

内河新一代航运系统规划方法构建与应用

刘清^{1,2*}, 欧阳旭辉², 严新平^{1,2,3,4}, 张雷⁵, 宋荣鑫^{1,3}, 刘佳仑^{1,3,4}, 张军⁵

(1. 水路交通控制全国重点实验室, 武汉 430063; 2. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 武汉 430063; 3. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430070; 4. 湖北东湖实验室, 武汉 420202; 5. 济宁港航发展集团有限公司, 山东济宁 272073)

摘要: 内河水域航区通航条件差异明显, 船港装备、通航设施、运输组织难以统一, 释放内河航运的区位优势与经济潜能亟需推进以绿色智能为特征的新一代航运系统建设; 研究面向新一代航运系统的规划工具, 可为支持内河不同水域绿色智能转型的“一域一方案”提供方法论。本文在梳理新一代航运系统基本理论体系的基础上, 融合系统工程方法论、开放式系统架构理念, 提出了分层递进、功能闭环的新一代航运系统规划方法 (NEW-WTSMM); 从内容及步骤、模型、评估方法等维度阐述了NEW-WTSMM构建思路, 特别是将规划模型细分为场景分类、功能配置、元素实现、执行过程4个层级, 覆盖从顶层设计到工程落地的全流程。以京杭运河(济宁段)为应用对象, 形成了“龙拱港-梁山港”的港-港联动航线新一代航运系统规划方案, 构建了包括顶层目标设定、子系统功能域设计、元素逻辑构成、单元运行机制在内的完整技术路径。案例结果表明, NEW-WTSMM能够支撑复杂内河水域条件下新一代航运系统的技术集成, 具有工程可操作性并适应新一代航运系统的商用化推广。

关键词: 内河航运; 新一代航运系统; 系统工程; 开放架构; 规划方法

中图分类号: U692 **文献标识码:** A

Construction and Application of Planning Methodology for New Generation of Inland Waterborne Transportation System

Liu Qing^{1,2*}, Ouyang Xuhui², Yan Xinping^{1,2,3,4}, Zhang Lei⁵,
Song Rongxin^{1,3}, Liu Jialun^{1,3,4}, Zhang Jun⁵

(1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan 430063, China; 2. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430070, China; 4. East Lake Laboratory, Wuhan, 420202, China; 5. Jining Port and Shipping Development Group Co., Ltd., Jining 272073, Shandong, China)

Abstract: Navigational conditions vary significantly across different inland waterway areas, making it difficult to standardize port equipment, navigation facilities, and transport organization. Therefore, unlocking the locational advantages and economic potentials of inland waterway transportation necessitates a new generation of waterborne transportation system (NEW-WTS) characterized by

收稿日期: 2026-01-07; 修回日期: 2026-02-24

通讯作者: *刘清, 武汉理工大学交通与物流工程学院教授, 研究方向为交通运输规划与管理; E-mail: lqwhutjt@whut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新时期推动**航道高质量发展政策与策略研究”(2026-149-05); 云南省交通运输厅科技创新及示范项目(YNZC2024-G3-04393-YNZZ-0391)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

green and intelligent development. Moreover, research on planning tools for the NEW-WTS can provide a methodological basis for developing “one-region, one-scheme” solutions that support the green and intelligent transformation of diverse inland waterways. Based on a review of the fundamental theoretical system of the NEW-WTS, this study integrates the systems engineering methodology with the modular open systems approach (MOSA) and proposes a multilayer, progressively structured, and functionally closed-loop planning method for the NEW-WTS, namely the new generation of waterborne transportation system modular method (NEW-WTSMM). The construction logic of the NEW-WTSMM is elaborated from the perspectives of contents and procedures, models, and evaluation methods; in particular, the planning model is divided into four hierarchical layers: scenario classification, functional configuration, element implementation, and operational execution, covering the entire process from top-level design to engineering realization. Taking the Jining section of the Beijing–Hangzhou Grand Canal as the application object, this study develops a NEW-WTS planning scheme for the port-to-port collaborative route between Longgong Port and Liangshan Port, and establishes a complete technical pathway encompassing top-level objective setting, subsystem functional-domain design, element-level logical composition, and unit-level operational mechanisms. The case results indicate that the NEW-WTSMM can support the technological integration of the NEW-WTS under complex inland waterway conditions, demonstrating engineering operability and adaptability to the commercial promotion of the NEW-WTS.

Keywords: inland waterway transportation; new generation of waterborne transportation system; systems engineering; modular open systems approach; planning method

一、前言

内河航运是我国综合交通运输体系的重要组成部分，在保障能源与大宗物资运输、促进产业合理布局和区域经济协调发展方面具有重要作用^[1]。内河受到航道水文、河床地质、航线船型等条件的影响，干线、支流、封闭水域等航区的通航条件差异明显，船港装备、通航设施、运输组织难以统一，亟需推进以绿色智能为特征的新一代航运系统建设，以释放内河航运的区位优势与经济潜能。长期以来，内河航运业态未有根本性变革且在综合运输体系中发展滞后，主要原因是绿色智能升级的商业化和集约化引导机制缺失，行业整体现代化水平和市场内驱力不足。现有的内河船舶约有70%是2015年前建造的，船型谱系化、系列化程度较低；内河码头运作以人机操作为主，船港自动化作业占比很低；内河航运市场竞争激烈、运价长期低迷，导致行业亏损面在40%左右。为了扭转上述状况，近年来在内河航运行业的共同努力下，新能源船舶占比逐步提高，港口智能化建设加快推进，数字航道覆盖里程稳步增加，内河水运的绿色智能发展取得阶段性成效^[2-4]。

然而，内河航运系统绿色智能技术应用多是基于传统业态的单体技术升级，未能开展面向内河航运系统的全链条协同，加之人工智能（AI）技术可以提升内河航运各要素能力，但难以解决不同智能化要素协同的不确定性问题的，导致行业总体效率的提升明显低于单体技术效率提升之和。应强化内河航运科技创新，依托AI实现内河航运系统的全链

条协同，以充分释放内河航运“承东启西、沟通南北”的区位优势与经济潜能^[5]，更好契合《关于“人工智能+交通运输”的实施意见》（2025年）提出的战略目标。对应地，新一代航运系统强调通过高新技术对航运要素进行系统集成与协同创新^[6]，构建面向新一代航运系统新业态的前沿技术体系是推动内河航运高质量发展的重要路径。

近年来，国内外围绕新一代航运系统中的绿色智能技术持续开展研究，船舶自动驾驶、船舶碰撞避免、船舶绿色动力、船舶远程控制、岸基通信、数字生态航道、智慧港口、韧性运营服务等方向进展迅速^[6-11]；以船舶绿色智能改造、船岸通信建设、港航基础设施数字化转型、运营组织优化为重点，形成了一批具有代表性的实践成果^[12]。例如，挪威研发的智能集装箱船具备自动避障、自主“靠离泊”功能^[13]，日本企业开发的氢燃料动力船舶开始航运应用^[14-15]，比利时SEAFAR公司完成全航程远程驾驶试验^[16]，德国西门子集团发布了包含岸基解决方案在内的船舶管理系统集成平台并在汉堡港开展了第五代移动通信技术试点应用^[17]，新加坡港将港口物流信息平台融入了贸易及供应链网络^[4]，欧盟探索了在应急场景中利用自主机器人优化船舶的拖曳连接作业^[18]，鹿特丹港构建了港口物流链全程信息服务系统^[19]。在我国，自主航行试验船“智腾号”完成实地试航^[20]，武汉理工大学“航行脑”系统在“豫交投001号”开展了应用测试^[21]，大连陆海科技股份有限公司的船岸综合信息系统强化了从岸基对船舶进行监控与管理的能力，多个沿海港建设了融合AI的智能化集装箱码头^[22-23]，长江三峡枢

组建成了水域通航监管系统^[24], 平陆运河工程构建了面向全生命周期的数字孪生运河^[25-26], 宁波港应用了覆盖码头生产全过程的数字孪生系统^[4]。

也要注意, 尽管国内外在航运系统中的“船-港-货-航-管”要素层面开展了智能技术商用, 但是航运系统各类要素分属不同主体, 协同运作与要素融合进展缓慢, 导致航运系统的综合效能(低污染、低成本、规模运输)未能充分发挥^[27]; 绿色智能技术的工程应用缺乏要素集成与全链条优化, 不同水域及要素尚未建立统一的标准体系, 加之“信息孤岛”情况客观存在, 制约了前沿技术的应用推广^[28]。实践表明, 即使船、货、港等局部要素采用先进的智能技术, 也难以促成航运业态的根本性变革, 因而要素融合的新一代航运系统建设亟需行业规划引领。新一代航运系统是区别于传统航运系统的新型业态, 在规划论证和方案设计时动态跟踪航运前沿科技并与系统工程方法论相结合, 适应多要素协同、全链条优化、动态迭代等新发展特性; 提出兼顾新业态特征、水域特点的规划方法, 支撑不同水域“一域一方案”制定, 保持不同水域条件下技术方案的差异性并兼容不同航区的融合运营要求。

本文结合运用系统工程方法论、开放式系统架构(MOSA)理念^[29-30], 构建涵盖内河航运要素绿色智能功能的新一代航运系统规划方法(NEW-WTSM); 选取京杭运河(济宁段)新一代航运系统规划作为案例, 开展所提方法的工程可操作性

验证。作为面向内河航运实际、把握绿色智能等前沿技术的规划方法论, 可为我国内河新一代航运系统业态的形成提供理论依据与实践参考。

二、内河新一代航运系统规划需求

(一) 新一代航运系统的内涵与特征

新一代航运系统融合现代交通控制和数字化前沿技术, 促进航运系统“船-港-货”“人-机-环”要素融会贯通并自洽共享, 是在信息物理系统基础上构建的数字化创新技术体系^[6]; 将船舶、港口、航道、客货等分散的物理单元通过信息进行互联共享, 显著提升运输服务的绿色、安全、智能、便捷水平^[31]。新一代航运系统突出绿色智能船舶、数字生态设施、可靠岸基支持、韧性运营服务等主力模块的深度融合, 推动航运模式从传统的人工主导转向“岸端驾控为主、船端值守为辅”的新型运营模式。在智能管控的跃迁逻辑基础上, 航运体系由建设导向演进至运行效率与可持续发展导向^[32], 注重系统要素在智能化、绿色化基础上的韧性协同。

新一代航运系统(见图1)具有要素单元级、功能系统级、架构集成级3个层级。要素单元级是系统运行的物理载体, 包括推进装置、系泊单位、计算机与显示屏等基本物理模块。功能系统级支撑航运系统的整体运行, 在各子系统功能模块的耦合作用下形成完整的功能链条, 支持信息流、能量流、控制流的传递与协同。架构集成级定义标准接口、

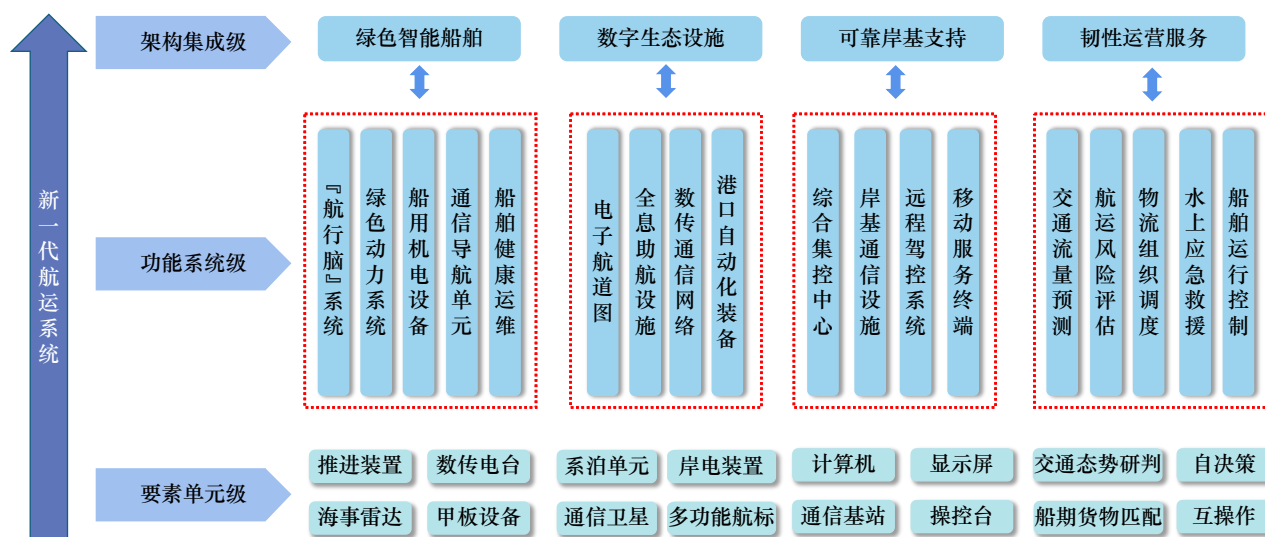


图1 新一代航运系统框架

数据模型、通信机制，确保系统各要素在统一架构下协同运行。在新一代航运系统框架下，绿色智能船舶聚焦清洁能源应用与自主航行能力提升^[33-34]；数字生态设施涵盖智慧港口、数字航道、通信基础设施建设，是支持港口自动化作业、航运要素信息互联与资源共享的关键环节^[35-36]；可靠岸基支持承担远程监控、指令调度、安全保障任务^[37]；韧性运营服务通过智能调度^[38]、应急响应、运行评估来增强系统的韧性与动态优化能力。整体上，新一代航运系统是融合各类航运要素后采取的前沿技术选择，也将各类航运要素在整体框架下（而非仅关注个体特性）进行方案设计，具有前瞻性、创新性、自主性、协同性。

（二）内河新一代航运系统规划的基本需求

新一代航运系统是新型业态，原有“供需规模出发”的规划思路不再适应绿色智能技术在系统设计、工程实施方面的需求^[39]。相应的规划方法论要求具有三方面特性：树立以内河航运系统全要素前沿技术融合为导向的规划理念，统筹船舶、岸基等航运资源配置，聚焦系统智能化、绿色化、数字化、韧性化发展目标；总体架构需要结构分层、逻辑闭环、符合水域空间特征，将水域航运系统建设需求与要素子系统任务分解为多个层级及模块，支撑不同阶段的技术迭代推进与功能灵活扩展；提供设计可量化、可追溯的评估工具，对规划方案的系统开放性、接口标准化、运行绩效等进行分析，确保规划路径与实施成效的精准匹配。

NEW-WTSMM是立足系统工程方法论并融合MOSA理念，支持新一代航运系统规划方案设计的体系化方法。从内河航运系统的整体视角出发，强调系统内部各要素的关联与协同，再通过分层建模和动态反馈，开展系统的全生命周期管理与优化；采用子系统标准接口设计、各模块交互设计，在不同技术条件下具有灵活扩展与持续演化能力^[40-41]。NEW-WTSMM也是从系统运行特性、客户需求、绿色智能产品搭载策略等维度出发，制定适配不同通航水域条件的规范化规划工具。根据规划目标的侧重点，将规划方案分为展示型、要素型、全景型，以细化客户需求响应，适应成本控制等差异化需求。例如，采用矩阵分类法^[42-43]，分析客户目标的支出规模、建设风险/机会（IOR）等维度，进

而制定差异化策略。

新一代航运系统的规划遵循以下设计原则。

- ① 系统性原则，从全局视角出发统筹“规划—建设—运行—评估”全过程，确保系统的目标一致性。
- ② 层次化原则，针对系统的复杂结构特征，划分“总体架构层—功能逻辑层—要素实施层—评价改进层”，理清系统的逻辑关系，降低建模和实施的复杂性。
- ③ 模块化与开放性原则，采用模块化架构、标准化接口设计，满足系统中多要素协同交互、子系统灵活扩展及快速迭代等需求，增强系统的可重构性与互操作性。
- ④ 协同与共享原则，强化“船—港—货”“人—机—环”各要素之间的信息互联与功能协同，促进资源共享与流程贯通，提升系统的整体运行效率。
- ⑤ 可持续与可评估原则，增强设施故障、极端天气、突发事件下系统的自适应与恢复能力，构建动态评估与持续改进机制，实现系统的稳健运行与滚动优化。

三、内河新一代航运系统规划方法

（一）新一代航运系统规划内容及步骤

新一代航运系统规划采用分层递进的方式，内容包括目标设定、功能分析、实施落地、评估优化等，划分为总体架构层、功能逻辑层、要素实施层、评价改进层4个层级。总体架构层面向差异化通航水域条件，明确“一域一方案”式的建设目标与发展方向。在建设目标牵引下，功能逻辑层梳理绿色智能船舶、可靠岸基支持、数字生态设施、韧性运营服务四大模块子系统的功能定位、业务流转、信息交互逻辑。要素实施层分别确立各模块子系统的功能、面向水域需求将功能转化成可执行的工程方案，定义关键接口并明确开放与接口标准。评价改进层相对独立，主要跟踪具体水域的新一代航运系统规划方案实施进展，根据建设和运营情况选取评估工具，识别规划方案在专有数据壁垒、要素协同调度方面的效果以及系统运行业绩，提出新一代航运系统业态持续性技术迭代方面的改进目标。整体上，以“目标—功能—实施—评价”的闭环逻辑开展规划，为新一代航运系统中各要素模块融合提供结构基础。

1. 总体架构层

总体架构层是新一代航运系统规划的起点，用

于设定系统的发展方向、提出顶层框架的构建任务。对目标水域的自然环境条件、基础设施水平、信息化程度、政策制度等要素进行综合分析,识别规划区域的通航条件,明晰建设新一代航运系统的基础与约束条件。明确目标水域的新一代航运系统建设定位,从绿色化、智能化、安全韧性、运营效率等方面提出系统建设目标,构建契合区域特征的运营场景,确立水域的规划类型,形成具有水域特色的系统总体框架。

2. 功能逻辑层

在总体框架层进行系统分解与功能剖析的基础上,功能逻辑层将规划目标细化为绿色智能船舶、数字生态设施、可靠岸基支持、韧性运营服务等子系统的功能目标。结合水域实际航线的运作流程,重构航线“船-港-货-管”各要素的业务流转关系,厘清各要素子系统的任务边界与交互方式。进一步设计子系统之间的信息交互逻辑,明确航运基础数据、船舶运行数据、系统决策数据的传递方向与频率,确保多源异构信息在各子系统之间的互联共享与动态反馈,实现面向系统全景目标的功能协同逻辑与闭环运行规则。

3. 要素实施层

在功能逻辑层明确子系统交互与水域航线条件的基础上,要素实施层分别为绿色智能船舶、可靠岸基支持、数字生态设施、韧性运营服务四大子系统配置的绿色智能产品及技术迭代升级预留接口并制定实施方案。各子系统的技术方案遵循模块化设计原则,按照功能边界划分出可独立开发、部署、升级的软硬件单元。预留各子系统之间的关键接口,采用开放式标准协议,避免“一域一方案”导致的系统不兼容问题,提升系统的跨平台、跨区域互操作能力。在关键接口的软件层面,统一通信协议、数据格式、编程接口规范,确保信息交互的一致性与系统互操作能力。在关键接口的硬件层面,统一操作方式、连接口径,保障不同水域系统之间的通用兼容与高效协作。需要指出的是,要素实施层宜面向新一代航运系统各子系统的功能逻辑,与系统整体工程技术方案的设计环节相对应,涉及内河航运要素智能技术产品在物理实现层面的软硬件单元构成、相关功能的具体执行方式两方面。

4. 评价改进层

评价改进层聚焦新一代航运系统的整体运行绩

效、各子系统之间的协同情况,开展具有开放性、协同性、可实施性、完备性的综合评估。采集、监测并分析实施规划工程航线的实际运行数据,运用开放架构评估工具(OAAT)等量化新一代航运系统规划方案的实施效果,识别技术更迭、专有数据壁垒等潜在风险并提出针对性的改进建议。基于评估结果,向总体架构层反馈优化策略,指导内河航运场景的细化分类,调整规划方案类型、技术迭代目标等,进而推动功能逻辑层优化业务流程与子系统交互逻辑,反馈至要素实施层完善技术方案与接口标准,形成动态闭环的可持续改进机制。在持续评估与闭环反馈的基础上,保持新一代航运系统规划方案的自适应优化与滚动迭代升级。

(二) 新一代航运系统规划模型

与新一代航运系统规划思路配套的模型需要适应结构性规划需求,各层级规划内容的选择均遵循“感知-认知-决策-执行”决策逻辑。例如,将规划模型细化为场景分类、功能配置、元素实现、执行过程4个层级,每层再按照“感知-认知-决策-执行”的决策逻辑进行进一步细化,据此确定对应各层的绩效衡量指标,形成不同水域的适用技术方案。在规划模型的统一参考框架下,内河航运要素的行为主体采用标准化的子系统语言来描述对应要素的运行状态、进行智能产品选型,明确子系统技术研发目标与演进方向。“场景-流程-实践”三维整合框架是规划模型的核心体现,将内河航运系统分解为绿色智能船舶、数字生态设施、可靠岸基支持、韧性运营服务4个核心流程模块,每个模块根据智能技术分类又细分为若干子流程,由此形成“自上而下”的分层结构。这种标准化分解便于规划主体清晰定位水域的重点建设目标,避免碎片化改进。此外,规划模型整合成功案例,提供流程优化、技术应用、组织变革方面的参考方案。整个规划过程立足数字化流程重构、动态协同机制、智能化决策框架,能够破解传统内河航运系统要素智能技术应用面临的碎片化瓶颈与协同短板,推动航运过程从“线性链条”向“智能网络”跃迁,成为内河航运业态变革的核心支撑。

1. 场景分类

作为规划模型的第一层,核心任务是提出水域新一代航运系统的规划类型与建设目标。根据目标

水域在船舶智能化、港口自动化、数字航道建设、航线运营等方面的支撑条件与制约因素,面向“岸基驾控为主、船端值守为辅”的新一代航运系统业态,选定适配水域特征的规划类型、技术迭代分级场景,提出水域新一代航运系统的建设目标与分阶段绩效,明确新型业态在水域的分步迭代演进路径并描述核心技术特征及业务运营模式。

2. 功能配置

在明确目标水域新一代航运系统建设场景的基础上,功能配置层聚焦系统功能配置,提供核心流程类型并与不同业务模式匹配。面向规划目标和技术迭代方向,构建涵盖绿色智能船舶、数字生态设施、可靠岸基支持、韧性运营服务4个核心模块的水域新一代航运系统总体架构;分别界定4个核心

模块对应实现的功能，进一步分解和细化为具体的功能模块。例如，船舶自主航行子系统规划场景可分解到绿色智能船舶模块对应的智能机舱、智能能效管理、智能航行控制、绿色动力等，数字生态设施模块对应的数字航道、船港闸数字交互、岸基通信设施、助导航设施等，可靠岸基支持模块对应的岸基运控中心、数据中台等，韧性运营服务对应的远程海事监管、物流调度等；根据水域实际条件，选择各模块功能对应的具体产品，分析可实现的关键技术与绩效考核指标。

在完成技术和产品选型后,依据新一代航运系统规划模型功能配置逻辑参考框架(见图2),识别目标水域绿色智能船舶、数字生态设施、可靠岸基支持、韧性运营服务四大模块之间的逻辑交互关

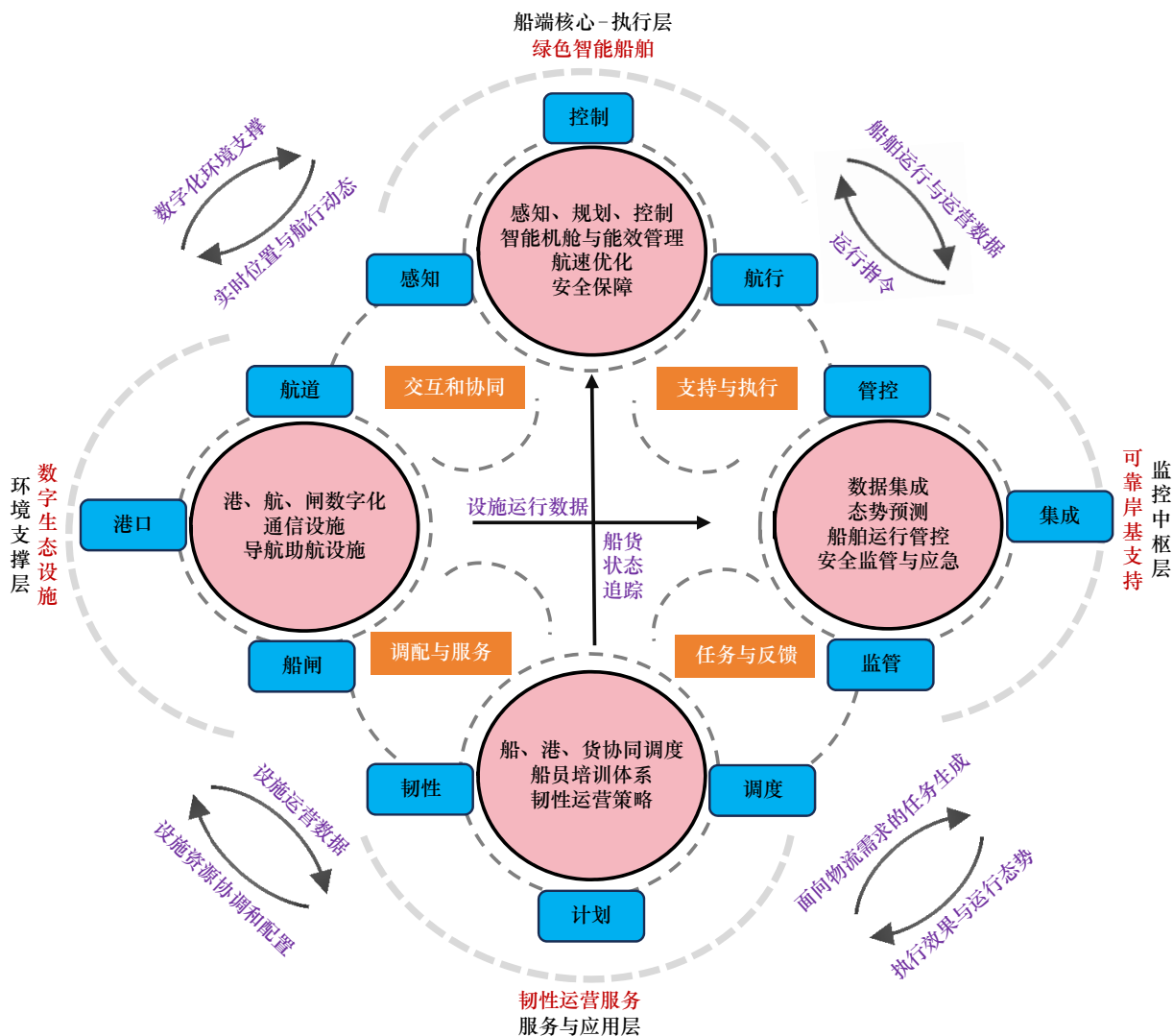


图2 新一代航运系统功能配置逻辑参考框架图

系。绿色智能船舶模块向数字生态设施模块反馈实时位置与航行动态，同步向可靠岸基支持模块传输船舶运营数据。可靠岸基支持模块向绿色智能船舶模块下达运行指令，将执行效果反馈至韧性运营服务模块。韧性运营服务模块依据物流需求向可靠岸基支持模块下达航运任务，协调数字生态设施模块开展资源配置。数字生态设施模块为绿色智能船舶模块提供环境数据支撑，同步向韧性运营服务模块反馈设施运行状态。

3. 元素实现

在明确功能配置的基础上，元素实现层聚焦配置功能的落地实施，将各功能的选定技术细化为可独立部署、迭代升级的具体软硬件单元，分析功能实现的基本逻辑流程，选取判定功能实现程度的指标，统一接口协议与标准规范。以绿色智能船舶为例，基于功能配置层明确目标水域绿色智能船舶模块搭载技术、落地产品以及对应的功能符号，根据《智能船舶规范（2025）》将船舶智能技术划分为智能航行、智能船体、智能机舱、智能能效管理、智能货物管理、智能集成平台等，针对远程控制船舶、自主操作船舶给予相应的附加标志。如果在功能配置层选择船舶自主航行技术与产品，则需明确对应的软硬件配置：船舶自动识别系统（AIS）感知算法、视觉感知算法、雷达感知算法、感知融合算法等感知类算法，航速航向控制、航迹控制等控制类算法，航线规划、避碰、故障诊断等决策类算法；环境感知和通导状态感知的诸多设备，如枪机摄像头、全景摄像头、红外摄像头、激光雷达、毫米波雷达、导航雷达、AIS、全球定位系统（GPS）、惯性测量单元、计程仪、测深仪、风速风向仪、电罗经、四角吃水系统、能见度仪等；涉及船岸协同的接口标准和通信方式。

4. 执行过程

作为规划模型的最底层，聚焦元素实现层上各功能元素的研发逻辑与配置。以船舶自主航行控制元素的航迹控制算法逻辑为例，元素实现层分解出船舶自主航行元素的硬件和软件配置，核心为船舶航迹和航速控制算法；船舶感知各硬件单元采集的航行环境数据，研发算法生成控制指令并驱动控制类硬件单元执行航行操作。算法实现逻辑包括分层式架构（单船）、集成式架构（船队）：单船自主运行可采用分层式架构并开展独立决策与运行^[44]；系

统在航线多船搭载后可切换为集成式架构，在统一调度下开展协同作业，提升系统整体运行效率与资源利用率。

（三）新一代航运系统规划的评估方法

内河航运实现“岸基驾控为主、船端值守为辅”的远景目标必然是技术渐进迭代的过程，如运输船舶智慧化功能将经历“减轻人负荷—替代人—完全自主”的技术演进，新一代航运系统场景将经历“远程监控—远程遥控—远程驾控—自主驾控”的迭代进化。需要对系统规划效果、建设工程等开展业绩量化评估，构建闭环的多层联动动态反馈机制，以明晰规划的技术迭代方案与内河水域的契合度，指导内河新一代航运系统的建设及改进。内河新一代航运系统规划的重点是航运要素融会贯通和自洽共享，可采用开放架构评估工具、项目评估与管理工具、模型驱动的系统工程方法等构建新一代航运系统规划评价能力。

1. 开放架构评估工具

鉴于新一代航运系统的规划效果评估涉及各模块、各要素的协同运作，应采用OAAT^[45]。重点评估目标水域新一代航运系统在开放性方面的成熟度，细分为基于优化的OAAT、基于模型的OAAT、基于数据的OAAT等。根据规划水域的建设目标设计问卷，结合问卷评分与量化模型，主要从航运组织管理、关键技术实现两个维度开展综合分析，重点评估各子系统之间航运数据交互的效率、模块的可升级性与可替换性、系统跨水域运行交接的兼容性与互操作能力。

2. 项目评估与管理工具

项目评估与管理工具用于评估新一代航运系统规划方案在工程建设阶段的执行质量。设计标准化问卷与量表，分析目标水域的绿色智能船队建设、智能航道网络布局等关键建设任务在目标年内的完成情况。评估结果可反映规划目标与实际执行效果之间的差异，为新一代航运系统建设全过程提供反馈依据，支撑规划方案的动态调整与持续优化。

3. 模型驱动的系统工程方法

模型驱动的系统工程方法为新一代航运系统的建模、验证、协同管理等提供统一的平台支撑能力。应用形式化建模语言与专业建模工具，将内河航运需求、业务流转关系、信息交互逻辑等在统一

平台上进行结构化表达与关联分析,整合航运基础数据、船舶运行数据、系统决策数据等分散信息,减少文档式设计存在的歧义与冗余^[46-47]。应用模型驱动的系统工程方法,构建绿色智能船舶、数字生态设施、可靠岸基支持、韧性运营服务的交互模型,支撑规划方案的动态评估与可视化展示,为系统验证与持续改进提供模型化能力支撑。

四、规划方法应用——以京杭运河（济宁段）新一代航运系统规划方案为例

京杭运河（济宁段）在推进船舶绿色智能化、基础设施数字化、航运组织高效化发展方面已具有一定的实践基础：建成国内首个内河新能源船舶制造示范基地并配套建设2座充（换）电站；建有长度为183 km的电子航道，Ⅱ级航道沿线布设351套感知与通信设施、11座现场水位采集点、2座雷达站等基础设施，在龙拱港、梁山港等重点港区开展智能化改造并显著提升作业效率；部署“融汇数易”“济港通”等数字化平台，实现航运业务全流程数字化管理、多运输方式协同联动。尽管该水域具备一定的内河航运要素智能化能力，但对照绿色智慧与安全韧性目标而言整个系统面临要素集成运营难题：航段通航环境复杂，如进港航道急弯多、桥梁净空受限且夜间能见度不足，对船舶安全通航与智能驾驶提出更高要求；现有船舶运营模式以人工驾驶、经验调度为主，对人工经验依赖程度较高，船舶、港口、航道、管理等要素分属不同主体，系统要素之间难以协同，系统运营效益效率与服务稳定性受到制约。

为此，基于京杭运河（济宁段）内河航运要素现实基础与关键制约条件，运用NEW-WTSMM构建了京杭运河（济宁段）新一代航运系统新业态，提出了航运要素智能化的系统集成与协同创新能力的建设目标；依次通过场景分类、功能配置、元素实现、执行过程4个层级，对“龙拱港—梁山港”的港—港联动航线进行了新一代航运系统规划，构建了包括顶层目标设定、子系统功能域设计、元素逻辑构成、单元运行机制在内的完整技术路径。案例应用结果表明，NEW-WTSMM能够支撑复杂内河水域条件下新一代航运系统的技术集成，在内河新一代航运系统新业态构建方面具有工程可操作性。

（一）京杭运河（济宁段）新一代航运系统的场景分类

依据NEW-WTSMM场景分类层的要求，结合京杭运河（济宁段）的现实条件，界定了水域的建设目标与运营场景。选取“梁山港—龙拱港”的港—港联动航线作为工程区段，长度约为90 km，有6艘船舶相对固定地在此航线运营；部分区段建设了数字航道系统并稳定运行，可实时获取航道水深、船舶定位等通航环境动态数据，为验证系统态势增强感知、航线规划等核心功能提供了数据支撑；基本具备开展船岸协同自动驾驶的条件，适宜采用全景式规划方案。考虑该航线航运系统“船—港—货—航—管”要素建设进展并面向全水域数字化、全流程智慧化的运营目标，将规划场景设计为渐进迭代的远程监控、远程遥控、远程驾控、自主驾控4个阶段，将船端驾驶、设备运维等船员负荷型作业逐步转移至岸端操作。京杭运河（济宁段）新一代航运系统业态的全景型规划方案目标为：近期实现开阔水域自主航行、复杂水域远程遥控，中期实现新能源船队智能航行，远期实现“岸端驾控为主、船端值守为辅”的新型运营模式。

（二）京杭运河（济宁段）新一代航运系统的功能配置

依据NEW-WTSMM思路，采用“感知—认知—决策—执行”的系统分析逻辑，结合水域条件、商业化航线特点并面向三阶段场景目标，完成京杭运河（济宁段）新一代航运系统总体架构的功能配置。在系统布局方面，依托京杭运河（济宁段）现有港航资源进行统筹配置：将该水域港—港联动航线运营的67.6 m纯电动多用途船选定为绿色智能船舶工程实施的标准船型；将技术升级和功能延展后的京杭运河（济宁段）港航现有“融汇数易”平台（位于济宁港航大厦）作为韧性运营服务平台；在济宁港航大厦内新建岸基运控中心，发挥既有平台的算力、通信底座和区位优势；依托示范区段内的数字化基础、“鲁航通”应用程序等，建设相应的数字生态设施。

京杭运河（济宁段）新一代航运系统的总体架构包括4个模块（见图3），各模块的交互协同依托运控中心建设的数据底座，提高面向复杂通航环境的系统感知、智能认知、自主决策、协同执行能

力。① 绿色智能船舶模块，近期选用分层式架构，实现67.6 m纯电动多用途船在港-港联动航线上的“自主航行+远程遥控”目标；中远期选用集成式架构，以新造的6艘船作为航线运输任务主体，均搭载船舶自主航行控制软硬件。② 数字生态设施模块，支持数据中台与外部数字航道、船闸调度系统、码头操作系统的数据交互。③ 可靠岸基支持模块，建设搭载船岸协同“智慧大脑”的岸基运控中心，承担远程监控、遥控指令下达、航行态势预测与应急接管等功能。④ 韧性运营服务模块，升级“融汇数易”平台，承担运输任务下达、港航资源调度、绩效评估等功能。

在系统总体架构下，根据NEW-WTSMM功能配置层的要求，厘清了各要素子系统功能的交互逻辑。以绿色智能船舶子系统模块为例，根据近期目标场景，将系统的基本功能域设定为67.6 m纯电动多用途船的船舶智能航行、船载电池远程运维、岸基运控中心，支撑开阔水域自主航行、复杂水域远程遥控的运营目标。① 船舶智能航行，面向港-港联动航线上的复杂通航环境，形成“增强感知-辅

助决策-自主控制”的功能闭环。船端具有增强驾驶、辅助驾驶能力，预留自动驾驶运行功能，契合中国船级社《智能船舶规范》中的功能定义，为船舶智能航行提供技术路径与功能边界。② 船载电池远程运维，以设备健康管理为重点，对电池动力系统及其关键运行参数开展远程实时监测、异常报警、故障诊断，提高电池动力系统的安全性及经济性。③ 岸基运控中心，开展船舶运行监控、复杂航段上船舶的远程遥控，对船舶位置、电量、设备状态进行实时监控，支持视频回传、数字孪生、历史轨迹回放；具有接收岸端遥控指令、转化船端桨舵指令等远程操控能力，支持特殊工况与应急场景的船舶接管。

根据规划的系统功能域、NEW-WTSMM功能配置层的要求，进一步厘清了各功能域中模块交互逻辑（见图4），以建设连接各模块的数据中台（布置在济宁港航大厦）作为核心任务。绿色智能船舶子系统主要包括全景感知信息融合、船舶辅助驾驶平台、控制执行与驾驶权限切换、船舶绿色轮机等

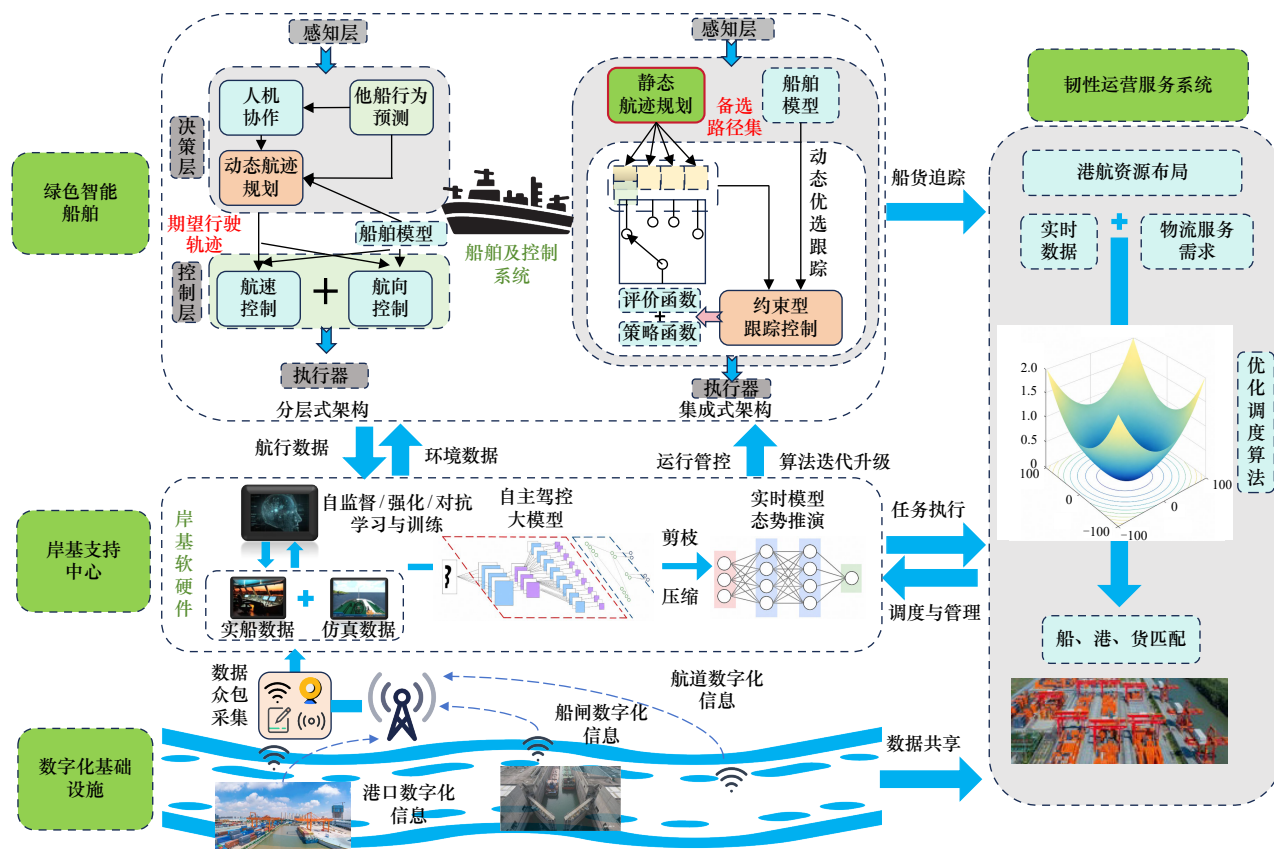


图3 京杭运河（济宁段）新一代航运系统总体架构图

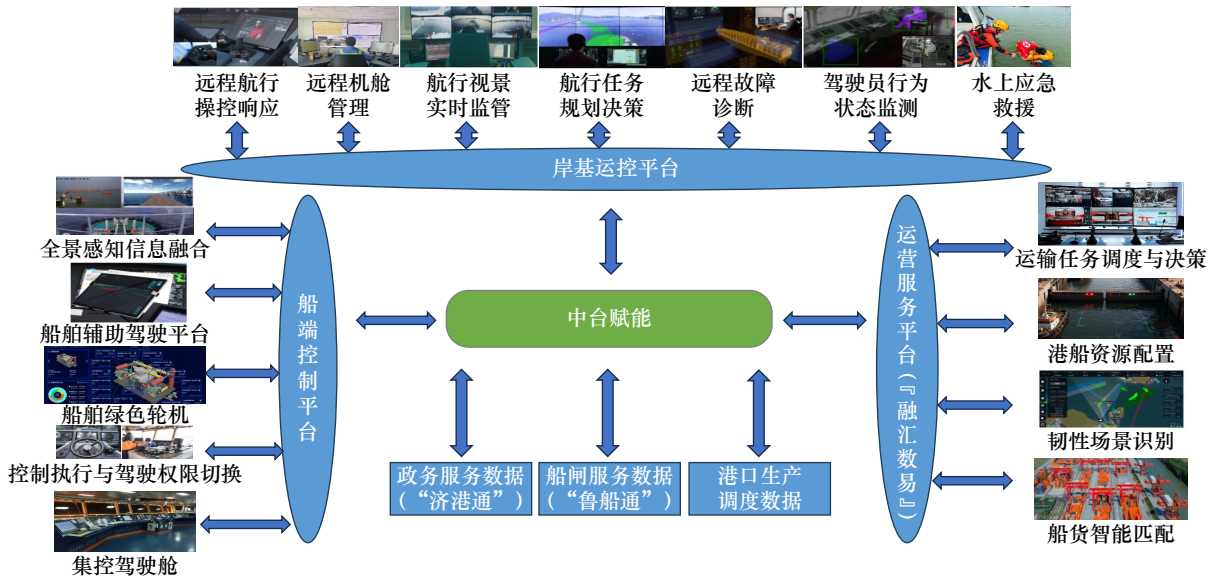


图4 近期场景功能域模块交互逻辑图

端控制平台、数据中台按照服务协议进行交互。全景感知信息融合功能域负责获取京杭运河（济宁段）的环境信息、船舶自身运行状态数据，将多源信息处理整合后通过集控驾驶舱进行集中管理、展示并提供服务。船舶辅助驾驶平台提供航行态势分析与操纵决策，控制执行与驾驶权限切换模块提供日常航道自主指令执行及状态反馈，紧急状况下驾驶权限切换至数据中台并对船舶进行远程遥控。船舶绿色轮机功能域面向纯电力系统的运行特性，构建覆盖状态监测、健康评估、辅助决策、综合显示的智能诊断系统。此外，数字生态设施子系统分解为政务服务数据（现行“济港通”系统）、船闸服务数据（现行“鲁船通”系统）、港口调度数据（现行龙拱港、梁山港的码头操作系统）功能域，岸基运控平台子系统分解为远程航行操控响应、远程机舱管理、航行视景实时监管、航行任务规划决策、远程故障诊断、驾驶员行为检测等功能域，韧性运营服务子系统分解为运输任务分配、船港资源配置、韧性场景识别、船货智能匹配功能域。所有子系统的功能域通过各自平台与数据中台交互，支撑67.6 m纯电动多用途船在港—港联动航线复杂通航环境下的安全、绿色、智能、高效航行。

（三）京杭运河（济宁段）新一代航运系统的元素实现

依据 NEW-WTSMM 元素实现层的要求，设计

了京杭运河（济宁段）新一代航运系统各功能域的技术实现路径。鉴于新一代航运系统具有复杂系统特性且各功能域的元素过多，故仅以绿色智能船舶子系统的全景感知信息融合功能域为例，对元素实现需要的软硬件功能单元进行物理拆解（见图5）。全景感知信息融合功能域模块主要执行感知信息采集、感知信息处理、感知信息融合、视觉增强、态势信息显示等功能。在软件层面，依托船舶自动驾驶感知系统软件，对来自多源传感设备的数据进行统一采集、处理和存储。在硬件层面，主要包括固态激光雷达、电子航道图、可见光一体摄像单元、红外热成像摄像单元、全景网络摄像机、船载导航雷达、网络硬盘录像机、船用运动参考单元、船用卫星定位系统、冗余卫星罗经系统、风速风向仪、测深仪、计程仪、增强感知与态势辨识服务器、船用串口服务器、船用网络交换机等物理单元。在接口协议与标准规范层面，以电子航道图为例，采用 S-57、S-63、S-100、S-101 等国际通用数据标准，为感知信息在船端系统及船岸系统之间的互联互通提供标准化通道。

（四）京杭运河（济宁段）新一代航运系统的执行过程

根据 NEW-WTSMM 执行过程层的要求，明确了元素实现层拆解的各功能元素的功能执行逻辑。鉴于各功能元素涉及软硬件过多，故仅以全景感知

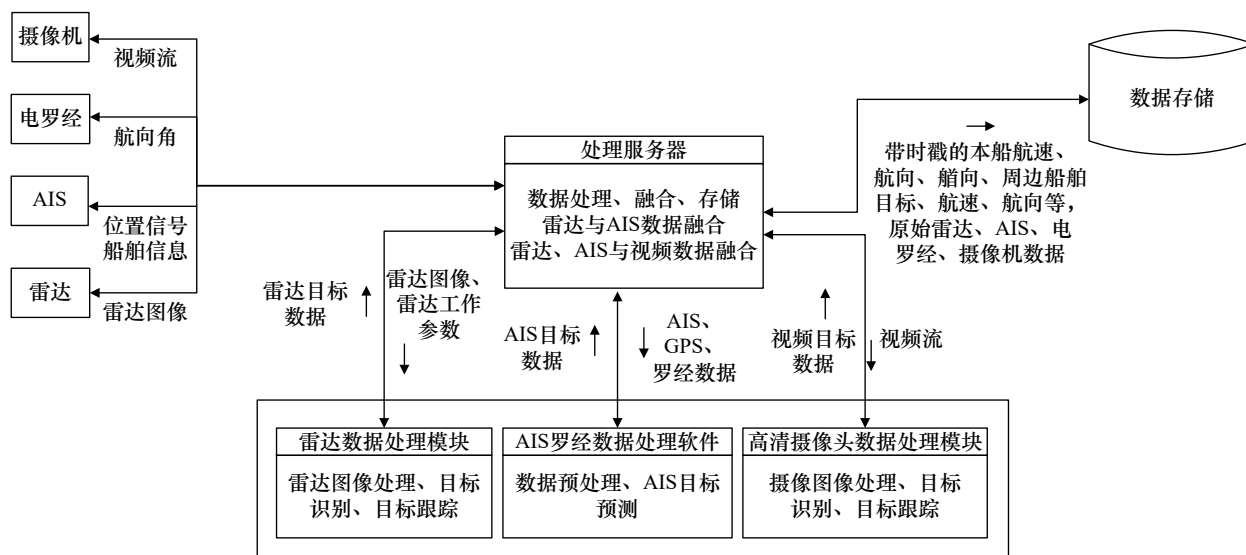


图5 船舶自动驾驶感知系统执行逻辑图

信息融合功能域模块中的船舶自动驾驶感知系统软件为例展示执行机制与交互逻辑（见图5）：采集来自雷达、AIS、电罗经、摄像头等感知设备获取的原始环境与船舶状态数据；处理服务器对多源感知数据进行分类接入与分模块处理；处理服务器对各数据处理模块输出的结果进行统一汇聚与融合分析，形成覆盖船舶周边环境的全景动态感知与增强环境态势信息；对原始数据、处理后的中间和结果数据进行统一存储，为后续调用与分析提供数据基础。

五、结语

传统交通供需规模导向的规划思路难以适应新型技术动态规划需求，因而面向前沿技术商用的内河新一代航运系统新业态亟需规划层面的方法论指导。本文将新一代航运系统基础理论与实际工程需求相结合，在内河新一代航运系统基本模块的基础上，明确了分层递进、功能闭环的技术导向型系统规划思路；以系统工程方法论、MOSA理念为指导提出了NEW-WTSMM，包括场景分类、功能配置、元素实现、执行过程4个层级的新一代航运系统规划模型，覆盖从顶层设计到功能落地的全过程；以京杭运河（济宁段）为工程案例，对“龙拱港—梁山港”的港—港联动航线进行了新一代航运系统规划，构建了包括顶层目标设定、子系统功能域设

计、元素逻辑构成、单元运行机制在内的完整规划方案。案例表明，NEW-WTSMM能够支撑复杂内河水域条件下新一代航运系统的技术集成，在内河新一代航运系统新业态构建方面具有工程可操作性，也为不同水域条件下的新一代航运系统“一域一方案”制定提供了坚实的方法论支撑与实施路径指导。

需要指出的是，NEW-WTSMM的研究与应用仅处于起步阶段，仍可深化与拓展。进一步强化适应动态迭代技术需求的规划模型能力，总结规划模型面向不同类型内河水域的适用性。纳入新一代航运系统各子系统功能模块的标准化、开放性、工程成熟度等绩效指标，构建反映新一代航运系统规划全过程、各要素技术方案的多维综合评估体系。引入AI、大数据、物联网、数字孪生等信息技术，构建新一代航运系统规划相关的工程软件平台和仿真验证平台^[48]，支持规划方案的模型化验证与可视化评估并促进迭代优化。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: January 7, 2026; **Revised date:** February 24, 2026

Corresponding author: Liu Qing is a professor from the School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology. Her major research field is transportation planning and management. E-mail: lqwhutjt@whut.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Policies and Strategies for Promoting High-Quality Development of

** Waterways in the New Era” (2026-149-05); Yunnan Provincial Department of Transportation Science and Technology Innovation and Demonstration Project (YNZC2024-G3-04393-YNZZ-0391)

参考文献

- [1] 靳廉洁,孙颖,陈正勇,等.“十四五”时期双循环新发展格局构建下我国水运发展思路[J].水运工程,2022(12):7-11,24.
Jin L J, Sun Y, Chen Z Y, et al. Development path of waterway transport in China under construction of new development pattern of domestic and international circulations during 14th Five-Year Plan period[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(12): 7-11, 24.
- [2] 童亮,袁裕鹏,李骁,等.我国氢动力船舶创新发展研究[J].中国工程科学,2022,24(3):127-139.
Tong L, Yuan Y P, Li X, et al. Innovative developmental of hydrogen-powered ships in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 127-139.
- [3] 洛佳男,耿雄飞,文捷,等.我国内河智慧航道现状、问题与展望[J].水运工程,2023(2):123-128,140.
Luo J N, Geng X F, Wen J, et al. Research status, problems, and prospects of smart channel for inland river in China[J]. Port & Waterway Engineering, 2023(2): 123-128, 140.
- [4] 严新平,涂敏,杨家其,等.我国建设世界一流海洋港口的路径研究[J].中国工程科学,2025,27(1):236-247.
Yan X P, Tu M, Yang J Q, et al. Development path of world-class marine ports in China[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(1): 236-247.
- [5] 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.
- [6] 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.
Yan X P, Li C, Liu J L, et al. Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5): 22-29, 76.
- [7] Ventikos N P, Chmurski A, Louzis K. A systems-based application for autonomous vessels safety: Hazard identification as a function of increasing autonomy levels[J]. Safety Science, 2020, 131: 104919.
- [8] Cheng T T, Utne I B, Wu B, et al. A novel system-theoretic approach for human-system collaboration safety: Case studies on two degrees of autonomy for autonomous ships[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 237: 109388.
- [9] Song R X, Papadimitriou E, Negenborn R R, et al. Enhancing collision avoidance in mixed waterborne transport: Human-mimic navigation and decision-making by autonomous vessels[J]. Ocean Engineering, 2025, 322: 120443.
- [10] Ghaderi H. Autonomous technologies in short sea shipping: Trends, feasibility and implications[J]. Transport Reviews, 2019, 39(1): 152-173.
- [11] Nuchtare C, Li T, Xia H P. Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships—A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110145.
- [12] 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]. Navigation of China, 2024, 47(2): 145-152.
- [13] Ichimura Y, Dalaklis D, Kitada M, et al. Shipping in the era of digitalization: Mapping the future strategic plans of major maritime commercial actors[J]. Digital Business, 2022, 2(1): 100022.
- [14] Wang Y, Cao Q, Liu L, et al. A review of low and zero carbon fuel technologies: Achieving ship carbon reduction targets[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 54: 102762.
- [15] Wang X Y, Zhu J Z, Han M F. Industrial development status and prospects of the marine fuel cell: A review[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 238.
- [16] Liu C G, Chu X M, Wu W X, et al. Human-machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: A review and consideration[J]. Ocean Engineering, 2022, 246: 110555.
- [17] Issa M, Rizk P, Boulon L, et al. Smart, connected, and sustainable: The transformation of maritime ports through electrification, IoT, 5G, and green energy[J]. Sustainability, 2025, 17(17): 7568.
- [18] Zereik E, Bibuli M, Mišković N, et al. Challenges and future trends in marine robotics[J]. Annual Reviews in Control, 2018, 46: 350-368.
- [19] 罗本成.鹿特丹智慧港口建设发展模式与经验借鉴[J].中国港口,2019(1):20-23.
Luo B C. Port of Rotterdam smart port construction development model and experience[J]. China Ports, 2019(1): 20-23.
- [20] 李梦霞,徐图远,邹天悦,等.内河船舶远程驾控技术试验研究[J].交通运输工程学报,2025,25(2):141-155.
Li M X, Xu T Y, Zou T Y, et al. Experimental research on remote navigation and control technology for inland waterway ships[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2): 141-155.
- [21] 马枫,陈晨,刘佳仑,等.船岸协同支持下的内河船舶远程驾控系统关键技术研究[J].中国舰船研究,2022,17(5):125-133.
Ma F, Chen C, Liu J L, et al. Key technologies of ship remote control system in inland waterways under ship-shore cooperation conditions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(5): 125-133.
- [22] 徐亮,徐青,王欣安,等.航运安全保障智慧化管控模式发展研究——以上海市为例[J].中国工程科学,2023,25(6):160-169.
Xu L, Xu Q, Wang X A, et al. Intelligent governance mode for shipping safety assurance: Taking Shanghai as an example[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(6): 160-169.
- [23] 程达,纪云杰.连云港智能化集装箱码头TOS系统正式上线! [J].大陆桥视野,2025(9):14.
Cheng D, Ji Y J. TOS system of Lianyungang intelligent container terminal is officially launched! [J]. New Silk Road Horizon, 2025(9): 14.

- [24] 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 J L, Chen D Y, Li R. 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.
- [25] 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.
- Liang C, Li W Y, Wang C H, 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.
- [26] Torzoni M, Tezzele M, Mariani S, et al. A digital twin framework for civil engineering structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2024, 418: 116584.
- [27] 许乐华,欧阳帆,任俊娴,等. 内河航运绿色发展内涵及评价指标体系研究[J]. 中国航海,2024,47(S1):272-277.
- Xu L H, Ouyang F, Ren J X, et al. Research on connotation and evaluation index system of green development of inland shipping [J]. Navigation of China, 2024, 47(S1): 272-277.
- [28] Li X Y, Mou J M, Chen L Y, et al. Ship-infrastructure cooperation: Survey on infrastructure scheduling for waterborne transportation systems[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(1): 31.
- [29] 郭超,潘辉. 美国开放式系统架构演变对机载武器发展的启示[J]. 战术导弹技术,2025(4):39-49.
- Guo C, Pan H. Enlightenment on the evolution of US open system architecture for airborne weapon development [J]. Tactical Missile Technology, 2025(4): 39-49.
- [30] 钮新强,谢明霞,徐利福. 水利工程智能建造的理论思考和发展展望[J]. 中国工程科学,2026,28(3):265-282.
- Niu X Q, Xie M X, Xu L F. Intelligent construction of water conservancy projects: Theoretical thinking and development prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2026, 28(3): 265-282.
- [31] 严新平. 内河新一代航运系统构建的思考[J]. 中国水运, 2021(5):6-8.
- Yan X P. Thoughts on the construction of a new generation of inland river shipping system[J]. China Water Transport, 2021(5): 6-8.
- [32] 严新平,柳晨光. 智能航运系统的发展现状与趋势[J]. 智能系统学报,2016,11(6):807-817.
- Yan X P, Liu C G. Review and prospect for intelligent waterway transportation system[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2016, 11(6): 807-817.
- [33] 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 of vessel intelligent navigation technology for the new generation of waterborne transportation system[J]. Scientia Sinica Technologica, 2023, 53(11): 1795-1806.
- [34] Qiao W L, Huang E Z, Zhang M, et al. Risk influencing factors on the consequence of waterborne transportation accidents in China (2013—2023) based on data-driven machine learning[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 257: 110829.
- [35] 严新平,刘佳仑,胡欣珏,等. 新一代航运系统的未来船舶技术展望[J]. 船海工程,2024,53(5):1-4.
- Yan X P, Liu J L, Hu X J, et al. Prospects for future ship technologies in the new generation shipping system[J]. Ship & Ocean Engineering, 2024, 53(5): 1-4.
- [36] 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 D S, Fan T Z, Yuan H W, et al. Review and prospect on system operation supervision technology of inland river navigation system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 1-14.
- [37] 田宇,周强,朱本飞. 自动化集装箱码头双循环AGV与场桥的集成调度研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2020,20(4):216-223,243.
- Tian Y, Zhou Q, Zhu B F. Integrated scheduling of dual-cycle AGV and yard crane at automated container terminal[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(4): 216-223, 243.
- [38] 范爱龙,严新平,李忠奎,等. 我国航运业绿色低碳发展的需求、路径与展望[J]. 船海工程,2024,53(4):1-5,12.
- Fan A L, Yan X P, Li Z K, et al. Demand, pathway, and prospects of green and low-carbon development in China's shipping industry[J]. Ship & Ocean Engineering, 2024, 53(4): 1-5, 12.
- [39] 朱炜,韩斌. 运输需求预测综合集成方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2013,13(3):25-32.
- Zhu W, Han B. A meta-synthesis method for transportation demand forecasts[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(3): 25-32.
- [40] 刘娜英,赵永库,孙永强. 面向未来战争的先进航空电子系统架构[J]. 火力与指挥控制,2024,49(12):208-214.
- Liu N Y, Zhao Y K, Sun Y Q. Advanced avionics system architecture for future war[J]. Fire Control & Command Control, 2024, 49(12): 208-214.
- [41] 刘志鹏,王军,赵永库. 国外武器即插即用集成技术的发展[J]. 电光与控制,2021,28(3):67-70,80.
- Liu Z P, Wang J, Zhao Y K. Development of plug-and-play weapon integration technology abroad[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(3): 67-70, 80.
- [42] 徐冽,刘芳. 基于二维矩阵模型的ABC分类法[J]. 物流技术, 2022,41(7):79-82,86.
- Xu L, Liu F. ABC classification based on two-dimensional matrix model[J]. Logistics Technology, 2022, 41(7): 79-82, 86.
- [43] 田茂,王怀相. 城市轨道交通投融资项目建设阶段风险识别[J]. 中国铁道科学,2018,39(3):131-137.
- Tian M, Wang H X. Risk identification in construction stage of investment and financing projects for urban rail transit[J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 131-137.
- [44] 何德峰,罗捷,李永福. 通信拓扑切换下车辆队列分布式多目标预测控制[J]. 中国科学:信息科学,2024,54(9):2263-2279.
- He D F, Luo J, Li Y F. Distributed multi-objective predictive control of vehicle platoons with switching communication topology[J]. Scientia Sinica Informationis, 2024, 54(9): 2263-2279.
- [45] Zimmerman P, Ofori M, Barrett D, et al. Considerations and examples of a modular open systems approach in defense systems[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2019, 16(4): 373-388.

- [46] 刘瑞华,王同伟,马赞. BDSBAS 机载接收机的MBSE设计及进阶阶段运行仿真[J/OL]. 系统仿真学报, 2026-06-15. <https://link.cnki.net/urlid/11.3092.V.20251022.1450.003>.
Liu R H, Wang T W, Ma Z. MBSE design and approach phase operational simulation of the BDSBAS airborne receiver[J]. Journal of System Simulation, 2026-06-15. <https://link.cnki.net/urlid/11.3092.V.20251022.1450.003>.
- [47] 王方博,郭健,杜承烈,等. 基于MBSE的有无人协同作战能力系统设计与验证[J]. 系统仿真学报, 2026, 38(3): 800-807.
Wang F B, Guo J, Du C L, et al. Design and verification of manned-unmanned collaborative combat capability system based on MBSE[J]. Journal of System Simulation, 2026, 38(3): 800-807.
- [48] 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.