

数据驱动下图模型冲突分析决策支持系统构建研究

徐海燕¹, 孔 杨^{1,2}, 戴思凡¹

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京 211106; 2. 滨州医学院公共卫生与管理学院, 烟台 264003)

摘要: 当今世界由于经济、科技、地缘战略、国际秩序等问题频繁爆发冲突事件, 冲突规模正由个体冲突、小规模群体冲突向复杂大规模群体冲突转变。相较于个体间的冲突, 大规模群体冲突事件持续时间更长、波及范围更广, 易对我国的社会秩序以及经济发展造成恶劣影响。图模型冲突分析(Graph model for conflict resolution, GMCR)理论提供了分析冲突、解决矛盾的有效方案, 作为一门专业解决冲突问题的理论工具已经在水资源、环境管理和经济政策等领域得到广泛应用, 并取得良好效果。然而, 随着冲突事件参与者日渐增多、主体的策略日趋复杂形成了指数级增加的局势, 以及主体的偏好行为不确定性加强, 传统的决策支持系统GMCR II难以求解此类复杂冲突问题。基于强度偏好冲突分析理论的代数表达, 开发了基于.NET平台的冲突分析WEB系统SP-GMCRDSS, 该系统包括可行状态生成、状态转移设置、强度偏好序列生成和稳定性分析引擎4个模块, 对比现有的系统, SP-GMCRDSS能更高效地辅助冲突分析者解决数据驱动下的大型、复杂的冲突。并且运用文本挖掘技术提取决策者策略数据, 辅助分析者确定决策支持系统建模信息的输入, 降低模型构建的主观性。最后, 通过“兰州水污染冲突事件”演示了该系统的建模、求解以及分析的功能。

关键词: 图模型冲突分析; 强度偏好; 决策支持系统; WEB系统; 数据驱动

中图分类号: C931.6 **文献标志码:** A

Data-Driven Decision Support System Construction Based on Graph Model for Conflict Resolution

XU Haiyan¹, KONG Yang^{1,2}, DAI Sifan¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Public Health and Management, Binzhou Medical University, Yantai 264003, China)

Abstract: Nowadays, conflicts frequently occur due to issues such as economy, technology, geostrategy, and international order, and the scale of conflicts is shifting from individual and small-scale group conflicts to complex large-scale group conflicts. Compared to conflicts between individuals, large-scale group conflicts have a longer duration and wider scope, which have a negative impact on China's social order and economic development. Graph model for conflict resolution (GMCR) has been widely applied to water resources, environmental management and economic policy as a theoretical tool for solving conflict problems, and has achieved good results. However, the increasing number of participants and strategies in conflict have led to an exponential increase in situation, and the uncertainty of the subject's preference

基金项目: 国家自然科学基金(72471117, 71971115); 智能决策与数字化运营工业和信息化部重点实验室项目(NJ2023027)。

收稿日期: 2023-06-05; **修订日期:** 2023-08-30

behavior is enhanced, so the traditional decision support system GMCR II is difficult to solve such complex conflicts. Based on the algebraic expression of strength preference conflict analysis theory, this paper designs a conflict analysis WEB system SP-GMCRDSS based on .NET platform, including four modules: feasible state generation, state transition setting, strength preference sequence generation and stability analysis engine. Compared with existing systems, SP-GMCRDSS can more efficiently assist conflict analysts in solving large and complex data-driven conflicts. The text mining technology is used to extract strategy, which can assist analysts to determine the input of decision support system, and reduce the subjectivity of model building. Finally, modeling, solving, and analysis functions of the system are demonstrated through the case "Lanzhou Water Pollution Conflict Event".

Key words: graph model for conflict resolution (GMCR); strength of preference; decision support system; WEB system; data driven

引言

冲突广泛存在于现实世界的方方面面,大至国家间的贸易冲突,小至企业间的价格竞争,其产生的根源在于利益各方的目标不一致性。随着社会发展进程加快,国与国、企业与企业、人与人之间的交往日益密切,各类大型、复杂冲突事件频发,对公共安全和社会稳定构成了严重威胁,亟需一种能有效解决大型、复杂、不确定冲突问题的理论工具。

图模型冲突分析(Graph model for conflict resolution, GMCR)是基于经典博弈论^[1]和偏对策理论^[2]构建冲突图模型,使用集合论和图论对冲突行为进行建模、分析的一种决策方法。GMCR理论进行建模时仅仅需要相对偏好就能进行建模、分析,对比经典博弈论,GMCR更易于用于解决实际冲突^[3]。在长期的理论研究和实际应用中,GMCR在环境资源冲突、水资源管理、经济纠纷等领域已取得了良好的效果,已经成为冲突分析最重要的理论工具之一。

随着时代的发展,冲突规模正由个体冲突、小规模群体冲突向复杂大规模群体冲突转变,多主体、多策略的复杂冲突结构产生了庞大的状态数据,简单的逻辑运算难以支撑海量的数据处理,完全依靠人工模式来构建冲突模型以及分析各决策者的稳定性变得不切实际。如何合理获取并筛选复杂冲突结构中决策者的策略信息,文本挖掘技术提供了解决问题的有效方案。文本挖掘,又称文本数据挖掘,是指从大量半结构化或非结构化的文本数据中抽取事先未知的、可理解的、最终可用的知识的过程。通过从大量文本数据中提取关键决策信息,文本挖掘技术可以降低冲突模型构建的主观性。决策支持系统(Decision support system, DSS)是一种计算机辅助决策的方式,是通过数据、模型和知识,以人机交互方式进行半结构化或非结构化决策的计算机应用系统^[4]。虽然DSS从概念提出发展到现在仅有40年的时间,但在不同领域里取得了飞速的发展^[5]。因此,计算机辅助GMCR成为必然,构建基于GMCR理论的数据驱动决策支持系统是一个重要的研究方向。表1对现有的3个GMCR决策支持系统就理论基础、访问方式、交互程度、偏好建模和稳定性分析这5个方面进行对比。

GMCR I系统是第一个基础功能完备的GMCR决策支持系统,1993年由Fang等^[6]设计并研发,为决策者在冲突谈判协商时快速做出决策提供了可靠和科学的计算机辅助方式,推动了

表1 GMCR决策支持系统对比
Table 1 Comparison of GMCR decision support systems

对比标准	GMCR I	GMCR II	MRCRDSS
理论基础	逻辑结构	逻辑结构	矩阵结构
访问方式	客户端	客户端	客户端
交互程度	弱	强	弱
偏好	简单偏好	是	否
建模	强度偏好	否	否
稳定性	简单偏好	是	是
分析	强度偏好	否	是

相关理论的发展。2003年,Fang等^[7-8]在GMCR I基础上加入最新的研究成果研发出了GMCR II。GMCR II分为3个子系统:建模子系统、分析引擎和结果输出子系统,GMCR II极大增强了与使用者的交互程度,精心设计了建模系统的交互式接口,包括可行状态生成删除、设置可行状态转移和偏好信息输入,该系统已经能够辅助决策者解决大部分冲突问题,如“云南曲靖陆良县铬污染”冲突^[9]和医患纠纷冲突问题^[10]。然而,GMCR II建模系统和稳定性分析引擎只支持简单偏好信息,当冲突方的偏好行为有更强烈的态度(强度偏好)时,无法进行分析工作,如劳资关系下的冲突问题^[11]。与此同时,GMCR II是建立在以逻辑符号表达为基础的GMCR理论框架之上,随着新理论不断发展,致使逻辑符号表达愈发复杂化,不便于理解和算法实现。2009年,Xu等^[12]结合代数矩阵表达的思想,首次提出了GMCR理论中稳定性的矩阵表达形式(Matrix representation for conflict resolution, MRCCR),并开发了相应的决策支持系统MRCCRDSS^[13]。MRCCR简化了稳定性分析算法中的数据表达式,极大地推动了系统的开发和执行效率,MRCCRDSS重点强化了稳定性分析算法,能进行简单偏好和强度偏好下的稳定性分析和结果输出,但在建模部分,与使用者之间的交互程度远不如GMCR II,输入决策者偏好的过程比较繁琐,需要对每个可行状态进行单独赋值以此确定决策者的偏好序列,当模型较复杂时,偏好序列输入需耗费大量时间。GMCR I、GMCR II和MRCCRDSS均只能通过客户端形式访问,针对不同操作系统需要开发不同版本的软件,系统更新难度大、成本高,不利于理论推广和系统升级。

本文在对上述3个系统各自的优势和不足进行分析比较后,设计了一套数据驱动下基于强度偏好的图模型冲突分析决策支持WEB系统SP-GMCCRDSS,系统中增加强度偏好分析功能可以更全面地刻画决策者的情感色彩,丰富决策信息,符合现实冲突事件的演化规律。该系统可直接通过浏览器与服务器进行数据交换,包括可行状态生成、状态转移设置、强度偏好序列生成和稳定性分析引擎4个模块。在可行状态生成、状态转移设置和强度偏好序列生成模块中提供了多种交互式操作方法,全面满足分析者各类建模需求。稳定性分析引擎的核心算法则采用矩阵数据结构。对比现有的系统,SP-GMCCRDSS能更高效地辅助冲突分析者进行冲突分析。面对冲突事件的突发性和不可预知性,冲突分析者能借助此系统实现实时建模、数据分析和快速决策。

1 强度偏好下的GMCR矩阵结构

1.1 GMCR理论概述

图模型冲突分析GMCR是基于有向图、使用图论和结合论对实际冲突进行建模、分析的理论,可表示为 $V = \{N, S, P, \{A_i\}_{i \in N}\}$ 。其中 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ($n \geq 2$)表示冲突事件中所有决策者形成的非空集合, n 表示决策者的个数;状态是每个冲突主体选择策略后形成的一个策略组合,可行状态是指符合逻辑的策略组合; S 代表所有可行状态形成的集合; $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 表示全体决策者的偏好集合;状态转移的有向弧集合 $A_i (A_i \subseteq S * S, i \in N)$ 中的元素 $(s, q)_i$ 表示决策者 i 从状态 s 经一步状态转移可以到达状态 q 。

GMCR解决冲突的过程主要包括冲突模型构建、稳定性分析和结果评价三大阶段,也称GMCR的生命周期,具体过程如图1所示。作为GMCR生

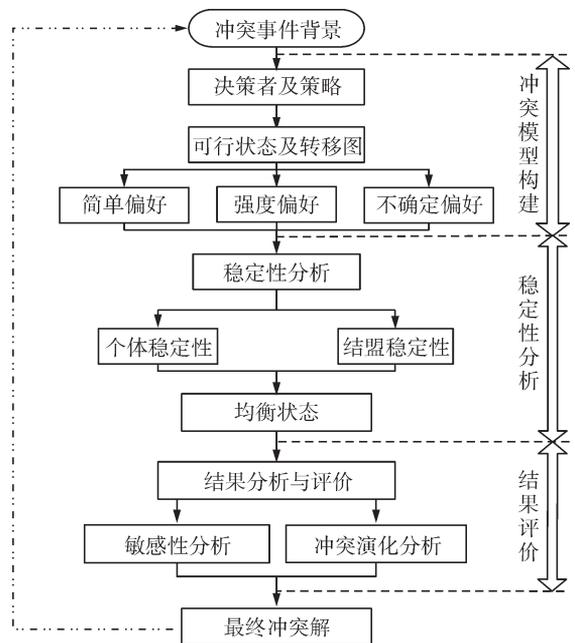


图1 GMCR生命周期图

Fig.1 Lifecycle diagram of GMCR

命周期的首要部分,冲突模型构建阶段要求冲突分析者完备地了解冲突事件的背景,从中识别出冲突事件的参与者(决策者集合 N)及其可执行的策略;根据策略信息,确定所有可行状态点 S 及状态转移的有向弧集合 $\{A_i\}_{i \in N}$;分析决策者的偏好信息,确定各决策者的偏好序列 P 。稳定性分析阶段是GMCR的核心,包括计算各决策者在不同稳定性下的稳定解,从而确定均衡解;结果评价阶段中,冲突分析者对稳定性分析阶段的输出进行分析和评价,从而得出最终的冲突解。

1.2 策略信息挖掘

复杂的冲突结构导致决策者的决策信息获取难度上升,冲突分析者人为界定决策者策略的方法主观性较强,易受分析者认知局限影响而产生偏差。因此,本文利用文本挖掘技术定量获取冲突中每个冲突者的关键策略数据,辅助分析者确定后续决策支持系统SP-GMCRDSS建模信息的输入。

文本挖掘过程主要包括3个环节:文本采集、文本预处理和文本数据分析。文本数据采集是进行后续文本数据处理分析的基础,主要通过网络爬虫采集大量互联网文本信息。网络爬虫能够自动请求、访问网页,并将所需的信息爬取下来,通过对爬取数据的处理,从而提取出有价值的信息。但是由于网络爬虫采集到的文本数据包含许多无意义信息,因此在进入文本数据分析前,需对文本数据进行预处理,剔除文本中无价值的信息。第二步的文本预处理环节包括进行文本分词和去停用词,本文在构建冲突策略词典和停用词表后,采用基于Python语言的Jieba分词工具对文本进行分词操作。第三步文本数据分析环节包括词频分析、关键词提取、文本主题模型、情感分析、文本分类和文本聚类等。本文主要通过Python进行词频分析,通过统计词语出现的次数来分析出文本的重点关注内容数据。具体过程如图2所示。

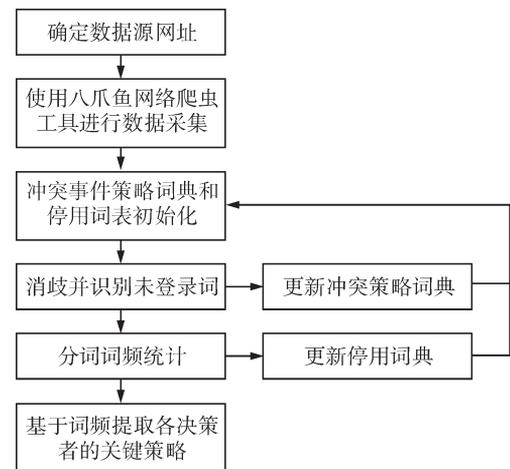


图2 基于词频分析的冲突事件关键策略挖掘流程
Fig.2 Process of mining key strategies for conflict based on word frequency analysis

1.3 强度偏好及强度偏好序列获取

GMCR要求分析者能从错综复杂的冲突背景中提取必要的建模信息,从而构建冲突模型。结合文本挖掘技术,冲突分析者往往能从背景信息中较直接地提取到决策者集合 N 及其策略信息,可行状态点集合 S 和状态转移的有向弧集合 $\{A_i\}_{i \in N}$,而偏好序列 P 的获取常为间接行为且受分析者主观影响较大。偏好排序结果是否真实刻画现实事件直接关系到模型构建的好坏,因此建模阶段的研究主要集中在偏好结构种类的选择及其排序方法。随着GMCR理论应用领域的复杂化,决策者对待冲突局势的态度越来越丰富、情感色彩也越来越浓厚,偏好种类已从简单偏好扩展至不确定偏好^[14],进而扩展至强度偏好^[15],以及混合偏好^[16],本文主要研究强度偏好。

在强度偏好下,决策者 i 的偏好结构表示为 $P = \{\gg_i, >_i, \sim_i\}$ 。对状态点 $s, q \in S, s \gg_i q$ 表示决策者 i 对 s 的偏好强烈优于 $q, s >_i q$ 表示决策者 i 对 s 的偏好一般优于 $q, s \sim_i q$ 表示决策者 i 对 s 的偏好与对 q 的偏好等价^[11]。强度偏好的引入丰富了决策者的感情色彩,表征了决策者对状态点偏好强弱的程度,弥补了其他偏好种类信息表达的不足,进一步丰富了决策者的偏好信息。如果偏好信息没有考虑决策者对待某一状态喜好的程度,则强度偏好结构退化为简单偏好结构。

强度偏好序列的获取方法有直接状态排序法和策略优先权排序法两种。直接法是分析者根据背

景主观地从状态点层面考虑,确定特定决策者的强度偏好序列,该方法快速有效,复杂度低,但易受分析者认知局限而产生较高偏差;策略优先权法试图从策略层面出发获取偏好序列,其基本思想是首先生成一组关于决策者策略的函数关系,参数为状态点,返回值为状态点的分值,计算状态点在所有函数关系下的分值并求和,最后按总分值大小对状态点排序得到偏好序列。具体方法介绍如下^[17]。

对每个决策者 $i \in N$, 给出一组声明集合 $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_k\} (k \geq 1)$, 单个声明 Ω 由策略编号及逻辑关系符号构成, 如“ $-2\&3$ ”表示没有执行策略2同时执行了策略3。对于状态 $s \in S$, 每个声明 Ω 取一个值, T 或 F 。如果 $\Omega(s) = T$, 表明状态 s 满足该声明; 否则状态 s 不满足该声明。声明可以是非条件形式, 条件形式或者双条件形式的, 声明的各种形式及其组成详见文献[7]。强度偏好下, 需要将决策者 i 对某些状态的强烈偏好体现到声明的强烈偏好上来。假设决策者 i 对声明 $\Omega_l (1 \leq l \leq k)$ 有强烈偏好, 在该声明之后附加符号“ $\&M$ ”, 如“ $-2\&3\&M$ ”, 说明决策者 i 对 Ω_l 的偏好要强烈优于 Ω_{l+1} , 允许有多个“ $\&M$ ”出现, 声明表示结构如图3所示。

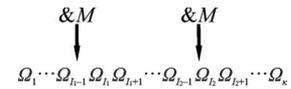


图3 强度偏好下的声明表示

Fig.3 Options under strength preference

对某个声明 $\Omega_j(s)$, 将所有满足 $\Omega_j(s) = T$ 的状态点加上特定的“分值” $\Psi_j(s)$, 计算方式如下

$$\Psi_j(s) = \begin{cases} W_j^{(g)} & \Omega_j(s) = T \\ 0 & \Omega_j(s) = F \end{cases} \quad (1)$$

$$W_j^{(g)} = \begin{cases} 2^{k-j} & l_g < j \leq k \\ 2^{k-j} + 2^k & l_{g-1} < j \leq l_g \\ 2^{k-j} + 2*2^k & l_{g-2} < j \leq l_{g-1} \\ \vdots & \vdots \\ 2^{k-j} + (g-1)*2^k & l_1 < j \leq l_2 \\ 2^{k-j} + g*2^k & 0 < j \leq l_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 k 表示决策者 i 的声明个数。计算出每个状态的总分值 $\Psi^*(s) = \sum_{j=1}^k \Psi_j(s)$, 然后根据总分值大小对状态点进行排序。总分值与强度偏好结构符号的对应规则如表2所示, 将状态点序列用符号 $\gg_i, >_i$ 或 \sim_i 连接, 最后, 采用直接状态排序法对状态偏好序列中使用符号 \sim_i 连接起来的相邻两个状态进行比较并重新排序, 从而得出决策者 i 的最终强度偏好序列 P_i 。

表2 分值和强度偏好的关系

Table 2 Relationship between score and strength preference

分值关系	偏好序列
$\Psi(s_1) = \Psi(s_2)$	$s_1 \sim_i s_2$
$0 < \Psi(s_1) - \Psi(s_2) < 2^k$	$s_1 >_i s_2$
$\Psi(s_1) - \Psi(s_2) \geq 2^k$	$s_1 \gg_i s_2$

1.4 强度偏好下稳定性的逻辑定义与矩阵表达

根据1.3节所述的策略优先权排序法获得决策者 i 的强度偏好序列后, 对强度偏好下的可达状态集合可定义如表3所示。 $R_i(s)$ 表示决策者 i 从状态 s 可达的状态集; $R_i^+(s)$ 表示决策者 i 一般优于状态 s 的可达集(标准改良可达集); $R_i^{++}(s)$ 表示决策者 i 强烈优于状态 s 的可达集(强改良可达集); $R_i^-(s)$ 表示决策者 i 一般劣于状态 s 的可达集(标准劣势可达集); $R_i^{--}(s)$ 表示决策者 i 强烈劣于状态 s 的可达集(强劣势可达集);

表3 可达集 $R_i(s)$ 定义

Table 3 Definition of reachable $R_i(s)$ lists

符号	逻辑含义
$R_i(s)$	$\{q \in S: (s, q) \in A_i\}$
$R_i^+(s)$	$\{q \in S: (s, q) \in A_i \text{ and } q >_i s\}$
$R_i^{++}(s)$	$\{q \in S: (s, q) \in A_i \text{ and } q \gg_i s\}$
$R_i^-(s)$	$\{q \in S: (s, q) \in A_i \text{ and } s >_i q\}$
$R_i^{--}(s)$	$\{q \in S: (s, q) \in A_i \text{ and } s \gg_i q\}$
$R_i^{+..++}(s)$	$R_i^+(s) \cup R_i^{++}(s)$

$R_i^{+,++}(s)$ 表示决策者*i*强烈优于或一般优于状态*s*的可达集。

强度偏好下的稳定性矩阵表达从现有的逻辑表达矩阵结构化而来,采用矩阵结构描述稳定性分析过程,清晰直观,易于理论拓展及算法实现。将强度偏好下稳定性矩阵的表示法描述如下:可达矩阵*J*和偏好矩阵*P*两类矩阵均为*m*阶0-1方阵,其中*m* = |S|为可行状态点的个数。将两类矩阵中满足表4所示条件的位置元素取值为1,其余元素均为0。

表4 *J, P*矩阵(*s, q*)位置为1所满足的条件

Table 4 Condition satisfied by the position (*s, q*) of matrix *J* and *P* being 1

矩阵	含义	(<i>s, q</i>)位置为1所满足的条件
J_i	可达矩阵	$(s, q) \in A_i$
$J_i^{+,++}$	强改良和一般改良可达矩阵	$q \in R_i^{+,++}(s)$
P_i^{++}	强偏好矩阵	$q \gg_i s$
$P_i^{+,++}$	强偏好和一般偏好矩阵	$q \gg_i s$ 或 $q >_i s$
P_i^{--}	强劣势偏好矩阵	$s \gg_i q$
$P_i^{-,+,+}$	非改良偏好矩阵	$q \ll_i s, q <_i s$ 或 $(q \sim_i s \text{ 和 } q \neq s)$

强度偏好下的稳定性分析公式由上述可达矩阵*J*和偏好矩阵*P*推导得到。首先在表5中给出稳定性分析公式中需要使用的若干概念及符号定义,具体公式详见文献[18]。

表5 稳定性分析公式中各符号的含义

Table 5 Meanings of each symbol in the stability analysis formula

符号	含义	符号	含义
<i>N</i>	决策者集合	sign	示性函数
<i>E</i>	所有元素均为1的矩阵	◦	Hadamard product
$M_{N \setminus \{i\}}^{+,++}$	决策者 <i>i</i> 所有对手的强改良和一般改良可达矩阵	$M_{N \setminus \{i\}}$	决策者 <i>i</i> 所有对手的可达矩阵
GS	代表GMR、SMR或SEQ稳定状态	S_i^{WGS}	决策者 <i>i</i> 的弱GS稳定状态集合
S_i^{SGS}	决策者 <i>i</i> 的标准GS稳定状态集合	S_i^{SGS}	决策者 <i>i</i> 的强GS稳定状态集合

在强度偏好条件下有4个标准稳定性:标准纳什稳定(GNash)、标准一般超理性稳定(GGMR)、标准对称超理性稳定(GSMR)和标准序列稳定(GSEQ)。根据对手的反击程度,将标准稳定性扩展为强稳定性和弱稳定性。GNash稳定性并未考虑对手的反击程度,因此强稳定性和弱稳定性只涉及GGMR、GSMR和GSEQ三种情形,即强一般超理性稳定(SGMR)、强对称超理性稳定(SSMR)和强序列稳定(SSEQ)与弱一般超理性稳定(WGMR)、弱对称超理性稳定(WSMR)和弱序列稳定(WSEQ)。表6给出了强度偏好下决策者的稳定性逻辑定义。

根据稳定性的逻辑定义给出相应的矩阵表达式如表7所示。当冲突中决策者为两个时,矩阵形式应退化为两个决策者*i, j*的矩阵,即 $M_{N \setminus \{i\}}$ 退化为 J_j ,表示决策者*j*的可达矩阵, $M_{N \setminus \{i\}}^{+,++}$ 退化为 $J_j^{+,++}$,表示决策者*j*的强改良和一般改良可达矩阵。

表6 强度偏好下稳定性的逻辑表达

Table 6 Logical representations of stabilities under strength preference

稳定性	逻辑定义
GNash	对于决策者 i , 如果状态点 s 满足 $R_i^{+,++}(s) = \emptyset$, 那么该状态点满足决策者 i 的 GNash 稳定性;
GGMR	对于决策者 i , 在状态点 s 下如果对于任一状态点 $s_1 \in R_i^{+,++}(s)$, 至少存在一个状态 $s_2 \in R_{N \setminus \{i\}}(s_1)$, 使得 $s_2 \in \Phi_i^{-,-,-}(s)$, 那么该状态点满足决策者 i 的 GGMR 稳定性;
GSMR	对于决策者 i , 在状态点 s 下如果对于任一状态点 $s_1 \in R_i^{+,++}(s)$, 至少存在一个状态 $s_2 \in R_{N \setminus \{i\}}(s_1)$, 使得 $s_2 \in \Phi_i^{-,-,-}(s)$, 并且对任意的 $s_3 \in R_i(s_2)$ 存在 $s_3 \in \Phi_i^{-,-,-}(s)$, 那么该状态点满足决策者 i 的 GSMR 稳定性;
GSEQ	对于决策者 i , 在状态点 s 下如果对于任一状态点 $s_1 \in R_i^{+,++}(s)$, 至少存在一个状态 $s_2 \in R_{N \setminus \{i\}}^{+,++}(s_1)$, 使得 $s_2 \in \Phi_i^{-,-,-}(s)$, 那么该状态点满足决策者 i 的 GSEQ 稳定性;
SGMR	对于决策者 i , 在状态点 s 下如果对于任一状态点 $s_1 \in R_i^{+,++}(s)$, 至少存在一个状态 $s_2 \in R_{N \setminus \{i\}}(s_1)$, 使得 $s_2 \in \Phi_i^{-,-}(s)$, 那么该状态点满足决策者 i 的 SGMR 稳定性;
SSMR	对于决策者 i , 在状态点 s 下如果对于任一状态点 $s_1 \in R_i^{+,++}(s)$, 至少存在一个状态 $s_2 \in R_{N \setminus \{i\}}(s_1)$, 使得 $s_2 \in \Phi_i^{-,-}(s)$, 并且对任意的 $s_3 \in R_i(s_2)$ 存在 $s_3 \in \Phi_i^{-,-}(s)$, 那么该状态点满足决策者 i 的 SSMR 稳定性;
SSEQ	对于决策者 i , 在状态点 s 下如果对于任一状态点 $s_1 \in R_i^{+,++}(s)$, 至少存在一个状态 $s_2 \in R_{N \setminus \{i\}}^{+,++}(s_1)$, 使得 $s_2 \in \Phi_i^{-,-}(s)$, 那么该状态点满足决策者 i 的 SSEQ 稳定性;
WGS	对于决策者 i , 如果状态点 s 满足标准稳定性, 但并不满足强稳定性, 那么该状态点满足决策者 i 的弱稳定性。

表7 强度偏好下稳定性的矩阵表达

Table 7 Matrix representations of stabilities under strength preference

稳定性	矩阵表达
GNash	$M_i^{\text{GNash}} = J_i^{+,++} \cdot E$
GGMR	$M_i^{\text{GGMR}} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot (P_i^{-,-,-})^T)]$
GSMR	$M_i^{\text{GSMR}} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot Q)]$ 其中, $Q = (P_i^{-,-,-})^T \circ (E - \text{sign}(J_i \cdot (P_i^{+,++})^T))$
GSEQ	$M_i^{\text{GSEQ}} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}}^{+,++} \cdot (P_i^{-,-,-})^T)]$
SGMR	$M_i^{\text{SGMR}} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot (P_i^{-,-})^T)]$
SSMR	$M_i^{\text{SSMR}} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot F)]$ 其中, $F = (P_i^{+,++})^T \circ (E - \text{sign}(J_i \cdot (E - P_i^{+,++})^T))$
SSEQ	$M_i^{\text{SSEQ}} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}}^{+,++} \cdot (P_i^{-,-})^T)]$
WGS	$S_i^{\text{WGS}} = S_i^{\text{GGS}} - S_i^{\text{SGS}}$

2 SP-GMCRDSS 系统设计

冲突的普遍性和突发性要求冲突分析者能对事件快速响应、实时建模、数据分析、快速决策。因此,冲突分析的决策支持系统要求操作简单,功能完备,同时降低对操作终端的要求。本文采用微软 .NET 平台下的 B/S 系统结构,设计了基于 Web Service 的系统 SP-GMCRDSS, SP-GMCRDSS 系统结构如图 4 所示,主要由表示层(用户界面)、业务层以及数据库组成,并通过逻辑关系结合计算机编程语言将不同功能模块系统化与集成化。B/S 结构将系统的核心功能存放在服务器,用户通过浏览器与服务器进行数据交换,对终端操作系统没有限制,可以是 Windows、Unix 或 Mac OS,用户可直接通

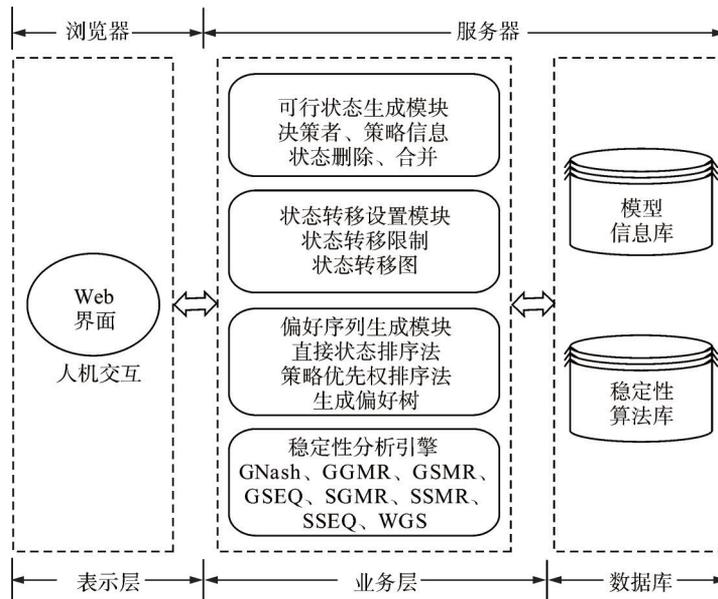


图4 SP-GMCRDSS基本结构

Fig.4 Basic structure of SP-GMCRDSS

过Web浏览器进入系统与服务器进行数据交换。因此该结构能简化系统使用,降低系统的开发和维护成本,由于GMCR理论研究在持续完善,需要不断向系统添加新功能,在B/S结构下只需从服务器端更新程序即可完成系统升级。

Web Service将数据库、业务逻辑和用户界面三者分开,数据库层和业务逻辑层放置在服务器端,用户界面层放置在浏览器端。使用基于ASP.NET的C++语言开发服务器端Web应用程序,提供Web服务,实现建模操作、稳定性分析引擎及其他业务逻辑。采用SQL Server作为数据库管理系统,为系统提供强有力的异构数据管理、检索和安全保障。

SP-GMCRDSS系统应允许使用者直接干预并能接受分析者的直观判断和经验,动态交互式地实现对建模信息的输入和调整,最大限度地满足不同冲突分析者的建模需求,因此精心设计了建模部分的操作接口,包括可行状态生成模块、状态转移设置模块、偏好序列生成模块。稳定性分析引擎是SP-GMCRDSS系统的核心,分析算法基于矩阵结构。

2.1 生成可行状态

此模块的主要功能是生成可行状态。输入决策者个数以及文本挖掘得到的各决策者关键策略个数,如果策略的个数为 k ,则理论上有 2^k 个状态点,但并不是所有的状态均逻辑可行或具有现实意义,此时需要提供状态点删除功能,删除非法状态,保留合法状态。利用匹配算法合并意义相同的状态点。生成可行状态模块工作流程如图5所示。

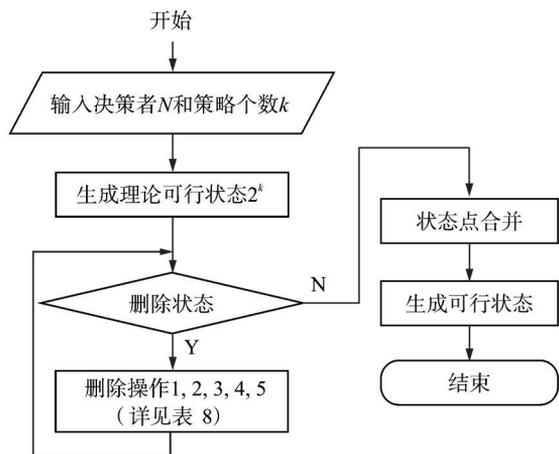


图5 生成可行状态流程

Fig.5 Process for generating feasible states

本模块提供了5种状态删除操作,包括直接删除法、策略互斥法、策略关联法、逻辑表达式法和策略模式匹配法,以及基于策略模式匹配的状态合并操作,具体功能描述如表8所示。

表8 状态设置功能描述
Table 8 Description of status setting functions

操作类型	操作描述
删除操作1 (直接删除法)	直接选择特定状态点,将其删除
删除操作2 (策略互斥法)	指定若干策略,将满足该策略集中至多只有一个策略被执行的状态保留
删除操作3 (策略关联法)	指定若干策略,将满足该策略集中至少有一个策略被执行的状态保留
删除操作4 (逻辑表达式法)	指定逻辑表达式: $(-1\&3)$,表示策略1不执行而策略3执行,删除使逻辑表达式为真的状态点
删除操作5 (策略模式匹配)	设置两个策略模式Pattern: $\{Y, -, N\}$ 模式表示策略1执行、策略3不执行、策略2任意),将满足Pattern1但不满足Pattern2的状态删除
合并操作 (策略模式匹配)	设置一个策略模式Pattern:将满足Pattern1的所有状态合成为一个状态

2.2 设置状态转移

在得到实际的所有可行状态点之后,分析者需要限制各个状态之间的转移是否可行。此模块提供了两种限制方式:策略转移限制法和策略模式匹配法。具体功能描述如表9所示。

表9 状态转移操作功能描述
Table 9 Description of state transition operation functions

操作类型	操作描述
操作1 (策略转移限制)	将状态之间的转移反映到策略之间转移:符号“ \leftarrow, \rightarrow ”表示策略可执行与不可执行之间的单向转移;符号“ \leftrightarrow ”表示策略可执行与不可执行之间的双向转移。如 $\{Opt1: N \leftarrow Y; Opt2: N \leftrightarrow Y\}$ 表示策略1只能从Y转移到N,策略2既可从Y转移到N,也可从N转移到Y
操作2 (策略模式匹配)	设置两个策略模式Pattern:与Pattern1匹配的状态点不能转移到与Pattern2匹配的状态点

2.3 强度偏好序列生成

强度偏好序列是建模部分的核心,获取强度偏好有两种执行方式:手动输入法,在状态点过多时不适用;策略优先权排序法,方法具体描述见1.3节。表10给出策略优先权法的算法流程。

为了更加直观清晰地考察偏好排序过程,给出强度偏好排序的偏好树表示形式。偏好树以二叉树结构为基础,各节点的左分支代表对该层的声明取 T ,右分支代表对该层的声明取 F ,叶节点代表满足分支条件的状态点。以文献[19]中“Lake Gisborne”冲突事件决策者DM2为例,该决策者的声明为 $\{2\&M; -1; -3\}$,共有8个可行状态点,则偏好树可绘制成如图6所示。将图6中的分值对照表2,可得

到DM2的强度偏好序列: $S_3 > S_7 > S_4 > S_8 \gg S_1 > S_5 > S_2 > S_6$ 。

表 10 强度偏好的策略优先权排序算法

Table 10 Sorting algorithm of strategy priority method based on strength preference

Algorithm: 强度偏好的策略优先权排序算法

1. 初始参数:可行状态点序列 S 及其数量 S_{num}
2. Input:声明序列 $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_k\}$
3. For $i = 1$ to S_{num} do
4. $\Psi^*(s) = 0$
5. For $j = 1$ to k do
6. $\Psi_j(S_i) = \begin{cases} W_j^{(g)} & \Omega_j(S_i) = T \\ 0 & \Omega_j(S_i) = F \end{cases}$, 其中 $W_j^{(g)} = \begin{cases} 2^{k-j} & l_g < j \leq k \\ 2^{k-j} + 2^k & l_{g-1} < j \leq l_g \\ 2^{k-j} + 2 * 2^k & l_{g-2} < j \leq l_{g-1} \\ \vdots & \vdots \\ 2^{k-j} + (g-1) * 2^k & l_1 < j \leq l_2 \\ 2^{k-j} + g * 2^k & 0 < j \leq l_1 \end{cases}$
7. $\Psi^*(S_i) = \Psi^*(S_i) + \Psi_j(S_i)$
8. endFor
9. endFor
10. #根据分值 $\Psi^*(S)$ 大小确定偏好类型
11. For $t = 1$ to $(S_{num} - 1)$ do
12. Switch $\Delta\Psi_t = \Psi^*(S_t) - \Psi^*(S_{t+1})$ do
13. Case $\Delta\Psi_t = 0$ then $S_t \sim S_{t+1}$
14. Case $0 < \Delta\Psi_t < 2^k$ then $S_t > S_{t+1}$
15. Case $\Delta\Psi_t \geq 2^k$ then $S_t \gg S_{t+1}$
16. endSwitch
17. endFor
18. Output:强度偏好序列

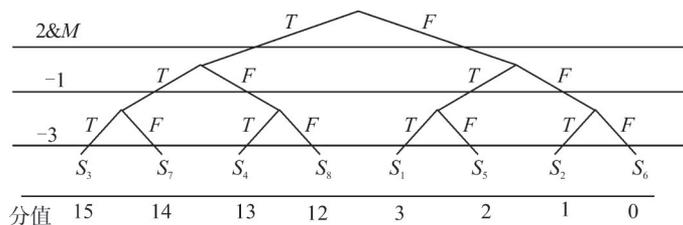


图 6 强度偏好的偏好树图

Fig.6 Preference tree of strength preference

2.4 稳定性分析引擎

强度偏好下的稳定性包括 GNash、GGMR、GSMR、GSEQ、SGMR、SSMR、SSEQ、WGMR、WSMR 和 WSEQ。表 11 为稳定性分析算法描述。

表 11 强度偏好下稳定性分析算法
Table 11 Stability analysis algorithm under strength preference

Algorithm: 稳定性分析算法	
1. 初始参数:	$J_i, J_i^{+,++}, P_i^{++}, P_i^{+,++}, P_i^{--}, P_i^{-,--}, =$
2.	$M_i^{GNash} = J_i^{+,++} \cdot E$
3.	$M_i^{GGMR} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot (P_i^{-,--})^T)]$
4.	$Q = (P_i^{-,--})^T \circ (E - \text{sign}(J_i \cdot (P_i^{+,++})^T))$
5.	$M_i^{GSMR} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot Q)]$
6.	$M_i^{GSEQ} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}}^+ \cdot (P_i^{-,--})^T)]$
7.	$M_i^{SGMR} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot (P_i^{--})^T)]$
8.	$F = (P_i^{++})^T \circ (E - \text{sign}(J_i \cdot (E - P_i^{++})^T))$
9.	$M_i^{SSMR} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}} \cdot F)]$
10.	$M_i^{SSEQ} = J_i^{+,++} \cdot [E - \text{sign}(M_{N \setminus \{i\}}^+ \cdot (P_i^{--})^T)]$
11.	#diag()取对角线元素
12.	$GNash, GGMR, GSMR, GSEQ = \text{diag}(M_i^{GNash}),$ $\text{diag}(M_i^{GGMR}), \text{diag}(M_i^{GSMR}), \text{diag}(M_i^{GSEQ})$
13.	$SGMR, SSMR, SSEQ = \text{diag}(M_i^{SGMR}),$ $\text{diag}(M_i^{SSMR}), \text{diag}(M_i^{SSEQ})$
14.	$WGMR, WSMR, WSEQ = 1 - \text{diag}(M_i^{SGMR}),$ $1 - \text{diag}(M_i^{SSMR}), 1 - \text{diag}(M_i^{SSEQ})$

综上所述,数据驱动下的系统设计流程如图 7 所示,其中箭头表示不同模块之间数据的交换。用户界面支持动态交互式决策信息的输入,并将数据传输至服务器端调用数据库中的算法辅助系统分析。

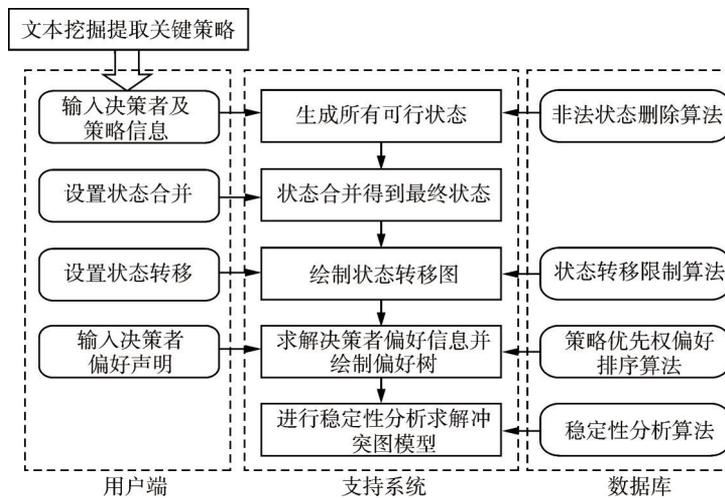


图 7 数据驱动下的系统设计流程图

Fig.7 Flow chart of data driven system design

3 案例分析

使用本文研发的决策支持系统 SP-GMCRDSS 构建“兰州水污染事件”冲突模型。

3.1 事件背景描述

随着我国经济的快速增长,环境污染问题日趋严重,由此引起的冲突频发。2014年4月10日,兰州市威立雅水务公司报告称自来水被严重污染。这次水污染事件主要是由中石化兰州分公司原料动力厂导致的地下含油污水引发,如何解决此次兰州水污染事件?是否应该将中石化兰州分公司等污染企业整体从兰州搬迁?但这一举措不仅影响中石化兰州分公司自身利益,还会影响当地政府的经济利益。同时,此次水污染事件中兰州威立雅水务公司也存在监管不力的问题。地下管道是供水企业运营的重要组成部分,兰州威立雅水务公司有责任对其进行维护、确保供水安全。但由于更换管道费用巨大,兰州威立雅水务公司不愿意承担。

中石化兰州分公司出于自身利益不希望从兰州迁址;兰州威立雅水务公司考虑到更换管道的成本过高,只想修修补补,这样无法解决兰州水污染问题,从而引发冲突,双方陷入了僵持阶段。当地政府又如何在水污染事件发生后权衡各方的利益,同时也考虑保护税收利益最终做出合理的决策,化解冲突各方的矛盾,从而有效地解决冲突?

3.2 事件冲突模型构建

针对兰州水污染冲突事件,本文从错综复杂的冲突中挖掘出3个决策者,分别为:是否愿意更换水管道的兰州威立雅水务公司(DM1)、支持兰州威立雅水务公司还是倾向中石化兰州分公司的地方政府(DM2),以及是否考虑迁移的中石化兰州分公司(DM3)。紧接着使用八爪鱼网络爬虫工具采集不同数据源网址的文本数据,通过Jieba分词后,利用Python进行进一步的词频统计,提炼出每个决策者的关键策略文本,确定他们各有1,2,1个策略。然后在本系统中输入决策者和对应策略的个数,信息输入界面如图8所示,“1,2,1”表示冲突模型中共包含3个决策者,并且第一个决策者有1个策略,第二个决策者有2个策略,第三个决策者有1个策略。其次输入文本挖掘得到的各决策者及其策略数据,如图9所示,点击提交后系统会自动生成所有可能的状态,如图10所示。



图8 策略信息输入

Fig.8 Strategy information input



图9 输入决策者和策略的描述

Fig.9 Input description of decision makers and strategies

兰州威立雅水务公司	改造设备	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
地方政府	支持迁址	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	
	支持改造设备	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	
中石化兰州分公司	迁址	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16

图10 生成理论可行状态

Fig.10 Theoretically feasible states generation

图10为所有理论状态点,共有 $2^4=16$ 种状态。但事实上,如果中石化兰州分公司(DM3)选择迁址,无论其他两个决策者选择怎样的策略,均能解决当前的水污染问题。因此,可将所有中石化兰州分公司选择迁址的状态合并,如图11所示。状态合并后,此次冲突事件共包含9种可行状态,如图12所示,其中,“1”表示决策者选择该策略,“0”表示决策者放弃该策略,“2”表示既可能选择该策略也可能放弃该策略。

状态合并

兰州威立雅水务公司	改造设备	-	-
地方政府	支持迁址	-	-
	支持改造设备	-	添加
中石化兰州分公司	迁址	Y	Y

图 11 合并状态界面

Fig.11 Interface of merge status

所有可行状态

兰州威立雅水务公司	改造设备	0	0	0	0	1	1	1	1	2
地方政府	支持迁址	0	1	0	1	0	1	0	1	2
	支持改造设备	0	0	1	1	0	0	1	1	2
中石化兰州分公司	迁址	0	0	0	0	0	0	0	0	1

S1 S2 S3 S4 S5 S6 S7 S8 S9

图 12 最终可行状态

Fig.12 Final feasible states

在得到所有可行状态之后,需要对状态之间是否能进行转移进行设置,如图 13 所示。点击提交后可以得到 3 个决策者的状态转移图,如图 14 所示。圆点表示 9 种可行状态(由 3 个冲突主体所选择的策略组合而成),弧的箭头方向表示从某一个状态可以移动到另一个状态(如 3 个冲突主体在谈判中从某一个僵持阶段协商后进入另一个阶段),双向箭头表示两个状态之间可以互相移动(这两个状态往往在冲突中没有显著的利弊),但是单向箭头一般是从不利状态移动到更有利于解决冲突的状态。各决策者的强度偏好声明及相关说明如表 12 所示。

设置状态转移

策略转移限制: 限制Y和N之间的转移

兰州威立雅水务公司	改造设备	N	<->	Y
地方政府	支持迁址	N	<->	Y
地方政府	支持改造设备	N	<->	Y
地方政府	迁址	N	<->	Y

策略模式匹配: 限制某些状态之间的转移

兰州威立雅水务公司	改造设备	Y	Y	Y	Y
地方政府	支持迁址	Y	Y	Y	Y
地方政府	支持改造设备	Y	Y	添加	Y
地方政府	迁址	Y	Y	Y	Y

图 13 设置状态转移

Fig.13 State transition setting

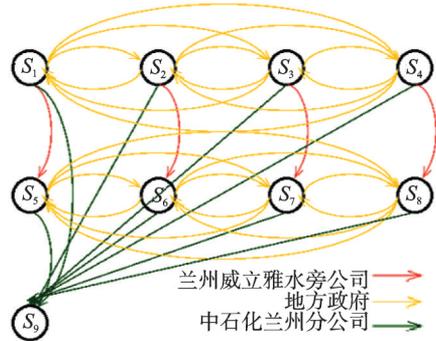


图 14 状态转移图

Fig.14 State transition diagram

表 12 兰州水污染冲突事件各决策者的声明及其解释说明

Table 12 Options and explanations of decision makers for Water Pollution conflict events in Lanzhou

决策者	声明	解释说明
兰威立雅水务公司(DM1)	-1&-3&M	强烈希望自己不改造设备且DM2不对自己施加压力
	1IFF3	当且仅当DM2对其施加压力时才对设备进行改造
	4	希望DM3迁址
	2	希望DM2施加压力令DM3迁址
地方政府(DM2)	-4&M	强烈希望DM3不迁址
	1&M	强烈希望DM1改造设备
	-2&3	不对DM3施加压力而对DM1施加压力
	-2&-3	不对DM1和DM3施加压力
	2&3	对DM1和DM3施加压力
中石化兰州分公司(DM3)	-4&M	强烈希望自己不迁址
	-2	不希望DM2施加压力令自己迁址
	1	希望DM1改造设备
	3	希望DM2施加压力令DM1改造设备

4 结束语

冲突分析图模型理论的实际运用充分融入了分析者的直观判断和经验,相应的数据驱动决策支持系统在数据分析的基础上支持半结构化和非结构化决策,允许分析者直接干预并能接受分析者的主观判断,满足动态交互式的操作需求。以往学者研发的支持系统往往存在交互程度或偏好结构支持方面的不足,以致使用体验和应用范围上的缺陷。本文研发的数据驱动下的SP-GMCRDSS是基于WEB系统,新增强度偏好分析功能能够更全面地刻画决策者的情感色彩、提供的多种交互式操作方法能够全面满足分析者各类建模需求,同时设计了可行状态生成、状态转移设置、强度偏好序列生成和稳定性分析引擎4个模块的业务及算法流程,给出了完整的设计方案。此外,本文利用文本挖掘技术提取冲突参与者的关键策略信息,可以辅助分析者确定决策支持系统SP-GMCRDSS建模信息的输入,降低了模型构建的主观性。

SP-GMCRDSS系统能应用于各种复杂的多主体、多策略冲突问题求解,帮助分析者更高效地认识和解决冲突问题。该系统同时也为未来GMCR决策支持系统的构建提供了新思路,将来可以进一步考虑混合偏好^[16]、主体结盟加强^[20]以及权力不对称^[21-22]的复杂情形。

参考文献:

- [1] VON N, MORGENSTERN O. The theory of games and economic behavior[M]. Princeton: Princeton University Press, 1944.
- [2] HOWARD N. Paradoxes of rationality: Theory of metagames and political behavior[M]. Cambridge: MIT Press, 1971.
- [3] 陈晔,武茜,徐海燕. 基于图模型的供需匹配决策研究[J]. 科技管理研究, 2018, 38(5): 218-226.
CHEN Ye, WU Qian, XU Haiyan. Research on supply and demand matching decision making based on graph model[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(5): 218-226.
- [4] 梁罗希,吴江. 决策支持系统发展综述及展望[J]. 计算机科学, 2016, 43(10): 27-32.
LIANG Luoxi, WU Jiang. Review and prospect on the development of decision support systems[J]. Computer Science, 2016, 43(10): 27-32.
- [5] 朱青,卫柯臻,丁兰琳,等. 基于文本挖掘和自动分类的法院裁判决策支持系统设计[J]. 中国管理科学, 2018, 26(1): 170-178.
ZHU Qing, WEI Kezhen, DING Lanlin, et al. Court judgment decision support system based on text-mining and machine learning[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(1): 170-178.
- [6] FANG L P, HIPEL K W, KILGOUR D M. A decision support system for interactive decision making: The graph model for conflict resolution[M]. New York: Wiley, 1993.
- [7] FANG L P, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. A decision support system for interactive decision making—Part I: Model formulation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2003, 33(1): 42-55.
- [8] FANG L P, HIPEL K W, KILGOUR D M, et al. A decision support system for interactive decision making—Part II: Analysis and output interpretation[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2003, 33(1): 56-66.
- [9] 赵金帅,徐海燕. 基于图模型理论有序偏好下的冲突反问题研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(3): 143-149.
ZHAO Jinshuai, XU Haiyan. Research on inverse problem based on graph model for ordinal preference[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(3): 143-149.
- [10] 赵士南,孙采云,张光明,等. 基于分段策略评分的冲突主体偏好排序方法及其应用[J]. 运筹与管理, 2022, 31(10): 120-126.
ZHAO Shinan, SUN Caiyun, ZHANG Guangming, et al. A preference ranking approach based on segmented option weighting and its application[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(10): 120-126.
- [11] 孟宏鹏,徐海燕,侯宇航. 基于GMCR-NPAWLAK混合模型的冲突分析研究[J]. 运筹与管理, 2017, 26(10): 181-187.
MENG Hongpeng, XU Haiyan, HOU Yuhang. Conflict analysis based on GMCR-NPAWLAK hybrid model[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(10): 181-187.

- [12] XU H Y, HIPEL K W, KILGOUR D M. Matrix representation of solution concepts in multiple decision maker graph models [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2009, 39(1): 96-108.
- [13] JIANG J, FAN Y Z, XIN J J, et al. A decision support system based on matrix representation for conflict resolution[C]// *Proceedings of International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. [S.l.]: IEEE, 2011: 2720-2724.
- [14] XU H Y, HAN Y, GINGER Y, et al. Modeling and implementation of a new negotiation decision support system for conflict resolution under uncertainty[J]. *Group Decision and Negotiation*, 2022(31): 531-553.
- [15] 吴雨珊, 江驹, 韩雪山. 基于冲突图模型强度偏好下的结盟稳定性分析[J]. *系统工程*, 2015, 33(2): 58-67.
WU Yushan, JIANG Ju, HAN Xueshan. Coalition analysis based on the graph model for conflict resolution[J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(2): 58-67.
- [16] XU H Y, KILGOUR D M, HIPEL K W, et al. Theory and application of conflict resolution with hybrid preference in colored graphs[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(3): 989-1003.
- [17] 侯宇航, 徐海燕. 基于冲突图模型策略优先权排序法的强度偏好排序研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(9): 64-70.
HOU Yuhang, XU Haiyan. Research on option prioritization for strength of preference based on the graph model for conflict resolution[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(9): 64-70.
- [18] XU H Y, KILGOUR D M, HIPEL K W. An integrated algebraic approach to conflict resolution with three-level preference[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, 216(3): 693-707.
- [19] HOU Y H, JIANG Y Z, XU H Y. Option prioritization for three-level preference in the graph model for conflict resolution [C]// *Proceedings of International Conference on Group Decision and Negotiation*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2015: 269-280.
- [20] ZHAO S N, XU H Y, HIPEL K W, et al. Mixed coalitional stabilities with full participation of sanctioning opponents within the graph model for conflict resolution[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(6): 3911-3925.
- [21] ALI S, XU H Y, YANG K, et al. Environment management policy implementation for sustainable industrial production under power asymmetry in the graph model[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 29: 636-648.
- [22] XU H Y, ADDAE B A, WEI R. Conflict resolution under power asymmetry in the graph model[C]// *Proceedings of the 20th International Conference on Group Decision and Negotiation*. Toronto: [s.n.], 2020.

作者简介:



徐海燕(1963-), 通信作者, 女, 教授, 博士生导师, 研究方向: 智能决策、冲突分析与数据分析, E-mail: xuhaiyan@nuaa.edu.cn。



孔杨(1981-), 女, 博士研究生, 研究方向: 冲突分析与卫生管理, E-mail: kongyang@bzmc.edu.cn。



戴思凡(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 决策理论与冲突分析, E-mail: dsf1985077@163.com。

(编辑: 夏道家)