

限制期条件下的应急过程可靠性建模及仿真

安金朝¹, 付跃强¹, 刘卫东²

(1. 南昌大学 理学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学 机电工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 应急过程本身可靠性是应急任务完成的基础, 过程的不同任务阶段必须在相应的应急限制期内启动。利用 UML 建立限制期条件下的应急过程模型, 并建立了应急过程可靠性模型, 提供了将 UML 模型转化为 Petri 网可靠性仿真模型的具体方法, 最后对实例通过计算机仿真进行了大量的计算, 对仿真结果进行了分析。

关键词: 可靠性; 统一建模语言; 仿真; Petri 网; 应急限制期

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2007)05-0072-04

Modelling and Simulation of Response Process' Reliability under Time Restriction

AN Jin-zhao¹, FU Yue-qiang¹, LIU Wei-dong²

(1. School of Sciences, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Mechanical and Electrical Eng., Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Response process' reliability is the basic of success of response, and every phase of the process must start before restricted time. The model of response process under time restriction based on UML is built and converted to Petri Net. The way of converting response model based on UML to reliability model based on Petri Net is expatiated. At last, a simulation example is provided and analyzed based on largely calculation.

Key words: reliability; UML; simulation; Petri Net; time restriction on response

0 引言

对应急过程可靠性进行评估不同于一般的可靠性研究, 应急过程具有动态性和复杂性, 影响其可靠性的因素极多且关系复杂, 需要利用过程模拟仿真方法对其可靠性进行评估。应急过程的不同任务阶段受到应急限制期的限制, 超过应急限制期的应急活动是毫无意义的^[1], 如美国的 EMS 条例规定: 对乡村的医疗救护必须在 30min 内到达, 城市必须控制在 10min; 我国对消防也作了相应的时间上的规定。而应急过程的不同任务阶段由一系列应急活动有机组合构成, 应急活动是应急任务完成的基础, 并且它们的逻辑关系复杂。如何建立应急过程模型, 准确描述任务阶段应急限制期、应急活动特性和过程复杂逻辑关系, 并通过仿真评估其可靠性, 文中将对这些问题进行深入研究。

Petri Net 和 UML(统一建模语言)在过程建模方

面各有所长, 前者具有形式化的严格性, 可以定量地分析系统, 善于模拟仿真系统动态特性; 后者具有友善的用户界面, 而且容易实现模型向程序代码的转化^[2]。因此考虑将两者结合起来建立应急过程模型, 并进行仿真评估应急过程可靠性。

1 应急过程建模

研究应急过程可靠性, 需要建立详尽描述过程特性的过程模型。应急过程可以按时序划分为一系列时间连续且不互相覆盖的任务阶段, 每个任务阶段调用不同的应急活动组合, 必须在相应的应急限制期内启动, 有不同的可靠性要求。

图 1 可以辅助说明应急过程的基本结构特点。PHASE1 包含两个串联的应急活动; PHASE2 包含 3 个应急活动, 并且 Operation3 和 Operation4 并联, 任意一个完成便可以启动 Operation5; PHASE3 包含 3 个应急活动, Operation6 和 Operation7 并联, 它们全部完成才可以启动 Operation8。

因此建立应急过程模型, 需要完成三项工作: 建立应急过程任务阶段模型, 准确描述应急活动组成的活

收稿日期: 2006-08-21

作者简介: 安金朝(1981-), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 研究方向为决策规划与计算机信息系统, 工业工程; 付跃强, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为工业工程; 刘卫东, 教授, 博士生导师, 研究方向为工业工程。

动网络,以及任务阶段的应急限制期;建立应急活动模型,以描述应急活动特性;在此基础上清楚描述任务阶段模型和应急活动模型的联系。利用 UML 的类图、对象图和活动图来建立应急过程模型。

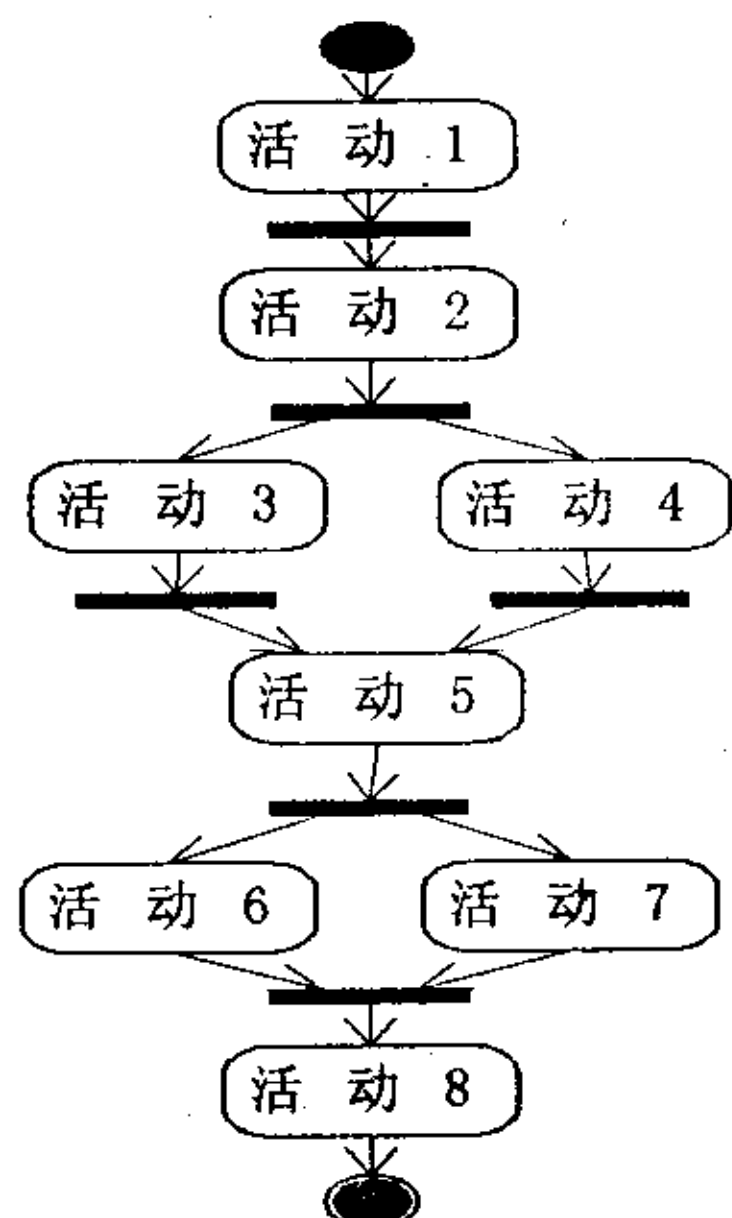


图1 应急过程阶段示意图

1.1 基本任务阶段模型

定义任务阶段类,包含任务阶段的一般属性,根据面向对象的继承性派生出各种专门的任务阶段对象。一个基本任务阶段对象应该包含三类属性。定义任务阶段类如下:

$$P_i\{D, S, L\};$$

式中 D 表示任务阶段活动周期,由阶段开始时间 $T_{b,i}$ 、结束时间 $T_{e,i}$ 和应急限制期 t_i 三个属性组成,即: $D = \{T_{b,i}, T_{e,i}, t_i\}$; S 表示基本任务阶段调用的应急活动集,由活动序列 S_i 属性描述; L 表示逻辑关系,由承前基本任务阶段 $P_{p,i}$ 和后续基本任务阶段 $P_{s,i}$ 组成,即: $L = \{P_{p,i}, P_{s,i}\}$ 。

1.2 应急活动模型

定义应急活动类,含应急活动的一般属性,可派生出各种专门的应急活动对象。一个应急活动对象应该包含三类属性。

定义应急活动类如下:

$$O_i\{D, R, L\};$$

式中 D 表示功能活动周期,由开始时间 $t_{b,i}$ 和结束时间 $t_{e,i}$ 以及活动进行需要时间 d_i 组成, $D = \{t_{b,i}, t_{e,i}, d_i\}$; R 表示应急活动故障属性,由故障分布函数 R_i 和修复分布函数 U_i 组成, $R = \{R_i, U_i\}$; L 表示逻辑关系,由当前应急活动的承前功能活动序列 PO_i 、重启方式 L_i 、冗余单元数 n_i 和后续活动序列 SO_i 组成, $L = \{PO_i, L_i, n_i, SO_i\}$ 。

(说明:重启方式,有记忆式($L_i = 1$)和非记忆式($L_i = 0$)两种,前者表示活动在经历了故障、修复后进入工作状态,只需完成剩余工作;后者则表示活动需要重新开始,经历 d_i 时间才能完成。承前和后续活动序

列的关系由 AND 和 OR 算子决定。如:活动 3 和活动 4 其中一个完成,活动 5 便可以开始工作;活动 8 必须在其承前活动 6 和 7 全部完成后才能够开始工作。)

1.3 建立应急过程活动网络图

在以上工作基础上,利用活动网络图建立任务阶段模型和应急活动模型的联系,完成整个应急过程模型。有两项工作:首先根据任务阶段对象的 S 属性和对应的应急活动对象的逻辑属性,建立每个任务阶段的活动网络图;然后根据任务阶段的 L 属性建立整个应急过程的活动网络图^[3]。

在以上所述的建模工作中,可利用基于 UML 语言的 Visio 软件完成。以上过程建模方法适合于描述复杂过程,可以详尽描述应急过程各层次的特性。

2 应急过程可靠性模型

应急过程的任务阶段如果不能在应急限制期内启动,则应急任务失败;应急活动故障及修复时间服从特定分布函数。

设应急过程必须在时间 T_p 内完成,有 K 个基本任务阶段,仿真 N 次。第 j 次仿真过程中,如果 $P_i (1 < i \leq k)$ 不能在 t_i 内启动(即 P_{i-1} 不能在 t_i 内完成),则 $\Phi_j = 1, \Phi_{j,i-1} = 1, \Phi_{j,h} = 0 (h \geq i)$,此次应急任务失败,开始下一次仿真,反之, $\Phi_{j,i-1} = 0$,成功开始本阶段应急任务;如果 $\Phi_{j,k-1} = 0$,且 $T_{e,k} \leq T_p$,则 $\Phi_j = 0, \Phi_{j,k} = 0$ 应急任务成功,开始下一次仿真;如果, $\Phi_{j,k-1} = 0$,且 $T_{e,k} > T_p$,则 $\Phi_j = 1, \Phi_{j,k} = 1$,虽然最后一个任务阶段成功启动,但是此次应急任务失败。

$$N \text{ 次仿真, 应急任务失败次数: } m = \sum_{j=1}^N \Phi_j;$$

$$\text{系统的累积失效概率(不可靠度)}^{[4]}: F \approx m/N;$$

$$\text{系统可靠度: } R = 1 - F;$$

$$\text{过程在 } i \text{ 基本任务阶段失效次数 } m_i = \sum_{j=1}^N \Phi_{j,i} (1 \leq i \leq k);$$

$$\text{系统失效概率分布 } F(P_i) \approx m_i/N (1 \leq i \leq k)。$$

3 基于 Petri 网的过程仿真

Petri 网是一种图形化、数学化的建模工具,在描述和研究具有并行、异步和随机性等特征的过程方面具有极强的能力^[5]。主要表现在两个方面:形式化的表达方式和数学背景支撑,这样可以具有描述过程的复杂逻辑的能力,并可以进行严谨的过程性能分析。

将上述 UML 模型转化为应急过程可靠性 PN 模型,需要完成三项工作,下面给出具体转化方法(文中模型利用基于高级有色 PN 的 Exspect 软件建立)。

3.1 应急活动 PN

根据活动类图,建立活动 PN。如图 2 所示,Channel ready, fault 和 working 分别对应了不同的时延。Store Otime 中存放活动工作时间,初始值为 d_i 。Store random 用来产生随机数函数的 seed,根据故障时间和修复时间分布函数可以模拟活动的故障属性。

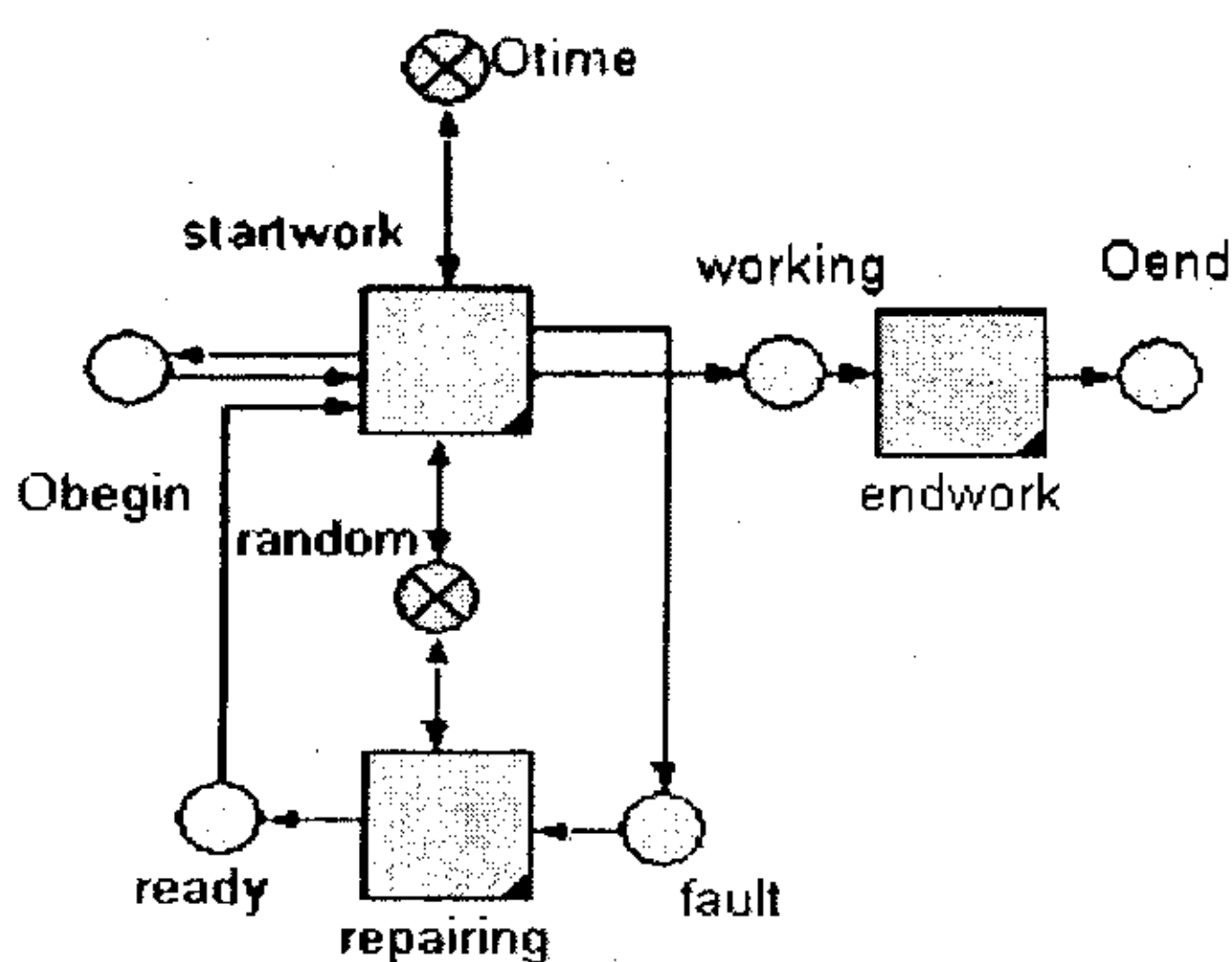


图 2 活动 PN

3.1.1 重启方式 PN 表示

如果, $L_i = 1$, 则 Processor startwork 定义为:

```

if Otime > poisson(2., random)
then fault < -1 delay poisson(2., random), Obegin < -1,
Otime < -Otime - poisson(2., random)
else working < -1
fi

```

如果 $L_i = 0$, 不需要实时更新 Otime, 即删去 $Otime < -Otime - poisson(2., random)$ 。

poisson [m:real, seed:real]: real, 为随机数产生函数, 模拟活动故障时间, 可根据不同分布特征选择不同随机数产生函数。

3.1.2 冗余 PN 表示

如图 3 所示, 活动冗余单元数为 1, $L_i = 1$, 则 processor startwork1 定义如下:

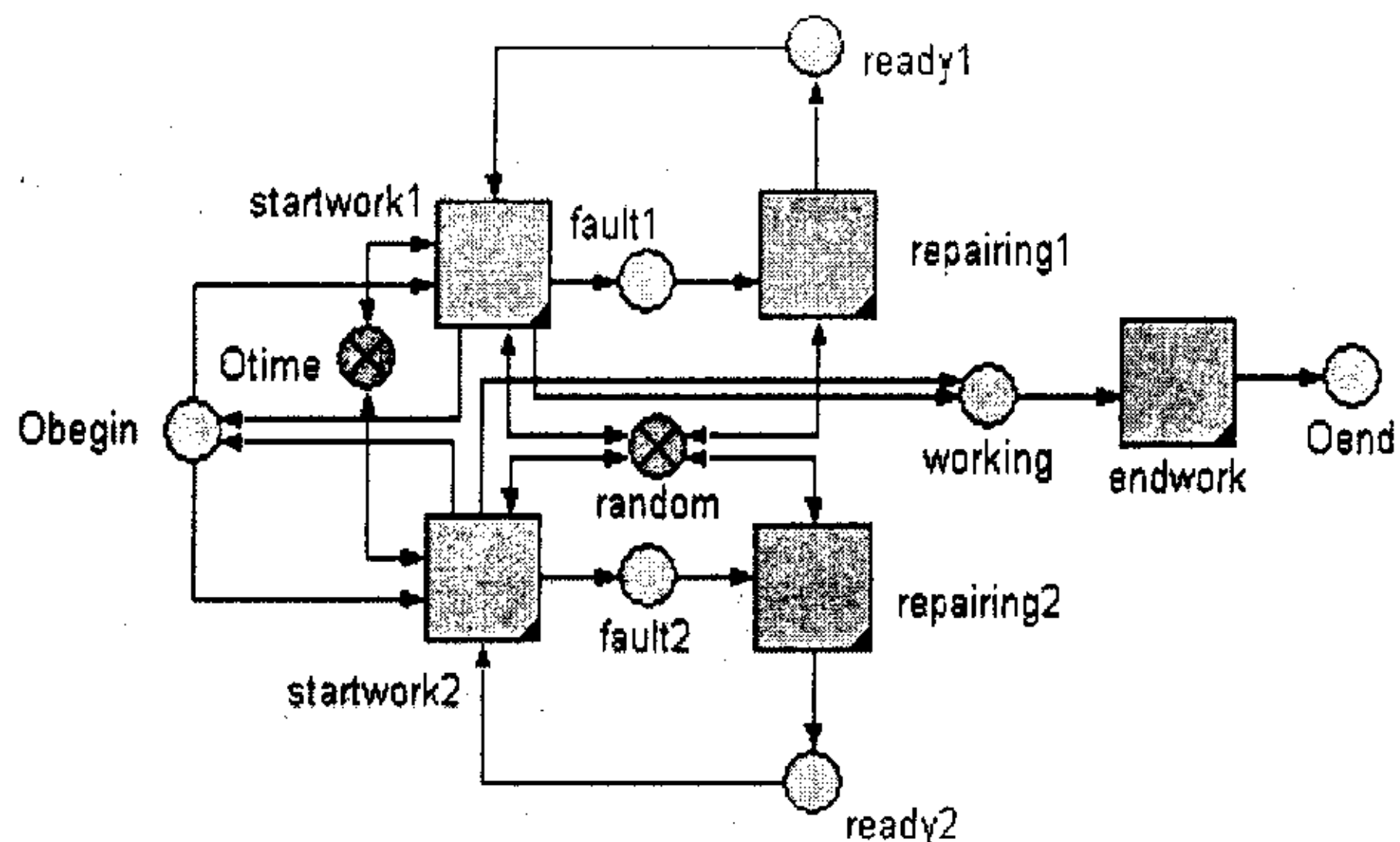


图 3 冗余 PN 表示

```

if Otime < uniform(1., 10., random)
then working < -1 delay Otime
else fault1 < -1 delay uniform(1., 10., random),
Obegin < -1 delay uniform(1., 10., random), Otime < -O-
time - uniform(1., 10., random)

```

Fi

processor startwork2 做类似定义。根据此方法, 可以针对具体 n_i 建立应急活动模型。

3.2 任务阶段 PN

根据阶段活动网络图、阶段对象图, 建立任务阶段 PN。

3.2.1 活动逻辑关系 PN

任务阶段中活动的逻辑关系可以由 AND 和 OR 算子描述, 两种基本的逻辑关系 PN 表示方法如图 4 和图 5 所示。

如图 4 所示, operation6 和 operation7 全部完成后, operation8 可以开始, processor P 定义如下:

O8begin < -1

即 channel O7end 和 O6end 中全部具有托肯是 processor P 激发的条件, 实现了 operation6 和 operation7 的逻辑关系描述。

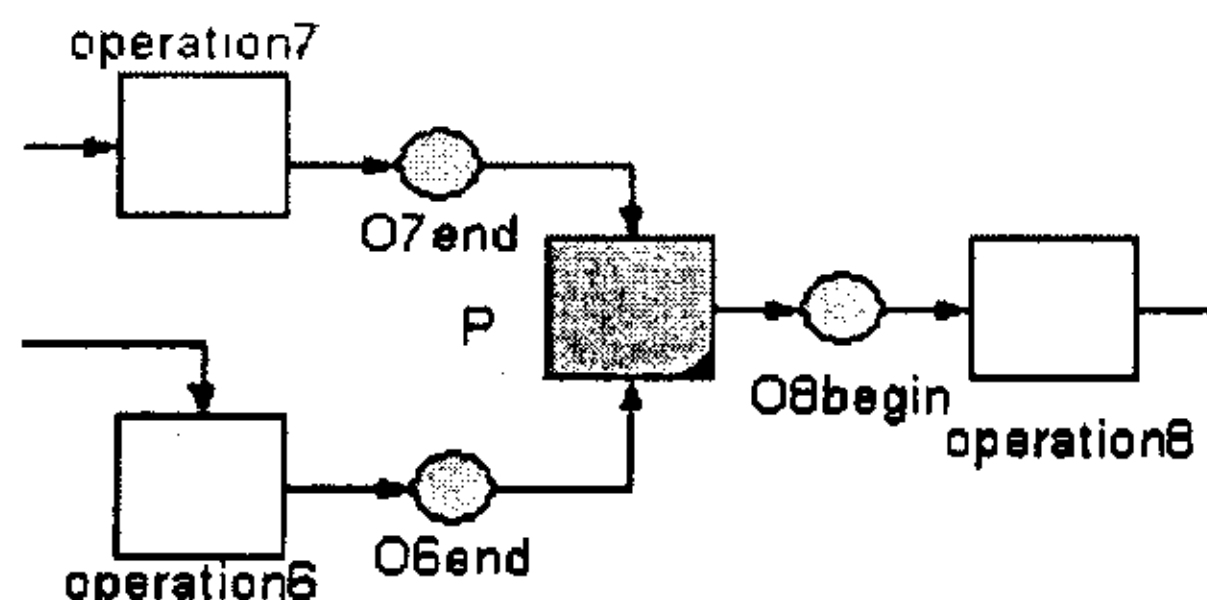


图 4 逻辑 OR 的 PN 表示

如图 5 所示, operation3 和 operation4 任一完成, operation5 便可以开始。Store O3endtime 和 O4endtime 分别记录 operation3 和 operation4 的完成时间。processor P3 定义如下:

```

if O4endtime >= O3endtime
then O5begin < -1
fi
processor P4 定义如下:
if O3endtime > O4endtime
then O5begin < -1
fi

```

更复杂的逻辑关系, 可由此两种基本关系表示。

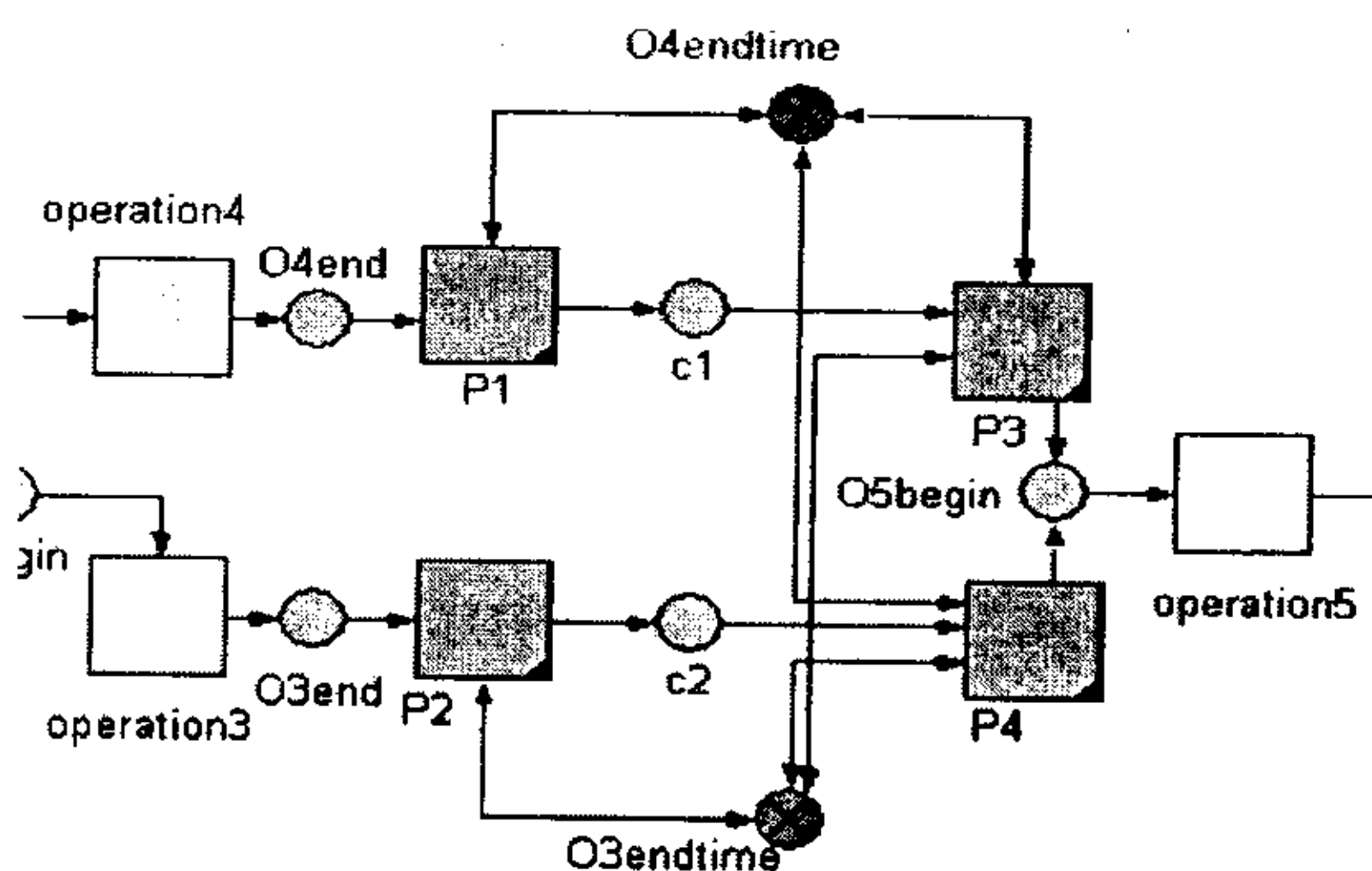


图 5 逻辑 AND 的 PN 表示

3.2.2 应急限制期 PN

任务阶段必须在应急限制期 t_i 内启动, 即其承前

任务阶段 $P_{p,i}$ 必须在 t_i 内完成,图 1 所示过程的第一任务阶段的一级模型如图 6 所示。Store $t1$ 存放下一阶段的应急限制期 t_2 (最后一个任务阶段为过程限制时间 T_p), store T 存放本次仿真的开始时间,则对 processor phaseend 做如下定义:

```

if t1 > time - T
then phase1end < -0
else phase1end < -1
fi

```

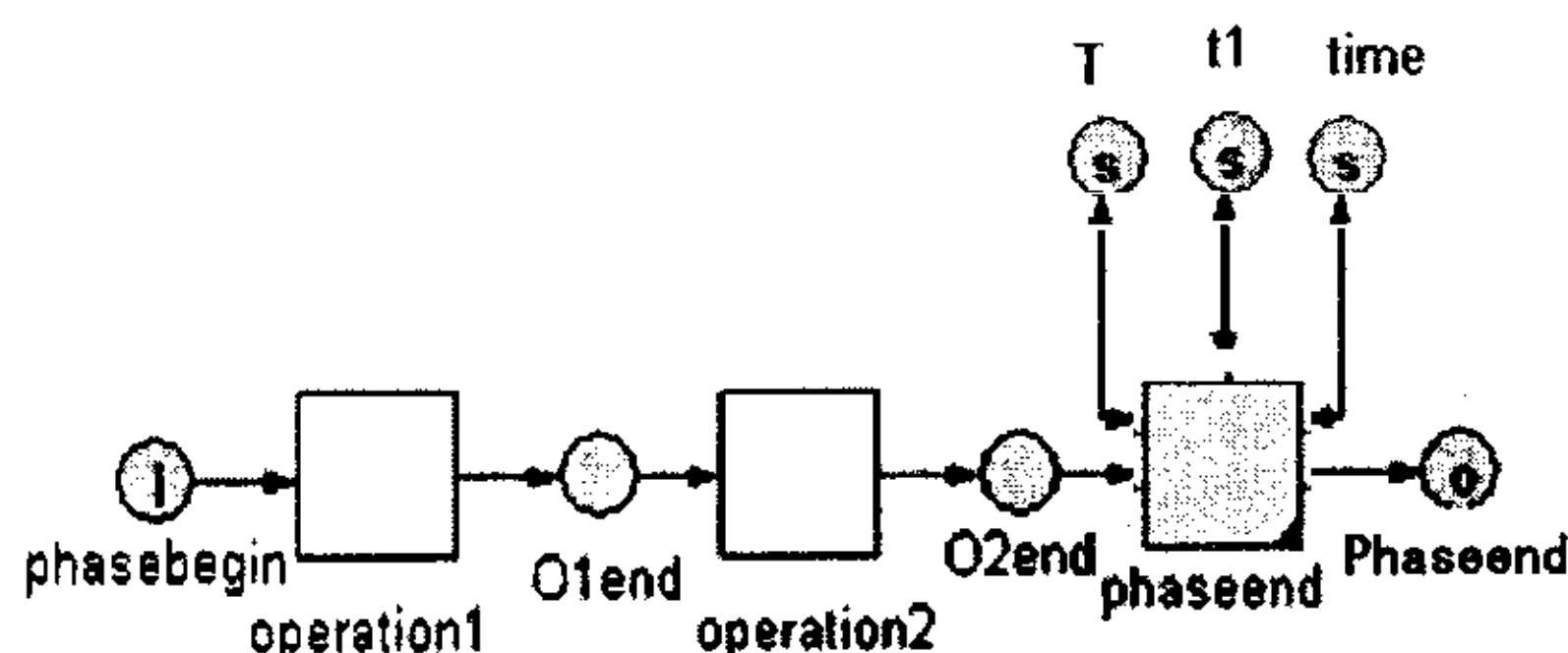


图 6 应急限制期 PN

3.3 应急过程 PN

将基本任务阶段按照 L 属性联结在一起,建立应急过程 PN 模型。例如:阶段 1 的 Phase1end 通过 Processor1 和阶段 2 的 Phase2end 连接在一起。

Processor f1 定义如下:

```

if phase1end = 0
then endrespond < -1, fail < -fail + 1, p1fail < -p1fail + 1 //store fail 记录应急过程失败次数, store p1fail 记录 phase1 失败次数
else phase2begin < -2 // phase2 有两个活动一起开始,因此移入 2 个托肯
fi

```

对其它阶段间的 Processor 做类似定义。

3.4 仿真输出

Store Pifail 分别记录了各阶段失败而导致应急任务失败的次数 m_i , Store fail 记录了应急任务失败次数 m , Store success 记录了应急任务成功次数 u 。

在大量的仿真运算基础上,根据上述三个库所的仿真结果,可以根据给出的应急过程可靠性模型评估应急过程的可靠性。

4 仿真实例

以某应急预案为例,应急过程由不同任务阶段组成,其中每个任务阶段必须在相应应急限制期内启动。任务阶段包含一系列有机组合的应急活动,应急活动的故障和修复特征数据,通过处理演习和历史数据得到。利用上述方法建立应急过程模型,首先,利用 Visio 建立应急活动类图和活动对象图,并建立任务阶段类图 and 对象图、活动网络图,然后建立应急过程活动网络图。接下来,将基于 UML 的应急过程模型转化为 PN 模型,并在 Exspect 环境下建立仿真模型,进行多次的仿真运算。

对仿真结果进行分析,根据应急响应过程可靠性参数可以得到应急过程的薄弱环节在第 2 阶段。需要对第 2 阶段的应急活动进行优化设计,以提高应急过程的可靠性。

5 结论

对限制期条件下的应急过程建模方法进行了研究,并建立过程可靠性模型,利用计算机模拟仿真技术评估应急过程可靠性,为改进应急过程提供决策依据。经过实例验证,本建模方法适合于描述应急过程的复杂特性,利用层次化建模方法降低了建模成本,利用仿真评估具有复杂特征的应急过程可靠性的方法,为研究应急过程可靠性提供了一条可行途径。

参考文献:

- [1] Ball M O, Lin Feng L. A reliability model applied to emergency service vehicle location[J]. Operations Research, 1993, 41 (1): 18-23.
- [2] 江金龙,周献中,孙勇成,等. 基于 UML 和 Petri 网的层次建模分析方法[J]. 系统仿真学报, 2006(2): 290-293.
- [3] 蔡 溯,李世其. 基于活动网络的生产系统仿真集成模型研究[J]. 计算机应用研究, 2005(12): 63-65.
- [4] 蒋文科,郝志华,李红梅,等. 设备系统故障的基本 Petri 网模型与仿真[J]. 农业机械学报, 2000(9): 104-105.
- [5] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电力工业出版社, 2005: 84-103.

(上接第 71 页)

参考文献:

- [1] Leland W, Taqqu M, Willinger W, et al. On the self-similar nature of Ethernet traffic[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1994, 2(1): 1-15.
- [2] 沈 伟,冯 瑞,邵启润. 自相似通信量下的 CSMA/CD 性能分析[J]. 计算机工程, 2003, 29(14): 30-32.
- [3] LAU W C, ASHOK E. Self-similar traffic generation: the random midpoint displacement algorithm and its properties

[C]/ICC'95. New York, NY, USA: [s. n.], 1995: 466-472.

- [4] 逯昭义,王思明. 计算机通信网信息量理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.
- [5] 肖田元,张燕云,陈加栋. 系统仿真导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [6] 高晓娟,钟联炯. C4ISR 中 p-坚持 CSMA/CD 局域网仿真系统设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(20): 173-175.