引文格式：历昌,隋海琛,杨鲲,等. 斯里兰卡海域某难船打捞测绘技术的融合应用[J]. 地理空间信息, 2024, 22(7): 104-107. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.07.024

斯里兰卡海域某难船打捞测绘技术的融合应用

历　昌[1,2,3]，隋海琛[1,2,3]，杨　鲲[1,2,3*]，马　深[1,2,3]

（1. 交通运输部天津水运工程科学研究所，天津 300456；
2. 天津水运工程勘察设计院有限公司，天津 300456；3. 天津市水运工程测绘技术重点实验室，天津 300456）

摘　要：详细介绍了新加坡籍集装箱船“X-PRESS PEARL”难船打捞施工过程中的融合测绘技术，包括难船前期位置与姿态调查，难船周边障碍物调查，海风、波浪与海流的海洋环境监测，水上水下综合导航定位，难船起浮姿态监测，难船自浮姿态监测以及最终的残骸打捞工作。通过融合应用一系列测绘设备以及技术创新，为难船的顺利打捞提供了大力支持，为海洋环境保护提供了有效的保障，为相关国际难船打捞工程提供了可靠的参考依据。

关键词：难船打捞；姿态调查；障碍物扫测；海洋环境要素监测；水上水下导航定位；姿态监测；残骸打捞；扫描声呐

中图分类号：P229　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）07-0104-04

Integrated Application of Surveying and Mapping Technologies for the Shipwreck Salvage in Sri Lanka

LI Chang[1,2,3], SUI Haichen[1,2,3], YANG Kun[1,2,3], MA Shen[1,2,3]

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., Tianjin 300456, China;
2. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China;
3. Tianjin Key Laboratory of Surveying and Mapping for Waterway Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: The shipwreck salvage project of Singapore-registered container ship “X-PRESS PEARL” has been carried out in November 2021. In this paper, we introduced the integrated surveying and mapping technologies in the whole salvage processing in detail, including the position and attitude investigation of shipwreck, obstacles around the shipwreck before salvage, the monitoring of wind, waves and currents, the integrated navigation and positioning of surface and underwater, buoyancy attitude monitoring, self-floating attitude monitoring during the lift up of shipwreck and the final debris salvage and removal. It provides support for the smooth salvage of shipwreck, effective protection of the marine environment, through a series of integrated application of surveyings and mapping equipments and technology innovation, which also demonstrate a reliable reference for related international shipwreck salvage.

Key words: shipwreck salvage, attitude investigation, obstacle scanning, marine environmental element monitoring, navigation and positioning of surface and underwater, attitude monitoring, debris salvage, scanning sonar

当地时间 2021 年 5 月 20 日下午，一艘 2 700 TEU 新加坡籍集装箱船“X-PRESS PEARL”号（以下简称珍珠号）在距离斯里兰卡科伦坡港约 9.5 海里处停泊时因甲板集装箱起火引发火灾；6 月 2 日试图拖曳该船时，船尾撞上海床沉没。该船运载的大部分集装箱货物在火灾中烧毁，泄漏的大量化学品和塑料粒子给当地海域造成了严重污染，大量海洋生物死亡，导致斯里兰卡面临最严峻的海滩污染，环保人士形容为斯里兰卡史上最严重的海洋生态浩劫[1]。珍珠号船总长 186 m，型宽 34.8 m，型深 17.9 m，入级 DNV，挂新加坡船旗，服务 X-PRESS FEEDERS 亚洲区间航线。船舶发生事故时，船上装载了 1 486 个集装箱，其中 81 个为危险品集装箱，包括 25 t 硝酸以及其他化学品和化妆品。难船沉没于科伦坡港西北侧海岸线约 4 海里处，属于科伦坡锚地区域，平均水深为 21.5 m；所处地理位置属于热带季风性气候，接近赤道、终年如夏，海上常年湿热，西南季风盛行，导致该海域气象环境多变，水文条件复杂[2]。

珍珠号难船打捞的主要工序为：①对难船及其周边区域进行全覆盖地貌地形扫测，确保船舶就位安全；②调查难船的精确位置与姿态；③施工船舶抛锚布场，进行潜水作业和其他相关工作。打捞期间严密

收稿日期：2023-03-08。
项目来源：中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目（TKS20200301、TKS20220104）。
第一作者简介：历昌（1987—），本科，高级工程师，研究方向为海洋测绘及地理信息系统应用，E-mail：gpslichang@163.com。
通信作者：杨鲲（1973—），正高级工程师，注册测绘师，主要从事海洋测绘研究工作，E-mail：tksyangkun@163.com。

监测海风、波浪、海流等海洋环境因素，进行难船抽油、封堵、水下过底钢丝穿引等工作。起浮过程中对难船进行水上水下定位和三维姿态监测。起浮到位后进行移船进档，将难船转移至半潜驳，在半潜驳进行绑扎固定和相关减重工作后，难船即随半潜驳前往印度尼西亚巴淡岛进行交付。在此期间，同步进行难船周围1 km半径范围内的障碍物扫测与打捞工作。难船起浮的实时姿态监测、移船进档船舶的位置监测都是工程的关键节点，直接决定了难船能否成功打捞与装载。由于难船沉没区域的特殊气候特征，夜间至中午风浪较小，午后风浪持续加大，给潜水、打捞、扫测等相关工作带来了空前难度，作业窗口极其有限[2]。交通运输部上海打捞局凭借多年丰富的打捞经验、科学的打捞方案以及专业的打捞装备，中标该难船打捞项目[3-6]，利用天津水运工程勘察设计院有限公司自主研发的难船打捞辅助决策系统实施难船打捞工程。工程通过多项技术的创新与融合应用，大幅提升了作业效率，确保了难船和障碍物的顺利打捞，为项目完成争取了宝贵时间。

1　预调查与海洋环境监测

1.1　难船预调查

难船姿态调查一直以来都是打捞的前提和难点，通常采用ROV水下机器人、潜水员水下探摸的方式。由于珍珠号起火后在拖往外海区域的过程中，火势增大导致大量集装箱掉落，贸然进行ROV作业或潜水作业风险极高，且难船尺寸较大、潜水探摸效率不高，传统方式对难船整体把握较差，很难全面细致地获取难船水下姿态。为探明难船的精确位置和三维姿态，借助水下声学设备对周边海底地形地貌进行调查：采用高分辨率侧扫声呐，调查难船周边的地貌情况；采用窄波束多波束测深系统对难船及其周边进行全覆盖扫测；结合侧扫声呐大扫宽、二维图像分辨率高与多波束全覆盖高精度、高密度点云的优势，准确全面地获取了难船的沉没位置、难船姿态及其周边障碍物的分布情况，为后期浮吊船作业提供了安全可靠的技术支持[7]。

最终获得的难船姿态为：珍珠号艏向249°，横倾角度为3°，纵倾角度为1°，球鼻艏离底。经过潜水探摸确认，难船已完全沉没坐底，货仓中有788个集装箱，舱盖板上的698个已散落漂失。

1.2　海洋环境监测

由于难船所处海域水文气象条件复杂，为精确掌握海风、波浪、海流等海洋环境要素信息，为打捞施工和潜水作业提供数据基础，对工程海洋环境进行实时监测。风速监测设备采用美国Kestrel 5000Link气象站；波浪观测设备采用WaMoS Ⅱ型X波段测波雷达；流速监测设备采用美国Teledyne Workhorse声学多普勒流速剖面仪，实时测量现场的流速与流向，并合理设置平均间隔，以消除瞬时观测值跳变的误差影响（图1）。所有传感器数据均通过符合IEC标准的RS232/RS422/RS485协议，将数据传输到集控操作计算机，通过难船打捞辅助决策系统对该海洋环境数据进行解译集成，绘制图、表，以更直观的方式显示海洋环境参数，为潜水作业提供可视化、形象化的参考，为潜水有效作业时间提供可靠的数据支撑。

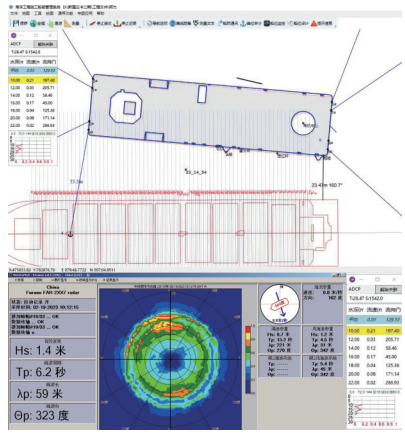


图1　潮流、波浪监测系统

2　船际组网与信息共享

2.1　多船舶船际组网

传统海洋工程施工作业方式通常采用国外软件进行船际通信（如主作业船抛锚就位工作），常用软件包括美国Xylem公司的Hypack、荷兰QPS公司的QINSy和美国Trimble公司的HYDROpro等，但上述软件对于综合救助打捞，特别是多作业船舶、多仪器设备、多作业节点的支持并不友好。例如，Hypack只支持一对一的通信模式；QINSy基于数据库管理，操作复杂，更改一个锚位设计都需要繁琐的操作才能完成。本次打捞工程现场作业的船舶包括浮吊船1艘、三用拖轮2艘、科伦坡港拖3艘、半潜驳1艘、平板驳2艘、抬浮驳2艘等。每条船均安装高精度GPS罗经设备和无线通信设备，通过难船打捞辅助决策系统可实时共享每条船、每个作业节点的关键信息，并可根据需要设置相应报警阈值，确保施工安全。

船际组网包括TCP、UDP两种模式，UDP传输速度快，TCP传输稳定，二者相结合可最大限度地发挥优势，满足不同场景需求。设备间通过UDP广播实现

数据共享，确保传输速度；船舶间采用TCP模式，保证数据稳定。网络采用星型拓扑结构，每条船均设置一个服务器，对所有数据进行整合转发，使有线与无线网络有机结合。所有网络终端均遵循统一的TCP/IP协议，组成一个大型无线局域网，所有数据均可共享传输，极大地提高了施工效率。

2.2 多节点信息共享

区别于单点式打捞作业，本项目船舶数量多、就位频繁，根据实际距离，合理选择无线通信参数，确保数据不发生中断、拥堵等现象。尤其是在拖轮夜间穿梭作业中，施工船锚缆、浮筒等关键信息的显示可为拖轮航行提供安全可靠的数据支撑，确保夜间海上施工安全。相较于传统观测方式，难船打捞辅助决策系统实现了高度集成，首创性地将数字信号经实时处理，绘制成各种参数图表，能更加直观、便捷地显示海洋环境要素，并具备可追溯性，能为难船打捞提供可靠的海洋环境要素支持。

3 难船打捞与起浮

难船起浮是难船打捞工作的重点和难点，本次打捞方案确定为将难船切割为艏、艉两部分后，分段进行起浮。起浮前需进行难船水下过底钢丝穿引工作，期间需要高精度水下定位的支持。

3.1 过底钢丝穿引

为顺利完成难船起浮，需在难船底部穿引64根13寸水下提升钢丝，钢丝要求完全等间距布设，设计间距为2.1 m。综合考虑水下能见度低、船体与海流等因素影响，实际要求偏差要求不超过80 cm，水下精度要求极高。在施工船上安装超短基线水下定位设备，换能器位置通过全站仪进行严格标定，对超短基线系统进行精确的静、动态校准，实时监测声速变化，以确保信标定位的精度。潜水员背负信标下潜，难船打捞辅助决策系统可实时解析信标数据并传输至各指挥室，实时显示潜水员水下位置等信息，用于指导水下钻孔与钢丝穿引工作。超短基线系统采用UTC时间同步接入，对所有信标设置统一时间间隔，避免多信标因时间不统一而互相干扰，在保证准确性的同时实现信标实时共享。

穿引钢丝完毕后经水下复核，最大偏差为+65 cm（+表示偏向难船艏向，–表示偏向难船艉向），最小偏差为–4 cm，所有钢丝穿引偏距均满足设计要求。

3.2 难船起浮与船组移船进档

难船起浮是成功打捞的关键，起浮过程中需实时监控难船姿态，包括位置、横倾、纵倾和艏向等，避免倾斜角度过大，发生二次倾覆[8–9]。难船水上部分安装高精度GPS设备，难船水上、水下重心位置安装高精度光纤罗经设备，结合水下无线通信传输技术，高频高精度实时输出难船的位置与姿态，供指挥人员参考；并可设定姿态变化阈值，通过屏幕闪烁、蜂鸣等方式，提醒指挥人员注意，调整提升系统相关参数，避免因某段钢绞线受力过大，发生断裂危险。

难船起浮后，难船和两抬浮驳经编队、浮运、移船进档等工序，完成至半潜驳的转运。半潜驳装货区距离限差要求极高（不足5 m），现场风浪、海流情况复杂，半潜驳只能通过船艏单航行锚固定，无法保持相对静止状态，难船移船进档难度相当大。在数艘作业船舶上安装高精度GPS，严格校准标定，以实时精确显示各船舶信息。不断通过带缆、解缆、倒缆、绞缆等操作，调整船组位置，将船组缓慢绞移至设计位置。2023年1月14日难船船组完美动态“镶嵌”至半潜驳甲板（图2）。

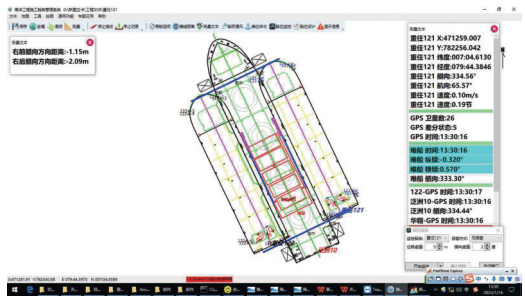


图2 抬浮驳与难船船组进档至半潜驳

由于火灾起火位置位于难船甲板层，难船内仍有大量货物残留，导致难船超重无法完成自浮。在难船进档至半潜驳后，进行难船的减重和自浮力增加工作，以确保难船可完成自浮，并在目的地港口印度尼西亚淡岛顺利交付。完成难船吊装减重和浮箱加装工作后，进行难船自浮实验。在难船上安装高精度定位设备和姿态监测设备，将高精度、高频率位置和姿态数据通过无线网桥实时传输至指挥室，确保难船自浮实验的顺利进行。经过半潜驳4 h的压载水调载工作，难船顺利完成自浮实验。实验结束后，半潜驳排压载水，将难船重量转移至半潜驳，对难船进行绑扎固定后，半潜驳运载难船前往印度尼西亚，进行难船交付工作。

4 障碍物残骸打捞

多波束测深系统具有高密度、窄波束角等优势，可获取水下全覆盖、高精度的点云数据，生成真实反映海底地形特征的水下三维地形图，但对海底的

细致特征反映较差；侧扫声呐具有高分辨率，可获取残骸高分辨率二维平面影像，但位置、高程信息精度较低，二者单独使用均无法获得全面、高精度的水下地形地貌数据[7]。本次打捞将两种方式相结合，残骸打捞需要即刻对扫测结果做出响应，在扫测速度、数据处理速度、扫测精度等方面均提出了更严格的要求。

4.1　障碍物残骸扫测

难船起浮完成后，需对难船周围1 km半径的区域进行障碍物探测与清理。区别于常规障碍物扫测和打捞，该项目要求扫测结束实时对结果进行验证。受海流、水下能见度、潜水员经验不同等因素影响，实际要求障碍物偏差不超过1 m。因此，采用侧扫声呐对残骸进行快速定性判断，采用窄波束高分辨率多波束测深仪搭载表面声速探头和高精度光纤惯导系统，使用RTK三维水深测量技术，免去了设置验潮站的环节[10]。多波束系统采用集成RTX的Trimble定位技术，能在海上动态航行的条件下，提供厘米级的定位精度。多波束测深系统经严格的数据处理后[10-15]，生成高密度的水深点、格网模型[12]和GeoTiff图像，供打捞施工参考。

4.2　障碍物残骸打捞

将扫测成果作为背景文件加入到难船打捞辅助决策系统中，对于大型障碍物，潜水员可在水下快速判断其位置，但对于体积较小或目标高度不明显的障碍物，潜水员无法准确获取目标信息。采用扫描声呐对其进行补充，将安装有信标的MS1000扫描声呐下放至障碍物区域，合理设置量程和TVG以获得最佳效果的图像，确定障碍物位置；然后潜水员背负信标下水，通过二者的声学反射影像可以快速定位，指导潜水员前往残骸，进行打捞工作，大幅提升了作业效率（图3）。

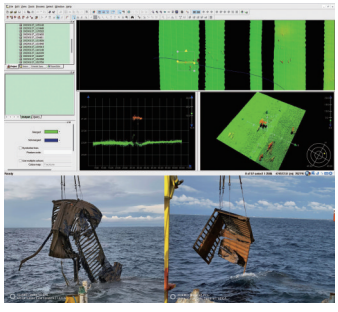


图3　残骸声学影像与打捞出水的集装箱残骸

采用超短基线与扫描声呐相结合的方式，可为潜水员水下作业提供指导，对于微小残骸的打捞起到了关键作用，大幅提高了打捞效率。RTX技术以其便捷、精准的优势，已逐步应用于国内陆地、海洋测绘等领域，但在海外的应用场景尚不多见。本项目成功验证了RTX在印度洋海域的可靠性和精度，海上动态平面定位精度达到±2 cm，可媲美自设基站或CORS系统的定位精度，且可使用RTK三维水深测量作业方式，免去设置海上验潮站的作业环节，节约了测量成本，降低了设备丢失的风险，大幅提高了作业精度与效率，可作为国际项目的参考依据。在使用过程中，应注意安装位置的选择，避免使用的卫星被遮挡，影响定位精度。

5　结　语

珍珠号难船沉没事件受到斯里兰卡政府和国际社会的广泛关注，如何在最大限度保护海洋环境的条件下顺利将其打捞，更是引起了全世界环保人士的高度重视。通过融合应用多种测绘设备，精确探明了难船的位置与姿态，为打捞的顺利实施提供了重要的数据支撑。在难船起浮的过程中，通过高度集成化的海洋环境要素图形化显示、多船舶间数据实时共享、多终端作业、难船起浮与自浮实验姿态监测，确保了难船的安全起浮，为难船起浮、障碍物打捞提供了强有力的技术支撑，还难船沉没海域干净、整洁的海洋环境，实现了工程目的。本文提供的思路可为国内、国际类似打捞项目提供宝贵的实践经验与参考依据。受作业船舶现场条件和海况差（存在长周期涌浪等）等因素影响，侧扫声呐探测较理论精度存在偏差，后续将对其探测精度进行深入研究。

参考文献

[1] Grappling with the Biggest Marine Plastic Spill in History[EB/OL]. [2023-02-24]. https://cen. acs. org/environment/pollution/marine-plastic-spill-xpress-pearl-nurdle/101/i3

[2] 斯里兰卡[EB/OL]. [2023-02-24]. https://baike. baidu. com/item/%E6%96%AF%E9%87%8C%E5%85%B0%E5%8D%A1/213964

[3] 陈世海，王伟平，蒋岩. “世越号”打捞工程的设计与实施[J]. 世界海运，2017，40(10):6-23

[4] 王伟平，杨濛，卞永明，等. 沉船打捞带缓冲补偿的液压同步提升系统研究[J]. 中国工程机械学报，2017，15(5):400-405

[5] 姚宗，蒋岩，王伟平，等. 世越号起吊姿态敏感性分析与方案选择[J]. 海洋工程，2018，36(2):135-142

[6] 金桐君，蒋岩，王伟平，等. “世越号”双驳抬吊方案设计[J]. 世界海运，2017，40(9):23-27

[7] 陈超，祝捍皓，陈政威，等. 多波束与侧扫声呐在海上风电场水下结构冲刷检测中的综合应用[J]. 海洋技术学报，2020，

（下转第132页）