

# 上覆硬质保护层海底管道检测技术探讨

杨肖迪<sup>1,2</sup>, 刘振纹<sup>1,2</sup>, 徐 爽<sup>1,2</sup>, 淳明浩<sup>1,2</sup>, 李 春<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油集团 工程技术研究院, 天津 300450; 2. 中国石油集团 海洋工程重点实验室, 天津 300450)

**摘 要:**海底管道在油气工业中发挥着重要作用,为保障其安全运营必须定期进行检测掌握其在海底的状态。有的海底管道在铺设时为其安全考虑,在海底管道上方覆盖了抛石等硬质保护层,这样就导致在海底管道定期检测时一些检测仪器难以探测到硬质保护层下海底管道的位置和埋深,而浅地层剖面仪和磁力仪仍然可以不同程度地实现这种情况下的海底管道检测。文中对浅地层剖面仪和磁力仪的原理进行了介绍并对其在上覆抛石等硬质保护层海底管道检测中的应用进行了分析探讨。分析结果表明浅地层剖面仪和磁力仪组成的综合检测系统对上覆硬质保护层的海底管道探测有一定效果,可查明海硬质保护层下海底管道的位置和埋深,为海底管道的安全管理和维护提供数据支持,也可为其他类似海底管道检测提供参考。

**关键词:**海底管道检测;浅地层剖面仪;磁力仪;抛石保护层

**中图分类号:** TE973

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-3682(2017)02-0029-07

**doi:** 10.3969/j.issn.1002-3682.2017.02.004

海底管道是海上油气资源开发的重要组成部分,把海上油气田的油气集输与储运系统联系起来,被称为海洋油气生产系统中的“生命线”。由于海底管道具有油气输送效率高、成本低、输送量大等优点,成为油气运输最经济、快捷、可靠的方式。海底管道所处海洋环境复杂,为避免人为因素和环境因素对管道的破坏,几乎所有的管道都要求进行埋设保护,埋设深度一般为 1.5~2.0 m,在需要特殊防护段如穿越航道段、临近锚地段等埋设深度要求 4 m 或更深,并且在回填土上覆盖块石层加强保护<sup>[1]</sup>。然而海底管道在风暴潮、海流冲刷等作用下,上覆沉积物可能被冲刷而裸露、悬空或是由于土体液化而移位,成为管道运营的不安全因素<sup>[2-3]</sup>。按照国内外海底管道系统规范和法律法规<sup>[4-6]</sup>,为保证管道运输安全,需定期对主干线油气输送管道进行检测。

目前国内外常用的海底管道检测手段有浅地层剖面仪、侧扫声呐、回声测深仪、磁力仪等<sup>[7-9]</sup>。其中侧扫声呐和测深仪可用于检测裸露管道,无法探测埋藏的管道;浅地层剖面仪可以检测一定埋设深度的管道;磁力仪不受管道埋藏状态的限制,可检测海底管道的平面位置。但是对于上覆块石等硬质层保护的海底管道尚未形成有效的检测方法。本文以深圳某海底管道检测为例,探讨了浅地层剖面仪和磁力仪综合探测系统在上覆硬质保护层海底管道检测中的应用。

## 1 海底管道检测技术

### 1.1 浅地层剖面仪原理

浅地层剖面仪是一种二十世纪六七十年代问世的一种走航式声学探测装备,用来探测海底以下不同深度的海底沉积物的结构构造特征并识别各种地质灾害因素,为海洋工程建设服务。浅地层剖面仪的发射换能器发射低频声波,声波在地层中传播过程中遇到波阻抗界面便会向上反射被换能器接收,接收的反射声波

收稿日期:2017-01-18

作者简介:杨肖迪(1989-),男,助理工程师,硕士,主要从事海洋工程勘察方面研究,E-mail: yangxiaodi1989@126.com

(李 燕 编辑)

依次以时间函数的形式记录下来,形成连续的地层剖面记录。反射声波的强度与地层反射系数有关:

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1}, \quad (1)$$

式中,  $\rho_1, v_1, \rho_2, v_2$  分别为界面上、下地层的密度和声波速度。由于海底管道的密度和声波速度大于周围地层的密度和声波速度,因此海底管道是一个强反射源,其反射特征在剖面图中表现为向下的双曲线(图 1),双曲线顶点可是为管道的顶部<sup>[10]</sup>。不同埋状态的海底管道其反射双曲线顶点与海底反射的关系也不同,根据双曲线顶点距海底反射的距离,可计算海底管道悬高度或埋藏深度。

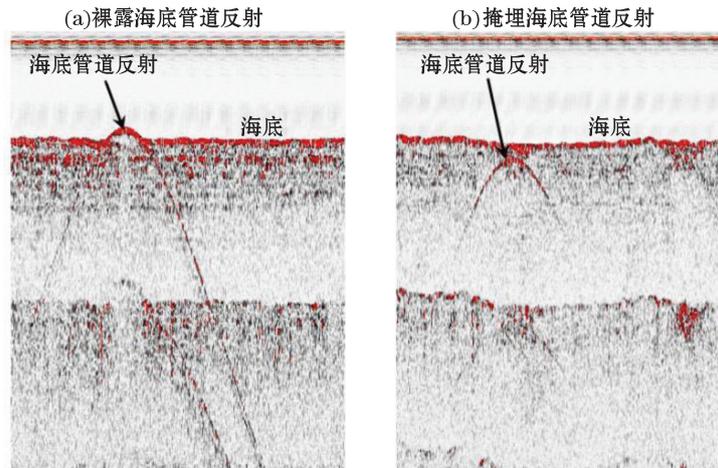


图 1 管道反射特征

Fig.1 The reflection features of the submarine pipeline

在管道检测中,垂向和横向分辨率是衡量浅地层剖面仪的重要参数,表示为

$$\Delta z = \frac{v}{2f_m}, \quad (2)$$

$$\Delta x = \frac{v}{2} \sqrt{t_0/f_m}, \quad (3)$$

式中,  $\Delta z$  和  $\Delta x$  分别为垂向分辨率和横向分辨率;  $v$  为地层中声速;  $t_0$  为双程反射时间;  $f_m$  为声波主频。由此可知,浅地层剖面仪的分辨率主要与声波主频和目标层深度有关。声波主频越高,垂向和横向分辨率越高,反之则越低。在实际应用中受浅地层剖面仪分辨率、管道上覆保护层类型、管道埋设深度等限制,对于上覆粒径小于 40 mm 的碎石的管道较易识别,但是对于上覆粒径 200~300 mm 的块石的管道很难识别;对于直径大于 0.3 m 的管道较易识别,对于直径 0.2~0.3 m 的管道在水深较浅、海况较好剖面清晰时也可以识别,对于直径小于 0.2 m 的管道,剖面图上很难或无法识别<sup>[11]</sup>。

## 1.2 磁力仪原理

磁力仪是利用地下岩石或岩土介质之间磁性差异所引起的磁场变化(磁异常)来寻找金属矿产、查明地下构造、寻找水下金属物体或解决其他地质问题<sup>[12]</sup>。大部分海底管道材质为钢,是铁磁性物质,磁化强度较强,引起的磁异常极强。相对于铁磁性物体的磁场,源于地层深处和地表岩层的地磁场要平缓的多,基本可认为海底管道周围的地磁场背景是一个均匀场<sup>[13]</sup>。海底管道引起的磁场则是较为剧烈的突变场,磁力仪在经过海底管道上方时可以探测到明显的磁异常信号。

海底管道产生的磁异常符合无限长圆柱体产生的磁异常,计算公式为

$$\Delta T = \frac{-\mu_0 m_s}{2\pi(x^2 + R^2)^2} \cdot \frac{\sin I_0}{\sin I_s} [(R^2 - x^2) \cos(i_s + I_s) + 2Rx \sin(i_s + I_s)], \quad (4)$$

式中,  $\mu_0$  为磁导率;  $m_s$  为单位长度有效磁矩;  $I_0$  为地磁倾角;  $I_s$  为地磁场有效磁倾角;  $i_s$  为圆柱体有效磁化倾角;  $R$  为圆柱体中心埋深。磁异常信号如图 2 所示,从图中可以看出,海底管道的磁异常特征曲线为一个较宽的脉冲信号,在管道正上方磁异常值最大,向管道两侧逐渐减小。

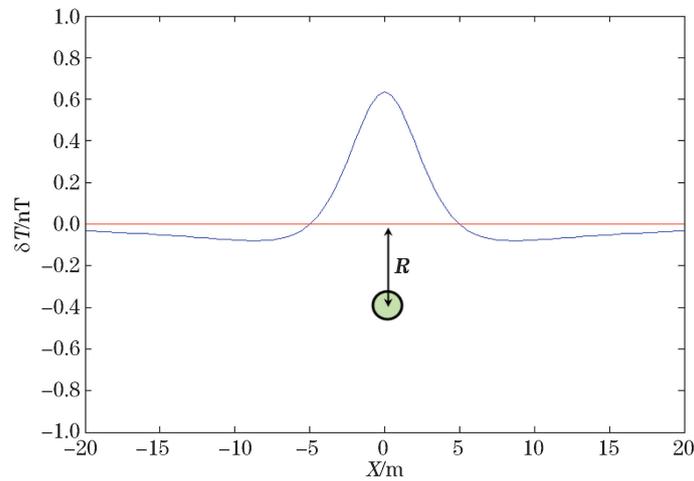


图 2 无限长圆柱体产生的磁异常特征

Fig.2 The magnetic anomaly produced by an infinite cylinder

由于各种仪器本身功能的局限性,无法全面探测管道在海底的状况,同时为了对各项测量结果进行相互校核,在进行数据分析处理时,需要将浅地层剖面数据、磁力异常数据等综合分析,最终确定管道在海底的状态。

## 2 测量实施

使用浅地层剖面仪和磁力仪组成的综合调查系统对深圳某海底管道进行调查,查明管道路由区海底管道的位置和埋深。

### 2.1 浅地层剖面仪

本次调查使用的浅地层剖面仪为 Kongsberg 公司生产的 GeoPulse 浅地层剖面仪,采用舷侧固定安装, DGPS 天线位于换能器正上方,无需位置校正。换能器用金属支架固定在船体中部右舷位置,入水深度 1 m,避免因螺旋桨搅动水流的影响。设置换能器发射声波频率为 3.5 kHz,发射能量 50 J,发射周期 300 ms,垂向分辨率 0.2 m,数据记录格式为 SEG-Y。调查船提前 100 m 对准测线,在调查船经过管道上方区域时调整船速为 2~3 kn。

### 2.2 海洋磁力仪

本次调查使用的海洋磁力仪为加拿大 Marine magnetics 公司生产的 SeaSPY 海洋磁力仪,与浅地层剖面仪同船测量。由于本次调查使用的调查船是木质船,船磁影响较弱,因此磁力仪拖体拖曳于调查船后 20 m,并在拖鱼前端加一个 10 kg 的非磁性重物,使拖鱼位于水下 2 m 左右,避免海面波浪、水流等环境干扰,设置磁力仪采样率为 4 Hz。在拖曳时仔细记录释放缆绳长度和倾角以及相对 DGPS 天线的位置,以完成探测数据空间坐标的校正。

### 3 检测结果

a 处和 b 处是两处典型的管道埋设情况,文中对 a 处和 b 处浅地层剖面仪检测数据和磁力仪检测数据进行了分析来说明浅地层剖面仪和磁力仪综合探测系统在上覆抛石保护层海底管道检测中的应用。

#### 3.1 浅地层剖面仪探测结果

海底是强反射界面,从浅地层剖面记录中可以识别追踪海底反射,如图 3 所示。从图中可以看出,管道上方海底存在沟槽,在 a 处沟槽深约 1 m,宽约 70 m;在 b 处沟槽深约 3 m,宽约 80 m。根据管道竣工勘察资料,管道铺设时挖沟宽度约为 50~200 m,深度约为 5~15 m,管道沟回填 4 m 左右。因此管道上方海底沟槽为未完全回填的管道沟。

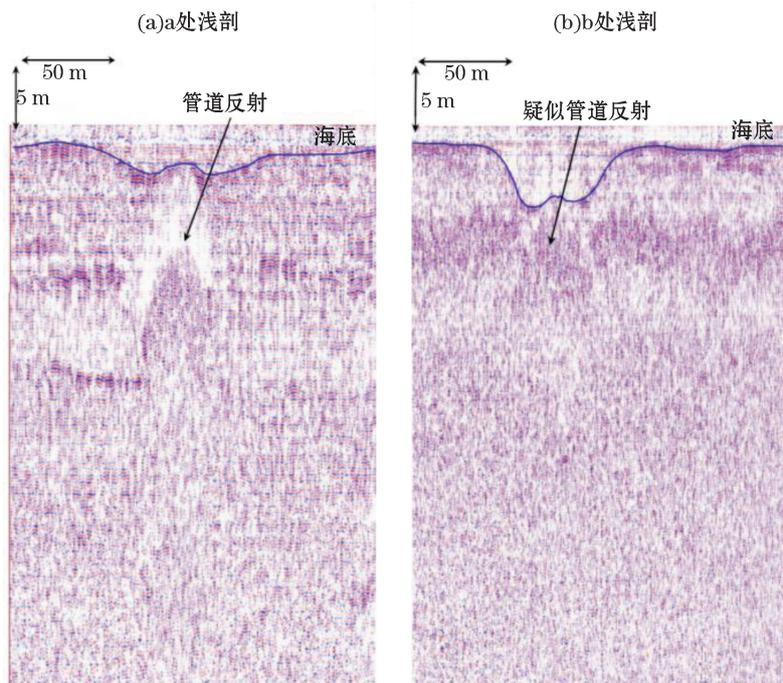


图 3 a 处和 b 处浅地层剖面图像

Fig.3 Sub-bottom profile images at the location a and b

由于管道上方覆盖 1~2 m 的抛石层,并且抛石之间夹杂较软的泥沙,这种软硬相间的介质对声波吸收严重,声波难以穿透查明抛石层下部的地层。在 b 处,海底以下反射比较杂乱,未见明显管道反射,难以判断管道的位置。在 a 处抛石层较薄处,浅地层剖面仪发射的声波可以穿透抛石层,获取抛石层以下地层信息,探测到管道。从浅地层剖面图中可以看到海底管道反射,为向上凸的弧线,如图 3 所示,弧线顶部距海底约 4.4 m,即海底管道埋深 4.4 m。

#### 3.2 磁力仪探测结果

磁力探测不受管道上方覆盖抛石的影响。在磁力仪经过海底管道上方时,可以看到明显的磁异常,磁场强度曲线如图 4 所示。由式(4)可知,管道产生的磁异常信号强度与距管道的距离有关,即距离管道越近,探测到的异常值越大,反之越小。在 a 处,水深约 3.8 m,磁力异常曲线呈尖脉冲形状,存在明显的峰值,测得的磁场值为 45 441.5 nT;在 b 处,水深约 7 m,测得的磁场值约 45 264.2 nT。而根据全球地磁场计算模型计

算的调查区域的平均地磁背景值约为 45 228.57 nT,磁力测量时段是在地磁日变相对稳定的下午,并且测量时间约 2 h,因此可忽略地磁日变的影响。在 a 处产生的磁异常值为 213 nT,在 b 处产生的磁异常值为 36 nT。由于周围海底没有其他铁磁性物质,因此认为此处的磁异常是由海底管道产生的,因此曲线峰值位置即为管道的中心位置。

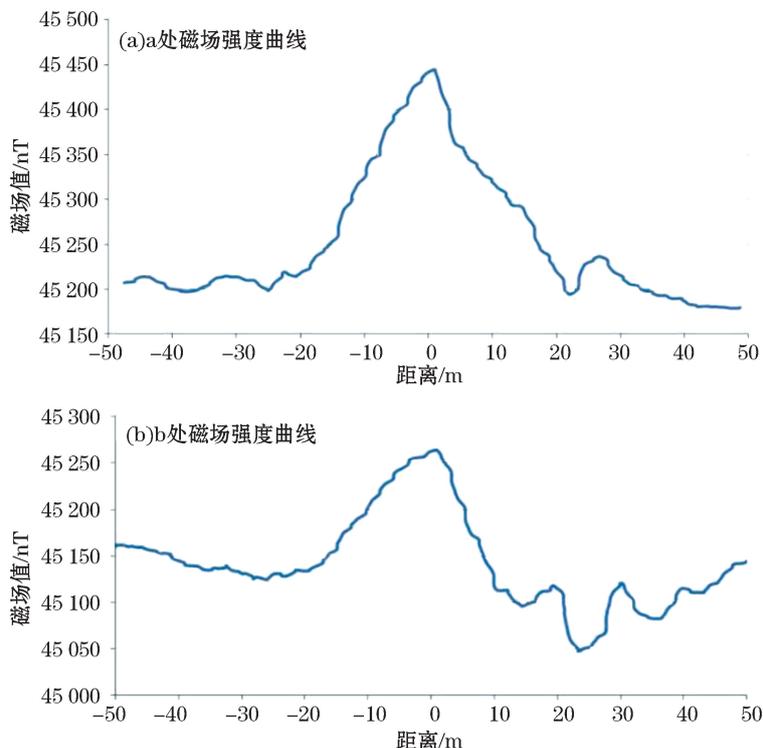


图4 a处和b处磁场强度曲线

Fig.4 The magnetic strength curve at the location a and b

#### 4 测量结果分析

海底管道在海底的状态复杂,单靠一种方法检测难以全面探测管道在海底的特征,因此将浅地层数据、磁力异常数据综合分析。以往的综合分析是分别对检测数据单独分析解释,得到管道的位置,然后再将分析结果在 CAD 平台上进行比对<sup>[14]</sup>,如果浅地层数据、磁异常数据、地形地貌数据分析得到的管道的位置一致,说明探测结果准确;如果分析得到的管道的位置不一致,一般遵循以定位精度高的仪器检测结果为准的原则,但是其检测结果并不一定就是海底管道,还有可能是其他的物体,无法准确判断管道的位置。

本文着力于将浅地层数据、磁异常数据(进行了缩放便于显示)按照坐标叠加在一起综合分析(图 5),可以直观地判断每种数据分析结果的准确性。在 a 处,海底存在未填平沟槽,在未填平沟槽下方存在管道反射,磁场强度曲线的峰值的平面位置在沟槽范围内,并且位于管道反射的正上方,与浅地层剖面数据确定的管道位置一致,因此根据磁场强度曲线的峰值判断的管道的位置是准确的。在 b 处,海底存在未填平沟槽,由于管道上覆较厚的抛石层,海底下部反射杂乱,未见明显的管道反射;而磁场强度曲线的峰值的平面位置在未填平沟槽中部,在其下方存在管道反射,尽管不如 a 处管道反射明显,仍可大致判断海底管道的位置和埋深。

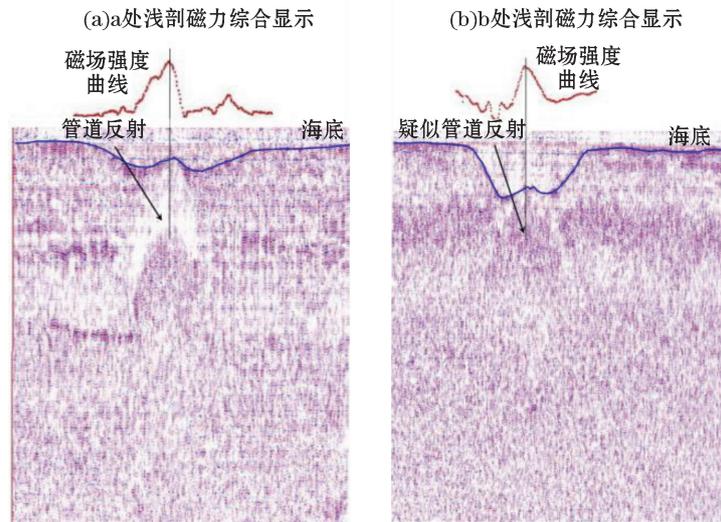


图5 a处和b处磁力异常数据和浅地层数据综合显示

Fig.5 The synthesized display of magnetic data and sub-bottom profile data at the location a and b

## 5 结 语

目前为止,上覆硬质保护层的海底管道探测仍是工程界的难题,尚未形成一种有效的方法来探测上覆保护层的海底管道的位置和埋深。本文对浅地层剖面仪和磁力仪组成的综合探测系统检测上覆保护层海底管道进行了分析和探讨,结果表明上述综合探测系统可以在一定程度上探测上覆保护层海底管道的位置和埋深,可为海底管道安全管理和维护提供参考。在成熟的检测上覆硬质保护层海底管道的方法形成前,也希望本文的尝试可以为类似的海底管道检测起一定的启示作用。

### 参考文献:

- [1] DU X J, ZHAO J, WANG Y T, et al. Contrast of pipeline trending methods[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2015(5):52-54. 杜喜军,赵杰,王艳涛,等. 海底管道挖沟方法的选择[J]. 管道技术与设备,2015(5): 52-54.
- [2] LIU L J, FU M Z, LI J G, et al. Geologic Hazards in the deep pipeline Routing area of the Liwan-31 Gas filed in the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(2):162-174. 刘乐军,傅命佐,李家钢,等. 荔湾3-1气田海底管道深水段地质灾害特征[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(2): 162-174
- [3] CUI H, CAO L H, CHEN Y L, et al. Study on the effect of bionic grass treatment for the suspended span of submarine pipelines around the oil platforms in the Chengdao Sea area[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(3):77-86. 崔华,曹立华,陈义兰,等. 埕岛海洋平台周围悬跨海底管线仿生草治理效果研究[J]. 海岸工程, 2015, 34(3):77-86.
- [4] Pressure pipe safety technology supervision regulation: TSG D0001-2009[S]. Beijing: AQSIQ, 2009. 压力管道安全技术监察规程: TSG D0001-2009[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2009.
- [5] Periodical inspection regulation for oil and gas pressure pipeline: TSG D7003—2010[S]. Beijing: AQSIQ, 2010. 压力管道定期检验规则: TSG D7003-2010[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010.
- [6] Specification for submarine cable and pipeline route investigation: GB/T 17502—2009[S]. Beijing: China Standard Press. 海底电缆管道路由勘察规范: GB/T 17502-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [7] XU J S, LI G X, CAO L H, et al. Integrated submarine pipeline investigation techniques and DF1-1 pipeline unsafely factor analysis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009(5):43-50. 徐继尚,李广雪,曹立华,等. 海底管道综合探测技术及东方1-1管道不稳定因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009(5):43-50.
- [8] TIAN W M. Integrated method for the detection and location of underwater pipelines[J]. Applied Acoustics, 2008(69): 387-398.

- [9] LAI X H, PAN G F, GOU Z H, et al. Study of application of side scan in submarine pipeline inspection[J]. *The Ocean Engineering*, 2011(3):117-121. 来向华,潘国富,苟净慷,等. 侧扫声呐系统在海底管道检测中的应用研究[J]. *海洋工程*, 2011(3):117-121.
- [10] CAI C L, ZHANG Y B, GU Z F. The application of non-linear(parametric) sonar system in submarine pipeline inspection[J]. *Marine Geology Letters*, 2007(4):38-42. 蔡春麟,张异彪,顾兆峰. 参量阵浅地层剖面技术在海底管道检测中的应用[J]. *海洋地质动态*, 2007(4):38-42.
- [11] ZHONG D L, WU Y T, LIU J L. Techniques for detecting submarine pipeline and cable in the neighborhood of Chengdao offshore oil platform[J]. *Coastal Engineering*, 2004, 23(4):32-37. 仲德林,吴永亭,刘建立. 埕岛海上石油平台周边海底管道与电缆的探测技术研究[J]. *海岸工程*, 2004, 23(4):32-37.
- [12] MA S Z, CHEN Y B, CHEN T H. Offshore submarine pipeline route survey and exploration[J]. *Research of Ecological South China Sea*, 2005(1):101-107. 马胜中,陈炎标,陈太浩. 近岸海底管道路由调查与管线的探测[J]. *南海地质研究*, 2005(1):101-107.
- [13] REN L P, HUANG M T, ZHAI G J, et al. A model for calculating magnetic field of underwater pipeline[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007(1):1-6. 任来平,黄谟涛,翟国君,等. 海底管线磁场计算模型[J]. *海洋测绘*, 2007(1):1-6.
- [14] LAI X H. Research on in-situ inspection and hydrodynamic analysis of seabed-pipeline system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. 来向华. 海床—管道原位检测及水动力响应分析[D]. 杭州:浙江大学, 2009.

## Study on the Detection Technology of Submarine Pipelines Covered With a Hard Protective Layer

YANG Xiao-di<sup>1,2</sup>, LIU Zhen-wen<sup>1,2</sup>, XU Shuang<sup>1,2</sup>, CHUN Ming-hao<sup>1,2</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>

(1.CNPC Research Institute of Engineering Technology, Tianjin 300450, China;

2.CNPC Key Laboratory of Marine Engineering, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Submarine pipelines play an important role in the oil and gas industry so that it is necessary to inspect them periodically in order to ensure their safe operation and know well their state under the seabed. For the purpose of safety, the submarine pipelines have been commonly covered with a hard protective layer like the riprap layer when they were laid. So, it is difficult to detect the position and buried depth of the pipelines buried below the hard protective layer during the periodical inspection. However, sub-marine profiler and magnetometer could partly inspect sub-marine pipeline in this condition. For this reason, the principles of both sub-bottom profiler and magnetometer are introduced and the application of the two instruments in the detection of submarine pipelines covered with the hard layer is analyzed and discussed. The results show that the integrated detection system composed of sub-bottom profiler and magnetometer has a certain effect for detecting the submarine pipelines buried below the hard layer, and could be used to ascertain the position and buried depth of the submarine pipelines which were buried below the hard protective layer. This study would provide a datum support for the safety management and maintenance of the submarine pipelines and offers a reference for the detection of other similar submarine pipelines.

**Key words:** submarine pipeline detection; sub-bottom profiler; magnetometer; riprap protection layer

**Received:** January 18, 2017