

海洋测深波束角效应改正的方向问题研究

邹永刚¹ 刘雁春¹ 肖付民¹ 夏伟¹

(1 大连舰艇学院海测工程系, 大连市解放路667号, 116018)

摘要:提出了顾及方向性的海底倾斜角解算模型。通过不同测线方向的数值仿真,验证了该模型的正确性,表明沿水深梯度方向布设测线可获得最接近于真实的海底倾斜角。

关键词:海洋测深;波束角效应;海底倾斜角计算;方向性

中图法分类号:P229.3

利用回声测深仪进行海底地形测量时,由于物理和技术上的原因以及海底探测的要求,换能器发射的声波或大或小地存在一定的波束宽度。这样测得的水深值是换能器至声波覆盖区域的最短距离,但并不一定是换能器到海底的垂直距离,两者之差就是波束角效应引起的测深误差。文献[1-6]对波束角效应进行了定性和定量的分析与计算,并给出了相应的改正模型。一般情况下认为波束角效应带来的误差只能减弱,不能彻底消除^[1-3]。实际测量中,测线方向不一定与水深梯度方向严格一致。当测线方向与水深梯度方向存在不同夹角时,根据测量资料计算得到的海底倾斜角 α 是不一样的,这将直接影响波束角效应的改正精度,这里称之为波束角效应改正的方向性问题。本文在分析波束角效应的方向性对测深值影响的基础上,提出了相应的改进模型,仿真数值试验表明了该模型的有效性。

1 测线方向性对测深值的影响

在实际测量中,设测线 S_1S_2 与水深梯度方向成夹角 A ,如图1所示,测船在 P_1 点发射波束,沿水深梯度方向波束边缘点为 t_1 ,沿测船方向波束边缘点为 t'_1 。此时,测量水深应为 P_1t_1 的值,但由于测线的方向性,在计算时,认为测深值为 $P_1t'_1$ 。令 $P_1t_1=r(x_1)$, $s_1t_1=\Delta y$, α 是水深梯度方向的海底倾斜角, α_γ 是测线 S_1S_2 对应剖面的海底倾斜角,沿测深线前进方向向下为正,向上为负。

下面分几种情况讨论测线方向性对测深值的影响。

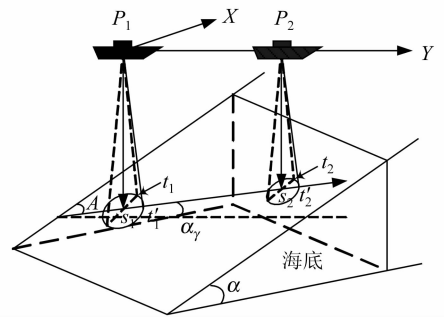


图1 波束角效应的方向性对测深值的影响
Fig. 1 Influence of Beam Width to Directivity

1.1 $|\alpha| > \theta, \alpha_r > \theta$

在图2(a)中,测深值是 t_1 到 P_1 的值,在进行波束角效应改正时,认为测深值是测线方向上 t'_1 到 P_1 的值,可以得到 P_1t_1 的实际水深为:

$$z = \sec\alpha \cos(\alpha - \theta)r$$

$$r' = z \cos\alpha_\gamma \sec(\alpha_\gamma - \theta)$$

由此可得测线方向性对测深值的影响为:

$$\Delta r = r' - r = (\sec\alpha \cos(\alpha - \theta) \cdot \cos\alpha_\gamma \sec(\alpha_\gamma - \theta) - 1)r \quad (1)$$

1.2 $|\alpha| > \theta, \alpha_r < \theta$

同理,由图2(b)可得 $P_1t'_1$ 的实际水深为:

$$z = \sec\alpha \cos(\alpha - \theta)r$$

$$r' = z \cos\alpha_\gamma$$

测线方向性对测深值的影响为:

$$\Delta r = r' - r = (\sec\alpha \cos(\alpha - \theta) \cos\alpha_\gamma - 1)r \quad (2)$$

1.3 $|\alpha| < \theta$

由图 2(c)可得 P_1t_1 的实际水深为:

$$z = r \sec \alpha$$

测线方向性对测深值的影响为:

$$\Delta r = r' - r = (\sec \alpha \cos \alpha_\gamma - 1)r \quad (3)$$

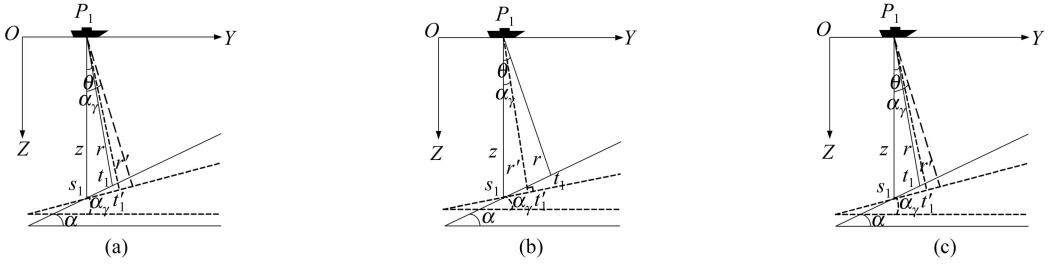


图 2 波束角的方向性带来的失真

Fig. 2 Distortion by Directivity of Beam Width

显然,当夹角 $A=0$ 时,不存在方向性的影响。当夹角 $A=90^\circ$ 时,测得海底为平坦海底,完全失真。以换能器波束角 20° 为例,分析波束角效应的方向性所带来的测深相对误差。从表 1 中可以看出,随着海底倾斜角和测线方向角的不断增大,测深相对误差也越来越大,最大可达 1% 以上,已经严重影响到测深的精度,应给予改正。

表 1 波束角效应的方向性带来的测深相对误差/%

Tab.1 Relative Error for Directivity of Beam Width/%

$A/(^\circ)$	$\alpha/(^\circ)$				
	1	2	5	10	15
15	0.016	0.065	0.406	0.100	0.149
30	0.019	0.076	0.476	0.373	0.590
45	0.023	0.091	0.571	0.751	1.298
60	0.027	0.107	0.667	1.133	2.153

2 顾及方向性的海底倾斜角解算模型

如图 3 所示,测线 $C''C'$ 方向为水深梯度方向,测线 $B''B'$ 方向与 $C''C'$ 方向的夹角为 A ,测线 $P'D'$ 与 $C''C'$ 垂直,即垂直水深梯度方向, BC 平行于 $B''C''$,且垂直于 $C''C''$; B' 、 C' 分别为 B 、 C 在 $abcd$ 平面的投影;水深梯度方向的海底视倾斜角为 φ_0 ,其他测线方向测得的海底视倾斜角为 φ_γ (图 3 中为 $\angle BB'B'$)。

由三角形 $CC'C''$ 和 $BB'B''$ 知:

$$\tan \varphi_0 = \frac{CC'}{C'C''}, \tan \varphi_\gamma = \frac{BB'}{B'B''} \quad (4)$$

因 $CC' = BB'$, 可得:

$$\cos A = \frac{C'C''}{B'B''} \quad (5)$$

由式(4)、(5)得:

$$\tan \varphi_\gamma = \tan \varphi_0 \cos A \quad (6)$$

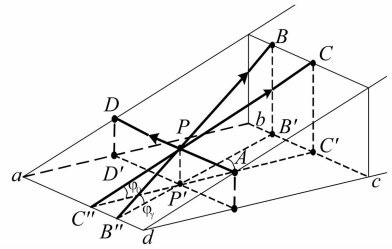


图 3 不同方向布设测线示意图

Fig. 3 Diagram of Different Directions

在海底同一点(如点 P)上,波束角效应在不同方向测线上的影响量是相同的,故可推导出水深梯度方向的海底倾斜角 α 与其他测线方向的海底倾斜角 α_γ 的关系为:

$$\tan \alpha_\gamma = \tan \alpha \cos A \quad (7)$$

从式(7)中可看出, α_γ 与 α 的比值随夹角 A 的增大而减小。特别地,当 A 为 90° 时,求得的海底倾斜角为 0,说明无论海底倾斜角的值是多少,只要测线方向与水深梯度方向的夹角为 90° ,测量得到的海底都为平坦海底。当测线方向与水深梯度方向不一致时,由测量数据得到的海底视倾斜角是不一样的。若采用直接计算得到的水深值进行波束角效应改正,必然带入误差,损失精度。

求得的海底倾斜角与实际海底倾斜角不符,直接导致波束角效应改正出现方向性偏差。为消除波束角效应的方向性影响,必须求得测线方向真实的海底倾斜角。

在文献[1]中, φ 和 α 之间的转换模型为:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan[\tan \varphi \cdot \cos \theta / (1 \pm \tan \varphi \cdot \sin \theta)], \\ |\varphi| \geq \theta \\ \alpha = \arcsin(\tan \varphi), |\varphi| < \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\varphi > 0$ 时,取“—”号; $\varphi < 0$ 时,取“+”号。其中,海底下倾时, $\varphi > 0$; 海底上倾时, $\varphi < 0$ 。

将式(6)、(7)代入式(8),可得到不同方向的海底视倾斜角 φ_y 与水深梯度方向的海底倾斜角 α 的关系为:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan(\tan\varphi_y \cdot \cos\theta / (\cos A \pm \tan\varphi_y \cdot \sin\theta)), & |\varphi_y| \geq \theta \\ \alpha = \arcsin(\tan\varphi_y / \cos A), & |\varphi_y| < \theta \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\varphi_y > 0$ 时,取“-”号; $\varphi_y < 0$ 时,取“+”号。

相对于式(8),式(9)引入了测线方向与水深梯度方向的夹角 A ,认为其对求得的海底倾斜角的值产生影响,而不是简单地将所有测线方向都认为是与水深梯度方向平行($\cos 0 = 1$)。因此,应用式(9)的模型能够求得更接近真实值的海底倾斜角,从而提高波束角效应改正的精度,这里称之为顾及方向性的海底倾斜角 α 解算模型。

3 仿真计算与分析

为检验所提出的顾及方向性的海底倾斜解算模型的有效性,本文利用计算机仿真宽波束测深仪获得测深资料,测线方向与海底水深梯度方向存在夹角 A ,利用两种改正模型进行对比分析。

3.1 $|\varphi_y| < \theta$

设波束角为 30° ,半波束角 $\theta = 15^\circ$,海底倾斜角 $\alpha = 15^\circ$,测线方向与水深梯度方向的夹角 $A = 60^\circ$,由于波束角效应的影响,由测深数据计算得到的海底视倾斜角 $|\varphi_y| < \theta$ 。两种模型的处理结果如图 4 和表 2 所示。表 2 中, x 为点名; $y_1, c_1, \Delta h_1$ 分别为应用原有模型时的海底真实水深值、改正后的水深值和二者差值; $y_2, c_2, \Delta h_2$ 分别为应用改进模型时的海底真实水深值、改正后的水深值和二者差值。

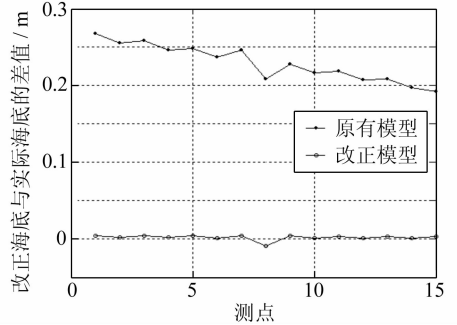


图 4 两种模型改正值的差值比较
Fig. 4 Difference Between Corrections of Two Models

表 2 两种模型比较/m

Tab. 2 Comparison Between Two Models/m

x	$\theta = 15^\circ, \alpha = 15^\circ$						$\theta = 5^\circ, \alpha = 15^\circ$					
	y_1	c_1	Δh_1	y_2	c_2	Δh_2	y_1	c_1	Δh_1	y_2	c_2	Δh_2
1	28.746 6	28.479 0	0.267 6	27.750 3	27.746 0	0.004 1	29.051 1	29.049 0	0.002 1	29.051 1	29.049 0	0.002 1
2	28.204 4	27.949 0	0.255 4	27.226 0	27.225 0	0.001 4	28.512 3	28.511 0	0.001 3	28.512 3	28.511 1	0.001 2
3	27.680 4	27.422 0	0.258 4	26.721 1	26.717 0	0.003 9	27.973 5	27.973 0	0.000 5	27.973 5	27.973 1	0.000 4
4	27.138 5	26.892 0	0.246 5	26.197 1	26.196 0	0.001 2	27.434 9	27.430 0	0.004 9	27.434 9	27.430 2	0.004 7
5	26.614 2	26.366 0	0.248 2	25.691 8	25.688 0	0.003 7	26.896 0	26.897 0	-0.001 0	26.896 0	26.897 3	-0.001 3
6	26.072 7	25.836 0	0.236 7	25.168 2	25.167 0	0.001 0	26.357 3	26.354 0	0.003 3	26.357 3	26.354 3	0.003 0
7	25.564 3	25.318 0	0.246 3	24.695 8	24.692 0	0.004 1	25.818 6	25.816 0	0.002 6	25.818 6	25.816 4	0.002 2
8	24.990 4	24.782 0	0.208 4	24.138 6	24.148 0	-0.009 5	25.279 8	25.278 0	0.001 8	25.279 8	25.278 4	0.001 4
9	24.481 8	24.254 0	0.227 8	23.633 3	23.630 0	0.003 4	24.741 0	24.740 0	0.001 0	24.741 0	24.740 5	0.000 5
10	23.940 9	23.724 0	0.216 9	23.110 4	23.110 0	0.000 6	24.202 4	24.198 0	0.004 4	24.202 4	24.197 6	0.004 8
11	23.415 6	23.197 0	0.218 6	22.604 0	22.601 0	0.003 2	23.663 6	23.660 0	0.003 6	23.663 6	23.659 6	0.004 0
12	22.875 1	22.668 0	0.207 1	22.081 5	22.081 0	0.000 5	23.124 8	23.122 0	0.002 8	23.124 8	23.121 7	0.003 2
13	22.349 4	22.141 0	0.208 4	21.574 8	21.572 0	0.003 0	22.586 1	22.584 0	0.002 1	22.586 1	22.583 7	0.002 3
14	21.809 2	21.612 0	0.197 2	21.052 6	21.052 0	0.000 3	22.047 3	22.046 0	0.001 3	22.047 3	22.045 8	0.001 5
15	21.272 2	21.080 0	0.192 2	20.538 3	20.536 0	0.002 8	21.508 5	21.508 0	0.000 5	21.508 5	21.507 8	0.000 7
α_y		7.1°			14.5°				7.23°			14.98°

3.2 $|\varphi_y| > \theta$

设波束角为 10° (半波束角 5°),海底倾斜角 $\alpha = 15^\circ$,测线方向与水深梯度方向的夹角 $A = 60^\circ$,由测深数据得到的海底视倾斜角 $|\varphi_y| > \theta$ 。两种模型的处理结果见表 2。

从表 2 可看出,当 $|\varphi_y| < \theta$ 时,改进模型能够得到更为精确的海底倾斜角。利用其结果计算得到的海底倾斜角值与真实海底倾斜角的差值

(0.5°)远远小于与原有模型的差值(7.9°),改正量由 dm 级提高到 mm 级。由此得到的改正值更接近真实水深,说明改进模型比原有模型更有效,能够较好地消除波束角效应改正的方向性影响。当 $|\varphi_y| > \theta$ 时,利用结果计算得到的海底倾斜角值与真实海底倾斜角的差值(0.02°)也远远小于与原有模型的差值(7.77°),但两种模型的改正量是一样的。由文献[1]中的改正模型可得知,当

$|\varphi_\gamma| > \theta$ 时, 计算得到的 $|\alpha_\gamma| > \theta$, 此时波束角改正模型中系数 $k = \cos\theta$, 其值与 α_γ 无关, 故在此情况下的二者的改正量是相同的, 此时水深值与真实值的差值很小。在现实情况中, 海底倾斜角一般都小于半波束角^[3,6], 且在同一海底, 存在夹角 A 会改变海底视倾斜角 φ_γ , 若不考虑 A 的作用, 将会影响 α_γ 的值, 降低改正精度。所以在测量海底时, 应尽量沿水深梯度方向布设测线。

4 结 语

本文讨论了波束角效应方向性对测深值的影响, 其带来的失真量级能达到水深值的 0.5%~1% 左右, 会严重影响到水深测量的精度。本文构造了顾及方向性的海底倾斜角解算模型, 计算时顾及了测线方向与水深梯度方向存在夹角时对改正量的影响, 能够求得精确的海底倾斜角, 基本消除了测线方向性所带来的改正误差。当波束角、海底倾斜角和测线方向与水深梯度方向夹角较大时, 效果尤其明显。

为了准确地探测海底以及进行波束角效应改正, 对于以前测量过的海区, 应该以最新海图和原

始测量资料为参考, 测线按水深梯度方向布设。

参 考 文 献

- [1] 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, 2003
- [2] 彭光宇. 宽波束回声测深仪测量水深的改正问题[J]. 海洋测绘, 1985, 5(3): 19-23
- [3] Lachapelle G. Hydrographic Surveying Viewgraphs [M]. Canada: The University of Calgary, 1996
- [4] Chen Yongqi, Liu Yanchun. Corrections for the Seabed Distortions Caused by the Angular Beam width of Echo Sounders [J]. The Hydrographic Journal, 1997, 84(4): 15-19
- [5] Chen Yongqi, Liu Yanchun. Improvement of Accuracy and Reliability of Hydrographic Survey in Near Shore Water and Harbor Areas [R]. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 1996
- [6] Ingham A E, Abbott V J. Hydrographic for the Surveyor and Engineer [M]. London: Blackwell Scientific Publications, 1992

第一作者简介: 邹永刚, 博士生, 研究方向为海洋测深数据处理。
E-mail: zyg-dljy@163.com

Correction for the Directivity of Beam Width in Bathymetry

ZOU Yonggang¹ LIU Yanchun¹ XIAO Fumin¹ XIA Wei¹

(1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, 667 Jiefang Road, Dalian 116018, China)

Abstract: The direction of beam width-effect has a significant influence in bathymetry. The slope angle of seabed is the key problem of the beam width-effect correction in bathymetry. Based on the theoretic analysis of beam-width effect, a slope angle calculation model was proposed, which considers the direction of survey lines. The results of numeric simulation in different headings show that the model is valid and could get the most accurate slope angle when the survey line heading is the depth gradient direction.

Key words: bathymetry; beam-width effect; seabed slope angle calculation; direction

About the first author: ZOU Yonggang, Ph.D candidate, majors in hydrographic sounding data processing.

E-mail: zyg-dljy@163.com