

虚实融合驱动智慧港口发展研究

曹菁菁^{1,2}, 雷阿会², 刘清^{1,2,3*}, 张煜^{1,2}, 王磊^{1,2}, 严新平^{1,2,3,4}

(1. 水路交通控制全国重点实验室, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063;
3. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063; 4. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430063)

摘要: 承担着全球90%以上贸易运输的航运业拥有丰富的数字化场景, 通过智慧港口建设赋能航运业、港口与虚实融合技术深度结合形成智慧港口数字底座, 成为业界共识。本文界定了智慧港口与虚实融合技术体系的基本内涵, 从作业计划、活动实施、设备运维、安全应急、能源绿色5个方面分析了港口生产运营对虚实融合技术的需求, 总结了系统仿真、扩展现实、信息物理系统、数字孪生、平行系统、元宇宙6种虚实融合技术图谱及其在智慧港口中的应用场景。在梳理发展思路、凝练科学问题的基础上, 论证提出了虚实融合驱动智慧港口高质量发展的“13531”体系框架, 涵盖技术体系发展定位、关键技术发展方向、重点领域研究方向等。从深化应用、政策激励、科技示范、人才培养等方面提出了发展建议, 以期稳健推动虚实融合技术体系在智慧港口中的工程应用提供先导性参考。

关键词: 智慧港口; 虚实融合; 信息物理系统; 数字孪生; 元宇宙

中图分类号: U65 **文献标识码:** A

Smart Port Development Driven by Virtual-Real Integration

Cao Jingjing^{1,2}, Lei Ahui², Liu Qing^{1,2,3*}, Zhang Yu^{1,2}, Wang Lei^{1,2}, Yan Xinping^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan 430063, China; 2. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China; 4. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The shipping industry, which undertakes over 90% of global trade and transportation, has rich digital scenarios. Empowering the shipping industry through smart port construction and integrating ports with virtual-real integration to form a smart port digital base has become an industry consensus. This study defines the smart ports and the virtual-real integration technology system, and analyzes the demand of port operation for virtual-reality integration technology from five aspects: operation planning, activity implementation, equipment operation and maintenance, safety and emergency response, and energy conservation. It also summarizes maps of six virtual-real integration technologies and their application scenarios in smart ports, the technologies being system simulation, extended reality, information-physical system, digital twin, parallel system, and metaverse. After sorting out the development idea and examining scientific issues, a system framework is proposed for the high-quality development of smart ports driven by virtual-real integration technologies, covering the development positioning of technology systems, key technology

收稿日期: 2023-03-18; 修回日期: 2023-05-11

通讯作者: *刘清, 武汉理工大学交通与物流工程学院教授, 研究方向为交通运输规划与管理; E-mail: lqwhutjt@whut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海南自贸港港口群协同发展战略”(21-HN-XZ-05), “湖北绿色智能航运发展战略研究”(HB202109); 国家自然科学基金项目(72174160)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

development directions, and research directions in key fields. Suggestions for development are proposed from the perspectives of deepening application, policy incentives, technological demonstration, and talent cultivation, thereby providing a reference for the engineering application of the virtual-real integration technology system in smart ports.

Keywords: smart port; virtual-real integration; cyber-physical systems; digital twin; metaverse

一、前言

港口是世界经济连接的重要节点，一个国家现代物流体系的关键枢纽。随着全球网联化、信息化、智能化发展，数字孪生、第五代移动通信(5G)、人工智能(AI)、云计算、大数据、区块链等信息技术深入应用，为港口转型升级提供了新的驱动力。以“关于建设世界一流港口的指导意见”(2019年)为引领^[1]，国家发布了一系列推动智慧港口建设的政策文件；在“十三五”时期，逐步建成一批安全、高效、智能、协同的智慧码头^[2]，基本形成“建立全新智慧码头”“传统码头智慧化改造”两条路径并举的发展格局。然而，受制于港口现实条件、技术成熟度、市场接受度等因素，船港信息共享不充分、技术集成程度不平衡、港口运作不协同、不同货类码头技术路径不明晰等问题依然存在。因此，探究支撑智慧港口建设的虚实融合技术框架和方向，是我国迈向世界一流港口强国过程中的切实需求和紧迫任务。

虚实融合驱动的智慧港口以信息物理系统(CPS)为结构框架，具有全面感知、智能决策、自主装卸、全程参与、持续创新的生态特征^[3]。其中，CPS的内核在于实现物理世界、虚拟世界的互联互通和互操作，达到信息高度共享、技术有机集成、领域迭代深入、生产高效协同的目的。一系列反映虚实融合特征的新兴技术在港口智能转型过程中涌现，逐步构成“以实映虚、以虚控实”的虚实融合技术体系^[4]。系统仿真、CPS、扩展现实(XR)、数字孪生、平行系统、元宇宙等虚实融合技术，也成为解决诸多领域中物理(全要素)、数据(全状态)、模型(全业务)、服务(全流程)融合/交互/协同问题的有效工具^[5]。

当前，有关虚实融合技术在港口特别是集装箱码头上的理论与应用研究正在稳步展开。例如，提出了数字孪生港口创建与实践的智慧港口实现路径^[6]，论述了仿真推演技术在天津港集装箱码头经营中的多种作用并设计了生产仿真推演模型^[7]，从

虚拟现实(VR)技术角度探讨黄骅港煤炭码头的三维可视化管理系统开发路线^[8]，从港航协同角度并基于CPS理论设计了体系架构及整体框架^[9]，分析了基于平行系统的智慧绿色港口现状需求、体系结构、新形态、关键平台技术^[10]，探讨了元宇宙技术驱动港航物流数字化转型的要点及趋势^[11]，概括了以数字孪生为主体的技术平台及框架在集装箱自动化码头应用方面的发展趋势^[12]。

智慧港口是一个复杂的巨系统，相关研究涉及港口系统的“人-机-物-港-航”解耦，“人-机-物”关系演变机理探析、全时/全域/全流程动态规律分析等问题。虚实融合技术和智慧港口系统紧密联系是未来港口建设发展的主要方向，呈现出更广泛物理对象的数字化、万物互联、社会虚拟空间建立、虚实空间边界消融、虚实系统深度集成等趋势。推动全域计划制定、全过程活动实施、设备群健康管理、多场景安全保障、综合性能源管理等方面的分阶段、分步骤、分场景智慧化发展，有助于实现港口智慧运营、智慧商务、智慧监管的发展目标，推动虚拟数字港口与真实物理港口的虚实映射、迭代交互、动态演化，增强最优作业计划、最短实施时间、最准故障预测、最快安全应急、最低能源消耗等方面的应用效能。针对于此，本文着重阐明智慧港口主要生产运营领域的发展需求、各类虚实融合技术的港口场景应用态势，研究适应智慧港口新阶段要求的体系框架并提出发展建议，以期促进港口与虚实融合技术体系的融合研究及应用。

二、虚实融合驱动智慧港口发展需求分析

从虚实融合视角看，智慧港口的发展重点在于：通过全新的运作模式，围绕智慧港区生产的全时/全域/全流程，在作业计划、生产实施、设备管理、安全保障、综合能源5个主要生产领域，实现最精准的计划、最高效的装卸、最智能的运维、最安全的作业、最生态的能耗。相应需求分析可结合主要生产领域展开。

（一）提升生产作业计划准度

我国港口作业生产任务繁重，2022年集装箱吞吐量为 2.95×10^8 标准箱，煤炭及其制品、金属矿石吞吐量分别为 1.67×10^8 t、 1.13×10^9 t，液化货品吞吐量（如原油、天然气）为 5.06×10^7 t^[13]；预计“十四五”时期货物吞吐量增速维持在2%~3%^[14]。港口作业流程环环相扣，复杂的业务场景、多变的生产环境、耦合的系统决策对生产作业在时空资源分配、任务整体安排方面的计划准确度提出了极高要求；而因相关能力存在不足，造成港口全局资源浪费、拥堵问题恶化，间接限制了港口吞吐能力的充分发挥。

我国大型港口的生产作业计划、全局智能调度主要采用引进的码头生产管理系统（TOS，由美国Navis公司开发），涵盖计划生成、作业指令计算、调度指令派发等任务环节。近年来，为了提高国产TOS软件占比、自主掌握港口核心数据，我国大型港口积极采用国产TOS系统，如上海港的CMPort、宁波舟山港的n-TOS、山东港口的A-TOS，江苏港口、厦门远海与招商港口的CTOS。然而，亟待利用新兴信息技术增强国产TOS系统的数字化、智能化水平，以更高效地解决码头多类型车辆混编作业、全流程设备集成协同作业等计划及调度问题。对应地，虚实融合技术具有高效联动多生产环节的特点，可针对物理港口的全过程、全要素，全面进行数字港口的仿真推演和自主决策；据此提高生产计划精准度、切实提升生产管理效率，是实现港口生产作业智能化的重要途径。

（二）提高生产活动实施效率

以集装箱码头为例，生产活动实施的主要内容为：在接收生产管理系统的作业指派后，港口设备控制系统（ECS）负责管控自动化集装箱码头桥吊、水平运输设备、轨道吊等主要自动化设备，实时执行作业指令。TOS、ECS被视为码头的“大脑”“神经”，通过协同完成港口生产任务，但两者配合受海量信息融合、智能控制集成、智能决策自治等因素的影响，导致真实场景协同困难、综合装卸效率不高。亟需构建智能虚拟协同系统，以为作业和管理人员提供与实际系统一致、具备良好预判能力的智能环境。

在智慧港口发展背景下，需要采用物联网感

知、通信导航、自动控制、信息网络、大数据、云计算、高清视频等技术，深度整合码头操作、设备控制、闸口控制、设备监测等系统；将虚实融合技术整合至生产活动实施过程，连结岸侧设备远程操控、水平运输无人化、堆场装卸自动化等真实港口场景以及虚拟港口场景的生产活动要素及状态、环境影响因素、操作控制行为等。部署虚实融合，推动智能装备替代人工劳动，根本性提高港口生产活动的实施效率。

（三）升级设备智能运维管理

随着经济、科技、贸易的发展，我国港口设备能力提升迅速。2021年，主要集装箱码头装卸船桥吊或其他吊车、轮胎吊或其他行车的负荷为5589.7 t、3292.9 t，数量为1114台、2391台，分别是2016年的1.07倍、1.11倍，1.77倍、1.48倍。2021年集装箱正面吊岸基供电设施设备的数量为382台，是2016年的1.91倍。此外，国产品牌的港口机械产品具有较强的国际市场竞争能力。

在良好的硬件基础上，我国主要港口实施了一系列与设备运维管理相关的技术改进项目，推动了码头设备运行异常监测、远程故障诊断、动态维修决策等的快速发展，但较国际先进水平存在一定差距。解决其中的关键科学问题，如“设备-构件-部件-零件”分层故障多物理场耦合及演化机理、多模态信息融合与处理、故障高保真建模理论、知识驱动的设备故障预测推演，需要应用虚拟融合技术实现多物理量、多尺度、多模态的设备群协同智能运维。升级港口设备智能运维系统的虚实融合能力，是提升设备健康管理水平、开展智能制造与数字化转型协同的必然选择。

（四）保障生产过程应急安全

港口装卸涉及石油原料库、危险化学品库、输油管道与储罐、危品运输车辆等风险环节，如因管理运行不善造成重大事故，将产生不可逆的灾难性后果。港口突发事件面临爆发时间短、扩展区域未知、人员疏散困难、各方协调不畅、次生灾害频发等突出问题。针对港口突发事件研发风险防范、应急管控技术，是提升港口管理运行的事前预警、事中救援、事后恢复能力的必然要求。

港口生产过程应急安全能力提升依赖健全的治

理体系、先进的科技体系，应急演练模拟仿真是增强监测预警能力的关键技术。传统的应急演练模拟系统多为事先规定系统各类参数的程序化培训及模拟，不能考虑港口突发事件特殊的货物存放方式、环境影响因素、人员聚集分布、监管权责机制。智能化交互式仿真演练技术可显著提升港口突发事件救援中的提前预警、多方协同行动、应急处置能力，形成态势预判、决策优化、动态推演、自适应调整的港口应急救援方案及策略^[15]。发展虚实融合技术，对提升港口重大突发事件相关的快速预测、应急方案评估等能力具有重要意义。

(五) 加强综合能源管控节能

绿色低碳是提升智慧生态港口发展水平、匹配港口城市环境需求的必要手段，重在减少能源消耗和碳排放量^[16]。我国沿海地区因海运产生的SO₂、NO₂、PM_{2.5}约占气态污染物的10%，港口能源系统存在负荷需求量超高、能源结构欠平衡、供需资源不可控、环境污染较严重等问题。近年来普及实施的岸电、油改电、油改气等降低了港口机械、停靠船舶的能源消耗，风能、氢能、太阳能、潮汐能等可再生新能源的港口应用具备技术可行性。在此背景下，建设绿色低碳智慧港口能源系统，稳固传统能源和新兴能源的统筹配置，加强物理能源与多种能流的有机融合，兼顾供能侧与用能侧的“船-港-城”互动协同，在港口能源系统与港口其他系统之间增强信息实时交互、提供灵活定制服务，促进智慧港口的绿色化、低碳化发展。

对于港口能源系统，虚实融合技术通过能源系统的实时感知、互联互通、资源协同、融合建模，有助于厘清多能流关系、促进信息物理融合、降低

非线性及多尺度特征造成的不确定性。其他领域已经提出了面向能源互联网、电力物联网、智慧能源系统的数字孪生或元宇宙体系架构，可为智慧港口领域发展提供经验借鉴^[17-19]。港口综合能源系统的发展，也为虚实融合技术的港口落地应用提供了新思路^[20]，有利于提升综合能源系统在全生命周期内（规划、建设、运行、维护）的能源利用效率及运行质量。加快虚实融合驱动的智慧港口能源发展，是深化绿色环保治理、实现“双碳”目标的必然路径。

三、虚实融合驱动智慧港口应用场景分析

虚实融合技术体系包含系统仿真、CPS、XR、数字孪生、平行系统、元宇宙6种主要技术（见表1），各种技术既有独立发展也有紧密联系。根据各种技术的港口应用发展程度，归纳了所处的发展阶段（初始、发展、成熟），列举了相关的应用场景（见图1）和技术图谱（见图2）。

(一) 港口应用“老大哥”：系统仿真

自2010年起，仿真学科研究进入爆发期。系统仿真指在分析系统各要素性质及其关系的基础上，建立具有逻辑关系和数量关系的仿真模型，具备描述系统结构和行为过程等功能，根据仿真实验或定量分析形成优化决策方案；属于虚实融合技术的雏形和基础。根据模型特征分为离散事件系统仿真、连续时间系统仿真。

离散事件系统仿真在港口领域应用广泛，可视为虚实融合技术在港口应用方面的“老大哥”。港口作为复杂的离散事件动态系统，具有非线性、不

表1 虚实融合技术特征对比

技术特征	系统仿真	CPS	XR	数字孪生	平行系统	元宇宙
建模精度	高精度	由需求决定， 相对较高	高精度	由需求决定， 相似度高	由需求决定， 相似度高	由需求决定， 相似度高
与现实实体相似度	高度相似	相似	高度相似	相似	可脱离现实， 平行发展	可脱离现实， 平行发展
数据输入	静态	动态实时	动态实时	动态实时	动态实时	动态实时
控制输出	无	动态实时	动态实时	决策干预非实时	决策干预非实时	动态实时
开放性	封闭	封闭	开放	开放	开放	开放
终端	嵌入式系统	嵌入式系统	VR	Web、VR、嵌入式系统	Web、VR、控制接口	VR、脑机接口

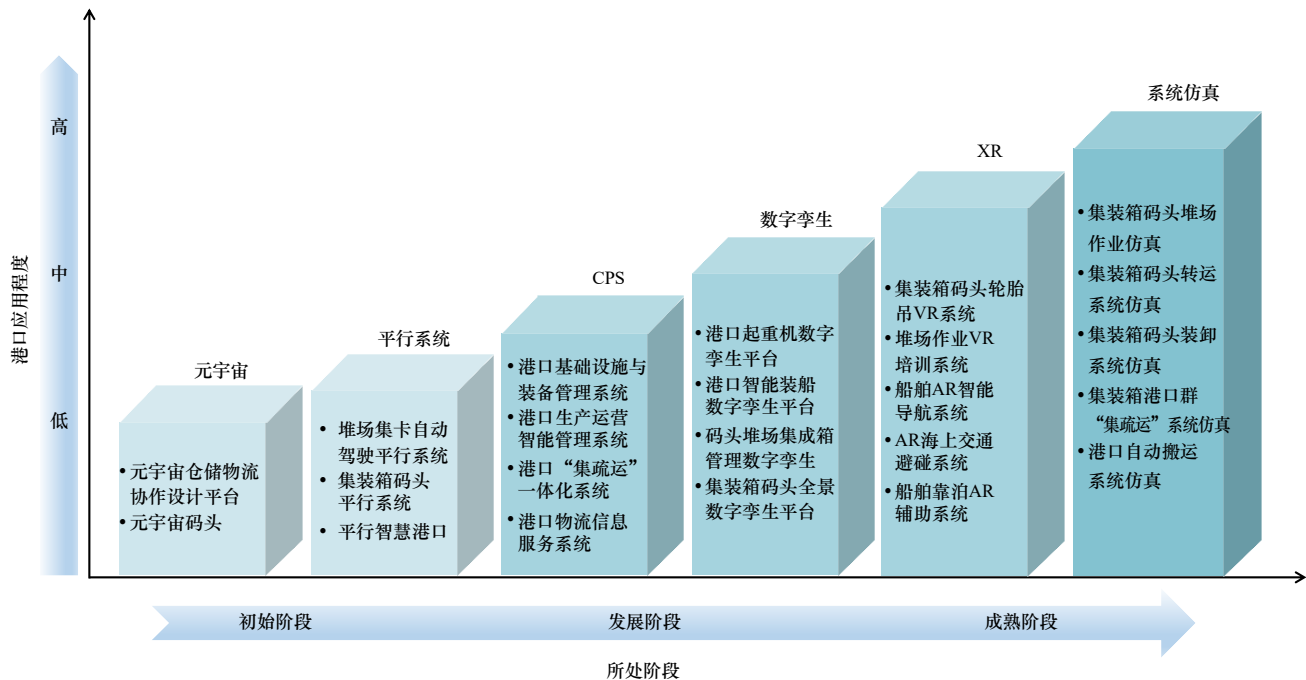


图1 虚实融合技术应用港口发展阶段图

注：AR表示增强现实。

确定性、状态变化异步性的特点，难以经由传统的数学解析方法进行描述。系统仿真通过建模仿真、因素分析、瓶颈优化等形式，解决码头通过能力测算、设计方案比选、生产效能评估等方面的规划、建设、运营问题。目前，离散事件系统仿真的研究对象由单一问题转向复杂化系统问题^[21,22]，可与其他新兴信息技术（如数字孪生）相结合。

连续时间系统仿真以力学理论为基础，多用于港口散货物料运输系统。针对转运系统料流控制不当引发的堵料、磨损、洒料、扬尘等问题，结合螺旋/链斗/刮板/抓斗卸船机、装船机、斗轮堆取料机、筒仓、转运站等具体场景，根据离散元等数值仿真方法结果来降低设备故障发生概率、提升设备整体作业效率。

（二）港口应用“潜力股”：扩展现实

XR指通过计算机将物理世界、虚拟世界相结合，形成提供沉浸式体验、可实现人机交互的虚拟环境。VR、AR、混合现实（MR）显示技术共同构成XR^[23]，分别侧重纯虚拟环境沉浸、真实叠加虚拟不互动、真实叠加虚拟互动。

基于XR的港口应用始于21世纪初，目前以VR为主，集中在3类应用场景：港口业务操作培

训，应用最为广泛，已有多项成果产出；辅助数字孪生或仿真系统，应用最具潜力，多用作数字孪生体系的虚实交互模块；码头装卸工艺模拟，正在逐步发展之中^[24]。

尽管XR技术起步较早，但因体感不佳、环境受限、便携度低、硬件成本高、兼容性差等原因导致港口应用场景受限。随着元宇宙概念的兴起，XR成为元宇宙的硬件基础，面临大量港口应用场景（如检测维护、流程管理）亟待开拓的良好局面。就当前发展趋势看，XR技术可视为未来港口研究和应用的“潜力股”。

（三）港口应用“先锋者”：信息物理系统

CPS是新一代虚实融合技术的奠基者，其发展受益于工业互联网、工业4.0等智能制造浪潮的兴起；集成计算、通信、控制技术，实现物理世界和信息世界中“人-机-物-环-信”的映射与交互，是高度集成、高效协同的多维复杂系统^[25]。相较数字孪生，CPS更侧重系统架构的基础科学研究。

CPS是基于虚实融合思想开展港口应用的“先锋者”。例如，以青岛港为代表，实施了新型“无人码头”CPS工程，建立了自动化码头CPS综合技术体系，具有全方位态势感知、柔性化作业控制、

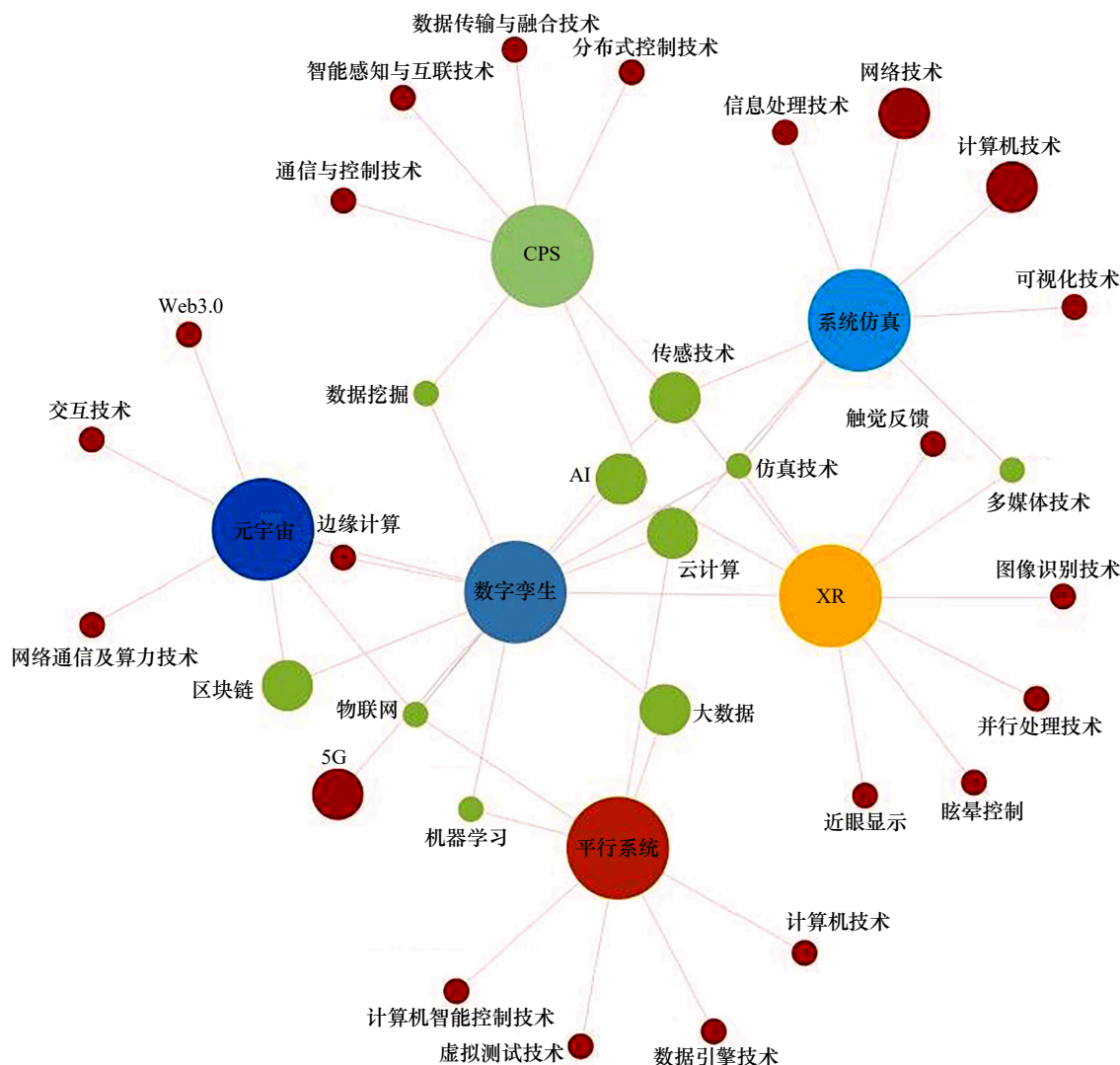


图2 虚实融合技术图谱

智能化调度指挥的特征。也要注意，随着数字孪生技术的出现和发展，单纯的CPS创新应用趋势减弱，但相关底层逻辑、核心思想等仍蕴含于各种新型虚实融合技术中。

(四) 港口应用“新宠儿”：数字孪生

数字孪生充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，具有多物理、多尺度、多学科集成，实时同步，虚实映射，高保真度等特征，是实现物理世界、虚拟世界交互及融合的技术手段^[26]。

作为港口复杂系统管理与控制方向的研究热点，港口数字孪生在经历了概念培育、方案架构阶段后逐步明朗，近年来进入场景试点期^[27-29]，但各大港口选取的视觉表现、技术集成、业务视角不尽

相同。在落地建设过程中，各大港口关注数字孪生在实时、保真特性方面的高要求，推动了集装箱自动化码头上的应用发展。然而，散货码头的数字孪生应用较少，已有应用侧重港口运营、设备作业、港航业务等的优化，通过港口作业的可视化仿真来提高港口运营效率。

(五) 港口应用“新形态”：平行系统

平行系统指基于人工系统、计算实验、平行执行的理论，由物理现实系统、一个或多个虚拟/理想人工系统组成的社会物理信息系统 (CPSS)^[30,31]；用于解决复杂系统建模精度低、有效实验管理及控制手段缺乏的问题，可降低复杂系统设计、部署、运维的难度。智慧港口作为复杂系统，在生产运行

中存在多个业务系统之间的高度耦合,在控制过程中存在不确定因素之间的交叉影响。平行系统在多场景的港口应用上具有天然优势,但当前针对智慧港口平行系统架构开展的研究不多^[11,32],仍处于港口应用的初始阶段。

平行系统作为港口应用的“新形态”,侧重港口生产作业计划、活动实施所用的码头管控平台架构设计,体现为科学性视角;但在人文性、社会性、知识性等偏主观因素方面,鲜有港口应用探讨。随着元宇宙的发展,考虑人在闭环、数字社会等转型方向,构造“以人为本”的平行系统港口新模式,成为智慧港口运营及管理的新趋势。

(六) 港口应用“爆发点”:元宇宙

元宇宙有很大概率成为集各类虚实融合技术于一体的港口应用“爆发点”,仿真交互、数字孪生、XR、物联网、云计算、区块链、5G、Web 3.0等技术可成为元宇宙的建设工具。元宇宙不仅涵盖CPS、数字孪生所对应的物理世界,还与“数实”融合息息相关,可创造基于内容生产、经济系统、用户体验等要素的虚拟世界。工业界开始探讨适宜工程应用的工业元宇宙、企业元宇宙、智造元宇宙等概念及体系。

元宇宙概念提出时间较短,尚未获得港口场景的实际应用,但其技术体系中的数字孪生、XR等已在港口应用上开展较多,具有扎实的应用基础。元宇宙可能的港口应用形式有^[12,33]:远程沉浸式作业替代亲临现场,显著减少员工通勤时间;虚拟人物助力从业人员处理繁琐工作,如沟通联络、账单核对、申请填报等;虚拟交付取代真实交付,以持有虚拟物品的方式避免无实际意义的实物交付及物流作业。鉴于元宇宙治理蕴含的巨大潜力^[34],仍可提炼其他港口应用场景。

四、虚实融合驱动智慧港口发展体系框架

(一) 发展思路及科学问题梳理

发展虚实融合驱动的智慧港口体系,旨在解决复杂港口系统的全过程协同、时空动态性、环境不确定、模块强耦合、系统难集成等核心问题;立足新技术发展趋势,按照生产流程“无缝链接、协同联动”基本原则,聚焦智慧运营、智慧商务、智慧

监管目标,支撑智慧港口高质量发展。开展虚实融合技术与智慧港口应用场景的适配,建立具有“全面感知、泛在互联、深度计算、实时分析、智慧决策、精准执行、自主装卸、闭环反馈”特征的智慧港口虚实融合赋能系统,提出覆盖港口智慧作业、智能控制、智能运维、智慧安防、智慧能源应用的虚实融合技术驱动发展模式;提升“虚拟港口”“物理港口”同步规划、设计、建设、呈现和实施能力,驱动港口信息实时共享化、资源配置最优化、生产管理柔性化。按照“汇技术、选方向、抓重点、配场景、达目标”的自下而上总体思路,论证形成虚实融合驱动智慧港口发展的体系框架,据此完善智慧港口生产管理体系,驱动港口建设和管理由扩张型向敏捷型转变。

虚实融合技术与港口应用趋向深度融合,为研究并解决智慧港口面临的系统演化、协同、预演、集成等层面的科学问题提供了可行途径。^①揭示港口系统多尺度时空演化规律。基于虚实融合技术提取物理港口宏观、中观、微观等尺度的系统关键特征,在虚拟港口中模拟系统的运营过程,挖掘系统的内在机理及运行规律。^②探索港口系统子结构内在关联机理。基于虚实融合技术探析港口物流系统的复杂性、分形自相似、不确定性等特性,揭示系统内部层次之间的相似性、层级之间的关联关系,建立港口物理对象与虚拟模型的状态映射关系。^③突破港口系统全要素协同调控理论。基于虚实融合技术构建港口系统“人-机-物”耦合模型及解耦方法,识别港口系统的动态驱动机制、韧性调控机理、协同管控策略,提出智慧港口系统统筹优化调控理论。^④剖析港口系统多源信息强融合机制。基于虚实融合技术集成多源信息,开展港口关键要素识别、定位、监测,实现数据级、特征级、决策级融合,探析港口绿色与安全运行态势并进行综合评估,支持智慧港口运营管理决策。

(二) 体系框架

虚实融合驱动的智慧港口技术体系用于构建“物理港口-信息港口-社会港口”互联、互通、互动、互助的闭环生态体系;从平台视角看,可划分为“基础层-技术层-领域层-目标层-定位层”5个层级,构建“1个基础底座+3类技术方向+5个领域重点+3大目标维度+1个体系定位”的“13531”

智慧港口发展体系框架（见图3）。其中，“1个基础底座”指聚合港口类型、领域建设相关的基础技术，建立技术集成环境，成为虚实融合技术全域覆盖的基石；“3类技术方向”指在基础单元底座上，确立巩固升级类、加快应用类、积极探索类等虚实融合技术发展方向；“5个领域重点”指智慧作业、智能控制、智能运维、智慧安防、智慧能源等生产领域发展重点，建立虚实融合技术、港口领域之间的映射/关联关系；“3大目标维度”指智慧运营、智慧商务、智慧监管等目标；“1个体系定位”指以数智虚实融合为内核，连结“人-机-物-港-航”，建成国际一流的智慧港口。

（三）技术方向

1. 巩固升级类技术

在系统仿真技术方向，重点实现港口生产计划、设备运维的管理智能化。① 研究基于复杂系统经典理论的快速建模、可复用建模技术，解决改变码头仿真对象需重新搭建仿真模型、步骤繁琐、用时较长等问题。② 发展基于AI的系统建模与仿真技术，提升新型系统的建模、运行、分析、处理能力^[35]。③ 提升仿真技术在数字孪生、平行系统中

的智能推演能力，结合系统动力学、知识表示、深度学习等技术，进行码头生产计划、设备故障的预测及反馈。

在XR技术方向，重点实现港口生产实施、设备运维的管理智能化。① 发展VR智能获取、普适设备、感知融合、核心芯片及器材、软件平台及工具、标准规范方面的技术，解决各类码头设备虚拟仿真精度不高、效率偏低的问题，为元宇宙技术应用确立基础。② 拓展AR技术的港口应用场景，借鉴船舶辅助驾驶、目标移动跟踪等AR应用经验，发展港口水平运输设备全景拼接、目标检测、图像渲染等技术。

在CPS方向，重点实现港口生产运营、运输服务、安全应急的管理智能化。借鉴船舶、汽车、航空、航天、石化等行业的技术应用经验，以人智、辅智、混智、机智4类模式为港口应用重点，依托数字孪生、XR、虚拟仿真等技术构建安全码头管理系统。

2. 加快应用类技术

在数字孪生技术方向，重点实现港口全生产领域的管理智能化。研究高精度、快速建模技术。发展二维和三维数字模型编码、空间模型精细融合、

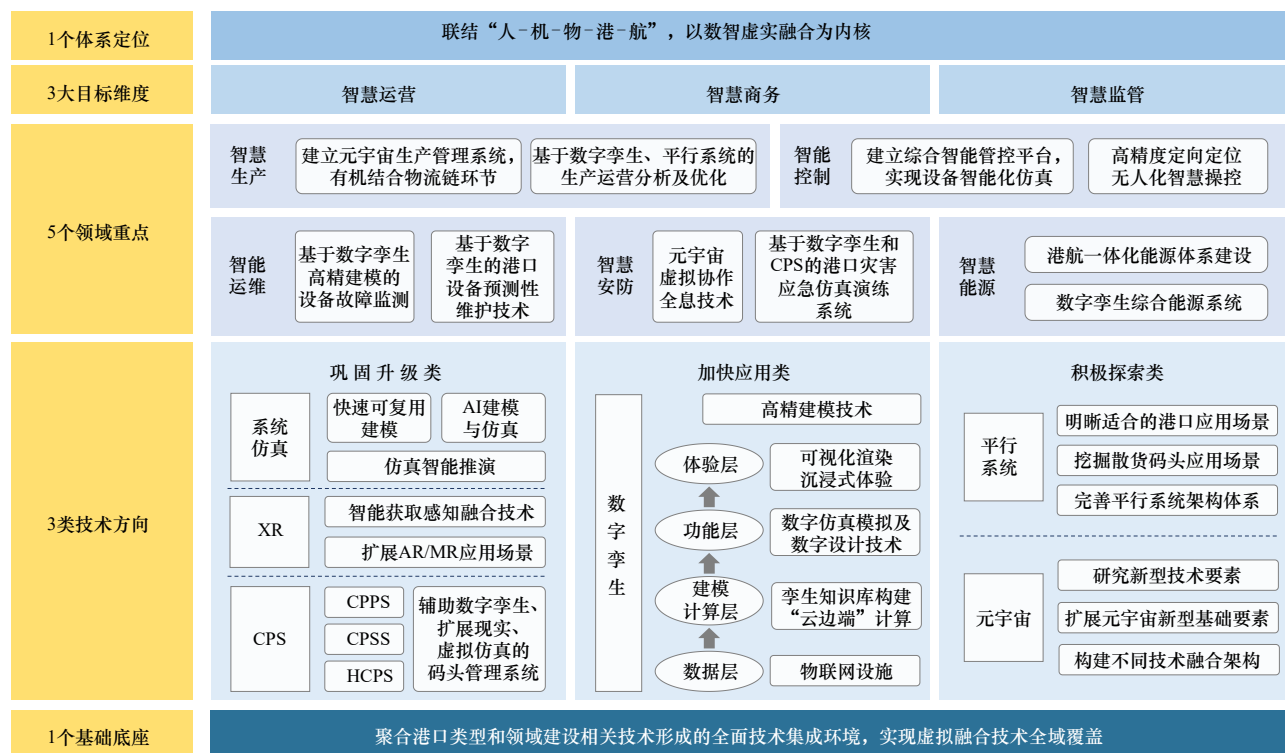


图3 “13531” 虚实融合驱动智慧港口发展体系框架

数字模型互操作性、数字模型可扩展等技术,基于地理信息系统、卫星定位系统、建筑信息模型、物联网的数据,结合激光雷达、倾斜摄影等手段,构建全要素、多尺度、高保真、大动态的智慧港口数字孪生体。

从数据到应用,可将数字孪生分为4个层级。

① 数据层,针对集装箱、干散货、液货不同类型港口,建设“人-机-物”互联的物联网基础设施,应用高速多维数据实时传输、数据治理、数据管理等技术。② 建模计算层,在传统建模技术以外,应用云计算、边缘计算、云原生等云端计算技术,研究“机理-模型”双驱动的建模行为及方法、多模态数据语义协同与挖掘、孪生知识库构建等。③ 功能层,在现有的数字仿真模拟技术以外,深入发展数字设计技术。④ 体验层,发展可视化渲染、沉浸式体验等技术。

3. 积极探索类技术

对于平行系统,重点明确适宜的港口应用场景。① 挖掘散货、液货码头的应用场景,如考虑液货码头突发事件具有难以预测、多成因关联、危害性大、演变过程复杂的特点,利用现有平行系统的“设备-人员-知识”要素、数据引擎计算环境,构建平行港口安全应急体系。② 完善平行系统技术架构,结合知识图谱、图深度学习、专家系统等知识挖掘方法,建立关联元宇宙技术的体系连结及重点内容,形成港口应用的新结合点。

聚焦以工业元宇宙为代表的元宇宙技术体系。筑牢数字孪生与数字原生、物联网、云计算、AI、VR/AR、区块链等技术基础,研究游戏引擎、社会系统等新兴的技术要素,拓展港口元宇宙涉及的元居民、元网络、元商业、元经济等基础设施要素;构建不同技术业态融合和有机组装的新架构,探索新兴产业和传统行业融合发展的新技术路径,满足虚实相生要求。对于当前的港口数字底座基础而言,元宇宙技术突破需以集装箱码头为先行对象,进而带动干散货码头、液体化工码头方面的应用。

(四) 领域重点

1. 港口智慧生产作业

港口智慧生产作业覆盖“全流程”,解决领域“不联通”问题。① 在当前的数字孪生码头基础上,突破元宇宙虚实融合技术应用瓶颈,采取“任

务-资源-约束-协同”技术路线,连结集装箱港区货物“船舶-泊位-岸桥-内集卡-场桥-外集卡”业务流程场景;在物理港口到虚拟港口的映射方面,从数字孪生1对1拓展为元宇宙1对N,通过自由产生的虚拟场景,不断凝练港口数据的知识漂移、再现和演化;建立元宇宙生产作业管理系统,实现配载计划、泊位计划、堆场计划、物流链环节的有机结合。② 以数字孪生、平行系统为重点,应用料堆轮廓三维扫描建模、激光雷达船舶扫描建模、数据挖掘、深度学习、AI决策等技术,与人员知识计算相结合,实现散货码头出口装船、进口转运等作业流程的中控智能调度、生产运营分析、生产运行优化。

2. 港口智慧生产实施

港口智慧生产实施显现“高精度”,解决领域“不可控”问题。① 结合生产管理系统,建立综合智能管控平台,针对智能理货、智能闸口、智能堆场、智能装卸、智能交通等场景,面向集装箱码头场桥、岸桥、无人集卡、AI运输机器人、自动导引运输车、智能导引车等设备,应用控制系统智能化仿真技术。② 研发散货码头堆取料机的高精度定位定向、无人化智慧操控,装船机、翻车机的自动化控制系统,清仓作业自动化等技术,以XR手段增强码头业务管控力和人员沉浸感。③ 以人机分离、人货分离为目标,研究粮食码头机器人自动化码包、牵引调车定位、灌包定位、流量均衡控制等技术,构建粮食码头信息控制平行系统,实现粮食码头的柔性、灵活、高效作业。

3. 面向智能设备运维

港口智能设备运维加强“精细化”,解决领域“粗放式”问题。① 侧重港口生产装卸设备的全役健康管理,以数字孪生建模技术为基础,研究关键零部件损伤模式及内在机理、重要构件多故障耦合机理及演化规律,支持构建港口设备故障监测、检测、诊断数字孪生体。② 针对港口设备预测性维护需求,考虑作业状态复杂、多重干扰环境等因素,发挥MR在港口设备维修技能培训、远程协作方面的优势,融合故障机理、知识、仿真数据、运行数据,构建带式输送系统关键构件运行的数字孪生模型。提出港口物流装备剩余寿命预测、以可靠性为中心的全任务输送系统预测性维修等策略,为后续元宇宙治理确立基础。

4. 港口智慧安全应急

港口智慧安全应急侧重“勤演练”，解决领域“不及时”问题。① 发展远程化、可遥控、智能化的液货码头应急现场处置与救援，快速疏散与避难、三维可视化、CPS 无人机动态巡航及群智协同、元宇宙虚拟协作的全息传输等技术，支持液体化工码头综合事故应急监测及处置决策，实现危险化学品品的全面监控、隐患排查、事故预警。② 以“航道-船舶-港口-城市”安全共同体为对象，基于数字孪生、CPS 发展港口灾害应急仿真演练系统；综合运用系统动力学、灾害仿真演化等理论，研究应急系统的异构模型集成、数字模型表达、行为情约束、动态自我修正等技术，建立全面系统、快速完备的智慧港口应急安全管控体系。

5. 港口智慧绿色能源

港口绿色能源系统促成“多融合”，解决领域“不单一”问题。① 加快“港-航”一体化能源体系建设，针对港口能源供给及需求的不确定性和耦合性，分析能源供补、港口生产、船舶航道、辅助设施等与能源体系的关系；构建“港-航”多能源“物理-模型-数据-服务”融合用能的数字孪生系统，深化架构配置、源荷匹配、协同优化等设计技术研究，建立“双碳”目标驱动的港口绿色能源治理体系。② 发展数字孪生综合能源系统，针对不同形态能源特别是天然气、氢气等液态网络，发展高精度建模技术、机理与数据驱动的能源状态评估及预测方法；加快“水-铁”“水-公”多式联运综合能源体系建设，提升能源利用效率和节能减排水平。

五、虚实融合驱动智慧港口发展建议

（一）深化虚实融合技术驱动港口发展的应用研究

提升虚实融合技术体系在国家港口发展规划中的技术地位，可从以下方面统筹港口虚实融合发展的总体布局：针对长江三角洲、珠江三角洲、渤海湾等地区的大型港口群，采用分层次的港口群虚实融合技术体系架构，体现各类港口群的差异化发展特点；深化虚实融合技术驱动“一带一路”沿线港口发展研究，明确场景和技术适配的发展路径；关注海南自由贸易港口建设，加快港口群的数字信息化基础设施、面向南海的供应链应急保障推演仿

真、“双碳”目标驱动的港口群数字孪生多能源融合等研究；促进长江流域内河港口系统仿真、数字孪生等技术的渐进发展与稳健应用，充分响应港口现实需求；加强“港-城”“港-产”协同，实施临港物流园区联动，增建“集疏运”新型基础设施，增强临港虚实融合技术体系项目培育能力。

（二）发布促进虚实融合技术港口应用的激励政策

建议采取有力管理举措，推动虚实融合驱动的智慧港口发展。给予政策优惠等正向激励，在国家、地方、行业等层面发布配套政策，合理加大金融、财税等的支持力度；支持港口数字孪生、元宇宙等的系统架构及基础设施建设，明确集装箱、干散货、液化、件杂货等码头的虚实融合平台建设优先级；递次开展港口生产安全监测及监控智能化、数据应用处理模型及应用系统开发、作业计划制定智能化等能力建设。以大型港口群为重点应用对象实施虚实融合技术创新应用，鼓励港口之间的良性竞争；体现政策引领、产业推进、企业实施特征，率先形成港口行业应用比较优势并可为其他行业提供借鉴。

（三）实施虚实融合技术港口应用的科技项目及应用示范

虚实融合技术支持真实港口和虚拟港口之间的信息共通、共融、共享，是驱动智慧港口高质量发展的有效途径。建议给予国家级科研计划项目支持，强化传统领域内及跨领域企业、高校、科研院所的深度合作，开展基础理论研究和关键核心技术攻关，注重科研项目对港口行业的示范引领和带动作用，提升智慧港口生产作业、实施、运维、安全、能源等方面的技术水平，带动虚实融合技术体系发展。同步开展虚实融合技术的国家标准体系建设，涵盖技术标准、安全标准、服务融合标准、应用标准、评估体系等，创建“企业+市场+社会”的智慧港口生态圈。

（四）加强智慧港口专业人才培养力度

着眼智慧港口应用服务，培育虚实融合专业型、复合型人才，构建“三维、两联”科技研发团队。在“三维”中，一是培育具有较高虚实融合理论水平的人才，能够创新前沿理论方法、专注解决

智慧港口瓶颈难题；二是培育具有较高虚实融合技术水平的人才，增强港口企业信息化队伍的虚实融合技术能力；三是培育具有较高虚实融合高管理水平的人才，与学术领军、高技术人才协同，形成数字化转型骨干团队。在“两联”中，一是建立跨国、跨界、跨域开放交流的人才联合机制，鼓励高质量的开放合作与技术交流；二是建立“产学研”创新联盟，以国家科研项目、校企合作实验室等为桥梁，支持科研成果的快速产业转化、科技人才在行业发展中发挥关键作用。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 18, 2023; **Revised date:** May 11, 2023

Corresponding author: Liu Qing is a professor from the School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology. Her major research field is transportation planning and management. E-mail: lqwhutjt@whut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Synergistic Development Strategy for the Port Cluster of Hainan Free Trade Port” (21-HN-XZ-05) and “Strategic Research on the Development of Green and Intelligent Shipping in Hubei Province” (HB202109); National Natural Science Foundation of China project (72174160)

参考文献

- [1] 九部门关于建设世界一流港口的指导意见 [EB/OL]. (2019-11-13)[2023-04-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-11/13/content_5451577.htm.
Nine departments jointly issued guidance to build world-class ports [EB/OL]. (2019-11-13)[2023-04-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-11/13/content_5451577.htm.
- [2] 林榕. “十四五”时期智慧港口建设形势与展望 [J]. 港口科技, 2020 (10): 1–3.
Lin R. The situation and prospect of smart port construction during the 14th Five Year Plan period [J]. Port Science & Technology, 2020 (10): 1–3.
- [3] 张驰. “互联网+”背景下天津港建设智慧港口发展模式研究 [J]. 天津科技, 2015 (10): 105–106.
Zhang C. Research on development model of Tianjin smart port in “Internet+” [J]. Tianjin Science & Technology, 2015 (10): 105–106.
- [4] 冯琦琦, 董志明, 彭文成, 等. 几种典型的虚实融合技术发展研究 [J/OL]. 系统仿真学报, [2023-02-17]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0793>.
Feng Q Q, Dong Z M, Peng W C, et al. Research on the development of several typical virtual reality fusion technologies [J]. Journal of System Simulation, [2023-02-17]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0793>.
- [5] 张兴旺, 吕瑞倩, 李洁, 等. 面向元宇宙的图书馆信息物理融合研究 [J]. 数字图书馆论坛, 2022 (4): 53–59.
- [6] 梅叶. 智慧港口运营生态与全链治理解析 [J]. 武汉交通职业学院学报, 2023, 25(1): 10–15.
Mei Y. Analysis of intelligent port operation ecology and whole chain governance [J]. Journal of Wuhan Technical College of Communications, 2023, 25(1): 10–15.
- [7] 王芳. 应用仿真推演技术助力“智慧港口”建设 [J]. 中国港口, 2019 (2): 62–64.
Wang F. Application of simulation projection technology to promote “smart port” construction [J]. China Ports, 2019 (2): 62–64.
- [8] 苏志国. 黄骅港煤炭码头三维可视化管理系统研究 [J]. 科学技术创新, 2014 (34): 122–124.
Su Z G. Research on three-dimensional visualization management system of Huanghua Port coal terminal [J]. Scientific and Technological Innovation, 2014 (34): 122–124.
- [9] 严新平, 李晨, 刘佳仑, 等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 22–29.
Yan X P, Li C, Liu J L, et al. Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 22–29.
- [10] 吴宇震, 张俊, 高天露, 等. 平行港口: 智慧绿色时代下港口工业物联网新形态与体系结构 [J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(2): 218–227.
Wu Y Z, Zhang J, Gao T L, et al. Parallel ports: New form and system structure of port industry Internet in smart and green era [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(2): 218–227.
- [11] 徐凯. 元宇宙对港航物流业影响几何 [J]. 中国船检, 2022 (8): 60–64.
Xu K. The influence of the universe on the port and shipping logistics industry [J]. China Ship Survey, 2022 (8): 60–64.
- [12] 杨宇奥, 武殿梁, 张入元. 无人集装箱码头数字孪生建模方法研究 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(6): 158–162.
Yang Y A, Wu D L, Zhang R Y. Research on digital twin modeling method of unmanned container terminal [J]. Computer Simulation, 2022, 39(6): 158–162.
- [13] 杨晓光. 我国港口建设世界一流港口取得的进展 [J]. 中国港口, 2022 (12): 1–11.
Yang X G. Progress made in building world-class ports in China [J]. China Ports, 2022 (12): 1–11.
- [14] 刘长俭, 高天航, 陈正勇, 等. “十四五”我国港口货物吞吐量结构化预测 [J]. 水运工程, 2022 (12): 1–6.
Liu C J, Gao T H, Chen Z Y, et al. Structural forecast of cargo throughput in China’s ports during 14th Five-Year Plan period [J]. Port & Waterway Engineering, 2022 (12): 1–6.
- [15] 吕洁印, 吴兵, 汪洋, 等. 港口灾害事件虚拟现实应急演练研究 [J]. 中国水运, 2022 (3): 39–42.
Lyu J Y, Wu B, Wang Y, et al. Research on virtual reality emergency drill for port disaster events [J]. China Water Transport, 2022 (3): 39–42.
- [16] 袁裕鹏, 袁成清, 徐洪磊, 等. 我国水路交通与能源融合发展路

- 径探析 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 184–194.
- Yuan Y P, Yuan C Q, Xu H L, et al. Pathway for integrated development of waterway transportation and energy in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 184–194.
- [17] 贺兴, 陈旻昱, 唐跃中, 等. 基于数字孪生与元宇宙技术的能源互联网态势感知系统论方法研究 (一): 概念、挑战与研究框架 [J/OL]. 中国电机工程学报, [2022-11-30]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222413>.
- He X, Chen M Y, Tang Y Z, et al. System theory study on situation awareness of energy Internet of things based on digital twins and metaverse (1): Concept, challenge, and framework [J]. Proceedings of the CSEE, [2022-11-30]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222413>.
- [18] 唐文虎, 陈星宇, 钱瞳, 等. 面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 74–85.
- Tang W H, Chen X Y, Qian T, et al. Technologies and applications of digital twin for developing smart energy systems [J] Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 74–85.
- [19] 赵鹏, 蒲天骄, 王新迎, 等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447–457.
- Zhao P, Pu T J, Wang X Y, et al. Key technologies and perspectives of power Internet of things facing with digital twins of the energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447–457.
- [20] 郇能灵, 王萧博, 黄文焘, 等. 港口综合能源系统低碳化技术综述 [J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3749–3763.
- Tai N L, Wang X B, Huang W T, et al. Review of low-carbon technology for integrated port energy systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3749–3763.
- [21] 封学军, 范永娇, 许博, 等. 基于增量分配的港口群集装箱集疏运系统仿真 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41(2): 8–14.
- Feng X J, Fan Y J, Xu B, et al. Simulation of container collection and distribution system of port group based on incremental allocation [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2022, 41(2): 8–14.
- [22] 郑红星, 贺国燕, 秦颖. 基于SD的港口群共享泊位方案仿真研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, 39(7): 114–120.
- Zheng H X, He G Y, Qin Y. Simulation study on shared berth scheme of port group based on SD [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2020, 39(7): 114–120.
- [23] 范丽亚, 于文江, 韦骞, 等. 2021年扩展现实 (XR) 热点回眸 [J]. 科技导报, 2022, 40(1): 184–195.
- Fan L Y, Yu W J, Wei Q, et al. Review on the hot spots of extended reality (XR) in 2021 [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(1): 184–195.
- [24] 梁庆, 李家华, 杨彪. 虚拟现实技术在自动化集装箱码头中的应用 [J]. 水运工程, 2022 (10): 213–216.
- Liang Q, Li J H, Yang B. Application of virtual reality technology in automated container terminal [J]. Port & Waterway Engineering, 2022 (10): 213–216.
- [25] 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: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Terms of cyber physical system: GB/T 40021—2021 [S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2021.
- [26] 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 F, Liu W R, Liu J H, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(1): 1–18.
- [27] 李玉, 裴道方, 高银萍, 等. 基于数字孪生的自动化集装箱码头多AGV动态调度 [J/OL]. 计算机集成制造系统, [2021-12-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211220.1932.008.html>.
- Li Y, Chang D F, Gao Y P, et al. Multi-AGV dynamic scheduling of an automated container terminal based on digital twin [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, [2021-12-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211220.1932.008.html>.
- [28] Zhou C H, Xu J, Miller-Hooks E, et al. Analytics with digital-twinning: A decision support system for maintaining a resilient port [J]. Decision Support Systems, 2021, 143(7): 113496.
- [29] 杨荣, 宁为玉, 张煜, 等. 自动化集装箱码头数字孪生系统设计研究 [J]. 起重运输机械, 2022 (5): 57–61.
- Yang R, Ning W Y, Zhang Y, et al. Design and research of digital twin system of automated container terminal [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2022 (5): 57–61.
- [30] 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.
- Wang F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems [J]. Control & Decision, 2004, 19(5): 485–489.
- [31] 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 L Y, Chen S Y, Wang X, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001–2031.
- [32] 郑松, 吴晓林, 王飞跃, 等. 平行系统方法在自动化集装箱码头中的应用研究 [J]. 自动化学报, 2019, 45(3): 490–504.
- Zheng S, Wu X L, Wang F Y, et al. Applying the parallel systems approach to automatic container terminal [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(3): 490–504.
- [33] 欧阳宏虹. “元宇宙+物流”创新耦合发展与应用风险探讨 [J]. 商业经济研究, 2022 (21): 101–104.
- Ouyang H H. Discussion on the coupling development and application risk of “meta universe+logistics” innovation [J]. Journal of Commercial Economics, 2022 (21): 101–104.
- [34] 刘成. 迈向虚实融合时代的元宇宙治理: 内涵、向度、风险与进路 [J/OL]. 电子政务, [2022-12-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5181.TP.20221229.1631.003.html>.
- Liu C. Metacosmic governance towards the era of virtual and real integration: connotation, direction, risk and approach [J/OL]. E-Government, [2022-12-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5181.TP.20221229.1631.003.html>.
- [35] 李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 面向新型人工智能系统的建模与仿真技术初步研究 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 349–362.
- Li B H, Chai X D, Zhang L, et al. Preliminary study of modeling and simulation technology oriented to neo-type artificial intelligent systems [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 349–362.