

文章编号: 1007-2993(2025)02-0159-08

基于 GIS+BIM+数字孪生技术的海域勘察 数字管理平台研发及应用

王晓伟 王 章 徐四一

(上海山南勘测设计有限公司, 上海 201206)

【摘要】 针对海上工程范围广、风险高、调度难、信息杂、理解难的问题, 利用 GIS(地理信息系统)、BIM(建筑信息模型)、数字孪生、IoT(物联网)等技术, 研究以信息技术赋能勘察管理, 开发海域勘测数字管理平台, 优化管理模式, 提高勘察作业管理及成果应用的效率, 实现数字化成果交付, 并在长江口区域取得了较好的应用效果。

【关键词】 GIS; BIM; 数字孪生; 海上勘察; 数字管理平台; 数字化交付

【中图分类号】 P642; TU195

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0243

Digital management platform for marine survey based on GIS+BIM+digital twin technology

Wang Xiaowei Wang Zhang Xu Siyi

(Shanghai ShanNan Survey and Design Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

【Abstract】 Given the problems of wide scope, high risk, difficult scheduling, mixed information, and difficult understanding of marine engineering, GIS (geographic information System), BIM (building information model), digital twin, IoT (Internet of Things), and other technologies were used to study the use of information technology to enable survey management, develop digital management platforms for marine survey, and optimize management modes. It significantly improved the efficiency of survey operation management and results application, achieved digital results delivery, and was well applied in the Yangtze River estuary region.

【Key words】 GIS; BIM; digital twins; marine survey; digital management platform; digital delivery

0 引言

近年来, 海洋经济、海岸带经济加快发展, 从光伏、海上风电等新能源产业, 到海洋牧场建设等现代海洋产业, 再到海上二氧化碳封存等新兴技术、海洋生态修复等生态环境产业, 一系列新兴技术及产业正成为海洋经济发展的新旋律。各类产业的发展离不开工程建设的推进, 作为总体工程的前期环节, 海上勘察工作的开展对于加快工程推进、尽早发挥工程效益意义重大。

当前, 海上勘察仍面临一些现实问题。一是海上作业环境复杂、风险高, 经常受到台风、寒潮等恶劣天气的影响, 需要有完备的应急预案。如何将理论应急预案转化成可实施、易理解的方案, 是项目实施过程中的重中之重。二是海上项目涉及范围广, 需要大量作业船只, 由于船舶作业受到天气、潮汐、海底地形等多方面影响, 加之海上作业面众多、船舶联络

不畅, 如何有效调度船只、优化作业海区内的航行路线、确保安全航行、进行合理作业分配, 进而提高整体作业效率, 是海上勘察面临的一大难题。三是海上项目场地范围一般较大, 导致成果的提供更加离散化, 以地质剖面图为例, 当一条完整的剖面长达几十公里时, 由于图幅限制, 要拆分成多个相互衔接的剖面, 导致在后序应用中需要专业人员利用上述资料进行三维场地的想象和构建, 对个人经验的要求较高, 也在一定程度上制约了岩土工程勘察成果的应用。

国家“十四五”规划提出: 迎接数字时代, 激活数据要素潜能, 以数字化转型整体驱动生产方式、生活方式和治理方式变革^[1]。水利部于 2021 年提出智慧水利业务的“四预”功能, 旨在通过数字化、网络化、智能化的手段, 全面构建具有预报、预警、预演、预案功能的智慧水利体系。《“十四五”工程勘察设计行业发展规划》^[2]指出: 以信息技术赋能勘察设计企

作者简介: 王晓伟, 男, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程技术及信息化研究。E-mail: 375872805@qq.com

业管理创新,优化管理模式,重塑管理流程,持续完善生产管理信息系统数据与功能的无缝集成,逐步实现全面动态业务管理^[3]。

当前阶段,数字化技术的应用已经成为行业内的热点问题。望毅等^[4]提出了一套合适的水运工程 BIM 技术体系。任彧等^[5]研发了基于 NURBS 和 Brep 技术的岩土工程勘察 BIM 软件。贾鹏飞^[6]从工期、成本、效率、风险控制等方面对 BIM 技术在岩土工程勘察的应用进行了探讨。曹思语^[7]结合铁路工程勘察设计的工作特点,分析了 BIM 技术应用方法和效果。王瑛莹^[8]对 BIM 技术在岩土工程勘察成果的三维可视化中的应用场景进行了分析。

王国岗等^[9]通过搭建三维数字化场景进行了地质信息的数字化采集及三维可视化仿真分析。祖国等^[10]采用数据库与三维 GIS 空间分析技术与方法结合,研制了海洋勘察综合数据三维可视化管理系统。熊鑫^[11]基于 GIS+BIM 技术,对工程勘察成果进行了 BIM 管理应用、系统设计与探索应用。李安乐等^[12]从成本、质量、风险控制、企业竞争力等方面分析了勘察信息化建设的意义,并提出勘察信息化的措施建议。

曹旭梅等^[13]研究了 BIM 和 IoT 技术的集成应用,并探索了在航道工程勘察安全管控中的应用。李春亮等^[14]提出了以 GIS 技术为基础的勘察数字化解决方案,实现了钻孔一张图可视化渲染、三维钻孔柱状图自动构建与展示、勘察业务数据分析与统计应用等功能。

目前,勘察阶段的数字化应用主要基于 BIM 建立模型,实现勘察成果三维可视化,助力后续设计计算工作。在此基础上,如何进行勘察阶段的数字孪生,指导勘察工作的实施,并基于 GIS+BIM 平台实现作业过程的风险管控及生产调度,从而提高管理效率,是一个值得研究的问题。

针对上述问题,陈健等^[15]提出了以平台建设为抓手的推动岩土工程数字孪生技术发展的研究思路。

本文着重研究如何以信息技术赋能海域勘察管理,在勘察工作开展前基于 GIS、BIM 等技术进行数字孪生,指导勘察作业,勘察作业过程中再结合 IoT 等技术进一步优化管理模式,从而提高勘察作业管理效率,为工程全生命周期提供易于理解及应用的数字化勘察成果。

1 GIS+BIM+数字孪生平台总体架构

1.1 总体思路

平台研发的目的在于优化海域勘察管理模式,

提升勘察作业管理及成果应用的效率,并实现数字化成果交付。具体思路如下:

(1)勘察前,利用 GIS、倾斜摄影、浅剖、侧扫声呐等技术,取得海域、陆域地理信息数据,对工程本体及周边环境进行数字化建模,形成数字底板。

(2)将应急预案过程导入数字化平台,模拟不同天气、潮汐条件下的应急预案处置,进行应急预案的数字孪生,优化应急预案。

(3)作业前,在数字平台底板上进行钻孔预建模,将作业方案导入平台,进行勘察作业过程的数字孪生,优化作业方案。

(4)作业过程中,将优化后的应急预案以“四预”的方式进行管理应用,利用平台进行应急预案管理。

(5)作业过程中,采用优化后的作业方案指挥调度、指导施工。

(6)作业完成后,录入过程资料及成果,可进行数据调阅和过程资料复盘,把控作业成果质量。

(7)采用基于克里金(Kriging)插值算法的三维岩土体模型构造技术进行 BIM 模型精准建立并应用。对钻孔成果进行异常检测,存在疑问的地方及时指导作业队伍验证。

(8)将 GIS+BIM 模型移交设计方,实现作业成果的数字化交付。

1.2 技术路线

以 GIS+BIM 模型为基础,依托云计算、IoT、数字孪生等技术,研发海域勘察数字化平台。通过地理信息模型、地质模型、钻孔模型、岛屿暗礁模型、施工船舶模型等与平台的叠加,实现海陆一体化建模和展示。平台同步整合外部数据端口链接,包括气象、潮汐、AIS 船舶自动识别系统等,实时获取作业船舶位置、施工状态以及海上环境信息,形成统一的海上勘察数字管理平台(见图 1)。

1.3 平台架构

系统的整体架构采用 B/S 设计,基于微服务架构模式,通过综合运用 GIS、BIM、三维仿真、数字孪生、数据库、网络技术,实现基于网络的勘察数据管理和服务(见图 2)。

基础设施层主要涉及数据存储,基于 MD5 (MD5 Message-Digest Algorithm)与 3DES(Triple Data Encryption Algorithm)加密算法保证安全,网站基于 SSL(Secure Socket Layer)保证数据传输安全。

数据资源层通过各类基础数据、文档数据、外业数据、成果数据的规范化整理,为平台分析及计算提

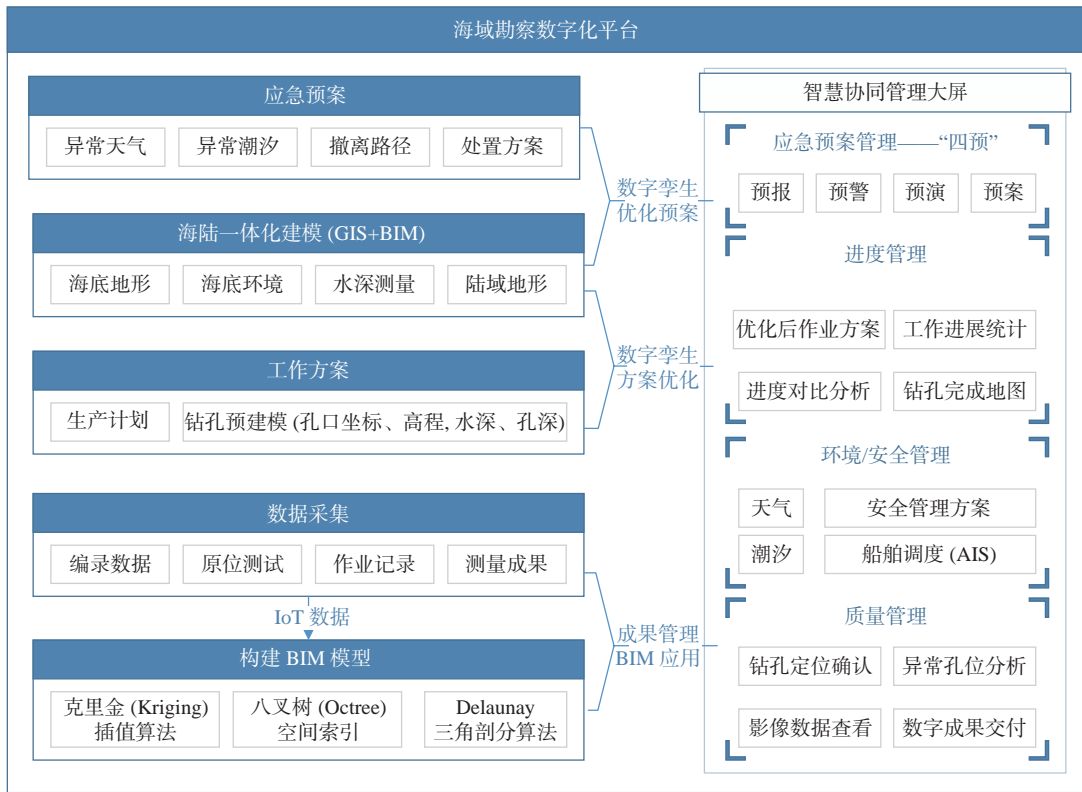


图 1 技术路线图

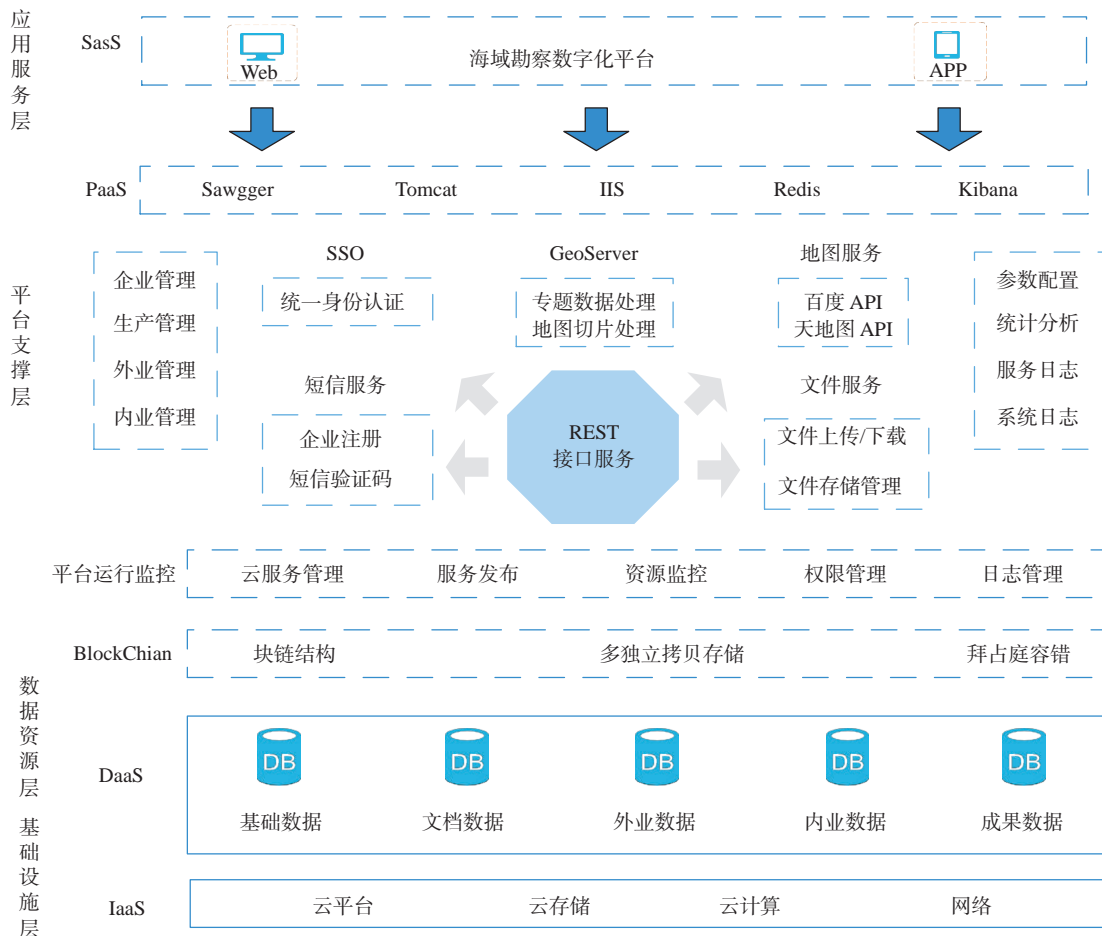


图 2 技术架构

供所需的各类参数。

平台支撑层主要是各类数据的汇聚,提供 REST 接口服务,确保平台的正常运转。

应用服务层是人机交互的界面,可通过 Web 端、APP 等进行访问,并对平台进行各类操作。

2 数字化模型构建关键技术

2.1 数据轻量化

平台通过构建并载入天地图、地形模型、海域模型、倾斜摄影模型和 BIM 地质模型,建立数字孪生底板,并引入可视化数字孪生引擎,主要通过以下技术进行 WebGL 轻量化多源模型融合渲染(见图 3):

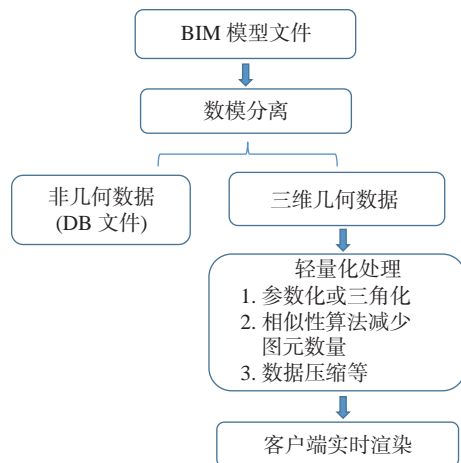


图 3 模型可视化优化思路

(1)优化图形数据:减少需要渲染的图形数据量,例如使用八叉树等数据结构来剔除不可见的图元,减少进入渲染区域的绘制对象。

(2)参数化几何描述和三角化几何描述:用多个参数来描述一个几何体,或者用多个三角形来描述一个几何体,从而减少需要传输和处理的图形数据量。

(3)使用高效的渲染策略:例如,只在视锥体内进行渲染,忽略不在视锥体内的物体;或者根据物体距离视点的远近,选择使用低精度或者高精度的渲染策略。

(4)压缩图像数据:对于纹理等图像数据,可以通过压缩的方式来减少数据量,从而提高渲染效率。

2.2 基于克里金插值算法的三维建模技术

研发了基于克里金(Kriging)插值算法的三维岩土体模型构造技术,使用该技术路线开发了基于 BIM 的岩土工程勘察建模软件系统。

本项目采用克里金插值算法,依据场地内已有钻孔模型,对其余部位的土层进行插值计算,可以取得理想的效果。

插值分析流程:

(1)根据场地内已有钻孔的坐标信息及地层深度信息,建立地层分界的高层对应关系,高层值用 z 表示;

(2)依据各钻孔坐标信息计算钻孔间距离,并计算半变差函数的估计量,其中,半变差函数用 $y(h)$ 表示,其估计量用 $y^*(h)$ 表示。

(3)分地层进行计算拟合,得到每个地层的半变差函数的参数(球状模型参数)。

(4)建立克里金方程组,根据上述参数,计算各地层的半变差值。

(5)求解虚拟插值点的高程属性估算值。

相关计算公式如下:

$$Z'(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

其中权系数 λ 的求解公式方程组为:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{i,j} + \mu = y_{i,0} (i = 1, 2, \dots, n); \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$y_{i,j} = y(x_i, x_j) = y(x_i - x_j) \quad (3)$$

3 平台功能介绍

3.1 环境、地形数字化模型构建

基于 GIS 地图数据、测绘数据、海岸倾斜摄影测量数据,融合水下地形地貌数据建模。

提供一套 Web 端轻量化、可视化数字孪生引擎,具备通用的三维交互功能,用以高度还原项目研究区域的三维仿真模型。支持多源三维数据格式导入并融合展示,可方便地集成钻孔、三维地质模型、倾斜摄影测量、地上构筑物等第三方软件生成的模型,达到空间一体化三维浏览功能;具备数据管理功能,支持第三方平台的数据对接,实现实体与属性信息的联动查询。

3.2 数字孪生

(1)应急预案数字孪生

通过数字孪生,检验不同天气条件下的应急预案可行性,把控风险管理。

进场作业前,将应急预案与海陆一体化数字模型相结合,模拟不同的天气、涌浪、潮汐等情况下,根据应急预案开展船舶撤离、人员避险等相关处置工作,检验应急预案的可实施性,优化应急预案。在现场勘察作业过程中,实时做好天气、潮汐、船舶调度等环境管理,利用智慧协同管理大屏强化“四预”(预

报、预警、预演、预案)工作,做好应急预案管理。

(2) 工作方案数字孪生

通过数字孪生,检验勘察纲要的合理性,优化施工路线、作业方案。

在海陆一体化数字模型基础上,根据孔口坐标、高程、水深、孔深等数据进行钻孔预建模,结合水下地形与潮汐情况,模拟当前航线的最优路径,辅助船舶的航行施工,并根据工作计划进行数字孪生,检验工作方案的可行性,经优化后形成易于理解和便于执行的方案,指导后续作业。

3.3 作业过程管理

经数字孪生优化后,作业过程中利用信息化平台推动工程勘察高质量管理的目标,可以实现如下管理功能:

(1) 船舶调度

建立现场船舶管理系统,通过船舶 AIS 信息对船舶进行准确定位,根据作业方案进行船舶航行路线调度。

(2) 进度管理

基于总工作量计划、已完成工作量、拟完成工作量,结合天气、潮汐、地形、船舶定位等情况,进行最优化调度。

(3) 质量控制

作业成果资料实时上传平台,第一时间进行整理,并快速建模,对异常情况及时分析,并指导现场进行孔位复核。

(4) 勘察资料管理

根据钻探成果,进行勘察资料数字化管理,包括:勘察成果电子化入库、建立勘察外业信息数据管理系统、建立勘察内业信息数据管理系统。

3.4 数字化成果的建立

平台支持以下三维建模功能:

(1) 支持三维钻孔、地质建模。

(2) 提供地质空间插值算法平滑内插,并可使用地形、剖面等约束融合建模。

(3) 地质模型可按需分阶段更新重构。

(4) 钻孔及地质模型可分层设色,挂接地质属性,提供数据对接与查询服务。

(5) 可按需导出 OBJ 三维数据格式。

3.5 数字化成果的应用

(1) 进度管理

作业过程中,及时根据钻孔情况对已完成钻孔建模,将已完成工作量与计划工作量进行比较,及时

分析,进一步完善工作方案。

(2) 质量管理

利用 BIM 模型进行钻孔数据的合理性检测,对异常孔位及时现场复核。

(3) 数字化移交

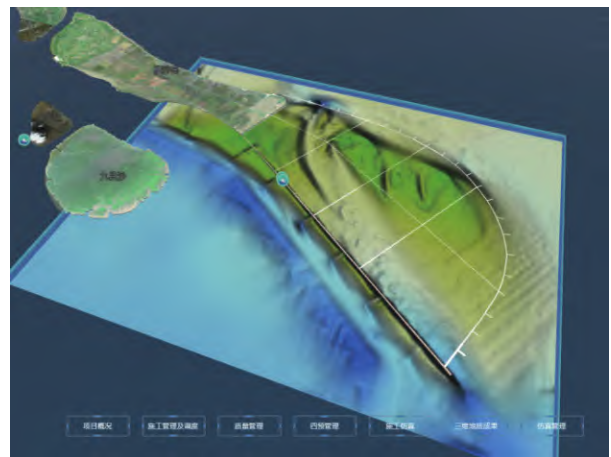
平台实现数字化移交,用于后续的设计应用、数字孪生。

4 应用实例

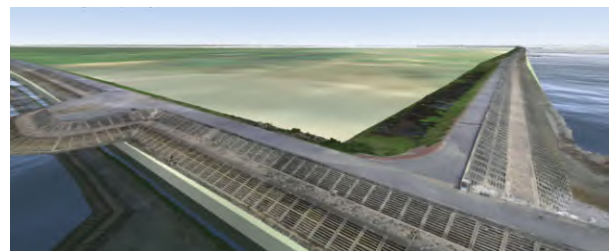
该勘察数字管理平台已应用于长江口某项目中。该项目面积达到 300 km²,勘察作业高峰期投入船只达到 60 艘,对项目管理提出了较高要求。

4.1 海陆一体化建模

在进场前,采用数据融合技术,基于 GIS+BIM 平台,整合前期海域测绘、浅地层剖面、侧扫声呐、陆域倾斜摄影等产生的成果(海底地形、水深、陆域地形)等数据建模,形成模型底板,用于后续数字孪生等应用(见图 4)。



(a) 海域模型—GIS+海域地形数据



(b) 陆域模型放大—GIS+倾斜摄影数据

图 4 海陆一体化建模成果

4.2 基于数字孪生的应急预案管理

根据数字孪生的结果优化应急预案,对照“四预”(预报、预警、预演、预案)功能技术要求,结合本项目特点开展“四预”管理(见图 5)。

预报:接入气象及台风预报信息,实时掌握当前及今后几天的气象信息,为及时预警做好数据支撑。



(a) 针对不同天气情况的船舶撤离路线预演



(b) 预案关联信息图

图5 “四预”应用场景

预警: 根据预报信息, 提前向作业船舶负责人发布大风、寒潮、台风等灾害气象信息, 根据紧急预案执行避险处理。

预演: 针对不同的天气, 根据不同预警等级, 模拟演练避险方案(船舶撤离、停靠、人员疏散最优路径), 结合地形模型优化避险路线。在数字孪生的基础上进行实际演练, 将演练过程以视频记录形式上传至平台, 供全体参与人员学习。

预案: 将应急预案转换成数字化流程图, 根据预案不同等级快速查找到相关信息, 在突发情况下能及时处置。

4.3 基于数字孪生的作业管理

(1) 动态模拟仿真—对勘察方案进行优化

结合水下地形与潮汐情况, 模拟当前航线的最优路径, 辅助船舶的航行施工; 根据既有地层资料, 对钻孔过程进行模拟, 并优化方案。

(2) 基于 IoT 数据的施工管理及调度

本项目面积大、船舶多、海上通信信号弱, 作业管理难度大, 通过接入 AIS 数据, 实时展现海域内作业船的实时位置, 根据作业区信息变化及时调度船舶, 提高海上作业效率(见图 6)。

可选择船舶, 实时了解该船的施工状态、定位, 以及生产进度、历史轨迹, 便于信息溯源及船舶调度(见图 7)。

(3) 海上环境管理

通过权威网站获取指定区域的潮汐数据, 台风

数据, 气象预报数据, 气温、气压、风场、洋流海浪等数据, 实时更新(见图 8)。



图6 作业船舶分布



图7 船舶信息及调度

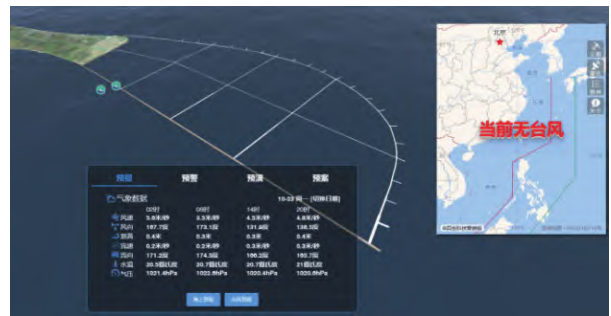


图8 气象和台风预报信息

(4) 海上勘测指挥舱

将各类信息进行数据化、可视化, 以智慧协同管理大屏的形式展现(见图 9), 如:



图9 海上勘测指挥舱

①海上看板, 基于 GIS 地图查看项目钻孔分布、完成情况, 实现钻孔搜索, 显示关联钻探船信息。

②集成海上看板、船舶 AIS 等信息, 在数据驾驶舱中以数据图表、仪表盘等方式提供全方位的工作进展统计分析, 了解船舶的施工状态、生产进度等, 以实现安全管理、实时调度。

4.4 三维数字化模型建立及应用

将已有勘察资料通过数字化平台进行建模, 并开展进一步应用。

(1) 作业管理

作业过程中, 及时对已完成钻孔进行建模, 通过实际完成情况与作业计划的比对, 实时调整作业计划, 有效推进作业进展。

建立数字场景展示分析及管理系统, 实现勘察作业场区的三维可视化及勘察资料成果的调阅(见图 10)。

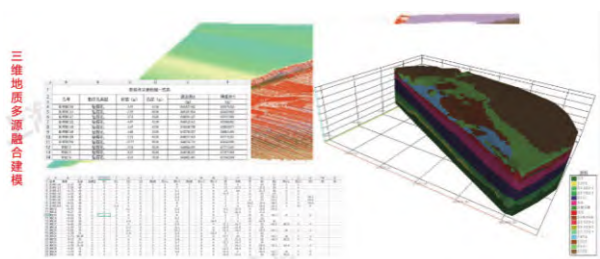


图 10 三维地质成果示意图

(2) 质量管理

根据勘察成果数据建立钻孔 BIM 模型(见图 11), 采用特定格式将模型和数据录入平台并进行关联, 实现 1500 余钻孔在系统中的快速查找定位和展示, 孔位模型与作业船只、人员、施工日志、现场照片和内业成果数据等相关联, 使数据成果可追溯, 提升作业管理效率。



图 11 作业船舶分布

根据已有数据开展质量管理: 通过平台的算法功能, 及时发现异常的钻孔成果, 专家组介入讨论并及时开展复核, 保证钻孔质量。

4.5 数字化移交

三维数字化模型可以完整移交给后续设计、施

工阶段进行使用, 继而助力运维阶段应用, 为全生命周期应用打下基础(见图 12)。



图 12 移交数字化成果图

5 结论

5.1 意义

(1)开发基于 GIS、BIM、数字孪生、IoT 等技术的数字化平台, 探索地质信息、环境信息等多源数据在作业风险研判、项目过程管控、数据成果呈现等方面的深入应用, 初步实现了海上勘察业务数字化协同工作模式。

(2)通过船舶 AIS、气象信息的动态感知和模拟现场工况, 实现海上勘测作业风险的智能研判和预警调度, 进行了数字孪生领域的拓展应用, 提升了业务数据智慧感知和数字编录能力, 赋能科学化、精准化、高效化决策管理。

5.2 展望

(1)进一步强化数字孪生应用场景和关联技术, 提升实时传输、监测和数据融合能力, 提升平台数字化、智能化应用进程。

(2)进一步加强智能感知、实时传输、计算分析能力, 推动现场作业“无纸化”、项目管理“一张屏”、统计分析“一张图”的目标, 为提升生产作业效率和数据精准性提供可靠的技术支撑和保障, 推动项目管理数字化转型升级。

参考文献

[1] 中华人民共和国国务院.《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》[EB/OL].(2021-03-13)[2024-06-03].https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm. (State Council of the People's Republic of China. Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Vision Goals to 2035 [EB/OL]. (2021-03-13) [2024-06-03]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm. (in Chinese))

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《“十四五”工程

- 勘察设计行业发展规划》[EB/OL]. (2022-05-09) [2024-06-03]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2022/art_17339_766072.html. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Development Plan for the Engineering Survey and Design Industry during the 14th Five Year Plan Period [EB/OL]. (2022-05-09) [2024-06-03]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2022/art_17339_766072.html. (in Chinese))
- [3] 曹珊. 抢抓“十四五”战略机遇期 推进勘察设计行业“五化”建设 [J]. 中国勘察设计, 2022(6): 19-22. (CAO S. Seize the strategic opportunity period of "14th Five-Year Plan" to promote the construction of "Five modernization" in survey and design industry[J]. China Engineering Consulting, 2022(6): 19-22. (in Chinese))
- [4] 望毅, 陈青红, 刘松. 水运工程勘察设计公司 BIM 技术体系探索 [J]. 水运工程, 2018(8): 109-112. (WANG Y, CHEN Q H, LIU S. Exploration on BIM technology system for port & waterway engineering survey and design companies[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(8): 109-112. (in Chinese))
- [5] 任彧, 戴一鸣. 基于 BIM 的工程勘察软件系统研究与应用 [J]. 工程勘察, 2017, 45(3): 29-34. (REN Y, DAI Y M. Research and application of geotechnical investigation software based on BIM[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(3): 29-34. (in Chinese))
- [6] 贾鹏飞. BIM 技术在我国岩土工程勘察的应用 [J]. 中国建设信息化, 2022(8): 64-65. (JIA P F. Application of BIM technology in geotechnical engineering investigation in China[J]. Informatization of China Construction, 2022(8): 64-65. (in Chinese))
- [7] 曹思语. 铁路勘察设计中 BIM 技术的研究与应用 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2018(9): 29-30,33. (CAO S Y. Research and application of BIM technology in railway survey and design[J]. Intelligent Building & Smart City, 2018(9): 29-30,33. (in Chinese))
- [8] 王瑛莹. BIM 技术在岩土勘察成果三维可视化的应用研究 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(11): 146-147. (WANG Y Y. Research on application of BIM technology in 3D visualization of geotechnical survey results[J]. Intelligent Building & Smart City, 2021(11): 146-147. (in Chinese))
- [9] 王国岗, 陈亚鹏, 赵文超. 基于 Bentley 平台的数字孪生技术在地质勘察中的应用 [J]. 中国勘察设计, 2023(12): 98-100. (WANG G G, CHEN Y P, ZHAO W C. Application of digital twin technology based on Bentley platform in geological exploration[J]. China Engineering Consulting, 2023(12): 98-100. (in Chinese))
- [10] 祖国, 雷伟刚, 潘屹峰. 海洋勘察综合数据三维可视化管理系统 [J]. 勘察科学技术, 2016(S1): 38-41. (ZU W G, LEI W G, PAN Y F. 3D visualization management system for integrated data of marine exploration[J]. Site Investigation Science and Technology, 2016(S1): 38-41. (in Chinese))
- [11] 熊鑫. 基于 GIS+BIM 技术的工程勘察 BIM 管理应用系统研究 [C]//2021 年全国土木工程施工技术交流会论文集 (下册). 北京:《施工技术》杂志社, 2021: 275-277. (XIONG X. Research on application system of engineering investigation BIM management based on GIS+BIM technology[C]//Proceedings of 2021 National Civil Engineering Construction Technology Conference (Part II). Beijing: Construction Technology Magazine, 2021: 275-277. (in Chinese))
- [12] 李安乐, 孙成科. 岩土工程勘察信息化建设的思考 [J]. 中国勘察设计, 2021(7): 76-78. (LI A L, SUN C K. Thinking on information construction of geotechnical engineering investigation[J]. China Engineering Consulting, 2021(7): 76-78. (in Chinese))
- [13] 曹旭梅, 杨杰, 邹艳春, 等. 基于 BIM+IoT 的某航道工程勘察安全管控应用技术 [J]. 水运工程, 2022(5): 164-169. (CAO X M, YANG J, ZOU Y C, et al. Application technology of safety management and control of a waterway engineering survey based on BIM and IoT[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(5): 164-169. (in Chinese))
- [14] 李春亮, 刘续. 基于 GIS 的勘察数字化平台关键技术研究与应用 [J]. 岩土工程技术, 2024, 38(2): 127-131. (LI C L, LIU X. Implementation of key technology for survey digital platform based on GIS[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2024, 38(2): 127-131. (in Chinese))
- [15] 陈健, 盛谦, 陈国良, 等. 岩土工程数字孪生技术研究进展 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2022, 50(8): 79-88. (CHEN J, SHENG Q, CHEN G L, et al. Research progress in digital twin technology for geotechnical engineering[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(8): 79-88. (in Chinese))

收稿日期: 2024-06-03