

基于动态贝叶斯网络的非常规 突发灾害事故情景推演

夏登友^{1,2}, 钱新明¹, 段在鹏¹

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国人民武装警察部队学院 消防指挥系, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 针对非常规突发灾害事故演变路径不清晰, 演变过程及发展态势复杂, 应急决策主体在应急救援过程中很难做出正确决策的现状, 在分析非常规突发灾害事故情景演变规律的基础上, 基于情景状态(S)、处置目标(T)、处置措施(M)和自身演变(E)四个要素分析了非常规突发灾害事故情景演变的路径, 基于动态贝叶斯构建了非常规突发灾害事故动态情景网络, 并利用联合概率公式进行相应节点变量的状态概率计算, 实现了非常规突发灾害事故的关键情景推演. 以大连“7·16”油库爆炸火灾事故为例, 演示了非常规突发灾害事故的情景推演流程及关键技术, 并对情景推演的结果进行了分析. 推演结果表明: 事故按输油管线爆炸→油罐爆炸起火→原油泄漏、污染海域的路径演变; 其中, 输油管线爆炸出现的概率为 90.2%, T103 罐爆炸起火出现的概率为 84.1%, 原油泄漏、污染海域出现的概率为 80.3%, 推演结果与实际灾害事故的情景发展状态基本一致, 证明了该方法的合理性和可行性.

关 键 词: 情景应对; 非常规突发灾害事故; 演变路径; 动态贝叶斯网络; 情景推演

中图分类号: X 915.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)06-0897-06

Scenario Deduction Model of Unconventional Emergency Based on Dynamic Bayesian Network

XIA Deng-you^{1,2}, QIAN Xin-ming¹, DUAN Zai-peng¹

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Department of Fire Command, The Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China. Corresponding author: QIAN Xin-ming, E-mail: qsemon@bit.edu.cn)

Abstract: The unclear evolution path and complex development of unconventional emergency could make it difficult for decision-makers to make right decisions. A model based on the dynamic Bayesian network was proposed to solve the key scenario deduction problems of unconventional emergency. In this model, the scenario evolution law of unconventional emergency was first analyzed to formulate the four factors including scenario situation (S), disposal target (T), disposal measure (M) and evolution (E). Then the scenario evolution path was performed based on the four factors. Finally, the state probabilities of corresponding node variables were calculated by using the joint probability formula. For the purpose of illustration and verification, the case of Dalian “7·16” oil depot fire and explosion accident was presented. The results showed that the evolution path follows oil pipeline explosion, oil tank explosion and fire, and oil spill and offshore pollution, whose probabilities are respectively 90.2%, 84.1% and 80.3%. Thus, it could be concluded that the proposed dynamic Bayesian network is both reasonable and feasible.

Key words: scenario response; unconventional emergency; evolution path; dynamic Bayesian network; scenario deduction

近年来,随着我国经济社会的快速发展和新材料、新能源、新工艺、新产品的广泛应用,使得灾

害事故之间关联性和依赖性变得复杂.超高层建筑、化工园区火灾、危险化学品泄漏、地震、飓风等突发灾害事故都呈现出明显的非常规性特征,严重影响了整个社会经济系统的运行^[1].在处置此类灾害事故时,往往因为其演变路径不清晰、演变过程及发展态势不确定,致使应急决策主体无法正确做出决策.因此,依据灾害事故当前的状态,对非常规突发灾害事故的演变路径及未来的发展趋势进行合理分析推理的研究就显得尤为重要.国内外学者在这方面进行了一些探索性的研究:Mahmou 等^[2]分析了非常规突发灾害事故的演变过程,提出此类事故演变机理的内在规律;Pomerol^[3]提出了情景演变的网络表达方式,并建立了非常规灾害事故情景演变分析流程;何婧等^[4]构建了非常规突发灾害事故进程演变模型;Ahmed 等^[5]分析了情景构建的步骤和方法;袁晓芳等^[6]基于 PSR 与贝叶斯网络构建非常规突发灾害事故的情景演变分析模型;杨保华^[7]建立基于随机网络的非常规突发灾害事故情景推演网络结构和情景推演耦合模型;裘江南等^[8]基于“输入要素、状态要素、输出要素”模型实现灾害事故的情景预测和推演.

上述文献从不同角度探讨了非常规突发灾害事故的演变机理及情景推演过程,取得了阶段性研究成果.但对非常规突发灾害事故的情景推演,大部分研究还停留在定性描述阶段,缺乏数据支撑的定量分析模型;且建立的模型较为单一,没有很好把握非常规突发灾害事故的演变规律,情景演变路径分析不够清晰,体现不出情景演变的动态性.本文基于动态贝叶斯网络构建非常规突发灾害事故推演模型,对情景演变路径分析、情景网络构建及情景概率计算等情景推演关键技术进行深入的研究,有效解决非常规突发灾害事故情景演变的不确定性和动态性问题,为此类事故现场有效应急决策和应急处置奠定基础.

1 情景演变路径分析

情景演变路径分析是指通过符号化、网络化的方式表达出情景要素、情景要素之间关系以及情景当前的状态、情景的演变过程以及情景的可能演变结果.通过情景演变路径分析,使应急决策主体能够对突发灾害事故当前的状态以及未来可能的发展趋势、影响事态发展的因素、驱动这些因素发挥作用的力量等有直观、概括的了解,使应急决策主体能够在紧迫的时间约束下,尽可能地做

出满意的、科学的决策.

1.1 事故情景演变规律

探求非常规突发灾害事故的情景演变规律是情景演变路径分析的基础.非常规突发灾害事故具有历史罕见性、突然爆发性、致灾因素复杂性、极度破坏性、时效紧迫性和极端不确定性等特征^[9].此类灾害事故的情景演变过程及规律复杂,灾害事故情景从发生后的初始状态、灾害事故发展、演变的规律以及人为干预和外界环境的影响等,会伴随一系列的动态演变.

非常规突发灾害事故的演变过程存在四个要素,分别为情景状态(S)、处置目标(T)、处置措施(M)和灾害事故的自身演变(E ,用 \odot 表示),这四个要素之间的关系如图 1 所示,表达了灾害事故情景在自身演变的基础上,处置措施对其干扰之后实现应急决策主体的处置目标与否.

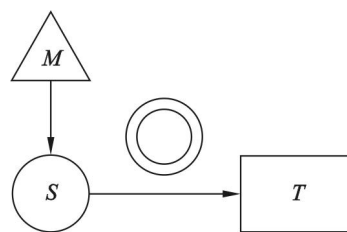


图 1 灾害事故情景要素之间的关系
Fig. 1 Relations of scenario elements

非常规突发灾害事故从开始爆发,随 t_1 时刻演变的过程中,出现三种或三种以上演变路径,由于应急指挥决策的介入,对非常规突发灾害事故制定不同的处置目标和处置措施,导致灾害事故在向 t_2 时刻演变的过程中,事故状态为 S_1 .依此类推,直至到达 t_n 时刻,灾害事故结束,如图 2 所示.灾害事故发生后,在 t_1 时刻,处置措施 M_1 作用于情景状态 S_1 ,在灾害事故自身演变的同时,达到处置目标 T_1 ;在 t_2 时刻,灾害事故又在自身演变的同时,情景状态演变为 S_2 ,处置措施 M_2 作用于情景状态 S_2 ,达到处置目标 T_2 ;依此类推,直至处置目标结束,灾害事故的情景状态也随之结束.

1.2 事故情景演变路径

非常规突发灾害事故在演变过程中存在多个关键情景,针对每个关键情景,应急指挥决策主体都会有不同的处置目标和处置措施.因此,当非常规突发灾害事故的情景按照处置措施达到处置目标时,灾害事故就以应急指挥决策主体的期望演变到下一时刻的情景,如果继续被合理解决,就会继续以应急指挥决策主体的期望进行演变,直至灾害事故消失;当灾害事故的情景没有按照处置

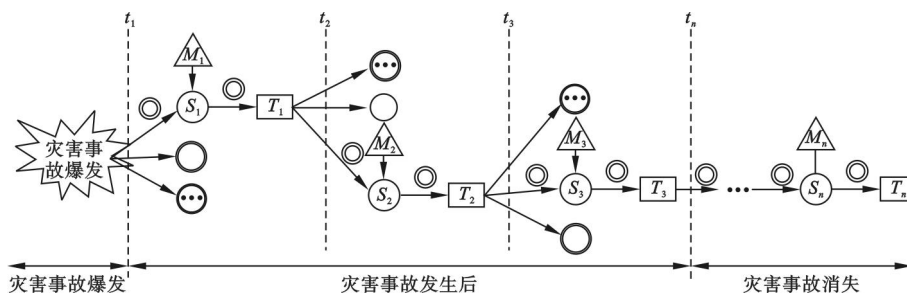


图2 非常规突发灾害事故情景演变规律示意图

Fig. 2 Scenario evolution rule sketch of unconventional emergency disaster accidents

措施达到相应的处置目标时,灾害事故就会朝着违背应急指挥决策主体意图的方向演变,直到灾害事故被完全合理解决或灾害事故自然消失.如图3所示,是一个包含若干个关键情景的非常规突发灾害事故情景演变的所有可能路径.横向箭头表示处置措施(M)使灾害事故朝最乐观的处置目标(T)方向演变,即 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4$;纵向箭头表示处置措施(M)使灾害事故朝最悲观的处置目标(T)方向演变,即 $S_1 \rightarrow S_9 \rightarrow S_{13} \rightarrow S_{15}$.非常规突发灾害事故从爆发开始就伴随着处置措施的作用,每个情景状态(S)中都会有对应的处置措施(M).如果达到相应的处置目标,灾害事故的情景状态就会朝着乐观方向演变;没有达到相应的处置目标,灾害事故的情景状态就会朝着悲观方向演变.

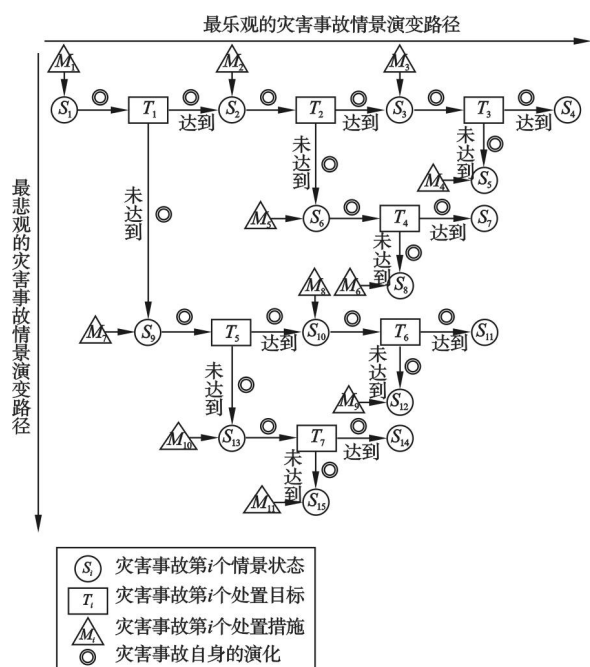


图3 非常规突发灾害事故情景演变路径示意图

Fig. 3 Scenario evolution path sketch of unconventional emergency disaster accidents

2 情景概率计算

在演变路径分析的基础上,提取影响事故演

变过程中关键要素作为动态贝叶斯网络的节点变量,将随时间推移而具有因果关系的节点变量连接起来构成动态情景网络;利用联合概率公式进行相应节点变量的状态概率计算,实现非常规突发灾害事故的情景推演.

2.1 动态贝叶斯网络

贝叶斯网络^[10]是描述变量之间概率关系的图形模式,是一个有向无环图.由代表变量节点及连接这些节点有向边构成(由父节点指向子节点),如图4a所示.节点代表随机变量,节点间的有向边代表了节点间的因果关系,用条件概率表达关系强度.节点变量可以是任何问题的抽象,适用于表达和分析不确定性和概率性的事件,可以从不完全、不精确或不确定的知识或信息中作出推理.动态贝叶斯网络^[11]是描述随时间而改变的模型,是在贝叶斯网络上加一个时间要素,可看作是贝叶斯网络在时间序列上的展开,如图4b所示.

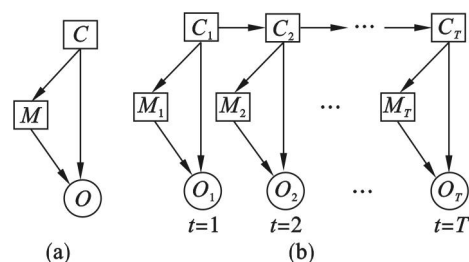


图4 贝叶斯网络和动态贝叶斯网络示意图

Fig. 4 Sketch of Bayesian networks and dynamic Bayesian networks

(a) 一贝叶斯网络; (b) 一动态贝叶斯网络.

动态贝叶斯网络的联合概率公式为

$$P(S_1, S_1, \dots, S_n) = \prod_{i=1}^n P(S_i | P(\prod S_n)) \quad (1)$$

动态贝叶斯网络描述了变量集 $X_t = \{C_t, M_t, O_t\}$ 的概率依存关系及其随时间 $t = 1, 2, \dots, T$ 的变化情况.图4b的网络中,在任意时刻 t ,变量 M_t 的状态由变量 C_t 决定,而 O_t 的状态则由 C_t 和 M_t 共同决定,变量集 X_t 的联合概率分布可表示为式(2)的形式:

$$P(X_i) = P(C_i)P(M_i|C_i)P(O_i|C_i,M_i) . \quad (2)$$

将动态贝叶斯网络应用到非常规突发灾害事故情景推演中,除了能进行灾害事故发展态势的推演外,还能反映出灾害事故发展态势的变化趋势和实现信息的累积,可以更好地辅助应急指挥决策.

2.2 事故动态情景网络构建

1) 节点变量的确定. 利用领域专家对非常规突发灾害事故情景演变过程中各要素进行打分,确定一个阈值. 当要素的分数大于该阈值时,表示该要素是影响灾变的关键要素,利用箭头连接起来;当分值小于该阈值时,表示该要素不是影响灾变的关键要素,给予舍弃.

考虑到非常规突发灾害事故发生后,应急处置的力量往往不足,本文采用悲观主义决策准则^[12]确定情景演变的动态贝叶斯网络结构,降低了由应急指挥决策失误而造成的严重后果.

2) 节点变量之间关系的确定. 贝叶斯网络的节点变量确定后,需要用有向边将节点变量之间的相互关系表示出来. 根据事故演变规律确定各节点变量之间的因果关系,构建非常规突发灾害事故情景演变的动态贝叶斯网络,如图 5 所示. 有向边代表一种因果关系,描述了不同时刻处置目标(T)、情景状态(S)与处置措施(M)之间的相互影响关系.

3) 分配概率. 对没有父节点的初始事件指定先验概率,即 $P(\prod S_i)$;对有父节点的变量根据专家打分得出条件概率,即 $P(S_i|P(\prod S_i))$,专家打分的方式同样采用悲观主义决策准则.

2.3 事故概率计算

依据上文构建的非常规突发灾害事故动态贝

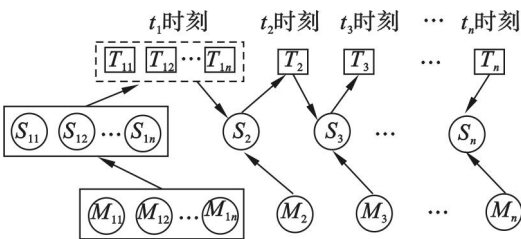


图 5 情景演变的动态贝叶斯网络

Fig. 5 Dynamic Bayesian networks of scenarios evolution

叶斯网络以及领域专家打分确定的各节点相互关系及条件概率表后,可利用联合概率公式(1)对网络中各节点变量进行对应的状态概率计算,最终得出下一时刻出现情景的状态概率,以实现此类灾害事故的情景推演. 推演结果可为应急指挥决策主体制定合理的控制措施和控制目标提供依据.

3 实例分析

以大连“7. 16”油库爆炸火灾事故为例进行实证分析. 该起事故着火油罐容积大、燃烧范围广、参战力量多,不能按正常的应急程序处置,是一起典型的非常规突发灾害事故.

3.1 事故情景演变路径分析

通过对案例的剖析,先初步设定网络节点变量,5 名领域专家对每个变量打分,利用悲观主义决策准则进行筛选. 根据历史资料统计分析和领域专家经验的估计,设定阈值为 0. 7. 最终,将此次事故的演变路径确定为以下 10 个情景状态、6 个处置措施和 6 个处置目标,见表 1.

表 1 大连“7. 16”油库爆炸火灾事故情景要素

Table 1 Scenario elements of Dalian “7. 16” oil depot fire and explosion accident

情景状态(S)	处置目标(T)	处置措施(M)
输油管道爆炸起火 S_1	管道泄漏被制止 T_1	关阀断料 M_1
地面流淌火 S_2	流淌火被扑灭 T_2	利用泡沫炮、泡沫枪堵截消灭流淌火 M_2
威胁毗邻油罐 S_4	降低热辐射 T_3	事故消失 S_3
		利用泡沫炮、泡沫枪冷却毗邻油罐 M_3
油罐爆炸起火 S_6	油罐被冷却 T_4	事故消失 S_5
火势稳定 S_7	火势被扑灭 T_5	利用泡沫炮、泡沫枪冷却着火罐 M_4
		利用泡沫炮、泡沫枪扑灭油罐火 M_5
		事故消失 S_8
原油泄漏,污染海域 S_9	原油泄漏被隔离控制 T_6	事故消失 S_{10}
		利用泡沫炮(枪)、围油栏等将油品堵截在一定区域内 M_6

将表 1 中各要素进行关联分析,形成如图 6 所示的事故情景演变路径.

3.2 事故情景概率计算

当油库输油管线爆炸起火后,根据事故在各

时刻发展、演变及相应情况,利用 5 名专家指定每个节点变量的条件概率,方法同上,各节点变量的条件概率见表 2.

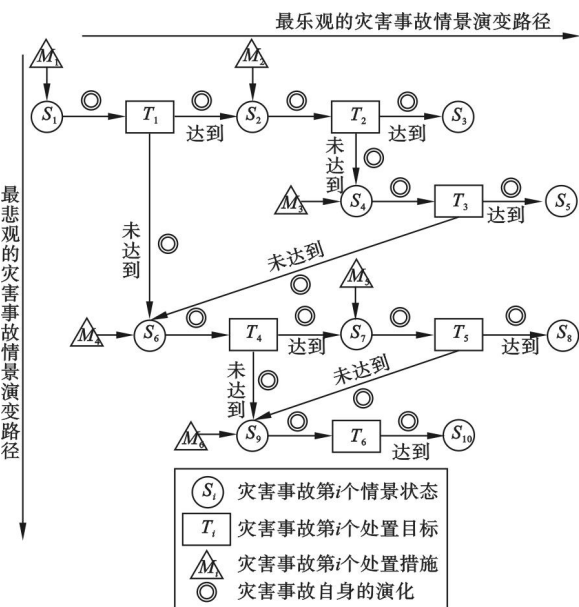


图 6 大连“7.16”油库爆炸火灾事故情景演变路径示意图
Fig. 6 Scenario evolution path sketch of Dalian “7.16” oil depot fire and explosion accident

利用式(1),从 S_1 开始计算表 2 中的各节点变量的状态概率. 例如, S_1 中 True 的状态概率为 $P(S_1) = P(S_1/M_1 = \text{True}) \times P(M_1 = \text{True}) + P(S_1/M_1 = \text{False}) \times P(M_1 = \text{False}) = 0.902$; S_1 中 False 的状态概率为 $P(S_1/M_1 = \text{True}) \times P(M_1 = \text{True}) + P(S_1/M_1 = \text{False}) \times P(M_1 = \text{False}) = 0.098$. 依此类推,计算其他节点变量的状态概率,本文利用计算软件 Netica 获得各节点变量的状态概率,如图 7 所示.

3.3 结果分析

- 1) 此次事故发生概率最大的为输油管线爆炸起火, T103 罐爆炸起火以及原油泄漏、污染海域这几个情景,它们发生的概率分别为 90.2%, 84.1%, 80.3%. 实际的事故也是按照此情景状态随时间的推移出现,证明了该方法的可行性.
- 2) 针对每一个事故的关键情景,都会有不同的处置措施和处置目标,这些具有针对性的处置

表 2 节点变量的条件概率表(节选)
Table 2 Conditional probability table of the node variables(part)

M_1	True	False	True	0.8	0.3
S_1	0.96	0.04	False	0.2	0.7
True	$M_1 = \text{True}$	$M_1 = \text{False}$
False	0.9	0.95	M_6	True	False
T_1	0.1	0.05		0.88	0.12
True	$S_1 = \text{True}$	$S_1 = \text{False}$	S_9	$T_4 = \text{True } M_6 = \text{True}$	$T_4 = \text{False } M_6 = \text{False}$
False	0.9	0.85	True	0.95	0.1
M_2	0.1	0.15	False	0.05	0.9
True	True	False		$T_4 = \text{True } M_6 = \text{False}$	$T_4 = \text{False } M_6 = \text{True}$
False	0.95	0.05	True	0.45	0.45
S_2	$T_1 = \text{True } M_2 = \text{True}$	$T_1 = \text{False } M_2 = \text{False}$	False	0.55	0.55
True	0.7	0.3	T_6	$S_9 = \text{True}$	$S_9 = \text{False}$
False	0.3	0.7	True	0.9	0.1
True	$T_1 = \text{True } M_2 = \text{False}$	$T_1 = \text{False } M_2 = \text{True}$	False	0.3	0.7
False	0.6	0.6	S_{10}	$T_6 = \text{True}$	$T_6 = \text{False}$
T_2	0.4	0.4	True	0.95	0.05
	$S_2 = \text{True}$	$S_2 = \text{False}$	False	0.15	0.85

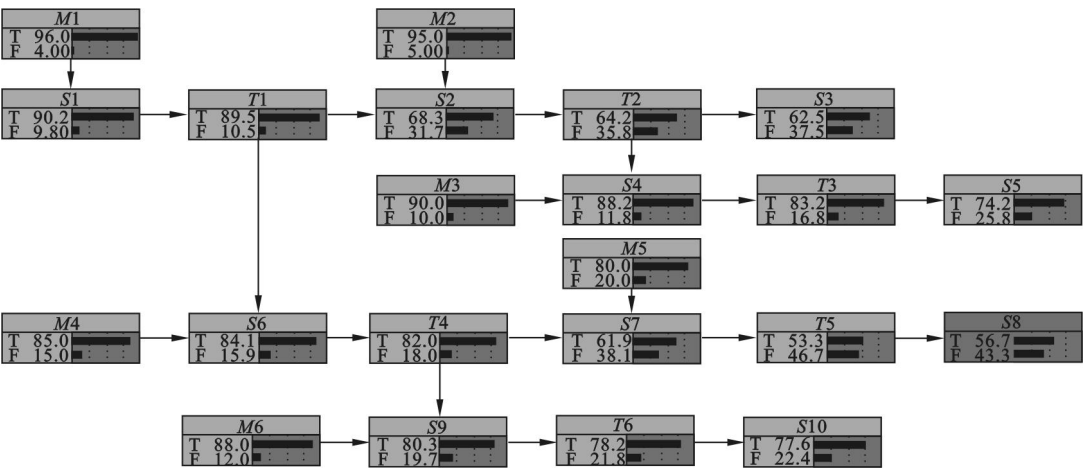


图 7 大连“7.16”油库爆炸火灾事故情景推演示意图
Fig. 7 Scenario inference sketch of Dalian “7.16” oil depot fire and explosion accident

措施是应急指挥决策主体为减少事故造成重大人员伤亡和财产损失的必然行为;采取不同的处置措施,灾害事故情景发展及演变的路径不同。

3) 无论处置措施和处置目标是否合理,事故朝恶化方向演变的概率依然很大;但并不意味着处置措施和处置目标不影响事故的演变方向,好的处置措施和处置目标不仅可以延缓事故朝恶化方向演变,为应急响应争取时间,还在一定程度上减少事故造成的损失。

以上对大连“7.16”油库爆炸火灾事故的情景推演进行了简化,真实的非常规突发灾害事故影响灾变因素繁多。在实际应用中可提取关键因素,以减少专家打分的主观性,提高情景推演的精度。

4 结 论

1) 基于情景状态(S)、处置目标(T)、处置措施(M)和自身演变(E)四个要素表示非常规突发灾害事故情景演变路径,可以将此类灾害事故的演变规律清楚表示出来,为应急指挥决策快速采取合理的干预手段提供依据。该方法建模过程简单,结果直观,便于推广。

2) 基于动态贝叶斯网络的情景推演模型可把握非常规突发灾害事故演变状态概率,推演过程具有前后连续性,为应急指挥决策主体针对下一时刻可能发生的灾害事故提前制定应对方案提供新方法。

3) 由于非常规突发灾害事故影响因素的复杂性、多样性和不确定性,导致对样本信息要求较高。因此在样本信息足够多、领域专家经验足够丰富时,方可得到更加精确的灾害事故推演结果。

参考文献:

- [1] 张静,刘茂,王悦,等. 基于本体的突发事件应急决策知识模型研究[J]. 安全与环境学报,2011,11(1):237-241.
(Zhang Jing, Liu Mao, Wang Yue, et al. Emergency decision-making knowledge model based on the theory of ontology [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2011, 11(1): 237-241.)
- [2] Mahmoud M, Liu Y Q, Hartmann H, et al. A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making[J]. *Environmental Modeling & Software*, 2009, 24(7): 798-808.
- [3] Pomerol J-C. Scenario development and practical decision making under uncertainty [J]. *Decision Support Systems*, 2001, 31: 197-204.
- [4] 何婧,刘娟娟,胡娉. 非常规突发事件进程演变模型的构建[C]// 第四届国际应急管理论坛暨中国(双法)应急管理专业委员会第五届年会. 北京,2009:59-62.
(He Jing, Liu Juan-juan, Hu Ping. Constructing evolution model of unconventional emergency [C] // The 4th International Emergency Management BBS and China (Double) Emergency Management Professional Committee of the 5th Annual Meeting. Beijing, 2009: 59-62.)
- [5] Ahmed D M, Sundaram D, Piramuthu S. Knowledge-based scenario management —process and support [J]. *Decision Support Systems*, 2010, 49: 507-520.
- [6] 袁晓芳,田水承,王莉. 基于PSR与贝叶斯网络的非常规突发事件情景分析[J]. 中国安全科学学报,2011,21(1): 171-176.
(Yuan Xiao-fang, Tian Shui-cheng, Wang Li. Scenario analysis of unconventional emergency based on PSR model and Bayesian networks [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(1): 171-176.)
- [7] 杨保华. 基于随机网络的非常规突发事件情景推演模型及其应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
(Yang Bao-hua. Research on scenario deduction model of unconventional emergency and its application based on graphical evaluation review technique network [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.)
- [8] 裘江南,刘丽丽,董磊磊. 基于贝叶斯网络的突发事件链建模方法与应用[J]. 系统工程学报,2012,27(6): 139-150.
(Qiu Jiang-nan, Liu Li-li, Dong Lei-lei. Modeling method and application of emergent event chain based on Bayesian network [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2012, 27(6): 139-150.)
- [9] 王旭坪,杨相英,樊双蛟,等. 非常规突发事件情景构建与推演方法体系研究[J]. 电子科技大学学报,2013,15(1): 22-27.
(Wang Xu-ping, Yang Xiang-ying, Fan Shuang-jiao, et al. A methodology of scenario construction and deduction of unconventional emergency [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology*, 2013, 15(1): 22-27.)
- [10] 唐立建,黄德镛. 基于动态贝叶斯网络分析法的炸药库爆炸事故分析[J]. 安全与环境学报,2010,10(6): 160-163.
(Tang Li-jian, Huang De-yong. Accident analysis of explosion risk in explosive storerooms based on dynamic Bayesian network [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(6): 160-163.)
- [11] Murphy K P. Dynamic Bayesian networks: representation, inference, and learning [D]. Berkeley: University of California, 2002.
- [12] Klein G A, Orasanu J, Calderwood R, et al. Decision making in action: models and methods [M]. Westport: Ablex Publishing, 1993.