

# 超短基线定位和流速剖面在圣杯屿沉船水下考古中的应用

黄泽鹏<sup>1</sup>, 冉德禄<sup>2</sup>, 阮永好<sup>3\*</sup>

1. 国家文物局考古研究中心, 北京 100013

2. 山东省水下考古研究中心, 济南 250000

3. 漳州市文物保护中心, 漳州 363099

**摘要** 介绍了超短基线定位系统和声学多普勒流速剖面仪的工作原理和应用场景。根据漳州圣杯屿沉船水下考古工作需求, 综合使用2种设备开展实时数据采集和分析, 得到了高精度的水下绝对位置信息, 以及精确的流速向等潮汐水文观测数据, 从而提高了遗址定位精度, 建立起对整个遗址海流剖面的实时监控, 创新性地研发出一套水下考古实时定位监测系统, 保障了水下考古作业安全, 为沉船考古发掘工作提供技术支撑。对于工作中存在的定位跳点等问题, 通过改进超短基线系统的抗干扰设计, 增强了其在环境中的稳定性和可靠性。

**关键词** 超短基线定位系统; 声学多普勒流速剖面; 水下考古; 圣杯屿沉船

作为海陆兼备的文明古国, 中国水域内遗留下了数量众多、类型丰富、价值巨大的海洋文化遗产。近年来, 水下考古和水下文化遗产保护发展迅猛, 取得重要成果。由于水下文化遗产埋藏环境的特殊性, 水下实时定位和水流实时监测技术对于水下考古具有重要作用<sup>[1]</sup>, 但是长期以来该技术未得到较为圆满的解决方案。

漳州圣杯屿元代沉船遗址位于福建省漳州市古雷港经济开发区杏仔村东南侧圣杯屿海域, 水深27~31 m, 表层为砂石底质。沉船东北距离圣杯屿约200 m, 西侧距离古雷沙滩500 m, 东侧紧邻菜屿门航道。划定的水下考古工作区域(图1)水况较

复杂, 是一处历史性海难多发区。2022—2023年, 国家文物局考古研究中心联合福建省考古研究院、漳州市文物保护中心等单位对该沉船遗址进行水下考古发掘, 项目组通过水下实时定位和水流实时监测技术的创新, 为整个项目的科学实施和安全作业提供了重要保障。

本文以圣杯屿沉船水下考古项目为例, 通过搜集沉船区域的海图、潮汐、海况、天气等相关资料, 综合分析超短基线定位和流速剖面在水下考古中的应用, 实现更精确的定位和流速观测, 以达到保障水下考古作业的安全, 为沉船发掘工作提供科学支持的目的。

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2024-03-10

基金项目: 国家文物局2023年度文物科学技术研究项目(自筹)(2023ZCK009)

作者简介: 黄泽鹏, 馆员, 研究方向为水下考古、海洋探测, 电子信箱: zp.huang@uch-china.com; 阮永好(通信作者), 副研究馆员, 研究方向为水下考古, 电子信箱: 346707661@qq.com

引用格式: 黄泽鹏, 冉德禄, 阮永好. 超短基线定位和流速剖面在圣杯屿沉船水下考古中的应用[J]. 科技导报, 2024, 42(14): 116-124;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.07.01103

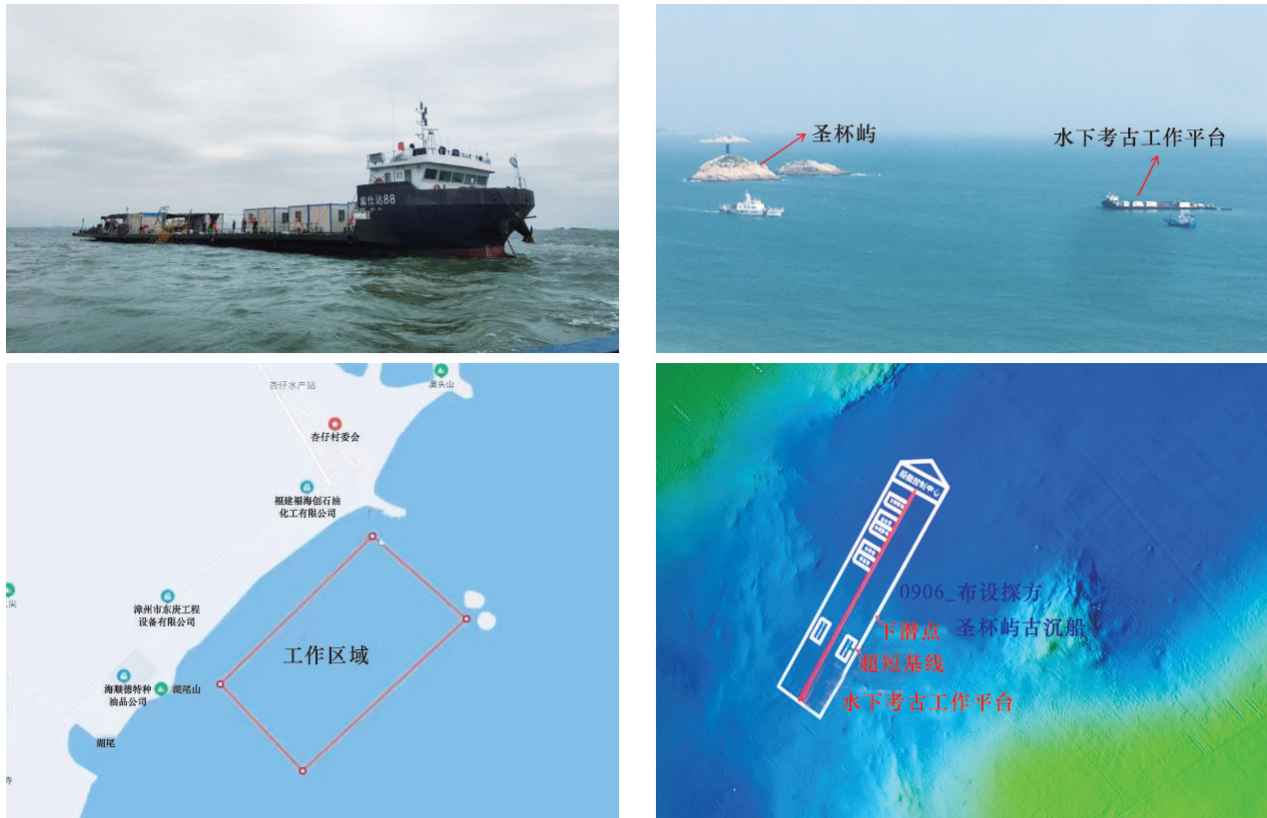


图1 水下考古工作平台及工作区域

# 1 研究方法

## 1.1 基于超短基线定位系统的水下精确定位

借助水声定位,在水面能够观察到定位对象——水下考古队员和潜水器在水下的实时位置<sup>[2]</sup>。声波在水下传播特性良好,作用范围广,声学定位方法可以按照接收基阵的尺寸或应答器基阵的基线长度分类,水声定位系统分为长基线(long base line, LBL)、短基线(short base line, SBL)和超短基线(ultra-short base line, USBL)3种<sup>[3]</sup>。上述3种声学基线定位系统各具优势和特点,相对而言,超短基线系统尺寸小、使用方便,定位精度取决于船只和水下载体的距离,适用于大范围区域的跟踪<sup>[4]</sup>,尤其适合浅水及近海应用<sup>[5]</sup>。国际上,挪威 Kongsberg、法国 iXblue、英国 Sonardyne 和 AAE 等公司均在水下定位系统设备的研发与生产方面处于领先地位,各自拥有代表性水下声学定位系统<sup>[5]</sup>。

超短基线定位系统一般包括水下定位系统、辅

助传感器和水面定位系统。通过精确测量2个传感器接收的声学信号的相位差进行方位的解算,以及测量询问信号发出与应答信号收到的时间差来完成距离的解算<sup>[6]</sup>。

本项目使用英国 Sonardyne 超短基线定位系统(图2),其中水下定位系统由安装在船体的声学换能器和水下声学应答器组成。辅助传感器含高精度光纤罗经和姿态仪,用以准确测量船舶的升沉、横摇、纵摇和艏向(heave/roll/pitch/ heave/heading)。超短基线换能器采用法兰盘刚性安装在水下考古

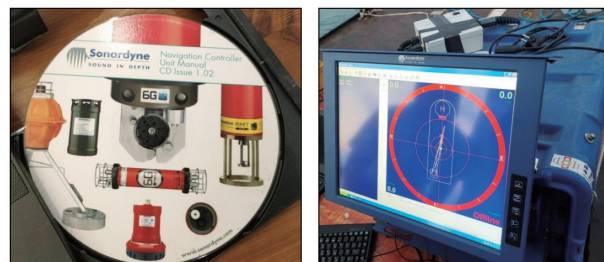


图2 英国 Sonardyne 超短基线定位系统及其操作页面

工作平台的右侧船舷并浸入水中,结合全球卫星定位系统、姿态传感器、罗经完成最终的定位,测距精度优于0.2 m。

简化的用户图形界面使系统操控非常简易,水下考古队员将安装有信号发射器的信标绑在气瓶上(图3),通过探头上的接收器测量出水下考古队员的相对距离和方位,以及所处的水深。2007年,超短基线定位系统应用于“南海I号”南宋沉船打捞工作,成功完成沉船整体打捞。



图3 超短基线定位信标及安装方式

## 1.2 基于声学多普勒流速剖面仪的流速观测

由于水下考古调查和发掘工作受到水流等自

然环境因素的影响较大,水下考古工作只能在高平潮和低平潮时段进行,因此流速监测是水下考古作业安全中的一项重要工作。

声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profilers, ADCP)是一种融合水声通信、水声换能器设计、电子技术和信号处理等多学科而研制的新型设备,作为重要声学海洋观测设备,能够实时监测和记录高分辨率、高精度的海水流速流向及相关水文信息数据,一直以来得到广泛应用<sup>[7]</sup>。近年来,国际上 ADCP 开始向多频组合、小型化和深水相控阵等方向发展<sup>[8]</sup>。

波源和观察者处于相对运动时,观察者接收到波的频率与波源发出的频率并不相同,这一现象称为多普勒效应<sup>[9]</sup>。水体中的散射体(如浮游生物、气泡等)随水体而流动,与水体融为一体,其速度即代表水流速度<sup>[10]</sup>。当 ADCP 向水体发射声波脉冲信号时,声波脉冲信号碰到水体中的散射体后产生反射, ADCP 再对回波信号进行接收和处理(图4)。同时考虑多普勒效应,计算出水中的悬浮粒子的流速流向,量测的流速即为该水层的平均流速<sup>[11-12]</sup>。

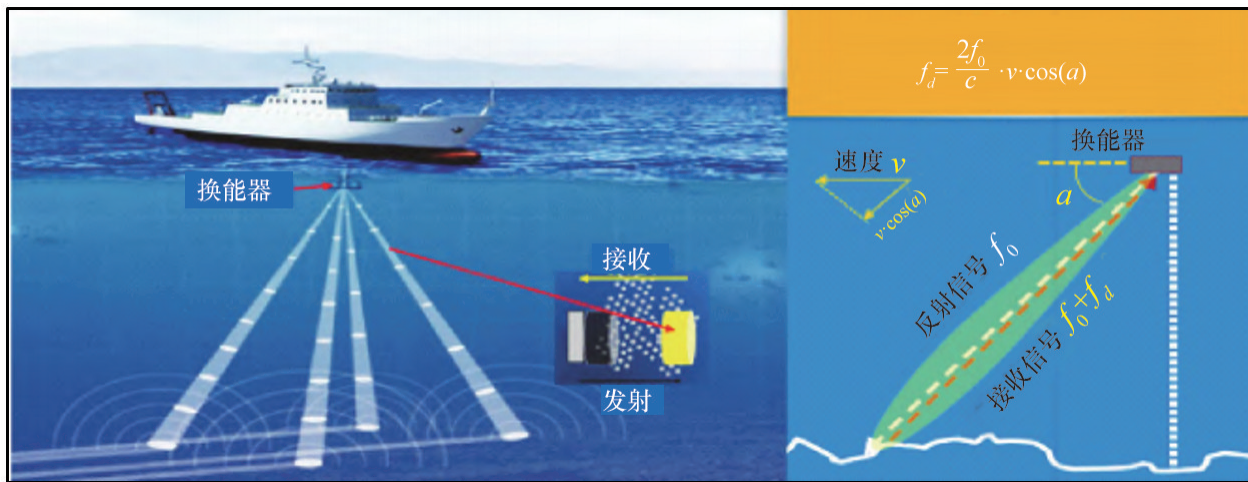


图4 ADCP测流原理

ADCP的传感器主要包括3个声学换能器,即倾斜度传感器、温度传感器和压力传感器,可获得温度、压强及海流等数据。后期可对数据进行质量控制,并根据需要输出不同方向的速度分量等海流数据。海流数据的质量控制主要包括数据所选声束数量、信噪比(SNR)阈值设定和姿态校正等<sup>[13]</sup>。

传统的直流式流速计,如HYSLC9-2便携式直读式海流计(图5(a)),只能测量某一深度的流速流向<sup>[14]</sup>,而且深度有限,更适宜于超浅海域中使用。本项目使用的ADCP为“小阔龙”声学多普勒流速剖面仪(图5(b)),与传统的流速测量技术相比,具有以下优势:无活动部件(如螺旋桨等),不易

磨损;不需作定期校正,随时间变化无零点漂移,测量准确度高,观测连续性好;体积小、质量轻,便于携带安装,收放维护操作简单;所用材料抗腐蚀,耐老化;长期布放中功耗低。

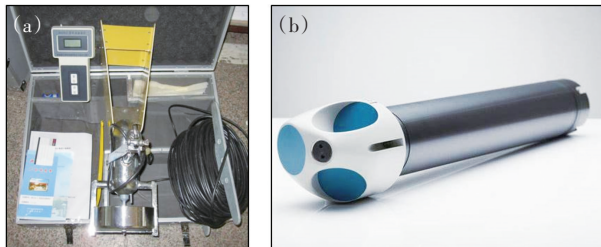


图5 便携式直读式海流计(a)与“小阔龙”ADCP(b)

ADCP在水下考古工作平台的右舷进行布放,一般情况下,水下考古发掘作业平台都锚住不动,避免船舶航行对ADCP探头的破坏。同时,ADCP工作过程中,对被测验流场不产生任何扰动,也不存在机械惯性和机械磨损。

## 2 实际应用

### 2.1 基于超短基线定位系统的水下考古应用

在以往水下考古工作中,通常利用水下喇叭进行水面和水下的通信,但是由水面人员对水下考古队员进行喊话,只能完成水面对水下的单向信息传输,无法了解水下考古队员的具体位置及所处水深情况。此外,水面人员还可以通过观察水下考古队员呼吸产生的气泡,确定水下考古队员所处的大概位置,但由于气泡会因为水流发生偏移,而且波浪和距离的影响也会增大观察难度,容易跟丢气泡,因此安全系数及效率相对较低。

通过超短基线水下定位,与水面观察相结合,可用于跟踪水下考古队员,时刻关注水下考古队员动态,并及时结合水下喇叭进行提醒。一般情况下,水面人员会及时报告水下考古队员入水时长及水面流速等相关信息,并提醒水下考古队员注意观察所剩气体残压,确保潜水安全。通过喇叭传话后,通常水下考古队员会及时根据指令完成相关工作,队员若长时间无响应,安全监测人员就可以及

时判断并上报,项目领队就会安排相应的应急救援活动。另外,通过观察水下考古队员所处水深,可以判断他们是否处于上升阶段,及时在水面进行出水支持。

本次调查使用的水下考古实时定位监测系统是国家文物局考古研究中心与交通运输部天津水运工程科学研究所共同研发的一种针对水下考古队员定位的实时系统。采用“超短基线+海底多波束测深地形底图”实现水下考古队员的实时相对定位、导航以及水下考古队员之间、水下考古队员与水面平台间的三方交流(图6)。

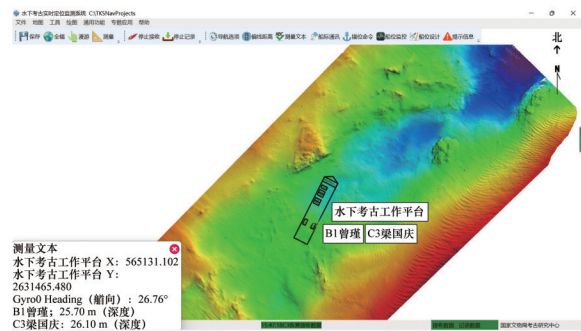


图6 超短基线实时定位水下考古队员

与陆地考古不同,水下考古的不确定性更强,水下能见度差、水流过大、出现缠绕等问题随时可能发生。中国考古工作开展30多年来,至今未发生过重大安全事故,这得益于整个水下考古项目团队的团结协作。这其中不仅需要所有水下考古队员掌握专业的潜水技能,时刻保持清醒冷静的思维,彼此相互协作,更需要前沿科技设备提供的技术支持,才能为水下考古队员提供更好的安全保障。

2022年9月,通过超短基线水下定位,发现水下考古队员不断往西南约210°方向偏移(图7),观测人员立即反应,判断水下考古队员可能由于能见度低的原因找不到安全绳,出现“放漂”,于是发出警报,立即组织船上人员进行水面观察,通过水下喇叭通知并安抚“放漂”的水下队员,同时迅速派出小艇沿西南方向开往定位系统显示的位置。此时系统显示水下考古队员所处深度逐渐变小,判断处于正常上升阶段。通知小艇保持一定距离等候。

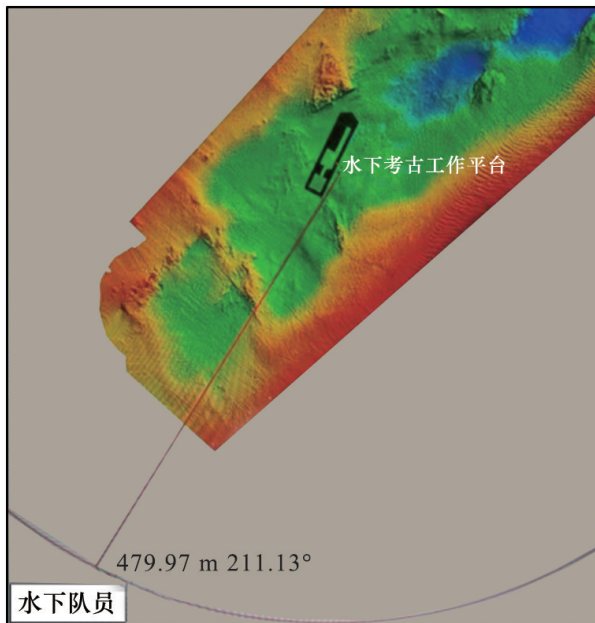


图7 水下考古队员偏离作业区域

最后水下考古队员安全出水,应急小队顺利完成应急救援任务。

如果没有水下实时定位系统,则无法及时发现水下作业队员发生“放漂”现象,并且无法判断水下考古队员“放漂”的具体方位,只能由水面人员朝各

个方向进行瞭望,效率较低,而且受天气因素影响,晴天时阳光刺眼,即使队员出水,若距离太远,视线也会受到一定影响,因此超短基线定位能够有效保障水下考古作业安全。

## 2.2 基于声学多普勒流速剖面仪的水下考古应用

通过对 ADCP 的应用,建立起对整个遗址海流剖面的实时监控(图 8),实时获取遗址海域 0~30 m 水深的流速、流向等潮汐水文数据。一般情况下,水下考古作业选择流速在 50 cm/s 以内的平潮期进行,通过研究沉船遗址海域流速变化规律,为科学选择水下作业时间窗口提供了依据。

本次水下考古作业自 2022 年 9 月 5 日开始,使用 ADCP 进行周期观测,直至 10 月底水下考古项目结束。利用相关观测数据和历史文献资料进行综合分析,得到圣杯屿海域的潮汐水文特征。

1) 经过近 2 个月 ADCP 的观测发现,圣杯屿沉船海域的潮汐比官方潮汐表(来自“全球潮汐”软件)的时间提前约 2 h。以 2022 年 10 月 1 日为例,图 9(a)为圣杯屿海域的潮汐表,显示 16:25 为下午的高平潮时间。图 9(b)为 ADCP 实测流速(水深 5 m 处),可看到约 14:30 达到流速最小值,图 9(c)

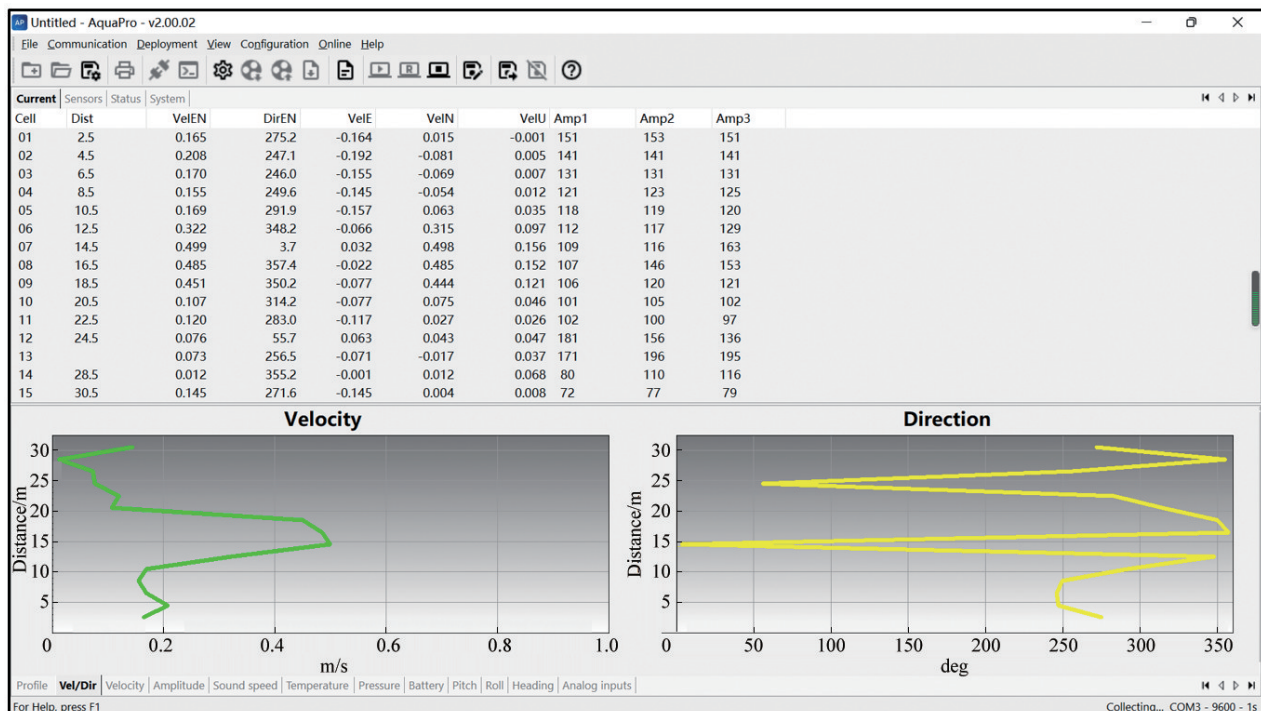


图8 ADCP实时监测流速

为 ADCP 实测流向(水深 5 m 处), 可以看到约 14:25 开始逐渐转流, 流向由 160° 左右逐渐转向, 在 15

:10 趋于稳定, 流向转为 340° 左右。综合对比可验证圣杯屿沉船海域潮汐相比潮汐表提前约 2 h。

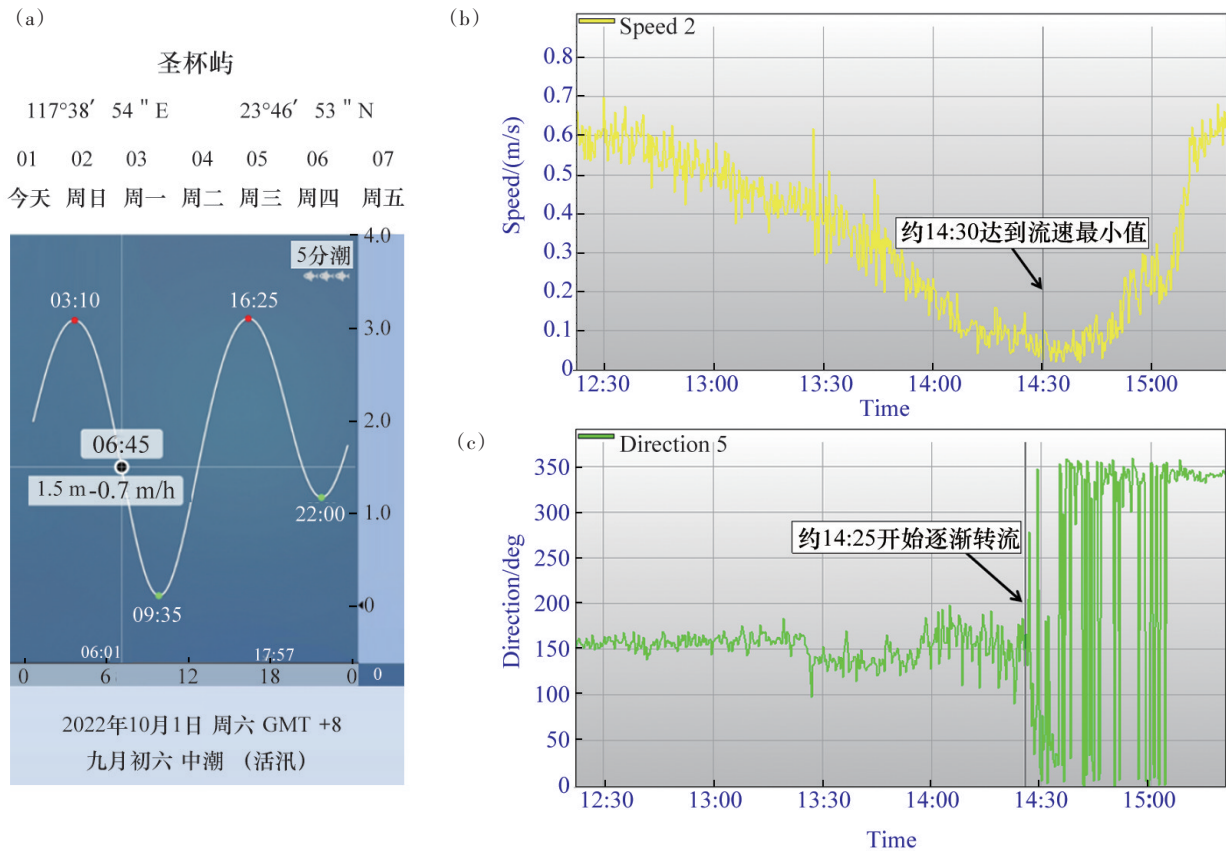


图9 2022年10月1日圣杯屿潮汐表与ADCP实测流速流向对比

2) 古雷半岛海域潮汐性质为不正规半日潮混合潮<sup>[15]</sup>, 潮流作用较强。涨落潮最大流速均出现在半潮面附近时段, 最小流速和流向转流发生在高、低平潮点附近时刻。如图 10 所示, 以 2022 年 9 月 28 日为例, 选择 14:00、14:30、15:00、15:30 等 4 个时段(处于半潮面时段)的流速剖面图, 可以看出实测最大流速已经超过 140 cm/s。根据 Postma 的关系曲线<sup>[16]</sup>, 这样大的流速足以搬运圣杯屿海域周边 2.5 ~ 3.5 $\Phi$  粒级的砂, 因此砂石底质在沿涨、落潮时趋向于南北扩散<sup>[17]</sup>, 从而沉船遗址周边较易于进行再沉积, 因此吹沙作业也是本次水下考古发掘中一项重要的工作。

3) 平均涨潮流向主要集中在 S 向(约 160°), 平均落潮流向主要集中在 N 向(约 340°), 平均涨落潮流向、最大涨落潮流向在垂向各层分布基本一致, 表明该海域潮流运动呈明显往复流性质<sup>[18]</sup>。

4) 涨潮和落潮时各层的平均流速均有自上而下逐渐减小的规律, 底层平均涨落潮流速最小。涨落潮最大流速在垂线上的分布一般表层最大, 中层次之, 底层最小, 这主要是因为海底摩擦作用, 越接近底层, 流速越小。如图 11 所示, 随机选择了 2022 年 10 月 1 日 9:00—12:00 期间的 16 个时段内的 ADCP 实测流速, 可以验证以上结论。

### 2.3 注意事项

2022 年 10 月底水下考古项目结束, 将超短基线定位系统换能器和 ADCP 探头从水下拆卸时, 发现仪器上面附着有大量海洋生物(图 12)。因此, 仪器设备入水后, 要定期进行收放和清洗, 对设备进行维护和保养, 提高设备使用寿命。对于海洋生物附着密集的区域, 需要仔细清理, 不可使用刻刀等锋利的工具, 以免仪器受损, 影响数据采集的灵敏度。

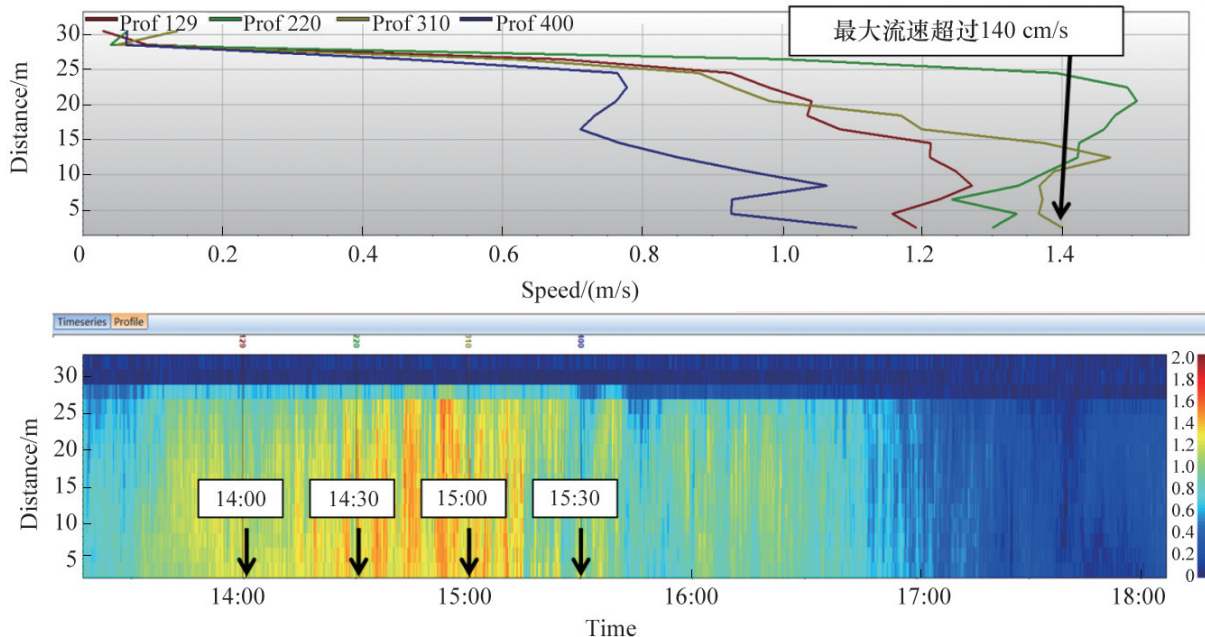


图10 2022年9月28日 ADCP实测不同时段的速度变化

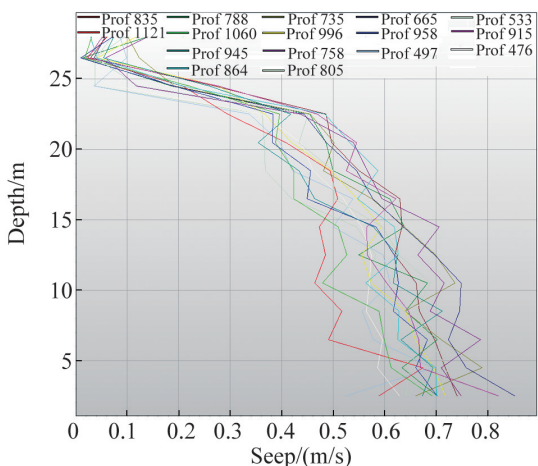


图11 2022年10月1日 ADCP实测不同时段的速度变化



图12 仪器长期在水下布设后附着有大量海洋生物

### 3 讨论

本研究开展过程中,超短基线定位系统在大多数时间内可以给出相对稳定的定位数据,部分数据存在跳点(position jumps)情况,会导致定位轨迹不连续(图13)。经过分析,主要存在以下2种原因:水下声波遇到障碍物或水面反射,会产生多路径效应,导致信号的到达时间不同,进而引起定位误差;水下环境中存在的噪声,如船只的引擎噪声、其他声呐设备的干扰等,影响超短基线的信号接收。

另一方面,超短基线系统的发射器和接收器如果没有正确校准,也会导致定位数据不准确。超短基线各测量设备的分离式安装导致船载声学换能器阵与外围辅助传感器之间不可避免地存在安装偏差。虽然通过海上标定试验可以对偏差进行有效校正,但是随着时间的推移,又会引入新的偏差,导致定位性能下降,如果将姿态传感器与声学换能器阵一体化安装,在实验室完成标定,开发便携式、即插即用、免标定的超短基线定位系统无疑是未来的发展趋势<sup>[19]</sup>。

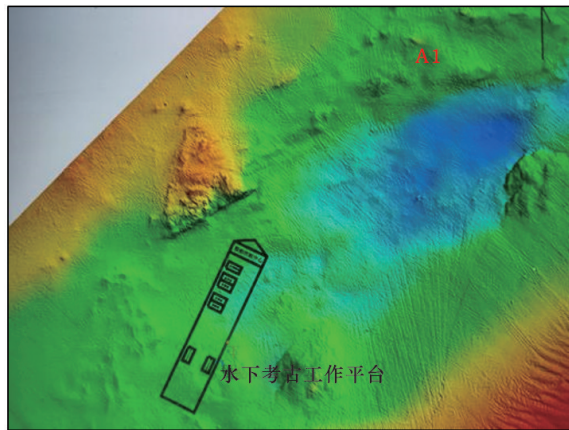


图13 超短基线定位系统信标(A1)跳点现象

通过综合考虑以上因素并采取相应的措施,可以有效减少和避免超短基线定位系统出现跳点情况,提高水下定位的准确性和稳定性。同时,可进一步对定位系统进行升级和改造,改进超短基线系统的抗干扰设计,增强其在复杂水下环境中的稳定性和可靠性,确保超短基线系统在噪声较大或环境复杂的水域中仍能提供准确的定位数据。从而提高水下考古队员工作安全和效率,为沉船遗址调查、发掘和保护继续提供科学的技术支持。

随着科学与技术的不断进步,人类对深海水下定位技术也提出了越来越高的要求,提升定位精度是超短基线发展与研究的重点<sup>[20]</sup>。目前,中国水下考古已开始向深海进军。超短基线定位系统的缺点是定位精度与距离/深度有关,而深海考古领域需要更精确的定位,这就需要长基线定位系统。长基线定位系统的优点是定位精度高,且与深度无关,缺点是需要投放信标阵列,设备和时间成本高<sup>[21]</sup>。如果将长基线定位系统与超短基线定位系统相结合,研发长/超短基线组合定位系统,既可以保证定位精度独立于工作水深,又兼具超短基线机动灵活的特点,实现对水下载体的连续高精度导航定位,将会成为水下定位技术发展的新趋势。同时,在水运工程领域对超短基线定位声呐检定与校准提出迫切需求的情况下,针对性地开展水下超短基线测试装置研制也具有重要的现实意义<sup>[5]</sup>。

根据本次 ADCP 在水下考古工作中的应用,未来可对实时流速监测软件进行更新和改进,将数字孪生、人工智能和机器学习技术引入 ADCP 数据的

处理和分析过程中,实现自动化和智能化的数据分析。针对水下考古特点专项修改和设置相关参数,当流速超过 50 cm/s 时自动预警。建立动态模型,在水流流速达到最大限度之前,通知水下考古队员提前出水。智能化的数据分析可以快速识别水流变化趋势,提供预测性分析,为考古决策提供科学依据。另一方面,通过长期监测,ADCP 可以帮助考古学家制定遗址保护方案。例如,在发现重要的水下遗址后,可以使用 ADCP 定期监测水流变化,评估水流对遗址的影响,采取措施如建造防护结构或调整发掘计划,以保护遗址的完整性。

与陆地考古不同,水下环境具有高度不确定性,需要更加谨慎,做好万全准备,在保障水下考古人员安全的前提下,有序开展沉船调查、发掘和保护工作。

## 4 结论

经综合分析,此次水下考古作业中的水下定位和流速观测可以满足实际应用需求。因观测条件和设备测量精度不断变化,暂不能进行定量的指标考核检验,但通过长期观测比对可知,超短基线定位系统定位精度小于 0.2 m,能够有效确定水下考古队员相对位置。超短基线定位系统因其成本低、操作简便、无需布设海底应答器、安装灵活、测距精度高等诸多优势,未来仍将是水下考古工作中水下定位的主要方式,而 ADCP 具有省时、高分辨率、高精度、信息海量完整、低能耗的特点,尤其适合在流态复杂的海域进行观测,通过实时监测能够科学选择和有效安排水下考古作业时间窗口。

通过超短基线水下定位和 ADCP 实时测流,对漳州圣杯屿沉船海域的水深、流速、流向进行精细化监测,为水下考古队员提供行进引导,避免水下考古队员和设备在强流中作业,高效保障作业安全,极大程度降低了潜水作业风险。

**致谢:**本研究开展过程中,国家文物局考古研究中心、自然资源部第三海洋研究所、交通运输部天津水运工程科学研究院等多家单位给予大力支持。

## 参考文献(References)

- [1] 国家文物局考古研究中心. 水下考古学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 118.
- [2] Nautical Archaeology Society. Underwater archaeology: The NAS guide to principles and practice(2nd Edition) [M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2011.
- [3] 吴永亭, 周兴华, 杨龙. 水下声学定位系统及其应用[J]. 海洋测绘, 2003, 23(4): 18-21.
- [4] 金博楠, 徐晓苏, 张涛, 等. 超短基线定位技术及在海洋工程中的应用[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 8-20.
- [5] 梁景然. 超短基线定位声呐测试装置设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [6] 宋乾坤. 多频多信号 ADCP 流速测量技术及实现方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [7] 邓锴, 张兆伟, 俞建林, 等. 声学多普勒流速剖面仪(AD-CP)国内外进展[J]. 海洋信息, 2019, 34(4): 8-11.
- [8] 胡圣航, 闵小龙. 超短基线水声定位系统动态定位误差测试研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(6): 516-521.
- [9] 刘彦祥. ADCP 技术发展及其应用综述[J]. 海洋测绘, 2016, 36(2): 45-49.
- [10] 刘德铸. 声学多普勒流速测量关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [11] 邓鹏. 基于声学多普勒流量测量系统的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2008.
- [12] 曹忠义, 孙大军, 张志鑫, 等. 声学多普勒测速技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(11): 1914-1926.
- [13] 何琰, 陈红霞, 张洁, 等. 楚科奇海锚碇潜标观测数据集[J]. 全球变化数据学报(中英文), 2017, 1(2): 177-182, 196-201.
- [14] 周庆伟, 白杨, 封哲, 等. 海流测量技术发展及应用[J]. 海洋测绘, 2018, 38(3): 73-77.
- [15] 付翔, 吴少华, 李涛, 等. 福建中南部沿岸海域潮汐特征分析[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(2): 164-170.
- [16] Postma H. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment[EB/OL]. [2024-03-01]. <https://www.vliz.be/nl/imis?module=ref&refid=131007>.
- [17] 蔡爱智, 蔡月娥. 闽南古雷半岛风沙的入海及其扩散[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(4): 41-47.
- [18] 王立辉, 李杰, 周伯豪, 等. 漳州古雷港南2号码头潮流特征及通航条件分析[J]. 上海海事大学学报, 2014, 35(2): 11-16.
- [19] 张同伟, 王向鑫, 唐嘉陵, 等. 深海超短基线定位系统现状及展望[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(10): 1-6.
- [20] 肖家耀. 超短基线定位系统在深水工程勘察中的应用[J]. 价值工程, 2022, 41(15): 82-84.
- [21] 付进. 长基线定位信号处理若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.

## Application of ultrashort baseline positioning system and acoustic doppler current profiler in underwater archaeology of the shipwreck by Shengbeiyu Island

HUANG Zepeng<sup>1</sup>, RAN Delu<sup>2</sup>, RUAN Yonghao<sup>3\*</sup>

1. National Centre for Archaeology, Beijing 100013, China
2. Shandong Underwater Archaeology Research Center, Jinan 250000, China
3. Zhangzhou Cultural Relics Protection Center, Zhangzhou 363099, China

**Abstract** This paper introduced the working principles and application scenarios of ultra short baseline positioning system and acoustic Doppler current profiler. According to the underwater archaeological work requirements of the Shengbeiyu Island shipwreck in Zhangzhou, two types of equipment were comprehensively used to carry out real-time data collection and analysis, obtaining high-precision underwater absolute position information and accurate tidal hydrological observation data such as flow velocity direction, thereby improving the accuracy of site positioning. A real-time monitoring system for the entire site's ocean current profile was established, and an innovative underwater archaeological real-time positioning and monitoring system was developed to ensure the safety of underwater archaeological operations and provide technical support for shipwreck archaeological excavation work. By improving the anti-interference design of the ultra short baseline system, the stability and reliability of the system in the environment have been enhanced to address issues such as location jumps in work.

**Keywords** ultrashort baseline positioning system; acoustic doppler current profiler; underwater archaeology; Shengbeiyu shipwreck ●



(责任编辑 傅雪)