

6-9-2021

## Development and Prospect of Simulation Research in China

Xiaogang Qiu

1. *College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;*  
;2. *The PLA's 31002 Unit, Beijing 100094, China;*

Duan Hong

1. *College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;* ;

Xie Xu

1. *College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;* ;

Mengna Zhu

1. *College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;* ;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Development and Prospect of Simulation Research in China

### Abstract

**Abstract:** It is important to treat modeling and simulation (M&S) as a discipline to advance its development. In China, M&S has been researched and applied over 40 years, and is gradually becoming an independent discipline. Modeling and simulating the complex systems are the challenge, however, this also brings grand opportunity for M&S to widen and improve itself. Since 1980s, the M&S community in China has realized the broad applications of M&S, comprehended M&S from multiple perspectives, conducted extensive research on basic questions, and discussed the composition of the basic simulation theory. By summarizing these achievements, the future works that have to be conducted to establish the simulation discipline and body of knowledge are envisioned.

### Keywords

simulation, simulation discipline, body of knowledge, simulation basis

### Recommended Citation

Qiu Xiaogang, Duan Hong, Xie Xu, Zhu Mengna. Development and Prospect of Simulation Research in China[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 1008-1018.

# 我国仿真学科研究的发展历程与展望

邱晓刚<sup>1,2</sup>, 段红<sup>1</sup>, 谢旭<sup>1</sup>, 朱蒙娜<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 中国人民解放军 31002 部队, 北京 100094)

**摘要:** 将仿真学科作为对象进行研究, 是推进仿真发展的重要工作。我国仿真经过 40 多年的发展, 正在逐渐形成了一门独立的学科。当前在面临复杂系统仿真挑战的同时, 仿真学科也进入了一个新的发展阶段, 必须完善自身建设。回顾 20 世纪 80 年代以来我国仿真学科研究的发展, 经历了 3 个阶段, 仿真界对仿真作用的认识在逐步加深, 对仿真技术发展有多种角度的解读, 对仿真学科基础进行了长期的探索, 并多方面探讨了仿真的基础理论构成。对这些发展进行了系统性的梳理, 并展望了建立仿真学科及其知识体系需要进一步开展的主要工作。

**关键词:** 仿真; 仿真学科; 知识体系; 仿真基础

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 05-1008-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0620

## Development and Prospect of Simulation Research in China

Qiu Xiaogang<sup>1,2</sup>, Duan Hong<sup>1</sup>, Xie Xu<sup>1</sup>, Zhu Mengna<sup>1</sup>

(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. The PLA's 31002 Unit, Beijing 100094, China)

**Abstract:** It is important to treat modeling and simulation (M&S) as a discipline to advance its development. In China, M&S has been researched and applied over 40 years, and is gradually becoming an independent discipline. Modeling and simulating the complex systems are the challenge, however, this also brings grand opportunity for M&S to widen and improve itself. Since 1980s, the M&S community in China has realized the broad applications of M&S, comprehended M&S from multiple perspectives, conducted extensive research on basic questions, and discussed the composition of the basic simulation theory. By summarizing these achievements, the future works that have to be conducted to establish the simulation discipline and body of knowledge are envisioned.

**Keywords:** simulation; simulation discipline; body of knowledge; simulation basis

## 引言

学科是对科学知识体系的分类。根据词典的解释, “学科”是“知识或学习的一门分科”或是“知识或教学的一个分支”, 因此学科有两方面含义: 一是科学技术研究; 二是科学工程教育<sup>[1]</sup>。按照知识的内在联系或类似的表现形式, 学科将人类理解、掌握的知识加以划分, 形成了一个知识体系, 因此学科是知识分类的产物, 是指某个知识领域或某门科学的分支<sup>[2]</sup>。现代意义上的学科是指特定的

趋于成熟的研究领域, 通过制度化手段, 规定了该领域特有的概念及范畴, 明确其研究对象和研究边界, 从而建立起严格的学术规范和科学的研究方法<sup>[2]</sup>。

从知识传授与教学的角度, 学科对应教学的科目; 从知识生产和学术研究的角度, 学科呈现为学问的分支; 从教学与研究组织的角度, 学科又可作为学术界或学术组织的单位<sup>[3]</sup>。因此, 关于仿真学科的研究也有 3 个角度, 但无论从何种角度, 作为知识或知识的分类这一主体认识是确定无疑的, 学

收稿日期: 2020-08-23

修回日期: 2021-02-25

第一作者: 邱晓刚(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为仿真平台设计、仿真建模、平行系统。E-mail: 13874934509@139.com

科是一种知识体系。在现代科技,特别是信息科学的发展推动下,仿真科学在理论方法研究、技术创新、工程应用以及各类工具开发等许多方面取得了快速的进展,正在发展成为一门独立的综合性学科。2009 年的仿真双新(新观点新学说)论坛上建议要“认认真真研究一下仿真的知识体系、仿真的内涵等一些基本问题”<sup>[4]</sup>。本文主要从仿真学科作为具有相对独立知识体系的科学领域角度,梳理我国仿真学科研究状况。

在国际仿真领域,我国仿真科学与技术的研究已具有比较重要的地位:中国仿真学会是国际上最大的国家仿真学术团体,李伯虎院士获得国际建模仿真学会终身成就奖,张霖教授曾被选为国际建模仿真学会主席。我国仿真学科的发展在国际上既有特色,又有一定的代表性。

本文将我国近 40 年来仿真学科研究分为了 3 个阶段,评述了每个阶段研究的主要特点,分析了学科研究存在的问题;然后从仿真作用、技术发展、学科基础和学科理论与知识体系 4 个方面梳理了仿真学科发展研究的历程;从 2 个角度分析了国内仿真界对仿真作用的认识;用 4 个类别归纳了仿真技术发展的研究;从相似理论、仿真学科理论与知识体系 3 个方面总结了仿真学科基础研究的成果;最后展望了未来仿真学科研究需要关注的 3 个工作:推进仿真学科知识的形式化研究、规范化仿真学科教育和探讨仿真学的建立。

## 1 仿真学科研究的 3 个阶段

我国仿真界对仿真学科的研究可分为 3 个阶段。

第 1 个阶段是 20 世纪 80—90 年代。我国目前可以检索到有关仿真学科讨论的文献是 1982 年发表的“仿真实论和方法”<sup>[5]</sup>,其中介绍了连续和离散事件系统的建模、连续系统与离散事件系统仿真语言及典型仿真语言的应用、随机数和随机变量产生等仿真实论与方法。这一时期,对仿真学科的基础进行了一定的探索,提出了相似理论的初步体系,作为仿真学科的基础理论<sup>[6-9]</sup>;并于 1989 年讨论了

系统仿真学科的定义、内涵,简要论述了相似理论含义、相似方式与相似方法,提出了相似理论的初步体系<sup>[7]</sup>。

这一阶段仿真作为一种技术手段,在国内发展迅速。特别是国防领域的大型仿真应用需求牵引,促进了我国仿真研究学术共同体的初步形成。但将仿真作为学科的关注不多,主要的工作是对仿真学科基础的讨论。直到这一阶段的后期,仿真学术才开始重视从学科的角度看仿真。

第 2 个阶段是 21 世纪第 1 个 10 年。许多专家对仿真学科及其理论体系进行了探讨。特别是通过中国仿真学会组织的仿真科学与技术一级学科论证,国内相关论文明显增多。

2000 年文献<sup>[10]</sup>提出将模型论、仿真算法和仿真可信度评估理论作为仿真学科基础理论的观点。2004 年有专家对系统仿真学科的层次进行了区分<sup>[11]</sup>。2005 年文献<sup>[12-13]</sup>以飞行模拟器的运动系统为例,讨论了被仿真系统与仿真系统的相似关系,进一步研究学科的基础,并提出了相似程度等级等概念;文献<sup>[14]</sup>提出了仿真进入复杂系统仿真新阶段的 3 个学科基础理论。2006—2007 年,文献<sup>[15-16]</sup>提出了仿真实论体系包括 6 个部分和 3 个层次;而文献<sup>[17-18]</sup>对仿真的定义和发展历史进行了讨论和梳理,讨论了仿真学科在现代科学技术体系中的定位;第 8 期双新论坛研讨了仿真作用与地位<sup>[19]</sup>。2008 年文献<sup>[20]</sup>认为仿真的理论体系包括:相似理论、仿真建模理论、仿真系统理论、仿真应用理论,并讨论了其内容。

2009 年,中国仿真学会完成了一份有关仿真学科发展的研究报告,并组织了有关高校向国家教育部申报仿真科学与技术一级学科,十多所院校的仿真领域学者和专家参与了该项工作,推动了我国仿真学科研究的发展<sup>[21]</sup>。2009 年多位教授发表了有关仿真学科的研究论文:文献<sup>[22]</sup>研究了系统动态相似理论,提出了系统仿真组合理论;文献<sup>[23]</sup>认为仿真学科知识体系包括仿真发展历史、建模理论与方法、离散事件系统仿真、连续系统仿真等

20 多个知识领域;文献[24]提出仿真学科知识体系包括学科理论基础、学科知识基础和学科方法论;文献[25]总结仿真学会申报一级学科研讨的成果,提出仿真学科理论体系主要由在各应用中的共性理论组成;文献[26]提出离散事件系统规范(Discrete Event System Specification, DEVS)可以支持建立形式化的仿真学科理论体系。2009 年的第 37 期双新论坛研讨了仿真的基础<sup>[4]</sup>。

这一阶段是仿真学科研究的爆发期,我国仿真界对仿真学科形成了一些基本共识,如仿真作用、发展阶段、知识体系和学科基础等,这些将在本论文后面部分展开梳理总结。

第 3 个阶段开始于 2010 年。经过仿真一级学科申报失败后,相关研究减少。这一研究阶段的研究有 3 个特点:一是关注科学发展的前沿领域与仿真的关系,体现在 2011 年、2013 年、2017 年举办的 3 次双新学术论坛,其主题分别为:复杂系统建模仿真中的困惑和思考、大数据时代对建模仿真的挑战与思考、认知仿真对复杂系统建模的争论与思考<sup>[27-29]</sup>,对推进我国仿真界的仿真学科研究起了很好的推动作用。二是对仿真学科的研究向下延伸,如 2014 年文献[30]提出了复杂电子信息系统仿真的理论方法框架,并对各种理论方法的综合应用进行了讨论;2016 年中国仿真学会组织编撰的《仿真科技与未来仿真》(2020 年出版)中总结了仿真学科的技术体系<sup>[31]</sup>;2017 年文献[32]讨论了数字仿真知识体系;2019 年文献[33]基于对美国老道明大学仿真本科专业课程设置的分析,对仿真课程体系进行了研究与思考。与前一阶段聚焦于对仿真学科的宏观论述不同,这一阶段仿真界转向仿真学科各方面的具体研究。三是中国仿真学会组织编写了《仿真科学与技术发展趋势预测及路线图》<sup>[34]</sup>、《2018—2019 仿真科学与技术学科发展报告》<sup>[35]</sup>,对仿真学科各个方面进行了较为系统的总结。

随着仿真技术的不断完善发展和应用领域人才需求刺激,仿真学科正在逐步形成自成体系且相对独立的理论与方法。过去仿真技术是在控制、管

理、计算机、系统工程等学科中成长起来的,并在一些领域的实际应用中发展成熟<sup>[24]</sup>,仿真发展长期依附于其他学科和其应用领域,专门从事仿真学科研究的人员较少,仿真学科的自身建设没有得到应有关注。当前我国各领域的仿真研究形成了遍地开花的格局,在国民经济与社会发展中的作用日益突出,但依然呈现出“分支旺盛,主干不足”的局面,仿真学科自身的发展还是没有跟上社会的需求。目前关于仿真学科的研究,在教学的科目、学问的分支和学术的组织 3 个方面,离成为成熟独立的学科都有较大的差距。

## 2 仿真作用的研究

对仿真作用的关注,源于计算机仿真的发展和复杂系统研究对仿真的需求。计算机仿真突破了实物仿真应用范围和技术的局限,广泛地应用于工程和自然科学的研究中,取得了显著的成效,成为人们研究复杂系统问题的普遍方式。对仿真作用的认识有 2 个层面:一是从哲学的高度,从方法论的角度;二是从应用的需求,从工具、手段的角度。

从方法论的角度,进入 21 世纪后,国内不少文献在涉及仿真作用的认识时,引用“仿真是继理论研究 and 实验研究之后人类认识世界的第 3 种方式”的观点<sup>[19]</sup>。该观点认为:仿真作为科学计算的主要方式,已成为具有战略意义的科学技术及工程应用研究手段<sup>[36]</sup>;与传统的理论研究、实验研究一起,构成了科学技术和工程设计中相互支持与关联的研究方法,是现代科学研究的三大“支柱”之一<sup>[37-38]</sup>。2007 年的第 8 届双新论坛“仿真-认知和改造世界的第 3 种方法”上的讨论,汇集了我国仿真界对此观点的认识<sup>[19]</sup>:第 1 种观点认为是认识和改造的第 3 种方法,因为实践表明仿真既能够认识问题,也能够有效地解决问题;第 2 种观点认为仿真是信息时代第 3 种认识世界的方法,但还不是改造世界的第 3 种方法,因为理论分析、科学实验和仿真都属于科学研究的范围,而改造世界不限于科学研究的范围<sup>[19]</sup>;第 3 种观点认为既不是认识、也不

是改造的第 3 种方法。还有一种比较极端的看法, 认为仿真科学方法应该比理论分析和科学实验高一个层次, 因为仿真不仅能够在现实世界中进行, 而且还能在虚拟世界进行。

在此之后, 随着大数据第四范式的提出, 接受上述观点的人逐步增加, 并超出了仿真领域。目前, 将计算机仿真当作一种认识事物的方式, 是研究复杂世界的一种可行和主要方法, 已达成比较普遍的认识: 随着社会发展和科学研究所面临问题的复杂性程度日益加深, 科学研究回归协同、集成、综合和共享已经成为一种趋势<sup>[24]</sup>。仿真正因为具有这些属性而成为现代科学研究的纽带, 它具有其他学科难以替代的求解高度复杂问题的能力<sup>[24]</sup>。

从应用的角度, 通过我国学位论文全文数据库对仿真研究与应用分析统计<sup>[39]</sup>, 发现仿真科学与技术已应用于当今社会的几乎所有领域, 包括国防、工业、农业、经济、社会服务、商业和娱乐等众多行业, 并且在各类系统论证、分析、设计、研制、试验、维护、人员训练等应用层次都发挥了不可或缺的重要作用<sup>[24]</sup>。美国国际技术评估中心(World Technology Evaluation Center, WTEC)提出的“基于仿真的工程科学”中的观点也逐步为大家接受: (计算机)仿真已成为有力的科研工具, 其作用足以影响和改变新世纪工程科学的研究之路; 基于仿真的科学与工程采用仿真的原理和方法来获取知识和应用知识, 从而造福于人类, 应成为科学技术与工程领域的优先发展项目; 仿真是缩短“纯科学的现实与工业的应用之间的距离”的科学技术<sup>[40-41]</sup>。随着现代信息技术的高度发展, 基于仿真的科学与工程应该成为科学家和工程师探索、研究、改造世界的得力助手, 成为实施工程创新、产品开发的有效工具<sup>[34]</sup>。

国内仿真界的一个共识是复杂系统的研究需求提升了科技领域对仿真作用的认识, 也使得仿真有望成为一个相对独立的学科。如文献[42]指出“复杂系统研究的核心是自身的演化性、自治性和涌现性, 对此利用传统的机理分析和实物试验的方法, 往往难以获得接近实际的结论”。于是, 人们不得

不转而采用仿真的研究方法。一些学者描述了各种复杂系统建模与仿真方法, 阐述了在复杂系统研究中仿真的重大意义, 并提出基于模板的思想, 采用递增式的处理方法来逐渐逼近复杂系统<sup>[43]</sup>。

2011 年 10 月, 在中国科协第 58 期新观点新学说学术论坛, 就“复杂系统建模仿真中的困惑和思考”进行了讨论。论坛认为复杂系统仿真是仿真研究面临的主要问题, 认识复杂系统性质、实现复杂系统的建模仿真具有挑战, 也具有重大意义。论坛设置了 3 个讨论主题<sup>[28]</sup>: 一是复杂系统对传统的建模仿真理论带来哪些本质影响? 相似性理论仍然适用吗? 还会有哪些性质发生变化? 二是如何对复杂系统的特性进行建模仿真? 涌现性、不确定性、自组织适应性等可以仿真吗? 三是复杂系统仿真需要解决哪些关键难题? 可信性、VV&A、仿真实验及仿真手段与工具等问题如何解决? 通过不同观点相互辩论、碰撞与交锋, 加深了对复杂系统的理解, 探讨了复杂系统建模仿真中的关键问题, 认为基于复杂网络、基于 Agent 的建模方法是复杂系统建模目前可行的途径, 提出要重视发展高效能建模仿真技术与系统, 并开展模型工程研究<sup>[28]</sup>。

仿真在社会领域应用的发展, 更加深了人们对复杂系统与仿真方法之间关系的认识。以人为主体的、具有主观能动性社会系统相对于物理世界的自然系统更为复杂, 用传统的还原方法难以有效进行分析<sup>[44]</sup>。采用基于微分方程的动力学方法虽然可以展现复杂系统状态的演化, 但只适用于系统元素间的相互作用关系呈现简单性的情景, 相关的变量变多就难以得到系统状态演化的解析解。计算机仿真方法适用于所研究对象的构成元素之间具有非线性关系、各元素相互作用之和不等于系统整体行为的情况, 即适用于复杂系统研究。计算机仿真方法在复杂(适应)系统研究中得到大展身手的机会, 体现了其真正的价值<sup>[44]</sup>。

国内对于仿真在整个学科体系中地位的研究不多。只有 2007 年发表的《仿真学科的研究》一文讨论了仿真学科在现代科学技术体系中的定位<sup>[17]</sup>。传

统的仿真在科学技术体系中的定位(20 世纪 80 年代以前),是放在工程技术这个层次和自然科学这个部类。而目前仿真界对仿真在整个科学技术体系中定位的讨论不多,认识也不统一。初步归纳,主要有 2 类:一是把仿真视为系统学部类中技术科学(理论)层次上一个分支;二是把仿真学科理论视为与类似数学层面的基础科学<sup>[17]</sup>。后一种非常有创意也有一定根据,但要想得到仿真内外学术界的认同,还有很大的困难,需要扎扎实实地开展理论研究工作。

中国仿真学会在《仿真科学与技术发展趋势预测及路线图》中归纳了仿真科学与技术的重要性集中体现在 4 个方面:① 仿真已成为人类认识与改造客观世界的重要方法;② 仿真技术具有广泛的应用需求,具有普适性;③ 仿真科学与技术将对科技发展起到革命性的影响;④ 仿真科学与技术对于实现我国创新型国家战略具有重要意义<sup>[24,34]</sup>。2019 年中国仿真学会在学科发展报告中进一步概括为:仿真是人类认识与改造客观世界的重要方法,具有普适性和广泛重大的应用需求,将对科技发展起到革命性的影响,对实现我国创新型国家战略具有重要意义<sup>[24,35]</sup>。

### 3 仿真技术发展的研究

对于仿真技术的发展历程,国内仿真界有多种观点,分析梳理后,可以归纳为 4 类。

第 1 类按仿真的基础设施,区分为模拟机阶段、串行处理阶段、模拟—数字混合机阶段、数字计算机仿真阶段、并行与分布仿真阶段以及云仿真阶段。

第 2 类按技术成熟度,区分为仿真技术在经历了初期发展阶段、成熟阶段和高级阶段之后,进入了以复杂系统仿真为研究对象的新阶段<sup>[14]</sup>;或者认为其发展经历了初级阶段、发展阶段、成熟阶段、学科形成阶段和学科发展新阶段<sup>[34-35]</sup>。

第 3 类按模型的特征,区分为基于相似三定律为主要内容的相似原理的实物仿真阶段<sup>[15]</sup>;基于数

学模型与计算机模型相似性实现仿真的数学模型仿真阶段;由多种数学模型到多种结构计算机模型构成的混合模型仿真阶段;针对复杂性仿真研究,基于智能体模型的仿真阶段<sup>[15]</sup>。

第 4 类从技术研究的角度认为仿真发展过程为 4 个阶段:仿真的分离研究阶段;协同/集成的通用仿真环境研究阶段;独立于仿真环境的模型、元模型以及通用模块的研究阶段;以提供动态标准模型库为标志的高度综合阶段<sup>[45]</sup>。

虽然从技术的成熟度区分得到了比较多的认同,但从长远发展的角度,其各个阶段的名称还需要斟酌。从逻辑上看,一般学科的发展需要经历起步、发展、提高 3 个阶段;从发展趋势上看,一般学科会呈现“高度分化基础上的高度综合,是分化与综合的高度对立统一”的规律<sup>[2]</sup>。目前,作为学科的仿真应该说已经起步,但刚进入发展阶段;仿真学科处于还在继续高度分化,但又面临高度综合的时期。

随着大数据与仿真、智能仿真、复杂系统仿真、认知仿真等理论的提出与发展,虚拟现实、网络化仿真、智能仿真、高性能(高效能)仿真、动态数据驱动仿真等关键技术研究的深入,对仿真学科理论体系构建提出了新挑战,同时也为仿真科学的发展带来了新的机遇,将促使仿真学科在内容和形式上都发生深刻的变化。文献[31-32]提出未来仿真将走向“数字化、高效化、网络化、智能化、服务化、普适化”,刻画了仿真技术进入新发展阶段的特征。

### 4 仿真学科基础的研究

仿真要成为一门成熟的学科,需要对学科的基础进行深入的研究。

#### 4.1 相似理论的研究

仿真是基于被仿真对象和其模型之间能够建立可信映射关系的信念,此信念的科学基础是相似理论。相似原理或理论研究自然成为了仿真学科的最基础部分,我国仿真学科创始人文传源对其进行

了长期的研究: 1989 年, 定义了“系统仿真是一门建立在相似理论、控制理论和计算技术基础上的综合性和试验性学科”<sup>[7]</sup>, 将相似理论作为仿真学科的基础。1992 年, 提出系统动态相似关系已完全超出相似原理所涉及的范围, 需完全重新建立相应的相似理论体系, 并提出了理论的初步体系<sup>[8]</sup>。2005 年, 连续发表了 3 篇文章: 《系统仿真实理论的探索》、《综合仿真系统与综合相似理论的探索》与《综合系统、综合仿真系统及其理论的探索》, 对综合系统、仿真系统与相似理论作了较系统的论述。这些论文超越按比例放大或缩小的简单几何相似原则, 以飞行模拟器的运动系统为例讨论原始系统与仿真系统的相似关系、相似方法、相似程度及其与误差的对应关系<sup>[12-13]</sup>; 梳理了几何、结构、性能、生理、心理、思维方法、行为过程、群体行动等主要相似方式, 以及全元素一一对应、等价、等效、选择匹配、组合效应、信息压缩与处理、隐元素、虚拟现实、模糊等相似方法<sup>[13]</sup>; 提出了完全相似、基本相似、较相似、一般相似和不相似等 5 级相似程度等级; 论述相似关系的符号、表达式, 关系处理和有关运算规则, 并用以表征有关综合仿真系统的相似方式、相似方法、相似程度, 从而形成一套有关系统仿真的综合相似理论体系; 通过分析仿真学科与系统学科的关系, 在同类系统固定元素间与稳态运动元素的相似理论基础上, 提出了系统动态相似理论。这些论文期望基于相似关系的相似规则与运算法则, 以及仿真中相似方式、相似方法、相似建模、相似程度等独特性内容, 建立一套相似理论体系作为仿真学科的基础。在 2009 年发表的《系统、仿真系统及其理论》一文中, 总结了从相似原理到相似理论, 再到综合相似理论的发展进程, 认为仿真学科的相似理论包括 2 部分<sup>[22]</sup>: 一是同类系统固定元素或等效瞬时确定元素间的相似关系和相似理论, 其所用运算规则为代数运算规则; 二是系统动态相似理论, 其所用运算规则一般为解算微分方程或泛函问题<sup>[22]</sup>。

相似性广泛存在, 形式多样。而仿真的相似理

论是限于以仿真为目的而寻找不同事物、系统、信息之间的相似性的理论, 不是泛指的相似性<sup>[16]</sup>。文传源关注的是使仿真成为现实的相似理论, 其工作对此建立了一个概念与理论框架, 此框架的丰富完善还有大量工作要做。

复杂系统仿真中的相似问题是近 10 年来关注的重点。仿真界既提出了相似性原理在复杂系统仿真中是否还有效的疑问, 又提出了按层次相似、通过微观相似产生宏观相似, 兼顾“过程”与“结果”的复杂系统仿真相似等思路<sup>[28]</sup>, 以及复杂系统的非线性相似、涌现性相似、不确定性相似、突变型相似、不可逆和不可重复性相似、自治性相似、自组织性相似等新的相似方式, 针对复杂系统仿真的相似研究还处于初步探索阶段<sup>[30]</sup>。总体上, 大家还是认为相似性理论是复杂系统仿真的基础, 但需要发展<sup>[28]</sup>。

有学者关注大数据对仿真基础的挑战: 仿真是基于相似性理论的, 但它可否基于相关理论? 仿真的目的就是预测未来, 但在某些情况下, 大数据方法可能做得更好。一些问题建不出来数学模型, 或者建出来的模型也很粗糙, 根本不能用, 因为很难找到两者之间直接的因果关系。那么基于相关理论是不是可以部分取代基于相似理论的建模仿真?<sup>[46]</sup>目前, 对这些疑问还难以给出确切的回答。

## 4.2 仿真学科理论研究

知识是学科发展过程中不断分化综合形成的, 是学科发展追求的目标。科学理论是系统化的科学知识, 是人的大脑对客观事物本质及其规律性的正确认识。仿真学科理论体系是系统化的科学知识, 是仿真学科知识体系的基础部分。学科对应着科学技术研究与科学工程教育, 前者侧重关注学科理论, 后者侧重关注学科知识体系。

我国仿真界对仿真学科的研究内容有一个基本的共识, 即包括建模、系统和应用 3 个方面<sup>[34-35]</sup>, 但对每个方面的具体内容有不同的认识。仿真界对围绕这 3 个方面研究产生的学科理论的认识, 一直

在不断地深化。

2000 年文献[10]提出了仿真的基础理论是模型论、仿真算法和仿真可信度评估理论。其中认为建立模型是整个仿真活动的核心所在,模型论针对系统应该具有模型,研究如何建立研究对象的模型,以及研究所建模型是否能够真实地反映了系统运行特性<sup>[10]</sup>。2005 年文献[14]针对仿真进入了以复杂系统为仿真对象的新阶段,提出其基础理论是模型论、方法论和科学方法、评估理论<sup>[14]</sup>。2006 年文献[15]提出仿真理论体系包括基础理论、专业理论和应用理论 3 个层次,分为相似理论、建模理论、仿真系统理论、仿真方法论、仿真质量控制理论及仿真应用理论 6 个部分;到 2007 年,又将仿真质量控制理论及仿真应用理论发展为仿真可信性理论及仿真综合应用理论<sup>[16]</sup>。2007 年文献[17]对一般建模与仿真理论及方法的发展进行了总结:从 1976 年 Zeigler 出版了《建模与仿真实论》一书,提出一个以数学为中心的形式描述框架开始,到 1999 年《建模与仿真实论》一书再版,仿真建模的数学基础依然还处于探索中。2008 年,有学者认为仿真的理论体系包括相似理论、仿真建模理论、仿真系统理论、仿真应用理论 4 个方面,并讨论了各方面的内容<sup>[20]</sup>;也有学者讨论了仿真应用理论,认为包括仿真试验设计的原理与方法、仿真的可视化理论与方法、仿真结果综合分析和评估的理论与方法,仿真与应用目的的一致性关系分析理论与方法等<sup>[47]</sup>。

### 4.3 仿真知识体系的研究

相对于仿真学科理论的讨论,国内仿真界对仿真学科知识体系的研究较少。2009 年文献[23]提出仿真学科知识体系应包括建模与仿真技术的发展历史、建模理论与方法等 20 项内容。这是我国仿真界对仿真知识体系进行的归类,但没有给出各方面内容的知识单元。该文还提出了制定仿真学科的知识体系应遵循 5 项原则。同年,文献[26]讨论了 DEVS 研究进展及其对建模与仿真学科建立

的作用,认为 DEVS 是目前仿真领域唯一能够为各类仿真知识系统提供基础支撑的理论,应作为仿真学科的基础理论;文献[24]提出仿真学科知识体系包括学科理论基础、知识基础和方法论;文献[25]在总结中国仿真学会申报一级学科研讨成果基础上,提出仿真科学与技术相对独立的理论体系主要由在各学科应用中的共性理论组成,包括相似理论、仿真建模理论、仿真系统理论和仿真应用理论 4 部分。2009 年中国仿真学会的学科发展报告认为仿真学科已初步形成独立的知识体系<sup>[31]</sup>,包括由仿真建模理论、仿真系统理论和仿真应用理论构成的理论体系;由系统、模型、应用领域专业知识综合而成的知识基础;由基于相似原理的仿真建模,基于系统论的仿真系统构建,以及全系统、全寿命、全方位的仿真应用综合而成的方法论。2010 年后,中国仿真学会的学科发展报告指出仿真学科已形成相对独立的理论体系<sup>[34]</sup>,主要包括仿真基础理论、仿真建模理论、仿真系统理论和仿真应用理论 4 个部分。

对仿真学科中某一部分理论的研究逐渐增加。如:2014 年文献[31]提出仿真系统一般理论是指导仿真系统研制的共性理论,包括仿真系统的定义与分类、仿真系统体系结构理论、仿真系统设计理论和仿真系统全寿命管理理论等,并讨论了复杂电子信息系统仿真的理论方法框架,并对各种理论方法的综合应用进行了探讨。2015 年在面向复杂系统仿真的模型工程研究中,给出一个由 5 部分构成的初步模型工程知识体系框架:模型工程基础、模型生命周期、模型工程实施与管理、模型工程工具和模型工程相关标准,并指出该知识体系可支持确定模型工程的研究范畴以及与其他相关学科的边界与关系<sup>[48]</sup>。2017 年文献[49]讨论了数字仿真知识体系,包括数字仿真基础科学、数字仿真技术科学和数字仿真应用科学;2018 年文献[50]研究了作战仿真试验理论体系,为基础理论、专业理论和应用理论 3 个层次。近年来,提出了面向新型人工智能系统的建模与仿真技术体系,包括:面向新型人工智

能系统的建模理论与方法、仿真系统支撑技术和智能仿真系统应用工程技术<sup>[51]</sup>。

总体上, 仿真学科基础的研究还是显得杂而乱, 存在拼凑的感觉。这是因为仿真学科的理论还没有被充分认识, 还有待研究与发现。理论与实践是仿真不可偏颇的 2 个方面, 实践对于促进仿真学科的发展具有推动作用, 但理论的构建也是基础性和决定性的。作为学科基础的知识体系应该具备独立性、系统性、完整性等特征。从这 3 个方面考量, 仿真学科理论与知识体系的研究还任重道远。

## 5 结论

仿真学科正处于跨入一个新阶段的发展阶段。要越过这个发展门槛, 仿真必须完善自身学科的建设<sup>[26]</sup>。当前仿真学科已积累大量的知识, 但仿真学界还缺乏对其进行系统梳理的工作。由于大量和急迫的应用需求, 长期以来国内仿真界的研究重心放在应用上, 学科基础理论、知识体系的建立问题虽常常提及, 但深入的研究工作却一直不足<sup>[26]</sup>。

一门学科建立与发展是要经过许多人甚至几代人的努力才可以建立起来的。从仿真和仿真学科发展建设现状来看, 相对仿真应用研究, 从事仿真学科理论研究的学者十分缺乏。仿真专业的人才, 多以技术研究、仿真系统设计为主, 真正学习研究仿真学科的人才很少, 仿真学科理论的教学与研究“短板”现象十分严重。对仿真学科系统而深入的认识成为当今仿真学科建设与研究的重点和当务之急。

仿真学科理论与知识体系的构建是一项长期的工作, 需要从分析仿真学科的基本概念着手, 通过深入剖析仿真学科的核心内容及其相互之间的关系, 深化学科的理论 and 知识体系的研究。当前可以推进的工作包括:

(1) 推进仿真学科知识形式化。现代科学具有普遍数学化特点。由于科学的数学化, 一方面数学渗透到各门学科并与之相结合; 另一方面形式化的认识理论和手段的普及应用, 导致在现代科学体系

中出现数学化、形式化的学科系列。仿真学科知识形式化的核心是采用数学语言来表示模型和仿真系统等的结构。模型和仿真系统形式化描述后, 可进行数学分析, 可促进其校核和验证, 加速仿真方法从研究转向实践应用<sup>[26]</sup>。

(2) 关注仿真学科的工程教育。美国国会于 2018 年将“建模与仿真”纳入了新修订的《美国高等教育法》。肖田元教授的调查结果表明<sup>[39]</sup>: 我国社会对仿真科学与技术人才有着强烈的需求。仿真学科教育和人才培养直接决定一个国家在仿真科学领域的竞争实力。关注仿真学科的工程教育必然要关注仿真学科知识体系构建, 而仿真工程教育实践, 也将为深化认识仿真学科提供动力。

(3) 尝试把仿真学科作为对象, 进行“仿真学”的研究, 建立起仿真学的理论、内容、架构, 达到“纲举目张”的效果, 促使仿真学科的研究产生一次升腾与飞跃的发展, 以适应新常态、新业态、新环境下经济社会发展对仿真的需求。

## 参考文献:

- [1] 戴先中. 自动化学科(专业)的知识结构与知识体系浅析[J]. 中国大学教学, 2005(2): 19-22.  
Dai Xianzhong. Analysis of Knowledge Structure and Knowledge System of Automation Discipline[J]. University Teaching in China, 2005(2): 19-22.
- [2] 袁曦临. 学科的迷思[M]. 南京: 东南大学出版社, 2017.  
Yuan Xilin. Myth of Discipline[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2017.
- [3] 李娟, 李晓旭. 高等学校重点学科建设研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015: 31-33.  
Li Juan, Li Xiaoxu. Research on the Construction of Key Disciplines in Colleges and Universities[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2015: 31-33.
- [4] 中国科协学会学术部. 仿真是基于模型的实验吗?[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.  
Academic department of CAST. Is Simulation a Model-Based Experiment?[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009.
- [5] 韩慧君. 仿真理论和方法[J]. 国外自动化, 1982(2): 33-35.  
Han Huijun. Simulation Theory and Method[J]. Foreign

- Automation, 1982(2): 33-35.
- [6] 文传源, 王正中, 熊光楞. 系统仿真技术及其发展[J]. 自动化学报, 1985, 11(2): 1-5.  
Wen Chuanyuan, Wang Zhengzhong, Xiong Guangleng. System Simulation Technology and Its Development[J]. Acta Automatica Sinica, 1985, 11(2): 1-5.
- [7] 文传源. 相似理论的探索与研究[J]. 系统仿真学报, 1989, 1(1): 2-14.  
Wen Chuanyuan. Exploration and Research on Similarity Theory[J]. Journal of System Simulation, 1989, 1(1): 2-14.
- [8] 文传源. 系统仿真学科与仿真系统技术[J]. 系统仿真学报, 1992, 4(3): 1-8.  
Wen Chuanyuan. System Simulation Discipline and Simulation System Technology[J]. Journal of System Simulation, 1992, 4(3): 1-8.
- [9] 文传源. 综合系统论及其规范化建模[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(5): 328-333.  
Wen Chuanyuan. Integrated System Theory and Its Standardized Modeling[J]. Journal of System Simulation, 1999, 11(5): 328-333.
- [10] 王子才. 关于仿真实理论的探讨[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(6): 604-608.  
Wang Zicai. Discussion on Simulation Theory[J]. Journal of System Simulation, 2000, 12(6): 604-608.
- [11] 黄柯棣. 对建模与仿真技术学科的粗浅理解——为庆祝《计算机仿真》杂志创刊20周年而写[J]. 计算机仿真, 2004, 21(9): 9-12.  
Huang Kedi. A Understanding of Modeling and Simulation Technology: in Celebration of the 20th Anniversary of the Publication of Computer Simulation[J]. Computer Simulation, 2004, 21(9): 9-12.
- [12] 文传源. 系统仿真实理论的探索[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 1-6.  
Wen Chuanyuan. Exploration of System Simulation Theory[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(1): 1-6.
- [13] 文传源. 综合仿真系统与综合相似理论的探索[J]. 系统仿真技术, 2005, 1(1): 1-7.  
Wen Chuanyuan. The exploration of Synthetic Simulation System and Similarity Theory[J]. System Simulation Technology, 2005, 1(1): 1-7.
- [14] 王子才. 仿真科学的发展及形成[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1279-1281.  
Wang Zicai. Development and Formation of Simulation Science[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(6): 1279-1281.
- [15] 王精业, 杨学会. 仿真科学与技术的发展及其理论体系[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 1-4.  
Wang Jingye, Yang Xuehui. Development of Simulation Science and Technology and Its Theory System[J]. Computer Simulation, 2006, 23(1): 1-4.
- [16] 王精业, 杨学会, 徐豪华. 仿真科学与技术的学科发展现状与学科理论体系[J]. 科技导报, 2007, 25(12): 5-11.  
Wang Jingye, Yang Xuehui, Xu Haohua. Advances of the Simulation Science and Technology[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(12): 5-11.
- [17] 王正中. 仿真学科的研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4101-4103.  
Wang Zhengzhong. Research on Simulation Discipline[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(18): 4101-4103.
- [18] 刘藻珍. 仿真科学的研究[J]. 科技导报, 2007, 25(2): 14-21.  
Liu Zaozhen. Study on Simulation Science[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(2): 14-21.
- [19] 中国科协学会学术部. 仿真——认知和改造世界的第3种方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.  
Academic Department of CAST. Simulation: the Third Way to Recognize and Transform the World?[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2007.
- [20] 杨学会, 王精业. 仿真科学与技术学科的理论体系探讨[C]// 第十届中国科协年会论文集(一). 北京: 中国科协, 2008: 1-7.  
Yang Xuehui, Wang Jingye. On Theoretical System of Simulation Science and Technology Discipline[C]// 10th Annual Meeting of China Association for Science and Technology (1). Beijing: Academic department of CAST, 2008: 1-7.
- [21] 中国系统仿真学会学科设置建议工作组. 设置“仿真科学与技术”一级学科建议书[R]. 北京: 中国系统仿真学会, 2009.  
Working Group on Discipline Setting Proposal of China Society for System Simulation. Proposal for Setting up “Simulation Science and Technology” First Level Discipline[R]. Beijing: China Society for System Simulation, 2009.
- [22] 文传源. 系统、仿真系统及其理论[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5289-5291.  
Wen Chuanyuan. System, Simulation System and theories[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5289-5291.
- [23] 王行仁, 龚光红, 刘藻珍, 等. “仿真科学与技术”学科

- 知识体系与课程体系的探讨[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5275-5280.
- Wang Xingren, Gong Guanghong, Liu Zaozhen, et al. Discussion about Body of Knowledge and Body of Course for Science and Technology Discipline[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5275-5280.
- [24] 陈宗基, 李伯虎, 王行仁, 等. “仿真科学与技术”学科研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5265-5269.
- Chen Zongji, Li Bohu, Wang Xingren, et al. Study on Discipline of Simulation Science and Technology[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5265-5269.
- [25] 王精业, 黄柯棣, 邱晓刚, 等. 仿真科学与技术学科的理论体系探讨[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5270-5274.
- Wang Jingye, Huang Kedi, Qiu Xiaogang, et al. Discussion of Theory Framework for Simulation Science and Technology Discipline[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5470-5474.
- [26] 邱晓刚, 段伟. DEVS 研究进展及其对建模与仿真学科建立的作用[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6697-6704, 6709.
- Qiu Xiaogang, Duan Wei. The Research Progress on DEVS and Its Role in the Establishment of Modeling and Simulation Discipline[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(21): 6697-6704, 6709.
- [27] 中国科协学会学术部. 复杂系统建模仿真中的困惑和思考[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
- Academic Department of CAST. Confusion and Thinking in Modeling and Simulation of Complex Systems[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2011.
- [28] 中国科协学会学术部. 大数据时代对建模仿真的挑战与思考[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2013.
- Academic Department of CAST. Challenges and Reflections on Modeling and Simulation in the Era of Big Data[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2013.
- [29] 中国科协学会学术部. 认知仿真对复杂系统建模的争论与思考[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2017.
- Academic Department of CAST. Debate and Reflection on Cognitive Simulation for Complex System Modeling[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2017.
- [30] 王积鹏, 李伯虎. 复杂电子信息系统仿真理论方法体系探讨[J]. 电波科学学报, 2014, 29(3): 586-594.
- Wang Jipeng, Li Bohu. System of Simulation Theory and Method for Complex Electronic Information System[J]. Journal of Radio Science, 2014, 29(3): 586-594.
- [31] 中国仿真学会. 2049 年中国科技与社会愿景——仿真科技与未来仿真[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
- China Simulation Society. China Science & Technology and Social Vision in 2049: Simulation Technology and Future Simulation[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2020.
- [32] 徐庚保, 曾莲芝. 现代仿真[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 8-11.
- Xu Gengbao, Zeng Lianzhi. Modern Simulation[J]. Computer Simulation, 2017, 34(1): 8-11.
- [33] 周云, 朱晓敏. 美国老道明大学仿真本科专业课程设置研究与思考[J]. 高等教育研究学报, 2019, 42(3): 67-73.
- Zhou Yun, Zhu Xiaomin. Research and Reflection on the Curriculum Setting for Undergraduate Program of Modeling and Simulation in the Old Dominion University[J]. Journal of Higher Education Research, 2019, 42(3): 67-73.
- [34] 中国仿真学会. 仿真科学与技术发展趋势预测及路线图[R]. 北京: 中国系统仿真学会, 2018.
- China Simulation Society. Trend Prediction and Development Roadmap of Simulation Science and Technology[R]. Beijing: China Society for System Simulation, 2018.
- [35] 中国仿真学会. 2018-2019 仿真科学与技术学科发展报告[R]. 北京: 中国系统仿真学会, 2019.
- China Simulation Society. Development Report of Simulation Science and Technology Discipline in 2018-2019[R]. Beijing: China Society for System Simulation, 2019.
- [36] 肖田元. 我国仿真科学与技术的进展[C]// 2010 系统仿真技术及其应用学术会议论文集. 北京: 中国系统仿真学会, 2010: 8.
- Xiao Tianyuan. Progress of Simulation Science and Technology in China[C]// 2010 Academic Conference on System Simulation Technology and its Application. Beijing: China Society for System Simulation, 2010: 8.
- [37] National Science Foundation of America. Simulation Based Engineering Science[R]// A Report on a Workshop Held Under the Auspices of the National Science Foundation. USA: National Science Foundation of America, 2004.
- [38] National Science Foundation of America. Simulation Based Engineering Science-Revolutionizing Engineering

- Science through Simulation[R]// Report of the National Science Foundation Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science. USA: National Science Foundation of America, 2006.
- [39] 肖田元, 范文慧, 杨明, 等. 仿真科学与技术学科的人才培养与社会需求[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5281-5288.  
Xiao Tianyuan, Fan Wenhui, Yang Ming, et al. Study on Education and Social Demand of Simulation Science and Technology Discipline[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5281-5288.
- [40] World Technology Evaluation Center. International Assessment of Research and Development in Simulation based Engineering and Science[R]// World Technology Evaluation Center (WTEC), Inc. Panel Report. USA: World Technology Evaluation Center, 2009.
- [41] World Technology Evaluation Center. Inventing a New America through Discovery and Innovation in Science, Engineering and Medicine-A Vision for Research and Development in Simulation Based Engineering and Science in the Next Decade[R]// World Technology Evaluation Center (WTEC), Inc. Report. USA: World Technology Evaluation Center, 2010.
- [42] 刘兴堂, 刘力, 宋坤, 等. 对复杂系统建模与仿真的几点重要思考[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 3073-3076.  
Liu Xingtang, Liu Li, Song Kun, et al. Important Considerations of Building Pattern to Complicated System[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(13): 3073-3076.
- [43] 刘晓平, 唐益明, 郑利平. 复杂系统与复杂系统仿真研究综述[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(23): 6303-6315.  
Liu Xiaoping, Tang Yiming, Zheng Liping. Survey of Complex System and Complex System Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(23): 6303-6315.
- [44] 齐磊磊. 计算机模拟方法的哲学分析[J]. 学术研究, 2018(7): 30-36.  
Qi Leilei. Philosophical Analysis of Computer Simulation Methods[J]. Academic Research, 2018(7): 30-36.
- [45] 董淑英, 周玉生. 系统仿真学科领域研究的探讨[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 183-188.  
Dong Shuying, Zhou Yusheng. Discussion on Fields of Study of System Emulation Discipline[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(2): 183-188.
- [46] 胡晓峰. 大数据时代对建模仿真的挑战与思考[J]. 军事运筹与系统工程, 2013, 27(4): 5-12.  
Hu Xiaofeng. Challenges and Reflections on Modeling and Simulation in the Era of Big Data[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2013, 27(4): 5-12.
- [47] 范锐, 王精业. 试论仿真应用理论[C]//第十届中国科协年会论文集(一). 北京: 中国科协, 2008: 78-84.  
Fan Rui, Wang Jingye. On the Simulation Application Theory[C]// 10th Annual Meeting of China Association for Science and Technology (1). Beijing: Academic Department of CAST, 2008: 78-84.
- [48] 张霖, 张雪松, 宋晓, 等. 面向复杂系统仿真的模型工程[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2729-2736.  
Zhang Lin, Zhang Xuesong, Song Xiao, et al. Model Engineering for Complex System Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2729-2736.
- [49] 徐庚保, 曾莲芝. 数字仿真发展趋势[J]. 计算机仿真, 2013, 30(5): 1-4.  
Xu Gengbao, Zeng Lianzhi. Development Tendency of Digital Simulation[J]. Computer Simulation, 2013, 30(5): 1-4.
- [50] 徐享忠, 杨建东, 郭齐胜. 作战仿真试验理论体系研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(2): 98-103.  
Xu Xiangzhong, Yang Jiandong, Guo Qisheng. Research on Theoretical System of Combat Simulation Test[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2018, 32(2): 98-103.
- [51] 李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 面向新型人工智能系统的建模与仿真技术初步研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 349-362.  
Li Bohu, Chai Xudong, Zhang Lin, et al. Preliminary study on Modeling and Simulation Technology Oriented to Neo-Type Artificial Intelligent Systems[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 349-362.