



# 复杂仿真系统可信度评估研究进展

李伟, 林圣琳, 周玉臣, 马萍, 杨明\*

哈尔滨工业大学控制与仿真中心, 哈尔滨 150080

\* 通信作者. E-mail: myang@hit.edu.cn

收稿日期: 2018-03-30; 接受日期: 2018-04-08; 网络出版日期: 2018-07-16

国家自然科学基金重大科研仪器研制项目 (批准号: 61627810) 资助

**摘要** 建模与仿真技术应用广泛, 现已成为人们认识和改造现实世界的重要手段, 而仿真系统可信与否是仿真用户十分关注的问题. 随着仿真对象愈发复杂以及用户对仿真应用要求越来越高, 仿真系统呈现出多种复杂特性, 以致于其可信度评估面临诸多挑战. 本文首先总结了国内外仿真可信度评估发展历程, 并分析了复杂仿真系统的特点及可信度评估面临的问题; 然后, 在此基础上给出了复杂仿真系统可信度评估解决方案及应对策略; 最后总结了复杂仿真系统可信度评估所面临的挑战与机遇, 指出了未来研究方向.

**关键词** 复杂仿真系统, 可信度评估, 校核验证与确认, 仿真模型验证, 研究进展

## 1 引言

从仿真发展初期开始, 仿真系统可信度一直都是仿真用户关注的焦点. 经过多年的研究与实践, 仿真系统可信度评估与 VV&A (verification, validation and accreditation) 工作取得了长足进步, 并成为国内外仿真领域的研究热点. 下面给出仿真可信度评估与 VV&A 的相关概念, 并总结国内外仿真系统可信度评估发展历程.

### 1.1 仿真及可信度评估相关概念

建模与仿真技术是目前人们认识和改造现实世界的一种重要手段<sup>[1]</sup>. 建模是建立系统模型的过程, 是研究系统的重要手段和前提. 按照系统论的观点, 模型是一个系统 (实体、现象、过程) 的物理的、数学的或其他逻辑的表现形式, 依模型的形式不同可将其分为实体模型和数学模型<sup>[2]</sup>. 而仿真是在计算机上或实体上建立系统的有效模型并在模型上进行系统实验的过程<sup>[3]</sup>. 仿真模型是建模者对建模对象为满足仿真应用需求而建立的、以某种形式 (计算机语言、实体模型的物理实现) 给出的描述. 利用仿真模型代替被研究的对象, 在计算机或其他设备组成的环境中进行实验, 则形成了仿真系

**引用格式:** 李伟, 林圣琳, 周玉臣, 等. 复杂仿真系统可信度评估研究进展. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 767-782, doi: 10.1360/N112018-00001

Li W, Lin S L, Zhou Y C, et al. Research progress on credibility assessment of a complex simulation system (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 767-782, doi: 10.1360/N112018-00001

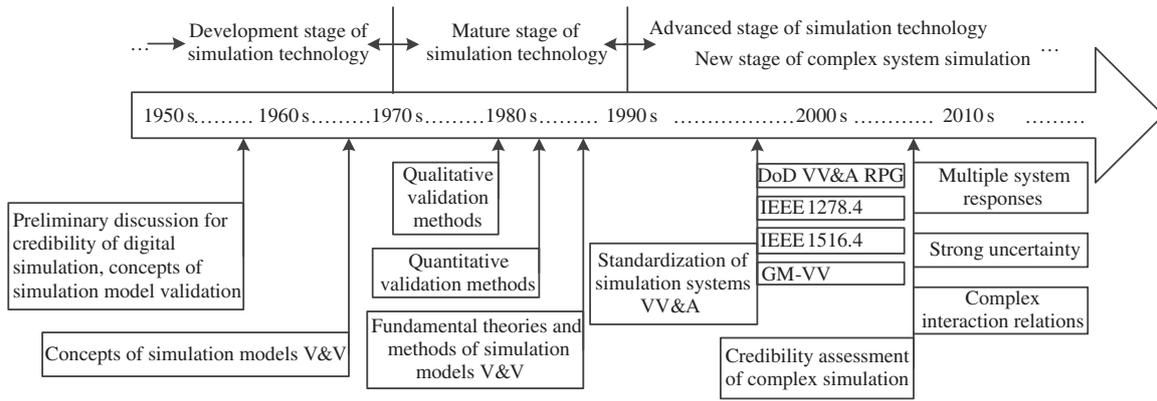


图 1 国外仿真可信度评估发展里程碑

Figure 1 Milestone of foreign simulation credibility assessment

统 [4]. 可信度是仿真系统的使用者对应用仿真系统在一定环境、一定条件下仿真实验的结果, 解决所定义问题正确性的信心程度 [5]. 可信度评估是指对模型/仿真系统/仿真实验结果是否可信以及可信程度进行分析、计算和评价.

随着仿真技术的发展, 仿真系统可信度评估与 VV&A 工作逐渐被仿真系统的开发者和使用者所重视 [6]. VV&A 是通过仿真系统生命周期中的有关活动, 对各阶段工作及其成果的正确性和有效性进行全面的评估, 进而保证仿真系统达到足够高的可信度水平以满足应用目标的需要 [4]. 其中, 校核 (verification) 是用于判定在建模过程中, 模型从一种形式转化为另一种形式是否正确, 具体就是判断从“概念模型”到“数学模型或实体 (物理效应) 模型”, 以及从“数学模型或实体 (物理效应) 模型”到“仿真模型”转化的正确性; 验证 (validation) 是从仿真系统应用目的出发, 考查仿真系统在其作用域内是否准确地代表了原型系统, 主要包括概念模型验证和仿真结果验证; 确认 (accreditation) 是在校核和验证的基础上, 由权威机构最终确定仿真系统相对于某一特定应用是否可接受 [7].

此外, 数据有效性是开展仿真系统可信度评估与 VV&A 的重要条件, 为此, IEEE 1278.4 给出了面向过程的数据 VV&C (verification, validation and certification) 标准规范 [8], 校核数据是否满足标准和业内规则及其正确性、验证数据是否代表了真实世界实体在应用域内的基本特征、确认数据在应用域内是否满足规定的标准和判据水平. 数据 VV&C 需由数据提供者和数据使用者双方共同完成.

可信度评估的目的包括仿真模型/系统的评价、选择及修正等. 通过可信度评估可给出仿真模型/系统可信度的量化结果, 进而对仿真系统进行判断和认定; 可信度评估可对同一对象的多个仿真模型从可信度角度进行排序, 进而选取最优的仿真模型进行使用; 可信度评估能够对仿真模型/系统的缺陷进行追溯和定位, 进而辅助仿真系统设计与优化. 而目前可信度评估方式主要分为面向开发过程的评估和面向结果的评估两种, 前者伴随仿真系统开发过程进行可信度评估, 后者是在仿真模型/系统开发完成后进行评估.

## 1.2 国外仿真可信度评估发展历程

国外自 20 世纪 50 年代末开始对仿真可信度评估进行研究, 经历了半个多世纪的发展, 取得了长足的进步, 总结其发展历程及具有代表性的研究成果如图 1 所示.

从 1929 年第 1 台 Link 练习器诞生起至 20 世纪 60 年代为仿真技术发展阶段, 期间通用电子模拟计算机和混合模拟计算机出现, 火炮控制与飞行控制动力学系统研究迅速发展. 此时, 主要集中于

对仿真模型校验问题的初步研究. 1959 年, Conway 和 Maxwell 对数字系统仿真的可信度问题进行了初步探讨<sup>[9]</sup>. 1967 年, Fishman 和 Kiviat 采用频谱分析方法对一个排队仿真模型与实际系统的等价性进行了评估, 并首次提出了仿真模型校核与验证的概念<sup>[10]</sup>.

20 世纪 70 年代后, 仿真技术从军事领域扩展到了工业领域, 相继出现了仿真设备和仿真系统生产专业化公司, 并开发出一些工业过程的仿真系统、训练模拟器等产品, 标志着仿真技术进入了成熟阶段. 在此时期, 相关学者对仿真模型验证方法进行研究, 形成了几类具有代表性的仿真模型验证方法, 这些方法多数用于仿真结果验证. 在定性验证方面, 具有代表性的验证方法有表面验证<sup>[11]</sup>和图灵测试<sup>[12]</sup>. 在定量验证方面, 根据验证数据的动、静态特性可将验证方法分为静态结果验证和动态结果验证两类. 静态结果验证方法包括经典假设检验和参数估计法, 具体方法有  $t$  检验<sup>[13]</sup>、K-S 检验和  $\chi^2$  检验<sup>[14]</sup>、区间估计<sup>[15]</sup>等. 动态结果验证方法包括 Theil 不等式系数 (TIC) 法<sup>[16]</sup>、时间序列概率密度一致分析法<sup>[17]</sup>、频谱分析法<sup>[18]</sup>等. 此外, 相关学者对仿真模型 V&V 原理和方法进行了总结, 将可信度评估方法分为静态分析、动态测试、约束分析和理论证明<sup>[19,20]</sup>. 总的来说, 这一时期的研究重点是仿真模型验证及可信度评估的基础方法.

到 20 世纪 90 年代, 以 DIS, HLA 为代表的分布式仿真技术快速发展, 仿真技术进入了高级阶段. 此时国外重点开展了以分布式仿真为代表的复杂仿真系统 VV&A 与可信度评估的标准化工作, 规范了面向仿真系统开发过程的评估方式, 具有代表性的标准规范有: (1) 1996 年美国国防部建模与仿真办公室 (DMSO) 制定的 VV&A 规范 (DoD VV&A RPG)<sup>[21,22]</sup>, 用于对下属陆、海、空军和导弹防御局等机构的建模与仿真 VV&A 工作起整体指导作用; (2) 美国电气电子工程师学会 IEEE 于 1997 年和 2007 年分别对分布交互仿真 (DIS) 系统以及 HLA 中的联邦研发和执行过程制定了 VV&A 规范 IEEE 1278.4<sup>[8]</sup>和 IEEE 1516.4<sup>[23]</sup>; (3) 2012 年仿真互操作标准化组织 (SISO) 组织制定了一个通用的仿真系统 VV&A 规范 (GM-VV)<sup>[24~26]</sup>.

20 世纪末至今, 随着仿真对象的复杂化以及用户对仿真系统应用要求的提高, 仿真技术进入了以复杂系统仿真为主的新阶段, 对复杂仿真系统可信度评估也带来了新的挑战. 相关学者针对具有不确定性影响<sup>[27]</sup>、多元静态输出变量<sup>[28]</sup>, 以及多子模型构成的复杂仿真模型<sup>[29]</sup>的结果验证问题进行了研究. 其中, 以美国 Sandia 国家实验室的 Oberkampf 为代表的学者们主张以经典统计学为理论背景对复杂仿真结果验证问题进行研究, 提出了基于区间估计<sup>[30]</sup>、概率分布差异<sup>[31]</sup>的验证方法, 解决了具有不确定性影响的仿真模型的结果验证问题. 美国 Vanderbilt University 的 Mahadevan 等学者主张以 Bayes 学派的思想解决模型验证问题, 与经典统计学不同的是该方法引入了模型输出的先验信息, 并与参考输出的样本信息相结合, 通过 Bayes 假设检验的方法获取仿真模型验证结果<sup>[32]</sup>. 其研究成果包括: 基于假设检验和 Bayes 假设检验法的多元输出结果验证方法<sup>[33]</sup>, 并将两种假设检验方法推广至区间假设检验<sup>[34]</sup>; 在大规模复杂仿真系统可信度评估方面, 采用 Bayes 网络对子模型的验证结果进行分析进而推广至仿真系统整体可信度<sup>[35]</sup>; 同时提出了小波变换与 Bayes 因子相结合的动态输出结果验证方法<sup>[36]</sup>.

此外, 相关学者还针对不同应用背景下的仿真模型验证及可信度评估问题开展了研究. 文献 [37] 提出了时间响应误差评估法 (EARTH), 用于车辆安全仿真模型的动态输出模型验证问题. 文献 [38] 针对空中对抗仿真模型提出了基于博弈论的模型验证方法, 文献 [39] 对 GM-VV 标准进行裁剪并对 F-16 飞行模拟器进行可信度评估. 文献 [40] 采用时序变迁图对离散事件系统进行描述, 并提出了离散事件仿真模型验证框架. 文献 [41] 基于 Agent 的模型验证方法对宏观经济学仿真模型进行验证, 文献 [42] 研究了评估人员的经验在模型验证中的作用. 文献 [43] 提出了数据驱动仿真模型验证的基本流程, 文献 [44] 提出了数据驱动仿真中语义可组合性的验证方法. 文献 [45] 提出了一套开发和验证多智能体

仿真系统的方法, 文献 [46] 提出了基于向量自回归模型的多智能体模型验证方法, 采用因果搜索算法将系统输出拟合为向量自回归模型, 并进行一致性分析。

### 1.3 国内仿真可信度评估发展历程

国内对于仿真可信度评估与 VV&A 的研究始于 20 世纪 80 年代末, 之后得到了快速发展。在评估理论方法方面主要以跟踪国外研究为主, 并结合实际需求对相关方法进行应用及改进, 同时有针对性地提出若干可信度评估新方法。下面从仿真模型验证和仿真系统可信度评估两方面进行总结。

仿真模型验证方面, 国内学者借鉴了国外的实验比对法、置信区间法、假设检验法、Bayes 参数估计法、Bayes 假设检验法等, 将其应用于静态仿真结果验证问题; 针对动态仿真结果验证问题, 提出了基于灰色关联分析法<sup>[47]</sup>的验证方法, 并结合国外的 TIC 法、相似系数法、谱分析方法、EARTH 方法、回归分析法等方法形成了基于特征差异的验证方法<sup>[48]</sup>。

考虑不确定性影响的模型验证方法研究方面, 文献 [5] 给出了基于特征差异和证据距离相结合的仿真结果验证方法。考虑参考数据缺乏的情况, 文献 [49] 将概率分布差异法与马氏距离、概率积分变换、主成分分析等方法相结合用于多元静态输出的模型验证, 文献 [50] 改进了 Bayes 估计的方法、基于小子样参数估计的方法用于解决参考数据缺乏的验证问题。针对多元动态输出的结果验证问题, 文献 [51] 给出了改进 EARTH 与层次分析相结合的验证方法, 文献 [52] 给出了基于主成分分析与证据理论相结合的解决方案。此外, 文献 [53] 将基于知识的方法、基于专家系统的方法、智能化数据分析方法用于不同背景下的智能化验证问题。

仿真系统可信度评估方面, 国内学者对国外研究成果, 如基于相似度的方法、基于层次分析 (AHP) 和模糊综合评判 (MSE) 相结合的方法<sup>[54]</sup>、基于 Markov 模型的方法<sup>[55]</sup>、基于证据理论的方法<sup>[5]</sup>、基于 Bayes 网络的方法<sup>[56]</sup>等进行改进以满足实际应用需求。在离散事件仿真系统可信度评估方面, 文献 [57] 从离散状态一致性的角度进行评估; 文献 [58] 提出了基于事件图的离散事件仿真模型并行检验方法。针对复杂仿真系统可信度评估问题, 文献 [59] 提出了基于可信度评估网 (CESN) 的网络化指标体系构建方法和缺陷追溯方法。同时, 相关学者给出了半实物仿真系统的可信度评估思路与方法<sup>[60]</sup>和人在回路仿真系统的可信度评估框架<sup>[61]</sup>。

综上所述, 国外在仿真可信度评估方面的研究起步更早、积累更多, 在应用深度、广度与标准化等方面领先。但国内外在复杂仿真系统可信度评估方面均面临新的挑战, 缺乏系统性的理论、方法和技术支撑。下文首先总结复杂仿真系统的特点, 并分析其可信度评估面临的问题与难点; 然后在此基础上, 从方法、技术、支撑环境 3 个层次给出复杂仿真系统可信度评估的解决方案及应对策略; 最后分析复杂仿真系统可信度评估面临的挑战、机遇, 并指出未来研究方向。

## 2 复杂仿真系统可信度评估问题分析

复杂仿真系统在机理、规模、结构等方面表现出一定的复杂性, 其可信度评估面临许多新问题。下面在分析复杂仿真系统特点的基础上, 总结其可信度评估面临的问题。

### 2.1 复杂仿真系统特点分析

复杂仿真系统本质上依然是仿真系统, 但具备了某些复杂特性, 主要体现在模型的复杂性和仿真系统的复杂性两个层面。模型是仿真系统的核心, 而人们对仿真系统应用要求的提高以及仿真对象的

复杂性共同决定了仿真模型的复杂性,主要体现在两个方面:一是模型本身具有机理复杂、输入输出变量复杂、不确定性强等特点;二是模型由众多子模型组合而成,子模型间存在着复杂交互关系。

仿真系统的复杂性不仅体现在系统组成、结构及输出数据特征等外在表现方面,还体现在运行机理等内在特征方面。其外在表现的复杂性主要包括如下方面:(1) 大规模。构成复杂仿真系统的模型、软硬件设备种类较多,且数量庞大;(2) 混合性。复杂仿真系统可能具有连续离散混合系统特点,还可能存在人在回路、硬件在回路的情况;(3) 非结构化输出。复杂仿真系统可能产生除结构化输出外的图像、视频、音频、自然语言等非结构化输出;(4) 实验空间广。利用复杂仿真系统进行实验的过程中实验因子多、变化范围大,而用户对仿真实验结果的准确性和全面性要求越来越高,导致大量的仿真实验次数和海量的仿真实验数据;(5) 虚拟环境复杂。复杂仿真系统可能包含复杂的虚拟自然环境和人为环境,它们与仿真系统中实体的动态过程、人的行为等之间相互影响复杂,同时不同类型的虚拟环境之间亦存在相互影响。

而仿真系统内在特征同样存在复杂性。(1) 模型复杂。构成仿真系统的若干仿真模型是复杂的;(2) 模型多分辨率多粒度。用户需求和仿真目的多样,导致构成复杂仿真系统的子系统分辨率和粒度不同;(3) 并行/分布式。复杂仿真系统常具有并行/分布式/网络化的特点,其开发、运行与分析过程更加复杂;(4) 子系统间交互复杂。不同层次不同分辨率的子系统构成复杂仿真系统,其运行过程涉及多分辨率多粒度子系统的互操作,面临时空不一致等问题。

## 2.2 复杂仿真系统可信度评估面临的问题

基于复杂仿真系统的特点,从复杂仿真模型及复杂仿真系统两个方面分析可信度评估所面临的主要难点。复杂仿真模型验证主要面临以下问题:如何解决具有多元异类输出且输出间存在一定相关关系的仿真模型验证问题;如何解决仿真模型输入及参数具有不确定性的仿真模型验证问题;如何解决参考数据缺乏情况下的仿真模型验证问题;如何解决多个仿真模型重用与组合形成的复杂仿真模型的快速评估问题。

综合复杂仿真系统的内外部特征,其可信度评估面临的主要问题包括:在子系统可信的前提下如何解决子系统间交互复杂的仿真系统的可信度评估;如何开展具有连续-离散混合、数学-人-设备混合的复杂仿真系统可信度评估;如何对多粒度、多分辨率、分布式/网络化的仿真系统进行可信度评估;如何解决具有大数据、非结构化输出特点的复杂仿真系统可信度评估;如何对复杂仿真系统中的虚拟环境进行可信度评估;如何有效管理复杂仿真系统可信度评估过程、提高可信度评估的自动化程度与效率。

## 3 复杂仿真系统可信度评估解决方案

本节首先针对复杂仿真系统可信度评估面临的部分问题给出解决方案,从评估方法、技术,以及支撑环境 3 个方面进行阐述,然后给出其他复杂仿真系统可信度评估问题与难点的应对策略。

### 3.1 可信度评估方法

#### 3.1.1 复杂仿真模型验证方法

(1) 考虑不确定性影响的仿真模型验证方法。由于不确定性的影响,仿真输出和参考输出均具有随机性,采用基于数据特征和证据距离的方法度量仿真和参考输出的一致性<sup>[5]</sup>。首先提取系统输出数

据的特征, 其中静态输出数据常以随机变量的形式存在, 选取变量本身作为其数据特征; 而对于动态输出数据, 将每次系统运行得到的仿真和参考数据序列与相应的平均输出数据序列进行比较, 提取其数据特征. 以参考输出为例, 给出动态输出的位置、形状及频谱特征的度量模型为

$$F_F(Y_{Rj}, Y_{Rd}) = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^T z(i)^2}, \quad (1)$$

$$F_T(Y_{Rj}, Y_{Rd}) = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{i=1}^T [z(i) - \bar{z}]^2}, \quad (2)$$

$$F_H(Y_{Rj}, Y_{Rd}) = 1 - \frac{m}{M}, \quad (3)$$

其中,  $Y_{Rj}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , 表示第  $j$  个动态输出样本;  $Y_{Rd} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Y_{Rj}$  表示参考输出的平均值;  $z(i) = Y_{Rj}(i) - Y_{Rd}(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, T$ ;  $\bar{z} = \sum_{i=1}^T z(i)/T$ ;  $T$  为动态输出序列的长度;  $F_H(\cdot)$  表示从频域的角度度量  $Y_{Rj}$ ,  $Y_{Rd}$  的一致性, 其中  $m$  为表示未通过相容性检验的频率点数,  $M$  为参与相容性检验的频率点总数.

基于上述特征度量模型能够得到参考和仿真输出数据关于某特征的随机变量  $e_{Rk} = \{e_{Rk}^1, e_{Rk}^2, \dots, e_{Rk}^{n_r}\}$ ,  $e_{Sk} = \{e_{Sk}^1, e_{Sk}^2, \dots, e_{Sk}^{n_s}\}$ ,  $k$  为数据特征标号, 为度量二者受不确定因素的影响程度并进行一致性度量, 利用证据理论对  $e_{Rk}$  和  $e_{Sk}$  进行描述, 进而将其转化为证据体的形式. 而后, 采用证据距离方法度量参考和仿真输出特征变量的一致性, 在此过程中对传统证据距离存在的缺陷进行改进<sup>[52]</sup>. 设  $m_1, m_2$  是同一辨识框架  $\Theta = \{1, 2, \dots, N\}$  上的两组 BPAs, 令  $A, B$  分别为其焦点元素,  $\Theta$  含有  $N$  个完备且相互独立的元素, 传统的证据距离计算式为

$$d_{BPA}(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2} (\|m_1\|^2 + \|m_2\|^2 - 2\langle m_1, m_2 \rangle)}, \quad (4)$$

其中  $\langle m_1, m_2 \rangle$  表示向量之间的内积,  $\|m\|$  表示向量的模,  $\|m\|^2 = \langle m, m \rangle$ , 内积的计算公式为

$$\langle m_1, m_2 \rangle = \sum_{i=1}^{2^N} \sum_{j=1}^{2^N} m_1(A_i) m_2(B_j) \frac{|A_i \cap B_j|}{|A_i \cup B_j|}, \quad A_i, B_j \in 2^\Theta. \quad (5)$$

针对式 (4) 给出改进的证据距离计算公式:

$$id_{BPA}(m_1, m_2) = 1 - \sqrt{\frac{2\langle m_1, m_2 \rangle}{\|m_1\|^2 + \|m_2\|^2}}. \quad (6)$$

(2) 具有多元异类输出的仿真模型验证与排序评估方法. 除了不确定性的影响, 复杂仿真模型通常还具有多个类型不同的输出变量. 针对考虑不确定性和多元异类输出的结果验证问题, 给出基于主成分分析和证据距离的结果验证方法<sup>[52]</sup>. 采用 EARTH<sup>[37]</sup> 提取动态数据特征, 并采用证据理论分别对其进行描述, 而后引入主成分或区间主成分分析对多元相关输出特征的证据体进行降维并去除相关性影响, 采用式 (6) 计算证据体间的一致性得到验证结果.

此外, 在仿真系统开发过程中, 有时还需要从多个备选模型中选择可信的模型进行使用, 即仿真模型的排序评估问题, 给出基于聚类和判别分析的仿真模型排序评估方法<sup>[48]</sup>. 首先根据式 (1)~(3) 提取动静态输出的数据特征, 采用主成分分析方法对多元相关输出的差异特征进行降维; 而后采用聚类分析方法将多个仿真模型的输出分为若干类, 采用判别分析方法判断参考输出的所属类别, 进而得出此类别中仿真输出对应的仿真模型为可信模型.

(3) 考虑参考数据缺乏的仿真模型验证方法. 针对参考数据缺乏的情况, 可由专家给出参考数据的统计分布, 并与仿真数据进行一致性分析. 例如, 利用证据距离进行仿真模型验证时, 考虑参考数据缺乏的情况, 可由多个专家给出参考数据所在区间的概率分布, 并采用证据融合方法对多源专家意见进行综合. 设  $m_1, m_2, \dots, m_n$  为  $n$  个专家给出的估计信息, 焦点分别为  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), 则

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{1-K} \sum_{\bigcap_{A_i=A} 1 \leq i \leq N} \prod m_i(A_i), & A \neq \emptyset, \\ 0, & A = \emptyset, \end{cases} \quad (7)$$

式中  $K = \sum_{\bigcap_{A_i=\emptyset} 1 \leq i \leq N} \prod m_i(A_i)$ ,  $m(A)$  表示综合后的专家估计信息.

此外, 为了保证仿真模型可信度量化结果的准确性, 同时便于验证方法的实际应用, 既需要充分考虑多个专家意见带来的不确定性, 又需要采用统一的形式对专家意见进行刻画, 给出基于三角模糊数的仿真模型验证方法<sup>[54]</sup>. 首先将多元异类输出的响应对比图形及特征直观地呈现给专家, 进而评定得到每个仿真输出变量的一致性, 采用三角模糊数对其进行描述; 然后, 基于三角模糊数层次分析法得到各仿真输出变量的权重; 最后, 利用模糊综合评判法综合各仿真输出分量的一致性, 得到仿真模型可信度.

### 3.1.2 复杂仿真系统可信度评估方法

(1) 复杂仿真系统可信度评估指标综合方法. 对从不同角度建立的仿真系统可信度评估指标进行综合时常遇到以下 3 种情况: 专家组给出的指标权重信息不完全, 专家组给出的指标权重信息完全但是不一致, 不同指标之间非独立. 为此, 给出了相应的评估指标综合方法<sup>[62]</sup>. 针对权重信息不完备问题, 定义了区间数直径与偏离度, 对每位专家所给出的残缺区间判断矩阵确定专家客观权重, 再利用凸组合对专家主客观权重进行综合, 进而得到专家的综合权重. 针对权重信息完备但不一致的问题, 给出基于群组 AHP 和凸组合方法相结合的指标综合方法; 针对评估指标非独立的情况, 引入模糊测度对指标间的关系进行描述, 结合摆幅置权法、比例标度法、2-可加模糊测度和 Choquet 模糊积分, 实现评估指标综合.

(2) 考虑专家意见的复杂仿真系统可信度评估方法. 由于复杂仿真系统可信度评估存在参考数据缺乏的情况, 复杂仿真系统的某些指标只能依靠专家意见进行评估, 带有主观性和不确定性. 引入模糊集和粗糙集对专家意见进行处理, 并采用证据融合方法获得综合评估结果<sup>[63]</sup>. 首先建立一般的复杂仿真系统可信度评估指标体系, 使用模糊集理论获取底层指标的评估意见; 其次使用粗糙集理论处理不一致的评估意见并对其进行简化; 最终利用证据理论融合评估意见和评估指标值, 获取仿真系统可信度.

(3) 考虑多子系统关系复杂的仿真系统可信度评估方法. 复杂仿真系统通常由多个子系统构成, 子系统间的交互通过相应仿真模型间的交互而实现, 同时子系统内部仿真模型亦存在复杂的交互关系. 因此, 多子系统交互关系复杂的仿真系统可信度评估实质是对多个交互关系复杂的仿真模型进行验证. 针对含有迭代运算的仿真模型进行验证, 可构建按照结构分解的树型评估指标体系和按照解算过程分解的网型指标体系, 其中树型指标体系用于可信度综合评估, 网型指标体系则用于缺陷回溯<sup>[64]</sup>. 同时, 定义能够表示模型间交互关系的可信度评估指标体系, 给出了带有串联、并联及迭代关系指标的综合方法以及缺陷回溯方法<sup>[59]</sup>.

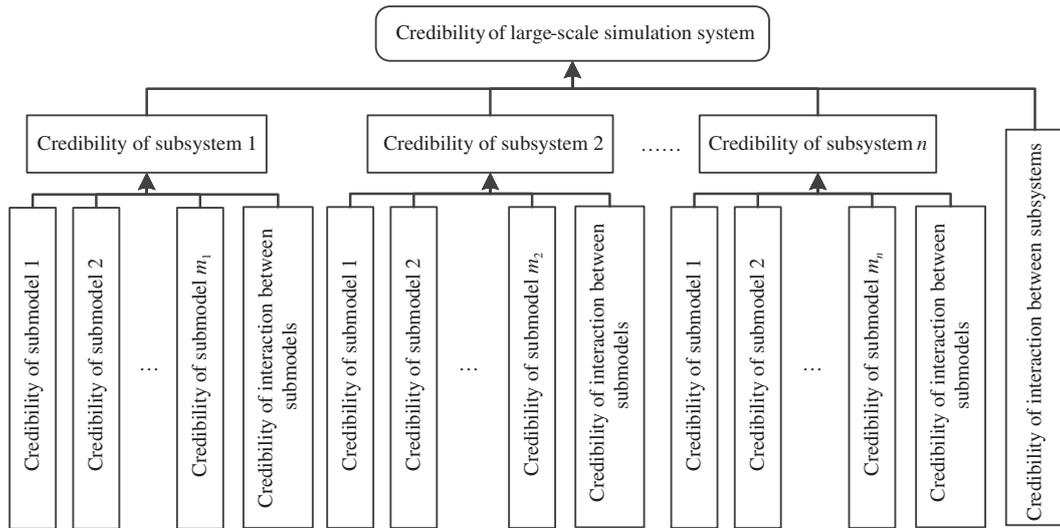


图 2 大规模仿真系统可信度评估指标体系

Figure 2 Index system of credibility assessment for large-scale simulation system

### 3.1.3 大规模混合仿真系统可信度评估方案

(1) 大规模仿真系统可信度评估方案. 在大规模仿真系统开发完成后对其可信度进行评估, 可采用面向结果的评估方式, 基于系统论和还原论相结合的层次化评估思想建立评估指标体系, 如图 2 所示. 将系统整体可信度指标按系统结构分解为多个子系统/模型的可信度指标, 实现评估指标的细化, 此外还需考虑多个子系统/模型之间交互影响的可信度, 其评估内容包括: 仿真系统中子系统的交互关系与实际系统的一致性、交互内容的正确性和时效性等. 需要说明的是, 该方案是大规模复杂仿真系统可信度评估的一种折衷思路.

(2) 混合仿真系统可信度评估方案. 针对连续离散混合仿真系统的可信度评估, 需分别从连续、离散系统特点出发进行分析, 同时需要考虑子系统/模型间交互的可信度. 对于连续系统特性, 根据其输出数据类型采用相应的一致性分析方法进行评估; 对于离散事件系统特性, 从事件发生序列正确性、条件事件发生概率一致性以及活动执行时间一致性 3 方面进行评估, 建立指标体系如图 3 所示.

对于数学 - 人 - 设备混合的仿真系统, 具有人在回路仿真和硬件在回路仿真的特性, 其可信度评估存在一定困难. 以飞行训练仿真器为例, 给出数学 - 人 - 设备混合仿真系统的可信度评估方案<sup>[57]</sup>, 从仿真模型的可信度、系统功能的一致性、系统布局的一致性、人体感觉的逼真性、训练效果的一致性等方面进行评估, 建立评估指标体系如图 4 所示.

其中, 仿真模型可信度评估用于对训练仿真器包含的仿真模型进行验证; 系统功能一致性评估用于度量训练仿真器的功能是否与实际系统保持一致; 系统布局一致性评估用于度量训练仿真器内部结构、布局与实际系统的差距; 人体感觉逼真性评估用于度量训练仿真器给操作人员感觉器官的信息与实际系统的差距, 如视觉、听觉、触觉、体感等; 训练效果一致性评估用于度量利用训练仿真器与实际系统分别进行训练所取得的训练效果的差距.

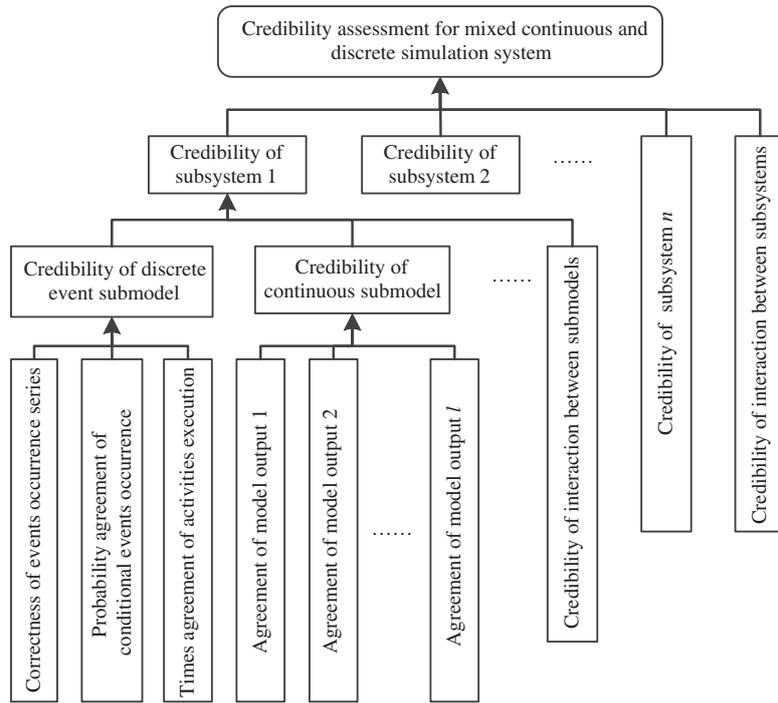


图 3 连续离散混合仿真系统可信度评估指标体系

Figure 3 Index system of credibility assessment for mixed continuous and discrete simulation system

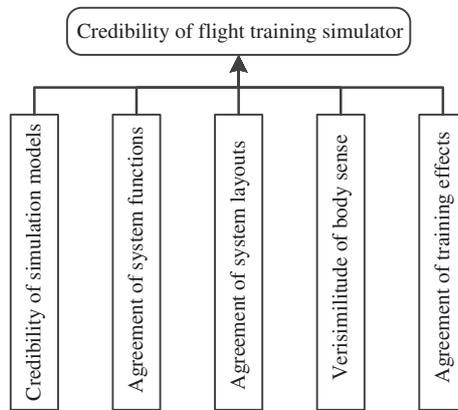


图 4 飞行训练仿真器可信度评估指标体系

Figure 4 Index system of credibility assessment for flight training simulator

### 3.2 可信度评估技术

(1) 智能化仿真模型验证技术. 为减轻复杂仿真系统可信度评估人力资源开销, 实现仿真模型验证的自动化, 给出复杂仿真模型智能化验证技术<sup>[53]</sup>. 首先, 对模型验证的客观和主观方法中的数据和信息转化过程, 以及用于模型验证中参考数据和领域专家的经验等信息进行抽象和归纳; 其次, 在知识抽象的基础上, 分别建立领域知识模型、验证技术模型和验证任务模型; 最后, 在知识模型的基础上设计和实现智能化验证系统, 提高仿真模型验证效率.

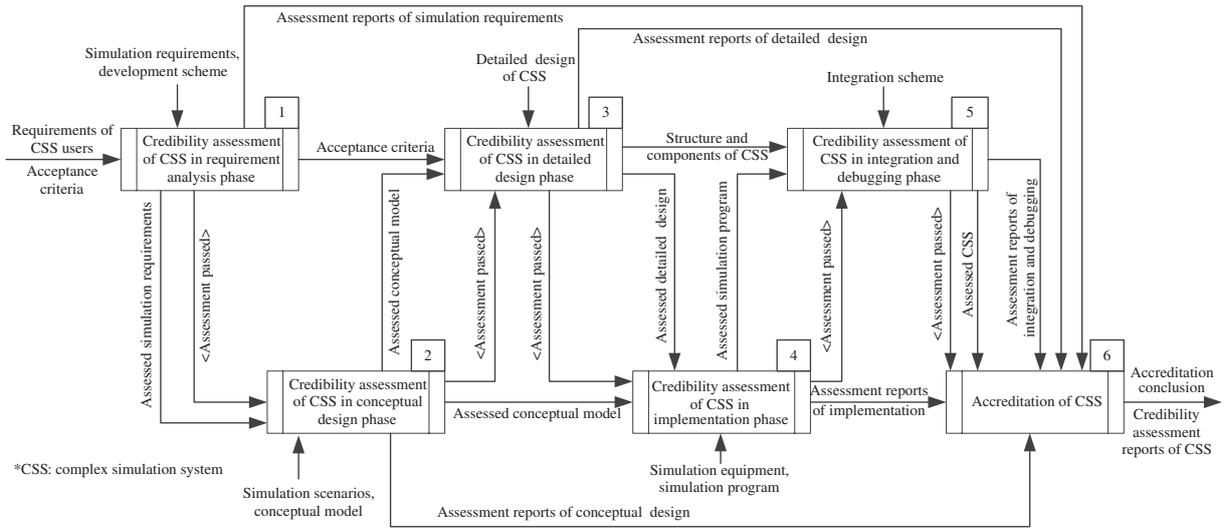


图 5 复杂仿真系统可信度评估过程模型

Figure 5 Process model of credibility assessment for complex simulation system

(2) 复杂仿真系统 VV&A 过程管理技术. 为规范复杂仿真系统 VV&A 过程, 确保 VV&A 各阶段活动顺利开展, 基于多级 workflow 开发复杂仿真系统 VV&A 过程模型<sup>[65]</sup> (如图 5 所示). 该模型具有一定的普适性, 以阶段为基本单位, 表达了控制流与数据流, 其中矩形框表示可信度评估工作阶段, 带箭头实线表示控制连接弧 (执行顺序关系), 带箭头虚线表示数据连接弧 (数据传递关系), 控制连接弧上的双尖括号内容表示连接弧条件. 该过程模型将复杂仿真系统全生命周期分为 6 个阶段进行评估, 若某个阶段的评估不通过, 则返回相应的仿真开发阶段进行修改. 该可信度评估过程的数据流比较复杂, 数据传递关系不仅存在于两个相邻的阶段间, 也在过程内跨阶段存在. 此外, 评估过程与仿真开发过程间也存在数据流耦合, 在图中体现为没有源点的外部数据连接弧输入.

需求分析阶段的评估: 评估复杂仿真系统需求、可接受准则、开发计划是否反映了用户的最初需求. 概念设计阶段的评估: 评估仿真想定和系统概念模型是否反映了系统需求, 校核系统需求、可接受准则更新等是否符合仿真想定和概念设计. 详细设计阶段的评估: 评估总体设计、分系统设计、模型设计、开发约定等是否反映了系统概念模型. 实现阶段的评估: 评估仿真模型程序实现、仿真设备实现、分系统实现等是否反映了系统概念模型, 限于各分系统内部. 集成与测试阶段的评估: 伴随复杂仿真系统的集成运行, 验证仿真模型、验证仿真设备和验证仿真系统. 仿真的确认: 根据系统可接受准则和各阶段的评估结果, 完成复杂仿真系统的确认工作.

### 3.3 可信度评估支撑环境

复杂仿真系统可信度评估支撑环境用于辅助评估人员进行可信度评估, 集成了可信度评估过程管理工具、评估指标体系构建工具、数据一致性分析工具、评估指标综合工具、智能化仿真模型验证工具, 同时以评估过程数据库、实验数据库、仿真结果库、评估方法库、评估结果库以及专家知识库作为数据库支撑, 其架构如图 6 所示.

可信度评估过程管理工具能够辅助用户制定 VV&A 过程, 确定仿真系统可信度评估对象、评估顺序等<sup>[65]</sup>. 评估指标体系构建工具用于辅助评估人员构建树型和网型指标体系, 同时, 支持仿真系统

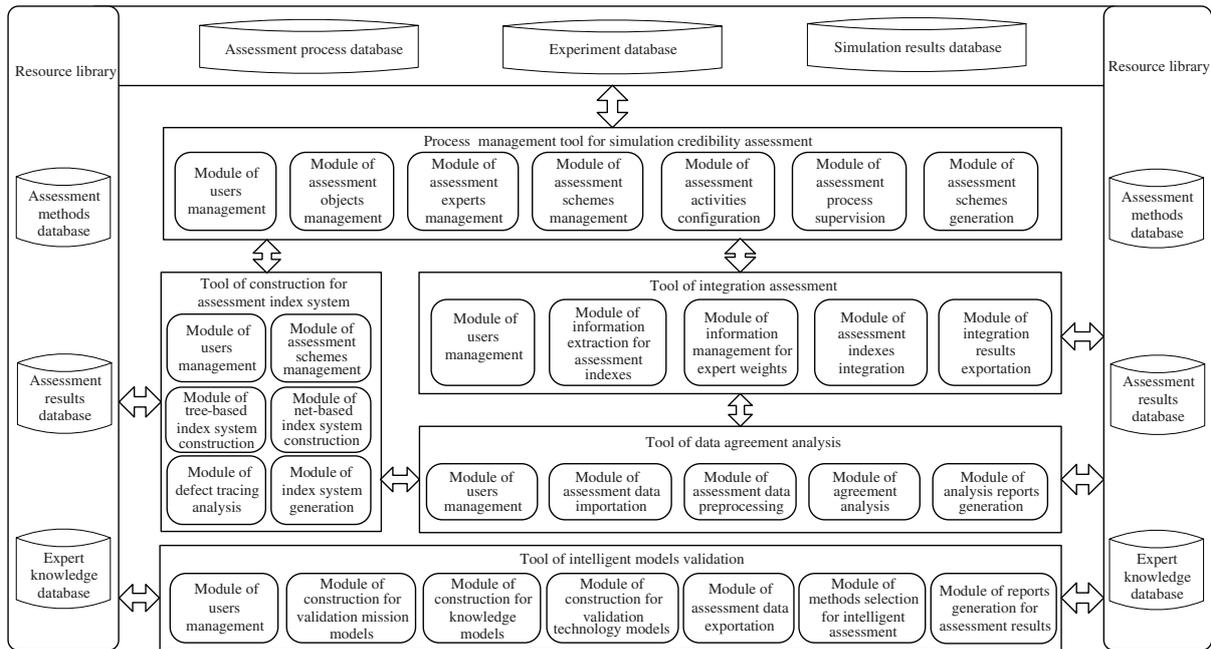


图 6 复杂仿真系统可信度评估支撑环境组成框架

Figure 6 Structure of supporting environment of credibility assessment for complex simulation system

的缺陷回溯. 数据一致性分析工具用于底层可信度评估指标的计算, 包括数据预处理、数据特征差异提取、一致性分析等功能<sup>[5, 52]</sup>, 可处理不确定性、多元异类输出及参考数据缺乏情况下的复杂仿真模型验证问题. 评估指标综合工具用于综合评估指标获取最终可信度, 包括了基本的指标综合方法及专家权重信息不完备、不一致、指标间不独立时的综合评估方法<sup>[62]</sup>. 智能化仿真模型验证工具能够根据评估输入数据自动选择适合的模型验证方法<sup>[53]</sup>, 并能够收集、提取和抽象验证基本流程信息、验证数据类型、验证方法, 进而构建验证任务模型、知识模型, 以及验证技术模型, 根据评估数据输入信息自动推理选出最优的模型验证方法进行分析.

评估过程数据库用于存储各阶段评估活动信息, 包括评估对象信息、评估活动状态、评估活动执行时间、评估活动优先级等. 实验数据库用于存储参考数据, 仿真结果库用于存储仿真运行结果. 评估方法库提供多种指标体系构建方法、数据预处理方法、一致性分析方法、综合评估方法等(见表 1), 同时支持对用户自定义评估方法的管理. 评估结果库用于存储评估结果, 包括评估指标体系、一致性分析结果、综合评估结果等. 专家知识库用于存储专家意见、评估相关知识信息等.

### 3.4 其他可信度评估难题的应对策略

前文从可信度评估方法、技术, 以及支撑环境 3 方面给出了复杂仿真系统可信度评估难题的部分解决方案. 除此之外, 对于 2.2 小节中的尚未解决的评估问题与难点, 从复杂仿真模型验证和复杂仿真系统可信度评估两方面给出了应对策略.

针对多粒度多分辨率的分布式复杂仿真系统可信度评估问题, 需考虑仿真系统的时间一致性、空间一致性, 以及各子系统的交互关系是否合理等因素; 针对海量、非结构化的评估数据, 可引入数据挖掘、机器学习、统计理论等方法进行分析评估; 针对复杂仿真系统中虚拟环境的可信度评估, 可从对仿

表 1 评估方法库中的方法分类

Table 1 Classification of methods in assessment method database

Category of assessment methods	Subcategory of assessment methods
Construction methods of index system	Construction methods of tree-based index system
	Construction methods of net-based index system
Preprocessing methods of data	Preprocessing methods of static data
	Preprocessing methods of dynamic data
Agreement analysis methods	Agreement analysis methods of static data
	Agreement analysis methods of dynamic data
Integration assessment methods	Value assessment methods
	Sorting assessment methods

真实体的影响、环境自身之间的影响与真实世界的差异的角度选取评估指标. 总的来说, 解决复杂仿真系统可信度评估面临的问题需要相关领域的理论、方法和技术作为支撑.

#### 4 复杂仿真系统可信度评估研究方向

通过多年研究, 复杂仿真系统可信度评估研究取得了一定进展. 针对多元输出、强不确定性、交互关系复杂的仿真模型验证问题研究了相应的验证方法和技术; 同时, 针对子系统交互复杂、大规模、连续离散混合及人在回路等特点的仿真系统可信度评估问题, 研究了面向过程及结果的可信度评估方法和技术. 但目前仍存在一些问题需要进一步研究. 在仿真模型验证方面: (1) 针对具有相关关系的多元异类输出仿真结果验证问题, 现有方法多数依赖于主成分分析方法去除相关性, 但验证结果不够准确; (2) 参考数据缺乏情况下如何降低评估主观影响需要进一步研究. 仿真系统可信度评估方面: (1) 针对子系统交互关系复杂的仿真系统可信度评估问题, 目前的方法未能解决考虑复杂交互关系的指标综合问题; (2) 如何进行仿真系统级、仿真实验级两级可信度综合评估, 随着仿真应用要求的不断提高, 在复杂仿真系统本身可信的基础上, 对仿真实验的可信度也提出了要求; (3) 复杂大系统无法进行实验导致参考数据缺乏, 但可获取其子系统的局部可信度, 存在不确定性及多元异类输出时, 如何通过局部可信度外推得到复杂仿真系统整体可信度则需要进一步研究.

随着信息技术的发展以及仿真应用模式的变化, 出现了面向服务的仿真/云仿真等新的仿真架构. 云仿真支撑平台<sup>[66]</sup>基于云计算理念, 综合应用各类先进信息技术、建模仿真技术及应用领域有关的专业技术等, 保证系统中各类仿真资源安全地按需共享与重用, 进而实现复杂系统全生命周期的相关活动<sup>[67]</sup>. 通过面向服务的、云仿真平台构建仿真系统, 其实质是若干仿真模型的重用与组合, 平台中单一仿真模型是可信的, 在此基础上如何快速地评估多个可信仿真模型所构成的新的仿真系统的可信度是需要进一步研究的问题. 此外, 为确保复杂仿真系统在整个输入空间的准确性和可用性, 通常需要进行大量仿真实验, 进而产生仿真大数据, 如何处理这些数据, 提取有用信息对系统进行评估、分析及优化也是需要进一步研究的问题.

利用大数据分析平台对结构化程度不同的数据进行存储、提取和分析, 其 MapReduce 编程模式能够快速地挖掘复杂、非结构化数据隐含的信息, 辅助仿真大数据的管理与分析. 此外, 复杂仿真系统可信度评估与 VV&A 是一项多人员多层次多目标的综合评估问题, 为减少评估人力资源开销, 基于机器学习的智能化评估方法与技术成为当前的研究热点. 目前人工智能已经迈向 2.0 阶段, 形成了以大

数据智能、互联网群体智能、跨媒体智能、人机混合增强智能、自主智能系统为主的新技术,为解决复杂仿真系统可信度评估问题带来了机遇。

## 5 结论

可信度评估技术的发展与仿真技术的发展及应用密不可分,仿真系统可信度评估的复杂性来源于复杂仿真系统本身以及用户对仿真应用要求的提高。本文系统地总结了复杂仿真系统可信度评估领域的研究进展,分析仿真系统的复杂特点及其可信度评估所面临的问题,进而从可信度评估方法、技术及支撑环境3方面给出了若干解决方案及应对策略,并通过分析复杂仿真系统可信度评估及信息技术发展现状,总结指出可信度评估面临的挑战、机遇以及未来研究方向。

## 参考文献

- 1 Wang Z C. Development and formation of simulation science. *J Syst Simul*, 2005, 06: 1279–1281 [王子才. 仿真科学的发展及形成. *系统仿真学报*, 2005, 06: 1279–1281]
- 2 Yang M, Zhang B, Wang Z C. The analysis of modeling and simulation development direction. *J Syst Simul*, 2004, 16: 1901–1904 [杨明, 张冰, 王子才. 建模与仿真技术发展趋势分析. *系统仿真学报*, 2004, 16: 1901–1904]
- 3 Robinson S. *Simulation: the Practice of Model Development and Use*. London: Palgrave Macmillan Press, 2014. 18–21
- 4 Wang Z C, Zhang B, Yang M. Verification, validation and accreditation (VV&A) for simulation system: current status and future. *J Syst Simul*, 1999, 11: 321–326 [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. *系统仿真学报*, 1999, 11: 321–326]
- 5 Qian X C. Research on simulation model validation and calibration methods under uncertainty. Dissertation for Ph.D. Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 [钱晓超. 考虑不确定性影响的仿真模型验证及校准方法研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016]
- 6 Yang M, Zhang B, Ma P, et al. Five key issues of the development of simulation systems VV&A. *J Syst Simul*, 2003, 15: 1502–1506 [杨明, 张冰, 马萍, 等. 仿真系统 VV&A 发展的五大关键问题. *系统仿真学报*, 2003, 15: 1502–1506]
- 7 Sargent R G. Verification and validation of simulation models. *J Simul*, 2013, 7: 12–24
- 8 Distributed Interactive Simulation Committee of the IEEE Computer Society. *IEEE Recommended Practice for Distributed Interactive Simulation — Verification, Validation, and Accreditation*. Version 1278.4, 1997
- 9 Conway R W, Johnson B M, Maxwell W L. Some problems of digital systems simulation. *Manage Sci*, 1959, 6: 92–110
- 10 Fishman G S, Kiviat P J. The analysis of simulation generated time series. *Manage Sci*, 1967, 3: 525–557
- 11 Hermann C F. Validation problems in games and simulations with special reference to models of international politics. *Syst Res*, 1967, 12: 216–231
- 12 Schruben L W. Establishing the credibility of simulations. *Simulation*, 1980, 34: 101–105
- 13 Teorey T J. Validation criteria for computer system simulations. *Simuletter*, 1975, 6: 9–20
- 14 Balci O, Sargent R G. Some examples of simulation model validation using hypothesis testing. In: *Proceedings of the 14th Conference on Winter Simulation*, San Diego, 1982. 621–629
- 15 Balci O, Sargent R G. Validation of simulation models via simultaneous confidence intervals. *Am J Math Manage Sci*, 1984, 4: 375–406
- 16 Kheir N A, Holmes W M. On validating simulation models of missile systems. *Simulation*, 1978, 30: 117–128
- 17 Tytula T P. A Method for Validating Missile System Simulation Models. Army Missile R&D Command, Redstone Arsenal, 1978
- 18 Montgomery D C, Conard R G. Comparison of simulation and flight-test data for missile systems. *Simulation*, 1980, 34: 63–72
- 19 Balci O. Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study. *Ann Oper Res*, 1994, 53: 121–173
- 20 Kleijnen J P C. Verification and validation of simulation models. *Eur J Oper Res*, 1995, 82: 145–162

- 21 Defense Modeling and Simulation Office. Verification, Validation and Accreditation Recommended Practice Guide BUILD 1. 1996
- 22 Defense Modeling and Simulation Office. Verification, Validation and Accreditation Recommended Practice Guide BUILD 2. 2000
- 23 Simulation Interoperability Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Recommended Practice for Verification, Validation, and Accreditation of A Federation: an Overlay to the High Level Architecture Federation Development and Execution Process. Version 1516.4, 2007
- 24 Simulation Interoperability Standards Organization. Reference for Generic Methodology for Verification and Validation (GM-VV) to Support Acceptance of Models, Simulations and Data. Vol. 1: Introduction and Overview Version 1, 2012
- 25 Simulation Interoperability Standards Organization. Reference for Generic Methodology for Verification and Validation (GM-VV) to Support Acceptance of Models, Simulations and Data. Vol. 2: Implementation Guide Version 2, 2013
- 26 Simulation Interoperability Standards Organization. Reference for Generic Methodology for Verification and Validation (GM-VV) to Support Acceptance of Models, Simulations and Data. Vol. 3: Reference Manual Version 3, 2013
- 27 Mullins J, Ling Y, Mahadevan S, et al. Separation of aleatory and epistemic uncertainty in probabilistic model validation. *Reliab Eng Syst Safe*, 2016, 147: 49–59
- 28 Zhao L F, Lu Z Z, Yun W Y, et al. Validation metric based on Mahalanobis distance for models with multiple correlated responses. *Reliab Eng Syst Safe*, 2017, 159: 80–89
- 29 Kwag S, Gupta A, Dinh N. Probabilistic risk assessment based model validation method using Bayesian network. *Reliab Eng Syst Safe*, 2018, 169: 380–393
- 30 Ao D, Hu Z, Mahadevan S. Design of validation experiments for life prediction models. *Reliab Eng Syst Safe*, 2017, 165: 22–33
- 31 Wu D Q, Lu Z Z, Wang Y P, et al. Model validation and calibration based on component functions of model output. *Reliab Eng Syst Safe*, 2015, 140: 59–70
- 32 Li Y L, Wang X J, Wang C, et al. Non-probabilistic Bayesian update method for model validation. *Appl Math Model*, 2018, 58: 388–403
- 33 Jiang X M, Yuan Y, Mahadevan S, et al. An investigation of Bayesian inference approach to model validation with non-normal data. *J Stat Comput Simul*, 2013, 83: 1829–1851
- 34 Ling Y, Mahadevan S. Quantitative model validation techniques: new insights. *Reliab Eng Syst Safe*, 2013, 111: 217–231
- 35 Sankararaman S, Mahadevan S. Integration of model verification, validation, and calibration for uncertainty quantification in engineering systems. *Reliab Eng Syst Safe*, 2015, 138: 194–209
- 36 Atkinson A D, Hill R R, Pignatiello J J, et al. Wavelet ANOVA approach to model validation. *Simul Model Pract Theory*, 2017, 78: 18–27
- 37 Sarin H, Kokkolaras M, Hulbert G, et al. A comprehensive metric for comparing time histories in validation of simulation models with emphasis on vehicle safety applications. In: *Proceedings of the ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, New York, 2009
- 38 Poropudas J, Virtanen K. Game theoretic validation of air combat simulation models. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Antonio, 2009. 3243–3250
- 39 Lemmers A, Roza M, Voogd J, et al. V&V study of an F-16 familiarization training simulator. In: *Fall Simulation Interoperability Workshop*. USA: SISO, 2013. 98–108
- 40 Dhananjayan A, Seow K T. A formal transparency framework for validation of real-time discrete-event control requirements modeled by timed transition graphs. *IEEE Trans Hum-Mach Syst*, 2015, 45: 350–361
- 41 Guerini M, Moneta A. A method for agent-based models validation. *J Econ Dyn Control*, 2017, 82: 125–141
- 42 Jebeile J, Barberousse A. Empirical agreement in model validation. *Stud Hist Philos Sci Part A*, 2016, 56: 168–174
- 43 Michopoulos J, Lambrakos S. On the fundamental tautology of validating data-driven models and simulations. In: *Proceedings of International Conference on Computational Science*, Atlanta, 2005. 738–745
- 44 Szabo C, Teo Y M. On validation of semantic composability in data-driven simulation. In: *Proceedings of IEEE Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation*, Atlanta, 2010. 73–80
- 45 Lamperti F. An information theoretic criterion for empirical validation of simulation models. *Economet Stat*, 2018, 5:

83-106

- 46 Guerini M, Moneta A. A method for agent-based models validation. *J Econ Dyn Control*, 2017, 82: 125-141
- 47 Wei H L, Li Z W. Grey relational analysis and its application to the validation of computer simulation models for missile systems. *Syst Eng Electron*, 1997, 2: 55-61 [魏华梁, 李钟武. 灰色关联分析及其在导弹系统仿真模型验证中的应用. *系统工程与电子技术*, 1997, 2: 55-61]
- 48 Li W, Jiao S, Lu L Y, et al. Validation and selection of simulation model based on the feature differences. *Act Autom Sin*, 2014, 40: 2134-2144 [李伟, 焦松, 陆凌云, 等. 基于特征差异的仿真模型验证及选择方法. *自动化学报*, 2014, 40: 2134-2144]
- 49 Li L, Lu Z Z. A new method for model validation with multivariate output. *Reliab Eng Syst Safe*, 2018, 168: 579-592
- 50 Wu Y J, Wang J M, Yang W G. Approach of credibility evaluation for testing system with small samples. *J Beijing Univ Aeronaut Astronaut*, 2016, 42: 1911-1917 [吴云洁, 王建敏, 杨文光. 基于小样本的试验系统可信度评估方法. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42: 1911-1917]
- 51 Zheng K, Hu J, Zhan Z F, et al. Multivariate responses analysis for model validation of dynamic systems. *J Shanghai Jiao Tong Univ*, 2015, 49: 191-195 [郑凯, 胡洁, 詹振飞, 等. 动态系统模型验证的多元响应分析. *上海交通大学学报*, 2015, 49: 191-195]
- 52 Wang H Y. Research on multivariate simulation result validation methods under uncertainty. Dissertation for Master Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016 [王海英. 多元不确定仿真结果验证方法研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016]
- 53 Min F Y, Yang M, Wang Z C. Knowledge-based method for the validation of complex simulation models. *Simul Model Pract Theory*, 2010, 18: 500-515
- 54 Jiao S, Li W, Yang M. Validation method of simulation model based on triangular fuzzy number. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2014, 45: 124-131 [焦松, 李伟, 杨明. 基于三角模糊数的仿真模型验证方法. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45: 124-131]
- 55 Huang Z J, Chen B, Ou Y H. Model checking continuous time Markov process based on timed schedulers. *J Guangxi Univ Sci Technol*, 2014, 25: 59-63 [黄镇谨, 陈波, 欧阳浩. 基于时间策略的连续时间 Markov 过程验证. *广西科技大学学报*, 2014, 25: 59-63]
- 56 Wang S, Wu D H, Qu L, et al. Study on credibility evaluation framework of complex simulation systems. *Comput Simul*, 2012, 29: 116-122 [王石, 伍丁红, 瞿亮, 等. 复杂仿真系统可信度评估框架研究. *计算机仿真*, 2012, 29: 116-122]
- 57 Niu S, Lin S L, Li W, et al. Model validation method for discrete event simulation. *J Syst Simul*, 2017, 29: 1984-1990 [牛帅, 林圣琳, 李伟, 等. 一种离散事件仿真模型验证方法. *系统仿真学报*, 2017, 29: 1984-1990]
- 58 Xia W, Yao Y P, Mu X D, et al. Parallel model checking for discrete event simulation models based on event graphs. *J Softw*, 2012, 23: 1429-1443 [夏薇, 姚益平, 慕晓冬, 等. 基于事件图的离散事件仿真模型并行检验方法. *软件学报*, 2012, 23: 1429-1443]
- 59 Fang K, Zhou Y C, Zhao E J. Discussion for the factor space of simulation model validation. *Syst Eng Electron*, 2017, 39: 2592-2602 [方可, 周玉臣, 赵恩娇. 关于仿真模型验证指标体系的探讨. *系统工程与电子技术*, 2017, 39: 2592-2602]
- 60 Zhao H Y. Analysis on credibility of radar seeker hardware-in-the-loop simulation system. *Ship Electron Eng*, 2015, 35: 90-92 [赵红云. 雷达制导半实物仿真系统可信度分析. *舰船电子工程*, 2015, 35: 90-92]
- 61 Lin S L, Li W, Ma P, et al. A new credibility assessment framework for training simulators. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Modeling and Simulation (ICCMS)*, Canberra, 2017. 182-186
- 62 Zhang Z. Research on evaluation method for credibility of simulation system. Dissertation for Ph.D. Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 [张忠. 仿真系统可信度评估方法研究. 博士学位论文. 哈尔滨工业大学, 2014]
- 63 Liu F, Ma P, Yang M, et al. Research on credibility quantification of complex simulation systems. *J Harbin Inst Technol*. 2007, 39: 1-3 [刘飞, 马萍, 杨明, 等. 复杂仿真系统可信度量化研究. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39: 1-3]
- 64 Fang K, Zhou Y C, Zhao K B. Validation method for simulation models with iteration operation. *Syst Eng Electron*, 2017, 39: 445-450 [方可, 周玉臣, 赵开斌. 含有迭代运算的仿真模型验证方法. *系统工程与电子技术*, 2017, 39: 445-450]
- 65 Fang K, Yang M, Wang Z C. The HITVICE VV&A environment. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Orlando, 2005. 1220-1227

- 66 Ju R S, Yang M, Huang K D, et al. Summary of service oriented modeling and simulation. *Syst Eng Electron*, 2013, 35: 1539–1546 [鞠儒生, 杨妹, 黄柯棣, 等. 面向服务的建模与仿真技术综述. *系统工程与电子技术*, 2013, 35: 1539–1546]
- 67 Li B H, Chai X D, Hou B C, et al. Networked modeling & simulation platform based on concept of cloud computing — cloud simulation platform. *J Syst Simul*, 2009, 21: 5292–5299 [李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 等. 一种基于云计算理念的网络化建模与仿真平台 —— 云仿真平台. *系统仿真学报*, 2009, 21: 5292–5299]

## Research progress on credibility assessment of a complex simulation system

Wei LI, Shenglin LIN, Yuchen ZHOU, Ping MA & Ming YANG\*

*Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*

\* Corresponding author. E-mail: myang@hit.edu.cn

**Abstract** Modeling and simulation have been used extensively, and they have become an important means to recognize and remold the real world. Whether the simulation system is credible has been a concern of simulation users. Various complexity characteristics of the simulation systems are presented with increasingly complex simulation objects and higher application requirements, creating some challenges in credibility assessment. First, the development process of the simulation credibility assessment is summarized. Next, the characteristics of complex simulation systems and the problems of the credibility assessment are analyzed, and some solutions and countermeasures for the assessment problems are provided. Finally, the challenges and opportunities of the credibility assessment for complex simulation systems are summarized, and the corresponding future research directions are indicated.

**Keywords** complex simulation system, credibility assessment, VV&A, simulation model validation, research development



**Wei LI** was born in 1980. He received a Ph.D. degree in the School of Astronautics from HIT, Harbin, in 2009. Currently, he is an associate professor at HIT. His research interests include simulation analysis and evaluation, distributed simulation, and simulation experiment design.



**Shenglin LIN** was born in 1989. He is a Ph.D. candidate in the School of Astronautics from HIT. His research interests include simulation credibility assessment, VV&A, and simulation-based evaluation.



**Ping MA** was born in 1970. She received the Ph.D. degree from the School of Astronautics from HIT, Harbin, in 2003. Currently, she is a professor at HIT. Her research interests include complex system modeling and simulation, distributed simulation, and VV&A.



**Ming YANG** was born in 1963. He received the Ph.D. degree from the School of Astronautics from Harbin Institute of Technology (HIT), Harbin, in 1997. Currently, he is a professor at HIT. His research interests include vehicle guidance and control and complex system simulation theory and methods.