

基于 SHCPN 的系统动态可靠性建模及分析

林长春¹, 罗朝平², 仇悦², 张明清¹

(1. 解放军信息工程大学电子技术学院, 郑州 450004; 2. 北京市 7227 信箱 6 分箱, 北京 100072)

摘要: 针对传统复杂可修系统可靠性建模方法只能建立系统静态分析模型的问题, 提出基于随机层次着色 Petri 网(SHCPN)的动态可靠性建模方法, 并在讨论 SHCPN 形式化定义和建模方法的基础上, 描述利用该方法建立复杂可修系统动态可靠性分析模型的过程。实验结果证明该方法可有效解决以往系统可靠性建模中存在的不足。

关键词: 动态可靠性建模; 随机层次着色 Petri 网; 延时变迁; 随机分布函数

System Dynamic Reliability Modeling and Analysis Based on SHCPN

LIN Chang-chun¹, LUO Chao-ping², QIU Yue², ZHANG Ming-qing¹

(1. Institute of Electronic Technology, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450004;
2. Beijing 7227 Mail Box 6 Part Box, Beijing 100072)

【Abstract】 Aiming at the existing shortage that traditional complex repairable system reliability modeling methods just constitute a static analytical model, this paper presents a dynamic reliability modeling method based on Stochastic Hierarchical Colored Petri Net(SHCPN). At the foundation of discussing the formalization definition of SHCPN and the method of modeling, it describes the process of modeling a complex repairable system reliability dynamic analytical model using this method particularly. Result proves that this method can resolve the existing shortage of former system reliability modeling effectively.

【Key words】 dynamic reliability modeling; Stochastic Hierarchical Colored Petri Net(SHCPN); delayed-transition; stochastic distribution function

1 概述

可靠性是产品的基本属性, 是度量产品质量的重要标准之一。为分析系统可靠性, 须建立反映系统结构和功能特性的数学模型, 并在模型基础上进行系统可靠性分析。因此, 可靠性建模是系统可靠性设计、分配、预计和评定的基础, 在系统可靠性工程中占有非常重要的地位。

目前, 系统可靠性建模方法有很多, 如可靠性框图法、故障树法等。虽然这些方法在传统可靠性建模领域取得了很多成果, 但是它们难以表达复杂系统的动态特性和系统内部单元的关联性, 并且模型的可重用性和可维护性差^[1]。与其他建模方法相比, Petri 网兼有图形化建模能力和数学计算能力, 以研究系统模型的组织结构和动态行为为目标, 着眼于系统中可能发生各种状态变化以及变化之间的关系, 描述系统的动态变化过程。

本文针对复杂可修系统在结构和功能上的复杂性, 在深入学习可靠性理论与 Petri 网理论的基础上, 将随机 Petri 网^[2]和着色 Petri 网^[3]相结合, 运用层次化建模的方法^[4], 提出基于随机层次着色 Petri 网的动态可靠性建模方法, 并将该方法应用于复杂可修系统可靠性建模过程, 建立了复杂可修系统动态可靠性分析模型。

2 基于SHCPN的系统可靠性建模

2.1 SHCPN定义

在描述 SHCPN 的形式化定义前, 给出多重集的概念。

定义 1 多重集^[5]: 一个非空集合 S 上的多重集 m 满足 $m \in [S \rightarrow N]$, 记作 $\sum_{s \in S} m(s)s$ 。其中, s 是非空集合 S 中的元素; $m(s) \in N$ 是元素 s 在多重集 m 中的出现次数。

多重集与集合的区别在于前者允许同个元素出现多次。

定义 2 随机层次着色 Petri 网是一个多元组:

$SHCPN = (P, T; F, S, D, C, W, K, M_0, G, \lambda)$, 其中:

(1) $(P, T; F)$ 是一个有向网, 称为基网, P 是库所集, T 是变迁集, 分为瞬时变迁和延时变迁, 瞬时变迁的点火时间为零, 延时变迁的点火时间是随机变量, 服从特定的随机分布函数, F 是有向弧集, $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ 。

(2) S 是页(page)的有限集, 且有:

$$\forall s_i \in S, s_i = (SHCPN, f_p, f_t)$$

$$\forall s_1, s_2 \in S: [s_1 \neq s_2 \Rightarrow (P_{s_1} \cup T_{s_1} \cup F_{s_1}) \cap (P_{s_2} \cup T_{s_2} \cup F_{s_2}) = \emptyset]$$

其中, f_p, f_t 分别称为库所替换和变迁替换, 将在下文进行定义。

(3) D 是有限、非空的原子颜色集合。

(4) $C: P \cup T \rightarrow \xi(D)$ 称为颜色函数, $\xi(D)$ 为原子颜色集合 D 的幂集合, 使得: $\forall p \in P, C(p)$ 是 p 上所有可能出现 token 色的集合, $\forall t \in T, C(t)$ 是 t 上所有可能出现 token 色的集合。

(5) $K: P \rightarrow D_{MS}$ 称为容量函数, D_{MS} 为颜色集 D 的多重集的集合, 使得: 对 $\forall p \in P, K(p) \in C(p)_{MS}$, 是 p 上所有可能的各色 token 的数量集。

(6) $W: P \times T \rightarrow [D_{MS} \rightarrow D_{MS}]$ 称为权函数, $W = \{I_-, I_+\}$, 其

作者简介: 林长春(1981-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 系统可靠性; 罗朝平, 高级工程师; 仇悦, 高级工程师、硕士; 张明清, 副教授

收稿日期: 2009-09-23 **E-mail:** dailin3758@sina.com

中, I_- 为输入函数, I_+ 为输出函数。

(7) $M_0: P \rightarrow D_{MS}$ 是初始标识, 满足: $\forall p \in P: M_0(p) \in C(p)_{MS}$, 即 $M_0(p)$ 是 p 的 token 颜色集合上的多重集。

(8) $G: T \times C(T) \rightarrow [type(G(t)) \rightarrow \{0,1\}]$, 称为防护函数, 是定义在变迁上的布尔表达式, 其中, $[type(G(t)) \rightarrow \{0,1\}]$ 为与表达式关联的命题函数。

(9) $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ 是延时变迁平均实施速率集合, 表示在可实施的情况下单位时间内的平均实施次数, 其倒数 $\tau_i = 1/\lambda_i$ 表示延时变迁实施的平均延时时间。

定义 3 $N = (P, T; F)$ 为一个有向网, 存在 f_p, f_t 分别为如下操作:

(1) 对 $\exists p \in P$, 用一个三元组 (P_1, T_1, F_1) 替换 p 和 F_p , 即 $f_p(p, F_p) = (P_1, T_1, F_1)$, 使得 $(P_1, T_1 \cup \cdot p^*, F_1)$ 构成一个网, 则称库所 p 为替换库所, f_p 为对网 N 的一个库所替换。

(2) 对 $\exists t \in T$, 用一个三元组 (P_1, T_1, F_1) 替换 t 和 F_t , 即 $f_t(t, F_t) = (P_1, T_1, F_1)$, 使得 $(P_1 \cup \cdot t^*, T_1, F_1)$ 构成一个网, 则称变迁 t 为替换变迁, f_t 为对网 N 的一个变迁替换。

(3) 若 f_p, f_t 至少有一个发生, 则称 (N, f_p, f_t) 是以 N 为基础的层次网模型, 称 $N = (P, T; F)$ 为父页, 称 $N_1 = (P_1, T_1, F_1)$ 为子页; 其中, $F_p, F_t: F_x = \{(x, y) \in F\} \cup \{(y, x) \in F\}$ 为 x 关联弧集, $\cdot p^*, \cdot t^*: \cdot x^* = \cdot x \cup \cdot x^*$ 为 x 的外延。

2.2 基于SHCPN的可靠性建模方法

利用 SHCPN 对系统进行可靠性建模, 通常采用系统建模中自顶向下、逐步求精的思想。下面对基于 SHCPN 的建模方法进行详细描述:

(1) 定义系统, 明确系统建模目标。

对系统进行可靠性建模, 首先要全面了解系统的功能任务。定义与可靠性有关的系统功能任务, 了解系统的组成结构, 在此基础上, 明确系统可靠性建模的目标。

(2) 自顶向下, 将系统分解成若干层次。

一个系统按其复杂程度可分解成若干功能模块, 各个功能模块又是由不同设备按一定的逻辑关系组成的, 而各个设备又可划分为更低层次的部件或元器件。根据系统分析需求, 将系统划分为不同层次的组成元素。各层之间既相互依存又相互制约, 因此在划分层次和建模的过程中, 要定义好上下层之间的接口, 使它们保持合理、协调的相互作用和约束关系, 并且容易控制。

(3) 建立各层 SHCPN 模型, 构建层次网模型。

对各层进行 SHCPN 建模, 得到系统模型的各个子页。采用库所替换或变迁替换的方法, 将各层 SHCPN 模型连接起来, 构建系统层次网模型。

(4) 赋予延时变迁随机延时分布, 得到系统 SHCPN 模型。

在得到的 SHCPN 层次网模型上, 为各页中的延时变迁赋予随机延时分布, 最终建立起系统的 SHCPN 可靠性分析模型。

3 基于SHCPN的复杂可修系统可靠性建模

本文研究的是复杂可修系统动态可靠性, 系统故障后可通过维修使其恢复功能。因此, 根据系统可靠性分析需求, 建立系统工作-故障-维修状态变化的 SHCPN 模型。

根据层次化建模原则, 可将系统分为多个不同的功能模

块, 各功能模块分别完成不同的功能任务, 保证系统功能任务的实现。将维修考虑到建模的过程中, 因此, 增加一个维修模块, 该模块包含各种不同的维修资源(包括维修人员、维修工具、备用设备等)和维修策略等。维修模块针对不同功能模块提出的故障维修申请, 对模块进行故障检测, 采取相应的维修策略, 完成对模块的维修工作。从可靠性建模的意义上讲, 各种功能模块的可靠性状态变化过程都可用图 1 中左侧虚线框内的模型来表达, 用库所中包含的不同颜色的 token 来表示不同的功能模块。维修模块则可用图 1 中右侧虚线框内的模型来表达, 不同的维修工作也用不同颜色的 token 加以区分。

建立各功能模块 SHCPN 可靠性模型, 如图 1 所示。

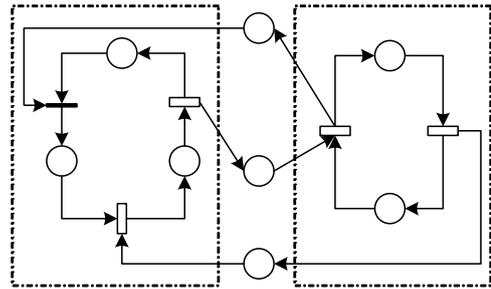


图 1 可修功能模块的 SHCPN 可靠性模型

图 1 中的库所和变迁含义如表 1 所示。

表 1 库所和变迁的含义

库所	含义	变迁	含义
P_{S1}	功能模块工作状态	t_{S1}	模块故障
P_{S2}	功能模块故障状态	t_{S2}	接受维修
P_{S3}	功能模块维修状态	t_{S3}	模块恢复
P_{W1}	维修模块空闲状态	t_{W1}	维修开始
P_{W2}	维修模块工作状态	t_{W2}	维修完成
P_{M1}	维修申请消息		
P_{M2}	维修响应消息		
P_{M3}	维修完成消息		

当某个处于工作状态的功能模块发生故障时(此时 P_{S1} 中有相应颜色的 token), t_{S1} 点火, 输出一个相应颜色的维修申请消息 token 到 P_{M1} , 模块进入故障状态 P_{S2} ; 当维修模块收到维修申请后, 且维修资源空闲时, 即 P_{W1} 有相应颜色的维修资源 token, t_{W1} 点火, 维修模块进入工作状态, 同时向 P_{M2} 输出一个相应颜色的维修响应消息 token; 当 P_{M2} 收到维修响应消息后, t_{S2} 点火, 故障的功能模块接受维修, 进入维修状态 P_{S3} ; 经过一段时间的维修后, t_{W2} 点火, 维修模块完成维修工作, 输出一个相应颜色的维修完成消息 token 到 P_{M3} , 同时释放维修资源, 维修模块进入空闲状态; 当 P_{M3} 收到维修完成消息后, t_{S3} 点火, 功能模块故障解除, 模块恢复, 进入工作状态。在图 1 中, 除变迁 t_{S2} 为瞬时变迁外(瞬时变迁用粗线段来表示), 其余变迁均为延时变迁(延时变迁用矩形框来表示), 相应的点火时间由其随机分布函数来确定。

本文把各功能模块当作一个整体来考虑其可靠性。而在实际系统中, 各功能模块是由不同设备, 按一定的逻辑关系(如串联、并联、混联、备份等)组成的, 设备又可进一步分解为各种部件或元器件。以此类推, 可将系统分解为若干层次, 每个层次由属于该层的若干单元构成。分解是以系统分析需求和精确度要求为准则的。

基于上述分析, 对于分解的每层, 可以构造相应的 SHCPN 模型, 而各层的 SHCPN 模型可用库所替换或变迁替

换的方法实现上下层的接口连接。下面以图 1 中的库所 P_{S1} 为例, 说明用库所替换的方法构造二层 SHCPN 模型, 如图 2 所示。

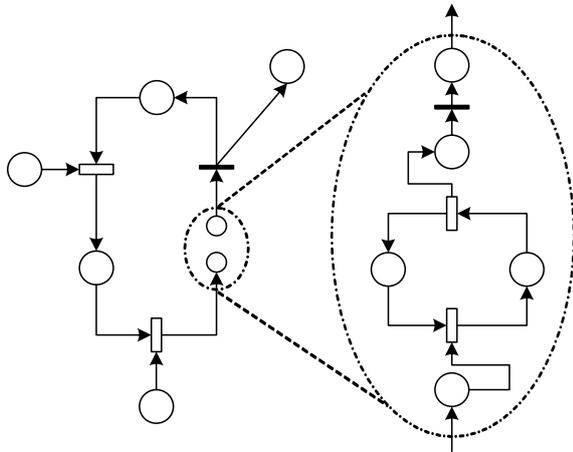


图 2 用库所替换法构造的二层 SHCPN 模型

图 2 中左侧的库所和变迁含义与表 1 中相同, 右侧虚线框中的库所和变迁含义如表 2 所示。

表 2 库所和变迁的含义

库所	含义	变迁	含义
P_{S10}	设备维修完成消息	t_{S11}	设备故障
P_{S11}	设备工作状态	t_{S12}	设备恢复
P_{S12}	设备故障状态	t_{S13}	设备开关变迁
P_{S13}	设备故障信息		
P_{S14}	模块故障信息		

图 2 模型表示的是用设备层 SHCPN 模型替换功能模块层中库所 P_{S1} 后得到的二层 SHCPN 模型图解, P_{S1} 即为替换库所。在模型中, 不同设备的故障信息用不同颜色的 token 表示。当某个设备发生故障, 变迁 t_{S11} 点火, 输出相应的颜色 token 到库所 P_{S12} , P_{S13} , 设备进入故障状态。标识 $M(P_{S13})$ 是一个颜色集上的多重集, P_{S13} 上可能含有多个不同颜色的故障 token, 也就是说该功能模块中可能有多个设备同时或顺序发生故障。变迁 t_{S13} 上定义有故障条件布尔表达式, 该表达式决定了该层上各设备之间的可靠性逻辑关系, 即图 2 左侧的 SHCPN 模型可以表达功能模块中各设备的串联、并联、备份等可靠性逻辑关系。当标识 $M(P_{S13})$ 使表达式为真时, t_{S13} 点火, 输出一个标志故障信息的 token 到库所 P_{S14} , 表示这个设备发生故障导致了该功能模块故障。根据库所替换的定义可知, 库所 P_{S14} 有 token 等同于 P_{S1} 中有故障 token, 则 t_{S1} 点火。之后的变化过程与图 2 描述的相同。这里, 变迁 t_{S1} , t_{S13} 是瞬时变迁, 其余变迁均为延时变迁, 点火时间由其随机分布函数来确定。

在利用 SHCPN 进行可靠性建模的过程中, 始终遵循: 对于同一层次的不同单元, 依其分解的需求来决定是否用相同的 SHCPN 模型表示, 即如果同一层次的 2 个模块都不需要分解成更低层次的组成单元时, 则用同一个 SHCPN 模型来表示这个 2 个模块, 用不同颜色的 token 加以区分; 如果有 1 个或者 2 个模块都需要向更低层次分解时, 则用 2 个 SHCPN 模型来分别表示这 2 个模块, 低层次以此类推, 直到系统不需要分解为止。

经过上述可靠性建模分析, 得到复杂可修系统的 SHCPN 可靠性分析模型, 如图 3 所示。图中是只有 4 个功能模块与

1 个维修模块的 SHCPN 模型, 其中的每个功能模块还可根据构成元素的逻辑关系继续分解为更低层次的模型。根据系统可靠性分析需求, 可以酌情对模型进行增减, 体现在系统 SHCPN 模型上, 只是增加或减少了相应的颜色 token, 而对于维修中有设备、元器件的替换或改进, 只要改变相应延时变迁的随机分布函数的参数即可, 因此不会造成系统 SHCPN 模型结构的改变和状态空间爆炸问题。

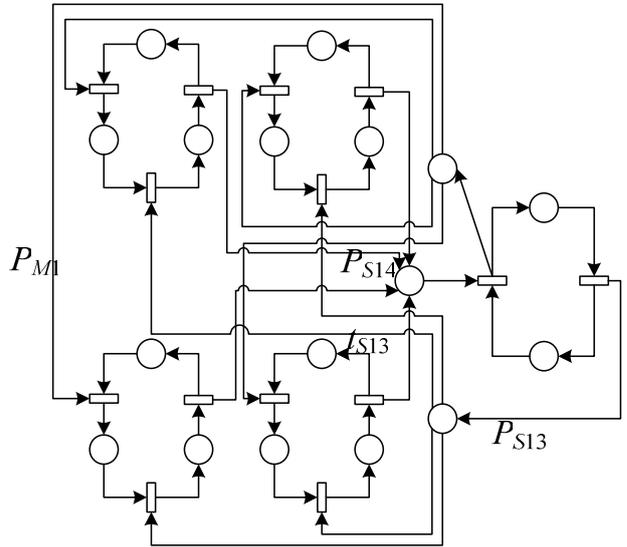


图 3 复杂可修系统 SHCPN 可靠性分析模型

对于 SHCPN 模型复杂可修系统的可靠性求解, 可以利用模型仿真的方法来计算, 如利用蒙特卡洛仿真法计算系统的可用度、平均故障间隔时间等可靠性指标。基于仿真法的可靠性求解不要求模型中的变迁一定服从指数分布, 因此, 基于仿真的系统可靠性求解方法很好地解决了变迁的非指数分布问题。

4 结束语

针对传统可靠性建模方法难以反映复杂系统可靠性动态变化的问题, 本文将随机 Petri 网与着色 Petri 网相结合, 运用层次化建模的方法, 提出了基于 SHCPN 的可靠性建模方法, 建立了复杂可修系统动态可靠性分析模型。分析表明, 利用该方法对复杂系统进行可靠性建模, 能够有效降低系统模型的复杂度, 解决了状态空间爆炸问题; 所建模型能够很好地反映系统可靠性的动态变化过程, 以及系统各层次之间的可靠性逻辑关系, 具有一定的典型性, 为将来复杂系统的可靠性分析提供了良好的模型基础。

参考文献

- [1] O'Connor P D T. Practical Reliability Engineering[M]. 4th ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons Inc., 2002.
- [2] 林 闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [4] 张继军, 吴哲辉. Petri 网的分层递归模型[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(8): 89-91.
- [5] 李 莉. 基于 CPN 的 Multi-agent 调度系统建模与仿真[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.

编辑 任吉慧