

智慧海洋数字孪生技术及其应用

赵龙飞^{1,2}, 姜晓轶^{1,2*}, 洪宇^{3,4}, 孙苗¹, 王漪^{1,2}, 康林冲^{1,2}, 曹磊^{1,2}

1. 国家海洋信息中心, 天津 300171
2. 自然资源部海洋信息技术创新中心, 天津 300171
3. 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室, 深圳 518034
4. 深圳市海洋发展研究促进中心, 深圳 518000

摘要 面向智慧海洋建设需求, 提出海洋数字孪生技术体系及应用方向, 分析了当前智慧海洋研究和发展现状, 通过研究新一代信息技术与工业技术融合应用, 阐述了数字孪生的概念内涵, 并给出海洋科学认知、海洋开发利用、海洋装备全生命周期、海洋治理决策4个方面的数字孪生应用场景; 针对智慧海洋建设与应用的共性需求, 提出包含现实海洋、数字化海洋、交互映射、孪生海洋数据、孪生海洋知识、孪生智慧应用6个基本要素的海洋数字孪生六维模型架构理论; 探讨了数字孪生赋能智慧海洋的关键技术问题及实现路径。

关键词 智慧海洋; 数字孪生; 海洋数字孪生六维模型; 海洋数字孪生

信息技术智能化高速发展, 海洋信息体系建设经历以数字化为目标的初期发展阶段后, 其智慧化发展, 形成从数据, 到知识, 到预测, 再到最优决策的海洋发展模式, 即“智慧海洋”, 成为了海洋信息化发展的必然趋势^[1]。智慧海洋将新一代信息技术与海洋环境、海洋装备、人类活动和管理主体4大板块信息深度融合, 实现互联互通、智能化挖掘与服务, 是认识和经略海洋的整体解决方案, 也是海洋强国建设的基础性、战略性工程。智慧海洋的发

展定位是引导海洋智能化技术革命4.0的信息基础设施建设^[2]。围绕海洋综合感知网、海洋信息通信网、海洋大数据处理分析、海洋信息智慧应用服务, 中国开展了一系列智慧海洋建设与应用实践, 取得了明显成效, 但与世界海洋强国相比, 海洋信息化基础薄弱、核心技术与装备自主研发能力弱、智慧海洋应用手段单一等问题仍较突出, 特别是在海洋信息处理分析与应用方面, 对新技术、新理念的介绍、消化和吸收不够, 在未来发展态势预测及海洋

收稿日期: 2023-07-11; 修回日期: 2023-09-28

基金项目: 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金项目(KF-2022-07-006)

作者简介: 赵龙飞, 助理研究员, 研究方向为海洋数字孪生与智慧海洋, 电子信箱: zhaolongfei220@163.com; 姜晓轶(通信作者), 研究员, 研究方向为海洋信息化, 电子信箱: Andjiangxy@126.com

引用格式: 赵龙飞, 姜晓轶, 洪宇, 等. 智慧海洋数字孪生技术及其应用[J]. 科技导报, 2024, 42(4): 91-101; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.04.009

环境对目标影响分析等方面存在不足,进而导致信息对海洋活动的支撑能力有限^[9]。

数字孪生(digital twin)作为人类解构、描述、认识现实世界的新型技术,面向人工智能国家战略中解决先进制造、规划决策等任务需求,是践行智慧化转型理念与目标的数字化技术最新手段,已经成为全球信息技术发展的新焦点^[10]。海洋具有多尺度、大范围、三维立体、动态多变的特性,直接在海洋实体空间开展各种试验代价较高,在数字空间反复预演,经过综合评估分析选择最佳方案,再运用到实际中,是技术发展的趋势,数字孪生以实时同步、虚实映射、高保真度等特性为海洋认知、利用与治理提供了一种新的工具,它与智慧海洋相结合也将催生海洋数字孪生概念的诞生,可以预见,海洋数字孪生是实现智慧海洋理想目标的关键技术路径、重要设施和基础能力。

数字孪生旨在以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等^[12-13]。关于数字孪生的研究成果主要从技术支撑出发,聚焦于数字孪生的技术体系。陶飞等^[14]总结了数字孪生驱动的6条应用准则,涉及了数字孪生驱动的14类应用设想与实施过程中所需突破的关键问题与技术;庄存波等^[15]总结了智能制造中产品数字孪生体的基本内涵,提出了产品数字孪生体的体系结构,并阐述了产品数字孪生体在产品设计阶段、制造阶段和服务阶段的实施途径;周瑜等^[16]以雄安新区数字孪生城市建设为例,认为数字孪生技术能够实现实体城市与数字城市之间的相互映射、协同交互,因而能够适应城市的复杂系统。Jiang等^[17]利用机器学习技术开发了第1个地球海岸线的数字孪生体,取得的成果为大规模加速沿海动力学模拟器提供了新方法。吕曜辉等^[18]研究建立基于数字孪生的动态声场预报系统,通过对动态海洋声场预报模型的仿真模拟,为实时监控动态声场预报的设计优化提供新思路。冶运涛等^[19]给出了数字孪生流域的概念内涵、模型框架、关键技术、发展方向和实施路径,并指出数字孪生

流域是推进智慧水利建设的关键与核心。

作为数字化技术的前沿,虽然数字孪生得到了工业界和学术界的广泛关注,并在智能制造、智慧城市、智慧水利等领域进行了初步研究和探索,但数字孪生实例化的应用仍远远不足。从公开资料及文献来看,针对海洋领域的数字孪生应用尚未开展系统的理论方法、技术支撑与场景应用研究,鉴于此,数字孪生在智慧海洋建设中的应用落地亟需相应的理论指导和关键技术支持。

1 数字孪生内涵与进展

1.1 数字孪生内涵

数字孪生是一个超现实的前瞻性概念,也称数字镜像、数字化映射或者数字双胞胎。结合国内外对数字孪生的认识和理解,数字孪生是对物理实体的精细化数字描述,能基于数字模型的仿真更真实地反映出物理产品的特征、行为、形成过程和性能等,能对物理实体全生命周期的相关数据进行管理,并具备虚实交互能力,实现将实时采集的数据关联映射至数字孪生体,从而识别、跟踪和监控物理实体,同时通过数字孪生体对模拟对象行为进行预测及分析、故障诊断及预警、问题定位及记录,实现优化控制。将数字孪生概念进一步泛化,可以将现实世界的人、物、环境、事件等所有要素数字化,在网络空间再造一个一一对应的虚拟世界,现实世界和虚拟世界同生共存、虚实交融,万物皆可数字孪生,且应用场景极为广泛。根据数字孪生模型的演化进程,其主要技术特征是:(1) 虚拟映射,在虚拟空间建立与物理实体几何、结构和性质相同的虚拟实体;(2) 物联感知,通过信息交互建立虚拟实体和物理实体的动态关联;(3) 虚实融合,通过虚拟实体直观反映物理实体特征,并实现以虚控实;(4) 预测推演,通过虚拟实体仿真模拟真实世界的运行规则,结合分析计算实现对物理实体未来状态的预测推演;(5) 智能孪生,通过实时数据接入与智能决策控制,形成相互依存的数字孪生体与物理实体。此外,数字孪生还具有可计算性、多学科性

和超写实性,以及虚拟性和集成性。

1.2 数字孪生研究与应用进展

目前,智能控制、智慧城市、智慧水利等领域的数字孪生研究引起了广泛关注,并在理论方法和实际应用方面取得较多突破,主要原因如下。(1) 精细化几何建模、逻辑建模、有限元建模、多物理场建模、多学科耦合建模等精细化建模与仿真技术,以及虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)、混合现实(mixed reality, MR)等沉浸式人机交互与协同的数字化表达技术得到广泛应用,通过这些技术的突破使得对物理实体全生命周期各阶段的高保真模拟成为可能,其在虚拟空间为数字孪生仿真设计及应用提供了关键技术支撑。(2) 基于信息物理系统CPS的数据实时采集、高性能并行计算和边缘计算等技术的快速发展,以及机器学习、深度学习等智能优化算法的不断涌现,海量动态实时数据的实时采集、存储和分析预测成为可能,为虚拟空间和物理空间的实时关联与互动提供了重要的技术支撑。

1) 智能制造领域。美国国家航空航天局和美国空军研究实验室在对未来航天器的设计研发过程中,充分运用数字孪生概念,减少实体产品直接模拟产生的大量成本;美国通用电气公司、德国西门子股份公司等国际领先的制造业公司均将自身生产业务与数字孪生技术相结合;中国于近年也开展了相应工业互联网、智慧工厂研究,为数字孪生技术切入智能制造领域提供支撑。

2) 专业软件开发领域。专业软件开发面临数据高效采集、多属性多专业建模、高性能算力提升、复杂场景应用等多方面的挑战,数字孪生技术可为专业软件开发提供工作基础,为专业软件融合共通提供支撑条件。目前已在电力、燃气等公共基础设施层面开展应用,形成智慧电力、智慧燃气等模式,即通过建构数字孪生平台,构筑各基础应用间的相互关系,并以数字孪生模型作为基础优化现实应用和模拟现实情况,减少人力和时间等层面的成本需求。

3) 智慧城市领域。加拿大多伦多、法国雷恩、新加坡等城市均已开展数字孪生城市的规划设计

探索,如“虚拟新加坡”项目构建的城市数字模型。2017年,中国信息通信研究院提出“数字孪生城市”概念以来,数字孪生城市在国内迅速发展,已应用到雄安新区CIM(城市信息模型)、BIM(建筑信息模型)管理平台、杭州都市圈“新城建”等国土空间规划项目中。

4) 智慧水利领域。构建数字孪生流域,是当前中国智慧水利建设的核心工作。2021年,水利部正式启动数字孪生流域建设,其建设及应用主要包括信息化基础设施、数字孪生平台、业务应用系统3大部分。2022年4月,水利部启动数字孪生流域建设先行先试项目,黄河、长江、淮河等主要江河流域的数字孪生平台建设陆续规划实施,在数据底板、模型和知识平台方面进展显著。

数字孪生在各领域的研究与应用中逐渐孕育出大量新技术和新模式,将进一步推动在其他相关领域的拓展应用和发展。可以预见,未来数字孪生不仅在智能控制等工业领域,也必将在智慧海洋等资源环境开发利用与治理管理领域发挥重要的技术引领作用,并逐渐向拟实化、集成化、智能化和全生命周期化方向发展。

2 海洋数字孪生基本内涵

数字孪生不再仅仅是一种技术,而是一种发展模式、一种转型路径、一股推动行业变革的动力。结合数字孪生技术特点及智慧海洋发展需求,海洋数字孪生是以海洋学科为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、海洋知识为驱动,对海洋环境全要素、海洋开发利用与治理管理全过程进行数字化映射、智能化模拟,实现与自然海洋及人类活动同步仿真运行、虚实交互、迭代优化,达到以多维度、全视角、协同交互、沉浸式的信息表达方法认知海洋、经略海洋的目的。其内涵是基于高度集成的数据闭环赋能新体系,生成以海洋环境、海上目标、人类活动、海洋管理等为主要内容的全息数字虚拟镜像空间;通过“由实入虚”,利用多维多时空尺度高保真模型的数字化仿真、虚拟化交互,形成数据驱动决策、虚实充分融合交织的智能系统,实现在虚

拟空间重现现实海洋,从粗到细、从宏观到微观、从海面到海底,复制、仿真及预测海洋环境、装备、人类活动及管理的状态和过程;通过“以虚映实”,使现实海洋可以在数字海洋空间进行协同建模、仿真预测、自主演化、干预操控,并将运行机理复杂、结构复杂,且内部状态和过程不可见的海洋变得透明,为各类海洋活动提供量化直观的分析评估结论;通过“由虚控实”,“以虚预实”“以虚优实”,以实时数据流方式按需供给几何模型、机理模型、数据模型、知识模型、业务模型等多维多尺度模型,支撑实现动态监测、态势诊断、趋势预判、虚实互动,以最优方案在现实海洋中的实施来最大程度地规避风险、减少损失、提高效益,如图1所示。

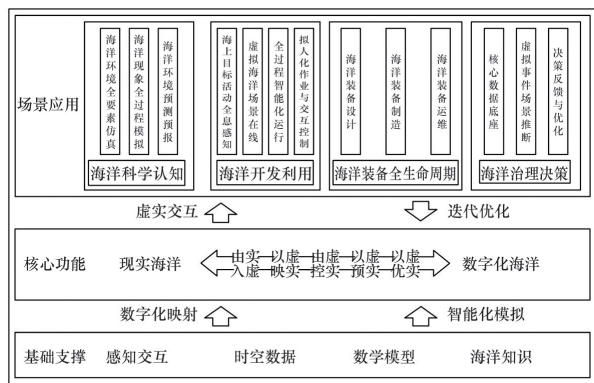


图1 海洋数字孪生体系架构

2.1 海洋科学认知的数字孪生

海洋科学认知的数字孪生是海洋数字孪生应用的第1层级,包括海洋自然环境的数字化仿真和预测预报2个方面,前者以海洋大气环境、水体环境、海底环境、海岛海岸带环境、经济社会信息等数据底板为支撑,通过构建海洋可视化物理模型、可验证的仿真模型、可表示的逻辑模型、可计算的数据模型,结合VR/MR技术,对海洋环境全要素和海洋现象全过程在虚拟空间进行数字化映射,实现“三维空间+时间维+多维海洋环境要素与现象”的动态呈现、集成表达与实时交互;后者在充分研究海洋动态时空过程变化机理的基础上,基于海洋环境数字化映射成果,利用模式识别、关联挖掘、线性预测、机器学习、深度学习等海洋时空预测方法,挖掘

分析与预报相关的多要素之间的关联关系,构建预测预报数据模型,实现对海洋要素和海洋现象的深度认知与预测预报。

2.2 海洋开发利用的数字孪生

海洋开发利用的数字孪生是在第1层级应用的基础上,针对海洋开发利用活动与海洋环境相互作用的时空特性和重构复杂性,基于装备流、物流、信息流和人员流等动态要素,通过构建海洋开发利用活动中使用的各类设施设备,如海洋观测监测设备、港口泊位、舰艇、船舶、海上风电场、海上构筑物等物理实体的数字孪生模型,形成感知分析、交互反馈、智能控制、智能决策的智能系统,精确表征数字孪生模型的时空演化特性与映射重构性能,实现海上目标物理实体与数字孪生体之间在海洋环境中的虚实映射、实时交互,以及目标活动的全息感知、全过程智能化运行、拟人化作业与虚拟海洋场景展现,进而达到海洋开发利用过程远程智能监测、设施设备实时监控和生产场景三维可视化目标,提升海洋开发利用的安全、绿色、高效和智能化水平。具体包括数字孪生船舶、数字孪生海洋牧场、数字孪生海上港口、数字孪生海上风电、数字孪生海上油气开采等海洋产业活动场景。

2.3 海洋装备全周期的数字孪生

海洋装备具有服役周期长、可靠性要求高的特点^[20]。针对海洋装备在长期承受多种海洋环境载荷的联合作用下,易发生性能退化、损伤失效等问题,面向海洋装备全生命周期,包括设计、制造和运维等多个阶段,开展“载荷和响应实时获取”“多尺度建模和仿真分析”“高保真模型修正”“疲劳损伤分析和剩余寿命预测”“智能化管理平台研发”等数字孪生技术方法应用,实现在虚拟空间高保真、高可靠地映射物理装备的真实状态,辅助预测装备设计阶段的可靠性和运维阶段的退化趋势,避免结构提前失效附带的安全隐患,降低海洋装备全生命周期的维护费用。具体来说,在设计阶段,初步建立海洋装备物理设计的数字孪生模型,结合温、盐、风、浪、流、冰等复杂海洋环境孪生底座,在虚拟空间开展联合作用预先模拟,校核海洋装备性能、迭代和优化设计方案;在制造阶段,基于模型定义开

展协同制造,根据装备的真实制造尺寸和材料,定义每个构件的数字孪生模型;在运维阶段,根据实时感知的海洋环境和装备运行信息,与数字孪生模型进行交互映射,并开展预测性维护;在报废阶段,利用数字孪生模型对海洋装备进行剩余寿命预测,计算装备全寿命周期费用,确定装备残值,控制报废费用,对剩余寿命过少的设备进行报废处理。

2.4 海洋治理决策的数字孪生

科技变革是全球海洋治理程度不断深化的动力,借鉴文献[21]在数字孪生城市支撑智能社会治理方面的思路,海洋数字孪生是未来海洋治理的核心数据底座,同时也是海洋治理各项任务设计、开展、运行、反馈、优化的工作基础,有助于壮大参与海洋治理的力量,实现多层次、多维度的海洋治理。操作层面,需要在构建海洋科学认知及开发利用活动数字孪生模型的基础上,叠加海洋管理数据、海上事件场景信息、海洋治理策略集合数据、“场景—最优策略”数据、“泛化场景—模拟”数据,从海洋环境层、地理层、状态层、感知层、认知层、行为层、价值观层、文化层等层面,构建完备的数字孪生支撑海洋治理的生态任务谱系,对每一类海上事件场景,掌握其发生、演化机制,进行反事实推断,利用数字孪生模型在虚拟空间模拟各种情况下的可能结果和应采取的对应措施,基于场景泛化、常态化模拟,实现海洋治理决策的智能化、精准化、实时化、标准化。

海洋数字孪生是海洋人机物三元世界中各实体对象及其行为,以及相互作用与机理的综合表达。海洋实景三维则是海洋数字孪生的空间基底和统一的空间定位框架与分析基础。海洋实景三维与实时数据结合用于描述现实海洋的实际状况也可认为是最基础的数字孪生模型。从海洋实景三维到海洋数字孪生,具有典型的“数字化—信息化—智能化”技术演进和“数据服务—信息服务—知识服务”需求升级特点^[22]。

3 海洋数字孪生模型架构

构建全息感知、多源融合、流程控制和数据交

互的数字孪生模型是实现海洋数字孪生的关键与核心,因此,面向智慧海洋建设与应用的共性需求,将包含物理实体、虚拟实体、连接、服务、数据、知识的数字孪生六维模型和智慧海洋相结合,提出海洋数字孪生包括现实海洋、数字化海洋、交互映射、孪生智慧应用、孪生海洋数据、孪生海洋知识6个基本要素。在6个要素协同下,完成对海洋自然环境及各类海洋目标活动的动态监控、模拟仿真、诊断评估、预测预报、决策优化、管理控制等功能。其中,数字化海洋是现实海洋的虚拟化数字映射,是海洋数字孪生的虚拟孪生体,现实海洋是海洋数字孪生的物理孪生体。根据上述分析,提出海洋数字孪生基本模型(O_{DT}),如式(1)所示

$$O_{DT} = \{O_R, O_V, O_C, O_S, O_D, O_K\} \quad (1)$$

式中, O_R 表示现实海洋; O_V 表示数字化海洋; O_C 表示交互映射; O_S 表示孪生智慧应用; O_D 表示孪生海洋数据; O_K 表示孪生海洋知识。

O_{DT} 基本架构如图2所示。

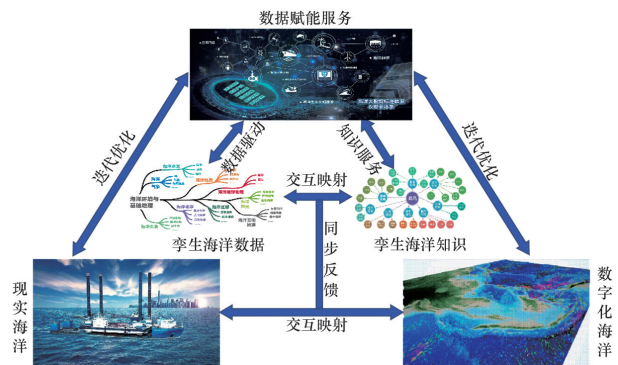


图2 海洋数字孪生六维模型架构

1) 现实海洋(O_R)。 O_R 是海洋数字孪生六维模型架构的构成基础,包括海底环境、水体环境、气象环境、海岛海岸带等海洋自然环境,海洋观测监测设施、舰船、油气平台、构筑物等海上目标,以及海洋科学认知、资源开发、治理管控等各类海洋活动,对其全面准确分析是建立 O_{DT} 的前提。 O_R 具有层次性,按照功能及结构一般包括单元级、系统级和复杂系统级3个层级。单元级对应海洋自然环境中的学科要素及组成海上装备目标中的设备单元,系

统级对应某一区域海洋的整体自然环境及其中的静态及动态的设施设备目标,复杂系统级是一个包含装备流、物流、信息流和人员流等,以及自然海洋与人类活动相互作用的综合动态系统。根据不同应用需求和管控粒度对 O_r 进行分层,是分层构建 O_{DT} 、实现“由实入虚”的基础。

2) 数字化海洋(O_v)。 O_v 重点是在虚拟空间构建多维多尺度的数字孪生模型,包括几何模型(M_c)、机理模型(M_m)、数据模型(M_d)、机理和数据融合模型($M_{m&d}$)、智能识别模型(M_r)、行为模型(M_b)、知识模型(M_k),实现对 O_v 从多维多尺度的描述与刻画,如式(2)所示

$$O_v = \{M_c, M_m, M_d, M_{m&d}, M_r, M_b, M_k\} \quad (2)$$

M_c 为描述 O_r 几何结构和参数、空间位置与关系的实景三维模型,与 O_r 保持时空一致性;对 M_c 进行细节层次的渲染,包括材质、光照、纹理等,可使 M_c 从视觉上更加接近 O_r 。 M_c 可用BIM、AutoCAD、3dMAX等建模软件或倾斜摄影测量、激光扫描点云进行创建。

M_m 是海洋气象、海水动力、海洋声场、生态环境、海底重磁、地形地貌、海洋产业活动等模型,适用于海洋系统物理对象过程和参数能够观测、运动机理明晰和变化规律能够充分掌握、数学模型表达形式固定的情况。 M_d 通常利用数理统计、机器学习和深度学习对海量样本进行训练建立,适用于现实海洋实体对象物理机制不清、参数众多且状态变量缺少观测的情况。 $M_{m&d}$ 是将 M_m 和 M_d 相结合进行融合建模,分为并联型和串联型2种方式,前者是以 M_m 为主, M_d 作为误差补偿方式校正 M_m ;后者是 M_d 通过海量样本训练获得 M_m 的输入或者通过估计 M_m 模型的内部变量或参数的关系作为 M_m 的输出。

M_r 是基于人工智能方法的海洋遥感、雷达、AIS(船舶自动识别系统)、北斗、视频等信息的识别模型,实现典型海洋现象、海洋动力灾害、生态灾害、海上违法活动、海洋权益事件等自动识别。通过完善识别对象或事件样本库,对不断增加的样本的持续学习训练,可以提高 M_r 的准确度。

M_b 是描述海洋事件及场景的实时响应及行为的模型,如海平面上升影响评估模型、海洋灾害安全评估模型、海洋权益事件影响评估模型、海洋监管决策模型,以及海洋经济与资源环境协调分析模型等。

M_k 是以知识图谱方式构建的海洋知识模型,即以不断积累的规律规则和经验为基础,通过自主学习和演化,对 O_v 进行同步映射校正,提高实时判断、动态评估、持续优化及精准预测能力,以及对 O_r 的精细管理、自动控制与安全保障水平。

3) 交互映射(O_c)。 O_c 用于实现 O_{DT} 各组成部分的互联互通,从而支持虚实实时互联与融合。通过智慧海洋建设的全球海洋立体观测网、海洋环境实时在线监测系统、深海和极地综合观(监)测系统、业务化海洋调查、海洋目标感知网、工业控制网、传感网及相关信息通信技术,实现海洋环境、目标、活动感知数据,模拟分析、预测预报数据,以及控制指令、管理措施、决策优化、控制运行等数据在现实海洋、数字化海洋、孪生智慧应用、孪生海洋数据、孪生海洋知识之间的高效连接传输、协同交互操控及同步迭代优化,如式(3)所示

$$O_c = \{C_{rv}, C_{rd}, C_{rk}, C_{rs}, C_{vd}, C_{vs}, C_{sd}, C_{sk}, C_{dk}\} \quad (3)$$

C_{rv} 实现 O_r 与 O_v 之间的交互,利用智慧海洋综合感知网采集现实海洋的各类数据,通过通信协议传输给 O_v ,实时校正各种海洋数字孪生模型; O_v 产生的模拟分析、仿真预测、方案决策等数据,通过控制指令和管理措施转化,即可以反馈传输给海洋设备执行器进行控制,又可以传输给相应海洋管理人员进行操控。

C_{rd} 实现 O_r 与 O_d 之间的交互,同样利用 C_{rv} 的感知手段获取数据至 O_d ;反过来, O_d 经过整合处理与融合分析的数据、产品及分析结果反馈指导 O_r 的安全稳定运行。

C_{rk} 实现 O_r 与 O_k 之间的交互,同样利用 O_k 反馈指导 O_r 的安全稳定运行。

C_{rs} 实现 O_r 与 O_s 之间的交互,同样利用 C_{rv} 的感知手段获取数据至 O_s 进行更新和优化; O_s 产生的专业分析、决策优化、管理措施、操作指导等结果以

应用软件或移动端 APP(应用程序)的形式提供给用户,通过人工操作实现对 O_r 的调控。

C_{vd} 实现 O_v 与 O_d 之间的交互,通过 JDBC、ODBC、OLE DB、ADO 等数据库接口实现,一方面把 O_v 产生的仿真分析、预测预报等相关数据实时存储到 O_d 中,另一方面实时读取 O_d 的融合分析数据、关联分析数据、现实海洋的全生命周期数据等驱动海洋动态仿真。

C_{vs} 实现 O_v 与 O_s 之间的交互,可通过 Socket、RPC、MQSeries 等软件接口实现 O_v 与 O_s 的双向通信,完成直接的指令传递、数据收发、消息同步等。

C_{sd} 实现 O_s 与 O_d 之间的交互,利用和 C_{vd} 类似的数据接口方式,一方面将 O_s 产生的数据实时传输至 O_d 存储管理,另一方面调用 O_d 中的海洋历史数据、实时数据、预测预报数据等支撑海洋数字孪生的智慧应用服务及迭代优化。

C_{sk} 实现 O_s 与 O_k 之间的交互,利用和 C_{vd} 类似的数据接口方式,一方面将 O_s 产生的知识实时传输至 O_k 存储管理,另一方面调用 O_k 中的规则、算法、模型等支撑海洋数字孪生的智慧应用服务及迭代优化。

C_{dk} 实现 O_d 与 O_k 之间的交互,一方面将 O_d 的数据深度挖掘分析得到的可用结果实时传输至 O_k 存储管理;另一方面 O_k 中的知识能够反馈指导 O_d 开展数据挖掘分析。

4) 孪生智慧应用(O_s)。 O_s 是海洋数字孪生建设的最终目标,是在数字化海洋的基础上,通过集成大数据、云计算、人工智能、物联网、区块链、虚拟现实等技术,针对海洋科学认知、海洋开发利用、海洋装备全生命周期、海洋治理决策等具体应用场景,面向海洋管理部门、科研院所、涉海企业、社会公众等不同单位的用户,实现深度和强化学习、知识引导和推理、群智协同优化、智能控制等现实海洋与虚拟海洋的同步运行,提供工具组件、中间件、模块引擎等形式支撑海洋数字孪生内部技术开发运维的功能性服务,以及以应用软件、移动端 APP 等形式满足不同领域、不同用户、不同业务需求的业务性服务。

5) 孪生海洋数据(O_d)。 O_d 是海洋数字孪生建

设最核心的驱动力,主要包括 O_r 数据(D_r)、 O_v 数据(D_v)、 O_s 数据(D_s)以及融合分析衍生数据(D_f),如式(4)所示

$$O_d = \{D_r, D_v, D_s, D_f\} \quad (4)$$

D_r 包括海洋自然环境、海洋装备及设施、海上开发利用活动及海洋治理管理的基础数据、属性数据及实时观测数据,具有多时间尺度、多维、多源和异构等特点; D_v 主要包括 O_v 相关的几何尺寸、空间位置、外观纹理等几何模型相关数据,模型边界条件、参数化时空分布等数学模型相关数据,相关事件场景引起的决策响应及状态调整等行为数据,边界条件约束、调度控制运行规则、海洋实体关联关系等规则数据,以及基于上述模型开展的模拟评价、预测预报、调配优化等的仿真模拟数据;各类海洋领域的模型算法数据和海洋治理业务管理数据; D_s 包括功能性服务中的算法和模型、海洋数据处理方法等相关数据,以及海洋科研认知服务、海洋开发利用活动服务、海洋装备全生命周期服务、海洋治理决策服务等业务管理数据; D_f 是对 D_r 、 D_v 、 D_s 进行数据治理(包括预处理、格式转换、分类融合、关联分析、数据集成等)得到的衍生数据,以及通过“时间—空间—业务域”关联分析得到的“信息—物理”融合数据等。

6) 孪生海洋知识(O_k)。 O_k 主要包括海洋领域的法律法规、标准规范、政策规划、方案报告、行业知识、专家经验及分析样本等事实性知识;面向特定海洋科学问题的计算过程模型及经过演化推导过程后的最终结论等过程知识;海洋科学认知、海洋开发利用活动、海洋装备全生命周期运行,以及海域海岛、海洋经济、海洋生态、海洋权益、海洋预警减灾等海洋治理管理形成的概念知识;海洋环境安全应急调度方案、业务流程规则等规则知识等。

4 海洋数字孪生关键技术

结合海洋数字孪生概念、内涵、特征,围绕海洋数字孪生模型和智慧海洋场景应用,归纳出海洋数字孪生构建的核心科学问题,包括现实海洋的数字化仿真及数字化海洋向现实海洋的反馈优化 2 个

方面。实现现实海洋的数字化仿真,一方面需要实现对现实海洋的全面感知,另一方面需结合物理机理建模和数据驱动建模的优点,针对不同场景应用构建海洋多维、多学科、多尺度高保真模型,也即要突破现实海洋数据实时获取技术、海洋多学科高保真数字化模型构建与协同技术;实现数字化海洋向现实海洋的反馈优化,则应突破现实海洋与数字化海洋的交互映射技术、数字化海洋的精确表征及优化方法等技术。

1) 现实海洋数据实时获取技术。构建海洋综合立体感知网,实现现实海洋数据的实时获取,是“由实入虚”的基础。未来海洋感知体系的发展趋势是构建具有感知、计算和通信能力的传感器网络与万维网结合而产生的天空岸海潜集成一体化观测网络,对海洋整个空间领域各种状态进行多尺度、全天候、连续观测,并通过一系列接口提供观测数据与空间信息服务,为海洋数字孪生建设提供数字化支撑。(1) 需要将智能控制、云存储、物联网、5G通信及人工智能等新技术引入海洋监测平台技术中;(2) 在传感技术方面,加强新材料、新原理、智能传感及传感网络技术的研究应用,深入研究传感器阵列技术、等离子体共振技术、膜技术、生物传感技术等,推动产生微型化、智能化、集成化、网络化的新型传感技术,开展深海高压、极地极寒等极端恶劣环境下的新型传感测量、水密耐压、极寒环境供电等关键技术研究,自主研发海洋系统多圈层探测和观测技术装备;(3) 在数据综合处理技术方面,不断提高仪器装备可靠性,由连续现场监测逐渐实现长期原位监测;(4) 突破海洋感知仪器装备的智能化技术,实现自主的数据采集、跟踪和控制、修复故障、融合监测数据等功能。此外,突破天空岸海潜传感器集成管理、多源异构感知资源协同技术,实现海量传感器组网通信、异构传感器接入、传感网资源管理、传感网服务组合、流式数据挖掘分析和地理信息互操作等,研究传感器信息建模、观测能力评价、协同监测、点面观测数据融合和按需聚焦服务等新方法。

2) 海洋多学科高保真数字化模型构建与协同技术。海洋多学科高保真数字化模型是海洋数字

孪生建设的核心,是能够体现数字孪生智能化协同交互和自主性进化的根本,是“以虚映实”的基础。在天空岸海潜一体化感知网支持下,开展高空、海面、水体、海底在内的整个海洋空间领域自然环境和非自然实体具有权威性、完整性、多态性和一致性的数据描述、模型表示和仿真,不仅要数字化表达海洋全学科多要素及属性,还要描述海洋装备、人类活动与海洋环境之间的交互效应,即数字化模型的构建包括海洋环境数据模型和交互作用模型2个部分,交互作用模型由海洋环境效应模型、环境自效应模型、环境影响模型组成,是一种高度复杂的、高度时空可变的物理场,全面揭示现实海洋时空现象的发生、演化规律及对人类活动的影响。但由于海洋的复杂性,传统的机理模型过参数化和建模条件简化,导致模型在运行过程中,误差累计效应带来模拟预测与真实偏离越来越多。因此要采取以下措施:(1) 要开展海洋科学基础研究,利用大数据、人工智能深化对海洋演变规律与相互作用机理的认识,改进模型结构对现实海洋进行精准描述;(2) 在模型运行演进中动态融合实时观测数据,反馈校正模型状态变量和参数,调整模型运行轨迹;(3) 以机器学习和深度学习为基础构建数据驱动模型,并融合多维多尺度模型形成高保真模型。除此以外,需要充分利用云计算、大屏展示、VR/MR技术,突破模型与观测数据同化、模型资源共享与集成、模型可信度评估、模型高性能计算、模型沉浸可视化等关键技术,支持集成模型高效开发、已有模型连接、模型管理、参数配置、可视化的海洋电子沙盘系统,系统中既包括气象变化、海水循环、生态过程、海底构造等自然过程模型,也包括人文社情、海洋管理、海洋开发利用等社会经济模型,支持模型多空间尺度、交互式、沉浸式展现,以及从月、旬、候,到年、数十年,甚至上万年的时间尺度模拟,同时,集成机器学习、深度学习和知识系统,充分利用非结构化信息,形成快速定制决策支持能力。

3) 现实海洋与数字化海洋的交互映射技术。交互映射是实现海洋数字孪生动态运行和虚实空间高效融合的核心关键,是“由虚控实”的基础,其

主要功能是实现海洋数字孪生6个要素间的数据传输与信息交换。作为海洋数字孪生的“血管”和“脉搏”,交互映射搭建了信息交流共享的桥梁和纽带,为数字孪生模型动态更新、物理实体实时控制、决策方案在线优化运送“数据养分”^[23]。(1)为保障海洋数字孪生提供高保真模型、精准数据、优质服务,需构建海洋数字孪生“虚—虚”要素、“虚—实”要素、“实—实”要素间交互网络,实现数字孪生的信息全面互联;(2)为保障海洋数字孪生要素间可靠通信,需建立实时、可靠、安全的通信机制,实现高质量信息互通;(3)为保障海洋数字孪生具备融合智能,需满足虚实空间、模型数据、人机智能的交互融合需求,实现多维度互融。交互映射的内涵包括海洋数字孪生内部交互(同维度要素间交互和不同维度要素间交互)及外部交互(与物理环境交互、与人交互和与信息环境交互),准确、实时、可靠、一致、安全是交互映射的准则和要求,其理论体系包括信息感知、连接通信、虚实映射、数模联动和交互融合5个部分。因此,在信息感知方面需重点研究多模态感知、同步感知、状态感知、协同感知、感知数据预处理和感知信息融合技术;在连接通信方面,需重点研究通信协议映射与交互技术、通信协议一致性测试技术、通信—计算融合技术、自适应同步通信技术及通信安全技术;在虚实映射方面,基于虚—实数据订阅传输模式,实现虚实空间的动态映射和深度融合,基于数据采集、数据集成和数据匹配等,实时呈现现实海洋的运行状态,并重点研究虚实映射关联挖掘、虚实映射一致性评估、映射关联关系存储与管理技术、映射关联自适应更新与优化技术、映射关联可视化技术;在数模联动方面,需重点研究数模联动一致性评估、时空状态初始化、时域同步驱动、数据同步交互技术;在交互融合方面,基于预测控制、最优控制等算法,以实现数字化海洋对现实海洋的准确控制和性能优化,并重点研究“人一机—环境”共融、虚实数据挖掘与融合、“实体—数据—模型—服务”融合技术。

4) 数字化海洋的精确表征及优化方法等技术。海洋数字孪生的建设目标在于增强对现实海洋时空特征和变化规律的认识,并基于数据挖掘和

知识发现,在自感知的基础上实现自学习、自判断、自预测、自优化、自决策和自执行,即实现“以虚预实”“以虚优实”。实现上述目标,需要通过在线实时的模拟仿真、历史数据的萃取、经验数据的积累,形成海量的样本数据,利用深度学习、强化学习总结现实海洋的特征,构建现实海洋各类物理对象的运行规则和知识图谱,并不断地进行自我训练,以最优方案指导实施,再根据实施情况反馈优化训练,进而提高各场景的应变能力。(1)需要研究VR等技术提供的全息数字镜像与可视化能力,将常规手段难以获取的现实海洋复杂环节内部状态信息通过虚拟现实、增强现实等手段实时呈现,从视觉、听觉、触觉等各个方面提供沉浸式、人机互动的体验,辅助海洋时空规律发现、装备故障检测与诊断;(2)研究利用人工智能和深度学习技术,建立对象仿真、智能仿真、分布交互仿真、虚拟现实仿真等模型,实现对现实海洋运行态势的推演,以及不同环境背景和决策下的情景模拟,并从海量实时数据中进行自主学习,从而实现自动决策以及对现实海洋的反向智能控制^[24];(3)通过海洋知识图谱的应用,实现基于海洋原生数据的深度知识推理,提高大规模知识图谱的计算效率与算法精度,突破认知推理、图计算、类脑计算及演化计算算法,加强知识图谱标准化测试工具的建设,提升海洋数字孪生的语义理解和知识推理能力;(4)发展高性能计算技术,通过高性能分析算法的云化、异构加速的计算体系(如CPU+GPU、CPU+FPGA),提高云计算平台的计算能力,满足实时性要求极高的海洋数字孪生运算要求。

5 结论

伴随着“工业4.0”的革命浪潮,数字孪生从理论创新到技术实现都面临着前所未有的研究热潮。面向智慧海洋建设需求,提出海洋数字孪生技术体系及应用方向,可以为后续研究提供方法论和技术支持。

1) 中国智慧海洋建设与应用实践取得了明显成效,但仍面临新技术、新理念的引进、消化和吸收

不够,以及信息对海洋活动的支撑能力不足等问题。从海洋的空间特点、多学科复杂特性,以及智慧海洋建设需求出发,结合数字孪生概念内涵、关键技术及应用场景分析,认为海洋领域引入数字孪生是解决这些问题的新途径,也是未来智慧海洋技术演进的必然趋势。

2) 海洋领域的数字孪生应用尚未开展系统的理论方法、技术支撑与场景应用研究。为此,从赋能智慧海洋发展与建设出发,给出海洋数字孪生的概念与内涵,指出海洋数字孪生的核心特点是实现“由实入虚”“以虚映实”“由虚控实”“以虚预实”及“以虚优实”,其应用方向包括海洋科学认知、海洋开发利用、海洋装备全生命周期及海洋治理决策4个方面。

3) 发展数字孪生三维、五维模型概念,将包含物理实体、虚拟实体、连接、服务、数据、知识的数字孪生六维模型和智慧海洋相结合,提出海洋数字孪生包括现实海洋、数字化海洋、感知交互、孪生智慧应用、孪生海洋数据、孪生海洋知识6个基本要素,给出了各要素的主要内容和交互迭代关系,为规范海洋数字孪生在各领域的应用模式,加快数字孪生技术在智慧海洋中的落地应用提供了重要参照。

4) 从应用落地和实际需求出发,探讨了海洋数字孪生理念在赋能智慧海洋建设技术路径中需要解决的关键技术问题,包括现实海洋数据实时获取技术、海洋多学科高保真数字化模型构建与协同技术、现实海洋与数字化海洋的交互映射技术、数字化海洋的精确表征及优化方法技术等。期望相关工作能推动海洋数字孪生理论、方法、技术与系统的研究与发展,为未来智慧海洋深度发展和工程建设提供有益的启发与借鉴。

顶层设计是牵引和带动数字孪生技术研究和应用实践的核心力量,未来将进一步深化海洋数字孪生技术体系研究,在理论的基础上同时兼备可操作性,同时,借鉴智慧城市、智慧水利等领域数字孪生建设与应用经验,加强战略研究,提出发展蓝图与总体实施方案等,开展智慧海洋数字孪生典型应用场景技术实践应用。

参考文献 (References)

- [1] 张宏军,何中文,程骏超. 运用体系工程思想推进“智慧海洋”建设[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 13-18.
- [2] 姜晓轶,潘德炉. 谈谈我国智慧海洋发展的建议[J]. 海洋信息, 2018(1): 1-6.
- [3] 何广顺,李晋. 海洋信息化顶层设计框架[J]. 海洋信息, 2018(1): 11-16.
- [4] Tuegel E J, Ingraffea A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, 2011: 1687-5966.
- [5] Negri E, Fumagalli L, Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 939-948.
- [6] 李德仁. 数字孪生城市: 智慧城市建设的新高度[J]. 中国勘察设计, 2020(10): 13-14.
- [7] 张帆,葛世荣,李闯. 智慧矿山数字孪生技术研究综述[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 168-176.
- [8] Hu L, Nguyen N T, Tao W, et al. Modeling of cloud-based digital twins for smart manufacturing with MT connect[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 26: 1193-1203.
- [9] Yun S, Park J H, Kim W T. Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems[C]//2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Milan: IEEE, 2017: 922-926.
- [10] Brenner B, Hummel V. Digital twin as enabler for an innovative digital shopfloor management system in the ESB logistics learning factory at Reutlingen-University [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 9:198-205.
- [11] Blair G S. Digital twins of the natural environment[J]. Patterns, 2021, 2(10): 100359.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [15] 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.
- [16] 周瑜,刘春成. 雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): 60-67.

- [17] Jiang P, Meinert N, Jordão H, et al. Digital twin earth-coasts: Developing a fast and physics-informed surrogate model for coastal floods via neural operators[J/OL]. [2021-10-14]. <https://arxiv.org/abs/2110.07100v1>.
- [18] 吕曜辉, 李瑞, 成霄. 数字孪生海战场动态声场预报[J]. 无线电工程, 2022, 52(5): 719-723.
- [19] 冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 等. 数字孪生流域: 未来流域治理管理的新基建新范式[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 683-704.
- [20] 武文华, 常进云, 顾乃建, 等. 海洋装备智能运维的数字孪生方法研究[C]//第二十届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 湛江: 中国海洋学会海洋工程分会, 2022: 322-328.
- [21] 吕鹏. 数字孪生城市: 智能社会治理的基础架构[J]. 国家治理, 2023(11): 66-70.
- [22] 朱庆, 张利国, 丁雨淋, 等. 从实景三维建模到数字孪生建模[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 1040-1049.
- [23] 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.
- [24] 张新长, 李少英, 周启鸣, 等. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考[J]. 测绘科学, 2021, 46(3): 147-152.

Smart ocean digital twin technology and its application

ZHAO Longfei^{1,2}, JIANG Xiaoyi^{1,2*}, HONG Yu^{3,4}, SUN Miao¹, WANG Yi^{1,2}, KANG Linchong^{1,2}, CAO Lei^{1,2}

1. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China

2. Marine Information Technology Innovation Center of the Ministry of Natural Resources, Tianjin 300171, China

3. Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518034, China

4. Shenzhen Marine Development & Promotion Center, Shenzhen 518000, China

Abstract In response to the demand for smart ocean construction, a digital twin technology system and application directions for the ocean are proposed. Firstly, the current research and development status of smart ocean is systematically reviewed and analyzed. By studying the integration and application of new generation information technology and industrial technology, the concept and connotation of digital twin are elaborated, and the application scenarios of digital twin in marine scientific cognition, marine development and utilization, the full life cycle of marine equipment and the ocean governance decision-making are provided. Then, in response to the common needs of smart ocean construction and application, a six-dimensional ocean digital twin model architecture theory is proposed, which includes six basic elements: real ocean, digital ocean, interactive mapping, twin ocean data, twin ocean knowledge, and twin intelligent application. Finally, key technical issues and implementation paths for empowering the smart ocean with digital twins are proposed and explored. The aim is to provide some thinking and reference for the future development and deep application of smart oceans through the research of marine digital twin technology.

Keywords smart ocean; digital twin; ocean digital twin six-dimensional model; ocean digital twin application ●



(责任编辑 王微)