

图3 多波束条带测深仪系统框图

反映在船的摇摆角度中,因此,我们选用了TSS335涌浪滤波器,对船的横摇、纵摇、升沉进行了实时补偿。

定位单元,采用DGPS每秒接收一组经纬度数据,与罗经测得的船的航向共同提供系统的定位数据。DGPS输出的大地坐标的误差直接影响深度点的水平位置精度,因此,在测量中必须采用测量精度允许的DGPS和罗经作为定位单元。

多波束测深系统采用不同的海底回波信号时延检测方法。目前大多利用相位和能量两种检测法。相位检测法是检测接收波束的入射角度和相位,能量检测法是检测波束的射程。无论哪种方法,其测量计算误差都对波束点的水深和水平位置产生影响。这两种方法相比,从原理上,能量检测方法在中央附近波束测量精度较高;相位检测法在边缘波束测量精度较高,这两种方法对多波束测量精度的影响与海底底质、地形及海况有关。因此,本系统采用4种能量检测法,以尽量减小海底变化引起的误差,提高检测估计的精度。

在整个的测量过程中,声速剖面的测量误差对测深的精度影响最大。波束传播射线的弯曲随时间地点、海况而不断变化,由其变化曲线可知,它不仅影响测量波束点的水深,也影响水平位置,因此,在测量中,必须采用实时实地测量的声速剖面参与计算,且表层声速测量需特别注意。

数据后处理及成图系统通过声线修正、涌浪修正、潮位吃水修正、对高密度数据进行筛选,剔除粗大误差,进行图形处理等数据处理,最终给出成果图。本文在多波束测深系统成果图测深数据的基础上进行误差分析,采用了深度的静态精度、相对精度和绝对精度的评估方法。

2 静态精度评估方法

静态精度评估方法就是使系统的声纳基阵处于某点固定的静态状态,或在实验室水池中,或使测量船固定在水面上某一点,进行相同位置已知深度的多波束连续测量,对相同波束相同位置的水深数据做数学统计。它是评定精度的一种简单方法。在误差理论中,这符合同一测量条件下,对同一对象多次重复测量的误差统计条件,因此,可以采用常规误差统计分析理论。

设 H_i ($i=1, 2, \dots, n$) 表示某波束的各次深度测量值,共测量 n 次; \bar{H} 表示该波束深度的真值,那么

$$\bar{H} \approx E[H_i] = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad n \rightarrow \infty \text{时}$$

$$\text{该波束的标准差为} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2}{n}}$$

如果用相对误差 δ 来表示设备的设计指标,则有

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{H}} \times 100\%$$

静态精度评估本质上是一种系统稳定性的试验,其结果反映了系统深度的重复测量精度,用来评价声纳测深系统本身的水深测量精度。但它无法暴露整个系统各误差源引起的水深和位置误差,因此它是有限项误差评估的方法。

3 相对精度评估方法

相对精度评估方法是通过一定的规划测线的测量,确定系统水深测量精度的方法。这种方法是多波束测深系统自身的测量数据间进行的精度评估,可以确定除了系统偏差外的综合误差,它是一种多波束测量水深精度的有效评估方法。

由于多波束测深系统的一些传感器误差对测量水深的影响自中央波束向边缘波束增加,即中央波束精度明显高于边缘波束精度,因此,进行中央波束与两侧其他波束水深偏差的对比统计是反映影响波束水深精度各项因素综合误差的有效方法。

一般选择海况良好的天气,试验海区没有突变

地形,坡度较缓。测线规划原则是布设几条平行的主测线,关键是测线间距要达到条带宽度的50%重叠。也就是,让相邻测线的边缘波束与中央波束更接近,再布设两条左右的检查线与主测线垂直。如图4示,测量后进行数据后处理及成图。

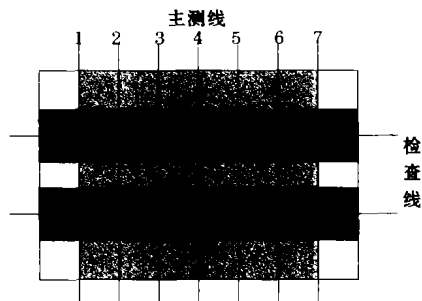


图4 相对精度评估法的交叉重叠的测线布设示意图

误差估计的方法如下:

(1) 选取同测点不同主测线的数据组进行水深的误差统计

设 m_i, n_i , ($i=1, 2, 3, \dots, k$) 分别表示两主测线各自的水深,并取 k 个测点, ΔH_{mn} 和 σ_{mn} 分别表示两测线水深的平均偏差和标准差估计,根据方差估计的 Bessel 公式,有

$$\Delta H_{mn} = E[m_i - n_i] = \frac{\sum_{i=1}^k (m_i - n_i)}{k}$$

$$\hat{\sigma}_{mn} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k \Delta H_{mn}^2}{2k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (m_i - n_i)^2}{2k}}$$

(2) 选取同测点主、检测线的数据组进行水深的误差统计

设 m_i, c_i , ($i=1, 2, 3, \dots, l$) 分别表示主、检测线各自的水深,并取 l 个测点, ΔH_{mc} 和 σ_{mc} 分别表示两测线水深的平均偏差和标准差估计,同上原理,根据方差估计的 Bessel 公式,有

$$\Delta H_{mc} = E[m_i - c_i] = \frac{\sum_{i=1}^l (m_i - c_i)}{l}$$

$$\hat{\sigma}_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l \Delta H_{mc}^2}{2l}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (m_i - c_i)^2}{2l}}$$

(3) 选取同测点所有水深数据进行水深均值的误差统计

设 h_{ij} , 其中 $i=1, 2, 3, \dots, l$ 表示测点数, j

$=1, 2, 3, \dots$ 表示同测点的水深数据数目, \bar{H}_i 表示某测点的水深均值,有

$$\bar{H}_i \approx E[h_{ij}] = \frac{\sum_{j=1}^j h_{ij}}{j-1}, \text{ 为有限次测量}$$

设 H_{\max}, H_{\min} 分别为同测点水深数据均值的最大值和最小值,有

$$\bar{H}_{\max} = \max(\bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{H}_3, \dots, \bar{H}_l)$$

$$\bar{H}_{\min} = \min(\bar{H}_1, \bar{H}_2, \bar{H}_3, \dots, \bar{H}_l)$$

根据 IHO S-44 标准,分别计算最大和最小误差限差

$$\sigma_{\max} = \sqrt{a^2 + (b \cdot \bar{H}_{\max})^2}$$

$$\sigma_{\min} = \sqrt{a^2 + (b \cdot \bar{H}_{\min})^2}$$

那么, (1)、(2) 计算的标准差估计应满足

$$\sigma_{\min} \leq \hat{\sigma} \leq \sigma_{\max}$$

以上计算的是几种情况下满足 95% 置信度的标准差,从而获得了水深测量的相对精度的综合评估。

4 绝对精度评估方法

由于多波束测深系统采用了波束开角小于 3° 的窄波束技术,因此,其中央波束的精度应高于单波束测深精度,在技术上,不能采用由单波束系统来检验多波束系统的方法。绝对精度评估方法是对多波束测深系统的系统偏差和外侧波束精度的分析和评估。

为了确定系统偏差,选择海底地形较平坦的区域,同时进行单波束测深与多波束测深测量,消除声速变化和定位误差的影响,并与中央波束对比,统计分析确定水深的系统偏差,可以求出多波束测深系统因使用不同声学原理和信号处理方法而带入的系统偏差。

在完成系统偏差评估之后,应进行系统全部波束的精度评估。使多波束测深系统与高精度的测深仪同时测量同一测区,由后者的测量数据建立高精度的“参考地形模型”,使多波束测深系统的每个波束与参考地形模型对比后,计算出水深的平均误差和标准偏差,由此来评估多波束测深系统水深精度。

在 1999 年 3 月的南海试验中,也在浅水区和深水进行了绝对精度的检验。即在多波束测量的同

时,使用高精度的双频单波束测深仪进行测量,并分别成图进行精度评估,对比结果见 5。结果表明,系统完全符合 95%有效测量的我国海道测量标准,达到设计指标。

5 海试数据处理结果

1997 年 10 月我国第一台多波束条带测深仪在东海海域平均深度约 32.6 m、抛锚进行了静态试验测量。在海况良好、海底相对平坦的情况下,如图 5 示,测量深度数据共统计了 600 个测量周期。误差统计首先尽量消除系统误差后,根据“ 3σ 准则”去除粗大误差 32 组数据,有效测量 99.67%,计算各波束的均值、标准差及相对误差,结果如表 1,如图 6 所示。表明重复测量的相对误差满足设备深度设计指标。

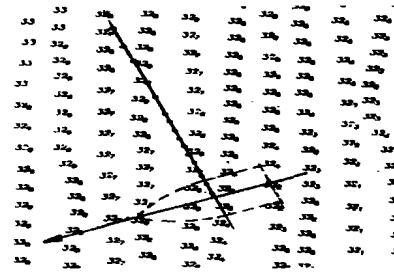


图 5 东海静态试验海区规划图

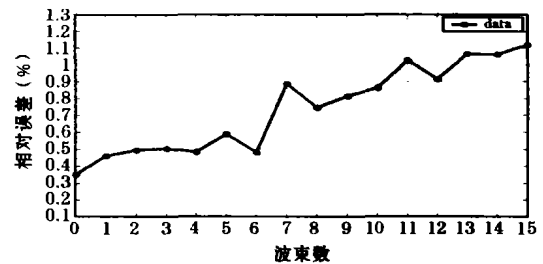


图 6 东海静态试验深度相对误差曲线

表 1 各波束的均值、标准差及相对误差

波束号	0#	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
深度均值 (m)	32.69	32.99	32.97	32.89	33.07	33.06	32.79	33.11
标准差 (m)	0.165 1	0.201 8	0.213 4	0.215 9	0.209 7	0.244 7	0.207 9	0.343 5
相对误差 (%)	0.352 1	0.460 1	0.495 5	0.504 4	0.482 8	0.588 8	0.481 6	0.886 4
波束号	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#
深度均值 (m)	33.30	32.88	33.28	33.39	32.72	33.53	33.34	33.05
标准差 (m)	0.298 6	0.317 7	0.337 0	0.392 5	0.348 9	0.406 6	0.403 0	0.419 8
相对误差 (%)	0.746 6	0.814 2	0.862 3	1.025 8	0.973 5	1.063 4	1.058 9	1.119 0

1999 年 3 月,多波束条带测深仪在我国南海海域进行了海上试验,试验海区选择浅海和深海两处。浅海区地形较平坦,平均深度约 102 m,在面积约为 20 km² 的区域设计了 8 条主测线和 3 条检查线。深海区地形稍有起伏,平均深度约 900 m,在面积为

4 km² 的区域内,布设了两条间距小于 50% 测幅的测线。测量后进行了数据处理及拼图,分别在成果图上进行了浅水区主检深度、相邻测线深度及深水区同测点的深度精度评估,结果如表 2。

表 2 主检深度、相邻测线深度及深水区同测定的深度评估

单位: m

水深测量	相对精度评估				绝对精度评估 (多波束与双频)			
	浅海测线		深海测线		浅海测线		深海测线	
	主检	相邻	主检	相邻	系统偏差	参考地形	系统偏差	参考地形
偏差	1.684	1.424	...	7.231	1.81	1.720	3.0	6.222
标准差	1.308	1.121	...	6.597	...	1.278	...	5.916

如表 2 可以看出,系统达到了 95% 的有效测量,精度符合我国海道测量标准,并满足了设计任务书的要求。而且,系统偏差与测量深度有关,这

是多波束测深系统从原理上不同于单波束测深仪的表现。

6 结束语

多波束测深系统静态精度、相对精度和绝对精度的系统精度评估方法,分别从系统稳定性、自符合性和系统误差等方面考核了由所有误差源的综合误差对系统精度的影响,是对多波束测深系统的全面评价。因此,经过这3种方法的精度评估,证明

了多波束条带测深系统是符合海道测量标准的测量仪器。

由于每次测量的环境条件不同,系统各误差的分布及影响也不同,测量数据的质量将随之有较大的差异,为了能对各次系统测量的整体质量水平有一个与海道测量标准相应的定量概念,可以将相对精度评估方法作为测量数据的质量评价方法。

参考文献:

- [1] 哈尔滨船舶工程学院水声研究所. 条带测深仪技术方案报告. 1993.
- [2] 哈尔滨工程大学水声研究所. 条带测深仪技术鉴定报告, 1998.
- [3] 哈尔滨工程大学水声研究所. 条带测深仪备忘录, 1999.
- [4] 陈非凡著. 多波束条带测深仪技术的研究. 哈尔滨工程大学博士后出站报告, 1998.
- [5] 李家彪著. 多波束勘测原理技术与方法. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [6] 贾沛璋著. 误差分析与数据处理. 北京: 第一版. 国防工业出版社, 1992.
- [7] 肖明耀著. 误差理论与应用. 北京: 计量出版社, 1985.
- [8] 冯师颜著. 误差理论与实验数据处理. 北京: 科学出版社, 1964.

The Evaluation method of the Precision of the Multi-beam Bathymetric System

WU Ying-zi¹, XU Xin-sheng¹, QIAO Li-zheng²

(1. College of Underwater Acoustical Engineering of Harbin Engineering University, Harbin, 150001;

2. Naval Navigation Guarantee Department, Yianjin, 300111, China)

Abstract: On the basis of analyzing the error source of the multi-beam bathymetric system, the authors discuss the evaluation method of the system precision, including static precision, relative precision, and absolute precision. The static precision evaluation method is to measure the error at the same depth under the static condition of the system; the relative precision evaluation method is to measure the error of the overlap points by deploying various overcrossing and overlapping lines; absolute precision evaluation method is to measure the same area using high precision bathymeter in order to test the precision of multi-beam bathymetry by referring to it's geography model at the same time. According to the error theory, the three methods identify integrated error of error sources from the viewpoint of system stability, self-coincidence and system error, respectively, and they are effective methods to test whether this system accords with the standards of channel measuring. We provide important experiment data and validation method of the equipment.

Key words: Multi-beam bathymetric; Static precision; Relative precision; Absolute precision; Self-coincidence; System error

