

学 术 著 作 丛 书

*Application of Petri Net in C⁴ISR Systems
Modeling, Simulation and Analysis*

Petri网在C⁴ISR系统建模、 仿真与分析中的应用

罗雪山 罗爱民 张耀鸿 著
曾熠 余滨 祝江汉 饶先宏

国防科技大学出版社

国防科技大学学术著作
专项经费资助出版

Petri 网在 C^4 ISR 系统建模、 仿真与分析中的应用

罗雪山 罗爱民 张耀鸿 曾 熠 著
余 滨 祝江汉 饶先宏

国防科技大学出版社
·长沙·

内 容 简 介

本书是作者多年研究 Petri 网、C⁴ISR 系统建模理论与方法以及 Petri 网在 C⁴ISR 系统建模、仿真与分析中应用研究的工作总结,内容包括 Petri 网的基本理论以及 Petri 网在 C⁴ISR 系统分析、设计与评估各方面的应用。本书可作为高等院校指挥自动化系统、信息系统工程等相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可作为从事信息科学、管理科学以及其他相关研究工作技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

Petri 网在 C⁴ISR 系统建模、仿真与分析中的应用/罗雪山等著. —长沙:国防科技大学出版社,2007.4

ISBN 978-7-81099-403-3

I .P… II .罗… III . 计算机网络-应用-指挥自动化系统 IV .E917-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 004977 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:卢天赋 责任校对:陈 靖

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:12 字数:301 千
2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-1000 册

*

ISBN 978-7-81099-403-3

定价:36.00 元

序 言

Petri 网的概念是由 Carl Adam Petri 在 1962 年提出的。Petri 网是描述和分析具有分布、并发、异步等特征系统的一种有效的模型工具。它不仅能够自然地描述同步、并发、资源争用等特性,且本身自含执行控制机制,非常适于离散事件系统的描述,是一种常见的离散事件系统建模方法。在实际应用中,为满足系统建模需要, Petri 也得到不断改进,产生了许多改进形式,如时间 Petri 网、随机 Petri 网、着色 Petri 网、谓词 Petri 网等。这些高级 Petri 网通过对基本 Petri 网建模元素的时间特性、点火条件和概率、令牌类型等的描述,大大提高了 Petri 网对系统的建模能力,也使得 Petri 网在许多领域得到广泛应用。经过 40 年的发展, Petri 建模方法已经在机械制造、计算机软件、硬件、通信系统、C⁴ISR 系统等领域得到广泛的应用。

C⁴ISR (Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance) 系统,即指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察系统。美军将其定义为被设计用来在整个军事作战范围内支持指挥官筹划、指挥和控制部队的综合指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察系统。我国将其称为指挥信息系统、指挥自动化系统或军事综合电子信息系统,它是由多个信息系统综合集成的,为诸军兵种联合作战提供指挥控制的一体化军事信息系统。它是对各军种所使用的信息系统进行综合设计、综合集成和综合运用,是信息系统、武器系统和军事保障系统的粘合剂,是形成整个武器装备体系的纽带。它是保障陆、海、空军和战略导弹部队等各军兵种遂行联合作战指挥和信息战的主要手段,

是指挥控制、情报侦察、预警探测、通信和信息战、电子战等要素多层次、大范围、综合连接的大系统。

通过考察 C^4 ISR 系统的概念、组成和工作原理,我们知道, C^4 ISR 系统是基于信息的系统,它支持的是军事指挥控制过程, C^4 ISR 系统的功能绝大多数是与信息密切相关的,可以看出,信息活动的描述是 C^4 ISR 系统动态要素建模、分析与仿真的基础。从基本特征来看,信息活动是离散的,并是由事件驱动的,因此 C^4 ISR 系统中的信息活动构成了一个离散事件系统。故从理论上来说,离散事件系统的建模方法一般可适用于 C^4 ISR 系统功能的建模。 C^4 ISR 系统的动态要素除了离散事件的特性之外,还具有分布、并发、同步等特性,要完成 C^4 ISR 系统的建模分析工作,要求所采用的离散事件系统建模方法必须能恰当地描述这些功能特性。目前离散事件系统的描述方法很多, Petri 网是具有强大生命力的一种方法。然而,由于基本 Petri 网本身也有一些不足之处,例如,它的描述元素过于简单,只能描述一些简单事件,对复杂系统的描述会导致模型过于庞大等。因此,各国的学者在基本 Petri 网的基础上,进行了各种各样的扩充,提出了多种扩充的 Petri 网。这些 Petri 网经过十多年的发展目前可以归为两大类:一是谓词/转移网;一是着色 Petri 网。这两类 Petri 网都可以实现 C^4 ISR 系统的建模与仿真。目前在美国等西方国家,人们非常重视运用 Petri 网对 C^4 ISR 系统进行定量建模分析,以优化系统的设计。我们根据 C^4 ISR 系统建模的特点,采用 Petri 网作为描述语言的基础,提出了一种对象 Petri 网(Object Petri Net, OPN),并已用于 C^4 ISR 系统的建模与分析。

运用 Petri 网进行复杂系统建模分析必须有计算机辅助工具的支持,目前各国不少的研究机构推出了诸如 CPN Tools 等支持工具。我们针对 C^4 ISR 系统建模仿真的需要,研制了支持对象 Petri 网(OPN)的对象 Petri 网建模仿真环境(Object Petri Net Modeling and

Simulation Environment, OPMSE), 并将其在 C⁴ISR 系统中进行了大量的应用。

本书是我们就 Petri 网在 C⁴ISR 系统建模、仿真与分析中应用研究的工作总结, 内容包括 Petri 网的基本理论以及 Petri 网在 C⁴ISR 系统分析、设计与评估各方面的应用。

本书由罗雪山策划、编目和审定, 第一章由罗雪山撰写, 第二章由饶先宏撰写, 第三章由余滨撰写, 第四章由祝江汉撰写, 第五章由罗爱民撰写, 第六章由曾熠撰写, 第七章由张耀鸿撰写, 曾熠参与了全书的审定工作。由于 Petri 网和 C⁴ISR 系统都是发展的, 尤其是 C⁴ISR 系统对我国整体来说是个很新的领域而且发展非常迅速, 我们准备和编写的时间很短, 因此本书不足之处在所难免, 我们诚挚欢迎广大读者对本书内容提出宝贵意见。

2006 年 12 月
于长沙国防科技大学

目 录

第一章 模型与建模方法论

第一节 模型的一般概念	(1)
1.1.1 概述	(1)
1.1.2 系统的模型谱系	(3)
1.1.3 建模的基本原则	(4)
1.1.4 建模的基本方法	(6)
第二节 系统的数学模型	(7)
1.2.1 数学模型的定义与作用	(7)
1.2.2 数学模型的分类	(9)
1.2.3 系统的数学模型	(11)
第三节 系统建模途径和过程	(20)
1.3.1 建模过程的信息源	(20)
1.3.2 建模过程的总体描述	(22)
1.3.3 模块化建模方法	(24)
第四节 离散事件系统模型与基本的建模方法	(27)
1.4.1 离散事件系统模型	(27)
1.4.2 基本建模方法	(29)
1.4.3 Petri 网建模方法	(31)
参考文献	(33)

第二章 Petri 网基础理论

第一节 Petri 网基本概念	(34)
-----------------------	--------

2.1.1	Petri 网相关的例子	(34)
2.1.2	网的基本定义	(39)
第二节	条件事件系统	(41)
2.2.1	情况和步骤	(41)
2.2.2	条件事件系统	(46)
2.2.3	循环和活性模型	(48)
2.2.4	条件事件系统的等价与同构	(49)
2.2.5	无冲撞条件事件系统	(51)
2.2.6	条件事件系统的情况图	(55)
第三节	条件事件系统的运行特征	(56)
2.3.1	偏序集	(58)
2.3.2	发生网	(62)
2.3.3	进程	(65)
2.3.4	进程与情况图	(70)
第四节	位置转移网	(74)
2.4.1	位置转移网	(74)
2.4.2	位置转移网的矩阵表示	(77)
2.4.3	可达性	(78)
2.4.4	有限覆盖	(82)
2.4.5	活性	(82)
第五节	网不变量	(83)
2.5.1	S-不变量	(83)
2.5.2	用 S-不变量进行系统分析	(91)
2.5.3	T-不变量	(97)
第六节	基本 Petri 网建模的一般方法	(98)
	参考文献	(102)

第三章 高级 Petri 网

第一节 谓词/转移网	(104)
3.1.1 谓词/转移系统的概念	(104)
3.1.2 谓词/转移系统的定义	(111)
3.1.3 谓词/转移系统的行为	(116)
第二节 着色 Petri 网	(124)
3.2.1 CPN 的概念	(125)
3.2.2 CPN 的定义	(134)
第三节 时间 Petri 网	(152)
3.3.1 时间 Petri 网的概念	(152)
3.3.2 时间 Petri 网的定义	(156)
第四节 随机 Petri 网	(158)
3.4.1 随机 Petri 网的概念	(158)
3.4.2 随机 Petri 网的定义	(164)
第五节 对象 Petri 网 (OOPN)	(171)
3.5.1 OOPN 的概念	(171)
3.5.2 OOPN 的定义	(174)
参考文献	(175)

第四章 Petri 网在 C^4 ISR 系统功能分析中的应用

第一节 “立方”分析法	(177)
4.1.1 确定系统功能和执行功能资源	(179)
4.1.2 功能分析	(180)
4.1.3 数据处理与通信负荷分析	(184)
4.1.4 系统不同结构的分析	(187)
第二节 功能需求的 Petri 网描述	(189)

4.2.1	功能责任的 Petri 网描述	(189)
4.2.2	基于剧情的功能需求建模	(192)
4.2.3	不同执行模式的需求建模	(196)
第三节	案例:空中禁飞任务系统	(201)
4.3.1	简介	(201)
4.3.2	功能定义	(202)
4.3.3	执行器定义	(204)
4.3.4	功能责任的描述	(205)
4.3.5	详细需求的生成	(220)
	参考文献	(225)

第五章 Petri 网在指挥控制分析中的应用

第一节	指挥控制系统的 Petri 网描述	(226)
5.1.1	单个指挥员的模型	(227)
5.1.2	指挥员交互作用的模型	(228)
5.1.3	资源限制的指挥员模型	(231)
5.1.4	指挥控制系统与环境交互的 Petri 网模型	(232)
第二节	利用指挥控制系统的 Petri 网模型进行 性能分析	(234)
5.2.1	C ⁴ ISR 系统的决策时延分析	(235)
5.2.2	最大流通率的计算	(237)
5.2.3	指挥控制结构、性能对流通率的影响	(247)
第三节	分布指挥决策的 CPN 模型	(259)
5.3.1	任务层 CPN 网	(262)
5.3.2	协作层 CPN 网	(264)
	参考文献	(267)

第六章 对象 Petri 网支持环境及其在 C⁴ISR 系统仿真分析中的应用

第一节 对象 Petri 网描述语言——OPDL	(268)
6.1.1 OPDL 的图形建模元素	(269)
6.1.2 OPDL 脚本描述语言	(275)
第二节 基于 OPDL 的 C ⁴ ISR 系统建模方法	(278)
6.2.1 OPDL 对 C ⁴ ISR 系统建模的支持	(278)
6.2.2 基于 OPDL 的 C ⁴ ISR 系统建模一般方法	(280)
6.2.3 OPDL 建模的几项原则	(290)
第三节 对象 Petri 网建模仿真支持环境——OPMSE	(291)
6.3.1 系统概述	(291)
6.3.2 OPMSE 系统组成	(291)
6.3.3 OPMSE 使用及操作步骤	(305)
第四节 野战防空战术 C ⁴ ISR 系统建模仿真分析	(306)
6.4.1 野战防空战术 C ⁴ ISR 系统概况及建模仿真目标分析	(306)
6.4.2 系统模型设计及仿真设计	(308)
6.4.3 野战防空战术 C ⁴ ISR 系统仿真结果分析	(317)
参考文献	(321)

第七章 Petri 网在 C⁴ISR 系统中的其他应用

第一节 C ⁴ ISR 系统通信网络效能评估	(322)
7.1.1 C ⁴ ISR 系统通信网络效能评估的意义和方法	(322)
7.1.2 C ⁴ ISR 系统通信网络仿真模型	(324)

7.1.3 C ⁴ ISR 系统通信网络效能指标计算模型·····	(334)
第二节 卫星支持下的导弹火力打击效能研究 ·····	(336)
7.2.1 应用背景 ·····	(336)
7.2.2 模型建立 ·····	(338)
7.2.3 结论分析 ·····	(349)
第三节 舰艇编队对抗仿真中的应用 ·····	(351)
7.3.1 研究背景 ·····	(351)
7.3.2 舰艇对抗的基本作战过程 ·····	(352)
7.3.3 模型体系 ·····	(356)
参考文献 ·····	(369)

第一章 模型与建模方法论

Petri 网模型是一种功能强大的模型,它可以对很大一类复杂系统进行建模。为了使读者对模型和建模方法论有全面深入的了解,进而熟练运用 Petri 网进行系统建模,本章首先介绍有关模型与模型建立的一般性概念和方法论。

第一节 模型的一般概念

1.1.1 概 述

模型是对真实对象和真实关系中那些有用的和令人感兴趣的特性的抽象,是对所要研究的系统某些本质方面的描述,它以各种可用的形式提供被研究系统的信息。模型描述可视为是对真实世界中的物体或过程相关信息进行形式化的结果。模型具有与所研究系统某一或几个侧面相似的数学描述和物理描述。从某种意义上来说,模型是系统的一种表现,同时也是对系统的简化。另一方面,模型应足够详细,以便从模型的实验中取得关于实际系统的有效结论。

建立在科学工程方法基础上的人与外部世界的相互作用,归根结底是建立模型、模型的分析 and 应用。科学研究中的绝大部分

工作是由形式化过程——建立模型及分析模型的过程所组成的。科学家们通过观察和实验,试图建立抽象的表示方法和定律。这些方法和定律是对现实世界中已经证明了的假设的形式化,然后通过它们建立描述现实世界的模型。当这些形式化模型确实表现了现实世界的基本性质时,它就变成人们进行推理、分析和设计的重要工具,这就是模型的分析与利用。上述过程如图 1.1 所示。

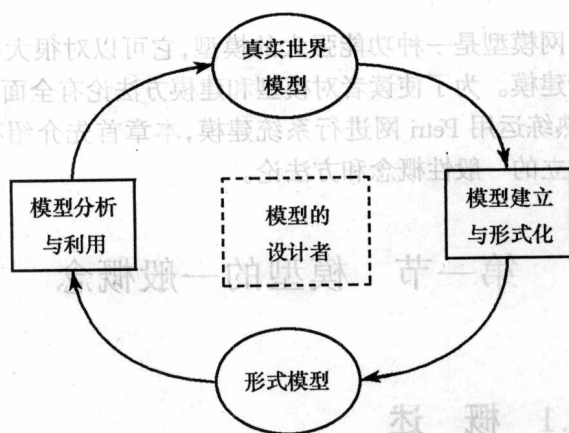


图 1.1 科学研究中人与客观世界的相互作用

构建系统模型一般包括两方面内容:第一是建立系统模型结构,第二是提供有关数据。在建立模型结构时,不仅要确定系统的边界,而且要鉴别系统的实体、属性和活动。在选择模型结构时,要满足两个前提条件,一是要细化模型研究的目的,二是要了解有关特定的建模目标与系统结构之间的关系。提供数据则要求能够明确包含在实体、活动中的各个属性之间确定的关系。

一般来说,系统模型具有以下性质:

(1)相似性

模型与所研究系统在属性上具有相似的特性和变化规律,这

种相似性可能是对真实系统某个侧面的相似,也可能是多个侧面的相似。

(2) 简单性

从实用的观点来看,由于模型在建立过程中,忽略了一些次要因素和某些非可测变量的影响,因此,实际的模型是一个被简化的近似模型。一般而言,在满足使用需要的前提下,模型越简单越好。

(3) 多面性

对于由许多实体组成的系统来说,由于其研究目的不同,就决定了所要收集的与系统有关的信息也是不同的,所以用来表示系统的模型并不是唯一的。由于不同分析者关心系统的不同方面,或者由于同一分析者要了解系统的各种变化关系,对同一个系统可以产生相应于不同层次的多种模型。

1.1.2 系统的模型谱系

按照人们对各类系统的认识程度,可以得到各种系统模型的谱系,如图 1.2 所示。谱系的右边是白色的,表示人们已经对这些系统的物理规律有了比较深入的了解,这些系统基本上可以通过演绎的方法来建立它们的数学模型。谱系的中间是灰色的,表示人们对这些系统的了解尚不甚清楚,因此要通过演绎与归纳相结合的方法来建立它们的模型。而谱系左端则是黑色的,表示人们对这些系统了解得还不清楚,主要是通过黑箱方法来建立模型。由于这些系统的数据掌握较少,所以,这些模型的准确度一般比较差。

模型的谱系与模型的形式之间有着密切的关系。对于接近白色的动力学系统,如机械系统、电子电路系统、过程控制系统,主要是用常微分方程来描述。接近灰色的环境系统、空间系统则主要

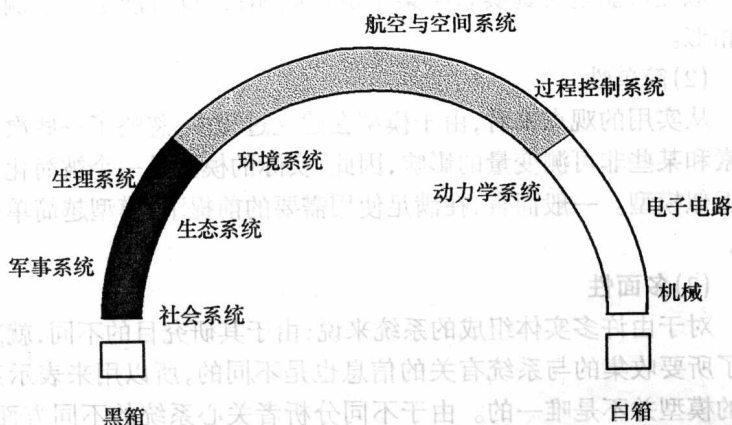


图 1.2 各种系统的模型谱系

是用偏微分方程来描述。灰度较大的生理学、生态学系统,虽然在空间上也是分布的,但由于目前对它们的认识程度还不够,通常近似地被看做集中参数,因此仍用常微分方程来描述。接近黑色的军事系统、社会系统,则由于实际数据量少,目前常采用离散时间的差分方程或离散时间系统模型形式来加以描述。

1.1.3 建模的基本原则

在模型建立中一般要遵循以下一些基本原则:

(1) 清晰性

一个复杂的系统是由许多子系统组成的,因此对应的系统模型也是由许多子模型构成的。除了研究目的所必须的信息联系外,系统子模型之间相互耦合要尽可能少,这样,模型的结构才能尽可能清晰、简单。

(2) 相关性

模型中应该只包括系统中与研究目的有关的信息。例如,对一个空中交通管制系统的研究,只需要考虑飞行的方位、航向,而无需涉及飞机的飞行姿态。尽管与研究目的无关的信息包含在系统模型中可能不会有很大害处,但是它会增加模型的复杂性,使得在求解模型时增加额外的工作,所以应该把与研究目的无关的信息排除在外。

(3) 准确性

建立系统模型时,应该考虑所收集的、用以建立模型的信息的准确性,包括确认所应用的原理和理论的正确性和应用范围,以及检验建模过程中针对系统所做假设的正确性。例如,在建立导弹飞行动力学模型时,应将导弹视为一个刚体而不是一个质点,同时要注意导弹在超高音速运动中的特殊性。如果仅考虑导弹的射程问题,导弹在大气中的运动可以做相应的简化,但如果是考虑导弹的命中精度问题,就不能做这样的简化。

(4) 可辨识性

模型结构必须具有可辨识的形式。所谓可辨识性是指系统的模型必须有确定的描述或表示方式,在这种描述方式下,与系统性质有关的参数必须有唯一确定的解。若一个模型中具有无法估计的参数,则此模型就无实用价值。

(5) 集成性

由于一个大系统是由许多子系统组成,因此,建模过程中还需考虑的一个因素就是模型的集成性。例如,对防空导弹系统的研究,除了能够研究每枚导弹的发射细节和飞行规律外,还要集成导弹发射的指控系统、导弹的制导系统,通过对这些子模型的集成研究防空导弹系统。