

# 基于 Petri 网的概念模型验证方法研究

樊 浩, 黄树彩

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:** 针对目前概念模型动态部分内容的验证由于其复杂性难以通过阅读式地审查发现其中的瑕疵等问题, 提出了利用 Petri 网进行概念模型验证的一种新思路, 研究了进行概念模型验证的具体步骤, 分析了概念模型错误对应的 Petri 网错误, 以及检测这些错误时需要验证的 Petri 网性质; 最后以防空导弹作战过程为例, 研究了利用 Petri 网以及 CPN Tools 软件进行概念模型动态部分内容验证的具体过程。实践证明此方法减少了领域专家直接进行概念模型验证的主观性影响, 提高了效率。

**关键词:** Petri 网; 概念模型验证; CPN Tools; 防空导弹作战过程

**中图分类号:** TP391.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)03-0999-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.03.052

## Study of conceptional model validation method based on Petri net

FAN Hao, HUANG Shu-cai

(Missile Institute AFEU, Sanyuan Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** It is difficult to validate the dynamic part of conceptual model by subjective detection in view of its complexity. This paper put forward a new method to validate conceptual model with Petri net. It studied the concrete approaches carrying on the conceptual model validation, analysed the faults of Petri net correlated with conceptual model and the validated properties of Petri net when detecting these faults. Lastly, as the air defense missile operation process an example, it researched that how to validate the dynamic part of conceptional model with the Petri net and CPN Tools. The practice proves the method's availability in aspect of reducing the subjective impacts of validating the concetual model directly and improving the efficiency of the validation.

**Key words:** Petri net; conceptional model validation; CPN Tools; air defense missile operation process

仿真系统概念模型是建模过程中的第一阶段, 对指导仿真系统的开发和评估具有重要意义<sup>[1]</sup>。概念模型的正确性是其质量的基本保证, 只有正确的概念模型才能真实地反映客观世界, 才能实现高可信度的仿真, 才能使仿真设计和实现阶段犯错误的可能性越小, 所以必须对概念模型的正确性进行验证, 以确保概念模型对现实世界问题的模型表达是否能合理地满足建模目的, 从而保证建模和仿真正确进行。

进行概念模型验证前必须对其进行描述, 概念模型可分为格式化描述和形式化描述两个阶段。目前概念模型验证主要在概念模型描述的基础上由领域专家对其静态和动态部分内容进行定性、主观地审查, 以确定概念模型的正确性, 这种方法称之为专家法。概念模型静态部分的内容比较容易理解和检查, 而动态部分的内容则由于其复杂性难以通过阅读式地审查发现其中的瑕疵。Gervasi 等人<sup>[2]</sup>提出了轻量级形式化方法的思想, 这种思想只能对概念模型的部分关键内容进行验证, 而且对其进行形式化描述仍然不是一件容易的事情, 有待进一步的研究。文献[3]提出了利用概念执行机制通过模型的动态执行来发现模型的错误或缺陷的方法, 并给出了一个基本步骤, 但实际操作还存在很大困难。文献[4,5]指出利用可执行模型在人机交互条件下验证概念模型的动态部分是很有意义的, 但没有给出具体实施方法。概念模型的验证是一种流程逻辑的验证, 虽然基于 IDEF、UML 形式化描述的模型已经

很完备, 却不能动态执行。Petri 网(尤其是着色 Petri 网、随机 Petri 网等高级 Petri 网)在流程逻辑验证方面显示出了巨大的优势, 它综合了数据流、控制流和状态转移, 能很自然地描述并发、同步、资源争用等特性, 而且本身内含执行控制机制, 集规范表示与执行于同一模型, 并且能够进行动态仿真等诸多优点, 所以用其进行概念模型的验证将是很有意义的。

### 1 基于 Petri 网的概念模型验证步骤

遵循概念模型的验证贯穿于其开发的全过程这个原则, 对一个军事仿真系统的概念模型进行验证时, 一个可行且易于实际操作的具体验证步骤如下:

a) 获得概念模型的格式化描述。格式化描述主要解决军事知识的规范表示, 为军事人员和技术人员提供沟通与合作的桥梁, 从而极大地提高了技术开发人员对军事问题的深入准确理解。

b) 获得概念模型的形式化描述。首先综合利用直观易懂的 IDEF、UML 等建模语言在格式化描述的基础上进行形式化描述, 以更利于理解和下一步的仿真软件分析设计。通常用 IDEF 建立系统功能模型, 以侧重从军事角度描述系统的功能结构和信息流; 用 UML 用例图进行系统需求分析, 用 UML 活动图描述系统行为状态过程, 以侧重从技术开发角度描述对系统的认识和理解; 然后, 把 IDEF 和 UML 建立的模型进行映射,

收稿日期: 2009-07-14; 修回日期: 2009-08-25

作者简介: 樊浩(1982-), 男, 陕西三原人, 博士研究生, 主要研究方向为飞行器控制与制导、仿真系统 VV&A (sqdtk@163.com); 黄树彩(1967-), 男, 湖北黄梅人, 教授, 博导, 主要研究方向为飞行器控制与制导、仿真系统 VV&A。



在可达标志集的基础上,构造所建防空导弹作战过程 Petri 网的可达标志图,如图 2 所示。

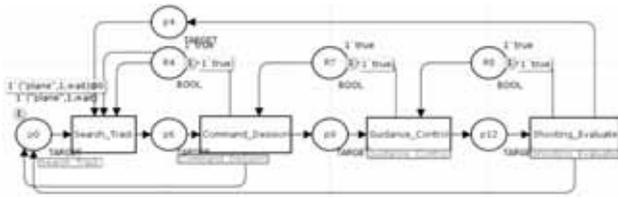


图2 导弹武器系统作战过程顶层Petri网模型

分析该 Petri 网的可达标志集和可达标志图可知:

(a) 可达标志集为有限的,说明体系中各物理实体(设备)处理能力能够保证任务的执行而不至于瘫痪;

(b) 在给定初始标志下,图 4 中的系统从初始状态可以到达最终状态,意味着导弹作战飞行流程可以顺利进行,可达图恰当地描述了导弹作战飞行过程。

2) 验证有界性和安全性 由 Petri 网模型易知,所建模型不但是有界的而且是安全的。同时应该注意到对于具有多目标打击能力的第 3 代防空导弹武器系统来说,对应的 Petri 网模型将不再是安全的,但它依然是有界的。

3) 验证活性 根据可达标志集和可达标志图易知该网是活的。表明了所建模型不会出现死锁,整个作战飞行过程可以正常继续进行。

4) 验证回归性(家态) 易知该 Petri 网模型具有可逆性,充分体现了导弹作战飞行过程的战前准备、拦截实施、再战准备的循环过程。

5) 验证公平性 由于所建 Petri 网中并发的变迁按一定的随机概率激发,以解决并发冲突造成的资源竞争。例如对于变迁 t18、t19 的实施是由一定的概率实施,所以当变迁 t18 不引发,而另一个变迁 t19 引发的最大次数是有界的,即 t18、t19 具有有界—公平关系,同理可知网中的每一个变迁都具有有界—公平关系,则该网是有界—公平网。体现了作战过程在资源(设备)竞争中不会出现饥饿现象。

综合以上分析可知,用 Petri 网建立的导弹作战过程概念模型是合理的,满足建模需求。

### 3.3.2 利用 CPN Tools 软件进行分析<sup>[9-11]</sup>

1) 作战过程的 Petri 网仿真模型 根据导弹作战过程的特点,利用 CPN Tools 软件建立其 Petri 网仿真模型时,为了实现其作战过程并发事件、随机事件和延时效应的准确描述,以及避免直接建立选择性结构的 Petri 网模型会出现并发冲突的资源竞争,并简化 Petri 网的图形表示,扩大标记所拥有的信息量。本文采用广义随机着色 Petri 网来建立其作战过程层次化模型。该模型由五页 Petri 网模型组成,其顶层模型 Missile\_Process 如图 3 所示。

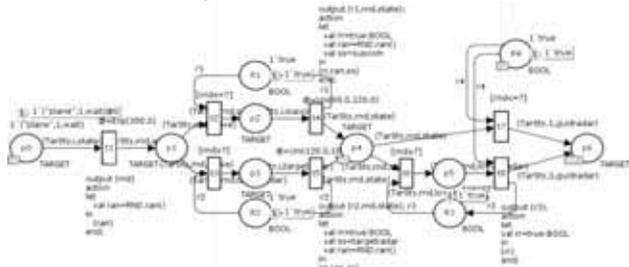


图3 导弹武器系统作战过程Search\_Track子页模型

顶层 Petri 网模型的四个变迁扩展为四个子页,分别 Search\_Track、Command\_Decision、Guidance\_Control 和 Shooting\_

Evaluate 子页,每个子页都有自己完整的 Petri 网模型,这里只给出 Search\_Track 子页模型,如图 4 所示。

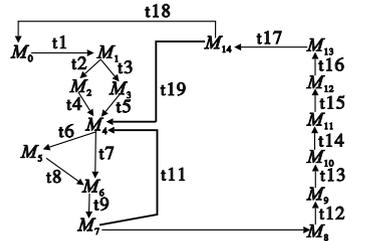


图4 导弹作战飞行过程Petri网模型的可达标志图

其中模型的主要着色集、函数及变量定义如下:

```
colset RND = int with 1..10;
colset STATE = with wait | arrive | supcom | targetradar | lowatradar |
guidradar | C3I | cannflau | bindpara | laumissile | trackmissile | guidmissile | self-
guidmissile | startevaluate | finishevaluate | finishkill | killagain;
colset TARGET = product STRING * RND * STATE timed;
fun Exp(t:real) = floor(exponential(1.0/t));
fun Uni(a:real,b:real) = floor(uniform(a:real,b:real));
var TarSty:STRING;
var r,r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7,r8:BOOL;
var rnd:RND;var i:INT;var state:STATE;
```

以上着色集中,RND 表示 1~10 的离散随机整数。STATE 是枚举型数据,表示作战过程状态,如 selfguidmissile 表示导弹自导引阶段。TARGET 表示库所的数据类型,是由复合 (STRING,RND,STATE)数据类型构成的,STRING 表示目标类型,如 plane。RND 控制随机变迁的发生,STATE 用于跟踪作战运行到哪一阶段。这里采用随机数控制并发变迁的激发,以解决并发冲突造成的资源竞争,例如 t1 变迁输出产生随机数,对于 t2、t3 并发变迁,当随机数  $md \leq 7$ ,则变迁 t2 激发,即由上级指挥中心传递目标信息,当  $md > 7$ ,则变迁 t3 激发,即由目标指示雷达传递信息。其中当资源库所中含有 BOOL 类型的变量 true 标记时,表示其处于闲状态,不含标记时,表示其处于忙状态。函数 Exp() 及 Uni() 表示变迁与随机分布的实施延时相关联。

2) 仿真分析<sup>[12]</sup> 综合利用 CPN Tools 生成的状态空间报告加之对仿真模型进行单步或连续的模拟仿真,观察标记的流动可以找出使标记错误流动以及不能流动的原因,根据此方法可以检查出 Petri 网的大部分错误。技术人员把分析结果交给领域专家,辅助领域专家检测概念模型的和现实世界不一致,以及对现实世界的描述不够细致、不符合仿真目的的错误,从而进行模型的修改和完善,这样减少了专家直接进行概念模型验证主观因素的影响,提高了在建模阶段发现错误的概率。这种方法可以辅助专家发现不易发现的错误,提高概念模型验证的效率。

## 4 结束语

概念模型验证是建模与仿真过程中最重要、最困难的问题之一,是仿真系统置信度评估中举足轻重的一个环节,对提高大型仿真系统的互操作性和可重用性都有着重要意义。通过建立系统 Petri 网模型,同时利用 CPN Tools 仿真软件对其仿真模型进行动态分析,将得到的有关系统结构和动态行为方面的结论和信息提供给专家,辅助专家进行概念模型的检查,继而对概念模型进行修改和完善,并且还可以减弱专家主观性的影响和充分发挥专家评估方法的灵活性,提高 (下转第 1005 页)

(2) 资源信息。使用仿真工具 Gridsim 生成诊断资源  $R_1 \sim R_5$ , 具有足够的离散性, 由这五个资源形成资源域 resource01, 则故障诊断任务将在这个资源域中运行。

表4 资源信息表

resource	architecture	OS	MIPS cost per second
$R_1$	SGI Origin Irix	200	100
$R_2$	SGI Origin Irix	150	200
$R_3$	Compaq OSFI	200	300
$R_4$	Intel Pentium Linux	500	200
$R_5$	Sun Ultra Solaris	300	150

(3) 任务信息。仿真是针对 FMS 主轴、三向(X、Y、Z) 进给轴上电压信号的, 将通过逐步增加电压故障信号的数量, 结合三种不同的调度策略<sup>[8]</sup> MET (minimum execution time)、MCT (minimum cost time)、OTC (optimise time and cost), 比较最终的 process\_time 和 process\_cost 来验证任务调度系统的可行性。

2) 结果分析

本文在模拟实验中分别使用了三种不同的目标函数进行仿真实验, 且任务数量依次取为 200、400、600、800 和 1 000, 平均任务长度设为 100MI, 在图 4、5 中对任务的完成时间和运行费用进行比较。

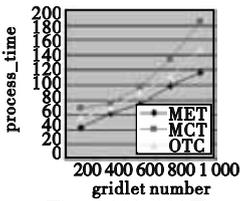


图4 运行时间图

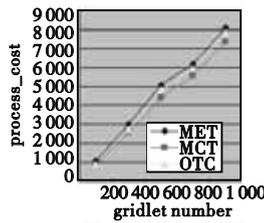


图5 运行费用图

分析结论如下:

- a) 本文所提出的任务调度模型是可行的, 模型中各组件及其相互之间的关系在仿真中都得到了很好的模拟。
- b) 如图 3 所示, 采用 MET 目标所花费的时间明显小于其他两种; 如图 4 所示, 采用 MCT 目标所花费的费用明显小于其他两种。
- c) 在任务数量较少时, 采用 OTC 目标与其他两种在花费时间、费用上相差不大, 但随着任务数量的增加, 有明显差异。

(上接第 1001 页) 概念模型验证的效率。本文的研究为进行概念模型动态部分内容的验证提供了有效方法。

参考文献:

[1] 王子才, 王勇. 复杂系统仿真概念模型研究进展及方向[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 779-784.

[2] GERVASI V, NUSEIBEH B. Lightweight validation of natural language requirements [J]. Software Practice and Experience (S0038-0644), 2002, 32: 113-133.

[3] 何晓晔, 吴永波, 徐培德, 等. 任务空间概念模型 VV&A 研究[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(3): 34-37.

[4] 郝靖, 毕学军, 曹伟华. 概念模型验证[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(5): 144.

[5] 易锋. 概念模型的结构化表示[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[6] AAKST Wil van D, VAN HEE K. workflow management - 模型、方法和系统

根据以上分析, 本文所提出的故障诊断网格的任务调度模型是可行的, 从三种调度目标来看各有优点和缺点, 且任务数量越多, 运行时间和运行费用之间的差异越大, 越能体现各种策略的特点。

4 结束语

任务调度模型是故障诊断网格的重要组成部分, 本文提出了一种故障任务调度的模型, 并通过仿真的方式讨论了该模型的可行性, 为下一步对调度算法的优化打下了基础。进一步的研究可以从两方面来展开: a) 在真实网格环境中实现该模型; b) 改进模型使其从当前的静态结构转向可以适应即使加入紧急任务的动态调度模式。

参考文献:

[1] FOSTER I, KESELMAN C. The grid: blueprint for a new computing infrastructure[M]. CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1998.

[2] RUSSELL D, DEW P, DJEMAME K. Service-based collaborative workflow for DAME[C]//Proc of IEEE International Conference on Services Computing. 2005: 139-146.

[3] 王跃宣, 吴澄, 倪晚成. 设备网格服务链共享技术与方法研究[J]. 华中科技大学学报, 2005, 33(Z1): 15-17.

[4] 陈培林, 史铁林, 余佳兵, 等. 分布式故障诊断系统中控制的组织方法[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(6): 41-43.

[5] 韩彦岭. 面向复杂设备的远程智能诊断技术及其应用研究[D]. 上海: 上海大学, 2004.

[6] MUTHUVELU N, LIU Jun-yang, SOE LIN N, et al. A dynamic job grouping-based scheduling for deploying applications with fine-grained tasks on global grids[C]//Proc of Conferences in Research and Practice in Information Technology Series. 2005: 41-48.

[7] BUYYA R, MURSHED M. GridSim: a toolkit for the modeling and simulation of distributed resource management and scheduling for grid computing[J]. Journal of Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2002, 14(13): 1175-1220.

[8] 周维, 罗泽, 南凯, 等. 以策略为机制的网格调度模型研究[J]. 计算机工程, 2007, 33(7): 89-91.

[M]. 王建民, 闻立杰, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[7] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[8] 龙光正. 防空导弹 C<sup>3</sup>I 系统谓词/变迁赋色 Petri 网建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(12): 47-48.

[9] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[10] GORDON S, BILLINGTON J. Analyzing a missile simulator with colored Petri nets[C]//Proc of International Journal on Software Tool for Technology Transfer. [S. l.]: Springer-Verlag, 1998: 144-159.

[11] 鲁晓春. 物流系统着色 Petri 网模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.

[12] Analysinga CP-net syntaxcheck, simulation, statespace analysis[EB/OL]. [http://wiki.daimi.au.dk/cpntools-help/analysing\\_a\\_cp-net.wiki?cmd=get&anchor=Analysing+a+CP-net](http://wiki.daimi.au.dk/cpntools-help/analysing_a_cp-net.wiki?cmd=get&anchor=Analysing+a+CP-net).