

# 基于模糊动态贝叶斯网络的原油储罐火灾风险分析

程万洲<sup>1</sup> 吴泽琳<sup>2\*</sup> 郭雅迪<sup>1</sup> 闫朔<sup>1</sup> 杨光<sup>2</sup>

(1. 国家石油天然气管网集团有限公司, 北京 100013)

(2. 中国石油大学(北京), 北京 102249)

**摘要:** 原油储罐受设备状态、天气环境等时变因素的影响。风险因素复杂, 具有较强的动态特性。准确、高效的风险评估是油罐区生产经营安全运行的重要保障。本文提出了一种基于动态贝叶斯网络的罐区安全事故系统风险评估方法, 构建了灾害识别和灾害演化过程的领结模型, 并引入时间维度确定贝叶斯网络。通过建立专家判断与模糊集理论相结合的概率估计模型, 确定了风险因素的先验概率和条件概率。该方法可以系统表征不同场景、不同阶段的油罐安全事故风险概率波动, 并根据油罐生产数据、当天天气等实时情况, 实施有针对性的安全生产措施。

**关键词:** 原油储罐; 蝴蝶结模型; 动态贝叶斯网络; 模糊数据集; 动态风险分析

## 0 前言

原油是国家发展的重要能源支柱。据统计, 截至2023年, 石油占能源消费总量的17.9%, 仅次于煤炭, 在中国能源消费总量中排名第二。随着石化工业的日益发展, 中国大型储罐量逐年增加。同时, 它又是一个高风险行业, 由于设备设施缺陷、人为失误等因素, 发生事故极易造成严重的人员伤亡和财产损失, 造成不良的社会影响。因此, 有必要重点识别和分析风险潜在因素中的动态特征, 明确原油储罐的失效形式, 进一步提高储罐的风险评估水平。

目前, 成熟的油罐风险研究方法主要有安全检查表法、事故树法、故障树法等。许多学者采用传统的概率分析法或两者相结合的方法来完成目标的风险概率分析, 主要集中在以下几个方面: ①储罐事故发生的风险分析, 包括事故类型和后果、事故频度分析<sup>[1]</sup>; ②石油生产作业风险分类与控制, 包括油罐/管道大修风险、功能区风险分类管理等<sup>[2]</sup>; ③储罐应急措施优化<sup>[3]</sup>。然而, 上述研究在风险因素之间的相关关系、不确定性因素的特征、风险的定量分析等方面还存在不足。贝叶斯网络是推理领域补偿不确定性因素最有效的理论模型之一。时间维度可以弥补上述方法在表征因子动态方面的不足。近年来, BN在各种研究中得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。

基于本文提出的风险评估方法, 可以实现油库风险的定量评估。通过识别主要风险因素、控制危险源、增加安全屏障等措施降低整体事故概率, 有效提高预防措施和有针对性的资金投入成本。

## 1 模型分析

### 1.1 BN模型

贝叶斯网络(BN, Belief Network)是一种有向无环图网络拓扑。每个部分由三个主要部分组成: 有向边、节点和条件概率表, 其中节点表示事件, 有向边和条件概率表分别表示事件之间的因果关系和概率关系。一般情况下, 变量集 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 上的联合概率分布可表示为:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i)) \quad (1)$$

式(1)中,  $X_i \in X$ ;  $Pa(X_i)$ 是父节点 $X_i$ 的集合。

网络中的每个节点都有一个概率分布, 当出现新的观测或证据条件时, 变量的先验概率可以更新, 即该变量的后验概率为:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n | E) = \frac{P(X_1, X_2, \dots, X_n, E)}{P(E)} = \frac{P(X, E)}{\sum_x P(X, E)} \quad (2)$$

式(2)中,  $E$ 代表观测证据。

### 1.2 概率估计模型

根据模糊集理论, 将专家的评分结果转化为精确概率, 用九级模糊语言描述“绝对低、很低、低、较低、中、较高、高、很高、非常高”的基本事件。利用模糊集理论将语言术语的描述转化为模糊数。采用专家经验与模糊集理论相结合的概率估计模型, 通过将概率表示为模糊数、处理专家判断、去模糊化、可化等一系列处理程序, 得到事件的模糊概率值。

基于专家学历、从业人员年龄等因素的影响, 在协调整体专家意见时引入权重值, 使用式(3)计算。

最后对专家意见处理的模糊集进行统一、去模糊化。

$$w_i = \frac{Score_i}{\sum_{i=1}^m Score_i} \quad (3)$$

式中， $w_i$  表示专家的权重值； $Score_i$  表示专家  $i$  的重要性等级； $m$  表示专家总数。

用方程 (4-7) 对专家意见处理的模糊集进行统一、去模糊化。

$$\tilde{P}_{ij} = \sum_{i=1}^m w_i \otimes A_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}) \quad (4)$$

$$FPS = \frac{\int \mu(x) x dx}{\int \mu(x) dx} = \frac{\int_a^b \frac{x-a}{b-a} x dx + \int_b^c x dx + \int_c^d \frac{d-x}{d-c} x dx}{\int_a^b \frac{x-a}{b-a} dx + \int_b^c dx + \int_c^d \frac{d-x}{d-c} dx} = \frac{1}{3} \frac{(d+c)^2 - dc - (a+b)^2 + ab}{d+c-a-b} \quad (5)$$

$$FP = \begin{cases} \frac{1}{10^k}, FPS \neq 0 \\ 0, FPS = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$K = \left[ \left( \frac{1-FPS}{FPS} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \times 2.301 \quad (7)$$

式中， $\tilde{P}_{ij}$  表示事件  $i$  对应的梯形模糊数； $A_{ij}$  表示专家  $i$  对事件  $j$  评价的模糊集；FPS 表示模糊似然评分； $\mu(x)$  表示模糊概率隶属函数；FP 表示事件的模糊概率值。

## 2 案例分析

### 2.1 工程情况

以国内某储罐区为例，该区运行的存储容量为 20000 m<sup>3</sup>，其中四个浮顶罐内的存储容量分别为 20000m<sup>3</sup> 和 30000m<sup>3</sup>。委托区消防服务公司专职消防队伍承担消防防护任务，公司实行“站仓合一”的管理模式。

### 2.2 风险识别与分析

结合《危险化学品重大危险源辨识》(GB 18218-2018) 和《地上石油储(备)库完整性管理规范》(GB/T 42097-2022)，选取典型储油库区域，从人、机、环境、管道、材料五个方面进行案例分析，识别出设备存储条件、预警监控、人员操作等可能的影响因素。

综合人、机、环境、管道、材料五个方面的主要不安全因素，将火灾事故作为首要事件，将火灾发生的要素包括原油泄漏、点火源出现和预警设备失效作为关键中间事件，利用 BT 模型与 BN 模型之间的映射关系，采用基本事件与节点对应的原则，构建动态贝叶斯网络结构。因果关系对应于有向边，有向边的箭头指向原因(父节点)的结果因素(子节点)，如图 1 所示。

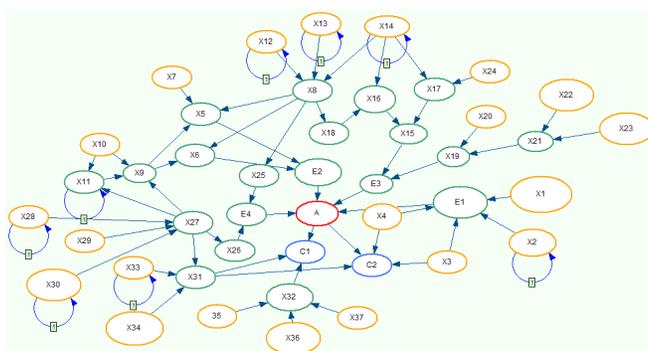


图 1 储罐区域事故风险的 DBN 结构

表 1 BT 模型的基本事件

符号	基本事件	状态划分	符号	基本事件	状态划分
X1	危险等级	state1/ state2/ state3	X23	临时操作	True/
X2	存储容量百分比	state1/ state2/ state3	X24	上罐作业	True/
X3	储罐等级	state1/ state2/ state3	X25	预警装置	True/
X4	安全距离	True/	X26	离开岗位	True/
X5	储罐泄漏	True/	X27	安全教育	True/
X6	管道泄漏	True/	X28	每日教育频次	High/Medium/Low
X7	油舱清洗	True/	X29	入职培训	Good/Average/Bad
X8	设备条件	Good/Bad	X30	完善的应急预案	True/
X9	误操作	True/	X31	紧急消防	True/
X10	周转频率	High/Medium/Low	X32	威胁的人口	More/Less
X11	未经授权的操作	True/	X33	安全教育评估	True/
X12	设备的完整性	Good/Bad	X34	周边火灾响应	True/
X13	日常检查	True/	X35	昼夜不停	Day/Night
X14	天气	Sunny/rain/Cloudy	X36	周边人口密度	High/Medium/Low
X15	火花	True/	X37	固定员工	<50/50~150/>150
X16	闪电	True/	E1	油库危险等级	High/Low
X17	静电	True/	E2	燃油泄漏	True/
X18	防雷	True/	E3	着火源	True/
X19	明火	True/	E4	及时的控制	True/
X20	烟花	True/	C1	人员伤亡	True/
X21	吸烟	True/	C2	财产损失	True/
X22	安全标志	True/	A	事故发生	True/

符号 X 是基本事件，符号 E 是中间事件，符号 C 是事故的后果。基本事件的符号、描述和状态如表 1 所示。部分节点有时间片，用有向弧线表示，弧线中的“1”表示时间间隔为 1。符号 X 是基本事件，符号 E 是中间事件，符号 C 是事故的后果。基本事件的符号、描述和状态如表 1 所示。部分节点有时间片，用

有向弧线表示,弧线中的“1”表示时间间隔为1。同时,在该模型中,根据节点因素的实际工作情况,用合适的语言对节点状态进行定性或定量描述。例如,“油罐清洗操作”和“安全距离符合性”用“是(真)/否(假)”来描述状态是否为真。事件的具体描述及节点状态划分情况如表1所示。

### 2.3 结果分析

在构建的DBN风险评估模型的基础上,以一周的工作时间为一个周期,选取典型油罐生产案例,创建“日检缺失,安全距离未满足”或“日检缺失,天气阴雨”等多个场景,研究不同条件下的风险变化。利用时间序列的观测证据为例。各阶段的观测证据包括:①E0阶段时,无证据说明;②E1阶段时,罐区安全管理和环境条件理想,周转频率等生产作业频率高;③E3阶段时,由于天气转多云,可能会下雨,人员流动频率等减少,工人作业暂停。部分区域的安全距离符合性被检查为不符合,其他条件与E1相同;④E4阶段时,第三次安全距离改善问题因下雨和缺乏日常检查和设备完整性而暂停。同时,雨水导致了水箱的浮筒变形和倾斜。其他条件与E2相同。最终,可得到不同观测证据下罐区风险概率的更新曲线如图2所示。

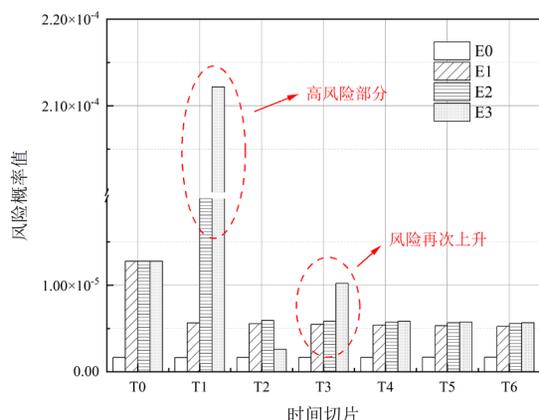


图2 基于不同证据的更新风险概率

研究发现,多个观测证据影响下的罐区火灾风险在T1~T3之间波动,在T1时发生风险的概率最大,与观测证据的概率相差一个数量级。随后出现波动,说明此阶段储罐面积风险较大,安全运行状态不稳定。在输入“一级罐区、高周转频率、安全教育完成”等观测证据后,罐区安全事故风险概率显著增加14.94%。但在整体运行良好的基础上,“日常检查、员工教育”良好,因此风险趋势随时间减小,相对稳定。当“天气、设备状况、日常安全教育懈怠”等变化因素的节点出现问题时,多个风险事件同时发生,风险概率显著上升至 $2.12 \times 10^{-4}$ 。另一方面,当第一

次日常检查的频率太低,通过人工干预作用,下次的日常检查的频率必会上升。相反,当一段时间的日常检查趋于稳定时,就会出现工人懈怠,检查频率降低的情况。因此,结果与实际情况相符,标志着该DBN风险评价模型具有一定的合理性和适用性。

### 2.4 预防措施分析

利用贝叶斯网络中的灵敏度分析函数,将火灾事故设置为目标节点,从各节点的灵敏度值分布可以看出,导致火灾事故发生的主要因素为及时控制、预警装置、工人离岗。次要因素主要有设备状态、日常检查、设备是否齐全、天气。因此,与大多数企业关注的“安全教育和日常检查”等因素相比,应急响应方案在及时的事后控制措施、预警设备、人员下班检查等方面应该更加警惕。因此,为减少罐区安全事故的发生,具体预防措施应包括:①加强罐区监测预警,完善监督检查人员配置;②提高设备投资成本,增加防护装置;③投入专职管理人员,加大教育力度。

### 3 结论

①本文提出了一种原油储罐安全风险评估方法,建立了基于贝叶斯网络模型的动态风险评价模型,对储罐区域的安全风险进行了系统的动态预测和定性分析;②通过计算结果发现,风险值的变化受多种因素的影响而呈波动变化。在生产中,应注意罐体运行过程中多因素的耦合影响关系;③通过实际生产案例经验和DBN模型中的数据分析功能,分析风险波动的原因。本文案例场景的主要风险因素是事故的及时控制、预警设备的准备和下班人员的管理,同时提出了针对性的安全防范措施。

#### 参考文献:

- [1] 刘性庄. 10000m<sup>3</sup>原油储罐塌陷事故的原因分析[J]. 油气储运, 1997(3):43-45+61-6.
- [2] 胡永, 邢智, 袁胜强. 常压储罐罐体变形原因分析及防范措施[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(2):77-79.
- [3] 邹碧海, 张宝生. 大型油气(危化品)储罐区安全监控预警系统设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(8):193-197.

#### 作者简介:

程万洲(1983—),男,汉族,河北沧州人,硕士,高级工程师,主要从事智慧管道建设、管道和站场完整性管理、风险评价相关的科研与管理工。

#### 通讯作者:

吴泽琳(1996—),女,汉族,河南郑州人,硕士,主要从事安全风险评价技术研究。