

基于广义随机 Petri 网的军事应急物流行动 流程建模与分析

邓焯 唐建

(解放军理工大学 野战工程学院 江苏 南京 210000)

摘 要: 基于真实军事应急物流行动的特点和“军民融合”的原则,同时考虑系统的反馈控制功能,完善了应急情况下的军事物流行动流程,提高了军事应急物流行动的稳定性,对指挥决策具有很好的参考价值。基于广义随机 Petri 网对该军事应急物流行动流程进行建模,通过不变量判断验证了模型的有效性,基于 PIPi 软件平台得到状态空间可达图,并利用更加严谨的同构的随机点过程求解模型稳态概率。最后结合汶川地震中某团军事应急物流行动实例数据,对模型的各类性能指标进行分析,对军事应急物流行动的时效性提出改进建议。

关键词: 军事应急物流; 广义随机 Petri 网; 随机点过程; 嵌入马尔可夫链

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-8211(2016)02-0050-08

1 引言

军事应急物流是一个全新的研究领域,相关研究尚不多。我军著名物流专家王宗喜^[1]首次提出军事物流概念,在此基础上,张伟^[2]首次提出了军事应急物流的概念。虽然近年来非战争军事行动日益频繁,很多军事物流部门渐渐重视军事应急物流的组织指挥、预案编制、应急物资储备、应急物流演练等工作,并通过定性方法来提高军事应急物流行动的效率,但是在军事应急物流行动流程的定量分析方面,军内外均没有深入的研究。主要的定量研究工作仍集中于对军事物流采购、运输、仓储、配送、中心选址以及供应链的建模和分析,较少涉及针对性强的应急物流行动整个流程的建模和优化。这些不足突出体现在“5.12”抗震救灾中:一是缺乏统一的军事应急物流保障组织机构;二是军事应急物流保障预案不完善,预案体系及支持系统不合理;三是军事应急物流保障专业队伍和救援装备缺

乏,派遣程序相对复杂;四是信息系统不完善,信息滞后,沟通不畅。因此本文重点对军事应急物流行动的预警决策、组织指挥、行动分类、信息反馈、调整优化等几个方面进行优化设计,以图克服传统流程中的固有缺陷。同时,目前军事物流与地方商业物流进行融合是大势所趋,但如何安全科学管理,尤其是在应急情况下如何融合还存在很多问题,故本文在行动流程模型中加入存在公共物流应急平台的情况作为补充。总之,本文希望通过以上这些改进措施,为军事应急物流研究做出一定创新性和实用价值的工作。

军事应急物流行动流程属于业务流程的范畴,即工作流的一种,是兼具动态性和离散性的分布式事件系统,很适合用分布式系统的建模和分析工具 Petri 网来进行研究^[3]。目前, Petri 网在应急管理流程建模方面的应用研究已经比较深入, Fateh 等基于 Petri 网对铁路站台的应急撤离流程进行建模仿真分析^[4]; Sharming 对洪水应急管理流程建立了

收稿日期: 2015-10-15; 修回日期: 2016-04-26

基金项目: 江苏省青年基金资助项目(BK20150724); 解放军理工大学军事学基金资助项目

作者简介: 邓焯(1989—) 男, 博士研究生, 主要研究方向为军事运筹学、军事物流配送路径规划; 唐建(1977—) 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为装备保障优化决策。

Petri 网模^[5]; 葛丹利用由 Petri 网发展起来的工作流网 WF-net, 建立应急管理工作流模型, 并验证了模型的合理性^[6]。Zhong 等采用 Petri 网模型研究了城市应急响应系统并说明了模型有效性^[7]。但是这些研究均忽略了应急管理中的时间紧迫性, 因此随后一些研究者引入广义随机 Petri 网 (Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN) 进行改进: 张岳峰等首先应用广义随机 Petri 网模型定量分析了一般应急管理工作流程的性能及运作效率; 李迁、刘亚敏采用广义随机 Petri 网对工程突发事件应急处置流程建模并进行仿真分析, 发掘出应急处置流程中的瓶颈环节和关键活动, 对以后工程事故处置工作具有指导意义^[8]; 刘晓燕、吕涛同样基于广义随机 Petri 网对能源突发事件应急管理流程进行建模并提出优化流程的建议^[9]。考虑到实际军事应急物流行动中需求点、需求供给量、配送过程、信息传递等环节存在随机性和动态性, 本文同样采用广义随机 Petri 网建立军事应急物流行动流程 GSPN 模型, 定量分析军事应急物流行动中各阶段运行状况, 提出优化改进措施, 以期达到提高系统运行效率和可靠性的目的。

2 广义随机 Petri 网介绍

Petri 网是由 C.A.Petri^[10] 于 1962 年提出的, 但在基本的 Petri 网中并没有时间的要素。为了对信息延时、流程安排等系统的动态性能进行分析, Molloy、Florin 和 Natkin 等人独立提出了将变迁与随机的指数实施延时相联系起来的的思想, 给 Petri 网的每个变迁关联一个实施速率 (firing rate), 得到的模型就是随机 Petri 网 (stochastic Petri net, SPN)^[11]。在随机 Petri 网中, 一个变迁的实施需要延时, 即从变迁 T 变成可实施、到它实施完成所花费的时间被看成是一个连续随机变量 (取正实数值), 且服从于一个指数分布函数。但是, 随机 Petri 网的状态空间会随着问题的增大而呈指数增长, 并且随机 Petri 网很难处理条件选择等问题。因此, Marsan 领导的科研组在 SPN 的基础上进行了扩充, 提出了广义随机 Petri 网理论^[12]。广义随机 Petri 网是 SPN 的一种扩充, 主要表现为将变迁分为两类, 一类是瞬时变迁与随机开关相关联且实施延时为零; 另一类是时间变迁与指数随机分布的

实施延时相关联。

定义: 广义随机 Petri 网是一个七元组: $GSPN = (P, T, F, V, W, M_0, \lambda)$, 其中元素含义见表 1。

表 1 广义随机 Petri 网元素含义

元素	含义
P	$P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 为库所 (Place) 的非空有限集
T	$T = T_t \cup T_i (T_t \cap T_i = \emptyset)$ 为变迁 (Transition) 的集合; $T_t = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$ 为时间变迁集; $T_i = \{T_{k+1}, T_{k+2}, \dots, T_n\}$ 为瞬时变迁集
F	$F \subseteq a^+ \cup a^-$ 为变迁有向弧 (Arc) 集, 其中 $a^+ \subseteq T \times P$ 表示变迁输出弧集合; $a^- \subseteq P \times T$ 为变迁的输入弧的集合; 关联矩阵 $a = a^+ - a^-$
V	$V \subseteq P \times T$ 为变迁的禁止弧
W	$W: F \rightarrow N$ 为有向弧的权函数, $N = \{1, 2, 3, \dots\}$ 为权系数空间, 代表将有向弧集映射到权系数空间
M_0	$M_0: P \rightarrow N_{Token}$ 为系统初始标识, $N_{Token} = \{1, 2, 3, \dots\}$ 为库所可能的 Token 数, $M_i(P_j)$ 代表第 i 个 M 标识下库所 P_j 的 Token 数
λ	$\lambda = \lambda_T \cup \lambda_I$ 为变迁的平均速率集合, $\lambda_T = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k\}$ 为时间变迁平均速率, 服从指数分布; λ_I 为瞬时变迁速率, 与随机开关相关联, 实施延时为 0

GSPN 稳定状态概率求解^[11]: 通常为了使 GSPN 便于应用, 假设下列条件成立: ①可达集是有穷的; ②变迁实施速率与时间无关 (可能与标识相关); ③任何可达标识返回初始标识的概率不为零, 亦即在可达集中的标识相互之间都是可达的。在此假设基础上, GSPN 的可达图同构于一个齐次有穷状态、连续时间随机点过程 (stochastic point process, SPP), 并且 GSPN 标识和 SPP 状态之间存在一一对应关系^[13], 若不考虑时间因素, 则与 GSPN 同构的 SPP 可看成一个嵌入马尔可夫链 EMC (embedded Markov chain, EMC), 进而求解稳态概率。主要有两种算法: ①从 EMC 中移去消失状态, 仅在压缩的 EMC 上计算实存状态之间的转移概率; ②基于随机离散有穷状态马尔可夫过程 (stochastic discontinuous finite state Markov process, SDFSMP) 理论给出的结论性方程式^[14]。本文采用第一种算法求解。

3 基于 GSPN 的军事应急物流行动流程建模

军事应急物流,是指用于满足军队平时与战时紧急需要的物流活动,是以提供各种突发事件所必需的各种应急军事物资为目的,以追求军事效率最大化和灾害损失最小化为目标的特种军事物流活动^[2]。由于其非常强调物流活动的效率,故要求军事应急物流行动必须反应迅速、流程简洁、流体充足、载体畅通、流向正确、流速快捷、反馈及时等,为了达到这样的目标,建立一个专业、高效的军事应急物流运行机制有重要意义。

完整的军事应急物流行动流程从内容上看一般包括三个部分:①军事应急物流预警和准备;②突发事件应急响应;③军事应急物流反馈和调整。但是这三个部分在时间上并无明确的间断区分,而是贯穿整个军事应急物流始终,并且在逻辑上互为依存。发生应急事件后及时报警迅速准备,才能在下一步充分响应,应急到位;而根据后者实施的效果需要进行下一步的信息反馈和方案调整,反馈的结果是产生新的需求信息或应急方案,并最终形成总结报告和对现有应急物流预案进行完善和扩充,以应对未来潜在的突发事件,提高军事应急物流整体水平。基于此过程,结合“军民融合”思想,本文将军事应急物流具体行动流程描绘如图 1 所示。

根据图 1 中的军事应急物流行动流程,可以建立相对应的广义随机 Petri 网模型。其中,表示逻辑的过程定义为瞬时变迁(T_0 、 T_3 、 T_{15}),表示实际运作流程的过程定义为时间变迁,如图 2 所示。

为了使模型不产生冗余信息和简化模型,对部分过程进行拆分和合并:如 T_1 代表军事应急物流信息汇总和选择合适的军事应急物流预案过程; T_2 代表应急处理专业技术机构对突发事件进行分级和提供辅助决策信息; T_6 代表选择第三方物流支持和公共资源信息更新过程并对阶段性实施效果进行独立评估; T_{12} 代表对军事应急物流四类行动阶段性实施效果进行独立评估等。其他各类库所和变迁定义见表 2。

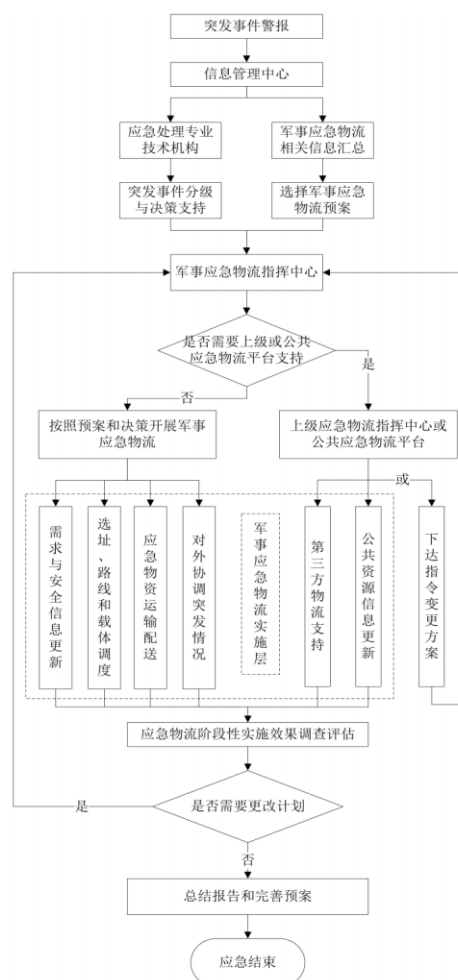


图 1 军事应急物流行动流程图

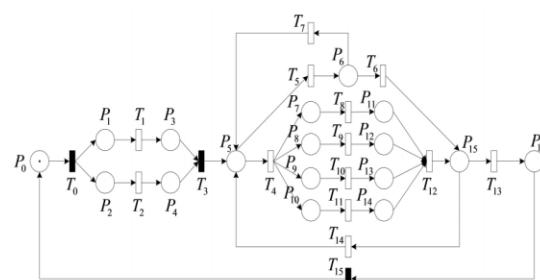


图 2 军事应急物流行动流程 GSPN 模型

表 2 GSPN 模型中库所与变迁的定义

库所	定义	变迁	定义
P_0	突发事件发生	T_0	信息中心接到警报(瞬时变迁)
P_1	接收军事应急物流相关信息	T_1	军事应急物流信息汇总和选择预案

(续表 2)

P_2	应急处理专业技术机构接收信息	T_2	应急处理专业技术机构对突发事件进行分级和提供辅助决策信息
P_3	应急预案选择完毕	T_3	应急预案和辅助决策信息汇总(瞬时变迁)
P_4	突发事件分级结果与辅助决策信息	T_4	开展军事应急物流准备工作
P_5	军事应急物流指挥中心接收信息	T_5	上级物流指挥中心或公共应急物流平台对信息进行分析研究
P_6	上级物流指挥中心或公共应急物流平台接收信息	T_6	第三方物流辅助应急和公共资源信息更新并对阶段性实施效果进行独立评估
P_7	需求与安全信息开始更新	T_7	上级物流指挥中心或公共应急物流平台向军事应急指挥中心下达指令
P_8	开始节点选址、路线规划、运输载体调度等工作	T_8	需求与安全信息更新
P_9	开始应急物资运输和配送工作	T_9	开展节点选址、路线规划、运输载体调度等工作
P_{10}	开始对外协调工作(如开辟应急通道的协调等)	T_{10}	开展应急物资运输和配送工作
P_{11}	需求与安全信息开始更新完毕	T_{11}	开展对外协调工作
P_{12}	节点选址、路线规划、运输载体调度等工作完毕	T_{12}	对军事应急物流四类行动实施阶段性效果评估
P_{13}	应急物资运输和配送完毕	T_{13}	撰写总结报告和扩充完善预案
P_{14}	对外协调工作完毕	T_{14}	根据更新的信息对原计划进行修改
P_{15}	应急物流行动阶段性实施效果评估结果	T_{15}	表逻辑连接(瞬时变迁)
P_{16}	军事应急物流结束		

4 模型的有效性分析

GSPN 模型的有效性可按照普通 Petri 网模型有效性来判断,即是否具有有界性和活性,可根据不变量计算结果判断。不变量是 Petri 网的结构特性,包括 S^- 不变量和 T^- 不变量。 S^- 不变量代表系统中资源的流动范围, T^- 变量代表系统中变迁的发生效果。本文采用求解 T^- 不变量的方法来判断军事应急物流行动流程 GSPN 模型是否具有有界

性和活性。

设 Petri 网 $W = (P, T, F)$, $|T| = n$, A 为 W 的关联矩阵,则如果存在非平凡的 n 维非负整数向量 X 满足 $AX = 0$,则称 X 为网 W 的一个 T^- 不变量。经计算,可得 T^- 不变量:

$$\begin{cases} X_1^T = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1) \\ X_2^T = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1) \\ X_3^T = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0) \\ X_4^T = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) \\ X_5^T = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) \end{cases}$$

其中,向量 X_i^T 表示不同情境下变迁的发生序列,分量 1 代表该处变迁触发,0 代表未触发。根据结果可知,所有变迁都被触发过至少一次,不存在未被触发过的变迁,因此,模型具有活性。根据 Petri 网结构有界性定理, W 为结构有界网的充分必要条件为存在正整数向量 X ,使得 $AX \leq 0$,该 T^- 不变量使得条件成立,因此,模型具有有界性。综上,本文提出的 GSPN 模型是有效的。

5 模型的稳态概率求解

根据建立的军事应急物流行动流程 GSPN 模型,利用 Petri 网建模软件——PIPE(Platform Independent Petri net Editor)可得到该 GSPN 模型的可达图如图 3 所示,其中,矩形标识代表不可达,圆形标识代表可达。各标识状态及包含库所情况见表 3。

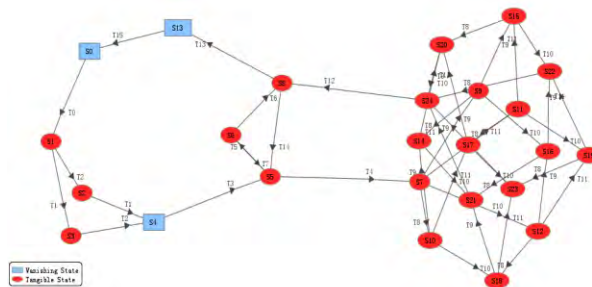


图 3 军事应急物流行动流程 GSPN 模型可达图

如前文所述,可利用同构的嵌入马尔可夫链 EMC 求解 GSPN 模型的稳态概率。该 EMC 转移概率矩阵为:

$$U = A + B = \begin{bmatrix} C & D \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ E & F \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 3 GSPN 模型标识状态及包含库所

标识	包含库所	状态	标识	包含库所	状态
S0	P_0	消失	S13	P_{16}	消失
S1	$P_1 P_2$	实存	S14	$P_9 P_{10} P_{11} P_{12}$	实存
S2	$P_1 P_4$	实存	S15	$P_7 P_9 P_{12} P_{14}$	实存
S3	$P_2 P_3$	实存	S16	$P_7 P_{10} P_{12} P_{13}$	实存
S4	$P_3 P_4$	消失	S17	$P_8 P_9 P_{11} P_{14}$	实存
S5	P_5	实存	S18	$P_8 P_{10} P_{11} P_{13}$	实存
S6	P_6	实存	S19	$P_7 P_8 P_{13} P_{14}$	实存
S7	$P_7 P_8 P_9 P_{10}$	实存	S20	$P_9 P_{11} P_{12} P_{14}$	实存
S8	P_{15}	实存	S21	$P_{10} P_{11} P_{12} P_{13}$	实存
S9	$P_7 P_9 P_{10} P_{12}$	实存	S22	$P_7 P_{12} P_{13} P_{14}$	实存
S10	$P_8 P_9 P_{10} P_{11}$	实存	S23	$P_8 P_{11} P_{13} P_{14}$	实存
S11	$P_7 P_8 P_9 P_{14}$	实存	S24	$P_{11} P_{12} P_{13} P_{14}$	实存
S12	$P_7 P_8 P_{10} P_{13}$	实存			

式(1)中 A 中元素是 EMC 由消失状态向消失状态集 C 和实存状态集 D 的转移概率,由随机开关的分布确定; B 矩阵的元素表示 EMC 由实存状态向消失状态集 E 和实存状态集 F 的转移概率,由时间变迁的实施速率确定。将 EMC 中的全部消失状态移出,只剩下实存状态,就可得到一个压缩的 EMC(reduced embedded Markov chain, REMC)。REMC 的实存状态转移概率矩阵为:

$$U' = F + E \times (1 - C)^{-1} \times D \quad (2)$$

式(2)中 $C = [c_{rs}]$, $D = [d_{ij}]$, $E = [e_{is}]$, $F = [f_{ij}]$, $U' = [u'_{ij}]$; r, s 表示 EMC 中任意消失状态, i, j 表示 EMC 中任意实存状态。

求解 REMC 有以下方程组:

$$\begin{cases} Y = YU' \\ \sum_i y_i = 1 \end{cases} \quad (3)$$

由于解此方程需要已知随机开关的分布 λ_i 与时间变迁的转移速率 λ_T ,一般需要抽样统计和假设检验才可得到,在 6.1 案例分析中将进行具体说明。解出的元素 y_i 表示为 REMC 的实存状态概率分布,选择 REMC 的一个状态作为参考状态,则 $V_{ij} = \frac{y_j}{y_i}$ 代表 SPP 在连续两次访问状态 i 之间访问 j 的次数。重新引入时间参数就可计算 SPP 的稳定状态概率,每个状态上的平均驻留时间为:

$$ST_i = \begin{cases} 0 & \forall i \in V \\ \left(\sum_{j \in H_i} \lambda_j \right)^{-1} & \forall i \in T \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中 H_i 为实存状态下可实施的变迁集。

则 SPP(GSPN) 的稳定状态概率最终可写成:

$$P_j = \begin{cases} 0 & j \in V \\ \frac{V_{ij} \cdot ST_j}{\sum_{j \in T} V_{ij} \cdot ST_j} & j \in T \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中 V 代表消失状态集, T 代表实存状态集。

6 案例与模型性能分析

6.1 案例分析

为了使构建的 GSPN 模型逼近真实的军事应急物流行动实践,必须根据实际军事应急事件的统计数据对时间变迁的转移速率 λ_T 进行设定。值得注意的是,瞬时变迁与随机开关相关联,其实施延迟为 0,故转移速率 λ_T 可看作 ∞ ,瞬时变迁的发生概率为 1,故随机开关分布为常数 1。

在已查阅文献中,大部分研究者对时间变迁的转移速率 λ_T 采用经验假设的方法进行参数设置,导致在此基础上得到的仿真结果缺乏可信度,而通过可靠数据的抽样统计和参数估计的方法求解各时间变迁的转移速率 λ_T 则显得更加合理。方便起见,本文中假设的各时间变迁的发生时间 X 均服从参数为 λ_p 指数分布 $f(x) = \lambda_p e^{-\lambda_p x}$ ($x \geq 0$),因此,其转移速率满足 $\lambda_p = \lambda_T$,且满足指数分布的两个统计量:①期望值 $EX = \lambda_T^{-1}$,②方差 $DX = \lambda_T^{-2}$ 。

不同的应急事件中参与响应的军事应急物流主体不尽相同,主要包括武警和解放军各级联勤部门。本文以某部队团级作战单位为例,搜集汇总该团参与“5.12”汶川地震抗震救灾中对青川县的军事应急物流行动的部分数据进行分析。

6.1.1 背景简介

该团当时下设与军事应急物流相关的部门有团级指挥部、军民协调委员会、信息情报部门、物资运输部门。本文所提 GSPN 模型中各变迁均涵盖在以上四大部门中。但由于该团没有完全按照本文提出的行动流程进行保障,因此本文对部分数据做出假设以方便分析。譬如军队的对上负责制制约了该团采用“军地融合”应急保障模式的实施,其并没有与第三方物流平台进行广泛融合,只是利用非政府组织(NGO)提供的少量车辆进行运力补

充,但本文为方便分析将其类比为第三方平台数据进行研究。

6.1.2 数据处理与显示

由于救援时间较长,本文采用应急物流工作最重要的前 10 天数据作为代表进行分析。将与各时间变迁 i 对应的相关部门分段时间内的转移速率 λ_{Ti}^d 等效记为:

$$\lambda_{Ti}^d = \frac{d \text{ 时段变迁 } i \text{ 处理业务数}}{\text{处理天数}} \quad (6)$$

将总应急时间内变迁发生时间的期望记为:

$$EX = \frac{\text{处理总天数}}{\text{变迁 } i \text{ 处理业务总数}} \quad (7)$$

通过统计分段时间 d 内的处理业务数,可以发现转移速率的变化情况,见表 4(业务数由于类型不同,无法统一单位,这里为方便表达,将其化作传统物流中的接单数“件”加以简化)。本文认为,当分段处理业务数在相邻时间段近似相同时,此时的转移速率即为稳态情况下的理想转移速率。

表 4 某团军事应急物流行动部分数据统计汇总表

变迁	第 1—10 天内处理业务数(件)					EX
	[1,2]	[3,4]	[5,6]	[7,8]	[9,10]	
T_1	22	17	12	10	9	0.143
T_2	19	14	9	7	8	0.175
T_4	21	13	10	8	7	0.170
T_5	4	8	15	16	17	0.167
T_6	2	3	5	4	4	0.556
T_7	20	19	16	18	18	0.110
T_8	8	10	14	12	13	0.175
T_9	11	12	9	10	10	0.192
T_{10}	5	6	5	4	3	0.435
T_{11}	18	15	14	12	12	0.141
T_{12}	21	15	16	14	13	0.127
T_{13}	4	6	10	15	14	0.204
T_{14}	20	18	17	16	16	0.115

6.1.3 计算结果

综上,结合表 4 数据和式(6)、式(8),求得时间变迁 i 的转移速率参数估计 $\bar{\lambda}_i$:

$$\bar{\lambda}_i = \begin{cases} n / \sum_{d \in D} 1 / \lambda_{Ti}^d & i \in T \\ \infty & i \in I \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, D 为稳态情况下时段范围集合; n 为稳态情况下天数; T 为时间变迁集合; I 为瞬时变迁集合。

从表中数据可以发现,第 5 天以后的数据结果较为稳定,尤其是最后 4 天的结果,平均波动最小,

因此,确定 $D = [7, 10]$, $n = 4$ 。求解结果为: $\bar{\lambda} = \{ \infty, 5.4, \infty, 4.8, 2.9, 6.5, 2.6, 7.7, 8, \infty \}$ (单位:次/天)。(注:为方便后文模型性能分析,仅保留整数,考虑到数据具有随机性,影响可忽略)。

将基于以上稳态情况求出的解转化为期望值(求倒数)与式(7)计算的期望值 EX (见表 4)进行相关度比较,求得相关系数为 0.9354,接近 1,故相关度较大,判断基于稳态情况下求得的结果具有较高可信度。

再将 $\bar{\lambda}$ 带入式(1) — 式(4)求解,最终求得 $S_0 - S_{24}$ 的稳态概率为: $S = \{ 0, 0.0475, 0.0380, 0.0594, 0, 0.1680, 0.1222, 0.0353, 0.0611, 0.0126, 0.0163, 0.0163, 0.0042, 0, 0.0197, 0.0197, 0.0038, 0.0280, 0.0052, 0.0052, 0.1880, 0.0148, 0.0148, 0.0238, 0.0960 \}$ 。

6.2 模型性能分析

基于稳态概率可进行系统的性能分析,一般分为库所平均标识数性能、变迁利用率分析、时间性能分析等。

6.2.1 库所的平均标识数

库所标识数反映了库所的忙闲状态,计算结果见表 5。由结果可知, P_{11} 和 P_{14} 的平均标识数最大,说明此处产生信息堆积,这是因为信息更新过程后 P_{11} 会产生海量信息,要在短时间内提取有用信息十分困难;而 P_{14} 由于对外协调具有突发性和滞后性,所以也会产生冗余信息; P_{12} 次之,说明由于信息的不断丰富,不确定事件的增多,需要不断调整选址和路线计划,协调不同运输载体参与应急。

表 5 各库所平均标识数

库所	平均标识数	库所	平均标识数
P_0	0	P_9	0.3359
P_1	0.0855	P_{10}	0.1119
P_2	0.1069	P_{11}	0.3918
P_3	0.0594	P_{12}	0.3694
P_4	0.0380	P_{13}	0.1678
P_5	0.1680	P_{14}	0.3918
P_6	0.1222	P_{15}	0.0611
P_7	0.1119	P_{16}	0
P_8	0.1343		

6.2.2 变迁利用率分析

变迁 T_i 的利用率等于使 T_i 可实施的所有标识的稳态概率之和, $U(T) = \sum_{S \in E} P(S)$, 其中 E 是使 T

可实施的所有可达标识集合。它反映了各项行动占整个应急物流响应过程的时间长短。本文仅对典型军事应急物流行动部分,即 T_4 、 T_8 、 T_9 、 T_{10} 、 T_{11} 、 T_{12} 进行分析,结果见表 6。

表 6 部分变迁平均利用率

变迁	平均利用率	变迁	平均利用率
T_4	0.1680	T_{10}	0.3359
T_8	0.1119	T_{11}	0.1119
T_9	0.1343	T_{12}	0.0960

可以看出,在同时进行四项军事应急物流行动 T_8 、 T_9 、 T_{10} 、 T_{11} 中, T_{10} 的利用率最高,即开展应急运输与配送工作是整个应急物流行动的关键和主要部分,其他的行动利用率不高,启示我们在真实的应急物流行动时应适当缩小其他部门的资源和人员配置,重点保障运输和配送部门的行动。 T_4 和 T_{12} 代表军事应急物流开始准备和阶段评估行动,从结果来看, T_4 较大,说明应急准备时间过长,可尽量采取措施缩短准备时间,满足应急的紧迫性,甚至可以牺牲一定的准确性来换取时效性,以提高整个军事物流应急系统的运行效率。

6.2.3 时间性能分析

军事应急物流的时间因素是应急物流行动的重要性能指标,其平均执行时间是指在通常情况下,军事应急物流某一行动环节需要的平均时间,计算方法与随机 Petri 网相同,利用 Little 公式 $N_c = \lambda_c T_c$,其中 N 为稳态时 Petri 网系统环节 C 的平均标识数, λ_c 为单位时间进入该环节的标识数, T_c 是该环节的平均执行时间。前文从军事应急物流行动流程内容角度将其分为了三个部分,但由于反馈与调整部分贯穿行动流程始终,故这里从时间角度出发,将其分为两个阶段,分别是:应急准备阶段 $C1: P_0 - P_4$,应急实施阶段 $C2: P_5 - P_{16}$ 。首先计算每个库所拥有令牌的概率,以 P_2 为例: $P(S(P_2 = 1)) = P(S1) + P(S3) = 0.0475 + 0.0594 = 0.1069$,其实,对于初始状态只有一个令牌的系统来说,库所拥有令牌数的概率值其实就等于该库所的平均令牌数。因此,可直接使用表 5 中的结果。由此可以得到各阶段的平均标识数: $N_{C1} = \sum_{i \in C1} P(S(P_i = 1)) = 0.1829$, $N_{C2} = \sum_{i \in C2} P(S(P_i = 1)) = 2.3661$, $\lambda_{C1} = R(T_{15}, P_{16}) = 0.0611 \times 7 = 0.4277$, $\lambda_{C2} = R(T_1, P_2) +$

$$R(T_2, P_4) = 0.0855 \times 5 + 0.1069 \times 4 = 0.8551.$$

各阶段的平均时间:

$$T_{C1} = \frac{N_{C1}}{\lambda_{C1}} = \frac{0.1829}{0.4277} = 0.4276$$

$$T_{C2} = \frac{N_{C2}}{\lambda_{C2}} = \frac{2.3661}{0.8551} = 2.7670$$

平均时间 T 的大小反映了各阶段的运行速度,由计算结果可知应急准备阶段耗时比应急实施阶段耗时短很多,说明本文建立的军事应急物流行动流程模型符合实际需求,比较合理。当然,根据实际需要,还可将模型细分为更小的子系统进行分析,篇幅所限不再详述。

7 结束语

军事应急物流是一个具有不确定性和随机性的复杂系统,本文设计的军事应急物流行动流程具有并行和反馈的特点,可以对整个应急行动过程进行调控,同时与公共应急物流相结合,体现了“军民融合”思想,且提高了系统稳定性。通过构建广义随机 Petri 网 GSPN 模型,结合离散随机点过程 SPP 进行求解稳态概率,并根据结果对模型的性能进行分析,验证了模型的合理性和有效性,得到一些有价值的结论。

从所用方法来看,目前很多学者是将广义随机 Petri 网简化为随机 Petri 网,再利用同构的时间连续的齐次马尔可夫链进行求解,虽然解法简单,但是却不够严谨,同时对于一些复杂的不可化简的广义随机 Petri 网无法求解。本文将 GSPN 可达图看为同构的连续的随机点过程 SPP,并采用压缩的嵌入马尔可夫链 REMC 进行求解,方法上较为严谨,结果更为可靠。当然,由于本文为减少分析的复杂度,将变迁的发生时间均假设为指数分布,在一定程度上影响了模型分析的准确性,在未来研究中,还需结合具体数据准确拟合其分布来加以完善。

参考文献

- [1] 王宗喜.加强应急物流与军事物流研究刻不容缓[J].中国物流与采购, 2003(23): 20.

(下转第 80 页)

参考文献

- [1] 李决龙. 海防工程智能信息系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014 [2014-7-10]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Uq-tD7KBRR1>.
- [3] IPCC. Summary for policymakers [M/OL]//IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2014 [2014-8-15]. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5-SPM-FINAL.pdf>.
- [4] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [5] 张海滨. 美国关于气候变化对国家安全影响的研究评述[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(3): 145-150.
- [6] FINGAR T. National intelligence assessment on the national security implications of global climate change to 2030 [R/OL]. [2008-09-02]. http://www.dni.gov/testimonies/20080625_testimony.pdf.
- [7] 殷洁, 戴尔阜, 吴绍洪. 中国台风灾害综合风险评估与区划[J]. 地理科学, 2013, 13(10): 1370-1375.
- [8] 彭鹏. 气候变化与战场环境影响关联及风险评估研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2014.
- [9] 朱斌. 基于偏好关系决策方法及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [10] CRAWFORD G, WILLIAMS C. A note on the analysis of subjective judgment matrices[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1985, 29(4): 387-405.
- [11] AGUARON J, MORENO-JIMENEZ J M. The geometric consistency index: Approximated thresholds[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147(1): 137-145.
- [12] XU ZS, WEI CP. A consistency improving method in the analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116(2): 443-449.
- [13] 黎锁平. 运用蒙特卡罗方法求解随机性问题[J]. 甘肃工业大学学报, 2006, 27(6): 595-596.
- [14] 李德毅, 杜鹃. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [15] 杨理智, 张韧. 基于云模型的我国海上能源战略通道安全风险评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(1): 74-80.
- [16] 刘常显, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. 计算机工程与应用, 2004(2): 32-35.
- [17] 李国锋. 空间数据挖掘技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [18] 杨理智, 张韧, 洪梅, 等. 基于云模型的我国西南边境水资源安全风险评估[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 1-5.
- [19] 宋晨阳, 王锋, 张韧, 等. 气候变化背景下我国城市高温热浪的风险分析与评估[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 201-206.
- [20] PETRI C A. Kommunikation mit Automaten/[D]. Institut Fuer Instrumentelle Mathematik, 1962.
- [21] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [22] 王文宾, 达庆利. 基于广义随机 Petri 网的再制造供应链建模与性能分析[J]. 系统工程理论与实践, 2007(12): 56-61.
- [23] MARSAN M A, BALBO G, CONTE G, et al. Modelling with generalized stochastic Petri Nets[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [24] 朱宏立. 以太网与 CAN 总线的 DSPN 建模与性能分析[D]. 天津大学, 2004.
- [25] MURATA T. Use of resource-time product concept to derive a performance measure of timed Petri nets[C]// Proceedings of 1985 Midwest Symp. Circuits Systems, 1985.
- [26] AMMAR H H, LIU R W. Analysis of the generalized stochastic Petri nets by state aggregation[C]// Proceedings of Workshop on Timed Petri Nets, Torino, Italy, 1985.
- [27] 景熠, 王旭, 李文川. 广义随机 Petri 网在生态产业园区性能分析中的应用[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6): 2133-2136.

(上接第 56 页)

- [2] 张伟. 论多样化军事行动中的应急物流保障[J]. 物流技术, 2009, 28(1): 143-147.
- [3] MURATA T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications [C]// Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 1989.
- [4] KAKAI F, HAYAT S, MOUDNI A. A hybrid petri nets-based simulation model for evaluating the design of railway transit stations[J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2007, 15(8): 935-969.
- [5] SULTANA S, CHEN Z. Modeling of flood-related interdependencies among critical infrastructures [R]. Berlin, 2007.
- [6] 葛丹, 郑会颂, 姚国章. 基于 Petri 网的应急管理 workflow 模型[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2009, 9(1): 64-68.
- [7] ZHONG M, SHI C, FU T, et al. Study in performance analysis of China urban emergency response system based on petri net[J]. Safety Science, 2010, 6(48): 48.
- [8] 李迁, 刘亚敏. 基于广义随机 Petri 网的工程突发事故应急处置流程建模及效能分析[J]. 系统管理学报, 2013, 22(2): 162-167.
- [9] 刘晓燕, 吕涛. 基于 GSPN 的能源应急管理流程建模与分析[J]. 科技管理研究, 2014, 21(35): 175-179.