

基于层次 Petri 网的复杂装备保障流程分析方法

江式伟¹, 曹延杰¹, 吕卫民¹, 王波²

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 73682 部队, 江苏 徐州 221000)

摘要: 针对复杂装备保障流程约束条件多、动态性强、耦合严重、层次结构复杂的特点, 提出了一种基于层次 Petri 网的流程分析方法; 首先, 分析了保障流程的层次化结构, 采用着色时间约束 Petri 网, 建立了包含保障人员、保障设备、保障空间等保障资源库所的层次化 Petri 网流程模型; 然后, 采用流程基本模型起始时间——流程子网起始时间——流程总时间的层次方法, 设计了流程时间参数统计算法; 最后, 以某复杂装备系统保障流程为例, 进行了实例分析, 并通过与 ExSpect 软件 Monte Carlo 仿真对比验证了算法的有效性。

关键词: 复杂装备; 保障流程; Petri 网; 时间参数

Analysis Method of Complex Equipment Support Process Based on Hierarchical Petri Net

Jiang Shiwei¹, Cao Yanjie¹, Lü Weimin¹, Wang Bo²

(1. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China; 2. 73682th Unit of PLA, Xuzhou 221000, China)

Abstract: For the characteristics of strong dynamic, severe coupling and multi-process constraints of the complex equipment support, this paper established a hierarchical flow analysis model based on Petri net. First, the hierarchical structure was analyzed: the coloring time constraints Petri net was used to build the hierarchical flow model containing the support resources such as the support personnel, the support equipments and the support space. Then, the statistics algorithm of the time parameters of the flow was introduced via the hierarchical analysis method. Lastly, an example was taken in a support process of certain equipment system. By contrast with the results of ExSpect software and Monte Carlo simulation, the effectiveness of the algorithm was verified.

Keywords: complex equipment; support process; Petri Net; time parameter

0 引言

装备保障流程是指为了保持和恢复装备完好的技术状态, 保证装备能正确操作使用, 以便充分发挥其作战性能所进行的一系列有序活动的集合^[1-2]。复杂装备保障流程的执行源于其异质组成成员职能与功能的互补性、协同性以及适应性, 通过保障流程将保障系统的各要素保障活动动态地耦合在一起, 完成任何单一成员的职能与功能执行都不能完成整体使命任务。

流程能够表示装备保障任务活动、活动间的时序关系和逻辑关系, 同时还能相应地得出结构组成, 具有目标性、动态性、结构性^[3]。因此, 通过流程分析, 可以清楚地表示复杂装备的自主性以及各系统间的松散耦合关系, 对于复杂装备建模和评价以研究, 均具有重要的价值。

目前, 对于流程的建模与分析进行了较多的研究^[4-6], 但是对于复杂流程的参数计算方法实用简单的较少, 本文根据复杂装备保障的特点, 建立了保障流程的层次模型, 提出了一种流程参数分析方法, 并进行了分析验证。

1 复杂装备保障流程建模

流程建模方法有很多, 如 UML、Petri 网、SOA 等。Petri 网既有严格的形式定义, 又有直观的图形表示, 具有丰富的系统描述手段和系统行为分析技术, 为描述并行、异步、分布式和随机性等特性的复杂系统提供了强有力的手段^[7]。Petri 网区别于其他建模方法的最大特点就是, 它可将人员、

设备、空间等信息集成在一起进行描述, 通过对 Petri 网模型进行仿真, 可以分析流程的具体指标参数。因此, Petri 网是流程描述和分析的主要表达方法^[8-9]。

定义着色时间约束 Petri 网 (colored timing constraint petri nets, CTCPN) 是一个多元组 $CTCPN = (N, C, K, M, W, D)$, 其中 N 是一个经典的 Petri 网^[7], $N = (S, T; F, M_0)$, C 是颜色集合, K 是库所容量集合, M 是标识, W 是权函数, D 为变迁的执行延迟 $t_d(t)$ 的集合, M 是 TCPN 的一个标识, 变迁 $t \in T$ 在 M 下可行的条件是 $\forall s \in \cdot t; M(s) \geq 1$ 。

CTCPN 的变迁触发机制和时间约束 Petri 网一致, 要求 $?t$ 的标识数大于或者等于输入弧上的权函数, 而且颜色要符合要求。

如图 1 所示是复杂装备保障流程的层次结构模型, 分为“保障流程顶层——保障活动——保障业务”三层模型体系, 保障业务是具体的保障工作, 对应不同的变迁, 各类保障资源对应不同的库所, 其数量为库所内相应颜色 Token 的容量, 由各类基本逻辑类型组成, 如图 2 所示; 保障活动是同类保障业务的组合, 通过子网构成模块化模型, 以减少分析过程中的状态空间维数; 保障流程顶层模型表征流程的总体运行过程, 实现保障流程的全周期过程建模。

2 保障流程时间模型

保障流程的时间参数分析是其性能分析的基础, 保障流程的层次结构导致其时间的计算难以直观的表达。本文保障流程时间计算包括三部分内容, 第一是根据下一层动作时间计算上一层流程的总时间; 第二是根据流程中设定的约束逻辑关系, 计算保障活动流程子网动作起始时间; 第三是计算流程基本模型的动作起始时间。

收稿日期: 2015-10-15; 修回日期: 2015-03-31。

作者简介: 江式伟(1981-), 男, 山东聊城人, 博士, 主要从事系统工程方向的研究。

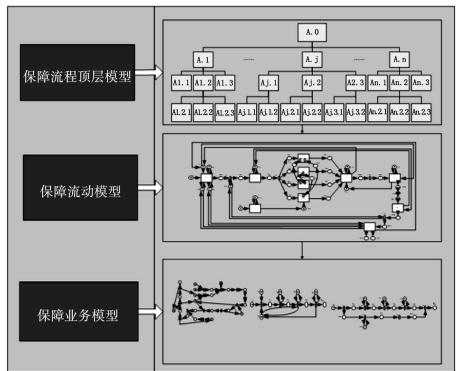


图 1 保障流程层次结构

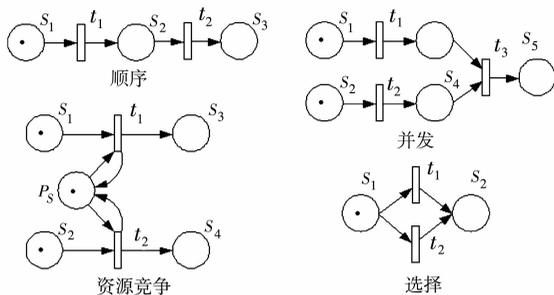


图 2 流程基本逻辑类型

2.1 流程基本模型的动作起始时间计算

设当前需计算的流程节点为 t_i ，其起始时间用表示 $Tstart_{t_i(-)}$ ，该子流程（或单元动作）持续时间用 $TD_i(t)$ 表示，其下一级子节点用 $t_{i-0(+)}、t_{i-1(+)}、t_{i-2(+)}$ 表示，相邻子节点时间间隔用 $\Delta t_{0-1}、\Delta t_{1-2}、\Delta t_{2-3}$ 表示。下面以图 2 Petri 网流程基本模型来分别给出其动作起始时间计算的算法。

1) 顺序关系 (SeqR):

对于 SeqR 来说，保障活动基础节点（变迁）的相对时间类型基准分为 3 种，分别是相对于自身父节点（上一级流程节点）的时间；相对其它任一子流程节点开始后（前）某一时刻的时间；相对其它任一子流程节点结束后（前）某一时刻的时间；

设当前需计算的流程节点为 t_i ，其起始时间用 $Tstart_i$ 表示，该节点动作持续时间用 $TD_i(t)$ 表示，其上一级父节点起始时间用 $Tstart_{i(-)}$ 表示，而其设为相对时间基准的另一个节点起始时间用 $Tstart_k$ 表示，其相对的时间长度用 Δt 表示。

计算 SeqR 单节点起始时间算法 I 如下所述。

找到 t_i 的相对时间基准节点 t_k ，然后利用下式：

$$Tstart_i = \begin{cases} Tstart_k \pm \Delta t \\ Tstart_k + TD_k \pm \Delta t \\ Tstart_{i(-)} + TD_{i(-)} + Tdis_i + Tcon_i \end{cases}$$

其中：第 1 式是相对其它起始类型，第 2 式是相对其它结束类型，第 3 式是相对父节点起始类型。 $Tdis_i、Tcon_i$ 分别表示变迁的逻辑等待时间和资源等待时间。

算法 I 结束。

2) 并发关系 (ConcR):

假设 $t_{i-0(+)}、t_{i-1(+)}$ 是并发关系，其余节点为顺序关系，则将 $t_{i-0(+)}、t_{i-1(+)}$ 看作一个子网， $t_{i-2(+)}$ 变为其子节点。

计算 ConcR 单节点起始时间算法 II 如下所述：

$$Tstart_{t_{i-0(+)}} = Tstart_{t_{i-1(+)}} = Tstart_i + \Delta_{i-0},$$

$$\Delta_{i-0} = TD_i + Tdis_i + Tcon_i,$$

$$Tstart_{t_{i-2(+)}} = Tstart_{t_{i-0(+)}} + \min(\Delta_{0-2}, \Delta_{1-2}).$$

算法 II 结束。

3) 选择关系 (ChoR):

假设以优先权 $p_{i-0(+)}$ 选中 $t_{i-0(+)}$ 执行、 $t_{i-1(+)}$ 不执行（反之亦然），其余节点为顺序关系。

计算 ChoR 单节点起始时间算法 III 如下所述：

$$Tstart_{t_{i-1(+)}} = Tstart_i + \Delta_{i-0},$$

$$\Delta_{i-0} = TD_i + Tdis_i + Tcon_i,$$

$$Tstart_{t_{i-1(+)}} = \Theta,$$

$$Tstart_{t_{i-2(+)}} = Tstart_i + \Delta_{i-0} + \Delta_{0-2}.$$

算法 III 结束。

4) 竞争关系 (ComR):

假设 $t_{i-0(+)}、t_{i-1(+)}$ 是竞争关系，优先权分别为 $p_{i-0(+)}, p_{i-1(+)}$ ，其余节点为顺序关系，将 $t_{i-0(+)}, t_{i-1(+)}$ 看作一个子网， $t_{i-2(+)}$ 变为其子节点，

计算 ComR 单节点起始时间算法 IV 如下所述：

$$Tstart_{t_{i-0(+)}} = Tstart_i + Tcon_{t_{i-0(+)}} + \Delta_{i-0},$$

$$Tstart_{t_{i-0(+)}} = Tstart_i + Tcon_{t_{i-0(+)}} + \Delta_{i-1},$$

$$\Delta_{i-0} = \Delta_{i-1} = TD_i + Tdis_i + Tcon_i,$$

$$Tstart_{t_{i-2(+)}} = Tstart_i + (1 - X_{t_1 p_1}^{nf}) (Tcon_{t_{i-1(+)}} + \Delta_{t_{i-1-2}}) + (1 - X_{t_2 p_2}^{nf}) (Tcon_{t_{i-0(+)}} + \Delta_{t_{i-0-2}})$$

算法 IV 结束。

2.2 保障活动子网起始时间计算

在得到基础变迁节点起始时间的基础上，对于保障活动子网来说，由于流程逻辑结构的复杂性，故总时间的计算是一个反复迭代的过程，迭代算法如下。

计算以第 i 个节点 t_i 为首的流程子网总时间算法 V 如下所述。

第 1 步：统计 t_i 所包括的所有下一级子节点 $Tcon_{t_{i-0(+)}}、Tcon_{t_{i-1(+)}}、Tcon_{t_{i-2(+)}}、\dots、Tcon_{t_{i-h(+)}}、\dots、Tcon_{t_{i-h(+)}}$ ：

1) 如果 $t_{i-h(+)}$ 为变迁节点动作（不含其它子节点），则直接利用算法 I 计算其起始时间；

2) 如果 $t_{i-h(+)}$ 是一个包含一个或多个子节点的子流程，则令 $t_i = t_{i-h(+)}$ ，返回算法 V 继续计算新节点的总时间；直到得到两个最基本单元（顺序、并发、选择、竞争）动作间的时间计算，依次利用算法 I~IV 计算其起始时间；

第 2 步：在完成了 t_i 所有下一级子节点的时间统计计算时，利用下式计算 t_i 的总时间

$$TD_i = \sum_h (TD_{t_{i-h(+)}} + Tdis_{t_{i-h(+)}} + Tcon_{t_{i-h(+)}}) = \sum_{h=1}^H (Tstart_{t_{i-h(+)}} - Tstart_{t_{i-h-1(+)}}) + \Delta_{t_{H-H-1}}$$

$\Delta_{t_{H-H-1}}$ 为 t_i 最后一个子节点与其上一动作的时间间隔，主要由延迟时间、逻辑等待时间、资源等待时间决定，可用下式计算：

$$\Delta_{t_{H-H-1}} = TD_{t_{i-h(+)}} + Tdis_{t_{i-h(+)}} + Tcon_{t_{i-h(+)}}$$

第 3 步：对于整个保障活动来说，首先从其起始节点变迁开始，搜索计算所有子网的起始时间，则该子网总时间，

$$TSAD_i = TSAend_i - TSAstart_i = \sum TD_i + \Delta t$$

算法 V 结束。

该算法是在综合利用流程节点相对时间计算算法基础上完成的，在计算过程中，可以将需要计算的子流程的首节点带入

算法中的 t_i 即可。

2.3 流程总时间统计方法

流程层次结构层次多而且复杂, 流程节点间的相对时间连接关系也是多级复杂连接的, 故在计算过程中以上两种时间计算往往会产生耦合, 即当完成某一子流程的总时间统计后, 由于其时间长度发生变化, 从而会影响到以它为时间基准的其它子流程的时间调整, 而该时间调整又会引起其上层节点的总时间统计变化而以该节点为时间基准的另外一些节点时间调整, 因此, 如果要计算真正满足流程内所有设定的逻辑约束的流程总时间, 需对以上两个算法反复迭代调用方可完成。

在计算高层模型的起始时间时, 将需调用的下一层模型作为一个节点, 采用算法 VI 反复迭代, 可得出其起止时间, 依次回溯, 得出流程总时间。

3 实例分析

某复杂装备保障流程如图 3 所示, 其中 S_{O_n} 是保障对象, S_{r_i} ($i = 1, 2, \dots, 7$) 分别代表 7 种不同的保障资源, S_{m_j} ($j = 1, 2, \dots, 12$) 分别是中间库所, 代表保障过程中的中间状态, S_{end} 为任务结束库所; t_k ($k = 1, 2, \dots, 13$) 分别表示保障过程中的不同的保障工作。

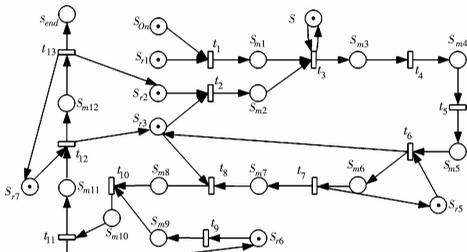


图 3 某复杂装备保障流程 Petri 网模型

为完成保障任务, 需要连续完成 N 个保障对象 S_{O_n} 的保障工作 ($N = 20$), 保障对象按照顺序依次进行保障, 形成保障任务的顶层模型如图 4 所示。

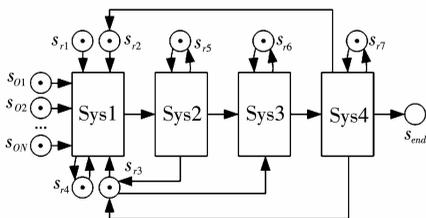


图 4 保障流程顶层 Petri 网模型

表 1 变迁作业时间分布表

代号	时间分布/min	代号	时间分布/min
t_1	$N(1.5, 0.2^2)$	t_8	$N(7, 1.5^2)$
t_2	$N(2, 0.2^2)$	t_9	$N(1, 0.1^2)$
t_3	$N(3, 0.3^2)$	t_{10}	$N(3, 0.3^2)$
t_4	$N(2, 0.2^2)$	t_{11}	$N(2, 0.2^2)$
t_5	$N(1, 0.1^2)$	t_{12}	$N(7, 1.5^2)$
t_6	$N(1.5, 0.2^2)$	t_{13}	$N(10, 2.0^2)$
t_7	$N(2, 0.2^2)$		

采用本文所建时间模型, 利用 Matlab 工具, 计算得到每个保障对象的保障时间,

$$T_{S_n} = [40.5, 40.5, 42.0, 42.0, 43.5, 43.5, 45.0, 45.0, 46.5, 46.5, 48.0, 48.0, 48.5, 48.5,$$

51.0, 51.0, 52.5, 52.5, 54.0, 54.0], 以任务开始记为 0 时刻, 各保障对象保障开始时刻 $T_{start_{S_n}} = [0, 0, 0, 0, 3, 3, 3, 3, 6, 6, 6, 6, 9, 9, 9, 9, 12, 12, 12, 12, 12]$, 保障任务的整体完成时间期望值为 66.5 min。

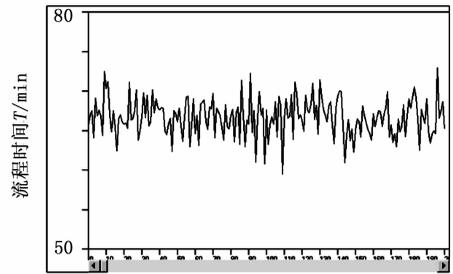


图 5 ExSpect 仿真图

利用 ExSpect 对某复杂装备保障任务流程进行模拟, 通过 Monte Carlo 仿真, 统计 Petri 网流程的参数^[10-11]。进行 200 次仿真, 得到其活动时间分布如图 5 所示。通过对仿真结果的分析, 可以得到保障任务的时间均值为 66.7 min, 保障任务时间服从 $N(66.7, 5.6)$ 分布。与本文算法相比误差仅为 0.3%, 印证了算法的有效性。

4 结论

本文根据复杂装备保障的特点, 建立了基于 Petri 网的保障流程模型, 将保障过程进行层次划分通过子网技术形成保障流程的层次模型, 针对保障流程约束条件多的特点, 提出了流程时间参数分析方法, 以某复杂装备系统保障为例, 进行了计算分析, 并通过对比验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] 徐崇昌. 装备保障性工程与管理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 陈春良, 王岩磊, 孙盛坤. HTCPN 在装备保障业务过程建模与优化中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (10): 2746-2750.
- [3] 范玉顺, 工作流管理技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [4] 张建强, 张涛, 郭波. 基于 Petri 网的维修保障流程多层次仿真模型研究 [J]. 兵工自动化, 2003, 22 (4): 14-17
- [5] 李阳, 武昌. 军用装备维修保障系统面向对象 Petri 网建模 [J]. 计算机仿真, 2005, 22 (2): 38-41
- [6] 刘芳, 赵建印, 郭波. 基于扩展 CGSPN 的维修保障系统仿真评估与优化方法 [J]. 计算机仿真, 2005, 22 (5): 82-85
- [7] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] 江式伟, 吕卫民, 冯浩源. 基于时间 Petri 网的装备体系可靠性建模与仿真 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (4): 895-899
- [9] Tsai J J P, Yang S J, Chang W H. Timing constraint Petri nets and their applications to schedulability analysis of real-time system specifications [J]. IEEE Trans. on Software Engineering, 1995, 21 (1): 32-49.
- [10] Jiang S, Lü W M, Jiachen Feng. Research on Process Modeling and Analyzing Methods of Distributed Equipment System - of - Systems [A]. 2012 International Conference on Quality Reliability Risk Maintenance and Safety Engineering [C]. Chengdu
- [11] Deloitte & Touche Bakkenist. Exspect User Manual. [EB/OL]. [1999]. <http://www.exspect.com/ex641user manual.pdf>.