

面向突发事件规则推理的问题域特征网络模型

王 宁*, 路国粹, 郭 玮

(大连理工大学 管理与经济学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为实现对突发事件演化态势的推演及问题的分解, 针对已有突发事件态势研究中缺乏与推理规则结合的问题, 借鉴基于知识元的事物知识表示方法, 提出突发事件问题域知识组织的事件对象-属性-关系层次模型. 通过将模型关系层中推理规则由基本结构转换为最简结构, 得到两个事物属性间最简洁的关联结构. 连接推理规则最简结构, 构建可用于表示突发事件问题域发展态势及实现问题分解的特征网络. 最后, 通过震后物资调度的案例验证了特征网络对突发事件态势描述的可行性.

关键词: 突发事件; 知识元; 特征网络; 推理规则转换

中图分类号: C931

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201506013

0 引 言

突发事件应急决策是在信息不完备、时间空间限制和巨大心理压力条件下的决策^[1], 快速准确地掌握事件所处的状态和未来的发展趋势, 可减轻突发事件造成的危害^[2]. 然而, 突发事件产生的突发性和演化的快速性, 使得通过获取事件演化实时数据信息来掌握事件发展态势的方法不能很好地满足应急管理及时性要求. 因此, 如何在事件发展的过程中快速掌握事件的态势, 揭示事件推理规则与事件演化态势之间的关系, 成为事件演化推演和应急决策的基础问题.

突发事件问题域的态势, 是指事件在当前问题域内的事物状态和未来发展趋势. 当前对突发事件问题域态势的研究主要从情景演化^[3-4]和网络演化^[5-7]的角度开展. 文献[4]从动态视角将突发事件看成是由初始情景、中间情景和结束情景构成的, 提出情景重构, 即根据部分已知事件实时信息和历史信息模拟构造事件情景要素, 从而重新构造事件中一系列情景发生的顺序和逻辑关系. 文献[5]将突发事件演化划分为点式演化模式、链式演化模式、网络演化模式和超网络演化模式4种. 其中, 网络演化模式作为一种突发事件应

急知识的图形化组织方法, 可增强事件应急的人为干预能力, 提高事件应对的效率^[6]. 文献[2]将突发事件情景的演化看成是由情景、处置目标、处置措施、事件自身的演化构成的, 并将事件应急决策中情景演化表示成以情景为节点、处置措施是否实现处置目标为边的网络. 文献[7]基于 Bayes 推理提出灾害演化网络模型, 该模型根据新获取的信息对演化网络中的活动参数进行动态修正形成新的演化思路. 由上述分析可知, 近年来的相关研究使用情景和演化网络两种方式对事件发展状态和发展趋势进行表示, 但在演化网络对事件的表示中, 忽略了推理规则作为事件演化内在逻辑对事件发展态势的影响, 使得演化网络更倾向于子事件间的演化, 缺乏对子事件本身的描述.

针对已有突发事件态势研究中缺乏推理规则的不足, 本文提出一种基于推理规则的突发事件问题域特征网络构建方法. 从事物知识组织的角度出发, 使用基于知识元的事物知识表示方法对突发事件中的事物知识和推理规则进行组织, 将推理规则转化成最简结构形式, 连接推理规则最简结构, 进而构建以突发事件中目标问题为导向的问题域特征网络, 基于特征网络对突发事件发展态势进行分析, 并实现对目标问题的分解, 为突

发事件的推演分析及决策支持提供支撑。

1 突发事件问题域的知识组织

突发事件的问题域(problem domain)是指为了解决事件中的某个目标问题而形成的知识集合,包括事物知识、事件知识、推理规则和实时监测数据等信息.从事件演化的角度,可将事件的演化看作不同问题域之间的演变.为更高效地组织事件问题域中的知识,采用文献[8]提出的基于知识元的事物知识表示方法:

$$K_m=(N_m,A_m,R_m) \tag{1}$$

$$K_a=(p_a,d_a,f_a) \tag{2}$$

$$K_r=(p_r,A_r^I,A_r^O,f_r) \tag{3}$$

式中: K_m 为对象知识元,是对事物的概念、属性状态集、映射关系集的宏观描述; K_a 为属性知识元,是对事物属性的可测特征、测度量纲集、时变函数的微观描述; K_r 为关系知识元,是对事物属性间关系的输入输出属性集、具体映射函数的微观描述^[9].项目团队基于此种表示方法,对诸如地震、泥石流等自然灾害事件的知识进行整理.目前,在团队知识库中记录对象知识元 1 486 个、属性知识元 28 625 个、关系知识元 873 个.

事物知识元模型从概念、属性、关系 3 个角度对事物的共性知识进行组织,是对事物共性知识的静态描述,在此基础上为事物共性知识加入层次关系,形成问题域的对象-属性-关系层次模型,如图 1 所示.

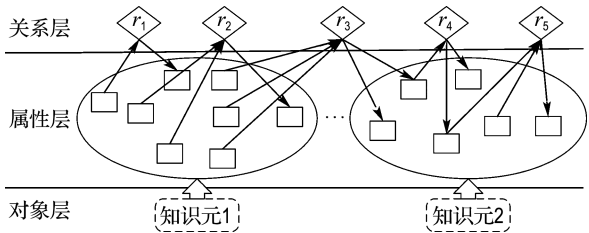


图 1 突发事件问题域的对象-属性-关系层次模型
Fig. 1 The object-attribute-relation hierarchical model of emergency problem domain

其中,对象层描述问题域中的对象知识元,是对问题域中同类事物共同特征的知识化描述,对对象知识元模型;属性层是对象知识元的属性集合的描述,是对象实例化后对具体事物的状态描述,对应属性知识元模型;关系层是对事物属性

间的关联关系的描述,对应关系知识元模型.由问题域的对象-属性-关系层次模型可知,问题域目标问题的解决依赖于事物知识间的关系,关系层成为事件问题域知识推理的核心.

关系层的推理规则可使用关系知识元 K_r 表示,其中 A_r^I 是输入属性集, A_r^O 是输出属性集, f_r 是广义映射函数. f_r 既可以是可计算的函数,也可以是 If...Then 的形式化规则,二者统称为推理规则,所有推理规则构成事件问题域的规则集合 $R=\{r_1,r_2,\cdots,r_n\}$.推理规则是指能够为事件演化推理提供逻辑支持的规则,由问题域的对象-属性-关系层次模型可得到式(3)推理规则 f_r 的基本结构(fundamental structure):

$$A_r^O=f_r^t(A_r^I) \tag{4}$$

在突发事件演化推演中,推理规则一般是由领域专家或应急管理部门在事件发生前建立的,它包括事件发展过程中客观事物与事件本身的知识 and 规则. 本文将从方法的角度讨论突发事件问题域特征网络的构建,故假设事件的推理规则库已经是建立且完备的.

2 问题域特征网络的构建

2.1 问题域的最简结构

定义 1 推理规则的最简结构(the briefest structure)由两个属性构成,属性之间为单一关系,记为

$$v_i=r_k^b(v_j) \tag{5}$$

其中 v_i 和 v_j 为客观事物的属性, r_k 表示问题域的第 k 个最简结构,最简结构的权值 $w_{r_k}=1$,相同最简结构的权值可以相加.一对属性之间的单一关系包括两种情形:一种是属性间的输入输出关系,是从函数运算的角度确定属性间的单一关系;一种是输入属性间的偏序关系,是从属性间的更优关系来确定单一关系.

定义 2 在式(5)中,如果属性 v_i 不是单个属性,而是一个属性集合,称属性集合 $\cup v_i$ 和属性 v_j 构成的单一关系为半最简结构.

半最简结构是推理规则向最简结构过渡的中间形态,是一种临时表示方式.

将推理规则的 r_i 从基本结构转换为最简结构,根据 A_r^I 和 A_r^O 中属性个数,可分为以下 4 种类型.

(1) 一对一型转换

当 A_r^1 和 A_r^0 中属性个数都为 1 时,称基本结构 $A_r^0 = f_r^1(A_r^1)$ 向最简结构 $v_i = r_k^b(v_j)$ 的转换为一对一型转换. 这种类型的转换与最简结构形式上相似,可直接将一对一的基本结构转化为一个最简结构. 一对一型转换适用于单自变量的可计算规则、单因子的产生式规则、多因子或连接的产生式规则从基本结构向最简结构的转换.

(2) 一对多型转换

当 A_r^1 中属性个数为 1,而 A_r^0 中属性个数大于 1 时,称基本结构 $A_r^0 = f_r^1(A_r^1)$ 向最简结构 $v_i = r_k^b(v_j)$ 的转换为一对多型转换. 在 A_r^0 中,多个属性都是经过 f_r^1 计算得到的,多个输出属性间并不存在输入输出关系. 因此,可认为一对多型规则是由多个一对一型规则组合而成的,在将推理规则转换为最简结构时,可将一对多型分解为多个一对一型.

(3) 多对一型转换

当 A_r^1 中属性个数大于 1,而 A_r^0 中属性个数为 1 时,称基本结构 $A_r^0 = f_r^1(A_r^1)$ 向最简结构 $v_i = r_k^b(v_j)$ 的转换为多对一型转换. 多个输入属性共同作用得到一个输出属性,显然多个输入属性在对输出属性的作用中存在影响力的差异,可在 A_r^1 中选择一个对 f_r^1 最具影响力的属性 v_i 与输出属性构成一个最简结构. 对于剩余属性集 $\{A_r^1 - v_i\}$ 中的多个属性,可与最具影响力的属性 v_i 分别建立偏序关系,如图 2 所示.

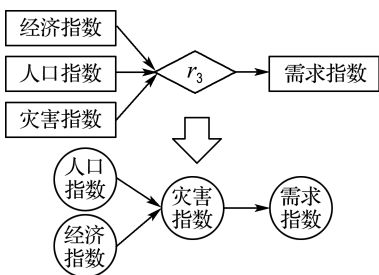


图 2 多对一映射的转换

Fig. 2 The conversion of many-to-one

如在某问题域中将 f_r^1 具体形式化为 $s = w_e \cdot e + w_p \cdot p + w_q \cdot q (w_e < w_p < w_q)$, 其中 s 表示需求指数, e, p, q 分别表示经济指数、人口指数和灾害指数, w_e, w_p 和 w_q 表示这 3 个变量的系数. 首先,分别对 e, p, q 求 s 的偏导得

$$\left. \frac{\partial s}{\partial q} \right|_E > \left. \frac{\partial s}{\partial p} \right|_E > \left. \frac{\partial s}{\partial e} \right|_E$$

选择对 s 影响最大的输入属性,与输出属性构成一个 K_r^q 关系最简结构: $s = r_1^b(q), w_{r_1}^b = 1$. 对于剩余属性集 $\{A_r^1 - v_i\}$, 分别建立与属性 q 之间的偏序关系,即 $q = r_2^b(p), q = r_3^b(e), w_{r_2}^b = 1, w_{r_3}^b = 1$.

多对一型转换可用于多自变量的可计算规则、关系运算符连接的产生式规则、多因子并连接的产生式规则基本结构向最简结构的转换.

(4) 多对多型转换

当 A_r^1 和 A_r^0 中属性个数都大于 1 时,称基本结构 $A_r^0 = f_r^1(A_r^1)$ 向最简结构 $v_i = r_k^b(v_j)$ 的转换为多对多型转换. 同样,可以按照 A_r^0 中的多个属性将基本结构分解为多个多对一型的半最简结构,然后按照多对一型转换方法得到最简结构.

2.2 突发事件问题域的特征网络

定义 3 问题域的特征网络 (feature network) 是以推理规则中客观事物的属性为节点、推理规则中属性间最简关系为有向边的网络,它通过描述属性集之间的逻辑关系,建立起事件在当前问题域下的内在逻辑关系,实现对问题域下事件态势的描述. 问题域的特征网络可记为

$$N_f = (V, E) \tag{6}$$

$$V = \bigcup_{a \in A_m} K_a \tag{7}$$

$$E = \bigcup_{r \in R_m} K_r^q \cup \bigcup_{r \in R_m} K_r^p \tag{8}$$

式中: N_f 表示特征网络, V 为网络的节点集合, $\bigcup_{a \in A_m} K_a$ 表示基于属性知识元 K_a 结构描述的事物属性的集合, E 为网络边的集合, $\bigcup_{r \in R_m} K_r^q$ 表示基于关系知识元 K_r 结构描述的事物属性间输入输出关系的集合, $\bigcup_{r \in R_m} K_r^p$ 表示基于关系知识元 K_r 结构描述的输入属性间偏序关系的集合. 因此,构建问题域的特征网络应遵循以下准则:

- (1) 网络的节点集合 V 由推理规则集合 R 中的输入属性集 A_r^1 和输出属性集 A_r^0 组成.
- (2) 网络的边集合 E 由问题域的最简结构组成,网络的边通过属性节点依次连接.
- (3) 相同最简结构的权值可相加.
- (4) 对于无法接入特征网络的孤立最简结构,设定其表示的推理规则对事件问题域的推理无意义,在构建特征网络时忽略此最简结构.

在上述准则的基础上,通过事物属性节点依次连接问题域中的最简结构,可得到事件问题域的特征网络。

3 实例分析

以地震事件后的救灾物资调度问题为例,验证本文提出的突发事件特征网络构建方法的可行性。救灾物资调度问题是地震之后的首要问题,已有学者对此问题进行深入的研究。一般的,从物资组成的角度,可将震后物资调度问题域抽象为包括储备中心、担架、帐篷、救济粮食、受灾地区和受

灾指挥人员的应急管理场景^[10-11]。

首先,识别问题域中的事物知识,并将推理规则表示成规则基本结构形式。针对震后物资调度问题域,从本团队已经建立的知识库中,提取相关的地震事件的对象知识元、属性知识元和关系知识元,可得到震后物资调度问题域的对象-属性-关系层次模型,如图 3 所示。该问题域的层次模型包括:

- 对象层 = {储备中心, 担架, 帐篷, 救济粮食, 受灾地区, 受灾指挥人员}
- 属性层 = {GDP, 人口数量, ..., 人口密度}
- 关系层 = { $r_1, \dots, r_{12}$ }

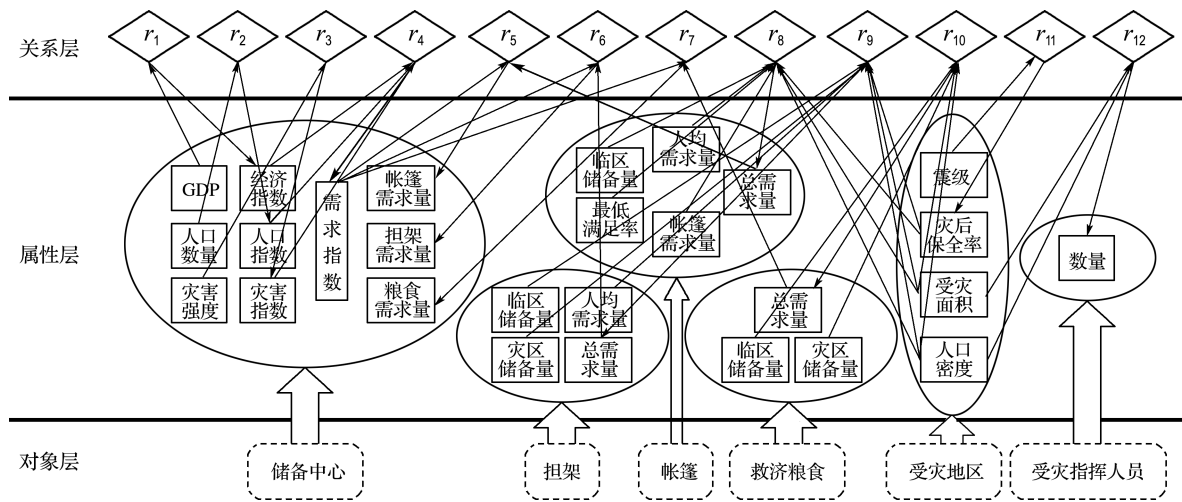


图 3 震后物资调度问题域的对象-属性-关系层次模型

Fig. 3 The object-attribute-relation hierarchical model of problem domain of material dispatch after earthquake

在关系层中,把推理规则集合 R 表示成规则的基本结构,整理得到 12 条基本结构。例如 r_5 的基本结构为

帐篷需求量 = f_r^t (帐篷总需求量, 需求指数)

然后,将规则的基本结构集合中的每条推理规则转换成对应的最简结构,整理得到规则的最简结构 30 条。

最后,依次连接所有规则最简结构的属性节点,得到震后物资调度问题域的特征网络,如图 4 所示。该特征网络由 27 个事物属性节点和 30 条有向边构成。

$V = \{GDP, 人口数量, 灾害指数, \dots, 受灾面积\}$
 $E = \{r_1^b, r_2^b, r_3^b, \dots, r_{30}^b\}$

分析震后物资调度问题域特征网络的静态指标数据可得^[12-13]:特征网络的平均度为 2.2,即平均每个事物属性与两条推理规则相关,表明该问

题域的推理路径串行特点突出;特征网络的平均最短路径长度为 3.292,即从一个事物属性节点

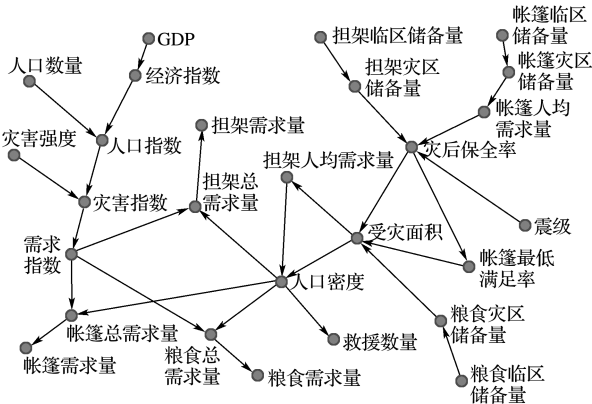


图 4 震后物资调度问题域的特征网络

Fig. 4 The problem domain feature network of material dispatch after earthquake

到另一个事物属性节点之间平均需要经过 3 条规则的推理;特征网络的平均聚集系数为 0.044 0 (随机网络的聚集系数为 0.000 2),表明问题域内的事物属性之间具有较高的关联性,内聚程度较高.对网络静态指标的计算结果表明,震后物资调度问题域的特征网络具有平均度较小、平均路径较短、聚集系数较大的特点,说明事件在当前问题域下的发展呈现串行特点,即事件发展的逻辑比较单一,相应事件的处理思路也清晰.对于震后物资调度问题域,可从灾害指数、担架需求量、帐篷需求量、粮食需求量、人口密度、灾后保全率几个事物属性,快速掌握事件的主要态势,由此科学制订目标问题应对的方案.

进一步,对震后物资调度问题域的特征网络进行模块化分析,如图 5 所示,可知该特征网络被划分为灾后保全率、人口指数、担架总需求量、人口密度和灾害指数 5 个子模块.表明震后物资调度问题应以灾后保全率为目标,以灾害指数、人口指数、人口密度为参考,以提供合适数量的担架为手段.从事件推演的角度可知,满足震后担架的需求量将会使事件向好的方向发展.

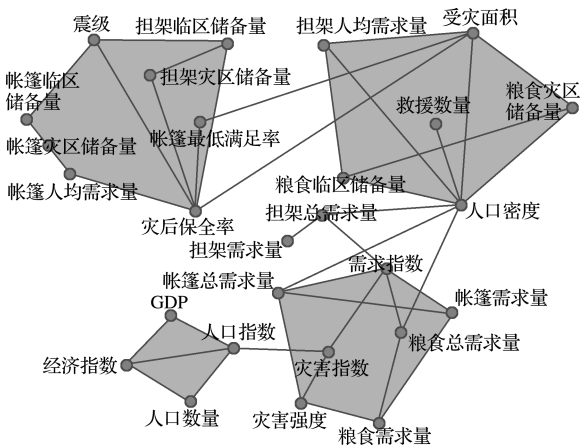


图 5 震后物资调度问题域特征网络的模块化图
Fig. 5 The modular diagram of problem domain feature network of material dispatch after earthquake

由此可以看出,由推理规则的最简结构组成的问题域特征网络,可以完成对突发事件态势的描述.同时,还可以对特征网络进行模块划分,每个子模块对应问题域中的一个子问题,因此目标问题的解决可分解为若干子问题,为事件应急决策提供新的思路.此外,构建的问题域特征网络还可以运用到识别事件关键事物要素、规则的组

调用、规则推演等环节,为突发事件的演化推演和事件应对提供支持.

4 结 语

本文通过将推演规则由基本结构转换成最简结构,连接最简结构集合构建突发事件问题域的特征网络,提出了一种基于推理规则的事件问题域特征网络模型.该模型突出了规则作为事件演化内在逻辑的重要性,可用于对问题域的事件发展态势进行描述,从而可为基于规则的突发事件演化推演提供支持.提出的问题域特征网络的构建方法,是建立在推理规则的最简结构基础上的,但在一些严重缺失事件推理规则的事件中该方法具有使用的局限性.因此,如何在规则部分缺失的情况下提高特征网络描述事件的准确性,是后续研究工作的内容.

参考文献:

[1] 范维澄. 国家突发公共事件应急管理科学问题的思考和建议[J]. 中国科学基金, 2007(2):71-76.
FAN Wei-cheng. Advisement and suggestion to scientific problems of emergency management for public incidents [J]. **Bulletin of National Natural Science Foundation of China**, 2007(2): 71-76. (in Chinese)
[2] 姜 卉,黄 钧. 罕见重大突发事件应急实时决策中的情景演变[J]. 华中科技大学学报:社会科学版, 2009, 23(1):104-108.
JIANG Hui, HUANG Jun. The study on the issues of scenario evolution in real-time decision making of infrequent fatal emergencies [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology: Social Science**, 2009, 23(1):104-108. (in Chinese)
[3] Sánchez A M, Patricio M A, Garcia J, et al. A context model and reasoning system to improve object tracking in complex scenarios [J]. **Expert Systems with Applications**, 2009, 36(8): 10995-11005.
[4] 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[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(5):954-962.
WANG Yan-xin, LI Xiang-yang, XU Lei. Fuzzy rules reasoning method in emergency context reconstruction [J]. **Systems Engineering — Theory & Practice**, 2012, 32(5):954-962. (in Chinese)
[5] 荣莉莉,张继永. 突发事件的不同演化模式研究

- [J]. 自然灾害学报, 2012, **21**(3):1-6.
- RONG Li-li, ZHANG Ji-yong. Research on different evolution models of emergency [J]. **Journal of Natural Disasters**, 2012, **21**(3):1-6. (in Chinese)
- [6] 王庆全, 荣莉莉, 于 凯. 应急决策知识发现的推理方法研究[J]. 运筹与管理, 2010, **19**(1):21-29.
- WANG Qing-quan, RONG Li-li, YU Kai. A knowledge reasoning method for emergency decision-making knowledge discovery [J]. **Operations Research and Management Science**, 2010, **19**(1):21-29. (in Chinese)
- [7] 方志耕, 杨保华, 陆志鹏, 等. 基于 Bayes 推理的灾害演化 GERT 网络模型研究[J]. 中国管理科学, 2009, **17**(2):102-107.
- FANG Zhi-geng, YANG Bao-hua, LU Zhi-peng, *et al.* The GERT network model study of disaster evolution based on Bayes inference [J]. **Chinese Journal of Management Science**, 2009, **17**(2):102-107. (in Chinese)
- [8] 王延章. 模型管理的知识及其表示方法[J]. 系统工程学报, 2011, **26**(6):291-297.
- WANG Yan-zhang. Knowledge and representation of model management [J]. **Journal of Systems Engineering**, 2011, **26**(6):291-297. (in Chinese)
- [9] 陈雪龙, 肖文辉. 面向非常规突发事件演化分析的知识元网络模型及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2013, **53**(4):615-624.
- CHEN Xue-long, XIAO Wen-hui. Knowledge unit network model for evolution analysis of unconventional emergency and its application [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2013, **53**(4):615-624. (in Chinese)
- [10] 于 辉, 刘 洋. 应急物资的两阶段局内分配策略[J]. 系统工程理论与实践, 2011, **31**(3):394-403.
- YU Hui, LIU Yang. Two-stage online distribution strategy of emergency material [J]. **Systems Engineering—Theory & Practice**, 2011, **31**(3):394-403. (in Chinese)
- [11] 唐伟勤, 张 敏, 张 隐. 大规模突发事件应急物资调度的过程模型[J]. 中国安全科学学报, 2009, **19**(1):33-37.
- TANG Wei-qin, ZHANG Min, ZHANG Yin. Process model for materials dispatching in large-scale emergencies [J]. **China Safety Science Journal**, 2009, **19**(1):33-37. (in Chinese)
- [12] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. **Review of Modern Physics**, 2002, **74**:47-97.
- [13] 李 英, 周 伟, 郭世进. 上海公共交通网络复杂性分析[J]. 系统工程, 2007, **25**(1):38-41.
- LI Ying, ZHOU Wei, GUO Shi-jin. An analysis of complexity of public transportation network in Shanghai [J]. **Systems Engineering**, 2007, **25**(1):38-41. (in Chinese)

Problem domain feature network model for rule-reasoning of emergency

WANG Ning*, LU Guo-cui, GUO Wei

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

Abstract: To actualize the development state of emergency and problem decomposition, aiming at solving the problem of lacking combination with reasoning rules in the state of emergency, in view of the knowledge representation method based on knowledge unit, the object-attribute-relation hierarchical model for knowledge organization in emergency problem domain is proposed. Through conversing the basic structure to the briefest structure of reasoning rules in model relation-layer, the briefest relation between two things' attributes is obtained. By connecting the briefest structure of reasoning rules, the feature network is constructed which can represent the development state of emergency problem domain and achieve problem decomposition. Finally, the feasibility of the feature network to describe the state of emergency is proved through a material-dispatching case after the earthquake.

Key words: emergency; knowledge unit; feature network; transform of reasoning rules