

柴军辉, 张子健, 刘明威, 等. 储罐区内有移动槽罐车时的多米诺效应事故动态分析[J]. 安全与环境学报, 2026, 26(6): 2398–2408.

CHAI J H, ZHANG Z J, LIU M W, et al. Dynamic analysis of domino effect accidents involving mobile tank trucks in storage tank areas[J]. Journal of Safety and Environment, 2026, 26(6): 2398–2408.

储罐区内有移动槽罐车时的多米诺效应事故动态分析*

柴军辉^{1,2}, 张子健², 刘明威³, 王元鑫³, 包士毅³, 罗利佳³

(1 宁波市特种设备检验研究院, 浙江宁波 315048;

2 宁波市劳动安全技术有限公司, 浙江宁波 315048; 3 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310032)

摘要: 石油化工储罐区除了有存储危化品的固定式储罐之外, 还有在罐区道路上运输危化品的移动槽罐车, 而槽罐车的介入可能会改变罐区内多米诺效应事故的扩展路径, 导致事故后果升级, 因此考虑移动槽罐车的影响对储罐区的风险分析具有重要意义。利用动态贝叶斯网络对石油化工储罐区内多米诺效应事故的动态演变过程进行建模分析, 通过在网络中添加移动节点引入移动槽罐车对多米诺效应事故的影响, 通过情景推演辨识罐区内多米诺效应事故的扩展路径, 根据燃料燃尽时间和设备失效时间划分事故演变过程的时间节点, 运用 Probit 函数模型和贝叶斯理论计算多米诺效应事故在各级设备单元的扩展概率, 提出了石油化工储罐区内有移动槽罐车时多米诺效应事故的动态分析方法, 为石油化工储罐区内多米诺效应事故的分析与预防提供方法支撑。通过对实际罐区进行案例分析展示了所提出方法的效果和优势, 结果表明: 当罐区内的多个固定储罐同时发生火灾事故时, 事故可能会扩展到道路上或装卸区域内的槽罐车; 当槽罐车作为初始事故单元时, 在所研究案例的前提下并不会引发多米诺事故, 这主要是因为槽罐车与固定储罐之间的距离足够远, 遏制了事故传播。

关键词: 安全工程; 储罐区; 多米诺效应; 动态贝叶斯网络; 移动节点

中图分类号: X937; TQ053.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6094(2026)06-2398-11

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1193

0 引言

随着工业化进程的逐渐加快, 石油化工储罐区内的储罐数量及规模不断增大, 危险化学品的种类和重大危险源逐渐增多, 随时面临着发生泄漏、火灾、爆炸等重大安全事故的危险, 容易引发多米诺效应事故, 造成严重事故后果。多米诺效应事故的核心是初始事故可以导致多个事故发生, 且初始事故产生的升级物理效应可以引发一个或一个以上单元发生二次事故, 事故带来的最终危害高于初始事故的危害。石油化工储罐区除了有固定的储罐, 还有移动槽罐车。当储罐区发生事故时, 移动槽罐车的加入可能使事故进一步升级, 造成更严重的事故后果。因此, 对石油化工储罐区内有移动槽罐车时的多米诺效应事故进行风险评估具有重要意义。

在多米诺效应事故的风险分析领域, 贝叶斯网络分析方法十分重要。2015年, Khakzad^[1]考虑到火灾多米诺效应事故持续的时间较长, 首次将时间因素引入贝叶斯网络中, 提出了一种基于动态贝叶

斯网络的多米诺效应事故分析方法, 用于模拟多米诺效应事故的空间和时间演变。2017年, Khakzad等^[2]首次提出了一种基于事件树分析的动态贝叶斯网络方法, 可以量化消防系统性能的动态演变与火灾升级过程中事件之间的时间相关性, 从而评价火灾保护措施的性能及对火灾多米诺效应事故的影响。白晓昀^[3]基于贝叶斯网络研究了罐区多米诺效应事故, 介绍了利用贝叶斯网络分析多米诺效应事故的优势, 简单分析了多米诺事故协同效应的作用和阈值发生改变对风险评估的影响, 但没有给出多事故耦合作用下动态多米诺效应的扩展概率计算方法。2019年, 郑峰等^[4]首次引入储罐燃尽时间和储罐失效时间两个时间节点来研究储罐在每个时间节点同类事故协同作用下的事故后果概率, 通过对时间区间进行划分, 分别建立各个时间片段内的动态贝叶斯网络模型。童琦^[5]利用动态贝叶斯网络分析计算设备发生火灾或爆炸事故的概率以及事故之间相互触发的概率, 并采用模糊理论和模糊风险矩阵来分析多米诺效应事故发生概率和后果的不确定

* 收稿日期: 2025-07-08

作者简介: 柴军辉, 教授级高工, 从事特种设备检验检测及安全保障研究, cjh@nbanji.com; 罗利佳(通信作者), 教授, 从事特种设备无损检测、结构健康监测、风险评价等研究, lijialuo@zjut.edu.cn。

基金项目: 宁波市公益性科技计划项目(2023S093)

性。黄海燕^[6]利用贝叶斯网络对储罐遭受雷击发生损坏引发的多米诺效应事故进行建模分析,并通过 GeNIe 软件呈现了多米诺效应事故的发生场景和事故发生概率。张江石等^[7]以天津港“8·12”事故为例,基于外部环境、事件情景、应急处置三类要素推断事故的情景演变路径,利用动态贝叶斯网络构建情景推演模型,对事故中的关键情景进行了推演。王璇等^[8]根据多米诺效应事故扩展过程中的关键时间节点,运用 Probit 模型和贝叶斯方法计算储罐多米诺效应的扩展概率,并利用动态贝叶斯网络和 GeNIe 软件分析了储罐区多米诺效应事故的动态演变过程。

近年来,危化品槽罐车的事故分析受到学者们的广泛关注。陈亚雄等^[9]采用事件树方法分析了液氨罐车在移动过程中可能发生的故事,并利用 ALOHA 软件对事故中毒范围、燃烧危害和爆炸冲击波进行了仿真模拟,得出危害区域。宋晓燕等^[10]利用 PHAST 程序对液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG)槽罐车的泄漏爆炸事故进行了数值模拟,发现喷射火的热辐射能量大致呈抛物线形状。张志斌等^[11]利用 FLUENT 软件对 LPG 罐车泄漏进行了数值模拟,得到 LPG 泄漏扩散的浓度范围,然后根据 LPG 火灾爆炸极限,分析了泄漏扩散区域内可能发生爆炸的范围及对周边的影响。2024 年,刘勇等^[12]首次构建了多项 Logistic 危化品槽罐车火灾类型判别模型,并开展了准确性检验、显著性检验及实例应用,通过实例验证了液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)罐车发生池火灾的概率最大,其次是喷射火灾,沸腾液体扩展蒸气爆炸(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)火灾的概率最小。

上述文献都是通过找出罐区内固定储罐关键危险单元来进行多米诺事故传播序列研究,或只分析单一槽罐车发生事故造成的影响,而没有考虑罐区内移动槽罐车对事故传播序列的影响。目前由于缺乏在有移动槽罐车情况下对罐区进行动态风险分析的方法,对移动槽罐车如何促使罐区多米诺事故升级的认知还不够清楚,这可能会导致对罐区风险估计不充分。针对该问题,本文采用动态贝叶斯网络分析石油储罐区的多米诺事故,通过在网络中添加移动节点来引入移动槽罐车的影响,从情景推演角度出发,辨识罐区内多米诺事故的扩展路径,运用 Probit 函数模型和贝叶斯网络计算不同时间段内各设备的事故扩展概率,提出储罐区内有移动槽罐车

时多米诺事故的动态分析方法,为罐区多米诺事故的分析 and 预防提供方法支撑。

1 多米诺效应事故分析

1.1 多米诺效应事故扩展概率计算

设备发生火灾或爆炸事故后,产生的物理效应会破坏周围设备,引起事故扩展,进而发生更高阶的事故,产生比初始事故更为严重的后果,即多米诺效应事故^[13]。事故产生的物理效应向四周扩展,有一定的概率使周围设备发生破坏。Cozzani 等^[14]根据以往的池火、喷射火和爆炸事故数据,对不同事故场景下常压容器的扩展阈值进行统计分析,发现常压容器在接收的热辐射低于 15 kW/m^2 时,其失效时间均大于 10 min ,常压容器受到的超压冲击波低于 22 kPa 时,其结构损坏的可能性可以忽略。因此,Cozzani 等^[14]总结了热辐射和超压导致设备失效的阈值,如表 1 所示。需要注意的是,表 1 中热辐射的阈值条件中 10 min 只对应于热辐射为 15 kW/m^2 的情况,当热辐射超过 15 kW/m^2 时,时间可以小于 10 min ;此时只需判断目标设备在所接收热辐射下的失效时间 t_s 是否小于或等于热辐射作用于该设备的时间,如果满足这一条件,目标设备可能失效,否则目标设备不会失效。

表 1 列出了当物理效应超出阈值时计算目标设备发生失效的概率单位的经验公式。确定概率单位之后,目标设备的扩展概率可利用 Probit 函数模型进行计算。Probit 函数模型为

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-u^2/2} du \quad (1)$$

式中 P_d 为目标设备的扩展概率; Y 为概率单位值,由表 1 的经验公式计算得出; u 为积分变量。一级多米诺事故发生概率可通过式(2)计算。

$$P_m = P_0 \prod_{i=1}^N [1 - P_{d,i} + \delta_m (2P_{d,i} - 1)] \quad (2)$$

式中 P_m 为一级多米诺事故的发生概率; P_0 为初始事故的发生概率; $P_{d,i}$ 表示第 i 个目标设备发生事故的,由式(1)计算得到; N 为次级单元总数; δ_m 为系数,当第 i 个目标设备发生的事故参与了第 m 种事故组合时, δ_m 取 1,否则取 0。

1.2 基于时间的多米诺协同作用

初始单元发生火灾和爆炸事故后,事故产生的热辐射和超压对其他单元共同造成的影响称为多米诺协同作用。火灾和爆炸两种事故场景下的多米诺协同作用分为下面三种情况。

(1) 均为火灾时,对目标设备受到的所有热辐

表1 目标设备的失效阈值与概率单位^[14]Table 1 Failure threshold and probability unit of the target equipment^[14]

物理效应	目标设备	失效阈值	概率单位 Y 的计算式
热辐射	常压容器	15 kW/m ² 持续 10 min	$\ln t_s = -1.128 \ln I - 2.667 \times 10^{-5} V + 9.877$, $Y = 12.54 - 1.847 \ln t_s$
超压		22 kPa	$Y = -18.96 + 2.44 \ln p$

注: I 表示目标设备接收到的热辐射, kW/m²; V 表示设备的体积, m³; t_s 表示失效时间, s; p 表示目标设备接收到的峰值超压, Pa。

射 I_i 进行简单叠加, 根据叠加值判断是否超过阈值, 以最终叠加值计算扩展概率。

$$I = \sum_{i=1}^M I_i \quad (3)$$

(2) 均为爆炸时, 对目标设备接收的所有超压 p_i 进行比较, 考虑到爆炸超压的瞬时性, 不对超压进行叠加处理, 而是取其中最大值, 根据最大值判断是否超过阈值, 并进行扩展概率计算。

$$p^* = \max(p_1, p_2, \dots, p_M) \quad (4)$$

(3) 既有火灾又有爆炸时, 只要其中一种事故能导致目标设备破坏则认为扩展成立, 否则不认为目标设备被破坏。根据每种事故物理效应计算出相应扩展概率 P_i , 采取并联系统模型^[15], 进行并联计算, 得出最终的概率 P_f 。其中, 爆炸和火灾共同导致的失效时间由破坏主体决定, 如果主体为火灾, 则以火灾导致的失效时间计算, 否则为瞬时破坏。

$$P_f = 1 - \sum_{i=1}^M (1 - P_i) \quad (5)$$

实际情况中多米诺事故场景并非静态扩展, 而是随着时间的变化而变化。火灾热辐射更是与时间息息相关, 主要体现在火灾燃料的燃尽时间 t_b 和目标设备的失效时间 t_s 两方面^[4], 应将两者定为时间节点, 划分时间片段后进行分析, 而不能仅将上述情况(1)中的热辐射值进行简单叠加, 因此, 需要对火灾事故进行时间条件判定: 当前级单元发生火灾的燃料燃尽时间 t_b 不小于后级单元设备的 t_s 时考虑事故扩展, 否则不考虑扩展。

当单个火灾源的热辐射超过目标设备的扩展阈值, 且已经作用一段时间, 但还未满足目标设备失效所需时间时, 又加入另一火灾源共同对目标设备进行破坏, 则目标设备失效实际所需时间 t_s 计算式为

$$t_s = t_0 + \frac{t_1 - t_0}{t_1} t_2 \quad (6)$$

式中 t_s 为两事故协同作用下目标设备失效时间, s; t_0 为单事故已作用时间, s; t_1 为单事故作用下目标设备失效所需时间, 计算式见表 1, s; t_2 为多事故同时

共同作用下目标设备失效所需时间, s。当发生池火时, 燃料燃尽时间 t_b 根据燃烧效率与液体泄漏量进行计算, 液池中燃料的燃烧速率采用文献[16]中危险物质溢出的物理效应方法进行计算。

2 基于贝叶斯网络的多米诺效应事故分析

2.1 动态贝叶斯网络构建

贝叶斯网络是一种有向无环图的网络构造形式, 用于在不确定的情况下进行推理, 包括单元节点、有向弧和概率分布。单元节点代表网络中的随机变量, 单元节点之间通过有向弧连接。有向弧的起始连接单元被看做父节点, 指向单元被看做子节点, 有向弧代表的是父节点与子节点之间的条件概率。贝叶斯网络中没有父节点的节点概率称为先验概率, 可以借鉴历史数据资料或结合经验进行确定^[17]。贝叶斯网络中的每个节点依赖其父节点, 根据链式法则和 D-分离准则, 可得变量集合 $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 的联合概率为

$$P(U) = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P[X_i | F(X_i)] \quad (7)$$

式中 $F(X_i)$ 表示 X_i 的父节点。

静态贝叶斯网络模型的构建过程包括以下几个关键步骤。

(1) 确定需建立模型的各变量单元。

a. 确定初始单元。一种是自行选择确定; 另一种是结合罐区重大危险源分级指数、设备情况指数、重大危险区域筛选指数^[18-19]和单元拥挤指数对罐区内最大危险源进行筛选, 进而确定初始单元。

b. 根据事故单元的事故类型和设备的扩展阈值确定危险区域, 然后根据该区域内其他设备接收到的物理效应值确定次级单元; 当有多个设备发生事故时, 需要考虑事故间的协同作用; 目标设备的失效事故类型需结合实际情况, 根据设备结构、储存介质及上级单元事故影响程度进行分析。

(2) 构建网络:根据设备发生破坏的顺序分析事故传播路径,通过有向弧连接父节点与子节点。

(3) 确定概率:无父节点的初始单元的事故概率需依靠以往数据资料确定,本文将初始单元的事故概率设定为储罐失效泄漏率、点火概率和事故分配率的乘积。储罐失效泄漏率可参考同类设备平均失效概率推荐值^[19]。点火概率可结合重大危害事故数据系统(Major Hazard Incident Data Service, MHIDAS)数据库^[20]、《定量风险评估指南》(紫皮书)^[21]、专家建议等进行取值。由于火球和闪火作用时间太短,达不到破坏周边设备的程度,仅考虑池火、喷射火、蒸气云爆炸(Vapor Cloud Explosion, VCE)和沸腾液体扩展蒸气爆炸(BLEVE)四种事故类型。Cozzani 等^[14]对 100 起火灾爆炸事故进行统计,发现发生池火 44 起、喷射火 8 起、蒸气云爆炸 16 起、沸腾液体扩展蒸气爆炸 15 起。因此,本文设置点火后事故类型的分配率分别为:池火 0.530、喷射火 0.096、蒸气云爆炸 0.193、沸腾液体扩展蒸气爆炸 0.181。对于子节点的概率,根据次级单元接收到的事故物理效应值,运用 Probit 函数模型对目标设备的扩展概率进行计算。

动态贝叶斯网络是以静态贝叶斯网络为基础引入时间元素进行扩展所得。将需要分析的时间段分成若干个时间区间,在某个时间区间内的节点不仅依赖于它在当前时间区间内的父节点,还依赖于它在上一个时间区间中的自身节点和父节点^[22]。图 1 为动态贝叶斯网络的结构图,动态贝叶斯网络模型的构建流程如图 2 所示。

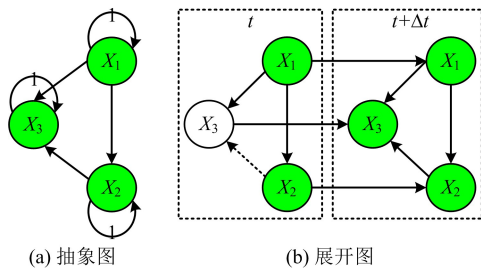


图 1 动态贝叶斯网络的结构图

Fig. 1 Structure diagram of the dynamic Bayesian network

假设贝叶斯网络中有 n 个节点,当选定某一点 i 作为父节点时,各节点之间的关系可利用联合概率公式表示,即

$$P(U^{t+\Delta t}) = P(X_1^{t+\Delta t}, X_2^{t+\Delta t}, \dots, X_n^{t+\Delta t}) = \prod_{i=1}^n P(X_i^{t+\Delta t} | X_i^t, F(X_i^t), F(X_i^{t+\Delta t})) \quad (8)$$

式中 X_i^t 表示 t 时刻的 X_i 节点; $X_i^{t+\Delta t}$ 表示 $t + \Delta t$ 时刻的 X_i 节点; $F(X_i^t)$ 表示 t 时刻 X_i 的父节点; $F(X_i^{t+\Delta t})$ 表示 $t + \Delta t$ 时刻 X_i 的父节点。

考虑时间因素后,网络变化极为复杂,为了方便计算和建模,做出如下假设:

(1) 在设定的一定时间段内,事故的扩展概率对所有 t 都是平稳的;

(2) $t + \Delta t$ 时间后的状态仅与 t 时刻的状态有关,而与 t 时刻之前的状态无关。

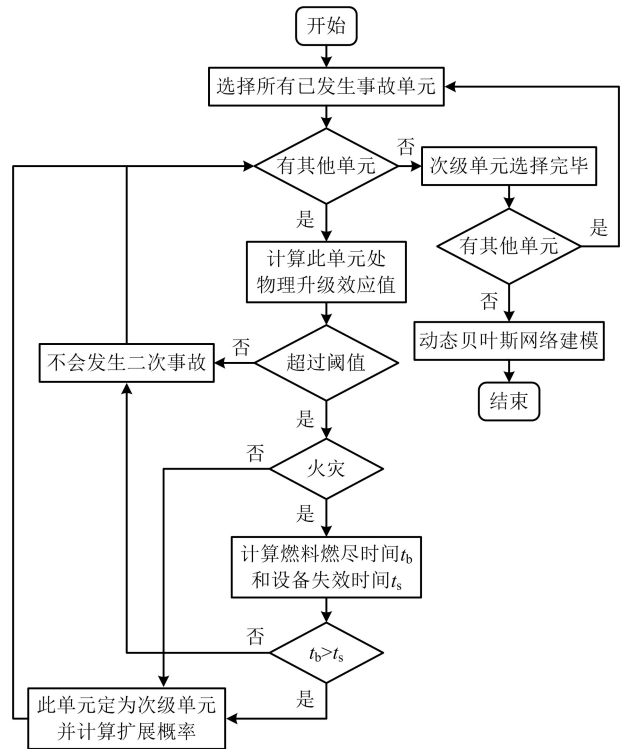


图 2 动态贝叶斯网络的建模流程图

Fig. 2 Flow chart of dynamic Bayesian network modeling

2.2 移动节点载入

石油化工储罐区内除了有固定的储罐外,还有移动槽罐车。移动槽罐车的存在会给储罐区带来很大风险,尤其是当槽罐车在储罐区域进行装卸作业时,很可能会由外界因素导致火灾、爆炸事故发生。当槽罐车停靠在储罐区附近的装卸区域时,一旦发生火灾爆炸事故,很有可能破坏周边储罐,引发罐区多米诺效应事故;此外,若储罐作为初始单元发生事故,在原本不会发生扩展效应的情况下,由于槽罐车的介入,事故范围扩大,进而影响其他区域内的设备,导致更复杂的多米诺效应事故^[23]。移动槽罐车的参与会导致网络拓扑结构发生变化,如图 3 所示。

考虑到移动槽罐车分析的复杂性,对移动槽罐车做出以下假设:

(1) 槽罐车只能在规定的道路上行驶,不能携带物料随意行驶;

(2) 位于装卸区的槽罐车认为处于停车状态;

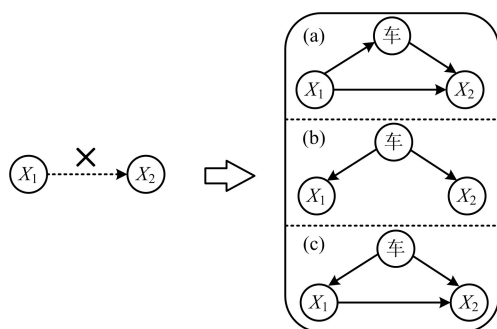
(3) 槽罐车为带安全阀的罐车,物料为易燃介质,充装系数根据国家标准 GB 18564.1—2019 确定^[24];

(4) 罐区道路上只有一辆槽罐车行驶;

(5) 槽罐车发生事故时则立即停止移动;

(6) 槽罐车物料泄漏后,若无几何尺寸限制,根据不同地面类型与液池最小厚度关系进行液池厚度选择,一般平滑地面取 0.01 m,粗糙地面取 0.025 m,混凝土地面取 0.005 m,草地取 0.02 m,平滑水面取 0.001 8 m^[25];

(7) 罐区内除了储罐外,无其他建筑物遮挡。



(a) 储罐 X_1 → 槽罐车 → 储罐 X_2 ;

(b) 槽罐车 → 储罐 X_1 和 X_2 ; (c) 槽罐车 → 储罐 X_1 → 储罐 X_2 。

图3 槽罐车参与罐区多米诺效应事故的三种可能拓扑形式
Fig. 3 Three possible topological forms of the domino effect accident involving a tank truck in the tank area

根据槽罐车的状态可以分为移动过程和装卸过程。对于装卸区的槽罐车,槽罐车处于停车状态,作为静止节点考虑。此时,可简单地将槽罐车看作一个小型的固定储罐,与罐区内的其他储罐一同进行分析。对于移动过程中的槽罐车,槽罐车的位置发生变化,对罐区的影响后果也会不同,作为移动节点考虑。如图4所示,作为移动节点的槽罐车是否参与多米诺事故需要根据以下情况进行判定:

(1) 当槽罐车作为初始事故单元时,只有槽罐车发生初始事故的阈值范围(如图4中半径为 R_v 的圆)内包括至少一个储罐时,槽罐车才作为移动节点参与动态贝叶斯网络建模。

(2) 当槽罐车作为事故扩展单元时,只有槽罐车的位置位于单个储罐发生事故的阈值范围(如图4中半径为 R_1 的圆)内或多个储罐发生事故的协同作用阈值范围(如图4中半径为 R_{1+2+3} 的圆)内,槽

罐车才作为移动节点参与动态贝叶斯网。

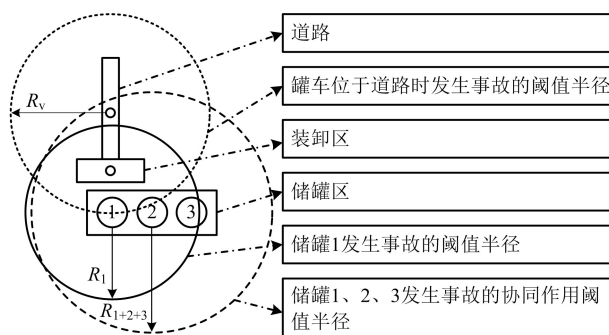


图4 利用阈值半径判定槽罐车为移动节点的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of determining a tank truck as a mobile node using threshold radius

3 实例分析

以某石油储运企业为例^[23],厂区内主要有办公区、储存区和装卸区,厂区重要设施布局图如图5所示, X_1 和 X_2 为汽油储罐, $X_3 \sim X_6$ 为重柴油储罐;储罐体积均为 1 000 m³,直径为 15 m,储存系数为 0.85,均为常压内浮顶储罐,其他相关参数见表2。

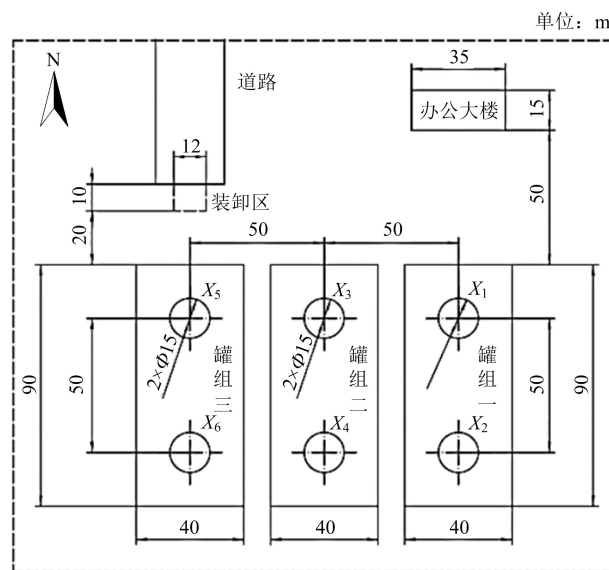


图5 厂区关键设施示意图

Fig. 5 Schematic diagram of important facilities in the factory

罐组周围均设有防火堤,长度、宽度、高度分别为 90 m、40 m、1.2 m。厂区每天来 2 辆槽罐车装卸燃料(汽油或重柴油),定为单元 X_7 。罐车从厂区北门驶入,直接开往装卸区,不驶入其他区域。厂区道路宽 9 m,道路两侧分布有道牙,高 200 mm。考虑地面对液体流动的阻碍作用,槽罐车完全泄漏后燃料液池的高度设定为 0.025 m。槽罐车的容积为 40

表 2 相关参数选取

Table 2 Selection of related parameters

物质	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	燃烧热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	环境 温度/K	环境压力/ kPa	地面导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	地面扩散系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
汽油	750	46 000	293. 15	101	1. 1	$1. 29 \times 10^{-7}$
重柴油	800	42 652	293. 15	101	1. 1	$1. 29 \times 10^{-7}$

m^3 ,充装系数为 0. 9,罐体均为常压储罐。当地年平均风速为 2. 9 m/s,大气稳定度为 D。

池火灾和蒸气云爆炸是储罐区最常见的导致多米诺效应事故的初始事故场景^[3]。由于火灾引发的多米诺效应事故占比更高,对应应急救援的现实意义更大,分别以储罐区和槽罐车发生初始池火事故为例进行分析。

3.1 初始事故在储罐区

以储罐 X_1 为初始事故单元进行分析,该储罐区域内主要设备发生事故的情况为:罐组一的汽油储罐 X_1 作为初始事故单元,完全破裂泄漏遇到点火源,发生池火;由于汽油储罐都在同一个罐组,由防火堤包围,储罐 X_1 泄漏发生的池火包裹住储罐 X_2 ,储罐 X_2 发生泄漏后会立即点燃,不会发生 VCE;由于重柴油不易挥发,重柴油储罐受到热辐射影响,发生泄漏很难导致 VCE,只会导致池火事故发生;槽罐车在道路上移动时,由于车速和风速影响,燃料泄漏很难形成蒸气云团,因此只考虑池火现象;槽罐车进行装卸作业时,由于装卸过程中存在安全人员,槽罐车破裂不会发生 VCE 现象,只会发生池火事故;储罐区事故链为:储罐 X_1/X_2 (池火)→储罐 $X_3/X_4/X_5/X_6$ (池火)→槽罐车 X_7 (池火)。汽油和重柴油的燃烧效率因子为 0. 35,空气热辐射透过系数为 1;借助

Mudan 模型^[26]计算罐组一的单个储罐发生池火事故产生的热辐射能量,根据表 1 中常压储罐的热辐射阈值计算出相应的半径,如表 3 所示;当槽罐车位于装卸区时,通过点热源模型求得当单个设备发生池火时其他各设备所受到的热辐射,如表 4 所示。

表 3 罐组一发生池火时与热辐射阈值相对应的半径

Table 3 Radius corresponding to thermal radiation threshold for a pool fire in the tank group 1

事故单元	表面热辐射 能量/kW	与常压储罐的阈值 相对应的半径/m
X_1 或 X_2	1 661 781. 85	93. 89

根据表 1 的阈值可知,当道路上的槽罐车接收到的热辐射超过 $15 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时才有可能发生失效。由表 4 的热辐射计算结果可知,只有当罐组一、二、三中多个储罐同时发生池火事故时,其共同作用下的热辐射才可能破坏道路上的槽罐车。建立如图 6 所示的坐标系,通过计算可知,在罐组一、二、三的 6 个储罐同时发生池火事故的共同作用下,当道路上的槽罐车位于坐标为(0, 92. 24 m)的位置时,槽罐车接收到热辐射为 $15 \text{ kW}/\text{m}^2$,达到发生失效的临界阈值。因此,当槽罐车处于图 6 中用黑色加粗线段标记的道

表 4 单个设备发生池火时邻近设备接收到的热辐射

Table 4 Received thermal radiation flux of adjacent equipment from pool fires of one equipment

储罐	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1		211. 58	42. 32	42. 32	12. 45	12. 45	8. 87
X_2	211. 58		42. 32	42. 32	12. 45	12. 45	8. 87
X_3	12. 07	12. 07		60. 33	12. 07	12. 07	5. 10
X_4	12. 07	12. 07	60. 33		12. 07	12. 07	5. 10
X_5	3. 55	3. 55	12. 07	12. 07		60. 33	7. 70
X_6	3. 55	3. 55	12. 07	12. 07	60. 33		7. 70
X_7 (汽油)	4. 86	3. 07	12. 92	5. 07	28. 88	6. 48	
X_7 (重柴油)	1. 36	0. 86	3. 61	1. 42	8. 07	1. 81	

路段上时,有可能参与罐组的多米诺效应事故。

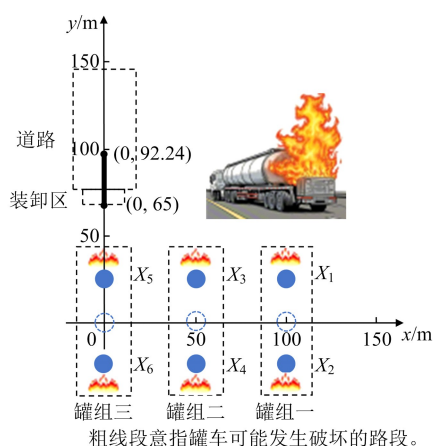


图6 储罐区发生火灾时道路上槽罐车发生失效的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of tank truck failure on the road in the case of fires in the storage tank area

汽油储罐 X_1 发生池火事故时,液池内燃料燃尽时间为 1 892 s;罐组二和罐组三中的单罐重柴油发生完全泄漏导致池火时,液池内燃料燃尽时间均为 6 675 s;汽油罐车完全泄漏发生池火的燃尽时间为 200 s。利用表 1 的公式计算得到事故链中各单元设备失效所需的时间,如表 5 所示,罐组一、罐组二和罐组三的燃料燃尽时间均大于所有目标设备失效所需时间,因此无需考虑燃尽时间问题。

表5 事故链中各单元设备失效所需时间

Table 5 Time required for each unit equipment failure in the accident chain

单元设备	接收总热辐射/(kW·m ⁻²)	失效时间/s
X_2	211.58	46
X_3 或 X_4	42.32	278
X_5 或 X_6	24.52	514
X_7 (装卸区)	21.67	606
$X_7(0, 92.24 \text{ m})$	15.00	918

表6 储罐 X_1 为初始事故单元时事故链中不同时间区间的扩展概率

Table 6 Expansion probabilities of different time intervals in the accident chain with tank X_1 as the initial accident unit

时间区间/s	事故单元扩展路径	扩展级别	初始事故发生概率和扩展概率
[0, 46)	X_1	无扩展	1.07×10^{-4}
[46, 278)	$X_1 \rightarrow X_2$	一级扩展	6.92×10^{-1}
[278, 792)	$X_1, X_2 \rightarrow X_3, X_4$	二级扩展	2.18×10^{-3}
[792, 1 398)	$X_1, X_2, X_3, X_4 \rightarrow X_5, X_6$	三级扩展	3.34×10^{-5}
[1 398, +∞)	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6 \rightarrow X_7$	四级扩展	8.84×10^{-6}

本文考虑到在役设备存在老化磨损等问题,对设备泄漏概率进行修正,均提升 1 个数量级。利用动态贝叶斯网络对储罐区多米诺效应事故进行分析,当槽罐车 X_7 停靠在装卸区时,划定时间节点,不同时间节点的扩展概率如表 6 所示,构建储罐区多米诺效应事故的动态贝叶斯网络结构模型,如图 7 所示。

由表 6 和图 7 可知,当储罐区内发生火灾事故时,若该储罐区内有移动槽罐车,事故将进一步升级,由三级升级到四级,事故进一步扩大。当槽罐车在图 6 中用黑色加粗线段标记的道路上移动时,槽罐车处于四级扩展目标单元,但相较于槽罐车在装卸区域内时失效所需时间发生了延长,最长变成 918 s[对应槽罐车位于坐标(0, 92.24 m)的位置],即在第 1 710 s 时,移动槽罐车被破坏,此时槽罐车被破坏的扩展概率为 2.11×10^{-7} 。

3.2 初始事故在槽罐车

当槽罐车在道路上发生泄漏时,以槽罐车完全泄漏遇到点火源并发生池火为初始事故进行分析。参考 3.1 节的分析,该储罐区事故链为:槽罐车 X_7 (池火)→储罐 $X_1/X_2/X_3/X_4/X_5/X_6$ (池火)。计算槽罐车发生池火事故产生的热辐射能量,根据表 1 中常压储罐的热辐射阈值计算出相应的半径,如表 7 所示。

由图 5 计算可知,位于道路上或装卸区的槽罐车与储罐的最短距离是 45 m,该距离大于表 7 中 X_7 (重柴油)对应的阈值半径 33.01 m,但小于 X_7 (汽油)对应的阈值半径 62.44 m。由此可知,当槽罐车运输重柴油时,完全泄漏发生池火并不会影响到储罐,因此本案例将槽罐车作为初始事故单元时,仅对槽罐车运输汽油的情况进行分析。通过计算可知,当道路上的槽罐车驶入坐标(0, 87.44 m)处发生池火时(见图 8),储罐 X_5 接收到热辐射为 15 kW/m²,达到了常压储罐可能发生失效所接收到的热辐射值

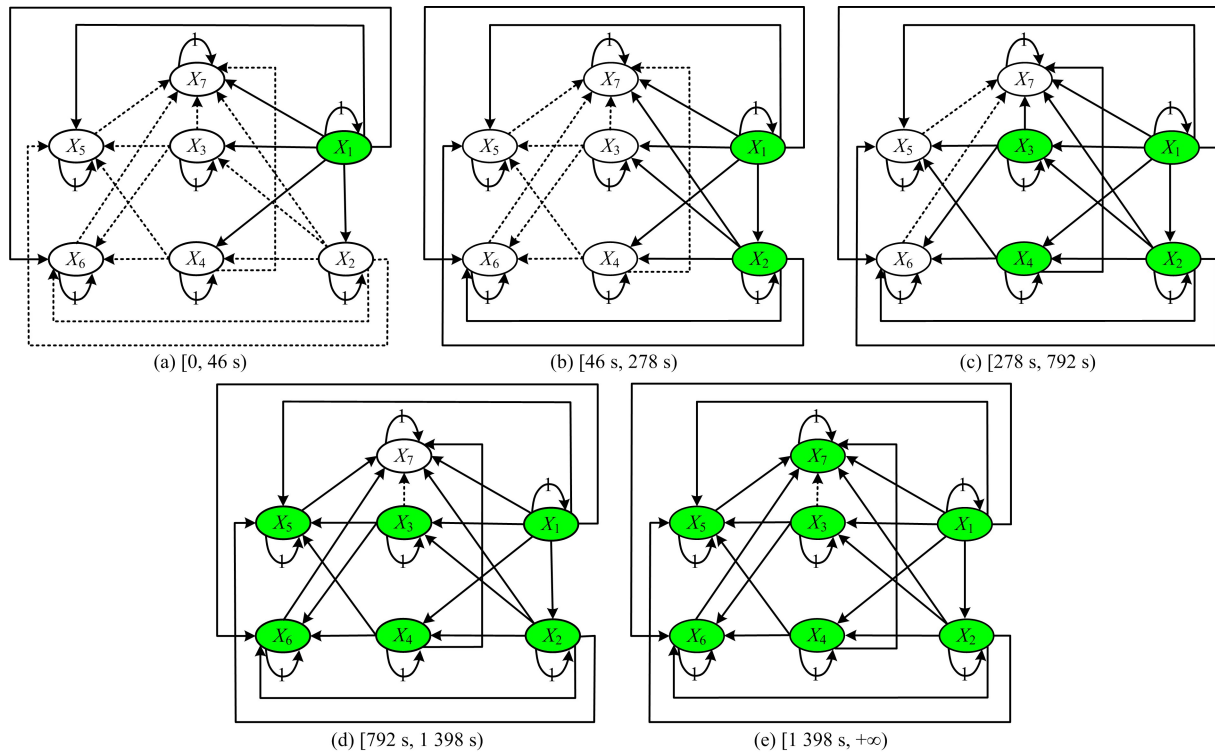


图 7 储罐 X_1 发生事故时引发多米诺事故的动态贝叶斯网络

Fig. 7 Dynamic Bayesian network of the domino accident caused by the tank X_1 accident

表 7 槽罐车发生池火时与热辐射阈值相对应的半径

Table 7 Radius corresponding to thermal radiation threshold for pool fires in the tank truck

事故单元	表面热辐射能量/kW	与常压储罐的阈值相对应的半径/m
X_7 (汽油)	734 932.87	62.44
X_7 (重柴油)	205 442.44	33.01

的阈值条件,但需要进一步判断是否满足热辐射时间条件才能确定储罐是否发生失效。当槽罐车驶入图 8 中黑色加粗线段所标记的道路的上边界点 [对应坐标为(0, 87.44 m)]时,距离槽罐车最近的储罐 X_5 受到热辐射导致失效所需的时间为 901 s,超过槽罐车泄漏发生池火的燃尽时间 200 s,因此储罐 X_5 不会失效,并不会导致多米诺效应事故。即使槽罐车驶入装卸区域内发生池火,储罐 X_5 受到热辐射导致失效所需的时间为 431 s,仍大于燃尽时间,也不会导致多米诺效应事故。

为了分析由槽罐车事故引起的多米诺效应,假设槽罐车驶入装卸区后继续沿原路线向罐组靠近,直至驶入坐标(0, 57.15 m)时,储罐 X_5 受到热辐射为 56.57 kW/m²,导致失效所需的时间为 200 s,恰好等于槽罐车泄漏发生池火的燃尽时间,满足发生失效的条件。由于此时 X_6 接收到 X_7 (槽罐车) 发生池火事故的热辐射为 8.67 kW/m²,没有超过热辐射

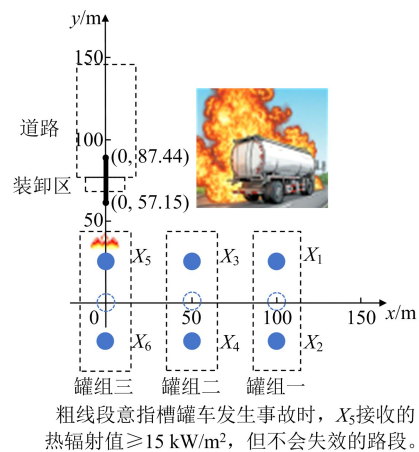


图 8 储罐 X_5 受槽罐车火灾事故影响发生失效的示意图

Fig. 8 Schematic diagram of tank X_5 failure caused by the tank truck fire accident

阈值,因此 X_6 不会在 X_7 池火作用下被破坏; X_3 接收到 X_7 发生池火事故的热辐射为 16.55 kW/m²,但导

致失效所需的时间为 800 s,超出了槽罐车泄漏发生池火的燃尽时间,因此 X_3 不会在 X_7 池火作用下被破坏。由表 4 可知,储罐 X_5 发生池火事故后可能会导致储罐 X_6 发生失效,其失效所需的时间为 186 s,其余储罐单元所接收到的热辐射不超过热辐射的破坏阈值(即 15 kW/m^2),因此不会发生失效。表 8 列出了事故链中不同时间区间内的事故扩展概率。利用表 8 的时间节点构建储罐区多米诺效应事故的动态贝叶斯网络结构模型,如图 9 所示。由表 8 和图 9 可知,当槽罐车在坐标(0, 57.15 m)处发生池火事故时,可能引发储罐 X_5 和 X_6 失效,失效时间分别是 200 s 和 386 s,扩展概率分别为 1.24×10^{-2} 和 1.73×10^{-2} 。

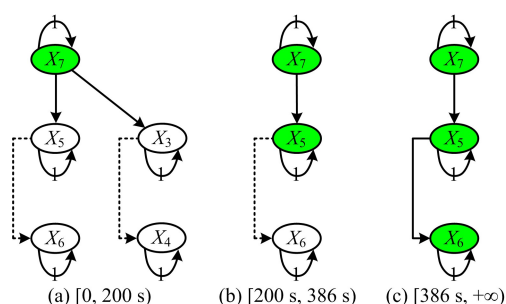


图9 槽罐车发生事故时引发多米诺事故的动态贝叶斯网络

Fig. 9 Dynamic Bayesian network of the domino accident caused by the tank truck accident

4 结论

(1) 当石油化工储罐区内固定的储罐发生多米诺效应事故时,若储罐区内存在移动槽罐车,可能会导致多米诺效应事故发生升级,造成事故后果进一步扩大。本文针对石油化工储罐区内有移动槽罐车时的多米诺效应事故,分析了槽罐车参与多米诺效应事故的场,提出了储罐区多米诺效应事故的动态贝叶斯网络分析方法,运用 Probit 函数模型和贝叶斯方法计算各个设备多米诺效应事故的扩展概率,揭示事故的动态演变过程。

(2) 以某石油储运企业为研究对象,考虑到每

天都有槽罐车驶入储罐区进行装卸燃料,利用动态贝叶斯网络方法分析了当储罐区内的固定储罐发生事故时,对道路上或装卸区域内槽罐车的影响。结果表明:仅在罐组一、二、三池火事故协同作用下才会影响到道路上的槽罐车;当道路上的槽罐车驶入坐标为(0, 92.24 m)的位置时,槽罐车接收到热辐射为 15 kW/m^2 ,达到阈值而有可能发生失效;当槽罐车分别位于道路上坐标为(0, 92.24 m)的位置和装卸区域内时,发生失效的时间分别是第 1 710 s 和 1 398 s,扩展概率分别为 2.11×10^{-7} 和 8.84×10^{-6} 。

(3) 在实际案例中,当槽罐车作为初始事故单元时,因为槽罐车与固定储罐之间的距离足够远,遏制了事故传播,所以并不会引发多米诺效应事故,这表明该案例的槽罐车行驶路线与装卸区域规划具备一定的安全性。为了分析槽罐车参与多米诺效应事故的影响,假设槽罐车驶入装卸区后继续沿原路线向罐组靠近,直至驶入坐标为(0, 57.15 m)的位置时发生池火,将引发储罐 X_5 和 X_6 失效,发生失效的时间分别是第 200 s 和 386 s,扩展概率分别为 1.24×10^{-2} 和 1.73×10^{-2} 。

参考文献 (References):

- [1] KHAKZAD N. Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 138: 263–272.
- [2] KHAKZAD N, LANDUCCI G, RENIERS G. Application of dynamic Bayesian network to performance assessment of fire protection systems during domino effects [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 167: 232–247.
- [3] 白晓昀. 基于贝叶斯网络的石油罐区多米诺效应风险分析技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
BAI X Y. Risk analysis for domino effect in tank area based on Bayesian network [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [4] 郑峰, 张明广, 左亚雯. 基于动态贝叶斯网络的化工装置区多米诺事故情景构建[J]. 南京工业大学学报

表8 槽罐车为初始事故单元时事故链中不同时间区间的扩展概率

Table 8 Expansion probabilities of different time intervals in the accident chain with tank truck as the initial accident unit

时间区域/s	事故单元扩展	扩展级别	初始事故发生概率和扩展概率
[0, 200)	X_7	无扩展	1.03×10^{-4}
[200, 386)	$X_7 \rightarrow X_5$	一级扩展	1.24×10^{-2}
[386, +∞)	$X_5 \rightarrow X_6$	二级扩展	1.73×10^{-2}

- (自然科学版), 2019, 41(5): 554–560.
- ZHENG F, ZHANG M G, ZUO Y W. Study on domino accident in chemical plant area based on dynamic Bayesian network[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2019, 41(5): 554–560.
- [5] 童琦. 基于贝叶斯理论的库区重大事故风险分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- TONG Q. Risk analysis of reservoir areas based on Bayesian theory[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [6] 黄海燕. 石化罐区雷电灾害风险辨识与评估研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- HUANG H Y. Research on risk identification and assessment of petrochemical tank areas by lightning[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.
- [7] 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 J S, FENG N N. 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.
- [8] 王璇, 宫博. 基于动态贝叶斯网络的储罐区多米诺效应事故研究[J]. 当代化工, 2024, 53(11): 2755–2759.
- WANG X, GONG B. Research on domino effect accidents in tank farm based on dynamic Bayesian networks[J]. Contemporary Chemical Industry, 2024, 53(11): 2755–2759.
- [9] 陈亚雄, 范茂魁, 胡博恺. 液氨槽罐车事故分析及处置措施研究[J]. 广东化工, 2023, 57(7): 125–127.
- CHEN Y X, FAN M K, HU B K. Accident analysis and treatment measures of liquid ammonia tank car[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 57(7): 125–127.
- [10] 宋晓燕, 苏含琴, 谢中朋. LPG 槽罐车泄漏爆炸数值模拟研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(6): 153–157.
- SONG X Y, SU H Q, XIE Z P. Study on numerical simulation of leakage and diffusion of LPG tanker[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(6): 153–157.
- [11] 张志斌, 叶继红. 高速路上 LPG 罐车泄漏爆炸危险性分析[J]. 工业安全与环保, 2023, 49(4): 5–10.
- ZHANG Z B, YE J H. Risk analysis of explosion from leaking LPG tankers on highway[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2023, 49(4): 5–10.
- [12] 刘勇, 李肖, 施式亮, 等. 基于多项 Logistic 的危化品槽罐车火灾类型判别[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 231–237.
- LIU Y, LI X, SHI S L, et al. Fire types discrimination of hazardous chemicals tanker based on multinomial Logistic[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024, 34(1): 231–237.
- [13] 衣健民. 基于贝叶斯网络的多米诺效应下事故传播机理研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- YI J M. Study on accident propagation mechanisms under domino effects based on Bayesian networks[D]. Shenyang: Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [14] COZZANI V, ANTONIONI G, SPADONI G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 19(5): 463–477.
- [15] 刘培, 宋文华, 张炳锋. 多米诺效应中的多事故点协同作用后果研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(11): 131–136.
- LIU P, SONG W H, ZHANG B F. Study on consequence by synergistic action of multiple accident points in domino effect[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(11): 131–136.
- [16] Committee for the Prevention of Disasters. Methods for the calculation of physical effects (‘Yellow Book’)[M]. Hague: Directorate-General for Social Affairs and Employment, 2005.
- [17] 韩恩慧. 基于贝叶斯网络耦合方法的石化装置定量风险评估[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2017.
- HAN E H. The quantitative analysis of petrochemical unit based on coupling method of Bayesian network[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [18] 危险化学品重大危险源辨识: GB 18218—2018[S]. Identification of major hazard sources of hazardous chemicals: GB 18218—2018[S].
- [19] 承压设备系统基于风险的检验实施导则 第 4 部分: 失效可能性定量分析方法: GB/T 26610.4—2022[S]. Guidelines for risk-based inspection of pressure equipment system. Part 4: quantitative analysis method for failure probability: GB/T 26610.4—2022[S].
- [20] 袁雄军, 朱常龙, 葛秀坤. 危险化学品泄漏事故点火概率取值研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(9): 39–45.
- YUAN X J, ZHU C L, GE X K. Study on values taking of ignition probabilities in hazardous chemical leakage accidents[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(9): 39–45.
- [21] Committee for the Prevention of Disasters. Guide lines for quantitative risk assessment (‘Purple Book’)[M]. Hague: Directorate-General for Social Affairs and Employment, 2005.

- [22] 伍壮. 基于多米诺效应分析的大型原油储罐区火灾风险研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
WU Z. Study on fire risk of large crude oil tank farm based on domino effect analysis [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [23] 刘明威. 基于贝叶斯网络的化工园区多米诺事故建模与分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2022.
LIU M W. Modeling and analysis of domino accidents in chemical industrial parks based on Bayesian networks [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2022.
- [24] 道路运输液体危险货物罐式车辆 第1部分: 金属常压罐体技术要求: GB 18564.1—2019[S].
Road transportation of liquid dangerous goods tank vehicles. Part 1: technical requirements for metal atmospheric pressure tanks: GB 18564.1—2019[S].
- [25] 林红. MTG 工艺危险后果模型改进和泡沫消防适应性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
LIN H. Improvement of MTG process hazard consequence model and research on foam fire protection adaptability [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [26] 张龙梅, 蒋攀, 鲁顺清. 池火灾热辐射量化模型对比分析研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(9): 58–61.
ZHANG L M, JIANG P, LU S Q. Research on the comparison and analysis of pool fire thermal radiation quantitative model [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(9): 58–61.

Dynamic analysis of domino effect accidents involving mobile tank trucks in storage tank areas

CHAI Junhui^{1,2}, ZHANG Zijian², LIU Mingwei³, WANG Yuanxin³, BAO Shiyi³, LUO Lijia³

(1 Ningbo Special Equipment Inspection & Research Institute, Ningbo 315048, Zhejiang, China;

2 Ningbo Labor Safety Technology Service Co., Ltd., Ningbo 315048, Zhejiang, China;

3 College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: In petrochemical storage tank areas, in addition to fixed storage tanks containing hazardous chemicals, mobile tank trucks transporting these materials also operate on the roads within the site. The presence of tank trucks can alter the propagation pathways of domino effect accidents, potentially exacerbating the consequences of such incidents. Therefore, accounting for the impact of moving tank trucks is crucial for conducting a thorough risk analysis of the storage tank area. This paper models and analyzes the dynamic evolution of domino effect accidents in petrochemical tank areas using dynamic Bayesian networks. The influence of moving tank trucks on domino effect accidents is incorporated by introducing dynamic nodes into the Bayesian networks. Through scenario simulations, the extended pathways of domino effect accidents within the tank area are identified. The timeline of the accident evolution process is segmented based on fuel burnout times and equipment failure times. Additionally, the Probit function model, in conjunction with Bayesian theory, is utilized to calculate the probability of domino effect accidents propagating across various levels of equipment units. A dynamic analysis method for domino effect accidents is proposed for scenarios involving moving tank trucks in petrochemical storage tank areas. This method offers valuable support for analyzing and preventing domino effect accidents in these environments. The effectiveness and advantages of the proposed approach are illustrated through a case study conducted in a real-world tank area. The analysis results reveal the following insights: (1) When multiple fixed storage tanks within the tank area catch fire simultaneously, the incident may extend to tank trucks located on the road or in the loading and unloading areas. (2) Conversely, when a tank truck serves as the initial accident unit, it does not trigger a domino effect accident under the conditions of this case study. This is primarily due to the sufficient distance between the tank truck and the fixed storage tanks, which prevents the spread of the accident.

Key words: safety engineering; storage tank area; domino effect; dynamic Bayesian network; mobile node