

## 面向 Agent 的 CPN 及其在航天装备体系评价中的应用\*

沈如松<sup>1</sup> 张育林<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 东风航天中心, 甘肃 兰州 732750)

摘要: 为弥补 Agent 和 Petri 网在各自建模中的缺陷, 分析了二者现有的几种结合方式, 给出面向 Agent 的着色 Petri 网(AOCPN)的定义及其运行规则和分析方法。利用 AOCPN 建立了以海上目标监视和打击为任务的航天装备体系评价模型, 对其逻辑特性和作战效能进行了分析。建模过程和仿真结果表明, AOCPN 能够完整描述体系的逻辑和物理特性, 可用于全面分析评价体系的性能和对作战结果的影响, 有效追踪体系执行任务的过程。

关键词: 航天装备体系; 着色 Petri 网; Agent; 逻辑性能; 作战效能

中图分类号: V457 文献标识码: A

## Agent-oriented CPN and Its Application to the Evaluation of Space Equipment Architecture

SHEN Ru-song<sup>1</sup>, ZHANG Yu-lin<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Dongfeng Space Center, Lanzhou 732750, China)

**Abstract:** To remedy the defects of modeling by using of Agent and Petri Net individually, the ways of combining Agent and Petri net nowadays are reviewed, and Agent-oriented Petri Net (AOCPN) is put forward. The running rules and analytic methods of AOCPN are presented. With keeping targets on sea under surveillance and striking them as its tasks, the evaluation model of the space equipment architecture is built and its logical characteristics and operational effectiveness are analyzed. The modeling process and simulation results show that AOCPN can describe the logical and the physical functions of the architecture completely, and be applied to analyze the performance of the architecture and evaluate its influence on combat outcomes comprehensively. The procedure of the architecture carrying out the tasks can be traced effectively.

**Key words:** space equipment architecture; colored Petri net; Agent; logical performance; operational effectiveness

Agent 在军事系统建模与仿真中得到比较好的应用<sup>[1]</sup>,但在分析系统体系结构,尤其是逻辑特性方面略显不足,而这些特性对正确建立和评价军用装备体系有很重大的意义。Petri 网在离散事件动态系统中是一种逻辑层次的建模方法,很适于表示系统中的并行、同步、冲突及因果依赖等关系,分析系统的动态特性。但 Petri 网的缺陷是对系统的仿真模拟能力不足。因此 Petri 网在军事上的应用主要侧重于指挥控制结构和逻辑分析<sup>[2]</sup>。如能将 Agent 和 Petri 网结合起来构建离散事件动态系统模型,可望使它们扬长避短、相得益彰,一方面使利用 Petri 网建模简单直观,同时提高其仿真模拟能力,又可在发挥 Agent 特长的情况下增加模型的体系结构分析能力,从而将仿真分析和逻辑结构分析结合起来。

从 20 世纪 90 年代开始,学者们从不同角度探讨了 Agent 和 Petri 网结合方式及建模方法。如 Jin 等<sup>[3]</sup>采用非再生随机 Petri 网建立和分析多 Agent 系统中 Agent 的概率行为。Xu 等<sup>[4]</sup>扩展面向对象 Petri 网,侧重于利用 Petri 网构建 Agent,在此基础上利用 Petri 网表示 Agent 之间的消息交互,并利用 Petri 网的理论分析整个系统的性能。Hiraishi<sup>[5]</sup>基于最基本的 P/T 网,以 Agent 构造令牌,Agent 本身也由 P/T 网构造,形成网中网。Abouaissa 等<sup>[6]</sup>用 Agent 表示系统元模型中的角色,体现 Agent 的行为,Agent 的相

\* 收稿日期 2005 - 04 - 16

基金项目:十五 国家部委基金资助项目(413200102)

作者简介:沈如松(1971—),男,讲师,博士生。

互关系遵循角色间的关系,将 Agent 作为着色 Petri 网中的变迁,构建系统的着色 Petri 网模型分析系统的性能。在 Petri 网中,位置一般代表实体或角色,有明确的含义,变迁表示事件的执行或实体间的交互关系,因此用 Agent 构建位置节点模型更直观,更易理解。

## 1 面向 Agent 的着色 Petri 网

### 1.1 AOC PN 的定义

定义 1 AOC PN 定义为七元组  $AOC PN = (A, T, C, E, W, \lambda, M_0)$ ,其中  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  为以 Agent 描述的位置集合,  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  为变迁集合,且  $A \cap T = \emptyset, A \cup T \neq \emptyset$ ;  $E$  为有向弧集合,反映位置和变迁节点间的关系,  $e(a, t) \in A \times T$  和  $e(t, a) \in T \times A$  分别表示从位置  $a$  到变迁  $t$  和从变迁  $t$  到位置  $a$  的有向弧,全部弧的集合  $E \subseteq A \times T \cup T \times A$ ;  $C$  为颜色集合,  $C = \{\alpha(a) | a \in A\}$ ,定义每个位置中令牌的数量和属性,表示 Agent 接收和产生的消息;  $W$  为有向弧的权的集合,  $w(a, t) \in Z^+$  和  $w(t, a) \in Z^+$ ;  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$  为变迁平均实施速率集合,具有实际的物理意义;  $M_0: A \rightarrow \{0, 1, N\}$  为初始标识,定义系统初始状态,反映初始令牌在网的位置中的分布情况。

定义 2 Agent 定义为四元组  $A_i = (IO, A_u, K, A_c)$ ,其中  $IO$  为输入输出接口,负责与其它 Agent 和环境交互,通过  $IO$  输入输出消息;  $A_u$  为 Agent 的属性,包含描述 Agent 的性能指标和动作所涉及的参数;  $K$  为 Agent 中的知识库,以规则的形式给出;  $A_c$  为 Agent 中的动作,分为自主动作和响应动作。自主动作是在无外界直接操纵的情况下,根据内部状态和感知的环境信息,决定和控制自己的行为。响应动作是对外界消息或请求做出反应,根据需要访问知识库,按照规则采取相应动作。

### 1.2 AOC PN 的运行和引发规则

变迁皆为瞬时变迁,将时间延迟即任务在每个 Agent 中等待和执行的时间赋予位置。AOC PN 的引发规则与普通 Petri 网没有本质区别,只是令牌在经过变迁进入位置后会引发一系列动作。具体过程为:上一位置中的令牌经过引发变迁后通过输入接口进入 Agent,Agent 根据令牌属性确定应采取的动作并做出相应的反应,变更令牌属性,通过输出接口引出此位置产生的令牌,引发变迁将令牌送入下一 Agent。

### 1.3 AOC PN 的分析方法

由于 AOC PN 将 Agent 抽象为位置,因此可同样采用 Petri 网的有关理论分析 AOC PN 的有界性、可达性、活性、冲突等逻辑特性。冲突通过 Agent 的输出消息定义令牌的流向来解决,体现了知识和决策的作用。将时间延迟赋予位置,从其随机特性来说等价于将时间延迟赋予变迁,因此可参照随机 Petri 网的有关分析方法分析系统的时间特性。例如,如果认为各位置的时间延迟服从负指数分布,则 AOC PN 同构于马尔科夫链,这样通过构造求解同构的马尔科夫链,可以分析整个系统的某些性能,如时间延迟、Agent 的利用率等。结合构造的 Agent,可对系统进行仿真,分析系统的效能。

## 2 基于 AOC PN 的航天装备体系评价

### 2.1 航天装备体系评价模型

本文以航天装备体系为例,探讨 AOC PN 在装备体系结构分析和作战效能评估中的应用。体系配置为光学侦察卫星(若干)、海洋监视卫星(若干)、信息处置中心、卫星指控中心、地面站(若干)、作战指挥中心、弹道导弹(若干),其任务是对海上目标进行监视和打击。

根据体系配置、作战想定和设想的敌我态势,利用 AOC PN 构建的航天装备体系评价模型如图 1 所示。各 Agent 和变迁的含义如表 1 所示。Agent 的构造要结合实体模型。

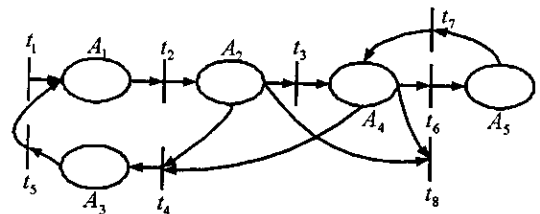


图 1 航天装备体系作战效能评估模型

Fig.1 Operational effectiveness evaluation model of the space equipment architecture

表 1 各 Agent 和变迁的含义

Tab.1 The meaning of Agents and transitions in fig. 1

Agent(位置)	变迁
$A_1$ : 侦察卫星	$t_1$ : 目标进入战区
$A_2$ : 信息处置中心	$t_2$ : 请求处理信息
$A_3$ : 卫星指控中心	$t_3$ : 分发信息
$A_4$ : 作战指挥中心	$t_4$ : 确认目标
$A_5$ : 作战单元	$t_5$ : 请求对特定地区侦察
	$t_6$ : 指挥攻击目标
	$t_7$ : 报告攻击情况
	$t_8$ : 结束任务

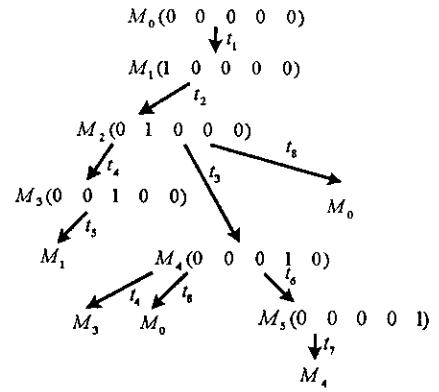


图 2 图 1 对应的可达图

Fig. 2 The reachable diagram of fig. 1

### 2.2 航天装备体系性能分析

利用可达树分析法可得在给定初始标识下的可达图如图 2 所示。通过分析可达图可知：

(1) 可达标识集为有限的, 因此所构造的 Petri 网是有界的, 也就意味着此体系结构中各物理实体处理能力可以满足要求 (2) 在给定初始标识  $M_0$  下, 标识  $M_5$  可达, 意味着整个体系配置可保证完成攻击任务 (3) 在给定初始标识下任何变迁都可以引发, 即所构造的 Petri 网中不存在死锁, 逻辑结构是合理的 (4) 变迁  $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_8$  及变迁  $t_4$ 、 $t_6$ 、 $t_8$  会产生冲突, 这需要根据 Agent 的执行情况来决定引发, 体现了 Agent 的自主性、协作性和交互性 (5) 从目标出现到完成攻击目标的最短引发顺序为  $M_0 \xrightarrow{t_1} M_1 \xrightarrow{t_2} M_2 \xrightarrow{t_3} M_4 \xrightarrow{t_6} M_5$ , 这一引发过程是影响装备体系作战效能最重要的环节。

如果假设每个 Agent 中令牌到达服从泊松分布, 处理时间服从负指数分布, 则令牌在 Agent 中的延迟时间服从负指数分布, 图 1 所给出的模型同构于连续时间马尔科夫链, 对应的马尔科夫链如图 3 所示。图中有向弧上标注的为变迁引发后令牌在 Agent 中平均逗留时间的倒数。利用马尔科夫随机过程的有关理论可分析体系的瞬态和稳态性能。

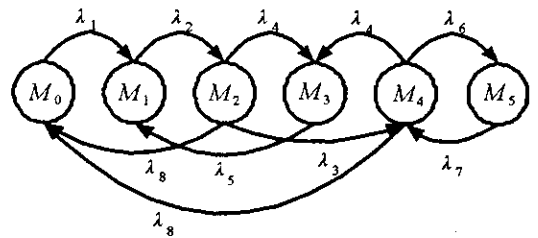


图 3 图 1 对应的马尔科夫链

Fig. 3 The corresponding Markov chain of fig. 1

### 2.3 航天装备体系作战效能评估

评价航天装备体系最重要的指标之一是其作战效能, 即装备在预期或规定使用环境和使用方式条件下, 由有代表性的人员使用该装备完成规定任务的能力。本文构建的航天装备体系的最终目的是打击目标, 因此定义导弹命中目标概率为作战效能指标。图 4、图 5 和表 2 给出的是根据图 1 构建的模型

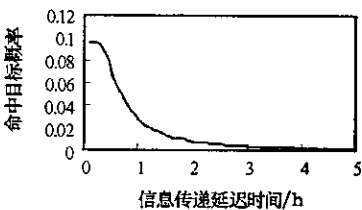


图 4 信息传递延迟时间与作战效能的关系

Fig.4 The relation between delay time of information relay and operational effectiveness

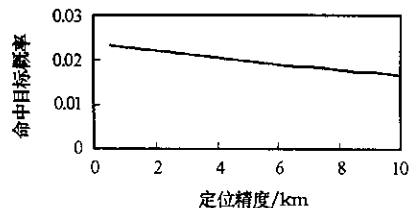


图 5 卫星定位精度对作战效能的影响

Fig.5 Effect of location precision of satellite on operational effectiveness

得到的一些仿真结果。其中图 4 为光学侦察卫星定位精度 500m 时信息传递延迟时间与作战效能的关系,图 5 为信息传递延迟 1h 情况下卫星定位精度对作战效能的影响,表 2 给出在信息传递延迟 1h、光学成像侦察卫星定位精度为 500m、海洋监视卫星定位精度为 3675m 时,卫星不同工作方式下体系的作战效能。

表 2 不同工作方式下体系的作战效能

Tab.2 Operational effectiveness of the architecture in different operating ways

卫星组合	发现目标概率	命中目标概率
电子侦察卫星	0.7446	0.071
光学成像卫星	0.2167	0.023
双星配合	0.9699	0.1248
双星不配合	0.7999	0.0786

由图 4 可知,信息传递延迟时间对导弹最终命中目标的概率影响十分显著,在给定的初始条件下,从获取信息到导弹打击目标的时间达到 1h 时,导弹命中目标的概率已变得很小。这是由于随着信息传递延迟时间的增大,要打击的动目标所处的不确定范围随之增大,当此时间增大到一定程度时,目标所处的不确定范围已超出导弹末端导引头搜索捕获目标的能力。基于同样的原因,再加上信息传递延迟所导致的目标不确定范围已远大于卫星对目标的定位精度,因此在这种情况下,相对信息传递延迟时间,卫星定位精度对导弹命中目标概率的影响并不显著,如图 5 所示。由表 2 可知,在同样初始条件下,两类侦察卫星不同的配合方式对作战结果有很大的影响,这是由于两类卫星各有优缺点,配合工作能使它们扬长避短。从表 2 还可看到,光学成像侦察卫星单独工作的作战效能很小,主要原因是卫星覆盖宽度太窄,无法有效覆盖到目标,而如果利用海洋监视卫星所获得的目标先验信息,则将大幅提高体系的作战效能。

### 3 结束语

在从顶层构建装备体系模型时各物理实体相对独立,涉及复杂的动作,用 Agent 表述更合适。但这些实体之间互相关联、互相协作构成了体系,需要结合 Petri 网来反映它们之间的逻辑关系。从建模过程和仿真结果可以看出,本文所提出的 AOC PN 构造简单,描述系统直观,方便利用 Petri 网的一些理论分析系统的逻辑结构,同时又可充分发挥 Agent 在构模方面的优点,保证了所构建模型的仿真能力,从而能够完整描述体系结构的逻辑和物理特性,弥补单纯采用 Agent 或 Petri 网的缺陷,全面分析评价体系的结构性能和作战效能。此外,通过研究分析 AOC PN 的引发序列,可有效追踪任务的执行过程,为分析和改进装备使用方式提供依据。

### 参考文献:

- [1] Gonzales D, Moore L, Permin C, et al. Assessing the Value of Information Superiority for Ground Forces-Proof of Concept[R]. RAND DB-339-OSD, 2001.
- [2] Shin I, Levis A H. Performance Prediction Model Generator Powered by Occurrence Graph Analyzer of Design/CPN[C]. Proceedings of 2nd Workshop on Practical Uses of Coloured Petri Nets and Design/CPN, Aarhus University, Denmark, Oct. 1999.
- [3] Jin Q, Yano Y, Sugawara Y. Modeling and Analysis of Agents' Probabilistic Behavior by a Non-Regenerative Stochastic Petri Net[C]. Proceedings of IEEE International Conference on SMC, 1996.
- [4] Xu H, Shatz S M. An Agent-based Petri Net Model with Application to Seller/Buyer Design in Electronic Commerce[C]. Proceedings of 5th IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 2001.
- [5] Hiraishi K A Petri-net-based Model for the Mathematical Analysis of Multi-agent Systems[C]. Proceedings of IEEE International Conference on SMC, 2000.
- [6] Abouaissa H, Nicolas J C, Czesnalowicz E. Formal Specification of Multi-Agent Systems: Approach based on Meta-Models and High-Level Petri Nets-Case Study of a Transportation System[C]. Proceedings of IEEE International Conference on SMC, 2002.

