

## ◆特邀栏目◆

## 海洋石油单点系泊系统外检测技术及工程应用\*

刘晓燕<sup>1</sup>, 罗耀安<sup>2</sup>, 黄建福<sup>2</sup>, 房立祥<sup>2\*\*</sup>

(1. 广东石油化工学院, 广东茂名 525000; 2. 茂名新金明石油有限公司, 广东茂名 525000)

**摘要:**海洋石油单点系泊(Single Point Mooring, SPM)系统被广泛应用于海洋油气田开发,是海上石油运输的中转终端,采用合理的检测方案以保障其安全性是海洋石油工程领域备受关注的问题。声学探测、目视检测是常用的单点系泊系统外检测技术。本研究基于 EdgeTech 6205 组合式双频侧扫声呐与条带式多波束测深系统、Innomar SES 2000 参量阵浅地层剖面仪、国产 FIFISH PRO W6 水下机器人等调查装备,介绍了声学探测技术和目视检测技术在国内某单点系泊系统外检测中的应用实例。探测结果表明,该单点系泊区域地形整体平坦,局部受侵蚀冲刷影响,区域内有 6 条锚链沟发育,锚链沟深度为 1.0—4.5 m,锚链摆动小,浮筒稳定性较好;管道埋藏类型分为完全埋藏型、浅埋藏型、裸露型 3 类。通过综合分析对比,查明了锚链被大量生物附着、腐蚀速度加快的具体位置,提出了定期进行防腐蚀除锈维护的有效建议。

**关键词:**单点系泊系统;外探测技术;海底地形地貌;海底输油管道

中图分类号:P756 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)03-0604-09

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20231123.001

单点系泊(Single Point Mooring, SPM)系统被广泛应用于海洋石油工程领域,其功能类似于码头,能够系泊大型油轮,完成原油及成品油的装卸。其设计最大的优势在于具有风向标效应,允许系泊船体围绕单点浮筒做 360° 的风标旋转,使船体处于最小受力状态,有效减小风载、波浪及海流的影响<sup>[1-3]</sup>。然而,漂浮式海上石油生产存储设施(Floating Production Storage and Offloading, FPSO)自投入生产以来,发生过多起涉及单点系泊系统安全的事故<sup>[4]</sup>,除

台风等极端恶劣天气因素外,单点系泊系统区域的地质条件变化及自身部件的腐蚀老化是系统失效的主要原因<sup>[5]</sup>,因此,及时有效的检测及维护是单点系泊系统长久稳定运行的工作重点。

单点系泊系统常用的外检测方法包括声学探测和目视检测两类。声学探测具有探测范围广、效率高的特点,是目前海底管道及其系泊系统检测的主要技术,多波束测深系统、侧扫声呐、浅地层剖面系统等是常见的声学探测设备<sup>[6,7]</sup>。在目视检测技术方面,遥

收稿日期:2023-10-10

修回日期:2023-11-05

\* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA22050502)资助。

## 【第一作者简介】

刘晓燕(1970—),女,讲师,主要从事电子技术等方面研究,E-mail:lxlyya99@163.com。

## 【\*\*通信作者简介】

房立祥(1987—),男,工程师,主要从事单点系泊装置及油气管道运营管理研究,E-mail:flxiang333@163.com。

## 【引用本文】

刘晓燕,罗耀安,黄建福,等.海洋石油单点系泊系统外检测技术及工程应用[J].广西科学,2024,31(3):604-612.

LIU X Y, LUO Y A, HUANG J F, et al. External Detection Method and Engineering Application of Offshore Oil Single Point Mooring System [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3): 604-612.

控式水下机器人 (Remotely Operated Vehicle, ROV) 的出现为水下近距离观测提供良好平台, 利用 ROV 搭载光学摄像机及声呐系统成为近年来新兴的水下检测手段。本研究以某 30 万吨级单点系泊系统为例, 介绍船载多波束测深侧扫声呐、浅地层剖面系统以及 ROV 搭载光学摄像机、扫描声呐在系泊系统检测工作中的应用实例, 对比分析不同探测技术的优缺点, 这对单点系泊系统运行维护具有借鉴意义。

## 1 单点系泊系统

单点系泊系统主要分为转塔式、塔架式、单锚腿式、悬链锚腿式 4 类。悬链锚腿式系泊 (Catenary Anchor Leg Mooring, CALM) 系统是投入使用较早的一类单点系泊系统, 该系统建设在离海岸有一定距离的海域, 采用柔性缆或硬钢臂与船体连接, 解决了港口由于水浅无法停泊大型油轮的问题<sup>[8,9]</sup>, 其因具有投资少、建设周期短的优势, 成为技术成熟且成本低廉的主流原油装卸方案<sup>[10]</sup>。CALM 系统由系泊缆总成、浮筒、锚链组、水下软管、漂浮软管、海底管线、海底管汇、系泊缆等部分组成 (图 1)。浮筒一般由 6—8 根锚链与海底锚桩连接固定, 油轮或 FPSO 由系泊缆与浮筒连接, 油轮的系泊载荷通过系泊缆、浮筒、主轴承、锚链、锚桩传递到海底, 油轮、浮筒、软管、海底管汇、海底管道和陆地终端构成 CALM 系统的物流通道<sup>[11]</sup>。

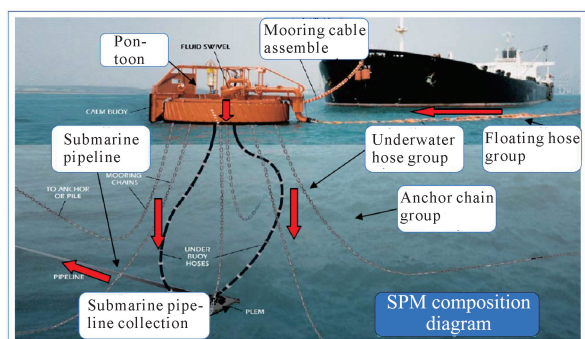


图 1 单点系泊系统 SPM 组成示意图

Fig. 1 Sketch map of SPM

本次检测的单点系泊海域在大地构造上属华南褶皱系, 主要构造线方向为东北—西南向, 地处副热带季风气候区域, 受季风、热带气旋、热带辐合带、副热带高压等天气系统的影响, 5—8 月盛行偏南风, 10 月至次年 2、3 月盛行东北风, 4、9 月一般为季风交替过渡期。本海域为不正规半日潮区, 单点系泊点平均潮差为 1.49 m, 潮流长轴为东北—西南向, 潮流流速一般小于 1 kn (1 kn=1.852 km/h)。单点系泊及其

管道处海底地形总趋势为自北向南倾斜, 整体海底平坦, 以泥质粉砂为主。根据原有管道路由测区调查结果, 调查范围内最浅点 (约 5.0 m) 位于登陆点附近, 海底最大深度为 25.8 m, 位于单点系泊南侧锚链沟附近。

单点系泊系统在使用过程中会出现各类故障, 自 FPSO 等海洋石油设施投入生产后, 先后发生了多起事故, 严重时甚至会导致海上油田停产, 其中锚链损坏是单点系泊系统失效的一个重要原因<sup>[5,12]</sup>。造成锚链损坏的主要原因包括海水对锚链的腐蚀、锚链与海底的摩擦损伤等客观因素, 因此对锚链的海底状态、水中状态进行有效检测和及时修复, 是单点系泊系统管理的重要一环, 对海上石油生产和储运系统的正常运转起着决定性作用。

## 2 外检测技术

当前单点系泊系统的外检测技术主要基于船载、ROV 搭载两类平台开展 (图 2), 检测的最终目的是确定锚链和其他设施的安全性, 检测锚链的腐蚀情况并确定需要维护部分的位置, 同时根据锚链周围的海底地形、地貌判断是否有影响海底管道及单点系泊系统生产的不利因素。船载测量主要通过搭载声学探测装备来完成。搭载的设备主要包括多波束测深系统、侧扫声呐、浅地层剖面系统等; 目视检测主要指利用 ROV 搭载高清摄像机及扫描声呐开展的一种检测手段。综合船载测量和目视检测两类调查结果, 可以查明检测范围内所有锚链及锚链冲刷沟 (包含锚链掩埋区域) 的状态特征, 检测海底管道的掩埋情况, 并对不同埋设深度的管道进行分类描述, 进而对单点系泊系统的整体安全性做出评价。下文将介绍以 EdgeTech6205 组合式双频侧扫声呐与条带式多波

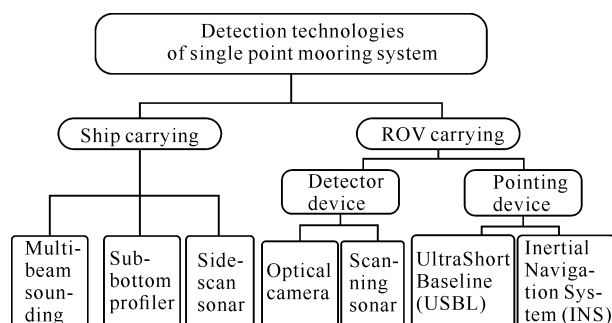


图 2 单点系泊系统检测技术方法分类

Fig. 2 Classification of single point mooring system detection technologies

束测深系统、Innomar SES 2000 参量阵浅地层剖面仪、国产 FIFISH PRO W6 水下机器人搭载水下光学摄像机和侧扫声呐在某单点系泊系统检测中的实例应用。

### 3 工程应用

#### 3.1 车载测量

车载测量设备主要为声学探测仪器。多波束数据可以展示海底的地形特征和局部起伏变化特征,侧扫声呐数据能直观显示海底的地貌特征,浅地层剖面数据能够展示海底地层特征及管线埋藏特征。

执行外业测量任务前,依据调查规范并结合调查区实际情况布设测线。为满足数据全覆盖的要求,以管道为路由由中心,以 30 m 间距布设 9 条平行于管道中轴线的主测线,进行多波束测深系统水深和侧扫声呐测量;以 50 m 为间距布设垂直于管道中轴线的横向测线,使用浅地层剖面仪进行探测,每条横向测线长度设置为 300 m。围绕单点系泊系统布设环形测线,以查明单点系泊系统锚链处地形地貌。作业过程中,在管道路由区域采用走航式调查,船速为 45 kn,主测线同步进行多波束测深系统地形调查和侧扫声呐地貌调查,同时使用 SVP-1000 声速剖面仪进行声速测量。结束后再进行横向测线的前地层剖面检测。外业测量结束后,通过 Caris hips & sips 11.4、SonarWiz 7、Surfer 等软件对探测数据进行处理,提取地形、地貌和地层结构等信息,并编制成图,再综合各种数据结果对单点系泊系统锚链组的安全状态进行评估。

##### 3.1.1 多波束测深系统

多波束测深系统主要用于海底地形的测量,能够发现由锚链摆动形成的锚链沟,反映锚链的在位状态信息。多波束测深系统由相互成一定角度的换能器阵列发射具有指向性的声波,到达海底后经过反射、散射后被换能器接收,根据海水中声速及传播时间计算目标探测距离<sup>[13,14]</sup>。多波束测深系统每次发射的声波能够覆盖一个条带的测量区域,每个条带的宽度是水深的数倍,按照布设好的测线通过走航式探测方案实现对海底的大规模连续观测,依靠换能器收发阵列正交形成的波束脚印回波信息提取地形特征。多波束测深系统结合声速剖面仪和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)完成水深测量、定位测量、海底地形图绘制,生成的三维图像用于高程异常点分析及人工设施的在位状态检测。

EdgeTech 6205 是新型组合式双频侧扫声呐与条带式多波束测深系统,根据用户具体使用需求,该系统有 230/550 kHz 或 550/1 600 kHz 换能器可选。其中 230 kHz 或 550 kHz 可作为多波束测深系统的工作频率。外业数据采集完成后,利用 Caris hips & sips 11.4 软件处理测深数据,将单点系泊系统海底区域检测数据绘制成三维地形图,能清晰地观察到锚链沟的位置及方向(图 3),并且可以根据回波时间差计算出锚链沟的深度。

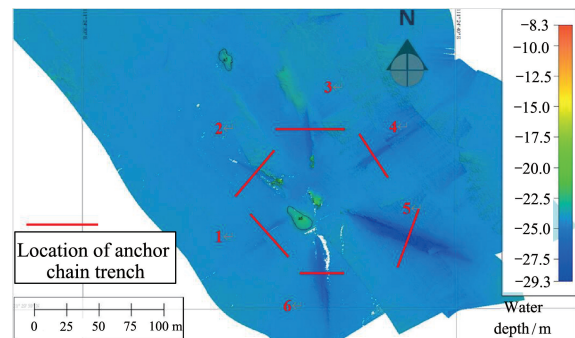


图 3 单点系泊区域海底地形图

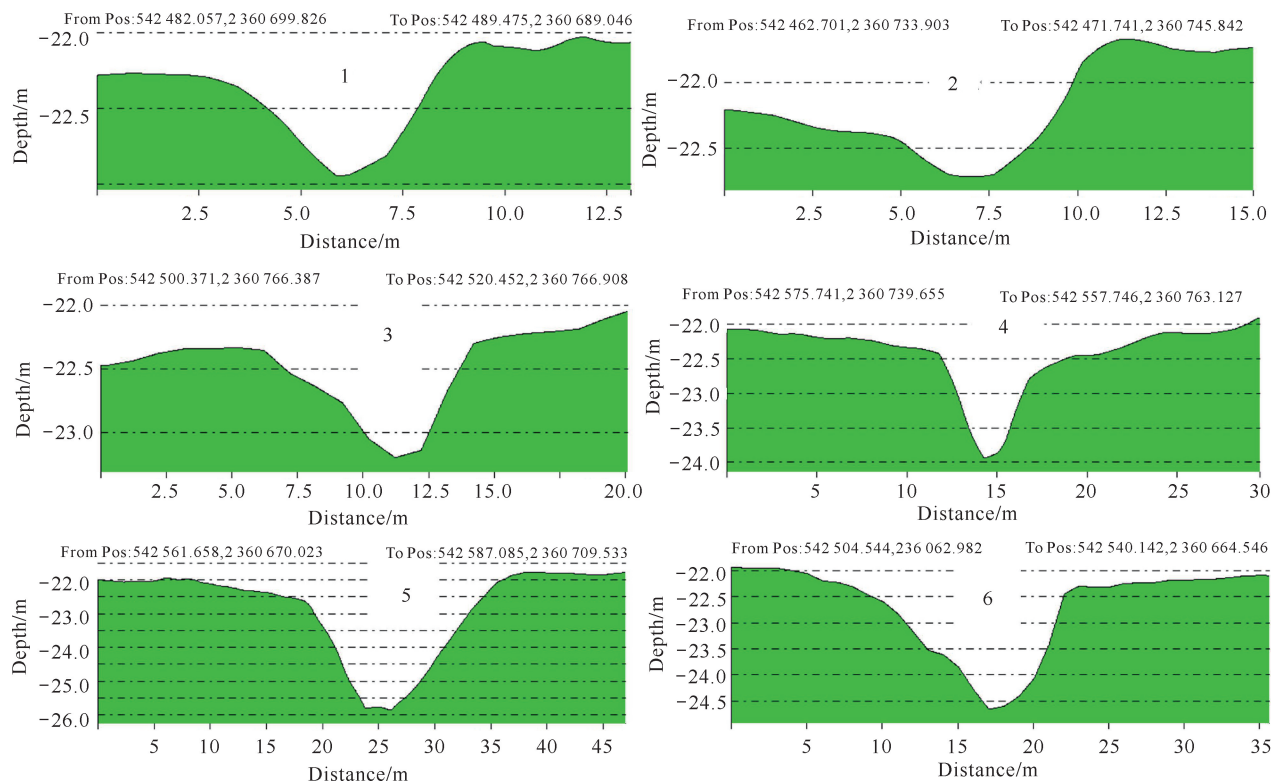
Fig. 3 Submarine topographic map of single point mooring area

在海底地形图(图 3)中存在 6 处明显的锚链沟,为了查明锚链沟的尺度规模及动态变化情况,取锚链沟的中段做横截剖面(图 4),锚链沟深度为 1.0—4.5 m。与往年数据对比,锚链沟处于一种缓慢的动态变化中,4、5、6 号规模一直较大,其中 4、6 号锚链沟长度、宽度基本稳定,说明锚链摆动幅度小且位置稳定,单点系泊系统未发生明显的位置偏移,锚链受力均匀,安全性能得到充分的保障<sup>[7]</sup>。

##### 3.1.2 侧扫声呐

侧扫声呐是一种以图像形态测绘水下地貌特征的仪器,其通过换能器阵列向垂直于航线两侧的海底发射窄波束扇形声波脉冲,根据声波回波时间及反射强度生成灰度图像。不同的材质对声波的反射强度不同,坚硬、粗糙的物体表面产生强反射,柔软、凹陷的物体表面会产生弱反射,因此不同的目标物会在图像上呈现出灰度值的差异,以此确定目标物的相对位置和形状,侧扫声呐已被广泛应用于海底地貌、管道和锚链等水下目标的检测<sup>[15]</sup>。侧扫声呐图像分辨率高,能够清楚地反映海床冲刷、泥沙堆积、人工设施等地貌特征,通过探测到的海底目标物存在位置及变化趋势,完成海底管道铺设情况调查,分析海底堆积物、海底露头等海底构造是否会给单点系泊系统安全性带来影响。





1—6 correspond to the anchor chain groove in Fig. 3

图4 锚链沟地形剖面图

Fig. 4 Profiles of anchor chain trench topography

外业调查完成后,利用 SonarWiz 7 软件进行影像后处理和声呐图像镶嵌。在地貌类型分类中,一方面根据侧扫声呐图像的灰度和形态,另一方面也参考了水声学中声波在海底不同介质中的反射、散射原理,以此分析本研究调查区域海底管道掩埋以及锚链沟冲刷情况。图 5 结果表明,单点系泊系统的 6 条锚链沟在侧扫声呐图像中同样清晰显现,与其在海底地形图(图 3)上特征一致。

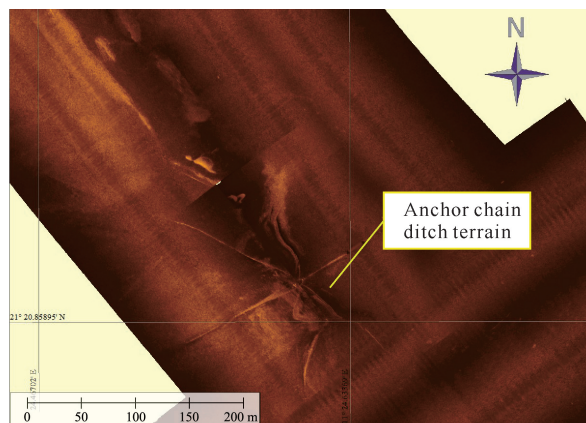


图5 单点系泊区域侧扫声呐海底地貌图

Fig. 5 Side scan sonar seabed topographic map of single point mooring area

### 3.1.3 浅地层剖面探测

浅地层剖面探测技术主要应用于海底浅层信息探测和海底掩埋目标调查,其最大优势是能够探测到掩埋物体的形态和埋深等信息<sup>[16]</sup>。声学参量阵技术是利用非线性声学现象原理<sup>[17]</sup>,换能器在主频附近发射两组频率稍微不同的高频声波,声波之间的非线性相互作用会产生频率很低的次频,利用次频获取地层剖面数据。参量阵声呐换能器发射的低频声波脉宽短、波束角小、波束指向性好,声波信号更容易识别。海底管道在浅地层剖面仪图像上表现为抛物线,通过抛物线顶点到海底面的距离可以判断管道的悬空高度或者掩埋深度<sup>[18]</sup>。

Innomar SES 2000 参量阵浅地层剖面仪作业水深为 1—400 m,最大穿透深度 40 m,最小分辨率可达 5 cm,在近海岸海洋工程测量中被大量应用。调查发现,调查区海底管道埋藏状态分为完全埋藏型、浅埋藏型和裸露型 3 种(图 6)。完全埋藏型管道埋藏深度大于 0.50 m,是目前单点系泊系统中管道的主要埋藏状态[图 6(a)];浅埋藏型主要指管道埋藏深度小于等于 0.50 m,表明虽然管道处于管沟中心,但是埋藏深度浅,掩埋不实,从管沟一侧掩埋,或只埋



管道上方部位,管沟未回填完全[图 6(b)];裸露型主要指未回填的管道部分,在浅地层剖面图上呈现直接裸露于海底的特征[图 6(c)]。浅埋藏型和裸露型管道回填剩余土料原地堆积,在管沟一侧形成高土垅,

对管道是个不利因素,后期容易受到海底潮流影响,可能会加重管沟掏蚀进而使得管道裸露或悬空,造成安全隐患,建议定期巡查检测,保证管道安全运行。

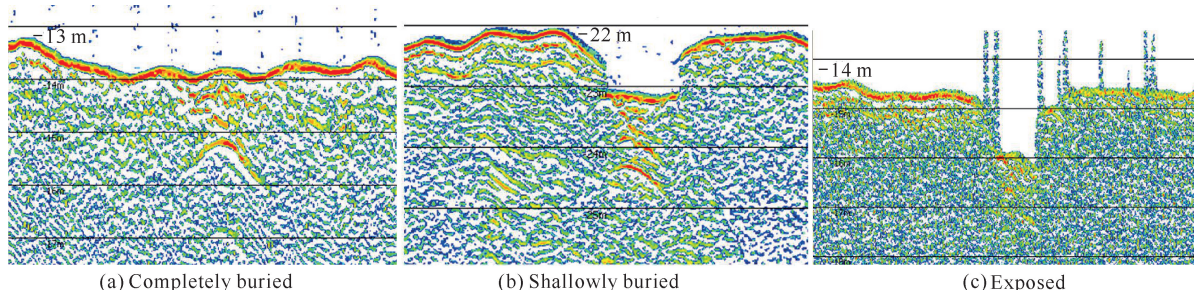


图 6 单点系泊区域海底管道浅地层剖面特征

Fig. 6 Shallow stratum section features of submarine pipeline in single point mooring area

### 3.2 目视检测

目视检测是使用光学成像设备在水下对锚链进行近距离观察的检测方式,ROV 具有作业时间长、下潜深度大、安全性高等优势,逐渐取代了潜水员水下作业的传统作业模式,成为当前目视检测的主流技术手段。

ROV 为缆控机器人,由船上控制系统、ROV 主体、水下作业系统 3 部分组成<sup>[19]</sup>。船上控制系统主要包括 ROV 收发系统、GPS 导航定位系统、超短基线定位系统<sup>[20-22]</sup>、数据传输存储显示软件硬件;ROV 主体包括框架、推进系统、照明系统、负载系统等;水下作业系统包括电子控制系统、声学/光学检测成像系统、机械臂等作业工具<sup>[23]</sup>。船上控制系统和水下作业系统由脐带缆连接,船上控制系统提供电力并控制 ROV 进行精细化作业,水下作业系统可搭载各类探测仪器,按照指令完成水下检测作业。目视检测通过 ROV 搭载光学摄像机、扫描声呐等设备,根据前期测量的初步结果进行 ROV 下潜作业,对单点系泊系统进行光学、声学成像,依据影像资料,勘察锚链的在位状态、被腐蚀和生物附着等情况。

#### 3.2.1 搭载光学摄像机

光学摄像机获取的图像数据直观易读,可用于锚链自身及其周围海洋环境的检测。以国产 FIFISH PRO W6 水下机器人为例,其工作深度可达 350 m,能够搭载市面上所有类型的成像声呐。自带的双摄像头有 100°的垂直视场角和 166°的水平视场角,有

效像素为 12 MP,视频分辨率可达 4 K UHD,配有 12 000 lm 的水下补光灯,能够在水质较好的场景中提供广阔的视野以及高清的图像和视频资料。该类型 ROV 能够完成锚链腐蚀、变形、涂层脱落、生物附着等问题的检测,以及对海洋生物群落、海底地形的观察。

#### 3.2.2 搭载扫描声呐

扫描声呐成像是由换能器发射脉冲信号,反射声波被换能器连续接收并记录目标信息,根据回波信号的时延和强度实现水下目标成像。扫描声呐具有设备体积小、效率高、成图直观的优势,可以依托 ROV 平台进行作业<sup>[24,25]</sup>。本研究搭载 BlueView BV5000 三维全景扫描声呐,尺寸为 10.5 in×9.2 in×15.4 in (1 in = 2.54 cm),净重 12 kg,工作频率为 1.35 MHz,理想工作范围是 1—20 m,分辨率可达 0.015 m,扫描声呐图像资料虽成像效果不如光学相机,但其具有不受海水浑浊度影响的优点,在水质不佳的情况下扫描声呐可代替摄像机完成锚链的跟踪检测,很大程度上弥补了光学摄像机的不足<sup>[19,26]</sup>。

ROV 水下作业结果表明,距离较远时,受到海水中悬浮颗粒物的影响,光学摄像机的成像效果不佳,需要根据扫描声呐图像对锚链进行路由跟踪,靠近锚链后光学摄像机的清晰度提高。从图 7 的可见光图像中可以看出锚链被大量生物附着,这必然会加快锚链的腐蚀速度,建议定期进行防腐蚀除锈维护,以提高锚链的安全性能。

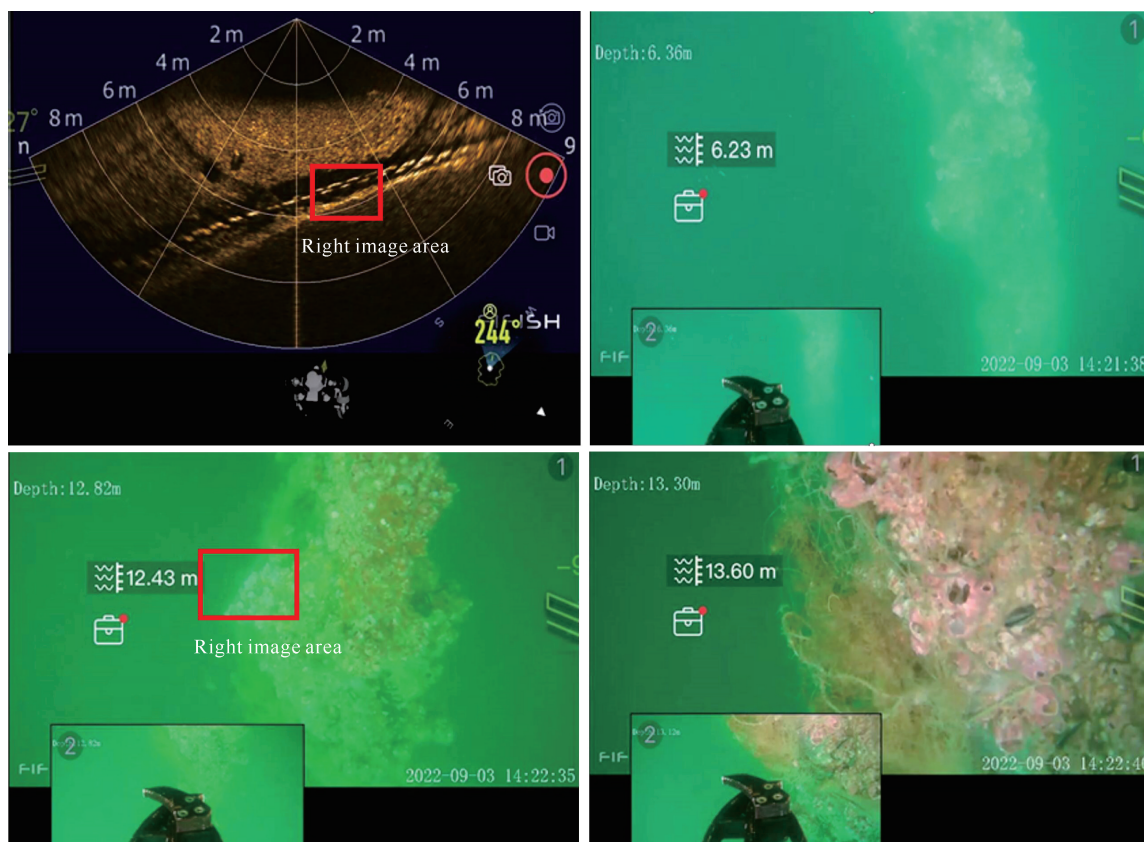


图7 ROV 搭载光学摄像机、扫描声呐锚链成像结果

Fig. 7 Imaging results of anchor chains using ROV mounted optical camera and scanning sonar

#### 4 技术对比分析

ROV 搭载光学摄像机、扫描声呐均有影像直观、检测精度高的优点,被广泛应用于锚链观测及海底地形探测。光学摄像机检测效果最为直观,检测数据不需要进行后期处理,影像的解析不需要太多的先验知识,不仅可以用于锚链跟踪摄影,还可以实时观察锚链的腐蚀损伤情况,缺点是对水质要求高,无法在浑浊水体中取得良好的探测效果;相比之下,ROV 搭载扫描声呐设备不受水体浑浊度影响,可以在浑浊水体中成像,但是缺少探测目标的定位信息。船载多波束测深系统根据获取的声波传输时间及声速数据生成三维地形图,完成锚链沟的位置检测及深度计算,测量精度较高。侧扫声呐根据回波时间及反射强度生成灰度图像,图像分辨率高,能清楚地展示海底地形精细地貌特征。多波束测深系统及侧扫声呐数据需要用到专业的数据后处理软件,对数据进行校正需要有专业的知识背景,且处理时间长,最终的成果也需要专业人员进行解读。

光学摄像机、多波束测深系统和侧扫声呐设备都只能完成裸露锚链、管道及其周围地形的检测,对于

掩埋在海底沉积物中的锚链及管道则无法探测。浅地层剖面仪可以对掩埋管道进行检测,参量阵技术利用次频提供高分辨率的地层剖面数据,可以查明管道的裸露、埋藏特征,揭示管道的海底埋藏状态,缺点是只能完成剖面检测,无法对目标物体进行连续观测,存在数据空白区域。在实际作业中,一般会采取侧扫声呐搭配浅地层剖面仪对管道进行联合检测,在侧扫声呐图像中根据灰度值的差异检测出裸露管道位置及其铺设走向,结合浅地层剖面数据记录其埋藏深度。未回填段管道的侧扫声呐图像和浅地层剖面仪图像特征明显[图 8(a)],因管道铺设而形成的管沟人工地貌在图像上有清晰的体现;回填段管道经过自然回淤、海底潮流冲刷,地形已趋于平坦[图 8(b)],在侧扫声呐图像中无法提取有效特征来判断管道走向及埋深,因此要依靠浅地层剖面仪对此类管道进行多处信息采集,探测埋深的同时记录管道位置,依据管道铺设复杂程度调整检测间距,保证准确度的同时兼顾效率,完成管道铺设走向和埋深的检测。

因此,为完成单点系泊系统的全面检测,需综合运用上述技术手段,优势互补,才能对单点系统系泊的运行、维护提出有效建议(表 1)。



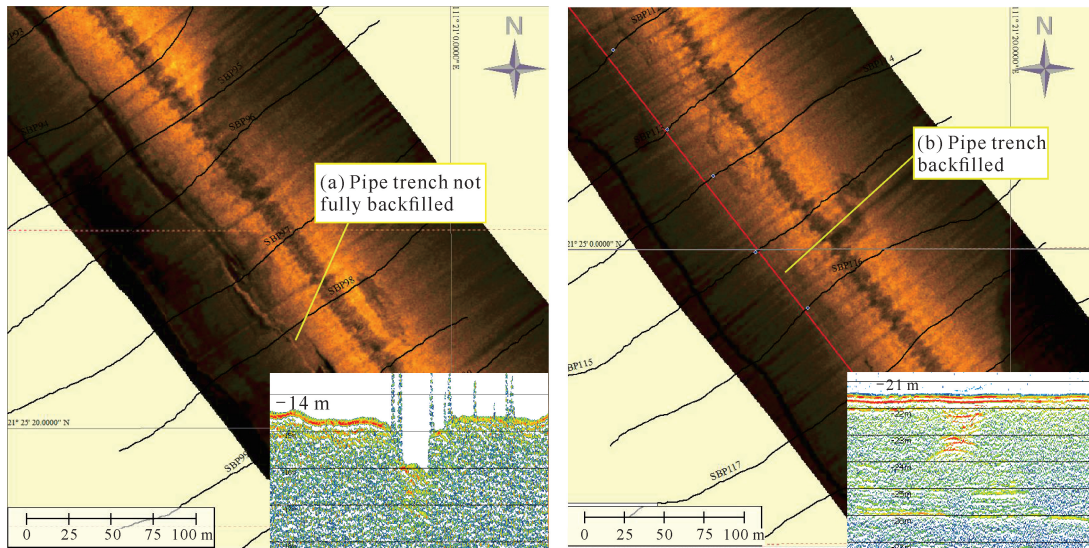


图8 海底管道联合检测结果

Fig. 8 Joint inspection results of submarine pipeline

表1 单点系泊系统常用检测技术对比

Table 1 Comparison of common detection techniques for single point mooring system

检测技术 Detecting technique	原理 Principle	优点 Advantage	缺点 Disadvantage
ROV mounted optical camera	Optoelectronic imaging	The image is intuitive and easy to understand	It is greatly affected by water quality and the detection distance is short
ROV mounted scanning sonar	Differences in acoustic reflection	High-resolution images can still be obtained in turbid water	Low accuracy of positioning information
Multibeam sounding on board	Differences in acoustic reflection	The detection efficiency and precision is high, and the result is intuitive	Unable to detect buried pipelines and anchor chains
Side scan sonar on board	Differences in acoustic reflection	The image is intuitive, high resolution and wide scanning width	Unable to detect buried pipelines and anchor chains
Sub-bottom profiler	Differences in acoustic reflection	It can detect buried pipelines and anchor chains	The detection efficiency is low and there is a data blank area
Divers work underwater		Intuitive observation at close range	Underwater operation is risky

从表1可以看出,各方法对单点系泊系统的检测都有其优势及缺点,要结合探测区域的特点及作业任务,综合考虑精度要求和工作成本,完成相应方案的选择。其中,检测时间与检测范围的效率比、检测精度是重点考虑的内容。多波束测深系统和侧扫声呐以垂直于航迹方向的波束开角进行探测,每条测线都可以获取条带式检测数据,检测效率较高,但随着探测区域水深的增加,条带数据的覆盖范围随之扩大,相对精度也会降低,因此船载多波束测深系统和侧扫声呐适用于大规模海底地形检测及管道铺设状态调查。当检测目标尺度较小时,多波束测深系统和侧扫声呐不能完成相应精度的检测需求,可以采用ROV搭载成像设备进行近距离检测来完成锚链腐蚀状态调查,近距离观测有着极高的检测精度,但同时又存

在可视区域较小、检测效率低的缺点。当探测单点系泊系统周围海底地形时,采用船载方式搭载多波束测深系统、侧扫声呐及浅地层剖面仪进行检测,作业效率高、成本低,基本可以达到检测目的并满足精度要求。对单点系泊系统的锚链则采用潜水员作业或者ROV搭载探测设备进行检测。综合考虑成本、效率及适用性,采用最多的工作方式是“船载+ROV”的检测方案<sup>[27]</sup>。

## 5 结论

声学探测技术是当前单点系泊系统及其海底管道应用最为广泛的检测方式,其中多波束测深、侧扫声呐、浅地层剖面探测技术已被大量应用。ROV搭载光学摄像机和扫描声呐使得单点系泊系统锚链和



管道的赋存状态检测更加准确。外业调查前要根据实际情况选择合适方案,可将多种技术结合使用、相互印证,以降低外界环境因素的影响,提高检测准确性和精度,为单点系泊系统的安全运行做好保障。

#### 参考文献

- [1] 王伟,李牧,刘学涛,等. 基于实测数据的单点系泊系统钢缆触地分析[J]. 船海工程,2023,52(2):11-14.
- [2] 古才荣. 茂名单点系泊系统接卸超巨型油轮的安全论证[J]. 安全、健康和环境,2006,6(6):16-19.
- [3] 纪志远,董宝辉,刘波. 单点系泊系统设计研究[J]. 石油和化工设备,2022,25(2):53-57.
- [4] 黄佳,范模,王忠畅,等. 南海单点系泊系统故障分析[J]. 船海工程,2015,44(5):88-92.
- [5] 陈捷俊,周莉. FPSO 单点系泊系统风险与检验[J]. 石油工程建设,2014,40(4):24-28.
- [6] 张永明,石晓伟,毕建强,等. 声波探测技术在海底输油管道检测中的应用[J]. 海洋测绘,2014,34(1):65-67.
- [7] 张建兴,宋永东,栾振东,等. 声学探测技术在海底管道外检测中的应用[J]. 广西科学,2020,27(3):217-224.
- [8] 包建平. 悬链线式系泊系统测量技术研究 with 实测分析[D]. 大连:大连理工大学,2014.
- [9] 田凯,杨益涵,蓝天,等. 考虑动态响应的悬链浮筒式单点锚泊系统恢复力分析[J]. 石油工程建设,2020,46(S1):157-160.
- [10] 刘帅,蔡铮,王亮,等. CALM 式单点系泊系统完工调试与检查[J]. 现代工业经济和信息化,2020,10(4):123-124.
- [11] 周楠,董宝辉,李俊汲,等. CALM 单点系泊设施设计要点[J]. 海洋工程装备与技术,2020,7(6):425-429.
- [12] 王火平,陈道毅. 南海深水 FPSO 系泊锚链腐蚀原因分析及强度预测[J]. 中国海洋平台,2021,36(6):84-89.
- [13] 杨阳,李东德,芮建明. 实时三维多波束声呐在海底管道勘测中的应用[J]. 水道港口,2021,42(6):820-823.
- [14] 陈士杰. 海底管道探测与三维可视化技术的研究与实现[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [15] 曹兰杰,陈小华. 声呐与多波束测深技术在海底管道检测中的应用[J]. 现代测绘,2022,45(6):57-60.
- [16] 杨国明,朱俊江,赵冬冬,等. 浅地层剖面探测技术及应用[J]. 海洋科学,2021,45(6):147-162.
- [17] 宋永东,杨慧良,栾振东,等. SES-2000 浅地层剖面仪在福建 LNG 海底管道检测中的应用[J]. 海洋地质前沿,2020,36(5):73-77.
- [18] 刘程程,刘晓,曾宇阳,等. 基于超声回波法的可变径海底石油管道溢油检测方法[J]. 当代化工研究,2023(5):53-55.
- [19] 张震. 基于 ROV 搭载技术的综合水下检测应用[C]// 中国水利学会. 中国水利学会 2021 学术年会论文集第三分册. 北京:[s. n.],2021:289-294.
- [20] 余航,岳长青,何文蔚,等. 综合导航技术在 ROV 勘探作业中的应用[C]// 石油地球物理勘探编辑部. 2022 年中国石油物探学术年会论文集(下册). 海口:[s. n.],2022:41-43.
- [21] 刘静. 水下海管检测机器人组合导航定位技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020.
- [22] 李学成,谢阳光,张舸,等. 基于实测数据回放的 ROV 导航定位系统研究[J]. 导航定位与授时,2023,10(1):84-91.
- [23] 刘芳平,黄煜宗,叶俊聪,等. 深海作业型 ROV 系统概述及展望[J]. 船舶物资与市场,2021,29(10):43-46.
- [24] 侯斌,张旭,林福宽,等. ROV 在桥梁水下桩基检测中的应用前景与关键问题思考[J]. 公路,2023,68(5):166-170.
- [25] 刘振方,朱友生,陈冠军. 海底管道探测技术应用[J]. 中国海洋平台,2019,34(3):1-7,54.
- [26] 黄必桂,雷方辉,李家钢,等. 海洋石油平台附近已建海底管道探测方法概述[J]. 中国海洋平台,2016,31(3):1-6.
- [27] 陈冠军,郝高建,刘在科,等. 海底管道在位状态调查实践[J]. 海岸工程,2020,39(4):287-296.

# External Detection Method and Engineering Application of Offshore Oil Single Point Mooring System

LIU Xiaoyan<sup>1</sup>, LUO Yao'an<sup>2</sup>, HUANG Jianfu<sup>2</sup>, FANG Lixiang<sup>2\*</sup>

(1. Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong, 525000, China; 2. Maoming New King Ming Petroleum Co., Ltd., Maoming, Guangdong, 525000, China)

**Abstract:** The Single Point Mooring (SPM) system of marine oil is widely used in the development of offshore oil-gas fields and serves as a transfer terminal for offshore petroleum transportation. Ensuring the system safety by adopting a reasonable detection scheme attracts increasing attention in petroleum engineering. Acoustic detection and visual detection are commonly used external detection technologies of the single point mooring system. This paper presents the applications of acoustic detection and visual detection in the external detection of single point mooring systems with EdgeTech 6205 dual-frequency side scan sonar with trip multibeam system, Innomar SES 2000 parametric sub-bottom profiler, and FIFISH PRO W6 underwater robot made in China. The detection results showed that the topography of the single point mooring area was generally flat. Under the influences of erosion and abrasion, there were six anchor chain trenches developed within the area, which showed the depths ranging within 1.0–4.5 m, minimal swing of anchor chains, and good stability of the buoy. The buried pipelines can be classified into three categories: completely buried, shallowly buried, and exposed. The comprehensive analysis and comparison located the position where anchor chains were heavily attached by marine organisms and demonstrated accelerated corrosion. Finally, recommendations for periodic corrosion treatment and rust removal were proposed.

**Key words:** single point mooring system; external detection technology; seabed topography; submarine oil pipeline

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>