

11-30-2023

Application of Virtual-Real Simulation in Military Field

Ziquan Mao

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China, 429070654@qq.com

Jialong Gao

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China

Jianxing Gong

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China, fj_gjx@nudt.edu.cn

Quan Liu

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410000, 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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Application of Virtual-Real Simulation in Military Field

Abstract

Abstract: The definition and content of the virtual-real simulation are presented. According to different technical ideas, the development status and existing problems of virtual-real simulation are summarized from three aspects of digital twin, live-virtual-constructive (LVC) simulation, and parallel system. The similarities and differences, as well as the advantages and disadvantages of the three methods are analyzed and compared, and their main application fields are discussed. In order to deal with difficulties encountered in military training, operational tests, equipment development, and equipment maintenance, a solution based on virtual-real simulation is proposed by means of theoretical guidance, case comparison, and transfer and application. In view of the requirements of high fidelity, confidentiality, and security of relevant equipment and tests in the military field, the future development direction of virtual-real simulation is proposed.

Keywords

virtual-real simulation, digital twin, parallel system, LVC, military equipment

Recommended Citation

Mao Ziquan, Gao Jialong, Gong Jianxing, et al. Application of Virtual-Real Simulation in Military Field [J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2289-2311.

虚实结合仿真在军事领域的应用综述

毛子泉, 高家隆, 龚建兴*, 刘权

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 阐述了虚实结合仿真的概念与内涵。根据技术思路的不同, 从数字孪生、LVC(live-virtual-constructive)仿真和平行系统 3 个领域总结了当前虚实结合仿真的发展现状和存在的问题, 分析对比了 3 种方式的异同和优缺点, 并阐述了其主要适用领域。针对目前军事训练、作战试验、装备研发、维修维护遇到的困难, 以理论指导、案例对比、迁移运用的方式提出了基于虚实结合的解决方法。针对军事领域相关装备和试验的高保真性、保密性和安全性要求, 提出了未来虚实结合仿真的发展方向。

关键词: 虚实结合; 数字孪生; 平行系统; LVC; 军事装备

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)11-2289-23

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0672

引用格式: 毛子泉, 高家隆, 龚建兴, 等. 虚实结合仿真在军事领域的应用综述[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(11): 2289-2311.

Reference format: Mao Ziquan, Gao Jialong, Gong Jianxing, et al. Application of Virtual-Real Simulation in Military Field [J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2289-2311.

Application of Virtual-Real Simulation in Military Field

Mao Ziquan, Gao Jialong, Gong Jianxing*, Liu Quan

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: The definition and content of the virtual-real simulation are presented. According to different technical ideas, the development status and existing problems of virtual-real simulation are summarized from three aspects of digital twin, live-virtual-constructive (LVC) simulation, and parallel system. The similarities and differences, as well as the advantages and disadvantages of the three methods are analyzed and compared, and their main application fields are discussed. In order to deal with difficulties encountered in military training, operational tests, equipment development, and equipment maintenance, a solution based on virtual-real simulation is proposed by means of theoretical guidance, case comparison, and transfer and application. In view of the requirements of high fidelity, confidentiality, and security of relevant equipment and tests in the military field, the future development direction of virtual-real simulation is proposed.

Keywords: virtual-real simulation; digital twin; parallel system; LVC; military equipment

0 引言

虚实结合仿真是在全物理仿真难以做到, 纯虚拟仿真的可信度无法达到要求时, 应运而生的

一种仿真技术, 半实物仿真是最早的虚实结合仿真, 其技术的快速发展要追溯到 20 世纪 40 年代伴随着自动化武器的诞生, 半实物仿真与之一同发展起来^[1]。由于半实物仿真对导弹研制的巨大意

收稿日期: 2022-06-21

修回日期: 2022-10-17

第一作者: 毛子泉(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为武器装备自动化与仿真。E-mail: 429070654@qq.com

通讯作者: 龚建兴(1976-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为作战仿真与任务规划。E-mail: fj_gjx@nudt.edu.cn

义, 在这个时期, 美国、苏联和欧洲等国都对其投入了大量资源进行研究。特别是电子技术发达的美国, 在此领域更是独占鳌头。由此可见, 虚实结合仿真在诞生之初就与计算机性能和计算能力紧紧关联起来。

自 20 世纪 70 年代以来, 计算机技术与芯片制造技术飞速发展, 摩尔定律一次次得到印证, 与此同时, 80 年代开始出现 LVC 仿真^[2]。2002 年, 密歇根大学的 Michael Grieves 教授提出了数字孪生的概念^[3], 并阐述了数字孪生技术在工业生产和产品管理中的应用前景。文献[4]提出了平行系统的概念, 指出平行系统是一个自然的现实系统与对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统。

虚实结合是完成系统的虚拟仿真和实际待测设备互换互联的结合方式, 该方式能发挥虚拟系统仿真具备的接口抽象、功能模拟和测试功能迭代开发的特点, 同时结合实际设备的真实性, 使得测试满足全面、高效和可靠要求^[5]。虚实结合的仿真方式, 充分调动了仿真系统中的数字资源和物理资源, 使原本如设计—建模—仿真—验证呈线性进行的开发流程, 能在仿真与验证阶段并行

开展, 有效提高了开发效率。

1 虚实结合仿真

科技是军队战斗力的重要组成部分, 当一项新技术问世时, 应当首先考虑能否将其用于军事领域。当在科技的助力下, 两支军队的武器技术存在代差时, 胜利的天平就已经向武器技术先进的一方倾斜了, 这一倾斜在如今陆海空天电网全域战场中将会愈发明显, 虚实结合技术作为未来极有希望的新兴技术, 对战斗力的促进作用已经初步显现, 未来的发展趋势也将难以估量。

本文聚焦于军事应用, 按照理论和技术的复杂程度由浅入深的顺序, 调研了近年来虚实结合的 3 个主要技术领域(见图 1), 即 LVC 仿真、数字孪生、平行系统的学术成果和在军事领域的应用。总结了目前主要的应用方式和已有的工程成果, 在此基础上指出了当下虚实结合应用存在的一些问题, 探索了虚实结合在军事领域的应用前景和待突破的技术, 为未来虚实结合在军事领域更好地提升战斗力提供了理论和方法参考。

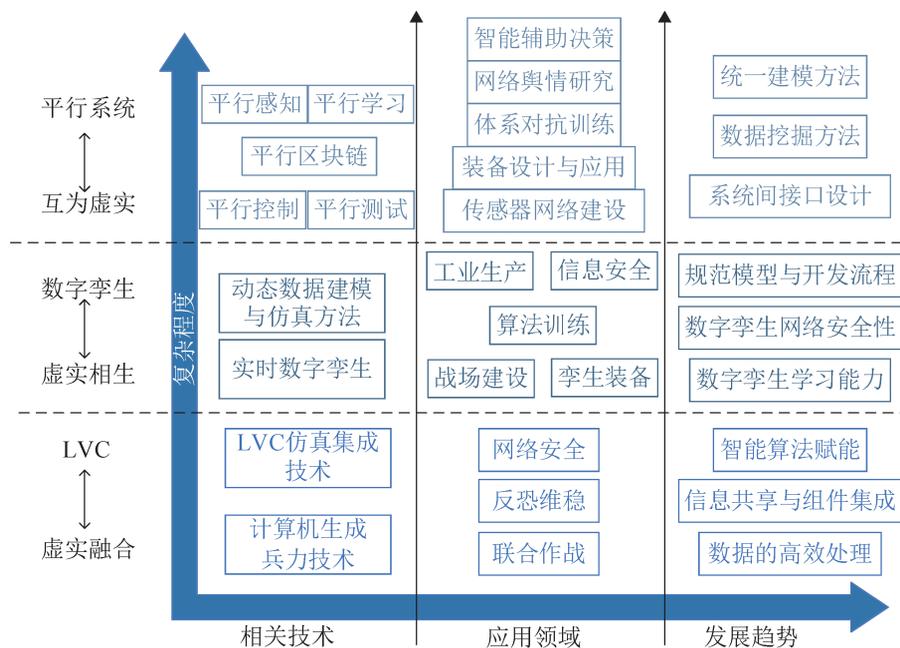


图 1 虚实结合仿真相关概念区分

Fig. 1 Virtua I-real combined simulation-related concepts are distinguishe

<http://www.china-simulation.com>

2 LVC仿真的发展与应用

2.1 LVC仿真的概念

由于LVC仿真出现较早,经过数十年的发展,体系已经十分完备,在定义上,LVC通过其组成部分来定义,即LVC仿真由三个部分组成,分别是Live—实物仿真,Virtual—虚拟仿真和Constructive—构造仿真,LVC不是这三种仿真技术的合称,而是集成了实物仿真、虚拟仿真、构造仿真的技术的统称,而使用LVC技术搭建的虚实结合仿真系统,称为LVC系统。

实物仿真指在仿真世界中以实兵实装的形式出现的部分,如参训士兵、坦克等;虚拟仿真则是以半实物形式出现在仿真世界中的部分,如各种武器装备的操作模拟器;构造仿真则是通过计算机生成的部分,如虚拟无人机对象、虚拟火炮等。通过LVC仿真,可以实现多军兵种跨空间演习,而不用出动大量的实装实兵。通过这种方式可以有效提高军事训练中人员的安全性和装备的完好度,并且计算机生成的兵力可以通过人工智能技术学习相关领域的知识,成为难度可编辑、过程可复盘、结果可量化的作战对手。以美国为首的世界军事强国都将LVC仿真技术作为未来重点发展的技术,而随着LVC技术的进步,其在军事训练中起到的作用也将更为重要。

美军目前的LVC建设主要集中在空军领域,目前的主要应用是建设F-15C和F-15任务培训中心,在未来的12年里,美军将重点发展将F-35融入LVC的方法,包括F-35操作模拟器的开发以及任务部署和执行的相关软件、环境的建设^[6]。

在军事训练中,美军通过“红旗”军演、“北方利刃(Northern Edge)”军演和“虚拟旗(Virtual Flag)”军演,充分利用LVC技术,将不同驻地的飞行员和不同的战机集成到一个战场环境中进行演习,使飞行员能在高逼真的虚拟环境中进行技战术训练,有效提高了作战能力。

LVC以其出众的体系训练能力而备受各国关注,对于我军来说,也应当建设以未来主战装备为核心的LVC训练系统,通过体系训练才能有效提高部队联合作战的能力。

2.2 LVC仿真技术概述

LVC仿真技术的主要研究发力点,在LVC仿真集成、计算机生成兵力、系统容错设计和LVC仿真资源管理,这些技术从系统的集成、运行、容错和管理4个领域对LVC仿真进行建设,共同完善了LVC仿真体系,以下从LVC仿真集成技术和计算机生成兵力技术2个方面阐述有关技术发展情况。

2.2.1 LVC仿真集成技术

LVC仿真集成技术,是将各个异构的仿真系统和仿真资源集成到一个仿真世界的技术。为了实现异构资源的集成,需要首先设计LVC的建模方法,在统一的模型框架内进行开发,是实现集成的先决条件。

(1) 仿真集成建模技术

通用作战单元组件化模型框架是LVC仿真模型资源的基础框架,所有的作战实体都在该框架之上进行开发,这是保证某个资源崩溃时,其他资源会进入一个自稳定的基础状态的方法^[2]。LVC仿真技术的本质是多异构系统互联,LVC技术就是在不断解决异构系统集成和互联过程中的数据交互、逻辑联系、扩展性和组合性、时空一致性问题过程中逐渐发展的。目前LVC的开发工作正在朝着一个战略、协作、系统和整体的概念发展,集成的整体系统的开发通过构建可链接组件,使不同组件在整体架构中互操作,为LVC提供最大的灵活性和创新性^[7]。

(2) 仿真集成时间管理技术

完成LVC集成框架建模后,需要对系统的仿真时间推进方法的规定,即异构仿真系统的时空统一技术。为了解决LVC仿真中异构资源时空描述的问题,引入一种基于观察者的仿真时间与

物理状态描述机制^[8]。在这个机制中，仿真世界定义 LVC 仿真系统中的实体物理状态描述与仿真时间的关系，定义仿真实体观察其他仿真实体时的时空逻辑，并通过创建“态”来储存每一个模型最新的状态。当观察者需要获取对应实物实体状态时，直接读取仿真世界的“态”值，这个值无需同步更新。因此当 LVC 仿真无法统一步长时，仿真步长较长的组件也能获取最新的仿真步长短组件的值，而不是通过历史数据来推断，提高了仿真数据的准确性。

多系统多模型联合运行时，保持交互状态间的一致性将产生耗费较大的时间和空间开销，从而导致消息传递错乱和逻辑关系不合理的问题。为了解决这个问题，文献[9]提出了多层分级时间管理的思路，以试验训练一体化仿真支撑平台(test and training integrated simulation architecture, TISA)为基础来实现。在基础层采用基于周期的逻辑时间推进和基于事件的逻辑时间推进的方式，在更高层级则使用分级控制的方法，即中间层级受限于基础层级，但控制更高的层级，通过这种方法实现对全网时间进行统一时间推进，进而减少为了维持一致性产生的开销。

在异构仿真集成系统中，通常采用定步长仿真，这种方式的仿真精度和速度无法调节，当异构系统仿真步长差距较大时，仿真数据会产生较大误差。文献[10]提出了基于 DDS(data distribution service)的 LVC 实时互联技术和变步长仿真技术，可以动态调整仿真精度与仿真速度的关系，提高系统的仿真能力，实现实时仿真。但由于步长预测计算步骤的引入，也使得计算过程更为复杂，运算时间更长。在 LVC 联合试验环境的搭建上，使用高层体系结构(high level architecture, HLA)与 DDS 作为环境和通信方法，实现仿真成员的动态加入和成员间的稳定通信。

(3) 实时仿真中间件技术

在多异构系统联合试验的发展中，形成了一系列的标准规范，包括 HLA、基本对象模型

(browser object model, BOM)、试验与训练使能体系结构(test and training enabling architecture, TENA)、模型驱动体系结构(model driven architecture, MDA)等。以上 4 种架构均采用发布/订阅式的通信方式，其中基于 TENA 的仿真一般提供 3 种交互模式，分别是对象交互、消息传递和方法调用。由于发布/订阅模式会导致代码冗余性，导致 LVC 无法满足武器体系快速响应的试验任务需求。为了解决这个问题，文献[11]以训练使能体系架构为基础改造了 LVC 的仿真试验中间件和应用模型框架，体现了仿真即服务(simulation as a service, SaaS)的理念。此中间件改善了消息的传递机制，使 LVC 能快速调动复杂资源，使仿真世界中各部分顺利协同。

为了避免 LVC 仿真中物理域和逻辑域产生混淆，在中间件对消息进行传递时，必须要采用信息域与物理域分离的配置方法^[8]，确保系统能对精度链进行高真实度仿真。

在仿真集成系统的仿真资源的管理上，文献[12]总结了目前存在的 3 种资源描述方法，即元数据法、资源描述框架(resource description framework, RDF)方法和赶集参数标记语言(simulation reference makeup language, SRML)方法在完整性、互操作性、平台无关性、灵活性和可信性 5 个方面的特性，并进行了定性对比。在此基础上提出了 LVC 仿真接口的设计原则、仿真资源设计规范和仿真资源描述规范，为基于 LVC 的一体化仿真系统的建设提供了参考。

2.2.2 计算机生成兵力技术

计算机生成兵力，即 LVC 中的 C 为构造仿真。通过计算机生成兵力，实现受训人员与虚拟兵力的虚实对抗，可以说，计算机生成兵力的强弱、真实程度决定了受训人员的训练效果。由于目前人工智能技术的发展，深度学习、强化学习、神经网络等为计算机生成兵力赋予智能，难度可变更、决策更灵活、流程更随机成为了目前计算机生成兵力技术的发展方向。

计算机生成兵力需要解决好2个问题:虚拟兵力打得到和虚拟兵力打得好,即虚拟兵力能否被受训人员攻击,与虚拟兵力决策是否与真实战争中的情况相符合。

(1) 在LVC中,存在参训人员无法通过肉眼观测到计算机生成兵力的问题,对于使用步枪等视距内武器的兵种,虚拟兵力无法被其攻击。当这些兵种需要对视距内的虚兵进行打击时,会造成LVC战场中的逻辑错误。针对这个问题,文献[13]以集合的方式规定了计算机生成兵力的范围,确保需要肉眼观察的装备是实装,而通过仪器探测的装备可以是虚拟装备。同时还提出了基于图论的无向图描述示例,并从训练需求角度分析,把根据图论获取的求解结果分为自主式对抗、控制式指挥、管理式演习三类的配置模式,有效解决了虚实兵力在逻辑战场上的不同步问题^[14]。

但通过视距来对装备进行分类的方法仍然存在局限性,当装备生成时,已经自带了“视距内”或“视距外”的属性,即能否被实装操作人员通过肉眼观察的属性,这样就对装备的使用范围进行了限制,使战法的创新和装备的使用受到局限。

(2) 虚拟兵力的决策模型是否完善,在创建虚拟兵力时,人类能做出的高层战术决策是使用人工智能建模的最具挑战性的决策^[15]。目前在虚拟兵力的决策建模上,十分依赖相关专家提前完成的脚本^[13]。已经写好的脚本无法做到战法创新,在摸透脚本后,训练成为了背书,失去了训练本来的意义。专家根据经验完成的脚本也会引入人的主观性问题,知识的覆盖面不足,而且程序员与军事专家需要沟通,其中也会存在误解。在这个问题上,文献[13]提出基于深度强化学习的分队战术决策建模,通过创建一个容量的“对手池”来让决策模型学习,进而达到根据受训者的战法调整自身灵活多变的效果。最后提出了基于动态贝叶斯网和遗传神经网络的参数矫正建模方法,对计算机生成兵力的水平进行灵活调整,积极适应受训者的水平,使不同水平的受训者都能获得

较好的训练效果。文献[15]从用户角度出发探讨了智能算法在LVC中的应用。在LVC中,通过智能算法训练的代理可以充当红方队员,也可以作为训练的对手。专家经验是代理行为的重要依据,但仅依赖专家经验的代理是静态的、脚本化的,训练效果会随着时间的延长而下降。借助智能算法可以充分提升代理的灵活性和可扩展性,并使算法的可重用性增加。

在针对特定参训人员的蓝方决策实体的设计中,往往不需要对对手的决策进行最优设计,而是需要最符合特定参训人员的需求,在针对空战的蓝方决策实体建模中,文献[16]采用将智能优化方法和神经网络相结合,并根据具体训练需求来构建适应度函数的方法来构建蓝方模型,可以实现受训人员与“特定作战对手的化身”或者“以前的自己”展开训练。

2.3 LVC技术的发展方向

LVC技术是军事训练和部队建设的重要技术支撑,美军提出了未来LVC发展的3个方向,如图2所示,分别是嵌入式训练、多技术体系混合集成技术和联邦LVC(joint LVC, JLVC)。

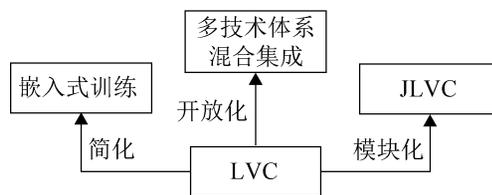


图2 LVC技术发展方向示意图
Fig. 2 Development direction of LVC Technology

(1) 嵌入式训练及其应用

嵌入式训练(embedded training, ET)通过只建设LVC中的实物部分(L)和构造部分(C)来缩短系统开发周期、减少系统包含资源、节省系统开发经费。嵌入式训练由于没有实物模拟器的参与,在LVC网络构建上更为简洁,对仿真资源需求的更少,也无需大量人员对LVC训练进行保障,简洁的ET可以在单件装备上部署。在将计算机生成

兵力集成在实物装备上后, 受训人员可以根据装备实际操作方法来进行训练, 并通过计算机生成兵力实现一定程度上的虚实对抗, 这种方式相比于传统的模拟器训练, 提升了训练的真实程度, 这也是 LVC 训练中的关键核心技术。但由于缺少模拟器的参与, ET 难以实现受训人员之间的对抗训练。

(2) 多技术体系混合集成技术

美军认为模拟器的标准化和网络化是美军建设 LVC 重点考虑的方面^[17]。不同的装备模拟器采用不同的技术体系, 因此多技术体系混合集成技术是未来实现 LVC 训练的重点技术, 在将多个异构仿真系统联合起来构建 LVC 训练环境需要注意各训练系统间的数据互识别、联合系统的逻辑合理性、可扩展性、可组合性的问题^[17]。

多技术体系混合集成还包含集成在不同仿真架构上搭建的仿真系统。包括分布式交互仿真技术体系 (distributed interactive simulation, DIS)、HLA、TENA 和公共训练仪器体系在内的仿真体系是目前搭建 LVC 训练系统常用架构。多技术体系混合集成技术就需要在包含这些体系的 LVC 系统中搭建网桥、网关等, 保证不同体系之间的通信顺畅。

(3) 面向联合作战的 JLVC

21 世纪初, 美军开始建设 JLVC 作为 LVC 训练的环境。随着联合作战概念的提出和发展, JLVC 也逐步融入联合作战训练中。JLVC 使用分布式仿真支持系统, 采用了开放的方式吸收了包括 HLA/RTI、DIS、TENA 和 Link16 等协议和标准^[18], 因此 JLVC 能连接不同体系的武器装备、模拟器和构造仿真系统。JLVC 联邦支持的 LVC 训练有效提升了美军联合作战能力, 促进了美军战斗力生成模式的转变, 对信息化条件下的军事训练起到了巨大的推动作用^[19]。

JLVC 在联合作战训练中, 可以集成不同军兵种的装备、模拟器以及其他仿真资源, 实现战术背景统一规划、战役进程统一调度、战斗资源统

一调配、战斗结果统一评估。可以为参加训练的指挥员、战斗员提供真实的训练环境和优质的训练对手。

但由于 JLVC 本身的建设要求, 使 JLVC 的建设存在开发时间长、运维成本高、复杂性上升的问题。为了解决这些问题, 美军提出了基于云使能模块服务 (cloud-enabled modular service, CEMS) 的 JLVC2020 框架。CEMS 主要有数据服务代理、接口层、战争模拟层和环境层构成, 其中数据服务代理是 JLVC 核心引擎^[17]。通过发展云服务和提升计算机性能后, 美军认为 JLVC 面临的问题挑战能得到解决, JLVC 将成为未来联合作战训练的重要技术基础。

2.4 LVC 技术的具体应用

LVC 应用主要集中在军事训练以及军事设施的建设和管理上。文献[20]分析了 LVC 在潜艇有关领域的应用前景, 基于未来的应用方式给出了潜艇作战系统 LVC 仿真系统的组成与关系, 并提出了一种仿真引擎组件化设计与实现的方式。通过组件化和模块化的开发方式, 可以实现引擎功能的可扩展性, 在功能可编辑的同时, 也能更方便地加入其他仿真组件。

文献[21]以某型水面舰艇单舰综合防空作战想定为应用背景, 解决水面舰艇作战指标无法充分考核的难题。在 LVC 资源集成的条件下提出了水面舰艇作战试验环境构设资源组成及其相关关系, 构建水面舰艇作战仿真中实兵实装在回路的仿真模式, 为水面舰艇作战指标考核提供了技术途径。

本文参考了美军在联合试验支撑环境的建设方法, 从平台体系框架、中间件两个部分的建设提出了基于 LVC 的试验鉴定支撑平台构建的方法, 通过建设支撑平台, 可以实现多军兵种试验资源统一调度、跨区域试验和资源灵活重组的效果^[22]。

文献[23]将 LVC 与混合现实结合起来, 研究了 LVC 在行人疏散领域的应用, 在搜集行人运动

数据的同时, 实现了行人之间和行人与环境的交互, 体现了虚实结合的技术要点。此项技术可应用于非战争军事行动中, 反恐行动的解救人质等行动的训练, 使参训人员在逼真的环境中获得直观的感受。

在网络安全领域, 文献[24]将LVC技术应用于网络安全实验, 搭建了在不同模型之间具有良好互操作性的Cy-through平台, 极大丰富了网络安全仿真中的网络攻击场景。网络安全是通信的基础, 随着战斗中信息化程度的加深, 对一个安全的通信网络的需求也越来越强。将LVC技术应用于网络安全仿真是节约成本、提高效率、扩大规模的要求体现。对于LVC分布式仿真系统网络本身的安全, 文献[25]将联盟区块链技术应用于智能LVC网络, 可以避免LVC网络中的数据篡改和由于单节点故障影响整体系统运行效率的问题, 在跨域场景中实现了安全有效的数据存储和共享。

3 数字孪生的发展与应用

数字孪生的概念在2002年被提出, 但由于当时认知观念和技术的限制, 并未受到学界和工业界的重视。随着技术的进步, 在世界各国陆续提出工业4.0的规划后, 数字孪生作为一个热门技术又重新进入人们的视野。

3.1 数字孪生的概念

根据美国国防部(the United States department of defense, DoD)的定义, 数字孪生是由数字线程支持的集成多物理、多尺度、概率模拟的系统, 其使用最佳可用模型、传感器信息和输入数据来在虚拟空间中预测其相应实物实体在生命周期内的活动^[26]。文献[27]认为数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性, 具有实时同步、忠实映射、高保真度特性, 能够实现物理世界和信息世界交互与融合的技术手段, 数字孪生的根本特征如图3所示。

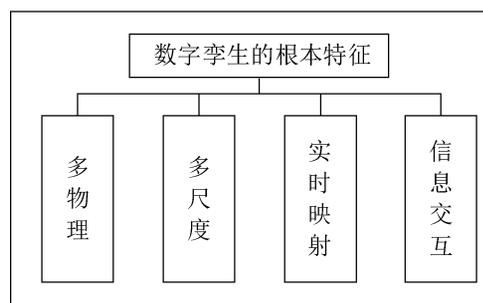


图3 数字孪生的根本特征

Fig. 3 Fundamental characteristics of digital twinning

在这两个定义中, 多物理、多尺度、信息、映射、实时, 这些词语均有出现。可见, 在中外研究者看来, 具有多物理、多尺度、实时映射、信息交互这些性质是数字孪生的根本特征, 也是数字孪生在实际应用中区别于其他仿真技术的优势。“数字孪生”是有上述根本特征的一种技术, 而使用该技术搭建的虚实结合仿真系统, 称为数字孪生系统。

数字孪生的发展程度可以分为3个阶段, 分别是: ①数字模型; ②数字阴影; ③数字孪生^[28]。这3个阶段根据数据的更新来区分, 在数字模型阶段, 数据从虚拟实体到实物实体与从实物实体到虚拟实体, 都需要手动进行更新; 在数字阴影阶段, 虚拟实体作为实物实体的“影子”, 数据从实物实体到虚拟实体的流向是可以自动进行的, 而从虚拟实体到实物实体的流动与更新仍然是手动进行; 数字孪生阶段的数据, 则是两个方向均是自动进行, 数据在双向的顺利流动, 使基于数据的算法、模型、仿真等在数字孪生的技术基础上大力发展。

3.2 数字孪生模型、标准与评价体系

数字孪生的模型、标准与评价体系是数字孪生从概念走向应用的必要元素。统一的数字孪生建模方法有助于开发者和研究者们进行交流, 同时节省了开发时间, 一个合理的模型也是后续进行技术细节设计的基础。

文献[29]使用Grievies提出的三维模型, 即虚

拟实体、实物实体、虚拟实体与实物实体之间的连接三者组成的模型，使用高斯过程(Gaussian process, GP)和深度卷积神经网络(deep convolutional neural networks, DCNN)技术，分别建立了重型车辆行驶状态的两个数字孪生模型，对重型车辆的驾驶进行了仿真。

文献[30]在Grievess教授的数字孪生三维模型的基础上提出了数字孪生五维模型，并提出了五维模型在数字孪生卫星等十个领域的应用。二者的区别如图4所示，实线部分为Grievess提出的三维模型，虚线部分为陶飞团队创新的内容。陶飞团队在Grievess的模型的基础上，增加了“数据”和“服务”两个维度，并拓展了“连接”的内容。在保持数字孪生主体要素不变的前提下，使模型结构更加清晰，数据作为单独一个维度也凸显了动态数据在数字孪生中的重要性。

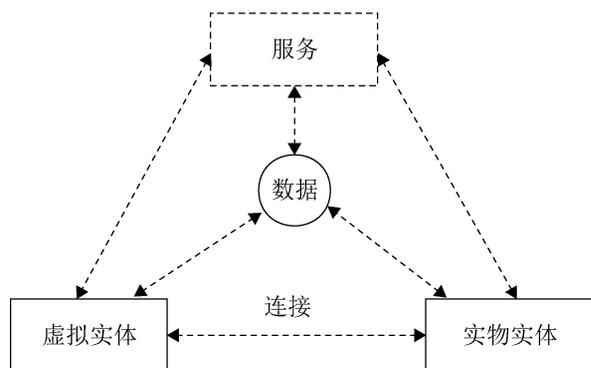


图4 三维模型与五维模型示意图
Fig. 4 3D model and 5D model

数字孪生五维模型将交互的数据作为驱动模型运作的“动力”，数据也是数字孪生的特征中信息交互的载体，数据的准确程度直接决定了数字孪生的虚拟实体的准确程度，以及对实物实体预测的正确与否。文献[31]提出了面向数字孪生的动态数据建模与仿真方法，并给出了应用框架，指出在动态数据的驱动下，可以将基于先验知识的信息物理模型(cyber physical system, CPS)与基于新数据的CPS通过贝叶斯理论融合起来，从而实现数字孪生以实利虚的功能。

传统的基于物理模型的数字孪生可以生成正

常物理资产的知识，但是在物理模型发生故障时，模型无法对已经出现故障的物理模型的行为进行预测。此外，传统的数据驱动的方法对数据的质和量要求较高，但是有些故障系统的数据可能无法用于训练，其中有的可能需要长期的测试周期来生成，比如材料的疲劳失效，有的则是开发一个故障系统的成本很高，比如一些精密的仪器或者大型的武器装备。针对以上问题，文献[32]提出了实时数字孪生(live digital twin, LDT)的概念和体系结构。此模型通过学习(learn)、识别(identify)、验证(verify)、拓展(extend)四个步骤，将数字孪生模型从第一阶段的高保真—正向仿真模式发展到最后阶段的高保真—反向仿真，实现了使用模型的输出数据对输入数据进行预测。

针对数字孪生存在缺乏标准构建的相关术语、架构、模型等要素的问题，文献[33]从数字孪生标准建立、数字孪生落地实施、数字孪生效益评价3个方面建立数字孪生的标准体系。数字孪生标准体系的构建是数字孪生技术能否顺利展开的关键，在构建了一套业界认可的标准体系之后，相关技术的交流和开发，不同领域技术的融合、未来技术的创新与评价才能消除壁垒，提高效率。一套数字孪生标准的建立能有效减少重复建设、排查缺漏建设、实施共通建设。例如在军用装备的设计和制造中，一架飞机的零部件可能来自全国各地甚至全世界各地的厂商，如果他们使用不同的数字孪生标准，那将厂商提供的数字孪生标准整合起来，形成整架飞机的数字孪生体，就是一件十分困难的事情，甚至无法实现。不同的数字孪生标准也会导致数据难以检测，后续开发难以进行等问题。因此，建立一套合适的数字孪生标准体系，是未来数字孪生建设的必要一环。

文献[34]研究了数字孪生评价体系的建立，提出了数字孪生模型评价的8条准则，分别是有效性、通用性、高效性、直观性、连通性、整体性、灵活性和智能性。这8条准则全面概括了一个良好的数字孪生模型所需要具备的性质，有效性、

通用性、高效性评价数字孪生模型是否好用,直观性、连通性、整体性则评价数字孪生是否便于理解,灵活性和智能性则评价了数字孪生模型是否便于衍生和复用。在提出定性评价数字孪生的指标后,他们也提出了定量评估的参数和公式。从准则层的8个要素中推导出29项指标的量化方法,通过归一化和加权求和的方式,得到最后的数字孪生模型评价的量化结果。

数字孪生评价体系是数字孪生建设的指挥棒与风向标,一个正确的评价体系能引导数字孪生技术向技术进步梯度最大的方向发展。在评价体系的建设中,指标选取、效能评估、权重分配等是关键因素。在未来军用装备的建设中,装备的数字孪生技术评估也是装备性能好坏的重要指标之一。因此,数字孪生评价体系在未来装备性能指标确定、装备效能评估审查、装备采购参考依据等方面都将起到重要作用。

3.3 数字孪生在军事领域的应用

作战试验与军用装备仿真对仿真对象的高保真性有很高的要求,而数字孪生的优势在于数字对象与物理对象的高度一致性,即在虚拟世界中进行仿真时,能保持对物理对象的高保真性。因此数字孪生在提出后,迅速获得了作战试验和军用装备领域的关注。在军事领域,数字孪生在工业生产、信息安全、算法训练、战场建设、装备建设方面都有较多应用。

3.3.1 数字孪生在工业生产领域的应用

工业生产是目前数字孪生应用最多的领域,文献[35]调研了现有的研究成果,在他们的调研范围内,约66%的案例研究都集中在制造领域,且目前已知的数字孪生优势最多的是制造领域。洛克希德—马丁公司使用数字线程和CAD模型直接驱动计算机的数字控制铣削复合编程系统来放置碳纤维。随着数字孪生技术的成熟,洛克希德—马丁公司将利用数字孪生技术来开发和制造新一代飞机,如F-35隐身战斗机^[26]。

在军用装备制造中,文献[36]提出在航天器装配过程中运用数字孪生技术的思想,构建了一个装配质量监控与预测体系。通过建立数字孪生系统,可以在产品装配阶段对原本在总装完毕后才能测试的性能指标进行评估测试,有效缩短了测试周期,并大大降低了产品返修和报废的比率。但由于数字孪生系统是在信息有限的条件下完成数据计算与结果推导,因此在历史数据较少时,会与实物模型有较大偏差。所以在数字孪生系统的开发中,要求系统具有学习能力,在不断加入历史数据后,能够自我对模型进行完善,进而实现更加准确的预测。

目前的装备设计,往往需要多个单位协作进行,数字孪生的实现可以让不同的使用者在不同的地域同时获得关于物理对象更为直观的信息,进行更直接的比较,实现了工作的更高水平的协同,提高了效率^[37]。

3.3.2 数字孪生在信息安全领域的应用

数字孪生在信息安全领域的技术主要有两个方面:①数字孪生在信息网络的开发、维护、故障预测等方面的应用;②数字孪生本身信息网络安全的问题。

网络安全作为国家非传统安全领域的重要组成部分,在如今这个智能时代显得愈发重要,目前数字孪生在工业应用上越来越广泛,但很少有关于数字孪生网络安全的研究。美国防部2021年1月发布的《增材制造战略》指出,在加强增材制造工作流的安全性保护方面,美国将在机器间的数据传输和访问以及网络连接上使用数字孪生技术,对数据进行验证,确保数据不会被篡改和伪造,以保证数字供应链的安全^[38]。

卫星通信是目前各国通信网络的核心组成部分,在这个方面,文献[39]提出了网络数字孪生(cyber digital twin, CDT)的应用,CDT可以在无需实物实体中断的情况下,进行原先必须在此情况下的研究。这种技术为网络安全的研究人员提供

了方便的研究环境,减少服务器停机维护的时间,缩短网络服务的研发和测试周期,通过这种方式可以提升通信系统的鲁棒性和稳定性。但是这种技术带来的影响是恶意的攻击者可以无需获取实物,通过虚拟实体即可以研究实物实体的系统漏洞和缺陷。借助数字孪生可以对卫星等位于通信网络上的关键设施进行攻击,从而导致整个通信网络的瘫痪。与之对应,我方可以通过数字孪生发现敌方卫星的系统异常而提前进行修复^[40]。

因此,在未来战争中,开战前尽可能多次准确地搜集对方数据成为必备的准备工作的。当战争双方获取到对方的数字孪生信息时,可以借助孪生体研究对方网络中可能发生的错误。因此保证数字模型的安全和保密,是未来军事斗争中网络防护的重要组成部分,这也是数字孪生自身网络安全的重要建设领域。

3.3.3 数字孪生在算法训练领域的应用

数字孪生可以创建高保真的环境,当实验室拥有的物理实验环境难以达到算法训练要求的环境时,可以通过数字孪生创造的虚拟环境代替。

实物实体与虚拟环境结合,形成了虚实结合的仿真系统,称为信息物理系统(cyber physical system, CPS)。其复杂性、动态性和不确定性使得通过 CPS 获取的数据大多存在偏差。对于这个问题,文献[31]提出了面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法,并提出通过随机有限集(ranfom finite set, RFS)来支持动态数据驱动的建模,通过贝叶斯推理实现动态数据驱动的仿真运行,通过这种动态数据驱动的方法来解决 CPS 产生数据不准确的问题。

文献[41]介绍了一种新的基于 RFS 的战场学习算法,并通过数字孪生进行战场学习。在数字孪生的帮助下,算法可以消除真实战场和虚拟战场的壁垒,实现真实战场和虚拟战场的交互。通过虚拟战场和真实战场的双向实时互操作,指挥官可以实时了解到战场动态,作出及时的指令,这对于无人作战的算法训练是十分有利的。

文献[42]提出了一种将数字孪生与深度强化学习结合的方法,用来对无人机集群的有关智能算法进行策略学习。数字孪生可以为深度强化学习提供逼真的学习环境,并通过数字孪生快速部署到实物无人机上。由于真实环境中存在非线性和不确定因素,导致在仿真环境中通过深度强化学习学到的策略无法直接部署到真实的无人机上。数字孪生可以根据历史数据、传感器数据和物理对象来及时反应真实世界的状态^[42]。数字孪生创造了一个高保真的虚拟环境,在此环境下,可以提高无人机数据采集的速率,使无人机能在一个逼真的环境中以较快的速度学习到适合真实环境的策略。

在无人机路径规划算法的开发上,文献[43]提出了一种基于模型的系统工程(model-based systems engineering, MBSE)方法,用以开发无人机系统(unmanned aerial system, UAS)的数字孪生系统。这套系统集中于解决战场环境下的“最后一公里”后勤物资补给问题,包括无人机系统的路径规划和任务规划算法。文章给出了利用数字孪生解决一个具体工程问题的步骤和方法,并对任务进行了建模,指出由于战场的瞬息多变,使用数字孪生系统训练出来的算法,可以帮助指挥员进行决策,使决策依赖的信息更为可靠,决策产生的效果更容易观测,并提供不同方案的效益和损失的直观评价。文献[44]介绍了基于陶飞团队的数字孪生五维模型的无人机数字孪生建模方法。在无人机数学模型的基础上,使用 Gazebo 构建无人机的虚拟实体,实现了无人机在数字世界和物理世界的同步运行,初步展现了数字孪生的应用效果,但存在数字孪生只包含无人机运动状态信息的缺点,无法做到无人机全状态的实时同步。

数字孪生对计算机的计算性能提出了更高的要求,如何在有限的计算资源和非理想的更新速度下完成数字孪生系统的更新与维护,使深度强化学习能在非理想环境中仍保持较好的性能是未来研究的方向。

3.3.4 数字孪生在战场建设领域的应用

战场建设作为一项长期的战备工程,一直备受各国重视,法国在二战时期修筑了马奇诺防线用以抵抗德军的进攻,中国在古代也使用长城这样的防御工事抵御来自草原的威胁。如今的战场建设手段也更加先进,文献[45]提出了数字孪生战场的概念,指出数字孪生战场的建设内容应当包括除了物理要素之外的抽象要素。数字孪生战场管理平台为战场建设提供了统一的接口与框架,在此基础上进行信息统筹与协调,可以实现军队与地方信息的共享,使指挥员对战场的认识更加深入。在战场建设与管理上,数字孪生所创建虚拟世界具有权威、单一、安全的特点,通过对数字孪生建立的信息共享平台可以使军队与政府、有关企业共同论证战场建设与管理方案,有效避免战场建设过程中产生的重复建设和无效建设。

在数字孪生战场建设的模型构建上,文献[46]对基于云的信息物理系统(cloud-based cyber physical system, C²PS)的数字孪生架构参考模型进行了分析描述,提出了C²PS、计算、通信和控制的关键特性的分析模型,并在一个基于远程信息处理的车辆辅助驾驶上进行了模型的应用。通过C²PS体系结构以及一种公共语言,可以无缝地进行跨域集成,借助这个架构可以形成一个数字孪生战场,作战单位和后勤保障单位可以轻松地跨域访问数据,使不同要素在数字孪生战场中有机结合。

在战场的各组件建设上,文献[47]通过将数字孪生技术引入光通信领域,提出了一种适用于光通信的DT框架,并借助深度学习算法,在数字空间建立了故障管理、硬件配置、动态传输仿真模型,以保证光通信系统和网络的高可靠性运行和高效管理。文献[48]以数字孪生五维模型为指导提出了基于数字孪生和GIS的公路交通建设,指出通过数字孪生技术能极大地提高工程在规划、设计、施工、运营、安全方面的管理水平,实现交通管理决策协同化和智能化。

在军事应用领域,对作战任务涉及到的战场要求进行数字孪生建模,可以对未来战场有一个全面的认识。在这次俄乌冲突中,我们可以认识到,公路机动将是未来战争的武器平台主要机动方式,俄罗斯军队在公路上数次遭到乌克兰军队的伏击导致大量装备损坏和人员伤亡,如图5所示。因此公路的信息就成为了战术指挥以及战略机动的必须掌握的信息。

数字孪生与GIS技术的结合在公路网的应用,可以协助指挥官对战场中的道路实时情况进行评估,制定部队的机动方式以及机动路线;对红方交通状况的评估有助于指挥官确定打击对象和打击关键节点。对蓝方而言,公路状况涉及到蓝方的后勤保障、战术机动、装备伪装等,数字孪生较如今的数字沙盘而言,动态数据实时驱动使指挥官对战场的掌握更加准确。孙子曰:“知己知彼,百战不殆。”只有对蓝方阵地和红方阵地有充分了解,才能制定出合理的战术,减少伤亡的同时对红方关键要害部位进行精确打击。



图5 沿公路机动被击毁的俄军车辆
Fig. 5 Destroyed Russian military vehicles along the highway

3.3.5 数字孪生装备的研究与发展

数字孪生装备是未来高性能、高智能装备的发展方向之一,文献[49]介绍了未来的数字孪生装备的构想与发展前景,提出了数字孪生装备的理想特征,即自感知、自认知、自学习、自决策、自执行和自优化。数字孪生装备由于其动态数据

驱动的特性, 自诞生时, 就与机器学习、强化学习、知识图谱等智能学习方法有千丝万缕的联系, 而这些学习手段也是无人作战装备被赋予智能的重要方法。未来的数字孪生军用装备, 不仅在设计、制造、维修、保养等方面可以通过动态数据驱动的方法来节省制造时间, 预测装备损伤, 更能通过学习来给出维修与保养建议。

军用卫星是未来典型的数字孪生装备之一, 文献[50]提出了数字孪生卫星概念与内涵, 指出数字孪生卫星在空间维度上对各场景及对象的服务应用, 实现了时间维度上的系统工程管理。

美军为了缩短新型宙斯盾系统的测试周期, 并将宙斯盾系统引入作战演习之中, 开发了虚拟宙斯盾系统。美国印太司令部曾在 2020 年将用于导弹驱逐舰的“宙斯盾”作战系统, 通过数字孪生手段, 将其“打包”成手提箱大小, 带上岸并与陆军炮兵部队、空军指挥节点和 F-35 “闪电 II”联合打击战斗机连接^[51]。

此外, 通过虚拟宙斯盾系统对算法进行验证, 一旦通过, 则可以直接部署到真实系统上, 美军则减少了额外的海试成本^[52]。

对于智能无人装备, 机器学习、强化学习、深度强化学习将会通过数字孪生对无人作战算法、战法进行仿真。由于数字孪生统一的接口和安全框架, 在未来的无人作战装备的算法训练中, 将极大地节省仿真平台的开发时间, 提高训练效率。同时, 针对目前算法的计算机仿真与实际部署之间, 由于复杂的现实环境产生的效果差异性, 数字孪生也能通过其高保真的特性, 来有效降低这种效果差异, 减少算法从设计、仿真、部署、调试的迭代次数, 使战法能更快地部署在一线作战装备上, 达成更快的 OODA 循环。

在装备损伤预测上, 文献[53]提出了基于物理模型的贝叶斯损伤诊断方法, 可以自然地量化诊断中的不确定性。贝叶斯方法非常适合融合来自检查、以往的任务记录和结构维修的异构信息。作者使用贝叶斯方法融合来自不同来源的直觉和

认知不确定性, 从而量化预测后的总体不确定性。通过开发了一个融合从概率损伤诊断和预测中获得信息的数字孪生, 通过使用最新的信息和量化的不确定性来支持任务的智能规划和决策。

装备损伤预测以及装备维修的一个具体应用领域是飞行器的检修与维护, 加拿大国家研究委员会提出了一种飞机机身数字孪生 (airframe digital twin, ADT) 的建设计划, 美国空军的 ADT 框架是基于概率和预测单体飞机跟踪 (probabilistic and prognostic individual aircraft tracking, PPIAT) 方法。该方法将飞机有关参数的不确定性 (如飞机使用方法、几何形状、材料特性、材料初始不连续状态等) 纳入单体飞机的概率疲劳寿命评估。加拿大国家研究委员会根据美国国防部对数字孪生的定义提出了 ADT 的定义, 其中的 5 个要素为: ①飞机通用数据库; ②个体的数字孪生; ③定量风险评估; ④单个实物实体飞机; ⑤贝叶斯推断。当每次从实物实体上获取数据时, ②~⑤都会更新一次, 这使得数字孪生体与实物实体愈发接近, 降低了计算和推断的不确定性水平。因此, 如果数字孪生用于基于定量风险评估、优化维护和制定检查计划, 在最大限度提高可用性的同时, 显著降低管理飞机结构的成本^[26]。

4 平行系统的发展与应用

文献[4]在提出平行系统时指出, 现代控制理论是成功应用平行系统理念的典范。但现代控制理论并未使用或很少使用人工系统的方法对实物实体进行预测, 究其原因是以往的受控系统并没有复杂到需要使用虚实结合的方式来创建人工系统的需要。随着人类社会的发展, 受控系统的复杂程度日益提升, 诸如人类社会、军事行动、群体智能等复杂系统也成为目前研究的热门领域。因此, 对于无法获得准确参数的复杂系统模型, 平行系统成为了对其进行预测并指导实际系统运行的重要方法。

4.1 平行系统的概念和内涵

文献[4]提出平行系统是指由某一个自然的现实系统和对应的一个或多个虚拟或理想的人工系统所组成的共同系统。这里的人工系统并不是现实系统的完全复制体,因为复杂系统的许多参数无法准确测量,其内部的运行机理也尚未完全弄清。人工系统与真实系统,应当做到在全局宏观和系统功能性上的“平行”与“等价”,而不以数学模型的精确性来逼近,否则就从平行系统走向了数字孪生^[54]。平行系统的本质就是把复杂系统中难以认知的“虚”和“软”的部分,通过可定量、可实施、可重复、可实时的计算实验,使之硬化,以解决实际复杂系统中不可准确预测、难以拆分还原、无法重复实验等问题。平行系统的最终目的是使所构造的人工系统的观测和实际系统的观测在某种意义上一致^[55],而构建满足上述要求的系统的技术,称为平行系统技术。

平行系统的核心是 ACP(artificial system, computational experiments, parallel execution)方法,其形式如图6所示,ACP方法是指与现实系统宏观等价的人工系统(A),通过计算实验(C)来获取系统可能的发展方向,在获取人工系统运行的结果后,指导现实系统通过平行执行(P)来达到人工系统所得到的理想的结果。在平行系统的概念研究中,文献[55]建立了平行系统的模型,给出了平行系统的数学表示,在数学表示的基础上阐述了平行系统与数字孪生的异同点。对于平行系统的核心 ACP方法,给出了 ACP方法的数据驱动计算框架,并针对 ACP方法实现的三种方式“学习与训练”、“试验与评估”、“管理与控制”给出了数学形式上的改写。从流程上而言,平行系统通过数据获取、人工系统建模、计算实验场景推演、实验解析与预测、管控决策优化与实施、虚实系统实时反馈、实施效果实时评估来完成闭环处理过程^[56]。

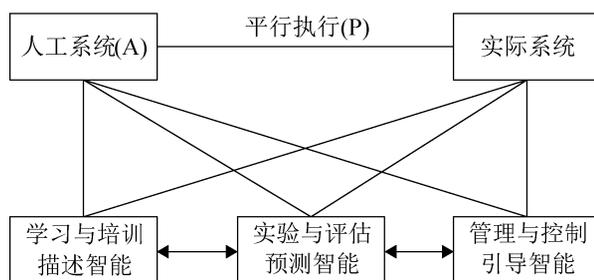


图6 ACP方法框架

Fig. 6 ACP methodology framework

同为现实系统在虚拟空间中的映像,平行系统与数字孪生却有本质的差异,文献[57]对比了数字孪生与平行系统的异同,指出数字孪生与平行系统是两类不同的原创范式,在核心思想、研究对象、架构和实现方法等方面都存在一定的区别。在理论思想发展程度上,平行系统的复杂程度要超过数字孪生,数字孪生强调虚拟系统与现实系统保持数学模型上的完全一致,通过这种一致,准确预测现实系统未来的发展状况。而平行系统则将虚拟系统与现实系统均看作该系统的一种发展可能,计算实验是为了开展在现实系统中难以开展的实验,虚拟系统发生的变化并不会强制影响现实系统,虚拟系统只向观察者展现现实系统未来的一种可能。

4.2 平行系统的关键技术

目前平行系统的关键技术主要集中在平行感知、平行学习、平行区块链、平行控制和并行测试5个方面^[57],这5个方面是建立一个完整的平行系统从数据获取到处理再到应用的全流程。

4.2.1 平行感知

平行感知是平行系统获取现实系统数据的方法,随着传感器技术和传感器网络的发展,越来越多的数据可以传递给计算机进行处理,对数据的实时搜集能力也更加强大。文献[58]提出了分布式获取数据的方法,在交通应用场景中,将交通管控从原本的集中式搜集处理信息,即在路口设

置摄像头并将数据传输回处理中心进行处理的方式, 改变为分布式地处理信息, 即通过车辆之间的物联网以及边缘计算方法, 更为快速高效地对交通进行测量和管理。文献[59]提出数据获取后预处理的 3 个步骤: ①对数据进行归一化以减少误差; ②使用滑动窗口或滞后窗口的方法准备数据集; ③将数据集拆分成训练集和测试集两个部分, 用以算法的学习和测试。准确数据的获取是搭建合理人工系统的前提, 因此, 平行感知是平行系统中的一项首要工作。

4.2.2 平行学习

目前研究较多的平行学习方法, 包括深度学习和强化学习。在使用强化学习搭建推荐系统时, 虽然能解决根据连续决策过程, 不断学习用户喜好来捕捉用户偏好。但由于采样数据往往是不确定, 且数据的概率分布也是可变的, 强化学习无法综合考虑到推荐系统的状态和行为。为了解决这个问题, 文献[60]提出了基于 ACP 方法的平行强化学习, 通过计算实验减少现实系统中的不确定性, 实现更好的推荐效果。

文献[59]在采集建筑物数据并通过深度学习来对建筑物能耗进行预测时, 在预测模型中使用长短期记忆算法(long short-term memory, LSTM)作为编码器获取被预处理后的数据, 通过 LSTM 算法, 将搜集的数据转化为特征, 使用循环门单元(gated recurrent unit, GRU)作为解码器, 预测输出序列, 在结合 ACP 方法的深度学习下输出的预测结果要优于单一的混合深度学习算法。

在平行系统中, 可以使用现实系统产生的小数据来构建宏观一致的人工系统, 在交通应用场景中, 通过人工交通系统生成数据能更为简便和廉价地获取交通信息的相关数据^[58], 中间涉及到平行系统的关键技术之一的平行学习, 即如何通过较少的初始真实数据来对人工系统进行训练, 从而使人工系统能自己产生偏差不大的人工数据。

4.2.3 平行区块链

区块链技术是与数字货币、去中心化与分布

式认证等技术一起提出来的一种计算范式。平行区块链通过人工系统计算在区块链网络中新增或减少节点对整体的影响, 进而对区块链的布局进行评估。文献[61]利用平行区块链的技术, 创建金融沙箱, 借助平行系统对金融创新进行监管, 有效规避金融创新的风险。同时, 基于 ACP 方法的监管沙箱可以将人工智能引入金融领域, 将新型的区块链技术与智能监管沙箱相结合, 以解决在金融领域显著的数据流通不畅和监管滞后的问题。

4.2.4 平行控制

在工业生产中, PID 控制是一类简单而有效的控制方法, 是很多工业设备采用的控制方法。随着设备的日益复杂, 虽然预测控制可以通过对被控系统的预测, 动态进行控制参数的调节, 但在一些复杂控制网络中, 仍然无法获得最优的控制参数, 进而降低控制器的效果。平行控制通过搭建人工系统, 进行计算实验可以在各种可能的情况中选择最优的控制参数, 使控制器发挥最优性能。

为了解决火力发电中的超临界火电机组的控制问题, 文献[62]提出了基于 ACP 方法的平行控制方案。通过人工系统对物理系统进行模型辨识、控制方法选择和控制器参数初始化, 再使用计算实验和平行执行的方法在不同运行条件下选择最优控制参数并执行, 经过仿真实验证明了基于 ACP 的平行控制方法相较于传统的模型预测算法具有更小的超调量和调整时间, 且不容易出现模型失配, 体现出了更好的控制性能。

4.2.5 平行测试

越是复杂的系统, 对其需要进行的测试就越多。军事装备往往需要根据其使用环境, 在各种严苛的条件下进行大量测试, 而一些工业设备, 如火力发电机、汽车等需要进行例如加速实验、压力实验和边界实验等, 通过大量的计算实验, 可以预测未来的发展状况, 并将最优状况返回真实世界, 通过平行执行的方式, 引导实际系统接近人工系统中的理想情况运行。

<http://www.china-simulation.com>

• 2302 •

4.3 平行系统在军事领域的应用

平行军事体系由实际军事组织及系统和相应人工军事组织及系统组成,其特点是以数据为驱动,通过实际军事组织及系统的数据构建人工军事组织及系统^[57]。军事体系包含作战行动、后勤保障、战场建设、边境管控、装备发展等领域,平行系统以其人工系统计算实验和平行执行的优势,在军事体系中的许多领域得到了应用。

4.3.1 装备设计与应用

战斗力是人、武器和人与武器的结合,武器装备的好坏对一支军队的战斗力有重大影响。机械结构是一件装备的基础,文献[63]在机械设计领域引入ACP方法,机械设计过程无需真实的系统,ACP方法在虚拟与现实的交互中起到并行优化、闭环反馈和协同优化的作用。ACP方法可以加强人机交互,从而建立起一种创造性和计算能力的互补机制。通过计算实验,创造性地提出不同的设计思路,并验证设计效果,最后由人类设计师来对结果进行评判,这种方式充分融合了人类的经验与计算机的计算能力,可以有效提升设计效率,减少迭代次数。

在航天器飞行控制和仿真方面,文献[64]提出了一种航天器飞控仿真与平行系统架构,以仿真与验证子系统为前端、决策与支持系统为后端实现数据的采集与处理、过程的仿真与推演、结果的评估与决策。并将此系统成功运用到了嫦娥五号的飞行控制工作中,验证了系统架构的合理性和可行性。目前卫星组网组成大型星座是搭建天基卫星系统的基础方法,文献[65]通过引入平行因子的概念,将复杂天基组网星座的天地一体平行演化问题转化为平行系统理论,即ACP框架下的平行因子的“平行预估”与“自适应校正”问题。在此基础上,提出了基于平行系统的自主运行框架,将地面站的遥测数据注入平行系统,通过平行系统获取的合理结果,上注到卫星中,完成最优自主定轨。这中间涉及到平行系统关键技术中

的平行学习,即通过对历史数据的学习,完善平行系统,并输出最优的平行因子和轨道调节参数。

4.3.2 体系对抗训练

现代战争作为一个复杂系统,包含环境、人员、装备等诸多要素,作战双方均以作战体系的形式参与战争,因此体系对抗作为军事训练的重要方面,是世界各军事大国大力发展的训练方式。文献[66]提出了以平行系统理论来研究体系对抗仿真的方法,并给出了训练各元素投影进入虚拟空间的方法。在平行系统的ACP架构下,对复杂系统建立人工系统,并在此技术上开展计算实验和平行执行,执行的结果可以用来指导现实体系对抗训练的开展,现实体系对抗的演训结果可以充实人工系统的各项数据和模型。

4.3.3 传感器网络建设与资源调度

边境管控一直是各国边防部队的重要任务,边境地区往往环境、气候条件十分恶劣,有些地方士兵巡逻难以到达。因此,在传感器技术和网络技术快速发展的今天,利用传感器在边境布置一张监测网络成为智能边境管控的选择。但由于环境和气候的影响,已布置的传感器往往难以更换,因此传感器能源的管理是影响传感器网络寿命的关键因素。为了解决一体化观测网络中任务管理与资源调度的需求,文献[67]提出了基于平型智能方法的一体化网络协同任务管理建模,在能量效率资源分配的问题中提出任务调度的建模方法和计算实验开展方法,有效减轻了网络带宽压力,并提高了信息传输和频谱效率。

海洋环境资源监测,对于军事和民用领域均有举足轻重的地位,在军事领域,海洋水文信息、海底资源分布状况、海底建设开发情况,都是一国重要的情报信息。因此,针对如何有效对海洋监测资源进行规划,实际上是海洋中的传感器网络的布设和资源调配问题,文献[68]提出了以平行系统的方法来建设海洋环境平行监测体系,对海洋监测体系进行优化融合,在平行系统的优化融

合决策过程中, 引入“体系融合熵”的概念, 定量确定融合后的系统评价指标体系的权重, 确保优化融合后的各个系统监测效能不降低, 并减少运行成本。

4.3.4 无人作战集群智能辅助决策

在无人作战中, 无人机集群是主要作战力量, 无人机集群的智能程度决定了一支集群的作战能力。文献[69]构建了无人机协同航迹规划的平行系统, 在人工系统中通过计算实验获取评估指标最优的航迹规划方案, 再将方案传递给现实系统进行动态执行, 根据结果不断调整航迹规划算法的参数和模型参数, 修正人工系统以重新进行航迹规划和辅助决策, 从而达到平行执行的目的。文献[70]借助平行系统的思想, 在无人机群体智能的生成中, 使用无人机集群平行系统来辅助无人机进行决策。在这个思路, 提出了一种平行无人机集群系统架构, 并指出平行系统方法成立的前提, 应该是地空通信延迟与地面计算能力满足任务调整和航路再规划的时限性要求, 这也为未来无人机集群平行系统的发展指明了方向。

4.3.5 网络舆情研究与引导

在现代战争中, 网络舆情的重要性不言而喻, 在伊拉克战争中, 美军通过“拯救女兵林奇”的视频, 在美国网络上一扫战争失利的阴云, 网络舆情由原本的反战厌战变为支持美军的伊拉克战争。我国台湾地区也有被称为“1450”的台湾绿营网军存在, 因此, 在未来可能到来的战争中, 把握并引导网络舆情的走向是十分重要的无声战场之一。文献[71]在 ACP 方法基础上, 引入群体行为动力学和社会运动组织理论, 提出了动态网民群体运动组织研究方法。通过人工社区建模和计算实验, 可以预测网民群体运动的可能方向和结果。

5 发展趋势与展望

随着计算机性能和计算机网络技术的发展, 智能设备与人类的生活结合更加紧密, 通过智能设备, 人类与物理系统进行了更为深入和广泛地交互。计算机互联网也进入了万物互联的物联网时代, 通过物联网, 实物实体之间可以充分交换信息, 传感器也更为广泛地分布在人类社会中。信息系统与物理系统的深度交互, 进一步催生了信息物理系统(CPS)。在过去的 60 年中, 仿真的重点从系统分析到教育培训, 再到数据获取、系统兼容, 最后到研究和娱乐^[72]。民用领域的逐渐完善意味着仿真技术在军用领域也将迎来巨大发展机遇, 虚实结合仿真作为仿真技术研究的重点方向, 也必将取得突破性发展。

5.1 LVC 技术未来发展

LVC 技术强调将现实、虚拟和构造三个部分的元素集成到一个环境中, 实现虚中有实, 实中有虚的虚实融合。结合现有的技术发展和应用场景, LVC 未来的发展趋势, 如图 7 所示。

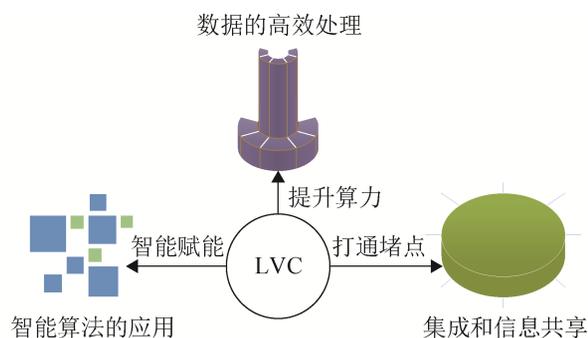


图 7 LVC 的发展方向

Fig. 7 Development direction of LVC

(1) 智能算法在计算机生成兵力上的应用。目前的计算机生成兵力的智能水平仍不能让人满意, 智能算法在战术层和决策层的应用场景较少, 且实战化程度不高。未来的研究方向是使智能算法更符合作战实际, 打通智能算法在 LVC 训练系统

中的落地流程。在人机交互上,简化管理人员修改计算机生成兵力战术战法的交互界面和开发方法,使智能算法简单易用,无需专业工程师长时间参与。

(2) 信息共享与组件集成。实际作战中,各单位之间需要有信息的传递,包括全流程的命令、情报等。与之相应的是,LVC各参与方之间的信息共享是限制LVC规模的因素之一。目前不同国家军队之间的联合作战演习日渐频繁,他们采用的训练系统往往不尽相同,LVC必须采用可扩展的组件,为不同的需求提供最大的创新性。未来LVC集成的领域将会越来越多,需要解决不同形式的信息和组件如何快速加入到已有LVC系统的问题,使联合训练所包含的成员更多、训练科目所包含的领域更广。

(3) 大量数据的高效处理。未来随着LVC涵盖的领域更加广泛,需要处理的数据量也会随之增大,特别是对于分布式的LVC系统,庞大的数据将会进一步导致时空一致性的错乱^[73],引发逻辑错误。未来在大规模分布式仿真中,需要使用更为高效的数据存储和处理方式来代替集中式的数据处理,包括边缘计算、云计算等,完善LVC中的多分辨率建模技术,以减少工作量和网络流量^[74]。在LVC中,大量的实体既是整个系统的负载,但同样也是系统中的资源。边缘计算是一种新兴的网络辅助计算模型,通过将计算(和存储)资源放置在靠近移动或传感器设备的网络边缘(例如WiFi接入点、蜂窝基站)来优化云计算^[75]。利用LVC中的实物实体布置边缘计算和云计算,进而优化系统各个组件的延迟,将对LVC的时空一致性有重要意义。

5.2 数字孪生未来发展

数字孪生希望在虚拟空间建立一个与现实系统完全一致的数字双胞胎,通过对数字对象的研究实现对现实系统的准确预测或对现实系统进行控制。目前数字孪生已逐渐从理论研究走向工程

实践,未来发展文献如图8所示。

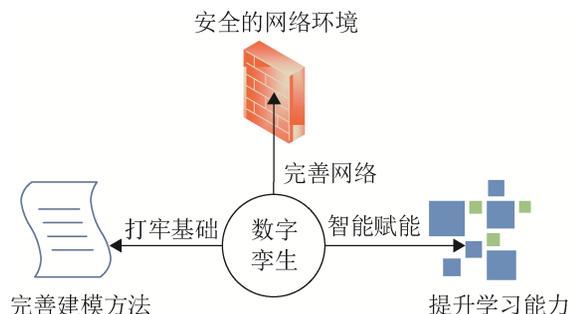


图8 数字孪生的发展方向

Fig. 8 Development direction of digital twin

(1) 规范数字孪生模型与开发流程。目前数字孪生的模型主要有三维模型和五维模型两种,相比于三维模型,五维模型的内容更加丰富,分类更为清晰,是未来主要采用的模型。五维模型以动态数据动力,驱动其他四维的建设与发展,动态数据在五维模型中占据了核心位置。因此,使动态数据更准确可靠、模型更精确、服务结果可信度更高是数字孪生开发的要求。未来应提升数字孪生模型的完备程度,目前数字孪生模型的学习能力尚未被归纳到五维模型的任何一个维度中。数字孪生也没有一个成熟的开发流程,即在搭建数字孪生系统时,模型各个维度的协同开发方法及其联系的实现方式。

(2) 增强数字孪生网络的安全性。三军之事,莫重于秘,对于军事应用来说,安全保密是装备最基本的要求,对于商业公司也是一样,每家公司都有其不能泄露的商业秘密。目前数字孪生的安全性主要从CPS的安全性延伸而来,与自身特点仍有一些出入,需要根据数字孪生自身的特点来完善安全性法规。数字孪生的安全性要求主要体现在如何防止数字孪生体被盗用或篡改,如何在孪生体被窃取时,将实物实体受到的损失降到最低,以及大规模数字孪生网络的防护问题。区块链技术是去中心化的,具有很强安全性的技术,如何将区块链技术和数字孪生技术结合起来,完善数字孪生网络的安全性将是未来的重要研究

方向。

(3) 提高数字孪生的学习能力。人工智能技术为机器人赋予智能，赋予学习能力，在智能赋能下，机器人在军事、家居、助老、医疗等领域的发挥的作用越来越大。为数字孪生赋予智能，不仅是扩大其应用领域的要求，也是以动态数据驱动的数字孪生应有之义。如何自主地清洗数据、准确地分析数据、高效地应用数据，是增强数据这个原动力所需要解决的问题。目前基于随机有限集、深度学习、机器学习等方法的数字孪生已有一定的发展，未来需要沿着这个发展方向进一步提升智能算法和数字孪生的融合程度。

5.3 平行系统的未来发展

平行系统在CPS的基础上，将社会信息也加入其中，形成了社会信息物理系统(cyber-physical-social systems, CPSS)，其研究仍然处于初级阶段，在平行感知、平行学习、平行控制、平行区块链和并行测试领域仍然需要更深入的研究^[76]。平行系统的发展方向如图9所示。

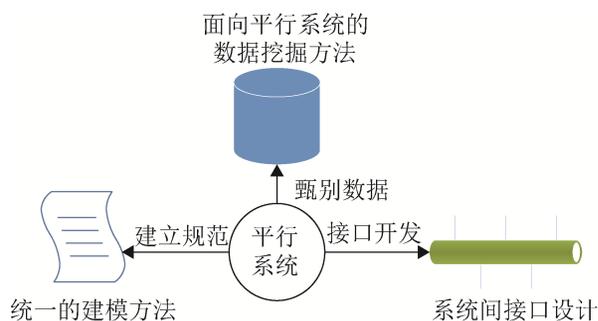


图9 平行系统的发展方向

Fig. 9 Development direction of parallel system

(1) 平行系统的统一的建模方法。平行系统与数字孪生都处于技术发展的早期，模型、方法、规范都不够明晰，但模型是系统设计的前提工作。因此，完善平行系统的建模方法是未来必须要进行的工作。目前采用语义系统描述的平行系统模型，存在模型粗糙，难以直接使用的问题，针对不同的应用场景需要对模型进行大量地完善，可

重用性不好。未来需要发掘面向不同场景的平行系统建模中的相同点，以提高平行系统模型的可重用性。

(2) 面向平行系统的数据挖掘方法。平行系统通过已有的，准确的“小数据”来搭建系统，并产生用于预测和决策的“大数据”。这种方式对作为“本源”的小数据的准确性要求很高。当源数据失之毫厘时，产生出来的结果可能差之千里。基于更优秀的硬件和更智能的算法的平行感知技术，是为平行系统筛选数据的重要技术领域。由此，制造性能更为优越的硬件与完善硬件组成的网络是未来平行感知发展的方向之一，其中就涉及到了嵌入式技术、通信技术、计算机技术等。

先进的数据挖掘算法，则是使这些数据得到充分运用的保障。基于机器学习、强化学习的数据挖掘方法可以有效提取低价值密度数据中的有用信息，但也存在无法综合考虑系统状态和信息的缺陷。基于一些特殊问题，比如交通信息提取，较为广泛地采用基于自然语言处理文本数据的方式进行^[77]。因此，改良机器学习和强化学习方法，使之更适合平行感知，以及为不同领域设计更贴合的数据挖掘方法，是未来的发展方向。

(3) 系统间的接口设计。LVC需要将真实、虚拟和构造系统融合到一个系统中，而平行系统则需要将感知、学习、服务融合到一个系统中，不同系统之间的数据接口该如何规范化设计、面向不同应用场景的数据结构、针对平行系统的数据特点设计通信协议是未来在平行系统互联互通方面需要努力的技术领域。

6 结论

本文首先总结了近年来虚实结合相关技术的发展情况以及在军事领域的应用，分别阐述了LVC、数字孪生、平行系统的概念、关键技术和应用方式。通过对比，探讨了虚实结合三种主要技术的各自特点和联系。虚实结合技术是计算机技术充分发展后的产物，也必将随着计算机技术

的进一步发展而更加完善。军事领域作为人类斗争最为激烈的领域,是所有新技术的最佳试验田,在可以预见的将来,虚实结合技术也必将在军事领域扎根生长。

虚拟系统从LVC中对现实系统的补充,到数字孪生中作为现实系统在虚拟空间中的存在,再发展到平行系统中与现实系统平行存在,互相指导的关系,从LVC到数字孪生再到平行系统,系统的复杂度呈明显的上升趋势。

相比于较为成熟的LVC技术,数字孪生与平行系统仍然处于发展的初级阶段,目前已经成功实现并大规模应用的技术并不多,很多方面的应用仍然处于构想层面。相比于LVC和数字孪生,平行系统更加适合未来人类社会的发展,也更适合在军事领域进行战术战法创新、武器装备建设、作战模式探讨等。平行系统是一个充满可能性的复杂系统,它不仅包含系统中的各个元素,也包含元素之间的相互关系,更能在动态演变中不断完善这些相互关系,并涌现出新的知识,必将成为未来人类社会和军事体系评估预测的发展方向。

参考文献:

- [1] 文浪. 无人机飞控地面半实物仿真平台研究与设计[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
Wen Lang. Research and Design of UAV Flight Control Ground Hardware in the Loop Simulation Platform[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [2] 庞维建, 李辉. LVC仿真集成技术发展趋势研究[C]//第三十三届中国仿真大会论文集. 北京: 中国仿真学会, 2021: 32-36.
- [3] 刘瑜, 谢强. 数字孪生的技术特点及在飞行试验中的应用展望[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1364-1373.
Liu Yu, Xie Qiang. Technical Characteristics of Digital Twins and Application Prospects in the Field of Flight Testing[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1364-1373.
- [4] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514.
Wang Feiyue. Parallel System Methods for Management and Control of Complex Systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [5] 邓能文. 基于虚实结合的互联互通测试平台搭建方案[J]. 科技创新与应用, 2020(4): 118-119.
- [6] 周进登, 宋健, 刘影, 等. 美军LVC建设梳理及对我军仿真建设的启发[J]. 网信军民融合, 2020(8): 45-48.
- [7] M A Fernández-Villacañas Marín. Beyond the Use of Simulators for the Training of Security and Defence Forces: New Challenges in Modeling & Simulation of Emerging Holistic Systems for Combat Air Forces[C]//15th International Technology, Education and Development Conference. Valencia, Spain: IATED, 2021: 8528-8537.
- [8] 王晓路, 贾长伟, 刘闻, 等. 体系级LVC仿真集成技术研究[C]//2020中国仿真大会论文集. 北京: 中国仿真学会, 2020: 358-364.
- [9] 冯琦琦, 董志明, 贾长伟, 等. 面向LVC仿真的多层分级时间管理方法研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(12): 1-4, 11.
Feng Qiqi, Dong Zhiming, Jia Changwei, et al. Research on Multi-level Time Management Method for LVC Simulation[J]. Computer Simulation, 2020, 37(12): 1-4, 11.
- [10] 张衡. 基于DDS的LVC实时互联及变步长仿真技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
Zhang Heng. Research on LVC Real-time Integration and Variable Step Simulation Based on DDS[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [11] 杜楠, 谭亚新. 面向SaaS的LVC仿真试验中间件设计研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1268-1276.
Du Nan, Tan Yaxin. Design of LVC Simulation Test Middleware for SaaS[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(6): 1268-1276.
- [12] 李超, 朱宁, 吴正雄, 等. 基于LVC仿真的资源描述方法与规范研究[C]//2020中国系统仿真与虚拟现实技术高层论坛论文集. 北京: 中国自动化学会专家咨询工作委员会, 中国计算机系统仿真应用工作委员会, 中国仪器仪表学会产品信息委员会, 北京国信融合信息技术研究院, 2020: 215-219.
- [13] 高昂, 董志明, 张国辉, 等. LVC训练系统中计算机生成兵力生成技术研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(3): 745-752.
Gao Ang, Dong Zhiming, Zhang Guohui, et al. Research on Generation Technology of Computer Generated Force in LVC Training System[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 745-752.
- [14] 高昂, 董志明, 郭齐胜, 等. 陆军分队LVC战术训练虚实实体配置研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 982-994.
Gao Ang, Dong Zhiming, Guo Qisheng, et al. Study on Virtual and Real Entity Configuration of Army Units LVC Tactical Training[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 982-994.

- [15] Källström J, Granlund R, Heintz F. Design of Simulation-based Pilot Training Systems Using Machine Learning Agents[J]. *The Aeronautical Journal*, 2022, 126(1300): 907-931.
- [16] 高昂, 董志明, 李亮, 等. 面向LVC训练的蓝方虚拟实体近距空战决策建模[J]. *系统工程与电子技术*, 2021, 43(6): 1606-1617.
Gao Ang, Dong Zhiming, Li Liang, et al. Decision Modeling of Close-range Air Combat for LVC Training in Blue-side Virtual Entity[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(6): 1606-1617.
- [17] 白爽, 洪俊. 美军面向LVC联合训练的技术发展[J]. *指挥控制与仿真*, 2020, 42(5): 135-140.
Bai Shuang, Hong Jun. Development of U.S. LVC Joint Training Technology[J]. *Command Control & Simulation*, 2020, 42(5): 135-140.
- [18] Gao Yang, Zhang Yuanyuan, Zhou Xiaoguang, et al. Overview of Simulation Architectures Supporting Live Virtual Constructive (LVC) Integrated Training[C]//2021 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 333-338.
- [19] 李进, 吉宁, 刘小荷, 等. 美军新一代支持联合训练的JLVC2020框架研究[J]. *计算机仿真*, 2015, 32(1): 463-467.
Li Jin, Ji Ning, Liu Xiaohe, et al. Study of JLVC2020's Framework for U.S. New Generation Joint Training[J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(1): 463-467.
- [20] 吴金平, 陆铭华, 薛昌友. 潜艇作战系统LVC一体化仿真设计与引擎实现[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(7): 1647-1653.
Wu Jinping, Lu Minghua, Xue Changyou. Design and Engine Implementation of Submarine Combat System Simulation Based on LVC[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(7): 1647-1653.
- [21] 徐强, 金振中, 杨继坤. 基于LVC的水面舰艇作战试验环境构设研究[J]. *舰船电子工程*, 2021, 41(9): 157-160.
Xu Qiang, Jin Zhenzhong, Yang Jikun. Research on the Construction of Operational Test Environment for Warships Based on LVC[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41(9): 157-160.
- [22] 杨晓岚, 陈鼻, 张翠侠, 等. 基于LVC的试验鉴定支撑平台构建方法研究[C]//第六届中国指挥控制大会论文集(上册). 北京: 电子工业出版社, 2018: 534-536.
- [23] Chen Minze, Yang Rui, Tao Zhenxiang, et al. Mixed Reality LVC Simulation: A New Approach to Study Pedestrian Behaviour[J]. *Building and Environment*, 2022, 207, Part B: 108404.
- [24] Lee D, Kim D, Ahn M K, et al. Cy-through: Toward a Cybersecurity Simulation for Supporting Live, Virtual, and Constructive Interoperability[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 10041-10053.
- [25] Pan Bo, Tao Qian, Wang Dong, et al. Secure Data Access and Consensus Algorithm based on Consortium Blockchain in LVC[C]//2021 International Conference on Computer, Blockchain and Financial Development (CBFD). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 185-189.
- [26] Liao Min, Renaud G, Bombardier Y. Airframe Digital Twin Technology Adaptability Assessment and Technology Demonstration[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 225: 106793.
- [27] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al. Digital Twin and Its Potential Application Exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18.
- [28] Errandonea I, Sergio Beltrán, Arrizabalaga S. Digital Twin for Maintenance: A Literature Review[J]. *Computers in Industry*, 2020, 123: 103316.
- [29] Liu Jianmin, Dong Yi, Liu Yanbin, et al. Prediction Study of the Heavy Vehicle Driving State Based on Digital Twin Model[C]//2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 789-797.
- [30] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [31] 王鹏, 杨妹, 祝建成, 等. 面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(12): 2779-2786.
Wang Peng, Yang Mei, Zhu Jiancheng, et al. Dynamic Data Driven Modeling and Simulation Method for Digital Twin[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(12): 2779-2786.
- [32] Malek N G, Tayefeh M, Bender D, et al. LIVE Digital Twin for Smart Maintenance in Structural Systems[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2021, 54(1): 1047-1052.
- [33] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(10): 2405-2418.
Tao Fei, Ma Xin, Hu Tianliang, et al. Research on Digital Twin Standard System[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2405-2418.
- [34] 张辰源, 陶飞. 数字孪生模型评价指标体系[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(8): 2171-2186.
Zhang Chenyuan, Tao Fei. Evaluation Index System for

- Digital Twin Model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(8): 2171-2186.
- [35] Juarez M G, Botti V J, Giret A S. Digital Twins: Review and Challenges[J]. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2021, 21(3): 030802.
- [36] 张佳朋, 刘检华, 龚康, 等. 基于数字孪生的航天器装配质量监控与预测技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 605-616.
- Zhang Jiapeng, Liu Jianhua, Gong Kang, et al. Spacecraft Assembly Quality Control and Prediction Technology Based on Digital Twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 605-616.
- [37] 李洪阳, 魏慕恒, 黄洁, 等. 信息物理系统技术综述[J]. *自动化学报*, 2019, 45(1): 37-50.
- Li Hongyang, Wei Muheng, Huang Jie, et al. Survey on Cyber-physical Systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1): 37-50.
- [38] 阴鹏艳. 美国防部首份《增材制造战略》解析[N]. *中国航空报*, 2021-03-16(A11).
- [39] Holmes D, Papanthanasaki M, Maglaras L, et al. Digital Twins and Cyber Security-solution or Challenge? [C]// 2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-8.
- [40] Mendi A F, Erol T, Dilara Doğan. Digital Twin in the Military Field[J]. *IEEE Internet Computing*, 2022, 26(5): 33-40.
- [41] Wang Peng, Yang Mei, Zhu Jiancheng, et al. Digital Twin-enabled Online Battlefield Learning with Random Finite Sets[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021, 2021: 5582241.
- [42] Shen Gaoqing, Lei Lei, Li Zhilin, et al. Deep Reinforcement Learning for Flocking Motion of Multi-UAV Systems: Learn from a Digital Twin[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(13): 11141-11153.
- [43] Lee E B K, Douglas L Van Bossuyt, Bickford J F. Digital Twin-enabled Decision Support in Mission Engineering and Route Planning[J]. *Systems*, 2021, 9(4): 82.
- [44] Ji Guang, Hao Jianguo, Gao Jialong, et al. Digital Twin Modeling Method for Individual Combat Quadrotor UAV [C]//2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-4.
- [45] 邓焯, 奉祁林, 赵健. 数字孪生战场建设探讨[J]. *防护工程*, 2020, 42(3): 58-64.
- Deng Ye, Feng Qilin, Zhao Jian. Discussion on Construction of Digital Twin Battlefield[J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(3): 58-64.
- [46] 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.
- [47] Wang Danshi, Zhang Zhiguo, Zhang Min, et al. The Role of Digital Twin in Optical Communication: Fault Management, Hardware Configuration, and Transmission Simulation[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2021, 59(1): 133-139.
- [48] 郑伟皓, 周星宇, 吴虹坪, 等. 基于三维GIS技术的公路交通数字孪生系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(1): 28-39.
- Zheng Weihao, Zhou Xingyu, Wu Hongping, et al. Digital Twin System for Highway Traffic Based on 3D GIS Technology[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(1): 28-39.
- [49] 陶飞, 张辰源, 张贺, 等. 未来装备探索:数字孪生装备[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(1): 1-16.
- Tao Fei, Zhang Chenyuan, Zhang He, et al. Future Equipment Exploration: Digital Twin Equipment[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(1): 1-16.
- [50] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星:概念、关键技术及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2020, 26(3): 565-588.
- Liu Weiran, Tao Fei, Cheng Jiangfeng, et al. Digital Twin Satellite: Concept, Key Technologies and Applications [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2020, 26(3): 565-588.
- [51] 军事文摘. 美国测试虚拟"宙斯盾"反导和反舰能力[N]. *国防时报*, 2021-07-21(11).
- [52] 张敏. 美军打造虚拟宙斯盾系统[J]. *军事文摘*, 2018(5): 39-41.
- [53] Karve P M, Guo Yulin, Kapusuzoglu B, et al. Digital Twin Approach for Damage-tolerant Mission Planning Under Uncertainty[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 225: 106766.
- [54] 郭域峰, 柴震, 陈敏. 基于ACP方法的战略态势信息融合平行系统研究[C]//第六届中国指挥控制大会论文集(上册). 北京: 电子工业出版社, 2018: 468-472.
- [55] 张俊, 许沛东, 王飞跃. 平行系统和数字孪生的一种数据驱动形式表示及计算框架[J]. *自动化学报*, 2020, 46(7): 1346-1356.
- Zhang Jun, Xu Peidong, Wang Feiyue. Parallel Systems and Digital Twins: A Data-driven Mathematical Representation and Computational Framework[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1346-1356.
- [56] 袁勇, 王飞跃. 平行区块链:概念、方法与内涵解析[J]. *自动化学报*, 2017, 43(10): 1703-1712.

- Yuan Yong, Wang Feiyue. Parallel Blockchain: Concept, Methods and Issues[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(10): 1703-1712.
- [57] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- Yang Linyao, Chen Siyuan, Wang Xiao, et al. Digital Twins and Parallel Systems: State of the Art, Comparisons and Prospect[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [58] Zhu Fenghua, Lü Yisheng, Chen Yuanyuan, et al. Parallel Transportation Systems: Toward IoT-enabled Smart Urban Traffic Control and Management[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(10): 4063-4071.
- [59] Almalaq A, Hao Jun, Zhang Jun, et al. Parallel Building: A Complex System Approach for Smart Building Energy Management[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(6): 1452-1461.
- [60] Huang Tianyi, Zhu W. Long-term Recommender System Based on ACP Framework[C]//2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 216-218.
- [61] Wang Shuai, Tu Xiaojun, Chai Hongfeng, et al. Blockchain-powered Parallel FinTech Regulatory Sandbox Based on the ACP Approach[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(5): 863-867.
- [62] Gong Linjuan, Hou Guolian, Gu Hongqun, et al. Parallel Control of Supercritical Thermal Power Unit Based on the ACP Method[C]//2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-4.
- [63] Li Shimeng, Wang Yutong, Wang Xiao, et al. Mechanical Design Paradigm Based on ACP Method in Parallel Manufacturing[C]//2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-4.
- [64] 袁利, 程铭, 王磊. 航天器飞行控制仿真与平行系统[J]. *宇航学报*, 2021, 42(8): 982-988.
- Yuan Li, Cheng Ming, Wang Lei. Spacecraft Flight Control Simulation and Parallel Systems[J]. *Journal of Astronautics*, 2021, 42(8): 982-988.
- [65] 黄文德, 贺达江, 米贤武, 等. 一种基于平行系统的大型复杂天基组网星座自主运行框架[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(17): 14-18.
- Huang Wende, He Dajiang, Mi Xianwu, et al. Framework for Autonomous Operation of Large Complex Space-based Network Constellation Based on Parallel Systems[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(17): 14-18.
- [66] 谢堂涛, 易方, 梅光焜. 平行系统理论在体系对抗训练中的应用初探[J]. *现代防御技术*, 2020, 48(1): 100-106.
- Xie Tangtao, Yi Fang, Mei Guangkun. Preliminary Exploration on Application of Parallel System Theory in Systemic Confrontation Training[J]. *Modern Defence Technology*, 2020, 48(1): 100-106.
- [67] 杜晓明, 王晓, 韩双双, 等. 一种能效最大化的一体化观测网络任务调度优化方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(6): 1547-1555.
- Du Xiaoming, Wang Xiao, Han Shuangshuang, et al. Task Scheduling and Optimization for Integrated Observation Network With Maximum Energy Utilization Efficiency[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2021, 41(6): 1547-1555.
- [68] 苏振东, 杨瑞平, 王飞跃. 海洋环境监测平行系统优化融合[J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(1): 170-175.
- Su Zhendong, Yang Ruiping, Wang Feiyue. Optimum Fusion of Marine Environment Monitoring Parallel System[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(1): 170-175.
- [69] 刘爽. 基于免疫克隆和自适应蚁群的无人机协同规划平行系统[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- Liu Shuang. Collaborative Planning Parallel System of UAVs Based on Immune Clone and Adaptive Ant Colony [D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [70] 许瑞明. 无人机集群智能的生成样式研究[J]. *现代防御技术*, 2020, 48(5): 44-49.
- Xu Ruiming. Research on Generation Style of UAV Cluster Intelligence[J]. *Modern Defence Technology*, 2020, 48(5): 44-49.
- [71] 王晓, 韩双双, 杨林瑶, 等. 基于ACP的动态网民群体运动组织建模与计算实验研究[J]. *自动化学报*, 2020, 46(4): 653-669.
- Wang Xiao, Han Shuangshuang, Yang Linyao, et al. The Research on ACP-based Modeling and Computational Experiment for Cyber Movement Organizations[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(4): 653-669.
- [72] Collins A J, Sabz Ali Pour F, Jordan C A. Past Challenges and the Future of Discrete Event Simulation[J]. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 2023, 20(3): 351-369.
- [73] Hill R R, Tolk A, Hodson D D, et al. Open Challenges in Building Combat Simulation Systems to Support Test, Analysis and Training[C]//2018 Winter Simulation Conference (WSC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 3730-3741.
- [74] Lee K, Lee G, Rabelo L. A Systematic Review of the

- Multi-resolution Modeling (MRM) for Integration of Live, Virtual, and Constructive Systems[J]. Information, 2020, 11(10): 480.
- [75] Xu Chenren, Jiang Shuang, Luo Guojie, et al. The Case for FPGA-based Edge Computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(7): 2610-2619.
- [76] Wang Xiao, Han Shuangshuang, Yang Linyao, et al. Parallel Internet of Vehicles: ACP-based System Architecture and Behavioral Modeling[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 3735-3746.
- [77] 刘丽艳. 大规模城市交通数据的语义挖掘与可视化[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2021.
- Liu Liyan. Semantic Mining and Visualization of Large-scale Urban Traffic Data[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2021.