

文章编号: 1005-9865(2007)04-0066-07

单波束测深技术在海底管道检测中应用

来向华^{1, 2}, 潘国富², 傅晓明², 苟铮慷², 陈云敏¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 国家海洋局第二海洋研究所 工程海洋学研究中心, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 为查明海底管道的位置和掩埋状态, 在海底管道检测中使用了单波束测深技术。对探测过程中海底管道的声波反射特征和解释方法进行了研究, 研究结果表明, 浅水时反射曲线更能反映管道的真实形态; 深水时无论是绕射曲线还是反射曲线均与管道的真实形态有较大差异。波束角会严重影响单波束对海底管道的探测能力。通过对测量记录的分析, 可对海底管道的位置、埋设深度和是否发生悬空等状况进行判断。

关键词: 单波束测深系统; 海底管道; 波束角

中图分类号: P756.2 **文献标识码:** A

Application of single-beam echo sounding techniques in submarine pipeline inspection

LAI Xiang-hua^{1, 2}, PAN Guo-fu², FU Xiao-ming², GOU Zheng-kang², CHEN Yun-min¹

(1. Geotechnical Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Laboratory of Engineering Oceanography, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In order to inspect the pipeline position and quantitate the pipeline settling depth, the single-beam echo sounding technique is used in submarine pipeline inspection. The reflection features from the pipeline and the interpretation methods of the echogram are analyzed. The results suggest that the reflection curve can represent the pipeline vividly in the shallow water, while both the reflection and diffraction curves can not do so in the deep water. The beam angle can badly influence the inspection ability of the single beam echo sounder. Based on the analyses of the echogram, the pipeline position, the pipeline settling depth and the free-span state can be quantitated.

Key words: single beam echo sounder (SBES); submarine pipeline; beam angle

单波束测深技术自上世纪中叶以来在水道测量和水下地形测绘中逐渐得到广泛应用^[1, 2]。随着海洋油气资源开发, 海底油气管道日益增多, 如何对海底管道的施工掩埋情况进行检测, 成为人们日益关心的问题^[3, 4], 单波束测深技术逐渐被人们用于检测海底管道的位置、掩埋情况和管道沟的形态等情况。单波束运用于海底管道探测已有一定的历史, 国内也得到了比较广泛的应用, 但从发表的文献来看^[5~7], 多集中于定性的描述, 缺乏对有关问题的系统研究, 将结合作者多次海底管道检测工程实例, 对单波束测深技术在海底管道检测中的应用进行深入研究。

1 测深仪声波在海底管道上的反射特征

单波束测深系统通常包括单波束测深仪和数据采集系统等。单波束测深仪的工作原理非常简单: 由换能器向水中发射一个具有一定空间指向性的短脉冲声波(波束), 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, 已知换能器发射和接收到回波的时间间隔 t 与声波在水体中的平

收稿日期: 2007-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372098, 40476032)

作者简介: 来向华(1973—), 男, 江苏铜山人, 博士研究生, 主要从事海底工程检测和浅基稳定性研究。

均传播速度 V , 就可以计算出声波的单程旅行距离 Z , 即换能器到海底的距离。重复这一过程就可以对水深进行连续测量。单波束测深仪的工作原理与垂直收发的地震勘探方法很相似。

测深仪发射的声波遇到海底管道时同样会发生反射和散射, 换能器接收到管道回波后就会同时保存在模拟记录和数字记录中。

1.1 反射特征

单波束测深仪的频率变化范围一般在 $12 \sim 1\,000\text{ kHz}$ 之间, 通常使用的中浅水双频测深仪的高频为 200 kHz 左右, 低频为 $20 \sim 40\text{ kHz}$ 。高频测深 h 范围通常在 $1 \sim 200\text{ m}$ 之间, 这样当测深仪进行管道横剖面探测时, 第一菲涅尔带半径 $R = \sqrt{h\lambda/2 + \lambda^2/16}$, 其中 h 为管道放置深度, λ 为波速, 对 200 kHz 的高频来说, 其变化范围为 $0.061\,3 \sim 0.866\,0\text{ m}$ 之间, 随水深 h 的增加而增大。海底管道的直径规格多种多样, 在与管道正交的剖面内, 由地震勘探原理可知, 如反射段的几何尺寸大于相应的第一菲涅尔带, 则可以按照反射定律来研究反射问题; 反之则可按点绕射来研究海底管道的反射问题。为简单起见, 不考虑因声速的各向异性导致的声线在水体中的弯曲。海底管道示意图 1。

1.1.1 绕射曲线

首先考虑海底管道的绕射曲线, 当第一菲涅尔带大于反射段的几何尺寸时, 就可以看成点绕射。显然, 沿与海底管道正交测线进行测量时, 因为单波束测深仪的发射和接收换能器是一体的, 发射的波束又有一定的指向角, 只能在一定的范围内接收到管顶的绕射波, 这个范围与波束照射面积成正比, 即在区域 $(-\delta, \delta)$ 内, 记录波形为顶点产生的绕射波。可以将管顶看成点源, 则在上述区域的水面上接收到的时程曲线为双曲线:

$$r^2(x) = r_0^2 + x^2$$

(1)

在上述范围以外, 则不符合双曲线方程, 见图 2, 其中 $\delta = r_0 \tan(\phi/2)$, ϕ 为波束角。

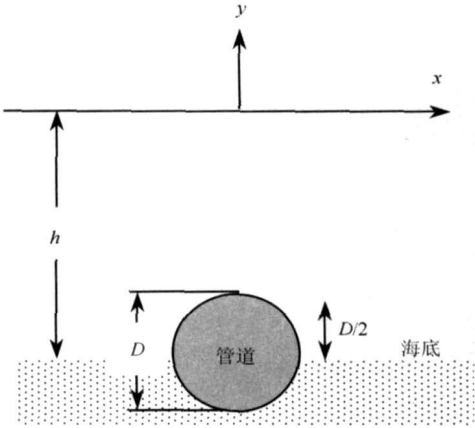


图 1 海底管道示意

Fig. 1 Definition of notation

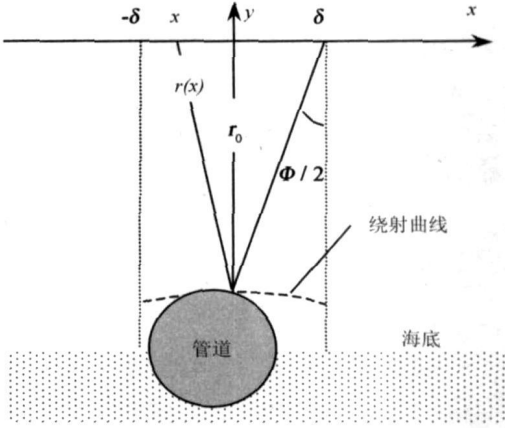


图 2 海底管道的绕射曲线

Fig. 2 Diffraction curve of submarine pipeline

1.1.2 反射曲线

人们很早就注意到^[1], 当测深仪经过海底斜坡时, 会发生测量误差, 海底会发生变形, 测深仪显示的水深为 z_m , 并不是测深仪垂直下方的水深, 而是距斜坡上方水平距离为 $X = z_m \sin(\zeta)$ (当海底坡度 ζ 小于二分之一波束角时 $\phi/2$), 或 $X = z_m \sin(\phi/2)$ (当海底坡度 ζ 大于二分之一波束角时 $\phi/2$) 的海底斜距。

同样, 由上述可知, 对于可用连续可导函数表示的海底面, 其斜率为非零的每一点, 在用单波束测量时, 均会发生水平向的位置偏移和水深值的改变^[8]。

按上述方式对于海底管道上的每一点进行正演, 可以获得管道的模拟记录图像。海底管道的坐标如图 1 所示, 由于只考虑声线在水体中的直线传播, 单波束仅能探测到管道的上半部分, 该剖面可用半圆表示:

$$y = -h - \sqrt{(D/2)^2 - x^2}$$

(2)

当半圆曲线的斜率等于波束角的一半时,

$$x = x_0 \pm \sqrt{\frac{(D/2)^2 \tan^2(\phi/2)}{1 + \tan^2(\phi/2)}}$$

(3)

模拟记录上显示的管道位置可由下式确定:

当 $|x| > x_0$ 时, 模拟记录上管道的反射记录可用下式确定, $x < -|x_0|$ 时, 式(4)右边第二项取正号, 反之取负号。

$$X = x \pm (-h - \sqrt{(D/2)^2 - x^2}) \tan(\phi/2) \tag{4}$$

$$Y = (-h - \sqrt{(D/2)^2 - x^2}) \sec(\phi/2) \tag{5}$$

当 $|x| \leq x_0$ 时, 模拟记录上管道的反射记录可用下式确定:

$$X = x + (-h - \sqrt{(D/2)^2 - x^2}) y'(x) \tag{6}$$

$$Y = (-h - \sqrt{(D/2)^2 - x^2}) \sec\{\arctan[y'(x)]\} \tag{7}$$

式中: $y'(x)$ 为海底地形曲线在 x 处的斜率。

1.1.3 海底管道回波特征

图 3 和图 4 分别为水深 10 m、100 m, 管径为 1 m 时, 用上述二种方法计算的管道正演图像; 图 5 和图 6 分别为不同水深处真实模拟记录与计算曲线的比较图。从图上可以看出, 绕射原理计算出来的曲线部分与反射曲线重合。浅水时, 反射曲线更能反映管道的真实形态, 也与记录到的回波接近; 深水时无论是绕射曲线还是反射曲线均与管道的真实形态有较大差异, 但绕射曲线与记录到的回波更接近。

当单波束对海底管道沟进行测量时, 因为波束角的存在仍然会使管道沟的模拟记录发生变形。一般情况下, 对于连续可导的凹形海底任意点 x_0 , 如果 x_0 的曲率半径小于等于该点的水深值, 该点的某一邻域内的水深就无法被单波束探测到, 从而发生水深缺失; 相反, 如果该点的曲率半径大于水深值, 该凹点的水深就不会缺失, 单波束就能探测到该点的水深。对于海底管道沟而言, 因管道沟的宽度有限(通常在 6 m 以内), 除极浅水区域外, 沟底的曲率半径通常都小于该点的水深, 所以单波束探测到的海底管道沟都会发生变形。

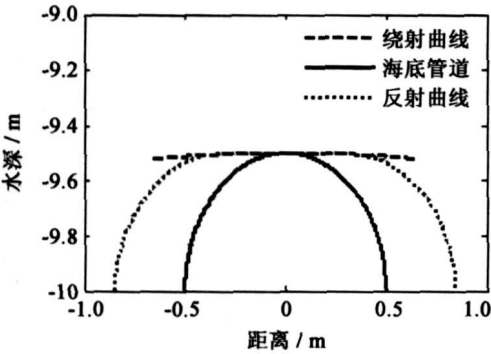


图 3 水深 10 m 时计算得到的曲线

Fig. 3 Calculated curves(water depth = 10 m)

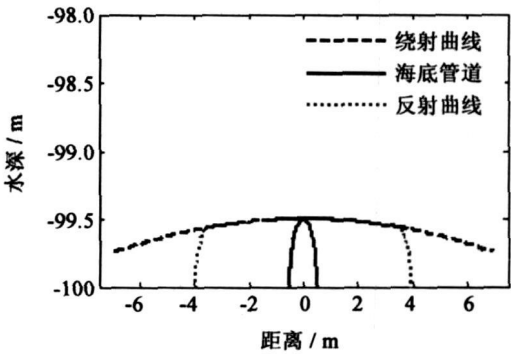


图 4 水深 100 m 时计算得到的曲线

Fig. 4 Calculated curves(water depth = 100 m)

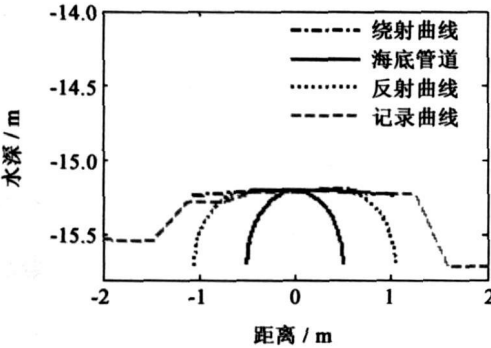


图 5 真实记录曲线与计算曲线比较

Fig. 5 Comparison between calculated curves and recording curve

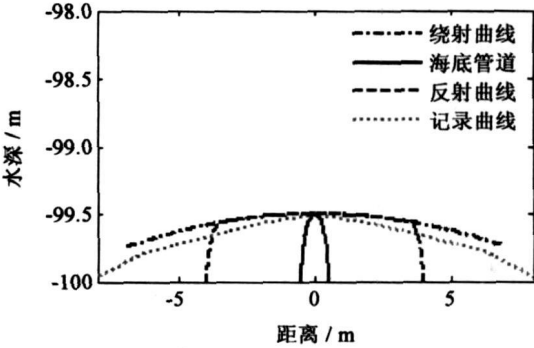


图 6 真实记录曲线与计算曲线比较

Fig. 6 Comparison between calculated curves and recording curve

1.2 管道探测影响因素分析

1.2.1 换能器波束角的影响

由图7可知, 随着波束角的减小, 得到反射曲线越能反映真实管道, 但在实际应用中, 波束角的大小受到换能器尺寸的影响, 同时波束角还会影响到接收回波的稳定性, 所以, 实际使用中, 波束角会有一定的范围。

1.2.2 探测高度的影响

图8是假设波束角为 4° 的单波束对管径为1 m的管道进行探测, 水深分别为10、50和100 m时的反射曲线。由此图可以看出水深对管道探测的影响非常大, 随着水深的增加, 反射曲线的侧向变形非常明显, 大于50 m水深以后, 反射曲线已基本不能反映管道的形态, 记录回波与绕射波更接近。

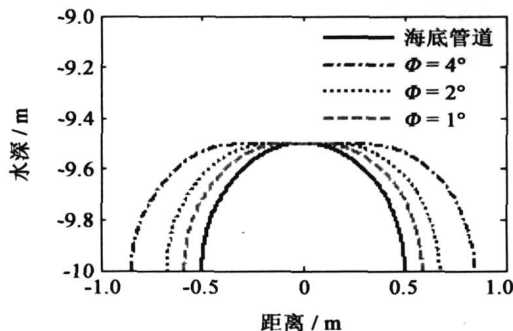


图7 波束角对海底管道探测的影响(水深为10 m)

Fig. 7 Influence of beam angle on the detection ability

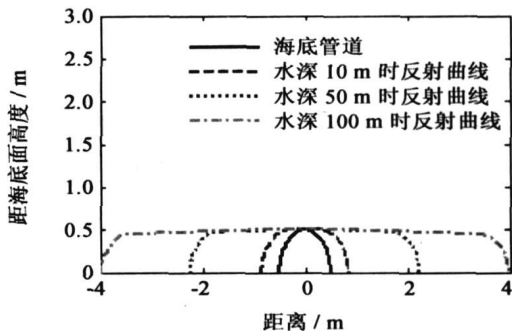


图8 探测深度对海底管道探测的影响

Fig. 8 Influence of water depth on the detection ability

1.2.3 模拟记录的解释方法

根据上述规律, 海底管道探测获得的水深模拟图像解释方法可以概括如下:

1) 管道位置的确定。根据上述规律, 管道的顶点在探测时不发生变形, 模拟记录上得到的管道反射曲线的最大值点就管道的顶点, 由此可以确定海底管道的位置。

2) 管道悬空状态的判断。海底管道悬空与否是海底管道检测中需要查明的重要问题之一, 由于水深记录上的管道具有侧向变形, 管道沟也因沟壁的变形和沟底数据的缺少而变浅变窄, 只靠单波束测深仪器本身难以对此问题给出全面的判断。在水深记录上, 如果管顶至海底面的垂向距离大于管径, 就可以断定管道处于悬空状态。其余情况则需要配合侧扫声纳等设备进行综合判断。

3) 管道掩埋状况的判断。海底管道掩埋状况也是海底管道检测中需要查明的重要问题之一, 但通常情况下, 单波束的频率较高, 无法穿透沉积物, 探测不到掩埋的海底管道。当海底管道直接敷设在海底管道沟中时, 因水深记录中海底管道沟发生变形而变浅变窄, 有时模拟记录上会有管道发生了掩埋的虚假图像, 需要配合侧扫声纳等设备进行综合判断。

2 提高单波束测深仪海底管道探测能力的技术措施

为提高单波束对海底管道探测的分辨率, 在现场施测和数据处理时, 有以下几点需要特别注意。

2.1 选择合适的单波束测深仪

由上述分析可知, 随换能器工作频率的增加, 波束角的减小, 水深记录上的管道图像越接近海底管道的真实形状, 但高频的穿透性差, 因此要求低频换能器的频率要尽可能的低, 以保证一定的穿透深度。因此海底管道探测时要求使用双频单波束测深仪, 高频换能器要求频率高, 窄波束角; 低频换能器要求频率尽可能地低一些(见图9)。测深仪要同时具备数据采集和模拟记录打印能力。

2.2 消除波浪引起的误差

波浪引起的海底起伏会影响海底管道沟的探测, 所以必须消除波浪带来的水深误差, 见图10。波浪带来的误差通常可以通过两种方法消除: 一是通过硬件, 如惯性运动传感器或涌浪补偿器来进行滤波; 一是对采集的水深数据进行滤波处理。后一种方法无法对模拟记录进行滤波, 且滤波的效果不稳定, 因此作者建议采取前一种滤波方式。

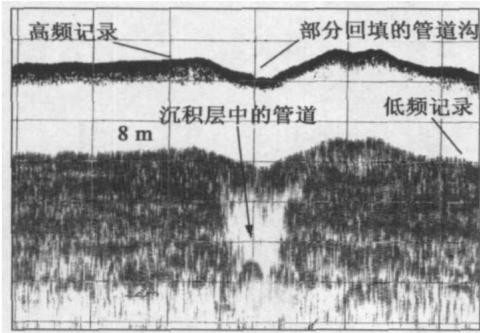


图 9 已进行涌浪滤波处理的双频测深记录
Fig. 9 Echogram of SBES with heave compensated

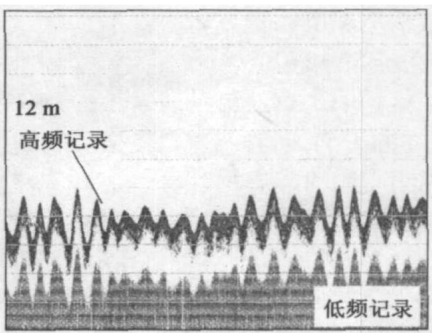


图 10 未进行涌浪滤波处理的双频测深记录
Fig. 10 Echogram of SBES without heave compensated

2.3 提高数据采集点密度

为了更好地描述海底管道的形态,必须要有高密度的数据,这就要求在数据采集时,要采用有效的最高换能器发射频率,同时要求船速要尽可能的低。

2.4 降低探测高度

由上述反射特征可知,施测高度对管道检测精度的影响非常大,探测深度同时也决定换能器的发射频率。在海洋工程实践中,降低施测高度往往是通过将测深仪安装在 ROV 上来实现的,见图 11, 12。

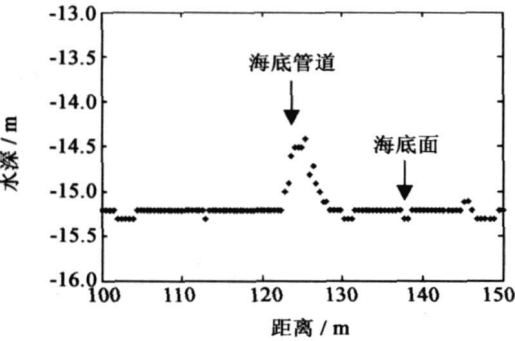


图 11 穿越铺设在海底的海底管道的地形剖面(单波束)
Fig. 11 Profiler crossing the pipeline gained from SBEC

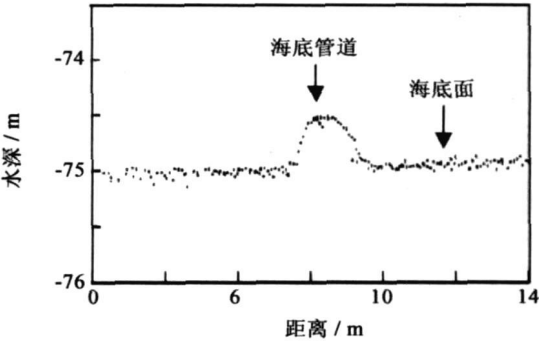


图 12 穿越铺设在海底的海底管道的地形剖面 (ROV + 单波束)
Fig. 12 Profiler crossing the pipeline gained from SBEC installed on the ROV

3 工程实例

3.1 海底管道敷设在海底面上

对于敷设于海底面上的海底管道,在一定的水深范围内,单波束测深仪很容易探测到海底管道,如图 13 和图 14。在已知管道直径的情况下,通过计算管道顶部到海底面的距离,可以判断管道的掩埋情况。图 13 中,管道基本未被掩埋,而图 14 中,管道已被掩埋约三分之二。

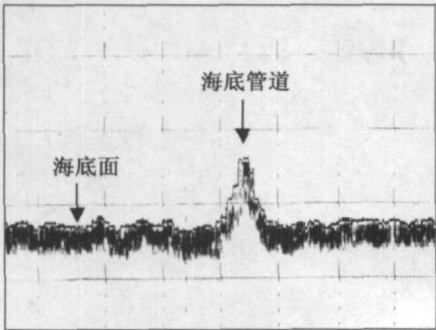


图 13 部分掩埋的海底管道

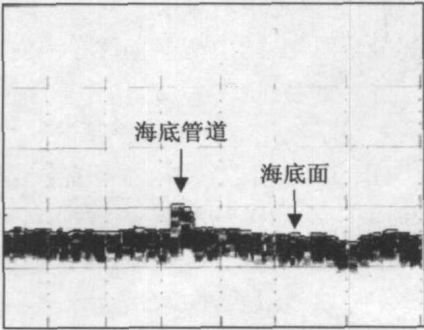


图 14 部分掩埋的海底管道

3.2 海底管道敷设在管道沟内

用单波束测深仪对敷设在管道沟中的海底管道进行探测, 主要受水深、沟宽和沟深的影响, 情况就比较复杂, 见图 15~18。图 15 和图 16 为浅水的探测记录, 从图中可以清晰地判断管道和管道沟的相互关系, 二图中海底管道均未被完全掩埋, 图 15 中海底管道顶部高出海底面, 图 16 中海底管道低于海底面, 但管道的掩埋程度因受管道沟变形的影响而难以做出判断。图 17 和图 18 为深水探测记录, 图 17 中管道顶部低于平均海底面, 而图 18 中管道顶部高出平均海底面, 但管道在管道沟中的掩埋情况因受变形的影响而难以判断。

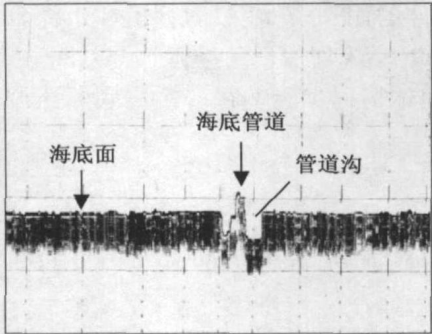


图 15 管道沟中的海底管道
Fig. 15 Pipeline in the trench

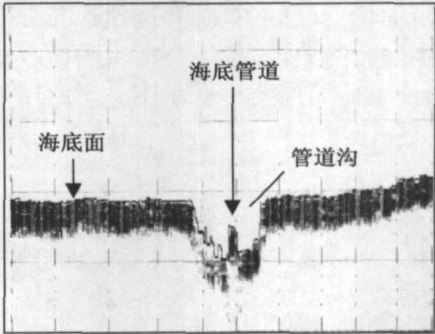


图 16 管道沟中的海底管道
Fig. 16 Pipeline in the trench

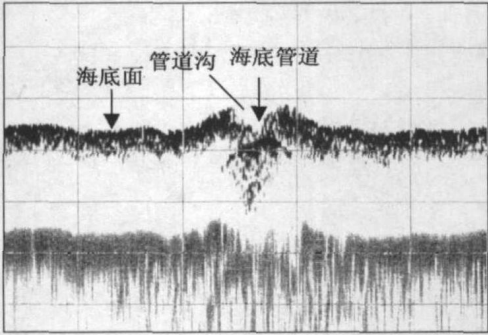


图 17 管道沟中的海底管道
Fig. 17 Pipeline in the trench

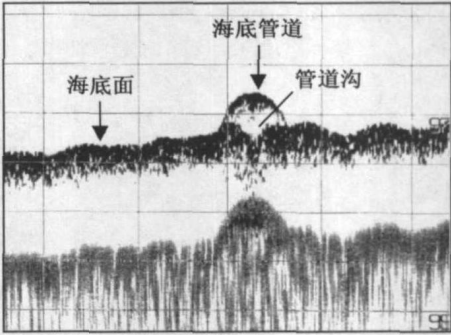


图 18 管道沟中的海底管道
Fig. 18 Pipeline in the trench

3.3 海底管道的悬空

受探测深度的影响, 单波束测深仪不能完全判断出海底管道的悬空情况。图 18~20 中均为海底管道沟中的管道探测记录, 从图上看, 管道似乎均处于悬空状态, 但仔细分析, 就会发现只有图 19 中管道可以判断为悬空状态(管道顶部至平均海底面的距离大于管道的直径), 图 18 和图 20 中因管道和管道沟的变形而无法判断。

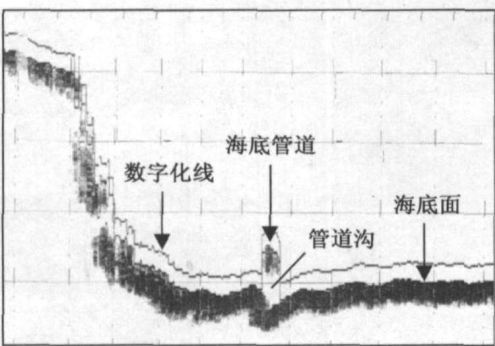


图 19 管道沟中的海底管道
Fig. 19 Pipeline in the trench

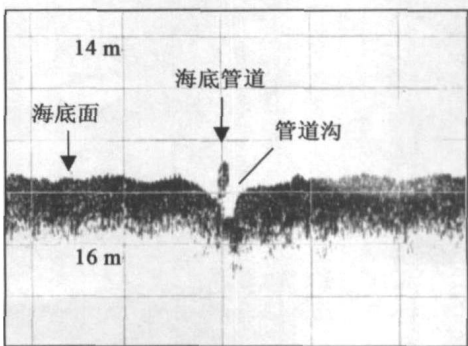


图 20 管道沟中的海底管道
Fig. 20 Pipeline in the trench

3.4 海底管道的掩埋

海底管道的掩埋情况有时同样会因记录中的变形问题而难以判断。图 9 和图 17 为海底管道的探测记

录,从图上看,管道似乎均处于被掩埋的情况,但仔细分析,就会发现图 9 中的管道处于完全掩埋的状态,而图 17 因受管道和管道沟变形的影响而难以判断。实际上通过侧扫声纳的探测可知,图 17 中管道是未被完全掩埋的。

4 结 语

作为一种简便和实用的物理探测手段,单波束测深技术可以应用于海底管道的探测。单波束测深技术可以对管道的位置、悬空状态和掩埋状况进行探测,但受技术条件的限制,对埋藏的管道和水深较深的海底管道的探测能力较差,需要综合运用侧扫声纳、浅地层剖面仪和 ROV 等物探设备进行综合判断。

致谢:感谢国家海洋局第二海洋研究所海洋工程中心海洋工程地球物理实验室在多次海底管道调查中的大力支持!

参考文献:

- [1] IHO. Manual on hydrograph, Publication-M13[M] . Intemational Hydrographic bureau. 4 Quai Antoine 1er, B. P. 445-MC 98011 MONACO Cedex, 2005.
- [2] USACE. Engineering and design hydrographic survey[M] . U. S. Am Corps of Engineering, Washington, DC 20314— 1000, 2004.
- [3] 蔡元忠, 宋 波, 顾斌超, 等. 海底管道掩埋状况调查研究[J] . 海洋工程, 2000, 18(3) : 91— 96.
- [4] 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.
- [5] 崔征科. 海底输油气管道维护性检测中的工程物探技术[J] . 海洋石油, 2006, 26(2) : 104— 107.
- [6] 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.
- [7] 张剑波, 袁超红. 海底管道检测与维修技术[J] . 石油矿场机械, 2005, 34(5) : 6— 10.
- [8] 徐晓晗, 刘雁春, 肖付民, 等. 海底地形测量波束角效应改进模型[J] . 海洋测绘, 2005, 25(1) : 10— 13.