

基于案例和随机网络的油储系统火灾情景推演

袁长峰 童雅婷 孟莎莎 王佳荟

大连海事大学航运经济与管理学院, 辽宁 大连 116026

摘 要:油储系统火灾事故的发展蔓延将导致灾害更为严重的二次或次生事故,为较准确掌握事故可能的发展过程和变化趋势,根据情景分析思想,提出了基于案例和随机网络的油储系统火灾情景推演方法,构建了情景推演随机网络模型。通过对国内外 173 例石油储罐典型火灾爆炸事故案例的统计分析,总结出油储系统火灾事故应急过程中 20 种主要情景,构建了油储系统火灾事故情景演化路径图,并运用随机网络方法将其转化为油储系统火灾事故情景演化随机网络,通过随机网络解析算法,求得了情景演化路径的可能发生概率、平均发生时间、发生时间方差等特征值。在情景可能发生概率求解中,提出了综合考虑由案例统计得到的情景条件概率和 Dempster-Shafer (DS) 证据理论修正的专家评分得到的情景经验概率相结合的情景发生概率求解规则。以大连“7·16”油库火灾爆炸事故为例,通过与实际事故发展演化过程的对比分析,验证了所提方法和模型的有效性。基于案例和随机网络的油储系统火灾情景推演方法和推演随机网络模型,较好地解决了事故发展演化过程的定性和定量描述问题,为油储系统火灾事故情景演化态势的判断从概率统计意义上提供了新的量化分析手段。

关键词:油储系统;火灾事故;情景推演;随机网络

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2023.03.020

Scenario evolution of oil storage system fire based on real cases and GERT network

YUAN Changfeng, TONG Yating, MENG Shasha, WANG Jiahui

School of Maritime Economics and Management, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning, 116026, China

Abstract: The development and spread of fire incidents for oil storage system will lead to more serious secondary incidents. In order to grasp the possible development process and changing trend of the incident more accurately, based on the scenario analysis approach, this paper proposes a scenario evolution method of oil storage system fire based on historical cases and GERT (Graphical Evaluation and Review Technique) network, and develops a scenario evolution GERT network model. Through the statistical analysis of 173 historical cases of fire and explosion incidents in oil storage tank at home and abroad in nearly 50 years, twenty main scenarios in the emergency processes for fire incidents in oil storage system are summarized, and the possible scenario evolution paths of fire incident for oil storage system are developed and transformed into GERM network of scenario evolution. The probability of occurrence, average occurrence time, variance of occurrence time and other characteristics of possible paths of scenario evolution are obtained by analysis

收稿日期:2023-01-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目“油储系统火灾事故应急过程本质安全的风险源分析方法研究”(51404052);辽宁省教育厅科学研究经费项目(面上项目)“油气储运火灾事故应急过程风险评估及主动防控研究”(LJKZ0049);教育部产学研合作协同育人项目“新工科背景下适应航运发展新需求的‘决策支持系统’课程教学改革”(202102159012)

作者简介:袁长峰(1975-),女,山西阳泉人,教授,博士,主要从事事储运安全、应急管理、决策支持等方面的研究工作。E-mail: ycf1028@dlmu.edu.cn

algorithm of GERT network. Among them, the solving rule of scenario occurrence probability is put forward, which combines the scenario conditional probability obtained by case statistics with the scenario experience probability obtained by expert score modified by DS (Dempster-Shafer) evidence theory. Taking the "7·16" Dalian Oil Depot fire and explosion incident as an example, the effectiveness of the proposed method and model is verified by comparing the development and evolution process with actual event. The scenario evolution method and model of oil storage system fire based on historical cases and GERT network can better solve the problem of qualitative and quantitative description of the development and evolution process of the incident, which provides a new quantitative analysis method for judging the scenario evolution of fire incident in oil storage system from the perspective of probability statistics.

Keywords: Oil storage system; Fire incident; Scenario evolution; GERT network

0 前言

油储系统火灾事故是危害社会公共安全的重大突发事件,损失多、影响大,社会影响恶劣。事故的发生、发展速度快,演化扩展过程会出现许多不可预知的情景状态,情景间的相互作用又会导致新的情景出现,使得事故的发展具有不确定性和随机性。为有效提高事故的应对和应急处置能力,辅助决策者对事故发展趋势做出更正确合理的判断,应尽可能地获知事故演化过程中可能出现的情景状态,掌握情景可能的发展演化路径,以及各演化路径的可能发生概率和造成的事故后果。油储火灾事故属于典型的非常规突发事件,事故的发展过程会出现一系列不同的情景,从情景角度进行分析和推演更符合事故发展过程,而情景分析和推演方法也是非常规突发事件普遍采用的研究方法。目前常用的情景推演方法主要有以下几种。

1) 基于系统动力学理论建立情景演化模型。李勇建等人^[1]以汶川地震衍生的堰塞湖事件为例,建立了该事件的系统动力学情景演化模型,并进行了模拟仿真;王德鲁等人^[2]从企业应急行为和公众行为反应角度,建立了企业突发事件演化系统动力学模型并仿真。

2) 基于贝叶斯网络或动态贝叶斯网络的情景推演方法。屈静等人^[3]采用动态贝叶斯网络构建了输油管道泄漏事故情景推演模型,研究输油管道泄漏事故情景演化的特征与路径;巩前胜^[4]、夏登友等人^[5]运用动态贝叶斯网络构建了非常规突发灾害事故情景推演模型;张江石等人^[6]以天津港“8·12”事故为例,基于外部环境、事件情景、应急处置3类情景要素分析危险化学品事故的情景演变路径,采用动态贝叶斯网络构建情景推演模型;Xin Peiwei 等人^[7]为实现灾害的实时识别,建立了灾害情景的贝叶斯网络映射模型;Wu Jiansong 等人^[8]运用贝叶斯网络方法建立了矿井突水灾害事故的情景演化模型。

3) 基于随机网络的情景推演方法。杨保华^[9]建立了非常规突发事件情景推演的随机网络模型,并搭建了

基于随机网络的地震生命工程情境推演平台系统;方志耕等人^[10]把随机网络方法和贝叶斯推理工具相结合,建立了灾害演化的随机网络模型;周愉峰等人^[11]运用情景分析方法,构建了基于情景推演的地震灾害演化的动态随机网络模型。

在这些情景推演方法中,基于系统动力学理论建立情景演化模型更关注事件的发展演化结果和可能导致的危险状态,较少给出事故发展可能的情景演化路径的概率预测;基于贝叶斯或动态贝叶斯网络的情景推演方法能较好地描述事故发展的情景演化过程,着重于情景节点的发生概率求解,而非情景演化路径的概率预测;基于随机网络的情景推演方法能够较好地建立事故发展的情景演化网络,但在求解每条路径从初始情景至某个消失情景的路径概率时,仍主要依赖于专家的主观经验,影响了路径概率的准确性。虽然在路径概率的求解过程中,有些也结合了贝叶斯网络推演方法,但贝叶斯网络主要是对情景节点发生概率的计算,在相邻前后情景组成的情景演化路径上,后情景节点的前提情景节点只有1个时,用贝叶斯网络计算出的后情景节点的发生概率可以认为是该路径的发生概率,但如果后情景节点的前提情景节点不止1个时,由贝叶斯网络计算出的概率是该后情景节点的发生概率,不能简单认为是该路径的发生概率。

因此,考虑油储系统火灾事故发展演化的动态性、随机性的特征,本文提出了基于案例和随机网络的油储系统火灾情景推演方法。即通过对已发生事故案例的统计分析,总结出油储系统火灾事故发生后主要的情景以及可能的情景演化路径,运用随机网络方法建立事故的情景演化模型,采用随机网络方法和本文提出的情景发生概率求解方法(在求解相邻前后情景组成的演化路径时,将实际事故案例统计与专家经验相融合,由实际案例数据计算结果求得的条件概率与专家给出的经验概率进行比较,通过设定一定的阈值,确定出不同情况下二者的比较运算结果,由此确定出相邻情景节点组成的演化路径概率,减少专家的单纯主观经验对计算结果的影响,进一步提高计算结果的较准确性),对各情

景以及情景演化路径的发生概率进行预测计算,从概率统计意义上,为事故发展演化趋势的预判提供大概率可能的评估方法。目前,将实际的事故案例统计分析 with 随机网络方法相结合,构建油储系统火灾事故情景推演模型及评估演化路径发生概率的方法,还未见公开报道。

1 油储系统火灾应急过程主要情景分析

当油储系统火灾事故发生后,随着时间的推进,事故会发展和演变为多种可能的情景,例如当油库区输油管线起火后,在应急处置过程中可能会相继出现:大量原油泄漏→油品流入火灾区,形成大面积地面流淌火→油罐损坏,罐体坍塌或炸裂→高温残片飞溅,破坏周围的油储设施→相邻储罐爆炸起火。事故发展和演化的可能途径就是几个或多个情景随时间发展的组合。决策者在应急处置过程中,要对事故可能的发展态势做出正确的评估,就要获知事故发生后可能的情景演化路

径,而要获知可能的情景演化路径,就必须找到组成演化路径上这些可能的情景。为此,本文通过收集整理相关资料和公开报道,统计了国内外 173 例石油储罐典型火灾爆炸事故^[12-16]。所统计的典型火灾爆炸事故是指:具有代表性的较大火灾爆炸事故,这些事故对企业或社会造成了影响严重,并产生了较大财产损失或人员伤亡。主要统计了 6 种火灾模式的石油储罐火灾爆炸事故,即先爆炸后燃烧、先燃烧后爆炸、局部稳定燃烧、爆炸后不燃烧、沸溢性燃烧、单罐着火后蔓延为多罐燃烧爆炸。统计的事故案例中对储罐类型、起火原因、油品种类等均没有固定标准。通过统计分析发现,这些事故中有 128 例(包括国内 77 例,国外 51 例)是初次事故发生后在应急处置过程中又引发了二次事故。通过对 128 例事故的分析汇总,总结出应急处置过程中频繁出现的 20 种事故主要情景和出现频数^[15],见表 1。

表 1 128 例油储系统火灾事故应急过程主要情景和发生次数统计表

Tab. 1 Statistical table of main scenarios and occurrences in emergency processes of 128 fire incidents for oil storage system

情景	频数 / 次	情景	频数 / 次	情景	频数 / 次
罐内油品燃烧,沸溢飞溅,高温残片飞溅 S_1	100	冲击波对其他油储设施造成破坏,导致更大面积泄漏 S_8	13	油品复燃复爆 S_{15}	20
油品燃烧,高温残片飞溅,引燃周围树木等易燃物 S_2	30	储罐或者输油管线剧烈燃烧,产生热辐射 S_9	97	油储设施爆炸对供电供水系统造成破坏 S_{16}	15
高温残片飞溅,破坏或引燃周围其他油储设施 S_3	23	热辐射引燃了其他油储设施 S_{10}	36	油品从管线或法兰等部位泄漏、喷出,四处流淌 S_{17}	97
油罐或者输油管线产生爆炸 S_4	99	输油管线破损、变形 S_{11}	49	油品外溢,产生流淌火 S_{18}	85
冲击波破坏了供电供水设施 S_5	8	油罐损坏,罐体坍塌或炸裂,焊接处破裂 S_{12}	83	流淌火引燃其他油储设施 S_{19}	59
冲击波破坏了建筑物 S_6	12	产生高温蒸汽云 S_{13}	68	外溢油品对环境造成污染 S_{20}	5
冲击波破坏了消防设施 S_7	14	蒸汽云遇热,静电火花燃烧爆炸 S_{14}	18		

2 油储系统火灾情景演化分析

2.1 油储系统火灾情景演化路径分析

油储系统火灾事故发生后,依照事故发展演化规律、外界环境、人为应急处置措施等的干扰程度,会呈现出初始情景发生、情景发展演化和情景消失的过程。采用夏登友等人^[17]提出的情景要素表达方法,建立油储系统火灾事故的情景演化过程,见图 1。图 1 中, $S_1 \sim S_n$ 为情景; $S_{消}$ 为情景消失; $T_1 \sim T_n$ 为处置目标; $M_1 \sim M_n$ 为处置措施;◎为情景的自身演变,即情景按照其自身发生发展机理的变化过程以及结果; t 为时间; t_0 为初始情景发生时刻; t_1 为情景发展演化中的某一时刻; t_n 为情景消失时刻。

油储系统火灾事故初次发生后,在 t_0 时刻将出现 1 个

或多个初始情景(如 S_1 、 S_n),此时,应急决策主体(如现场救援人员、应急决策者)会根据出现的情景制定相应的应急目标和处置措施,事故情景在自身演变的同时,向预期应急目标发展。到 t_1 时刻,由于之前采取的应急处置措施效果的差异,会出现新的不同情景和情景演化路径,例如情景状态 S_1 ,对其采取处置措施 M_1 ,若 M_1 有效, S_1 向预期处置目标 T_1 发展,情景状态由 S_1 演变到 S_2 ,若 M_1 无效, S_1 可能演变到 S_3 ;同样,对情景状态 S_2 设定处置目标 T_2 ,采取处置措施 M_2 ,若 M_2 有效,则 S_2 达到预期处置目标 T_2 ,并在 t_n 时刻情景消失,事故结束,即形成 $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_{消}$ 的情景演化路径;但若 M_2 无效, S_2 则可能演变到 S_4 ,对 S_4 再设定预期处置目标 T_4 ,并采取处置措施 M_4 ,伴随着 M_4 有效与否继续演变,直至 t_n 时刻情景消失,在这一过程中,则可能的情景演化路径为: $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_4 \rightarrow S_{消}$ 。由此可见,油储系统火灾事故发生后,随着事故

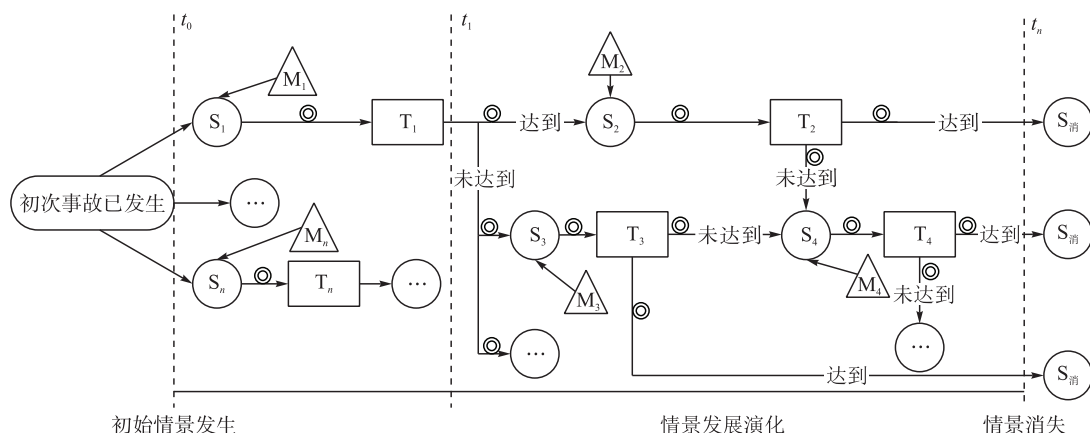


图1 油储系统火灾情景演化过程示意图

Fig. 1 Diagram of scenario evolution process in oil storage system fire

的发展和应急措施的介入,可能会出现一系列情景状态以及多条情景演化路径,不同的情景演化路径可能会产生不同的事故后果。因此,构建出油储系统火灾事故可能的情景演化路径,并获知各路径可能发生概率,对决策者较准确判断事故发展态势和提出有效应急处置措施,减少二次或次生事故损失具有重要意义。

2.2 油储系统火灾情景演化路径图的构建

基于图1的油储系统火灾情景演化流程,根据表1

统计的油储系统火灾事故应急过程主要情景,构建了油储系统火灾情景演化的可能路径图,见图2。图2中, $S_{4'}$ 为随着事故发展新生成的输油管道爆炸情景; S_a 为直接引发了二次或次生事故(如大面积的林木火灾或易燃物的爆炸事故);横向箭头为灾害事故情景朝着最乐观的方向演变,如 $S_{17} \rightarrow S_{20} \rightarrow S_{21}$;纵向箭头为灾害事故情景朝着最悲观的方向演变,如 $S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_{11} \rightarrow S_{17} \rightarrow S_{18} \rightarrow S_{19} \rightarrow S_{16}$;处置目标T和处置措施M具体含义见表2。

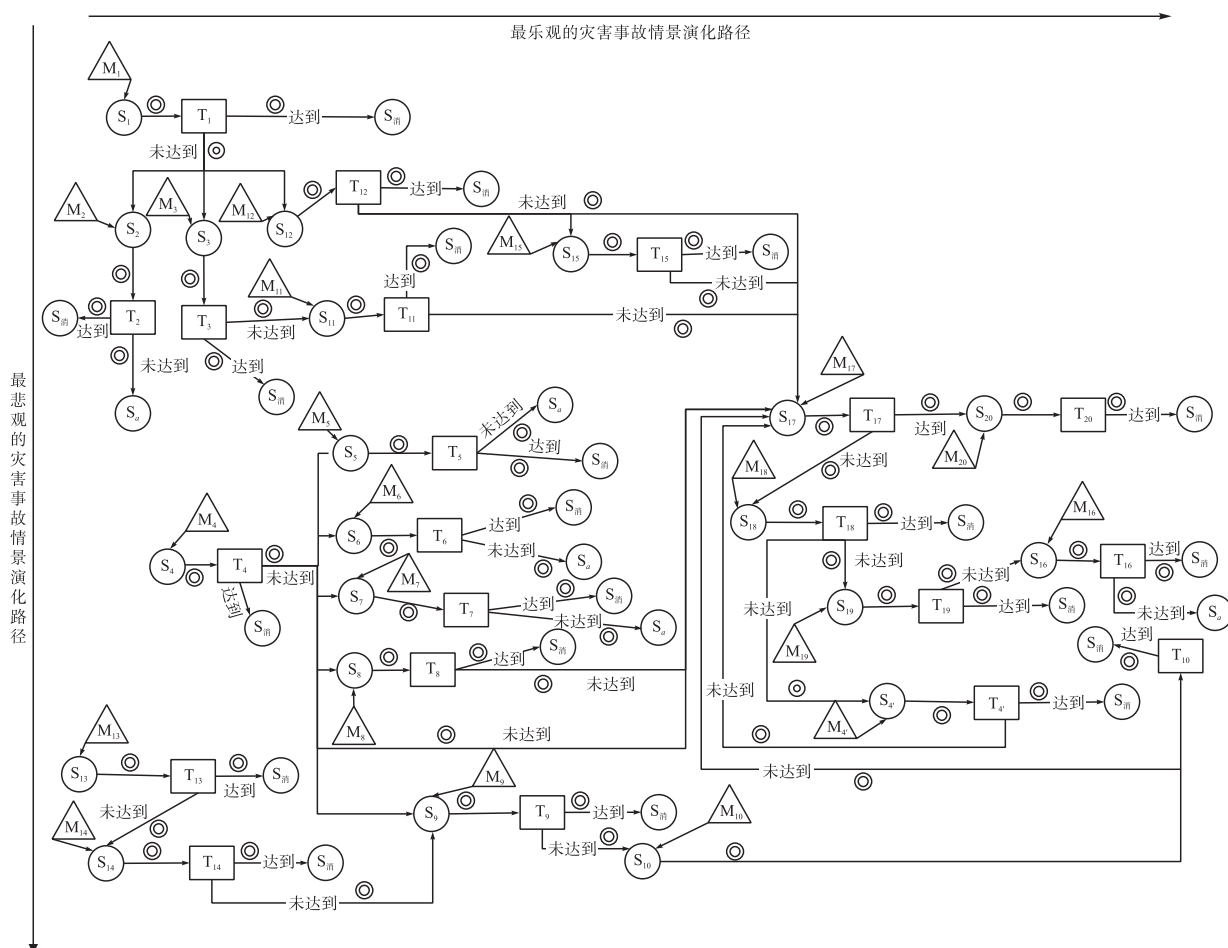


图2 油储系统火灾情景演化路径图

Fig. 2 Scenario evolution path diagram of oil storage system fire

表 2 处置目标 T 和处置措施 M 的含义表

Tab. 2 The meanings of T and M values

情景状态	处置目标	处置措施
S_1	冷却油罐,防止油品沸溢飞溅 T_1	用泡沫炮、泡沫枪消灭储罐内火灾 M_1
S_2	堵截火势向周围易燃物蔓延 T_2	用泡沫炮、泡沫枪堵截飞溅出的油品及残片 M_2
S_3	堵截火势,降热辐射 T_3	利用泡沫炮、泡沫枪堵截高温残片,利用水炮、水枪冷却周围油储设施 M_3
S_4	制止油品泄漏 T_4	关闭阀门,用水炮、水枪冷却着火储罐 M_4
S_5	保障水源电源供应 T_5	寻找备用水源电源 M_5
S_6	防止因建筑物损毁而造成损失和伤亡 T_6	判断建筑结构的安全程度及次生灾害发生的可能性并划定警戒区域 M_6
S_7	保障消防水平 T_7	增调消防设施 M_7
S_8	控制油品泄漏与流淌 T_8	用直流水枪堵截泄漏油品,并利用围油栏将油品控制在一定区域内 M_8
S_9	控制热辐射带来的次生灾害 T_9	用泡沫炮、泡沫枪灭火,用水炮、水枪为周围易燃物降温 M_9
S_{10}	堵截火势向其他油储设施蔓延 T_{10}	及时关闭或停止其他油储设施的油品供应,用水炮、水枪冷却其他油储设施 M_{10}
S_{11}	防止因管线破损而导致油品泄漏 T_{11}	关闭主阀门 M_{11}
S_{12}	防止因罐体损坏而导致油品泄漏 T_{12}	隔离该区域防止油品外溢 M_{12}
S_{13}	防止因高温蒸汽云引发的次生灾害 T_{13}	用水炮、水枪为储罐以及易燃物降温 M_{13}
S_{14}	减小火势 T_{14}	用泡沫炮、泡沫枪对着火区域进行灭火 M_{14}
S_{15}	扑灭复燃火 T_{15}	用泡沫枪、泡沫炮进行灭火,用水炮、水枪冷却着火储罐 M_{15}
S_{16}	保障水源电源供应 T_{16}	及时找到或调用备用水源电源 M_{16}
S_{17}	制止油品泄漏与流淌 T_{17}	关闭阀门、切断原料供应,用水炮、水枪堵截油品 M_{17}
S_{18}	扑灭流淌火 T_{18}	用泡沫炮、泡沫枪堵截并消灭流淌火 M_{18}
S_{19}	扑灭流淌火并制止其他油储设施进一步着火 T_{19}	用泡沫炮、泡沫枪堵截消灭流淌火,用水炮、水枪为周围油储设施降温 M_{19}
S_{20}	隔离并收集泄漏油品 T_{20}	用围油栏将油品隔离在一定区域内,采用人工收集、加入清洗剂等措施处理泄漏油品 M_{20}

3 油储系统火灾情景演化随机网络模型

3.1 模型构建

通过对油储系统火灾情景演化路径的分析可知,初次事故发生后,情景状态会不断发生变化,事故会沿着不同的情景演化路径发展,情景间的转移具有一定的概率性,转移关系具有一定的概率分布特征,整个事故的发展过程就是情景间以一定概率和概率分布特征的情景转移过程,从而形成了不同的情景演化路径,以哪条路径演化具有一定的随机性。具有这种随机性和概率性特征的事件动态演化过程,正适合于采用随机网络方法模拟情景的演化过程。油储系统火灾情景演化随机网络基本构成见图 3。图 3 中,节点 S_i 、 S_j 为事故的主要情景,节点类型为“异或概率型”,用逻辑符号“ $\ltimes$ ”表示;箭头线为情景间的演化路径; W_{ij} 为节点间

的传递函数,指情景间的传递演化具有一定的概率关系。

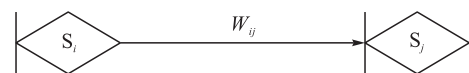


图 3 油储系统火灾情景演化随机网络基本构成示意图

Fig. 3 Basic structure diagram of scenario evolution GERT network in oil storage system fire

基于随机网络的基本构成,可将油储系统火灾情景演化路径图转化为随机网络模型,见图 4。图 4 中节点间 W 为两情景节点间的传递函数,即两情景节点间演化传递的概率关系(如 $W_{1,2}$ 为 $S_1 \rightarrow S_2$ 演化传递的概率关系),这些函数值由两情景间的发生概率和矩母函数决定,具体求解将在 3.2 节详细说明。

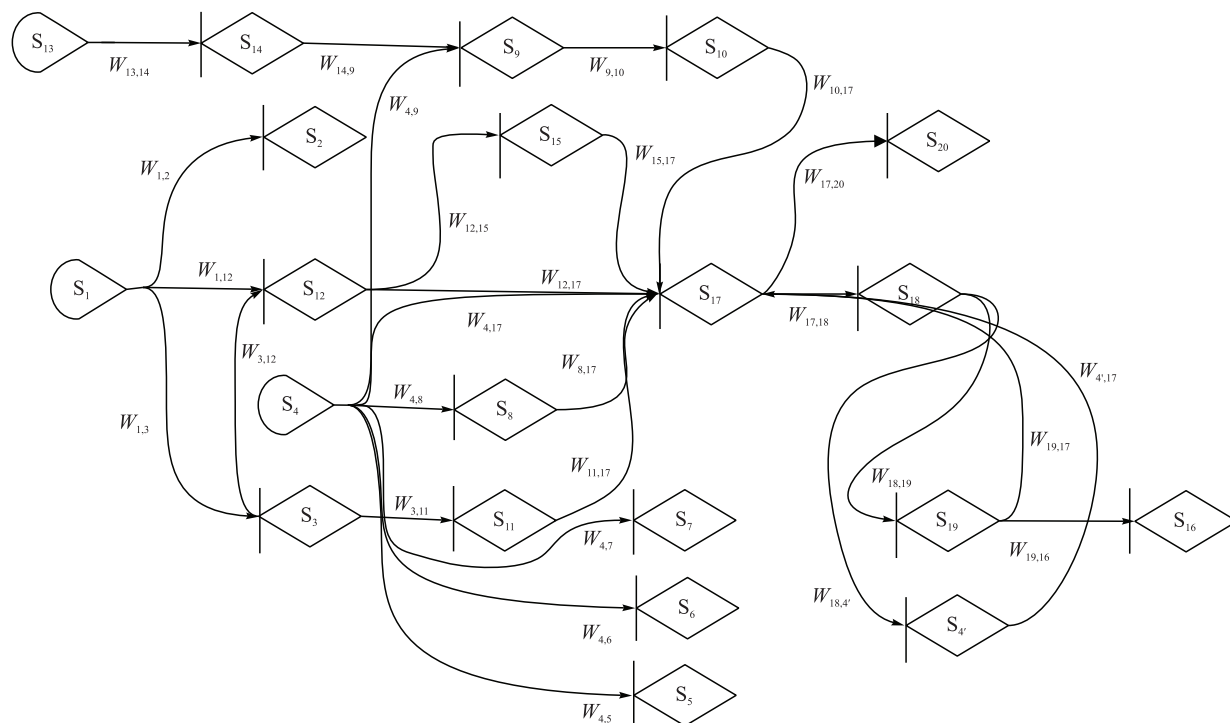


图4 油储系统火灾情景演化随机网络模型图

Fig. 4 GERT network diagram of scenario evolution in oil storage system fire

3.2 模型求解与应用

在建立起油储系统火灾情景演化随机网络模型后,需对模型进行求解,主要是对模型中传递函数以及各条情景演化路径发生概率的求解。根据随机网络的求解算法^[18],对任意实数 s ,前后情景 S_i 和 S_j 间(或称活动 $S_i \rightarrow S_j$)的传递函数 $W_{ij}(s) = P_{ij} \cdot M_{ij}(s)$ 。其中, P_{ij} 为情景节点(或活动 $S_i \rightarrow S_j$)的发生概率; $M_{ij}(s)$ 为情景节点(或活动 $S_i \rightarrow S_j$)的矩母函数。 P_{ij} 的求解算法将在3.2.1节提出; $M_{ij}(s)$ 的计算以及各条情景演化路径发生概率的计算将在3.2.2节详细说明。

3.2.1 活动 $S_i \rightarrow S_j$ 发生概率 P_{ij} 的求解

活动 $S_i \rightarrow S_j$ 发生概率 P_{ij} 是指前提情景 S_i 发生情况下,后续情景 S_j 又发生的概率,即为 $S_i \rightarrow S_j$ 路径的发生概率。对 P_{ij} 的求解,目前随机网络方法中,通常采用由专家的经验评分和借助贝叶斯网络方法求解的确定方法。单纯由专家打分具有一定的主观性;由贝叶斯网络方法求解是对发生概率的计算,当某情景的前提情景只有1个时,由贝叶斯网络方法推理求得后续的发生概率可以认为是 $S_i \rightarrow S_j$ 路径的发生概率;当前提情景不止1个时,由贝叶斯网络方法推理求得后续的发生概率不能认为是 $S_i \rightarrow S_j$ 路径的发生概率。因此,本文提出了基于事故案例统计数据 and 专家经验评分相结合的 P_{ij} 求解方法。具体为:首先根据油储系统火灾情景演化随机网络模

型,统计出具有路径关系相邻两情景在已有事故案例数据中分别出现的次数,然后计算出每一具有路径关系的相邻活动间的发生概率,本文称之为活动的条件概率。根据本文统计的128例发生了二次事故的油储系统典型火灾爆炸事故案例,统计出了图4中所有具有路径关系的相邻两情景(或活动)间的条件概率,见表3。

但由于事故案例数据统计的不全面性和某些事故数据的不完全公开性,仅以统计数据求得的条件概率作为活动间的发生概率有失准确性,为此,应结合专家对活动发生概率的经验评估分值综合确定出活动间的发生概率。为尽量降低专家打分的主观性,提高专家对活动发生概率的较准确评估,本文引入 Dempster-Shafer (DS) 证据理论,DS 证据理论适用于针对来自多源的不确定信息进行综合后给出结果的判定,如用于判断活动状态的发生概率,可综合多位专家给出的意见最终确定概率值^[19-20]。即假设随机网络中某一活动存在A、B两种独立状态, m 为每种状态的mass函数(基本概率分配函数),若有 i 名专家分别对活动的两种独立状态进行mass函数打分,可分别记为 $\{m_1(A_1), m_1(B_1)\}$, $\{m_2(A_2), m_2(B_2)\}$, ..., $\{m_i(A_i), m_i(B_i)\}$,根据DS证据理论多证据合成规则,随机网络中某一活动的可能发生情况 $X(X \in (A, B))$ 的融合 m 值(即 $m_{DS}(X)$)为:

表 3 128 例油储系统火灾爆炸事故应急过程各情景的条件概率表

Tab. 3 Conditional probability of each scenario in emergency processes for 128 typical fire and explosion incidents in oil storage system

情景状态	情景出现频数 /次	前提情景	前提情景出现频数 /次	条件概率
S ₁	100	—	128	0.781
S ₄	99	—	128	0.773
S ₁₃	68	—	128	0.531
S ₁₈	85	S ₁₇	97	0.876
S ₂₀	5	S ₁₇	97	0.052
S ₅	8	S ₄	99	0.081
S ₇	14	S ₄	99	0.141
S ₁₀	36	S ₉	97	0.371
S ₃	23	S ₁	100	0.230
S ₁₅	20	S ₁₂	83	0.241
S _{4'}	41	S ₁₈	85	0.482
S ₂	30	S ₁	100	0.300
S ₆	12	S ₄	99	0.121
S ₈	13	S ₄	99	0.131
S ₁₁	49	S ₁₃	68	0.721
S ₁₉	59	S ₁₈	85	0.694
S ₁₄	18	S ₁₃	68	0.265
S ₁₆	15	S ₁₉	59	0.254
S ₁₇	4	S ₁₅	20	0.200
S ₁₇	16	S ₁₉	59	0.271
S ₁₇	2	S ₁₁	49	0.041
S ₁₇	3	S ₁₀	36	0.083
S ₁₂	10	S ₃	23	0.435
S ₉	6	S ₁₄	18	0.333
S ₁₇	3	S ₁₂	83	0.036
S ₁₇	9	S _{4'}	41	0.220
S ₁₇	2	S ₈	13	0.154
S ₁₇	58	S ₄	99	0.586
S ₁₂	73	S ₁	100	0.730
S ₉	91	S ₄	99	0.919

$$m_{DS}(X=A)=\begin{cases} \frac{\sum_{A_1\cap A_2\cdots\cap A_n=X} m_1(A_1)m_2(A_2)\cdots m_n(A_n)}{\sum_{A_1\cap A_2\cdots\cap A_n\neq\phi} m_1(A_1)m_2(A_2)\cdots m_n(A_n)}, X\neq\phi \\ 0, X=\phi \end{cases} \quad (1)$$

$$m_{DS}(X=B)=\begin{cases} \frac{\sum_{B_1\cap B_2\cdots\cap B_n=X} m_1(B_1)m_2(B_2)\cdots m_n(B_n)}{\sum_{B_1\cap B_2\cdots\cap B_n\neq\phi} m_1(B_1)m_2(B_2)\cdots m_n(B_n)}, X\neq\phi \\ 0, X=\phi \end{cases} \quad (2)$$

本文构建的油储系统火灾情景演化随机网络模型中,以活动 S₁→S₂ 为例说明 DS 证据理论的计算过程。活动 S₁→S₂ 存在 True(T) 和 False(F) 两种状态,即 S₁ 发生时 S₂ 也发生了(记为 S₁→S₂=T 状态),S₁ 发生时 S₂ 未发生(记为 S₁→S₂=F 状态)。假设有 3 位专家分别根据事故的发展趋势及其应急措施、实施效果情况对活动 S₁→S₂ 两种独立状态进行概率打分(即 mass 函数打分),打分情况见表 4。运用 DS 证据理论,由式(1)~(2)最终求得的 m 值,本文称之为活动的经验概率值。

表4 3位专家对活动 $S_1 \rightarrow S_2$ 两种状态的 mass 函数打分表Tab.4 Mass function scores for two independent states of activity $S_1 \rightarrow S_2$ by three experts

状态	m_1	m_2	m_3	m_{DS}
$S_1 \rightarrow S_2 = T$	0.65	0.49	0.40	$m_{DS}(T) = 0.54$
$S_1 \rightarrow S_2 = F$	0.35	0.51	0.60	$m_{DS}(F) = 0.46$

根据式(1)~(2)可得:

$$\begin{aligned}
 m_{DS}((S_1 \rightarrow S_2) = T) &= \frac{m_1(T)m_2(T)m_3(T)}{m_1(T)m_2(T)m_3(T) + m_1(F)m_2(F)m_3(F)} \\
 &= \frac{0.095\ 55}{0.220\ 5} \approx 0.54
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 m_{DS}((S_1 \rightarrow S_2) = F) &= \frac{m_1(F)m_2(F)m_3(F)}{m_1(T)m_2(T)m_3(T) + m_1(F)m_2(F)m_3(F)} \\
 &= \frac{0.124\ 95}{0.220\ 5} \approx 0.46
 \end{aligned} \quad (4)$$

这样,对油储系统火灾情景演化随机网络模型中的任一相邻2个活动, $S_i \rightarrow S_j$ 路径的发生概率都会对应2个概率值,一是由案例统计得到的该活动条件概率值;二是由专家打分并运用DS证据理论求得的该活动经验概率值,根据相关文献和专家经验设定合适的阈值,确定出活动 $S_i \rightarrow S_j$ 的发生概率值 P_{ij} 。具体确定方法有以下几点。

1)若条件概率值与经验概率值均大于阈值,则按照悲观主义决策准则,取二者中较小者作为该活动发生概率值。

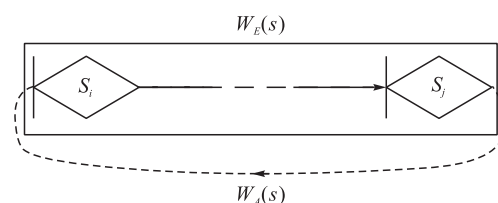
2)若条件概率值与经验概率值中有1个大于阈值,1个小于阈值,则需要加权计算。通过分析统计的128例事故案例发现,由事故案例统计得出的条件概率值与实际发生概率接近的比例约占60%,而经验概率值与实际发生概率接近的比例约占40%。因此,取实际事故案例统计得出的条件概率值占60%权重和经验概率值占40%权重进行加权计算。

3)若条件概率值与经验概率值均小于阈值,则按照乐观主义决策准则,取二者中较大者作为该活动发生概率值。

3.2.2 随机网络解析算法

由3.2.1节可求出任一相邻2个活动 $S_i \rightarrow S_j$ 的发生概率 P_{ij} ,相对应的矩母函数 M_{ij} 的求解为:根据矩母函数的定义^[21],对任意实数 s ,1个与随机变量 X 相关的矩母函数是实数 s 的函数 $M_X(s)$ 。当 X 为离散随机变量时,相关矩母函数 $M_X(s) = \sum_X e^{sX} P_X(X)$,其中, $P_X(X)$ 是随机变量 X 的概率分布函数;当 X 是连续随机变量时,相

关矩母函数 $M_X(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{sX} f_X(X) dX$,其中, $f_X(X)$ 是随机变量 X 的概率密度函数,例如,当随机变量 X 的 $f_X(X)$ 服从均值为 μ 、方差为 σ^2 的正态分布时,则对应的矩母函数为 $M_X(s) = e^{\mu s + \frac{(\sigma s)^2}{2}}$ 。因此,在随机网络中,相邻活动 $S_i \rightarrow S_j$ 间的矩母函数 $M_{ij}(s)$ 则依赖于活动的概率分布情况,可通过分析以往事故情景演化特征、参考相关文献和专家经验综合考虑给出。由图4可知,油储系统火灾情景演化随机网络模型由多个始节点出发,经过多条情景演化路径最终到达多个终节点的网络结构,在求得相邻情景间的发生概率和矩母函数后,最终需要求出各条情景演化路径的可能发生概率。为此,本文以图4任一通用性组成结构为例,运用随机网络解析法进行情景演化路径发生概率的求解。如图5为从 $S_i \rightarrow S_j$ 的闭合网络结构, $W_E(s)$ 为 $S_i \rightarrow S_j$ 的等价传递函数;为采用随机网络的闭合网络特征式求解方法,增加了由 $S_j \rightarrow S_i$ 的闭合曲线,用虚线表示; $W_A(s)$ 为 S_j 到 S_i 的等价传递函数。对等价传递函数 $W_E(s)$,若路径中活动间为串联结构,则 $W_E(s) = W_{ik}(s) \times W_{kl}(s) \times \dots \times W_{nj}(s)$,即等价传递函数为路径上各相邻活动间传递函数之乘积;若路径中活动间为并联结构,则 $W_E(s) = \sum_{n=1}^f W_{nij}(s)$, f 为路径上分支路径个数,即等价传递函数为路径上各分支路径的传递函数之和。

图5 $S_i \rightarrow S_j$ 的闭合网络结构图Fig.5 The closed network structure of $S_i \rightarrow S_j$

根据闭合网络的特征式等于0^[9],令 H 为具有 W 参数的闭合网络特征值, P_E 为由 $S_i \rightarrow S_j$ 的等价发生概率, $M_E(s)$ 为由 $S_i \rightarrow S_j$ 的等价矩母函数。有:

$$H = 1 - W_E(s) \cdot W_A(s) = 0 \quad (5)$$

可得: $W_A(s) = \frac{1}{W_E(s)}$, 或 $W_E(s) = \frac{1}{W_A(s)}$ 。又由 $W_E(s) = P_E \cdot M_E(s)$, 由矩母函数的特征可知,当 $s=0$ 时:

$$\begin{aligned} W_E(0) &= P_E \cdot M_E(0) \\ &= P_E \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{st} f(t) dt \Big|_{s=0} = P_E \end{aligned} \quad (6)$$

因此,等价发生概率 P_E 就是等价传递函数 $W_E(s)$ 在 $s=0$ 时的数值,即 $P_E = W_E(s) \Big|_{s=0}$,利用梅森公式求解出随机网络的等价传递函数 $W_E(s)$,则相应的等价矩母函数 $M_E(s)$ 即可求得:

$$M_E(s) = \frac{W_E(s)}{P_E} = \frac{W_E(s)}{W_E(0)} \quad (7)$$

依据矩母函数的数学性质,油储系统火灾事故情景演化随机网络的分布特征值,如平均周期、分布方差等可求得:

$$E[t] = \frac{\partial}{\partial s} [M_E(s)] \Big|_{s=0} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right] \Big|_{s=0} \quad (8)$$

$$E[t^2] = \frac{\partial^2}{\partial s^2} [M_E(s)] \Big|_{s=0} = \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right] \Big|_{s=0} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V[t] &= E[t^2] - (E[t])^2 \\ &= \left\{ \frac{\partial^2}{\partial s^2} \left[\frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right] \Big|_{s=0} \right\} - \left\{ \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{W_E(s)}{W_E(0)} \right] \Big|_{s=0} \right\}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

3.2.3 模型应用

油储系统火灾情景演化随机网络模型给出了灾害演化的动态过程,该模型通过对以往事故案例的统计分析,总结出油储系统火灾可能的情景演化路径,具有一定的普遍性,可应用该模型进行事故分析和灾害发展演化过程的评估。在模型应用时,应该注意以下问题。

1) 模型中各情景节点和演化路径是油储系统火灾事故发生后,随着时间的推移,较频繁出现的主要情景和可能的情景发展过程,在进行具体事故分析和情景推演预测时,由于应急过程可能采取的处置措施或处置目标的不同,模型情景节点和演化路径不一定都实现。

2) 模型情景节点间的逻辑关系并非都是顺序转移关系,网络结构中存在回路,说明某些情景可以重复出现。

3) 模型中的两个情景节点之间可能有1条以上支线,节点的输出端可能有多个路径分支,且支线上情景节点间的发生概率和时间分布参数可以取各种类型的概率分布。实际应用时,需结合以往事故案例的分析数据和综合专家知识,确定各情景间的发生概率和时间分布参数,然后再运用随机网络解析算法,得到灾害演化系统的各种参数和特性指标值。

4) 模型中始节点和终节点不是唯一的,模型是由多个始节点出发,经过多条情景演化路径最终到达多个终

节点的网络结构。每个由始节点、终节点和中间节点组成的路径结构表示一个具体的结果。应用该模型得到的情景推演结果,表示事故可能的演化发展路径和发生概率,概率值越大,表明事故沿该路径演化的趋势越大。推演结果只是事故发展态势的大概率吻合评估,并非精确的预测结果。

4 实证分析

4.1 事故案例的情景演化路径分析

为验证本文基于案例和随机网络的油储系统火灾情景推演方法和模型的有效性,以大连“7·16”油库火灾爆炸事故为例进行实证分析,该案例未包含在所统计的173例事故中。该事故着火油罐容积大、燃烧范围广、损失严重、社会影响重大,是典型的石油储罐火灾事故。根据事故调查公开报道,事故起因是由于操作不当,导致脱硫氧化剂在2号输油管线内聚集产生爆炸起火^[22],起火后又出现了一系列情景状态和情景演化过程,由于所收集资料的有限性,较难构建出整个事故完整的情景发展过程。本文以2号输油管线爆炸起火后,又相继引发了储罐爆炸导致二次事故发生这一主要发展蔓延过程为例,构建事故的情景演化过程。根据油储系统火灾情景演化随机网络模型可知,输油管线爆炸起火后,会出现油品泄漏情景,泄漏的原油又可能引发的情况:一是油品不断泄漏蔓延,流入附近海域造成环境污染,直至污染海域被清理,情景结束;二是管线外溢的油品遇外部环境点火源形成地面流淌火,随着火势继续蔓延,导致更多输油管线爆炸起火,或引燃周围储罐或其他油储设施,再分别导致更多的油品泄漏,直至大火扑灭,事故结束。由此可构建出大连“7·16”油库火灾爆炸事故情景演化的随机网络图,见图6。图6中 S_{end1} 和 S_{end2} 分别为以上两种情况各自演化的结束情景。

4.2 事故案例的情景演化随机网络求解

根据3.2节油储系统火灾情景演化随机网络模型求解方法,首先选取5名专家对图6各相邻情景间的发生概率给出估计值,并根据式(1)计算出各相邻情景的经验概率值;根据表3确定图6所涉及的活动条件概率值;根据相关文献和专家经验设定阈值为0.6^[3],按照3.2.1节中情景间发生概率的3种确定方法,比较各相邻情景的经验概率值和条件概率值,最终确定各相邻情景的发生概率值。图6中情景间的条件概率、经验概率和发生概率 P_{ij} 见表5,对于存在消失情景的活动,由于不同事故案例受外部环境影响不同和处置措施不同,条件概率也存在差异。因此,情景 $S_{19} \rightarrow S_{\text{end1}}$ 、 $S_{47} \rightarrow S_{\text{end1}}$ 、 $S_{20} \rightarrow S_{\text{end2}}$ 的发生概率仅参考专家打分求得的经验概率值。

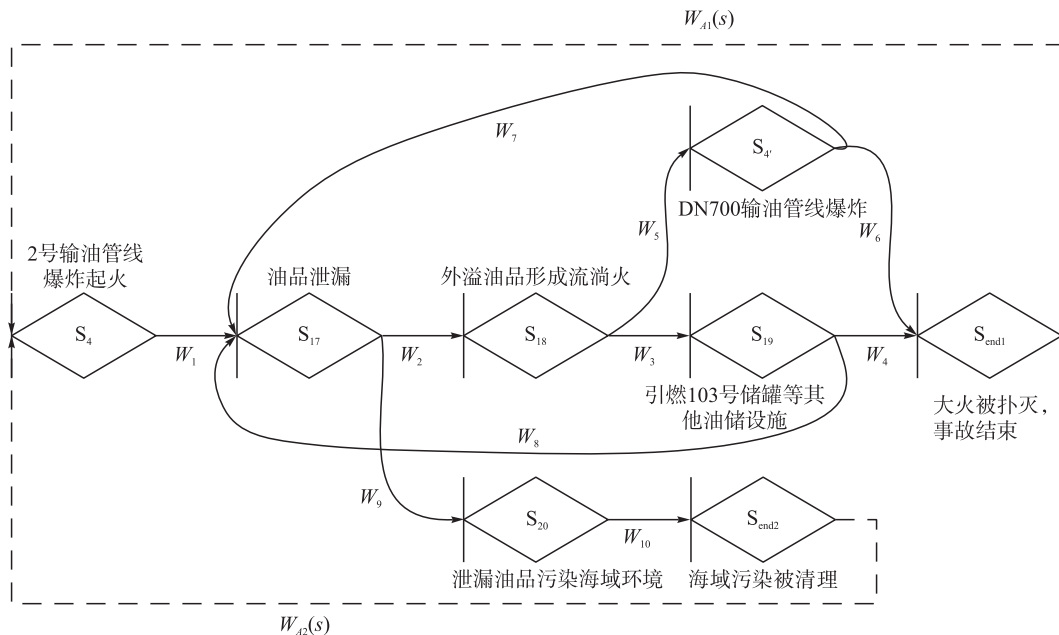


图6 大连“7·16”油库火灾爆炸事故情景演化随机网络图

Fig. 6 GERT network diagram of scenario evolution for Dalian “7·16” incident

表5 事故演化随机网络中各活动参数表

Tab. 5 Parameters of each activity in GERT network for incident evolution

活动	传递函数	条件概率	经验概率	发生概率	分布类型	参数 t/h	参数 $\sigma/\sqrt{h}$	矩母函数 $M_{ij}(s)$
$S_4 \rightarrow S_{17}$	W_1	0.586	0.853	0.693	常数	0.2	—	$\exp(0.2s)$
$S_{17} \rightarrow S_{18}$	W_2	0.876	0.867	0.867	正态分布	0.5	0.2	$\exp(0.5s + 0.02s^2)$
$S_{18} \rightarrow S_{19}$	W_3	0.694	0.588	0.652	正态分布	0.2	0.4	$\exp(0.2s + 0.08s^2)$
$S_{19} \rightarrow S_{end1}$	W_4	—	0.855	0.855	常数	2.0	—	$\exp(2.0s)$
$S_{18} \rightarrow S_{4'}$	W_5	0.482	0.550	0.550	正态分布	0.2	0.4	$\exp(0.2s + 0.08s^2)$
$S_{4'} \rightarrow S_{end1}$	W_6	—	0.639	0.639	常数	1.0	—	$\exp(1s)$
$S_{4'} \rightarrow S_{17}$	W_7	0.220	0.449	0.449	常数	0.2	—	$\exp(0.2s)$
$S_{19} \rightarrow S_{17}$	W_8	0.271	0.293	0.293	常数	0.3	—	$\exp(0.3s)$
$S_{17} \rightarrow S_{20}$	W_9	0.052	0.221	0.221	正态分布	0.4	0.8	$\exp(0.4s + 0.32s^2)$
$S_{20} \rightarrow S_{end2}$	W_{10}	—	0.774	0.774	常数	9.0	—	$\exp(9.0s)$

通过分析以往事故的情景演化特征,并参考杨保华^[9]、孟秀丽等人^[23]、陈万明等人^[24]和李娜等人^[25]的相关文献并咨询专家,总结了随机网络中各活动的时间参数分布规律:与始节点和终节点相关的活动以及向前连接闭合回路的活动通常为常数分布,其余通常为正态分布,更贴近实际事故的演化特征。根据表5各活动的发生概率,结合实际事故数据,可得到图6的各特性指标值。根据随机网络理论的闭合特性和梅森公式,可求得图6中情景演化路径的等价传递函数和等价发生概率,

并可计算出由始情景到终情景 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 和 $S_{4'} \rightarrow S_{end2}$ 的各路径发生概率、期望时间和方差。

4.2.1 由 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 路径发生概率、期望时间和方差

根据3.2.2节随机网络解析算法,构造由情景 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 的闭合回路,如图6中 $W_{A1}(s)$ 虚线所示。根据闭合随机网络的特征式等于0的性质有:

$$H = 1 - W_2 W_3 W_8 - W_2 W_5 W_7 - W_1 W_2 W_3 W_4 \frac{1}{W_E} - W_1 W_2 W_5 W_6 \frac{1}{W_E} = 0 \quad (11)$$

$$W_E = \frac{W_1 W_2 W_3 W_4 + W_1 W_2 W_5 W_6}{1 - W_2 W_3 W_8 - W_2 W_5 W_7} \quad (12)$$

$$= \frac{P_{4,17} M_{4,17} \cdot P_{17,18} M_{17,18} \cdot P_{18,19} M_{18,19} \cdot P_{19,end1} M_{19,end1} + P_{4,17} M_{4,17} \cdot P_{17,18} M_{17,18} \cdot P_{18,4'} M_{18,4'} \cdot P_{4',end1} M_{4',end1}}{1 - P_{17,18} M_{17,18} \cdot P_{18,19} M_{18,19} \cdot P_{19,17} M_{19,17} - P_{17,18} M_{17,18} \cdot P_{18,4'} M_{18,4'} \cdot P_{4',17} M_{4',17}}$$

代入表5各项活动参数,得:

$$W_E(s) = \frac{0.335 \exp(2.9s + 0.1s^2) + 0.211 \exp(1.9s + 0.1s^2)}{1 - 0.166 \exp(1.0s + 0.1s^2) - 0.214 \exp(0.9s + 0.1s^2)} \quad (13)$$

$$P_E = W_E(s) \big|_{s=0} = W_E(0) = 0.881 \quad (14)$$

因此可知,由 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 的情景演化路径发生概率为 88.1%。

又由:

$$M_E(s) = \frac{W_E(s)}{W_E(0)} = \frac{W_E(s)}{P_E}$$

$$= \frac{0.380 \exp(2.9s + 0.1s^2) + 0.240 \exp(1.9s + 0.1s^2)}{1 - 0.166 \exp(1.0s + 0.1s^2) - 0.214 \exp(0.9s + 0.1s^2)} \quad (15)$$

对 $M_E(s)$ 分别求一阶和二阶偏导,并令 $s=0$,可得:

$$E[t] = \frac{\partial M_E(s)}{\partial s} \bigg|_{s=0} = 3.09 \text{ h} \quad (16)$$

$$E[t^2] = \frac{\partial^2 M_E(s)}{\partial s^2} \bigg|_{s=0} = 11.21 \text{ h}^2 \quad (17)$$

$$V[t] = E[t^2] - (E[t])^2 = 1.66 \text{ h}^2 \quad (18)$$

即,由 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 的平均时间为 3.09 h,方差为 1.66 h²。

4.2.2 由 S_4 到达 S_{end2} 路径发生概率、期望时间和方差

根据 3.2.2 节随机网络解析算法,构造由 $S_4 \rightarrow S_{end2}$ 的闭合回路,如图 6 中 $W_{A2}(s)$ 虚线所示。根据闭合随机网络的特征式等于 0 的性质有:

$$H = 1 - W_1 W_9 W_{10} \frac{1}{W_{E'}} = 0 \quad (19)$$

$$W_{E'} = W_1 W_9 W_{10}$$

$$= P_{4,17} M_{4,17} \cdot P_{17,20} M_{17,20} \cdot P_{20,end2} M_{20,end2} \quad (20)$$

代入表5各项活动参数,得:

$$W_{E'}(s) = 0.119 \exp(9.6s + 0.32s^2) \quad (21)$$

$$P_{E'} = W_{E'}(s) \big|_{s=0} = W_{E'}(0) = 0.119 \quad (22)$$

因此可知,由 $S_4 \rightarrow S_{end2}$ 的情景演化路径发生概率为 11.9%。

又由:

$$M_{E'}(s) = \frac{W_{E'}(s)}{W_{E'}(0)} = \frac{W_{E'}(s)}{P_{E'}} = \exp(9.6s + 0.32s^2) \quad (23)$$

对 $M_{E'}(s)$ 分别求一阶和二阶偏导,并令 $s=0$,可得:

$$E'[t] = \frac{\partial M_{E'}(s)}{\partial s} \bigg|_{s=0} = 9.6 \text{ h} \quad (24)$$

$$E'[t^2] = \frac{\partial^2 M_{E'}(s)}{\partial s^2} \bigg|_{s=0} = 92.8 \text{ h}^2 \quad (25)$$

$$V'[t] = E'[t^2] - (E'[t])^2 = 0.64 \text{ h}^2 \quad (26)$$

即,由 $S_4 \rightarrow S_{end2}$ 的平均时间为 9.6 h,方差为 0.64 h²。

4.3 结果分析

由 4.2 节的求解结果可知,从情景 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 的情景演化路径发生概率较高,为 88.1%,说明在初次事故发生后,事故情景沿着这一路径演化的可能性较大。对比大连“7·16”油库火灾爆炸事故的公开报道,2 号输油管线爆炸起火导致罐体阀门炸坏无法关闭,输油泵房和电力系统损坏,大量原油泄漏流入火区,形成大面积地面流淌火,随着火情加剧,又导致更多管道以及罐体的破坏,造成 103 号储罐爆炸起火,引发二次事故^[22]。对比实际事故发展蔓延过程与由 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 的情景演化路径较吻合;而且,从 $S_4 \rightarrow S_{end1}$ 平均时间为 3.09 h,方差为 1.66 h²,实际事故中初次事故发生时间为 2010 年 7 月 16 日 18 时 20 分,16 日 21 时 55 分现场明火被扑灭,实际用时 3.58 h,与预测时间也较接近。另外,在 4.2 节预测结果中,从 $S_4 \rightarrow S_{end2}$ 的情景演化路径发生概率较小,为 11.9%,说明在初次事故发生后,事故情景沿着这一路径演化的可能性较小,对比实际事故情况,2 号输油管线爆炸起火后导致了原油泄漏,泄漏原油并非直接沿着从 $S_4 \rightarrow S_{end2}$ 的情景演化路径发展,但最终造成了至少 1 500 t 原油流入附近海域,受污染海域 430 km²,说明确实出现了泄漏原油流入大海,造成一定程度的海域污染情景。

通过将大连“7·16”油库火灾爆炸事故情景演化模型的求解结果与实际情景演化过程进行对比分析后可知,应用本文所构建的情景推演模型和推演方法,大概率与事故实际的发展蔓延过程和路径演化概率吻合。而且,分析验证结果也可发现,油储系统火灾事故一旦发生,无论人为干预的效果如何,事故朝恶化方向演变的概率依然很大,所产生的后果十分严重。事故演化路径上的每个关键情节都可能决定事故的发展和演变方向,提前预测事故可能的传播路径,对事故演化发展趋势做出正确评估,可为应急处置措施的有效实施提供正确判断,以延缓事故朝恶化方向演变,在一定程度上减少二次事故可能造成的更大危害。

以上对大连“7·16”油库火灾爆炸事故的情景推演

进行了简化,真实的灾害事故影响灾变因素繁多。在实际应用中需更充分收集统计更详尽的事故信息、调研咨询专家经验知识、分析挖掘更精确的事故发展演化特性,以建立更加全面详细的油储系统火灾事故情景演化模型,方可得到更加精确的灾害事故情景推演结果。

5 结论与建议

准确掌握油储系统火灾事故发生后可能的情景演化路径和发生概率,可为做出正确合理的应急处置决策提供科学依据,有效避免二次或次生事故的发生并降低危害造成的损失。然而事故发生后的情景演化过程具有随机性、动态性和系统性,增加了演化过程预测的难度。通过对国内外173例石油储罐典型火灾爆炸事故案例的统计分析,总结出油储系统火灾事故可能的情景演化路径,建立了较普遍适用的事故情景演化随机网络模型,给出了模型的求解方法和应用时需注意的一些问题,并通过实证分析对模型进行了验证。根据本文的研究工作和研究结果,建议决策者在应用该模型进行辅助应急决策时,还需重点关注几个方面。

1)在油储系统火灾事故发生早期,情景演化的状态较少,其危害较小,尽早介入有效控灾、救灾行为,将大幅降低事故危害和发展态势的恶化,使事故最大可能地向最乐观的情景演化路径发展。

2)需着重关注事故演化模型中可能由此衍生出多条演化路径的情景集结点(如图2的 S_4 情景节点),当该情景状态出现时,应当采取最有可能使情景演化路径向着最乐观方向发展的控灾、救灾措施,以最大限度降低事故演化的危害并控制发展态势的延续。

3)重点关注发生概率值较大的情景节点,该节点是演化路径中较常出现的情景状态,其所在的情景演化路径是事故大概率可能发展蔓延的过程,在该情景节点实施有效的控灾、救灾行为,可大概率阻控情景进一步的演化路径,使事故的危害及发展态势得到尽早的控制。

基于案例和随机网络的油储系统火灾情景推演方法和推演模型,从概率统计意义上,为油储系统火灾事故发展演化过程的评估提供了一种大概率可能的判断方法,为辅助应急决策的制定提供了一定的参考依据。更为科学、准确的情景演化模型研究还有待进一步加强。

参考文献:

- [1] 李勇建, 乔晓娇, 孙晓晨, 等. 基于系统动力学的突发事件演化模型[J]. 系统工程学报, 2015, 30(3):306-318.
LI Yongjian, QIAO Xiaojiao, SUN Xiaochen, et al. Modeling the evolution of emergency based on system dynamics [J]. Journal of Systems Engineering, 2015, 30 (3): 306-318.
- [2] 王德鲁, 孙建滨. 基于行为的企业突发事件演化动力学模型及仿真[J]. 情报杂志, 2015, 34(4):97-103.
WANG Delu, SUN Jianbin. Modelling and simulation of enterprise emergency evolution dynamic based on behavior perspective [J]. Journal of Intelligence, 2015, 34 (4): 97-103.
- [3] 屈静, 张建彬, 李旭芳, 等. 基于贝叶斯网络的输油管道泄漏事故情景推演[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1):192-198.
QU Jing, ZHANG Jianbin, LI Xufang, et al. Deduction of leakage accident scenarios of oil pipeline based on Bayesian network [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31 (1): 192-198.
- [4] 巩前胜. 基于动态贝叶斯网络的突发事件情景推演模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(2):119-126.
GONG Qiansheng. Research on scenario deduction model of emergency based on dynamic Bayesian networks [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2018, 33 (2): 119-126.
- [5] 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.
XIA Dengyou, QIAN Xinming, DUAN Zaipeng. Scenario deduction model of unconventional emergency based on dynamic Bayesian network [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36 (6): 897-902.
- [6] 张江石, 冯娜娜. 基于动态贝叶斯网络情景推演的危化品事故应急处置研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4):1420-1426.
ZHANG Jiangshi, FENG Nana. On the emergency disposal of the hazardous chemical accidents based on the dynamic Bayesian network scenario deduction [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20 (4): 1420-1426.
- [7] XIN Peiwei, FAISAL K, SALIM A. Dynamic hazard identification and scenario mapping using Bayesian network [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2017, 105: 143-155.
- [8] WU Jiansong, XU Shengdi, ZHOU Rui, et al. Scenario analysis of mine water inrush hazard using Bayesian networks [J]. Safety Science, 2016, 89: 231-239.
- [9] 杨保华. 基于随机网络的非常规突发事件情景推演模型及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
YANG Baohua. Research on scenario deduction model of unconventional emergency and its application based on graphical evaluation review technique network [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [10] 方志耕, 杨保华, 陆志鹏, 等. 基于Bayes推理的灾害演化GERT网络模型研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17

- (2):102-107.
- FANG Zhigeng, YANG Baohua, LU Zhipeng, et al. The GERT network model study of disaster evolution based on bayes inference [J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17 (2): 102-107.
- [11] 周愉峰, 马祖军. 基于情景推演的地震灾害演化动态 GERT 网络模型[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(3):68-75.
- ZHOU Yufeng, MA Zujun. Scenario inference-based dynamic GERT network model for evolution of earthquake disasters [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22 (3): 68-75.
- [12] 范继义. 油库 1050 例安全事故数据的统计分析[J]. 石油库与加油站, 2003, 12(6):19-21.
- FAN Jiyi. Statistical analysis of 1050 cases of safety accident data in oil depots[J]. Oil Depot and Gas Station, 2003, 12 (6): 19-21.
- [13] 张清林. 国内外石油储罐典型火灾案例剖析[M]. 天津: 天津大学出版社, 2014.
- ZHANG Qinglin. Analysis of typical fire cases of domestic and foreign oil storage tanks [M]. Tianjin: Tianjin University Publisher, 2014.
- [14] 杨 艺, 刘建章, 付士根. 油库安全评价与应急救援技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.
- YANG Yi, LIU Jianzhang, FU Shigen. Safety evaluation and emergency rescue technology for oil depots [M]. Beijing: Sinopec Publishing House, 2009.
- [15] 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[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- MA Siming. Scenario deduction and scenario decision evaluation in emergency processes of fire accidents for oil-gasstorage and transportation [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [16] 赵 爽, 姜虎生, 陈广芳, 等. 基于事故树分析的油库燃爆事故安全评价研究[J]. 当代化工, 2014, 43 (12):2585-2587.
- ZHAO Shuang, JIANG Husheng, CHEN Guangfang, et al. Safety evaluation of oil depot explosion accident based on fault tree analysis [J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43 (12): 2585-2587.
- [17] 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.
- XIA Dengyou, QIAN Xinming, DUAN Zaipeng. Scenario deduction model of unconventional emergency based on dynamic Bayesian network [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36 (6): 897-902.
- [18] 冯允成, 吕春莲, 杜瑞甫, 等. 随机网络及其应用[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987.
- FENG Yuncheng, LYU Chunlian, DU Ruifu, et al. Stochastic networks and their applications [M]. Beijing: Beijing Aviation Academy Press, 1987.
- [19] AGREH O Y, GHAFARI-HADIGHEH A. Application of dempster-shafer theory in combining the experts' opinions in DEA [J]. Journal of the Operational Research Society, 2018, 9: 1-11.
- [20] 陈 杰. 基于 DS 理论的决策融合算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- CHEN Jie. Research on decision fusion algorithm based on DS theory[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [21] 王红军, 杨有龙. 矩函数在计算随机变量数字特征中的应用[J]. 高等数学研究, 2021, 24(4):28-30.
- WANG Hongjun, YANG Youlong. Application of moment generating function in calculating numerical characteristics of random variables [J]. Studies in College Mathematics, 2021, 24 (4): 28-30.
- [22] 国务院安委会办公室. 关于中国石油天然气集团公司在大连所属企业“7·16”输油管道爆炸火灾等 4 起事故调查处理结果的通报 [EB/OL]. (2011-11-25) [2023-01-04]. <http://www.esafety.cn/law/67499.html>.
- Office of the Safety Committee of the State Council. Announcement on the results of the investigation and handling of four accidents including the “7-16” oil pipeline explosion and fire in Dalian, an enterprise owned by China National Petroleum Corporation [EB/OL]. (2011-11-25) [2023-01-04]. <http://www.esafety.cn/law/67499.html>.
- [23] 孟秀丽, 陈云云, 孙树垒, 等. 基于 GERT 网络的乳制品质量链协同效应的研究[J]. 科技和产业, 2017, 17(2):62-66.
- MENG Xiuli, CHEN Yunyun, SUN Shulei, et al. Study on the synergistic effect of dairy products quality chain on basis of GERT network [J]. Science Technology and Industry, 2017, 17 (2): 62-66.
- [24] 陈万明, 裴玲玲, 杨保华, 等. 基于 GERT 网络的救灾人员动态优化配置模型研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(5):125-130.
- CHEN Wanming, PEI Lingling, YANG Baohua, et al. Study on the dynamic optimization model for relief workers allocation based on GERT network [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32 (5): 125-130.
- [25] 李 娜, 高雷卓, 王 磊. 基于 GERT 网络模型的课程实际度量值研究[J]. 数学的实践与认知, 2018, 48(10):289-297.
- LI Na, GAO Leifu, WANG Lei. A study on the actual metrics of curriculum based on GERT network model[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2018, 48 (10): 289-297.