



Open Access

引用格式:陆明志,刘晓晓,刘后宏,等.基于声学-光学联合探测的海底构筑物多模态数据融合评估方法[J].海南大学学报(自然科学版中英文),2026,44(2):185-193.

Citation: LU Mingzhi, LIU Xiaoxiao, LIU Houhong, et al. Research on multimodal data fusion evaluation method for subsea structures based on acoustic-optical joint detection[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(2): 185-193.

基于声学-光学联合探测的海底构筑物 多模态数据融合评估方法

陆明志^{ID¹}, 刘晓晓^{ID^{2,3}}, 刘后宏^{ID^{2,3}}, 周世凯^{ID⁴}, 任常斌^{ID^{2,3}}✉

(1. 国家能源集团乐东发电有限公司, 海南 乐东 572500; 2. 浙江大学海南研究院, 海南 三亚 572025;

3. 海洋环境监测与探测装备海南省工程研究中心, 海南 三亚 572025;

4. 海南智汇享科技有限公司, 海南 海口 570100)

摘要: 针对近岸水下人工构筑物(以海水输运构筑物为例)因冲刷腐蚀、生物附着或堵塞导致的效能下降问题,需开展常态化检测与精确评估。基于多源数据融合思想,提出一种声学-光学多模态联合诊断方法,通过集成多波束测深、双频成像声呐及水下机器人光学摄像多种技术,构建了声学-光学-地形综合数据评估体系,并创新性地提出了多传感器时空配准与动态量化分析方法。现场试验表明,该方法在复杂海况下能精准识别结构缺陷,检测效率较传统方式明显提升,有效解决了冲刷地形重构误差问题,对海上风电基础、跨海隧道等海洋工程结构的智能化运维具有重要参考价值。

关键词: 海底构筑物; 故障诊断; 多源数据融合; 声学探测; 光学探测

中图分类号: P756.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-1729(2026)02-0185-09

DOI: 10.65658/j.hndk.2025062701

CSTR: 32403.14.hndk.2025062701

Research on multimodal data fusion evaluation method for subsea structures based on acoustic-optical joint detection

LU Mingzhi^{ID¹}, LIU Xiaoxiao^{ID^{2,3}}, LIU Houhong^{ID^{2,3}}, ZHOU Shikai^{ID⁴}, REN Changbin^{ID^{2,3}}✉

(1. Ledong Power Plant, China Energy Co. Ltd., Ledong 572500, China; 2. Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya 572025, China;

3. Hainan Provincial Engineering Research Center for Marine Environment Monitoring and Detection Equipment, Sanya 572025, China;

4. Hainan Zhihui Xiang Technology Co. Ltd., Haikou 570100, China)

Abstract: Offshore underwater artificial structures (e.g., sea transmit pipeline) are susceptible to instability due to long-term hydrodynamic impacts, biological attachment or blockage, which requires regular detection and precise inspection. Grounded in the concept of multi-source data fusion, this study proposes an acoustic-optical multimodal joint diagnostic methodology. By integrating three underwater monitoring technologies—multibeam bathymetry, dual-frequency imaging sonar, and optical imaging from remote operated vehicle (ROV)—an acoustic-optical-topographic comprehensive data evaluation framework is established, with spatiotemporal registration and dynamic quantitative analysis methods for multi-sensor. Field tests demonstrate that this approach enables accurate defect identification in certain complex marine conditions, significantly

Received: 2025-04-30; Revised: 2025-08-11; Accepted: 2025-08-12.

✉ Corresponding author(s): REN Changbin, E-mail: renchangbin@zju.edu.cn.

improves detection efficiency compared to conventional methods, and effectively mitigates reconstruction errors induced by scouring. The findings provide valuable insights for the intelligent operation and maintenance of marine engineering structures such as offshore wind turbine foundations and cross-sea tunnels.

Keywords: subsea structures; fault diagnosis; multi-source data fusion; acoustic detection; optical detection

0 引言

海底构筑物是近海重大海洋工程稳定运行的重要设施,其健康状况直接影响输运系统的安全运行。随着海洋资源开发与利用的不断深入,海底隧道、输水管道和电缆管线等水下构筑物的规模与复杂度显著增加,其长期处于高盐、高压和强流等恶劣海洋环境中,易受到冲刷、腐蚀、生物附着等多重因素的影响,导致结构损伤与功能退化^[1]。例如,某滨海电厂水下取水设施出现水力损失系数远远大于设计值,导致取水量骤减,严重影响发电机组安全运行。

单维度检测方法往往难以全面、准确地评估构筑物的实际状态,尤其是在能见度低、水流湍急的实际海况下,检测数据的可靠性与完整性面临严峻挑战^[2]。如多波束测深只能进行高精度的海底地形测绘,并不能完成一些小尺度的精细调查(如栅条的裂缝和生物附着)^[3];成像声呐能够穿透浑浊的水体来获得相应的声学图像,但受到水体反射条件等影响,垂直分辨率较低,难以形成稳定清晰的图像^[4];潜水员或遥控无人潜水器(remote operated vehicle, ROV)进行光学检测时,由于水流的影响以及能见度较差,不利于定量地判定是否出现损伤^[5]。近年来,国内外学者在海底构筑物检测技术方面开展了多项研究。李辉等^[6]利用多波束系统对海底管道进行地形扫描,但在细微结构识别方面存在局限;沈莹等^[7]通过声呐三维成像技术提升管道表面缺陷检测能力,但仍受限于声学图像的分辨率与噪声干扰;李友龙等^[8]基于ROV平台开展水下资源探测,强调了近距离观测的重要性,但在大范围应用中效率较低。此外,多源数据融合技术逐渐应用于海洋工程领域,党云廷等^[9]通过点云数据优化提升了地形建模精度;李兆强等^[10]利用改进曲面重建算法增强了复杂结构的可视化效果;时宗胜^[11]提出多模态数据融合可显著提高了目标识别的精确性。然而,现有研究仍缺乏系统性将声学、光学与地形数据进行时空配准与量化分析的方法,各维度不同检测数据间存在割裂无法直接用以发现隐患间的相互耦合作用,尤其在冲刷坑体积计算、堵塞面积量化等具体应用场景中,尚未形成统一的、可工程化的技术体系。

针对上述问题,本文提出构建声学-光学-地形多源融合评估方法,综合运用多波束测深数据、双频成像声呐数据、ROV光学摄像数据,对海底取水构筑物进行检测分析,通过多源数据融合分析海底取水构筑物故障位置,精确量测故障位置处的损坏情况,实现海底取水构筑物故障的准确诊断定位。

1 水下声学-光学数据融合评估方法

在海底取水构筑物的缺陷定量评估中,冲刷坑体积计算及局部成像补充分析是判定其海底工况的重要依据。针对水下结构设施周边复杂的地形变化与结构损伤特征,研究建立基于多源数据融合的定量评估方法。

1.1 基于声学多波束测深原始点云数据的冲刷计算 冲刷体积的精确计算首先要获得高分辨率的地形数据。从原始点云数据,经波束测深采集后预处理,采用联合不确定性与水深估计方法(combined uncertainty and bathymetry estimator, CUBE)进行水深数据质量控制,并将受多径效应或悬浮物影响所产生的异常值剔除(置信度阈值设为95%);然后以未经冲淤过的地形数据作为参照基准,在保留新床的点云基础上,应用最小二乘法拟合海床曲面 $z_0(x,y)$ ^[12],其数学表达式为

$$z_0(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (1)$$

其中,多项式系数根据地区地形特征设定,拟合残差控制在3 cm以内。实测地形曲面 $z(x,y)$ 和基准面高程差 $\Delta z(x,y)$,对冲刷深度的空间分布进行模拟。

为计算冲刷体积,将离散点云转换成连续三角网格,用三角剖分算法,以最大最小内角准则为约束,解决狭长三角形带来的积分误差^[13],每个三角面元的冲刷体积为

$$V_i = \frac{1}{3}(\Delta z_1 + \Delta z_2 + \Delta z_3)S_i \quad (2)$$

其中, Δz_1 、 Δz_2 和 Δz_3 分别为三角形顶点的冲刷深度, S_i 为面元投影面积。整体冲刷体积则为所有面元体积之和:

$$V_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N V_i \quad (3)$$

为验证插值法在声学盲区地形填补的可靠性,选取典型冲刷区域进行蒙特卡洛模拟。通过随机含高斯噪声($\sigma=5$ cm)的数据集,计算冲刷体积,误差稳定在 3.2% ~ 4.7% 之间(置信水平 95%)。

1.2 基于光学成像探测数据的盲区补齐 声学多波束在垂直角度构筑面等部位易存在探测盲区导致冲刷地形数据缺失。因此,利用 ROV 光学影像与激光标定数据,对盲区进行空间补偿^[14]。通过 ROV 抵近拍摄获取高分辨率影像,结合激光标定模块测量特征点三维坐标(精度 0.2 mm),提取盲区边界几何约束;结合声学数据的空间相关性变异函数,基于克里金插值算法,预测缺失区域的高程值:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (4)$$

其中, $z(x_i)$ 为已知点 x_i 的观测值, λ_i 为权重系数, n 为参与插值的已知点。权重系数 λ_i 由变异函数模型确定,本文采用指数模型:

$$\lambda_i = 0.12 + 0.25(1 - \exp(-h/8.7)) \quad (5)$$

其中, h 为空间点之间距离。

1.3 成像声呐图像中缺陷面积的计算 结合高频声呐图像和光学图像,对缺陷区域开展区域面积量化计算。使用声呐的高频通道获取格栅表面的毫米级分辨率声学图像,采用自适应直方图均衡化增强目标区域的信号强度^[15]:

$$I_{\text{enh}}(x, y) = \frac{I(x, y) - \mu}{\sigma} \alpha + \beta \quad (6)$$

其中, $I(x, y)$ 为原始图像灰度值(0 ~ 255); μ 和 σ 为图像均值和标准差; $\alpha=1.5$, $\beta=30$ 分别为对比度与亮度调节系数。

为适应不同水域浊度与光照差异,自适应直方图均衡化采用动态参数配置策略,基于历史经验数据建立水质分级参数(清澈、中等浑浊和重度浑浊),预设(α, β)参数组合(如 $\alpha=1.2 \sim 1.8$, $\beta=20 \sim 40$)。现场作业时通过 ROV 快速拍摄标准测试板进行水质评估,自动匹配最优参数组,提高声呐图像数据在浊度变化下的质量。针对声呐图像反射强度不均问题,将图像划分为 32×32 像素子区域独立计算阈值,通过局部直方图分析动态调整分割边界,克服因入射角差异导致的反射强度变化,提升渔网与生物附着区的识别精度,并保留完整形态特征。

2 试验设计

为准确定位海底取水构筑物隐蔽性缺陷,本文构建声学-光学-地形多源融合诊断方法。利用多波束测深系统得到高精度海底地形图,将双频成像声呐与 ROV 光学成像采集的各维度时序信息进行时空配准,为精确配准多源数据,为 ROV 加装超短基线水下定位模块(ultra-short baseline positioning, USBL),通过实时同步水面组合导航数据,实现声学与光学采集平台的时空对齐,克服海流漂移影响,确保多波束、声呐与 ROV 摄像数据的空间一致性。

2.1 水面层地形测绘 利用多波束测深系统获取宽频声呐阵列(200 ~ 400 kHz)对水下结构设施海床进

行高密度扫描,得到厘米级的数字高程模型(digital elevation model, DEM),使用深水区高清探针进行补充获取其三维坐标值。考虑到声波传播的不均匀性会随着声速的不均衡而造成水底地形数据的变化,使用声速剖面数据校正仪器实时更新;运用定位精度 5 cm、高程误差 ≤ 2 cm 的 GNSS 导航卫星数据(global navigation satellite system, GNSS)与组合导航数据(integrated navigation system, INS)实施位置定位,利用该阶段所得到的数据作为宏观分布评估的坐标系^[16]。

2.2 水体层结构探测 为补充地形数据的不足,采用双频成像声呐对底部数据进行补充。选用高频(1.2 MHz)通道(分辨率 5 cm)对进水格栅表面毫米级裂缝、渔网缠绕等细节定位,并用自适应时间变增益(time variable gain, TVG)补偿水体浑浊变化引起的影像模糊,选用低频(750 kHz)通道(穿透深度 >2 m)穿过表层沉积物,测量积泥量大小,融合声学影像与时域地形数据,实现冲刷坑边缘形态与局部区域损伤点对应评估^[5]。

2.3 海底层精细观测 为解决声学手段对微观缺陷量测不准确的问题,采用光学摄像及激光标定组合设备,将 ROV 放置于海底层做近距离观察,通过惯性稳定云台稳定视角,对目标区域连续拍摄 10 帧以上成像,并基于图像叠加算法消除运动模糊。同时,结合激光标定获取网格点厚度数据,确保微观缺陷的可靠识别^[5]。基于定位信息提取关键帧,采用 SIFT 特征匹配算法(scale-invariant feature transform, SIFT)拼接生成全景图,通过边缘自动标注生物附着热区(如贝类覆盖率 $>15\%$ 区域),直观显示渔网缠绕分布趋势,为人工复核提供参考目标。

3 试验验证

为了检验上述多源融合检测方法的效用,在某滨海电厂水下结构设施海域开展系统的现场试验。试验采用分阶段递进策略,先采用测量船搭配 Reson T50 多波束测深系统完成水下结构设施周围 50 m $\times$ 50 m 范围内的全部地形扫描;然后使用 EdgeTech 4200MP 双频成像声呐对疑似区域进行加密探测,最后使用 ROV 水下机器人对可疑点位进行光学验证。兼顾检测的效率和精度,在依靠多种途径手段互为验证的基础上最大程度提升最终成果的真实可靠程度。

3.1 水面层地形测绘 采用 Reson T50 多波束测深系统(工作频率 200 ~ 400 kHz,最大测深 300 m),技术参数如表 1 所示,其条带宽度 B 与水深 D 的关系为

$$B = 2D \cdot \tan(\theta/2) \quad (7)$$

表 1 多波束数据采集技术参数

参数	性能
工作频率/kHz	200 ~ 400
波束数	1 024
最大测深/m	300
声速剖面校正	声速剖面测量

GNSS/INS 组合导航平面定位精度 5 cm,高程精度 2 cm,以水深 4 倍为横向覆盖宽度,全覆盖水下结构设施周围。为消减声波传播引起的测量误差,使用 CUBE 滤波算法剔除声速剖面 and 潮位变化异常点,增设物理约束硬性阈值,依据测区设计水深范围,剔除高程值小于 -5 m 或大于 35 m 的异常点云,有效过滤因多路径效应或悬浮物产生的离群噪点,保障冲刷体积计算可靠性。

0.1 m $\times$ 0.1 m 格网的数字高程模型(DEM)如图 1 所示。从图 1 可以看出,冲刷凹陷区位于水下结构设施东北部,长 15 m、宽 10 m 的区域,平均冲刷深度约 4.2 m,最大冲刷深度达到 6.5 m。

3.2 水体层结构探测 对于格栅、箱涵隐蔽性的损伤,应用双频成像声呐加密探测,用其高频(1.2 MHz)通道(分辨率 5 cm)检测有无格栅表面 ≥ 3 mm 的裂缝和渔网缠绕;低频(750 kHz)通道(穿透深度 >2 m)探测箱涵内部淤积情况,并运用自适应时间变增益补偿算法,根据实际声像中水体状况,实时调整声呐发射强度大小,保证目标回波强度变化的误差控制在 ± 2 dB 以内。声呐成像如图 2 所示。由图 2 可知某一处

格栅存在 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 弱反射区, 疑似存在结构破损; 另外 2 处格栅前端存在较强的回波信号, 疑似是沉积物异常堆积。

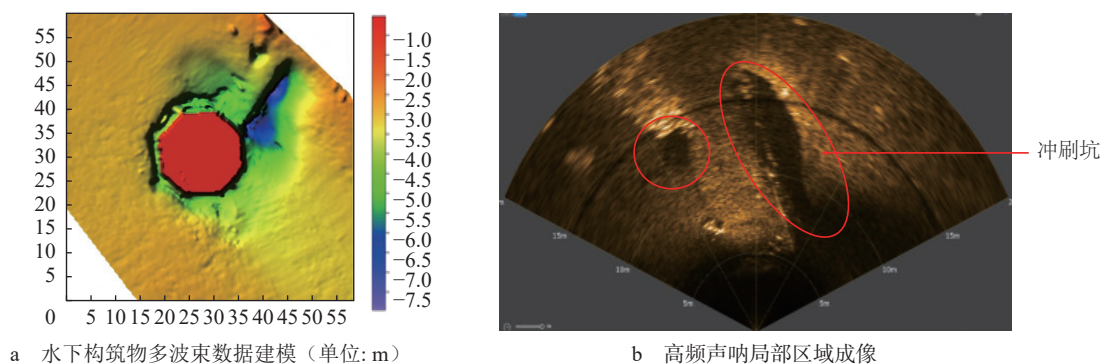


图 1 水下结构设施声学探测联合评估

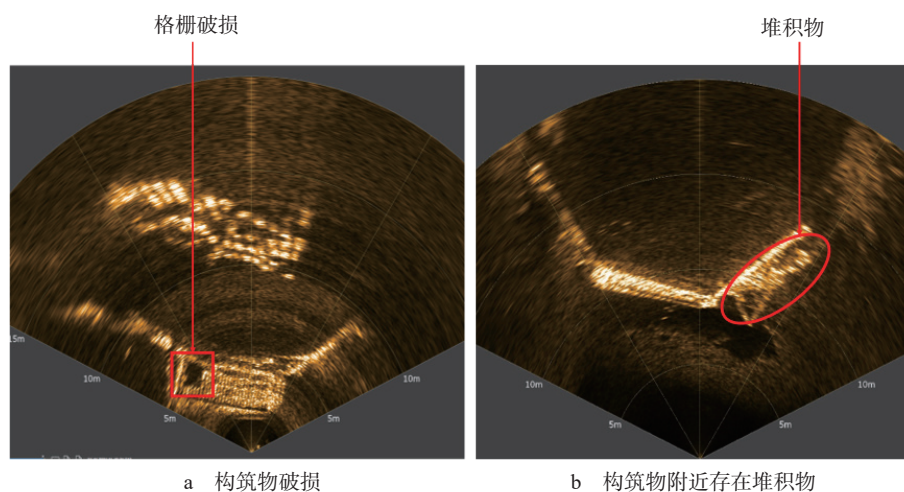


图 2 水下结构设施声学联合探测影像

3.3 海底层精细观测 取水系统运转, 格栅前后流速较高, ROV 搭载 1080P 光学摄像机和激光标定模块近距离拍摄时, 姿态保持较为困难, 惯性稳定云台有效地克服上述不利因素。ROV 光学成像如图 3 所示。

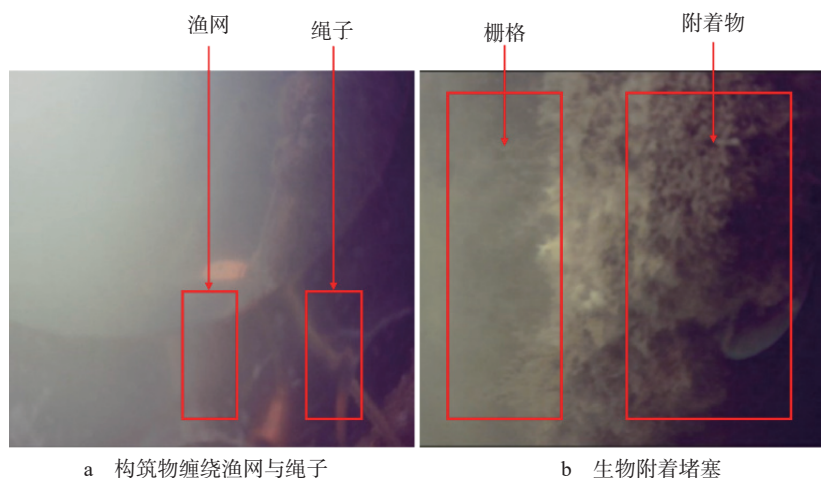


图 3 水下结构设施光学影像图

从图 3 中可以看出多处的构筑面布满渔网和生物附着。针对贝类/藻类分布不均的问题, 将 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 格栅划分为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 网格单元, 随机抽取 20% 网格点进行激光标定厚度测量(精度 0.2 mm), 计算平

均附着厚度及标准差,避免单一测点的局限性,结合高频声呐影像与 ROV 光学数据,进一步提升堵塞区域的量化准确性。

4 数据分析处理

4.1 海底冲刷体积测算 冲刷体积的精确计算是多源数据融合的核心目标之一。首先对多波束测深系统获取的原始点云数据(密度达 5×10^4 点 $\cdot$ m^{-2})进行预处理。首先,利用声速剖面传感器实时采集声速数据,结合水温和盐度变化动态修正声波传播路径,消除因声速梯度引起的折射误差^[17],然后开展潮位动态补偿,通过验潮站提供潮汐时序数据,逐秒校正水深测量值,确保地形数据的时空一致性^[18],最后运用 CUBE 算法,以 95% 的置信度过滤悬浮物影响及多径效应对有用波的影响,得到的有效波波形点数约为 2 350 万。

基于未被冲刷的地形基准进行二次曲面建模,将实测地面和基准地面之间高程差 Δz 应用三角剖分方法得到的连续三角网格应用于本区域模型^[19],经过单次模型模拟分析得出总冲刷量占比。为验证算法鲁棒性,在进行蒙特卡洛模拟时设置模拟次数为 1 000 次,并向原始数据添加高斯噪声,得出的冲刷体积误差范围在 3.2% ~ 4.7%(置信水平 95%)。通过 ROV 光学影像对东北侧冲刷坑边缘进行采样,实测深度与计算值偏差仅为 4.3%,表明该方法在复杂地形下的可靠性。

4.2 构筑物堵塞面积测算 构筑物堵塞的量化分析需融合高频声呐影像与 ROV 光学数据。采用自适应直方图均衡对高频声呐图像的目标区域对比度进行提升,用阈值分割的方式把可能堵塞部位找出,将某处弱反射区域中 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 部分增大,图像增强后发现堵塞面积约 0.82 m^2 。成像声呐图像处理前后对比如图 4 所示。然后进行光学验证与修正,采用 ROV 抵近拍摄,光学图像如图 5 所示,经测算该区域渔网覆盖率达 73%,生物附着厚度 $8 \sim 12 \text{ mm}$,综合计算过流面积损失率为 32.1%,8 组构筑物中 3 组堵塞程度超阈值(损失率 > 25%)。

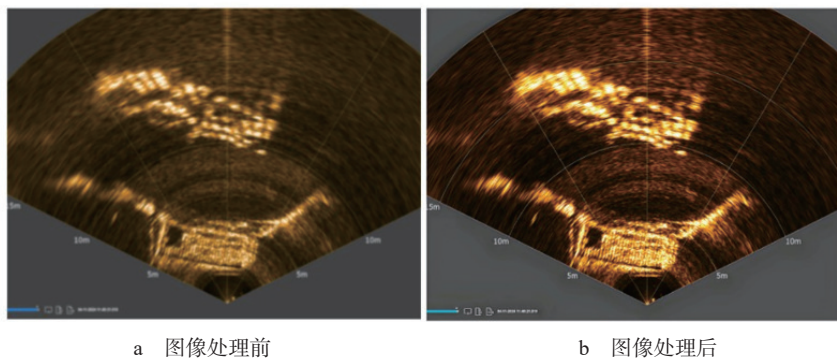


图 4 成像声呐图像处理前后对比

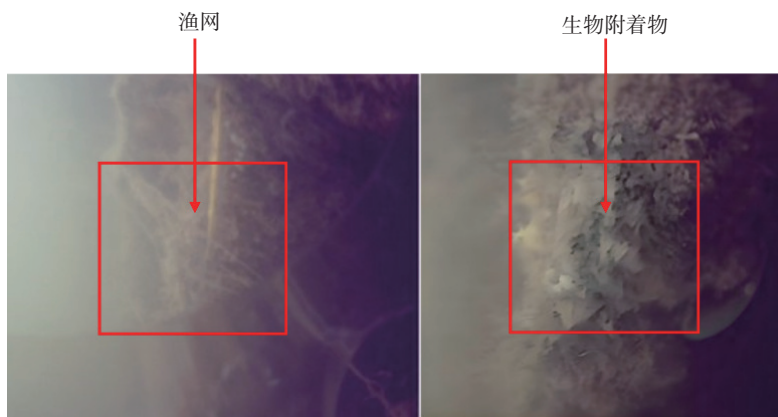


图 5 ROV 近距离拍摄构筑物图像

4.3 试验结果 通过多源融合检测,结合历史运维数据及区域地质特征(底质为粉砂质黏土,中值粒径 $d_{50}=0.15\text{ mm}$,临界起动流速 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;涨落潮最大流速差 $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),探测共识别出3类典型隐患,具体隐患点位情况及修复建议如表2所示。

表2 隐患点位情况及修复建议

隐患编号	故障内容	修复建议
1	水下结构设施东北侧冲刷坑(最大的长15 m,宽10 m,最大深度6.5 m,体积625.8 m ³)	(1)抛石防护:选用30~50 cm花岗岩块石(密度 $2.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),形成人工糙面降低床面剪切应力; (2)导流板优化:基于CFD(computational fluid dynamics, CFD)模拟结果,在水下结构设施迎流侧加装弧形导流板,抑制马蹄涡生成(涡量降低至 1.8 s^{-1})。
2	进水口堵塞(过流面积损失32.1%),主因渔网缠绕(覆盖率73%)及生物附着(厚度8~12 mm)	ROV机械清理:配备液压剪切刀(剪切力 $\geq 5\text{ kN}$)与旋转刷($200\text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$),优先清除渔网等异物。
3	进水口破损(破损面积约 0.8 m^2)	(1)对破损进行更换或修复; (2)考虑后续将过滤物更换为可拆卸设计便于维护; (3)喷涂聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)涂层(厚度 $500\text{ }\mu\text{m}$,表面能 $\leq 20\text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$),抑制生物附着 ^[20] 。

5 结 论

本文提出声学-光学的多源数据融合方法,解决海底取水构筑物冲刷、堵塞耦合损伤的诊断问题。工程试验与分析表明,结合多波束测深、双频声呐成像和光学探测等手段的综合检测体系可发现单一检测手段难以发现的隐蔽缺陷。相较于传统检测方法,本文所提方法的精度较高,适用于海况复杂环境下缺陷识别,为水下构筑物的故障诊断和维护维修决策提供一种可靠的技术选择。此外,本文提出的多源数据融合方法还可用于海上风电基础冲刷监测、跨海隧道结构裂缝识别等其他场景。

参考文献:

- [1] 王印忠,李治洁,李雪,等.我国海水利用工程取水构筑物型式研究[J].工业用水与废水,2021,52(1):1-6.
WANG Y Z, LI Z J, LI X, et al. Study on types of intake structures of seawater utilization projects in China[J]. Industrial Water & Wastewater, 2021, 52(1): 1-6.
- [2] 刘爱荣,腾帅,陈炳聪,等.桥梁水下结构检测研究进展与挑战[J].中国公路学报,2025,38(6):17-35,
LIU A R, TENG S, CHEN B C, et al. Advancements and challenges of underwater structural detection research on bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(6): 17-35,
- [3] 姜艳,段安民,肖雪露.大型构筑物水下检测多源数据处理及可视化系统设计与实现[J].舰船电子工程,2023,43(4):104-109.
JIANG Y, DUAN A M, XIAO X L. Design and implementation of multi-source data processing and visualization system for large underwater structures[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(4): 104-109.
- [4] 沈海伟,王湛,贾鹏琦.基于声呐检测的管道三维成像方法研究[J].工程与建设,2025,39(1):9-11.
SHEN H W, WANG Z, JIA P Q. Research on pipeline 3D imaging method based on sonar detection[J]. Engineering and Construction, 2025, 39(1): 9-11.
- [5] 刘振国,徐帷巍,郑泽豪,等.基于ROV平台的水下精细探测技术在水下隐蔽构筑物安全检测应用[J].浙江水利科技,2024,52(1):92-95,99.
LIU Z G, XU W W, ZHENG Z H, et al. The application of underwater fine detection technology based on ROV platform in the safety detection of underwater concealed structures[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2024, 52(1): 92-95, 99.
- [6] 李辉,詹燕红.多波束测深系统在海底输油气管道检测中的应用[J].石油和化工设备,2023,26(11):127-130.
LI H, ZHAN Y H. Application of multibeam sounding system in detection of submarine oil and gas pipeline[J]. Petroleum & Chemical Equipment, 2023, 26(11): 127-130.
- [7] 沈莹.基于声呐的海底输气管道泄漏检测及可视化技术研究[D].杭州:浙江大学,2021,doi:10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.000348.

- SHEN Y. Research on leak detection and visualization technology of submarine gas pipeline based on sonar[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021, doi:10.27461/d.cnki.gzjdx.2021.000348.
- [8] 李友龙, 黄雪方, 王健哲, 等. 水下机器人 ROV 在石油行业检测维修中的应用研究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(7): 28–30.
- [9] 党云廷. 基于点云数据的水下精细化探测技术研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020, doi:10.27275/d.cnki.gsdku.2020.000251.
- DANG Y T. Study on underwater fine detection technology based on point cloud data[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020, doi:10.27275/d.cnki.gsdku.2020.000251.
- [10] 李兆强, 吴巧俊, 熊福力, 等. 基于点云曲面拟合的自适应阈值地面分割算法 [J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(16): 337–347.
- LI Z Q, WU Q J, XIONG F L, et al. Adaptive threshold ground segmentation algorithm based on point cloud surface fitting[J]. Computer Engineering and Applications, 2025, 61(16): 337–347.
- [11] 时宗胜. 基于多模态数据融合的目标识别技术 [J]. 智慧中国, 2025(8): 26–27.
- [12] 杨莉, 杨亮, 姬焕, 等. 基于多波束测深技术的水下地形点云数据优化方法 [J]. 水力发电, 2025, 51(5): 25–29, 124.
- YANG L, YANG L, JI H, et al. Optimization of underwater terrain point cloud data based on multi-beam sounding technology[J]. Water Power, 2025, 51(5): 25–29, 124.
- [13] 张前, 王健, 齐智宇, 等. 改进 Crust 算法的点云复杂曲面精细化三维重建 [J]. 激光与红外, 2024, 54(12): 1827–1833.
- ZHANG Q, WANG J, QI Z Y, et al. Refined 3D reconstruction of point cloud complex surface with improved Crust algorithm[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(12): 1827–1833.
- [14] 朱群雄, 田业, 顾祥柏, 等. 基于残差补偿的特征空间插值虚拟样本生成方法 [C]//第 33 届中国过程控制会议论文集. 乌鲁木齐: 中国自动化学会过程控制专业委员会, 中国自动化学会, 2022: 740, doi:10.26914/c.cnkihy.2022.067474.
- [15] 文海琼, 李建成. 基于直方图均衡化的自适应阈值图像增强算法 [J]. 中国集成电路, 2022, 31(3): 38–42, 71.
- WEN H Q, LI J C. An adaptive threshold image enhancement algorithm based on histogram equalization[J]. China Integrated Circuit, 2022, 31(3): 38–42, 71.
- [16] 常正科, 郭珍珍. 多波束测深技术在水利测绘中的应用分析 [J]. 科技资讯, 2025, 23(1): 173–175.
- CHANG Z K, GUO Z Z. Analysis of application of multibeam bathymetry technology in water conservancy surveying and mapping[J]. Science & Technology Information, 2025, 23(1): 173–175.
- [17] 原齐泽, 冯晓晖, 张赛, 等. 典型水声环境的浅海声信道多径特性研究 [J]. 电声技术, 2024, 48(4): 34–37, 41.
- YUAN Q Z, FENG X X, ZHANG S, et al. Research on multipath characteristics of shallow water acoustic channels in typical underwater acoustic environment[J]. Audio Engineering, 2024, 48(4): 34–37, 41.
- [18] 陈正伟, 韩磊. 基于高精度 GNSS 定位解算及姿态数据获取潮位研究 [J]. 海洋技术学报, 2019, 38(5): 55–59.
- CHEN Z W, HAN L. Research on tidal acquisition based on high-precision GNSS positioning solution and attitude data[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(5): 55–59.
- [19] 王起刚, 冷浩, 于雅琼, 等. 波流作用下海底管道周围局部冲刷和水动力特征研究 [J]. 海洋湖沼通报(中英文), 2024, 46(5): 64–72.
- WANG Q G, LENG H, YU Y Q, et al. Evolution analysis of local scour of umbrella suction anchor foundation under stokes wave and current[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(5): 64–72.
- [20] 狄志刚, 官自超, 刘亚安, 等. 典型海洋生物污损过程及涂层表面特性对其附着行为的影响 [J]. 涂料工业, 2024, 54(7): 77–82.
- DI Z G, GUAN Z C, LIU Y A, et al. The fouling process of typical marine organisms and the influence of coating surface characteristics on their attachment behaviors[J]. Paint & Coatings Industry, 2024, 54(7): 77–82.

作者贡献声明

本声明旨在明确各作者对本论文的具体贡献, 确保学术成果署名的规范性和公平性, 各作者贡献如下: 陆明志负责提出核心研究问题、设计整体试验方案、确定理论框架和协助解读分析结论。刘晓晓负责数据采集收集、系统整理、数

陆明志等. 基于声学-光学联合探测的海底构筑物多模态数据融合评估方法

Natural Science of Hainan University (ISSN 1004-1729)

<https://hndk.hainanu.edu.cn>

据统计分析、结果可视化及结论解读。刘后宏负责撰写论文初稿,完成内容修订及语言润色,并参与数据分析和细节完善。周世凯负责开展现场试验与设备操作,参与数据整理与解读、论文修订。任常斌负责研究过程中的学术指导、方向把握,对方案设计、结论分析提出指导性建议。

利益冲突声明

作者声明,其不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文未使用人工智能(AI)协助撰写。

伦理声明

不适用:本文不涉及人类或动物研究。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 <https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025062701>。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到以下基金项目支持:国家重点研发计划项目(2024YFC2814904)和海南省科技人才创新项目(KJRC2023D36)。

This work was supported by the following funding projects: National Key R&D Program of China (2024YFC2814904) Hainan Provincial Science and Technology Talent Innovation Project (KJRC2023D36).

作者简介

陆明志(1995—),男,海南东方人,国家能源集团乐东发电有限公司工程师,长期从事海洋构筑物及设备的探查检测与运维管理工作。E-mail: 907938848@qq.com。

刘晓晓(1987—),女,山西大同人,浙江大学海南研究院工程师,研究方向:水下装备研发测试。主要参与国家与省部级重点项目3项,代表性成果包括在国际期刊合作发表关于深海静力触探设备控制器的研究论文,并拥有多项授权发明专利,涉及水下构筑物空间稳定性诊断、声线弯曲修正方法等领域。E-mail: xxliu616@zju.edu.cn。

刘后宏(1993—),男,海南澄迈人,浙江大学海南研究院工程师,研究方向:海洋工程装备与技术。E-mail: liuhh@zju.edu.cn。

周世凯(1996—),男,海南文昌人,研究方向:海底管道稳定性诊断与海底构筑物多模态探测。E-mail: 1551221974@qq.com。

任常斌(1983—),男,山西长治人,浙江大学海南研究院工程师,研究方向:自动控制、水下声学及水下无人装备。在国内外期刊上发表多篇学术论文,拥有丰富的发明专利成果,授权专利涵盖海底构筑物隐患声光联合检测、多维度水下声学感知避障、障碍物识别检测方法、便携式漂流浮标和软体机器人抓手等多个技术方向。E-mail: renchangbin@zju.edu.cn。

(责任编辑:高 喆,英文校对:吴 慰)



This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.