

乔玥, 单红仙, 王宏威, 等. 基于数字孪生的海底悬浮物时空变化可视化技术实现与应用[J]. 海洋学报, 2023, 45(8): 166–177, doi:10.12284/hyxb2023082

Qiao Yue, Shan Hongxian, Wang Hongwei, et al. Implementation and application of digital twin-based visualization technology for spatial and temporal variation of seafloor suspensions[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(8): 166–177, doi:10.12284/hyxb2023082

基于数字孪生的海底悬浮物时空变化 可视化技术实现与应用

乔玥¹, 单红仙^{1,2}, 王宏威¹, 朱超祁^{1,2,3}, 孙志文¹, 贾永刚^{1,2*}

(1. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 3. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 数字孪生技术构建的虚拟海洋平台, 能够进一步实现海底环境监测数据的三维可视化分析。本文基于深海底长期原位监测数据, 使用 Unity3D 技术构建出多模型融合的虚拟海洋环境, 初步建立海洋工程地质环境数字孪生系统; 结合 MATLAB、ArcGIS 数据分析技术实现智能监测、数据分析、人机交互、辅助决策等功能; 研究进一步构建虚拟环境粒子系统, 对南海北部陆坡神狐海域近底层悬浮物浓度升高事件进行了三维可视化分析, 结果表明: 在虚拟环境粒子系统中悬浮物浓度、粒子数量与聚集程度具有较大的时空差异。特别是悬浮物浓度维持在较高水平时, 发现粒子间相互碰撞、重叠, 并在空间中衍生了密集程度更高的微团, 当悬浮物浓度进一步升至峰值时, 微团数量增加并占据空间大部分体积, 形成悬浮颗粒高度聚集, 覆盖范围更广的悬浮物聚合体。本文基于图像分析技术, 将可视化分析结果与真实海底摄像进行对比, 相对误差在 0.16%~2.80% 范围内, 具有较高的可行性。

关键词: 数字孪生; 悬浮物浓度; 可视化分析; 虚拟粒子系统; 深海原位长期监测

中图分类号: P751; P734.2³

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)08-0166-12

1 引言

近年来海上油气开采平台、海底管线、深海养殖等深海工程大量兴建^[1-4], 然而海洋地质灾害的发生对海洋工程会构成严重威胁^[5-6]。深海原位长期监测能够揭示灾害触发机制及演变过程, 进而有效预报海底地质灾害并减少相关损失, 但是由于深海环境复杂多变, 监测面临高测量精度、耐压耐腐蚀、抗电磁干扰、长期电能供应等一系列挑战^[7], 导致缺乏长期、连续的海底现场观测数据^[8], 结合现有的分析方法, 数据难以直观表现海洋工程地质环境变化, 更无法精准识别海洋地质灾害, 严重制约深海工程建设发展。

数字孪生技术是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型^[9], 通过深海原位长期监测数据与虚拟模型进行交互, 为海洋工程地质环境的可视化分析提供技术支撑。2003 年美国密歇根大学 Grieves^[10-11] 教授提出数字孪生概念, 2010 年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 引入数字孪生技术对航天系统的运行状态进行诊断与预测, 确保航天器的运行安全^[12]。近年来, 数字孪生与大数据、人工智能等新兴技术融合快速发展, 广泛应用于工业、互联网、智慧城市等新型场景, 国内外团队也引入该技术开展海洋工程领域的数字孪生平台研发^[13-14]。Coraddu 等^[15] 研发数字孪生船, 结合监

收稿日期: 2022-12-08; 修订日期: 2023-03-08。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41831280); 国家自然科学基金面上项目(41877223); 国家自然科学基金青年项目(42207173)。

作者简介: 乔玥(1998—), 女, 江苏省徐州市人, 研究方向为基于数字孪生技术的海底地质灾害监测预警。E-mail: jay0127@qq.com

* 通信作者: 贾永刚(1965—), 男, 吉林省伊通满族自治县人, 教授, 博士, 研究方向为海洋工程地质与环境。E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

测数据估算出海洋污垢造成的油耗损失; Mayani 等^[16]构建海上油井的数字孪生系统进行作业优化, 实现异常状态的早期检测; Wang 等^[17]研发海上风力涡轮机支撑结构的数字孪生系统, 实现支撑结构运行状态的实时监测及故障诊断; 张磊等^[18]提出海上石油平台工艺数字孪生系统方案, 包含远程监控、虚拟巡检等功能; 王文明等^[19]构建海洋修井数字孪生系统, 实现修井管柱分析、辅助决策等功能。总体而言, 数字孪生技术在海上风电、油井等海洋工程上进行了初步应用, 但是此类数字孪生平台在构建海洋环境方面多利用虚拟数据, 而非实测数据, 造成数字孪生技术在海洋环境数据可视化分析上存在诸多问题。

本研究构建的数字孪生系统结合复杂深海工程地质原位长期观测设备 (*In-situ* Surveying Equipment of Engineering Geology in Complex Deep Sea, SEEGeo) 的

深海底实测数据, 将 SEEGeo 搭载的 RBR 多参数水质仪监测的浊度数据、海水抽滤测量的悬浮物浓度和近底层悬浮物粒径等数据相结合, 使用 Unity3D 技术构建虚拟环境粒子系统, 实现了南海北部陆坡神狐海域近底层悬浮物浓度升高的时空变化分析, 提供了一种新的数据可视化分析手段, 为海洋工程地质环境监测、灾害预测提供技术支撑。

2 数字孪生系统框架

陶飞等^[20]在 2019 年提出数字孪生五维模型理论, 内容包括物理实体、虚拟实体、孪生数据、数据连接、系统服务, 对卫星、飞机、船舶、智慧城市等多个领域的数字孪生应用提供理论参考。本研究在此理论的基础上, 构建了海洋工程地质环境数字孪生系统, 包括物理层、传输层、虚拟层、应用层, 如图 1 所示。

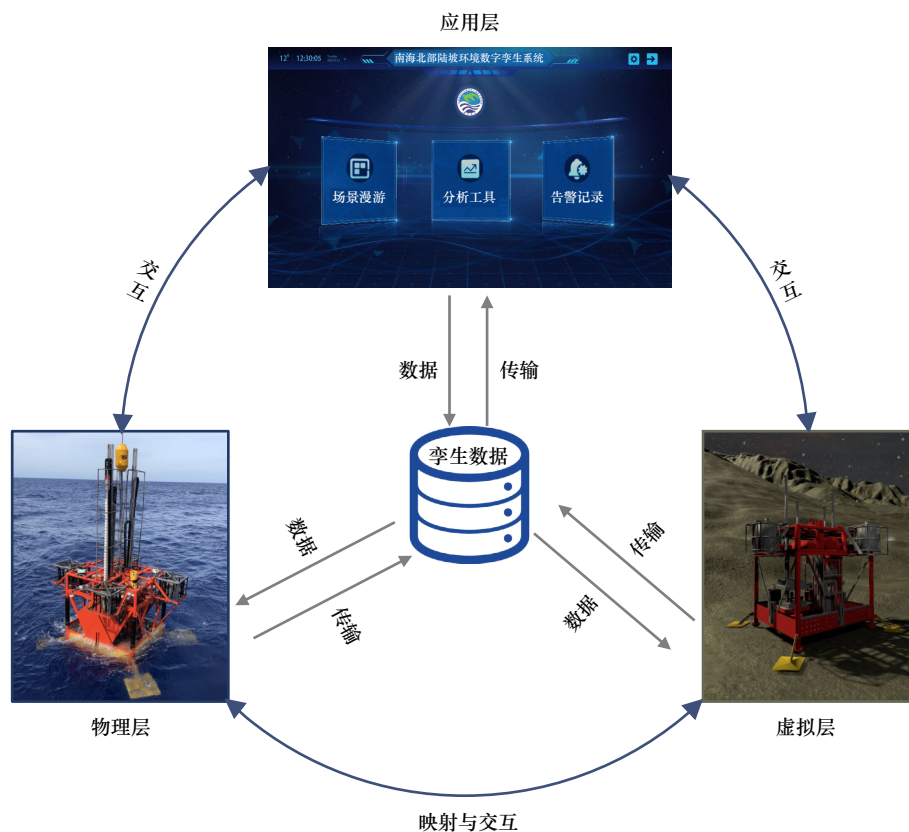


图 1 海洋工程地质环境数字孪生系统框架

Fig. 1 Framework for a digital twin system for the marine engineering geological environment

2.1 物理层

物理层是指作业现场的环境, 由各种功能子系统组成。本研究的物理层基于 SEEGeo 构建, 由海底观测平台、海面中继浮标、室内监控平台 3 部分组成, 工作模式如图 2 所示。工作原理为海底观测平台监测海底边界层温度、盐度、深度、压力、水体流速流

向、海水浊度等环境要素^[21], 数据通过水声通信传输至海面中继浮标, 再通过卫星通信将数据输送到室内监控平台。

2.2 传输层

传输层实现监测数据与虚拟层的交互, 构建物理层、虚拟层和应用层的联系。研究采用 MySQL 作为

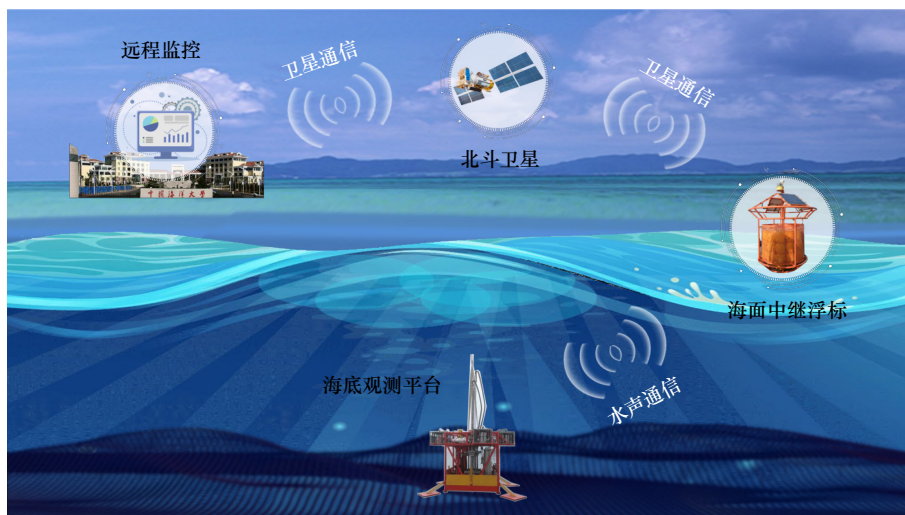


图 2 SEEGeo 工作模式

Fig. 2 SEEGeo working mode

监测数据存储平台,在 MySQL 中设计节点数据表的逻辑结构,将数据在垂向上分成海洋环境数据、海底地形数据和海底地层数据 3 部分,通过 Unity3D C#脚本将 MySQL 中的数据批量传输给虚拟层,在 UI 界面中实现数据的三维可视化分析,分析结果传输至应用层实现人机交互、辅助决策等功能。

2.3 虚拟层

虚拟层是由几何模型、物理模型、行为模型构成的多维度模型^[9],反映设备的实际工作状态。研究使用 Unity3D 技术构建设备几何模型,根据现实设备重力、浮力等力场属性构建设备物理模型,基于海洋工程学与流体力学的方法构建设备行为模型。通过虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)增强实测数据在虚拟层的多维度表达,建立具有交互功能的海洋工程地质环境数字孪生系统。

2.4 应用层

应用层具备智能监测、数据分析、人机交互和辅助决策等功能。智能监测功能监控设备的运行状况;数据分析功能实现监测数据的可视化分析;人机交互功能实现设备作业模拟和海底环境漫游;辅助决策功能帮助用户快速掌握海底环境异常信息,辅助用户做出决策,优化设备作业。

3 虚拟层场景构建

虚拟层场景构建是数字孪生系统的关键,其精细化程度决定系统对现实环境的映射质量。本研究构建的虚拟层融合设备三维模型、虚拟仿真模型和虚拟现实交互模型,设备三维模型依据真实设备尺寸和材料构建,虚拟仿真模型依据设备实际工作状态构

建,虚拟现实交互模型依据用户对现实环境的主观感受构建,最大程度实现虚拟场景对现实环境的映射,实现过程如图 3 所示。

3.1 设备三维模型构建

本研究使用 SolidWorks 构建设备三维模型,包括设备平面几何、零件与装配体等信息,通过采集设备的平面几何信息构建各个零件模型,组装零件模型实现设备模型的装配及仿真演示。通过转换装配体模型格式、重新计算法线、删除冗余顶点,降低模型复杂度进而优化模型,最后导入 Unity3D 建立虚拟仿真模型。

3.2 虚拟仿真模型构建

本研究使用 Unity3D 构建虚拟仿真模型,包括设备模型和海洋环境仿真模型两部分。设备模型导入 Unity3D 后,根据设备的材质信息,在软件中设置不同材质球的着色器(Standard)参数赋予模型材质属性,在场景中添加定向光(Directional Light)和区域光(Area Light)增强虚拟模型的显示效果,添加刚体(Rigid Body)、碰撞体(Collider)等组件模拟设备在海底环境中受重力、浮力、碰撞等作用,如图 4 所示。本研究使用实测的多波束数据建立海底三维地形模型,在 Unity3D 中使用 Heightmaps 方法创建地形模型,使用平滑高度(Smooth Height)工具对模型进行平滑处理,进而实现海底三维地形模型的构建,如图 5 所示。通过粒子系统(Particle System)模拟浊度计现场记录的近底层浊度升高事件,设置粒子发射状态、运动周期、初始速度、重力等参数,模拟粒子在虚拟空间的运动行为,效果如图 6a 所示。使用天空、海洋等动态环境模块表现虚拟海洋环境细节,增强环境真实感,如图 6b 所示。

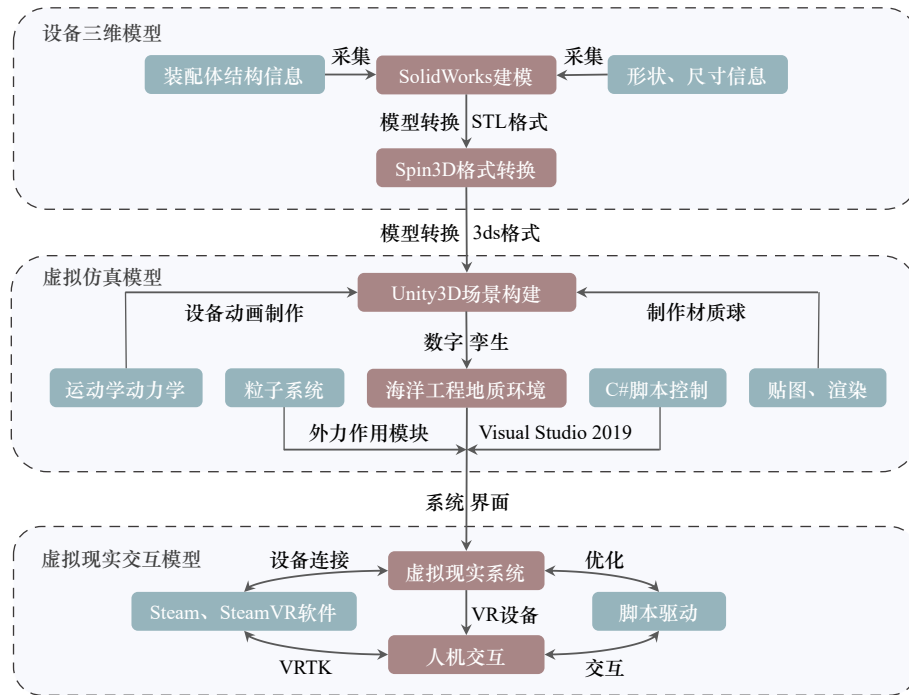


图3 虚拟层场景实现过程

Fig. 3 Virtual layer scenario realisation process

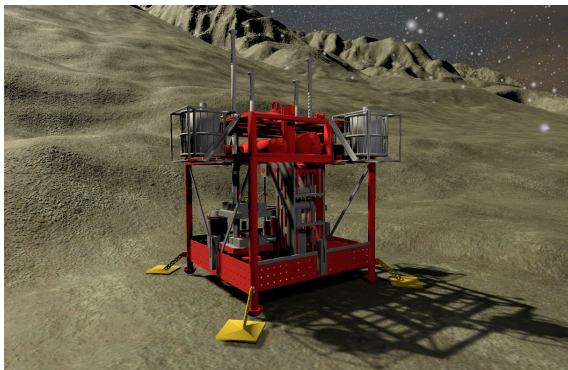


图4 设备虚拟仿真模型

Fig. 4 Virtual simulation models of equipment



图5 海底地形模型

Fig. 5 Submarine terrain model

3.3 虚拟现实模型构建

为增强监测数据可视化分析效果,本研究采用虚拟现实技术进行人机交互。通过虚拟现实模型将监

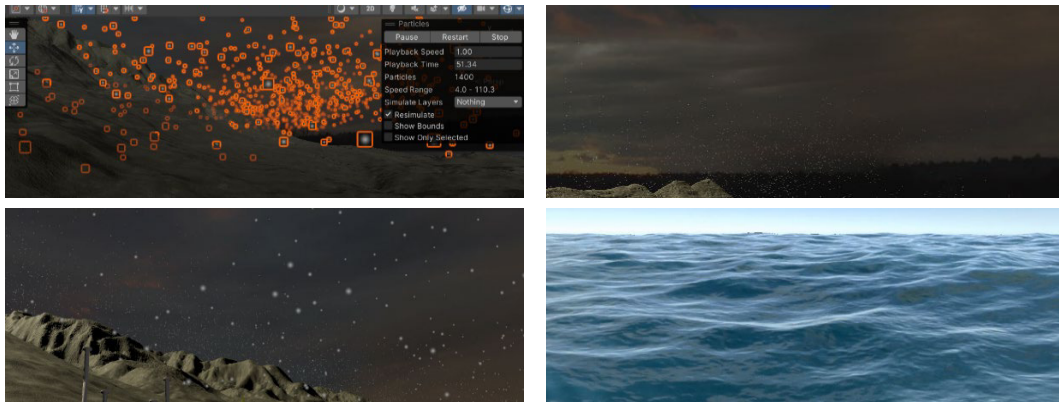
测数据可视化分析,加强用户对海洋环境信息的理解。虚拟现实技术结合计算机和现场监测数据生成具有交互功能的数字化环境,实现框架如图7所示。研究使用HTC Vive设备,包括头戴式VR眼镜和操控手柄,将HTC Vive连接至终端SteamVR,同时将SteamVR Plugin和VRTK插件导入Unity3D虚拟现实空间,通过编写Visual Studio C#脚本控制对象。用户使用操控手柄控制VR视角,触控进行空间移动、抓取特征、选中对象等UI交互,实现人机交互功能。

4 系统功能

本研究设计的数字孪生系统,使用Unity3D技术构建场景漫游、分析工具、告警记录等UI界面,结合MATLAB、ArcGIS数据分析技术实现智能监测、数据分析、人机交互、辅助决策等功能。

4.1 智能监测功能

智能监测功能实现对设备运行状态的实时监控。应用倾斜姿态测量传感器数据判别设备的坐底姿态,应用北斗卫星通信数据实时定位设备,综合判断海底设备的作业安全状态。智能监测界面如图8a、图8b所示,用户通过Unity GUI图形控件切换地形、设备视角,远程监控设备作业过程,查看设备基本信息、当前状态、作业任务、执行情况等,查询设备部件实时运转情况及历史运行数据,实现设备的智能化监测。



a. 粒子系统模拟近底层悬浮物

b. 天空及动态海洋

图 6 海洋环境仿真模型

Fig. 6 Marine environment simulation model

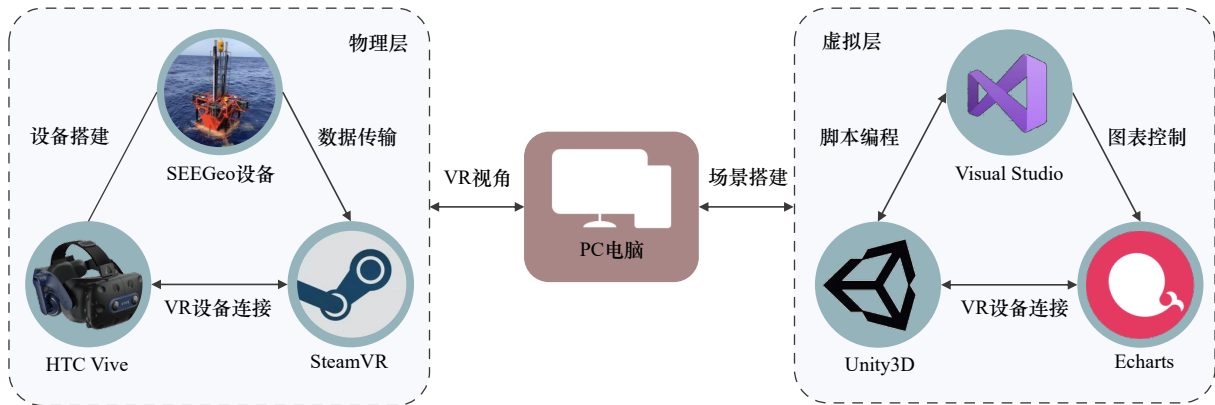


图 7 虚拟现实模型实现框架

Fig. 7 Virtual reality model implementation framework



a. 地形视角

b. 设备视角

图 8 智能监测功能

Fig. 8 Intelligent monitoring functions

4.2 数据分析功能

系统数据分析功能在 MATLAB、ArcGIS 等数据分析方法的基础上,建立海洋环境、海底地形、地层等多空间维度数据处理模式。对于海洋环境数据,系统使用快速傅里叶变换频谱分析方法对压力数据进行滤波处理,采用平滑/高斯滤波器对浊度、温度数据进行降噪处理;对于海底地形数据,使用等值线、坡度、坡向分析等工具对海底 DEM 数字高程模型进行

等高线加密、高程统计、坡度及坡向分析;对于海底地层数据,采用路径剖面工具快速提取 DEM 断面高程数据并生成剖面图。分析结果使用 Unity3D Echarts 分析工具进行可视化展示,如图 9a、图 9b 所示。

4.3 人机交互功能

系统具有虚拟现实人机交互功能。通过在 Unity3D Camera 上编写 Visual Studio C#脚本,用户能够在场景中进行旋转、平移、缩放等操作,点击相应控件切换



图9 数据分析功能

Fig. 9 Data analysis functions

场景,实现海底场景漫游功能。系统使用MySQL数据库实时记录监测数据及设备运行信息,用户通过访问数据库进行数据可视化分析、判断设备运行状态。人机交互功能实现用户在虚拟场景中分析数据,从用户角度出发,增强监测数据的可视化分析效果。

4.4 辅助决策功能

辅助决策功能根据可视化分析结果辅助用户进行决策,系统将异常监测数据传输至虚拟层,虚拟层根据可视化分析结果做出辅助决策,将海底环境异常情况进行弹窗警告,使用户及时对监测设备下达应急操作指令并告知相关工程单位,提出应对措施以减少工程损失。

5 系统应用

5.1 研究区概况

本研究开展上述数字孪生系统在南海神狐峡谷

区的应用设计与实践,研究区位置如图10所示。神狐海域位于南海北部陆坡的中部,构造上隶属于珠江口盆地最大的沉积凹陷——白云凹陷,该区域海底地貌复杂,发育17条SSE走向的陆坡限制型海底峡谷,平均坡度约为 2° 。研究区水深约为1 300 m,沉积物类型以细粒沉积为主,主要为粉砂、含泥质粉砂、泥质粉砂,该区域陆源碎屑来源丰富,沉积速率较高,且由于洋流、等深流和沉积物漂积等对碎屑物质的长途搬运,使得研究区内普遍发育滑塌沉积、浊流沉积^[22-24]。

5.2 研究方法

2020年9月,SEEGeo在南海神狐海域(水深1 342 m)由“海洋地质六号”船进行布放并开展200余天深海原位长期观测,搭载的RBR多参数水质仪监测到浊度、温度、盐度、压力、溶解氧浓度、电阻率等近底层环境要素变化。其中,水质仪在2021年3月

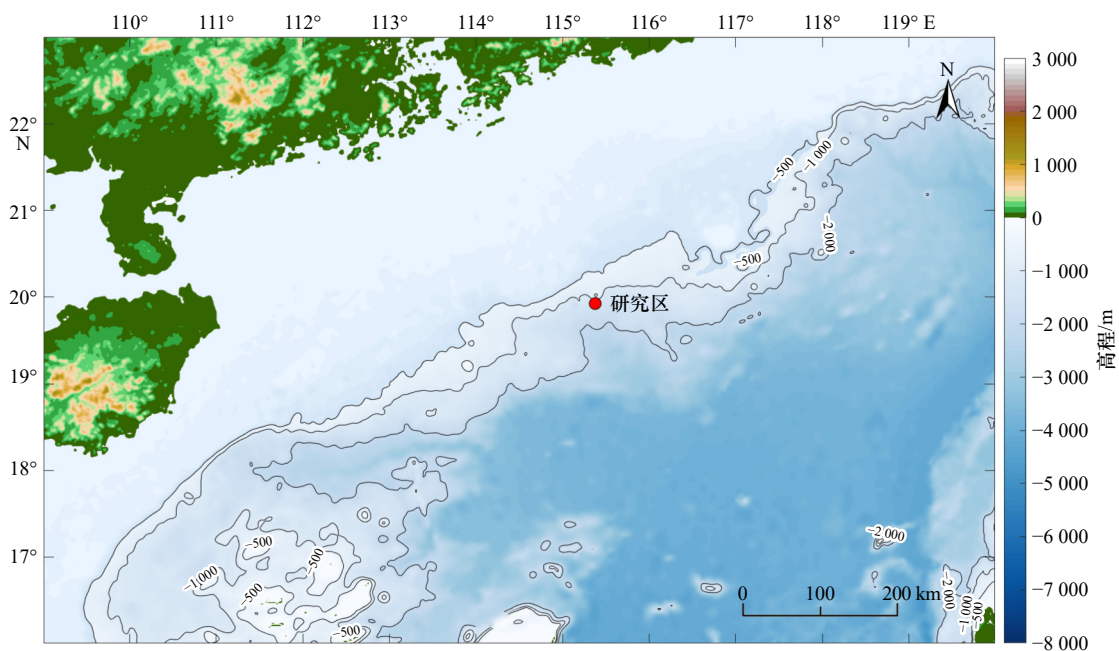


图10 研究区位置

Fig. 10 Location of the study area

7-21 日期间监测到近底层沉积物悬浮导致浊度升高事件,但根据传统分析方法,数据只能以二维图表形式表现出浊度值随时间的变化,研究者难以将浊度值与近底层悬浮物的空间变化特征相联系,本研究使用数字孪生技术将浊度值变化与虚拟仿真模型进行交互分析,提供一种新的数据可视化分析手段,使沉积物悬浮事件在数字孪生虚拟平台进行分析展示。

研究使用 Unity3D 技术构建虚拟环境粒子系统,对沉积物悬浮事件进行可视化分析。水质仪浊度数据量化悬浮物浓度的单位为 NTU,使用最小二乘法建立浊度与抽滤测定悬浮物浓度的经验关系,将浊度数据反演为悬浮颗粒物浓度(单位: mg/L);根据悬浮物的平均粒径(30 μm),计算单个悬浮物的体积为 14 130 μm^3 ;根据悬浮物的平均密度(1.48 g/cm^3)^[25],计算在 1 m^3 空间范围内悬浮物的体积为 3 943 mm^3 (以 1 mg/L 为例);根据单个悬浮物的体积,估算 1 m^3 空间范围内约有悬浮物数量 279 021 059 个;根据传感器的有效探测范围(125 cm^3)与海底摄像机的拍摄视野范围按一定比例(1 : 4 096 000)进行放大,设置 512 m^3 的粒子体积空间;由于悬浮颗粒很少以单个颗粒的形式运输,而是以胶体、絮凝等复合形式运输^[26],因此参照 ROV 拍摄近底层悬浮物直径(25.6 mm)将单个粒子体积按比例(1 : 621 378 370)放大,相关设置参数如表 1 所示。

在此基础上建立粒子在虚拟空间的运动行为,包括粒子发射状态、运动周期、初始速度、重力等。为了更好地描述近底层悬浮物的空间运动特性,根据

表 1 近底层悬浮物颗粒虚拟仿真粒子信息表

Table 1 Virtual simulation particle information sheet for near-bottom suspended particles

虚拟仿真参数名称	参数信息
悬浮物平均粒径	30 μm
悬浮物体积	14 130 μm^3
悬浮物平均密度	1.48 g/cm^3
悬浮物体积(1 mg/L)	3 943 mm^3
悬浮物数量(1 m^3)	279 021 059
传感器有效探测范围	125 cm^3
空间体积放大比例	1 : 4 096 000
空间体积	512 m^3
单个粒子体积放大比例	1 : 621 378 370
粒子体积	8 780 mm^3

Woodward 研究可知悬浮物很少以单个颗粒的形式存在,而是以胶体、絮凝或聚集的形式存在^[27],在系统中设置粒子碰撞器,使粒子间碰撞形成微团用于描述悬浮物颗粒的聚集过程。Gillard 等^[28]的研究表明,沉积是海底悬浮物最重要的运移去向,在系统中设置碰撞检测,当检测到粒子与海底面碰撞时,使粒子消失,用于描述近底层悬浮物的沉降过程。编写 Visual Studio C#脚本建立实测浊度值与虚拟环境悬浮粒子的对应关系,实现近底层浊度值的三维可视化分析。

5.3 结果分析

5.3.1 浊度数据分析

在整个观测期内(图 11a, 2020 年 9 月 15 日至 2021 年 6 月 27 日),RBR 多参数水质仪监测到为期 15 d(2021 年 3 月 7-21 日)的近底层浊度升高事件,如图 11b 所示。在近底层浊度升高事件发生之前,浊度值维持在 0.56 NTU 左右,在 2021 年 3 月 7 日后的第 1 至 9 日,浊度整体呈锯齿状周期上升,上升周期在 20 h 左右,每个周期浊度值增加近 10 NTU,然后快速下降到 10 NTU 或 12 NTU,下降时间为 1~2 h,在此期间浊度值的峰值为 49.69 NTU,约是最初水平的 88 倍。观测区域位于峡谷底部,峡谷头部陆源碎屑不断向底部进行垂向运输,可能是造成此次近底层浊度升高事件的原因。后第 10 至 15 日浊度开始下降,最终回归之前的均值水平。

5.3.2 海底悬浮物浓度的反演

为实现数字孪生技术在此次近底层浊度升高事件的可视化应用,对目标区域悬浮物浓度及粒径开展研究,于 2022 年 9 月,使用“东方红 3”号船 CTD 采水器(SBE911PLUS)对研究区 5 m、50 m、100 m、200 m、300 m、500 m、1 000 m 深度的海水进行抽滤分析,结果如图 12 所示,使用最小二乘法建立浊度与抽滤测定悬浮物浓度的经验关系,将浊度(Tu)反演为悬浮颗粒物浓度(SSC, mg/L),得到表达式为 $\text{SSC} = 38.405Tu - 32.570$,相关性达到 0.815。

5.3.3 悬浮颗粒物粒径分析

在 CTD 采水器上使用 LISST-deep 设备获取研究区近底层悬浮物平均粒径,图 13 显示 LISST-deep 所测悬浮物体积浓度在 32 组均匀粒径(1.36~230 μm)下的垂直分布情况,并给出悬浮物的中值粒径(M_d)曲线。发现研究区悬浮物粒径范围在 16.458~57.479 μm 之间,平均粒径为 30 μm ,这与 Lokhov 等^[29]在巴伦支海使用 LISST-deep 测量近底层悬浮物粒径的结果相似。在 800~900 m 深度处的悬浮物体积浓度结果显著,存在一个明显的底部高浊度层,此时悬

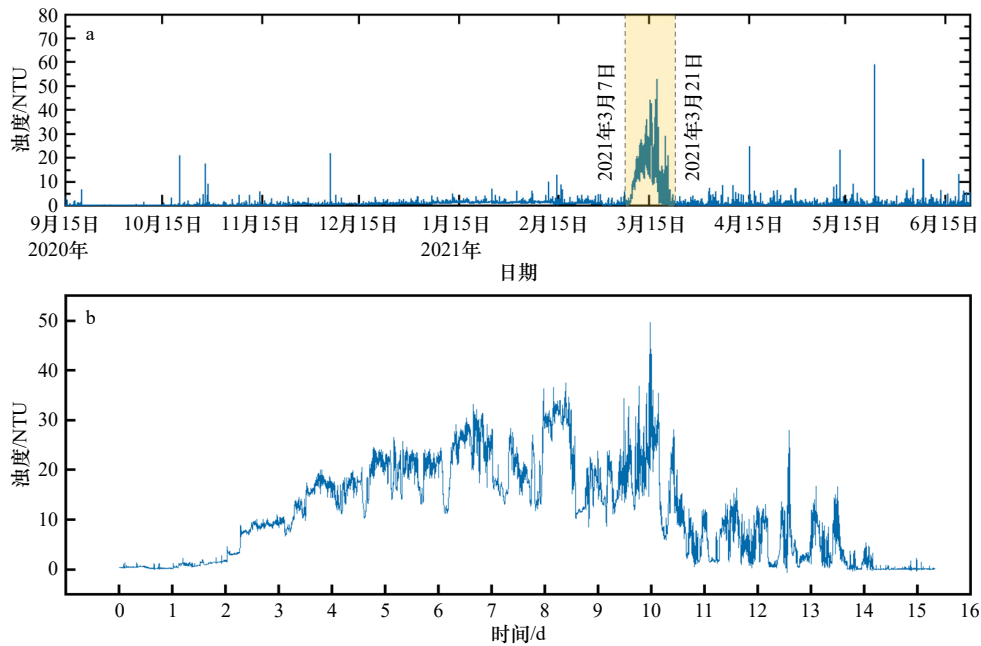


图 11 浊度随时间变化关系

Fig. 11 Relationship between turbidity and time

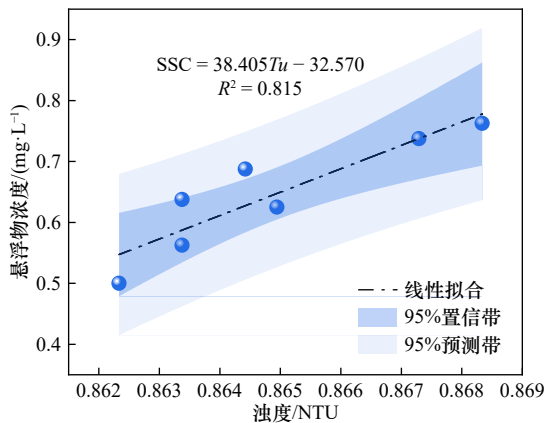


图 12 浊度与悬浮物颗粒浓度之间的线性关系

Fig. 12 Linear relationship between turbidity and suspended particle concentration

浮物体积浓度达到峰值,粒径为 $36\ \mu\text{m}$,可能是该环境富存来自陆源输送的悬浮物、有机聚合物和生物碎屑。

5.3.4 海底悬浮物时空变化规律

为进一步探讨海底悬浮物的时空变化规律,本文对 2021 年 3 月 15–16 日的近底层悬浮物浓度升高事件使用数字孪生技术进行可视化分析。结果发现在虚拟环境粒子系统中,悬浮物浓度、粒子数量与聚集程度具有较大的时空差异。如图 14 所示,在 0~12 h 期间,悬浮物浓度变化呈上升趋势,图 14d 中粒子数量相比图 14a 增加 1.63 倍,过程中粒子间相互碰撞发生聚集,在视野中粒子密集程度增高,其中前 4 h 悬浮物浓度以每小时 $137.9\ \text{mg/L}$ 的速率迅速上升,图 14b

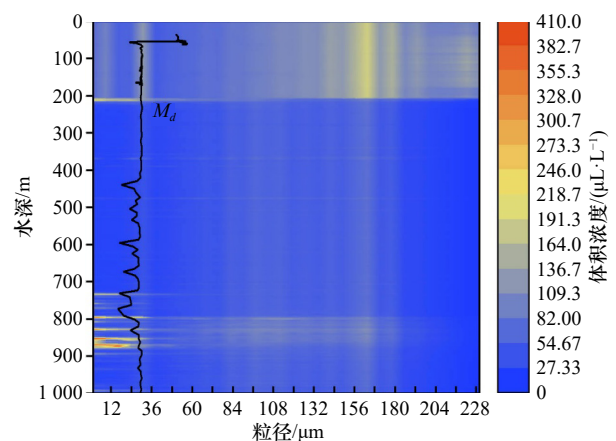


图 13 悬浮颗粒物粒径的垂直分布及中值曲线

Fig. 13 Vertical distribution and median curves of suspended particulate matter particle sizes

视野中的粒子出现较为明显的增加,数量是原来的 2.2 倍,4 h 后上升速率减缓,以每小时 $39.5\ \text{mg/L}$ 左右的速率波动上升,图 14b 至图 14d 中粒子总数维持较高水平,视野空间中粒子数目增加,形成多个粒子微团,悬浮物浓度达到峰值,Dropo^[30]认为悬浮物微团是矿物颗粒、有机物和生物有机体(如硅藻、细菌和藻类)的混合物,与悬浮物颗粒在物理、化学和构成上具有明显差异,在本研究观测到微团的形成可能是有机质与海底悬浮物强烈相互作用的结果。通常,悬浮物微团的密度较低,不易沉降^[31],在图 14d 视野中粒子之间出现较为明显的重叠,对设备的覆盖面积达到最大,峰值后悬浮物浓度以每小时 $240.2\ \text{mg/L}$ 的速率

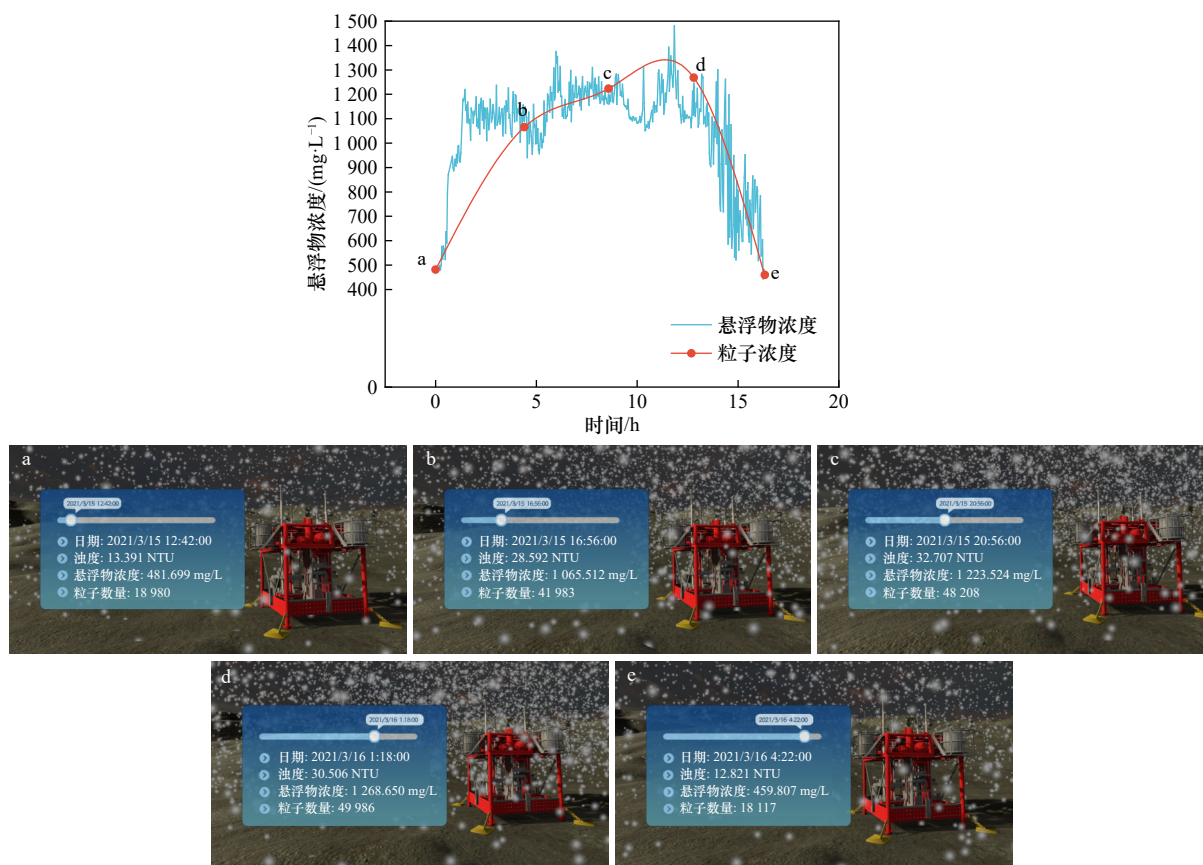


图 14 悬浮物浓度时间变化曲线及对应数字孪生虚拟粒子系统可视化分析图

Fig. 14 Temporal variation curve of suspended matter concentration and corresponding digital twin virtual particle system visualisation

波动下降,经碰撞器检测,大部分粒子与海底面碰撞后消失,如图 14e 所示,粒子数量与之前相比减少了 64%,视野中粒子密集程度减小,空间内粒子相互重叠的现象减弱,微团生成数目减少,恢复到最初水平。

5.3.5 虚拟粒子系统可行性分析

为验证上述可视化分析方法的可行性,本研究将 ROV 海底摄像影片和数字孪生虚拟粒子系统可视化分析图进行对比分析。图 15a 至图 15c 为 ROV 于 2021 年 6 月 22 日挂缆回收设备时拍摄到的近底层悬浮物画面,使用二值化方法处理图像,通过直方图寻找二值化阈值,增强悬浮物在图像中的显示,对比分析 ROV 摄像影片和虚拟粒子系统可视化分析图中颗粒在图像面积上的占比,如图 15a 至图 15c 所示,虚拟粒子系统分析误差在 0.16%~2.80% 范围内,与 ROV 拍摄的情况基本一致,证明该分析方法具有较高的可行性。本研究通过建立数字孪生虚拟粒子系统,与深海原位长期监测的浊度数据相结合,能够展示近底层悬浮物的时空变化特征。

6 结论

(1) 本文研发了海洋工程地质环境数字孪生系

统,阐述了数字孪生系统的组成,基于深海长期原位观测数据,使用 Unity3D 技术构建了设备三维模型、虚拟仿真模型和虚拟现实模型等多模型融合的虚拟海洋环境,实现了对现实海洋环境的同步映射,同时结合 MATLAB、ArcGIS 数据分析技术开发了智能监测、数据分析、人机交互、辅助决策等功能。

(2) 本研究基于数字孪生技术对南海北部陆坡神狐海域峡谷区的沉积物悬浮事件展开研究,基于 RBR 多参数水质仪监测的浊度数据、海水抽滤测量的悬浮物浓度及 LISST-deep 获取的近底层悬浮物粒径等数据,使用 Unity3D 技术构建虚拟环境粒子系统,将 SEEGeo 监测到的近底层悬浮物浓度升高事件在虚拟环境粒子系统上进行可视化分析,提供了一种新的数据可视化分析手段。研究发现在整个观测期内悬浮物浓度、粒子数量与聚集程度具有较大的时空差异,其中,悬浮物浓度变化呈上升趋势时,视野中粒子间相互碰撞发生聚集,密集程度增高;悬浮物浓度维持较高水平时,视野中粒子数目显著增加,并发现粒子间形成多个微团,出现较明显的重叠现象,加剧了粒子对设备的覆盖程度。

(3) 经进一步验证,虚拟粒子系统分析误差在

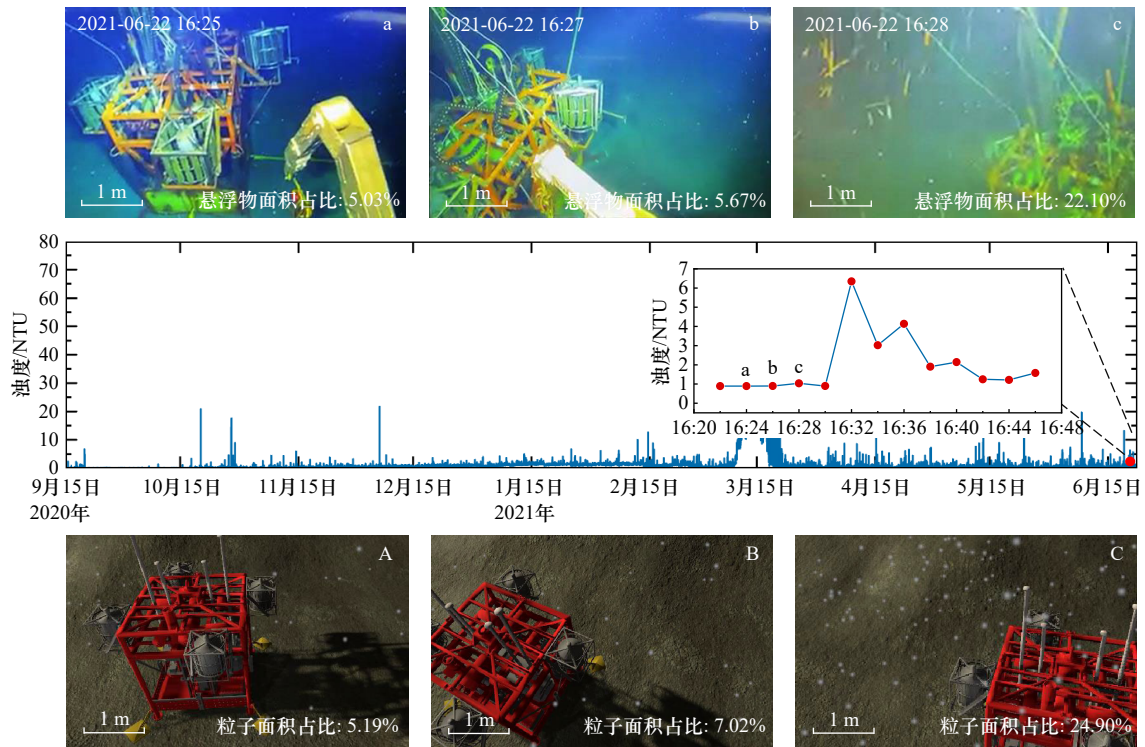


图 15 ROV 海底摄像影片和数字孪生虚拟粒子系统可视化分析对比图

Fig. 15 Comparison of ROV subsea camera film and digital twin virtual particle system visualisation analysis

0.16%~2.80% 范围内,具有较高的可行性。本研究通过建立数字孪生虚拟粒子系统,与深海原位长期监测的浊度数据相结合,能够展示近底层悬浮物的时空变化特征,为海洋工程监测数据可视化分析提供了新的方法,是数字孪生技术在海洋工程领域的一个应用实例。数字孪生技术在揭示地质环境对海底工程的影响方面优势突出,将温度、压力、流速等监测数据应用于系统进行综合分析,对探索海底地质灾害监测

预警方面能够起到重要作用。

致谢: 本研究的数据及样品采集得到国家自然科学基金重大仪器专项(41427803)和国家自然科学基金委员会共享航次计划项目(42149905)的资助。该航次(NORC2022-05)由“东方红3”号科考船实施,感谢徐景平、胡聪、孙中强、冯学志、孙均楷对本论文给予的帮助和支持,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 刘晓磊, 陆杨, 王胤, 等. 海洋资源开发与海洋工程地质——第二届国际海洋工程地质学术研讨会(ISMEG 2019)总结[J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 169-177.
Liu Xiaolei, Lu Yang, Wang Yin, et al. Exploration of marine resources and marine engineering geology: summary on the 2nd international symposium on marine engineering geology[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(1): 169-177.
- [2] 李浩, 张侃, 李晓军, 等. 论海洋油气开采环境保护的重要性[J]. 天津科技, 2016, 43(6): 85-86, 90.
Li Hao, Zhang Kan, Li Xiaojun, et al. On the importance of environmental protection for offshore oil and gas exploitation[J]. Tianjin Science & Technology, 2016, 43(6): 85-86, 90.
- [3] Peng K, Li X B, Wan C C, et al. Safe mining technology of undersea metal mine[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(3): 740-746.
- [4] Zhang Y P, Zhang H W, Liu J, et al. Submarine pipeline tracking technology based on AUVs with forward looking sonar[J]. Applied Ocean Research, 2022, 122: 103128.
- [5] 王海平, 张伟, 李春雷, 等. 海底浅层地质灾害的高分辨率地震识别技术[J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 103-109.
Wang Haiping, Zhang Wei, Li Chunlei, et al. High resolution seismic identification of seafloor shallow geological hazards[J]. Marine Sciences, 2014, 38(7): 103-109.
- [6] 赵卫, 熊元凯, 宫少军, 等. 天津近海海底地质灾害类型及声学特征[J]. 海洋科学, 2021, 45(2): 119-126.
Zhao Wei, Xiong Yuankai, Gong Shaojun, et al. Acoustic characteristics and types of submarine geological hazards in Tianjin offshore areas[J]. Marine Sciences, 2021, 45(2): 119-126.

- [7] 贾永刚, 陈天, 李培英, 等. 海洋地质灾害原位监测技术研究进展[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(3): 1–14.
Jia Yonggang, Chen Tian, Li Peiying, et al. Research progress on the in-situ monitoring technologies of marine geohazards[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(3): 1–14.
- [8] 于新生, 阎子衿, 朱明亮, 等. 自主式深海海底溶质通量原位观测站研究进展[J]. *海洋科学*, 2017, 41(6): 150–161.
Yu Xincheng, Yan Zijin, Zhu Mingliang, et al. Review of seabed landers for monitoring solute fluxes in deep sea[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(6): 150–161.
- [9] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(1): 1–18.
Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1–18.
- [10] Grieves M W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1/2): 71–84.
- [11] Grieves M. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products Through Product Lifecycle Management[M]. Kennedy: Space Coast Press, 2011: 1–3.
- [12] Piascik R, Vickers J, Lowry D, et al. Technology Area 12: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map[M]. Washington, DC: NASA Office of Chief Technologist, 2010: 1–2.
- [13] Wu Q C, Mao Y S, Chen J X, et al. Application research of digital twin-driven ship intelligent manufacturing system: pipe machining production line[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(3): 338.
- [14] Fang X, Wang H H, Li W J, et al. Fatigue crack growth prediction method for offshore platform based on digital twin[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 244: 110320.
- [15] Coraddu A, Oneto L, Baldi F, et al. Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106063.
- [16] Mayani M G, Baybolov T, Rommetveit R, et al. Optimizing drilling wells and increasing the operation efficiency using digital twin technology[C]/IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Galveston: SPE, 2020: 1–10.
- [17] Wang M M, Wang C Y, Hnydiuk-Stefan A, et al. Recent progress on reliability analysis of offshore wind turbine support structures considering digital twin solutions[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 232: 109168.
- [18] 张磊, 郑兴周, 宋健辉, 等. 基于数字孪生技术的海洋平台工艺系统仿真模型[J]. *中国仪器仪表*, 2020(12): 75–78.
Zhang Lei, Zheng Xingzhou, Song Jianhui, et al. The simulation model of offshore platform process system base on digital twin technology[J]. *China Instrumentation*, 2020(12): 75–78.
- [19] 王文明, 侯春来, 武振宇, 等. 海洋无隔水管修井的数字孪生框架与可视化交互[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 423–431.
Wang Wenming, Hou Chunlai, Wu Zhenyu, et al. Frame and visualization for digital twin of marine riserless well intervention[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 423–431.
- [20] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1–18.
Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1–18.
- [21] 孙志文, 贾永刚, 权永峥, 等. 复杂深海工程地质原位长期监测系统研发与应用[J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 216–228.
Sun Zhiwen, Jia Yonggang, Quan Yongzheng, et al. Development and application of long-term *in situ* monitoring system for complex deep-sea engineering geology[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 216–228.
- [22] 杨承志, 罗坤文, 梁金强, 等. 南海北部神狐海域浅层深水沉积体对天然气水合物成藏的控制[J]. *天然气工业*, 2020, 40(8): 68–76.
Yang Chengzhi, Luo Kunwen, Liang Jinqiang, et al. Control effect of shallow-burial deepwater deposits on natural gas hydrate accumulation in the Shenhu Sea Area of the northern South China Sea[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(8): 68–76.
- [23] 姜衡. 神狐海域含水合物浊流沉积体差异性对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018: 14–17.
Jiang Heng. Comparative study on the difference of hydrate-bearing turbidites in the Shenhu Sea Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018: 14–17.
- [24] 石思思, 陈星州, 马健, 等. 南海北部神狐海域W19井天然气水合物储层类型与特征[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(3): 24–29.
Shi Sisi, Chen Xingzhou, Ma Jian, et al. Natural gas hydrate reservoir classification and characterization in the well W19 of Shenhu Sea Area, northern South China Sea[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(3): 24–29.
- [25] 罗云, 侯正瑜, 田雨杭, 等. 南海海底沉积物声学物理参数测定的温度和时间优化研究[J]. *热带海洋学报*, 2018, 37(4): 81–88.
Luo Yun, Hou Zhengyu, Tian Yuhang, et al. Optimization of temperature and time of acoustic physics parameters of seafloor sediment in the South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(4): 81–88.
- [26] Droppo I G, Ongley E D. The state of suspended sediment in the freshwater fluvial environment: a method of analysis[J]. *Water Research*, 1992, 26(1): 65–72.
- [27] Woodward J C, Walling D E. A field sampling method to obtain representative samples of composite fluvial suspended sediment particles for SEM analysis[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, 64: 742–744.
- [28] Gillard B, Purkiani K, Chatzievangelou D, et al. Physical and hydrodynamic properties of deep sea mining-generated, abyssal sediment plumes in the Clarion Clipperton fracture zone (eastern-central Pacific)[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2019, 7(1): 5.

- [29] Lokhov A S, Kravchishina M D, Klyuvitkin A A, et al. *In situ* measurements of the characteristics of suspended particles in the Barents sea by the LISST-deep laser diffractometer[J]. *Oceanology*, 2020, 60(5): 650–663.
- [30] Droppo I G. Rethinking what constitutes suspended sediment[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(9): 1551–1564.
- [31] Droppo I G, Leppard G G, Flannigan D T, et al. The freshwater floc: a functional relationship of water and organic and inorganic floc constituents affecting suspended sediment properties[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, 99(1): 43–53.

Implementation and application of digital twin-based visualization technology for spatial and temporal variation of seafloor suspensions

Qiao Yue¹, Shan Hongxian^{1,2}, Wang Hongwei¹, Zhu Chaoqi^{1,2,3}, Sun Zhiwen¹, Jia Yonggang^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The virtual ocean platform constructed by digital twin technology can further realize the 3D visualization and analysis of seabed environmental monitoring data. Based on the long-term *in-situ* monitoring data of the deep seabed, this paper uses Unity3D technology to build a virtual marine environment with multi-model fusion, and initially establishes a digital twin system for marine engineering geological environment; combines MATLAB and ArcGIS data analysis technology to realize intelligent monitoring, data analysis, human-computer interaction and auxiliary decision-making; the study further constructs a virtual environment particle system to conduct a 3D visualization and analysis of the near-bottom suspended sediment concentration elevation event in the northern part of the South China Sea. The results show that there are large spatial and temporal differences in suspended matter concentration, particle number and aggregation degree in the virtual environmental particle system. In particular, when the suspended matter concentration is maintained at a high level, particles are found to collide and overlap with each other, and the denser microclusters are derived in space. When the suspended matter concentration rises further to the peak, the number of microclusters increases and occupies most of the volume of space, forming a highly aggregated suspended matter aggregate with a wider coverage of suspended particles. This paper is based on image analysis techniques and compares the visualization results with real seafloor cameras with relative errors in the range of 0.16%–2.80%, which is highly feasible.

Key words: digital twins; concentration of suspended solids; visual analysis; virtual particle system; *in situ* long-term monitoring of deep sea