

引用格式: 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 K, XU H, ZHANG M Y, et al. Research and application of digital twin technology in waterway transportation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(5): 1-10.

数字孪生技术在水路运输领域的应用及研究



扫码阅读全文

王凯, 徐浩, 张梦妍, 黄连忠*, 马冉祺, 王建行, 王中一
大连海事大学轮机工程学院, 辽宁大连 116026

摘要:数字孪生是在计算机系统中对物理实体进行全面精准刻画的数字化模型, 其应用可助力提升水路运输智能化管理水平。基于大数据监测与分析、数字孪生体构建、虚实模型的信息实时匹配与交互和数字驱动控制, 以及动态可视化等水路运输数字孪生关键使能技术的分析, 详细阐述基于数字孪生的船舶系统智能制造、运营管理、全生命周期智能运维、虚拟场景构建与虚拟实验的研究与应用现状, 在此基础上, 对水路运输装备的数字孪生技术进行归纳与展望, 为数字孪生技术在水路运输领域的发展与应用提供参考。

关键词:水路运输; 数字孪生; 智能制造; 智能管理; 智能运维

中图分类号: U671.99; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02451

Research and application of digital twin technology in waterway transportation

WANG Kai, XU Hao, ZHANG Mengyan, HUANG Lianzhong*, MA Ranqi, WANG Jianxing, WANG Zhongyi
Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: A digital twin is a digital model that comprehensively and accurately depicts physical entities in a computer system. Such technology can improve the intelligent management level of waterway transportation. Based on an analysis of the key enabling technologies of a digital twin model for waterway transportation, including big data monitoring and analysis, digital twin model construction, real-time matching and interaction of virtual and real model information, data-driven control of virtual and real models, and dynamic visualization technologies, the research and application status of the intelligent manufacturing of ship systems, operation management of waterway transportation equipment, intelligent life cycle operation and maintenance, virtual scenario construction and virtual experiments based on the digital twin are analyzed in detail. On this basis, digital twin technology for waterway transportation is summarized and predicted, providing valuable references for the development and application of digital twin technology in the field of waterway transportation.

Key words: waterway transportation; digital twin; intelligent manufacturing; intelligent management; intelligent operation and maintenance

0 引言

近年来,随着“E航海”“智能航运”等发展战略的实施,信息化与工业化的融合程度日益加深,数字孪生技术的研究和应用有效促进了水路

运输行业的数字化与智能化发展,受到业界的广泛关注^[1]。数字孪生技术是以数字化方式在计算机系统中构建物理实体的虚拟模型,利用物理模型与数字孪生体的动态交互仿真,结合数据融合、决策优化等方法实现设备管控、目标优化、

收稿日期: 2021-07-15

修回日期: 2022-01-14

网络首发时间: 2022-08-09 10:22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51909020, 52071045); 中国博士后科学基金资助项目(2020M670735, 2021T140080); 辽宁省自然科学基金资助项目(2019-BS-023); 船舶动力工程技术交通运输行业重点实验室开放基金资助项目(KLMPET2020-06); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(3132019316)

作者简介: 王凯,男,1990年生,博士,副教授。研究方向: 船舶新能源与智能能效优化控制技术。

E-mail: kwang@dlnu.edu.cn

黄连忠,男,1969年生,博士,教授。研究方向: 绿色智能船舶。E-mail: huanglz@dlnu.edu.cn

*通信作者: 黄连忠

故障诊断、行为预测等功能^[2],具有多维度、多尺度、高可靠性的特点。而且,随着物理实体在时间上的变化进行动态演进,数字孪生技术可实现水路运输装备(水运装备)在全生命周期内的数字化推演,助力提高水运装备的制造、产品性能优化、运营管理与决策等方面的数字化和智能化水平^[3]。本文将重点探讨数字孪生技术在水路运输行业多领域的一系列研究成果与应用,同时也总结归纳了当前存在的问题,并对未来发展提出展望。

1 水路运输数字孪生技术应用架构

数字孪生是指对研究对象进行数据采集与融合后,在信息化平台内构建物理实体、作业流程或系统网络的虚拟孪生体^[4],通过信息化平台的虚拟空间获取研究对象的运行状态信息,基于所设置的交互接口实现虚实交互与控制。数字孪生的构建与应用要求集成多种技术,特别是对于水

运装备这种复杂系统,需采用大数据监测与分析技术实现对其多源异构数据的获取及分析。为了合理构建这种复杂系统的数字化模型,建立物理模型与数字化模型信息之间的实时映射关系,需要应用孪生体构建技术、虚实模型的信息实时匹配与交互等数字孪生使能技术。另外,虚实模型数字驱动控制技术和动态可视化等数字孪生关键使能技术同样也是实现水运装备虚实融合优化管理与控制的关键所在。

图 1 所示为数字孪生技术在水路运输领域的研究及应用框架。由图可见,基于数字孪生关键使能技术,可以实现数字孪生技术与水运装备的智能制造、运营管理、全生命周期智能运维、虚拟场景构建与虚拟实验等水路运输系统核心要素的深度融合,从而实现数字孪生技术在装备制造、产品性能、运营管理等全链条、全生命周期各环节的研究与应用^[5]。

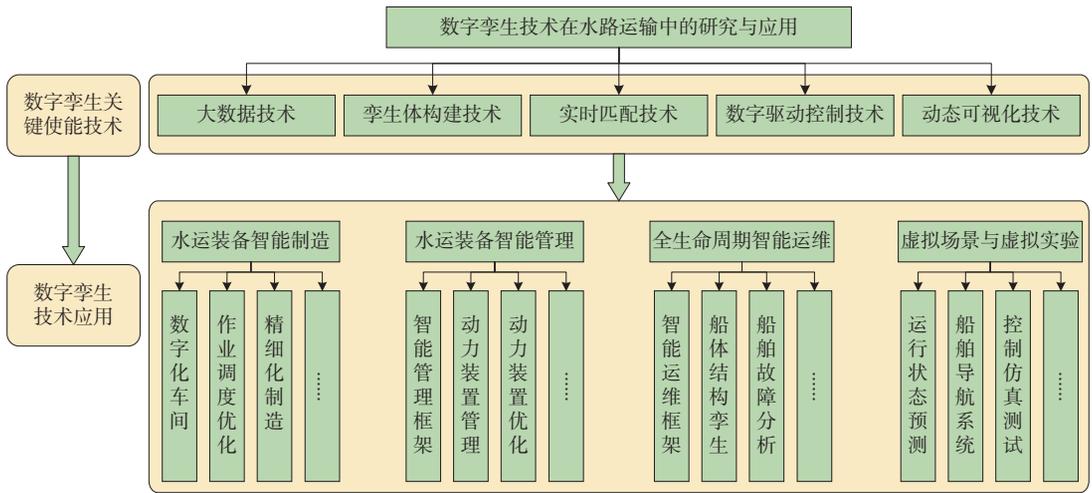


图 1 水路运输数字孪生技术应用分析

Fig. 1 Application analysis of digital twin technology in waterway transportation

2 数字孪生关键使能技术

2.1 大数据监测与分析技术

孪生数据是数字孪生技术的核心与基础。对于数字孪生体的构建及应用效果而言,数据获取的方法和可靠性对孪生数据的影响更直接,而原始数据的异常及噪声等因素也不可忽视。大数据监测与分析技术是实现数字孪生在水运装备应用中的关键使能技术,包括数据采集、数据处理、数据挖掘^[6]。对于数据共享,其需运用现代通信技术实现人、机、物的互联互通,通过数据与网络联通实现信息的实时交互和共享,是实现水运装备的虚实模型信息实时匹配及数字驱动控制的重要基础。目前,面向水运装备优化管理的数据采集

与分析技术已经得到广泛研究,例如,基于船舶自动识别系统和海洋环境等公开数据的特征分析,针对数据特征开发可视化程序,可以实现对航行环境及作业特性的评估分析^[7]。

2.2 数字孪生体构建技术

数字孪生技术可以应用于水运装备产品的研发与工艺规划、零部件设计与制造、智能管理维护等多方面^[8],而数字孪生体的构建是其重要基础和关键。如图 2 所示,水运装备数字孪生体的构建需针对不同应用服务和仿真建模等需求,构建面向不同研究对象的物理实体的数字孪生体模型,该模型还能从系统工程的角度出发,真实反映物理实体内在的运行规律,保证数字孪生体与物理实体间实现有效闭环,以满足实际研究与应

用的需要^[9]。基于虚拟现实(VR)等技术的水运装备三维模型的构建与仿真方法,可为构建合理的数字孪生体模型奠定重要基础^[10]。国内外对于虚拟模型构建技术的研究较多。例如,郭晨等^[11]建

立了船舶舵轮、螺旋桨和舵叶的局部三维模型,通过模型仿真可实现船舶姿态和操纵的动态过程展示,实现了场景、操纵方式与视角的切换,可用于船舶运动控制策略的仿真验证。

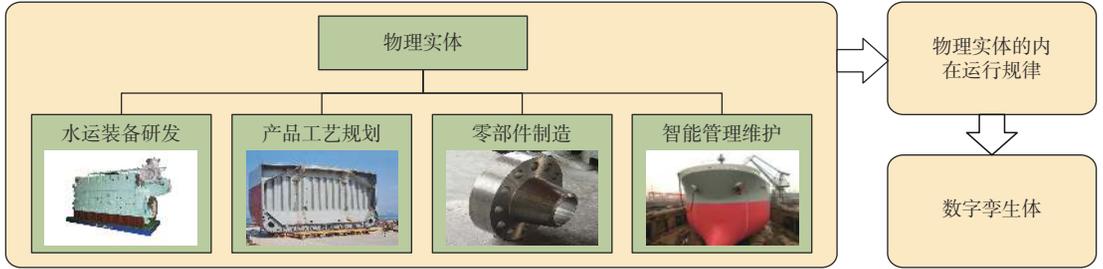


图 2 水路运输数字孪生体构建过程

Fig. 2 Construction process of digital twin model of waterway transportation

2.3 虚实模型信息实时匹配与交互技术

数字孪生的基础理论体系包含物理实体、虚拟模型以及二者的实时匹配与交互,因此在建立研究对象的虚拟模型后,需实现虚拟模型与物理实体在静态属性和动态属性上的实时匹配与交互^[12]。虚实模型的信息实时匹配与交互技术能将物理实体的信息数据转换成虚拟模型所支持的信息语言,并可实时调用和进行映射展示,形成镜像的数字化虚拟对象。水路运输装备的信息实时匹配与交互技术主要应用于装备管理系统及其设计系统,通过将装备实际运营的数字信息、图像信息及原始信息等通过计算机语言处理转换成相应的输入信号,再输入能反映物理实体内在规律的虚拟模型中,实现虚实模型间的信息实时匹配与交互,从而为虚实模型融合驱动与优化控制奠定重要基础。总之,虚实模型信息实时匹配与交互技术的研究与应用可提高数字化水运装备的拟实化程度,并获得沉浸式的装备管理体验。在此方面,刘旻等^[13]基于互联网的互联互通功能以及VR技术的沉浸式仿真效果,应用Unity3D设计了虚拟船厂与虚拟船舶的交互仿真实验系统,组建了多功能沉浸式船舶制造虚实交互实验平台。

三维虚拟模型,利用传感器、计算机、多媒体等方式实现操作者与虚拟环境、虚拟模型间的实时交互控制^[15],例如,通过实时人机交互可实现船舶、船队、港口等水路运输关键要素的综合管理与决策。虚实模型数字驱动控制架构包括了孪生体模块、控制模块、反馈模块等,如图3所示。通过虚实模型数字驱动控制技术可以实现水运装备的物理实体与虚拟模型的协同优化管理与控制,基于虚实模型及算法引擎的融合,可以在产品设计、工艺制造、优化决策、实际运营这些阶段为技术人员和管理者提供可靠的指导与优化决策控制^[16]。在智能化水运装备发展的趋势下,虚实模型数字驱动控制技术在装备的设计与制造阶段、优化决策阶段的应用将逐步深入。

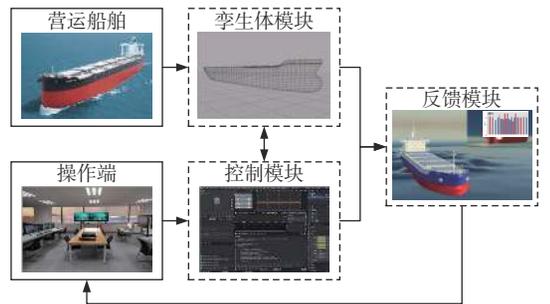


图 3 虚实模型数字驱动控制架构

Fig. 3 Data-driven control architecture of the virtual and real model

2.4 虚实模型数字驱动控制技术

数字孪生虚拟模型将随着物理实体的状态更新、维护与维修、升级和改造等而实时变化,甚至可通过数字化模型控制和优化物理实体的行为。因此,在虚拟模型的数据与物理实体的形态参数等比例映射的同时,需要实现控制逻辑及控制指令的实时匹配和协同驱动^[14]。虚实模型数字驱动控制技术是水运装备数字孪生技术的重要组成部分,其融合了通信传输、三维处理、计算机编程等多种技术,通过构建逼真的三维虚拟动态环境与

2.5 动态可视化技术

动态可视化技术可以使物理实体在虚拟空间得到更加清晰直观表征^[17]。采用此技术能够动态展现水运装备与系统的制造、运维形式,可针对装备的系统进行多领域、多尺度的实时智能状态监测与管理。通过结合VR、增强现实(AR)等技术,还可动态展示装备的运行环境及运营状态等信息,如图4所示。动态可视化技术主要包括数据信息可视化、虚拟场景可视化,以及数字孪

生体运行状态可视化等。其中,数据信息可视化需展现物理实体的相关关键数据信息,虚拟场景可视化是在孪生系统中高精度地模拟出物理实体的实际运行场景(例如船舶航行海域场景模拟),数字孪生体运行状态可视化则通过虚拟动画、图表等多维度可视化方式叠加到所构建的虚拟场景中对研究对象予以动态可视化。例如,雷进宇等^[18]结合实船数据与 VR 技术,在考虑动态环境影响因素的情况下对船舶运动进行了分析,基于分析结果构建了多维可视化集成框架,包括二维图表数据和航行环境的虚拟三维视图,该框架可通过标准化的数据结构实现实时的仿真和数据交换。孙晓雪等^[19]为实现船舶航行时的岸基远程监控和管理,开发了船舶远程辅助驾驶支持系统,以三维动态形式显示船舶的航行交通状况,该系统能准确显示船舶的真实航行场景及其状态信息,促进了船岸一体化智能体系的发展。此外,刘旻等^[20]结合 VR 与 AR 等技术,构建工艺过程信息的虚实融合引导模式和浏览模式,通过手势和语音控制等技术手段,实现水路运输装备分段建造过程的信息引导。

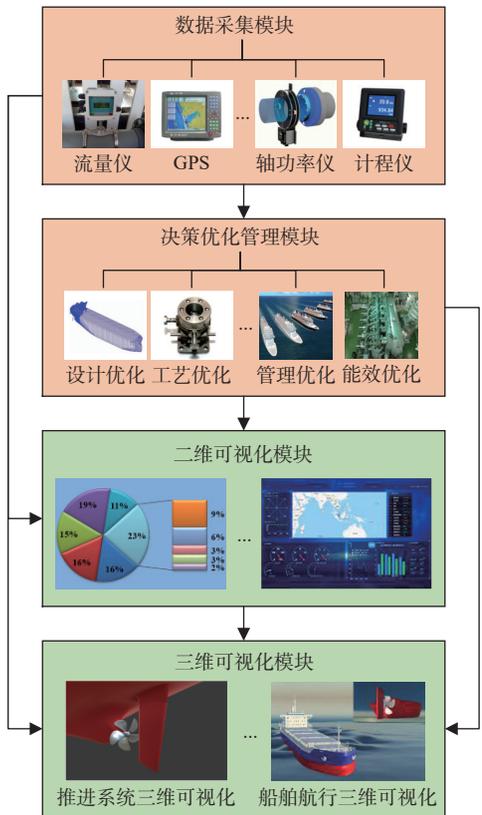


图 4 动态可视化技术架构

Fig. 4 The architecture of the dynamic visualization technology

3 基于数字孪生的船舶系统智能制造

数字孪生技术是实现船舶系统智能制造的新兴技术。在“数字孪生”的赛博物理系统(Cyber-

physical systems, CPS) 中,三维模型数据与实际设备形态参数等比例映射,虚拟设备间的控制逻辑和动态行为也要匹配实际生产制造流程,形成镜像的数字化虚拟对象。基于物理传感器等的信息,提取与分析系统的实际特性,通过系统的实际运行信息反馈来指导系统产品的方案设计,采用智能化、数字化制造与管理方式以提高船舶系统的制造效率、优化作业调度流程。

近年来,随着水路运输业对数字孪生技术研究的逐步深入,数字孪生技术在船舶系统制造领域已取得了一定的研究成果。针对船舶系统智能制造的数字化车间构建问题,徐鹏等^[21]开展了基于数字孪生的船舶管加工数字化车间研究,采用 B/S 系统架构完成了数字孪生系统的构建,如图 5 所示,通过将船舶管系加工制造过程中的大量实时数据与产品信息模型、生产线信息模型、过程信息模型进行实时匹配与关联组合,形成了完整的高精度虚拟车间模型,可以根据实时数据传输快速评估生产线的性能,进而实现生产决策的优化。李磊等^[22]针对船舶曲面分段建造难度大、效率低的问题,提出了一种基于数字孪生的流水线分段建造车间作业的调度模式,模拟了船舶数字化制造工厂的作业调度过程,基于智能算法进行调度优化,结果表明所提数字孪生智能车间可有效缩短船舶曲面分段建造周期,可有效提升船舶建造效率。方喜峰等^[23]针对船用柴油机制造过程中碳排放量高等问题,提出了一种基于数字孪生技术的船用柴油机关键件切削参数在线决策优化方法,通过构建切削参数决策优化的数字孪生模型,可使物理车间、虚拟车间与切削参数决策优化模块进行数据互联与实时匹配驱动,并通过实验验证了该方法的可行性和有效性,为柴油机制

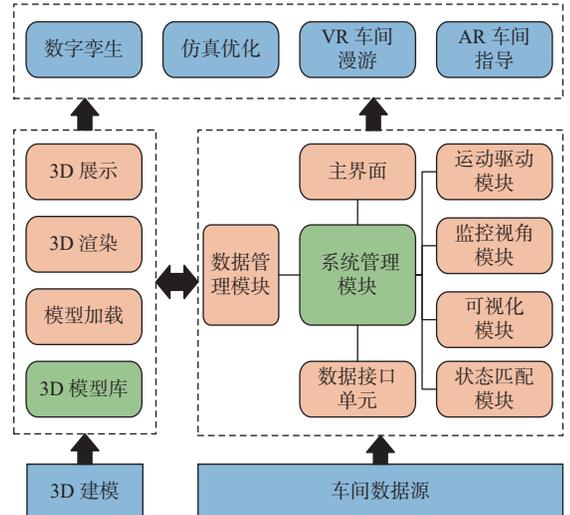


图 5 智能车间数字孪生系统架构^[21]

Fig. 5 Digital twin system framework of the intelligent workshop^[21]

造过程中的关键件切削参数优化提供了一种新的理念和方法。

4 基于数字孪生的水运装备运营管理

数字孪生技术的发展与应用为实现水运装备的高效管理提供了新的途径,可以提高水运装备的数字化与智能化管理水平,促进水路运输业的智能、安全、绿色、高效发展。基于数字孪生的水运装备智能管理属于装备性能数字孪生范畴,主要针对装备投入使用时的产品性能管理,基于物理传感器等的信息对装备特性进行提取与分析,从而实现预测性设备维护和性能优化等功能。

国内外学者在水运装备管理中数字孪生技术的应用研究已取得了一定成果。例如, Wu 等^[24]

分析了数字孪生技术在船舶设备管理中的应用现状,提出了一种基于数字孪生技术的水运设备智能管理框架(图 6),并探讨了数字孪生技术在船舶设备管理应用中所面临的挑战,为水运设备的智能化管理方式提供了参考。Bondarenko 等^[25]提出了一种基于数字孪生的柴油机推进设备动态预测模型,与传统预测方法相比,该模型可有效提高柴油运行状态预测的求解速度和精度,进一步提升船舶柴油机设备的智能化管理水平。Taskar 等^[26]基于实船数据,建立了船舶航速和主机功率的数字孪生模型,探讨了不同波浪阻力对主机性能预测的影响,结果表明,采用合适的波浪阻力计算方式可有效提高船舶主机设备的性能预测精度,优化主机设备的管理效率。

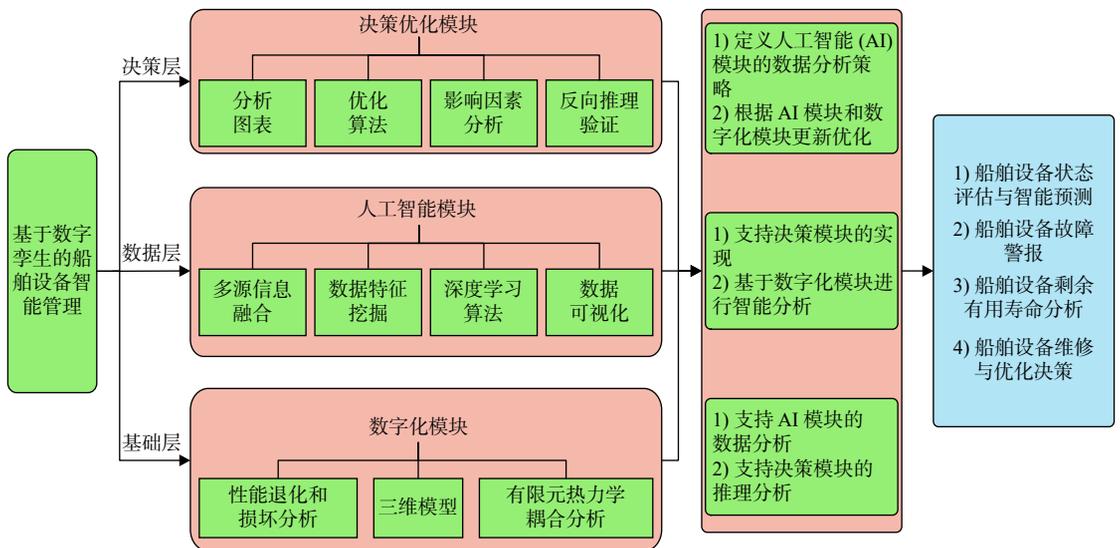


图 6 基于数字孪生的水运设备管理架构^[24]

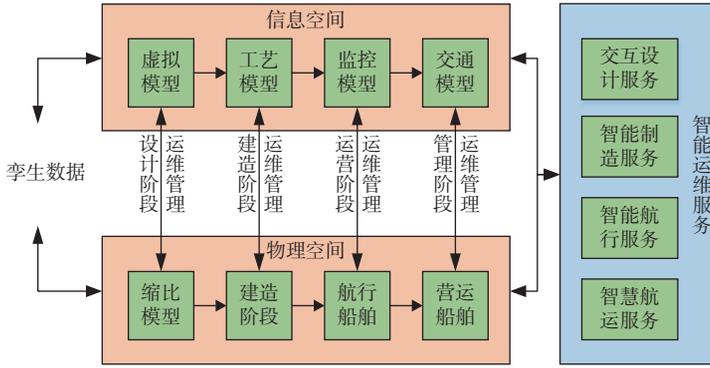
Fig. 6 Digital twin-based management of water transport equipment^[24]

5 基于数字孪生的船舶全生命周期智能运维

基于数字孪生技术的船舶全生命周期智能运维是指将模型、算法和决策分析等结合在一起,建立船舶物理实体的数字化映射,在各阶段辅助进行优化决策,使全船管理运营模式简单化、高效化、全面化,进而实现船舶从建造阶段到运营阶段的一体化综合智能管理与维护。

近年来,国内外学者提出了将数字孪生技术应用于船舶全生命周期运维的框架构想,提出了数字孪生技术的应用方法。例如,杨少龙等^[27]分析了数字孪生技术的应用对助力船舶全生命周期的智能化运维服务的必要性,总结了在船舶全生命周期智能运维中构建数字孪生系统的作用与特点,提出了船舶全生命周期数字孪生智能运维框

架(图 7),在此基础上,详细阐述了系统组成、运行机制、关键技术等,并探讨了数字孪生在船舶全生命周期运维管理中的应用前景。Arrichiello 等^[28]提出从船舶全生命周期运维的角度建立船体结构的数字孪生模型,基于数字孪生体对船舶设计过程进行决策优化与改进,并总结了数字孪生技术在船舶全生命周期管理中的应用价值。李福兴等^[29]针对船舶全生命周期进行了预测性运维管理分析,建立了针对船舶设备使用寿命及故障状态的运维管理框架,并总结了数字孪生技术在船舶全生命周期中的预测性维护管理的难点及发展路径。杨元龙等^[30]针对舰船蒸汽动力系统,提出了一种总体数字孪生模型应用体系,从物理对象、过程要素、生命周期及虚拟空间这几个维度,形成了舰船蒸汽动力系统的总体数字孪生架构模型,该体系可以有效支撑系统的方案设计、操作

图 7 基于数字孪生的船舶全生命周期智能运维架构^[27]Fig. 7 Framework of full life cycle intelligent operation and maintenance of ship based on digital twin technology^[27]

运行分析及试验方案评估,从而实现舰船全生命周期中物理空间与虚拟空间的交互协同与运行管理。

6 基于数字孪生的虚拟场景与虚拟测试

针对难以开展基于物理实体操作和测试的问题(例如智能船舶的航行测试),开展基于数字孪生的多场景虚拟测试实验(其可以大幅降低船舶生产测试成本)具有重要的意义和价值。物理实体的高精度数字化模型及运行场景的构建是实现基于数字孪生的虚拟测试的关键^[31]。其中,虚拟

场景的构建是通过利用计算机程序及软件生成虚拟的三维模型,使用户产生一种沉浸式的视觉效果;虚拟测试是以虚拟场景为基础,借助虚拟场景进行各种复杂的测试实验。基于数字孪生技术的虚拟场景与虚拟测试能真实再现物理实体的实际运行状态和运行环境,操作者可以根据实际情况进行船舶的虚拟操控和实验^[32]。基于数字孪生的虚拟场景与虚拟测试面向研究对象的性能优化与提升,通过船舶系统的虚拟测试运行信息可以反馈指导船舶系统的设计方案与运营管理方案。虚拟场景构建与虚拟实验流程一般包括数据库建设、驱动控制、拟实渲染、虚拟实验和验证等,如图 8 所示。

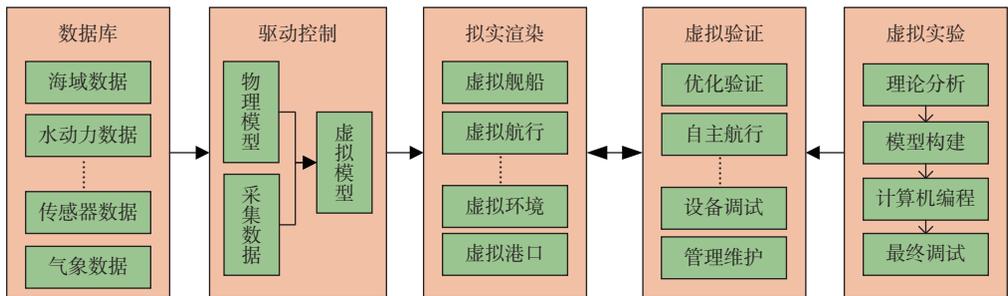


图 8 虚拟场景构建与虚拟实验过程

Fig. 8 Virtual scene construction and virtual experiment process

通过在虚拟场景中驱动船舶虚拟模型,可完成各项预测性仿真测试实验。例如,针对船舶运行状态的智能预测分析问题,景乾峰等^[33]提出了一种基于 VR 系统的船舶数字孪生框架,建立了实海域数据库和水动力数据库,通过数据驱动虚拟船舶模型,完成了真实海洋环境的重现和船舶运动状态的预测,对智能船舶的发展具有重要的应用价值。Pedersen 等^[34]基于数字孪生技术,构建了船舶航行的虚拟场景,模拟出了航行环境、航行地理信息以及海面交通状况,并通过实验评估了船舶导航系统的态势感知能力、导航准确率以及航行安全性。时光志等^[35]构建了 LNG 船舶

的数字孪生三维模型,以及六自由度的船舶运动数学模型,模拟了各种海况条件下的船舶运动规律,并基于海浪建模、柔性物体建模等实现了高逼真度的航行动态场景模拟,实现了船舶的虚拟控制及仿真测试。

7 水路运输数字孪生技术应用探析

水运装备的设计与生产阶段影响因素较多,需要针对不同系统特征进行精细化设计与制造,且具有生产周期长、成本高、部分产品生产环境恶劣、安全隐患多等特点^[36]。水运装备的设计建造涉及复杂系统耦合,具有多学科、多物理场的

特征,且各个环节的数据体量巨大、模态繁多。数字孪生技术在水运装备中的应用,可提高设计生产及运营管理阶段的数字化水平,提升多方协同优化机制效能,降低设计周期和生产运营成本^[37]。在智能航运发展的背景下,数字孪生技术在水运装备方面具有较好的应用前景,其可在装备结构装配、远程实时监控与维护、功能仿真测试等智能化研制服务和智能运营管理等方发挥重要作用,必将助力水运装备制造及运营管理的智能化发展^[38]。

数字孪生集成了物联网、大数据、AI和机器学习等多种技术,针对水运装备对象,通过将水运装备产品模型、运行环境、运营管理优化算法和决策分析的融合,建立物理实体的数字化映射,可实现水运装备的设计、制造、服务等全生命周期的各个阶段的辅助设计与优化管理决策。水路运输数字孪生技术可通过映射、监控与操纵、诊断、预测等过程逐层实现^[39],首先,通过映射刻画物理实体的三维可视化模型,尺寸、位置、装配关系等几何参数;然后,通过监控与操纵保证物理实体和虚拟模型的数据联通,通过算法引擎驱动虚拟模型实时反映物理对象的状态变化,并对物理对象的状态和行为进行必要调整;当水运装备发生异常时,基于物理实体实时数据与虚拟模型仿真数据寻找故障原因,从而进行故障诊断与分析;在此基础上,实现水运装备的运行与预测性维护、排放预测、运行状态预测等功能。

近年来,数字孪生技术已在水路运输行业中得到了一定的研究和应用。例如,挪威船级社于2015年与日本邮船联合构建了船舶数字孪生体,实现了船舶性能监测、维护检验等功能,并联合Rolls Royce Marine、SINTEF Ocean等机构建立了数字孪生开放仿真平台,如图9所示,其为船舶制造提供了船舶仿真模型接口规范,可显著降低船舶系统集成设计制造与仿真验证难度,为船舶智能设计、优化及虚拟验证分析等提供了智能化平台^[40]。此外,Kongsberg公司提出了船舶数字孪生构想,如图10所示^[33],管理人员可以基于数字孪生体对船舶关键组件进行管理与控制,读取访问所有相关数据并进行操作,此外,可以在船舶实际运行前进行虚拟实验分析,保障船舶的安全高效航行。另外,芬兰Eniram公司基于获取的运营船舶及航行环境的历史与实时数据,构建了数据驱动的船舶航行数字孪生体,并通过实时数据分析与航行环境预测,实现了船舶航行环境感知与能效管理,可有效降低船舶燃料消耗与污染气体排放^[27]。



图9 开放仿真平台^[40]

Fig. 9 Open simulation platform^[40]



图10 船舶数字孪生构想^[33]

Fig. 10 Conception of digital twin of ship^[33]

8 总结与展望

数字孪生技术在水路运输领域大有可为,可应用于船舶系统智能制造、水运装备的运营管理、全生命周期智能运维、虚拟测试等方面,为其提供相应的优化决策管理功能与服务。虽然数字孪生技术在水路运输领域获得了一定的研究与应用,但目前仍存在以下问题:

1) 水路运输数字孪生关键技术与基础理论还有待进一步强化,特别是缺少水路运输数字孪生应用技术标准体系。此外,在运行场景多变、复杂要素影响下的高精度、高可靠性虚拟模型构建等关键技术研究方面仍有待加强。

2) 基于数字孪生技术的智能管理系统开发主要面向单一管理对象,缺少多方协同的综合智能管理系统的研究。而水运装备优化管理往往是多约束、多变量的复杂综合管理系统,仍有待加强多方协同的综合数字孪生系统技术研究,以进一步延伸和扩展数字孪生技术在无人船自主航行、能效协同优化控制、港口智能优化管理等方面的研究与应用。

3) 现有研究大多集中于产品设计及沉浸式仿真模拟方面,而在数字孪生技术实际应用的可行性及适用性分析等方面也需加强。此外,相应的数字孪生技术应用还缺乏顶层优化设计,难以形成软硬件的全面协同,尚未构建完成基于全数据链的水路运输管理的数字孪生系统,其数字化、智能化水平有待进一步提升。

结合水路运输数字孪生技术的研究现状,针

对当前水路运输数字孪生技术发展面临的问题与挑战,对数字孪生技术提出如下展望:

1) 针对水路运输行业的特点,进一步强化数字孪生技术在水路运输方面的基础理论与方法的研究,逐步建立水路运输数字孪生技术应用标准体系,着力突破多源异构数据通挖掘技术、多物理场、多尺度、多学科的高精度、高可靠性虚拟模型构建技术、基于 VR 或 AR 的多方协同优化等关键技术,实现多变运行场景下、复杂要素耦合作用下的物理场景高精度再现,以及多领域多尺度融合建模,以服务于水运装备研发与优化管理的信息化、数字化、智能化发展。

2) 将数字孪生与物联网、人工智能等技术深度融合,着力开展多方协同的综合数字孪生系统关键技术研究,通过构建包含系统装备智能制造孪生体、水运装备智能管理孪生体、智能运维孪生体、港口优化管理孪生体、能效协同优化控制等水路运输综合管理数字孪生体,以数字化建模仿真与优化为特征,将信息技术全面应用于水运装备研发、设计、制造、管理与决策的全过程,实现数据与信息的多方位深度融合与应用,进一步提升水路运输管理的效率及智能化水平。

3) 应在强化数字孪生技术实际应用的可行性及适用性分析的基础上,加强数字孪生技术应用的顶层优化设计,形成软硬件的全面协同与高效应用,构建基于全数据链的水路运输管理的数字孪生系统,实现数据获取、传输、挖掘分析、应用的数据闭环,实现物理空间与信息空间的高效协同交互与共融,打造水路运输管理新模式,重塑水路运输管理新业态。

参考文献:

- [1] DELGADO J M D, OYEDELE L. Digital twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 49: 101332.
- [2] FONSECA C A, GASPAR H. Challenges when creating a cohesive digital twin ship: a data modelling perspective [J]. *Ship Technology Research*, 2021, 68(2): 70–83.
- [3] TAO F, QI Q L. Make more digital twins[J]. *Nature*, 2019, 573(7775): 490–491.
- [4] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1–18.
TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1–18 (in Chinese).
- [5] 蔡笑驰, 姚怡芝, 李鑫. 数字孪生技术在船舶全生命周期的应用架构 [J]. *船舶设计通讯*, 2019(2): 27–32.
CAI X C, YAO Y Z, LI X. Application architecture of digital twin technology in ship lifecycle[J]. *Journal of Ship Design*, 2019(2): 27–32 (in Chinese).
- [6] YAN X P, WANG K, YUAN Y P, et al. Energy-efficient shipping: An application of big data analysis for optimizing engine speed of inland ships considering multiple environmental factors[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 169: 457–468.
- [7] OH M J, ROH M I, PARK S W, et al. Operational analysis of container ships by using maritime big data[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(4): 438.
- [8] PERABO F, PARK D, ZADEH M K, et al. Digital twin modelling of ship power and propulsion systems: application of the open simulation platform (OSP)[C]//2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Delft, Netherlands: IEEE, 2020.
- [9] DANIELSEN-HACES A. Digital twin development-condition monitoring and simulation comparison for the revolt autonomous model ship[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [10] HAN Y S, LEE J, LEE J, et al. 3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(7): 658–668.
- [11] 郭晨, 焉丽飞, 沈海青. 超大型双桨双舵船舶运动数学模型与虚拟仿真 [J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(9): 1976–1982, 1988.
GUO C, YAN L F, SHEN H Q. Mathematical model of maneuvering motion and virtual simulation for ultra large twin-propeller twin-rudder ship[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(9): 1976–1982, 1988 (in Chinese).
- [12] ROSEN R, VON WICHERT G, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. *IFAC-PapersOn Line*, 2015, 48(3): 567–572.
- [13] 刘咏, 郭春雨, 孙聪, 等. “互联网+”时代虚拟船舶交互实验平台建设与实践 [J]. *实验室研究与探索*, 2018, 37(10): 162–167, 175.
LIU Y, GUO C Y, SUN C, et al. Construction and practice of virtual ship interaction experiment platform in era of "Internet Plus"[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 37(10): 162–167, 175 (in Chinese).
- [14] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势 [J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(4): 753–768.
ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4):

- 753-768 (in Chinese).
- [15] 刘旸, 陈浩政, 高良田, 等. 虚拟船厂、船舶交互仿真实验教学系统设计与应用 [J]. *实验室研究与探索*, 2019, 38(6): 79-84, 114.
LIU Y, CHEN H Z, GAO L T, et al. Design and application of interactive Simulational-experimental Teaching system of virtual shipyard and marine[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2019, 38(6): 79-84, 114.
- [16] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 1-10.
LIU D T, GUO K, WANG B K, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 1-10.
- [17] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(10): 2405-2418.
TAO F, MA X, HU T L, et al. Research on digital twin standard system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2405-2418 (in Chinese).
- [18] 雷进宇, 初秀民, 蒋仲廉, 等. 内河船舶自动识别系统异常数据的可视分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(6): 840-845.
LEI J Y, CHU X M, JIANG Z L, et al. Abnormal automatic identification system data by visual analytics[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(6): 840-845 (in Chinese).
- [19] 孙晓雪, 王胜正, 殷非, 等. 智能船舶远程辅助驾驶3D场景构建关键技术研究 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(增刊1): 173-179.
SUN X X, WANG S Z, YIN F, et al. Key technologies of 3D scene construction for remote assisted driving of intelligent ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(Supp 1): 173-179 (in Chinese).
- [20] 王冀凯, 朱明华, 罗明宇, 等. 基于HoloLens的船舶分段建造工艺信息引导技术 [J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(3): 182-187, 194.
WANG J K, ZHU M H, LUO M Y, et al. A process guidance method of ship block fabrication based on HoloLens[J]. *Machine Design & Research*, 2020, 36(3): 182-187, 194.
- [21] 徐鹏, 陈卫彬, 廖良闯, 等. 基于数字孪生的船舶管加工数字化车间研究 [J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(8): 139-144.
XU P, CHEN W B, LIAO L C, et al. Research on digital workshop of ship pipe machining based on digital twin[J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(8): 139-144 (in Chinese).
- [22] 李磊, 朱安慰, 景旭文, 等. 船舶曲面分段建造作业调度数字化仿真与优化 [J]. *机械设计与制造*, 2020(2): 141-144.
LI L, ZHU A W, JING X W, et al. Digital simulation and optimization of the job scheduling process of ship curved block[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(2): 141-144 (in Chinese).
- [23] 方喜峰, 张杰, 胡中泰, 等. 基于数字孪生技术的船用柴油机关键件切削参数在线决策优化方法 [J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(1): 66-75.
FANG X F, ZHANG J, HU Z T, et al. Online decision-making optimization method for processing parameters of key components of marine diesel engine based on digital-twin technology[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 35(1): 66-75 (in Chinese).
- [24] WU W H, CHEN G B, YANG Z C. The application and challenge of digital twin technology in ship equipment[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1939: 012068.
- [25] BONDARENKO O, FUKUDA T. Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics[J]. *Energy*, 2020, 196: 117126.
- [26] TASKAR B, ANDERSEN P. Comparison of added resistance methods using digital twin and full-scale data[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 229: 108710.
- [27] 杨少龙, 孙延浩, 向先波, 等. 船舶数字孪生及其服务全生命周期研究综述 [J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(11): 1-8.
YANG S L, SUN Y H, XIANG X B, et al. Ship digital twin and a review of life-cycle service[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(11): 1-8 (in Chinese).
- [28] ARRICHIELLO V, GUALENI P. Systems engineering and digital twin: a vision for the future of cruise ships design, production and operations[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2020, 14(1): 115-122.
- [29] 李福兴, 李璐熾, 彭友. 基于数字孪生的船舶预测性维护 [J]. *船舶工程*, 2020, 42(增刊1): 117-120, 396.
LI F X, LI L X, PENG Y. Ship predictive maintenance based on digital twins[J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(Supp 1): 117-120, 396 (in Chinese).
- [30] 杨元龙, 孙玲, 张晓滨, 等. 基于数字孪生的舰船蒸汽动力总体模型框架研究 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 157-167.
YANG Y L, SUN L, ZHANG X B, et al. Analysis on the overall model framework of ship steam power based on digital twin[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(2): 157-167 (in Chinese).
- [31] 刘佳仑, 杨帆, 马枫, 等. 智能船舶航行功能测试验证的方法体系 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 45-50.
LIU J L, YANG F, MA F, et al. Method system of navigation function test and verification for intelligent ship[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 45-50 (in Chinese).
- [32] 张勇亮, 张均东, 张志政. 三维船舶轮机虚拟实验室的设计和实现 [J]. *计算机应用与软件*, 2019, 36(1):

- 171–175.
ZHANG Y L, ZHANG J D, ZHANG Z Z. Design and implementation of 3D marine engine virtual laboratory [J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(1): 171–175 (in Chinese).
- [33] 景乾峰, 神和龙, 尹勇. 一种基于虚拟现实系统的船舶数字孪生框架 [J]. *北京交通大学学报*, 2020, 44(5): 117–124.
JING Q F, SHEN H L, YIN Y. A ship digital twin framework based on virtual reality system[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2020, 44(5): 117–124 (in Chinese).
- [34] PEDERSEN T A, GLOMSRUD J A, RUUD E L, et al. Towards simulation-based verification of autonomous navigation systems[J]. *Safety Science*, 2020, 129: 104799.
- [35] 时光志, 周毅, 李萌, 等. 基于虚拟现实技术的 LNG 船舶仿真系统 [J]. *航海工程*, 2021, 50(3): 25–28, 33.
SHI G Z, ZHOU Y, LI M, et al. LNG ship navigation simulation system based on virtual reality technology[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2021, 50(3): 25–28, 33 (in Chinese).
- [36] 周少伟, 吴炜, 张涛, 等. 舰船动力系统数字孪生技术体系研究 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 151–156.
ZHOU S W, WU W, ZHANG T, et al. Digital twin technical system for marine power systems[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(2): 151–156 (in Chinese).
- [37] 白雪梅. 数字孪生技术在船舶海工领域的应用前景 [J]. *中国船检*, 2020(5): 49–53.
BAI X M. Application prospect of digital twin technology in Marine Engineering[J]. *China Ship Survey*, 2020(5): 49–53 (in Chinese).
- [38] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与并行系统: 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 (in Chinese).
- [39] 陈定方, 胥军. 智能制造 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2021.
CHEN D F, XU J. Intelligent manufacturing[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2021 (in Chinese).
- [40] LUDVIGSEN K B, JAMT L K, HUSTELI N, et al. Digital twins for design, testing and verification throughout a vessel's life cycle[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. Lecce, Italy: [s. n.], 2016: 448–456.

相关论文

- [1] 余永华, 解美强, 李宝月, 等. 基于数字孪生的船用柴油机曲轴应力预测 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(5): 50–56. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02833](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02833)
- [2] 盛毕武, 杨艳芳, 吕小波, 等. 基于数字孪生的过盈配合组件装配质量监测方法 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(5): 40–49. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02790](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02790)
- [3] 李华峰, 刘炎, 陈建如, 等. 基于碳钢腐蚀的混合数字孪生的设计与实现 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 230–237. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02008](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02008)
- [4] 周少伟, 吴炜, 张涛, 等. 舰船动力系统数字孪生技术体系研究 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 151–156. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.01858](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01858)
- [5] 许萌萌, 张成伟, 梅顺峰, 等. 基于数据大脑的船岸一体机舱智能运维系统研究设计 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(6): 79–87. doi: [10.19693/j.issn.1673-3185.02642](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02642)