

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<sup>[1-7]</sup>, 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<sup>[8-12]</sup>。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<sup>[11-14]</sup>。

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;  $\Delta$  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,  $\delta_{ixj}$  为 1, 否则为 0;  $\Gamma$  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,  $\gamma_{ixj}$  为 1, 否则为 0;  $M$  是 Petri 网的标记,  $M = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ ,  $\theta_i$  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  $\rho = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m\}$ ,  $\rho_j$  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。

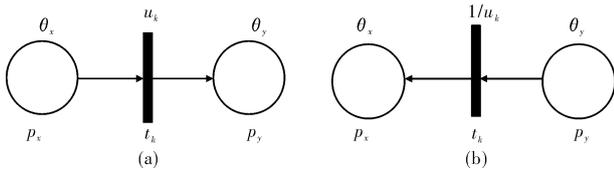


图 1 模糊 Petri 网和反向模糊 Petri 网

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  $k = \{1, 2, \dots, p\}, i = \{1, 2, \dots, n\}, j = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

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。

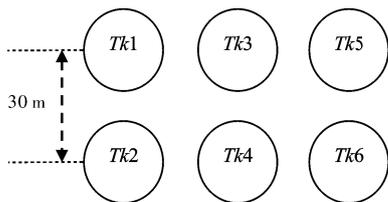


图 2 储罐区油罐布局

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  $12.5 \text{ kW/m}^2$ , 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  $Tk3$  将引发多米诺效应,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。

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降低( $p_5$ ),  $CF = 0.95$ ;

R5:IF 着火储罐的热辐射未及降低( $p_5$ ) AND 邻近储罐接收的热辐射未及降低( $p_6$ ) 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。

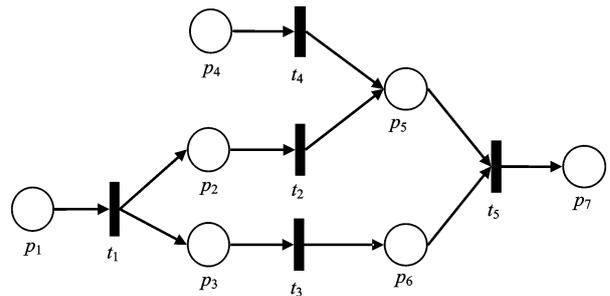


图 3 应急响应对多米诺效应影响的模糊 Petri 网

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。

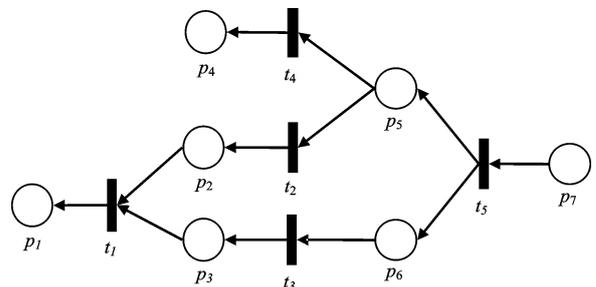


图 4 应急响应对多米诺效应影响的反向模糊 Petri 网

