

9-25-2023

Cloud-Edge Collaborative Service Architecture for LVC Training System

Peng Yong

*College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China,
yongpeng@nudt.edu.cn*

Miao Zhang

*College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China,
zhangmiao15@nudt.edu.cn*

Yue Hu

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 Special Column 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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Cloud-Edge Collaborative Service Architecture for LVC Training System

Abstract

Abstract: LVC training, an important means of military training, has received great attention from military and M&S experts. As the virtual and physical elements become more abundant and deeply integrated, LVC training systems become increasingly complex. Aiming at physical-virtual connection, information interaction, simulation computation, run-time control, etc., this paper designs a cloud-edge collaborative service architecture for LVC training systems (CESA-LVC) by reference to cyber-physical systems and cloud-edge computing architectures. CESA-LVC standardizes the structures of LVC training systems from several aspects of intelligent real-time interconnection, joint simulation computation, training auxiliary service, training cognitive decision, and dynamic configuration optimization. It provides a reference model for the design and development of a service-oriented, flexible deployment, and efficient LVC training system. The paper discusses the key technical problems of joint simulation computation, complex network communication, and complex system control. The prototype system for LVC training spanning three provincial-level regions is realized, and the main indicators of each level of CESA-LVC architecture are verified, which proves the rationality of the architecture design.

Keywords

LVC, training, cloud-edge computing, collaborative service, simulation

Recommended Citation

Peng Yong, Zhang Miao, Hu Yue. Cloud-Edge Collaborative Service Architecture for LVC Training System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(9): 1825-1836.

编者按 复杂系统因其组成元素之间以及系统和环境之间存在依赖、竞争、关联等复杂相互作用而难以被有效描述,一直是国内外建模仿真领域持续关注的研究对象。随着网络通信、人工智能、大数据、云计算、边缘计算等技术的快速发展,复杂系统建模与仿真迎来了跨越发展的重要机遇。如何拥抱新型信息技术的发展潮流,为传统建模仿真技术研究注入活力,也成为了新的挑战。军事领域存在大量复杂系统,是建模仿真理论和方法研究与应用的重要领域。复杂军事系统建模与仿真理论方法和体系架构研究的突破,必然带来复杂系统建模与联合仿真领域的技术井喷,极大提升仿真技术在模拟训练、装备试验和指挥决策等领域的仿应用和发展水平。

国防科技大学是我国国防科技自主创新高地,今年正值国防科技大学建校 70 周年,国防科技大学系统工程学院联合《系统仿真学报》共同策划出版“复杂系统建模与联合仿真方法及应用”专栏,为从事仿真科学与技术领域研究的国防科技大学师生和校友提供一个展示仿真领域最新学术成果的平台,推动仿真科学与技术学科的发展。专栏征稿推出后,受到了包括国内仿真领域专家和学者的广泛关注,共收到了 20 余篇高质量原创性成果投稿。经过学报编委会组织的严格同行评议和审查,本期精选出 6 篇高水平成果以飨读者。论文内容涵盖了 LVC 一体化训练系统架构、训练仿真想定优化生成、运载火箭天线耦合辐射仿真、智能认知行为建模、装备体系保障效能评估等复杂系统建模与仿真前沿和热点技术领域。

面向 LVC 训练系统的云边协同服务架构

彭勇, 张淼*, 胡越

(国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: LVC 训练作为军事训练的一种重要手段得到军事专家和建模仿真专家的高度关注。随着虚实要素类型越来越丰富和深度融合, LVC 训练系统变得越来越复杂。针对 LVC 训练系统物理虚拟空间互联互通、信息交互、仿真计算和运行控制等问题,参考信息物理系统、云边计算架构设计面向 LVC 训练系统的云边协同服务架构 (CESA-LVC)。CESA-LVC 从智能实时互联、联合仿真计算、训练辅助服务、训练认知决策和动态配置优化等几个方面规范 LVC 训练系统的结构,为设计开发面向服务、云边灵活部署、高效运行的 LVC 训练系统提供参考模型。探讨了 CESA-LVC 的联合仿真计算、复杂网络通信、复杂系统控制等 3 个方面的关键技术问题。实现了跨越 3 个省区的 LVC 训练原型系统,对 CESA-LVC 架构各层次主要指标进行了验证,证明了架构设计的合理性。

关键词: LVC; 训练; 云边计算; 协同服务; 仿真

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)09-1825-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0681

引用格式: 彭勇, 张淼, 胡越. 面向 LVC 训练系统的云边协同服务架构[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(9): 1825-1836.

Reference format: Peng Yong, Zhang Miao, Hu Yue. Cloud-Edge Collaborative Service Architecture for LVC Training System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(9): 1825-1836.

收稿日期: 2023-06-05 修回日期: 2023-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(62103420)

第一作者: 彭勇(1981-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为仿真体系结构、面向服务仿真。E-mail: yongpeng@nudt.edu.cn

通讯作者: 张淼(1994-), 男, 助理研究员, 博士, 研究方向为面向服务仿真、计算资源调度。E-mail: zhangmiao15@nudt.edu.cn

Cloud-Edge Collaborative Service Architecture for LVC Training System

Peng Yong, Zhang Miao*, Hu Yue

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

Abstract: LVC training, an important means of military training, has received great attention from military and M&S experts. As the virtual and physical elements become more abundant and deeply integrated, LVC training systems become increasingly complex. Aiming at physical-virtual connection, information interaction, simulation computation, run-time control, etc., *this paper designs a cloud-edge collaborative service architecture for LVC training systems (CESA-LVC) by reference to cyber-physical systems and cloud-edge computing architectures. CESA-LVC standardizes the structures of LVC training systems from several aspects of intelligent real-time interconnection, joint simulation computation, training auxiliary service, training cognitive decision, and dynamic configuration optimization.* It provides a reference model for the design and development of a service-oriented, flexible deployment, and efficient LVC training system. The paper discusses *the key technical problems of joint simulation computation, complex network communication, and complex system control.* The prototype system for LVC training spanning three provincial-level regions is realized, and the main indicators of each level of CESA-LVC architecture are verified, which proves the rationality of the architecture design.

Keywords: LVC; training; cloud-edge computing; collaborative service; simulation

0 引言

自 2006 年美军在训练转型战略计划提出由 JNTC 构建 LVC 训练环境^[1], 在各个领域全面推行 LVC 训练后, LVC 训练和 LVC 仿真技术得到军方、工业部门和学术界的高度关注。LVC 仿真技术架构始终是研究热点, 2009 年美军提出了 LVC 架构发展路线图^[2], 同时, 为提高跨军种联合训练能力, 发布了《JLVC 联邦集成指南》^[3]指导各军兵种训练系统的集成运用。随着系统规模的扩展, 集成复杂度越来越高, JLVC 多种架构共存的异构集成方法难于持续, 2012 年, 美军提出基于云使能模块化服务 (cloud-enabled modular services, CEMS) 的 JLVC2020 全新技术架构统合各类模拟训练系统^[4]。

随着虚实一体联合训练的场景越来越复杂, 参与系统和要素越来越多, 地域分布更广, 实时性要求更高, 虚实融合越来越紧密, 基于 DIS、HLA 和 TENA 等传统分布仿真技术的 LVC 集成架构已经难以满足 LVC 联合训练系统开发、集成、运用和管理的要求。同时, 云计算、服务化、人

工智能、大数据等技术发展也不断推动 LVC 联合训练系统技术架构的发展^[5-8]。

未来的 LVC 联合训练系统接入实装的类型越来越丰富, 虚拟仿真的逼真度越来越高, 物理空间和虚拟空间深度融合, 其技术架构需要突破传统分布仿真、异构集成架构的局限, 从整体考虑物理空间和虚拟空间的互联互通、信息交互、计算调度、运行控制等设计问题, 为此, 本文提出基于信息物理系统 (cyber physical system, CPS) 的 LVC 云边协同服务架构 (cloud-edge collaborative service architecture for LVC, CESA-LVC), 为联合训练系统的设计、开发和运用提供技术参考模型, 提高联合仿真系统互联互通、可扩展、可组合、可配置等能力。

1 必要性

随着实战化训练的要求越来越高, 联合训练系统的应用需求呈现出新的特征, 主要包括虚实一体、异地同步、多级联动等几个方面。虚实一体特征主要表现在充分发挥实兵实装在训练中保

持战训一致的优势以及虚拟兵力在快速构建协同兵力、强力对手、逼真战场环境等方面的灵活性, 形成虚实统一训练空间。同时, 虚实要素在训练过程中的 OODA 各个阶段能够深度融合交互、形成一体。这与以前训练系统只包含实兵实装或只运用虚拟兵力, 或包含虚实兵力但无法完全实现虚实融合感知、决策、对抗的训练有明显区别。

异地同步特征主要体现在各单位的系统在物理空间是地域分布的, 能够在各单位驻地和其他单位常态化开展时空同步的联合训练; 在虚实空间和虚实时间方面, 通过统一逻辑时空形成统一训练空间, 具体的说就是物理分布、时空同步、逻辑统一。

多级联动特征主要表现为支撑联合训练多级要素能够实现状态、指令、态势等信息高效传递, 战役层系统能够直接带动战术层系统、单兵单装开展训练。同时, 不同层级、不同实时性要求的系统还能够协调一致、高效稳定运行。

为了能够适应训练系统上述应用需求的变化, 对系统的技术也提出了新的要求, 主要包括体系化集成、网络化运行、一体化运用等几个方面。

体系化集成主要有两个层面, 一方面是从信息技术(information communication technology, ICT)基础设施、模型数据资源、平台服务到应用业务按照统一技术体制全栈式的系统集成; 另一方面是跨军兵种的训练系统按照标准化业务流程的顶层应用体系集成; 体系化集成的需求主要是提升联合训练系统快速响应训练场景变化和跨军兵种组训的能力。

网络化运行是指在传统任务驱动式系统联网运行基础上, 依托各单位的云计算中心、数据中心和网络基础设施, 采用云边协同、服务化等模式, 开展常态化、多系统协同、异地同步、多级联动的联合训练, 把训练资源连接起来, 训练业务联动起来, 实现训练资源的充分共享、训练业务的深度协同。

一体化运用是指充分发挥 LVC 三类训练手段的各自优势以适应训练各层级、各领域的需求, 同时实现各类 LVC 训练资源的灵活组合、综合集成和一体运用, 避免 LVC 训练手段相互隔离、分离, 实现 LVC 训练资源的深度融合、无缝衔接、高效交互, 形成一个有机整体提升 LVC 训练效益。

随着应用要求的提高和技术的演进, 虚实融合联合训练系统的要素和结构日趋复杂。在物理空间, 系统需要通过各类有线、无线、卫通等网络接入地上、水面、空中各式装备和传感器, 实时采集状态数据和传输指令。高动态的真实设备智能互联接入、控制和带宽受限通信规划优化是系统面临的一个巨大技术挑战。在虚拟空间, 不同运行实时性要求的构造仿真模型需要协调一致运行, 多模时间管理和数据交互、大规模仿真模型计算调度、面向频繁交互的软件定义网络通信优化等问题还需要深入研究。此外, 系统引入的大数据处理、智能机器学习等功能需要分布并行计算技术支撑, 分布并行仿真架构和分布并行计算架构的有机融合还没有一个完整解决方案。

在虚实空间要素融合交互方面, 为满足系统强实时、实时、超实时运行要求, 系统模型和服务需要根据需要在云、边、端灵活动态部署, 需要从计算、通信和控制维度设计系统总体架构。

综上所述, LVC 一体的联合训练系统包括物理设备的接入、控制, 建模仿真和信息处理优化, 物理空间要素和信息空间要素相互作用等, 具有信息物理系统的典型特征, 传统面向仿真系统集成分布仿真架构已难以满足联合训练系统需求演进和技术发展的要求, 需要借鉴 CPS 架构, 融合分布并行仿真、云边计算、复杂系统控制等技术设计 LVC 云边协同服务架构, 为联合训练系统设计、开发和运用提供基本的参考模型。

2 LVC云边协同服务架构

研究人员参考CPS模型^[9-10]在智能制造^[11-13]、数字孪生^[14-16]、健康医疗^[17-18]等领域提出了基于云计算的CPS系统架构。在LVC训练领域,暂时还没有找到从CPS角度研究云边协同服务架构的成果。为此,基于LVC训练系统的特征和CPS具有高度相似性,本文提出了基于CPS^[9-10]的LVC云边协同服务架构(CESA-LVC),如图1所示。

CESA-LVC包括智能实时互联层、联合仿真计算层、训练辅助服务层、训练认知决策层和动态配置优化层等5个部分。从CPS的角度看,智能实时互联层映射到CPS的物理层,其他4部分映射到CPS的信息层。从云边端计算的维度,智能实时互联层跨终端设备和边缘计算,联合仿真计算层跨边缘计算和中心云计算,其他部分映射到云计算。CESA-LVC假设各层内部、跨层的设备或服务之间都有一条或多条物理网络链路联通,

可以直接或间接相互通信。不同层的服务采用统一的技术体制,可以根据需要实现跨层动态服务迁移,以满足训练系统实时运行要求。

2.1 智能实时互联

LVC训练中,CESA-LVC的智能实时互联层支撑实实对抗和虚实对抗。在异构物理网络基础上,CESA-LVC的智能实时互联层提供装备和人员等物理实体智能接入、跨网异构网络通信实体之间实时数据传输等服务。LVC训练中的实兵实装、传感器等物理实体处于CESA-LVC的智能实时互联层。物理实体通过4G/5G网络、专用无线网络、卫星通信、有线通信网络等建立网络连接。CESA-LVC的智能实时互联层采用网络传输控制层级的协议建立统一授权机制和接入规范,实现物理实体按需动态接入和授权管控,通过统一技术协议屏蔽异构网络差异实现物理实体端到端的数据交互。

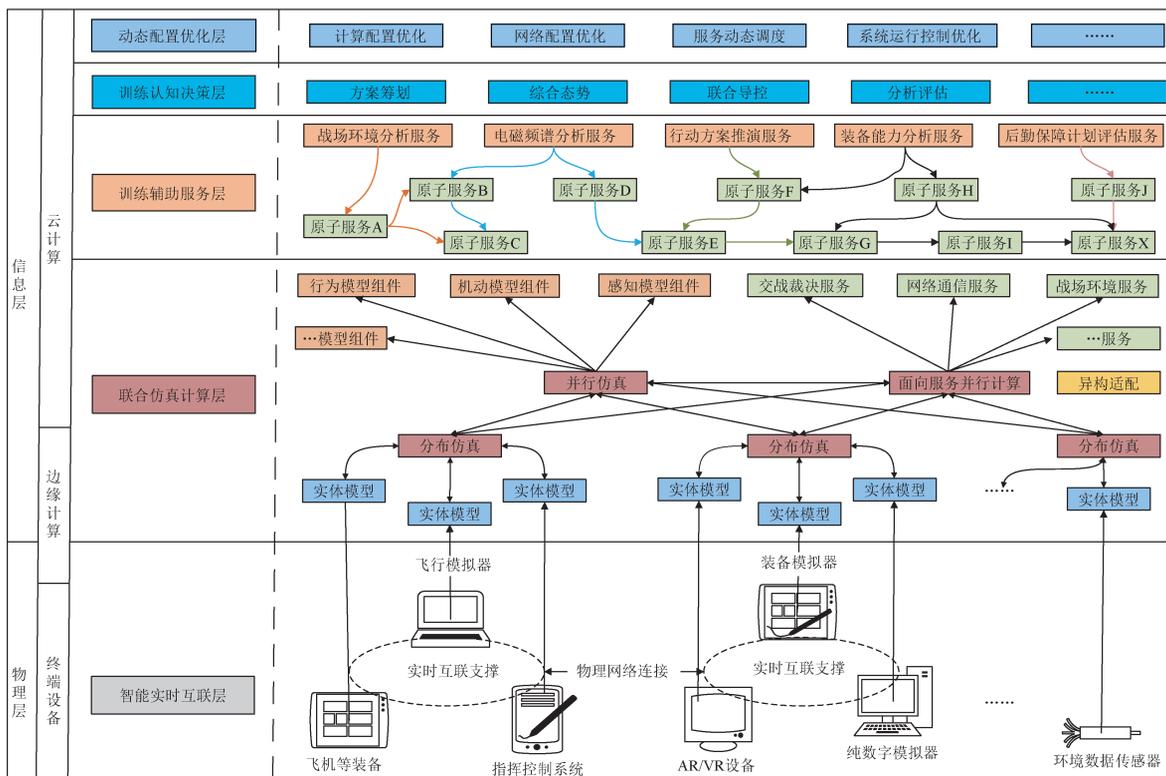


图1 LVC云边协同服务架构

Fig. 1 Cloud-edge collaborative service architecture for LVC

在训练中, 物理实体严格根据物理时钟驱动感知、决策、行动等行为, 同时物理时钟保持时空一致性, 对于数据传输的实时性要求非常高, 要求智能实时互联层的网络传输控制层级协议具有轻量、高速等特征, 采用 UPD 点播、组播或其他定制化网络协议实现数据传输。根据训练的实时性要求, 网络协议需要支持通信逻辑域划分, 不同的通信逻辑域具有不同的实时性。跨逻辑域的数据传输需要 CESA-LVC 联合仿真计算层服务支持。

CESA-LVC 的智能实时互联层采集到物理实体的状态、交互数据后, 上传到联合仿真计算层, 同时还需要接受联合仿真计算层的虚拟实体的数据, 实现实对虚的对抗。

2.2 联合仿真计算

CESA-LVC 的联合仿真计算层引接智能实时互联层的物理实体状态和交战事件数据, 在信息空间建立对应虚拟实体模型, 通过分布仿真、并行仿真、服务化并行计算等手段, 接入构造仿真模型、系统和公共计算服务, 实现虚拟兵力对实兵实装、虚拟兵力对虚拟兵力的对抗, 在信息空间形成虚实一体的统一对抗训练空间。

CESA-LVC 的联合仿真计算层的分布仿真采用联合仿真中间件的方式支撑构造仿真系统和异地实兵实装节点的互联、数据交互和时空同步。因组网复杂、网络质量等原因, 智能实时互联层远程异地节点的互联需要通过仿真中间件实现。仿真中间件提供远程跨域通信、虚实时间同步、高效数据分发、服务质量保证等功能, 打通虚实空间实体之间的数据交互和时空同步的通道。服务质量保证是确保接入训练系统的虚实单元满足运行要求的重要手段, 对虚实单元输入输出数据规模和频率、时间同步精度、状态历史记录、响应能力等提出明确要求, 并明确服务质量无法保证时的应对措施。

并行仿真通过组件化建模方法开发组件模型,

支持组件模型动态组合, 在并行离散事件引擎驱动下, 实现模型的高效解算, 满足 LVC 训练中频繁交互超实时仿真的场景需求。

针对毁伤裁决、战场空间通视计算、通信效果计算等非频繁交互请求应答式公共计算服务需求, 联合仿真计算层提供服务化并行计算模式, 通过服务注册、组合、动态调度等方式, 实现公共计算服务的灵活部署、调用, 满足服务标准化开发、灵活使用的需求。

联合仿真计算层融合分布仿真、并行仿真、并行计算形成一体化、服务化的虚实对抗驱动引擎, 为上层提供动态态势和交战事件等数据。

2.3 训练辅助服务

CESA-LVC 的训练辅助服务层主要为受训人员提供动态战场环境分析、电磁频谱兼容性分析、行动方案推演分析、装备能力分析、指挥控制、情报分析等训练过程中的专题服务, 用于辅助决策。

专题服务采集、汇聚联合仿真技术层产生的动态态势和交战事件数据, 根据需求从综合态势数据抽取特定数据形成一系列的专题数据, 例如战损数据、兵力部署位置数据、弹药消耗数据等。训练辅助服务层应用一系列原子服务对专题数据进行分析, 形成对辅助决策有用的结果。

专题服务通过对原子服务的组合、编排, 根据需要动态调用不同的原子服务完成其功能。此外, 部分功能需要通过联合仿真计算层支撑实现。例如, 在训练过程中, 基于当前的整体态势拟制了一个新的行为方案, 为对行动方案推演分析, 需要通过并行仿真、并行计算动态加载模型, 以当前态势作为输入构建临时推演子系统。通过子系统推演得到行动方案的分析结果来决定是否执行行动方案。

除了支持受训人员发起的专题服务外, 训练辅助层还支持主动监控训练的进程, 综合运用学习推理、分析评估、预测推演等手段, 发现训练

过程中可能出现的关键事件和态势演化趋势等重要知识,主动向参训人员实时推送相关信息,辅助参训人员对训练进程进行实时干预控制。例如,在联合仿真计算层存在大量 CGF 虚拟实体在上级意图的指导下自主遂行任务,由于信息不完全或智能水平不足等原因,可能出现一些不符合实际情况的行为。这时需要训练辅助层发现问题,主动将情况推送给参训人员,参训人员对 CGF 虚拟实体进行实时干预控制。

在训练辅助层,实兵实装、模拟器、构造兵力等经过抽象形成综合态势数据,对 LVC 要素进行统一指挥控制,无需区分不同要素的区别,只是指令传递方式有区别。对实兵实装的指令通过指挥控制系统传递,对虚兵的指令通过联合仿真计算层传递给模型。

2.4 训练认知决策

CESA-LVC 的训练认知决策层通过整合训练辅助服务层的专项服务能力,应用远程可视化、多维数据分析评估等技术,为参训人员、组训人员提供方案筹划、综合态势、联合导控、分析评估等训练认知决策服务。

参训人员、组训人员通过综合态势和数据统计,实时掌控训练态势的演进情况,通过联合导控对训练进程进行干预和控制,通过态势回放、复盘分析对训练进行总结讲评。

2.5 动态配置优化

LVC 训练系统包括物理空间装备和设备的接入、控制,信息空间的仿真计算、服务调度、数据分析、可视化等任务。从部署运行角度看,系统包括远程异地部署、云上集中部署、边端部署等多种方式。从运行实时性要求维度看,系统有超实时、强实时、实时和非实时等多种不同的模式。从网络通信的视角看,有无线网络通信、有线网络通信、软件定义网络通信等多种形式,系统不同组成部分对通信的要求不尽相同。因此,LVC 训练系统是典型的复杂 CPS 系统。为此,需

要根据系统不同部分运行实时性、稳定可靠运行等要求,通过对系统计算资源和任务、网络通信资源进行动态规划控制,确保系统各项性能指标满足训练要求。

计算资源配置优化主要根据训练系统智能实时互联层、联合仿真计算层、训练辅助服务层、训练认知决策层各部分仿真、计算、服务的算力需求对计算资源进行静态规划分配,在系统运行时根据需要的变化,对计算资源进行动态增量申请、回收、分配,以保证各项任务运行的实时性^[19-20]。

网络资源配置优化和计算资源配置优化类似,主要是根据物理实体和虚拟实体在训练空间位置变化、交互数据的变化导致通信负载不均衡进行网络带宽和路由路径的动态优化,确保带宽受限条件下通信效率满足系统使用要求。

服务动态调度对服务在云边端的部署进行动态调整以满足服务响应要求。例如实兵实装的交战裁决服务可以在联合仿真计算层和智能实时互联层互相迁移,以满足裁决实时性要求。

此外,动态配置优化层还需要对系统响应时间、运行速度、运行稳定性等关键性能指标进行优化控制。

3 关键技术问题

近十年建模仿真、云计算、5G 通信、大数据、人工智能等技术的迅猛发展,对推动 LVC 训练系统技术体制的升级发展发挥了重要作用,但是由于 LVC 训练系统具有要素类型多、异地分布广、运行实时要求高、虚实实体频繁交互、结构动态变化等特点,是典型的复杂信息物理系统。CESA-LVC 架构还有一系列的关键技术问题尚待解决。下面分别从联合仿真计算、复杂网络通信、复杂系统控制 3 个方面进行分析。

这 3 个方面关键技术问题,每个方面都包含若干技术难点,都是复杂的工程技术问题,内容丰富,同时 3 个方面的技术问题虽然侧重点不同,

但又有关联性, 不是完全独立的。例如, 复杂 LVC 训练系统的全局逻辑一致性控制问题, 表面上看是属于复杂系统的优化可控制问题, 但要较好的解决该问题, 还需要有联合仿真计算高效时间同步算法和计算任务优化调度、网络传输的流量控制和时延控制技术的支撑。

本文从 LVC 训练系统云边协同服务架构的角度对架构涉及的关键技术区分为联合仿真计算、复杂网络通信和复杂系统控制 3 个方面, 期望能从 CPS 的角度进一步明晰技术的分类、概念内涵和边界。

3.1 联合仿真计算

联合仿真计算是支撑 LVC 训练系统构建虚实统一训练空间, 保证训练空间实体时空一致性和系统高效运行的重要技术手段。对于复杂 LVC 训练系统, 还有物理虚拟时间统一表示、多层次实时系统协同仿真、连续和离散系统协同计算等技术需要深入探索和研究。

复杂 LVC 训练系统由实兵实装、模拟器、构造兵力在时间驱动下相互作用产生状态变化来实现对军事对抗过程模拟。时间一致性是保证系统各部内部行为和各部分交互行为一致性的基础。在 LVC 训练系统中, 存在多种时间基准和表示方法。例如, 实兵实装使用北斗天文时间, 模拟器使用本地物理时钟, 构造仿真系统使用逻辑时间等, 时间基准和表示方式不一致导致系统各部分交互信息处理变得复杂甚至出现逻辑错误。因此, 物理虚拟时间统一表示技术是值得关注的技术问题。物理信息空间统一的时间表示、计算和变换方法, 是构建逻辑一致、高效运行的 LVC 训练系统的基础。

在 CESA-LVC 的各层存在强实时、实时、超实时、非实时等不同运行实时性要求, 不同的实时性导致系统内部之间运行机制、数据交互变得复杂和难以协调。需要在物理虚拟时间统一表示技术的基础上研究多层次实时系统协同仿真技术,

为 LVC 训练系统提供统一时间管理、协同运行控制、高效数据同步等技术支撑。

LVC 训练系统的实兵实装一般是连续系统, 虚拟空间的实体一般是离散的。基于时间或空间离散状态采样是实现连续系统和离散系统数据交换的基本方法, 但对于复杂 LVC 训练系统, 该方法具有明显的局限性。例如, 高动态弹目交汇计算会要求离散时间采样的频率非常高, 大大增加了计算量, 同时因为计算和数据传输带来的时延, 导致即使提高采样精度也未必能够提高弹目交汇计算的精度。因此, 需要研究连续和离散系统协同计算技术, 通过连续系统自适应离散化和离散系统状态外推、差值等方法, 实现连续系统和离散系统协调运行。

由于现代通用计算机硬件和操作系统的“尽力而为”设计思想和“抢占式”调度方法, 导致其执行任务的行为和时间行为具有不可预测性。而 LVC 训练系统对时间控制精度和仿真计算服务的质量又非常高。因此, 如何保证仿真计算服务的响应及时准确、并发访问、行为可预测、异常情况通知等质量就显得尤为重要, 这是仿真计算服务质量保证技术要解决的问题。

LVC 训练系统既有复杂模型仿真, 又有大数据分析评估、智能学习推理等复杂计算服务, 仿真和计算任务具有很强的耦合性和动态性。仿真和计算任务的部署和动态调度对系统的整体运行性能和稳定性有重要影响。仿真和计算服务融合优化调度技术需要从系统整体性能指标优化角度考虑仿真和计算任务静态部署和动态实时调度, 同时还要考虑系统局部运行响应性能约束。

3.2 复杂网络通信

复杂 LVC 训练系统是物理分布、异构、开放、变结构、频繁交互的大规模系统, 对网络通信的效率、实时性要求非常高^[21-22]。

在 LVC 训练系统中, 网络互联互通是实现虚实对抗训练的物理基础。有线网络、无线网络、

卫星通信、不同密级网络、不同承载内容网络等异构网络特性是当前及未来限制灵活便捷开展虚实一体训练的主要障碍。需要攻克异构网络实时互联技术，从网络协议层解决跨网互联、协议转换、安全控制等问题，实现不同类型网络的集成和协作，满足 LVC 训练按需动态接入、实时互联、安全可靠的需求。

LVC 训练系统内部之间频繁数据交互，不同的虚实节点数据生产能力和消费能力不一致，系统协同运行过程中缺乏有效的数据传输控制，导致系统运行效率不高。高效数据传输控制技术是解决上述问题的主要手段。从数据生产、传输、处理服务质量保证的角度，对系统各类节点的生产、消费数据的容量、速率等能力建模，对数据传输路由、占用带宽、速率等进行优化控制，实现不同优先级数据在系统内部高效流转和网络资源合理分配，以满足训练系统高效数据分发的需要。

网络数据传输时延是影响 LVC 训练系统时间精度的重要因素，同时网络数据传输时延抖动会明显影响系统运行流畅性，特别是如果系统不能对网络传输性能做出预判，还是按照正常的速率推送数据，会加剧网络性能恶化，严重影响系统的运行性能。CESA-LVC 的联合仿真中间件、消息服务、数据分发服务等需要具备网络传输性能预测能力，对网络带宽占用率、时延变化、抖动变化等进行建模，构建网络动力学行为模型动态分析预判网络运行情况，通过高效数据传输控制技术实现对网络的合理高效使用。

3.3 复杂系统控制

并行分布仿真为保证时间一致性而提出乐观、保守时间同步算法，从本质上看属于复杂系统的分布控制方法。在 LVC 训练系统中，还存在大量类似的协同控制优化问题。例如，在系统设计阶段，系统运行性能的建模、设计和评估问题；在系统运行阶段，系统响应时间、运行速度、运行

稳定性等关键性能指标优化控制等问题。由于 LVC 训练系统融合了连续-离散、实时-非实时、物理-虚拟、集中-分布等要素，再叠加网络时延、消息、抖动等因素，导致对其的控制优化面临巨大的挑战。

(1) 复杂 LVC 训练系统性能建模、设计和评估问题。需要对连续系统、离散系统的运行行为建立动力学模型，对物理时钟的偏移、频率漂移等规律建模，对网络的时延、抖动等行为建模，再根据各部局部运行性能要求和总体性能要求进行指标分配和综合设计，最后进行分析评估，确保系统性能指标可预测、可实现、可控制。

(2) 带时延的分布任务动态调度优化控制问题。需要在系统性能建模的基础上，运用分布式状态感知、适变传输、协同控制等关键技术和多目标优化方法对联合仿真、计算任务进行动态调度和控制，提高系统优化性能^[23-25]。

(3) LVC 训练系统主要通过全局时间一致性控制来实现逻辑一致性。无论是逻辑时间同步算法还是物理时间同步，都需要进行全局信息同步，导致系统的扩展性存在问题。虽然提出了一些改进的方法，但无法从根本上解决全局同步带来的问题。实际上，全局时间一致是逻辑一致的充分非必要条件。需要进行理论方法和技术创新，实现系统逻辑一致性的高效控制。

3.4 解决思路

总体上看，要系统地解决这 3 个方面的技术问题，一方面需要从系统整体的角度加强系统抽象层次设计、系统建模和体系结构设计。需要对智能实时互联、联合仿真计算等各层时间、时延等物理属性进行描述和分类，功能性能约束和分配进行规约描述、设计，为系统功能性能分析、优化和验证提供总体指导。

另一方面，在体系结构总体设计的指导下，需要运用并行分布仿真、云计算、网络通信、复杂系统控制等方面方法和技术解决 LVC 训练系统

的单个技术问题。例如文献[26]提出的支持LVC互操作的分布联合仿真技术,为解决CESA-LVC联合仿真计算层的异构仿真资源集成、互操作、可重用和可组合问题提供很好借鉴。文献[20]在基于云的分布仿真环境的计算和任务静态调度方面的研究成果,可以为CESA-LVC动态配置优化层的带时延的分布任务动态调度优化控制问题的解决提供思路。文献[23]提出的集合约束下多智能体系统分布式固定时间优化控制可以为CESA-LVC的全局逻辑一致性控制提供参考。

4 原型系统及验证

4.1 系统构成

本文构建了一个LVC训练原型系统对CESA-LVC进行初步的验证。

原型系统的结构如图2所示。该系统实现指挥信息系统、实兵交战系统、实装直升机等实兵实装,智能靶标、飞行模拟器、坦克模拟器等模

拟器,聚合级数字仿真兵力等LVC要素互联互通和联合训练。通过该系统,能够实现在同一逻辑时空下虚实对抗。

原型系统包括的硬件终端1000余台套,虚实兵力实体约1万个。系统异地部署在A, B, C共3个城市。A市的部署又分为内外场。其中内场部署系统的中心云节点,为系统的虚拟化计算、存储和网络等IT资源。系统的联合导控、综合评估、指挥控制等业务应用部署在云中心。外场主要部署坦克、装甲车、单兵等实兵实装要素,同时单兵佩戴多模态人机交互系统实现实兵和虚兵的视觉、语音和手势等多种形式的交互。多模态人机交互系统和中心云通过5G网络提供大带宽、低时延的视频、语音通信。B市部署飞行模拟器,为系统提供航空兵对抗和航空兵对地攻击的模拟。C市部署5G核心网,为系统提供5G通信管理服务。三地通过以太网进行互联。3个城市节点内部的设备通过内部局域网互联。

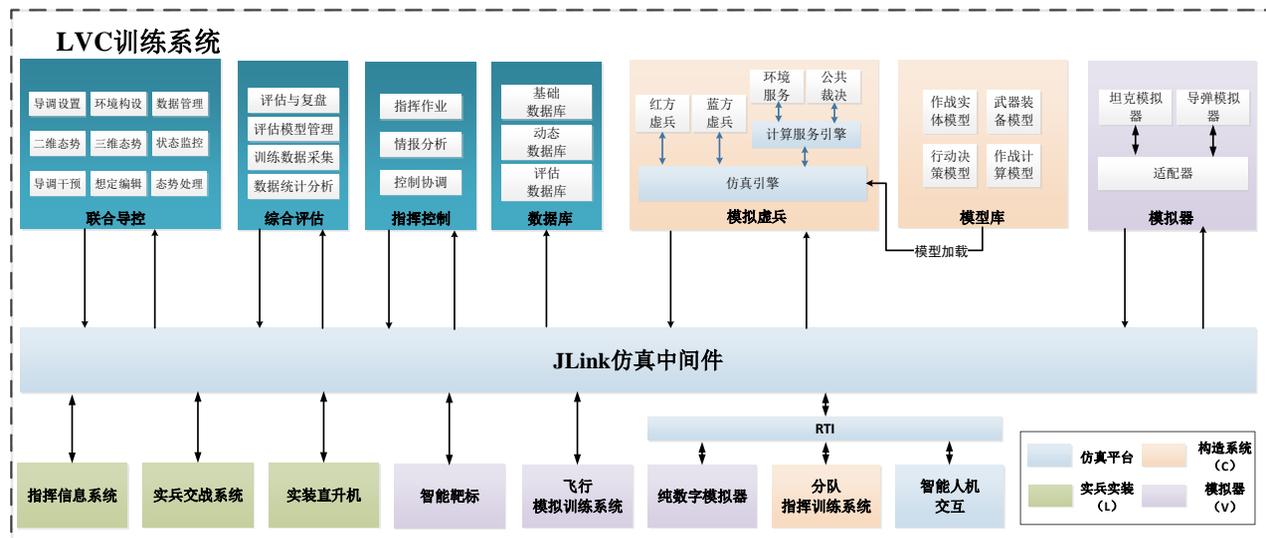


图2 LVC训练原型系统结构

Fig. 2 Prototype structure of LVC training system

4.2 架构实现

从CESA-LVC角度看,系统的智能实时互联层由实兵实装、模拟器等装备或设备,以太网、

5G、WIFI、实兵交战系统、人机交互系统等构成。通过装备、设备的状态数据采集和传输实现实兵对实兵、实兵和虚兵之间对抗,各装备和设备之间通过网络授时或卫星授时实现时间同步。

运营保障系统负责中心云和外场边缘节点的通用计算、网络设备异构纳管和虚拟化，为系统运行提供统一的虚拟资源池。

通过联合仿真中间件、仿真引擎和计算服务引擎初步实现分布仿真、并行仿真和服务并行计算的融合，能够支撑分布仿真系统互联、组件化模型并行仿真和公共服务的并行计算。联合仿真中间件负责异地分布节点之间数据交互和时间同步，仿真引擎负责组件模型的数据交互和时间同步。系统验证了CESA-LVC联合仿真计算层的技术可行性。

原型系统通过运营保障系统提供服务注册、服务发现、服务编排等通用功能，为训练辅助服务层的服务开发、动态组合、动态迁移提供技术支持。

认知决策层的联合导控、综合评估和指挥控制等应用直接接收联合仿真计算层的态势数据，和训练辅助服务层的计算结果数据，显示系统红蓝双方的对抗态势，便于参训人员对抗过程的认知理解。辅助参训人员进行决策，并对参与训练的虚实兵力进行导调，控制对抗训练的进程。

在动态配置优化方面，原型系统通过运营保障系统和规划管控系统能够实现对系统运行所需IT基础设施的统一异构纳管、席位动态开设、应用规划部署。

4.3 实验结果

系统规模、配置和部署情况如表1所示。系统经过开发和联调联试后，进行多场次的演练。每次演练会根据实际需要，配置和部署不同的LVC兵力。因此，每次实际参与的兵力规模数量会有细微的差别，表1的LVC兵力规模数量代表平均值。

系统开展一次演练活动平均需要30~60 min，具体时间由演练对抗活动的复杂程度决定。依据系统的主要性能指标，通过记录演练过程的数据，取多次数据的平均值得到系统实验结果数据如表2

所示。

表1 系统规模和配置

Table 1 System size and configuration

主要参数	量值	部署位置
实兵实装(L)数量	>600	A市外场
模拟器(V)数量	>20	A市外场、B市
构造兵力(C)数量	>8 000	A市外场
异地互联网络带宽/Mb	100	A市内场、B市
内部局域网带宽/Mb	1 000	A市内场、B市
5G基站数量(台)	2	A市外场
云服务器数量(台)	30	A市外场
人机交互终端设备(台)	120	A市内场、B市

表2 实验结果

Table 2 Experimental results

功能层	主要参数	量值
智能实时互联	平均接入终端实体数量	600
	终端接入平均时间开销/ms	105
	点对点数据传输平均时延/ms	76
	现地AR显示帧率/(帧/s)	35
联合仿真计算	分布仿真节点数	133
	仿真时间同步精度/s	1
	点对点数据传输平均时延/ms	236
	点对点数据传输最大平均时延/ms	630
	点对点数据传输最小平均时延/ms	102
	并行仿真模型实体数量	708
	并行仿真加速比	3.6:1
训练辅助服务	1 000次毁伤裁决服务调用平均时间开销/s	3.05
	服务调用响应平均开销/ms	208.3
	100次服务调用平均时间开销/s	708.9
训练认知决策	综合态势显示实体数量	8 368
	综合态势显示刷新频率/(帧/s)	32
	评估指标数量	26
动态配置优化	虚拟机数量(台)	130
	系统开设平均时间开销/s	6 356
	虚拟网络平均时延/ms	23

智能实时互联层的指标主要是在一定终端规模条件下，终端接入的平均时延和点对点数据传输的平均时延。从实验结果可以看出，终端的接入和数据传输不会让参训人员感到明显的延迟、停顿，可以满足实时训练的要求。

联合仿真计算层主要考察分布仿真、并行仿

真和服务计算的效率。异地分布物理网络时延已经达到80 ms左右。在此基础上, 联合仿真计算层实现133节点、8 000多个实体状态数据共享, 虚拟时间同步精度到达1 s, 平均时延控制在236 ms, 确保整个演练流畅推进, 表明了其具有较高的性能。

训练辅助服务的服务调用响应平均开销以及服务调用平均时间开销两个指标较高, 是因为这些服务承载的业务运算逻辑比较复杂, 同时服务部署在云平台上, 服务启动时间开销比较大。

训练认知决策层考核的主要是系统显示规模、刷新频率等指标。从结果数据可以看出, 能够满足大规模复杂态势显示、辅助分析评估的要求。

动态配置优化主要关注系统席位开设的效率和网络优化的效率等指标。从结果数据看, 能够满足快速开设系统席位要求, 大大减少了系统运营保障的难度。网络数据传输的损耗能够满足当前系统的需求。

5 结论

针对LVC联合训练系统的虚实一体、异地同步、多级联动等应用需求和体系化集成、网络化运行、一体化运用等技术要求, 提出了面向LVC训练系统的云边协同服务架构(CESA-LVC), 从智能实时互联、联合仿真计算、训练辅助服务、训练认知决策和动态配置优化等几个方面规范LVC训练系统的结构。同时, 从联合仿真计算、复杂网络通信、复杂系统控制3个方面探讨了CESA-LVC需要解决的关键技术问题, 并通过原型系统对设计的架构进行初步验证。CESA-LVC为设计、开发面向服务、云边灵活部署、高效运行的LVC训练系统提供参考模型。

参考文献:

- [1] Department of Defense United States of America. Strategic Plan for Transforming DoD Training[EB/OL]. (2006-05-08) [2023-03-16]. <https://indianstrategicknowledgeonline.com/web/FinalTrainingTransformationStrategic2006.pdf>.
- [2] Henninger A E, Cutts D, Loper M, et al. Live, Virtual, Constructive Architecture Roadmap (LVCAR) Final Report[R]. Washington DC: Institute for Defense Analysis, 2008.
- [3] United States Joint Forces Command. Joint Live Virtual and Constructive (JLVC) Federation Integration Guide [EB/OL]. (2009-01-24) [2023-08-11]. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA521311>.
- [4] Edgren M G. Cloud-enabled Modular Services: A Framework for Cost-effective Collaboration[C]// Proceedings of the NATO Modelling and Simulation Group Symposium on Transforming Defense through Modelling and Simulation-Opportunities and Challenges. Arlington, USA: NATO STO, 2012. 1-10.
- [5] 罗永亮, 张珺, 熊玉平, 等. 支持LVC仿真的航空指挥和保障异构系统集成技术[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(10): 2538-2541.
Luo Yongliang, Zhang Jun, Xiong Yuping, et al. Air Command and Support Heterogeneous Systems Integration Technology Supporting LVC Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2538-2541.
- [6] 刘影梅, 卿杜政. 基于"云+边缘"的建模仿真架构[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(2): 86-89.
Liu Yingmei, Qing Duzheng. Research on Modeling and Simulation Architecture Based on Microservices[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(2): 86-89.
- [7] 冯琦琦, 董志明, 彭文成, 等. 几种典型的虚实融合技术发展研究[J/OL]. 系统仿真学报. (2023-02-17) [2023-03-16]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0793>.
Feng Qiqi, Dong Zhiming, Peng Wencheng, et al. Research on the Development of Several Typical Virtual Reality Fusion Technologies[J/OL]. Journal of System Simulation. (2023-02-17) [2023-03-16]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0793>.
- [8] 杨芸, 胡建军, 李京伟. LVC训练体系建设发展现状及关键技术[J]. 兵工自动化, 2023, 42(1): 4-15.
Yang Yun, Hu Jianjun, Li Jingwei. Development Status and Key Techniques of LVC Training System[J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(1): 4-15.
- [9] National Institute of Standards and Technology. Workshop Report on Foundations for Innovation in Cyber-physical Systems[EB/OL]. (2013-01-01) [2023-08-11]. <https://www.nist.gov/system/files/documents/el/CPS-WorkshopReport-1-30-13-Final.pdf>.
- [10] Habib M K, Chimsom I C. CPS: Role, Characteristics, Architectures and Future Potentials[J]. Procedia Computer Science, 2022, 200: 1347-1358.

- [11] Lee J, Bagheri B, Kao H A. A Cyber-physical Systems Architecture for Industry 4.0-based Manufacturing Systems[J]. *Manufacturing Letters*, 2015, 3: 18-23.
- [12] Cao Kun, Hu Shiyang, Shi Yang, et al. A Survey on Edge and Edge-cloud Computing Assisted Cyber-physical Systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(11): 7806-7819.
- [13] Ren Ju, Zhang Deyu, He Shiwen, et al. A Survey on End-edge-cloud Orchestrated Network Computing Paradigms: Transparent Computing, Mobile Edge Computing, Fog Computing, and Cloudlet[J]. *ACM Computing Surveys*, 2020, 52(6): 125.
- [14] Josifovska K, Yigitbas E, Engels G. Reference Framework for Digital Twins within Cyber-physical Systems[C]//2019 IEEE/ACM 5th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems (SEsCPS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 25-31.
- [15] Alam K M, El Saddik A. C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-based Cyber-physical Systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 2050-2062.
- [16] Voge A, Ralph Klaus Müller, Kampa T, et al. Concept and Architecture for Information Exchange Between Digital Twins of the Product (CPS) and the Production System (CPPS)[J]. *Procedia CIRP*, 2021, 104: 1292-1297.
- [17] Rajabi Shishvan O, Zois D S, Soyata T. Machine Intelligence in Healthcare and Medical Cyber Physical Systems: A Survey[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 46419-46494.
- [18] Sood S K, Mahajan I. Fog-cloud Based Cyber-physical System for Distinguishing, Detecting and Preventing Mosquito Borne Diseases[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2018, 88: 764-775.
- [19] Zhang Miao, Peng Yong, Yang Mei, et al. A Discrete PSO-based Static Load Balancing Algorithm for Distributed Simulations in a Cloud Environment[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2021, 115: 497-516.
- [20] Zhang Miao, Peng Yong, Zhu Jiancheng, et al. Efficient Flow-based Scheduling for Geo-distributed Simulation Tasks in Collaborative Edge and Cloud Environments[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2022, 33(12): 3442-3459.
- [21] 李仁发, 谢勇, 李蕊, 等. 信息-物理融合系统若干关键问题综述[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 49(6): 1149-1161.
- Li Renfa, Xie Yong, Li Rui, et al. Survey of Cyber-physical Systems[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 49(6): 1149-1161.
- [22] 陈玉冰, 任熠营, 卢楚杰, 等. 面向信息物理系统的覆盖网构造方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2022, 43(2): 411-415.
- Chen Yubing, Ren Yiyang, Lu Chujie, et al. Method of Building Overlay Networks for the Cyber-physical Systems[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2022, 43(2): 411-415.
- [23] 陈刚, 李志勇. 集合约束下多智能体系统分布式固定时间优化控制[J]. *自动化学报*, 2022, 48(9): 2254-2264.
- Chen Gang, Li Zhiyong. Distributed Fixed-time Optimization Control for Multi-agent Systems with Set Constraints[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(9): 2254-2264.
- [24] 郑毅, 李少远, 魏永松. 通讯信息约束下具有全局稳定性的分布式系统预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(5): 575-585.
- Zheng Yi, Li Shaoyuan, Wei Yongsong. Global Stabilizing Distributed Model Predictive Control Systems with Limited Communication[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(5): 575-585.
- [25] 关新平, 陈彩莲, 杨博, 等. 工业网络系统的感知-传输-控制一体化: 挑战和进展[J]. *自动化学报*, 2019, 45(1): 25-36.
- Guan Xinping, Chen Cailian, Yang Bo, et al. Towards the Integration of Sensing, Transmission and Control for Industrial Network Systems: Challenges and Recent Developments[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 25-36.
- [26] 蔡继红, 卿杜政, 谢宝娣. 支持LVC互操作的分布式联合仿真技术研究[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(1): 93-97.
- Cai Jihong, Qing Duzheng, Xie Baodi. Research of Joint Simulation Platform Supporting Interoperability of LVC [J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(1): 93-97.