

# 耙吸挖泥船浚测一体化系统研究

高翔

(长江航道工程局有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 本文针对目前耙吸挖泥船疏浚施工过程中, 疏浚与测量分离, 施工效率和效益不高的问题, 进行了耙吸挖泥船疏浚测量一体化系统研究。主要采用高密度声呐阵列技术进行疏浚测量一体化系统设计, 并对系统精度进行测试。结果表明系统精度符合有关要求, 能够实现浑浊的施工水域全自动化、高精度的水深测量和河床地形探测, 实现疏浚施工与工程测量的同步及实时水深测量数据和施工管理系统结合。将浚测一体化系统运用于疏浚船舶, 能有效提高疏浚施工的质量和效率。

**关键词:** 耙吸式挖泥船; 疏浚; 测量; 一体化

**中图分类号:** U674.31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006—7973 (2020) 07—0050—04

疏浚测量是疏浚作业的重要工作之一, 尤其现代疏浚工程中, 及时得到准确的水下地形资料十分重要, 直接影响到工程的进度。关于疏浚测量, 学者们已经进行了系列研究: 孙银根等针对疏浚施工中, 水砣或测试板打出的深度往往与高频测深仪所测数据不一致的问题, 从超声波测深原理和量化数据方面分析了浮泥层对高频测深仪的影响, 并提出几种解决方案; 郭雄强等将卫星精准定位、多声波技术用于疏浚测量, 实现了对海洋的底质类型、淤泥厚度等深度精准测量; 施永富设计了一种轻便型航道疏浚测量系统, 并将系统用于内河航道图测量, 研究结果表明该系统能够直观准确反映疏浚施工质量, 在实际应用中效果显著; 王庆浩将彩色竹竿和测深锤代替 GPS 和测深仪用于实际疏浚施工测量, 施工结果表明该测量方法具有较好的技术效益和经济效益; 万滔研究了适用于绞吸挖泥船的实时测量系统, 该系统能实现浚前、浚中和浚后水深数据测量, 施工质量实时控制; 李素江提出将 GPS PPK 潮位测量技术用于超长航道疏浚工程测量, 并将其用于工程实际, 实践发现, 相比 GPS RTK 技术, GPS PPK 技术具有精度高、可靠、现势性好等优势。目前, 关于疏浚测量的研究较多, 但大部分只是针对疏浚测量技术进行改进优化研究, 对于实时测量系统的研究还比较少, 由于疏浚施工和测量的分离, 施工成本高、数据时效差、效率低能耗高等弊端还未得到解决。

考虑到上述问题, 本文提出了一种适用于耙吸挖泥船的疏浚测量一体化(以下简称“浚测一体化”)系统, 该系统主要基于高密度声呐阵列技术, 并采用疏浚同步核心算法和多维数据修正技术等, 配备浚测一体化系统软件, 能实现船舶疏浚施工与工程测量同步, 施工质量实时控制, 从而有效缩短测量周期, 提高施工效率和质量, 提升施工效益。

## 1 高密度声呐阵列

针对传统声呐测量技术在浑浊水域测量时误差较

大、周期较长等问题, 本文提出了一种适用于河床地形检测的高密度声呐阵列, 其中主要包括: 能量聚焦、动态降噪及多设备集成等技术。

### 1.1 能量聚焦技术

由于测量环境水域浑浊、水体成分复杂, 导致被测河床出现局部回波紊乱、波束脚印放大、噪信比提高, 这会严重影响检测精度。通过在高密度声呐阵列中使用能量聚焦技术, 在单一测量周期内(50~100 毫秒)缩短单次发射波长(约 3~5 微秒)、增加发射次数(约 10~20 次)、增大发射功率, 使被测区域在该测量周期内被更密集的声波重复覆盖, 即会导致脚印内回声能量和脚印外回声能量级别被放大。同时能量聚焦技术的使用, 原始声呐检测数据量也被放大约 10~20 倍, 使得数据及时传输和处理工作变得更为复杂和困难, 所以相应的在后端数据处理单元, 通过增加多片高速 DSP 和 FPGA 的方式来解决这一问题, 通过多片高速 DSP 协同工作, 分片流水式运行来满足海量数据的及时运算。

### 1.2 动态降噪技术

由于本项目的应用场景是疏浚水域, 其水质较湖泊、海洋更为浑浊且含各类悬浮物, 势必造成水体声学噪声较多; 施工区域因船舶施工形成的紊流、水花以及气泡都会造成声呐噪声。针对上述噪声的产生原因和实际情况, 在高密度声呐阵列中增加了水体噪声预识别技术和动态信噪比调节技术, 在前端进行噪声抑制, 大大减少了检测结果中的噪点和野值。

### 1.3 多设备集成技术

在高密度声呐阵列中不但集成了声呐多波束发射装置和多波束接收阵列, 还集成了惯导测姿装置、表面声速测量装置、海量测量数据双向通信设备。通过集成惯导测姿装置, 使得通过高密度声呐阵列精确河床地形, 实现了高密度声呐阵列在测量过程中无需校准, 并对测量过程中的船舶横摇、纵摇、航向变化等因素进行了前端修正, 既提高测量精度还减少后端数据修正运算量。

通过集成表面声速测量装置，实时测量当前水域的表面声速，为后端数据运算和分析提供精确的声速数据。在河床地形检测应用场景下，后端需要大量的水下声呐波束测量原始数据即辅助设备数据，其中包含水体噪声数据、回波能量数据、回波检波数据、横摇、俯仰、航向角、声速数据等，这些海量数据需要在最小延时范围内传输给后端数据处理系统，同时还接收来自后端系统的配置和控制指令，通过在高密度声呐阵列中集成海量数据双向传输设备，实现对原始数据在本地压缩后高速传输至后端系统。

## 2 系统实现

### 2.1 系统组成

耙吸挖泥船浚测一体化系统的组成主要包括：高密度声呐阵列测深系统、升降测量平台、计算机及网络系统、系统软件。如图 1 所示为测量机构安装示意图，在船舶艏部左右对称设置两个测量井，在每个测量井内安装一套自动升降测量机构，高密度声呐阵列安装于测量机构上。测量机构采用分段式组装模式，无需上坞即可拆装维护，具备导轨自动除污功能。测量井结构通道内焊接有定向导轨，升降平台上安装有自润滑滑块，升降平台在定向导轨约束下做上下升降运动，当收回和放下到位时通过升降平台上的自动锁紧机构锁紧。高密度声呐阵列固定安装在升降平台内，实现校准全自动完成，无需人工进行任何的测前校准工作。

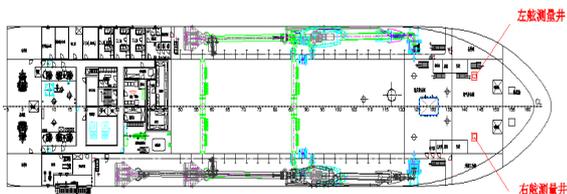


图 1 测量机构安装示意图

当开启测量模式时，自动升降机构将水下基阵伸出船底板外；当测量结束时，自动升降机构将高密度声呐阵列收回至船体内。

测量过程无需人工干预，自动完成测前准备、测量过程中数据采集和传输、测后的数据自动清洗校准和成图，以及成图数据的自动叠加显示和网络化传输。开展浚前测量工作时，船舶施工人员仅需在系统软件中设置待测区域，并依照系统自动生成的航测控制线在待测区域内航行即可完成浚前水深数据的测量，测量数据自动剔除野值并自动成图，支持数据的多种模式显示。浚中测量即在船舶施工的同时开展测量，此时高密度声呐阵列扫测的数据即是耙头即将施工区域的水深数据，可为施工人员提供及时的水深数据指导，浚中测量时测量数据

的显示采用冒泡方式显示，直观明了，并可以根据当前耙头位置和耙头轨迹预测，重点显示即将施工区域水深数据。浚后测量的操作流程类似于浚前测量，可充分利用施工间隙、抛泥航行等时间来完成浚后测量，浚后测量数据显示支持与浚前数据叠加显示、浅点自动搜索和显示等功能，以便于施工人员利用浚后数据进行施工质量检查。

### 2.2 系统性能

测量宽度：耙吸式挖泥船浚测一体化系统测量宽度超过 10 倍水深。

测点间距：测量水深点间距  $\leq 0.5$  米，完全满足施工测量要求。

测深范围：0.5 米 ~ 100 米。

测深精度：符合 JT/T790-2010 特级或一级精度。

测深设备最大功率  $\leq 500W$ 。

吃水调整范围：1 ~ 15 米，根据船舶吃水、横倾角、纵倾角与测量装置下放深度进行自动修正。

声速调整范围：1400 ~ 1600m/s，分辨率 0.1m/s。

系统工作环境温度：- 5℃ ~ 50℃。

数据：无需配备测量导航（外业）软件和数据后处理（内业）软件。

## 3 精度测试

### 3.1 高密度声呐阵列精度测试

#### 3.1.1 高密度声呐阵列安装校准

根据相关测量技术要求，需要对浚测一体化系统的横摇偏差、纵摇偏差和艏向偏差等三个参数进行校准，校准方法如下：

(1) 布置两条平行测线，每条测线往返测量各一次。

(2) 以相同的航速完成 4 条测线的测量。

(3) 使用 Hypack 软件，完成校准测线数据处理。

(4) 使用 Hypack 软件的 Patch 功能模块，按照技术要求中规定，选择合适的测线和校准顺序，分别计算出横摇偏差、纵摇偏差和艏向偏差。

(5) 重复 (2) - (4) 两次，对每个参数得到三组校准，统计校准平均值和中误差。

采用 Hypack 软件的 Patch 功能模块，进行横摇偏差、纵摇偏差、和艏向偏差的校准参数计算。对三组校准数据分别进行处理，得到校准参数如表 1 所示：

表 1 校准参数

组别	校准 1	校准 2	校准 3	校准结果统计		
				平均值	中误差	校准结果
横摇偏差 (度)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04
纵摇偏差 (度)	-3.5	-3.3	-3.4	-3.4	0.10	-3.4
艏向偏差 (度)	-0.8	-0.7	-0.7	-0.73	0.06	-0.7

由表 1 可知, 高密度声呐阵列的安装偏差参数分别为: 横摇偏差 0.04 度, 纵摇偏差 -3.4 度, 纵摇偏差 -0.7 度。横摇偏差、纵摇偏差和艏向偏差的中误差分别为 0.00 度、0.10 度和 0.06 度, 满足《多波束测深系统测量技术要求 JT/T790-2010》中要求的, 横摇中误差小于 0.05 度、纵摇中误差小于 0.3 度和艏向中误差小于 0.1 度的要求。

### 3.1.2 内符合精度测试

完成横摇偏差、纵摇偏差和艏向偏差测定与校准后, 对其内符合精度测试(综合测深误差测试), 测试方法如下:

(1) 选择水深大于或等于测区内最大水深、水下地形平坦的水域进行。

(2) 按正交方向分别布设 2 条测线; 每个方向的测线测量两次。

(3) 按照相同航速测量, 得到 4 条测量的数据。

(4) 使用 Hyapck 软件处理测量数据, 并分别得到 4 条测线的测深点数据。

(5) 每次选择 4 条测线中的 2 条, 对比重叠部分的水深, 统计水深比对不符值点数, 不符值点数不应超过参加总比对点数 15%, 其中, 不符值限差参照公式 1 中的方法计算(本测试不符值限差为 0.29 米)。

(6) 4 条测线两两比对, 共进行 6 次统计, 得到 6 次比对结果和所有比对的总结果。根据所选用测试方法得到内符合精度测试如表 2 所示:

表 2 内符合精度测试统计表

序号	比对总点数	符合点数量	符合点比例	超限点数量	超限点比例
1	103,430	102,146	98.76%	1,284	1.24%
2	51,744	50,164	96.95%	1,580	3.05%
3	50,997	49,427	96.92%	1,570	3.08%
4	54,520	52,851	96.94%	1,669	3.06%
5	53,797	52,159	96.96%	1,638	3.04%
6	101,621	100,330	98.73%	1,291	1.27%
总和	416,109	407,077	97.83%	9,032	2.17%

由表 2 可知, 超限点比例最大值为 3.08%; 6 组合并统计时, 总比对点数为 416,109, 超限点数量仅为 9,032, 超限点比例为 2.17%。6 组对比结果和合并统计结果均远优于《技术要求》中该规定的不超过 15% 的要求。

### 3.1.3 外符合精度测试

内符合精度测试满足限差要求后, 还应对水深大于或等于测区内的最大水深、水下地形平坦的水域采用单波束测深仪对系统进行水深精度比对, 测试方法如下:

(1) 使用检测板的方式对单波束测深精度进行校准。

(2) 选择水深大于或等于测区内最大水深、水下地形平坦的水域进行。

(3) 高密度声呐阵列测量: 按正交方向分别布设 2 条测线; 每个方向的测线测量两次。按照相同航速测量, 得到 4 条测量的数据。

(4) 单波束测量: 沿正交方向、按与多波束测线平行的方式布设两组平行线, 每组测线 3 条。按照相同航速测量, 得到单波束测量数据。

(5) 以单波束测深结果为参照, 比对高密度声呐阵列测深系统测量结果, 统计水深比对不符点的数量, 计算不符点比例, 给出外符合精度测试结果。

使用 Hyapck 软件对高密度声呐阵列和单波束测量数据进行处理, 以单波束测深结果为参考, 对高密度声呐阵列测量的水深精度进行比对, 各测点的测量结果统计如表 3 所示:

表 3 高密度声呐阵列与单波束测深比对统计表

高密度声呐阵列测深点数	单波束测深点数	重合位置点数	符合点数量	符合点比例	超限点数量	超限点比例
482343	8532	12456	12220	98.11%	236	1.89%

由表 3 可知, 对于 12456 个重合点, 有 236 个点超过《多波束测深系统测量技术要求 JT/T790-2010》规定的相符值限, 超限点比例为 1.89%, 满足《多波束测深系统测量技术要求 JT/T790-2010》规定的超限点比例不超过 15% 的要求。

### 3.2 实船精度测试

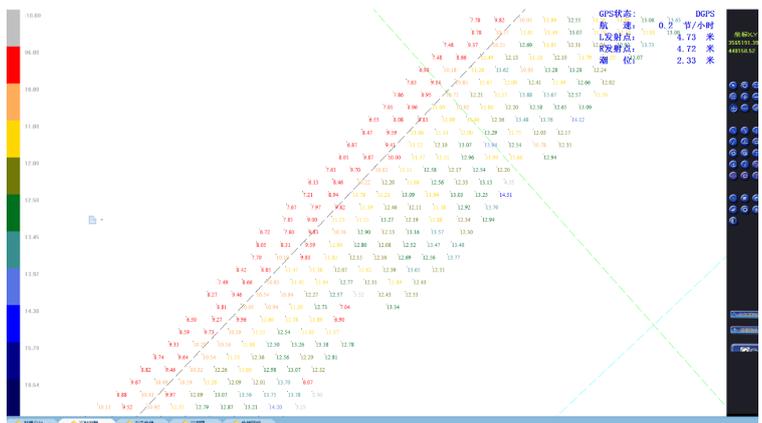
将测一体化系统安装至长鲸 7 号耙吸挖泥船, 并在长江口岸直水道附近施工过程中进行精度测试, 测试方法如下:

(1) 在同一施工区域进行多次反复测量, 然后对测量数据进行随机比对。

(2) 在同一施工区域针对不同浚次进行测量, 形成单独记录文件, 结合施工轨迹进行地形比对。

(3) 安排测量队对同一施工区域进行高密度测量, 通过系统软件中的数据比对功能模块对上述 1 和 2 的数据进行比对。

对比数据如图 2 所示:



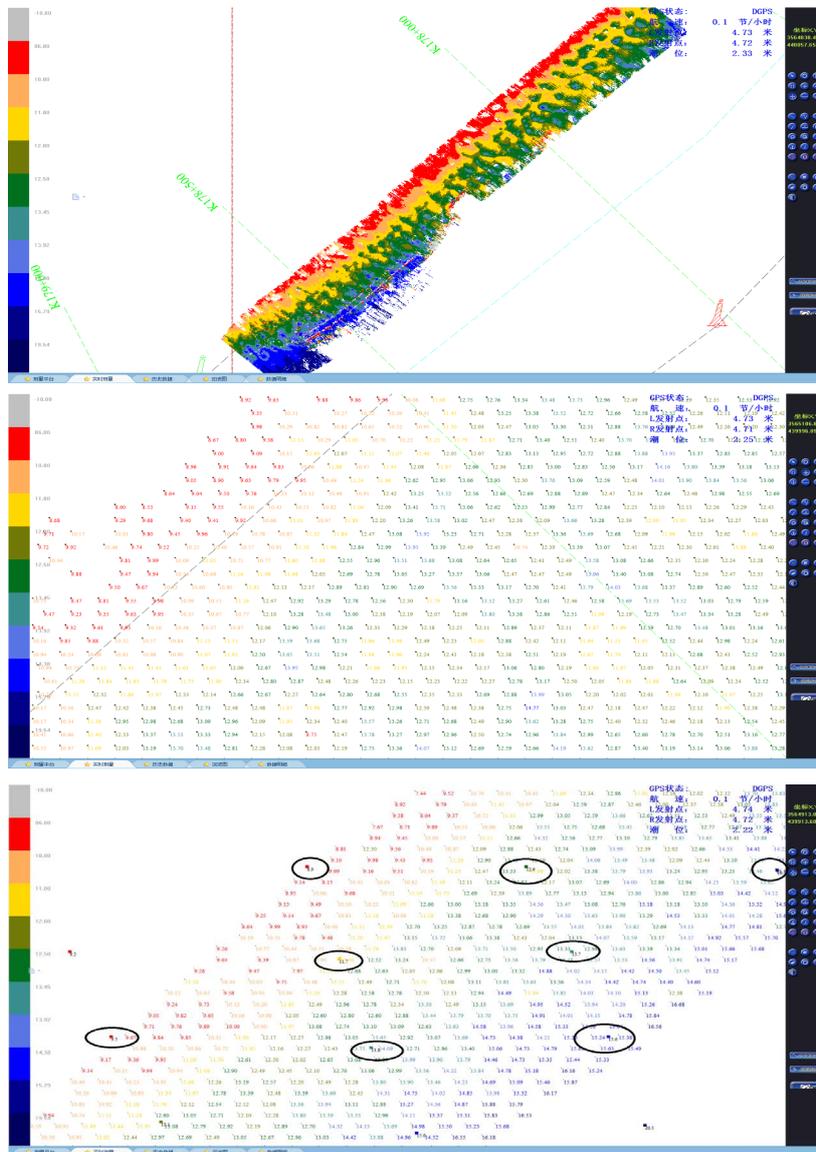


图2 实验测试数据对比

#### 4 结论

(1) 利用密度声呐阵列技术,并集成了疏浚同步核心算法和多维数据修正等技术手段,设计了一套适用于耙吸挖泥船浚测一体化系统。

(2) 浚测一体化系统各项精度指标均符合有关系统测量精度技术要求,能够实现复杂疏浚水域的水深测量和河床地形探测。

(3) 耙吸挖泥船浚测一体化系统能够实时为疏浚控制系统提供精确的河床感知数据,实现施工和测量同步进行,能有效解决传统疏浚施工中浚测分离的弊端,提高疏浚施工的质量和效率。

#### 参考文献:

[1] 武建中,卢志炎,盛晨兴.我国疏浚业的现状与展望[J].中国水运,2017(02):14-16.  
 [2] 陈云.疏浚业将大有可为[J].施工企业管理,2010(12):32-33.

[3] 施永富.轻便型航道疏浚测量系统开发及应用研究[J].科技资讯,2015,13(31):70-71.

[4] 刘树东,李素江.疏浚工程高效、高精度多波束测量方法[C].世界疏浚协会,中国疏浚协会.2010:62-70.

[5] 孙银根,王蕾,杜媛安.浮泥层对高频测深仪在疏浚测量中的影响分析[J].中国水运.航道科技,2019(01):76-80.

[6] 郭雄强,刘力,刘思航,等.探究现代海洋测绘及通信技术在港航道疏浚工程测量中的应用[J].科技风,2017(14):126.

[7] 施永富.轻便型航道疏浚测量系统开发及应用研究[J].科技资讯,2015,13(31):70-71.

[8] 王庆浩.彩色竹竿在疏浚工程测量中的应用[J].矿山测量,2016(01):33-36.

[9] 万滔.绞吸挖泥船疏浚实时测量技术的研究与应用[J].船舶,2015,26(04):91-94.

[10] 李素江,王华原.GPS PPK 潮位测量技术在疏浚测量中的应用[J].水道港口,2012,33(02):178-184.