

深远海高质量地形探测方法探讨

陶泽丹, 张洪运

(中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266520)

摘要:随着海洋强国战略的推进和国家对深远海开发的重视程度不断增加, 掌握全球海洋地形信息将变得越来越重要, 所以深远海高质量地形的探测就变得极其重要。为获取高质量的深远海地形数据, 以在西太平洋海域的深远海地球物理航次为基础, 从航前准备、航次实施、数据处理及成果图件编制等方面探讨获取高质量深远海地形探测的方法和注意事项。通过对整个深远海高质量地形调查过程的介绍让后期相关项目从业人员了解整个项目过程中的关键节点和注意事项, 对后期进行深远海地形探测的研究和开发、提升国家在国际深远海领域的话语权和自主权有着重要的意义。

关键词: 深远海; 多波束测深系统; 地形探测

中图分类号: P229.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-3682(2022)02-0153-09

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20210803001

引用格式: 陶泽丹, 张洪运. 深远海高质量地形探测方法探讨[J]. 海岸工程, 2022, 41(2): 153-161. TAO Z D, ZHANG H Y. Discussion on the method for high quality terrain detection in the deep sea[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(2): 153-161.

近年来随着国家经济的发展、人口的急剧增加, 陆地上的很多宝贵资源已经濒临枯竭, 但是海洋却仍蕴藏着大量未被认知或者开发的资源和宝藏^[1], 所以人类已经将资源的勘探开发深入到海洋特别是深远海领域。

随着国际上大量的远洋科考船下水, 世界各国特别是欧美发达国家都在加大力度进行深远海的勘测与研究。我国在深海勘测研究领域虽然起步较晚, 但近几年随着国家经济的发展和远洋战略目标的提出, 也开始加大力度投入深远海的勘测事业。国内中国科学院海洋研究所、中国科学院深海科学与工程研究所、自然资源部第一海洋研究所、自然资源部第二海洋研究所、中国海洋大学和厦门大学等纷纷建造深远海综合考察船, 并承担相应的深远海考察任务。

21 世纪是人类开发和利用海洋的世纪, 在海洋的开发和利用过程中海底地形的调查又是所有勘探开发活动的基础, 在探测海底地形、开发海洋资源、发展海洋科学研究和维护海洋权益等方面发挥着非常重要的作用^[2]。所以获得高质量的深远海地形数据就是当前面临的主要问题和挑战, 资料的质量直接影响到未来进一步对深远海的研究和开发, 同时也直接决定着我国在深远海科研领域的话语权和主动权。

当前虽然深远海考察船越来越多, 设备精度和稳定性也越来越高, 但是各自属于不同的系统, 没有形成统一的作业规范。如何获得高质量的深远海地形资料, 需要许多方面的工作, 不仅需要高精度的探测设备, 还需要具备标准规范的作业流程做指导。

本文以“科学”号综合考察船在西太平洋海域开展的地球物理调查航次为例, 从航前准备、航次实施和数据后处理几个方面具体介绍如何获取高质量的海底地形资料。

1 航前准备

航前准备工作是在航次开展之前必须要进行的前序工作, 准备充分与否直接影响着航次执行的顺利程度, 也对航次的成败及数据质量的好坏起到至关重要的作用。在确定航次任务以后, 就要开始进行航前的准

收稿日期: 2021-08-03

作者简介: 陶泽丹(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋地球物理及海洋测绘方面研究. E-mail: taozd@qdio.ac.cn

(李 燕 编辑)

备工作,具体工作分为以下几个部分。

1.1 查阅区域背景资料

在开展作业任务之前首先要查阅历史资料,了解前人在该区或者邻区所完成的工作,大体了解该区的地理地貌特征以及构造背景。另外还应该了解作业期间工区的海况以及是否具有季节性的海洋水文和气象特征。

从国外海洋数据相关网站和其他渠道,查阅到作业区平均水深 5 000 m 左右,最深处水深 8 000 m,最浅处水深 1 000 m,地形等值线呈 NNE—SSW 向排列。在春季,风主要以 E 向为主,流以 WNW 向、近 W 向以及 NE 向为主。

1.2 设备选取

为获得高质量的一手数据,在充分考虑调查区域范围、水深的条件下,选择高性能、高精度的海底地形调查设备,包括主探测设备及辅助设备两类。

1.2.1 主探测设备

主探测设备主要指全水深多波束测深系统。多波束测深系统是在回声测深仪的基础上发展起来的^[3],可以用来准确、高效地获取海洋地形信息,故多波束为本次地球物理调查任务最重要的设备。

本次工作区域平均水深 5 000 m,最大水深超过 8 000 m,为获得该调查区的精确水深,本次选用 SeaBeam3012 全水深多波束测深系统。该系统是德国 Elac 公司生产的最新一代全水深多波束测深系统,采用波束扫描技术,可以实时实现全姿态运动补偿。系统的工作频率 12 kHz,可以满足 80~11 000 m 水深范围内的作业^[4],具体技术指标见表 1。同时,该系统还具备实时显示测深信息、后向散射数据以及侧扫声呐图像的能力,可方便现场技术人员对数据质量进行实时评估。

表 1 SeaBeam3012 全水深多波束测深系统主要技术指标

Table 1 The main technical indicators of the SeaBeam3012 full-depth multi-beam echo-sounder system

设备参数	技术指标	设备参数	技术指标
频率/kHz	12	最大工作船速/kn	15
测深范围/m	80~11 000	采集工作站	Windows 操作系统
波束个数/个	301	发射换能器	25 个模块
波束开角/(°)	60~150	接收换能器	11 个模块
波束发射方式	波束扫描技术	记录数据格式	XSE
精度	0.2%×水深(±30°范围内)	系统发射速率	不超过 4 Hz,但受来回声程的时间限制
平均脚印分辨率	1.0°×1.5°	波束补偿环境限制	Roll: ±10°; Pitch: ±7°; Yaw: ±5°

1.2.2 辅助设备

辅助设备主要包括声速校正设备及其他外围辅助设备两类。在进行多波束地形调查中,影响测深精度的因素很多,其中声速是各项因素中最重要也是最难控制的影响因素^[5]。故为准确获取地形信息,必须利用精确的声速数据对多波束测深进行校正。

当前获得海洋声速数据最准确的方法为声速剖面仪(Sound Velocity Profiler, SVP)直接测量方法和全水深温盐深剖面仪(Conductivity Temperature Depth, CTD)间接测量法。但是这 2 种方法均需停船作业,极大地影响了作业效率。由于海洋中声波传播速度在 1 000 m 以浅的范围内变化较大,到 1 000 m 以深水层变化较小,故在测区范围内主要通过 SVP 和 CTD 来进行全水深声速的确定,同时结合 1 000 m 量程的投弃式温盐深剖面

仪(Expendable Conductivity Temperature Depth, XCTD)声速资料作为补充, 共同来确定声速模型。这样既能保证声速剖面精度, 又能提高作业效率^[6]。以下分别介绍这些声速校正设备及外围辅助设备。

1) 声速剖面仪(SVP)

本次选用的声速剖面仪为加拿大 AML 公司的 Minos X 型声程法测量仪, 该声速剖面仪上装有固定距离的发射声源和反射器, 在水中声源发出的声波经反射后被接收, 根据其往返程时间来直接计算水中的声速。

该设备为自容式声速剖面仪, 最大工作水深为 6 000 m, 声速量程为 1 375~1 625 m/s, 响应时间小于 1 ms, 精度为 ± 0.006 m/s, 分辨率为 0.001 m/s。

2) 温盐深剖面仪(CTD)

本次选用的 CTD 为美国 Seabird 公司的 911Plus 万米级 CTD, 该 CTD 为直读式温盐深水文调查设备, 可准备获取海水的温度、电导率信息, 同时利用声速经验公式可以计算全水深的声速剖面数据。

3) 投弃式温盐深仪(XCTD)

XCTD 选用日本鹤见精机有限公司(TSK)的产品, 选用的型号为 XCTD-1 型, 量程为 1 000 m, 最大工作船速 12 kn, 测量时间约 300 s。温度测量精度为 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$, 电导率测量精度为 0.03 mS/cm。

4) 定位及导航系统

定位系统选用美国 C&C 公司的 C-Nav3050 型高精度 GPS 定位系统, 并选用差分定位信号, 定位精度可以达到分米级, 在航次出发之前还应该完成连续 24 h 的定点测量, 以观察 GPS 定位的稳定性。导航系统则选用 Hypack 导航软件, 并采用 Mercator 投影, 根据工区位置设置中央经线和中央纬线, 这样在完成测线的布设后, 可以根据 Hypack 导航信息进行测线的扫测作业。

5) 罗经及姿态传感器

为了对多波束数据进行实时的姿态校正, 在进行多波束作业的同时必须导入其实时的姿态和罗经数据。本次选用法国 IXSEA 公司的 Octans 光纤罗经运动传感器来为其提供实时的姿态及罗经数据。Octans 系统的航向精度为 $\pm 0.1^{\circ}$, 横摇和纵摇的动态精度可以达到 0.01° , 完全可以满足多波束进行实时校正的精度要求。

1.3 测线及声速站位布设

1.3.1 测线布设

由于工区内等值线大致呈 NNE—SSW 向排列, 结合工区整体范围, 将工区主测线定为 NS 向。由于 SeaBeam3012 全水深多波束测深系统的波束开角范围可以在 $60^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 任意设置, 在平衡数据质量和作业效率后, 将波束开角暂定为 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}$, 具体视现场数据质量再做调整, 这样在 5 000 m 水深的情况下, 双侧扫宽约为 12 000~17 300 m。按照《海洋调查规范: 第 10 部分 海底地形调查》^[7] 要求, 相邻测幅的重叠应不少于测幅宽度的 10%, 故将主测线间隔定为 10 km, 共布设了 40 条 NS 向的主测线。另外《海洋调查规范: 第 10 部分 海底地形调查》^[7] 中还规定, 联络测线长度应不少于主测线总长度的 5%, 故根据工区实际情况布设 6 条 EW 向的联络测线, 同时在水深小于 3 000 m 的区域还根据实际情况加密测线。

1.3.2 声速站位布设

对于多波束地形调查来讲, 声速站位的布设数量和区域分布直接影响着多波束数据的质量和准确度。在综合考虑数据质量和工作效率的前提下, 在 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 范围内至少下放 1 次全水深的 SVP 和 CTD 以获取声速剖面数据, 同时保证获取到最深处的全水深声速剖面。另外, 每 72 h 内要投掷 1 枚 XCTD, 且保证在上午、下午和夜间等时间段均有投放数据。

2 航次实施

航次实施阶段是获取高质量数据的关键阶段, 如果该阶段数据质量不合格, 后续无论如何努力都无法得

到高质量的数据资料,故在航次实施过程中除保证设备正常工作外,还有许多准备工作需要注意,以下对各具体事项进行阐述。

2.1 外围数据导入

多波束主要通过向海底发射声波信号,经海底反射和散射后返回到海面被换能器接收,通过分析到达波束的入射角和时间来确定海底的位置和深度^[8]。SeaBeam3012 全水深多波束测深系统能够实现实时全姿态运动补偿,故需要将 DGPS、罗经、姿态数据通过串口输入多波束采集工作站。

为现场实时查看数据质量,需将通过 SVP 测量和 XCTD 计算的声速资料处理后导入 Hydrostar 采集软件。为更好地实现回波归位,必须要实时获取换能器附近的声速数据,故在船底安装表面声速仪来实时获取海水表层的声速,并通过串口实时传入到多波束系统中。由于多波束换能器在船底的位置已经固定,为更好地实现换能器与大地坐标系统的转换,则需要将带有多波束、GPS 及罗经安装位置的信息加载到多波束采集系统中,以保证记录数据中的信息位于同一坐标系统下。

参数校准是多波束系统消除系统内部固有误差的基本方法,其消除的误差主要有换能器、罗经的安装误差以及 GPS 的时延误差。故其参数校准主要包括横摇偏差校准、纵摇偏差校准、罗经偏差校准和导航时延校准四项^[9]。

1) 横摇偏差校准

横摇偏差校准是为消除换能器在安装过程中存在的横向角度误差而进行的校准方法。具体操作方法为:选择一平坦地形的海区,布设一条测线,沿测线来回扫测并记录数据。来回测量数据地形夹角的 1/2 即为横摇偏差的夹角,根据所计算的夹角来对横摇偏差进行校准。

2) 纵摇偏差校准

纵摇偏差校准是为消除换能器在安装过程中存在的纵向角度误差而进行的校准方法。具体操作方法为:选择一有地形起伏或者有孤立特征物的地区,布设一条测线,来回匀速穿越特征区域并记录数据。假如有纵摇偏差,则来回经过孤立特征物时会造成特征物在测线方向的位置偏差,根据位置偏差的大小和水深大小计算出偏差角度,从而对纵摇偏差进行校准。

3) 罗经偏差校准

罗经姿态偏差是由于罗经传感器安装角度不准而引起的测量方位角误差。校准此种误差的操作方法为:选择一有线性目标的区域布设一条测线,进行来回扫测,由于有罗经角度误差,故资料处理后线性目标物会呈现一定的角度,则夹角的 1/2 即为罗经的安装角误差。

4) 导航延迟校准

导航罗经校准应该选择一个水深较浅且有目标特征物的地区,将波束角设置为最小,来回两次分别以最大的速度和最小的速度穿过目标物,由于存在导航延迟,故在处理后的测线图上目标物会出现分离现场。在不同速度下,延迟相同时间船舶运行的距离存在差别,故以不同速度通过目标物时会造成目标物的位置偏差,根据偏差的大小和通过速度可以计算出导航的延迟时间,从而对其进行校准。

2.2 现场作业实施

由于 SeaBeam3012 全水深多波束测深系统中央波束的精度高,而边缘波束的精度低,故不能为了提高作业效率而将波束开角设为最大,应根据现场数据质量情况将波束开角先设置为 120° (图 1),如果调查区内声速结构时空变化剧烈,有明显的水团活动,则考虑将波束开角进一步缩小,保证有效回波数不低于 85%。同时考虑到区域内水深差异较大,应将发射能量、增益以及中央水深和门限均设为自动(图 2)。

每一条测线要求船舶提前 500 m 上线,一条测线完成后要延长观测 500 m,然后船舶才可以下线。同时考察船在测线勘测过程中要匀速行驶,且航速保持在 10 kn 以内,瞬时速度不超过 12 kn。如遇设备故障或者其

他原因中途下线,再上线时要提前 2 km,保证有一定的重复区段。

在进行测线勘测过程中,要安排值班人员 24 h 值班,并在上下线及交点等特殊时刻进行班报记录。此外每隔 30 min 记录一次班报,班报内容主要包括记录测线号、时间、经纬度、水深、航向、航速、扫宽等参数。同时每天或者每条测线完成后,要对数据进行备份,并对数据进行现场质控处理,以便发现问题并及时解决,必要时进行补测,将损失降至最小。

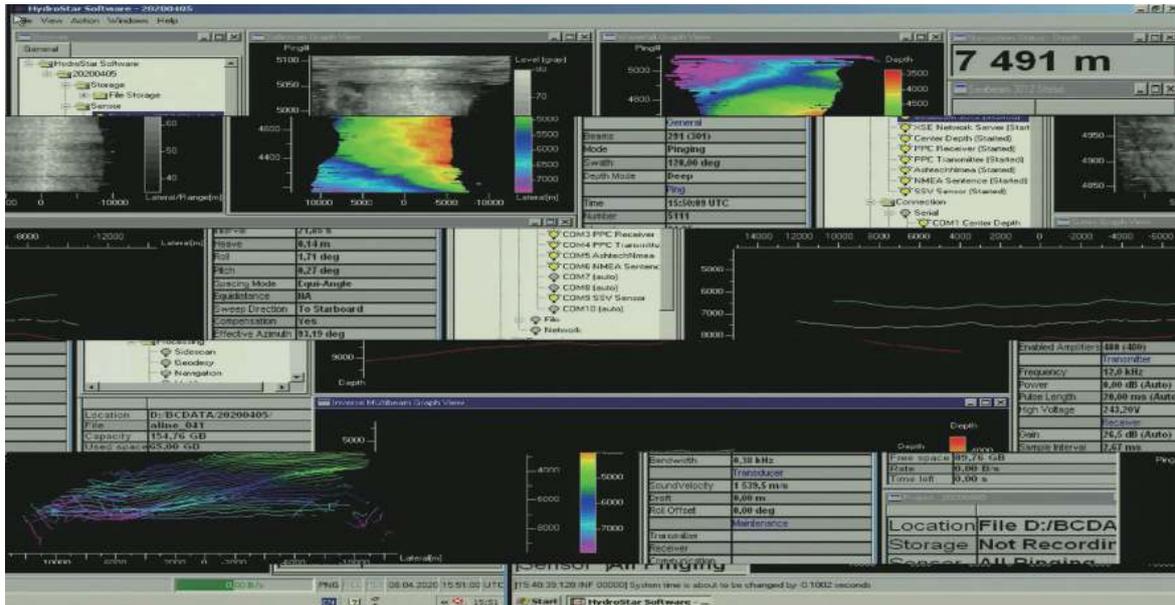


图 1 SeaBeam3012 全水深多波束现场采集界面

Fig. 1 The field acquisition interface of the SeaBeam3012 full-depth multi-beam

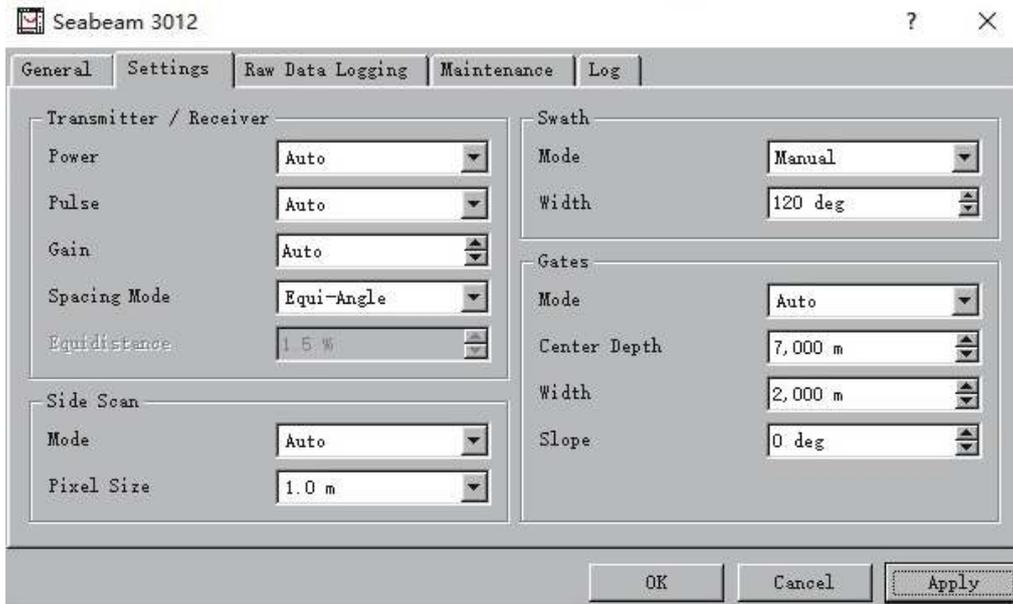


图 2 多波束采集软件现场设置界面

Fig. 2 The field setting interface of the multi-beam acquisition software

2.3 声速获取

按照测线布设计划,到站位后同时下放 SVP 和 CTD 以获取全水深的声速剖面数据。由于声速在 1 000 m 以浅的区域变化比较大,而到 1 000 m 以深则变化很小,故每 72 h 内投放 1 次 XCTD 用来对 1 000 m 以浅的声速数据进行校正。这样既保证了全水深的声速测量精度,又能及时对浅层变化较复杂的声速场文件进行修正,提高多波束数据的精度。

2.4 海况、船速和航向

由于多波束换能器安装在船底,故多波束数据质量不可避免地会随船受到海况影响,所以在有条件情况下,应尽量避免高海况条件下作业。本次调查由于航次时间紧、任务重,在海况较差的情况下不得不进行作业,故在此种情况下必须降低船速,同时尽量保证航向与风浪方向一致以保证安全、提高观测数据质量。通过现场数据质量分析看,航向与风浪方向一致时数据质量最好,航向与风浪方向垂直时数据质量次之,当航向与风浪方向相反时则数据质量最差。

3 数据后处理

在现场采集过程中,还应该及时对数据进行处理,并时刻监督数据质量和覆盖情况,对于由于水深较浅或者数据质量差等原因导致的覆盖不符合要求的区域应该及时进行补测^[10]。

在多波束的测量过程中,不可避免地会记录一些噪音信息。另外,由于海况或声速等其他原因的影响,也会出现各种噪点或虚假数据。为了去除或消减多波束数据中的虚假信息、提高海底地形数据精度,必须对多波束采集的数据进行后处理,从而去除虚假信息、保留真实数据,提高地形数据质量。

3.1 多波束数据处理

多波束数据现场处理与后处理的思路基本一致,只是后处理的要求相对更高一些。本次数据处理选用的是 Caris 后处理软件,处理过程主要包括数据导入、姿态及罗经数据处理、GPS 数据处理、声速导入、条带编辑、数据融合、不确定误差计算、建立曲面以及曲面编辑等。

其中姿态及罗经数据处理主要是指在采集过程中姿态仪及罗经所记录的船艏向、深沉以及横摇和纵摇数据,这些数据在进行外业采集的时候一起被记录下来并融入多波束数据中,会直接影响数据质量,故在后处理过程中要进行姿态及罗经数据的质控及处理,将不合理或错误的的数据去掉,以便获得真实的姿态及罗经校正参数(图 3)。

由于在外业数据采集的同时必须赋予其位置信息,故 GPS 会同时记录采集时的位置坐标信息,坐标数据的质量也直接关系到数据的质量和有效性,故在后处理过程中也要对 GPS 数据进行质控和处理(图 4),避免由于 GPS 信息错误影响数据的质量和有效性。

在各种外围传感器的数据都处理完成以后,就可以对多波束的数据进行处理,这也是处理过程中最复杂、最耗费时间的工作。多波束数据处理主要是结合条带编辑(图 5)和曲面编辑(图 6)将数据中的噪点和虚假数据去除,以还原最真实的地形状态。

由于在数据处理过程中每 72 h 内完成 1 次 XCTD 投放,故应该以距离优先原则选择声速文件。另外还要满足主测线和联络测线的交点处误差要小于水深值的 2%、超限的点数不得超过参加比对总数的 10%。

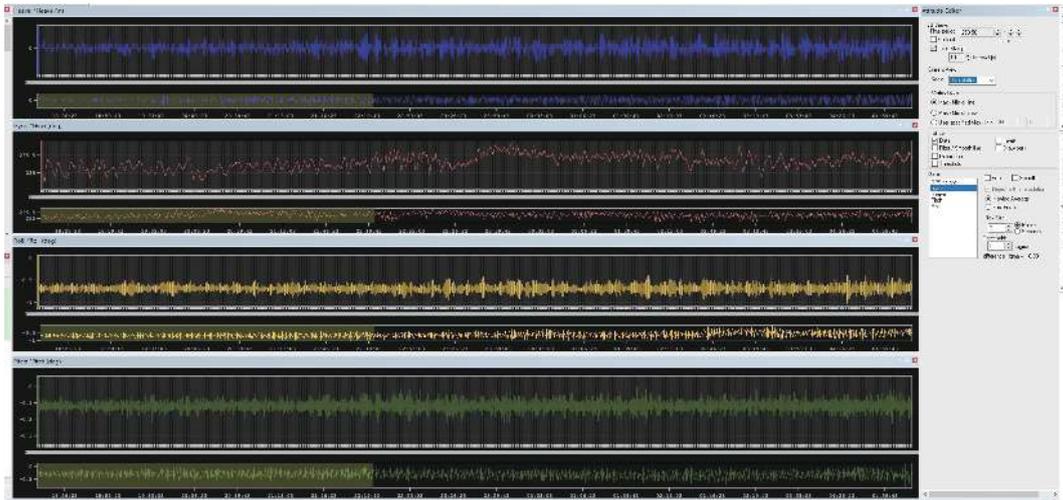


图 3 姿态及罗经数据处理

Fig. 3 Data processing of attitude and compass

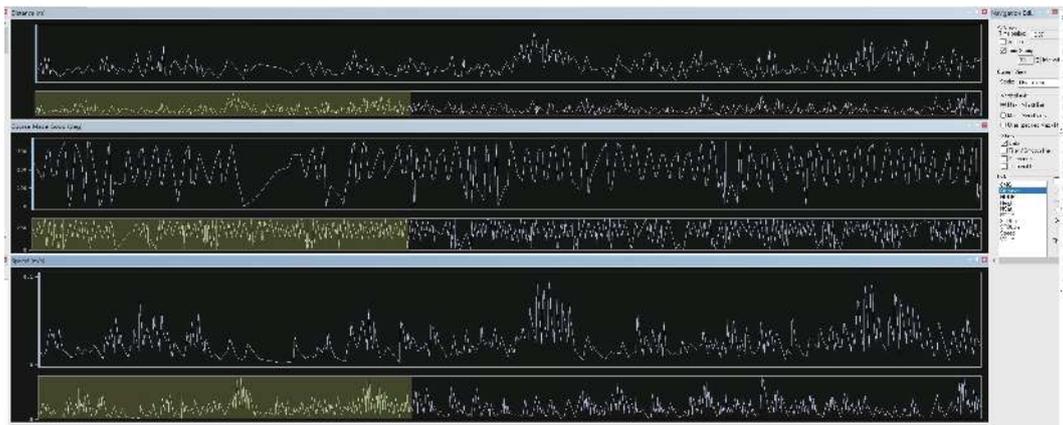


图 4 GPS 数据处理

Fig. 4 GPS data processing

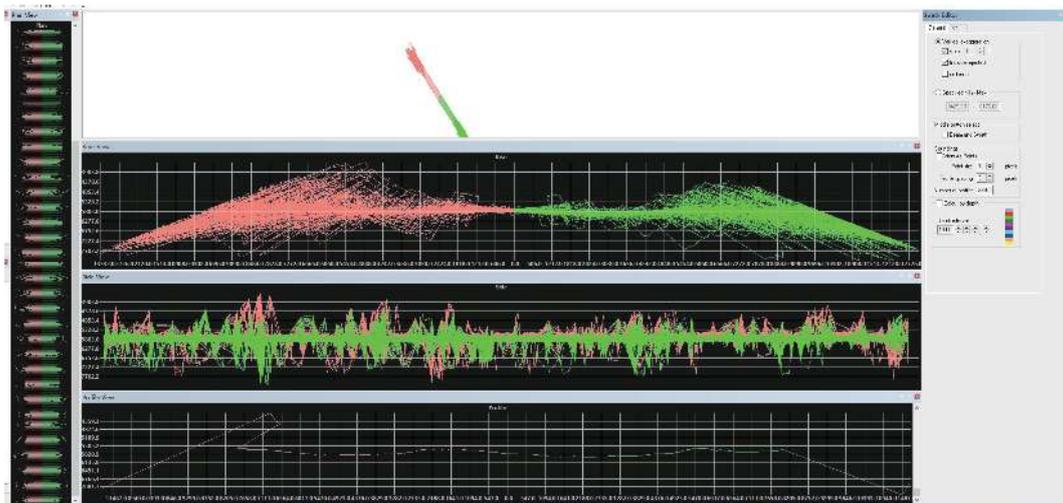


图 5 条带编辑

Fig. 5 Swath editing

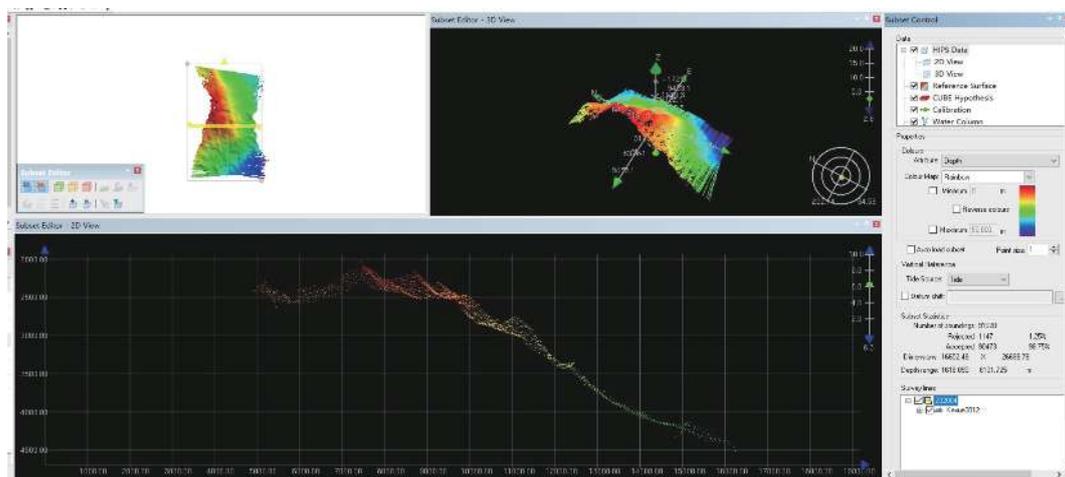


图 6 曲面编辑

Fig. 6 Curved surface editing

3.2 图件编制

数据处理完成后可以获得含有坐标信息的水深数据,后期可以根据项目的要求,完成相应比例尺和图幅大小的平面等值线图、立体等值线图以及交叉点误差图等图件的制作。

4 结 语

深远海地形测量是进行深远海调查、深远海资源环境开发、海洋科学研究的基础。获得高质量的深远海地形数据就是当前面临的主要问题和挑战,资料质量的正确与好坏直接影响到未来进一步对深远海的研究和开发,同时也直接决定着我国在深远海科研领域的话语权和主动权。

本文以深远海地球物理调查航次为例,从航前准备、航次实施、数据处理等几个方面阐述了地球物理调查过程中每一步工作所用到的设备以及所需要的准备工作和注意事项。需要特别注意的是,在航次执行过程中,除设备本身的性能影响外,布线方式和设备的参数设置也至关重要,布线方式直接影响作业效率和覆盖程度,而参数设置会直接影响原始数据的真实度和精度,这直接影响到最终提交的航次数据和成果产品质量。

参考文献 (References):

- [1] 王建村, 景春雷, 田旭. 美国大型海洋装备运维现状及对我国的启示[J]. *海洋科学*, 2020, 44(2): 171-179. WANG J C, JING C L, TIAN X. Current status of the operation and maintenance of largescale marine equipment in the United States and its enlightenment to China[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(2): 171-179.
- [2] 李家彪. 多波束测深原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999. LI J B. Principle, technology and method of multibeam survey[M]. Beijing: Ocean Press, 1999.
- [3] 张登, 张涛, 马云龙. SeaBeam3012深水多波束测深机理及其应用[J]. *测绘技术装备*, 2019, 21(1): 92-96. ZHANG D, ZHANG T, MA Y L. Mechanism and application of seabeam3012 deep water multibeam bathymetry[J]. *Surveying and Mapping Technology and Equipment*, 2019, 21(1): 92-96.
- [4] 张登, 朱永灵, 张涛, 等. SeaBeam3012深水多波束测深系统标定方法[J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(4): 144-149. ZHANG D, ZHU Y L, ZHANG T, et al. Research on calibration method of Seabeam3012 multibeam bathymetry system[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(4): 144-149.

- [5] 董庆亮, 陈东, 李明叁, 等. 投弃式温盐深测量仪在海底地形测量中的应用[J]. *海洋测绘*, 2013, 33(3): 36-39. DONG Q L, CHEN D, LI M S, et al. Applications of XCTD profiling system in seabed topographic survey[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2013, 33(3): 36-39.
- [6] 徐泽, 于宗泽, 傅晓洲, 等. XCTD与CTD的对比测试研究[J]. *海洋技术学报*, 2012, 40(2): 22-28. XU Z, YU Z Z, FU X Z, et al. Study on the comparative test of XCTD and CTD[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2012, 40(2): 22-28.
- [7] 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第10部分 海底地形地貌调查: GB/T 12763.10—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. National Center of Ocean Standards and Metrology. Specifications for oceanographic survey: Part 10 Marine hydrographic observation: GB/T 12763.10—2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [8] 吴自银, 阳凡林, 罗孝文, 等. 高分辨率海底地形地貌: 探测处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017. WU Z Y, YANG F L, LUO X W, et al. High Resolution Submarine Geomorphology: Theory and Technology for Surveying and Post-processing[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [9] 李家彪, 郑玉龙, 王小波, 等. 多波束测深及影响精度的主要因素[J]. *海洋测绘*, 2001(1): 26-32. LI J B, ZHENG Y L, WANG X B, et al. Multi beam sounding and main factors affecting accuracy[J]. *Marine Surveying and Mapping*, 2001(1): 26-32.
- [10] 赵建虎, 刘经南. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008. ZHAO J H, LIU J N. Multi beam bathymetry and image data processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.

Discussion on the Method for High Quality Terrain Detection in the Deep Sea

TAO Ze-dan, ZHANG Hong-yun

(*Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266520, China*)

Abstract: With the promotion of the maritime power strategy and the increasing attention of the state to the deep-sea development, it has been more and more important to know the global seafloor terrain information. As a result, the high-quality terrain detection in the deep sea has become extremely important. In order to obtain high-quality topographic data of the deep sea, methods and precautions for carrying out high-quality topographic detection in the deep sea are discussed from the aspects of pre-voyage preparations, voyage implementation, data processing and compiling the achievement maps and based on the deep-sea geophysical surveys in the western Pacific Ocean. By introducing the whole process of the high-quality topographic surveys in the deep sea, the practitioners related to relevant projects in the later stage can understand the key nodes and precautions in the whole process of the projects, which is of great significance for the future study and development of the deep-sea topographic detections and also for enhancing the China's discourse power and autonomy in the international deep sea field.

Key words: deep sea; multi-beam sounding system; topographic survey

Received: August 3, 2021