

中文引用格式:杨震,梁峻铭,郭梨,等. 基于混合因果逻辑的化工园区雷击储罐风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 174-182.

英文引用格式:YANG Zhen, LIANG Junming, GUO Li, et al. Risk assessment of chemical industrial park storage tanks struck by lightning based on hybrid causal logic methodology[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 174-182.

基于混合因果逻辑的化工园区雷击储罐 风险评估*

杨震^{1,2}副教授, 梁峻铭¹, 郭梨¹, 董晓斌³

(1 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2 西安市智慧工业感知计算与
决策重点实验室, 陕西 西安 710055; 3 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

中图分类号: X937 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.0090

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51974223); 陕西省杰出青年基金资助(2020JC-44); 陕西省自然科学基金面上项目(2022JM-274)。

【摘要】 沿海化工园区的雷击事故时有发生, 对园区生产安全构成严重威胁。为评估化工园区雷击储罐引发的 Natech 事故, 提出一种基于混合因果逻辑(HCL)的风险评估方法。首先, 采用事件序列图(ESD)和故障树分析法(FTA), 定性分析雷击储罐导致 Natech 事故的演化路径, 为阻断事故传递过程提供可视化基础; 其次, 采用贝叶斯网络(BN)定量解算人因失误概率, 评估雷击储罐事故的混合因果关系; 最后, 采用混合因果逻辑方法, 实现可视化解构雷击储罐 Natech 事故的复杂性和不确定性。研究表明: 决策失误是人因失误模型的首要风险源; 组织氛围、心理状态、工作环境不佳及监管不力是导致人因失误频繁的主要因素; 防雷设施有效性缺失是雷击储罐事故链的诱因; 降低风险场景的严重性需要重点加强对全液面火灾和池火灾的管控。

【关键词】 混合因果逻辑(HCL); 化工园区; 雷击储罐; 风险评估; 贝叶斯网络(BN); 事件序列图(ESD)

Risk assessment of chemical industrial park storage tanks struck by lightning based on hybrid causal logic methodology

YANG Zhen^{1,2}, LIANG Junming¹, GUO Li¹, DONG Xiaobin³

(1 School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 Xi'an Key Laboratory of Perceptual Computing and Decision-making in Intelligent Industry, Xi'an Shaanxi 710055, China;
3 School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: Coastal chemical industrial parks have frequently experienced lightning strikes, which seriously threaten production safety. A risk assessment method based on HCL methodology was proposed to assess Natech (Natural-technological) accidents triggered by lightning strikes on storage tanks in these parks. Firstly, ESD and Fault Tree Analysis(FTA) were employed to qualitatively analyze the evolution

的各因素之间逻辑关系,由逻辑门、基本事件(Basic Event, BE)、中间事件(Intermediate Event, IET)和顶事件(Top Event, TE)组成^[12]。BN 基于概率论,由节点及连接节点的有向边构成。节点之间依赖关系的类型和强度用条件概率来表征^[13]。BN 节点概率采用模糊数模型,具体语言变量与模糊数对应关系见表 1^[14]。

表 1 人因失误模型语义值和模糊数

Table 1 Human error model semantic values and fuzzy numbers

| 等级 | 语义值 | 模糊数 |
|----|-----|-----------------|
| 7 | 非常高 | (0.9, 1.0, 1.0) |
| 6 | 高 | (0.7, 0.9, 1.0) |
| 5 | 偏高 | (0.5, 0.7, 0.9) |
| 4 | 中等 | (0.3, 0.5, 0.7) |
| 3 | 偏低 | (0.1, 0.3, 0.5) |
| 2 | 低 | (0, 0.1, 0.3) |
| 1 | 非常低 | (0, 0, 0.1) |

2 风险评估模型框架

2.1 雷击储罐事故情景构建

雷击储罐事故场景以雷暴天气下雷击中外浮顶储罐顶部(IE₁)和雷击中外浮顶储罐侧壁(IE₂)展开,随后依次引入 PE 和 ES,分别见表 2 和表 3,最终构建雷击储罐事件 ESD,如图 2 所示。

表 2 关键事件描述

Table 2 Description for PE

| 编号 | 描述 |
|-----------------|------------------------|
| PE ₁ | 雷电击中储罐,防雷设施发挥作用 |
| PE ₂ | 一、二次密封区气体浓度达到爆炸极限,雷击引燃 |
| PE ₃ | 固定灭火系统有效,扑灭密封圈火灾 |
| PE ₄ | 固定灭火系统自启失效,人员介入 |
| PE ₅ | 储罐侧壁被雷电击穿导致原油泄漏 |
| PE ₆ | 储罐存储区出现热源,引燃泄漏原油 |

表 3 结果事件描述

Table 3 Description for ES

| 编号 | 描述 |
|-----------------|-------------------|
| ES ₁ | 防雷设施完好,无事故发生 |
| ES ₂ | 密封圈发生火灾后及时响应事故终止 |
| ES ₃ | 密封圈火灾烧穿密封圈,引燃原油液面 |
| ES ₄ | 泄漏原油漫延,遇明火发生池火灾 |
| ES ₅ | 原油泄漏 |

2.2 雷击储罐事故情景致因分析

在 ESD 诸多关键事件中,PE₁、PE₂ 和 PE₆ 等 3 个事件的发生基于一系列可预测且可控的客观条

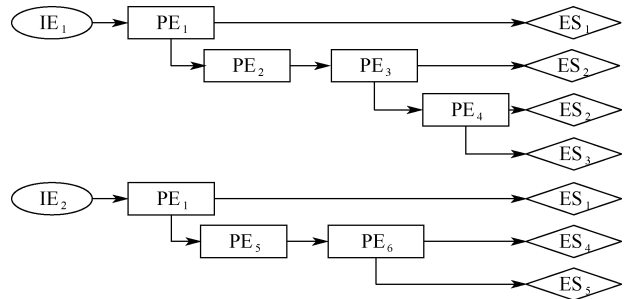


图 2 雷击储罐事件序列

Fig. 2 ESD of accident of lightning striking storage tanks

件。在处理这些事件时,FTA 展现出其显著的优势。

对于 PE₁,防雷设施失效通常分为未安装防雷设施和已安装防雷设施失效 2 种情况,针对后者通常可以从接地装置失效、避雷网/针失效和等电位连接失效 3 方面构建 FTA₁,如图 3a 所示。对于 PE₂,多数大型储油罐采用外浮顶结构,为保证浮盘的灵活性并防止油气泄漏,浮盘与罐体之间需要安装密封装置防止外部空气进入储罐,同时防止储罐内的气体逸出。参考程玉龙^[15]对密封结构的研究,选取基本事件构建 FTA₂,如图 3b 所示。对于 PE₆,储罐区产生火源主要涉及 3 种情况:雷击火花、电气设备火花与储罐的静电火花。其中,雷击火花主要是雷电击中储罐后导致储罐局部产生热点。电气设备火花主要是由于储罐区的电气设备老化过载或者电气设备维护使用不当而产生热点。静电火花通常来自储罐自身的静电积聚以及人体静电而产生热点。据此构建 FTA₃,如图 3c 所示。

采用排序质心法(Rank-Order Centroid method, ROC)为 FTA 基本事件概率赋值,具体计算过程可以参考前人研究^[16]。

2.3 雷击储罐人因失误模型分析

2.3.1 贝叶斯节点选取

参考人为因素分析和分类模型(Human Factors Analysis and Classification System, HFACS)^[17]选择 PE₄ 节点,据化工园区事故统计数据^[15,18-19]及化工园区储罐实际管理情况,结合雷击储罐事故特征和情景推演结果,得出化工园区 HFACS 模型,见表 4。

2.3.2 贝叶斯结构建模

采用解释结构模型(Interpretative Structure Modeling, ISM)构建 BN 网络,通过专家经验判断节点之间关系的强弱,生成邻接矩阵 **B**,作为 ISM 的输入,计算 **B**,得到可达矩阵 **M**。**M** 可划分为可达集合 $R(S_i)$ 与先行集合 $Q(S_i)$,其中, S_i 代表 **M** 第 i 个要素。当 $R(S_i) = [R(S_i) \cap Q(S_i)]$ 时,则 S_i

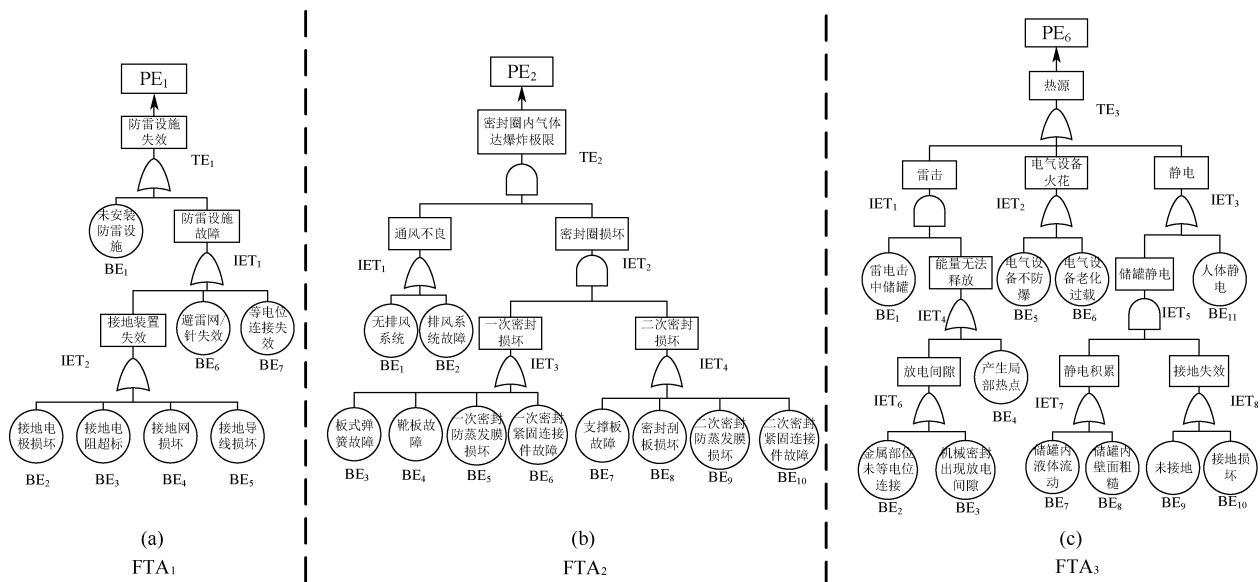


图 3 PE₁、PE₂、PE₆ 事件节点故障树模型

Fig. 3 Fault tree model for event nodes PE₁, PE₂, and PE₆

表 4 化工园区 HFACS 模型

Table 4 HFACS model for chemical industrial parks

| 编号 | 模型层级 | 人为因素 | 描述 |
|------------------|------------|---------|------------------|
| BN ₁ | 组织影响 | 组织氛围 | 组织内部的工作氛围,企业文化等 |
| BN ₂ | | 组织过程缺陷 | 组织决策和规则管理存在缺陷 |
| BN ₃ | 不安全监督 | 操作计划恰当性 | 操作计划是否合适 |
| BN ₄ | | 已知问题的纠正 | 管理存在未纠正的风险 |
| BN ₅ | | 监管违规 | 监管人员无视制度授权不安全作业 |
| BN ₆ | 不安全行为的前提条件 | 心理状态 | 由于心理行为导致工作出错 |
| BN ₇ | | 生理状态 | 能够对安全生产造成影响的生理状况 |
| BN ₈ | | 能力局限 | 承担的任务超出员工能力 |
| BN ₉ | | 工作环境 | 包括生产环境和厂区环境 |
| BN ₁₀ | 不安全行为 | 技术性失误 | 基础技能导致的失误 |
| BN ₁₁ | | 决策性失误 | 在面对不确定性时决策出现差错 |
| BN ₁₂ | | 感知性失误 | 个人感知与现实世界存在偏差 |
| BN ₁₃ | | 习惯性违规 | 违反规章制度但被监管人员忽视 |
| BN ₁₄ | | 偶然性违规 | 由于不确定偶然违反规章制度 |
| BN ₀ | — | 人因失误 | 人为因素导致的失误 |

代表的事件被划分为第一层。此时删除 M 中 S_i 所在行和列,并以此法计算第二层事件,最终确定后续所有事件的层级划分,分层有向图结果如图 4 所示。其中,圆圈代表节点,箭头代表节点间的关系,从箭头发出发端指向端代表影响和被影响节点。

3 雷击储罐风险评估案例研究

案例选取沿海某化工园区,该园区有多座固定顶常压柴油储罐、外浮顶常压原油储罐、液化石油气储罐、液化天然气储罐和液氧储罐。其中,外浮顶常压原油储罐型号见表 5。

表 5 外浮顶常压原油储罐型号

Table 5 Tank parameters in external floating roof atmospheric crude oil storage tank

| 存储介质 | 高度/m | 外直径/m | 浮盘直径/m | 避雷针高度/m | 罐内液面高度/m | 壁厚/mm |
|------|------|-------|--------|---------|----------|-------|
| 原油 | 14.4 | 55 | 46 | 20 | 10 | 28 |

3.1 FTA 量化分析

采用 ROC 定量计算 FTA₁、FTA₂ 和 FTA₃ 各基本事件发生概率,以 FTA₂ 密封圈内气体到爆炸极限为例说明 ROC 的计算过程,FTA 基本事件概率计

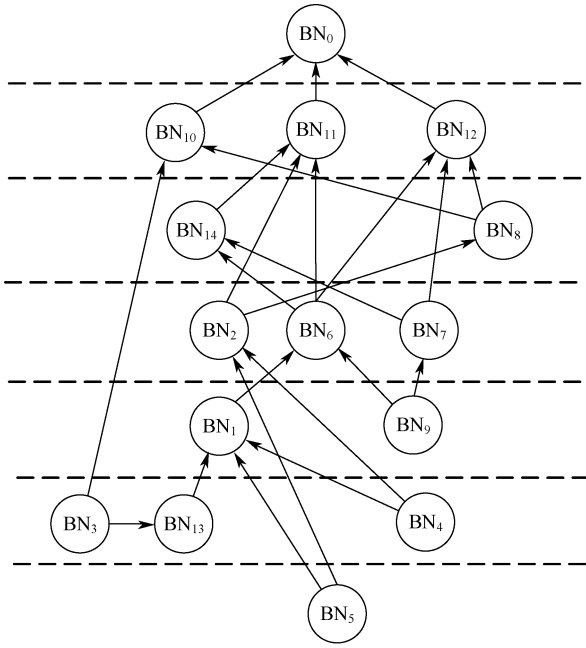


图4 雷击储罐情景分层有向图

Fig. 4 Digraph for lightning strike on storage tanks scenario

算过程见表6,其中, ϕ_i 表示基本事件分配似然度, P_i 为第 i 个事件发生的概率。最终 FTA 顶上事件概率见表7。

3.2 BN 定量分析

采用模糊数形式表示人因失误模型根节点的先

表6 FTA₂ 基本事件概率

Table 6 Probability of basic events of FTA₂

| 编号 | 事件 | 排序 | ϕ_i | P_i |
|------------------|-------------|------------------|----------|-------|
| BE ₁ | 无排风系统 | 7 th | 0.4 | 0.144 |
| BE ₂ | 排风系统故障 | 3 rd | 0.8 | 0.289 |
| BE ₃ | 板式弹簧故障 | 5 th | 0.6 | 0.217 |
| BE ₄ | 靴板故障 | 10 th | 0.1 | 0.036 |
| BE ₅ | 一次密封防蒸发膜损坏 | 2 nd | 0.9 | 0.325 |
| BE ₆ | 一次密封紧固连接件故障 | 8 th | 0.3 | 0.108 |
| BE ₇ | 支撑板故障 | 6 th | 0.5 | 0.181 |
| BE ₈ | 密封刮板损坏 | 4 th | 0.7 | 0.253 |
| BE ₉ | 二次密封防蒸发膜损坏 | 1 st | 1 | 0.361 |
| BE ₁₀ | 二次密封紧固连接件故障 | 9 th | 0.2 | 0.072 |

表7 故障树顶上事件概率

Table 7 Probability of top event in fault tree

| 编号 | 节点名称 | 概率 |
|------------------|-------------|-------|
| FTA ₁ | 防雷设施失效 | 0.303 |
| FTA ₂ | 密封圈内气体达爆炸极限 | 0.103 |
| FTA ₃ | 储罐区热源 | 0.179 |

验概率和中间节点的条件概率。BN 根节点的先验概率通过模糊数进行概率整合,根节点先验概率见表8。采用模糊数模型对各节点的条件概率进行输入,以 BN₂ 节点(组织过程缺陷)为例,条件概率计算见表9。将根节点先验概率和中间节点的条件概率输入 GeNie4.0 (BN 模拟软件)建立化工园区人因失误 BN 模型,如图5所示。

表8 根节点先验概率

Table 8 Prior probability of root node

| 节点 | 注释 | 状态 | 专家1 | 专家2 | 专家3 | 均值 | 解模糊 | 归一化 |
|-----------------|---------|----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-------|-------|
| BN ₃ | 组织计划恰当性 | 不良 | (0, 0.1, 0.3) | (0, 0.1, 0.3) | (0, 0.1, 0.3) | (0, 0.1, 0.3) | 0.125 | 0.125 |
| | | 恰当 | (0.7, 0.9, 1.0) | (0.7, 0.9, 1.0) | (0.7, 0.9, 1.0) | (0.7, 0.9, 1) | 0.875 | 0.875 |
| BN ₄ | 已知问题的纠正 | 没有 | (0, 0.1, 0.3) | (0.1, 0.3, 0.5) | (0, 0.1, 0.3) | (0.033, 0.167, 0.367) | 0.183 | 0.183 |
| | | 存在 | (0.7, 0.9, 1.0) | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.7, 0.9, 1.0) | (0.633, 0.833, 0.967) | 0.817 | 0.817 |
| BN ₅ | 监管违规 | 没有 | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.7, 0.9, 1.0) | (0.567, 0.767, 0.933) | 0.758 | 0.758 |
| | | 存在 | (0.1, 0.3, 0.5) | (0.1, 0.3, 0.5) | (0, 0.1, 0.3) | (0.067, 0.233, 0.433) | 0.242 | 0.242 |
| BN ₉ | 工作环境 | 不良 | (0, 0.1, 0.3) | (0.1, 0.3, 0.5) | (0.1, 0.3, 0.5) | (0.067, 0.233, 0.433) | 0.242 | 0.242 |
| | | 良好 | (0.7, 0.9, 1.0) | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.567, 0.767, 0.933) | 0.758 | 0.758 |

表9 BN₂ 组织过程缺陷条件概率

Table 9 Conditional probability of organizational process defects of BN₂

| BN ₅ 监管违规 | BN ₄ 已知问题的纠正 | BN ₂ 组织过程缺陷 | 专家1 | 专家2 | 专家3 | 均值化 | 解模糊 | 归一化 |
|----------------------|-------------------------|------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-------|-------|
| 没有 | 没有 | 没有 | (0, 0.1, 0.3) | (0.1, 0.3, 0.5) | (0.1, 0.3, 0.5) | (0.067, 0.233, 0.433) | 0.242 | 0.242 |
| | | 存在 | (0.7, 0.9, 1) | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.567, 0.767, 0.933) | 0.758 | 0.758 |
| | 存在 | 没有 | (0.9, 1, 1) | (0.9, 1, 1) | (0.7, 0.9, 1) | (0.833, 0.967, 1) | 0.942 | 0.942 |
| | | 存在 | (0, 0, 0.1) | (0, 0, 0.1) | (0, 0.1, 0.3) | (0, 0.033, 0.167) | 0.058 | 0.058 |

续表 9

| BN ₅ 监管违规 | BN ₄ 已知问题的纠正 | BN ₂ 组织过程缺陷 | 专家 1 | 专家 2 | 专家 3 | 均值化 | 解模糊 | 归一化 |
|----------------------|-------------------------|------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------------|-------|-------|
| 存在 | 没有 | 没有 | (0, 0.1, 0.3) | (0, 0, 0.1) | (0, 0.1, 0.3) | (0, 0.067, 0.233) | 0.092 | 0.092 |
| | 存在 | 存在 | (0.7, 0.9, 1) | (0.9, 1, 1) | (0.7, 0.9, 1) | (0.767, 0.933, 1) | 0.908 | 0.908 |
| | | 没有 | (0.7, 0.9, 1) | (0.5, 0.7, 0.9) | (0.7, 0.9, 1) | (0.633, 0.833, 0.967) | 0.817 | 0.817 |
| | | 存在 | (0, 0.1, 0.3) | (0.1, 0.3, 0.5) | (0, 0.1, 0.3) | (0.033, 0.167, 0.367) | 0.183 | 0.183 |

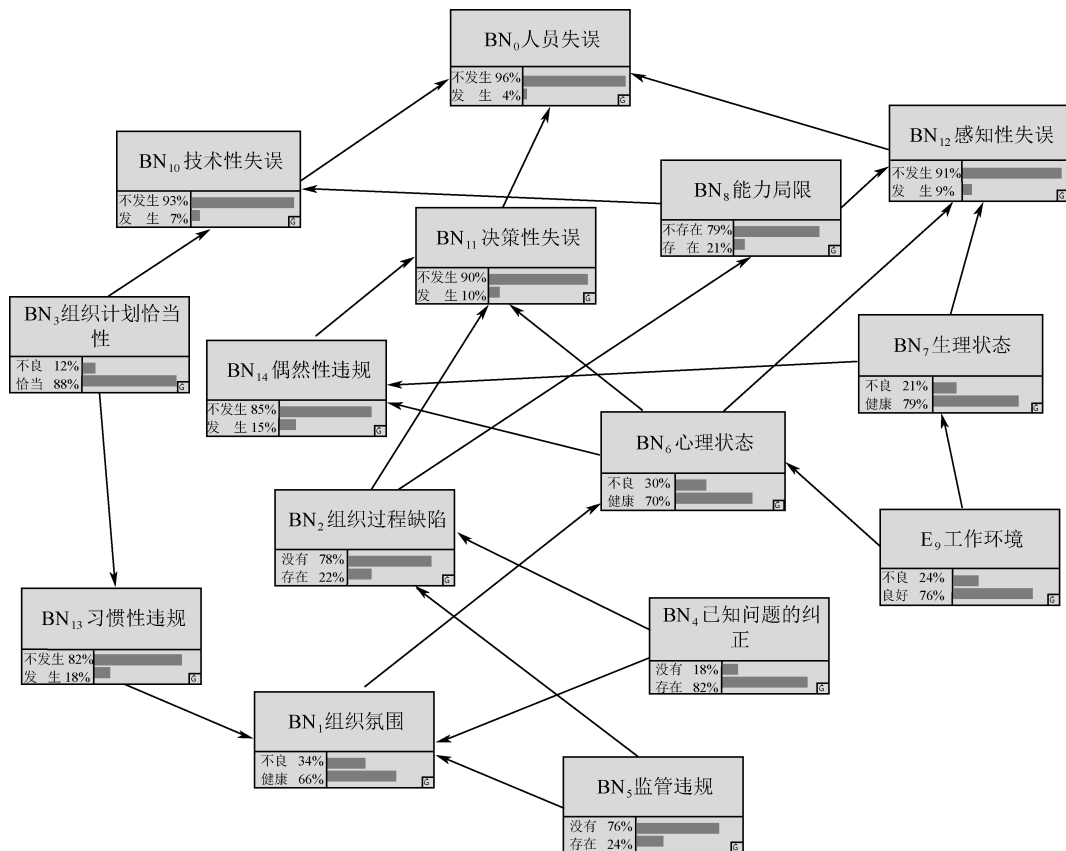


图 5 化工园区人因失误贝叶斯模型

Fig. 5 Bayesian model of human error in chemical industrial parks

3.3 其他事件节点量化分析

1) 雷电击中外浮顶储罐的概率。雷电击中外浮顶储罐概率^[20]计算过程如下:

$$P_L = n_g A_c \quad (1)$$

$$n_g = 0.024 T_d^{1.29} \quad (2)$$

$$A_c = \pi \left(r_{cm} + \frac{D}{2} \right)^2 \quad (3)$$

$$r_{cm} = 50.07 + 1.89H - 2.33 \times 10^{-2} H^2 \quad (4)$$

式中: P_L 为雷电击中储罐的发生概率; n_g 为地面雷电密度, $1/(km^2 \cdot year)$; A_c 为雷电捕获面积, m^2 ; T_d 为该地区的年雷暴小时数, $h/year$; D 为储罐的外径, m ; r_{cm} 为地面平均吸引半径, m ; H 为储罐高度, m 。

2) 雷击中储罐外浮顶的条件概率。雷击中储罐外浮顶条件概率^[20]计算过程如下:

$$P_T = \left(\frac{D_1/2 - r_f}{D_1/2} \right)^2 \quad (5)$$

$$r_f = \sqrt{H_T(60 - H_T)} - \sqrt{h_f(60 - h_f)} \quad (6)$$

式中: P_T 为雷电集中储罐顶部的概率; D_1 为储罐外浮顶直径, m ; r_f 为储罐外浮顶水平方向上受到防护的最大半径, m ; H_T 为避雷针高度, m ; h_f 为罐内液面高度, m 。

最终获得雷电击中外浮顶的概率如下:

$$P_{IE1} = P_L P_T \quad (7)$$

3) 固定式灭火系统有效概率。外浮顶储罐固定灭火系统作为一种重要的安全设施,用于保护外浮顶

储罐免受火灾的威胁。其中,灭火系统失效概率参照文献[21],取 $P_{PE3} = 1 - 8.1 \times 10^{-3} = 0.992$,见表10。

表10 灭火系统失效概率

Table 10 Failure probability of fire suppression systems

| 灭火系统类型 | 失效概率 |
|---------------|----------------------|
| 固定式泡沫边缘密封灭火系统 | 8.1×10^{-3} |
| 惰性气体覆盖系统 | 5.0×10^{-3} |
| 自动边缘密封灭火系统 | 2.4×10^{-3} |

4) 雷电击穿储罐并发生泄漏的概率。当雷电击中储罐并击穿罐壁时,会导致罐内物质与外界环境直接接触,从而可能引发泄漏事故。雷电的高能量和瞬时性使得其对罐壁的破坏具有极大的不确定性和难以预测性。当雷电击穿罐壁,发生泄漏事故

的概率^[20]如下:

$$P_{PE5} = \frac{P_d S_L}{S_{tot}} \quad (8)$$

$$\ln(P_d) = 0.8944 - 0.9081 \ln t \quad (9)$$

式中: P_d 为雷电击穿概率; S_L 为暴露在雷电冲击下容器总表面中与介质接触的面积, m^2 ; S_{tot} 为暴露在雷击下的容器总表面积, m^2 ; t 为储罐壁厚, m (取对数时无量纲化)。

最终计算获得该案例雷击击中外浮顶常压储罐的概率为0.013,其他事件节点发生概率见表11。

表11 其他事件概率

Table 11 Probability of other events

| 节点 | IE ₁ | IE ₂ | PE ₃ | PE ₅ |
|----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 概率 | 7.2×10^{-3} | 5.8×10^{-3} | 9.9×10^{-1} | 9.2×10^{-2} |

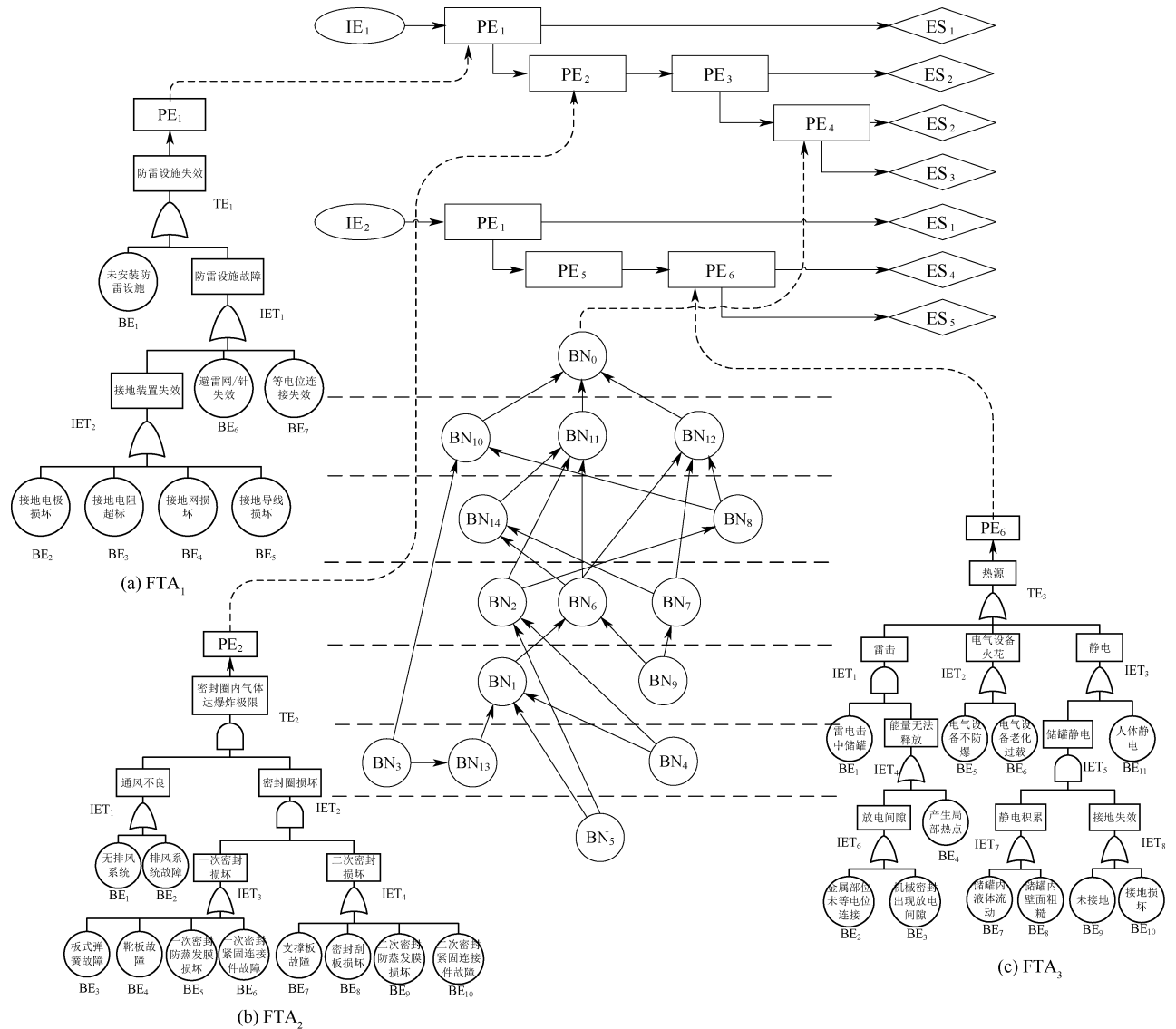


图6 HCL 风险评估模型

Fig. 6 Risk assessment model based on HCL

3.4 结果分析

通过融合 ESD、FTA 和模糊 BN 的特点,构建 HCL 风险评价模型,如图 6 所示。随后全面评估雷击引发的化工园区储罐的风险情景,并确定各事件链的发生概率,见表 12。

表 12 雷击储罐事件链

Table 12 Event chain of lightning strike tank accident

| 序号 | 事件链 | 概率 |
|----|---|----------------------|
| 1 | $IE_1 \rightarrow PE_1(1) \rightarrow ES_1$ | 5.0×10^{-3} |
| 2 | $IE_1 \rightarrow PE_1(0) \rightarrow PE_2(1) \rightarrow PE_3(1) \rightarrow ES_2$ | 2.2×10^{-4} |
| 3 | $IE_1 \rightarrow PE_1(0) \rightarrow PE_2(1) \rightarrow PE_3(0) \rightarrow PE_4(1) \rightarrow ES_2$ | 1.7×10^{-6} |
| 4 | $IE_1 \rightarrow PE_1(0) \rightarrow PE_2(1) \rightarrow PE_3(0) \rightarrow PE_4(0) \rightarrow ES_3$ | 7.3×10^{-8} |
| 5 | $IE_2 \rightarrow PE_1(1) \rightarrow ES_1$ | 4.0×10^{-3} |
| 6 | $IE_2 \rightarrow PE_1(0) \rightarrow PE_5(1) \rightarrow PE_6(1) \rightarrow ES_4$ | 2.9×10^{-5} |
| 7 | $IE_2 \rightarrow PE_1(0) \rightarrow PE_5(1) \rightarrow PE_6(0) \rightarrow ES_5$ | 1.3×10^{-4} |

根据化工园区雷击储罐事故混合因果模型分析,共得出 7 条事件链。其中,防雷设施的有效性达到 0.697,ESD 各事件链揭示了防雷设施状态与事故发生存在联系。有效的防雷措施可以降低事故发生的风险,不足或失效的防雷设施则可能成为事故链的触发点。

固定灭火系统的有效概率为 0.992,其高效运行是防止火灾蔓延的关键。在极端雷电环境下,灭

火系统的电子元件有因雷击失效而无法自启动的可能性,因此增加了人为干预的必要性。人因失误概率为 0.04,如果人员因失误未能及时介入,密封圈火灾可能升级为全液面火灾,尽管全液面火灾事件链发生可能性最低为 7.3×10^{-8} ,但后果在诸多事故中最为严重。

最后,储罐泄漏的风险相对较低,为 1.3×10^{-4} 。这反映在常规运行和维护条件下,储罐能够保持较高的安全性能,进而有效降低了泄漏事故发生的可能性。如果罐区出现不可控的热源引燃泄漏原油,泄漏演变成池火并可能进一步扩大事故后果。尽管这种情况的发生概率较低(2.9×10^{-5}),但也不容忽视。

4 结论

1) 基于 ISM 和 HFACS 优化 BN 模型,发现决策性失误发生概率最高,组织氛围、心理状态工作环境和监管违规是人因失误模型中发生频率较高的因素。

2) 防雷设施有效性在事件序列图中出现频率最高,其失效是诱发后续事故的关键。全液面火灾发生概率最低,其次是池火灾,两者是雷击储罐事故最为严重的风险场景。

3) 雷击储罐混合风险评估模型能够实现多灾种事件链分析,有助于快速理解雷击储罐事故风险状况和演化路径,为决策者提供直观的风险可视化工具。

参考文献

- [1] SHOWALTER P S, MYERS M F. Natural disasters in the United States as release agents of oil, chemicals, or radiological materials between 1980—1989: analysis and recommendations [J]. Risk Analysis, 1994, 14 (2): 169–182.
- [2] 杨运锋. 典型自然灾害诱发的化工园区多米诺效应事故链路概率预测与风险防控[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
YANG Yunfeng. Risk prevention and control and probabilistic prediction for accidental chains of domino effects triggered by typical natural disasters in chemical industrial parks[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [3] RASMUSSEN K. Natural events and accidents with hazardous materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 1995, 40(1): 43–54.
- [4] NECCI A, ANTONIONI G, COZZANI V, et al. A model for process equipment damage probability assessment due to lightning[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 115: 91–99.
- [5] NECCI A, ARGENTI F, LANDUCCI G, et al. Accident scenarios triggered by lightning strike on atmospheric storage tanks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2014, 127: 30–46.
- [6] YANG Yunfeng, CHEN Guohua, CHEN Peizhu. The probability prediction method of domino effect triggered by lightning in chemical tank farm[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 116: 106–114.
- [7] CHENG Yulong, LUO Yun. Analysis of Natech risk induced by lightning strikes in floating roof tanks based on the

- Bayesian network model[J]. *Process Safety Progress*, 2021, 40(1): 1-8.
- [8] ZHANG Di, HAN Zhepeng, ZHANG Kai, et al. Use of hybrid causal logic method for preliminary hazard analysis of maritime autonomous surface ships[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(6): 1-26.
- [9] 张镓. 基于混合因果逻辑的自主货物运输船舶风险辨识研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
ZHANG Kai. Study on risk identification of maritime autonomous surface ship based on hybrid causal logic methodology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [10] XU Sheng, KIM E. Hybrid causal logic model for estimating the probability of an icebreaker-ship collision in an ice channel during an escort operation along the Northeast Passage[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 284: 1-16.
- [11] THOMAS S, GROTH K M. Toward a hybrid causal framework for autonomous vehicle safety analysis[J]. *Journal of Risk and Reliability*, 2023, 237(2): 367-388.
- [12] 张冰鉴, 苏秦, 刘海龙. 基于 FTA-BN 的云 ERP 不安全事件的人因失误分析[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(2): 38-47.
ZHANG Bingjian, SU Qin, LIU Hailong. Human error analysis for unsafe events of cloud ERP based on FTA-BN[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(2): 38-47.
- [13] 寇兴怡, 帅斌, 黄文成. 基于贝叶斯网络的高速动车组运营故障分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(4): 63-69.
KOU Xingyi, SHUAI Bin, HUANG Wencheng. Analysis on operation fault of high-speed EMU based on Bayesian network[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(4): 63-69.
- [14] 姚诗忆. 基于模糊贝叶斯网络的综合交通枢纽地铁车站安全风险评价研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
YAO Shiyi. Research on Safety risk assessment of metro station in integrated transportation hub based on fuzzy bayesian network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [15] 程玉龙. 油库雷电火灾耦合致灾机理及防控策略[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
CHENG Yulong. Study on coupling mechanism of lightning induced fire disasters and pre-control strategy in oil depots[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [16] YANG Zhen, DONG Xiaobin, GUO Li. Scenario inference model of urban metro system cascading failure under extreme rainfall conditions[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2023, 229: 1-12.
- [17] WIEGMANN D A, SHAPPELL S A. A human error analysis of commercial aviation accidents using the human factors analysis and classification system (HFACS) [J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 2001, 72(11): 1006-1016.
- [18] 刘全龙, 彭雨蒙, 赵盼, 等. 基于 HFACS 模型的制造企业机械伤害事故致因分析[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(3): 51-59.
LIU Quanlong, PENG Yumeng, ZHAO Pan, et al. Analysis of causes of mechanical injury accidents in manufacturing enterprises based on HFACS model[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(3): 51-59.
- [19] RENNI E, KRAUSMANN E, COZZANI V. Industrial accidents triggered by lightning [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 184(1/2/3): 42-48.
- [20] 李子杰. 典型自然灾害引发的罐区事故风险与储罐安全间距研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021.
LI Zijie. Study on accident risk and safety distance of tank farm caused by typical natural disasters[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021.
- [21] NECCI A, ANTONIONI G, BONVICINI S, et al. Quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightning[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, 154: 60-72.

作者简介: 杨震 (1984—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 主要从事安全系统工程、可靠性工程与系统安全、AI 与安全信息处理等方面的研究。E-mail: yangzhen@xauat.edu.cn。

