

海洋地球物理方法在海底管道检测中的应用探讨

刘恩泽, 李海东*, 王恒波, 张汉女

(自然资源部第三海洋研究所海洋与海岸地质实验室, 福建 厦门 361005)

摘 要: 海洋地球物理探测方法可用于不同类型海底管道外检测工作, 本文从海底管道的原位状态入手, 主要阐述了海底管道的埋藏、裸露、悬跨三类状态的存在特点、产生原因和治理需求, 从仪器的基本原理与应用过程方面论述了目前国内常用于海底管道检测的各类传统海洋地球物理探测方法的功能和特点。对舟山跨海输水管道检测项目中侧扫声呐、浅地层剖面和多波束测深等多种探测方法的图像进行了研究, 结果表明侧扫声呐和多波束测深对于展现裸露与悬空的管线走向与形态具有较好的探测效果; 浅地层剖面仪对于管线的深度和周围地层情况具有准确的探测效果; 磁力仪适用于判断管线存在与否和位置。结合实际应用过程中可能受到的干扰因素和仪器自身的原理限制, 对各类海洋地球物理方法的能力与特点进行分析与对比, 总结出各类方法对于不同状态的海底管道的适用性与优劣势, 以保证并提高对管道状态判别的准确性。此外, 本文还介绍了多种新型海洋地球物理探测技术, 并探讨了海底管道检测方法的现状与未来发展趋势。

关键词: 海底管道; 侧扫声呐; 多波束测深; 浅地层剖面; 合成孔径声呐; 三维实时成像声呐技术

中图分类号: P738

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2025)01-0069-15

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20240429001

引用格式: 刘恩泽, 李海东, 王恒波, 等, 2025. 海洋地球物理方法在海底管道检测中的应用探讨[J]. 海岸工程, 44(1): 69-83. LIU E Z, LI H D, WANG H B, et al, 2025. Application of marine geophysical exploration methods to submarine pipeline detection[J]. Coastal Engineering, 44(1): 69-83.

作为现代海洋工程的重要部分, 海底管道承担了大陆之间、大陆与海岛间的供水、输油、输气, 以及海洋油气开采的输油、输气等功能, 铺设范围可达数百、数千乃至数万千米(卞培旺等, 2018)。受海底环境中不同因素的影响, 如海洋水动力对管道局部的冲刷侵蚀、管道所处位置的沉积物流失, 导致埋藏部分管道浅埋、裸露, 进而出现悬跨振动或局部移位, 以至海底管道发生疲劳损坏, 最终断裂和物质泄漏, 对所在片区内的资源供应、人类生活和自然生态环境带来危害和污染, 尤其是海底油气泄漏可引发严重的生态环境灾害(杨元平等, 2022)。因此, 海底管道的定期检测和状态评估对于国家的资源保障和环境生态安全等方面具有重要意义。

对于海底管道的检测分为内检测和外检测, 内检测一般用于管道内部腐蚀、缺陷、内壁裂纹等管内因素导致的情况, 而外检测通常运用海洋地球物理探测手段, 一般先对已铺设的管道进行探测与评估, 工作内容包括前期的大面积探查, 探明管道所处的地形地貌特征和冲刷情况、浅地层结构与特征, 判别管道的埋设状态, 获得准确的管道埋藏深度、裸露与悬跨的长度和悬跨高度等数据, 从而为确定需要维护和治理的工作内容、工作方案和工作量等提供支撑(冯百全等, 2015; 聂沙沙等, 2018; Ho et al, 2020)。本文拟介绍侧扫声呐、多波束测深、浅地层剖面和海洋磁力等海洋地

收稿日期: 2024-04-29 网络首发日期: 2024-08-02

资助项目: 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2018033)

作者简介: 刘恩泽(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地球物理方面研究. E-mail: liuenze@tio.org.cn

*通信作者: 李海东(1979—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋地球物理和海洋测绘方面研究.

E-mail: lihaidong@tio.org.cn

(责任编辑 陈 靖)

球物理探测方法对海底管道外检测的应用效果,分析、总结各类方法的适用性及特点,并介绍合成孔径雷达、三维地层扫描等新型的海洋地球物理探测方法,指出海底管道外检测未来的发展要求与趋势,以期为保证海底管道赋存状态判别的准确性和后续相关监测与治理提供理论依据和支撑。

1 海底管道状态与影响因素

海底管道在铺设完成之后,便与所处的海床、海底地层和海水组成为一个整体,因此在海域背景下地层结构、沉积物类型、水动力特征、海水含沙量、海床的冲淤变化等因素会不断影响运行中的海底管道状态,导致管道的状态不断发生变化。

根据管道的埋设情况可分为埋藏、裸露、悬跨三种类型,上述海域背景因素和管道邻近区域的船只抛锚、渔捞等作业易对裸露与悬跨的管道造成破坏,只有完全埋藏状态下的海底管道才是相对安全的(Baldock et al, 2011)。需通过不同海洋地球物理方法的运用和技术方案的实施以确定埋藏段的位置和埋深、裸露段与悬跨段的范围和长度、管道悬跨高度及对应的海底地形地貌和地层特征,为后期的治理措施提供相应依据。

1.1 海底管道状态

1.1.1 埋藏状态

埋藏指海底管道全部埋设于海床以下一定深度且被沉积物完全覆盖。通常情况下,埋设在人工开设的沟槽内的海底管道包括其铺设的抛石基槽、碎石、垫砂层、覆盖层等保护设施。埋藏又分为完全埋藏、未来危险区、浅埋三类状态。

1) 完全埋藏

指海底管道埋设于海底面的沉积地层中,且埋设深度满足设计的埋深要求。在完全埋藏状态下的管道是相对安全的,不易受到破坏,在一般情况下只需定期跟踪监测其平面位置与埋深变化情况。

2) 未来危险区

指海底管道的埋设状态虽满足设计的埋深要求,但是其位于海底区域的冲刷状况强烈,在长时间的冲刷下有发展为浅埋、并逐渐形成裸露和悬跨状态的风险。

3) 浅埋状态

指海底管道虽处于海床以下,但是由于所在海区冲淤变化复杂等因素影响,管道埋藏的深度未达到设计的埋深标准,有形成裸露状态的风险。可根据浅埋管道所处区域的回淤条件评估其是否会发展为裸露或悬跨状态。对于具有自然回淤条件的海底区域,浅埋管道上部的覆土厚度会逐渐增加,达到埋深要求;对于不存在回淤条件的区域,由于水动力的冲刷作用,浅埋管道在未来具有发展为裸露于海底面的风险,应标出此类管道区段并进行说明,便于在日后重点关注并做好防护和处理。

1.1.2 裸露状态

裸露指管道没有被沉积物掩盖,出露于海床,但并未明显高出于海床的情况(出露海底的管道高度小于海底管道直径)。造成海底管道裸露的原因主要有施工条件限制与水动力环境的影响。

1) 施工条件限制

受管道自身影响和施工条件的限制而形成管道裸露,例如在管道铺设时直接放置于海床上,通过波浪作用掩埋管道,或是在将管道铺设在人工开设的沟槽后,以水动力或其他情况令土体自然回填,最终掩埋管道,此两种施工方式在初期时管道均会处于裸露状态。

2) 水动力影响

由于海洋水动力环境下的波浪、海流作用, 致使管道上覆沉积物与土体受到不断冲刷, 使管道裸露于海床表面(孙永福等, 2018)。海底管道一旦裸露, 其周边海流作用可能导致附近的部分海床继续受到冲刷, 此状态下海底管道容易发生悬跨并在海流影响下继续扩展, 且水动力的不断作用会使管道形态发生变化, 在易发生位移的情况下继续受到海水作用, 最终发生破坏, 所以应密切关注其变化的态势并及时采取相应防治处理措施。

1.1.3 悬跨状态

悬跨指海底管道明显高于海床和管道沟底面的现象(管道顶端高于海床且高出的部分大于管道直径)。悬跨现象通常是由管道在裸露之后进一步发展而来, 在管道发生裸露后, 下方的土体由于受到海流的不断淘蚀, 海底管道最终失去支撑而产生悬跨。造成悬跨的因素较多, 这里列举海流冲刷作用、海底地形变化、管道应力集中三类主要因素。

1) 海流冲刷

海流冲刷导致管道的悬跨现象, 是最为常见和主要的管道悬跨因素, 随着海流的冲刷程度不断增强, 管道周围的土体结构改变, 承载力降低, 或者管道-土相互作用导致局部土壤液化, 使沉积物更易被冲刷, 导致悬跨现象进一步加深。在悬跨长度过长的情况下, 管道在海流与重力的共同作用下有发生折断的风险, 造成巨大的危害与损失。

2) 海底地形变化

由于海底地形变化, 管道所在的区域地貌起伏加剧, 如管道铺设处位于板块交界处的地震多发区, 易受地震导致海床发生震陷。在地形变化的同时, 伴随区域内波浪、海流等水动力环境对海底管道造成影响, 最终导致管道悬跨, 甚至发生扭曲、移位等现象(孙永福等, 2018)。

3) 管道应力集中

海底管道因残余应力等因素产生应力集中, 使管道发生轴向屈曲的情况而产生形变, 最终导致悬跨(武慧生, 2017)。在悬跨长度过大的情况下, 管道内部应力和形变均会不断加大, 继而加剧悬跨现象。

海底管道在悬跨状态下极为危险, 随着水动力的影响悬跨段会不断扩展, 致使管道的安全大受影响, 在海流的作用下管道易发生涡激振动, 而且在长期作用下会引发管道的结构疲劳(Ronald, 1995; Zhao et al, 2012; Peng et al, 2013), 造成损害, 严重时会产生海底管道错位、弯折、断裂问题(张伟等, 2015), 不仅干扰管道的正常运行, 同时有造成经济损失与资源浪费的巨大风险, 如天然气与石油管道的泄漏往往会对所在海区的海洋生态环境造成难以挽回的污染与损害。

1.2 海底管道状态的影响因素

作为影响海底管道状态的主要因素, 海洋水动力环境包括有潮汐、波浪、海流等方向与性质各异的海水运动形式。其中潮汐是海水受到月球、太阳等天体引潮力影响下的水体运动, 主要表现为周期性升降运动的潮差和周期性水平运动的潮流现象; 海流是海水在一定条件下沿着定向路径的大规模流动; 波浪则是指发生在海洋表面到内部的不同密度层的各类水体波动, 不同的水体波动在尺度、特性与机理上均存在差异(Bacino et al, 2019)。

各类水动力一般作用于海底的松散底质, 长期作用下可在海底堆积成各类凸起的底形或形成磨痕与沟槽, 塑造出如侵蚀地貌、堆积地貌等各类底床形态, 最终形成多样的海底地形(Bi et al, 2014); 同时, 可通过潮流和海流的流向与流速、海底沉积物供应的变化来判断海域是处于淤积还是冲刷的背景状态。在管道的状态变化中, 水动力主要通过冲刷、剥蚀等作用造成海底管道的裸露和悬跨。因此, 明确目标海区的水动力情况和底质构成对分析海底管道状态的形成过程与原因

具有重要作用。

2 常用探测方法

如何高效、准确地获得海底管道的存在状态是海底管道外检测中的关键部分, 本文为分析地球物理方法对海底管道的检测能力与适用情况, 论述了 4 种常用于管道检测的海洋地球物理方法的基本原理, 并详细阐述了各类方法对管道的检测方式。

在实际案例方面, 结合舟山跨海输水管道检测项目背景展现不同方法对海底管道的实际检测效果, 图 1 为管道路由与海区的平面图, 其中共有 4 条管道, 由宁波市镇海区澥浦入海向东延伸, 至舟山岛西北部的马目登陆, 管道路由的北侧位于杭州湾南区, 为强潮区; 南侧的岛屿分布较多, 水动力情况较为复杂, 该区域海流运动以往复流为主, 涨潮流向区间为 $344^{\circ}\sim 12^{\circ}$, 落潮流向区间为 $94^{\circ}\sim 164^{\circ}$, 海域内的潮流运动受制于水道和沿岸地形, 海域内平均含沙量为 0.987 kg/m^3 , 靠近镇海为 1.461 kg/m^3 , 舟山马目为 0.512 kg/m^3 , 镇海附近海域含沙量较高, 悬沙运移总趋势为北进南出(王恒波等, 2020)。

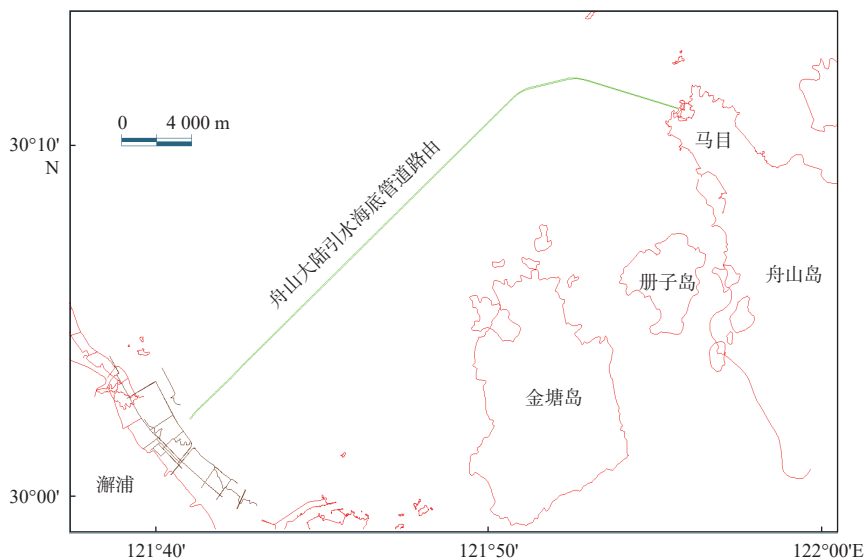


图 1 舟山跨海输水管道路由平面分布

Fig. 1 Plane distribution of the route of cross-sea water pipeline in Zhoushan

探测海区内铺设了 4 条海底输水管道(图 2), 管道均为钢铁材质, 共分三期建设: 一期管道外径 1.02 m, 设计埋深为 1~1.5 m, 埋设于 2001 年; 二期有 2 条管道, 外径均为 1.2 m, 长度分别为 32.97 和 33.02 km, 设计埋深为 1~1.5 m, 于 2012 年埋设完成; 三期管道管径 1.2 m, 设计埋深为 1~2 m, 于 2017 年完成铺设工作。

探测海区(图 3)位于杭州湾口南部与舟山群岛西部的交汇区, 地貌特征主要为西南部的平缓浅滩东倾至东北部, 形成深且起伏的地形状态, 并有潮流冲刷槽; 冲刷区域内的海底表层沉积物以淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土为主; 海流运动则以往复流为主。该海区属于高含沙量、强潮型海域, 因受海底地形、沉积物构成、水动力条件和泥沙供应量减少等因素制约, 海域内具有强冲刷区, 其不断且多变的冲刷过程易改变通过其中的管道状态, 从而对其安全运行造成影响。

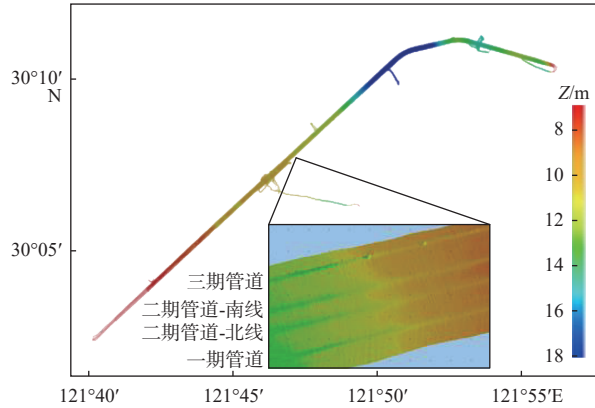
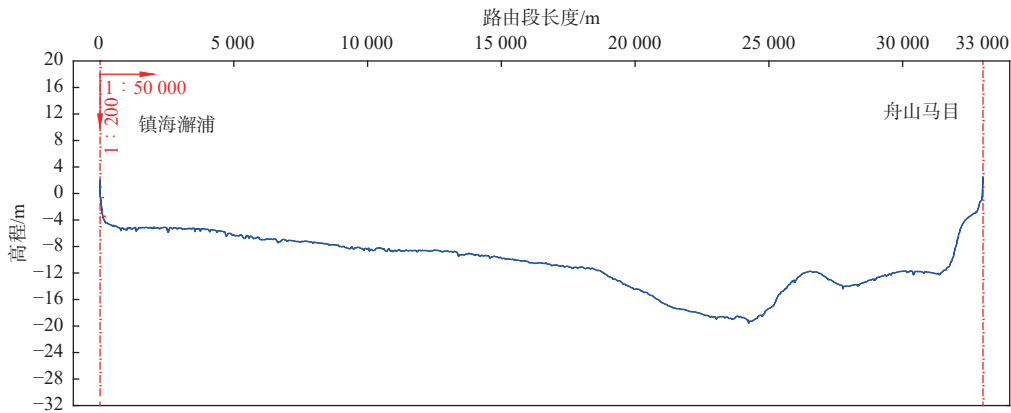


图 2 舟山跨海输水管道走向与位置

Fig. 2 Extension direction and position of the cross-sea water pipeline in Zhoushan



注: 深度基准面参考 1985 国家高程基准。

图 3 路由海区海底地形剖面

Fig. 3 Topographic Profiles of the seafloor in the pipeline route area

我们以侧扫声呐、多波束测深系统和浅地层剖面仪为主要检测手段, 主要开展了对海底管道路由区地形与地貌、海底管道路由区浅地层、海底管道状态的检测; 通过对图像进行解释、判别与分析, 得到管道埋藏、裸露、悬跨的在位状态、形态特征和其所在海区的海底地形特征。结合仪器设备的运行原理和受到的外部限制的影响因素后, 最终得出各类方法对不同状态管道的适用性结果, 并对其优劣势进行了对比分析。图 4 为管道登陆点由南到北拍摄的现场照片, 登陆点位于镇海新泓口。



图 4 管道登陆点实拍

Fig. 4 A photograph of pipeline landing site

2.1 侧扫声呐探测

作为一种主动声呐, 侧扫声呐通过声反射获得海底表面信息, 生成高分辨率的海底地貌图像。在工作时, 其换能器通常以压电陶瓷结构具有的压电效应来完成声能和电能的相互转换, 换能器

基阵向两侧以一定开角发射高频声波组成的扇形波束，并按反射距离远近先后接收回波，形成在声波覆盖区域内的高分辨率二维平面灰度图像。侧扫声呐的图像可清晰地反映出海底面整体情况、海底障碍物的形态与大小、位于海底面的目标状态，适用于判断海底管道的裸露与悬跨状态。侧扫声呐对出露管道的成像原理(图5)为：①接收的回波信号强度以灰度值表现在图像中，其强弱取决于该处海底面底质的构成与起伏形态。②探测盲区的宽度变化反映了侧扫声呐拖体与海床的距离，距离越大时，盲区范围越小。③图中被管道遮挡的海底面无回波反射，形成声影区(Johnson et al, 1990; 邱雅梦, 2017)。

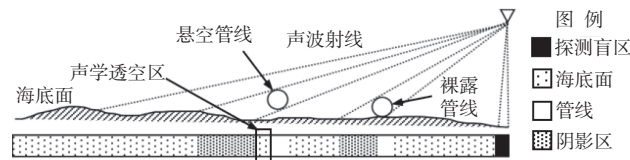


图5 侧扫声呐对海管成像原理(横剖面)

Fig. 5 Principle of submarine pipeline imaging of side scan sonar (cross section)

当海底管道发生裸露或悬跨时，管道下方与海床或管沟之间的空隙距离(即管道悬跨高度)可允许声波穿过并反射，形成声学透空区。通常来说，透空区的长度和管道悬跨高度成正比，而裸露的管道由于与海底面贴合，不存在声学透空区，通过对透空区与阴影区在图像中纹理特征的观察，即可判断出露管道处于裸露或是悬跨状态。

侧扫声呐在探测时，通过相关软件对拖鱼横摇、纵摇的角度进行监测，保证其在水中姿态的稳定性，从而确保数据的可靠性与准确性；在对数据进行处理，完成后拖校正、斜距校正等措施后，利用图像对管道的裸露或悬跨状态进行判别、圈定其位置与走向，并进行地貌识别等处理工作(冯百全等, 2015)。应用美国生产的 Klein S3000 型双频侧扫声呐系统得到舟山跨海输水管道的图像(图6)，该系统具有 100 kHz 与 500 kHz 两种工作频率，单侧扫宽可达 100 m，其通过合理的测线布设可达到测区完全覆盖与相邻测线范围重叠扫测的要求。

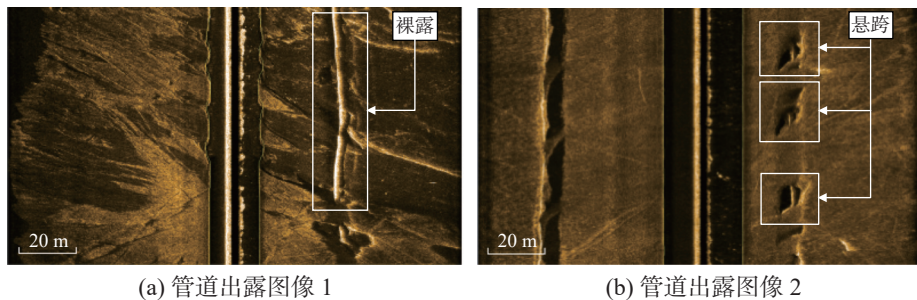


图6 侧扫声呐探测到的裸露与悬跨管道

Fig. 6 The exposed and suspended pipelines detected by side scan sonar

图6a与图6b分别为两种不同的管道出露类型对比，扫宽的单侧量程均选用75 m，可满足扫幅宽度和分辨率的需要。出露于海底面的管道因其较粗的管径和较强烈的声反射，呈现出较亮的图像特征，并具有明显的阴影变化，图6a与图6b中右侧均出现明显的管道出露，图6a中管道整体裸露于海底面，裸露面积较大且状态连续，阴影与管道部分衔接紧密，并无透空区，说明管道处于裸露状态，结合周围主要呈现为片状与条带状组成的冲刷区地貌特征，可初步解释造成此段管道裸露的成因；图6b中的出露管道则分为3段，在较亮的管道段周围有透空区存在，紧接着阴影，表明其均为悬跨状态，但是出露的状态不连续且范围较小。

基于实例的图像效果, 可知侧扫声呐探测能以平面形式直观显示测区水下地貌特征, 通过对图像的解释和量测能判断出露的海底管道处于裸露还是悬跨状态, 并确定管道的出露位置、范围、走向等信息。由于侧扫声呐对目标区域地形的扫测面积较大, 因此可通过图像明确出露管道所处区域的海床地形总体情况、地貌起伏和海底冲刷状况的微细地貌特征, 初步了解其底质构成, 便于与其他探测方法的结果进行综合分析。

由于高频声波的穿透力有限, 常规的侧扫声呐可以显示海床特征, 但无法探测处于埋藏状态的海底管道, 且相较于其他探测技术, 其定位信息与水深精度不足(吕邦来, 2009; 王恒波, 2020)。另外, 声波掠射角、拖体高度和姿态的变化、船体转弯、海水混浊与水流等因素均会对侧扫声呐的探测精度和效果造成影响。

2.2 多波束测深

多波束测深是一种多传感器组合的回声测深系统, 以宽覆盖面、采集点密集的条带覆盖式测量的方法获得测区内高精度水深地形数据, 生成三维海底地形图, 直观地展现海床形态并对海底物质进行特征识别与定向描述, 适合在水深大于 5 m 的海域进行海底地形探测(王恒波, 2020)。

多波束测深系统的组成较为复杂, 一般以换能器基阵、数据接收与处理、辅助传感器、显示输出系统等共同组成。基本原理是由换能器基阵的发射阵发出宽扇区声波波束, 经海底反射与散射后通过接收阵进行窄波束接收并转换为电信号, 在数据接收系统与处理系统进行滤波放大并进行数据处理, 结合传感器获取的船体姿态、位置信息和声速等参数, 对回波信号进行到达时间和角度的计算后, 生成大量海底条带上采样点的深度值数据, 将深度值和通过 DGPS 获得的位置信息相合, 最终绘制出高分辨率的三维海底地形图。

多波束测深的基本工作模式如图 7 所示, 发射和接收波束均在垂直于航行方向的海底条带区域内, 发射波束中平行于航迹方向的部分较窄而垂直于航迹方向部分较宽, 接收波束则与之相反。以波束宽度为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的多波束系统为例, 其发射波束为横向 44° , 纵向 2° , 接收波束为横向 2° , 纵向 20° , 发射和接收波束在投射在海底面的区域相重叠, 形成宽度为 2° 的矩形接收区域, 即波束脚印, 按照此模式即可形成数以百计的照射脚印。在对其脚印进行处理后, 得到数量庞大的精确水深值, 并以点、线扩展到面的测深技术特点将大量的水深值进行立体成图, 准确地描绘出三维特征, 最终体现出沿探测航线的海底地形和海底目标物的形状、大小和高低起伏。

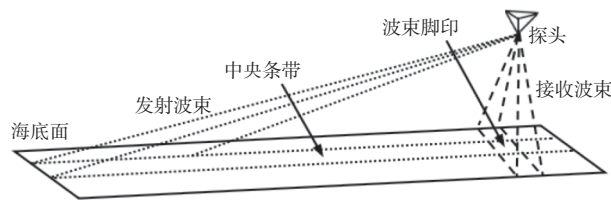


图 7 多波束原理简图

Fig. 7 Sketch of the principle of multibeam bathymetry system

探测采用 Reson SeaBat 7125 sv2 多波束系统, 采集海底输水管道的裸露与悬跨状态(图 8)。该多波束系统工作频率为 200 kHz, 波束为 256 束, 发射与接收波数宽度为 $2^{\circ} \times 1^{\circ}$, 测深范围为 0.5~400 m, 测深分辨率可达 6 mm。通过图 8a 中呈现出的清晰立体的出露管道走势与轮廓, 可判断出露的管道形成前段为裸露状态, 到中段与后段均为悬跨状态的形态变化。在测区为强冲刷情况的背景下, 掩埋管道的上覆土层和下方的土体易受潮流冲刷带走, 管道状态会由裸露转变为悬跨。图 8a 的中部管道悬跨范围较大, 管道底部已明显高于海床, 其下方并无支撑的土体, 在持续冲刷

和渗流、涡激振动等因素的影响下,管道的受冲刷范围不断扩大,周围土体的流失速度加快,中段与后段的悬跨状态会不断向两侧扩展,易在最终形成两段悬跨段连结成整段管道悬跨的现象,且伴随出现更多裸露与悬跨的趋势;图 8b 中出露段的前后部分均出现悬跨,中部则为裸露的管道形态,相较于图 8a,其悬跨深度较低,相应的出露规模较小。

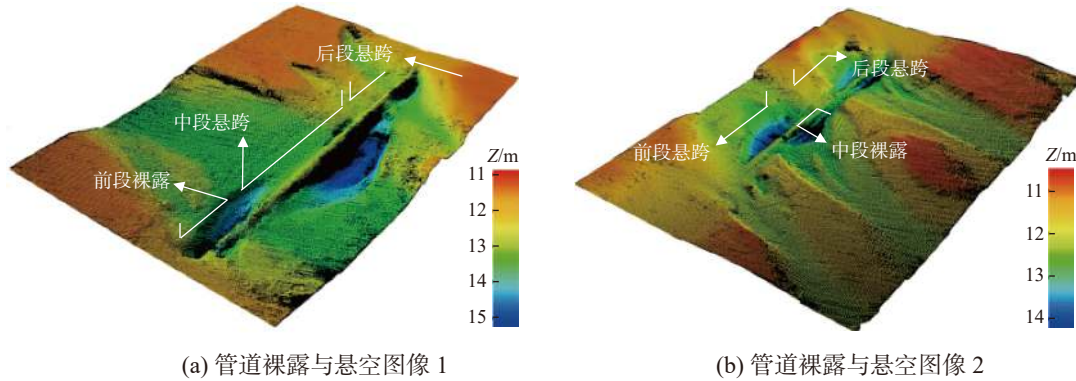


图 8 多波束探测的海底管道图像

Fig. 8 Images of submarine pipelines detected by multibeam bathymetry system

多波束系统可探明海底地形和出露管道的具体形态,查明管道出露位置、悬跨高度与管沟深度,其三维图像能清晰、直观地反映出周边地形地貌特征等信息,以此为管道状态分析能提供更加具体、有效的支撑与补充。在多波束测深系统实际的应用过程中,必须保证用到的甲板、安装台、安装杆等工具完全固定,尽量做到无变形和颤动,在探测时水深、波束开角等因素均会对多波束测深系统的探测效果造成干扰,如水深的增大会导致图像的分辨率降低,且多波束系统也无法探测埋藏状态下的海底管道。

2.3 浅地层剖面探测

浅地层剖面探测利用低频声波脉冲能量大、穿透能力强、衰减慢的特点,定时定向发射声波信号穿透海底地层中不同声阻抗界面的介质层,如淤泥层、砂质层、基岩层等,逐层反射并进行回波接收,直至声波能量损失耗尽为止(董玉娟等, 2015)。通过记录和分析接收到的反射波的双程返回时间、振幅、频率等信息并加以计算,获得声波穿透的地层的厚度和结构等特性信息,输出为表现声波反射能力、声波反射强弱对比和特征的剖面图,以此反映海底以下浅部地层的结构、分层情况及底质构成等多方面信息。

利用浅地层剖面判断海底管道位置和状态时,由于海底管道的材质大多为混凝土或金属,其对浅地层剖面发射声波的反射能力强,因此对管道反射产生的绕射波在图中往往呈现为抛物线状,其顶点即对应管道顶端,据此可判断管道所处状态与深度。

舟山跨海输水管道检测时,浅地层剖面探测采用美国 Edgetech 3200-XS 浅层剖面系统,工作频率为 2~16 kHz,垂直分辨率为 6~10 cm,穿透力对一般砂质层为 6 m,对泥质层为 80 m。据近岸段的海底管道埋藏与裸露的浅地层剖面图像(图 9)可得到海底面的地层与管道的埋藏深度,用以对管道的在位状态进行判断,图中海底底质较软,4 条管道均呈现清晰的向下抛物线形状,左侧两条管道的绕射波顶点均在海底面以下,表明其处于埋藏状态,其中一条管道(左一)埋藏完全,另一管道(左二)在图中较为不明显,其埋藏深度接近设计埋深(1 m),有发展为浅埋状态的风险;后方两条管道的管顶位置均超出海底面,管顶距海底面均不超过管径 1.2 m,且管道下方海底面的层界较为分明,无明显的管沟存在,据此可判断两条海底管道均处于裸露状态。

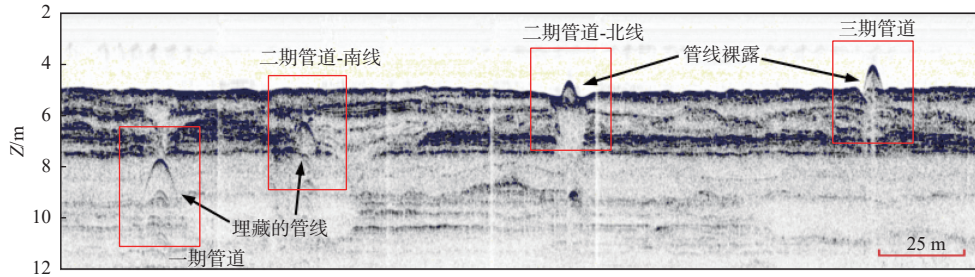


图 9 海底管道的浅地层剖面探测图像

Fig. 9 Images of submarine pipelines detected by sub-bottom profiler

图像实例的展示表明, 浅地层剖面探测系统对管道埋藏、裸露与悬跨状态均可进行探测, 并以准确的管道埋深与出露高度等数据对其在位状态做出更具体的判断, 结合图像中地层结构和分层的情况, 了解管道的所处环境和状态成因, 并查明是否存在如浅埋这类具有发展成裸露或悬跨状态风险的管道段。

受限于声波的穿透能力, 浅地层剖面探测系统对如砂砾、岩石这类较硬的上层覆盖物和直径较小的管道探测效果较差(卞培旺等, 2018)。实际上, 通过测量船与管道相切而得出剖面图的探测方式, 其图像的表达效果不够直观, 无法展现管道的走向, 对其周围地形变化的探测能力有限, 且因探测的管道路由不连续, 对于具体走向不明确的管道, 如果采用浅地层剖面仪盲探, 工作量过大, 需先进行调研或利用其他探测方法确定海底管道的大致分布和走向后, 再以浅地层剖面仪进行探测。

2.4 海洋磁力探测

海底地层由不同的岩性地层和底质构成, 在各类岩性地层中分布的金属类矿物往往具有较高的磁化率, 在仪器探测下, 其在正常的磁场背景下会出现磁异常。同理, 材质为铁磁性物质的海底管道的磁化率较强, 与埋设地层周边的磁场强度存在显著差异, 因此海洋磁力仪常用于探测海底管道的具体位置与走向。具体过程为在磁力仪横切海底管道之后, 通过海底管道产生的磁场引起局部地磁场分布的变化曲线(即磁异常)来确定管道所在的位置(吕邦来, 2009)。

对比一些常见物质的磁化率(表 1)可知, 其中金属质和水泥等常用作管道材料的物体磁化率较强, 与其埋设地层周边的其他物质差异显著, 其产生的磁场强度与周边物质的磁场强度自然也有较大差异, 这是通过磁力仪探测海底管道的必要前提条件(吕邦来, 2009)。

磁异常曲线主要有 y 轴对称和原点对称两种类型, 如图 10 所示, 曲线类型 a 和 c 分别以 y 轴对称和原点对称判断管道定位点, 而 b 和 d 两种不对称曲线则通过近似对称原则进行判断, b 更接近 a 曲线类型, 所以定位点接近极值点; 而 d 更接近 c 曲线类型, 定位点则更接近曲线拐点(刘胜旋, 2002)。

在海洋磁力探测设备安装时, 采用的拖缆长度须保持在 2.5 倍船长以上(至少 30 m)以消除船磁影响; 为减少如海底强磁噪声、周边物质的磁性、海水衰减等因素造成的干扰, 海洋磁力仪在作业时须尽量贴近海底以较慢船速测量(江峻毅等, 2020; 周志普等, 2021), 并在作业时尽量避开旁经大型船只或其他含大量金属的设备或物质。另外, 在船只作业时一般需设立地球磁场变化观测站从而进行日变校正。

表 1 常见物质磁化率表

Table 1 List of magnetization rates of common substances

物质名称	磁化率/($\times 10^{-5}$)
海水	小于 10
沉积岩	小于 10
水泥	200~400
水泥构件	600~1 200
常见钢铁	50 000~120 000

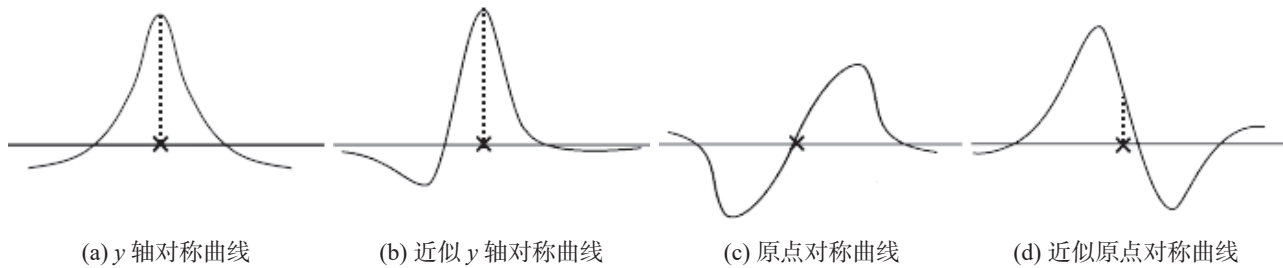


图 10 磁异常曲线类型

Fig. 10 Types of magnetic anomaly curves

相较于其他探测设备,海洋磁力探测对地层序列的干扰较小,对管径小、埋设较深的海底管道仍可准确探测其存在与位置。然而,如果以磁异常曲线为数据信息独立地作为海底管道的存在依据,其准确性不足,需结合其他探测方法综合分析,最后在磁异常点位确定每条测线上管道的具体位置坐标后,将多条垂向测线(相互平行)上的磁异常点相互连接,就能够确定目标管道的平面位置与整体路由走向,再经过反演推算后可大致推测海底管道埋深。

3 新型探测技术

3.1 合成孔径声呐

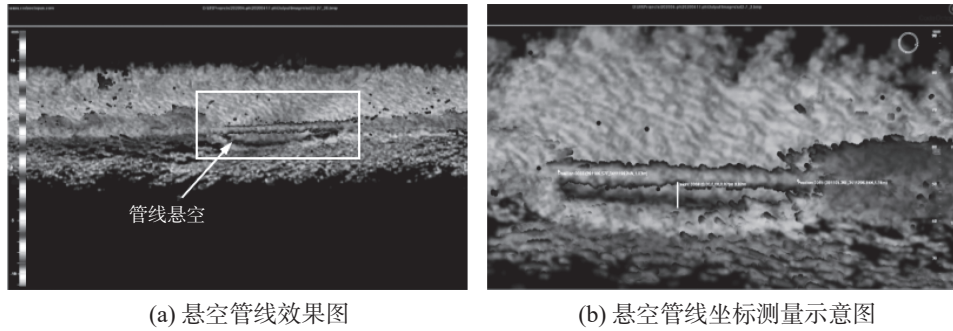
合成孔径声呐是一种高分辨率水下探测成像技术,其概念最早由美国的 Raytheon 公司提出,基本原理是利用小孔径基阵匀速直线运动并在确定位置顺序发射、接收回波信号,根据空间位置与相位关系对各位置上的回波信号进行相干叠加处理后形成等效的虚拟大孔径,实现对目标物沿运动方向上的高分辨率成像(孙宝申, 2018)。

合成孔径声呐具有高低频系统相结合的探测方式,其分辨率与自身作业频率、工作距离等无关,通过高频系统测量时,可得到海底面上的地貌特征与管道出露情况;在采用低频系统时,利用其穿透性对海底面以下埋藏的管道进行探测。在将高、低频图像结合后,便可分辨出管道的埋藏状态,利于对管道的浅埋状态的判断(郎诚等, 2021; 赵阳, 2021)。相较于侧扫声呐与多波束测深,合成孔径声呐能准确、全面地反映较小目标物(如光缆类管线)的埋藏状态,具有分辨率高与探测距离广的优势,但也存在对设备安装和测线偏航率的要求较高,以及作业成本过大的不足之处。

3.2 三维实时成像声呐技术

三维成像声呐是一种新型的声呐探测技术,以复杂 3D 结构的成像效果实现对海底地貌与水下目标物的细部结构检测,通过二维面阵在空间的 3 个方向上获得目标体的分辨率,二维序列成像后,再以计算机软件合成三维图像。

从应用 EchoScope 3D 水下三维声呐设备探测的悬跨管道的实时影像(图 11)中,得到海缆悬跨高度、裸露长度和冲刷坑深度的高精度数据,能够立体地展现出露管道的外形轮廓与细部构造,效果较常用方法更加清晰、直观。与多波束相比,该技术的三维图像无声影遮挡区域且更加精细,减少了存在隐患的可能性,同时对管道形态的细节描述更加具体(李斌等, 2015; 赵志冲等, 2020; 何常鑫等, 2021),是目前较为先进的管道检测手段。



注: 本图源自赵志冲等(2020)。

图 11 三维实时成像声呐检测图像

Fig. 11 Images of submarine pipelines detected by 3D real-time imaging sonar

3.3 电磁感应法

探测电缆或光缆时, 由于有的海底电缆直径小、磁性弱, 常规仪器和设备的探测方法对其较难有准确的探测效果, 对于这类本身带有一定频率的交变电流信号的海底缆线, 电磁感应法探测可以较好地发挥其作用。

电磁感应法的基本工作方法依据电磁感应原理, 探测时由于在海水中电磁信号的衰减速度快, 因此设备需要与目标缆线较为接近, 以海底电缆追踪设备 TSS440 为例, 将设备装于 ROV 上并调整使其骑跨于海管之上进行连续检测, 在设备中的左、中、右三个线圈上加脉冲电压, 当电压通过线圈时, 其周围产生相应磁场, 在磁场范围内的缆线会产生相对应的电压与电流变化, 继而使缆线周围的磁场产生变化, 使得线圈内部产生感应电压, 通过移动线圈接收电磁感应信号的强度大小及变化数据。3 个线圈和缆线距离不同, 得到的电压信号等信息也不同, 根据不同线圈的数据综合计算出海底缆线的坐标, 从而获取其埋深、路径和悬跨高度, 并确定海底电缆的路由走向(宋春娜等, 2014)。相较于传统的海洋地球物理方法, 该技术具有精度高、作业效率高、检测周期短等优势。

4 讨 论

基于对 4 种传统的海洋地球物理探测方法的原理阐述, 并结合案例工程项目中的实际情况和图像分析, 总结出不同探测方法的各自特点和侧重面。

以声学为基础原理的海洋地球物理探测方法是海底管道的主流检测手段中的重要部分, 案例项目探测中充分运用了侧扫声呐、多波束测深和浅地层剖面探测海底输水管道的在位状态, 通过对原理和图像效果分析并探讨 3 类方法对不同状态下的管道检测的能力, 其中侧扫声呐和多波束测深均适用于探明海床地形地貌情况和识别海底管道的裸露或悬跨状态, 二者具有相似的工作原理, 其主要区别在于: 侧扫声呐的波束空间的定向较为粗略, 主要依照回波信号在海底反射到达时间的先后顺序记录信号的能量幅度, 并以其强度信息获得海底地貌图像; 多波束测深以接收波束形成技术实现精确定向, 通过回波往返时间和斜距获得大量精确的水深数据, 并以此绘制图像。

将侧扫声呐的二维地形图像与多波束测深系统的三维立体图像相结合, 可准确查明管道出露的范围和具体位置, 并获得管道偏移、出露长度、悬跨高度、管道沟位置和深度等精确数据; 同时能够探明测区海底地貌的整体情况和周边海底微地貌特征, 整合后获得全方位、高精度的海底管道形态与数据。

浅地层剖面仪用以探明管道的埋藏、裸露与悬跨状态和埋深数据，并表现出相关的地层构造情况，在将出露管道的深度数据和侧扫声呐的图像相互印证后，可对出露管道的具体形态和特点进一步了解，最终确定受探测管道的整体状况和出露段范围。

不同于上述3类声学探测方法以直观的图像呈现来判断管道状态的能力，海洋磁力探测方法主要以观察磁异常曲线图来定位管道所处位置，主要通过发现线性趋势中的明显跳变，结合常对应于管道曲线的变化类型确定其定位点，将各磁异常的点位整合后，最终获取管道的位置信息和整体走向。

在探测设备的作业过程中，实际情况往往较为复杂，目前常用的探测方法分别有不同的适用条件，且在各类因素作用之下易对探测效果造成不同的干扰(表2)。在实际的适用情况中，应尽量通过合理的测线规划和准备充足的预防措施，避免不同方法对应的干扰因素对探测效果造成影响。

表2 海底管道常用探测技术对比

Table 2 Comparison of detection techniques commonly used for submarine pipeline

探测方法	适用条件	缺点和易受到的干扰因素
侧扫声呐	裸露、悬跨的管道	位置精度较低，探测时图像质量易受拖体姿态与水流的影响
多波束测深	裸露、悬跨的管道	波束开角和水深均会影响探测效果，水深过大会导致图像的分辨率降低
浅地层剖面仪	埋藏的管道	探测的管道图像为剖面图，无法连续地表现管道的整体形态与走向，对较硬的底质探测效果较差
海洋磁力仪	判别管道存在	依据图像判断定位点时易受周边物质磁性干扰、易受海水衰减等因素影响

在选择应用探测方法时，因侧扫声呐和多波束的图像直观性较强、覆盖面积较大，通常先采用侧扫声呐和多波束测深寻找并判别出露于海底面的管道段，对二者图像进行分析后，可掌握其具体形状、出露范围、位置和走向，明确管道总体的出露区域；以浅剖探测后的管道剖面图可分别确定埋藏和出露的管道的位置和埋深信息，在与侧扫声呐和多波束测深的图像进行对比分析后，不仅能相互对应管道的出露状态，且能了解研究区整体的海底地形特征和底质构成；再结合磁力仪的位置信息，得出对海底管道整体走向的描述。通过将不同探测方法进行结合分析与交叉印证，最终对海底管道的具体出露形态和总体情况形成可靠、准确的认知，为下一步研究论证保护措施方案提供依据。

文中介绍的新型探测技术中，采用电磁感应法的探测技术在检测有交流电信号的海底电缆和光缆方面具有独特优势，是针对特定类型的管线探测而研制的专型技术；合成孔径声呐与三维声呐成像技术两类新型技术，是基于声学原理的传统地球物理探测方法上进一步研发的探测技术。与传统方法相比，合成孔径声呐能提高对海底管道状态判断的准确性，而三维成像声呐能够更加具体而精确地展现出露状态下的管道的所处形态、细部构造，利于对管道状态的形成机制和发展进行更加精细而深入的分析。

5 结 语

本文从海底管道检测方面系统性地介绍了几种常用的海洋地球物理方法的工作原理及应用能力，以实际案例展现了不同方法的效果与优劣。

每种探测方法都有其适用性和局限性，在实际情况中，需综合考虑海底管道所处海域环境因素的影响，在对管道材质、埋设方法和各类探测技术具备充分认知和理解的情况下，综合利用各类方法，根据各仪器的适用性优劣互补、配合作业，并在测量时尽量避免干扰。在通过对各类方法

的图像数据进行专项分析与对比研究后, 有效增强不同数据之间的关联与相互验证, 实现对海底管道在位状态的准确探明, 提高海底管道检测的质量与效率, 达到检测要求。

未来的海底管道检测技术在向更高效率、更高精度和更智能化等方面发展, 可利用更多新型探测设备的更高新的成像技术、快速的作业模式及设备集成化等优势针对管道的不同类型或不同状态下的形态、构造进行更细化的研究, 为海底管道安全与稳定运行提供更加坚实的保障。

参考文献 (References):

- 卞培旺, 陈法锦, 张叶春, 2018. 2种海上物探方法对海底管道的探测效果[J]. *广东海洋大学学报*, 38(6): 61-68. BIAN P W, CHEN F J, ZHANG Y C, 2018. Comparison of two marine geophysical methods in submarine pipeline detection[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 38(6): 61-68.
- 董玉娟, 周浩杰, 王正虎, 2015. 侧扫声呐和浅地层剖面仪在海底管线检测中的应用[J]. *水道港口*, 36(5): 450-455. DONG Y J, ZHOU H J, WANG Z H, 2015. Application of side scan sonar and sub-bottom profiler in checking of submarine pipeline[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 36(5): 450-455.
- 冯百全, 亢保军, 孟宪阔, 等, 2015. 综合物探在海底管线调查中的应用[J]. *港工技术*, 52(2): 94-96. FENG B Q, KANG B J, MENG X K, et al, 2015. Application of integrated geophysical exploration in subsea pipeline investigation[J]. *Port Engineering Technology*, 52(2): 94-96.
- 何常鑫, 黄伟, 2021. 3D声呐在海上风电场水下桩基和海缆检测中的应用[J]. *港口科技*, (1): 42-48. HE C X, HUANG W, 2021. Application of 3D sonar in the detection of underwater piles and cables in offshore wind farms[J]. *Port Science & Technology*, (1): 42-48.
- 江峻毅, 高兴国, 王方旗, 等, 2020. 海洋地球物理综合探测法在海底管线探测的应用研究[J]. *电力勘测设计*, (S01): 200-204. JIANG J Y, GAO X G, WANG F Q, et al, 2020. Research on the application of marine geophysical integrated detection method in subsea pipeline detection[J]. *Electric power survey and design*, (S01): 200-204.
- 郎诚, 茅克勤, 向芸芸, 2021. 三维合成孔径声呐在海底掩埋目标探查中的应用现状与展望[J]. *海洋开发与管理*, 38(1): 49-52. LANG C, MAO K Q, XIANG Y Y, 2021. The applications and prospect of 3D synthetic aperture sonar system in seabed buried target detection[J]. *Ocean Development and Management*, 38(1): 49-52.
- 李斌, 金利军, 洪佳, 等, 2015. 三维成像声呐技术在水下结构探测中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 26(3): 184-188, 192. LI B, JIN L J, HONG J, et al, 2015. Application of three-dimensional imaging sonar technology in detection of underwater structure[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 26(3): 184-188, 192.
- 刘胜旋, 2002. 光泵磁力仪在光缆路由调查中的应用[J]. *海洋测绘*, 22(1): 25-29. LIU S X, 2002. On the application of optical pumping magnetometer to the investigation in optical cable routing[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 22(1): 25-29.
- 吕邦来, 2009. 海底管线的地球物理探测技术探讨[J]. *水运工程*, (7): 146-150. LÜ B L, 2009. Geophysical survey techniques for marine submerged pipeline[J]. *Port & Waterway Engineering*, (7): 146-150.
- 聂沙沙, 2018. 关于海底管线探测方法流程探讨[J]. *石化技术*, 25(3): 187. NIE S S, 2018. Discussion on the process of submarine pipeline detection method[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 25(3): 187.
- 邱雅梦, 2017. 浅谈海底管线地球物理调查方法[J]. *中国石油石化*, (12): 81-82. QIU Y M, 2017. Geophysical survey methods for submarine pipelines[J]. *China Petrochem*, (12): 81-82.
- 宋春娜, 林守强, 齐兵兵, 2014. TSS440在海管检测中的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 34(11): 15-17. SONG C N, LIN S Q, QI B B, 2014. Application of TSS440 in marine pipe inspection[J]. *China Petroleum and Chemical Standards and Quality*, 34(11): 15-17.
- 孙宝申, 2018. 合成孔径成像的应用及发展[J]. *应用声学*, 37(5): 787-793. SUN B S, 2018. Applications and development of synthetic aperture imaging[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 37(5): 787-793.
- 孙永福, 王琮, 周其坤, 等, 2018. 海底沙波地貌演变及其对管道工程影响研究进展[J]. *海洋科学进展*, 36(4): 489-498.

- SUN Y F, WANG C, ZHOU Q K, et al, 2018. A review on sand waves evolution and its influence on pipeline engineering[J]. *Advances in Marine Science*, 36(4): 489-498.
- 王恒波, 2020. 综合地球物理方法在海底管道检测中的应用——以舟山大陆引水工程为例[J]. *海岸工程*, 39(3): 169-178.
- WANG H B, 2020. Integrated application of multiple marine geophysical approaches in submarine pipeline detection: a case of Zhoushan continental water diversion project[J]. *Coastal Engineering*, 39(3): 169-178.
- 王恒波, 李海东, 刘伯然, 等, 2020. 杭州湾南部海域背景冲刷对海底管线安全性影响分析[J]. *海洋技术学报*, 39(6): 99-106.
- WANG H B, LI H D, LIU B R, et al, 2020. Analysis of the impact of background scour on the safety of submarine pipelines in the south of Hangzhou Bay[J]. *Journal of Ocean Technology*, 39(6): 99-106.
- 武慧生, 2017. 地震波作用下海底管道反应分析[D]. 大连: 大连理工大学.
- WU H S, 2017. Response analysis of submarine pipeline subjected to seismic waves[D]. Dalian: Dalian University of Technology.
- 杨元平, 张芝永, 吴修广, 等, 2022. 强潮海域近岸掩埋海底管线裸露原因分析[J]. *浙江水利科技*, 50(3): 1-4,10.
- YANG Y P, ZHANG Z Y, WU X G, et al, 2022. Study on exposure and suspension of buried pipeline in strong tidal coast[J]. *Zhejiang Hydraulics*, 50(3): 1-4,10.
- 张伟, 孙伯娜, 王朝, 等, 2015. 海底管线路由探测方法研究[J]. *港工技术*, 52(6): 111-113.
- ZHANG W, SUN B N, WANG C, et al, 2015. Study on seabed pipeline routing detection[J]. *Port Engineering Technology*, 52(6): 111-113.
- 赵阳, 2021. 合成孔径声纳系统在海底掩埋电缆探测中的应用研究[J]. *科技资讯*, 19(10): 68-70.
- ZHAO Y, 2021. The application and researches of aperture sonar system in submarine buried cable detection[J]. *Science & Technology Information*, 19(10): 68-70.
- 赵志冲, 尹学威, 2020. 水下三维声纳系统在海底天然气管线裸露悬跨段调查中的应用[J]. *港口科技*, (09): 43-47.
- ZHAO Z C, YIN X W, 2020. Application of underwater three-dimensional sonar system in the survey of exposed suspended section of submarine gas pipeline[J]. *Port Science & Technology*, (09): 43-47.
- 周普志, 李正元, 沈泽中, 等, 2021. 海底光缆磁法探测技术研究与应用[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 60(4): 100-110.
- ZHOU P Z, LI Z Y, SHEN Z Z, et al, 2021. Research and application of magnetic detection technology for submarine optical cable[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 60(4): 100-110.
- BACINO G L, DRAGANI W C, CODIGNOTTO J O, 2019. Changes in wave climate and its impact on the coastal erosion in Samborombón Bay, Río de la Plata Estuary, Argentina[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219: 71-80.
- BALDOCK T E, ALSINA J A, CACERES I, et al, 2011. Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves[J]. *Coastal Engineering*, 58(2): 214-227.
- BI N S, WANG H J, YANG Z S, 2014. Recent changes in erosion-accretion patterns of the active Huanghe (Yellow River) delta lobe caused by human activities[J]. *Continental Shelf Research*, 90: 70-78.
- HO M, EI-BORGI S, PATIL D, et al, 2020. Inspection and monitoring systems subsea pipelines: a review paper[J]. *Structural Health Monitoring*, 19(2): 606-645.
- JOHNSON H P, HELFERTY M, 1990. The geological interpretation of side-scan sonar[J]. *Reviews of Geophysics*, 28(4): 357-380.
- PENG X L, HAO H, LI Z X, et al, 2013. Experimental study on subsea pipeline bedding condition assessment using wavelet packet transform[J]. *Engineering Structures*, 48: 81-97.
- RONOLD K O, 1995. A probabilistic approach to the lengths of free pipeline spans[J]. *Applied Ocean Research*, 17(4): 225-232.
- ZHAO X F, BA Q, LI L, et al, 2012. A three-index estimator based on active thermometry and a novel monitoring system of scour under submarine pipelines[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 183: 115-122.

Application of Marine Geophysical Exploration Methods to Submarine Pipeline Detection

LIU Enze, LI Haidong, WANG Hengbo, ZHANG Hannü

(*Laboratory of Coastal and Marine Geology, Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China*)

Abstract: Marine geophysical exploration methods can be used for external detection of submarine pipelines. By starting with the in-situ states of the submarine pipelines, the existence characteristics, causes and treatment requirements of the buried, exposed and suspended states of the submarine pipelines are described and the functions and characteristics of various traditional marine geophysical exploration methods commonly used for the submarine pipeline detection in China at the present are introduced in the aspects of the basic principle and application process of instruments. The images of side scan sonar, sub-bottom profiler and multibeam bathymetry system obtained in the cross-sea water pipeline inspection project in Zhoushan are investigated. The results indicate that the methods of side scan sonar and multibeam system have better detection effects on the direction and shape of the exposed and suspended pipeline, the sub-bottom profiler can detect accurately the buried depth and surrounding strata of the submarine pipelines and the magnetometer is suitable for detecting the existence and position of the pipelines. Combined with the interference factors possibly encountered in the detection process and the principle limitations of the instrument itself, the capabilities and characteristics of the marine geophysical exploration methods are analyzed and compared, and the applicability and the advantages and disadvantages of these methods to the submarine pipelines with different states are summarized, in order to guarantee and improve the accuracy of the pipeline state discrimination. In addition, new marine geophysical exploration techniques are listed and the current situation and future development trend of submarine pipeline detection methods are discussed.

Keywords: submarine pipeline; side scan sonar; multibeam bathymetry system; sub-bottom profiler; synthetic aperture sonar (SAS); 3D real-time imaging sonar

Received: April 29, 2024 **Online:** 2024-08-02