

基于案例的突发事件推演规则验证方法

王 宁, 谢晓珊, 刘海园

(大连理工大学管理与经济学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为提高突发事件案例利用率和突发事件推演规则的适用性及准确率, 结合应急管理和知识管理理论, 提出了一种利用相似案例验证推演规则适用性的方法. 该方法以共性知识元模型作为突发事件情景、推演规则、案例的共性表示基础. 首先, 利用当前情景匹配突发事件推演规则, 提取匹配成功的推演规则; 然后结合当前情景匹配突发事件案例, 并以匹配成功的案例对推演规则进行推演验证, 验证通过的推演规则用于突发事件情景推演, 从而为应急管理提供决策支持; 最后, 以汶川县七盘沟等泥石流为例验证了该方法的有效性.

关键词: 知识元; 突发事件; 案例匹配; 规则验证; 情景推演

中图分类号: C934 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2019)02-0145-13

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2019.02.001

Validation method of emergency deduction rules based on cases

Wang Ning, Xie Xiaoshan, Liu Haiyuan

(Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to improve the utilization ratio of emergency cases as well as the suitability and accuracy of the emergency inference rules, combining the emergency management and knowledge management, this paper proposes a method to verify the applicability of inference rules by similar cases. It takes the general knowledge model as a foundation of scenarios, common inference rules and cases. Firstly, this method uses the current scenario to match emergency inference rules, then extracts the matched inference rules. After that those matched inference rules, combined with the current scenario are matched with emergency cases; those matched cases are used to verify the extracted inference rules by deduction, the valid inference rules are used in scenario deduction to provide decision support for scenario deduction of emergencies. Finally, the debris flows happened in Qipan gully in Wenchuan and other places validate the effectiveness of the method.

Key words: knowledge element; emergency; case-based matching; inference rules validation; scenario deduction

1 引 言

近年来一系列突发事件给人类社会带来了巨大的财产损失以及人员伤亡, 促使相关研究成为了热点问题. 突发事件具有极强的随机性、不确定性, 演化过程复杂且影响因素较多, 为降低突发事件推演与应对的复杂性, 将突发事件划分为“情景”, 从“情景”出发研究突发事件的演化与推演成为当前研究的主流^[1-2]. 基于情景的突发事件的推演又可分为规则推演(RBR)^[3]与案例推演(CBR)^[4]两种主要模式, 人们在长期的实践与科研中整理形成的突发事件案例库与规则库, 为基于突发事件规则推演与案例推演提供了数据前提. 两

收稿日期: 2016-09-09; 修订日期: 2017-04-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71373034; 71774021); 国家自然科学基金重点资助项目(71533001).

种推演模式各有优点,通常认为规则推演逻辑性更强,推演更为精准,但由于突发事件情景依然多变,给规则的适用性与准确性也带来了很大的挑战。

在突发事件规则推演领域,对于突发事件规则推演的研究主要从已有规则出发,直接使用概率规则推理^[5]、模糊规则推理^[6]、构建规则引擎^[7]及融合规则推理与案例推理^[8]等方法实现情景状态转变,强调规则推演方法的使用,而缺乏规则本身的适用性验证。在规则验证方面,李晓聪^[9]提出了一种基于谓词逻辑的空间访问控制系统的描述方法,并采用模型检测的方法来验证空间访问控制系统规则是否满足相应的约束;文献^[10]提出了一种面向主体的规则验证方法,并且基于该方法实现了面向主体的规则验证平台;肖冰冰^[11]提出了一种规则的逻辑规则验证方法,提高了规则库的正确性、一致性和完整性;王科富^[12]利用关联矩阵实现了规则结构错误的有效检测;He等^[13]利用Petri网构建可达图检测规则的结构错误。综合来看,现有对规则验证方法的研究主要集中于控制系统即确定性事件的应用系统,而未涉及应急管理领域,并且验证的是访问控制系统授权规则^[9]、智能主体服务规则的选择^[10]及推理规则的结构错误^[11-13],包括规则冗余、冲突、死循环及完备性,未从推演规则本身出发验证其适用性。而在应急管理领域中,由于突发事件本身的特殊性,即发生突然、情景要素繁杂以及发生发展机理复杂等特点,突发事件演化发展方向不确定性极强,导致在突发事件规则推演过程中,经常出现推演规则输入输出要素匹配良好,但推演的结论却存在很大差异的情况。因此,在突发事件规则推演中,有必要对推演规则适用性验证进行研究。

针对以上问题,本文提出了一种利用相似案例对推演规则进行适用性验证的方法,该方法主要是基于共性知识元模型对突发事件情景、案例、推演规则进行统一表示,其中案例相似度计算、推演规则验证通过率计算采用了与传统统计学相结合的方式,实现了推演规则适用性的有效验证,从而提升情景推演准确性及应急决策科学性。

2 基于知识元的突发事件情景表示

在情报学领域,知识元被定义为构造知识结构的基元,此定义从文本内容组织排列的角度出发,将知识元作为组成文献最小的独立单位^[14];王延章^[15]认为知识元是关于客观事物对象的认知单元,具有给定论域或范畴下的不可再分性和完备性,并提出共性知识模型,对突发事件知识元做出具体的形式化描述;文献^[16]在其基础上利用知识元对突发事件案例情景化表示及存储模式进行了研究,形成了突发事件应急案例库;王宁等^[3]借鉴知识元对突发事件推理规则进行表示的基础上,提出了一种基于推理规则的突发事件问题域特征网络构建方法。在以上研究基础上,本文以共性知识元模型对突发事件案例、情景、推演规则进行了统一表示,实现突发事件情景、案例和推演规则的综合集成管理,为推演规则适用性验证提供基础模式与方法。

2.1 共性知识元模型

在现代计算环境和管理学视角下,王延章^[15]认为新的模型理念应该是知识、数据、信息、规则与数学混合模型,并用 M 表示这类模型的集合。对于一个具体的共性知识元模型 $m(m \in M)$,主要由对象知识元 K_m 、属性知识元 K_a 和关系知识元 K_r 三部分组成。

1)对象知识元

$$K_m = (N_m, A_m, R_m), \forall m \in M, \quad (1)$$

其中 N_m 为对应事物的概念及属性名称, A_m 表示对应的属性状态集, R_m 表示 $A_m \times A_m$ 上的映射关系,描述属性状态变化及相互作用关系。

2)属性知识元

$$K_a = (p_a, d_a, f_a), \forall a \in A_m, \forall m \in M, \quad (2)$$

其中 A_m 又与属性知识元 K_a 对应,对于事物属性 $a \in A_m$, p_a 为可测特征描述, d_a 为测度量纲, f_a 为数值或时变函数。

3) 关系知识元

$$K_r = (p_r, A_r^I, A_r^O, f_r), \quad \forall r \in R_m, \forall m \in M, \quad (3)$$

对于属性状态关系 $r \in R_m$, p_r 为映射属性描述, A_r^I 为输入属性状态集, A_r^O 为输出属性状态集, f_r 为映射函数, $A_r^O = f_r(A_r^I)$, 其中 $p_r \neq \emptyset$, $A_r^O \neq \emptyset$, $A_r^I \neq \emptyset$, $f_r \neq 0$, 这样共性知识元模型 K_f 就可描述为

$$K_f = \bigcup_{m \in M} \left(K_m \cup \left(K_a \cup K_r \right) \right). \quad (4)$$

对某一具体知识元进行赋值, 就会得到知识元实例, 即知识元实例化. 例如 $N \cdot A_u$ 表示知识元 N 的属性知识元 A_u , 且 A_u 不含具体值, a_u 为 $N \cdot A_u$ 的属性状态值, 则其知识元实例化过程可描述为 $P : N \cdot A_u = a_u$, 意为将属性状态值 a_u 赋给知识元 N 的属性 A_u , a_u 即为知识元实例, 且 a_u 必须满足预先定义的知识元属性约束.

共性知识元模型 K_f 可理解成是对现实世界中不同客观事物统一的知识抽象表示, 它是对事物共性特征的高度概括, 使得整个匹配、检索、验证过程有着统一的表示基础, 从而可以更好地应对复杂的突发事件推演问题. 基于突发事件的情景推演具有高度的复杂性, 推演过程中需要决策者充分利用多学科、多领域、多渠道的知识进行实时决策. 而知识元实例化后可以直接应用于推演研究, 基于知识元结构化表示方法也便于其存储到数据库中, 应急管理人员可方便地进行检索、调用及共享. 因此, 将共性知识元模型引入到应急管理领域意义重大.

2.2 基于知识元的情景表示

突发事件情景是决策者进行应急管理决策的基础, 因此对突发事件情景给出明确清晰的界定是非常有必要的. Durance 等^[17]认为情景是对不确定环境中的突发事件在具体时刻上的属性状态描述, 对应着突发事件在某个时刻片段点上的集成表现. 姜卉等^[18]认为情景是由一定的要素构成的, 并认为对一个突发事件的描述可以从受害体、受灾体和抗灾体三个维度进行描述; 舒其林^[19]将情景基本要素分为致灾因子、承灾体及孕灾环境; 陈晨等^[20]在其基础上加上应急活动及环境影响作为突发事件情景要素总体构成; 王宁等^[16]将应急管理案例的情景知识结构分为事件、承灾体及应急活动. 由于突发事件是一系列事件及承灾体相互作用的结果, 所以本文将情景定义为在某时刻、一定区域范围内, 对突发事件演化发展产生一定作用或受突发事件演化发展发生一定改变的事物及其属性状态集, 这里的作用既有促进作用也有抑制作用. 对突发事件发生发展起一定作用的首先是突发事件本身以及随之产生的一系列次生、衍生事件, 然后事件对承灾体产生作用使其属性状态发生改变, 承灾体反作用于突发事件使得其属性状态发生变化, 另外人为的应急活动也会对突发事件和承灾体的属性状态产生一定影响. 由于突发事件的发生发展具有极强的随机性, 应急决策者面临的实时环境主要是在人们还未采取应急活动之前, 基于承灾体和突发事件相互作用的实时结果展现, 即应急活动理论上应作为情景信息精准获取及基于情景的规则推演之后采取的应对措施, 因此本文将情景要素主要分为事件和承灾体.

情景作为突发事件规则推演与案例推演的出发点, 其表示模式直接影响到规则与案例的匹配. 为了便于后文的推演规则检索、相似案例匹配以及最终的推演规则验证, 需要对情景、案例及推演规则进行统一表示, 而共性知识元模型正好满足这一需求, 因此本文采用共性知识元模型对突发事件情景进行形式化表示. 由情景定义可知, 情景 S 可分为事件知识元 KE_i 和承灾体知识元 KO_j , 将其形式化表示为

$$S = \{KE_1, KE_2, \dots, KE_i, KO_1, KO_2, \dots, KO_j\}, \quad (5)$$

其中 KE_i 是情景 S 中的事件知识元, $1 \leq i \leq l$. 由共性知识元模型表示方法可知 KE_i 含有具体的属性, 即 $KE_i = \{E_1^i, E_2^i, \dots, E_{a_i}^i\}$, 其中上标 i 代表事件知识元的序号, 下标 a_i 代表第 i 个事件知识元含有的属性个数, 则 $E_{a_i}^i$ 代表第 i 个事件知识元的第 a_i 个属性知识元, 未经实例化不含具体值; KO_j 为情景 S 中承灾体知识元, $1 \leq j \leq n$. 同理 $KO_j = \{O_1^j, O_2^j, \dots, O_{b_j}^j\}$, 其中上标 j 代表承灾体知识元的序号, 下标 b_j 则代表第 j 个承灾体知识元含有的属性个数, 则 $O_{b_j}^j$ 代表第 j 个事件知识元的第 b_j 个属性知识元, 未经实例化不含具体值. $P : KE_i \cdot E_{a_i}^i = e_{a_i}^i$, 即知识元 KE_i 的第 a_i 个属性 $E_{a_i}^i$ 实例化之后属性值为 $e_{a_i}^i$.

$ke_i = \{e_1^i, e_2^i, \dots, e_{a_i}^i\}$, $e_{a_i}^i$ 代表 $e_{a_i}^i$ 实例化之后的属性知识元实例, 含有具体值; 由于在实例化过程中存在属性缺失或属性取值为空, 因此 $a_i' \leq a_i$; 同理承灾体知识元 KO_j 实例化得到 $ko_j = \{o_1^j, o_2^j, \dots, o_{b_j}^j\}$, $b_j' \leq b_j$. 则对应的情景实例 S^s 可描述为

$$S^s = \{ke_1, ke_2, \dots, ke_{l'}, ko_1, ko_2, \dots, ko_{n'}\}, \quad (6)$$

其中 S^s 与 S 的主要区别在于后者未经知识元实例化, 含有相关属性, 但其具体属性取值为空. 对于应急决策者首先面对的一个抽象的情景模型 S , 对其实例化处理即 $P(S) \rightarrow S^s$ 得到突发事件情景实例, S^s 可直接用于推演规则检索及案例匹配. 同一事物知识元实例化之后可能对应多个实例化对象, 即对应的 $l' \geq l, n' \geq n$. 后文的案例情景 S^{ks} 及当前情景 S^{ds} 获取都是情景模型 S 经过实例化得到的.

2.3 突发事件案例表示

一个应急案例描述了案例突发事件发生发展的全过程, 是由多个情景按照事件发生的时间顺序组成的情景序列. 以往将整个突发事件作为一个情景研究, 缺乏对情景的划分, 很难适应演变过程复杂、演化路径多样的突发事件应急管理. 因此, 以突发事件发展过程中情景要素属性值的变化作为情景片段转换的标志, 即某知识元属性值发生变化代表一个新的情景片段. 由此, 将突发事件案例情景模型记为 EC , 实例化之后得到 EC^s , EC^s 中包含了一系列的情景片段, 即

$$EC^s = \{S^{k_1^s}, S^{k_2^s}, \dots, S^{k_r^s}\}. \quad (7)$$

情景片段 $S^{k_r^s}$ 是突发事件发生发展过程中在某一时刻所有情景要素的集合, 主要由突发事件和承灾体进行描述. 为统一标识案例情景, 记 S^{ks} 为案例情景标识, 基于 $S^{k_1^s}, S^{k_2^s}, \dots, S^{k_r^s}$ 的共性特征, 将其实例化案例情景模型统一记为 S^{ks} . 因此, 基于情景表示模型 S 可将案例情景模型 S^{ks} 表示为

$$S^{ks} = \{ke_1^k, ke_2^k, \dots, ke_{l_k}^k, ko_1^k, ko_2^k, \dots, ko_{n_k}^k\}, \quad (8)$$

其中 $ke_{i'}^k = \{e_1^{i'k}, e_2^{i'k}, \dots, e_{a_{i'}}^{i'k}\}$, $1 \leq i' \leq l_k$, $a_{i'}$ 代表案例情景 S^{ks} 中第 i' 个事件知识元含有的属性知识元个数, $ko_{j'}^k = \{o_1^{j'k}, o_2^{j'k}, \dots, o_{b_{j'}}^{j'k}\}$, $1 \leq j' \leq n_k$, $b_{j'}$ 代表案例情景 S^{ks} 中第 j' 个承灾体知识元含有的属性知识元个数; l_k, n_k 则分别代表案例情景 S^{ks} 中事件知识元实例个数和承灾体知识元实例个数.

2.4 突发事件推演规则表示

产生式规则的知识表示在一般专家系统中得到广泛应用, 主要是因为产生式系统具有知识表示直观简明、符合人类的推理习惯的特点. 可计算模型 $y = f(x)$ 也可以用产生式规则表示, 如将变量 x 和对应关系 $f(x)$ 作为规则输入, 因变量 y 作为规则输出, 那么可计算模型的产生式表示为 $x \wedge f(x) \rightarrow y$, 意为将 x 与 $f(x)$ 的对应关系作为规则 y 输出. 因此, 文中涉及的推演规则或可计算模型均以产生式规则的形式表示. 突发事件推演规则库 RD 存放突发事件的一系列规则的集合, 即 $RD = \{R_1, R_2, \dots, R_e\}$. 其中推演规则可用知识元属性状态关系 $K_r = (p_r, A_r^I, A_r^O, f_r)$, $\forall r \in R_m, \forall m \in M$ 进行表示, p_r 为映射属性描述如结构、隶属、线性、非线性、模糊、随机及具体的映射函数等. 同时有 $r: A_r^I \rightarrow A_r^O, A_r^I \in A_m, A_r^O \in A_m, \forall m \in M$, 其中 A_r^I 称为输入属性状态集, A_r^O 称为输出属性状态集, 对应存在具体映射函数 $A_r^O = f_r(A_r^I)$, 这个映射函数既可以表示基本的产生式规则, 又可以表示具体的函数规则包括可计算模型. 基于此, 给出推演规则 R_e 的结构表示形式

$$R_e: A_r^O = f_r(A_r^I). \quad (9)$$

对应的输入属性状态集 A_r^I 和输出属性状态集 A_r^O 用知识元及其属性表示为

$$A_r^I = \{n_\alpha \cdot a_\alpha^\beta = "x_\alpha^\beta" | 1 \leq \alpha \leq \alpha', 1 \leq \beta \leq t_\alpha\}, \quad (10)$$

$$A_r^O = \{n_\theta \cdot a_\theta^\gamma = "y_\theta" | 1 \leq \theta \leq \theta', 1 \leq \gamma \leq t_\theta\}. \quad (11)$$

对于输入属性状态集 A_r^I , $n_\alpha \cdot a_\alpha^\beta$ 表示规则输入中第 α 个知识元的第 β 个属性, α' 为知识元的个数, t_α 为第 α 个知识元的属性个数, $i = \alpha, \theta, x_\alpha^\beta$ 为输入的第 α 个知识元第 β 个属性的状态值. $n_\alpha \cdot a_\alpha^\beta = "x_\alpha^\beta"$ 是

规则输入所含知识元属性实例化的过程, 基于实际情景执行推演规则时, 可利用该过程依次实现推演规则输入实例化, 执行推演规则之后得到规则输出, 通过 $n_{\theta} \cdot a_{\theta}^{\gamma} = "y_{\theta}^{\gamma}"$ 依次实现推演规则输出实例化。

3 推演规则验证总体架构

突发事件情景推演方法研究主要集中于启动应急预案^[21]、基于案例推演^[22]、基于规则推演^[5]及案例规则混合推演^[8]等。在突发事件应急决策中, 应急决策主体处在高度不确定和紧急的环境下, 受到有限的时间、资源和人力等约束条件带来的压力, 加上突发事件的随机性特征, 使得应急决策主体很难在极短时间内做出较为准确的应急决策。同时, 突发事件的罕见特征决定了决策主体必须依靠对当前情景的判断以及对未来发展态势的把握, 经过全局性的考量和筹谋之后, 通过非常规、非程序化的手段做出准确的决断。而基于规则推演自身的科学性、易获取性, 及时高效地推演出目标情景, 为突发事件应急管理提供决策支持。以往的规则推演都是将获取的推演规则直接用于推演, 对于确定性事件而言, 推演规则往往具有一定的适用性, 而突发事件的随机性、不确定性特征使得推演规则适用性大大降低, 准确率也随之降低。因此本文提出一种基于实时情景的推演规则获取及验证方法, 辅助应急决策主体做出实时准确的决断。

结合知识元共性关系, 如图 1 所示, 推演规则验证方法具体步骤如下:

步骤 1 将当前情景 S^{ds} 对应的属性代入规则库 RD 中, 并以一定的检索策略进行检索。

步骤 2 对于检索通过的推演规则依据一定的筛选策略进行筛选, 输出通过筛选的推演规则 R_{Th} 。

步骤 3 将当前情景 S^{ds} 对应的属性代入案例库 ECD 中, 并以一定的检索策略进行检索。

步骤 4 对于检索出的案例情景根据一定的匹配策略进行一次匹配和二次匹配, 输出每一推演规则 $R_{Th}, 1 \leq h \leq \sigma$ 对应的案例情景 $S_h^{ky}, 1 \leq y \leq z_h$ 。

步骤 5 将筛选之后输出的推演规则 $R_{Th}, 1 \leq h \leq \sigma$ 代入相似案例情景 $S_h^{ky}, 1 \leq y \leq z_h$ 进行验证。

步骤 6 提取通过验证的推演规则, 记为 $R_{Th'}, h' \in [0, \sigma]$ 。

步骤 7 基于当前情景 S^{ds} 执行推演规则 $R_{Th'}, h' \in [0, \sigma]$, 输出目标情景 S^C 。

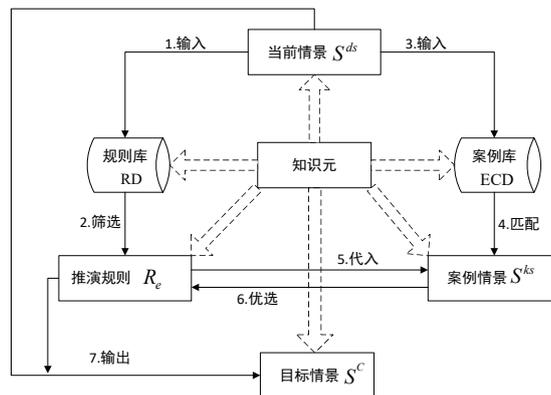


图 1 推演规则验证总体架构

Fig. 1 General framework of validation of deduction rules

知识元作为当前情景 S^d , 推演规则 R_e , 案例情景 S^{ks} , 规则库 RD 以及案例库 ECD 的共性描述基础, 将当前情景、突发事件推演规则、突发事件案例情景有效紧密联系起来, 如图 1 所示。通过突发事件推演规则、案例及情景中含有的对象知识元诠释出突发事件演化发展过程中的共性关系, 为基于当前情景进行推演规则检索、案例情景匹配及最终利用相似案例情景对推演规则进行二次匹配提供可执行前提, 同时提高了规则检索效率和案例情景匹配效率。另属性知识元变化从一定程度上凸出情景转变趋势, 关系知识元则使复杂的情景要素及其之间的属性作用关系在整个突发事件演变过程中清晰化。因此, 知识元不仅仅起着统一表示的共性基础作用, 还将突发事件各情景要素有效紧密衔接起来, 描述推演规则验证过程从而为应急管理提供决策支持。

4 情景规则匹配

4.1 情景信息获取

突发事件情景是突发事件应急决策者赖以处置的基础和依据,使得情景信息精准获取、形式化表示成为首要解决的问题.本文通过选取客观事物对象知识元、实例化知识元及建立对象知识元实体间的关联关系三个步骤生成初始情景,从而确定突发事件当前情景 S^d .为了同规则推演、案例匹配及验证达成一致,将知识元作为情景的表示方式,具体如下

$$S^d = \{KE_1^d, KE_2^d, \dots, KE_{l''}^d, KO_1^d, KO_2^d, \dots, KO_{n''}^d\}. \quad (12)$$

对 S^d 实例化处理

$$S^{ds} = \{ke_1^d, ke_2^d, \dots, ke_{l''}^d, ko_1^d, ko_2^d, \dots, ko_{n''}^d\}. \quad (13)$$

S^d 与 S^{ds} 区别在于后者是前者实例化之后的结果,即 $P(S^d) \rightarrow S^{ds}$,且 S^{ds} 含有具体属性值.

4.2 推演规则检索

推演规则检索是指按照一定的检索策略,从规则库 RD 中检索出适于当前情景 S^d 的可用推演规则,其适用性是指检索出的推演规则对当前情景的适用情况.因此,检索策略应基于当前情景 S^d 进行检索.在进行推演规则检索之前,可对规则库中的推演规则按照当前情景问题域进行初步检索,例如当前情景事件为泥石流,则从规则库中抽取所有泥石流规则作为待检索规则.同时为使后面的推演规则验证更具合理性,假设规则库完备.检索策略主要是将当前情景信息与规则库中的规则输入进行匹配,并输出匹配成功的推演规则.当前情景 S^d 与规则库 RD 中的规则都是基于知识元进行表示的,这为推演规则的检索提供了可执行基础.

将推演规则前件统一称为规则输入,后件则为规则输出.依次将上一阶段获取的当前情景中含有的事件知识元及承灾体知识元实例化结果按顺序记为 $n_1 \cdot a_1^1, n_1 \cdot a_1^2, \dots, n_1 \cdot a_1^{u_1}, n_2 \cdot a_2^1, n_2 \cdot a_2^2, \dots, n_2 \cdot a_2^{u_2}, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^1, n_\omega \cdot a_\omega^2, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^{u_\omega}$,则对应的属性状态值分别为 $x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{u_1}, x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{u_2}, \dots, x_\omega^1, x_\omega^2, \dots, x_\omega^{u_\omega}$, ω 代表知识元序号, u_ω 为第 ω 个知识元含有的属性总数,例如 $n_\omega \cdot a_\omega^{u_\omega}$ 代表的是第 ω 个知识元的第 u_ω 个属性, $x_\omega^{u_\omega}$ 代表第 ω 个知识元的第 u_ω 个属性状态值.经过初步筛选给出推演规则检索步骤如下:

步骤 1 依次将 $n_1 \cdot a_1^1, n_1 \cdot a_1^2, \dots, n_1 \cdot a_1^{u_1}, n_2 \cdot a_2^1, n_2 \cdot a_2^2, \dots, n_2 \cdot a_2^{u_2}, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^1, n_\omega \cdot a_\omega^2, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^{u_\omega}$ 代入 RD 中检索,匹配规则输入,输出匹配成功的规则集合,分别记为

$$R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1u_1}, R_{21}, R_{22}, \dots, R_{2u_2}, \dots, R_{\omega 1}, R_{\omega 2}, \dots, R_{\omega u_\omega},$$

其中 $n_1 \cdot a_1^1$ 检索结果记为 R_{11} ,那么 $n_\omega \cdot a_\omega^{u_\omega}$ 检索结果记为 $R_{\omega u_\omega}$.

步骤 2 依次提取 $R_{11}, R_{12}, \dots, R_{1u_1}, R_{21}, R_{22}, \dots, R_{2u_2}, \dots, R_{\omega 1}, R_{\omega 2}, \dots, R_{\omega u_\omega}$ 的规则输入,分别记为 $R_{11}^q, R_{12}^q, \dots, R_{1u_1}^q, R_{21}^q, R_{22}^q, \dots, R_{2u_2}^q, \dots, R_{\omega 1}^q, R_{\omega 2}^q, \dots, R_{\omega u_\omega}^q$,其中 $R_{1u_1}^q$ 代表一个规则输入集合,由多个规则输入组成.

步骤 3 依次将 $R_{11}^q, R_{12}^q, \dots, R_{1u_1}^q, R_{21}^q, R_{22}^q, \dots, R_{2u_2}^q, \dots, R_{\omega 1}^q, R_{\omega 2}^q, \dots, R_{\omega u_\omega}^q$ 中包含的每一知识元属性提取出来,并逐个代入 $n_1 \cdot a_1^1, n_1 \cdot a_1^2, \dots, n_1 \cdot a_1^{u_1}, n_2 \cdot a_2^1, n_2 \cdot a_2^2, \dots, n_2 \cdot a_2^{u_2}, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^1, n_\omega \cdot a_\omega^2, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^{u_\omega}$ 中进行检索,若某一推演规则对应的规则输入在 $n_1 \cdot a_1^1, n_1 \cdot a_1^2, \dots, n_1 \cdot a_1^{u_1}, n_2 \cdot a_2^1, n_2 \cdot a_2^2, \dots, n_2 \cdot a_2^{u_2}, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^1, n_\omega \cdot a_\omega^2, \dots, n_\omega \cdot a_\omega^{u_\omega}$ 中都能检索到,则提取该推演规则并分别记为 $R_{T1}, R_{T2}, \dots, R_{T\sigma}$,否则丢弃.

提取推演规则 $R_{T1}, R_{T2}, \dots, R_{T\sigma}$,即为最终待相似案例情景验证的推演规则,其集合记为 DRD.

5 相似案例匹配

突发事件案例库有大量历史数据、决策经验、专家意见以及应急管理知识,对其进行整理、分析等过

程处理可形成突发事件推演规则库. 因此, 用相似案例对推演规则进行适用性、准确率验证是可行的, 且对情景、案例与推演规则都采用共性知识元模型表示方式, 为突发事件案例情景匹配提供可执行基础.

5.1 情景案例匹配

由应急案例结构分析可知, 应急案例可以划分成若干个相互关联的情景片段, 而每一个情景片段在某一特定时期内是相对稳定的状态, 且相对于整个事件而言不具有明显的特殊性. 因此, 在案例表示的基础上, 以情景片段作为案例检索的依据, 通过对当前情景 S^{ds} 与案例情景中突发事件知识元实例和承灾体知识元实例间属性的相似度计算, 以检索出包含与当前情景相似的案例情景的应急案例为目标, 进而将检索到的推演规则代入匹配成功的相似案例中以检验规则的适用性与准确率.

从案例库 ECD 中初步根据突发事件类型提取可能相似的案例情景集 $S^{k1}, S^{k2}, \dots, S^{kg}$, 对于情景案例匹配相似度计算方法, 文献[23]将其主要分为概念层 d_1 和属性层 d_2 两部分, 并且概念层相似度计算优先于属性层相似度计算, 即情景间概念层相似度超过阈值 φ 才会进行实例层相似度的计算.

总体相似度为

$$d_w = \text{sim}(S^{ds}, S^{ks}) = \begin{cases} 0, & d_1 < \varphi \\ d_1\delta_1 + d_2\delta_2, & d_1 \geq \varphi, \end{cases} \quad (14)$$

其中 d_w 即为当前情景 S^{ds} 与案例情景 S^{ks} 总体相似度, d_1 为两者之间概念层相似度, d_2 为两者之间属性层相似度, δ_1 和 δ_2 分别为 d_1 和 d_2 在总体相似度计算中的权重. 但文献[23]对 δ_1 和 δ_2 的值没有给出明确计算方法, 具有较大的主观性. 对于 S^{ds}, S^{ks} 在概念层相似度 d_1 , 若当前情景 S^{ds} 与所有候选相似案例情景 S^{ks} 的概念层相似度的差异较小, 那么概念层相似度对于案例情景检索的贡献较小, 应赋予较小权重, 即 d_1 、 d_2 的权重与其自身客观相似度有关. 基于相似度离差信息的客观权重计算公式为

$$w_k = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=i+1}^{\tau} (d_k^i - d_k^j)^2}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=i+1}^{\tau} (d_1^i - d_1^j)^2\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{\tau} \sum_{j=i+1}^{\tau} (d_2^i - d_2^j)^2\right)^2}}, \quad k = 1, 2, \quad (15)$$

其中 τ 代表候选相似案例情景的个数, 对计算结果进行归一化处理, 即

$$\delta_k = w_k / (w_1 + w_2), \quad k = 1, 2. \quad (16)$$

利用以上公式计算总体相似度 d_w 取值, 针对具体情况给出合理的阈值 ψ 初步筛选出相似案例情景, 初次匹配成功的相似案例情景分别记为 $S^{k1}, S^{k2}, \dots, S^{kg'}$, $g' \in [0, g]$.

5.2 推演规则案例再匹配

案例情景能够用来验证推演规则的前提是案例信息完备, 为了提升推演规则验证的准确性, 要求匹配出来的相似案例情景必须含有待验证推演规则对应的全部信息, 包括规则输入和规则输出中含有的所有信息, 否则丢弃即不能用于推演规则验证, 因此需要对初步匹配成功的案例进行二次匹配. 初次匹配主要匹配规则输入, 二次匹配则指匹配规则输出, 即将每一推演规则对应的规则输出代入初步提取的相似案例情景, 按照一定方法进行检索, 若案例情景中含有推演规则的所有规则输出, 则该案例情景为对应推演规则在当前情景下的最终相似案例情景, 即可作为验证推演规则的相似案例情景. 对应二次匹配步骤如下:

步骤 1 提取待验证推演规则 $R_{Th}, 1 \leq h \leq \sigma$ 的规则输出, 记为 $R_{Th}^p, 1 \leq h \leq \sigma$, 其中 R_{Th}^p 代表一个规则输出集合, 即 R_{Th}^p 中包含一条至多条规则输出.

步骤 2 将推演规则 $R_{Th}, 1 \leq h \leq \sigma$ 含有的所有规则输出代入已有案例情景 $S^{k1}, S^{k2}, \dots, S^{kg}$ 中检索.

步骤 3 若案例中含有 $R_{Th}^p, 1 \leq h \leq \sigma$ 的所有规则输出, 则提取该案例情景作为验证案例情景 S_h^{ky} , 其中 S_h^{ky} 代表第 h 个推演规则 R_{Th} 的第 y 个相似案例情景.

步骤 4 输出 $R_{Th}, 1 \leq h \leq \sigma$ 所有二次匹配成功的案例, 依次记为 $S_h^{ky}, 1 \leq h \leq \sigma, 1 \leq y \leq z_h$, 其中 z_h

代表推演规则 R_{Th} 二次匹配成功的相似案例情景总数。

6 推演规则验证

6.1 基于案例的推演规则验证

突发事件发生发展机理复杂多变, 信息缺失普遍存在, 使得推演规则的适用范围大大缩小, 因此在面对实时情景时需要推演规则的适用性进行验证。而突发事件推演规则主要由专家根据历史案例等数据整理而来, 因此, 采用相似案例对推演规则进行验证具有一定的合理性和可行性。

输入信息包括情景规则匹配过程获取的当前情景 S^d 和提取的推演规则 R_{Th} 及情景案例匹配过程得到的相似案例 S_h^{ky} , 输出信息为目标情景子集 S^{Cv} , $v \in [0, \sigma]$, 给出具体步骤如下:

步骤 1 将提取的推演规则依次代入对应的相似案例中, 即 $R_{Th} \rightarrow S_h^{ky} = \{S_h^{k1}, S_h^{k2}, \dots, S_h^{kz_h}\}$, $1 \leq h \leq \sigma$, 其中 R_{Th} 代表提取的第 h 个推演规则, S_h^{ky} 代表推演规则 R_{Th} 匹配成功的第 y 个相似案例。

步骤 2 规则输入实例化处理。对于 R_{Th} , $1 \leq h \leq \sigma$, 结合 S_h^{ky} , $1 \leq h \leq \sigma$, 依次进行规则输入实例化, 即 $n_\alpha \cdot a_\alpha^\beta = "x_\alpha^\beta"$, $1 \leq \alpha \leq \alpha', 1 \leq \beta \leq t_\alpha$, 表示对规则输入的第 α 个知识元的第 β 个属性的实例化, 其属性状态值为 x_α^β 。

步骤 3 利用 $R_{Th}: A_r^O = f_r(A_r^I)$ 得到规则输出中知识元属性值, 这一过程是对规则输出对应知识元属性实例化的过程, 即 $n_\theta \cdot a_\theta^\gamma = "y_\theta^\gamma"$, $1 \leq \theta \leq \theta', 1 \leq \gamma \leq t_\theta$, 表示对 R_{Th} 输出的第 θ 个知识元的第 γ 个属性的实例化, 其属性状态值为 y_θ^γ 。

步骤 4 依次比较 y_θ^γ 的值与案例中该属性取值 ρ_θ^γ , 求出其相似度大小, 即相似案例 S_h^{ky} 对 R_{Th} 的验证通过率 μ_h^y , 其计算公式参照文献[23] 属性取值相似度计算。

步骤 5 计算 R_{Th} 的综合验证通过率 ρ_h , 即求出推演规则在当前情景下的相似案例综合验证通过率。记当前情景下 R_{Th} 对应的相似案例情景为 S_h^{ky} , 当前情景的总体相似度为 d_{wh}^{ky} , $1 \leq y \leq z_h$ 。若当前情景与所有案例情景相似度 d_{wh}^{ky} 差异越小, 则其对综合通过率的贡献越小, 因此其权重越小, 即相似度的权重 w_h^1 受自身差异性影响。借鉴离差最大化客观权重确定方法, 即

$$w_h^k = \frac{\sum_{i=1}^{z_h} \sum_{j=i+1}^{z_h} (d_{wh}^{ki} - d_{wh}^{kj})^2}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{z_h} \sum_{j=i+1}^{z_h} (d_{wh}^{ki} - d_{wh}^{kj})^2\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{z_h} \sum_{j=i+1}^{z_h} (\mu_h^i - \mu_h^j)^2\right)^2}}, \quad k = 1, 2, \quad (17)$$

对计算结果归一化处理得

$$\lambda_h^k = w_h^k / (w_h^1 + w_h^2), \quad k = 1, 2. \quad (18)$$

对于提取的推演规则 R_{Th} , $1 \leq h \leq \sigma$, 记 z_h 为推演规则 R_{Th} 对应的相似案例总数, d_{wh}^{ky} 为第 h 个推演规则的第 y 个相似案例情景与当前情景的相似度, μ_h^y 为第 h 个推演规则的第 y 个相似案例情景推演规则验证通过率, 综合验证通过率 ρ_h 计算公式

$$\rho_h = \frac{1}{z_h} \sum_{y=1}^{z_h} (\lambda_h^1 d_{wh}^{ky} + \lambda_h^2 \mu_h^y), \quad (19)$$

其中, 由于相似案例及推演规则都是经过一定阈值筛选得到, 所以对应的每一相似案例的相似度及验证通过率误差不大, 因此选择所有案例的验证通过率均值作为最终推演规则综合验证通过率。

步骤 6 比较 ρ_h 的取值与阈值 ε 的大小关系, $1 \leq h \leq \sigma$, 输出验证通过率大于阈值 ε 的推演规则作为最终的推演规则。记为 $R_{Th'}$, $h' \in [0, \sigma]$ 且 h' 为整数。 $R_{Th'}$ 对于待验证推演规则 R_{Th} , h' 取 σ 说明所有推演规则都验证通过, 取 0 则说明没有推演规则验证通过。关于相似度阈值 ε 的取值, 可由应急决策者根据 ρ_h 的计算结果以及依据经验和相关历史数据来确定。

步骤 7 执行 $R_{Th'}, h' \in [0, \sigma]$, 输出目标情景子集 $S^{Cv}, v \in [0, \sigma]$.

6.2 目标情景输出

对推演规则进行适用性验证主要是为了提升突发事件情景推演的准确率. 依次执行在 6.1 节中利用相似案例对推演规则适用性进行验证得到的推演规则 $R_{Th'}, h' \in [0, \sigma]$, 输出目标情景.

1) 将通过验证的推演规则 $R_{Th'}, h' \in [0, \sigma]$ 的规则输入分别基于当前情景实例化处理, 对规则输入依次按照知识元进行编号, 记为

$$R_{Th'} \rightarrow S^{ds} = \{ke_1^d, ke_2^d, \dots, ke_m^d, ko_1^d, ko_2^d, \dots, ko_n^d\},$$

$$n_\alpha \cdot a_\alpha^\beta = "x_\alpha^\beta", 1 \leq \alpha \leq \alpha', 1 \leq \beta \leq t_\alpha.$$

2) 利用推演规则作用关系 $R_{Th'} : A_r^O = f_r(A_r^I)$ 得到规则输出, 即实例化规则输出

$$n_\theta \cdot a_\theta^\gamma = "y_\theta^\gamma", 1 \leq \theta \leq \theta', 1 \leq \gamma \leq t_\theta.$$

3) 依次输出目标情景子集 $S^{Cv}, v \in [0, \sigma]$, 最终由这些子集集合形成目标情景 S^C .

7 实例验证

以汶川县七盘沟泥石流情景推演过程为例, 实现推演规则提取、相似案例匹配、推演规则验证及突发事件情景推演等过程, 验证基于案例的突发事件推演规则验证方法的有效性.

7.1 实例情景描述

汶川县七盘沟泥石流突发事件情景作为当前情景 S^{ds} , 可用知识元实例以共性知识元模型的表示方法进行描述, 其部分知识元实例如表 1 所示.

表 1 当前情景部分可用知识元实例
Table 1 Parts of available knowledge element instance of current scenario

知识元模型		框架模型 $K_m = (N_m, A_m, R_m)$								
		N_m 为对应知识元及其属性的概念名称		A_m 为对应的属性状态集					f_a 数值或时变函数	
				a_u 属性状态值		属性状态管理				
N 知识元名称	A_u 属性名称	定量	定性	P_a 可测特征描述	单位	d_a 测度量纲	范围	类型		
突发事件	暴雨	激发雨强	77.3		可测量的	mm	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		持续时间	40		可测量的	min	[0,90]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
	泥石流	容重	2.09		可测量的	t/m ³	[0,2.5]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		平均流速	5.64		可测量的	m/s	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		峰值流量	314.4		可测量的	m ³ /s	[0,10 ³]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		固体物含量	65		可测量的	%	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		最大堆积长度	0.4		可测量的	km	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		一次过程总量	782		可测量的	10 ³ m ³	[0,10 ³]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		过流面积	54.2		可测量的	km ²	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
		承灾体	泥石流沟	纵比坡降	192		可测量的	%	[0,10 ²]	
相对高度	2.9				可测量的	km	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$
主沟长度	15.1			可测量的	km	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$	
流域面积	54.2			可测量的	km ²	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$	
平均坡度	50			可测量的	度	[0,90]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$	
山坡	坡度	54		可测量的	度	[0,90]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$	
	植被覆盖率	> 60		可测量的	%	[0,10 ²]		数值型	空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$	

注: 空/a = $f_a(a_{t-1}, t)$ 表示当 f_a 为数值时, 属性 a 值为定值, 则其对应关系函数 f_a 为空; f_a 为时变函数时则属性 a 为 f_a 对应的时变函数.

7.2 推演规则验证及目标情景输出

首先, 提取当前情景中含有的知识元及其属性, 根据 4.2 节推演规则检索方法, 从推演规则库中检索出

待验证推演规则集 DRD, 如表 2 所示.

表 2 待验证推理规则集
Table 2 Set of inference rules to be verified

可用推演规则 R_{Th}	p_r 规则属性	A_r^I 输入属性状态集	f_r 具体映射函数	A_r^O 输出属性状态集
R_{T1}	非线性函数	泥石流·峰值流量 Q_c 泥石流·历时 T	$W_c = 0.26Q_c T$	泥石流·一次性冲出量 W_c
R_{T2}	非线性函数	泥石流·过流面积 A_c 泥石流·平均流速 V	$Q_c = A_c V$	泥石流·峰值流量 Q_c
R_{T3}	产生式规则	泥石流·容重 γ_c 泥石流·固体物含量 k_c	若 $(1.8 < \gamma_c < 2.3 \text{ 且 } k_c > 50)$ 则 $c = \text{“粘性”}$ 若 $(\gamma_c < 1.8 \text{ 且 } k_c < 50)$ 则 $c = \text{“稀性”}$	泥石流·类型 c
R_{T4}	非线性函数	泥石流·一次性冲出量 W_c	$L = 0.04W_c^{0.344}$	泥石流·最大堆积长度 L

然后, 从案例库 ECD 初步提取泥石流案例情景集 $S^{kg}, g = 1, 2, \dots, 10$ 作为可能相似案例情景集, 依次为矮子沟、熊家沟、无名沟、走马岭、文家沟、高家沟、红椿沟、八一沟、纸厂沟以及大沟. 其部分知识元实例如表 3 所示.

表 3 案例情景集
Table 3 Set of cases scenario

情景	属性名称	S^{k1}	S^{k2}	S^{k3}	S^{k4}	S^{k5}	S^{k6}	S^{k7}	S^{k8}	S^{k9}	S^{k10}	
突发事件	暴雨	激发雨强	26.9	36.7	73	70	69.3	40	16.4	75.0	40.0	58.0
		历时	—	90	—	90	90	90	90	104	—	—
	泥石流	容重	1.71	1.93	2.38	2.25	2.22	1.97	2.05	1.88	1.62	1.80
		平均流速	7.54	3.8	3.1	7.19	9.62	—	—	15.3	5.51	1.12
		峰值流量	1000	180.1	25.04	812.5	899.9	—	696.45	1082	—	4.99
		固体物含量	57.3	—	74.3	80.1	—	69.1	62	67.4	—	—
		最大堆积长度	—	—	—	—	—	0.25	0.39	0.25	0.13	0.09
		一次过程总量	27	13.14	12.4	121.64	310	67.96	711	195	27	12
承灾体	泥石流沟	过流面积	122.8	—	7.61	120.51	91.5	—	88.7	—	6.31	—
		纵比坡降	155	376	56.26	16.4	46.74	510	358	377	319.7	359.8
		相对高度	3.04	1.72	1.38	1.08	1.519	1.8	1.288	1.605	1.579	0.585
		主沟长度	21.96	4.05	2.2	3.39	3.25	3.2	3.6	4.45	4.94	7.38
		流域面积	65.55	5.5	0.9	5.76	7.81	3.62	5.35	8.63	6.87	10.36
	山坡	平均坡度	26	40	26	—	45	45~60	35	42.7	—	29
		坡度	40~55	—	—	30~50	20~54	45~55	35~50	25~45	30~70	30~50
		植被覆盖率	50%	—	> 80%	70%	> 85%	80%	36%	—	—	—

再次, 计算 $S^{kg}, g = 1, 2, \dots, 10$ 与 S^{ds} 的相似度. 其概念层相似度依次为 0.875 0, 0.750 0, 0.750 0, 0.875 0, 0.875 0, 0.750 0, 0.937 5, 0.875 0, 0.750 0 和 0.812 5, 取 $\varphi = 0.75$, 则 $S^{kg'}, g' = 1, 2, \dots, 10$ 为初次匹配成功的相似案例情景.

根据式(15)和式(16), 计算 $S^{kg'}$ 与 S^{ds} 的概念层相似度 d_1 和属性层相似度 d_2 权重分别为 0.59 和 0.41, 依据式(14)总体相似度 $d_{w1}, d_{w2}, \dots, d_{w10}$, 如表 4 所示.

表 4 $S^{kg'}$ 与 S^{ds} 的总体相似度
Table 4 The overall similarity of $S^{kg'}$ with S^{ds}

d_{w1}	d_{w2}	d_{w3}	d_{w4}	d_{w5}	d_{w6}	d_{w7}	d_{w8}	d_{w9}	d_{w10}
0.85	0.72	0.77	0.81	0.81	0.69	0.84	0.80	0.76	0.78

取 $S^{kg'}$ 与当前情景 S^{ds} 的总体相似度的阈值 ψ 为 0.75, 确定 $S^{k1}, S^{k3}, S^{k4}, S^{k5}, S^{k7}, S^{k8}, S^{k9}, S^{k10}$ 为相

似案例情景, 剔除 S^{k2}, S^{k6} ; 根据 5.2 节的推演规则案例再匹配方法, 得到每一待验证推演规则对应的相似案例情景集, 其对应关系如表 5.

表 5 推演规则与相似案例集对应关系

Table 5 Set of similar cases corresponding with inference rules

推演规则	R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}	R_{T4}
	S^{k4}	S^{k1}	S^{k1}	S^{k7}
	S^{k5}	S^{k3}	S^{k3}	S^{k8}
相似案例	S^{k7}	S^{k4}	S^{k4}	S^{k9}
	S^{k8}	S^{k5}	S^{k7}	S^{k10}

根据表 4 和表 5, 可得每一推演规则的对应案例相似度 $d_{wh}^{ky}, 1 \leq h \leq 4, 1 \leq y \leq 4$, 如表 6.

表 6 案例相似度

Table 6 Similarity of cases

推演规则	R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}	R_{T4}
	d_{wh}^{k1}	0.81	0.85	0.85
	d_{wh}^{k2}	0.81	0.77	0.77
案例相似度	d_{wh}^{k3}	0.84	0.81	0.81
	d_{wh}^{k4}	0.8	0.81	0.84

结合 6.1 节给出的基于案例的推演规则验证方法, 得出推演规则对应相似案例验证通过率如表 7 所示.

表 7 基于相似案例情景的推演规则验证

Table 7 Inference rules validation based on scenario of similar cases

可用推演规则集 R_{Th}	R_m 描述属性状态变化及其相互作用关系			规则输出 y_θ^γ	实测值 ρ_θ^γ	验证通过率 μ_h^y	
	p_r 规则属性	A_r^I 输入属性状态集	f_r 具体映射函数				
R_{T1}	非线性函数	泥石流·峰值流量 Q_c	$W_c = 0.26Q_c T$	泥石流·一次性	114.08	121.6	
		泥石流·历时 T		过程总量 W_c	126.3	310	41.8%
					97.79	71.1	62.5%
					175.54	195	90%
R_{T2}	非线性函数	泥石流·过流面积 A_c	$Q_c = A_c V$	泥石流·峰值流量 Q_c	925.91	1000	
		泥石流·平均流速 V			23.42	25.04	93.5%
					866.47	812.5	93.8%
					880.23	899.9	97.8%
R_{T3}	产生式规则	泥石流·容重 γ_c	若 $(1.8 < \gamma_c < 2.3$ 且 $k_c > 50)$ 则 $c = \text{"粘性"}$ 若 $(\gamma_c < 1.8$ 且 $k_c < 50)$ 则 $c = \text{"稀性"}$	泥石流·类型 c	稀性	稀性	100%
		泥石流·固体物含量 k_c			粘性	粘性	100%
					粘性	粘性	100%
					粘性	粘性	100%
R_{T4}	非线性函数	泥石流·一次性	$L = 0.04W_c^{0.344}$	泥石流·最大堆积长度 L	0.39	0.383	98.2%
		过程总量 W_c			0.25	0.245	98.1%
					0.13	0.124	95.4%
					0.09	0.094	95.7%

经过整理得推演规则验证通过率 $\mu_h^y, 1 \leq h \leq 4, 1 \leq y \leq 4$, 如表 8 所示.

表 8 推演规则验证通过率

Table 8 Passing rate of inference rules validation

推演规则	R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}	R_{T4}
	μ_h^1	93.8%	92.6%	100%
验证通过率	μ_h^2	41.8%	93.5%	100%
	μ_h^3	62.5%	93.8%	100%
	μ_h^4	90%	97.8%	100%

根据表 6 和表 8 结合式(17)和式(18), 得出待验证推演规则 $R_{Th}, 1 \leq h \leq 4$ 案例相似度权重 λ_h^1 和推演规则验证通过率权重 λ_h^2 , 如表 9.

表9 案例相似度权重和推演规则验证通过率权重

Table 9 Weight of similarity of cases and passing rate of inference rules validation

推演规则		R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}	R_{T4}
案例相似度权重	λ_h^1	0.01	0.69	1	0.84
推演规则验证通过率权重	λ_h^2	0.99	0.31	0	0.16

然后利用式(19)得到推演规则 R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} , R_{T4} 的综合验证通过率 ρ_h , $h = 1, 2, 3, 4$, 如表 10 所示, 取验证通过率阈值 ε 为 0.8, 因此淘汰推演规则 R_{T1} , 即验证通过的推演规则为 R_{T2} , R_{T3} , R_{T4} .

表10 综合验证通过率

Table 10 Comprehensive passing rate of rules validation

推演规则	R_{T1}	R_{T2}	R_{T3}	R_{T4}
ρ_h	0.72	0.85	0.85	0.82

最后, 提取验证通过的推演规则, R_{T3} , R_{T4} 代入当前情景进行规则推演, 输出目标情景子集 S^{Cv} , $v \in [0, \sigma]$, 具体结果如表 11 所示.

表11 目标情景输出

Table 11 output objective scenario

推演规则 $R_{Th'}$	A_r^I 输入属性状态集	f_r 具体映射函数	A_r^O 输出属性状态集	目标情景子集 S^{Cv}	实测值	通过率
R_{T2}	泥石流·过流面积 A_c 泥石流·平均流速 V	$Q_c = A_c V$	泥石流·峰值流量 Q_c	305.7	314.4	97.2%
R_{T2}	泥石流·容重 γ_c 泥石流·固体物含量 k_c	若 $(1.8 < \gamma_c < 2.3$ 且 $k_c > 50)$ 则 $c =$ “粘性” 若 $(\gamma_c < 1.8$ 且 $k_c < 50)$ 则 $c =$ “稀性”	泥石流·类型 c	粘性	粘性	100%
R_{T4}	泥石流·一次性冲出量 W_c	$L = 0.04W_c^{0.344}$	泥石流·最大堆积长度 L	0.4	0.445	90%

通过比较规则输出结果与实测值, 得到规则输出的通过率均大于 90%, 因此规则推演合理, 输出目标情景子集 S^{C1} , S^{C2} , S^{C3} 分别为泥石流·峰值流量 $Q_c = 305.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 泥石流·类型 c 为粘性, 泥石流·最大堆积长度 L 为 0.4 km.

8 结束语

人类在长期的社会实践与科研活动中积累了大量的知识, 很多知识被显性化地表示为各种规则, 并用来进行推演. 由于突发事件本身的不确定性、复杂性等特征, 使得已有推演规则难以适应所有的推演情景. 为提高推演规则的适用性及准确率, 本文利用突发事件情景、推演规则依次对案例情景进行匹配, 二次匹配成功的相似案例用于验证推演规则的适用性, 从而通过推演规则的验证及选取提升推演的准确性与可靠性, 最后以实例验证了该方法的有效性.

本文对推演规则验证的前提是相关突发事件案例丰富且信息完备. 作者所在团队通过收集整理及同国家安全生产总局合作等方式, 已经获得了大量的突发事件案例, 目前在案例的结构化和情景化表示方面也完成了一些工作, 今后还会逐渐完善该部分工作.

参考文献:

- [1] Chang M S, Tseng Y L, Chen J W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2007, 43(6): 737–754.
- [2] 于振宇, 韩传峰, 孟令鹏. 基于马氏决策过程的突发传染病防控决策模型. *系统工程学报*, 2016, 31(3): 338–349.
Yu Z Y, Han C F, Meng L P. Decision making model of emerging epidemics control based on Markov decision processes. *Journal of Systems Engineering*, 2016, 31(3): 338–349. (in Chinese)

- [3] 王 宁, 路国粹, 郭 玮. 面向突发事件规则推理的问题域特征网络模型. 大连理工大学学报, 2015, 55(6): 644–649.
Wang N, Lu G C, Guo W. Problem domain feature network model for rule-reasoning of emergency. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(6): 644–649. (in Chinese)
- [4] 李永海, 樊治平, 李铭洋. 解决广义不确定型决策问题的案例决策方法. 系统工程学报, 2014, 29(1): 21–29.
Li Y H, Fan Z P, Li M Y. Case-based decision analysis method for general uncertain decision making problem. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(1): 21–29. (in Chinese)
- [5] 曲 毅, 仲秋雁, 马晓霏, 等. 基于情景的突发事件演变概率规则推理方法. 系统工程学报, 2014, 29(4): 571–578.
Qu Y, Zhong Q Y, Ma X F, et al. The event evolution scenario-based reasoning method via probably rules. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(4): 571–578. (in Chinese)
- [6] 王颜新, 李向阳, 徐 磊. 突发事件情境重构中的模糊规则推理方法. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5): 954–962.
Wang Y X, Li X Y, Xu L. Fuzzy rules reasoning method in emergency context reconstruction. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(5): 954–962. (in Chinese)
- [7] 王记伟. 基于规则推理的应急事件自动处理技术研究. 上海: 东华大学, 2009.
Wang J W. The Technical Research of Emergent Event's Auto-process based on Rule reasoning. Shanghai: Donghua University, 2009. (in Chinese)
- [8] 郑昌兴, 刘喜文. 基于规则推理和案例推理的应用模型构建研究: 以地震类突发事件为例. 情报理论与实践, 2016, 39(2): 108–112.
Zheng C X, Liu X W. Research of application model building based on rule reasoning case-based reasoning: Taking emergencies of earthquake for example. Information Studies: Theory & Application, 2016, 39(2): 108–112. (in Chinese)
- [9] 李晓聪. 基于模型检测的空间访问控制系统规则验证. 镇江: 江苏大学, 2010.
Li X C. Verification of Rules in Spatial Access Control Systems through Model Checking. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- [10] 李 童, 刘 璘. 一种面向主体的服务规则模拟验证方法. 计算机工程与科学, 2010, 32(5): 67–73.
Li T, Liu L. An agent-oriented service rules validation method. Computer Engineering & Science, 2010, 32(5): 67–73. (in Chinese)
- [11] 肖冰冰. 规则化描述方法及其验证技术的研究与应用. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
Xiao B B. Research and Application of Rule Description Method and Its Verification. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 王科富. 规则化描述方法中规则的结构错误检测与词法语法分析. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
Wang K F. Structural Error Detection and Lexical Parsing in Rule Description Method. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] He Xudong, Chu William C, Yang Hongji. A new approach to verify rule-based systems using petri nets. Information and Software Technology, 2003, 45(10), 663–669.
- [14] 温有奎, 徐国华. 知识元链接理论. 情报学报, 2003, 22(6): 665–670.
Wen Y K, Xu G H. Knowledge element linking theory. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2003, 22(6): 665–670. (in Chinese)
- [15] 王延章. 模型管理的知识及其表示方法. 系统工程学报, 2011, 26(6): 850–856.
Wang Y Z. Knowledge and representation of model management. Journal of System Engineering, 2011, 26(6): 850–856. (in Chinese)
- [16] 王 宁, 郭 玮, 黄红雨, 等. 基于知识元的应急管理案例情景化表示及存储模式研究. 系统工程理论与实践, 2015, 35(11): 2939–2949.
Wang N, Guo W, Huang H Y, et al. Validation method of emergency deduction rules based on cases. Systems Engineering: Theory & Practice, 2015, 35(11): 2939–2949. (in Chinese)
- [17] Durance P, Codet M. Scenario building: uses and abuses. Technological Forecasting and Social Change, 2010, 77(9): 1488–1492.
- [18] 姜 卉, 黄 钧. 罕见重大突发事件应急实时决策中的情景演变. 华中科技大学学报(社会科学版), 2009, 23(1): 104–108.
Jiang H, Huang J. The study on the issue of scenario evolvement in real-time decision making of infrequent fatal emergencies. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition), 2009, 23(1): 104–108. (in Chinese)
- [19] 舒其林. 非常规突发事件的情景演变及“情景-应对”决策方案生成. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(11): 936–941.
Shu Q L. Study on scenario evolvement and alternative generation of “scenario-response” decision-making in unconventional emergencies. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(11): 936–941. (in Chinese)