

矿山事故应急救援数字预案的任务协同流程网络模型及时效分析

赖祥威^{1,2} 郑万波^{1,2} 吴燕清³ 夏云霓⁴ 冉啟华⁵ 董银环^{1,2}

1 昆明理工大学理学院 昆明 650500

2 昆明理工大学数据科学研究中心 昆明 650500

3 重庆大学资源及安全学院 重庆 400030

4 重庆大学计算机学院 重庆 400030

5 云南卫士盾科技有限公司 昆明 650500

(875269923@qq.com)

摘要 矿山开采环境复杂,一旦发生事故,应急救援工作困难大,研究矿山事故应急救援流程有利于科学指导相关人员提高应急处置的效率。文中针对矿山应急管理的数字预案的任务协同问题开展研究。首先,描述省级数字预案体系的典型国有企业应急预案体系及衔接关系;其次,建立典型矿山事故灾难应急救援指挥 workflow Petri 网模型;再次,利用随机 Petri 网和随机过程分析技术,获得多个瞬态和稳态的计算结果,建立预测指挥信息调度 workflow 的所有救援任务时间模型;最后,以典型瓦斯爆炸案例进行建模,并对模型进行性能分析。研究结果表明,该模型实证结果比较合理,在矿山应急救援方面具有普适性,能够优化应急救援调配,提高救援效率。

关键词: 数字化预案;任务协同流程;Petri 网模型;矿山事故救援;时效分析

中图法分类号 TP315

Task Collaborative Process Network Model and Time Analysis of Mine Accident Emergency Rescue Digital Plan

LAI Xiang-wei^{1,2}, ZHENG Wan-bo^{1,2}, WU Yan-qing³, XIA Yun-ni⁴, RAN Qi-hua⁵ and DONG Yin-huan^{1,2}

1 Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2 Data Science Research Center, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

3 College of Resources and Security, Chongqing University, Chongqing 400030, China

4 College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China

5 YunNan Wisdom Science and Technology Co., Ltd., Kunming 650500, China

Abstract The mining environment of mines is complex. Once an accident occurs, emergency rescue work is difficult. Studying the emergency rescue process of mine accidents will help scientifically guide relevant personnel to improve the efficiency of emergency response. This paper focuses on the task coordination of digital emergency management plans for mines. The emergency plan system and connection relationship of the conventional production enterprise of the provincial digital plan system are described. Secondly, this paper establishes the Petri net model of the typical mine accident disaster emergency rescue command workflow. Thirdly, this paper uses the stochastic Petri net and stochastic process analysis technology to obtain multiple transient sums based on the preliminary calculation results, and establishes a time model of all rescue missions for predicting the command information scheduling workflow. Finally, a typical gas explosion case is used for modeling, and the model is used for performance analysis. The research results show that the empirical results of this model are reasonable and universal in mine emergency rescue. It can optimize emergency rescue deployment and improve rescue efficiency.

Keywords Digital plan, Task collaborative process, Petri net model, Mine accident rescue, Time analysis

1 引言

我国以“一案”促“三制”,预案是龙头,预案包括了应急管理各环节的内容,2003年“非典”以来,国务院办公厅成立应急预案工作小组;2004年4月6日,国务院办公厅印发《国务院有关部门和单位制定和修订突发事件应急预案框架指南》

和《省(区、市)人民政府突发公共事件总体应急预案框架指南》,这成为了我国应急总体预案体系的编制纲领,按照“横向到边、纵向到底”的原则,各级地方政府及部门编制了总体预案、专项预案和部门预案。由此,国家行政应急管理体系大轮廓开始清晰起来,由“一案三制”组成,目前我国政府和企业已经形成了较为完备的“横向到边、纵向到底”的应急预案体系,

基金项目:重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2016shmszx90002);昆明理工大学人培项目(KKZ3201907003)

This work was supported by the Special Science and Technology Innovation Project for Social Undertakings and People's Livelihood Security in Chongqing(cstc2016shmszx90002) and Kunming University of Science and Technology Human Resource Training Project (KKZ3201907003).

通信作者:郑万波(zwanbo2001@163.com)

建立了数字库及数字预案信息系统^[1],并进一步推动了矿山事故应急救援指挥决策一体化信息平台建设^[2]。

国内外学者在应急管理和工作流方面做出了许多研究,Zeng等在Petri网模型的基础上扩展了任务执行组织部门、资源消耗以及消息传递等任务要素,研究了应急处置流程的时间性能分析、资源冲突检测以及部门内部任务化简等问题,针对上述问题提出了形式化的解决方案^[3];Yang等根据成本属性构建了事故应急响应成本冰山图^[4];Chen等在考虑部门协同、动态决策的基础上,提出了部门协同网络、协同矩阵、协同系数等新的概念,基于多目标优化的思想,建立了多阶段多目标多部门的应急协同决策模型^[5];Wang等研究了煤矿事故救援必要的必要技术基础^[6]。在煤炭事故应急处置方面,Zhang等建立了煤矿应急救援组织结构模式,并将组织结构模型抽象为网络,通过对效率、效率比的计算来获得应急救援组织的效率^[7];Zhang等研究了矿山应急处置能力评估方法^[8]。在矿井应急通信技术方面;Zhang等研究了多模式矿井应急通信系统设计与性能分析^[9]。在应急预案方面,Guo等以多个煤矿事故为例,分析了快速建立应急救援预案的关键性,研究了煤和瓦斯突出事故应急预案^[10];Zhang建立了基于数字预案的应急处置流程构造方法^[11]。在应急协同方面,Kang等提出了一种多层次应急救援力量协同的方法,结合协同调度的原则,建立了多层次应急救援协同调度模型^[12]。Liu等挖掘出了分层业务过程模型的方法,挖掘得到的模型用分层Petri网来描述并给出了模型质量度量方法^[13],Yu等研究了一种基于进程验证的Petri网可达性判定方法^[14]。Zhang等发现了现有的应急预案评价指标体系存在评价指标的侧重点偏移、可靠性不足及指标种类不够精细等问题,并提出了相应改进建议^[15]。Zeng等使用Petri网的跨组织紧急响应系统进行了建模和分析^[16]。He等研究了煤矿安全应急管理的耦合协调度^[17]。Fang等研究了业务流程控制流Petri网模型的变化域和数据流Petri网模型的变化域^[18]。Zeng等使用Petri网的不确定性来解决紧急响应过程的资源冲突检测和消除策略^[19]。也有学者研究了国内外应急救援工作存在的问题,提出了加强矿山应急预案工作的措施。

尽管国内外存在应急处置和协同学的研究^[20],但是应急处置数字预案较少,而其与协同结合的研究更少,从而可开展研究的空间很广阔。对于不同级别的事事故响应的机制协同指挥的研究可加强,以提高救援系统的效率,为实地救援工作争取宝贵时间。从协同学的角度进行应急救援数字预案的研究甚少,更未对应急救援预案模型进行模型的效能评估。

由于在应急救援指挥过程中存在许多不确定性因素,为了将应急预案有效利用,因此本文希望从系统的角度分析矿山灾害事故应急救援流程,建立数字预案的应急协同Petri模型并对此模型进行系统性能分析。

2 矿山企业应急数字预案体系架构及衔接

同时,我国的矿山数字预案技术逐步建立,但是应急预案演练数字化、信息化水平低,难以标准统一、“演”“练”并重;作者前期的研究提出一种典型省级区域煤矿生产安全事故多层次多方位数字预案体系与评估体系的必要性、思路和技术方法,并开发了一套数字预案信息系统,但是目前还缺乏任务协同网络建模及效能评价。

通过数字化技术,实现文本预案的数字化管理,同时形成一个多方位多层次联动的智能化系统。省级区域数字预案体系包括省级区域安全生产应急预案体系、市(区)应急预案体系、县应急预案体系、企业应急预案体系。省级预案体系与市(区)、县应急预案体系、企业预案体系相衔接,横向包括综合应急预案、专项应急预案和现场处置方案,纵向包括上级主管企业预案体系及属地的区县管理预案体系。

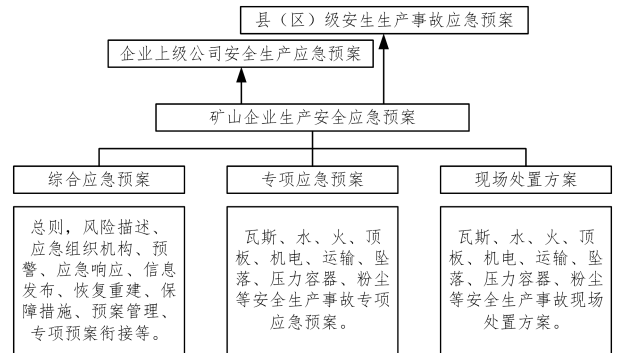


图1 某省属国有矿山企业应急预案体系及衔接

Fig.1 Emergency response plan system and connection of a state-owned mining enterprise in a province

3 矿山应急救援指挥任务协同指挥流程的Petri网模型

矿井事故应急响应涉及煤炭监管局、各级政府应急办公室、救护队、医疗、电力、警察、应急指挥中心等部门。他们共享救灾物资和信息等资源,实现跨组织部门的快速反应,统一指挥和合作,建立有效的应急协调体系,及时、高效地开展应急救援活动,为矿山事故灾难应急救援指挥提供强有力的保障。

以《XX市煤矿事故灾难应急预案》为基础,按照《生产安全事故报告和调查处理条例》和《煤矿生产安全事故报告和调查处理规定》,煤矿事故灾难预警分为4级:特别重大预警(I级)、重大预警(II级)、较大预警(III级)和一般预警(IV级)。

3.1 矿山应急处置流程

首先,根据矿山事故应急响应级别,成立矿山事故灾难应急指挥部,启动矿山事故灾难应急预案,依据应急响应级别,将相关信息及时报送到上级政府和煤监局等相关单位,或者国家(省级、市、县级)应急救援中心。

矿山事故灾难应急指挥部应下达应急救援指挥任务,协同其他各组织部门配合应急行动,全面展开应急救援工作,如:专业技术组(瓦斯、顶板水害、机电等)和专家组负责现场技术支持,后勤组做好后勤和家属安抚工作;信息组发布信息;保卫组维护现场秩序;矿山救护队进行搜救;医护人员对受伤工人进行医疗救治;最后,恢复事故现场,安置受伤矿工和家属,对救援过程进行评估,改进现有预案。因此,矿山事故灾难应急救援指挥任务协同指挥流程是一种典型的大规模分布式动态系统,其中的并发、同步、互斥、资源竞争、不确定性等复杂性质,都可以用对应的Petri网结构进行精确的形式化描述。

3.2 矿山应急处置流程分析

矿山事故灾难应急救援指挥协同任务信息用Petri网表示,系统中每项任务的输入、输出信息用库所P表示;内部信息状态间的转化用t表示,在信息可用的库所中设置托肯,托

青的流动代表信息的流动。

依据应急救援响应的业务流程,应用 Pipe2 仿真软件绘制 Petri 网模型,通过 Petri 网的触发条件和 token 变化表示整个矿山事故应急协调过程的动态行为,应急救援协同流程的建模步骤如下:

(1) 确定每个库所 P 的应急救援状态以及变迁 t 的转换过程,预先设定库所与变迁含义表;

(2) 构建煤矿企业事故灾难预警响应分级的应急处置流程,如图 2 所示。

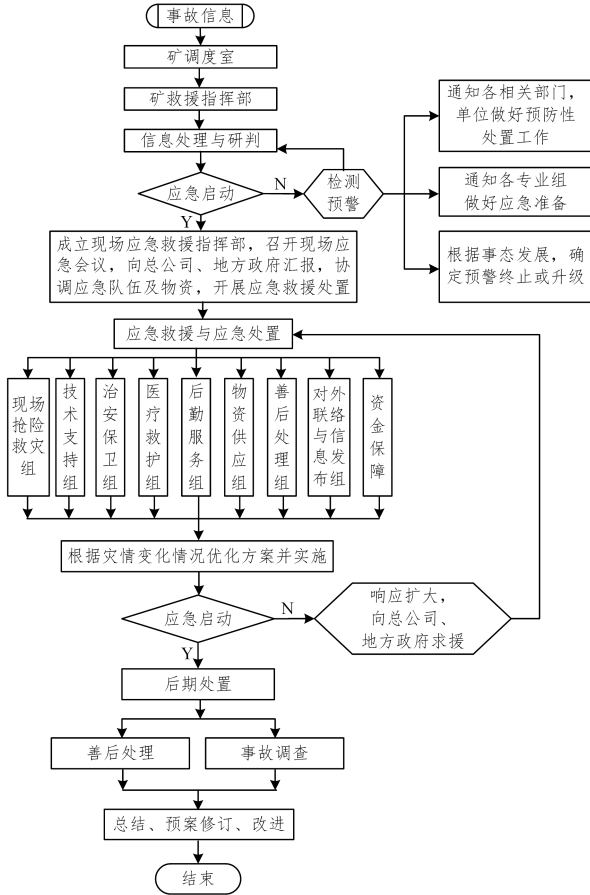


图 2 典型矿山企业事故灾难响应分级的应急处置流程

Fig. 2 Emergency disposal process for the classification of accidents and disasters in typical mines

3.3 矿山应急处置流程随机 Petri 网及元素描述

在矿山应急救援流程的描述上,结合矿山救援的特点和 Petri 网的知识,得到矿山应急处置流程 SPN。

(1) 流程设计

足够熟悉矿山应急处置预案的方法和内容,并对其细节也非常清楚,能够将其进行分析和描述。

(2) 建模初始化

在对模型进行描述后,明确得到 SCN 模型各个环节之间的关系、属性、类型、事件以及状态输入输出关系。

(3) Petri 网模型的构建

在上述基础上,考虑矿上应急救援预警流程、应急响应处置、后期处置流程之间的关系以及应急处置整体流程,建立随机 Petri 网。

(4) 定义属性值

将模型中的各元素的含义进行解释,得到流程中令牌的数量和变迁激发条件。

(5) 构建矿山应急处置流程 SPN 模型

基于矿山应急救援的属性和各个流程之间的关系,利用构建矿山应急处置流程 SPN 模型的方法,构建矿山应急处置流程 SPN 模型,如图 3 所示。其中,库所有 26 个,变迁有 18 个,其具体含义如表 1 所列。

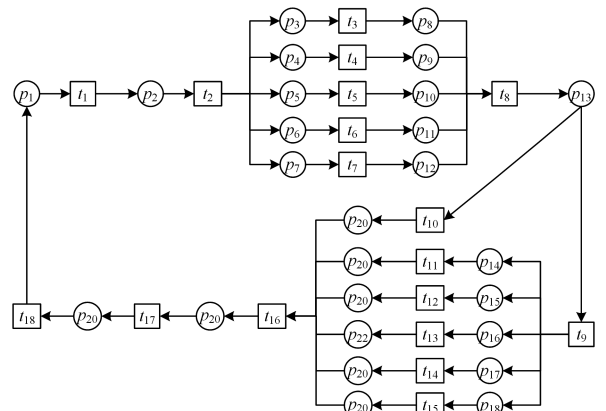


图 3 典型矿山事故灾难应急救援指挥工作流 Petri 网模型

Fig. 3 Typical mine accident disaster emergency rescue command workflow Petri-net model

表 1 库所和变迁解释表

Table 1 Library and change interpretation table

变迁	含义	库所	含义	库所	含义
T1	接警	P1	收到早期报警信息	P14	救援助人员到位信息
T2	警报通知	P2	报警信号信息	P15	通信平台打开信息
T3	现场信息反馈	P3	现场反馈信号信息	P16	应急物资到位信息
T4	信息整合	P4	整合信息	P17	医疗人员到位信息
T5	早期救援处置	P5	早期救援处置信息	P18	现场指挥到位信息
T6	早期事故等级分析	P6	早期事故信息	P19	高级别应急预案信息
T7	报告应急指挥部	P7	完成早期处置信息	P20	救援人员到位结束信息
T8	专家决策	P8	现场反馈结束信息	P21	通信平台开启结束信息
T9	专应急预案启动	P9	信息整合结束信息	P22	应急物资到位结合信息
T10	启动高级别应急	P10	早期救援处置结束信息	P23	医疗人员到位结合信息
T11	救援人员就位	P11	早期事故分析结束信息	P24	现场指挥到位结束信息
T12	通信平台打开	P12	报告应急指挥部结束信息	P25	应急处置结束信息
T13	应急处置物资调配	P13	专家决策信息	P26	应急处置反馈信息
T14	医疗人员到位				
T15	现场指挥到位				
T16	应急处置行动				
T17	应急处置结束				
T18	应急信息反馈				

4 矿山应急救援流程 Petri 网模型性能评估指标与分析方法

矿山应急救援的时间是应急处置效率的主要指标,通常应急处置消耗时间越长,损失就越大。本文从执行时间的角度来考虑应急救援流程评估的指标,表现形式有:库所稳态概率、变迁利用率、平均执行时间。其中,库所稳态概率指流经库所的平均令牌数,对应矿山应急救援某个环节对总体流程处置时间所占的比重;变迁利用率指变迁的繁忙程度,对应矿山应急救援中救援活动环节的重要程度,利用率越高,则该环节越可能是该整体救援流程的中枢,决策人员应当给予高度重视;平均执行时间指整个流程的执行平均时间,这个指标代表着整个流程实施的效率。

传统的性能分析办法一般是运用排队论对系统的性能进行评估和分析,但是在实际情况中,由于流程复杂等因素导致表达不准确、计算繁杂的问题,Petri 网运用层次化建模的方法高效地将复杂度降低。从而,本文将结合 Petri 网的知识对矿山应急救援流程模型进行性能分析与评价。在评估中,本文主要从信息传递方面讨论整个流程的执行效率与平均执行时间,不考虑具体的物资、人员调配等问题,具体评价指标求解算法如下:

(1)使用状态空间工具的模拟工具模拟状态节点的数量和连接的弧的数量,如果整个过程中的资源流动顺畅,既不会发生阻塞也不会无限期地等待某个任务,则表明紧急指挥信息调度工作流程的所有救援任务将在有限的时间内完成;如果没有状态标志,则不能实现转换,表明模型中没有死锁。

(2)先在矿山救援流程模型的基础上,得到实际每个变迁的激发速率 λ ,则平均时延为 $\frac{1}{\lambda}$,对于整个流程就是完成任务的所有时间。

(3)根据救援流程各个环节与状态之间的关系,构建出应急救援流程同构的马尔可夫链。利用构造的同构马尔可夫链,得到各个状态转移的稳态矩阵,然后解出方程。

$$\begin{cases} P \times Q = 0 \\ \sum_{i \neq j} G(M_i) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, Q 为 $n \times n$ 稳态概率转移矩阵,则:

$$Q = (\delta_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1n} \\ Q_{21} & Q_{22} & \dots & Q_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \dots & Q_{nm} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $i = (1, 2, \dots, n), j = (1, 2, \dots, n)$ 。在矩阵 Q 中,非对角线元素 δ_{ij} 为 M_i 到 M_j 的转移概率,计算式如下:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{当 } M_i \text{ 到 } M_j \text{ 之间不存在有向弧时} \\ -\sum_{i \neq j} \delta_{ij}, & \text{当 } M_i \text{ 到 } M_j \text{ 之间存在有向弧时} \end{cases} \quad (3)$$

(4)基于以上分析和计算,我们可以直接使用随机 Petri 网和随机过程分析技术来获得多个瞬态(例如任务响应时间)和稳态(例如平均任务负载)的计算结果,即得到稳定状态下的概率 $P(S) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。再根据马尔可夫链的稳态概率,对模型系统的各项性能指标进行计算,即对变迁利用率、库所繁忙程度和平均执行时间进行计算。

5 矿山应急救援流程 Petri 网模型的实例检验与评估

下文将以重庆市特别重大煤与瓦斯突出事故为例,在信

息传递方面对矿山应急救援流程各环节的执行效率和执行时间展开评估,得到矿山应急救援流程中的重要环节与次要环节,从而得到救援流程优化算法。

5.1 事故介绍

2009年5月30日10时49分,重庆市能源投资集团公司松藻煤电公司同华煤矿(以下简称同华煤矿)三区+100水平安稳皮带斜井揭煤工作面发生一起特别重大煤与瓦斯突出事故。该事故突出煤量3000吨,瓦斯量28.2万立方米;造成了30人死亡,79人受伤(其中12人重伤),直接经济损失为1219万元。

5.2 建立应急响应和救援随机 Petri 网模型

以此事故为背景,根据上述建模方法和模型,建立此案件应急响应与救援随机 Petri 网模型,如图4所示。

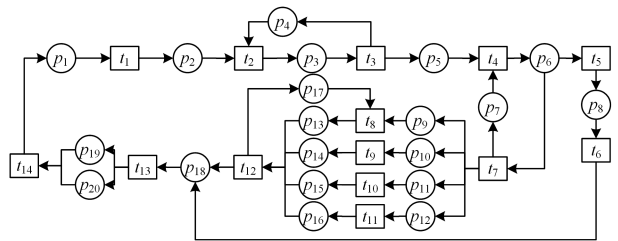


图4 同华煤矿事件应急响应与救援随机 Petri 网模型

Fig. 4 Stochastic Petri net model of emergency response and rescue in Tonghua Coal Mine

该模型中各个库所和变迁的含义如表2所列。

表2 库所和变迁的含义

Table 2 Meaning of the library and the changes

库所	含义	变迁	含义
P1	矿山事件	T1	报警
P2	接收报警信息	T2	调度室接警
P3	报警信息	T3	分析预警信息
P4	信息反馈	T4	专家决策
P5	预警信息	T5	判断事故为高级别应急
P6	专家决策信息	T6	高级别应急
P7	事态控制信息	T7	启动应急预案
P8	应急升级信息	T8	分配应急资源
P9	应急资源配置信息	T9	救援人员到位结束
P10	救援人员到位信息	T10	开启应急通道
P11	应急通道开启信息	T11	现场指挥到位结束
P12	现场室位信息	T12	应急救援反馈
P13	应急资源配置结束	T13	应急结束
P14	救援人员到位结束	T14	应急过程结束和总结
P15	信息平台开启结束		
P16	现场指挥到位结束		
P17	救援物资充足		
P18	应急救援		
P19	事故调查评估		
P20	善后处理		

根据上述随机 Petri 网确定出现的状态集,将决策阶段的所有状态表示为 M_1, M_2, \dots, M_{24} ,各标识如下:

$$M_1 = (p_1, p_4, p_7, p_{17})$$

$$M_2 = (p_2, p_4, p_7, p_{17})$$

$$M_3 = (p_3, p_7, p_{17})$$

$$M_4 = (p_4, p_5, p_7, p_{17})$$

$$M_5 = (p_4, p_6, p_{17})$$

$$M_6 = (p_4, p_8, p_{17})$$

$$M_7 = (p_4, p_{17}, p_{18})$$

- $M_8 = (p_4, p_7, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{17})$
- $M_9 = (p_4, p_7, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{13})$
- $M_{10} = (p_4, p_7, p_9, p_{11}, p_{12}, p_{14}, p_{17})$
- $M_{11} = (p_4, p_7, p_9, p_{10}, p_{12}, p_{15}, p_{17})$
- $M_{12} = (p_4, p_7, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{16}, p_{17})$
- $M_{13} = (p_4, p_7, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14})$
- $M_{14} = (p_4, p_7, p_{10}, p_{12}, p_{13}, p_{15})$
- $M_{15} = (p_4, p_7, p_{10}, p_{11}, p_{13}, p_{16})$
- $M_{16} = (p_4, p_7, p_9, p_{12}, p_{14}, p_{15}, p_{17})$
- $M_{17} = (p_4, p_7, p_9, p_{11}, p_{14}, p_{16}, p_{17})$
- $M_{18} = (p_4, p_7, p_9, p_{10}, p_{15}, p_{16}, p_{17})$
- $M_{19} = (p_4, p_7, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{15})$
- $M_{20} = (p_4, p_7, p_{11}, p_{13}, p_{14}, p_{16})$
- $M_{21} = (p_4, p_7, p_{10}, p_{13}, p_{15}, p_{16})$
- $M_{22} = (p_4, p_7, p_9, p_{14}, p_{15}, p_{16}, p_{17})$
- $M_{23} = (p_4, p_7, p_{13}, p_{14}, p_{15}, p_{16})$
- $M_{24} = (p_4, p_7, p_{17}, p_{19}, p_{20})$

5.3 模型的性能分析

根据此事故的数据记录,依据上述模型进行模型性能分析与评估。

(1)模型中令牌流动未出现停滞,存在变迁 t_1, t_2, \dots, t_{14} 和状态集 M_1, M_2, \dots, M_{24} ,使得 $M[t_1 > M_1 [t_2 > M_2 \dots M_{23} [t_{14} > M_{24}, M_{24}$ 是 M 可达的。

(2)整个流程模型中 p_4, p_7, p_{17} 始终存在一个令牌,其他位置只存在一个令牌,因此是有界的,且任何一个标识 M_i 是可达的,故不会死锁。

(3)随机 Petri 网同构于连续时间的马尔可夫链,其中随机 Petri 网中的库所转移时间服从指数分布,其中每条弧的实施速率设为 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, 14)$, 变迁 t_1, t_2, \dots, t_{14} 的倒数为平均转移速率 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{14}$ 。据上述转移状态集 M_1, M_2, \dots, M_{14} , 可以得到同构的马尔可夫链,如图 5 所示。

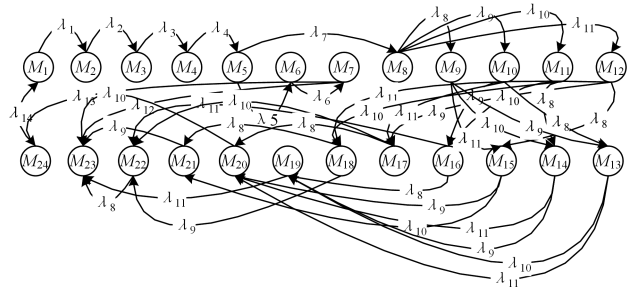


图 5 马尔可夫链
Fig. 5 Markov chain

根据此案件的数据记录,整理得到以下变迁 t_1, t_2, \dots, t_{14} 对应的数值折线图,如图 6 所示。

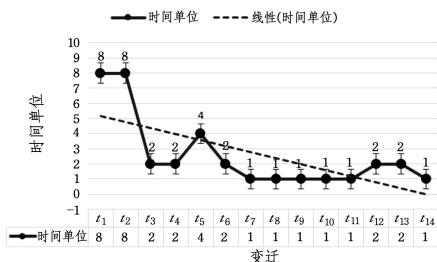


图 6 变迁对应赋值表
Fig. 6 Change corresponding assignment table

根据各个状态的稳态概率,用向量 $(G(M_1), G(M_2), \dots, G(M_{24}))$ 表示,可以得出式(4):

$$\begin{cases}
 \lambda_1 G(M_1) = \lambda_{14} G(M_{14}) \\
 \lambda_2 G(M_2) = \lambda_1 G(M_1) \\
 \lambda_3 G(M_3) = \lambda_2 G(M_2) \\
 \lambda_4 G(M_4) = \lambda_3 G(M_3) \\
 \lambda_5 G(M_5) + \lambda_7 G(M_5) = \lambda_4 G(M_4) \\
 \lambda_6 G(M_6) = \lambda_5 G(M_5) \\
 \lambda_{13} G(M_7) = \lambda_6 G(M_6) + \lambda_{12} G(M_{23}) \\
 (\lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) G(M_8) = \lambda_7 G(M_5) \\
 (\lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) G(M_9) = \lambda_8 G(M_8) \\
 (\lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11}) G(M_{10}) = \lambda_9 G(M_8) \\
 (\lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{11}) G(M_{11}) = \lambda_{10} G(M_8) \\
 (\lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10}) G(M_{12}) = \lambda_{11} G(M_8) \\
 (\lambda_{10} + \lambda_{11}) G(M_{13}) = \lambda_9 G(M_9) + \lambda_8 G(M_{10}) \\
 (\lambda_9 + \lambda_{11}) G(M_{14}) = \lambda_{10} G(M_9) + \lambda_8 G(M_{11}) \\
 (\lambda_9 + \lambda_{10}) G(M_{15}) = \lambda_{11} G(M_9) + \lambda_8 G(M_{12}) \\
 (\lambda_8 + \lambda_{11}) G(M_{16}) = \lambda_9 G(M_{10}) + \lambda_{10} G(M_{11}) \\
 (\lambda_8 + \lambda_{10}) G(M_{17}) = \lambda_9 G(M_{12}) + \lambda_{11} G(M_{10}) \\
 (\lambda_8 + \lambda_9) G(M_{18}) = \lambda_{10} G(M_{11}) + \lambda_{11} G(M_{12}) \\
 \lambda_{11} G(M_{19}) = \lambda_{10} G(M_{13}) + \lambda_9 G(M_{14}) + \lambda_8 G(M_{16}) \\
 \lambda_{10} G(M_{20}) = \lambda_{11} G(M_{13}) + \lambda_9 G(M_{15}) + \lambda_8 G(M_{17}) \\
 \lambda_9 G(M_{21}) = \lambda_{11} G(M_{14}) + \lambda_{10} G(M_{15}) + \lambda_8 G(M_{18}) \\
 \lambda_8 G(M_{22}) = \lambda_{11} G(M_{16}) + \lambda_{10} G(M_{17}) + \lambda_9 G(M_{18}) \\
 \lambda_{12} G(M_{23}) = \lambda_{11} G(M_{19}) + \lambda_{10} G(M_{20}) + \lambda_9 G(M_{21}) \\
 + \lambda_8 G(M_{22}) \\
 \lambda_{14} G(M_{24}) = \lambda_{13} G(M_7) \\
 \sum_{i=1}^{24} G(M_i) = 1
 \end{cases} \tag{4}$$

依据本次事故的数据记录,利用 MATLAB 的数学计算能力进行编程计算,很容易地得到变迁 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{14}$ 的平均激发速率(次/分钟),如图 7 所示。

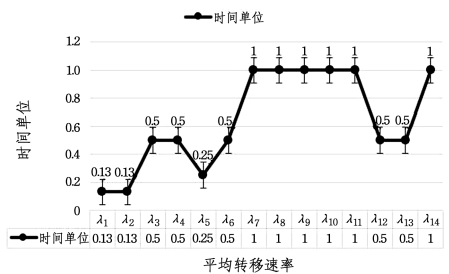


图 7 各个平均转移速率赋值表

Fig. 7 Each average transfer rate assignment table

将图 7 所示的平均发生率的数值代入到方程组中,可以解出各个标识的稳态概率,如表 3 所列。

表 3 稳态转移概率

Table 3 Steady state transition probability

库所	稳态概率	库所	稳态概率	库所	稳态概率
$G(M_1)$	0.0302	$G(M_9)$	0.0050	$G(M_{17})$	0.0050
$G(M_2)$	0.0302	$G(M_{10})$	0.0050	$G(M_{18})$	0.0050
$G(M_3)$	0.0753	$G(M_{11})$	0.0050	$G(M_{19})$	0.0151
$G(M_4)$	0.1506	$G(M_{12})$	0.0050	$G(M_{20})$	0.0151
$G(M_5)$	0.0602	$G(M_{13})$	0.0050	$G(M_{21})$	0.0151
$G(M_6)$	0.1205	$G(M_{14})$	0.0050	$G(M_{22})$	0.0151
$G(M_7)$	0.0753	$G(M_{15})$	0.0050	$G(M_{23})$	0.0301
$G(M_8)$	0.0151	$G(M_{16})$	0.0050	$G(M_{24})$	0.3022

根据马尔可夫链的稳态概率,对模型系统的各项性能指标进行计算,即变迁利用率、库所繁忙程度和平均执行时间。

变迁利用率的计算式为:

$$U(t_i) = \sum_{S \in e} G[S] \quad (5)$$

其中, e 表示所有可以让变迁激发的状态集。

代入数据并计算可以得到变迁利用率表,如图 8 所示。

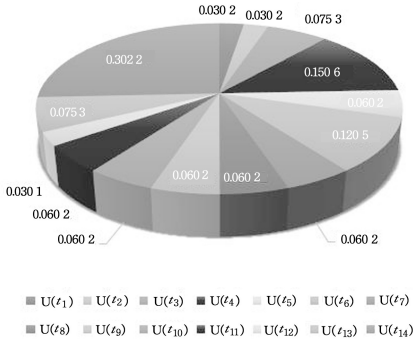


图 8 变迁的利用率

Fig. 8 Utilization of transition

库所繁忙程度的计算式为:

$$G[M(P_i) = 1] = \sum_j G(M_j) \quad (6)$$

其中, M_j 表示标识中库所 P_i 含有资源的全部状态。代入数据并计算可以得到下面各个库所的繁忙概率表,如表 4 所列。

表 4 库所的繁忙概率

Table 4 Busy probability of the library

库所	繁忙概率	库所	繁忙概率
$G[M(P_1) = 1]$	0.0302	$G[M(P_{11}) = 1]$	0.0602
$G[M(P_2) = 1]$	0.0302	$G[M(P_{12}) = 1]$	0.0602
$G[M(P_3) = 1]$	0.0753	$G[M(P_{13}) = 1]$	0.0953
$G[M(P_4) = 1]$	0.9247	$G[M(P_{14}) = 1]$	0.0953
$G[M(P_5) = 1]$	0.1506	$G[M(P_{15}) = 1]$	0.0953
$G[M(P_6) = 1]$	0.0602	$G[M(P_{16}) = 1]$	0.0953
$G[M(P_7) = 1]$	0.7440	$G[M(P_{17}) = 1]$	0.6025
$G[M(P_8) = 1]$	0.1205	$G[M(P_{18}) = 1]$	0.0753
$G[M(P_9) = 1]$	0.0602	$G[M(P_{19}) = 1]$	0.3022
$G[M(P_{10}) = 1]$	0.0602	$G[M(P_{20}) = 1]$	0.3022

系统平均执行时间的计算过程如下。

各个库所的平均令牌数为:

$$\bar{N} = G[M(P_1) = 1] + G[M(P_2) = 1] + \dots + P[G(P_{20}) = 1] = 1.8653$$

单位时间内进入系统的令牌数为:

$$R(T_1, P_3) = W(T_1, P_2) \times U(T_1) \times \lambda_1 = 0.302$$

根据最小化原则结合平衡原理,计算系统的平均时延

$$\bar{T} = \frac{\bar{N}}{\lambda} = 6, \text{即系统平均工作时间为 } 6 \text{ h.}$$

结合煤矿事件不同等级,将这些指标代入考虑,一样可以得到系统平均工作时间,可以作为系统性能的判断依据。

结束语 本文针对煤矿应急管理的数字化预案的多层次多方位预案流程及决策模型问题,开展以下研究:

(1) 分析应急管理领域的数字预案的研究现状,以省级区域应急预案管理和数字化需求为切入点,提出了应急管理信息系统框架和省级区域数字预案系统的研究目标;

(2) 根据典型煤矿企业事故灾难预警响应分级的应急处置流程,矿山事故灾难应急救援指挥任务协同指挥流程是一种典型的大规模分布式动态系统,其中的并发、同步、互斥、资源竞争、不确定性等复杂性质,都可以用对应的 Petri 网结构进行精确的形式化描述,建立典型矿山事故灾难应急救援指挥工作流 Petri 网模型。

(3) 提出若没有状态标志,则不能实现转换,表明模型中没有死锁,直接使用随机 Petri 网和随机过程分析技术来获得多个瞬态(例如任务响应时间)和稳态(例如平均任务负载)的计算结果,建立预测指挥信息调度工作流程的所有救援任务时间模型,为提高救援效率提供依据。

尽管矿山事故应急救援任务流程模型有效,但是本文依然存在不足之处,如矿山事故应急救援情况复杂,不确定因素较多,尚未从不确定性的角度分析与建模。后续工作将从不确定性的角度分析并建立矿山应急救援任务流程模型。最终为建立提供一种省级区域多级预案联动信息系统平台提供一种标准化模型,进一步推动“一案三制”的应急管理框架体系的数字化、信息化水平。

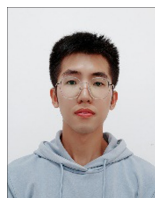
参考文献

- [1] ZHENG W B, WU Y Q, HU Y B, et al. Research on key technologies of regional mine risk warning and digital plan information system[M]. Meteorological Press, 2020.
- [2] ZHENG W B, WU Y Q, XIA Y N, et al. Key technologies of integrated information platform for emergency rescue command and decision-making in mine accidents [M]. Meteorological Press, 2020.
- [3] ZENG Q T, LU F M, LIU C, et al. Modeling and analysis of inter-organizational emergency response system based on Petri nets[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(11): 2290-2302.
- [4] YANG J, HUANG Y C. Study on the composition and classification of cost elements of emergency response to work safety accidents[J]. Chinese Safety Science Journal, 2019, 29(7): 143-149.
- [5] CHEN X, WANG Y, WU L Y, et al. Emergency decision model with multiple stages, multiple objectives, and multidivisional cooperation[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2010, 30(11): 1977-1985.
- [6] WANG Y K, LU B B. The path algorithm coal mine's emergency rescue[C]// International Conference on Electronic & Mechanical Engineering & Information Technology. IEEE, 2011.
- [7] ZHANG J B, GUO D Y, WANG L B. Study on mine emergency rescue organization structure model[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 664-668.
- [8] ZHANG J S, FU G, CHEN N, et al. Research on the evaluation method of miners' emergency response capability[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 290-294.
- [9] ZHANG F, ZHAO S Y, ZOU A P. Design and performance analysis of multi-mode mine mobile emergency communication system[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 583-590.
- [10] GUO D Y, ZHENG M J, CHENG W, et al. Research and application of emergency plan for coal and gas outburst accidents[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 208-211.
- [11] ZHANG F, HAN Y B, CHEN X, et al. The construction method of emergency response process based on digital plan[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2013, 19(8): 1802-1809.

- [12] KANG K, CHEN T, YUAN H Y. Multi-level emergency rescue coordination scheduling model[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2016, 56(8): 830-835, 843.
- [13] LIU C, CHENG L, ZENG Q T, et al. Layered business process mining method based on Petri nets[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2020, 26(6): 1525-1537.
- [14] YU F, LUO J Z, LI W, et al. A Petri net reachability determination method based on process verification[J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(2): 288-299.
- [15] ZHANG S L, KANG Q S, FANG Y. Study on the evaluation index system of emergency plans in Zhejiang Province[J]. Chinese Safety Science Journal, 2012, 22(10): 164-169.
- [16] ZENG Q T, LU F M, LIU C, et al. Modeling and analysis for cross-organizational emergency response systems using Petri nets[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(11): 2290-2302.
- [17] HE G, ZHU Y N, ZHANG G S, et al. Research on coupling coordination degree of security emergency management in coal mine[J]. International Journal of Security and its Applications, 2016, 10(12): 207-218.
- [18] FANG X W, ZHAO F, FANG H, et al. Fusion analysis of business process change domain based on Petri net Behavior Inclusion[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(3): 695-708.
- [19] ZENG Q T, LIU C, DDUAN H. Resource conflict detection and

removal strategy for nondeterministic emergency response processes using Petri nets[J]. Enterprise IS, 2016, 10(7): 729-75.

- [20] LI A N, DENG X Q, ZHAO Q H. Unconventional emergency emergency coordination organization from the perspective of fractal[J]. System Engineering Theory and Practice, 2017, 37(4): 937-948.



LAI Xiang-wei, born in 1996, postgraduate. His main research interests include machine learning, intelligent information system analysis and integration.



ZENG Wan-bo, born in 1981, Ph.D, associate researcher. His main research interests include big data intersects with cloud computing, data analysis and mining and mine tunnel emergency management, mine tunnel emergency rescue and disposal information technology and equipment, engineering geophysical exploration, measurement and control technology and instruments.

(上接第 586 页)

- [17] BROCK A, DONAHUE J, SIMONYAN K. Large scale gan training for high fidelity natural image synthesis[J]. arXiv: 1809.11096, 2018.
- [18] LI Y, XIAO N, OUYANG W. Improved boundary equilibrium generative adversarial networks [J]. IEEE Access, 2018, 6: 11342-11348.
- [19] ENGIN D, GENÇ A, KEMAL EKENEL H. Cycle-dehaze: Enhanced cyclegan for single image dehazing[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. 2018: 825-833.
- [20] DENG W, ZHENG L, YE Q, et al. Image-image domain adaptation with preserved self-similarity and domain-dissimilarity for person re-identification[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018: 994-1003.
- [21] WEI L, ZHANG S, GAO W, et al. Person transfer gan to bridge

domain gap for person re-identification[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018: 79-88.



ZHAO Xiao, born in 1982, undergraduate, engineer. His main research interests include transmission line operation and maintenance.



LI Fan, born in 1986, Ph.D, lecturer, master's supervisor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include picture processing and image recognition.