

7-20-2021

## Networked Simulation and It's Development Trend

Duan Hong

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

Xiaogang Qiu

*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.

---

## Networked Simulation and It's Development Trend

### Abstract

**Abstract:** Carrying out simulating whenever and wherever possible as well as the large-scale trend of simulation lead to the demand of networked simulation.. Through the changes of range, from model interconnection, experimental collaboration and domain simulation collaboration, *three layers of meanings of networked simulation are analyzed; The characteristics of networked simulation are summarized from five aspects, pattern, application, target, focus, and morphology. The idea that the networked simulation will bring changes to the simulation application of the activity scope and method, resource construction, resource verification, organizational structure, and so on is proposed.* By sorting out the development process of networked simulation, from distributed interactive simulation, Web-based simulation to cloud simulation, *the development motivation is analyzed* from the application requirements and the development requirements of simulation itself. *The development trends of networked simulation are discussed* from the perspectives of cloud simulation, network technology, software-defined simulation, big data, and management policies.

### Keywords

domain simulation, networked simulation, simulation resources, systems engineering

### Recommended Citation

Duan Hong, Qiu Xiaogang. Networked Simulation and It's Development Trend[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(7): 1526-1533.

# 网络化仿真及其发展趋势

段红, 邱晓刚

(国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 随时随地仿真和大规模仿真的需求催生了网络化仿真。通过提出网络化仿真作用范围的变化, 从模型互联、实验协作到领域仿真协同, 分析了网络化仿真的 3 层含义; 从模式、应用、目标、重点和形态 5 个方面归纳了其特性; 提出了网络化仿真将给应用领域在仿真的活动范围与方式、资源构建、资源验证、组织结构等带来变化。在梳理网络化仿真从分布交互式仿真、基于 Web 的仿真到云仿真的发展历程基础上, 从应用需求和仿真自身发展需求 2 个方面剖析其发展动因。从云仿真、网络技术、软件定义仿真、大数据和管理政策等角度讨论了其发展趋势。

**关键词:** 领域仿真; 网络化仿真; 仿真资源; 仿真工程

中图分类号: TP301      文献标志码: A      文章编号: 1004-731X (2021) 07-1526-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0032

## Networked Simulation and It's Development Trend

Duan Hong, Qiu Xiaogang

(College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Carrying out simulating whenever and wherever possible as well as the large-scale trend of simulation lead to the demand of networked simulation. Through the changes of range, from model interconnection, experimental collaboration and domain simulation collaboration, *three layers of meanings of networked simulation are analyzed*; The characteristics of networked simulation are summarized from five aspects, pattern, application, target, focus, and morphology. The idea that the networked simulation will bring changes to the simulation application of the activity scope and method, resource construction, resource verification, organizational structure, and so on is proposed. By sorting out the development process of networked simulation, from distributed interactive simulation, Web-based simulation to cloud simulation, *the development motivation is analyzed* from the application requirements and the development requirements of simulation itself. The development trends of networked simulation are discussed from the perspectives of cloud simulation, network technology, software-defined simulation, big data, and management policies.

**Keywords:** domain simulation; networked simulation; simulation resources; systems engineering

## 引言

网络化仿真, 泛指以现代网络技术为支撑实施系统建模、仿真运行试验、分析评估等全过程活动的一类仿真技术<sup>[1]</sup>, 被认为是仿真科学与工程值得特别关注的方向之一<sup>[2]</sup>。

当今社会全球化程度日益提高, 同时, 社会分

工日益精细, 使得社会协同需求日益增强, 人类认识和应对各类重大社会问题的能力面临巨大挑战。在博弈、控制、预测等领域以及社会发展、环境保护、经济管理、金融风险分析、突发事件应对等宏观层面, 迫切需要能满足从系统论证到系统维护全生命周期需求的先进仿真技术, 一方面使得国民经

济、国防建设、自然科学、社会科学等领域中的大规模复杂系统仿真成为可能; 另一方面对仿真全过程进行全方位管控, 从整体上提高复杂系统仿真效率、降低费用<sup>[3-4]</sup>。网络化仿真技术应以满足以上需求作为发展目标。

例如, 在军事领域中, 随着战争信息化程度的提高、新的作战形式的出现, 未来战争信息化程度将达到前所未有的高度, 陆、海、空、天、电、网、核全域多维一体联合作战将成为未来战争的基本形态。联合作战体系能力和效能的仿真评估, 需要大量多源、异构数据、知识、模型的集成互动, 需要多领域人员的协同, 面临时间和经费的压力, 这些都给仿真技术提出了新的挑战<sup>[5-6]</sup>。这类复杂系统的仿真, 需要仿真环境提供支持, 从而使仿真资源可配置、仿真工具可再集成和仿真过程可协同, 以确保仿真评估过程管理的高效性<sup>[7]</sup>。网络化仿真对各类仿真资源进行集成, 提供协同工作环境和工具, 可以支持这一集成、协同和融合的需求, 从而提高仿真全过程效率。

网络化仿真的作用主要体现在提升人类社会分析研究复杂性问题的能力上, 在复杂系统论证、试验、设计、分析、维护、人员训练等方面将得到全面应用。

## 1 含义与特征

网络化仿真起源于 20 世纪 80 年代开始出现的先进分布式仿真技术。先进分布式仿真技术的概念由美国国防部针对军事领域的复杂系统仿真需求率先提出, 经历了网络仿真器 (SIMulator Networking, SIMNET), 分布交互仿真 (Distributed Interactive Simulation, DIS), 聚合级仿真协议 (Aggregate Level Simulation Protocol, ALSP) 和高层体系结构 (High Level Architecture, HLA) 等发展阶段。1995 年, 美国国防部公布的“建模与仿真主计划”对网络化仿真思想的形成具有重要推进作用<sup>[8]</sup>, 也对网络化仿真技术研发与推广应用模式产生重要影响, 领域高层对仿真进行统一计划和协调管理

成为一种需要。

网络化仿真技术的内涵随信息技术的发展而不断拓展, 在早期的 HLA 为代表的先进分布仿真基础上, 逐步发展出基于 Web 仿真、网格仿真以及云仿真等技术<sup>[9]</sup>。

狭义的网络化仿真指利用计算机互联网络对仿真资源进行集成和运行的一种仿真模式。广义的网络化仿真指为了实现高效仿真的目标, 以网络技术、仿真技术及其他相关技术为手段, 利用协同方式, 突破各种约束, 集成各种仿真资源, 开展各类仿真活动。

现阶段, 网络化仿真主要有 3 层含义: ①仿真模型(仿真应用节点)通过网络互联进行仿真运行, 即传统网络化仿真, 以 DIS, ALSP 及 HLA 为代表; ②通过网络协作完成一次仿真实验过程, 以基于 Web 仿真、HLA Evolved 为代表; ③形成适于领域内大范围协同工作的仿真环境, 支持领域中的各种仿真实验, 提高领域仿真整体效能, 以云仿真、领域仿真工程为代表。

网络化仿真内涵丰富, 尚处于发展阶段, 目前可归纳出以下基本特征: ①以网络技术为基础的先进仿真模式, 是在现代网络环境支持下, 人们在较大范围内(如某应用领域全范围)管理和组织各类仿真活动的理论与方法; ②覆盖应用领域的所有仿真应用, 可以用来支持应用领域的各类仿真活动, 覆盖领域活动的全生命周期; ③以提高仿真活动全生命周期的效率为主要目标, 通过仿真网络化提高仿真响应速度, 进而扩大仿真应用范围; ④强调应用领域各个部门的协作与资源共享, 提高领域的仿真应用能力, 实现领域设计、分析、评估、生产全周期成本的降低; ⑤具有多种形态和功能。结合领域不同部门的具体应用需求, 网络化仿真环境可提供多种形态的仿真, 可有多种功能的仿真应用系统并存。

网络化仿真的核心是构建支持应用领域协作、共享的仿真环境, 打造利益相关方合作共赢的仿真生态。网络化仿真环境是在网络化仿真模式、理论和方法指导下, 在网络和信息技术支持下, 以领域

需求为牵引,设计实施的基于网络的仿真环境,环境中的资源对用户可见、可得、可用。领域用户在该环境中可以方便地查找、获取、使用、改进和增加各类仿真资源;该仿真环境对用户需求提供快速响应能力和各类支撑工具,从而提高全领域的仿真能力和效率。

网络化仿真将带来应用领域仿真实念和运作方式的变化,包括:①仿真活动范围和方式上的变化——突破空间地域对仿真运作范围和方式的约束,通过网络化仿真环境协同完成仿真实验,使得大型复杂仿真活动成为可能;②仿真资源构建方式的变化——由原来相对封闭的开发模式转变为基于网络的开放式协同开发模式;③仿真资源应用方式的变化——各个部门的仿真活动可以应用全领域的仿真资源;④仿真资源验证方式的变化——网络经济模式将被引入模型、数据的校核与验证,全网皆可参与验证;⑤组织结构上的变化——网络化时代的工作模式、人际交往模式、人机互动模式均发生重大变化,导致组织结构发生变化,仿真组织也不能例外,网络化仿真环境须提供利于协同和知识共享的、遵循网络经济模式的新型组织模式;⑥资源观念上的变化——传统上,仿真资源往往由某部门专用,可共享性不强,网络时代,由于部门间的合作增强,对仿真资源的全领域共享提出了迫

切需求,资源的全领域可见、可得、可用性,对于提高仿真资源共享和重用具有重要意义。

## 2 发展历程与动因

20世纪80年代中期美国国防部启动的SIMNET项目将分散在异地的仿真器(坦克、装甲车)用计算机网络连接起来,提供一个更加丰富的训练环境,被视为分布式仿真技术的开端和当时的代表性成果。但由于当时网络尚处于发展阶段,受扩展能力、应用范围、网络技术限制,分布式仿真系统的发展也受到限制。先进分布式仿真(Advanced Distributed Simulation, ADS)技术概念的正式提出,为分布式仿真技术的蓬勃发展奠定了基础<sup>[8]</sup>。随着DIS, ALSP和HLA等标准的推广应用,分布仿真技术在仿真界得到广泛的研究和应用,为网络化仿真的发展奠定了良好的基础。从网络化仿真作用范围逐步扩大的角度分析,网络化仿真的发展主要有3个方向:①以实现模型互联为主要目标的分布交互式仿真;②以仿真资源共享来完成仿真实验的基于Web的仿真;③以实现通过网络随时随地无障碍地获取所需的建模仿真服务为目标的云仿真。前面2个方向并行交织发展,预计将融合并进入到后一个方向中。网络化仿真的发展进程如图1所示。

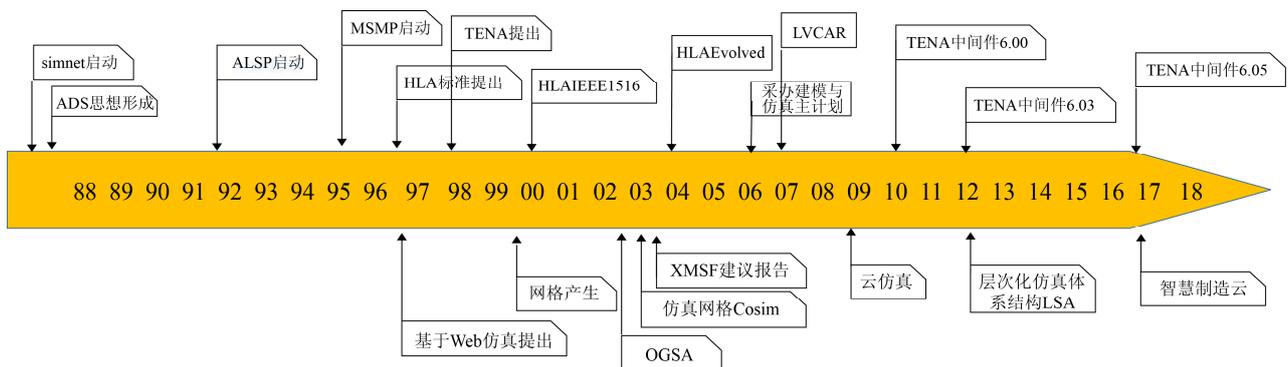


图1 网络化仿真里程碑

Fig. 1 Milestone of networked simulation

分布交互式仿真在经历了 SIMNET, DIS, ALSP, HLA 等发展阶段后,一方面与 Web/Web Service 技术结合,向 HLA Evolved 发展;另一方面向领域仿真标准化方向发展, TENA 是典型代表。分布交互式仿真主要用于解决异构、异地、异质仿真系统互联问题,为各类仿真系统提供互联标准,其作用正如以太网为各种网络提供互联标准,IP 协议为各种网络协议提供互联标准一样。分布交互式仿真技术源于并广泛应用于训练和试验领域,例如,美国国防部为了满足一体化试验训练的需求,利用 TENA 技术,对很多“烟囱式”试验与训练靶场进行了互联和资源重组,实现了资源之间的互操作<sup>[10-11]</sup>。

基于 Web 的仿真始于 20 世纪 90 年代,其目标是改变模型开发方式(组件式协同开发)、记录方式(通过多媒体动态记录)、分析方式(开放地、广域地)、执行方式(大规模分布式并行)。可扩展建模与仿真框架(XMSF)的提出标志着基于 Web 仿真技术的形成<sup>[12]</sup>。其后的发展主要是与 HLA/RTI 的开发应用结合,体现为 HLA Evolved 标准与技术,即扩展 HLA 支持基于 Web 的仿真。基于 Web 的仿真因其简便、协同等优点,逐渐成为网络化仿真的发展方向之一。

云仿真始于 21 世纪初,由李伯虎院士提出的一种通过网络、云计算平台,按用户需求组织网上仿真资源(仿真云),为用户提供各类仿真服务的一种新的仿真方法<sup>[7]</sup>。云仿真构建在网络之上,是未来网络化仿真发展的主线<sup>[13-14]</sup>,得到广泛关注。例如,北约持续推进基于云计算的“建模仿真即服务”(MSaaS)理念,期望有效解决仿真成本与仿真资源可接入性问题,并推动在北约及同盟国家范围内广泛应用建模与仿真。

以云计算平台为基础构建“仿真云”,使云仿真成为一种可按需向网络用户提供仿真服务的新模式。由于云计算模式的引入,仿真数据、模型、软件工具等软资源及计算、存储、仿真与试验设备等硬资源均可纳入仿真云的统一管理,对用户透明,

为用户共享;软硬件资源的统一管理为构造、虚拟、实况 3 类仿真的集成提供了便利条件,使得 3 类仿真的混合应用成为可能<sup>[7]</sup>;在服务模式上,云仿真能够通过网络向用户提供全方位、全生命周期仿真的服务,包括对单用户和多用户在某一阶段及跨阶段的按需支持<sup>[7]</sup>。

网络化仿真发展的需求,一方面源于国家发展中面临的复杂系统问题,另一方面源于仿真自身发展的需要。前者重在提高对复杂系统进行仿真的能力,后者重在提高仿真活动自身效率。网络化、智能化时代,各领域对复杂问题进行研究的需求大大增加,推动了仿真技术的发展与应用,促使仿真科学与技术逐步发展成一门学科<sup>[3]</sup>。

以军事领域为例,现代作战节奏日益加快、协同日渐精准、指挥日趋复杂、数据日益庞大,军事相关体系包含多元行动力量、多种行动样式、多维行动空间,其仿真具有研究层次多样、研究目的多种、体系动态变化、各要素高度协同等鲜明特性<sup>[6]</sup>。现代联合作战中,各个作战单元的依赖关系越来越广泛,要进行微观层面的作战实验,来揭示作战态势演化的动态特性以及成因,使得联合作战仿真要考虑的实体因素增加、不确定性因素变多,导致仿真计算量激增,衍生出对云计算环境的需求。例如,作战训练需适应多层次、多方向、多样式战略战役战术训练需要,体现信息化条件下作战特点,实现“战训一致”,这就需要建立和完善综合化、网络化、多功能化的仿真训练系统及一体化虚拟演练环境。同时,为了探索信息化、智能化时代的战争规律及军事系统发展需求,作战仿真需要嵌入到人机结合的综合环境当中,将人与数据、信息、技术、设备等有机结合起来,这种结合需要网络化仿真环境提供支持<sup>[15]</sup>。此外,大量仿真数据的获取、清洗,需要网络化的仿真数据采集环境提供支持。

另一方面,由于仿真规模、周期、复杂程度、牵涉部门和人员等因素,复杂系统仿真总费用激增,成为需要解决的重大问题。仿真涉及两方面的经济因素:一是通过仿真降低真实世界费用,如装

备研制、军事训练等费用；二是降低仿真系统自身费用，包括建设、使用、维护、升级等费用。此外，缩短仿真周期、降低对人员素质和数量的要求、提高结果可信性以及降低管理难度等也是需要解决的问题。

网络化仿真发展不仅仅依赖技术的进步，还需要先进的仿真管理体制的支撑。我国军用仿真领域的高层计划和协调管理机制不够完善，在一定程度上影响了仿真技术，特别是网络化仿真的发展。

### 3 未来发展趋势

未来仿真发展的趋势是“数字化、虚拟化、网络化、智能化、集成化、协同化”<sup>[1,14]</sup>，网络化是仿真发展的一个重要趋势。

未来网络化仿真的总发展趋势，是云仿真为主线，融合分布交互式仿真和基于 Web 的仿真，由封闭走向开放，由独立运行走向互操作，向互联速度更快、互联规模更大、互联类型更广的方向发展，以仿真普适化为目标。这个总趋势中，包含着与网络技术协调发展、通过软件定义仿真平台、与大数据结合等主要技术发展趋势，以及相应的管理与组织变化趋势。

#### 3.1 云仿真模式发展的趋势

云计算的发展为云仿真提供了推力。正如李伯虎院士提出的：云仿真平台是一种基于云计算理念的网络化建模与仿真平台<sup>[7]</sup>，未来网络化仿真发展的主要趋势是云仿真。融合人工智能的云仿真，通过将领域内的仿真和领域专家及各类仿真资源集成到一个协同化仿真环境中，支持跨专业、跨阶段协同工作，形成云仿真模式<sup>[16]</sup>，实现仿真资源的智能化部署和优化调度。

目前，云仿真尚处于发展阶段，进一步提升服务能力，云仿真面临以下 2 个问题：①面对海量分布式仿真资源，对资源的有效组织和整合能力不足，难以提供敏捷的服务响应能力；②面对全领域协同仿真的需求，自动化、无歧义地互操作能力不

足。为解决以上问题，基于云计算、大数据、人工智能等技术手段，云仿真模式正不断向个性化、智能化、协同化方向发展。李伯虎院士指出：未来的人工智能仿真云可“将各类资源和能力进行虚拟化、服务化，解决用户能按需获取各类资源和能力服务，进而开展数学、人在回路、硬件在回路/嵌入式仿真等各类仿真活动”<sup>[7,14]</sup>。

#### 3.2 与网络技术协调发展的趋势

网络技术是网络化仿真的使能技术，分布交互仿真、基于 Web 的仿真、网格仿真、云仿真分别基于 Internet 技术、Web 技术、网格计算和云计算，可以说，网络技术的每一次进步都给仿真带来新的发展机遇<sup>[16]</sup>。网络技术的发展，促成了地理上分散的仿真系统/模型的互联互通互操作，促进了仿真资源的共享与重用，从而极大促进了仿真技术的发展与应用。另一方面，仿真技术的发展需求，也对网络及计算机技术的发展提出了新需求。未来网络化仿真将从基于互联网向基于物联网、物联网拓展，仿真将与各种网络有机融合。物联网的出现，将催生智能的网络化仿真技术。

在仿真与网络融合过程中，仿真物联化将是重要的发展趋势，其雏形是 LVC(Live, Virtual, Constructive)仿真。而仿真物联化的进一步发展是面向物联网的仿真——通过仿真支持知识生成自动化以及使得仿真智能化。另一方面，具备学习能力的智能化模型和智能化工具将广泛存在于网络化仿真系统中，可为物联网的形成与应用提供支撑。

#### 3.3 软件定义仿真平台的趋势

未来正在进入一个软件定义的时代，其基本特征表现在万物皆可互联，一切均可编程。软件定义的仿真平台和系统将日益显现。未来的网络化仿真将具有软件定义能力，仿真组织、过程、功能等均可软件化，可通过软件定义实现灵活重构，使得复杂系统仿真自动化成为可能。

### 3.4 与大数据结合的趋势

未来复杂系统仿真一方面会因为需要模拟大数据时代的系统而被迫引入大数据思维或大数据模型, 另一方面也会需要处理仿真模型日益精细、仿真样式多样化、仿真历史数据堆积而产生的大数据, 无论如何, 大数据必将对复杂系统仿真产生深刻的影响, 而大数据及其相关分析技术也必将成为未来仿真数据分析中的一个关键技术。

未来的仿真技术将向普适化方向发展。普适化仿真源于普适计算, 是指无所不在、随时随地可以进行仿真的一种模式。普适化仿真的目标是建立一个泛在的仿真环境, 使得仿真能力广泛分布在领域的各个工作场所, 以自然的方式为用户所用。一代互联网技术解决了计算机互联问题, 使计算机可以随时在线; 二代互联网解决了人与网络互联的问题, 使人可以随时在线; 普适仿真需要解决仿真系统/模型随时在线问题, 这里的随时在线指的是仿真系统/模型不仅随时可见、可得, 而且随时在线可用。目前而言, 仿真系统/模型随时在线可用还是一大难题, 尤其是重用时, 常需要人工干预, 即仿真系统/模型“主动”适应环境的能力还有待提高。

### 3.5 与管理科学深度合作趋势

美国国防部制定了建模与仿真管理政策, 推出了建模与仿真主计划, 成立了国防部建模与仿真办公室, 这 3 项举措对军用建模与仿真技术, 特别是大规模分布交互仿真技术的发展和推广应用起到了举足轻重的作用。国内军用仿真界虽然一直呼吁建立全军层面的建模与仿真组织, 统筹军用仿真技术的发展与应用问题, 却一直未果。除此之外, 还有一个不争的事实, 国内大型分布式军用仿真系统的应用情况一直不理想, 可以说建设水平与应用水平不匹配。仿真界认识到上述问题的存在, 也一直试图解决这些问题, 成效却不令人满意。

事实上, 如何建好并用好领域协同仿真环境不仅仅是工程技术问题, 也是社会问题, 涉及组织机制、政策法规、行为学、经济学等方方面面的问题,

需要引入社会科学专门人才共同解决问题。在这方面, e-Science 的经验值得借鉴。

e-Science 一词于 2001 年由时任英国科学与技术办公室下辖的研究委员会主任 John Taylor 使用<sup>[17]</sup>, Taylor 认为“e-Science 同时关涉关键科学领域内的全球协同及使 e-Science 成为可能的下一代信息基础设施”。与 e-Science 相伴的一个概念是 CyberInfrastructure (CI), 出于 2003 年美国自然科学基金会题为“通过赛博基础设施改革科学与工程”的蓝带报告<sup>[18]</sup>。

值得注意的是, 美英的 e-Science/CI 计划均在国家科研管理机构层面提出并组织实施, 下辖各学科部门建设自己的基础设施, 共性技术问题由计算机与信息学科部负责, 共性社会问题(如政策法规、体制机制、多部门/国家协同机制等)由社会学部负责<sup>[18-20]</sup>。

为了使 e-Science/CI 计划切实达到效果, 相关部门在世界范围发起了 e-Science 运动<sup>[20]</sup>, 包括政策引导、投资保障、组织与机制建设、项目设置与评估、营造 e-Science 氛围、建设 e-Science 文化、协调知识共享与知识产权保护等, 鼓励科研机构 and 从业人员共享论文、数据及科研设施(计算模型可视为一类软设施, 对科研的重要性日益显现), 推动更好、更快地开展分布式协同研究, 提高知识生产的效率, 顺应知识经济发展的需求<sup>[18]</sup>。从概念到实施, e-Science 都带有鲜明的社会-技术特性, 需要社会、技术和法律的三重进步, 缺一不可<sup>[21]</sup>。目前, 科研论文和数据的共享已经相当普遍, 大型科研设施的共享也大大改善, 这一效果, 绝非仅靠技术进步可以达到。

未来的网络化仿真不仅仅是技术, 还是一种仿真模式。领域协同仿真环境是一个社会-技术系统, 是分布式组织与分布式仿真系统的有机融合, 决非单纯的技术系统, 需要按照社会-技术系统的模式建设和运用。e-Science/CI 计划的运作模式值得网络化仿真借鉴。

## 4 结论

网络化仿真须保持开放与共享。网络化建模仿真的发展有赖于信息科学、系统科学、网络技术甚至人文社科等多学科的发展和高层次大跨度的交叉。

网络化协同工作环境与协同机制是网络化仿真的关键,该协同环境不仅仅是网络基础设施、云计算、人工智能等与各类仿真技术与资源的结合,还需考虑人们在基于网络的环境下协同工作的人因、心理、社会交往甚至经济等问题。其中,各类仿真资源,包括仿真专家和领域专家,在网络化仿真环境中可见、可得、可用是基础,随时在线可用则是发展方向。

网络化仿真将引导塑造云仿真、普适化仿真的新业态,成为科学研究的纽带,改进当前的科学研究方式,并推动人类社会的发展。

### 参考文献:

- [1] 中国仿真学会《仿真科学与技术发展趋势预测及路线图》课题组. 仿真科学与技术发展趋势预测及路线图[R]. 北京: 中国仿真学会, 2018.  
China Simulation Society's "Advance Trend Prediction and Roadmap of Simulation Science and Technology" Working Group. Advance Trend Prediction and Roadmap of Simulation Science and Technology[R]. Beijing: China Simulation Society, 2018.
- [2] 范文慧, 吴佳惠. 计算机仿真发展现状及未来的量子计算机仿真[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(6): 1161-1167.  
Fan Wenhui, Wu Jiahui. Development and Future Trend of Computer Simulation and Quantum Computer Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1161-1167.
- [3] 中国科学技术协会, 中国仿真学会. 2018-2019 仿真科学与技术学科发展报告[R]. 北京: 中国科学技术出版社, 2019.  
China Association for Science and Technology, China Simulation Society. 2018-2019 Report on Advances in Simulation Science and Technology[R]. Beijing: China Science and Technology Press, 2019.
- [4] 黄柯棣, 邱晓刚, 查亚兵, 等. 建模与仿真技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2010.  
Huang Kedi, Qiu Xiaogang, Zha Yabing, et al. Modeling

- and Simulation Technology[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2010.
- [5] 胡晓峰. 战争工程论—走向信息时代的战争方法学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Hu Xiaofeng. War Engineering—Methodology for War in Information Era[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [6] 胡晓峰, 杨镜宇, 张昱. 武器装备体系评估理论与方法的探索与实践[J]. 宇航总体技术, 2018(1): 1-11.  
Hu Xiaofeng, Yang Jingyu, Zhang Yi. Exploration and Practice to the Theory and Method of Evaluating Weapon System of Systems[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018(1): 1-11.
- [7] 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”[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(17): 5292-5299.  
Li Bohu, Chai Xudong, Hou Baocun, et al. Networked Modeling & Simulation Platform Based on Concept of Cloud Computing—Cloud Simulation Platform[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5292-5299.
- [8] 邱晓刚, 陈彬, 孟荣清, 等. 基于 HLA 的分布仿真环境设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.  
Qiu Xiaogang, Chen Bin, Meng Rongqing, et al. Design of Distributed Simulation Environment Based on HLA[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [9] Higashino W A, Capretz M A M, Bittencourt L F. Cepsim: Modelling and Simulation of Complex Event Processing Systems in Cloud Environments[J]. Future Generation Computer Systems (S0167-739X), 2016, 65: 122-139.
- [10] 中国国防科技信息中心. 军用建模仿真领域发展报告[R]. 北京: 国防工业出版社, 2017.  
China Information Center of Defense Technology. Report on Advances in Military Modeling and Simulation Area[R]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [11] The Test and Training Enabling Architecture (TENA) Overview Briefing[EB/OL]. (2010-02-22)[2020-01-10]. <https://www.tena-sda.org>.
- [12] 谭娟, 李伯虎, 柴旭东. 可扩展建模与仿真框架——XMSF 技术研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 96-101.  
Tan Juan, Li Bohu, Chai Xudong. Technology Research of eXtensible Modeling and Simulation Framework——XMSF[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 96-101.
- [13] Li He. Review on Simulation Methods of Cyber-physical Complicated Distribution System[C]// 2016 6th International Conference on Information Engineering for Mechanics and Materials (ICIMM 2016), Hohhot, Inner Mongolia, China: Computer Science and Electronic Technology International Society, 2016: 261-266.

- [14] 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): 349-358.  
Li Bohu, Chai Xudong, Zhang Lin, et al. Preliminary Study of Modeling and Simulation Technology Oriented to Neo-Type Artificial Intelligent Systems[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 349-358.
- [15] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚, 等. 战争复杂系统仿真分析与实验[M]. 北京: 国防大学出版社, 2008.  
Hu Xiaofeng, Yang Jingyu, Si Guangya, et al. War Complex System Simulation Analysis and Experimentation[M]. Beijing: National Defense University Press, 2008.
- [16] Shekhar S, Abdel-Aziz H, Walker M, et al. A simulation as a Service Cloud Middleware[J]. Annals of Telecommunications (S0003-4347), 2016, 71(3/4): 93-108.
- [17] Taylor J. Defining e-Science[EB/OL]. (2006-05-25) [2020-01-10]. <http://www.nesc.ac.uk/nesc/define.html>.
- [18] Atkins D. Revolutionizing Science and Engineering through Cyberinfrastructure: Report of the National Science Foundation Blue-Ribbon Advisory Panel on Cyberinfrastructure[R]. Arlington, VA: Directorate for Computer and Information Science and Engineering, National Science Foundation, 2003.
- [19] Berman F, Brady H. Final Report: NSF SBE-CISE Workshop on Cyberinfrastructure and Social Sciences[R]. Alexandria, Virginia, USA, National Science Foundation, 2005.
- [20] David P A, Spence M. Designing Institutional Infrastructures for e-Science[R]// Ch. 5 in Legal and Policy Framework for e-Research: Realizing the Potential. Brian Fitzgerald, ed. Sydney, Australia: University of Sydney Press, 2008.
- [21] Schroeder R. e-Sciences as Research Technologies: Reconfiguring Disciplines, Globalizing Knowledge[R]. USA: Social Science Information, 2008.