



# 危化品码头防波堤多源数据 综合监测技术研究

李振兴, 郑文进, 陈金桥

(中交华南勘察测绘科技有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 针对危化品码头防波堤在长期运行中存在的沉降、位移、冲刷及坍塌隐患等问题, 开展基于多源数据集成的综合监测研究, 并在江苏某液化天然气项目防波堤进行了两年工程应用。通过布设 25 个全球导航卫星系统监测点开展毫米级沉降与位移监测, 利用多波束与侧扫声呐融合技术获取并处理水下地形数据, 生成高精度三维地形图; 结合无人机影像与高清摄像头监控, 对防波堤表面滑移、坍塌进行判别, 通过云平台集成各类监测数据, 实现多维度数据的实时采集、实时监测与综合分析。结果表明: 多源数据集成与综合分析技术显著提升了防波堤监测的精度与时效性, 实现了从单点、低频人工监测向多维度、自动化、智能化监测的转变, 为危化品码头防波堤的安全管控提供了可靠的技术支撑, 对类似港口设施的安全运行与风险管理具有推广价值。

**关键词:** 危化品码头; 防波堤; 多源数据; 综合监测

中图分类号: U654.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0113-08

## Multi-source data integrated monitoring technique of breakwaters at hazardous chemicals terminals

LI Zhenxing, ZHENG Wenjin, CHEN Jinqiao

(CCCC Southern China Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** In view of the long-term risks of settlement, displacement, scouring, and collapse in breakwaters of hazardous chemical terminals, a comprehensive monitoring study on the basis of multi-source data integration is conducted, and a two-year engineering application is carried out on the breakwater of a liquefied natural gas project in Jiangsu. Twenty-five global navigation satellite system monitoring points are deployed for millimeter-level settlement and displacement monitoring. Underwater topographic data are acquired and processed by the fusion technology of multi-beam and side-scan sonar to generate high-precision 3D topographic maps. Surface sliding and collapse of the breakwater is identified by combining unmanned aerial vehicle imagery with high-definition camera surveillance. Finally, all monitoring data are integrated through a cloud platform to achieve real-time collection, monitoring, and comprehensive analysis. The results show that the integration and comprehensive analysis technique of multi-source data greatly enhances the accuracy and timeliness of breakwater monitoring, achieving a transition from single-point, low-frequency manual monitoring to multi-dimensional, automated, and intelligent monitoring. This technique provides reliable technical support for the safety management of hazardous chemical terminal breakwaters and offers valuable reference for the safe operation and risk management of similar port facilities.

**Keywords:** hazardous chemical terminal; breakwater; multi-source data; integrated monitoring

危化品码头作为重要的能源运输枢纽, 其防波堤的安全运行对于保障港口的正常运营和周边

环境的安全至关重要。防波堤在长期运行过程中, 受到海洋环境、地质条件以及施工质量等多

收稿日期: 2025-08-03 录用日期: 2025-10-03

作者简介: 李振兴(1985—), 男, 高级工程师, 从事海洋测绘、工程测量等工作。

种因素的影响,可能出现沉降、位移、冲刷等变形现象,威胁港口的安全运营。因此,对防波堤进行实时、精准的监测,及时发现潜在的安全隐患,对于保障危化品码头的安全运行具有重要意义。

传统的防波堤监测方法主要依赖于人工测量和单点监测设备,存在效率低、精度有限、数据不连续等问题。特别是在危化品码头,由于其高安全标准和复杂的运行环境,传统监测技术难以满足实时、全面监测的需求。因此,研发一种高效、精准、智能化的监测技术具有重要的现实意义。

本文提出一种基于多源数据集成的综合监测技术<sup>[1]</sup>,通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)自动化监测、多波束<sup>[2-3]</sup>和侧扫声呐融合<sup>[4]</sup>、无人机影像识别<sup>[5]</sup>、高清摄像头监控以及综合分析技术,实现防波堤表层沉降位移、水下地形地貌、视频监控等多维度数据的实时监测与综合分析,提高监测效率和精度,实现对潜在安全隐患的实时预警,可为危化品码头的稳定运营提供技术支撑。

## 1 工程概况与监测需求

### 1.1 工程概况

某液化天然气(liquefied natural gas, LNG)项

目防波堤位于江苏省某港区。防波堤长 2 510 m,堤顶高程 4.0 m,堤顶宽度 6.6~7.2 m。堤身下设置土工格栅,堤身由二片石垫层、堤心石及垫层石组成,上部覆盖 4 和 10 t 扭王字块护面。堤身外侧设置混凝土联锁块软体排,排体上部与垫层石结合处设置护底块石。堤头与北侧防波堤之间的口门宽度为 700 m。

### 1.2 监测需求分析

1) 自动化监测:防波堤表层沉降位移监测需要高频率的数据采集,以实时掌握防波堤的变形情况。

2) 水下结构安全监测:水下地形地貌的监测需要高精度的多波束和侧扫声呐数据,以及时发现水下冲刷和回淤现象<sup>[6]</sup>。

3) 实时监控与预警:通过高清摄像头监控和智能分析技术,实现对防波堤的实时监控和潜在安全隐患的预警。在建设单位指定位置布设监测成果发布系统及终端,成果发布系统为发光二极管(light emitting diode, LED)屏幕,实时动态发布防波堤表层沉降位移观测成果数据与图表、防波堤声呐图像、监控视频等监测成果。

4) 多源数据融合与智能分析:将多种监测数据进行融合处理,通过智能分析实现对防波堤整体安全状态的综合评估。

防波堤监测主要工作内容见表 1。

表 1 防波堤监测主要工作内容  
Tab.1 Main tasks of breakwater monitoring

监测项目	采用仪器	监测方法	观测频次	特殊要求
表层沉降位移	GNSS	自动化监测	1 次/h	无
水面以下防波堤两侧障碍物	3DSS-iDX 侧扫声呐	人工监测	2 次/月	台风前后应进行扫测
防波堤视频	摄像头	自动化监测	全时段实时监控	无
防波堤周边水下地形	3DSS-iDX 侧扫声呐	人工监测	2 次/月	台风前后应进行扫测

## 2 监测技术与系统设计

### 2.1 GNSS 自动化监测技术

GNSS 自动化监测原理为:采用 GNSS 技术,通过在防波堤上布设多个监测点,实时接收卫星信号,计算各监测点的三维坐标变化,实现对防波堤表层沉降和位移的自动化监测。GNSS 监测系

统具有高频率、自动化程度高的特点,能够实时提供监测点的位移数据。

本文在防波堤轴线上均匀布设 25 个 GNSS 监测点,其布置见图 1,每个监测点配备 1 台 GNSS 接收机。监测频率为 1 次/h,数据通过无线网络实时传输至监控中心。

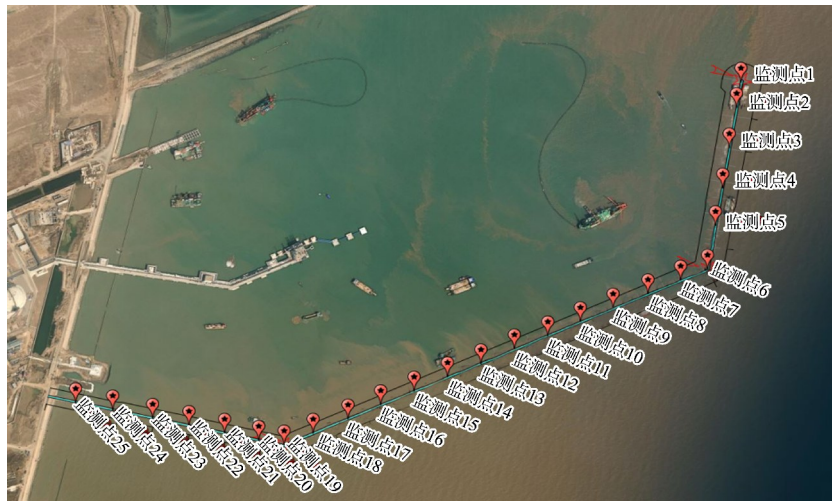


图 1 GNSS 监测点布置

Fig. 1 Breakwater monitoring points layout

### 2.2 多波束和侧扫声呐融合技术

水下测量分为水面以下防波堤两侧的周边水下地形测量和侧扫声呐测量。测量区域为防波堤中心线两侧各 50 m 范围内。根据本项目的实际情况多波束测量时测线沿防坡堤平行布设, 按测线间距 10 m 布设, 测线总长度约 20 km, 水深浅于 5 m 区域只采用中央波束数据。侧扫声呐的测线布设与多波束测线布设一致。

#### 2.2.1 仪器设备

测深系统以及侧扫声呐系统采用 3DSS-iDX 侧扫声呐, Trimble SPS356 为导航定位设备, 以 3DSS-iDX 自带的 Ping DSP 系列软件 3DSS-DX Sonar Control 为水深数据及侧扫声呐数据采集软件、Caris 作为水深数据内业处理软件、SonarWiz 为侧扫声呐数据后处理软件、亿点通测量软件为导航定位软件。

测深系统测量水下地形地貌, 侧扫声呐获取水下结构的高分辨率图像, 用于检测水下冲刷和坍塌现象。

#### 2.2.2 数据融合与处理方法

将多波束和侧扫声呐数据进行融合处理, 生成高精度的水下地形地貌图。

采用 SonarWiz 软件处理与解释侧扫数据, 侧扫声呐系统数据处理流程见图 2。

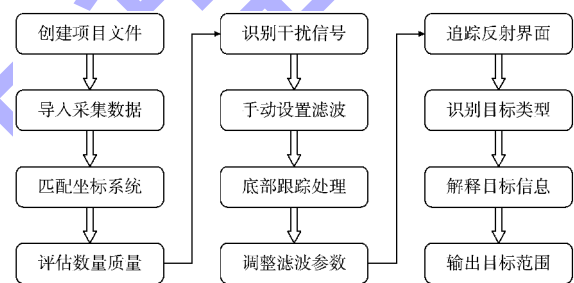


图 2 侧扫声呐系统数据处理流程

Fig. 2 Side-scan sonar system data processing flow

一般情况下, 海底底质的不同, 其侧扫图像所呈现的反射强度也不同。桥墩或抛石后方发射声波被遮挡会有阴影, 可通过数据处理软件获得水下障碍物出露海底表面的高度等信息。

### 2.3 无人机影像识别技术

采用无人机搭载高清相机, 定期对防波堤进行航拍巡查, 获取防波堤表层的影像数据, 对无人机拍摄的影像进行处理, 识别防波堤表层滑移、坍塌。

### 2.4 高清摄像头监控技术

视频监控主要目的是对水面以上防波堤进行安全巡视, 实时监测、记录水面以上防波堤现状, 判断水面以上防波堤是否存在明显的滑移、坍塌等变形。

#### 2.4.1 监控系统架构及组网

视频监控系统由前端子系统和监控中心两大部分组成, 其中前端子系统在各个点位部署高清

网络摄像机及相应配套设备，监控中心主要部署存储设备、显示大屏、视频综合管理一体机、核心交换机、客户端个人计算机(personal computer, PC)等设备。此外，传输网络为前端子系统与监控中心

的信息传输提供通道，主要包括光纤收发器、以太网无源光网络(ethernet passive optical network, EPON)设备和接入交换机等。视频监控系统架构见图3。

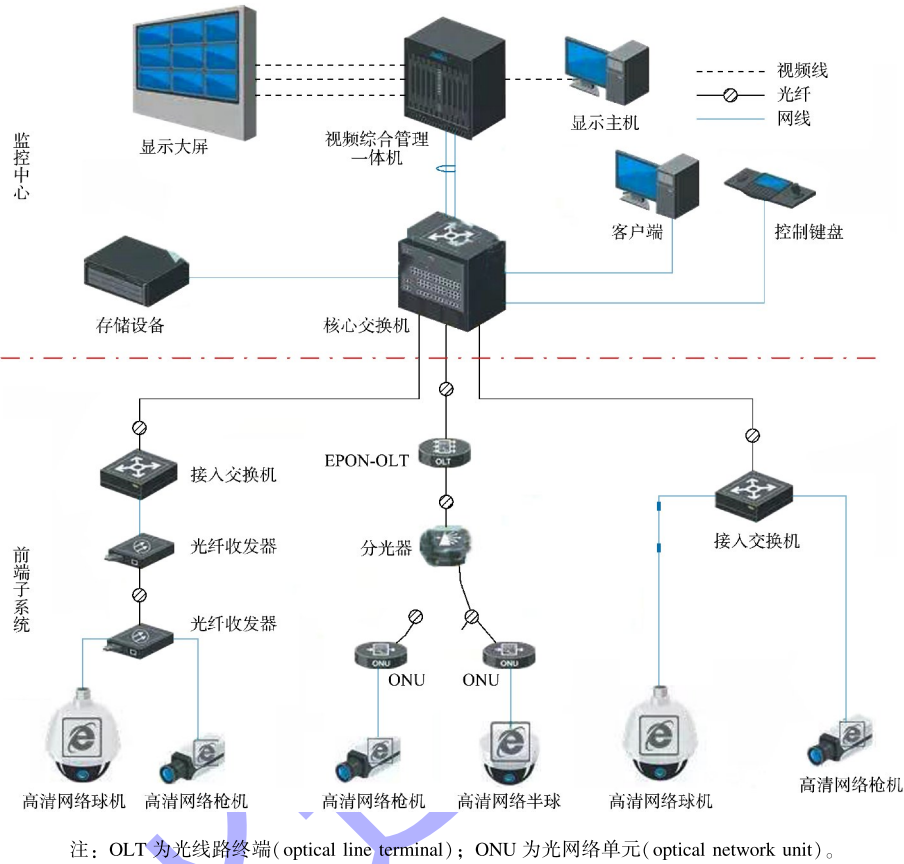


图3 视频监控系统架构  
Fig. 3 CCTV system architecture

### 2.4.2 监控系统安装与布局

在防波堤关键位置布设5台高清摄像头，其中2台安装在工作船码头，主要监控港池，其他3台安装在LNG码头，对防波堤实时监控，安装位置见图4。

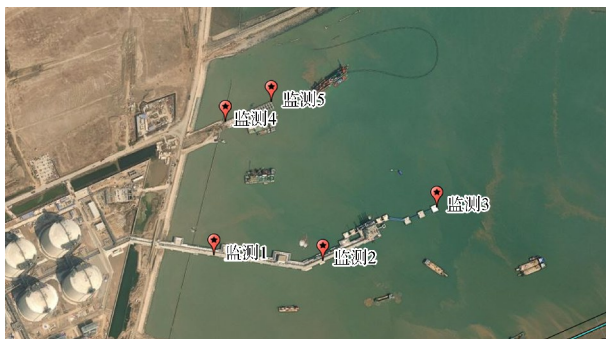


图4 监控系统安装位置  
Fig. 4 Closed-circuit television installation position

### 2.4.3 实时监控与视频分析

通过视频分析技术，实时监控防波堤的动态变化，及时发现潜在的安全隐患。

### 2.5 多源数据系统集成与综合分析

#### 2.5.1 数据系统集成

构建基于云平台的多源数据集成系统<sup>[7]</sup>，实现各类监测数据的统一管理和分析。采用有线和无线相结合的传输方式，确保数据的实时传输和稳定存储。

#### 2.5.2 监测成果发布系统

监测成果发布系统由前文提到的自动化监测系统、视频监控系统、图像上传系统等组成，能实时动态发布防波堤表层沉降和位移观测成果数

据与图表、防波堤声呐图像、监控视频等监测成果,侧扫声呐和无人机观测到的影像数据以图片格式上传<sup>[8]</sup>。

成果发布系统终端显示屏由点间距为 2.5 mm 的 LED 屏幕组成,面积 10 m<sup>2</sup>。显示屏支持卡扣配合型连接器(bayonet nut connector,BNC)、视频图形阵列(video graphics array,VGA)、数字视频接口(digital visual interface,DVI)、高清多媒体接口(high definition multimedia interface,HDMI)等多种接口,通过控制软件对需要上墙显示的信号进行显示,通过视频综合管理一体机可实现信号的实时预览、视频拼接显示、任意分割、开窗漫游、图像叠加、图像拉伸缩放等一系列功能。成果发布系统终端界面见图 5。



图 5 成果发布系统终端界面

Fig. 5 Terminal interface of achievement release system

### 2.5.3 分析预警

通过对采集的多源数据进行处理,结合沉降位移数据判别、全时段实时监控<sup>[9]</sup>,以及多波束与侧扫声呐数据和无人机影像数据的辅助分析,依据设定的预警模型进行综合分析,实现了对防波堤安全状态的实时评估与预警,能够对潜在安全隐患进行实时预警<sup>[10]</sup>。

## 3 现场实施与结果分析

### 3.1 监测系统现场布设与调试

1) 监测设备安装:按照设计方案完成 GNSS 接收机、多波束和侧扫声呐、无人机、高清摄像头等设备的安装和调试。

2) 系统联调与测试:对整个监测系统进行联调测试,确保各设备之间的协同工作和数据传输的稳定性。

### 3.2 监测数据采集与处理

1) GNSS 监测数据:实时采集防波堤表层沉降位移数据,通过自动化监测系统进行数据处理和分析。

2) 多波束与侧扫声呐数据:定期进行水下地形地貌测量,通过数据处理软件生成高精度的水下地形图。

3) 无人机影像数据:定期进行航拍巡查,通过影像识别防波堤表层的滑移、坍塌。

4) 高清摄像头监控数据:实时采集防波堤的视频监控数据,通过视频分析技术进行动态监测。

### 3.3 监测结果分析

#### 3.3.1 防波堤变形监测结果分析

通过 GNSS 自动化监测系统,实时掌握防波堤表层沉降位移情况,以每半个月为 1 个监测周期,生成 GNSS 监测点水平方向、垂直方向上的位移量曲线。GNSS 监测点日变化速率曲线见图 6。可以看出,监测周期内的各变形监测点水平位移( $x,y$ )、沉降位移( $z$ )的变化速率均在 1 mm/d 以内,根据设计文件,监测期内各点的沉降位移速率均未超过预警指标(4 mm/d)。

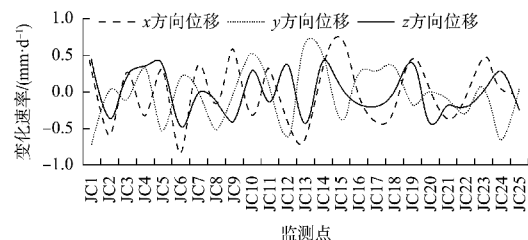


图 6 GNSS 监测点日变化速率曲线

Fig. 6 Diurnal displacement rate curve for GNSS monitoring points

2024 年 5 月—2025 年 7 月各监测点位移累计变化量见表 2。可以看出,防波堤各监测点累计沉降、位移量均未超过预警值(竖向 30 mm、水平 36 mm)。

表 2 2024 年 5 月—2025 年 7 月的各监测点累计变化量  
Tab. 2 Cumulative displacement at monitoring points from May 2024 to July 2025

监测点	位移累计变化量/mm		
	x 方向	y 方向	z 方向
JC1	0.11	-7.49	-2.98
JC2	-1.83	-1.77	-14.01
JC3	3.60	-3.62	-9.39
JC4	-0.41	5.72	-3.83
JC5	-2.69	-8.82	-5.26
JC6	-7.07	8.14	-14.30
JC7	7.05	2.20	-12.31
JC8	-9.26	-6.82	-5.82
JC9	5.00	-8.77	-12.63
JC10	-5.82	0.07	-8.17
JC11	6.42	2.62	-10.12
JC12	-8.19	-9.45	-4.86
JC13	-5.94	7.84	-13.84
JC14	-1.89	6.43	-2.83
JC15	6.80	-0.88	-1.86
JC16	0.31	3.59	-11.41
JC17	-6.41	0.59	-11.72
JC18	-1.78	6.42	-6.07
JC19	3.44	-4.04	-4.36
JC20	-3.60	7.42	-10.34
JC21	-2.43	-3.38	-4.80
JC22	-6.50	0.69	-8.81
JC23	7.08	6.91	-4.15
JC24	-5.27	-5.63	-6.23
JC25	-5.56	7.19	-8.33

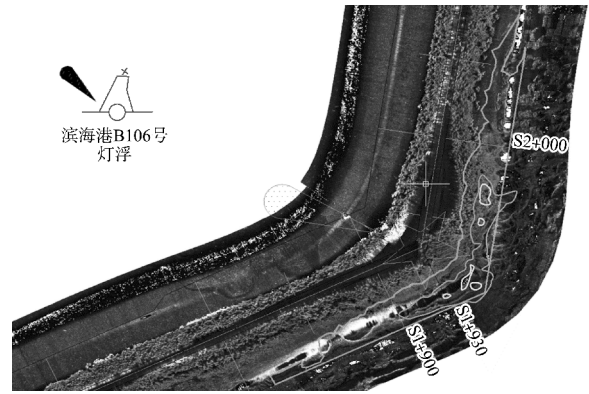
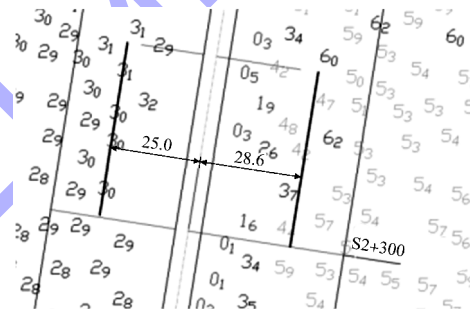
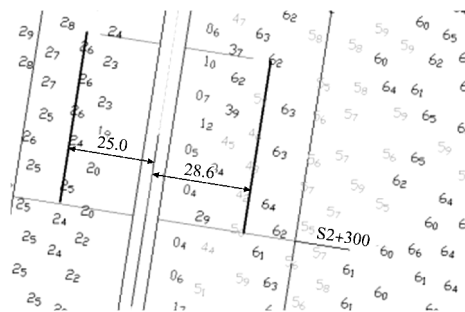


图 8 防波堤 2# 灯塔深坑区域外侧扫声呐影像  
Fig. 8 Side-scan sonar image of scour depression at breakwater lighthouse 2#

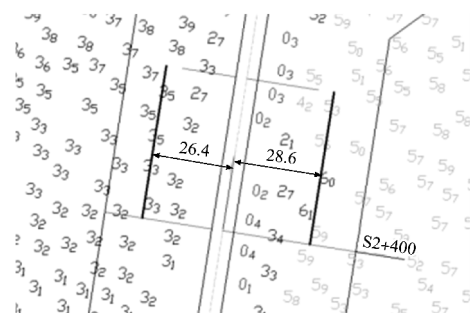
2025 年 6 月与 2023 年 11 月的水深对比见图 9。可以看出，防波堤 S2+300 附近外侧冲刷 0.6~1.0 m，防波堤 S2+400 附近外侧冲刷 0.4~1.0 m。



a) 2023年11月, S2+300



b) 2025年6月, S2+300



c) 2023年11月, S2+400

### 3.3.2 水下结构冲刷监测结果

通过多波束和侧扫声呐测量，发现防波堤外侧出现一定的冲刷现象，与上期监测对比冲刷位置相同，冲刷面积近似，无明显变化，保持稳定，水下三维地形和声呐影像见图 7 和图 8。

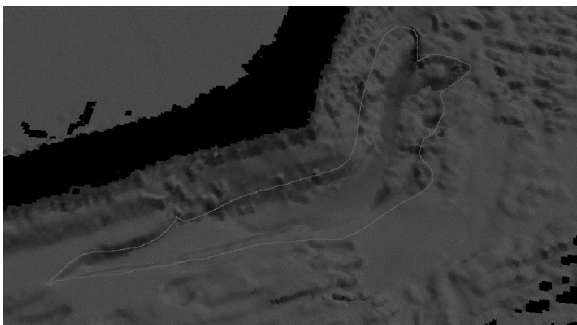


图 7 防波堤 2# 灯塔外侧区域水下三维地形  
Fig. 7 Underwater 3D terrain of seaward area at breakwater lighthouse 2#

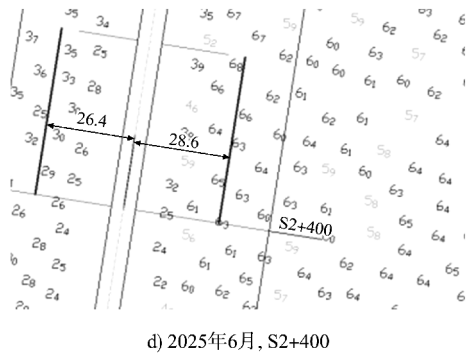


图9 2023年11月与2025年6月水深对比(单位:m)  
Fig.9 Comparison of water depth between November 2023 and June 2025 (unit:m)

### 3.3.3 防波堤表层的滑移、坍塌监测结果

对防波堤进行无人机航拍巡查,发现3处地形疑似发生坍塌,其中S2+000—S2+400段外侧的扭王字块部分已被冲刷坍塌,露出下层块石,防波堤外侧对比内侧变化较为明显,分析可能受潮水冲刷影响所致,其他区域暂无明显滑移、坍塌情况。防波堤无人机航拍见图10,S2+300—S2+400附近侧扫声呐影像见图11。

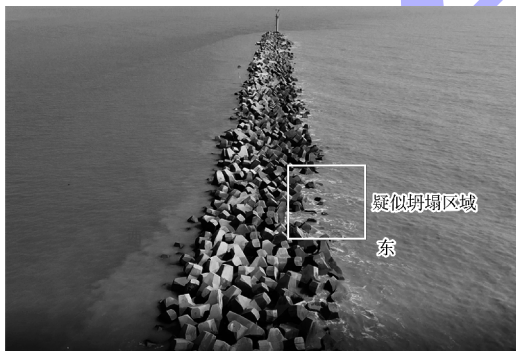


图10 防波堤无人机航拍图  
Fig.10 Unmanned aerial vehicle aerial photo of breakwater

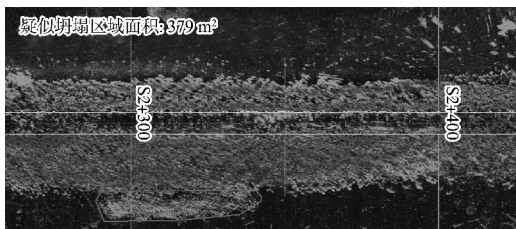


图11 S2+300—S2+400附近侧扫声呐影像  
Fig.11 Side-scan sonar image of section near S2+300—S2+400

### 3.3.4 实时监控与预警案例

通过高清摄像头监控系统,实时监控防波堤的动态变化,及时发现并处理了1起潜在的安全隐患。

### 3.4 多源数据融合与综合分析

本文构建了防波堤安全监测的多源数据融合与综合分析技术,通过整合GNSS自动化监测、多波束-侧扫声呐联合探测、无人机影像识别及高清摄像头监控等空天地海一体化技术,实现了防波堤表层沉降位移、水下地形地貌、结构外观等多维度数据的实时采集、实时监测与综合分析,能够全面评估防波堤整体安全状态。

通过预设安全阈值与多渠道(短信、邮件)预警机制,监测数据异常时能及时通知相关人员,显著提升了防波堤安全监测的全面性、准确性与预警时效性,形成“监测—分析—评估—预警”的闭环管理流程,为防波堤结构安全运行维护提供了可靠的技术支撑。

实际应用结果表明,该技术实现了监测数据毫米级实时获取,监测周期内各点位沉降速率均小于1 mm/d(未超预警指标),冲刷区域面积稳定无明显扩展;无人机影像识别3处局部坍塌,均通过系统及时处置;相较于全站仪人工监测可减少现场人员2人,显著提升效率并降低人力成本。同时,监测系统依托多源数据综合分析能力,可及时识别异常并预警,为隐患快速处置提供支撑,保障了防波堤结构安全与稳定运营。

## 4 结语

1) 本文通过多源数据融合技术,整合GNSS、多波束、侧扫声呐、无人机影像及高清摄像头等监测数据并开展综合分析,有效优化了危化品码头防波堤安全监测手段。

2) 当前虽实现多源数据综合分析,但无人机影像与视频监控仅能视觉识别及定性分析,多源数据融合智能分析研判仍有不足。

3) 后续将引入无人机激光雷达测量技术, 结合人工智能与机器学习算法, 优化多源数据匹配分析, 实现表层坍塌自动识别和定量评估, 同步构建综合智能预警模型, 提升预警准确率与可靠性, 为类似工程安全监测提供更优技术方案。

#### 参考文献:

- [1] 孙永朝, 丁咚, 李广雪, 等. 基于多源观测技术的海堤变形监测方法研究[J]. 海洋科学, 2021, 45(3): 108-121.  
SUN Y C, DING D, LI G X, et al. Monitoring methods of seawall deformation based on multi-source observation technology[J]. Marine sciences, 2021, 45(3): 108-121.
- [2] 周天. 超宽覆盖海底地形地貌高分辨探测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.  
ZHOU T. Research on high-resolution detection technology for ultra-wide coverage seabed topography and geomorphology [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [3] 张秋明. 利用多波束测深技术对防波堤检测的应用[J]. 经纬天地, 2019(6): 59-61.  
ZHANG Q M. Application of multi-beam bathymetry in breakwater inspection [J]. New exploration, 2019(6): 59-61.
- [4] 马建林, 金菁, 刘勤, 等. 多波束与侧扫声纳海底目标探测的比较分析[J]. 海洋测绘, 2006, 26(3): 10-12.  
MA J L, JIN J, LIU Q, et al. Multi-beam echosounder versus side scan object detection a comparative analysis [J]. Hydrographic surveying and charting, 2006, 26(3): 10-12.
- [5] 马柏辉, 林力山. 利用航空摄影测量及多波束水文测量技术监测堆石防波堤及海堤[C]//中国水利学会围涂开发专委会 2004 学术年会论文集. 杭州: 围涂开发专业委员会秘书处, 2004: 93-100.  
MA B H, LIN L S. Monitoring rockfill breakwater and seawall by using aerial photogrammetry and multi-beam hydrographic surveying technology [C]//Proceedings of the 2004 Academic Conference of the Specialized Committee on Reclamation Development of the Chinese Hydraulic Engineering Society. Hangzhou: Secretariat of the Specialized Committee on Reclamation Development, 2004: 93-100.
- [6] 邹双朝, 皮凌华, 甘孝清, 等. 基于水下多波束的长江堤防护岸工程监测技术研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 93-98.  
ZOU S C, PI L H, GAN X Q, et al. Revetment monitoring of Yangtze River embankment by underwater multi-beam sonar system [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(1): 93-98.
- [7] 雷尚彬, 刘良志, 程林, 等. 多传感器信息融合技术在防波堤状态检测中的应用[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(3): 1-5.  
LEI S B, LIU L Z, CHENG L, et al. Application of multi-sensor information fusion technology in breakwater detection [J]. China harbour engineering, 2024, 44(3): 1-5.
- [8] 邓居勇, 傅伟军. 高精度准实时监测防波堤抛石的软件开发[J]. 水运工程, 2019(10): 176-180, 186.  
DENG J Y, FU W J. Software development of high precision and quasi real-time monitoring of breakwater riprap [J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 176-180, 186.
- [9] 翟焕明. 滨州港临港产业园区陆域防波堤工程稳定性监测[J]. 水运工程, 2017(S1): 105-108.  
ZHAI H M. Monitoring and stability analysis of inland tide embankment in Binzhou Port-vicinity Industry Zone [J]. Port & waterway engineering, 2017(S1): 105-108.
- [10] 杨德磊, 魏献忠. 某防波堤工程施工监测与安全性分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(9): 125-127.  
YANG D L, WEI X Z. Safety monitoring and analysis of breakwater construction project [J]. Yellow River, 2013, 35(9): 125-127.

(本文编辑 王璁)