

# 深远海大吨位沉船打捞中的实时海流监测

王洪战<sup>1</sup>, 吴昊<sup>1</sup>, 付东<sup>2</sup>

(1. 中铁第六勘察设计院集团有限公司, 天津 300308; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

**摘要:**传统直读式海流测量仪需要采用人力或机械等方式进行设备收放和操作, 只能观测某一固定深度的海流流速和流向情况, 测量精度低、设备稳定性差、容易遭受外部破坏, 无法满足现代海洋施工对海流高精度观测的需求。ADCP 声学多普勒海流剖面仪采用多普勒回声频移计算原理, 能够实时动态观测整条垂线上各设定分层的流速和流向, 测量时间短、数据精确度高, 报表生成智能。结合某深远海大吨位沉船打捞工程, 介绍了 ADCP 的工作原理和功能特性, 对比了相较传统直读式海流仪的优势。通过整个施工周期长达 500 多天的不间断实时海流监测, 获取了沉船地点及附近海域的海量观测数据, 拟合分析了该海域及周边海流的分布规律。

**关键词:** 深远海; 大吨位; 海流监测; 沉船打捞

**中图分类号:** P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2023) 03—0107—03

深远海大吨位沉船救助打捞, 受深水海洋环境的影响, 往往风大浪高、水流湍急, 是世界沉船救助打捞领域的一个难题, 鲜有成功实施的经典案例。某 10 万吨危化品货轮受台风袭击, 沉没于离岸约 300 公里的外海。因其货物属性对海洋环境有极大的污染风险, 当地海事救助部门组织对该船进行打捞工作。按照打捞方案, 施工方将进行沉船周边除泥、船艙系固重力锚安放、钢梁牵引导向块安放、托底钢梁海底开沟等作业, 每道工序或关键节点均需要潜水员进行潜水辅助或探摸确认。但因为受海底地形、周边岛屿等的影响, 海水在不同的深

度其流动速度和流动方向是各不相同的。尤其受不规则半日潮潮汐规律的影响, 涨、落潮转换期间, 不同海水深度的各层流速流向更是差异巨大。为了掌握沉船水域的海流运动变化规律, 极大地利用平缓流期间的憩流时间进行水下施工作业, 需要实时监测海流情况, 统计分析海流变化规律, 预报未来涨落潮趋势, 为潜水施工和其他水下作业提供准确的参考。

## 1 直读式海流仪

直读式海流仪是海洋施工中最常用的一种海流观

简要论述, 为船闸金属结构的防腐涂装施工规范化提供了依据, 将有利于行业的规范化发展。

参考文献:

[1] Chu F, Wu X. Fabrication and condensation characteristics of metallic superhydrophobic surface with hierarchical micro-nano structures[J]. Applied Surface Science, 2016, 371(15):322-328.

[2] 孔小东, 胡会娥, 苏小红. 金属腐蚀与防护导论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

[3] Farshchian B, Gatabi J R, Bernick S M. Scaling and mechanism of droplet array formation on a laser-ablated superhydrophobic grid[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2018, 547:49-55.

[4] Yan Z, Liang X, Shen H, et al. Preparation and basic properties of superhydrophobic silicone rubber with micro-

nano hierarchical structures formed by picosecond laser-ablated template[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2017, 24(3):1743-1750.

[5] 赵广生, 任亮, 王建军, 等. 论水工钢结构防腐蚀技术[J]. 内蒙古水利, 2005(03):103-105.

[6] 秘冬梅. 磁控溅射制备 Zr<sub>55</sub>Al<sub>10</sub>Ni<sub>5</sub>Cu<sub>30</sub> 非晶合金薄膜及其性能研究[D]. 天津大学, 2018.

[7] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.

[8] 付文静. 国内外防腐蚀涂料的技术现状与发展[J]. 全面腐蚀控制, 1998(01):25-28.

[9] 王池嘉. 防腐涂层填料的功能化改性及性能研究[D]. 东北石油大学, 2019. [10] 魏勇, 李瑞玲. 富锌涂料的研究进展[J]. 涂料技术与文摘, 2008, 29(6):6-8.

测方法。直读式海流仪外观呈纺锤形，内置一个磁通门罗经，尾部安装有一个螺旋桨。海流冲击海流仪时，磁通门罗经采集设备的磁北方位角作为当前海流的流向，然后根据其螺旋桨转速计算当前海流的速度，从而完成海流的流速和流向观测。为了保持海流仪测量时姿态的稳定性，防止风浪冲击造成海流仪剧烈翻滚或大幅度摇摆，通常会为其配重约 10—20kg 不等的铅鱼。所以在海上观测时，一般需要使用绞车或滑轮将其悬吊于舷边，依次沉放于某一设定的海水深度才能完成整条垂线的观测。直读式海流仪的悬吊式作业方式受天气、风浪、船舶摇摆等外部环境影响较大，同一时刻只能监测某一固定深度的海流情况，所以要想监测整条垂线，就必须不断地下放和回收设备，人力无法长期坚持，必须要设备机械辅助。



图 1 直读式海流仪

## 2 ADCP

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)，中文全称为“声学多普勒海流剖面仪”，又称为“海流垂线仪”<sup>[1]</sup>。ADCP 的探头部分由 4 个声波脉冲换能器组成，各换能器都按照与探头内置坐标系的固定夹角排列<sup>[2]</sup>。每个换能器既是发射源又是接收源，换能器按照某一频率发出集中于一定狭窄范围内的声波脉冲后<sup>[3]</sup>，即开始聆听被水体中悬浮颗粒物体反射回来的声波。假设悬浮颗粒物的运动速度与海水流速相同<sup>[4]</sup>，则当颗粒物向换能器靠近移动时，换能器接收到的回声频率比发射频率要高；当颗粒物远离换能器移动时，换能器接收到的回声频率要比发射频率低。这种因为悬浮颗粒物的运动而引起声波频率的改变称为声学多普勒频移，即为发射声波频率与返回声波频率之差<sup>[5]</sup>。公式如下：

$$F_d = 2F \frac{V}{C}$$

式中： $F_d$  为声学频移； $V$  为悬浮颗粒物沿声束方向的移动速度（即沿声束方向的水流速度）； $F$  为声波发射频率； $2$  为多普勒频移双倍乘积系数； $C$  为声波在水中的传播速度<sup>[6]</sup>。声束坐标沿 ADCP 换能器的轴线建

立，每条轴线对应一个声束坐标，每个换能器测量的流速方向与声束坐标方向相同，则任意的三条轴线即可组成一个独立的空间声束坐标系<sup>[7]</sup>。ADCP 探头内部按照换能器指向自定义有空间直角坐标系： $X-Y-Z$ ， $Z$  方向为竖直方向。ADCP 首先测量计算出各声束坐标的流速分量，然后根据内置空间直角坐标系与声束坐标系的七参数转换关系<sup>[8]</sup>，采用赫尔默特变换法将声束坐标系海流矢量转换为内置空间直角坐标系下的三维矢量。然后，再根据电罗经测量的真北艏向数据和姿态仪测量的姿态数据，将内置空间直角坐标系下的海流矢量归算至绝对地理坐标系<sup>[9]</sup>。



图 2 ADCP 探头

与传统直读式海流仪相比，ADCP 的优点有：

作业方式可采用走航式动态测量。直读式海流仪只能采用固定点位抛锚的静态观测模式，一般按照水深分为三层或五层测点，将设备沉放至各层测点测量，然后计算出整条垂线的平均流速和流向。

海水垂线观测密集且分层多。直读式流速仪只能固定几条代表性垂线来覆盖整个测量海域，每条垂线也只能按照海水实际深度分为 1 ~ 5 层观测。因为 ADCP 可以在船舶航行中进行走航式测量，所以可以根据需要设定采样密度和观测层数，则能够生成测量范围内任意位置的垂线和任意深度的海流情况。

海况适应性强。直读式海流仪要求风平浪静的良好气象条件。而 ADCP 可以接入惯性导航系统、全球定位系统、电罗经、倾斜仪等定位定姿设备，能够有效减弱或消除因位移、俯仰、横滚、升沉等产生的误差，在不利海况下依然能够作业<sup>[7]</sup>。

## 3 工程应用

### 3.1 设备选型

该货轮沉没现场海域水体浑浊、泥沙含量较大、悬移质和浮游生物浓度高，则低频声波脉冲较难穿透水体得到准确的观测数据。因此，选用美国 TELEDYNE 公司生产的 WORK HORSE 高频 ADCP。WORK HORSE ADCP 的脉冲频率为 600kHz，是一种适用于水深 200m

以浅水域的海流剖面仪，它既可以自容存储数据，也可以通过有线电缆用于直读式海流测量，并且具有海底跟踪功能，可以自动识别海底干扰进行走航式测量。

### 3.2 安装设置

因为打捞作业施工船为大型浮吊船，其航行时产生的水体阻力巨大，为了保证 ADCP 换能器姿态稳定和设备安全，使用壁厚 8mm、外径 168mm 的高强度钢管作为固定装置，将 ADCP 探头安装固定于舷侧。为了防止船体和底部对海流移动和声波信号的阻挡，固定钢管在下放时超出船底龙骨线约 1.5 米。将高精度星站差分 GPS 和电罗经数据接入测量采集软件，实时修正船舶对地速度和方向对设备采集的影响，解算得正确的流速和流向数据。设置步骤如下：

(1) 高精度星站差分 GPS 以 NMEA-0183 协议格式将 \$GPGGA 数据传输至测量软件。解析数据中的经纬度信息转换为平面坐标，然后计算船舶运动的航速，继而可得到 ADCP 换能器的绝对地理速度，从而消除探头相对海水移动的影响。

(2) 电罗经真北方向测量数据以 \$HEHDT 协议格式传输至测量软件。因为 ADCP 内置的磁罗经在受到钢铁等金属材质干扰时，会发生数值抖动和漂移，从而无法得到正确的船向数据，所以必须采用稳定的外部罗经数据。

(3) ADCP 观测参数设置。根据换能器的安装情况和实际水深情况，设置盲区深度、吃水深度、海水观测层数、单层宽度、声波频率、海底跟踪等参数。

### 3.3 数据分析

使用涵盖大、中、小，一个完整潮汐周期的海流观测进行调和统计分析，计算各垂线平均流速、流向，其中垂线平均流速  $\bar{V}_p$ 、流向  $\bar{\theta}_p$  采用“矢量加权平均法”计算，公式如下：

$$V_{PN} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i V_i \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n C_i}, \quad V_{PE} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i V_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n C_i}, \quad \bar{V}_p = \sqrt{V_{PN}^2 + V_{PE}^2}, \quad \bar{\theta}_p = \arctg \frac{V_{PE}}{V_{PN}}$$

根据长期观测分析结果，该货轮沉没水域涨潮主流向为 230°，落潮主流向为 40°，为典型不规则半日潮型。涨潮历时长于落潮历时，涨潮一般为 7.5 个小时，落潮一般为 4.5 个小时。高平潮的憩流历时明显长于低平潮的憩流历时，涨潮憩流时间一般为 50—130 分钟，落潮憩流时间一般为 20—60 分钟。流速最快可至 2m/s—2.5m/s，小潮汛期间全天流速可小于 0.5m/s。典型各层流速、流向数据，如图 3—4：

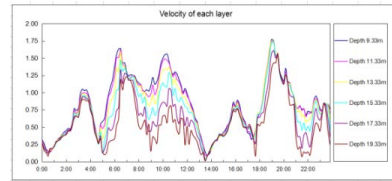


图 3 典型各层流速

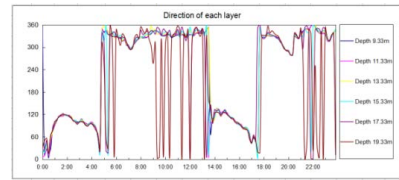


图 4 典型各层流向

## 4 总结

ADCP 采用多波普勒声波频移原理，对海水垂线发射若干组声波，根据每层海流回波的情况即可推算该层海流的流速和流向，再结合自动控制和分析软件，即可全天候、高精度监测各层海流的流速和流向。ADCP 解决了传统直读式海流仪抗环境干扰性差、人力资源占用大、测量精度低、采集数据密度低等问题。ADCP 应用于该沉没货轮打捞施工后，极大提高了潜水作业和水下施工对憩流时间的利用率，并可根据统计规律对未来的海流变化情况进行模拟预判，为施工方案编制、作业计划制定和现场施工作业提供了精准的参考。

### 参考文献：

- [1] 田淳, 刘少华. 声学多普勒测流原理及其应用 [M]. 黄河水利出版社, 2003, 12.
- [2] 陈琳, 陆欣华. ADCP 测量技术在长江口深水航道治理工程中的应用 [J]. 水运工程, 2000, 12 (2): 12—15.
- [3] 卢佐, 刘杰, 刘彦祥. ADCP 在黄骅港水文测量中的应用 [J]. 水道港口, 2006, 27(6): 26—28.
- [4] 刘彦祥. ADCP 技术发展及其应用综述 [J]. 海洋测绘, 2016, 32(2): 45—50.
- [5] 宋政峰, 席占平. 走航式 ADCP 流量测验主要误差来源及其控制 [J]. 水文, 2016, 36(1): 58—62.
- [6] 范东华, 谌业良. 声学多普勒流速仪 (ADCP) “旁瓣”区数据处理方法的探讨 [J]. 水道港口, 2006, 27(1): 39—42.
- [7] 张春海, 董晓冰. 声学多普勒测流原理及应用研究 [J]. 吉林水利, 2013, 2013(11): 17—19.
- [8] 霍树梅. 声学多普勒测流技术进展评述 [J]. 气象水文海洋仪器, 1998, 1998(4): 6—8.
- [9] 刘长乐, 刘有刚, 尹训强. 声学多普勒海流计的近期发展综述 [J]. 科技视界, 2015, 2015(26): 184.