

高频浅地层剖面技术 在海底管道探测中的应用

刘 臻,曹立华,童思友*,蒲进菁,徐继尚

(中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100)

摘 要:在海底管道的探测中,为获知海管在海底的真实赋存状态,确定其埋藏深度或悬跨高度,多使用高频浅地层剖面仪等传统声学设备。但在海底斜坡、凹坑、凸起等不平整地层处,由于设备自身原理造成的地层探测界面偏移、图像失真及资料多解性问题仍困扰着工程人员。通过正演模拟的方法探究高频浅地层剖面仪在海底特殊地层处海管检测的波场传播特征,探讨资料的解释陷阱,并提出了解决方案。研究结果表明,利用浅地层剖面仪探测管道在海底的赋存状态,应将探测图像与海底地形、地貌、沉积物运移等因素结合起来综合考虑,把探测图像回归到真实海底环境中,以准确评价海底管道的安全状态。

关键词:浅地层剖面仪;不平整地层;海底管道;正演模拟

中图分类号:P631.443

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2015.07010

海底油气管道凭借其输送效率高、工期短、投产快等优点,被誉为“海洋油气田的生命线”,但由于海底地形多变、地质灾害频发以及第三方活动致使其运行环境极为恶劣,导致管道自身的安全问题日益凸显。相关研究表明海床运动和波流—构筑物—地基相互作用造成的海管悬跨是海底管道失效的主要原因^[1,2]。海底管道一旦发生事故,不仅给油气生产造成直接的经济损失,而且还会给海洋生态环境带来灾难性的破坏。因此,海底管道铺设完成后应定期(或适时)进行维护性检测,掌握管道在海底的真实赋存状况,确保管道的正常运行和油气正常开采^[3]。

高频浅地层剖面声学探测仪因其经济高效的优势而在海底管道检测中得到广泛应用^[4-6],探测过程沿与管道轴向正交的测线进行走航测量,基

于声波反射原理形成连续断面。由于管道与海底沉积物之间具有较大的波阻抗差异,使得管道和海底的相对位置在断面图像上得以清晰、直观的反映,所获探测资料能够为海底管道的安全评估提供直接的判断依据。但是海洋环境的特殊性决定了海底地形、下伏地层结构及“管—床”相对位置关系都十分复杂,并且浅地层剖面仪所基于的声学探测方法和技术也具有一定的局限性,因此,野外探测资料中的现象并不能够完全反应管道在海底的真实赋存状态,所形成的探测假象往往导致对管道悬跨高度、悬跨长度判定上的失真。笔者从设备工作原理出发,分析和讨论了浅地层剖面仪在海底特殊地形处管道探测中出现的问题,并提出了相关的处理手段,为海底管道的安全评估提供更加真实的探测资料。

1 基本原理

高频浅地层剖面仪作为一种零偏移距的声学探测设备,综合水声学原理、声波转换技术、数字信号处理技术、导航定位技术,形成自激自收单道

收稿日期:2015-03-24

基金项目:国家自然科学基金(41006024)

作者简介:刘 臻(1987—),男,在读硕士,主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail:aaa_liuzhen@126.com

* 通讯作者:童思友(1969—),男,博士,教授,主要从事海洋地球物理方法研究工作。E-mail:tsy@ouc.edu.cn

地震剖面,是探测海底管道的常规手段之一^[4]。探测过程通过发射换能器垂直向海底发射声波信号并穿透海底地层,下行过程中接受各介质的滤波,遇声阻抗界面返回,最终携带有地层信息的反射声波被接收换能器接收(图1)。在生成的高分辨率反射剖面上,不仅能够识别管道路由区浅地层结构、各种灾害地质因素(浅层气、埋藏河道、断层等),而且还能够判断管道与海床的空间位置关系,确定其埋藏深度或悬跨高度。在沿与管线轴向正交的测线上进行测量时,可将海底管道看作一个绕射点,在浅地层剖面仪的波束角范围内,接收到管顶的绕射波,最终在声学剖面上形成以绕射曲线为标志的管道识别特征(图2)。根据绕射

曲线顶点至海底的高度(h)与海底管道的管径(Φ)大小关系可判断出管道掩埋($h < 0$)、裸露($h < 0, h > \Phi$)、悬跨($h < 0, h > \Phi$)的赋存状态。

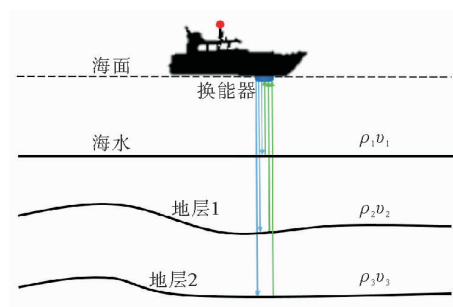


图1 浅地层剖面工作原理

Fig. 1 Working principle of sub-bottom profiler

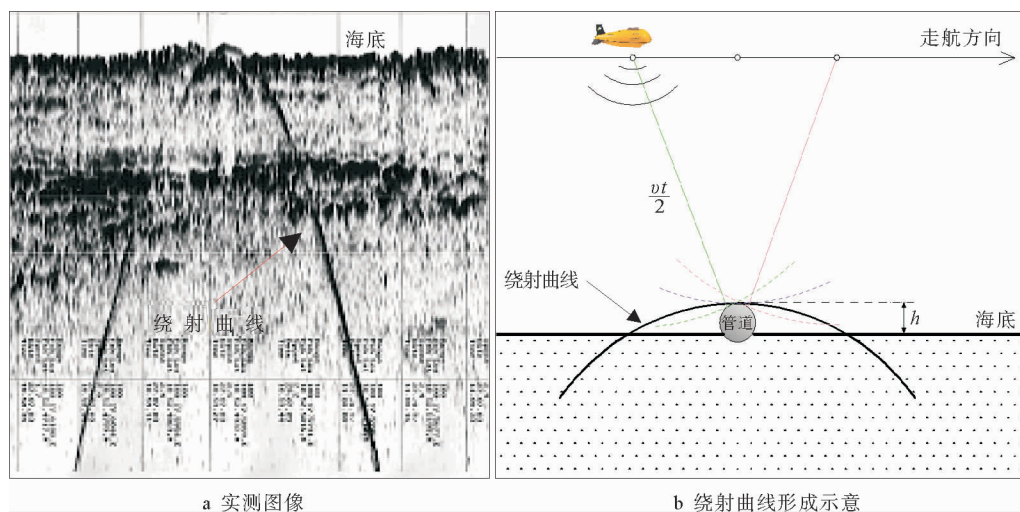


图2 海底管道浅剖探测识别特征

Fig. 2 Signatures of a submarine pipeline in sub-bottom profile

2 海底不平整地层反射界面的偏移现象

在海洋环境中由于波浪、潮流等水动力的变化,海底地形时刻处于动态调整之中,海底管道路由区地形地貌的变化直接影响管道运营安全。一方面,海底沉积物性质的差异造成局部水动力的变化,导致海床产生差异冲刷,形成冲刷沟、坑等不平整海底地形(图3a、b),近底泥沙的运动掏空管道下方的基土使管道呈悬跨状态,对海底管道构成威胁;另一方面,在潮流等水动力作用下活动性沙波的起伏、迁移造成海底局部地形的改变,不

仅使管道发生位移,而且还会掏蚀海底管道下方的土体(图3c、d),引起管道悬跨甚至折断^[7]。

运用高频浅地层剖面仪对海底管道进行探测,最重要的是检测管道与海床的相对位置关系,探测形成的自激自收地震剖面大致反映了海底浅地层的构造形态和“管-床”相对关系,是进行地质解释与判断管道状态的基础资料。基于声波传播理论,自激自收得到的反射信息对应的反射点位置来自以 $\frac{vt}{2}$ 为半径,以自激自收点为圆心的圆弧上的任意一点,但总是将界面反射点的位置显示在换能器下方的铅垂线上。当地层水平时,这种显示方式是符合实际情况的;但当地层倾斜时

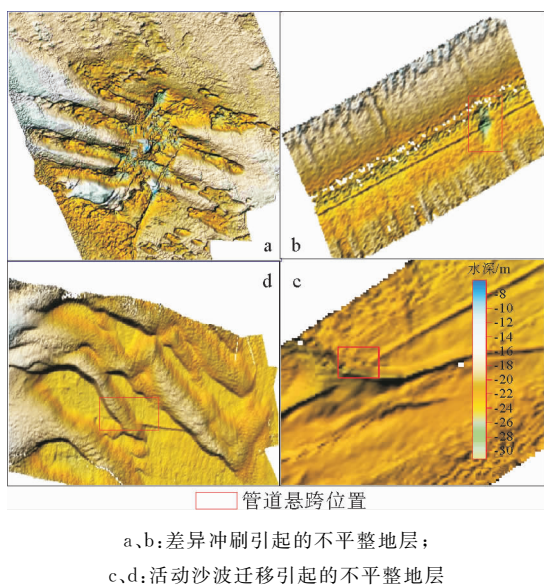


图3 海底管道悬跨处非水平海底地形

Fig. 3 Topography of non-horizontal seabed where pipelines span

(图 4a), 换能器分别位于 A、B 两点自激自收, 接收到的反射波信号来自海底 A''、B'' 两点, 反射点位置偏离了换能器下方的铅垂线, 而实际上却把反射信号显示在 A、B 两点铅垂方向的 A'、B' 两点处, 使得反射点的位置沿地层下倾方向发生了偏移, 最终造成探测图像上的浅地层界面偏移失真^[8]。同样, 浅地层剖面仪在凹坑和凸起地形处探测时, 所形成的自激自收地震剖面也存在地层偏移现象, 前者形成了“蝴蝶结”式的识别特征, 并在视觉上产生凹坑变浅的假象(图 4b), 后者使得凸起两侧边坡的高度变大、倾角变小(图 4c)。因此, 如不对探测图像上声学反射界面的偏移失真现象加以识别改正, 常常会对管道在海底的赋存状态产生误判, 最终影响工程人员对海底管道

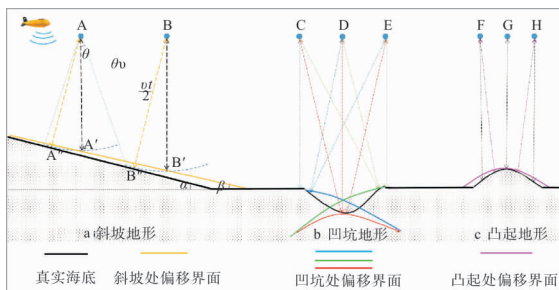


图4 不平整地形偏移现象示意

Fig. 4 Schematic diagram of migration of a uneven topography

的安全评估。

3 正演模拟探究非水平界面对管跨高度判定的影响与修正

本文依据地震正演模拟理论在计算机 Matlab 平台上实现高频浅地层剖面仪对管道路由区不平整地层自激自收探测的正演模拟仿真。由建立的“管道—海床”共存地质模型(图 5)生成相应的反射地震剖面, 通过合成地震记录识别管道与海床的相对位置关系, 弄清波场在管床共存环境中的传播特征, 进而分析海底斜坡、凹坑等不平整地层的偏移现象对管道在位状态的影响。针对浅地层剖面仪自激自收的探测特点, 有针对性地采取地层反偏移方法, 将不平整反射界面归位到真实位置, 还原“管道—海床”的真实位置关系。

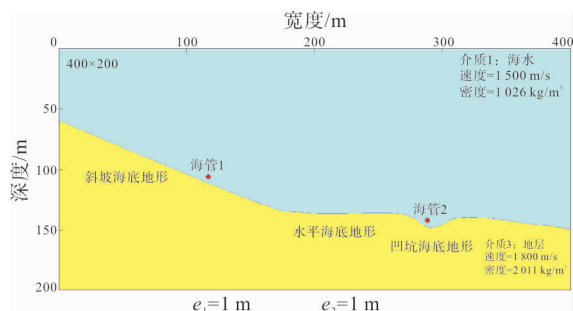


图5 “管—床”共存地质模型

Fig. 5 Coexistence geological model of pipelines and seabed

“管道—海床”共存地质模型设计参数如下(图 5): 模型宽度为 400 m, 深度为 200 m; 在模型横向坐标轴由小到大的方向上依次设计海底斜坡—水平海底—海底凹坑—海底斜坡地形; 模型中各介质由上到下分别为: 介质 1—海水, 速度 $v_1 = 1500 \text{ m/s}$, 密度 $\rho_1 = 1026 \text{ kg/m}^3$; 介质 2—海底管道, 速度 $v_2 = 4500 \text{ m/s}$, 密度 $\rho_2 = 3850 \text{ kg/m}^3$, 海管直径 $\Phi = 1 \text{ m}$; 介质 3—海底地层, 速度 $v_3 = 1800 \text{ m/s}$, 密度 $\rho_3 = 2011 \text{ kg/m}^3$ 。海管 1 在左侧斜坡地形处的悬跨高度 $e_1 = 1 \text{ m}$, 海管 2 在海底凹坑中的悬跨高度 $e_2 = 1 \text{ m}$ 。根据地质模型的大小和野外作业参数, 将正演观测系统的采集参数做以下定义: 炮间距 $L = 1 \text{ m}$, 炮点数 $N = 400$ 。

从正演得到的合成地震记录(图 6)上可以看到,斜坡地形处探测出的海底界面发生了向右的偏移,表现为每一炮点位置水深值减小。海底凹坑处“蝴蝶结”型声波图像同相轴和管道“双曲线”型同相轴同时出现,显得较为杂乱。双曲线的顶点(图 6 中红色标注点)即海底管道真实位置,在地质模型的设计中,2 处管道均位于海底上方 1 m 处,但是探测图像中处在斜坡地形处的管道 1 和处在海底凹坑中的管道 2,其位置都在海底界面以下,处于掩埋状态。之所以在探测图像中产生这种假象,是因为在使用浅地层剖面仪探测时,声

波在波束角范围内呈球面扩散所造成的海床形态失真和海底界面移位,从而使失真的海底界面混淆了管道的真实赋存状态。由此可知,运用浅地层剖面仪进行海底管道探测,必须对不平整地层界面进行归位校正,还原真实的地层深度与倾角,消除杂乱的绕射现象后再对管道的状态进行评判。由地质模型的设计参数,将 Kirchhoff 积分叠后偏移方法应用到正演模拟的合成地震记录中(图 7a),得到偏移剖面(图 7b)。从偏移剖面可以看到管道位于海底上方,呈悬跨状态,与地质模型一致,还原了真实的相对位置关系。

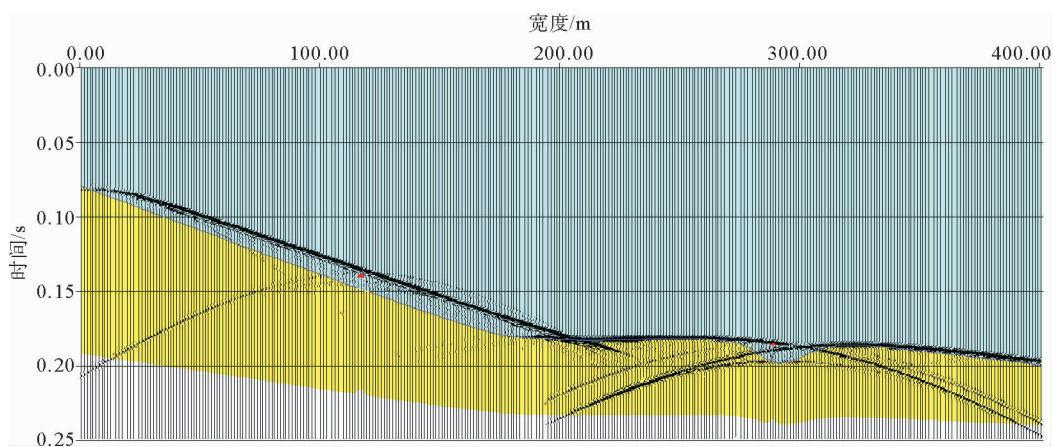


图 6 “管—床”共存地质模型正演模拟记录

Fig. 6 Forward simulation records of coexistence geological model of pipelines and seabed

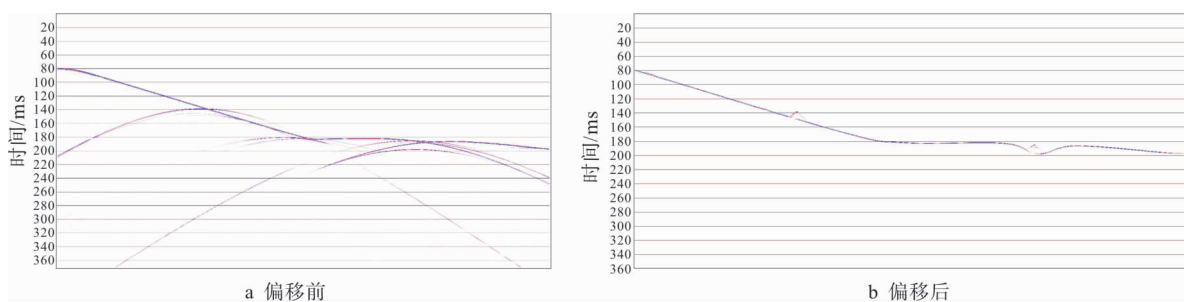


图 7 “管—床”共存地质模型正演模拟记录偏移前(a)后(b)对比

Fig. 7 Comparison of forward simulation records of pipelines and seabed coexistence geological model before and after migration

4 结语

高频浅地层剖面仪作为目前较为成熟的海底管道声学探测设备,其探测精度和图像质量越来

越高,为评估管线在海底的赋存状态提供了强有力的数据支撑。但是在资料后处理和解释方面存在的问题依然很多,工程人员大都依据探测资料直接判读管线在海底的在位信息,忽略了由于仪器自身原理产生的资料多解性、地层偏移、图像失

真等问题,没有将地震反射剖面进行偏移归位,也没有将探测现象回归到真实海底冲淤环境中评估海底管道的赋存状态,因此,在管线评估过程中必须将探测图像与海底地形、地貌、沉积物运移等因素结合起来综合考虑。

笔者基于高频浅地层剖面仪对海底管线探测资料的判读,分析并讨论了这种仪器在海底特殊地形处的探测假象及产生的原因。运用浅地层剖面仪对不平整地层处海底管线进行探测时,由于波束角的存在,换能器接收到的声波来自以换能器为圆心, $(\frac{vt}{2})_{\min}$ 为半径的圆弧与海底界面的交点,使反射点的位置偏离了换能器的铅垂方向,而把接收到的反射波显示到了换能器正下方,从而造成探测图像上海底声学反射界面的偏移失真,进而无法准确判断海底管道与海底的相对位置关系。通过 Kirchhoff 积分叠后偏移方法将自激自收地震剖面进行偏移归位,还原了海底的真实地形,避免了对管线赋存状态的误判。因此,对海底不平整地层处管道赋存状态的判定应引起足够的重视,其探测图像必须通过一定方法将海底地层

偏移归位,还原“管一床”真实位置关系,消除解释误区。

参考文献:

- [1] Herbich J B. Offshore pipeline design elements[M]. New York: M. Dekker, 1981.
- [2] Demars K R, Vanover E A. Measurement of wave induced pressures and stresses in a sand bed[J]. Marine Geotechnology, 1985, 6(1): 20-59.
- [3] 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.
- [4] Tian W M. Integrated method for the detection and location of underwater pipelines[J]. Applied Acoustics, 2008, 69: 387-398.
- [5] 马胜中, 陈炎标, 陈太浩. 近岸海底管线路由调查与管线的探测[J]. 南海地质研究, 2005(1): 101-107.
- [6] 周兴华, 姜小俊, 史永忠. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2007, 27(4): 64-67.
- [7] Pu J J, Xu J S, Li G X. Self-burial and potential hazards of a submarine pipeline in the sand wave area in the South China Sea[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2013, 4(2): 124-130.
- [8] 董敏煜. 地震勘探[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.

PROBLEMS OF APPLICATION OF HIGH-FREQUENCY SUB-BOTTOM PROFILER TECHNOLOGY TO SUBMARINE PIPELINE INSPECTION

LIU Zhen, CAO Lihua, TONG Siyou*, PU Jinjing, XU Jishang

(College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The Sub-bottom profiler is widely used to detect submarine pipelines, especially the burial depth and spanning height. However, the working principle of the device itself often causes distortion of detecting images and multiplicity of data under peculiar seabed topography. We, therefore, studied in this paper the interference wave features of pipes at various topographic features, such as slope, pit, bump and non-horizontal strata by forward modeling method in order to eliminate the traps in data interpretation. It is concluded that pipeline assessment should consider image and seabed topography, as well as sediment transport and other factors comprehensively. Image interpretation should be tested under the real underwater environment.

Key words: sub-bottom profiler; uneven stratum; submarine pipeline; forward simulation