

一种多波束换能器横摇角度偏差二次校准方法

孙文川¹ 暴景阳¹ 金绍华¹ 肖付民¹ 张志伟¹

¹ 海军大连舰艇学院海洋测绘系, 辽宁 大连, 116018

摘要:针对多波束测量换能器校准不完善问题,提出了一种基于加权最小二乘的多波束换能器横摇偏差二次校正方法。基于平坦海底的多波束回波数据,采用加权最小二乘法拟合海底地形,进而计算海底倾角,即可得到换能器横摇偏差角度,将得到的角度偏差作为修正值,对测船模型中换能器横摇偏差进行校正。实验结果表明,较之改正前,校正后的水深数据在条带交叉区域具有较小的不符值,证明校正后的多波束水深数据具有更高的精度。

关键词:横摇偏差; 最小二乘; 校正; 水深误差

中图法分类号:P229

文献标志码:A

在利用多波束进行水深测量时,多波束测深系统声学换能器安装的几何误差将影响测深精度和位置精度^[1,2],为了保证多波束测深的精度,在测量过程中必须进行严格的各项内部影响因素的校正和各项外部影响因素的改正^[3]。参数校正是指多波束系统为消除系统内部的固有误差而引入的误差改正,并通过系统的参数设定,达到消除内部误差的目的^[4-7]。

换能器在安装时存在相对于船体的左右倾斜,称为横摇角度偏差,其会与船体的横摇等因素产生耦合,共同影响波束在水体中的初始发射角,进而对水深数据在地理坐标系下的坐标产生影响。当横摇角度偏差存在时,多波束各条带水深数据会出现系统性的倾斜,引起海底地形探测失真^[8-9];图 1 为典型的横摇角度存在偏差的情形,当海底平坦时,各测线在 CARIS 中进行子区编辑时会出现航向相同的条带水深具有相同的倾角,航向相反的条带水深出现反向的倾角。刘方兰等分析了横摇角度偏差对水深的影响,并指出横摇角度误差不但产生的水深误差大,而且随着波束角、纵倾横摇角度的增大而增加。当波束角大于 30°时,横摇角度误差引起的水深相对误差已经超过了 0.1%^[8]。文献[9-10]分析了多波束测深系统换能器安装校准的原理和方法及在海底地形测量中的应用。现有的基于软件的横摇偏差校准方法对操作人员判断经验的依赖性较强^[2];而采用

剖面重合法进行横摇角度偏差校正又需要对假定的绝对水平的海底进行一条测线的往返测量^[8]。

针对多波束换能器校准不完善问题,本文基于实测多波束条带水深数据,选取相邻航向相反的条带水深数据,采用加权最小二乘法拟合平坦海底,求出换能器横摇角度偏差,进而将得到的修正结果输入 CARIS 船文件中,完成对换能器横摇角度偏差的校正。实验结果表明,该方法对多波束换能器横摇角度偏差进行二次校正,解决了多波束测量换能器校准不完善问题。经过统计,经校准后的多波束水深数据在主测线与检查线重叠区具有更好的一致性。

1 换能器横摇偏差引起海底倾斜

图 1 所示为某测区内 5 个条带的后视剖面图,从中选取上层较为典型的 A、B、C 三个条带,并对其航向进行标记(条带 A、C 的航向为垂直纸面向外,条带 B 的航向为垂直于纸面向内),可以看出,航向相同的条带(条带 A、C),其水深横断面具有相同的倾斜方向,而航向相反的条带(条带 A、B)则呈现出反方向的倾斜,据此可判断图 1 为典型的因换能器横摇偏差(在平坦海底,换能器纵摇偏差的对水深的影响相对较小,换能器横摇偏差产生的水深误差较大^[8],因此,本文只考虑换能器横摇偏差对水深的影响)改正不彻底引起的“海

底倾斜”^[14]。

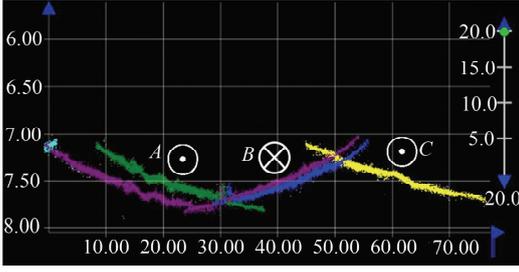


图 1 换能器横摇偏差引起的海底倾斜
Fig. 1 Seabed Slope Caused by Roll Bias

2 多波束换能器横摇偏差校正最小二乘法

2.1 计算原理

如图 2 所示,将图 1 中实测的 B、C 条带水深进行模型化,图中, S 为真实海底, S' 为 B 条带因换能器横摇偏差改正不完善引起的偏差海底, S'' 为条带 C 对应的偏差海底;由于条带 B 与条带 C 相邻且航向相反,其各自得到的偏差海底与真实海底形成的夹角 θ 大小相同,方向相反。由此可以得出,两偏差海底相对于水平方向倾角的差值即为两倍的换能器横摇偏差。

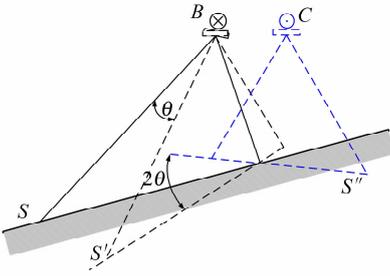


图 2 换能器偏差计算原理图
Fig. 2 Calculation of Roll Bias

由以上分析,可得到换能器横摇偏差的计算公式为:

$$\theta_{\text{Roll}} = \frac{|\arctan k_{S'} - \arctan k_{S''}|}{2} \quad (1)$$

式中, $k_{S'}$ 和 $k_{S''}$ 分别为偏差海底 S' 和 S'' 相对于水平方向的斜率; θ 为换能器横摇偏差改正。

2.2 最小二乘拟合求取偏差海底倾角

地形拟合原理如图 3 所示。为了得到偏差海底与水平方向的夹角,选择测线经过的一段平坦海底,将多波束每 ping 水深数据在其垂直航向的平面内进行最小二乘直线拟合,其公式如下^[11-13]。

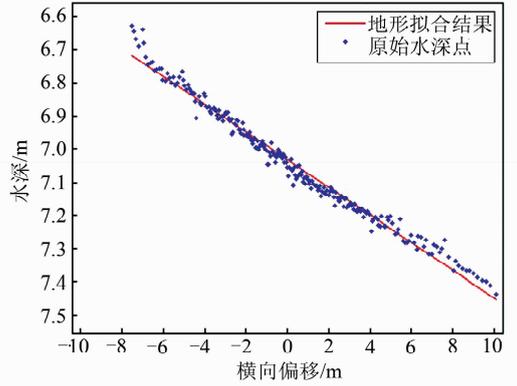


图 3 地形拟合原理图

Fig. 3 Calculation of Terrain Dip by the Least Squares

将平坦海底描述为线性函数:

$$y = kx - b \quad (2)$$

将式(2)写成矩阵形式,考虑到水深的偶然误差,则有:

$$V = B\hat{X} - L \quad (3)$$

其中, $L = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T$, $\hat{X} = [k \ \hat{b}]^T$,

$$B = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T,$$

$$\hat{X} = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (4)$$

式中, y_i 为 ping 中各波束对应的水深; x_i 为各波束对应的横向偏差; \hat{X} 为待估参数; V 为残差向量。

2.3 顾及微地形影响的海底倾角计算

在真实的海底环境中,不存在绝对平坦的海底。起伏的海底微地形对计算海底倾角产生影响,为了准确地捕获多波束条带扫测过海底的倾角,削弱因微小地形起伏给计算带来的干扰,在此提出一种基于局部倾角的水深点配权方案,过程如下。

1) 令 $P = I$, 用最小二乘法根据式(4)计算初始海底倾角 K_0 ;

2) 计算海底各水深点所在位置的局部海底倾角

$$k_i = \begin{cases} (y_2 - y_1)/(x_2 - x_1), & i = 1 \\ (y_i - y_{i-1})/(x_i - x_{i-1}), & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

3) 计算用于线性拟合的水深点权重

$$P = \text{diag}\left(\frac{1}{(k_1 - K_0)^2}, \frac{1}{(k_2 - K_0)^2}, \dots, \frac{1}{(k_n - K_0)^2}\right) \quad (6)$$

4) 根据 $\hat{X} = (B^T P B)^{-1} B^T P L$ 计算 K_i 作为新的海底倾角带入式(6)中,重复步骤 2)~步骤 4),

设定终止条件 $|K_i - K_{i-1}| < 0.001$, 当满足终止条件时, 结束迭代, 得到海底倾角。

如图4所示, 蓝色圆点为一 ping 多波束原始水深点, 其整体趋势较为平坦, 但在该 ping 数据的左侧出现了小尺度的微地形变化; 图中红色虚线为直接采用最小二乘法拟合的海底, 结合图4和最小二乘拟合原理可以看出^[11-13], 当海底出现小尺度的微地形起伏时, 拟合结果受到起伏的微地形水深的干扰, 得到海底斜率 $k_1 = 0.049$, 不能有效地反映海底总体倾角; 图中黑色实线为采用加权最小二乘法迭代计算得到的海底地形拟合结果, 其斜率 $k_2 = 0.038$, 可以看出: 由于顾及了微地形的影响, 在迭代过程中, 拟合的海底地形逐渐向平坦海底进行收敛, 大大削弱了微地形水深对捕获海底倾角所造成的误差, 得到的海底倾角拟合结果更为有效。

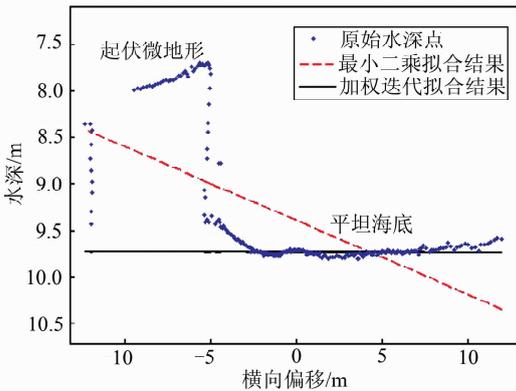


图4 加权迭代拟合消除微地形影响
Fig. 4 Inhibitional Effect Of Iterative Weight to the Micro Topography

3 实例计算

3.1 实验概况

图5为某一次多波束作业所有测线布设情况, 图中左侧为测线分布情况, 右侧为所选子区放大图, 子区共包含5个条带的的数据(024728、031641、022653、051214、021117)。首先对测区所有测线进行水位改正和声速剖面改正, 改正后对所有测线进行融合; 对选取的子区数据进行子区编辑, 其后视图如图1所示, 图中条带A、B、C分别对应子区中的测线031641、022653、021117。

此次作业所采用测船的配置参数如表1所示, 表中记录了作业人员进行多波束测量前, 通过传统方法得到的换能器各项校准参数。

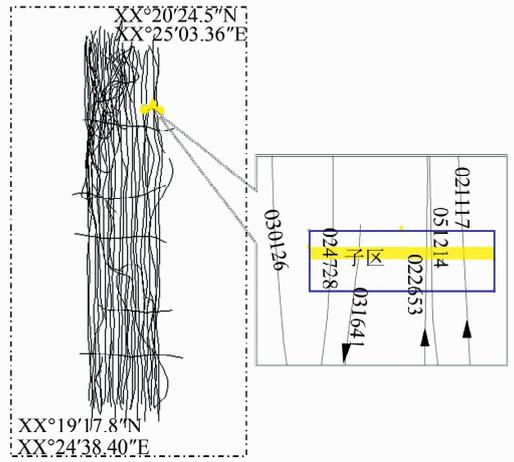


图5 子区测线分布图

Fig. 5 Lines Distribution in Subset

表1 换能器校准参数

Tab. 1 Parameters of Swath Calibration

参数	值
时间延迟/s	-0.150
X轴偏差/m	0.000
Y轴偏差/m	0.000
Z轴偏差/m	0.000
纵向偏差/(°)	1.100
横摇偏差/(°)	1.110
艏向偏差/(°)	1.440

3.2 计算横摇偏移改正值

图1中, 条带B和C航向相反, 其对应条带水深出现反向倾斜, 采用§2.2中方法分别计算其斜率, 得 $k_B = 0.01697$ 、 $k_C = -0.01663$, 最后通过式(1)计算 $\theta_{Roll} = 0.9624^\circ$ 。

将以上计算的横摇偏差修正值 θ_{Roll} 与船文件原始设定的横摇偏差 θ_0 相叠加, 得到新的换能器横摇角度偏差为 $\theta_{new} = -\theta_{Roll} + \theta_0 = -0.9624^\circ + 1.110^\circ = 0.1476^\circ$, 将其作为新的换能器横摇角度偏差改正值输入船文件, 对测区数据进行处理, 得到处理后子区条带后视图如图6所示。

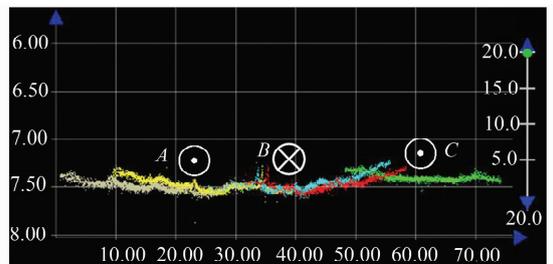


图6 换能器横摇偏差改正后条带后视图

Fig. 6 Rear View of Swath After Roll Bias Calibration

对比图1和图6可以看出, 经重新校正后的条带水深数据, 明显地消除了因换能器横摇角度

偏差校准不完善引起的海底系统性倾斜;在条带重叠区域,水深能够较为平稳的过度(图 6 中因条带自身弯曲造成的条带间水深差异与声速改正误差有关^[15-18]),有效地缩小了两条带间边缘波束的差异。

3.3 重叠区不符值统计

为了验证本文方法的有效性,选取测区内一块主测线与检查线的条带交叉区域,以检查线水深点为准,将主测线水深数据内插成 100×100 规则网格(交叉区域水深在 7.80 m 左右),分别比较换能器横摇偏差校正前后对应网格水深点的不符值,其统计结果如表 2 所示。

表 2 两条带交叉区域不符值统计/m

Tab. 2 Statistics Comparison of Depth Error of Before and After Correction/m

差值	最大值	最小值	平均值	中误差
改正前	0.68	-0.71	0.05	0.28
改正后	0.32	-0.34	0.04	0.11

如表 2 所示,采用本文方法计算得到的换能器横摇偏差校正后的水深数据,其交叉区域不符值统计结果明显优于改正前的结果,证明了采用本文方法进行换能器横摇偏差校正能够有效地削弱因换能器横摇偏差产生的系统误差。

4 结 语

在分析了换能器安装横摇角度偏差对海底地形影响的基础上,介绍了现有解决的方法;针对传统方法存在的局限性,基于实测多波束条带水深数据,提出了换能器横摇角度偏差校正的最小二乘方法;结果表明:经进一步校正后,得到的条带水深数据明显地消除了因换能器横摇角度偏差校准不完善引起的海底系统性倾斜,通过主测线与检查线重叠区域水深点不符值的统计证明了该方法能够有效地削弱因换能器横摇角度偏差引起的条带水深数据系统误差,提高了多波束水深数据的精度。

参 考 文 献

[1] Ruan Rui, Shao Haitao. Detection and Analysis of Multibeam Bathymetric Internal System Parameters [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2001, 21(4): 51-54(阮锐, 邵海涛. 多波束测深系统内部参数的检测与分析[J]. 海洋测绘, 2001, 21(4): 51-54)

[2] Dong Qingliang, Wang Weiping. EM1002 Multi-

beam Sounding System and its Parameter Correcting [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(5): 23-26(董庆亮, 王伟平. EM1002 型多波束测深系统及参数校正[J]. 海洋测绘, 2004, 24(5): 23-26)

[3] Li Jiabiao, Zheng Yulong, Wang Xiaobo, et al. The Main Affecting Factors of Multibeam Bathymetry Accuracy [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2001, 21(1): 26-32(李家彪, 郑玉龙, 王小波, 等. 多波束测深及影响精度的主要因素[J]. 海洋测绘, 2001, 21(1): 26-32)

[4] Li Jiabiao. Principles Multibeam Survey Techniques and Methods[M]. Beijing: Ocean Press, 1999(李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1999)

[5] Zhao Jianhu, Liu Jingnan, Yang Fanlin. Weaken Systematic Error in Depth Data of MES[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(5): 394-397(赵建虎, 刘经南, 阳凡林. 多波束测深数据系统误差的削弱方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(5): 394-397)

[6] Zhu Qing, Li Deren. Error Analysis and Processing of Multibeam Soundings [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1998, 23(1): 1-4(朱庆, 李德仁. 多波束测深数据的误差分析与处理[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(1): 1-4)

[7] Gou Fabin, Zhou Xinghua, Chen Yilan. Analysis On The Distortion Of Mbes Data [J]. *Hydrograph Ic Surveying and Charting*, 2008, 28(1): 59-61(郭发滨, 周兴华, 陈义兰. 多波束测深数据出现失真的因果分析[J]. 海洋测绘, 2008, 28(1): 59-61)

[8] Liu Fanglan, Zhang Zhirong, Yu Ping. The Methods Correcting Roll and Pitch Biases of Multibeam Bathymetric System [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2004, 34(4): 621-624(刘方兰, 张志荣, 余平. 多波束系统横摇、纵倾参数的校正方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 621-624)

[9] Zhang Haitao, Tang Qiuhua, Zhou Xinghua, et al. Installation and Calibration Analysis of the Multibeam Echo Sounder Transducer [J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(1): 102-107(张海涛, 唐秋华, 周兴华, 等. 多波束测深系统换能器的安装校准分析[J]. 海洋通报, 2009, 28(1): 102-107)

[10] Yang Fanlin, Lu Xiushan, Li Jiabiao, et al. Correction of Imperfect Alignment of MRU for Multibeam Bathymetry Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(7): 816-820(阳凡林, 卢秀山, 李家彪, 等. 多波束勘测运动

- 传感器偏移的改正方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(7): 816-820
- [11] School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University. Error Theory and Fundation of Surveying Adjustment[M]. 2nd eds. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 第2版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [12] Liu Yanchun. Space Structure and Data Processing in Marine Sounding [M]. BeiJing: The Mapping Publishing Company, 2003 (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)
- [13] Liu Yanchun. Space Structure and Data Processing in Marine Sounding[D]. Wuhan: Wuhan Technology University of Surveying and Mapping, 1998(刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1998)
- [14] Dong Qingliang, Cui Minxun, Zhou Junhua, et al. Analysis and Processing of Transform Geography of Convex and Cave in Multibeam Sounding System [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(1): 32-35(董庆亮, 崔民勋, 周君华, 等. 多波束测深系统中凹凸变形地形的分析与处理[J]. 海洋测绘, 2011, 31(1): 32-35)
- [15] Dong Qingliang, Han Hongqi, Fang Zhaobao. The Influence of Sound Speed Profiles Correction on Multibeam Survey [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(2): 56-58(董庆亮, 韩红旗, 方兆宝, 等. 声速剖面改正对多波束测深的影响[J]. 海洋测绘, 2007, 27(2): 56-58)
- [16] Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Multibeam Bathymetric Survey and Image Processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(赵建虎, 刘经南. 多波束测深及图像数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008)
- [17] Cartwright D C. Multibeam Bathymetric Surveys in the Fraster River Delta, Managing Severe Acoustic Refraction Issues[D]. New Jersey, USA: University of New Brunswick, 2003
- [18] Kammerer E. New Method for the Removal of Refraction Artifacts in Multibeam Echosounder Systems[D]. New Jersey, USA: University of New Brunswick, 2000

A Re-calibration Method for Roll Bias of Multi-beam Sounding System

SUN Wenchuan¹ BAO Jingyang¹ JIN Shaohua¹ XIAO Fumin¹ ZHANG Zhiwei¹

¹ Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

Abstract: In this paper, a method of re-calibration for roll bias of multi-beam sounding system is proposed to solve the faltiness of multi-beam sunding transducer calibration. Based on the sounding data of smooth terrain, the roll bias angle of transducer, the dip of terrain, can be calculated by using the method of weighted least squares. The obtained bias angle can be used for roll bias correction of transducer in vessel model. The conclusion shows that the corrected bathymetry data in the overlapping area of adjacent two swaths is more consistent than before, the accuracy of multi-beam bathymetry data has been significantly improved.

Key words: roll bias; weighted least squares; calibration; sounding error

First author: SUN Wenchuan, PhD, specializes in hydrographic surveying data processing. E-mail: sunwech1986@163.com

Foundation support: The Natonal Natural Science Foundation of China, No. 41074002; the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program), No. 2009AA121402-4.