

王茂枚, 周广宇, 陈楠, 等. 基于高分辨率的多波束测量方案研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(S2): 385-389.

WANG Maomei, ZHOU Guangyu, CHEN Nan, et al. Multi-beam measurement technology based on high resolution [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(S2): 385-389.

# 基于高分辨率的多波束测量方案研究

王茂枚<sup>1</sup>, 周广宇<sup>1</sup>, 陈楠<sup>1</sup>, 蔡军<sup>1</sup>, 王远<sup>2</sup>

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210000; 2. 江阴市水利工程公司, 江苏 江阴 214400)

**摘要:** 多波束测量技术在测绘、水利等领域有重要的应用,《海道测量规范》第四部分对测线布设、测线间隔等多波束测量技术方案提出要求,其中最高等级的特等测量针对水平投影长度为1 m的水下目标,当识别物小于这个值时,没有相应的测量要求。对于河道流域范围,水下地形测绘、疏浚、水下抛石护岸等工程领域需要更精细的测量方案。基于多波束测量数据点云密度对于识别地形地物的要求;测量数据点距与测量扇面角的关系,确定合理的测线间隔以及相应测线是否需要往返测量。以实现全覆盖测量为前提要求,结合多波束测量数据纵向点距对于识别地形地物的要求,确定测量船速。以水下块石测量为例,通过多波束测量分辨率数学模型分别计算了平整地形与坡度地形测量船速、测线间隔等主要技术参数。研究成果可用于制订多波束高于特等级测量的方案。

**关键词:** 多波束分辨率; 地物识别; 点云密度; 水下抛石

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.S2.083

中图分类号: TV82

文献标志码: B

文章编号: 1000-0860(2021)S2-0385-05

## Multi-beam measurement technology based on high resolution

WANG Maomei<sup>1</sup>, ZHOU Guangyu<sup>1</sup>, CHEN Nan<sup>1</sup>, CAI Jun<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Institute of Hydraulic Research, Nanjing 210000, Jiangsu, China;

2. Jiangyin Water Conservancy Engineering Company, Jiangyin 214400, Jiangsu, China)

**Abstract:** Multi-beam measurement technology has important applications in the fields of surveying and mapping, water conservancy, etc. The fourth part of the "Specification for hydrographic survey" puts forward requirements for multi-beam measurement technical solutions such as survey line layout and survey line interval. The highest level of special measurement is for horizontal projection length. It is a 1-meter underwater target. When the recognition object is smaller than this value, there is no corresponding measurement requirement. For the scope of the river basin, engineering fields such as underwater topographic surveying and mapping, dredging, and underwater riprap revetment require more sophisticated surveying schemes. Based on the requirements of multi-beam measurement data point cloud density for identifying terrain and features; the relationship between the measurement data point distance and the measurement fan angle, determine a reasonable survey line interval and whether the corresponding survey line needs round-trip measurement. Based on the premise of achieving full coverage measurement, combined with the longitudinal point distance of multi-beam measurement data for identifying terrain features, the measurement ship speed is determined. Take underwater block stone measurement as an example, the main technical parameters such as the ship speed and line interval of flat terrain and slope terrain are calculated by theoretical models. The research can be used to formulate a general multi-beam measurement scheme.

**Keywords:** multi-beam resolution; feature recognition; point cloud density; underwater rock throwing

收稿日期: 2021-07-26

作者简介: 王茂枚(1983—),男,高级工程师,博士研究生,主要从事水下地形测量研究。E-mail: wangmaomei@163.com

通信作者: 周广宇(1979—),男,工程师,硕士,主要从事水下地形测量研究。E-mail: zgylhx@163.com

## 0 引言

相对于单波束的逐点探测,多波束阵列扫描测量技术具有全覆盖、高效率的测量优势。多波束测量技术在海洋测绘、水下地物探测、航道疏浚工程质量检测、水下护岸工程质量检测等众多领域有着广泛而重要的应用。实现测量全覆盖,满足实际测量项目要求,需要对多波束测量工作原理进行研究,保证测量准确性、精确性的同时兼顾效率。《水利水电工程测量规范》明确要求水下地形点的密度应以能反映水下地形特征为原则,全面、客观反映地形地物特征,需要全覆盖的高分辨率测量数据。《海道测量规范》第四部分技术设计中,对测线布设、测线间隔等多波束测量技术方案提出要求,其中特等测量针对水下目标水平投影长度为1 m,当识别物小于这个值时,没有相应的测量要求。对于河道流域范围水深相对较浅,因此可以设计相应的测量方案,现有的多波束测量方案不能满足特定工程的测量要求,比如水下抛石工程,块石粒径一般在0.5 m以下,没有相应的规范明确测量技术方案。

随着多波束仪器性能的提高,研究人员探索了平坦、坡度地形条件下的小型地物的精细探测方案。现有文献较少考虑地形起伏产生的影响,多波束每Ping采样周期也不够明确。实际表明坡度地形对测量技术方案要求有着重要影响,应纳入数模计算进行综合分析。为实现高分辨率的测量获取相对较高密度的点云数据,文中以Sonic2024多波束水下抛石地形测量为例,设计测量船速、测线间隔等测量方案。

## 1 数模组成

### 1.1 多波束全覆盖测量船速

多波束以Ping为单位发射波束阵列,Ping的更新与水深、测量扇面角相关,每Ping中各声波达到水底的距离不同,但通过延迟发射方法使得各基元声波同时到达相对距离不同的目标区域<sup>[12]</sup>,由此每Ping采集时间至少为测量扇面角边缘最远波束传播时间(见图1—图3)。从而每Ping采样周期 $T$ 可用如下公式确定。

$$T = 2H / C \cos \theta_a \quad (1)$$

式中, $H$ 为水深; $C$ 为水下声速取1500/s; $\theta_a$ 为1/2测量扇面角。

基于单Ping发射条件的多波束实现全覆盖测量,要求扇面边缘波束一个测深周期 $T$ 内的航行距离小于等于Ping之间的距离 $L$ (见图1—图2)。船速 $V$ 需满足: $VT \leq L$ 。可得到

$$V \leq C \cos \theta_a \tan(\theta_0/2) / \sqrt{2} \quad (2)$$

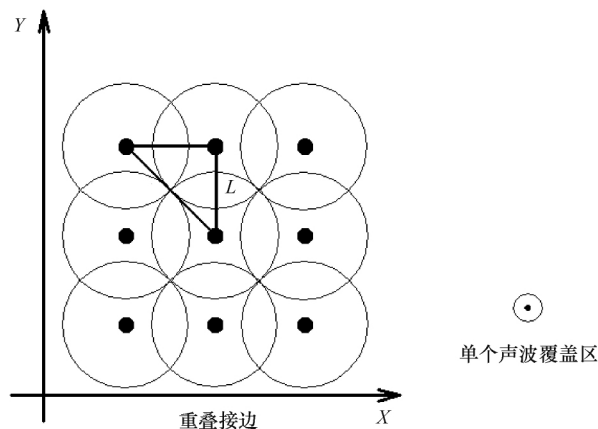


图1 全覆盖测量 Ping 间重叠

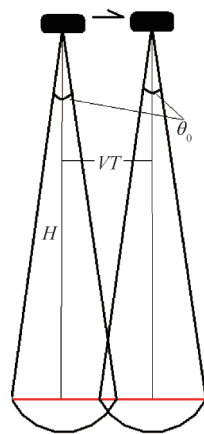


图2 全覆盖测量船速

Sonic2024多波束纵向发射波束角 $\theta_0$ 设为 $1^\circ$ ,则测量扇面角 $90^\circ$ 时,实现全覆盖的 $V$ 值不超过约13节的船速。

### 1.2 多波束测量纵、横向分辨率

多波束一个波束脚印内只估计一点的深度信息<sup>[13]</sup>,则多波束测量纵、横向分辨率近似为纵横向的测点点距。对于平整地形多波束一次全覆盖测量,多波束测量点云地形数据纵向点距与船速相关,为相邻Ping之间的船速与每Ping采样周期 $T$ 的积,通过控制船速可保持纵向点距。

#### 1.2.1 平整地形横向分辨率

由声波探测原理,多波束一次全覆盖测量中横向分辨率为

$$\Delta X_i^* = H \times [\tan \theta_{ai} - \tan(\theta_{ai} - \theta_i)] \quad (3)$$

分辨率平均值为

$$\Delta \overline{X^*} = \Delta X(\theta_{ai}), \quad \left( \theta_{ai} = \frac{\theta_a}{2} \right) \quad (4)$$

式中,  $\theta_s$  为仪器横向各个波束间角是固定值, 略小于单个波束张角( Sonic2024 波束张角为  $0.5^\circ$  ),  $\theta_s$  设为  $0.4^\circ$ ;  $\theta_{ai}$  为各波束脚印对应的测量扇面角,  $\theta_{ai} = i \times 0.4^\circ (i=1, 2, 3, \dots, \frac{\theta_a}{0.4^\circ})$ ;  $\theta_a$  约为每 Ping 最大测量扇面角值的  $1/2$ ;  $i$  自中央波束向两侧, 取整( 见图 3—图 5 )。

### 1.2.2 坡度地形横向分辨率

如图 4 所示, 边坡地形横向分辨率由几何空间关系得出

$$\Delta X_{li}^* = \frac{H_a \times \tan \theta_{ai} \times \sin(90^\circ - \theta_{ai})}{\sin(90^\circ + \theta_{ai} - \alpha)} - \frac{H_a \times \tan \theta_{a(i-1)} \times \sin[90^\circ - \theta_{a(i-1)}]}{\sin[90^\circ + \theta_{a(i-1)} - \alpha]} \quad (5)$$

$$\Delta X_{li}^* = \frac{H_b \times [\tan \theta_a - \tan \theta_{a(i-1)}] \times \sin[90^\circ + \theta_{a(i-1)}]}{\sin[90^\circ - \alpha - \theta_{a(i-1)}]} - \frac{H_b \times (\tan \theta_a - \tan \theta_{ai}) \times \sin(90^\circ + \theta_{ai})}{\sin(90^\circ - \alpha - \theta_{ai})} \quad (6)$$

式中,  $\theta_{ai}$  为各波束脚印对应的测量扇面角,  $\theta_{ai} = i \times 0.4^\circ (i=1, 2, 3, \dots, \frac{\theta_a}{0.4^\circ})$ 。

### 1.3 点云密度与点距

多波束测量数据中  $X$ 、 $Y$  为平面位置坐标,  $Z$  为高程。以矩形测量区域为例, 设  $X$ 、 $Y$  方向长为  $L_X$ 、宽为  $L_Y$ ,  $X$ 、 $Y$  方向点距分别为  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ , 假设测量数据呈正交等距均匀排列, 数据点云密度为, 测区内总点数记为  $S_{\text{总}}$ , 测区面积记为  $A_{\text{面}}$ , 则有下列关系式  $M = S_{\text{总}}/A_{\text{面}}$ ,  $A_{\text{面}} = L_X \times L_Y$ ,  $X_{\text{点数}} \approx L_X/\Delta X$ ,  $Y_{\text{点数}} \approx L_Y/\Delta Y$ ,  $S_{\text{总}} = X_{\text{点数}} \times Y_{\text{点数}}$ ,  $M \approx 1/(\Delta X \times \Delta Y)$

(7)

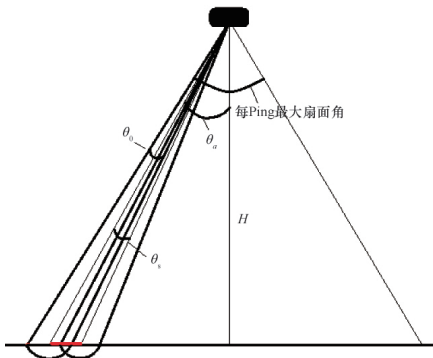


图 3 平整地形横向分辨率

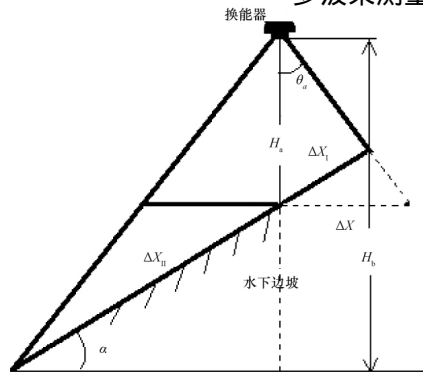


图 4 边坡地形横向分辨率

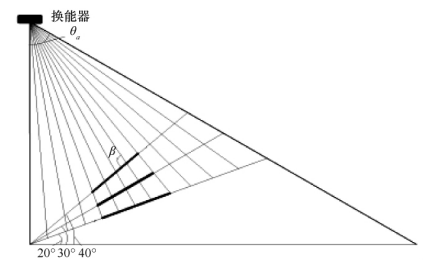


图 5 不同坡度与扇面角分辨率

## 2 工程实例

### 2.1 水下块石识别点距要求

文中以水下散抛石为例进行研究。水下块石被探测的点距要求( 见图 6 ), 参考块石粒径 1 是临界值, 设参考粒径 2 块石无声波脚印探测点覆盖。护岸块石中值粒径  $D$  一般为  $0.25 \text{ m}$  以上, 则基本保证任意分布的块石有 1 个以上的实测高程点  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  需满足

$$\Delta X = \Delta Y = \frac{D}{\sqrt{2}} \leq 0.17 \text{ m} \quad (8)$$

由点云密度与点距关系, 点云数据密度为每平方米 35 个实测点可以反映任意分布的水下块石, 这个点云密度作为反映抛石地形的真值。

### 2.2 平整地形的测量

保证水下每个块石覆盖一个波束脚印( 高程点 ) 的点距要求已在 2.1 小节论述。图 6 中纵向点距代表船速, 当纵向点距大于  $0.17$  时产生测量盲区, 即波束覆盖点落在块石之外。

以最大水深  $60 \text{ m}$  为例, 水下抛石地形实现多波束一次全覆盖高分辨率测量的船速、扇面角,  $\Delta \bar{X}$ 、 $\Delta \bar{Y}$  及值如表 1 所列。

由表 1 可知, 一次全覆盖测量实现 100% 的抛石数据采集率是在水深小于  $20 \text{ m}$  条件内, 超过该水深时, 需通过合理的测量方式来实现。

通过两次以上的加密全覆盖测量, 可获取加倍密度的原始测量点云数据。多波束等角测量模式中两次全覆盖测量的分辨率高低互补, 如图 7 所示, 测线 2 与测线 1、3 重叠覆盖区域, 此时测量数据点云密度增加 1 倍, 且最大点距必定小于等于一次全覆盖测量的平均点距。则有以下关系

$$S = (2 - P) \times H \times \tan \theta_a \quad (9)$$

式中,  $S$  为测线间隔;  $H$  为各区间最小水深;  $\theta_a$  测量扇面角;  $P$  测线间条带覆盖率。

多波束测量中, 测线间条带覆盖率需大于 10%。

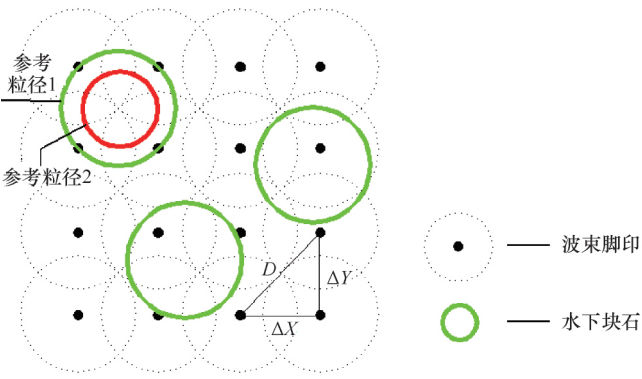


图6 点距与多波束脚印、块石关系

表1 平整地形水下抛石多波束一次全覆盖测量

水深范围 $H/\text{m}$	船速 $V/\text{节}$	计算参考扇 面角 $\theta_a/(\circ)$	纵向平均 点距 $\Delta \bar{Y}/\text{m}$	横向平均 点距 $\Delta \bar{X}/\text{m}$	点云密度 $M/\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$
<20	6.3	60	0.17	$\leq 0.18$	$\geq 33$
20~30	6.0	45	0.17	0.16~0.25	24~40
30~40	6.0	35	0.17	0.23~0.31	19~26
40~50	5.0	30	0.17	0.30~0.38	15~20
50~60	4.3	30	0.17	0.38~0.45	13~15
>60	3.4	$\leq 30$	—	—	—

相应要求及测量数据 $\Delta \bar{X}$ 、 $\Delta \bar{Y}$ 如表2所列,最小水深取3 m。其中多次覆盖测量数据点云密度按一次测量点云密度值与地形总覆盖率的乘积计算,总为多次全覆盖测量总点云密度。

2.3 边坡地形的测量

水下抛石工程大多在水下岸坡实施,需对边坡地形多波束测量进行研究。大多数情况下,边坡地形的纵向点距与平面地形基本一致,船速要求不变。另外无法确保避免多次全覆盖测量落入测量盲区,因此无论是否多次全覆盖测量,船速要求与一次全覆盖测量船速一致。

坡度地形测量的横向分辨率随着坡度及测量扇面角的变化而变化,直接求解式(5)、式(6)的极小值非常困难。

参考图5采用数值代入法相结合求解,此时的扇面角 $\theta_a$ 约在 $20^\circ \sim 45^\circ$ ,分别考虑 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 三种坡度情况下的分辨率。为便于计算分析波束间角取

表2 平整地形水下抛石多波束多次全覆盖测量

水深范围 $H/\text{m}$	测线间 隔 $S/\text{m}$	条带覆盖率以及 总覆盖率/%	测量方式	纵向点距 $\Delta \bar{Y}/\text{m}$	横向点距 $\Delta \bar{X}/\text{m}$	点云密度 $M/\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$
<20	—	10~50	测一次	0.08~0.17	0~0.14	36~50
20~30	20	100(200)	测一次	0.08~0.17	0.08~0.13	48~80
30~40	21	100(200)	测一次	0.08~0.17	0.12~0.16	38~52
40~50	23	100(300)	每隔一条测线往返测	0.08~0.17	0.1~0.13	45~60
50~60	29	100(300)	每隔一条测线往返测	0.08~0.17	0.13~0.15	39~45
>60	35	100(400)	每条测线往返 测	—	—	—

$5^\circ$ 计算,将上述数值带入式(5)计算,结果如表3所列。定向发射的波束随着测量距离增大,波束脚印随之增大。由此对于任意坡度,波束发射器到达该坡面越近则测量分辨率越小,则 $\beta$ 值越趋于 $90^\circ$ 则测量分辨率越小。因 $\beta = 180^\circ - (90^\circ - \alpha) - \theta_a$ ,则 $\theta_a$ 与坡度值 $\alpha$ 与越相近则获取的测量分辨率越高。测量分辨率最大差值比越小则数据点云密度越均匀。

依据 ArcGIS 分析张家港老海坝、扬州嘶马段等险工河段的坡度,表明坡度 $25^\circ \sim 35^\circ$ 占大多数, $45^\circ$ 为极大坡度值。所以控制测线间 $\theta_a$ 平均值在 $30^\circ$ 、最大值在 $35^\circ$ 左右为宜,即测量扇面张开角度在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。另外,已知 $H_1$ 时,有若未知水域 $45^\circ$ 边坡测量分辨率符合相应水深划分等级条件下的抛石识别要求,那么其它坡度值也符合相应要求(见图8),测线间隔 $S$ 与水深 $H$ 、测线间的测量扇面角 $\theta_a$ 、坡度角 $\alpha$ 之间的关系为

$$S(n) = H(n) \times \tan \theta_a(n+1) \quad (10)$$

$$H(n+1) = H(n) + S(n) \times \tan \alpha \quad (11)$$

在保证纵向点距小于0.17满足要求的基础上,进一步论证多波束坡度地形测量横向分辨率(点距),以形成合理测线间隔。

(1) 当 $H_1 < 20 \text{ m}$ 时,必然有 $\Delta X_i \leq \Delta X$ (见图8)。计算测线间隔仅需满足条带间的覆盖率大于10%,点距即点云密度基本满足要求。

(2) 当 $H_1 = 20 \text{ m}$ ,设测线间最大扇面角 $\theta_{a2}$ 取值 $37^\circ$ ,按公式(10)、(11)则 $S(n+1) = 15$ , $H_2$ 取值 $20 \sim 35 \text{ m}$  $\beta_1 \approx 23^\circ$ 。实现一次高分辨率的测量为主,以主要参考测线间的扇面角计算测线间隔。参考测线 $n+1$ , $L_1$ 段一次测量分辨率在 $0.22 \sim 0.43 \text{ m}$ 之间。同时 $L_1$ 段在测线 $n$ 、测线 $n+2$ 测量覆盖区域内,由分辨率与点距、点云密度的关系,每条测线进行一次全覆盖测量可满足水下抛石地形识别要求。

(3) 当 $H_2 = 35 \text{ m}$ ,为获得较高测量分辨率,随着水深的增加应减小测线间的最大扇面角。设 $\theta_{a3}$ 取值 $35^\circ$ ,则 $S(n+2) = 25$ , $H_3$ 取值 $35 \sim 60 \text{ m}$ , $\beta_2 \approx 22^\circ$ 。主要参考测线 $n+2$ , $L_2$ 段一次测量覆盖测量分辨率在



表 3 20°~40°扇面角测量三种坡度地形的分辨率

项 目	20~25° 扇面角	25~30° 扇面角	30~35° 扇面角	35~40° 扇面角
20°坡面	$0.082H_a$	$0.083H_a$	$0.087H_a$	$0.091H_a$
30°坡面	$0.077H_a$	$0.075H_a$	$0.077H_a$	$0.077H_a$
40°坡面	$0.073H_a$	$0.07H_a$	$0.069H_a$	$0.067H_a$
平均值	$0.077H_a$	$0.076H_a$	$0.077H_a$	$0.078H_a$
最大差比/%	12.3	18.5	26.1	35.8

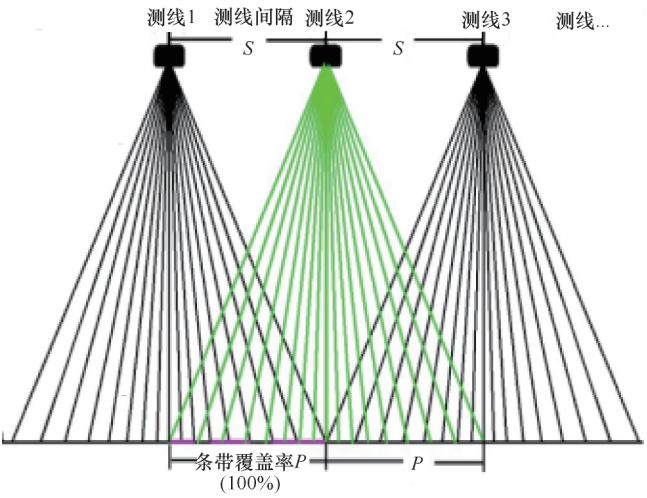


图 7 波束覆盖率与点云密度

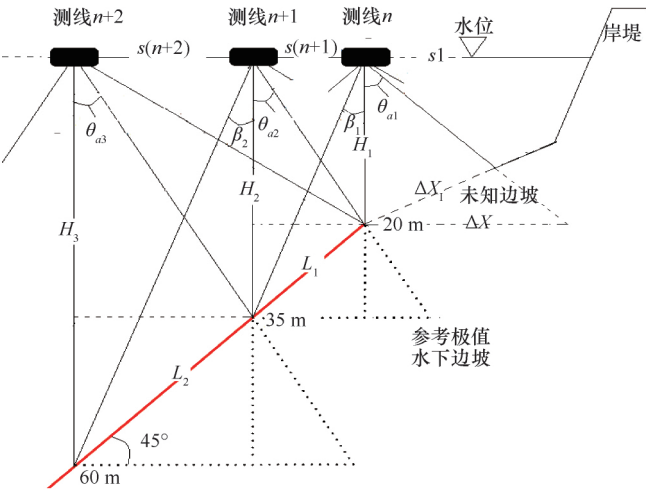


图 8 边坡测量方式示意

0.37~0.62 m 之间。测线  $n+2$  进行往返两次测量加密点云密度, 综合考虑  $L_2$  在测线  $n+1$ 、测线  $n+3$  测量覆盖区域内, 基本满足水下抛石地形识别要求。

(4) 当  $H_3>60$  m 时, 设测线间的最大扇面角  $\theta_{a4}$  取值  $30^\circ$ , 分辨率为水下块石粒径 2 倍以上。要反应

抛石地形该水深测线需重复多次测量(见表 4)。

需要指出的是, 由于边缘扇面角测量获取的数据误差较大, 而抛石地形的随机性, 点位值仅反映近距离(块石粒径)范围内地形。后期数据分析过程, 无论是 TIN 三角网、栅格建立地理模型, 或者是点云数据矢量分析, 在保证每个块石已经有测量数据点位情况下, 多次覆盖测量中扇面角度较大(测量误差大)的测量点将导致建模以及最终成果误差较大。所以应避免加入误差较大的点数据加入到原始数据, 由此多波束测量过程中需要严格控制最大测量扇面角。

表 4 多波束水下抛石地形测量方案

水深/ m	船速/ 节	测量扇面 角 $\theta_a/(^\circ)$	地形总覆盖 率/%	测线间隔/ m	测量 方式
0~20	6.3	50	125	10	测一次
20~35	6.0	23~37	200	15	测一次
35~60	4.3	23~35	300	25	往返测
60 以上	$<3.4$	$\leq 30$	400	35	往返测

综上, 为便于实际操作, 20~60 m 水深内的测线间隔统一为 15 m, 其它测量方式不变。若测量船只航行困难, 可将测线间隔限值统一调整为 20 m, 当水深达 20 m 以上时进行往返测, 测量获取的地形数据, 基本满足抛石地形测量要求。往返测同时可满足测量数据后处理阶段中仪器姿态校正的要求, 任选其中符合要求的测线进行姿态校正, 在满足地形识别要求的同时兼顾了测量效率。

3 结 语

在研究多波束平整、坡度地形测量分辨率的基础上, 分析水下抛石地形所需的点云密度, 计算抛石地形测量中的船速、测量扇面角、测线间隔等技术参数。较小的船速与较小的测线间隔是获得较高分辨率的有效方法, 在尽可能实现一次全覆盖高分辨率的测量的基础上进行多次全覆盖测量。鉴于水深条件对于长江河道, 测量数据基本能真实反映水下抛石地形。

本文研究可为修订水下抛石工程多波束测量规范提供参考, 也可用于制订其它多波束水下探测方案。随着多波束性能提高, 较小的波束角、多 Ping 同时发射等均可以提高测量分辨率以及测量效率。

(责任编辑 王海锋)