

Doi:10.3969/j.issn.2097-0307.2023.03.006

# 极地海洋多波束测量测线布设系统设计与实现

王风帆, 马永

(国家海洋信息中心, 天津 300171)

**摘要:** 针对目前多波束测量缺少专门的测线布设软件问题, 考虑极地海域海冰对多波束测量的影响, 本文设计并实现了极地海洋多波束测量测线布设系统。首先针对航前与现场作业等场景, 设计了系统技术路线、架构和主要功能, 特色功能包括建议测线方向计算、测线自动与手动生成、多波束现场处理数据导入和结果可视化评价等。阐述了系统功能实现的关键技术, 包括测线自动生成、条幅制作与信息统计等。系统采用 Python 语言以及第三方开源工具包开发, 最后开展不同场景下的应用试验并对结果进行了讨论。试验结果表明, 系统可以快速、方便地进行多波束测量测线布设并对布设结果进行评价, 能够有效提高多波束测量方案的设计效率, 有利于极地海底地形地貌调查工作的开展。

**关键词:** 极地海域; 地形地貌; 多波束测量; 系统设计; 测线布设

**中图分类号:** P715; P229.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2097-0307(2023)03-0158-05

## Design and realization of line layout system for marine multi-beam bathymetric survey

WANG Fengfan, MA Yong

(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

**Abstract:** In view of the impact of the lack of software for survey line layout and sea ice on multi-beam bathymetric surveys in the polar ocean, we designed and implemented a line layout system for the multi-beam surveys. First, aimed at scenes before and during the survey, we designed the system's technical route, architecture and main functions. The features include calculation of line direction recommendation, automatic and manual line design, import of multi-beam on-site processed data, result in visual evaluation, etc. We elaborated on the key technologies to implement the system, including automatic line generation, swath production and information statistics. The system was developed in the Python language with some third-party open-source libraries. Finally, we conducted application experiments and discussed the results. The results show that the system can quickly and conveniently carry out line layout for multi-beam survey and evaluation of the results, which can effectively improve the efficiency of scheme design for multi-beam bathymetric survey, and is conducive to the development of a topographic and geomorphological survey of the polar seafloor.

**Keywords:** polar ocean; topography; multibeam bathymetric survey; system design; line layout

海底地形是海洋科学研究、海洋工程和军事应用等方面的重要基础数据, 开展海底地形测量是海洋测绘的重要内容<sup>[1-2]</sup>。多波束测深是当下海底地形测量的主要手段之一, 可以对海底实现全

覆盖测量<sup>[3]</sup>。目前, 海上多波束测量的测线布设一般借助于 ArcGIS、Global Mapper 等 GIS 平台<sup>[4-5]</sup>。由于这些平台缺少针对性功能开发, 导致操作效率不高, 设计人员需要同时掌握两个领域的专业

收稿日期: 2022-11-22; 修订日期: 2022-12-30

基金项目: 科技部“十四五”重点研发项目(2022YFC2803600; 2021YFC3101600)

作者简介: 王风帆(1987—), 博士, 助理研究员, 主要从事地球物理资料处理与应用及海底地形命名等研究, 电子邮箱: fengfan\_wang@163.com

知识与技术，提高了熟练进行测线布设与修改的学习成本。

另外，在南北极等特殊区域，因常年漂浮海冰等障碍物<sup>[6-8]</sup>，在此区域开展多波束测深存在一些特殊注意事项。例如在测量作业期间，因调查船躲避浮冰会导致测线出现大量弯曲；而船舶破冰产生的噪声会造成波束脚印缩短，这些都会影响全覆盖测量的实现。为了填补测量间隙，研究人员需要现场根据多波束数据预处理结果进行测线设计与修改。因此，开发专门的多波束测量测线布设系统，提高测线布设效率具有重要意义。

本文首先根据极地海域多波束水深测量作业需求，开展了系统总体设计、架构、功能设计与开发，然后阐述了功能实现的关键技术，最后选取区域进行应用试验及讨论。

## 1 系统设计

### 1.1 总体设计

多波束测量测线布设系统针对作业前实施方案编制和现场补测工作设计了两种场景，主要功能包括测线、条幅的生成以及布设结果评价三个方面。测线生成主要分为根据预设参数自动生成和手动设计两种方式，分别对应前面两种场景；为了使生成条幅尽可能接近实际测量结果，提高预测准确性，引入海底地形网格数据等相关资料作为参考；对测量结果的评价需要依据相关标准指标<sup>[9]</sup>，并综合考虑实际场景以及功能实现的难易度。

根据极地海域多波束测量测线布设实际需求，系统技术路线（图1）设计如下：

（1）输入测区边界点地理坐标、多波束仪扫描开角、条幅重叠率指标等初始参数；确定测线方向，或者利用测区范围内国际公开地形网格数据（先验地形数据）计算获得建议测线方向，后者主要用于主测线设计。

（2）针对主测线设计，根据步骤（1）参数，结合先验地形数据，自动生成测线；针对检查测线设计，通过输入测线间隔自动生成测线；针对现场补漏测线设计，通过手动设计方式生成测线。

（3）结合先验地形数据，沿测线生成多波束测量条幅多边形。

（4）利用主测线、检查测线和补漏测线的条幅多边形以及测区坐标参数，统计总覆盖率和主测线条幅重叠率等指标，并通过可视化技术展示。

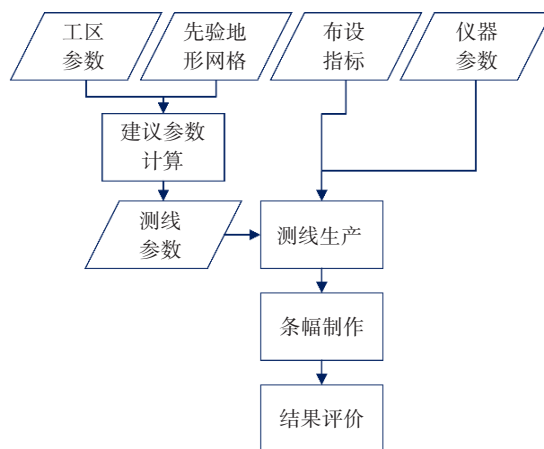


图1 技术路线

### 1.2 系统架构

系统使用Python语言以及numpy、matplotlib、scipy、shapely、gdal等第三方函数库，以PyCharm为开发平台，采用分层模式进行架构<sup>[10]</sup>（图2），包括数据层、应用层和表示层。

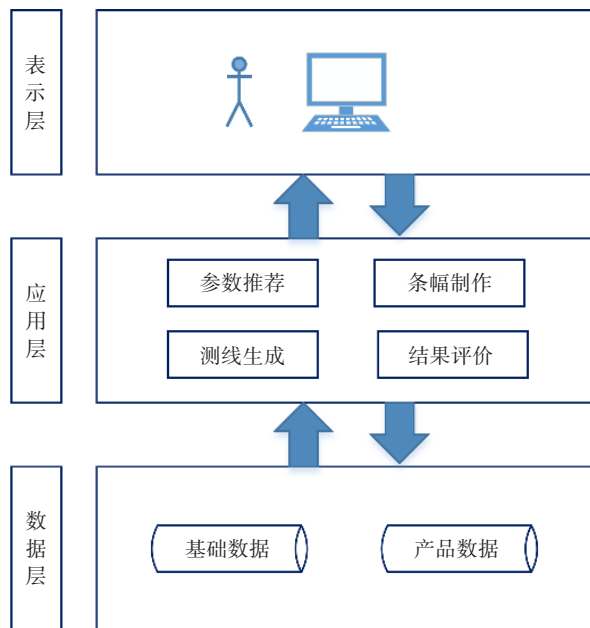


图2 系统架构

（1）数据层：包括支撑系统功能实现的基础数据（先验地形数据等）和系统运行所产生的产品数据，例如测线、条幅等。

（2）应用层：提供系统各项功能，实现各种

操作,包括参数推荐、测线生成、条幅制作、结果评价等。

(3) 表示层:为用户提供交互界面,可输入各项参数、显示设计过程与结果、手动点击生成测线,以及导入测线数据等。

### 1.3 主要功能

#### (1) 建议测线方向计算

利用测区坐标参数,制作测区多边形(可以是非矩形)。选用IBCAO等国际公开地形网格<sup>[11-12]</sup>数据源作为先验地形数据,利用测区多边形进行裁剪,获得测区内地形网格数据。生成等深线,计算等深线走向,以获得的所有等深线走向平均数作为测线走向建议值。

#### (2) 测线生成

测线自动生成包括自动测线间隔与固定测线间隔两种方式。前者以满足条幅重叠率指标为目标,通过脚印估计的方式保证测线间条幅重叠率大致达到指标要求,这里需要用到先验地形数据、多波束开角等;后者则以满足测线间距要求为目标,固定测线之间距离,生成均匀排布的测线。

手动设计方式则是通过人机互动方式,手动点击测区内位置生成测点,依次连接测点形成测线。

#### (3) 条幅制作

输入测线数据,包括自动生成测线和手动生成测线。利用先验地形网格获得沿测线水深,结合多波束开角等信息计算多波束脚印,利用脚印端点坐标生成条幅多边形。

另外,为了进一步满足现场设计需求,系统还需能够导入现场多波束数据处理结果,并形成覆盖区域多边形,用于现场补漏设计参考及结果评价。

#### (4) 结果评价

统计并检查测线总长度,计算设计测线形成的总覆盖率和条幅重叠率<sup>[9]</sup>。利用测区参数和条幅多边形,计算测量覆盖面积与测区面积之比,作为总覆盖率。条幅重叠率主要针对主测线,统计相邻测线重叠区域宽度与测线间距之比的平均值,即平均条幅重叠率 $\gamma$ :

$$\gamma = \sum_{i=1}^n (L_i/D_i) / n \times 100\% \quad (1)$$

式中: $L_i$ 为采样点处测线间条幅重叠的宽度, $D_i$ 为采样点处测线间距, $n$ 为采样点数。

测线间条幅重叠率可通过可视化手段尽可能展示相关信息,低于预设指标的重叠区域可在图中突出显示。

#### (5) 测线导出

完成设计后,将形成测线导出为shp格式或者文本文件等多种形式,前者主要用于同其他制图软件配合,方便于方案图件制作,后者是为了作业导航,用于与调查船导航系统配合。

## 2 关键技术

### 2.1 测线自动生成

系统测线自动生成功能有两种方式:测线自动排布与固定间隔排布。二者主要区别在于测线间隔的确定方法,主测线排布需要满足条幅重叠率指标的要求<sup>[9]</sup>,特别是在地形变化比较剧烈的区域,如果采用等间隔测线容易造成成本与标准之间的矛盾,间隔太大容易造成重叠率不达标,甚至出现呈带状的测量间隙,间隔太小会导致工作量太大,成本太高,手工设计比较耗时,因此需要进行测线间隔的自动判断,以提供最为合适的测线布设方案。而检查测线没有条带覆盖率的要求,因此可以采用效率较高的固定间隔方式生成。

#### (1) 测线自动排布

测线走向确定后,再确定测线通过的一点即可生成一条直线,然后利用测区多边形对直线切割即可得到测线(图3)。

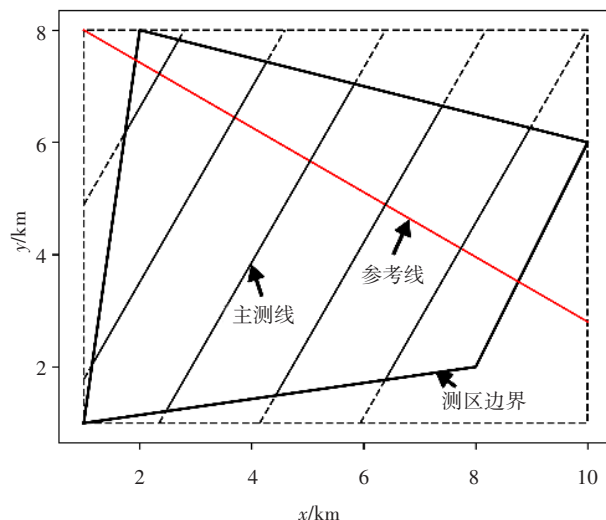


图3 测线自动排布原理图

这里为了便于实现, 首先将测区多边形简化为矩形, 然后在一条通过矩形顶点并与测线垂直的线段上确定测线点, 这条线段称为参考线。

通过插值获取参考线上的水深, 然后利用式(2)计算各水深点的单侧脚印宽度  $W$ 。

$$W = H \cdot \tan \theta \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为多波束开角,  $H$  为水深。

最后在测线上依次确定满足条幅重叠率<sup>[9]</sup>的最远的点, 作为测线点。

### (2) 固定间隔排布

与测线自动排布方法类似, 区别在于参考线改为简化矩形的对角线。在输入固定的测线间隔后, 以一定间隔在参考线上进行测线点的排布。

最后, 根据测线走向和锚定的点生成直线, 再利用测区边界多边形进行切割, 获得测线。

## 2.2 条幅制作

输入测线, 统一转换为 LineString 格式, 利用先验地形网格数据, 插值获取测线上的水深信息, 结合多波束仪开角, 利用式(1)计算垂直测线方向的脚印长度, 进而获得脚印端点坐标, 顺时针依次连接测线两侧脚印端点, 获取条幅多边形。

输入的多波束预处理数据一般是 geotiff 格式, 利用 gdal 库解析, 获取坐标、投影、水深等信息, 进而获取测量空白的位置, 并生成覆盖区域多边形, 用于补漏测线设计及结果评价。

## 2.3 信息统计

结果评价功能中, 比较关键的是根据测区、条幅和多波束覆盖等形成的多边形对总覆盖率和条幅重叠率进行计算。

根据《海洋多波束水深测量规程》(DZT 0292-2016), 多波束测深需满足全覆盖测量及达到一定的条幅重叠率。融合条幅获取总覆盖多边形, 该多边形面积与测区面积之比达到 100% 即为全覆盖测量。在前期设计阶段, 计算总覆盖率所用到的主要是主测线和检查测线条幅多边形的融合结果, 现场设计阶段用到的主要是现场处理结果所形成的多边形与检查测线条幅多边形的融合结果。

条幅重叠率按照规程为重叠宽度与测线间距的百分比, 应用于对主测线设计的评估。系统采用可视化手段, 对测线间条幅重叠率进行展示, 方便设计者直观评价设计结果。受地形变化影响,

条幅一般不是规则矩形, 测线间的条幅重叠率是变化的, 因此采用重叠率平均值以及标准差作为评价依据。

## 3 实现效果

### (1) 前期方案设计

选取某一海区进行试验(图4), 测区形状根据地形大致走向设计为平行四边形, 截取区域内水深网格数据, 计算得到建议主测线布设方向为  $218.7^\circ$ 。设置条幅重叠率指标为 10%。

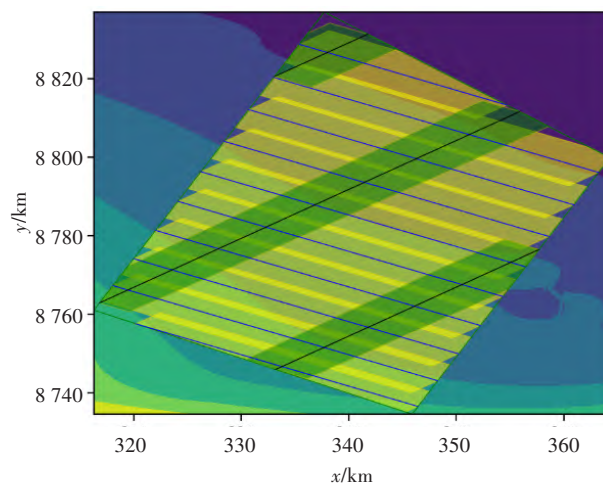


图4 方案设计主测线与检查测线

注: 蓝色线为主测线, 黑色线为检查测线; 黄色条带为主测线条幅, 绿色条带为检查测线条幅。

通过自动测线排布生成主测线(图4中蓝色线), 通过固定间隔排布(24 km)生成检查测线(图4中黑色线)。利用条幅制作功能生成主测线条幅(图4中黄色条带)与检查测线条幅(图4中绿色条带), 其中, 黄色条带间加深部分为条幅重叠区域。最后利用测线评估得到总覆盖率(98%)和测线间条幅重叠率(图5)。

可以看出, 总覆盖率基本能够满足全覆盖要求, 但也存在一些小空白区域。而在实际测量中, 调查船改换测线时这些区域顺便就被覆盖掉, 因此影响不大。相邻测线间平均条幅重叠率存在大于 20% 的情况, 这是由于部分测线上水深变化较大引起的, 这一点可以从图5中的标准差看出, 但考虑到实际测量中调查船航迹存在不可避免的弯曲, 相较而言对结果的影响不会很显著。



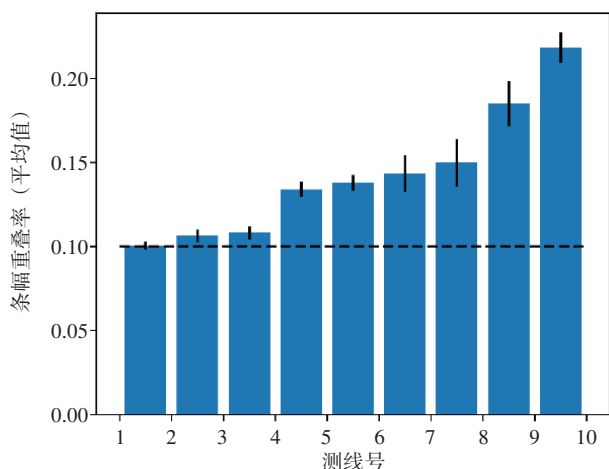


图5 方案设计主测线间条幅重叠率

注：黑色线段为标准差。

## (2) 补漏测线设计

利用历史多波束测量处理数据,生成多波束覆盖区域图(图6),现场作业时为了躲避海冰等障碍物,测量产生了许多空白区域。通过点击方式设计4条补漏测线(图7中蓝色线),继而生成条幅多边形(图7中黄色条带),可以直看到测线条幅已基本将空白区域覆盖掉,最后利用评价功能计算总覆盖率为99.7%,基本实现全覆盖。

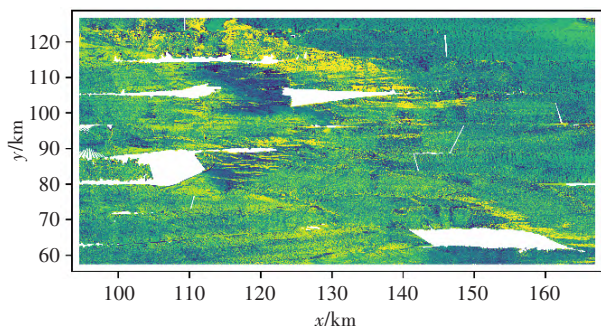


图6 现场处理多波束数据(白色区域为漏测区域)

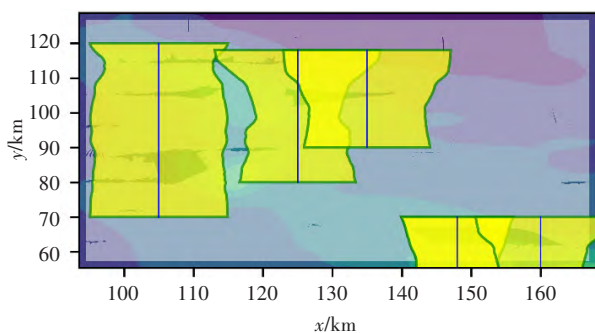


图7 补漏测线设计

试验证明,多波束测量测线布设系统可以方便、高效地设计出多波束测线,并对设计结果进行快速评价,可应用于前期与现场设计等场景。系统还将继续在诸多地方进行改进,以期设计者提供一个功能齐全、使用方便的多波束测量测线设计工具。

## 4 结语

本文针对极地海域多波束测量测线布设进行了系统设计,并对其中关键技术进行了详细的分析探讨,最后利用实际资料进行试验与讨论。研究结果表明:

(1) 系统设计明确,架构简捷有效,可方便用于系统功能开发,与用户交互友好,设计人员上手难度小,适用于多波束测量测线布设。

(2) 测线自动生成技术可快速、有效生成测线,制作条幅与可视化展示便于结果评价、信息统计对标相关规程,并针对现场补测场景开展了实用设计,方便高效。

(3) 为进一步满足多波束测量测线布设实际需求,系统会进行界面化设计,并进一步提升兼容性与扩展性,考虑继续优化测线生成与脚印预测功能,增加外部测线输入等功能,不断提高系统的可用性。

## 参 考 文 献

- [1] 赵建虎. 现代海洋测绘[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [2] 宁津生, 刘经南, 陈俊勇, 等. 现代大地测量理论与技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- [3] 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.
- [4] 成芳, 胡迺成. 多波束测量测线布设优化方法研究[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(2): 87-91.
- [5] 张旭, 叶小心, 洪德玫. 多波束系统在长江航道测量中的测线布设方法研究[J]. 航道科技, 2017, (1): 52-55.
- [6] 刘玥, 庞小平, 赵羲, 等. 1979—2018年南极海冰边缘区范围时空变化研究[J]. 极地研究, 2021, 33(4): 508-517.
- [7] 刘忠方. 北极海冰消退及其主要驱动机制[J]. 自然杂

(下转第186页)

一体化深度融合数据中心,实现了海域综合管理业务纵向一体化、横向协同化的一站式集成服务,提升了海洋空间资源综合管理及应用水平,并且在实际应用中取得了良好的社会效益和经济效益,为智慧海洋建设提供了山东样板。未来将继续在海洋强国、海洋强省的战略引领下,在智慧海洋行动的框架指导下,继续提高海洋综合管理及运用的智慧化水平。

### 参 考 文 献

- [1] 邵泽东. 智慧海洋大数据平台框架及关键技术研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
- [2] 李晋, 姜晓轶. 助力海洋强国建设: 海洋信息互联互通、深度融合、智慧应用——2018 中国海洋信息技术高端论坛会议综述[J]. 海洋信息, 2018, 33(3): 6-10.
- [3] 王妍, 魏莱. 构建智慧海洋体系, 建设世界海洋强国[J]. 今日科苑, 2021(11): 66-73.
- [4] 鲍广扩. 地方级智慧海洋建设中的技术架构和系统设计[J]. 渔业研究, 2021, 43(5): 523-528.
- [5] 丁冬. 连云港市智慧海洋平台建设研究[J]. 中国管理信息化, 2022, 25(11): 216-219.
- [6] 李仕峰. 多源异构数据时空融合关键技术研究与应用[J]. 地理空间信息, 2021, 19(10): 19-21.
- [7] 涂伟, 曹劲舟, 高琦丽, 等. 融合多源时空大数据感知城市动态[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12): 1875-1883.
- [8] CAO R, TU W, YANG C, et al. Deep learning-based remote and social sensing data fusion for urban region function recognition[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 163: 82-97.
- [9] TU W, HU Z, LI L, et al. Portraying Urban Functional Zones by Coupling Remote Sensing Imagery and Human Sensing Data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 141.
- [10] 李浩. 基于二三维一体化的山东省数字海域工程系统设计与实现[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(2): 77-82.
- (本文编辑: 李红军)

(上接第 162 页)

- 志, 2022, 44(1): 39-46.
- [8] 马玉贤, 许宁, 袁帅, 等. 基于现场观测的辽东湾东岸海冰环境基本特征[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 1-9.
- [9] 全国国土资源标准技术委员会. 海洋多波束水深测量规程: DZ/T 0292-2016 [S]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [10] 刘凌佳, 付智溢. 陆海基础空间要素数据一体化系统设计与实现[J]. 海洋测绘, 2022, 42(3): 77-82.
- [11] JAKOBSSON M, MAYER L, COAKLEY B, et al. The international bathymetric chart of the arctic ocean (IBCAO) version 3.0[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(12): 1-6.
- [12] SMITH W H F, SANDWELL D T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings[J]. Science, 1997, 277(5334): 1956-1962.
- (本文编辑: 李红军)