

油气储运火灾事故应急过程情景推演与情景对策评估分析

马宏伟（山东港源管道物流有限公司，山东 烟台 264000）

摘 要：现今，随着石油化工行业的不断发展，对于油库储运安全也提出了较高的要求。因为油库范围较大，涉及面广，再加上储存和运输的介质具有一定的易燃易爆性，所以稍有不慎就会引发较大的安全事故。并且一旦发生事故，应立即采取有效的应对措施加以正确处置，这样才能最大化减少事故蔓延，降低事故危害以及环境污染程度。本文根据油气储运火灾事故的特征以及演变过程，通过实际案例，采取基于“情景-应对”的动态贝叶斯网络，来对油气储运火灾事故应急过程的情景演化路径予以着重分析，并提出相应的应急对策评估模型，以提升油库火灾事故发生后的应急处置能力提供可靠的参考依据。

关键词：油气储运；应急过程情景推演；情景对策评估；研究探讨

近年来，据相关数据统计，火灾和爆炸事故在油气储运过程中时有发生，所导致的人员伤亡人数约占总人数 9% 和 26% 左右。因此，提高油气储运安全刻不容缓，相关企业必须结合火灾爆炸事故的特征及演变过程，提前做好相应的防御和控制措施。特别是在事故发生后，应立即开展相应的应急处置工作，以快速消除和减少事故的扩展和造成的危害。但若是在应急处置过程中，所采用的方法和措施不得当，势必会导致二次事故的发生，进而给人们的生命财产安全以及周围环境造成严重后果。

1 油气储运火灾事故特征及演变过程分析

1.1 特征

①难以预测性。油气储运火灾事故在发生之前，往往没有任何预兆，基本是突然发生。这就使得相关企业及工作人员很难对其发展趋势以及发展过程中可能出现的复杂场景等予以准确分析；②快速蔓延性。油气储运火灾事故具有较强的快速蔓延性，由于其事故诱发原因较多，所以一旦发生，会在短时间内迅速爆发升级，从而导致多种事故连锁反应的发生；③危害大且不可控。油气储运火灾事故在初期发生阶段，往往与一般事故相同，仅仅是简单的零部件损坏，但由于其涉及范围广，且突发性以及蔓延性较强，所以一旦发生，周围环境及人员很难及时得到有效保护，进而造成严重的后果；④处置难度明显。目前，尽管大部分油库都会针对容易出现的油气储运火灾事故展开了相应的预防和控制措施。但由于事故突发性和不可控性较强，再加上产生的事故情景复杂，危害辐射范围较广，所以一旦发生，很难在短期内对其进行有效控制和处理。

1.2 演变过程

①初始阶段。该事故演变阶段属于初次事故与二次事故发生的过渡阶段。一般持续时间较短，基本处在几分钟范围之内。另外，该阶段的事故面积小、火焰温度低、发展不剧烈，很容易发现其二次事故的前兆。因此，若在该阶段及时采取有效措施加以处置和预防，势必会控制后续事故的发展和蔓延；②猛烈阶段。该阶段的油气储运火灾事故特征不仅火焰温度高、颜色深、发展剧烈。而且火灾面积扩散迅速，会产生大量的热辐射及二次事故。因此这一阶段的火灾事故控制难度和处置难度也会大大增加；③稳定持续阶段。这一阶段的油气储运火灾事故特征，不仅火焰温度高、燃烧速度明显，基本达到最大值，而且还会向周围释放大量的热辐射。虽然该阶段的火灾事故已得到了很大程度的缓解，但由于火灾稳定持续时间较长，所以其产生的大量热辐射很难在短时间内得到有效处理；④衰减熄灭阶段。这一阶段的油气储运火灾情况基本得到了很好地控制，不仅油品已经燃烧殆尽，而且火焰温度、燃烧速度和热辐射等都开始逐步下降，因此，这一阶段的事故处置难度也是相对较小。

2 油气储运火灾事故应急过程情景演化路径分析

2.1 实例分析

某市高新区罐区的一条输油管道突然爆炸起火，由于罐区阀门、电力系统和输油泵房被炸坏而无法正常使用，所以使得大量原油泄漏流入火区，并在地面性成大面积的流淌火。相关企业在发现火灾隐患后，第一时间采取了相应的措施进行控制和处置，并邀请行业专家针对本次事故的基本情景以及相应的情景处置措施的有效性，是否演变成预期情景的可行性等予以深入的分析评估打分。同时还利用动态贝叶斯网络根据专家打分结果构建火灾事故情景推演模型，以

便根据事故情景演变路径，提出更为完善可行的情景优化对策，以便因事故处置方法不得当，从而引发二次事故和次生事故的发生。

2.2 演化路径

该罐区火灾事故动态贝叶斯网络情景推演模型在构建过程中，其情景推演节点概率计算的准确性，常常会受到专业打分的主观判断及工作经验等因素所影响。为了避免这种情况的发生，就要引入 DS(Dempster-Shafer) 融合理论，并通过对各个专家经验数据的合成处理，来减小因专家的主观判断造成的误差，提高情景状态概率值的准确度。在具体执行时，假设该罐区火灾事故动态贝叶斯网络中，某 -- 变量节点为 A、B 两种独立节点，且有多名专家根据事故情景及其处置措施的效果进行打分，就可按照公式（1）：

$$m_{DS}(A)=\left\{\begin{matrix} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j) \\ 1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j) \end{matrix}, A \neq \phi \right\} \quad (式1)$$

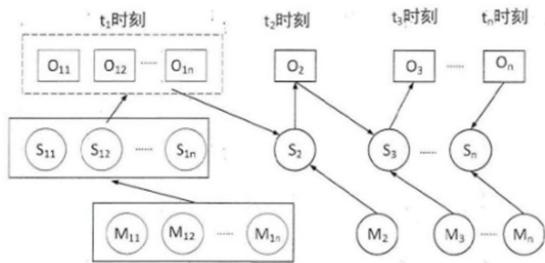


图 1 动态贝叶斯网络的罐区火灾事故情景演化路径

所示的 DS 理论多证据合成规则求出 A、B 两种节点状态下的事故情景推演状态概率值。这样才能在此基础上构建出基于动态贝斯网络的罐区火灾事故情景演化路径，如图 1 所示。

另外，还要依据图 1 的事故演化路径，通过动态贝叶斯网络的联合概率公式（2）：

$$P(S_1, S_2, \dots, S_n) = P(S_1)P(S_2 / S_1)P(S_3 / S_2 / S_1) \dots P(S_n / S_1, S_2, \dots, S_{n-1}) = \prod_{i=1}^n P(S_i / \prod_{j=1}^{i-1} S_j) \quad (式2)$$

推算出随时间推进下火灾事故各情景节点演化情况，如表 1 所示。

在表 1 中，Sa 表示中间过渡情景、S4' 表示事故推进中所产生的新的管道爆炸情景、其余 S4、S5、S6 等则表示一次事故后由于处置措施不及时或不合理而导致的二次事故或次生事故情景。基于此，假定初始事故已经发生，设初始情景概率为 1，从 S4 开始，根据各专家打分各变量，综合公式（1）和（2），再按照公式（3）：

$$S4=1 \quad (式3)$$

对罐区火灾事故各个情景节点的状态概率进行推算，推算结果如表 2 所示。

表 2 罐区火灾事故各个情景节点的状态概率推算结果

情景代码	情景出现次数	情景发生条件次数	条件概率
S5	67	80	0.837
S14	85	90	0.922
S16	6	7	0.857
S4	93	116	0.802
S6	20	95	0.210
S15	75	86	0.872
S17	55	70	0.786

表 1 火灾事故各情景节点演化情况

代码	情景状态 S	处置目标 O	处置措施 M
S4	2 号管线爆炸起火	关闭管线阀门	关闭管线主阀门 M4
Sa	火势稳定	成功扑灭火 1	持续灭火 Ma
S6	已经扑灭的油品再次燃烧	成功扑灭火 2	给泄漏油品冷却降温 M6
S14	爆炸起火管线的油品泄漏	泄漏油品并未引燃	隔离泄漏油品和火源 M14
S16	泄漏油品对周围海域造成污染	及时处理泄漏油品	清理回收 M16
S15	泄漏油品被引燃形成地面流淌火	有效隔离流淌火	沙土填埋、泡沫覆盖 M15
S5	泄漏油品燃烧形成高温蒸汽云	降低蒸汽云温度	持续冷却降温 M5
S4'	高温蒸汽云产生的热辐射导致临近原油管线被引燃	邻近原油管线燃烧情况得到控制	关阀断源，持续灭火 M4
S17	泄漏油品和地面流淌火导致邻近储油罐及其他储运设施燃烧	火灾成功扑灭	持续灭火 M17

从表2可以得知,罐区火灾事故演化路径中可能出现的情景分别为S6、S14、S15、S16、S17。与设定阈值0.8相比,S6的事故条件概率和专家打分概率都要相对偏小,所以其不是事故的关键情景节点;而S5、S14和S16的事故条件概率和专家打分概率却相对大于阈值,按照悲观主义决策准则比较,S15和S17中,有一项事故条件概率和专家打分概率要≤阈值,若按0.2:0.8进行加权计算,最终事故关键情景节点状态概率应如表3所示。

表3 罐区火灾事故关键情景节点状态概率推算结果

关键情景节点代码	情景概率
S4	1
S5	0.8375
S14	0.887
S15	0.803
S16	0.8267
S17	0.8068
S4	0.802

依据上述事故情景状态概率推算结果,还要利用GeNIe计算软件对各节点变量概率予以计算分析。最终结果可以得知,在罐区火灾事故中,S1、S16、S15、S17、S5和S4都是发生概率较高的情景。具体而言,即该罐区2号输油管线发生爆炸,其所泄漏的油品不仅导致地面流淌火的产生,并诱发邻近储油罐燃烧,从而产生高温蒸汽云。而且外溢油品造成了环境污染及较大的热辐射。鉴于此,为了有效防止事故发展产生更严重的后果,应立即采取有效的危机隔离措施,这样才能最大程度控制火灾事故蔓延,降低事件损失,从而为后续决策与管理争取宝贵的时间。

3 基于熵权法-TOPSIS模型的油气储运火灾事故应急对策评估分析

油气储运火灾事故具有明显的复杂性和难以预测性,且各个情景之间有着十分紧密的联系,若仅凭决策者的主观判断与分析,很难制定出科学有效、合理完善的应急处理措施。必须依据应急决策、模糊以及运筹学等理论知识,运用模糊综合评价、层次分析与风险理论分析等方法的验证才能确保所制定的应急对策的可行性。根据该罐区火灾事故情景演化路径以及关键情景节点状态概率等可以得知,虽然相关企业针对性地制定多种应急处置措施,但不同措施产生的事故结果和发展状态也会不尽相同,因此,要想择优录取,选择出最佳的处置对策,应采取熵权法-TOPSIS针对制定的油气储运火灾事故应急决策予以全面科学的评估分析。

假设该罐区火灾事故应急过程情景处置措施为 m 个,与之相对应的应急对策属性集就为 X ,根据各情景节点状态概率以及专家应急响应综合评价指标来构建相应的矩阵决策评估模型。在这一过程中,专家相应的综合评价指标可根据公式(4):

$$y_{ij}^{(k)} = \frac{x_{ij}^{(k)} - \min\{x_{ij}^{(k)}\}}{\max\{x_{ij}^{(k)}\}}, 1 \leq i \leq m \quad (\text{式4})$$

和公式(5):

$$y_{ij}^{(k)} = \frac{\max\{x_{ij}^{(k)}\}}{x_{ij}^{(k)}}, 1 \leq i \leq m \quad (\text{式5})$$

分为正向和负向两种指标形式。然后再通过对评价指标的归一化处理,得到归一化后的矩阵:

$P = [P_{ij}]_{m \times n}$ 。同时还要在此基础上建立加权标准化矩阵 V 和矩阵 X 、矩阵 Y 。这样根据所建立的矩阵模型就可对罐区火灾事故应急对策予以全面有效地分析,从而为决策者更好地应对突发油气储运火灾事故提供可靠的参考依据。

4 结束语

综上所述,油气储运过程中,很容易受到各种因素所影响而出现预测难、突发性和发展迅速不易控制的火灾事故。由于这类火灾事故的涉及范围较广,所产生的后果严重,所以,要想在事故发生后,能够第一时间制定出科学合理的应对处置措施,避免对周围环境造成更大的二次事故或次生事故。相关企业或部门就要采取科学的情景推算方法对可能出现的情景及其发生概率等予以准确的分析,并在此基础上通过模型构建的方式对制定的应急处理措施的可行性展开全面分析,这样才能为减少罐区损失及危害程度提供可靠的参考依据。

参考文献:

- [1] 马思铭. 油气储运火灾事故应急过程情景推演与情景对策评估[J]. 大连海事大学, 2020(05):107-109.
- [2] 袁长峰, 童雅婷, 孟莎莎, 等. 基于案例和随机网络的油储系统火灾情景推演[J]. 天然气与石油, 2023(03):139-151.
- [3] 黄辉, 唐倩, 蔡喜洋, 等. 基于贝叶斯网络的化工企业火灾爆炸事故情景推演[J]. 安全, 2023(08):23-30.
- [4] 张玉龙. 油气储运火灾事故应急过程致因因素评估及预防[J]. 大连海事大学, 2022(04):25-28.

作者简介:

马宏伟(1982-),男,汉族,山东台儿庄人,大学本科,山东港源管道物流有限公司副总经理,技术员,研究方向:化工工程。