

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.016

海港智慧航道基础支撑平台架构与关键技术

庞启秀¹, 李怀远¹, 辛海霞^{1,2}, 赵张益¹, 谢琳¹, 陈纯¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心工程泥沙交通运输行业重点实验室;
2. 天津水运工程研究院有限公司)

摘要: 构建了海港智慧航道基础平台的总体架构、逻辑架构及应用架构,并研究了全要素智能感知、高精度水动力泥沙模拟仿真和预报系统自动化运行等关键技术。以天津港为例,搭建了智慧航道基础支撑平台,实现了气象、水文、泥沙、船舶等多要素实时智能感知,以及未来 72 h 水位、流速、水深等关键环境要素模拟计算,并在天河超级计算服务器上自动化运行,实现了通航环境的智能化动态预报。根据天津港智慧航道基础平台正常运行 1 年多的情况,讨论分析了基础支撑平台建设经验教训和辅助航道养护、通航保障等港口智慧化生产运营管理服务方向。

关键词: 智慧航道;基础支撑平台;智能感知;模拟预报;天津港

Architecture and key technologies of basic platform for intelligent waterways in seaports

Pang Qixiu¹, Li Huaiyuan¹, Xin Haixia^{1,2}, Zhao Zhangyi¹, Xie Lin¹, Chen Chun¹

(1. Key Laboratory of Engineering Sediment for the Transport Industry, National Engineering Research Center for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT;
2. Tianjin Water Transport Engineering Research Institute Co., Ltd.)

Abstract: The overall architecture, logical architecture, and application architecture of the basic platform for intelligent waterways in seaports were constructed. Key technologies were researched, such as full-element intelligent sensing, high-precision hydrodynamic sediment simulation, and automatic operation of the forecast system. On this basis, the basic platform for intelligent waterways was developed with Tianjin Port as a case study. The platform achieved real-time intelligent sensing of meteorological, hydrological, sedimentary, and vessel-related elements, along with simulated calculations of critical environmental elements such as water level, flow velocity, and water depth for the next 72 h. The platform operated automatically on the Tianhe supercomputer, achieving intelligent and dynamic forecasting of the navigation environment. Based on the normal operation of the basic platform for intelligent waterways in Tianjin Port for over one year, the experiences and lessons learned from the construction of the basic platform, as well as the directions for supporting waterway maintenance, navigation guarantee, and other aspects of intelligent production and operation management services of waterways, were discussed.

Key words: intelligent waterway; basic platform; intelligent sensing; simulation and forecast; Tianjin Port

沿海港口逐步呈现大型化、深水化趋势,很多大型枢纽港如天津港、连云港等都已开挖升级至 30 万 t 级航道,港口通过能力得到大幅度提升,同时也对通航保障能力、航道建设养护的精细化与智能化管理水平提出了更高要求,以此更好地适配业务量高速增长与绿色智能发展的双重目标。近年来,国家先后出台多项政策文件,从智能航运、数字交通、新型基础设施等多方面提出了明确要求,推动物联网、人工智能、北斗导航等技术在航道管理中的深度融合。智慧航道是航道数字化与网络化发展的产物,以其前瞻性、系统性、科学性彰显出“远程智慧”的先进优势^[1]。但是,智慧航道发展具有显著的阶段性特征,在不同的科学技术水平下具有不同的内涵、任务和内容,从发展历程上可分为数字航道、智能航道和智慧航道 3 个阶段^[2]。国内数字航道始于长江数字航道^[3-6],该航道为内河数字航道建设的主体和标杆,已构建起覆盖内河数字航道建设、电子航道图生产制作、运行服务及全流程管理的完整体系^[7]。智慧航道是在数字航道基础上,利用智能传感

基金项目: 天津市技术创新引导专项(基金)科技领军培育企业重大创新项目(S23PY17002);天津港(集团)有限公司重大创新项目(02122047)

作者简介: 庞启秀(1977—),男,研究员,博士,主要从事港口航道及近海工程研究。E-mail:pangqixiu@163.com

通信作者: 辛海霞(1980—),女,高级工程师,硕士,主要从事港口航道模拟仿真研究。E-mail:981161233@qq.com

器、物联网自动控制、人工智能等技术,自动获取航道系统要素信息,通过融合处理与深度挖掘,动态发布航道有关信息,实时地为航道维护管理、船舶航行提供可靠的航道信息^[2-5,8-9]。另外,京杭大运河流域也开展了智慧船闸、数字航道、服务决策与支撑平台建设^[10],江苏干线航道实现了电子航道图全覆盖^[11]。在内河数字航道或智慧航道建设期间,也突破了大量关键技术难题。在长江数字航道建设中,开展了内河数字航道要素感知、电子航道图在线动态更新、大数据融合应用及对外服务等关键技术研究,奠定了长江干线数字航道工程建设与应用的技术基础^[12];杨阳等^[13]通过系统研究,提出了内河航道设施服役状态的一系列在线智能监测技术方法,进而给出了配套的航道设施智能预警技术方案;何涛涛等^[14]搭建数字长江航道无人机无人船智能识别应用平台,利用人工智能识别技术,实现对航标的识别与状态检测、水尺观读和航道整治建筑物缺损检测。总体来看,数字航道、智慧航道的研究和建设大多数集中在长江干线航道及京杭运河、江苏干线航道等内河航道,沿海港口智慧航道的相关研究成果鲜有报道,也没有正式建设运行的海港智慧航道。相比于内河航道,沿海的水文、泥沙、气象等环境要素更加复杂,数据采集及传输、通信等方面的难度更大,其通航规则与内河航道相比亦存在显著差异,因此迫切需要在内河智能航道研究的基础上,结合沿海航道自身特点,开展海港智慧航道基础平台设计和关键技术研究。

本文设计了海港智慧航道基础支撑平台的总体架构、逻辑架构及应用架构,并针对航道信息基础设施建设中的多源异构数据智能采集与融合、高精度水文泥沙要素预测数值模拟、高性能仿真等关键技术研究,在此基础上开发并搭建了天津港智慧航道基础支撑平台。

1 基础支撑平台架构

1.1 总体架构

智慧航道基础支撑平台采用 1+N 的总体架构,如图 1 所示,1 为智慧航道数字底座“1 中心”,N 为智能化应用“N 场景”。智慧航道数字底座“1 中心”汇集了航道全要素数据资源体系,内涵了航道监测感知网、航道通信传输网、航道数据智能算法集、航道数据资源管理(大数据中心)等内容,是智慧航道建设的数字基础。智慧航道智能化应用“N 场景”是从航道业务领域及职能部门的组织分工角度出发,设计智慧航道数字成果功能应用模块,形成不同业务场景下的智能化解决方案,实现航道业务的智能化转型升级。智慧航道应用场景包括但不限于航道建设养护、航道生产调度、航运信息服务、安全应急保障、电子航道图融合应用、航道数字孪生等。智能应用场景的实现采取模块化策略,可根据不同用户的具体需求进行定制化开发,并以插件化的方式与智慧航道基础支撑平台进行集成应用。

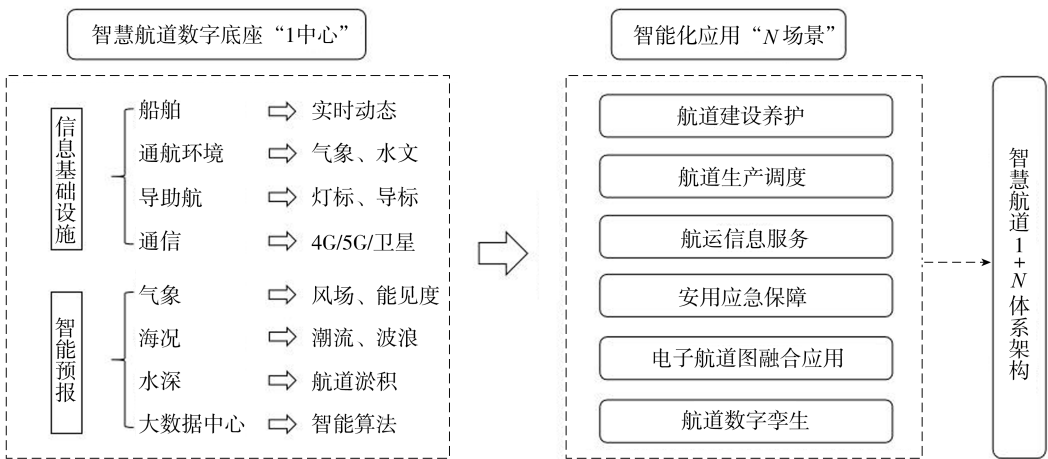


图 1 平台总体架构

Fig. 1 Overall architecture of platform

1.2 逻辑架构

智慧航道基础支撑平台采用 5 层架构设计,分别为数据监测层、网络传输层、支撑环境层、业务模块层和终端应用层(图 2),构建起数据驱动、智能响应、高效协同的智慧航道体系。数据监测层是平台的基础,负责采集航道水文、气象、船舶等要素的实时数据,作为智慧感知与决策分析的核心支撑,通过整合既有观测设备

与新建站点,构建覆盖全航道的观测网,为后续模型计算与业务应用提供可靠数据基础。网络传输层作为信息交互枢纽,支持各类通信方式,包括北斗通信、移动通信、甚高频、VPN、Lora、物联网等,实现监测数据的实时上传与平台指令下发,保障数据在各层之间的稳定流通和快速响应。支撑环境层由云服务环境和超级计算环境双核构成;云环境负责数据管理、服务响应和系统控制,是平台“大脑”;超级计算环境为水动力与泥沙预报等高性能计算任务提供资源支撑,是平台“引擎”;两者通过安全网络实现高效协同。业务模块层围绕航道建设、运维、调度、安全、辅助决策等关键业务,搭建功能模块体系;各模块基于监测与预报数据,结合专业知识开展建模分析,为航道智能化管理提供决策支持和技术支撑。终端应用层面向港口管理单位、海事部门、引航机构和船舶用户等,提供三维可视化展示、数据服务与功能调用,通过门户网站、App 和接口服务等多种形式,实现平台成果的共享与高效应用。

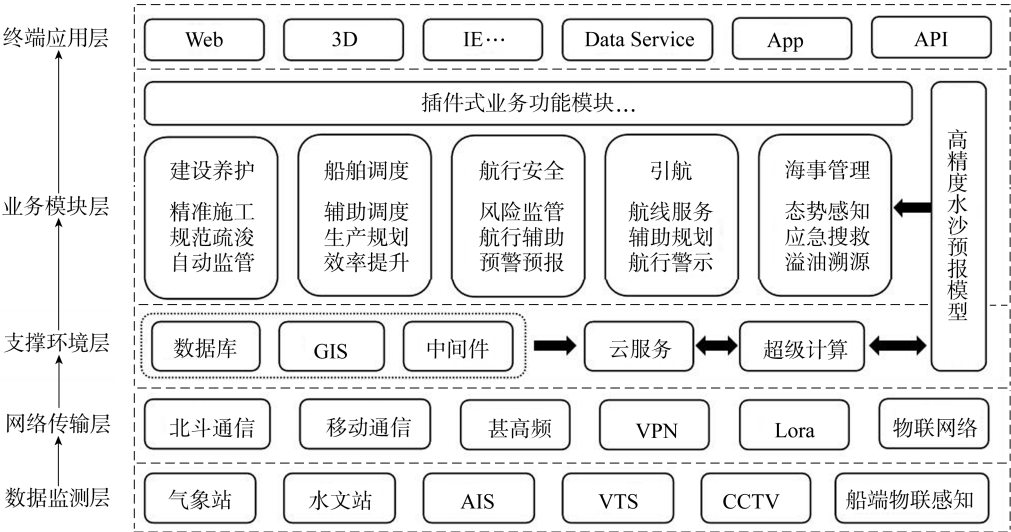


图 2 平台逻辑架构

Fig. 2 Logical architecture of platform

1.3 应用架构

智慧航道基础支撑平台在应用层面构建了四大核心子系统:航道全要素智能采集、水动力模拟预报、水沙分析和可视化应用,形成完整的数据生产—分析决策—可视服务闭环。航道全要素智能采集子系统作为平台的数据源头,整合现有及新建水文、气象、船舶等观测设备,构建多要素观测网,实现对航道状态的实时感知与数据汇聚,为平台模型计算和智能分析提供基础支撑。水动力模拟预报子系统通过部署高精度数学模型,生成潮位、潮流等预报数据,具备实时预报能力,是实现智慧化预测的核心组件。水沙分析子系统能自动处理与分析测回数据和泥沙数据,依托泥沙运动模型实现航道淤积状态和水深动态预报,并支持定期数据更新与汇总分析。上述三大子系统共同构成平台的基础数据生产体系,观测数据由平台数据中心统一管理,水文与泥沙模型部署于高性能计算环境,成果数据反馈用于平台智能化分析及可视化模块调用。可视化应用子系统构建用户端操作入口,基于 B/S 架构及动态可视化技术,提供交互式航道场景展示与功能操作,实时呈现模型仿真结果与业务状态,助力用户实现高效、直观的航道智能管理。

2 基础支撑平台关键技术

海港智慧航道基础支撑平台以航道环境要素数据的采集和预报为核心内容,关键技术主要包括航道全要素智能感知技术、高精度水动力泥沙模拟仿真、预报系统自动化运行。

2.1 航道全要素智能感知技术

《关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见》中指出,应推进航道智能感知设备部署应用,加强水位、气象、海况、航标状态、航道尺度、整治建筑物、桥梁通航净空尺度、通航建筑物运行状态的动态监测。通过在航道及周边合适位置部署前端传感器监测设备,重点监测航道的水文、气象等环境要素和船舶要素等,是建立智慧航道的基础,也是实现航道智能化升级的必要手段。航道全要素智能感知技术主要包括环境要素的感知、船舶要素的感知及后台数据管理,其技术路线如图 3 所示。

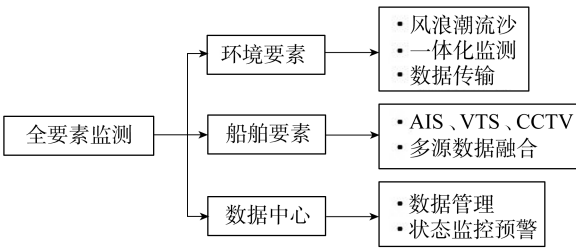


图3 航道全要素智能感知技术路线

Fig. 3 Technical route for full-element intelligent sensing of waterway

2.1.1 环境要素感知

根据航道水文气象监测规范(如 GB/T 12763.3—2020《海洋调查规范—第3部分:海洋气象观测》)及技术指标进行部署实施,对气象六要素、能见度等气象数据和潮位、潮流、波浪、含沙量、水深等水文数据等进行实时监测。气象六要素及能见度主要通过建立气象站、能见度监测站的方式实时采集,观测手段已非常成熟。水文数据直接反映了航道通航条件,是影响船舶安全通航的重要环境因素,同时也是影响航道通航利用率的关键,因此水文数据是航道感知网的重点监测内容。潮位、潮流、波浪、含沙量数据的观测均有成熟的传感器设备,以浮标为载体辅以适当的通信手段,可实现以上数据的实时观测。

a. 潮位。潮位可采用压力式验潮仪进行测量,并配备移动数据通信、太阳能供电系统等,实时将数据传输至数据中心,实现潮位数据的24 h不间断连续采集与实时遥报。现场布设过程中,一般将验潮设备安装于海底。水下验潮设备的技术参数选择如下:①采样频率不低于2 Hz,具备数据平均及过滤平滑功能;②深度量程不少于30 m,精度不低于±0.05%FS,时间常数小于10 ms。

b. 测流设备。多选择基于声学多普勒原理的观测设备,技术参数如下:①具备底跟踪功能,以确保浮标在回旋运动过程中的测量精度;②具备自容式及在线式两种观测模式;③具备剖面分层功能,分层单元厚度不超过2 m;④底跟踪最大深度30 m,流速量程20 m/s,流速精度(0.25%±2) mm/s;⑤内置罗经与姿态传感器,能外接电池包。

c. 波浪。目前大多采用坐底式测量方法进行连续自动观测。波浪观测设备的技术参数如下:①测量参数包括波浪高度、波浪方向、周期;②波高、波向、波周期的测量范围分别为0~30 m、0~359°、0~25 s;③波高、波向、波周期的测量精度分别为测量范围的1%或0.01 m、±10°、±0.5 s;④波高、波向、波周期的测量分辨率分别为0.01 m、1°、0.01 s。

d. 含沙量数据通过浊度仪进行测量。测量精度为±2%测量值或0.5 NTU;测量范围为0~1 000 NTU(低量程)/0~4 000 NTU(高量程)。水体含沙量观测需分层采集数据,然后通过“浊度观测值-含沙量”率定关系进行观测数据的转化,将结果转换成含沙量数据输出。

e. 基于遥测遥报的多源数据采集控制。按照设定的工作时序,由数据采集器自动采集、处理、存储观测数据,并将处理后的数据通过移动网络实时发送至接收站。

2.1.2 船舶要素感知

船舶动态数据包含船舶AIS信息、雷达扫测数据、CCTV视频监测数据。通过建立VTS雷达站、AIS陆地基站、CCTV视频监测站的方式可对港域船舶动态进行实时监管。不同监测方式采集到的信息也不完全相同,且各有优缺点,一般采用多种监测手段相结合的方式提高船舶动态监测的覆盖度及可靠性。目前大多数港口已有的VTS监管系统已经形成对海域船舶动态监管的全面覆盖,但尚需要完成多源数据融合与云物联集成改造,将已有船舶监测数据纳入智慧航道观测系统中,实现数据的实时对接,并对监测数据进行网络并入,实现数据实时传输。

2.1.3 数据中心

后台数据管理中心负责实时接收现场监测数据,对监测数据进行校核、解码、清洗、存储,并对现场监测设备的运行状态进行预警。

2.2 高精度水动力泥沙模拟仿真

虽然通过现场测站实时采集了水文要素,但测站建设和运维费用高昂,因此现场只会布设几个站位,导致有限的水文监测站数据不足以反映航道整体水文泥沙环境态势。同时,现场测站无法获得未来的海洋环

境变化过程,因此还需要依据水文水深的预报数据提升通航效率和安全保障水平。水动力及泥沙智能预报模型的实现依赖于高精度水文泥沙数值模拟技术和高性能计算机仿真技术的融合。根据智慧航道对水文泥沙场预报数据的需求,基于水动力及泥沙运动理论,对近海水体运动过程进行数学建模,并通过离散化运算实现物理方程求解,得到水体的运动过程,并输出潮、流、浪、沙等数据信息。

2.2.1 数学模型控制方程

控制方程主要包括动量方程、连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \tag{3}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{4}$$

式中: u, v, w 分别为速度在 x, y, z 方向的分量; g 为重力加速度; t 为时间; ρ_0 为水体参考密度; ρ 为水体密度; p 为静水压力; f 为科氏参数; K_m 为垂向涡黏系数; F_u, F_v 为水平动量扩散系数。

悬沙运动控制方程为三维对流扩散方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial C}{\partial z} \right) \tag{5}$$

式中: A_H, K_h 分别为水平和垂向泥沙质量扩散系数; C 为悬浮泥沙浓度; w_s 为泥沙沉速。

2.2.2 高性能模拟仿真技术

沿海港口航道水域的潮汐与潮流,受近岸海域地形、岸线等地理条件的约束,叠加波浪、径流、气象强迫等动力因素的综合作用,呈现出显著的时空演变特征。为了保证数学模型运算速度及数据时效性满足港口航道生产业务应用,尚需要解决潮汐潮流预报准确性、空间高分辨率与计算效率、多要素综合作用与短预报时限的矛盾等 3 个关键技术问题。为此,本文将水文泥沙数学模型与高性能仿真技术进行融合,采用高效并行潮汐潮流三维数值模式,从预报精度、模拟效率、潮汐潮流对复杂动力要素的响应 3 个方面出发,采用不同的技术方法进行解决:①研发近岸海域分潮序列自动同化技术,采用短期实测数据同化,解决潮汐预报精度的问题;②采用区域分割和并行计算技术,形成大范围海域低分辨率网格和近岸高精度网格的在线嵌套模式,解决空间高分辨率与计算效率之间的矛盾;③实现风场动力环境耦合计算,考虑风场因素对潮汐潮流的影响,引入距平参数调差方法,解决多要素综合作用与短预报时限的矛盾。

2.3 预报系统自动化运行

数学模型建立完成后,动力环境及泥沙环境的智能预报还需要解决在无人干预的条件下实现模型自动化运算的问题。本文由预报系统完成水文泥沙要素的模拟计算及预报结果的输出。预报系统是航道智能预报的核心,其作用是加载各数学模型,按照计划任务及设计参数完成计算过程,并按指定格式输出计算结果,同时可通过定时任务计划及控制脚本实现整个计算过程的自动运行。

预报系统运行环境基于 Linux 系统平台,运行流程:①通过 Linux 系统的定时任务守护进程 crontab 定时启动预报主控脚本;②由主控 Shell 脚本逐级分解作业,依次完成数学计算模型所需的气象数据、潮汐开边界文件格式的转换;③计算文件准备完毕后调用 Linux 集群作业调度系统 Slurm,将数学模型计算任务提交并保障其运行所需的计算资源,以确保按照预期完成计算过程;④计算完成后进行预报结果的分析与处理,将预报数据进行备份,将指定的预报结果进行发布和展示;⑤将整个预报流程的日志信息发送至目标邮箱,以便对运行过程中可能出现的警告和报错信息进行监控。整个预报流程从启动到预报结果的发布都由布置在计算服务器中的预报系统控制,在布置完成后,其正常运行可完全脱离人工的操作。

3 天津港智慧航道基础支撑平台建设成果

3.1 基础数据现场实测站建设

在天津港海域建设了航道基础数据观测站,实现了数据的实时采集与传输,包括:1 个气象站,部署于东

突堤处;2个潮位站,采用压力式验潮仪,部署于东突堤和航道口门处;1个波浪和潮流站,采用多普勒声波浪剖面流速仪 AWAC(浪龙),该仪器与流速测量仪 ADCP 进行集成,实现浪、潮流一体化观测,部署于航道口门处;2个含沙量站,采用 OBS 3+浊度计,部署于东突堤及航道口门处;1个 AIS 基站,监测港区周边船舶 AIS 数据,位于海边办公楼顶。

3.2 水动力和泥沙淤积模型构建与运算

通过自主研发风、浪、流、沙耦合的精细化模拟技术,建立天津港航道水动力和泥沙淤积模型,基于实时观测数据的同化反演实现预报精度的提升,并基于高性能并行化技术实现海量数据的快速运算。

a. 模型构建。数学模型涵盖了渤海和黄海全部及东海部分区域。为拟合岸线和航道、堤线等复杂边界,数学模型采用非结构化的三角形网格,重点对天津港主航道所在区域进行网格加密。

b. 模型验证。常规天气条件下,进行多组基于实测数据的模型验证工作,分别选取海域的短期序列(现场定点观测的大、小潮水文资料)和长期序列(观测数月的潮位、流速流向和含沙量)开展模型验证;极端天气条件下,主要依据的是近年实测风暴潮增水潮位过程,模型计算时考虑了空间分辨率为 0.1°的实测风场数据,由此计算得到多个实测潮位站的潮位过程,并与实测值进行对比,同时对风暴潮增水期间的高潮位进行了误差统计分析,并根据结果对模型进行优化。

c. 模型运算。天津港智慧航道基础支撑平台在天河超算环境下完成了预报系统的调试、部署、上线,实现了预报系统的业务化运行及预报数据生产。预报系统由天河超级计算服务器上的定时任务守护进程启动预报主控脚本,控制数值计算程序逐级分解作业,依次完成计算文件准备、计算任务提交、计算任务执行、预报结果的处理、备份及发布,并对预报任务的计算时间及稳定性进行日志记录。

3.3 预报精度

天津港智慧航道基础支撑平台从 2024 年 2 月开始运转,利用平台测站开展风速、水位、潮流、波浪和含沙量等实时观测,同步开展水动力泥沙模拟计算,针对当日 00:00 起未来 72 h 的情况进行预报。正常天的潮位预测精度达到 0.1 m 左右,整体能够满足实际生产需求。同时各测站计算值与实测流速、流向在连续的变化过程中都比较接近,满足 JTST 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》要求,潮流模型能够较好地反映天津港海域的潮流运动规律。

3.4 可视化展示系统

平台用户界面采用 B/S 架构,Web 端用户界面的设计采用 WebGIS 界面风格,观测数据主要通过曲线图表方式展示,气象、潮流场、泥沙场预报数据通过动态矢量图层方式展示,地图图层包含电子地图、卫星图、电子海图、电子航道图及其他专题图等多种图层数据信息。整体界面风格适配大屏幕界面展示风格为主,内嵌智慧航道平台智能化建设养护功能模块,并预留生产调度、航运服务、通航安全保障等智能化应用场景接口。

天津港智慧航道基础支撑平台整体界面设计如图 4 所示,图中展示了天津港口门附近涨潮时刻的流场分布。同时具备人机交互操作功能,通过鼠标点击可以弹窗方式展示任何位置处的水深、潮位、流速、流向等关键要素。用户还可以通过窗口选项或界面上划线选取的方式,查询某段航线沿程在不同时刻的水动力要素预报值,并根据输入的阈值查询相关通航预警等,从而为计划调度、航行操作等提供辅助。

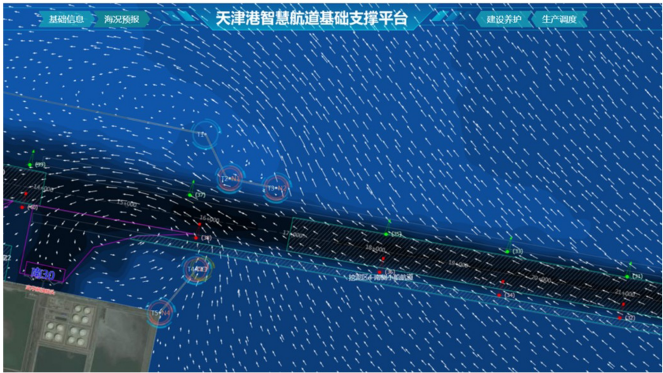


图 4 智慧航道基础支撑平台可视化界面示意图

Fig. 4 Visualization interface of basic platform for intelligent waterway

4 讨 论

4.1 基础平台建设经验教训和发展方向

4.1.1 环境要素基础设施建设

天津港智慧航道基础支撑平台目前已经正常运转 1 年多的时间,各要素都按相关要求进行了实时采集与传输、存储,为未来天津港建设世界一流智慧港口^[15]打下了坚实基础。但是,口门附近海域因防波堤挑流产生环流,在转流时刻流向相对较乱,导致此处实测站与航道内的流速、流向有所差别。因此,后续实测站位应

尽量布设在口门环流直接影响区之外。

另外,存在沿海现场测站成本高、仪器容易锈蚀损坏、仪器维护成本高等行业共性难题,造成智慧航道建设总投资高昂,一定程度上抑制了海港智慧航道的发展,因此降低现场环境要素感知成本是迫切需要解决的问题。其中含沙量观测代价最大,目前基本是采用光学仪器测量浊度并根据率定关系计算含沙量,但因光学仪器容易附着海生物等而造成数据失真,需要非常频繁的清洗维护工作^[16]。声学测量含沙量是一个重要方向,如使用 ADCP、AQUAscatter 等声学测沙仪,除受水生物污垢影响较小外,还可测量得到非侵入式的含沙浓度剖面,将光学仪器的单点测量变为浓度剖面。但这种声学测量方法估算悬移质浓度也有较大的局限^[16-17],如粒径影响、能量耗散等,因而现场实际操作中很少应用。另外,融合多源卫星遥感数据与现场观测资料,构建悬沙浓度反演关系,实现海域悬沙浓度反演,可大幅减少浊度计数量,并实现含沙量观测由个别站点升级为大范围海域,因此该技术在智慧航道中的应用将会更广阔。

水深观测方面由于难以克服定点大范围扫测及海量数据在线处理的难题,尚无法实现航道水深的实时自动观测,目前仍需依靠测量船定期扫测获得航道水深,采用的仪器为单波束测量仪或多波束测量仪。随着无人船测量技术发展,在适当位置设立无人船基地,针对波高和流速都较小的港池泊位及内航道等区域,在非通航时段对重点区域进行水深观测,将有助于实现水深自动化测量,并大幅降低成本。

4.1.2 模型预报精度

正常天气下的环境要素模拟预报精度已能满足相关规范要求,并满足船舶调度、引航等实际生产需求,但是在台风、寒潮等特殊大风作用下潮位、流速和泥沙淤积的预报精度都还有较大的提升空间。研究发现,台风中心附近增水变化显著,潮致欧拉余流速度也有较大变化^[18],而渤海、黄海等海域经常会受寒潮影响而产生较大增减水。因此,水位变化即增减水以及上层水体的流速、流向等在很大程度上受风向、风速、风时等气象要素影响。但是目前风场预报精度相对较差,往往导致大风引起的相关环境要素的模拟与实测值相差较大,因此大风模拟精度提升是重要方向。另外,随着长期观测数据的积累,借助人工智能优化预报模型,也是提升水动力泥沙预报精度的一个重要方向。

4.1.3 动态展示

天津港智慧航道基础支撑平台具备了地理信息数据的展示与动态可视化功能,但离数字孪生平台还有较大差距。未来,需要利用数字孪生技术,开展复杂场景感知、自主协同控制、调度组织优化、信息安全交互等研究,形成泛在互联、高效智能的航道孪生场景应用^[19-21]。

4.2 基于基础支撑平台的管理服务智慧化

借助基础支撑平台提供的基础数据,可以进一步推进生产调度智慧化、航道养护智慧化、航道公共服务智慧化。例如航道养护管理方面,利用基础支撑平台提供的预报水深,以施工全过程智能监测为主,并支持自动识别浅点、方量分析、疏浚计划制定与方案优化,提升施工全周期的规范化、透明化和智能化管理水平^[22]。另外,还可为航道生产调度、通航安全保障、溢油及搜救等生产运营管理提供智能化辅助。

5 结 语

在基础支撑平台框架设计和环境要素感知与模拟预报关键技术研究的基础上,开发建设了天津港智慧航道基础支撑平台,实现了覆盖气象、水文、泥沙、船舶等多要素的实时智能感知,并通过高精度水动力泥沙模拟仿真和自动化运行,实现了未来 72 h 水位、流速、水深等关键环境要素预报,为航道通航、养护等业务提供数据支撑。在航道基础设施数字化的基础上,进一步开发相关功能模块来提升生产运营管理和对外服务智慧化水平,是未来智慧航道建设的重要发展方向。

参考文献:

[1] 许家帅,鲍可馨,马瑞鑫,等. 智慧水运发展综述与展望[J]. 水道港口,2025,46(1): 1-11. (Xu Jiashuai, Bao Kexin, Ma Ruixin, et al. Review and outlook on the development of smart water transport[J]. Journal of Waterway and Harbor,2025,46(1): 1-11. (in Chinese))
[2] 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. (Luo Jianan, Geng Xiongfei, Wen Jie, et al. Research status, problems, and prospects of smart channel for inland river in China[J]. Port & Waterway

Engineering,2023(2):123-128. (in Chinese))

[3] 郭涛,刘怀汉,万大斌,等. 长江“智能航道”系统架构与关键技术[J]. 水运工程,2012(6):140-145. (Guo Tao,Liu Huaihan,Wan Dabin,et al. System architecture and key technology research of Yangtze River intelligent waterway[J]. Port & Waterway Engineering,2012(6):140-145. (in Chinese))

[4] 吕永祥,何乐,陈琳,等. 长江数字航道和智能航道的分析与思考[J]. 交通科技,2013(2):161-164. (Lyu Yongxiang,He Le,Chen Lin,et al. Analytics and thoughts on Yangtze River digital and intelligent waterway[J]. Transportation Science & Technology,2013(2):161-164. (in Chinese))

[5] 刘怀汉,李学祥,杨品福,等. 长江智能航道关键技术体系研究[J]. 水运工程,2014(12):6-9. (Liu Huaihan,Li Xuexiang,Yang Pinfu,et al. System of key technology of Yangtze River intelligent waterway[J]. Port & Waterway Engineering,2014(12):6-9. (in Chinese))

[6] 陆英. 长江数字航道建设成果及展望[J]. 水运工程,2016(1):12-14. (Lu Ying. Progress and reflection of Changjiang digital waterway construction[J]. Port & Waterway Engineering,2016(1):12-14. (in Chinese))

[7] 李学祥. 内河智慧航道发展研究[J]. 中国水运,2023(7):15-19. (Li Xuexiang. Research on the development of inland river intelligent waterways[J]. China Water Transport, 2023(7):15-19. (in Chinese))

[8] 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 Xinping,Liu Chenguang. Review and prospect for intelligent waterway transportation system[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2016,11(6):807-817. (in Chinese))

[9] 李学祥,刘怀汉. 长江航道关键技术研发进展综述[J]. 中国水运,2023(1):93-95. (Li Xuexiang, Liu Huaihan. A review of research progress in key technologies of the Yangtze River Waterway[J]. China Water Transport, 2023(1):93-95. (in Chinese))

[10] 童剑. 京杭运河智慧航运建设方案研究[J]. 现代交通技术,2021,18(3):83-87. (Tong Jian. Research on the construction plan of smart shipping on the Beijing-Hangzhou canal[J]. Modern Transportation Technology, 2021, 18(3):83-87. (in Chinese))

[11] 叶嘉宁,孙俊锋,廖鹏. 江苏智慧航道建设经验与展望[J]. 中国水运,2024(23):64-66. (Ye Jianing, Sun Junfeng, Liao Peng. Experience and prospects of intelligent waterway construction in Jiangsu Province[J]. China Water Transport,2024(23):64-66. (in Chinese))

[12] 刘怀汉,张圣丽,沈思,等. 长江干线数字航道建设进展及展望[J]. 水道港口,2025,46(2):165-170. (Liu Huaihan,Zhang Shengli,Shen Si,et al. Effect and application of Yangtze River digital channel construction[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2025,46(2):165-170. (in Chinese))

[13] 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. (Yang Yang,Zhang Mingjin,Han Yufang,et al. Research on key technologies of intelligent monitoring, warning and information service of inland waterway facilities[J]. China Basic Science,2021,23(1):26-33. (in Chinese))

[14] 何涛涛,黄登,余长慧,等. 面向长江数字航道的关键航道要素智能感知研究[J]. 测绘地理信息,2023,48(1):122-126. (He Taotao,Huang Deng,Yu Changhui,et al. Intelligent perception of key waterway elements for digital waterway in Yangtze River[J]. Journal of Geomatics,2023,48(1):122-126. (in Chinese))

[15] 褚斌. 全力打造世界一流智慧港口 持续开创蓬勃兴盛天津港新局面[J]. 中国水运,2020(4):6-8. (Chu Bin. Build a world-class intelligent port and create a new situation of prosperous Tianjin port[J]. China Water Transport,2020(4):6-8. (in Chinese))

[16] 庞启秀,辛海霞. 风浪期间及风后泥沙现场观测技术研究[J]. 泥沙研究,2013(6):38-44. (Pang Qixiu,Xin Haixia. Techniques of felid survey of sediment during and after large wind waves[J]. Journal of Sediment Research,2013(6):38-44. (in Chinese))

[17] Thornea P D,Hanes D M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes[J]. Continental Shelf Research, 2002,22(4):603-632.

[18] 罗锋,汪忆,杨洁,等. 相似路径台风风暴潮过程对比[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(6):130-140. (Luo Feng,Wang Yi,Yang Jie,et al. Comparative study on storm surge processes caused by typhoons with similar tracks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(6):130-140. (in Chinese))

[19] 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. (Yan Xinping,Li Chen,Liu Jialun,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. (in Chinese))

[20] 毕金强,高邈,鲍可馨,等. 沿海航道数字孪生场景构建方法研究[J]. 水道港口,2024,45(6):939-946. (Bi Jinqiang, Gao Miao, Bao Kexin, et al. Research on construction method of digital twin scene of coastal channel[J]. Journal of Waterway and Harbor,2024,45(6):939-946. (in Chinese))

[21] 马瑞鑫,薛礼,问皓,等. 数字孪生航道建设及航道智慧化指标体系研究[J]. 水道港口,2024,45(4):612-620. (Ma Ruixin, Xue Li, Wen Hao, et al. Research on digital twin waterway construction and intelligent waterway indicator system[J]. Journal of Waterway and Harbor,2024,45(4):612-620. (in Chinese))

[22] 庞启秀,李怀远,王克勤,等. 航道疏浚全过程智能监管系统研发[J]. 航海技术,2024(2):18-21. (Pang Qixiu, Li Huaiyuan, Wang Keqin, et al. Research and development of intelligent supervision system for the whole process of channel dredging[J]. Marine Technology,2024(2):18-21. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 08 - 01 编辑:刘晓艳)

+++++

(上接第 60 页)

[11] 徐力群,张国琛,马泽锴. 土石堤坝隐患探测综合物探技术发展综述[J]. 地球物理学进展,2022,37(4):1769-1779. (Xu Liqun, Zhang Guochen, Ma Zekai. Development of comprehensive geophysical prospecting technology for hidden danger detection of earth rock dams[J]. Progress in Geophysics,2022,37(4):1769-1779. (in Chinese))

[12] 陈亮,颜书法,万昱. 跨孔电法探测地下连续墙渗漏隐患的应用研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(8):1605-1614. (Chen Liang, Yan Shufa, Wan Yu. Application of cross-hole electrical method to detection of the hidden leakage of diaphragm walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(8):1605-1614. (in Chinese))

[13] Abdulsamad F, Revil A, Ahmed A S, et al. Induced polarization tomography applied to the detection and the monitoring of leaks in embankments[J]. Engineering Geology,2019,254:89-101.

[14] 陈江,熊杰,李宇驰,等. 基于热效应的涉水混凝土工程裂缝监测方法[J]. 工程科学与技术,2023,55(1):296-303. (Chen Jiang, Xiong Jie, Li Yuchi, et al. Crack monitoring method for wading concrete engineering based on thermal effects[J]. Advanced Engineering Sciences,2023,55(1):296-303. (in Chinese))

[15] 刘国庆,洪云飞,王蔚,等. 联合示踪探测方法在石梁河水库大坝渗漏中的应用[J]. 水利水电科技进展,2023,43(6):74-81. (Liu Guoqing, Hong Yunfei, Wang Wei, et al. Application of combined tracer detection method in dam leakage of Shilianghe Reservoir[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(6):74-81. (in Chinese))

[16] 张治国,程志翔,张孟喜,等. 盾构隧道接缝漏损诱发水土流失模型试验及离散元分析[J]. 中国公路学报,2023,36(1):162-175. (Zhang Zhiguo, Cheng Zhixiang, Zhang Mengxi, et al. Model test and discrete element analysis of soil and water loss induced by joint leakage of shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(1):162-175. (in Chinese))

[17] Stefania G A, Rotiroti M, Buerge I J, et al. Identification of groundwater pollution sources in a landfill site using artificial sweeteners, multivariate analysis and transport modeling[J]. Waste Management,2019,95:116-128.

[18] 戚海博,顾凯,张博,等. 基于单孔热响应测试的地下水渗流场评价:以扬中指南村崩岸场地为例[J]. 工程地质学报,2022,30(5):1713-1720. (Qi Haibo, Gu Kai, Zhang Bo, et al. Evaluation of groundwater flow field based on single-borehole thermal response test: a case study of Zhinan Village bank collapse site[J]. Journal of Engineering Geology,2022,30(5):1713-1720. (in Chinese))

[19] Yu Haitao, Liu Zhibin, Cai Xinchun, et al. Research on the detection of leakage points in vertical barrier walls using a combined method of ERT and tracer methods[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(59):123008-123021.

[20] 梁越,何慧汝,许彬,等. 基于透明土的水力梯度对渗流侵蚀影响试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):60-66. (Liang Yue, He Huiru, Xu Bin, et al. Experimental study on the influence of hydraulic gradient on seepage erosion based on transparent soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(5):60-66. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 02 - 17 编辑:刘晓艳)