

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.027

基于动态贝叶斯网络的储罐区 燃爆事故多米诺效应研究*

柯特¹, 陈先锋¹, 陈月^{1,2}, 黄楚原¹, 刘丽娟¹

(1. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 武汉 430070; 2. 武汉纺织大学环境工程学院, 武汉 430200)

摘要: 化工储罐区存放多为易燃易爆的有毒危险化学品, 一旦发生泄漏, 进而会引发燃爆事故, 后果将不堪设想。基于动态贝叶斯网络方法, 选取某 LNG、LPG 储罐区, 确定事故多米诺效应的演变过程、事故过程时间节点以及各层级间的影响作用, 借助贝叶斯计算软件分析, 提出动态贝叶斯网络多米诺效应分析方法, 对热辐射值进行二次计算, 运用设备损坏概率模型, 得到 0 ~ 37.55 min、37.55 ~ 47.55 min、47.55 ~ 52.55 min 和 52.55 ~ 57.55 min 四个时间段内各储罐多米诺事故扩展概率。考虑对单个以及多个储罐采取应急措施, 设置不同置信度分别对应分配不同程度应急救援力量使储罐达到安全状态的程度, 得到初始事故发生后在应急救援力量充足和应急救援力量有限情况下各事故储罐关键时刻事故发生概率。结果表明: 在应急救援力量充足和应急救援力量有限情况下, 优先考虑对化工园区安全性影响最大储罐采取应急措施, 可大大降低化工园区燃爆风险, 提升化工园区安全性。结论为后续储罐区燃爆风险的评估提供理论依据, 为消防力量分配提供数据支撑, 为多米诺效应事故应急决策提供指导作用。

关键词: 化工储罐区; 燃爆事故; 动态贝叶斯网络; 多米诺效应; 应急措施

中图分类号: O381 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0186-06

Domino Effect Study of Tank Area Ignition and Explosion Accident based on Dynamic Bayesian Network

KE Te¹, CHEN Xian-feng¹, CHEN Yue^{1,2}, HUANG Chu-yuan¹, LIU Li-juan¹

(1. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Environmental Engineering, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: A chemical storage tank area stores most of the inflammable and explosive toxic and dangerous chemicals. Once leakage occurs, it will cause ignition and explosion accidents, and the consequences will be unimaginable. Based on the dynamic Bayesian network method, an LNG and LPG storage tank area was selected to determine the evolution process of the accident domino effect, the time nodes of the accident process and the influence between different levels. With the help of Bayesian computing software, the domino effect analysis method of dynamic Bayesian network is proposed, and the thermal radiation value is calculated twice. Then, the extended probability of domino accident of each storage tank in four time periods of 0 ~ 37.55 min, 37.55 ~ 47.55 min, 47.55 ~ 52.55 min and 52.55 ~ 57.55 min was obtained by using the equipment damage probability model. Considering emergency measures for individual and multiple tanks, different levels of confidence are set to allocate different degrees of emergency rescue force to make the storage tank reach the safe state. Based on this, the accident probability of each accident

收稿日期: 2022-11-01

作者简介: 柯特(1999-), 女, 硕士, 主要从事危险化学品风险评估研究, (E-mail) 303317@whut.edu.cn。

通讯作者: 陈月(1986-), 女, 博士、讲师, 主要从事热安全防护材料技术、公共安全与应急管理方向研究, (E-mail) chenye9458@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金(52274224、52104213); 湖北省安全生产专项资金项目(SJZX20211003); 湖北省重点研发计划(2021BCA216)

storage tank at the critical moment is obtained under the condition of sufficient and limited emergency rescue force after the initial accident. The results imply that under the condition of sufficient emergency rescue force and limited emergency rescue force, priority should be given to taking emergency measures for the storage tank that has the greatest impact on the safety of the chemical industry park, which can greatly reduce the risk of ignition and explosion.

Key words: chemical storage tank area; explosion accident; dynamic Bayesian network; domino effect; emergency measures

随着化工行业快速发展,化工企业储罐区呈现出危化品种类复杂化,储罐规模和容积大型化的特点。储罐区复杂化和大型化提高了化工生产的效率,同时也大大增加了储罐区燃爆事故发生概率以及发生二级及更高次事故可能性,单个装置发生事故往往会波及其他装置,引发连锁反应,事故多米诺效应危险性急剧增加^[1,2]。

当前多米诺效应研究的主流为定量风险评价,即计算初始事故和二次事故发生的可能性和严重程度大小,再将其风险值进行叠加,最后通过个人风险和社会风险等指标来,衡量整体风险的大小。该方法目前已相当成熟,有大量的计算模型和辅助软件支持,但这种方法的结果所表达的是所研究对象的整体风险大小,不能反映出多米诺事故内部作用机理和事故传播过程。基于这方面的限制,近些年有一些学者将贝叶斯网络应用到多米诺效应事故传播过程分析中,这些研究表明贝叶斯网络是一种非常适用于事故传播过程建模的方法。另外,在大量的国内外多米诺效应研究中,很少有考虑时间因素和应急措施这两方面因素,这将会造成分析结果的不准确。所以,应用贝叶斯网络方法对多米诺效应进行分析,并综合考虑时间因素和应急措施两个方面,将是多米诺效应研究中的一个新方向。

文章基于动态贝叶斯网络分析技术,认为燃爆事故多米诺效应是时间依赖的过程,通过确定事故链中的时间节点,预测多米诺效应的时间演变方向,分析不同时间段各个储罐所受到的热辐射值,运用贝叶斯计算软件定量研究燃爆多米诺效应概率。同时,设置不同置信度分别对应分配不同程度应急救援力量使储罐达到安全状态的程度,探讨对单个以及多个储罐采取应急措施时对多米诺效应事故演变影响。

1 燃爆事故多米诺效应

1.1 多米诺效应概述

AICHE-CCPS 定量风险评估指南将多米诺效应定义为“从一个项目开始,可能通过热辐射、爆炸或碎片影响附近项目的事件”,导致后果严重程度或

故障频率的增加^[3]。Reniners 等结合前人研究^[4],提出一个较全面的定义:一个初始事件传播到附近设备,触发一个或多个二次事件,进而引发高阶事件,导致比初始事件后果更严重的事故。

1.2 目标设备失效阈值

发生多米诺效应,初始事故产生的物理效应(火灾、爆炸、碎片冲击等)作用在目标设备上,当物理效应达到一定值时,目标设备受到破坏,初始事故发生“升级”,触发一个或多个二次事故场景,这个临界值即为多米诺效应的阈值^[5]。多米诺效应场景的评估主要通过使用失效阈值识别可能被初始事故破坏的次要目标。基于目标设备失效阈值选择可信的升级场景是评估和控制多米诺效应事故所造成风险的一个核心问题。

Cozzani 等人认为火灾热辐射的阈值受时间、目标设备和热辐射强度等因素的影响^[6],在没有火焰撞击或吞噬的情况下,若常压容器辐射强度低于 10 kW/m^2 或加压容器辐射强度低于 40 kW/m^2 ,热辐射作用时间高于 30 min ,在一定时间内可能导致的容器壁加热升级。Landucci 等人根据有效减缓时间对热辐射阈值进行了修正^[7],有效减缓时间指发现燃爆事故后到应急措施实施所需要的时间,如表 1 所示。

表 1 常压或压力容器热辐射阈值
Table 1 Thermal radiation threshold of atmospheric or pressure vessel

有效减缓时间 最大值/min	热辐射阈值/ $(\text{kW} \cdot \text{m}^{-2})$	
	压力容器	常压容器
30	40	10
15	50	13
10	60	15

1.3 设备损坏概率模型

设备损坏概率是指初始事件向二次事故场景扩展,导致其他目标设备受到破坏,进而发生二次事件的概率。Cozzani 和 Landucci 等人基于经验数据和试验验证^[8],通过对火灾、爆炸事故场景造成的目标设备损坏概率进行模型简化计算,给出了 Probit 模型,如式 1 所示

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y-\frac{x^2}{2}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (1)$$

式中： P 为目标设备的损坏概率； Y 为目标设备失效的概率单位值； x 为积分变量。概率单位值压力容器部分如式 2、式 3 所示

$$Y = 14.11 - 3.42 \ln(t_f) \quad (2)$$

$$\ln(t_f) = -0.947 \ln(I) + 8.835V^{0.032} \quad (3)$$

式中： t_f 为储罐失效时间，s； I 为热辐射强度，kW/m²； V 为目标设备的容积，m³。

2 案例应用

2.1 储罐区燃爆场景构建

本节将选取某 LNG、LPG 储罐区，具体布局如图 1 所示。其中 $T_1 \sim T_4$ 为 LNG 罐， $T_5 \sim T_8$ 为 LPG 罐，体积(V)均为 1000 m³，液池半径(R)均为 10 m，其他相关参数燃烧速率(m''_{∞})、平均火焰长度的修正熄灭因子($k\beta$)、发光点的发射功率($E_{f,max}$)、燃烧热(H_c)如表 2 所示。

2.2 储罐相互间热辐射值

燃爆事故是化工企业储罐区最常见的导致多米诺效应事故的初始事故场景。相对于毒气泄漏来说，燃爆事故多米诺效应的发生更为频繁，预防和应

急处置更加具有实际意义，故本节选择无风情况下对储罐区发生的燃爆事故进行分析。通过 Mudan 模型求得各储罐所受的热辐射值^[9]。如表 3 所示。

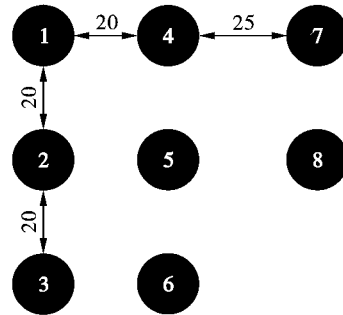


图 1 化工园区储罐区布局图(单位:m)
Fig. 1 Layout map of the tank area in the chemical park (unit:m)

表 2 储罐存储物质相关参数
Table 2 Parameters related to the storage substance in the tank

	$m''_{\infty}/$ (kg · m ⁻² · s ⁻¹)	$k\beta/$ (m ⁻¹)	$E_{f,max}/$ (kW · m ⁻²)	$H_c/$ (kJ · kg ⁻¹)
LNG/甲烷	0.141	0.136	265	35590
LPG/丙烷	0.118	0.500	250	47472

表 3 T_j 罐接收到来自 T_i 罐的热辐射值 (kw/m²)

Table 3 The thermal radiation from the T_i tank to the T_j tank (kw/m²)

T_j T_i	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
T_1	0.00	33.34	12.55	33.34	21.12	10.43	10.80	9.19
T_2	33.34	0.00	33.34	21.12	33.34	21.12	9.19	10.80
T_3	12.55	33.34	0.00	10.43	21.12	33.34	10.80	9.19
T_4	33.34	21.12	10.43	0.00	33.34	12.55	26.70	18.50
T_5	18.73	29.99	18.73	29.99	0.00	29.99	16.32	23.88
T_6	8.99	18.73	29.99	10.89	29.99	0.00	8.38	16.32
T_7	9.32	7.89	9.32	23.88	16.32	8.38	0.00	29.99
T_8	7.89	9.32	7.89	16.32	23.88	16.32	29.99	0.00

2.3 关键时间节点分析

当 T_1 储罐发生事故后， T_2 和 T_4 所受到的热辐射为 33.34 kW/m² < 40 kW/m²，作用时间超过 30 min 会发生一次多米诺效应事故。而此时 T_1 发生事故后，同时也会作用于 T_5 ，热辐射值为 21.12 kW/m² < 40 kW/m²，未超过扩展阈值，但此时 T_5 也会受到邻近的 T_2 和 T_4 储罐的叠加影响，热辐射叠加值为 21.12 + 33.34 + 33.34 = 87.8 kW/m² > 60 kW/m²，超过扩展阈值，则认为事故发生扩展。此处的分析推理忽略了一个问题，可能 T_5 储罐在失效前 T_1 储

罐已经燃尽熄灭了，储罐 T_5 仅仅受到 T_2 和 T_4 储罐的热辐射作用，热辐射强度为 66.68 kW/m²，进而会影响失效时间的长短，对下一次多米诺效应的扩展有所影响。

考虑燃尽时间(t_b)和失效时间(t_f)，燃尽时间的计算方法如式 4 所示^[10]

$$t_b = \frac{m}{Q_v} \quad (4)$$

式中： m 为储罐燃料总质量，kg； Q_v 为燃料的燃烧速率，kg/s。

T_5 受到 T_1 、 T_2 和 T_4 协同作用引发事故必须满足

$t_b(T_1) \geq t_f(T_2) + t_f(T_4) + t_f(T_5)$ 、 $t_b(T_2, T_4) \geq t_f(T_5)$ 。
 $T_1 \sim T_4$ 储罐燃尽时间为 4.39 h, $T_5 \sim T_8$ 的为 2.89 h。

2.4 基于时间序列动态贝叶斯多米诺效应概率计算

2.4.1 热辐射值和扩展概率二次计算

储罐接收到的热辐射值会随着时间的变化而变

化,相应扩展概率也会发生变化,故对热辐射值进行二次计算如表 4 所示。在事故传播阶段,引入时间因素,不同储罐失效时间不同,且储罐燃尽时间远远大于储罐失效时间,故此案例应用中不必考虑储罐燃尽问题。

表 4 第一、二和三阶段热辐射值及扩展概率

Table 4 Thermal radiation values and expansion probabilities in the first, second and third stage

作用过程	时间段/min	热辐射值/(kw · m ⁻²)	失效时间/min	扩展概率
第一阶段: T_1 作用于 T_2 和 T_4	0 ~ 37.55	33.34	37.55	0.786
第二阶段: T_1, T_2 和 T_4 作用于 T_5	37.55 ~ 47.55	87.8	15.11	0.998
第三阶段: T_1, T_2 和 T_4 作用于 T_3	37.55 ~ 52.55	56.32	22.91	0.960

第四阶段: T_1, T_2, T_4 和 $T_5(T_3)$ 分别作用于 T_6, T_7 和 T_8 储罐。首先对 37.55 ~ 47.55 min, 47.55 ~ 52.55 min, 52.55 ~ 57.55 min 三个阶段储罐接收到热辐射值二次计算,计算结果如图 2 所示。再对扩展概率进行二次计算,如表 5 所示。

本平稳一致^[10],借助 GeNIe 动态贝叶斯软件对储罐区多米诺效应进行分析,得到基于贝叶斯网络的多米诺效应概率^[11],如图 3,表 6 所示, state0 和 state1 表示储罐不发生事故和储罐发生事故两种情况。

表 5 扩展概率进行二次计算

Table 5 The second calculation of the extended probabilities

	T_3	T_6	T_7	T_8
接收热辐射值	65.69	67.43	57.55	52.74
扩展概率	0.994	0.996	0.98	0.966

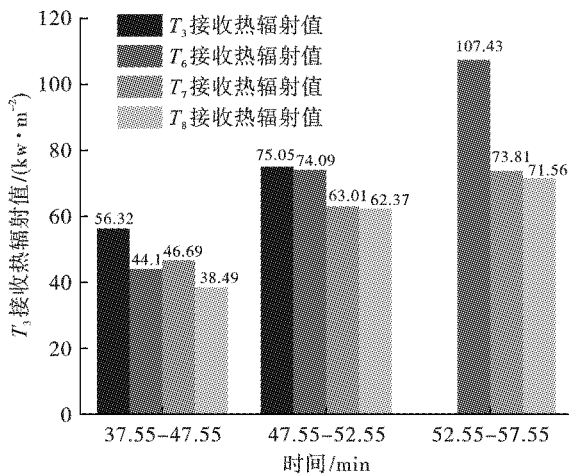


图 2 储罐接收到热辐射值二次计算

Fig. 2 The second calculation of thermal radiation received by the tank

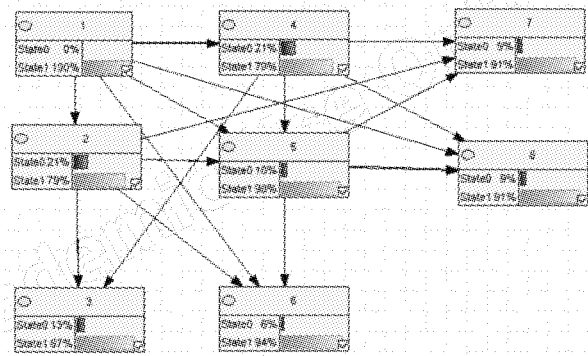


图 3 基于贝叶斯网络的多米诺效应概率图

Fig. 3 Domino effect probability plot based on Bayesian network

2.4.2 基于贝叶斯网络的多米诺效应概率图

假设储罐事故扩展概率在一定时间 $t + \Delta t$ 内基

表 6 基于时间动态贝叶斯网络的多米诺效应概率

Table 6 Domino effect probability based on temporal dynamic Bayesian networks

时间/min	$P(T_1, T_2, T_2, T_4)$	$P(T_1, T_2, T_4 - T_5)$	$P(T_1, T_2, T_4, T_5 - T_3)$	$P(T_1, T_2, T_4, T_5, T_3 - T_6)$	$P(T_1, T_2, T_4, T_3, T_3 - T_7)$	$P(T_1, T_2, T_4, T_5, T_3 - T_8)$
0 ~ 37.55	0.786					
37.55 ~ 47.55		0.905				
47.55 ~ 52.55			0.873			
52.55 ~ 57.55				0.944	0.913	0.907

3 储罐区燃爆事故的应急措施

储罐区安全对策措施主要可分为三类^[12]：第一类为主动防护措施，以防止储罐发生燃爆事故而采取的主动防护措施，例如保温绝热防护措施、压力防护措施；第二类为被动防护措施，是指以储罐发生燃爆事故后尽可能减少事故的危害，采取的应对措施^[13]，例如消防冷却水防护措施、泡沫覆盖措施和干粉灭火措施；第三类为应急措施，即储罐区的安全管理人员通过调动可用资源来减轻事故危害^[14]。文章主要考虑事故发生后应急措施中消防力量的分配调度，并且因储罐 4 为 LNG 罐，储罐 5 为 LPG 罐，储存物质不同，故分情况讨论。

3.1 对单个储罐采取应急措施

设置不同置信度分别对应分配不同程度应急救援力量使储罐达到安全状态的程度，定义升高比例为受影响的储罐 6、7 和 8 安全度较原安全度升高的百分比之和。表 7、表 8 分别为储罐 4、5 采取不同置信度的应急措施后，对储罐 6、7 和 8 安全度的影响变化，其中，当只对 5 采取应急措施时（即储罐 5 置信度为 100%，使储罐 5 不发生扩展事故），储罐 6、7、8 的安全比例分别为 46%、46%、53%，高于只对储罐 4 采取应急措施时（即储罐 4 置信度为 100%，使储罐 4 不发生扩展事故）的 16%、32%、26%，由此可见对储罐 5 采取应急措施对罐区整体安全性影响较大。

表 7 储罐 4 应急措施在不同置信度下对储罐 6、7 和 8 的影响

Table 7 Impact of emergency measures of tank 4 on tanks 6,7 and 8 at different confidence levels

情景	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
储罐 4 置信度/%	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
储罐 6 安全度/%	6	6	7	7	8	9	10	11	12	14	16
储罐 7 安全度/%	9	10	11	12	14	16	18	20	23	27	32
储罐 8 安全度/%	9	10	11	12	13	14	16	18	20	23	26
升高比例/%	0	2	5	7	11	15	20	25	31	40	50

表 8 储罐 5 应急措施在不同置信度下对储罐 6、7 和 8 的影响

Table 8 Impact of emergency measures of tank 5 on tanks 6,7 and 8 at different confidence levels

情景	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
储罐 5 置信度/%	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
储罐 6 安全度/%	6	6	7	9	6	12	15	18	23	31	46
储罐 7 安全度/%	9	9	10	11	13	15	17	20	25	32	46
储罐 8 安全度/%	9	10	11	13	14	16	19	23	28	37	53
升高比例/%	0	1	4	9	9	19	27	37	52	76	121

如图 4 所示，当分别对储罐 4 和储罐 5 采取应急措施，置信度小于 75% 情况下，储罐 4 和储罐 5 对储罐区安全性影响较为接近；置信度大于 75% 情况下，储罐 5 采取应急措施对罐区安全性影响较大，故在发生燃爆事故时，由此也能证明，事故发生时应优先考虑先对储罐 5 采取应急措施。

3.2 对两个储罐同时采取应急措施

(1) 应急救援力量充足时，同时对储罐 4、5 采取应急措施，使储罐 4、储罐 5 不发生事故扩展即 $state(4,5)0 = 1$ ，所得概率如图 5 所示，储罐 6、7 和 8 安全比例分别降低至 48%、66%、67%，远高于原事故以及只对单个储罐采取应急措施时的安全比例。

(2) 应急救援力量有限时，只能同时对储罐 4 和储罐 5 采取部分有限的应急措施，通过设置不同置信度以描述这类情景，具体情景 1 ~ 11 如表 9

所示。

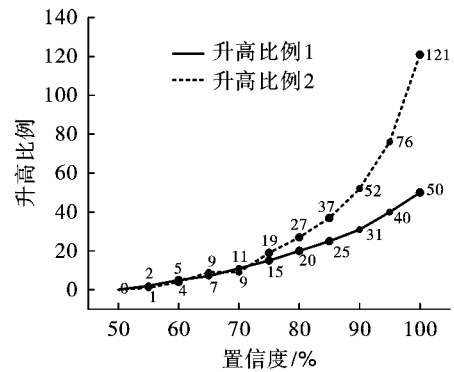


图 4 储罐 4 和储罐 5 应急措施

在不同置信度下对储罐 6、7 和 8 的影响

Fig. 4 Impact of emergency measures of tank 4 and tank 5 on tanks 6,7 and 8 at different confidence levels

表9 情况1~11对应储罐4和5置信度

Table 9 Confidence levels corresponding to states 1~11 of tanks 4 and 5

情景	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
储罐4置信度/%	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
储罐5置信度/%	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50

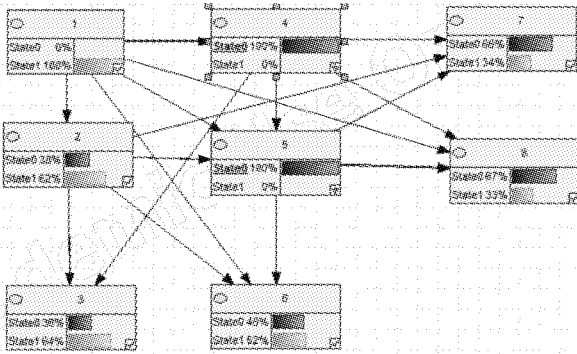


图5 储罐4、5不发生事故扩展

Fig. 5 No accident expansion of storage tanks 4,5

由图6、图7可知,同时对储罐4和储罐5采取应急措施,应急救援力量一定,在1~11不同情景中,通过储罐6、7和8安全状态的升高比例所反映出的应急措施效果显示,储罐区安全性呈现下降后升高的趋势,总体而言,优先将应急救援力量分配给储罐5,使得储罐区安全性提升较高。

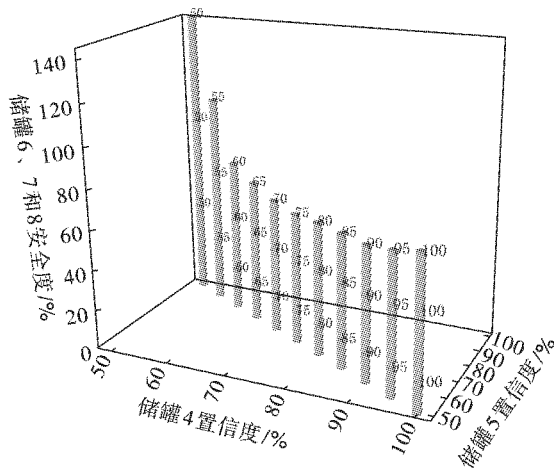


图6 储罐4和储罐5在50%~100%置信度下分别对储罐6、7和8的影响

Fig. 6 Effects of tanks 4 and 5 on tanks 6,7 and 8, respectively, at 50%~100% confidence

4 结论

论文以某化工园区储罐区为研究对象,基于动态贝叶斯网络分析技术,认为多米诺效应是时间依赖的过程,确定事故多米诺效应的演变过程、事故

过程时间节点以及各层级间的影响作用,借助贝叶斯计算软件分析,提出动态贝叶斯网络多米诺效应分析方法,得到以下结论:

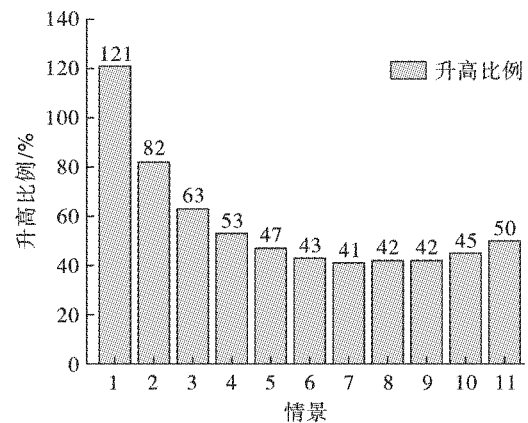


图7 储罐4和储罐5在50%~100%置信度下对储罐6、7和8综合影响

Fig. 7 Combined effect of tanks 4 and 5 on tanks 6,7 and 8 with 50%~100% confidence

(1)对化工园区储罐区燃爆多米诺效应进行了风险分析,基于时间序列对储罐区开展了不同事故场景下的贝叶斯网络分析,并建立了失效时间与阈值时间判定体系,对热辐射值进行二次计算,运用设备损坏概率模型,得到 T_2 、 T_4 、 T_5 、 T_3 、 T_6 、 T_7 、 T_8 储罐在0~37.55 min、37.55~47.55 min、47.55~52.55 min和52.55~57.55 min四个时间段内多米诺事故扩展概率分别为0.786、0.786、0.905、0.873、0.944、0.913、0.907,量化了评估事故演化机制,为后续化工园区燃爆风险的评估提供理论依据。

(2)通过研究对不同储罐采取应急措施多米诺效应概率的变化,得出初始事故发生后,应急救援力量充足和应急救援力量有限情况下各事故储罐关键时刻事故发生概率,结果表明,对储罐5采取应急措施使得化工园区安全性提升最大,可优先考虑对储罐5采取应急措施,为消防力量分配提供数据支撑,为多米诺效应事故应急决策提供指导作用。