

基于 HTCPN 的飞机维修保障过程建模与仿真

王岩磊¹, 陈春良¹, 韩昕锋², 王 森¹

WANG Yan-lei¹, CHEN Chun-liang¹, HAN Xin-feng², WANG Sen¹

1. 装甲兵工程学院 技术保障工程系, 北京 100072

2. 海军装备部, 北京 100841

1. Department of Technologic Support, Engineering Institute of Armored Forces, Beijing 100072, China

2. Equipment Department of Navy, Beijing 100841, China

E-mail: wangyanlei666@sina.com

WANG Yan-lei, CHEN Chun-liang, HAN Xin-feng, et al. Modeling and simulation of aircraft maintenance support process based on HTCPN. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(29): 235-238.

Abstract: Maintenance process model of aircrafts is the basis of the research on aircraft maintenance support system, and the maintenance process is a typical discrete event system. Hierarchical timed colored Petri net (HTCPN) is a powerful tool to describe maintenance support process of aircrafts. The modeling method based on HTCPN has been introduced in this paper, the maintenance support process of aircraft has been analyzed. The model developed on HTCPN by CPNTools has been given, and the model has been analyzed, which could provide references for researching and optimizing the maintenance process of aircraft.

Key words: HTCPN; process; model; aircraft

摘 要: 飞机维修保障过程模型是研究飞机维修保障系统结构与运行的基础, 是典型的离散系统, 层次赋时着色 Petri 网 (HTCPN) 有多种优点, 是描述飞机维修保障过程的有力工具。论文介绍了 HTCPN 的建模方法, 分析了飞机的维修保障过程, 在 CPNTools 平台上, 建立了基于 HTCPN 的飞机维修保障过程模型, 并对模型进行了仿真, 给出了分析结果, 为研究飞机的维修保障提供了参考, 为优化飞机维修过程、合理配置资源提供了依据。

关键词: HTCPN; 过程; 建模; 飞机

文章编号: 1002-8331(2007)29-0235-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

1 引言

高技术条件下的现代战争越来越表现出高强度、快速、精确的特征, 这对飞机维修保障系统提出了更高的要求。飞机的维修保障是指为了保持和恢复飞机完好的技术状态, 保证飞机能正确操作使用, 以便充分发挥其作战性能所进行的一系列技术和管理活动, 以及为保证这些活动有效地实施所必需的维修保障资源^[1]。现代战争的实践已经证实, 军用飞机的维修保障工作将直接影响飞机战斗力发挥。优化维修保障过程, 既能够及时为部队的需求申请提供有效服务, 又经济高效, 不增加作战系统的负担, 是提高维修保障系统效能的核心要求。无论是用技术手段对飞机维修保障系统进行技术改造, 还是用先进的管理理念对飞机维修保障系统进行优化重组, 建立完善、准确的飞机维修保障过程模型都是至观重要的。过程建模技术和方法提供了对过程描述、分析技术, 成为评估、优化和过程重组的重要基础。

飞机的维修保障过程是典型的离散系统, 对离散系统进行仿真建模的常用的过程建模方法有: CPM/PERT 方法, IDEF3 方法, Petri 网方法, 基于活动的随机网络方法等^[2]。Petri 网是一

种可用图形表示的组合模型, 具有直观、易懂和易用的优点, 对描述和分析有独到的优越之处。同时, Petri 网又是严格定义的数学对象, 借助于数学开发的 Petri 网分析方法和技术既可用于静态的结构分析, 又可用于动态的行为分析, 具有灵活的建模和强大的系统性能分析能力。文献[3, 4]利用事件/变迁 Petri 网建立了飞机使用保障的模型, 但由于事件/变迁 Petri 网比较简单, 其模型缺乏进一步的研究和分析能力。本文针对飞机维修保障过程的特点, 利用层次赋时着色 Petri 网 HTCPN (层次赋时着色 Petri 网) 建立了飞机维修保障过程模型, 为研究飞机的维修保障过程提供参考依据。

2 基于 HTCPN 的建模方法

Petri 网理论建立 40 余年来, 发展了以并发论、同步论、网逻辑、网拓扑等为主要内容的理论体系。基于 Petri 网的建模技术可用于模拟带有并发性、异步性、分布式、非确定性、并行性等特性的系统, 已成为目前最有前途的建模工具之一, 越来越多的应用领域采用它来进行系统建模与分析^[5]。Petri 网系统的基本六元组定义大家已比较熟悉, 不再赘述, 这里给出 HTCPN

的扩展形式化定义。

一个 HTCPN 是一个多元组, $HTCPN=(S, SN, SA, PN, PT, PA, FS, FT, PP)$, 其中:

(1) S 是页(pages)的有限集合, 其中对于每一页 $s \in S$ 是一个非层次的时间着色 Petri 网 TCPN, 且每一页的网的元素是两两互不相交, 即:

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

(2) $SN \subseteq T$ 是替代变迁(substitution nodes)的集合;

(3) SA 是页分配函数(page assignment function), 是从 SN 定义到 S 的函数, 而且任何页不是自身页的子页;

(4) $PN \in P$ 是端口节点(port node)的集合;

(5) PT 是端口类型(port type)函数, 是从 PN 定义到 $\{in, out, i/o, general\}$ 的函数;

(6) PA 是端口分配函数(port assignment function), 是从 SN 定义的插座节点和端口节点的如下二元关系:

①插座节点和端口节点对应:

$$\forall t \in SN: PA(t) \subseteq X(t) \times PN_{SN(t)}$$

②插座节点具有对应的类型:

$$\forall t \in SN \forall (p_1, p_2) \in PA(t):$$

$$[PT(p_2) \neq general \Rightarrow ST(p_1, t) = PT(p_2)]$$

③对应的节点具有相同的颜色和初始表达式:

$$\forall t \in SN \forall (p_1, p_2) \in PA(t):$$

$$[C(p_1) = C(p_2) \wedge I(p_1) \diamond = I(p_2) \diamond];$$

(7) $FS \subseteq P_s$ 是一个有限的联合集(fusion type function), 是从联合集里的元素具有相同的颜色和初始表达式:

$$\forall fs \in FS \forall p_1, p_2 \in fs: [C(p_1) = C(p_2) \wedge I(p_1) \diamond = I(p_2) \diamond];$$

(8) FT 是联合类型函数(fusion type function), 是从联合集定义到 $\{global, page, instance\}$ 的函数。页联合节点集合和局部联合节点集合同属于一个页: $\forall fs \in FS: [FT(fs) \neq global \Rightarrow \exists s \in S: fs \subseteq P_s]$;

(9) PP 是根页(prime page)的多元集合;

(10) R 是一系列时间标识;

(11) r_0 为初始时间, $r_0 \in R$;

(12) C 是颜色集合, 对一个库所来讲, $C(P) = \{a_{i,1}, \dots, a_{i,m}\}$, $u_i = |C(p_i)|, i=1, \dots, n$ 。

用 HTCPN 来建立飞机维修保障过程模型的好处是可以由其层次性实现简洁层次化的建模, 用其时间特性弥补 Petri 网性能分析的不足, 用颜色来区别资源的不同。

3 飞机维修保障过程分析

作为一种复杂的高技术装备, 飞机的维修保障过程具有自身的特点, 不仅需要考虑到飞机本身的类型、结构、任务范围等因素, 还必须考虑到整个使用与维修环境、保障设施等。这是一个复杂与动态的相互作用过程, 如何使用模型把这个过程准确的表达出来, 是飞机维修保障建模中的主要问题之一。为解决这一问题, 需要首先对飞机的整个使用与维修保障过程进行分析。飞机的使用与维修保障过程主要包括制定训练计划、飞行训练、维护保养与维修四大模块, 其中各个模块又包含若干子模块。

飞机根据飞行训练计划进行相关的飞行准备并完成任务。每次任务开始前与结束后, 维修保障人员对检测到或任务中发生的故障进行判别, 并通过保障部门获取相关保障资源, 予以

相应级别的维修保障。在实际的飞机使用维修保障过程中, 由于飞机故障发生的随机性和飞行任务的多样性, 各部分工作是相互作用、相互交叉进行的。为了保障飞行任务的顺利完成和故障飞机的最快恢复, 在飞机的使用和维修之间, 存在着对人员与保障设备的竞争。同时在为任务指派飞机时, 根据飞机状况也有一个优先顺序的决策。因为这种相互之间不确定的联系, 仅仅针对某一部分因素建立模型将不能得到理想的结果, 建立飞机整个使用维修保障过程的模型是非常必要的。

4 飞机维修保障过程模型

论文以 CPN-Tools 作为建模及仿真平台, CPN-Tools 是丹麦奥胡斯大学的 Petri 网研究中心开发的 Petri 网建模仿真平台, 开发语言为 C++, 支持 Linux 与 Windows 操作系统, 支持层次赋时着色 Petri 网的建模与分析, 支持二次开发^[6,7]。

4.1 飞机维修保障过程顶层模型

如上所述, 飞机维修保障过程顶层模型包括四个主要模块, 如图 1 所示。

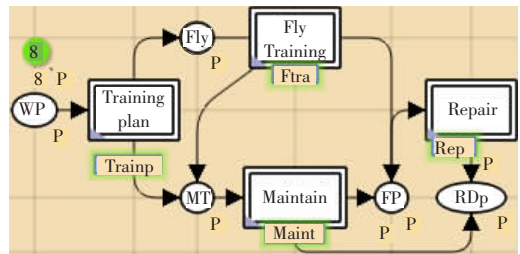


图 1 飞机维修保障过程顶层模型

其中, 库所 WP 表示初始状态等待安排的飞机, $8p$ 表示其初始标有 8 架飞机; Fly 表示将参加飞行训练的飞机; MT 表示将进行维护保养的飞机; FP 表示有故障的飞机; RDp 表示经过修理和维护保养的处于完好状态的飞机。

当处于等待状态的飞机进入飞行训练计划后(Training plan), 将分为飞行训练与维护保养两部分。进行飞行训练的飞机经过技术准备检测, 无故障的执行飞行任务, 有故障的进入 FP 等待维修, 执行完飞行任务后进入 MT 等待维护保养。进入 FP 的飞机经过修理(Repair)后进入 RDp。

4.2 飞行训练计划子模块

飞行训练计划子模块比较简单, 其主要功能就是将待命飞机分为飞行训练与维护保养两部分, 如图 2 所示, 包括制定计划、准备飞行任务与准备维修保养三个变迁。

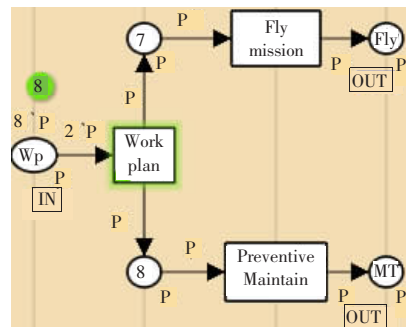


图 2 飞行训练计划子模块

4.3 飞行任务子模块

飞行任务子模块包括测试、飞行准备、飞机返回三个变迁。

库所 FF 表示准备执行飞行任务的飞机,库所 FI 表示正在飞行的飞机。如图 3 所示。

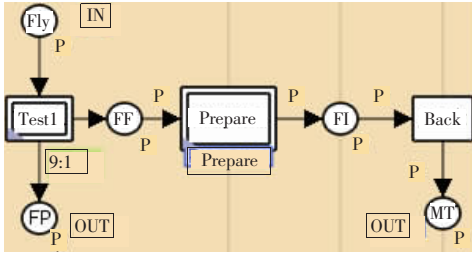


图 3 飞行任务子模块

对于进入飞行任务子模块的飞机,经过通电检测(Test)合格的进入飞行技术准备(Prepare),不合格的进入故障飞机库所(FP)等待修理。完成飞行任务返回的飞机(Back)进入 MT 等待维护。

飞行技术准备(Prepare)二级子模块是该模块中比较重要的变迁,将其展开如图 4 所示。

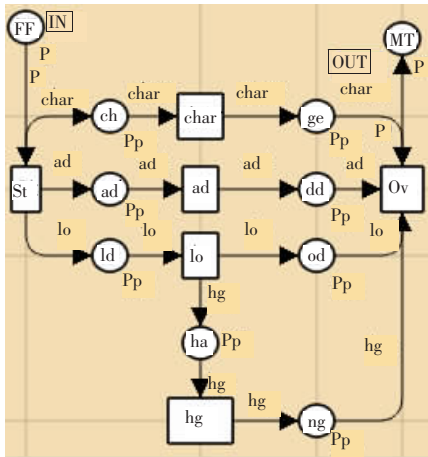


图 4 飞行技术准备二级子模块

飞行准备开始(Start1)后,飞机进入各种准备步骤,包括 Charge, add, load 和 hang, 分别对应飞行准备的“充、填、加、挂”四个步骤,需要说明的是 Charge, add, load 三个步骤可以同时进行,是并行的,而 hang 必须在 load 之后进行与 load 串行。

4.4 维护保养子模块

维护保养子模块主要包括测试、与保养两个二级子模块(图略)。飞机经过测试后无故障的进行保养,有故障的进入 FP 准备维修。其中,保养二级子模块 Maintenance 包含 brush, wash, change, charg 四个主要变迁,分别对应飞机保养中的“擦、洗、换、充”四个步骤,与图 4 类似。其中,brush, wash, change 三个步骤可以并行,而 charg 需要在前三项完成之后进行。

4.5 修理子模块

修理子模块包括修理级别分析(LORA)、一级维修(1levelRE)、二级维修(1levelRE)、修理结束(Over)几部分如图 5 所示。

故障飞机由 FP 首先进入 LORA,确定修理级别(本文中仅探讨一二两级部队修理),然后分别进行各级修理,结束后将作为完好飞机送至 RDp 库所。

其中,影响 LORA 修理级别分析结果的因素很多,模型中难以将所有故障枚举,但根据统计可以得知分析结果在一定条

件下是符合某种分布的,这里按照进入一、二级维修的飞机服从以下二项分布进行建模及仿真分析。

$$P=\{X=k\}=\binom{n}{k}0.3^k(1-0.3)^{n-k}$$

一级修理与二级修理过程基本相似,这里给出一级修理的模型如图 6 所示。

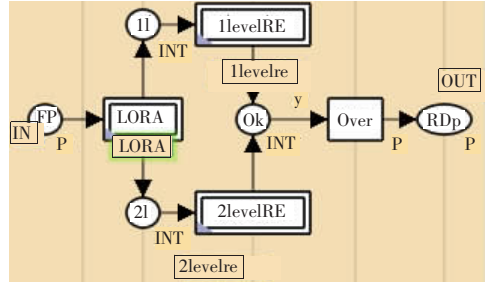


图 5 修理子模块

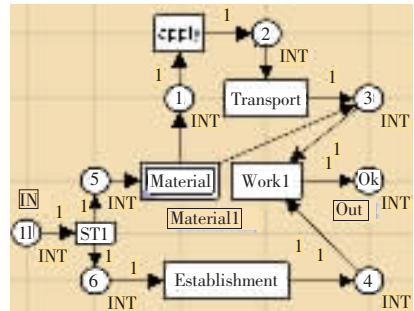


图 6 一级修理二级子模块

进入库所 11 中的托肯表示飞机将进行一级修理。修理准备(ST1)开始以后维修器材准备(Material1)与维修设施准备(Establishment)将同时进行。维修器材如果不足可以向上级申请(Apply),经过运输(transport)后到达 3 库所,其中准备的不同器材和设施可以用不同类的托肯表示(即着色)。在两项准备都完成以后将开始工作(work1),修竣的飞机将送至 RDp 库所。

5 模型分析

Petri 网由于其结构、参数和初始状态标识的不同,而使其状态转换过程表现出不同的特性。在用 Petri 网建模后,就可以对系统进行特性分析,以检查实际系统的特性。对系统进行特性分析可采用分析和仿真两种方法进行研究。CPN-Tools 支持状态方程分析与时间仿真^[8]。

通过对模型相应的变迁、弧、以及库所赋时,可以仿真实际工作的时间。有了系统的运行时间以后,我们就可以对系统的很多性能进行分析和评价。例如,在假设只有一个维修单元的情况下,将模型进行多次仿真运行,针对维修过程得到如表 1 所示的数据。

其中:

τ_{ia} 表示第 i 架飞机到达时刻;

τ_{ri} 表示第 i 次维修单元就绪时刻;

τ_{si} 表示第 i 架飞机维修开始时刻;

t_{fi} 表示第 i 架飞机修竣时刻;

t_{ui} 表示第 i 架飞机维修工作时间; $t_{ui}=\tau_{ri}-\tau_{si}$;

t_{mi} 表示第 i 架飞机等待维修单元时间;

表1 模型仿真平均数据

τ_{ai}	τ_{ri}	τ_{si}	τ_{fi}	l_{ai}	l_{ni}	l_{ci}	l_i
2	0	2	11	9	0	0	9
3	11	11	13	2	8	0	10
7	13	13	20	7	6	0	13
14	20	20	25	5	6	0	11
17	25	25	43	18	8	0	26
20	43	43	46	3	23	0	26
35	46	46	69	23	11	0	34
61	69	69	83	14	8	0	22

$$t_{mi} = \begin{cases} \tau_{ri} - \tau_{ai}, & \tau_{ri} > \tau_{ai} \\ 0, & \tau_{ri} \leq \tau_{ai} \end{cases}$$

t_{ei} 表示维修单元等待第 i 架飞机时间:

$$t_{ei} = \begin{cases} \tau_{ai} - \tau_{ri}, & \tau_{ai} > \tau_{ri} \\ 0, & \tau_{ai} \leq \tau_{ri} \end{cases}$$

装备等待维修单元时间 t_{mi} 反映了装备对维修单元需求的满足情况, 维修单元等待装备时间 t_{ei} 反映了维修单元的利用率。通过计算, 可以进一步得到一些战场指挥员进行决策时可以作为直接参考的参数:

飞机平均维修时间 $T = \bar{t}_i$;

飞机平均净维修工作时间: $T_w = \bar{t}_{wi}$;

飞机平均等待时间: $T_m = \bar{t}_{mi}$;

维修单元平均等待飞机时间: $T_e = \bar{t}_{ei}$;

飞机平均等待队列长度: $L = T_m / T_w$;

维修单元利用率: $A = T_w / (T_w + T_e)$ 。

例如, 为了确定最佳战场维修资源配置方案, 我们可以通过仿真给出不同维修单元数量情况下维修单元利用率与飞机平均等待队列长度之间的关系如图 7 所示。

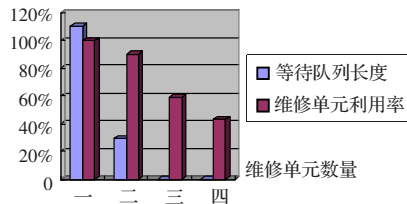


图7 维修单元利用率与平均等待队列长度的关系

(上接 224 页)

参考文献:

- [1] CLERC M. The swarm and queen: towards a deterministic and adaptive particle swarm optimization[C]//Proceedings of CEC 1999. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1999: 1951-1957.
- [2] SUN J, FENG B, XU W B. Particle Swarm Optimization with particles having quantum behavior[C]//Proceedings of 2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004: 325-331.
- [3] Sun J. Particle Swarm Optimization with particles having quantum behavior[C]//Proceedings of 2004 Congress on Evolutionary Computation, 2004: 325-331.
- [4] Eberhart R C, Shi Y. Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization[C]//Proceedings of IEEE International Congress on Evolutionary Computation, 2000, V1: 84-88.
- [5] Sun J. A global search strategy of quantum-behaved Particle Swarm Optimization[C]//IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent

可以看出, 当维修单元数量为 1, 平均飞机等待队列长度为 1.1, 也就是说在整个过程中平均有 1.1 架飞机一直处于等待维修的状态时, 不能得到及时的维修, 同时维修单元在不停工作, 没有空闲休整时间 (A 为 100%)。当维修单元数量达到 3 时, 平均飞机等待队列长度为 0, 也就是说所有飞机到达即可维修, 不需等待, 同时维修单元利用率约为 60%。维修单元数量达到 4 时, 平均飞机等待队列长度为 0, 维修单元利用率约为 40%。

6 结论

论文给出的飞机维修保障过程模型, 包括了飞机的任务制定、执行任务、维护保养和分级别修理的内容, 通过对模型的仿真运行, 即可得到飞机战备完好率、维修人员与保障设备的利用率, 以及航材备件的供应情况等等。结合数学分析结果与仿真结果, 可以分析过程瓶颈、调整资源配置参数、优化资源调用申请时间, 优化维修过程等。模型具有较好的可扩展性, 可用于飞机维修保障的进一步研究, 也可作为更高层次军事系统仿真的组成部分。(收稿日期: 2007 年 3 月)

参考文献:

- [1] 张恒喜, 朱家元. 军用飞机型号发展工程导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 曲长征. 基于赋时有色 Petri 网的维修过程模型 [J]. 计算机仿真, 2006.
- [3] 汪凯. 基于 Petri 网的军用飞机使用维修保障建模[J]. 飞机指挥技术学院学报, 2005(12).
- [4] 翟庆刚. 军用飞机维修保障仿真建模[J]. 航空维修与工程, 2006(1).
- [5] Jensen K. A brief introduction to colored Petri nets[EB/OL]. (2005). Meta Software Corporation and Department of Computer Science, University of Aarhus, Denmark, <http://www.daimi.aau.dk/~kjensen/>.
- [6] Jensen K. Colored Petri nets: basic concepts, analysis methods and practical use[M]. [S.l.]: Springer-Verlag, 1997.
- [7] Kristensen L M, Jensen K. The practitioner's guide to colored Petri nets[J]. International Journal on Software Tools for Technology, 1998.
- [8] Jensen K. CPN Tools occurrence graph manual[EB/OL]. (2005). Meta Software Corporation and Department of Computer Science, University of Aarhus, Denmark. <http://www.daimi.aau.dk/~kjensen/>.

Systems, 2004: 111-116.

- [6] Sum J, Feng B, Xu W. Particle Swarm Optimization with particles having quantum behavior[C]//IEEE Proc of Congress on Evolutionary Computation, 2004.
- [7] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm explosion, stability and convergence in a multi-dimensional complex space[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 6: 58-73.
- [8] 刘静秋. 最小二乘法在系统辨识中的应用[J]. 北京建筑工程学院学报, 2004, 20(3).
- [9] 刘建成, 刘学敏. 极大似然法在水下机器人系统辨识中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(5).
- [10] 张彤, 张华, 王子才. 浮点数编码的遗传算法及其在应用[J]. 哈尔滨大学学报, 2000, 32(4): 59-61.
- [11] 任子武, 余治. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1).
- [12] 李晓斌, 左磊, 于波. 一种自适应免疫遗传算法及其在系统辨识和参数优化中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(3).