

全息航行场景图的概念、定义及关键技术研究

程小东, 黄亮, 蒋仲廉, 黄亚敏, 文元桥, 严新平

1. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063)

摘要:为提高船舶智能航行的水路交通系统认知能力,总结了与新一代航运系统适配的电子地图系统研究进展,提出了未来水路交通系统的地图技术需求和全息航行场景图的概念。将全息航行场景图作为“航行脑系统”的重要组成部分;解析了其的组成要素和特征内涵,重点阐述了其在通航环境信息对象化建模和机器认知表达方面的核心特征。从场景要素时空对象建模、全要素对象层次组织、全要素对象动态关联、场景自适应跨域计算、语义认知建模、场景图多维动态表达等方面探讨了全息航行场景图的关键技术,依托浙江省水网地区智能航运项目,阐述了全息航行场景图的应用实践与实际成效。结果表明:全息航行场景图可以有效汇聚、组织、关联和呈现水路交通数据,实现水路交通系统全要素及其相互关系的认知表达,为发展新一代航运系统的船舶智能航行技术和标准体系等提供重要技术支撑。

关键词:水路运输;全息航行场景图;认知建模;场景语义;智能船舶

中图分类号:U675.81 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.018

Research on the concept, definition and key technologies of Pan-information-based Navigation Scenario Map

CHENG Xiaodong, HUANG Liang, JIANG Zhonglian, HUANG Yamin, WEN Yuanqiao, YAN Xinping

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

Abstract: To enhance the cognitive capabilities of waterborne transportation systems for intelligent ship navigation, this study first reviews the development of electronic map systems designed for the new generation of shipping systems and summarizes the technical requirements for future map functionalities in waterborne transportation. Subsequently, the Pan-information-based Navigation Scenario Map (PNSM) is proposed as a core component of the "Navigation Brain System". The elements, characteristics, and conceptual foundations of the PNSM are analyzed, with emphasis placed on its capabilities in object-oriented modeling and computer-cognitive representation of navigational environment data. Key technologies underpinning the PNSM are further discussed, including spatiotemporal object modeling of scenario elements, hierarchical organization of all elements, dynamic association among objects, adaptive cross-domain computing for scenario data, cognitive modeling of scenario semantics, intelligent information services, and multi-dimensional dynamic visualization of the scenario map. The application process and practical effectiveness of the PNSM are illustrated using data from the Intelligent Shipping Project in the Water Network Areas of Zhejiang Province, China. Research results demonstrate that the PNSM can effectively integrate, organize, correlate, and visualize water traffic data, enabling comprehensive

收稿日期:2024-03-29

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2021C01010);国家自然科学基金项目(52001241)

作者简介:程小东(1992—),男,博士,研究方向为智能航海,E-mail: cxd921121@whut.edu.cn

通信作者:黄亮(1986—),男,副研究员,博士,从事智慧航道和海事大数据分析研究,E-mail: leung.huang@whut.edu.cn

引用格式:程小东,黄亮,蒋仲廉,等.全息航行场景图的概念、定义及关键技术研究[J].中国航海,2025,48(3):147-156.

CHENG X D, HUANG L, JIANG Z L. Research on the concept, definition and key technologies of Pan-information-based Navigation Scenario Map[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 147-156. (in Chinese)

cognitive representation of all elements within the waterborne transportation system and their interrelationships. It provides essential technical support for the advancement of next-generation shipping systems, including intelligent navigation technologies and standardized frameworks.

Key words: waterborne transportation; pan-information-based navigation scenario map; cognitive modeling; scenario semantics; intelligent ship

先进信息处理技术、控制技术、传感器技术、遥感技术^[1]等高新技术在水路交通领域的深入应用,促使船舶、港口、航道和客货等航运系统单元要素的数字化感知能力不断加强,发展绿色、智能、韧性的新一代航运系统成为水路交通发展的重大需求^[2]。水路交通要素的全息感知、融合贯通、自洽共享是新一代智能航运系统的重要特征之一,是船舶运行呈现“岸基驾控为主、船端值守为辅”新范式的基础条件^[3]。但现有电子航道图系统仍然采用分层分幅的方式组织、管理、表达和应用多源水路交通要素数据,全要素数据的关联共享与协同认知能力仍有待提高^[4]。面向与新一代航运系统适配的电子地图系统需求,国内外学者开展了广泛深入的探索研究,主要体现在地理数据模型、数字航道模型与标准、数字航道图系统研发等方面。

地理数据模型是连接现实与计算机世界的桥梁,为人类获取和发现地理知识发挥了重要作用^[5]。当前地理数据模型大多将地理空间抽象为连续的“场”或者离散的“对象”,由此派生出栅格和矢量两种数据模型^[6]。而现实很多事物同时具有“场”和“对象”的特征,单一的表达形式难以满足复杂分析的需求,同时为了体现动态变化特征,序列快照模型、时空立方体模型也相继被提出^[7]。针对传统地理信息系统的局限,华一新等^[8]提出采用多粒度时空对象模型描述现实世界的时空实体。为解决地理要素表达不连续和时空表达不统一的问题,闫国年等^[9]提出地理场景的概念,将场景作为地理信息综合表达的载体。全息位置地图^[10]等概念理论模型也在不断发展。

在数字航道模型与标准方面,内河电子航道图(Inland Electronic Navigation Chart, IENC)实现了通航场景及要素的抽象表达和集成显示。内河电子海图显示与信息标准等为内河电子航道图系统的应用程序操作、性能要求、测试方法和测试结果提供了统一的参考基础^[11]。在电子海图数据模型方面,国际海道测量组织制定的数字海道测量数据转换标准(简称“S-57”)将真实世界定义为特征物标和空间物标,描述了从理论数据模型到S57标准数据结构的转换机制。为提高电子海图系统数据表达的灵活性和易用性,国际海道测量组织进一步提出了通

用海洋测绘数据模型(简称“S-100”)。S-101电子海图标准对数据组织进行了明确规定,针对航海用途定义了新的要素分类与编码,并调整了要素属性和复杂结构以适应要素的变化。然而,S-100系列标准仍存在应用上的不足^[12]。

国内长江航道测量中心结合长江特点和相关国际标准,制定了多项内河电子航道图标准,如《内河电子航道图技术规范》(JTS 195-3—2019),该标准以物标形式展现水路交通要素,规定了电子航道图制作中允许使用的物标与属性,物标、属性及其关联关系则构成具体的地理数据模型,通常以树形结构进行描述,要素编码更加灵活,且易于拓展和更新。以上标准为水路交通系统数据的存储、管理、表达和应用提供了重要基础。

在数字航道图系统研发方面,近年来,多维电子航道图系统则成为我国内河基础设施数字化领域的重要发展方向。研究人员相继开发了基于倾斜摄影生成的三维模型和电子航道图瓦片数据的多维航道可视化平台^[13]、基于三维视频融合的内河航道数字孪生模型^[14]、融入实时数字航道流场信息的内河航段辅助航行^[15]、虚拟仿真测试平台^[16],实现了水路交通要素的全方位展示,例如航道三维可视化、水文信息实时检测与航行预警、船舶定位等功能。尽管航道要素感知和服务水平的能力不断提升,现有数字航道图仍然无法满足新一代航运系统在航道智能化方面的要求,主要包括水路交通要素全信息表达不充分、要素动态变化缺少表征、未能建立要素动态关联关系、船岸信息协同化程度低等。

综上,现有电子航道图系统在表征水路交通系统要素及其相互关系的信息丰富度、协同化程度等方面存在不足。一方面,在复杂通航条件的河段或繁忙水域,传统二维电子航道图在要素全信息内容、要素关系、要素空间表达等方面具有局限性;另一方面,电子航道图系统设计与应用的重点已从多维空间信息可视化转向以位置为核心的空间信息关联与智能服务,并追求全要素信息的全面、实时和精准表达。同时,地图学也朝着场景化^[9]、语义化^[17]、高精度化^[18]方向快速发展,以支撑地图多维动态表达和数据协同分析的应用需求,一些学者正在积极探索和研究水路交通领域语义地图^[19]。因此,亟须研发

面向内河新一代航运系统的新型助航系统,实时感知并关联航运系统的全要素信息,以高效的数据组织方法承载多维航行层次的相关信息^[20],对于水路交通安全、航道管理与维护、船舶智能导航等具有重要意义。

1 全息航行场景图系统需求分析

为适应新一代智能航运系统^[21]的发展需求,武汉理工大学严新平院士团队首次设计并提出了“航行脑系统”概念^[22],详细阐述了航行脑系统在感知、认知和决策执行三个功能空间的工作原理,支撑船舶智能航行。其中感知空间是获取船舶自身状态和航行环境的感知信息并进行处理,认知空间则根据感知信息抽象出航行场景。船舶辅助驾驶、远程驾控、自主航行等一系列的高度智能化航行需要实时、丰富和高精度的感知信息以及人的认知与逻辑分析

能力。全息航行场景图作为水路交通信息认知的载体,其系统需求在于数据驱动的多尺度对象建模,功能驱动的多模态场景认知,场景驱动的多粒度行为认知,服务驱动的多维度场景表达。其中多尺度对象建模解决水路交通要素全信息的统一认知描述问题,多粒度行为认知和多模态场景认知解决水路交通系统要素状态、行为及其相互关系的动态表征问题,多维度场景表达则解决远程驾驶、辅助驾驶、自动驾驶等不同模式下的场景信息表达问题。

2 全息航行场景图的概念

2.1 全息航行场景图的概念与内涵

全息航行场景图是一种可以承载时间、地点、对象、事件等水路交通要素,实现水路交通要素相互关系、相互作用以及演化过程结构化表达的信息系统。概念示意如图1所示。

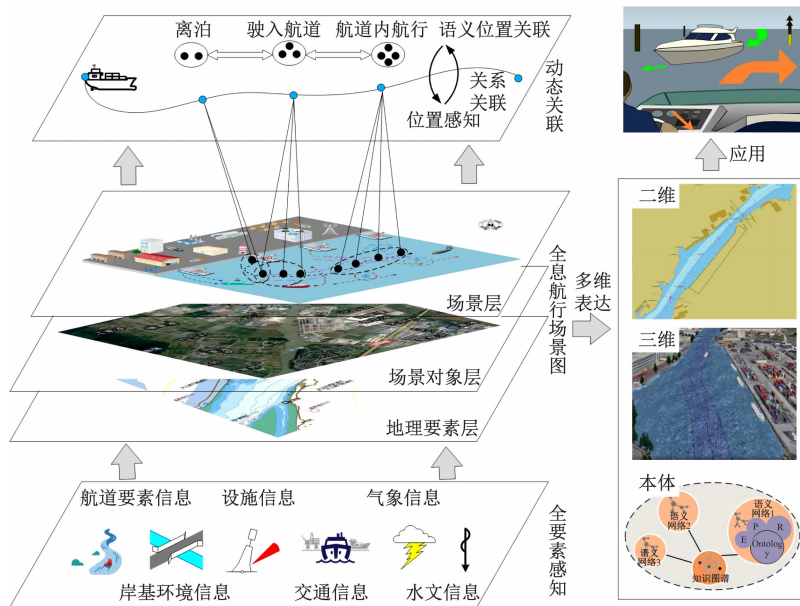


图1 全息航行场景图概念示意

Fig.1 Conceptual diagram of PNSM

“全息”源于地理中泛在信息的全方位表达,在水路交通中,包含四层含义:1)全要素,指以位置为纽带,通过陆海空天立体感知体系^[23]获取的水路交通系统全部要素信息,包括自然环境、交通流、基础设施以及岸基场景等,能够直接或间接地与空间位置相关联;2)全过程,指采用时空对象模型描述水路交通要素,能够准确地记录水路交通对象的全生命周期,也可以描述水路交通行为从发生到结束的完整时空过程;3)全粒度,指能够实现从微观活动到宏观状态所有粒度的水路交通行为认知。4)全尺度,指以时空对象模型为基础,结合场景对象多过程聚合的多层次事件,能完备地表达出不同时空尺

度、不同维度的水路交通系统信息。

航行场景则是一定时空范围内各种水路交通要素(包括自然环境、通航基础设施、船舶、船上人员等)相互联系、相互作用所构成的具有特定结构和功能的水域综合体。航行场景不仅可以承载时间、地点、对象、事件等要素,还可以反映水路交通对象与事件的空间分异、演化过程和相互作用关系。

在水路交通全要素表征的基础上,定义场景-场景对象-通航要素之间的多尺度层级耦合与嵌套关系,即:1)地理要素层提供各类通航要素的实体信息及其时空分布;2)场景对象层是在统一时空框架下,融合通航要素的“实体”“属性”“关系”“功能”

等信息形成场景对象;3)场景层是各种场景对象相互联系、相互作用所构成的综合体,例如船舶、桥梁、水体、航道等构成的过桥航行场景。

2.2 全息航行场景图的核心特征

与现有电子航道图相比,全息航行场景图在多个维度具有显著差异,如表1所示。

表1 全息航行场景图与电子航道图的对比
Tab.1 Comparison between PNSM and IENC

项目	电子航道图	全息航行场景图
面向对象	航运从业人员(人)	船舶(机器)和航运从业人员(人)
数据类型	地理空间信息	位置叠加的通航要素对象全信息
数据实时性	以静态信息为主,更新慢	以动态信息为主,实时或近实时更新
空间认知	将地理对象以空间坐标形式进行叠加融合	揭示各种水路交通要素对象及其相互关联关系
维度	二维	多维
组织方式	以地理坐标形式组织	通过语义位置模型关联信息
适应性	需人为操作实现助航服务等功能	自适应满足对象需求,面向航行任务提供对象所需信息

全息航行场景图的核心特征之一是实现通航要素的对象化表达,从图层化的要素数据组织转变为对象化的时空数据组织。传统数字航道图以及多维航道模型均采用矢量、栅格等数据模型实现通航要素的数字化表达,并建立通航要素空间特征数据和属性特征数据的关联。全息航行场景图采用时空实体对象建模方法,构建水路交通要素的对象化描述模型,能够系统全面地描述水路交通要素全信息内容,还能直接体现要素随时间的变化以及要素之间的关联关系。

另一核心特征是实现水路交通要素信息的机器认知表达。现有数字航道图主要面向人类认知,侧

重基于地图的符号化表示。面向未来水路交通系统的机器认知需求,全息航行场景图综合本体建模、知识图谱等理论描述水路交通要素及其相互关系,构建环境-规则-行为一体化的场景语义模型,定义场景对象属性和行为演化的逻辑推理规则库及其知识推理方法,形成水路交通场景知识图谱,从而实现水路交通系统的机器认知表达。

3 全息航行场景图关键技术

本文探讨了场景全要素对象建模、对象组织、对象动态关联、语义建模、场景跨域计算、场景图多维动态表达与智能服务等关键技术,如图2所示。

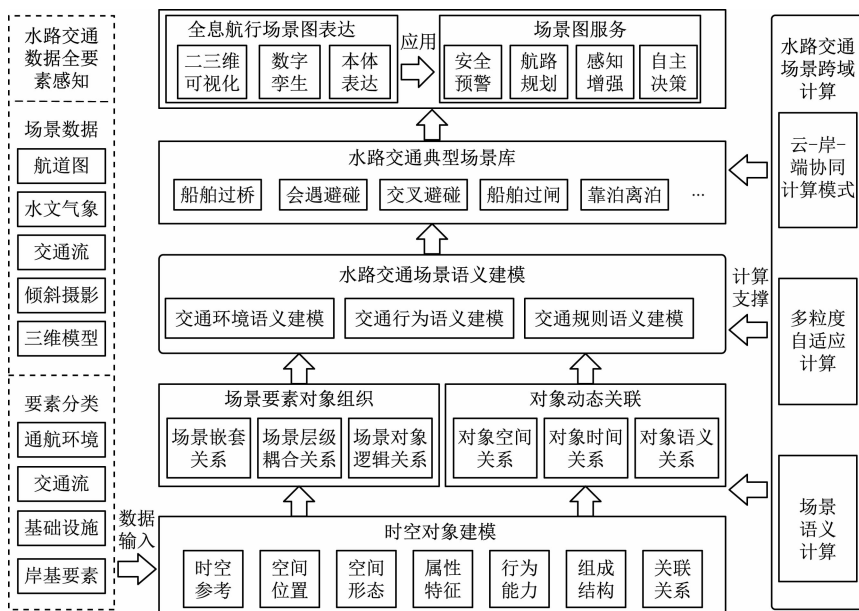


图2 全息航行场景图关键技术内容

Fig.2 Key technical content of PNSM

3.1 场景要素时空对象建模

1) 全要素时空对象化建模

多粒度时空对象模型^[24]是一种基于面向对象的数据模型。水路交通场景及组成要素的对象化描述模型重点解决场景及要素在计算机信息空间中的具象描述问题。区别于传统水路交通要素“几何-位置-属性”特征的简单表征,采用多粒度时空对象建模思想,从时空参考、空间位置、空间形态、基本信息、属性特征、行为能力、组成结构、关联关系等八个方面构建水路交通要素的多粒度时空对象描述模型。

通过对通航要素的多粒度时空对象化描述,实现全要素的时空特征、属性特征与关系特征的全方位表达。对象化建模的方式可在对象发生变化后以对象版本的形式进行存储,数据更新时只需要进行局部更新,减少了数据冗余;同时关联关系作为特征项存储在对象中,在对象更新进行关系维护时,无需额外的数据整理和空间分析,从而提高数据的动态更新效率。考虑拓扑和度量混合的环境表征、利用多源数据融合创建高精度航道图,船舶进行定位与导航时从环境感知数据中提取场景要素,与高精度航道图匹配,实现对象信息的高精度表征。

2) 全要素时空对象分类编码

从满足全方位、多层次、多粒度的要素信息感知需求出发,亟须研究全息航行场景图要素分类方法,构建简洁、可解析、易扩展的场景图要素编码体系。

全息航行场景图要素主要包括:通航环境要素、岸基场景要素、基础设施要素、交通流要素等。全要素统一编码规则参考《内河电子航道图技术规范》

《江苏省内间航道电子航道图要素分类与编码》《基础地理信息要素分类与代码》《地理信息分类与编码规则》等规范,将要素分为大类、中类、小类和要素名称,以6位数字码加要素名称拼音首字母缩写作为编码号,其中大类、中类、小类各2位数字码,按照要素的从属关系顺序编码。

3.2 全要素对象层次组织

在不同的时空尺度下对同一水路交通系统存在不同的认知,使得水路交通场景具有多尺度的结构特征。基于水路交通场景及组成要素的多粒度时空对象表征,从尺度变化、边界特征、嵌套耦合模式等方面构建水路交通场景的多尺度层次认知模型,定义场景-要素-事件之间的多尺度层级耦合与嵌套关系。场景不仅作为组织和管理实体、事件等交通要素的容器,还可以集成其他场景,即场景与场景之间存在父子包含关系。可以采用空间9交模型计算不同场景之间的空间拓扑关系,依据不同场景的边界特征确定场景之间的嵌套关系(包含/被包含关系)和耦合关系(相接、相交),形成水路交通场景的层次结构。

实体与事件是水路交通场景的主要组成要素,如图3所示。针对具有精确边界特征的水路交通实体或事件,采用空间拓扑模型计算场景与实体、事件之间的嵌套关系;依据最小粒度描述规则构建水路交通实体或事件的分配模型,使最终分配的水路交通场景对象不具有同样能够包含待分配要素的子场景对象;针对不具有精确边界特征的水路交通实体或事件,则通过属性与语义分析等方法进行人工干预确定。

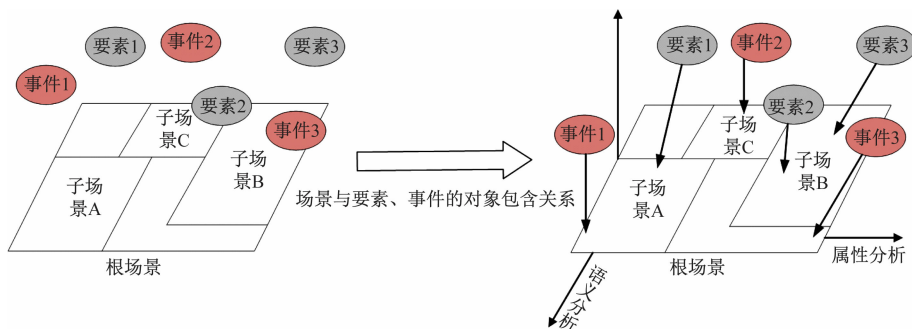


图3 场景与实体要素、事件要素之间的嵌套包含关系

Fig. 3 Nested inclusion relationship between scenario and entity, and event

完成水路交通场景的组成要素及结构模型后,需进一步构建描述场景要素对象之间复杂的相互关系。采用类模板技术构建水路交通场景及场景要素的对象类,如图4所示。

3.3 全要素对象动态关联

全息航行场景图采用基于语义位置的要素动态关联方法。在时空框架下,基于语义位置模型(地名、坐标等)表征场景要素的空间位置,融合几何对

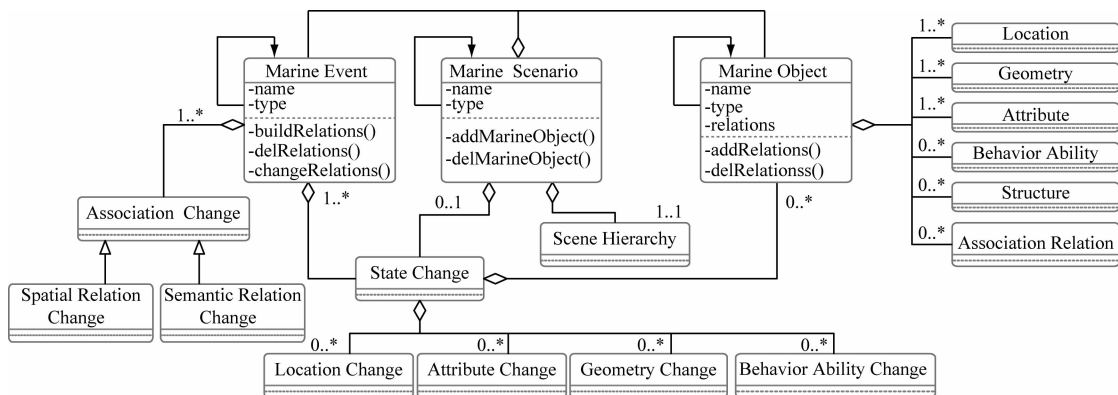


图4 水路交通场景不同对象关系的逻辑结构

Fig. 4 Logical structure of different object relationships in waterborne traffic scenarios

象模型(点、线、面、体等)表征场景要素在不同尺度下的空间形态特征,通过逻辑结构模型表征复杂场景要素的不同组成部分,并从空间关系、时间关系、语义关系等方面表征场景要素之间的关联关系。

空间关系上,拓扑关系用于计算对象与对象、对象与环境之间的拓扑关联。方位关系用于计算对象之间以及对象与环境之间的方位关系。距离关系用于描述对象之间的距离。时间关系是包含时间点关系和时间段关系。根据对象因时间特征产生的关联关系,包括早于、晚于、介于、开始于、结束于等。语义关系较为复杂,包含属性关系、认知关系等。属性关系用于描述对象属性特征之间的关联关系,如航道水位与桥梁净空高度存在此消彼长的函数关系、水深点和航标等对象共同组成航道这一独立对象形成映射关系。此外还存在逻辑认知上的语义关系,如两船在会遇过程中进行VHF协商产生通信关系;两船在过驳区共同完成过驳作业构成协同关系。

3.4 场景数据自适应跨域计算

为适应场景认知、交互认知、认知控制过程中任务的规划与调度,需要构建一种新型的水路交通数据计算体系。当前已有学者提出面向内河远程控制船舶的协调计算架构和模型,能有效降低远程控制端负载并降低时延。

基于认知的资源管理与数据处理,设计一种船载边缘计算、岸基区域雾计算、全局云计算为基础的“云-岸-端”协同计算架构。其中,云端为场景图的数据服务中心,重点针对时间非敏感性计算,侧重解决跨域的大范围内全局信息交互、任务管理与优化,并负责协调全局计算资源。岸基为区域性的场景图服务节点,侧重于短周期、多源异构数据处理的计算。船端作为场景图的基础采集与处理节点,以船舶为单元实现计算资源的管理与调度、本船任务管理与执行。

为满足不同自动化程度的船舶在不同场景下的航行需求,场景图需要智能提取与航行相关的对象及其属性等相关信息,然后自动进行不同粒度的计算,如图5所示。根据船舶航行中的实际任务分解为实时高频类、非实时高频、实时低频类、非实时低频类四类。实时高频类任务常见为船舶的实时控制指令,如车、舵等指令信息。非实时高频类任务常见为语音交互,其数据包数目较多,对信息的完整度要求较高。实时低频类任务常见为视频请求,地图导航等,一般为流式数据。非实时低频类任务常见为船舶状态信息上报,气象信息上报等,任务特点为对信息的完整性和准确率较高。采用模式识别与匹配方法对船舶航行中的航行场景和计算任务进行预测和实时匹配,然后根据识别和匹配的结果选择相对应的资源调度方法。

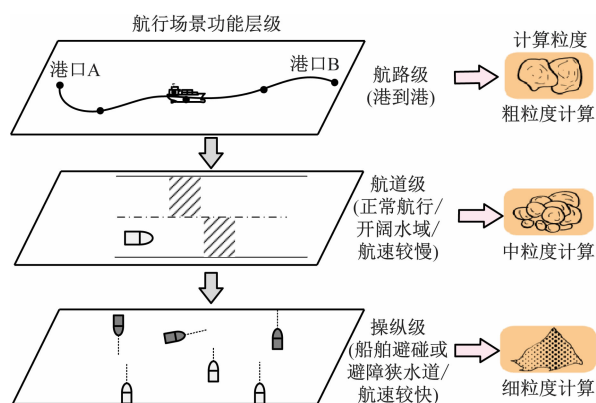


图5 不同功能层级的航行场景的自适应计算

Fig. 5 Adaptive computing of navigation scenarios at different functional levels

3.5 场景语义认知建模

通过分析水路交通场景中要素属性及其相互间关联性,建立环境-规则-行为的水路交通场景知识图谱,如图6所示。

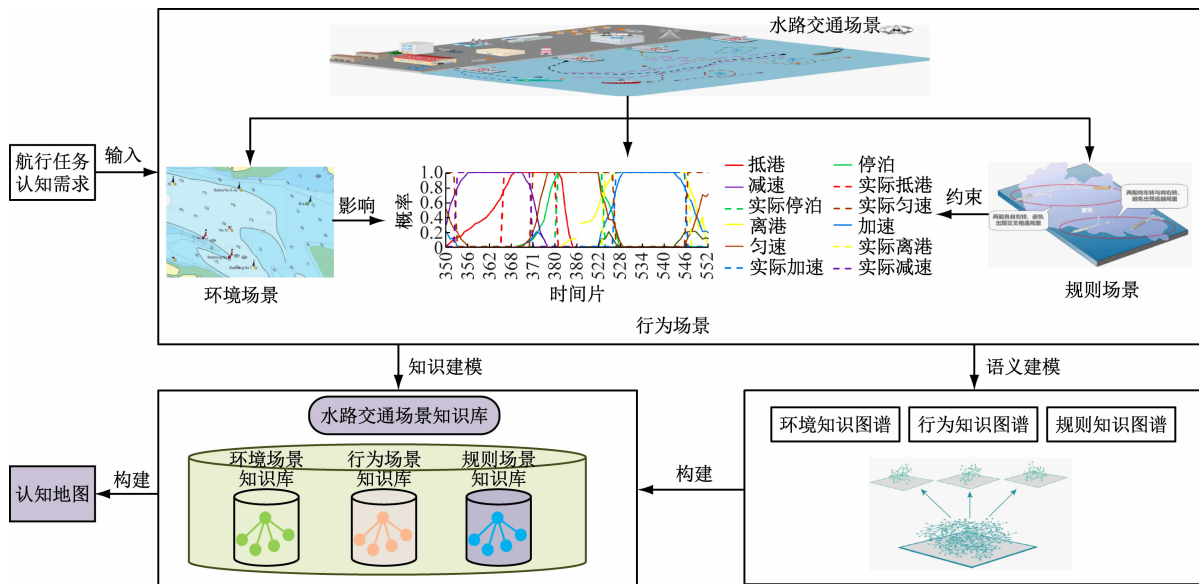


图6 水路交通场景的认知过程

Fig. 6 Cognitive process of waterborne traffic scenarios

1) 交通环境的语义建模

采用本体建模的思路,构建语义空间下的水路交通环境场景模型。水路交通环境场景语义模型包含语义建模和语义提取。语义建模是将交通环境的语义信息结构化处理后作为知识源存入本体知识库。语义提取则考虑到环境场景类别和环境要素的相关性(例如港口水域-泊位),通过对场景类别的识别可使船舶在执行航行任务时有效缩小搜索范围。基于深度学习算法识别出环境场景类别;将提取的语义描述以自然语言的形式表达后,采用基于本体的语义解析器来解析出环境语义中的实例和属性,最后将环境场景类别、实例和属性与环境场景本体知识库相对应。

在执行航行任务时,船舶以任务为导向,采用自动重传请求(Automatic Repeat-reQuest, ARQ)查询引擎,以三元组匹配的方法检索本体知识库中的所需环境语义信息。

2) 交通规则语义建模

基于知识图谱中的本体建模方法,抽取水路交通规则中的要素,抽象为交通对象、对象行为、对象与对象或行为之间的关系及前三者具备的属性,并进行语义提取、语义关联,构建每一规则所描述水路交通场景的语义模型。

最后,对每一水路交通规则场景中具有指定行为与属性的船舶对象进行避碰角色辨识,并基于本体的推理与查询机制,对每一船舶应执行的操作进行语义推理与语义查询,形成特定场景下具有特定行为与属性的规则知识库模型。

3) 交通行为的语义建模

首先,基于船舶对象的活动数据构建其运动状态向量,建立水上交通对象的元行为模型来描述表征对象运动状态的行为语义单元。

其次,将船舶活动轨迹和水域环境视为空间几何对象,根据维数扩展9交模型(DE-9IM)对对象活动轨迹与环境之间形成的拓扑关系进行建模,同时考虑运动方向,实现对对象行为的拓扑语义丰富。例如船舶轨迹与锚地边界相交,且船舶在锚地外变为在锚地内,其拓扑语义为船舶进入锚地。结合对象行为的轨迹特征与拓扑关系,构建水路交通对象的交通行为模型,对水路交通对象的元行为进行完备语义空间的描述与表达。

最后,对水路交通对象的行为从时间、空间、语义等维度进行不同尺度的分析,划分为活动(微观行为)、过程(介观行为)、事件(宏观行为)。

3.6 全息航行场景图的多维动态表达

场景表达^[25]可以因用户不同而呈现出不同的视图,表达方式包括二维电子航道图、三维模型以及多模态信息展示、信息融合后的集中展示^[26]、数字孪生^[27]等多种表达形式。

1) 面向驾驶人员的表达

场景的二维表达主要以平面二维图层的方式构建场景底图,实时加载场景对象,以点、线、面表达对象的属性特征,以关系符号表达对象间的关联关系。场景的三维表达主要以三维图层的方式对真实航行场景建模,基于岸基传感器实时生成场景对象孪生体模型。基于三维场景加载场景对象,实时渲染场

景水文气象等泛在数据的多维度动态演变,自适应提取场景多源异构数据,基于导航或监管需求动态关联场景对象,构建多层次的航行场景。

面向远程驾驶的人机共融交互式表达需求,将全息航行场景图作为现实世界的数字孪生体。根据船端与岸端数据对数字孪生体进行更新,对船舶操纵进行数字模拟,判断航行安全态势。船舶航行中,岸端远程控制中心在船舶数字孪生体中输入虚拟船舶操纵信号,模拟船舶运动轨迹与船舶周围环境变化情况,并将模拟的结果反馈给远程驾控人员。若在此操作指令下,船舶航行是安全的,则执行该操作指令,否则拒绝执行指令,从而实现场景图系统与现实世界的信息交互。

2) 面向机器的表达

面向未来自主航行对于水路交通场景的机器认知,需对场景进行形式化表达,利用本体建模、描述逻辑等理论方法描述水路交通对象与行为。参考本体建模语言 OWL 的基本元素,将时空本体和模糊本体相关理论引入传统本体模型中,在本体基本结构基础上设计时空状态、属性和关系等方面的顶层本体结构,包括基于时空状态描述的概念顶层本体、基于模糊属性扩展的属性顶层本体、基于关系强度的关系顶层本体,共同形成面向水路交通场景领域的本体表达。在本体建模基础上,采用基于描述逻辑和 SWRL 的推理方法进行场景认知计算与知识推理,定义对象属性和关系演化的逻辑推理规则库,从而形成水路交通场景知识图谱。

3.7 全息航行场景图的智能服务

1) 安全预警

构建水路交通安全预警功能场景体系,包括船舶触碰预警、障碍物预警、搁浅预警、船舶碰撞预警等等。具体包含功能描述、主要场景、实现原理、通信方式、基础性能需求和数据交互需求,场景图系统根据船舶语义位置以及行为识别出功能场景后,提取与场景相关的对象数据,采用相应的通信方式进行船岸交互或船船交互,从而实现安全预警功能。

2) 分道级航路规划

全息航行场景图包含精细化的环境信息和丰富的交通语义信息,比如高精度航道位置和水深、航道中各分道的拓扑关系、推荐航行方向以及各交通要素的层次和关联关系等。可通过识别、抽取通航环境语义信息,判断约束条件,从而给出最优路径。实际应用中,首先通过场景图系统的航道图等静态信息提供环境先验知识,对船舶航路进行初步全局规划。由于实际航行过程中通航环境复杂多变,还需

要融合毫米波雷达、摄像头、AIS 以及风速风向仪、流速流向仪等采集的动态数据,更新与航行场景相关的自然环境、交通条件等动态信息进行局部路径规划。

3) 感知增强

船舶受其他船舶遮挡、在弯曲航道受临河建筑物/绿化遮挡、在桥区受跨河桥梁遮挡以及能见度不良情形下,需要场景图提供感知增强服务,服务方式包括主动式与请求式。主动式服务指船舶航经弯道、桥区、交汇水域时,岸基向船舶自动推送附近水域的全局交通动态信息;能见度不良时,岸基自动将超出本船视距一定范围外的交通信息推送给本船;一旦产生安全预警,立即提示感知增强信息。请求式服务指本船视线受到遮蔽,如本船认为被遮蔽区域交通信息对本船航行安全有影响时,向岸基发送请求,岸基将被遮蔽区域的实时交通信息推送给本船。

4) 自主航行决策

首先,从预处理后的航行信息中提取非量化的知识要素,利用知识图谱对知识进行深度预处理,创建场景知识图谱。然后,模拟人脑中短时记忆、工作记忆与长时记忆信息处理方式,实现对感知知识的理解、学习、推理以及存储记忆。最后,通过机器学习方法将语义知识表示为实值向量,表示计算机可理解的知识模型。无人驾驶船舶根据当前场景的学习分析,以任务需求为导向做出最后行动决策。

4 浙江水网地区内河全息航行场景图实践

基于浙江水网地区搭建了内河全息航行场景图系统,使用 Vue3 作为前端框架,依托 MineMap 平台,将倾斜摄影、岸基摄像头、毫米波雷达、水文气象感知设备、AIS 等手段采集的数据为基础,分析场景对象属性与特征;通过构建对象单体模型,对通航环境及岸基设施进行倾斜摄影,将场景在系统平台进行可视化展示,如图 7 所示。



图7 水路交通对象可视化展示

Fig. 7 Visualization display of waterborne traffic objects

在数据更新方面,对于岸基场景和航道地形数据本地存储、阶段性维护,动态目标(船舶)数据实时传输,建立航道信息数据共享平台。搭建航道地理信息数据库,并将历年来的水文、流量、测图、航标配布等资料与航道模型构件进行关联,构建数字航道系统和信息数据共享平台,实现查询或自动汇总任意时间点的数据情况,辅助形成在任意水位下的航道三维模型数据云集。

内河航行场景图系统分为数据管理、动态监测、船舶导航、信息发布四大模块。基于三维地球框架实现二、三维全息电子航道图全要素一体化展示,利用数据驱动船舶过桥、会遇、靠泊等专题场景的动态多维可视化表达等,如图8所示。

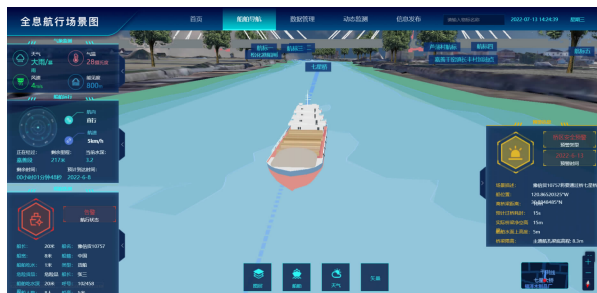


图8 船舶过桥预警场景

Fig.8 Scenario of ship crossing bridge

系统以对象作为基础单元,对对象属性与关系特征进行储存与管理,可以实现动态扩容和提高服务可用性,基于此可以方便对各类交通对象进行动态监测;在信息发布方面,系统主要实现了包括自然环境、通航环境、基础设施、交通安全预警、航运管理、视频监控和港航信息等内容的展示。航道信息数据管理如图9所示。

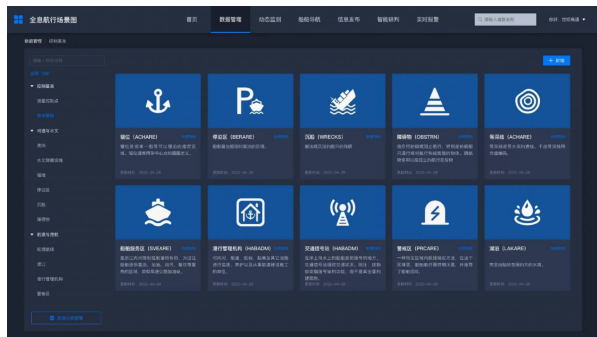


图9 场景图系统的数据管理

Fig.9 Data management of PNSM system

5 结束语

面向适配新一代航运系统的数字航道图系统重大需求,本文提出了全息航行场景图概念,系统论述了全息航行场景图的内涵及关键技术。全息航行场

景图是内河新一代航运系统的重要组成部分,提供了一种面向对象、可汇聚和关联水路交通场景全要素信息、自适应用户需求的智能服务综合平台。依托浙江省水网地区智能航运项目,阐述了全息航行场景图的实践与应用成效;本文研究成果将为全息航行场景图的应用和推广提供重要基础。

参 考 文 献

- [1] 林培斌,邵哲平,林盛泓. 基于改进 R~2CNN 的遥感图像船舶检测方法研究[J]. 中国航海,2023,46(2): 106-112.
LIN Y B, SHAO Z P, LIN S H. Ship detection in remote sensing image with improved R2CNN[J]. China Navigation, 2023, 46(2):106-112. (in Chinese)
- [2] 严新平,李晨,刘佳伦,等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021,21(5):22-29.
YAN X P, LI C, LIU J L, et al. Research on system architecture and key technologies of the new generation shipping system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 22-29. (in Chinese)
- [3] 严新平,韩亚,吴兵,等. 水路交通系统的发展现状与未来展望[J]. 中国航海,2024,47(2):145-152.
YAN X P, HAN Y, WU B, et al. Current development and future prospects of waterborne transportation systems [J]. China Navigation, 2024, 47(2): 145-152. (in Chinese)
- [4] 万辉,吴龙乐,俞毅,等. 智能航保体系构架与关键技术研究[J]. 中国航海,2024,47(1):45-51.
WAN H, WU L L, YU Y, et al. Research on the architecture and key technologies of intelligent navigation service[J]. China Navigation, 2024, 47(1):45-51. (in Chinese)
- [5] 王迪,钱海忠,赵钰哲. 综述与展望:地理空间数据的管理、多尺度变换与表达[J]. 地球信息科学学报, 2022,24(12):2265-2281.
WANG D, QIAN H Z, ZHAO Y Z. Review and prospect: Management, multi-scale transformation, and representation of geospatial data [J]. Journal of Geoinformation Science, 2022, 24(12): 2265-2281. (in Chinese)
- [6] HE Y F, SHENG Y H, HOFER B, et al. Processes and events in the centre: a dynamic data model for representing spatial change[J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1): 276-295.
- [7] 黄毅. 地理场景数据模型构建与本体表达[D]. 南京师范大学, 2020.
HUANG Y. Construction and ontological expression of

- geographic scenario data models [D]. Nanjing Normal University, 2020. (in Chinese)
- [8] 华一新,周成虎. 面向全空间信息系统的多粒度时空对象数据模型描述框架[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(9): 1142-1149.
HUA Y X, ZHOU C H. Framework for multi-granularity spatiotemporal object data model description oriented to an all-space information system [J]. Journal of Geoinformation Science, 2017, 19(9): 1142-1149. (in Chinese)
- [9] 闫国年,俞肇元,袁林旺,等. 地图学的未来是场景学吗? [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(1): 1-6.
LV G N, YU Z Y, YUAN L W, et al. Is the future of cartography scenography? [J]. Journal of Geoinformation Science, 2018, 20(1): 1-6. (in Chinese)
- [10] 余卓渊,闫国年,张夕宁,等. 全息高精度导航地图: 概念及理论模型[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 760-771.
YU Z X, LV G N, ZHANG X N, et al. Holographic high-precision navigation maps: Concept and theoretical model[J]. Journal of Geoinformation Science, 2020, 22(4): 760-771. (in Chinese)
- [11] 罗睿,李晓雨. 电子航道图标准建设与应用[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(1): 56-58.
LUO R, LI X Y. Construction and application of electronic navigational chart standards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(1): 56-58. (in Chinese)
- [12] 陈长林,周成虎,杨管妍,等. 电子海图开放式图示表达模型及其构建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 325-330.
CHEN C L, ZHOU C H, YANG G Y, et al. An open representation model for electronic maritime charts and its construction method [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(3): 325-330. (in Chinese)
- [13] 刘欣然. 基于 Cesium 的多维航道空间信息可视化研究[D]. 大连海事大学, 2020.
LIU X R. Research on multidimensional waterway spatial information visualization based on Cesium [D]. Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 谭昆,郭涛,宋成果,等. 基于船舶-流场耦合作用的内河航段船舶航行虚拟辅助驾引[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(2): 71-80.
TAN K, GUO T, SONG C G, et al. Virtual assistant navigation for vessels based on ship-flow field interaction in inland waterway sections [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(2): 71-80. (in Chinese)
- [16] 韩成浩,马吉林,刘佳仑,等. 基于虚拟仿真测试平台的船舶智能航行系统设计及应用[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 148-154.
HAN C H, MA J L, LIU J L, et al. Virtual test platform in design and application of intelligent navigation system [J]. China Navigation, 2023, 46(1): 148-154.
- [17] 齐清文,姜莉莉,张岸,等. 全息地图建模与多重表达[J]. 测绘科学, 2018, 43(7): 7-14.
QI Q W, JIANG L L, ZHANG A, et al. Holographic map modeling and multiple expressions [J]. Geomatics Science, 2018, 43(7): 7-14. (in Chinese)
- [18] 杜清运,况路路,任福,等. 自动驾驶高精度地图特征分析及发展展望[J]. 地球信息科学学报, 2024, 26(1): 15-24.
DU Q Y, KUANG L L, REN F, et al. Feature analysis and development prospects of high-precision maps for autonomous driving [J]. Journal of Geoinformation Science, 2024, 26(1): 15-24. (in Chinese)
- [19] VAN BAELEN S, PEETERS G, BRUYNINCKX H, et al. Dynamic semantic world models and increased situational awareness for highly automated inland waterway transport [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2022, 8: 739062.
- [20] 郝江凌,单雄飞,赵丽宁,等. 电子海图导航系统的研究进展与未来趋势[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(3): 1-7.
HAO J L, SHAN X F, ZHAO L N, et al. Research progress and future trends of electronic maritime chart navigation systems [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(3): 1-7. (in Chinese)
- [21] 马勇,王雯琦,严新平. 面向新一代航运系统的船舶智能航行技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(11): 1795-1806.
MA Y, WANG W Q, YAN X P. Research progress in intelligent navigation technology for ships aimed at the new generation shipping system [J]. Scientia Sinica Technologica, 2023, 53(11): 1795-1806. (in Chinese)
- [22] 严新平,吴超,马枫. 面向智能航行的货船“航行脑”概念设计[J]. 中国航海, 2017, 40(4): 95-98.
YAN X P, WU C, MA F. Concept design of a "navigation brain" for intelligent navigation of cargo ships [J]. China Navigation, 2017, 40(4): 95-98. (in Chinese)
- [23] 洛佳男,耿雄飞,文捷,李春旭. 我国内河智慧航道现状、问题与展望[J]. 水运工程, 2023, (2): 123-128.

- Engineering, 2020;1730946.
- [15] MAJEWSKI M, KACALAK W. Innovative intelligent interaction systems of loader cranes and their human operators [C] // Artificial Intelligence Trends in Intelligent Systems: Proceedings of the 6th Computer Science On-line Conference 2017 (CSOC2017). Springer International Publishing, 2017: 474-485.
- [16] XIAO H, JIE M, HU Z, et al. high-precision ship-loader-shore collaborative localization in bulk carrier cargo hold clearing scene[R]. 2024.
- [17] DUCHON F, BABINEC A, KAJAN M, et al. Path planning with modified A star algorithm for a mobile robot[J]. Procedia Engineering, 2014, 96:59-69.
- [18] XIAO H, MENG J, HU Z, et al. Robot-grabber cooperative localization under highly dynamic clearing operation of bulk carriers [C] //2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (VI). Piscataway: IEEE, 2024: 900-905.

(上接第 156 页)

- LUO J N, GENG X F, WEN J, LI C X. Current status, issues, and prospects of intelligent waterways in China's inland waters [J]. Port and Waterway Engineering, 2023, (2): 123-128. (in Chinese)
- [24] 郭玮,谷宇航,江南.面向多粒度时空对象数据模型的网络电子地图生成方法[J].地球信息科学学报, 2022,24(7):1264-1274.
- GUO W, GU Y Y, JIANG N. A method for generating online electronic maps oriented to multi-granularity spatiotemporal object data models [J]. Journal of Geoinformation Science, 2022, 24(7): 1264-1274. (in Chinese)
- [25] 朱军,付林,李维炼,等.知识引导的滑坡灾害场景动态表达方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020, 45(8):1255-1262.
- ZHU J, FU L, LI W L, et al. Knowledge-guided dynamic expression methods for landslide disaster scenarios [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45 (8): 1255-1262. (in Chinese)
- [26] 张利国,丁雨淋,朱庆,等.铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,49(6):1018-1027.
- ZHANG L G, DING Y L, ZHU Q, et al. Integrated expression model of “Ontology Domain-Change Domain-State Domain” associations for railway geographic geological data [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49 (6): 1018-1027. (in Chinese)
- [27] 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 virtual reality system-based digital twin framework for ships [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44 (5): 117-124. (in Chinese)

(上接第 175 页)

- [31] FOSSEN S, FOSSEN T I. Five-state extended Kalman filter for estimation of speed over ground (SOG), course over ground (COG) and course rate of unmanned surface vehicles (USVs): experimental results [J]. Sensors, 2021, 21(23):7910.
- [32] SINGER R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, AES-6(4):473-483.
- [33] BROWN R G, HWANG P Y C. Introduction to random signals and applied Kalman filtering [M]. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2012.