

辛晶, 周扬, 夏登友, 等. 城市商业综合体建筑火灾事故情景推演模型[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 63–66, 89. [XIN-Jing, ZHOU Yang, XIA Dengyou, et al. Scenario Deduction Model of Urban Commercial Complex Fire Accidents[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 63–66, 89. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.014.]

# 城市商业综合体建筑火灾事故情景推演模型<sup>\*</sup>

辛 晶<sup>1</sup>, 周 扬<sup>2</sup>, 夏登友<sup>1</sup>, 李健行<sup>1</sup>

(1. 中国人民警察大学, 河北 廊坊 065000; 2. 吴忠市消防救援支队, 宁夏 吴忠 751100)

**摘 要:** 为了有效地解决城市商业综合体建筑火灾事故情景演变过程中的动态性和不确定性问题, 首先利用 Dempster 合成法则选取网络节点变量, 构建基于贝叶斯网络的情景网络图; 其次利用联合概率公式估算网络节点变量的状态概率, 构建符合现场实际的火灾情景推演模型, 形成直观的火场综合态势图; 最后以某国际商业广场火灾事故为实例, 对情景推演模型进行应用。实例表明了城市商业综合体建筑火灾事故情景推演模型的合理性和可行性, 以便为灭火救援指挥人员应急决策提供可行的参考。

**关键词:** 城市商业综合体建筑; 火灾事故; 情景推演; 贝叶斯网络; Dempster 合成法则; 应急决策

**中图分类号:** X45; X915.5; F299.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)03-0063-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.03.014

由于城市商业综合体建筑结构复杂、功能多样、人员聚集, 使得其火灾具有发生难以预测、演变过程复杂、后果严重等特点。根据城市商业综合体建筑火灾出现的实时情景有效地推演, 能使灭火救援决策主体在关键决策点做出科学的决策, 不仅能提高决策效率, 而且能实现成功灭火救援的目的。

国内学者对城市商业综合体建筑火灾事故的不同方面进行了研究。雷友学<sup>[1]</sup>研究了火灾的预防、徐楠楠<sup>[2]</sup>研究了人员疏散、王刘兵<sup>[3]</sup>研究了烟气流动问题。周扬等<sup>[4]</sup>构建了城市商业综合体建筑火灾事故情景演变路径分析及表示模型, 为情景推演搭建可靠的框架。对于情景推演方面, 李健行等<sup>[5]</sup>基于知识元与动态贝叶斯网络对非常规突发灾害事故情景进行分析, 夏登友等<sup>[6]</sup>构建了基于动态贝叶斯网络的非常规突发灾害事故情景推演模型, 并以油库爆炸火灾事故为例进行应用。以上研究对于城市商业综合体建筑火灾事故情景推演研究的较少。因此, 本文在构建城市商业综合体建筑火灾情景网络图的基础上, 利用联合概率公式计算情景网络图中各节点变量的状态概率, 构建情景推演模型, 形成随时间推移而变化的、直观反映火场实际情况的综合态势图, 为灭火救援决策主体实时决策提供可靠的依据。

## 1 情景网络图

以贝叶斯网络为理论, 通过专家对各情景特

征要素进行综合评定, 利用 Dempster 合成法则对专家评定结果进行整合, 选取满足阈值且因果关系较强的要素作为网络节点变量, 构建城市商业综合体建筑火灾事故情景网络图。

### 1.1 贝叶斯网络

贝叶斯网络是一种将概率理论和图论相结合, 将不确定性知识以概率网络直观表达的理论形式。它将先验知识与后验知识相融合, 较好地解决了实际工程中的不确定性问题<sup>[7]</sup>。网络图中的节点为随机变量, 节点的状态表示各节点变量的可信程度, 各节点变量间的有向边表示节点变量间具有直接的因果关系。 $P$  是条件概率表的集合,  $P = \{P(V_i | P_a(V_i)), V_i \in V\}$  表示每一个节点  $V$  都有一个条件概率分布, 用来表示  $V_i$  与其父节点  $P_a(V_i)$  的相关度。条件概率  $P(V_i | P_a(V_i))$  表示父节点情景节点变量是子节点情景节点变量发生的直接原因, 没有任何父节点的条件概率称其为先验概率。

贝叶斯网络用联合事件概率公式<sup>[7]</sup>计算不确定性:

$$P(V_1, V_2) = P(V_1 | V_2)P(V_2). \quad (1)$$

用贝叶斯规则表示:

$$P(V_1 | V_2) = \frac{P(V_2 | V_1)P(V_1)}{P(V_2)}. \quad (2)$$

当情况复杂、具有多个影响因素时, 可以采用贝叶斯的扩展规则表示。设  $\vec{e}$  是多个信息属性的向量值,  $H_i$  是假设  $H$  的  $S$  状态集合:

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-12-30 修回日期: 2020-02-30

基金项目: 河北省自然科学基金面上项目(G2018507023)

第一作者简介: 辛晶(1976-), 女, 汉族, 黑龙江绥化人, 博士, 教授, 主要从事灾害事故应急救援方面的研究。

E-mail: xin\_jing@126.com

$$P(H_i|\vec{e}) = \frac{p(\vec{e}|H_i)P(H_i)}{\sum_{i=1}^s P(\vec{e}|H_i)P(H_i)} \quad (3)$$

式中:  $P(H_i)$  为先验概率, 是未对状态  $i$  进行测量前的概率。 $P(H_i|\vec{e})$  是在状态  $i$  给定了已测量向量  $\vec{e}$  条件下的后验概率。利用变量的先验概率计算后验概率:

$$P(S_1, S_2, \dots, S_n) = \prod_{i=1}^n P(S_i | P_a(S_i)) \quad (4)$$

## 1.2 Dempster 合成法则

Dempster 合成法则是证据理论的核心, 其作用是把多源信息融合成一个合理的证据。在冲突程度不严重的情况下, 可以使正确的信息进行累积, 使融合后的结果分布更集中, 其提供了合成两个或多个证据的合成公式<sup>[8-9]</sup>:

对两个信度函数进行合成:

$$m(A) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j)} \quad (5)$$

式中:  $m_1$  和  $m_2$  分别是信度函数的概率,  $A_i$  和  $B_j$  分别为  $m_1$  和  $m_2$  的焦点。

对多个信度函数进行合成:

$$m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{A_i \cap B_j \cap C_l \dots = A} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) \cdot m_3(C_l) \dots \quad (6)$$

式中:  $k = \sum_{A_j \cap B_l \cap C_l \dots = \phi} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) \cdot m_3(C_l) \dots$ , 其大小反应专家评定之间冲突的大小。

对于式(6), 若  $k=1$ , 证据之间有矛盾, 无法继续使用。当  $k$  值趋近 1 时, 证据的冲突大, 会产生有悖于常理的数值。因此, 采用改进的证据合成公式<sup>[9]</sup>:

$$m(A)' = \sum_{A_i \cap B_j \cap C_l \dots = A} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) \cdot m_3(C_l) \cdot \dots + k \cdot q(A) \quad (7)$$

式中:  $k = \sum_{A_i \cap B_j \cap C_l \dots = \phi} m_1(A_i) \cdot m_2(B_j) \cdot m_3(C_l) \dots$ ,

$$q = \frac{1}{n} \sum_{1 \leq i \leq n} m_i(A)$$

为了获得更加准确的因果关系, 采用式(6)和(7)计算结果的平均值:

$$m(A)_h = \frac{m(A) + m(A)'}{2} \quad (8)$$

## 1.3 情景网络图的构建

### 1.3.1 网络节点变量的确定

根据城市商业综合体建筑火灾事故情景演变分析<sup>[4]</sup>可知, 情景中致灾因子( $F$ )、承灾体( $B$ )及驱动要素( $D$ )的种类、参数及力度等特征要素不同, 致使火灾事故在发展演变过程中存在多种情景状态( $S$ )。根据情景特征要素的作用, 将其划分为情景输入层、情景状态分析层和情景输出层, 这些变量构成了情景推演的网络节点变量。

### 1.3.2 网络拓扑结构的确定

确定网络拓扑结构就是明确网络节点变量间的因果关系。通过灭火救援专家的经验明确具有因果关系的网络节点变量, 构建初步的情景网络拓扑结构。为降低专家确定节点间关系时的主观

性和分歧性, 采用 Dempster 合成法则对评定结果整合处理。若两个节点变量间的因果关系变量为真的信度大于设定的信度阈值, 则节点变量间的因果关系成立, 通过有向边连接。考虑到城市商业综合体建筑火灾的动态变化性, 上一时间段  $t_0$  情景输出层的节点变量作为下一时间段  $t_1$  的输入层作用于下一时间片段的各情景变量。根据贝叶斯网络和 Dempster 合成法则构建城市商业综合体建筑火灾事故情景网络图(图1)。

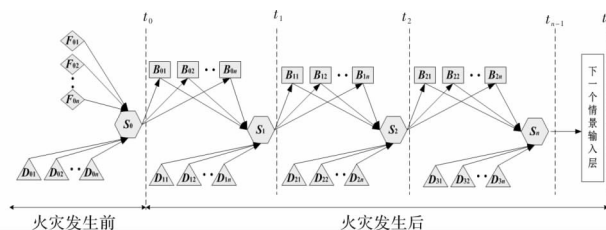


图1 城市商业综合体建筑火灾事故情景网络图

## 2 情景推演模型

情景推演是基于情景特征要素及其因果关系, 构建情景网络图, 通过一系列数理方法的推理规则, 估算可能情景状态的概率值, 实现情景随时间的动态推演, 控制火灾情景向有利的方向演变。

### 2.1 节点变量条件概率的分配

为了实现火灾事故情景推演的功能, 城市商业综合体建筑火灾情景网络图构建完成后, 需要对网络各节点变量的条件概率进行分配。由于城市商业综合体建筑火灾事故案例较少, 一旦发生现场较复杂, 难以获取全面的样本数据作为支撑, 因此, 节点变量的条件概率由灭火救援领域的专家根据其经验确定。

### 2.2 节点变量状态概率的确定

城市商业综合体建筑火灾事故现场隐性信息较多, 准确地获取信息难度大。因此, 以专家确定网络节点变量的条件概率为基础, 采取 Dempster 合成法则将多名专家对于同一个节点的条件概率进行合成, 确定出一个概率值, 以消除专家主观性造成的不一致性, 然后通过联合概率公式, 利用 GeNIe 软件<sup>[10]</sup> 计算城市商业综合体建筑火灾情景网络图中节点变量的状态概率, 再结合具体的情景计算城市商业综合体建筑火灾在不同时间阶段情景的状态概率, 形成情景状态概率表, 便于灭火救援决策主体预知险情, 提前采取预防性措施, 控制火灾情景向有利的方向演变, 确保灭火救援行动顺利进行。

### 2.3 情景推演综合态势图

为了便于灭火救援决策主体直观地掌握现场整体态势, 将情景演变路径、情景网络拓扑结构以及各节点变量的状态概率三者融合在一张图中, 形成全面反映火灾事故情景演变的“数形”结合的综合态势图<sup>[11]</sup>, 为灭火救援决策主体进行准确快速的现场决策提供一个直观明确的参考依据, 提高指挥决策效率。

### 3 实例应用

以 2008 年发生在某国际商业广场火灾事故为实例进行应用, 以验证该推演模型的可行性和合理性。

#### 3.1 事故描述

20:25, 某市 119 指挥中心接到某国际商业广场发生火灾的报警, 调集 9 个中队、61 辆消防车、230 名消防员到场扑救。后续又调集了 23 辆消防车、205 名消防员支援灭火战斗。经过奋力扑救, 火势于次日凌晨 5 时得到基本控制, 大火于 23 时彻底扑灭, 共疏散群众 120 余人, 抢救被困人员 3 名, 确保了与该国际广场直接相连成一体的大酒店、外贸批发市场以及相邻的国贸大厦、商贸城、文体用品中心等总占地面积 19.5 万  $\text{m}^2$ 、总建筑面积 25 万  $\text{m}^2$  的商圈和大量货物的安全, 有效防止了着火建筑的整体坍塌。

#### 3.2 情景网络图

从首批灭火救援力量到场时观察到的情景开始, 通过对该国际广场火灾案例资料的深度分析以及与灭火救援专家进行交流, 将火灾事故演变过程中的若干情景按照时间脉络进行梳理和提取, 确定关键情景演变路径的特征要素, 形成情景网络的节点变量。

以承灾体  $B_1$  为例, 5 名灭火救援专家给出基

表 1 承灾体  $B_1$  的专家打分结果

特征要素	$m_1(T, F)$	$m_2(T, F)$	$m_3(T, F)$	$m_4(T, F)$	$m_5(T, F)$	$m(T)$
$B_{11}$	(0.94, 0.06)	(0.82, 0.18)	(0.50, 0.50)	(0.80, 0.20)	(0.68, 0.32)	0.895
$B_{12}$	(0.93, 0.07)	(0.95, 0.05)	(0.88, 0.12)	(0.75, 0.25)	(0.70, 0.30)	0.947
$B_{13}$	(0.89, 0.11)	(0.93, 0.07)	(0.87, 0.13)	(0.96, 0.04)	(0.80, 0.20)	0.980
$B_{14}$	(0.40, 0.60)	(0.25, 0.75)	(0.40, 0.60)	(0.34, 0.66)	(0.23, 0.76)	0.1508
$B_{15}$	(0.40, 0.60)	(0.20, 0.80)	(0.50, 0.50)	(0.30, 0.70)	(0.10, 0.90)	0.13167

表 2 某国际商业广场火灾事故情景状态概率表

火灾情景	情景状态概率/% (True, False)
火势从 A、B 段结合处一至四层外窗翻卷, 同时沿内部两侧扶梯向上蔓延 $S_1$	100, 0
火势在横向突破防火分区, 向 A、B 段两边蔓延 $S_2$	76.2, 23.8
事故消失 $S_3$	76.6, 23.4
火势沿全部的电梯开口持续向上蔓延, A、B 段低层全部燃烧 $S_4$	88.9, 11.1
事故消失 $S_5$	82.9, 17.1
二期建筑 1-12 层全面立体燃烧 $S_6$	89, 11
火势蔓延到二期建筑与一期建筑的连接处 $S_7$	83.3, 16.7
事故消失 $S_8$	77.3, 22.7
现场发生爆炸, 火势蔓延至一期建筑 $S_{11}$	82.9, 17.1
一期火势持续向上蔓延, 有群众被困 $S_{12}$	81.7, 18.3
事故消失 $S_{13}$	85.3, 14.7
现场再次发生爆炸, 一期建筑发生局部坍塌, 可能有人人员伤亡 $S_{16}$	92.2, 7.8
一期建筑全面燃烧 $S_{17}$	79.2, 20.8
火灾结束 $S_{18}$	81.4, 18.6
连廊呈立体燃烧态势, 大酒店出现局部燃烧 $S_{19}$	83.7, 16.3
事故消失 $S_{20}$	76.3, 23.7
火势向批发市场的连廊蔓延 $S_{21}$	92.9, 7.1
事故消失 $S_{22}$	93.92, 6.08
大酒店、批发市场全面燃烧 $S_{23}$	80.9, 19.1
事故消失 $S_{24}$	79, 21

本概率赋值函数  $m_i(T, F)$ , 利用式(5) - 式(8)计算  $m(T)$ , 若  $m(T) \geq \beta$  (设定信度阈值  $\beta$  为 0.85), 表明该节点变量为网络中的节点。承灾体  $B_1$  的专家打分结果如表 1 所示。由表 1 可知, 承灾体二期建筑 A 段  $B_{11}$ 、二期建筑 B 段  $B_{12}$  和建筑内部的货物  $B_{13}$  是情景网络的节点变量。按照上述方法构建该国际商业广场火灾事故情景网络图。

#### 3.3 情景推演综合态势图

在情景网络图的基础上, 采用专家估计法和 Dempster 合成法则确定各节点变量的条件概率, 利用 GeNIe 软件计算节点变量的状态概率值。该国际商业广场在不同时间段情景的状态概率表如表 2 所示。由表 2 可知, 该国际商业广场火灾中发生概率最大的情景状态为“现场再次发生爆炸, 一期建筑发生局部坍塌, 可能有人人员伤亡” $S_{16}$  和“火势向批发市场的连廊蔓延” $S_{21}$ , 其概率值分别为 92.2% 和 92.9%。

根据火灾现场实时汇总的最新信息, 完善网络节点变量, 把上一时间段的情景状态分析层和情景输出层的状态概率输入到下一时间段的情景输入层, 计算更新后可能出现情景的状态概率, 动态推演下一时间段可能出现的情况, 直至火灾结束。该国际商业广场火灾事故情景状态概率的大小随时间推演的结果与事故实际发展情况基本一致, 情景推演综合态势图如图 2 所示。

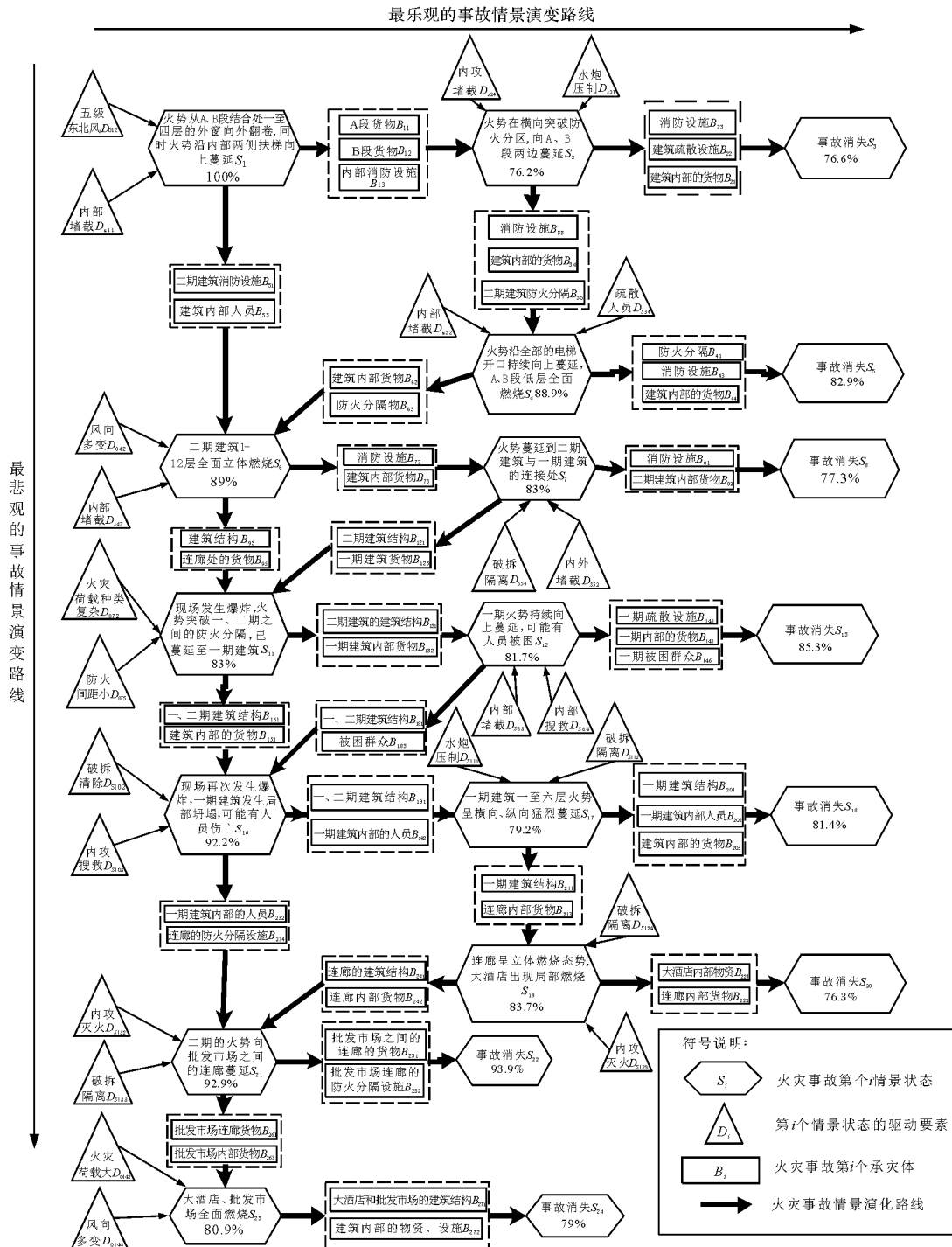


图2 某国际商业广场火灾事故情景推演综合态势图

## 4 结论

通过对城市商业综合体建筑火灾情景推演及应用研究,可以得出以下结论。

(1)建立了基于贝叶斯网络和 Dempster 合成法则的城市商业综合体建筑火灾事故情景推演模型,有效地解决了火灾事故演变过程中的动态性和推演结果的不确定性问题。

(2)绘制了城市商业综合体建筑火灾事故情景推演的综合态势图,实现了定量化和动态化推演,

便于灭火救援决策主体在现场复杂和信息不完全情况下做出较为客观准确的决策。

(3)以某国际商业广场火灾事故进行实例应用,推演结果与实际的火灾事故演变顺序基本一致,验证了城市商业综合体建筑火灾事故情景推演模型的可行性和合理性。

(4)提出的情景推演模型的准确性在很大程度上依赖于对现场信息的获取以及专家评定概率的合理性。因此,如何利用计算机提取全面的情景特征要素,减少主观的专家打分,并开发情景推演系统是今后研究的方向。

(下转第 89 页)

by the measured GPS and DInSAR results. Finally, the three-dimensional Los deformation was transformed into horizontal deformation and vertical deformation, which preserves the high spatial resolution characteristics of SAR data on the basis of ensuring the accuracy. The results show that the difference between DInSAR Los deformation and three-dimensional Los deformation is small for the time interval of SAR revisit period, with only a correction of 1 mm, indicating that for a short period of time, the horizontal deformation is small. For the 1-year interval, the average deviation between the Los deformation after DInSAR correction and the 3D Los deformation is 0.34 mm, and the RMS error is 0.49 mm, both of which are smaller than the DInSAR deformation before the correction. The results of this study can be used to obtain the three-dimensional deformation of the regional surface quickly and provide a reference for post-deformation analysis.

**Key words:** GPS; DInSAR; Los Deformation; area; three-dimensional surface deformation

(上接第 66 页)

## 参考文献:

- [1] 雷友学. 大型商业综合体建筑火灾安全防护对策[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(4): 524–527.
- [2] 徐楠楠. 大型商业综合体火灾安全疏散研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [3] 王刘兵. 大型商业综合体防排烟系统性能化设计[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [4] 周扬, 夏登友, 高平. 城市商业综合体建筑火灾事故演变路径分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 170–174.
- [5] 李健行, 夏登友, 武旭鹏. 基于知识元与动态贝叶斯网络的非常规突发灾害事故情景分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 167–170.
- [6] 夏登友, 钱新明, 段在鹏. 基于动态贝叶斯网络的非常规突发灾害事故情景推演[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 897–902.
- [7] 徐磊. 基于贝叶斯网络的突发事件应急决策信息分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 李文艺. 证据理论中 Dempster 合成规则的等效计算方法[J]. 南阳理工学院学报, 2014, 6(6): 121–122.
- [9] 吴海秀. 基于贝叶斯网络和 D-S 证据理论的态势估计方法[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.
- [10] GeNIe. Decision Systems Laboratory, University of Pittsburg. Available at: <https://www.bayesfusion.com/>, Accessed July 20, 2017.
- [11] 夏登友. 基于“情景-应对”的非常规突发灾害事故应急决策技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

## Scenario Deduction Model of Urban Commercial Complex Fire Accidents

XINJing<sup>1</sup>, ZHOU Yang<sup>2</sup>, XIA Dengyou<sup>1</sup> and LI Jianhang<sup>1</sup>

(1. China People's Police University, Langfang 065000, China; 2. Wuzhong Fire Rescue Division, Wuzhong 751100, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the dynamic and uncertain problem during the scenario evolution process of the urban commercial complex fire accidents. Firstly, network node variables are determined using Dempster synthetic rule and the scenario network structure is developed based on Bayesian network in the paper. Secondly, joint probability formula is used to estimate the state probabilities of network node variables and the scenario deduction model is constructed to obtain the synthetic scenario evolution map. Finally, a certain urban commercial complex fire accident is applied to demonstrate the rationality and practicability of the scenario deduction model, which can provide feasible references for emergency commanders to make decisions.

**Key words:** urban commercial complex; fire accidents; scenario deduction; Bayesian network; Dempster synthetic rule; emergency decision