



数字孪生航道技术 及成熟度等级评价模型研究*

马瑞鑫^{1,2}, 吴静媛³, 葛乃铭¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;
2. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026; 3. 中国交通信息科技集团有限公司, 北京 101399)

摘要: 数字孪生航道是新一代信息技术与传统航道专业融合发展形成的一种新型航道基础设施。从数字孪生航道工程实际应用出发, 阐述数字孪生航道的概念, 构建包含物理实体航道、航道时空数据、孪生驱动引擎、数字虚体航道和场景应用服务在内的五维架构。根据数字空间到物理世界的逻辑关系提出以“仿真(L1)、映射(L2)、控制(L3)、预测(L4)和优化(L5)”为特点的五级数字孪生航道成熟度等级。基于五维架构和五级成熟度设计一套数字孪生航道成熟度评价模型, 并在某段数字孪生航道开展定级评价, 清晰展现其在数字孪生航道建设方面的长处和短板。结果表明, 提出的数字孪生航道成熟度等级评价模型能有效指导数字孪生航道建设。

关键词: 数字孪生航道; 智慧航道; 成熟度模型; 评价指标

中图分类号: U61; TP39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0209-08

Technology and maturity level evaluation model of digital twin waterway

MA Ruixin^{1,2}, WU Jingyuan³, GE Naiming¹

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T., Tianjin 300456, China;

2. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

3. China Communications Information & Technology Group Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: Digital twin waterway is a new type of waterway infrastructure formed by the integration and development of the new generation information technology and traditional waterway specialties. Based on the practical application of digital twin waterway engineering, we expound the concept of digital twin waterway, and build a five-dimensional architecture including physical entity waterway, spatiotemporal data, twin drive engine, virtual digital waterway and scene service application. According to the logical relationship between the digital space and the physical world, we propose a five-level digital twin channel maturity level characterized by “simulation (L1), mapping (L2), control (L3), prediction (L4) and optimization (L5)”. Based on the five-dimensional architecture and the five-level maturity level, we design a set of digital twin channel maturity evaluation model, and carry out the grading evaluation of a section of digital twin waterway, which can clearly show its strengths and weaknesses in the construction of the digital twin waterway. The results show that the digital twin waterway maturity level evaluation model proposed in this paper can effectively guide the construction of digital twin waterway.

Keywords: digital twin waterway; intelligent waterway; maturity model; evaluation indicator

收稿日期: 2023-12-13

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2603800); 广西科技重大专项(2023AA14003); 中央级公益性科研院所科研创新项目(TKS20230203)

作者简介: 马瑞鑫(1991—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事水运工程信息化技术研究和应用。

数字孪生是以虚拟化的方式在数字空间建立物理实体的多维度、全时空数字模型,能够突破时间、空间等物理条件的限制,再现对应实体在物理世界中的行为、属性、状态等,反映对应实体功能、实时状态及演变趋势等,从而实现仿真、映射、控制、预测和优化物理世界,是一种从数字空间研究物理世界变化规律的新的科学方法,更是一种推进行业和社会发展向数字化、网络化、智能化转型的有效途径。水运交通是综合交通运输体系的重要组成部分,智慧水运是水运交通高质量发展的必然要求,数字孪生水运是新一代信息技术在水运交通行业的创新融合应用,代表了下一代智慧水运发展的新模式和新方向。数字孪生技术最早应用于美国航空航天局(NASA)航天飞行器的设计优化和伴飞监测等,目前已广泛应用在工业制造^[1]、航空航天^[2]、能源电力^[3]、交通监测^[4]、水利防洪^[5]、海事监管^[6]等领域。在工业制造、航空航天、能源、水利等领域已形成较为完善的技术标准和应用体系。但在水运领域,尚缺乏数字孪生航道相关的系统架构、模型体系等理论参考,不同专家、学者和用户对数字孪生航道的认识和理解也不同,从而造成相关研究和工程应用存在交流不畅、共享困难等问题。

本文创新构建数字孪生航道的五维架构模型,划分五级数字孪生航道成熟度等级,并设计出一套数字孪生航道成熟度评价模型。研究成果对我国数字孪生航道建设具有重要的指导意义。

1 数字孪生航道概念

航道是支撑现代化航运体系的关键基础设施^[7]。当前常用在试验大厅通过同比例尺缩减的航道物理模型研究预测实体航道的状态变化,也是孪生技术在物理世界的体现。然而由于物理实体航道或航道物理模型受时间、空间、成本等方面的约束,航道运行监测、养护管理决策等相关业务在物理环境中无法得到更全面、准确、科学的数据和模型支撑^[8]。

数字孪生航道(digital twin waterway, DTW)以

物理实体航道为对象、多维时空数据为底座、数学机理模型为核心、航道业务知识为驱动,对实体航道全要素在数字虚拟空间中的数字映射、智能模拟和前瞻推演,与实体航道同步仿真运行、虚实交互,是反映实体航道全生命周期过程的新型航道基础设施^[9]。其包含空间维度上对航道建筑物、航标、边坡护岸等航道要素场景的孪生覆盖,也包括时间维度上对航道工程规划、设计、施工、养护等全流程的覆盖^[10]。

2 数字孪生航道架构模型

根据工程建设经验,把握数字孪生航道核心要素^[11],研究建立适用于数字孪生航道的五维架构模型,即物理实体航道(physical entity waterway, PEW)、航道时空数据(spatiotemporal data of waterway, SDW)、孪生驱动引擎(twin drive engine, TDE)、数字虚体航道(virtual digital waterway, VDW)和场景服务应用(scene service application, SSA)。模型表达见式(1),架构见图1。

$$M_{DTW} = (PEW, SDW, TDE, VDW, SSA) \quad (1)$$

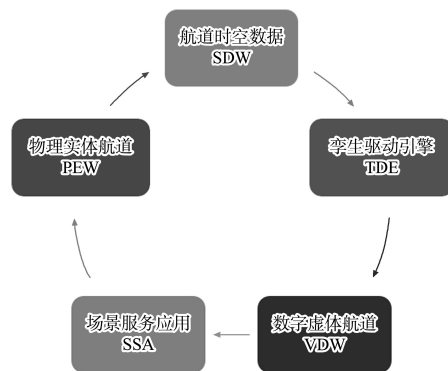


图1 数字孪生航道五维架构模型

2.1 物理实体航道

PEW是数字孪生航道的构建对象,其具有层次性,按照功能及结构一般包括单元级、系统级和工程级。单元级一般指航道功能实现的最小单元,通常为单个设施或设备,例如航标灯、水位站、岸线等;系统级一般指实现航道某个功能的单元集成,通常为整套设施,例如航标、船闸、整治建筑物等^[12];工程级一般指航道整个系统,能够实现各系统间的组织与协调,例如航道设计

工程、航道建设工程、航道维护工程等。

2.2 航道时空数据

SDW 是实现物理实体航道和数字虚体航道同步的关键。SDW 主要包括航道基础数据、动态监测数据、业务管理数据和地理空间数据,见下式:

$$SDW = (D_{bsc}, D_{dyn}, D_{man}, D_{gis}) \quad (2)$$

式中: D_{bsc} 为指航道涉及的相关要素的数字化表达,主要涵盖航道、岸线、锚地、桥梁、服务区、通航建筑物等要素的空间信息和属性信息,空间信息记录对象的位置、拓扑关系及其外观的参数化节点模型信息或三角面片网点模型信息,属性信息记录对象的标识信息、特征信息和时间戳; D_{dyn} 为航道运行过程中各类要素的实时状态变化数据,分为空间监测和业务监测数据,空间监测数据是对船舶、水位、航标等对象空间位置、运动状态的数字表达,业务监测数据是对航道各要素在业务运行中的变化数据,依据业务更新周期进行更新^[13]; D_{man} 为航道管理涉及的业务应用数据,包括行业监管、船舶公司、港口码头等相关业务产生的管理数据,也包括从其他行业部门共享过来的水文、气象、海事等数据; D_{gis} 为与航道相关的地理空间和几何尺度数据^[14]。

2.3 孪生驱动引擎

TDE 主要实现数据驱动、场景渲染和模型呈现,通过实时渲染数字孪生体,实现与物理实体航道同步仿真运行,并提供数字孪生体灵活的人机交互能力。

当前常见的引擎主要有两大类:1)以游戏引擎为主,通过 Native3D(客户端)或 Web3D(浏览器)引擎渲染,当前主要有 Unity、UE4、T3D 等;2)基于三维地图开发渲染,更多呈现地理空间的相关分析。当前的游戏引擎大都是封闭的虚拟世界,更强调娱乐性,通过触发机制对相关人物、地点和场景进行预先设计;而面向数字孪生航道的孪生驱动引擎有大量的系统平台需要兼容和集成,有大量的实时数据需要接入和处理,此外由于物理场景会不断演进和变化,功能需求也会不断变化,因此需要孪生驱动引擎具有更快的需求

响应速度和适应能力,保持渲染帧率稳定,具备多尺度的细分着色渲染能力^[15]。

2.4 数字虚体航道

VDW 是在数字空间对物理实体航道的数字化表达,狭义的数字虚体航道是指航道的静态三维显示模型即为几何模型,实现航道的三维可视化;广义的数字虚体航道包括几何模型、行为模型和知识模型,这些模型能从时间、空间、机理等多维度对 PEW 进行多尺度描述,见下式:

$$VDW = (M_{geo}, M_{beh}, M_{know}) \quad (3)$$

式中: M_{geo} 为描述 PEW 几何参数与位置关系的三维可视化模型,主要包括其外观形状、尺寸大小、空间位置、相互关系等; M_{beh} 为航道物理属性、时空约束及演化行为特征等信息,主要包括水动力模型、泥沙动力学模型、船舶动力学模型、建筑物安全模型、航道交通流模型等^[16]; M_{know} 为航道业务知识库,能对航道的相关业务进行评估、预测和优化等,可从航道相关技术标准获取,也可随着时间的推移,从隐性数据中总结的知识经验中获取。

2.5 场景服务应用

SSA 是数字孪生航道建设的主要落脚点,根据航道业务相关场景应用,包括面向管理部门的智能养护管理和面向社会公众的便捷公共服务。

在智能养护管理方面,可通过数字孪生航道开展航道运行状态管理、航道设施设备监测、通航环境监测、交通运行状态预测、航道动态养护管理、船闸运行调度等业务管理,以直观地展示航道运行状态和发展趋势^[17]。基于数字孪生航道的模拟仿真能力,可为优化航标配布、航运资源配置、应急指挥抢险、分析航道地形演变、预测航道尺度变化等提供预测推演性功能支撑^[18]。在便捷公共服务方面,可应用数字孪生提供的航道时空数据实现船舶伴随式助航服务和全视角进出港服务,对船舶航行过程提供精细化、定制化的助航服务,预测船舶到达时间、桥梁防碰撞预研、装载计划制定等,保障船舶安全、便捷、高效航行^[19]。

3 数字孪生航道成熟度等级

基于成熟度模型理论，以数字空间对物理世界的影响和作用为主，研究提出一套数字孪生航道成熟度等级模型，对数字孪生航道的任务范畴

和发展阶段进行系统性描述^[20]。成熟度等级由低到高共分为“以虚仿实”、“以虚映实”、“以虚控实”、“以虚预实”和“以虚优实”5 个等级，如图 2 所示。

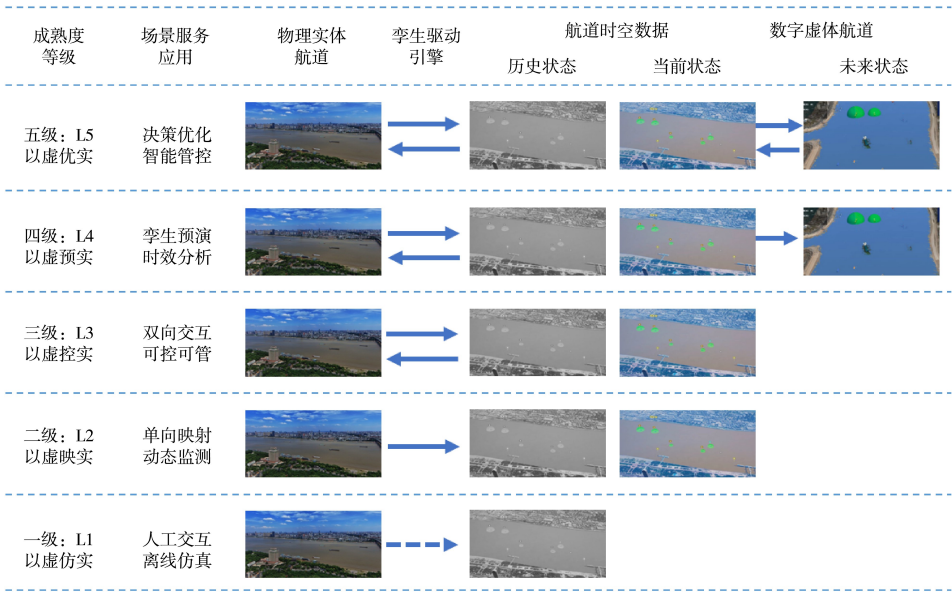


图 2 数字孪生航道成熟度等级

3.1 以虚仿实

以虚仿实是指可通过数字孪生体对物理实体航道的属性、行为、特征进行仿真和描述，该等级位于数字孪生航道成熟度等级的基础等级(L1)。物理实体航道和数字虚体航道之间不存在动态数据交换，数字空间中的数据多为物理空间中的历史数据或模拟数据。

在该等级，数字孪生航道主要应用在航道工程设计和可视化展现中，具体体现在航道规划设计物理模型、运营维护阶段的三维可视化等，技术人员可基于相关仿真试验结果不断优化设计工作，指导航道工程设计实施等。

3.2 以虚映实

以虚映实是指可通过数字虚体航道实时映射并呈现物理实体航道的实时状态和变化过程，该等级位于数字孪生航道成熟度等级的第 2 等级(L2)。数字虚体航道由真实且具有时效性的物理实体航道动态监测数据驱动运行，同步直观呈现与物理实体航道一致的运行状态和结果。在交互操作方面，仍然依赖人工介入，无法实现对物理实体航道的远程管控。

在该等级，数字孪生航道主要应用在航道运行状态监测方面，通过水位、岸线、航标、船舶目标等相关传感器实时采集物理实体航道运行的相关数据，通过无线网络传输到数字空间，并驱动数字虚体航道基于动态数据同步运行，可将物理实体航道的运行状态同步映射到数字虚体航道中。技术人员无需到现场巡查航道的运行状态即可直观掌握其动态信息，一旦发现航道运行异常，便可报警并及时人工介入。

3.3 以虚控实

以虚控实是指可通过数字孪生体间接控制物理实体航道的运行过程，该等级位于数字孪生航道成熟度等级的第 3 等级(L3)。数字虚体航道能够通过接受数字空间中的输入指令在物理空间中实现一定的操作，该等级的数字孪生航道需要物理实体航道在硬件设备方面的优化升级，同时建立由数字空间到物理世界的实时双向数据传输通道。

在该等级，数字孪生航道主要应用在航道的管理养护方面，可在数字空间中控制数字虚体航道实现实体航标灯质、频率等的调整，控制船闸闸室

的开启和关闭,控制弯曲航道上下行信号灯,同时也可控制无人机、无人艇的自动起飞和自动巡航。

3.4 以虚预实

以虚预实是指通过数字孪生体可预测物理实体航道未来的运行过程和状态,该等级位于数字孪生航道成熟度等级的第4等级(L4)。数字虚体航道基于双向闭环交互机制利用数字孪生航道相关行为规则模型,基于物理实体航道的时空数据所蕴含的隐性规律,实现对物理实体航道未来运行过程的在线预演和运行状态的预测,从而在一定程度上突破时间和环境的限制,实现更为准确和精细化的航道运行管理分析。

在该等级,数字孪生航道主要应用在航道的运营维护管理方面,可通过数字孪生航道的航道专业模型和相关业务知识库实现航道历史演变分析、水文预测、泥沙运动预测、船舶交通流量预测、航道拥堵预测等,辅助管理人员实现对航道的管理决策。

3.5 以虚优实

以虚优实是指可利用数字孪生模型对物理实体航道的管理决策给予一定的优化策略建议,具有该能力的数字孪生航道处于其成熟度等级

的第5等级(L5)。数字虚体航道可学习利用航道知识库、相关业务规则,利用对抗策略、大数据算法和隐藏的逻辑关系,实现具有时效性的智能决策和优化,并基于实时交互机制实现对物理实体航道的智能管控,以达到最优的管理决策等。

在该等级,数字孪生航道主要应用在航道的辅助决策方面,例如在发生航道应急事件或者航道规划设计方案调整,可通过数字孪生航道计算不同环境、不同技术路线下的最优方案集,根据映射的物理实体航道动态数据从方案集中选取当前的最优方案,并按照最优方案实现物理实体航道和数字虚体航道的协作执行。

4 数字孪生航道评价指标体系

为使数字孪生航道成熟度等级具有更强可操作性,结合本文提出的数字孪生航道五维架构模型,从物理实体航道、航道时空数据、孪生驱动引擎、数字虚体航道和场景服务应用进一步细化其相应的评价因子,共同构成数字孪生航道成熟度评价指标体系^[21-23]。评价因子的描述见表1。数字孪生航道架构维度、评价因子及成熟度等级的相关关系见图3。

表1 数字孪生航道成熟度模型评价因子描述

架构维度	评价因子	描述(L1~L5 逐级增强)
物理实体航道 (PEW)	控制(PC)	物理实体控制方式、控制范围等
	传感器(PS)	传感器种类、数量、覆盖范围、数据传输方式、远程配置等
	接口与设备(PD)	数据接口、远程管控、多机协作等
航道时空数据 (SDW)	数据丰富性(DR)	基础数据、动态数据、业务数据、生成数据
	标准及兼容性(DS)	数据标准化、可兼容性
	数据采集及交换(DE)	数据时效性、传输延时性、获取方式等
	数据质量(DQ)	数据重复、缺失、数据验证、评估机制等
孪生驱动引擎 (TDE)	数据驱动能力(ED)	动态数据驱动建模、时空约束规则验证
	场景渲染能力(ES)	数据量大小、场景数量、逼真度等
	业务结合能力(EB)	业务模型融合能力、知识验证能力等
数字虚体航道 (VDW)	模型完整度(VC)	描述物理实体航道的外观呈现、内部机理、特性和行为等
	模型标准化程度(VS)	数据接口标准化、兼容程度、复用程度等
	模型数据接口(VD)	静态和动态参数的输出和输入接口、接口的重配置功能
	整体性和协调性(VI)	在数据层面、连接层面、特征层面和决策层面等
	模型灵活性(VF)	可配置性和可重构能力
场景服务应用 (SSA)	场景多样性(SV)	展示、监测、控制、预测、辅助决策能力
	场景集成度(SI)	可兼容环境的集成度
	场景灵活性(SF)	人工或自动配置、调用和调优能力

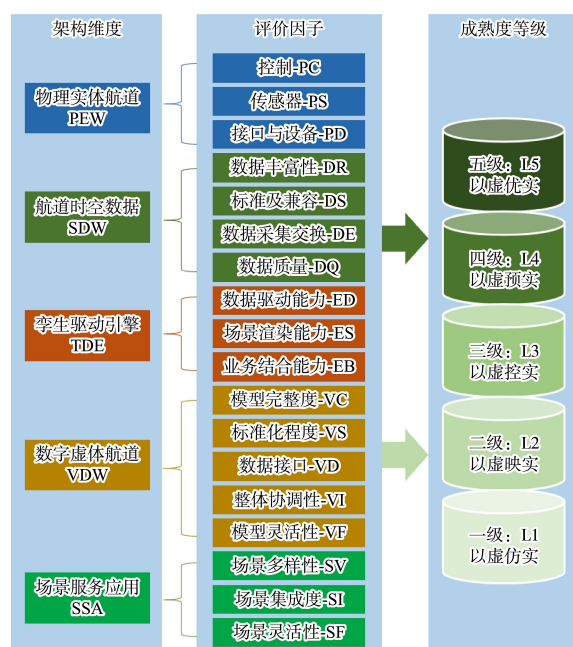


图3 数字孪生航道成熟度模型构成

5 应用案例

以某段数字孪生航道为例，分析数字孪生航道评价指标体系应用。该航段基于电子航道图数据、动态监测数据和三维模型实现数字孪生航道建设。主要实现了航道的三维可视化，并基于三维航道开展航道运行监测、养护管理、应急救援和助航服务等方面的内容^[24]。系统界面见图4。

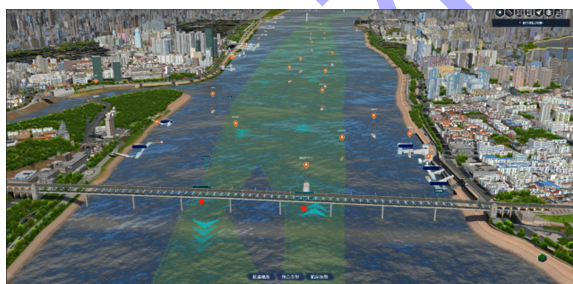


图4 长江某航段数字孪生航道建设界面

5.1 评价对象主要特征描述

基于本文提出的数字孪生航道五维架构模型，该数字孪生航道在物理实体航道方面，配有水位、气象、无人机、无人船、智能航标等多种传感器，可以实现多维动态数据的精准感知；在航道时空数据方面，具有地理空间数据、航道基础信息、

动态监测数据、业务管理数据，数据类型多样化，且大部分遵从了统一的行业相关标准；在孪生驱动引擎方面，基于三维地理信息系统(GIS)引擎研发，能支持大规模海量数据的并行渲染，具备航道地形、航道水体流场、航道水面环境高保真的实时渲染能力；在数字虚体航道方面，实现航道场景的水上、水下多视角的三维可视化，行为模型集成航道交通流量模型、航道岸线演变分析模型、水动力相互作用模型等；在场景服务应用方面，主要提供养护管理和助航信息服务，可实现航道运行监测、应急管理、航道养护管理，同时可为船舶提供伴随式助航信息服务。

5.2 评价方法

根据数字孪生航道成熟度等级要求，逐项确定数字孪生航道各维度下各评价因子的成熟度等级，单项评价因子所能支撑的数字孪生航道成熟度的最高等级，记为该项评价因子的得分，记为 X_i 。数字孪生航道维度得分依据各构成评价因子的加权值确定，具体见下式：

$$\begin{cases} S_n = \sum_{i=1}^m \lambda_i X_i \\ \sum_{i=1}^m \lambda_i = 1 \\ S_n \in \{PEW, SDW, TDE, VDW, SSA\} \end{cases} \quad (4)$$

式中， S_n 为第 n 个维度的综合评分； λ_i 为第 i 个评价因子的权重，可通过专家打分确定，同时所有权重之和为1。

各维度的得分确定后，可计算整个数字孪生航道的综合成熟度得分，具体见下式：

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^5 \gamma_i S_i \\ \sum_{i=1}^5 \gamma_i = 1 \\ S_i \in \{PEW, SDW, TDE, VDW, SSA\} \end{cases} \quad (5)$$

式中： L 为该数字孪生航道的综合成熟度分； S_i 为第 i 个维度的综合得分； γ_i 为第 i 个维度的权重，

可通过专家打分确定,同时所有权重之和为1。由 L 即可确定该数字孪生航道的成熟度等级。

5.3 成熟度评价结果与分析

根据上述数字孪生航道的特征分析,邀请行业内港航工程和智能化相关领域专家打分评价,并进行加权平均,各评价因子、模型维度和成熟度总得分见表2。

将各因子得分及模型维度得分通过雷达图展示,见图5。该数字孪生航道量化综合得分为3.37,根据图5左侧的梯级划分,得分处于3.0~4.0的L3等级,因此确定数字孪生航道成熟度等级为第3级,整体满足以虚控实的数字孪生航道要求,部分功能可满足以虚预实要求。从5个构成维度分析,孪生驱动引擎的得分最高,物理实体航道的得分最低,下一步应重点从得分较低的评价因子方面进行提升。

表2 数字孪生航道成熟度评价得分

评价因子	因子得分	模型维度	维度得分	总成熟度得分
PC	3.5	PEW	2.83	3.37
PS	2			
PD	3			
DR	3	SDW	3.50	
DS	4			
DE	3			
DQ	4			
ED	4.5	TDE	3.83	
ES	4			
EB	3			
VC	3	VDW	3.00	
VS	4			
VD	3			
VI	3			
VF	2			
SV	4	SSA	3.67	
SI	4			
SF	3			

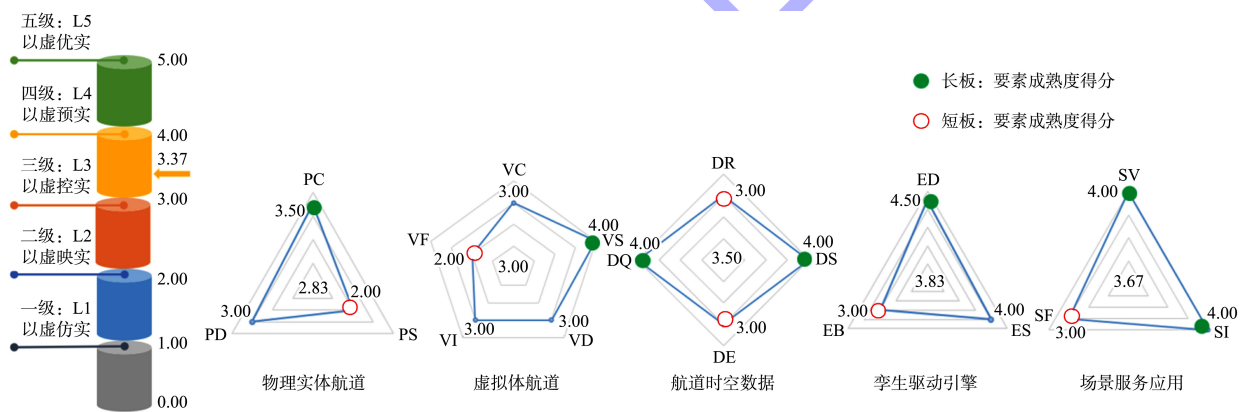


图5 数字孪生航道各维度得分雷达图及成熟度评价结果

6 结语

1) 数字孪生航道是智慧航道发展到一定阶段所呈现的高阶展现形式,是研究物理实体航道运行规律、优化航道决策分析,突破物理实体航道在时间、空间、成本等多方面限制条件的有效途径^[25]。

2) 本文构建数字孪生航道五维架构模型,研究提出了组成数字孪生航道的核心要素,即物理实体航道(PEW)、航道时空数据(SDW)、孪生驱动引擎(TDE)、数字虚体航道(VDW)和场景服务

应用(SSA)。

3) 本文划分了数字孪生航道技术成熟度等级,以数字空间对物理世界的影响和作用为技术特点,提出以“仿真(L1)、映射(L2)、控制(L3)、预测(L4)和优化(L5)”为特点的五级数字孪生航道成熟度等级。

4) 本文设计出数字孪生航道评价指标体系,基于五维数字孪生航道架构,细化18项评价因子,对应到五级成熟度模型,并阐述评价因子的具体解释。

5) 实践证明, 本文提出的相关模型和方法能有效支撑行业内数字孪生航道的建设和发展, 对加快制定行业相关标准规范具有重要促进作用。

参考文献:

- [1] TAO F, QI Q L. Make more digital twins [J]. *Nature*, 2019, 573: 490-491.
- [2] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. *航空学报*, 2020, 41(9): 6-17.
- [3] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2012-2029.
- [4] 王凌波, 王秋玲, 朱钊, 等. 桥梁健康监测技术研究现状及展望[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(12): 25-45.
- [5] 黄艳, 喻杉, 罗斌, 等. 面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J]. *水利学报*, 2022, 53(3): 253-269.
- [6] 王凯. 基于数字孪生的智慧海事监管系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
- [7] 严新平, 李晨, 刘佳仑, 等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21(5): 22-29, 76.
- [8] LAUBENBACHER R, SLUKA J P, GLAZIER J A. Using digital twins in viral infection [J]. *Science*, 2021, 371: 1105-1106.
- [9] 严新平, 贺亚鹏, 贺宜, 等. 水路交通技术发展趋势[J]. *交通运输工程学报*, 2022, 22(4): 1-9.
- [10] 赵建豪, 秦斌, 邬德宇. 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.
- [11] 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.
- [12] 李明伟, 安小刚, 潘士琦, 等. 基于数字孪生的船闸安全智慧管理方法[J]. *水运工程*, 2021(6): 212-217.
- [13] 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.
- [14] 杨阳, 张明进, 韩玉芳, 等. 内河航道设施智能化监测预警与信息服务关键技术研究[J]. *中国基础科学*, 2021, 23(1): 26-33.
- [15] 史旭初, 邓志鹏, 金钱菽. 基于数字孪生技术的内河集装箱港口信息协同系统设计[J]. *水运管理*, 2023, 45(5): 5-9.
- [16] ZHANG H, QI Q L, TAO F. A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor [J]. *Journal of manufacturing systems*, 2022, 62: 417-428.
- [17] 马瑞鑫, 李子龙, 陈静. 基于多源异构数据融合的船舶目标检测与跟踪技术研究[J]. *水道港口*, 2021, 42(3): 392-398.
- [18] MA R X, YIN Y, CHEN J, et al. Multi-modal information fusion for LiDAR-based 3D object detection framework[J]. *Multimedia tools and applications*, 2023, 83(6): 7995-8012.
- [19] 马瑞鑫, 赵鹏, 朱俊, 等. 乌江水上安全预测预警系统研发及应用[J]. *人民长江*, 2019, 50(5): 211-216.
- [20] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(5): 1267-1281.
- [21] 杨凯, 胡亚杰, 马瑞鑫. 我国智慧港口评价指标体系初步研究[J]. *水道港口*, 2017, 38(6): 647-652.
- [22] 罗本成, 胡筋, 王若蒂. 基于灰色熵变权的智慧港口等级评价方法[J]. *交通运输研究*, 2023, 9(1): 127-133, 142.
- [23] 郑仲, 李红亮. 基于 KPI 和 AHP 的国际港口智慧化评价[J]. *武汉理工大学学报(社会科学版)*, 2022, 35(1): 81-88.
- [24] MA R X, BAO K X, YIN Y. Improved ship object detection in low-illumination environments using RetinaMFANet [J]. *Journal of marine science and engineering*, 2022, 10(12): 1996-2011.
- [25] LIU J L, YAN X P, LIU C G, et al. Developments and applications of green and intelligent inland vessels in China[J]. *Journal of marine science and engineering*, 2023, 11(2): 318-329.

(本文编辑 王璁)