

城市火灾扑救调度指挥过程的 Petri 网模型研究

韩 新 李 杰 沈祖炎

(同济大学土木工程学院建工系, 上海 200092)

摘 要

在经典 Petri 网理论的基础上, 发展了一类有色非自主 Petri 网方法, 用以建立城市火灾扑救调度指挥过程的仿真模型, 并通过实例, 对火警出动等级判断规则及按火警出动等级调派车辆规则进行了初步仿真研究。

主题词: 城市火灾 Petri 网 调度 仿真

中国图书分类号: P928.7

1 引言

城市火灾是发生频率较高的一种灾害, 它不仅可在顷刻之间烧掉大量物质财富, 而且会危及人们的生命安全。目前, 对于火灾问题的主要研究课题集中在有关防火安全的基础理论上, 如运用物理-化学、物理-机械、经济-数学等方法分析与研究火灾的形成与蔓延过程以及建筑物的消防措施等, 而对和城市火灾扑救的组织与调度指挥相关的理论与方法研究甚少。因此, 适时地开展有关这方面的理论与技术研究, 不仅具有较强的理论意义, 而且具有重要的现实意义。

从系统控制理论的角度分析城市火灾扑救与调度指挥过程, 关键在于灭火力量的实时调度与决策控制模型, 而建模与控制的侧重点是解决系统的数量决策问题。由于火灾是随机事件, 因而灭火的对策是受火灾发生的时间、地点、气象、燃烧对象等许多因素所制约。即使是同一种对象发生火灾, 也会由于火场的环境不同, 灭火力量的素质和器材装备不同, 从而使所采取的扑救方法不可能完全一样。因此, 城市火灾的扑救是一个十分复杂的动态过程, 包括从接到火灾报警开始至灭火战斗终结的整个过程。根据这一特点, 灭火力量的实时调度指挥就是依据一个城市的消防力量、所需完成的火灾扑救任务、各消防中队的灭火能力以及正在执行的火灾扑救任务等信息, 实时地决定所发生的火灾分别由哪些消防中队、出动什么等级的灭火力量扑救火灾, 以使整个火灾扑救过程的性能指标达到最优(一般是到达火场时间最短以及最快控制火势并将其扑灭)。考虑到火灾扑救过程实时调度的离散与随机特点, 在本文中, 基于 DEDS (Discrete Event Dynamic System; 离散事件动态系统) 理论, 我们发展了一类有色非自主 Petri 网方法, 用于城市火灾扑救与调度指挥过程的仿真研究。

2 城市火灾扑救调度指挥过程的仿真方法

以人造系统的行为逼近真实世界中复杂系统的行为是系统仿真方法的主旨。对于一般离散事件系统进行仿真研究,主要是根据系统中各类实体之间的逻辑联系,以及实体活动的发生统一在同一时间基准上的特点,建立仿真模型。采用事件调度、活动扫描或进程交互等仿真算法,推进仿真钟,进而在一合适的时间区段内,运行仿真模型,再现系统中事件的产生和发展过程。同时,对系统行为的特征参量进行统计分析,给出系统的功能评价,为系统的设计和改进提供技术依据。

在建立火灾扑救调度指挥过程的仿真模型时,一方面,应着重分析火灾扑救的调度指挥所具有的多规则性、实时性以及优化要求;另一方面,必须考虑这一研究的目的是为消防指挥员在实战及训练中提供决策支持。因此,从灭火作战指挥功能要求出发,在建模时,应把灭火指挥过程分解为基本活动和事件,并按活动和事件的逻辑关系建立组合模型。通过研究组合模型中各类变量的数量关系及调度规则对系统整体行为的作用,揭示灭火指挥过程的功能和实质,进而制定各类调度指挥决策方案,实现火灾灾场的最优控制。

3 Petri 网(PN)理论与仿真策略

PN 理论是由德国的 Carl Adam Petri 博士于 1962 年在开发计算机操作系统中的信息流模型过程中提出的。目前,这一理论已广泛应用于离散事件动态系统的性能分析与控制研究。作为系统模型,PN 具有动态、并发等特点,同时,网理论不变量、同步、网子类等手段与方法,使调度与控制的规则较易于转化为子系统,进而可能与原模型合成一个闭环系统。作者在经典 PN 的基础上,发展了一类有色非自主 PN 方法,用于火灾扑救调度指挥的仿真研究。

3.1 经典 Petri 网

(1)定义:一般将 PN 定义为如下五元组:

$$N=(P, T, I, O, M)$$

其中:

- 1) $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n>0$, 为有限位置集合;
- 2) $T=\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m>0$, 为有限变迁集合;且 $P \cup T \neq \emptyset$, $P \cap T = \emptyset$;
- 3) $I(p, t): P \times T \rightarrow \{0, 1\}$, 是位置到变迁的映射,为输入函数;
- 4) $O(p, t): P \times T \rightarrow \{0, 1\}$, 是变迁到位置的映射,为输出函数;
- 5) $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$, 是标识(marking),反映令牌(token)在 PN 各位置中的分布。

(2)变迁使能与激发规则

- 1) 变迁 $t \in T$ 是使能的,当且仅当对于所有 $p \in P$, 当 $I(p, t)=1$ 时, $M(p)>0$;
- 2) 使能变迁 t 经标识 M 激发后,所产生的新标识为:

$$M(p_i)=M(p_i)+O(p_i, t)-I(p, t), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

3.2 有色非自主 Petri 网(CNPN)

有色 PN 可以表达复杂的信息, 将位置中的每个标识与一种标识符或“颜色”相联系, 信息由 $\langle \text{位置}, \text{标记颜色} \rangle$ 对表示时, 即可得到有色 PN。而非自主 PN 则描述一个系统的运行, 其演变受到外界事件与(或)时间的限制。用于火灾扑救调度指挥过程仿真研究的有色非自主 PN 还要求考虑系统的时延与随机特性。本文建议的有色非自主 PN 模型的基本描述如下所述。

(1) 定义: 有色非自主 PN 定义为如下七元组:

$$CNPN = (P, T, Pre, Post, C, \sigma_T, M^C)$$

其中:

- 1) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, n > 0$, 已着色有限位置集合;
- 2) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}, m > 0$, 已着色有限变迁集合, $P \cup T \neq \emptyset, P \cap T = \emptyset$;
- 3) $Pre\{p_i, t_j/c_k\}: P \times T \rightarrow R, R > 0$, 着色位置到着色变迁的映射, 为输入函数;
- 4) $Post(p_i, t_j/c_k): P \times T \rightarrow R, R > 0$, 着色变迁到着色位置的映射, 为输出函数;
- 5) $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}, k > 0$, 关于位置或变迁的颜色集合, $C(p_j)$ 是与位置 $p_j \in P$ 相关的颜色集; $C(t_i)$ 是与变迁 $t_i \in T$ 相关的颜色集, 且:

$$\begin{aligned} C(p_j) &= \{a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{ju_j}\}, u_j = |C(p_j)|, j = 1, 2, \dots, r \\ C(t_i) &= \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iv_i}\}, v_i = |C(t_i)|, j = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (2)$$

U_j 为位置 p_j 中可能出现的所有令牌的不同种类数, 即 p_j 所对应的颜色集大小; V_j 为变迁 t_i 所表示的不同事件种类数, 即 t_i 所对应的颜色集大小;

- 6) $\sigma_T: T \rightarrow \lambda, \lambda > 0$, 为随机参数, 即对网中的每一个变迁 t_i 均赋予一正时间值 $\sigma_T(t_i)$ 表示该变迁每次激发从开始到结束的随机持续时间;

7) $M^C: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$, 已着色标识。对于位置 p_j 的标识 $M(p_j)$, 由各种颜色标识数之和表示, 即:

$$M(p_i) = \sum n_{ih}, \quad M(p_i)(a_{ih}) = n_{ih} \quad (3)$$

2) 变迁使能与激发规则

- 1) 变迁 $t_j \in T$ 关于颜色 c_k 是使能的, 当且仅当对于所有 $p_i \in P, M(p_i) \geq Pre(p_i, t_j/c_k)$;
- 2) 使能变迁 t_j 关于颜色 c_k 经标识 M 激发后, 所产生的新标识为

$$M(p_i) = M(p_i) + Post(p_i, t_j/c_k) - Pre(p_i, t_j/c_k), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

3.3 火灾扑救调度指挥过程仿真策略

根据上述建议模型, 本文发展了火灾扑救调度指挥过程的仿真模型, 具体建模与仿真步骤为:

(1) 首先, 按**递阶分解思想**, 将调度指挥过程划分为**接警、判断火警等级、调动消防力量**等一系列子过程;

(2) 依据有色非自主 PN, 建立各子过程的网模型;

- 1) 具体定义 P 和 T 中各元素的含义;
- 2) 对每个位置元素确定其颜色的维数、各颜色维的含义及所对应的颜色集;
- 3) 确定有关位置及变迁的其它参数, 如各变迁激发持续时间的随机参数分布等;

(3) 针对位置与变迁均已被着色的特点, 构造基本颜色函数(见表 1), 而各类调度规则的引入与实施, 则通过基本颜色函数的运算得以实现;

- (4)子过程复合,得到整个调度指挥过程的 PN 模型;
- (5)依据离散事件仿真原理,按固定增量时间(定步长)推进仿真钟,运行 Petri 网模型。当仿真步长与实际时间之比为 1: 1 时,仿真过程与运行过程同步,调度仿真即可直接应用与实际控制;
- (6)通过对仿真结果中有系统性能指标的综合分析,确定相应的最优调度策略,进一步为调度控制奠定基础。

表 1 基本颜色函数

颜色	函数	定 义	注释
任意色	I_d	$I_d(<c_i>)=<c_i>$	恒等
	Dis	$Dis(<c_i>)=<\circ>$	消色
简单色	$Succ$	$Succ(<c_i>)=<c_{i+1}>$	后继(增值)
	$Pred$	$Pred(<c_i>)=<c_{i-1}>$	前缀(减值)
复合色	$Succ_1$	$Succ_1<c_i, c_j>=<c_{i+1}, c_j>$	一个分量的增值
	$Succ_2$	$Succ_2<c_i, c_j>=<c_i, c_{j+1}>$	
	$Proj_1$	$Proj_1<c_i, c_j>=<c_j>$	一个(或几个)分量消色
	$Proj_2$	$Proj_2<c_i, c_j>=<c_i>$	

4 实例

按照递阶分解-复合的方法所建立的城市火灾扑救调度指挥过程 CNPN 模型如图 1 所示。

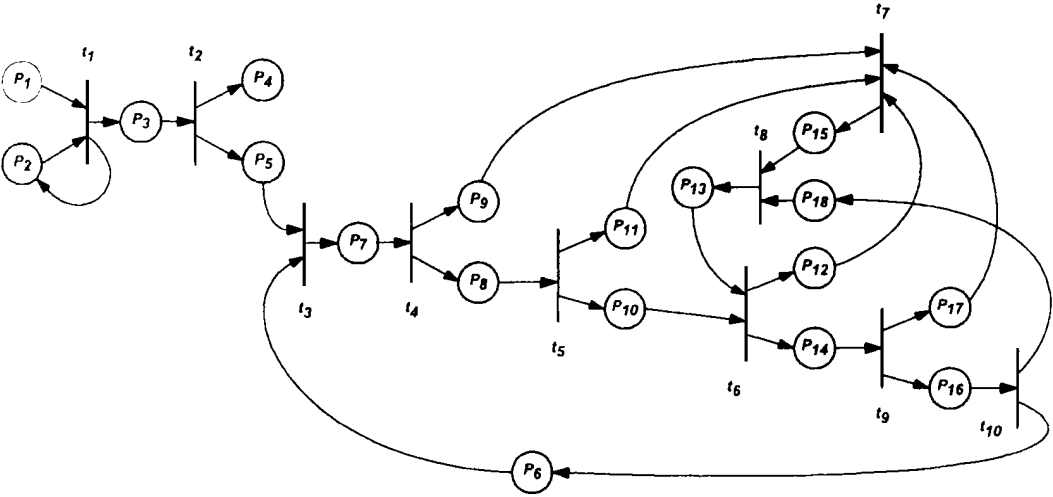


图 1 城市火灾扑救调度指挥过程有色非自主 Petri 网模型

图中各位置与变迁分别表示:

(1)位置: P

P_1 : 有火灾发生; p_2 : 119 指挥中心空闲; p_3 : 119 指挥中心初步掌握火灾情况; p_4 : 不需要消防中队前往

扑救; p_5 : 判明了火警等级; p_6 : 消防中队处于执勤状态; p_7 : 主管消防中队出动; p_8 : 主管消防中队到达火场; p_9 : 途中消息; p_{10} : 开始扑救火灾; p_{11} : 火场首次消息; p_{12} : 火场续报消息; p_{13} : 应援消防队中队到达火场; p_{14} : 火灾基本控制; p_{15} : 119 指挥中心收到有关火场消息; p_{16} : 火灾扑救结束; p_{17} : 火灾熄灭消息; p_{18} : 应援消防中队处于执勤状态。

(2)变迁: T

t_1 : 受理火警; t_2 : 判断火警等级; t_3 : 调动责任消防中队前往扑救; t_4 : 赶赴火场; t_5 : 战斗展开与火场侦察; t_6 : 扑救火灾; t_7 : 向 119 指挥中心汇报火场消息; t_8 : 增派应援力量; t_9 : 火场战斗总结; t_{10} : 消防中队归队。

火灾情况以及消防力量调度方案在实际系统中的流动, 反映到模型里就是标识在 CNPN 中的流动。仿真过程中, 这一标识从一个变迁流向下一个变迁, 使系统状态发生改变。

在本算例中, 每个位置中标识所包含的颜色维的主要内容定义为:

①火灾对象; ②发生时间; ③发生地点; ④天气情况; ⑤周围环境; ⑥火警等级; ⑦责任消防中队; ⑧应援消防中队; ⑨接火警时间; ⑩判断火警时间; ⑪调度灭火力量时间; ⑫灭责任消防中队出动时间; ⑬扑救火灾准备时间; ⑭扑救火灾时间; ⑮汇报火场情况时间; ⑯灭火战斗总结时间; ⑰消防中队返回时间。

表 2 火警出动等级判定规则

火警出动等级	判 定 规 则
I 级	(1)自动报警系统报火警; (2)一般单位、居民火警; (3)一般性电器、汽车火警
II 级	(1)人员集中场所火警; (2)报警较多的单位、居民火警; (3)生产、储存危险品单位火警; (4)缺水地区火警; (5)重要交通、通信枢纽火警; (6)辖区结合部位凌晨火警
II 级	(1)成灾迹象明显火警; (2)重大灾害事故; (3)火场发生爆炸; (4)人员被困、中毒; (5)棚户区、危险品仓库火警; (6)到场主管中队不能控制的一、二级火警
IV 级	(1)燃烧面积 400m ² 以上火警; (2)报控制分钟未熄灭火警; (3)到场消防车辆不能控制的二、三级火警
V 级	(1)燃烧面积 600m ² 以上火警; (2)由四级火警到场不能控制火势的火警

火灾扑救调度指挥是一个多规则问题。以下, 重点介绍火警出动等级判定规则与按火警出动等级调派消防车辆规则, 见表 2 至表 4。

在具体仿真分析中, 通过运行仿真模型随机产生了 10 个火灾案例, 并得到了相应的规则调用结果, 如表 5 所示。

表 3 按照火警出动等级调派直接灭火车辆规则

火警出动等级	调派消防车辆数(辆)
I 级	2~3
II 级	4~6
III 级	7~10
IV 级	15 以上
V 级	20 以上

表 4 火警出动等级力量调派对照表

火灾性质	火 警 出 动 等 级				
	I 级	II 级	III级	IV级	V 级
砖 木	3 泵	6 泵—1 抢	10 泵—2 抢	15 泵—3 抢	20 泵—3 抢
多 层	3 泵	6 泵—1 抢—1 登	10 泵—2 抢—1 登	15 泵—3 抢—2 登	20 泵—3 抢—2 登
高 层	3 泵	6 泵—1 抢—1 登	10 泵—2 抢—2 登	15 泵—3 抢—3 登	20 泵—3 抢—4 登
棚 户	3 泵—1 抢	6 泵—2 抢	10 泵—2 抢	15 泵—3 抢	20 泵—3 抢
一般单位	2 泵—1 泡	4 泵—2 泡—1 抢	7 泵—3 泡—2 抢	10 泵—2 抢—5 泡	10 泵—10 泡—3 抢
重点单位	3 泵—1 抢	4 泵—2 泡—1 抢	7 泵—3 泡—2 抢	10 泵—3 抢—5 泡	10 泵—10 泡—4 抢

注：泵—泵浦车；抢—抢险车；登—登高车；泡—泡沫车

表 5 仿真实例与调度结果

编号	火灾对象	发生时间	发生地点(km)	周围建筑	风力	火警等级	到场火势	扑救时间(min)	调动车辆(辆)
1	居民多层	22: 25	3	密集	无风	II	猛烈	30	6
2	重点单位	04: 03	5	密集	大风	III	猛烈	45	10
3	一般单位	10: 20	7	稀疏	小风	I	初期	18	2
4	居民多层	19: 40	8	稀疏	小风	I	下降	10	3
5	商 店	05: 38	3	密集	小风	III	猛烈	35	9
6	居 民	10: 15	2	稀疏	小风	I	初期	26	3
7	居民高层	08: 15	2	稀疏	无风	I	发展	25	3
8	一般单位	03: 58	4	密集	无风	II	发展	12	3
9	办公楼	14: 01	3	稀疏	小风	II	发展	8	5
10	居民平房	18: 00	2	稀疏	无风	I	熄灭	0	2

5 结语

城市火灾灾场的控制是一个非常复杂的课题。本文从城市火灾扑救调度指挥过程的建模与仿真研究入手, 初步建立了基于一类有色非自主 Petri 网方法的火灾扑救调度指挥仿真模型, 用以分析火警出动等级判定规则与消防车辆调派规则。更为详细的研究结果将在后续文章中逐步给出。

参 考 文 献

1 Rene David & Hassane Alla. Petri Nets for Modeling of Dynamic Systems— A Survey. Automatica, 1994, 30(2): 175 ~ 202

2 Kien De Bosschere & Jalal Almhana. Performance Evaluation of a Blackboard Using Stochastic Petri Nets. Simulation, 1995, 65(4): 269 ~ 278

3 R. 大卫, H. 奥兰著. 佩特利网和逻辑控制器图形表示工具. 北京: 机械工业出版社, 1996

4 上海市消防局编. 上海市火灾年报. 1986~1996 年

5 沈祖炎, 李杰, 韩新. 城市火灾控制问题初步研究. 第一届全国土木工程防灾学术会议论文集, 结构工程师 1997 年增刊, 1997

6 韩新, 李杰, 沈祖炎, 陈寒根. 基于模型的城市火灾扑救指挥决策支持系统. '97 上海市消防协会第三届年会论文集, 1997—10

7 韩新, 李杰, 沈祖炎, 陈寒根. 城市火灾扑救与调度指挥过程的有色 Petri 网模型. '97 上海市消防协会第三届年会论文集, 1997—10

PETRI NET BASED METHODOLOGY FOR DISPATCHING AND
COMMANDING PROCESS OF URBAN FIRE-FIGHTING

Han Xin Li Jie Shen Zuyan

(College of Structural Engineering Tongji University, Shanghai 200092)

ABSTRACT

In this paper, a new Colored Non—autonomous Petri Net (CNPN) method developed on classical PN theory is put forward. It enables the modeling of dispatching and commanding process of urban fire—fighting for simulation study. Through simulation on practical example, the decision rules for fire alarm grade and dispatching of fire trucks are analyzed.

KEY WORDS: Urban fire Petri net Dispatching Simulation

江泽民主席就严峻的火灾形势作重要指示

“最近火灾接连不断, 有建筑火灾, 还有森林大火。全党同志要敲起警钟, 既要及时灭火救灾, 更要强调预防。我在电视上看到救火缺乏水源, 要尽快搞好消防设施建设, 小洞不补, 大洞受苦。各地公安机关要及时向党委、政府汇报, 抓紧研究落实。现在已进入夏季, 石油化工、易燃易爆物品容易着火, 要引起高度重视。”