

·应急管理·

群体共识决策的研究进展与展望



□张恒杰¹ 王芳¹ 董庆兴² 巩在武³ 吴坚⁴ 吴志彬⁵ 许叶军⁶
张震⁷ 董玉成⁵

[1. 河海大学 南京 211100; 2. 华中师范大学 武汉 430079; 3. 南京信息工程大学 南京 210044; 4. 上海海事大学 上海 201306; 5. 四川大学 成都 610065; 6. 天津大学 天津 300072; 7. 大连理工大学 大连 116024]

[摘要] 【目的/意义】群体共识决策通过协调决策者观点之间的冲突, 寻求各决策方广泛支持的群体方案, 是群体决策领域的热点研究问题。对群体共识决策的研究进行系统地梳理并探讨其未来的研究方向, 有助于促进群体共识决策研究的进一步发展。【设计/方法】首先, 提炼一般的群体共识决策框架, 并对不同环境下的群体共识决策范式进行综述和讨论。然后, 分析群体共识决策的典型应用。最后, 对现有研究进行评述与展望。【结论/发现】主要存在识别-方向和优化两种共识规则。基于这两种共识规则, 国内外学者从不同的视角构建了传统和复杂决策环境下的群体共识决策模型, 这些模型在失效模式分析、供应链管理、水资源管理和应急/灾害管理等领域都取得了良好的应用效果。此外, 对决策者的行为进行深入研究并结合偏好学习等人工智能技术对群体共识决策进行优化设计将是非常有前景的研究方向。

[关键词] 群体决策; 共识过程; 反馈机制; 共识规则; 优化模型

[中图分类号] C934

[文献标识码] A

[DOI] 10.14071/j.1008-8105(2021)-1002

Consensus in Group Decision Making: Research Progress and Prospect

ZHANG Heng-jie¹ WANG Fang¹ DONG Qing-xing² GONG Zai-wu³ WU Jian⁴
WU Zhi-bin⁵ XU Ye-jun⁶ ZHANG Zhen⁷ DONG Yu-cheng⁵

(1. Hohai University Nanjing 211100 China; 2. Central China Normal University Wuhan 430079 China; 3. Nanjing University of Information Science and Technology Nanjing 210044 China; 4. Shanghai Maritime University Shanghai 201306 China; 5. Sichuan University Chengdu 610065 China; 6. Tianjin University Tianjin 300072 China; 7. Dalian University of Technology Dalian 116024 China)

Abstract [Purpose/Significance] Consensus in group decision making, committed to finding solutions that every decision maker actively supports by managing the conflict of opinion, is a much-discussed research question in group decision making (GDM). To promote the development of the consensus in group decision making, it is necessary to provide a comprehensive review on the development of the consensus in group decision making and discussion on its future research direction. [Design/Methodology] In the first place, this paper presents the general framework of the consensus in group decision making and analyzes its research paradigm in different

[收稿日期] 2021-02-09

[基金项目] 国家自然科学基金 (71801081, 71971135, 71971039, 71871149)。

[作者简介] 张恒杰 (1988-) 男, 博士, 河海大学商学院教授; 王芳 (2000-) 女, 河海大学商学院硕士研究生; 董庆兴 (1988-) 男, 博士, 华中师范大学信息管理学院副教授; 巩在武 (1975-) 男, 博士, 南京信息工程大学管理工程学院教授; 吴坚 (1978-) 男, 博士, 上海海事大学经济管理学院教授; 吴志彬 (1982-) 男, 博士, 四川大学商学院研究员; 许叶军 (1979-) 男, 博士, 天津大学管理与经济学院教授; 张震 (1986-) 男, 博士, 大连理工大学经济管理学院副教授。

[通信作者] 董玉成 (1979-) 男, 博士, 四川大学商学院教授. E-mail: ycdong@scu.edu.cn.

environments. Secondly, this paper analyzes some typical applications of consensus in group decision making. Finally, some current research reviews and perspectives are discussed. [Findings/Conclusions] This paper finds that there are two main consensus rules, namely identification rule and direction rule, optimization-based rule, and several consensus decision making models under traditional and complex decision-making environments are proposed based on the above two consensus rules. These models applied in failure model effectiveness analysis, supply chain management, water resource management, and emergency/disaster management have demonstrated a good result. Moreover, the in-depth study of decision makers' behaviors and the optimal design of consensus in group decision making that incorporates artificial intelligence such as preferential learning is a very promising research direction.

Key words group decision making; consensus process; feedback mechanism; consensus rule; optimization model

引言

群体决策研究如何将多个决策者的观点融合成群体观点^[1-5]。群体决策理论早期的研究大多关注投票机制的设计和投票悖论。Arrow、Sen以及Simon等多位诺贝尔经济学奖获得者的研究工作极大地推动了群体决策理论的发展和应用。群体决策理论和方法在政治、经济、文化和军事等各个领域的管理活动中都有非常广泛的应用,对管理决策、金融决策、投资决策、军事决策等实际问题均有重要的指导意义^[6-10]。

由于受到事物本身不确定性等客观因素和决策者的知识结构、判断水平等主观因素的影响,决策者的观点往往会存在较大分歧^[11-14]。传统的群体决策模型聚焦于将个体观点融合为群体观点,忽略了决策者之间的共识水平。在现实生活中,许多决策问题都需要各利益方达成共识才能得到有效解决^[15-16],例如,供应商选择问题^[17]以及拆迁补偿问题^[18]等。群体共识决策致力于协调决策者观点之间的冲突,寻求各决策方广泛支持的群体方案,成为近年来群体决策领域的热点研究问题。此外,群体交互和合作行为的演化也被列为《Science》杂志创刊125周年之际公布的125个重大科学问题之一。在群体决策中使用共识机制有以下优点^[19]:(1)有利于群体方案的顺利实施;(2)有利于在组织内部构建更加和谐的人际关系。

关于群体共识决策的研究可以追溯至20世纪40、50年代。French及合作者(参见Coch & French^[20]和French^[21])首次使用数学模型对群体共识决策进行了研究。Coch和French^[20]的研究集中于两点:个体为什么会对观点调整产生抵触,以及如何克服个体的抵触。French^[21]利用图论和矩阵运算等数学工具分析了决策者的人际关系、群体成员的沟通模式以及成员的社会影响力对群体共识决策的影响。DeGroot^[22]和French^[23]从概率论的角度对群体共识的达成做出了更为详细的描述。Cook等^[24]提出了Borda-

Kendall方法来获得共识的方案排序。《Synthese》杂志在1985年专门出版了专辑来讨论群体共识达成问题^[25]。共识测量是群体共识决策中的一个关键要素^[15,26],使用不同的共识测量方法会得到不同的群体共识决策模型。传统的群体共识决策模型多采用“硬(Hard)”共识测量。在“硬”共识测量中,共识只有两个状态:0(不共识或部分共识)和1(完全共识)^[27]。然而,在实际的群体共识决策中,达成完全共识是非常困难且没有必要的。因此,“软(Soft)”共识测量通常在群体共识决策中被广泛使用。Loewer和Laddaga^[28]以及Kacprzyk^[29]提出了“软”共识测量方法。基于“软”共识测量,国内外学者提出了大量的群体共识决策模型^[30-35]。此外,群体共识决策的理论研究也促进了非盈利性组织和新商业模式的出现。例如,著名的共识建立研究所(Consensus Building Institute, CBI, <https://www.cbi.org/>),致力于解决全球政府、组织及个体间的矛盾和冲突。美国Community X Inc.建立了“共识网络”,并出版了学术专著《On Conflict and Consensus》^[36]。西班牙Martínez教授和Herrera教授^[37]团队在开发的群体决策支持系统(AFRYCA software framework, <http://sinbad2.ujaen.es/afryca/>)中应用了群体共识决策机制,并取得了良好的效果。

本文对群体共识决策的研究范式和进展进行系统地梳理和归纳分析,以便相关学者对群体共识决策有一个清晰的认识,并促进其在实际中的应用。其主要工作如下:首先,通过对群体共识决策相关文献的系统梳理,提炼群体共识决策的研究范式和一般的群体共识决策框架,并分析群体共识决策中常用的两种共识规则,即:识别-方向共识规则(Identification rule and direction rule, IR-DR)和优化共识规则(Optimization-based rule, OR)。接下来,分别对传统决策环境和复杂决策环境下基于IR-DR和OR的群体共识决策的研究进展进行综述,并梳理群体共识决策在实际问题中的应用。最后,对群体共识决策研究中存在的问题及面临的挑战进

行分析, 并探讨未来的研究方向。

一、群体决策与共识决策框架

(一) 群体决策

群体决策的研究已有两个多世纪, 最早的学者包括Borda^[38]和Condorcet^[39], 他们对投票选举问题进行了研究。随后, Arrow和Simon的研究工作极大地推动了群体决策理论的发展。一方面, Arrow^[40]在其著作《社会选择和个人价值》中提出了著名的不可能性定理, 一些学者遵循Arrow的研究思路对其进行了深化和拓展。另一方面, 根据Simon^[41]提出的“有限理性原则”和“满意标准”, 一些学者对群体决策中决策者的非理性行为进行了深入研究, 并逐渐形成了群体行为决策学派。群体决策的核心问题是研究如何使用某种集结机制将多个决策者 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 的观点融合成群体观点, 其研究范式可以表示如下:

$$F(o^1, o^2, \dots, o^m) = o^c \quad (1)$$

其中, o^k 表示决策者 $d_k (k=1, 2, \dots, m)$ 的观点, o^c 是群体观点。 F 是集结函数, 即群体决策机制。

在群体决策中, 决策者的观点之间往往会有很大的分歧。通过使用上述决策范式(式(1))强制集结个体观点形成的群体观点往往缺乏决策个体的广泛认可, 从而影响决策效果以及群体方案的顺利实施。为此, 群体共识决策模型被提出并应用于协调决策者观点之间的冲突, 寻求各决策方广泛支持的决策方案。

(二) 群体共识决策框架

与传统的群体决策范式相比, 群体共识决策引入了反馈调整机制, 允许决策者在决策过程中调整自己的观点^[30]。群体共识决策的研究范式可以表示如下:

$$\begin{cases} (o^1, o^2, \dots, o^m) \rightarrow (\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) & (a) \\ CL(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) \geq \alpha & (b) \\ F(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) = \bar{o}^c & (c) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\bar{o}^k (k=1, 2, \dots, m)$ 表示决策者 d_k 调整后的观点, $\bar{o}^c$ 表示调整后的群体观点, $CL(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m)$ 表示 $\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m$ 之间的共识水平; 式(a)表示反馈过程中观点的协商及调整过程; 式(b)表示 $\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m$ 之间的共识水平是可接受的, 其中, α 是共识阈值。

基于上述研究范式(即式(2)), 一般的群体共识决策框架^[42]可以用图1表示, 主要包括如下步骤: (1) 决策者使用偏好结构表达自己的观点; (2) 使用集结方法将个体观点集结成为临时

的群体观点; (3) 计算决策者之间的共识水平, 并判断其是否可接受; (4) 使用反馈机制生成观点修改建议, 并引导决策者进行观点调整。不断重复以上过程, 直到群体达成共识。

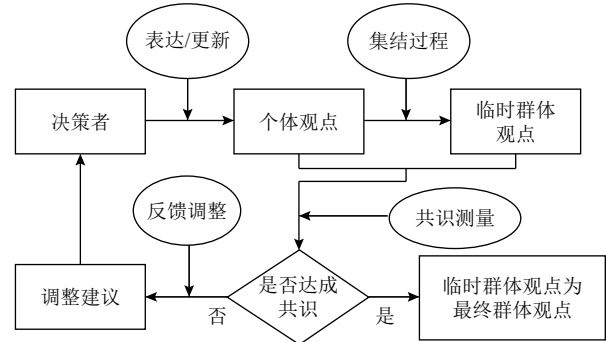


图1 群体共识决策框架^[42]

在群体共识决策中, 反馈调整过程主要产生决策者观点修改的建议, 引导决策者进行观点调整。群体共识决策的反馈调整大多基于以下两种共识规则:

1. IR-DR^[42]: IR用于识别出共识水平较差的决策者、决策方案、评价/偏好元素等, DR用于产生观点调整的方向(增大、减小或不变)。

2. OR^[43-44]: 考虑到群体共识决策问题中的共识资源(如时间等)是有限的, OR主要用于最小化观点调整前后的距离或者观点调整的成本。

基于上述两种共识规则, 不同的学者从不同视角建立了群体共识决策模型(Group consensus decision model, GCDM), 其主要包括: 传统/复杂决策环境下基于IR-DR的GCDM(记作IR-DR-GCDM); 传统/复杂决策环境下基于OR的GCDM(记作OR-GCDM)。

二、基于识别-方向共识规则的群体共识决策模型

令 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 和 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 分别表示决策者集合和备选方案集合, $V^k = (v_{ij}^k)_{n \times t}$ 和 $V^c = (v_{ij}^c)_{n \times t}$ 分别表示决策者 d_k 提供的决策矩阵和群体决策矩阵。在多属性群体决策中, v_{ij}^k (或 v_{ij}^c)表示方案 x_i 在第 j 个属性下面的评价价值; 在基于偏好关系的群体决策中, v_{ij}^k (或 v_{ij}^c)表示方案 x_i 与方案 x_j 相比的重要程度, 并且 $n=t$ 。为方便起见, 令 $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $T = \{1, 2, \dots, t\}$ 。此外, 令 $CL(d_k)$ 、 $CL(x_i)$ 和 $CL(v_{ij})$ 分别表示决策者 d_k 、方案 x_i 和决策矩阵中 (i, j) 位置上元素的共识水平, $\hat{V}^k = (\hat{v}_{ij}^k)_{n \times t}$ 表示决策者 $d_k (k \in M)$ 调整后的决策矩阵。本节接下来分别对IR和DR共识规则进行介绍^[42]。

1. IR主要用于识别出共识程度较差的决策者、方案和元素:

(1) 识别共识程度较差的决策者: $ID = \{d_k \in D | CL(d_k) < \alpha\}$;

(2) 识别共识程度较差的决策方案: $IX = \{x_i \in X | CL(x_i) < \alpha\}$;

(3) 识别共识程度较差的元素: $IE = \{v_{ij} | CL(v_{ij}) < \alpha, i \in N, j \in T\}$ 。

2. DR主要为IR识别出来的评价/偏好值提供调整方向:

(1) 针对IR识别出来的决策者 $d_k \in ID$, 其调整之后的决策矩阵 $\tilde{V}^k = (\tilde{v}_{ij}^k)_{n \times t}$ 应满足 $\tilde{v}_{ij}^k \in [\min\{v_{ij}^k, v_{ij}^c\}, \max\{v_{ij}^k, v_{ij}^c\}] (i \in N, j \in T)$; 对于未被IR识别出来的决策者 $d_k \notin ID$, 其决策矩阵保持不变。

(2) 针对IR识别出来的方案 $x_i \in IX$, 其调整之后的决策矩阵 $\tilde{V}^k = (\tilde{v}_{ij}^k)_{n \times t}$ 应满足 $\tilde{v}_{ij}^k \in [\min\{v_{ij}^k, v_{ij}^c\}, \max\{v_{ij}^k, v_{ij}^c\}] (k \in M, j \in T)$; 对于未被IR识别出来的方案 $x_i \notin IX$, 决策者关于其评价/偏好信息保持不变。

(3) 针对IR识别出来的元素 $v_{ij} \in IE$, 其调整之后的决策矩阵 $\tilde{V}^k = (\tilde{v}_{ij}^k)_{n \times t}$ 应满足 $\tilde{v}_{ij}^k \in [\min\{v_{ij}^k, v_{ij}^c\}, \max\{v_{ij}^k, v_{ij}^c\}] (k \in M)$; 对于未被IR识别出来的元素 $v_{ij} \notin IE$, 决策者关于其评价/偏好信息保持不变。

上面介绍的IR-DR为基本的共识规则, 这些共识规则也可以组合使用。基于IR-DR, 学者们提出了大量的群体共识决策模型。本节接下来将分别对传统决策环境下的IR-DR-GCDM研究进展和复杂决策环境下的IR-DR-GCDM研究进展进行综述。

(一) 传统决策环境下的IR-DR-GCDM

传统决策环境下的IR-DR-GCDM主要包括: 基于不同偏好结构的IR-DR-GCDM、考虑个体一致性的IR-DR-GCDM、多属性IR-DR-GCDM和考虑行为的IR-DR-GCDM。

1. 基于不同偏好结构的IR-DR-GCDM

在群体共识决策中, 偏好序、效用值、偏好关系等偏好结构被用于表达决策者对备选方案的评价。Bryson^[45]和Altuzarra等^[46]对AHP (Analytic Hierarchy Process) 群体决策中的共识达成问题进行了研究。Pérez等^[47]提出了基于加性偏好关系的群体共识决策模型。Cabrerizo等^[48]构建了不完全信息下基于非平衡语言术语集的群体共识决策模型。张世涛等^[49]提出了基于重要度引导、偏好识别和修正的多粒度语言共识决策模型。Herrera-Viedma等^[42]提出了基于偏好信息转化函数的方法来处理异构偏好群体共识决策问题。Choudhury等^[50]提出了一个基于多智能体系统的协商模型, 来解决异构偏好环

境下的制造企业的技术选择问题。Chen等^[51]对基于异构偏好信息的群体共识决策模型进行了系统总结和梳理。

2. 考虑个体一致性的IR-DR-GCDM

在基于偏好关系的群体决策中, 个体一致性用于确保决策者提供的偏好关系是没有矛盾并且是合乎逻辑的。Aguarón等^[52]提出了基于精确一致性/共识矩阵的方法来处理AHP群体决策中的个体一致性和群体共识。Herrera等^[53]以及Wu和Xu等^[54]提出了两阶段方法来处理群体共识和个体一致性, 其中第一阶段用于管理个体一致性, 第二阶段用于提高群体共识水平。Dong等^[55]提出了能够同时管理AHP群体决策中个体一致性和群体共识的决策模型。

3. 多属性IR-DR-GCDM

Kim等^[56]提出了一个交互式的共识达成算法用于解决基于不完全评价信息的多属性群体决策问题。Xu^[57], 徐迎军和李东^[58]提出了基于自动化的共识决策模型来解决多属性群体决策问题。Ervural和Kabak^[59]提出了基于累积信念度的方法来解决基于异质信息的多属性群体共识决策问题。陈侠和樊治平^[60]设计了基于区间型评价信息的多属性群体共识决策模型。

4. 考虑行为的IR-DR-GCDM

现实生活中的群体决策问题不仅涉及数学模型, 也涉及决策者的心理和行为^[61-62]。Palomares等^[63]考虑了决策者在共识达成过程中的非合作行为, 并提出了基于协调者的非合作行为管理机制。Quesada等^[64]和Dong等^[65]分别提出了基于Uninorm集结算子和自组织机制的方法来管理群体共识决策中的非合作行为。Xu等^[66]提出了考虑决策者的非合作行为和少数观点的群体共识决策模型。Guha和Chakraborty^[67]提出了考虑决策者观点自信任水平的群体共识决策模型。

(二) 复杂决策环境下的IR-DR-GCDM

本节将从大群体决策、社会网络群体决策、基于观点动力学的群体决策和动态与Web环境的群体决策几个方面对复杂决策环境下的IR-DR-GCDM的研究进展进行介绍。

1. 大群体IR-DR-GCDM

经济与社会的发展正在导致传统群体决策的决策范式向大群体决策转变^[68-69]。Zhang等^[70]提出了基于个体关注和满意度的异构大群体共识决策模型。Ding等^[71]提出了基于稀疏表示和社会网络分析的冲突侦测过程, 并将其应用到大群体共识决策中。徐选华和张前辉^[72]研究了应急决策环境下的大

群体共识决策问题。Labella等^[37]对小规模群体共识决策模型和大规模群体共识决策模型进行了比较分析。Ding等^[73]对大群体共识决策的研究进展进行了详细的综述。

2. 社会网络环境下的IR-DR-GCDM

社会网络是描述群体决策成员关系的有效方式,对群体决策过程有着重要影响^[74~75]。Wu和Chiciana^[76]提出了考虑决策者之间社会信任关系的群体共识决策模型。Kamis等^[77]提出了基于偏好相似度和社会网络层次聚类的群体共识决策模型。Dong等^[78]研究了社会网络环境下的共识达成和策略操纵问题。Zhang等^[79]提出了社会网络环境下考虑决策者有界置信水平和意见领袖的群体共识决策模型。Dong等^[80]对社会网络环境下的群体共识决策进行了系统的综述和分析。

3. 基于观点动力学的IR-DR-GCDM

在群体共识决策中,决策者之间的观点会相互影响和演化,一些学者将观点动力学模型引入群体决策中,提出了基于观点动力学的群体共识决策模型。Capuano等^[81]建立了基于社会影响的观点更新机制,并用其处理不完全信息和群体共识达成问题。Castro等^[82]建立了社会网络环境下基于DeGroot观点动力学模型的群组共识推荐决策模型。杨雷和杨洋^[83]建立了基于Deffuant边界信任观点动力学模型的群体共识收敛调控策略。Dong等^[84]建立了基于网络演化和观点动力学的群体共识决策模型。Zha等^[85]提出了具有边界信任的群体共识决策模型。

4. 动态与Web环境下的IR-DR-GCDM

Dong等^[86]针对决策者的方案集和属性集存在差异的多属性群决策问题,提出了方案集和属性集动态变化的群体共识决策模型。Kacprzyk和Zadrozny^[87]提出了基于软计算和Web智能技术的群体共识决策模型。Pérez等^[88]对动态群体共识决策模型进行了系统地综述。

三、基于优化共识规则的群体共识决策模型

评价/偏好信息调整的距离或者共识成本是衡量群体共识决策效率的重要指标。为此,Dong等^[43]提出了语言环境下的最小调整共识决策模型,其简化的数值版本如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k \in M} d(o^k, \bar{o}^k) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} F_\lambda(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) = \bar{o}^c & (a) \\ CL(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) \geq \alpha & (b) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m$ 为决策变量;目标函数为观点调整前后的距离;约束 (a) 用于将调整后的个体观点融合为群体观点;约束 (b) 用于确保 $\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m$ 之间的共识水平是可接受的。

Ben-Arieh和Easton^[44]提出了共识成本的概念,并设计了一个算法来以最小的成本帮助决策者达成共识。然而,他们没有给出最小成本共识决策的具体数学模型。为此,Zhang等^[89]提出了基于优化理论的最小成本共识决策模型:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k \in M} c_k \cdot d(o^k, \bar{o}^k) \\ \text{s.t.} & CL(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) \geq \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

其中, c_k 表示决策者 d_k 的单位调整成本,目标函数为决策者观点调整的成本。

Zhang等^[89]将集结函数引入模型 (4), 构建了如下模型:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k \in M} c_k \cdot d(o^k, \bar{o}^k) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} F_\lambda(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) = \bar{o}^c & (a) \\ CL(\bar{o}^1, \bar{o}^2, \dots, \bar{o}^m) \geq \alpha & (b) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

在模型 (5) 中,当所有单位调整成本都为 1 (即 $c_k = 1 \forall k \in M$) 时,其和模型 (3) 等价;当 F_λ 为OWA (Ordered Weighted Averaging) 算子并且权重向量为 $\lambda = (0.5, \dots, 0, \dots, 0.5)^T$ 时,其和模型 (4) 等价。详细证明参见Zhang等^[89]的研究。

上述最小调整共识决策模型 (模型 (3)) 和最小成本共识决策模型 (模型 (4) 和 (5)) 产生的最优解通常被用于引导决策者调整观点。基于模型 (3) ~ (5), 一些学者从不同的视角提出了基于优化共识规则的群体共识决策模型 (OR-GCDM) ^[31, 90~91]。本节接下来将分别介绍传统决策环境和复杂决策环境下OR-GCDM的研究进展。

(一) 传统决策环境下的OR-GCDM

本节介绍传统决策环境下的OR-GCDM, 主要包括: 具有成本约束和不对称单位成本的OR-GCDM, 基于最小成本和最大回报的OR-GCDM, 基于不同偏好结构的OR-GCDM, 多属性OR-GCDM, 以及基于多阶段优化策略的OR-GCDM。

1. 具有成本约束和不对称单位成本的OR-GCDM

考虑到群体共识决策中的资源往往是有限的,Ben-Arieh^[92]提出了最大专家共识决策模型,并设计了能够让尽可能多的专家达成共识的算法。Zhang等^[93]提出了基于优化理论的最大专家共识决策模型,并进一步在模型中使用了集结函数和软共识测量。Gong等^[94]设计了最大效用共识决策模型以寻求在有限的资源约束下最大化决策者和协调者的效用。此外,

在一些情况下, 决策者提高或降低观点的单位成本会有所不同, 即决策者的单位调整成本取决于观点调整的方向。针对此情况, Cheng等^[95]提出了基于非对称单位成本的最小成本共识决策模型。

2. 基于最小成本和最大回报的OR-GCDM

群体共识决策中主要存在两种角色: 协调者和决策者。协调者需要引导决策者调整观点, 而引导决策者调整观点则需要支付一定的成本。从协调者的视角来看, 其希望支付给决策者的成本应尽可能小。然而, 决策者希望得到的补偿尽可能多。为此, Gong等^[96]和Zhang等^[97-98]设计了基于最小成本和最大回报群体共识决策模型。

3. 基于不同偏好结构的OR-GCDM

Zhang等^[99]提出了基于加性偏好关系的最小调整共识决策模型来管理群体共识和个体一致性。Labella等^[90]通过考虑个体和群体加性偏好关系之间的差异, 建立了最小成本共识决策模型。Dong等^[100]针对基于多粒度不平衡二元语义偏好关系的群体决策问题, 提出了考虑个体一致性的最小调整共识决策模型。Wu和Tu^[101]设计了最小调整共识决策模型来改进个体的一致性和群体共识。Kwok和Lau^[102]提出了基于最小成本的Delphi法来促进AHP中的群体共识达成。Wu等^[103]提出了基于柔性语言表达的最小调整共识决策模型。此外, Zhang等^[104]设计了最小信息损失共识决策模型来最小化异构偏好信息和个体偏好向量之间的信息损失。

4. 多属性OR-GCDM

Parreiras等^[105]设计了语言环境下基于决策者权重优化机制的多属性群体共识决策模型。Zhang等^[106]以最小化评价信息调整距离和元素调整个数为目标, 建立了多属性最小调整共识决策模型。Chen等^[107]和Zhang等^[108]提出了面向方案有序分类的多属性最小调整共识决策模型。针对基于多粒度犹豫模糊语言术语集的多属性群决策问题, Yu等^[109]建立了基于最小调整的共识决策模型。

5. 基于多阶段优化策略的OR-GCDM

Zhang等^[110]提出了基于四阶段优化策略的群体共识决策模型, 依次优化发生决策信息发生调整的决策者数目、方案个数、评价值/偏好值个数以及决策信息调整前后的距离。此外, Wu等^[111]提出了基于三阶段优化策略的群体共识决策模型, 优化目标依次为决策信息调整前后的距离、决策信息发生调整的元素个数和决策者数目。

(二) 复杂决策环境下的OR-GCDM

本节介绍复杂决策环境下的OR-GCDM, 主要

包括: 大群体环境下的OR-GCDM, 基于观点动力学的OR-GCDM和社会信任网络环境下的OR-GCDM。

1. 大群体环境下的OR-GCDM

近几年, 面向大群体的共识决策理论和方法受到了广泛关注。Xiao等^[112]针对基于语言分布偏好关系的大群体决策问题, 建立了最小调整共识决策模型。该模型首先使用聚类算法对决策者进行聚类, 然后对每个决策者子群使用最小调整共识决策模型获取子群的共识观点, 接着在子群间使用最小调整共识模型获取群体的共识观点。Wang等^[113]构建了二维二元语义环境下的大群体共识决策模型。

2. 基于观点动力学的OR-GCDM

Dong等^[114]提出了基于社会网络DeGroot模型的最小调整群体共识决策模型。基于Hegselmann-Krause观点动力学模型, Liang等^[115]建立了具有时间约束的最小调整群体共识决策模型。

3. 社会信任网络环境下的OR-GCDM

近年来, 一些学者提出了社会信任网络环境下的OR-GCDM。Wu等^[116]提出了基于语言分布信任网络的最小调整共识决策模型。Cheng等^[117]提出了社会网络环境下基于残缺语言偏好关系的最小调整共识决策模型。Xiao等^[118]设计了社会信任网络环境下面向方案有序分类的最小信息损失共识决策模型。

四、群体共识决策的应用

迄今为止, 群体共识决策模型在实际管理决策问题中得到了广泛的应用, 其典型应用领域主要包括失效模式与影响分析(FMEA)、供应商选择、应急管理, 如表1所示。接下来, 本节将针对这几个领域的应用做简要介绍。

表 1 群体共识决策的一些应用

应用领域	文献
失效模式与影响分析	Zhang等 ^[108, 119]
供应链管理	程发新等 ^[17] ; Liu ^[120] ; Yu等 ^[121]
水资源管理	Cheng等 ^[95] ; Xu等 ^[122] ; Srdjevic等 ^[123]
应急/灾害管理	Xu等 ^[66] ; Wan等 ^[124]

1. 失效模式与影响分析

FMEA是一种前瞻性的可靠性管理工具。Zhang等^[108]将最小调整共识决策模型应用在FMEA中用于产生关于失效模式的有序分类。此外, Zhang等^[119]将考虑决策者自信水平的最小调整共识决策模型应用于FMEA中来提高风险分析专家之间的共识水平。

2. 供应链管理

程发新等^[17]将群体共识决策模型应用在低碳供

应商选择问题中。Liu^[120]提出了基于偏好学习的群体共识决策模型,并将其应用于能源应急供应链协同优化中。Yu等^[121]研究了语言分布环境下基于大群体共识决策模型的全球供应商选择问题。

3. 水资源管理

Cheng等^[95]将群体共识决策模型应用在中国太湖流域跨界水资源污染治理的谈判中,为跨界水污染治理谈判提供决策支持。Xu等^[122]将群体共识决策模型应用于水资源分配问题中。Srdjevic等^[123]将AHP群体共识决策模型应用于灌溉技术评价与选择中。

4. 应急/灾害管理

Xu等^[66]和Wan等^[124]提出了面向应急/灾害管理的大规模群体共识决策模型,为应急/灾害管理问题的解决提供决策支持。

五、研究评述与展望

(一) 研究评述

通过对群体共识决策领域的相关文献进行综述,可以发现,国内外学者基于IR-DR和OR两种共识规则提出了适合不同决策环境的群体共识决策模型,这些模型在FMEA、供应链管理、水资源管理、应急/灾害管理等领域也得到了广泛的应用。但群体共识决策的研究中还存在一些亟待解决的问题:

1. 缺乏对单位共识成本测量的系统研究。单位共识成本是最小成本共识决策模型的基础。然而,几乎所有的最小成本共识决策模型都假定单位共识成本是已知的,缺乏对单位共识成本测量这一基础性问题的研究。

2. 对决策者行为的研究不足。在群体共识决策中,决策者的行为(例如,非合作行为、策略操纵行为、博弈行为)对共识达成有着重要的影响。然而,已有的群体共识决策模型对决策者行为的研究尚处于起步阶段,而基于OR规则的群体共识决策模型对决策者的行为研究尤为匮乏。

3. 缺乏对共识决策质量的研究。尽管众多学者从不同的视角对群体共识决策进行了研究,在群体决策中使用共识机制是否可以提高决策的质量仍然是值得讨论的问题。

4. 社会信任网络结构对共识达成影响的研究不足。在基于社会信任网络的群体共识决策中,社会信任网络结构对观点调整有着重要的影响。然而,已有的研究主要利用社会信任网络产生决策者的权

重,缺乏社会信任网络结构对共识达成影响的研究。此外,对社会信任网络如何构建的研究也比较缺乏。

5. 实证研究不足。已有工作大多是从理论(模型)层面对群体共识决策进行研究,对群体共识决策有效性的讨论也是基于一些假设数据或仿真实验,缺少从实证视角利用真实数据对群体共识决策进行有效性检验。

6. 应用研究需要进一步丰富。尽管群体共识决策模型在实际中取得了一些应用,其应用领域还需要进一步拓展和丰富。

(二) 研究展望

基于群体共识决策领域存在的问题和挑战,本文提出一些该领域未来可能的研究方向:

1. 群体共识决策的公理化设计。一些学者从公理化的视角对群体决策进行了研究,例如著名的阿罗不可能性定理^[40]。尽管大量的群体共识决策模型已经被提出,然而缺乏对群体共识决策的公理化设计。类似于对群体决策的公理化设计,有必要对群体共识决策进行公理化设计,避免重复性的研究工作,并构建与经典群体决策理论的链接。

2. 数据驱动的偏好学习与共识决策。偏好学习是机器学习与决策分析交叉的一个新的研究领域^[125]。利用数据驱动的偏好学习方法对群体共识决策中涉及的相关参数进行估计能够推动群体共识决策模型在实际中的应用。例如,利用偏好学习方法估计最小成本共识决策模型中的单位共识成本或者识别决策者之间的社会信任网络。

3. 行为驱动的群体共识决策。决策者的行为对群体共识达成具有重要影响,例如策略操纵行为、非合作行为和博弈行为等。此外,在群体共识过程中,决策者是否调整观点可能是由不同的行为所驱动的,有些个体可能出于从众心理,有些个体可能出于要和自己信任的决策者保持一致的心理,还有些决策者在决策过程中可能对决策问题有了新的认识。因此,在设计群体共识决策模型时需要考虑决策者的这些行为,使得群体共识决策模型更加贴近现实的决策场景。

4. 从观点和社会信任网络调整两个视角对群体共识决策进行优化设计。观点和社会信任网络调整是促进共识形成的两种方式,有必要从观点和社会网络联合优化的视角提高群体共识达成的效率。

5. 设计考虑决策者观点调整意愿的群体共识决策模型。在群体共识决策中,反馈调整过程致力于产生观点调整的建议。然而,已有的群体共识决策

模型大多没有考虑决策者是否会接受反馈调整过程提供的观点调整建议。例如, 在社会信任网络上, 决策者在调整观点时会参考其信任的决策者的观点。如果反馈调整过程提供的观点与决策者信任的决策者的观点偏差较大时, 决策者可能不会接受该观点调整建议。因此, 在设计群体共识决策模型时需要考虑决策者的观点调整意愿。

6. 建立利益冲突环境下的共识决策机制。已有的群体共识决策模型大多针对如下决策情境: 决策者由于认识水平、知识背景和经历等方面存在差异, 对决策问题会有不同的观点。然而, 在许多实际的群体共识决策问题中, 决策者会存在利益冲突。例如, 在技术转移中, 技术输出方和输入方之间存在着利益冲突, 他们需要就技术转移协议达成共识。因此, 有必要对利益冲突环境下的共识决策进行研究。

7. 群体共识决策的实际应用和实证研究。结合实际应用问题(如群体推荐), 利用真实数据对群体共识决策的理论模型进行检验和修正也是一个非常有趣的研究问题。同时, 也有必要使用实证的方式对共识决策的质量进行分析。

参考文献

- [1] ARROW K J. Individual values and social choice[M]. New York: Wiley, 1951.
- [2] HOCHBAUM D S, LEVIN A. Methodologies and algorithms for group-rankings decision[J]. *Management Science*, 2006, 52(9): 1394-1408.
- [3] WALLENUS J, DYER J S, FISHBURN P C, et al. Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead[J]. *Management Science*, 2008, 54(7): 1336-1349.
- [4] BAUCCELLS M, SARIN R K. Group decisions with multiple criteria[J]. *Management Science*, 2003, 49: 1105-1118.
- [5] 董玉成, 徐寅峰, 张桂清. 群体思维收敛性定量验证[J]. *系统工程理论与实践*, 2006(3): 108-111.
- [6] 何耀耀, 宋晓晨, 万金红, 等. 考虑决策者偏好的洪水灾害模糊聚类迭代评估模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2680-2688.
- [7] 于文玉, 仲秋雁, 张震. 权重信息不完全的多粒度犹豫模糊语言群决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(3): 777-785.
- [8] 陈晓红, 李慧, 谭春桥. 考虑不同心理行为偏好的混合随机多属性决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(6): 1545-1556.
- [9] 郑晶, 王应明. 面向多部门多属性的群决策应急方案调整方法[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(2): 66-72.
- [10] 杨洁, 李登峰. 指标相关且信息模糊的合作创新伙伴选择方法[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(5): 53-58.
- [11] 刘金培, 杨宏伟, 陈华友, 等. 基于交叉效率DEA与群体共识的区间乘性语言偏好关系群决策[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(2): 190-198.
- [12] 陈侠, 樊治平, 陈岩. 基于语言判断矩阵的专家群体判断一致性分析[J]. *控制与决策*, 2006, 21(8): 879-884.
- [13] FU C, YANG S L. The group consensus based evidential reasoning approach for multiple attributive group decision analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 206(3): 601-608.
- [14] 余高峰, 李登峰, 邱锦明, 等. 考虑偏好冲突的多类评价信息群体决策方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(11): 2013-2018.
- [15] 顾基发. 意见综合——怎样达成共识[J]. *系统工程学报*, 2001, 16(5): 340-348.
- [16] PALOMARES I, ESTRELLA F J, MARTÍNEZ L, et al. Consensus under a fuzzy context: taxonomy, analysis framework AFRYCA and experimental case of study[J]. *Information Fusion*, 2014, 20: 252-271.
- [17] 程发新, 程栋, 赵艳萍, 等. 基于共识决策的低碳供应商选择方法研究[J]. *运筹与管理*, 2012, 21(6): 68-73.
- [18] GONG Z W, XU C, CHICLANA F, et al. Consensus measure with multi-stage fluctuation utility based on China's urban demolition negotiation[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2017, 26(2): 379-407.
- [19] SUSSKIND L E, MCKEARNEN S, THOMAS-LAMAR J. The consensus building handbook: a comprehensive guide to reaching agreement[M]. London: Sage Publications, 1999.
- [20] COCH L, FRENCH J R P. Overcoming resistance to change[J]. *Human Relations*, 1948, 1: 512-532.
- [21] FRENCH J R P. A formal theory of social power[J]. *Psychological Review*, 1956, 63: 181-194.
- [22] DEGROOT M H. Reaching a consensus[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1974, 69: 118-121.
- [23] FRENCH S. Consensus of opinion[J]. *European Journal of Operational Research*, 1981, 7: 332-340.
- [24] COOK W D, SEIFORD L M. On the Borda-kendall consensus method for priority ranking problems[J]. *Management Science*, 1982, 28: 621-637.
- [25] LOEWER B. Information theoretic epistemology and semantics || preface[J]. *Synthese*, 1987, 70(2): 157.
- [26] GONZÁLEZ-ARTEAGA T, DE ANDRÉS CALLE R, CHICLANA F. A new measure of consensus with reciprocal preference relations: the correlation consensus degree[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 107: 104-116.
- [27] BEZDEK J C, SPILLMAN B, SPILLMAN R. A fuzzy relation space for group decision theory[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1978, 1: 255-268.

- [28] LOEWER B, LADDAGA R. Destroying the consensus[J]. *Synthese*, 1985, 62: 79-95.
- [29] KACPRZYK J. On some fuzzy cores and 'soft' consensus measures in group decision making[M]//BEZDEK J C. The analysis of fuzzy information. Boca Raton: CRC Press, 1987: 119-130.
- [30] HERRERA-VIEDMA E, CABRERIZO F J, KACPRZYK J, et al. A review of soft consensus models in a fuzzy environment[J]. *Information Fusion*, 2014, 17(5): 4-13.
- [31] DONG Y C, XU J P. Consensus building in group decision making: Searching the consensus path with minimum adjustments[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2016.
- [32] 吴志彬. 群体共识决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [33] 张曙阳, 李磊. 一种处理群体决策中个体偏好信息的新方法——部分共识模型[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(11): 84-92.
- [34] DONG Q X, COOPER O. A peer-to-peer dynamic adaptive consensus reaching model for the group AHP decision making[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(2): 521-530.
- [35] FU C, YANG S L. An evidential reasoning based consensus model for multiple attribute group decision analysis problems with interval-valued group consensus requirements[J]. *European Journal of Operational Research*, 2012, 223: 167-176.
- [36] BUTLER C T, ROTHSTEIN A. On conflict and consensus: a handbook on formal consensus decisionmaking [J/OL]. [2021-01-22]. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:On+Conflict+and+Consensus+A+Handbook+on+Formal+Consensus+Decisionmaking#0>.
- [37] LABELLA A, LIU Y Y, RODRÍGUEZ R M, et al. Analyzing the performance of classical consensus models in large scale group decision making: a comparative study[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 67: 677-690.
- [38] BORDA J C. Memoire sur les elections au scrutin[M]. Paris: Histoire de l'Academie Royale de Science, 1781.
- [39] CONDORCET M. Essai sur l'application de l'analyse a la probabilité des decisions rendues a la pluralité des voix[M]. Paris: Imprimerie Royale, 1785.
- [40] ARROW K J. Social choice and individual values[M]. New York: Wiley, 1964.
- [41] SIMOM H A. A behavioral model of rational choice[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1955, 69: 99-118.
- [42] HERRERA-VIEDMA E, HERRERA F, CHICLANA F. A consensus model for multiperson decision making with different preference structures[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2002, 32: 394-402.
- [43] DONG Y C, XU Y F, LI H Y, et al. The OWA-based consensus operator under linguistic representation models using position indexes[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 203: 455-463.
- [44] BEN-ARIEH D, EASTON T. Multi-criteria group consensus under linear cost opinion elasticity[J]. *Decision Support Systems*, 2007, 43: 713-721.
- [45] BRYSON N. Group decision-making and the analytic hierarchy process: exploring the consensus- relevant information content[J]. *Computers & Operations Research*, 1996, 23: 27-35.
- [46] ALTUZARRA A, MORENO-JIMÉNEZ J M, SALVADOR M. Consensus building in AHP-group decision making: A bayesian approach[J]. *Operations Research*, 2010, 58: 1755-1773.
- [47] PÉREZ I J, CABRERIZO F J, ALONSO S, et al. A new consensus model for group decision making problems with non-homogeneous experts[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2014, 44: 494-498.
- [48] CABRERIZO F J, PÉREZ I J, HERRERA-VIEDMA E. Managing the consensus in group decision making in an unbalanced fuzzy linguistic context with incomplete information[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2010, 23: 169-181.
- [49] 张世涛, 朱建军, 刘小弟. 基于重要度引导偏好识别修正的多粒度语言共识模型[J]. *控制与决策*, 2015, 30(9): 1609-1616.
- [50] CHOUDHURY A, SHANKAR R, TIWARI M. Consensus-based intelligent group decision-making model for the selection of advanced technology[J]. *Decision Support Systems*, 2006, 42: 1776-1799.
- [51] CHEN X, ZHANG H J, DONG Y C. The fusion process with heterogeneous preference structures in group decision making: A survey[J]. *Information Fusion*, 2015, 24: 72-83.
- [52] AGUARÓN J, ESCOBAR M T, MORENO-JIMÉNEZ J M. The precise consistency consensus matrix in a local AHP-group decision making context[J]. *Annals of Operations Research*, 2016, 245: 245-259.
- [53] HERRERA F, HERRERA-VIEDMA E, VERDEGAY J L. A rational consensus model in group decision making using linguistic assessments[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 88: 31-49.
- [54] WU Z B, XU J P. Managing consistency and consensus in group decision making with hesitant fuzzy linguistic preference relations[J]. *Omega*, 2016, 65: 28-40.
- [55] DONG Y C, ZHANG G Q, HONG W C, et al. Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method[J]. *Decision Support Systems*, 2010, 49: 281-289.
- [56] KIM S H, CHOI S H, KIM J K. An interactive procedure for multiple attribute group decision making with

- incomplete information: Range-based approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 118: 139-152.
- [57] XU Z S. An automatic approach to reaching consensus in multiple attribute group decision making[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56: 1369-1374.
- [58] 徐迎军, 李东. 多属性群决策达成一致方法研究[J]. *控制与决策*, 2010, 25: 1810-1814.
- [59] ERVURAL B, KABAK O. A cumulative belief degree approach for group decision-making problems with heterogeneous information[J]. *Expert Systems*, 2019, 36: e12458.
- [60] 陈侠, 樊治平. 基于区间数偏好信息的专家群体共识性研究[J]. *运筹与管理*, 2011, 20(1): 29-34.
- [61] 杨善林, 朱克毓, 付超, 等. 基于元胞自动机的群决策从众行为仿真[J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(9): 115-124.
- [62] 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: 271-293.
- [63] PALOMARES I, MARTÍNEZ L, HERRERA F. A consensus model to detect and manage noncooperative behaviors in large-scale group decision making[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2014, 22: 516-530.
- [64] QUESADA F J, PALOMARES I, MARTÍNEZ L. Managing experts behavior in large-scale consensus reaching processes with uninorm aggregation operators[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 35: 873-887.
- [65] DONG Y C, ZHANG H J, HERRERA-VIEDMA E. Integrating experts' weights generated dynamically into the consensus reaching process and its applications in managing non-cooperative behaviors[J]. *Decision Support Systems*, 2016, 84: 1-15.
- [66] XU X H, DU Z J, CHEN X H. Consensus model for multi-criteria large-group emergency decision making considering non-cooperative behaviors and minority opinions[J]. *Decision Support Systems*, 2015, 79: 150-160.
- [67] GUHA D, CHAKRABORTY D. Fuzzy multi attribute group decision making method to achieve consensus under the consideration of degrees of confidence of experts' opinions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 60: 493-504.
- [68] 陈晓红, 张威威, 徐选华. 社会网络环境下基于犹豫度和一致性的大群体决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40(5): 1178-1192.
- [69] 张晓, 樊治平. 基于前景随机占优的多属性多标度大群体决策方法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(8): 1429-1433.
- [70] ZHANG H J, DONG Y C, HERRERA-VIEDMA E. Consensus building for the heterogeneous large-scale GDM with the individual concerns and satisfactions[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26: 884-898.
- [71] DING R X, WANG X Q, SHANG K, et al. Social network analysis-based conflict relationship investigation and conflict degree-based consensus reaching process for large scale decision making using sparse representation[J]. *Information Fusion*, 2019, 50: 251-272.
- [72] 徐选华, 张前辉. 社会网络环境下基于共识的风险性大群体应急决策非合作行为管理研究[J]. *控制与决策*, 2020, 35(10): 2497-2506.
- [73] DING R X, PALOMARES I, WANG X Q, et al. Large-scale decision-making: Characterization, taxonomy, challenges and future directions from an Artificial Intelligence and applications perspective[J]. *Information Fusion*, 2020, 59: 84-102.
- [74] WU J, CHICLANA F, HERRERA-VIEDMA E. Trust based consensus model for social network in an incomplete linguistic information context[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 35: 827-839.
- [75] CHU J F, WANG Y M, LIU X W, et al. Social network community analysis based large-scale group decision making approach with incomplete fuzzy preference relations[J]. *Information Fusion*, 2020, 60: 98-120.
- [76] WU J, CHICLANA F. Multiplicative consistency of intuitionistic reciprocal preference relations and its application to missing values estimation and consensus building[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 71: 187-200.
- [77] KAMIS N H, CHICLANA F, LEVESLEY J. Geo-uninorm consistency control module for preference similarity network hierarchical clustering based consensus model[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 162: 103-114.
- [78] DONG Y C, ZHA Q B, ZHANG H J, et al. Consensus reaching and strategic manipulation in group decision making with trust relationships[J/OL]. [2020-1-13]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8957414>.
- [79] ZHANG Z, GAO Y, LI Z L. Consensus reaching for social network group decision making by considering leadership and bounded confidence[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2020, 204: 106240.
- [80] 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.
- [81] CAPUANO N, CHICLANA F, FUJITA H, et al. Fuzzy group decision making with incomplete information guided by social influence[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26: 1704-1718.
- [82] CASTRO J, LU J, ZHANG G Q, et al. Opinion dynamics-based group recommender systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48: 2394-2406.

- [83] 杨雷, 杨洋. 决策要素动态变化的群体决策偏好演化过程[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(9): 2302-2311.
- [84] DONG Q X, ZHOU X, MARTÍNEZ L. A hybrid group decision making framework for achieving agreed solutions based on stable opinions[J]. *Information Sciences*, 2019, 490: 227-243.
- [85] ZHA Q B, DONG Y C, ZHANG H J, et al. A personalized feedback mechanism based on bounded confidence to support consensus reaching in group decision making[J/OL]. [2019-10-28]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8884669>.
- [86] DONG Y C, ZHANG H J, HERRERA-VIEDMA E. Consensus reaching model in the complex and dynamic MAGDM problem[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 106: 206-219.
- [87] KACPRZYK J, ZADROŻNY S. Soft computing and Web intelligence for supporting consensus reaching[J]. *Soft Computing*, 2010, 14: 833-846.
- [88] PÉREZ I J, CABRERIZO F J, ALONSO S, et al. On dynamic consensus processes in group decision making problems[J]. *Information Sciences*, 2018, 459: 20-35.
- [89] ZHANG G Q, DONG Y C, XU Y F, et al. Minimum-cost consensus models under aggregation operators[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2011, 41: 1253-1261.
- [90] LABELLA A, LIU H B, RODRÍGUEZ R M, et al. A cost consensus metric for consensus reaching processes based on a comprehensive minimum cost model[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 281: 316-331.
- [91] ZHANG H J, ZHAO S H, KOU G, et al. An overview on feedback mechanisms with minimum adjustment or cost in consensus reaching in group decision making: research paradigms and challenges[J]. *Information Fusion*, 2020, 60: 65-79.
- [92] BEN-ARIEH D, EASTON T, EVANS B. Minimum cost consensus with quadratic cost functions[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 2009, 39: 210-217.
- [93] ZHANG B W, DONG Y C, XU Y F. Maximum expert consensus models with linear cost function and aggregation operators[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 66: 147-157.
- [94] GONG Z W, XU X X, LI L S, et al. Consensus modeling with nonlinear utility and cost constraints: a case study[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 88: 210-222.
- [95] CHENG D, ZHOU Z L, ZHOU Y F, et al. Modeling the minimum cost consensus problem in an asymmetric costs context[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 270: 1122-1137.
- [96] GONG Z W, ZHANG H H, FORREST J, et al. Two consensus models based on the minimum cost and maximum return regarding either all individuals or one individual[J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 240: 183-192.
- [97] ZHANG B W, DONG Y C, ZHANG H J, et al. Consensus mechanism with maximum-return modifications and minimum-cost feedback: a perspective of Game Theory[J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287: 546-559.
- [98] ZHANG H H, KOU G, PENG Y. Soft consensus cost models for group decision making and economic interpretations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 277: 964-980.
- [99] ZHANG G Q, DONG Y C, XU Y F. Linear optimization modeling of consistency issues in group decision making based on fuzzy preference relations[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39: 2415-2420.
- [100] DONG Y C, LI C C, XU Y F, et al. Consensus-based group decision making under multi-granular unbalanced 2-tuple linguistic preference relations[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2015, 24: 217-242.
- [101] WU Z B, TU J C. Managing transitivity and consistency of preferences in AHP group decision making based on minimum modifications[J]. *Information Fusion*, 2021, 67: 125-135.
- [102] KWOL P, LAU H. Modified Delphi-AHP method based on minimum-cost consensus model and vague set theory for road junction control method evaluation criteria selection[J]. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 2016, 7: 46-82.
- [103] WU Y Z, DONG Y C, QIN J D, et al. Flexible linguistic expressions and consensus reaching with accurate constraints in group decision-making[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50: 2488-2501.
- [104] ZHANG B W, DONG Y C, HERRERA-VIEDMA E. Group decision making with heterogeneous preference structures: an automatic mechanism to support consensus reaching[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2019, 28: 585-617.
- [105] PARREIRAS R O, EKEL P Y, MARTINI J S C, et al. A flexible consensus scheme for multicriteria group decision making under linguistic assessment[J]. *Information Sciences*, 2010, 180: 1075-1089.
- [106] ZHANG B W, DONG Y C, XU Y F. Multiple attribute consensus rules with minimum adjustments to support consensus reaching[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 67: 35-48.
- [107] CHEN X, XU W J, LIANG H M, et al. The classification based consensus in multi-attribute group decision making[J/OL]. [2019-8-27]. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01605682.2019.1609888>.
- [108] ZHANG H J, DONG Y C, PALOMARES I, et al. Failure mode and effect analysis in a linguistic context: A consensus-based multi-attribute group decision-making

- approach[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, 68: 566-582.
- [109] YU W Y, ZHANG Z, ZHONG Q Y. Consensus reaching for MAGDM with multi-granular hesitant fuzzy linguistic term sets: a minimum adjustment-based approach[J/OL]. [2019-10-25]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-019-03432-7>.
- [110] ZHANG H J, DONG Y C, CHICLANA F, et al. Consensus efficiency in group decision making: a comprehensive comparative study and its optimal design[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 275: 580-598.
- [111] WU Z B, HUANG S, XU J P. Multi-stage optimization models for individual consistency and group consensus with preference relations[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 275: 182-194.
- [112] XIAO J, WANG X L, ZHANG H J. Managing personalized individual semantics and consensus in linguistic distribution large-scale group decision making[J]. *Information Fusion*, 2020, 53: 20-34.
- [113] WANG Z L, RODRÍGUEZ R M, WANG Y M, et al. A two-stage minimum adjustment consensus model for large scale decision making based on reliability modeled by two-dimension 2-tuple linguistic information[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 151(1):106973.
- [114] DONG Y C, DING Z G, MARTINEZ L, et al. Managing consensus based on leadership in opinion dynamics[J]. *Information Sciences*, 2017, 397-398: 187-205.
- [115] LIANG H M, DONG Y C, DING Z G, et al. Consensus reaching with time constraints and minimum adjustments in group with bounded confidence effects[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 28: 2466-2479.
- [116] WU J, DAI L F, CHICLANA F, et al. A minimum adjustment cost feedback mechanism based consensus model for group decision making under social network with distributed linguistic trust[J]. *Information Fusion*, 2018, 41: 232-242.
- [117] CHENG D, CHENG F X, ZHOU Z L, et al. Reaching a minimum adjustment consensus in social network group decision-making[J]. *Information Fusion*, 2020, 59: 30-43.
- [118] XIAO J, WANG X L, ZHANG H J. Managing classification-based consensus in social network group decision making: an optimization-based approach with minimum information loss[J]. *Information Fusion*, 2020, 63: 74-87.
- [119] ZHANG H J, XIAO J, DONG Y C. Integrating a consensus-reaching mechanism with bounded confidences into failure mode and effect analysis under incomplete context[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2019, 183: 104873.
- [120] XIANG L. Energy emergency supply chain collaboration optimization with group consensus through reinforcement learning considering non-cooperative behaviours[J]. *Energy*, 2020, 210: 118597.
- [121] YU S M, DU Z J, XU X H. Hierarchical punishment-driven consensus model for probabilistic linguistic large-group decision making with application to global supplier selection[J/OL]. [2020-8-3]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10726-020-09681-3>.
- [122] XU Y J, CABRERIZO F J, HERRERA-VIDEIA E. A consensus model for hesitant fuzzy preference relations and its application in water allocation management[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 58: 265-284.
- [123] SRDJEVIC B, SRDJEVIC Z, BLAGOJEVIC B, et al. A two-phase algorithm for consensus building in AHP-group decision making[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37: 6670-6682.
- [124] WAN Q F, XU X H, CHEN X H, et al. A two-stage optimization model for large-scale group decision-making in disaster management: minimizing group conflict and maximizing individual satisfaction[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2020, 29: 901-921.
- [125] LI C C, DONG Y C, PEDRYCZ W, et al. Integrating continual personalized-individual- semantics learning in consensus reaching in linguistic group decision making[J/OL]. [2020-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9253574>.

编辑 何婧