

基于 Petri 网的工业火灾应急响应行动时间分析^{*}

李子成 周剑峰 教授

(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

学科分类与代码: 6208040(应急救援)

中图分类号: X928.7

文献标志码: A

基金项目: 国家自然科学基金资助(71673060)。

【摘要】 为预防石化工业储罐区火灾触发的多米诺效应,首先,构建基于层次着色时间 Petri 网(HCTPN)的储罐火灾应急响应模型,以库所表示状态或指令,以变迁表示应急响应行动,以托肯的移动表示系统的动态变化;其次,提出 5 种不同的时间模式,包括时间串行门、时间输出与门、时间输入与门、时间输出或门和时间输入或门,分析该模型的时间性能;最后,以某储罐火灾为例,通过 CPN Tools 仿真分析应急响应时间,评估多米诺效应发生的概率,并通过讨论 2 种场景探究应急响应行动的协作对多米诺效应的影响。结果表明:应急行动的并行模式比串行模式更省时间、更能预防多米诺效应;用所构建模型能有效地分析应急响应行动的时间性能。

【关键词】 层次着色时间 Petri 网(HCTPN); 工业火灾; 多米诺效应; 应急行动; 时间分析

Petri-net based time analysis of emergency actions responding to industrial fires

LI Zicheng ZHOU Jianfeng

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

Abstract: In order to prevent domino effect triggered by fire in tank areas of petrochemical industry, an HCTPN based model was built for analyzing emergency actions responding to tank fires. The states of emergency response were represented by places, emergency actions by transitions, and changes of emergency states by flow of tokens in the net. Then, five different time patterns time serial gate, time output AND gate, time input AND gate, time output OR gate and time input OR gate, were proposed to analyze the time performance of the model. Finally, a tank fire was taken as an example, and the emergency response times were analyzed by using by the CPN Tools. The probabilities of domino effects were evaluated through the simulation analysis of the emergency response times. Two scenarios were discussed to analyze the impact of collaboration of emergency actions on fire escalation. The results show that the parallel mode of emergency actions is more time-saving and can prevent domino effect better than the serial mode, and that the model can be used to effectively analyze the time performance of emergency actions.

Keywords: hierarchical colored timed Petri net (HCTPN); industrial fire; domino effect; emergency actions; time analysis

^{*} 文章编号: 1003-3033(2018)07-0184-06; DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.07.030
收稿日期: 2018-04-10; 修稿日期: 2018-06-22

0 引言 研究问题的起因

石化行业中大量不同的油品、气体等易燃物常常储存于同一罐区。当一个储罐发生火灾,产生的热辐射会影响到附近的其他储罐,从而使事故扩展,引发多米诺效应。因此,一旦一个储罐发生火灾,及时采取应急行动(灭火或冷却等)降低热辐射作用,以防止火灾蔓延,是十分重要且必要的。对此,许多学者开展了大量研究,例如: RENIERS 等^[1]开发了 DomPayPlanning 软件,用于防止/减轻化工领域的多米诺效应;周剑峰^[2]结合 Probit 分析方法和我国火灾应急响应统计数据,建立了储罐区火灾引发多米诺效应的概率分析模型;徐安琦等^[3]通过构建安全屏障优化决策模型,在总成本有限的条件下,优化安全屏障布置方案,使多米诺效应发生概率降至最低; ABDOLHAMIDZADEH 等^[4]提出一种基于蒙特卡罗模拟评估多米诺概率的新方法,可预测和评估单元间事故的影响; DARBRA 等^[5]通过 MHIDAS 数据库分析 1961—2007 年间事故的时间分布、发生地、物质、原因、发生源(存储、加工过程、运输等环节)以及多米诺序列,统计各因素引发多米诺效应的概率并提出建议; JANSSENS 等^[6]提出了一种支持安全屏障定位的决策模型,以减轻工业区内多米诺效应造成的事故后果; LANDUCCI 等^[7]提出了一种基于保护层分析的定量评估方法,通过量化安全措施,来防止火灾引发的多米诺效应; ZHOU Jianfeng 等^[8]通过混合 Petri 网建立了消灭多处火灾的应急响应模型,分析消防员的安排策略,发

现大多数情况下根据火灾严重程度分配人员比平均分配更优;另外,ZHOU Jianfeng 等^[9]还构建了应急资源 Petri 网模型,分析资源冲突,并相应提出消除冲突的排队方法。

以上研究主要是关于概率评估和设置安全屏障方面的,而从应急响应时间性能方面研究预防多米诺效应的还比较少。因此,笔者拟构建基于层次着色时间 Petri 网(Hierarchical Colored Timed Petri Net, HCTPN)的应急响应模型,分析应急响应时间性能,并通过 CPN Tools 工具仿真计算多米诺效应的发生概率,以期预防多米诺效应的应急响应行动提供指导。

1 构建模型

Petri 网作为一种强大的建模和分析工具,可以形式化地描述复杂系统中的活动流,而 HCTPN 不仅继承了一般 Petri 网的同步、顺序、并发等特性,并且能对模型分层和分类,降低模型的复杂度和冗余性,还能表述应急行动的时间^[10]。

以库所表示状态或指令;以变迁表示应急响应行动;以托肯表示系统的动态变化,从一个库所到另一库所直到结束。该模型的颜色集及函数含义见表 1,库所和变迁的含义见表 2。基于 HCTPN,建立储罐火灾应急响应模型,如图 1 所示。另外,变迁 Execute 为替代变迁,代表一个子网,对应流程中的任务,子网模型中库所和变迁的含义见表 3;子网模型如图 2 所示。

表 1 颜色集与函数的含义

Tab.1 Meanings of the color sets and the functions

模型颜色集与函数声明	含义
$\text{colset}AC = \text{with } f \text{ timed}$	事故类型 f 为火灾事故
$\text{colset}WM = \text{with } wm wm_1 wm_2 \text{ timed}$	现场工作小组(wm): 小组 1(wm_1)、小组 2(wm_2)
$\text{colset}S = \text{with } st cl \text{ timed}$	状态颜色集 st 为启动/开始; cl 为已准备/结束
$\text{colset}FC = \text{with } fc$	消防中心
$\text{colset}FS = \text{with } fs \text{ timed}$	火灾情况/状态
$\text{colset}FT = \text{with } ft_1 ft_2 \text{ timed}$	消防队伍: 消防队 1(ft_1)、消防队 2(ft_2)
$\text{colset}FR = \text{with } fe fm fr \text{ timed}$	消防资源: 消防车(fe)、消防员(fm)、其他消防资源(fr)
$\text{colset}I = \text{int}$	整型颜色集
$\text{colset}GP = \text{with } sgp rgp tgp fgp cgp$	现场消防组: 火情勘测组(sgp)、资源保障组(rgp)、运输组(tgp)、灭火组(fgp)、冷却组(cgp)
$\text{fun } \text{lognormal}(\mu, \sigma^2) = \text{Math.exp}(\text{normal}(\text{Math.ln}(\mu^2 / \text{Math.sqrt}(\mu^2 + \sigma^2)), \text{Math.ln}((\mu^2 + \sigma^2) / \mu^2)))$	变迁时间满足对数正态分布函数

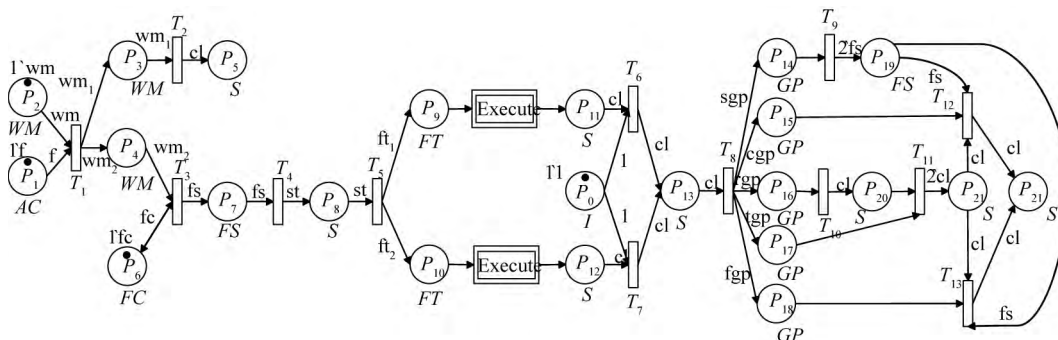


图1 储罐火灾的应急响应行动的 Petri 网

Fig.1 Petri net for emergency response to a tank fire

表2 库所与变迁的含义

Tab.2 Meanings of places and transitions

库所	变迁
P_1 : 储油罐着火	T_1 : 火灾被发现、安排人员
P_2 : 储罐区组 1 (wm ₁) 在岗	T_2 : 关闭着火罐、周围储罐及管线的进出阀门
P_3 : 储罐区组 2 (wm ₂) 在岗	T_3 : 报火警
P_4 : 阀门已关闭	T_4 : 启动应急预案
P_5 : 消防中心在职	T_5 : 调集消防队伍
P_6 : 火灾信息已确定	T_6 : 成立现场指挥部
P_7 : 应急预案已启动	T_7 : 成立现场指挥部
P_8 : 消防队 1 (ft ₁)	T_8 : 现场任务安排与决策
P_9 : 消防队 2 (ft ₂)	T_9 : 着火罐和周围储罐的热辐射等因素勘测
P_{10} : 消防队 1 (ft ₁) 已到现场	T_{10} : 资源准备(水、泡沫等)
P_{11} : 消防队 2 (ft ₂) 已到现场	T_{11} : 将资源运输到指定位置
P_{12} : 现场指挥部已成立	T_{12} : 冷却行动
P_{13} : 火情勘测编队 (sgp)	T_{13} : 灭火行动
P_{14} : 冷却编队 (cgp)	—
P_{15} : 资源保障编队 (rgp)	—
P_{16} : 运输编队 (tgp)	—
P_{17} : 灭火编队 (fgp)	—
P_{18} : 现场火灾实时情况	—
P_{19} : 资源准备已完成	—
P_{20} : 资源已到达指定位置	—
P_{21} : 前期准备结束	—
P_{22} : 控制库所	—

表3 子网模型中库所与变迁的含义

Tab.3 Meanings of places and transitions in subpage

库所	变迁
P_1 : 输入端口	T_a : 派遣安排
P_a : 消防车 (fe)	T_b : 车辆准备
P_b : 消防员 (fm)	T_c : 人员准备
P_c : 其他消防资源 (fr)	T_d : 资源准备
P_d : 消防车 (fe) 已准备完成	T_e : 前往火灾现场
P_e : 消防员 (fm) 已准备完成	—
P_f : 其他消防资源 (fr) 已准备完成	—
P_0 : 输出端口	—

2 时间模式分析

应急响应过程由一系列行动构成, 应急响应的时间由各行动的延迟时间来确定。据此, 提出以下 5 种应急响应时间模式来分析应急响应的时间性能。

1) 时间串行门。应急行动是串行执行的, 托肯从输入库所 P_0 串行执行变迁 T_1 、 T_2 到达库所 P_2 , 时间串行门如图 3 所示。输出库所 P_2 的时间为输入时间加所有变迁延迟时间之和, 即 $t(P_2) = t(P_0) + T_1 + T_2$ 。

2) 时间输出与门。托肯从输入库所 P_0 执行变迁 T_1 , 输出库所 P_1 、 P_2 同时获得一个托肯。时间输出 AND 门如图 4 所示。输出库所 P_1 、 P_2 的时间相同, 且等于输入时间加上变迁延迟时间之和, 即 $t(P_1) = t(P_2) = t(P_0) + T_1$ 。

3) 时间输入与门。当输入库所 P_1 、 P_2 都存在托肯时, 变迁 T 才能被执行, 执行后 1 个托肯进入输出库所 P_0 。时间输入与门如图 5 所示。输出库所 P_0 的时间等于最大的输入库所的时间加变迁延迟时间之和, 即 $t(P_0) = \max(t(P_1), t(P_2)) + T$ 。

4) 时间输出或门。输入库所 P_0 的一个托肯只

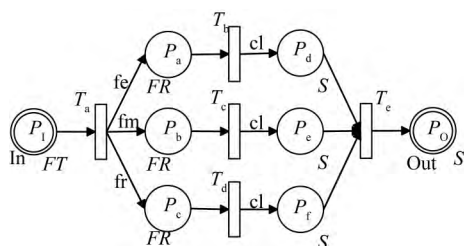


图2 替代变迁 Execute 的子网模型

Fig.2 Subpage for substitution transition Execute

能使变迁 T_1 或 T_2 之一激活, 托肯到达相应的输出库所。时间输出或门如图 6 所示。输出库所的时间等于输入库所 P_0 的时间加被选择的变迁延迟时间之和。若 T_1 被执行, 则输出库所为 P_1 , 且 $t(P_1) = t(P_0) + T_1$; 若 T_2 被执行, 则输出库所为 P_2 , 且 $t(P_2) = t(P_0) + T_2$ 。

5) 时间输入或门。输入库所 P_1 或 P_2 中先获得托肯的库所相对应的变迁被激活且执行, 执行后输出库所 P_0 都能获得一个托肯; 库所 P_c 为控制库所。时间输入 OR 门如图 7 所示。输出库所 P_0 的时间等于最小输入库所的时间加被执行的变迁延迟时间之和, 即若 $\min(t(P_1), t(P_2)) = t(P_1)$, 则 $t(P_0) = t(P_1) + T_1$ 。

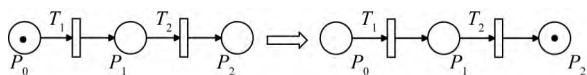


图3 时间串行门

Fig.3 Time serial gate

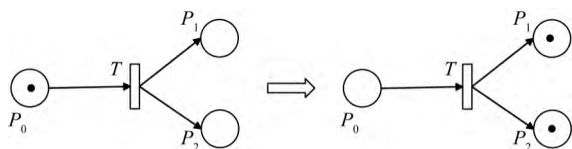


图4 时间输出与门

Fig.4 Time output AND gate

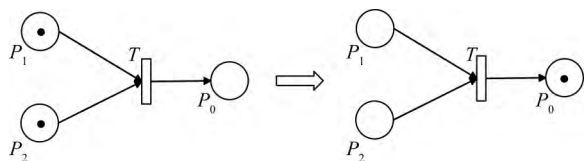


图5 时间输入与门

Fig.5 Time input AND gate

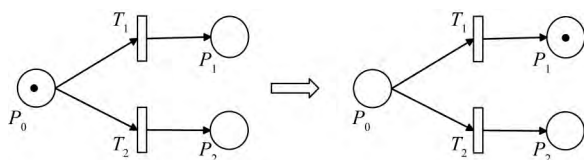


图6 时间输出或门

Fig.6 Time output OR gate

3 案例仿真分析与讨论

3.1 案例仿真分析

以某储罐区为例^[11], 该罐区有 6 个汽油常压罐 ($Tk1-Tk6$), 布局如图 8 所示。每个储罐的直径为 20 m, 高为 10 m。储罐 $Tk1$ 到 $Tk2$ 或 $Tk3$ 的中心距

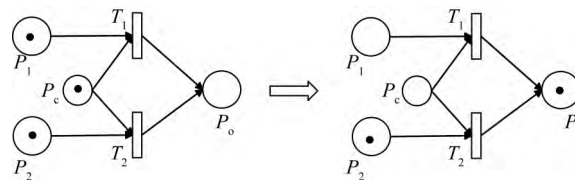


图7 时间输入或门

Fig.7 Time input OR gate

离均为 30 m。

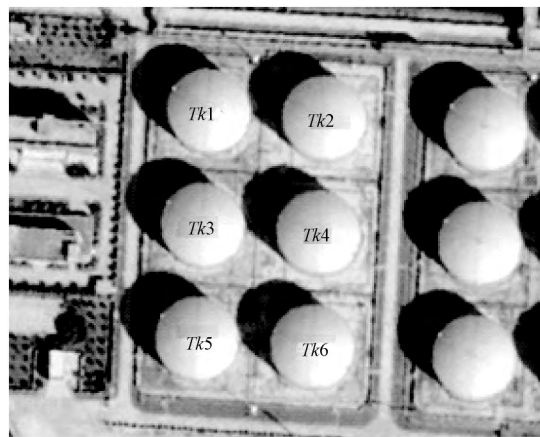


图8 汽油罐区的布局

Fig.8 Layout of the gasoline tanks

火灾应急响应中的 2 个时间段对于预防多米诺效应尤其重要。其一为灭火时间, 即从火灾发生到执行灭火行动的时间; 其二为冷却时间, 即从火灾发生到执行冷却行动的时间。如果这 2 个时间都大于或等于储罐失效时间 (T_{if}), 则多米诺效应可能发生。因此, 为了防止多米诺效应, 在 T_{if} 之前, 需要通过灭火行动把着火储罐发出的热辐射降到某一阈值 (或扑灭火灾); 或把相邻储罐接收到的热辐射降到某一值 (通过冷却)。

常压储罐的 T_{if} 可根据下式确定^[12]:

$$\ln(T_{if}) = -1.128 \ln(I) - 2.667 \times 10^{-5} V + 9.877 \quad (3)$$

式中: I 为热通量 kW/m^2 ; V 为储罐容积 m^3 。

根据 Mudan 模型^[13], $Tk1$ 着火时, $Tk2$ 和 $Tk3$ 接收到的热辐射量最大, 为 $12.5 \text{ kW}/\text{m}^2$, 因而计算得 T_{if} 为 17 min。

应急执行的执行时间满足对数正态分布^[11, 14], 变迁时间的对数正态分布的参数见表 4。 T_{12} 和 T_{13} 的执行时间为 0。

3.2 讨论

应急响应由一系列应急响应行动构成。诸应急响应行动之间的协作与配合, 对防止多米诺效应起重要

表4 变迁时间的对数正态分布参数

Tab.4 Logarithmic normal distribution parameters of transition time

变迁	平均时间 μ/min	标准差 σ
T_1	0.5	0.2
T_2	3.5	0.8
T_3	1.0	0.6
T_4	0.7	0.1
T_5	1.5	0.8
T_6	0.5	0.2
T_7	0.5	0.2
T_8	2.8	0.8
T_9	2.5	0.2
T_{10}	2.5	0.2
T_{11}	1.5	0.2
T_a	0.5	0.2
T_b	1.5	0.5
T_c	1.2	0.5
T_d	1.0	0.5
T_e	2.5	1.0

作用。假设在消防队到达现场成立指挥部之前的应急响应行动不变,下面将讨论在指挥部成立后的2种场景:

场景1:在现场指挥部的统一指挥下安排任务,勘查组勘查现场火灾情况,勘查结束后进行资源准备,资源准备完成后送到指定的位置。此后,冷却组和灭火组分别执行冷却行动和灭火行动。

场景2:在现场指挥部的统一指挥下安排任务,消防队被分为5个组,分别为勘查组、资源保障组(2个)、冷却组和灭火组。在勘查组进行火灾勘查工作时2个资源保障组分别在冷却点和灭火点指定位置同时进行资源准备。当勘查工作和资源准备完成后,冷却组和灭火组分别执行冷却行动和灭火行动。

由于在成立现场指挥部之前,Petri网模型与上述模型一致,这里只讨论后半部分建模。场景1的Petri网模型如图9所示;场景2的Petri网模型如图10所示。其中,库所 P_0 表示控制库所;库所 P_{16}^1 、 P_{16}^2 是库所 P_{16} 的延伸,含义与 P_{16} 一致; T_{10}^1 、 T_{10}^2 是变迁 T_{10} 的延伸,含义与 T_{10} 一致; P_{20}^1 及 P_{20}^2 是库所 P_{20} 的延伸,含义与 P_{20} 一致;其中右上角1和2表示不同编号。

CPN Tools是一种编辑、模拟和分析着色Petri网,现今最成熟的CPN建模与仿真工具^[15]。其支持层次Petri网、着色时间Petri网的编辑、仿真和分析。文中以CPN Tools作为建模和分析工具。

基于案例参数,通过CPN Tools对上述2种场

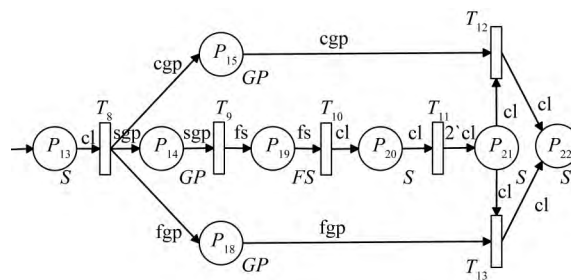


图9 场景1的Petri网模型

Fig.9 Petri net model for scenario 1

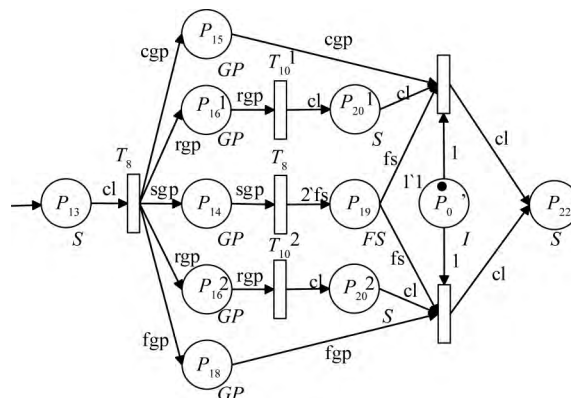


图10 场景2的Petri网模型

Fig.10 Petri net model for scenario 2

景建模仿真 10^5 次,其多米诺效应发生次数和概率见表5。

表5 2种场景下多米诺效应发生概率

Tab.5 Probabilities of domino effect into two scenarios

场景	仿真次数	响应时间大于 T_{tr} 的次数	多米诺效应概率
1	10^5	23 532	0.235 3
2	10^5	560	0.005 6

由表5可以看出,场景1发生多米诺效应的概率更高,而场景2低很多。其主要原因是:场景1在火灾现场的应急行动安排是串行执行的,在执行冷却或灭火行动前消耗更多时间,超过了邻近储罐失效时间 T_{tr} ,导致多米诺效应发生概率增大;而场景2通过分配各行动组并行执行应急行动,大幅缩减了应急响应时间,并且在冷却点和灭火点同时进行资源准备行动,减少了资源运输到指定位置的时间,从而降低了多米诺效应的发生概率。

场景1和场景2模型的实际应急响应的平均时间和CPN Tools仿真的平均时间比较见表6。

由表6可以看出,不同场景的实际应急响应的平均时间与基于CPN Tools仿真的平均时间相差不大,偏差为5%左右。因此,该工业火灾应急响应

表6 应急响应时间比较

Tab.6 Comparisons of emergency response time

场景	实际应急响应 平均时间/min	仿真平均 时间/min	偏差/%
1	18	17.18	4.5
2	14	13.30	5.0

Petri 网模型通过 CPN Tools 仿真的结果与实际情况基本相符。

4 结 论

1) 不同的应急响应协作模式预防多米诺效应

效果不一,应急行动的并行模式比串行模式更省时间、能够降低多米诺效应发生的概率。

2) 基于 Petri 网的工业火灾应急响应模型是一种可行的、有效的时间评估模型,可用来为预防工业火灾多米诺效应提供指导。

3) 文中只重点分析了应急响应行动的时间,而关于应急行动对响应过程的灵敏性,将是下一步的研究内容。

参 考 文 献

- [1] RENIERS G L L, DULLAERT W. User-friendly software for planning domino effects prevention[J]. Safety Science, 2007, 45(10): 1 060-1 081.
- [2] 周剑峰. 储罐区火灾引发多米诺效应的概率分析方法[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(11): 51-53.
ZHOU Jianfeng. Probability analysis for domino effect triggered by storage tank fire[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(11): 51-53.
- [3] 徐安琦, 钱一潇, 钱瑜. 化工企业多米诺事故安全屏障优化布置[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 175-180.
XU Anqi, QIAN Yixiao, QIAN Yu. Study on optimal layout of barriers against domino effects in chemical enterprise[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(2): 175-180.
- [4] ABDOLHAMIDZADEH B, ABBASI T, RASHTCHIAN D, et al. A new method for assessing domino effect in chemical process industry[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1/2/3): 416-426.
- [5] DARBRA R M, PALACIOS A, CASAL J. Domino effect in chemical accidents: main features and accident sequences[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1): 565-573.
- [6] JANSSENS J, TALARICO L, RENIERS G, et al. A decision model to allocate protective safety barriers and mitigate domino effects[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 143: 44-52.
- [7] LANDUCCI G, ARGENTI F, TUGNOLI A, et al. Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 143: 30-43.
- [8] ZHOU Jianfeng, RENIERS G. Petri-net based simulation analysis for emergency response to multiple simultaneous large-scale fires[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40: 554-562.
- [9] ZHOU Jianfeng, RENIERS G. Petri-net based modeling and queuing analysis for resource-oriented cooperation of emergency response actions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 102: 567-576.
- [10] 韩耀军. 网格计算资源调度的层次 Petri 网建模与分析[J]. 计算机科学, 2006, 33(4): 236-239.
HAN Yaojun. Hierarchical Petri nets model and analysis of resource scheduling for grid computing[J]. Computer Science, 2006, 33(4): 236-239.
- [11] ZHOU Jianfeng, RENIERS G. Petri-net based evaluation of emergency response actions for preventing domino effects triggered by fire[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 51: 94-101.
- [12] COZZANI V, GUBINELLI G, ANTONIONI G, et al. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 127(1/2/3): 14-30.
- [13] MUDAN K S. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1984, 10(1): 59-80.
- [14] 彭晨. 消防响应时间统计规律及其与城市火灾规模相关性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
PENG Chen. The statistics law of fire response time and its correlation with the scale of urban fire[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [15] JENSEN K, KRISTENSEN L M, WELLS L. Coloured Petri nets and CPN tools for modelling and validation of concurrent systems[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2007, 9(3/4): 213-254.



作者简介: 李子成 (1994—), 男, 广东阳西人, 硕士研究生, 研究方向为系统安全与风险分析等。E-mail: 460113247@qq.com。