

浅谈海水深度测量的设计思路

郭靖宇¹ 刘泽众¹ 李朝阳²

1. 西安工业大学光电工程学院, 中国·陕西 西安 710021

2. 西安工业大学计算机科学与工程学院, 中国·陕西 西安 710021

摘要: 多波束测深系统利用声波的反射原理以及在海水中的传播可以计算出海水的深度, 比单波束测深系统具有更加高效的特点。如何在不同坡面的海水区域满足水深探测重叠率合理的测量设计思路十分关键。通过讨论覆盖宽度、重叠率和海水深度之间的关系, 建立优化模型解决多波束测线问题。实验结果表明: 选择的测线方向应与海底坡面的等势线平行时测线最优。

关键词: 多波束测深; 覆盖宽度; 重叠率

Design Ideas for Seawater Depth Measurement

Jingyu Guo¹ Zezhong Liu¹ Zhaoyang Li²

1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi, 710021, China

2. School of Computer Science and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi, 710021, China

Abstract: Multi beam bathymetry systems use the reflection principle of sound waves and their propagation in seawater to calculate the depth of seawater, which is more efficient than single beam bathymetry systems. How to meet the reasonable measurement design concept of water depth detection overlap in different slope seawater areas is crucial. By discussing the relationship between coverage width, overlap rate, and seawater depth, an optimization model is established to solve the problem of multi beam survey lines. The experimental results indicate that the optimal measurement line direction should be parallel to the equipotential line of the seabed slope.

Keywords: multi beam depth measurement; coverage width; overlap rate

1 引言

在水利工程领域, 测量海水深度是非常重要的一项工作, 尤其对于海洋工程、海岸防护和航海等领域至关重要。世界各地都在不断发展和应用各种先进技术来进行海水深度的测量, 以确保建设项目的准确性和安全性。基于单波束测深发展的多波束测深系统一次能发射数以百计的波束, 再由接收换能器接收由海底返回的声波。在海底平坦的海域内, 多波束换能器能测量出以测线为轴线具有一定宽度的全覆盖水深条带, 使得对海底面貌的探测效率更高。肖元弼等利用卡尔曼滤波法降低边缘波束的系统性误差^[1]; 孙岚等利用组网平差判定法来降低测深系统中相邻测线之间的系统差异^[2]; 祝慧敏采用空间自适应趋势面滤波法对测深数据进行分区块滤波处理^[3]; 但是, 由于多种误差的影响, 多波束测深缺乏统一的设计模型。论文针对这种情况, 设计出在合理的测线重叠率对测深数据进行评价, 建立优化模型解决多波束测线问题。

2 海水深度与重叠率的关系

2.1 海水深度与测量距离的模型建立

我们选定一块海域, 其测量船距离岸边 2673 米, 我们沿着船测线的方向延长与海底的坡面交于一点, 每间隔 200

米的测线, 互相形成如图 1 所示的相似三角形。其中, d 为测量船每测量一次之间的间隔, W 为多波束测线在海底坡面形成的测线条带, θ 为多波束换能器的开角, α 为海底坡面坡度。

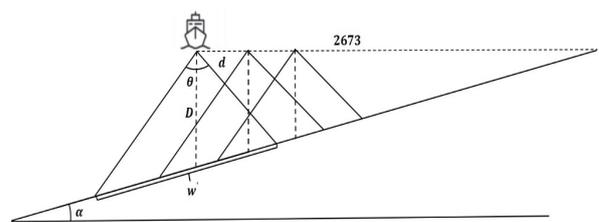


图 1 多波束测线示意图

通过对图 1 分析, 我们发现不同测线所测量的海水深度是成比例的。利用三角函数关系计算出测线到海平面与坡面交点的水平距离为 $D\tan\alpha$, 得出海域中心所在海平面与坡面的交点, 建立海水深度与测线距离中心点处的距离的数学模型为:

$$D_i = 70 \times \frac{D\tan\alpha}{D\tan\alpha - x} \quad \text{公式 (1)}$$

2.2 海水深度与重叠率的模型建立

海底是具有一定的坡度, 导致各个测量点的水深有所差异, 测线一次发射的测线之间的长度是不对称关系, 所以

观测到的是不规则的三角形。我们对多波束测线的示意图进行分析,如图 2 所示。其中, D 为水深, W 为测线条带宽度。

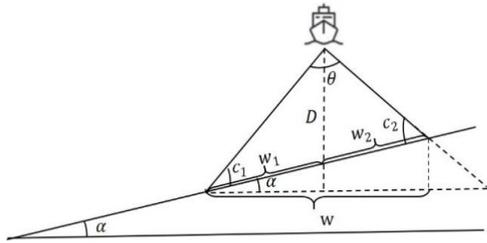


图 2 多波束测线局部分析图

我们将沿坡面方向的覆盖宽度分成两部分组成,分别为中心测线左侧 W_1 和右侧 W_2 , 我们利用正弦定理求得 W_1 与 W_2 , 函数关系式如下:

$$\frac{\sin c_1}{D} = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{W_1} \quad \text{公式 (2)}$$

$$\frac{\sin c_2}{D} = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{W_2} \quad \text{公式 (3)}$$

通过平面几何和三角函数中的知识分析图 2, 我们得出波束覆盖宽度为:

$$W = D \sin \frac{\theta}{2} \times \left(\frac{1}{\sin(90^\circ - \frac{\theta}{2} - \alpha)} + \frac{1}{\sin(\alpha + 90^\circ - \frac{\theta}{2})} \right) \times \cos \alpha \quad \text{公式 (4)}$$

在海底地形平坦且测线相互平行的情况下, 相邻条带之间的重叠率为

$$\eta = 1 - \frac{d}{W} \quad \text{公式 (5)}$$

联立公式 (4) (5), 得出对于具有一定坡度的多波束测深覆盖宽度 W 与相邻条带之间重叠率 η 的关系式:

$$\eta = 1 - \frac{d \sin(90^\circ + \frac{\theta}{2}) \cos \alpha}{W \sin(90^\circ - \frac{\theta}{2} - \alpha)} \quad \text{公式 (6)}$$

2.3 海水深度与重叠率的模型求解

该海域海底坡面的倾斜角 $\alpha=15^\circ$, 海域中心的水深为 70 米, 波束换能器的开角为 120° , 将上述数据代入式 (6), 利用 MATLAB 进行仿真计算得出该海域的测深结果, 如表 1 所示。

3 海水深度测线优化方案的设计

在工程测量当中测线方向均与等深线互相平行, 此时测线所成的测深面积为矩形。设计测量长度最短、可以完全覆盖整个海域的测线, 并且相邻两条条带之间的重叠率较为合理, 我们选取青海湖中一块南北长约 2 海里, 东西宽约 4 海里的矩形水域进行模拟优化测量。为了使得测量船行驶的距离最短, 耗费测线长度最短, 测量船应沿着南北方向行驶, 我们建立如下单目标优化模型:

表 1 海底坡度局部测线各参数统计表

测线距中心点处的距离 /m	-800	-600	-400	-200	0	200	400	600	800
海水深度 /m	90.95	85.71	80.47	75.24	70.00	64.76	59.53	54.29	49.05
覆盖宽度 /m	315.71	297.53	279.35	261.17	242.99	224.81	206.63	188.45	170.27
重叠率 /%	—	29.59	25.00	19.79	13.78	6.81	-1.39	-11.17	-23.04

决策变量: 相邻测线的间隔 d , 测线的条数 n 。

目标函数: 测线总长度 y :

$$y=3704n \quad \text{公式 (7)}$$

约束条件: 重叠率的约束:

$$10\% < \eta < 20\% \quad \text{公式 (8)}$$

矩形海域边界的约束:

$$\frac{w_0}{2} + \sum_{i=1}^n d_i < 7408 \quad \text{公式 (9)}$$

$$\frac{w_0}{2} + \sum_{i=1}^n d_i + \frac{w_n}{2} \geq 7408 \quad \text{公式 (10)}$$

测线间隔的约束:

$$d_{i-1} < d_i \quad \text{公式 (11)}$$

为使测线的覆盖宽度的利用率最大, 因此将第一条测线所覆盖的临界区域与海域最西侧重合, 如图 3 所示。

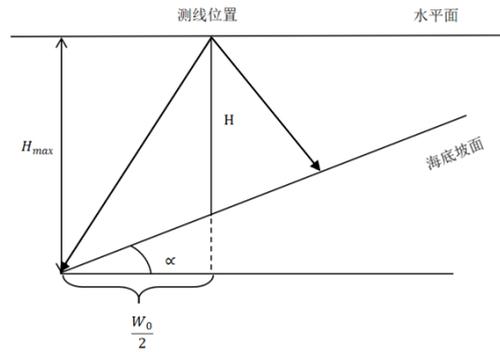


图 3 海水深度与侧线位置的几何示意图

通过上图, 可以得出第一条测线的具体位置, 模型如下:

$$H = H_{\max} - \frac{w_0}{2} \times \tan \alpha \quad \text{公式 (12)}$$

测线条带宽度与海水深度的关系模型如下:

$$W_i = 2\sqrt{3} [D_{\max} - (\sum_{k=1}^i d_k + \frac{w_0}{2}) \times \tan \alpha] \quad \text{公式 (13)}$$

结合式 (6), (12), (13), 可得海水深度测线的优化模型为:

$$\begin{aligned} \min: & y \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{aligned} & \frac{w_0}{2} + \sum_{i=1}^n d_i < 7408 \\ & \frac{w_0}{2} + \sum_{i=1}^n d_i + \frac{w_n}{2} \geq 7408 \\ & 1 - \frac{d_i \sin(90^\circ + \frac{\theta}{2}) \cos \alpha}{W_i \sin(90^\circ - \frac{\theta}{2} - \alpha)} > 10\% \\ & 1 - \frac{d_i \sin(90^\circ + \frac{\theta}{2}) \cos \alpha}{W_i \sin(90^\circ - \frac{\theta}{2} - \alpha)} < 20\% \\ & d_{i-1} < d_i \\ & n \in N^* \end{aligned} \right. \quad \text{公式 (14)} \end{aligned}$$

通过 MATLAB 软件对上述线性优化模型进行仿真求解, 得出当南北方向的测线条数 n 为 36 时, 每两条测线的间隔为 $d[d_1, d_2 \dots d_{n-1} d_n]$ 能够使得重叠率在合理范围内, 即测线总长度最短为 72 海里, 且各个测线之间的间隔、覆盖宽度和重叠率, 如表 2 所示。

表 2 矩形海域测线各参数统计表

测线条数	测线间隔 /m	覆盖宽度 /m	重叠率 /%
1	281.94	657.61	19.90
2	242.08	635.65	19.89
3	211.97	616.42	19.65
4	205.02	597.82	19.43
.....			
33	125.85	74.94	18.31
34	118.97	64.15	18.12
35	112.28	53.96	17.94
36	97.75	45.10	17.05

测线若与海底坡面存在一定的角度, 将会使得测线难以完全覆盖整个海域, 因此测线应与海底坡面的等势线平行, 测量船为南北方向直线行驶, 这样极大程度上满足了重叠率的条件, 减少了测量船行驶的距离, 节约了资源。同时利用优化模型, 拥有较为统一的算法, 避免了人为因素的影响, 将问题简化, 为多波束测线问题提供了非常有效的方法。

4 应用实例

多波束测深是一种利用声波来测量水深的技术, 通过同时发射多个声波束并记录它们的回波时间来计算水深。这项技术在海洋科学和工程领域有着广泛的应用, 具体包括:

①海洋地质勘探: 多波束测深可用于海底地形的绘制和地质构造的研究, 有助于寻找潜在的矿产资源或确定海底地形特征^[4]。

②海洋地形测绘: 多波束测深可以提供高分辨率的海底地形数据, 为海洋地图制作和海洋环境调查提供基础数据^[5]。

③海底管道和电缆敷设: 在海底管道和电缆的敷设过程中, 需要准确的水深数据来进行规划和布设, 多波束测深技术能够提供高精度的水深信息。

④水文学研究: 多波束测深可用于海洋水文学研究, 例如测量海底的洼地和隆起, 以及海底沉积物的分布情况。

总的来说, 多波束测深技术在海洋工程、海洋地质和海洋科学领域发挥着重要作用, 为海洋资源开发、海洋环境保护和海洋科学研究提供了重要的数据支持。

5 存在的问题

在实际应用中, 虽然多波束测深优化模型能够提供海水各项参数的准确测量结果, 但也存在一些问题需要解决。

首先, 系统缺陷是一个主要挑战。相较于单波束系统, 多波束测深系统在灵活性、安装复杂度和操作难度上存在较大差异, 需要投入更多的人力和物力资源, 且工作效率相对较低。其次, 数据处理方面也会带来不少繁琐的工作。多波束测深系统所需的数据量庞大, 后期的内部加工工作复杂繁琐, 人为干预可能会影响数据处理的准确性, 特别是在水流急促、水深变化大的地区, 数据处理效率较低。最后, 误差难以被及时察觉也是一个重要问题。多波束测深系统容易受到多种因素的影响, 如水流情况、系统参数设置、测船状态等, 这些因素可能导致明显的误差产生。为确保测量准确性, 需要合理设置设备位置、加强质量控制和精确评估, 以及及时发现并纠正误差。

6 结语

近几年来, 海洋多波束测深系统是目前国家海洋探测广泛应用的手段之一, 有良好的测深效果。论文重点以固定海底坡面的矩形海域为研究对象, 分析覆盖宽度、重叠率和海水深度之间的关系, 建立优化模型, 得出海水深度测量设计的最优方案为: 选择与海底坡面等深线相互平行的方向为测线方向。

参考文献:

- [1] 肖元弼, 彭认灿, 暴景阳, 等. 利用卡尔曼滤波改正多波束数据声速整体误差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1461-1468.
- [2] 孙岚, 李明叁, 刘雁春, 等. 测深拼接的组网平差判定方法[J]. 海洋测绘, 2009, 29(4): 49-52+56.
- [3] 祝慧敏. 多波束测深系统水下地形测量关键技术与精度评估[J]. 经纬天地, 2022(2): 4-6.
- [4] 龚旭东, 刁新源, 吕亚军, 等. 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[J]. 海洋科学, 2020, 44(8): 223-230.
- [5] 余启义. 基于多波束测深技术的海底地形测量[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(9): 262-264.