



波束测深质量控制难点及其在 盐田港工程中的应用*

孙洪瑞, 张登奎

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对多波束测深数据质量控制中遇到的难点, 对数据质量的控制方法和主要影响因素进行研究和 technical 分析, 通过采用重复测量和验证测量等方法, 提出大幅降低波束边缘误差的解决措施, 并以深圳港盐田东港区一期工程为例, 将2次复测成果与单波束检核测量结果进行对比。结果表明: 选择较好的海况、更换船型、强化传感器安装方式、优化数据采集参数等方法, 能够确保数据准确可靠、成果质量较高, 重点适用于工程量核算等高精度测量需求, 对类似工程提供重要参考价值。

关键词: 多波束测量; 质量控制; 测量精度; 盐田港

中图分类号: U652.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0283-06

Difficulties in multi-beam bathymetry quality control and its application in Yantian Port project

SUN Hongrui, ZHANG Dengkui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: For the difficulties encountered in the quality control of multi-beam bathymetry data, research and technical analysis are conducted on the control methods and main influencing factors of data quality. By adopting methods such as repeated measurements and verification measurements, this article proposes solution measures to significantly reduce the error of the beam edge. Taking the first phase project in the east area of Yantian Port, Shenzhen Port as an example, the results of secondary retest are compared and analyzed with the results of the single beam verification measurement. The results show that selecting better sea conditions, replacing ship types, strengthening sensor installation modes, optimizing data acquisition parameters and other methods, not only ensure that the data is accurate and reliable, but also achieve high quality results. It is mainly applicable to the high-precision measurement requirements such as engineering quantity accounting, and provide important reference value for similar projects.

Keywords: multi-beam measurement; quality control; measurement accuracy; Yantian Port

多波束测量技术在水运工程中具有广泛的应用领域, 包括航道测量、港口建设、疏浚工程、

水下地形测绘等。其高精度、高分辨率的特点使得该技术成为水运工程领域不可或缺的重要工

收稿日期: 2024-09-27

***基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 孙洪瑞 (1984—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为港口与航道工程测量数据处理与新技术应用。

具^[1]。尤其对于大型港口工程,采用多波束扫海技术可以全面掌握规划海域的海底地形、地貌,为规划设计和投资决策提供可靠的基础数据。随着工程建设的高质量发展,对高精度水下地形测量的需求也日益增加。

多波束测量系统通过发射和接收多个波束的声波信号,能够同时覆盖较大的水下区域,并获取丰富的水深数据。相比传统的单波束测深仪,多波束测量系统具有更高的测量精度和分辨率,能够更准确地反映水下地形的真实情况^[2-3]。此外,多波束测量系统逐渐实现了自动化与智能化,能够实时处理测量数据,生成高精度的三维地形图,并具备自动校正、误差补偿等功能^[4]。该特性大大提高了测量效率,降低了人工干预的需求。但多波束测量属于面测深,其实施要求严格,质量控制关键环节较多,影响成果精度的要素也较为复杂。因此,如何进行多波束测量质量控制及其成果精度评估尤为重要,且采取的方法宜经济合理。

1 多波束测深质量控制难点

多波束测深质量控制的难点主要体现在4个方面,其中环境因素和安装校准问题最难控制,对数据质量影响最大,见表1。

表1 多波束测深质量控制难点

Tab.1 Difficulties in multi-beam bathymetry quality control

影响因素	难点说明
系统复杂性	集成水声、计算机、导航定位和数字化传感器等多种技术,系统组成复杂,各环节之间的协同工作对测量精度影响较大 ^[5]
环境因素	水下环境复杂多变,包括水温、盐度、压力、潮汐、波浪、噪声等,这些因素都会对声波的传播产生影响,从而影响测量精度 ^[6]
安装与校准	安装和校准要求极高,任何微小的偏差都可能导致测量误差。此外,系统使用过程中的磨损和老化也会影响测量精度 ^[7]
数据处理复杂性	数据量大,处理过程复杂,包括数据滤波、噪声去除、潮汐改正、声速改正等多个步骤,任一环节处理不当都可能降低数据质量

2 数据质量的控制方法

2.1 基础数据核查

基础数据核查主要针对测量基准点的平高数据进行核查,包括平面控制点和水准点核查。

2.2 外业数据质量检查

外业数据质量检查包括3个方面,即测线布设合理性检查、船体坐标系检查、多波束系统误差校准标定检查,主要检查和消除多波束安装时产生的系统误差,包括横摇、纵摇和艏摇的校准^[8]。

2.3 多波束测量及成果精度评估

多波束测量的成果精度评估主要采用交叉验证/对比分析法和统计分析法^[9]。交叉验证/对比分析法是将单波束校核数据与多波束测量成果进行对比,评估测量精度,其深度比对互差需满足JTS 131—2012《水运工程测量规范》^[10]中表8.4.6的规定,见表2。

表2 深度比对互差要求
Tab.2 Requirements for mutual difference in depth comparison

水深 H/m	深度比对互差/m
$H \leq 20$	≤ 0.4
$H > 20$	≤ 0.2

统计分析法是对测量数据进行统计分析,评估数据的离散程度和误差分布,进一步验证测量精度。常采用均方根误差(E_{RMS})进行统计分析^[11-12]:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} \quad (1)$$

式中: n 为测点总数, h_i 为第*i*个测点的测量水深。

3 工程案例

3.1 测量目的

采用多波束测量系统对深圳港盐田东港区一期工程规划水域进行精细化水深测量,为水、陆域布置提供高质量数据成果,确保港池疏浚、水工结构工程量计算的准确性。

3.2 工程概况

水下地形扫测区域见图1,测量面积约1.5 km²。



图 1 水域测量范围

Fig. 1 Measurement scope of water area

3.3 仪器设备

主要测量仪器包括 NORBIT WBMS 多波束测深系统、一体化罗经和运动传感器 Octans、华测 P3 差分 GPS、AML 表面声速探头和声速剖面仪、数据采集和显示软件 Qinsky 和多波束后处理软件 CARIS 等。

现场组装不锈钢支架, 将多波束换能器固定在测量船舷右侧, 并将 NORBIT WBMS 多波束测深系统、一体化罗经和运动传感器 Octans、华测 P3 差分 GPS 等各辅助设备相连接, 进行软硬件系统的调试, 见图 2。

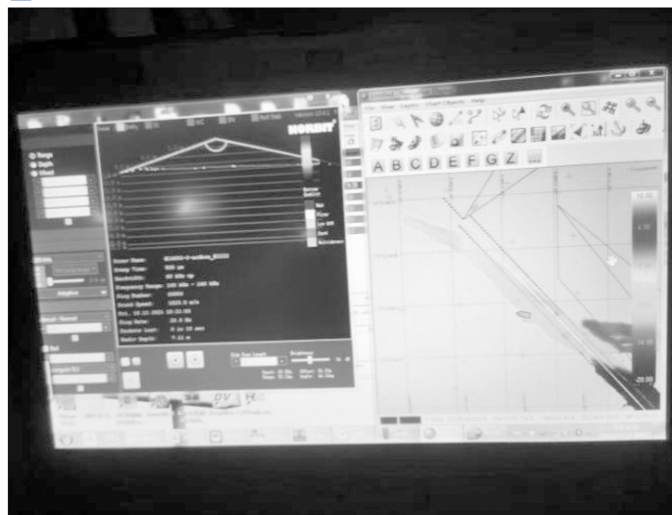


图 2 多波束安装与测试 (首次测量)

Fig. 2 Installation and testing of multi-beam (first measurement)

3.4 问题分析

首次多波束扫海测量成果与已有资料的高程

数据存在明显差异(重合区域), 可能引起较大的工程量误差。在确认测量基准、外业数据质量和和

内业数据处理等均无误后，按照 1:2 000 比尺对全域进行单波束测量，发现两套成果之间不存在系统性的高程差值(即不存在固定差值)，高程差值普遍在±0.20 m 以内，局部区域高程差值较大，最大值约±0.50 m。根据式(1)计算单波束数据与多波束数据高程中误差为±0.16 m。原因可能是外业采集时波束开角过大、部分校正参数的精确度不高，导致条带边缘水深数据误差较大。

选择 4 块较为简单的区域进行划分，见图 3。单波束测量与多波束测量土方量计算(方格网法)对比结果见表 3。

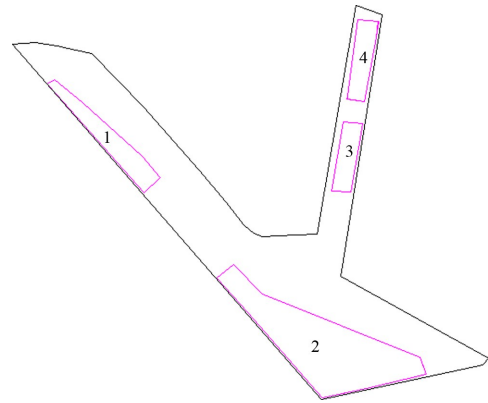


图 3 区域划分
Fig. 3 Regional division

表 3 分块工程量计算
Tab. 3 Block-by-block engineering quantity calculation

区域	面积/万 m ²	单波束工程量/万 m ³	多波束工程量/万 m ³	工程量差/万 m ³	反算高差均值/m	备注
1 区	8.130 87	21.234 43	19.774 57	1.459 86	0.17	平坦区域
2 区	30.255 96	71.723 87	74.413 00	-2.689 13	-0.08	平坦区域
3 区	4.239 33	34.595 67	34.024 80	0.570 87	0.13	平坦区域
4 区	4.977 61	42.768 87	42.086 38	0.682 49	0.14	平坦区域
全区	142.308 47	925.344 83	907.372 34	17.972 49	0.11	重叠区域

由表 3 可知，各区域的单波束与多波束测得的工程量计算结果存在一定差异，其中第 1 块区域的工程量差异最大(反算高差均值为 0.17 m)，但全区差异不明显。

3.5 解决方案

全面梳理多波束测量中质量控制关键点，加强环境因素以及安装、校准两方面的控制力度，并进行重复测量。具体方案包括：1) 多波束测量时，尽量选择海况较好的天气(风力宜小于 6 级，浪高 0.4 m 以内)，选择中大型船舶；2) 设备安装牢固稳定，确保各传感器运转正常，尽量降低多波束探头的抖动；3) 测量期间，及时准确地动态调整各控制参数，波束开角尽量控制在 120° 以内，条带重叠度控制在 30% 以上，减少因校正参数精度不足导致的边缘水域误差偏大；4) 在多波束条带重叠区域中央位置布设检测线，见图 4。采用单波束测深仪进行检核测量，提高质量检核的有效性。

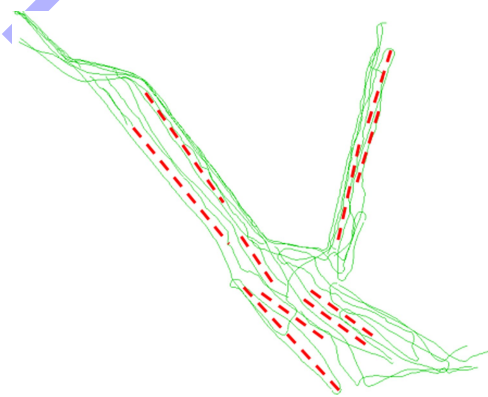


图 4 单波束检测线布置
Fig. 4 Layout of single-beam detection lines

为检核第 2 次复测成果的数据质量，按照 1:2 000 比例尺对整个水域测区进行单波束测量，重点对多波束测线的条带重叠区域中央位置进行单波束检核测量。

根据图 3 的分块范围，再次对 4 个区域分别进行单波束与多波束测量的工程量计算，并与表 3 中首次测量时的反算高差均值进行对比，结果见图 5。

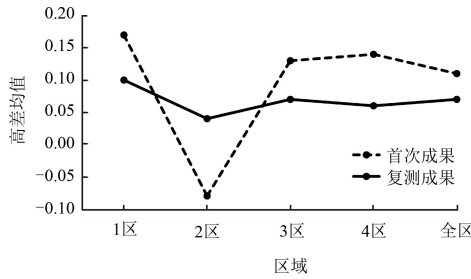


图 5 工程量反算高差均值

Fig. 5 Mean volume of height difference for back-calculation of earthwork

由图 5 可知, 复测的数据成果较为稳定, 说

明成果质量较高。

以单波束测点周边 0.5 m 为半径提取多波束数据作为该单波束数据的共点, 进行单波束与多波束测量数据对比, 结果见表 4。

根据表 4 数据, 本次单波束与多波束测量互差统计中 95.3% 的结果不大于 0.20 m, 根据式(1)统计的单波束数据与多波束数据高程中误差为 ± 0.07 m。符合《水运工程测量规范》要求, 很好地解决了局部范围高程互差较大的问题, 同时满足对工程量核算的高标准要求。

表 4 单波束与多波束测量高程互差

Tab. 4 Elevation difference between single-beam measurement and multiple-beam measurement

差值范围/m	$ \Delta \leq 0.05$	$0.05 < \Delta \leq 0.10$	$0.10 < \Delta \leq 0.20$	$0.20 < \Delta \leq 0.40$
比例/%	24.4	41.3	29.6	4.7

4 结论

1) 以满足工程量核算为目的的多波束测量成果精度指标应高于 JTS 131—2012《水运工程测量规范》规定, 高程方向数据的偶然误差宜在 ± 0.10 m 以内, 且非系统误差。

2) 通过优化环境因素以及安装、校准等方面的控制措施, 可以明显提升多波束测量的整体精度。

3) 随着多波束技术的不断进步及应用领域的不断拓展, 传感器的集成化、参数调节和数据处理的自动化程度愈加成熟, 多波束测深在水运工程领域的应用前景将更加广阔。

参考文献:

[1] 陈璞然. 多波束测深系统在 1:2 000 水下测量中的应用分析[J]. 北京测绘, 2018, 32(5): 583-585.
CHEN P R. Application and analysis of multi beam sounding system in 1:2 000 underwater measurement[J]. Beijing surveying and mapping, 2018, 32(5): 583-585.

[2] 齐晓迪. 多波束测绘系统在现代海洋测绘中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(8): 200-203.
QI X D. Application of multibeam surveying and mapping system in modern marine surveying and mapping [J]. Geomatics & spatial information technology, 2021, 44(8): 200-203.

[3] 杨超. 多波束探测技术在海底地形测量中的应用研究[J]. 城市勘测, 2023(3): 151-154.
YANG C. Research on application of multi-beam detection technology in subsea topographic survey [J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2023 (3): 151-154.

[4] 祝慧敏. 多波束测深系统水下地形测量关键技术与精度评估[J]. 经纬天地, 2022(2): 4-6.
ZHU H M. Key technology and accuracy assessment of underwater topographic survey of multi-beam sounding system [J]. Survey world, 2022(2): 4-6.

[5] 李家彪, 郑玉龙, 王小波, 等. 多波束测深及影响精度的主要因素[J]. 海洋测绘, 2001(1): 26-32.
LI J B, ZHENG Y L, WANG X B, et al. Multibeam sounding and the main factors affecting the precision [J]. Hydrographic surveying and charting, 2001(1): 26-32.

[6] 王小龙, 朱文泉, 李亚东, 等. 高精度水深测量的误差影响因素及控制措施[J]. 水运工程, 2022(S2): 103-107.
WANG X L, ZHU W Q, LI Y D, et al. Influencing factors of errors in high precision bathymetry and control measures [J]. Port & waterway engineering, 2022 (S2): 103-107.

[7] 朱庆, 李德仁. 多波束测深数据的误差分析与处理[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(1): 1-4.
ZHU Q, LI D R. Error analysis and processing of multibeam soundings [J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 1998, 23(1): 1-4.

[8] 吴超, 殷晓冬, 张立华, 等. 基于不确定度的多波束测深数据质量评估方法[J]. 海洋测绘, 2009, 29(5): 11-14.
WU C, YIN X D, ZHANG L H, et al. The method of quality estimation in multibeam sounding data based on uncertainty [J]. Hydrographic surveying and charting, 2009, 29(5): 11-14.

[9] 李宜龙, 殷晓冬, 张立华, 等. 交叉检查在多波束测深精度评估和误差分析中的应用[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 119-123.
LI Y L, YIN X D, ZHANG L H, et al. The application of crosscheck in multibeam accuracy evaluation and error analysis[J]. Ocean technology, 2006, 25(1): 119-123.

[10] 中交天津航道局有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., CCCC Tianjin Harbor

Survey and Design Institute Co., Ltd. Specifications for port and waterway engineering survey: JTS 131-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

[11] 汪诗奇, 王莹, 陈科, 等. 多波束数据内业处理方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(11): 219-221.
WANG S Q, WANG Y, CHEN K, et al. Research on indoor processing methods of multi-beam data [J]. Geomatics & spatial information technology, 2022, 45(11): 219-221.

[12] 张运鑫, 赵卫丽, 王群. 多波束水下扫测水底地形测量方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(S1): 302-304.
ZHANG Y X, ZHAO W L, WANG Q. Research on multi-beam scanning method for underwater topographic survey[J]. Geomatics & spatial information technology, 2022, 45(S1): 302-304.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 236 页)

[9] PTV GROUP. PTV VISSIM User Manual[M]. Karlsruhe: PTV AG, 2015.

[10] 北京市市政工程设计研究总院有限公司. 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012(2016 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd. Code for design of urban road engineering: CJJ 37-2012 (2016 edition) [S]. Beijing:

China Architecture & Building Press, 2016.

[11] 交通运输部公路局, 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路工程技术标准: JTG B01—2014[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
Highway Bureau of the Ministry of Transport, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd. Technical standard of highway engineering: JTG B01-2014 [S]. Beijing: China Communication Press, 2015.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 257 页)

[5] 沈翀, 范晓进, 汪志飞. 徕卡 MS60 全站扫描仪在电厂烟囱倾斜监测中的应用分析[C]//中国电力规划设计协会. 2019 年勘测分会测量专业经验交流论文集. 北京: 中国电力出版社, 2019: 840-844.
SHEN C, FAN X J, WANG Z F. Application of Leica MS60 in inclination monitoring of power plant chimney [C]//China Electric Power Planning & Engineering Association. Proceedings of Survey Branch Measurement Professional Experience Exchange Meeting 2019. Beijing: China Power Press, 2019: 840-844.

[6] 朱宁宁. 三维激光扫描在地铁隧道形变监测中的应用[J]. 测绘工程, 2015, 24(5): 63-68.
ZHU N N. Application of 3D laser scanning to the subway tunnel deformation monitoring [J]. Engineering of surveying and mapping, 2015, 24(5): 63-68.

[7] 王研. 三维激光扫描仪在复杂环境中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(1): 153-154.
WANG Y. Application of three dimensional laser scanner in complicated environment [J]. Geomatics & spatial information technology, 2014, 37(1): 153-154.

(本文编辑 王隽)