海底管线巡检信息融合大数据平台研发与应用浅析

唐宏，林仰纯，朱长富

（中水珠江规划勘测设计有限公司　广州　510610）

摘要：为了提升海底管线巡检作业效率和更加合理有效地管理巡检数据以科学分析和预测管线健康状况，采用 WebGIS 和三维可视化技术，构建了一个高效、智能的海底管线巡检智慧管理平台，平台具有作业流程自动化管理、作业现场可视化监控、巡检数据智能分析与可视化展示等功能。实际海域测试结果表明，该平台具有较高的先进性与可靠性，可为海底管线巡检系统的自动化、可视化、智慧化赋能。平台的完善与推广将对保障我国海底管线高效率、低故障运行具有重大意义。

关键词：海底管线；管线巡检；海工装备；海洋信息工程；WebGIS；三维可视化

中图分类号：P75　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－9857(2023)09－0013－06

Brief Analysis of Research and Application of Big Data Integration and Management Platform for Submarine Pipeline Inspection

TANG Hong，LIN Yangchun，ZHU Changfu

（China Water Resources Pearl River Planning，Surveying & Designing Co.，Ltd.，Guangzhou 510610，China）

Abstract：In order to improve the efficiency of submarine pipeline inspection，and manage inspection data more reasonably and effectively，so as to analyze and predict pipeline health status more scientifically，an efficient and intelligent submarine pipeline inspection management platform was constructed by using WebGIS and 3D visualization technology. The platform has functions such as automatic management of job flow，visual monitoring of job site，intelligent analysis and visual display of inspection data. The results of applications show that the platform is advanced and reliable，and can enable the submarine pipeline inspection system to be automated，visualized and intelligent. The improvement and promotion of the platform will be of great significance to ensure the high efficiency and low fault operation of China′s submarine pipelines.

Keywords：Submarine pipeline，Pipeline inspection，Marine engineering equipment，Digital ocean engineering，WebGIS，3D Visualization

0　引言

21 世纪经济主导权之争，很大程度上是海洋经济开发权和海洋装备之争，作为海洋经济发展的重器，以水下智能装备为核心的海工智能装备是 21 世纪智能制造产业的技术制高点、产业集聚中心和主

收稿日期：2023-01-28；**修订日期**：2023-08-03

基金项目：广东省自然资源厅海洋经济发展专项资金项目“水下常驻型智能多参数海底管线巡检系统关键技术研究”（粤自然资合[2022]34 号）.

作者简介：唐宏，工程师，硕士研究生，研究方向为水利信息化、地理信息系统、人工智能

要经济发展方向[1-2]。我国高度重视海工智能装备技术的发展，在国家开发海洋资源、利用海洋资源的大背景下，国家不断加大水下机器人研发投入。

广东省全面建设海洋强省的决策部署，加快推进广东省海洋六大产业发展，中水珠江规划勘测设计有限公司牵头承担了广东省自然资源厅海洋经济发展专项资金项目“水下常驻型智能多参数海底管线巡检系统关键技术研究”（粤自然资合[2022]34 号），本项研究是其中一个子课题“海底管线巡检信息融合大数据平台研发与应用”。

当前国内外的海底管线巡检系统研究工作大多集中于无人遥控潜水器（ROV）本身，从海底管线检测中 ROV 影响因素出发（机器人性能、作业船性能、水下定位系统、高性能的摄像系统等）对巡检系统进行改进，而在巡检信息融合与处理、巡检数据管理与利用方面的工作做得还很少，导致已有巡检系统存在诸多问题。如：缺乏全面、直观的水下感知能力，突发和复杂情况处理能力弱；缺乏科学严谨的作业流程控制，巡检效率低；巡检数据管理和利用手段落后，“数据孤岛”问题严重。

研究融合海底地形、海底管线和 ROV 设计模型，构建模拟海底管线巡检作业环境的实景三维平台。以实景三维平台为基础，依据科学、严谨、自动化的作业流程，通过智能规划巡检路线，ROV 3D 导航控制，利用 ROV 对海底管线进行检测。通过科学分析巡检数据和智能诊断预测管线状态，及时发现海底管线存在的安全隐患，为海底管线巡检的自动化、可视化、高效化、智慧化赋能，切实保障海底管线高效率、低故障运行。

1 原理及架构

1.1 工作原理

常规水下机器人管线巡检系统的基本原理是：利用侧扫声呐或三维多波束声呐采集海底信息，通过图像处理算法检测出管道的位置和走向，引导 ROV 对管线跟踪（或机器人自主跟踪），利用搭载的摄像头及其他检测设备，对海底管线缺陷进行初步检测[3-5]。ROV 的水下巡航效率很大程度上取决于以计算机视觉处理为基础的管道自动识别技术的效率和精度，复杂海况适应能力差，巡检数据的分析处理很大程度上仍需要依靠专业人员人工完成。整体上巡检效率、复杂海况和突发情况处置能力、数据处理利用效率有待提升。

在海底管线巡检信息融合大数据平台中，通过融合海底地形数字高程模型（DEM），结合海底管线和 ROV 的设计模型，构建模拟海底管线巡检作业环境的实景三维平台，提供水下作业的可视化保障；以实景三维平台为基础，作业前智能规划巡检路线；作业过程中实时展示 ROV 的位置、航向、姿态等信息，结合实时回传的视频、图片和检测数据，通过智能分析和人员辅助决策发现可疑部位后进行标定，并进一步控制 ROV 抵近调查。作业过程中建立与各作业单元之间的通信连接，采集、监测各单元作业信号，掌握其运行状态，为系统的高效常驻巡检提供保障；作业完成后，所有检测数据将以数字化的形式存储，形成海底管线的“体检档案”，智能分析诊断管线健康状况，形成海底管线诊断的“数字病例”，提出维护建议，为海底管线长期的维护管理提供科学依据以及数据支撑（图 1）。

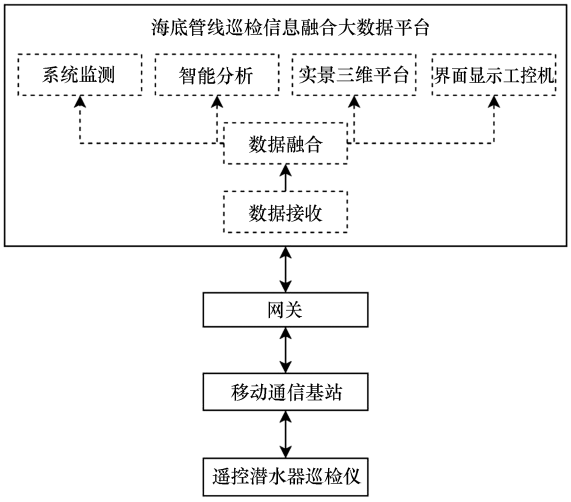


图 1 海底管线巡检系统构成

Fig.1 A sketch map of submarine pipeline inspection system

1.2 平台架构

基于分布性、共享性、客户零维护的需求，平台采用 B/S 架构。将巡检业务逻辑、数据访问的处理放在服务器端实现，利用三维地理信息技术为用户提供交互式的操作界面，主要包括 3D 地图上的漫

游、信息查询、结果展示等。

系统在逻辑层面分为管理层、应用层、服务层、数据层、基础层 5 个层次。①基础层包括操作系统、网络、主机、存储设备等，是系统运行的基础，为数据资源和巡检业务应用提供实体环境的各类基础支撑保障。②数据层利用网络基础设施和硬件基础设施构成一个存储、访问和管理空间与非空间数据的关系数据库服务器，负责海底地形数据、设施模型数据、管线检测数据、系统监测数据、导航定位数据等，并向中间服务层提供空间数据库引擎(SDE)，为系统提供数据支撑。③服务层包括数据服务与应用服务。数据服务包括数据访问服务、GIS 服务、许可服务组成，通过统一服务访问数据库，实现信息交换与共享。应用服务负责调取数据服务提供给客户端。④应用层负责数据维护、查询、处理、分析、展示等。⑤管理层负责系统的安全与运行监控管理，保证系统与数据的安全(图 2)。

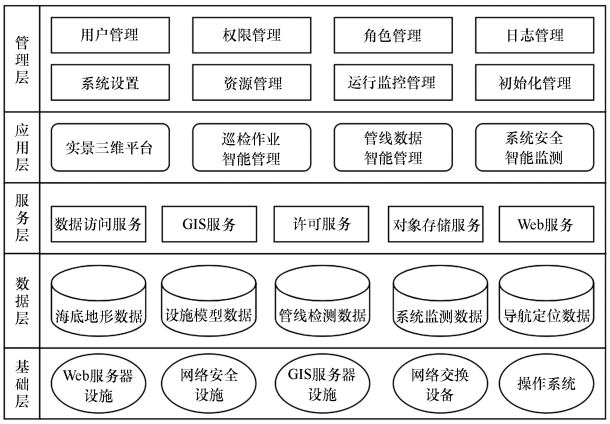


图 2　平台总体架构

Fig. 2　Overall architecture of big data integration and management platform for submarine pipeline inspection

2　关键技术

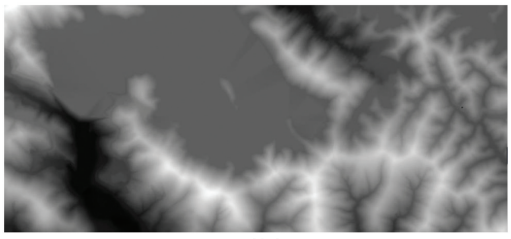
2.1　实景三维平台

采用 PostGIS ＋ GeoServer ＋ Cesium 的开源 WebGIS 组件组合，搭配其他开源 Web 开发组件进行实景三维平台开发[6−10]。承载海底表面起伏信息的三维地形、承载海底地物地貌信息的影像是构建海底三维场景的最底层数据[9]，以此为基础，叠加管线、ROV 设计模型，构建巡检业务场景下的实景三维平台。

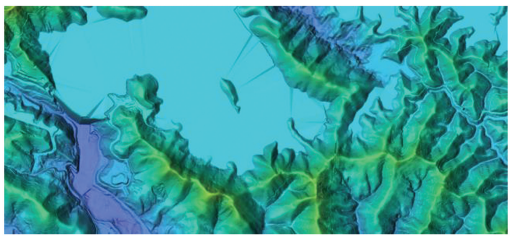
(1)地形加载。Cesium 支持加载 Small Terrain 类型地形数据。利用地形切片工具 Cesium Terrain Builder 将现有高精度海底地形 DEM 数据生成 Small Terrain 规范的.terrain 文件，得到金字塔结构的地形瓦片数据，并利用 Tomcat 发布成服务，最后通过 Cesium 提供的 Cesium Terrain Provider 接口加载地形服务，可以在保证地形精度的同时提高访问效率[10−11]。

需要注意的是，原始 DEM 位于水下，直接生产的地形瓦片加载到 Cesium 中后将无法正常显示，需要对 DEM 数据进行处理以整体抬升至海平面之上。

(2)影像加载。目前仍然缺乏类似卫星遥感技术的可高效获取大范围海底真实影像的技术手段。考虑到海底管线巡检业务场景对海底地物地貌信息的依赖和需求不高，平台采用经过三原色(RGB)合成的.tif 格式水下 DEM 作为水底表面影像，以实现水下地表形态的有效展现。利用 GeoServer 将水底表面影像发布成网络地图服务(WMS)服务[12]，通过 Cesium 提供的 Web Map Service Imagery Provider 接口加载服务(图 3)。



(a) 原始水下地形



(b) 经过RGB合成的水下地形

图 3　水下地形影像

Fig.3　Submarine terrain image

(3)模型构建。Cesium 可以加载 GLTF 格式模型和 3DTiles 格式模型[11]。GLTF 模型可以通过 DAE 格式的三维模型转换而来。在 3DS MAX 建模软件中制作管线、ROV 模型后，利用导出插件 COLLADA 导出为 DAE 格式。然后在命令提示符(CMD)中通过命令

运行转换程序 COLLADA2GLTF. exe，完成 DAE 格式模型到 GLTF 格式模型的转换工作。

(4)模型存储。存储模型最简单的方式就是将 GLTF 模型以文件夹形式存放在前端项目下，以相对路径请求模型资源。但是，这种存储方式会导致平台维护困难，一旦模型需要更换，整个前端项目就需要重新部署。更加适合的方式是通过文件服务器进行存储，从而避免模型更换带来的频繁部署问题。文件服务器可以采用 MinIO，也可以利用 Nginx 自行搭建。

(5)模型加载。模型加载通过 Cesium 提供的实体(Entity) 或图元(Primitive) 应用编程接口(API)完成，二者各有优缺点。Entity 是更高级别的数据驱动 API，封装完美，因此其用法更简单、调用更便捷；Primitive 更加接近 webGL 的底层，没有 Entity 一样的附加属性，但是加载时效率更高，具有更大的灵活性。为了减轻中央处理器(CPU) 压力和提高图形处理器(GPU)资源的利用效率，根据模型量和模型相关业务复杂度分类加载模型。模型量大的管线使用 Primitive 进行加载，其他模型使用 Entity 加载。

在场景中加模型后，就可以利用 Cesium 的浏览功能对模型进行放大、缩小平移、旋转等操作，同时管线缺陷以动画形式展示，实现对海底场景的三维多视角浏览；使用鼠标拾取场景中的模型和缺陷，可以查看属性库中的信息和文件服务器中的图片、视频等；同时还可以进行距离、高度、面积等三维空间测量及其他功能(图 4)。

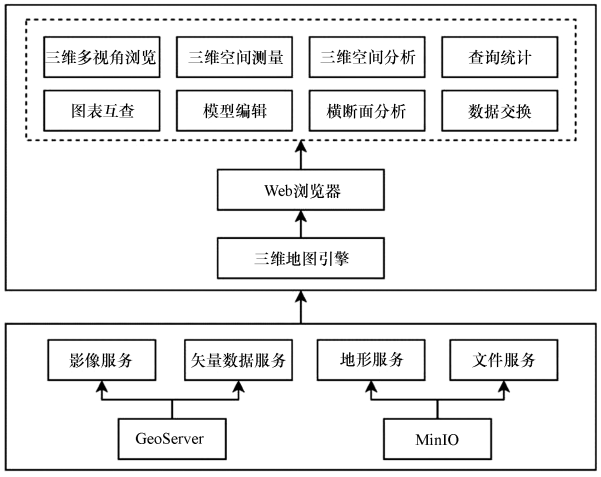


图 4 实景三维平台组成

Fig.4 A sketch map of 3D platform of real scene

2.2 自动化流程管理

大数据平台根据管理部门信息、任务组信息和线路信息生成巡检任务单，根据巡检任务单生成线路明细。巡检系统根据线路明细执行巡检任务，大数据平台记录执行巡检过程中发现的管线缺陷和对发现的管线缺陷进行消除的过程，并更新缺陷数据库。

已发现的管线缺陷，需要对其进行复检，不同等级缺陷其复检频率不同。对不同等级的缺陷，赋予不同的权值，结合其历史巡检记录，科学分析其需要再次检测的优先等级，有计划、分步骤、分缓急对管线进行巡检，提高巡检效率。复检优先等级最高的缺陷构成必检点。必检点的巡检过程如下：大数据平台综合线路信息和缺陷数据生成巡检必检点，实时获取执行巡检任务过程中的巡检仪地理坐标，根据巡检仪地理坐标与必检点的信息进行必检点的巡检任务核实，经过核实后对必检点进行检测，记录必检点的最新状态和对必检点缺陷进行消除的过程，并更新缺陷数据库。通过对巡检必检点的巡检、核实，实现了主要管线位置的万无一失。

大数据平台通过自动化的作业流程控制，能够依据巡检系统执行定期的巡检任务，依据反馈的信息来生成巡检任务单，巡检任务单中的巡检任务能够最终排查缺陷和消除缺陷，使得整个巡检工作更加高效，及时应对缺陷(图 5)。

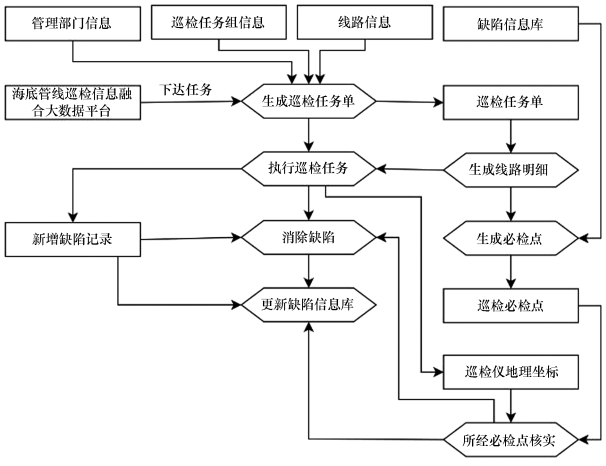


图 5 海底管线检测作业流程

Fig.5 Pipeline inspection operation flow chart

2.3 智能统计分析

大数据平台存储了缺陷点的位置、类别、危害等级、检测时间、照片、视频等信息，根据上述信息

进行统计与分析。

(1)缺陷地图。根据缺陷等级、类型，采用不同的动画符号在实景三维平台中展示。在搜索框中输入相应的类型、等级，可排除非相关缺陷只展示感兴趣的缺陷。点击缺陷可查看缺陷详细信息，包括图片、视频。可按检测时间的先后顺序动态轮播展示隐患图片、视频，了解缺陷变化趋势。

(2)统计分析。通过实际位置分布、汇聚图、热力图等多种形式，在实景三维平台上展示缺陷点，以了解其整体分布情况。可按照类型、等级对缺陷进行分类汇总，并按时间段以图表形式展示。对不同管线段，根据不同时间段的缺陷统计数据，分析其隐患主要成因，给出维修建议。

(3)生成报告。支持自动生成报告，详细列出缺陷清单、缺陷成因、维修建议，支持输出.pdf 和.doc文件，支持微信查看分享。

3　系统应用

为了充分检验海底管线巡检信息融合大数据平台在实际海域作业时的性能稳定性，2022 年 10 月项目研发团队对系统开展了第 1 次海域测试工作，测试地点选在广东省某海域。该轮测试累计巡检海底管线超过 10 km，发现管线悬空、腐蚀减薄等缺陷 20 余处，基本验证了大数据平台提供的实景三维平台的可靠性、作业流程管理的科学性和严谨性。由于缺陷样本量较少，以后还需增加测试轮次，加大缺陷样本采集量，以对大数据平台的其他性能指标进行检验。

4　结语

海底管线巡检信息融合大数据平台满足了管线巡检工作快速、高效、及时的要求，将管线巡检管理水平提高到了一个新的层次，实现了巡检工作电子化、信息化和智能化，从而保障管线系统高效率、低故障运行。主要的特点和创新点有以下几方面。

(1)研发了模拟管线巡检水下作业环境的实景三维平台，为巡检系统提供了可视化能力，提高了系统针对突发和复杂情况的处理能力。

(2)通过优化设计作业流程，提供了科学、严谨、自动化的作业流程控制能力，使整个巡检工作更加高效。

(3)对巡检数据进行科学管理、海量数据分析和数据挖掘，充分摸清管线缺陷部位，掌握管线健康状况，提出维护建议，确保管线安全运行。

参考文献(References)：

[1] 李应晓，张晶，张高尉，等. 海工装备制造企业数字化转型探究[J]. 船舶物资与市场，2022，30(1)：85－87.
LI Yingxiao，ZHANG Jing，ZHANG Gaowei，et al. Research on digital transformation of offshore equipment manufacturing enterprises[J]. Marine Equipment/Materials & Marketing，2022，30(1)：85－87.

[2] 武晓岚. 我国海工装备产业研发投入的经济效应[J]. 海峡科技与产业，2021，34(5)：9－11.
WU Xiaolan. Economic effect of R&D investment in China′s offshore equipment industry[J]. Technology and Industry Across the Straits，2021，34(5)：9－11.

[3] 王金龙，何仁洋，张海彬，等. 海底管道检测最新技术及发展方向[J]. 石油机械，2016，44(10)：112－118.
WANG Jinlong，HE Renyang，ZHANG Haibin，et al. State-of-the-art advancement and development direction of submarine pipeline inspection technology[J]. China Petroleum Machinery，2016，44(10)：112－118.

[4] 肖治国，李成钢. 海底管道水下机器人检测技术[J]. 中国石油和化工标准与质量，2014，34(3)：18.
XIAO Zhiguo，LI Chenggang. Submarine pipeline detection technology based on underwater robot[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality，2014，34(3)：18.

[5] 冯文川，赵茁. 无人艇海管检测系统的研制及应用[J]. 油气储运，2021，40(5)：561－565.
FENG Wenchuan，ZHAO Zhuo. Development and application of subsea pipeline detection system based on the unmanned surface vessel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation，2021，40(5)：561－565.

[6] 黎佩东，许金，何桥. 基于开源组件的矿井 GIS 一张图系统设计与实现[J]. 煤炭工程，2020，52(10)：20－24.
LI Peidong，XU Jin，HE Qiao. Design and implementation of mine GIS one-map system based on open source component[J]. Coal Engineering，2020，52(10)：20－24.

[7] 木啸林，牛坤龙，蔡世荣，等. 开源网络地理信息系统的技术体系与研究进展[J]. 计算机工程与应用，2022，58(15)：37－51.
MU Xiaolin，NIU Kunlong，CAI Shirong，et al. Technical framework and advances of open source Web geographic information system[J]. Computer Engineering and Applications，2022，58(15)：37－51.

[8] 于艳超，许捍卫. 基于 OGC 规范的 WebGIS 开源平台研究[J].

测绘与空间地理信息,2015,38(4):56－58.
YU Yanchao, XU Hanwei. Research and application of WebGIS open-source platform based on OGC standards[J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2015,38(4):56－58.

[9] 郭泽,谭衢霖,秦晓春,等. 基于 Cesium 的铁路线路三维场景空间信息服务[J]. 测绘通报,2022(11):144－148.
GUO Ze, TAN Qulin, QIN Xiaochun, et al. Spatial information service of railway line 3D scene based on cesium technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022 (11):144－148.

[10] 乐世华,张煦,张尚弘,等. 基于 Cesium 的 WebGIS 流域虚拟场景搭建[J]. 水利水电技术,2018,49(5):90－96.
YUE Shihua, ZHANG Xu, ZHANG Shanghong, et al. Cesium-based construction of WebGIS watershed virtual scene [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5):90－96.

[11] 杨菁,陈冰凌,王文鹏,等. 基于 Cesium 的三维可视化场景建设及发布技术的研究[J]. 测绘通报,2021(S1):50－53.
YANG Jing, CHEN Bingling, WANG Wenpeng, et al. Research on 3D visualization scene construction and publishing technology based on Cesium[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2021(S1):50－53.

[12] 代林海,秦荣波. Geoserver 的 WMS 服务分析与应用[J]. 测绘,2021,44(2):67－70＋78.
DAI Linhai, QIN Rongbo. Analysis and Application of WMS Service of Geoserver[J]. Surveying and Mapping, 2021, 44(2):67－70＋78.