

doi: 10. 11720/wtyht. 2023. 0175

田培先,陈伟坚,林启辉,等. 海上航道地球物理勘查技术的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1450–1455. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 0175](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0175)

Tian P X, Chen W J, Lin Q H, et al. Application of geophysical exploration technologies for channel at sea[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1450–1455. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2023. 0175](http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.0175)

# 海上航道地球物理勘查技术的应用

田培先, 陈伟坚, 林启辉, 周伟斌

(广东省广建设计集团有限公司, 广东 广州 511453)

**摘 要:** 扩(新)建海上航道前需要获得航道水深、底质资料, 以便确定疏浚设备和工艺等。基于已有验潮站、海上钻孔和不同勘查技术数据的相互检核, 用多波束测深技术、浅地层剖面探测技术分别获得了航道精确的水深、海底地形和软土层、硬土层底质的厚度和展布。在此基础上, 总结出海上航道勘查的关键技术处理措施以及底质软土层和硬土层的反演特征。上述应用结果有益于多波束测深技术、浅地层剖面探测技术在涌浪较大的海上开展经济、高效的航道勘查, 而且能延拓到含有毒物质的水下沉积物勘查。

**关键词:** 航道; 多波束测深; 浅地层剖面探测; 海上钻孔; 底质

**中图分类号:** P631; U616

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2023)06-1450-06

## 0 引言

为了发展对外贸易, 维护经济可持续性发展, 需扩(新)建海上航道, 而扩(新)建前, 需要进行海上航道地球物理勘查, 工作内容包括: 水深、海底地形测量, 底质组成、厚度和分布勘察; 在测量、勘察基础上进行疏浚设备和工艺选择, 确保航道达到设计要求。因此, 寻找经济、高效的海上航道地球物理勘查技术具有现实性和紧迫性。对于水深及海底地形测量, 主要采用多波束测深技术。国内大学最早开展了多波束测深仪的研发, 在成功研发仪器的基础上, 将电子海图与 GPS 数据相结合, 进行了反射波采集、处理、解释以及精度评估等方面的研究, 保证了仪器的有效应用<sup>[1-3]</sup>; 马建林<sup>[4]</sup>基于多波束测深数据, 采用 ArcGIS、GeoDatabase 技术, 建立了大区域、高分辨率的海底数字高程模型(DEM)并实现了数据库管理; 一些学者应用国外的多波束测深仪进行了特定水域水深、海底地形测量<sup>[5-9]</sup>。对于海底底质组成、厚度和分布的勘察, 主要使用两种物探方法: 人工地震法和浅地层剖面探测技术, 前者采用穿透深度超过千米、频率百赫兹以内的波, 分辨率低,

成本高, 主要应用于水上油气勘探; 后者采用穿透深度百米以内、频率几百至几十千赫兹的波, 分辨率高, 成本低, 主要应用于浅层天然气水合物勘探、地层结构和构造以及海底管线、沉船调查<sup>[10-12]</sup>, 还可以基于浅地层剖面探测技术的海底反射信号进行海底地形测量<sup>[13]</sup>。目前, 鲜有涉及两种技术同时应用于海上航道勘查领域的报道。海上航道的测量和勘察有其特殊性, 需要获得水深、底质等资料, 因此需要多波束测深、浅地层剖面探测两种技术的有机结合应用, 实现经济、高效的海上航道地球物理勘查。

针对海上航道地球物理勘查的实际需求及现实问题, 本文依托南方某港口 30 万吨新航道勘查项目, 选取外航道 K30+000 至 K31+100 段, 利用多波束测深技术和浅地层剖面探测技术, 获得了新航道水深、海底地形以及底质的组成、厚度和分布, 为新航道的疏浚设备和工艺的选择奠定了基础; 同时, 对涌浪较大时海上航道地球物理勘查系统选型、数据采集、关键技术处理措施、不同勘查技术获得的数据相互校核, 对底质软土层、硬土层反演特征等进行了总结。上述成果不仅可供同行在开展类似工作时参考, 而且能延拓到含有毒物质的水下沉积物调查工作中<sup>[14]</sup>。

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-08-30

第一作者: 田培先(1978-), 男, 高级工程师, 长期从事岩土工程、工程物探等工作。Email: 417509023@qq.com

1 项目概况

某港口 30 万吨级的旧航道需要加长、加宽和加深成为新航道。旧航道已运营多年,所在区域浪高 0.5~1 m,受波浪和潮汐影响,海底沉积物发生了搬运、沉积,使旧航道的水深、海底地形发生了变化,因此,本次工作的重点是获得最新的水深、底质资料,以便为新航道疏浚及其他工程决策提供基础数据支持。新航道设计要求为:长度向外海方向延深 10.1 km 后变为 64.1 km;航道边线各加宽 15 m,宽度由 310 m 变为 340 m;内航道水深由 21.6 m 变为 23.0 m,外航道水深由 21.9 m 变为 23.6 m(图 1)。

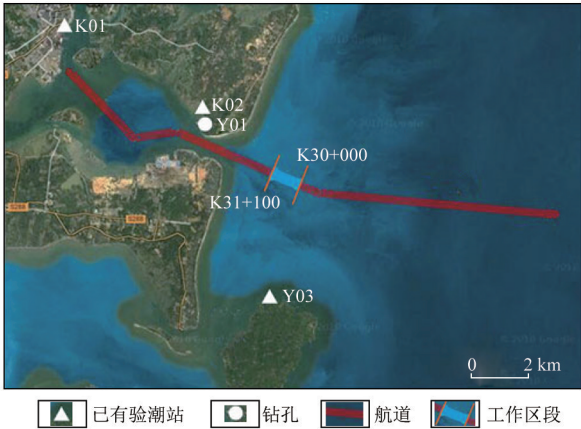


图 1 新航道位置  
Fig. 1 New channel location map

本着勘查方法经济高效和勘查资料准确的原则,此次工作布置了少量海上钻孔,并利用港口附近已有验潮站进行水位校正,同时选择多波束测深技术进行水深测量,选择浅地层剖面探测技术进行底质勘察,两种技术数据相互支持。

2 勘查原理

2.1 多波束测深技术原理

多波束测深技术采用正交的发射、接收两组换能器(图 2),发射阵平行船纵向排列,并且呈两侧对称向下方发射 2°(沿船纵向)×44°(沿船横向)扇形脉冲声波。接收阵沿船横向排列,但在束控方向上接收与发射方向正好相反,以 20°(沿船纵向)×2°(沿船横向)的 16 个波束角接收来自海底照射面积为 2°×44°扇形的回波。接收波束与发射波束叠加后,形成沿船横向两侧、对称的 16 个 2°×2°波束,在海底形成 16 个矩形投影区。这些矩阵投影区内,回

波波束将按入射的路途返回换能器接收并记录各波束回波的到达角和旅行时间,获得每一个矩形的深度,获得船正下方垂直航向排列的水深剖面<sup>[15]</sup>。

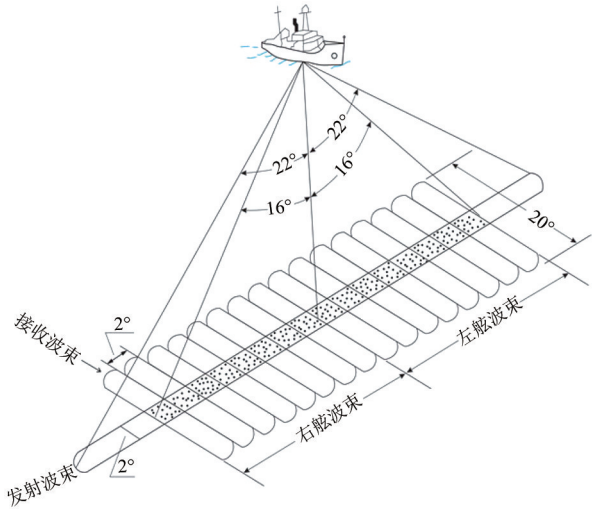


图 2 多波束测深技术原理示意  
Fig. 2 Principle diagram of multi-beam sounding technology

2.2 浅地层剖面探测技术原理

浅地层剖面探测技术是利用声波在声阻抗界面即不同底质界面发生反射波与透射波,透射波在下一个底质界面继续产生反射波与透射波,因为接收到的反射波信息与穿透的底质物理性质有关,通过反演反射波得到的反射波振幅、反射系数获得底质特性<sup>[16]</sup>。以两层水平展布的底质为例:

$$A_r = R \times A_i, \tag{1}$$

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}, \tag{2}$$

式中:  $A_r$  为反射波振幅;  $A_i$  为入射波振幅;  $R$  为反射系数;  $\rho_1$ 、 $V_1$  和  $\rho_2$ 、 $V_2$  分别表示上部底质和下部底质的平均密度和传播速度。

3 勘查技术

3.1 准备工作

海上航道地球物理勘查的主要工作流程可归纳为 4 个阶段:准备工作—海上勘查—室内分析—成果输出。无论多波束测深还是浅地层剖面探测,准备工作阶段的要点如下:

1) 平面控制采用已有的 3 个点: K01、K02、K03(图 1)。

2) 多波束测深线平行于航道中轴线,间距为 4 倍底质水深,相邻测深线间重叠大于 20%,满足全覆盖要求;两组换能器阵安装在离测量船船头约

1/3 处且不活动的船舷侧面,超过船底 10~30 cm,安装位置远离噪音源;表面声速仪固定在换能器阵上;光纤罗经固定在船重心位置,避免震动和电磁场干扰;定位系统安装在船头中间位置,接收机高出船体最高处;船速为 5~6 节。

3)浅地层剖面探测主测线平行于航道中轴线、沿新航道边线各布设 1 条主测线,另外布设了 1 条联络线。电火花水下声源和接收底质反射的宽间距拖曳式水听器阵列被列置于离探测船船尾 30 m 处,消除螺旋桨噪声对反射信号的影响。GPS 接收机天

线在底质反射源中心,在数据采集软件中进行坐标改正。探测参数:发射能量为 1 200 J,触发时间 0.6 s,记录深度 100 m,延迟时间 0.08 s;探测船的船速为 3~4 节,定标为等距离 20 m。

4)新航道外边线上以长度 1 km 为单元布置 1 个钻孔。在外航道 K30+000 至 K31+100 段,浅地层剖面探测主测线上分别布置了 ZK101、ZK42,钻孔深度以理论深度基准面为基准,超过外航道设计水深 2 m 孔底标高-25.60 m 终孔。

勘查所用仪器及主要技术参数见表 1、表 2。

表 1 多波束测深系统主要部件  
Table 1 Main components of multi beam sounding system

序号	名称	型号	产地	备注
1	Reson SeaBat 多波束测深仪	T20-P	丹麦	频率:400~200 kHz;发射开角:>145°~>142°;接收:1.1°±0.05°~2.2°±0.1°;深度:175~450 m
2	光纤罗经和三维传感器	Polaris FOG-200	英国	动态精度:±0.1°;分辨率:0.01°
3	声速剖面仪	HY1200	中国	分辨率:0.015 m/s
4	表面声速仪	Reson SVP70	丹麦	分辨率:0.01 m/s
5	多波束数据采集软件	PDS2000	丹麦	
6	多波束数据后处理软件	Caris Hips/Caris Sips	美国	
7	GPS 接收机	华测 i80	中国	

表 2 浅地层剖面探测系统主要部件  
Table 2 Main components of sub-bottom profiler detection system

序号	名称	型号	产地	备注
1	甲板能量发射单元	CSP-D2400J	英国	能量输出:50~2 400 J;发射速率:4 次/s
2	电火花水下声源	Squid 2400	英国	水面拖曳作业,水下 0.2~0.4 m 发射声源;穿透深度:80~200 m;分辨率:25~35 cm
3	宽间距拖曳式水听器阵列	20 单元	英国	
4	接收机	Geopulse 5210A 型	英国	磁带记录
5	数据采集和处理工作站	SonarWiz 5	美国	
6	GPS 接收机	Trimble SPS351	美国	

3.2 主要工作流程

图 3 给出了多波束测深的主要工作内容:①海上勘查,主要包括平面定位、部件安装和调试、现场校正、声速测定;②室内分析,把海上勘查获得的原始数据导入到处理软件,室内校正后得到数字化勘查成果;③成果输出,把数字化勘查成果变成水深图、海底地形图。

浅地层剖面探测的主要工作流程与图 3 展示的内容基本相同,在室内分析阶段增加了以海上钻孔资料为基础的底质特性反演及用多波束测深获得的海底地形数据对浅地层剖面进行海底归位校正,而成果输出是把数字化勘查成果变成浅地层剖面图。

3.3 室内分析关键技术措施

3.3.1 水位校正

由于海面时时变化,导致船上发射、接收声波的系统部件在起始点高度上下起伏,需要进行水位校

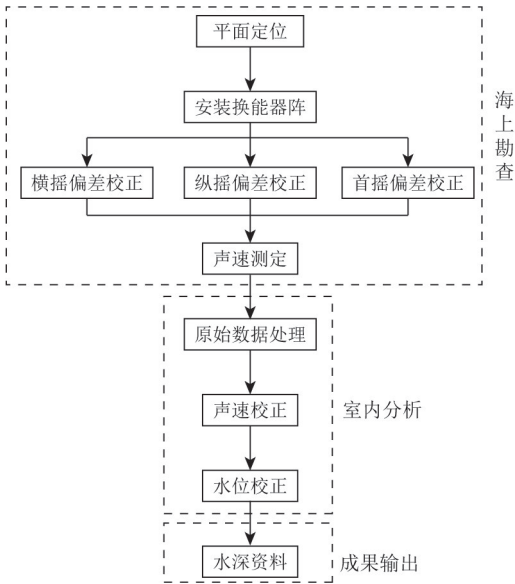


图 3 多波束测深主要工作流程

Fig.3 Main working flow of multi beam sounding



正。水位校正是提高勘查精度的关键环节之一,通常采用 2 种方法:①近海区域利用或建立验潮站;②全球定位导航系统。本航道勘查时利用港口附近已有的验潮站进行水位校正,验潮站位于距离外航道 K30+000~K31+100 段最近的 Y01(图 1)。

多波束测深系统水位校正原理如图 4 所示。以 1985 国家高程基准点为基础,水深测量前 10 min 开始在验潮站观测海面高程  $h_3$ ,此后每隔 10 min 观测一次,直至测量结束后 10 min。以时间为横坐标、以海面高程为纵坐标绘制曲线图。1985 国家高程基准点和理论深度基准面之间的深度  $h_2$  是固定已知的,因此可以把多波束测深过程中得到的每 10 min 实时海面高程归算至理论深度基准面,即航道水深  $h_1 = H - h_2 - h_3$ 。

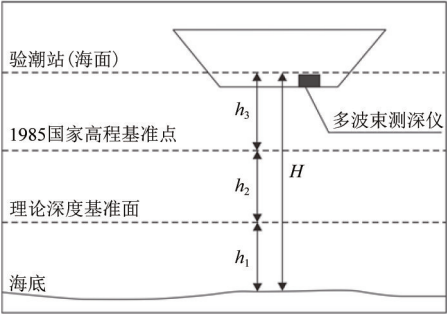


图 4 多波束测深水位校正原理示意

Fig. 4 Schematic Diagram of water level correction with multi beam sounding

3.3.2 浅地层剖面探测反演

浅地层剖面探测技术反演是基于不同年代或不同沉积物底质会产生不同的底质声阻抗界面来获得底质界面。反演要点为:利用钻孔资料确定声阻抗界面,然后在浅地层剖面探测声图中进行该声阻抗界面的追踪;进行海底归位校正;利用主测线和联络线的交点,进一步验证声阻抗界面的判断。

基于上述反演要点,需要在剖面图上计算出每一个定位点的声阻抗界面之间的厚度数值。由于剖面记录的是时间分量,因此要进行以理论深度基准面为基准的深度转换。根据航道区域已有底质沉积物声学研究成果,把底质浅部沉积松散层声波速度选定为 1 600 m/s。利用该速度进行深度转换,得到底质界面之间的厚度。

4 成果解释

通过波束测深技术、浅地层剖面探测技术和海上钻孔的有机结合,南方某 30 万吨级航道 K30+000 至 K31+100 段的勘查成果见图 5、图 6。

图 5 显示:①旧航道两侧水深小、中间水深大,水深范围为 18~22 m;②旧航道水深等值线沿航道中轴线平行分布;③旧航道边线外延加宽 15 m 部分,水深为 16~18 m;④旧航道水深达不到新航道水深 23.6 m 的设计要求。

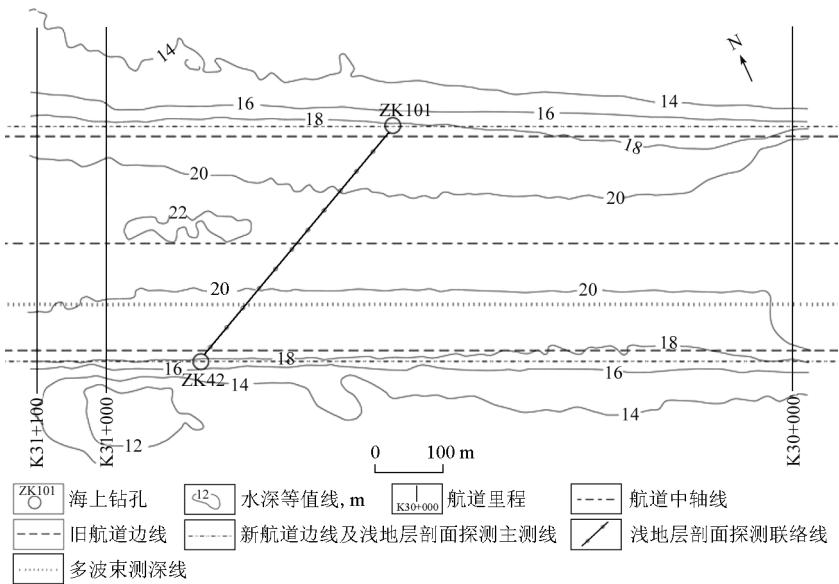


图 5 K30+000 至 K31+100 航道段实测水深等值线平面

Fig. 5 Actual bathymetric chart of K30+000 to K31+100 Channel

利用浅地层剖面探测技术勘查底质时,将声波易穿透的底质称为软土层,如淤泥、淤泥质黏土,软

土层在浅地层剖面图中灰度强,易被识别;将声波不易穿透的底质统称为硬土层,如砂、黏土、粉土和砾

砂,硬土层在浅地层剖面图中灰度弱,不易被识别<sup>[16-18]</sup>。图 6、表 3 显示浅地层剖面分为两层:上部灰度强,判断为软土层,相当于 ZK101 钻遇的淤泥、淤泥质粉质黏土组成的底质,下部灰度弱,判断为硬土层,相当于 ZK101 钻遇的中砂、粉质黏土和砾砂组成的底质;两种底质厚度均匀、近水平分布。图 6 显示 ZK101 所在的浅地层剖面探测主测线水深为 18 m,按设计要求,需疏浚 5.6 m,因此需要进入 4 m 厚的软土层以及 1.6 m 的硬土层,根据地层特征,使用耙吸、链斗、铲斗等一般疏浚方法即可。

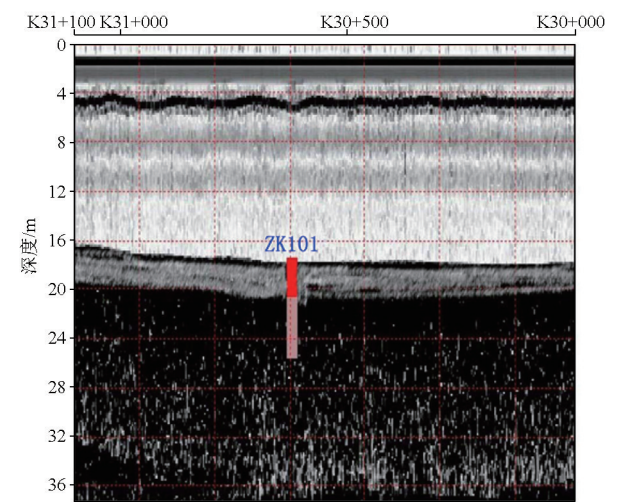


图 6 K30+000 至 K31+100 航段浅地层剖面

Fig. 6 Sub-bottom profiler K30+000 to K31+100 Channel

表 3 ZK101 钻孔底质地层

Table 3 Sediment table of ZK101 drilling hole

序号	岩性	厚度/m	地层特征	备注
1	淤泥	1.50	灰黑色,流塑,土质不均匀,略有腐臭味,含贝壳碎屑	软土层
2	淤泥质粉质黏土	2.50	灰黑色,流塑,土质不均匀,略有腐臭味	
3	中砂	3.00	灰黑色,中密,分选性一般,级配不良,成分以石英、长石为主	硬土层
4	粉质黏土	1.90	灰黑色、灰黄色,可塑,土质不均匀,黏性较好,局部含少量砂粒	
5	砾砂	1.40	灰黑色,中密,分选性一般,级配不良,成分以石英、长石为主	

5 结论

1)在近海区域进行航道勘查时,可用已有验潮站进行水位校正,降低勘查成本。

2)用浅地层剖面探测技术勘查海上航道底质时,最好采用电火花水下声源,其通过高压放电气化海水产生爆炸声波,声波能量高,穿透深度大。在浅地层剖面图上,软土层灰度强,容易被识别,而硬土层灰度弱,不易被识别。

3)进行海上航道勘查时,要把波束测深技术、浅地层剖面探测技术和海上钻孔有机地结合起来,数据相互校核,提高勘查精度,且能获得水深、底质等数据,也能为疏浚设备和工艺的选择提供依据,提高勘查效率。

4)本文得到的海上航道勘查时的勘查系统选型、准备工作、数据采集、关键技术处理措施和基于海上钻孔的反演要点等,也适用于江河、湖上区域的水上勘查。

参考文献 (References):

[1] 王鑫. 水流引起的多波束测深误差改正方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.

Wang X. Research on correction methods of errors in multi-beam sounding resulted from water flow [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.

[2] 徐超. 海底散射模型与多波束混响信号统计特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.

Xu C. Research of seafloor scattering model and statistical characteristic of multi-beam reverberation signal [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.

[3] 翟春平. 基于电子海图的浅水多波束测量导航方法研究与软件开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.

Zhai C P. Research and software development of shallow water multi-beam sounding navigation based on electronic sea chart [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.

[4] 马建林. 基于多波束和 ArcGIS 的数字海底地形研究及其实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

Ma J L. The study and implement of digital seabed surface based on multi-beam and ArcGIS [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[5] 李文杰, 胡平, 肖都, 等. 多波束测深在海洋工程勘察中的应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(4): 373-376.

Li W J, Hu P, Xiao D, et al. The application of multi-beam sounding to marine engineering exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28(4): 373-376.

[6] 姚一帆, 廖曾平, 张鹏, 等. 深中通道深水区管节基槽回淤特征分析[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(3): 54-57.

Yao Y F, Liao Z P, Zhang P, et al. Analysis of characteristics of back-siltation in foundation trench for immersed tunnel segments in deep water area for Shenzhen-Zhongshan link project [J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(3): 54-57.

[7] 冯湘子, 年永吉. 海洋工程物探勘察中的几种声学假象[J]. 工程地球物理学报, 2023, 20(3): 322-329.

Feng X Z, Nian Y J. Several acoustic artifacts in marine engineer-

ing geophysical survey [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2023, 20(3): 322–329.

[8] 余启义. 基于多波束测深技术的海底地形测量[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(9): 262–264.

Yu Q Y. Seabed topography measurement based on multi-beam bathymetry technology [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2022, 45(9): 262–264.

[9] 王启, 刘胜旋, 关永贤, 等. 浅水多波束测深资料处理关键技术探讨[J]. 海洋测绘, 2021, 41(2): 29–33.

Wang Q, Liu S X, Guan Y X. The discussion on shallow multi-beam echo sounding data processing method [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2021, 41(2): 29–33.

[10] 杨国明, 朱俊江, 赵冬冬, 等. 浅地层剖面探测技术及应用[J]. 海洋科学, 2021, 45(6): 147–162.

Yang G M, Zhu J J, Zhao D D, et al. Development and application of sub-bottom profiler technologies [J]. Marine Sciences, 2021, 45(6): 147–162.

[11] 李铭珂. 浅地层剖面数据处理与海底底质分类研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.

Li M K. Research on sub-bottom profile data processing and seabed sediment classification [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[12] 林兆彬. 浅地层剖面系统在水下文物探测中的应用研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2018.

Li Z B. Research of sub-bottom profile in detecting underwater cultural relics [D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, 2018.

[13] 刘秀娟, 高抒, 赵铁虎. 浅地层剖面原始数据中海底反射信号的识别及海底地形的自动提取[J]. 物探与化探, 2009, 33(5): 576–579.

Liu X J, Gao S, Zhao T H. The recognition of the seabed reflection signal and the automatic pickup of seabed topography from the original data of sub-bottom profile [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(5): 576–579.

[14] 王海啸, 夏文俊, 周欣. 长期浸水条件下重塑固化疏浚土中重金属浸出特性[J]. 河南科学, 2021, 39(10): 1642–1648.

Wang H X, Xia W J, Zhou X. Heavy metals’ leaching behavior of remolded stabilized dredged sediment under long-term immersion [J]. Henan Science, 2021, 39(10): 1642–1648.

[15] 马延霞. 多波束条带测深系统测深精度评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

Ma Y X. A study on surveying accuracy of estimation in multi-beam sounding system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.

[16] 李平, 杜军. 浅地层剖面探测综述[J]. 海洋通报, 2011, 30(3): 344–350.

Li P, Du J. Review on the probing of sub-bottom profiler [J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3): 344–350.

[17] 王长涛, 任玉宾, 张世兴, 等. 均质软黏土中双筒吸力桩基础最佳荷载作用点不排水承载特性数值分析[J]. 河南科学, 2022, 40(4): 558–570.

Wang C T, Ren Y B, Zhang S X, et al. Numerical study on undrained uplift bearing capacity of optimal loading point of double-bucket suction pile foundation in homogeneous soft clay [J]. Henan Science, 2022, 40(4): 558–570.

[18] 赵鹏, 侯振国, 罗浩, 等. 建筑垃圾改良黄河冲积粉土的力学特性试验研究[J]. 河南科学, 2022, 40(10): 1611–1618.

Zhao P, Hou Z G, Luo H, et al. Experimental study on mechanical properties of the yellow river alluvial silt modified by construction waste [J]. Henan Science, 2022, 40(10): 1611–1618.

Application of geophysical exploration technologies for channel at sea

TIAN Pei-Xian, CHEN Wei-Jian, LIN Qi-Hui, ZHOU Wei-Bin

(Guangdong Construction Engineering Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511453, China)

**Abstract:** Prior to the construction of an offshore channel, it is necessary to acquire data on the water depth and seabed sediments within the channel, aiming to determine appropriate dredging equipment and processes. Based on the mutual verification of data from existing tidal stations, offshore boreholes, and different exploration technologies, this study determined accurate water depth, seabed topography, and the thicknesses and distributions of sediments in both soft and hard oil layers utilizing the multibeam sounding and sub-bottom profiling techniques. Accordingly, this study summarized the technical measures, as well as the inversion characteristics of soft and hard soil layers of sediments, for offshore channel exploration. The obtained results are beneficial for the economical and efficient offshore channel exploration in sea areas with large waves using the multibeam sounding and sub-bottom profiling techniques. Furthermore, these results can be promoted to the exploration of subsea sediments containing toxic substances.

**Key words:** offshore channel; multibeam sounding; sub-bottom profiling; offshore borehole; sediment

(本文编辑: 沈效群)