

仿真模型可信度评估研究综述及难点分析

杨小军 徐忠富 张 星 孙丹辉

(中国洛阳电子装备试验中心 河南 洛阳 471003)

摘 要 近年来,随着计算机和建模与仿真技术的不断发展,仿真模型在军事、社会、经济等领域得到了广泛应用。同时,仿真模型的功能和性能大大增强,仿真系统越来越复杂,仿真模型的可信度评估面临着新的挑战,已经成为建模与仿真领域的关键难题。鉴于此,文中对国内外仿真模型可信度研究的主要工作进行了系统的回顾与总结,特别地分析了近年来的最新研究成果。首先,明确了仿真模型可信度的概念及其与校核、验证与确认(Verification, Validation and Accreditation, VV&A)之间的关系;然后,总结了仿真模型可信度研究的发展历程、范式和生命周期模型,对仿真模型可信度评估的方法与技术进行了总结与分类;最后,提出了仿真模型可信度评估面临的 8 项挑战。通过综述与难点分析,文章为制定仿真模型可信度评估的研究框架、创新可信度评估理论和方法提供了参考。

关键词 可信度评估, VV&A, 仿真模型, 研究综述, 难点分析

中图法分类号 TP391.9 文献标识码 A

Overview and Difficulties Analysis on Credibility Assessment of Simulation Models

YANG Xiao-jun XU Zhong-fu ZHANG Xing SUN Dan-hui

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract Along with the developing of computing and modeling and simulation techniques, simulation models have been applied in military, social and economic areas widely in these years. Meanwhile, the capabilities of simulation models become more and more strong, and simulation systems become more and more complex. Thus, the credibility assessment of simulation models is confronted with many challenges and becomes the crucial difficult problem nowadays. This paper reviewed principal works, especially current researches on credibility assessment of simulation models. Firstly, the concept of credibility and its relationship with Verification, Validation and Accreditation(VV&A) were introduced. Secondly, the research history, paradigm and life cycle of credibility assessment of simulation models were summarized, and important methods and techniques were analyzed and classified. Finally, eight challenges of credibility assessment of simulation models were presented. The overview and difficulties analysis provide significant references for constructing the framework and innovating theories and methods for the credibility assessment of simulation models.

Keywords Credibility assessment, VV&A, Simulation models, Overview, Difficulties analysis

1 引言

仿真具有无破坏,可重复,经济,安全,高效,保密,不受气候条件、时间、空间限制等优点,是分析、研究和设计各种复杂系统的有效工具,是探索客观世界的重要手段。随着计算机和仿真技术的发展,建模与仿真在军事、社会、经济等领域得到了广泛应用。与此同时,人们对仿真模型的可信度也越来越重视。仿真模型本质上是对现实世界的近似抽象,其可信度直接关系到仿真应用的成败。缺乏足够可信度的仿真模型产生的仿真结果可能会误导决策者,甚至酿成无法挽回的军事、政治、经济上的损失。

从 1997 年到 2007 年,国内众多学者对仿真模型可信度评估及 VV&A 理论相关研究工作进行了总结和综述^[1-7]。伊文英等^[8]总结了基于 Agent 仿真模型的校核与验证的研究

进展和分析框架。最近,李伟等^[9]系统研究了复杂仿真系统的特点及可信度评估面临的挑战,并给出了若干解决方案和应对策略。

十多年来,随着计算机的普及和推广,特别是计算机运算速度和网络带宽及存储能力得到了迅猛提升,人们能够利用计算机模型来精细模拟复杂系统和过程。正由于此,计算机科学突破了实验和理论科学的局限性,成为人们认识和改造世界的重要手段。近年来,人们利用计算机模拟构建了大量的经济仿真系统、社会仿真系统和军事仿真系统,建模与仿真的范围越来越广,仿真模型越来越复杂。这些计算机仿真模型能够快速、低成本地模拟复杂现象和过程,同时产生了大量的功能特性和仿真数据。与之相适应地,仿真模型的可信度评估及 VV&A 研究得到了进一步发展,同时也面临着许多新的挑战。

本文受“十三五”装备预研领域基金(6140001010506)资助。

杨小军(1986—),男,硕士,助理研究员,主要研究方向为系统仿真、评估决策, E-mail: yangxiaojun2007@gmail.com(通信作者);徐忠富(1969—),男,博士,研究员,主要研究方向为建模与仿真;张 星(1986—),男,硕士,助理研究员,主要研究方向为仿真实验与评估;孙丹辉(1982—),男,工程师,主要研究方向为仿真实验。

本文系统回顾了国内外仿真模型可信度研究的主要工作,特别分析了近年来的最新研究成果,并从中总结了相关概念和主要方法,分析了仿真模型可信度评估面临的挑战。

2 相关概念辨析

2.1 基本概念

研究人员从不同的工程技术背景出发,提出了仿真模型可信度的定义,其大体可分为 3 类^[10]。

(1)基于相似度的定义:仿真模型可信度是由仿真模型与被仿真对象之间的相似度决定的,是仿真模型与被仿真对象在功能、结构上的相似程度。

(2)基于置信度的定义:仿真模型实验结果处于置信区间内的概率为仿真模型可信度。

(3)基于误差的定义:仿真模型可信度取决于仿真结果的精度,是指用户对仿真实验结果应用到某一研究时的正确性的信任程度。

通常认为,仿真模型可信度是指在特定的应用目的条件下,仿真用户对于所开发的仿真模型以及仿真输出结果是否正确的一种信任程度;或者是指,基于一定的建模与仿真目的,开发的仿真模型能够再现被仿真对象各项指标的可靠程度。

从可信度的定义可以看出,仿真模型可信度包括客观和主观两个方面的内容:客观方面是指仿真模型在一定的相似形式下(结构、功能、输出结果等)与被仿真对象的相似程度;主观方面是指基于现有相似程度,仿真模型能否满足预期的仿真应用要求及满足要求的程度。因此仿真模型可信度评估通常结合使用定性方法和定量方法。

国内外仿真领域都已经确认,对于仿真模型可信度的保障可以通过校核、验证与确认(VV&A)工作来完成。校核是确定仿真模型和有关数据是否准确反映了开发者的概念描述和技术规范。验证是从模型的应用目的出发,确定仿真模型和有关数据代表被仿真对象的正确程度。确认是权威地鉴定仿真模型和有关数据用于特定目的是否可以接受。

通过规范建模与仿真过程以保证仿真模型的可信度是 VV&A 工作的初衷。VV&A 这 3 个过程是相辅相成的,一般地,校核侧重于对建模过程的检验,而验证侧重于对仿真结果的检验,确认则是在校核与验证的基础上,由权威机构来最终确定仿真模型对于某一特定应用是否可接受。

2.2 可信度评估与 VV&A 的关系

仿真模型可信度评估与 VV&A 之间的关系非常密切。美国国防建模与仿真办公室的《VV&A 实践指南》中指出“仿真模型的可信度可以通过 V&V 来测量”,也有人认为仿真模型可信度评估就是 VV&A。事实上,在没有 VV&A 这个提法之前,人们已经开始注意到仿真模型可信度的问题,仿真模型可信度的研究带动、促进并丰富了 VV&A 理论的发展和研究。VV&A 目的在于提高仿真模型的可信度,是仿真模型可信度分析的基础和重要内容,仿真模型可信度评估工作又促进并指导了 VV&A 工作的开展。总的来讲,VV&A 起源于并最终归属于仿真模型的可信度分析,为仿真模型可信度评估提供定性和定量数据。

VV&A 是贯穿建模与仿真全生命周期的质量控制技术,是一个过程管理,也是道德规范和政策要求,是仿真模型可信

度的一个完整的保证体系。例如,VV&A 要求在建模与仿真过程中,首先要对概念模型进行校核与验证^[11]。

VV&A 的基本出发点是:充分而有效的 VV&A 行为为一定能够保证仿真模型具有较高的可信度。对一个已有的仿真模型进行可信度分析无疑是非常困难的。VV&A 则是在系统开发过程中最大限度地减少可能导致可信度降低的因素,通过对过程的监控来保证可信结果,这从某种程度上回避了上述难题。仿真模型可信度分析是在建模与仿真 VV&A 过程中求取仿真模型可信度的重要活动。可信度评估与 VV&A 之间既有联系又有区别,主要表现为以下几个方面^[12]。

(1)可信度评估与 VV&A 活动的主体不一样。可信度评估活动的主体主要是专门的评估人员及用户;而 VV&A 活动的主体比较广泛,包含仿真模型开发与使用的所有人员。

(2)VV&A 为可信度评估提供文档、数据、方法和工具的支持,因而可信性评估要充分利用 VV&A 的成果,而可信性评估的结果也可以为 VV&A 的确认工作提供重要的参考依据。

(3)VV&A 是贯穿于建模与仿真整个生命周期的一项重要活动,以一定规范来约束系统的开发,利用 V&V 技术与方法来确保仿真模型的可信度;若可信度达不到要求,可以督促开发人员进行修改,再次进行 V&V 与可信度评估。因此,VV&A 是一个反复迭代的过程;而可信度评估是对建模与仿真的各个阶段的产品进行可信度度量的活动,这个过程要比 VV&A 过程短。

(4)VV&A 中的确认结论是在系统的可信度满足要求的情况下由确认代理作出,其中可信度评估的结果是确认的一个重要条件;而可信度评估是对仿真模型进行客观评价,可不对评估结果作出是否可以接受的判断。

3 研究现状分析

3.1 理论研究

仿真模型可信度研究有近 60 年的历史。20 世纪 50 年代末 60 年代初,人们对使用仿真模型代替实际系统进行实验的可信度有了怀疑,开始对仿真模型进行检验。1959 年,Conway 等率先探讨了仿真模型的可信度问题^[13]。1962 年,美国学者 Biggs 等就对“警犬”导弹仿真模型的可信度进行了全面评估^[14]。1967 年,Naylor 等建议采用均值(方差)分析、 χ^2 检验、因子分析、Kolmogorov-Smirnov 检验、非参数检验、回归分析、频谱分析、Theil 不等式系数等方法分析仿真结果与实测数据的吻合度(goodness of fit,degree of conformity),从而对仿真模型进行验证^[15]。Mckenny 在评论 Naylor 等的文章时指出,仿真模型验证并不是要判断仿真模型能否完全复现出被仿真对象,而是判断仿真模型的输出误差是否大到淹没其有用性,因此,在验证仿真模型时要考虑模型的具体应用目的,他还指出可依靠精通该问题域的专家采用图灵测试方法对仿真模型进行验证^[16]。Schrack 和 Holt 在评论 Naylor 等的文章时指出,仿真模型的验证结果不应是判定其正确或者错误,而关键是判断模型的有效性(usefulness),他们提出对仿真模型预期应用中的各项变量的验证结果进行加权求和,得到总体验证结果^[17]。1968 年,美国兰德公司的 Fishman 和 Kiviat 提出将仿真模型的检验过程划分为模型校核(Verification)和模型验证(Validation)两个部分,并对二者在

评估过程中承担的角色进行分析,从此,仿真模型 V&V 这一观点被国际仿真界普遍采纳^[18]。

1971 年, Van Horn 进一步指出,模型验证的核心是考查仿真模型与被仿真对象在特定的仿真应用目的下所表现出的行为特性的一致程度,而不是单纯地考查仿真模型的建模机理是否正确^[19]。Shannon 在 1975 年进一步明确提出,模型验证的根本途径是,仿真模型输入与真实系统的输入相同的情况下,通过比较仿真模型的仿真实验输出和真实系统的实际输出来判定仿真模型的有效性^[20]。1978 年, Kheir 和 Holmes 认为,在研究复杂系统的可信度时,应按照系统本身的特点将其分解为多个子系统,这样可以将仿真模型中的误差分解到各子系统中,便于更好地发现仿真模型中的误差并进行相应修正^[21]。

20 世纪 80 年代以后,随着大型复杂仿真系统的开发与应用,建模与仿真及其 VV&A 的难度不断增加,这就迫切需要建立规范、科学和有效的建模与仿真及其 VV&A 范式。此后, Schlesinger、Sargent、Knepell 和 Zeigler 等人均提出了对建模与仿真过程的理解^[22]。其中, Sargent 提出的建模与仿真及其 VV&A 范式^[23]得到了广泛认可,如图 1 所示。

随着仿真模型越来越复杂,对一个已有的仿真模型进行验证与可信度分析无疑是非常困难的。因此,人们更加注重在仿真模型开发的全生命周期的各个阶段对建模与仿真过程进行 VV&A。Balci 等学者在 VV&A 的原则及建模与仿真全生命周期的 VV&A 过程方面的研究工作比较具有代表性。

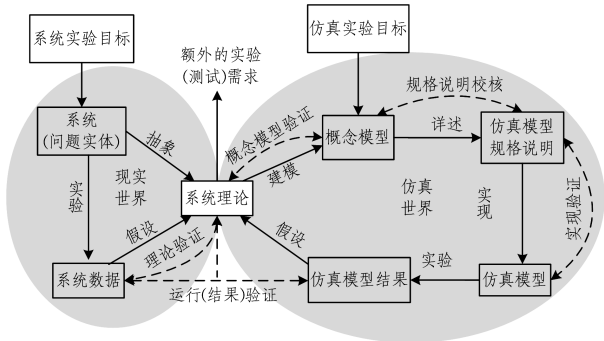


图 1 建模与仿真及其 VV&A 范式

Balci 等学者对 VV&A 进行了系统研究,在总结有关研究资料的基础上,提出了 VV&T(Test) 的概念并总结了 15 条原则^[24],在 2010 年将其扩充为 20 条黄金法则,为建模与仿真从业者进行校核、验证、测试与验收提供了参考依据^[25]。国内相关综述论文^[2,5]对 VV&T(Test) 的 15 条原则进行了介绍与分析。

Balci 认为,对大型复杂仿真模型的可信度评估应贯穿于仿真模型开发的全生命周期的 7 个评估过程,并列举了每个评估过程可用的模型校核与验证方法^[26]。2012 年, Balci 进一步指出, VV&A 应贯穿于建模与仿真的全生命周期中,将建模与仿真的生命周期划分为 10 个阶段,对每个阶段执行 VV&A,提出了建模与仿真及其 VV&A 生命周期模型^[27],如图 2 所示。

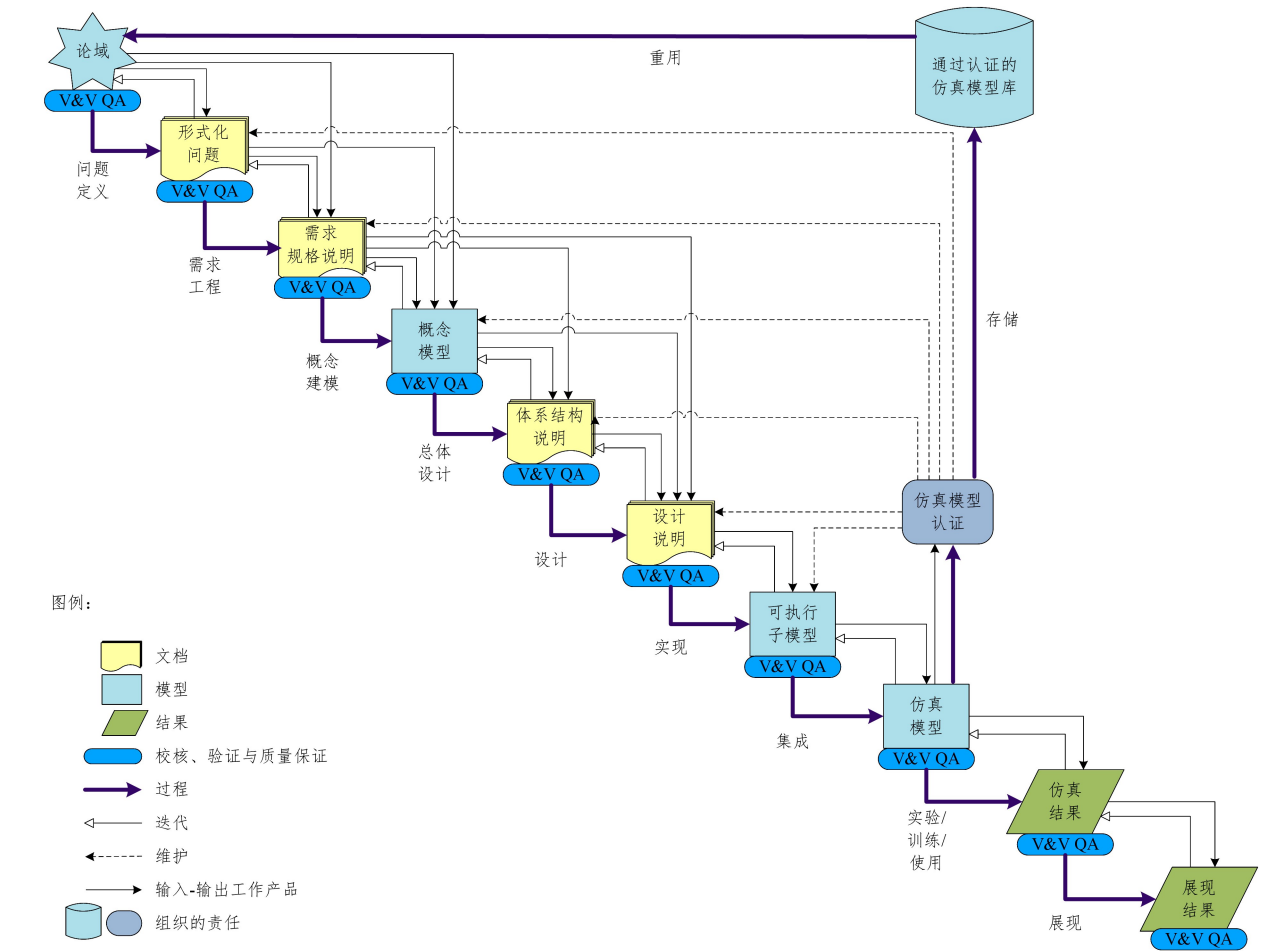


图 2 建模与仿真及其 VV&A 生命周期模型

2016 年, Sargent 等学者指出,仿真模型的验证应针对其

每项预期应用目的,均设定相应试验条件进行检验分析,并提

出了 3 种确定仿真模型是否有效(可信)的决策方法^[28]。第一种决策方法是现实中经常使用的,由仿真模型的开发团队判定仿真模型是否有效;第二种决策方法是由仿真模型的用户判定仿真模型是否有效;第三种决策方法也称为“独立的校核与验证(Independent Verification and Validation,IV&V)”,由第三方判定仿真模型是否有效。

3.2 方法与技术研究

1997 年,Balci 归纳了可用于传统仿真模型的校核与验证的 77 种方法和面向对象仿真模型的校核与验证的 38 种方法^[29]。这些方法主要来源于软件测试领域,通常用于测试软件的正确性与可靠性。国内相关综述论文^[2,5-7]对仿真模型校核与验证的 77 种方法进行了介绍与分析。

Sargent 总结的仿真模型校核与验证的方法包括^[23]:动画法、与其他模型比较法、数据关联正确性检验、退化测试、事件验证、极端条件测试、表面验证、历史数据验证、内部检验、多阶段验证、图示法、灵敏度分析、结构走查、运行跟踪、图灵测试等,并根据被仿真系统是否可观测,对运行验证方法进行了简单分类,详见表 1。

表 1 运行验证方法分类

决策方法	可观测系统	不可观测系统
主观方法	利用图示法进行比较	考查模型行为
	考查模型行为	与其他模型进行比较
客观方法	利用统计测试与其他模型结果进行比较	

在基于专家的主观方法的基础上,Ahn 等^[30]提出了利用 Delphi 方法和群决策技术对仿真模型的可信度进行评估。Jebeile 等^[31]肯定了评估人员的经验在模型验证中的重要作用,同时也强调了其局限性。

在客观分析方面,仿真模型验证的典型方法是,把驱动真实系统运行的数据和环境输入到仿真模型中,比较仿真模型输出与真实系统输出的数据一致性,从而分析仿真模型与真实系统的相似性,验证仿真模型的有效性与其可信性。

针对输出特性的客观分析,国内外许多研究者提出了基于统计检验^[15]、Theil 不等式系数^[21]、误差分析^[32]、相关系数^[33]、灰色关联分析^[34-36]、相似系数^[37]、时间序列分析^[38-41]、频谱分析^[38,42]、小波分析^[43-44]等对仿真模型输出结果与真实数据(参考数据)的一致性进行定量分析的验证方法。Hauduc 等^[45]总结了 30 种计算仿真模型输出结果与真实数据(参考数据)的一致性的方法。Crochemore 等^[46]更是列举了多达 60 种计算仿真模型输出结果与真实数据(参考数据)的距离

或相似度的数学公式。

近年来,在多元输出、多样特征和动态输出的复杂仿真模型的校核与验证及可信度评估方面,取得了诸多研究成果。Fachada 等^[47]和 Li 等^[48]利用主成分分析对多元输出仿真模型进行验证。Zhao 等^[49]利用马氏距离对多元相关输出的仿真模型进行验证。Liao 等在仿真模型验证中综合考虑多类输出特征。Olsen 等综合结构、行为和数据 3 个方面的验证结果计算仿真模型的可信度^[51]。Kwag 等利用贝叶斯网对多子模型构成的复杂仿真模型进行验证^[52]。Li 等采用贝叶斯思想在仿真模型验证中引入模型输出的先验信息^[53]。Lamperti^[54]和 Atkinson 等^[55-56]分别利用 Shannon 熵和小波偏差分析对输出为时间序列数据的仿真模型进行验证。此外,Song^[57-58]利用着色 Petri 网验证系统结构、状态和功能的正确性。Guarro 等^[59]利用动态流程图方法和 Markov 元映射射技术对软件系统进行校核与验证。

随着仿真模型的功能需求不断增加、应用范围不断扩大,仿真模型的结构越来越复杂,输出特性越来越多样。因此,对仿真模型的单一行为、单一应用的数据一致性分析结果或定性评估结果难以完全满足可信度评估的需求。仿真模型可信度评估逐渐演变为一项复杂的多指标综合评估问题。鉴于此,许多研究者提出了基于层次分析法^[60-62]、模糊综合评判^[63]、相似理论^[64]、贝叶斯网^[65]等的仿真模型可信度综合评估方法。

Balci 等人设计并开发了一个称为 EE(Evaluation Environment)的建模与仿真可信度综合评估系统^[66],将可信度评估过程分解为 13 个步骤,基于功能层次分解思想建立可信度评估指标体系,并采用层次分析法计算指标权重。其中,叶节点指标的可信度评估为采用精确值、区间数或语言变量表示的区间[0,100]内的得分数。如果采用领域专家对某叶节点指标评估,则直接将领域专家的打分结果作为该叶节点指标的可信度得分;如果采用测试、直接测量或分析方法对某叶节点指标进行处理,则需将测试结果、直接测量结果或分析结果进行解释后,转换为该叶节点指标的可信度得分。

经过 50 多年的发展与完善,仿真模型 VV&A 及可信度评估方法与技术的研究已经取得比较丰富的研究成果,众多研究者提出了许多实用的仿真模型验证与可信度评估方法。这些方法可分为定性方法、定量方法与综合性方法三大类^[67-69],详见表 2。

表 2 仿真模型验证与可信度评估方法

方法分类		方法名称
定性方法		图灵测试、图示法、动画法、表面验证、曲线法、Delphi 法
定量方法	静态数据	点估计、区间估计、贝叶斯估计、 t 检验、 F 检验、 χ^2 检验、游程检验、秩和检验、置信区间法、回归分析
	时域	Theil 不等式系数、灰色关联分析、误差分析、特征匹配、相似系数法、相关分析
	频域	傅里叶谱分析、窗谱分析、最大熵谱分析、交叉谱分析、瞬时谱分析、小波频谱分析
	时频域	离散小波变换、离散短时傅里叶变换、离散 Gabor 变换
综合性方法		层次分析法、模糊综合评判、神经网络、支持向量机、相似理论、贝叶斯网

针对复杂仿真模型的可信度评估,通常需要建立可信度评估指标体系,综合采用多种定性和定量的评估方法^[70],根据各项评估指标的特点选择合适的验证与评估方法。

然而,Padilla 等^[71]最近对 283 位建模与仿真相关人员的问卷调查发现,目前,仿真模型校核方法主要是通过反复试错

(详见表 3),仿真模型验证方法主要是通过与真实数据进行比较(详见表 4),而大部分仿真模型未进行或很少进行确认。

表 3 校核方法实践占比

校核方法	试错法	正式方法	目测法	软件工具	其他方法	未校核
占比/%	35.8	21.2	19.9	8.6	13.9	0.7

表 4 验证方法实践占比

验证方法	真实数据	专家	其他模型	目测	第三方	其他	未验证
占比/%	55.6	17.2	7.9	5.3	1.3	11.3	1.3

2017 年,Sargent 和 Balci 在仿真模型校核与验证的历史回顾与总结中指出^[72],现有的仿真模型验证及可信度评估方法与技术是足够丰富的,需要加强实践中的重视与应用,其同时指出,参考数据的缺乏限制了一些如统计检验类方法的使用。

4 仿真模型可信度评估的难点分析

仿真模型可信度评估是一项非常复杂的过程,涉及对大量定性和定量指标的测量与评估,评估过程中通常还需要依赖相关领域专家的判断,同时需要将不同类型的测量与评估结果进行综合处理。如今的仿真模型越来越复杂,其状态变量与输出变量众多,变量关联关系复杂多样,如何度量复杂仿真模型的可信度,已经成为建模与仿真领域的关键难题。

(1)仿真模型输入变量的组合爆炸及不确定性

在一个复杂仿真模型中,通常存在多个输入变量,有些输入变量的取值范围较大,甚至存在一定的不确定性。多个输入变量的组合可能会导致输入空间的组合爆炸,在有限的时间和资源的限制下,不可能对每种组合都进行全面的测试。比如对于雷达仿真模型,不同的地形条件、气象环境、干扰情况、目标特性、目标数量、作用距离以及雷达自身采取的抗干扰措施等,都会对雷达仿真模型的输出产生影响,敌我双方在对抗过程中采取的决策行动甚至存在一定的不确定性。因此,对于如今的复杂仿真模型,要在所有可能面临的条件下测试仿真模型的输出特性或许是不可能的。

(2)仿真模型功能及输出特性的多样性

仿真模型的输出域或许不会像输入域那样出现组合爆炸的情况。但是,随着现今的仿真模型功能越来越多,可能需要分析仿真模型在同一输入下的多项输出特性,而对输出域进行准确完备地界定是很困难的。比如,对外军指挥所仿真模型的验证,就需要在某一态势和空情输入下,同时分析外军指挥所的情报融合功能、威胁评估功能、火力分配功能、作战方案评估功能等。有些仿真模型甚至需要模拟指挥员的决策过程和行为,在这种情况下,对仿真模型输出特性的界定和分析将更加困难。输出特性的多样性还体现在仿真模型对外交互的多样性,特别是在大型复杂仿真系统中,一个仿真模型与其他模型间通常存在多种交互关系。例如,在联合作战仿真中,指挥所模型不但要与上级、下级指挥所模型进行指挥命令和情报的交互,还需要与所属的武器单元仿真模型和侦察装备仿真模型等进行交互。

(3)被仿真对象参考数据的稀缺性

通过分析、比较仿真模型与被仿真对象在相同输入下的输出特性的一致性来判定仿真模型的可信度是最为客观、有效的方法。通常情况下,通过大量的仿真实验,可以获得足够的仿真结果数据。然而,由于时间、空间、经费、安全、保密、情报等限制,现实中不可能对被仿真对象(实际系统)进行充分的试验与观察。特别是对军事作战系统,历史积累的数据不足,导致被仿真对象的参考数据具有稀缺性。有些被仿真对象在真实世界甚至不存在,如设想的系统、未来战争模拟、研发项目的先期技术演示等。由于没有与之对照的参照物,分

析、评估这类仿真模型的可信度就更加困难。因此,在参考数据稀缺甚至没有的情况下,获得仿真模型可信度较为客观的分析结果是一项巨大的挑战。

(4)数据一致性分析结果与可信度映射关系的主观性

采用仿真模型与被仿真对象在相同输入下的输出特性的一致性来分析仿真模型的可信度时,通常会计算出仿真模型输出数据与被仿真对象输出数据的差异大小或相关大小,以反映输出特性的相似程度。特别是对于输出数据是时间序列的情况,如弹道导弹仿真模型输出的导弹轨迹数据,通常是计算两个时间序列之间的距离、TIC 系数、误差、相关系数等。但是,从数据一致性分析结果到可信度的映射过程,通常需要依赖领域专家或决策者的主观判断。例如,假设计算出来仿真模型输出的导弹轨迹序列与真实情况下的导弹轨迹序列之间的欧氏距离是 5.2,当把这个数量的差异转换为可信度时,通常需要借助领域专家或决策者的主观判断。

(5)输出数据及评估结果数据的异类性

仿真模型与被仿真对象的输出数据的类型多种多样,包括确定性数据、随机数据、非周期性时间序列、周期性时间序列以及描述性的功能特性等。例如雷达扫描周期、最大作用距离等可视作为确定性数据,导弹命中率、毁伤概率等通常视为随机数据,导弹飞行过程中随时间变化的推力、质量、速度、加速度等属于非周期性时间序列,卫星轨道、飞机巡逻航线等通常为周期性时间序列。不同类型的数据可能适合采用不同的数据一致性分析方法,如确定性数据适合采用误差分析方法,随机数据适合采用假设检验方法,非周期性时间序列适合采用距离及相关系数度量方法,周期性时间序列适合采用频域分析方法。这就需要根据实际情况选择恰当的数据一致性分析方法,同时这也导致了评估结果数据的类型多种多样。即使是对于同一项指标,采用不同的方法或不同专家的评估结果的表示方法也难以统一。例如,实际中可能采用精确值、区间数、统计值、等级程度、模糊语言、犹豫模糊语言等表示评估结果。

(6)仿真模型可信度评估指标关联关系的复杂性

现今的仿真模型是一般由多个子模块甚至子分模块等构成的大型复杂模型,需要完成多项功能特性的建模与仿真。因此,仿真模型可信度是一个综合性指标,不能只考虑仿真模型的某一行或部分行为特性的可信度,而需要建立可信度评估指标体系。虽然在选择可信度评估指标的过程中,尽可能地减小指标之间的耦合性,但是对于复杂仿真模型,很难真正实现指标之间完全无耦合。仿真模型(被仿真对象)的多项输出特性之间可能存在复杂的耦合关系,例如,导弹飞行过程中的推力与质量特性与其加速度特性之间存在强烈的相关耦合关系。此外,指标之间还可能存在部分冗余、前置关联等耦合关系。现有的公开资料中,针对多耦合输出仿真模型验证的指标体系描述及可信度评估的相关研究极少。

(7)不同类型的可信度评估结果聚合的困难性

仿真模型可信度评估涉及大量的参数和指标,有些可测量得到准确的数值,有些可用概率统计或区间估计表示,还有一些则没有确切的数据,需要领域专家进行经验估计或定性评估。因此,在评估过程中获取的数据和评估结果可能既包括精确值、区间数、统计值等定量数据,还包括等级程度、语言描述等主观定性数据,具有类型多样的特征。充分利用各种

类型数据,研究有效的多类型数据聚合方法,是提高可信度评估结果的合理性和可靠性的关键。因此,需要研究不同类型(heterogeneous)数据的统一表示与运算方法,并且在不同类型数据的聚合运算过程中尽量避免主、客观信息的丢失和扭曲,从而使评估决策结果更加科学合理。然而,目前对精确值、区间数、统计值、等级程度、模糊语言、犹豫模糊语言等各种类型数据的统一表示方法和运算法则还未见报道。

(8)可信度评估结果分析工作的艰巨性

开展仿真模型可信度评估的另一个重要目的是分析找出制约仿真模型可信度的瓶颈,以此指导仿真模型的改进。由于时间、人力、资金等方面的限制,难以对仿真模型的所有缺陷都进行改进。此时,优先改进哪些缺陷,某项缺陷的改进会对仿真模型的各项可信度指标产生什么影响,影响程度如何,这些都是仿真模型可信度分析工作需要解决的核心问题。然而,目前的绝大多数研究仅集中于计算仿真模型的整体可信度和各项指标的可信度。现有公开资料中,基于仿真模型可信度评估结果的进一步分析研究方面的成果较少。从灵敏度分析到大数据挖掘,基于仿真模型可信度评估结果的分析工作往往是艰巨的。

结束语 随着建模与仿真技术的发展与广泛应用,仿真模型的功能和性能大大增强,仿真系统越来越复杂,仿真模型可信度评估面临着许多新的挑战。通过系统回顾国内外仿真模型可信度研究的主要工作,分析近年来的最新研究成果,进一步总结了相关概念和方法,提出了仿真模型可信度评估面临的 8 项挑战。

为应对这些挑战,下一步需要系统研究仿真模型可信度评估的研究框架、仿真模型校核与验证的新方法和新技术,以满足不断发展的复杂仿真模型可信度评估的需要。

参 考 文 献

[1] 黄柯棣,查亚兵.系统仿真可信性研究综述[J].系统仿真学报,1997,9(1):4-9.

[2] 王子才,张冰,杨明.仿真系统的校核、验证与验收(VV&A):现状与未来[J].系统仿真学报,1999,11(5):321-325,340.

[3] 李鹏波,张金槐.仿真可信性的研究综述[J].计算机仿真,2000,17(4):12-14.

[4] 张伟,王行仁.仿真可信度[J].系统仿真学报,2001,13(3):312-314.

[5] 刘庆鸿,陈德源,王子才.建模与仿真校核、验证与确认综述[J].系统仿真学报,2003,15(7):925-930.

[6] 唐见兵,查亚兵,李革.仿真 VV&A 研究综述[J].计算机仿真,2006,23(11):82-85,98.

[7] 贾仁耀,刘湘伟.建模与仿真的校核与验证技术综述[J].计算机仿真,2007,24(4):49-52.

[8] 伊文英,李波.基于 Agent 仿真模型的校核与验证研究[J].计算机科学,2015,42(Z11):460-463,472.

[9] 李伟,林圣琳,周玉臣,等.复杂仿真系统可信度评估研究进展[J].中国科学:信息科学,2018,48:767-782.

[10] 左彩霞.复杂全数字仿真系统的可信性评估方法的研究与应用[D].成都:电子科技大学,2010.

[11] 顾闯,刘彬,张星,等.装备保障仿真概念模型的语义验证方法研究[J].计算机科学,2014,41(9):24-27,37.

[12] 唐见兵,查亚兵.作战仿真系统校核、验证与确认及可信度评估[M].北京:国防工业出版社,2013.

[13] CONWAY R W,JOHNSON B M,MAXWELL W L. Some Problems of Digital Systems Simulation [J]. Management Science,1959,6(1):92-110.

[14] BIGGS A G,CAWTHORNE A R. Bloodhood Missile Evaluation [J]. Journal of the Royal Aeronautical Society,1962,66(621):571-587.

[15] NAYLOR THOMAS H,FINGER J M. Verification of Computer Simulation Models [J]. Management Science,1967,14(2):B92-B101.

[16] MCKENNY J L. Critique of: Verification of Computer Simulation Models[J]. Management Science,1967,14(2):B-102-B-103.

[17] SCHRANK W E,HOLT CC. Critique of: Verification of Computer Simulation Models[J]. Management Science,1967,14(2):B-104-B-106.

[18] FISHMAN G S,KIVIAT P J. The Statistics of Discrete Event Simulation[J]. Simulation,1968,10:185-195.

[19] VAN HORN R L. Validation of Simulation Results [J]. Management Science,1971,17(5):247-258.

[20] SHANNON R E. Systems Simulation;The Art and Science [M]. Prentice-Hall,1975.

[21] KHEIR N A,HOLMES W M. On Validating Simulation Models of Missile Systems [J]. Simulation,1978,30(4):117-128.

[22] 周威,张国忠.建模与仿真 VV&A 基本问题研究——VV&A 的系统观[M].北京:机械工业出版社,2017.

[23] SARGENT R G. Verification and Validation of Simulation Models [J]. Journal of Simulation,2013,7:12-24.

[24] BALCI O. Principles of Simulation Model Validation, Verification and Testing [J]. Transaction of the Society for Computer Simulation International,1997,14(1):3-12.

[25] BALCI O. Golden Rules of Verification, Validation, Testing, and Certification of Modeling and Simulation Applications [J]. SCS M&S Magazine,2010,1-7.

[26] BALCI O. Verification, Validation, and Certification of Modeling and Simulation Applications [C]//Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference,2003,150-158.

[27] BALCI O. A Life Cycle for Modeling and Simulation [J]. Simulation,2012,88(7):870-883.

[28] SARGENT R G,GOLDSMAN D M,YAACOUB T. A Tutorial on the Operational Validation of Simulation Models [C]//Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference,2016,163-177.

[29] BALCI O. Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models [C]//Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference,1997:135-141.

[30] AHN J,DE WECK O L,STEELE M. Credibility Assessment of Models and Simulations Based on NASA's Models and Simulation Standard Using the Delphi Method [J]. Systems Engineering,2014,17(2):237-248.

[31] JEBEILE J,BARBEROUSSE A. Empirical Agreement in Model Validation [J]. Studies in History and Philosophy of Science,2016,56:168-174.

[32] DAMBORG M J. An Example of Error Analysis in Dynamic Model Validation [J]. Simulation,1985,44(6):301-305.

[33] BARLAS Y. An Autocorrelation Function Test for Output Validation [J]. Simulation,1990,55(1):7-16.

[34] 刘慧博,钱永杰. 基于粗糙集和灰色关联分析的仿真可信度评估[J]. 系统仿真学报,2018,30(2):459-464.

[35] 宁小磊,吴颖霞,于天朋,等. 基于改进灰色关联分析的仿真模型综合验证方法[J]. 兵工学报,2016,37(2):338-347.

[36] 李玉宁. 基于灰色关联分析的仿真模型验证及辅助工具研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[37] LEGATES D R,MCCABE J G J. Evaluating the Use of Goodness-of-fit Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation [J]. Water Resources Research, 1999, 35 (1): 233-241.

[38] FISHMAN G S,KIVIAT P J. The Analysis of Simulation-Generated Time Series [J]. Management Science, 1967, 13 (7): 525-557.

[39] MONTGOMERY D C,CONARD R G. Comparison of Simulation and Flight-test Data for Missile Systems [J]. Simulation, 1980,34(2):63-72.

[40] WANG X Y,MUEEN A,DING H,et al. Experimental Comparison of Representation Methods and Distance Measures for Time Series Data [J]. Data Min Knowl Disc,2013,26:275-309.

[41] 王斐,梁晓庚,王艳奎,等. 基于曲率距离的制导系统动态仿真可信度评估[J]. 系统仿真学报,2013,25(8):1896-1900.

[42] 李鹏波,谢红卫. 频谱分析方法在仿真可信性研究中的应用[J]. 系统仿真学报,1998,10(3):18-21,54.

[43] JIANG X M,MAHADEVAN S. Wavelet Spectrum Analysis Approach to Model Validation of Dynamic Systems [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25: 575-590.

[44] 张鸿喜,张洁. 小波变换在舷外有源诱饵仿真模型验证中的应用[J]. 系统仿真学报,2018,30(1):318-324.

[45] HAUDUC H,NEUMANN M B,MUSCHALLA D,et al. Efficiency Criteria for Environmental Model Quality Assessment; A Review and Its Application to Wastewater Treatment [J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 68: 196-204.

[46] CROCHEMORE L,PERRIN C,ANDRÉASSIAN V,et al. Comparing Expert Judgement and Numerical Criteria for Hydrograph Evaluation [J]. Hydrological Sciences Journal, 2015, 60(3):402-423.

[47] FACHADA N,LOPES V V,MARTINS R C,et al. Model-independent Comparison of Simulation Output [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 72: 131-149.

[48] LI L Y,LU Z Z. A New Method for Model Validation with Multivariate Output [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2018, 169: 579-592.

[49] ZHAO L F,LU Z Z,YUN W Y,et al. Validation Metric Based on Mahalanobis Distance for Models with Multiple Correlated Responses [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 159: 80-89.

[50] LIAO W C,ZHANG J,ZHENG X P,et al. A Generalized Validation Procedure for Pedestrian Models [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 77: 20-31.

[51] OLSEN M M,RAUNAK M,SETTEDUCATI M. Enabling Quantified Validation for Model Credibility [C]//Proceedings of the 50th Computer Simulation Conference. 2018:1-10.

[52] KWAG S,GUPTA A,DINH N. Probabilistic Risk Assessment Based Model Validation Method Using Bayesian Network [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2018, 169: 380-393.

[53] LI Y L,WANG X J,WANG C,et al. Non-probabilistic Bayesian Update Method for Model Validation [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 58: 388-403.

[54] LAMPERTI F. An Information Theoretic Criterion for Empirical Validation of Simulation Models [J]. Econometrics and Statistics, 2018, 5: 83-106.

[55] ATKINSON A D,HILL R R,PIGNATIELLO J J J,et al. Wavelet ANOVA Approach to Model Validation [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2017, 78: 18-27.

[56] ATKINSON A D,HILL R R,PIGNATIELLO J J J,et al. Wavelet ANOVA Bisection Method for Identifying Simulation Model Bias [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 80: 66-74.

[57] SONG H F,LIU J Y,SCHNIEDER E. Validation, Verification and Evaluation of a Train to Train Distance Measurement System by Means of Colored Petri Nets [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2017, 164: 10-23.

[58] SONG H F,SCHNIEDER E. Development and Validation of a Distance Measurement System in Metro Lines [C] // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2018:1-16.

[59] GUARRO S B, YAU M K, OZGUNER U, et al. Formal Framework and Models for Validation and Verification of Software-Intensive Aerospace Systems [C]//Proceedings of AIAA SciTech Forum. 2017:1-10.

[60] 刘荷明,张树平,王小锋,等. 层次分析法在仿真系统可信度评估中的应用[J]. 航天电子对抗, 2016, 32(1): 35-38.

[61] 张忠,方可,杨明. 基于群组 AHP 的复杂仿真系统可信度评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(11): 2569-2572.

[62] 王雨潇,王松艳,晁涛,等. 制导控制系统的多准则变权综合评估方法[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 435-442.

[63] 吴静,吴晓燕,高忠长. 基于模糊聚类 and 粗糙集的仿真可信性模糊综合评估[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 770-773.

[64] 徐迪. 基于相似理论的系统仿真可信性分析[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 4: 49-52.

[65] 王石,伍丁红,戴金海. 基于 Bayes 网的武器装备仿真可信度评估[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(6): 1082-1085, 1103.

[66] BALCI O,ADAMS R J,MYERS D S,et al. A collaborative evaluation environment for credibility assessment of modeling and simulation applications [C] // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. 214-220.

[67] 查亚兵,唐见兵. 基于主观综合评判的作战仿真可信度评估方法研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 153-157.

[68] 李莉红. 船舶电力推进系统仿真可信度评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

[69] 张忠. 仿真系统可信度评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[70] YANG Y N,KUMARASWAMY M M,PAM H J,et al. Integrated Qualitative and Quantitative Methodology to Assess Validity and Credibility of Models for Bridge Maintenance Management System Development [J]. Journal of Management in Engineering, 2011, 27(3): 149-158.

[71] PADILLA J J,DIALLO S Y,LYNCH C J,et al. Observations on the Practice and Profession of Modeling and Simulation: A Survey Approach [J]. Simulation, 2018, 94(6): 493-506.

[72] SARGENT R G,BALCI O. History of Verification and Validation of Simulation Models[C]//Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. 2017:292-307.