

基于Unity3D的自航耙吸船三维疏浚辅助监控系统

任菊慧, 林良钊, 肖 薇, 王一凡, 何锡赢, 廖玮婷, 宋佳怡, 齐文欣

上海电机学院电子信息学院, 上海

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月28日; 发布日期: 2024年12月6日

摘 要

中国疏浚业的现代化历程已逾百年, 自新中国成立以来, 该行业经历了从缓慢到迅速的发展阶段。尽管疏浚船的高效作业得益于先进的可视化系统, 但现有系统在效率和精度方面仍有待提升。为解决这一问题, 本文研发了一套基于Unity3D的自航耙吸船三维疏浚辅助监控系统, 并成功应用于实体疏浚船。该系统采用数字孪生技术, 通过骨骼系统构建了1:1精细化的“船舶-设备-部件”数字孪生体, 实现了对施工作业船的精确模拟。通过整合传感器数据并将其转化为三维模型的动作驱动数据, 这些数据与船舶数字孪生体紧密结合, 实现了数字孪生体与实际船舶动作状态的无缝同步。这一创新系统的开发, 不仅提高了疏浚作业的质量和效率, 而且为疏浚行业的智能化和自动化转型提供了强有力的技术支持, 预示着该行业可持续发展的未来。

关键词

疏浚业, Unity3D, 三维可视化, 耙吸式挖泥船

A 3D Dredging Auxiliary Monitoring System for Self-Propelled Trailing Suction Hopper Dredger Based on Unity3D

Juhui Ren, Liangzhao Lin, Wei Xiao, Yifan Wang, Xiying He, Weiting Liao, Jiayi Song, Wenxin Qi

School of Electronic Information Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai

Received: Oct. 15th, 2024; accepted: Nov. 28th, 2024; published: Dec. 6th, 2024

文章引用: 任菊慧, 林良钊, 肖薇, 王一凡, 何锡赢, 廖玮婷, 宋佳怡, 齐文欣. 基于 Unity3D 的自航耙吸船三维疏浚辅助监控系统[J]. 海洋科学前沿, 2024, 11(4): 219-228. DOI: [10.12677/ams.2024.114024](https://doi.org/10.12677/ams.2024.114024)

Abstract

The modernization journey of China's dredging industry has spanned over a century. Since the founding of the People's Republic of China, the industry has gone through stages of development from slow to rapid. Although the efficient operation of dredging vessels benefits from advanced visualization systems, there is still room for improvement in terms of efficiency and accuracy in existing systems. To address this issue, this paper has developed a 3D dredging auxiliary monitoring system for self-propelled trailing suction hopper dredgers based on Unity3D, which has been successfully applied to a physical dredging vessel. The system utilizes digital twin technology to construct a 1:1 refined "ship - equipment - component" digital twin body through a skeletal system, achieving precise simulation of the construction vessel. By integrating sensor data and converting it into motion-driven data for the 3D model, these data are closely integrated with the digital twin of the vessel, achieving seamless synchronization between the digital twin's motion state and the actual vessel. The development of this innovative system not only improves the quality and efficiency of dredging operations but also provides strong technical support for the intelligent and automated transformation of the dredging industry, heralding a sustainable future for the industry.

Keywords

Dredging Industry, Unity3D, 3D Visualization, Drag Suction Dredger

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球航运业的迅猛发展,航道和港口的疏浚工作变得日益重要。耙吸式挖泥船作为疏浚工程中的主力船舶,因其自航、自载、自卸的特点,在航道疏浚、港口码头开挖维护等领域得到了广泛应用[1][2]。然而,耙吸式挖泥船的疏浚作业复杂,受多种因素影响,如水下地形、泥沙特性等,这些因素直接影响疏浚效率和质量。此外,耙吸式挖泥船的操作依赖于操作人员的经验,缺乏统一的标准和高效的监控手段,导致疏浚效率时高时低,有时还会产生安全风险[3]。

传统的疏浚监控系统往往局限于二维界面,无法直观展示耙吸船的作业状态和环境信息[4],影响了作业人员的决策效率和对作业状态的全面掌控。为提高疏浚效率和安全性,国内外学者和工程师们进行了大量的研究和开发工作。例如,耙吸挖泥船信息化监测系统的开发,通过集成 AIS 和雷达信息,提高了疏浚施工的安全性和效率[5]。基于 Unity3D 的疏浚船作业虚拟仿真系统能够全方位、多角度模拟疏浚作业过程,为疏浚工程的规划与评估提供了新的方法[6]。尽管已有研究取得了一定的进展,但仍存在一些问题 and 挑战。首先,现有疏浚监控系统多侧重于二维监视,缺乏直观性,且客户端安装部署和维护较为麻烦[7]。其次,耙吸挖泥船的智能化水平仍有待提高,目前的疏浚作业主要依靠操作人员的经验,缺乏有效的智能化决策支持[3]。最后,疏浚施工数据的深度挖掘与产能优化分析方法及应用仍需进一步研究,以实现高效疏浚。

本文针对现有挖泥船在疏浚过程中三维可视化监测显示效果差、精度低的问题,实现了基于 Unity3D 的自航耙吸船三维疏浚辅助监控系统。通过应用数字孪生技术,解决了疏浚仿真系统中模型精细度不足、地形显示模糊等问题,提高了工程质量和效率。通过精细建模与实时数据驱动,实现高保真模拟。通过

应用 1:1 CAD 建模技术, 精确再现船舶部件, 确保虚拟与实际一致, 并引入三维地形生成和施工参数模型, 提升作业精度与效率。

2. 系统分析

2.1. 技术可行性

Unity3D 引擎以其卓越的渲染能力和高效的脚本支持, 为海上无人施工船的建模与仿真提供了坚实的技术基础。与此同时, 3DS Max 作为业界领先的专业建模工具, 其对 CAD 数据的精确导入功能, 确保了模型的高精度和逼真度。通过物联网(IoT)技术的集成, 系统能够实时接收并传输船舶数据, 为项目的顺利进行提供了额外的保障。此外, 系统的多物理场仿真功能为科学决策提供了坚实的依据, 并助力于数据分析, 进一步优化施工流程。这两种技术的结合, 构建了一个高精度的仿真平台, 为海上无人施工船项目的高效运作和智能化管理提供了强有力的技术支持。

2.2. 经济可行性

数字孪生技术与自动化数据分析的结合, 显著降低了人力成本, 并通过实时监控有效防止了超挖和欠挖现象, 从而提升了作业效率, 节约了时间和资源。该系统具有广泛的市场潜力, 能够适应多种船型和应用场景。系统设计注重用户体验, 学习成本低, 界面友好, 操作简单, 这减少了培训成本并提高了用户满意度。总体来看, 本系统以其高效性、广泛的适用性和优良的易用性, 展现出了非常乐观的经济前景。

2.3. 操作可行性

利用 3DS Max 软件精心制作的船舶外观及船舱内部构件的仿真模型, 再通过 Unity3D 平台整合这些三维模型, 可以构建出逼真的虚拟场景。这种结合创造了一个直观且用户友好的界面, 并配备了详尽的使用手册, 使得即使是非专业用户也能迅速掌握操作。系统提供的高度定制化服务, 能够灵活适应不同的作业环境, 确保了最佳性能。通过实时更新的反馈机制, 系统能够即时捕捉到船舶状态的任何变化, 并将关键信息及时传递给操作员, 支持他们做出准确和迅速的决策。综上所述, 本系统以其良好的易用性、灵活的定制能力和实时反馈功能, 确保了用户能够享受到高效且无忧的操作体验。

3. 系统关键技术和 UI 设计

3.1. 疏浚船数字孪生

在本系统中, 疏浚船的船体通过数字孪生技术进行了精确模拟, 以全面反映其动态性能。模拟不仅涵盖了船体本身, 还包括了如螺旋桨和波浪补偿器等辅助部件的工作状态。特别是波浪补偿器, 在纵向上对船体位置的微小变化起到了关键的缓冲和补偿作用。这种精细的设计能够有效地应对由风浪流等因素引起的船体纵向位置的突然变化, 从而减少对耙头位置的影响。这不仅确保了耙头与海底的稳定接触, 还避免了因耙头压力过大而对疏浚设备造成的潜在损害。

图 1 展示了本系统中疏浚船数字孪生体的详细组成。从图中可以清晰地看到, 该数字孪生体能够模拟以下操作:

- (1) 船体的操作, 包括航行和转向;
- (2) 船体关键部件的操作, 涵盖挖泥(如 A 字架的下放和左右耙的操作)、卸泥(泥舱和泥门的开闭)、抛泥(泥舱、艏喷口的开闭);
- (3) 其他部件的操作, 如推进螺旋桨、风浪补偿器、烟囱、闸阀以及遗留装置的开闭。

这种模拟技术为施工人员提供了一个直观的平台，使他们能够实时掌握船舶的运作情况，从而提高施工效率和安全性。这项技术的应用为海上施工作业带来了一种创新的监控和优化手段，极大地提升了整个施工过程的质量和可靠性。通过数字孪生技术，我们能够确保疏浚作业的每一个环节都在精确控制之下，为海上作业的智能化和自动化奠定了坚实的基础。

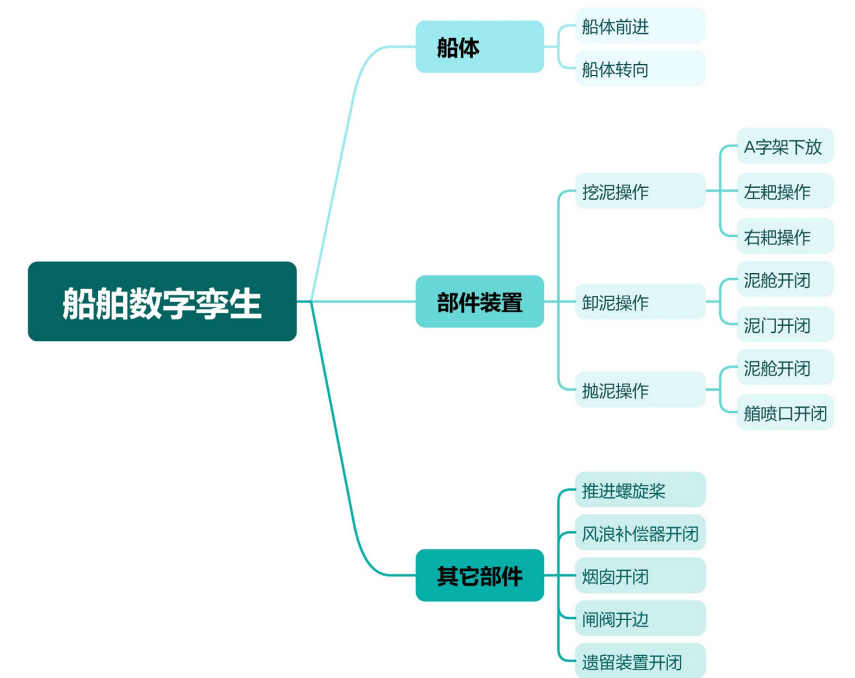


Figure 1. Digital twin of a ship
图 1. 船舶数字孪生

3.2. 水下地形数字孪生

水下地形数字孪生技术，凭借其先进的实时感知和重构能力，能够精确捕捉并生成水下地形的三维模型(如图 2 所示)。这项技术通过定量分析和参数评估，创建详尽的水深文件和地形图。利用先进的可视化映射技术和插值算法处理数据，实现了对水下地形的精确模拟和深入分析。

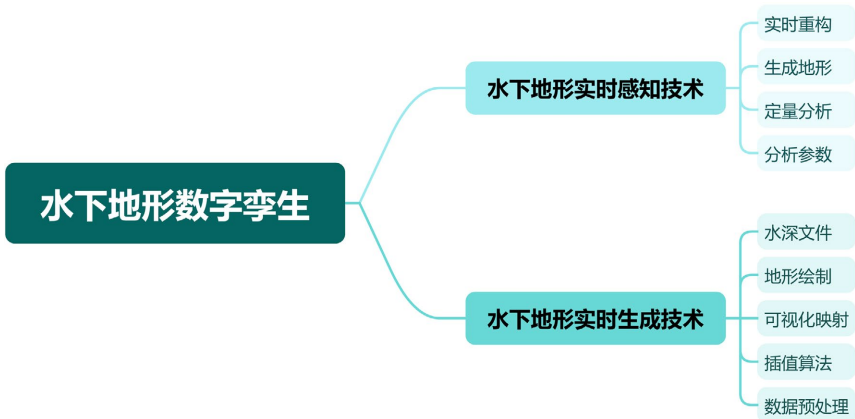


Figure 2. Digital twin of underwater topography
图 2. 水下地形数字孪生

面对水下地形信息的复杂性和分析的高难度，通过提前进行地形数据的勘测和模型生成，可以在作业前期对整个工作流程进行准确的预估，从而显著减少实际施工的准备时间。水下地形实时生成技术通过采集施工区域的地形数据，经过预处理和插值算法的优化，再通过可视化映射技术，形成高分辨率的三维地形图，直观地展示水深信息。

此外，水下地形实时感知技术构建了定量分析模型，结合土质、耙头结构及施工参数，能够快速生成并同步更新三维地形模型，实现高精度的实时重构。这项技术为海上施工船提供了强大的数字孪生支持，优化了施工流程，显著提升了作业效率与安全性，是海上作业智能化发展的关键技术。

总的来说，水下地形数字孪生技术不仅提高了海上施工的精确度和效率，还为施工安全提供了有力保障，是推动海上作业向智能化转型的重要技术支撑。

3.3. UI 设计

本系统的用户界面(UI)采用了如图 3 所示的架构设计，提供了直观的功能操作，具体如下：

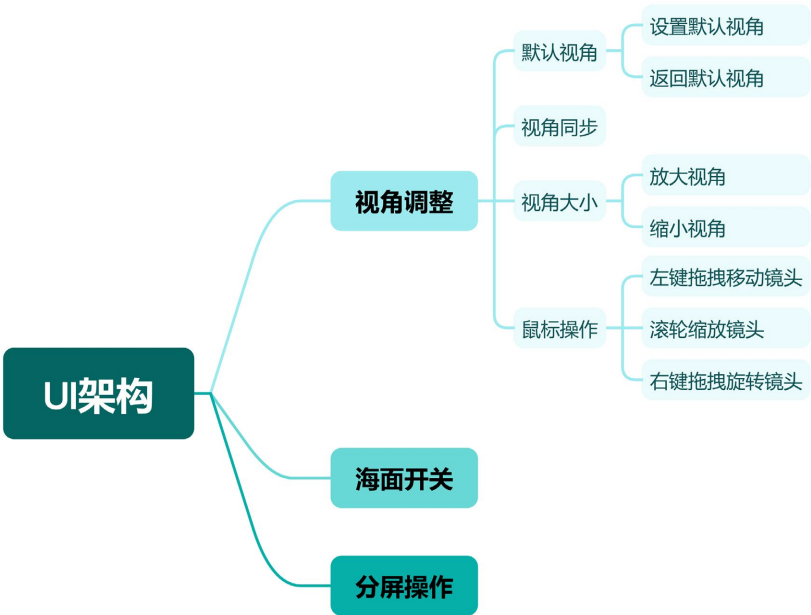


Figure 3. UI architecture diagram
图 3. UI 架构图

- (1) 视角调整：用户可以对摄像机视角进行细致的设置，包括：
- **默认视角：**允许用户快速恢复到预设的默认视角。系统会自动存储摄像机参数，确保用户能够一键切换回初始视角，提高了操作的便捷性。
 - **视角大小：**用户可以调整摄像机的位置参数，实现视角的缩放功能，以满足不同观察需求，无论是宏观的全景还是细节的特写，都能轻松获取。
 - **视角同步：**通过点击预设的视角，系统会自动调整摄像机至该位置，极大地提升了操作的便捷性，使得用户能够迅速聚焦于关键区域。
 - **鼠标操作：**用户可以通过鼠标的长按并拖拽左键来平移摄像机画面，按住鼠标滚轮进行画面的缩放，以及按住鼠标右键拖拽来旋转摄像机，实现对船只的全方位观察。这些操作的设计旨在提供灵活而平滑的用户体验。

(2) **分屏功能:** 该功能允许用户增加三个额外的摄像机视角, 与原有的摄像机视角一起, 组成四个不同的视角。这些视角可以分屏展示, 用户可以拖动改变每个视角的显示角度, 从而同时从多个角度监控场景, 增强了对施工环境的全面理解。

(3) **海面开关:** 用户可以通过此功能控制海面效果的显示与隐藏。这一功能的设计考虑了用户在不同情况下对视觉效果的需求, 提供了更多的自定义选项, 使得用户可以根据自己的偏好和需求来调整界面显示。

通过这些精心设计的 UI 功能, 本系统不仅提高了操作的直观性和便捷性, 还增强了用户对疏浚作业环境的理解和控制, 从而提升了整体的工作效率和安全性。

4. 系统实现

4.1. 系统部署

本系统部署于某实体疏浚船, 通过高精度 PLC 传感器数据采集, 实现了船舶状态的实时监控。这种实时监控对于确保疏浚作业的精度和效率至关重要。同步船舶数字孪生体, 实现了物理与虚拟映射, 这不仅提高了施工的安全性, 还为远程监控和故障诊断提供了可能。利用地形实时生成技术, 感知耙头状态, 重构施工后地形, 这一创新技术显著提高了疏浚作业的精度和效率。操作人员可实时监控设备状态, 还原地形感知变化, 确保精准施工, 提高作业效率。

此外, 模拟船舶的动作, 可以使用 ComMax 软件, 一个明文的 Tcp 服务器, 建立与船舶的连接(如图 4 所示), 然后输入一些规定的报文, 船舶模型就会动起来。

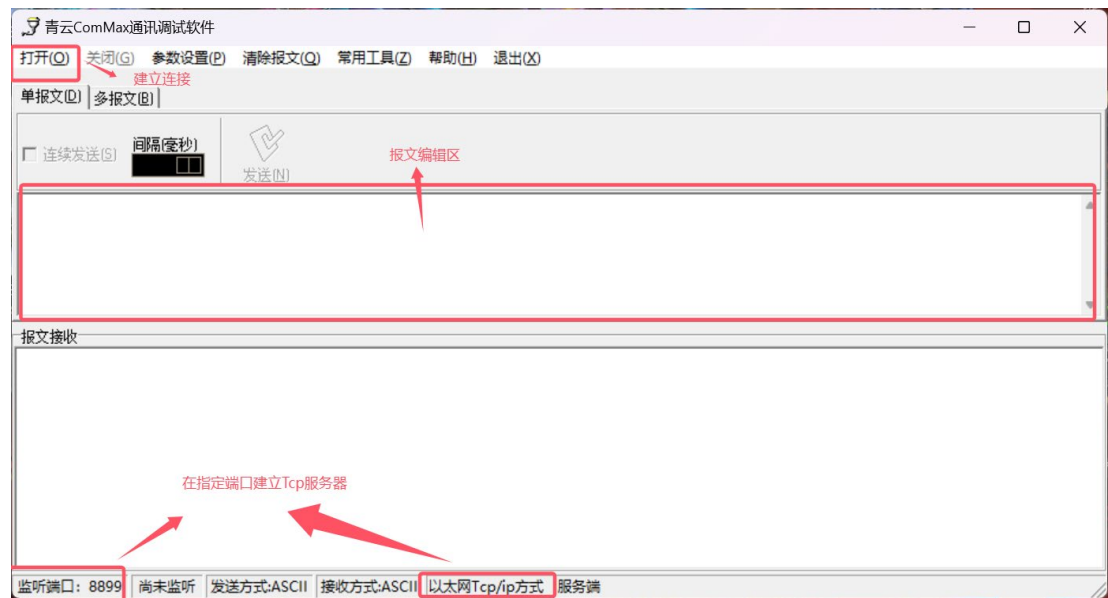


Figure 4. Schematic diagram of using ComMax software to connect and send messages on a ship
图 4. 使用 ComMax 软件连接船舶发送报文示意图

4.2. 系统界面

为了更逼真地模拟船载环境, 基于报文发送机制, 开发了 WPF 应用, 专门制作了控制台小程序。通过控制台按钮发送报文, 以模拟船载环境, 这种设计显著提高了操作的直观性和效率。控制台背景为特定图片, 按钮分为“船体操控”、“设备组件”及“耙臂管理”三大模块(如图 5 所示), 清晰区分疏浚功

能。这种布局设计不仅提高了操作的直观性，还通过 Canvas 控件的 Top 和 Left 属性精确定位元素，确保了界面的响应速度和准确性。



Figure 5. Console design layout

图 5. 控制台设计布局

运行逻辑方面，首先建立 Tcp 服务器并连接指定端口，利用动态链接库文件创建_3DTcpServer 对象。接着，将报文参数转化为变量，并拼接成字符串格式，赋予初值以防空指针异常。最后，通过_3DTcpServer 对象的 send 方法发送报文，并在控制台输出。按钮交互逻辑则通过修改参数并调用发送报文方法实现。

4.3. 系统功能

4.3.1. 船舶航行功能

本文实现了船舶航行相关的具体功能，均在某实体疏浚船上进行了测试，以验证其在实际作业中的有效性。1) 船舶状态初始化功能，通过提供船舶状态初始化(如图 6 所示)，使各部件参数可控，这为非船载环境下测试系统功能提供了可能。2) 船体前进功能，通过获取船舶角度参数，利用正交分解和三角函数控制船体前进，采用公式解决精度问题，显著提高了船舶航行的稳定性和精度。3) 船体转向功能，通过改变角度参数报文实现转向，参数为船与正东夹角，顺时针为正，这种设计提高了船舶转向的灵活性和准确性。4) 船体吃水深度变化功能，通过调整左右耙口深度参数实现，这种功能对于适应不同水深的疏浚作业至关重要。

4.3.2. 船舶疏浚功能

下面列出的功能均在某实体疏浚船上进行了测试。

(1) A 字架下放功能

在实际施工中，疏浚船行驶到指定施工地段后，驾驶员需要控制好船速、船位，下达下耙指令。浚工重复命令并通知耙头下放深度。下耙的过程首先实现的就是 A 字架(如图 7 所示)。A 字架的参数是倾斜角度，通过加大倾斜角度实现 A 字架的下放。这种功能的设计不仅提高了疏浚作业的效率，还通过精确控制下放深度，减少了对水下环境的破坏。



Figure 6. Ship status initialization

图 6. 船舶状态初始化

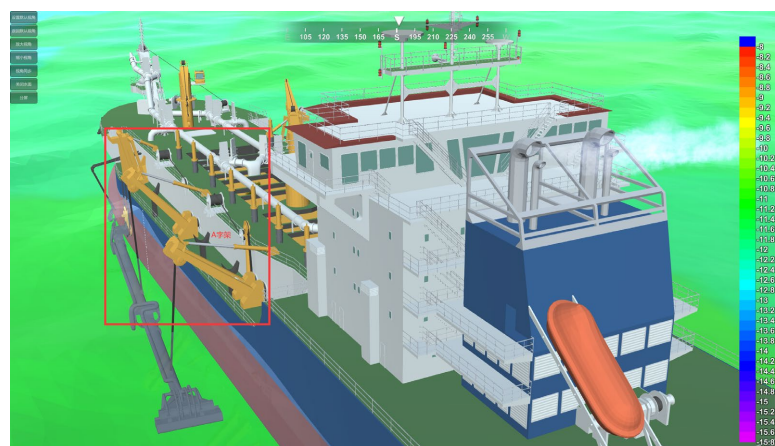


Figure 7. A-frame

图 7. A 字架

(2) 耙臂下放功能

A 字架的下放之后使得耙臂能够实现下放操作(如图 8 所示)。操作员 A 接指令后下耙,待弯管放到吸入口告知负责操作员 B,操作员 B 立即开启泥泵,将转速逐渐调节到正常转速。操作员 A 将耙头下放至控制深度处。这里在实体船上测试了下放耙臂、调整耙头、启动泥泵挖泥的过程,结果显示耙头与泥面接触的部位能够产生挖泥的效果。这种功能的设计提高了疏浚作业的精确性和效率,同时通过实时监控耙头状态,确保了作业的安全性。

(3) 疏浚过程

为测试疏浚过程中,利用水下地形实时感知技术记录的疏浚痕迹,进行了疏浚过程测试。在下放耙臂后,可实现疏浚挖泥的工作,如图 9 所示。当船舶进行移动、上下耙臂进行水平移动的时候会留下施工痕迹,痕迹仿真度作为测试指标。这种实时感知技术的应用,不仅提高了疏浚作业的精度,还通过实时监控施工痕迹,减少了对环境的非必要影响。

(4) 卸泥抛泥过程

在实体船上还测试了卸泥和抛泥功能。首先测试舱底抛泥,通过液压控制泥门,泥沙流出沉积水底。水深允许时,全开泥门以节省时间。新建大型耙吸船配备吹泥管路,可吹填泥浆至施工区。测试了艏喷

抛泥，泥浆经渐缩管斜向上喷出，如图 10 所示。这种功能的设计提高了疏浚作业的效率，同时通过精确控制抛泥过程，减少了对环境的污染。

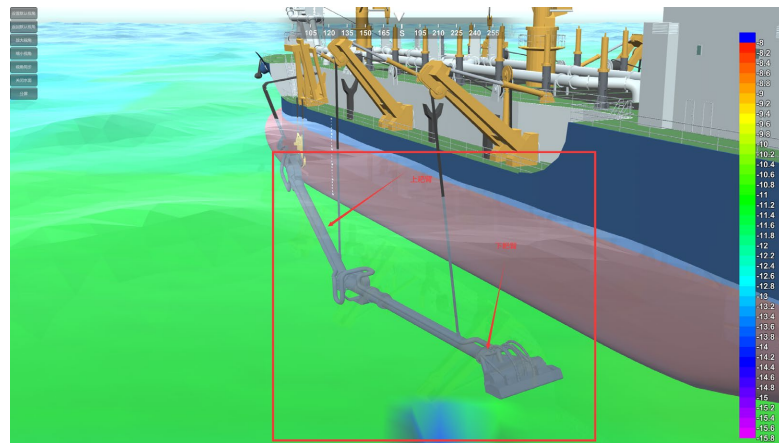


Figure 8. Rake arm

图 8. 耙臂

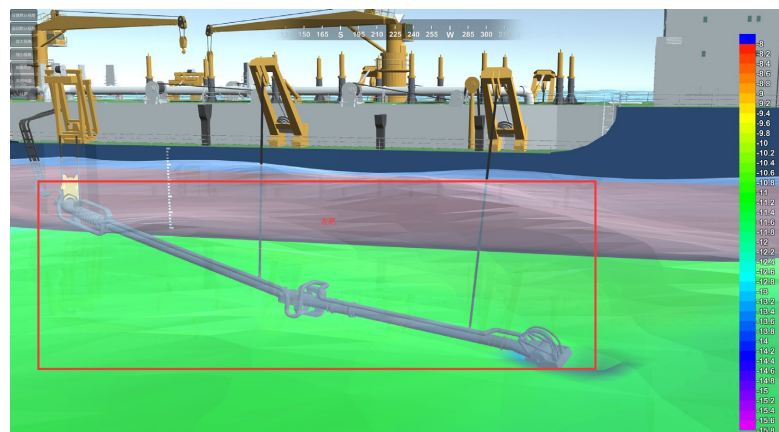


Figure 9. Left rake dredging process test

图 9. 左耙疏浚过程测试

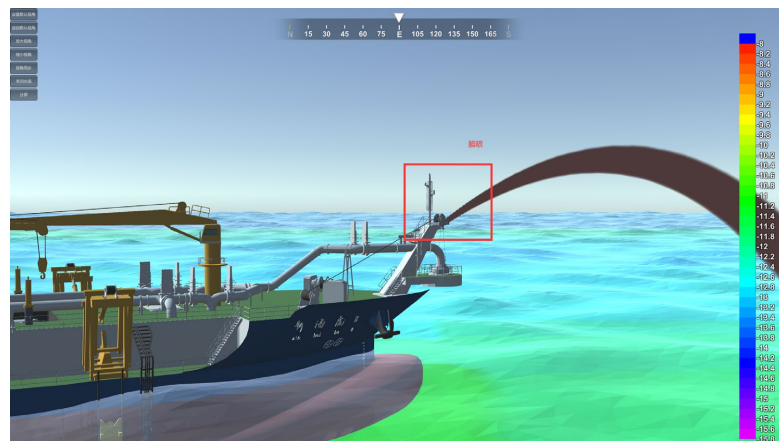


Figure 10. Bow mud ejection test

图 10. 艏喷抛泥测试

5. 总结与展望

5.1. 总结

本文基于数字孪生技术和三维可视化技术开发了基于 Unity3D 引擎的自航耙吸船三维疏浚辅助监控系统。1) 本文通过对某实体疏浚船的数字孪生建模,实现了三维模型与实际船舶动作的一致性;2) 通过实时数据驱动,确保船舶数字孪生体和实际船舶动作状态同步;3) 系统还能实时生成和感知水下地形变化,提高疏浚作业的精度和效率,减少疏浚过程中可能出现的超挖、欠挖等问题。综上可知,该系统不仅能辅助自航耙吸式疏浚船的疏浚作业,还很好地为海上施工作业船进行赋能。

5.2. 展望

未来的研究中,还有以下几个方面值得进一步探讨完善。1) 可进一步增强海洋环境的真实感,改进海面波浪模拟算法,提升环境渲染效果,以增强用户体验;2) 可进一步研发更真实的施工场景模型,增加更多应用场景进行仿真模拟,以满足不同的施工需求;3) 可考虑将该系统扩展应用到其他类型的海上施工船,提高系统的通用性;4) 可通过调整模型参数和公式参数,使系统能够适应更多样的船型和疏浚机具,进一步扩大其在行业内的应用范围,增强竞争力。

参考文献

- [1] 梅立群. 耙吸挖泥船抽舱吹岸过程机理分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [2] 朱大鹏. 耙吸挖泥船的装舱建模与施工参数自主寻优研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [3] 张曦元. 耙吸挖泥船的管道输送建模与控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.
- [4] 庞景墩, 贺海涛, 林直, 等. 挖泥船施工作业三维可视化系统优化设计与应用[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(8): 93-98.
- [5] 张戟, 诸葛玮. 耙吸挖泥船信息化监测系统开发[J]. 水运工程, 2010(6): 30-36.
- [6] 谢宇, 何坤金, 陈义仁, 等. 基于 Unity3D 的疏浚船作业虚拟仿真系统[J]. 计算机仿真, 2022, 39(7): 426-432.
- [7] 许墅, 戴文伯, 周雨森, 等. 基于 B/S 架构的耙吸船施工三维监视系统设计与研究[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(10): 94-98.