

文章编号:1671-1637(2026)04-0200-30

内河航道数字孪生技术研究进展、 关键技术与前景

梁才^{1,2,3}, 李文勇^{1,3,4}, 王长海^{*5}, 申威^{2,3}, 周晓琴^{3,6}, 罗任童^{2,3}

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043; 2. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029;
3. 广西基础设施三维数字孪生工程研究中心, 广西 南宁 530023; 4. 桂林电子科技大学 建筑与交通工程学院,
广西 桂林 541004; 5. 华中科技大学 电子信息与通信学院, 湖北 武汉 430074; 6. 广西交通职业技术学院
智能建造与低空技术学院, 广西 南宁 530000)

摘要:为厘清航道数字孪生的概念内涵、关键技术及发展趋势,推进内河航道向全生命周期精细化与智能化管理转型升级,采用文献计量与文本挖掘相结合的研究方法,系统梳理了2000~2025年间相关的中英文文献,总结并分析了航道领域数字孪生的研究现状及关键特征,辨析与对比航道数字孪生的定义及相关概念;针对内河航道工程的特征,建立以数字孪生技术作为核心驱动的内河航道全生命周期管理范式,打通了从航道设计、建造到运维、管理、服务全过程数据;进一步提出基于工程分解结构(EBS)的跨阶段数据映射机制与面向全生命周期的内河航道数字孪生系统架构,涵盖数据底座、基础支撑平台、算法模型平台、应用服务平台等核心要素,并介绍了平陆运河工程应用案例;探讨了航道数字孪生应用现状、挑战、未来发展前景。研究表明:当前航道数字孪生面临全面精准感知体系并未形成、多源数据融合与治理难、模型仿真与交互能力不足、应用成效与智能化水平不足等诸多挑战,未来将朝着空-天-地-水一体化智能感知、全生命周期管控、实时计算与仿真推演、AI自主决策与智能控制、多行业融合等方向发展,通过数字孪生系统建设和技术应用驱动航道实现全流程建设管控、全方位智能运维业务变革,支撑航道管理实现更智能、高效的转型升级。
关键词:内河航道;数字孪生;综述;智慧航道;数据底座;发展趋势

中图分类号:U611 文献标志码:A DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.083

Research progress, key technologies, and prospects of digital twin technology for inland waterway

LIANG Cai^{1,2,3}, LI Wen-yong^{1,3,4}, WANG Chang-hai^{*5}, SHEN Wei^{2,3},
ZHOU Xiao-qin^{3,6}, LUO Ren-tong^{2,3}

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China;
2. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, Guangxi, China; 3. Guangxi
Infrastructure 3D Digital Twin Engineering Research Center, Nanning 530023, Guangxi, China; 4. School of
Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004,
Guangxi, China; 5. School of Electronic Information and Communication, Huazhong University of Science
and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 6. College of Intelligent Construction and Low Altitude

出版历程:2025-05-28 收稿,2025-10-02 修回,2025-11-27 录用

基金项目:广西科技重大专项(AA23062053);广西科技基地和人才专项(AD25069109)

作者简介:梁才(1987-),男,湖南涟源人,正高级工程师,E-mail:87350461@qq.com。

*通信作者:王长海(1981-),男,安徽巢湖人,正高级工程师,E-mail:15078888596@163.com。

引用格式:梁才,李文勇,王长海,等.内河航道数字孪生技术研究进展、关键技术与前景[J].交通运输工程学报,2026,26(4):200-229.

Citation:LIANG Cai, LI Wen-yong, WANG Chang-hai, et al. Research progress, key technologies, and prospects of digital twin technology for inland waterway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(4): 200-229.

Technology, Guangxi Transport Vocational and Technical College, Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: To clarify the conceptual connotation, key technologies, and development trends of digital twins for waterways and to promote the transformation and upgrading of inland waterways towards refined and intelligent management throughout the full lifecycle, a research method combining bibliometrics and text mining was adopted. Relevant Chinese and English literatures from 2000 to 2025 were systematically reviewed. The research status and key characteristics of digital twins in the waterway field were summarized and analyzed, and the definition and related concepts of waterway digital twins were discriminated and compared. In view of the characteristics of inland waterway projects, a full lifecycle management paradigm for inland waterways driven by digital twin technology as the core was established, and the data of the whole process from waterway design and construction to operation, maintenance, management, and service were connected. Furthermore, a cross-stage data mapping mechanism based on engineering breakdown structure (EBS) and a digital twin system architecture for inland waterways oriented to the full lifecycle were proposed, covering core elements such as data foundation, basic support platform, algorithm model platform, and application service platform. The application case of the Pinglu Canal project was introduced. The application status, challenges, and future development prospects of waterway digital twins were discussed. Research results show that current waterway digital twins face many challenges, such as the unformed comprehensive and precise perception system, difficult multi-source data fusion and governance, insufficient model simulation and interaction capabilities, and insufficient application effectiveness and intelligence level. In the future, it will develop towards the directions of space-air-ground-water integrated intelligent perception, full lifecycle management and control, real-time computing and simulation deduction, AI autonomous decision-making and intelligent control, and multi-industry integration. Through the construction of digital twin systems and technology applications, the whole-process construction management and control of waterways and the transformation of all-round intelligent operation and maintenance business are driven, supporting the smarter and more efficient transformation and upgrading of waterway management.

Keywords: inland waterway; digital twin; review; smart waterway; data foundation; development trend

Publication history: Received 2025-05-28; Received in revised form 2025-10-02; Accepted 2025-11-27

Funding: Guangxi Science and Technology Major Project (AA23062053); Guangxi Science and Technology Base and Talent Special Project (AD25069109)

* **Corresponding author:** WANG Chang-hai, professor of engineering, E-mail: 15078888596@163.com.

0 引言

随着全球经济一体化进程的加速,水运作为中国交通运输的重要组成部分,凭借运能大、成本低、能耗少、污染小等优势,承担着支撑经济高质量发展、构建现代化综合交通运输体系、保障能源安全、服务区域协调发展等多重战略任务。截止到2024年,中国内河航道里程达到 1.287×10^6 km,其中高等级航道通航里程为 6.84×10^5 km,内河航运(IWT)货运量达到 4.953×10^{10} t^[1],构建了世界上

最繁忙的内河水运体系。近年来中国先后出台了一系列政策文件推动水运发展,如《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》等,明确提出要大力发展内河水运并提升水运服务能力和水平。与此同时绿色发展理念也得到广泛认可,水运的低碳环保优势变得日益凸显,成为实现交通运输领域“碳达峰、碳中和”目标的重要途径。随着“一带一路”倡议深入实施以及区域经济一体化不断发展,中国的航道建设逐渐从单纯的基础设施建设转向智能化、数字化管理。2023年11月交通运输部印发《关于

加快智慧港口和智慧航道建设的意见》，明确鼓励建设港口和航道数字孪生平台，要提高水运行业的智能化水平，通过数字化、智能化手段提升航道的管理、监控、服务和保障能力。计划到 2027 年，航道基础设施数字化、生产运营管理和对外服务智慧化水平全面提升，建成世界一流的智慧航道^[2]。这一趋势体现国家对水运产业转型升级的重视，数字化、智慧化管理正逐步成为行业发展的主要方向。

在现代航道转型与高质量发展的需求背景下，传统航道建设和管理模式面临诸多挑战，包括航道建设与环境保护的矛盾日益突出、航道运营维护成本持续攀升、航道安全风险防控压力加大^[3-5]，航道管理决策主要依赖人工经验和规则^[6]，航道信息化管理在智能感知、数据整合与技术集成上面使能不足，容易出现信息孤岛和管理脱节等问题^[7-8]。特别是在全生命周期管理方面，虽然行业已普遍意识到建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）及数字化技术在项目全生命周期中的重要作用，但大多数仍然停留在概念和框架性研究层面^[9-10]，缺乏航道工程全生命周期的理论体系以及该模式的实际应用^[11]，从而导致规划、设计、建设与运营阶段之间缺乏数据的有效衔接。如何提升航道建设和运营管理的精细化、智能化水平，实现航道全生命周期的安全、高效、绿色发展，已成为当前亟待解决的关键问题。

数字孪生(Digital Twin, DT)技术^[12]作为新一代信息技术的重要代表，为解决上述航道建设和管理难题提供了现实可行的新思路方法，近年来也受到学术界和工程界的高度关注。数字孪生技术通过虚实映射、实时交互和智能决策，为航道工程规划设计、施工管理和智能运维带来革新性提升，成为新兴的信息技术应用范式^[13]。它能够充分利用 BIM、地理信息系统(GIS)、物联网、大数据、云计算、人工智能等先进技术，对物理航道进行全方位、多尺度、高精度的建模和仿真，实现航道状态实时感知、运行规律精确预测、决策方案智能优化和管理过程精细控制^[14-16]。把数字孪生技术与航道工程领域相结合，在提升航道建设、运营管理水平，促进航道全生命周期数据互联互通及深度挖掘，推动航道数字化转型、智慧化升级方面展现出巨大潜力^[15]。

基于以上问题和技术背景，现阶段开展航道工程全生命周期数字孪生技术研究具有重要现实意义。本文是在对现有文献开展系统梳理以及统计分析的基础上，反映出当前航道数字孪生技术的研究

图景，提出以数字孪生技术作为核心驱动的内河航道全生命周期治理范式，其研究价值体现在 3 个方面：①理论方面，系统性地提出并且构建了面向内河航道的“规划设计-智慧建造-养护运维”全生命周期数字孪生系统架构，该架构明确了针对数字孪生的物理实体航道、航道时空数据、孪生驱动引擎、数字虚体航道和场景应用服务五大核心维度及其内在关联，打破了以往研究大多聚焦于单一阶段（尤其是运营阶段）的局限；②创新多维数据融合与业务映射技术，提出的工程系统分解结构的结构化关联映射机制，解决了航道全生命周期中多源异构数据融合困难和跨阶段数据传递脱节的核心难题，构建了支撑全生命周期应用的统一数据底座；③应用拓展，从应用场景、应用形式、应用价值 3 个维度总结数字孪生技术应用现状，通过平陆运河等工程验证，驱动航道“全流程建设管控+全方位智能运维”业务变革，构建数字孪生全生命周期管控范式。

1 文献综述

1.1 文献统计分析

1.1.1 文献来源与筛选方法

本文采用文献计量学方法，研究数字孪生在在在内河航道工程中的应用，并横向对比其在其他交通领域的应用。所使用的中文数据库来源于中国知网(CNKI)，英文数据库来源于 Web of Science(WOS)、ScienceDirect、Scopus，选取上述数据库中 2000~2025 年的文献。中文库搜索策略为选取航道相关的关键词“数字孪生、航道、运河、水运、船闸、水路”等，检索字符串采用组合方式如数字孪生*(航道+运河+水运+船闸+水上交通+水路)，并结合主流核心技术做匹配如航道*(流固耦合+三维仿真+维护诊断+算法模型+数据底座+预测+智能控制)。此外进一步扩大检索范围至交通领域进行对比，采用主题检索式：数字孪生*(公路+水运+航道+运河+交通+道路)。英文库搜索选取相关的关键词 Digital twin、Waterway、Canal、Ship lock、Inland shipping 等进行组合，如 WOS 中采用检索式：((TS=(Digital twin) OR TS=(Digital twins)) AND (TS=(Waterway) OR TS=(Canal) OR TS=(Ship lock) OR TS=(Inland shipping)))。以上检索结果经进一步整理，仅纳入学术论文和会议论文类型，并排除主题内容不相关、无作者或关键词信息、2000 年以前发表的文献，共得到有效的中文库中航道数字孪生相关 117 篇、交通数字孪生相

关 1 108 篇,英文库中航道数字孪生相关 695 篇。采用 VOSviewer 等可视化工具进行文献统计、关键词共现、共被引等分析,以展现航道数字孪生领域的研究图景。

1.1.2 文献分布分析

根据中文检索和分析的结果,统计中国航道数字孪生发文数量及其与交通领域数字孪生对比如图 1 所示。从时间来看中国交通领域数字孪生起步较晚,第 1 篇以数字孪生命名的相关文献发表于 2018 年,但呈现快速增长的趋势。2018 年 4 月国务院批复的《河北雄安新区规划纲要》^[17]中明确了同步规划、建设数字城市与现实城市,建立适度超前的智能基础设施,这一要求隐含并实质上推动了数字孪生城市的建设,而在随之而来的解读中,明确公开提出了打造数字孪生城市^[18]。2020 年 4 月国家发展改革委和中央网信办联合印发《关于推进“上云用数赋智”行动 培育新经济发展实施方案》^[19],首次将数字孪生列为七大新一代数字技术之一,并提出“数字孪生创新计划”,标志着数字孪生成为国家战略技术,2020 年开始交通行业数字孪生相关发文量呈现爆发式增长。水运和航道工程数字孪生发展相对较晚,航道数字孪生在交通领域的发文量远低于公路,2022 年开始体现较大的增幅,且在交通领域的占比逐渐增大。

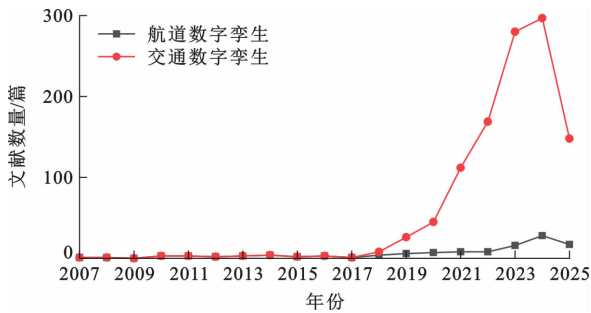


图 1 近年来中国交通领域和航道领域数字孪生发文数量对比(截至 2025 年 7 月)

Fig.1 Comparison of the number of digital twin publications in the field of transportation and waterways in China in recent years (end in July 2025)

相对来说国外航道数字孪生的文献发布较早(图 2),但 2000~2018 年间发展缓慢,外文发文量未体现明显增长,从 2018 年开始快速增长,与中国呈现相同趋势。从文献作者的国家来看,中国该领域的论文发文量位居第 1(如图 3 所示),且占比呈上升趋势,体现出航道数字孪生技术研究和应用逐渐受到国内学者的关注。

为进一步识别航道数字孪生文献对应的领域及

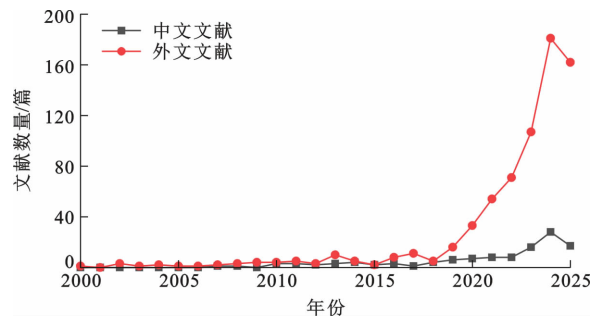


图 2 2000~2025 年国内外航道数字孪生发文统计(截至 2025 年 7 月)

Fig.2 Statistical analysis of digital twins in domestic and international navigation channels from 2000 to 2025 (end in July 2025)

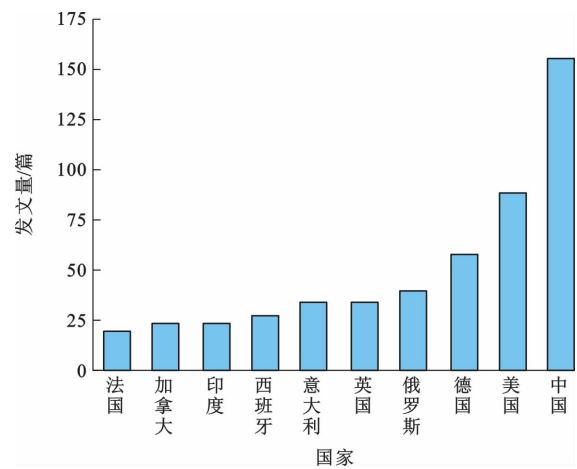


图 3 不同国家航道数字孪生发文量对比

Fig.3 Comparison of digital twin publications in different countries' waterways

期刊分布,对 2000~2025 年国内外相关文献的期刊进行统计,形成发文量排名前 5 的期刊(表 1)。期刊研究领域主要涵盖水运、海洋、交通运输、港口、水利、环境科学等多个学科,反映出航道数字孪生涉及领域的丰富性,以及与相关学科之间的交叉研究。

表 1 2000~2025 年中英文航道数字孪生领域期刊文献排名

Table 1 Ranking of journal Chinese and English literatures in the field of digital twin of navigation from 2000 to 2025

排名	英文期刊	中文期刊
1	Ocean Engineering	《中国水运》
2	IFAC-PapersOnLine	《水道港口》
3	Transportation Research Procedia	《水运工程》
4	Heliyon	《江苏水利》
5	Science of the Total Environment	《中国工程科学》

1.1.3 文本挖掘分析

为了进一步从现有的文献中提取关键信息、隐含模式和有价值的信息,采用文献计量的方法对非结构化文本数据进行自动化处理和挖掘分析,以支

持研究人员快速发现研究热点与趋势、挖掘潜在的关联和规律并提高分析效率。本文采用文献计量工具软件 VOSviewer, 在导入关键引文信息后进行合作关系、共被引、关键词共现分析, 并绘制可视化科学图谱。通过 VOSviewer 进行筛选梳理了中文关

键词 150 个, 英文关键词 183 个, 生成了相应的关键词共现知识图谱(图 4、5)。该关键词共现网络生成了多个不同的聚类, 每个聚类都代表了一个主题的研究兴趣集中点, 这些聚类主题之间具有较高的联系。

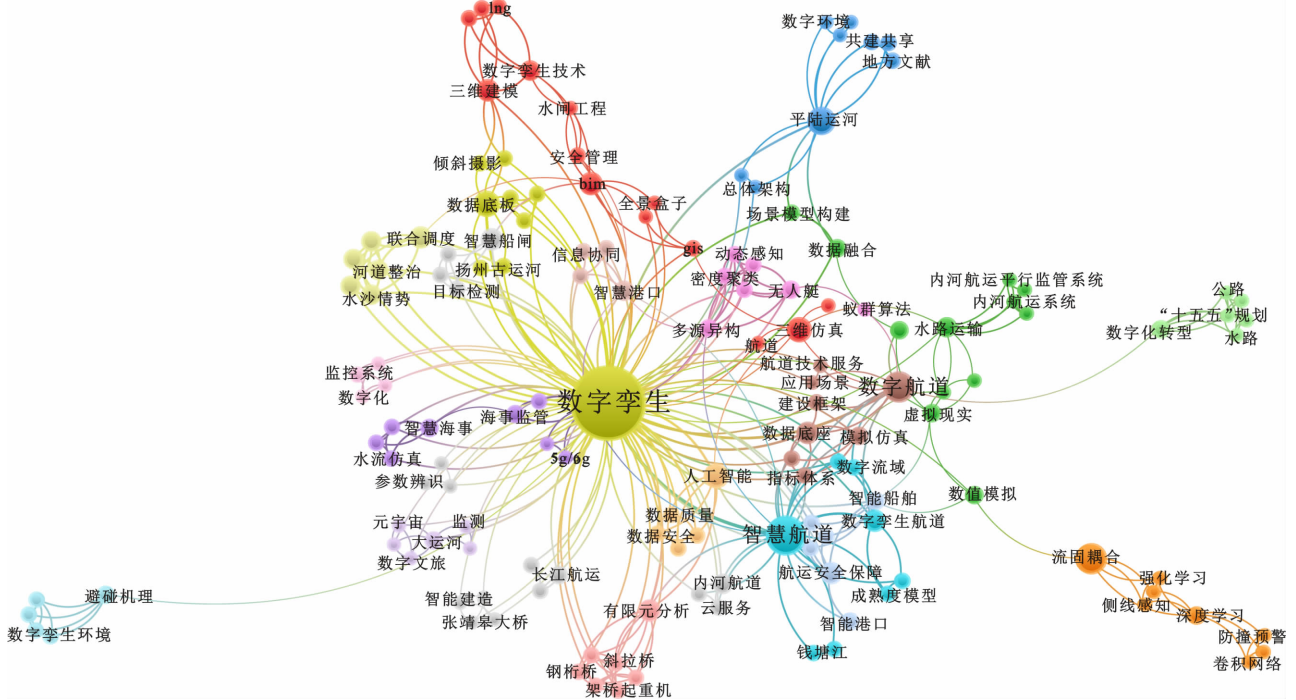


图 4 中文文献关键词共现聚类图谱

Fig. 4 Keyword co-occurrence cluster map of Chinese literature

从中文文献关键词共现聚类图谱分析结果得出, 数字孪生、智慧航道、数据底板、数字航道、平陆运河等是最热门的关键词, 这体现了数字孪生技术与数字化及智慧化的高度关联。由于中文数据库中引文数量的限制, 无法反映相关研究领域的热门程度, 主要原因在于数字孪生航道是一个相对较新的主题, 但总体反映了航道领域数字孪生的研究趋势。相对来说外文的文献数量较多, 最热门的关键词为 Digital twin、Sustainability、Resilience、Machine learning、Artificial intelligence 等, 反映了航道数字孪生与可持续发展、人工智能等热门技术的结合研究受到了高度关注。其重点应用领域在生态和可持续发展, 这是由于世界上人工建设的航道较少, 大多处于运营阶段管理。通过关键词知识图谱的构建还反映了当前研究方向的概览, 为航道数字孪生领域未来的研究提供指导。

1.2 数字孪生的关键特征及定义

1.2.1 数字孪生的概念及特征

数字孪生的明确概念比较公认最早是由密歇根大学的 Michael Grieves 教授在 2003 年的产品全生

命周期 (PLM) 课程中提出^[20], 最初的概念侧重于产品设计和制造阶段的虚拟模型, 旨在通过虚拟模型来模拟和优化物理产品的性能。随着新一代信息技术的发展, 数字孪生的概念逐步演化, 其内涵和外延不断拓展。Madni 等^[21]追溯数字孪生技术的起源, 指出数字孪生可视为物理系统动态数字表示, 与虚拟原型不同之处在于能持续更新物理系统性能、维护和健康状态数据, 强调数字孪生具有动态性和全生命周期特性。张霖^[22]对数字孪生概念的演进和内涵进行深入探讨, 指出学术界对数字孪生的理解存在一定模糊性和多样性, 但构建物理实体在虚拟空间映射、实现虚实交互和数据融合以支持物理实体优化运行和管理这一核心思想已成共识。从技术层面来讲, 数字孪生并非单一技术而是多种技术的集成和融合。Jeong 等^[23]认为数字孪生是先进机器学习算法、数据分析、超分辨率可视化建模和仿真等多种技术的融合体, 构建数字孪生模型需要考虑分阶段实施步骤和技术要素。他们提出数字孪生实施层并为每个实施层提供相应的技术要素, 为数字孪生实际应用提供指导。陶飞等^[24]在 2023 年进一步

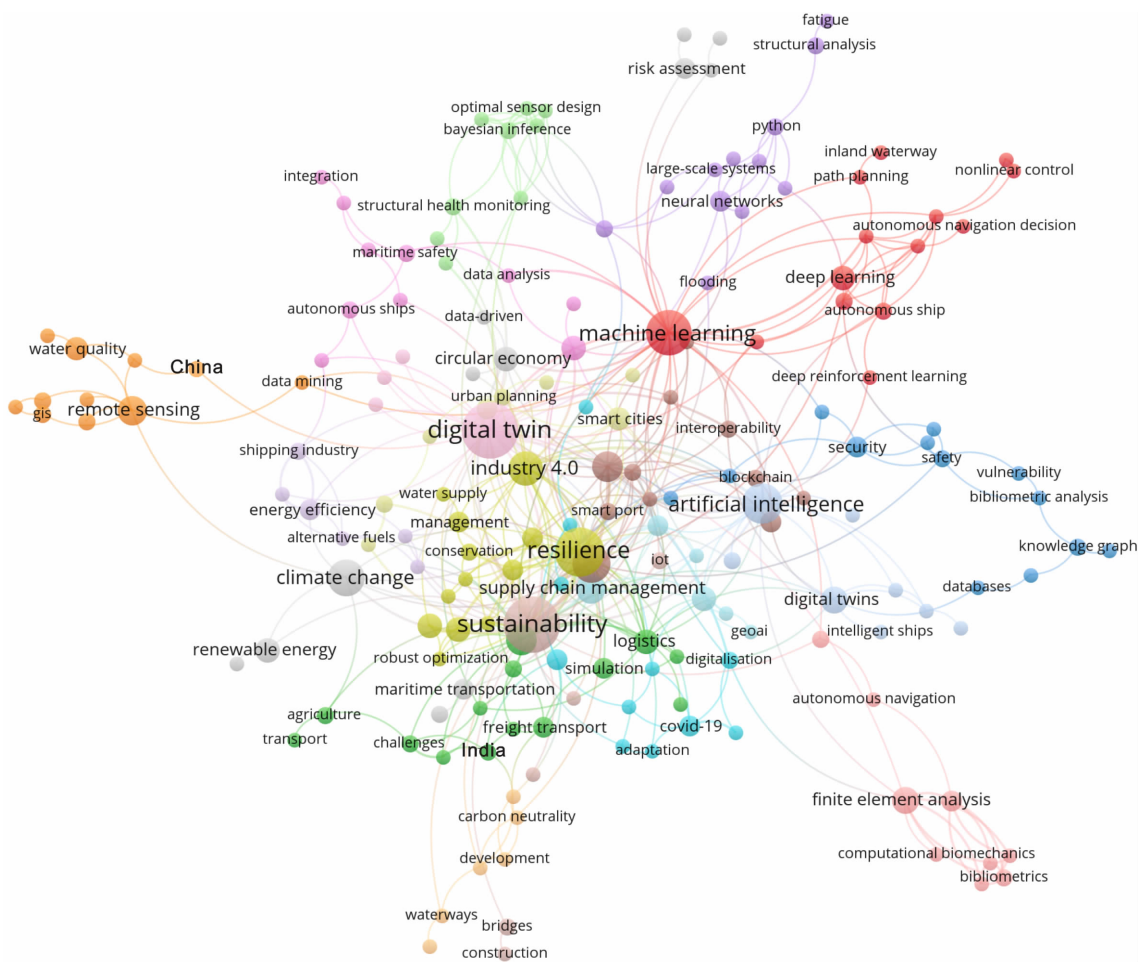


图 5 英文文献关键词共现聚类图谱

Fig. 5 Keyword co-occurrence cluster map of English literature

从连接与交互角度深入探讨了数字孪生的理论体系和关键技术,提出数字孪生连接交互的内涵并建立包括感知、通信、映射、联动、融合在内的连接交互理论体系,为数字孪生理论研究和应用落地提供支撑。Hananto 等^[25]认为物联网是数字孪生的重要支柱,数字孪生是连接工业 4.0 物理和数字领域的关键环节,进一步强调了物联网在数字孪生技术体系中的重要作用,并主张采用三维数字孪生术语取代数字孪生,强调了三维可视化在数字孪生中的重要性。

综合以上文献,可以总结出数字孪生的一些关键特征。

(1)虚实映射与同步。数字孪生所构建出的虚拟模型能够真实反映物理实体的几何、物理、行为和环境特征,而且能够通过物联网感知技术与物理实体保持实时同步,使得虚拟模型能够动态地反映物理实体的当前状态和历史演变。

(2)数据驱动与分析。数字孪生不只是一个可视化模型,更是数据驱动的智能系统,能够汇聚来自物理实体、虚拟模型及其他相关系统的大量数据,利

用算法模型、大数据分析、人工智能等技术对数据进行深入挖掘和智能分析,以此实现对物理实体仿真分析、故障诊断、性能预测、决策辅助等功能。

(3)动态交互与控制。数字孪生可通过虚拟模型对物理实体进行仿真、分析和优化,把优化结果反馈到物理实体当中,实现虚实之间反馈控制和实时决策能力,进而驱动现实世界改进和优化。

(4)全生命周期管理。数字孪生的应用趋向于往航道全生命周期发展,即通过数字孪生技术贯穿于设计、建造到运维、管理、服务的全过程,以数据底座为基础实现跨阶段数据有效衔接和价值挖掘,从而进一步提升工程的整体效率和数字孪生技术应用价值。

1.2.2 航道数字孪生的定义及总体框架

在总结数字孪生定义及特征的基础上,航道数字孪生的特点在于其涉及到水文、泥沙、结构工程、环境工程、交通运输等领域。将数字孪生概念与航道工程领域相结合,航道数字孪生可以被定义为通过构建虚实映射的航道实体数字模型,利用模型基础数据、感知数据、业务数据驱动及算法模型,在虚

拟空间中完成对物理航道的仿真分析、故障诊断、性能预测、优化控制,支持航道建设、管理、运维、服务

全生命周期的管理和优化。图6展示了航道数字孪生的总体框架及其维度。

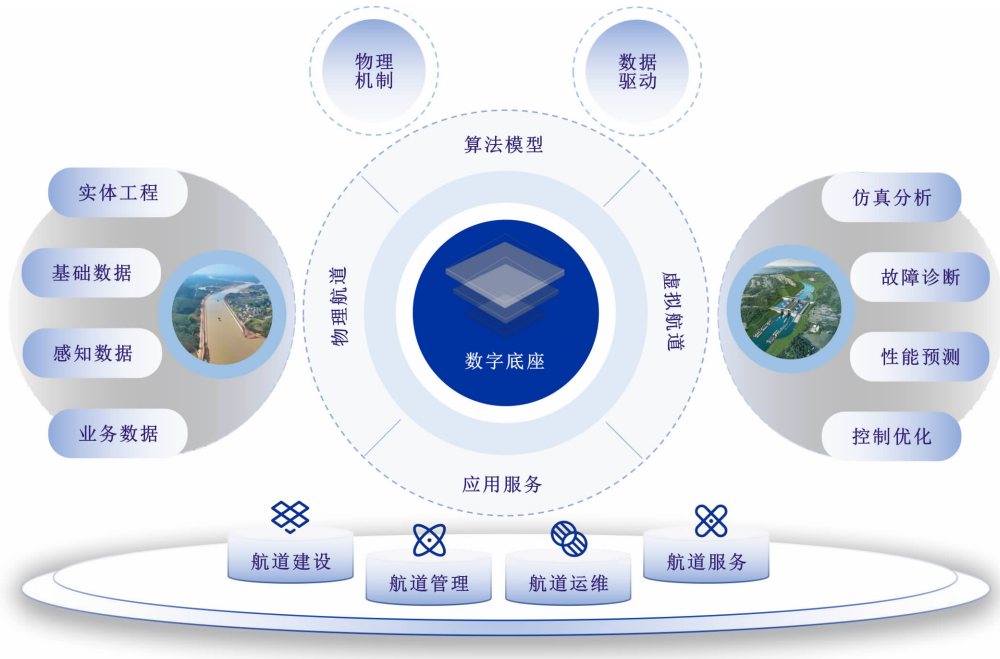


图6 航道数字孪生总体框架及其维度

Fig. 6 Overall architecture and dimensions of waterway digital twins

1.3 相关概念的辨析与对比

由于航道数字孪生目前还处在发展初期阶段,其概念内涵、技术体系以及应用模式等多个方面都还需要进行深入研究和探索。通过梳理和分析现有文献,明确数字孪生航道和相关概念之间的差异与联系,能够有助于厘清数字孪生航道的发展脉络情况,把握其核心特征和优势,进而为未来的研究和实践工作提供理论支撑与方向指引。

1.3.1 数字孪生航道与传统相关航道的对比

在航道数字化相关领域,数字孪生航道和航道数字化、智慧航道等是经常被提到且容易产生混淆的概念,这几个方面都代表航道发展的前沿方向,但实际上在概念内涵、技术侧重、应用目标等各个方面都存在显著差异。表2^[3-4,9,16,26-31]从多个维对数字孪生航道与传统航道、信息化航道、数字化航道、智慧航道进行了对比,能为相关研究和实践提供一定的参考。

1.3.2 航道数字模型、数字阴影与数字孪生的对比

在数字孪生发展过程中,还有其他一些术语也描述了物理和数字对象之间交互的概念,然而在功能、复杂性、应用场景上存在明显的差异,常见的有数字模型(Digital Model, DM)、数字阴影(Digital Shadow, DS)^[32-34]。表3列出了数字模型、数字阴影以及数字孪生之间的对比情况,这些概念可从数

据流、实时性、交互性、应用场景这几个方面进行显著区分,理解这些差异有助于在特定场景中选择适当的技术进行应用,从而提升应用效率并降低成本。

1.3.3 联邦数字孪生

传统数字孪生技术主要聚焦单个物理实体或系统虚拟映射与优化,而随着现代系统变得愈发复杂且相互连接,如跨国多式联运交通系统、智能城市、工业物联网等,均涉及多个子系统和物理实体,这些子系统之间需要开展相互协作以及进行数据共享,单一数字孪生的局限性就变得比较明显。而联邦数字孪生(Federated Digital Twin, FDT)的提出正是为应对这一需求,通过在虚拟环境里连接并协调多个自主DT,从而提供联邦集体视角并且增强决策能力^[35-36]。

和传统数字孪生相比,FDT呈现为多个数字孪生构成的网络,借助管理不同数字孪生之间的异构性与互操作性,让这些数字孪生系统在虚拟空间里协作以达成共同目标,并且依靠联邦机制保证数据的安全性与合规性。通过文献分析发现现阶段针对联邦数字孪生的研究和应用相对较少,其中Vergara等^[35]在2023年提出FDT的概念和架构,并且描述了FDT的4种架构风格,分别是集中式、对等式、分层式、区域式。这些架构的目的是支持多个数字孪生系统之间的数据共享与协同工作,同时保障数据

表 2 数字孪生航道与其他相关航道的对比

Table 2 Comparison between digital twin waterways and other related waterways

对比维度	数字孪生航道 ^[16,26]	传统航道 ^[3-4,27]	信息化航道 ^[28-29]	数字化航道 ^[9]	智慧航道 ^[30-31]
概念内涵	物理航道的数字镜像,实现实时感知、仿真分析、智能决策,是智慧航道的关键支撑技术	侧重于航道的建设与管理,缺乏与数字世界的深度融合	利用信息技术实现航道信息的采集、存储、管理与共享,提升管理效率	实现航道物理实体的数字化映射,构建航道数字模型	利用新一代信息技术实现航道的全面感知、智能分析与优化决策
建模方法	高精度数字模型,融合 BIM、GIS、物联网等技术,动态更新、实时同步	物理模型试验、经验模型,精度低、周期长、成本高	信息管理系统、电子航道图等,侧重信息管理,缺乏深度建模	利用 BIM、GIS 等技术构建静态数字模型,缺乏动态仿真能力	强调数据驱动和模型应用,可结合数字孪生模型应用
模型精度	高精度、多维度、动态更新,实时反映物理航道状态	精度受限,难以反映复杂环境和动态变化	侧重信息管理,模型精度和动态性不足	静态数字化表达,缺乏动态仿真和实时更新能力	可结合数字孪生提升模型精度和动态性
数据采集与更新	物联网传感器实时采集,数据驱动模型动态更新	人工测量为主,数据更新周期长	信息采集和共享,缺乏实时性和动态更新能力	数字化表达,缺乏实时数据采集和动态更新机制	可实现数据采集和智能分析
智能化水平	高度智能化,支持智能感知、仿真分析、优化决策	管理方式粗放,智能化水平低	信息管理为主,智能化决策能力较弱	缺乏智能化决策和动态仿真能力	强调智能化应用与决策
虚实交互能力	强调虚实交互和闭环优化,数字模型与物理实体实时同步	缺乏虚实交互机制	缺乏虚实交互和闭环优化能力	缺乏虚实交互和动态仿真能力	可利用数字孪生航道进行虚实交互
应用场景	航道规划、设计、建设、运行管理、航运服务等全生命周期	主要用于航道建设与基本运行管理	信息查询、管理与共享,提升管理效率	航道数字建模、静态数据管理	智能化决策支持、优化管理策略
技术集成性	集成 BIM、GIS、物联网、大数据、人工智能等技术	传统测量与监控技术,技术集成性低	侧重信息技术应用,技术集成性有限	数字化技术集成,缺乏智能化和动态仿真能力	强调新一代信息技术融合,需结合数字孪生提升集成深度
价值创造	提升航道管理水平和服务能力,支撑精细化、智能化管理	满足基本航运需求,难以适应精细化管理要求	提升信息管理效率,解决信息孤岛问题	提升数据获取和管理能力,为管理提供数字基础	提升智能化水平,优化管理决策和服务质量

表 3 数字模型、数字阴影及数字孪生对比

Table 3 Comparison of digital model, digital shadow and digital twins

特性	数字模型	数字阴影	数字孪生
定义	物理对象或系统的静态虚拟表示	物理对象在数字空间中的实时数据映射,反映当前运行状态	物理对象的数字表示,具有物理与数字之间的双向实时数据流
数据流向	无自动数据流	单向,物理到数字	双向
实时性	无实时性,手动更新	具有实时性,自动反映物理对象的当前状态	高度实时性,数字对象与物理对象同步变化
交互性	静态或有限	单向反映,无控制	双向实时控制
应用场景	设计、仿真和分析	监控、历史分析	实时监控、预测、优化、控制

的安全性和隐私保护。Baek等^[37]提出了构建大规模数字孪生系统的联邦数字孪生实施方法,其联邦数字孪生架构由多个层次构成,从单个数字孪生系统到联邦层,再到应用层。在交通运输领域,Czekster等^[36]探讨了 FDT 在跨国多式联运交通系统中的应用,通过整合不同国家和地区的交通基础设施、运输模式、监管标准,实现跨区域的交通流量

优化和资源分配。Irfan等^[38]提出了用于智能交通系统的网络级数字孪生,通过在不同 DT 之间的跨孪通信实现交互,和联邦数字孪生存在一定的相似性,但对比来看网络级数字孪生偏向单一领域的全局优化,而联邦数字孪生则适用于跨领域、跨系统的复杂场景。在航道工程领域,为了考虑数字孪生航道与外部不同系统之间的协作并实现共同应用目

标,可参照联邦数字孪生架构来开展,图7展示了航道数字孪生系统与外部系统的关系。

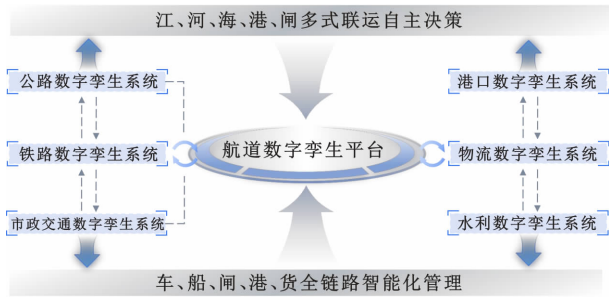


图7 航道FDT架构

Fig.7 Federated digital twin architecture for waterways

2 研究特征及进展

2.1 内河航道工程的差异化特征

内河航道工程作为水路交通运输的关键基础设施,长期以来在国家经济发展当中起着至关重要的作用^[39-40]。内河航道工程与公路、市政、航空等其他交通领域相比,具有其独特的复杂性与挑战性,同时内河航运可持续发展也面临着其特有的诸多障碍^[41]。航道基础设施的建设和维护面临复杂多变自然环境,易受水文、泥沙、气象等多种自然因素的影响,像冬季结冰或夏季水位降低都可能影响内河航运的可靠性,需通过疏浚和天气监测等技术手段来提升安全性^[4];另一方面航道运输成本低而且环境友好,尤其在长距离运输方面具有明显优势,然而其基础设施初期投资高且建设周期长^[41];水运每吨里程碳排放低,有助于减缓城市拥堵以及空气、噪音等污染情况^[42],但同时可能带来溢油事故等水污染风险^[43];在安全方面,航道运输的交通密度较低从而总体事故率较低,但与此同时其安全与可靠性受自然条件影响较大,并且水上救援的复杂性增加了安全管理难度^[3,44-45];在技术方面,内河航道工程相对来说是一个复杂的系统工程,涉及水动力学、泥沙运动学、结构工程学、环境工程学、交通运输等多个学科交叉融合,在数字化转型背景下要构建安全、绿色、高效的智慧航道体系,对系统协调发展与技术创新提出了更高的要求。

2.2 技术研究热点及进展

近年来随着各地推进智慧航道的建设工作,支撑航道智慧化升级的数字孪生技术研究成果不断出现。表4^[12,16,26,46-58]中选取了最近几年针对航道数字孪生的一些典型研究,从现有的文献分析能够看出,当前研究热点主要体现在3个方面。

(1)开展数字孪生航道框架及体系研究,期望构

建出适用于航道的通用框架。其研究框架中都体现了数据底座、模型引擎和应用服务这3个核心组成部分,以及物理实体与数字虚体的映射关系。但目前的架构均侧重于层次结构的建立,缺少对应用场景的梳理、跨阶段业务数据的传递以及全生命周期应用。

(2)进行数据底座建设技术研究,包括数据采集、感知、融合、一张图呈现等内容,研究采用无人机倾斜摄影、激光雷达、多波束测深等手段进行数据采集建模,结合计算机视觉实现高精度三维重构优化。进一步融合物联网传感、遥感探测、5G通信等技术开展多源数据融合研究,以实现航道数据的实时、精准采集,结合BIM+GIS集成技术来构建航道动态数据底座。

(3)开展算法模型与仿真分析研究,重点研究航道运行相关的动态仿真及分析预测方法,主要集中在航道运营阶段。包括建立高保真、动态可更新的航道数字模型,结合人工智能、大数据分析、智能优化算法等技术,用于实现航道状态的智能感知、运行规律的深度挖掘、风险的智能预警、养护决策的智能支持。

2.3 全生命周期数字孪生航道

随着国家大力推进水运工程建设,航道的管理从以往的运营为主,逐渐转向了从勘察设计、建设到运营的全过程管理,数字孪生航道的特征和主要价值也从以运营阶段为主向全生命周期应用转变,体现数据跨阶段传递应用价值及构建全过程数据资产。BIM+GIS集成技术的应用可以实现航道结构微观信息和地理环境宏观信息的有机结合,贯穿设计-建设-运营跨阶段的数据传递与业务融合,为航道工程的数字化建设提供全过程的数据底座支撑^[59-60]。在此基础上进一步引入IoT(物联网)技术实现实时监测与感知,是构建数字航道数字孪生体,实现全过程数字化应用的有效方法^[28,61-62]。BIM+GIS+IoT支撑的数字孪生核心是将BIM模型、GIS数据、IoT传感器数据进行集成,构建一个能够实时感知物理航道状态、动态模拟航道运行过程、智能分析航道性能、优化航道管理决策的数字孪生系统。

考虑到航道建设、运营过程中会产生大量的业务数据,除了BIM和GIS等基础数据的传递共享外,如何实现业务数据的关联映射以及全生命周期应用是需要解决的另一个关键问题。本文以BIM+GIS+IoT技术为基础,以BIM模型及其EBS拆分为信息中枢,提出了航道全生命周期数据映射与传递技术架构,如图8所示。该技术架构根据“轻几何、重数据”的理念,采用模型与信息分离的技术方案,

表 4 航道数字孪生研究进展
Table 4 Research progress on digital twin of waterways

研究热点	年份	参考文献	研究进展
航道数字孪生框架	2020	[46]	提出了基于工业 4.0 参考架构模型(RAMI4.0)的通用数字孪生架构,将数字孪生体划分为类型层、实例层和执行层,并与 RAMI4.0 的信息技术层级进行了对齐
		[12]	提出了加莱运河数字孪生框架,旨在利用数字孪生技术辅助运河管理者进行决策。该框架通过回放历史场景和快速仿真预测性管理策略,为管理者提供决策支持
	2024	[26]	从内河航道数字化转型的角度,构建了内河航道数字孪生框架体系。该框架体系主要包括 3 个部分:数据底座、引擎及知识库、数字孪生应用。该框架在苏州内河干线航道通扬线高邮段等航道的实际应用表明其科学合理
		[16]	从数字孪生航道工程实际应用出发,构建了包含物理实体航道、航道时空数据、孪生驱动引擎、数字虚体航道、场景应用服务在内的五维架构,全面地描述了数字孪生航道的组成要素和功能
		[47]	提出了数字孪生航道总体技术架构,并基于该架构设计与实现了长江通航安全保障系统。该技术架构强调多源数据融合治理,实现了通航安全信息的实时获取及监测预警,为通航保障服务提供了技术支撑
数据底座	2020	[48]	着重于通过融合多种公共数据集,推动内河水运在多式联运中的应用。利用 AIS 等数据,构建了详细的内河可导航水道网络模型,并通过与车载 GPS 数据的融合,分析运输流量区域,为未来的基础设施投资优先级提供支持
	2021	[49]	结合无人机倾斜摄影技术,快速、高精度地采集了内河航道的三维几何数据,并在数字孪生与安全管理结合的研究中,展示了基于 3D 视频融合的数字孪生应用框架
	2022	[50]	研究了多波束技术在智慧航道建设中的应用,指出多波束测深系统可以提供详细的水下地形数据,该技术能够高效、精准地采集航道水下地形数据,是构建高精度航道数字模型的重要数据来源
	2023	[51]	构建了集成 AIS、视频监控和激光雷达的监测系统,实现了多维感知和数据融合,提升了数据收集的准确性
	2024	[52]	利用特征点匹配法与迭代最近点法,实现了无人机和 underwater 多波束采集等多源数据融合,构建多细节层次构建三维可视化模型支撑航道建设及养护应用
	2025	[53]	探讨了物联网技术在智慧航道建设中的应用。通过在关键航道部署传感器网络,收集水位、流速、水质、气象、船舶动态数据,实现了航道的实时监控与管理
仿真模拟与分析	2022	[54]	提出了一种实时数字孪生模型,通过整合传感器数据和船舶动态模型实现实时仿真,用于预测船舶在波浪中的操作行为,优化航道导航和风险管理
	2023	[55]	采用数字孪生技术构建了涵盖内河航运系统的多层级虚拟模型,模拟不同减排措施和管理干预措施对系统的影响,全面评估零排放策略的效果
	2024	[56]	提出了“几何-物理-行为-规则”的沿海航道全要素数字孪生体构建方法,实现了物理航道向数字航道的多维映射。该方法从几何、物理、行为和规则 4 个维度,全面地描述了航道数字孪生的组成要素和特征
		[57]	在信江航道中开展了通航仿真与滩道分析,通航仿真技术可以通过模拟航行过程,评估航道通航能力和安全性,滩道分析可以用于分析航道滩道的冲淤变化规律,为航道维护和整治提供科学依据
	[58]	通过实时数据流和仿真环境,构建了虚拟航道模型,利用数字孪生模拟船舶在复杂环境(如码头和狭窄通道)中的导航行为,该数字孪生模型能够准确预测船舶轨迹和潜在碰撞风险,显著提高了 ASV 在狭窄航道中的导航安全性	

实现全过程数据的传递及业务关联。在数据层面,以设计为数据源头,通过 BIM 正向设计交付形成协同数据为核心,统一管理信息模型拆分、工程量清单、0 号台账数据,包括设计变更、竣工交付、移交养护等环节的数据转换,实现一个数据中心、多套模型及属性信息的数据管理体系;在管理层面,以 BIM+GIS+IoT 结合大数据平台构建贯穿全生命周期的数据底座,采用 EBS 作为业务数据主骨架,关联建管养各阶段多个 WBS 分解需求,实现模型信息与项目前期管理到建设、养护运维管理全过程的数

据互通。通过在实际工程中的应用,表明该架构能否有效实现建管养各阶段的数据共享以及业务数据的关联映射,提升航道数字孪生数据驱动能力以及项目全生命周期数字化管理。

3 航道数字孪生系统架构与关键技术

3.1 面向全生命周期的航道数字孪生系统架构

当前国内外学者和研究机构针对数字孪生技术架构及应用已经开展大量研究工作。在通用数字孪生架构方面研究者从不同角度提出多种架构模型,

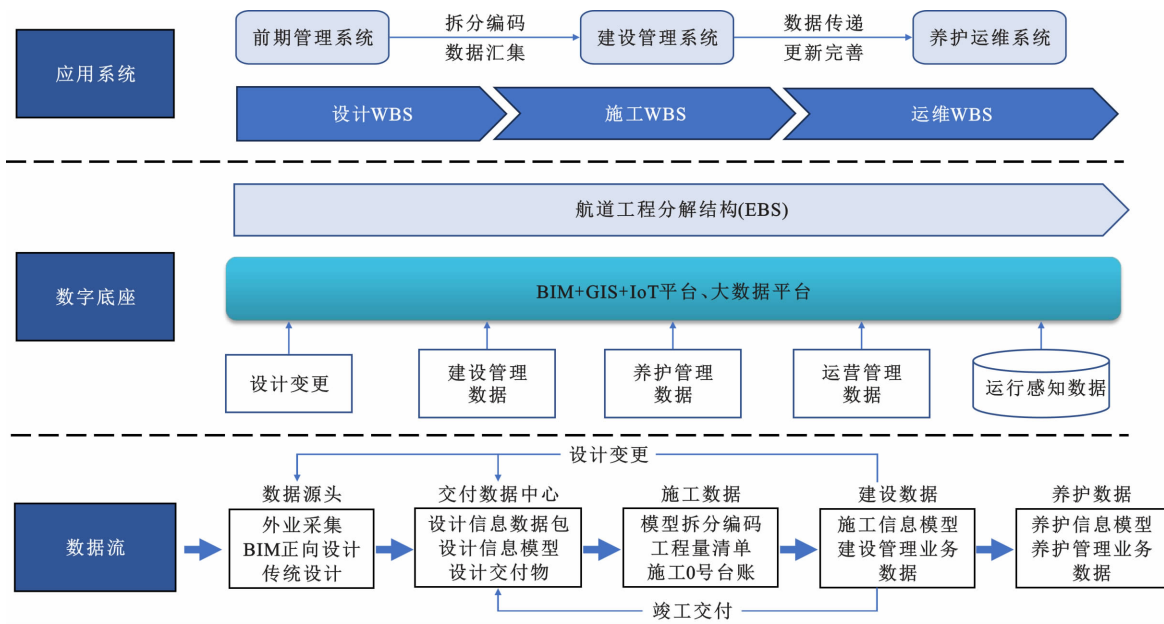


图 8 航道全生命周期数据映射与传递架构

Fig. 8 Architecture for mapping and transmitting full life-cycle data of waterways

常见的有基于 RAMI4.0 参考架构模型的通用数字孪生架构^[46]以及面向不同行业应用的数字孪生技术体系^[63]。在航道数字孪生领域,有研究针对内河和沿海航道特点分别构建相应的数字孪生框架体系^[26,56];探讨了航道数字孪生成熟度等级评价模型^[64]。

然而,当前关于航道数字孪生技术架构的研究主要针对航道智慧运营场景,在全生命周期航道数字孪生技术架构方面还缺乏深入梳理和分析。本文结合平陆运河全生命周期数字孪生技术研究和系统建设实践,从系统平台建设应用的角度出发,系统地梳理和总结航道数字孪生技术架构研究现状,并提出面向内河航道全生命周期的数字孪生系统架构,为推动航道数字孪生技术理论研究和全生命周期工程应用提供参考。主要架构包含基础支撑平台、数据底座、算法模型平台、应用服务平台等,与外部支撑的各类软硬件进行交互,共同构成航道数字孪生应用体系,如图 9 所示。

3.2 数据底座

数据底座主要负责汇聚和管理来自航道物理实体的多源异构数据,为构建高精度、高保真、实时更新的航道数字孪生虚拟模型,实现业务分析、仿真推演和智能应用提供基础数据支撑。主要包括航道基础数据、地理空间数据、IoT 感知数据、业务管理数据、外部共享数据等多源异构数据的集成和应用,涉及到 BIM+GIS、智能感知、多源数据融合、数据治理等关键技术。

航道基础数据是航道各关联实体对象的属性集合,包括起止点坐标、通航水位、闸室尺寸、码头泊位规格等基础空间参数数据,沿线地形地貌、水文气象条件等工程基础环境数据以及设计图纸、施工及竣工验收报告等过程文档记录数据,主要来源于航道工程建设运营全周期资料。一般采用标准化格式转换,将多源基础数据统一为兼容格式;通过 MQTT、WebSocket 等实时传输协议接入动态基础数据,结合离线导入补充静态文档;利用空间映射技术实现基础数据与数字孪生场景空间关联,构建动态更新的基础数据支撑层。

地理空间数据主要为航道场景相关的三维空间数据,包括航道水系、岸线、地形地貌、航道设施等的三维几何模型及其信息,采用 BIM、GIS、倾斜摄影测量、激光雷达扫描等技术进行构建,以 BIM+GIS 为骨架,实现对航道物理空间形态的数字化表达。除了传统的人工建模外,采用计算机视觉方法进行高精度、语义化的自动三维建模是前沿的研究方向^[65],而通过 BIM+GIS 实现多源异构数据融合,共同构建地理空间数据底座仍是当前的主流的表现形式^[66-67],但需解决精度与效率之间的平衡。管先祥等^[68-69]论述了 BIM 以及 BIM+GIS 技术在航道整治工程中的应用,基于 BIM 技术分析了多源测量数据集成、整治建筑物建模以及维护管理,通过格式转换、坐标转换和数据关联等方法实现 BIM+GIS 的有效融合,实现了 BIM+GIS 数据的一体化浏览、显示、管理和分析等功能,有效地解决了 BIM 技术



图 9 面向全生命周期的航道数字孪生系统架构

Fig. 9 Architecture of waterway digital twin system for the whole life-cycle

无法管理大范围工程和反映工程周边环境的不足。袁占全等^[70]针对航道工程空间分布特性,提出了基于 BIM+GIS 的航道三维漫游系统设计与实现方法,并开发了航道整治工程 BIM+GIS 三维交互汇报系统^[71],实现了 BIM+GIS 技术在航道工程管理和协同方面的应用。Wu 等^[49]通过无人机倾斜摄影和 BIM 建模技术构建内河航道三维场景模型,并实现了多源感知数据与数字孪生的融合;孙俊锋^[72]将 BIM+GIS 技术应用到内河智慧航道建设过程,论证了 BIM+GIS 在航道工程设计施工、养护巡检与清淤管理、船舶导助航等方面应用模式和效果,表明其在建设、养护、服务各阶段都能有效支撑智慧航道建设。从现有的应用来看,BIM+GIS 技术在航道数据底座构建中得到广泛应用,通过 BIM+GIS 集成能将航道地理空间及工程构筑物集成到统一信息平台,并且与业务系统数据形成关联映射,形成数字

孪生数据集成和统一展示的关键底座。

航道感知数据依靠各种传感器、监测设备和信息采集技术,实时获取航道物理实体状态数据,涵盖航道本体、航道设施、航运船舶、航道环境等多个要素。如可以利用物联网技术,部署水文传感器、气象传感器、视频监控设备、AIS 船舶自动识别系统、GNSS 定位系统等,对航道水位、流速、气象条件、船舶位置、航道设施状态等进行实时监测,通过空间位置关联实现感知数据与地理空间的融合。罗丹等^[73]分析了数字孪生各类传感器及数据传输技术的特点及应用情况,指出新型传感技术(如激光传感器和基于摄像头的视觉传感器)显著提升了复杂环境下结构状态监测的空间分辨率与响应速度。He 等^[74]提出了一种基于物联网大数据的航道水深信息挖掘方案,利用 AIS(自动识别系统)数据实时集成到船舶导航环境中,通过数据挖掘技术提取航道

深度信息,并利用 Hermite 插值方案和 BP 神经网络模型预测最大船舶吃水深度,为船舶导航和海事监管提供了及时准确的航道水深信息。Miciula 等^[75]提出了内河航行自动危险识别信息系统(AHIIS),该系统通过集成多种传感器数据,结合了数学计算和专家决策,实现了对航道环境的实时感知和风险评估。Wu 等^[49]针对内河航道开展安全监控时视频碎片化、子系统数据分离以及应急响应不及时等一系列问题,提出一种基于三维视频融合的内河航道数字孪生重建与应用方法,把多源物联网感知数据集成到数字孪生场景中,从而支撑航道状态的实时监控与智能管理。Lei 等^[76]提出了一种基于轨迹特征的 AIS 和雷达目标关联方法以用于内河航道智能航行中的态势感知。此方法通过提取船舶雷达和 AIS 数据中的轨迹特征并利用支持向量机(SVM)模型实现数据关联,进而提高了船舶轨迹的识别精度,为内河航道的智能航行提供了技术支持。

外部共享数据主要来源于交通厅、港航中心、水利、气象、自然资源、规划、统计、住建等行业或跨行业部门,包括流域航运发展规划、江海联运数据、沿线地形地貌更新数据、防汛调度管理数据、气象环境数据、极端天气预警数据、区域社会经济数据等,主要通过标准化接口实时同步与离线批量获取等方式实现数据共享。通过外部共享数据的整合,能有效弥补航道系统内部数据在宏观环境、区域规划、应急联动等维度的不足,为航道数据孪生平台的仿真分析与决策提供更全面的外部环境支撑。

从目前已有的研究进展情况来看,航道数据方面侧重于各阶段独立应用,缺乏贯穿全生命周期的数据底座以及业务数据的融合治理体系。如王海涛等^[77-78]在文献中分别探讨了广东航道以及长江航道大数据治理应用,目的是提升航道的业务治理以及安全运行水平,但其数据治理主要侧重于航道运营阶段。本文已在图 8 中给出了航道各阶段之间数据传递与映射的架构,提供了一种贯穿设计、建设、运营全生命周期数据底座构建的方案。在此基础上,应建立统一的数据标准体系以及工程分解结构,实现跨阶段的数据传递以及模型与 WBS 和各阶段业务数据的映射,支撑全生命周期数据底座的共享及应用。

3.3 基础支撑平台

数据底座的构建和业务场景的应用需要基础支撑平台进行海量数据的有效整合与管理,通过基础

支撑平台提供强大的数据接入、数据管理、数据可视化和数据服务能力,是实现业务可视化同步应用的关键支撑。基础平台的核心部分包括三维图形引擎、物联网平台、大数据平台等内容,这些基础支撑平台的性能会直接影响数字孪生系统的应用效果。

3.3.1 三维图形引擎

可视化是数字孪生航道的重要特征之一,三维图形引擎能实现海量航道数据高效渲染与流畅交互,其性能和功能直接影响数字航道系统用户体验和应用效果。三维图形引擎负责把海量航道数据高效渲染成逼真三维场景,还支持用户进行流畅交互操作,为航道管理、航运服务和决策支持提供形象化高效信息交互及可视化方式。现有的图形引擎在技术架构、功能特性、应用领域等方面各有侧重,如 Unity 和 Unreal Engine 等商业游戏引擎,依靠强大功能和成熟生态系统在游戏开发、虚拟现实、增强现实等领域占主导地位^[79-80];Cesium、Three.js、Esri ArcGIS 等引擎则专注于地理信息系统和 Web 三维可视化^[79-81],在数字地球、智慧交通等领域应用广泛。

现阶段关于数字孪生图形引擎的研究热点主要包括 3 个方面:一是开展基于 OpenGL/WebGL 或 OGRE 的图形引擎底层技术与优化方法研究,包括基于这些引擎 API 构建的各类图形引擎和应用系统,研究内容涉及引擎架构、光照模型、纹理映射以及性能优化等多个方面;二是基于开源或商用图形引擎的行业化二次开发应用,在航道工程领域如 BIM+GIS 的业务管理系统,以及基于商业游戏引擎虚拟现实和仿真模拟应用,如多维空间数据融合^[82]、三维漫游与交互汇报^[70]、航道导航仿真与预警^[83]、船舶交通流仿真^[84]、三维视频融合应用^[49]等;三是新一代图形渲染技术,主要关注神经渲染技术^[85-86],例如神经辐射场(NeRF)、3D Gaussian Splatting 等在图形学领域的应用,利用深度学习模型,从数据中学习场景的表示和渲染规律,可以实现高质量、高效率的渲染效果。研究内容包括新视角合成、逆向渲染、场景重建等。

从数字孪生系统建设的角度来看,选择合适的图形引擎至关重要,本文分析对比了主流数字孪生引擎的特点及航道工程适用情况,如表 5 所示。结果表明,开源 WebGL 引擎和国产商用 GIS 开发平台对航道数字孪生具有较好的适用性。

3.3.2 物联网平台

前面的小节中介绍了利用物联网技术实现航道

表 5 航道数字孪生图形引擎对比

Table 5 Comparison of waterway digital twin graphics engines

引擎名称	引擎类型	架构	技术特点	航道适用性
Cesium ^[87]	开源 WebGL 引擎	B/S 架构	专注于地理空间渲染,支持大场景三维渲染	适用于航道大场景规划设计、建设管理
Three.js ^[88]	开源 WebGL 引擎	B/S 架构	轻量级、灵活,但对大场景的支持还需优化	适合中小型航道场景的快速开发
Unity ^[81]	商业游戏引擎	C/S 架构+像素流	跨平台,支持 PhysX 物理引擎,动态调度,渲染效果好	偏向于视觉要求高的中小型场景数字孪生,适用于航道运营场景
Unreal Engine ^[79-80]	商业游戏引擎	C/S 架构+像素流	高性能,支持物理渲染、全局光照、光线追踪,渲染效果好,硬件要求高	偏向于视觉要求极高的中小型场景数字孪生,适用于航道运营场景
OGRE	开源底层引擎	C/S 架构	高度定制化渲染,跨平台,但开发难度高	适合科研或需要底层优化的航道仿真系统
SuperMap/ArcGIS	商用 GIS 开发平台	混合架构	GIS 功能完善,支持三维空间分析,支持大场景三维渲染	适合需要深度 GIS 分析的航道地理空间数字孪生

智能感知,而考虑到实际航道工程中物联感知设备多而分散,建设统一的物联网平台能提高数据整合和系统扩展性。在工业领域,物联网已经成为数字孪生的重要支柱^[89],Awouda 等^[90]提出了用于数字孪生的标准 IoT-DT 框架,Bellavista 等^[91]提出了 IoTwins 方法论和平台,均强调了物联网平台对数字孪生的支撑作用。在水运及航道领域,平陆运河构建了统一的物联网平台^[30],实现感知数据的统一接入。Miah 等^[92]构建了基于物联网的先进水运系统架构,物联网平台为使用不同类型的传感器和协议收集数据,提高了水运系统的安全性和效率。Li 等^[93]提出了一种基于边缘计算的物联网应用方法,用于内河受控航道的无人交通指挥系统,提升了交通实时感知的准确性。在实际工程中,物联网技术的应用正在从单系统的智能感知传输向边缘计算应用以及统一物联网平台发展,构建项目级和企业级物联网平台以实现数据统一接入和管控已逐渐成为趋势。

3.3.3 大数据平台

大数据平台是支撑航道数据采集、存储、管理和分析的重要基础,包括基础空间数据、物理实体层采集的实时监测数据、应用平台层产生的业务数据等。大数据平台应具备高吞吐、低延迟、高可靠、可扩展等特性,能够支持海量数据的存储、查询、分析和挖掘。目前大数据平台技术在航道领域的应用主要包括分布式存储、分布式计算、数据仓库及数据湖等及技术。Ding^[94]提出了基于混合时间窗口约束的多式联运信息共享平台设计方法,解决了多式联运站点间的信息互联问题。Wang 等^[95]对具有时空特征的大数据服务平台构建模型进行了探讨,明确指出

智能化处理、高性能服务和数据融合是支撑平台高效运行的核心技术要求。平陆运河构建起统一的大数据平台和数字底座,实现了数据统一汇聚、治理、跨部门共享以及跨业务协同^[30]。Zhang 等^[96]提出面向大数据平台的智能网络虚拟化架构(INVA),通过赋予网络智能化能力显著提升大数据平台在资源调度、流量管理和任务分配方面的效率,从而满足多样化应用场景的需求。在数据安全和隐私方面,Stergiou 等^[97]指出大数据平台的数据集虽为数字孪生技术提供了输入来源但也引入了多重安全挑战,如数据泄露、访问控制不足以及加密算法性能瓶颈等问题,还提出了新的安全算法以提升数据传输可靠性及系统整体安全性。以上研究可以看出,大数据平台正朝着平台云原生化、安全化以及统一化发展。统一大数据平台的建设将有效提升业务数据统一接入和管控能力,并进一步为企业积累“数据资产”。

3.4 算法模型平台

算法模型平台用于构建、存储和管理各种算法模型,是支撑航道数字孪生仿真和分析应用的核心部分。平台通过提供知识库及模型接口,支持应用层调用各种算法模型进行数据分析和预测,算法模型主要包括机理分析模型、数理统计模型、混合模型 3 类。机理分析模型以物理规律、工程原理为核心构建,适用于需明确物理因果关系的场景;数理统计模型依托海量历史数据,通过机器学习等统计学习方法挖掘数据间的关联规律,适用于数据积累充足、难以用明确物理公式描述的场景;混合模型融合机理分析与数量统计的优势,以机理模型搭建核心框架、统计模型修正误差或补充未知因素,适用于物理

机理部分明确但存在复杂干扰因素的场景。算法模型平台主要包括模型仓库、模型开发环境、模型运行引擎及模型服务接口,目前相关的研究主要集中在水利领域,交通及航道领域的研究较少。现有算法模型的应用主要关注专业模型理论与算法建设,在模型统一管理及多业务协同智能决策方面支撑不足^[98]。刘昌军等^[99]结合南四湖水系实际应用案例,从模型平台架构等4个方面介绍了水利专业模型平台的设计及实例化运行情况,为相关模型平台的建设提供了借鉴。罗斌等^[98]提出的专业模型平台有效支撑了三峡智慧流域运行管理工作平台的综合调度管理系统建设和运行。靖争等^[100]提出了专业模型体系的优化策略,通过模型体系构建支撑数字孪生“四预”应用,并探讨了专业模型平台的共建共享机制。

水利专业的模型平台应用取得了一定成效,但现有平台在模型通用性、复杂场景模拟能力、多类型模型配置技术、多业务场景动态支撑能力等方面仍存在不足,模型与应用的紧耦合、建模过程复杂、平台推广机制不完善等问题也限制了其广泛应用。而相对来说,因涵盖“航道-船闸-港口-船舶”全链条,航道领域涉及到更多的算法模型以及更广的专业间耦合,需融合水文、通航、结构、物流等多领域算法模型,专业算法模型平台将进一步朝着多模型耦合、平台模块化服务化、平台 AutoML 化(自动化机器学习)发展,提升模型平台的通用性以及开发效率;同时增强模型的可解释性,提高模型的透明度和可信度。当前,多模型耦合方面,张阳等^[101]提出多模型融合船舶轨迹预测方法,整合时域卷积网络与动力学方程模型,提升了内河船舶轨迹预测精度,为复杂水域通航模拟提供支撑;模型平台模块化服务方面,张力澜等^[102]构建的以模块化服务为核心的模型平台,通过微服务与并行计算技术,实现多模型标准化部署与敏捷复用,支撑智能“四预”业务。在 AutoML 方面,陈柯兵等^[103]基于 AzureAutoML 构建长江下游水位潮位预报模型,降低建模门槛,满足航道周旬尺度预报需求。为进一步构建开放的算法模型平台,需要高校、企业、政府部门等共同参与建设和应用,并通过加强国际合作,共同构建通用、共享的水运行业算法模型体系。

3.5 数字孪生应用服务

应用服务是航道数字孪生系统价值实现的环节,通过将数字航道系统的各种功能和数据分析结果进行整合与可视化呈现,面向航运企业、管理部

门、公众等不同类型的用户,提供多样化的航道信息服务和决策支持等智能化应用。传统的信息系统面向单个阶段或某类应用需求,容易存在业务系统多、数据分散,统一管理和决策不便以及数据孤岛等问题。而通过数字孪生构建统一的应用服务平台为打通全生命周期应用的现实路径,进一步结合算法模型、AI 分析等实现数据驱动智能业务应用。Di 等^[104]构建了基于需求识别的内河航道云基信息服务平台架构,并针对 Iwamas(内河航道即服务,包括 PaaS、DaaS、IaaS 层)提出了技术解决方案,为内河航道用户提供全面的信息应用服务。王凡等^[105]通过功能分类、双引擎架构、前后端分离等技术,设计并开发了数字孪生工程可视化平台,在数字孪生大藤峡工程中得到验证。平陆运河已完成数字孪生平台总体设计及建设期平台建设,实现了运河建设全流程和全方位管理,并充分考虑了延伸运营期需求^[30]。总体来说,现有应用平台研究主要集中在开发面向不同用户的航道信息服务平台,提供航道信息查询、三维可视化展示、导航规划、安全预警、船舶调度、决策支持等多种服务,未来的发展需进一步拓展应用服务的功能和集成性,提升应用智能化水平,支撑航道全生命周期应用。

4 内河航道数字孪生应用现状

4.1 典型应用现状

数字孪生技术在交通领域展现出广阔的前景和巨大的应用潜力^[106],在公路、铁路、航空、港口等多种交通方式中已进行应用并且取得显著成效。在公路交通领域,数字孪生技术用于流量预测、拥堵缓解和安全管理,通过实时监测和预测为交通管理者提供优化决策支持^[107]。在铁路交通领域,数字孪生技术用于列车运行控制、线路维护管理和安全预警等方面^[108],以此确保运输安全高效。在航空领域,数字孪生技术广泛应用于飞机设计、制造、运营和维护等环节^[109],通过数字孪生进行虚拟设计和仿真验证,优化飞机结构性能并进行健康监测与预测性维护。在港口领域,数字孪生技术用于港口运营管理、设备维护和安全监控等方面^[110],借助港口数字孪生模型实现作业流程优化与设备预测性维护以提升运营效能。

和其他交通领域对比,内河航道数字孪生的工程实际应用相对较少,航道工程所具有的多专业耦合特性让全要素和全过程应用面临更多挑战,目前现有的航道数字孪生运营主要集中在运营维护阶

段,表 6 展示了数字孪生在航道领域的典型应用 现状。

表 6 内河航道数字孪生典型应用

Table 6 Typical application of digital twin in inland waterways

文献	应用阶段/ 场景	应用形式	实际应 用类型	应用地点	算法类型	结果/应用价值
[111]	规划设计	三维可视化展示、 参数化设计	DM	河南沱浚 河航道	空间分析、工程算量	提高设计效率和精度
[30]	建设管理	多源数据整合、数字 化映射及管理、安全 监测及预警、遥感监 测分析、应急调度	DT	广西平陆 运河	水文水动力模型、 安全性动态仿真	提升运河工程规建管养全过程的一体化 管控能,提升建设进度、安全、质量、 绿色管控能力,为后续的运营期 提供了数据基础
[112]	运河 改扩建	数字建模、仿真分析、 指标预测	DM	巴拿马 运河	离散事件模型、系统动力学 模型、神经网络、支持 向量回归(SVR)	提前预测巴拿马运河扩建后的运营 情况,评估潜在的环境影响,为运 河的扩建和运营提供科学依据
[108]	建设及 运营管理	二维视频与三维 场景融合	DS	未提及	视频图像拼接匹配、 虚拟场景构建	提高水路交通监控的效率和准确性,提 升应急响应能力和历史事件追溯能力
[113]	运营服务	数字化建模、实时监控、 动态交互、决策支撑	DT	俄罗斯南北 运河、北海 运输走廊	数据处理、仿真评估、 机器学习	提高运输效率、降低运营成本、 增强运输安全性
[114]	技术探索/ 安全管理	建模和仿真、运行模拟、 船员培训	DS	长江航道	数据分析、可视化分析	提高长江航运的安全性和管理效率
[78]	航道运营 维护	数字化建模、数据交互、 模拟仿真、优化预测	DT	长江航道	数据治理、大数据分析、 机器学习	提升长江航运安全性和运行效率, 降低维护成本,增强环境保护能力
[115]	运营管理	数据整合、数字化 映射及管理、水情 预报、调度预演	DT	长江三峡	大数据分析、智能识别 模型、水文学和水动力 学算法模型	提升三峡工程的预报、预警、预演、预案 “四预”智慧化水平,增强工程的 综合管理和协同能力
[47]	运营安全 保障	多源数据整合、要素 数字化映射、 实时监测及分析	DT	长江航道	数据治理、水流动力学 模型、船舶运动模型、 安全分析预警	提升长江航道的通航效率与安全性
[116]	运营维护	概率模型和专家知识 库构建、不确定性 分析及预测	DS	欧洲杜 罗河航道	贝叶斯网络算法	提高内河运输系统的韧性,优化 运输过程,为决策提供科学依据
[117]	运营管理	运行状态模拟、 预测、优化控制	DT	法国 加莱运河	模型预测控制、移动视界 估计、线性离散时间模型	减少因潮汐变化和降雨导致的洪水风 险,降低运营成本,提高水资源利用效率
[104]	运营服务	需求分析、数据汇聚 分析、云平台建设	DS	长江航道	需求识别模型,层次 分析法、云计算服务	精准识别不同用户群体的信息需求, 优化内河航道信息服务的提供, 提高服务质量和效率

4.2 技术应用生态

数字孪生相关技术在内河航道领域有广泛应用场景,已逐渐渗透到航道建设与管理各个环节,初步形成了丰富的应用生态和良好的前景。结合现有文献研究,航道数字孪生技术应用可从应用场景、应用形式和应用价值 3 个方面论述,图 10 展示了航道数字孪生技术应用生态。

(1)在应用场景上,航道数字孪生贯穿航道全生命周期,涵盖规划设计、智慧建造、航道养护、智慧运营和安全应急等关键环节。在规划设计阶段能构建

航道空间地理环境、交通流量等要素的数字孪生模型,实现对航道规划方案可视化展示、仿真分析及优化评估,为航道选线、通航标准确定、结构物设计等工作提供科学依据^[111-112]。在智慧建造阶段,可通过构建施工数字孪生模型实时反映施工进度、设备状态、人员位置等信息,实现施工过程可视化监控与精细化管理,及时发现施工现场隐患与问题并预警反馈,从而优化施工流程和资源配置^[30]。在养护与运营阶段,数字孪生技术可对航道设施、运行环境和结构健康状态进行监测和评估,实时反映航道交通

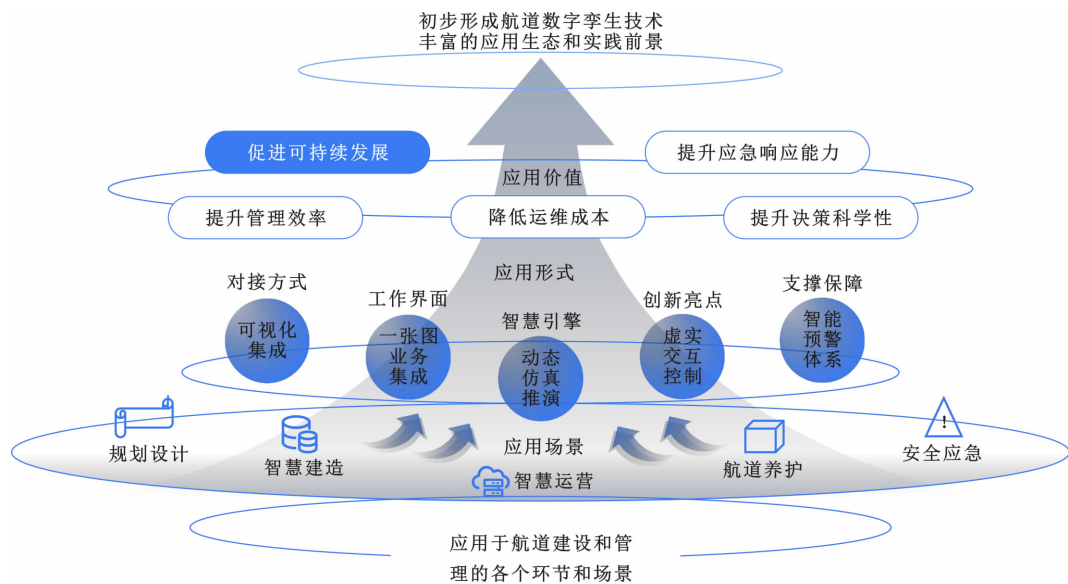


图 10 航道数字孪生应用生态

Fig. 10 Application ecosystem of waterway digital twin technology

流量及船舶运行状态等信息,进一步通过多源数据融合与动态模拟、预测提升通航安全保障和运营调度效率,从而支持运营者制定科学的养护和运营调度策略^[78,113,116-117]。在安全管控方面,可通过构建航道安全运行的数字孪生模型实现对航道安全风险实时监测、预警和应急仿真模拟,以提升全过程安全管控水平^[47,114]。

(2)在应用形式上,航道数字孪生技术呈现出多维应用形态,涵盖可视化呈现、一张图业务集成、动态仿真推演、虚实交互控制以及智能预警体系等形式。基于三维动态映射模型构建的立体可视化系统,能够完整复现航道地理特征、工程布局、船舶动态、环境参数,进而形成具备空间感知能力的综合决策支持界面^[113];依托地理信息一张图的数据集成功能,可以整合多源异构的航道水文资料、船舶轨迹数据、基础设施信息以及航道建设养护管理业务信息,以实现空间化数据聚合与业务集成管理^[30];通过动态仿真引擎模拟物理系统运行机理,针对航道通航效率、结构应力变化与生态影响开展数值推演,为建设运营管理提供科学量化依据^[112];借助虚实交互控制能够实现船闸远程控制、启闭时序优化、航标状态实时调控等精准操作,动态感知系统持续获取物理航道运行参数,通过模型推演预判未来变化趋势,形成“感知-分析-预警”的闭环管理机制^[47]。

(3)在应用价值上,主要体现于提升管理效率、降低运维成本、提升决策科学性、提升应急响应能力、促进可持续发展等诸多方面,依靠统一数据底座去打破信息壁垒,达成数据的互联互通以及共享应

用,以此提高项目管理效率与信息协同水平;借助实时监测和预测分析手段,提前发觉潜在问题并及时采取相应措施,进而降低建设与运维成本;基于仿真模拟与预测分析方法,增强决策的科学性和精准性程度;通过一体化监测和预警机制,提升航道安全监测、预防以及应急处置能力,保障航道的安全与畅通状态;结合环境监测和资源优化利用方式,推动航道环境保护和可持续发展进程。

4.3 平陆运河应用案例

4.3.1 项目概述

平陆运河作为新中国成立以来建设的第一条通江达海的运河工程,从规划设计前期就开展 BIM 设计及施工应用,并确定了构建全生命周期数字孪生运河的目标。按照数字孪生航道主要建设内容,结合平陆运河工程项目全生命周期智能建设运行的现实需求,以可视、可管、可控为核心目标的平陆运河全生命周期数字孪生平台建设关键要素包括:数据资源建设、应用支撑建设、算法模型建设、业务应用建设等。平台建设充分利用建设单位已有的数据中台、物联平台、视频平台等基础平台能力,以数据采集、汇聚、应用为核心,发挥数据全过程汇聚和治理应用的价值,以提升项目建设运营水平为导向,实现“全过程”数据采集分析、“全要素”数据集成管控的“两全”目标。总体架构如图 11 所示。

4.3.2 建设应用内容

(1)数据资源建设。平陆运河建设期数字孪生平台数据资源建设通过遥感卫星、无人机、机载激光雷达等设备全方位采集汇聚水雨情、工程安全监测

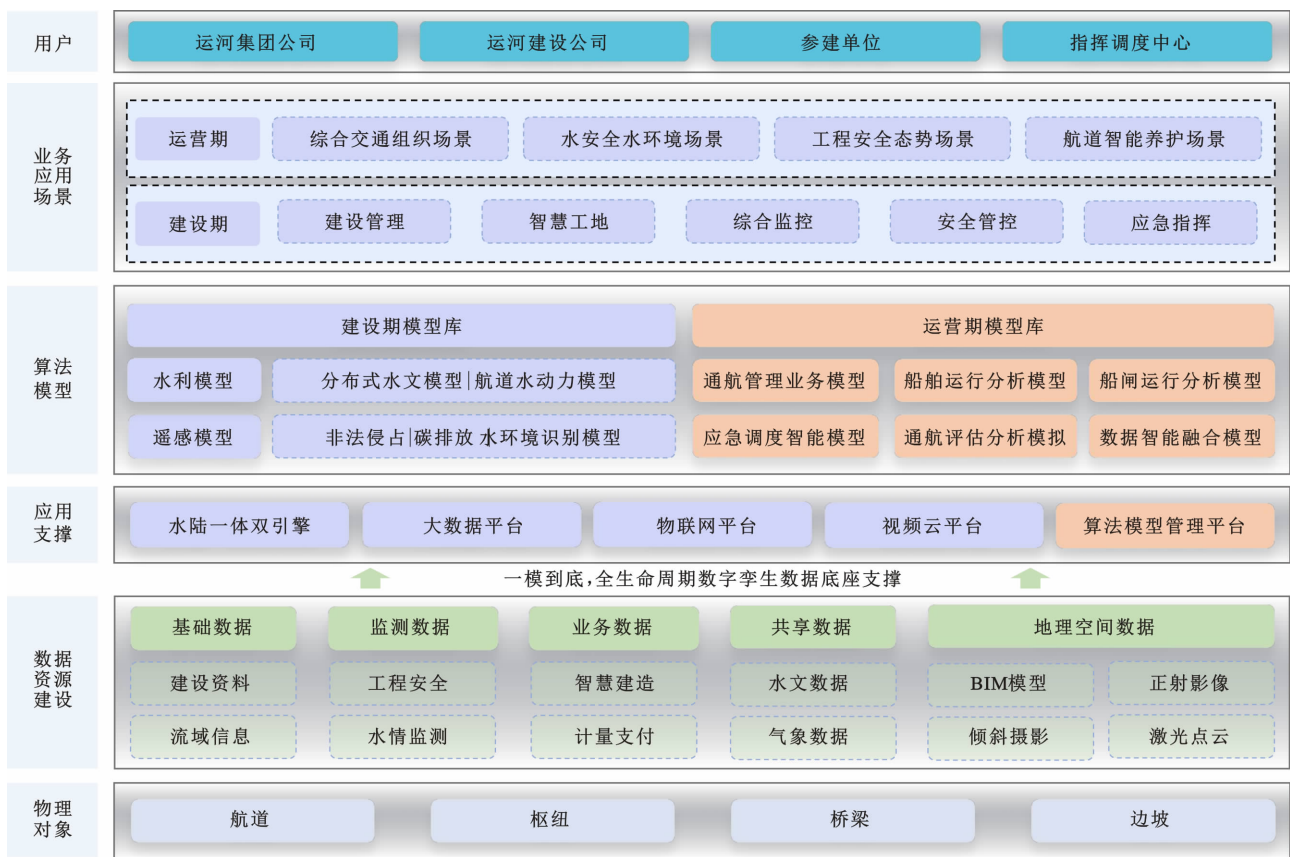


图 11 平陆运河建设期数字孪生系统架构

Fig. 11 Digital twin system architecture of Pinglu Canal

信息、生态环保数据、三维实景模型等多源异构数据,构建134.2 km物理运河全覆盖的数字化模型,形成高精度二、三维数据底板,一模到底,实时映射平陆运河状态和行为,为实现工程全生命周期数字孪生管理筑牢数字孪生数据底座。

(2)应用支撑建设。平台基于自主可控的BIM+GIS三维可视化引擎,构建覆盖多源异构空间数据的全功能要素水陆一体双引擎支撑。引擎以高性能数据调度与智能空间计算为核心,提供二、三维可视化浏览能力,能够实现大场景秒级加载与流畅渲染,为上层业务应用提供实时、精准的空间信息支撑与决策赋能,服务全生命周期孪生应用。

(3)算法模型建设。针对平陆运河建设期围堰施工安全、工程建设合规用地、生态环保等业务管理提升需求,搭建了融合机理模型、数据驱动的水利专业算法模型和智能遥感识别模型,以此开展实时高效的工程施工分析预测,实现建设期汛期洪水侵袭、现场碳排放管理、河道水环境变化等关键环节智能化推演模拟,为运河建设科学决策提供精准且有力的支撑。

(4)业务应用建设。在建设期围绕核心业务需

求构建多层次专题化应用体系,为工程管理人员提供直观高效决策支持。平台以首页作为驾驶舱融合BIM、实景模型等多源数据,实现项目全周期环境孪生对比;建设管理集成投资、进度、质量等关键业务数据,支撑项目精细化管理与全局洞察;智慧工地聚焦标段管理通过图表化展示实时营运状态与预警信息,强化在线监管能力;综合监控整合水文、环境等监测数据实现三维空间动态预演,提升现场信息管理效率;安全管控汇聚隐患、边坡及沉降监测信息构建集预警、分析、展示于一体的安全风险防控体系。通过数据可视化与智能交互全面提升项目态势感知与应急指挥能力。

4.3.3 关键技术特点

(1)多源异构空天地数据融合技术。针对数字孪生平台构建多模态数据结构差异大,协同融合难度大的问题,提出气象、水文、水动力等动态模拟与地形、河床、构筑物等静态仿真的多源异构数据融合框架,解决数字孪生运河跨平台多源数据融合共享难题,为多模态数据融合感知与表达的数字孪生平台构建提供空间一致的融合数据。

(2)基于多元遥感卫星的生态环境监测技术。

平台创新融合光学、水色、雷达、碳卫星等多源遥感数据,构建空天地协同感知网络,突破传统监测局限。通过国产光学卫星实现平陆运河全线 1 000 余公顷红树林覆盖度与叶绿素等状态动态追踪;首创碳卫星与碳排放因子法双重验证机制,基于大气 CO₂ 浓度与能耗数据趋势相关性分析,保障绿色施工成效真实可控;利用雷达卫星干涉测量技术实现施工全线毫米级沉降监测,识别人眼不可见形变风险。

(3)“空-天-地-水”智能监测及预报预警技术。针对项目多处高大边坡、复杂船闸水工建筑物、多座桥梁拆改等建设风险,应用“空-天-地-水”智能融合监测预警技术,实现平陆运河爆破施工及高风险边坡全域实时监测;针对平陆运河施工期河网动态变化和标段施工导流协同难点,提出运河新水系自适应栅格产汇流计算方法,开发了径流段分布式水文预报和感潮段水位预报模型,24 h 滚动预测航道未来 72 h 流量、水位,实现航道水位淹没分析和预警,为施工防洪安全及导流方案优化提供关键水情信息。

4.3.4 运营期建设规划

数字孪生平陆运河工程是在工程建设期已取得显著成效,下一步将聚焦工程高质量运行和综合效益发挥,在建设期基础上无缝衔接,强化智慧化模拟能力。在算法模型方面,进一步引入并研发一系列智能算法模型,包括运河通航综合评估、船舶运行综合分析、船闸运行综合分析等模型,打造运河多源数据智能融合分析模型体系;在业务应用方面,以工程安全运行为核心重点建设数字孪生应用场景分析应用,打造数字映射、智能模拟、前瞻预演智能分析体系,以此提升航运协同服务和运行保障能力,夯实精细化航运监管,打造广西践行交通强国战略的创新型智慧航运样板工程,为中国其他大型内河智慧航运工程建设提供示范案例。

5 挑战与问题

内河航道数字孪生在实际研究与应用中面临多层次、多维度的挑战,从数字孪生系统实际工程应用的角度来看,这些挑战贯穿于感知层、数据层、模型层、应用层,涉及技术、管理、标准等多个方面。

5.1 感知层:全面精准感知体系未形成

航道建设和运营环境的复杂性形成了多层次的感知需求,涵盖水文气象、地形地质、通航要素等多个方面,而航道感知数据质量高度影响着数字孪生

模型的精度和可靠性^[78,118]。如何构建全要素、高精度的航道综合感知体系面临一系列挑战。

(1)全面感知与整合难度大。不同的感知设备和数据源,如航道测量、气象、船舶交通等由不同机构提供,在数据格式、标准和协议等方面存在差异。如何从海量、异构的数据中提取有效信息从而实现多源数据融合和协同感知是当前面临的挑战^[49,119]。

(2)感知数据质量与可靠性不足。航道由于受水文气象等环境复杂多变影响,传感器采集的原始数据经常存在干扰或者缺失的情况,比如水下设备容易受到水流冲击和腐蚀的影响,从而导致监测盲区或数据失真的问题^[120]。现有的智能感知算法在复杂环境当中的鲁棒性、泛化能力,以及对小目标、异常事件的识别能力需要进一步提升^[121-122],这限制了航道感知数据在实际应用中的可信度。

(3)感知数据时效性不足。数据采集和传输过程中出现延迟或者丢失是常见现象,这使得模型的动态更新能力受到了限制^[120,123]。而感知数据的传输要依赖稳定的通信网络,通信网络覆盖不足以及延迟会影响实时交互还会造成决策滞后。

(4)感知网部署与维护成本的矛盾。传统的航道感知设备成本高、功耗大且运维成本也高^[48],如何建立低成本、低功耗且高性能的感知体系是提升航道全面感知能力的关键。

5.2 数据层:多源数据融合与治理难

针对航道各类基础数据和业务数据的整合、清洗治理以及业务关联映射是影响数字孪生数据集成应用的又一关键问题,主要表现为如下 4 个方面。

(1)多源数据异构性与标准化问题。航道数字孪生体涉及的基础数据包含水文、气象、BIM、地理信息等多种类型且不同来源数据在语义、编码标准和质量上有差异^[124]。实际应用中缺乏统一数据标准和规范,导致数据互操作性差进而造成数据整合和共享困难^[13,125-126]。

(2)数据质量与实时处理难题。不同方式采集的基础数据和不同系统的业务数据质量参差不齐,有效评估、清洗和高效治理数据以确保数据质量是数字孪生体构建关键^[78,127]。此外因数据不断产生、更新和演变,实现多源数据实时融合及高效更新以满足高并发和低延迟要求也是性能上的瓶颈^[76,128-129]。

(3)跨生命周期的数据传递和管理机制尚不完善。航道数字孪生需要深度集成各类业务数据,构建统一业务管理体系来实现多领域协同应用,其系

统集成的复杂性和难度都比较大。特别是在不同主体之间的数据交接过程当中,存在数据所有权转移和治理缺失的问题,导致数据模型不连续以及信息丢失情况^[130]。怎样有效管理和利用历史数据与实时数据,实现数据在时间维度上持续演化和更新,也是一个复杂的技术问题^[131]。

(4)业务数据映射及模型融合。航道数字孪生体的核心价值在于实现物理空间与虚拟空间的协同与交互,然而在非结构化业务流程和模型之间的映射上存在颗粒度不一致、语义鸿沟等问题。尤其动态且难以结构化的业务信息增加了数据映射的复杂性。

5.3 平台层:模型仿真与交互能力不足

平台层是实现数据集成与业务分析的“中枢系统”,基于图9中提到的系统架构,平台层主要包括基础支撑平台和算法模型平台,涵盖电子航道图、图形引擎、数据中台、物联网平台、航道建设和管理各类业务模型等。但要发挥好平台层对航道智能分析和业务应用的关键支撑作用仍存在如下4个矛盾与挑战。

(1)高精度建模与计算资源之间的矛盾。一方面高精度场景模型的创建和处理不仅需要更高的建模成本及资源消耗,也带来了更低的运行效率^[120,132],如何解决模型精度与效率的矛盾是当前需要解决的关键问题^[133]。

(2)多类型算法模型建模与协同难度大。航道工程涉及的算法模型种类繁多,如水动力模型、船舶运动模型、交通流模型等,建模难度大且难以准确反映物理航道真实状态和行为^[120]。此外由于不同模型之间缺乏统一的接口和协议,使得模型的集成和协同工作变得困难^[134],如何构建统一的模型平台,兼顾模型平台的通用性及航道领域特定需求,并通过自动化和智能化的模型更新^[135],提升模型更新效率并降低维护成本,是航道数字孪生模型应用面临的关键问题。

(3)模型可视化与渲染能力有待加强。航道工程涉及大体量BIM、GIS、水环境、船舶等基础数据基础以及业务数据融合,难以实现轻量化、低延迟、高并发的实时渲染与交互,严重影响了用户体验和应用决策效率^[120,136],是当前底层图形平台面临的共性技术问题。

(4)数据实时同步与系统交互能力弱。航道数字孪生涉及到大量实时动态变化的感知数据以及算法模型平台的分析数据^[134],可视化平台与业务系统、算法模型之间脱节,形成“两张皮”现象是常见问

题。需要解决模型与业务关联映射、交互反馈互通等问题。

5.4 应用层:应用成效与智能化水平不足

现有的航道数字化应用仍然侧重于数据可视化、模型仿真、辅助决策,在智能决策、自主控制、业务创新、安全保障等方面仍存在明显短板,影响了数字孪生技术应用价值体系。主要包括如下4个挑战。

(1)数据智能分析与挖掘能力薄弱。多数系统应用依赖传统数据统计方法和专家经验,缺乏数据挖掘、深度学习、知识图谱等智能化技术支持^[137],使得航道数字孪生处理船舶交通与环境变化等复杂动态变化时,难以适应不确定环境下时空演化^[138],也无法及时准确开展评估、趋势分析和预测^[139]。

(2)自主决策与智能控制能力不足。当前航道数字孪生主要用于辅助决策层面,实际工作中仍需人工干预进行调整和管理^[132]。系统的自适应能力有待提升,尤其是在相对复杂的航道管理中,如船舶调度、船闸运维、路径规划与安全控制等还不能进行自主优化与决策^[6,140-141];AI模型可靠性、鲁棒性、安全性难以保障,而错误决策可能导致严重的后果^[32,142],距离实现数字孪生自主决策与智能控制的核心目标还有一定差距^[143]。

(3)智能化应用场景与业务模式创新不足。当前智能化应用场景较为局限,主要聚焦于航道运营管理数字化升级,仅提供部分水利相关仿真分析与预测算法应用。智能化应用广度拓展和信息挖掘深度有限^[6,144],水上交通流仿真预测与调度等方面在现有文献中未得到广泛探索应用。

(4)标准规范与安全保障体系不完善。航道数字孪生相关的技术、平台、数据以及应用标准体系的缺失不仅加大了技术实施方面的不确定性,还造成了数据互通共享、跨平台合作和模型标准化应用等障碍^[143]。与此同时,航道管理时大规模的数据交互,特别是多源数据接入与融合处理环节容易成为安全漏洞的切入点,大规模物联网设备的接入使用也让隐私泄露风险增加^[32,138]。因此,怎样平衡系统安全性、效率和实用性,仍然是当前需要解决的现实问题。

6 未来发展趋势

基于前述关于国内外航道数字孪生研究现状以及存在的问题,未来要进一步释放数字孪生航道的应用价值与潜力,其发展趋势应更聚焦于实际业务需求。本文根据航道水文、航运、建设运营管理业务

场景需求,围绕航道感知-数据管理-仿真推演-智能调度-生态协同等核心环节,提出具有针对内河航道

的发展路径探讨。图 12 展示了航道数字孪生技术与应用发展图景。



图 12 航道数字孪生技术与应用发展图景

Fig. 12 Development vision of waterway digital twin technology and applications

6.1 从单点监测到空-天-地-水的一体化智能感知

航道环境复杂多变,涉及水文、气象、地质、交通、设施等多个方面,而当前航道感知主要依赖单点、局部监测手段,难以全面、实时地感知水下地形、船舶动态、气象水文等关键信息。未来,航道数字孪生将向“空-天-地-水”一体化智能感知体系发展^[145]。通过集成卫星遥感、无人机、无人船、岸基监测站、水下探测设备及智能浮标,构建覆盖范围更广、要素更全、时空分辨率更高的立体化感知网络,实现对航道水文、气象、地形、通航船舶及设施状态的全方位、多尺度、动态化感知^[29,146]。随着智能传感器向边缘计算和雾计算发展^[147-148],具备计算和分析能力的智能传感器将得到更广泛应用^[149],利用 AI 识别算法提升航道感知的实时性、自适应性与系统响应效率,如航道边界识别、泊位识别、浅滩预警、水下结构健康监测、船舶行为识别等。同时,多模态数据融合技术将在航道工程中得到进一步发展,通过对图像、雷达、声呐、AIS、文本等异构数据的深度融合与语义理解,形成对航道环境全面、准确、一致的认知^[150]。

6.2 从数据孤岛到全生命周期数据贯通

针对当前航道数据分散,数字孪生应用主要集中在运营阶段,数据标准不统一、建设运营数据互通困难等问题,从单一阶段向数据集成和全生命周期

管理转变,实现航道系统全要素、全时空、全生命周期的数据集成与管理^[131,138,151],是发挥数字孪生价值的重要路径。这不仅是技术层面的数据融合,更是未来航道管理理念和模式变革的重要方向。

(1) 标准化与开放的统一平台。为解决数据孤岛和互操作性方面的问题,构建针对航道的专业数据标准如 IFC 标准^[152]的制定和应用将是重要趋势,而统一的数字孪生平台是实现数据高效集成的现实路径^[110],通过提供标准化的接口和服务,可以集成来自航道设计、建设、运营、通航管理等不同参与方的系统和应用,促进系统生态的构建和发展^[153]。

(2) 语义化建模与数据可追溯性。要提升数字孪生的认知能力,在传统的数据库集成基础上,将倾向于利用本体论^[131,154]和知识图谱技术对航道领域的知识进行显式化,实现水文、地形、船闸、船舶、工程管理、环境等数据的语义化建模、关联分析。同时建立完善的数据治理机制是实现航道数字孪生跨阶段应用的重要保障,需构建航道业务数据与数字孪生模型之间的映射关系,并确保数据的一致性、准确性和可追溯性。

(3) 全生命周期的数字孪生应用。未来数字孪生应用不再是单阶段,而是形成贯穿航道规划、设计、建造、运营、维护等全生命周期的数字主线^[130],

通过数据资产化管理及信息的双向追溯,实现多业务功能集成化管理^[118],从而提升各阶段工作的协同效率和决策水平。

6.3 从静态数据展示到实时动态推演

航道数字孪生的核心能力之一是利用虚拟模型对物理航道的运行状态进行实时模拟、分析和预测,并对不同策略或场景进行仿真推演,以支持优化决策^[15]。当前数字孪生系统多以静态数据展示和离线仿真为主,难以实时反映航道水情、泥沙、通航状态等的动态变化,并预测期对航道建设过程或通航状态的影响。为发挥数字孪生航道的预测和预警能力,未来将进一步提升其实时计算与仿真推演能力。具体包括如下 3 个方面。

(1)高保真与高效率混合仿真。航道数字孪生仿真具有流固耦合、水陆一体的特点,需要集成不同类型、不同粒度的仿真模型来描述复杂的物理现象和系统行为。其中结合物理机理模型和数据驱动模型的混合仿真方法,可充分利用物理模型保证仿真的准确性和可解释性,并利用数据驱动模型提升计算效率和对复杂现象的拟合能力,为平衡模型精度与效率提供了解决方案,将成为重要发展方向^[155]。

(2)概率性仿真与不确定性量化。航道建设和运营过程面临复杂多变的环境和气候条件影响,未来的数字孪生仿真将更加注重对不确定性的建模和量化,比如传感器误差、模型参数不确定性、环境随机性等^[116]。采用概率性仿真方法,可以提供更可靠的预测区间和风险评估结果,从而实现更鲁棒的决策。

(3)多引擎融合的可视化渲染。由于航道工程涉及量大面广线长的地理空间,适用于基于 GIS 的图形引擎;同时对水文、泥沙等高动态、高保真渲染要求高,需要借助游戏引擎的渲染能力。未来航道数字孪生可视化将向着多引擎融合和协同渲染的方向发展,比如结合 Cesium 的地理空间能力和 Unreal Engine 的高品质渲染效果,实现移动端和云端数字孪生应用。此外,结合 AI 技术开展的神经渲染也正在成为大模型处理和实时渲染的重要研究方向^[85-86]。

6.4 从调度依赖人工到船闸与通航智能控制

除了实时计算和仿真推演外,数字孪生的另一个重要作用是反向作用于物理世界,从而实现智能化的决策与控制,提升航道系统的整体运行效率^[118,156]。当前航道数字孪生系统在船闸调度、通航控制等核心业务中,仍以可视化应用和辅助决策

为主,大部分依赖人工经验,对复杂业务场景的识别、自主优化及闭环控制能力不足。随着人工智能(AI)技术的发展,其将在航道数字孪生中会发挥越来越重要的作用^[78]。主要发展方向如下。

(1)深度强化学习驱动的自主优化控制。深度强化学习(DRL)在处理复杂决策问题上已经展现出巨大潜力^[157-158]。未来会在航道交通调度、船舶自主航行、多级船闸联合优化运行、通航资源动态分配与应急响应管理等方面获得更广泛应用,实现航道管理从“人工调度”到“智能控制”的跨越。

(2)高信赖与可解释的 AI 应用。航道管理涉及船舶安全、通航秩序、水资源调度与公共责任,AI 应用若仅提供最优调度方案或预测结果而明确决策依据与逻辑链条,难以取得调度管理人员的信任与决策支持。未来将更加重视 AI 决策的可解释性、透明度和鲁棒性^[155],从而提升航道运行管理和安全应急等关键领域的 AI 应用能力。研究将重点关注可解释 AI(XAI)技术以及 AI 模型的安全性和可靠性验证技术。

(3)多智能体协同应用。航道系统涉及多个相互作用的智能体(如船舶、闸站、泊位、控制中心等),未来需要发展更有效的多智能体学习和协同决策机制^[38],解决它们之间的合作和冲突问题以实现系统层面的整体优化。

6.5 从航道独立运行到多行业协同的智慧水运生态

航道数字孪生的价值不仅在于航道本身,还体现在通过联邦数字孪生应用^[35-36],促进水路运输与港口、物流、水利、能源、城市管理等多个行业的深度融合与协同创新^[156,159]。未来的发展将更加强调多行业的深度融合和开放的协同创新生态,航道数字孪生需要与智慧港口系统^[110]、智能船舶系统^[160-161]实现更高层次的数据共享和业务协同,形成“船-港-航”一体化的智慧水运体系;与公路、铁路、航空等其他交通方式的信息系统对接,形成多式联运的优化调度和协同管理^[162-163];与水利工程数字孪生^[132]、环境监测系统^[164]、能源管理系统等进行信息交互和协同优化,实现经济效益、社会效益和生态效益的统一。同时共同构建数字孪生政产学研用协同创新生态,积极探索智能化航道管理全新模式,实现水路运输、水资源配置、多式联运、绿色能源与城市服务等多目标协同优化,形成开放协作、高效智能的综合水运体系。

7 结 语

(1)通过对现有文献进行梳理和分析发现,航道

数字孪生技术研究及应用已成为当前水路交通领域热点与发展趋势。在推进航道工程高质量发展这一进程中,传统建设及运营模式面临运营成本攀升、风险防控压力增大、管理决策效率不足、绿色与环保问题严峻等诸多问题,已经难以满足现代航道管理以及日益增长的航运服务需求,航道数字孪生作为数字技术和航道工程深度融合的产物,代表着未来智慧航道发展的重要发展方向,将在推动航道数字化转型和智能化升级方面发挥愈发重要的作用。

(2)目前航道数字孪生技术研究和应用已有一定进展,研究者从不同角度提出数字孪生架构模型,开展相关数字建模智能感知仿真分析平台建设等应用,涵盖建设管理运营服务保障等多个方面。这些研究表明其在提升航道智能化管理与运营水平上有广阔应用前景和发展潜力。然而对航道数字孪生概念及内涵界定和价值认知存在不足,相关研究和应用偏向于智慧运营场景,缺乏完善的全生命周期数字孪生技术架构和示范应用,还面临全面精准感知难、数据融合与集成问题、高精度建模与效率矛盾、业务可视化同步能力不足、智能化水平有待提高、标准规范体系待建立等问题,为数字孪生应用价值体现带来挑战。

(3)本文针对航道数字孪生应用阶段偏单一及跨阶段的数据传递和业务映射难等问题,提出了面向全生命周期的航道数字孪生系统架构,该架构明确了数据底座、基础支撑平台、算法模型平台和应用服务平台等核心要素及其在全生命周期中的协同关系,解决了现有研究缺乏贯穿航道全生命周期理论体系和实际应用模式的痛点,并在平陆运河打造了中国首个全生命周期数字孪生运河应用示范。

(4)未来航道数字孪生的研究与应用需要建立良好的协同创新生态,驱动多学科交叉融合和产学研用攻关,技术、标准、应用模式协同创新。在持续技术创新和应用实践支撑下,数字孪生应用将为提升航道基础设施韧性、保障水路运输安全畅通、促进内河航运高质量发展、助力交通强国和数字中国建设发挥重要的作用。

参 考 文 献 :

References :

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2024年交通运输行业发展统计公报[J]. 水道港口, 2025, 46(3): 308.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transport industry in 2024 [J]. Journal of Waterway and Harbor,

2025, 46(3): 308.

- [2] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见[J]. 中国水运, 2024(3): 27-29.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Opinions of the Ministry of Transport on accelerating the construction of smart ports and smart waterways [J]. China Water Transport, 2024(3): 27-29.
- [3] HUANG X, WEN Y Q, ZHANG F, et al. A comprehensive risk assessment framework for inland waterway transportation of dangerous goods [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(8): 858.
- [4] CALDERÓN-RIVERA N, BARTUSEVICIENE I, BALLINI F. Sustainable development of inland waterways transport: A review [J]. Journal of Shipping and Trade, 2024, 9(1): 3.
- [5] 曹民雄, 汪路瑶, 申 霞, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道工程的技术难点与建设特点分析 [J]. 水运工程, 2019(10): 1-8.
CAO Min-xiong, WANG Lu-yao, SHEN Xia, et al. Analysis on features and difficulties during the construction process of deep water navigation channel project in the Yangtze River below Nanjing [J]. Port & Waterway Engineering, 2019 (10): 1-8.
- [6] 齐俊麟, 陈冬元, 李 然. 三峡-葛洲坝梯级枢纽通航二十年创新发展与实践 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 155-166.
QI Jun-lin, CHEN Dong-yuan, LI Ran. Innovation and practice of high-quality navigation of the Three Gorges-Gezhouba Cascade Hub in 20 years [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 155-166.
- [7] 周敬祥, 李彦文, 郝田标, 等. 京杭运河济宁段“三改二”工程智慧港航方案设计 [J]. 水运工程, 2021(10): 300-304, 309.
ZHOU Jing-xiang, LI Yan-wen, HAO Tian-biao, et al. Design of smart port and shipping for “third-level waterway changed to second-level waterway” project of the Jining section in the Beijing-Hangzhou Grand Canal [J]. Port & Waterway Engineering, 2021(10): 300-304, 309.
- [8] 张 磊. 内河航运物联网智能感知与信息传输系统研究与实现 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
ZHANG Lei. Research and implementation of intellisense and information transmission system for inland shipping internet of things [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [9] 王 浩, 徐洪波, 徐靖国. 数字化技术在内河航道建设和运行中的应用研究 [J]. 珠江水运, 2022(10): 70-72.
WANG Hao, XU Hong-bo, XU Jing-guo. Study on the application of digital technology in the construction and operation of inland waterway [J]. Pearl River Water Transport, 2022(10): 70-72.
- [10] 李家华, 张宏铨, 万浩然, 等. 水运工程中 BIM 模型编码技术研究及应用 [J]. 中国港湾建设, 2021, 41(10): 38-43.
LI Jia-hua, ZHANG Hong-quan, WAN Hao-ran, et al. Research and application of BIM model coding technology in waterway engineering [J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(10): 38-43.
- [11] 顾振伟. 内河航道工程全寿命期绿色发展的制约因素及解决

- 策略研究[D].大连:东北财经大学,2023.
- GU Zhen-wei. Green development during the whole life period of inland waterway projects research on the restriction factors and the solution strategies [D]. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics, 2023.
- [12] WANG Y, WANG H, WANG W, et al. Architecture, application, and prospect of digital twin for highway infrastructure [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2024, 11(5): 835-852.
- [13] RANJBAR R, DUVIELLA E, ETIENNE L, et al. Framework for a digital twin of the canal of calais [J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 178: 27-37.
- [14] MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ A, DÍEZ-GONZÁLEZ J, FERRERO-GUILLÉN R, et al. Digital twin for automatic transportation in industry 4.0 [J]. *Sensors*, 2021, 21(10): 3344.
- [15] 王凯,徐浩,张梦妍,等.数字孪生技术在水路运输领域的应用及研究[J].*中国舰船研究*,2023,18(5):1-10.
- WANG Kai, XU Hao, ZHANG Meng-yan, et al. Research and application of digital twin technology in waterway transportation [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(5): 1-10.
- [16] 马瑞鑫,薛礼,问皓,等.数字孪生航道建设及航道智能化指标体系研究[J].*水道港口*,2024,45(4):612-620.
- MA Rui-xin, XUE Li, WEN Hao, et al. Research on digital twin waterway construction and intelligent waterway indicator system [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2024, 45(4): 612-620.
- [17] 中共河北省委,河北省人民政府.河北雄安新区规划纲要[J].*建筑知识*,2018(4):3-17.
- CPC Hebei Provincial Committee, People's Government of Hebei Province. Outline of the planning for the Xiong'an New Area in Hebei Province [J]. *Architectural Practice*, 2018(4): 3-17.
- [18] 张旭东,齐雷杰,王敏,等.从规划亮点看雄安“未来之城”:解读《河北雄安新区规划纲要》之一[J].*共产党员:河北*,2018(9):21-23.
- ZHANG Xu-dong, QI Lei-jie, WANG Min, et al. Looking at Xiong'an's "city of the future" from the highlights of planning: Interpretation of "planning outline of Xiong'an New Area" [J]. *Communist (Hebei)*, 2018(9): 21-23.
- [19] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,中央网信办.《关于推进“上云用数赋智”行动 培育新经济发展实施方案》的通知(发改高技[2020]552号)[EB/OL].(2020-04-07).https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-04/10/content_5501163.htm.
- National Development and Reform Commission, Central Cyberspace Affairs Commission. Notice on the Implementation Plan for Promoting the "Cloud Computing, Data Utilization, and Intelligence Empowerment" Initiative to Cultivate the Development of the New Economy (NDRC High Tech[2020] No. 552)[EB/OL]. (2020-04-07). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-04/10/content_5501163.htm.
- [20] LI X, LIU X, WAN X. Overview of digital twins application and safe development [J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(3): 385-392.
- [21] MADNI A M, MADNI C C, LUCERO S D. Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering [J]. *Systems*, 2019, 7(1): 7.
- [22] 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):1-10.
- ZHANG Lin. Cold thinking about digital twinning and the modeling and simulation technology behind it [J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(4): 1-10.
- [23] JEONG D Y, BAEK M S, LIM T B, et al. Digital twin: Technology evolution stages and implementation layers with technology elements [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 52609-52620.
- [24] 陶飞,马昕,戚庆林,等.数字孪生连接交互理论与关键技术[J].*计算机集成制造系统*,2023,29(1):1-10.
- TAO Fei, MA Xin, QI Qing-lin, et al. Theory and key technologies of digital twin connection and interaction [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(1): 1-10.
- [25] HANANTO A L, TIRTA A, HERAWAN S G, et al. Digital twin and 3D digital twin: Concepts, applications, and challenges in industry 4.0 for digital twin [J]. *Computers*, 2024, 13(4): 100.
- [26] 叶嘉宁,葛乃铭,问皓,等.数字孪生航道建设框架体系构建及应用[J].*水道港口*,2024,45(6):933-938.
- YE Jia-ning, GE Nai-ming, WEN Hao, et al. Construction and application of digital twin waterway construction framework system [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2024, 45(6): 933-938.
- [27] 赵建豪,秦斌,邹德宇.BIM技术与智慧工地在内河航道整治工程中的综合应用[J].*水运工程*,2022(3):139-145.
- ZHAO Jian-hao, QIN Bin, WU De-yu. Comprehensive application of BIM technology and intelligent construction sites in inland waterway regulation works [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(3): 139-145.
- [28] 徐永强,殷彤,邓志鹏.基于GIS+IOT的建设管理系统在内河航道工程中的应用[J].*中国水运*,2024(12):24-26.
- XU Yong-qiang, YIN Tong, DENG Zhi-peng. Application of construction management system based on GIS + IOT in inland waterway engineering [J]. *China Water Transport*, 2024(12): 24-26.
- [29] LI X X. Summary and prospect of the technology of inland digital waterway [C]//IEEE. 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). New York: IEEE, 2017: 163-171.
- [30] 周敬祥,潘海涛,陈永剑,等.智慧运河总体架构与典型场景应用实践[J].*水运工程*,2025(2):9-16,26.
- ZHOU Jing-xiang, PAN Hai-tao, CHEN Yong-jian, et al. Overall architecture and typical application scenarios of smart canal [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2025(2): 9-16, 26.
- [31] PENG L. Design and development of a smart waterway system

- [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1030/1031/1032: 1988-1991.
- [32] FULLER A, FAN Z, DAY C, et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 108952-108971.
- [33] ERIKSTAD S O. Merging physics, big data analytics and simulation for the next-generation digital twins[J]. *High-performance Marine Vehicles*, 2017: 141-151.
- [34] KRITZINGER W, KARNER M, TRAAAR G, et al. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(11): 1016-1022.
- [35] VERGARA C, BAHSOON R, THEODOROPOULOS G, et al. Federated digital twin[C]//IEEE. 2023 IEEE/ACM 27th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT). New York: IEEE, 2023: 115-116.
- [36] CZEKSTER R M, PEREZ A G, KAVAKLI-THORNE M, et al. Cyber-physical and business perspectives using federated digital twins in multinational and multimodal transportation systems[EB/OL]. (2024-10-11). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.08479>.
- [37] BAEK M S, JUNG E, PARK Y S, et al. Federated digital twin implementation methodology to build a large-scale digital twin system[C]//IEEE. 2024 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). New York: IEEE, 2024: 1-2.
- [38] IRFAN M S, DASGUPTA S, RAHMAN M. Toward transportation digital twin systems for traffic safety and mobility: A review[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(14): 24581-24603.
- [39] 刘 宁. 以平陆运河为牵引的西部陆海新通道水运体系和联运模式研究[J]. *水利水运工程学报*, 2025(1): 1-15.
LIU Ning. Research on the waterway system and intermodal transport model of the new western land-sea corridor driven by the pinglu canal[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2025(1): 1-15.
- [40] 严 律, 鲍 鑫. 基于数字化测图的航道工程测量分析[J]. *中国水运*, 2022(7): 51-54.
YAN Lü, BAO Xin. Analysis of waterway engineering survey based on digital mapping[J]. *China Water Transport*, 2022(7): 51-54.
- [41] CALDERÓN-RIVERA N, BARTUSEVICIENE I, BALLINI F. Barriers and solutions for sustainable development of inland waterway transport: A literature review[J]. *Transport Economics and Management*, 2024, 2: 31-44.
- [42] HOFBAUER F, PUTZ L M. External costs in inland waterway transport: An analysis of external cost categories and calculation methods[J]. *Sustainability*, 2020, 12(14): 5874.
- [43] 程金香, 韩兆兴, 徐洪磊, 等. 内河水域船舶溢油应急能力建设研究[J]. *环境保护*, 2015, 43(8): 58-59.
CHENG Jin-xiang, HAN Zhao-xing, XU Hong-lei, et al. Research on oil spills emergency capacity building of ships in inland waters[J]. *Environmental Protection*, 2015, 43(8): 58-59.
- [44] UDDIN M, RAIHAN M A, PERVAZ S. Transportation safety in the inland waterways of bangladesh: Challenges and mitigation options[C]//ICCESD. 5th International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD). Khulna: ICCESD, 2020: 1-8.
- [45] BACKALOV I, VIDIC M, RUDAKOVIC S. Lessons learned from accidents on some major european inland waterways[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 273: 113918.
- [46] STEINDL G, STAGL M, KASPER L, et al. Generic digital twin architecture for industrial energy systems[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(24): 8903.
- [47] 刘静思, 黄巧薇, 张 欣. 基于数字孪生航道的长江通航安全保障系统设计与实现[J]. *中国水运*, 2024(15): 60-62.
LIU Jing-si, HUANG Qiao-wei, ZHANG Xin. Design and implementation of navigation safety guarantee system of the Yangtze River based on digital twin channel[J]. *China Water Transport*, 2024(15): 60-62.
- [48] ASBORNO M I. Commodity-based freight activity on inland waterways through the fusion of public datasets for multimodal transportation planning[M]. Bentonville: University of Arkansas, 2020.
- [49] WU Z H, REN C X, WU X B, et al. Research on digital twin construction and safety management application of inland waterway based on 3D video fusion[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 109144-109156.
- [50] 冯正茂, 陈桃红, 李忠文. 多波束技术在智慧航道建设中的应用[J]. *大众科技*, 2022, 24(4): 1-6.
FENG Zheng-mao, CHEN Tao-hong, LI Zhong-wen. Application of multi-beam technology in intelligent channel construction[J]. *Popular Science & Technology*, 2022, 24(4): 1-6.
- [51] LU Y Y, HUANG D L, WANG L, et al. Research on intelligent sensing technology of traffic volume in Yancheng inland trunk waterway [J]. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, 2023, 2(3): 1-3.
- [52] 胡书才. 多源数据融合可视化技术在内河航道建设和养护中的应用研究[J]. *中国水运*, 2025(11): 81-83.
HU Shu-cai. Research on the application of multi-source data fusion visualization technology in the construction and maintenance of inland waterway[J]. *China Water Transport*, 2025(11): 81-83.
- [53] 彭秋华. 物联网技术在智慧航道建设中的应用[J]. *中国航务周刊*, 2025(2): 48-50.
PENG Qiu-hua. Application of internet of things technology in the construction of smart waterway[J]. *China Shipping Gazette*, 2025(2): 48-50.
- [54] LEE J H, NAM Y S, KIM Y, et al. Real-time digital twin for ship operation in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112867.
- [55] KIRICHEK A, PRUYN J, ATASOY B, et al. Paving the way towards zero-emission and robust inland shipping[J].

- Modelling and Optimisation of Ship Energy Systems, 2024, 2024: 1-12.
- [56] 毕金强,高 邈,鲍可馨,等.沿海航道数字孪生场景构建方法研究[J].水道港口,2024,45(6):939-946.
BI Jin-qiang, GAO Miao, BAO Ke-xin, et al. Research on construction method of digital twin scene of coastal channel [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2024, 45(6): 939-946.
- [57] 伍贤熙.信江智慧航道建设与关键技术简析[J].港口航道与近海工程,2024,61(3):48-52.
WU Xian-xi. Brief analysis of key techniques applied in construction of intelligent-type waterway in Xinjiang River [J]. Port, Waterway and Offshore Engineering, 2024, 61(3): 48-52.
- [58] MENGES D, RASHEED A. Digital twin for autonomous surface vessels: Enabler for safe maritime navigation [EB/OL]. (2024-11-05). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.03465>.
- [59] CARRASCO C A, LOMBILLO I, SÁNCHEZ-ESPESO J M, et al. Quantitative and qualitative analysis on the integration of geographic information systems and building information modeling for the generation and management of 3D models [J]. Buildings, 2022, 12(10): 1672.
- [60] HOR A H, JADIDI A, SOHN G. BIM-GIS integrated geospatial information model using semantic web and rdf graphs [J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, 4: 73-79.
- [61] 孟文君,丁越峰,杨 琪.融合 BIM 和 GIS 的轻量型数字孪生平台及其在智慧港航中的应用[J].水运工程,2024(9):217-222.
MENG Wen-jun, DING Yue-feng, YANG Qi. Lightweight digital twin platform integrating BIM and GIS and its application in smart port and waterway [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(9): 217-222.
- [62] LI H, DUAN X L. Construction of smart water conservancy system based on digital twin technology [C]//IEEE. 2024 7th International Conference on Computer Information Science and Application Technology (CISAT). New York: IEEE, 2024: 693-700.
- [63] 郎为民,田尚保,李宇鸽,等.数字孪生技术架构研究[J].电信快报,2022(8):1-6.
LANG Wei-min, TIAN Shang-bao, LI Yu-ge, et al. Research on the technical architecture of digital twin [J]. Telecommunications Information, 2022(8): 1-6.
- [64] 马瑞鑫,吴静媛,葛乃铭.数字孪生航道技术及成熟度等级评价模型研究[J].水运工程,2024(9):209-216.
MA Rui-xin, WU Jing-yuan, GE Nai-ming. Technology and maturity level evaluation model of digital twin waterway [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(9): 209-216.
- [65] GU J J, LIU C, AKBAR A, et al. Bridging implicit neural representations and semantic LoD3 for automated 3D building reconstruction under challenging visual conditions [J]. Automation in Construction, 2025, 178: 106382.
- [66] 宫志群,王永志,廖少明.基于数字孪生的建设工程项目管理数字化[J].土木工程学报,2024,57(7):106-128.
GONG Zhi-qun, WANG Yong-zhi, LIAO Shao-ming. Digitalization of construction engineering project management based on the digital twin [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(7): 106-128.
- [67] 李 才,管林杰,杨 坤,等.数字孪生架构下水工程数字底座建设研究[J].水利规划与设计,2022(4):70-73.
LI Cai, GUAN Lin-jie, YANG Kun, et al. Research on digital base building of water engineering based on digital twin architecture [J]. Water Resources Planning and Design, 2022(4): 70-73.
- [68] 管先祥,王 翀.BIM 技术在航道整治工程中的应用研究[J].中国水运,2022(13):108-110.
GUAN Xian-xiang, WANG Chong. Research on application of BIM technology in waterway regulation project [J]. China Water Transport, 2022(13): 108-110.
- [69] 董 钟,王 刚,李国杰,等.BIM 与 GIS 融合技术在航道整治工程中的应用[J].水运工程,2021(4):163-168,179.
TONG Zhong, WANG Gang, LI Guo-jie, et al. Application of BIM and GIS integration technology for channel regulation project [J]. Port & Waterway Engineering, 2021(4): 163-168, 179.
- [70] 袁占全,李明益.基于 BIM+GIS 的航道三维漫游系统设计与实现[J].水运工程,2022(2):153-157,178.
YUAN Zhan-quan, LI Ming-yi. Design and implementation of three-dimensional waterway roaming system based on BIM+GIS [J]. Port & Waterway Engineering, 2022(2): 153-157, 178.
- [71] 袁占全,曾 威,郑 松,等.航道整治工程 BIM+GIS 三维交互汇报系统设计与应用[J].水运工程,2022(11):184-190.
YUAN Zhan-quan, ZENG Wei, ZHENG Song, et al. Design and application of BIM + GIS three-dimensional interactive reporting system for waterway regulation project [J]. Port & Waterway Engineering, 2022(11): 184-190.
- [72] 孙俊锋.BIM+GIS 技术在内河智慧航道建设中的应用[J].现代交通技术,2023,20(6):90-94.
SUN Jun-feng. Application of BIM + GIS technology in the construction of inland intelligent waterway [J]. Modern Transportation Technology, 2023, 20(6): 90-94.
- [73] 罗 丹,黄晓琴,冷费贤,等.数字孪生在交通基础设施智能建造中的应用与挑战[J].交通运输工程学报,2025,25(3):33-64.
LUO Dan, HUANG Xiao-qin, LENG Fei-xian, et al. Applications and challenges of digital twin in intelligent construction of transportation infrastructure [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(3): 33-64.
- [74] HE Z W, YANG F, LI Z, et al. Mining channel water depth information from IoT-based big automated identification system data for safe waterway navigation [J]. IEEE Access, 2018, 6: 75598-75608.
- [75] MICIULA I, WOJTASZEK H. Automatic hazard identification information system (AHIIS) for decision support in

- inland waterway navigation[J]. *Procedia Computer Science*, 2019, 159: 2313-2323.
- [76] LEI J Y, SUN Y, WU Y, et al. Association of AIS and radar data in intelligent navigation in inland waterways based on trajectory characteristics[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(6): 890.
- [77] 王海涛, 胡伟民. 广东航道大数据应用体系研究[J]. *交通世界*, 2020(8): 19-21, 26.
WANG Hai-tao, HU Wei-min. Research on Guangdong waterway big data application system[J]. *Transpo World*, 2020(8): 19-21, 26.
- [78] 金琪然, 余杰. 数字孪生和人工智能技术在长江航道大数据治理中的融合应用研究[J]. *中国水运*, 2023(增2): 146-155.
JIN Qi-ran, YU Jie. Research on the application of digital twinning and artificial intelligence technology in big data governance of Yangtze River channel[J]. *China Water Transport*, 2023(S2): 146-155.
- [79] EHAB A, BURNETT G, HEATH T. Enhancing public engagement in architectural design: A comparative analysis of advanced virtual reality approaches in building information modeling and gamification techniques[J]. *Buildings*, 2023, 13(5): 1262.
- [80] PYBUS C, GRAHAM K, DOHERTY J, et al. New realities for Canada's parliament: A workflow for preparing heritage BIM for game engines and virtual reality[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, 15: 945-952.
- [81] BROOKES J, WARBURTON M, ALGHADIER M, et al. Studying human behavior with virtual reality: The unity experiment framework[J]. *Behavior Research Methods*, 2020, 52(2): 455-463.
- [82] 刘涛. 多维航道模型及应用关键技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
LIU Tao. Research on multi-dimensional waterway model and key technology for application[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.
- [83] ZHANG S H, ZHANG T X, WU Y, et al. Three-dimensional waterway system for ship navigation based on integrated virtual waterway and flow simulation[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2017, 143: 04016011.
- [84] 王先登. 仿真技术在航道工程设计评价中应用研究[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2015, 39(1): 216-219, 224.
WANG Xian-deng. A study of simulation tools for waterway designing assessment[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2015, 39(1): 216-219, 224.
- [85] SHI Y H, WU Y M, WU C M, et al. GIR: 3D Gaussian inverse rendering for relightable scene factorization[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2025, 99: 1-12.
- [86] YU M, LU T, XU L, et al. GSDF: 3DGS meets SDF for improved rendering and reconstruction[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2024, 1-24.
- [87] 牛艺博. 基于 WebGL 的地理信息三维可视化技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
NIU Yi-bo. Research on three-dimensional visualization technology for geographic information based on WebGL[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [88] 晁阳, 牛志伟, 齐慧君. 基于 WebGL 的 BIM 模型可视化研究[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(9): 79-82.
CHAO Yang, NIU Zhi-wei, QI Hui-jun. Research on visualization of BIM model based on WebGL[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(9): 79-82.
- [89] ATTARAN S, ATTARAN M, CELIK B G. Digital twins and industrial internet of things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0[J]. *Decision Analytics Journal*, 2024, 10: 100398.
- [90] AWOUDA A, TRAINI E, BRUNO G, et al. IoT-based framework for digital twins in the industry 5.0 era[J]. *Sensors*, 2024, 24(2): 594.
- [91] BELLAVISTA P, DI MODICA G. The IoTwins methodology and platform to implement and operate digital twins-based I4.0 applications in the cloud continuum[C]// *IEEE. 2023 26th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*. New York: IEEE, 2023: 176-183.
- [92] MIAH M I, GOPE J C, NATH A D, et al. Advanced waterway transport system based on internet of things (IoT): A novel approach[C]// *IEEE. 2022 25th International Conference on Computer and Information Technology (ICIT)*. New York: IEEE, 2022: 1-6.
- [93] LI Z C, LIU T, LI S, et al. An unmanned traffic command system for controlled waterway in inland river: An edge-centric IoT approach[J]. *Unmanned Systems*, 2026, 14(1): 79-93.
- [94] DING L Q. Multimodal transport information sharing platform with mixed time window constraints based on big data[J]. *Journal of Cloud Computing*, 2020, 9(1): 11.
- [95] WANG J W, ZENG J H, JIANG Z H. Exploration of the construction mode and application of big data service platform in the digital economy[C]// *Springer Nature. Applications of Decision Science in Management*. Singapore: Springer Nature, 2022: 493-501.
- [96] ZHANG H T, WEI Y. INVA: An intelligent network virtualization architecture for big data platform[C]// *IEEE. 2023 9th International Conference on Big Data Computing and Communications (BigCom)*. New York: IEEE, 2023: 16-23.
- [97] STERGIOU C L, BOMPOLI E, PSANNIS K E. Security and privacy issues in IoT-based big data cloud systems in a digital twin scenario[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(2): 758.
- [98] 罗斌, 周超, 张振东. 数字孪生水利专业模型平台构建关键技术及应用[J]. *人民长江*, 2024, 55(6): 227-233.
LUO Bin, ZHOU Chao, ZHANG Zhen-dong. Key technology and application of digital twin platform of water conservancy business models[J]. *Yangtze River*, 2024, 55

- (6): 227-233.
- [99] 刘昌军,刘业森,喻海军,等. 水利模型平台构建及南四湖水系应用探索[J]. 中国水利, 2023(20): 43-48.
LIU Chang-jun, LIU Ye-sen, YU Hai-jun, et al. Construction of water conservancy model platform and application exploration of Nansi Lake water system[J]. China Water Resources, 2023(20): 43-48.
- [100] 靖争,王敏,崔冬冬,等. 水利专业模型体系研究与模型平台推广[J]. 中国水利, 2025(5): 1-14.
JING Zheng, WANG Min, CUI Dong-dong, et al. Research on the model system of water conservancy and promotion of the model platform[J]. China Water Resources, 2025(5): 1-14.
- [101] 张阳,高曙,何伟,等. 基于多模型融合的内河船舶航行轨迹预测方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(10): 1142-1152.
ZHANG Yang, GAO Shu, HE Wei, et al. Navigation trajectory prediction method of inland ships based on multi-model fusion[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(10): 1142-1152.
- [102] 张力澜,王留杰,杨静学,等. 数字孪生北江模型平台建设研究[J]. 水利信息化, 2024(5): 22-27.
ZHANG Li-lan, WANG Liu-jie, YANG Jing-xue, et al. Research on construction of digital twin Beijiang model platform[J]. Water Resources Informatization, 2024(5): 22-27.
- [103] 陈柯兵,邓良爱,李瀛,等. 基于 AutoML 的长江下游周旬尺度枯水位及潮位预报[J]. 水运工程, 2023(11): 120-125.
CHEN Ke-bing, DENG Liang-ai, LI Ying, et al. Forecast of low water level and tide level in lower reaches of the Yangtze River on week and ten-day scales based on AutoML[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(11): 120-125.
- [104] DI X J, ZHANG J X, LI B D, et al. Research on the method and application of intelligent information service demand identification of inland waterway[C]//IEEE. 2020 IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). New York: IEEE, 2020: 345-350.
- [105] 王凡,李镇江,武健超. 数字孪生工程可视化平台设计[J]. 水利规划与设计, 2024(10): 140-144.
WANG Fan, LI Zhen-jiang, WU Jian-chao. Design of digital twin engineering visualization platform[J]. Water Resources Planning and Design, 2024(10): 140-144.
- [106] GAO C, WANG J W, DONG S, et al. Application of digital twins and building information modeling in the digitization of transportation: A bibliometric review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(21): 11203.
- [107] RUDSKOY A, ILIN I, PROKHOROV A. Digital twins in the intelligent transport systems[J]. Transportation Research Procedia, 2021, 54: 927-935.
- [108] WU Z H, WANG H H, REN C X, et al. Demand analysis and application prospect of 3D video fusion technology in waterway traffic management [C] // Springer. Emerging Trends in Intelligent and Interactive Systems and Applications. Munich: Springer, 2021: 384-392.
- [109] BARRICELLI B R, CASIRAGHI E, FOGLI D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications [J]. IEEE Access, 2019, 7: 167653-167671.
- [110] WANG K, HU Q Q, ZHOU M J, et al. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports[J]. Case Studies on Transport Policy, 2021, 9(3): 1298-1312.
- [111] 杨志. 三维正向设计在沱浚河航道整治工程的应用[J]. 中国水运, 2023(15): 83-85.
YANG Zhi. Application of three-dimensional forward design in Tuohui River waterway regulation project[J]. China Water Transport, 2023(15): 83-85.
- [112] RABELO L, CRUZ L, BHSIDE S, et al. Analysis of the expansion of the panama canal using simulation modeling and artificial intelligence[C] // IEEE. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. New York: IEEE, 2014: 910-921.
- [113] КУПРИЯНОВСКИЙ В, КЛИМОВ А, ГОЦ И, et al. Digital twin technologies in transport corridors for sea and waterways in russia[J]. International Journal of Open Information Technologies, 2020, 8(12): 113-132.
- [114] 黄孝东. 数字孪生在长江航运安全管理体系中的应用研究[J]. 中国信息化, 2024(3): 75-76.
HUANG Xiao-dong. Research on the application of digital twinning in the Yangtze River shipping safety management system[J]. China Informationization, 2024(3): 75-76.
- [115] 周竟亮,韩月琪. 数字孪生三峡建设探索与实践[J]. 中国水利, 2023(19): 23-26.
ZHOU Jing-liang, HAN Yue-qi. Exploration and practice in the construction of the digital twin three gorges project[J]. China Water Resources, 2023(19): 23-26.
- [116] ALEXANDRAMICU E, ASGARI F, KHOUADJIA M, et al. A probabilistic digital twin model for inland waterway transportation systems using Bayesian networks [C] // Springer Nature. Climate Crisis and Resilient Transportation Systems. Switzerland: Springer Nature, 2025: 855-864.
- [117] RANJBAR R, SEGOVIA P, DUVELLA E, et al. Digital twin of Calais canal with model predictive controller: A simulation on a real database[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2024, 150(5): 05024002.
- [118] LI H L, ZHANG R, ZHENG S F, et al. Digital twin-driven intelligent operation and maintenance platform for large-scale hydro-steel structures [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 62: 102661.
- [119] 何涛涛,黄登,余长慧,等. 面向长江数字航道的关键航道要素智能感知研究[J]. 测绘地理信息, 2023, 48(1): 122-126.
HE Tao-tao, HUANG Deng, YU Chang-hui, et al. Intelligent perception of key waterway elements for digital waterway in Yangtze River[J]. Journal of Geomatics, 2023, 48(1): 122-126.
- [120] YANG Y F, XIE C, FAN Z W, et al. Digital twinning of river basins towards full-scale, sustainable and equitable

- water management and disaster mitigation[J]. *NPJ Natural Hazards*, 2024, 1: 43.
- [121] LIU R W, NIE J T, GARG S, et al. Data-driven trajectory quality improvement for promoting intelligent vessel traffic services in 6G-enabled maritime IoT systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5374-5385.
- [122] YE Y D, ZHEN R, SHAO Z P, et al. A novel intelligent ship detection method based on attention mechanism feature enhancement[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(3): 625.
- [123] WANG Z R, GUPTA R, HAN K, et al. Mobility digital twin: Concept, architecture, case study, and future challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(18): 17452-17467.
- [124] ZHANG R L, AI Y, LI S X, et al. Application of augmented reality in waterway traffic management using sparse spatio-temporal data[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(4): 1710.
- [125] 张 伟,张恩东,魏永长.多源异构大数据汇聚共享平台技术研究[C]//中国宇航协会.第十五届中国航天电子技术研究院学术交流会议论文集.北京:中国宇航协会,2018:131-138.
ZHANG Wei, ZHANG En-dong, WEI Yong-chang. Research on multi-source heterogeneous big data aggregation and sharing platform technologies[C]//Chinese Society of Astronautics. Proceedings of the Excellent Papers from the 15th Academic Exchange Conference of the China Academy of Aerospace Electronics Technology. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2018: 131-138.
- [126] DING H F, WENG J X. A robust assessment of inland waterway collision risk based on AIS and visual data fusion [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 307: 118242.
- [127] QU J X, LIU R W, GUO Y, et al. Improving maritime traffic surveillance in inland waterways using the robust fusion of AIS and visual data[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 275: 114198.
- [128] 王永兴,王 涛,韦 扬.多源融合的船舶身份智能识别与验证技术[J]. *中国航海*, 2022, 45(4): 133-139.
WANG Yong-xing, WANG Tao, WEI Yang. Intelligent ship identity identification and verification with multisource fusion [J]. *Navigation of China*, 2022, 45(4): 133-139.
- [129] ZHANG R L, ZHAO C H, LIANG Y, et al. Edge-based dynamic spatiotemporal data fusion on smart buoys for intelligent surveillance of inland waterways[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, 13(2): 220.
- [130] BRONSON J A, FONSECA Í, GASPAR H M. Challenges towards an integrated digital twin platform for maritime systems: Tackling shifts in data ownership[C]// ASME. 2024 43th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Singapore: ASME, 2024: 1-13.
- [131] REN Z J, SHI J H, IMRAN M. Data evolution governance for ontology-based digital twin product lifecycle management [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(2): 1791-1802.
- [132] LI W G, MA Z F, LI J, et al. Digital twin smart water conservancy: Status, challenges, and prospects[J]. *Water*, 2024, 16(14): 2038.
- [133] TAO F, ZHANG H, ZHANG C Y. Advancements and challenges of digital twins in industry[J]. *Nature Computational Science*, 2024, 4(3): 169-177.
- [134] ZHANG M, TAO F, HUANG B Q, et al. Digital twin data: Methods and key technologies[J]. *Digital Twin*, 2024, 1: 2.
- [135] 杨 刚,李梦洁,崔朝臣,等.数字孪生:内涵、挑战及应用[J]. *软件导刊*, 2021, 20(1): 6-10.
YANG Gang, LI Meng-jie, CUI Chao-chen, et al. Digital twin: Connotation, challenge and application[J]. *Software Guide*, 2021, 20(1): 6-10.
- [136] 郭歌洋,王晓晶,沈孔健,等.基于 IFC 的 BIM 模型格式转换与 GIS 融合展示方法研究[J]. *交通建设与管理*, 2024(3): 136-141.
GUO Ge-yang, WANG Xiao-jing, SHEN Kong-jian, et al. Research on BIM model format conversion and GIS fusion display method based on IFC[J]. *Transport Construction & Management*, 2024(3): 136-141.
- [137] LI Y, LIU X T, WANG Z S, et al. Construction of a large-scale maritime element semantic schema based on knowledge graph models for unmanned automated decision-making[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1390931.
- [138] YAN B, YANG F, QIU S, et al. Digital twin in transportation infrastructure management: A systematic review[J]. *Intelligent Transportation Infrastructure*, 2023, 2: 1-18.
- [139] XU H, ZHANG X M, HE J, et al. ROTracker: A novel MMW radar-based object tracking method for unmanned surface vehicle in offshore environments [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024, 11: 1411920.
- [140] YUAN X L, YUAN C J, TIAN W L, et al. Path planning for ferry crossing inland waterways based on deep reinforcement learning [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2): 337.
- [141] BERG H S, MENGES D, TENGESDAL T, et al. Digital twin syncing for autonomous surface vessels using reinforcement learning and nonlinear model predictive control [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 9344.
- [142] YAMANY W, MOUSTAFA N, TURNBULL B. OQFL: An optimized quantum-based federated learning framework for defending against adversarial attacks in intelligent transportation systems [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(1): 893-903.
- [143] KARLSEN M A. A move towards smart water infrastructure an evaluation of utilizing multi-criteria decision making methodologies to determining internet-of-things and digital twin requirements[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2022.
- [144] 陈德山,范腾泽,元海文,等.内河航运系统监管技术现状与展望[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2022, 22(6): 1-14.
CHEN De-shan, FAN Teng-ze, YUAN Hai-wen, et al. Review and prospect on system operation supervision technology of inland river navigation system[J]. *Journal of Trans-*

- portation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 1-14.
- [145] 张毅. 覆盖“天空地海”的自然资源智能感知监测监管体系建设的构想:以江苏省为例[J]. 国土资源信息化, 2021(6): 7-14.
ZHANG Yi. Thoughts on the construction of intelligent sensing monitoring and supervision system of natural resources covering ‘sky, air, land and sea’: A case study of Jiangsu province[J]. Land and Resources Informatization, 2021(6): 7-14.
- [146] HUANG J, YAO H Y, CHEN Z Y. Exploration of digitalization system and technical solutions for inland waterway[C] // Springer Nature. Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022. Singapore: Springer Nature, 2023: 838-849.
- [147] GUPTA H, VAHID DASTJERDI A, GHOSH S K, et al. iFogSim: A toolkit for modeling and simulation of resource management techniques in the internet of things, edge and fog computing environments [J]. Software: Practice and Experience, 2017, 47(9): 1275-1296.
- [148] PRABAHARAN G, VIDHYA S, CHITHRAKUMAR T, et al. AI-driven computational frameworks: Advancing edge intelligence and smart systems[J]. International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 2024, 11(1): 1363-1369.
- [149] 黄跃文, 牛广利, 李端有, 等. 大坝安全监测智能感知与智慧管理技术研究及应用[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 180-185, 198.
HUANG Yue-wen, NIU Guang-li, LI Duan-you, et al. Research and application of intelligent perception and intelligent management technology for dam safety monitoring[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 180-185, 198.
- [150] 李广, 孔飞飞, 王逍遥, 等. 基于多视觉传感器融合的装配过程质量移动智能检测技术研究[J]. 现代制造工程, 2023(4): 116-123.
LI Guang, KONG Fei-fei, WANG Xiao-yao, et al. Research on mobile intelligent inspection technology of assembly process quality based on multi vision sensor fusion [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2023(4): 116-123.
- [151] HEDBERG T Jr, FEENEY A B, HELU M, et al. Towards a lifecycle information framework and technology in manufacturing[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2017, 17(2): 021010.
- [152] 陈健, 盛谦, 陈国良, 等. 岩土工程数字孪生技术研究进展[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 79-88.
CHEN Jian, SHENG Qian, CHEN Guo-liang, et al. Research progress in digital twin technology for geotechnical engineering[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 79-88.
- [153] MORETTI N, XIE X, MERINO J, et al. An openBIM approach to IoT integration with incomplete As-built data [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8287.
- [154] CAI H M, XU L D, XU B Y, et al. IoT-based configurable information service platform for product lifecycle management [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1558-1567.
- [155] RASHEED A, SAN O, KVAMSDAL T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective [J]. IEEE Access, 2020, 8: 21980-22012.
- [156] 许家帅, 鲍可馨, 马瑞鑫, 等. 智慧水运发展综述与展望[J]. 水道港口, 2025, 46(1): 1-11.
XU Jia-shuai, BAO Ke-xin, MA Rui-xin, et al. Review and outlook on the development of smart water transport [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2025, 46(1): 1-11.
- [157] PENG J K, ZHANG S Y, ZHOU Y, et al. An integrated model for autonomous speed and lane change decision-making based on deep reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(11): 21848-21860.
- [158] TAO Y H, DU J L, LEWIS F L. Integrated intelligent guidance and motion control of USVs with anticipatory collision avoidance decision-making [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(11): 17810-17820.
- [159] BUSSE A, GERLACH B, LENGELING J C, et al. Towards digital twins of multimodal supply chains [J]. Logistics, 2021, 5(2): 25.
- [160] 于全虎. 内河水运基础设施及船舶技术发展现状与展望[J]. 船舶, 2024, 35(1): 96-108.
YU Quan-hu. Development and prospects of inland waterway transport infrastructure and ship technology [J]. Ship & Boat, 2024, 35(1): 96-108.
- [161] 谭星, 查伊倩, 赵丽莉, 等. 上海航运安全保障智慧化创新方向研究[J]. 船舶工程, 2024, 46(7): 103-110, 135.
TAN Xing, ZHA Yi-qian, ZHAO Li-li, et al. Research on intelligent innovation direction of Shanghai shipping safety assurance [J]. Ship Engineering, 2024, 46(7): 103-110, 135.
- [162] ARDA A. Analysing the requirements of a digital twin for multimodal transportation [D]. Twente: University of Twente, 2024.
- [163] GBAKO S, PARASKEVADAKIS D, REN J, et al. A systematic literature review of technological developments and challenges for inland waterways freight transport in intermodal supply chain management [J]. Benchmarking, 2025, 32(1): 398-431.
- [164] 杨舒毓. 生态环保理念与数字化技术在内河航道治理中的应用实践与融合发展思考[J]. 中国水运, 2025(5): 40-43.
YANG Shu-yu. Application and integrated development of ecological and environmental protection concepts and digital technologies in the governance of inland waterway channels [J]. China Water Transport, 2025(5): 40-43.