

周剑峰, 彭磊. 基于反向模糊 Petri 网的应急响应条件下事故的致因分析[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 124–126. [Zhou Jianfeng and Peng Lei. Reversed fuzzy Petri nets based accident causation analysis under emergency response[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 124–126.]

基于反向模糊 Petri 网的应急响应条件下事故的致因分析*

周剑峰, 彭磊

(广东工业大学 机电工程学院工业工程系, 广东 广州 510006)

摘要: 分析应急响应行动对事故发展的影响, 对完善应急准备具有重要作用。提出利用反向模糊 Petri 网进行推理, 以对应急响应行动进行分析。讨论了模糊 Petri 网和反向模糊 Petri 网的推理方法, 以火灾多米诺效应这一典型受应急响应影响的事故为例, 建立了 Petri 网模型, 并对主要的应急行动进行了分析, 结果表明, 基于模糊 Petri 网反向推理的分析方法对应急行动进行分析是可行的。

关键词: 反向模糊 Petri 网; 应急响应; 事故; 致因分析

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2015)03–0124–03

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2015.03.023

事故发生后的应急行动, 会对事故的演化造成影响, 事故不同的演化方向会造成不同的后果。对影响事故演化的原因进行分析, 可以帮助我们完善应急预案, 在事故中采取合理的应急行动, 减少事故的损失。

多米诺效应是指一个事故发生后, 引起其它一系列事故相继发生。化工或流程企业的生产过程中处理或储存的危险化学品种类繁多, 其中绝大多数具有易燃易爆、有毒有害或腐蚀等危险特性。危险源之间在事故中存在相互作用, 例如危险化学品泄漏后, 由其引发的火灾、爆炸事故中所产生的热辐射、冲击波和碎片等, 还会导致附近其它危险源发生泄漏、火灾或爆炸, 从而造成更大的事故。多米诺效应是初始事故发展的结果, 初始事故发生后人们往往采取应急响应, 应急行动会影响事故的发展, 进而影响多米诺效应发生的可能性。

虽然对多米诺效应的研究已经很多^[1–7], 但很少涉及应急响应对事故的影响。应急响应是由一系列应急行动构成, 这些行动对事故的发展会造成很大的影响, 有效的应急行动可能会阻止多米诺效应产生, 但错误的行动也可能会促进多米诺效应发生。本文针对多米诺事故分析应急行动对事故的影响。

模糊 Petri 网(Fuzzy Petri Net, FPN)采用图形

建模方法, 模型直观、易于理解, 又有深刻的数学内涵和基础, 以及良好的形式化描述方法, 可以清晰地表示相关知识, 还可以表现出知识库系统中规则之间的结构化特性, 并在故障诊断、知识推理等方面得到一定的应用^[8–12]。本文利用模糊 Petri 网进行多米诺效应的致因分析。

1 反向模糊 Petri 网

基于模糊 Petri 网推理的主要目的是确定命题之间的因果关系, 并计算当原因成立时后果成立的可能性。实践中存在已知结果产生的可能性, 而需要计算原因的可能性, 这可以利用模糊 Petri 网反向推理来实现^[11–14]。

模糊 Petri 网 FPN 可定义为一个 5 元组:

$$FPN = (P, T, \Delta, \Gamma, M, U). \quad (1)$$

式中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为库所集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为变迁集合; Δ 为 $m \times n$ 矩阵, 元素 $\delta_{ixj} \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, 当 p_i 是 t_j 的输入时, δ_{ixj} 为 1, 否则为 0; Γ 为 $m \times n$ 矩阵, 元素 $\gamma_{ixj} \in \{0, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$, 当 p_i 是 t_j 的输出时, γ_{ixj} 为 1, 否则为 0; M 是 Petri 网的标记, $M = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$, θ_i 为库所 p_i 的可信度; $U = (u_{ij})_{m \times n}$, 为 $m \times$

* 收稿日期: 2014–11–18 修回日期: 2015–01–12

基金项目: 广东省自然科学基金资助(S2011040003990)

作者简介: 周剑峰(1970–), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事系统安全与风险分析研究。

E-mail: jf.zhou@gdut.edu.cn

m 对角矩阵,其元素 u_{ij} 为变迁 t_j 的可信度(CF), $u_{ij} = 0 (j \neq i)$ 。

此外,定义 $\rho = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m\}$, ρ_j 表示变迁 t_j 的输入库所的可信度的最小值。

把模糊 Petri 网中弧的方向反转,可以得到对应的反向模糊 Petri 网,因而定义反向 Petri 网(RFPN)为:

$$RFPN = (P', T', \Delta', \Gamma', M', V). \quad (2)$$

式中, $P' = P; T' = T; \Delta' = \Gamma; \Gamma' = \Delta; M' = M; V = (v_{ij})_{m \times n}$, 且 $v_{ij} = 1/u_{ij}$, $v_{ij} = 0, j \neq i$ 。

模糊 Petri 网和反向模糊 Petri 网如图 1 所示,其中图 1a 为模糊 Petri 网推理过程,图 1b 为反向模糊 Petri 网推理过程。

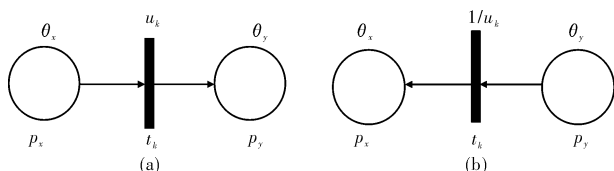


图 1 模糊 Petri 网和反向模糊 Petri 网

为形式化描述推理过程,引入两个算子:

$\oplus: A \oplus B = C$, A 、 B 和 C 均为 $m \times n$ 矩阵, a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} 分别表示它们的元素,有 $c_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}$;

$\otimes: A \otimes B = C$, A 、 B 和 C 分别是 $m \times p$, $p \times n$ 和 $m \times n$ 矩阵, $c_{ij} = \max\{a_{ik} \times b_{kj}\}$, 其中 $k = \{1, 2, \dots, p\}$, $i = \{1, 2, \dots, m\}$, $j = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

基于 RFPN 的反向推理算法为迭代计算 Petri 网的标记 M :

$$M(k) = M(k-1) \oplus [\Delta \times V \otimes \rho(k)]. \quad (3)$$

2 罐区火灾多米诺效应致因分析

某油库储罐区有 6 个汽油常压储罐(立式圆柱储罐),储罐间的距离 30 m(底部圆心间距离),储罐的直径均为 20 m,高 10 m,储罐布局如图 2 所示。一个储罐发生火灾(假设 $Tk1$ 发生火灾,火灾范围不超过储罐直径,视为池火灾),在应急响应下,火灾可能会被控制甚至会被扑灭,但在火灾热辐射作用下,也可能使邻近的储罐发生火灾甚至爆炸。

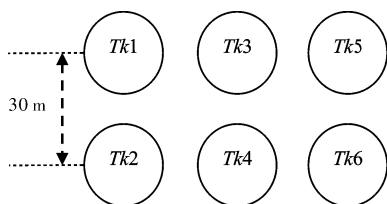


图 2 储罐区油罐布局

图 2 中所示的储罐区,若 $Tk1$ 发生火灾,根据池火灾热辐射模型,可以估算出邻近的 $Tk2$ 和 $Tk3$ 所受到的热辐射强度最大,最可能先发生多米诺事故。经估算, $Tk2$ 和 $Tk3$ 所受的热辐射约 12.5 kW/m^2 , 对应的失效时间约 17 min, 因此,应急响应应在 17 min

内采取措施降低储罐 $Tk2$ 和 $Tk3$ 受到的热辐射强度,若超过 17 min 热辐射仍没有降低,可认为 $Tk2$ 和 $Tk3$ 将发生多米诺效应,从而使事故扩大。若 $Tk1$ 发生火灾后,不采取任何应急响应行动,根据其容量和汽油燃烧速率估算,火灾持续时间会超过 2 000 min(假设汽油不外溢), $Tk2$ 和 $Tk3$ 甚至其它储罐会在热辐射的作用下产生多米诺效应,生成更严重的事故。

初始火灾事故发生后,企业和社会的应急组织和人员会采取应急响应行动,以减少事故的损失。应急响应中许多因素对事故的发展都有影响,如人员的素质、资源的配置、采取的行动、相互配合等,这里只考虑两种行动的事故的影响,一是应急人员到现场延误,二是灭火行动不正确。相应的规则如下,

R1: IF 到达现场延误(p_1) THEN 延迟灭火(p_2) AND 延迟对邻罐喷水降温(p_3), $CF = 0.8$;

R2: IF 延迟灭火(p_2) THEN 着火储罐的热辐射未及时降低(p_5), $CF = 0.9$;

R3: IF 延迟对邻罐喷水降温(p_3) THEN 邻近储罐接收的热辐射未及时降低(p_6), $CF = 0.9$;

R4: IF 灭火行动不正确(p_4) THEN 着火储罐的热辐射未及时降低(p_5), $CF = 0.95$;

R5: IF 着火储罐的热辐射未及时降低(p_5) AND 邻近储罐接收的热辐射未及时降低(p_6) THEN 多米诺效应产生(p_7), $CF = 0.95$ 。

建立相应的模糊 Petri 网如图 3 所示。

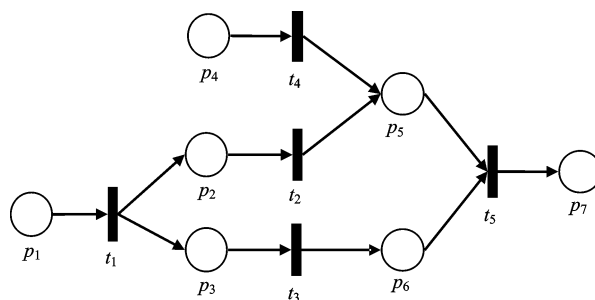


图 3 应急响应对多米诺效应影响的模糊 Petri 网

基于文献[15]中的多米诺效应概率分析方法,以及我国消防响应时间的统计规律,估算出在储罐 $Tk1$ 发生池火灾, $Tk2$ 和 $Tk3$ 发生多米诺效应的概率为 28%。现在要分析在上述规则下,各应急行动因素对多米诺效应的影响程度,建立反向模糊 Petri 网如图 4 所示。

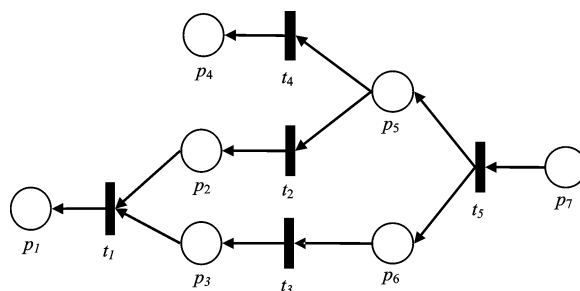


图 4 应急响应对多米诺效应影响的反向模糊 Petri 网

从图 4 可得:

$$\Delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, V = \begin{pmatrix} \frac{1}{0.8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{0.9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.9} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{0.95} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{0.95} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$M(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.28]^T, \rho(0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.28]^T. \quad (5)$$

通过迭代计算可得:

$$M(1) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.29 \ 0.29 \ 0.28]^T, \quad (6)$$

$$M(2) = [0 \ 0.32 \ 0.32 \ 0.31 \ 0.29 \ 0.29 \ 0.28]^T, \quad (7)$$

$$M(3) = [0.4 \ 0.32 \ 0.32 \ 0.31 \ 0.29 \ 0.29 \ 0.28]^T, \quad (8)$$

$$M(4) = [0.4 \ 0.32 \ 0.32 \ 0.31 \ 0.29 \ 0.29 \ 0.28]^T. \quad (9)$$

因 $M(4) = M(3)$, 迭代计算结束。从结果可知, 在已知多米诺效应发生的可信度为 0.28 基础上, 根据前述的推理规则, 可知到达事故现场延误的可信度为 0.4, 灭火行动不正确的可信度为 0.31, 这样的原因分析可以为相应企业的应急准备提供参考。

3 结论

事故发生后的应急响应可以影响事故的发展, 在知道结果发生的可能性, 对原因进行分析, 可以帮助我们完善应急准备。本文提出利用反向模糊 Petri 网对应急响应结果进行致因分析, 以确定各应急响应因素的可能性。

因火灾造成多米诺效应是典型的受应急响应行动影响的事故, 初始火灾发生后通常会采取应急响应和救援, 这会对事故的发展产生影响, 并影响多米诺效应的产生。本文以油库储罐区火灾事故为对象, 分析影响多米诺效应的应急响应行动, 结果表明, 利用反向模糊 Petri 网进行致因分析是可行的。

参考文献:

- [1] 张永强, 刘茂, 张董莉. 多米诺效应定量风险分析[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 145-149.
- [2] 李求进, 杨玉胜, 陶红. 基于多米诺效应的定量风险评价研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(1): 71-76.
- [3] 王艳华, 戴雪松, 鲜鱼小东, 等. 化学工业重大事故的多米诺效应分析[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 129-136.
- [4] Gabriele Landucci, Gianfilippo Gubinelli, Giacomo Antonioni, et al. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire [J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41: 1206-1215.
- [5] Antonioni G Spadoni, Cozzani V G. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(5): 614-624.
- [6] Khan F I, Abbasi S A. Models for domino effect analysis in chemical process industries [J]. Process Safety Progress, 1998, 17(2): 107-123.
- [7] Mingguang Z, Juncheng J. An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158(2/3): 280-286.
- [8] 黄晓光, 高梅梅, 王永泓, 等. 模糊 Petri 网在电站燃气轮机故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报, 2000, 15(3): 311-313.
- [9] 袁海斌, 袁海文, 李行善. 层次故障诊断模型的模糊 Petri 网推理[J]. 仪器仪表学报, 2006, 1(27): 1720-1721.
- [10] 潘俊任, 裴道武. 基于模糊 Petri 网的模糊推理算法[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(6): 874-879.
- [11] Hesuan Hu, Zhiwu Li, Abdulrahman Al-Ahmari. Reversed fuzzy Petri nets and their application for fault diagnosis[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60: 505-510.
- [12] Liu Huchen, Lin Qinglian, Ren Minglun. Fault diagnosis and cause analysis using fuzzy evidential reasoning approach and dynamic adaptive fuzzy Petri nets[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 66: 899-908.
- [13] 鲍培明. 模糊 Petri 网模型的反向推理算法[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2003, 3(3): 21-25.
- [14] 杨劲松, 凌培亮. 一种模糊 Petri 网的逆向知识推理方法设计实现[J]. 计算机科学, 2009, 36(12): 158-160.
- [15] Gabriele Landucci, Gianfilippo Gubinelli, Giacomo Antonioni, et al. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire [J]. Accident Analysis and Prevention, 2009, 41: 1206-1215.

Reversed Fuzzy Petri-nets Based Accident Causation Analysis under Emergency Response

Zhou Jianfeng and Peng Lei

(Department of Industrial Engineering, School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Analyzing the impacts of emergency response actions on the development of an accident is important for improving emergency preparedness. Reversed fuzzy Petri nets based reasoning method is proposed to analyze emergency response actions. Reasoning approaches of fuzzy Petri nets and reversed fuzzy Petri nets are discussed. Domino effect triggered by fire which is a typical accident influenced by emergency response is taken as an example to illustrate the method. The reversed fuzzy Petri net is established and the emergency actions are analyzed. The results show that the method is feasible for emergency actions analysis.

Key words: reversed fuzzy Petri nets; emergency response; accident; causation analysis