# 应用随机进程代数的网络系统可靠性预计方法

严博，吴晓平，付钰
（海军工程大学信息安全系，430033，武汉）

**摘要**：针对复杂结构网络系统可靠性预计建模与分析的难题，提出了一种应用随机进程代数的网络系统可靠性预计方法. 通过分析3种基本网络拓扑结构，研究了网络系统随机进程代数模型的建立方法，根据随机进程代数操作语义，推导出一个带时间延迟的可靠性标记变迁系统，依据其隐含的马尔可夫转移关系和系统的当前状态，计算得到系统在一段时间内的可靠性预计值. 仿真实验表明，该方法能精确刻画网络系统随机行为以及组件之间的相互关系，可有效预测不同状态下系统的可靠性水平.

**关键词**：网络系统；拓扑结构；随机进程代数；可靠性预计
**中图分类号**：TP302.7 **文献标志码**：A **文章编号**：0253-987X(2011)06-0040-06

# Reliability Prediction for Network Systems Using Stochastic Process Algebra

YAN Bo, WU Xiaoping, FU Yu
(Department of Information Security, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract**: A reliability prediction method is proposed based on stochastic process algebra (SPA) to deal with the difficulties in the reliability modeling and analysis of network systems with complex structure. SPA modeling of network systems is proposed through analyzing characters of three basic network topologies. Then a labeled transition system (LTS) with time delay marks for the model is generated utilizing the SPA's operational semantics. The prediction value of the system's reliability can be solved out from the LTC's Markovian transition relation and the system's current state. Simulation results show that the proposed method can precisely describe system's stochastic behaviors and interactions among components, and predict the reliability level under different status effectively.

**Keywords**: network system; topology structure; stochastic process algebra; reliability prediction

随着网络技术的发展，计算机网络与人们的工作、生活联系日益紧密，网络安全问题成为了共同关注的一个焦点问题. 作为网络系统安全性评价的前提和基础，需要建立一套可量化和可操作的安全性评价指标体系，而网络系统的可靠性作为描述系统在一个特定时间内能够持续执行特定功能的概率指标，是评价网络安全性的一个重要属性[1]. 为了提高网络系统的可靠性水平，往往需要在网络建立之初对系统进行可靠性预计研究. 可靠性预计是在设计阶段，根据系统的历史可靠性数据、构成和结构特点、工作环境等因素估计组成系统的部件及系统可靠性的一种技术. 对网络系统进行可靠性预计，研究人员能够预先评价系统能否达到要求的可靠性指标，发现影响系统可靠性的主要因素，找出薄弱环节，改进设计措施，提高网络系统的可靠性水平.

随着网络系统拓扑结构日益复杂，传统的可靠

收稿日期：2010-12-01. 作者简介：严博(1984—)，男，博士生；吴晓平(联系人)，男，教授，博士生导师. 基金项目：国家自然科学基金资助项目(60774029).
网络出版时间：2011-03-25 网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110325.1024.005.html

性预计方法对于复杂网络系统存在一定的局限性[2].相比之下,各种随机模型方法更易对网络系统状态进行全面有效地描述,精确刻画网络系统随机行为以及组件之间的相互关系[1].本文结合网络系统可靠性研究的特点,提出一种应用随机进程代数的可靠性预计方法,为该方向的研究提供了一个新的思路.

# 1　理论基础

## 1.1　随机进程代数

进程代数是一种形式化地描述复杂并发系统的建模工具,本质上是一种抽象描述语言,是支持并发分布系统的组合描述和性质形式化证明的代数语言体系.随机进程代数(stochastic process algebra,SPA)是在继承经典进程代数对模型的代数形式描述方法的基础上,给系统中的每个活动联系一个用于表现活动持续时间特性或概率特性的随机变量,从而可以实现对系统性能的量化评价.目前,典型的SPA 建模语言有性能评价进程代数(PEPA)、扩展的马尔可夫进程代数(EMPA)和时间进程及性能分析进程代数(TIPP),这几种建模语言的主要区别是在多个活动同步时,活动速率计算方法和语法及语义上具有一定的差异[3].

## 1.2　PEPA 及其语法定义

PEPA 是 SPA 中非常有代表性的模型描述语言,最早由 Hillston[4] 提出,通过聚类、模型分解等手段,能够更好地处理空间爆炸问题[5],对多攻击、多故障的大型分布式关键任务系统,可以快速和精确地实现形式化建模与量化分析[6].在 PEPA 语法中,基本建模单位被称为构件,整个系统由若干个构件组合而成,构件可以执行一系列活动,每个活动都被指派一个负指数分布的随机变量,用于表现活动的持续时间[7].

假设系统可以观察到的所有动作集合为 $A$,系统不可观察到的内部动作用 $\tau$ 表示,令 $U=A\cup\{\tau\}$,表示所有动作的全集,$a\in U$,$L\subseteq A$,$r\in\mathbf{R}^+$,PEPA 由以下语法定义产生[6]

$$P::=(a,r).P\mid P+Q\mid P<L>Q\mid P/L\mid C$$

这 5 组操作算子的含义如下:

(1)$(a,r).P$ 代表前缀操作,下标符号.之前表示构件执行一个时间呈参数 $r$ 的负指数分布的活动 $a$,符号.之后表示执行该活动后,该进程变为 $P$;

(2)$P+Q$ 代表选择操作,表示系统可以选择执行进程 $P$ 或进程 $Q$,系统采用竞争策略来决定执行哪个进程;

(3)$P<L>Q$ 代表合作操作,表示 2 个进程 $P$ 和 $Q$ 的并发执行,其中活动集 $L$ 是 2 个进程需要同时执行的动作,即需要同步的动作;

(4)$P/L$ 代表隐藏操作,即 $P$ 对集合 $L$ 中的活动隐藏,通常用 $\tau$ 来表示隐藏的活动类型,这些活动被看成内部的动作,即不能被外部所观察到;

(5)$C$ 代表常量,定义方程 $C=P$,表明 $C$ 具有与进程 $P$ 同样的行为,并允许递归定义.

PEPA 模型需要借助操作语义对模型进行推导,以此产生与该模型对应的标记转移系统(labeled transition system,LTS)[8],并利用该 LTS 隐含的马尔可夫转移关系,对系统性能进行分析与证明[4].PEPA 操作语义的所有规则如图 1 所示,图中各式横线上部表示条件,下部表示推导结果.

Prefix　$\overline{(a,r).P\xrightarrow{(a,r)}P}$

Choice　$\dfrac{P\xrightarrow{(a,r)}P'}{P+Q\xrightarrow{(a,r)}P'}$　$\dfrac{Q\xrightarrow{(a,r)}Q'}{P+Q\xrightarrow{(a,r)}Q'}$

Cooperation

$$\frac{P\xrightarrow{(a,r)}P'}{P<L>Q\xrightarrow{(a,r)}P'<L>Q}(a\notin L)\qquad\frac{Q\xrightarrow{(a,r)}Q'}{P<L>Q\xrightarrow{(a,r)}P<L>Q'}(a\notin L)$$

$$\frac{P\xrightarrow{(a,r_1)}P'\quad Q\xrightarrow{(a,r_2)}Q'}{P<L>Q\xrightarrow{(a,R)}P'<L>Q'}(a\notin L)\ \text{where}\ R=\frac{r_1}{r_a(P)}\frac{r_2}{r_a(Q)}\min(r_a(P),r_a(Q))$$

Hiding　$\dfrac{P\xrightarrow{(a,r)}P'}{P/L\xrightarrow{(a,r)}P'/L}(a\notin L)$　$\dfrac{P\xrightarrow{(a,r)}P'}{P/L\xrightarrow{(\tau,r)}P'/L}(a\in L)$

Constarnt　$\dfrac{Q\xrightarrow{(a,r)}Q'}{P\xrightarrow{(a,r)}Q'}(P=Q)$

图 1　PEPA 操作语义

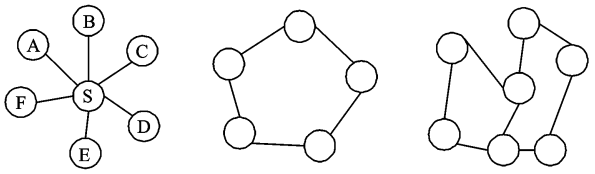
目前,研究人员已开发了多种 PEPA 模型分析工具[9-10],为基于 PEPA 的可靠性建模与分析提供了极大的便利.

# 2　网络系统可靠性预计的 SPA 模型

## 2.1　基本网络拓扑结构

一个计算机网络系统可能是单一的拓扑结构,也可能是由多个不同拓扑结构的子网组成的复杂拓扑结构.一般而言,基本的网络拓扑结构主要有星形、环形和不规则结构 3 种,如图 2 所示.本文将对这 3 种不同的网络拓扑结构建立相应的 SPA 可靠性预计模型,而对于更复杂的网络拓扑结构,可以通过结构分解与递推形成这 3 种基本的网络结构,并建立相应的模型.现假设文中所有的网络系统每个节点只有工作和失效 2 种状态,且单个节点的故障是统计独立的,节点的正常工作时间和故障修复时

间遵守负指数分布，而当整个系统处于完全失效状态时，系统会自动开启重置机制回到初始状态.




(a)星形结构 (b)环形结构 (c)不规则结构

图 2 基本网络拓扑结构

## 2.2 星形结构网络系统的 SPA 可靠性预计模型

星形结构的网络系统由一个功能较强的中心节点以及一些通过点到点链路连到中心节点的从节点组成，采用此种拓扑结构的网络建网容易，易于扩充，但是由于属集中控制，对中心节点的依赖性大，一旦中心节点失效，将会导致整个网络的失效.

假设存在一个有 $n$ 个从节点的星形结构网络系统，每个从节点的正常工作时间、失效修复时间分别服从参数为 $r_1$ 和 $r_2$ 的负指数分布，中心节点的正常工作时间服从参数为 $r_3$ 的负指数分布，系统完全失效后重置的平均时间为 $r_4$. 以下给出该星形结构网络系统的 SPA 表达式

$$S_0 = (a, nr_1).S_1 + (c, r_3).S_f \tag{1}$$

$$S_i = (a,(n-i)r_1).S_{i+1} + (b, ir_2).S_{i-1} + (c, r_3).S_f, \quad 0 < i < n-1 \tag{2}$$

$$S_{n-1} = (a, r_1).S_f + (b,(n-1)r_2).S_{n-2} + (c, r_3).S_f \tag{3}$$

$$S_f = (d, r_4).S_0 \tag{4}$$

式中：$a$ 表示单个从节点的失效事件；$b$ 表示单个从节点的修复事件；$c$ 表示中心节点的失效事件；$d$ 表示系统的重置事件；$S_i$ 表示当前有 $i$ 个从节点处于失效态；$S_f$ 表示整个网络系统处于失效状态，此时中心节点处于失效态，或所有的从节点处于失效态. 根据上述 SPA 表达式，利用 PEPA 的操作语义，可推导出相应的星形结构网络的可靠性 LTS，如图 3 所示.

## 2.3 环形结构网络系统的 SPA 可靠性预计模型

环形结构的网络系统是一种首尾相连的总线型拓扑结构，是由通信线路将各节点连接成的一个闭合环. 根据这种拓扑结构的特点可知，系统上任一节点的失效都会导致整个系统的失效.

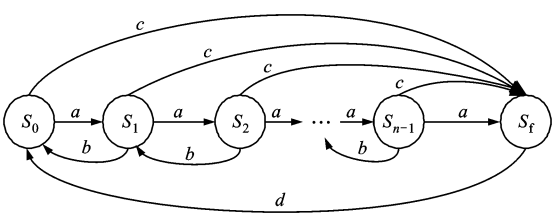



图 3 星形结构网络的可靠性 LTS

假设存在一个由 $n$ 个节点构成的环形结构网络系统，则它的 SPA 表达式为

$$S_0 = (a_1, r_1).S_f + (a_2, r_1).S_f + \cdots + (a_n, r_1).S_f \tag{5}$$

$$S_f = (d, r).S_0 \tag{6}$$

在式(5)中，将所有导致进程 $S_0$ 变迁至进程 $S_f$ 的一步变迁事件进行合并，可得到它的等价表达式

$$S_0 = (a, nr_1).S_f \tag{7}$$

由式(6)、(7)可推导出该环形结构网络系统的可靠性 LTS，如图 4 所示.

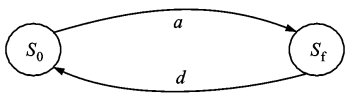



图 4 环形结构网络的可靠性 LTS

## 2.4 不规则结构网络系统的 SPA 可靠性预计模型

对于规模较大的网络系统，各节点之间的连接往往没有一个固定的模式，连接方式主要依据节点之间的信息流量以及网络所处的地理位置而定，特别是地域范围很大且节点数较多时，都为部分节点连接的任意拓扑结构. 对于这类不规则结构的网络系统，建立 SPA 可靠性模型时，首先要对系统进行逐级分解，直至分解所得的每一部分均只含有单一的串联或并联形式为止，再利用串/并联结构网络系统 SPA 可靠性建模的方法逐级回溯，最后得到整个系统的 SPA 可靠性模型.

由上式可知，对于不规则结构的网络系统 SPA 可靠性建模，最终要归结到对串/并联结构的网络系统 SPA 可靠性建模上. 对于串联结构的网络系统，由于任一节点的失效都会导致整个系统的失效(这与环形结构的网络系统相同)，所以其 SPA 可靠性模型也与环形结构网络的 SPA 可靠性模型类似，在此不再重复叙述. 对于并联结构网络的 SPA 可靠性模型，只有当全部节点失效时整个系统才会失效. 根据并联结构的特点，给出一个由 2 个节点并联而成的网络系统的 SPA 表达式

$$S_0 = (a, 2r_1).S_1 \tag{8}$$

$$S_1 = (a, r_1).S_f + (b, r_2).S_0 \tag{9}$$

$$S_f = (r, r_4).S_0 \tag{10}$$

由式(8)～式(10)可以看出，除非 2 个节点全部失效，否则任一节点的失效都不会使系统进入失效

状态 $S_f$,并且每个节点都能自行修复,这大大提高了系统的可靠性水平,实际上采用并联结构也是系统可靠性设计中的一个有效手段. 由式(8)～式(10)可推导出该并联结构网络系统的可靠性 LTS,如图 5 所示.

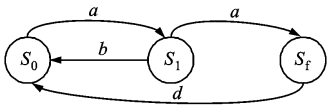



图 5　并联结构网络的可靠性 LTS

## 3　基于 SPA 的可靠性预计

利用 SPA 对一个网络系统进行可靠性预计分析. 首先需要将系统的自然语言描述转变为 SPA 类型的形式化语言描述,然后利用 SPA 操作语义推导出一个与模型相关的、带时间延迟标记的 LTS,正如本文上节中所做的工作. 由于每个事件的执行时间均遵守负指数分布,所以该 LTS 隐含对应一个连续时间的马尔科夫转移关系,该转移关系就是预测网络系统可靠性水平的关键. 为方便描述,本文使用系统可用度作为网络系统的可靠性指标,可用度是反映可修复系统利用率的一种概率指标,被定义为可修复系统在规定条件下,某一时刻处于正常可用状态的概率. 下面以 2.4 节中的并联结构网络为例,简要介绍系统可靠性预计的过程.

由该网络的可靠性 LTS 可知,系统共有 3 种状态,其中状态 $S_0$ 和 $S_1$ 是系统的正常工作状态,$S_f$ 为系统的失效状态. 假设在 $t$ 时刻,系统处于上述 3 种状态的概率分别为 $p_1(t)$、$p_2(t)$、$p_3(t)$,令向量 $\boldsymbol{p}(t)=[p_1(t),p_2(t),p_3(t)]$用以表征系统在某时刻的状态分布,则 $t$ 时刻系统的可用度为

$$D(t) = p_1(t) + p_2(t) \tag{11}$$

根据 LTS 的转移关系,易得系统的状态转移率矩阵

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} -2r_1 & 2r_1 & 0 \\ r_2 & -r_1-r_2 & r_1 \\ r_4 & 0 & -r_4 \end{bmatrix}$$

给定系统初始状态分布 $\boldsymbol{p}(0)=[p_1(0),p_2(0),p_3(0)]$,状态转移率矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 中的元素用 $q_{ij}(i,j=1,2,3)$表示. 在此条件下,通过如下解微分方程组

$$\left.\begin{aligned} p_i'(t) &= \sum_{k\in\{1,2,3\}} p_k(t)q_{ki},\ i=1,2,3 \\ \boldsymbol{p}(0) &= [p_1(0),p_2(0),p_3(0)] \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

可求得在任意 $t$ 时刻系统处于状态 $S_1$、$S_2$ 的概率 $p_1(t)$、$p_2(t)$,再由式(11)即可求得任意 $t$ 时刻网络系统的可用度.

除可求出系统在某一时刻的可用度外,通过 LTS 的马尔可夫转移关系对系统状态进行稳态分析[11],还可求得系统的平均可用度 $D$. 设 $\boldsymbol{p}=[p_1,p_2,p_3]$为系统状态的稳态概率分布,且满足下式

$$\boldsymbol{pQ} = \boldsymbol{0} \tag{13}$$

由于有 $\sum_{i=1}^{3} p_i = 1$,在该条件下,通过式(13)即可求解出系统的稳态概率分布 $\boldsymbol{p}$,从而得到系统的平均可用度 $D=p_1+p_2$,系统的平均可用度可以作为判定系统总体可靠性水平的依据.

## 4　实例分析

为了使网络系统具备一定的容错能力,提高系统的可靠性水平,设计人员在设计系统时常常采用热备份的设计模式. 所谓热备份的设计模式即冗余设计,通过增加影响系统可靠性的关键节点或设备的数量(只有当规定数量的节点或设备发生故障时系统才会丧失功能),从而使系统的可靠性得到提高. 考虑一个具有容错能力的网络系统,在该系统中有 A、B 两种服务器,数量都为 2 台. 当 2 种服务器中各有至少一台服务器能正常工作,就能保证整个网络系统的正常工作. 假设存在针对 A、B 服务器的 2 类攻击行为,每类攻击行为一次只能攻击一台服务器,在受到网络攻击的情况下,单个 A 服务器的失效率是平均每分钟 $\lambda$ 次,B 服务器的失效率是平均每分钟 $\upsilon$ 次. 失效的服务器都可以在一定时间内修复,假设单个 A 服务器的修复时间、单个 B 服务器的修复时间分别服从参数为 $\mu$ 和 $\sigma$ 的负指数分布,当系统处于失效状态时,系统可以通过重置恢复到初始状态,重置需花费的平均时间为 $\gamma$.

在上述容错网络系统中,既有串联结构,又有并联结构,通过对其网络拓扑进行分解,可给出系统的 SPA 表达式,如式(14)～(20)所示

$$S_{00} = (a,T).S_{10} + (b,T).S_{01} \tag{14}$$

$$S_{10} = (a,T).S_f + (b,T).S_{11} + (r_A,\mu).S_{00} \tag{15}$$

$$S_{11} = (a,T).S_f + (b,T).S_f + (r_A,\mu).S_{01} + (r_B,\sigma).S_{10} \tag{16}$$

$$S_{01} = (a,T).S_{11} + (b,T).S_f + (r_B,\sigma).S_{00} \tag{17}$$

$$S_f = (d,\gamma).S_{00} \tag{18}$$

$$K_A = (a,\lambda).K_A \tag{19}$$

$$K_B = (b,\upsilon).K_B \tag{20}$$

式中：$S_{ij}$ 表示系统所处的状态，其中 $i$、$j$ 分别表示 A、B 服务器处于失效状态的数量；$K_A$ 和 $K_B$ 分别代表 A、B 服务器的攻击者；$T$ 表示该类事件为被动同步事件，其活动速率由同步的另一方决定；系统的事件集合为$\{a,b,r_A,r_B,d\}$，$a$、$b$ 分别表示单个 A、B 服务器受到网络攻击的事件，$r_A$、$r_B$ 分别表示单个失效 A、B 服务器的修复事件；$d$ 表示系统的重置事件. 系统当前的状态为 $S_{01}$，则模型的系统描述式为

$$S = (\text{attackA}[m] \parallel \text{attackB}[n]) < a,\ b > S_{01} \tag{21}$$

式中：$m$、$n$ 若取值为 1，表示存在相应的网络攻击行为，若取值为 0，则表示未发动相应的网络攻击.

系统 SPA 表达式中各参数的值为 $\lambda=0.008$，$\upsilon=0.006$，$\gamma=0.05$，$\mu=0.01$，$\sigma=0.015$，系统的初始状态概率分布向量

$$\boldsymbol{p}(0) = [p_1(0),p_2(0),p_3(0),p_4(0),p_5(0)] = [0,1,0,0,0]$$

$p_1(t)$至 $p_5(t)$依次代表 $S_{00}$到 $S_{11}$以及 $S_f$ 的概率分布. 当 $m$、$n$ 的值都为 1 时，根据 PEPA 操作语义，可推导出系统的可靠性 LTS，如图 6 所示.

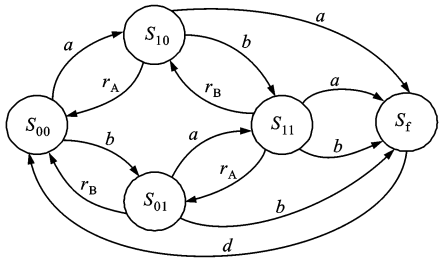



图 6 一个容错网络的可靠性 LTS

根据该容错网络系统的可靠性 LTS，可得系统状态转移率矩阵

$$\boldsymbol{Q} = \begin{array}{c} \\ S_{00} \\ S_{01} \\ S_{10} \\ S_{11} \\ S_f \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} S_{00} & S_{01} & S_{10} & S_{11} & S_f \end{array} \\ \begin{bmatrix} -\lambda-\upsilon & \upsilon & \lambda & 0 & 0 \\ \sigma & -\sigma-\lambda-\upsilon & 0 & \lambda & \upsilon \\ \mu & 0 & -\mu-\lambda-\upsilon & \upsilon & \lambda \\ 0 & \mu & \sigma & -\mu-\sigma-\lambda-\upsilon & \lambda+\upsilon \\ \gamma & 0 & 0 & 0 & -\gamma \end{bmatrix} \end{array} =$$

$$\begin{bmatrix} -0.014 & 0.006 & 0.008 & 0 & 0 \\ 0.015 & -0.029 & 0 & 0.008 & 0.006 \\ 0.01 & 0 & -0.024 & 0.006 & 0.008 \\ 0 & 0.01 & 0.015 & -0.039 & 0.014 \\ 0.05 & 0 & 0 & 0 & -0.05 \end{bmatrix}$$

该容错网络系统可正常工作的状态有 $S_{00}$、$S_{01}$、$S_{10}$ 以及 $S_{11}$，所以可得系统的可用度 $D(t)=p_1(t)+p_2(t)+p_3(t)+p_4(t)$，将 $\boldsymbol{Q}$ 带入式(12)中，即可得某一段时间后系统的可用度预测值. 图 7 显示了在 2 h内系统可用度的变化情况，从图中可以看出，系统在 38 min 左右的可用度预计值最低，在该时间段系统失效的风险将最大.

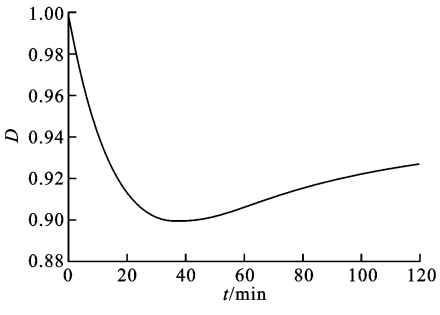



图 7 系统可用度变化情况

将 $\boldsymbol{Q}$ 带入式(13)，可得在同时受到 2 种攻击的情况下，该容错网络系统的平均可用度 $D=0.933\ 472$，这表明系统的可靠性总体水平偏低，需要加强整个系统的抗攻击能力和自修复能力. 此外，改变 $m$ 与 $n$ 的值，还可预测系统在受到不同攻击模式下的可用度预测情况. 图 8 显示了当系统初始状态为 $S_{01}$时，在 A、B 两类服务器同时受到攻击，或只有 A 类或 B 类服务器受到攻击这 3 种攻击模式下，2 h 内系统可用度预测值的变化情况. 从图中可以看出，攻击 A 类服务器比攻击 B 类服务器对该容错网络系统的威胁程度更大，如果适当增强 A 类服务器的抗攻击能力，将有效提高系统的总体可靠性水平.

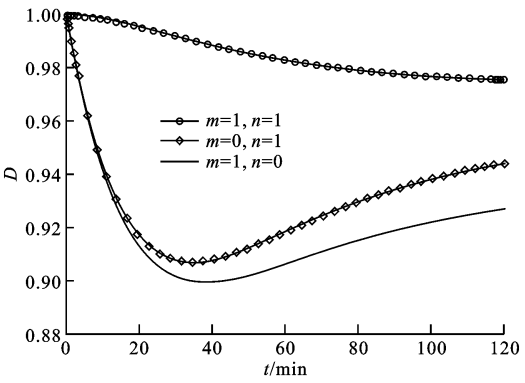



图 8　不同攻击模式下的系统可用度

## 5　结　论

对网络系统进行可靠性预计研究的主要价值是，可以在设计阶段发现影响系统可靠性的主要因素，为设计决策提供依据. 本文利用随机进程代数的方法开展了针对网络系统的可靠性预计的研究，先简要介绍了随机进程代数的相关理论，并给出了 3 种基本网络拓扑结构的 SPA 建模方法，而更复杂的网络拓扑结构 SPA 模型可在这 3 种基本结构之上构造. 在此基础上，详细阐述了基于 SPA 的系统可靠性预计方法，并结合一个容错网络系统实例，分析了该系统在受到网络攻击条件下的可靠性变化情况，验证了方法的可行性和有效性. 下一步将在本文的研究基础上，考虑当系统动作延迟时间符合一般分布时，基于随机进程代数的网络系统可靠性建模与分析的方法.

**参考文献：**

[1] 林闯，汪洋，李泉林. 网络安全的随机模型方法与评价技术[J]. 计算机学报，2005，28(12)：1943-1956.
LIN Chuang，WANG Yang，LI Quanlin. Stochastic modeling and evaluation for network security[J]. Chinese Journal of Computers，2005，28(12)：1943-1956.

[2] 刘玲艳，吴晓平，田树新. 基于粗糙集和 Petri 网的随机流网络可靠性评价方法[J]. 控制与决策，2010，25(8)：1273-1276.
LIU Lingyan，WU Xiaoping，TIAN Shuxin. Assessment method of system reliability for stochastic flow network based on rough sets theory and Petri nets [J]. Control and Decision，2010，25(8)：1273-1276.

[3] 林闯，魏丫丫. 随机进程代数与随机 Petri 网[J]. 软件学报，2002，13(2)：203-213.
LIN Chuang，WEI Yaya. Stochastic process algebras and stochastic Petri nets [J]. Journal of Software，2002，13(2)：203-213.

[4] HILLSTON J. A compositional approach to performance modeling [D]. South Bridge，Edinburgh，UK：University of Edinburgh. College of Science and Engineering，1994.

[5] GALPIN V. Continuous approximation of PEPA models and Petri nets [J]. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology，2010，2(4)：324-339.

[6] 王慧强，吕宏武，赵潜，等. 一种关键任务系统自律可信性模型与量化分析[J]. 软件学报，2010，21(2)：344-358.
WANG Huiqiang，LÜ Hongwu，ZHAO Qian，et al. Model and quantification of autonomic dependability of mission-critical systems [J]. Journal of Software，2010，21(2)：344-358.

[7] HILLSTON J. Tuning system：from composition to performance [J]. The Computer Journal，2005，48(4)：385-400.

[8] 徐明迪，张焕国，严飞. 基于标记变迁系统的可信计算平台信任链测试[J]. 计算机学报，2009，32(4)：635-645.
XU Mingdi，ZHANG Huanguo，YAN Fei. Testing on trust chain of trusted computing platform based on labeled transition system [J]. Chinese Journal of Computers，2009，32(4)：635-645.

[9] BRADLEY J，DINGLE N，GILMORE S，et al. Derivation of passage-time densities in PEPA models using IPC：the imperial PEPA compiler [C]// Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems. Piscataway，NJ，USA：IEEE，2003：344-351.

[10] TRIBASTONE M，DUGUID A，GILMORS S. The PEPA eclipse plug-in project [J]. Performance Evaluation Review，2009，36(4)：28-33.

[11] 覃广平. 交互式马尔可夫链：理论与应用[D]. 成都：中国科学院成都计算机应用研究所，2006.

**[本刊相关文献链接]**

增强 Ad Hoc 网络稳定性的移动问题解决策略. 西安交通大学学报，2011，45(40)：6-11.

应用部分马尔科夫博弈的网络安全主动响应决策模型. 西安交通大学学报，2011，45(4)：18-24.

可演化网络中移动代理的性能分析及优化方法. 西安交通大学学报，2010，44(12)：5-9.

移动 Ad Hoc 网络中提高路由稳定性的动态备份多径路由. 西安交通大学学报，2010，44(12)：16-21.

（编辑　刘杨　武红江）