

多波束测深数据的误差分析与处理

朱 庆 李德仁

(武汉测绘科技大学地理信息系统研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要 在系统分析多波束测深数据的误差来源与性质的基础上,介绍了条带式多波束测深仪所采用的误差处理的理论模型。针对海洋测量的特点,特别强调了基于趋势面分析的粗差探测与剔除和相邻条带数据的整体拼接以及对航向误差的改正等关键问题。本文介绍的误差处理模型对保证多波束测深系统必要的精度和数据质量有着重要的实际意义。

关键词 多波束测深仪;误差处理;粗差;条带拼接;航向改正

分类号 P207; P229.1

近年来,为了满足民用海洋工程以及战场准备等海洋研究工作对海底地形资料日益增长的需要,各发达国家竞相研制各种新型的海底地形测量设备,主要目的是解决全覆盖问题和提高测深效率,加快测深速度。多波束测深系统(又称高精度海底地形测绘声纳)作为高效率、高精度和高分辨率的一种船载海底地形测绘设备受到了普遍的重视^[1]。多波束条带测深系统在向海底发射一次声波的过程中,能获得两侧一个条带上许多点的海深数据,一般测得的水深数据为沿航向、宽是深度 3 倍左右的一个条带,并且相邻条带之间有一定的重叠,即获得海区全覆盖海底地形。利用条带测深设备获得的深度数据以及相关的船舶定位和姿态等信息,便可以绘出高分辨率高精度的海底地形图。

多波束条带测深系统最终给出的是以海平面为参考,以海深为参数的海底地形图。由于船舶的运动,加上海平面经常受到潮汐和气象条件的影响而时涨时落,还有鱼和水草等反回的假回声等复杂原因,最后所得海区地形资料的精度不仅依赖于各种先进的硬件设备,还依赖于完备的辅助数据和先进的数据处理技术。

海底地形测量不同于一般地面测量。在海上,测量工作必须在不断运动着的海面上进行,因此就某点而言,无法进行重复观测,而其连续观测的结果总是对应着与原观测点接近但又不同点的观测数据,所以不存在平差问题。要提高海底地形测绘的精度,只有分析各种因素,对水深观测结果进行改正。由于影响测深数据质量和精度的主要因素是仪器误差和外界环境因素,而仪器误差一般

通过改进定型设备并对结果进行必要的补偿或系统改正均能得到较好解决,所以测绘精度的关键主要取决于对诸如由于鱼和水草等反回的假回声(即粗差)和由于舰船偏航及各项系统误差改正的残差造成的条带扭曲等误差的处理。对于粗差,传统方法需在野外或在测深记录的解释中增加额外的工作以消除其影响或者打印出受大于一定输入阈值滤波影响的断面点来探测粗差,或者直接绘出等深线图形再通过目视检查凭经验确定^[2,5]。这种方法显然不适宜于大规模快速测量数据的自动化处理。为了得到覆盖全海区的海深数据,须将相邻条带之间的数据拼接起来。通过条带拼接也可以消减条带模型的各种扭曲误差。常规的方法是基于图形拼接的方式,即先由测深数据插绘每一条带的等深线图形,再将相邻条带的等深线图形拼接起来。实际上,这种拼接处理只能解决重叠区域若干线迹的误差均衡问题,而不能解决连续覆盖问题。另外,由于相邻条带之间的重叠特性和采样数据的非均匀性,最终得到的海深数据存在很大的冗余,因此也有必要进行海深数据的筛选。

1 误差分析

从理论上讲,测深误差包括粗差、系统误差和随机误差 3 部分。粗差的绝对值较大,但个数稀少。系统误差按某种规律存在于观测数据之中。粗差和系统误差是影响观测数据精度的主要原因。从测量过程看,误差来源则包括实时测量误差和非实时测量误差两类。前者指实时计算海深和水平距离参数对所需的有关参数的测量误差,而后

者则是数据后处理所需数据的测量误差或算法等因素所产生的误差。根据误差与海深的关系,测深误差又有绝对误差和相对误差之分。所谓绝对误差是指那些跟海水深度值的大小没有关系的误差,如舰船升沉测量误差、潮汐改正误差、舰船纵横摇引起的误差和绝对计时误差引起的测深误差等;而相对误差则指与深度值相关的误差,如声速测量误差和接收波束角测量误差引起的测深误差等。对不同来源、不同性质的各种误差,只有采取相应的处理才能保证测深系统的必要精度。

1.1 实时测量误差

对 i 号波束,测距公式为:

$$r_i = ct_i, h_i = ct_i \cos \theta_i \quad (1)$$

式中, r_i 为第 i 号波束对应的斜距; c 为声速; h_i 为第 i 号波束对应的海深; t_i 为声波单程传播时间; θ_i 为声线与垂线的夹角。

可见,实时计算海深 h_i 的误差来自测时误差、声速误差和接收波束角的误差

1) 声速误差

由于声速与海水温度、含盐量和静水压力密切相关,而温度和含盐量又随海区、深度、时间和季节等海况条件而变化,声速仪不可能实时提供每一个测量条带上的声速,而只能在某一海域、某一时间取若干个声速剖面测出声速值并取平均声速。可见,测深系统装定的声速与实际声速之间总存在一定的误差,并且这种误差在整个海区呈随机分布,不可能完全消除

2) 测时误差

条带测深实际测量的是双程传播时间,即脉冲从发射时刻起到每个波束输出海底反向散射信号为止脉冲信号在海洋中的传播时间。由于绝对计时与使用频率、各类噪声、接收机带宽和信道多途等因素有关,加上假回声、声线弯曲、船的摇摆和升沉运动等因素的影响,所测声程会与实际声程不符。因此,时间测量的误差是十分复杂的,既有系统性的误差,也有随机性的误差。

3) 测角误差

接收波束角的测量同样会有误差。一方面基阵安装的误差会导致预成波束的实际方向与理论值不符,而产生系统性的误差;另外,接收处理器不能及时准确补偿舰船的摇摆或仪器本身对摇摆测量不准都会对测角产生影响,而造成系统性和随机性的测角误差。

1.2 非实时测量误差

在得到最基本的海深数据后,还要根据舰船的定位信息产生覆盖全海区的海深数据,进行投

影变换、潮汐改正、数据筛选和条带拼接等数据处理。可见,非实时测量的误差可以是由于定位误差引起的实际海域的深度误差,或者由于验潮仪本身的精度及验潮仪与测深处理系统不同步造成的误差,以及数据筛选和条带拼接等处理带来的误差等。这类误差常常包含系统误差、随机误差和粗差3种类型。

1.3 航向计算误差

如图1所示,多波束测深仪每一发射周期所

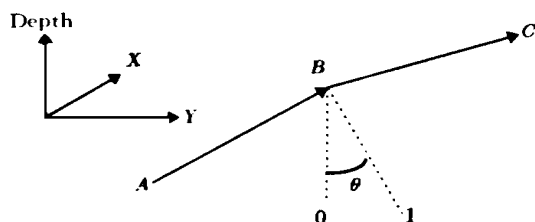


图1 海底地形点大地坐标计算示意图

Fig. 1 The Illustration of Geodetic Coordinates

Computation of Bathymetric Point

采集的数据包括龙骨点(如 B)的大地坐标和左右两侧各16个海底地形点(如中心点 0 和任意点 1)的水深。对任意点而言,波束角 θ 是预知的,所以要计算海底地形点 1 的三维坐标,关键在于确定航向 BC 的方位如式(2):

$$Y_1 = \text{Depth}_1 \times \tan \theta \times \sin T_{BC} \quad (2)$$

实际上 BC 的方位可以简单地根据 B 和 C 的大地坐标反算出来。然而,由于数据采集的中断和GPS定位的误差,特别是在舰船改变航向时,这种简单处理却难以取得满意的结果。这种计算航向不准确的误差往往是影响采样点大地坐标精度的主要因素。因此对航向进行改正正是改善数据质量的必要手段。

2 误差处理模型

处理系统误差的有效方式是在知道其规律的前提下在最接近误差源的地方对观测量进行有效的补偿或改正;对于粗差,则必须进行有效的探测和定位,最终剔除之;随机误差则可以通过最小二乘法平差得到有效解决。然而,因海上测量不可能进行重复观测,不存在平差的问题,所以对各种随机误差也就无法处理,也就不能在平差过程中对粗差进行自动定位。这就要求对粗差和系统误差进行如下妥善的处理。

1) 对影响测深精度的几个关键因素如声速误

差、舰船纵横摇、船的升沉和潮汐等,该系统通过采用先进的定型设备并利用专门装置进行实时测量与同步补偿或记录有关数据在后处理过程中予以改正。由于许多误差仅仅分析单个独立的测深数据往往得不到很好的解决,也难以精确模拟和测量,只有最终从整体上来分析一个区域的海深数据,尽可能地去逼近或减小这些物理现象的复杂程度^[3,4]。

2)为了精确计算航向,将每相邻的 5 个舰船龙骨点即航迹采样点用 B 样条函数进行拟合,每个点处的航向根据曲线的法线方向进行计算。为了排除数据中断的影响,给定一阈值限制相邻扫描线之间的距离。

3)根据 3σ 原则,即从统计意义上讲,当观测值与模型值之差(模型误差)的绝对值大于 3 倍均方根模型误差时,则可以认为是小概率事件。本系统首先采用趋势面分析找出大量偏离总趋势(即大于 3σ)的异常数据可疑点,也称候选粗差;再在三维表面可视化环境下,综合考虑局部海底地形,从而交互式地来审查并确认这些候选者是否可作为粗差而被剔除掉。该系统采用的最小二乘趋势面为如下的多项式:

$$\text{Depth}(x,y) = \sum_{k=0}^i \sum_{j=0}^k a_{kj} x^{k-j} y^j, (j = 2, 3) \tag{3}$$

短条带用二次多项式,长条带用三次多项式。由每一个采样点(深度 Depth 和大地坐标 X, Y 均已知)都可以建立一个这样的方程,经过最小二乘平差即可解算出多项式(3)的系数。将每个采样点的大地坐标代入该多项式即可计算出相应的模型值,该值与实际观测值之差称为模型误差,由此可以计算整个区域内所有采样点的模型误差的均方根值^①。由于条带模型的复杂性,模型误差大于 3σ 的采样点并不一定都是异常点。为此,我们提供了一种人机交互式的辅助手段,将可疑点附近的一个局部区域进行基于 TIN 的三维线框透视显示,同时突出可疑点位置如图 2 所示。在此可视化环境下,结合区域地形变化规律很容易作出准确的判断。

4)经过上述处理,由于各种残余误差的影响,条带模型被扭曲变形,导致相邻 2 个条带重叠部分的数据不一致。为了得到覆盖全海区的连续的测量数据,须将重叠区域的采样数据进行拼接处理。我们设计了一种称为条带网平差的方法进行整体数据拼接。其基本思想是用如式(4)的二次多项式来表达条带模型变形:

$$W = a + bX + cY + dX^2 + eXY + fY^2 \tag{4}$$

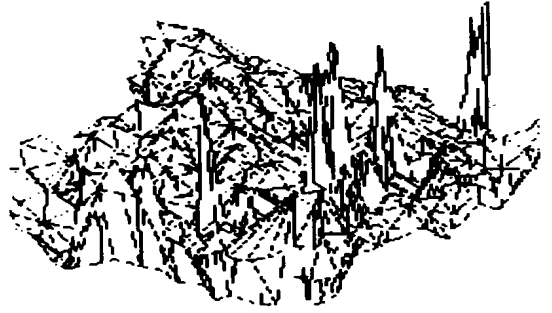


图 2 可视化粗差处理

Fig. 2 Visualization of Gross Error Processing

进而借助于摄影测量领域的航带法区域网平差理论^[6]进行测区若干条带的整体平差以实现相邻条带数据的整体拼接,达到对测区的全覆盖。整体平差的数学模型由相邻条带 i 和 $i+1$ 的一个公共点(位于重叠区域根据最小二乘趋势面内插的点),建立如下的一个误差方程:

$$\begin{aligned} - (V_{i+1} - V_i) = & (a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 \\ & + a_4xy + a_5y^2)_{i+1} - (a_0 \\ & + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy \\ & + a_5y^2)_i - (Z_{i+1} - Z_i) \end{aligned} \tag{5}$$

其中, V_i 为第 i 条带上位置 (x, y) 处的模型变形改正数; Z_i 为相应位置处的模型值。由整个测区的若干条带的若干公共点便可组建一系列误差方程,并根据 $\sum (V_{i+1} - V_i)^2 = \min$ 解算方程即可得到每一条带的误差改正系数。最后再根据式(4)对重叠区域内的每一个深度数据进行改正即可达到条带的整体拼接。经过整体拼接处理,相邻条带重叠区域的趋势面将会一致起来。

5)为了合理评价原始观测数据和条带拼接后数据的精度,利用趋势面分析的结果,直接计算相邻条带重叠区域内所有数据点在两个条带模型中的模型值之差(称之为残差)的均方根,并以此为依据评判数据精度。

6)为了保证最后用于建立数据库的数据分布的无冗余性和一致性,往往需要进行数据筛选处理。数据筛选(即从稠密深度数据点中选取可以代表总体的样本)的原则是根据深度排序的结果,每确定一个点便排除落在其一定邻域(影响范围)内的其它点。对于一个测量条上的若干波束数据,通过差分分析,判断其中的一些深度数据是否可以由其它相邻的数据线性内插得到。若是,则可以筛选掉这些数据。最后便能得到一个可以代表全体的没有冗余数据的重要点集 VIP (Very Impor-

tant Points).

7)为了保证所有后续分析和绘图都基于经过改正、拼接和筛选的原始VIP数据,本系统直接利用随机分布的VIP建立基于Delaunay三角形的不规则三角网模型TIN。这种DEM具有逼真描述实际地形表面的特点,因而可以利用较简单的方法从中提取各种地形特征因子如等深线、坡度坡向,并进行三维表面的线框透视和逼真晕渲显示等。

3 实验结果

为了检验多波束条带测深系统硬件原型与数据处理软件的可靠性和实用性,在浙江省新安江水库进行了试验。由于整个试验在风平浪静的情况下进行,所以波浪的影响和舰船纵横摇均非常小,当然也没有潮汐的影响。动态试验所测区域的水深在18~70m之间,航速为2kn,两次有效记录之间的时间间隔为2s。整个试验结果包括4个条带的数据。考虑成本因素,这次试验采用的条带测深仪只安装了半个发射阵(左阵),即每个发射周期只能得到16个采样数据,所以每个条带包含约650条扫描线,每条扫描线有16个数据。图3所示分别为航向改正前后中心波束的分布情况,如图4所示为相邻条带数据的分布情况,对重叠



图 3 实验据航向改正的结果

Fig. 3 Heading Correction for Case Study

的相邻条带进行了整体拼接处理,结果见表1所示。值得注意的是,由于这次实验只有两个条带存在部分重叠,并且趋势面分析和模型变形改正都

采用一样的二次多项式模型,所以通过整体拼接处理两个条带模型的重叠部分完全一致

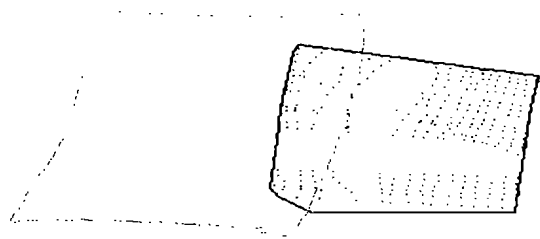


图 4 相邻条带整体拼接

Fig. 4 Integrated Mosaic of Neighbor Strips

表 1 条带整体拼接处理结果

Tab. 1 The Results of Integrated Strips Mosaic

条带名	重叠区	趋势面分析	多项式改正	多项式改正
	域内采 样点数	的均方根模 型误差 /m	前的均方根 残差 /m	后的均方根 残差 /m
C30DT-07	86	1.609	5.255	0.000
C30DT-08	45	2.306		

4 结 论

本文提出的计算机自动判别和人工审查相结合的方法,有利于对大数据量的粗差进行高效可靠的处理。基于条带网法平差的整体数据拼接与常规的基于等高线的图形拼接相比,更有利于建立一致性的连续覆盖全部海区的海底地形数据库。

参 考 文 献

1 宋文光等.海洋定位重力测量及其地质地球物理解释.北京:科学出版社,1993.

2 陈永奇等.海洋工程测量.北京:测绘出版社,1989.

3 Salzmänn M. A. A Real Time Quality Control Procedure for Use in Integrated Navigation Systems. The Hydrographic Journal, 1994(72)

4 Kielland P, Tubman T. On Estimating Map Model Errors and GPS Position Errors. In: International Hydrographic Review, LXXI(2). Monaco, 1994

5 NERC. Methods of Display of Ocean Survey Data. Australia, 1984.

6 李德仁.误差处理和可靠性理论.北京:测绘出版社,1988.

- 3 贺仲雄.模糊数学及其应用.天津:天津科学技术出版社,1983.
- 4 沈清,汤霖.模式识别导论.长沙:国防科技大学出版社,1991.

Research on Application of Pattern Recognition in the Automatic Recognition of Human Being's Hand Wrists

Yang Ting Liu Youguang Huang Youcai

(Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 1 Zhanlan Road, Beijing, China, 100044)

Abstract The automatic recognition of human being's hand wrists is the key to the automation of bone age evaluating. Based on acquiring data with digitizing instrument, the theory and method of pattern recognition technique and fuzzy mathematics are studied, which are applied in the automatic recognition of hand wrists. Experiments show that the application of pattern recognition technique is successful.

Key words hand wrist; bone age; digitizing; pattern recognition; fuzzy mathematics

(上接第 4页)

Error Analysis and Processing of Multibeam Soundings

Zhu Qing Li Deren

(Research Centre for GIS, WUTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract As a good choice of more powerful automatic bathymetric survey techniques with high accuracy and full coverage, the multibeam strip sounder equipped for the first middle-pelagic survey vessel made in China has been brought out recently. Based on systematic analysis to the error sources and error properties of multibeam soundings, the theory models for error processing will be presented in this paper. Especially based on trend surface analysis, the methods for gross error process and strips mosaic, and heading correction will be stressed.

Key words multibeam sounder; error process; gross error; strips mosaic; heading correction