

12-30-2023

Development of Several Typical Virtual Reality Fusion Technologies

Qiqi Feng

Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China; PLA 32290 Troops, Ji'nan 250002, China, 594472717@qq.com

Zhiming Dong

Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China, dong_zhiming@163.com

Wencheng Peng

Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China

Yi Dai

Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, 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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Development of Several Typical Virtual Reality Fusion Technologies

Abstract

Abstract: Virtual reality fusion can realize the two-way interaction, mapping and linkage between virtual world and physical world, which attracts the attention of countries in the world. In order to sort out and make statistics on concept connotation, academic status and application of the related new technologies, digital twin, cyber-physical systems, metaverse and live-virtual-constructive simulation are taken as representatives. The comparison on the development process, functional characteristics, target trends, etc. is carried out.

Keywords

digital twin, cyber-physical systems, metaverse, LVC simulation, virtual reality fusion

Authors

Qiqi Feng, Zhiming Dong, Wencheng Peng, Yi Dai, and Bingshan Si

Recommended Citation

Feng Qiqi, Dong Zhiming, Peng Wencheng, et al. Development of Several Typical Virtual Reality Fusion Technologies[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2497-2511.

几种典型的虚实融合技术发展研究

冯琦琦^{1,2}, 董志明^{1*}, 彭文成¹, 戴翊¹, 司炳山¹

(1. 陆军装甲兵学院, 北京 100072; 2. 中国人民解放军 32290 部队, 山东 济南 250002)

摘要: 虚实融合是实现虚拟世界与物理世界双向交互、映射联动的一种方式, 成为当前各国关注的热点。为理清该框架下层出不穷的新技术状况, 以数字孪生、信息物理系统、元宇宙和实况-虚拟-构造仿真为代表, 围绕各自概念内涵、学术现状、应用情况进行梳理统计; 并从它们的发展进程、功能特点、目标趋势等方面做了对比。

关键词: 数字孪生; 信息物理系统; 元宇宙; LVC 仿真; 虚实融合

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2023)12-2497-15

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0793

引用格式: 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]. 系统仿真学报, 2023, 35(12): 2497-2511.

Reference format: Feng Qiqi, Dong Zhiming, Peng Wencheng, et al. Development of Several Typical Virtual Reality Fusion Technologies[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(12): 2497-2511.

Development of Several Typical Virtual Reality Fusion Technologies

Feng Qiqi^{1,2}, Dong Zhiming^{1*}, Peng Wencheng¹, Dai Yi¹, Si Bingshan¹

(1. Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China; 2. PLA 32290 Troops, Ji'nan 250002, China)

Abstract: Virtual reality fusion can realize the two-way interaction, mapping and linkage between virtual world and physical world, which attracts the attention of countries in the world. In order to sort out and make statistics on concept connotation, academic status and application of the related new technologies, digital twin, cyber-physical systems, metaverse and live-virtual-constructive simulation are taken as representatives. The comparison on the development process, functional characteristics, target trends, etc. is carried out.

Keywords: digital twin; cyber-physical systems; metaverse; LVC simulation; virtual reality fusion

0 引言

虚拟世界广义上是指借助计算机、互联网等载体打造的数字信息空间。现代科技的日新月异不仅加快了行业间虚实互联的步伐, 而且还促使人类社会朝着网络化、信息化、智能化方向演进, 进而推动了物理世界与虚拟世界的融合共生。在这样的背景下, 一些以数字孪生(DT)、信息物理系统(cyber-

physical-systems, CPS)、元宇宙(Metaverse)、实况-虚拟-构造仿真(LVC)、虚拟现实(VR)等为代表的虚实融合技术蓬勃发展, 并不断应用到城市建设、工业制造、互联网、军事、游戏等领域, 给人们的工作、学习和生活带来了多样化的便利体验^[1-4]。但是, 随着各项技术的不断突破, 它们的内涵被逐渐丰富, 边界变得模糊, 甚至出现交叉。为理清困惑, 本文对数字孪生、信息物理系

收稿日期: 2022-07-08

修回日期: 2022-11-15

基金项目: 全军军事类研究生资助课题(YJ2021C107)

第一作者: 冯琦琦(1992-), 女, 博士生, 研究方向为军用仿真。E-mail: 594472717@qq.com

通讯作者: 董志明(1977-), 男, 教授, 博士, 研究方向为军用仿真。E-mail: dong_zhiming@163.com

统、元宇宙和实况-虚拟-构造仿真4种典型的虚实融合技术进行梳理比较。

1 数字孪生概况

1.1 概念内涵

数字孪生思想诞生于20世纪美国国家航空航天局(NASA)的阿波罗计划,通过构建航天器的孪生体来反映实体在轨状态,辅助航天员处理任务^[1-2]。2003年,密歇根大学的Dr. Michael Grieves在产品生命周期执行课上提出了“等价于物理产品的虚拟化表达”概念^[3-4],被认为是数字孪生确立的标志。之后,他将NASA专家John Vickers建议的“Digital Twin”一词正式写入书中^[5]。

对于数字孪生概念的理解大致分为3类:①从技术角度考虑,认为数字孪生是仿真的进一步应用^[6-7];②从构成维度出发,认为数字孪生是物理对象的虚拟或镜像模型^[5,8-10];③从服务功能定义,认为数字孪生是物理世界/产品系统的数字化手段,此种表述相对宽泛,得到多数人的认可^[11-17]。综上认为,数字孪生是一种实现物理实体在信息空间数字化精确映射的技术,它在数据的驱动下形成的虚拟模型可与物理实体全生命周期过程保持一致。

1.2 学术研究现状统计

(1) 论文发表量及学科分布

在中国知网和Web of Science数据库进行检索,中文检索主题为“数字孪生”“数字孪生体”“数字双胞胎”或“虚拟孪生”,英文检索主题为“digital twin”或“digital twins”,检索时间为2012-01-01—2021-12-31,图1为检索情况。可以看出,数字孪生10年间的总发文量为6 118篇,发文趋势近似指数增长,尤其近5年表现明显,2021年的全年发文量更是首次突破1 000篇,学科研究遍布计算机、信息、自动化、工业、建筑、航空航天等领域。

(2) 相关代表著作

数字孪生读物通常与工程应用紧密结合,国外代表作品有Twin-Control: A Digital Twin Approach to Improve Machine Tools Lifecycle, The Smart City in a Digital World;国内有《数字孪生》《数字孪生实战》《复杂装备系统数字孪生》《数字孪生及车间实践》《数字孪生:数字经济的基础支撑》,部分单位还发布了《数字孪生体技术白皮书2019》《数字孪生应用白皮书(2020)》《数字孪生国防白皮书》《数字孪生技术应用白皮书(2021)》《城市数字孪生标准化白皮书(2022版)》等指导性文件。

(3) 研究机构(学者)及典型会议

组织机构方面,中国工业4.0研究院于2019年发起数字孪生行业组织—数字孪生体联盟(digital twin consortium, DTC)。之后,美国、德国相继成立数字孪生联盟、数字孪生体协会^[18]。学者方面,以北航陶飞、张霖教授为代表的一些专家研究涉及数字孪生概念、模型、理想特征、构建准则等多方面内容^[11,19-26]。会议方面,2017—2021,国内20多所高校机构联合召开了五届“数字孪生与智能制造服务学术会议”,期间中国仿真学会也举办了“数字孪生与智能制造”青年学术沙龙。这些活动对于推动数字孪生的理解传播和应用落地发挥了重要作用。

1.3 发展应用情况分析

近几年,数字孪生技术发展势头强劲,在许多行业建设中发挥了重要作用。西门子整合所有生产系统模型,打造了“虚拟模型+物理资产数据+虚实互联”的闭环数字孪生工厂;福特汽车在此基础上也对全球实体工厂进行了数字化建模,实现线上对线下产品生产运行状态的实时监测。

杭州“城市大脑”、虚拟新加坡平台、多伦多高科技社区、雄安智慧新区、福州滨海新城等数字孪生城市,不仅能优化配置公共资源,还能预测预警突发事件,呈现出动态叠合、安全有序、虚实交融的智慧城市发展新范式^[27-30]。

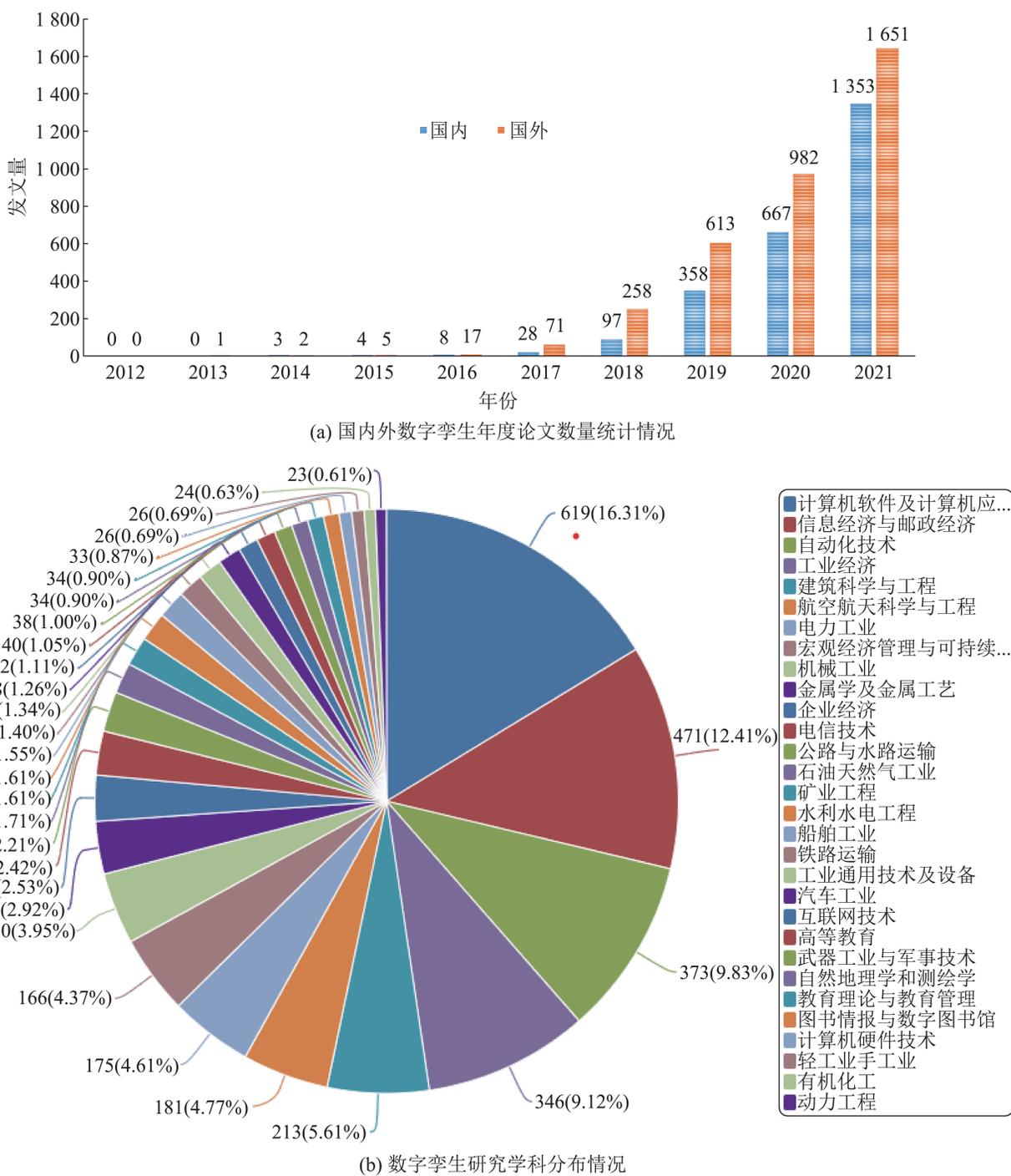


图 1 数字孪生学术研究现状统计分布图

Fig. 1 Statistical distribution map of status quo of digital twin academic research

早期, 美国空军通过数字孪生技术实现对 F-35 战机生产工艺流程的改进和对飞行器的健康管控^[23]; 2019 年, 美国海军完成“虚拟宙斯盾”作战系统的导弹拦截试验, 同年又开发出体系级的数字孪生航母模型“数字林肯”; 2021 年, 美国

空军研究实验室使用虚拟弹药模拟平台演示 Weapon ONE 的数字孪生功能^[31]。这些工作为构建各类武器的虚拟模型奠定了基础。

1.4 小结

从虚实融合角度看, 数字孪生主要表现为虚

拟模型与物理实体间的交互，二者要素映射一致，指标动态同步。对整个物理世界而言，数字孪生要在虚拟空间建立物理空间人、机、物、环境等全部要素对应相同的虚拟实体。对单个物理对象而言，数字孪生不仅能对静态物理实体几何结构进行准确的刻画和描述，而且还能随行为、状态、时间上的变化同步输出与实际相符的结果。

2 信息物理系统概况

2.1 概念内涵

信息物理系统得益于物联网、云计算、大数据等技术的进步与推动^[32]。美国国家科学基金会(national science foundation, NSF)认为传统的信息技术概念无法有效描述嵌入式系统在工业领域的深度应用，需要新的解释来阐述信息空间与物理空间的融合趋势^[33]。于是，NSF的Helen Gill在2006年的研讨会上总结提出了“Cyber-Physical Systems”概念。另有看法认为这一术语最早由NASA提出^[34]，但此观点不如前者在学术界的认可度高。

不同的人对信息物理系统的理解不同，代表观点：CPS是软件和机电系统作用的系统^[35]；CPS是计算过程和物理过程的集成系统^[36]；CPS是网络化物理设备系统^[37]。NSF定义CPS是通过计算核心(嵌入式系统)实现感知、控制、集成的物理、生物和工程系统^[38]。我国国家标准GB/T40021-2021《信息物理系统术语》认为，CPS是通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术，构建的物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的系统^[39]。

2.2 学术研究现状统计

(1) 论文发表量及学科分布

采用与数字孪生相同的检索模式，中文检索主题为“信息物理系统”“信息物理融合系统”“赛博物理系统”或“赛博物理融合系统”，英文检索主题为“cyber-physical systems” or “CPS”，

图2为国内外数据库检索情况。可以看出，CPS论文总体数量巨大，10年累计为26 203篇，国内外发文量差距十分明显，国外年均量约是国内的10倍，受到自动化技术、电力工业、计算机软件及计算机应用、互联网技术、工业经济等领域的重点关注。

(2) 相关代表著作

美国刊发Cyber-Physical Systems Executive Summary, Framework for Cyber-Physical Systems, A 21st Century Cyber-Physical Systems Education等指导性文件，出版书籍Principles of Cyber-Physical Systems, Embedded System Interfacing: Design for the Internet-of-Things(IoT)and Cyber-Physical Systems(CPS), System Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II; 欧盟公布CyPhERS. Cyber-Physical European Roadmap & Strategy; 德国出版Guide to Computing Fundamentals in Cyber-Physical Systems; 国内发布《信息物理系统参考架构》《信息物理系统术语》两项国家标准及《中国制造2025》《信息物理系统白皮书(2017)》《信息物理系统(CPS)典型应用案例集(2019)》《信息物理系统建设指南(2020)》等^[40]。

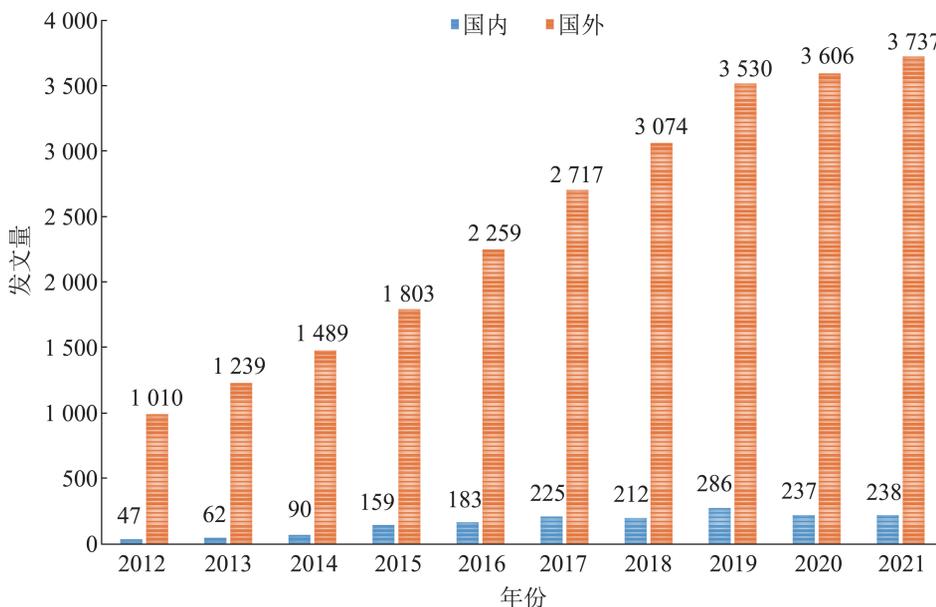
(3) 研究机构(学者)及典型会议

组织机构方面，美国成立了CPS研究指导小组和公共工作组；国内中科院早在2007年就启动了CPS的研究任务^[41]，重庆大学和华中科技大学分别设立信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室、人机物系统与安全实验室。学者方面，国际上以NSF、伯克利工业CPS研究中心、IEEE下属CPS技术委员会三大流派为代表，国内以何积丰、胡权等专家为代表。会议方面包括IEEE CPS-IoT Week、美国“CPS研究中的产业—学术界新型伙伴关系”主题研讨会、清华大学CPS论坛、UCCPS亚洲论坛等。2022年11月，国际电子电气和能源工程协会召开了2022年信息物理系统与物联网国际会议，促进了CPS的进步发展。

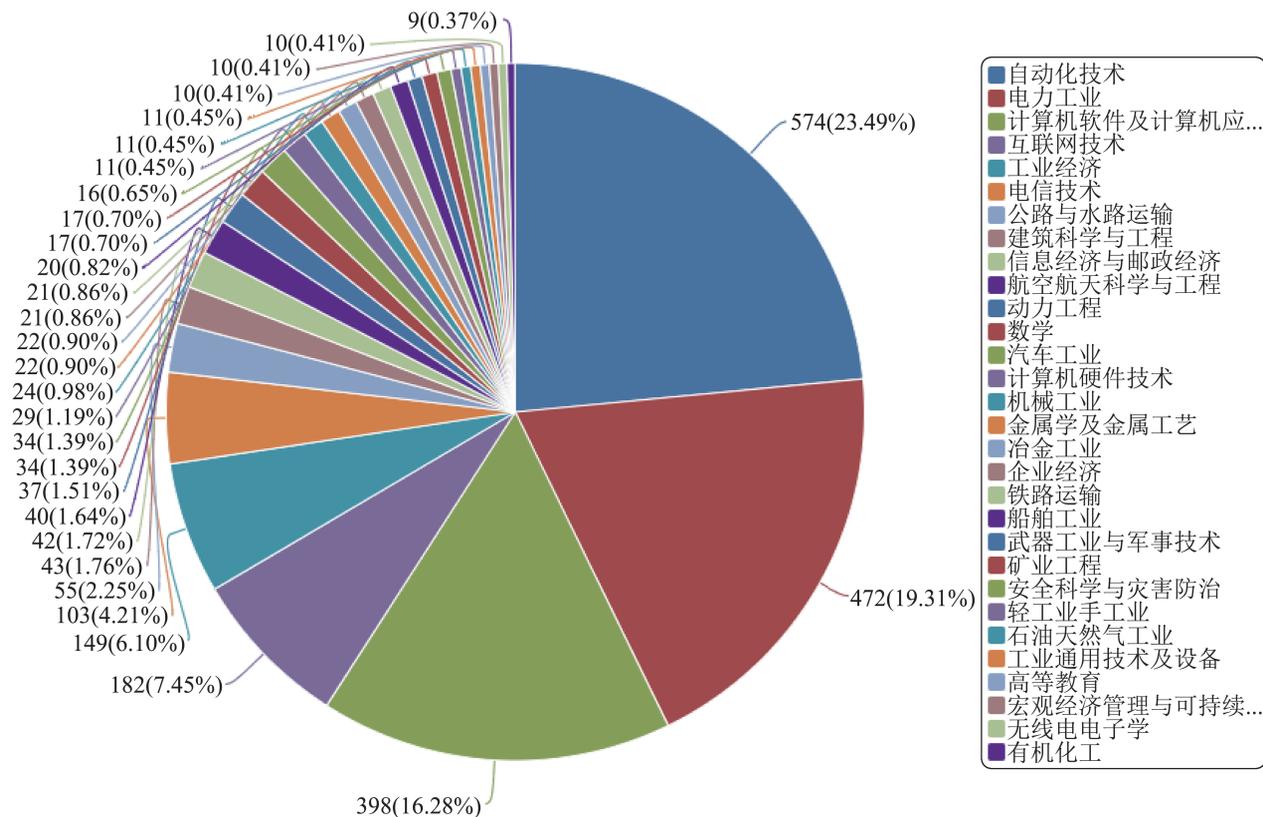
2.3 发展应用情况分析

国内外关于 CPS 的研究大多集中在工业体系较为完善的国家和地区, 形成了单元级、系统级、

体系级的结构层次^[42]。一台可控机床、一组机器人生产线、一个智能工厂都能通过 CPS 较好地实现深度感知、精准控制和最优决策^[43]。



(a) 国内外信息物理系统年度论文数量统计情况



(b) 信息物理系统研究学科分布情况

图2 信息物理系统学术研究现状统计分布图

Fig. 2 Statistical distribution map of status quo of cyber-physical systems academic research

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

• 2501 •

CPS有了更多的外延。德国工业4.0的信息物理融合生产系统(cyber physical production system, CPPS)实现了工业模式由集中式控制到分散式增强控制的转变;中科院王飞跃强调人和社会因素对复杂系统的重要性,提出社会物理信息系统(cyber-physical-social systems, CPSS),现已推广应用在了交通、制造等领域;中国工程院周济面向新一代智能制造提出人-信息-物理系统(human-cyber-physical systems, HCPS),将传统制造过程将从“人-物理系统”二元关系发展为“人-信息-物理系统”三元关系。

此外, CPS还在军事领域衍生出军事信息物理系统(military cyber physical systems, MCPS)。邓苏等设计面向战场资源服务的MCPS体系架构^[44];董志明等突破MCPS端节点多源数据采集与融合分析技术^[45];张博提出智能复合微能源系统用于解决MCPS供能问题^[46];金宏等建立面向远程精确打击服务的MCPS架构及平台^[47];王刚等搭建MCPS武器装备基础信息网络平台^[48]。

2.4 小结

从虚实融合角度看,信息物理系统主要表现为信息系统与物理系统间的交互,二者共生集成迭代演进。由CPS的层次性可知,单个物理设备与感知、计算、通信等信息要素结合能够实现自动控制;多个物理设备通过信息软件能够实现统一管理;不同种类的物理设备/系统融入信息网络能够实现体系优化。以武器装备发展为例,MCPS建立起机械化装备与指挥控制系统、信息化装备之间的连接,有助于推进新老装备的优化重组和协同配合。

3 元宇宙概况

3.1 概念内涵

1992年,美国作家尼尔·斯蒂芬森在其小说《雪崩》里刻画了一个与现实世界平行并立的三维空间称为“Metaverse”^[49]。此后,电影《黑客帝

国》《头号玩家》《失控玩家》等都曾描绘过现实与虚拟交织的新世界景象^[50]。然而,真正让“元宇宙”概念爆火的事件是扎克伯格为打造下一代互联网将“Facebook”软件更名为“Meta”^[51-52]。

当前,人们对于元宇宙的认识各不相同。马化腾称元宇宙是“全真互联网”;阿里巴巴认为元宇宙是“VR/AR眼镜上的整个互联网”^[53];元宇宙是“大规模、可互操作、实时渲染的三维虚拟世界网络”^[54]、“具备永续、开放、自治和沉浸感的通证经济形态”^[55],以及“虚拟世界与现实世界的融合”等观点^[56]。清华大学提出“元宇宙是整合多种新技术而产生的新型虚实相融的互联网应用和社会形态,它基于扩展现实技术提供沉浸式体验,基于数字孪生技术生成现实世界的镜像,基于区块链技术搭建经济体,将虚拟世界与现实世界在经济系统、社交系统、身份系统上密切融合,并且允许每个用户进行内容生产和世界编辑”^[57]。

3.2 学术研究现状统计

(1) 论文发表量及学科分布

采用与数字孪生相同的检索模式,中文检索主题为“元宇宙”,英文检索主题为“Metaverse”,图3为国内外数据库检索情况。早期,国外论文中“Metaverse”代表“二维或三维的虚拟世界”,而国内多指哲学或“多元宇宙”,与论文含义不同未列入统计。可以看出,国内从2021年才真正开始研究元宇宙,仅一年发文量就超过500篇,相关话题引发了计算机、新闻传媒、经济、教育、游戏、建筑等多个领域的热烈讨论。

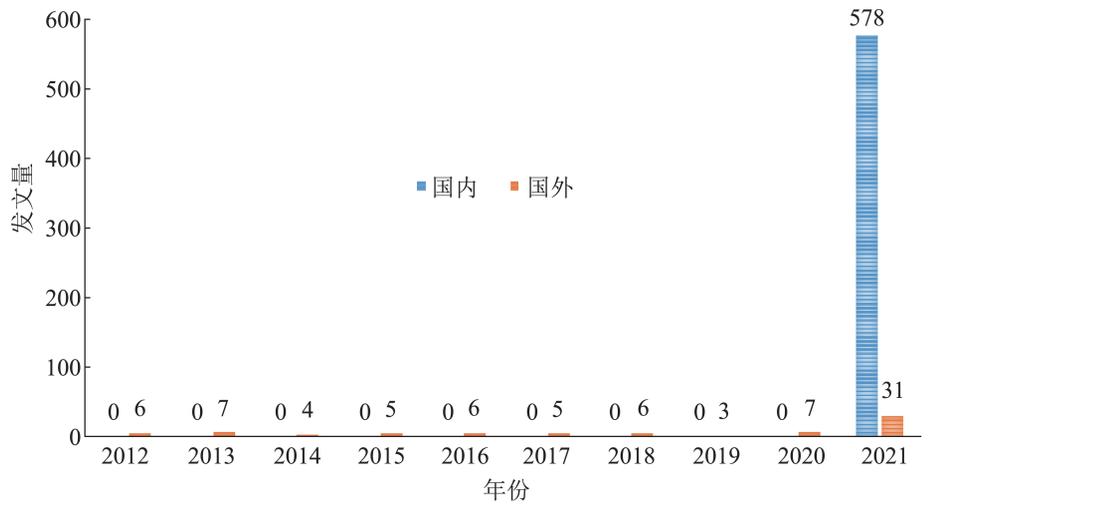
(2) 相关代表著作

韩国出版《极简元宇宙》《元宇宙指南》《元宇宙时代》;国内刊发《元宇宙与数字经济》《元宇宙:图说元宇宙》《元宇宙:设计元宇宙》《元宇宙基石:Web3.0与分布式存储》《元宇宙》《元宇宙通证》《元宇宙大投资》《2020—2021年元宇宙发展研究报告》《上海市信息产业发展“十四五”规划》等书籍文件,影响力较高。

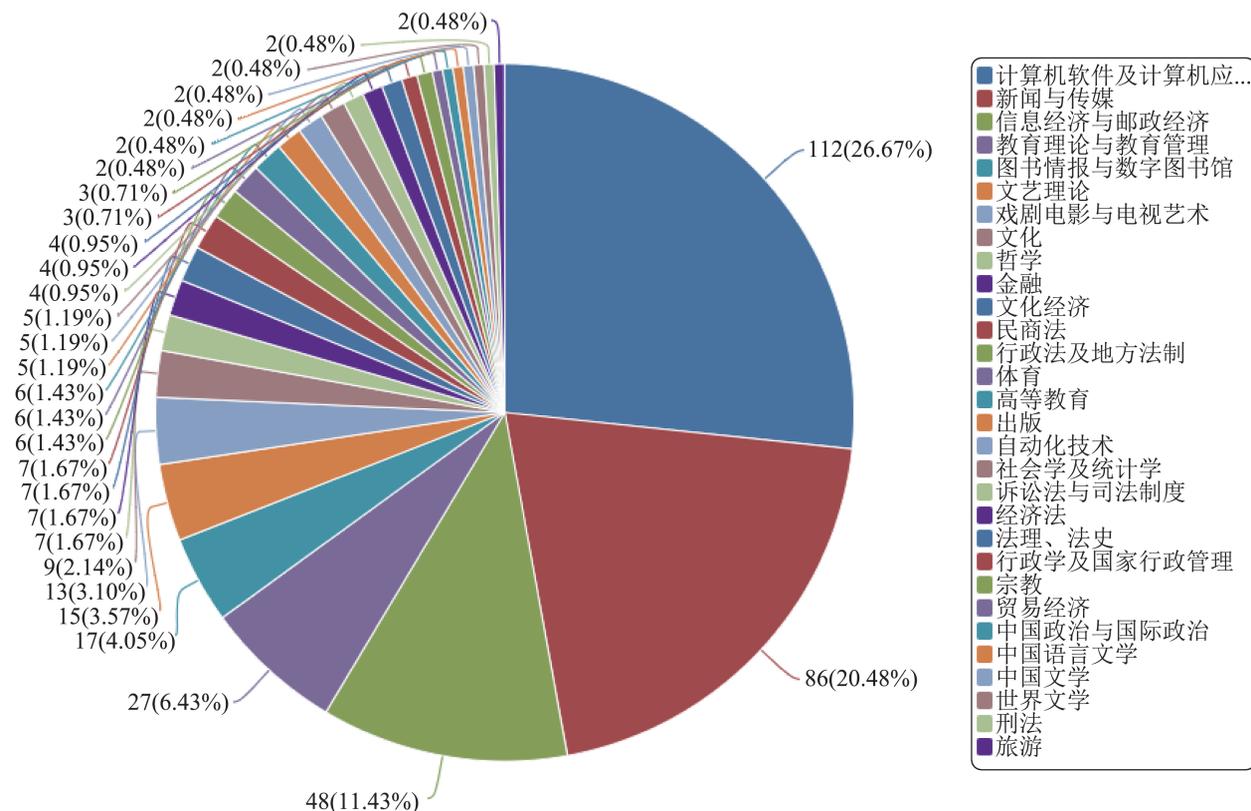
(3) 研究机构(学者)及典型会议

组织机构方面, 国内成立了元宇宙工作委员会、新华社元宇宙联创中心、中国移动通信联合会元宇宙产业委员会、中国仿真学会元宇宙专业委员会等。会议方面, 国际召开澳大利亚虚拟现

实和智能系统国际会议、法国拉瓦尔虚拟大会、美国 Immerse 全球峰会等; 国内组织“洞见元宇宙, 数字新空间”WMC2022世界元宇宙大会, 搭建交流互动和体验平台。



(a) 国内外元宇宙年度论文数量统计情况



(b) 元宇宙研究学科分布情况

图 3 元宇宙学术研究现状统计分布图

Fig. 3 Statistical distribution map of status quo of metaverse academic research

3.3 发展应用情况分析

许多企业正成为这一新兴行业的重要参与方、投资人和有力竞争者。2021 年, 美国游戏社交平台 Roblox 顶着“元宇宙第一股”的称号在纽约成功上市^[58], 超过 500 万的开发者在 Roblox 上参与创作和分享。Meta 研发出“气动触觉手套”, 可让用户体验到抓取虚拟物体的真实触感^[59]。微软推出更加沉浸、多元、个性化的新一代虚拟办公空间 Mesh for Microsoft Teams。

国内, 字节跳动开展元宇宙多方布局, 包括投资元宇宙概念公司和虚拟人“李未可”、收购 VR 和游戏公司、上线聊天互动 APP“派对岛”等^[60]。腾讯成为 Roblox 中国发行方, 推出产品《罗布乐思》, 申请注册“逆战元宇宙”“腾讯音乐元宇宙”“王者元宇宙”等商标。2022 年 9 月, 南京信息大学以探索智慧教育为目标, 成立元宇宙研究所, 并将“信息工程系”改名为“元宇宙工程系”。

在军事领域, 美国太空军技术与创新主管丽莎·科斯塔认为, 军事元宇宙能用于协同作战、训练、执行等任务, 未来所有军种都将受益于该技术。

3.4 小结

从虚实融合角度看, 元宇宙主要表现为虚拟世界与现实世界的交互, 二者空间边界逐渐模糊。一方面, 元宇宙突出人的参与感和沉浸感, 通过拓展现实、人工智能、脑机接口等手段叠加, 把人在现实世界的活动范围延伸至虚拟世界, 从技术层面联通虚实空间; 另一方面, 在元宇宙中人可以任意切换数字身份, 全方位实现与物理空间一样的娱乐、工作、学习活动, 诸如参加虚拟演唱会、远程办公、线上听课等, 从精神层面打破虚实边界壁垒。

4 实况-虚拟-构造仿真概况

4.1 概念内涵

20 世纪 70 年代初, 单一武器系统仿真无法满足部队高级战术训练的需求, 仿真技术亟需从独

立运行模式向联网交互模式转型。1983 年, 美军的模拟器网络计划(SIMNET)首次完成了异地实装坦克和装甲模拟器的协同作战任务。90 年代末, 美军意识到单纯的计算机模拟容易造成战、训脱节, 又开始倡导实兵、模拟器、构造相结合的理念, 成为 LVC 仿真雏形。后来, 仿真互操作标准组织(simulation interoperability standards organization, SISO)正式明确实况-虚拟-构造仿真为一种常用的模型与仿真分类方法^[61]。

实况-虚拟-构造仿真的概念相对明确, 是指包含实况仿真(L)、虚拟仿真(V)和构造仿真(C)的分布式仿真。其中, L 是实兵在物理环境中操作真实武器装备的活动; V 是实兵在虚拟环境中操作装备模拟器的活动; C 是虚兵在虚拟环境中操作虚拟武器装备的活动。

4.2 学术研究现状统计

(1) 论文发表量及学科分布

采用与数字孪生相同的检索模式, 中文检索主题为“实况-虚拟-构造仿真”“真实-虚拟-构造仿真”“LVC”或“LVC 仿真”, 英文检索主题为“live-virtual-constructive simulation”“live virtual constructive”or“LVC simulation”, 图 4 为国内外检索情况。可以看出, 国内外 LVC 的整体发文量都不多, 总计 229 篇, 研究涉及计算机软件及计算机应用、武器工业与军事技术、军事、电力工业、互联网技术等。

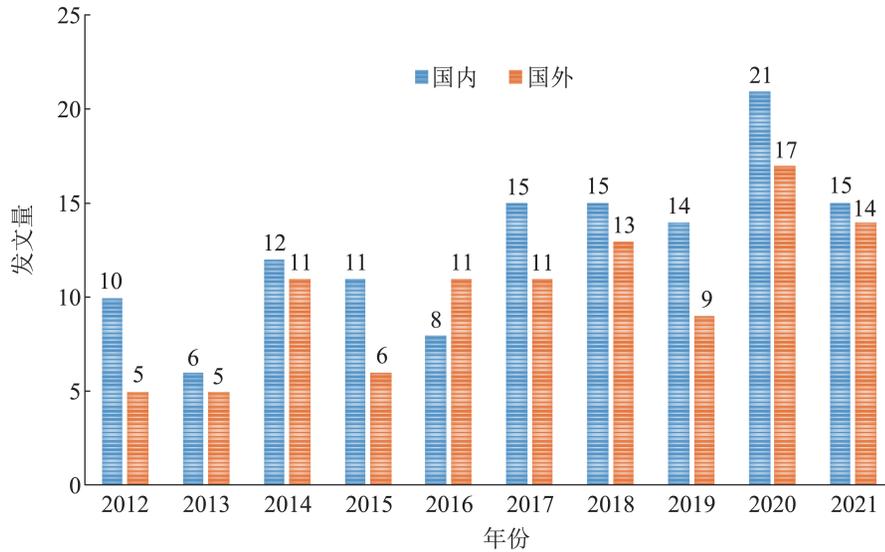
(2) 相关代表著作

IEEE 发布分布式交互仿真标准 1278.1-2012-IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation-Application Protocols, 美国出版了 Cyber Modeling & Simulation(M&S) for Test and Evaluation(T&E), Modeling and Simulation Support for System of Systems Engineering Applications, 国内学者张宏军等将其翻译成《建模与仿真在体系工程中的应用》, 出版《美军作战模拟技术发展与应用调研报告》《系统建模与仿真》《军用建模仿真领域发展报告》。

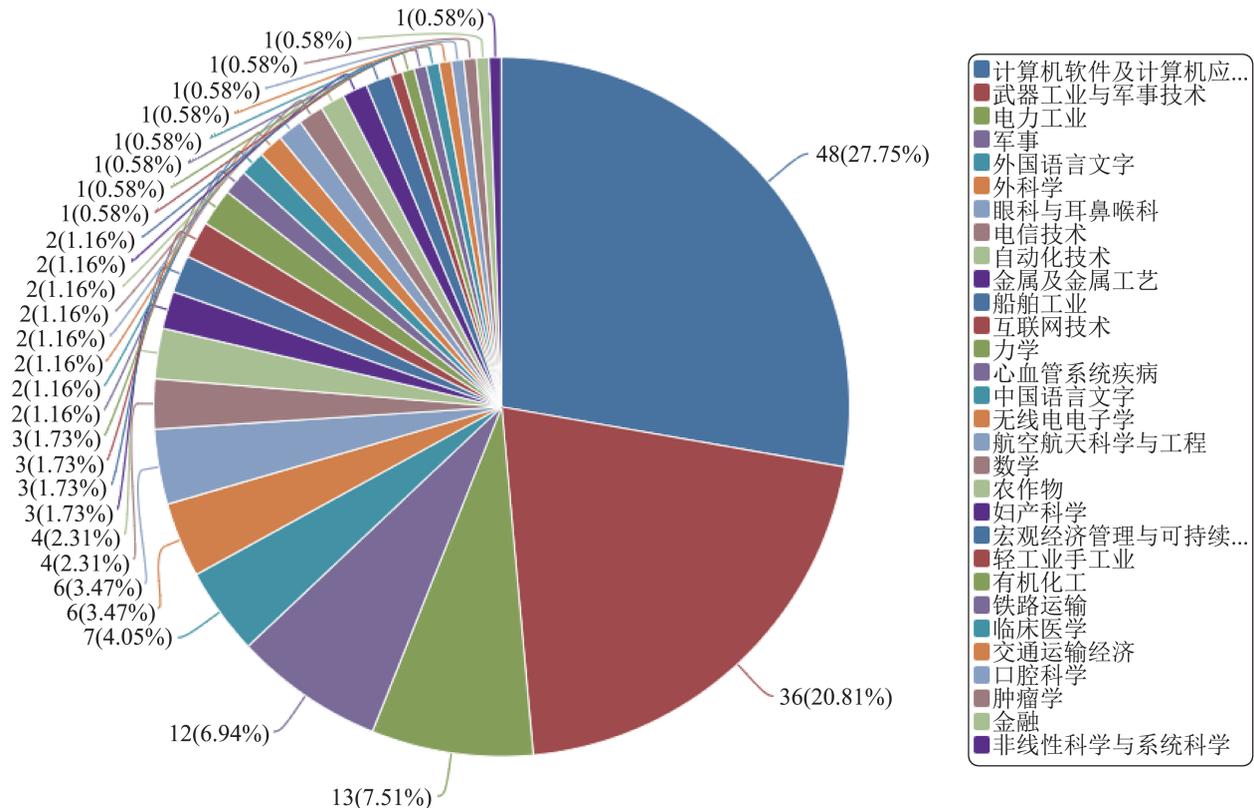
(3) 研究机构(学者)及典型会议

组织机构方面, 美国联合兵力司令部提出 LVC 体系结构路线图, SISO 致力于建模与仿真的互操作性和可重用性, 中国仿真学会促进 LVC 仿

真的普及推广。会议方面, 冬季仿真会议(Winter Simulation Conference)、TSIS、I/ITSEC 论坛、中国仿真大会, 共同为工业界、政府、军方、学校等机构人员提供 LVC 仿真的交流园地。



(a) 国内外LVC仿真年度论文数量统计情况



(b) LVC仿真学术研究现状统计分布情况

图4 LVC仿真学术研究现状统计分布图

Fig. 4 Statistical distribution map of status quo of LVC simulation academic research

4.3 发展应用情况分析

LVC 仿真建设是一个涉及人员、技术、组织和管理复杂系统工程^[62]，国外研制了 SIMNET、DIS、ALSP、HLA、TENA、CTIA、LVC-G、SCARS 等系列框架和标准，率先实现了实装坦克与模拟仿真器组队协同、异构仿真器互联、分布式陆空构造仿真聚合、含实装的异构系统实时互操作等^[63-65]。我国也在 LVC 联合逻辑靶场建设、中间件及平台开发中取得成果^[66]，包括国防科技大学 KD-RTI 和 YH-RTI^[67]、航天机电集团 SSS-RTI、北京航空航天大学 BH RTI/DVE_RTU、浙江大学 CADRTI、西北工业大学 DVTA^[68]、中国运载火箭技术研究院 VITA^[69]、哈尔滨工业大学 HIT-TENA^[70]、北京仿真中心 JOSIM^[71]、陆军装甲兵学院 TISA^[72-73] 及海军导弹综合试验系统等^[74]。

LVC 仿真技术相对成熟，在很多军事活动中发挥了巨大作用。例如，美国空军“红旗 20-1”军演中，75% 的演习由虚拟仿真完成，25% 通过内利斯靶场的实兵和构造仿真系统完成^[75]。美国海军“2021 大规模演习”横跨 17 个时区的多个海域，涉及 36 个实兵部队、50 多个虚拟和构造部队，完成了迄今最大规模的 LVC 试验^[76]。韩国航空航天工业公司开发 LVC 培训系统，已为 16 个国

家的人员提供了集成训练。我国空军也曾多次组织联合防空演练，推进我军 LVC 向实战化发展的进程^[77]。

4.4 小结

从虚实融合角度看，LVC 仿真主要表现为实兵实装、实兵虚装、虚兵虚装彼此间的交互，3 类资源优势结合相互补充。L 中人员、装备、环境资源都是真实的，满足实战化要求，试验训练效果直观具体；V 中人员、装备模拟器资源是真实的，战场环境资源是虚拟的，既保证了真实感，又方便开展对抗训练；C 中人员、装备、环境资源都是虚拟的，组织实施灵活快捷，有助于模拟推演和方案决策。

5 DT、CPS、Metaverse 与 LVC 的比较

从 20 世纪 80 年代的 LVC，到 21 世纪初的 DT 与 CPS，再到 2021 年的 Metaverse，几种虚实融合技术既独立发展，又紧密联系，形成了虚实资源结合互补、虚实实体一致同步、虚实系统深度集成、虚实空间边界消融的多元并存格局。表 1 为 4 种虚实融合技术的对比情况。

表 1 4 种虚实融合技术的对比
Table 1 Comparison of four virtual reality fusion technologies

技术名称	起源时间	发展进程	功能特点	目标趋势
DT	2003 年	普遍适用性强，多应用于军事、工业制造、城市建设等	物理对象实现孪生建模，虚实实体一致同步	全部物理对象的数字化
CPS	2006 年	从理论指导迈向工程实践，持续聚焦工业领域	改变工业运营模式，虚实系统深度集成	万物互联
Metaverse	2021 年 (元年)	初期探索，涉及游戏、娱乐、社交等互联网行业	包含现实世界三维镜像和虚拟新生景象，虚实空间边界消融	建立人类社会的虚拟生存空间
LVC	1983 年	发展成熟，军事领域作战、训练、试验效果显著	满足对抗博弈需求，人、装、环境等虚实资源结合互补	L、V、C 互联互通互操作

从发展进程看，它们经过长期的理论实践已经渗透到社会的方方面面，成为行业数字化转型的重要手段。2011 年，美国空军使用 DT 对飞行器

实施健康管理，为它带来了新的生机，之后因其理论和技术体系具有普遍适用性，便很快传播到工业制造、城市建设、医疗等领域；CPS 自提出

以来, 持续聚焦工业产品质量和加快企业升级, 逐步从科学理论指导迈向了工程实践, 在汽车、航空航天、电力、船舶、国防等领域表现亮眼; Metaverse在新一代信息技术的推动下逐步从科幻小说走进现实, 在人机交互设备方面积累了不少成果, 目前, 初期主要应用于游戏、娱乐、社交等互联网行业; LVC是4种技术中发展最早也最为成熟的, 当前较好地解决了分布跨域军事仿真资源的互联问题, 在LVC集成架构、中间件、仿真平台等方面成果丰硕, 对联合作战、对抗训练和装备试验效果显著。

从功能特点看, 它们共同推动了社会和经济的繁荣, 呈现出交互性、实时性、融合性等明显特征^[78]。DT描述了物理实体在数字空间的孪生建模, 它提供的运转模拟、参数调整、反馈控制等服务能够提高产品的可靠性, 降低物理实体的研发费用与设计风险; CPS集成了信息系统和物理系统的跨域互联, 改变了过去工业的运营模式, 特别是它提供的实时传感与动态监测功能, 可以准确预估出产品故障点, 缩短后期维修时间和费用; Metaverse融合了现实世界的三维镜像和虚拟世界的新生景象, 其代表性衍生物数字藏品引入了版税机制, 不仅帮助创作者持续获得收入, 增添数字市场活力, 还极大地激发了人们对虚拟空间的创作热潮; LVC打造了人、装、环境等虚实资源异构互补的军事体系, 通过大力发展计算机生成兵力、综合仿真环境等, 既满足了对抗双方的博弈需求, 提升作战总体效益, 又节约了人力物力财力。

从目标趋势看, 它们不断加快物理空间与虚拟空间的连接, 力争达到以实驱虚, 以虚控实的效果。DT目标是能够完成全部物理对象的数字化, 追求物理实体与虚拟实体之间信息的闭环反馈, 下一步需要在物理空间数据的准确采集、虚拟空间的综合建模等行业共性问题上寻求突破; CPS目标是达到万物互联, 单一设备的物理过程与计算系统紧密集成, 下一步需要重点关注物理

空间设备组件与信息空间网络协议安全性问题; Metaverse目标是建立人类社会的虚拟生存空间, 人与数字分身能够自由切换生活, 下一步需要提高复杂三维环境仿真能力、海量数据处理能力, 以及高质量动作捕捉能力; LVC目标是L、V、C互联互通互操作, 致力于实现人+机器人+计算机生成兵力、武器+模拟器+虚拟装备的协同作战, 下一步需要改善计算机生成兵力的智能程度、虚拟环境的逼真度, 以及基础设施的灵活度等。

6 结论

本文总结了4种主要的虚实融合技术近10年概况, 分别阐述了数字孪生、信息物理系统、元宇宙和实况-虚拟-构造仿真的概念内涵、学术研究及应用情况。而后通过对比, 探讨了它们在发展进程、功能特点、目标趋势方面的联系与区别。总的来说, 4种技术既不能完全割裂开来, 也不能混为一谈, 本质上是虚实融合在不同阶段、不同场景、不同领域的具体体现。

参考文献:

- [1] 中国电子技术标准化研究院, 树根互联技术有限公司. 数字孪生应用白皮书(2020版)[EB/OL].(2020-11-16)[2022-03-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/J7sD6kplF8HHkBahMZzG4g>.
- [2] 王巍, 刘永生, 廖军, 等. 数字孪生关键技术及体系架构[J]. 邮电设计技术, 2021(8): 10-14.
Wang Wei, Liu Yongsheng, Liao Jun, et al. Key Technology and Architecture of Digital Twin[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(8): 10-14.
- [3] Grieves M W. Product Lifecycle Management: The New Paradigm for Enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1/2): 71-84.
- [4] 张冰, 李欣, 万欣欣. 从数字孪生到数字工程建模仿真迈入新时代[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 369-376.
Zhang Bing, Li Xin, Wan Xinxin. From Digital Twin to Digital Engineering Modeling and Simulation Entering a New Era[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 369-376.
- [5] Grieves M. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management

- [M]. Cocoa Beach, FL: Space Coast Press, 2011.
- [6] Glaessgen E H, Stargel D S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2012: AIAA 2012-1818.
- [7] 王鸿庆, 杨雨辰. 数字孪生|工四100术语(编号308)[EB/OL]. (2016-05-19)[2022-03-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/98xLVNpEC4i8WM7HakCSpA>.
- [8] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 前插1-10.
- [9] 杨尚文, 周中元, 陆凌云. 数字孪生概念与应用[J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(5): 38-42.
Yang Shangwen, Zhou Zhongyuan, Lu Lingyun. Concept and Application of Digital Twin[J]. Command Information System and Technology, 2021, 12(5): 38-42.
- [10] 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.
- [11] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 385-392.
Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and Safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.
- [12] 中国移动通信有限公司研究院, 中移物联网有限公司, 深圳华龙迅达信息技术股份有限公司, 等. 数字孪生技术应用白皮书(2021)[EB/OL]. (2021-12-09)[2022-03-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/einok0T5iwnHEgqiQ2oaZw>.
- [13] 袁野, 曹伟. 数字孪生技术研究[C]//2021年(第九届)中国水利信息化技术论坛论文集. 济南: 河海大学, 山东水利学会, 山东省水利科学研究院, 2021: 1-4.
- [14] 蔡远利, 高鑫, 张渊. 数字孪生技术的概念、方法及应用[C]//第20届中国系统仿真技术及其应用学术年会(20th CCSSTA 2019)论文集. 合肥: 中国自动化学会, 中国系统仿真学会, 2019: 129-133.
- [15] 时培昕. 数字孪生的概念、发展形态和意义[J]. 软件和集成电路, 2018(9): 28-33.
- [16] 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.
- [17] 聂蓉梅, 周潇雅, 肖进, 等. 数字孪生技术综述分析与发展展望[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1): 1-6.
Nie Rongmei, Zhou Xiaoya, Xiao Jin, et al. Analysis and Perspective on Digital Twin Technology[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(1): 1-6.
- [18] 李心悦. 德国为什么成立"工业数字孪生体协会"? [EB/OL]. (2020-10-28) [2022-03-19]. <http://www.innovation4.cn/toutiao/108220-1328811954/>.
- [19] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间—一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
Tao Fei, Zhang Meng, Cheng Jiangfeng, et al. Digital Twin Workshop: A New Paradigm for Future Workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.
- [20] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1-17.
Tao Fei, Zhang He, Qi Qinglin, et al. Ten Questions Towards Digital Twin: Analysis and Thinking[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 1-17.
- [21] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
Tao Fei, Cheng Ying, Cheng Jiangfeng, et al. Theories and Technologies for Cyber-physical Fusion in Digital Twin Shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [22] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
Tao Fei, Zhang He, Qi Qinglin, et al. Theory of Digital Twin Modeling and Its Application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1-15.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Tao Fei, Qi Qinglin, Wang Lihui, et al. Digital Twins and Cyber-physical Systems Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison[J]. Engineering, 2019, 5(4): 653-661.

- [27] 佟林杰, 牛朝文. 基于数字孪生的智慧城市建设研究[J]. 四川行政学院学报, 2021(5): 18-26.
Tong Linjie, Niu Chaowen. Research on the Construction of Smart Cities Based on Digital Twin[J]. Journal of Sichuan Administration Institute, 2021(5): 18-26.
- [28] Mohammadi N, Taylor J E. Smart City Digital Twins[C]// 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [29] 王筱卉, 蔡宸青, 宋凯. 数字孪生: 支撑新型智慧城市转型升级[J]. 城乡建设, 2022(6): 51-53.
- [30] 毛子骏, 黄膺旭. 数字孪生城市: 赋能城市"全周期管理"的新思路[J]. 电子政务, 2021(8): 67-79.
- [31] 中国信息物理系统发展论坛. 信息物理系统白皮书(2017)[EB/OL]. (2017-03-01)[2022-03-20]. <http://www.cesi.cn/uploads/soft/170302/1-1F3020PJ4.zip>.
- [32] 阴鹏艳. 数字工程! 美空军"一号武器"展示了软件定义武器的数字孪生技术[EB/OL]. (2021-01-26)[2022-03-20]. <http://mp.ofweek.com/aerospace/a156714250107>.
- [33] 胡权. 关于CPS与Digital Twin的渊源与对比[EB/OL]. (2017-12-26)[2022-03-20]. <http://www.innovation4.cn/toutiao/125717-2026580654>.
- [34] 中国电子技术标准化研究院. 信息物理系统(CPS)典型应用案例集[M]. 北京: 电子工业出版社, 2019.
- [35] Liu Yang, Peng Yu, Wang Bailing, et al. Review on Cyber-physical Systems[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(1): 27-40.
- [36] Lee E A. Computing Foundations and Practice for Cyber-physical Systems: A Preliminary Report[EB/OL]. (2007-05-21)[2022-03-20]. <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2007/EECS-2007-72.pdf>.
- [37] 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.
- [38] 杨挺, 刘亚闯, 刘宇哲, 等. 信息物理系统技术现状分析与趋势综述[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(12): 3393-3406.
Yang Ting, Liu Yachuang, Liu Yuzhe, et al. Review on Cyber-physical System: Technology Analysis and Trends [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(12): 3393-3406.
- [39] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 信息物理系统 术语: GB/T 40021-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Cyber-physical Systems-terminology: GB/T 40021-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [40] 中国电子技术标准化研究院, 中国信息物理系统发展论坛. 信息物理系统建设指南(2020)[M]. (2020-08-28)[2022-03-20]. <http://www.cesi.cn/images/editor/20200828/20200828110931649.pdf>.
- [41] 胡权. 中国的CPS研究距离美国有多远?[EB/OL]. (2017-10-08)[2022-03-20]. <http://www.innovation4.cn/toutiao/107617-1908162047>.
- [42] 肖红, 程良伦, 张荣跃, 等. 智能制造信息物理系统安全研究[J]. 信息安全研究, 2017, 3(8): 727-735.
Xiao Hong, Cheng Lianglun, Zhang Rongyue, et al. Research on Intelligent Manufacturing Information System Security[J]. Journal of Information Security Research, 2017, 3(8): 727-735.
- [43] 刘棣斐, 田洪川, 刘贺贺. 工业CPS技术、架构及应用策略研究[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(5): 17-20.
Liu Difei, Tian Hongchuan, Liu Hehe. Technologies, Architecture and Application Strategies of Industrial CPS[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(5): 17-20.
- [44] 邓苏, 王嵘, 王志飞, 等. 军事信息物理系统架构及动态资源调度稳定性研究[J]. 指挥与控制学报, 2016, 2(4): 309-314.
Deng Su, Wang Rong, Wang Zhifei, et al. Architecture of Military Cyber Physical System and Stability Analysis of Dyanmic Resource Scheduling[J]. Journal of Command and Control, 2016, 2(4): 309-314.
- [45] 董志明, 冯琦琦, 王晓路. 军事信息物理系统初探[C]// 国际工程科技发展战略高端论坛-新一代人工智能引领下的建模仿真技术暨2019年中国仿真大会论文集. 2019.
Dong Zhiming, Feng Qiqi, Wang Xiaolu. On the Military Cyber Physics System[C]//International High-end Forum on Engineering Science and Technology Development Strategy-model Technology and Simulation Technology and 2019 China Simulation Conference. 2019.
- [46] 张博. 用于军事赛博物理系统的微能源技术研究现状与发展[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(8): 6-10, 17.
Zhang Bo. Research Status and Development of Micro Power Sources Technologies for Military Cyber Physical Systems[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(8): 6-10, 17.
- [47] 金宏, 余跃, 吴正午, 等. 面向远程精确打击服务的信息物理系统[C]//2014第二届中国指挥控制大会论文集(上). 北京: 中国指挥与控制学会, 2014: 533-536.
- [48] 王刚, 张含, 孟庆微. 赛博物理系统对武器装备建设的影响[J]. 空军工程大学学报, 2015, 15(1): 41-43.
Wang Gang, Zhang Han, Meng Qingwei. Influence of Cyber Physical System on Weapon Equipment

- Construction[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2015, 15(1): 41-43.
- [49] 王运武, 王永忠, 王藤藤, 等. 元宇宙的起源、发展及教育意蕴[J]. 中国医学教育技术, 2022, 36(2): 121-129, 133.
Wang Yunwu, Wang Yongzhong, Wang Tengting, et al. The Origin, Development and Educational Implication of the Metaverse[J]. China Medical Education Technology, 2022, 36(2): 121-129, 133.
- [50] 王海龙, 李阳春, 李欲晓. 元宇宙发展演变及安全风险分析[J]. 网络与信息安全学报, 2022, 8(2): 132-138.
Wang Hailong, Li Yangchun, Li Yuxiao. Research on Evolution and Security Risk of Metaverse[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2022, 8(2): 132-138.
- [51] 张洪忠, 斗维红, 任吴炯. 元宇宙: 具身传播的场景想象[J]. 新闻界, 2022(1): 76-84.
Zhang Hongzhong, Dou Weihong, Ren Wujiong. Metaverse: Scene Imagery of Embodied Communication[J]. Journalism and Mass Communication, 2022(1): 76-84.
- [52] Zhang Liangjie. MRA: Metaverse Reference Architecture [C]//Internet of Things-ICIOT 2021. Cham: Springer International Publishing, 2022: 102-120.
- [53] 谭平. 元宇宙: 下一代互联网[EB/OL]. (2021-10-26) [2022-04-22]. <http://vr.sina.cn/news/2021-10-26/detail-iktzscyy1828383.d.html>.
- [54] 方凌智, 沈煌南. 技术和文明的变迁-元宇宙的概念研究[J]. 产业经济评论, 2022(1): 5-19.
Fang Lingzhi, Shen Huangnan. Conceptualizing Metaverse: A Perspective From Technology and Civilization[J]. Review of Industrial Economics, 2022 (1): 5-19.
- [55] 杨丹辉. 元宇宙的当下与未来[EB/OL]. (2022-04-20) [2022-04-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/W159-xDvW2Qx73LIEP5S5Q>.
- [56] 方军. 元宇宙的起源、发展现状及未来展望[EB/OL]. (2022-03-28) [2022-04-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/l4XO9ZIOga9HjNbjdc5eNw>.
- [57] 清华大学. 元宇宙发展研究报告 2021[EB/OL]. (2021-10-31) [2022-04-22]. <https://mp.weixin.qq.com/s/01JAqrD1AA0q5jLaWnTd9w>.
- [58] 佚名. 到底什么才是"元宇宙"?[J]. 华东科技, 2021(9): 78-79.
- [59] Stokel-Walker C. Facebook is Now Meta-but Why, and What Even is the Metaverse?[J]. New Scientist, 2021, 252(3359): 12.
- [60] 闫学功. 字节跳动悄咪咪凑齐元宇宙"三件套"[EB/OL]. (2022-02-15) [2022-04-22]. https://www.sohu.com/a/522944953_250147.
- [61] 何晓骁, 王秉涵. 美军"实况-虚拟-构造"仿真技术发展及应用研究[J]. 航空兵器, 2021, 28(6): 14-18.
He Xiaoxiao, Wang Binghan. Research on Development and Application of LVC Simulation Technology in US[J]. Aero Weaponry, 2021, 28(6): 14-18.
- [62] 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.
- [63] 张昱, 张明智, 胡晓峰. 面向LVC训练的多系统互联技术综述[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2515-2521.
Zhang Yu, Zhang Mingzhi, Hu Xiaofeng. On Multi-system Integration Technology Oriented to LVC Training [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(11): 2515-2521.
- [64] 冯琦琦, 蔡卓函, 先大蓉. 军用LVC仿真技术的发展研究[J]. 价值工程, 2020, 39(27): 176-179.
Feng Qiqi, Cai Zhuohan, Xian Darong. Development of Military LVC Simulation Technology[J]. Value Engineering, 2020, 39(27): 176-179.
- [65] 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.
- [66] 黄越平, 蔡旭红, 徐建军, 等. 多靶场联合战试训体系结构研究[J]. 航天电子对抗, 2016, 32(2): 18-21.
Huang Yueping, Cai Xuhong, Xu Jianjun, et al. Research on the Architecture of Multi Range Joint Operation Test and Training[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2016, 32 (2): 18-21.
- [67] 许霄. 武器装备综合仿真试验环境关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
Xu Xiao. Research on Key Technologies of Synthetic Simulation Test Environment for Weapon System of Systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013.
- [68] 张光宇. 分布虚拟试验系统运行支撑体系结构研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [69] 赵雯, 廖馨, 代坤, 等. 虚拟试验验证技术发展思路研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(3): 437-439.
Zhao Wen, Liao Xin, Dai Kun, et al. Development Research on Virtual Test and Evaluation Technology[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(3): 437-439.
- [70] 王献鹏. 试验训练体系结构中件开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Wang Xianpeng. Development of Test and Training Architecture Middleware[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [71] 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.
- [72] 郭齐胜, 董志明. 试验训练一体化仿真支撑平台设计研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 1-5.
- Guo Qisheng, Dong Zhiming. Research on Design of Test and Training Integrated Simulation Supporting Platform[J]. Computer Simulation, 2020, 37(9): 1-5.
- [73] 董志明, 郭齐胜. 试验训练一体化仿真支撑技术研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 1-3, 23.
- Dong Zhiming, Guo Qisheng. Research on Support Technology of Test and Training Integrated Simulation[J]. Computer Simulation, 2021, 38(2): 1-3, 23.
- [74] 涂亿彬. LVC联合试验体系结构及关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- Tu Yibin. Research on LVC Joint Test Architecture and Key Technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [75] 冯芒. 聚焦空、天、赛博联合演训, “红旗20-1”军演增强美军杀伤力 [EB/OL]. (2020-04-24) [2022-05-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/rwBgXwwZeEJL-yBiVpXOg>.
- [76] 戴钰超. 美国海军启动“大规模演习2021”测试新质作战概念 [EB/OL]. (2021-08-17) [2022-05-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/5ac4nrwgPtaGflffXVzaFg>.
- [77] 刘逢安. 从“训练打靶”向“实战检验”转变-“火力-2015·山丹”陆军防空兵部队跨区基地化实兵实弹演习侧记[J]. 现代军事, 2015(8): 24-31.
- [78] 李京燕, 韩升. 虚实融合与新一代信息技术[C]//第十七届中国CAE工程分析技术年会论文集. 海口: 中国力学学会产学研工作委员会, 中国航空学会结构与强度分会, 中国塑料加工工业协会注塑制品专业委员会, 陕西省国防科技工业信息化协会, 2021: 38-43.