzy preference relations[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2023, 458: 201-220.
- [21] Gong Z W, Xu X X, Zhang H H, et al. The consensus models with interval preference opinions and their economic interpretation[J]. *Omega*, 2015, 55: 81-90.
- [22] Cheng D, Zhou Z L, Cheng F X, et al. Modeling the minimum cost consensus problem in an asymmetric costs context[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 270(3): 1122-1137.
- [23] 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.
- [24] Arcidiacono S G, Corrente S, Greco S. as simple as possible but not simpler in Multiple Criteria Decision Aiding: The robust-stochastic level dependent Choquet integral approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 280(3): 988-1007.
- [25] Jacquet-Lagrèze E, Siskos Y. Preference disaggregation: 20 years of MCDA experience[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(2): 233-245.
- [26] Sun J P, Gong Z W, Zhang D, et al. A robust ordinal regression feedback consensus model with dynamic trust propagation in social network group decision-making[J]. *Information Fusion*, 2023, 100: 101952.
- [27] Tanino T. Fuzzy preference orderings in group decision making[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1984, 12(2): 117-131.
- [28] Xu Z S. Incomplete complementary judgment matrix[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2004, 24(6): 93-97.
- [29] Mousseau V, Figueira J, Dias L, et al. Resolving inconsistencies among constraints on the parameters of an MCDA model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 147(1): 72-93.
- [30] Zhou K, Gong Z W, Chen X Q, et al. Determination of a representative collective value function through a value function-based consensus-reaching process[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2024, 33(5): 1089-1113.

#### 作者简介

夏璇 (1992-), 女, 博士生, 主要研究方向为决策分析、偏好学习, E-mail: [xiaxuan1022@163.com](mailto:xiaxuan1022@163.com);

巩在武 (1975-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为决策分析、偏好学习、应急管理, E-mail: [zwgong26@163.com](mailto:zwgong26@163.com).