

# 涉海工程水下检测技术的发展与工程应用

苏 宇<sup>1</sup>, 潘 蕾<sup>2</sup>

(1. 上海市水务建设工程安全质量监督中心站, 上海市 200237; 2. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 200011)

**摘 要:** 系统研究了涉海工程水下检测技术的发展历程及其在实际工程中的应用。通过对传统水下检测方法进行细致分类与深入分析揭示其显著局限性, 详细阐述了水声信号探测的基本原理, 并对相关设备进行了全面介绍。结合涉海工程的具体检测项目, 深入探讨了这些新型检测技术在实际应用中的优势与局限性。分析结果表明新型水下检测技术相较于传统方法具有显著优势: 多波束测深系统能够提供高精度的三维地形数据; 双频识别声呐在局部细节探测方面表现出色; 浅表地层剖面仪则可穿透沉积物进行厚度或断面量测。这些技术的协同使用, 能够有效提高涉海工程水下检测的效率和准确性, 显著降低人工潜水探摸的风险, 为涉海工程的质量控制提供了有力的技术支持。进一步明确了新型水下检测技术在涉海工程中的应用前景, 为相关技术研究和推广应用提供了可靠的参考依据。

**关键词:** 涉海工程; 水下检测; 多波束; 声呐; 浅剖

**中图分类号:** TU198+.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2025)08-0357-07

## Development and Engineering Applications of Underwater Detection Techniques Related to Marine Engineering

SU Yu<sup>1</sup>, PAN Lei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Water Construction Engineering Safety Quality Supervision Center, Shanghai 200237, China; 2. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200011, China)

**Abstract:** The development history of underwater detection technology related to marine engineering and its application in the practical engineering are systematically studied. By meticulously categorizing of the traditional underwater detection methods, and further analyzing and revealing its significant limitations, the basic principles of acoustic signal detection are set forth in detail, and the related equipment is comprehensively introduced. Combined with the detail detection items related to the marine engineering, the advantages and limitations of these new detection technologies in practical applications are deeply discussed. The analysis results show that compared with the traditional methods, the new underwater detection technologies have the distinct advantages, that is, the multibeam bathymetric system can provide the high-precision three-dimensional topographic data, the dual-frequency recognition sonar performs well in local detail detection, and the shallow stratum profiler can penetrate sediments to measure thickness or cross-section. The collaborative use of these technologies can effectively enhance the efficiency and accuracy of underwater detection related to marine engineering, significantly reduce the risks associated with manual underwater exploration, which provides the powerful technical support for quality control related to marine engineering. The application prospects of new underwater detection technologies related to marine engineering are further clarified, which provides the reliable references and basis for the research, promotion and application of the relevant technologies.

**Keywords:** marine-related engineering; underwater detection; multibeam; sonar; brief analysis

## 0 引 言

我国幅员辽阔, 拥有 1.8 万 km 的海岸线和 300 万 km<sup>2</sup>

的海洋国土, 海洋资源丰富, 自 21 世纪以来, 我国对海洋资源的保护、开采和利用不断增加, 实施了一系列政策和项目来改善和修复沿海生态系统, 沿海地区的近海岸港口工程也在大规模开展<sup>[1-3]</sup>。然而, 涉海工程所处的环境相对恶劣, 存在波浪海流冲刷、海水腐蚀、地质灾害和人为破坏等诸多不利因素<sup>[4-5]</sup>。因此, 无论在实施过程还是服役过程中, 涉海工程的质量控制都是相对困难的, 例如, 气象和水文的变化

收稿日期: 2025-04-23

基金项目: 上海建科院科研创新项目(KY10000038.20240031)

作者简介: 苏宇(1982—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事水

务工程质量安全监督工作。  
通信作者: 潘蕾(1990—), 男, 工学博士, 从事岩土工程勘察监

测检测方面的研究工作。电子信箱: panlei1@sribs.com

会影响施工平台稳定性,进而使得作业区域偏离施工设计;在海流不断的涌浪冲刷下,可能导致水下铺排发生局部扭曲或偏移。这些不利因素可能会对水下结构物的性能和安全存在一定影响,因此需对涉海工程开展全方位的水下工程检测工作,以确保质量符合建设要求。

相比水上结构检测而言,水下工程结构的检测方法和设备的起步发展都相对较晚<sup>[6]</sup>。在21世纪以前,水下检测仍以潜水员水下肉眼观察和摸排为主,存在安全性差、效率低、主观性强等诸多弊端<sup>[7]</sup>;近年来,水声信号处理技术取得了显著的进步,为涉海工程的安全质量检测提供了更有力的技术支持。本文将首先总结水下检测技术的发展应用,再对涉海工程的检测项目进行特征分析,最后针对各检测项目的难、特点分析各类新技术的适用性,为涉海工程的检测工作提供一定的参考依据。

## 1 传统水下检测方法分类

国外在水下检测技术领域的发展历程较长,1985美国交通管理局将水下检测分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类检测<sup>[8]</sup>:

Ⅰ类检测是指人员借助目视、探摸以及水下摄像设备来开展外观检查,目的是对水下结构损伤、破坏进行定性检查。

Ⅱ类检测是进一步的详细目视,需持有检测资质的人员对关键部位进行精细检查。主要分为4类:

- (1)机械性损伤、变形、裂缝检查;
- (2)结构腐蚀检查;
- (3)水生物检查;
- (4)基础冲刷检查。

Ⅲ类检测指水下无损检测技术,主要包括电场特征检测法(FSM, field signature method)、交流磁场法技术(AFMC, alternating field measurement technique)、水下涡流探伤(UWECT, underwater eddy current testing)、X射线探伤(RT, radiographic testing)、水下超声波成像(UWUI, underwater ultrasonic imaging)等方法<sup>[9-10]</sup>。

(1) AFMC、FSM和UWECT都是基于电场布设,分析检测对象损伤特征导致的磁场畸变、电压差和磁场涡流对缺陷进行检测,常用于金属结构检测。

(2) RT是通过X射线衰减识别材料内部缺陷,可用于水下结构、管道、焊接接头等内部缺陷检测。

(3) UWUI通过发射超声波脉冲,通过分析材料

内部缺陷产生的反射波,确定缺陷的位置和大小,适用于水下管道、海洋平台、船舶等内部缺陷检测。

可见,传统水下检测方法都需要潜入水下才能开展检测任务,可采用人工潜水或水下机器人方式开展点对点检测。但涉海工程通常为大型施工项目,施工规模大、范围广,且在海洋中水下操作危险性相对较大,因此上述传统水下检测方法难以在涉海工程中大范围展开应用。

## 2 水声信号探测原理与设备

除上述检测方法分类,水下检测方法还可根据检测方式分为:排水放空检测、人工潜水检测、水下声呐成像检测。其中排水放空检测又分为排水检测和放空检测2种方法,分别适用桥梁隧洞等水下结构<sup>[11]</sup>;人工潜水检测是由潜水员执行水下目视检测和探摸作业来完成,广泛应用于海洋平台、沉管隧道、大型桥梁等各类水下结构的检测作业<sup>[12-13]</sup>。

21世纪以前,通常采用传统水下检测技术方法(排水检测和人工潜水检测),但随着水声信号技术的发展,水声目标定位技术和成像技术逐渐成熟,近年来逐渐在涉海工程检测工作中得到应用。

### 2.1 水声信号探测系统

水声信号探测是通过声呐探测水下物体,确定物体外观或性能的一种技术。水声探测系统在功能上主要由信号检测、目标定位、运动估计、特征提取、目标识别和数据中心等组成<sup>[1]</sup>,如图1所示。

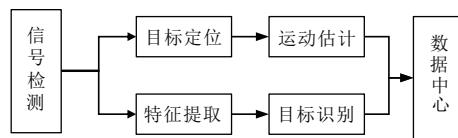


图1 水声信号探测系统组成

在水声检测系统中,目标识别与目标定位是主体部分,目标识别是指通过解析声波信号获取水下结构物的外部特征,目标定位是基于一系列信号参数得到水下结构物的详细位置<sup>[14]</sup>。基于目标识别和定位,可进一步解析实现水声成像(即声呐成像),完成水下检测工作。这一过程中还需考虑其他多种因素以优化检测结果,例如海洋噪声模型、声场传播模型、水声信道特性和水声环境非高斯噪声模型建立等。目标识别可通过声波信号探测结果进行确定,不做赘述,以下将重点介绍目标定位技术。

### 2.2 水声目标定位技术

水声目标定位技术是水声探测领域关键环节,

其重要性源于对目标存在和位置的确认需求。水下定位采用的为声信号,因声信号在水下传输中衰减较小,可以支持较长的传播距离。通常而言,定位系统是通过传感器阵列实现目标定位,常见有以下 6 类定位方法<sup>[15-16]</sup>:

TOA:距离的计算基于测量信号从发射源到接收器的传播时间,再通过多基站测得交点确定目标位置。

DOA:测量信号到达接收天线方向确定位置。

AOA:测量信号到达接收器角度确定目标位置。

TDOA:测量信号到达多个接收器时间差确定。

RTOF:测量信号从发射源到目标再返回发射源的总时间,以确定目标位置。

RSS:利用接收信号的强度来定位目标的位置。

上述各类目标定位方法各具不同优缺点,主要表现在定位精度不同和定位距离不同 2 个方面。例如:DOA 不需要精确时间同步但测角精度高,则常被应用于水下声呐系统;AOA 定位精度高但距离较短,因此常被应用于多波束测深系统;TDOA 抗多径能力强,则常被应用于浅表地层剖面系统。

2.3 水声探测设备

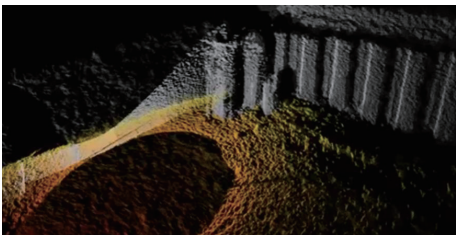
涉海工程中所应用水声探测设备一般包括:实时三维声呐系统、双频识别声呐、水下侧扫声呐、多波束测深系统和浅表底层剖面仪等检测设备<sup>[17-20]</sup>,如图 2 所示。



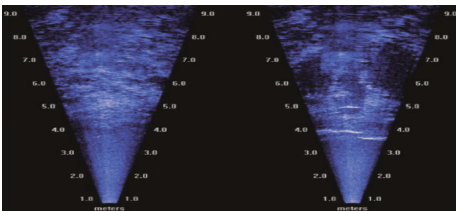
图 2 水声探测仪器

三维成像声呐系统主要由发射换能器、接收换能器、信号处理单元和图像生成模块组成。发射换能器向水下目标区域,对多个方位发射特定频率的声波信号,反射信号再被接收换能器捕获,经过计算

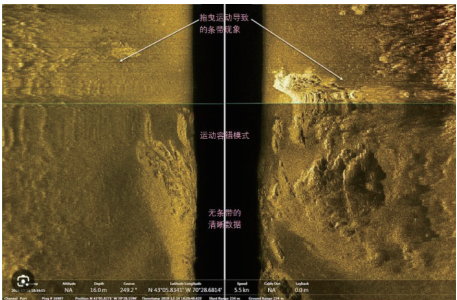
处理生成三维图像,如图 3(a)所示,具有实时性高、覆盖广、检测结果准确等特点<sup>[21]</sup>,常用于海底地形测绘、水下工程监测等工作中。



(a) 三维声呐探测结果



(b) 二维双频声呐探测结果



(c) 测扫声呐探测结果

图 3 声呐成像

双频识别声呐与三维成像声呐原理类似,通过发射高、低两种不同频率声波生成图像,但由于发射方位单一,其结果为二维图像,如图 3(b)所示。但研究人员也指出,可通过多帧图像的配准和融合,重建出目标的三维图像<sup>[22]</sup>。双频识别声呐由于其高分辨率通常可用于探测水下平面物体的损伤中。

水下侧扫声呐是向水下两侧发射高频声波脉冲,接收海底或其他物体反射的声波信号,从而生成海底地形或水下目标的二维图像,如图 3(c)所示。

上述 3 种声呐设备都具有实时显示探测图像的能力,可为操作人员提供即时反馈,从而提高工作效率和决策的准确性。但也存在不足之处,例如:三维声呐系统操作复杂、价格昂贵难以大范围推广;二维双频声呐和测扫声呐结果为二维图像,在三维信息获取上存在局限且探测精度有限。

从应用推广性和探测精度可靠性出发,多波束测深系统相对更具优势。多波束测深系统主要由声学系统、数据采集系统和数据处理系统组成,工作原理是通过“发射换能器阵列”向海底发射宽扇区覆盖

的声波,然后利用“接收换能器阵列”对声波进行窄波束接收。可见,与单波束系统相比,多波束能同时发射和接收多束声波信号,其测量结果为三维点云数据,如图4所示,检测区域全面、效率更高<sup>[23]</sup>,常用于海底测绘、管道铺设、资源探测领域。

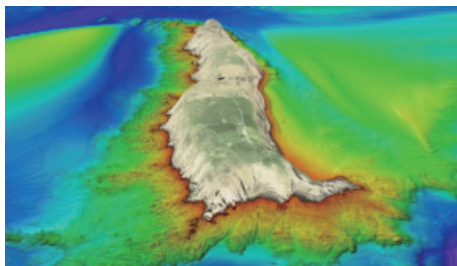


图4 多波束海底地形测量结果

以上所述检测方法都是探测水下目标表面的特征,无法对具有一定埋深的物体进行探测。浅表底层剖面仪则是一种能够对水下浅部地层结构进行探测的设备,通过发射低频声波脉冲穿透海底沉积物,通过分析声波在不同介质中的传播和反射特性,探测海底以下一定深度的地层结构,生成海底浅部地层的剖面图<sup>[24]</sup>,其工作原理如图5所示。

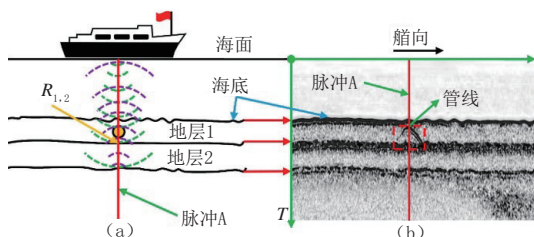


图5 浅表底层剖面工作原理

### 3 涉海工程检测内容

涉海工程主要指圈围工程、海上堤坝、跨海桥梁、海底管道、海洋矿产资源开发等海洋工程项目,当前我国每年新增涉海工程量约400余个<sup>[25]</sup>。以长江口为例,受长江流域减沙、水沙变迁以及大型河口侵蚀环境影响,周边河势和深水航道安全受到严重威胁,因此需对其进行固沙保滩改造。

此类固沙保滩圈围工程中,一般需对以下水下施工内容进行严格的质量把控:

- (1)砂肋软体排沉排铺设;
- (2)混凝土连锁块软体排铺设;
- (3)袋装碎石垫层单元;
- (4)抛石垫层(水下);
- (5)抛石筑堤(水下)。

#### 3.1 软体排沉排铺设

砂肋软体排主要由土工织物排布、加筋带、砂肋

套和充填砂组成,分别起到抗冲反滤、增强整体性、固定砂肋、压重排水等功能,砂肋软体排具有良好的整体性和柔韧性,可适应不同的地形,能够在水流较缓的水下环境中保持相对稳定。

混凝土连锁块软体排则是利用土工织物缝接而成排布,再将混凝土预制板块通过丙纶绳绞接或绑扎,形成具有一定强度和整体性的压重防冲结构,适应水流相对较急区域。

上述2种软体排的根本目的都是实现压重防冲实现保沙固沙功能,其铺设是否满足设计要求直接影响了实际效果,因此需对以下2点进行检验:

- (1)沉排搭接宽度量测;
- (2)铺设范围量测。

根据《水利工程施工质量验收标准》(DG-TJ08-90—2021)<sup>[26]</sup>(以下简称“标准”),软体排的检验方法为“水下铺设,采用潜水探摸、设备量测”。

#### 3.2 袋装碎石垫层单元

袋装碎石垫层单元是一种用于水利工程和地基处理的结构,由土工织物制成的袋子和填充其中的碎石组成,其主要功能为固结加固、排水反滤以及保护隔离。其施工质量评定主要包括:碎石垫层厚度量测、垫层表面平整度量测和垫层基面坡度量测。

标准中,袋装碎石的铺设厚度检验方法为“检查施工记录观察、钢尺量测”。

#### 3.3 抛石垫层/筑堤工程

抛石垫层是通过抛填土石方料,依靠填筑体自重和施工机械压力将淤泥挤出基底范围;抛石筑堤则是通过抛填石料来形成堤坝结构,其原理也是利用石料的自重和压实作用,将软土地基中的淤泥挤出。两者皆为提高地基承载力,形成具有抗冲、消波能力的堤坝构筑物。其施工质量评定内容主要为轴线位置量测、抛石断面量测、堤顶宽度量测。

标准中,抛石筑堤工程的水下轴线位置检测方法为“经纬仪、GPS测量”;堤顶宽度和高程检验方法分别为“钢尺量测和水准仪等量测”。

可见目前在标准中,涉海工程的相关水下检测方法仍主要采用“水下探摸”形式。但人工潜水探摸检测存在不足之处,主要表现为以下4点:

- (1)涉海工程远离海岸线,水下可能存在强水流、暗流、漩涡等,人工潜水探摸风险极高;
- (2)对潜水人员专业性要求较高,需对水下结构的病害/检测要求有清楚认知;
- (3)对水体能见度要求较高,水体较为浑浊时肉

眼和水下摄像机的效果都是相对有限的;

(4)检测效率较低,受限于潜水员的体力和作业时间以及水下环境的可操作性。

水利工程施工质量验收推荐的传统方法已相对落后于当前的社会发展水平,应采用先进的检测技术以提高检验质量和效率,并同步减少检验工作过程中的潜在危险因素。

4 涉海工程新型水下检测技术与应用

4.1 多波束测深系统与应用

多波束测深系统在前文中已对其工作原理进行了简要介绍,以下将对其操作流程以及在圈围工程水下施工质量检测中的应用进行描述。

4.1.1 操作流程

4.1.1.1 设备固定

依据设备安装手册,将设备固定在检测平台(如测量船、无人船等),在正式测量前需测试设备工作状态,防止量测过程中出现故障,如图6所示。

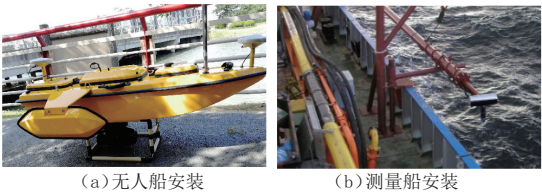


图6 设备固定

4.1.1.2 系统校准

惯性导航系统的准确性是保证测量结果有效的前提。首先测量船沿如图7所示的8字形轨迹航行,直到艏向达到系统要求的误差精度 $0.6^{\circ}$ 。部分设备型号的校准工作还包括横摇校准、纵摇校准、坐标校准等,以进一步提高测量精度<sup>[27]</sup>。在安全情况下操纵船只,连续画3个“8”字形(快速且紧凑)(见图7(a)),以安全允许的最快速度倒船保持航向30 min(见图7(b)),保持相同航向,以安全允许的最快速度前进(见图7(c))。重复(a)、(b)和(c)步骤,直至出现下一步骤。点击“取消”可恢复之前的值并退出。

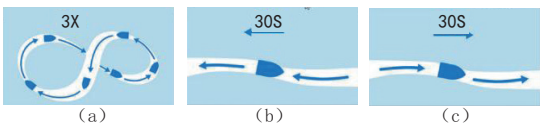


图7 系统校准

4.1.1.3 数据采集

测量船沿规划的测线对检测区域进行往复扫测。在测量过程中,确保测量船沿测线直线行驶是保证测量数据质量的关键因素。注意到,完成某段

区域测量后,需及时检查数据完整性,对缺漏部分进行补测,避免二次复工。

4.1.1.4 数据处理

利用如Hypack等专业软件将图像单元拼接在一起,再进行点云去噪处理,完成一级和二级噪声处理,确保最终得到的声学图像清晰且准确。

4.1.1.5 图像分析

根据降噪后的数据,通过回波强度、高程或其他综合方式进行渲染处理,得到相对直观可视的三维图像,再基于点云数据对水下结构目标进行量测与分析。

4.1.2 检测应用

4.1.2.1 软体排检测

如上文所述的5类水下施工内容,其中软体排沉排铺设中搭接宽度以及铺设范围可通过多波束测深仪进行精准量测。因多波束检测结果为三维点云数据,联合GNSS/RTK后每个数据点都带有地理空间的平面与高程坐标信息,因此,可将施工设计图与点云数据融合,进行精准检测,如图8所示。

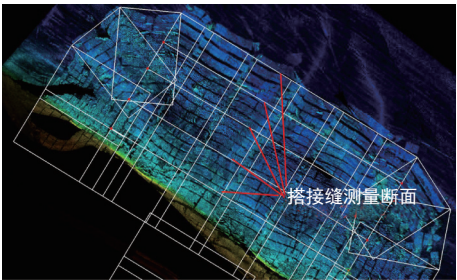


图8 水下软体排验收量测

4.1.2.2 袋装碎石垫层检测

多波束测深同样可应用于垫层和堤坝的部分检测项目中。袋装碎石垫层工程的质量评定中包含3个主要内容:垫层厚度量测、表面平整度量测和基面坡度量测。

首先,在袋装碎石抛投前,采用多波束对海床进行地形量测获得初始地形标高。随后,在袋装碎石垫层抛投后、产生浮泥/沙淤积前,采用多波束再对工后环境进行量测。则根据二次扫测结果可对表面平整度和基面坡度进行量测检验,再根据前后两次地形标高差可计算获得垫层厚度,完成检验工作。

4.1.2.3 抛石筑堤/抛石垫层检测

抛石筑堤和抛石垫层的质量评定中包含3个主要内容:轴线位置、抛石断面和堤顶宽度。与袋装碎石垫层检测方法相同,轴线位置和堤顶宽度可通过

工后扫测结果进行检验,抛石断面可通过工前工后对比进行检验,如图9所示。

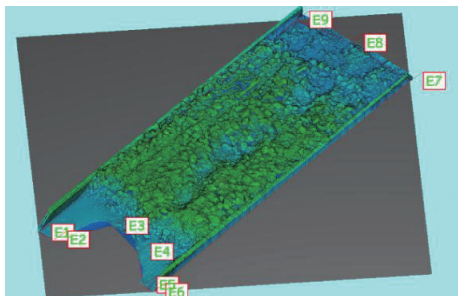


图9 抛石筑堤工后扫测图

#### 4.2 双频识别声呐与应用

双频识别声呐可发送高频和低频2种不同的声波束,其中高频声呐一般用于近距离、高分辨率的探测,低频声波用于远距离探测<sup>[20]</sup>。设备操作流程如下。

##### 4.2.1 设备安装

检查声呐主机、发射/接收换能器、电缆、甲板单元等部件齐全且外观无损坏;确认电源电压符合设备要求且电源稳定。将声呐设备安装在合适的载体上,如图10所示,确保其在水下作业时稳定。设备下水前连接声呐,点击校准按钮,校准压力传感器。



图10 水下机器人携带双频识别声呐

##### 4.2.2 目标探测

将水下机器人缓慢放入水中,根据水深及水域情况选择合适的投放长度。在实际操作中,通常首先采用低频声波寻找目标点,然后再切换为高频声波对目标进行细致探测。

##### 4.2.3 检测应用

双频识别声呐可在软体排铺设质量检测中开展实施,例如,在多波束检测结果中发现局部存在不清晰或未探明位置后,可采用水下机器人搭载双频识别声呐方式进行定点探摸。此外,该设备的检测结果虽然为二维图像,但通过计算解析同样可实现相对精确的量测,如图11所示。

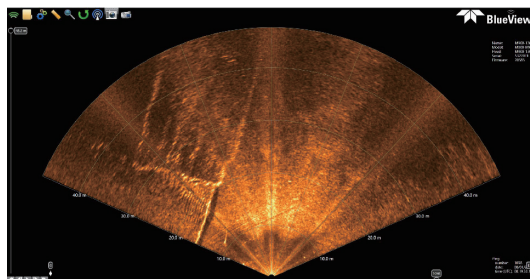


图11 双频声呐检测图像

#### 4.3 浅表地层剖面仪与应用

前文关于袋装碎石垫层、抛石筑堤和抛石垫层的质量评定中,采用多波束量测前提是“检测时间未发生浮泥或沙的淤积”,且欲完成厚度或断面的检测,需提前获得工前的三维地形。如此,质量验收阶段的检测工作是相对受限的。

##### 4.3.1 操作流程

###### 4.3.1.1 设备安装

检查浅剖仪主机、换能器、电缆、适配器、数据传输线等部件齐全且外观无损坏;将换能器通过连接设备与船体固定连接,保持指示方向与船头方向一致;将主机置于平稳牢固处并连接,避免船体振动产生数据断连;安装辅助设备包括RTK和姿态仪等,以提高测量精度。

###### 4.3.1.2 目标探测

探测前需对测量区进行分析并规划航线,确保测量断面能整体反映测区概况;进入目标测量区前点击数据采集,并实时查看地层剖面信息和导航信息。

##### 4.3.2 检测应用

浅表地层剖面仪可穿透一定深度范围内的海底沉积物,获得目标物抛投界面,可完成检测对象厚度或断面量测。然而,该技术在实际应用中也存在一些受限条件,主要集中在2个方面<sup>[24]</sup>。

###### 4.3.2.1 穿透性

浅剖仪穿透能力受海底沉积物特性影响较大。沉积物的密度、孔隙度和颗粒大小等因素会直接影响声波的传播和反射特性。密度越大、孔隙度越小、颗粒越大的沉积物,声波穿透能力越强,因此砂层的穿透性要优于淤泥层穿透性。欲提高其穿透性,则应选择频率更低波段进行发射。

###### 4.3.2.2 分辨率

浅剖仪分辨率与发射频率密切相关。高频声波能够提供更高的分辨率,但穿透能力较弱;低频声波则相反。以常见浅剖仪为例,Bathy-2010型号3.5 kHz

频率下分辨率可达8 cm, SES-2000采用非线性调频原理,最高分辨率可达5 cm。

在实地测试中,本文采用SES-2000型浅剖仪对水下抛石进行了断面检测,经一系列声波特征分析和降噪处理后,其检测效果相对较好,可获得抛石断面基本形态,如图12所示。

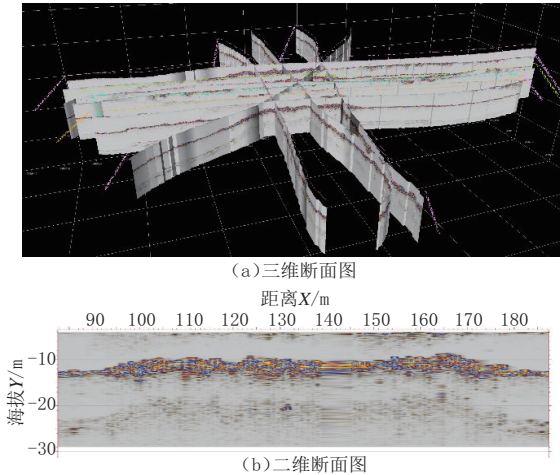


图12 抛石筑堤工后浅剖面图

综上所述,多波束测深系统、双频识别声呐和浅表地层剖面仪三种技术在涉海工程水下检测中各有优势和适用场景。多波束测深系统适用于大面积、高精度的地形量测;双频识别声呐在局部细节探测和二维图像解析方面表现出色;浅表地层剖面仪则在穿透沉积物进行厚度或断面量测方面具有独特优势。通过合理选择和组合这些技术,能够有效提高涉海工程水下施工质量检测的效率和准确性,为涉海工程的顺利实施提供有力保障。

## 5 结 语

水下检测是保证水下结构工程安全稳定运行的重要质量控制手段,但传统水下检测方法存在诸如效率低、效果不理想和信息难以复用等问题,新型水下检测技术相较于传统方法具有显著的优势:

(1)多波束测深系统具备提供高精度三维地形数据的能力,适用于大面积的水下地形测绘和施工质量检测;

(2)双频识别声呐在局部细节探测方面表现出色,能够对复杂环境下的水下结构进行高分辨率的二维成像;

(3)浅表地层剖面仪则能够穿透海底沉积物,获取目标物的抛投界面,为厚度和断面量测提供了新的解决方案。

这些技术的结合使用,能够有效提高涉海工程

水下检测的效率和准确性,减少人工潜水探摸带来的风险,为涉海工程的质量控制提供了有力的技术支持。在实际应用中,针对不同类型的涉海工程和检测项目,应进一步细化技术标准和操作规范,以确保检测结果的可靠性和一致性。随着海洋开发的不断深入,涉海工程的复杂性要求检测技术具备更高的适应性和灵活性,技术的集成化和协同化将成为主流趋势,以进一步提高其效率和精度;另一方面,智能化和自动化检测系统的开发将成为未来的研究重点,通过引入人工智能算法和机器学习技术,实现对水下检测数据的自动分析和诊断,减少人工干预,提高检测效率和准确性。。水下检测技术作为保障涉海工程安全运行的关键手段,其发展趋势和前景十分广阔,可为涉海工程的安全、高效运行提供更加坚实的保障。

### 参考文献:

- [1] 孙海信,张学波,田峰,等.水声探测前言技术与应用[M].北京:人民邮电出版社,2023.
- [2] 安鑫龙,顾继光,李元超,等.海洋生物礁类型、生态功能及其生态修复[J].生态学报,2023,43(19):7874-7885.
- [3] 胡爱彬,焦连强.近海工程施工难点与施工工艺研究[J].中国水运,2020,20(8):193-194.
- [4] 常永旭,徐鹏程,万波,等.水下无损外检测技术研究进展[J].科技通报,2024,40(4):1-5.
- [5] Zawawi N A, Liew M S S, Alaloul W S, et al. Non-destructive Testing Techniques for Offshore Underwater De-commissioning Projects Through Cutting Detection: A State of Review [C]//Kuala Lumpur: SPE Symposium, 2019.
- [6] 孟庆航.基于目标检测与点云技术的水下结构病害检测与分析[D].大连:大连海事大学,2024.
- [7] 周豪,张颖.水下综合检测技术在雁洲涌水闸安全鉴定中的应用[J].人民珠江,2023,44(增刊2):199-205.
- [8] Ryan T W, Hartle R A, Mann J E, et al. Bridge inspector's reference manual[R]. Washington, D. C.: Federal Highway Administration NHI, 2006.
- [9] 甘进,李世桢,王彬,等.工程结构物水下检测技术及其应用[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(3):499-506.
- [10] 黄钧,王国荣,李国进,等.焊接结构水下无损检测技术及其进展[J].无损检测,2005,27(4):207-211.
- [11] 谢琛,张秀梅,牛香芝,等.抽水蓄能电站压力管道放空的实施过程与关键技术环节分析[J].大坝与安全,2008,255(5):5-9.
- [12] 秦伟航.水中桩基础病害检查方法[J].交通科技与经济,2012,14(2):20-22.
- [13] 吴胜亮.某电站消力库水下检测技术应用[M].北京:中国三峡出版社,2012.
- [14] 罗居刚,张景奎.基于声呐成像的水下结构检测技术[J].江淮水利科技,2022,13(3):1-4.
- [15] 庞菲菲.基于水声传感网络的目标被动检测和定位技术研究[D].西安:西北工业大学,2019.
- [16] Sumithra G, Ajay N, Neeraja N, et al. Hybrid Acoustic System for

(下转第381页)