

学 术 著 作 丛 书

*The Verification, Validation and
Accreditation Technologies on System
Modeling and Simulation*

系统建模与仿真的校核、
验证与确认 (VV&A) 技术

廖 瑛 邓方林 梁加红 等编著

国防科技大学出版社

国防科技大学学术
专著出版基金资助

系统建模与仿真的校核、验证 与确认(VV&A)技术

廖 瑛 邓方林 梁加红 编著
王仕成 冯向军 杨雪榕

国防科技大学出版社
湖南·长沙

图书在版编目 (CIP) 数据

系统建模与仿真的校核、验证与确认 (VV&A) 技术/廖瑛等编著. —长沙: 国防科技大学出版社, 2006.9

ISBN 7-81099-327-5

I. 系… II. ①廖… ②邓… ③梁… III. ①导弹—系统建模 ②导弹—系统仿真 IV. TJ76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 063655 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: 耿筠 责任校对: 肖滨

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: 13 字数: 338 千
2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数: 1-2000 册

*

ISBN 7-81099-327-5/TJ·4

定价: 35.00 元

前 言

随着科学技术的日益发展，人类认识、描述、分析和仿真客观世界的能力越来越强。仿真对象由一般系统发展到复杂系统，由宏观世界进入到微观世界。系统仿真技术已广泛应用在工程技术、社会科学、经济学、生命科学、军事学等各个领域，并且发挥着越来越重要的作用。

仿真是一种基于模型的活动，模型是系统仿真的重要部分。仿真的结果是否可信，一方面决定于模型对系统行为子集特性描述的正确性与精度，另一方面决定于计算机模型和/或物理模型在实现系统模型时的准确度。只有建立能够准确反映系统内特性和变化规律的模型，才能得到准确的仿真结果。只有保证了建模与仿真的正确性与可信度，其仿真结果才具有实际的应用价值和意义。所以，建模与仿真的校核、验证和确认（Verification Validation and Accreditation，以下简称 VV&A）技术，很早就受到国内外仿真专家们的重视。1962 年，美国就进行过“警犬”导弹仿真的全面评估。20 世纪 70 年代中期，美国计算机仿真学会成立了模型可信度技术委员会，负责制定与模型可信度相关的概念、术语和规范。此后美国各种仿真会议、国际自动控制联合会（IFAC）世界大会、高性能计算机会议、军事运筹学会议等都安排了仿真 VV&A 的专题讨论。在海湾战争后，美国国防部为了加强对国防领域建模与仿真的管理，在 1991 年中期设立了国防建模与仿真办公室，该办公室公布了有关建模与仿真管理方面的计划，包括国防系统仿真章程和仿真 VV&A 的国防部指南等。美国弹道导弹防御办公室及海、陆、空各军种都制定了 VV&A 细则，

国家标准局制定了 VV&A 的国家标准。加拿大建立了国防部合成环境协调办公室,并于 2003 年 5 月制定和发布了建模与仿真 VV&A 指南的初稿 (DND SECO, 2003)。该指南是加拿大防御体系中建模与仿真发展、获得、应用中使用的 VV&A 工具和技术有关的指导书,准备在防御系统里指导校核、验证和确认过程中使用。

我国对建模和仿真的 VV&A 技术也逐步重视起来,已有不少刊物和会议报道了这方面的成果,其中既有概念性讨论,也有技术方面的研究,还有工程应用。工程研制部门、管理部门以及仿真试验部门对 VV&A 技术尤为重视,并且取得了较大的效益。

随着建模方法的多样化,被仿真系统的日益复杂化和仿真试验难度的加大,系统建模与仿真校核、验证和确认 (VV&A) 的重要性愈来愈突出,完全有必要对 VV&A 技术和方法进行更进一步的广泛、系统、深入研究。然而,到目前为止,全面、深入、系统地论述系统建模与仿真 VV&A 技术专题的著作在国内并不多见,我们编写这本书的目的也就是希望该书能在提高系统仿真的有效性和可信度的努力中发挥重要作用,为建立导弹系统仿真 VV&A 的标准细则作技术准备,为提高导弹系统仿真的规范化、正确性、仿真精度提供参考,为我国的仿真事业做出自己的微薄贡献。

本书以导弹系统仿真为研究背景,系统深入地研究仿真系统 VV&A 的理论、技术和方法,广泛收集了该领域国内外专家近年来的研究成果,并融入作者自己的观点和看法进行了总结归纳。而且,作者在实际应用中,对其中的一些技术和方法进行了成功的改进。因而,该书具有重要的理论意义和工程实用价值。全书共分十一章,主要内容为:建模与仿真的校核、验证与确认 (VV&A) 概述, VV&A 的策略和方法综述;国内外建模与仿真 VV&A 研究近况;伪随机数的产生及其独立性检验;建模与仿真

VV&A 方法的改进及其应用；系统建模与仿真可信度评估的原则和规范研究；基于六自由度的导弹系统建模与全数字仿真；系统半实物仿真方案设计；导弹六自由度建模与仿真验证；基于 VV&A 的 M&S 管理系统设计与开发；导弹的 M&S 管理及仿真结果验证等。

本书适用于系统仿真专业的研究人员、工程技术人员、高等院校教师等，亦可作为高等院校系统仿真等有关专业的博士或硕士研究生课程教材。

在本书的编著过程中，作者参阅和部分引用了国内外许多专家学者的论文和书籍；阎斌博士、陆斌博士、潘旺华博士、张健博士等参加了本书部分内容的编写及校对工作；该书还得到了上海航天设计研究院朱士青研究员的热情帮助，在此向他们表示衷心的感谢！张金槐教授审定了全书，对本书和我们的研究工作做了较高的评价，并提出了宝贵的修改意见，在此向这位尊敬的老前辈、评估理论与技术方面的资深专家表示衷心的感谢！感谢航天支撑技术基金、国防科技大学创新研究基金、国防科技大学学术专著出版基金、第二炮兵工程学院等对本课题研究和本书出版的大力支持！

由于水平所限，对某些问题的理解尚不是十分透彻，书中定有不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

作 者

2006 年 4 月于国防科技大学

目 录

第一章 绪 论

1.1 系统仿真技术概述	(1)
1.1.1 系统仿真的基本概念	(1)
1.1.2 系统建模与仿真技术	(7)
1.2 模型的校核、验证与确认(VV&A)概述	(9)
1.2.1 VV&A 定义	(9)
1.2.2 建模和仿真的 VV&A 技术	(11)
1.2.3 VV&A 原则	(12)
1.2.4 M&S 生命周期中的 VV&A	(17)
1.2.5 V&V 技术	(21)
1.2.6 M&S、VV&A 与 T&E 的关系	(32)
1.2.7 VV&A 软件开发模型	(36)
1.2.8 VV&A 工具	(40)
1.3 影响模型有效性的因素	(42)
1.3.1 模型与现实系统不能完全吻合的主要因素 ...	(42)
1.3.2 模型验证工作的难点	(44)
1.3.3 研究上的难题与问题	(46)
1.4 仿真模型 VV&A 的意义	(48)
1.5 本书概貌	(50)
1.5.1 主要内容	(50)

1.5.2 主要特色	(52)
------------------	------

第二章 模型校核、验证与确认(VV&A)的策略和方法综述

2.1 建模与仿真 VV&A 的发展史	(54)
2.2 模型校核与模型验证的一般性策略	(57)
2.2.1 模型校核的一般方法	(57)
2.2.2 模型验证的一般方法	(59)
2.2.3 模型校核与验证中的一些问题	(60)
2.2.4 系统仿真精度和可信度	(62)
2.3 常用模型验证方法理论分析	(64)
2.3.1 专家经验评估法	(64)
2.3.2 灵敏度分析法	(66)
2.3.3 系统分解法	(67)
2.3.4 参数估计法	(68)
2.3.5 假设检验方法	(70)
2.3.6 动态关联分析法	(93)
2.3.7 基于频谱分析的统计推断验模法	(101)
2.3.8 稳健统计	(115)
2.4 模型确认方法综述	(119)

第三章 国内外建模与仿真 VV&A 研究近况

3.1 国内建模与仿真 VV&A 研究近况	(122)
3.1.1 VV&A 基本概念的研究近况	(122)
3.1.2 VV&A 技术与方法的研究近况	(124)
3.1.3 VV&A 技术应用的研究近况	(128)
3.1.4 建模与仿真校核、验证与确认的发展方向	(132)

目 录

3.2 国外建模与仿真 VV&A 研究近况	(136)
3.2.1 关于 VV&A 定义	(136)
3.2.2 VV&A 工作的基本规律和指导原则	(138)
3.2.3 VV&A 技术方法	(140)
3.2.4 VV&A 工作的方法学	(141)
3.2.5 VV&A 应用研究	(145)
3.3 美军军事验模法规简介	(147)
3.4 加拿大国防部建模与仿真 VV&A 指南简介	(148)
3.4.1 VV&A 概述	(148)
3.4.2 VV&A 过程	(150)
3.4.3 VV&A 在国防部的应用实例	(163)

第四章 伪随机数的产生及其独立性检验

4.1 伪随机数的产生方法	(167)
4.1.1 概 述	(167)
4.1.2 多递归矩阵方法	(168)
4.1.3 逆同余法	(170)
4.1.4 显式逆同余法(EICG - Explicit Inversive Congruential Generators)	(170)
4.1.5 复合方法	(170)
4.1.6 数字逆方法	(171)
4.2 随机序列独立性检验方法	(172)

第五章 系统仿真 VV&A 方法的改进及应用

5.1 一种新的仿真模型验证过程与方法	(175)
5.2 统计线性化伴随方法(SLAM)	(178)

5.2.1	概 述	(178)
5.2.2	Monte - Carlo 方法、CADET 和 SLAM 的比较	(178)
5.2.3	统计线性化伴随方法(SLAM)	(180)
5.2.4	SLAM 在随机仿真中的应用	(186)
5.3	动态模型验证的改进方法	(187)
5.3.1	问题描述	(187)
5.3.2	测试信号的产生	(189)
5.4	应用时 - 频分布进行导弹仿真模型验证	(191)
5.4.1	Wigner - Ville 分布(WVD)	(191)
5.4.2	Wigner - Ville 谱在导弹仿真模型验证中的应用	(200)

第六章 系统建模与仿真可信度的评估原则与规范研究

6.1	仿真模型 VV&A 的基本原则	(202)
6.2	仿真模型 VV&A 的主要工作	(205)
6.3	模型验证管理的规范化	(208)
6.3.1	模型验证的组织管理	(208)
6.3.2	模型验证的过程管理	(210)
6.3.3	模型验证的文本管理	(212)
6.4	模型校核方法与步骤	(214)
6.5	模型确认的基本原则	(217)
6.6	提高导弹系统仿真可信度的方法	(218)
6.6.1	导弹系统模型校核的层次化方法	(218)
6.6.2	验证导弹系统仿真模型的方法	(220)
6.6.3	导弹系统仿真建模和验模工程一体化方法 ...	(224)

第七章 基于六自由度的导弹系统建模与全数字仿真

7.1 概 述	(227)
7.2 弹体质心运动与绕质心运动数学模型	(227)
7.2.1 质心运动的动力学方程	(229)
7.2.2 绕质心运动的动力学方程	(245)
7.3 导弹制导与姿态控制系统建模	(249)
7.4 导弹被动段六自由度模型	(251)
7.5 六自由度仿真的计算机实现	(252)
7.5.1 建立仿真模型	(252)
7.5.2 仿真算法的选择	(252)
7.5.3 仿真步长的选择与变步长处理	(253)
7.5.4 非线性函数的处理	(255)
7.5.5 多变量函数生成与插值的处理	(255)
7.6 导弹六自由度仿真研究	(256)
7.6.1 控制系统对质心运动的影响	(256)
7.6.2 姿态运动对质心运动的影响	(259)
7.6.3 发动机摆动惯性、推进剂晃动、弹性振动及它们 之间的相互耦合对导弹运动的影响	(262)

第八章 导弹系统半实物仿真方案设计

8.1 概 论	(265)
8.2 半实物仿真的总体方案	(266)
8.3 基于分布式并行仿真计算机的半实物仿真系统	(269)
8.4 惯性测量系统运动环境模拟	(270)
8.4.1 三轴仿真转台精度及误差来源分析	(271)

8.4.2	速率陀螺仪系统的电流加矩法运动模拟	(277)
8.4.3	加速度表系统的电流加矩法运动模拟	(278)
8.4.4	三轴稳定平台系统	(282)
8.4.5	弹上计算机的接入	(288)

第九章 导弹六自由度建模与仿真的验证

9.1	样本数据分布形式的识别	(295)
9.1.1	引 言	(295)
9.1.2	基于神经网络的样本分布识别	(296)
9.1.3	样本数据分布形式的模糊识别	(301)
9.2	仿真输出分析——小样本输出统计分析方法	(307)
9.2.1	引 言	(307)
9.2.2	正态 Bayes 方法	(309)
9.2.3	正态伽玛 Bayes 方法	(310)
9.2.4	伽玛 Bayes 方法	(311)
9.2.5	Bayes 方法中验前分布的确定	(314)
9.3	六自由度仿真模型验证	(315)
9.3.1	静态性能的验证	(316)
9.3.2	动态性能的验证	(318)
9.3.3	六自由度仿真模型验证	(319)

第十章 基于 VV&A 的 M&S 管理系统

10.1	问题的提出	(320)
10.2	M&S 管理系统设计	(322)
10.2.1	系统数据库设计	(322)
10.2.2	系统结构与功能设计	(328)

目 录

10.3 M&S 管理系统的开发与实现	(332)
10.3.1 系统数据库开发与实现	(332)
10.3.2 系统应用程序开发与实现	(340)
10.4 基于 M&S 管理系统的全生命周期管理与可信度评估	(349)
10.4.1 基于 M&S 管理系统的全生命周期管理	(349)
10.4.2 基于 M&S 管理系统的可信度评估	(352)
10.5 结 论	(354)

第十一章 导弹的 M&S 管理及仿真结果验证

11.1 系统数学建模与模型管理	(355)
11.1.1 弹体动力学方程	(355)
11.1.2 自动驾驶仪回路数学模型	(364)
11.1.3 数学模型管理	(367)
11.2 仿真结果验证	(369)
11.3 结 论	(374)

参考文献	(375)
------------	-------

第 1 章 绪 论

1.1 系统仿真技术概述

1.1.1 系统仿真的基本概念

1.1.1.1 系统

系统仿真研究的对象是系统,关于系统的定义目前使用得很多,这里给出大多数教科书和专著上使用的定义:

系统是相互作用和相互依赖的若干组成部分,按照某些规律结合而成的、具有特定功能的有机整体。

上述定义中的各组成部分通常被称为子系统或分系统,而且一个系统本身又可以是它所从属的更强大系统的组成部分。

任何一个系统都具有以下几个特征:

①整体性:系统是由诸多要素构成的,它们互相之间不可分离,一旦要素与要素被分离,那么要素就不是原来意义的要素,系统也就不是原来意义下的系统了。

②集合性:指系统是由两个以上要素构成的集合体,并且这些要素在系统中的作用是不相同的。

③相关性:指系统要素与整体之间,各要素之间存在着这样一种相互作用与相互依赖的关系,即系统的功能与组成系统的要素的功能并不构成直接的线性关系。

④层次性:指系统具有一定的内部结构,即系统各要素之间的

排列组合顺序和方式往往呈现为层次的结构,每个要素都存在于一定的等级和层次上,各自有条不紊地发挥着作用。

⑤可分解性:指系统的各要素是可以识别的,而且同层次的要素之间相互作用较强,不同层次要素之间的作用相对较弱。

⑥功能结构专一性:指系统的结构决定了系统的功能,构成系统的各元素或子系统都分别具有各自的特定功能,并且由于他们之间相互作用、相互影响、相互合作而形成整个系统的功能。

⑦对环境的适应性:系统以外的各种因素或事物常常会对系统或其中的子系统产生影响,这些影响和作用没有达到使系统功能和性质发生根本变化时,可以认为系统是处于相对稳定状态,它对环境是适应的,当环境的影响使系统的性质发生根本性的变化,甚至使系统被破坏或形成另一个新系统时,系统不具有环境适应性,环境对系统的作用可以认为是系统的输入,系统对输入进行加工产生输出,把输入转换为输出也是系统的功能。

1.1.1.2 模型

模型是系统某种特定性能的一种抽象形式。通过模型可以描述系统的本质和内在的关系。无论是工程系统还是非工程系统都可以建立起一定形式的模型。模型一般分为物理模型和数学模型两大类。

1.1.1.2.1 物理模型

物理模型与实际系统有相似的物理性质。这些模型可以是按比例缩小了的实物外形,如风洞试验的飞行器外形和船体外形,或生产过程中试制的样机模型,如导弹上的陀螺、导引头样机等。

1.1.1.2.2 数学模型

用抽象的数学方程描述系统内部物理变量之间的关系而建立起来的模型,称为该系统的数学模型。通过对系统数学模型的研究可以揭示系统的内在运动规律和系统的动态性能。

数学模型又可以分为静态模型和动态模型两类。

1. 静态模型

静态模型的一般形式是代数方程、逻辑表达式,如理想电位器的转角和输出电压之间的关系式或继电器的逻辑关系式等。

2. 动态模型

(1)连续系统模型

连续系统模型有确定性模型和随机模型,确定性模型又分为集中参数模型和分布参数模型两种。集中参数模型描述系统运动用的是微分方程、状态方程和传递函数,而描述热传递过程的偏微分方程则是典型的分布参数模型。

(2)离散系统模型

①时间离散系统。这种系统又称为采样控制系统,一般用差分方程、离散状态方程和脉冲传递函数来描述。这种系统的特性其实是连续的,仅仅在采样的时刻点上来研究系统的输出。各种数字式控制器的模型均属于这一类。

②离散事件模型。这种系统用概率模型描述。这种系统的输出,不完全由输入作用的形式描述,往往存在着多种可能的输出。它是一个随机系统,如库存系统、管理车辆流通的交通系统、排队服务系统等。输入和输出在系统中是随机发生的,一般要用概率模型来描述这种系统。

对一个复杂系统,如导弹武器系统,其最终的、完美的模型应该具有以下的特点:

①模型是动态变化的。随着时间的推移,环境的变化,反映复杂系统的模型也能产生“适应性”变化。

②模型是开放的。复杂系统的模型具有很强的可扩展性,通过增加相应的功能模块和局部模型,系统的模型就可以反映不同层次的复杂现象,获得系统的宏观和微观模型。

1.1.1.3 仿真与仿真技术

通俗地讲,仿真就是用某种模型来模仿或者模拟真实的对象并对其进行研究达到人们所求目的的过程。仿真是人们认识世界的一个重要手段,仿真技术是一门综合性强的技术,具有可靠、无破坏性、可多次重复、安全、经济、不受气象条件和场地空域的限制等特点,得到广泛的应用。

仿真是一个为实现特定目的而进行的循环往复的过程。也就是说,它既是一个通过模型实验认识原型的方法,同时又是一个认识过程,而且可能是多次反复的过程。当然,每经过一次反复,人们对原型的认识也就提高一步,从而也就把模型向原型推进一步。

仿真开发初期的单循环过程通常包含以下几个阶段:

- ①对原型的初步认识和需求分析;
- ②建立有关被研究对象的概念模型;
- ③将概念模型转化为仿真模型;
- ④运行仿真模型(仿真试验);
- ⑤分析仿真结果。

以上五个阶段之间的关系如图 1.1 中的方框所示。

从阶段①过渡到阶段②需要得到以下信息的支持:

明确建模目的、明确假设条件、选择建模方法(演绎法、归纳法或者二者结合)。

从阶段②到阶段③,支持信息有:

明确精度要求、选择仿真算法、选择仿真语言进行程序设计。

从阶段③到阶段④,支持信息有:

针对原型的工作环境创造模型运行环境、确定相应的模型输入、观察并记录模型的行为(输出)。

从阶段④到阶段⑤,支持信息有:

原型行为的有效数据、模型及仿真输出确认标准、专家经验。