# 水下井口探测技术研究

杨肖迪<sup>1,2</sup>,姚志广<sup>1,2</sup>,淳明浩<sup>1,2</sup>,罗小桥<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:在海上油田开发过程中,往往存在一些当时不具备开发条件的水下井口。这些井口一方面现阶段具有重 新开发价值,另一方面也是海洋工程建设的障碍物。而水下井口尺度小,常用的调查手段较难探测到。文中介绍 了浅地层剖面仪和磁力仪的原理,并开展了浅地层剖面仪和磁力仪综合探测水下井口的应用与分析。结果表明浅 地层剖面仪和磁力仪均可探测到井口,在浅地层剖面图像上表现为垂向的声学空白带,为桩坑和井口的反射;磁异 常平面等值线为等轴状,存在极大值和极小值,井口位于极大值和极小值之间。浅地层剖面仪和磁力仪探测的井 口位置相差1m,与给定井口坐标偏差2m,满足工程需求。因此使用浅地层剖面仪和磁力仪综合探测水下井口在 现阶段不失为一种可行的方法。

关键词:水下井口;浅地层剖面仪;磁力仪;综合探测

**中图分类号:**TE952 **文献标识码:**A **文章编号:**文章编号:1002-3682(2019)03-0232-08

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.03.009

**引用格式**:YANG X D, YAO Z G, CHUN M H, et al. Research on detecting technology of subsea well mouth[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(3): 232-239. 杨肖迪,姚志广,淳明浩,等.水下井口探测技术研究[J]. 海岸工程, 2019, 38(3): 232-239.

近些年,随着国际油价回升,上游油气勘探开发投资逐渐增加,海洋油气勘探和海洋工程建设逐渐增加。 一方面前期封存的开发成本较高的井又有了开发价值,重新启动开发;另一方面,封存的水下井口对于周围 区域内的工程建设也是一种障碍物。前期封存的井口的位置信息往往精度不高或者缺失,因此需要精确探 测水下井口的位置。而前期封存的水下井口在海流、波浪等作用下,往往被掩埋。水下掩埋井口的探测一直 是工程界的难题,尚无有效的探测仪器或探测方法。基于这些现状,本文尝试使用高分辨率浅地层剖面仪和 磁力仪综合探测水下井口,开展这一技术的应用研究。

1 测量原理

## 1.1 浅地层剖面仪

浅地层剖面仪是一种基于水声学原理的走航式的探测海底浅部地层结构的地球物理探测设备。

声波是物质运动的一种形式,在不同强度、结构和密度的介质中,声波的传播速度、频谱成分和能量衰减 等波场特征都会变化<sup>[1-2]</sup>。

声波在水体和地层中的传播的波动方程为

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial^2 t} = 0, \qquad (1)$$

其中,  $\nabla^2$  为拉普拉斯算子; *t* 为时间; *c* = *c*(*x<sub>i</sub>*), *p* = *p*(*x<sub>i</sub>*, *t*) 为声波的声速和声压, 若 *i* = 1 或 2, 则式(1)改 写为平面谐波方程:

**收稿日期:**2019-02-14

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

(王佳实 编辑)

$$p(x_i,t) = p_0 \sin\left(\frac{2\pi x_i}{\lambda} - \omega t + \varphi\right), \qquad (2)$$

其中,t为周期, $p_0$ 为声波振幅, $\lambda$ 为波长, $\omega = 2\pi f$ 为角频 率, $\varphi$ 为相移。在浅地层剖面探测中,换能器激发的声波可视 为多个简谐波的叠加。

介质对声波的改变称为波阻抗,为介质的密度ρ与声速*c* 的乘积,声波在穿透相邻不同介质的界面时,会发生反射和透射<sup>[3]</sup>。声波的反射能量以反射系数*R* 表征,反射系数为

$$R = \frac{\rho_2 \ v_2 - \rho_1 \ v_1}{\rho_2 \ v_2 + \rho_1 \ v_1},\tag{3}$$

其中, ρ<sub>1</sub>, v<sub>1</sub>, ρ<sub>2</sub>, v<sub>2</sub> 分别为界面上层介质的密度、声速和界面 下层介质的密度、声速。

沉积环境不同的地层往往具有不同的物理力学性质<sup>[4]</sup>, 而晚第四纪以来的沉积地层是海相沉积、陆相沉积交错,相邻 地层具有不同的波阻抗,反射系数不为零,地层界面处反射波 同相轴清晰,且相邻地层性质差异越大,反射系数越大,反射 波能量越大(图 1)。

## 1.2 磁力仪

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的地球物理 探测设备,广泛用于海底管道探测,水下金属物体探 测等<sup>[5-8]</sup>。

物体的磁性主要是感应磁化强度、剩余磁化强度以 及消磁强度之和,磁异常是磁场总强度与正常场的差值。 水下井口包括井口塞、导管、表层套管等,主要由钢管和 水泥环构成。在常见物质中(表 1),钢和水泥构件的磁化 率远大于海水、淤泥、岩石的磁化率<sup>[9]</sup>,因此水下井口相 对于周围平缓的磁场环境,磁异常突出。

水下井口垂直于水平面向下延伸,可视为无数个磁 性体质点沿竖向的线性排列,磁性体质点的磁异常 ΔT 表达式为

$$\Delta T = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \Big[ (2R^2 - x^2 + y^2) \sin I^2 + (2x^2 - y^2 - R^2) \cos I^2 \cos A^2 + (2y^2 - x^2 - R^2) \cos I^2 \sin I^2 - 3xR(\sin I \cos I \cos A + \sin I \cos I \cos A) + 3xy(2\cos I^2 \sin A^2) + 3yR(\cos I^2 \sin A \cos A + \cos I \sin A \sin I) \Big]_{\circ}$$
(4)

水下井口的磁异常表达式为

$$\Delta T = \frac{\mu_0 M_s \sin \alpha}{2\pi} \frac{\sin I}{\sin i_s} \left[ \frac{1}{2} \cos(\alpha - 2i_s) \ln \frac{(x-b)^2 + h^2}{(x+b)^2 + h^2} - \frac{\sin(\alpha - 2i_s) (\arctan \frac{x+b}{x} - \arctan \frac{x-b}{h})}{1} \right],$$
(5)

其中, $\mu_0$ 为真空中的磁导率, $M_s$ 为磁矩,I为磁化强度倾角, $i_s$ 为有效磁化倾角, $\alpha$ 为磁性体的倾角,b为磁



Fig.1 The principle of sub-bottom profiler

#### 表 1 常见物质的磁化率

Table 1 The magnetic susceptibility of common substances

物质种类	磁化率/×10 <sup>-5</sup>
海水/淡水	<10
淤泥	<10
沉积岩	<100
水泥	<200~400
水泥构件	100~1 200
常见钢铁	50 000~120 000

233

性体的半径, h 为磁性体埋深, A 为剖面方位角。

由图 2 可见,水下井口的磁异常特征,水下井口位于北半球,地磁场向下倾斜。假设水下井口的磁化方向与地磁场方向相同,那么水下井口的磁异常表现为在水下井口的南侧磁异常为正值,在水下井口的北侧磁 异常为负值。



图 2 水下井口的磁异常特征(磁化强度倾角 56°,38°N) Fig.2 Magnetic anomaly characteristics of subsea well mouths

#### 1.3 浅地层剖面仪和磁力仪综合测量水下井口

水下井口与周围沉积物的物理性质存在明显差别,其波阻抗分别约为1.5×10<sup>7</sup>和0.3×10<sup>7</sup>kg/(m<sup>2</sup>•s),水下井口和周围沉积物之间的反射系数约为0.67,水下井口是一个强反射源。水下井口在水平面的投影大约为直径0.5~1.0 m的圆形,小于浅地层剖面仪的水平分辨率(假设浅地层剖面仪的主频为3.5 kHz,水深5 m时其水平分辨率为2 m),形成点绕射。

水下井口主要由钢管和水泥环构成,其磁化率在 1 000~120 000 κ/10<sup>-5</sup>,假设水下井口的磁矩为 2 000 Am<sup>2</sup>,且井口为垂直磁化,水下井口在泥面以下 5 m,在水深 5 m 时水下井口在水面处产生的磁异常 约为 2 000 nT,远大于周围地磁背景波动,在磁异常曲线中变现为脉冲状,峰值宽度约 30 m。

将根据浅地层剖面识别的绕射点的位置和根据磁异常曲线峰值识别的特征点按照坐标绘制到 CAD 的 不同图层中,比对分析不同数据确定的井口的位置。如果浅地层剖面数据和磁异常数据确定井口的位置一 致,表明确定的井口的位置是准确的(图 3)。

如果浅地层剖面数据和磁异常数据确定的井口的位置不一致,需进行周围海底是否存在海底电缆、 金属物体(导管架平台、人工岛等)等磁干扰因素分析<sup>[10]</sup>。如果周围海底存在磁性干忧,则应对磁异常数 据进行向下延拓分析、磁异常梯度分析等,识别井口引起的磁异常,然后将重新确定的井口位置重新导入 到 CAD 中,如果二者一致,则表明井口的位置是准确的。如果周围海底不存在磁性体干扰,需要对浅地 层剖面数据进行道集能量均衡、带通滤波、几何扩散矫正、反褶积等精细处理,然后识别井口特征反射,重 新导入到 CAD 中,如果二者一致,则表明确定的井口位置是准确的;如果二者确定的井口位置仍不一致, 则以磁力仪确定的井口位置为准,因为相对于浅地层剖面探测,井口的磁异常可探测范围大,磁力仪探测 结果可信度更高。



图 3 综合浅地层剖面数据和磁异常数据识别水下井口方法



# 2 现场测量

2017-06 在黄河三角洲埕北海域进行了浅地层剖面仪和磁力 仪综合探测水下井口现场试验。首先从胜利油田获取到某一废 弃水下井口的坐标,以给定井口坐标为中心,布设正交网格状测 线,测线方位角分别为 80°和 170°,测线间距 10 m,测线长度 100 m,如图 4 所示。

## 2.1 浅地层剖面仪测量

本次调查使用的浅地层剖面仪为德国 Innomer 公司生产的 SES-2000 浅地层剖面仪,采用舷侧固定安装,星站差分 GPS 天线 位于换能器正上方,在调查船重心处安装姿态补偿仪。换能器用 金属支架固定在船体右舷靠近重心的位置,入水深度 1 m,避免因 螺旋桨搅动水流的影响。精确量取水下换能器、姿态补偿仪、GPS 天线之间的相对位置关系,并输入到采集软件中。设置换能器发射 声波频率为 8~12 kHz,发射周期 250 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,在调查船经过水下井口上方区域时调整船速为 2~3 kn。

#### 2.2 海洋磁力仪测量

本研究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。由于本研究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

30 m,并在拖鱼前端加1个10 kg的非磁性重物,使拖鱼位于水下2m左右,避免海面波浪、水流等环境干扰,设置磁力仪采样率为4Hz。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。由于测量时间在14:00-17:00,地磁日变波动较小,而且测量目标是水下井口的磁异常,为相对磁异常,且其磁异常远大于地磁日变波动值,磁异常测量值无需进行地磁日变改正,因此在测量中未在岸上设立地磁日变观测站。

在测量时使用 HYPACK 软件导航,将浅地层剖面仪换能器、GPS 天线、姿态补偿仪、磁力仪拖鱼的相对 位置关系输入到 HYPACK 中。同时在浅地层剖面仪采集软件、磁力仪采集软件、HYPACK 软件中设置相 同的投影坐标系,并且时间都同步到 UTC 时间。

3 测量结果分析

#### 3.1 浅部地层情况

在经过给定井口时,浅地层剖面图像上出现2种不同的垂向声学空白带,其中一种声学空白带较宽,横向宽约18~26m,由于SES-2000浅地层剖面仪探测深度约15m,声学空白带纵向未见底;另一种声学空白带较窄,横向宽度约3~5m,并且两侧同相轴向下弯曲,同样纵向未见底(图5)。这种垂向的声学空白带应该是人为作业造成的,考虑到前期有自升式平台在此井位作业,声学空白带应该为桩坑或井口的反射。



Fig.5 The reflection characteristics of pile hole and subsea well mouth on sub-bottom profiles

自升式平台在就位、移位过程中的插拔桩会破坏海底地层的结构和连续性,造成海底土层扰动,尤其是 具桩靴(桩靴直径 9~15 m)<sup>[11]</sup>的自升式平台在插桩、拔桩过程中注水冲桩会对桩靴周围土层造成较大程度的 扰动,在平台移位后会在海床上形成桩坑,桩坑直径约为 20 m。在海流、波浪等水动力作用下,桩坑周围土体产 生扰动、滑塌或塑性流动,填充到桩坑内,海水中悬浮沉积物也会在桩坑内沉积,逐渐将桩坑填平<sup>[12]</sup>。桩坑内填 充物为高含水率的快速堆积物,内部性质均匀,与周围正常沉积的土层性质存在明显差别,在浅地层剖面图像 中桩坑反射表现为海底以下的垂向声学空白带。因此较宽的(18~26 m)声学空白带应该为桩坑的反射特征。

井口由隔水管和多层套管以及套管之间的水泥环构成,隔水管和套管往往要靠外力压载进入海底土层, 在打入导管和套管时,会对海底土层产生冲剪破坏作用,扰动土层。当水下井口弃置切割后,也会在海床上 形成凹坑,而后被底层悬浮泥沙填充。在浅地层剖面图像上井口反射表现为绕射点。由于较窄的(3~5 m) 声学空白带两侧同相轴绕射向下弯曲,推测其为井口的反射。

将浅地层剖面图像上的声学空白带反射中心点展布在 CAD 中,发现桩坑反射的特征点置聚集成 3 个区域,彼此之间距离约 35 m。井口反射的特征点在桩坑特征反射点南侧,与桩坑区域垂直距离约 4~5 m。推测为前期自升式平台的作业痕迹。

## 3.2 磁异常分析

对井口进行磁力测量时,布设相互正交的 2 组测线:一组为近 N-S方向;另一组为近 E-W 方向。在 N-S方向上,磁异常曲线为非对称 状,同时存在极大值和极小值。其中极小值在北 侧,极大值在南侧,每条测线上极小值与极大值 之间梯度最大的点可以连成一条直线。在 E-W方向上,磁异常曲线为对称状,存在极大值或 极小值,其中存在极大值的测线分布在南侧,存 在极小值的测线分布在北侧,每条测线上的极小 值或极大值可以连成一条直线(图 6)。

对磁异常数据插值网格化后,绘制磁异常等 值线图。磁异常等值线呈等轴状,包含极大值和 极小值,极小值在极大值北侧,并且极大值和极



小值连线与近 N-S方向的测线平行。将 N-S方向的特征点连线和 E-W 方向的特征点连线按坐标叠加 到磁异常等值线图中,2条特征点连线相交的点位于磁异常等值线中极大值和极小值之间梯度最大的位置, 推测为井口的位置(图 7)。



Fig.7 Magnetic anomaly contours of the subsea well mouth

# 3.3 浅地层剖面数据和磁异常数据综合分析

为了验证浅地层剖面仪探测结果和磁力仪探测结果分析的一致性和准确性,将浅地层剖面数据和磁异

常数据综合分析。

将浅地层剖面图像和磁异常数据按照坐标导入到三维空间内叠加显示(图 8),以便直观地将浅地层剖 面仪探测结果和磁力仪探测结果对比验证。在浅地层剖面图像中存在着狭长垂直空白带和较宽的垂直空白 带。磁异常数据进行网格化后,呈非对称状,存在极大值和极小值。磁异常极大值和极小值之间梯度最大的 位置与浅地层剖面图像上狭长的垂直空白带位置一致,表明浅地层剖面仪和磁力仪探测的水下井口位置一 致,说明浅地层剖面图像上狭长的垂直空白带反射和磁异常极大值和极小值之间梯度极大值均为水下井口 的特征,探测的水下井口的是正确的。井口反射特征点与磁异常数据确定的井口之间偏差约1m,与给定的 井口坐标之间偏差约2m,因此判断浅地层剖面仪和磁力仪综合探测获得的井口位置是准确的。



图 8 浅地层剖面数据和磁异常数据综合确定井口的位置

Fig.8 The position of well mouth identified synthetically based on sub-bottom profiles and magnetic anomalies

# 4 结 语

浅地层剖面仪和磁力仪是海洋工程勘察中常用的探测手段,可以有效探测海底浅部地层结构、识别潜在 海底地质灾害和海底掩埋金属物体。

目前,水下井口探测仍是工程界的难题,尚未形成有效的探测方法。本文尝试使用浅地层剖面仪和磁力 仪进行水下井口探测试验,综合浅地层剖面数据和磁异常数据进行分析。分析结果表明探测井口与给定井 口坐标偏差约2m,满足工程要求,说明综合浅地层剖面仪和磁力仪探测水下井口是可行的。在成熟的水下 井口探测方法形成前,也希望本文的研究可以为类似水下井口的探测起到一定的启示作用。

#### 参考文献(References):

- [1] XIJJ, YUGM, LIUYZ, et al. Acoustic detecting technology in engineering geology survey of submarine cable[J]. Science and Technology of Detection, 2018(3): 41-50. 习建军,于国明,刘珍岩,等. 海底输电工程地质勘察中的声波探测技术[J]. 勘察科学与技术, 2018(3): 41-50.
- [2] WEI Z Q, ZHANG Z Q, JIANG J J. Application of sub-bottom profiler in inspecting investigation of Daya Bay seabed pipeline[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2009, 29(6): 71-73. 魏志强,张志强,蒋俊杰. 浅地层剖面仪在大亚湾海底管道检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2009, 29(6): 71-73.
- [3] LEI W, XIAO H Y, DENG Y Q. Course of geophysical prospecting in engineering and environment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 23-29. 雷宛,肖宏跃,邓一谦. 工程与环境物探教程[M]. 北京:地质出版社, 2007: 23-29.
- [4] LI P, DU J. Review on the probing of sub-bottom profiler[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3): 344-350. 李平, 杜军. 浅地层剖面 探测综述[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 344-350.

- [5] LULX, WANGSQ, HUR, et al. High-precision magnetic method applies to detection of embedded submarine pipeline[J]. Port Engineering Technology, 2015, 52(4): 99-101. 陆礼训, 王水强, 胡绕, 等. 高精度磁法用于海底深埋管线探测[J]. 港工技术, 2015, 52(4): 99-101.
- [6] PEIYL, LIANG R C, ZHENG Y P, et al. The method and practices of the submarine pipelies detection using magnetometers[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 2226-2232. 裴彦良,梁瑞才,郑彦鹏. 海底线缆的磁力探测方法与实践[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(5): 2226-2232.
- [7] AHMED S, TOSHIO H, JOSEPH K A, et al. Detection of unexploded ordnance (UXO) using marine magnetic gradiometer data[J]. Geophysics Exploration, 2005, 36(1): 97-103.
- [8] DWAIN K, Butler. Implications of magnetic backgrounds for unexploded ordnance detection[J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 54(1-2): 111-125.
- [9] REN L P, TAN M J, LI K F, et al. Analysis on magnetic anomaly strength and mass magnetization of underwater object[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2012, 32(2): 7-10. 任来平,谭美景,李凯峰,等. 水下目标磁异常强度与质量磁化强度分析[J]. 海洋测 绘, 2012, 32(2): 7-10.
- [10] YANG X D, LIU Z W, XU S, et al. Study on the detection technology of submarine pipelines covered with a hard protective layer[J]. Coastal Engineering, 2017, 36(2): 29-35. 杨肖迪, 刘振纹,徐爽,等. 上覆硬质保护层海底管道检测技术探讨[J]. 海岸工程, 2017, 36(2):29-35.
- [11] WANG N. Research on soil failure mechanism and bearing capacity of spudcan foundation in the Yellow River underwater delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. 王楠. 黄河废弃水下三角洲土体破坏机制及桩靴承载能力研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.
- [12] XU Y C. Response to platform pile insertion and pullout of Yellow River abandoned underwater delta foundation soil[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. 徐永臣. 黄河废弃水下三角洲地基土对平台插拔桩的响应[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.

# **Research on Detection Technology of Subsea Well Mouth**

YANG Xiao-di<sup>1,2</sup>, YAO Zhi-guang<sup>1,2</sup>, CHUN Ming-hao<sup>1,2</sup>, LUO Xiao-qiao<sup>1,2</sup>

Research Institute of Engineering Technology, CNPC, Tianjin 300450, China;
 Key Laboratory of Marine Engineering, CNPC, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** There are usually some subsea wells which have no further developing conditions in the offshore oilfield development. These wells have, on the one hand, the value to be developed again at the present state, but on the other hand they become obstacles for marine engineering constructions. However, it is difficult to detect them by using common survey procedures because of their small mouth. For the purpose of detecting these wells, the principles of sub-bottom profiler and magnetometer and the comprehensive application of these two instruments in the detection of subsea well mouths are introduced. It is see that both sub-bottom profiler and magnetometer can be used for the detection of subsea well mouths. The vertical acoustic blanks occurring in the profiles of sub-bottom profiler indicate the presence of pile holes or subsea well mouths. The presence of an equated shape on the plane contour map of magnetic anomalies, together with the presence of magnetic anomaly maximum and minimum, may possibly indicate that the position of well mouth should be located between the maximum and the minimum of the magnetic anomalies. The deviation of the well mouth position detected by sub-bottom profiler and magnetometer is 1 m. Comparing the given coordinates of the well mouth, the deviation is 2 m, satisfying the requirements of engineering. It is, therefore, concluded that using sub-bottom profiler and magnetometer for synthetically detecting the subsea well mouths should be a reasonable method at the present stage.

Key words: subsea well mouth; sub-bottom profiler; magnetometer; detecting synthetically Received: Februrary 14, 2019