



# 基于沉管隧道工程的高精度多波束测深技术\*

历 昌<sup>1,2,3</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456;

2. 天津水运工程勘察设计院有限公司, 天津 300456; 3. 天津市水运工程测绘技术重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 在沉管隧道的施工过程中, 碎石整平的质量控制是沉管顺利沉放的重要前提。以深中通道沉管隧道基础碎石整平为例, 针对该工程提出的 $\pm 4$  cm 高精度施工要求, 结合工程现场实际对多波束测量方法进行一系列优化调整, 提出一种深度直接标定法提升精度, 并通过点状法、线状法等多重手段对多波束数据进行比对验证。结果表明, 该多波束测深技术可满足工程的精度要求; 可应用该套多波束测深技术进行现场的碎石整平、管节回填等多个环节的成果检测。

**关键词:** 多波束测深系统; 沉管隧道; 深中通道; 碎石基础整平; 高精度

中图分类号: P229

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0198-06

## High precision multibeam sounding technology based on immersed tube tunnel project

LI Chang<sup>1,2,3</sup>

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T., Tianjin 300456, China;

2. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Surveying and Mapping for Waterway Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** Quality control of gravel leveling is an important prerequisite for successful installation of the immersed tube tunnel during construction. Taking the immersed tube tunnel foundation gravel leveling project of the Shenzhen-Zhongshan Link as an example, aiming at the high-precision construction requirement of  $\pm 4$  cm proposed for this project, we put forward a series of optimization adjustments to the multibeam measurement method based on the construction site, propose a direct depth calibration method to improve precision, and compare and verify the multibeam data by multiple methods, such as point method and line method etc. The results show that this multibeam sounding technology can meet the engineering requirements. The application of the multibeam sounding technology can meet the result detection of multiple stages of construction, such as gravel leveling and backfilling of tube.

**Keywords:** multibeam sounding system; immersed tube tunnel; Shenzhen-Zhongshan Link; gravel foundation leveling; high precision

沉管隧道基础的稳定性直接影响沉管结构的稳定性及耐用性, 按处理方法主要分为先铺法和后铺法。先铺法工艺是在基槽开挖完成后, 铺设碎石基础垫层, 采用特制整平装置调整碎石面至设计高程, 沉管落座于碎石垫层上, 典型案例包

括我国港珠澳大桥沉管隧道、美国旧金山快速交通隧道、韩国釜山巨济隧道及我国在建的深中通道沉管隧道; 后铺法工艺是在基槽开挖后, 在基槽内设置临时支座, 管节沉放至支座, 将填充物通过管道对沉管底部进行充填, 达到基础处理的

收稿日期: 2023-03-20

\*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (TKS20200301、TKS20220104)

作者简介: 历昌 (1987—), 男, 工程师, 从事海洋工程勘察及测绘。

目的, 又称压砂法, 典型案例包括日本多摩川隧道、博斯普鲁斯海峡隧道、我国南昌红谷隧道等。就应用场景而言, 先铺法多用于外海区域, 后铺法多用于内河或江中沉管<sup>[1]</sup>。深中通道沉管隧道

地理位置位于珠江口核心区域, 水文条件复杂, 管节具备超长、超宽、变宽等特点, 隧道基础采用先铺法工艺, 其中碎石垫层基础的限差要求为  $\pm 40\text{ mm}$ <sup>[2-3]</sup>。深中通道地理位置见图 1。

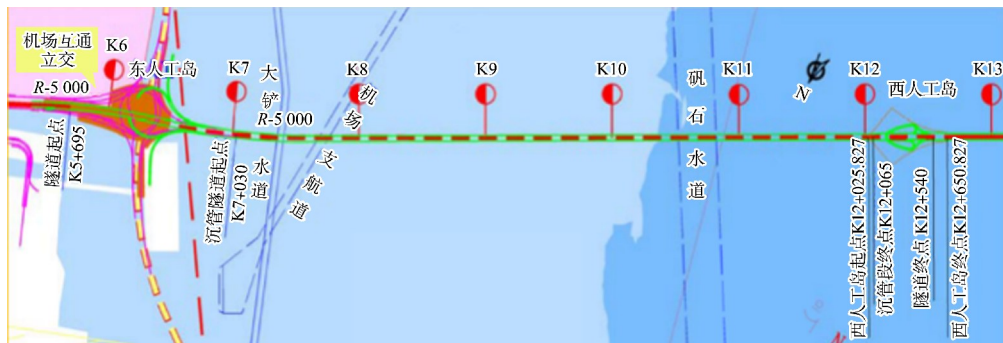


图 1 深中通道位置

## 1 研究方法

多波束测深系统以其全覆盖、高精度、高效率等诸多优点, 已成为当今水运工程施工的主流测量设备, 广泛应用于港口码头、航道水深测量、水下结构物检测、疏浚及验收等相关工程中。

本文依托深中通道沉管隧道碎石基础整平工程, 由于该工程限差要求极高, 目前国内与国际水运工程相关标准均未有涉及。为解决工程难题, 首先从理论角度对多波束误差来源进行系统分析, 优化作业方案, 提出一种标定方法, 将多波束精度提升至  $\pm 40\text{ mm}$ , 并采取多重手段进行验证。

### 1.1 多波束测深系统分析

#### 1.1.1 误差源分析及优化

多波束测深系统由多波束测深仪及辅助设备组成<sup>[4]</sup>。鉴于影响多波束测量精度的因素较多且不易控制<sup>[5]</sup>, 结合现场施工实际, 采取了一系列控制方法, 用以削弱各作业过程带来的误差: 选用 Teledyne SeaBat T50-P 多波束测深仪, 采用精度优于  $\pm 2\text{ cm}$  的全球定位系统-载波相位动态实时差分方法 (GPS-RTK) 进行平面定位; 使用 1 脉冲/s 时间同步技术消除时间延迟; 设置  $60^\circ$  小开角模式以减小边缘波束影响; 严格执行绕  $x$  轴旋转的俯仰角度、绕  $y$  轴旋转的纵向翻滚角度、绕  $z$  轴的偏航角度参数的校正; 采用 RTK 三维水深测量方

法, 免去布设验潮站工序; 换能器通过不锈钢杆与船刚性连接, 确保稳定牢固<sup>[6-9]</sup>。

#### 1.1.2 绝对深度直接标定

T50-P 多波束测深仪具备  $6\text{ mm}$  的标称量程分辨率, 由于多波束系统辅助传感器较多, 误差源随之增多。根据误差传播定律, 测深误差会超过本工程限差要求。为此, 还需要对多波束测深值做进一步校正。故本文提出一种深度直接标定法: 选择特征明显、表面光滑的目标物, 其高程可通过高精度方法获取, 在每次多波束测量前, 进行一次直接标定。选取预制场内  $E_{24} \sim E_{32}$  管节标定测量所用观测桩为目标物, 该观测桩位于预制场船坞内, 桩顶绝对高程通过与已知高等级控制点进行控制测量, 采用全站仪观测得到, 可达到毫米级精度。多波束正式扫测前, 船坞内注水, 测量船完成观测桩扫测, 将扫测结果与光学结果进行拟合计算, 求取多波束强制改正值。该方法反映了多波束测量各误差的综合, 标定结果更加准确。

### 1.2 多波束测深精度验证

传统精度评估采用的井字形测线或主检测线比对<sup>[10]</sup>无法满足工程需求, 本文提出新的验证方法。

#### 1.2.1 点状法

点状检测法分为测量杆法和纳淤箱法。

1) 测量杆法是一种直接方法,制作一个垂直测量杆,底部焊接一块  $80\text{ cm}\times 80\text{ cm}\times 2\text{ cm}$  (边长 $\times$ 边长 $\times$ 厚)硬质平板,顶部安装 GPS 天线,杆中部装有可移动式浮筒,使测量杆可以保持垂直,测量杆水面以上高度超过施工船舶甲板及生活楼,避免卫星遮挡,对采集的 GPS 大地坐标经过深中坐标系的七参数转换及高程异常改正,可以得到实时的碎石高程。该方法的优点为测量速度快、精度高、不需要额外数据处理。

测量杆法适用于整平架海试期间,海试区域位于  $E_{20}$  管节基槽附近,距离 S08 标施工区域距离最近约  $0.5\text{ km}$ , 最远约  $1.7\text{ km}$ 。海试区域平均水深约  $17.5\text{ m}$ , 沉管基槽平均水深在  $22\sim 27\text{ m}$ 。海试期间,测量杆与多波束作业时间不超过  $1\text{ h}$ , 保证测量环境的一致性。

2) 纳淤箱法是一种间接方法,需要 2 次测量做差计算结果。杨华等<sup>[11]</sup>根据港珠澳大桥  $E_{15}$  管节基槽严重回淤,提出纳淤箱监测回淤量的方法。在管节正式浮运至隧址前相关工序内,在海底定期布放回收纳淤箱,量取沉积物厚度,以监测回淤量及验证多波束精度。该方法属物理方法,不会受各种声学因素干扰,测量绝对精度高,能够达到毫米级。

通过利用两次多波束结果做差得到回淤量,并统计与纳淤箱回淤量差值。纳淤箱法适用基槽施工期间,涵盖  $E_{24}\sim E_{32}$  管节施工环节,基槽平均水深在  $22\sim 27\text{ m}$ 。纳淤盒回收时间与多波束作业时间不超过  $0.5\text{ h}$ 。作业区域一致,且水深、海水温度、盐度、密度、浊度及水动力环境保持了一致,消除测量环境变化带来的误差影响。

### 1.2.2 线状法

线状法是一种单点声呐方法,在整平作业期间可同步进行。碎石基础是管节顺利沉放的前提<sup>[12]</sup>,在碎石整平过程中,整平架上安装有垂直杆,顶部有 GPS 天线,4 个支腿安装有倾斜仪装置测定整平架姿态,通过料斗口附近安装的高精度单点声呐对碎石面进行实时高程测量,单点声

呐与 GPS 天线相对关系通过全站仪精确标定得到。单点声呐距碎石面约  $1.5\text{ m}$ ,通过测量声速值输入软件,软件可由 GPS 结合姿态、相对关系计算得到碎石面实时高程,由于测距很短,测量绝对精度高。该方法的优点在于误差来源少,绝对精度优于多波束,也可有效验证多波束数据精度。

纳淤箱法适用碎石整平期间,涵盖  $E_{24}\sim E_{32}$  管节施工环节,碎石整平作业与多波束作业时间不超过  $1\text{ h}$ 。同样保持了作业区域及海洋环境等参数的一致性。

## 2 试验过程

### 2.1 多波束测量的数据采集及处理

采用上述优化的多波束系统对试验区域进行数次扫测,多波束数据经位置修正、姿态编辑、声线追踪及潮位改正、合并计算等流程<sup>[13]</sup>后,输出间距  $0.1\text{ m}$  的点云数据。

### 2.2 数据检核

#### 2.2.1 点状检测法

1) 测量杆法。整平架海试期间,整平船吊机将测量杆平板下放至碎石垄面,测量碎石垄面高程,采用多波束系统对海试区域进行扫测,三维图见图 2。

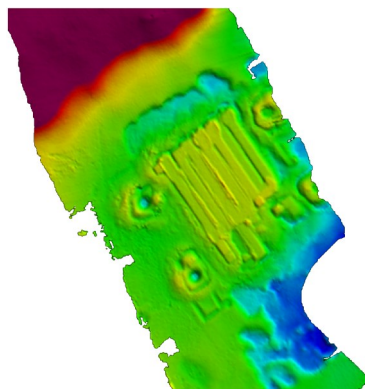


图 2 整平架海试多波束扫测三维图

2) 纳淤箱法。 $E_{29}$  管节基槽粗挖完成后,于基槽内布放 10 个纳淤箱,覆盖管节基槽区域。纳淤箱定期回收,经静置沉淀量取回淤厚度,通过多波束两次扫测差值计算,可间接得到回淤厚度,统计两者回淤差值并绘制表格。

2.2.2 线状检测法

整平作业开始，声呐即实时记录数据，作业结束后将整平数据导出。采用多波束对整平区域进行扫测，按照 0.1 m 间距进行展点。统计多波束与整平数据差值，绘制统计图表。

3 比对结果

3.1 点状结果

3.1.1 测量杆法

测量杆共比对 12 个点，结果见表 1。测量杆与多波束最大差值为 27 mm，最小差值-4 mm。

表 1 碎石垄面测量杆与多波束测量比对结果

比对点号	东坐标/m	北坐标/m	设计值/m	测量杆测量值/m	测量杆与设计差值/mm	多波束测量值/m	多波束与设计差值/mm	测量杆与多波束差值/mm
1	243 120.33	145 159.11	-17.770	-17.678	22	-17.670	30	8
2	243 120.77	145 157.51	-17.770	-17.711	-11	-17.690	10	21
3	243 122.59	145 156.21	-17.770	-17.685	15	-17.680	20	5
4	243 115.73	145 163.96	-17.770	-17.678	-2	-17.680	20	22
5	243 084.81	145 144.82	-17.681	-17.683	-2	-17.670	11	13
6	243 086.73	145 142.69	-17.681	-17.687	-6	-17.680	1	7
7	243 089.58	145 138.36	-17.681	-17.697	-16	-17.670	11	27
8	243 093.09	145 132.76	-17.681	-17.690	-29	-17.690	-9	20
9	243 102.19	145 139.64	-17.627	-17.616	11	-17.620	7	-4
10	243 099.72	145 142.57	-17.627	-17.616	-12	-17.620	7	19
11	243 097.43	145 145.30	-17.627	-17.616	4	-17.610	17	13
12	243 092.78	145 150.96	-17.627	-17.616	-5	-17.610	17	22

3.1.2 纳淤箱法

采用 4 期回淤监测数据，选择纳淤箱半径 50 cm 内多波束数据与纳淤箱数据进行比对，将纳淤箱监测

结果与多波束监测结果进行比对验证，结果见图 3。可以看出，多波束结果与纳淤箱结果基本相符，差值最大为 1.4 cm，验证了多波束数据的准确性。

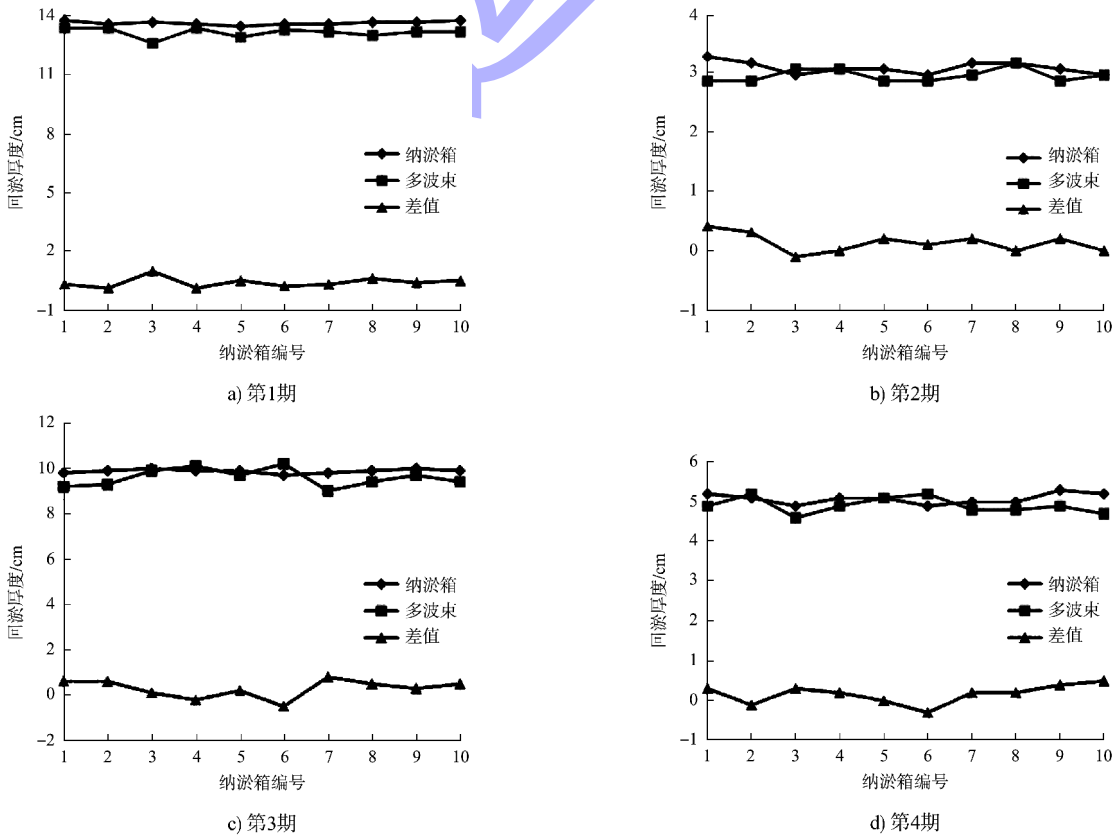


图 3 4 期回淤监测数据比对



### 3.2 线状结果

对多波束数据及整平架声呐数据进行差值分析,共统计水深数据 25 473 个,按照 0.02 m 的区间间隔,绘制差值分布见图 4。

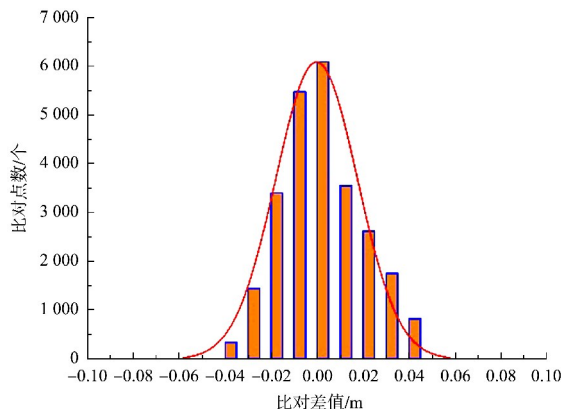


图 4 多波束与整平架数据差值分布

多波束结果与整平架结果差值统计最大为  $\pm 0.04$  m,最小为 0.00 m,偏差值分布具有对称性,小于  $\pm 0.02$  m 的差值数据占比达 93% 以上。

### 3.3 总结

测量杆、纳淤箱属点状方法,整平架属线状方法,虽精度高但效率低。多波束测深验证结果比对良好,表明该套多波束测深系统可以满足施工要求。3 种检测方法对比见表 2。可以看出,多波束测深系统的全覆盖面状方法,兼具检测精度高、作业效率高等优点,成为回淤监测及基础检测的首选方法。

表 2 3 种检测方法对比

检测方法	检测原理	作业效率	检测精度	覆盖范围
点状法	GPS/物理方法	中	高	低
线状法	单点声呐	高	高	中
面状法	多波束声呐	高	高	高

## 4 工程应用

### 4.1 浅点探测

采用该套多波束测量方法,可满足沉管隧道施工诸多环节的质量检验,应用场景十分广泛。

在基槽施工(块石抛弃、碎石整平等)过程中,不可避免会存在块石振密强度不够、碎石落淤等现象,导致部分块石区域及碎石垄顶超过限差要

求,需要对高点进行二次振密、刮平及清理工作。多波束的剖面视图可快速探明高点区域,指导水下刮刀进行清理,并可采用多波束确认清理效果。探测到的碎石垄高点及清理后的垄面,见图 5。最终经多波束验收,所有管节碎石垄高程满足要求,确保了管节顺利沉放。

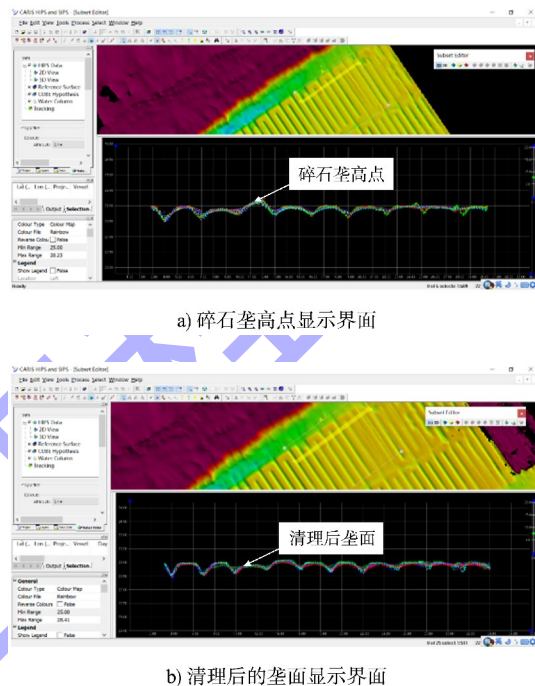


图 5 多波束探测碎石垄高点及清理后的碎石垄面三维图

### 4.2 管节回填

管节回填分多道工序,各工序都有严格回填要求。通过多波束扫测,可直观查看不满足回填标准区域,见图 6,及时指导补填,多波束成果海量点云数据可供 Hypack 软件进行断面绘制及工程量统计等工作。

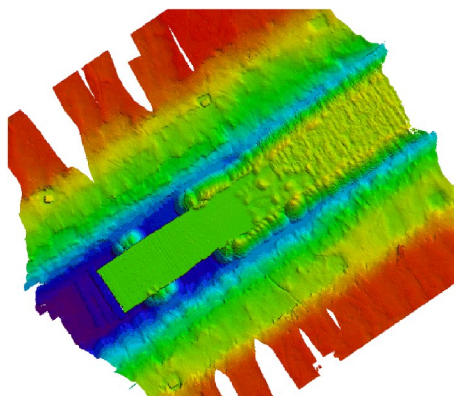


图 6 管节回填多波束三维地形图

## 5 结语

1) 为满足深中通道沉管隧道碎石基础限差的高精度要求, 从理论角度分析多波束误差源并结合工程实际针对性给出了误差削弱方法, 提出一种标定方法使多波束绝对测深精度大幅提升。

2) 采用多波束优化测量方法对数个试验区域进行扫测, 利用 GPS 高程测量、回淤监测、单点声呐等不同方式对多波束结果进行比对验证。结果表明, 多波束结果与其他方式结果比对良好, 满足精度要求。

3) 多波束可在沉管隧道施工的多个环节进行应用, 施工作业效率得到显著提升。

4) 通过一系列方法及试验, 将多波束绝对测深精度提升至满足工程的 $\pm 40$  mm 极高精度要求, 圆满完成了 S08 标全部管节的碎石整平作业, 有效确保了管节的顺利安装, 可为后续类似工程的高精度测量提供参考。

## 参考文献:

- [1] 冯海暴, 苏长玺. 沉管隧道基础处理方法研究分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 33-38.
- [2] 王崇明, 孔维达, 雷鹏, 等. 沉管隧道碎石基础整平监测技术研究[J]. 水道港口, 2020, 41(2): 244-248.

(上接第 136 页)

从经济效益上看, 施工采用非禁航施工的作业方式, 对通航影响较小, 可以保障正常通航的经济效益, 同时工期的缩短更有利于成本控制, 减少机械和人力的投入。

## 6 结语

1) 通过分析研究河段附近水位变化过程, 提出将施工时间提前至中水期进行, 在保证足够的通航尺度的同时, 实现了非禁航施工。同时通过优化疏浚区及抛泥区位置、现场航道布置及施工顺序, 进一步提高疏浚施工效率。

2) 从实施效果来看, 施工质量符合设计要求, 施工工期较枯水期禁航实施可大幅缩短, 从而降低航道维护疏浚对正常通航的影响, 具有较大的社会 and 经济效益。

- [3] 宋神友, 陈伟乐, 金文良, 等. 深中通道工程关键技术及挑战[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 143-152.
- [4] 王萧寒, 王俊刚, 卢军民. 水工建筑物水下三维检测精确定位分析[J]. 水运工程, 2021(10): 85-89.
- [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.
- [6] 田勋, 肖付民, 朱小辰, 等. 多波束测深系统各误差的传播影响规律分析[J]. 海洋测绘, 2011, 31(1): 23-27.
- [7] 肖付民, 黄毅, 张永厚, 等. 表层声速误差对多波束测深数据的影响分析[J]. 海洋测绘, 2021, 41(1): 27-30.
- [8] 张志伟, 暴景阳, 肖付民. 多波束换能器安装偏差对海底地形测量的影响[J]. 海洋测绘, 2016, 36(1): 51-54.
- [9] 黄辰虎, 陆秀平, 欧阳永忠, 等. 多波束水深测量误差源分析与成果质量评定[J]. 海洋测绘, 2014, 34(2): 1-6.
- [10] 章家保, 程李凯, 朱瑞虎, 等. 多波束测深系统在水下检测码头接缝中的应用[J]. 水运工程, 2019(7): 99-104.
- [11] 杨华, 王汝凯, 韩西军, 等. 港珠澳大桥沉管隧道基槽泥沙回淤研究总述及创新实践[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 125-132.
- [12] 吴瑞大, 任朝军, 吕黄, 等. 沉管隧道管节沉放施工技术[J]. 水运工程, 2013(5): 176-180.
- [13] 肖付民, 郭立新, 金绍华, 等. CARIS HIPS 多波束测量数据后处理教程[M]. 北京: 测绘出版社, 2015.

(本文编辑 王璁)

## 参考文献:

- [1] 李文杰, 杨宁, 杜洪波, 等. 长江上游船舶大型化对典型污染排放的影响[J]. 水运工程, 2022(2): 100-105.
- [2] 肖锋, 柯丰茂, 刘新明. 土质变化对疏浚效率的影响规律初探[J]. 中华建设, 2011(3): 90-91.
- [3] 王嘉卿, 杨凯, 黄金晶. 施工土质和疏浚装备对绞吸挖泥船生产效率的影响分析[J]. 港口科技, 2021(11): 44-47.
- [4] 王海生. 影响疏浚船舶施工效率的因素及解决办法[J]. 智能城市, 2021, 7(4): 132-133.
- [5] 赵浩程. 长江口 12.5 m 深水航道运行期维护疏浚效率分析[J]. 水道港口, 2021, 42(5): 664-669.
- [6] 何艳军, 马李伟, 何旭, 等. 单纯疏浚技术在长江上游卵石浅滩整治中的应用[J]. 水道港口, 2013, 34(3): 239-242.

(本文编辑 王璁)