

综合海洋勘测技术在长江口二号沉船打捞过程中的应用

于小刚^{1,2}, 梁国庆^{3*}, 刘芝波^{1,2}, 隋海琛^{1,2}

1. 天津水运工程勘察设计院有限公司, 天津 300456
2. 天津市水运工程测绘技术企业重点实验室, 天津 300456
3. 国家文物局考古研究中心, 北京 100013

摘要 长江口二号沉船成功整体打捞出水, 是中国水下考古又一里程碑式的重大成果, 海洋勘测技术在沉船打捞过程中发挥了至关重要的作用。介绍了整个施工打捞过程中应用到的海洋勘测技术, 包括沉船周边海底地形测量、沉船位置姿态探测、岩土工程勘察、海洋水文环境监测、多船舶网络化导航定位、钢桩定位监测、沉船姿态实时监测等。一系列海洋勘测技术的创新与应用, 为长江口二号沉船整体打捞出水提供了重要的数据基础, 极大提高了施工作业效率, 开创了综合海洋勘测技术在水下考古及沉船打捞领域的系统作业模式。

关键词 长江口二号; 海洋勘测; 岩土工程勘察; 海洋环境监测; 导航定位; 姿态监测

2015年, 国家文物局水下文化遗产保护中心和上海市文物保护研究中心等单位联合在长江口北港下段主槽进行水下考古调查时, 首次通过声呐扫测与潜水探摸发现了长江口二号沉船遗址。该船沉没于上海市崇明区横沙岛东北部北港航道水下8~10 m处, 船体残长约38.1 m, 宽约9.9 m, 船体大部分埋藏于约5.5 m深的淤泥中^[1]。经水下考古调查发现, 该沉船现存31个舱, 船艏、缆桩、主桅杆、左右舷等结构基本完整, 是目前国内发现的体

量最大、保存最为完整、船载文物丰富的古代木质沉船之一, 填补了中国清代晚期大型木帆船空白。为保证沉船的完整性, 上海市文物保护中心与上海打捞局合作, 开创性地采用了“弧形梁非接触文物整体迁移技术”, 对沉船进行整体打捞^[2]。但是, 由于沉船所处位置属于浑水海域, 水下能见度极低, 无法通过传统的水下录像方式进行观测, 且水流流速大, 水况复杂, 给打捞过程中沉船的安全监测带来巨大困难。

收稿日期: 2023-10-01; 修回日期: 2024-03-04

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); 国家重点研发计划项目(2020YFC1521705)

作者简介: 于小刚, 工程师, 研究方向为海洋工程勘察, 电子信箱: 378270942@qq.com; 梁国庆(通信作者), 副研究馆员, 研究方向为水下考古、沉船考古和海上丝绸之路考古, 电子信箱: 18513503003@163.com

引用格式: 于小刚, 梁国庆, 刘芝波, 等. 综合海洋勘测技术在长江口二号沉船打捞过程中的应用[J]. 科技导报, 2024, 42(14): 81-90;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.10.01605

为完善沉船打捞施工方案,确保打捞过程中沉船安全监测可控,该项目通过综合运用海洋勘测技术,为沉船打捞提供了重要的地理信息数据和监测技术手段,关键技术及新颖点主要在于综合采用多波束测深系统和三维合成孔径声呐2种设备相结合的方法,精细地探明了沉船的位置和姿态,构建了沉船三维模型,对沉船区域进行了一系列的海底地形、岩土勘察和水文观测等综合海洋勘测,为施工方案制定和沉船打捞过程中的安全监控系统提供了数据支撑。

1 沉船位置、姿态探测

沉船的水下位置、姿态探测一直以来都是施工打捞过程中的关键问题。传统的作业方式是通过潜水员进行水下探摸确认^[3],但长江口二号沉船所处的海域水下能见度极低,水流流速较大,潜水员水下作业难度极大,且效率低、准确性差、安全风险高。借助多波束测深系统和三维合成孔径声呐等先进的声学海洋调查设备,对沉船区域进行全面精细化的水下扫测,可以得到沉船的三维点云数据,经过数据处理后,能够获取沉船的精确位置、方位、姿态及埋深情况^[4]。

1.1 多波束水深地形测量

2022年6月,沉船打捞施工作业前,采用超高分辨率 Reson T50P 多波束测深系统、高精度星站差分全球定位系统(GPS)、光纤罗经、声速剖面仪等设备,使用PDS2000数据采集软件,对沉船区域及周边地形进行了详细的全覆盖扫测,主要目的是获取沉船的精确位置、形态以及周边水深、地形和地貌等情况^[5],为进一步水下考古及施工打捞提供重要参考。

为保证外业数据采集的质量,分别选取合适的位置安装设备:将GPS天线安置于无遮挡的船舶驾驶室顶部栏杆上,以便于接收导航卫星信号;多波束换能器支架安装于测量船重心附近的左侧船舷位置(约1/2船长处),此位置可以远离船舶主机、泵和螺旋桨并有效地避免测量船摇摆及噪音干扰;选择测量船甲板中心结实处安装姿态仪(光纤罗经),

调整光纤罗经使其测量的方位角与测量船艏艉线一致。设备安装完成后,以多波束换能器安装杆与海水面交点作为参考点,建立船体坐标系,定义右舷方向为X轴正方向,船艏方向为Y轴正方向,垂直向上为Z轴正方向,量取各设备相对于参考点的位置,往返各量1次,取平均值作为最终设备偏移结果,设备安装示意图及偏移量如图1、表1所示。

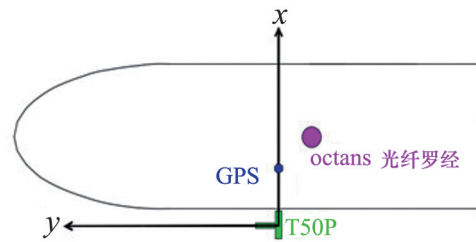


图1 仪器设备安装示意

表1 仪器设备安装偏移量

类别	设备偏移量		
	X/m	Y/m	Z/m
参考点	0	0	0
GPS	1.080	0	6.705
多波束测深仪	0	0	-1.850
光纤罗经	3.380	-2.010	3.605

多波束外业测量实施过程中,由于现场水流流速较大,水流方向大致为东西方向,根据现场水流方向布设计划测线,计划测线方向为260°,测线间隔为20 m,对沉船周边500 m×500 m范围进行水下地形测量。同时,选择平流时间,在发现的沉船位置区域50 m×100 m范围,沿沉船艏艉线南北方向布设9条测线,沉船中心附近测线间隔5~10 m,对沉船位置区域进行精细化测量,进一步探测沉船的位置、形态及轮廓。测线布设示意如图2所示。

依据多波束测量采集的数据资料,使用CARISHIPS数据处理软件,经过处理形成沉船三维影像图(图3(a))。从影像图中可以看出一些比较大的目标物和船体结构,如沙袋、木板、桅杆等。同时,采用模拟光照算法对沉船区域多波束系统采集的点云数据进行可视化渲染^[6]。根据视觉原理,按灰

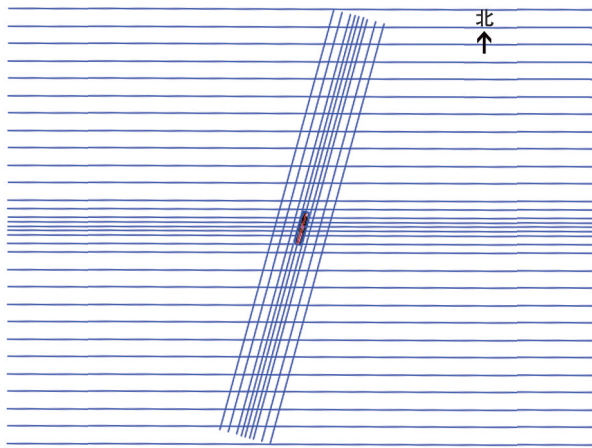
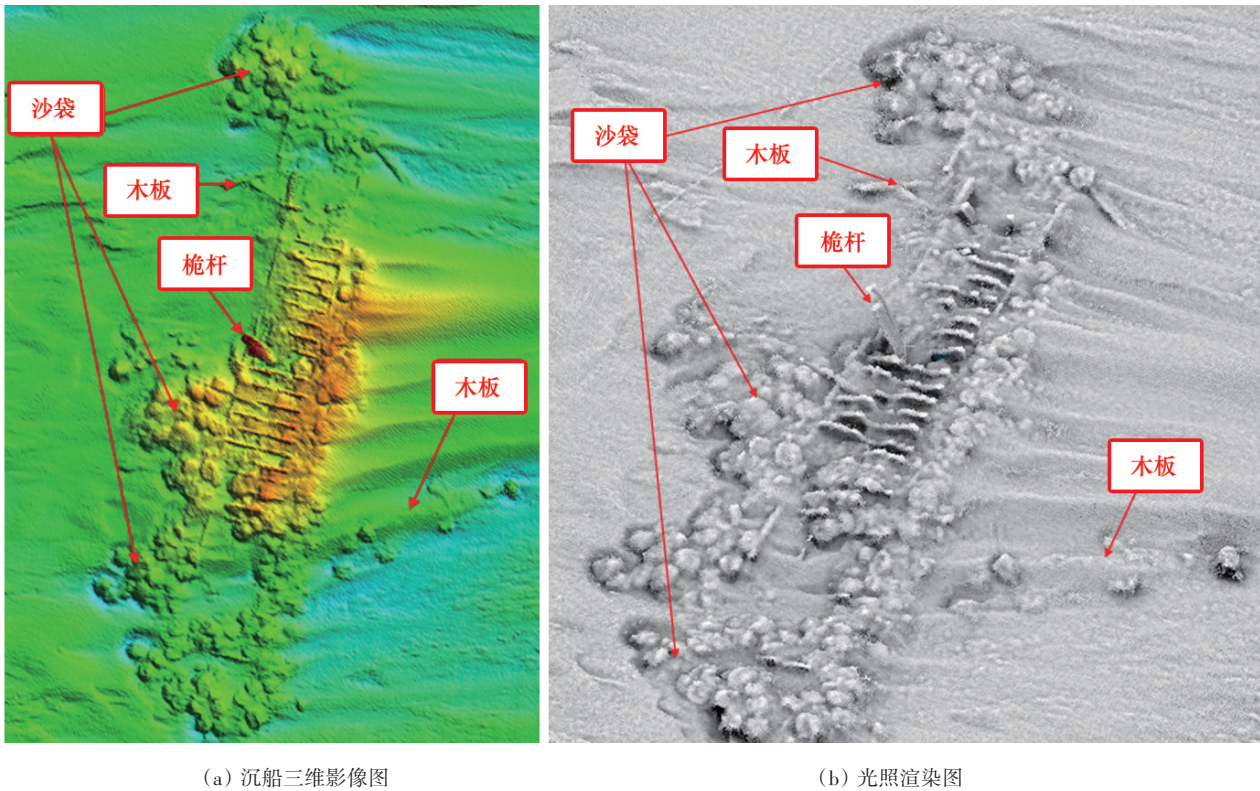


图2 计划测线布设示意

度等级分 256 级进行配色,其细节层次比按照水深着色效果要好,使得三维点云的颜色更加符合人类视觉感官,如图 3(b)所示。

根据多波束精细化测量数据处理结果显示,沉船区域附近水深 4.8~9.2 m,平均水深约 8.4 m。从沉船三维影像图上可以看出沉船周围的一些目标物,最浅点位于桅杆顶部,水深约为 4.8 m,桅杆长度约 3.5 m;沉船整体呈“坐沉”状态沉于海床,整体呈向西倾斜,船艏、船尾及右舷被部分沙袋及海底泥沙掩盖。后经过海底吹泥处理作业,船头及船尾露出泥面,再次进行多波束精细化测量,调查结果显示沉船长度约 38.1 m,船宽约为 9 m。



(a) 沉船三维影像图

(b) 光照渲染图

图3 长江口二号多波束扫测渲染图

本次多波束水深地形测量获取了沉船大量三维点云数据,经过精度验证达到了分米级测量精度,为完成沉船水下状态的模型重构提供了关键数据,对于提高打捞效率具有重要作用。

1.2 三维合成孔径声呐探测

长江口二号沉船沉没时间久远,大部分船体处

于海床以下埋藏状态,根据沉船整体打捞方案和历史文化保护的需求,探明沉船船体的埋藏深度及状态至关重要。多频三维合成孔径声呐系统,同时集成安装了下视三维合成孔径声呐、下视多波束声呐、侧视声呐等 3 部声呐分机,采用模块设计,可根据不同要求灵活组合,以满足不同任务场景及安装

需求^[7]。该系统可同时输出海底浅地层剖面、海底掩埋物三维图像、线缆目标路由、海底地貌和沉底目标高清图像、海底悬浮目标图像、高精度海底地形图等^[8]。

三维合成孔径声呐系统提供了多种视角的声学图像,其中在直角坐标系下的3个方向上任意切片投影,形成了俯视图、右视图、前视图3种视角的二维声图:俯视图在垂直方向上,对任意厚度切层的数据进行投影;右视图在水平面且垂直航迹方向上,对任意厚度切层的数据进行投影;前视图在沿航迹方向上,对任意厚度切层的数据进行投影。其中,右视图与浅地层剖面仪获得的声学图像的视角类似,前视图与多波束声呐获得的水柱图的视角类似,具体切片投影方式如图4所示。

长江口二号沉船探测过程中,首次采用了中科探海(苏州)海洋科技有限责任公司自主研发的三

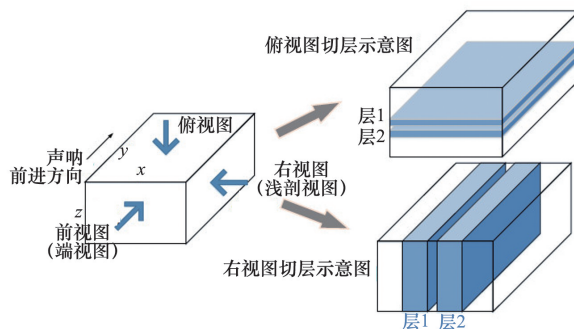


图4 三视图切割和投影示意

维合成孔径声呐系统,对沉船区域上方进行了多回次扫测,依据三维声呐图像数据资料分析,形成了侧扫声呐影像图、前视图、右视图和俯视图(图5),根据声学图像判别出沉船的最新状态,船体大部分处于掩埋状态,最大埋藏深度约5.5 m,该探测结果对沉船整体打捞施工提供了重要的参考数据。

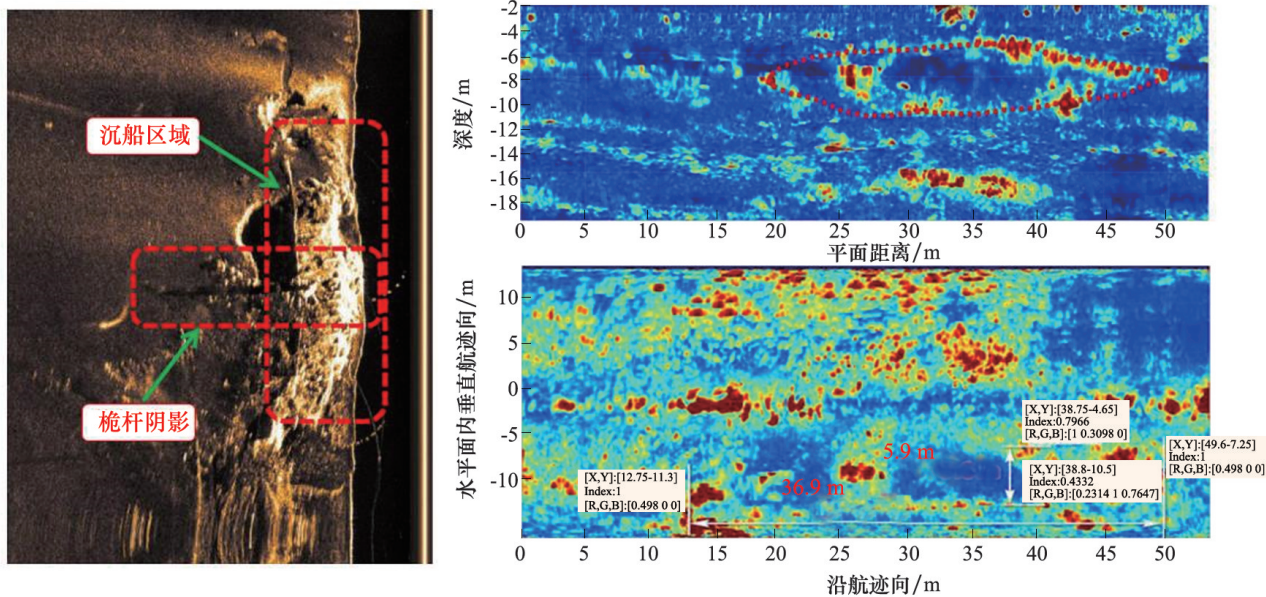


图5 侧扫声呐图、右视图和俯视图

2 海洋岩土工程勘察及海洋环境监测

2.1 海洋岩土工程地质勘察

为确保沉船整体打捞方案中沉船周边4根定

位桩沉桩、端板-纵梁打捞框架结构入泥沉放、弧形弯梁掘进等施工顺利进行,施工前采用工程地质钻探取样、原位试验的作业方式,对施工区域地层结构、岩土性质、地基土工程地质特性进行分析,查明钻探区域是否有沉船及海底散落物等情况,为后

期沉船整体打捞提供基础数据。

2021年3月,根据施工方案在沉船周边目标区域布设了5个地质钻孔,编号分别为SBP-SN-1、SBP-10-2、SBP-SN-7、SBP-SN-8及MAG点。其中SBP-SN-7、MAG这2个取样孔为技术孔,孔深为泥面下40 m,进行取土样和标准贯入试验,同时确定下方是否有沉船船体或其他杂物;SBP-SN-1、SBP-10-2、SBP-SN-8这3个钻孔为探测孔,设计孔深为泥面下15 m,目的是确定泥面下方是否有其他沉船或杂物,钻孔布设位置如图6所示。

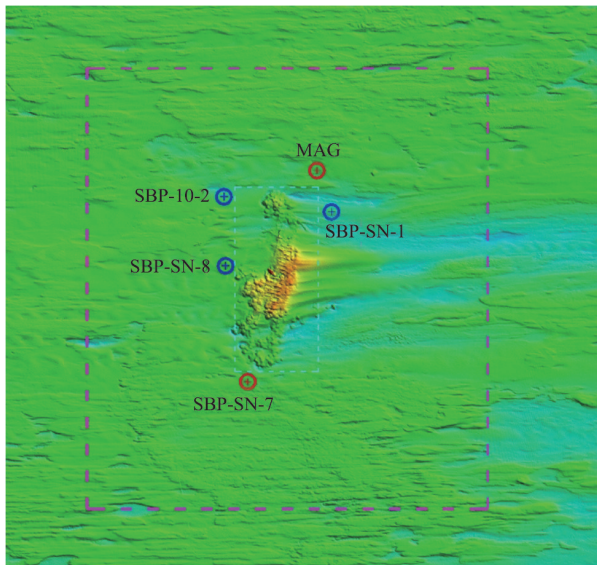


图6 钻孔布设位置示意

本次勘探施工租用500 t船舶架设作业平台,采用四锚定位,使用GXY型100 m钻机,岩芯管全断面取芯钻进,兼做标准贯入试验。软黏性土采用 $\Phi 108$ mm薄壁取土器静压法取样,可塑状黏性土采用厚壁取土器取样,砂土进行标准贯入试验。标准贯入试验采用 $\Phi 42$ mm钻杆、质量63.5 kg的落锤,落距76 cm,采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击,先将贯入器打入土中15 cm后,开始记录后30 cm每打入10 cm的锤击数、累计打入30 cm的锤击数,为标准贯入试验锤击数;试验过程中保持孔内水位略高于地下水位,并减少导向杆与锤间的摩擦力,避免锤击时的偏心 and 侧向晃动,保持贯入器、探杆、导向杆联接后的垂直度,锤击速率小于30击/min,试验间距为1.0~2.0 m。

通过海上地质勘察取样工作,共完成5个钻孔,钻探总进尺约125 m,取得原状土样54件,标准贯入试验53次,按照《岩土工程勘察规范》^[9]、《疏浚岩土分类标准》^[10]和《土工试验方法标准》^[11]等相关国家规范和标准^[7-9],对土样进行了野外命名编录、室内土工试验,获取地基土体的物理力学性质、强度指标、天然地基和桩基础承载力等参数。根据土体室内试验和现场试验的数据参数,分析地基土工程地质特性,论证区域地质构造稳定性,评价工程场地的稳定性和适宜性,分析其对工程设计、施工可能产生的不利影响。

沉船区域的岩土工程地质勘察数据结果表明:

(1) 沉船区无活动性断裂通过,地貌类型属三角洲前缘地貌,海床面平缓,勘察时未发现深沟、岩礁,现状无滑坡、崩塌等不良地质作用,场地稳定性较好;(2) 场区普遍分布第四系覆盖层,厚度较大,土层整体上分布均匀,勘探点位置未发现沉船、海底散落物等对工程施工不利的埋藏物,适合沉船打捞;(3) 场地为不液化场地,沉船打捞时桩基类型宜采用钢管桩,建议采用灰色粉质黏土层(层顶埋深为27.30~27.50 m)作为桩基持力层,桩基设计时应该考虑软土固结对桩身产生负摩阻力的不利影响。

2.2 海洋环境监测

沉船打捞施工现场的海洋环境及气象情况,对打捞作业的安全和效率具有至关重要的作用^[12],因此需要对工区海洋水文环境进行实时监测,主要包括海流、潮汐、波浪等,对沉船海域的海洋水文环境进行监测,以便服务于施工打捞和潜水作业。本次沉船打捞施工位置距离岸边较近,受波浪影响较小,因此重点对施工海域海流和潮汐情况进行观测。

海流是海水的实际流动,是由引起海水流动的各种因素产生的,包括潮汐流、风海流、密度流等。潮汐流是海水受月球和太阳的作用,在发生潮汐现象的同时所产生的海水水平方向的周期性流动。在实际应用中,由于海流的周期性,一般将海流分为潮汐流和余流^[13]。一般来说,海水由外海向港湾的流动引起港湾的水位升高,而由港湾向外海的流动引起港湾的水位下降。因此,通常将由外海向港

湾的流动叫做涨潮流,由港湾向外海的流动叫做落潮流。

在施工船舶“大力号”船舷,采用释放杆安装美国 RDI 公司生产的骏马系列哨兵型自容式声学多普勒海流剖面仪(ADCP),实时观测作业海域的流速和流向情况,为现场施工作业和潜水作业时间提供直观的数据参考。同时,在施工海域,使用 KellerDCX-25 自动验潮仪设立临时验潮站,通过长时间观测潮位信息,统计潮汐规律,预报未来潮汐,为现场施工作业计划的制定提供参考依据。

哨兵型自容式 ADCP 是一种适用于水深 200 m 以浅水域的自容式海流剖面仪,也可装上电缆,用于直读式海流测量。该仪器体积小,质量为 13 kg,携带和布放十分方便。它具有海底跟踪功能,既可自容,又可直读;既可固定式定点测量,又可进行走航测量,用户可根据需要灵活使用。RDIADCP 主要有 2 种工作模式:标准工作模式和浅水高精度工作模式。标准工作模式适应范围大,应用于大多数情况。然而在水很浅,流速很低情况下,采用浅水高精度工作模式可以有效地提高测量精度。该设备主要技术指标如表 2 所示。

表 2 ADCP 关键技术参数

参数名称	技术指标
流速精度(1200, 600 kHz)	水流速度 $\pm 0.25\%$, $\pm 2.5/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$
流速分辨率/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	1
流速范围/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	± 20 (最大值)
流速深度单元个数/个	1~128
标准传感器量程(温度)/ $(^{\circ}\text{C})$	-5~45
标准传感器精度/ $(^{\circ})$	± 0.4
标准传感器分辨率/ $(^{\circ})$	0.01
倾斜量程/ $(^{\circ})$	± 15
倾斜精度/ $(^{\circ})$	± 0.5
倾斜分辨率/ $(^{\circ})$	0.01
罗经精度/ $(^{\circ}\text{e})$	± 2
罗经分辨率/ $(^{\circ})$	0.01
罗经允许最大倾角/ $(^{\circ})$	± 15

在流速监测实施过程中,采用 VmDas 软件对 ADCP 进行参数配置,包括 GPS 定位设备、外置罗经、串口连接方式和波特率,以及现场测流分层数、

每层厚度、盲区厚度、吃水深度、海底跟踪、长平均时间、短平均时间、储存文件、测量模式等参数;配置完成后运行 VmDas 软件,进行实时数据采集;数据采集完成后,采用 WinADCP 对采集的数据进行后处理生成测流数据报表,计算各垂线平均流速、流向,绘制流速、流向过程线图和垂线平均图,通过对长时间观测数据进行处理,分析海流规律,实现对现场海流的预报^[14]。根据预报的海流情况对作业计划进行合理安排,极大提高了作业效率。

3 导航定位监测

3.1 通信网络构建

现场施工作业船舶较多,需要所有船之间实现导航定位数据的集成和共享。每条船上均配备导航定位设备、软件系统和网络通信工具,根据现场作业情况构建局域网,采用星型拓扑结构,使用具有 Mesh 功能的无线网桥、路由器、交换机等网络通信设备,将现场有线网和无线网有机结合在一起^[15],同时在主作业船舶“大力号”选取一台电脑作为服务器,并将其安装的无线网桥作为中心站接入点,其余船舶上安装的网桥均通过中心站点进行数据交换,所有定位监测设备的数据信息均通过串口或网络的形式集成到服务器,由服务器对各种数据进行广播传输^[16]。

为保证各种数据信息的融合,现场构建的局域网必须具备相同的 TCP/IP 网络协议,每一条船上的任意一个终端电脑均可以访问其他船上任意一台终端电脑,任一终端均可获得接入网络的设备数据信息,很好地解决了各船舶、多传感器、多种施工信息数据分布离散化和多样化的问题^[17]。

3.2 施工船舶导航定位

各施工船舶定位均采用双天线定位定向 GPS 和无线网桥等设备,船舶导航定位软件采用天津水运工程勘察设计院有限公司自主研发的“海洋工程施工船舶管理系统”。该软件以各种导航定位设备的数据为基础,可以接收多种设备或传感器的数据,经过系统的数据分析处理、数据管理及形象逼真的数据展现,以图形化的方式实时显示船舶的位

置和各种背景底图,采用网络的方式对数据进行集成和共享,可实现多层次网络、多节点分布、中枢管理、统计分析和远程监控的功能^[18],以保障现场施工作业顺利进行。

3.3 沉桩定位监测

为最大限度地保护沉船的完整性,根据沉船整体打捞施工方案,需要在沉船周边沉放4根钢桩,用于定位和固定端板-纵梁打捞框架结构的安放,因此钢桩的精确定位及沉桩过程监测尤为重要。4根钢管桩沉桩位置容许误差半径为0.25 m,任意2根钢管桩的间距容许测量精度误差半径为0.03 m,

钢桩垂直度(桩轴线倾斜度)偏差 $\leq 5\%$,桩顶高程允许偏差 $< \pm 0.1$ m。

钢桩吊装前,需在施工船“大力号”船舷安装定位定向 Trimble 992 DGPS、沉桩固定架等装备,开通 RTX 高精度基站差分信号进行实时定位,采用全站仪精确测量沉桩固定架、GPS天线杆等关键点相对于船体坐标系的偏移量,并添加到导航定位软件中。钢桩沉放定位作业,主要通过“大力号”锚缆收放的方式,将沉桩固定架移位至钢桩设计位置,同时可在导航定位软件中设置钢桩偏移距离限值,在软件系统中实时显示平面距离偏差(图7)。

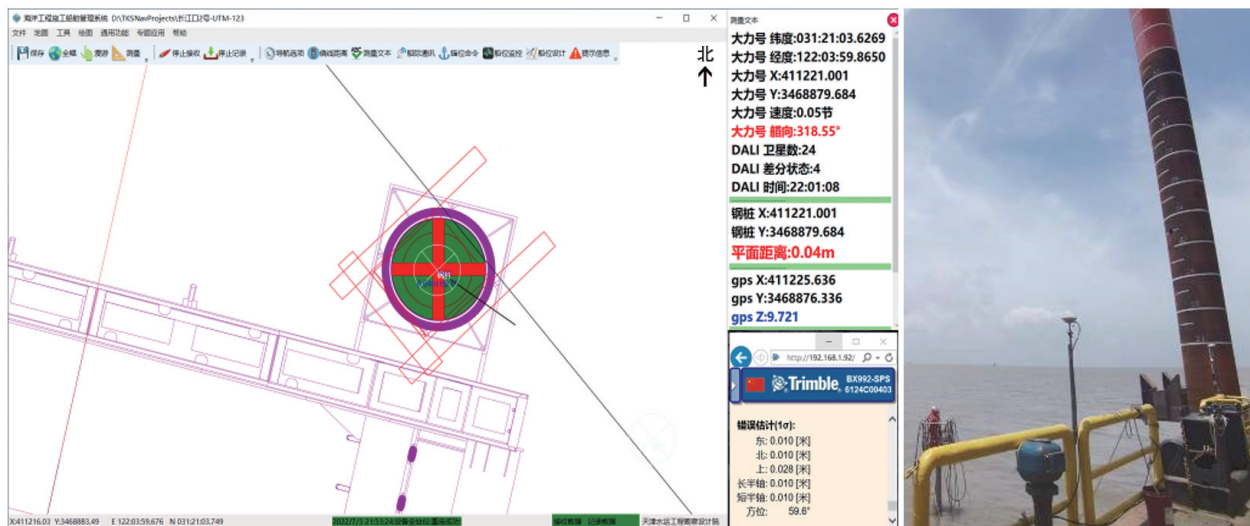


图7 钢桩沉桩定位作业界面

钢桩吊装就位完成后,通过液压振动桩锤进行沉桩作业^[19]。在此过程中采用“圆心拟合测量法”观测上、下2个钢桩截面上若干个坐标点,拟合出钢桩中心坐标,进而求出钢桩倾斜度和倾斜方位,同时注意观测钢桩顶部的标高,保证4根钢桩沉桩完成后满足设计需求。

“圆心拟合测量法”的具体作业方法如下^[20]:在辅助架上任意位置架设全站仪,采用无棱镜模式,首先对钢桩的截面上左侧任意一点进行观测,然后对同一个截面由左向右进行观测,进行8~10组数据的记录。按照此方法,依次完成钢桩上、下截面

的观测。利用最小二乘原理,拟合出各截面圆心坐标,通过编写的软件可实时计算出钢桩倾斜度和倾斜方位,并同步显示在导航定位软件系统中,供打桩指挥人员参考。

为保证测量数据计算结果的精度,在测量过程中,选取钢桩上、下截面的距离间隔尽量大于5 m,每个截面的测量点尽量在同一高程,且均匀分布,拟合圆心坐标时,圆半径尽量接近钢桩设计半径(0.75 m);同时,测量钢桩顶部标高时,采用多次观测取均值的方式,观测钢管桩上的同一刻度线或桩顶。钢桩沉桩过程监测记录如图8所示。

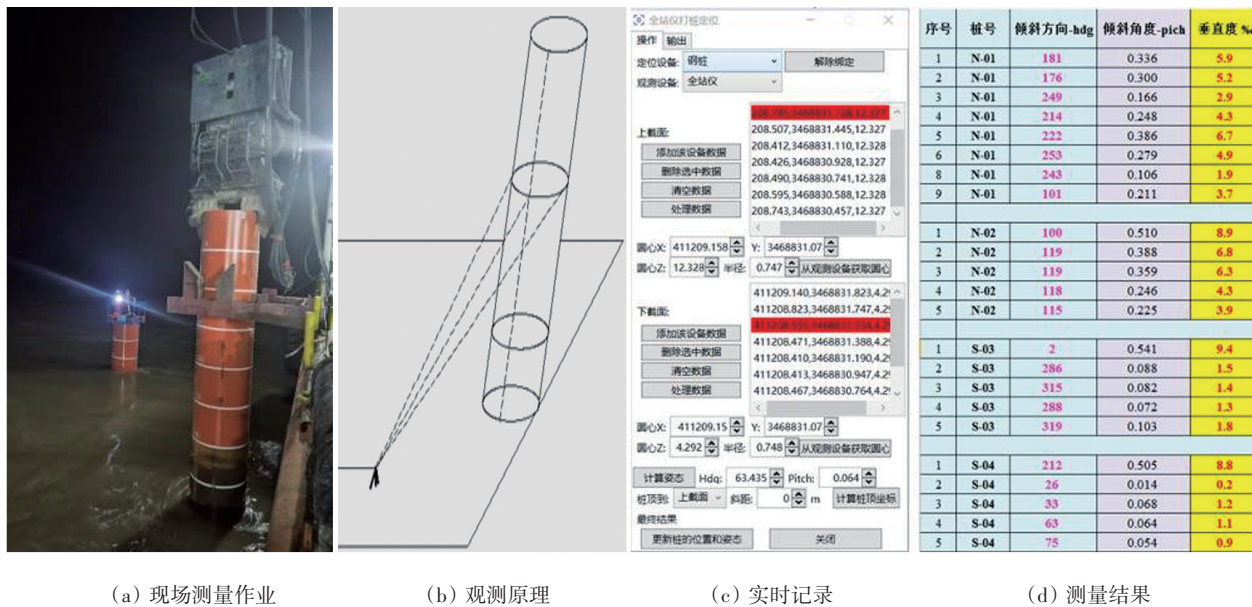


图8 钢桩沉桩过程监测

4 沉船打捞过程姿态监测

沉船打捞现场海域气象多变,水文条件较为复杂,最大流速约6节。沉船起浮过程会受到多种海洋环境因素的影响,容易发生钢丝绳断裂、沉船侧翻等事故,从而导致打捞失败。因此起浮过程要保证沉船和抬浮驳姿态的稳定,必须对沉船的姿态进行实时监测^[21]。沉船起浮过程中的姿态信息主要包括横倾、纵倾和离底高度,这些姿态数据信息必须实时展示给施工指挥人员。

长江口二号沉船整体打捞过程中,首先采用端板-纵梁框架结构及22根弧形弯梁包裹整个船体,然后由44根起吊钢丝绳两端分别连接水下端板-纵梁端头和抬浮驳“奋力轮”上的钢绞线端头,利用钢绞线液压同步提升原理将沉船抬浮出水^[22],实现沉船的整体打捞。

打捞框架结构下放时以4根定位桩为引导,需要连续监测下放过程中框架结构的实时姿态变化及入泥深度,保证打捞框架结构整体基本处于水平状态,直至两侧端板底部入泥深度大于沉船的埋深为止。同理,在整体起浮施工过程中,需要对船体及打捞框架结构的水下姿态进行连续实时监测,姿态数

据主要是纵倾和横倾数据,如果姿态数据出现较大变化说明沉船起浮过程姿态不稳,需要通过钢绞线收放方式进行调平,保证沉船起浮过程姿态大致水平^[23]。

针对沉船打捞过程中的水下姿态监测,天津水运工程勘察设计院有限公司自行开发了水下姿态监测系统,首先在端板-纵梁框架结构顶部4个角点处分别选取合适位置各安装1个高精度水位计DT100,尽量保持高度一致,并量取各水位计相对于打捞框架结构体坐标系的偏移量,输入至“海洋工程施工船舶管理系统”中,通过“压力传感器计算”功能模块,获取打捞框架结构的水下实时姿态,并在软件中显示出来。同时在海底再布设1个水位计作为基准,通过压力计算,可以实时显示打捞框架结构的入泥深度。

2022年9月11—12日,现场完成沉船打捞框架结构体的下放,过程中水下姿态数据及入泥深度显示正常,随后通过隧道掘进施工工艺进行了一段时间的水下弧形弯梁安装作业,并于11月15日全部安装完成22根弧形弯梁。2022年11月20日,抬浮驳“奋力轮”进场,经过抛锚定位完成布场,然后进行沉船打捞起浮的所有准备,于21日凌晨2时利用钢绞

线液压同步提升的方法将长江口二号沉船整体成功打捞出水。整个起浮过程使用水下姿态监测系统进

行数据实时观测,沉船姿态数据较为稳定(图9),姿态数据变化在可控范围内,期间通过钢绞线收放方式进行船体姿态调整,一系列海洋勘测技术的应用有力地保障了本次打捞工程的顺利完成。

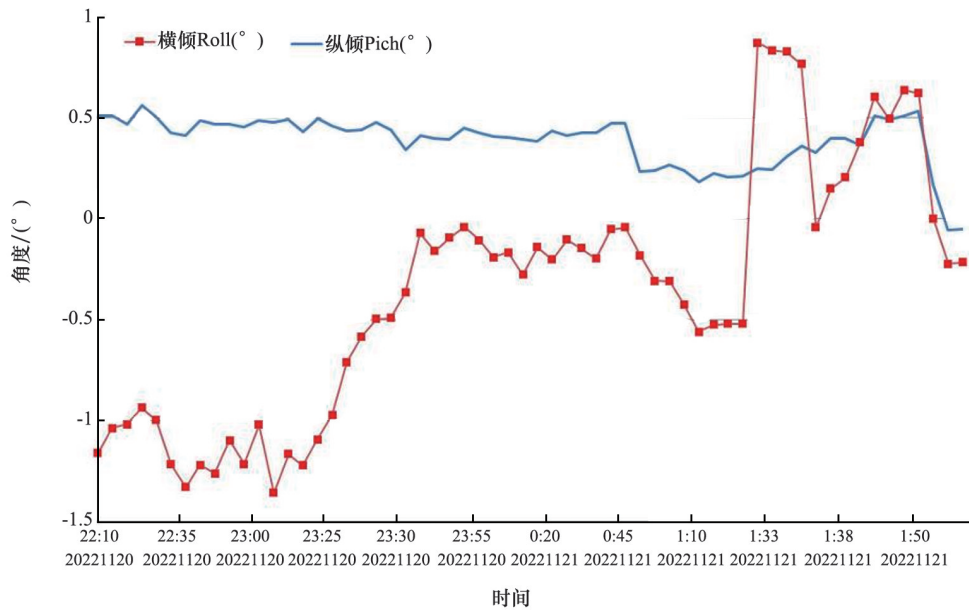


图9 沉船起浮过程姿态监测结果

5 结论

长江口二号沉船整体打捞是中国水下考古及沉船打捞领域的重大工程,通过一系列海洋勘测技术的创新及应用,对沉船区域的海底地形地貌、工程地质情况和海洋水文环境进行了详细的调查和监测,精细化地探测了沉船的水下位置、姿态,为沉船打捞方案的制定提供了重要参考依据。在沉船打捞施工过程中,多船协作网络化导航定位作业、钢桩沉桩定位实时监测、沉船打捞过程水下姿态实时监测、集中监测系统等技术的应用,为长江口二号沉船的成功整体打捞提供了重要的技术支撑,开创了综合海洋勘测技术在水下考古和救助打捞领域的系统作业模式,为今后类似打捞工程的开展提供了有益的经验。

参考文献(References)

[1] 赵萃, 翟杨, 孟原召, 等. 上海长江口二号清代沉船遗址

水下考古工作与研究回顾[J]. 国家航海, 2023,(2): 38-54.

[2] 曹玲娟, 王珏. 水下考古再“发力”, 长江口二号古船整体出水[N]. 人民日报, 2022-11-23(11).

[3] 吴建成, 孙树民. “南海1号”古沉船整体打捞方案[J]. 广东造船, 2004, 23(3): 69-72.

[4] 隋海琛. 三维声呐在水下沉船姿态探测中的应用[J]. 水道港口, 2016, 37(5): 569-572.

[5] 王健, 金锋, 彭忠卫. 海床精细化调查方法在打捞工程中的应用与研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(3): 205-207.

[6] 朱德海, 郭浩, 苏伟. 点云库PCL学习教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.

[7] 郎诚, 茅克勤, 向芸芸. 三维合成孔径声呐在海底掩埋目标探查中的应用现状与展望[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(1): 49-52.

[8] 岳雷, 姜春华, 罗松, 等. 低频宽带多波束声呐系统设计及试验研究[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(1): 97-106.

[9] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 500021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

[10] 中华人民共和国交通部. 疏浚岩土分类标准: JTJ/T320

- 96[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [11] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [12] 刘伟, 宁大勇, 田昊, 等. 沉船打捞集成监测及虚拟仿真系统设计[J]. 船海工程, 2018, 47(1): 94–98.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋调查规范 第2部分: 海洋水文观测: GB/T 12763.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 王崇明, 杨鲲, 隋海琛. “世越号”沉船打捞中综合海洋测绘技术的应用[J]. 海洋测绘, 2019, 39(4): 79–82.
- [15] 王崇明, 修义瑞, 雷鹏, 等. 水运工程施工船舶管理系统软件设计与实现[J]. 水道港口, 2016, 37(2): 203–207.
- [16] 陆云龙, 雷志华. 基于Windows服务的网口与串口通信设计及应用[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(17): 5075–5079.
- [17] 隋海琛, 雷鹏, 李晶. 海洋施工定位软件结构解析[J]. 水道港口, 2012, 33(6): 544–546.
- [18] 吴昊, 隋海琛. 网络化导航定位技术在韩国“世越号”沉船打捞中的应用[C]. 卫星导航定位技术文集, 2020: 233–236.
- [19] 郭伟. 海上风电基础钢管桩打桩监测[J]. 工业建筑, 2016, 46(增刊): 588–591.
- [20] 郝建录, 历昌. 一种用于海上打圆桩过程监测的新型测量方法[J]. 海洋测绘, 2018, 38(5): 59–62.
- [21] 王崇明, 王晓琳, 杨海忠, 等. “世越号”整体打捞起浮过程中沉船状态监测[J]. 水道港口, 2019, 40(5): 611–615.
- [22] 李兴奎, 吴志勇, 戴义平, 等. 基于液压同步牵引的沉船打捞技术[J]. 建筑机械化, 2010, 31(增刊1): 53–57.
- [23] 隋海琛, 杨鲲, 张彦昌, 等. “南海一号”打捞过程中的水下定位和姿态监测[J]. 水道港口, 2009, 30(2): 139–142.

Application of integrated marine survey technology in the salvage of Changjiang Kou No.2 shipwreck

YU Xiaogang^{1,2}, LIANG Guoqing^{3*}, LIU Zhibo^{1,2}, SUI Haichen^{1,2}

1. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., LTD., Tianjin 300456, China
2. Tianjin Key Laboratory of Surveying and Mapping Technology for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China
3. National Centre for Archaeology, Beijing 100013, China

Abstract The successful salvage of Changjiang Kou No.2 shipwreck out of water is another milestone achievement of underwater archaeology in China. Marine survey technology played a vital role in raising the shipwreck out of water. This paper introduces in detail the marine survey technologies applied in the whole salvage process, including bottom topographic survey around the shipwreck, position and attitude detection, geotechnical engineering investigation, marine hydrological environment monitoring, multi-ship network navigation and positioning, steel pile position monitoring, real-time attitude monitoring, etc. A series of innovation and application of marine survey technology have provided important data for the overall salvage of Changjiang Kou No.2 shipwreck. The efficiency of salvage operation is greatly improved, and a systematic operation mode of integrated marine survey technology in the field of underwater archaeology and wreck salvage is created.

Keywords Changjiang Kou No.2 shipwreck; marine survey; geotechnical engineering investigation; marine environment monitoring; navigation and positioning; attitude monitoring ●



(责任编辑 傅雪)