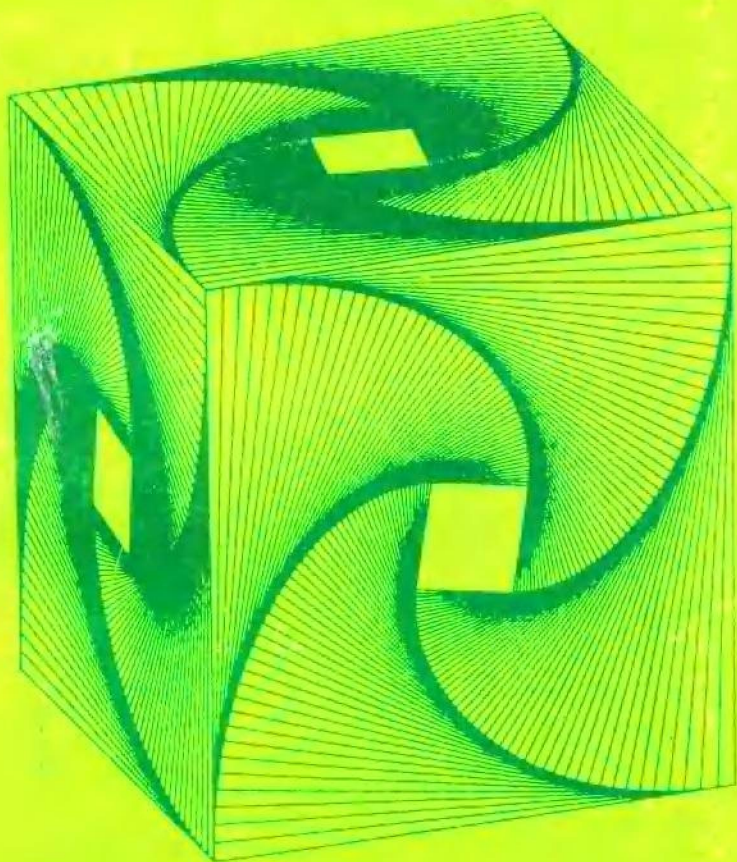


王维平 朱一凡 华雪倩 蔡放 编著

仿真模型有效性 确认与验证



国防科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

仿真模型有效性确认与验证 / 王维平, 朱一凡, 华雪倩, 蔡放编著. -长沙: 国防科技大学出版社, 1998.6

ISBN 7-81024-474-4

- I. 仿真模型有效性确认与验证
- II. 王维平 朱一凡 华雪倩 蔡放
- III. ①仿真 ②模型
- IV. O242

国防科技大学出版社出版发行

电话: (0731)4555681 邮政编码: 410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑: 卢天颢

责任校对: 何 晋

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: 6.875 字数: 172 千

1998年6月第1版第1次印刷 印数: 1-3000册

定价: 9.00 元

序 言

国际上对仿真模型有效性问题的研究由来已久。早在 20 世纪 50 年代末 60 年代初, Conway 等人就开始对仿真系统的评估问题进行研究。但是, 直到 1967 年美国兰德公司的 Fishman 和 Kiviat 明确指出仿真模型有效性研究可划分为模型确认和模型验证两个部分之后, 仿真模型有效性研究的概念和内容才逐渐变得清晰起来。近年来, 美国国防部门把模型的验证、确认和认定(缩写为 VV&A)作为模型有效性研究和应用的主要工作, 其中包括了有关模型版本管理的内容, 并且强调了模型有效性评估管理工作的重要性。Knepell 和 Arangno 提出的模型可信度评估方法是一种比较规范、成型的 VV&A 过程和方法, 并且融入了模型安全性的概念。模型有效性问题——重点在模型确认和验证——是当前国际仿真界研究的一个热点问题。经过长时间的理论方法研究和应用研究, 模型有效性评估方法已逐步变得成熟起来。

实际上, 仿真与计算机游戏之间的本质区别在于, 前者的模型在反映实际问题方面是“有效”的, 因此其结果对于决策是有参考价值的。否则, “仿真”岂不就成了“作假”的同义词?! 遗憾的是, 模型有效性问题在我国还没有得到应有的重视, 围绕这一问题开展的理论方法和应用研究还十分有限, 专门针对某一仿真系统开展的有效性研究项目还十分少见。近几年来, 我们在国家高技术课题和国防预研基金课题的资助下, 对仿真模型有效性问题进行了研究。在参考大量国外有关文献的基础上, 作了一些初步的研究工作, 取得了部分研究成果。为了推动国内在模型有效性方面的研究和应用工作, 我们将研究成果汇编成本书, 希望能起到抛砖引玉的作用, 不妥之处望国内学术同仁不吝赐教。

本书共分为六章。第一章介绍了仿真模型有效性研究的基本概念和基本问题，包括国外研究和应用的基本情况。第二章介绍仿真模型可信度评估方法，通过这一章的学习，读者可以对 VV&A 的实际过程和相应的评估方法有一个大致了解。第三章介绍用于仿真模型运行有效性确认的几种统计分析方法，主要是针对模型与实际系统的最终输出结果来讨论的。本章还介绍了模型的文本化方法，它是模型确认的基础。另外，对于仿真模型的灵敏度分析方法及仿真实验设计方法，本章也进行了介绍。第四章和第五章介绍有关仿真模型验证的内容；其中，第四章介绍仿真程序验证方法，第五章介绍仿真支持系统验证方法。第五章内容的重点放在对与仿真支持系统性能有关的一些特殊问题的讨论上，关于程序验证的一般性问题可参见第四章。第六章对在回路和硬件在回路两类特殊仿真系统的模型可信度评估问题进行了讨论。书后附录中的内容供读者阅读第三章和第五章的有关内容时参考。

本书中收入的部分成果是有关研究人员集体劳动的结晶。唐毅宏、徐永忠和殷洪义同志对本书的完成都作出过较大的贡献。在此谨对他们表示诚挚的谢意。

作 者

1998 年 5 月于国防科技大学

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 影响模型有效性的主要因素	(4)
1.3 仿真模型的确认、验证和认定	(6)
1.4 美国国防部门 VV&A 开展情况	(10)
1.4.1 基本情况	(10)
1.4.2 EADTB 项目的 VV&A 计划	(12)
第二章 模型可信度评估方法	(17)
2.1 可信度评估活动	(18)
2.2 常规评估方法	(24)
2.2.1 准备阶段	(26)
2.2.2 计划阶段	(28)
2.2.3 实施阶段	(29)
2.2.4 评定阶段	(31)
2.3 有限评估和维护性评估方法	(34)
2.3.1 有限评估	(34)
2.3.2 准备阶段	(35)
2.3.3 计划阶段	(38)
2.3.4 实施阶段	(39)
2.3.5 评定阶段	(40)
第三章 仿真模型确认方法	(41)
3.1 基本概念及有关的讨论	(41)
3.1.1 模型的有效性和精度	(41)
3.1.2 应用目的和实验条件	(42)
3.1.3 仿真模型输出类型	(42)
3.1.4 数据收集方法	(44)

3.1.5 置信区间与样本容量.....	(45)
3.2 模型确认方法综述.....	(48)
3.3 模型确认的统计方法.....	(50)
3.3.1 置信区间法.....	(51)
3.3.2 假设检验法.....	(62)
3.4 灵敏度分析的统计回归方法.....	(65)
3.4.1 建立模型输入/输出关系的回归模型.....	(66)
3.4.2 选择优良回归模型.....	(70)
3.4.3 回归模型一致性检验.....	(72)
3.4.4 灵敏度分析.....	(72)
3.5 理论模型有效性确认方法.....	(73)
3.6 模型文本化方法.....	(74)
3.7 仿真实验设计方法.....	(78)
3.8 模型确认应用示例.....	(88)
3.8.1 仿真实例介绍.....	(88)
3.8.2 仿真模型分解.....	(90)
3.8.3 子模型精度计算.....	(93)
3.8.4 模型的加权可信度.....	(101)
第四章 仿真程序验证方法	(102)
4.1 验证方法综述	(102)
4.1.1 代码会审	(102)
4.1.2 静态分析和动态测试.....	(105)
4.1.3 实例测试	(112)
4.2 系统流程图.....	(112)
4.3 数据流图和数据字典.....	(115)
4.3.1 数据流图.....	(115)
4.3.2 数据字典.....	(117)
4.4 图形工具.....	(120)
4.4.1 层次方框图.....	(120)

4.4.2 IPO 图.....	(121)
4.4.3 盒图(N-S 图).....	(122)
4.5 技术验证.....	(124)
4.6 程序测试.....	(130)
第五章 仿真支持系统验证方法	(136)
5.1 IHSL 语言及参照系统.....	(136)
5.2 仿真策略正确性检验.....	(139)
5.3 交互能力测试.....	(146)
5.4 伪随机数发生器的检验.....	(147)
5.4.1 均匀性检验.....	(148)
5.4.2 独立性检验.....	(149)
5.5 仿真结果正确性检验.....	(150)
第六章 特殊模型的可信度评估	(154)
6.1 人在回路中的仿真模型.....	(154)
6.1.1 人在回路中(MIL)模型.....	(154)
6.1.2 MIL 模型的常规评估	(157)
6.1.3 MIL 模型的有限评估和维护性评估	(159)
6.1.4 MIL 模型评估过程	(160)
6.2 硬件在回路中的仿真模型.....	(162)
6.2.1 硬件在回路中(HWIL)模型	(162)
6.2.2 HWIL 模型的常规评估	(164)
6.2.3 HWIL 模型的有限或维护评估	(165)
6.2.4 HWIL 模型评估过程	(166)
附录 1 逐步回归法计算机程序及说明	(170)
附录 2 SIMAN 与 IHSL 的比较对照表	(183)
附录 3 参考题库及其仿真结果	(189)
参考文献.....	(207)

第 1 章

绪 论

1.1 引言

随着仿真技术和计算机技术的发展,计算机仿真在工程技术、社会经济和国防军事的各个领域得到越来越广泛的应用。为了得到正确的结论,在利用仿真方法进行系统分析、预测和辅助决策时,必须保证仿真模型能够准确地反映实际系统并能在计算机上正确运行。因此,必须对仿真模型的有效性进行评估。仿真模型有效性评估主要包括模型确认和模型验证两部分内容。模型确认考察的是系统模型与被仿真系统之间的关系,模型验证考察的则是系统模型与模型计算机实现之间的关系。

对于一个具体的仿真项目来说,模型有效性评估贯穿于仿真课题研究的始终。必须指出,模型实际上是系统的一种抽象表述形式,要验证一个模型是否百分之百有效是极其困难的,也是没有实际意义的。另外,模型是否有效是相对于问题的研究目的以及用户需求而言的。在某些情况下,模型达到 60%的可信度便可满足要求;而在另外一些情况下,模型必须达到 90%以上的可信度才行。

在评估一个模型是否有效时,可能会产生以下三种类型的判断错误:

1 类错误: 仿真结果本应有效,却判为无效;

II 类错误: 仿真结果本应无效, 却判为有效;

III 类错误: 研究目的不明确而误认为明确, 即问题研究的实际内容与所需研究的内容不相符。

称 I 类错误发生的概率为建模者风险; II 类错误发生的概率为用户风险; III 类错误发生的概率为建模者与用户的共同风险。仿真研究遭致失败的主要原因是实际系统的运行规律缺乏深刻的认识, 最终反映为上述三类判断错误。

仿真模型的建立要耗费大量的人力、时间与资金, 建立大型的复杂系统模型甚至可能需要几年时间和上百万元经费才能够完成。值得注意的是, 无论国内还是国外, 在仿真系统的研制过程中, 人力、时间与资金主要耗费在建模过程和仿真运行上, 对模型的确认和验证工作还不够重视。这就使得许多仿真系统的应用遇到障碍——用户对所用模型心存疑虑。忽视模型确认和验证工作的主要原因, 一是费用问题, 二是迄今为止尚未形成一套完整而行之有效的模型有效性评估理论和方法。

对模型有效性问题的研究至今已有 30 多年的历史了。近十几年来, 模型的确认和验证在国内外仿真界受到了越来越多的关注。美国学者 Balci 和 Sergeant 曾先后两次进行了模型确认和验证方面研究文献的收集工作, 所收集的文献来源于国际仿真学术会议录、论文集、期刊杂志、技术报告等。第一次收集在 1980 年, 共收集文献 125 篇。第二次在 1984 年, 收集的文献数目达 308 篇。从分析的结果可以看出, 仿真界对模型确认和验证的重视程度在不断增加, 模型确认和验证的应用研究范围也在不断扩展。夏季计算机仿真会议(SCSC)于 70 年代末开始将模型确认列为一项专门议题。自此之后, 每期会议录中都收录模型确认和验证方面的专题论文。同时发表在《Simulation》, 《Operations Research》, 《Communications of the ACM》, 《Management Science》, 《Simulator》, 《IEEE Transaction》等国际杂志上的有关文章

也越来越多。此外，来自工程界的相当数量的技术报告也涉及到模型确认的问题。

国外已有一些国家的研究部门和职能机构在模型确认和验证的应用方面做了大量的工作，其中美国国防部门最具代表性。美国的科技人员较早注意到仿真模型确认和验证的重要性，并做了大量的工作。对“爱国者”导弹半实物仿真模型的确认就是成功的实例之一。其它实例包括 BGS(Battle Group Simulation)，LDWSS(Laser Designator/Weapon System Simulation)等武器仿真系统都经过了确认和验证；美国宇航局(NASA)对 TCV(Terminal Configured Vehicle)仿真系统进行了专门的确认；美国国防部对“星球大战”计划及其后续的“战区导弹防御计划”中的仿真项目都拟定并实施了相应的确认和验证计划。美国国防军事部门计划投入大量的人力和财力，对过去已建立的或正在建立的仿真系统进行验证、确认和认定。

但是，总的来说，模型确认和验证的研究与应用工作的进展还是比较缓慢的。美国西北大学 Hoover 教授 80 年代初的统计结果是：在有关仿真的论文中，提到模型确认和验证的文献数目最多不超过论文总数的 30%，而“绝大多数有关仿真的论文根本没有提到模型确认和验证的问题”。美国陆军导弹司令部负责仿真系统工作的 Holmes 博士在 80 年代初对北约成员国的 24 个主要仿真机构进行了一项调查，发现绝大部分机构在其仿真系统研制中没有系统地使用过任何模型确认和验证的技术。近 10 年来情况虽有好转，但还远远不够。在我国，这种情况更加严重。我国的仿真文献直到现在还极少涉及模型的确认和验证问题。仿真学术会议还没有将模型确认和验证作为专门议题；已出版的仿真书籍中很少有章节介绍模型确认和验证方法，极个别的虽然提到也仅限于简单介绍。另外，比较系统的模型确认和验证方面的应用工作也很难见到。

仿真模型往往是为某一特定目的开发的。开发的过程也是模型建立与修改的过程，需要反复进行；而且仿真模型是在一定假设条件下对现实系统的简化，它只能在一定程度上近似地反映所研究的系统，不可能做到绝对精确。仿真模型的这些特点决定了仿真模型的确认和验证是一个复杂的过程。随着仿真技术的迅速发展和广泛应用，仿真模型的复杂程度越来越高，层次越来越丰富，类型更加多种多样，对模型确认和验证方法也提出了新的需求。

1.2 影响模型有效性的主要因素

模型是用来描述系统的全部或局部状况的。建立模型的首要宗旨就是力争使模型能全面而恰如其分地表达所要研究的系统。尽管建模者可能耗费了大量的时间、资金与精力，然而几乎可以肯定地说，绝大多数模型并不是对原系统完全准确的表述。换言之，模型与现实系统之间总是存在着一定的差距。这种差距往往影响了模型的有效性。模型与现实系统不能完全吻合的主要因素包括：

(1) 建模的原理和方法不正确。或者原理和方法虽是正确的，但建模时的假设条件、参数选取或模型简化的方法不对。

(2) 建模过程中忽略了部分次要因素。由于对所研究的系统影响较小或与研究目标不甚相关，一些因素在建模中被忽略。这种忽略在一定程度上具有潜在的危险。首先，一个因素对系统的影响小到什么程度才应忽略并没有明确的标准。其次，在对模型进行多次修改的过程中，研究目标很可能发生偏离；而此时某个已被忽略的因素的影响可能变得不可忽略了。第三，有些因素可能由于模型求解方法上的限制（比如约束不能太多，或不可解等）而未予以考虑。第四，有些情况下，在忽略某因素时可能存在分

歧意见，最后只是由于人为意志而决定将其忽略。

(3) 目前尚没有一套标准来评价哪些约束在建模时是可以忽略的。在建模过程中，常常是凭经验决定约束的取舍，这就不可避免地会造成模型与现实系统之间的差异。

(4) 模型仿真实验的时间过短。有时仿真模型所描述的是一个复杂而缓慢的变化发展过程，这类模型的仿真实验常常需要较长的时间。此时，如果仿真时间太短，就得不到足够大的统计样本，从而给最后的分析带来许多误差。因此，仿真运行的时间是影响模型运行结果精度的因素之一。

(5) 对模型初始数据的选取存在失误。对于某些系统来说，仿真模型的初始状态对仿真的输出有直接影响。初始数据的偏差可能会引起仿真结果较大的“扰动”。而且，初始数据可能影响仿真的“预热”时间，所谓“预热”是指仿真达到稳态之前经历的一段过程。合理的初始数据可以缩短仿真的“预热”时间，从而使系统较早进入稳定状态。此外，模型中使用的数据可以直接从原始数据中选用，也可以经过一定处理后再使用，但它必须与原始数据保持一致，或者至少在分布上保持一致。

(6) 随机变量的概率分布类型确定或参数选取有误。仿真模型中一般都含有或多或少的随机变量，随机变量服从一定的概率分布，能否正确确定这些概率分布直接影响到模型的质量。一般来讲，只要收集到足够多的原始数据，并严格按统计方法进行分析，所确定的概率分布应是正确的。但大量的事实说明，在很多情况下对数据的收集存在较大困难，必须经过艰苦、细致、全面的工作才能收集到足够多的真实数据。原始数据的偏差和短缺，最终必然造成在随机变量概率分布类型的确定或模型参数的选取上的误差，从而影响模型的有效性。这是一个十分严重的潜在危险。另一方面，若原始数据不是在模型所要求的实验环境条件下收集的，则根本无法使用。

(7) 仿真输出结果的统计误差。对仿真输出结果的收集和统计方法有严格的要求。理论上讲，某个变量的仿真输出结果必须在达到稳态后才能开始记录；否则，其统计结果就可能不正确。对于不同模型来说统计方法也可能有所不同。若无论任何模型都采用同一种统计方法显然是不妥的。应当特别指出的是，目前许多仿真人员认为只要输出结果与实际系统相符就没问题，这是一种十分危险的想法。因为表面的吻合也许只是一种巧合，不能作为判断模型有效性的主要标准。

(8) 在进行计算机实现、求解和实验过程中，仿真模型的有效性还会受到诸如计算机字长、编码错误和算法等方面的影响。

上述诸多因素容易使人认为仿真模型具有“先天不足”。应该指出，这种“先天不足”是不可避免的。正是这种“先天不足”的存在，使得仿真模型的有效性评估变得十分重要。建模人员的首要任务就是尽量减少这种“先天不足”，同时又大胆地去伪存真，以得到对现实系统最合适的描述。

1.3 仿真模型的确认、验证和认定

仿真模型有效性的概念出现在 20 世纪 60 年代。随着计算机仿真技术在各个学科和工程领域的普遍应用，仿真模型有效性问题日益受到人们的关注。模型有效性问题研究逐渐成为仿真研究的一个重要内容。1967 年，美国兰德公司的 Fishman 和 Kiviat 明确指出，仿真模型有效性研究可以划分为两个部分——模型的确认(Validation)和验证(Verification)。这一观点被国际仿真学界普遍采纳。模型确认具有特定的含义，即通过比较在相同输入条件和运行环境下模型与实际系统输出之间的一致性，评价模型的可信度或可用性。而模型验证则是判断模型的计算机实现是否正确。尽管确认和验证在各个文献中的定义不尽相同，但对于二者之间

的区别，专家的看法却是基本一致的。简单地说，模型确认强调仿真的理论模型与实际系统之间的一致性，模型验证则强调理论模型与计算机程序之间的一致性。在有些文献中也采用工程技术人员容易接受的“校模”和“验模”两个术语来分别代替“确认”和“验证”。模型的确认和验证与建模、仿真过程之间的关系见图 1.1。

在图 1.1 中，“问题实体”指被建模的对象，如系统、观念、政策、现象等。“理论模型”是为达到某种特定的研究目的而对问题实体进行的数学 / 逻辑描述。“计算机模型”(Computerized Model)是理论模型

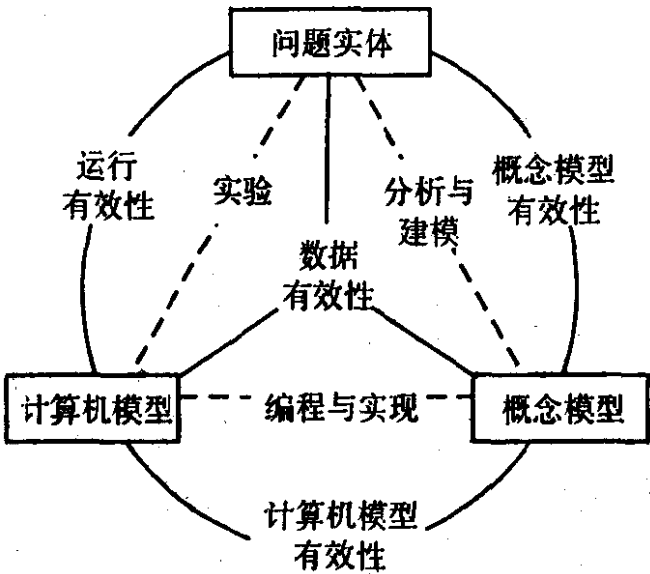


图 1.1 确认和验证与建模 / 仿真过程的关系

型在计算机上的实现。通过“分析与建模”活动可以建立理论模型。计算机模型的建立需通过“编程及实现”这一步骤来完成。经过仿真“实验”即可得到关于问题实体的仿真结果。

模型确认包括理论模型有效性确认、数据有效性确认和运行有效性确认三部分内容，其中运行有效性确认是模型确认的核心。

理论模型有效性确认是对理论模型中采用的理论依据和假设条件的正确性以及理论模型对问题实体描述的合理性加以证实的过程；数据有效性确认用于保证模型建立、评估、检验和实验所用的数据是充分的和正确的；运行有效性确认是指就模型开发目的或用途而言，模型在其预期应用范围内的输出行为是否有足够

的精度。

理论模型有效性确认包括两项内容:

(1) 检验模型的理论依据及假设条件的正确性。它具有两个含义,一是检验理论依据的应用条件是否满足,如线性、正态性、独立性、静态性等;该检验过程可以利用统计方法进行。二是检验各种理论的应用是否正确。

(2) 子模型的划分及其与总模型的关系是否合理,即分析模型的结构是否正确,子模型间的数学/逻辑关系是否与问题实体相符。理论模型经确认有效后,才能对其进行试运行。最后根据输出结果评估模型的精度。若理论模型无效,应重复分析、建模及确认的过程。

在模型开发过程中,数据用于模型的建立、校验和运行。充分、正确、精确的数据是建立模型的基础。数据有效性确认包括对模型中关键变量、关键参数及随机变量的确认,以及对运行有效性确认时所使用的参数和初始值等数据的确认。

运行有效性确认的目的是对模型输出结果的精度进行计算和评估。其前提是实际系统及其可比系统的数据均可获取。通过比较模型和实际系统在相同初始条件下的输出数据,可对模型有效性进行定量分析。与实际系统相类似的系统,确认为有效的解析模型,工程计算模型,以及经过确认的仿真模型都可作为仿真模型的可比系统。理论模型确认、数据有效性确认及模型验证是运行有效性确认的前提。经运行有效性确认被认为有效的模型即可作为正式模型投入运行,利用它进行实际问题的研究。若模型在运行有效性确认时被确认为无效,其原因可能是理论模型不正确,或计算机模型不正确,也可能是数据无效。具体原因的查明需从分析与建模阶段开始,重复模型的构造过程。若实际系统及其可比系统不存在或完全不可观测,则模型与系统的输出数据无法进行比较。在这种情况下,一般只能通过模型验证和理论模型确认,

定性地分析模型的有效性。

近年来，随着仿真有效性的研究和应用工作不断深入，美国国防军事仿真领域已达成一种共识，即认为与模型和仿真有效性有关的主要工作包括模型验证和确认(V&V)、版本管理(CM, Configuration Management)以及模型认定(Accreditation)等三项内容。美国军事运筹学会关于这些概念的定义如下：

模型验证是一个过程，它确定模型的计算机实现是否准确地表示了模型开发者对系统的概念表达和描述。

模型确认是一个过程，它从预期应用的角度来确定模型表达实际系统的准确程度。

模型版本管理是一种制度，它应用技术上和行政上的监督、控制手段，辨明模型的功能需求和能力并编写相应的文本。然后，监控模型能力的变化，将这些变化写入文本并发布相应的报告。

模型认定是一项相信并接受某一模型的权威性决定，它表明官方已认可模型适用于某一特定的目的。

以上各项工作一般统称为模型验证、确认和认定(VV&A)，国内习惯称之为模型校验。VV&A的目的是得到对模型和仿真系统(M&S)的信任度(Credibility)。评估仿真系统可信任度的过程又称为模型可信度评估(C Confidence Assessment)，也就是说可信度评估是一种特定的 VV&A 过程和方法。目前对于信任度还没有定

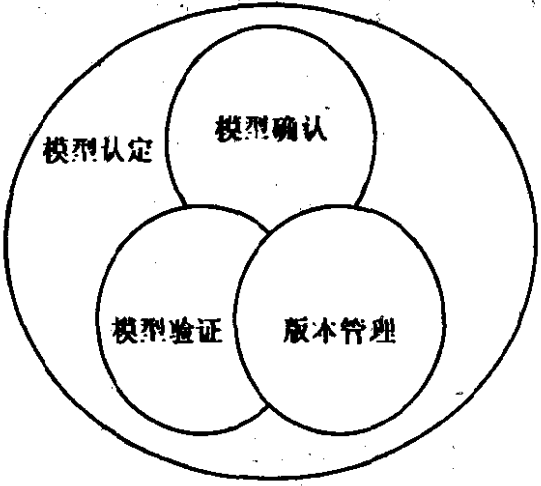


图 1.2 VV&A 的概念

量的度量方法,最终只能通过用户对 M&S 主观信任程度来表征。验证、确认、版本管理和认定四个概念之间存在交叉和包涵关系(见图 1.2)。验证、确认和版本管理是模型认定的途径和手段。

1.4 美国国防部门 VV&A 开展情况

1.4.1 基本情况

通过多年的研究,美国国防部首脑已经认识到加强 M&S 管理及制定相应政策的重要性和必要性,于 1991 年成立了国防建模和仿真办公室,并于 1994 年发布关于 M&S 管理的 5000.59 号令,要求各军种和国防部门建立关于模型验证、确认和认定的政策、步骤及指南。当前美国国防部门的大部分工作集中在 VV&A 的政策和行政管理方面,另一部分工作是有选择地对已完成的 M&S 项目进行 VV&A 内容复查。很少有单位在 VV&A 技术研究或已有技术人员的培训方面做工作,唯有斯马特(SMART)项目在发展模型验证和确认技术方面付出了很大的努力。近年来,美国国防部门为推动 VV&A 工作进行了大量努力。

(1) 1992 年美国陆军部发布了陆军条例 AR5-11。该条例全面阐述了陆军 M&S 管理的有关规定。1993 年,美国陆军部下发了 PAM5-11 手册。该手册给出了有关 VV&A 的指导原则和各种 VV&A 技术。另外,陆军中分管训练、试验等具体业务的领导机关(如 TRADOC, OPTEC 等)也分别发布了各自的 VV&A 指南。

(2) 1994 年美国空军发布 VV&A 条令草案供内部讨论。空军的 VV&A 计划包括对指挥员、项目经理及 M&S 开发组长的培训,使他们了解 VV&A 的必要性,并知道如何进行 VV&A 管理。

(3) 美国海军于 1994 年发布关于 M&S 项目管理的条令(5200.XX)草案,后续的命令和出版物中将包括有关 VV&A 的内