

## 基于时间 Petri 网理论模型的 MISS 建模与仿真研究

李琳琳, 韩艳军, 焦阳  
(火箭军工程大学, 西安 710025)

**摘要:** 针对时效性指标量化难的问题, 主要对时间 Petri 网理论模型进行了研究, 结合 Petri 网模型时间等效变换关系, 对基于军事信息服务体系 (MISS) 的防空作战进行 Petri 网建模, 并推导了整个作战过程的等效时延。在此基础上, 利用 Matlab 软件, 对系统的时效性能指标进行了仿真分析, 验证了该方法的有效性。

**关键词:** 军事信息服务体系; Petri 网; 仿真; 防空作战

**中图分类号:** V57      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2016)10-0041-04

## Modeling and Simulation of MISS Based on Time Petri Net

LI Lin-lin, HAN Yan-jun, JIAO Yang  
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** It is difficult to make quantitative analysis to time efficiency of a system. This paper mainly focuses on the theoretic model of time Petri net. Based on the time equivalent transformation of Petri net model, models for the air defense combat based on the Military Information Service System (MISS) are established with the Petri net. Also, the equivalent delay of the whole operational process is derived. On this basis, analysis is made to the system time efficiency through simulation with Matlab, and the effectiveness of the method is verified.

**Key words:** military information service system; Petri net; simulation; air defense combat

### 0 引言

随着信息技术的飞速发展及其在军事领域的广泛应用, 以信息为基础的作战已经成为高技术战争的主要模式<sup>[1]</sup>, 传统 C/S 架构和基于构件的金字塔状指挥信息系统集成方案已经不能满足未来联合作战对信息的需求。近年来, 随着 SOA 技术的迅猛发展, 军事信息服务的思想也越来越深入人心, 国内外对军事信息服务的概念体系、信息服务建模、服务效能评估都进行了有关的研究。

军事信息服务 (Military Information Service System, MISS) 体系采用面向服务的架构和相关技术, 将侦察探测、指控控制、通信、火力打击等系统和资源以服务的形式进行封装, 形成一个松散耦合的开放式结构, 为战略、战役和战术层次的作战指挥提供信息服务, 是夺取未来战争信息优势的关键所在。但是作为一种新型体系结构, MISS 服务作战的能力尚未得到实践检验,

因此, 采用技术手段对其进行评估是十分必要的。

目前, 对 MISS 仿真评估的研究主要是从满足作战需求的能力指标出发, 建立多级多层指标体系, 进而进行综合仿真评估。文献[2]从系统技术、作战应用和完成任务等能力出发, 以信息服务能力指标评估为例, 介绍了基于仿真试验的评估方法; 文献[3]采用解释结构模型法, 构建了天基信息服务体系能力评价指标体系, 并进行了综合评估; 文献[4]设计了两种情报服务网络方案, 并结合提出的效能指标进行了仿真对比分析。在评估指标体系的构建中, 时效性都是重要的评价指标, 也是 MISS 服务信息化战争的优势所在。本文提出一种基于时间 Petri 网的网络模型对 MISS 进行建模和时间性能分析, 发现服务瓶颈, 满足作战需求。

### 1 时间 Petri 网基本理论

Petri 网作为一种图形和数学兼并的模型工具, 具有两方面的显著特点: 1) 作为一种图形工具, 能形式化地描述系统的并发、同(异)步、冲突等行为特性; 2) 作为一种具有严格定义的数学对象, 可很好地描述和分析系统的不确定性和随机性<sup>[5]</sup>。时间 Petri 网在普通 Petri 网的基础上为库所或变迁引入时延参量, 使其不仅能够描述系统在逻辑层次上的关系, 还能适度地表

收稿日期: 2015-09-11

修回日期: 2015-10-11

基金项目: 国家“八六三”计划重点资助课题(2011701AA221)

作者简介: 李琳琳(1974—), 女, 辽宁营口人, 博士, 副教授, 研究方向为信息服务体系建模与仿真。

征系统在时间层次上的关系。假设一个基本事件  $X$  要求在时间段  $[t_1, t_2]$  内实施并完成, 则对应的时间 Petri 网模型如图 1 所示。

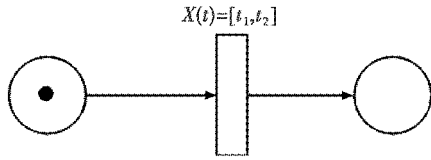


图 1 时间 Petri 网模型

Fig. 1 The model of time Petri net

用时间 Petri 网模型表示的模型应该满足以下基本要求<sup>[6-7]</sup>:

- 1) 一个 workflow 网只能有一个源位置库所(起始状态)和汇位置库所(结束状态);
- 2) 每一个变迁(位置)在一条有效的路径上;
- 3) 在任何情况下, 过程最终将被终结, 在过程终结时, 标识到达位置, 其他位置没有标识;
- 4) 不存在死的变迁, 即对于任何一个 workflow 网络中的变迁经过某种途径必然可以实现。

## 2 Petri 网模型等效变换关系

Petri 网模型的基本结构为顺序、选择、并行和循环等, 任何复杂的工作流模型都可由上述基本结构复合而成<sup>[8]</sup>。下面给出 4 种基本结构模型的时间等效变换关系。

### 2.1 顺序结构

如果一个变迁直接导致了另外一个变迁的执行, 则称这两个变迁的发生是顺序的, 模型如图 2a 所示。

顺序结构模型的时间等效关系为

$$(T_1, T_2) \rightarrow T[t_1 + t_3, t_2 + t_4] \quad (1)$$

即顺序模型的两变迁  $T_1, T_2$  在时间性能上可等效为变迁  $T$ 。

### 2.2 选择结构

在选择结构模型中, 选择由工作流的性质决定, 是一种确定的选择, 模型如图 2b 所示。

选择模型的时间等效关系为

$$(T_1, T_2) \rightarrow T[\min(t_1, t_3), \max(t_2, t_4)] \quad (2)$$

### 2.3 并行结构

如果两个变迁是并行关系, 则这两个变迁没有直接的映射关系, 并行结构模型如图 2c 所示。

并行模型的时间等效关系为

$$(T_1, T_2) \rightarrow T[\max(t_1, t_3), \max(t_2, t_4)] \quad (3)$$

### 2.4 循环结构

循环 Petri 网模型一般用  $k (k \geq 1)$  表达执行的次数, 等效时间模型最早和最晚实施时间都扩大为原来的  $k$  倍。模型如图 2d 所示。

循环模型的时间等效关系为

$$(T_1, k) \rightarrow T[k(t_1, t_2)] \quad (4)$$

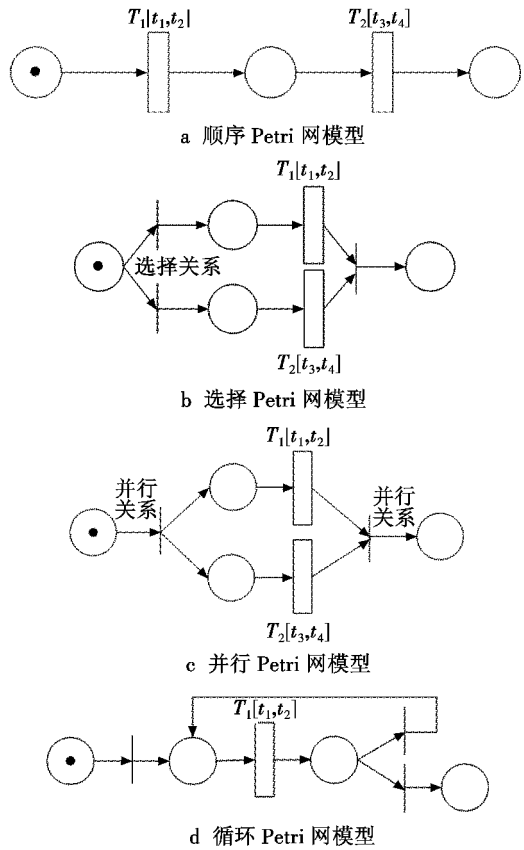


图 2 Petri 网模型的几种基本结构

Fig. 2 Basic structures of Petri net

## 3 MISS 时序 Petri 网建模与分析

### 3.1 防空过程服务化描述

整个服务化作战流程如图 3 所示。

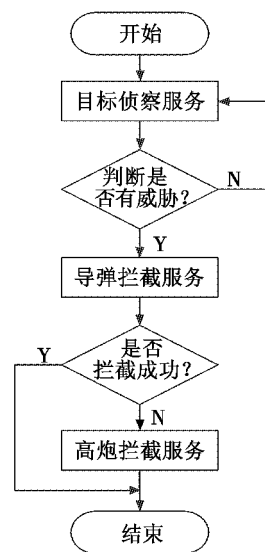


图 3 服务化作战流程

Fig. 3 The operational process of service

在防空作战过程中,一般采用导弹和高炮相结合的方式联合反导作战。在导弹飞行的各个阶段,根据卫星、雷达等各种侦察手段汇总的侦察信息进行威胁判断,定下作战决心,并启动导弹拦截服务,对导弹未成功拦截的目标启动高炮拦截服务,作战行动结束。

### 3.2 Petri 网建模

按照 workflow 模型与 Petri 网的相应转换规则,转换得到的防空作战 Petri 网模型如图 4 所示。

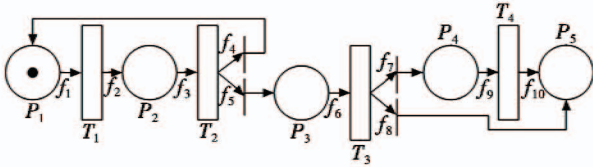


图 4 防空作战 Petri 网模型

Fig.4 The Petri model of air defense combat

Petri 网模型中各变迁的含义如表 1 所示。

表 1 各变迁对应的含义信息

Table 1 The meaning of the transitions

变迁	含义	变迁	含义
$T_1$	调用目标侦察服务	$T_3$	导弹拦截服务
$T_2$	威胁判断服务	$T_4$	高炮拦截服务

### 3.3 Petri 网时序模型转换

在防空反导 Petri 网模型中,主要包括了 4 个重要的变迁,对各变迁赋以完成时间限制,即得到了防空反导的时序 Petri 网模型。

#### 1) 调用目标侦察服务。

目标侦察服务是多种服务手段的高效融合,包括红外侦察、成像侦察、雷达侦察、数据融合、信息传输等服务。调用目标侦察服务的时间主要由多种侦察手段数据融合处理的时间和信息传输的时延组成,仿真运行时可设定为服从正态分布的随机函数,即  $T_1 \sim Normal(\mu_1, \sigma_1)$ 。

#### 2) 威胁判断服务。

威胁判断服务用于对目标侦察所获得的实时信息,结合相应的辅助决策软件,进行威胁判断分析,确定来袭目标是否构成威胁。威胁判断的时间一般比较固定,可设定为一定范围内均匀分布的函数,即  $T_2 \sim Uniform(a, b)$ 。

#### 3) 导弹拦截服务。

导弹拦截服务是指开始启动导弹拦截到拦截结果传回指挥所的整个服务过程,包括了侦察信息、信息传输、导航定位、毁伤评估等服务。时延主要由导弹飞行时延和信息传输时延组成,仿真运行时假定为服从正态分布的随机函数,即  $T_3 \sim Normal(\mu_3, \sigma_3)$ 。

#### 4) 高炮拦截服务。

高炮拦截服务是指开始启动高炮拦截到结果传回

指挥所的整个过程,包括了雷达侦察、信息传输、毁伤评估等服务,时延同样假定为服从正态分布的随机函数,即  $T_4 \sim Normal(\mu_4, \sigma_4)$ 。

根据模型满足合理性的判定,利用线性推理规则,进行时序模型转换,其中,  $P_1$  是起始点,  $P_5$  是结束点。

$T_1$  和  $T_2$  之间是顺序关系,变迁  $T_2$  完成的时间为  $(T_1, T_2) \rightarrow T[\mu_1 - 3\sigma_1 + a, \mu_1 + 3\sigma_1 + b]$ 。(5)

根据正态分布规律,变量取值在  $(\mu_1 - 3\sigma_1, \mu_1 + 3\sigma_1)$  之外的事件为小概率事件,此处不予考虑。

$T_2$  和  $T_3$  之间是选择关系,威胁判断为非攻击目标时,作战流程结束;威胁判断为攻击目标时,启动导弹拦截服务。考虑攻击目标的情况,变迁  $T_3$  完成的时间为

$$(T_2, T_3) \rightarrow T[s, t] \quad (6)$$

式中:  $s = \mu_1 - 3\sigma_1 + a + \mu_3 - 3\sigma_3$ ;  $t = \mu_1 + 3\sigma_1 + b + \mu_3 + 3\sigma_3$ 。

$T_3$  和  $T_4$  之间是选择关系,导弹拦截成功时,作战流程结束;导弹拦截未成功时,启动高炮拦截服务。考虑导弹拦截未成功的情况,变迁  $T_4$  完成的时间为

$$(T_3, T_4) \rightarrow T[u, v] \quad (7)$$

式中:  $u = \mu_1 - 3\sigma_1 + a + \mu_3 - 3\sigma_3 + \mu_4 - 3\sigma_4$ ;  $v = \mu_1 + 3\sigma_1 + b + \mu_3 + 3\sigma_3 + \mu_4 + 3\sigma_4$ 。即完成整个防空作战任务的时间范围在  $u, v$  之间。

### 3.4 仿真实验与分析

对 MISS 中涉及各服务过程,即时序 Petri 网模型中的各变迁时延赋以具体的分布函数,利用 Matlab 软件进行仿真实验,进而分析基于 MISS 的防空反导作战过程的时间参数分布情况。

仿真数据来源假定:仿真数据主要用于对理论模型的验证和分析,不必考虑实际系统应用情况,因此,可设定调用目标侦察服务服从均值为 10、标准差为 2 的正态分布;威胁判断服务服从的是 5~6 之间的均匀分布;导弹拦截服务服从的是均值为 6、标准差为 1 的正态分布;高炮拦截服务服从的是均值为 3、标准差为 0.5 的正态分布。其单位均为 min。

考虑在实际作战中,各变迁服务满足的是随机数,直接以最小值、最大值的区域处理不能真实反映情况,因此,把变迁  $T_1, T_2$  和  $T_3$  按随机数仿真处理。

依据统计学的原理,系统仿真次数越多,各变迁的仿真随机数越接近于设定的参数分布,结果越接近于现实。为演示方便,设定系统仿真 1000 次,得到整个防空作战过程时间参数点分布如图 5 所示。仿真结果显示,仿真 1000 次,有 55 次仿真时间大于 30 min,即小于 30 min 的概率是 94.5%。若防空作战的时间要求为 30 min,则在一定的条件下满足作战要求。

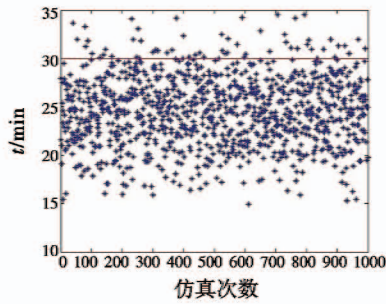


图 5 时间参数点分布

Fig. 5 The distribution of time preferences

在实际作战运用中,如若要求更短的完成时间或更高的满足概率:一方面可以通过 Petri 网模型优化作战流程,增加流程的并发性;另一方面可以在技术手段上缩短单个服务的完成时间。

### 4 结束语

本文对时间 Petri 网理论进行了介绍,重点对 Petri 网理论模型的时间等效变换关系进行了研究,并运用此理论对基于 MISS 的防空反导过程进行了建模和仿真分析,提出了满足作战时效性的相关建议。本文的研究对网络中心战条件下的信息系统服务能力,特别是时效性指标的评估提供了一种新的思路,并证明了方法的有效性和合理性。

### 参 考 文 献

[1] 蔡传青,黄光奇. 军事信息服务统一描述方法[J]. 指挥信息系统与技术,2011,2(2):53-56. (CAI C Q, HUANG G Q. Unified method for describing military information service[J]. Command Information System and Technology, 2011, 2(2):53-56.)

[2] 蓝羽石,邓克波,毛少杰. 网络中心化军事信息系统能力评估[J]. 指挥信息系统与技术,2012,3(1):1-7. (LAN

Y S, DENG K B, MAO S J. Capability evaluation of net-centric military information system[J]. Command Information System and Technology, 2012, 3(1):1-7.)

[3] 管清波,冯书兴. 天基信息服务体系与作战运用[M]. 北京:国防工业出版社,2014:132-159. (GUAN Q B, FENG S X. Space-based information service system and operational application[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2014:132-159.)

[4] 李颖,张占月,陈庆华. 空间对地观测系统的网络信息服务建模和仿真[J]. 火力与指挥控制,2012,37(10):67-73. (LI Y, ZHANG Z Y, CHEN Q H. Research on the modeling and simulation of web service effectiveness of space-to-earth observation system[J]. Fire Control and Command Control, 2012, 37(10):67-73.)

[5] 江金龙. UML 和 Petri 网建模方法及其在 C<sup>4</sup>ISR 系统中的应用[D]. 南京:南京理工大学,2006. (JIANG J L. Modeling method of UML & Petri nets and its application in C<sup>4</sup>ISR system[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2006.)

[6] 姜彬. 基于时间 Petri 网的建模与分析[DB/OL]. [2015-09-10]. <http://www.doc88.com/p-908298055003.html>. (JIANG B. The modeling and analysis based on time Petri net[DB/OL].)

[7] 王振江,刘云. 基于时间 Petri 网的铁通调度指挥系统建模与分析[J]. 北京电子科技学院学报,2006,14(2):19-22. (WANG Z J, LIU Y. Modeling and analysis of Tietong dispatching system based on time Petri net model[J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2006, 14(2):19-22.)

[8] AALST W M P. Verification of workflow task structures[J]. Information System, 2000, 25(1):43-69.

欢迎 订 阅 期 刊
欢 迎 刊 登 广 告