

# 声学探测技术在海底石油管线铺设后调查中的应用

王文龙<sup>1</sup>, 熊指南<sup>2</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2. 天津市陆海测绘有限公司, 天津 300191)

**摘要:** 海底石油管线铺设后可能多会出现不同程度的损伤、变形、冲刷、偏移、悬跨等情况, 这通常是铺设过程中管线受到物理、化学、机械等因素的影响造成的。为避免作业风险和海洋环境污染, 需要在管线铺设后对其铺设状态进行完工后调查, 以便及时了解海底管线的实际情况, 并根据调查结果采取相应的维护措施。本文根据管线后调查的工作需求, 从声学探测技术的工作原理出发, 研究并比较分析了 4 种声学探测技术的优势与局限性, 提出在海底管道检测时将各种探测手段配合使用, 使各手段“取长补短”, 可有效提高探测效率。并利用工程实例验证方法的有效性与可行性; 在实例验证过程中, 还明确给出了相关数据的处理分析方法, 得出将多种声学探测设备得到的数据进行综合分析并相互校核, 可有效提高测量数据精度。结果表明应用水声探测设备开展后调查的方法同时满足准确和高效率要求, 可有效支撑海底管线铺设后状态评价工作。

**关键词:** 声学探测技术; 海底管线; 完工后调查; 状态评价

**中图分类号:** P733.23; P75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2021)07-0110-11

**DOI:** 10.11759/hyxx20210302002

在海水中, 光波和无线电波衰减较快, 传播距离有限; 与它们相比, 声波在海水中的传播性能更好, 水声技术被广泛应用于海洋水下目标探测的工程实践中, 海底石油管线铺设状态后调查即是其重要的应用领域之一。铺设后裸露的海底石油管线会受到海水冲刷, 加速管线的磨损; 管线悬空, 会加速架空处的变形和材料疲劳, 加速管线的断裂和破损; 管线路由不当, 经过了基岩区等不良地质区域, 同样会加剧管线磨损<sup>[1]</sup>。因此, 管线的裸露、悬空、不当路由均是铺设过程中需避免的。但海底石油管线在铺设过程中受到复杂海洋环境的影响, 布设后管线的实际路由与设计路由会有所偏差, 其偏差可能会超出安全作业允许的范围; 另一方面, 海底管线周边精确的海床状况和海底管线的埋深及裸露情况, 也是管线日后维护和运行方案制定的必要依据。因此在管线布设后, 对其自身及周边海底环境的真实状态进行后调查是必要的工程环节。

目前, 声学探测技术凭其探测效率高、经济成本低等优势, 仍是国际上常用的海底管道安全检测的方法。为同时满足准确和高效率的要求, 通常需配合使用多种探测仪器; 同时在探测资料后处理与解译环节, 多解性和不确定性也是声学探测设备获取资料常遇到的问题, 使得资料无法真实反映管道的在位信息。现行的《海底电缆管道路由勘察规范》、《海

洋工程海底地形测量规范》等规范标准, 检测技术、检测成果各不相同, 尚不能满足当前海底管道日常运维服务的需要。本文提出在海底管道检测时将各种探测手段配合使用, 使各手段“取长补短”; 在进行数据处理时, 将多种声学探测设备得到的数据进行综合分析, 对各项探测结果进行相互检核, 解决单一调查设备探测资料的多解性问题, 可有效提高测量数据的精度。

本文分析了测深仪、侧扫声呐、浅地层剖面测量仪、声速剖面仪的技术实现方式, 并分析各设备在海底石油管线铺设状态后调查的工程实践中的长处与局限性, 进而得出各设备配合使用, 以充分满足管线铺设状态后调查工作的方法<sup>[2-5]</sup>。

## 1 仪器原理与技术特点分析

### 1.1 测深仪

测深仪是利用超声波遇到介质会产生反射的原

收稿日期: 2020-07-27; 修回日期: 2021-04-08

基金项目: 高技术船舶科研项目: 东方 1-1 气田水下生产系统集成技术工程示范(2019GXB01-08)

[Foundation: High-tech Ship Research Project: Engineering Demonstration of Subsea Production System Integration Technology of Dongfang 1-1 Gas Field, No. 2019GXB01-08]

作者简介: 王文龙(1983—), 男, 河南商丘人, 高级工程师, 主要从事海洋工程研究, E-mail: wangwl1@cnooc.com.cn

理来测量水深的仪器<sup>[6-7]</sup>, 测量时借助换能器发射超声波, 超声波在水中传播遇到海底后, 发生反射、透射和散射, 反射回来的回波被换能器接收, 通过测量发射波及反射波的时差来完成测量。根据回声发射技术特点, 可分为单波束测深仪和多波束测深仪。其测量过程和原理可表示为:

$$S = V \times t / 2, \quad (1)$$

其中,  $V$  代表声波在水体中的平均传播速度,  $t$  代表换能器发射和接收到回波的时间间隔,  $S$  代表声波的单程旅行距离, 即换能器到海底的距离<sup>[6-8]</sup>。换能器到水面的距离可通过探头杆的刻度读出, 加上换能器到海底的距离, 即为所测的水深<sup>[6-7]</sup>, 如图 1、图 2 所示。该类设备既具有传统的模拟记录功能, 又拥有先进的 DSP(数字信号处理)技术, 同时能在水下对水底目标进行跟踪探测, 并且受恶劣水文环境和复杂地貌的干扰小, 探测精度高, 得到的水声数据真实稳定可靠。通常采用标准的 RS232 接口可方便地与计算机、涌浪补偿器、GPS 等测量设备相连接, 实现对水深的自动化实时精确涌浪改正。

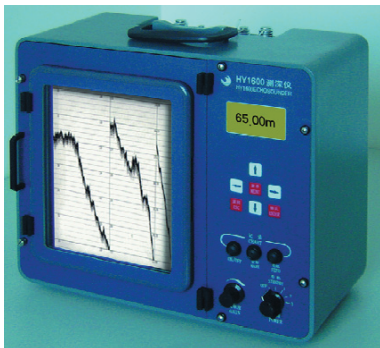


图 1 测深仪  
Fig. 1 Sounder

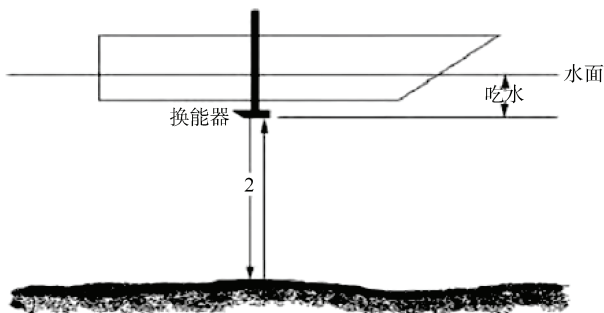


图 2 超声波回深测深示意图  
Fig. 2 Schematic of supersonic echo sounding

采用测深系统进行管线裸露目标探测, 能对精确寻找管线, 给出坐标位置, 并展示周边的海底面

状况, 可用于管线路由及其周边底质情况的勘测, 可清晰分辨铺设后悬空的管线目标, 但装备的探测能力受水深影响较大。

## 1.2 侧扫声呐

侧扫声呐系统利用回声测深原理探测海底地貌和水下物体的设备, 主要用于海底成像, 如图 3。又称旁侧声呐或海底地貌仪。侧扫声呐采用拖曳法测量, 工作时由拖鱼两侧的换能器基阵先发射一定频率的电脉冲, 然后转换成声脉冲向两侧海底发射, 声波在海底或水中物体传播时会产生反射并按原传播路线返回, 换能器将接收到的回波信号转换成一系列电脉冲, 然后经过处理显示在显示器的一条横线上, 每一次的回波数据都转换成一条一条的横线, 有序排列后就形成了反映海底地貌的声学图像<sup>[9-13]</sup>。依据声图像的灰度变化, 对海底地貌的起伏变化状况进行清晰地判断, 并分析图像不同纹理判读底质类型, 还可通过分析目标阴影及尺度判读海底管线的出露情况。该设备接收的是声强信号, 利用成像软件可以给水下地物更好的视觉表现效果。



图 3 侧扫声呐  
Fig. 3 Sidescan sonar

设备一般内置的艏向设置、横摇和纵摇校正保证拖体的准确定位。下图 4 为侧扫声呐测量目标物高度的几何关系图, 图中  $A$  为拖鱼深度,  $B$  为拖鱼到海底的高度,  $C$  为拖鱼到目标物的斜距,  $D$  为声图阴影区长度,  $E$  为目标物的高度。由相似三角形原理可得, 目标物的高度  $E = D / (C + D) \times B$ <sup>[9-10]</sup>。

该设备的优点是可以利用影像方便准确地进行地物判别, 且设备的使用不受水深的影响。其局限性是获得的是水下影像; 越向两侧延伸, 影像变形会越明显; 无法获得水深数据, 且定位精度相比于多波束测深设备较差, 无法获取海底管线的准确路由及其周边的准确地形位置信息。

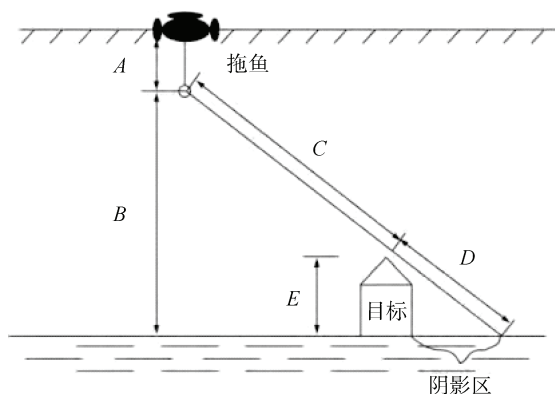


图4 侧扫声呐几何关系图

Fig. 4 Geometry diagram of the sidescan sonar

### 1.3 浅地层剖面仪

当前浅地层剖面测量设备主要借助于参量阵技术(又称非线性技术, 差频技术)得以实现<sup>[14-15]</sup>, 由于在高压下声波传播具有非线性特性, 采用两组频率接近 100 kHz 的高频换能器作为主频进行发射, 两组高频声波信号相互作用, 会产生新的、频率很低的声波, 称为次频<sup>[14-15]</sup>, 参量阵技术就是利用这种次频来穿透地层, 提供剖面数据, 如图 5 所示。假设海底具有多层结构, 将海底不同界面的岩石密度用  $\rho$  表示, 声波传输速度用  $c$  表示, 当声波由换能器发射到海底及以下界面时, 会产生反射和透射, 声波在海底不同界面形成的反射层次都会被换能器接收, 其反射系数  $R$  可通过式(2)计算得出<sup>[14-16]</sup>, 如图 6 所示。

$$R = \frac{\rho_2 C_2 - \rho_1 C_1}{\rho_2 C_2 + \rho_1 C_1} \quad (2)$$

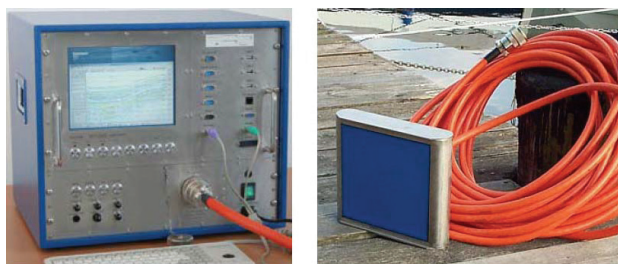


图5 浅地层剖面仪

Fig. 5 Sub-bottom profiler

地表的反射强度与相应的反射系数  $R$  呈正相关关系。浅地层剖面仪通过接收声波在海水和沉积层传播过程遇到声阻抗界面产生的反射信号, 得到海底浅部地层结构和构造等信息, 通过声学剖面图可以反映海底地质情况和管线赋存状态<sup>[14-23]</sup>。主要用于探测

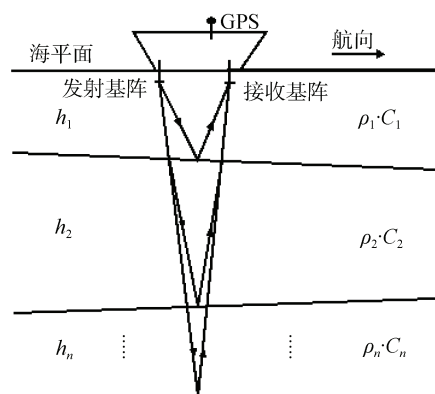


图6 浅地层剖面仪工作原理

Fig. 6 Sub-bottom profiler fundamental diagram

管线的埋设深度和位置, 也可探测管线的裸露和悬空情况, 特别对于新埋设的管线探测效果更佳<sup>[23-27]</sup>。

相较于测深仪和侧扫声呐, 浅地层剖面仪使用更低频率且更强能量的声信号, 信号在各个声速界面上形成反射, 水听器接收回波信号, 对信号进行分析后即可获得声学地层图像。

### 1.4 声速剖面仪

此类设备一般采用环鸣法直接测量声信号在固定的已知距离内的传播时间进而得到声速<sup>[28]</sup>, 用于矫正测深仪、浅地层剖面设备的声速剖面, 如图 7 所示。在管线后调查过程中, 用于精确分析勘测海域的声场环境, 配合其他声学设备使用。



图7 声速剖面仪

Fig. 7 Sound velocity profiler

## 2 设备应用方法

管线后调查需查明管线区域海底环境, 包括: 水深、地形、地貌。海底管线路由、埋深及裸露情况是后调查的重要内容。调查结束后将调查结果归纳整理, 评估海底管线的安全状况, 支撑海底管线的安全生产和后期维护等工作。根据前文所分析的 4 种水声探测设备的技术特点, 主要依据《海洋工程地形测量规范 (GB 17501—2017)》、《海底电缆管线路由勘察规范 GB/T 17502—2009》、《海道测量规范 GB 12327—



1998》、《水运工程测量规范 JTS 131—2012》、《全球定位系统(GPS)测量规范 GB/T 18314—2009》、《海洋调查规范 GB/T 12763—2007》、《港口工程技术规范(1987)》、《海上平台场址工程地质勘查规范 GB/T 17503—2009》、《测绘作业人员安全规范 CH 1016—2008》、《测绘成果质量检查与验收 GB/T 24356—2009》等标准规范,设计如下设备应用方法,以完成后调查工作,流程图如图 8 所示。

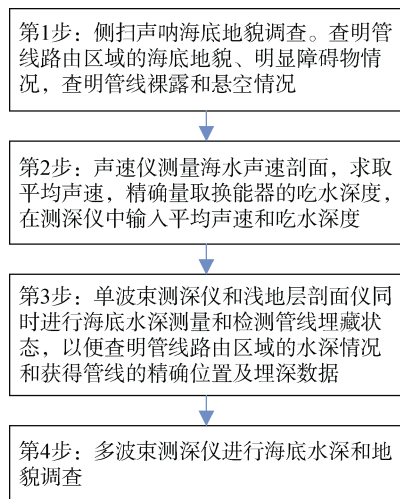


图 8 应用方法流程图

Fig. 8 Flowchart of the application method

第 1 步：侧扫声呐海底地貌调查。查明管线路由区域的海底地貌、明显障碍物情况；查明管线裸露和悬空情况。以海底管道为中央线，平行于中央线共布设 2 条声呐测线，测线距路由中央线的距离需保证条带间的覆盖重叠率达到 100%，实现海底管道全覆盖扫测。选取合适的高低频量程，测量中航速保持在 4 节左右，保证声呐图像清晰。

第 2 步：测深仪每天作业前，使用声速仪对海水声速剖面进行测量，并计算得出平均声速，精确量取换能器的吃水深度，在测深仪中输入平均声速和吃水深度。为保证测量精度，在整个测量过程中，根据水深变化实时调整仪器增益<sup>[29, 41]</sup>。

第 3 步：单波束测深仪和浅地层剖面仪同时进行海底水深测量和管线埋藏状态检测，以便查明管线路由区域的水深情况和获得管线的精确位置及埋深数据。单波束测线以海底管线为中央线，垂直于中央线布设管线探测测线，其中间点在路由中心线上；浅地层剖面仪以海底管线为中央线，垂直于中央线布设管线探测测线，其中间点在路由中心线上；发现悬跨海

管位置，进行浅地层剖面仪加密探测<sup>[30-34]</sup>。

第 4 步：多波束测深仪进行海底水深和地貌调查。多波束测线以海底管线为中央线，平行于中央线布置多波束测线，测线间距按实际水深深度的 2.5 倍布设，立管两端各向外延长；检查线测线：垂直于主测线，检查线总长度大于多波束主测线长度的 5%<sup>[35-38]</sup>。

### 3 方法应用实例

以我国南海某油气田群中的一条输油管线后调查为例，检验本文提出的水声探测设备应用方法在后调查中的应用效果。工程实施海域海底地形平坦简单，区内水深约 64~70 m；海底表层沉积物主要为陆源碎屑堆积，颗粒较细，主要为淤泥质粉质黏土、粉砂和细砂。本次作业于 2018 年 10 月启动，4 个测量人员、1 条测量船同时作业，历时 7 d。海底管线检测工程中的物探调查作业使用 WGS-84 坐标系；采用当地理论最低潮面，潮位改正采用预报潮位；使用导航定位软件 Hypack 2008 的导航处理模块处理导航数据；地域图由水深数据导入 CARIS HIPS and SIPS 7.0 软件，经后处理后生成；所有裸露及悬空状态下的数据由侧扫声呐、浅地层剖面仪和多波束测深仪数据提供，作为管线状态分析依据；在管线资料后处理与解译前，首先识别浅地层剖面图上的干扰波，去除影响管线判读的假信号，然后根据声波反射带回的地层信息对海底地层进行层序划分，结合测区资料判读海管在位状态，计算海管埋藏深度<sup>[39-41]</sup>。

#### 3.1 仪器设备选择

本次调查使用的单波束测深仪为无锡海鹰加科公司生产的 HY1600 精密浅水回声测深仪；多波束测深仪为美国生产的 ResonSeaBat T50P 型多波束；地貌测量设备为美国 EdgeTech 公司生产的 4200MP 侧扫声呐系统；管线探测设备分别为德国 Inomar 公司生产的 SES 2000 浅地层剖面仪。同时，采用 HY1200 声速剖面仪，以修正矫正测深仪、浅地层剖面设备的声速剖面。

#### 3.2 测线布设

##### 3.2.1 水深测量计划测线布设

单波束测线：以海底管线为中央线，垂直于中央线布设管线探测测线，其中间点在路由中心线上，测线长度 200 m，测线间隔为 200 m。

多波束测线：以海底管线为中央线，平行于中

央线布置多波束测线,测线间距按实际水深深度的2.5倍布置,立管两端各向外延长50 m,测线整体覆盖宽度为200 m。

检查线测线:垂直于主测线,检查线总长度大于多波束主测线长度的5%。

### 3.2.2 侧扫声呐测量计划测线布设

以海底管道为中央线,平行于中央线共布设2条声呐测线,立管两端各向外延长50 m,测线距路由中央线的距离为100 m。

### 3.2.3 浅地层剖面仪测量计划测线布设

以海底管线为中央线,垂直于中央线布设管线探测测线,其中间点在路由中心线上,测线长度200 m,测线间隔为200 m。

## 3.3 后调查结果及分析

### 3.3.1 多波束数据处理

多波束数据处理采用专业的数据处理软件 CARIS HIPS and SIPS 7.0,数据处理前先进行项目建立与数据格式转换、声速剖面改正、潮位数据改正等预处理措施,

然后对测线文件进行线模式编辑和 SUBSET 模式编辑,最后对采集到的水深数据进行压缩,生成管线路由区域的地域图<sup>[41-45]</sup>。地域图中不同颜色代表不同的水深信息,颜色较深的区域海管冲刷比较严重。图9显示海底裸露管线多波束图像;图10显示悬空管线的判断需要结合多波束侧视图进行判断。对地域图进行子区分析,可以直观读取裸露、悬空海管的管顶标高、海底标高。图11为本次调查管道路由多波束图像,可清晰地显示本次调查的输油管线与未知管缆相交,相交处管缆上方存在压块维护,相交处两管缆均处于埋藏状态。

### 3.3.2 声速改正

为提高测量数据的精度,每天进行水深测量作业前,使用声速剖面仪测量海水不同深度的声速,推算出该地区海水的平均声速。声速剖面仪处理程序可以显示当前的声速剖面曲线,通过读取声速剖面曲线上每个点的声速求和除以点数求取平均声速。使用声速仪直接测量各层水体的声速,与测深仪的设计声速进行比较后得出改正数,从而进行测深仪声速改正<sup>[28,46]</sup>。

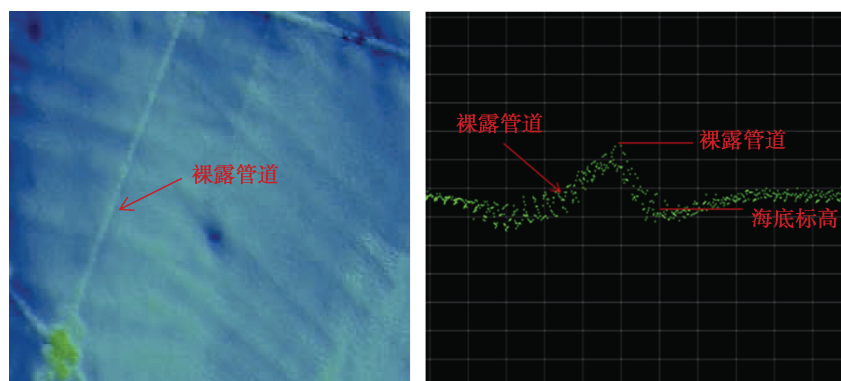


图9 裸露管道多波束图像  
Fig. 9 Multibeam image of exposed pipelines

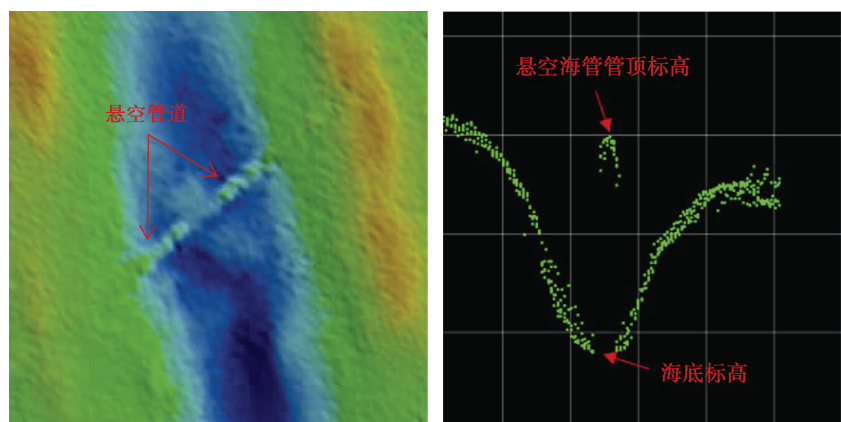


图10 悬空管道多波束图像  
Fig. 10 Multibeam image of suspended pipelines

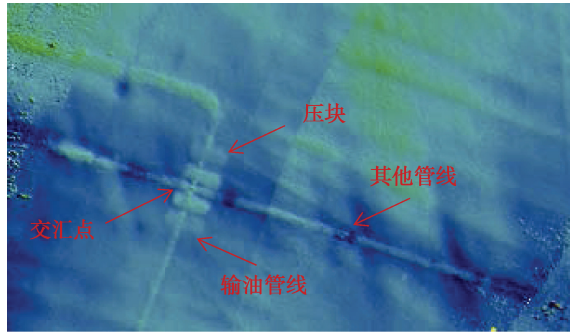


图 11 海底管线路由多波束图像  
Fig. 11 Multibeam image of submarine pipeline routes

表 1 现场测量声速表

| 作业日   | 平均声速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) |
|-------|---------------------------------------|
| 第 1 天 | 1 541.78                              |
| 第 2 天 | 1 541.09                              |
| 第 3 天 | 1 540.45                              |
| 第 4 天 | 1 540.46                              |
| 第 5 天 | 1 540.11                              |
| 第 6 天 | 1 540.12                              |
| 第 7 天 | 1 540.14                              |

### 3.3.3 声呐数据处理

使用专业的数据处理软件 Discover 4200 MP 2.00 对声呐数据处理, 在进行声呐图像判读前, 先进行声速、潮位校正, 通过调节合适的增益使采集到的海底图像达到最佳效果。对于检测到的海底裸露管道, 声波传播至此会形成较强的反射和散射, 在声呐记录图上为黑色的条带目标物, 如图 12 所示; 对于悬空管道, 由于海管悬跨, 管线下方距离海面有一定空隙, 声波可以穿过此空隙传播至管道背面一定距离, 在声呐记录图上为黑色条带后方间隔一段时间后形成管道遮挡的白色阴影<sup>[11, 47]</sup>, 如图 13 所示。

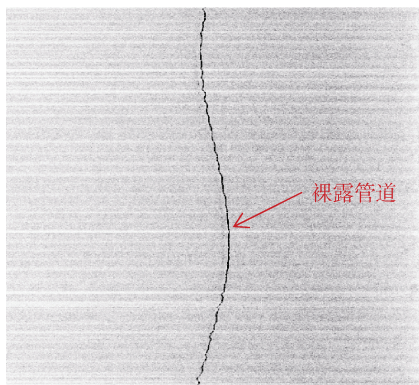


图 12 裸露管道声呐图像  
Fig. 12 Sonar image of exposed pipelines

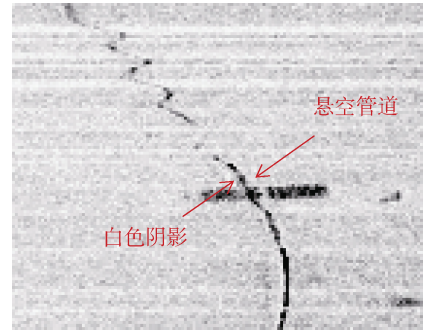


图 13 悬空管道声呐图像  
Fig. 13 Sonar image of suspended pipelines

### 3.3.4 浅地层剖面仪数据处理

浅地层剖面仪在横切海底管道进行测量时, 可将海底管道看做一个绕射点, 在浅地层剖面仪的波束角范围内, 接收到管顶的绕射波, 最终会形成以抛物状曲线为标志的绕射图像, 如图 14 所示。根据绕射曲线顶点至海底的高度( $h$ )与海底管道的管径( $\Phi$ )大小关系可判断出管道埋藏( $h < 0$ )、裸露( $h > 0$ ,  $h < \Phi$ )、悬空( $h > 0$ ,  $h > \Phi$ )的空间状态。

使用浅地层剖面仪系统自带的数据库处理软件 ISE2.0 对数据进行处理, 由于受作业环境、采集设备以及地质条件等因素的影响, 反映浅地层声学特征的记录剖面图上可能存在各种各样的干扰信号。一方面可通过现场调节设备发射脉冲宽度、频率、增益等参数进行优化, 另一方面可建立缆沟、电缆、地层图像样本库进行比对分析, 提高判读的准确性。图 15 为管线在不同空间状态下的浅地层剖面图。将管道正上方位置记为管顶标高, 管道正上方/下方海底泥面位置记为海底标高, 海底标高减去管顶标高即为管线的埋藏深度。

### 3.3.5 管道综合调查结果分析

将多波束、侧扫声呐、浅剖多种数据处理结果进行综合对比分析, 可得出管线路由的平面位置及相应的埋藏深度。为了方便查看管线路由信息, 将平面位置坐标距管线起点的距离以  $K_p$  值表示, 以  $K_p$  值为横坐标, 管线各坐标点对应的管顶标高为纵坐标, 绘制了管线纵剖面图, 图 16。

经查, 该工程输油管道存在 7 处埋藏, 埋藏总长度为 268.8 m, 占探测总长度的 1.30%, 存在 2 处悬空, 悬空长度为 10.5 m, 占探测总长度的 0.05%, 裸露总长度 20 432.9m, 占探测总长度的 98.65%。另外, 可将调查数据分析生成详细的管线埋深表。



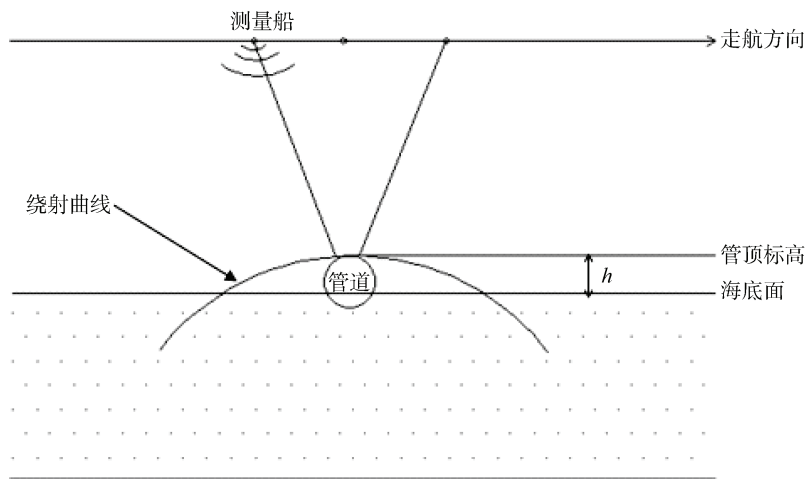


图 14 浅剖绕射曲线示意图

Fig. 14 Schematic of the sub-bottom profiling diffraction curve

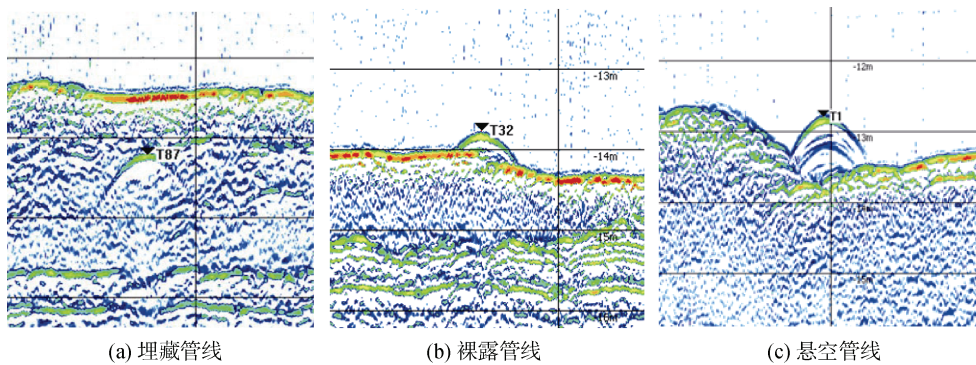


图 15 海底管线不同空间状态剖面

Fig. 15 Profile of submarine pipelines in different spatial states

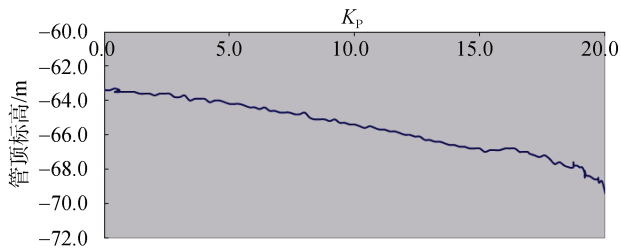


图 16 输油管道纵剖面图

Fig. 16 Longitudinal profile of oil pipelines

## 4 结论

声学探测技术在海洋调查,特别是海底的工程探测领域,一直发挥着不可或缺的作用。本文首先明确了要探讨解决的海洋工程技术问题,进而以问题为导向,有针对性地从事相关声学探测装备的工作原理出发,分析了 4 种装备在解决本文所研究问题方面的优势与劣势。在此基础上给出了应用 4 种声学

探测技术装备,满足海底石油管线铺设后调查工程技术需求的方法步骤,最后以我国南海某油气田群中的一条输油管线后调查为例对得出的方法进行验证。经实例验证,本文提出的应用水声探测设备开展石油管线铺设状态后调查的方法是可行的,能够有效满足对管线裸露、悬空情况以及管线路由情况的后调查工程需求。可见制定管线的后调查方案,需要考虑调查海域的底质、水深等多种情况,并综合考虑选择探测设备,发挥各种技术类型设备的优势,获得理想的调查结果。

要获得准确可靠的成果,需要技术人员在熟悉仪器原理和区域环境的基础上,系统运用各型设备,正确甄别信号、提取数据,并有效解决探测数据的多解性问题,也就是说技术人员的能力和水平是决定性因素之一。此外,除本文介绍的水声探测设备外,电磁感应法探测、海洋磁力测量等技术手段也是后调查的可选项,对于更为复杂的后调查工作

需求, 可将多类设备配合使用, 以达到最佳的调查效果。

#### 参考文献:

- [1] 韩孝辉, 李亮, 苟鹏飞. 探测海底输油气管线状态的方法[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(6): 633-639.  
HAN Xiaohui, LI Liang, GOU Pengfei. Methods for detecting the state of submarine oil and gas pipeline[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(6): 633-639.
- [2] 孟宪阔, 严天赦. 常用海底管道探测技术比较分析[J]. 港工技术, 2017, 54(2): 109-112.  
MENG Xiankuo, YAN Tianshe. Comparative analysis of conventional techniques of submarine pipeline detection[J]. Port Engineering Technology, 2017, 54(2): 109-112.
- [3] TIAN W M. Integrated method for the detection and location of underwater pipelines[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(5): 387-398.
- [4] TRABANT P K. Applied high-resolution geophysical methods[M]. Dordrecht: Springer, 1984.
- [5] CLARKE Hughes. Shallow-water imaging multibeam sonars: a new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf[J]. Marine Geophysical Researches, 1996, 18(6): 607-629.
- [6] 高玉旺. GPS结合测深仪水下地形测量原理与应用[J]. 低碳世界, 2016, 6(12): 48-49.  
GAO Yuwang. The principle and application of GPS combined with depth sounder for underwater topographic surveying[J]. Low Carbon World, 2016, 6(12): 48-49.
- [7] 万凌翔. GPS-PPK 结合测深仪在水下地形测量中的应用[J]. 水利技术监督, 2016, 24(1): 93-95.  
WAN Lingxiang. Application of GPS-PPK combined with depth sounder in underwater topographic survey[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2016, 24(1): 93-95.
- [8] 来向华, 潘国富, 傅晓明, 等. 单波束测深技术在海底管道检测中应用[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 66-72.  
LAI Xianghua, PAN Guofu, FU Xiaoming, et al. Application of single-beam echo sounding techniques in submarine pipeline inspection[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(4): 66-72.
- [9] 肖志广, 潘广山, 刘圣彪, 等. 侧扫声呐在海底管道路由调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(5): 627-631.  
XIAO Zhiguang, PAN Guangshan, LIU Shengbiao, et al. The Application of side-scan sonar to investigation of submarine pipeline route[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(5): 627-631.
- [10] 魏荣灏, 陈铁鑫, 郭晨. 侧扫声呐在海底管道悬空调查中的应用[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 63-65.  
WEI Ronghao, CHEN Tiexin, GUO Chen. Application of side-scan sonar in suspended submarine pipeline investigation[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(2): 63-65.
- [11] 王雷, 徐兴平, 张辛, 等. 悬跨海底管道的侧扫声纳检测方法[J]. 石油机械, 2013, 41(5): 50-53.  
WANG Lei, XU Xingping, ZHANG Xin, et al. Side-scan sonar detection method for suspended-span submarine pipelines[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(5): 50-53.
- [12] 秦清亮. 二维小波变换在侧扫声图目标检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2014, 34(3): 63-66.  
QIN Qingliang. Application of 2-D discrete wavelet transform in target-detection of side-scan sonar images[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(3): 63-66.
- [13] 刘臻. 海底管道声学探测方法中的问题分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
LIU Zhen. Analysis of problems in acoustic detection methods for submarine pipelines[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [14] 何庆. SES-2000 浅地层剖面仪在管线探测中的应用[J]. 居业, 2019(8): 13-14, 16.  
HE Qing. The application of SES-2000 shallow formation profiler in pipeline detection[J]. Create Living, 2019(8): 13-14, 16.
- [15] 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.  
ZHANG Jianxing, SONG Yongdong, LUAN Zhendong, et al. Application of acoustic detection technology in the external detection of submarine pipeline[J]. Guangxi Sciences, 2020, 27(3): 217-224.
- [16] 孙鹏. 浅地层剖面仪在海底管线探测中的应用[J]. 珠江水运, 2015(13): 76-77.  
SUN Peng. The application of shallow formation profiler in submarine pipeline detection[J]. Pearl River Water Transport, 2015(13): 76-77.
- [17] 柴海斌, 覃继, 吕邦来. 海底障碍物探测技术[J]. 水运工程, 2013(7): 104-107.  
CHAI Haibin, QIN Ji, LÜ Banglai. Detection Technology for seabed Obstacles[J]. Port and Waterway Engineering, 2013(7): 104-107.
- [18] 王继立, 黄潘阳, 胡涛骏, 等. 浅地层剖面仪在海底管道检测中的应用[J]. 船海工程, 2013, 42(3): 161-163.  
WANG Jili, HUANG Panyang, HU Taojun, et al. Application of sub-bottom profiler in submarine pipeline inspection[J]. Ship and Ocean Engineering, 2013, 42(3): 161-163.
- [19] 徐国强, 开发庆, 阚长宾, 等. 浅海海底管道探测技



- 术探讨[J]. 海岸工程, 2013, 32(2): 20-29.
- XU Guoqiang, QI Faping, KAN Changbin, et al. Analysis of technology used for submarine pipeline detection in the shallow seas[J]. Coastal Engineering, 2013, 32(2): 20-29.
- [20] 李颂文. 参量阵及其在水声工程中的应用进展[J]. 声学技术, 2011, 30(1): 9-16.
- LI Songwen. Parametric array and its application in underwater acoustic engineering: an overview[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(1): 9-16.
- [21] 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.
- SONG Yongdong, YANG Huiliang, LUAN Zhendong, et al. Application of SES-2000 sub-bottom profiler to detection of LNG submarine pipelines in the offshore Fujian Province[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(5): 73-77.
- [22] 谢铜辉, 刘书胜, 崔宁, 等. 一种探测海底电缆埋深的后调查方法[J]. 工程勘察, 2018(6): 68-72.
- XIE Jianhui, LIU Shusheng, CUI Ning, et al. Post-survey method for buried depth survey of submarine power cables[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(6): 68-72.
- [23] 谷明峰, 郭常升. 海底声学探测技术——浅地层剖面测量技术[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第 22 届年会论文集. 成都: 四川科学技术出版社, 2006.
- GU Mingfeng, GUO Changsheng. Submarine acoustic detection technology——Shallow Stratum Profile Measurement Technology[C]//Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2006.
- [24] IHO. Manual on hydrograph, Publication-M13[M]. International Hydrographic Bureau. 4, Quai Antoine ler, B.P.445-MC 98011 MONACO Cedex, 2005.
- [25] USACE. Engineering and design hydrographic survey[M]. Washington, D C: U. S. Arm Corps of Engineering, 2004.
- [26] Flemming B W. Side scan sonar: a practical guide[J]. The International Hydrographic Review, 1976, 53(1): 65-92.
- [27] LEENHARDT O. Side scan sonar-A theoretical study[J]. International Hydrographic Review, 1974, 50(1/2): 61-80.
- [28] 关致和, 赵先龙, 邵海涛, 等. HY1200 声速剖面仪计算测深仪声速改正数方法[J]. 海洋测绘, 2006, 26(1): 66-67, 74.
- GUAN Zhihe, ZHAO Xianlong, SHAO Haitao, et al. The correction method for the sound velocity data of HY1200 sound velocity profiler[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2006, 26(1): 66-67, 74.
- [29] 胡守田, 于晓燕, 邵晴晴. 海洋采油平台海底勘测调查及成果分析[J]. 测绘信息与工程, 2012, 37(3): 20-22.
- HU Shoutian, YU Xiaoyan, SHAO Qingqing. Investigation and results analysis of the seabed survey of the offshore oil production platform[J]. Journal of Geomatics, 2012, 37(3): 20-22.
- [30] CHAN Yin-lui Yinia. Acoustic surveys of the sea floor near Hong Kong[J]. The International Hydrographic Review, 1967, 44(1): 35-54.
- [31] FISH J P, CARR H A. Advanced application of side scan sonar[M]. Orleans: Lower Cape Publishing, 2001.
- [32] DEMARS K R, VANOVER E A. Measurement of water induced pressures and stresses in a sand bed[J]. Marine Geotechnology, 1985, 6(1): 20-59.
- [33] 侯志民, 施健, 胡斌. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在海底管断裂点定位中的应用[J]. 海洋测绘, 2017, 37(1): 79-82.
- HOU Zhimin, SHI Jian, HU Bin. Application of side-scan sonar and sub-bottom profiler in locating fracture positions of submarine pipelines[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(1): 79-82.
- [34] 张伟, 孙伯娜, 王朝, 等. 海底管线路由探测方法研究[J]. 港工技术, 2015, 52(6): 111-113.
- ZHANG Wei, SUN Bona, WANG Chao, et al. Study on seabed pipeline routing detection[J]. Port Engineering Technology, 2015, 52(6): 111-113.
- [35] 杨敏, 宋涅, 王芳, 等. 掩埋海底管道探测方法及新技术应用研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(6): 129-132.
- YANG Min, SONG Sheng, WANG Fang, et al. Discussion methods of buried submarine pipeline detection and application of new technology[J]. Marine Sciences, 2015, 39(6): 129-132.
- [36] 黄承义, 肖春桥, 李春风, 等. 多波束测量技术在海底管道探测中的应用[J]. 天津科技, 2013, 40(3): 12-13.
- HUANG Chengyi, XIAO Chunqiao, LI Chunfeng, et al. Application of multi-beam measurement technology in submarine pipeline detection[J]. Tianjin Science and Technology, 2013, 40(3): 12-13.
- [37] 来向华, 潘国富, 苟净慷, 等. 侧扫声纳系统在海底管道检测中应用研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 117-121.
- LAI Xianghua, PAN Guofu, GOU Zhengkang, et al. Study on application of side scan sonar in submarine pipeline inspection[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(3): 117-121.
- [38] 王化仁, 田春和, 王鹏, 等. 浅地层剖面仪在管线铺设路由调查中的应用[J]. 水道港口, 2007(2): 133-135.
- WANG Huaren, TIAN Chunhe, WANG Peng, et al. Application of subbottom profiler used in investigation of seabed pipeline routing[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007(2): 133-135.

- [39] 邱雅梦. 浅谈海底管线地球物理调查方法[J]. 中国石化, 2017(12): 81-82.  
QIU Yameng. Discussion on geophysical survey methods of submarine pipelines[J]. China Petroleum & Petrochemical, 2017(12): 81-82.
- [40] 党云廷, 阳凡林, 杨鲲. 基于快速双边滤波法的三维成像声呐在海底管道检测中的应用[J]. 地矿测绘, 2020, 36(1): 20-23.  
DANG Yunting, YANG Fanlin, YANG Kun. Application of 3D imaging sonar based on fast bilateral filtering method in submarine pipeline inspection[J]. Geology and Mineral Surveying, 2020, 36(1): 20-23.
- [41] 王洪武, 赵华. 埕岛油田海底管道路由复测技术与布控[J]. 石油和化工节能, 2017(2): 38-43.  
WANG Hongwu, ZHAO Hua. Technical analysis and deployment control of submarine pipeline routing in Chengdao Oilfield[J]. Energy Conservation in Petroleum and Chemical Industry, 2017(2): 38-43.
- [42] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. Automatics, 1975, 11(285-296): 23-27.
- [43] 来向华, 马建林, 潘国富, 等. 多波束测深技术在海底管道检测中的应用[J]. 海洋工程, 2006, 24(3): 68-73.  
LAI Xianghua, MA Jianlin, PAN Guofu, et al. Application of multi-beam echo sounding techniques in submarine pipeline inspection[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(3): 68-73.
- [44] 李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.  
LI Jiabiao. Multi-beam surveying principles, techniques and methods[M]. Beijing: Ocean Press, 1999.
- [45] 李文杰, 胡平, 肖都, 等. 多波束测深在海洋工程勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(4): 373-376.  
LI Wenjie, HU Ping, XIAO Du, et al. The application of multi-beam bathymetry in marine engineering survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration 2004, 28(4): 373-376.
- [46] 路武生. 水下地形测量原理与方法研究[J]. 科技创新导报, 2009(26): 191.  
LU Wusheng. Research on Principles and methods of underwater topographic surveying[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2009(26): 191.
- [47] 董玉娟, 周浩杰, 王正虎. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在海底管线检测中的应用[J]. 水道港口, 2015, 36(5): 450-455.  
DONG Yujuan, ZHOU Haojie, WANG Zhenghu. Application of side scan sonar and sub-bottom profiler in checking submarine pipeline[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2015, 36(5): 450-455.

# Application of acoustic detection technology in investigation after laying submarine oil pipelines

WANG Wen-long<sup>1</sup>, XIONG Zhi-nan<sup>2</sup>

(1. Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Zhanjiang, Zhanjiang 524057, China; 2. Tianjin Surveying and Hydrography Co., Ltd., Tianjin 300191, China)

**Received:** Jul. 27, 2020

**Key words:** acoustic detection technology; submarine pipeline; post-completion investigation; status evaluation

**Abstract:** Submarine oil pipelines may have various defects and abnormalities, such as damage, deformation, scouring, shift, and free spanning, because of the influence of physical, chemical, mechanical, and other factors during laying. To ensure safe operation, prevent pollution to the marine environment, and understand the actual situation of submarine pipelines, post-completion investigation of the laying status is required. Moreover, the corresponding maintenance measures need to be taken according to the investigation results. According to the post-investigation requirements of submarine pipelines and based on the working principle of acoustic detection technology, the advantages and limitations of four kinds of acoustic detection technology are analyzed and compared. Various detection methods should be used with submarine pipeline detection so that each method can “learn from each other’s strengths,” which can effectively improve detection efficiency. The effectiveness and practicability of the detection methods are verified through engineering projects. In this process, the analysis method of relevant data is also elucidated. The comprehensive analysis and mutual verification of data obtained using various acoustic detection equipment can effectively improve the accuracy of measurement data. Results show that the post-survey method using underwater acoustic detection equipment meets the requirements of high accuracy and efficiency at the same time and can effectively support the post-laying status evaluation of submarine pipelines.

(本文编辑: 丛培秀)