

全水深多波束测深系统 Seabeam3012 在西太平洋马里亚纳海山区地形测量中的应用

龚旭东^{1,2}, 刁新源^{1,2}, 吕亚军^{1,2}, 卢志君^{1,2}, 陶泽丹^{1,2}, 张洪运^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 中国科学院海洋研究所在开展西太平洋马里亚纳海山区多学科综合科学考察的过程中, 利用“科学”轮船载的全水深多波束测深系统 Seabeam3012 对多个海山进行了地形测量工作。针对作业过程中遇到的恶劣海况导致采集数据质量差、多波束系统易检测错误海底信息、测线布设难度大等问题, 提出了基于船体姿态对数据质量影响分析的多波束测线方向优化、基于地形变化并参考浅地层剖面资料的作业参数优化和基于实时采集情况的多波束采集测线布设优化等一系列措施, 有效地提高了海山区多波束数据采集质量, 并提高了作业效率。获得的高品质地形数据, 为多学科协同研究奠定了基础, 为 ROV 等设备的现场作业提供了安全保障。

关键词: 全水深多波束测深系统; 马里亚纳海山区; 船体姿态

中图分类号: P229.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)08-0223-08

DOI: 10.11759/hyxx20200304001

海山是一种广泛分布于世界各大洋, 高于海底, 但又不超出海面的大型海底地貌类型^[1-2]。西太平洋马里亚纳海山区是开展海洋生物多样性、海洋生物起源与进化、海山火山岩的物质组成及成因等研究的热点区域^[3-5], 而地形测量是开展多学科协同研究的基础。同时, ROV 作为海山区海底生物多样性调查和海底取样的有效工具, 为保障其作业的安全性, 在其下放到海底开展科学考察工作之前, 必须获得海山区准确的地形资料。为此, 在中国科学院先导专项(A类)“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”、国家科技基础资源调查专项“西太平洋典型海山生态系统科学调查”和 973 计划项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理”的支持下, 利用“科学”轮船载全水深多波束测深系统 Seabeam3012 对西太平洋马里亚纳海山区多个海山进行了地形测量工作。

本文拟对作业过程中, 海况条件差、地形起伏大、海底底质变化大等特点造成多波束数据质量差、易检测错误海底信息、测线布设难度大等情况, 分析原因, 提出了一系列解决措施, 对今后多波束采集作业具有一定的指导意义。

1 采集设备简介

“科学”轮是我国新一代海洋综合科考船, 配备

了海洋大气、水体、海底、深海极端环境和遥感信息现场验证等五大船载探测系统, 其中, 海底探测系统包括重力、磁力、多道地震、全水深多波束测深和浅地层剖面等。海山地形测量主要是应用产自德国 ELAC 公司的 SeaBeam3012 全水深多波束测深系统, 技术参数见表 1, 采集软件为 Hydrostar。同时, 为了保证数据质量, 还配备了 DGPS、OCTANS 光纤罗经和表面声速仪等辅助设备。

2 作业难点

2.1 气象条件复杂, 海况差, 严重影响数据采集质量

西太平洋暖池区是全球海洋水温最高区, 也是海洋-大气能量交换年总量最大区域, 该区域气象条件复杂, 在高温、高湿条件下易发生超低压中心, 构成强烈的热带风暴^[6], 从“2018 年科技基础资源调查专项麦哲伦海山科学考察航次”的船载自动气象站

收稿日期: 2020-03-04; 修回日期: 2020-03-26

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA22050501)

[Foundation: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No. XDA22050501]

作者简介: 龚旭东(1980-), 男, 河南南阳人, 高级工程师, 主要从事海洋科考数据处理工作, E-mail: gongxudong@qdio.ac.cn; 刁新源(1979-)男, 通信作者, 山东青岛人, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋调查工作, E-mail: diaoxinyuan@qdio.ac.cn

记录的真实风速上,可以看出整个航次一半时间内的风速在 10 m/s 以上(图 1)。恶劣海况严重影响多波束采集质量,图 2 是多波束采集现场监控界面,可以看到,恶劣海况下,采集波束不连续,质量差,地形起伏大的区域甚至不能跟踪中央波束。

2.2 海山区地形起伏大,底质类型差别大,易检测错误海底信息

海山区海底地形起伏大,底质类型差别大,海底回波信息复杂,多波束系统易检测到错误海底信息,从而导致虚假的地形。图 3 显示了马里亚纳 M6-10 海山水深曲面,海山顶部出现条带状异常,该异常与测线重合,水深值为相邻测线水深值的两倍,后查实,是多波束系统错误接收海底二次回波造成的。

表 1 SeaBeam3012 全水深多波束测深系统技术参数
Tab. 1 Technical parameters of the full ocean depth multibeam bathymetric system Seabeam 3012

指标名称	指标数值
频率	12 kHz
最大船速	15 kn
最大工作水深	11 000 m
波束数	301 个
波束覆盖宽度	140°
精度	0.2%×水深(开角 30°范围内)
发射波束角	垂直航迹方向 150°, 沿航迹方向 1°
接收波束角	垂直航迹方向 1.5°, 沿航迹方向 15°
平均脚印分辨率	1°×1.5°

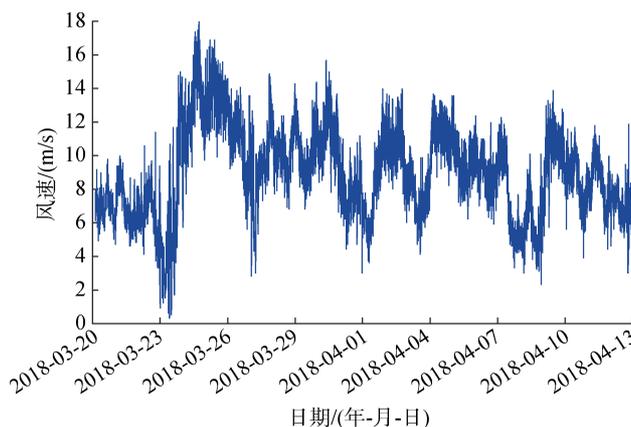


图 1 麦哲伦海山航次船载自动气象站记录真实风速

Fig. 1 Real wind speed recorded by the shipborne automatic weather station of the Magellan seamount voyage

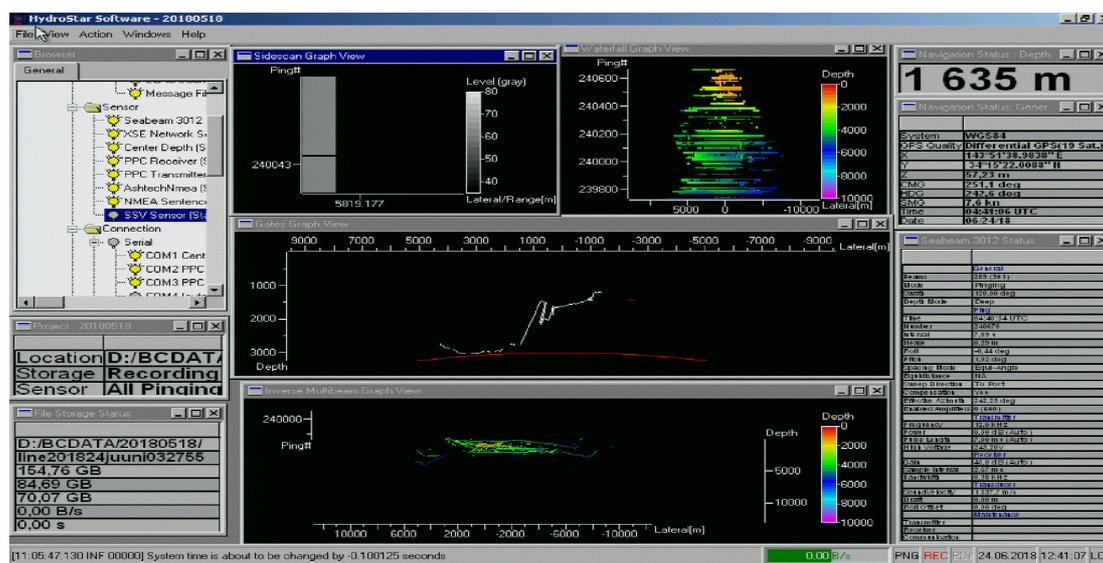


图 2 恶劣海况多波束采集现场监控界面

Fig. 2 On-site monitoring interface of multibeam acquisition under severe sea conditions

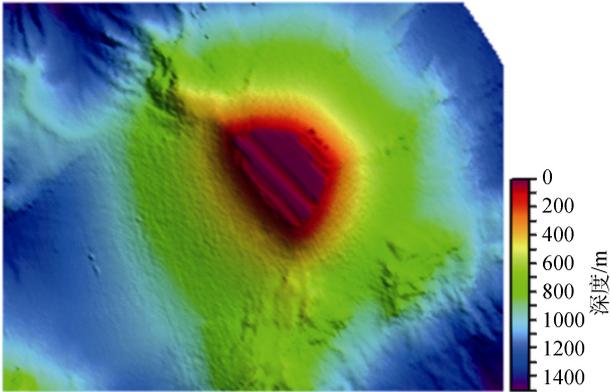


图3 马里亚纳 M6-10 海山水深曲面

Fig. 3 Water depth surface of the Mariana M6-10 seamount

2.3 测线布设难度大

科学考察航次耗资巨大,航次内容多涉及多学科联合作业,时间紧,任务重,各项作业需相互协调,提高作业效率。地形测量作为多学科协同研究的基础和设备现场作业的安全保障,是航次作业必须保质保量完成的基础工作,但海山区地形起伏大,造成多波束系统扫描宽度变化大(图 4),同时,对于未知海山,可获得的有效信息少,查询的海山地形和实际情况往往存在很大差异。因此,如何在保障多波束采集质量的基础上,合理布设测线,提高作业效率,是海山区多波束采集的作业难点。

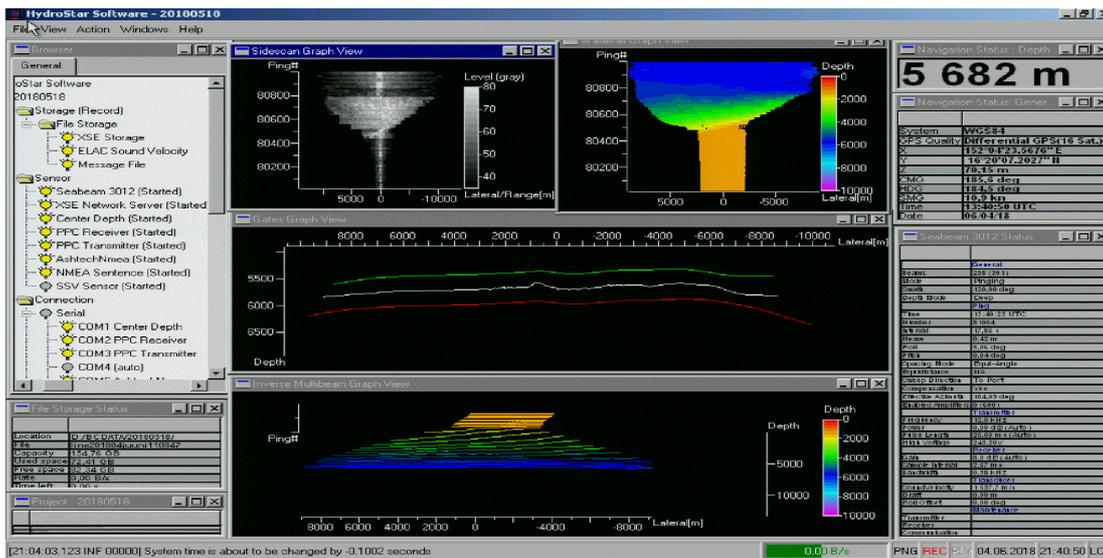


图4 海山区多波束采集现场监控界面

Fig. 4 On-site monitoring interface of multibeam acquisition in the seamount district

3 针对性技术措施

3.1 提高恶劣海况下多波束采集数据质量的措施

图 5 显示了风速为 12.5 m/s 左右的恶劣海况下,马里亚纳 M6-1 海山测线方向相反的相邻两条测线的多波束水深曲面图,其中,测线 1 方向与风向相反,测线 2 方向与风向相同。从中可以看到,作业海况相同,测线相邻,仅测线方向相反,但采集获得的资料品质却有较大差别。为调查其原因,对图 6 所示的对应测线船体的姿态数据曲线进行了分析,可以看到,与多波束数据采集质量关联度最大的是纵摇(PITCH)值,纵摇值变化越明显,即船体纵摇越剧烈时,多波束数据采集质量就越差,上述情况主要是由于恶劣

海况造成船体升沉运动时,船底的多波束系统与海水间产生大量气泡,从而影响波束的传播和接收,造成多波束数据采集质量差,尤其是在海山区,加上地形起伏的影响,海底回波信息更复杂,造成数据质量更差。

图 5 中的绿色测线位置与图 6 中的船体的姿态数据曲线完全对应,对比两图还可以看到,相同海况条件下,多波束数据采集质量差的位置往往是纵摇值出现较大正向跳跃变化的位置,而在纵摇值变化不大,或仅负向跳较大的位置,多波束数据采集质量受到的影响则较小。根据理论分析和实践观察,恶劣海况下,船舶顶着风浪行驶时,纵摇值易出现较大正向跳跃变化;船舶顺着风浪或侧着风浪行驶时,纵摇值变化不大,或仅负向跳跃较大。

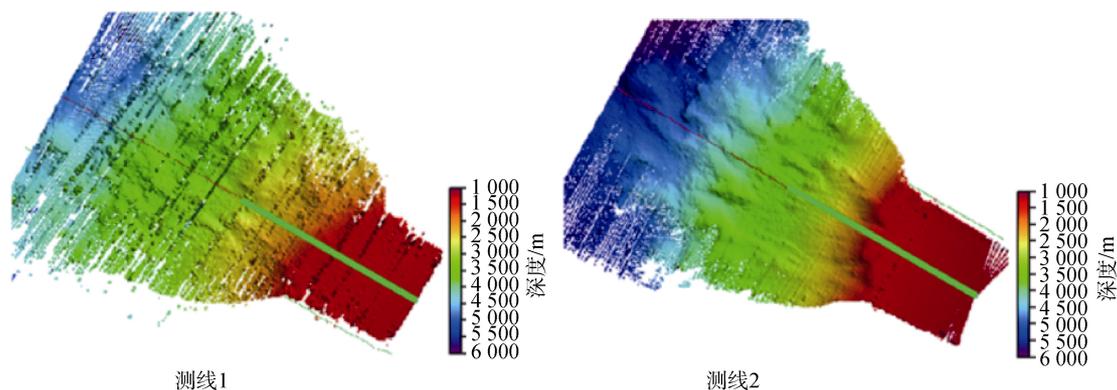


图5 马里亚纳 M6-1 海山相邻测线水深曲面

Fig. 5 Water depth surface of the adjacent survey line of the Mariana M6-1 seamount

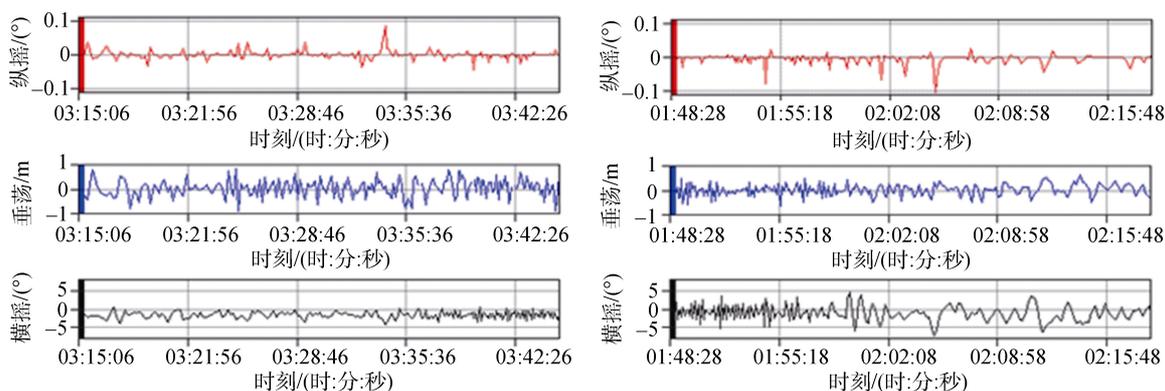


图6 马里亚纳 M6-1 海山相邻测线对应船体姿态曲线

Fig. 6 Attitude curve of the hull corresponding to the adjacent survey line of the Mariana M6-1 seamount

根据上述分析,提出了基于船体姿态对数据质量影响分析的多波束测线方向优化方案,即在恶劣海况条件下,进行多波束采集测线布设时,应适度考虑风浪对资料品质的影响,测线方向(尤其是关键区域)应选择倾向于与风浪方向保持一致或斜交,避免两者相对的情况。

图7是2018年马里亚纳-冲绳海槽热液航次中采集的M6-9海山和M6-5海山的水深曲面,该航次共完成在14个局部小海山地形测量,采用基于上述多波束测线优化方案,极大提高了多波束数据采集质量,所采集原始数据95%以上无明显噪点。

3.2 解决海山区多波束系统易检测错误海底信息的措施

全水深多波束测深系统在西太平洋马里亚纳海山区作业时,易检测错误海底信息,主要是由于该区域水深变化范围巨大,水深由几十米到上万米。地形起伏和底质差异引起海底反向散射回波信号的强度、到达时间和到达方向的变化,不同程度影响回

波信号的质量,导致时延检测产生错误^[7],进而干扰了跟踪控制参数的确定,使后续测量恶化,无法检测真正的海底信息。当系统错误跟踪引起错误测深时,就会导致虚假的地形^[8]。针对上述情况,在水深浅于100m的海山区进行多波束采集时,提出了基于地形变化并参考浅地层剖面资料的作业参数优化方案:(1)船速保持5~6kn;(2)激发能量降至-12dB以下;(3)采集时注意观察地形变化,对比多波束、浅剖等设备的海底深度(图8),如果发现相关设备海底深度差别较大时,必须查明原因,当多波束深度值与其它设备深度值呈倍数关系时,可判断多波束系统记录信息为海底多次回波,此时应继续降低激发能量,同时根据浅剖资料记录海底深度调整多波束信号追踪门限值。

图9为“科学”轮采集完成的西太平洋KLL海山水深曲面,该海山最浅处距海平面仅28m,海山基底以上高约3000m,海山两侧坡度接近80°。基于上述作业参数优化方案,最终获得了高品质的地形资料。

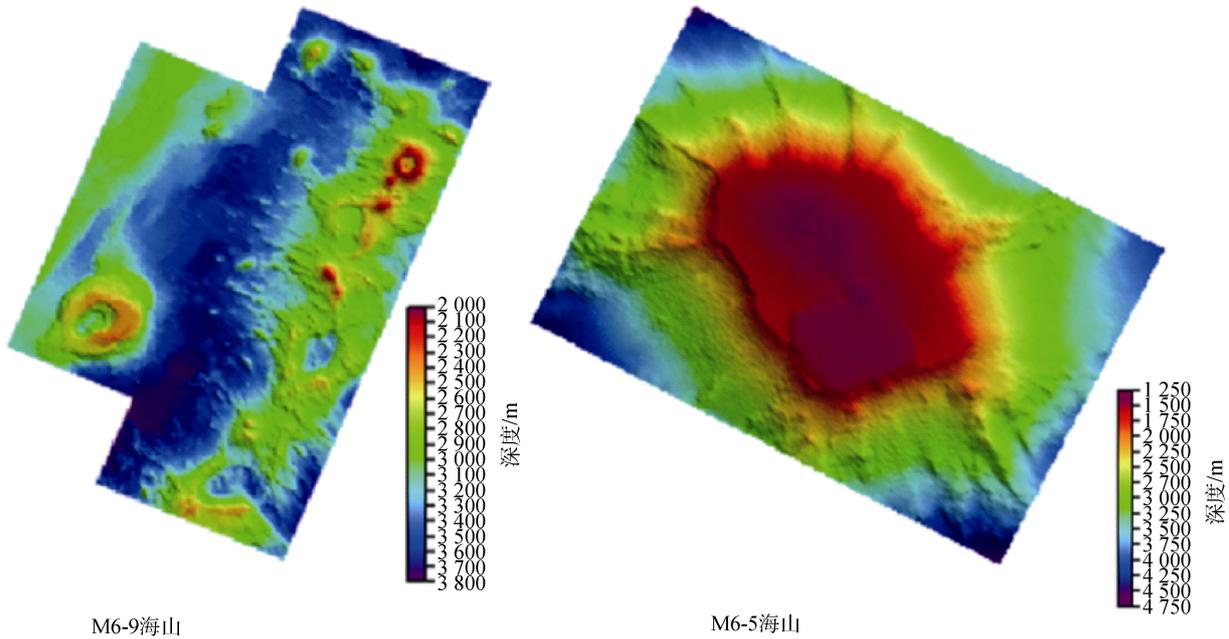


图7 马里亚纳 M6-9 海山和 M6-5 海山水深曲面
Fig. 7 Deep surface of the Mariana M6-9 and M6-5 seamounts

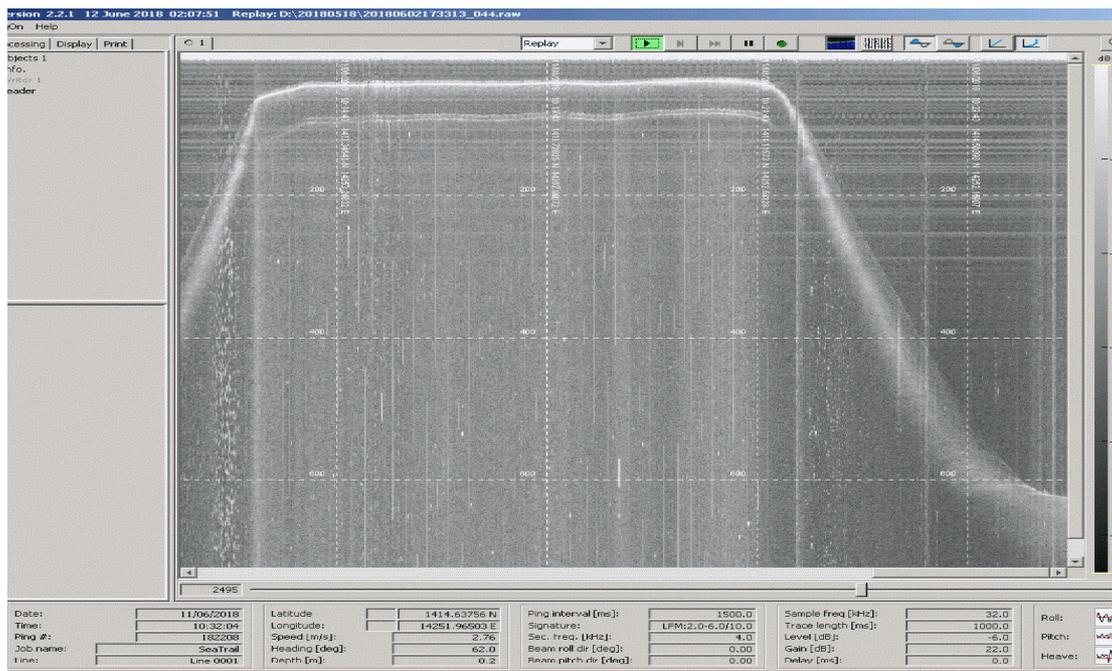


图8 海山区浅地层剖面现场监控界面
Fig. 8 On-site monitoring interface of a sub-bottom profiler in the seamount district

3.3 合理布设测线，提高作业效率的措施

科考航次时间紧、任务重，合理布设测线，提高多波束采集作业效率，可以为其他作业争取宝贵时间，保障航次任务的顺利完成。西太平洋马里亚纳海山区多波束水深测量时，采集软件无法生成实时水深曲面。基于现有条件，提出了基于实时采集情况的

多波束采集测线布设优化方案：(1)根据现有资料，不等间距、不等长度设计测线，减少测量工作量；(2)作业时，实时关注多波束幅宽变化，对测量结果进行预判，合理对设计测线进行增减，提高工作效率；(3)完成一条测线后，实时进行初步处理，避免了出现数据缺口，并对增减设计测线进行进一步确认。

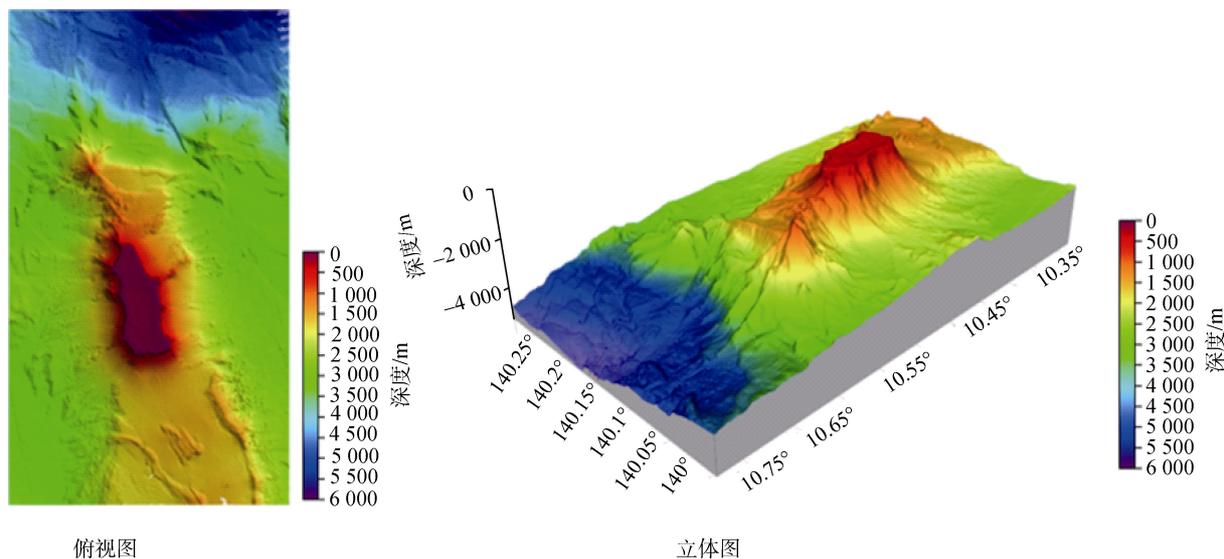


图9 西太平洋 KLL 海山水深曲面图

Fig. 9 Deep surface of the KLL seamount in the Western Pacific Ocean

在进行马里亚纳 M6-12 海山地形测量时, 课题组提供测量区块资料如下: (1)范围 20 km×20 km; (2)最浅水深约 200 m; (3)最深水深约 3 000 m; (4)最浅点位于工区中心。

基于有限资料, 设计测线如图 10 左图所示, 设

计测线长度共计 160 km(不含转弯部分), 具体参数见表 2。实际作业过程中, 按照上述测线布设优化方案, 在保质保量完成海山地形测量的基础上, 极大提高了工作效率, 实际作业测线长度 110 km, 节省了近 1/3 工作量。

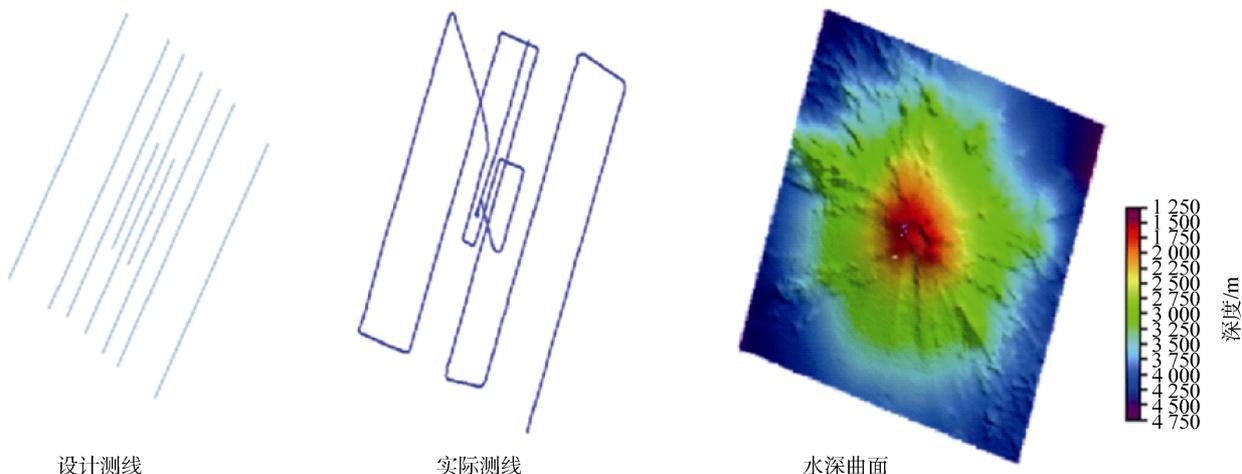


图 10 马里亚纳 M6-12 海山地形测量

Fig. 10 Topographic survey of a seamount in the Mariana Trench

4 结论

西太平洋马里亚纳海山区的地形调查有其特殊性, 针对气象条件复杂、海况差, 导致采集数据质量差的情况, 通过分析船体姿态对数据质量的影响, 提出了恶劣海况下, 测线布设方向应倾向于与风浪方向保持一致或斜交, 避免与其相对的优化方案,

提高了多波束采集数据的质量。针对海山区地形起伏大和底质差异大导致多波束系统易检测错误海底信息的情况, 提出了结合浅剖资料的作业参数优化方案, 改善了海底识别追踪效果。针对海山区水深变化剧烈导致的测线布设困难等问题, 提出了基于实时采集的测线布设优化方案, 大大节省了测线布设长度, 节省了调查成本, 提高了工作效率。

表 2 马里亚纳 M6-12 海山地形测量测线设计
Tab. 2 Topographic survey line design of a seamount in the Mariana Trench

测线名称	测线间距/m
测线 1-测线 2	6 000
测线 2-测线 3	3 000
测线 3-测线 4	1 400
测线 4-测线 5	600
测线 5-测线 6	600
测线 6-测线 7	1 400
测线 7-测线 8	3 000
测线 8-测线 9	6 000

注: 测线方向 200°; 设计测线长度: $20 \times 7 + 10 \times 2 = 160$ km。

通过一系列针对性措施的实施, 在保质保量完成调查任务的同时, 极大提高了多波束工作效率, 最终获得的高品质的地形资料为多学科协同研究奠定了基础, 为 ROV 等设备的现场作业提供了安全保障。这些技术措施也对未来海山区的多波束调查具有十分重要的借鉴意义。

致谢: 感谢“科学”轮各部门在西太平洋马里亚纳海山区地形调查作业过程中的积极配合, 感谢中国科学院海洋研究所海洋生物分类与系统演化实验室和海洋地质与环境重点实验室的科学家对工程技术部现场工作的支持。

参考文献:

[1] Harris P T, MacMillan-Lawler M, Rupp J, et al. Geomorphology of the oceans[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 4-24.
 [2] Claire H C, David T S. Global distribution of seamounts from seasat profiles[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, B9(10): 408-420.
 [3] Muller D, Leander F, Sven P, et al. Comparison between

magmatic activity and gold mineralization at Conical Seamount and Lihir Island, Papua New Guinea[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2003, 79(3-4): 259-283.
 [4] 张旭东. 科普: 中国“科学”号为何“钟情”西太海山[EB/OL]. [2019-05-21]. http://www.xinhuanet.com/tech/2019-05/21/c_1124522929.htm.
 Zhang Xudong. Popular science: why science of China “loves” the Western Pacific seamounts[EB/OL]. [2019-05-21]. http://www.xinhuanet.com/tech/2019-05/21/c_1124522929.htm.
 [5] Higashi, Y, Michinari S, Keiko K, et al. Microbial diversity in hydrothermal surface to subsurface environments of Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, using a catheter-type in situ growth chamber[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 47 (3): 327-336.
 [6] 翁学传, 张启龙, 颜廷壮. 热带西太平洋暖池及其与南方涛动和副热带高压关系[C]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(40). 北京: 科学出版社, 1998: 35-41.
 Weng Xuechuan, Zhang Qilong, Yan Tingzhuang. The Tropical Western Pacific warm pool and its relationship with the Southern Oscillation and subtropical high over the West Pacific [C]//Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. *Studia Marina Sinica*(40). Beijing: Science Press, 1998, 40: 35-41.
 [7] 张红梅, 赵建虎, 柯灏, 等. 精密多波束测量中时延的确定方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(4): 449-453.
 Zhang Hongmei, Zhao Jianhu, Ke Hao, et al. Study on the method of time delay detection in precise multibeam survey[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(4): 449-453.
 [8] 吴英姿. 多波束测深系统地形跟踪与数据处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.
 Wu Yingzi. A study on multi-beam sounding system seafloor tracking & data processing techniques[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2001.

Application of the full ocean depth multibeam bathymetric system Seabeam3012 in the topographic surveys of Mariana seamounts in the Western Pacific

GONG Xu-dong^{1,2}, DIAO Xin-yuan^{1,2}, LÜ Ya-jun^{1,2}, LU Zhi-jun^{1,2}, TAO Ze-dan^{1,2}, ZHANG Hong-yun^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China; 2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Received: Mar. 4, 2020

Key words: full ocean depth multibeam bathymetric system; Mariana seamount area; ship attitude

Abstract: In the courses of multidisciplinary comprehensive scientific investigation in the Mariana seamount area of the Western Pacific Ocean, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences has conducted several topographic surveys of seamounts using the full ocean depth multibeam bathymetric system Seabeam3012 on board the “KEXUE” ship. In view of the problems encountered during the process of operation, such as low data quality caused by poor sea conditions, detection of incorrect seabed information by the multibeam system, and difficulty in laying out survey lines, this study proposes a series of measures, such as multibeam survey line direction optimization based on the analysis of the influence of ship attitude on data quality, operation parameter optimization based on terrain changes and referring to shallow formation profile data, and layout optimization of multibeam acquisition line based on real-time acquisition. These measures have effectively improved the quality of multibeam data acquisition in seamount areas and enhanced the efficiency of operation. The obtained high-quality terrain data lay the foundation for multidisciplinary collaborative research and provide a safety guarantee for the field operation of remotely operated vehicle (ROV) and other equipment.

(本文编辑: 刘珊珊)