

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.010

郑霞忠, 余迪, 陈述, 等. 水电工程突发事件应急响应效能 Petri 网仿真模型[J]. 水利水电工程学报, 2016(1): 63-70.
(ZHENG Xia-zhong, YU Di, CHEN Shu, et al. Capability simulation model for emergency response of hydropower projects based on Petri nets theory[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 63-70.)

水电工程突发事件应急响应效能 Petri 网仿真模型

郑霞忠^{1,2}, 余 迪², 陈 述^{1,2}, 吴菊华²

(1. 三峡大学 湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:综合运用 Petri 网理论,提出系统效能分析的模型及方法优化水电工程突发事件应急响应流程及其响应能力。首先,抽象应急响应过程链,对事件应急响应流程进行过程建模,然后,利用 Petri 网与马尔可夫链同构特性,确定应急响应流程系统可能出现的状态集,构建同构的马尔可夫链。最后,通过仿真计算得到突发事件应急响应流程中各环节库所平均标记数、变迁利用率及平均执行时间等效能指标并进行分析。以雅砻江流域某水电工程突发事件应急响应流程为例,仿真计算并分析响应系统主要效能指标,结果表明:应将协助公共应急响应过程、应急系统总结评审和应急后期环节作为处理相对耗时的关键,并采取措施着重改善,能为应急管理提高整个系统的运行效率提供参考。

关 键 词:应急响应;效能仿真;Petri 网;水电工程;突发事件

中图分类号: X92

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)01-0063-08

水电工程突发事件时有发生,提高其应急响应能力是工程应急管理的关键环节。因此,对突发事件应急响应流程建模,定量分析应急响应效能,对于优化应急处置流程、评估应急响应效能具有重要意义^[1]。

建立应急响应流程模型是应急响应效能分析与评价的重要基础,而工作流建模工具的合理选择是前提。目前,随着对工作流模型研究的不断深入,已相继提出和借鉴多种适用的建模工具去解决相关问题,刘志强等^[2]采用统一建模语言(UML)对电厂设备检修管理系统进行可视化建模,分析了火力发电厂设备检修管理系统的功能需求;刘艳梅等^[3]采用扩展事件驱动过程链(eEPC)的方法对企业业务过程建模,呈现了一个事务过程流程结构的控制,通过整合业务过程中的静态资源进一步优化了企业业务过程;王莉等^[4]使用事务过程执行语言(BPEL)构建企业业务流程管理系统的框架,分析了 BPEL 业务流程执行引擎结构应用执行过程。高娟等^[5]利用网络服务流程语言(WSFL)来叙述网络服务流程及描述商业流,提出了使用 WSFL 在多个服务提供者之间进行商业过程的模型。

这些工作流工具比较直观、易理解,但较难准确描述应急管理措施之间的复杂关系,也缺乏针对应急管理流程具体的形式化描述和评价。Petri 网具有可视化图形功能,直观描述流程行动的关系,可对应急流程结构及性能进行数学定量分析,并能弥补以上建模工具的功能缺失。本文综合考虑应急响应措施之间相互关联、相互制约及并行和同步关系,综合运用 Petri 网的突发事件应急响应建模方法构建应急响应模型,计算水电工程突发事件应急响应 Petri 网效能指标,进一步剖析应急流程信息拥挤的瓶颈环节及事件应急处置的关键节点,为应急响应流程是否合理、高效、可靠提供评判依据^[6]。

收稿日期: 2015-03-16

基金项目: 湖北省教育厅自然科学研究项目(Q20151210)

作者简介: 郑霞忠(1963—),男,湖北鄂州人,教授,博士,主要从事安全科学与工程研究。

通信作者: 陈述(E-mail: chenshu@whu.edu.cn)

1 应急响应流程

水电突发事件应急响应流程是以应急启动、决策、行动以及恢复 4 个环节为逻辑主线^[7],依据水电工程突发事件的类别、可能造成的危害程度、紧急程度和发展态势,被划分为事件判定、应急处置、应急结束、后期处置等过程^[8]。其主要流程内容见图 1。

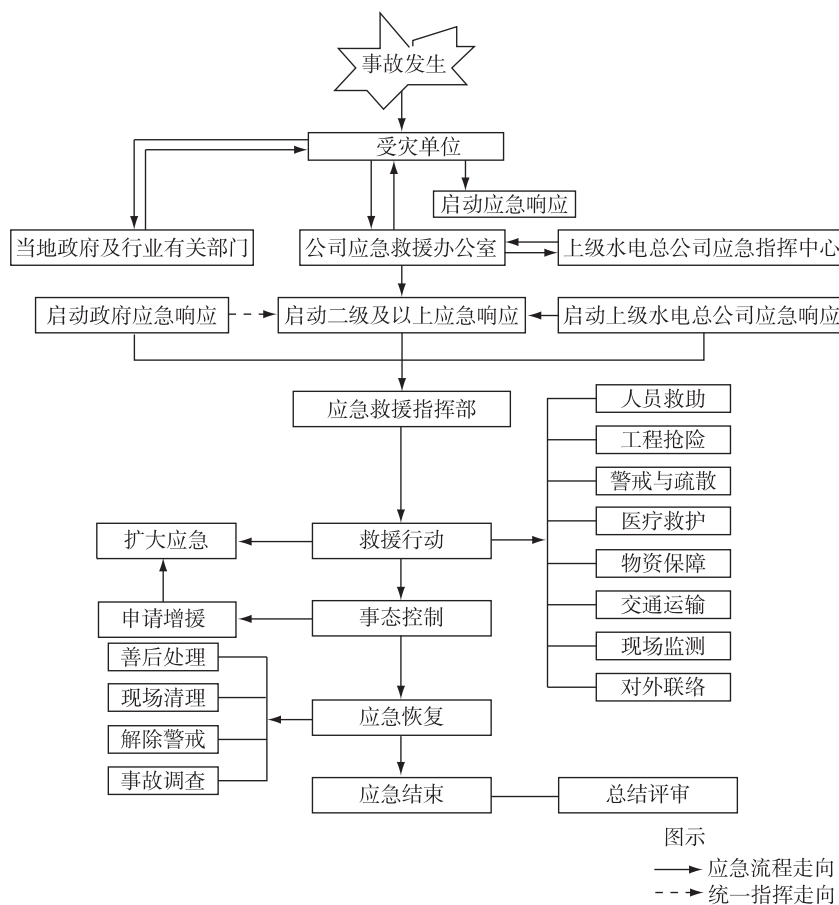


图 1 应急响应流程

Fig. 1 Graph of emergency response process

2 应急响应流程效能分析

Petri 网将变迁与随机的指数分布引发延时相联系,考虑活动时间因素,给 Petri 网的每个变迁相关联一个引发速率,可解决 workflow 中活动发生时间问题^[10]。目前,这一理论已广泛应用于动态离散系统的效能分析与控制研究^[11]。

2.1 Petri 网模型的建立

为深入剖析水电工程突发事件应急响应流程,综合上述应急响应程序提炼所研究系统的应急指挥过程,明确 Petri 网中库所和变迁的具体含义(见表 1),将指数分布时延与相应的变迁关联,建立水电工程突发事件应急响应流程所对应的 Petri 网模型,如图 2 所示。

表 1 库所和变迁的定义

Tab. 1 Definitions of place and transition

库所	状态情况含义	变迁	变化事件含义
P_1	事故单位报送信息	T_1	事故爆发后被发现
P_2	事故被发现	T_2	事故单位报传信息
P_3	应急救援中心接收信息	T_3	确定事态响应等级
P_4	相应等级应急响应	T_4	申请启动公共应急响应平台
P_5	公共应急响应申请获准	T_5	启动应急响应平台
P_6	各部门协同应急	T_6	组建应急现场指挥中心
P_7	应急方案制定	T_7	商讨应急方案
P_8	应急现场指挥中心筹备	T_8	各部门进行现场处置
P_9	应急处置完毕	T_9	事态分析判断
P_{10}	完成求援方案拟定工作	T_{10}	应急响应升级
P_{11}	应急现场指挥中心成立	T_{11}	应急恢复
P_{12}	明确事态信息	T_{12}	调查评估
P_{13}	应急结束	T_{13}	协助公共应急响应
P_{14}	总结评审结束	T_{14}	瞬时变迁

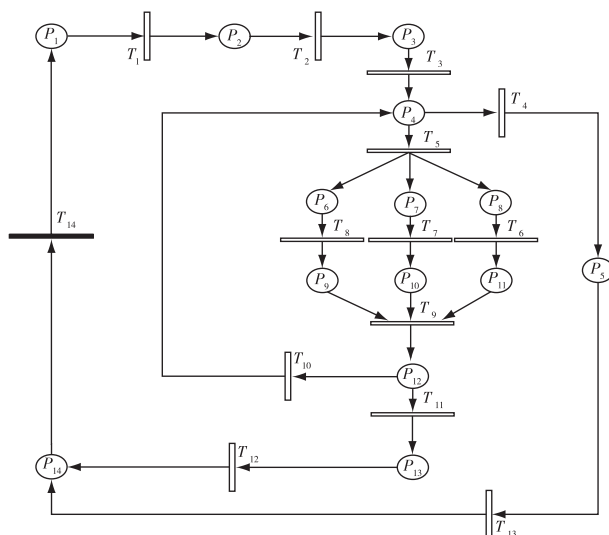


图 2 水电工程应急响应流程的 Petri 网模型

Fig. 2 Petri net model for emergency processes of hydropower projects

2.2 马尔可夫链的构建

确定 Petri 网中存在的可能状态,以流程存在的各库所 P_i 标示状态 M_i (如状态 M_6 由库所 P_6, P_7, P_8 标示,其表示应急响应进入紧急筹备应急现场指挥中心,制定应急方案,指挥各部门协同应急行动状态环节中),得到可达标示集(见图 3),构建其对应可达图。将图中每条线上所标注的引发变迁换成其平均引发速率,得出同构的马尔可夫链^[12],如图 4 所示,图中 λ_i 表示变迁 T_i 的平均速率。

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
M_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_6	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
M_7	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
M_8	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
M_9	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
M_{10}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
M_{11}	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
M_{12}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
M_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
M_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
M_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
M_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

图 3 可达标示集

Fig. 3 Set of reachable indication

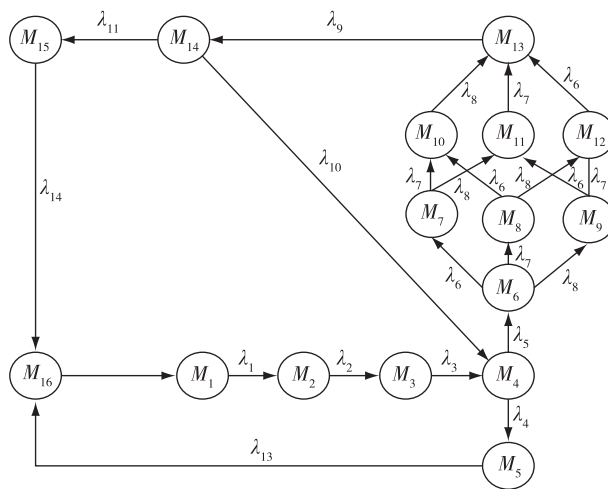


图 4 同构的马尔可夫链

Fig. 4 Isomorphic Markov chains

2.3 稳态概率的求解

Petri 网是一个暂态系统,当时间 $t \rightarrow \infty$ 时,达到一种动态平衡状态,状态 M_i 的稳态概率为 $P(M_i)$ 。为求解各状态下稳态概率,可根据马尔可夫链平稳分布的相关原理建立如下方程:

$$\begin{cases} \mathbf{PQ} = 0 \\ \sum_{i=1}^n P(M_i) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$q_{ij} = \begin{cases} \text{弧上标注的速率} & i \neq j, \text{若 } M_i \text{ 从状态到状态 } M_j \text{ 有一条弧相连} \\ 0 & i \neq j, \text{若 } M_i \text{ 从状态到状态 } M_j \text{ 无弧相连} \\ - \text{从状态输出的各条弧上标注的速率之和} & i = j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{P} = (P(M_1), P(M_2), \dots, P(M_n))$ 为马尔可夫链中 n 个状态下稳态概率组成的行向量; $\mathbf{Q}$ 为以 q_{ij} 为元素的转移速率矩阵。

2.4 系统效能分析

在求得稳态概率的基础上,结合实际变迁速率计算性能指标^[13],并进一步分析找出影响系统应急响应效能的主要因素。

(1)库所平均标记数。为反映库所信息及资源处理的繁忙概率,准确搜寻产生信息堆积,影响应急处置效能的关键环节,结合 Petri 网可达集(如表 2),计算库所中的平均标记数: $c_i = \sum_{N_{ij}=1} \mathbf{P}(M_j)$, 其中: N_{ij} 为可达标示集合数值。

(2)变迁利用率。为反映各项活动占用整个应急响应过程的时间长短,为应急决策者正确识别重点监管对象提供依据,计算变迁利用率: $U(t) = \sum_{M_i \in E} \mathbf{P}(M_i)$, 其中: E 为被 t 激发的所有库所状态集合; $\forall t \in T$ 。

(3)平均执行时间。为找出关键活动及优化应急处置预案,计算应急期间各环节运行执行时间: $T = N/\lambda$, $N = \sum_{P_i \in n} c_i$, $\lambda = \lambda' c'$, 其中: T 为某环节的平均执行时间; N 为稳态时 Petri 网系统中某环节的平均标记数; λ 为单位时间进入环节的标记数; c_i 为 N 对应环节中某个库所的平均标记数; λ' 为进入环节对应变迁发生率; c' 为进入环节对应库所的平均标记数。

3 应急响应流程效能仿真

基于建立的 Petri 网水电工程突发事件应急响应 workflow 模型,构建马尔可夫链,通过在应急流程中引入事件参数,对过程进行仿真,输出有关系统的效能指标参数,并以此为依据对 workflow 模型效能进行分析^[12, 14]。具体的仿真流程如下:

- (1)初始化参数数据,输入应急流程各工作基础统计数据;
- (2)设定最小时间事件,仿真过程中随仿真时钟的推进,满足条件的变迁受激发,通过记录每次激发的托肯(库所中的对象)收取及释放时间节点和对应的变迁标号^[15];
- (3)确定变迁的发生和托肯转移,经过多次循环,实现仿真程序的运行。

4 实例分析

4.1 应急效能参数

对雅砻江流域某水电工程突发事故应急响应流程进行模型仿真,根据应急预案演练的样本数据,统计变迁时延参数 $T_1 \sim T_{13}$ 及对应的变迁发生率参数 $\lambda_1 \sim \lambda_{13}$,如表 2 所示。

表 2 变迁时延参数

Tab. 2 Time parameter of transition

变迁时延	时间单位/h	平均发生率	参数	变迁时延	时间单位/h	平均发生率	参数
T_1	1	λ_1	1.000 0	T_2	3	λ_2	0.333 3
T_3	1	λ_3	1.000 0	T_4	1	λ_4	1.000 0
T_5	5	λ_5	0.200 0	T_6	4	λ_6	0.250 0
T_7	9	λ_7	0.250 0	T_8	1	λ_8	0.111 1
T_9	1	λ_9	1.000 0	T_{10}	1	λ_{10}	1.000 0
T_{11}	1	λ_{11}	1.000 0	T_{12}	2	λ_{12}	0.500 0
T_{13}	12	λ_{13}	0.083 3				

4.2 Petri 网的稳态概率

根据式(1)中 Q 的定义, 可得其转移速率矩阵 Q 。

$$Q = \begin{pmatrix} -1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.333\ 3 & 0.333\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.200\ 0 & 1.000\ 0 & 0.200\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.083\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.083\ 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.611\ 1 & 0.250\ 0 & 0.250\ 0 & 0.111\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.361\ 1 & 0 & 0 & 0.250\ 0 & 0.111\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.361\ 1 & 0 & 0.250\ 0 & 0 & 0.111\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.500\ 0 & 0 & 0.250\ 0 & 0.250\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.111\ 1 & 0 & 0 & 0.111\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.250\ 0 & 0 & 0.250\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.250\ 0 & 0.250\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.000\ 0 & 1.000\ 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.000\ 0 & 1.000\ 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.500\ 0 \\ 0.083\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.083\ 3 \end{pmatrix}$$

根据式(1)和(2), 计算得到每个状态标志稳态概率值, 如表 3 所示。

表 3 状态标志稳态概率值

Tab. 3 Steady-state probabilities of possible states

状态	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
概率	0.032 9	0.098 8	0.032 9	0.027 5	0.329 5	0.009 0	0.006 2	0.006 2
状态	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}
概率	0.002 0	0.028 0	0.004 8	0.004 8	0.005 5	0.005 5	0.011 0	0.395 4

4.3 应急响应效能指标

基于马尔可夫链及稳态概率计算 Petri 网应急响应系统的效能指标, 主要包括库所平均标记数、变迁利用率与系统平均执行时间。

(1) 库所平均标记数。计算得到各库所平均标记数的概率见表 4。

表 4 各库所平均标记数值
Tab. 4 Average number of markers in various places

库所	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
平均标记数	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
数值	0.032 9	0.098 8	0.032 9	0.027 5	0.329 5	0.049 4	0.022 0
库所	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
平均标记数	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}
数值	0.022 0	0.017 1	0.044 5	0.044 5	0.005 5	0.011 0	0.395 4

各库所平均标记数排序： $c_{14} > c_5 > c_2 > c_6 > c_{10} > c_{11} > c_1 > c_3 > c_4 > c_7 > c_8 > c_9 > c_{13} > c_{12}$ ，可见，应急系统总结评审结束时的状态表现最为繁忙，故精简评审流程，强化各部门之间沟通、提升处置信息的反馈效率，能有效解决环节中产生的信息堆积问题。

(2) 变迁利用率。计算可得各变迁利用率数值，如表 5。计算结果可知，协助公共应急响应过程需要重点管理和监督。

表 5 库所和变迁的定义
Tab. 5 Definitions of place and transition

变迁	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
利用率	$U(t_1)$	$U(t_2)$	$U(t_3)$	$U(t_4)$	$U(t_5)$	$U(t_6)$	$U(t_7)$
数值	0.032 9	0.098 8	0.032 9	0.027 5	0.027 5	0.022 0	0.022 0
变迁	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	
利用率	$U(t_8)$	$U(t_9)$	$U(t_{10})$	$U(t_{11})$	$U(t_{12})$	$U(t_{13})$	
数值	0.049 4	0.106 1	0.005 5	0.005 5	0.011 0	0.329 5	

(3) 平均执行时间。为系统分析整个应急流程的平均执行时间，先将其分为应急前期 $Q_1(P_1 \sim P_3)$ ，应急中期 $Q_2(P_4 \sim P_{12})$ 和应急后期 $Q_3(P_{13} \sim P_{14})$ 共 3 个环节^[16]。计算得各环节平均执行时间， $N_{Q_1} = 0.192\ 1, N_{Q_2} = 0.534\ 5, N_{Q_3} = 0.411\ 9, \lambda_{Q_1} = 0.005\ 5, \lambda_{Q_2} = 0.032\ 9, \lambda_{Q_3} = 0.005\ 5, T_{Q_1} = 34.930\ 0, T_{Q_2} = 16.250\ 0, T_{Q_3} = 74.890\ 0$ 。通过应急响应 Petri 网模型的仿真分析，结合工程实例资料，计算得到的应急期间三环节运行执行时间，结果表明应急后期运行效率相对较低，需采用各种有效措施提高这一环节的运行效率，如采用档案管理信息化方式提高效率。

5 结 语

(1) 抽象协同应急处置过程链，依据 Petri 网理论，建立了基于 Petri 网的水电突发事故应急响应模型，借鉴库所平均标记数、变迁利用率及平均执行时间等 3 个指标，有效发掘应急处置流程中瓶颈环节和处理耗时

的关键活动，结合实例，对所建立模型进行定量化的效能分析。

(2) 水电工程突发事件应急响应流程效能仿真可为剖析应急流程信息拥挤的瓶颈环节及事件应急处置的关键节点，进一步优化应急处置方案提供依据。实例分析结果表明“协助公共应急响应”过程占用时间长、相对耗时；应急系统总结评审结束状态表现最为繁忙；应急后期环节运行效率低。

(3) 水电工程突发事件复杂多变，受时间与信息等约束，响应决策难以协调与平衡各方利益，水电工程突发事件应急响应效能分析方法仍需在实践中不断修正与完善。

参 考 文 献：

[1] 郑霞忠, 湛巧玲, 陈述, 等. 基于粗糙集的水电工程施工安全评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(1): 82-86.

- (ZHENG Xia-zhong, CHEN Qiao-ling, CHEN Shu, et al. Safety assessment method for hydropower construction based on rough set[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(1): 82-86. (in Chinese))
- [2] 刘志强, 黄树红, 高伟. 火力发电厂设备检修管理系统的 UML 建模[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(4): 90-92. (LIU Zhi-qiang, HUANG Shu-hong, GAO Wei. Modeling equipment maintenance management system of power station with UML[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(4): 90-92. (in Chinese))
- [3] 刘艳梅, 郑国君, 祁国宁. 基于扩展事件驱动过程链(eEPC)的企业业务过程模型的仿真[J]. 制造业自动化, 2004, 26(2): 18-22. (LIU Yan-mei, ZHENG Guo-jun, QI Guo-ning. Simulation of enterprise business process model based on extended event process chain[J]. Manufacturing Automation, 2004, 26(2): 18-22. (in Chinese))
- [4] 王莉, 刘厚泉, 吴雪峰. 基于 BPEL 的业务流程管理系统架构的研究与应用[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(18): 3507-3510. (WANG Li, LIU Hou-quan, WU Xue-feng. Research and application on business process management system architecture based on BPEL[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(18): 3507-3510. (in Chinese))
- [5] 高娟, 姜利群. 基于 WSFL 的 Web 服务组合[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(9): 1652-1655. (GAO Juan, JIANG Li-qun. Web service composition based on WSFL[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(9): 1652-1655. (in Chinese))
- [6] FRACA E, JULVEZ J, SILVA M. On the fluidization of Petri nets and marking homothecy[J]. Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 2013.
- [7] 鹿新高, 鹿新阳, 邓爱丽, 等. 基于 3S 的三维可视化防汛减灾指挥系统[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 68-72. (LU Xin-gao, LU Xin-yang, DENG Ai-li, et al. 3D visualization command systems for flood defense and damage reduction based on "3S"[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 68-72. (in Chinese))
- [8] 文杰. 水电工程项目突发事件应急管理[J]. 人民长江, 2008, 39(9): 115-116. (WEN Jie. Emergency management on hydropower project[J]. Yangtze River, 39(9): 115-116. (in Chinese))
- [9] 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, 176. (LI Qian, LIU Ya-min. 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, 176. (in Chinese))
- [10] WANG Chao, FENG Xiao-jing, LI Xi, et al. Colored Petri net model with automatic parallelization on real-time multicore architectures[J]. Journal of Systems Architecture, 2014, 60(3): 293.
- [11] KOVALYOV A, MCLEOD R. New rank theorems for Petri nets and their application to workflow management [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Diego, 1998: 1, 226-231.
- [12] 宋佳兴, 林闯. Petri 网模型参数化可达图研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(增 1): 38-43. (SONG Jia-xing, LIN Chuang. Research on parameterized reachability graph of Petri net models[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(Suppl1): 38-43. (in Chinese))
- [13] 林闯, 李雅娟, 单志广. 基于随机 Petri 网的系统性能评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(4): 475-479. (LIN Chuang, LI Ya-juan, SHAN Zhi-guang. Performance evaluation of systems using stochastic Petri nets[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2003, 43(4): 475-479. (in Chinese))
- [14] 舒华英, 胡志根, 刘全. 施工截流运输系统的赋时 Petri 网模型及其仿真实现[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1501-1505. (SHU Hua-ying, HU Zhi-gen, LIU quan. A modeling and simulation of construction closure for transportation system based on Timed-Petri nets[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(11): 1501-1505. (in Chinese))
- [15] 钟登华, 常昊天, 刘宁, 等. 高堆石坝施工过程的仿真与优化[J]. 水利学报, 2013(7): 863-872. (ZHONG Deng-hua, CHANG Hao-tian, LIU Ning, et al. Simulation and optimization of high rock-filled dam construction operations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(7): 863-872. (in Chinese))
- [16] 张岳峰, 何建敏, 胡剑华. 基于 GSPN 的应急管理工作流程建模与分析[J]. 统计与决策, 2012(4): 44-46. (ZHANG Yue-feng, HE Jian-ming, HU Jian-hua. Capability simulation of hydropower projects emergency response on Petri nets theory[J]. Statistics and Decision, 2012(4): 44-46. (in Chinese))

Capability simulation model for emergency response of hydropower projects based on Petri nets theory

ZHENG Xia-zhong^{1,2}, YU Di², CHEN Shu^{1,2}, WU Ju-hua²

(1. *Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*; 2. *College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*)

Abstract: In order to optimize hydropower projects' emergency processes and evaluate emergency response capability, the models and methods of system performance analysis have been proposed according to the theory of Petri nets. First, the model of events in emergency processes was established by abstracting the emergency response process chains. Then, based on the isomorphic characteristics between Petri nets and Markov chains, the state set that may arise in the emergency response system was set up, and thus isomorphic Markov chains could be developed. Finally, the performance analysis of the emergency response system could be made by calculating the average number of markers in various places in different linkage systems, the utilization of transitions and average execution time and so on. A hydropower project in the Yalong River was taken as an example, the analysis results of performance index show that some measures should be taken to improve the relatively time-consuming process of the public assistance emergency response procedures, and summarize the evaluation of emergency systems and post-emergency links, which can provide a reference for the emergency management to improve the operation efficiency of the entire system.

Key words: emergency response; capability simulation; Petri nets; hydropower project; emergent events