

多波束与单波束测深数据的融合处理技术

黄谟涛,翟国君,欧阳永忠,刘雁春,陆秀平,王克平
(天津海洋测绘研究所,天津 300061)

Data Fusion Technique for Single Beam and
Multibeam Echosoundings

HUANG Mo-tao, ZHAI Guo-jun, OUYANG Yong-zhong,
LIU Yan-chun, LU Xiu-ping, WANG Ke-ping
(Tianjin Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China)

Abstract Based on an analysis of the error sources in multibeam echosounding system, a method of compensating systematic errors in multibeam survey, through the data fusion of neighboring swaths, is proposed in this paper. In order to improve the accuracy of overall swath, a data fusion technique for single beam and multibeam echosoundings, using single beam survey data as a control information, is then presented. Some questions involved in solving the adjustment problem, such as its feasibility and the numerical stability, are discussed in detail, and then a two-step adjustment method is suggested. Finally, a practical survey data set from a multibeam echosounding system named H/HCS-017 made in our country is used as a case study to prove the efficiency and reliability of the proposed methods.

Key words single beam echosounding; multibeam echosounding; error compensation; data fusion

摘 要: 本文在全面分析和总结多波束海洋测深主要误差源的基础上,提出通过相邻条带测深数据融合处理进行多波束测深系统偏差补偿方法;并提出以单波束测深数据作为控制,进一步提高多波束测深整体测量精度的数据处理方案;详细讨论了数据融合处理中的数值解算可行性和稳定性问题,相应提出了两步平差方法。本文最后使用我国自行研制的条带测深系统实测数据验证了上述方法的有效性和可靠性。
关键词: 单波束测深; 多波束测深; 误差补偿; 数据融合

1 引 言

多波束测深是一种具有高效率、高精度和高分辨率的海底地形测量新技术。多波束测深系统自 20 世纪 70 年代问世以来,特别是最近十几年,在高性能计算机、高分辨率显示、高精度定位和各种数字化传感器以及其他相关高新技术的介入和支撑下,代表当代海洋地形地貌勘测最新研究成果的多波束测深技术不断变革,获得了极大的发展^[1~3]。与传统的单波束测深仪相比较,多波束测深系统具有测量范围大、速度快、精度高、记录数字化以及成图自动化等诸多优点。它把测深技术

从原先的点线状扩展到面状,并进一步发展到立体测图和自动成图,从而使海底地形测量技术发展到一个较高的水平。总之,多波束测深技术经过 20 多年特别是最近几年的飞速发展,其仪器设备不论是结构设计还是观测精度,都已经达到相当成熟和相对稳定的阶段,不同类型仪器之间的性能差异也越来越小。在这种新的形势下,随着多波束测深技术的普及应用及其海量观测数据的不断积累,对多波束测深数据如何实施有效的处理和管理,是当前特别值得重视和亟待研究解决的主要问题^[4]。

我国自行研制的多波束测深系统仍处于试用阶段^[5],在许多方面可望作进一步的改进和完善。在这种背景下,及时开展多波束测量成果可靠性研究显得尤为重要。

2 多波束测深误差源分析

由于多波束测深系统是由多个传感器组成的综合测量系统,因此,多波束测量误差具有显著的多源特性,与单波束测深仪相比较,多波束系统在测量过程中受到的其他误差干扰主要体现在以下几个方面:

1. 在测深系统内部,为了解决边缘波束反射信号检测存在的困难,新生代多波束测深系统在回波信号检测中除了使用传统的振幅检测方法外,又增加使用了相位检测法。这两种方法有各自不同的误差特性,相位检测误差直接影响波束入射角的计算精度;振幅检测误差则直接影响波束射程的计算精度。两项检测误差均可影响测点的水深和水平位置,且具有一定的系统性。

2. 在设备安装方面,换能器横向安装误差直接影响测深数据的准确度,使海底地形产生扭曲;换能器纵向安装误差和电罗经偏差使测点位置产生位移,前者将造成测点位置沿船迹方向位移,而后者会引起测点位置以中央波束为原点旋转。因此这些偏差对测量参数的影响往往是综合的,而且是彼此相关的。

3. 在测量参数改正方面,声速剖面测量误差使声波传播曲线产生扭曲,不仅影响测点水深值的准确性,而且改变测点的水平位置。此外,船体姿态测量误差也是影响多波束测深精度的主要因素之一。垂直参考单元中的起伏误差直接导致深度值出现偏差,而横摇和纵摇误差则与换能器横向和纵向安装误差的性质相同,既影响测深精度,

又影响测点位置精度,其误差量值与垂直参考单元观测精度有关。

综合前面的分析,不难看出,多波束测深系统多数误差源对测量参数的影响明显具有自中央波束向边缘波束增大的趋势,即在正常情况下,中央波束精度要明显高于边缘波束精度。这个事实说明,多波束系统是一种非均匀精度测量系统,而且这种非均匀性表现出比较明显的规律性。

3 数据融合处理数学模型

3.1 多波束数据内部融合处理模型

根据前面所作的误差分析,我们可以将多波束测量中的误差综合效应表示为如下形式的趋势面函数

$$\delta = F_1(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$$
(1)

或

$$\delta = F_2(x, y) = F_1(x, y) + \sum_{i=1}^n (a \cos ik_x x + d_i \sin ik_x x) + \sum_{i=1}^n (e \cos ik_y y + f_i \sin ik_y y)$$
(2)

式中, $\delta = F(x, y)$ 代表多波束测深中的系统误差; (x, y) 为测点坐标; $k_x = 2\pi/\Delta x$, $k_y = 2\pi/\Delta y$, Δx 和 Δy 分别表示测区在 x 和 y 轴方向上的覆盖范围; a, a, d, e 和 f 均为待定系数。根据式 (1) 或式 (2), 可将多波束测深数学模型表示为

$$z = z_0 + F(x, y) + \Delta$$
(3)

式中, z 代表测点水深观测值; z_0 为水深真值; Δ 为观测白噪声, 即偶然误差影响项。设 z 的改正数为 v , 则通过相邻条带重叠区域内的公共点, 可建立起如下形式的误差方程式

$$v_i^{(j+1)} - v_i^j = -F_i^{(j+1)}(x, y) + F_i^j(x, y) + (z_i^{(j+1)} - z_i^j)$$
(4)

式中, i 代表重叠区内公共点的序号; j 表示条带序号。将式 (4) 写成矩阵形式为

$$V^{(j, j+1)} = A^{(j, j+1)} X^{(j, j+1)} - L^{(j, j+1)}$$
(5)

式中, V 代表水深观测值不符值改正数向量; X 为系统误差模型的待求参数向量; A 为系数矩阵; L 为相邻条带深度观测值的不符值向量; 上标 $(j, j+1)$ 代表对应于第 j 和第 $(j+1)$ 两个相邻条带的相关值。在每个相邻条带重叠区, 均可建立起与式 (5) 相同形式的误差方程组。设整个测区的条带总数为 m , 那么误差方程组的个数即为 $(m-1)$ 。由

于相邻误差方程组拥有一半相同的待求参数,即方程组之间存在函数相关关系,因此,我们必须对所有的方程组进行联合平差处理。但是这里必须指出的是,在误差方程式(5)中,由两个观测量相减获得的不符值(L)是一种相对观测量,因此通过平差只能唯一地确定其待求参数的相对变化量,要想求得误差模型的绝对参量,必须增加必要的约束条件^[6]。

为了简化数据处理解算过程,这里提出一种近似方法来处理多波束测深数据中的系统偏差补偿问题,其基本思想是将相邻条带之间的数据融合问题分为两步处理,即首先使用条件平差法对相邻条带重叠点进行平差,根据式(4),可将条件平差模型简写为

$$B\bar{V}-L=0 \tag{6}$$

式中, \bar{V} 为包含偶然误差(Δ)和系统误差(δ)在内的改正数向量; B 为由1和-1组成的系数矩阵; L 仍为重叠点水深不符值向量。方程式(6)的最小二乘解为

$$\bar{V}=P^{-1}B^T(BP^{-1}B^T)^{-1}L \tag{7}$$

相应的协因数阵为

$$Q_v=P^{-1}B^T(BP^{-1}B^T)^{-1}BP^{-1} \tag{8}$$

式中, P 为 L 的权矩阵。虽然在每个条带内部,多波束测深为非均匀精度测量,但在条带与条带之间,测量精度可近似认为是相等的,因此,这里取 P 为单位矩阵。

根据现代测量平差理论,按式(7)求得 \bar{V} 值以后,可进一步将 \bar{V} 作为一类新型的观测量,使用与式(1)或式(2)相同的误差模型函数,对包含偶然误差和系统误差的 \bar{V} 值进行滤波处理。与前面列出的误差方程式(5)不同的是,这里只需要独立地处理每一条带在两侧重叠点处的“观测”信息(即 \bar{V} 值)。设第 j 号条带所对应的“观测”向量为 $L^j=\bar{V}^j$,误差模型待求参数向量为 X^j ,则类似于式(5),可建立相应的误差方程式如下

$$V=A^jX^j-L^j \tag{9}$$

其最小二乘解为

$$X^j=(A^{jT}P_vA^j)^{-1}A^{jT}P_vL^j \tag{10}$$

式中, A^j 和 P_v 分别代表对应于第 j 号条带的误差方程系数阵和“观测”向量 \bar{V}^j 的权矩阵。

与按照序贯平差的严密处理方法^[7]相比较,虽然从理论上讲,这里提出的两步处理法由于忽略了条带之间的误差相关性而存在一定程度的近

似性,但从应用角度考虑,近似法比严密法拥有比较明显的优势,具体体现在计算过程和计算效果两个方面,很显然,使用两步处理法可使多波束数据融合计算过程得到大大简化,条带之间可以单独处理,其误差方程也不再出现秩亏现象^[6],因此它的平差结果应当更加稳定和可靠。

3.2 多波束与单波束数据融合处理模型

在3.1中,我们提出了根据相邻条带重叠区的水深不符值来建立误差模型,进而补偿多波束测深系统偏差的两步平差方法。尽管这种处理方法能够有效地实现相邻条带之间的合理拼接,但由于相邻条带重叠区均位于两个相邻条带的边缘,仅仅使用这些区域的观测信息建立误差模型,很难全面反映整个条带测量误差的变化特性,因此,从理论上讲,上述处理方法还是欠完善的,其主要原因是条带中央区缺少必要的检核信息作控制。

为了弥补上述方法的不足,这里提出利用单波束测深仪与多波束系统中央波束同船观测的比对结果,进一步改善多波束测深系统误差补偿效果的新方案。单波束测深仪经过几十年的开发应用和改进,无论是观测精度还是工作稳定性,都已经达到相当高的水平。多波束系统由于采用了窄波束技术,其波束横向开角(一般为 $1.5^{\circ}\sim 3^{\circ}$)远小于单波束测深仪的波束横向开角(一般为 $8^{\circ}\sim 30^{\circ}$),加上中央波束没有声线弯曲影响问题,因此多波束系统中央波束的精度已经达到甚至超过单波束测深仪的精度。在这种情形下,我们完全有理由将单波束与多波束中央波束测深当作同等精度数据处理,并将两者的差异信息融入到相邻条带重叠区的不符值观测量中,一起参与多波束系统偏差补偿模型的确定。跟前面的处理方法相比较,新方案充分考虑了单波束测深仪同船观测数据的作用,但由于其计算过程仍采用完全类同于前面的两步平差方法,只是在不同解算阶段,在每个条带中央区都增加一部分对应于单波束和多波束测量比对结果的条件方程式和误差方程式,因此,单波束与多波束测深数据融合处理的数学模型与前面的多波束数据内部融合处理模型完全相同,这里不再重复列出。由于单波束与多波束数据融合处理增加了条带中央区的重复观测信息控制,把不同误差源都包罗在假定的误差模型中,因此更能体现平差模型的合理性,这一点将在本文的算例中得到进一步的验证。

4 算 例

为了验证前面提出的两种数据融合方法的有效性,本文选用我国自行研制的 H/HCS-017型条带测深系统在某海区进行试验时获得的数据进行了试算和分析。该航次共完成 8条主条带和 3条检查条带测量,主条带长度均在 6 km左右。为了节省篇幅,这里将只给出 5号至 8号共 4条主条带数据融合的处理结果,表 1首先列出 4条带水深观测数据自身的统计特性

表 1 4条带测深数据统计结果
Tab. 1 The statistics of soundings for the four swaths

条带序号	测点总数	重叠 点数	最大 值 /m	最小 值 /m	平均 值 /m	标准 差 /m
5	17 056	875	106. 7	101. 2	104. 1	1. 24
6	14 896	828	106. 5	100. 5	103. 6	1. 27
7	17 280					
8	16 400	1 016	107. 5	100. 8	104. 3	1. 43

相邻条带重叠区两组测深数据的比对统计结果如表 2所示。

表 2 相邻条带测深数据比对统计结果
Tab. 2 The statistics of sounding discrepancies between the neighboring swaths

条带序号	最大值 /m	最小值 /m	平均值 /m	均方根 /m
5	2. 75	- 3. 48	- 0. 24	1. 69
6				
7	3. 09	- 2. 55	0. 16	1. 43
8	3. 46	- 3. 49	- 0. 04	1. 90

比较表 1和表 2统计结果可以看出,相邻条带两组测深值的差异幅度甚至比测深值自身的变化幅度还要大一些,这说明,该航次测深数据存在比较明显的系统偏差。我们首先分别使用式 (1)和式 (2)作为多波束数据内部融合处理的误差模型,按照前面介绍的两步平差方法,对该航次测量数据进行系统误差补偿,现将处理后的相邻条带比对统计结果统一列于表 3

从表 3统计结果可以看出,经数据融合处理后,相邻条带的拼接效果明显得到改善。这说明上述误差补偿方法是有效的,相比较而言,使用式 (2)作为误差模型要比使用式 (1)时的补偿效果更好一些。

由于该航次试验还同时使用双频单波束测深

仪进行同船测深,因此我们完全有条件按照前面介绍的多波束与单波束数据融合方法,对两种信息源进行平差处理。现首先将数据融合处理前,多波束中央波束与单波束测深比对结果列于表 4

表 3 经内部融合处理后的比对统计结果
Tab. 3 The comparison results between neighboring swaths after data fusion

误差模型	条带序号	最大值 /m	最小值 /m	平均值 /m	均方根 /m
式 (1)	5	2. 35	- 1. 41	0. 01	0. 48
	6				
	7	1. 76	- 1. 80	- 0. 01	0. 45
	8	1. 93	- 1. 92	- 0. 02	0. 59
式 (2)	5	1. 36	- 1. 09	- 0. 00	0. 39
	6				
	7	1. 69	- 1. 55	- 0. 00	0. 42
	8	1. 47	- 1. 35	0. 00	0. 44

表 4 处理前多波束与单波束测深比对结果
Tab. 4 The discrepancies between the single beam soundings and the center beams of multibeams before data fusion

条带 序号	比对点 个数	最大 值 /m	最小 值 /m	平均 值 /m	均方 根 /m	标准 差 /m
5	351	- 0. 70	- 1. 60	- 1. 27	1. 28	0. 14
6	307	- 1. 11	- 2. 48	- 1. 31	1. 32	0. 10
7	366	0. 24	- 2. 60	- 1. 20	1. 25	0. 33
8	368	- 0. 62	- 1. 73	- 1. 29	1. 29	0. 13

表 4比对结果说明,单波束与多波束测深数据之间存在比较明显的系统性偏差。我们分别使用式 (1)和式 (2)作为误差模型,对两组数据进行融合处理,处理后的比对结果分列于表 5和表 6

表 5 处理后单波束与多波束测深比对结果
Tab. 5 The discrepancies between the single beam soundings and the center beams of multibeams after data fusion

误差 模型	条带 序号	最大 值 /m	最小 值 /m	平均 值 /m	均方 根 /m	标准 差 /m
式 (1)	5	0. 22	- 0. 52	- 0. 17	0. 20	0. 11
	6	0. 28	- 0. 47	- 0. 10	0. 15	0. 11
	7	0. 43	- 0. 38	- 0. 18	0. 19	0. 07
	8	0. 40	- 0. 97	- 0. 32	0. 36	0. 16
式 (2)	5	0. 53	- 0. 41	- 0. 03	0. 12	0. 12
	6	0. 19	- 0. 37	- 0. 01	0. 09	0. 09
	7	0. 52	- 0. 28	- 0. 11	0. 12	0. 07
	8	0. 41	- 0. 92	- 0. 26	0. 31	0. 17

表 6 处理后多波束相邻条带水深对比结果

Tab. 6 The comparison results between neighboring swaths after data fusion

误差模型	条带序号	最大值 /m	最小值 /m	平均值 /m	均方根 /m
式 (1)	5	1. 55	- 1. 73	- 0. 03	0. 54
	6	1. 70	- 1. 64	0. 00	0. 46
	7	2. 10	- 1. 89	- 0. 06	0. 62
	8	1. 30	- 1. 47	0. 00	0. 41
式 (2)	6	1. 65	- 1. 49	0. 00	0. 44
	7	2. 37	- 1. 53	- 0. 07	0. 49
	8				

将表 5和表 6分别同表 4和表 2作比较可以看出,加入中央波束与单波束测深对比信息作控制后,平差结果已经从根本上消除了两者之间的系统性偏差,相邻条带的拼接效果也得到显著改善. 这一事实再次说明,本文提出的测深数据融合处理方法是可行有效的.

5 结 论

综合前面的分析和实际应用计算结果,本文可得出以下结论:

1. 通过建立误差模型的方法进行数据融合处理,可以有效地补偿多波束测深中的系统偏差影响,提高相邻条带的拼接光滑度;
2. 以单波束测深数据作为控制进行误差补偿,可有效地提高多波束测深的整体测量精度;
3. 本文提出的数据融合方法同样适用于处

理海洋机载激光测深中的系统误差补偿和相邻条带拼接问题.

参考文献:

[1] ATANU B, SAXEN A N K. A Review of Shallow Water Mapping Systems [J]. Marine Geodesy, 1999, 22(3): 249-257.

[2] McC AFFREY E K. A Review of the Bathymetric Swath Survey System [J]. International Hydro-graphic Review, 1981, LVI II(1): 19-27.

[3] TYCE R C. Deep Seafloor Mapping Systems- A Review [J]. Marine Technology Society Journal, 1986, 20(4): 4-16.

[4] LI Jia-biao, *et al.* Multibeam Sounding Principles, Survey Technologies and Data Processing Methods [M]. Beijing: Marine Publishing House, 1999. (in Chinese)

[5] CHEN Fei-fan. The Developing of Researches on Multibeam Swath Bathymeter [J]. Ocean Tech-nology, 1999, 18(2): 26-32. (in Chinese)

[6] HUANG Mo-tao, *et al.* On the Compensation of Systematic Errors in Marine Gravity Measure-ments [J]. Marine Geodesy, 1999, 22(2): 183-194.

[7] HUANG Mo-tao. Configuration Optimization of the Disturbing Point Masses Model and Its Se-quential Solution [J]. Acta Geodaetica et Carto-graphica Sinica, 1994, 23 (2): 81-89. (in Chinese)

启 事

欢迎订阅《测绘学报》《测绘通报》合订本.《测绘学报》1999~ 2000年,每年 1册(精装),定价 40元.《测绘通报》1997~ 2000年,每年上下两册(精装),定价 80元.需要购买者可通过邮局汇款(另加 20% 邮费)至北京复外三里河路 50号中国地图出版社期刊室收. 邮编: 100045,联系电话: (010) 83524588 63534931-2184, 2185,联系人: 金英.