

# 基于 GSPN 的计算机硬件系统可靠性分析

谷春英, 姚青山

(河南工程学院 计算机学院, 河南 郑州 451191)

**摘 要:** 以广义随机 Petri 网(Generalized Stochastic Petri Net, GSPN)为数学工具, 提出一种基于 GSPN 的计算机硬件系统可靠性建模与分析方法. 在给出 GSPN 形式化定义和模型要素图形化表示和用法的基础上, 建立了计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型, 该模型适用于描述结构简单的计算机硬件系统, 而对于逻辑结构关系复杂的计算机硬件系统, 由于其建模粒度过于精细势必造成组合爆炸问题. 为此, 对该计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型进行精化设计, 得到的精化模型可以用于描述结构复杂的计算机硬件系统. 实例研究验证了所提方法的有效性, 可以为计算机硬件系统可靠性设计提供理论指导.

**关键词:** 计算机硬件系统; 广义随机 Petri 网; 可靠性; 可用度

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2013)06-0122-04

## Reliability Analysis of Computer Hardware System Based on Generalized Stochastic Petri Net

GU Chun-ying, YAO Qing-shan

(School of Computer, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

**Abstract:** This paper presents a new reliability modeling and analysis method of computer hardware system (CHS) based on generalized stochastic Petri net (GSPN). The formal definition, graphical representation and usage of GSPN are given. The GSPN model of computer hardware system basic unit (CHSBU) which can describe simple structure CHS is established. Aiming at the combination explosion problem in the complicated structure CHS application, the GSPN refined model of CHSBU which can describe complicated structure CHS is established by using model refinement technology. The proposed method are validated by the case study. This work can give theoretical direction for reliability design of CHS.

**Key words:** computer hardware system; generalized stochastic Petri net; reliability; availability

### 1 引言

可靠性框图、故障树和事件树等传统系统可靠性分析方法无法描述计算机硬件系统与时间相关的动态特性<sup>[1]</sup>. 因此, 针对计算机硬件系统的动态特征, 研究相应的可靠性分析方法在当前显得尤为紧迫.

广义随机 Petri 网<sup>[2]</sup> (Generalized Stochastic Petri Net, GSPN) 是在普通 Petri 网基础上通过扩展变迁类型而得到的一种高级 Petri 网形式, 可以

有效地描述系统的动态变化运行过程, 已经在一些领域的可靠性分析与设计中得到了重视与研究<sup>[3-7]</sup>. 本文研究基于 GSPN 的计算机硬件系统可靠性建模与分析方法, 以期计算机硬件系统可靠性分析与设计提供有益参考.

### 2 建模方法

#### 2.1 GSPN 定义

广义随机 Petri 网可以描述为一个 8 元组<sup>[2,4]</sup>:  $GSPN = (P, T, I, O, H, M_0, W, \lambda)$ , 其中:

**收稿日期:** 2012-10-27; **修回日期:** 2012-12-12

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61142010)

- (1) $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  为库所的有穷集合;
- (2) $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  为变迁的有穷集合;
- (3) $I \subseteq P \times T$  为输入弧的有穷集合;
- (4) $O \subseteq T \times P$  为输出弧的有穷集合;
- (5) $H$  为禁止弧的有穷集合;
- (6) $M_0$  为系统初始标识的集合;
- (7) $W$  为弧权函数的有穷集合;
- (8) $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$  是与变迁集合  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  一一对应的平均实施速率集合.

2.2 GSPN 建模元素图形化表示与用法

表 1 所示为 GSPN 建模元素的图形化表示和用法.

表 1 GSPN 建模元素图形化表示与用法

| 元素   | 符号 | 用法                         |
|------|----|----------------------------|
| 库所   | ●  | 描述计算机硬件系统工作过程中的资源和状态等信息    |
| 时间变迁 | ▨  | 描述计算机硬件系统工作过程中的各种事件        |
| 瞬时变迁 | ■  | 描述计算机硬件系统工作过程中控制和运行逻辑      |
| 有向弧  | ↘  | 描述计算机硬件系统工作过程中状态和事件之间的因果关系 |
| 禁止弧  | ↘  | 描述计算机硬件系统工作过程的控制和逻辑描述      |
| 标记   | ●  | 描述计算机硬件系统的动态行为变化过程         |

表 2 模型中库所及其含义

| 库所 | 含义        |
|----|-----------|
| P1 | 正常运行状态    |
| P2 | 异常状态      |
| P3 | 临时性故障状态   |
| P4 | 永久性故障状态   |
| P5 | 可自修复故障状态  |
| P6 | 不可自修复故障状态 |

表 3 模型中变迁及其含义

| 变迁 | 含义        |
|----|-----------|
| T1 | 发生异常      |
| T2 | 发生永久性故障   |
| T3 | 发生临时性故障   |
| T4 | 维修后正常工作   |
| T5 | 发生可自修复故障  |
| T6 | 发生不可自修复故障 |
| T7 | 转化为永久性故障  |

模型工作原理:开始时,计算机硬件系统基本单元处于正常运行状态  $P_1$ ,由于某种故障原因,计算机硬件系统基本单元进入异常状态  $P_2$ .处于异常状态的计算机硬件系统基本单元有可能进入临时性故障状态  $P_3$ ,也可能进入永久性故障状态  $P_4$ .如果计算机硬件系统基本单元进入临时性故障状态  $P_3$ ,那么将又有可能转化为两种故障状态:可自修复故障状态  $P_5$  和不可自修复状态  $P_6$ .如果计算机硬件系统基本单元进入不可自修复状态  $P_6$ ,那么将转化为永久性故障状态  $P_4$ ,经过维修后,进入正常运行状态  $P_1$ .而如果计算机硬件系统基本单元进入可自修复故障状态  $P_5$ ,通过计算机硬件系统基本单元的自修复机制完成检修,同样可以进入正常运行状态  $P_1$ .

3 计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型

图 1 所示为计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型,模型中主要的库所和变迁及其含义分别见表 2 和表 3.所建模型包含 6 个库所(状态)和 7 个变迁(事件),可见建模粒度精细,可以有效描述计算机硬件系统基本单元内部的工作过程,清晰易懂.

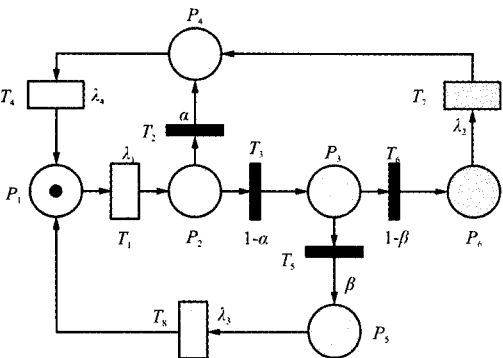


图 1 计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型

4 计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型精化设计

计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型的描述粒度精细,适用于描述结构简单的计算机硬件系统,而对于逻辑结构关系复杂的计算机硬件系统,由于其建模粒度过于精细势必造成组合空间问题,从而大大降低了模型的可解算性.为此,本小节采用模型精化技术对上述精细粒度模型进行精化设计.

4.1 简化假设

考虑到关键模型要素,做以下简化假设:

- (1) 仅考虑故障和正常运行两种状态
- (2) 假设系统中所有基本单元的故障发生服从故障率为  $\lambda$  的泊松过程;
- (3) 假设系统中所有基本单元的维修能力良好,服从维修率为  $\mu$  的泊松过程.

4.2 计算机硬件系统基本单元 GSPN 精化模型

如图 2 所示为计算机硬件系统基本单位 GSPN 精化模型,其中库所  $P_w$  表示计算机硬件系统基本单元处于正常运行状态,库所  $P_f$  表示计算机硬件系统基本单元处于故障状态;变迁  $T_f$  表示计算机硬件系统基本单元由于某种原因发生故障,变迁  $T_r$  表示计算机硬件系统基本单元通过维修人员和设备完成故障维修.

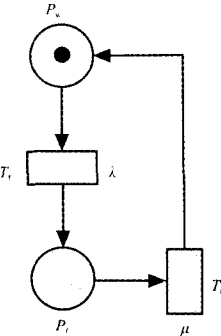


图 2 计算机硬件系统基本单位 GSPN 精化模型

模型工作原理:开始时,计算机硬件系统基本单元处于正常运行状态  $P_w$ ,由于某种故障原因,计算机硬件系统基本单元进入故障状态  $P_f$ . 经过某随机时间,计算机硬件系统基本单元完成维修,又进入正常运行状态  $P_w$ .

5 实例研究

5.1 某计算机硬件系统故障分析

以某计算机硬件系统为例,考察本文方法的有效性. 图 3 所示为某硬件系统故障逻辑图模型. 模型中,长方形  $S$  表示该计算机硬件系统全局故障. 长方形  $Y_i(i = 1,2,3)$  表示第  $i$  个功能模块故障. 圆形  $X_i(i = 1,2,\dots,8)$  表示各个硬件系统基本单元故障. 故障逻辑关系如下:功能模块故障  $Y_1$ 、 $Y_2$  和  $Y_3$  以或门逻辑引发全局故障  $S$ ;计算机硬件系统基本单元故障  $X_1$  和  $X_2$  以与门逻辑引发功能模块  $Y_1$  故障;计算机硬件系统基本单元故障  $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$  和  $X_6$  以或门逻辑引发功能模块  $Y_2$  故障;计算机硬件系统基本单元故障  $X_7$  和  $X_8$  以与门逻辑引发功能模块

$Y_3$  故障.

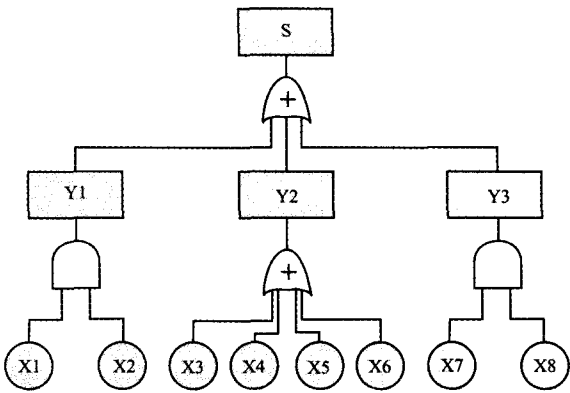


图 3 某计算机硬件系统故障逻辑图模型

5.2 计算机硬件系统 GSPN 可靠性分析模型

如图 4 所示,为在 TimeNET<sup>[8]</sup> 软件环境下实现的计算机硬件系统 GSPN 可靠性分析模型. 该模型中定义计算机硬件系统的可用度为  $P_{SA} = 1 - P\{\#P_S > 0\}$ , 同样功能模块的可用度为  $P_{YiA} = 1 - P\{\#P_{Yi} > 0\}(i = 1,2,3)$ .

在建立计算机硬件系统 GSPN 可靠性分析模型的基础上,设置各个计算机硬件系统基本单元的故障率和维修率,如表 4 所示.

表 4 故障率和维修率

| 名称 | 故障率   | 维修率  |
|----|-------|------|
| X1 | 0.005 | 0.05 |
| X2 | 0.005 | 0.05 |
| X3 | 0.002 | 0.04 |
| X4 | 0.004 | 0.02 |
| X5 | 0.001 | 0.04 |
| X6 | 0.005 | 0.01 |
| X7 | 0.008 | 0.1  |
| X8 | 0.008 | 0.1  |

5.3 模型仿真

由仿真结果可知:该计算机硬件系统全局可用度随着时间增加逐渐减小,到 160 h 后开始趋于平稳,最后为 45.1%. 功能模块  $Y_1$  可用度变化区间为  $[99.4\%,100\%]$ ,而功能模块  $Y_3$  可用度变化区间为  $[99.5\%,100\%]$ ,可见功能模块  $Y_1$  和  $Y_3$  对全局可用度的影响非常小,这是因为功能模块  $Y_1$  和  $Y_3$  采用的是与门逻辑设计. 功能模块  $Y_2$  可用度随着时间增加逐渐减小,到 100 h 后开始趋于平稳,最后为

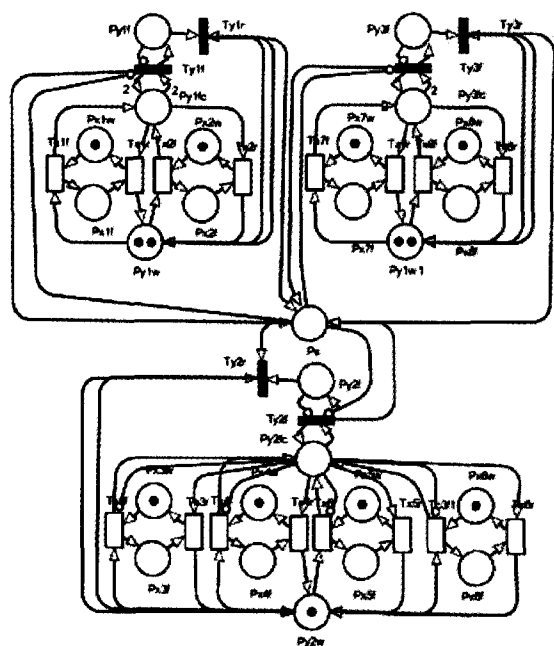


图 4 计算机硬件系统 GSPN 可靠性分析模型

65.2%, 可见:功能模块  $Y_2$  与计算机硬件系统的可用度变化趋势大致一样, 功能模块  $Y_2$  对影响系统的可用度影响最大, 这是因为功能模块  $Y_2$  采用的是或门逻辑设计, 而全局故障又是由功能模块  $Y_1$ 、 $Y_2$  和  $Y_3$  故障次数的叠加. 因此, 为提高计算机硬件系统的可用度, 在进行计算机硬件系统设计时, 设计者应当尽量增加与门逻辑的设计, 而减少或门逻辑的设计. 全局可用度见图 5,  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  的可用度见图 6 ~ 图 8.

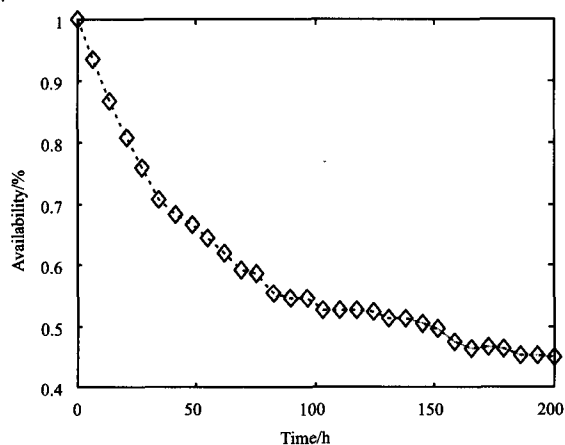
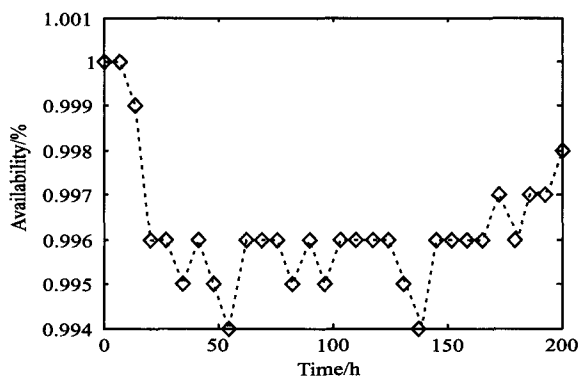
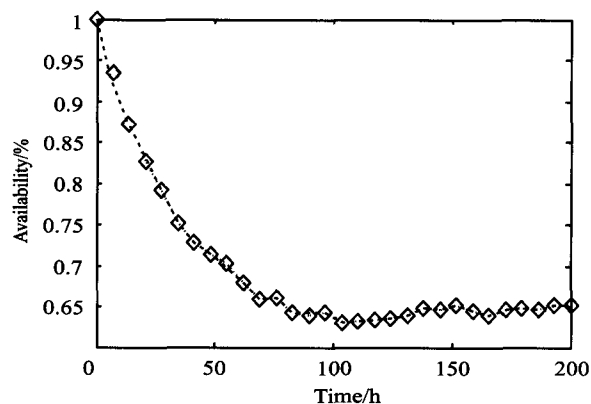
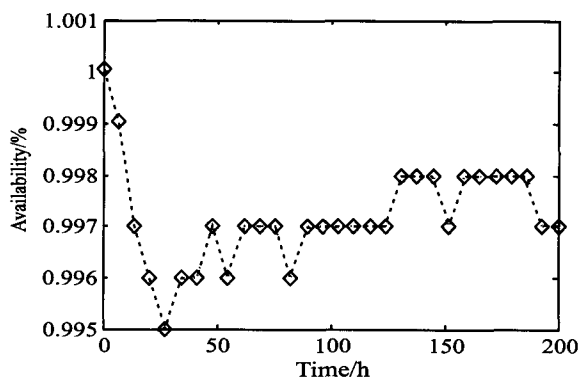


图 5 全局可用度

## 6 结束语

本文提出了一种基于 GSPN 的计算机硬件系统可靠性建模与分析方法. 构建的计算机硬件系统基本单元 GSPN 模型, 能够有效描述结构简单的计

图 6  $Y_1$  可用度图 7  $Y_2$  可用度图 8  $Y_3$  可用度

算机硬件系统, 具有建模粒度精细和清晰易懂优点. 但当描述结构关系复杂的计算机硬件系统时, 该模型将出现状态空间爆炸的问题, 大大降低模型的可解算性. 所构建的计算机硬件系统基本单元 GSPN 精化模型克服了状态空间爆炸问题, 可以用于描述结构复杂的计算机硬件系统. 实例研究验证了所提方法的有效性. 下一步研究将考虑大型工程系统中软件故障对于计算机硬件系统故障的影响, 进行更深层次的研究.

(下转第 130 页)

## 5 结束语

本文在量子粒子群优化算法和反向学习的粒子群算法的基础上提出一种融合反向学习的量子粒子群算法(O-QPSO). 混合算法在三方面上提高了标准粒子群算法的性能:种群初始化、种群的跳越和对种群最优个体的局部改进,改进算法有效的避免粒子群陷入局部最优并加速种群个体向最优位置的收敛. 通过数值试验验证了算法的有效性.

### 参考文献:

- [1] Kennedy J, Eberhart R C. Particles swarm optimization[C]//IEEE Int Conf Neural Networks washing-  
ton, DC, USA; IEEE, 1995; 1942-1957.
- [2] Sun J Feng B, Xu W B. Particle swarm optimization with particles having quantum behavior [J]. IEEE Conference on Evolutionary Computation, 2004 (1): 325-331.
- [3] Tizhoosh H R. Opposition-based learning: a new scheme for machine intelligence [C]//Int Conf on

Computational Intelligence for Modeling Control and Automation-CIMCA 2005. Vienna, Austria; IEEE, 2005; 695-701.

- [4] 吴昱, 李元香, 徐星. 基于群智能的新型反向混合差分进化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2009; 903-907.
- [5] Han L, He X. A novel opposition-based particle swarm optimization for noisy problems [C]//Proceedings of the Third International Conference on Natural Computation. [s. l.]: IEEE Press, 2007; 624-629.
- [6] 王燕, 贺兴时, 王凡, 等. 改进反向粒子群算法及其在噪声中的应用[J]. 西安工程大学学报, 2011, 25(5): 721-725.

### 作者简介:

肖文显 男, (1975—), 硕士, 讲师. 研究方向为人工智能及其应用、计算机网络.

刘震 女, (1976—), 硕士, 实验师. 研究方向为人工智能及其应用、计算机网络.

(上接第 125 页)

### 参考文献:

- [1] 曾声奎. 可靠性设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011; 13-48.
- [2] 林闯. 计算机网络和计算机系统的性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001; 133-162.
- [3] Karama K. Fault-tolerant system dependability-explicit modeling of hardware and software component-interactions[J]. IEEE Trans on Reliability, 2000, 49(4): 363-376.
- [4] 陈克伟, 董丽霞, 李丹. 基于 GSPN 的网络系统动态可靠性建模方法[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(4): 1091-1094.
- [5] 尹辉燕, 郭伟华, 石健, 等. 容错网络服务器系统可用性[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(9): 174-178.
- [6] 董世良, 刘海港, 石健, 等. 容错计算机网络综合可

用性建模与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1): 75-81.

- [7] 王昊天, 石健. 基于可用度模型的故障预测与健康管理方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2584-2589.
- [8] Zimmermann A, Knoke M. TimeNet user manual 4.0 [EB/OL]. [2012-10-25]. Berlin: Real-Time Systems and Robotics Group, 2007. <http://iv.tu-berlin.de/TechnBerichte/2007/2007-13.pdf>.

### 作者简介:

谷春英 女, (1973—), 硕士, 讲师. 研究方向为网络应用与软件技术.

姚青山 男, (1976—), 硕士, 副教授. 研究方向为网络应用与信息安全.