

3-22-2022

New Embedded Simulation Technology for Smart Internet of Things

Bohu Li

1.State Key Laboratory of Complex Product Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;2.Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;3.Science and Technology on Special Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;4.Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China;

Xudong Chai

5.CASICloud-Tech Co. , Ltd. , Beijing 100144, China;

Lin Zhang

4.Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China;

Duzheng Qing

1.State Key Laboratory of Complex Product Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;2.Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;3.Science and Technology on Special Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, 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 Invited Papers & Special Columns 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.

New Embedded Simulation Technology for Smart Internet of Things

Abstract

Abstract: Human society in the new development era and journey is facing the new situation. The operation paradigm, technology and ecosystem of industries related to the national economy and people's livelihood、national security are changing significantly towards the digital, networked, cloud-based and intelligent "Smart Internet of Things". The new embedded simulation technology, with the capabilities of online and continuous analysis, cognition, learning, decision-making, operation and optimization, is urgently needed for the development of "Smart Internet of Things". "Smart Internet of Things" is briefly introduced and the connotation, characteristics and application mode of the new embedded simulation technology are proposed and its architecture, technical system and nine key technologies are systematically discussed. The application examples on the industries of intelligent manufacturing, smart city and military intelligence are introduced. The achievements are summarized and the development suggestions are proposed.

Keywords

Smart IoT, modelling and simulation, embedded simulation, pervasive simulation, cloud simulation, high performance simulation, cyber-physical systems, digital twin

Authors

Bohu Li, Xudong Chai, Lin Zhang, Duzheng Qing, Guoqiang Shi, Tingyu Lin, Liqin Guo, Chen Yang, Mu Gu, Zhengxuan Jia, Hui Gong, and Zhen Tang

Recommended Citation

Bohu Li, Xudong Chai, Lin Zhang, Duzheng Qing, Guoqiang Shi, Tingyu Lin, Liqin Guo, Chen Yang, Mu Gu, Zhengxuan Jia, Hui Gong, Zhen Tang. New Embedded Simulation Technology for Smart Internet of Things[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(3): 419-441.



李伯虎 中国工程院院士，北京航空航天大学自动化学院博士生导师、荣誉院长。现任中国航天科工集团有限公司科技委高级顾问，复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室学术委员会主任；中国仿真学会荣誉理事长，中国计算机学会、中国人工智能学会、中国自动化学会、中国仿真学会、亚洲仿真学会联盟等会士，中国电子学会云计算专家委员会副主任委员；中国工业互联网产业联盟专家委员会副主任，国家智能制造专家委员会荣誉主任；国际杂志IJMSSC荣誉主编等。在系统仿真、制造业数字化等方面的成果获国家科技进步一等奖1项、二等奖3项；部级科技进步奖17项；个人或合作发表论文380篇，著作15本、译著4本。2012年、2017年、2019年分获国际建模与仿真学会、中国计算机学会和中国仿真学会等授予的“终身成就奖”。

机学会和中国仿真学会等授予的“终身成就奖”。

面向智慧物联网的新型嵌入式仿真技术研究

李伯虎^{1,2,3,4}，柴旭东⁵，张霖⁴，卿杜政^{1,2,3}，施国强^{1,2,3}，林廷宇^{1,2,3}，
郭丽琴^{1,2,3}，杨晨⁶，谷牧⁵，贾政轩^{1,2,3}，公慧⁷，唐震⁸

(1. 北京电子工程总体研究所 复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室，北京 100854；2. 北京仿真中心 北京市复杂产品先进制造系统工程技术研究中心，北京 100854；3. 北京仿真中心 航天系统仿真重点实验室，北京 100854；4. 北京航空航天大学 复杂产品先进制造系统教育部工程研究中心，北京 100191；5. 航天云网科技发展有限责任公司，北京 100144；6. 北京理工大学 网络空间安全学院，北京 100081；7. 航天科工智慧产业发展有限公司，北京 100039；8. 北京军尚科技有限公司，北京 100070)

摘要：当前我们正步入新时代、正面临新态势、正迈进新征程，人类社会国民经济、国计民生和国家安全等各领域系统的模式、技术和业态正在向数字化、网络化、云化、智能化的“智慧物联网”新模式、新技术和新业态发生重大变革。智慧物联网的发展迫切需要面向智慧物联网的新型嵌入式仿真技术，使智慧物联网能具备在线、持续的分析、认知、学习、决策、运行与优化的能力。简要概述了智慧物联网，在分析嵌入式仿真技术相关工作的基础上，提出了面向智慧物联网的新型嵌入式仿真技术的内涵、特征与应用模式，系统阐述了新型嵌入式仿真系统的体系架构、技术体系和九大关键技术，简要介绍了新型嵌入式仿真系统在智能制造、智慧城市和军事智能方面的应用范例。对所取得的成果进行总结并提出新型嵌入式仿真技术的发展建议。

关键词：智慧物联网；建模仿真；嵌入式仿真；普适仿真；云仿真；高性能仿真；信息物理系统；数字孪生

中图分类号：TP391.9 文献标志码：A 文章编号：1004-731X(2022)03-0419-23

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0119

New Embedded Simulation Technology for Smart Internet of Things

Li Bohu^{1,2,3,4}, Chai Xudong⁵, Zhang Lin⁴, Qing Duzheng^{1,2,3}, Shi Guoqiang^{1,2,3}, Lin Tingyu^{1,2,3}, Guo Liqin^{1,2,3},
Yang Chen⁶, Gu Mu⁵, Jia Zhengxuan^{1,2,3}, Gong Hui⁷, Tang Zhen⁸

(1. State Key Laboratory of Complex Product Intelligent Manufacturing System Technology, Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China; 2. Beijing Complex Product Advanced Manufacturing Engineering Research Center, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; 3. Science and Technology on Special Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China; 4. Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China; 5. CASICloud-Tech Co., Ltd., Beijing 100144, China; 6. School of Cyberspace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 7. CASIC Intelligent Industry Development Co., Ltd., Beijing 100039, China; 8. Beijing Junshang Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Human society in the new development era and journey is facing the new situation. The operation paradigm, technology and ecosystem of industries related to the national economy and people's livelihood、national security are changing significantly towards the digital, networked, cloud-based and

intelligent "Smart Internet of Things". The new embedded simulation technology, with the capabilities of online and continuous analysis, cognition, learning, decision-making, operation and optimization, is urgently needed for the development of "Smart Internet of Things". "Smart Internet of Things" is briefly introduced and the connotation, characteristics and application mode of the new embedded simulation technology are proposed and its architecture, technical system and nine key technologies are systematically discussed. The application examples on the industries of intelligent manufacturing, smart city and military intelligence are introduced. The achievements are summarized and the development suggestions are proposed.

Keywords: Smart IoT; modelling and simulation; embedded simulation; pervasive simulation; cloud simulation; high performance simulation; cyber-physical systems; digital twin

引言

当前，一场以科技革命与产业变革为主要内容的新一轮工业革命已在全球快速展开。我们正步入新时代、正面临新态势、正迈进新征程，其中：“新时代”是指“智能+”时代与后疫情时代交织的时代；“新态势”是指全球多边主义与单边霸凌主义长期竞争、博弈的严峻形势；“新征程”是指我国正开启“全面建设社会主义现代化国家的新发展阶段”，正贯彻“创新、协调、绿色、开放、共享”的新发展理念，正构建“以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进”的新发展格局。在这样的背景下，人类社会国民经济、国计民生和国家安全等各领域系统的模式、手段和业态正在向数字化、网络化、云化、智能化“智慧物联网”的新模式、新手段和新业态发生重大变革^[1]。

智慧物联网^[2]是一个复杂系统——它是在新发展理念指引下，在新一代人工智能技术引领下的人、信息(赛博)空间与物理空间融合的“新智慧资源/能力/产品”智慧互联协同服务的复杂系统。它由新产品/能力/资源体系、新网络/感知体系、新平台体系、新标准安全体系、新应用体系及新用户体系等六大子体系组成。

其中，新发展理念系指“创新、协调、绿色、开放、共享”。新一代人工智能技术为基于新的信息环境、新技术和新的发展目标的一类人工智能，其特征为“大数据智能、跨媒体智能、人机混合增强智能、群体集成智能和自主智能无人系统”等。

智慧物联网是一种新型物联网系统。系统的“智慧”意指在新发展理念指引下，新一代人工智能技术引领下的，以人为中心的人/信息空间/物理空间相互联系、层层递进的系统的“数字化、物联化、服务化(云化)、协同化、定制化、柔性化、绿色化和智能化”(八化)。

智慧物联网系统将具备六新：

新技术：基于新型互联网，在新发展理念指引下，在新一代人工智能技术引领下，借助新网络技术、新信息通信技术、新智能科学技术、新能源技术、新材料技术、新生物技术、新绿色技术及新应用领域专业技术等8类新技术深度融合的数字化、网络化、云化、智能化技术为工具，将人、信息(赛博)空间与物理空间中的人/机/物/环境/信息智能地连接在一起，提供智慧资源、智慧产品与智慧能力随时随地按需服务的一种新型智慧服务互联系统。

新模式：一种“用户为中心，人/机/物/环境/信息优化融合”，“数字化、物联化、服务化(云化)、协同化、定制化、柔性化、绿色化和智能化”的智慧协同互联新模式。

新业态：“万物智联，智能引领，数/模驱动，共享服务，跨界融合，万众创新”。

新特征: 全系统及全生命周期活动中人、机、物、环境、信息“自主智能”地感知、互联、协同、学习、分析、认知、决策、控制与执行。

新内容: 促使全系统及全生命周期活动中的人、技术/设备、管理、数/模、材料、资金(六要素)及人才流、技术流、管理流、数据流、物流、资金流(六流)集成优化, 形成数字化、网络化、云化、智能化的产品、设备/系统和全生命周期活动。

新目标: 支持系统数字化转型与智慧化升级, 实现“创新、绿色、开放、共享、个性”。

由于智慧物联网系统所涉及的工程系统、社会系统和军事系统往往具有系统机理复杂、系统组成与层次关系复杂、系统的子系统间以及系统与其环境之间交互关系复杂和能量交换复杂, 且整体呈现出定性定量混合、变结构、自适应、非线性、涌现、不确定、协同、博弈、混沌等特点, 因此迫切需要以新型建模仿真技术为支撑, 建立被研究对象的模型, 使它与被研究对象闭环/嵌入集成运行, 适时获取、分析、学习被研究对象运行状态的数据, 进而提升被研究对象的认知、改造与运行能力。

本文面向智慧物联网的构建、运行和服务, 提出一类新型的仿真技术——面向智慧物联网的嵌入式仿真技术(以下简称新型嵌入式仿真)。

1 相关工作

1.1 嵌入式仿真/普适仿真

嵌入式仿真最早在军事训练领域被提出^[3], 通过将虚拟仿真(virtual simulation)与实况仿真(live simulation)相结合, 为受训人员提供最真实的训练环境, 让受训人员在真实的武器装备上开展模拟的战术训练。目前的空战训练系统^[4], 基于空战机动仪器(air combat mobile instrument, ACMI)的支持^[5], 已经能够构建以实装-真人-虚弹为特征的高逼真训练能力。樊世友等在国内较早开展了嵌入式仿真的研究^[6], 提出了嵌入式仿真的体系结构以及互联、互操作等关键技术。国内在雷达、舰船动力等领域的训练系统中陆续开展了嵌入式仿真的研究^[7-8]。唐震等将嵌入式仿真推向了更广泛的领域, 通过与普适计算相融合, 以支持“透明”地获取仿真服务为核心, 提出了普适化仿真的理念^[9]。目前, 为了适应智慧物联网系统中人、机、物、环境存在的复杂机理、复杂组成、复杂交互关系和复杂行为, 并能高动态、自适应地提供认知与决策支持, 需要进一步地发展已有的嵌入式仿真与普适化仿真技术。

1.2 信息物理系统/数字孪生

信息物理系统(cyber physical system, CPS)源自嵌入式系统的广泛应用, 最早在2006年, 美国国家科学基金会的Helen Gill用“信息物理系统”一词来描述传统的IT术语无法有效说明的日益复杂的系统^[10]。CPS随后被列为美国研究投资的重中之重^[11]。在德国, CPS同样被认为是工业4.0的内核和基础^[12]。我国也在2016年由国务院发布了《关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》, 明确提出“构建信息物理系统参考模型和综合技术标准体系, 建设测试验证平台和综合验证试验床, 支持开展兼容适配、互联互通和互操作测试验证”^[13]。周济等将“人”的要素引入CPS中, 拓展提出了人-信息-物理系统HCPS^[14], 并将之用于研究和分析新一代智能制造系统。CPS的目标是实现物理世界和信息世界的交互融合。通过大数据分析、人工智能等新一代信息技术在虚拟世界的仿真分析和预测, 以最优的结果驱动物理世界的运行。而数字孪生(digital twin, DT)的本质就是在信息世界对物理世界的等价映射, 因此数字孪生成为实现CPS的最佳技术。

数字孪生一词最早由迈克尔·格里夫斯教授2003年在密歇根大学关于产品生命周期管理的演讲中提出的“物理产品的虚拟数字化表达”^[15]。新一代信息技术的蓬勃发展正在催生着DT的繁荣^[16]。美国国家航空航天局和美国空军在航空器的健康维护和剩余使用寿命预测中首先应用了DT^[17-18]。迈克尔·格里夫斯教授，将数字孪生应用在设计过程中的，指出物理产品的数字表达应能够抽象地表达物理产品，能够基于数字表达对物理产品进行真实条件或模拟条件下的测试^[15]。美国国家标准与技术研究院于2012提出了基于模型的定义(model based definition, MBD)和基于模型的企业(model based enterprise, MBE)的概念，将数字孪生的内涵扩展到了整个产品的制造过程^[19]。Yinping Gao等^[20]提出了一种数字孪生自动化堆场调度框架用于不确定港口调度。陶飞等^[21]提出了将数字孪生与车间管理相结合作为一种未来车间运行新模式。数字孪生需要创造一个数字版的“克隆体”，该虚拟“克隆体”被创建在信息化平台上，对实体对象动态仿真。但当前研究工作对真实世界物体建模的准确性和可靠性较低，可解释性不足^[22]。嵌入式仿真能够提供高逼真虚拟环境，将嵌入式仿真与CPS/数字孪生紧密结合，深度集成，将促进CPS/数字孪生对物理世界的虚拟和可视化，从而提高对物理世界的预测和决策能力。

2 新型嵌入式仿真技术内涵、特征与应用模式

2.1 新型嵌入式仿真技术内涵

新型嵌入式仿真技术主要面向工程领域、社会领域和军事领域智慧物联网系统的在线、持续认知与优化，基于泛在互连网络，借助新兴的仿真科学技术、信息通信科学技术、智能科学技术及应用领域专业技术深度融合的数字化、网络化、云化、智能化技术手段，构成以用户为中心、与被研究对象集成运行、人/信息(赛博)空间/物理空间无缝融合、各类智能化仿真资源/能力/产品统一经营管理的服务云(网)，支持用户和被研究对象随时随地、“实时”、“连贯”、“透明”地请求、访问和获得仿真服务，支撑被研究对象全系统及全生命周期活动中人、机、物、环境、信息自主智能地感知、互联、协同、学习、分析、认知、决策、控制与执行，实现被研究对象高效、优质、节省、绿色、柔性、安全地运行与演进。

2.2 新型嵌入式仿真技术特征

相比传统的仿真技术，新型嵌入式仿真技术具有“数字化、虚拟化、高效化、网络/云化、普适化、智能化”的综合特征。

数字化：是实现人/信息(赛博)空间/物理空间无缝融合的基础，一方面是基于机理和非机理及其融合的手段全面建立被研究对象的数字化模型，另一方面是能够提取被研究对象的属性、行为和状态等数字化信息并导入数字化模型。

虚拟化：是实现各类智能化仿真资源/能力/产品统一经营管理的基础，一方面是通过仿真资源/能力/产品的规范封装可以构建虚实结合的仿真系统，另一方面是数字化模型可以在经过虚拟化的各类基础设施上自由部署、按需服务。

高效化：是新型嵌入式仿真技术提供“实时”仿真服务的基础，一方面是通过新一代感知、接入技术高效实现被研究对象实时状态提取与仿真构建，另一方面是通过高性能仿真计算机实现大规模分枝演进和蒙特卡罗树搜索等并行处理。

网络化/云化：是新型嵌入式仿真技术提供“连贯”仿真服务的基础，一方面是通过分布式仿真支持

人在环/硬件在环/软件在环等各类复杂仿真应用, 另一方面是能够支持通过网络随时随地请求、访问部署在边缘和云上的仿真服务。

普适化: 是新型嵌入式仿真技术提供“透明”仿真服务的基础, 一方面是以十分自然的甚至是用户本身注意不到的所谓“蕴含式”发起仿真任务, 另一方面是在仿真过程中能够以用户和被研究对象为中心实现与仿真服务的自发交互。

智能化: 是实现智慧物联网系统持续认知与优化的基础, 一方面是通过新一代人工智能引领可以智能地感知、认知、决策、控制被研究对象, 另一方面是通过持续地数据收集和大规模并行训练支持被研究对象智能地不断演进。

2.3 新型嵌入式仿真应用模式

新型嵌入式仿真应用模式是一种以用户为中心、与被研究对象集成运行、人/信息(赛博)空间/物理空间无缝融合、云边端各类智能化仿真资源/能力/产品按需服务的网络化仿真新模式。如图1所示。

在智慧物联网系统中, 存在物理模型、认知模型和决策模型3类模型。其中, 物理模型对应并映射新型智慧物联网系统及其环境, 可以用来反映智慧物联网系统运行的效果。而认知模型和决策模型则在

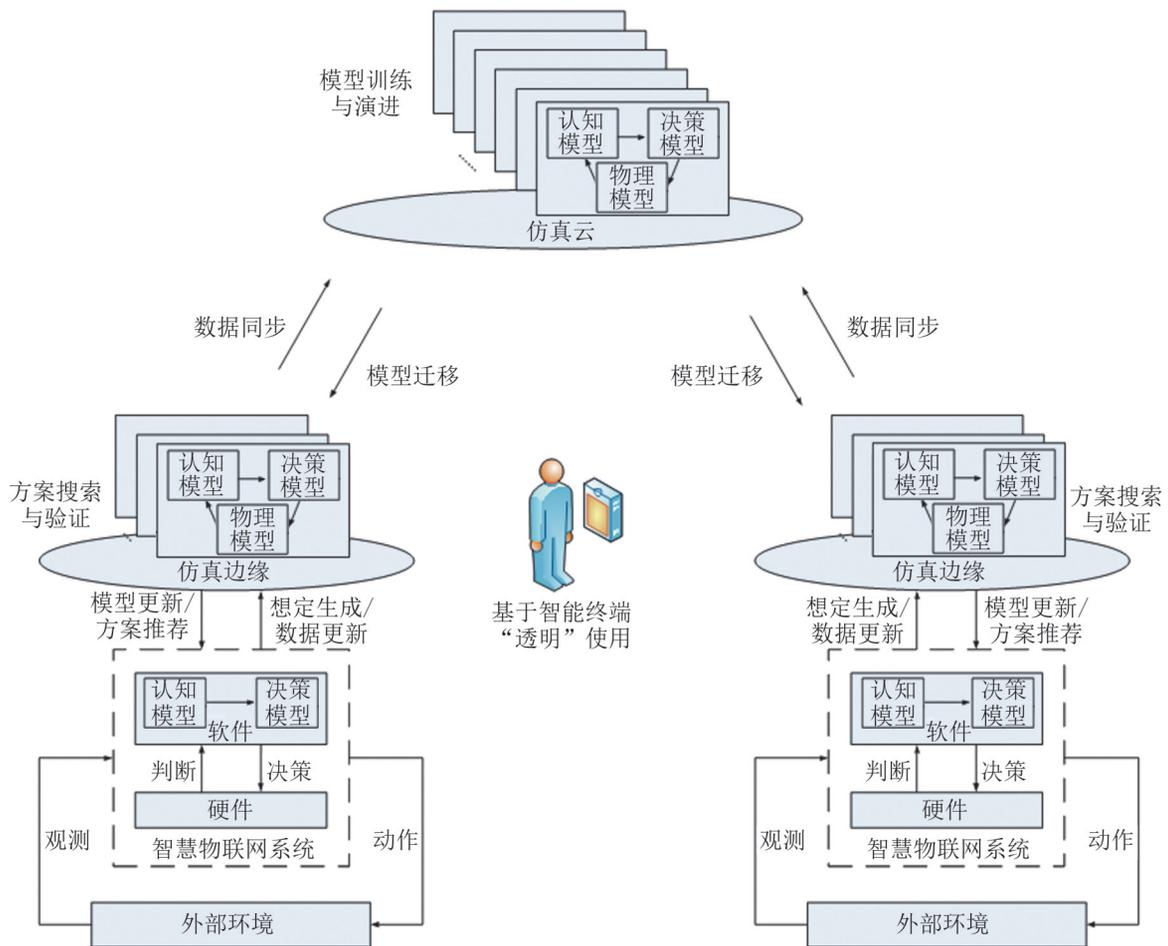


图1 新型嵌入式仿真应用模式图

Fig. 1 Application mode of new embedded simulation

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

智慧物联网系统运行的“观察-判断-决策-行动”(observation-orientation-decision-action, OODA)循环中起到核心作用。

结合智慧物联网系统的运行,用户置身于具有感知功能和联网功能的终端环境中,智能终端自动地感知用户的应用需求,并完成应用需求到仿真需求的映射,并能够自发地请求、访问和获得仿真服务,基于在线仿真及与用户的协同交互,实现监控、诊断、预测、决策等支撑。

面向智慧物联网系统的嵌入式仿真跟传统的嵌入式仿真相比,引入了云仿真和高性能仿真的能力,可以根据仿真任务的复杂程度,运用边缘侧和云端侧的高性能计算能力开展大规模多实例并行仿真,如在边缘侧的大规模分枝演进和蒙特卡罗树搜索、在云端侧的模型并行训练演进。

可以看出,新型嵌入式仿真应用是云边端一体化协同的开放式的CPS应用,基于随时随地、“实时”、“连贯”、“透明”地仿真支撑来增强传统CPS应用的能力;同时,新型嵌入式仿真应用是人/信息(赛博)空间/物理空间无缝融合的更高级的DT应用,可基于多重孪生空间提升认知决策能力。

3 新型嵌入式仿真系统体系架构

新型嵌入式仿真系统体系架构主要包括智能物理层、智能感知/接入/通讯/边缘处理层、智能边缘仿真处理平台层、智能云仿真服务平台层(含智能虚拟层、智能仿真服务支撑层、智能门户层)、智能应用层以及新型嵌入式仿真系统安全管理和标准规范。如图2所示。

(1) 智能物理层

主要包括智慧物联网系统及其环境、智能化仿真软硬件资源以及智能化仿真能力。智慧物联网系统是被研究对象,需要接入新型嵌入式仿真系统并集成运行。智能化仿真软硬件资源、智能化仿真能力将为新型嵌入式仿真系统提供基础设施支撑。

(2) 智能感知/接入/通讯/边缘处理层

主要基于物联网、移动互联网(如5G)等新一代信息通信技术为连接的智慧物联网系统及其环境提供智能感知与控制接口、数据采集的信息终端/物联网关/服务总线、传输网络及接口、智能信息融合与边缘处理等功能,支持物理层智慧物联网系统及其环境等的连接、调用。

(3) 智能边缘仿真处理平台层

主要基于智能边缘仿真资源、能力、产品、感知/接入/通讯虚拟化封装,构建虚拟智能边缘仿真资源、能力、产品、感知/接入/通讯(管理)池,依托IaaS/DaaS/PaaS/SaaS等基础服务,提供智能边缘仿真系统动态构建、运行支撑服务,支持接受智能边缘仿真领域应用任务按需开展建模、仿真和评估。

(4) 智能云仿真服务平台层

1) 智能虚拟层

主要基于智能云仿真资源、能力、产品、感知/接入/通讯虚拟化封装,构建虚拟智能云仿真资源(管理)池、智能云仿真能力(管理)池、智能云仿真产品(管理)池和智能云感知/接入/通讯(管理)池“四池”,支持基于统一抽象和组织实现按需组合、优化配置以及高效协作。

2) 智能仿真服务支撑层

主要针对需要开展大规模智能仿真分析、优化和演进等场景,依托IaaS/DaaS/PaaS/SaaS等基础服务,提供智能云仿真系统动态构建、运行支撑服务,支持接受智能云仿真领域应用任务,按需调用几何/

机理/数据/知识模型, 开展高性能/分布式仿真, 并进行 VV&A、分析与优化。

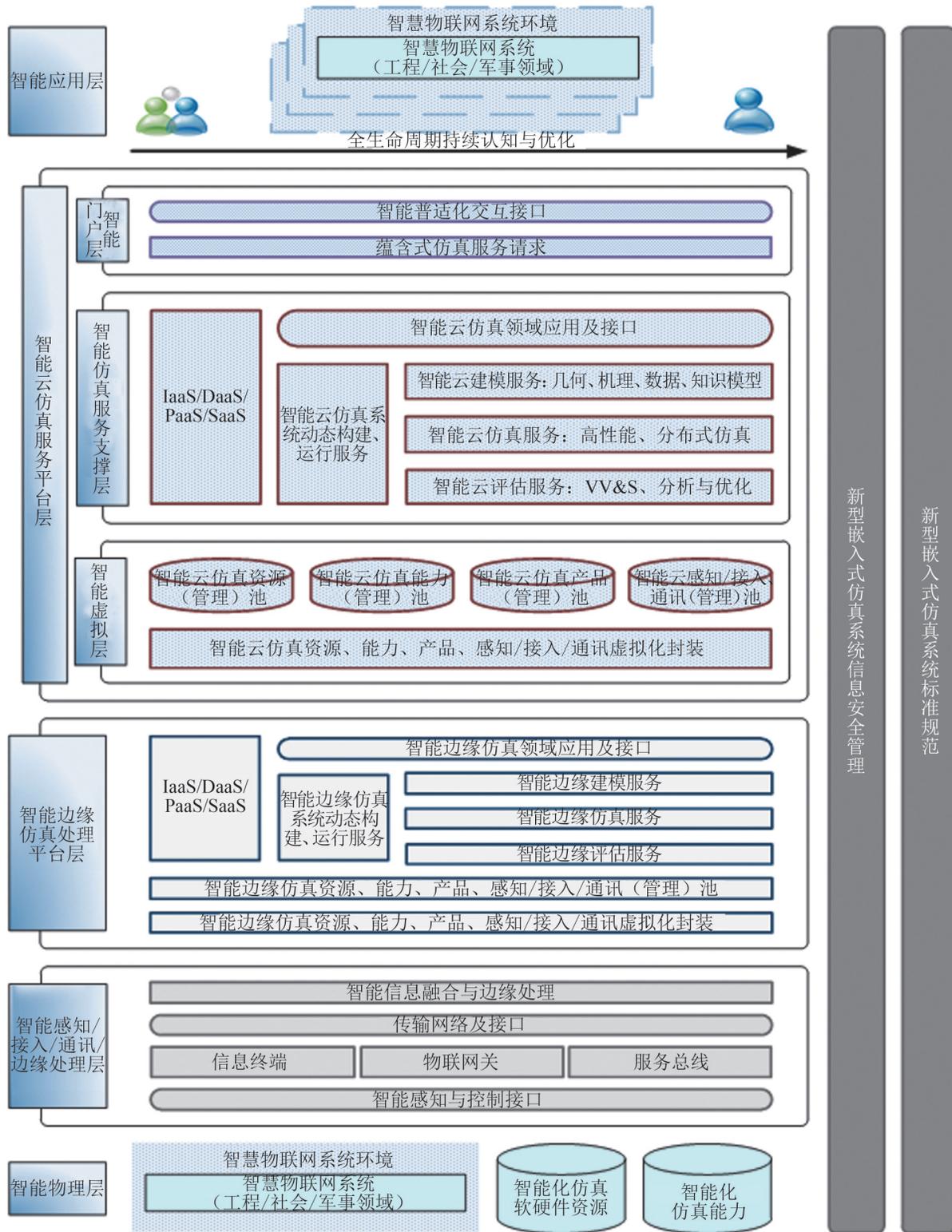


图2 新型嵌入式仿真体系架构图
Fig. 2 System architecture of new embedded simulation

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

3) 智能门户层

主要针对工程领域、社会领域和军事领域发布各类仿真应用 APP，通过各类智能普适化交互接口，自动感知用户需求和智慧物联网系统环境场景，可随时随地转换成仿真想定并发起蕴含式仿真服务请求，支持实现“实时”、“连贯”、“透明”地请求、访问和获得仿真服务。

(5) 智能应用层

主要针对工程领域、社会领域和军事领域智慧物联网系统所处的复杂环境以及被赋予的复杂任务，基于云、边缘、端相融合一体化运行以及人/信息(赛博)空间/物理空间无缝融合，按需开展基于仿真的智能感知、认知、决策、控制，实现智慧物联网系统的在线、持续地认知与优化。

4 新型嵌入式仿真系统技术体系及关键技术

4.1 技术体系

新型嵌入式仿真系统技术体系可以参照原仿真系统技术体系分为：面向新型嵌入式仿真系统的建模理论与方法、面向新型嵌入式仿真系统的仿真系统与支撑技术以及面向新型嵌入式仿真系统的仿真应用工程技术，如图 3 所示。

4.1.1 面向新型嵌入式仿真系统的建模理论与方法

面向新型嵌入式仿真系统的建模理论与方法包括：面向新型嵌入式仿真系统的一次建模理论与方法，具体包括定性定量混合系统建模方法、基于元模型框架的建模方法、变结构系统建模方法、基于大数据的建模方法以及基于深度学习的仿真建模方法、基于物理效应的仿真器/非数字模型建模方法；面向新型嵌入式仿真系统的二次建模理论与算法，具体包括四级并行高效能仿真算法、基于寻优算法的仿真方法以及面向机器学习的仿真算法、仿真器实现算法。

4.1.2 面向新型嵌入式仿真系统的仿真系统与支撑技术

面向新型嵌入式仿真系统的仿真系统与支撑技术包括：硬件支撑环境技术，软件支撑环境技术以及仿真系统构建与运行技术。其中，仿真系统构建与运行技术具体包括泛在感知与接入技术、实时服务使能技术、虚拟化服务使能技术、调度管理服务使能技术、负载均衡服务使能技术以及资源管理服务使能技术。

4.1.3 面向新型嵌入式仿真系统的仿真应用工程技术

面向新型嵌入式仿真系统的仿真应用工程技术包括：模型校核、验证与确认(VV&A)技术，智能系统仿真实验结果管理、分析与评估技术以及大数据智能仿真分析与评估技术。

4.2 关键技术

4.2.1 云边协同高性能仿真计算机系统技术

面向 2 类用户(高端仿真用户和海量用户群)/3 类仿真(虚拟、构造、实装)应用需求，融合新兴建模与仿真技术、云/边缘计算技术、智能科学技术及应用领域技术等，提出云边协同高性能仿真计算机系统(如图 4 所示)，提供从硬件(含计算节点、仿真加速专件、自主知识产权仿真样机)、支撑软件到仿真软件的一整套的解决方案，为智能制造、智慧城市、军事智能系统中嵌入式仿真应用提供一体化全生命周期的支撑。

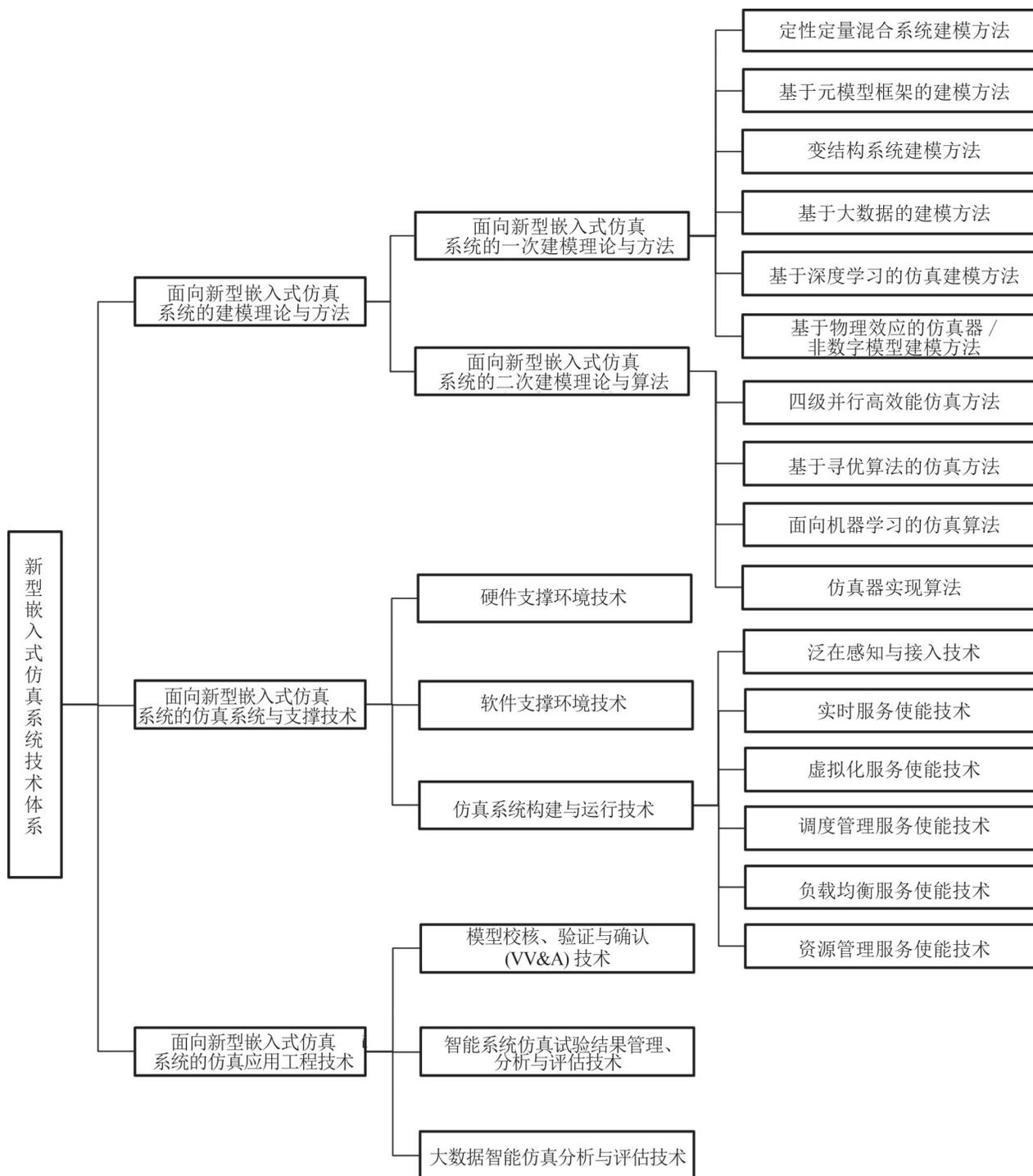


图3 面向新型嵌入式仿真系统的总体技术体系图
Fig. 3 Technical diagram for the new embedded simulation system

本团队研究成果有^[23-24]: 硬件方面, 峰值性能≥25 万亿次/s浮点运算(可按需扩展到1 000 万亿次/s浮点运算), 内部存储容量≥2 TB~10 TB, 外部存储器总容量≥40 TB~200 TB, 具备基于 X86 多核处理器与深度计算处理器的仿真计算结点、基于大数据处理技术的仿真加速部件、基于人工智能算法技术的仿真加速部件, 并提供与实装、仿真设备、智能制造系统等多类互联接口, 具有良好的开放性、扩展性; 软

件方面，提供了面向高端仿真用户和云仿真用户的各类仿真应用所需建模、运行、评估等一系列仿真服务，可支持云边协同的嵌入式仿真工程全生命周期活动。

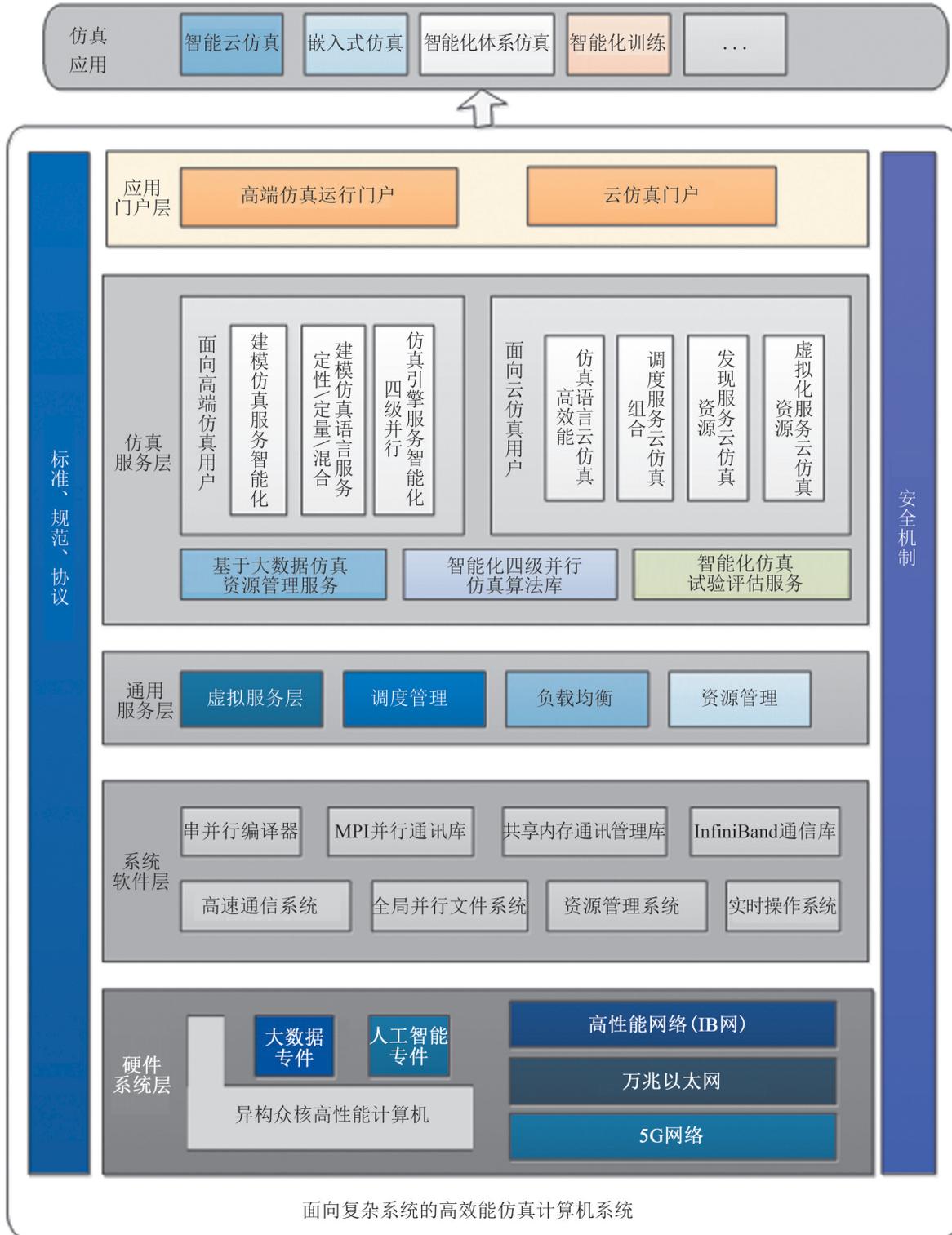


图4 云边协同高性能仿真计算机系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cloud-edge collaboration high-performance simulation computer system

4.2.2 物理空间泛在感知、接入服务技术

针对物理空间人、机、物、环境、信息等多源异构或异构信息融合的感知接入请求, 通过二维码、RFID、GPS、视觉以及雷达等传感器的智能感知、采集、传输、接入、分析及处理等, 实现智能仿真资源/能力/产品的物联接入、安全可控、协同集成、网络服务等功能, 从而实现仿真系统内对物理空间的认知建模、行为表征、人机交互等感知及接入的智能化。如图 5 所示。

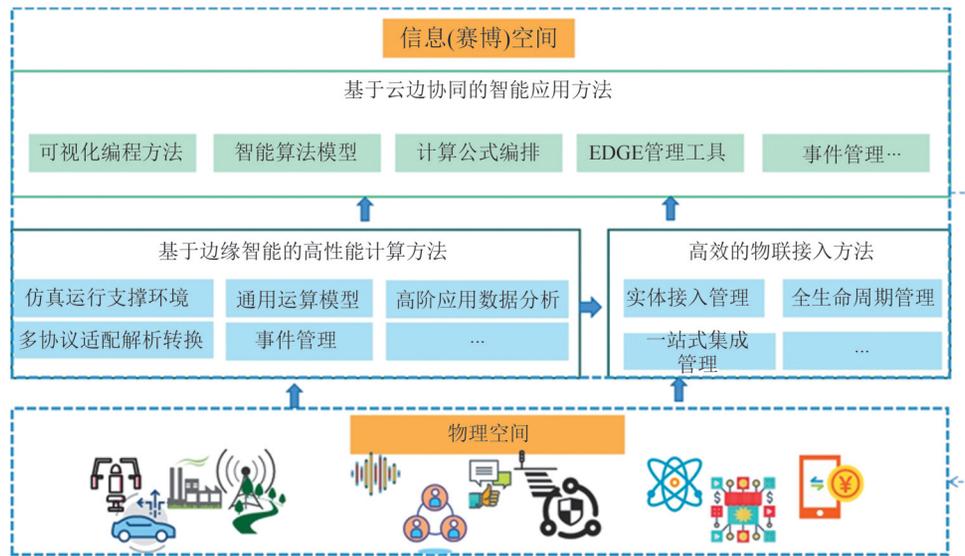


图 5 物理空间感知、接入框架示意图

Fig. 5 Schematic diagram of physical space perception and interface framework

本团队初步的研究成果有: 基于边缘智能的高性能计算方法^[25-26], 支持新型嵌入式仿真系统集成并行处理多源、异构、海量数据, 支持丰富的协议适配解析和开放接口, 支持多种仿真运行环境、多种通用运算模型、可视化编程、事件管理、高阶应用数据分析服务等; 高效的物联接入方法, 支持快速的物理空间实体系统接入及虚拟管理, 包括覆盖实体系统全生命周期的、一站式的管理服务; 基于云边协同的智能应用方法, 支持仿真系统边缘接入侧的自治管理和冗余备份能力, 支持对边缘侧人工智能模型的管理及本地推理。

4.2.3 蕴含式仿真服务请求技术

针对应用需求到仿真需求自动化、智能化映射的问题, 通过分析已有上下文感知、智能 Agent、语义匹配等技术, 面向智能制造、智慧城市和军事智能的嵌入式仿真应用需求, 创新性提出了蕴含式仿真服务访问框架(如图 6 所示), 实现仿真服务的自主发现和匹配, 支持嵌入式仿真中物理空间与仿真空间的自发交互。

本团队研究成果有^[27-28]: 基于上下文感知的用户仿真意图推理方法, 使得嵌入式仿真系统具备感知能力和自发行行为能力, 支持对用户仿真意图的推断以及相应仿真行为的执行; 仿真服务自主发现匹配技术, 支持对请求仿真服务和注册仿真服务的属性定义进行基于本体的规则推理, 匹配选择最符合要求的仿真服务。

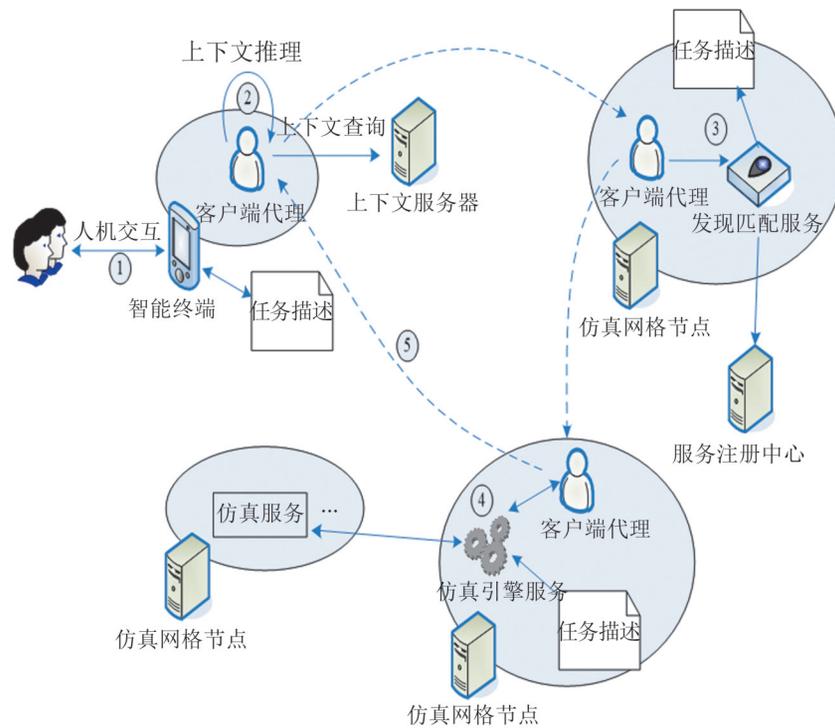


图 6 蕴含式仿真服务请求框架示意图

Fig. 6 Schematic diagram of implication simulation service request framework

4.2.4 云边端一体仿真任务调度技术

针对云边端一体联合仿真快速动态构建、高效运行容错对系统调度的需求，特别是综合考虑集群中异构计算节点的资源利用率与提交任务的资源需求之间的矛盾问题，提出云边端一体仿真任务智能化调度方法(如图 7 所示)，实现仿真资源智能化按需调度，提升对计算资源、网络资源、存储资源等的隔离共享和透明使用能力，支撑云边端一体仿真任务执行效率的提升。

本团队研究成果有^[29-30]：云边端仿真运行环境构建技术，为用户提供一个高效透明使用仿真资源的系统环境；基于 Kubernetes 的容器智能化调度方法和算法，支持对仿真任务需求的个性化智能调度执行；仿真微服务在线迁移方法，支持迁移前后仿真系统的可用性和前后一致性。

4.2.5 分布异构集成仿真互操作技术

针对嵌入式仿真对分布异构仿真资源(包括半实物模拟器、实装、数字模型等 LVC 资源)综合集成仿真应用需求，提出分布异构集成仿真互操作服务中间件(如图 8 所示)，解决分布异构仿真资源低时延广域网通信、异构系统高效自适应适配等问题，支撑虚实结合、分布部署的嵌入式联合仿真试验。

本团队初步的研究成果有^[31-32]：通用网关/适配器，采用“通用通路框架+协议转换插件”的模式，以适应不同系统的网关服务；基于元建模的复杂自适应系统建模方法，实现对复杂自适应系统中各种类型系统组分间感知、决策、交互的一体化建模，以及对复杂系统相互作用机制的有效描述；LVC 仿真中间件，实现分布于不同地域的异类异构资源“有序有制有体系”地集成联合，构成一个“物理上分布、逻辑上统一、时空上一致”的联合仿真系统。

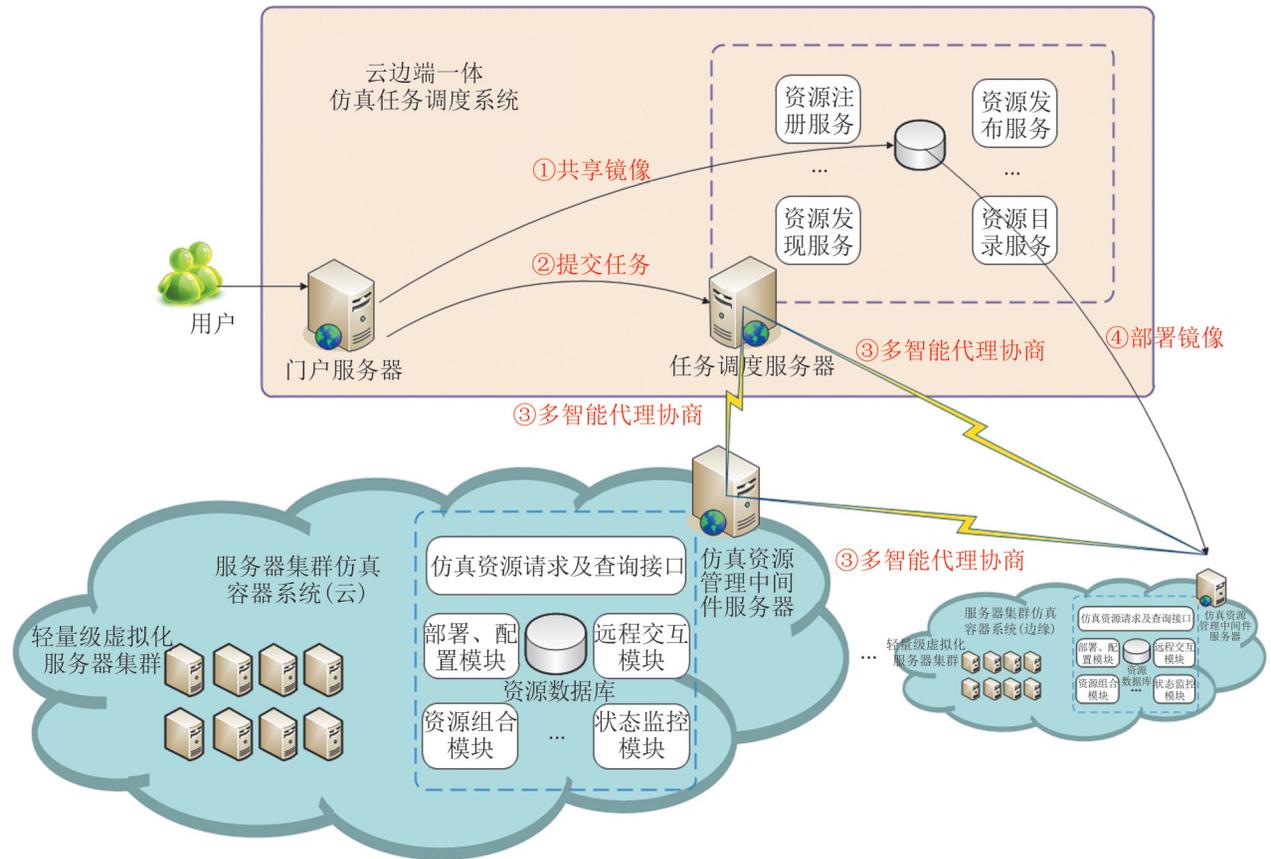


图 7 云边端一体仿真任务调度框架示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the cloud-edge-terminal integrated simulation task scheduling framework

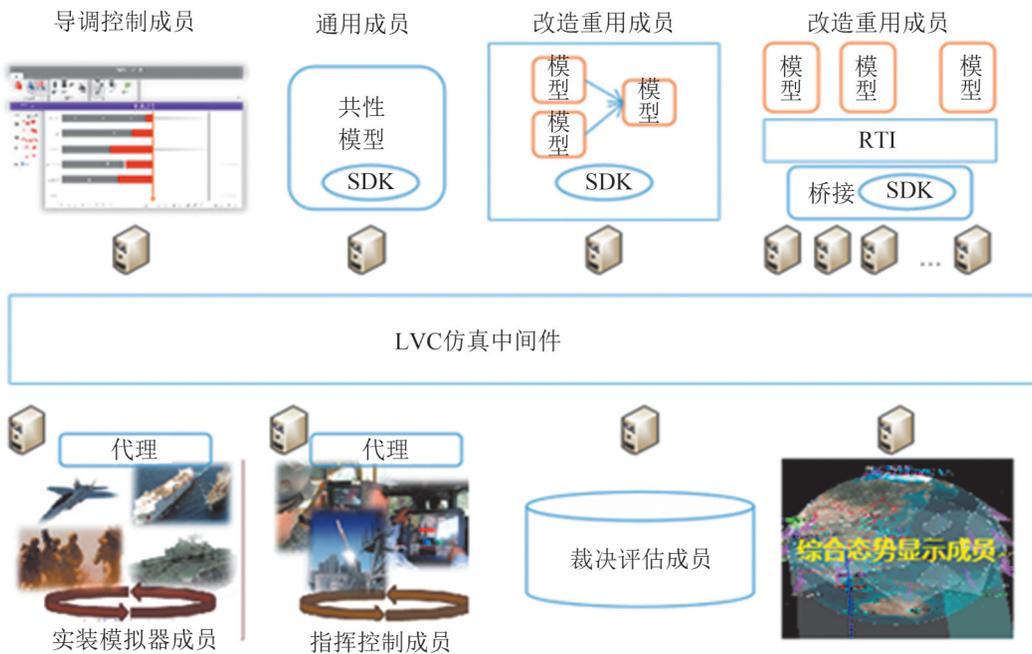


图 8 分布异构集成仿真互操作框架示意图

Fig. 8 Distributed heterogeneous integrated simulation interoperability framework

4.2.6 多级并行高性能仿真求解技术

针对实时高效处理用户和被研究对象的仿真请求，特别是大规模分枝演进和蒙特卡罗树搜索等并行处理需求，结合边缘高性能仿真计算机系统的并行计算能力，通过提出的四级并行仿真引擎框架(如图9所示)，实现大规模仿真问题的作业级并行、仿真系统内成员间的任务级并行、联邦成员内的模型级并行和基于复杂模型解算的线程级并行。

本团队初步的研究成果有^[33-34]：基于轻量级虚拟化的作业级仿真并行调度方法，支持在边缘高性能仿真计算机系统中对仿真系统快速地进行大规模的实例化；基于高性能RTI的任务级仿真并行调度方法，支持基于共享内存实现仿真成员间并行任务的时间同步管理和数据分发管理；基于公共事件表的模型级仿真并行调度方法，支持面向多核架构实现仿真成员内细粒度仿真模型的动态组合与并行执行；基于复杂模型结算的线程级仿真并行调度方法，支持基于方程组右函数均匀负载的连续系统常微分方程并行算法求解。

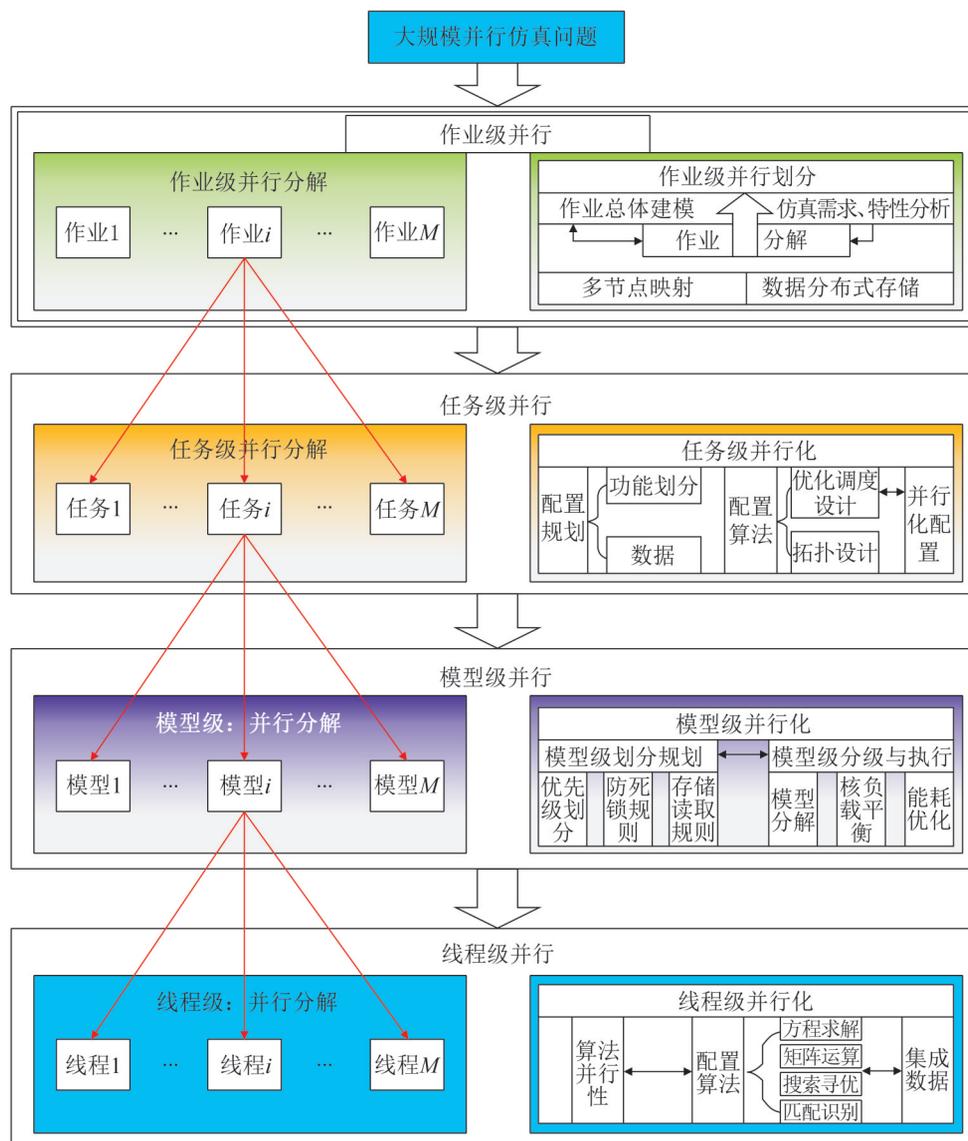


图9 四级并行仿真引擎框架示意图

Fig. 9 Framework of four-level parallel simulation engine

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

4.2.7 智能模型自主学习自进化技术

智能模型自主学习自进化主要面向智能决策模型, 其以强化学习为核心技术, 融合采用模仿学习、对抗学习技术手段, 实现具备强鲁棒性、强策略稳健性的最优决策模型构建及持续演化; 同时, 结合基于监督学习, 提出基于监督学习的行为模型与基于深度强化学习的策略模型协调演进, 实现面向真实世界的智能模型构建及持续演进, 支撑智能决策模型自主进化(如图 10 所示)。

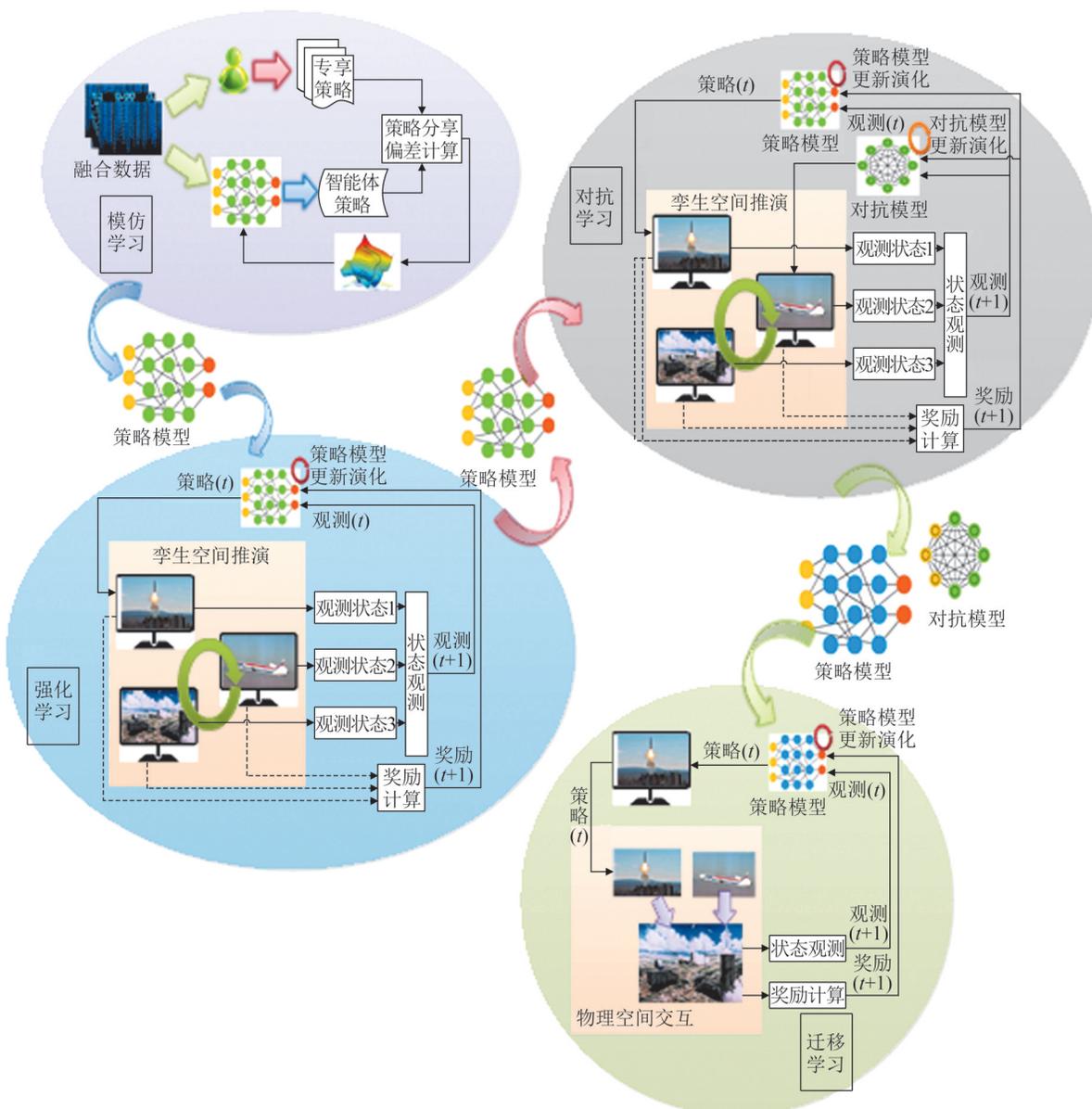


图 10 智能模型自主学习自进化框架示意图

Fig. 10 Schematic diagram of intelligent model self-learning and self-evolution

本团队初步的研究成果有^[35-37]: 基于环境动态模型与决策模型协调演进技术, 融合监督学习与自主学习, 支持动态复杂环境下最佳决策的智能构建; 基于智能模型演进算法统一框架, 融合以计算智能为核心的多类算法, 构建统一模板, 促进多种智能算法融合应用; 基于模型驱动自主演进智能设计方法,

支持智能体交互仿真环境以及智能体模型的快速构建,提升智能决策模型设计及收敛效率。

4.2.8 基于多重孪生空间智能化评估技术

围绕真实世界复杂系统中,新型智慧物联网系统认知决策性能评估问题,针对复杂系统特有的不确定性及涌现性等特点带来系统演化空间的爆炸性扩张问题,以智能决策模型驱动多重孪生空间平行推演,构建多重孪生空间(如图 11 所示),通过智能评估模型对孪生空间演化的剪枝和智能体决策效能评估指标体系的综合评估,实现复杂系统智能体决策效能的快速综合评估,支撑新型智慧物联网系统的认知与决策。

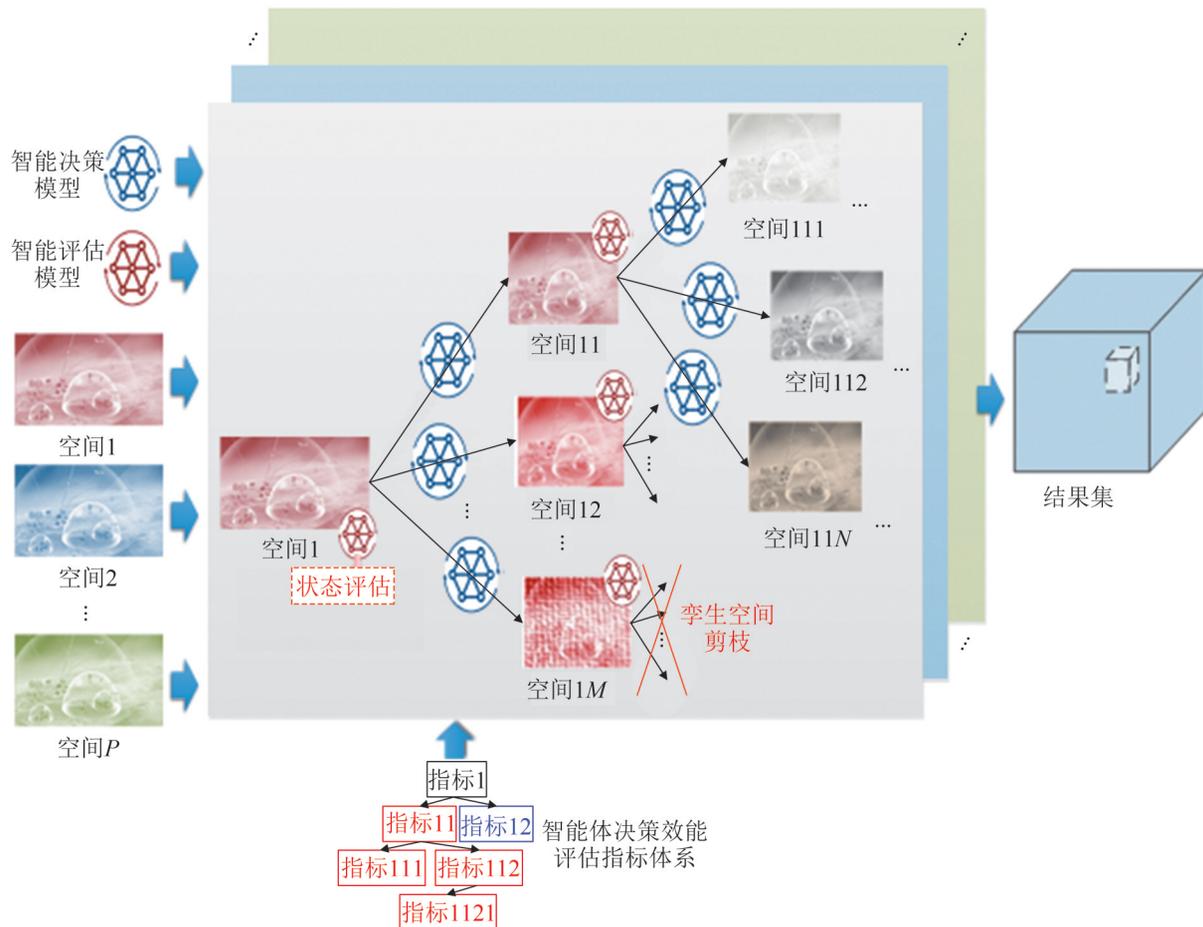


图 11 基于多重孪生空间智能化评估框架示意图

Fig. 11 Schematic diagram of intelligent evaluation framework based on multiple twin spaces

本团队初步的研究成果有^[35-36,38-39]:基于高效能云仿真的多工况仿真构建能力和并行调度方法,支持大规模孪生空间的快速构建;基于虚实融合的云设计框架,支持孪生空间构建及多重孪生空间衍生;基于深度强化学习的动态决策构建及演进方法,支持多重孪生空间中智能决策生成及迭代升级;基于人机混合增强复杂系统智能设计技术,融合人类经验与计算智能,以多重虚拟空间平行仿真为驱动,支持设计方案的智能化快速生成、评估及优化。

4.2.9 物理效应仿真器技术

针对现实环境难以用数字建模方法全面验证和分析的工况,可以建立等效复杂工况的物理效应仿真器,并加入有实物对象参与的仿真回路,通过联合实时运行与交互完成仿真任务。对于硬件在回路仿

真, 物理效应仿真器通常有生成电磁、光学等复杂环境; 对于人在回路仿真, 物理效应仿真器通常有视觉、听觉和触觉等感知环境。

本团队初步的研究成果有^[40]: 面向开展高端装备半实物仿真试验, 基于电磁、光电探测工作原理, 仿真目标与环境在典型工作情况下, 传感器观察的等效目标与环境特征, 主要包括运动特性、几何特性和辐射特性等, 并与传感器、飞控计算机等设备实现联动, 建立了多个国内领先的电磁效应和光电效应仿真实验室。

5 新型嵌入式仿真系统应用范例

5.1 智能制造领域应用范例

以离散制造业生产制造为场景, 基于新型嵌入式仿真, 构建电子元器件生产车间的质量工艺优化案例(如图 12 所示)。在该案例中, 车间物理产线、边缘网关、虚拟工艺仿真环境共同构成了数据驱动的生产质量工艺优化闭环反馈的新型智慧物联网系统。

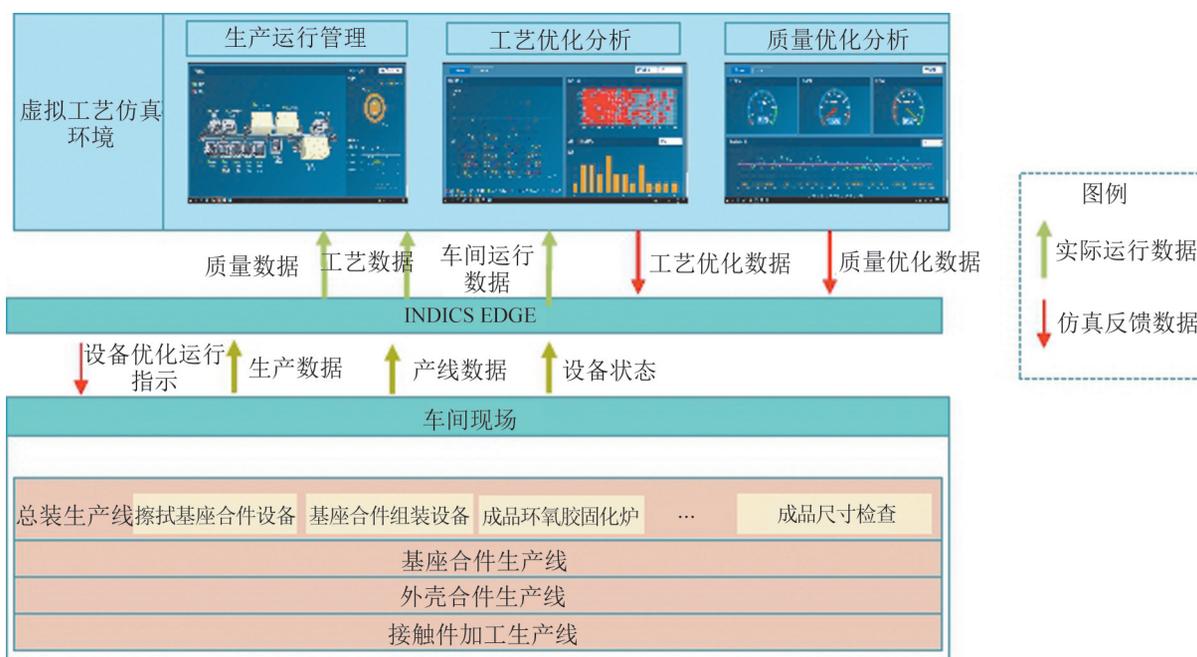


图 12 面向电子元器件生产质量工艺优化的嵌入式仿真应用示意图

Fig. 12 Schematic diagram of embedded simulation application for process optimization of production quality of electronic components

新型嵌入式仿真技术的主要作用是, 应用 RFID 与 IoT 技术, 集成机械臂、视觉检测系统等执行机构和传感器, 采集物理生产车间产线的设备运行数据、生产计划数据、质量数据和工艺数据, 并通过构建产品三维仿真工艺, 针对产品的连接扭矩峰值、分离扭矩峰值、合格品数量、不合格品数量等设备、生产数据建立产品质量一致性、失效性等质量模型, 针对分离扭矩、连接扭矩与安装高度、插针/插孔分离力等因素建立工艺关联关系模型, 同时结合产线设备实时运行状态与抖动情况, 仿真运算出影响产品质量工艺的关键因素, 并将仿真结果及时反馈到车间产线, 使车间及时调整设备运行参数, 指导优化实际的生产执行过程, 为产品质量提升和工艺优化提供决策支持。

如: 在贵州电连接器生产公司某系列产品生产过程中, 基于新型嵌入式仿真实念构建了企业云平

台, 支撑质量工艺优化, 将产品制造的螺纹内外径、产品高度等 14 个影响产品最终使用性能的测量和检验数据接入云平台, 并与虚拟设计试验仿真算法及非标设备抖动、噪声等运行知识智能融合, 对影响某系列电连接器产品质量的因素进行相关性分析, 使企业能够更深层次地进行质量问题分析和原因追溯, 为工艺师及设计师设计参数公差及工艺范围提供优化指导, 从而使产品质量合格率由之前的 95% 提升至 99.5%。

基于新型嵌入式仿真的质量工艺优化, 将实际生产的工业数据与虚拟仿真算法知识智能融合, 并通过仿真反馈系统对产品工艺及其他影响因素进行优化控制, 有效提升了企业质量工艺的闭环管理水平, 通过虚实数据的不断交互持续提升企业的产品优化能力。

5.2 智慧城市领域应用范例

以新型智慧城市(园区)建设为应用场景, 基于新型嵌入式仿真, 构建复杂系统集成的智慧城市运行仿真案例(如图 13 所示)。在该案例中, 智慧城市建设包含了城市管理、社会民生、资源环境、基础设施等领域的业务子系统, 如智慧环保子系统、智慧交通子系统、智慧管网子系统等, 这些业务子系统与智慧城市大数据平台、城市运行指挥平台, 构成了链接人、地、事、物、组织等要素的物理的城市、人类的城市、信息的城市三元融合的新型智慧城市仿真系统。



图 13 面向智慧城市运行指挥系统的嵌入式仿真应用示意图

Fig. 13 Schematic diagram of embedded simulation application for smart city operation command system

新型嵌入式仿真技术在智慧城市系统中的主要作用是: 支持构建智慧城市系统、子系统的模型, 实现对城市运行的感知、监测及趋势研判与预测预警。既可以支持构建智慧城市子系统的仿真, 又可构建智慧城市复杂巨系统的仿真, 从而及时准确掌控、预判城市运行中的各类风险隐患与未来发展趋势, 实现智能化的城市运行管理。

如: 在苏州智慧太湖新城建设中, 基于新型嵌入式仿真系统的思想, 构建了智慧城市综合运行监测仿真平台, 接入城市管网、经济、能源、安监、交通、环境、城建等 10 多个领域数据并进行动态监测监控、预警、分析和应急处置。如太湖新城智慧管网子系统, 结合前端的管线感知设备, 实现对热力、供水、通信等管道的动态监测、仿真与智能处理。此外, 基于太湖新城的智能交通子系统、包括路灯在内的基础设施子系统的建设与仿真, 实现区域交通的智能优化、路灯基础设施的智能优化调节等。该智慧

城市系统仿真理念与应用基础, 已于 2019 年推广至赣州蓉江新城进行应用, 均收到了良好的建设成效, 提升了城市运行管理的效果。

基于新型嵌入式仿真技术的智慧城市运行指挥系统——对城市现状进行精准、全面、动态映射的智能仿真, 利用获取的基础感知数据, 在网络空间的虚拟城市里, 对城市管理、社会民生、资源环境、基础设施等领域城市运行体征指标进行“一张图”动态监测监控、自主学习、预警分析、应急处置、指挥调度等, 及时准确掌控、预判城市运行中的各类风险隐患与未来发展趋势, 实现智能化的城市运行管理。

5.3 军事智能领域应用范例

以城市攻防为场景, 基于新型嵌入式仿真, 构建无人车集群智能演训案例(如图 14 所示)。在该案例中, 无人车集群物理系统、无人车集群虚拟系统以及以用户为中心的指挥控制台(筹划席和指挥席)构成了人/信息(赛博)空间/物理空间无缝融合的新型智慧物联网系统。

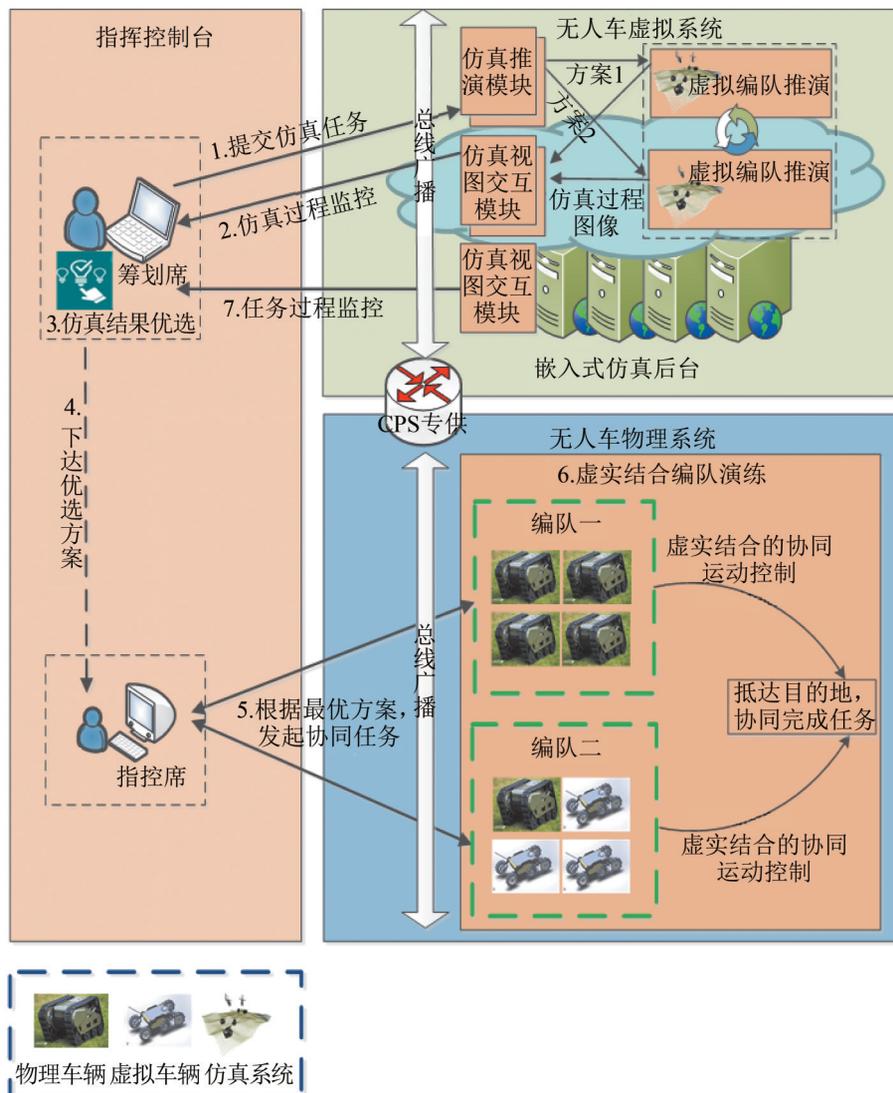


图 14 面向无人车集群智能演训的嵌入式仿真应用示意图

Fig. 14 Schematic diagram of embedded simulation application for intelligent training of unmanned vehicle swarms

新型嵌入式仿真技术的主要作用是，支持构建人在回路之上、虚实结合、大规模的仿真实例，每个仿真实例可以由物理无人车和虚拟无人车混编构成以模拟复杂任务；每个仿真实例可以在边缘仿真计算机系统超前推演以预示方案效能；基于对不同方案的分支演进和蒙特卡罗树搜索可以辅助指挥员优选仿真结果、更好地做出决策；最后决策结果下发给无人车物理系统执行。

如：在某无人车集群协同作战原型系统中，动态采集无人车集群的实时位置信息、环境感知信息，基于新型嵌入式仿真的大规模多实例在线推演，发起态势信息综合分析、预测和辅助决策，并开展群体智能算法的在线训练和虚实迁移，支持智能体持续地自学习、自适应、自成长，实现“人在回路之上”人机默契协同的态势认知与方案优化，有战争迷雾和通信受限条件下无人车集群的默契协同，以及博弈对抗条件下对智能蓝方无人车的协同围捕和探测打击动态闭环。

基于新型嵌入式仿真的大规模多实例在线推演，有效实现了群智默契协同、人机默契协同的态势认知与方案优化，并能够通过持续模拟演练支持智能体自学习、自适应、自成长。

6 结束语

本文提出了一种面向智慧物联网系统的嵌入式仿真技术，主要创新点包括：

(1) 提出了一种以用户为中心，与智慧物联网系统集成运行，支持其在线、持续认知与优化的新型嵌入式仿真应用模式。

(2) 提出了人/信息(赛博)空间/物理空间无缝融合、各类智能化仿真资源/能力/产品统一经营管理的新型嵌入式仿真系统体系架构。

(3) 提出了面向随时随地、“实时”、“连贯”、“透明”地请求、访问和获得仿真服务，兼容云仿真、高性能仿真的新型嵌入式仿真系统技术体系。

(4) 提出并攻克了9类关键技术，构建并成功应用了新型嵌入式仿真系统。

通过面向智慧物联网系统的嵌入式仿真技术的研究和初步实践，提出以下几点建议：

(1) 新型嵌入式仿真技术是新时代的一种建模仿真新模式、新技术和新业态，是实现新型智慧物联网系统高效、优质、节省、绿色、柔性、安全地运行与演进的关键技术。其技术发展要重视新一代人工智能科学技术、新一代信息通信技术、现代建模与仿真技术以及各应用领域新专业技术的深度融合。

(2) 新型嵌入式仿真技术正在持续发展中，其发展需要“技术、应用、产业”的协调发展。其发展路线应是持续坚持和发展“需求导向”、“技术推动”、“创新驱动”及“系统集成、优化”的原则。

(3) 新型嵌入式仿真技术的发展与实施还需要全国、全球的合作与交流，同时又要充分重视各国、各领域及各系统的特色和特点。

致谢

感谢技术研究与应用团队赵沁平、郝爱民、陶飞、李妮、赖李媛君、宋晓、苑海涛、张雅彬、张智慧、杨明、姚益平、厉军、戴荣、刘阳、宿春慧、李潭、马静、徐筠、张连怡、梅铮、王维靖、范帅、曲慧杨、肖莹莹、邢驰、曾贲、杨星熠、徐钊、刘泽伟等卓有成效的工作以及为本论文的编写提供的支持与帮助！

参考文献:

- [1] 李伯虎. 面向云制造系统3.0工程的建模与仿真技术研究与实践[R]. 北京: 北京仿真中心成立30周年学术交流会, 2021.
Li Bohu. Research and Practice of Modeling and Simulation Technology for Cloud Manufacturing System 3.0 Engineering [R]. Beijing: Symposium for Beijing Simulation Center 30th Anniversary, 2021.
- [2] 李伯虎. "智慧物联网"——一种适应新时代、新态势、新征程的新型物联网[R]. 北京: 第六届世界物联网大会, 2021.
Li Bohu. "Smart Internet of Things" - A New Type of Internet of Things Adapting to the New Era, New Situation and New Journey[R]. Beijing: The 6th World Internet of Things Conference, 2021.
- [3] Bahr H. Embedded Simulation for Ground Vehicles[C]// Spring 97 Simulation Interoperability Standards Workshop Proceedings. Florida, USA: SISO, 1997.
- [4] Brutzman D P, Fitzpatrick C. Creating Virtual Environments for Evaluating Human-Machine Teaming[D]. Monterey California: Naval Postgraduate School, 2020.
- [5] 万明, 樊晓光, 嵇真福, 等. 美军ACMI关键技术及发展趋势[J]. 电光与控制, 2015, 22(1): 62-66.
Wan Ming, Fan Xiaoguang, Gao Zhenfu, et al. Key Technologies and Development Trend of USAF ACMI[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(1): 62-66.
- [6] 樊世友, 朱元昌. 嵌入式仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(12): 10-13.
Fan Shiyu, Zhu Yuanchang. Embedded Simulation[J]. Computer Simulation, 2005, 22(12): 10-13.
- [7] 仇小光, 陶建锋, 张秦, 等. 雷达系统嵌入式仿真研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(1): 143-148.
Qiu Xiaoguang, Tao Jianfeng, Zhang Qin, et al. Embedded Simulation of Radar System[J]. Modern Defence Technology, 2009, 37(1): 143-148.
- [8] 周国平, 袁利国, 高宜朋, 等. 舰船动力装置实船嵌入式仿真训练系统[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(5): 74-78.
Zhou Guoping, Yuan Ligu, Gao Yipeng, et al. Research on Embedded on-Board Simulated Training System of Marine Power Plant[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(5): 74-78.
- [9] 唐震, 李伯虎, 柴旭东, 等. 普适化仿真网格研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(7): 1313-1321.
Tang Zhen, Li Bohu, Chai Xudong, et al. Pervasive Simulation Grid[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(7): 1313-1321.
- [10] Gill H. NSF Perspective and Status on Cyber-Physical Systems: NSF Workshop on Cyber-Physical Systems[M]. Austin, TX, USA: National Science Foundation, 2006.
- [11] Parrott A, Warshaw L. Industry 4.0 and the Digital Twin: Manufacturing Meets its Match[M]. Dallas: Deloitte University Press, 2017.
- [12] Wang Shiyong, Wan Jiafu, Zhang Daqiang, et al. Towards Smart Factory for Industry 4.0: a Self-Organized Multi-Agent System with Big Data Based Feedback and Coordination[J]. Computer Networks (S1389-1286), 2016, 101(4): 158-168.
- [13] 国务院. 国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见(国发〔2016〕28号) [EB/OL]. (2016-05-20)[2021-12-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/20/content_5075099.htm.
State Council. Guiding Opinions of the State Council on Deepening the Integrated Development of Manufacturing Industry and Internet: the No.28 Document Issued by the State Council in 2016 [EB/OL]. (2016-05-20)[2021-12-11]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/20/content_5075099.htm.
- [14] Zhou Ji, Zhou Yanhong, Wang Baicun, et al. Human-Cyber-Physical Systems (HCPSs) in the Context of New-Generation Intelligent Manufacturing[J]. Engineering (S2095-8099), 2019, 5(4): 624-636.
- [15] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication White paper[R]. Melbourne: US Florida Institute of Technology, 2014.
- [16] Sachin S Kamble, Angappa Gunasekaran, Harsh Parekh, et al. Digital Twin for Sustainable Manufacturing Supply Chains: Current Trends, Future Perspectives, and an Implementation Framework[J]. Technological Forecasting and Social Change (S0040-1625), 2022, 176(11): 121448.
- [17] Negri E, Fumagalli L, Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPSbased Production Systems[J]. Procedia Manuf (S2351-9789), 2017, 11: 939 - 948.
- [18] Glaessgen E, Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles[C]// 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, HI, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012: 1818.

- [19] 高星海. 从基于模型的定义(MBD)到基于模型的企业(MBE)——模型驱动的架构:面向智能制造的新起点[J]. 智能制造, 2017(5): 25-28.
Gao Xinghai. From MBD to MBE--Model Driven Architecture: the New Starting Point for Intelligent Manufacturing[J]. IM (Intelligent Manufacturing), 2017(5): 25-28.
- [20] Gao Yinping, Chang Daofang, Chen Chun-Hsien, et al. Design of Digital Twin Applications in Automated Storage Yard Scheduling[J]. Advanced Engineering Informatics (S1474-0346), 2022, 51(2): 101477.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 李伯虎, 柴旭东, 李潭, 等. 复杂系统高效能仿真技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(3): 221-228, 245.
Li Bohu, Chai Xudong, Li Tan, et al. Research on High-Efficiency Simulation Technology of Complex System[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2012, 7(3): 221-228, 245.
- [24] Li Bohu, Chai Xudong, Lin Tingyu, et al. Cyber-Physical System Engineering Oriented Intelligent High Performance Simulation Cloud[M]. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- [25] 邹萍, 张华, 马凯蒂, 等. 面向边缘计算的制造资源感知接入与智能网关技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 40-48.
Zou Ping, Zhang Hua, Ma Kaidi, et al. Perception and Access of Manufacturing Resource and Intelligent Gateway Technology for Edge Computing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 40-48.
- [26] Yang Chen, Lan Shulin, Shen Weiming, et al. Towards Product Customization and Personalization in IoT-enabled Cloud Manufacturing[J]. Cluster Computing (S1386-7857), 2017, 20: 1717-1730.
- [27] 唐震, 李伯虎, 柴旭东, 等. 普适化仿真网格中仿真服务迁移技术的研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12): 3631-3636, 3640.
Tang Zhen, Li Bohu, Chai Xudong, et al. Studies on Simulation Service Migration Technologies in Pervasive Simulation Grid [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(12): 3631-3636, 3640.
- [28] 唐震, 李伯虎, 柴旭东. 上下文感知在普适化仿真网格中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2008(8): 1550-1558.
Tang Zhen, Li Bohu, Chai Xudong. Application of Context-Awareness in Pervasive Simulation Grid[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008(8): 1550-1558.
- [29] Li Bohu, Shi Guoqiang, Lin Tingyu, et al. Smart Simulation Cloud (Simulation Cloud 2.0)—The Newly Development of Simulation Cloud[C]// 18th Asia Simulation Conference. Singapore: Springer, 2018: 168-185.
- [30] Guo Liqin, Wang Mei, Ruan Chao, et al. A Cloud Simulation Based Environment for Multi-Disciplinary Collaborative Simulation and Optimization[C]// IEEE International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Piscataway, NJ: IEEE, 2017.
- [31] Yang Chen, Shen Weiming, Lin Tingyu, et al. A Hybrid Framework for Integrating Multiple Manufacturing Clouds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S1433-3015), 2016, 86(1): 895-911.
- [32] 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.
- [33] Lin Tingyu, Shi Guoqiang, Yang Chen, et al. Efficient Container Virtualization-Based Digital Twin Simulation of Smart Industrial Systems[J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2020, 281(4): 124443.
- [34] Yang Chen, Chi Peng, Song Xiao, et al. An Efficient Approach to Collaborative Simulation of Variable Structure Systems on Multi-Core Machines[J]. Cluster Computing (S1573-7543), 2016, 19(1): 29-46.
- [35] Lin Tingyu, Jia Zhengxuan, Yang Chen, et al. Evolutionary Digital Twin: A New Approach for Intelligent Industrial Product Development[J]. Advanced Engineering Informatics (S1474-0346), 2021, 47(2): 101209.
- [36] 李伯虎, 林廷宇, 贾政轩, 等. 智能工业系统智慧云设计技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 3090-3102.
Li Bohu, Lin Tingyu, Jia Zhengxuan, et al. Smart Cloud Design Technology Applied to Intelligent Industrial System[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12): 3090-3102.
- [37] 林廷宇, 肖莹莹, 贾政轩, 等. 一种模型驱动自主演进智能设计方法: 中国, 202111323785.2 [P]. 2021-11-10(patent)

application accepted).

Lin Tingyu, Xiao Yingying, Jia Zhengxuan, et al. A Intelligent Design Method for Self-Adaptive Evolution: China, 202111323785.2[P]. 2021-11-10.

- [38] 林廷宇, 李伯虎, 肖莹莹. 一种基于机器学习和平行仿真的高级计划与排程方法: 中国, ZL201810092577.8[P]. 2018-07-06.

Lin Tingyu, Li bohu, Xiao Yingying. An Adaptive Plan and Scheduling Method Based on Machine Learning and Parallel Simulation: China, ZL201810092577.8[P]. 2018-07-06.

- [39] 林廷宇, 贾政轩, 曾贲, 等. 一种基于人机混合增强的复杂产品自主构建方法和模块: 中国, 202010841483.3[P]. 2020-12-11(patent application accepted).

Lin Tingyu, Jia Zhengxuan, Zeng Bi, et al. An Autonomous Construction Method and Module for Complex Products Based on Human-Machine Hybrid Enhancement: China, 202010841483.3[P]. 2020-12-11.

- [40] 马静, 卿杜政, 费锦东, 等. 浅谈复杂电磁环境建模与仿真技术[C]// 第七届军事信息系统软件仿真学术研讨会, 北京: 中国电子学会电子系统工程分会, 2010: 17-25.

Ma Jing, Qing Duzheng, Fei Jindong, et al. Brief Talk on Modeling and Simulation Technology of Complex Electromagnetic Environment[C]// The 7th Military Information System Software Simulation Symposium, Beijing: Electronic System Engineering Branch of China Electronics Society, 2010: 17-25.