

中小型湖泊测量 “五大难题”破解之道

□文 / 耿仕涛 张 通 李 杨 宁文斌 安洪岩

第一作者简介 耿仕涛,助理工程师,主要从事自然资源调查与科普研究工作。

通信作者简介 安洪岩,工程师,主要从事水资源基础调查工作。

镶嵌在大地之上的湖泊如同生态系统的蓝色心脏，既是维系陆地生命网络的淡水枢纽，也是解译地球水文密码的关键载体。湖泊通过持续的水循环构建起多维生态服务网络：其蓄积的万亿立方米淡水支撑着人类社会命脉，通过蒸发—降水机制调节区域气候，在碳、氮、磷等元素循环中搭建生物地球化学通道，更为水生生物提供生存家园。这种复合生态价值决

定了精确掌握其三维形态的紧迫性和必要性，只有通过高精度水下地形模型，才能有效支撑对湖泊生态承载力的评价。

现代湖泊水下地形测量技术主要以单波束、多波束声波测深系统为主，通过高频脉冲扫描湖底，利用声波在淡水中约 1 430 ~ 1 480 米 / 秒的传播速度，将计算往返时差转化为厘米级精度的水深数据，进而刻画出水下跌宕起伏的世界。测

湖人员通过这种系统化作业采集的数百万个点云数据，经过专业软件的智能拟合，最终将神秘的水下世界转化为三维数字模型，这个模型不仅能清晰展现湖盆的沟壑起伏，更能通过计算得出不同水位对应的“水立方”容积。然而要实现这样精密的测绘，对于面积较小、地形复杂的中小型湖泊来说，还面临着诸多技术挑战。以下就以中国东部平原湖区湖泊调查为例，破解中小型湖泊测量难点。

剖析难点 洞悉关键

中国东部平原湖区主要分布于长江中下游流域、淮河流域、海河流域及黄淮海平原区域，是我国淡水湖泊分布最为集中的地理单元。该区域除洞庭湖、鄱阳湖、太湖、巢湖和洪泽湖五大淡水湖外，其他湖泊大多属中小型规模。其类型多属河成湖，呈现典型浅水湖泊特征，具体表现为水体深度较浅、湖底地形平缓且形态结构复杂多变等特点。在实地测量作业中，常面临多重技术挑战。其一，人类活动产生的物理阻隔设施，如围湖养殖区、捕鱼地笼装置及围网捕鱼设施等人工障碍物，对测量线路形成空间制约；其二，高温极端天气、高强度太阳辐射、水面

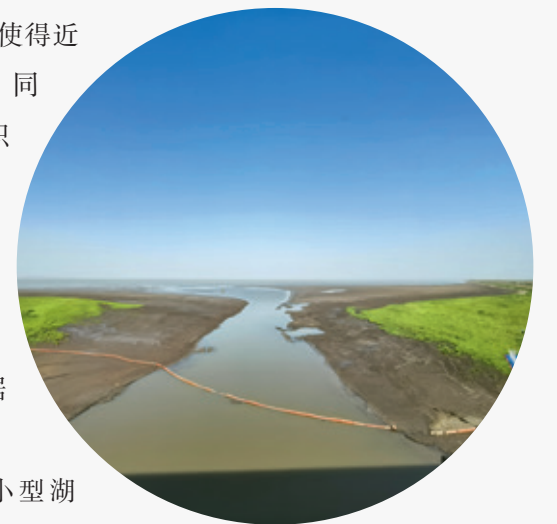


＞ 水下地形测量 毛宽振 / 摄

风浪扰动等复合型自然干扰因素叠加作用；其三，浅水区域、水生植被密集区等特殊水文环境对测量船只通行构成显著阻碍。这些技术难题可系统归纳为“浅、变、草、网、塘”五大测量障碍类型。若在关键测量技术环节处置失当，将直接导致测量精度降低及水文数据失真等系统性误差问题。

“浅”之难。由于平原地区中小型湖泊普遍水深相对较浅、湖底地形平缓，其岸线浅水区域水深往往不足 50 厘米，行船时往往担心吃水深度不足，导致搁浅而不敢靠近岸线作业，使得近岸区域测量精度受限。同时，浅水区域通常沉积物较厚，且受风浪影响显著，水体扰动频繁，这些因素都会对测深仪的回波信号产生干扰，影响测量数据的准确性。

“变”之难。中小型湖泊在丰水期与枯水期交替的过



＞ “变”之难——龙感湖枯水期 耿仕涛 / 摄



＞ 湖与城



> “草”之难



> “网”之难 耿仕涛 / 摄



> “塘”之难 视觉中国 / 供

程中，形态特征会发生剧烈变化。例如，在暴雨等极端天气条件下，水域面积急剧扩张，水位快速变化，导致湖泊岸线可能在数小时内发生显著位移，位移幅度可达数十米甚至上百米。这种极端情况下的快速形态变化，给水下地形测量工作带来了极大挑战和不确定性，要求测量工作必须具备灵活的调整方案和快速响应能力。

“草”之难。中小型湖泊因其“浅、平”的湖盆地形，往往具有内缘低洼、岸线曲折绵长的特点，为水生植被提供了天然温床，使得单位面积生物量远超大型湖泊。湖岸边缘茂密的水草带形成天然屏障，作业中设备易被缠绕干扰——发动机会因螺旋桨被水草缠住而熄火，声波信号也会因照射在植被上遭吸收散射而没有真正到达湖底，出现错误数据，限制了测量工作的精度与可操作性。

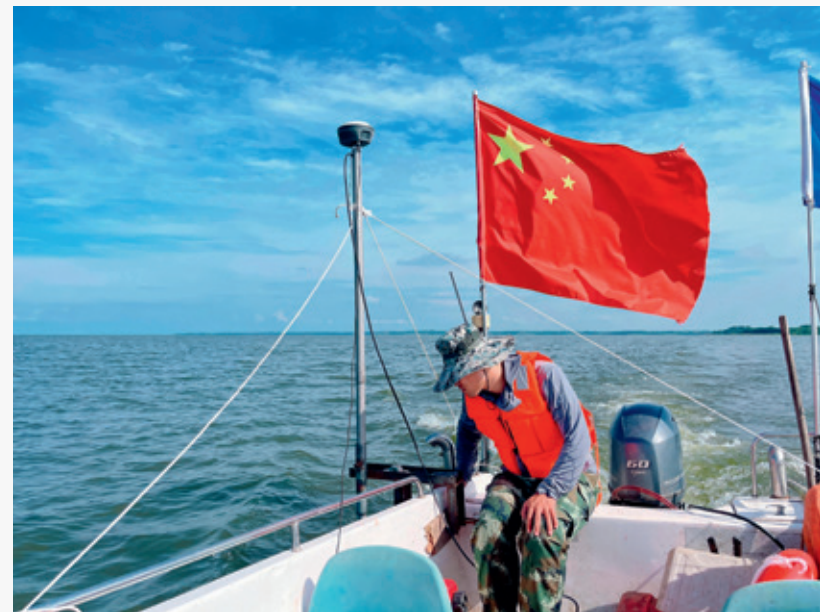
“网”之难。部分中小型湖泊受人类活动如围网捕鱼、围网养殖等因素影响。围网所构成的物理屏障，容易遮挡部分水域形成测量盲区，而水下围网更会造成缠绕测深设备的风险，限制了船舶测量活动。这种人为干扰不仅影响数据的完整性，更增加了测量成本和时间投入。

“塘”之难。围湖养殖不仅重塑了湖泊形态，将其割裂为人工坑塘，更在空间上制造测量盲区，在生态上改变了水文特征。养殖设施纵横交错，既限制测量路径，又干扰数据采集。同时，水产养殖势必影响到水质的变化，加上测量中还需考虑到养殖生物的安全，避免对其造成不必要的干扰或伤害，使得寻常船舶难以支撑测量活动。

中国东部平原湖区中小型湖泊水下地形测量中遇到的“浅、变、草、网、塘”五大测量难点并不是单一出现，往往是叠加在一起，问题错综复杂，影响测量作业。那么，种种难点汇聚，实操中如何破局，测湖人员需要综合考量影响因素，抓住关键矛盾，因地制宜，逐一化解，确保水下地形测量顺利进行，保证测量结果的准确性。

见招拆招 破题有道

系统剖析“五难”问题，创新构建分区测量体系，将湖泊测量整体工作细化成五大特征区：一般湖区、丰枯变化区、水草密集区、养殖活动区和坑塘改造区。测量工作以“优铺全局、细解难题”为基调，采取优先推进大水面作业、灵活穿插进行难点攻坚的方法，高效推进测量进程，逐一攻克问题难点。通过分区施策、梯次推进方式，既能确保测量效率，又可以攻克技术瓶颈，最终实现湖泊全域高精度测量的整体目标。



> 湖泊测量 耿仕涛 / 摄



> 空-水-陆一体化测量体系（安洪岩、任文广、赵男 / 供）

“遥”与“波”组合，把控丰枯变化，破“浅”与“变”之难。为把控丰枯变化显著湖区的测量质量，需结合实景三维中国数据库中的数字高程模型，进行水-陆一体化测量。

中小型湖泊测量宜选枯水期开展作业，其形态、水体相对稳定，实地测量工作量相对较少。枯水期可以最大限度地发挥遥感技术优势，实时获取水面以上的地形信息，记录岸线、地形和土地利用情况，再结合测深仪（单波束或多波束）完成对枯水期水体的水下地形测量，建立水-陆一体化数字高程模型。

丰水期湖泊形态相对不稳定，这就需要在枯水期测量方法的基础上，适时利用无人机载体优势，搭载激光雷达系统，高效获取复杂区域水面以上的数据，同步部署无人测深船，配备单波束或多波束模组，精确测量浅滩区域水下地形。这种空-水一体化测量体系，既能突破传统船舶作业限制，又能确保测量精度，为丰水期湖泊测量提供创新解决方案。

水-陆一体化测量能有效把控丰枯变化，通过陆域与水下数据重叠区的交叉验证，确保测量精度符合要求，保证数据的可靠性和一致性，为数据融合提供基础，生成准确的数字高程模型。与此同时，卫星遥感可对湖泊进行持续性有效监测，掌握多年水域变化规律，水-陆一体化测量则提供精确的空间基准，两者协同为湖泊科学研究构建起多尺度、多维度的数据支撑体系。



岸线调查 耿仕涛 / 摄

“控”字诀，辅助提升测量准确性。首先，在测量作业中“控”质量。船舶搭载测深仪进行测量作业过程中，为了提高测量的准确性和全面性，测量工作常辅以测深杆或测深锤等其他测量手段，验证数据采集准确性，控制测量质量。其次，还可以在岸线调查中“控”难点，在没有无人机载体的情况下，采取增加测量控制点的方法，提升测量精度和可靠性，辅助完成测量。其方法是结合测线布设规律，调查员利用实时动态差分定位技术（RTK）对岸线实地定位，记录实地情况，同时可穿水叉裤对浅滩区进行人工测深，破除“浅”“变”之难。利用人工方式补充测量虽然效率较低，但能充分保证调查精度，既完成了湖区边界调查，又兼顾了测线浅水区的测深工作。

“船”字诀，厘清水草湖区底数。在水草丰茂的湖区测量常常会遭遇水草缠绕换能器（测深仪发射装置）或者船舶螺旋桨的困境，不仅妨碍了测量工作，还可能对设备造成损伤，甚至干扰数据获取。在水草过于密集的情况下，如成片的菱角、水葫芦、荷花等水生植物会导致正常机械船和无人船无法进入，需人工撑船利用测深杆或测深锤逐点采集水深

数据。在此种情况下，可以采集水草区周边的水深数据，并结合水草区内样点数据，通过模型推演推算出水草区的水下地形，这种综合测量与分析方法，不仅深化了对水草湖区的认识，也降低了测量作业对水生生态系统的影响。

“控”与“船”搭配，扫清测量盲区，破“网”与“塘”之难。中小型湖泊水下测量盲区主要是受物理隔绝影响的围网养殖和坑塘。在测量养殖湖区时，需重新规划测线，沿水道布设，以获取水体流动和水深数据。测量人员应考虑水流、水草和养殖网围布局，确保覆盖关键区域。面对面积相对较小的围网区域时，可在围网外围加密测线，获取密集水深数据，进而推算内部地形；也可将无人测深船投放到围网内自动测量水深并实时传输数据，减少人工误差，确保数据全面可靠。面对数量繁杂的坑塘区时，可采用抽检的方法，通常抽取1%~5%的坑塘进行测量。有无人测深船时，可利用其优势完成测量，若没有无人船，则可利用人工测深方法。这种抽检比例不仅能保证样本的代表性，还能有效降低工作量，提高效率。同时，为了确保数据的准确性和全面性，采集点应在大小不同的坑塘中均匀分布，常见的采集点布局为“十”字形或“井”字形，



人工比测 安洪岩 / 摄

可有效覆盖坑塘各区域，并清晰描绘水深分布，以反映出各类坑塘的水深变化情况，便于后续分析和管理。在实际操作中，需要注意以下几个问题：根据坑塘形状、底部特征及水流情况调整采集点，特别是在水流明显或水草生长区域增加采集点，以获得更精确的水深数据。

中小型湖泊水下地形测量面对“五难”问题，既有自然因素影响，亦受人类活动制约，其概括未必全面却是实践中存在的共性问题。面对问题，灵活施用“遥”与“波”组合，发挥“船、机”载体优势，采用人“控”作业兜底等多方法融汇，可以破解“五难”，形成体系打法。这套体系破题之道不仅提升了湖泊调查的效率，也确保了测量数据的精度，更是将“山水林田湖草沙”生命共同体理念付诸实践的具体体现。

本文由“东部平原湖区北部湖泊调查（编号：DD20230505）”项目资助。

第一作者单位 / 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心

中国地质学会永定河下游地区自然资源监测技术创新基地

（本文编辑：何陈临秋）