

doi: 10.7690/bgzd.2015.07.004

国外武器装备体系仿真技术综述

王 贇, 蔡 帆

(中国航天科工集团第二研究院二〇六所装备总体技术研究室, 北京 100854)

摘要: 为提高体系仿真的真实性、互操作与可重用性, 对以美国为主导的国外武器装备体系仿真技术进行综述。在概述仿真需求的基础上, 从仿真体系构建、仿真标准规范制定、可扩展体系仿真平台搭载及仿真数据积累 4 个方面对其进行阐述, 并从仿真系统体系框架搭建、基于网络技术的仿真实现、复杂目标与环境建模仿真、高性能与可信性仿真技术和基于大数据的建模仿真技术多角度分析体系仿真技术的发展趋势。该研究可为装备体系建设全生命周期提供“更好、更快、更经济”的技术支撑。

关键词: 武器装备; 体系仿真; 网络化仿真; 大数据

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Review on Foreign Weapon System Simulation Technology

Wang Yun, Cai Fan

(Equipment General Technology Laboratory, No. 206 Institute, No. 2 Academy of China Aerospace Science & Industry Corp., Beijing 100854, China)

Abstract: In order to improve the system simulation authenticity, interoperability and reusability, the US-led foreign weapon system simulation technology was summarized. Based on an overview of the simulation requirements, the simulation system construction, simulation standard formulation, extensible system simulation platform and simulation data accumulation were set forth, and the system simulation technology development trend was analyzed by simulation framework building, simulation realization based on network technology, modeling and simulation for complex targets and environment, high performance and credibility of simulation technology and large data simulation technology. The study provides a better, faster, more economical technical support for the simulation system life cycle.

Keywords: weapon equipment; system simulation; network simulation; large data

0 引言

军事需求的增长指引着武器装备作战系统研制呈日益复杂化趋势。计算机仿真技术应用领域的不断拓宽满足了武器装备现代化的军事需求。利用计算机仿真技术开展复杂武器系统体系仿真的研究作为国防建设必不可少的环节, 越来越受到重视, 成为武器装备论证与研制的重要途径之一。因此, 笔者对国外武器装备体系仿真技术进行综述, 有助于国内仿真技术的发展。

1 武器装备体系仿真概述

美国国防部将仿真定义为“建立系统、过程、现象和环境的模型, 在一段时间内对模型进行操作, 应用于系统的测试、分析或训练, 系统可以是真实系统或由模型实现的真实和概念系统”。

系统仿真技术^[1]是在对仿真概念继承与发展的基础上, 以相似原理、模型理论、系统技术、信息技术以及仿真应用领域的相关专业技术为基础, 以计算机系统、仿真器和物理效应设备为工具, 利用

模型对已有或设想的系统进行研究、分析、评估、决策并参与系统运行的一门多学科的综合技术。经过半个多世纪的发展, 仿真技术建成如图 1 所示的体系结构^[2]。

由图 1 可以看出系统仿真技术主要分为仿真建模技术、仿真支撑系统与平台技术和仿真应用技术 3 个方向。仿真建模技术主要针对研制或设想的初始阶段对系统整体架构进行把握与构造; 仿真支撑系统与平台技术是搭建统一化规范化的仿真平台提高仿真系统开发的效率与实现程度, 实现仿真系统可重用与可组合型的模块式地开发; 仿真应用技术是武器系统开发要求与任务的实现, 是仿真与实际系统之间的无形桥梁, 有机地将两者紧密结合起来。

系统仿真具有多样化的分类形式^[3]。按照模型类型可以划分为连续仿真与离散仿真; 从实现手段可以分为物理仿真、数学仿真、半实物仿真与人在回路仿真; 按照真实程度可分为实况仿真(L)、虚拟仿真(V)与构造仿真(C)。武器装备体系仿真几乎涵盖了所有仿真形式, 它是以军事领域武器装备体

收稿日期: 2015-03-04; 修回日期: 2015-04-23

作者简介: 王 贇(1988—), 男, 辽宁人, 工程师, 从事装备总体设计、复杂系统建模与计算机仿真。

系为研究对象，为体系顶层设计、集成测试、实验验证和作战能力评估提供理论支撑。

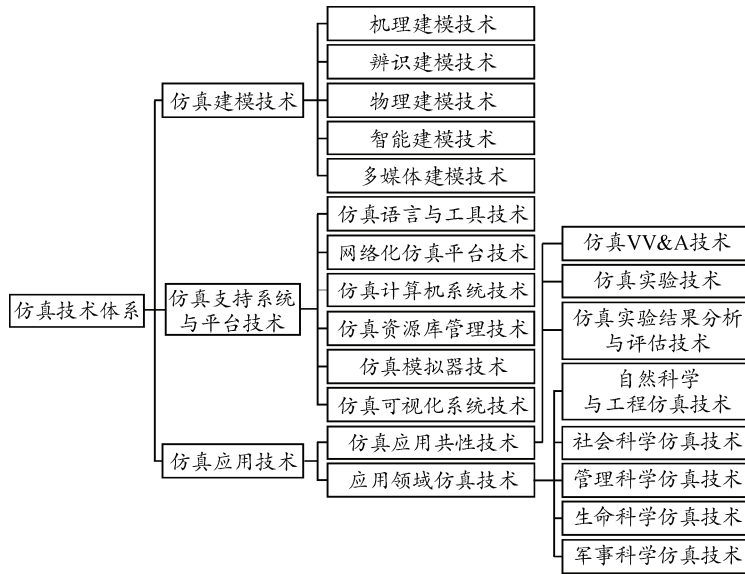


图 1 仿真体系结构

2 国外武器装备体系仿真技术发展

国外武器装备体系仿真发展较早,经过 30 多年的发展已经日趋成熟。20 世纪 90 年代以来,美国国防部在历年《国防技术领域计划》中均将仿真技术列为国防关键技术,视为“军队和经费效率的倍增器”,强调了作为基础技术的建模与仿真在构成使用、决策支持、作战规划与模拟训练中的作用,并将体系仿真提升到新的战略高度。

2.1 仿真体系的构建

武器系统的发展使得系统结构愈加复杂,任务规模越发庞大,不再单单是一个仿真实体或作战单元即满足任务需求,而是由不同分辨率的多层次装备体系构成,以高层体系结构^[4](high level architecture, HLA)为代表的多分辨率分布式交互仿真体系迅速发展。在美国国防部建模与仿真办公室组织下,科研机构依托 HLA 支撑平台,将实况、虚拟和构造等不同分辨率的仿真系统互联到同一个综合环境中,形成战役、任务、作战和工程等不同级别的仿真体系,建立了系列化、多层次的仿真架构,有力地支撑武器装备体系的设计、实验验证和评估,实例如表 1 所示。

2.2 仿真标准规范的制定

体系仿真技术的发展离不开规范的约束,没有标准化规范化的支撑平台就不能将异构的仿真环境与仿真实体有机的统一与融合,因此以美国为首的西方国家在建立了仿真体系的基础上,强化仿真标

准规范的制定,建设通用化的资源模型,支撑体系仿真迭代发展。

表 1 系列化多层次的仿真体系结构

级别	功能	技术体制	技术手段	实时性	典型案例
战役级	评估典型威胁环境装备体系的作战效能	事件驱动	—	超实时	美国导弹防御计算机模拟作战系统;扩展防空试验床系统(EADTB)
任务级	测试评估装备体系完成使命任务的能力	事件/时间驱动	人在/硬件在回路	超实时/实时	美国 GBI 分布式和集成地面测试体系(DGT/IGT)
交战级	测试评估单目标环境下单装备作战模型的作战效能	时间驱动	人在/硬件在回路	实时	Lockhead Martin 的 PAC3SIM 体系
工程级	测试验证单装备或部件的关键技术	时间驱动	硬件在回路	欠实时	美国 Eglin 空军基地红外实验体系

《建模与仿真主计划》中 2 次提及并明确军用仿真领域的发展目标与重点,强调通过统一框架、标准规范和基础资源,实现仿真的互操作性、可重用性与可组合性。

在体系架构方面,美先后提出分布式交互仿真(DIS)、聚合级仿真协议(ALSP)、高层体系结构(HLA)、训练与试验使能体系结构(TENA)和SPEEDES等架构标准^[5],有效地支撑了模拟器的互联互通、数字半实物与实装的综合集成以及试验靶场的一体化建设等。

在数据标准方面,美制定了以综合环境数据表示与接口规范^[6](synthetic environment data representation and interchange specification, SEDRIS)

与合成场景生成模型 (synthetic scene generative model, SSGM) 为代表的数据库与模型, 可完成空间目标背景可见光、红外、雷达特征与传输特性的建模和场景生成。

2.3 可扩展体系仿真平台的搭建

在武器装备体系仿真平台方面, 美军开发了大量的论证分析模型和平台软件, 其中以扩展防空仿真系统 (extended air defense simulation, EADSIM)、联合仿真系统 (joint simulation system, JSIMS) 和联合作战系统 (joint warfare system, JWARS) 最具代表性。通过长期的使用和不断修正, 平台功能已经较为完善, 得到的计算数据、结论具有较高的可信度, 成为美军分析武器装备体系问题的重要支撑手段。

EADSIM 由美国陆军空间与导弹防御司令部主导开发, 系统能够满足以 C⁴ISR (command control communications computers intelligence surveillance reconnaissance) 为中心的导弹战、空战、空间战及电子战等作战样式的需求, 集分析、训练和作战规划于一体, 应用领域涵盖作战方案分析与规划、武器装备论证与评估以及军事训练与战法研究。图 2 直观形象地展示了 EADSIM 系统可扩展模块, 由于平台具有可扩展性, 大大提高了系统开发效率, 加深模块化程度。

JSIMS 是美国军方发起的支持任务级仿真的军事系统, 是分布式的、无缝集成的仿真环境, 它可以 C⁴I 及不同地域装备相连接, 可以支持联合训练、开发和使命演练等活动。JSIMS 的使命空间是联合军事力量可以执行的过程、功能和任务的集合,

JSIMS 的使命空间功能描述由 12 个开发代理相互协作, 开发出 1 903 个形式化数据产品 (formalized data product, FDP) 及一个不同开发代理间交互 (XDI) 的列表。

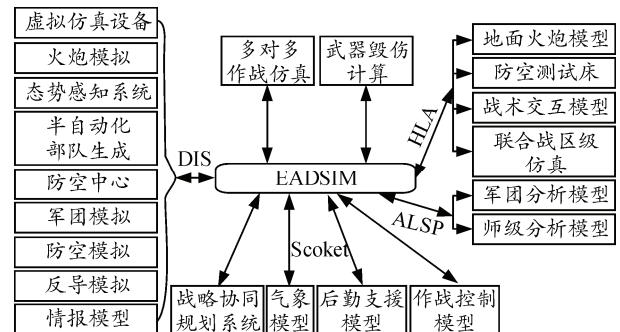


图 2 EADSIM 系统可扩展模块

JWARS 是美军方设计并开发的最先进的构造仿真系统, 它以联合条令为依据描述联合活动、过程和军事行动。JWARS 可以描述未来的战争, 可以辅助概念开发、军事力量分析和活动过程分析等。它的主要研究领域包括计划、执行和评估应用, 系统效能和折中分析, 概念与条令的开发和评估等。JWARS 的概念模型划分为移动机动、C4、ISR、开火、支持及系统防护 6 个使命域。

2.4 仿真数据的积累

美军不仅仅致力于软件平台的开发, 还建立了以多个实验室为载体的仿真实验系统, 结合靶场试验系统, 构成了比较完整的试验系统实现了具有“试、战、训”组件化子系统之间的集约合成。

武器装备体系仿真中试验数据的收集直接决定着仿真系统的可信度。美作战试验鉴定局计划 10 年完成飞行试验数据收集, 进行仿真模型校核验证, 支撑体系作战能力的各个任务剖面, 表 2 具体展示了计划的各个阶段。

表 2 弹道导弹防御系统试验数据收集计划

要素或系统 (#of CEC&EME)	Prior Years	FY10	FY11	FY12	FY13	FY14	FY15	FY16-20
Aegis BMD(20)	1.5	8	17	35	57	82	97	100
C2BMC(7)	15	31	42	55	68	83	92	100
GMD(13)	18	44	59	66	77	81	83	100
THAAD(23)	14	28	42	54	69	89	97	100
Sensors(22)	34	41	76	81	85	96	98	100
System(15)	1	16	32	50	60	73	85	100

CEC: Critical Engagement Conditions (关键交战条件); EME: Empirical Measurement Events (经验测量状态); FY: Financial Year (财年)。

3 体系仿真技术发展趋势

通过对以美国为主导的国外武器装备体系仿真技术发展的阐述, 分析国内装备体系仿真应该朝着互操作性、可信性、重用性及大数据挖掘的趋势方向发展。

3.1 武器装备体系仿真系统体系框架搭建

结合美国体系试验床 (Test Bed) 的概念与国内军事系统技术框架以及虚拟化服务化资源管理策略, 构建一体化、可扩展的仿真系统体系结构, 支持实况、虚拟和构造仿真的综合集成, 满足装备体系迭代优化发展需求。

现代化的武器装备开发需求已经不仅仅局限于装备实现这一基础视角，而是实现集设计、测试、

评估一体，集试验、作战、训练一身，数字化、半实物、实装集成的体系框架，框架如图 3 所示。

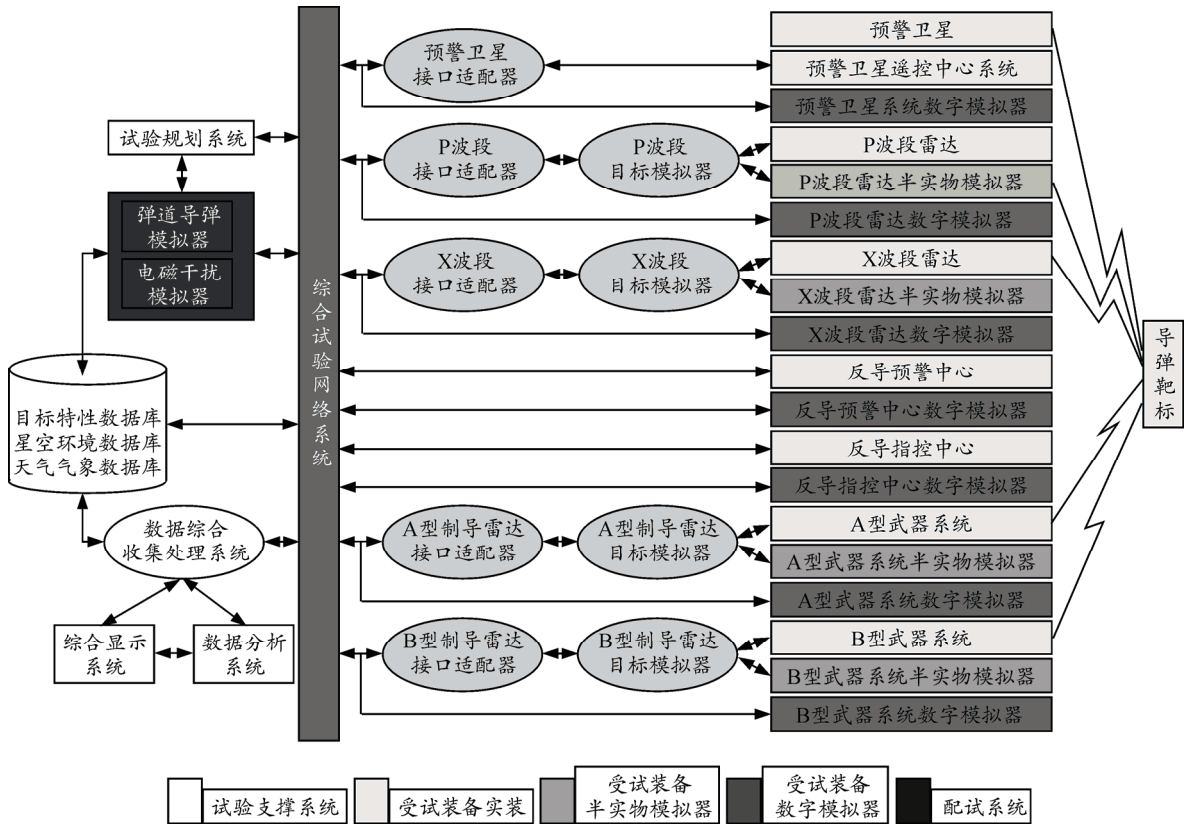


图 3 仿真体系框架搭建

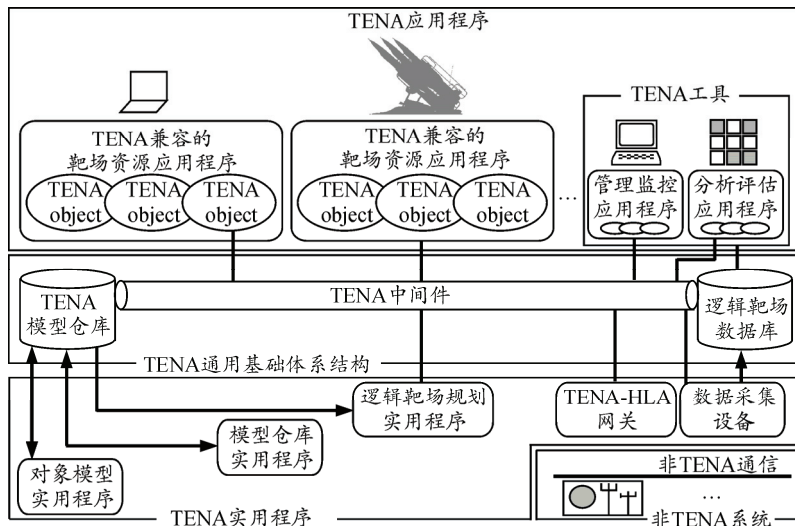


图 4 TENA 体系结构

从图 3 可以看出：随着装备规模的扩大，系统仿真规模也随之扩大，体系结构的框架对仿真系统的作用也越来越重要，它直接牵引着小型仿真系统的互操作，以及与大系统的接口对接，是组件化发展装备体系仿真的重要组成部分。

3.2 基于网络技术的仿真实现

基于网络的仿真技术指的是以现代化网络技术为支撑，实现建模、仿真运行试验和评估等活动的一类技术。网络仿真技术是历经 DIS、ALSP、TENA 和 HLA 的过程，IEEE1516 系列标准^[7]的制定将网

络化仿真技术完善成为理论与协议。

国内仿真发展趋势主要集中在 HLA 与 TENA 2 个平台应用上。

HLA 主要由规则、对象模型模版和接口规范组成。规则定义了联邦开发过程中每个联邦每个阶段所应遵守的准则，保证了仿真系统的正确交互；对象模型模版为仿真提供了标准形式，促进了模型的重用性；接口规范即 RTI 运行支撑平台定义了联邦际、与邦员际的交互方式。TENA 描述一个逻辑靶场的运作概念，其体系结构如图 4 所示，由 TENA 应用、非 TENA 应用、对象模型、公共基础设施和应用程序 5 类基本软件构成。

HLA 与 TENA 都是武器装备仿真体系结构，体系结构不是具体的实现工具，中间件就是基于 HLA 与 TENA 实现构造仿真的工具，HLA 的仿真是纯虚拟仿真，不能应用于硬实时仿真环境，TENA 是基于实时 COBRA 提出的仿真解决方案，在同一个装备开发中将 TENA 与 HLA 相集成是不相容、无法实现通信的^[8]。为了实现网络化仿真技术体系实现与仿真实验与训练资源之间的重用性与互操作性，中间件与 TENA-HLA 网关的开发成为网络化仿真体系发展的新趋势。

3.3 复杂目标与环境建模与仿真

复杂目标与环境的建模与仿真是指对目标特性进行分析，对包括陆地、海洋、大气和太空在内的整个自然环境空间领域具有权威性、完整性、多态性和一致性的数据进行模型建立与仿真，为国防领域建模仿真提供有力的目标特性数据、环境数据与模型数据的支撑。

复杂目标特性与干扰环境对武器装备体系作战效能影响很大。作战过程中，“看不见、分不清、

打不准”仍是装备体系面临的主要问题。

对于复杂目标研究未来发展趋势主要是研究目标特殊属性，如使用密集目标、主动干扰源、减少弹头特征信号和复制诱饵目标等方式，从机理出发，建立可信、可实现的复杂环境仿真模型库。在此基础上，建立复杂目标的分级分类标准，支持体系环境适应性评估需求，还要研制关键的仿真模拟设备实现目标特性数字化，支持传感器的测试与验证。

环境方面的研究趋势聚焦在综合自然环境数据、模型和仿真的互操作性、可信性与重用性，包括：环境数据模型和公共数据模型框架的搭建；综合环境数据的表示、映射与交换；环境数据库模型库的重用，最终实现环境状态的快速生成；多分辨率自然环境一致性及动态自然环境的建模与仿真。

3.4 高性能与可信性仿真技术

为了进一步实现仿真的高效性，仿真互操作性标准化组织 (SISO) 提出了一种高效的仿真建模框架——基本对象模型 (base object model, BOM)^[9]。BOM 主要包括模型识别信息、概念模型定义、模型映射和对象模型定义。BOM 是接口层的应用，可以通过简单的修改生成灵活的联邦对象模型 (federation object model, FOM)，还可以利用 BOM 促进可编译代码或可运行的二进制代码仿真运行模型的开发。

BOM 组件化模型提出针对实体和时间进行概念建模，未来趋势是真正实现了模型驱动仿真的体系结构。

仿真可信度是完成高性能仿真的基础问题与重要指标，迭代完善是行之有效的技术途径。仿真失去可信度，装备体系仿真就毫无意义。可信度评估的逻辑结构如图 5 所示。

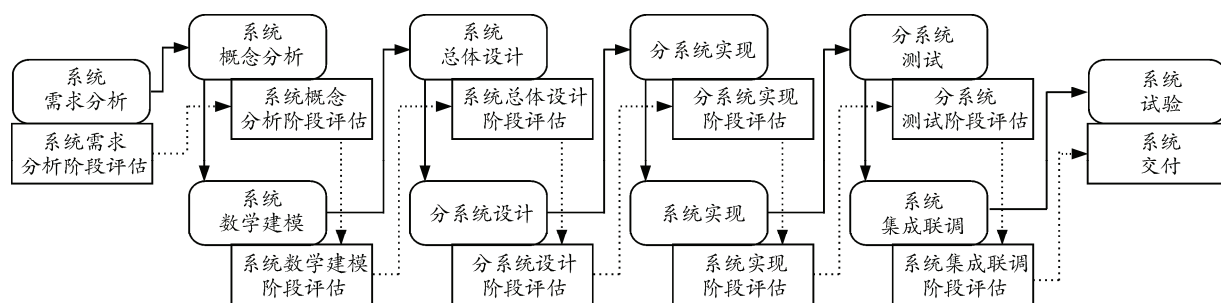


图 5 仿真可信度评估逻辑结构

仿真可信度技术未来发展趋势主要集中在从管理上加强仿真系统生命周期的校核、验证与确认以及充分利用采集的外场试验数据，加强模型验证，

推进仿真系统可信度提升这 2 个方面。

3.5 基于大数据建模仿真技术

信息化条件下的复杂装备体系仿真产生数据量

的规模十分巨大，不论是过程中模型之间的数据交互、结果数据存储，还是装备在研制、生产、试验和维修保障过程中产生的各类数据都是以 PB 量级计算的高维数据，这些数据具有大体量、多种类、高价值/低密度和快速度的典型大数据^[10]4 V 特性。

基于大数据的建模与仿真技术成为信息化背景下的主要研究趋势。利用现有的仿真数据对体系结构建模提供指导意见，为系统性能改进提供数据支持。大数据建模需要借助于计算机数据挖掘与数据仓库技术，将大体量的仿真数据进行集成存储构成元数据，数据挖掘利用元数据构建数据仓库之后，对其应用联机分析处理等技术手段挖掘出知识规则对装备性能进行优化，具体流程如图 6 所示。

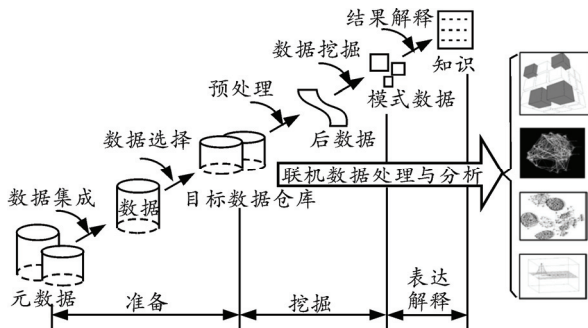


图 6 挖掘流程

大数据集约与合成是基于大数据建模仿真中数据仓库的主要功能，根据武器系统体系仿真得出对装备体系仿真改进有用的数据，将数据进行重构与求精，进而实现武器装备体系的评估优化，在装备研制的理论和实践中具有重要意义，也是仿真未来发展的重要方向。

4 结论

笔者在概述仿真需求的基础上，对以美国为主导的国外武器装备体系仿真技术进行了综述，从 5 个方面解析了装备体系仿真发展的主要趋势。

武器装备体系具有组成复杂、关系复杂和应用场景复杂等特点，仿真是可行甚至是唯一模拟武器

装备研制各个流程和各种作战工况的技术手段。以“需求牵引系统、系统带动技术、技术促进系统、系统服务于应用”的方式持续推进体系仿真技术的发展，为装备体系建设全生命周期提供“更好、更快、更经济”的技术支撑，是信息化条件下武器装备体系联合作战试验研究的必由之路。

参考文献:

- [1] 王子才. 仿真科学的发展及形成[J]. 系统仿真学报, 2007, 17(6): 1279-1281.
- [2] 黄柯棣, 刘宝宏, 黄健, 等. 作战仿真技术综述[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1887-1895.
- [3] 肖田元, 范文慧. 系统仿真导论[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2010: 435-462.
- [4] Wang Wenguang, Xu Yongping, Chen Xin, et al. High Level Architecture Evolved Modular Federation Object Model[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(3): 625-635.
- [5] 孙柏林, 靳大安. 外军建模与仿真综述[J]. 计算机仿真, 2002, 19(1): 4-8.
- [6] Zhao Kai, Hu Dabin, Xiao Jianbo. Research on Modeling of Scene Simulation Database for Voyage Training Simulation System[C]//the 3rd International Conference on Computer Design and Applications. New York: Academic Press, 2011: 515-518.
- [7] IEEE Std 1516. 4-2007. IEEE Recommended Practice for Verification, Validation, and Accreditation of a Federation-an Overlay to the High Level Architecture Federation Development and Execution Process[S]. New Jersey: The Institute of Electrical and Electronic Engineers Inc, 2007: 20-46.
- [8] 冯润明, 王国玉, 黄柯棣. TENA 及其与 HLA 的比较[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2): 288-291.
- [9] Gong Jianxing, Huang Jian, Hao Jianguo, et al. Research on Flexibly Extensible Simulation System Framework[C]//Proceedings of Asia Simulation Conference 2008/the 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing. New Jersey: IEEE Press, 2008: 316-321.
- [10] 李伯虎. 仿真科学与技术学科发展报告, 2009-2010[R]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 28-32.