

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2016.02.016

# 多波束测量测线布设优化方法研究

成 芳,胡迺成

(中国人民解放军 91439 部队,辽宁 大连 116041)

**摘 要:**随着多波束测深技术的广泛应用以及人们对高精度海底地形测量的迫切需求,海洋测深已由离散、低精度、低效率向全覆盖、高精度、高效率的方向发展,传统的技术设计已不能满足对海底精细描述的要求。而测线布设作为海区技术设计的一个重要环节,其设计方法仍相对滞后。基于这一现状,在深入分析测线布设对测量成果的影响机制基础上,提出了一种全新的多波束测线布设优化方法,并详细给出流程图。整体研究结果表明:该优化方法是合理可行的,体现了逐步优化设计的思想,更符合实际测量需求。

**关键词:**多波束测量;全覆盖测量;技术设计;地形分辨率;测线间距

**中图分类号:**P229.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1003-2029(2016)02-0087-05

《国际海道测量标准》中明确规定,基于多波束的特等和 1 a 等测量,首先必须保证全覆盖测量<sup>[1-3]</sup>。在此基础上,采样点密度越大,海底地形分辨率越高,对海底地形的描绘越精细,越能完善地显示海底地形。因此,海底地形描绘的精细程度取决于采样点个数,而采样点个数主要通过测线间距的调整来控制,测线间距选择过窄,虽然保证了海底地形分辨率的要求,但会增加工作量、降低测量效率;测线间距选择过宽,又极大地降低了海底地形分辨率,无法保证测量成果质量。因此,测线布设作为多波束测量海区技术设计的核心内容,在兼顾整个测区的测量成果质量和测量效率等方面起着极其重要甚至决定性作用。为此,本文在深入分析测线布设方式对测量成果质量影响的基础上,提出一种全新的多波束测线布设优化方法,此方法体现了逐步优化的思想,最终确保在该测线布设方式下,不仅保证全覆盖测量,还可得到满足预定地形分辨率要求的水深数据,并且保持较高的测量效率。

## 1 测线布设对多波束测量的影响

测线布设包括测线方向和测线间距选择两个

方面的问题<sup>[4]</sup>。对于测线方向,通常为使扫测宽度尽可能保持不变,测线方向尽量与等深线方向保持一致。而本文重点探讨测线布设间距对多波束测量的影响。

### 1.1 测线布设对全覆盖测量的影响分析

**1.1.1 波束脚印覆盖区域模型的建立** 波束脚印是发射波束与接收波束在海底的交叉重叠区域<sup>[5]</sup>。这里从技术设计的概略表示出发,认为单个波束脚印的形状为矩形即能较好地反映实际情况。

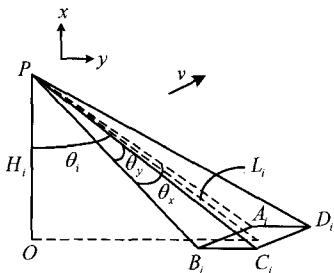


图 1 平坦海底探测脚印示意图

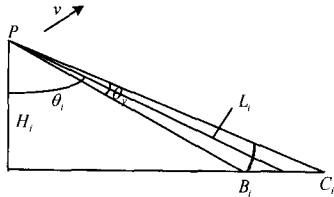


图 2 波束脚印纵横向宽度的求解

如图1~图2,假设测船在平稳状态施测(忽略各种效应对测深的影响), $P$ 为多波束换能器,令波束沿测船正横方向的波束宽度为 $\theta_y$ ,沿测线方向的波束宽度为 $\theta_x$ ,第 $i$ 个波束的入射角为 $\theta_i$ , $L_i$ 为第 $i$ 个波束对应的斜距, $H_i$ 为第 $i$ 个波束测量得到的水深值, $n$ 是波束总数。 $A_i, B_i, C_i, D_i$ 分别为第 $i$ 个波束脚印的4个顶点。

当波束数 $n$ 为奇数时,多波束换能器左右发射的波束数相等且按左右波束沿中央波束对称。此时,坐标原点为中央波束的中心点。对于第 $i$ 个波束脚印4个顶点,坐标表达式如式(1)所示:

$$\begin{cases} x_{A_i} = \frac{1}{2} L_i \theta_x & y_{A_i} = \pm \left[ \frac{1}{2} L_0 \theta_y + \sum_{n=1}^{i-1} L_n \theta_y / \cos \theta_i \right] \\ x_{B_i} = -\frac{1}{2} L_i \theta_x & y_{B_i} = \pm \left[ \frac{1}{2} L_0 \theta_y + \sum_{n=1}^{i-1} L_n \theta_y / \cos \theta_i \right] \\ x_{C_i} = -\frac{1}{2} L_i \theta_x & y_{C_i} = \pm \left[ \frac{1}{2} L_0 \theta_y + \sum_{n=1}^i L_n \theta_y / \cos \theta_i \right] \\ x_{D_i} = \frac{1}{2} L_i \theta_x & y_{D_i} = \pm \left[ \frac{1}{2} L_0 \theta_y + \sum_{n=1}^i L_n \theta_y / \cos \theta_i \right] \end{cases} \quad (1)$$

当波束数 $n$ 为偶数时,多波束换能器左右发射的波束数相等且按换能器垂线方向对称。此时, $y_K$   
 $= \pm \sum_{n=1}^{i-1} L_n \theta_y / \cos \theta_i, K_i \in \{A_i, B_i, C_i, D_i\}$ 。

式(1)中, $y$ 坐标取值,右舷波束取正,左舷波束取负。并且, $i = |\pm 1|, \dots, \left| \pm \frac{n-1}{2} \right|, \left| \pm \frac{n}{2} \right|$ ,左舷取负、右舷取正。

波束脚印的边长分别为:

$$A_i B_i = L_i \theta_x, B_i C_i = L_i \theta_y / \cos \theta_i \quad (2)$$

第 $i$ 个波束脚印的面积为:

$$S_i = A_i B_i \times B_i C_i = L_i \theta_x \times L_i \theta_y / \cos \theta_i \quad (3)$$

**1.1.2 测线布设对全覆盖测量的影响分析** 为直观说明测线布设间距对全覆盖测量的影响,以Seabat 8101多波束测深仪为例<sup>[6]</sup>,利用上节建立的波束脚印覆盖区域模型仿真不同测线间距的波束覆盖情况,为便于显示,图中截取相邻两测线间的波束覆盖区域进行显示。

实验中,测船在平稳状态下施测(不考虑其它测深效应的影响),船速6 kn,设计水深10 m,波束采样率设为10 Hz。SeaBat 8101多波束测深仪的波束宽度为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ ,扇面开角 $150^\circ$ ,101个波束。

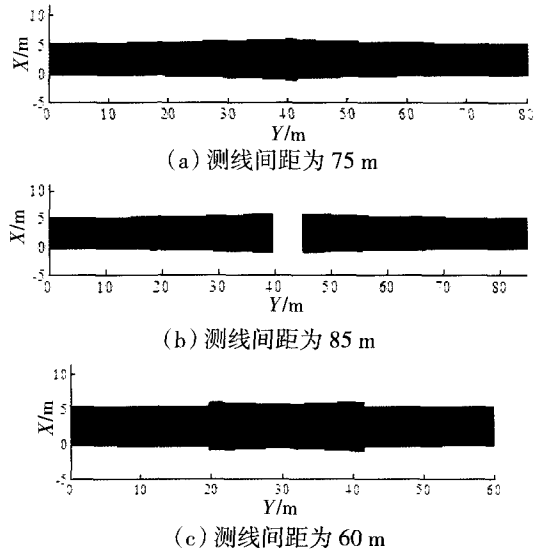


图3 不同测线间距时的波束脚印覆盖区域图

从图3中看出:以换能器扇区宽度为测线间距,实现了条带与条带间的全覆盖(如图3(a))。若增大测线间距,两条条带间出现空白区(如图3(b));若减小测线间距,将造成测船正横方向条带与条带间有重叠部分(如图3(c))。实际测量时,不同测量要求对重叠度的要求也不相同<sup>[7-8]</sup>,应根据不同要求适度增加或减小测线间距。若重叠度过大,势必影响测量效率;如果测线间距过大,将产生测量遗漏,无法实现横向的全覆盖测量,更无法保证系统探测能力,从而必将影响海底地形的测量结果。因此,只有选择适当的测线间距,才能在兼顾横向全覆盖探测的同时,有效提高测量效率。

## 1.2 测线布设对海底地形分辨率的影响分析

为了进一步研究测线布设优化方法,本文进行了仿真计算。首先采用Matlab语言构建复杂变化海底(如图4),利用Seabat 8101多波束测深仪(不考虑等距发射)沿测线方向对海底进行仿真采样(忽略各种测深效应对测深的影响),详细分析测线布设对测量结果的影响。

采用的具体分析方法是:直接将先验海图进行格网化(本文内插得到 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 格网点),模拟水深测量沿 $Y$ 轴仿真采样,统计分析半 ping 波束覆盖区域内平行于测线方向的每一列格网所获得的采样点均值,并绘制相应的关系图(如图5)。调整测线布设间距,通过考察半 ping 波束覆盖区域内不同列格网内横向采样点均值的变化情况,来分析测线布设间距对格网横向采样点密度的影响。实验中,设计船速8 kn,设计水深30 m。

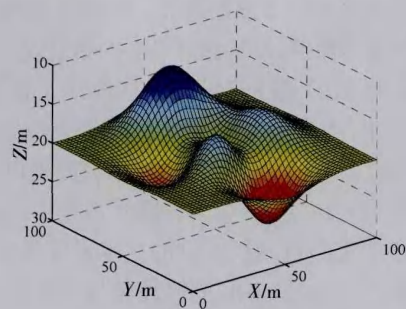


图 4 复杂变化海底示意图

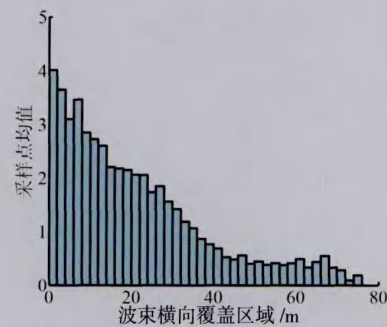


图 5 沿 Y 轴测量各列网格采样点均值

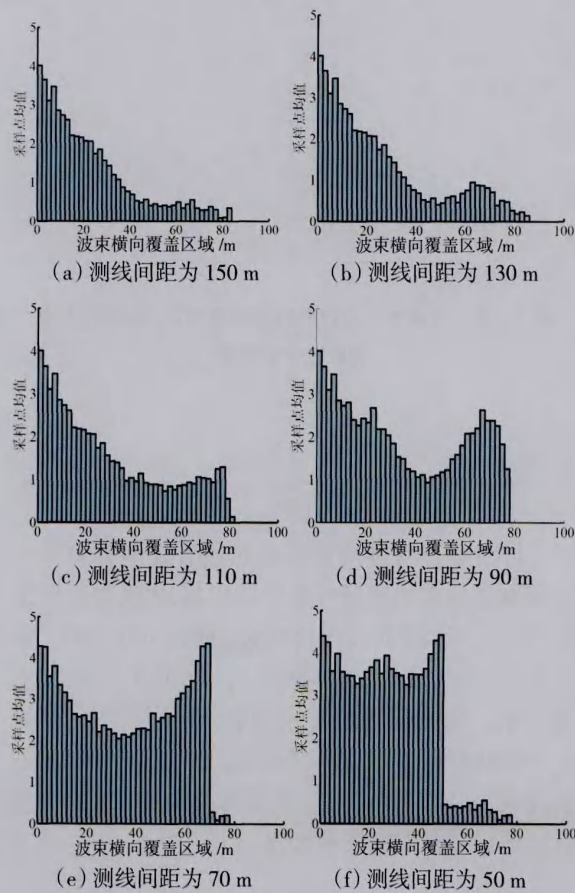


图 6 不同测线间距各列网格采样点均值变化趋势图

表 1 沿 Y 轴施测,半 ping 波束覆盖区域内不同测线间距的采样点个数一览表

列数	间距/m					
	150	130	110	90	70	50
2	3.6	3.6	3.6	3.6	4.3	4.3
3	3.1	3.1	3.1	3.1	3.5	3.6
4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.8	4.0
5	2.9	2.9	2.9	2.9	3.3	3.6
6	2.7	2.7	2.7	2.7	3.2	3.5
7	2.6	2.6	2.6	2.8	3.0	3.5
8	2.2	2.2	2.2	2.4	2.6	3.3
9	2.2	2.2	2.2	2.3	2.6	3.4
10	2.2	2.2	2.2	2.4	2.6	3.6
11	2.1	2.1	2.1	2.3	2.4	3.7
12	2.1	2.0	2.1	2.7	2.7	3.8
13	1.7	1.7	1.7	2.2	2.2	3.5
14	1.9	1.9	1.9	2.2	2.4	3.9
15	1.6	1.6	1.6	2.0	2.3	3.6
16	1.4	1.4	1.4	1.9	2.2	3.5
17	1.2	1.2	1.4	1.5	2.0	3.5
18	1.1	1.4	1.3	1.5	2.1	3.2
19	0.9	0.9	1.0	1.3	2.1	3.5
20	0.8	0.8	1.0	1.2	2.2	3.5
21	0.7	0.7	1.0	1.1	2.3	3.5
22	0.5	0.5	1.1	1.1	2.3	3.6
23	0.5	0.5	0.9	1.0	2.3	4.0
24	0.6	0.6	0.9	1.1	2.7	4.3
25	0.4	0.4	0.9	1.1	2.5	4.4

从图 5 中可直观看出,第 1 列格网(距中央声线 0~2 m 范围内)的采样点均值最大。从第 2 列格网(距中央声线 2~4 m)开始,采样点均值逐渐变小,到第 18 列格网(距中央声线 34~36 m)的采样点均值为 1,从第 19 列开始平均获得不到 1 个采样点。这说明若不考虑多波束换能器等距发射,越远离中央波束,获得的采样点越少,对海底表面的描绘越不精细。

为方便比较,考察不同测线间距时第 2 列至第 25 列采样点均值的变化情况(见表 1)。对比表 1 和图 6 可以得出,同一列格网,越靠近中央波束,采样点个数的变化越缓慢,这是由于单 ping 内各波束点的距离由多波束系统自身指标及水深决定,与测线布设间距无关。而越靠近边缘波束的格网,采样点个数随测线间距的变化变得明显,换句话说,越靠

近边缘波束的格网,随着测线间距的减小,其内的采样点个数逐渐增大。以第25列(距中央声线48~50 m)为例,当测线间距由150 m减少至50 m时,平均采样点个数由0个增至4个。

综合上述仿真实验得出,单 ping 内,不同波束施测得到的采样点个数存在较大差异,越靠近中央波束,获得的采样点越多,地形描绘得越精细;对于边缘波束,其内的采样点个数受测线布设间距的影响较大,其随着测线增大而逐渐较少。这也充分表明了测线间距是影响海底地形横向分辨率的重要因素。

## 2 多波束测量测线布设优化方法

通过上一节的分析结果和认识,进一步对如何进行测线的合理布设进行研究。首先给出测线布设的基本原理和方法,最后总结归纳给出多波束测量测线布设的步骤。

### 2.1 多波束测量测线布设的基本原理

多波束测线布设的基本原则是将先验海底地形格网化,通过控制每个格网的分辨率,来使得格网分辨率与测线间距相匹配,最终满足海底地形分辨率的要求。

由于海底地形分辨率,根本上取决于海底地形的区域变化特征,因此,本文提出如下测线布设的基本原理:根据测区的实际水深分布和多波束系统自身覆盖倍数情况合理选择多波束测深系统后,通过设计调整测线布设间距,在保证全覆盖测量的基础上,控制采样点密度,最终保证测量成果满足预定的海底地形分辨率要求。

具体实施时,还应考虑到施测的方便性和测量效率等因素的影响,来综合确定最佳的测线布设方案。

### 2.2 多波束测量测线布设方法

具体地说,可按图7的流程图来确定满足预定海底地形分辨率要求的测线间距。

特别需要指出的是,本文提出这种全新的测线布设的方法,是想体现出“实践-认识-再实践-再认识”的哲学思想,也体现了理论来源于实践,并用于指导进一步的实践。即应充分了解先验的海水深信息,然后提出较为合理的初测方案,再根据初测得到的最新水深信息,进一步对测线布设方法进行优化,

最终确保在该测线布设方式下,得到满足地形分辨率要求的水深数据,并且保持最高的测量效率。

本文提出的测线布设方法还体现了逐步优化的设计思想,当然也增加了测线布设技术设计的复杂性和难度。不过现代计算机技术为此提供了良好的解决环境。事实上,本文在研究过程中已编制了专用的多波束测量测线布设的技术设计软件,该软件可提供作业单位使用,同时该软件系统也直接提高了水深测量的信息化、自动化程度。

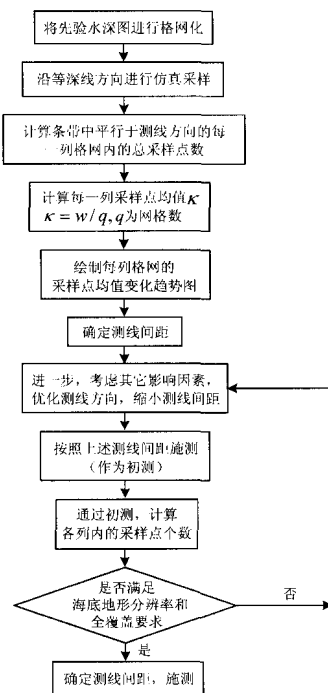


图7 基于海底地形分辨率的多波束测深测线间距优化选取方法流程图

## 3 结语

针对如何合理确定测线布设方式使其可同时兼顾测量效率与测量质量这一问题,本文提出了全新的多波束测线布设优化方法。研究过程采用了系统的、优化的理念,可有效平衡测线间距和采样点的关系,在充分考虑海底地形分辨率要求的基础上,对测线布设间距进行逐步优化。整体研究结果:该方法是合理可行的,为高质高效地完成水深测量任务提供了有力的技术支持。

## 参考文献:

- [1] 国家质量技术监督局. GB 12327-1998.海道测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [2] IHO. IHO Standards for Hydrographic Surveys, S-44, 5th Edition[S]. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
- [3] 刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理[M]. 北京: 测绘出版社, 2002.
- [4] 夏伟, 刘雁春, 边刚, 等. 基于海底地貌表示法确定主测深线间隔和测图比例尺[J]. 测绘通报, 2004(3): 24-27.
- [5] 李家彪, 王小波, 华祖根, 等. 多波束勘查原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [6] SeaBat8101 Multibeam Echosounder System OPERATOR'S MANUAL Version 2.02[EB/OL]. <http://www.reson.com>, Reson, 2003.
- [7] 刘雁春, 肖付民, 暴景阳. 面向 21 世纪的海洋测深(改正)新技术[J]. 地球科学进展, 1996(3): 17-22.
- [8] Barbara A Bond. Strategic Considerations for International Hydrography in the 21st Century [J]. International Hydrographic Review, 1996, LXXIII(2): 5-7.

## Research on the Optimization Method for Survey Line Layout in Multi Beam Survey

CHENG Fang, HU Nai-cheng

Troop 91439, The People's Liberation Army of China, Dalian 116041, Liaoning Province, China

**Abstract:** With wide application of multibeam echosounder systems and urgent need for high-precision bathymetric survey, traditional technical design is no longer able to meet the demand of accurate seafloor topographic survey. The development trends of marine bathymetry are featured by full coverage, high accuracy and high efficiency. As an important link in technical design, the survey line layout technique has not been fully developed in China. On the basis of analyzing the effect mechanism of survey line layout on surveying results, a newly optimized method of multibeam survey line layout is presented, with a detailed flow diagram given in this paper. The results from the overall research indicate the feasibility of this optimizing method, which embodies the gradual design idea, well suited to practical surveying requirements.

**Key words:** multibeam survey; full-coverage survey; technical design; bathymetric resolution; survey line interval