



基于北斗的人工岛建造数智化关键技术及平台研究

苏宏明^{1,2}, 张志坤^{1,2}, 刘玲^{1,2}, 胡文慧^{1,2}

(1. 中交星宇科技有限公司, 北京 101399; 2. 中国交通信息科技集团有限公司, 北京 101399)

摘要: 针对海上人工岛建造缺乏高精度地理信息时空基准、有效的通讯方式、整体沉降监测技术和统一的工程应用综合管理平台等问题, 进行人工岛海上施工建造数智化技术研究。采用基于北斗的施工船舶海上定位通讯、数字化施工与机械自动控制 and 北斗高精度安全监测技术方法, 设计人工岛数智化建造管理平台的总体架构和微服务功能架构并进行研发。平台在菲律宾帕塞吹填工程项目开展现场部署应用。结果表明, 北斗技术综合利用实现了施工现场船舶、机械、人员的统一调度指挥、可靠通讯保障和人工岛安全监测服务, 提升人工岛建造的工作效率和数智化水平。

关键词: 北斗技术应用; 海上人工岛建设; 船舶定位通讯; 数字化施工; 安全监测

中图分类号: U655.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0149-07

Key digital technologies and platforms for artificial island construction based on BDS

SU Hongming^{1,2}, ZHANG Zhikun^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, HU Wenhui^{1,2}

(1. CCCC Xingyu Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China;

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

Abstract: The construction of offshore artificial islands lacks high-precision geographical information spatio-temporal benchmarks and effective communication methods. At the same time, there are also issues such as overall settlement monitoring technology and a unified engineering application comprehensive management platform. In view of these problems, digital and intelligent technology for offshore construction of artificial islands is studied. Using BDS-based construction ship maritime positioning communication, digital construction machinery automatic control and BDS high-precision safety monitoring technology methods, the overall architecture and microservice functional architecture of the artificial island digital intelligent construction management platform are designed and developed. The platform is deployed and applied on-site in the Pasay Blow-Fill-Seal Project. The results show that the comprehensive utilization of BDS technology can realize the unified dispatching and command of ships, machinery, and personnel at the construction site, reliable communication guarantee, and artificial island safety monitoring services, and improves the work efficiency and digital intelligence level of artificial island construction.

Keywords: BDS technology application; construction of offshore artificial island; ship communication positioning; digital construction; security monitoring

填海造陆是人类向海洋拓展生存和生产空间的一种重要手段, 一方面可以增加城市建设和工业生产用地, 有效制造平地, 供市区发展, 改善

沿海景观; 另一方面可以创造更多的就业机会, 对旅游、房地产和服务业发展具有不可估量的作用^[1]。

收稿日期: 2024-06-12

作者简介: 苏宏明 (1996—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事卫星技术应用研究。

实际工程建设中,海上人工岛建设项目主要面临3类问题:1)各类施工船舶设备定位容易遭受海上电磁信号干扰,出现导航定位偏差和通讯不畅;2)人工岛建设需要数量和种类极多的船舶协调工作,开展大规模施工作业组织难度较大,作业效率极大受限于船舶间的协调机制;3)人工岛建成后仍然面临地表和深层不稳定的问题,需实时可靠的技术来监测人工岛面的位移沉降。

北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)作为中国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统,可在全球范围内全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定位、导航、授时服务^[2]。国内一些学者利用北斗技术对人工岛施工监测进行研究并部署实施,焦永强等^[3]利用北斗高精度定位和集成通信传输技术,实现远海施工船舶的高精度定位管理和远程管控。李明亮^[4]利用北斗定位技术实现对海上作业人员的位置追踪和遇难报警。田会静等^[5]利用全球定位系统(global positioning system, GPS)技术实现海上打桩船施工定位。吕达昕^[6]利用北斗技术结合各类传感器对人工岛位移进行监测,提供实时的人工岛沉降监测预警保障。

虽然北斗在国内已有较成熟广泛的应用,但目前人工岛建造应用推广北斗技术、产品、平台及标准等方面存在局限性。主要表现在:1)基础研发方面,缺乏在人工岛吹填工程中尤其是海外地区的统一高精度地理信息时空基准,难以实现可靠的船舶外海定位通信功能;2)产品应用方面,缺乏可广泛应用的标准化终端产品及平台,不能完全满足高效、便捷的工程业务应用需求;3)安全监测方面,采用北斗、物联网等多源融合方法监测人工岛整体沉降的技术仍处在起步阶段,尚未完全实现。本研究重点针对海上人工岛建设全周期过程,整合应用北斗星基与地基系统资源,集成统一的数智化管理平台,为海上施工船舶在建设过程中高精度定位和通讯的数智化需求提供技术保障,为人工岛位移监测提供实时的数据支撑。

1 数智化平台关键技术

1.1 北斗船舶定位与通讯技术

导航定位通讯是保证海上施工船舶获取自身位置和船舶管理的重要基础^[7],海上自然环境复杂、系统通联手段少,近海通信主要依靠运营商移动网络和微波通信两种方式,不具备远距离执行远海任务的能力。因此,人工岛吹填工程船舶在海上工作时,需要采用自主可靠的北斗导航定位和短报文通信方式,以保障船舶航行监控、管理调度等重要工作的开展。

1.1.1 船舶高精度定位技术

传统的海上船舶定位受限于外海环境复杂、通信装备配置低等无法满足远海施工船舶高精度通讯定位的需求。为此,提出基于多模多频实时数据的基准站修正信息生成及压缩解码技术。首先,提出北斗实时数据流解码流程,主要包括卫星轨道相关修正信息、大气修正信息、宽巷模糊度等信息解算,信息压缩编码;其次,为满足部分用户对实时性的需求,提出超快速星历方法(IGS ultra-rapid, IGU),能够实时获取且轨道精度较高,可以满足实时性与精度的要求,相较于广播星历几十厘米甚至米级的误差,IGU可大大削弱星历误差对定位带来的影响。根据对船舶北斗高精度接收机的性能验证,可用卫星数稳定保持在10颗以上,水平位置几何精度因子(horizontal dilution of precision, HDOP)稳定在1.5以下,水平位置差异小于10 cm,垂直位置差异小于20 cm。

1.1.2 船舶通讯抗干扰技术

受海上气象条件的影响,如海雾、恶劣天气等,导航定位和通信系统会受到一定程度的干扰,影响其正常运行,因此提升北斗导航定位系统信号的抗干扰能力非常重要。本文采用基于多维特征的干扰侦收技术,对单音干扰、梳状干扰等典型干扰进行干扰侦收,然后提出干扰抑制技术,对抗单音干扰同时有效防护窄带干扰信号,有效提升工程船舶导航定位和通信系统在复杂电磁环境下的正常通信、定位能力。

1.2 北斗数字化施工与控制技术

大规模人工岛建造需要许多不同类型的船舶协调工作, 针对大型人工岛礁建设施工技术难度大、效率低、成本高、通信定位困难等问题, 对施工现场作业环境感知技术进行研究。自动采集现场环境、建造对象、机械、人员数据, 保障施工现场信息的互联互通, 空地一体化多平台全息获取施工工作

业相关数据, 由北斗、激光雷达、惯导、电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD) 摄像机、微电脑控制器等组成, 主要架构见图 1, 设计为基于移动载体进行三维空间全景数据采集的高集成化设备, 可在移动载体行进过程中获取人工岛礁建设精确的地理编码影像和激光点云数据, 采用数据驱动方法对各层次点云实现智能化三维模型重建。

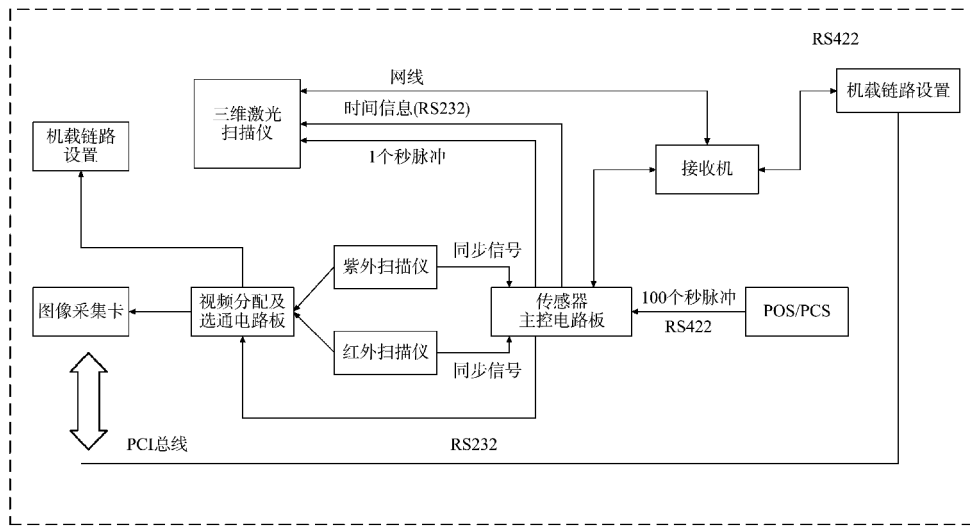


图 1 空地一体施工场景全息数据采集总体架构

Fig. 1 Architecture for holistic data collection in air-ground integrated construction scenario

如图 2 所示, 适用于北斗机械施工控制算法是实现工程机械自动导航的核心技术, 主要包括工程机械前轮转向操纵控制和路径跟踪控制两部分内容。机械在自动驾驶过程中, 通过实时动态(real-time kinematic, RTK)-北斗、速度传感器等车载传感器实时获取机械各项运动参数, 将机械实

际位置和航向信息与预定义路径比较, 计算横向偏差和航向偏差; 导航决策控制器以横向偏差和航向偏差信号作为输入, 通过内置的控制算法计算出预期前轮转角并传输到下位机; 下位机控制器控制工程机械前轮转向跟踪期望前轮转角, 以减小横向偏差和航向偏差, 从而实现自动控制。

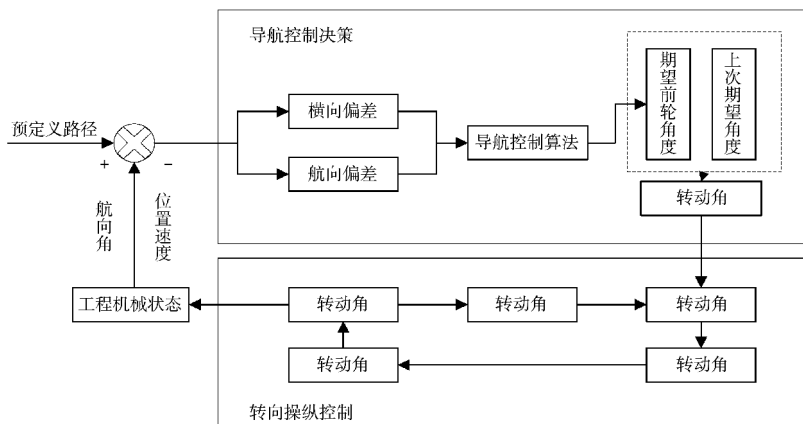


图 2 北斗数字化施工导航控制原理

Fig. 2 Principle of BDS digital construction navigation control

常见的路径跟踪控制方法有线性模型、比例-积分-微分 (proportional-integral-derivative, PID) 控制、最优控制、模糊逻辑、神经网络以及纯追踪模型等^[8]。本研究建立工程机械跟踪直线行驶的以后轴中心作为控制点的运动学模型、以前轴中心作为控制点的运动学模型, 以及机械跟踪直线行驶的以质心为控制点的动力学模型, 综合利用北斗/惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)等多源信息融合算法, 构建施工装备在本地坐标系和道路几何坐标系下的双重状态, 实现信息多种车辆运动模型和路面几何信息的深度融合, 针对常规模糊控制存在的问题, 提出复合模糊-PID 并联控制方法与双级模糊的控制方法, 并对机械模型简化造成的前轮转角控制不对称问题进行补偿, 解决了复杂施工环境下的连续高精度定位难题, 可用性得以极大提升。

1.3 北斗人工岛安全监测技术

人工岛的安全性和稳定性主要受区域地壳稳定性、地基稳定性和海洋环境稳定性影响, 目前运行期安全监测在动态连续稳定的运行监测方面较为缺乏, 不能及时发现异常状况, 相应防患措施滞后, 远不能满足人工岛运行期的安全管理要求, 王承强等^[9]采用码头无基准动态位移监测技术对江苏某高桩码头进行实时位移监测, 但是缺乏针对人工岛的安全位移监测技术。

本研究在人工岛面上软基监测点放置静力水准仪和北斗接收机, 如图 3 所示, 首先测量二者的相对位置关系, 调整二者的时钟同步; 静力水准仪用于采集软基监测点竖直方向上的变形量, 通过给定水平方向的变形约束条件及人工岛竖直方向上的变形量, 采用卡尔曼滤波进行参数估计,

实时解算出北斗接收机的位置参数和模糊度参数, 进而求出人工岛软基变形大小。根据连续监测结果, 提供预警分析, 降低由位移、沉降及工程的稳定性对人工岛造成的损害。相比传统监测方法, 采用该技术监测覆盖范围提高 66%, 量程提高 10 倍以上, 可为人工岛上的工程建设、城市管理与维护及其他地区的人工岛建设提供决策依据。

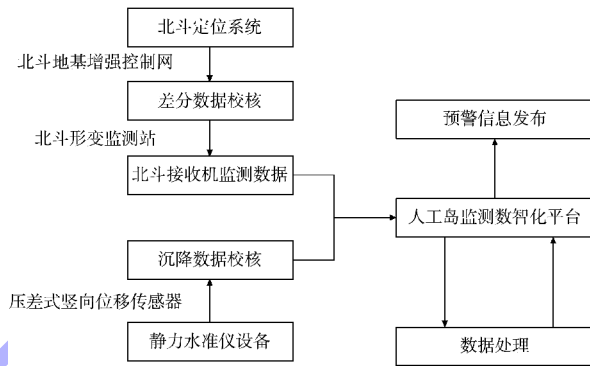


图 3 北斗+静力水准仪人工岛软基监测流程

Fig. 3 Monitoring process of artificial island soft foundation using BDS and static leveling instrument

2 基于北斗的超大规模人工岛数智化管理平台设计

2.1 设计思路

根据施工现场的实际需求, 针对人工岛吹填工程施工痛点, 通过北斗高精度定位、短报文、自动控制、新一代信息化技术等手段融合, 构建涵盖多业务多层次的一线项目现场应用, 动态实时地采集现场数据, 自动上传云端数据中心, 以可视化为主线, 实现对海上施工船舶的位置、轨迹、作业、视频、告警等关键数据的汇聚整合, 集成机械施工管理系统和人工岛面沉降监测系统, 研发基于北斗的人工岛数智化管理平台, 实现项目管理方式升级和工程降本增效。设计思路见图 4。

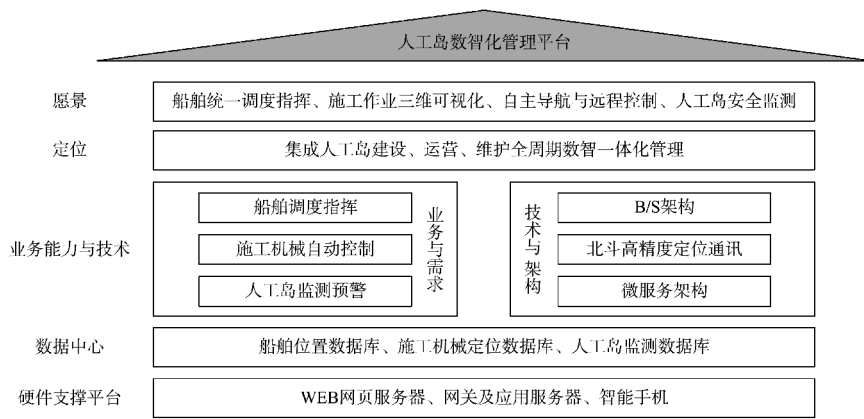


图 4 人工岛数智化管理平台设计思路

Fig. 4 Design ideas for digital and intelligent management platform of artificial islands

2.2 总体架构

数智化管理平台结合业务及信息化现状、发展形势、需求和业务架构分析, 总体框架概括为“一看板、一张图、一中心、一平台”, 即一个项目看板、一张数字孪生图、一个数据中心、一个集成平台。

项目看板是智慧工地的展示门户, 对现有数智化管理平台上的施工现场数据、信息进行整合和统计分析, 通过可视化的表现方式, 将各类信息直观地反映出来; 基于北斗的二/三维技术融合疏浚吹填工程相关基础信息, 形成数字孪生一张图, 为智慧工地应用提供底图支撑; 基于计算资

源需求搭建虚拟化数据中心, 构建应用支撑平台, 按照数据资源规划汇聚各类监测感知数据、业务数据, 实现数据交换共享, 形成施工区域全要素数据中心, 实现对数据的集中存储、治理、交换与服务管理, 为后续现场应用提供数据支撑; 以数字孪生为基础, 基于施工船舶、人员管理、施工机械管理、材料物资管理、生产安全管理、技术质量管理、环境管理、系统保障管理等核心业务, 建设数智化集成平台, 平台物理结构如图 5 所示, 通过从数据中心获取业务管理所需的相关数据, 实现对业务的智能化管理。

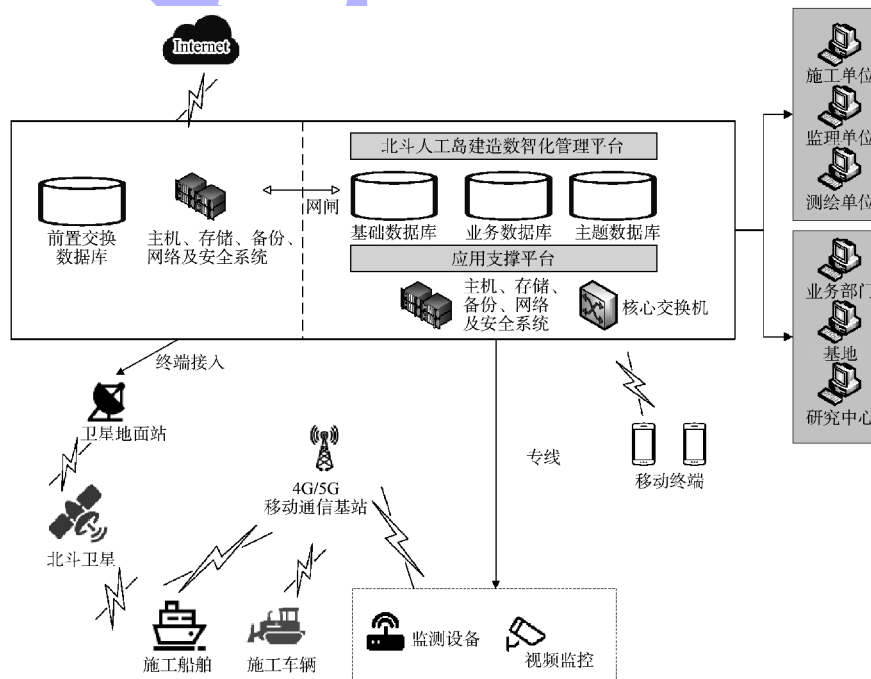


图 5 人工岛数智化平台总体架构布局

Fig. 5 Overall architecture layout of digital and intelligent platform of artificial island

2.3 微服务功能模块设计

微服务是一种新兴的软件架构，可将一个复杂系统拆分为多个独立服务并实现服务间轻量级

数据通信的软件架构体系^[10]。人工岛数智化管理平台根据功能需求和微服务架构特点，将系统归集为五大微服务功能模块，见图6。

人工岛建造全周期数智化管理平台																	
综合监控指挥数据看板				施工船舶管理			北斗数字化施工管理			北斗安全监测预警管理			移动端				
船舶定位通讯统一调度指挥	人工岛施工进度管理	二三维融合可视化展示	后台综合管理	船舶信息维护	船舶北斗高精度定位管理	船舶北斗短报文通信管理	施工现场全景数据采集管理	施工机械信息采集入维护	数字化施工调度指挥管理	施工现场动态监管	防波堤安全监测管理	吹填区域动态监测管理	施工现场环境监测管理	预警信息发布	现场隐患排查	中英文显示	密码重置管理

图6 数智化管理平台微服务功能模块设计

Fig. 6 Design of microservice functional modules of digital and intelligent management platform

1) 综合监控指挥数据看板微服务。针对用户现场进行大屏展示，方便对项目实施统一调度指挥、生产进度实时督察、应急通讯、隐患处置等可视化管理。

2) 施工船舶管理微服务。针对海上施工船舶，综合利用北斗高精度定位，对施工船舶进行定位引导，建设电子围栏，保障船舶安全，同时利用北斗短报文服务和移动公网的无缝衔接保障海上船舶的实时通讯。

3) 北斗数字化施工管理微服务。实现岛礁建设机械自主导航与远程控制，厘米级全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)/惯性导航系统(inertial navigation system, INS)组合导航定位，施工现场动态监管。

4) 北斗安全监测预警管理微服务。用北斗高精度定位服务系统、静力水准仪等技术，对人工岛量方、沉降、防波堤稳定性等进行监测，根据连续监测结果，提供预警分析，降低由位移、沉降及工程的稳定性对人工岛造成的损害。

建设规模大，需通过吹填加转运方式进行。项目综合性强，包括外海深水取运砂、储砂坑开挖、绞吸船吹填、围堰工程、地基处理和道路工程等多个分项工程，再加上需投入船机设备种类多、人员数量大、管理战线长，现场管理和组织调度难度大，对投入设备资源的有效合理使用要求高。

针对外海吹填工程实施过程中存在的施工区域广和人员设备多导致的管理困难问题，传统的施工方式远无法满足需求。如图7所示，通过在现场配备多种国产北斗终端，实时获取现场船舶、车辆、设备、人员的位置，将关键位置信息与地理信息系统(geographic information system, GIS)、电子海图、CAD施工图和遥感影像相集成，融合施工区域的气象、水文等环境数据，最终实现项目生产指挥调度“一张图”，为船舶提供准确的位置与可靠的航向指示，为施工机械提供高精度打桩、平地定位，提高船舶调度和施工机械监管控制能力。

施工船舶偏离设置的航线，会产生“偏航”报警；当外部船舶误入我方施工区时，会产生“外部船舶”报警；当我方船舶进入禁航区时，会产生“进入危险区”报警，方便项目部快速做出相应处置。将施工船舶上的视频信号传输到数智化平台上进行集中监控，实时监控作业情况，加强项目质量安全管理。

3 应用案例

菲律宾帕塞吹填项目毗邻马尼拉大都会区商业中心，在马尼拉湾吹填形成3个人工岛。施工区存在2层非常厚的淤泥层，主要施工内容包括陆域形成、地基处理工程。该工程为特大型项目，

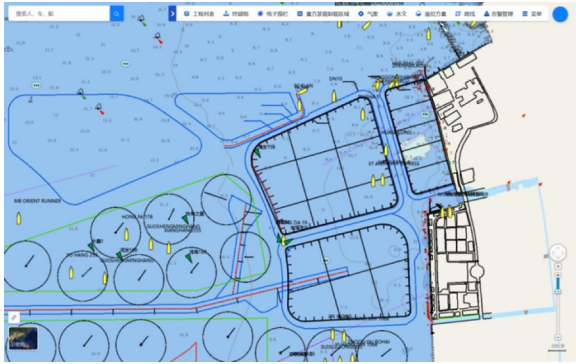


图7 菲律宾帕塞吹填造地工程船舶定位管理
Fig.7 Ship positioning management for land reclamation project by dredging and filling in Pasay, Philippines

4 结论

1) 海上人工岛吹填作业过程中的定位通讯保障、自动化作业、数字化施工管理等是目前研究及应用过程中急需解决的问题,融合北斗高精度定位、短报文通信、智能感知、大数据分析、云计算等技术,研发一套软硬件结合、性能稳定、技术成熟的人工岛吹填工程数智管理平台,形成数据纵向贯通,支撑横向分析,打造项目管理新模式。

2) 研究可以定向解决大型疏浚吹填项目施工过程中的定位、通讯和自动化施工等问题,项目成果在菲律宾帕塞吹填工程中得到充分应用验证,经济社会效果显著,可为其他同类项目海上施工现场船舶定位通信、机械自动化施工和岛面沉降监测提供重要的范例,对推动海洋强国、人工岛礁吹填建设具有重要意义和社会经济效益。

参考文献:

[1] 王达川,姚海元,丁文涛,等.沿海港口围填海要素制约问题分析及应对措施[J].水运工程,2023(2):7-11,16.
WANG D C, YAO H Y, DING W T, et al. Factors restricting China's coastal port reclamation: analysis and countermeasures [J]. Port & waterway engineering, 2023(2): 7-11, 16.

[2] 杨长风,杨军,杨君琳等.北斗卫星导航系统规模应用国际化发展战略研究[J].中国工程科学,2023,25(2):1-12.

YANG C F, YANG J, YANG J L, et al. The international development strategy of the large-scale application of Beidou navigation satellite system [J]. Strategic study of CAE, 2023, 25(2): 1-12.

[3] 焦永强,高炎,刘昆.基于北斗卫星的远海施工船舶精确定位和信息化管理[J].港口科技,2019(1):25-28.

JIAO Y Q, GAO Y, LIU K. Precise positioning and information management of offshore construction ships based on beidou satellite system [J]. Port science & technology, 2019(1): 25-28.

[4] 李明亮.北斗定位系统用于海上工程建设应急管理的思考[J].工程建设与设计,2021(17):100-102.

LI M L. Thoughts on the application of Beidou navigation system in offshore engineering construction emergency management [J]. Construction & design for engineering, 2021(17): 100-102.

[5] 田会静,秦亮,王天祥,等.打桩船沉桩施工定位与碰撞预警实时监控系统的开发与实现[J].水运工程,2023(S2):129-133.

TIAN H J, QIN L, WANG T X, et al. Development and implementation of real-time monitoring system for pilesinking construction positioning and collision early warning of pile driving barge [J]. Port & waterway engineering, 2023(S2): 129-133.

[6] 吕达昕.北斗卫星导航定位系统在人工岛安全监测中的应用[J].企业科技与发展,2020(5):113-114.

LYU D X. Application of Beidou satellite navigation and positioning system in safety monitoring of artificial islands [J]. Sci-tech & development of enterprise, 2020(5): 113-114.

[7] 赵树源,盛仕伟,赵知崇,等.基于北斗定位技术的海上求救终端研究[J].电声技术,2022,46(2):90-92.

ZHAO S Y, SHENG S W, ZHAO Z C, et al. Research on maritime distress terminal based on Beidou positioning technology [J]. Audio engineering, 2022, 46(2): 90-92.