

浅水多波束测深潮汐改正技术研究

陆秀平^{1,2} 黄辰虎² 黄谟涛² 欧阳永忠^{2,3}

(1 海军工程大学导航工程系,武汉市解放大道 717 号,430033)
(2 天津海洋测绘研究所,天津市友谊路 40 号,300061)
(3 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430072)

摘 要:提出了一种顾及潮时差变化的多验潮站多边形潮汐分区改正数学模型,设计了海量多波束数据通用的虚拟单验潮站改正模式。应用结果表明,该模型准确地再现了时变水位场,实现了区域瞬时海面的无缝拼接,较好地解决了多波束条带采用传统潮汐分区改正模型引起的断层及锯齿状问题。
关键词:浅水多波束测深;潮时差;时变水位场;区域瞬时海面;无缝拼接
中图法分类号:P229.3

国际海道测量标准 S-44 规定,高级别海区水深测量必须采用多波束全覆盖测量技术^[1]。开展如导航定位、声速改正、潮汐改正以及换能器吃水改正等与多波束测深相关的专项技术研究,是多波束数据处理面临的主要任务^[2]。目前,浅水多波束测深系统正逐步应用于国内重要的航道、港口、码头和锚地等重点海区的水深测量。这些区域的潮汐性质一般比较复杂,如何准确地再现水深测量期间的时变水位场(区域瞬时海面),据此进行科学合理的潮汐改正关系到最终的成图质量。国内外许多学者针对单波束测深潮汐改正问题进行了研究^[3-11]。本文提出了一种顾及潮时差变化的多验潮站多边形潮汐分区改正数学模型,设计了海量多波束数据通用的虚拟单验潮站改正模式。

1 顾及潮时差变化的多验潮站多边形潮汐分区改正数学模型

多验潮站多边形潮汐分区是根据潮波图确定测区潮波的传播方向及潮港类型,同时结合实测验潮数据判断各验潮站的潮汐相关性强弱,确定各分区采用的具体控制验潮站及分区的控制范围。

假定某浅水多波束测区共有 3 个潮汐分区,

并布设 A~D 4 个验潮站,其中各验潮站的位置已知。 $P(x,y)$ 点位于第 3 个潮汐分区,该点的时变水位场 $w(x,y,t)$ 待求,如图 1 所示。

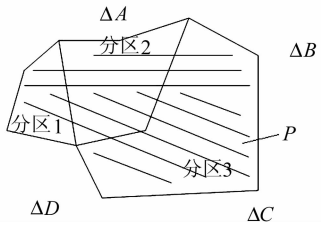


图 1 测区验潮站布设网

Fig. 1 Distribution of Tidal Stations in Surveying Area

1.1 P 点潮时差计算数学模型

假定第 3 个潮汐分区以 C 站作为主验潮站, A、B、D 作为副验潮站。潮汐改正的理论以两验潮站之间的线域控制算法为基础,采用时差法计算潮时差^[4,9]。关于 P 点潮时差的计算思路如下:① 计算 C 站分别到 A、B、D 站的潮时差 τ_{CA} 、 τ_{CB} 、 τ_{CD} ;② 计算 P 点相对于基本站 C 和 A、B、D 之一组成两站改正方式时的潮时差,即 $\tau_P(CA)$ 、 $\tau_P(CB)$ 、 $\tau_P(CD)$;③ 根据距离加权计算得到 P 点相对于基本站 C 的综合潮时差:

$$\tau_P = \frac{\frac{CP_{CA\perp}}{CA}\tau_{P(CA)} + \frac{CP_{CB\perp}}{CB}\tau_{P(CB)} + \frac{CP_{CD\perp}}{CD}\tau_{P(CD)}}{\frac{CP_{CA\perp}}{CA} + \frac{CP_{CB\perp}}{CB} + \frac{CP_{CD\perp}}{CD}} \quad (1)$$

式中, $CP_{CA\perp}$ 表示 CA 两站改正方式时 P 点在 CA 连线的垂足与基本站 C 的距离;其余参数意义类同。由式(1)可知, $P(x,y)$ 点的潮时差与其位置 (x,y) 有关,是连续变化的。

1.2 P 点潮汐改正值计算数学模型

1) 作时间归一化处理,顾及 $P(x,y)$ 点的潮时差,各验潮站与该点 t 时刻相对应的时间表示为:

$$t_C = t + \tau_P, t_A = t + \tau_P - \tau_{CA}$$

(2)

$$t_B = t + \tau_P - \tau_{CB}, t_D = t + \tau_P - \tau_{CD}$$

(3)

2) 根据距离加权计算 P 点 t 时刻潮汐改正值:

$$w(x,y,t) = \frac{\frac{1}{PC^2}h_C(t_C) + \frac{1}{PA^2}h_A(t_A) + \frac{1}{PB^2}h_B(t_B) + \frac{1}{PD^2}h_D(t_D)}{1/PC^2 + 1/PA^2 + 1/PB^2 + 1/PD^2}$$

(4)

式中, PC 表示 P 点到 C 验潮站的距离; $h_C(t_C)$ 表示 t_C 时刻 C 验潮站从理论最低潮面起算的水位实测值;其余参数意义类同。至此,建立了顾及潮时差变化的多验潮站多边形潮汐分区改正数学模型,由此可计算得到分区内任意测点的时变水位场。

1.3 虚拟单验潮站改正模式

为解决海量多波束数据潮汐改正的计算效率问题,在预先准备好潮汐数据的基础上,本文采用如下策略:① 进行通常意义的潮汐分区,即根据测区各验潮站的潮汐相关性确定各分区采用的具体验潮站;② 将测区作网格化处理,每个网格点假定为虚拟验潮站,根据式(4)计算各网格点的潮汐改正数值即时变水位场 $w(x,y,t)$,并设定其控制范围;③ 在该控制范围内,潮汐改正均采用单站模式进行。网格分辨率的大小根据测深精度要求确定,可保证各潮汐分区内部以及分区之间潮时差的连续变化,实现区域瞬时海面的无缝拼接,从而解决了多波束测深条带通过不同潮汐分区时,由于传统潮汐改正模型不合理出现的断层及锯齿状问题,最终实现测深条带的合理拼接。

2 工程应用

本文计算数据来源于某作业单位于 2005 年完成的某港口外航道和支线航道多波束水深测量工程,航道整体呈 V 字型向东扩展。根据海区属性和任务要求,测深采用丹麦 Reson 公司生产的 SeaBat 8101 浅水多波束系统,定位采用中海达 HD8500 型差分 GPS 测量系统,声速剖面测量采用 SVP-16,后处理软件采用 Caris HIPS。根据工程要求,为确保完全反映航道水下地形变化、障

碍物情况,多波束测线间隔按 100 m 平行布设于航道方向,有效覆盖重叠率满足规范要求。此次多波束测量外业进行 6 d,采集有效声速剖面数据 6 组,获得多波束测深条带共计 33 个。

该海域平均水深在 21~37 m 之间,测区潮汐性质复杂,潮差最大超过 4 m。本海区未做过精密潮汐场解算,为保证多波束测深数据成图质量,根据工程方要求在测区周围布设 Tide1、Tide2、Tide3、Tide4 和 Tide5 共计 5 个验潮站用于潮汐改正,其中各站潮汐数据均已归算至各自理论最低潮面。航道测区及验潮站布置如图 2 所示。

2.1 测区潮汐性质分析

该测区潮汐性质属正规半日潮,潮波传播方向为东南方向至西北方向,潮差在该方向上逐渐增大。选取各验潮站某日实测潮汐数据作曲线图(见图 3),该图反映出测区各验潮站潮汐性质基本相似,差别主要在于潮高和潮时。

利用测区 Tide1~Tide5 验潮站某日的潮汐数据分别进行两两验潮站之间的潮时差计算,结果见表 1。

表 1 各验潮站某日潮时差计算数值/min

Tab. 1 Interactional Time Differences from All Tidal Stations in Someday

	Tide 1	Tide 2	Tide 3	Tide 4	Tide 5
Tide 1		-22	-26	40	-66
Tide 2	22		-4	61	-46
Tide 3	26	4		66	-40
Tide 4	-40	-61	-66		-105
Tide 5	66	46	40	105	

利用表 1 数值,对图 2 中各验潮站组成的三角形网进行潮时差闭合差的检验,计算结果证明三角形潮时差闭合差均小于 6 min,满足规范要求。

2.2 测区潮汐分区情况对比

图 4(a)表示采用传统三站三角形分区改正模式,图 4(b)表示采用本文所建立的多站多边形分区改正模式。具体各潮汐分区的控制验潮站见表 2,表中加粗的表示该潮汐分区的主验潮站。

2.3 时变水位场的再现与对比

提高潮汐改正精度的关键在于能否准确地重现水深测量期间的时变水位场,即区域瞬时海面。按两种分区模式分别对该测区进行网格划分,网格间距为 1 500 m,共生成网格虚拟验潮站 318 个,如图 5 所示。

利用传统改正模型和本文新模型计算各虚拟验潮站的潮汐数值,据此再现时变水位场。在图 5(a)和 5(b)潮汐分区的内部,各选取一组相邻虚拟验潮站,在潮汐分区的边界左右两侧,各选取 3

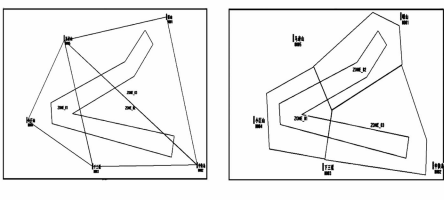
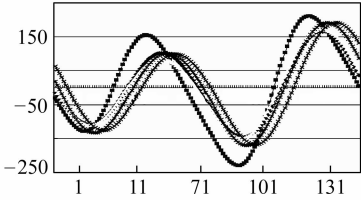
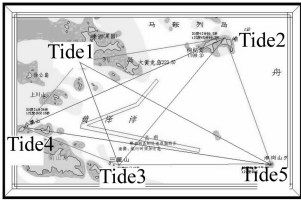


图 2 某港口航道多波束测区

图 3 验潮站潮汐曲线对比

图 4 潮汐分区情况对比

Fig. 2 Surveying Area of Multibeam Bathymetric Sounding

Fig. 3 Diagram Showing the Difference of Tidal Feature

Fig. 4 Diagram Showing Different Tidal Zoning Results

表 2 各潮汐分区控制验潮站

Tab. 2 Distribution of Tidal Stations in Different Subsets

控制站	分区 1	分区 2	分区 3
图 4(a)	Tide 1、Tide 3、Tide 4	Tide 1、Tide 3、Tide 5	Tide 1、Tide 2、Tide 5
图 4(b)	Tide 1、Tide 2、Tide 3、Tide 4、Tide 5	Tide 1、Tide 2、Tide 3、Tide 4、Tide 5	Tide 1、Tide 2、Tide 3、Tide 4、Tide 5

组相邻虚拟验潮站，分别计算各组虚拟站某日整点时刻潮汐数值的互差，计算结果见表 3。

表 3 两种模型相邻虚拟站潮汐数值的互差/cm

Tab. 3 Tidal Comparative Error of Neighboring Suppositive Tide Stations

整点时刻	传统模型				新模型			
	分区内部	分区边界			分区内部	分区边界		
0	-1.5	-9.8	-4.5	0.0	0.0	4.8	4.7	5.0
1	0.7	-11.9	-1.3	-2.5	4.8	0.0	0.0	5.4
2	2.5	-12.2	5.0	5.4	3.8	4.0	3.9	5.3
3	3.7	-10.3	10.7	12.8	2.2	1.9	2.1	3.7
4	4.1	-5.3	12.5	15.4	-0.1	-0.3	-0.1	1.1
5	3.7	2.1	9.9	12.6	-2.4	-2.5	-2.3	-1.9
6	2.3	8.9	5.1	7.1	-4.1	-4.1	-4.0	-4.5
7	-0.2	12.0	0.5	1.6	-4.6	-4.9	-5.0	-6.2
8	-2.9	11.1	-3.4	-3.6	-4.0	-4.5	-4.7	-6.1
9	-5.3	7.1	-6.9	-8.3	-2.2	-2.9	-3.0	-4.3
10	-6.1	1.6	-9.4	-11.8	0.2	-0.3	-0.4	-1.2
11	-5.4	-4.1	-10	-12.8	2.7	2.3	2.3	2.1
12	-3.4	-8.3	-8.6	-11.4	4.2	4.1	4.1	4.5
13	-0.6	-10.6	-4.9	-6.8	4.6	4.7	4.7	5.7
14	2.0	-10.7	1.0	0.5	3.8	4.2	4.1	5.4
15	4.1	-8.9	7.4	8.5	2.2	2.4	2.5	4.1
16	5.2	-4.1	10.7	13.1	0.0	0.2	0.4	1.8
17	5.5	3.5	9.5	12.2	-2.5	-1.9	-1.8	-1.2
18	4.6	11.1	5.4	7.6	-4.5	-3.8	-3.7	-4.2
19	2.4	15.6	0.9	2.3	-5.3	-4.8	-4.8	-6.2
20	-0.6	15.4	-2.4	-2.0	-5.0	-4.7	-4.8	-6.6
21	-3.4	11.2	-5.3	-6.0	-3.3	-3.3	-3.5	-5.0
22	-5.1	4.9	-7.5	-9.3	-0.6	-0.8	-0.8	-2.0
23	-5.1	-2.1	-8.3	-10.5	2.2	2.2	2.0	1.5
绝对值								
最大的	-6.1	15.6	12.5	15.4	-5.0	-4.9	-5.0	-6.6
互差								

图 6(a)表示两种模型在各自潮汐分区内部选取的一组相邻虚拟站的潮汐数值互差曲线;图 6(b)表示两种模型在各自分区边界左右两侧选

取的 3 组相邻虚拟站的潮汐数值互差曲线。其中,虚线表示采用传统模型计算,实线表示采用本文新模型计算。

由表 3 及图 6 可知,在潮汐分区内部,两种模型计算的两组相邻虚拟站潮汐数值的互差振幅均为 5 cm 左右,体现了水位场(瞬时海面)在时间和空间上的正常变化,表明两种模型在潮汐分区内部可取得基本一致的潮汐改正效果。在潮汐分区边界,新模型计算得到的边界两侧 3 组相邻虚拟站潮汐数值的互差振幅均为 5 cm 左右,与分区内部结果基本一致;传统模型计算的 3 组相邻虚拟站潮汐数值的互差振幅均为 15 cm 左右,其中不仅包含水位场(瞬时海面)在时间和空间上的正常变化,还包含了由于模型不合理导致的水位异常变化,这将导致多波束条带穿过潮汐分区边界时出现拼接断裂问题。

由以上分析可知,新模型更好地实现了区域瞬时海面的无缝拼接,因此可以准确再现时变水位场。

2.4 潮汐改正效果对比

分别利用以上两种改正模型计算得到的测区网格点时变水位场,对部分测深条带进行潮汐改正效果对比,条带剖面改正效果分别如图 7 所示。图中横轴表示与测船前进方向垂直的方向;纵轴表示海底地形。

由图 7 可看出,使用新模型后,测深条带之间拼接良好,解决了传统模型在分区边界两侧潮汐改正不合理导致的条带拼接断层现象。

3 结 语

本文提出的潮汐分区改正模型考虑了潮时差的连续变化和多个验潮站潮汐作用的综合影响,因此可以准确再现区域时变水位场,实现区域瞬时海面的无缝拼接,从而较好地解决了多波束测深条带采用传统潮汐分区改正模型时引起的拼接

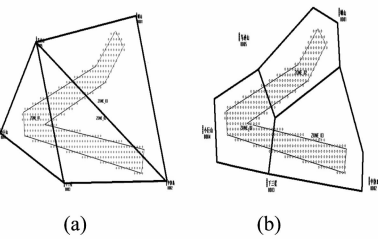


图 5 测区网格虚拟验潮站示意图

Fig. 5 Distribution of Supportive Tidal Stations in Surveying Area

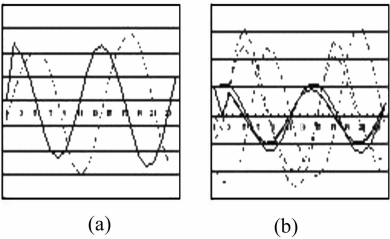


图 6 两种模型相邻虚拟站潮汐数值的互差曲线

Fig. 6 Diagram Showing Tidal Comparative Error of Neighboring Supportive Tide Stations

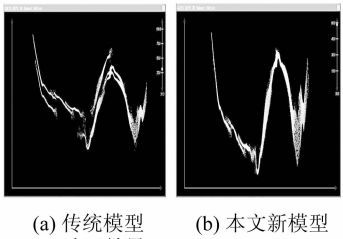


图 7 两种潮汐改正模型条带拼接效果对比

Fig. 7 Diagram Showing Joining Results of Neighboring Swathes

断层问题,对于提高多波束数据成图质量具有重要意义。

参 考 文 献

[1] IHO. IHO Standards for Hydrographic Surveys[S]. Monalo: International Hydrographic Bureau, 1998

[2] 李家彪. 多波束勘测原理技术与方法[M]. 北京:海洋出版社,1999

[3] 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

[4] 谢锡君,翟国君,黄漠涛. 时差法水位改正[J]. 海洋测绘,1988(3):22-26

[5] 刘经南,赵建虎. 海洋测量内外业一体化软件包的研制[J]. 武汉测绘科技大学学报,2000(3):56-61

[6] 何文亮,胡建炯. 强潮水域水深测量精度的保障方法[J]. 浙江水利科技,2005(2):77-79

[7] 周良勇,从鸿文. 滨浅海单波束测深潮汐改正的方

法[J]. 海洋地质动态,2005(3):36-39

[8] 智爱玲,张春泉,王卫平. 感潮水域水深测量数据处理中的水位改正[J]. 现代测绘,2005(2):29-31

[9] 暴景阳,刘雁春. 海道测量水位控制方法研究[J]. 测绘科学,2006(6):49-51

[10] Gill S. Description of Discrete Tide Zoning[R]. NOS, Center for Operational Oceanographic Products and Services,1998

[11] Cisternelli M, Gill S. Implementation of TCARI into NOS Hydrographic Survey Operations [R]. Technical Report, NOAA/NOS Center for Operational Oceanographic Products and Services, 2000

第一作者简介:陆秀平,工程师,博士生。现主要从事海道测量数据处理研究。
E-mail:hchhch-1997@163.com

Tidal Correction in Coastal Surveying Using Multibeam Bathymetric Sounding System

LU Xiuping^{1,2} HUANG Chenhu² HUANG Motao² OUYANG Yongzhong^{2,3}

(1 Department of Navigation, Naval University of Engineering,717 Jiefang Road,Wuhan 430033,China)

(2 Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting,40 Youyi Road,Tianjin 300061,China)

(3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University,129 Luoyu Road,Wuhan 430079,China)

Abstract: A mathematical model of tide zoning correction is proposed. Based on the computational model, a new tidal correction mode using single suppositive grid tide station is designed. The numerical test results show that the new method can reveal the time-space variation of water level, and the seamless joining of regional instantaneous sea level can be realized.

Key words: shallow water multibeam bathymetric sounding;tidal time difference;time-space variation of water level;regional instantaneous sea level;seamless joining