第 38 卷第 3 期　河北科技大学学报　Vol. 38, No. 3
2017 年 6 月　Journal of Hebei University of Science and Technology　June 2017

文章编号:1008-1542(2017)03-0269-09　doi:10.7535/hbkd.2017yx03009

应急物流救援系统的 Petri 网建模与性能分析

杨明欣,王　敏,瞿　英

(河北科技大学经济管理学院,河北石家庄　050018)

摘　要:为了更有效地分析应急物流救援系统的性能,在分析 Petri 网特性及主要功能的基础上,以大型自然灾害或突发事件为背景,引入随机 Petri 网建模方法建立应急系统模型,进行性能分析。首先根据应急物流救援系统流程图构建 Petri 网模型,对模型的可达性、活性、安全性进行分析以验证模型的有效性;然后利用马尔可夫随机过程与其同构的特性构建系统的马尔可夫链,建立线性方程,引入算例,通过主要性能指标的定量分析反映系统问题;最后针对系统问题提出建议。该模型能够形象地描述出流程发生的先后次序和异步并发关系,其成熟的性能分析方法能够有效发掘影响系统运作效率的关键环节,为分析系统流程提供了可行的方法,所提建议为优化应急物流救援系统提供了参考。

关键词:物流系统管理;系统建模;应急物流;Petri 网;马尔可夫链;性能分析

中图分类号:F252.14　　**文献标志码:**A

Modeling and performance analysis of the emergency rescue logistics system based on Petri nets

YANG Mingxin, WANG Min, QU Ying

(School of Economics and Management, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to more effectively analyze the performance of logistics emergency rescue system, based on analyzing the characteristics and main functions of the Petri net and its advantage of describing asynchronous concurrent random image system, this paper introduces stochastic Petri net modeling method to establish emergency system model on the basis of serious natural disasters or emergencies, and analyzes the performance. Firstly, according to the emergency rescue system of logistics flow chart, the Petri net model is built, and through the analysis of accessibility, activity and safety, the validity of the model is verified; Secondly, the Markov chain is constructed using the characteristics of isostructuralism with the Markov stochastic process, the linear equations is established, and a numerical example is introduced, reflecting the problems of the system through the quantitative analysis of main performance indexes. Finally, some suggestions are put forward about the problems. On the one hand, this modeling can vividly describe the sequential and asynchronous concurrent relationships between the processes; on the other hand, its mature performance analysis method can effectively explore the key links which have significant impacts on the operational efficiency of the system. The system analysis theory provides a feasible method for the analysis

---

收稿日期:2016-12-08;修回日期:2017-03-20;责任编辑:张　军

基金项目:国家自然科学基金(71301044);河北省教育厅科研项目(2017029,2014027)

第一作者简介:杨明欣(1974—),女,河北武邑人,副教授,博士,主要从事信息管理、计算机应用方面的研究。

通信作者:瞿　英教授。E-mail:quying1973@126.com

杨明欣,王　敏,瞿　英.应急物流救援系统的 Petri 网建模与性能分析[J].河北科技大学学报,2017,38(3):269-277.

YANG Mingxin, WANG Min, QU Ying. Modeling and performance analysis of the emergency rescue logistics system based on Petri nets [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology,2017,38(3):269-277.

of system flow, and the proposal provides a theoretical basis for the optimization of the entire emergency logistics rescue system.

Keywords: logistics systems management; system modeling; emergency rescue logistics; Petri nets; Markov chain; performance analysis

中国是受自然灾害影响较为严重的国家之一，灾害种类多，发生频率高，如2003年的SARS病毒爆发，2008年的汶川大地震，以及后来的舟曲泥石流、玉树大地震、云南大旱等，均造成了重大的人员伤亡、财产损失和生态环境的严重破坏，诸如此类的身然灾害事件直接催生出了巨大的应急物流需求。应急物流是指在紧急时间内，以损失或不利影响最小化、效益最大化为目标，通过现代信息和管理技术整合物流功能活动，对各类突发事件所需的应急物资实施从出发地到目的地的高效率管理过程，具有突发性、不确定性、非常规性、随机性、不均衡性、紧迫性等特点。应急物流系统是为了满足突发性的物流需求，将物流系统中的各个物流元素、物流环节、物流实体组合成相互联系、相互协调、相互作用的有机整体。目前很多学者对应急物流系统进行了研究，但大多局限于对供应链模式下的应急物流系统的研究，主要包括应急服务定位选址问题、应急物资配送问题、应急物资库存管理问题。

徐重岐等[1]提出一种应急物流配送中心选址问题的混合整数规划模型，并利用Matlab软件进行求解计算。甘秋明等[2]提出供应链视角下应急物流中心选址的相关指标，在此基础上应用主成分分析法对应急物流中心选址问题进行了建模和分析，从而为应急物流中心选址决策提供科学的参考依据。韦晓等[3]考虑到道路阻塞情况与受灾点需求信息不断更新等动态因素对路径选择的影响，构建了动态需求条件下的应急物流路径优化模型，并利用蚁群算法进行分析计算验证模型有效性。陈艺华等[4]根据自然灾害救助的应急物流配送现状分析试图建立一套较完善的应急物流配送机制，为及时制定合理的救援计划提供参考。朱佳翔等[5]针对应急物流配送过程中救灾信息具有多重不确定性的特点，提出基于灰动态规划的应急物流配送鲁棒控制策略，对于解决突发事件下的应急物流配送决策问题具有重要的应用价值与实际意义。周愉峰等[6]考虑到在不同地区建立应急物资储备库的失灵风险，以应急物资保障的及时性和可靠性为目标，建立了一种应急物资储备库的可靠性 P-中位选址模型。戚孝娣等[7]基于非线性规划理论建立供需不平衡条件下的区域应急物资调配模型，以调配系统损失最小化为目标，用PSONIW算法对调配模型进行求解分析。朱娜等[8]研究面向复杂网络的应急物流系统中多出救点、多受灾点的物资分配问题并在车辆运载能力等限制条件下提出多目标优化模型。随着对应急物流具体问题的详细分析，应急物流体系所折射出来的研究方向也越来越多，在这样复杂的动态物流网络下，对应急物流系统整体效率的研究就显得尤为重要。

已有的对应急物流救援系统的研究，为应急物流服务网点选址、路径优化问题提供了解决办法，为灾害发生所引发的应急物资调度、配送问题建立了完善的机制，为应急物资储备量的控制提供了算法和模型。但这些模型、算法、机制等都仅限于应急物流救援系统中的某一个环节，而不适用于整个系统。由于灾害发生的时间、地点和后果都存在极大的不确定性，因此应急物流救援系统流程繁多，过程复杂。而Petri网是一个适用于描述异步并发的离散随机性事件的工具，能够形象描述整个系统的各个环节，为系统建立模型并对模型进行性能分析，分析哪些环节需要改进，提高整体效率。

1 随机Petri网的概念及理论

1.1 随机Petri网的基本概念

Petri网是20世纪60年代由卡尔·A·佩特里发明的，是对离散并行系统的数学表示，适合于描述异步的、并发的计算机系统模型。它不仅仅是一种可以用数学图形表示的数学对象，同时也是一种尊重自然规律的物理对象，这样可以确保以Petri网为模型描述的系统都可以实现。

一般系统模型的元素由表示状态的元素和变化的元素构成，Petri网的状态元素和变化元素分别为 P 和 T，联系两者的是流关系 F。其中 P 元素是指库所Place，在Petri网中，将系统中的资源存放的位置称为库所，在Petri网中用圆圈○表示；存放在库所中的系统资源如原料、部件、产品、人员、工具、设备、数据及信息等称为托肯或者是令牌Token，用 M 表示，它是指与系统状态变化有关的因素，在Petri网中用圆点●表示；T 元素是指变迁Transition，激发库所中资源的产生、消耗等状态变化的事件，在Petri网中用矩形□或|表

示；F 是流关系（$F \subseteq P \times T \cup T \times P$），它表示库所与变迁之间的关系，变迁的产生导致库所状态的改变，在 Petri 网中用有向弧→表示。图 1 是初始 Petri 网，图 2 是激发变迁 t_0 后的 Petri 网[9-10]。

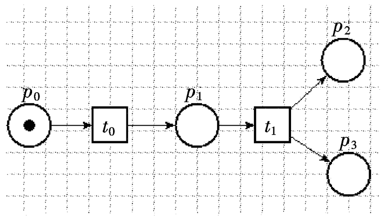

图 1　初始 Petri 网

Fig. 1　Initial Petri net

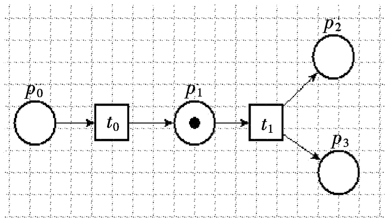

图 2　激发变迁 t_0 后的 Petri 网

Fig. 2　Petri net of excited t_0

1.2　Petri 网的主要性能

应急物流救援系统不同于普通物流系统，它是一个典型的离散事件系统，是由事件驱动系统进程的动态系统，事件发生的时间间隔不确定、地点不确定，救援配送的及时性很难控制，应急资源管理困难，救援需求信息的获取和及时反馈很难实现，这一系列的问题都在挑战整个应急救援系统。为了保证突发事件发生后系统能够高效运转，其各项功能以及系统目标能够完成，需要对系统进行性能分析。而 Petri 网中提供的性能分析方法，如可达树、可达图、安全性、有界性、活性、死锁以及随机 Petri 网特有的马尔可夫链随机过程的转化方法，可以从多维度对系统状态进行观察和检测，使系统的特性在运行前被有效监控并及时纠偏，从而避免错误的发生。用 Petri 网对该系统进行建模的目的在于分析系统性能，提高系统速率，优化整个系统。笔者主要从 Petri 网的主要特性，即可达性、有界性（安全性）和活性出发对其分析[11]。

1）可达性。可达性反映的是系统能否到达一个指定的状态，是研究系统动态特性的基础。当且仅当存在一个变迁实施序列 σ，使得初始标识 M_0 经 σ 实施得到 M，则称标识 M 是由 M_0 可达的，M 是 M_0 的后继标识，记为 $M_0[\sigma>M$。

2）有界性。有界性反映一个库所在系统运行过程中能获得的最大资源数。对于一个 Petri 网系统，令牌数为 1 时，称此系统是安全的，安全性是有界性的特殊状态。在实际设计中，必须使每个库所的令牌数在任何状态下都小于库所的容量，以保证系统正常运行而不发生溢出。如图 3 所示。

3）活性。当且仅当从初始标识 M_0 可达的任一标识出发，都可以通过执行某一变迁序列而最终启动任一变迁，称此 Petri 网系统是具有活性的。活性用于检测系统中是否存在死锁现象，若出现，则会严重影响系统的分析与优化。因此，要利用一切技术手段避免死锁现象出现，确保系统能正常运行。图 4 为死锁状态下的 Petri 网模型，t_0 和 t_2 互为死锁关系。

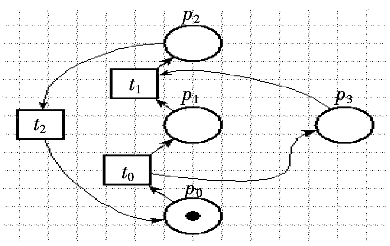

图 3　安全性 Petri 网

Fig. 3　Safety Petri net

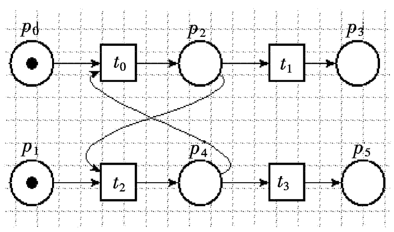

图 4　死锁状态下的 Petri 网模型

Fig. 4　Deadlock Petri net

1.3　Petri 网性能分析理论

对 Petri 网的性能分析基于马尔可夫随机过程，随机 Petri 网与时间连续的马尔可夫链是同构的，因此

可以通过求解出随机 Petri 网的可达集，构造出相应的马尔可夫链 MC，根据 MC 的稳定状态概率对系统进行性能分析。

定义 连续时间随机 Petri 网 $SPN=(P,T,F,W,M_0)$ 是一个 P/T 系统，$\lambda=\{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_m\}$ 是变迁平均实施速率集合。λ_i 是变迁 $t_i\in T$ 的平均实施速率，表示在可实施情况下单位时间内平均实施次数[12]。

求出 SPN 的可达图，将其每条弧上标注的实施变迁 t_i 换成其平均实施速率 λ_i（或与标识 λ_i 相关的函数)，即可得 MC[13]。

2 基于 Petri 网的应急物流救援系统建模

对应急物流系统建模是一个复杂的过程，主要包括应急物资的调配采购、车辆的调度、救援人员的配置、信息的收集反馈以及应急方案的制定。笔者利用 Petri 网进行建模主要是因为它能够反映其他模型不能反映的系统特性，而且在建模过程中能够发现系统存在的潜在问题并及时改变模型结构进行重新分析。Petri 网建模时只允许库所与变迁相连，不能出现库所与库所、变迁与变迁连接的情况，也不能出现独立的元素，同时所建模型不能有冲突和死锁的现象，应具有安全性、活性和可达性。

2.1 应急物流系统救援流程

当灾害事件发生时，首先由灾害救援中心感知，对事件情况进行灾害程度判断，根据灾害等级通知相应的救援部门采取行动。如发生Ⅰ级重灾害时，应急中心会针对发生灾害的地理环境立即制定应急决策并做出响应，包括启动应急物流中心、指挥现场及时救援、联系外援并实时根据现场反馈的信息修改决策等。突发灾害事件应急流程如图 5 所示。

2.2 基于 Petri 网的应急物流系统救援流程建模

根据图 5 应急流程图以及构建 Petri 网模型原则[14-15]，笔者对应急物流救援系统进行建模，如图 6 所示。

按照应急物流系统救援流程之间的关系，笔者对其进行了 Petri 网模型构建，模型中托肯是灾害事件地触发信息，分别对 Petri 网中库所与变迁的含义进行说明，如表 1 和表 2 所示。

表 1 Petri 网模型库所 P 变量说明

Tab.1 Meaning of variable P

库所	库所含义	库所	库所含义
P_1	灾害发生信息	P_{10}	上级救援队到位信息
P_2	救援中心获取灾害信息	P_{11}	专家支援队到位信息
P_3	判断为普通事件	P_{12}	救援实施信息
P_4	判断为Ⅰ级事件	P_{13}	实时监控信息
P_5	判断为Ⅱ级事件	P_{14}	应急救援工作达到预期目标
P_6	应急物流中心到位信息	P_{15}	应急救援工作没有达到预期目标
P_7	道路救援队到位信息	P_{16}	救援工作结束信息
P_8	医护救援队到位信息	P_{17}	工作总结与评估信息
P_9	其他救援队到位信息		

表 2 Petri 网模型变迁 T 变量说明

Tab.2 Meaning of variable T

变迁	变迁含义	变迁	变迁含义
T_1	启动灾害救援中心	T_7	展开Ⅱ级救援工作
T_2	判断灾害等级程度	T_8	事态实时监控
T_3	启动应急救援中心	T_9	判断应急救援是否达到预期目标
T_4	启动上级紧急救援	T_{10}	完成救援
T_5	展开普通救援工作	T_{11}	评估并总结救援工作
T_6	展开Ⅰ级救援工作	T_{12}	应急结束及信息反馈

3　应急物流系统 Petri 网模型性能分析

Petri 网的性能分析包括定性分析和定量分析，笔者借助马尔可夫随机链对该应急物流系统 Petri 网模型进行分析，判断其是否具有可达性、有界性（安全性）、活性等。在对该模型的性能分析中，借鉴了文献[12]中对 Petri 网性能的分析方法，但是该文献只是给出了定量分析的初步方法，并没有对每个稳定状态的概率进行计算，也没有给出具体的性能评价指标。基于此，笔者引入算例进行更进一步的分析，在求出每个稳定状态概率的基础上，引入 3 个主要性能指标进行计算，具体分析并得出结论。

3.1　Petri 网模型的定性分析

由图 6 可知，应急物流系统的 Petri 网模型的结构中含有顺序、并发、循环等结构，其中 T_3 和 T_4，T_5、T_6 和 T_7 是并发选择结构关系，T_9 和 T_4 是循环结构关系，其他的多为顺序结构关系。而且在此过程中，每一个变迁都有自己的输入、输出库所，表明每一项应急救援工作的完成都需要一定的条件。同时在该过程中没有死任务，即整个应急救援过程的各任务都能发生，应急救援工作可以顺利完成。

3.2　Petri 网模型的定量分析

定量分析是基于马尔可夫链进行的，根据图 6 的 Petri 网模型同构 MC，把各个实施变迁 T_i 换成实施速率 λ_i，依次为 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_{12}$。同时将该 Petri 网模型的初始标识设为 $M_0=(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$，表示 P_1 中有一个托肯，为了书写方便，将 M_0 记为（1），由此经过不同变迁得到可达集，进而有如下的状态集：$M_1=(2)$，$M_2=(3)$，$M_3=(4)$，$M_4=(5)$，$M_5=(12)$，$M_6=(6,7,8,9)$，$M_7=(6,7,8,9,10,11)$，$M_8=(13)$，$M_9=(14)$，$M_{10}=(15)$，$M_{11}=(16)$，$M_{12}=(17)$。

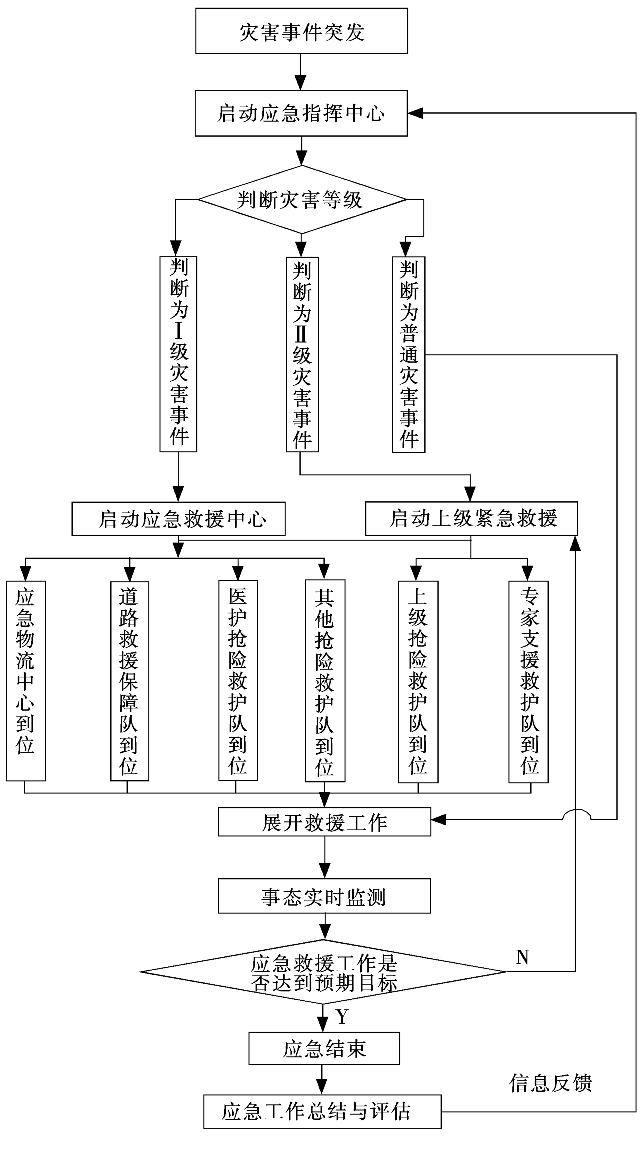

图 5　突发灾害事件应急流程图

Fig. 5　Flow chart of disaster emergency

根据 $M_0, M_1, \cdots, M_{12}$ 这些状态集，可以得出其同构的马尔可夫链，如图 7 所示，其中有向弧表示在应急物流救援系统模型中从一个状态转换到另一个状态[15]。

由图 7 所示的马尔可夫链，可得到以下结论：

1）整个过程中没有阻塞发生，且过程中没有无限地等待某个任务，说明应急救援过程的每一项工作在一定时间之内都会完成，每个任务的完成都是下一个任务顺利完成的基础，应急物流救援过程最重要的因素是时间因素，可以根据具体情况或者根据以往的数据调查分析对每个实施速率进行赋值。

2）在整个流程中，每个状态都是可达的，也就是说每个状态都会在相应变迁发生条件下发生，因此模型不存在死锁，是具有活性的。

3）在整个流程下，由状态 $M_{12} \rightarrow M_0$，托肯数没有发生变化，说明该模型是安全的。

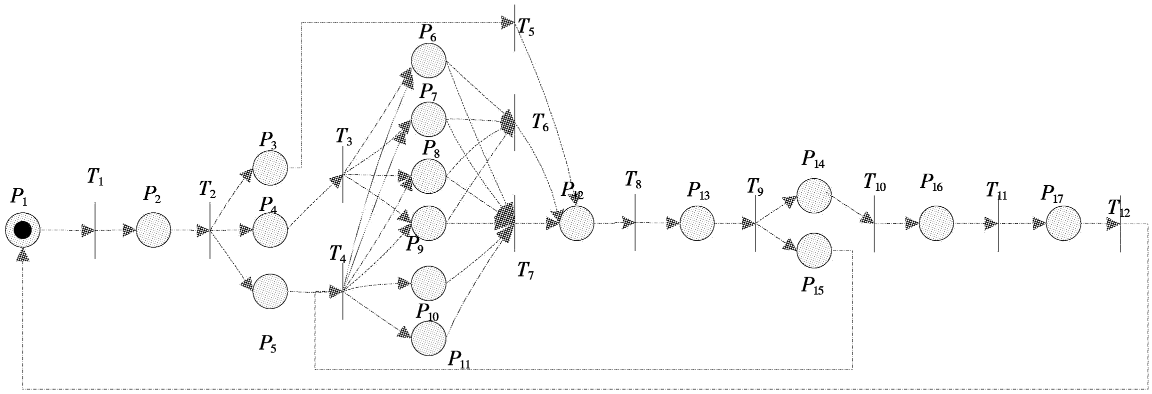

图 6　应急物流救援系统随机 Petri 网模型

Fig. 6　Stochastic Petri net model of emergency logistics rescue system

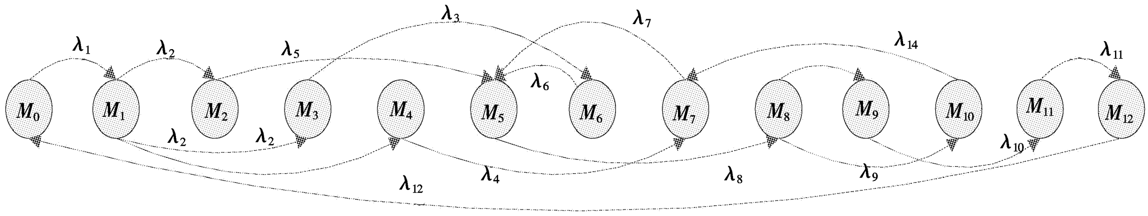

图 7　应急物流救援系统 Petri 网模型马尔可夫链

Fig. 7　Markov chain of the Petri net model

由所建马尔可夫链建立线性方程，如式(1)[16]所示：

$$i\text{ 的取值范围}\begin{cases}\boldsymbol{PQ}=0,\\ \sum\limits_{i}P_i=1,\end{cases}\quad 0\leqslant p_i\leqslant 12, \tag{1}$$

其中：$\boldsymbol{P}$ 为向量$(P(M_0),P(M_1),\cdots,P(M_{12}))$，$P(M_i)$ 为可达标识达到稳定状态的概率；$\boldsymbol{Q}$ 为马尔可夫过程转移的速率矩阵。当从标识 M_i 到标识 M_j 间存在一条有向弧时，矩阵元素 q_{ij} $(i\neq j)$ 为弧上的速率值[17]，即 λ_i，若没弧，则 $q_{ij}=0, i\neq j$，对角线上的元素 $q_{ii}=-\sum\limits_{i\neq j}q_{ij}$(即为从 M_i 出发可触发的所有变迁速率值之和)。假设实施速率 λ_i 依次是(6,4,6,5,3,2,1,3,4,4,2,2)，得到的速率矩阵如下。

$$\begin{matrix}
-6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & -12 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -8 & 4 & 4 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 4 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 2\\
2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2
\end{matrix}$$

根据式(1)以及以上速率矩阵，解线性方程组，得到的各可达标识达到稳定状态的概率依次为 $P(M_0)=P(M_6)=0.039\,8$，$P(M_1)=P(M_{33})=0.019\,9$，$P(M_2)=0.026\,5$，$P(M_3)=0.013\,3$，$P(M_4)=0.015\,9$，$P(M_5)=0.159\,2$，$P(M_7)=0.318\,4$，$P(M_8)=P(M_9)=0.059\,7$，$P(M_10)=0.008\,0$，$P(M_{11})=P(M_{12})=0.119\,4$。

根据计算所得概率，计算系统的性能指标：库所繁忙概率、库所空闲概率以及变迁利用率，以此分析系统的效率[18]。分析指标如下：

1)库所繁忙概率　库所繁忙指的就是各部门、各应急中心、各指挥中心、各救援队等处于忙碌状态，所以可以根据各可达状态的概率求得各库所实体忙碌状态的概率[19]。依次为

$P[M(P_1)=1]=P(M_0)=0.039\,8$，

$P[M(P_2)=1]=P(M_1)=0.019\,9$，

$P[M(P_3)=1]=P(M_2)=0.026\,5$，

$P[M(P_4)=1]=P(M_3)=0.013\,3$，

$P[M(P_5)=1]=P(M_4)=0.015\,9$，

$P[M(P_6)=1]=P[M(P_7)=1]=P[M(P_8)=1]=P[M(P_9)=1]=P(M_6)+P(M_7)=0.358\,2$，

$P[M(P_{10})=1]=P[M(P_{11})=1]=P(M_7)=0.318\,4$，

$P[M(P_{12})=1]=P(M_5)=0.159\,2$，

$P[M(P_{13})=1]=P(M_8)=0.059\,7$，

$P[M(P_{14})=1]=P(M_9)=0.059\,7$，

$P[M(P_{15})=1]=P(M_{10})=0.008\,0$，

$P[M(P_{16})=1]=P(M_{11})=0.119\,4$，

$P[M(P_{17})=1]=P(M_{12})=0.119\,4$。

从以上的所得概率可以看出库所 P_6，P_7，P_8，P_9，P_{10}，P_{11} 繁忙的概率较大，即应急物流中心、各救援队包括医疗部、道路抢险、专家协助等实施救援工作非常容易产生信息堆积的情况。由于各救援部门实施应急救援是整个流程的关键，救援工作的速率直接影响整体流程的速率，在灾害救援过程中，每个救援队的工作都会相互影响，要提高整体流程的速率必须保证这一环节速率有所提升，因此要将这一环节作为优化的重点，在保证各应急救援人员技术水平、道德水平等整体素质提高的基础上能够相互协调、相互促进，以提高救援环节的速率。

2)库所空闲概率　库所空闲概率可根据库所繁忙概率得出，即为 1 减去库所繁忙概率，所得结果就是库所空闲概率，根据上述所得繁忙概率可知，库所 P_2，P_3，P_4，P_5 等较为空闲，根据其库所意义可知，在自然灾害事件突发时，相关部门能够及时处理信息并做出及时响应，这方面应继续保持，做好应急响应工作。

3)变迁利用率　变迁利用率反映的是每项活动占整个应急响应过程的时间长短，它是使各个变迁可以实施的所有标识的稳定概率之和[20]，即

$U(T_1)=P(M_0)=0.039\,8$，

$U(T_2)=P(M_1)=0.019\,9$，

$U(T_3)=P(M_3)=0.013\,3$，

$U(T_4)=P(M_4)+P(M_{10})=0.023\,9$，

$U(T_5)=P(M_2)=0.026\,5$，

$U(T_6)=P(M_6)=0.039\,8$，

$U(T_7)=P(M_7)\ =0.318\,4$，

$U(T_8)=P(M_5)=0.159\,2$，

$U(T_9)=P(M_8)=0.059\,7$，

$U(T_{10})=P(M9)=0.059\,7$，

$U(T_{11})=P(M_{11})=0.119\,4$，

$U(T_{12})=P(M_{12})=0.119\,4$。

从以上数据可以看出，变迁 T_7，T_8，T_{11}，T_{12} 的利用率较高，从表 2 变迁所表示的意义上来看，主要是信息的实时监控、信息总结分析及反馈环节耗时较多，因为在应急救援过程中，灾害的影响导致信息不能及时

收集、传递,从而影响信息的分析评估,进而影响到应急决策,所以要保证应急工作达到预期目标,必须有完善的应急决策方案做为基础保证,变迁 T_7,T_8 的发生对整个救援系统影响很大,直接影响着后续的事件发生,任何一个变迁若不能实施,整个救援流程就不能圆满完成,直接影响救援整体效率。

4 结论与建议

运用 Petri 网对应急物流救援系统进行建模是符合系统流程之间关系的,所建模型能够通过定量的数据明确哪些环节对系统影响较大。Petri 网所提供的性能分析方法可为发掘系统中关键环节提供理论支持,模型可为相关应急部门进一步优化处理灾害事件提供依据,所得结果可为上级管理部门制定多方向优化方案提供决策依据。通过上述算例数据分析,本文对系统优化提出以下建议。

1)加强应急物流救援系统信息化建设

信息化处理速率的优化是整个系统优化的核心,信息传递的速率直接影响各部门进行相应救援措施的速率。拿地震来说,在地震灾区,因为不知道会不会发生余震的情况,若发生也不清楚什么时候发生。对于这类情况,救援队应该做好预防准备,相关信息监测部门应做好信息监测,实时监测,实时反馈,保障信息通道畅通。一方面多培养信息技术人才和经验决策专家,大力开发信息收集、多通道信息处理、实时跟踪监控等高科技系统设备,提高信息处理效率,高效快速制定精确的决策方案。另一方面,有效利用宣传媒体,大力呼吁社会志愿人士参与救援工作,呼吁各界人士捐资捐助并集思广益,为救援工作的高效实施提供帮助。

2)加强应急组织管理建设

各项具体救援流程操作速率对整个系统实施效率的影响较大,要提高整体效率,首先要提高各项救援工作的效率。为此,要培养专业的应急救护工作人员,包括医疗救护人员、疏散撤离受灾人群的人员等;其次要妥善分工,合理配置资源,协调组织指挥应急救援工作,缩短各项工作时间。

3)建立专业的应急物流中心

救援工作的展开离不开救援物资以及救援人员,而物资的运输配送以及人员的调配离不开物流中心,物流中心可直接反映应急救援系统的运转情况。针对自然灾害发生的不确定性,专门建立全国范围内以应急物资和应急运输工具为主体的应急物流中心,使其具备功能强大、适应性强、反应灵敏等特性,确保在最短的时间内,尽可能以较低的成本,把应急物资及时运送到灾害区,并合理分发到每个受灾群众手中。

在今后的研究中,可以将 Petri 网模型中的并发结构、循环结构、选择结构进行等价化简,突出主要环节,再结合层次分析法的权重计算,找出对系统流程速率影响最大的关键环节。同时可结合具体事件进行仿真研究,为模型的优化提供进一步的依据。

参考文献/References:

[1] 徐重岐,张涛,曾俊伟. 应急物流配送中心选址问题模型研究[J]. 物流科技,2015(1):1-3.
XU Zhongqi, ZHANG Tao, ZENG Junwei. Study on modeling of distribution center location of emergency logistics[J]. Logistics Sci-Tech, 2015(1):1-3.

[2] 甘秋明,赵道致,王敏. 供应链视角下应急物流中心选址研究[J]. 综合运输,2015, 37(10):68-72.
GAN Qiuming, ZHAO Daozhi, WANG Min. Study on the location of emergency logistics centers from the perspective of the supply chain [J]. China Transportation Review, 2015,37(10):68-72.

[3] 韦晓,常相全. 动态需求条件下应急物流路径优化问题研究[J]. 价值工程,2015(6): 24-26.
WEI Xiao, CHANG Xiangquan. On the emergency logistics path optimization under the condition of dynamic demand[J]. Value Engineering, 2015(6):24-26.

[4] 陈艺华,李大卫. 应急物流特点及我国应急物流配送机制研究[J]. 价值工程,2014(1): 22-23.
CHEN Yihua, LI Dawei. Study on the characteristics of emergency logistics and distribution mechanism of emergency logistics in China [J]. Value Engineering, 2014(1):22-23.

[5] 朱佳翔,谭清美,蔡建飞,等. 基于双重不确定性的应急物流配送策略[J]. 系统工程,2016, 34(3):1-8.
ZHU Jiaxiang, TAN Qingmei, CAI Jianfei. et al. Emergency logistics distribution strategy based on double uncertainty[J]. Systems Engineering, 2016, 34(3):1-8.

[6] 周愉峰，马祖军，王恪铭. 应急物资储备库的可靠性 P-中位选址模型[J]. 管理评论，2015，27(5)：198-208.
ZHOU Yufeng, MA Zujun, WANG Keming. A reliability P-median location model for relief supplies reserve bases[J]. Management Review, 2015, 27(5): 198-208.

[7] 戚孝娣，庄亚明. 供需不平衡条件下的区域应急物资调配模型研究[J]. 中国安全科学学报，2016，26(3)：169-174.
QI Xiaodi, ZHUANG Yaming. Study on model for dispatching regional emergency materials under imbalance between supply and demand [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(3): 169-174.

[8] 朱娜，郑亚平. 复杂物流网络下的应急物资分配模型[J]. 数学的实践与认识，2016，46(19)：133-141.
ZHU Na, ZHENG Yaping. The distribution model of emergency materials under the complex logistics network[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(19): 133-141.

[9] 崔政东，刘晋. 基于广义随机 Petri 网的供应链建模与分析[J]. 系统工程理论与实践，2005，25(12)：18-24.
CUI Zhengdong, LIU Jin. Supply chain modeling and analysis based on generalized stochastic Petri nets[J]. System Engineering Theory and Practice, 2005, 25(12): 18-24.

[10] 袁崇义. Petri 网应用[M]. 北京：科学出版社，2013.

[11] 艾厚文. 基于随机 Petri 网的铁路应急预案流程化研究[D]. 北京：北京交通大学，2008.
AI Houwen. Research on Flow of Railway Emergency Plan Based on Stochastic Petri Net[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

[12] 钟茂华，刘铁民，刘功智. 基于 Petri 网的城市突发事件应急联动救援系统性能分析[J]. 中国安全科学学报，2003，13(11)：17-20.
ZHONG Maohua, LIU Tiemin, LIU Gongzhi. Performance analysis on urban emergency response system based on Petri net[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(11): 17-20.

[13] 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.
LI Qian, LIU Yamin. Modeling and simulation of emergency management of construction incident based on generalized stochastic Petri nets[J]. Journal of Systems & Management, 2013, 22(2): 162-167.

[14] 薛晶晶. 基于时间 Petri 网的内陆港集装箱物流系统的建模与仿真[D]. 西安：长安大学，2012.
XUE Jingjing. Modeling and Simulation of the Container Logistics System in Inland Port based on Time Petri Nets[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[15] 曾梅，郭均鹏. 基于 CPSO 的基础设施模糊投资组合优化模型[J]. 河北工业科技，2016，33(1)：1-5.
ZENG Mei, GUO Junpeng. Fuzzy optimized investment portfolio model on infrastructure based on chaos particle swarm optimization[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2016, 33(1): 1-5.

[16] SERRAL E, SMEDT J D, SNOECK M, et al. Context-adaptive Petri nets: Supporting adaptation for the execution context[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(23): 9307-9317.

[17] WANG Liewei, MAHULEA C, JULVEZ J, et al. ON/OFF strategy based minimum-time control of continuous Petri nets[J]. Nonlinear Analysis Hybrid Systems, 2014, 12(2): 50-65.

[18] ZEE D J V D. Building insightful simulation models using Petri nets——A structured approach[J]. Decision Support Systems, 2011, 51(1): 53-64.

[19] MILINKOVI S, MARKOVI M, VESKOVI S, et al. A fuzzy Petri net model to estimate train delays[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2013, 33: 144-157.

[20] KHODYREV I, POPOVA S. Discrete modeling and simulation of business processes using event logs[J]. Procedia Computer Science, 2014, 29: 322-331.

[21] JOS C D A A, VILLANI E, JUNQUEIRA F. Coloured Petri nets and graphical simulation for the validation of a robotic cell in aircraft industry[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(27): 929-941.