



智慧运河总体架构与典型场景应用实践*

周敬祥¹, 潘海涛¹, 陈永剑¹, 闫强², 王宇龙², 王超亮¹, 张智森¹, 王帅¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 平陆运河集团有限公司, 广西南宁 530029)

摘要: 平陆运河是西部陆海新通道的骨干工程, 打造高效、智慧、绿色、韧性运河是高标准、高质量建设平陆运河的重要组成部分。通过规划智慧运河的总体架构, 结合平陆运河建设及运营管理特点及需要, 提出“建设管理全流程贯通协同、进度管理全周期数字孪生、质量管理全过程模拟调控、安全管理全方位预警预控、绿色管理全环节监测预警”为典型应用场景的智慧建管系统, 以及“运营管理一网高效协同、运行调度一体衔接联动、航闸管养一图科学智能、安全应急一键协同联通、物流服务一站高效便捷”为典型应用场景的智慧运营系统, 并从全要素立体感知、全过程数字孪生、全过程模拟推演、全方位智能服务、全技术自主可控等5个方面总结数字孪生运河的创新性技术特点, 可为类似智慧港航工程建设提供借鉴。

关键词: 数字孪生; 平陆运河; 总体架构; 智慧运河

中图分类号: U612.33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0009-08

Overall architecture and typical application scenarios of smart canal

ZHOU Jingxiang¹, PAN Haitao¹, CHEN Yongjian¹, YAN Qiang², WANG Yulong², WANG Chaoliang¹, ZHANG Zhisen¹, WANG Shuai¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: Pinglu Canal is the key project of the Western Land-Sea New Corridor, and building an efficient, intelligent, green, and resilient canal is an important component of the construction of Pinglu Canal with high standard and high-quality. By planning the overall architecture of the smart canal and combining the characteristics and needs of the construction and operation management of Pinglu Canal, the smart construction and management system is proposed as a typical application scenario including “full process integration and coordination of construction and management, full cycle digital twin of progress management, full process simulation and regulation of quality management, all-around early warning and prevention of safety management, and full-link monitoring and early warning of green management”, as well as the typical application scenarios of the smart operation system, including “one-net efficient coordination of operation management, one-body seamless coordination and linkage of operation and dispatch, one-map scientific and intelligent management of locks and maintenance, one-click coordinated and connected emergency response, and one-station efficient and convenient logistics services”. Furthermore, we summarize the innovative technical features of the digital twin Pinglu Canal from five aspects of “full-factorial three-dimensional perception, full-process digital twin, full-process simulation and simulation, all-around intelligent services, and full-technology self-developed and controllable”, which can provide reference for the construction of similar smart port and navigation projects.

Keywords: digital twin; Pinglu Canal; overall framework; smart canal

收稿日期: 2024-05-15

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC3208805)

作者简介: 周敬祥 (1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事智慧港航应用研究工作。

1 智慧运河提出的背景

当前,全球正处于新一轮技术革命孕育阶段,技术创新日趋活跃,催生了大量新产业、新业态、新模式。北斗导航、人工智能、5G等高新技术在船舶、港口、航道、航行保障、安全监管以及运行服务等领域的创新应用日趋广泛,对航道基础设施、运输装备及运输组织模式、治理模式产生了重大影响。在此背景下,京杭运河、小清河、江淮运河、长江等内河航运工程纷纷开展了内河信息化建设^[1]。

长江提出以“一主六分七中心,一图一站三平台”为总体架构,形成了以长江电子航道图为典型应用的长江数字航道系统;京杭运河苏北段推广使用苏北运河航闸智能运行系统和船讯通APP,通过船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)智能调度+联合调控,实现了高效过闸;京杭运河济宁段构建“一图一站三平台”的智慧航道,以利企便民为主线,推广应用“济港通”APP,实现服务和管理创新;山东小清河复航工程搭建“一中心统管全流域,一图一站两平台,感知传输两张网”的架构,实现航道要素运行状态的智能感知、运行监测数据的智能分析,以及面向不同用户的细粒度智能服务;江淮运河建设“数字孪生一张图、骨干通信一张网、数据资源一中心、指挥调度一平台”,有力支撑了项目建设和运营管理。

作为新时代的世纪工程,平陆运河具有规模大、多业务、多环节、河海直达等特点。2021年,交通运输部批复西部陆海新通道(平陆)运河智慧

航道工程为交通运输领域首批新型基础设施建设重点工程。工程系统总结了京杭运河、小清河、江淮运河、长江等内河信息化建设经验,实现信息技术与平陆运河建设运营特点相结合,构建智慧平陆运河建设与运营体系,提升了运河工程规建管养全过程的一体化管控能力、航运协同服务和运行保障能力^[2]。

2 智慧平陆运河总体架构

结合平陆运河规划建设、管理养护和运行监测、调度指挥、决策分析、公众服务等业务需求,构架以“一朵云两张网、一平台两系统、一中心两体系”为建设内容的智慧运河总体架构。“一朵云”即平陆云,构建安全可靠、算力充沛、集约管理、按需调配、互为备份的数据中心基础设施;“两张网”即泛在感知网及高速传输网,实现运河建设运营全要素信息实时感知和高效传输;“一平台”即数字孪生平台,实现平陆运河全生命周期数据汇聚、数据治理、数据服务、数据展示等功能,构建平陆运河数字底板;“两系统”即服务于建设期的智慧建管系统及服务于运营期的智慧运营系统;“一中心”即部署于平陆运河集团及青年枢纽的调度指挥中心;“两体系”为智慧平陆运河标准规范体系、安全保障体系及相关的接口等。总体框架体系分为感知网、传输网、平陆云、数字孪生平台、应用系统、终端层5个层级,形成具有“立体感知、全域协同、管控一体、智慧应用、弹性服务”特点的智慧平陆运河总体框架,见图1。



图 1 智慧平陆运河总体架构

Fig. 1 Overall structure of smart Pinglu Canal

3 智慧运河典型应用场景设计

3.1 智慧建管系统组成

3.1.1 工程建设管理“全流程”贯通协同

如图 2 所示, 通过流程标准化协同、工程质量无纸化验评、工程安全指标化管控、进度质量

精细化跟踪、档案文件全过程归集等技术手段, 建立具有“一模贯通、全域协同”为特征的工程项目管理系统, 实现“工程全要素虚拟映射、建设全过程同步演进、信息全方位交换共享、流程全方位贯通协同”。

流程标准化协同

多人/多业务/实时/异地/协同办公
全面梳理各类业务流程, 建立标准化流程、规范化电子表单库, 实现参建各方高效协同办公

工程质量无纸化验评

全专业数字化质量验评和电子化归档, 缩减了大量流程审批时间、减少人力投入成本、减少沟通成本

工程安全指标化管控

风险动态管控: 建立动态管控算法, 实现风险要素多源融合、风险管控全过程记录、安全风险实时预警
双控融合: 建立隐患排查与安全风险的关联关系, 助力安全双控落实

进度、投资精细化跟踪

智能进度分析, 综合一体化展示
进度仿真与实时控制分析
计划、合同、变更、结算等全过程管理

档案文件全过程归集

电子文件单轨制归档, 覆盖工程档案从产生、报审、签章到导出、归档的整个管理过程, 通过接口将电子档案线上移交至建设单位档案管理系统, 实现数字化移交

图 2 工程建设管理“全流程”贯通协同

Fig. 2 “Full process” integration and coordination of project construction and management

工程建设“一模贯通”: 建设涵盖平陆运河 3 大枢纽、26 座桥梁、35 处高边坡等运河要素的建筑信息模型(building information modeling, BIM)+

地理信息系统(geographic information system, GIS)+ 物联网(internet of things, IoT) 数字孪生平台, 贯穿于设计、建设、施工全阶段, 实现项目全线多

元业务流程与模型的同步更新、共生共长。工程管理“全域协同”：通过流程协同处理技术、无纸化验评技术、数字签名技术、电子档案技术等，构建覆盖设计、施工、监理、业主单位、监管单位等多部门、多专业协作平台，实现多参建单位等资源信息协同。

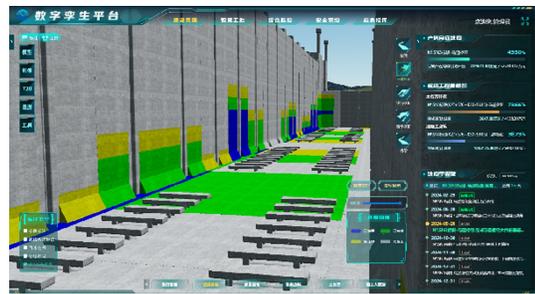
3.1.2 工程进度管理“全周期”数字孪生

依托视频监控、无人机、卫星遥感、物联网、BIM、GIS 等技术，运用多学科耦合仿真方法和仿真引擎技术完成现实世界中的运河要素物理实体到虚拟世界中的镜像数字化模型的精准映射^[3]，实现运河要素物理实体状态和孪生，现场动态“一屏统揽”、工程进度跟踪模拟。

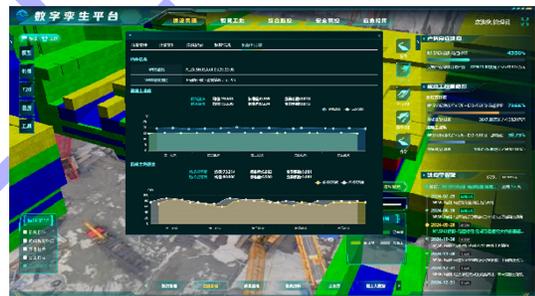
现场动态“一屏统揽”：接入无人机、水文站、遥感卫星等数据，实时统计工程量、土石方开挖量、投资情况，直观展现工程进度情况，并在项目检查和过程汇报时持续为平陆运河建设常态化管理提供有力支撑。工程进度跟踪模拟：清晰直观掌握项目的整体进展情况，包括任务的完成情况、里程碑的达成和关键路径的变化等记录任务的完成情况和工时消耗。通过图表和报表等方式展示项目进度，及时发现工程推进中的问题，确保项目按计划进行。



c) 时序影像



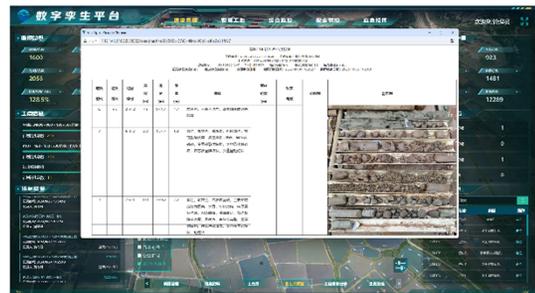
d) 进度管理



e) 业务关联



a) 数字底座



f) 岩土大数据



b) 三维实景

图3 工程建设管理“一模贯通”

Fig. 3 “One model integration” of project construction management

3.1.3 工程质量管理“全过程”模拟调控

平陆运河建设施工中存在大体积混凝土浇筑、巨量土石方开挖、高边坡防护等重点技术难题^[4]，通过信息化手段实现施工前期模拟推演制定最佳

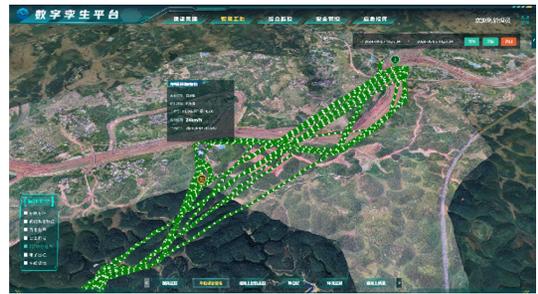
施工方案、施工过程可视可测动态调整施工工序、工程建成实时监测保证工程运行安全。

在大体积混凝土浇筑温控方面, 利用温度应力跟踪反馈仿真分析技术监测现场浇筑的各类边界条件, 真实模拟现场实际的浇筑过程。同时结合热力学参数与温度应力状态, 实时跟踪优化温控标准和措施, 及时反馈到智能温控系统并指导现场温控施工; 在巨量土石方开挖管理方面, 通过信息化手段实时监测工程施工点出产情况及供需情况, 对土石方运输的车辆轨迹、进度、出入场称量进行全过程管控, 实现土石方堆存场的目标匹配及调度方案优化, 整体提高土石方调配效率与综合利用率。

3.1.4 工程安全管理“全方位”预警预控

安全管理是平陆运河建设管理的重要组成部分。通过构建基于物联网技术的智能化管理平台, 全过程实时监控工地各项指标、预警危险情况、提供数据分析报告等功能^[5], 及时发现和解决安全问题, 同时优化施工流程, 提高工作效率。

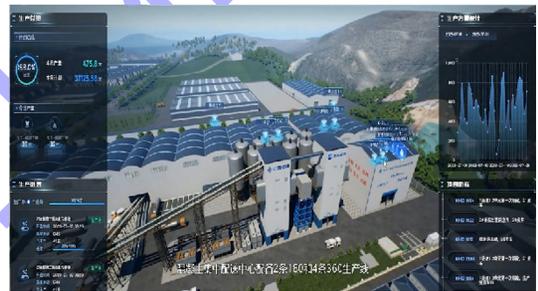
工地实时监控方面, 接入边坡监测、结构物监测、爆破等监测设备, 实时监测工地的各项指标, 及时发现潜在的安全隐患和设备故障。危险预警预控危险方面, 全线 120 个边坡实时监测提前感知, 实现边坡安全风险监控从被动处置到主动防御。通过研发分布式水文预报模型, 准确预报 72 h 水情, 为施工导流及防洪安全提供准确数据。应急救援调度指挥方面, 在现场布设主线单兵设备, 在台风、暴雨关键时期 24 h 值班, 实现应急指挥一键直连, 危险情况及时有效处置。智慧工地“一网感知”见图 4。



b) 车船设备管理



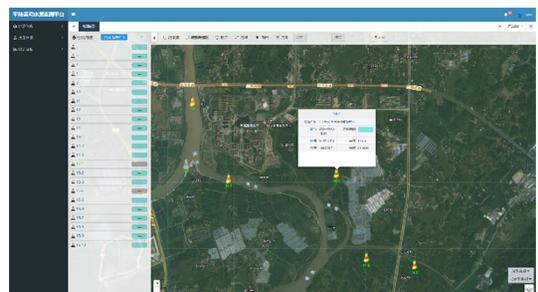
c) 混凝土智能温控



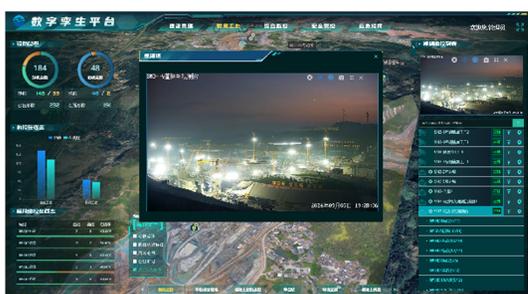
d) 智慧拌合



e) 环境监测



f) 水质监测



a) 视频监控

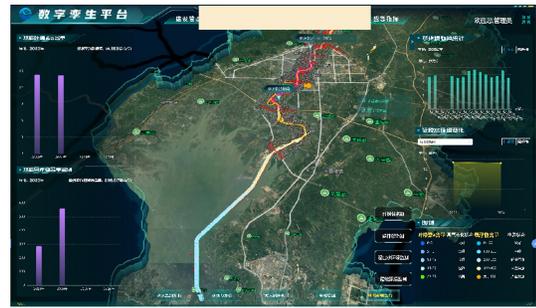
图 4 智慧工地“一网感知”

Fig. 4 “One network perception” of smart construction site

3.1.5 工程绿色管理“全环节”监测预警

绿色是高标准、高质量建设好平陆运河的重要内涵。工程运用信息数字化技术贯穿运河工程建设全过程，助力节约集约利用资源和能源，实现生态负效应最小化。

首次将碳卫星应用于辅助大型施工现场的二氧化碳排放观测^[6]，对运河周边 1 000 余公顷的红树林覆盖面积、叶绿素指数进行观测，解决全域动态巡查难题，实现红树林保护和降碳措施动态评估；定期组织无人机航拍，密切关注红树林环境变化；构建运河建设过程碳排放因子数据库及碳平台核算系统，全程实现碳排放跟踪分析。绿色监测管理相关界面见图 5。



d) 水环境监测

图 5 绿色监测管理相关界面

Fig. 5 Green monitoring management related interface

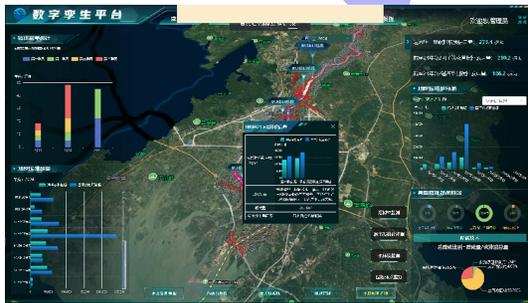
3.2 智慧运营系统组成

3.2.1 运营管理“一网”高效协同

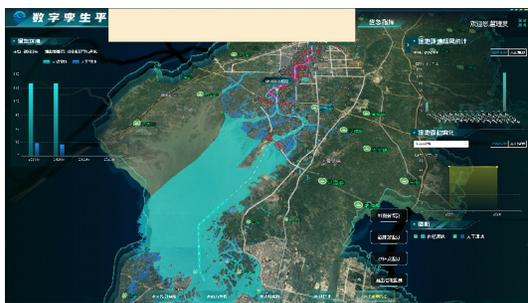
如图 6 所示，以提高物流效率、降低物流成本为目标，以船舶便利运输为核心，将航道、船舶、港口、货物、水文、气象等通航要素和物流服务对象作为一个整体考虑，实现运行调度、航闸管养、港口作业、行业监管等业务协同化、一体化^[7]。整体上实现以西江—平陆船闸群联合调度、北部湾港江海联运作业区调度为核心的“作业联通”、以公铁水多式联运为核心的“物流畅通”、以江河海效能匹配为核心的“能力相通”、以政事企协同监管为核心的“管理互通”。



a) 红树林监测



b) 碳排放监测



c) 湿地监测

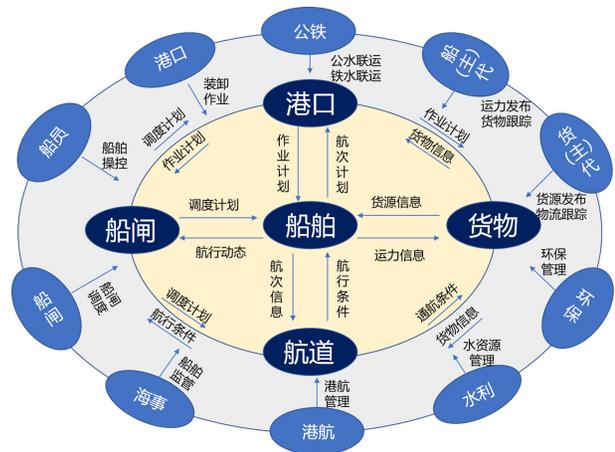


图 6 运营管理“一网”高效协同

Fig. 6 “One-net” efficient coordination of operation management

3.2.2 运行调度“一体”衔接联动

综合 AIS、VTS(vessel traffic service, 船舶交通服务)、北斗、CCTV(closed circuit television, 闭路

电视)等多技术手段,通过数据融合实现过闸船舶定位与身份智能感知,在江侧实现西江—平陆运河船闸群统一报到、统一调度、统一监控、统一服务,为过闸船舶实现“一次报闸、全网通行”^[8],在海侧实现平陆运河至北部湾港江海联运协同调度,解决船舶流量大、锚地容量受限、气象条件复杂、江海船混行等问题,保障船舶在江海联运海域安全有序通行和江海联运高效衔接。

3.2.3 航闸管养“一图”科学智能

根据《内河航道运行监测技术指南》,以 GIS 平台及数字孪生数字底板为基础,接入船闸、航道、船舶、环境等各类感知数据和业务数据,在“一张图”上动态发布航道尺度,提前获取航闸运行的相关预测预警信息及掌握航闸运行的风险点,科学合理安排养护任务,实现监测预警、养护任务、工作调度、现场作业全流程信息化、协同化,提升航道管理养护效率,有效降低养护工作强度。

3.2.4 安全应急“一键”协同联动

实时采集边坡、船闸、航道等基础设施监测信息以及水文气象、船舶航行信息等,建立预警预测模型,通过“一键巡航”及时发现运行安全隐患^[9];建立安全应急管理系统,充分考虑各种突发情况,整理形成应急装备、应急队伍、应急专家库、应急预案库等,突发事件发生时自动生成应急预案匹配,实现应急预案“一键生成”;通过统一通信系统、单兵装备等,打通信息报送、事件处置、应急调度、总结评估等应急工作的核心流程,实现指挥中心和应急现场“一键直连”和应急事件“看得见、喊得通、调得动”的目标,为平陆运河高标准、高质量建设运营保驾护航。

3.2.5 物流服务“一站”高效便捷

汇聚物流各节点的监测运行数据,建立涵盖船舶过闸服务、综合物流服务、多式联运服务、运河经济带相关服务等业务内容的综合物流服务平台^[10],通过网站、移动端等方式提供过闸调度申报、物流综合信息查询、航运交易管理、航运金融管理、航运增值管理、江海联运管理等多种

类的信息服务,构建全链条、智能化、一站式出行服务体系,全方位提升运河信息综合服务水平。

4 智慧平陆运河技术应用

4.1 建设运营“全要素”立体感知

在平陆运河总体规划设计中,通过视频监控、卫星遥感、水文气象、渗压渗流、沉降位移等感知技术手段对工地、车辆、混凝土、以及基坑、边坡、环境等建造期要素进行监测;通过视频监控、雷达、航标遥控遥测、桥梁防撞预警、多波束扫测、智能卡口、水文气象监测、环境感知等感知技术手段对船舶、船闸、航道、边坡、服务区等运营期要素监测。首次构建了陆、河、空、天四位一体的全要素、全方位的感知监测网络,为运河建设运营管理提供基础数据支撑。

4.2 建设运营“全数据”融合贯通

全面采集建设期工地、车辆、船舶、边坡以及运营期的港、航、闸、人、船、货、路的相关数据资源,通过统一的数据标准和共享规范,实现建设运营期全域数据接入,全方位数据治理,全业务多源数据融合,构建了标准统一、分层解耦、融合集成的平陆运河数字底座,实现数据统一汇聚、统一治理、统一服务,为业务综合应用、跨部门信息共享、跨业务协同提供支撑。

4.3 建设运营“全周期”数字孪生

基于建设及感知监测数据,依托 GIS、BIM 和虚拟仿真等技术,运用多学科耦合仿真方法和仿真引擎技术完成现实世界中的运河要素物理实体到虚拟世界中的镜像数字化模型的精准映射,构建了全航段、全过程的平陆运河数字孪生体。在建设期实现施工进度、资金拨付、安全监管、资料归档等业务流程与 BIM 模型的同步更新,在运营期直观展示运河运营情况,并为运行调度、航闸管养、综合服务提供基础支撑。

4.4 建设运营“全过程”模拟推演

基于数据孪生数字底板及感知监测数据,采

用边坡稳定性动态仿真模拟分析模型、基坑安全性动态仿真模拟分析模型^[11]、智慧运河复杂流态监测、通航水情(流场)预测预报模型、运河通航综合评估模型、船舶运行综合分析模型、船闸运行综合分析模型、运河应急调度智能优化模型、运河多源数据融合智能分析模型等计算方法对复杂多样的运河建设和运行形成的海量数据开展实时高效深度的分析预测,实现平陆运河建设及运营的全过程关键环节智能化推演模拟,为工程建设及运营提供辅助决策支持。

4.5 建设运营“全技术”安全可控

根据《中华人民共和国网络安全法》、《中华人民共和国计算机信息系统安全保护条例》、《交通运输部网络安全管理办法》、《信息安全等级保护管理办法》等国家相关法律法规规范,全面落实国家信创相关要求,坚持智能科技与自主可控融合,在船闸自动控制系统、计算存储系统、网络安全系统、前端感知系统、应用支撑系统等全面应用国产化技术,打造自主可控的智慧运河技术体系,确保系统安全、稳定、可控、可靠。

5 结语

1) 在智慧建管方面,打造建设管理“全流程”贯通协同、进度管理“全周期”数字孪生、质量管理“全过程”模拟调控、安全管理“全方位”安全预警、绿色管理“全环节”监测预警等5个应用场景,实现工程建设项目“可管、可视、可控”,提高了大型水运工程的精细化管理水平。

2) 在智慧运营方面,构建运营管理“一网”高效协同、运河调度“一体”衔接联动、航闸管养“一图”科学智能、安全应急“一键”协同联动、运河物流服务“一站”高效便捷等5个应用场景,实现了运营管理全域协同、一体联动。

3) 在技术创新方面,实现了建设运营“全要素”立体感知、“全数据”融合贯通、“全周期”数字孪生、“全过程”模拟调控、“全技术”安全可控

等创新,提高了大型水运工程建设运营的技术和应用水平。

4) 当前智慧运河工程已完成技术方案审查并付诸实施,在内河航运建设、营运智慧化应用方面将形成可复制、可推广的经验,打造践行交通强国战略的创新型智慧航运的样板工程,为大型内河智慧航运工程建设提供示范案例。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张桦,赵代娣.广西辖区内河智慧航道建设管理研究[J].西部交通科技,2024(9):210-212.
ZHANG H, ZHAO DD. Construction and management of smart waterway in Guangxi [J]. Western China communications science & technology, 2024(9): 210-212.
- [3] 刘静思,黄巧薇,张欣.基于数字孪生航道的长江通航安全保障系统设计与实现[J].中国水运,2024(15):60-62.
LIU J S, HUANG Q W, ZHANG X. Design and implementation of Yangtze Rivernavigation safety guarantee system based on digital twin channel[J]. China water transport, 2024(15): 60-62.
- [4] 张金志.建设工程大体积混凝土施工质量控制[J].工程质量,2024,42(9):34-38.
ZHANG JZ. The mass concrete construction quality control of construction engineering[J]. Engineering quality, 2024, 42(9): 34-38.
- [5] 赵建豪,邬德宇,李政,等.智能化安全管控在内河航道整治施工中的应用[J].水利水电技术(中英文).2022,53(S2):463-468.
ZHAO J H, WU D Y, LI Z, et al. Application of intelligent safety control in inland waterway regulation construction[J]. Water resources and hydropower engineering, 2022, 53(S2): 463-468.