

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.008

基于声波探测的海底管道非掩埋状态检测方法

熊春宝¹,李志¹,孙 轩²,丁建棣¹,陈小华³

(1. 天津大学建筑工程学院,天津 300350; 2. 南开大学周恩来政府管理学院,天津 300350;
3. 天津市陆海测绘有限公司,天津 300191)

摘要: 基于声波探测技术,提出一种对海底管道非掩埋状态进行联合检测的方法,以山东胜利油田某海底输油管道为对象,设计一种双声纳探头多波束测深系统,并联合侧扫声纳系统,通过对系统参数进行分析、优化,从而实现对海底管道非掩埋状态的高效精确检测。分析检测结果表明:基于双声纳探头多波束系统的海底管道检测可获得高密度的点云数据,显著提高了管道检测数据的稳定性及可靠性;侧扫声纳系统的良好检测效果有赖于其声波掠射角的最佳取值;参数优化后的联合检测系统的检测效率得到显著提高,能够精确判断出管道的实际状态。

关键词: 多波束系统;侧扫声纳;海底管道;非掩埋状态;参数优化;联合检测方法

中图分类号: P756.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)05-0425-07

Integrated acoustic survey method for inspecting the unburied status of submarine pipeline

XIONG Chunbao¹, LI Zhi¹, SUN Xuan², DING Jiandi¹, CEHN Xiaohua³

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2. Zhou Enlai School of Government, Nankai University, Tianjin 300350, China;
3. Tianjin Surveying and Hydrography Co., Ltd., Tianjin 300191, China)

Abstract: Based on acoustic survey, an integrated method for inspecting the unburied status of submarine pipeline is proposed. A Multi-Beam Bathymetric System (MBS) with dual-sonar sensors and a side-scan sonar system is employed in this method, and analyzing and optimizing of system parameters are implemented for efficient and accurate inspection of the unburied status of submarine pipeline at Shengli Oil Field in Shandong Province. The analysis of inspection results shows that the MBS with dual sonar sensors is able to obtain high-density point cloud data of submarine pipeline, which greatly improves the stability and reliability of the inspecting data. The well inspecting effect of a side-scan sonar system is dependant on the optimum value of its acoustic grazing angle. With the help of the optimized system parameters, the detection efficiency of the integrated system is significantly improved so that the actual status of submarine pipe can be determined more precisely.

Key words: multi-beam bathymetric system (MBS); side-scan sonar; submarine pipeline; unburied status; parameter optimization; integrated method for inspecting

由于海床常年遭受波浪、海流冲刷等作用,因此海底管道服役环境恶劣,容易出现非掩埋(裸露及悬空)状态^[1]。裸露及悬空于海床面之上的管道受海潮流冲击,形成较大的拉力,当裸露或悬空跨度足够长,造成管道形变过大及内应力大幅增加,易产生疲劳振动,甚至引起管道断裂^[2-5],严重威胁海上油气生产安全,因此亟需采用合适的检测方法对海底管道的精确状态进行安全检测^[6-8]。

收稿日期: 2016-08-12
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(NKZXB1483)
作者简介: 熊春宝(1964—),男,湖北荆州人,教授,博士,主要从事工程健康监测及海底管道检测研究。E-mail: luhai_tj@126.com
通信作者: 李志,博士研究生。E-mail: rangolee@tju.edu.cn

基于声波探测的多波束测深系统及侧扫声纳系统,实现了海底地形地貌的宽覆盖、高分辨探测,成为海底管道非掩埋状态检测中不可或缺的设备^[9-10]。然而,在检测过程中,由于系统自身及海况环境的复杂性以及检测数据的海量性,使其在应用过程中存在以下问题^[11-15]:(a)传统多波束系统在进行检测时,由于受波束开角的影响,多波束系统边缘波束逐渐发散,严重影响多波束测深数据精度,从而给位于海沟等复杂海底地形的非掩埋管道的检测带来困难;(b)侧扫声纳的声波掠射角对于检测效果的影响很大,但在海底管道状态检测时往往被忽略,导致检测结果出现偏差;(c)基于侧扫声纳及多波束系统的管道状态检测中,单一的检测方法因受工作原理的限制,往往只能确定海底管道的部分特征,很难全面反映管道的实际状态。

针对上述海底管道非掩埋状态检测方面存在的不足,基于声波探测技术,设计了双声纳探头多波束系统及侧扫声纳系统联合检测方法,通过分析多波束系统的波束开角及侧扫声纳系统的声波掠射角对于检测精度和检测效果的影响,对系统的这2个重要技术参数进行优化设计,通过对山东胜利油田某海底管道状态进行检测试验,以验证所提联合检测方法的可行性和参数优化设计的有效性。

1 联合检测方法原理

1.1 侧扫声纳系统

侧扫声纳通过拖鱼上的换能器向沿航迹两侧方向发射高频声脉冲,当声波碰到海底界面时发生散射,根据回波信号的强弱,形成海底地貌特征图。侧扫声纳对非掩埋的海底管道进行检测时,海床的影像呈灰色,由于管道产生的散射较强,在声图上显示为黑色的条状目标物,受到管道遮挡的海床,接收不到声脉冲,其声线受到屏蔽,在声图上显示为白色的声影区,因此可根据侧扫声纳的声图来确定管道的位置状态^[16]。

1.2 双探头多波束系统

多波束测深仪向海底发射一个由数百个单波束组成的扇形波束,该扇形波束垂直于航迹线分布,扇形角称为波束开角。当采用多波束系统进行海底管道检测时,减小波束开角,能有效提高检测分辨率,但由于扫描宽度变窄,检测效率降低;反之,当增大波束开角时,边缘波束的回波信号密度迅速降低,其信号质量严重降低,且对其他波束的回波信号造成干扰,形成噪声,导致多波束测深数据存在一定数量的异常值,这些异常值严重影响检测结果。因此,需对多波束数据水深异常值进行处理,其处理方法一般采用联合不确定度测深估计算法:利用实测水深数据,通过网格节点一定邻域范围内捕获的多个测深点,联合这些测深点的深度值和不确定度对网格节点处的水深及其误差进行动态滤波、估计与更新,有效剔除水深异常值^[17]。

令 $s_i = (\xi_i, \sigma_{H,i}^2, \sigma_{V,i}^2)^T$, 其中 $\xi_i, \sigma_{H,i}^2, \sigma_{V,i}^2$ 分别为测深点 i 的深度、水平测量方差、垂直测量方差。基于海底表面的连续性原则以及海底局部的空间相关性,则测深点 i 对网格节点 j 的信息传播模型为

$$e_j[i] = [d_{ij}, \sigma_{ij}^2]^T \tag{1}$$

其中
$$\sigma_{ij}^2 = \sigma_{V,i}^2 \left[1 + \left(\frac{\delta_{ij} + s_H \sigma_{H,i}}{\Delta_{\min}} \right)^m \right]$$

式中: d_{ij}, σ_{ij}^2 ——测深点 i 对网格节点 j 的传播深度和传播方差; δ_{ij} ——测深点 i 到网格节点 j 的距离; s_H ——水平误差尺度因子; $\Delta_{\min}$ ——最小网格节点间隔; m ——距离幂指数。

由式(1)可知, σ_{ij}^2 除了与 $\sigma_{H,i}^2$ 和 $\sigma_{V,i}^2$ 有关,还受 δ_{ij} 的影响,即随着 δ_{ij} 的增大而迅速增大。

假设当前节点 j 的估计为

$$\zeta_j[n] = (\tilde{z}_j[n|n], \tilde{\sigma}_j[n|n])^T \tag{2}$$

式中: $\tilde{z}_j[n|n], \tilde{\sigma}_j[n|n]$ ——第 n 个测深数据对网格节点 j 的深度估计、传播误差估计。

通过迭代计算,根据网格节点的前位深度与不确定度估计即可快速获得更新后的当前节点估计,且节点的深度与不确定度估计精度随着测深数据点个数的增加而迅速提高。鉴于此,采用双探头多波束测深系统,在未减小波束开角、确保检测效率的前提下,又可大大增加回波信号的密度和测深数据点的个数,从而减少测深数据的异常值,实现对较小的目标物更为精确的检测^[17-18]。

1.3 联合检测方法的优势

由于侧扫声纳系统不受水深影响,因此其扫描范围大,工作效率高,然而,侧扫声纳系统的声图在成像过程中受到海水混响噪声的影响,使得目标边缘或者外形有较大的不规则性,出现图像残缺,给海底管道实际状态的识别带来困难。另外,侧扫声纳系统无法得到水深信息,无法直接准确量测管道悬空状态时的悬空高

度。系统参数优化后的双探头多波束系统加大了回波信号密度,能提供海底地形(含非掩埋管道)的高密度三维点云,从而可以实现对较小目标物的更精确检测,但其波束的扫测范围较小。因此,将侧扫声纳系统与双探头多波束系统联合使用,充分利用各自的优势,从而实现对海底非掩埋管道的实际状态进行高效精确的检测。此联合检测方法流程如下:(a)根据目标管道尺寸、测区水文等信息,对联合检测系统参数进行优化设计;(b)利用侧扫声纳平行于海底管道方向进行扫测,以获取管道的海底状态基本信息,再通过双探头多波束系统沿管道方向进行管道状态的精确检测;(c)联合侧扫声纳及多波束数据成果,以实现管道状态及标高(裸露及悬跨高度)的统一,进行检测成果的表达。

2 系统参数优化分析

2.1 多波束系统波束开角的最优设计

水深、波束开角及航速是影响多波束系统检测效率与检测分辨率的 3 个主要因素^[19]。多波束系统垂直于航迹线方向的横向分辨率 σ_y 为^[20]

$$\sigma_y = \frac{H}{\cos^2 \theta} \frac{\alpha \pi}{180} \tag{3}$$

式中: α ——多波束系统横向波束角; H ——换能器正下方水深; θ ——最边缘入射波束与竖直方向夹角,此时波束开角为 2θ 。

由式(3)可知,多波束系统的 σ_y 与 H 、 2θ 及 α 有关。为了既能高效率检测,又能满足检测结果稳定性、可靠性的要求,需对波束开角进行优化设置。取最边缘波束所对应的边缘波束脚印宽度为横向分辨率,其应不大于被测海底管道的管径 D :

$$\sigma_y \leq D \tag{4}$$

将式(4)代入式(3)可得

$$\cos \theta \geq \sqrt{\frac{H}{D} \frac{\alpha \pi}{180}} \tag{5}$$

根据式(5)可得不同 D 时临界波束开角 $2\theta_r$ 与 H 之间的关系曲线(图 1)。从图 1 可以看出,当 D 一定时,随着 H 的不断增大, $2\theta_r$ 逐渐减小;当 H 一定时,随着 D 的增大, $2\theta_r$ 逐渐增大。因此,根据式(5)可进行最优波束开角范围的设计,在确保检测结果稳定和可靠的同时,使检测效率达到最高。

2.2 侧扫声纳系统声波掠射角的最佳取值

侧扫声纳系统检测悬空状态的海底管道时,声波掠射角 β 是影响检测效果的重要因素。由图 2 可得 β 的计算式:

$$\beta = \arccos \frac{0.5D}{\sqrt{(H_l - h - 0.5D)^2 + L^2}} - \arccos \frac{H_l - h - 0.5D}{\sqrt{(H_l - h - 0.5D)^2 + L^2}} \tag{6}$$

式中: h ——裸露(悬空)管道与海底之间的距离; H_l ——拖鱼距海底面的高度; L ——拖鱼至管道中心的水平距离; R ——发射线至管道影像末端的斜距。

与 H_l 和 L 相比, D 和 h 相对都很小,且为固定值,因此,从式(6)可以看出,侧扫声纳在进行海底管道检测时, β 主要由 H_l 和 L 这 2 个参数决定,即可通过现场调整 H_l 与 L ,以获取不同大小的声波掠射角 β 。

由图 2 还可以得到管道影像末端至管道声影区末端总长度 S 与声波掠射角 β 之间的关系式:

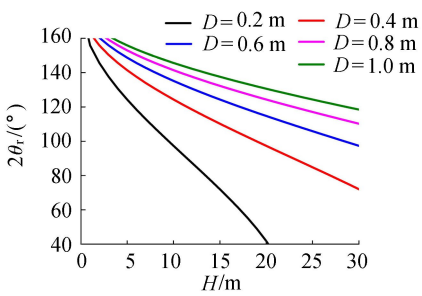


图 1 不同管径下 $2\theta_r$ 与 H 的关系
Fig. 1 Relation between $2\theta_r$ and H at different pipe diameters

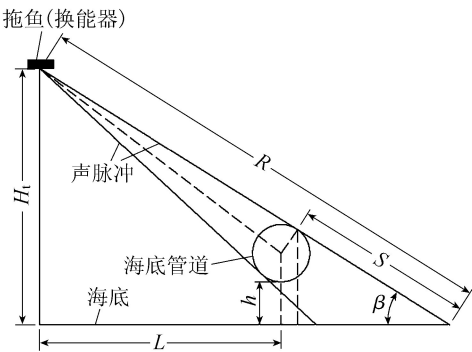


图 2 海底管道侧扫声纳检测示意图
Fig. 2 Inspecting diagram for side-scan sonar of submarine pipeline

$$S=\frac{h+0.5D(1+\cos\beta)}{\sin\beta}$$

(7)

由式(7)可得 S 与 β 之间的关系曲线(图3)。从图3可以看出,随着 β 的增大, S 均单调递减,当 D 为定值时(图3(a)),针对不同 h , 存在一簇临界角 β_c , 当 $\beta < \beta_c$ 时, S 随声波掠射角 β 的变化较为显著;当 $\beta > \beta_c$ 时, S 随 β 变化不敏感。

在侧扫声纳的声图中,为了能准确量取 S , 声影区(即 S)不能太小,从图3可知 β 不能过大;然而,随着 β 的减小,海底反向散射强度逐渐减小,海底散射影像灰度与管道声影区灰度接近,亦不利于管道声影区的准确判别量取。因此,在进行管道检测时,当 β 设定在一定范围(试验表明为临界角 β_c 的邻域内)时,既可保证必要的海底反向散射强度,使海底散射影像与管道声影区之间的边界清晰,同时又能保证一定的管道声影区的长度 S , 便于其准确判别量取。

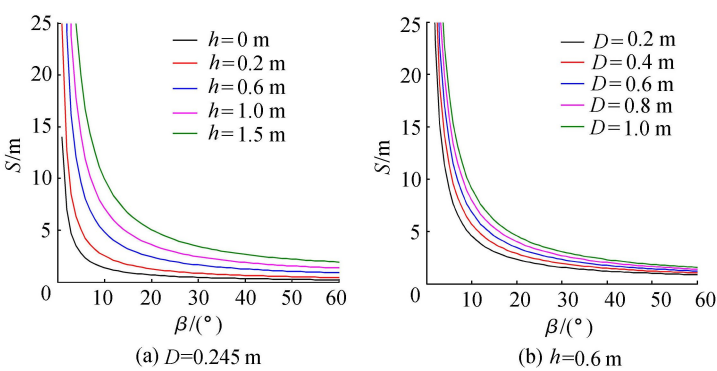


图3 S 与 β 的关系曲线
Fig.3 Relation between S and β

3 海底管道检测试验

3.1 试验方案设计

试验以山东胜利油田某输油管道为检测目标,管道直径 $D=245\text{ mm}$, 管道长度为 691.15 m , 检测海域属于浅水区,水深沿管道检测方向由 11.9 m 到 14.3 m 逐渐加深,平均水深约 13 m 。试验采用 Sonic2024 多波束测深仪,发射频率为 200 kHz 、 300 kHz 、 400 kHz , 为避免双探头声纳之间信号干扰,工作频率分别设置为 200 kHz 与 400 kHz 。试验采用 EdgeTech4200FS 侧扫声纳。此外,辅助设备由 DGPS 导航定位系统、Octans 光纤罗经、姿态传感器 MUR、声速剖面仪 SVP 组成,结合数据处理系统实现海底管道状态的精确检测。

根据目标管道尺寸、检测水域水文资料及系统空间分辨率,对检测系统进行参数优化设计。双探头多波束测深系统对海底目标管道进行实时检测,分别进行了2组试验以供对比分析:(a)通过控制声纳探头的工作状态进行单、双探头系统的实时切换,分别进行了同一波束开角下,单、双探头多波束系统检测试验;(b)通过调节声纳探头波束开角,分别进行了单、双探头多波束系统下不同波束开角的检测试验。侧扫声纳对海底目标管道进行实时检测,在海底管道单侧布置测线。由于进行检测的海域为浅水区,考虑到拖鱼的安全性,在检测过程中,保持拖鱼位于海平面以下 2 m 。

由式(5)通过对多波束系统的波束开角优化计算得临界波束开角为 94.3° 。试验所采用的多波束测深仪,其波束最大开角为 160° , 且 $10^\circ \sim 160^\circ$ 在线连续可调,试验将波束开角分别设计为 130° (工程中常用)与 95° 进行检测对比试验。

试验将多波束系统波束开角分别设计为 130° (工程中常用)与 95° 进行检测对比试验。试验以管道某处悬空高度为 1.01 m 为例,由图2可知,设 $S=5\text{ m}$ 为临界角 β_c 的选取依据,则由式(7)计算可得侧扫声纳系统的声波掠射角临界范围 $\beta_c=14.4^\circ$, 试验中取 $\beta=15^\circ$ 。由于海底的不平整, H_t 在 9.9 m 到 12.3 m 之间变化(可实时测得), 由此可算得 L 约为 32.3 m 到 41.2 m , 即侧扫声纳的测线可以布置于距离管道中心 $32\text{ m} \leq L \leq 42\text{ m}$ 范围内。为了检测对比,试验将侧扫声纳测线布置于距离管道中心分别为 20 m 、 30 m 、 35 m 、 40 m 、 50 m 处。

3.2 检测数据及图像的处理与分析

3.2.1 侧扫声纳系统检测结果分析

通过对侧扫声纳检测数据进行后处理,结合声速数据,经过横摇、纵摇、艏摇误差修正,得到各条测线对于管道同一截面(经过多波束精密扫测及潜水员水下探摸,得出该截面处的海底管道真实悬空高度为 1.01 m) 的侧扫声纳声图记录,并由图2可得 β 及 h 分别为

$$\beta=\arcsin\frac{H_t}{R}$$

(8)

$$h=\frac{H_tS}{R}-0.5D(1+\cos\beta)$$

(9)

式中: R ——发射线至管道影像末端的斜距, R 、 S 均通过声图记录量算得。

上述检测数据、量算数据、计算数据和检测图像分别列于表 1 和图 4 中。由表 1 和图 4 可知,当 β 较大时,即 L 较小时($L=20\text{ m},\beta=25.2^\circ$),由于管道影像与海底散射影像难以区分(图 4(a)),管道悬空高度估算时出现较大误差($\delta=20.8\%$);随着 β 减小,估算精度显著提高(表 1)。当 $\beta=15.2^\circ$ 时,管道影像与海底底质影像之间的边界、海底底质影像与管道声影区之间的边界均较清晰(图 4(b)), δ 相对最小,侧扫声纳检测海底管道的精度和效果均最好(表 1)。但当 β 从 15.2° 减小至 13.9° 和 10.8° 时,越来越小的 β 使海底反向散射强度逐渐减弱,海底散射影像与管道声影区之间的界线模糊(图 4(c)),难以区分,致使 δ 也降低(表 1)。

设海底底质的反向散射强度为 S_b ,根据 Lambert 散射定律^[21]可知,海底底质的反向散射强度不仅取决于 β ,还依赖于海底底质类型特征。因此,为了获得边界清晰的高质量检测声影图像,对于不同类型的海底底质,声波掠射角的最佳取值范围可能会略有不同。

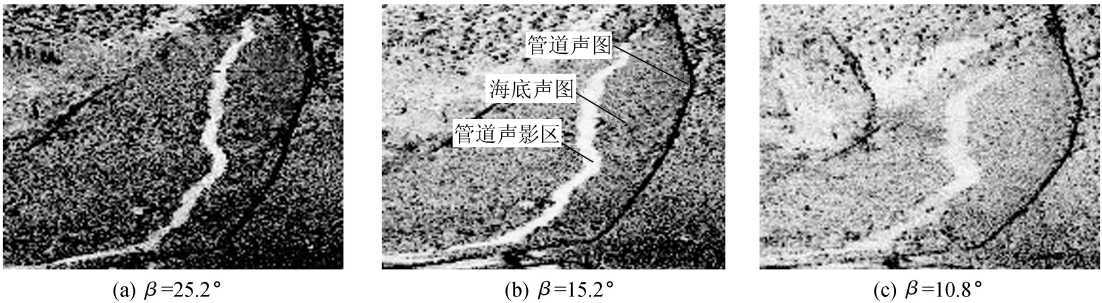


图 4 不同声波掠射角的检测图

Fig. 4 Inspection images at different acoustic grazing angles

3.2.2 多波束系统检测结果分析

将多波束检测结果采用 CARIS 后处理软件进行处理,得到海底地形及非掩埋的海底管道状态(图 5、图 6),通过截取其点云数据图对管道状态进行精细化分析判断。

将图 5(a)、6(a)分别与图 5(b)、6(b)对比,可以看出,单探头检测图中管道处扫测盲点盲区(黑色斑点)分别比双探头扫测的盲点盲区明显要多,即单探头对管道状态的检测效果较差;将图 5(a)、5(b)分别与 6(a)、6(b)对比,可以看出,波束开角优化设计之后(95°)的检测图中管道处扫测盲点盲区(黑色斑点)比未优化设计(130°)扫测的盲点盲区明显要少,即波束开角优化设计之后对管道状态的检测效果更好。相比而

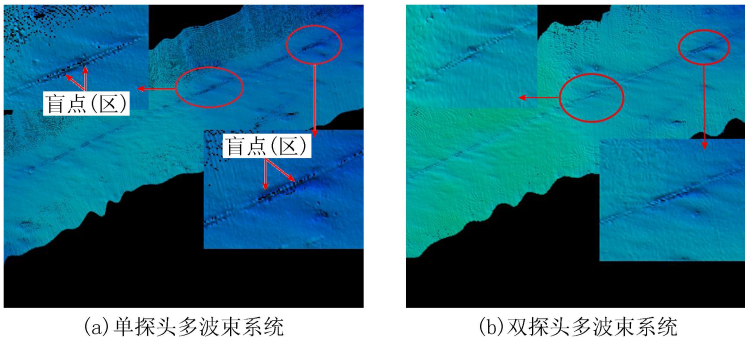


图 5 波束开角为 130° 的多波束系统管道状态检测图

Fig. 5 Inspection diagram of MBS at 130° angular coverage

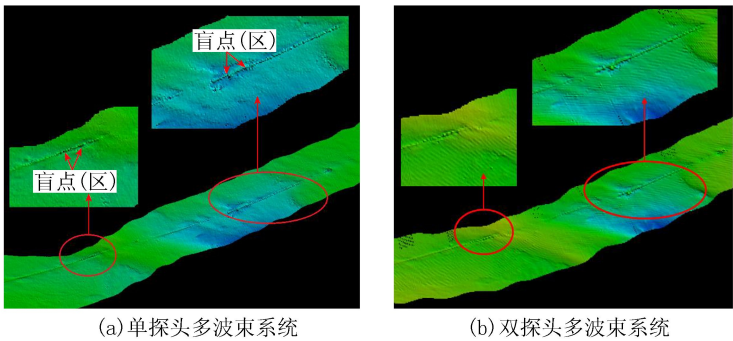


图6 波束开角为95°的多波束系统管道状态检测图

Fig.6 Inspection diagram of MBS at 95° angular coverage

言,双探头且波束开角优化设计为95°时的检测效果最好。

3.2.3 联合检测成果表达

根据试验联合检测的成果可知,被检测区域整体地形平缓,海底地貌粗糙,存在冲沟,局部区域存在凹凸地形,管道两端处以侵蚀地貌为主,各存在一处比较明显的冲刷区域。该管道状态的具体检测结果如图7所示,其状态分为:裸露、悬空及掩埋,其中裸露10段,累计445.66 m,占管道全长的64.48%,其中较长段分别为150.53 m、152.36 m;悬空管道累计57.55 m,占管道全长的8.33%,悬空段长度介于9.08~20.4 m,除两端悬空部位,其余悬空管道相邻部位的管道均处于裸露状态,因潮流冲刷影响,极易加大悬空段长度,从而造成管道失稳、断裂等破坏,应采取相应防护措施,此外,最大悬空高度为1.01 m,位于管道端部,应立即采取防护措施。

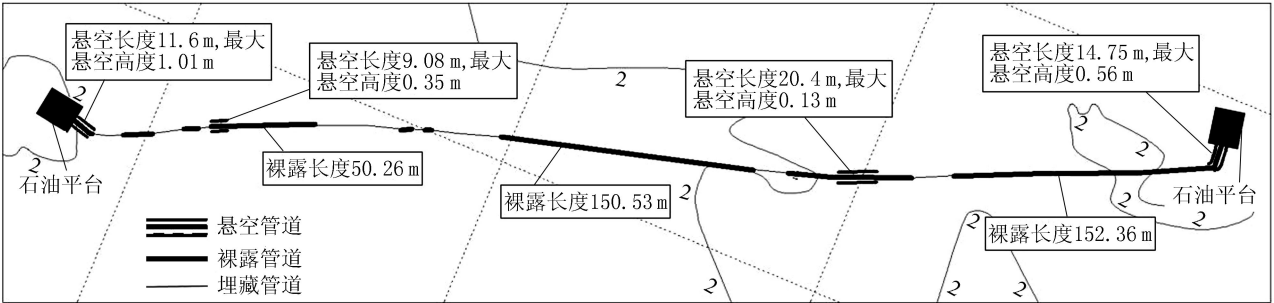


图7 海底管道检测结果

Fig.7 Survey results of the submarine pipeline

4 结 论

- a. 双探头多波束系统增加了回波信号密度,有效改善了边缘波束质量,使海底管道检测过程中的盲点或盲区显著减少;波束开角是多波束测深系统的重要技术参数,根据测区水深和检测的目标管径,对系统设置适当的波束开角,能够明显提高系统检测结果的稳定性及可靠度。
- b. 声波掠射角是侧扫声纳系统检测海底输油管道非掩埋状态时的重要技术参数,在布设测线时,通过设置恰当的测线至管道中心的水平距离,可以使声波掠射角的取值达到最优,以同时满足检测精度最高和检测效果最好的要求。
- c. 侧扫声纳系统扫测范围大,工作效率高,但其检测成果只是二维声影图,缺少水深信息;双探头多波束系统加大了回波信号密度,能提供海底管道的高密度三维点云,可以实现对小目标的精确检测,但其波束的扫测范围较小。因此,二者的联合使用,可以实现对海底非掩埋管道的高效精确检测。

参考文献:

[1] YANG B, YANG T, MA J L, et al. The experimental study on local scour around a circular pipe undergoing vortex-induced vibration in steady flow[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2013, 21(3): 250-257.

[2] 姜小俊,刘仁义,刘南,等. 强潮地区海底管道状态检测方法研究:杭州湾海底管道状态检测[J]. 浙江大学学报(工学

- 版), 2009, 43 (9): 1739-1742. (JIANG Xiaojun, LIU Renyi, LIU Nan, et al. Method to submarine pipe status inspection in strong tide region: submarine pipe status inspection in Hangzhou Bay [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43 (9): 1739-1742. (in Chinese))
- [3] PENG X L, HAO H, LI Z X, et al. Experimental study on subsea pipeline bedding condition assessment using wavelet packet transform[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 81-97.
- [4] ZHAO X F, BA Q, LI L, et al. A three-index estimator based on active thermometry and a novel monitoring system of scour under submarine pipelines[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 183: 115-122.
- [5] RONOLD K O. A probabilistic approach to the lengths of free pipeline spans[J]. Applied Ocean Research, 1995, 17(4): 225-232.
- [6] MOUSSELLI A H. Offshore pipeline design, analysis, and methods[M]. Tulsa: Penn Well Publishing Company, 1981.
- [7] TIAN W M. Integrated method for the detection and location of underwater pipelines[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(5): 387-398.
- [8] BAO C X, HAO H, LI Z X. Integrated ARMA model method for damage detection of subsea pipeline system[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 176-192.
- [9] 李海森, 李珊, 周天, 等. 多波束回波信号可变带宽滤波算法及其 FPGA 实现[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(10): 2396-2401. (LI Haisen, LI Shan, ZHOU Tian, et al. Variable bandwidth filtering algorithm for multi-beam seafloor echo and its implementation on FPGA[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(10): 2396-2401. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 吴自银, 金翔龙, 郑玉龙, 等. 多波束测深边缘波束误差的综合校正[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 88-94. (WU Ziyin, JIN Xianglong, ZHENG Yulong, et al. Integrated error correction of multi-beam marginal sounding beam[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4): 88-94. (in Chinese))
- [12] 阳凡林, 李家彪, 吴自银, 等. 浅水多波束测深数据精细处理方法[J]. 测绘学报, 2008, 37(4): 444-450. (YAN Fanlin, LI Jiabiao, WU Ziyin, et al. The methods of high quality post-processing for shallow multibeam data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(4): 444-450. (in Chinese))
- [13] YANG F L, LI J B, LIU Z M, et al. Correction for depth biases to shallow water multibeam bathymetric data[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(2): 245-254.
- [14] YANG F L, LI J B, HAN L T, et al. The filtering and compressing of outer beams to multibeam bathymetric data[J]. Marine Geophysical Research, 2013, 34(1): 17-24.
- [15] ZHAO J H, YAN J, ZHANG H M, et al. A new method for weakening the combined effect of residual errors on multibeam bathymetric data[J]. Marine Geophysical Research, 2014, 35(4): 379-394.
- [16] 柳黎明. 基于侧扫声纳系统的海底管道检测技术研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [17] 李沫. 基于 CUBE 多波束异常值检测算法与显控软件[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [18] 贾帅东, 张立华, 曹鸿博. 基于 CUBE 算法的多波束水深异常值剔除[J]. 测绘科学, 2010, 35(增刊1): 57-59, 94. (JIA Shuaidong, ZHANG Lihua, CAO Hongji. A method for eliminating outliers of multibeam echosounder data based on CUBE[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(Sup1): 57-59, 94. (in Chinese))
- [19] 苏程, 俞伟斌, 倪广翼, 等. 深水多波束测深侧扫声纳显控系统研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(6): 934-943. (SU Cheng, YU Weibin, NI Guangyi, et al. Display and control system for deep water multi-beam bathymetric side-scan sonar[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013, 47(6): 934-943. (in Chinese))
- [20] 吴利红, 许文海, 臧力龙, 等. 基于目标识别的多波束系统探测参数设计[C]//中国自动化学会智能自动化专业委员会. 2011 年中国智能自动化学术会议论文集(第一分册). 北京: 中国自动化学会智能自动化专业委员会, 2011.
- [21] JACKSON D, RICHARDSON D. High-frequency seafloor acoustics[M]. Berlin: Springer Publishing Company, 2007.