

文章编号:1004-5309(2023)-0116-12

DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2023.02.06

基于贝叶斯网络的城市爆炸事故风险概率研究

梁兴辉,武美豆*,张兆庆

(燕山大学经济管理学院,秦皇岛,066004)

摘要:针对频发的各类城市爆炸事故,采用事故树和贝叶斯网络相结合的综合风险评价方法构建概率模型,在分类溯源的基础上进行风险的概率测算、原因诊断和敏感节点分析。首先,按爆炸源属性将研究对象划分为粉尘爆炸、可燃性气体或液体爆炸、可燃性固体爆炸和物理爆炸四类;其次,运用专家信心权重法评估细化的 28 个根节点事件的先验概率,结合条件概率表计算顶事件发生的风险概率;再次,通过逆向推理法分析风险的形成原因。结果表明:在城市爆炸事故中可燃性气体或液体爆炸发生的概率最大,人员监管不到位、防爆知识欠缺、违规操作生产等是城市爆炸事故的关键风险因素和敏感节点;最后,根据研究结论提出风险管控预防措施,以期减少城市爆炸事故的发生。

关键词:城市爆炸;贝叶斯网络;事故树;风险概率;原因诊断

中图分类号: X93; X932

文献标识码: A

0 引言

随着高质量发展理念的贯彻落实,我国城市内各部门不断提高生产过程和设施运行的安全可控性标准。根据《2020 年国民经济和社会发展统计公报》发布的统计数据,21 世纪初至今全国的安全事故数及死亡人数分别下降了 85% 和 70%,但事故造成的人员伤亡和财产损失规模仍然十分庞大。在众多安全事故防范中,城市爆炸事故是重中之重。爆炸与火灾又往往互为因果,火灾产生的高温会形成爆炸事故的诱因,同时爆炸事故会导致易燃物外泄并由此引发火灾,二者在城市安全事故中发生频率高,对人员生命和财产安全形成严重威胁,给城市生产建设造成巨大损失。近年来接连发生的重大爆炸及其引发的火灾事故引起政府和社会的极大关注。据不完全统计,2020 年全国燃气爆炸新闻高达 548

起,造成 84 人死亡、670 人受伤。为进一步保证城市安全运行,防范城市系统潜在风险,国务院印发《关于推进城市安全发展的意见》特别指出把系统管控和长效安全作为生产的基本原则,加强各生产行业及易燃易爆场所灾害风险管控和隐患排查。因此,城市爆炸事故风险概率研究和致因分析对推进城市安全发展具有重要意义。

在风险致因方面,已有研究通常采用事故树和贝叶斯模型方法。张宁和盛武^[1]通过构建煤矿瓦斯爆炸贝叶斯网络模型,发现员工培训不到位是瓦斯漏检的主要诱因。台德清^[2]采用事故树法识别出铁路调车脱轨的三个主要因素。风险致因又构成基本事件,其先验概率可通过统计具体事件原因得到,还可通过专家评估和三角模糊理论等方法求解。赵莹莹和赵斌^[3]利用上述方法对压力管道爆炸的风险概率进行研究,得到以模糊度表示的基本事件置信度

收稿日期:2022-05-16;**修改日期:**2022-07-04

基金项目:河北省教育厅科学研究计划项目河北省高等学校人文社会科学重点项目(SD2021043);河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2022114)

作者简介:梁兴辉(1968—),男,燕山大学经济管理学院教授,硕士研究生导师,研究方向为城市经济、城市管理。

通讯作者:武美豆,硕士研究生,E-mail:jgkyk@ysu.edu.cn

概率区间。韩梅等^[4]在铁路超限运输的专家评估中引入模糊集,将基本事件模糊失效概率作为根节点的先验概率,更加客观真实。另外,网络节点条件概率分布可通过事件统计结合贝叶斯公式计算获得。李泽荃等^[5]在研究隧道坍塌风险概率时,利用以往坍塌事故中致因逻辑关系得到贝叶斯网络节点的条件概率表。罗小芳等^[6]通过分析设备间的依赖关系,编制出钻井平台各系统的条件概率表。综合各类风险概率,可利用敏感节点分析及贝叶斯逆向推理能力做出风险决策。在这方面,王春雪^[7]通过计算互信息指数值并排序,得到城市燃气管道泄漏风险的主要敏感节点,项琴等^[8]利用贝叶斯反向推理能力发现桥梁发生风险事故的三条关键路径,陈雍君等^[9]依照路径分析得到城市综合管廊灾害风险管控防范关键要求,为相关设施安全运行维护提供依据。

上述研究多针对特定种类事故展开典型爆炸事故致因分析,研究对象涉及化工厂、隧道铁路、综合管廊和煤矿等单一的特定事故发生地,致力于从源头防范。本文尝试综合研究城市中发生的各类爆炸,筛选出易发爆炸事故,进行分型归类,分析其发生概率和风险原因。研究思路为:通过建立城市爆炸事件事故树和相应的贝叶斯网络模型,运用专家打分法和三角模糊数计算各基本事件的条件概率,从而求出顶事件发生的风险概率。事故树和贝叶斯方法的优势是能够从正向和反向两个角度分析事件关系和概率大小,三角模糊数可将概率评级细化。为区分各因素的影响程度,进一步展开关键路径诊断和敏感节点分析,最后提出合理的管控预防建议,助力我国安全城市、韧性城市建设。

1 事故树和贝叶斯网络的基本原理及风险概率计算方法

1.1 事故树的基本原理

事故树(FTA)是一种用逻辑门表示因果关系的树状分析模型,通过逐层追溯风险事件原因展开演绎分析^[10]。事故树分析是常用的安全系统分析方法,既可根据最小集理论展开定性分析,又可根据逻辑关系的规律特点进行概率计算,在应用时可根据需求细化基本事件致因,避免遗漏。事故树各层间的逻辑门连接包括“与门”和“或门”,中间事件和基本事件通常用符号 M 和 x_i 表示^[11]。顶事件 T

发生与否用 1 和 0 表示,两种逻辑门代表的概率计算方法如式(1)和式(2)所示。

$$p_{\text{与}} = \prod_{i=1}^n p(x_i = 1) \quad (1)$$

$$p_{\text{或}} = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p(x_i = 1)] \quad (2)$$

1.2 贝叶斯网络分析的基本原理

贝叶斯网络是一种表示节点间逻辑关系和概率不确定性的有向无环模型^[12],相较于事故树分析具有更复杂的概率计算功能。网络图中没有任何指入关系的节点为根节点,没有任何指出关系的节点为叶节点,其余皆为起承接作用的中间节点,贝叶斯结构即为根节点经有向线指向叶节点。贝叶斯网络模型具有数据可视化和容错性高等优点,在实际应用时通常搭配先验概率和条件概率使用^[13],是计算失效概率的常用方法。

1.2.1 网络节点确定及条件概率取值

事故树和贝叶斯网络在模型结构上具有映射关系,但二者表达的逻辑顺序相反。事故树模型中代表风险源的基本事件和贝叶斯网络中的根节点对应,代表风险事件的顶事件和叶节点对应,其余节点根据连接顺序依次对应^[14]。贝叶斯网络节点条件概率表示父节点发生条件下子节点的发生概率,其数值根据事故案例中各层间的依赖关系结合公式运算得出。

设 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 是部分样本空间, A 为某任意事件,在条件概率的基础上,假设各基本事件相互独立,贝叶斯网络叶节点的联合概率可由式(3)得到,其中 $\pi(x_i)$ 表示父节点, x_i 表示子节点。

$$p(X) = P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n p(x_i | \pi(x_i)) \quad (3)$$

1.2.2 事故风险概率计算

通过专家调查法和三角模糊数法获得根节点的初始概率,即先验概率。结合根节点的先验概率与各节点间的条件概率表,用式(4)即可求出事故发生的概率。其中, n 为根节点数量, x_i 为根节点事件。本文假设风险概率服从伯努利大数定理,即发生频率趋向于发生概率。

$$P(T=1) = \sum_{i=1}^{2^n} [P(T=1 | x_1, x_2, \dots, x_n) \times P(x_1, x_2, \dots, x_n)] \quad (4)$$

1.3 事故树结合贝叶斯网络综合风险评价方法

该综合评价方法应用于分析城市爆炸问题,可充分发挥事故树递进式探寻原因的特点和贝叶斯分析法处理缺失信息问题的优势,还可参照曾明华

等^[15]的做法引入三角模糊数对不确定性进行修正,能够清晰展示风险因素间的因果关系,在定性和定量分析的基础上完成系统评价。首先构建事故树映射至贝叶斯网络并计算条件概率,然后运用概率等级和信心权重法以置信区间的方式求得每个基本事件的先验概率,再结合条件概率表推算事故发生的概率,最后利用贝叶斯网络逆向分析法进行事故原因诊断和敏感节点分析。

1.3.1 三角模糊数

传统贝叶斯计算概率存在一定的弊端,一方面是先验概率和条件概率的确定存在局限性,另一方面是专家认识受经验知识等主观性影响。对此,刘澎等^[16]引入模糊数的方法以弱化主观意识影响,本文则采用三角模糊数降低专家评估的主观影响,增加基本事件描述的准确性。

设 U 是某论域上的一个模糊集,则对任意 $x \in U$ 都存在一个数 $\Phi(x) \in [0, 1]$ 与之对应, $\Phi(x)$ 表示 x 对 U 的隶属度,符号 Φ 是隶属函数的简称。当隶属度的值为 0 时,则意味着基本事件完全不隶属于模糊集,随着隶属度数值的增加,基本事件与模糊集的隶属关系增强,当隶属值为 1 时,则二者间存在完全隶属关系。参考蔡超和刘艳秋^[17]对物流系统状态的三角模糊数描述,假设 u 和 l 分别表示模糊数取值范围上下限, m 为均值,则模糊数用 (l, m, u) 表示。本文通过构造如式(5)所示的隶属函数表示根节点先验概率对给定模糊数区间的隶属度。

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & x \leq l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x \geq u \end{cases} \quad (5)$$

1.3.2 专家信心权重指标法

专家信心权重指标法根据专家打分和权重来计算基本事件发生概率,其要点为:

首先,当基本事件概率值难以确切给出时,一般通过扩展概率值区间增加数据可信度。在完成概率等级划分后,专家的打分形式由概率值转化为概率区间,各区间的临界值需根据相关规定或惯例确定。基本事件评估结果的可靠性和精确性始终存在矛盾关系,如何确定合理的概率区间进而得到接近真值的概率成为难点。本文通过查阅相关领域的学术文献和准则要求将事件发生的概率等级划分为 10 个

表 1 概率等级区间划分

概率等级	下限 a_i	平均值 m_i	上限 a_{i+1}
Level 1	0	0.000 5	0.001
Level 2	0.001	0.005 5	0.01
Level 3	0.01	0.055	0.1
Level 4	0.1	0.55	1
Level 5	1	5.5	10
Level 6	10	15	20
Level 7	20	30	40
Level 8	40	50	60
Level 9	60	70	80
Level 10	80	90	100

区间,如表 1 所示。

其次,在专家评估过程中受主观因素影响结果具有一定局限性,同时因个人经验阅历等不同背景因素会增加结果的不确定性,因此本文借鉴李泽荃等^[5]对专家信心指数法的应用,将信心指数范围确定为 $[0, 1]$ 。信心指数是专家对自己所做判断可靠性和认可度的评价,虽然和打分结果共同使用会进一步扩大概率范围,但在计算时可为数据收集者提供有效的信心程度区分。 ξ 表示权重指数, φ 表示信心指数, θ 为信心权重指标,则基本事件所处概率等级的专家信心权重指标 θ 的值为权重指数和信心指数的乘积。再次,参考 Zhang 等^[18]对专家权重等级划分的方法,将评估专家按照工作年限、职称和教育经历等参考因素划分为四类,权重分别为 1.0、0.9、0.8、0.7,专家权重划分如表 2 所示。

表 2 专家权重划分

级别	工作年限/年	职称	权重
I 类	>20	资深教授	1.0
II 类	10~20	教授	0.9
III 类	5~10	副教授	0.8
IV 类	1~5	讲师	0.7

最后,对多个专家的评估结果进行综合分析,得到一个综合结果。

专家对选定概率区间进行信心指数打分,表明基本事件发生概率处于此区间的可能性最大,同时根据三角模糊数近似满足正态分布的特征,可知处于打分区间两侧的可能性依次减小,由此得到 k 在三种取值范围下基本事件落入选定区间的概率公式。 θ 表示基本事件 x_i 落入第 k 个区间的权重指标, k 为专家打分所处的区间位置,每个 k 值对应一个概率区间,其区间阈值限定变量 l 的取值范围。根据上述理论结合正态分布原理得到基本事件 x_i 的概率分布,如式(7)所示,即区间 l 遍历 k 值时的概率大小,该分布是单个专家打分结果的转化,此时打分区间未处于两端边界位置且 k 的取值范围为 $[2, 9]$ 之间的整数;当打分区间位于左右边界位置时,基本事件 x_i 的概率 p_l 如式(6)和式(8)所示,此时会有 θ 的概率落于打分区间,且有 $1-\theta$ 的可能性落于其余区间,并且 k 的取值范围分别为 $[2, 10]$ 和 $[1, 9]$ 之间的整数。

当 $k=1$ 时:

$$p_l = \begin{cases} \theta, l=k \\ \frac{a_{11+k-l} - a_k}{\sum_{l=k+1}^{10} (a_l - a_k)} \times (1-\theta), k+1 \leq l \leq 10 \end{cases} \quad (6)$$

当 $2 \leq k \leq 9$ 时:

$$p_l = \begin{cases} \frac{a_k - a_{k-l}}{\sum_{l=1}^{k-1} (a_k - a_l)} \times \frac{(1-\theta)}{2}, 1 \leq l \leq k-1 \\ \theta, l=k \\ \frac{a_{11+k-l} - a_k}{\sum_{l=k+1}^{10} (a_l - a_k)} \times \frac{(1-\theta)}{2}, k+1 \leq l \leq 10 \end{cases} \quad (7)$$

当 $k=10$ 时:

$$p_l = \begin{cases} \frac{a_k - a_{k-l}}{\sum_{l=1}^{k-1} (a_k - a_l)} \times (1-\theta), 1 \leq l \leq k-1 \\ \theta, l=k \end{cases} \quad (8)$$

1.3.3 基本事件先验概率计算方法

通过筛选有效的信心权重数据,可归纳出符合专家判断的概率区间分布,进而得出合理的基本事件 x_i 出现概率值。由于置信区间可提高模糊概率判断的容错率,因此各基本事件的最终概率由置信区间形式给出,同时因为样本含量较少且符合正态分布特征,故使用 t 检验进行处理。首先利用式(9)计算各位专家 j 对所有基本事件 x_i 出现概率的期

望值 P_{ij} ,其中 m_l 和 p_l 分别代表打分区间的中间值和对应三角模糊数值;接着计算打分统计样本的均值和方差,其中样本方差 S_i^2 用以代替未知的总体方差;然后根据式(10)及其推导式(11)计算 $1-\alpha$ 置信区间,本文取置信水平为 95%;最终可得到如式(12)所示的 $1-\alpha$ 置信区间,其中基本事件个数为 n ,相应的 $t_{\alpha/2}(n-1)$ 取值通过查询 t 分布表获得。

$$P_{ij} = E(P_l) = \sum_{l=1}^{10} (m_l \times p_l) \quad (9)$$

$$P \left\{ \left| \frac{\bar{P}_i - \mu_i}{\sqrt{S_i^2/n}} \right| \leq t_{\alpha/2}(n-1) \right\} = 1 - \alpha \quad (10)$$

$$P \left\{ \bar{p}_i - \frac{S_i}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \leq \mu_i \leq \bar{p}_i + \frac{S_i}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right\} = 1 - \alpha \quad (11)$$

$$\left[\bar{p}_i - \frac{S_i}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1), \bar{p}_i + \frac{S_i}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1) \right] \quad (12)$$

至此可得到由置信区间表示的基本事件 x_i 三角模糊数 $(\bar{p}_i - \frac{S_i}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1), \bar{p}_i, \bar{p}_i + \frac{S_i}{\sqrt{n}} t_{\alpha/2}(n-1))$, 其余节点的概率区间亦可由此方法计算得出。

2 城市爆炸事故风险概率测算方法设计

本文设计的基于贝叶斯网络的城市爆炸事故风险概率测算分析流程如图 1 所示。首先,对近四年

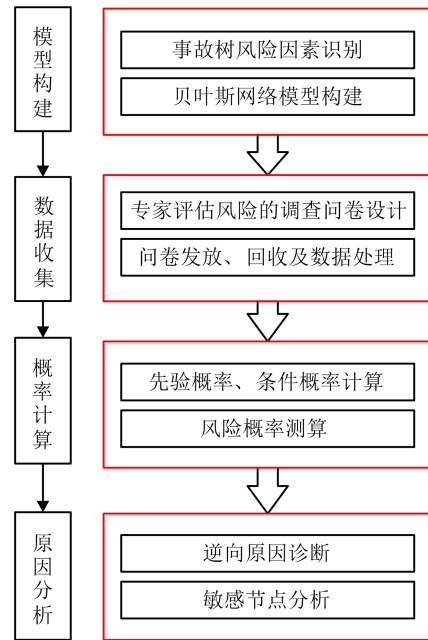


图 1 城市爆炸事故风险概率测算分析流程

Fig. 1 Calculation and analysis process of urban common explosion risk probability

发生的城市爆炸事故进行统计分析,识别爆炸风险因素并构建事故树描述因果关系,进而映射到贝叶斯网络模型;其次,设计专家评估城市爆炸事故风险概率的调查问卷,发放和收集调查问卷,整理数据,统计有效调查结果;然后,采用专家权重打分法与区间概率等级相结合的方法,获得根节点事件的先验概率,依据案例中各事件的依赖关系得到网络节点条件概率表,再基于先验概率和条件概率表做出风险测算;最后,通过逆向原因推理及正向敏感值计算,双向探寻爆炸事故主要原因。

2.1 城市爆炸风险因素识别及事故树构建

通过统计分析以往众多的城市爆炸事故可知,常见的城市爆炸事故包括化工产品生产及各类生活服务设施使用过程中发生的物理爆炸和化学爆炸;基于分类溯源分析的需要,本文根据爆炸源属性进一步将城市爆炸事故分为粉尘爆炸、可燃性气体或液体爆炸、可燃性固体爆炸和物理爆炸四大类。总

结相关文献的研究结论发现,火源是引发多数爆炸的关键因素,具体有电火花、明火以及撞击、静电和摩擦等操作产生的火花,还包括在特定条件下的自燃;其次,危险品暴露、气体泄漏或粉尘富集至一定浓度是导致爆炸的直接原因;此外,由于监管不到位、厂家违规生产、作业人员违规操作等人为因素引发的燃爆事故,以及设备失修故障引发的超压物理爆炸等案例屡见不鲜。有了爆炸事故原因的粗线条分类后,本文搜集了我国 2018~2021 年间发生的 90 起城市爆炸事故资料,并进行归类分析,以城市爆炸事故为顶层事件,将引发顶层事件的基本原因进一步细化、分类、编号,包括 10 类中间事件和具体 28 个基本事件,如表 3 所示。最后,将各事件用逻辑门连接并绘制出城市爆炸风险事故树,如图 2 所示。其中, M_2 在四大类中最为常见, M_1 的引发因素最复杂, M_4 类型事件相对较少。

表 3 城市爆炸事故原因分类
Table 3 Classification of causes of common urban explosion accidents

序号	编号	因素	序号	编号	因素
1	T	城市爆炸事故	21	X_{10}	安全警报系统故障
2	M_1	粉尘爆炸	22	X_{11}	人员监管不到位
3	M_2	可燃性气体或液体爆炸	23	X_{12}	防爆安全知识欠缺
4	M_3	可燃性固体爆炸	24	X_{13}	指挥不当
5	M_4	物理爆炸	25	X_{14}	作业人员违规操作
6	M_5	引爆火源	26	X_{15}	管线腐蚀
7	M_6	粉尘富集	27	X_{16}	制造缺陷
8	M_7	泄漏达到爆炸极限	28	X_{17}	管道超压破裂
9	M_8	危险品暴露	29	X_{18}	管道路线设计缺陷
10	M_9	人为因素	30	X_{19}	恶意实施爆炸
11	M_{10}	设备因素	31	X_{20}	违规储存
12	X_1	电火花	32	X_{21}	违规运输
13	X_2	明火	33	X_{22}	违规生产
14	X_3	摩擦、撞击火花	34	X_{23}	违规购买
15	X_4	静电火花	35	X_{24}	危险区域未设置警区
16	X_5	高温引燃	36	X_{25}	未及时采取有效措施
17	X_6	防尘设计不足	37	X_{26}	容器损坏
18	X_7	未执行粉尘防爆安全国家标准	38	X_{27}	容器材质缺陷
19	X_8	未及时清理导致积尘	39	X_{28}	安全附件故障
20	X_9	通风不良			

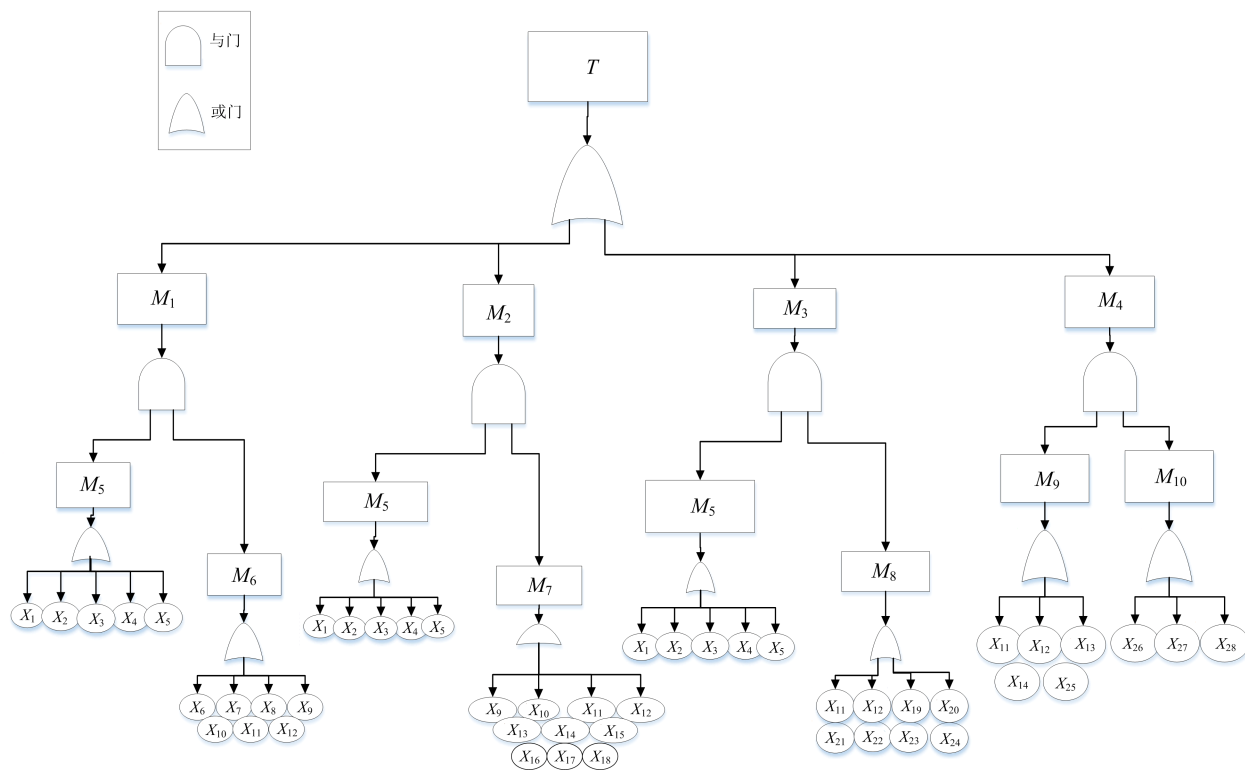


图 2 城市爆炸风险事故树

Fig. 2 Urban explosion risk accident tree

2.2 贝叶斯网络构建

参考韩梅等^[4]在风险评估中由事故树向贝叶斯网络映射的逻辑关系,建立如图 3 所示的城市爆炸风险贝叶斯网络结构。在计算贝叶斯概率时,假设条件为:基本事件相互独立且发生概率服从正态分布。本文通过搜集我国 2018~2021 年间发生的 90

起城市爆炸事故资料,梳理出每个案例中基本事件与中间事件的依赖关系如表 4 所示,再根据前文介绍的计算原理求出各节点条件概率值,鉴于数据表格篇幅太大,在此仅列出部分条件概率数据,如表 5 所示。

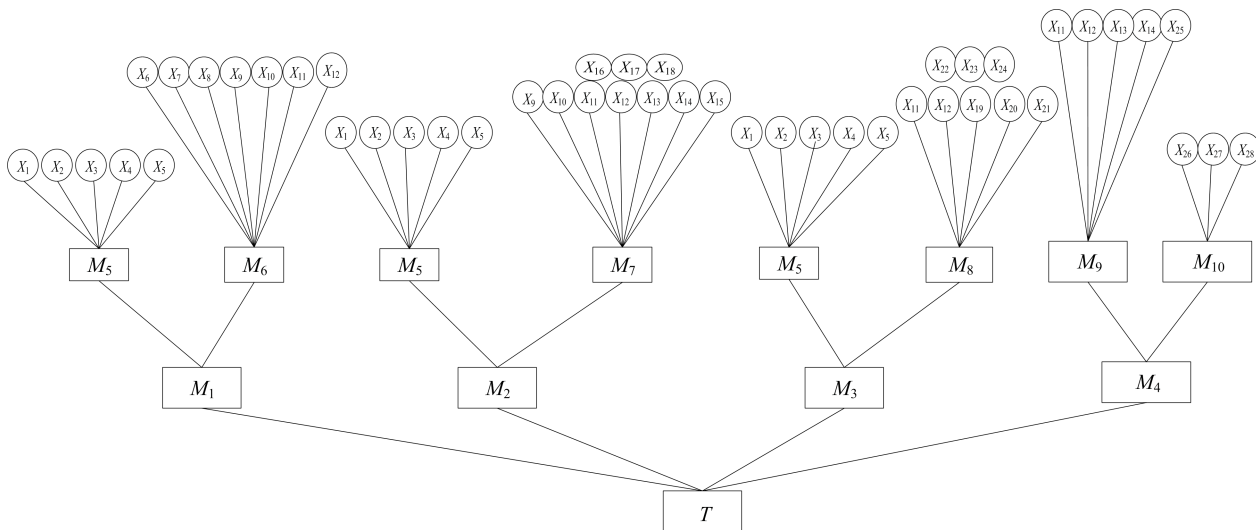


图 3 城市爆炸风险贝叶斯网络

Fig. 3 Bayesian networks for urban explosion risk

表 4 部分案例各事件依赖关系
Table 4 Some cases that depend on each event

编号	1	2	3	...	89	90	编号	1	2	3	...	89	90
X_1	1	0	0	...	0	0	X_{18}	0	0	0	...	0	0
X_2	1	1	0	...	0	0	X_{19}	0	0	0	...	0	0
X_3	0	0	0	...	1	0	M_7	1	1	0	...	0	0
X_4	0	0	0	...	0	0	M_2	1	1	0	...	0	0
X_5	0	0	0	...	0	0	X_{20}	0	0	0	...	0	0
M_5	1	1	0	...	1	0	X_{21}	0	0	0	...	0	0
X_6	0	0	0	...	0	0	X_{22}	0	0	0	...	0	0
X_7	0	0	0	...	1	0	X_{23}	0	0	0	...	0	0
X_8	0	0	0	...	1	0	X_{24}	0	0	0	...	0	0
X_9	0	1	0	...	0	0	X_{25}	0	0	1	...	0	1
X_{10}	0	0	0	...	0	0	M_8	0	0	0	...	0	0
X_{11}	1	0	1	...	1	0	M_3	0	0	0	...	0	0
X_{12}	1	1	1	...	1	0	X_{26}	0	0	1	...	0	0
M_6	0	0	0	...	1	0	X_{27}	0	0	0	...	0	0
M_1	0	0	0	...	1	0	X_{28}	0	0	0	...	0	1
X_{13}	1	0	0	...	0	0	M_9	0	0	1	...	0	1
X_{14}	1	0	1	...	0	1	M_{10}	0	0	1	...	0	1
X_{15}	0	1	0	...	0	0	M_4	0	0	1	...	0	1
X_{16}	0	0	0	...	0	0	T	1	1	1	...	1	1
X_{17}	0	1	0	...	0	0							

注:0 表示事件未发生,1 表示事件发生。

表 5 部分节点条件概率表
Table 5 Conditional probability table of partial nodes

X_{26}	X_{27}	X_{28}	$P(M_{10}=0 x_{26},x_{27},x_{28})$	$P(M_{10}=1 x_{26},x_{27},x_{28})$
0	0	0	1	0
0	0	1	0.5	0.5
0	1	0	0.928	0.071
1	0	0	0.857	0.142
0	1	1	...	...
1	0	1	...	...
1	1	0	...	...
1	1	1	0	1

3 城市爆炸事故风险概率测算及原因诊断分析

3.1 数据收集整理及先验概率区间推算

根据事故树法分析出爆炸事故的基本事件后,制作风险因素专家打分表,共向 26 位专家发放调查表,收回有效调查表 20 份,其中包括资深教授 1 名,教授 9 名,副教授 6 名,讲师 4 名。以基本事件 x_{14} 为例,专家信心指数和权重见表 6,其中,权重为 1.0、0.9、0.8、0.7 的专家各有 1、3、9、7 位。使用式(6)和式(7)计算专家对于基本事件 x_{14} 出现的概率等级评估结果,再根据基本事件概率作为观测值构造样本空间 $U_{14} = \{p_{14j} | 1 \leq j \leq n\}$,求出统计样本均值 $\bar{X}_{14} = 0.191$ 和方差 $S_{14}^2 = 0.012$ 。当显著性水平 α 取值为 0.05 时,查 t 分布表可得 $t_{0.025}(19) = 2.093$,最后由式(12)可得基本事件 x_{14} 位于 95% 的置信区间为 $[0.14, 0.22]$,事件 x_{14} 发生的三角模糊数为 $(0.14, 0.19, 0.22)$ 。以此类推计算所有基本事件在城市爆炸事故中出现的先验概率区间,见表 7。

3.2 城市爆炸事故风险概率测算

统计案例事故的依赖关系得到各节点条件概率表,将专家打分的有效数据进行三角模糊数处理得到各个基本事件发生的先验概率区间,见表 7。结合条件概率与先验概率可获得全国城市范围内发生爆炸事故的三角模糊数概率区间为 $(11.64\%, 18.83\%, 26.73\%)$,这意味着发生概率最可能的估计值为 18.83%;从爆炸源属性来看,粉尘爆炸(M_1)、可燃性气体或液体爆炸(M_2)、可燃性固体爆炸(M_3)和物理爆炸(M_4)发生概率最可能的估计值分别为 3.47%、10.55%、4.62%、1.46%。可见,可燃性气体或液体爆炸在城市爆炸事故中发生的概率最大。

3.3 城市爆炸风险原因诊断

根据贝叶斯定理逆向推断可得出各基本事件的后验概率,如图 4 所示。通过比较相对值大小可做原因诊断。假定城市已经发生了爆炸事故,根据图 4 概率值和图 3 网络关系逆向推理可以找到 4 条导致事故发生的关键路径,分别为 $x_{11}x_{12} \rightarrow M_6 \rightarrow M_1 \rightarrow T$; $x_{11}x_{12}x_{14} \rightarrow M_7 \rightarrow M_2 \rightarrow T$; $x_{11}x_{12} \rightarrow M_8 \rightarrow M_3$

$\rightarrow T$; $x_{11}x_{12}x_{14} \rightarrow M_9 \rightarrow M_4 \rightarrow T$,且前三条关键路径都伴随 $x_2 \rightarrow M_5$ 路径,即导致爆炸发生的关键风险因素有四个,它们分别是 x_2 明火、 x_{11} 人员监管不到位、 x_{12} 防爆安全知识欠缺以及 x_{14} 作业人员违规操作。如此,可根据分析结果为不同风险事故制定针对性预防措施,当爆炸事故发生时亦可根据关键路径判断致因并展开扑救行动。

表 6 基本事件 x_{14} 出现概率调查表

Table 6 Probability questionnaire of occurrence of basic event x_{14}

专家 编号	等级	信心 指数	权重 指数	信心权 重指标
1	5	0.8	0.7	0.56
2	7	0.7	1.0	0.70
3	5	0.7	0.8	0.56
4	7	0.8	0.8	0.64
5	5	0.75	0.9	0.675
6	5	0.9	0.7	0.63
7	5	0.7	0.8	0.56
8	6	0.7	0.8	0.56
9	5	0.8	0.8	0.64
10	6	1.0	0.8	0.80
11	5	0.8	0.7	0.56
12	7	0.7	0.8	0.56
13	7	0.8	0.8	0.64
14	5	0.7	0.9	0.63
15	5	0.6	0.8	0.48
16	6	0.75	0.9	0.675
17	8	0.8	0.7	0.56
18	6	0.9	0.7	0.63
19	7	0.6	0.7	0.42
20	5	0.6	0.7	0.42

表 7 基本事件先验概率区间

Table 7 Basic event prior probability interval

%

序号	编号	Min	Mean	Max	序号	编号	Min	Mean	Max
1	X_1	4.998	6.037	7.076	15	X_{15}	7.070	9.071	11.073
2	X_2	7.112	9.076	11.040	16	X_{16}	2.828	3.629	4.429
3	X_3	1.467	2.099	2.730	17	X_{17}	5.656	7.257	8.858
4	X_4	1.566	2.577	3.588	18	X_{18}	2.828	3.629	4.429
5	X_5	2.522	3.724	4.926	19	X_{19}	0.165	0.302	0.438
6	X_6	0.987	1.330	1.673	20	X_{20}	2.483	3.122	3.761
7	X_7	1.640	2.195	2.750	21	X_{21}	1.766	2.183	2.601
8	X_8	1.428	2.116	2.805	22	X_{22}	6.796	8.224	9.653
9	X_9	1.804	2.246	2.688	23	X_{23}	1.491	2.205	2.919
10	X_{10}	1.868	2.422	2.976	24	X_{24}	0.189	0.344	0.500
11	X_{11}	2.596	3.274	3.953	25	X_{25}	2.134	2.707	3.279
12	X_{12}	2.881	3.711	4.541	26	X_{26}	0.932	1.294	1.657
13	X_{13}	7.424	9.287	11.150	27	X_{27}	0.932	1.235	1.539
14	X_{14}	14.140	19.112	22.146	28	X_{28}	0.239	1.885	3.531

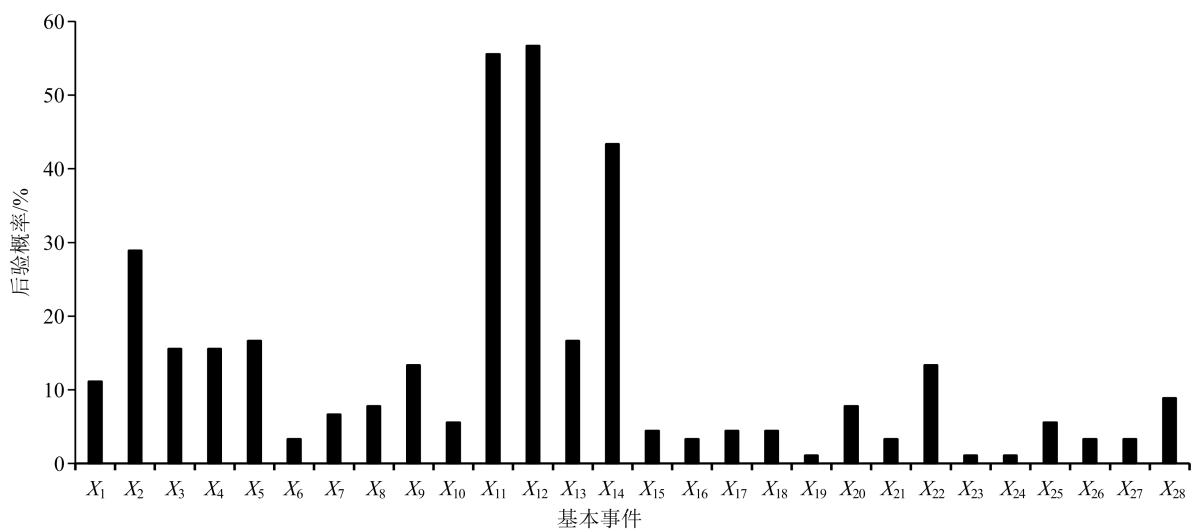


图 4 基本事件后验概率

Fig. 4 Probability of occurrence of basic events

3.4 敏感节点分析

测量风险因素对风险事件的重要程度通常使用敏感性分析方法^[19],而基本事件对顶事件的重要性可通过互信息指数来评估,其反映的是一个变量能在多大程度上减少对另一变量的不确定性^[20]。因此,本文用互信息指数表示城市爆炸事故风险的贝

叶斯网络中根节点对叶节点的敏感性,通过计算该指数发现城市爆炸事故风险敏感节点,其计算公式为:

$$MI(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \quad (13)$$

式中: X 、 Y 是随机变量, $p(x)$ 、 $p(y)$ 分别是 X 和 Y 的边缘概率分布函数, $p(x,y)$ 是 X 和 Y 的联合概率分布函数。结合城市爆炸贝叶斯网络节点的先验概率、条件概率和基本事件出现概率,计算得到根节点对叶节点的敏感程度 MI 值,见表 8。表 8 显示,在城市爆炸风险贝叶斯网络模型中,敏感指数 MI 值较高的节点有人员监管不到位(x_{11})、通风不良(x_9)、防爆安全知识欠缺(x_{12})、作业人员违规操作(x_{14})、违规生产(x_{22})、安全附件故障(x_{28})等。这与上述风险测算及原因诊断的结果基本符合,这些敏感节点对城市爆炸的影响作用最为显著,在日常风险预防中应加强对其相关方面的管理,避免爆炸事故的发生。

表 8 根节点敏感指数 MI 值
Table 8 The sensitivity index MI of the root node

根节点	MI	根节点	MI
X_1	3.35×10^{-6}	X_{15}	4.16×10^{-6}
X_2	8.72×10^{-6}	X_{16}	3.12×10^{-6}
X_3	4.69×10^{-6}	X_{17}	4.16×10^{-6}
X_4	4.69×10^{-6}	X_{18}	4.16×10^{-6}
X_5	5.03×10^{-6}	X_{19}	1.04×10^{-6}
X_6	1.16×10^{-5}	X_{20}	1.63×10^{-5}
X_7	2.32×10^{-5}	X_{21}	6.99×10^{-6}
X_8	2.71×10^{-5}	X_{22}	2.79×10^{-5}
X_9	4.65×10^{-5}	X_{23}	2.33×10^{-6}
X_{10}	5.20×10^{-6}	X_{24}	2.33×10^{-6}
X_{11}	5.42×10^{-5}	X_{25}	1.16×10^{-5}
X_{12}	3.48×10^{-5}	X_{26}	9.30×10^{-6}
X_{13}	1.19×10^{-5}	X_{27}	9.30×10^{-6}
X_{14}	2.65×10^{-5}	X_{28}	2.48×10^{-5}

4 结论与建议

本文尝试运用事故树与贝叶斯网络相结合的方法评估城市爆炸事故风险概率,在收集整理我国 2018~2021 年间 90 起城市爆炸案例的基础上,通过事故树法识别风险因素及相互依赖关系,构建贝

叶斯网络模型,运用该模型进行城市爆炸的风险测算、原因诊断及敏感节点分析,得到以下结论与建议。

4.1 结论

(1)风险的概率测算结果显示,城市爆炸事件发生的最可能估计概率按爆炸源属性分类由高到低分别是:可燃性气体或液体爆炸为 10.55%,可燃性固体爆炸为 4.62%,粉尘爆炸为 3.47%,物理爆炸为 1.46%。可见,可燃性气体或液体爆炸的发生概率最大,明显高于其他几类。

(2)风险原因诊断分析表明,明火、人员监管不到位、防爆安全知识欠缺、作业人员违规操作、违规生产等是关键风险因素,而人员监管不到位则是造成生产企业发生爆炸的最关键原因。

(3)敏感节点分析表明,人员监管不到位、通风不良、防爆安全知识欠缺、作业人员违规操作、违规生产和安全附件故障等风险因素是城市爆炸风险的敏感节点,加强对敏感因素的管控会大大降低城市爆炸事故发生的概率。

4.2 建议

(1)加大监管力度,杜绝违规操作。城市监管部门需进一步提高安全生产标准并保证生产部门严格执行相关制度,严格落实安全生产主体责任制,明确、细化安全监管职责分工,消除责任死角和盲区;生产过程中要严格按照各项规程正确操作,加强对易燃易爆品的储存和运输管理,严格控制点火源的出现,确保安全生产;聘请相关领域专家参与制定规范操作标准并适时更新。

(2)加强设备检修和更新,消除安全隐患。生产企业需在保障生产安全的前提下及时对老旧设备和生产工艺进行升级改造,按时完成设备安全检修,定期排查潜在的安全隐患并完善排查措施,采用相关法律法规规定的合格设备,且做到及时检修维护,确保安全使用,消除潜在危险。

(3)提高全民防爆安全意识。加强防爆安全教育培训力度,扩大防爆知识传播范围;定期对作业人员进行专业的防爆安全知识培训和考核,不定期进行抽检检查;定期对住宅区居民开展家庭防爆小知识宣讲,不定期开展相关知识竞赛活动。通过提高全民安全素质,可大幅减少爆炸事件的发生。

参考文献

- [1] 张宁, 盛武. 基于贝叶斯网络的煤矿瓦斯爆炸事故致因分析[J]. 工矿自动化, 2019, 45(7): 53-58.
- [2] 台德清. 浅谈事故树在铁路调车脱轨事故分析中的应用[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(3): 117-121, 134.
- [3] 赵莹莹, 赵斌. 基于三角模糊数学与事故树分析法的压力管道爆炸研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(6): 65-69.
- [4] 韩梅, 吴珊, 常青, 陈超, 韩延慧, 黄艳春. 基于事故树和模糊贝叶斯网络的铁路超限货物运输风险评估[J]. 铁道学报, 2021, 43(5): 9-17.
- [5] 李泽荃, 孙景来, 陈磊. 基于事故树和贝叶斯网络的隧道塌陷风险概率估计方法研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(4): 130-136.
- [6] 罗小芳, 白旭, 汤荣铿, 孙丽萍, 金辉. 基于贝叶斯网络的半潜式钻井平台钻井设备系统可靠性分析[J]. 船舶工程, 2020, 42(11): 118-123.
- [7] 王春雪. 基于贝叶斯网络的城市燃气管道泄漏风险研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(4): 539-542.
- [8] 项琴, 李远富, 朱宏伟. 基于模糊贝叶斯网络的山区高速铁路桥梁运营风险评估[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(11): 76-80.
- [9] 陈雍君, 吴光晔, 张宇, 李冠勋. 基于模糊贝叶斯网络的城市地下综合管廊运维风险分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 64-70.
- [10] 赵旭生, 马国龙, 乔伟, 宁小亮. 基于事故树分析的煤与瓦斯突出预警指标体系[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(3): 37-43.
- [11] 宋珂, 武玮, 马泽宇, 淡勇. 天然气净化厂工业管道安全屏障的综合评价方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(4): 621-631.
- [12] 王喆, 孔维磊, 方丹辉, 段志飞. 基于贝叶斯网络的城镇洪涝应急情景推演研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 182-188.
- [13] 郭发蔚, 王宏辉. 基于 Bayesian 隧道施工风险模糊综合评估方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 401-406.
- [14] 韩凤霞, 王红军, 邱城. 基于模糊贝叶斯网络的生产线系统可靠性评价[J]. 制造技术与机床, 2020(9): 45-49.
- [15] 曾明华, 王旭, 王转敏, 王敏. 基于模糊多态贝叶斯网络的地铁运营风险评估方法[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 28-33.
- [16] 刘澎, 吕淑然, 马舒琪. 面向高层建筑物的火灾演化路径研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1130-1137.
- [17] 蔡超, 刘艳秋. 基于模糊贝叶斯网络的物流服务供应链系统可靠性分析[J]. 中国流通经济, 2018, 32(4): 49-58.
- [18] Zhang L M, Wu X G, Skibniewski M J, Zhong J B, Lu Y J. Bayesian-network-based safety risk analysis in construction projects[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 131: 29-39.
- [19] 吴贤国, 丁保军, 张立茂, 陈跃庆, 薛莉敏, 宋若昕. 基于贝叶斯网络的地铁施工风险管理研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(1): 84-89.
- [20] Wang Y F, Xie M, Ng K M, Habibullah M S. Probability analysis of offshore fire by incorporating human and organizational factor[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17-18): 2042-2055.

Study on risk probability of urban explosion accidents based on Bayesian network

LIANG Xinghui, WU Meidou, ZHANG Zhaoqing

(School of Economics and Management, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A probability model of city explosion accidents is constructed using the comprehensive risk assessment method combining fault tree and Bayesian network. The risk probability calculation, cause diagnosis, and sensitive node analysis are carried out based on classification and traceability. Firstly, according to the attribute of explosion sources, the research objects are divided into four categories: dust explosion, combustible gas or liquid explosion, combustible solid explosion, and physical explosion. Secondly, the expert confidence weight method is used to evaluate the a priori probability of 28 root node events and then combined with the conditional probability table to calculate the risk probability of top events. Thirdly, the causes of risk are analyzed by reverse reasoning. The results show that the probability of combustible gas or liquid explosion is the highest in urban explosion accidents. Inadequate supervision of personnel, lack of explosion-proof knowledge, and illegal operation and production are the key risk factors and sensitive nodes of common urban explosion accidents. Finally, according to the research conclusions, risk control and preventive measures are put forward to reduce urban explosion accidents.

Keywords: Urban explosion; Fault tree; Bayesian network; Risk probability; Cause diagnosis