

菜子湖水深测量方案设计

二〇一八年七月

第一章 绪论

1 区域概况

菜子湖，为长江北岸支流水体，跨安徽省桐城县、枞阳县两县。水面由白兔湖、嬉子湖、菜子湖 3 个湖区组成。菜子湖区，位于中部，以车富岭为界，与白兔湖为南北向相连，与嬉子湖因小麦嘴圩圈建，仅以宽 200 米，长 1000 米的水域呈东西向相通。菜子湖与白兔湖、嬉子湖的湖水浑然一体，于双河口接枞阳长河经枞阳闸入长江，构成统一的菜子湖水系。全流域面积 3346 平方公里，湖泊总面积 226 平方公里。



图 1 菜子湖形状及区域

菜子湖，为桐城与枞阳共有水域，两县基本平分。东西长 22 公里，南北平均宽约 8 公里。供水河流主要为大沙河。湖底海拔 8 米。相应水位 14 米时，面积为 225.35 平方公里，平均水深 4.3 米，容水量 9.26 亿立方米。1956、1967、1968 年，该湖曾因大旱干涸。

白兔湖，亦为桐城与枞阳共有水域。南北长 16 公里，东西宽 4 至 5 公里，过松山后与菜子湖水面相接。湖底海拔 9 米。相应水位 14 米时，水面积 60 平方公里，平均水深 3.6 米，容水量 2.16 亿立方米。

嬉子湖，与白兔湖隔 2 至 3 公里宽的丘岗。湖面狭长，南北长 14 公里，东西宽 2 至 3 公里。湖底海拔 9.5 米。相应水位 14 米时，水面积 33 平方公里，平均水深 3 米，容水量约 1 亿立方米。

引江济淮工程是一项以城乡供水和发展江淮航运为主，结合灌溉补水和改善巢湖及淮河水生态环境为主要任务的大型跨流域调水工程。引江济淮工程之后菜子湖水深会有明显地增加。

2 主要成果指标

- (1) 导航定位指标（平面精度指标）：平面定位精度<10cm
- (2) 测深精度指标：测深综合精度<10cm

第二章 高精度水下地形测量方案

1 系统组成

精密水下地形测量主要借助 GPS-RTK 提供的瞬时平面解和垂直解，通过姿态参数，将之归位计算到换能器处，为换能器提供瞬时垂直基准；为消除异常定位数据的影响，外部罗经数据也应该作为系统的一个组成部分。因此，整个系统的设备组成如表 1 所示。

表 1 系统组成

仪器名	数量 (台/套)	用途
双频 GPS 接收机	2/3	精密 RTK 定位（导航）及 PPK 测量
信标 GPS 或者其他类型 导航接收机	1	辅助导航

姿态传感器 MRU	1	船姿监测，提供姿态 roll、pitch 和 Heave 参数
全站仪及棱镜	1	测定测量船上各传感器在船体坐标系 VFS 下坐标
水准仪及水准尺	1	水准联测及潮位测量中辅助参数测量
测深仪	1	测深
电罗经	1	辅助定位数据的位置修正
声速剖面仪 SVP	1	声速测量
Hypack 软件	1	数据采集
发电机	2	供电

2 设备安装

测量船上各单元设备安装如图2所示：

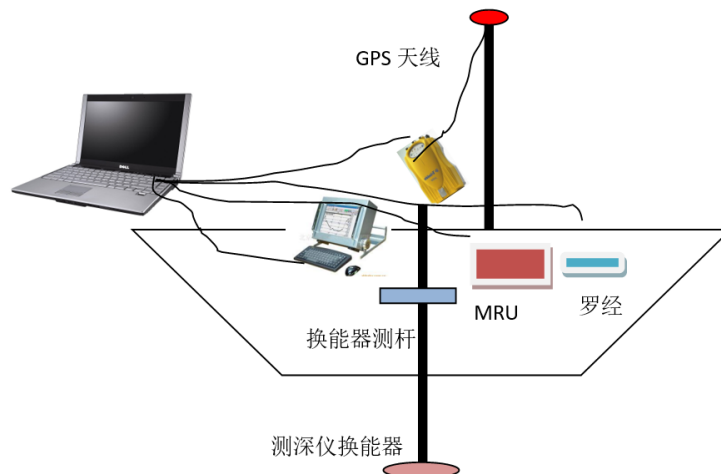


图 2 测量船上各传感器安装位置示意图

实际安装中：

- (1) GPS 天线尽量安装在测量船重心上方，减少姿态因素对其影响；
- (2) MRU尽量安装在测量船重心位置或者重心上方位置；
- (3) 罗经安装时轴向与测量船龙骨方向一致，可借助全站仪进行初始方位和安装偏差校准；

（4）对于专业测量船，测深仪换能器尽量安装在测量船重心正下方位置；若为简易安装，则考虑将换能器及其测杆安装在接近GPS的船舷边上，且具有一定的吃水；

（5）GPS接收机、主机及测深仪主机放置在驾驶舱内，并用电缆将与所有设备连接，借助接收机提取观测数据。

3 数据质量控制

RTK 标称精度（以华测公司 X10 RTK 为例，如表 2）与单波束标称精度（如中海达 HD-LITE，如表 3）都在 10mm 级别，但是实际情况由于水面环境复杂，多路径效应的影响导致 RTK 信号存在异常与失联情况，同时测深精度受到水体环境（温度、盐度、水质、底质等）因素影响有一定程度降低。

表 2 华测公司 X10 RTK 标称精度

标称精度②	静态精度	平面精度：±(2.5+ 0.5×10 ⁻⁶ ×D) mm 高程精度：±(5+0.5×10 ⁻⁶ ×D) mm
	RTK 精度	平面精度：±(8 + 1×10 ⁻⁶ ×D) mm 高程精度：±(15+ 1×10 ⁻⁶ ×D) mm
	星站差分③	≤5cm
	单机精度	1.5m
	码差分精度④	平面精度：±(0.25 + 1×10 ⁻⁶ ×D) m 高程精度：±(0.50+ 1×10 ⁻⁶ ×D) m

表 3 中海达 HD-LITE 单波束测深系统标称精度

测深范围	0.15m--200m
测深精度	±10mm+0.1%h, 分辨率：1cm

测深精度的保证主要依赖于 GPS RTK 实时高程定位精度，因此需要针对不同情况保证 GPS RTK 高程精度。

- 1）GPS 平面解质量控制：个别异常点可以通过异常检测，对异常数据进行内插。
- 2）基于 Heave 的短时异常 GPS 高程信号修正：对于短时间下的 GPS 高程数

据异常基于 Heave 的数据利用 Kalman 滤波进行修正。

3) 长时间异常和中断的 GPS RTK 高程修正：对较长时间的 RTK 信息丢失，利用水位数据+Heave+吃水等数据进行联合修正。

4) 基于 Heave 和 RTK 高程信息融合的换能器瞬时高程确定：通过不同数据源的数据的融合能够进一步提高精度。

4 船体方案

渔船方案

目前最长使用的方案，通过将主要仪器 RTK、测深仪、姿态传感器安装到渔船上，然后通过全站仪不同仪器之间的相对位置。

主要优势：1) 载重大，可以安装较为复杂的测深仪器，比如多波束测深仪等。2) 续航时间较长，在天气允许情况下可以保证全天候测量。

主要问题：1) 投入较大，越是长期的项目船自身的开销就大。2) 安装误差对测深精度影响较大。

无人船方案

可以用于湖泊水域中，该平台搭载不同仪器、设备，服务于多种领域的水上作业。（例如：侧扫声纳、多普勒流量计、放射性水体测量仪、小型气候站、单波束等多种仪器设备。）



图 3 无人船示意图

无人船优势：1) 集成度高。包含 RTK、测深仪等主要设备。2) 吃水浅。由于自身重量一般 30kg，吃水一般在 30cm，因而可以在湖泊航行的区域更大。

主要问题：1) 续航时间，一般连续工作 6—12 个小时。2) 对复杂水域有安全问题，无人船自身安全无法保证。

5 实例精度验证

众多项目证明 RTK 三维水深测量具有高精度数据的保证。2012 年武汉关附近水域实测实验利用中海达 RTK、中海达单波束、姿态传感器等其他辅助设备进行测试。在整个 10 条断面中，相对传统测深方法，精密测深方法的偏差基本分布于-10.0cm~10.0cm；个别最大偏差超出了 10cm，分析认为主要由于尚未顾及姿态因素影响造成。尽管如此，标准差均小于 10cm，如表 4 所示

表 4 RTK 测深方法往返断面测深不符值统计参数

最大 /m	最小 /m	均值 /m	均方根 /±m
0.16	-0.35	-0.02	0.08

吴敬文，周儒夫等在《RTK 三维水深测量的实施与精度控制》文中在长江口实测数据得到的 RTK 水深数据与人工观测数据都在 10cm 之内。

第三章 经费预算

1:2000

按照水域面积为 200 平方公里，为了保证足够平面点密度（对应足够大的比例尺地形图而言，需要保证足够的单波束测深点密度。

路线预计：按每个 10m 间隔测一个单波束测深点，20km*10km，需要行驶的长度就是 20km*（10km/10）=20000km,

时间预计：按船速 11 节约 20km/h，需 1000h，一条船，一天 10 小时，100 天，4 个月。

费用预算：

租船花费（包括油费）2500 元/天×100 天=25 万 / 无人船单价 50—80 万

设备费：单波束 20—50 万，RTK 一台 3 万，声速剖面仪一台 3-5 万，姿态传感器 7500-10000 元。// 设备租赁费 2000 元/天×100 天=20 万

人员费：200+200 元/人/天（工作+食宿） \times 100 天 \times 5 人=20 万

往返车费（含租车费）：15 万

其他费用：10 万

若适当降低地形图分辨率，按照每隔 20m-50m 间隔设计一条测线，则可以大大降低成本。

附录 中海达 iBoat BM1 智能无人测量船参数

船体参数	尺寸	1800 mm×840 mm×480 mm
	船体重量	30kg
	船体材料	凯夫拉防弹布的高强度符合材料
	船体设计形态	三体船设计，重心低、阻力小、航行稳
	抗风浪等级	5 级风、3 级浪
动力及电气参数	续航能力及时间	续航 6 小时@2m/s，可选配加一组 7kg 电池，续航时间可达 12 小时。
	船速	最大 3.5m/s
	动力装置	1 个主推涵道式推进器，两个辅助推进器
	推进器类型	直流无刷电机驱动
	方向转向控制	支持无舵机转向功能和“倒车”航行技术
安全性参数	避障	全自动超声波避障（选配）
	视屏	视屏实时传输（选配）
	自动返航	可设置自动返航点
岸基基站	支持操作系统	支持 Windows、iOS、Android 等主流操作系统 (用户可根据需要自行配置笔记本电脑或平板)
	通讯模式	实时射频点对点
	传输距离	电台 5km
		4G 网络无限制
	导航模式	手动或自动，任意切换
智能遥控器	通讯方式	实时射频点对点
	作用距离	5km
	防水等级	IP65
	功能	实时切换工作模式，实时控制无人船船速、转向等功能，实时显示无人船基本信息。

测深性能	工作频率	200KHz
	波束开角	$5^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$
	测深范围	0.15m~300m
	测深精度	$1\text{cm} \pm 0.1\%h$ (h 为水深), 1cm 水深分辨率
定位精度	RTK	水平: $\pm 8\text{mm} + 1\text{ppm RMS}$ 垂直: $\pm 15\text{mm} + 1\text{ppm RMS}$
	信标 (选配)	$0.5\text{m} (1\sigma)$
	SBAS	1.0mCEP
系统软件	船体控制软件	自主导航、船体参数控制、视屏显示、避障报警功能、坐标转换等功能。
	HiMAX 测深软件	具备测深仪参数设置、坐标转换、水深采集、导航、后处理 (模拟水深与数字水深叠加, 方便假水深判读; 任意特征点取样; RTK、潮位文件验潮; 多种数据格式成果输出) 等功能。