

近海海底不规则堆积体体积高精度量算 技术与应用

徐国强, 杜 军*, 田梓文, 闫文文, 崔爱菊

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:海底堆积体(充填体)体积累算技术在航道疏浚等海洋工程成本核算以及海洋执法方面有着广泛的应用。基于高精度多波束和参量阵极浅地层测量,总结了一种高精度计算海底堆积体体积的方法:提取海底堆积物表面多波束(地形)数据以及堆积体浅地层剖面(厚度)数据,通过 GIS 叠加及三维分析,可获得高精度海底堆积体体积数据。该方法原理简单、易于实现且精度高,基于日照海洋调查工程数据进行了实际测量与计算,证明了方法的可行性和准确性。该方法也可应用于海底以下地层中发育的特殊充填的自然沉积体相关参数的识别与量算。

关键词:海底;堆积体;体积累算;多波束;浅地层剖面仪;GIS

中图分类号:P753

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2017)04-0030-07

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2017.04.004

海底堆积体体积累算是航道疏浚等海洋工程成本核算的重要支撑技术,其中人工倾倒导致的海底堆积体体积累算也是海洋执法部门查处非法疏浚物倾倒案件的事实基础和处罚依据。海底地形本身复杂多变,其上堆积体也是形态各异,尤其是人工倾倒物更具有不规则性,因此,海底堆积体体积的计算具有不易识别、形态复杂、探测难度大等特点。目前,海底堆积体方量的常用计算方法有断面法^[1]、DEM 数字高程模型法^[2]、方格网法^[3]、区域土方量平衡法和平均高程法等。其中,断面法中断面线的布设距离太远会降低精度,距离太近则工作量增大。DEM 法精度较高,但其实际精度受原始数据采集误差和高程内插误差方面制约。方格网法精度较高,但适用性差,常应用于场地较为平坦的体积计算。基于此,依托山东省日照海域相关探测项目,综合应用高精度多波束、参量阵极浅地层剖面仪和地理信息系统软件,总结了一种计算海底堆积体体积的方法。该方法采用的多波束和浅地层探测技术已是海洋调查中广泛应用的技术,在保障体积体计算精度的同时可大幅提高探测效率,因而降低了海洋执法成本,在海洋工程科学用海和管理部门依法治海方面具有较大的应用价值。

1 计算原理

海底堆积体的体积计算原理是利用水深测量获取的现状海底地形与浅地层测量获取的原始海底地形的数据,通过 GIS 的三维分析功能模块计算获得。

通过获取的现状海底地形(多波束测量)和原始海底地形数据(浅地层剖面测量)分别拟合海底堆积体顶界面模型 A 和底界面模型 B,并分别确定顶、底界面模型中水深的最大值与最小值;然后,假定一个基准面 D,该平面水深需小于顶界面最小水深或大于底界面最大水深;最后,采用 GIS 方法分别计算平面 D 和界面 A 拟合成的不规则体体积 V_{DA} 、平面 D 和界面 B 拟合成的不规则体体积 V_{DB} ,堆积体体积 V 为二者之差(图 1):

收稿日期:2017-09-01

资助项目:国家电网公司科技项目——海底电缆工程高精度多元数据获取及分析技术研究(JYKJXM[2017]003);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——基于 CHIRP 浅地层探测技术的现代滦河口水下三角洲晚更新世以来的沉积特征与沉积模式研究(2015G14)

资助项目:徐国强(1987-),男,硕士,主要从事海洋工程地质与勘查技术方面研究. E-mail: xuguo@fio.org.cn

* **通讯作者:**杜 军(1974-),男,研究员,博士,主要从事工程地质灾害方面研究. E-mail: dujun@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

$$V = V_{DA} - V_{DB}, \quad (1)$$

式中: V_{DA} 为现状体积; V_{DB} 为原体积。

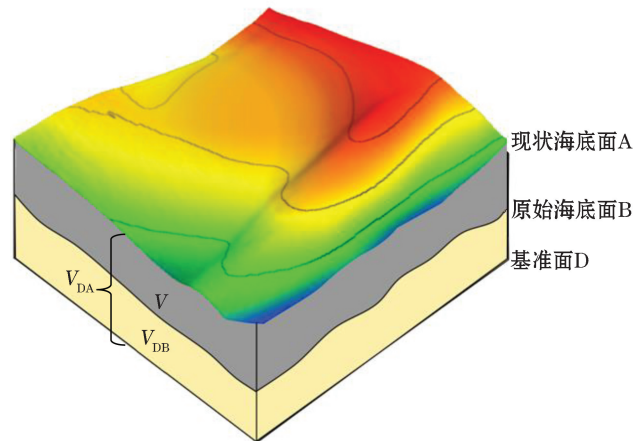


图1 堆积体体积计算示意图

Fig.1 A schematic diagram showing the volume calculation of submarine accumulations

2 海底堆积体外业量测

2.1 测量设计

堆积体顶面测量设计为多波束全覆盖采集,底界面测量设计采用浅剖仪探测原始海底,比例尺为1:5 000,中间采用GIS进行线性内插。本次测线布设原则为沿等深线走向布设,并且综合考虑测区的主流向,沿NE—SW向共布设56条,另垂直主测线布设了4条检查线。由于多波束测量需要全覆盖,并且至少有10%重叠,因此在测量过程中适当地对测线进行调整,本次多波束测量的实际水深为20~28 m,测量覆盖宽度随着水深变化。由于水深变化不大,本次外业数据采集的测线间距为75 m,测线布设见图2。本研究使用的坐标系为CGCS2000,中央经线120°E,投影为高斯-克吕格投影。

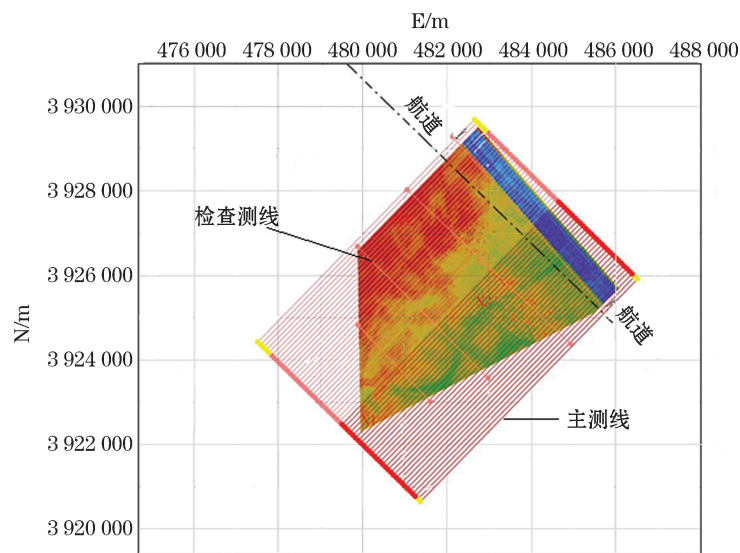


图2 研究区位置和测线布设示意图

Fig.2 Location of the study area and layout of the surveying lines

2.2 测量设备

堆积体顶面测量设备为美国 R2SONIC 公司产的 SONIC2024 条带多波束测深系统;工作频率为 200~700 kHz,实时在线可调,步长 10 kHz;左舷、右舷、下视探测波束角为 0.5° ,前、后探测波束角为 1.0° ;波束数目 256 个;覆盖宽度最大 160° , 10° ~ 160° 在线连续可调;探测分辨率 0.6 cm。

堆积体底面探测设备为德国 INNOMAR 公司产的 SES-96 参量阵测深/极浅剖仪;发射频率为一次频率 100 kHz,二次频率 4,5,6,8,10 和 12 kHz;功率 12 kW;测深深度为 1~300 m;低频波束角为 $\pm 1.8^{\circ}$;采样分辨率 5 cm。

辅助设备为 MRU 姿态传感器,消除波浪影响,动态精度 0.15° ,涌浪精度 5 cm。

2.3 外业测量

多波束测量之前,在研究区内进行校准,校准参数有横摇(ROLL)、纵摇(PITCH)、艏向(HEADING)。同时精确测定研究区内的声速剖面,对声线的弯曲进行声学跟踪,提高测量精度。在勘测中实施全方位的质量监测和控制:采用高精度 DGPS 导航定位系统,以便使动态定位精度在 1.0 m 以内。测量中船只偏离设计测线不超过 5 m。测线间距视水深和仪器的技术参数合理设计,确保两相邻测线的测宽有 10%~15%的覆盖,在测线两端至少延长 500 m,如测线偏离超过设计要求,立即纠正,必要时予以补测;出航前、归航后和在勘测期间进行探头的吃水深度测量,以便进行吃水改正;在勘测中保证至少在 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的范围内有一个声速剖面,并且每间隔 3 h 测量一次声速剖面。

调查浅地层资料前,按《海洋工程地形测量规范》^[4]等相关规范和仪器操作规程要求,对声学地层探测系统的各种参数进行技术实验及校正。根据测区水深、底质条件,充分调试仪器,选择最佳工作参数。作业期间,降低噪音和其他干扰因素,提高信噪比,保证记录质量;调节好记录时间延迟,使同一测线的记录量程一致。工作船速控制在 3~5 kn。

3 海底堆积体体积计算

海底堆积体的体积计算需要本次水深测量获取的海底地形与使用浅地层剖面仪获取的原始海底地形的数据,通过 GIS 的三维分析功能模块计算获得。

3.1 海底不规则堆积体表面形态分析

多波束主要用于水深全覆盖测量^[5-7],本文中用于获取不规则堆积体的顶面形态,理论上其探测精度可达 0.6 cm。多波束数据处理采用 CARIS HIPS 7.1,根据多波束获取数据绘制的研究区域三维水深(图 3)。总体上看,研究区中部分布较多的堆积体,分布范围约 10 km^2 。堆积体一般高出周边海底约 1 m,堆积体形状不规则,棱角明显,长度一般为 30~60 m。结合高分辨率浅地层资料分析,堆积体形状及分布不符合自然条件形成规律,与周边地形反差较大,南部的浅槽上方同样分布有堆积体。

图 4 和图 5 为 2 处典型海底堆积体局部放大示意图。由图 4 可知,S16 处位于测区的中北部,海底多孤立的小堆积体,堆积体形状不规则。S16 区域堆积体较周围海底高约 1 m 左右,堆积覆盖范围约 $40\text{ m}\times 60\text{ m}$,NE—WS 走向,而堆积体周边海底平坦。

由图 5 可知,G08 处位于测区的北部,该区为一孤立的小型堆积体,堆积体呈类似火山口的锥型,堆积中部较周围深约 0.8 m,整个堆积体直径约 28 m。堆积体周边海底平坦,但比堆积体中部要浅约 0.2 m。

由此可见,海底堆积体形态极不规则,高低起伏明显。本文以海底堆积体集中区,即图 3 中黄色范围为研究区域,经过多波束数据处理,得到了海底不规则堆积体的表面形态,记为曲面 A。

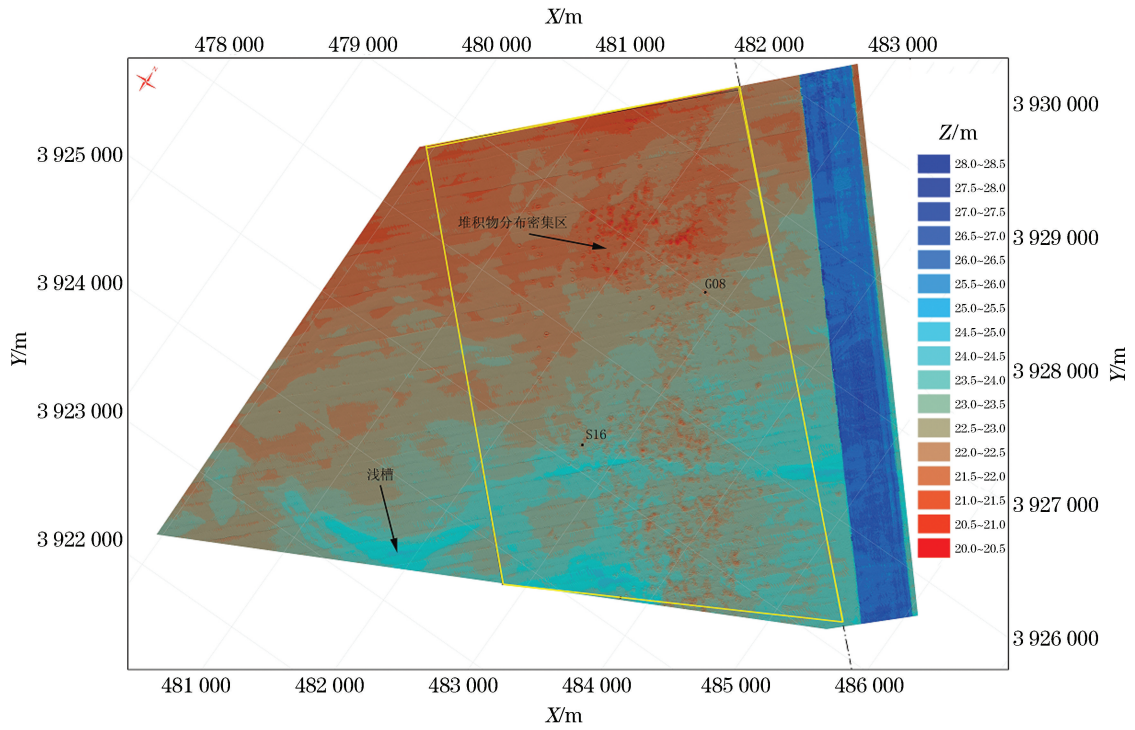


图 3 研究区三维水深图

Fig.3 The 3-D bathymetric map of the study area

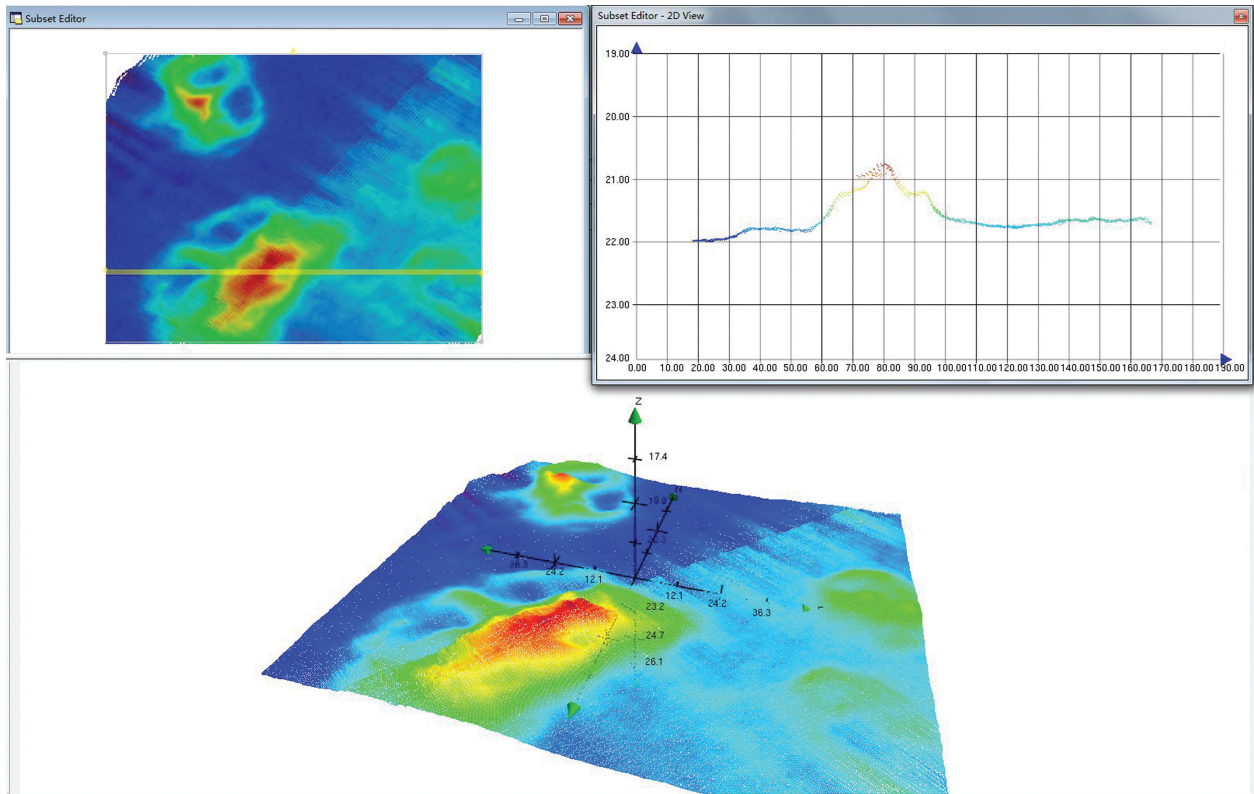


图 4 S16 处海底地形示意图

Fig.4 Sketch map of seafloor topography at S16

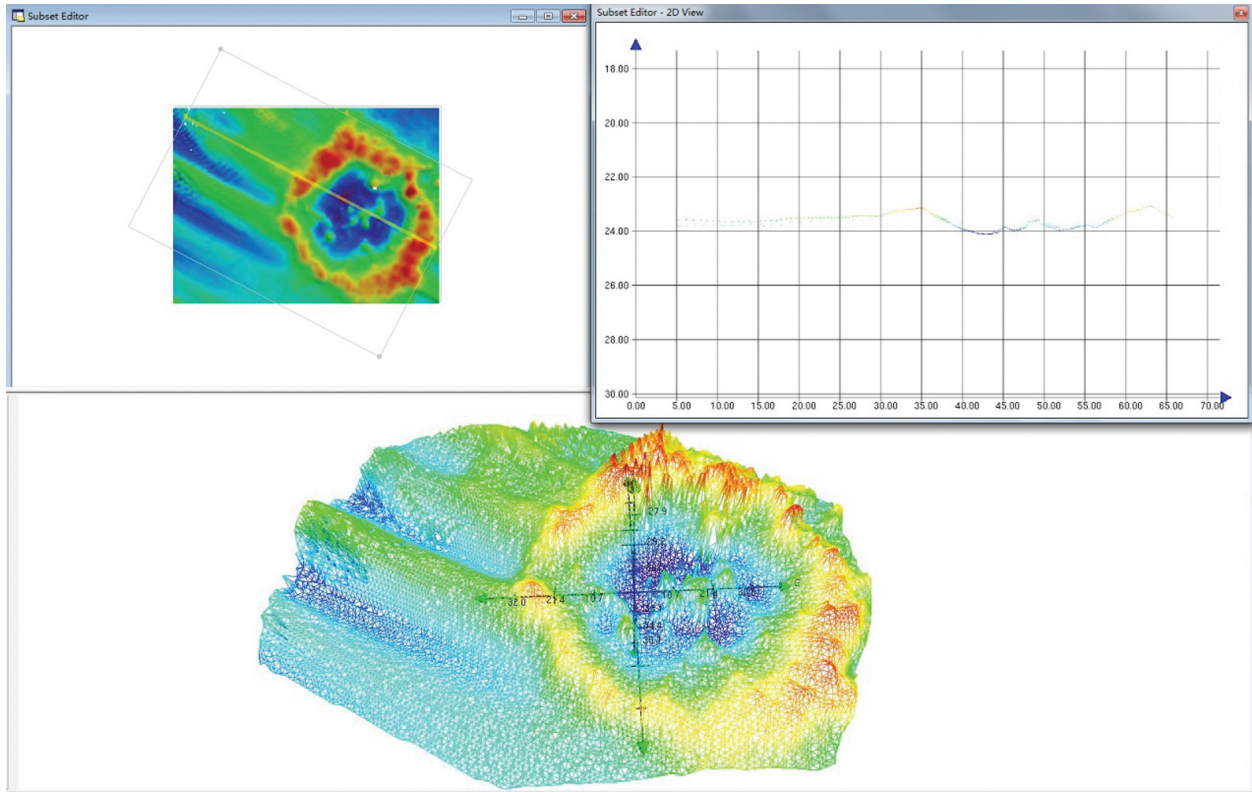


图 5 G08 处海底地形示意图

Fig.5 Sketch map of seafloor topography at G08

3.2 海底堆积体底边界形态分析

浅剖仪主要用于探测海底以下地层结构与构造^[8],本文中主要用于探测不规则堆积体的底部边界,采样分辨率理论上可达 5 cm。

通过分析浅地层反射数据,发现在海底堆积物存在的区域,上覆地层以下可见一较强声学反射界面(图 6),并且该界面在无堆积物的区域与海底面连续性较好,因此推测该界面为原始的海底面。该界面以下的 1~2 m 范围内的地层大致呈平行层理的地层结构,而界面以上的堆积体地形起伏较大,层间呈杂乱强反射,结合多波束与地貌资料基本可以判定现状海底界面和原始海底界面之间为外来堆积物填充。与多波束调查结果一致性较好。

使用 ISES 后处理软件将浅地层资料直接屏幕数字化。资料处理时根据声学记录图像,将各相关定位点的水深和各声学地层界面的埋藏深度值按规定比例尺进行标注,资料解译时计算各特征位置的高度差。以原海底为基准,共提取出 20 114 个海底堆积物的位置($X_1, X_2, X_3, \dots, X_{20114}$)和高差($H_1, H_2, H_3, \dots, H_{20114}$)。根据前文多波束测深数据,提取相应位置高程($A_1, A_2, A_3, \dots, A_{20114}$),减去对应高差得到原始海底高程信息($B_1, B_2, B_3, \dots, B_{20114}$)。在 20 114 个浅地层剖面仪获取的海底地形点基础上,为了有效覆盖整个堆积体分布范围,在堆积体周边平坦海底均匀选取 10 个点作为原海底点。最后使用 ARCGIS 将 20 124 个点构建 TIN 模型,获得原海底曲面 B。

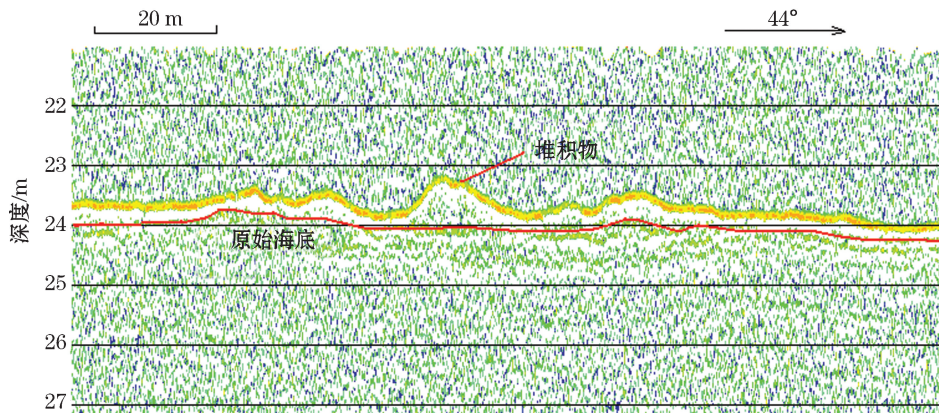


图6 堆积物分布区浅地层典型图像

Fig.6 Typical profiles of shallow strata in the area where submarine accumulations are distributed

3.3 堆积体体积计算

堆积体体积计算采用 ARCGIS 的三维分析模块^[9]中的 Surface volume 功能。据 3.1 和 3.2 节计算结果分别计算平面 D 和界面 A 拟合成的不规则体 V_{DA} , 以及 D 平面和 B 界面拟合成的不规则体体积 V_{DB} 。

在研究区取水深 26 m 平面为基准面 D, 计算体积为 $V_{DA} = 43.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $V_{DB} = 39.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。所用多波束测深系统的探测分辨率为 0.6 cm, 浅剖仪采样分辨率理论上可达 5 cm, 设备探测精度可达厘米级; 数据处理过程中多波束资料误差保持和浅地层剖面深度的误差保持在 5 cm 以内, 本次多波束成图网格采用 0.5 m × 0.5 m 间隔, 本次测量误差为 $\pm 1.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。依据式(1)得到堆积体体积为 $(3.8 \pm 0.12) \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

4 结 论

本文基于高精度多波束和参量阵极浅地层测量技术, 总结了一种高精度计算海底堆积体体积的方法。即提取海底堆积物表面多波束(地形)数据以及堆积体浅地层剖面(厚度)数据, 通过 GIS 叠加及三维分析, 可获得高精度海底堆积体体积数据。最后通过日照海洋调查工程数据的实际测量与计算, 证明了方法的可行性和精确性, 并得到结论:

1) 在确定海底堆积体范围时, 同时参考了海底底质沉积物样品分析的成果, 证明原状海底与堆积体海底在现场物理特征、粒度特征、元素特征和碎屑矿物特征等指标方面存在差异, 分析结果与多波束和浅地层探测成果相吻合。

2) 基于目前海洋工程调查中经常采用的多波束测深技术、浅地层剖面探测技术以及 GIS 叠加后处理方法, 总结了高精度量算海底堆积体体积的方法, 其原理简单、易于实现且精度高。

3) 该技术可应用于航道疏浚、海域使用等工程量算, 为相关海洋工程施工单位成本核算提供基础数据以及为海洋执法提供相关依据; 而且, 声学地层探测技术也可对海底下地层中发育的特殊充填的自然沉积体(埋藏古河道、古三角洲、透镜体等)进行识别并量算其相关参数, 为海洋古环境研究提供一种高效、高精度的技术手段。

参考文献 (References):

[1] FAN J W, LI T T. Application of section method in earthwork calculation of river channel and ditch[J]. Doors & Windows, 2012(10):

- 171-172. 范俊武, 李婷婷. 断面法在河道沟渠土方量计算中的应用[J]. 门窗, 2012(10): 171-172.
- [2] CHEN L J. Discussion on calculation method of silt in river dredging project[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2015, 43(1): 58-59. 陈良进. 河道清淤工程淤泥方量计算方法的探讨[J]. 浙江水利科技, 2015, 43(1): 58-59.
- [3] LIAO X Y, XIONG J J. The skills used in grid method to calculate earthwork quantity[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(1): 155-158. 廖小延, 熊俊杰. 方格网法计算土方量的应用分析[J]. 城市勘测, 2015(1): 155-158.
- [4] National Center of Ocean Standard and Metrology. Specification for marine engineering topographic surveying: GB 17501—1998[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999. 国家海洋局标准计量中心. 海洋工程地形测量规范: GB 17501—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [5] LI H S, ZHOU T, XU C. New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(2): 73-80. 李海森, 周天, 徐超. 多波束测深声纳技术研究新进展[J]. 声学技术, 2013, 32(2): 73-80.
- [6] DING J S, ZHOU X H, LIU Z C, et al. The working principle of multibeam bathymetric sonar system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 1999(3): 15-22. 丁继胜, 周兴华, 刘忠臣, 等. 多波束测深声纳系统的工作原理[J]. 海洋测绘, 1999(3): 15-22.
- [7] MA J L, JIN J, LIU Q, et al. Multi-beam echosounder versus side scan object detection a comparative analysis[J]. Hydrographic Surveying & Charting, 2006, 26(3): 10-12. 马建林, 金菁, 刘勤, 等. 多波束与侧扫声纳海底目标探测的比较分析[J]. 海洋测绘, 2006, 26(3): 10-12.
- [8] LI Y B, ZHANG Y F, LIU Y L, et al. Application of subbottom profiler to ocean engineering[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2007, 4(1): 4-8. 李一保, 张玉芬, 刘玉兰, 等. 浅地层剖面仪在海洋工程中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2007, 4(1): 4-8.
- [9] DUAN J G, XIAO Y. The calculation of earthwork volume based on TIN under the support of ArcScene[J]. Jilin Water Resources, 2008(S1): 25-28. 段建刚, 肖扬. ArcScene 支持下基于 TIN 的填挖方量计算[J]. 吉林水利, 2008(增1): 25-28.

High Precision Measurement Technology for the Volume of Submarine Irregular Accumulations in Coastal Waters and Its Application

XU Guo-qiang, DU Jun, TIAN Zi-wen, YAN Wen-wen, CUI Ai-ju
(The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: Measurement of submarine accumulations (or filling bodies) is widely applied for the cost accounting of marine engineering such as channel dredging and the marine law enforcement. Herein, a method for high precision calculation of the volume of submarine accumulations is summarized based on the high precision multi-beam data and the sub-bottom profiles acquired by parametric array. By this method, high precision data of the volume of submarine accumulations can be obtained by extracting multi-beam data (reflecting the seafloor fluctuation) of the submarine accumulation surface and sub-bottom profile data (reflecting the thickness of accumulation) of the submarine accumulations, and then through superimposition and three-dimensional analysis by using the Geographic Information System (GIS). This method is simple in principle, easy to be realized and high in precision, and has been successfully applied in precisely computing the volume of the submarine accumulations in the offshore area of Rizhao City. It has been proved that this method is of feasibility and accuracy and also can be applied to identify and calculate the related parameters of the naturally filled bodies formed in the strata below the seafloor.

Key words: seafloor; submarine accumulations; volume measurement; multi-beam; sub-bottom profiler; GIS

Received: September 1, 2017