

水深测量测线布设优化方法研究

成 芳, 杨晓华, 付德强

(中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041)

摘 要:测线布设是水深测量海区技术设计的一个重要环节。合理的测线布设方式既可以提高测量效率、降低测量成本,又能完善地反映海底地貌。首先探讨测线布设合理性评价准则,在深入分析测线布设方式对水深测量成果影响的基础上,提出了一种全新的测线布设优化方法,并详细给出流程图。整体研究结果表明:该优化方法是合理可行的,其体现了逐步优化设计的思想,更符合实际测量需求。

关键词:水深测量;测线间距;测线方向;插值精度

中图分类号:P229.1

文献标志码:A

文章编号:1003-2029(2012)04-0014-05

单波束水深测量时,获得的测量值反映的是每条测线上的水深信息^[3-4],而测线间存在测量盲区。为了完整地表征海底地形,必须对测量盲区中的水深信息进行内插,再结合测量值共同绘制水深成果图^[5]。那么,水深成果精度取决于观测点和插值点的精度,相当程度上更取决于插值点的精度。而插值点精度主要通过测线间距的调整来控制,测线间距选择过窄,虽然保证了测量成果精度,但会增加工作量、降低测量效率;测线间距选择过宽,又极大地降低了插值点的精度,无法保证测量成果精度。因此,测线布设作为水深测量海区技术设计的核心内容,在兼顾整个测区的测量成果质量和测量效率等方面起着极其重要甚至决定性作用。为此,本文首先探讨测线布设合理性评价准则,在深入分析测线布设方式对水深测量成果的影响基础上,提出一种全新的测线布设优化方法,此方法体现了逐步优化的思想,最终确保在该测线布设方式下,得到能满足预定测量精度的水深数据,并且保持较高的测量效率。

1 测线布设合理性评价准则

由于海底地形的变化特征及测线布设方式是影响水深插值精度的主要因素,因此在实际测量时,应结合实际海底地形,通过调整测线布设方式,来控制插值点的精度,保证测量成果满足预定的精度要求。也就是说,对水深插值精度的要求可以转化为对测线布设方式的要求,水深插值精度的要求不同,测线布设方式也将不同。因此,本文提出相邻测线插值评价准则,将水深插值精度作为反映测区测线布设是否合理的重要指标。

事实上,测量时布设的检查线恰好为评估水深插值精度

提供了条件和方法。因此,本文采用检查线上相邻测线的中点(水深插值精度最弱点)进行水深插值精度的计算。

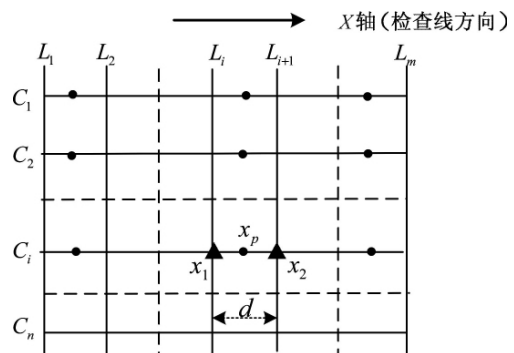


图1 检查线中点评估示意图

如图1,假设测区共布设 m 条主测线(L)和 n 条检查线(C),且主测线和检查线正交,共 $m \times n$ 个交叉点, x_p 为检查线中点坐标。

在每条检查线上,选取测线间的中点 x_p 作为插值精度检核点,对每一个中点 x_p 可得到水深差值 ΔH :

$$\Delta H = H_L - H_C \quad (1)$$

式中 H_L 为点 x_p 处由相邻主测线测量值内插得到的水深值; H_C 为点 x_p 处由检查线上实际测量的水深值。由于 H_L 与 H_C 不相关,故有:

$$m_{\Delta H}^2 = m_{H_L}^2 + m_{H_C}^2 \quad (2)$$

$$m_{H_L}^2 = m_{\Delta H}^2 - m_{H_C}^2 \quad (3)$$

式中 $m_{\Delta H}$ 为差值中误差; m_{H_L} 为插值中误差; m_{H_C} 为观测值中误差。

$m_{\Delta H}$ 和 m_{H_C} 可由整个测区的测量数据按式(4)和式(5)统计计算得到,即:

收稿日期 2012-06-30

作者简介 成芳(1981-),女,博士,工程师,主要研究方向为靶场环境测量和武器系统试验。Email:chengfang11@163.com

$$m_{\Delta H}=\pm\sqrt{\frac{[\Delta H\cdot\Delta H]}{N}}\tag{4}$$

式中 N 为检核点 x_p 的个数,当 m 条主测线和 n 条检查线均相交时,则 $N=(m-1)\times n$ 。

$$m_{H_C}=\pm\sqrt{\frac{[\rho\rho]}{2mn}}\tag{5}$$

式中 p 为主测线与检查线交叉点处主、检测量值的差值。

2 测线布设对水深测量的影响

测线布设包括测线方向和测线间距选择两个方面的问题^[6],为了研究测线方向和测线间距的选择方法,本文采用以上测线布设合理性的评价准则,详细仿真分析测线布设对水深测量的影响。

2.1 测线布设对水深测量影响的理论分析

如图 1,主测线间距为 d 。假定检查线沿 X 轴方向, x_1 和 x_2 分别为相邻主测线上的水深点坐标。

设沿检查线方向水深函数为 $S(x)$,且在区间 (x_1,x_2) 存在 $(n+1)$ 阶导,那么对于 x_p 有:

$$S(x)=S(x_p)+S'(x_p)(x-x_p)+\frac{S''(x_p)}{2!}(x-x_p)^2+\dots+\frac{S^{(n)}(x_p)}{n!}(x-x_p)^n+R_n(x)\tag{6}$$

式中 $R_n(x)=\frac{S^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!}(x-x_p)^{n+1}$, $\xi\in(x_1,x_2)$ 。

忽略 $S(x)$ 函数中 $n>2$ 时非线性部分的影响,则上式简

化为:

$$S(x)=S(x_p)+S'(x_p)(x-x_p)+\frac{S''(\xi)}{2!}(x-x_p)^2\tag{7}$$

式中 $\frac{S''(\xi)}{2!}(x-x_p)^2$ 为 $S(x)$ 中非线性项影响, $S''(\xi)$ 表示 $S(x)$

沿 X 方向的梯度变化。

将相邻主测线上点 x_1 和点 x_2 代入式(7),得到水深函数 $S(x_1)$ 、 $S(x_2)$,将其代入内插模型,得到插值点 x_p 处的水深值 $S(x_p)'$ 。与 $S(x_p)$ 比较,得到插值点 x_p 处的插值误差为:

$$I=S(x_p)'-S(x_p)=\frac{1}{8}S''(\xi)(x_1-x_2)^2\tag{8}$$

由于 $x_2-x_1=d$,式(8)最终可表示为:

$$I=\frac{1}{8}S''(\xi)\cdot d^2\tag{9}$$

由式(9)可以看出,对于某一测区而言,测线间距越大,水深梯度变化越复杂,插值精度越低,这也与本文后续仿真分析的结果一致。

2.2 测线布设对水深测量影响的仿真分析

具体分析方法是:直接对某一海底地形,按不同的测线布设方式模拟水深测量进行测线仿真采样,然后利用采样得到的数据,计算插值精度。通过考察插值精度的变化情况,来分析测线布设方式对水深测量的影响,具体仿真方案如表 1。

由于仿真分析中涉及的因素(参数)多,为了详细分析其影响,本文进行了大量的计算。(由于后续分析的结论一致,限于篇幅,本文仅给出代表性的仿真分析结果,见表 2)。

表 1 测线布设对水深测量影响的仿真方案

仿真背景	实测数据	仿真数据
测线方向	A;0°~180°(A 为测线方向与 X 轴的夹角); 步长为 10°	
测线间距	20~300 m;步长为 10 m	20~150 m;步长为 5 m
检查线间距	300 m	180 m
仿真目的	(1)考察相同测线方向,不同测线间距对水深插值精度的影响;(2)考察相同测线间距,不同测线方向对水深插值精度的影响;(3)考察相同内插精度测线方向与间距的匹配性。	
备注	实测数据来源于 2006 年某海区海洋深度测量,仿真数据来源于 matlab 语言建模。	

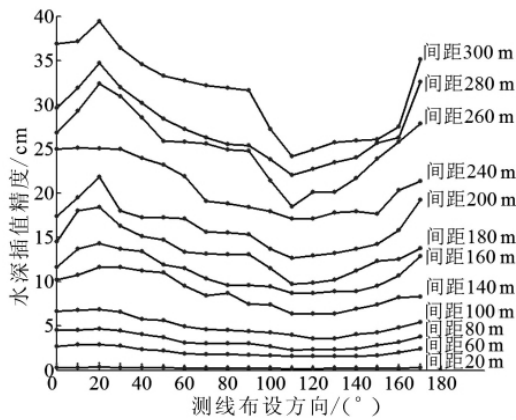


图 2 水深插值精度随测线方向变化示意图

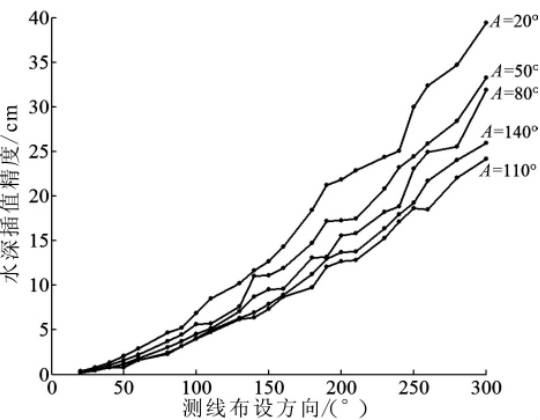


图 3 水深插值精度随测线间距变化示意图

表 2 不同测线布设方式下水深插值精度/cm

测线间距/m	测线方向/(°)						最大互差/cm
	20	50	80	110	140	170	
20	0.35	0.28	0.23	0.20	0.21	0.30	0.15
40	1.34	1.06	0.81	0.76	0.79	1.18	0.58
60	2.94	2.20	1.78	1.60	1.64	2.40	1.34
80	4.68	3.76	3.03	2.28	2.43	3.81	2.40
100	6.85	5.65	4.57	4.03	4.10	5.42	2.82
120	8.75	7.50	6.25	5.16	5.79	8.10	3.59
160	14.33	11.96	9.62	8.71	8.92	12.92	5.62
180	18.46	14.71	13.09	9.72	11.22	13.76	8.74
200	20.83	17.25	15.54	12.86	13.74	19.24	7.97
220	24.91	20.10	18.44	15.30	15.90	21.00	9.61
240	25.12	23.24	18.83	17.14	17.98	21.34	7.98
260	32.36	25.90	24.91	18.47	21.72	27.85	13.89
280	34.69	28.42	25.55	22.03	24.04	32.57	12.66
300	39.44	33.29	31.88	24.18	25.98	35.08	15.26
备注	该测区的梯度总方向为:110.67°						

2.2.1 实测海底的结果分析

表 2 中,最大互差是指测线布设间距一定,测线布设方向由 $A=0^\circ$ 至 $A=180^\circ$ 的内插精度最大与最小值之差。限于篇幅,表 2 只列举了不同测线布设方式下内插精度的部分值。

对照表 2、图 2、图 3,得出以下结论:

(1) 图 2 中,当测线方向为 $A=110^\circ$ 时,水深插值精度最高,当测线方向为 $A=20^\circ$ 时,水深插值精度最低。这是因为,该测区的梯度总方向为 $A=110.67^\circ$,测线布设方向越接近梯度总方向,水深插值精度越高,反之,测线布设方向越远离梯度总方向,水深插值精度越低,当测线布设方向为垂直于梯度总方向时,水深插值精度最低。因此,最佳的测线布设方向应为梯度总方向。

(2) 从图 3 中可以直观地看出,对每一个固定的测线方向,随着测线间距的增加,内插精度逐渐变低。这也充分说明了测线间距选择的重要性。

(3) 通过对图 2 中各条曲线的对比可以看出,随着测线间距的增加,不同方向测线仿真采样下得到的水深插值精度的差异也明显增大。这充分说明了测线间距的适当减小,可以提高非采样点水深值的推估精度,这样亦保证了测线间更好地满足线性条件。

2.2.2 仿真海底的结果分析

本文对倾斜海底、海沟、海底凸包等仿真海底进行了实验分析,由于各种海底得出的结论与前述的实测海底一致,这里实验结果从略。以下仅以海沟为例(如图 4),仅从大量的实验数据中抽出部分数据(如表 3),考察在满足精度要求下,测线间距与测线方向的匹配性。

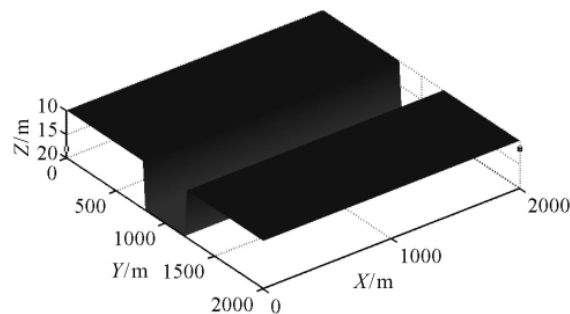


图 4 海沟

从表 3 中可以看出,尽管测线间距与测线方向并不相同,但它们的插值精度是相同的。如沿梯度总方向选择 120 m 测线间距与垂直于梯度总方向选择 90 m 作为测线间距,其水深插值精度是一致的,但需注意,此时垂直于梯度总方向布置的测线数是沿梯度总方向的 1.33 倍,也就是说,如果沿

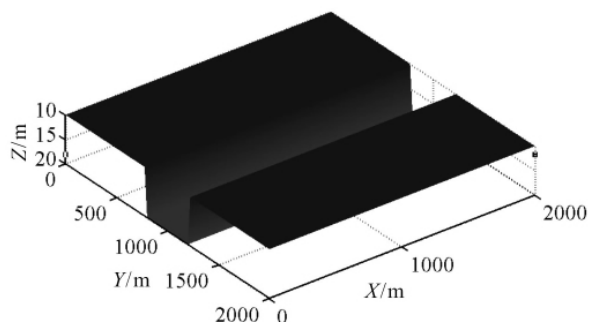
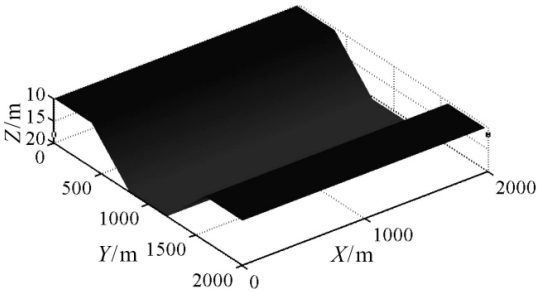


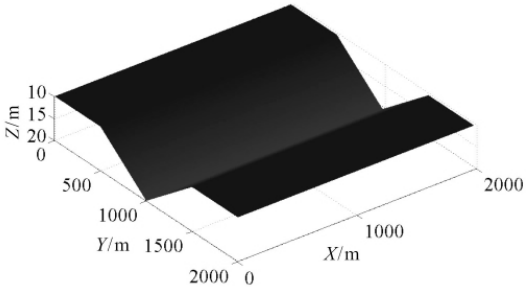
图 5 沿梯度总方向测得的海底表面图

表 3 海沟仿真分析一览表

固定插值 精度要求	仿真参数		对应的插值 精度/m
	测线间距/m	测线方向	
0.05 m	90	$A=20^{\circ}$	0.052 2
	90	$A=50^{\circ}$	0.045 0
	110	$A=80^{\circ}$	0.051 7
	120	$A=110^{\circ}$	0.051 6
	110	$A=140^{\circ}$	0.049 6
	90	$A=170^{\circ}$	0.049 8
0.1 m	130	$A=20^{\circ}$	0.102 3
	140	$A=50^{\circ}$	0.110 7
	170	$A=80^{\circ}$	0.111 1
	190	$A=110^{\circ}$	0.120 7
	170	$A=140^{\circ}$	0.104 0
	140	$A=170^{\circ}$	0.114 8



(a) 测线间距 400 m



(b) 测线间距 500 m

图 6 海沟沿垂直梯度方向重构的海底表面图

垂直于梯度总方向布设测线,虽然多布设了测线,但结果却与梯度方向测得的水深插值精度是相同的,均为 0.05 m。

通过上述分析可以得出,正确选择测线布设方向(梯度总方向),可有效减小测线间距,提高测量效率。为进一步验证这一结论,以下将分别沿梯度总方向和垂直梯度总方向对海沟进行测线仿真采样,然后利用采样得到的数据重构此海底。通过考察重构海底变形情况,来分析测线布设方向对测量效率的影响。

选择梯度总方向(Y轴正向)布设测线,重构得到的海底

表面图(如图 5)。从与原始海底(如图 4)的比较可以看出,重构海底与原始海底完全一致,因此对于此类海沟,沿梯度总方向布设测线可完善地显示海底地形。另外,通过扩大测线间隔发现,只要沿梯度总方向布设两条包含此海底的测线即可重构此海底,这大大提高了作业效率。

选择垂直梯度总方向布设测线,重构得到的海底表面图如图 6。从与原始海底(如图 4)的比较可以看出,沿垂直梯度总方向重构得到的海底表面图与原图相比发生了变形,海底方沟变成了梯形沟,随着测线布设间距的不断增大将变成三角沟,最大水深值小于原海底的最大水深值。这是因为布设测线时并不能保证测线经过原海底的极值点,此时使重构的海沟与原海底相比发生了伸长与平滑,本文称之为平滑效应、伸缩效应。在这两种效应的影响下导致了海底地貌的不完善显示。通过调整测线的间距和测线的位置发现,为了完

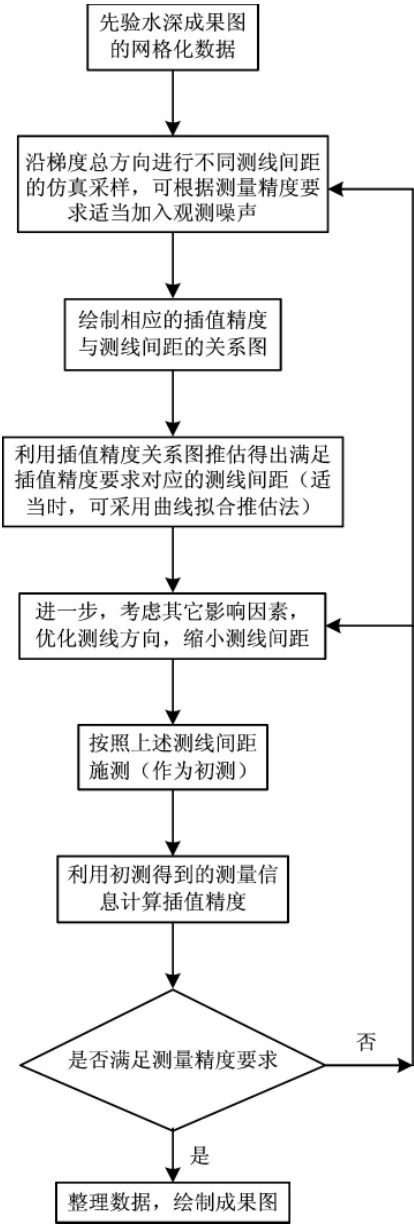


图 7 测线布设优化方法流程图

善地显示海底地形,必须将测线布设间距控制得很小,这样同沿梯度总方向测线相比就增大了工作量,降低了工作效率。

以上实验也充分表明测线方向选择的重要性,并且对每一个测线方向,存在一个满足预定测量精度要求的最大测线间距。显然,沿梯度总方向布设容许的测线间距最大,所需的测线数最少,测量效率最高。

3 测线布设优化方法

通过上一节的分析结果和认识,认为:单波束测量时,测线布设的基本原则是控制测线间的空白插值区域,使插值精度与测量精度相匹配,共同满足测量成果精度的总要求。

对于测线方向,其选择的主要内容是如何精确确定测区水深梯度总方向。首先对先验水深信息进行格网化,然后通过计算网格化数据每一点的梯度,进而求出测区的梯度

总方向。

对于测线布设间距的优化方法,可按图7所示的流程图来确定。应充分了解先验的海底地形信息,然后提出较为合理的初测方案,再根据初测得到的最新信息,进一步对测线布设方法进行优化,最终确保在该测线布设方式下,得到能满足预定测量精度的水深数据,并保持较高的测量效率。

4 结束语

针对如何合理确定测线布设方式使其可同时兼顾测量效率与测量精度这一问题,本文提出了一种全新的测线布设优化方法,整体研究结果表明:该方法是合理可行的,体现了逐步优化设计的思想,为高质高效地完成水深测量任务提供了有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 国家质量技术监督局. GB 12327-1998. 海道测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [2] IHO. IHO Standards for Hydrographic Surveys, S-44, 5th Edition[S]. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.
- [3] 刘雁春, 肖付民, 暴景阳, 等. 海道测量学概论[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [4] 叶久长, 刘家伟. 海道测量学[M]. 北京: 海潮出版社, 1993.
- [5] 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.
- [6] 夏伟, 刘雁春, 边刚, 等. 基于海底地貌表示法确定主测深线间隔和测图比例尺[J]. 测绘通报, 2004(3): 24-27.

Research on the Optimization Method of the Survey Line Layout in Hydrographic Surveying

CHENG Fang, YANG Xiao-hua, FU De-qiang

(91439 Unit, The People's Liberation Army of China, Dalian Liaoning 116041, China)

Abstract: The survey line layout is a significant process of hydrographic surveying technical design. The reasonable method of survey line layout can not only increase efficiency and reduce the cost, but also can describe the seabed topography detailedly. On the basis of analyzing the effect of the survey line layout on the depth survey, a new optimized method of survey line layout was given with the detailed flow diagram presented. The results indicate the feasibility of this method, which embodies the step-by-step design ideas and fits well with the practical requirement.

Key words: hydrographic surveying; interval of survey line; direction of survey line; interpolation accuracy