

8-19-2021

## Research and Application of Simulation Support Platform for System-of-Systems Combat

Xiaodong Huang

1. *Naval Aviation University, Yantai 264001, China; ;*

Kongshu Xie

1. *Naval Aviation University, Yantai 264001, China; ;*

Li Ni

2. *Automation Science and Electrical Engineering College, BUAA, Beijing 100191, China; ;*

Xuefeng Yan

3. *Computer College, NUAU, Nanjing 210016, China; ;*

*See next page for additional authors*

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.

---

# Research and Application of Simulation Support Platform for System-of-Systems Combat

## Abstract

**Abstract:** Based on the requirement of developing high-precision, high-reliability, and high-fidelity SoS (System-of-Systems) combat simulation system efficiently, the overall structure of SoS combat simulation platform is designed with the implementation process of the SoS simulation development as the starting point. The key methods such as the parameterized & serviced SoS simulation framework, SoS combat oriented multi-view collaborative modeling, extensible high-performance distributed parallel simulation, and intelligent simulation evaluation based on large data & deep learning are emphatically put forward and implemented. A simulation platform is developed to support the weapon equipment SoS combat simulation deduction and evaluation in complex environment. Applications show, the platform can effectively support the development and application of online deduction mode and simulation experiment mode.

## Keywords

System-of-Systems(SoS) combat, simulation platform, system modeling, simulation deduction, simulation experiment and evaluation

## Authors

Xiaodong Huang, Kongshu Xie, Li Ni, Xuefeng Yan, and Yali Zhao

## Recommended Citation

Huang Xiaodong, Xie Kongshu, Li Ni, Yan Xuefeng, Zhao Yali. Research and Application of Simulation Support Platform for System-of-Systems Combat[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(8): 1914-1926.

## 面向体系对抗的仿真支撑平台研究及应用

黄晓冬<sup>1</sup>, 谢孔树<sup>1\*</sup>, 李妮<sup>2</sup>, 燕雪峰<sup>3</sup>, 赵亚丽<sup>4</sup>(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;  
3. 南京航空航天大学 计算机学院, 江苏 南京 210016; 4. 航天科工四院指挥自动化中心, 北京 102308)

**摘要:** 围绕高效地开发高精度、高可信、高逼真体系对抗仿真系统的需求, 以体系仿真开发执行过程为起点, 设计了体系对抗仿真平台的总体组成结构, 提出并实现了参数化服务化的体系仿真架构、面向体系对抗的多视图协同建模、可扩展高性能分布并行一体化仿真、基于大数据和深度学习的智能化仿真评估等关键方法, 研制了一种支撑复杂环境下武器装备体系对抗仿真推演和评估的仿真平台。应用表明, 平台可有效支持在线推演和仿真试验两类体系对抗仿真系统的开发与应用。

**关键词:** 体系对抗; 仿真平台; 系统建模; 仿真推演; 仿真试验与评估

中图分类号: TP391.9      文献标志码: A      文章编号: 1004-731X (2021) 08-1914-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0227

## Research and Application of Simulation Support Platform for System-of-Systems Combat

Huang Xiaodong<sup>1</sup>, Xie Kongshu<sup>1\*</sup>, Li Ni<sup>2</sup>, Yan Xuefeng<sup>3</sup>, Zhao Yali<sup>4</sup>(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Automation Science and Electrical Engineering College, BUAA, Beijing 100191, China;  
3. Computer College, NUAU, Nanjing 210016, China; 4. The 4th Research Institute of CASIC, Beijing 102308, China)

**Abstract:** Based on the requirement of developing high-precision, high-reliability, and high-fidelity SoS (System-of-Systems) combat simulation system efficiently, the overall structure of SoS combat simulation platform is designed with the implementation process of the SoS simulation development as the starting point. The key methods such as the parameterized & serviced SoS simulation framework, SoS combat oriented multi-view collaborative modeling, extensible high-performance distributed parallel simulation, and intelligent simulation evaluation based on large data & deep learning are emphatically put forward and implemented. A simulation platform is developed to support the weapon equipment SoS combat simulation deduction and evaluation in complex environment. Applications show, the platform can effectively support the development and application of online deduction mode and simulation experiment mode.

**Keywords:** System-of-Systems(SoS) combat; simulation platform; system modeling; simulation deduction; simulation experiment and evaluation

## 引言

现代战争作战要素的高度耦合以及战场的高度信息化, 使得交战双方更关注于影响整个作战体系的主要因素和关键节点, 人们对战争的制胜机理的研究也更倾向于从作战体系顶层出发<sup>[1-2]</sup>。作战

体系是人、装备、环境的有机结合形成的整体, 体系对抗正是两个相互敌对的作战体系之间发生的作战行动<sup>[3]</sup>。

仿真的经济性和可重复性使得它成为研究体系对抗最重要的手段之一。目前, 在武器装备体系

收稿日期: 2021-03-19      修回日期: 2021-04-11

基金项目: 装备预研项目(41401020401, 41401050102)

第一作者: 黄晓冬(1975-), 男, 博士后, 教授, 研究方向为计算机软件、系统建模与仿真、人工智能应用。E-mail: 3065351527@qq.com

通讯作者: 谢孔树(1986-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为作战仿真。E-mail: xiekongshu1986@163.com

顶层设计、重大装备战技指标验证与优化、作战方案推演和决策指挥训练等应用方向, 体系仿真试验与评估方法及技术已成为研究问题和提升能力的主要手段, 如何利用这些技术高效地开发高精度、高可信、高逼真、高性能的体系仿真系统, 是人们关注的焦点<sup>[4]</sup>。

仿真平台是支撑仿真系统高效开发和运行的规范、模型、数据、工具的集合体<sup>[4-5]</sup>。“工欲善其事必先利其器”, 为了高效开发各类体系对抗仿真应用系统, 我国仿真行业必须自主掌握体系仿真试验与评估关键技术, 以解决国外“卡脖子”问题和信息安全问题, 并在此基础上研发相关的支撑软件及平台工具, 支撑建模验模、想定开发、试验设计、运行支撑、仿真评估等过程平滑过渡, 解决模型复用和系统互操作等关键问题, 从而快速对某个主题的体系对抗过程形成精确有效的研究手段, 最终为科学的决策和高效的训练服务; 从社会和经济效益看, 也有力地推动我国仿真行业的产业化进程, 促进我国经济和社会发展。

本文围绕高效地开发高精度、高可信、高性能、高逼真的体系对抗仿真系统的需求, 从仿真系统开发执行过程、平台设计理念、总体及关键技术进行了分析和介绍, 并介绍了平台的两类应用模式及其应用案例。

## 1 现状与挑战

在体系对抗仿真领域, 国内外差距主要体现在以下几个方面: ①规范制定和理解能力。规范是引领和支撑行业发展的核心成果, 目前国内主要参考、借鉴和追踪国外的相关规范, 缺少符合自身行业发展需要的规范体系; ②智能化建模、综合自然环境建模、多分辨率建模等关键技术的掌握和应用; ③仿真系统或仿真平台关键指标和高级特性, 如复用性、协同性、便捷性、高效性、可信性等; ④仿真系统或仿真平台的可靠性和成熟度, 体现在使用案例的数量、仿真资源的丰富性、作战要素考

虑的齐备性、效果的逼真性等方面。

与一般系统仿真相比, 体系仿真需要考虑瞬息万变的整个战场的指挥、装备和环境等要素, 具有研究范围广、研究对象大、研究层次多、组成结构和交互关系易变、实体增加或删除频繁等特点<sup>[6]</sup>, 因此, 体系仿真主要面临如下挑战: ①问题的复杂性。体系仿真由于涉及作战要素多、装备交联复杂、实体规模大、模型数量多、层次粒度多、系统动态性强、演化结果多样, 是目前公认的最复杂的仿真系统之一, 系统的混沌、涌现、不确定性等效应十分的明显<sup>[2]</sup>。②结果的可信性。由于体系对抗仿真对象之间交互关系复杂、建模过程涉及专业领域多、模型的可信度难以保证、边界条件复杂、试验输入多等原因, 准确评估或提高仿真结果的可信性变得非常困难。③精度与性能矛盾性。为了提高系统的精度, 往往采用提高系统采样频率和细化模型粒度的办法, 但这样会导致系统运算量大幅上升, 从而降低了系统的性能, 因此, 如何根据系统的需求和问题的主要矛盾, 在性能与精度之间找到一个平衡点, 同时最大程度发挥好已有硬件环境(多核、分布、集群等)的计算潜能, 也是一个巨大的挑战。

## 2 平台总体设计

### 2.1 体系仿真全生命周期过程模型

现代仿真工程本质上是软件工程的一个特例, 或者说是面向仿真领域的软件工程。面向特定领域的软件工程方法, 在电信、医疗、物流、金融等各个行业已得到广泛的研究和应用<sup>[2-3,6]</sup>。本文以软件工程的基本理论和方法为提导, 结合体系仿真领域的特点, 从过程和平台工具两方面开展研究。通过对典型仿真系统的开发与应用过程进行分析, 总结仿真系统全生命周期过程模型, 即整个过程分为资源开发、主题策划、任务筹划、仿真运行、分析评估等 5 个阶段<sup>[4-5,7]</sup>, 每个阶段则可分为若干子阶段, 如图 1 所示, 而每个阶段及其子阶段对应到平台的特定功能。

资源开发功能包括模型开发、数据整编、资源管理等子功能。模型开发首先基于可视化建模语言(如 UML 等)的顶层模型框架设计,明确模型间的交互、派生等关系,然后再开发与特定领域相关的算法代码,最终得到可复用的、参数化组件化的模型组件;数据整编指对非结构化的数据来源进行分析整理和入库,形成平台可直接访问和使用的数据集;资源管理指对全生命周期的相关文档、软件和数据资源进行统一的管理、访问和部署。

“主题”是指问题域相同或相似的一系列仿真任务,这类任务通常具有相同类别的仿真实体、模型和基础参数数据<sup>[4,7-10]</sup>。引入“主题”这个概念的目的,是为了更好地体现以参数化组件化为特征平台对模型和数据资源的组合化复用,并准确界定进行开发的深度,即以模型开发为主要内容的资源开发属于深度开发和定制,而主题策划属

于简单便捷的开发。主题策划包括组件选取、实体装配、模型及系统参数配置等功能。

任务筹划是在仿真主题基础上,根据试验任务进行想定编辑(确定试验场景中的仿真对象的初态和行动计划)、试验因子规划与评估指标构建,最后根据筹划内容生成多种形式的试验方案。

仿真运行是在各类资源准备就绪情况下,在底层软硬件环境支撑下,由仿真引擎对模型进行集成和调度,以及对仿真场景进行控制和管理,同时可以根据需要把仿真场景数据输出进行可视化。

分析与评估功能通常是仿真结束后,对仿真结果进行系统地分析、评估、优化、统计等,当然,某些系统也需要实时在线评估。

根据上述过程与功能描述,每个阶段的功能由相关的工具和服务进行支持<sup>[5]</sup>。如图 2 所示。



图 1 作战仿真系统开发执行过程

Fig. 1 Development and execution process of operation simulation system

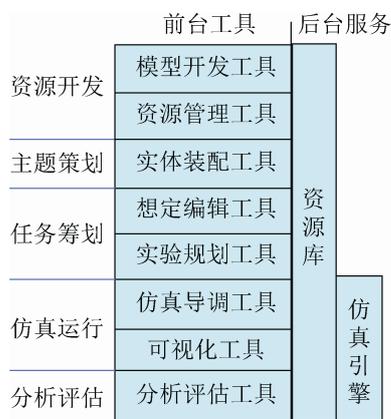


图 2 各阶段与平台工具以应关系

Fig. 2 Relationship between platform tools and development stages

本平台采用前后分离的设计原则,其中前台工具由开发或应用者操作使用,然后提交指令到后台,而后台服务(包括仿真引擎和资源库)由前台工具激活,执行核心的计算或资源管理功能,最终目标是确保工具的协同和模型、数据的互操作,从而实现各个阶段的无缝衔接和平滑过渡。其中,资源管理和模型开发工具对应资源开发阶段;实体装配和参数配置由实体装配工具完成,对应仿真主题策划阶段;想定编辑和试验规划工具对应到任务筹划阶段;仿真导调工具和可视化对应到仿真运行阶段;而分析评估工具对应到评

估与可视化阶段。所有的工具均有可能与资源库进行交互, 而导调、可视化及评估工具与仿真引擎可能存在实时的交互。

## 2.2 系统组成结构

如图 3 所示, 平台由仿真引擎、仿真工具和仿真资源库组成<sup>[5]</sup>。其中仿真引擎是平台的核心, 它既是仿真系统的“发动机”, 也是其“神经中

枢”和“骨架”<sup>[10-11]</sup>。仿真引擎通常以软件框架的形式固化或预定义了仿真系统的体系结构和集成策略, 同时为模型之间的通信、交互、调度、同步提供可复用的支撑和服务。仿真资源库管理和维护仿真模型、数据及非结构化的文档, 同时, 资源库还是其他仿真工具间相互进行非实时信息交换的通道。

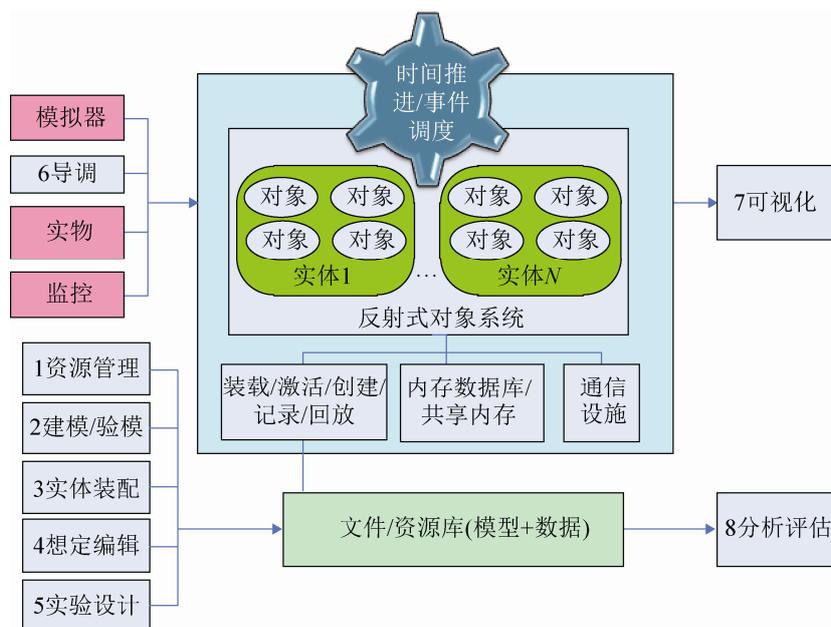


图 3 平台的组成结构

Fig. 3 Structure of the platform

在开发阶段(资源开发和主题策划), 仿真工具与资源库进行非实时的信息交换。在仿真运行阶段, 仿真引擎首先从资源库中激活并加载仿真资源, 创建仿真对象并进行系统初始化; 然后激活调度器对仿真对象进行调度、启动仿真时间推进以及处理来自外部的模拟器、导调系统、实装系统或监控系统的实时输入; 最后将仿真结果直接序列化到资源库或本地文件, 或输出到可视化系统。

## 2.3 系统体系结构

针对体系仿真规模大、实体多、试验因子多、评估指标复杂、仿真结果数据量大等特点, 本平台可以部署到云计算环境中, 也可以部署到分布式网络环境中或部署单机 PC 上。当部署到云

计算环境中时, 系统的体系结构如图 4 所示。

其中云基础设施层(IaaS)在对基础硬件设施的虚拟化基础上, 提供关于存储、计算、备份等基础服务, 本平台与云基础设施可方便地进行集成, 在运行时直接应用相关功能服务; 云平台服务层(PaaS)以本平台的仿真引擎为主体, 提供组件集成、模型调度、事件管理、对象管理、时间管理、场景管理、监控日志等仿真核心服务; 软件服务层(SaaS)是在 PaaS 层服务之上进行面向应用的定制和封装, 它包括仿真应用服务进程和仿真平台工具。其中, 仿真应用服务进程是仿真引擎集成了模型并加载了数据后构成的针对具体仿真任务的服务进程, 它可以接受来自用户或来自试验规划进程的控制输入。

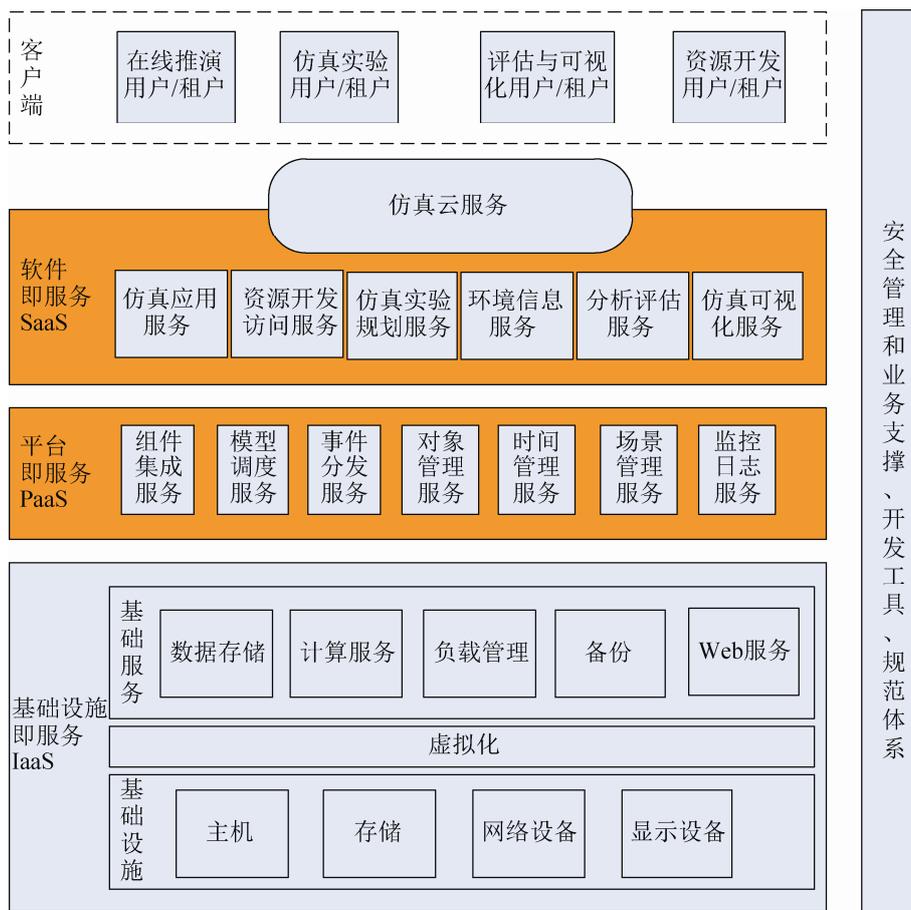


图 4 服务化的仿真平台体系结构  
Fig. 4 Service based simulation platform architecture

### 3 平台关键技术

#### 3.1 仿真引擎技术

仿真引擎是平台的核心软件，它定义了一套开放的可扩展的模型开发与集成规范，为模型的参数化和组件化提供支持，并在运行时对仿真对象、事件、时间进行管理。仿真引擎与模型框架是既分离又密切相关的，模型框架主要定义体系仿真领域内主要对象的功能、属性、交互、参数等内容，仿真引擎为模型框架的实现提供基础服务<sup>[10-12]</sup>。因此，狭义的仿真引擎，指仿真系统集成和调度的内核，而广义的仿真引擎，则包括仿真系统内核和模型框架。本文介绍的平台仿真系统内核与模型框架是分离的，因此没有特别说明的情况下，仿真引擎指的是仿真系统内核。

仿真引擎 HDOSE(High Performance Distributed Object Oriented Simulation Engine)<sup>[9-10]</sup>核心功能是在完成系统集成基础上，精准控制和管理每个仿真对象及仿真时间，确保时空一致情况下将计算、存储、通信等资源适时分配到每个对象，实现性能最优化。其中，计算资源的分配最为关键，HDOSE 采用了基于 OpenMP 提供的 Fork-Join 并行计算模式模式，即在给定的同步点主线程分叉(Fork)产生若干子线程，每个子线程分配到类型相同的仿真对象，然后在所有子线程完成计算后汇聚(Join)到主线程，以实现实体对象级的并行，同时也确保了每个线程的负载均衡<sup>[11]</sup>。

在体系结构设计上，HDOSE 分为应用层、服务层和连接层，如图 5 所示。应用层包括基于 HDOSE 的模型、工具、GUI 应用等，它由开发用

户定制而形成具体的应用系统; 服务层以反射式对象系统<sup>[10-11]</sup>为内核框架, 以对象化 API 接口提供系统管理、通信管理、组件管理、对象管理、事件管理、时间管理、场景管理、调试支持功能服务, 实现了集成组件化、编程对象化、配置参数化、调度自动化等特征。连接层封装了 RTI(Run Time Infrastructure), DDS(Data Distribution Service), TENA(Test and Training

Enableing Architecture), ACE(Adaptive Communication Environment)等中间件, 以及共享内存 SM、反射内存 RM、TCP 等更底层的通信协议<sup>[11]</sup>, 同时将本地的事件或对象状态适时与远程节点交互和同步, 为分布式系统提供发布订阅模式的通信服务并协调仿真逻辑时间, 实现了分布并行一体化的计算, 体现了协议多元化和通信透明化的特点。

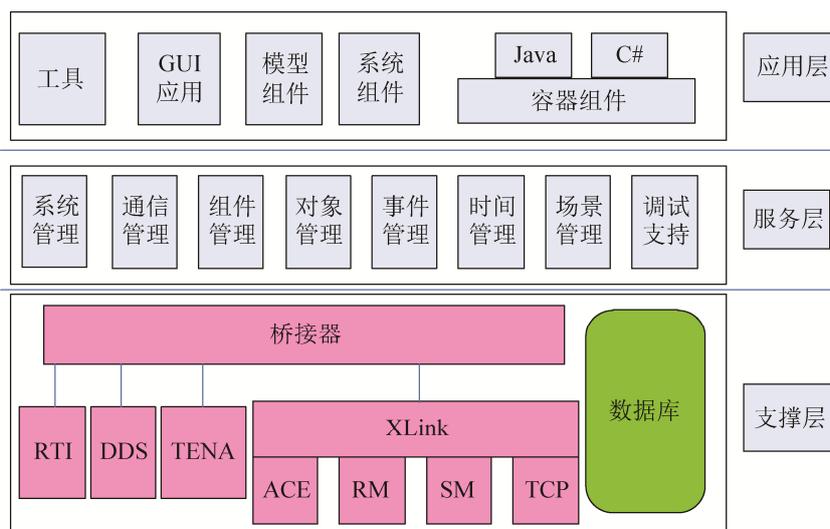


图 5 HDOSE 功能与体系结构  
Fig. 5 HDOSE function and architecture

在参数化支持方面, HDOSE 定义一套的模型和数据描述语言, 实现了模型、系统、场景的各类参数的一体化描述和解析应用。该语言在 SRML 基础上, 通过增加对组件的描述和对复杂结构、交互和行为的表达能力, 使其成为一个可扩展的演化式仿真系统描述语言<sup>[12-13]</sup>(eXtensible Evolution Simulation Language, XESL)。XESL 为对象类、实体类型、对象静态参数、对象初始属性 4 级参数提供统一的表示规范, 极大的方便了仿真系统开发和演化, 也为各类基于 HDOSE 的工具提供了集成规范。

HDOSE 严格区分了组件化建模和组合化建模的概念。组件化建模指模型以相对独立的物理模块开发、管理、部署和集成, 即组件是模型的容器, 模型是组件的内容。组合化指模型在逻辑上

可以组合装配形成具有一定行为和功能的实体。组件化与组合化均是支持复用的手段, 但组件化是为了灵活控制物理模块的粒度和内容, 而组合化是为了让模型的逻辑功能可以灵活叠加。组件化建模方面, HDOSE 定义一套平台无关的组件规范, 利用操作系统的动态库技术, 实现复杂系统组件化开发、复用和组装。组合化建模方面, HDOSE 支持以 XESL 语言灵活定义模型的组合和装配关系, 在定义“状态池+功能模型+模型参数”的仿真实体框架<sup>[14]</sup>基础上, 提供了大量关于参数解析、事件交互、对象创建和查找等功能服务。由于仿真引擎涉及技术较多, 在文献[9-14]中已陆续作了介绍, 本文不做赘述。

### 3.2 多视图协同建模技术

体系对抗仿真需要规模数量大结构关系复杂

的模型作为素材，为了清晰地描述和构建模型，平台采用多视图协同建模理论和方法。多视图协同建模的核心思想，是将复杂系统建模涉及到的多用户、多阶段、多学科、多粒度、多模式归结为系统的多视图，从而将系统模型在时间维与逻辑维进行统一。在此基础上，确立描述复杂系统的多视图分解原理和方案，以支持多用户在不同阶段、从不同角度、采用不同的建模方法对系统进行刻画和展示，最后通过各个视图间的相互关联、映射与融合，将多视图下的子模型合并成系统整体模型。

面向体系对抗的多视图协同建模涉及模型视图分解方法<sup>[15-17]</sup>、模型视图的可视化图元及表示法、模型的文本化表示方法等技术。其中模型视图分解是关键，本文将体系对抗系统模型视图分解为逻辑视图、部署视图、实现视图。逻辑视图是指从系统逻辑业务关系的角度来展示的系统特征视图，它是系统模型的核心，其他视图均为之服务。部署视图描述系统的逻辑元素如何部署到物理的载体中。实现视图描述类、类间关系及物理载体的组织结构。实现视图分解为组件视图、成员视图、类视图与代码视图。依据正交性原理<sup>[15]</sup>，逻辑视图进一步可以分为组成视图、交互视图、行为视图以及业务视图。组成视图刻画实体间的组织结构关系；交互视图刻画实体间如何根据自己的职责进行协作和信息交联；行为视图描述实体在某种场景下的活动。将系统结构、交互和行为三者分离，使各个相互独立的视图的变化不会影响别的视图，减少了视图间的耦合，有利于各视图模型的独立开发和演化。针对体系仿真的领域特点，业务视图进一步分解为搭载视图、感知视图、通信视图、指挥视图和交战视图，如图 6 所示。

模型视图的语义及表示方面<sup>[15-16,18]</sup>，平台的建模工具以 UML2.0 规范为基础进行了适当的剪裁和扩展，支持的视图种类包括：①静态结构图；②交互图，包括序列图和通信图；③状态

图；④流程图、PAD 图。以多视图协同建模方法为指导，结合体系对抗仿真领域的特点和模型复用的要求，本平台定义的模型体系框架如图 7 所示。从组成结构上将模型分为环境模型、军事装备模型、行为决策模型和裁决评估模型、通用算法模型<sup>[19]</sup>。

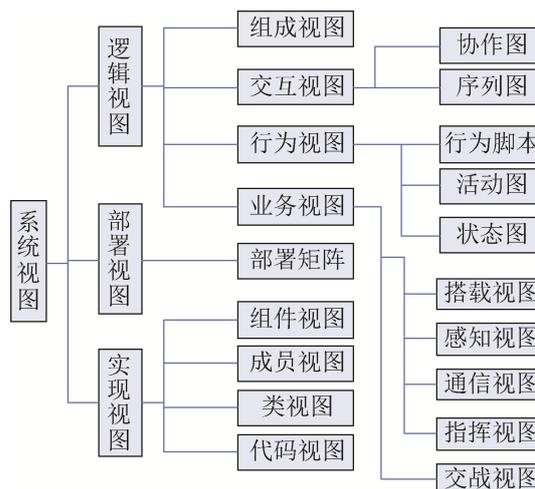


图 6 面向体系对抗的多视图分解  
Fig. 6 Multi view decomposition for SoS combat

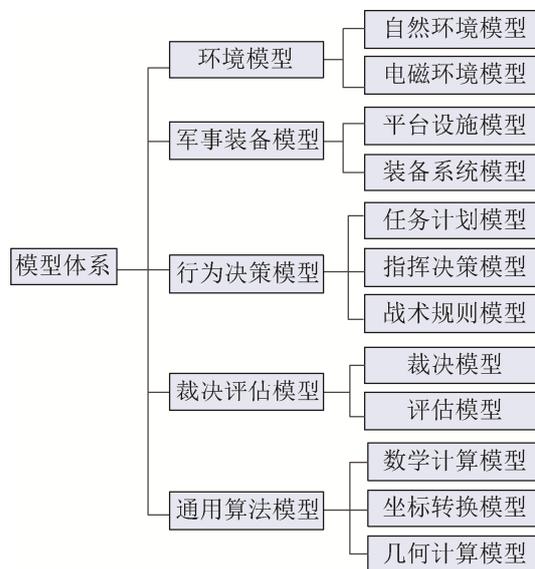


图 7 模型体系总体结构图  
Fig. 7 Overall structure diagram of model system

### 3.3 试验设计技术

试验规划系统的核心功能是试验设计，仿真试验设计是指尽可能选取试验空间中具有代表性的

试验点, 实现以较少的试验次数、时间以及费用来研究仿真系统。在实际问题中, 影响指标的因子往往有很多个, 对多因子的考察就涉及到试验方案的设计问题。最简单的试验方案设计方法就是全面设计, 即对每个因子的每个水平都设计一次试验, 这样一个  $n$  个因子  $m$  个水平的试验就会产生  $m^n$  个试验样本, 当  $n$  比较大时将会产生“维度灾难”。

常见的试验设计方法包括: 均匀设计<sup>[20]</sup>、正交设计<sup>[21]</sup>、拉丁立方体设计<sup>[22-23]</sup>等, 其中拉丁超立方设计(Latin Hypercube Design, LHD)有很好的—维投影特性, 是较为常用的方法。LHD 生成方法简单, 但生成的试验次数随因子水平数固定, 并且每次生成试验结果的空间分布性能随机, 需要对 LHD 设计结果进行优化, 优化方法主要分为两类: 一类是通过智能寻优算法, 比如基于  $\phi_p$  判断的模拟退火算法<sup>[24-25]</sup>、基于最大化交叉熵或综合均方差<sup>[26]</sup>的行元素交换法、基于中心  $L_2$  偏差的对列算法<sup>[27]</sup>等。这类方法的效果很好, 但很费时。另一类是以低维的最优 LHD 为模板, 向其他维度进行平移传播, 快速生成的近似最优 LHD<sup>[28-29]</sup>。

面向复杂体系仿真系统支持较多因子、混合水平、任意样本量的智能化试验设计, 项目团队提出并实现了一种基于数独分组的拉丁超立方试验设计方法(SDETPLHD)<sup>[30]</sup>, 进一步根据因子水平、样本量特点智能推荐适用算法, 高效生成均匀性好的高质量样本空间。

SDETPLHD 在扩展平移拉丁超立方(Extended Translational Propagation LHD, ETPLHD)的基础上, 进行数独分组降维的预处理, 降低 LHD 生成算法在中高维度的计算复杂性。数独矩阵是一种特殊的拉丁超立方, 在行和列的数字分布上具有良好的均匀性。以 5 水平×13 因子的试验空间为例。假设共进行  $k=4$  次分组, 如图 8 所示。SDETPLHD 算法步骤如下:

(1) 判断因子数  $n_v' = n_v = 13$  是否能被  $x$  整除,  $x \in \{Z^+ | 6 \leq x \leq 9\}$ 。如果能被整除, 将  $n_v' / x$  记

为单次分组数  $n$ ; 如果不能被整除, 因子数加一并赋值给  $n_v'$ , 重复上述操作。最终取  $n_v' = 15, n = 3$ 。

(2) 生成  $\frac{n_v'}{n} = 5$  因子,  $n_p = 5$  水平的 ETPLHD。

(3) 对  $n_v'$  上取到最接近的完全平方数  $4^2$ , 并生成 16 宫格的数独。

(4) 对 16 宫格数独进行分组。如图 8 所示, 去掉第一行中编号大于 15 的因子, 对剩余因子均分为  $n=3$  组; 每组因子按第(2)步的 ETPLHD 输出设计点集合, 其中序号大于 13 的因子不进行输出。取下一行, 重复上述步骤共  $k=4$  次。

(5) 将每次 3 组设计点集按因子编号升序串行排列, 作为一次试验设计结果; 将 4 次设计点集并行排列, 作为最终的试验设计结果。



图 8 数独分组过程  
Fig. 8 Sudoku grouping process

### 3.4 基于仿真大数据的智能化评估及优化

美国提出了 ARINC(Aeronautical Radio Inc.)、陆军的 AAM(Army Aviation Missile)、WSEIAC(Weapon System Effectiveness Industry Advisory Committee)等许多典型模型<sup>[31]</sup>。国内相关单位大

多综合采用如 ADC(Availability、Dependability、Capacity)法<sup>[32-33]</sup>、指数法<sup>[33]</sup>和作战环评估方法<sup>[34]</sup>等的模型驱动评估法、专家评价法和层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)等的经验驱动评估方法和作战模拟驱动的仿真模拟评估方法, 结合定性定量的指标处理方法, 开展多种效能的综合评估计算。

近年来, 利用基于深度学习的方法进行效能评估得到广泛关注, 国防科技大学、大连海事大学等同行进行了相关的研究<sup>[35]</sup>。深度学习方法不需要人工设计特征提取器, 能够自动进行最优特征的提取, 对特征具有更强的抽象、学习能力。样本数据较多时, 采用深度学习能够基于输入的理想参数直接得到效能评估结论, 加快评估的速度。

针对体系仿真的特点, 项目团队提出一种新的智能化评估方法, 即先用预先得到的试验输入

和效能评估结果作为训练数据来训练评估模型, 再用检验数据验证模型的有效性, 最后将待评估数据输入评估模型经推理后得出评估结果, 省去了复杂的仿真推演和评估计算过程。基于上述智能评估模型可快速获得不同试验因子与效能评估结果的对应关系, 将该智能化评估模型作为反向优化算法的适应度评价函数, 为智能优化过程中的试验因子组合的适应度快速评价建立基础。将试验因子的不同水平取值作为优化算法的优化变量, 初始化变量种群并进行快速自适应更新迭代, 最终获取较高作战效能对应的较优试验因子组合。智能评估流程如图 9 所示。

平台通过仿真试验—学习—优化—检验几个过程的不断迭代, 最终将得到优化的试验因子组合。在体系仿真的应用背景下, 优化试验因子组合意味着装备的优化指标或优化的作战方案。

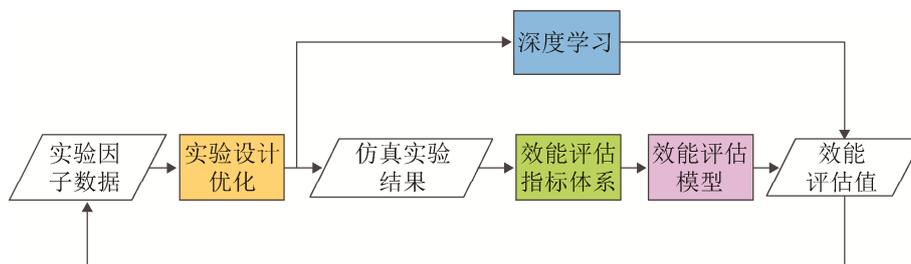


图 9 基于深度学习的智能评估流程

Fig. 9 Intelligent evaluation process based on deep learning

## 4 平台应用模式

平台主要支持两类应用模式, 即开环的在线推演模式和闭环的仿真试验模式。

### 4.1 在线推演模式

在线推演模式指用户通过前端工具或模拟器实时进行人在回路的输入, 输入数据即时对仿真过程和仿真结果产生影响, 如图 10 所示。在线推演模式通常运行在局域网环境中, 对用户的输入响应有较高的要求。在线推演模式作为一种人在回路的体系对抗仿真形式, 具有真实性、不可预测性和对抗性等特点。通过人为干预的方式, 消

除了计算机程序对人类行为决策模拟的误差, 有利于对试验细节进行详细研究推敲, 尤其适合应用于对指战员的指挥决策能力训练和战术战法关键问题的研究。本平台已经成功应用于支撑多个体系对抗仿真领域的在线推演应用系统构建, 包括攻防对抗推演、指挥系统模拟仿真、装备作战任务对抗训练、海上编队防空反导作战推演、无人机作战流程推演等应用案例<sup>[4,8,36-38]</sup>。

(1) 在某攻防对抗推演系统案例中, 基于平台的建模工具和模型框架构建了典型兵力仿真模型; 基于平台的想定编辑工具构建了典型推演仿真场景; 基于平台的集成机制, 将多个推演节

点、模拟器与仿真服务器联接起来, 构建分布式仿真推演环境; 基于平台提供的仿真数据记录工具, 记录仿真数据, 最终通过回放分析工具进行复盘分析。推演运行时, 利用导控工具加载并执行仿真想定, 由各节点推演人员在推演工具或模拟器上操作想定兵力、改变任务计划、控制仿真进程, 实现红蓝方背靠背对抗仿真推演。

(2) 在某型飞机任务训练模拟系统案例中<sup>[39]</sup>, 基于本平台构建了任务系统模拟器和多种对抗目标, 部署形成了由导调控制、任务操作模拟器、仿真对抗兵力、作战环境等节点构成的模拟对抗训练环境, 通过在线推演方式对任务人员的技战术能力

训练和检验提供有效的技术与系统支撑。

### 4.2 仿真试验模式

闭环的仿真试验模式指用户通过试验前端的任务规划工具和场景设计工具将所有仿真试验所需的参数统一提交到后台服务器, 服务器计算完毕后, 用户再通过仿真分析评估工具直接得到试验结论, 如图 11 所示。仿真试验模式运行在局域网或广域网, 由于对前端输入的响应没有实时性要求, 可以采用更灵活的 B/S 结构。无论哪一种模式, 仿真服务均运行在后端服务器上。

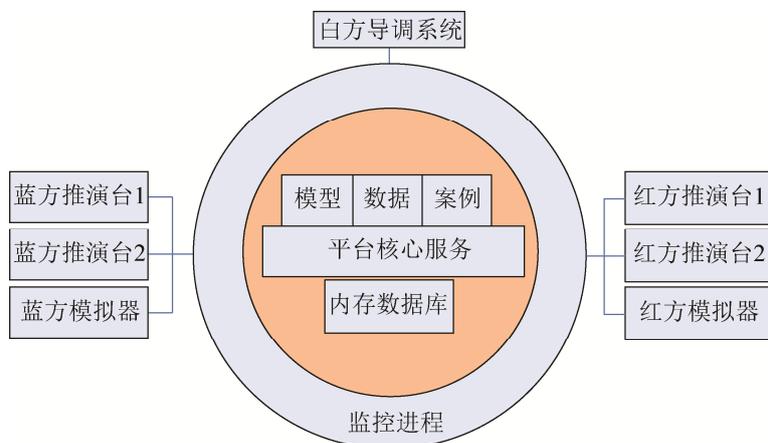


图 10 在线推演模式  
Fig. 10 Online deduction mode

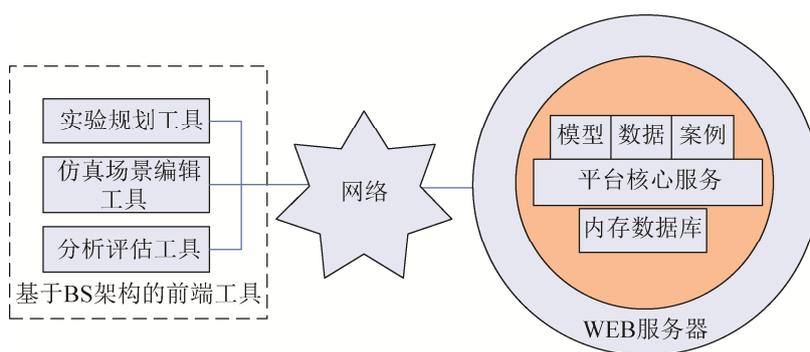


图 11 仿真试验模式  
Fig. 11 Simulation experiment mode

仿真试验模式是通过做大量试验产生大量数据的方法对特定的武器装备体系对抗仿真问题进行分析评估的一种仿真形式。由于武器装备体系对抗仿真中存在着大量的不确定因素, 可通过蒙

特卡洛试验方法产生大量的仿真数据, 再利用分析评估工具对仿真数据进行针对性的分析评估。通过本平台提供的技术手段和工具构建适用于研究对象的体系作战环境, 来评估论证武器装备的

性能指标、评估优化作战方案、分析作战效能等,已经成功应用于支撑多个体系对抗仿真领域的试验分析应用系统构建,包括突防效能分析、装备战技术指标验证与优化、装备作战试验效能评估、作战样式能力评估等案例<sup>[39-40]</sup>。

(1) 在某突防效能分析案例中,基于本平台构建了全数字化的红蓝方软硬武器攻防对抗仿真环境,目的是通过仿真获取大量结果数据,用于评价、验证、探索和优化作战方案的效能,为方案制定提供辅助决策支持。

(2) 在某型装备效能评估系统案例中<sup>[40]</sup>,基于本平台构建了包含装备模型、目标模型、环境模型、流程模型等核心要素的仿真试验环境,通过平台提供的想定设计工具、试验规划工具、仿真服务器进行大样本仿真试验,利用分析评估工具对仿真大数据进行分析,有效地支持对该型装备关键参数、作战流程和作战效能的分析与优化设计。

## 5 结论

本文介绍的体系对抗仿真平台以支撑复杂环境下武器装备体系对抗仿真推演和评估为主要目标,在突破参数化、组件化、服务化体系仿真架构、可扩展高性能分布并行一体化仿真引擎、多视图协同建模、基于大数据和深度学习的智能化仿真评估等关键技术基础上,构建了支持装备体系仿真建模、运行和试验评估全过程服务的开发和运行环境,应用表明,平台可支持开环的在线推演和闭环的仿真试验两类应用模式,为开发高精度、高可信、高性能的体系对抗仿真系统提供了强有力的支撑环境。

## 参考文献:

- [1] 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, 2019.  
Hu Xiaofeng. Engineering Theory of War - Methodology Toward the Information Age[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [2] 胡晓峰, 张斌. 体系复杂性与体系工程[J]. 电子科学研究院学报, 2011, 6(5): 446-450.  
Hu Xiaofeng, Zhang Bin. SoS Complexity and SoS Engineering[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2011, 6(5): 446-450.
- [3] 陆志洋, 洪泽华, 张励, 等. 武器装备体系对抗仿真技术研究[J]. 上海航天, 2019, 36(4): 42-50.  
Lu Zhifeng, Hong Zehua, Zhang Li, et al. Review on the Simulation Technology of Weapon System-of-Systems Encounter[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(4): 42-50.
- [4] 凌绪强. 多领域协同建模仿真支撑平台研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2012.  
Ling Xuqiang. Research on Collaborative Modeling and Simulation Platform for Multiple Application Fields[D]. Yantai: Naval Aeronautical Engineering Institute, 2012.
- [5] 凌绪强, 黄晓冬, 李伯虎. 一种协同建模与仿真平台及其关键技术研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(6): 1264-1269.  
Ling Xuqiang, Huang Xiaodong, Li Bohu. Collaborative Modeling and Simulation Platform with Its Key Techniques[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(6): 1264-1269.
- [6] Bernard P Zeigler, Hessam S Sarjoughian. 体系建模与仿真: 基础与实践[M]. 张霖晓, 吴迎年, 译. 北京: 清华大学出版社, 2018.  
Bernard P Zeigler, Hessam S Sarjoughian. System of Systems Modeling & Simulation: Foundations and Practice[M]. Zhang Linxiao, Wu Yingnian, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [7] Ling X Q, Huang X D, Li B H, et al. SimFaster: A Modeling and Simulation Platform with Multiple Views for Complex System [J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (S0332-1649), 2009, 28(6): 1546-1559.
- [8] 黄晓冬, 凌绪强, 温玮. 作战仿真系统开发平台研究及应用[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(9): 108-111.  
Huang Xiaodong, Ling Xuqiang, Win Wei. Research on Developing Platform for Operation Simulation System[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(9): 108-111.
- [9] 黄晓冬. 基于反射的适应性软件开发方法及其在分布交互仿真中的应用[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2005.  
Huang Xiaodong. Reflective Software Development Approaches for Adaptive Software with Applications in

- Distributed Interactive Simulation[D]. Naval Aeronautical Engineering Institute, 2005.
- [10] 黄晓冬, 李伯虎, 柴旭东, 等. 基于反射的分布交互仿真软件框架[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 27(4): 994-999.  
Huang Xiaodong, Li Bohu, Chai Xudong, et al. Reflection Based Distributed Interactive Simulation Framework[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 27(4): 994-999.
- [11] 黄晓冬, 何友, 徐俊艳. 一种基于 HLA 的弹性软件框架及其应用[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 95-99.  
Huang Xiaodong, He You, Xu Junyan, et al. An HLA-based Flexible Framework with Applications[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(1): 95-99.
- [12] 黄晓冬, 凌绪强, 温玮, 等. 基于 SRML 的仿真语言研究及应用[J]. 计算机仿真, 2013, 30(3): 285-289.  
Huang Xiaodong, Ling Xuqiang, Wen Wei, et al. Research on SRML-Based Simulation Language and Its Application[J]. Computer Simulation, 2013, 30(3): 285-289.
- [13] 温玮, 何友, 李牧. 基于参数数据库的 CGF 实体框架结构研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(6): 1231-1237.  
Wen Wei, He You, Li Mu. Research of CGF Entity Framework Based on Parameters Database[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(6): 1231-1237.
- [14] 温玮, 黄晓东, 杨瑞平, 等. 计算机生成兵力仿真引擎 HYCGF 的研究[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(7): 128-132.  
Wen Wei, Huang Xiaodong, Yang Ruiping, et al. Research on Simulation Engine for Computer Generated Forces HYCGF[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(7): 128-132.
- [15] 黄晓冬. 复杂系统多视图多粒度建模仿真方法研究及应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2008.  
Huang Xiaodong. Research and Application of Multi-View and Multi-Granularity Modeling & Simulation Method for Complex System[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [16] 温玮, 方伟, 何友. 支持 MDD 的代码生成、映射与逆向技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(28): 6-9.  
Wen Wei, Fang Wei, He You. Research on Techniques of Code Generating Mapping and Reversing Serving for Model-Driven Development[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(28): 6-9.
- [17] 温玮. 支持跨领域复用的协同建模环境的研究与应用[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2009.  
Wen Wei. Research on Cooperative Modeling Environment Supporting Reuse in Different Domains with Application[D]. Yantai: Naval Aeronautical Engineering Institute, 2009.
- [18] 温玮, 方伟, 黄晓冬. 面向领域的仿真设计建模工具 SIMDEMO 的研究与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(8): 981-985.  
Wen Wei, Fang Wei, Huang Xiaodong. Domain-oriented Simulation Designing and Modeling Tool[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(8): 981-985.
- [19] 温玮, 逯建军, 黄晓冬, 等. 建模工具 SIMDEMO 在体系对抗中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(6): 186-189.  
Wen Wei, Lu Jianjun, Huang Xiaodong, et al. Application of Domain-oriented Modeling Tool SIMDEMO System-of-Systems Confrontation[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(6): 186-189.
- [20] Fang K T, Lin D K J, Winker P, et al. Uniform Design: Theory and Application[J]. Technometrics (S0040-1706), 2000, 42(3): 237-248.
- [21] McKay M D, Beckman R J, Conover W J. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables from a Computer Code[J]. Technometrics (S1537-2723), 1979, 42(1): 239-245.
- [22] Iman R L, Conover W J. Small Sample Sensitivity Analysis Techniques for Computer Models, with an Application to Risk Assessment[J]. Communications in Statistics Part A: Theory and Methods (S0361-0926), 1980, 9(17): 1749-1842.
- [23] Morris M D, Mitchell T J. Exploratory Designs for Computational Experiments[J]. Journal of Statistical Planning Inference (S0378-3758), 1995, 43(1): 381-402.
- [24] Johnson M, Moore L, Ylvisaker D. Minimax and Maximin Distance Designs[J]. Journal of Statistical Planning Inference (S0378-3758), 1990, 26(2): 131-148.
- [25] Park J S. Optimal Latin-hypercube Designs for Computer Experiments[J]. Journal of Statistical Planning Inference (S0378-3758), 1994, 39(1): 95-111.
- [26] Fang K T, Ma C X, Winker P. Centered L2-Discrepancy of Random Sampling and Latin Hypercube Design and Construction of Uniform Designs[J]. Math. Comput. (S1683-3511), 2002, 71(237): 275-296.
- [27] Felipe A C V, Gerhard V, Vladimir B. An Algorithm for Fast Optimal Latin Hypercube Design of Experiments[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering (S1097-0207), 2009, 82(2): 135-156.

- [28] Z Gang Zhai, Yaofei Ma, Xiao Song, et al.. A Novel Flexible Experiment Design Method[C]// Asia Simulation Conference. Singapore: Springer Singapore, 2016: 28-39.
- [29] 张甜甜, 李妮, 龚光红, 等. 一种基于数独分组的拉丁超立方试验设计方法[J]. 系统仿真学报, 32(11): 2185-2191, 2020.  
Zhang Tiantian, Li Ni, Gong Guanghong, et al. A Fast Latin Hyper Cube Experiment Design Method Based on Sudoku Grouping[J]. Journal of System Simulation, 32(11): 2185-2191, 2020.
- [30] 董雪. 基于 ADC 模型的潜艇作战系统效能评估与工具实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.  
Dong Xue. Effectiveness Evaluation Method of Submarine Combat System Based on ADC Model and Tool Realization[D]. Nanjing: Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [31] 王锐. 先进战斗机作战效能评估[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.  
Wang rui. Combat Effectiveness Evaluation of Advanced Fighter Aircraft[D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2007.
- [32] 孟庆德, 张俊, 魏军辉, 等. 基于 ADC 法的舰炮武器系统作战效能评估模型[J]. 火炮发射与控制学报, 2015, 36(1): 73-76, 85.  
Meng Qingde, Zhang Jun, Wei Junhui, et al. Operational Effectiveness Evaluation Model of Naval Gun Weapon System Based on ADC[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2015, 36(1): 73-76, 85.
- [33] 张平, 李曙光, 肖南, 等. 基于指数法的装甲救护车作战效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(11): 171-175.  
Zhang Ping, Li Shuguang, Xiao Nan, et al. Effectiveness Evaluation for Armored Ambulance Combat Capability Based on Index Method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(11): 171-175.
- [34] 王子齐, 刘高峰. 基于 SEM 的近程反导舰炮武器系统作战能力评估[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(4): 85-91.  
Wang Ziqi, Liu Gaofeng. Combat Capability Evaluation of Short Range Antimissile Naval Gun System Based on SEM[J]. Command control & Simulation, 2017, 39(4): 85-91.
- [35] 侯磊, 曾望, 范海文, 等. 一体化智能柔性仿真评估技术研究[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(11): 174-179.  
Hou Lei, Zeng Wang, Fan Haiwen, et al. Research of Integrated Intelligent Flexible Simulation Evaluation Technology[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(11): 174-179.
- [36] 凌绪强, 黄晓冬, 杨瑞平, 等. 舰艇编队作战指挥系统设计与仿真平台[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 150-153.  
Ling Xuqiang, Huang Xiaodong, Yang Ruiping, et al. The Research and Development of Modeling and Simulation Platform for the Design of Operation Command System of Warship Fleet[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(3): 150-153.
- [37] 徐进, 黄晓冬. 面向装备体系对抗的想定规范化描述语言研究[J]. 系统仿真技术, 2011, 7(2): 156-162.  
Xu Jin, Huang Xiaodong. Research on Normative Description Language of Equipment System Antagonism Scenario[J]. System Simulation Technology, 2011, 7(2): 156-162.
- [38] 黄晓冬, 何友, 欧阳文, 等. 一种基于 HLA 的飞机训练模拟器的研制[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 897-900.  
Huang Xiaodong, He You, Ouyang Wen, et al. Research and Implementation of HLA Based Training Aircraft Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(4): 897-900.
- [39] 荆涛. 海军武器装备体系对抗的建模与仿真方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(10): 1767-1770.  
Jing Tao. Research on the Modeling and Simulation Methodology of Naval Weapon and Equipment System-of-Systems Warfare[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(10): 1767-1770.
- [40] 丑超弘, 文斌, 占凌云, 等. 基于体系作战的攻防对抗仿真系统[C]// 第 17 届中国系统仿真技术及其应用技术学术年会论文集. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2016: 133-137.  
Chou Chaohong, Wen Bin, Zhan Lingyun, et al. Offense-defense Confrontation Simulation System Based on System Combat[C]// 17th Chinese Conference on System Simulation Technology and Applications. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2016: 133-137.