

# 海流观测方法发展及应用

乔正明<sup>1</sup>, 孙霞<sup>2</sup>, 刘星<sup>1</sup>, 钟秋文<sup>1</sup>, 朱忆<sup>1</sup>, 李羽超<sup>1</sup>

(1. 国家海洋技术中心漳州基地筹建办公室 厦门 361007; 2. 厦门大学附属实验中学 漳州 363123)

**摘要:** 文章针对海流观测分类及命名在实际应用中存在部分专业术语使用不规范、分类不统一等问题, 参考国家标准、行业规范和相关资料, 结合观测原理、发展应用、优缺点和典型设备, 按照漂浮法测流、定点测流、走航测流和表层遥感测流四大类, 对海流观测方法进行梳理和分析, 为业界提供借鉴和参考。

**关键词:** 海流观测; 测流分类; 漂浮法测流; 定点测流; 走航测流; 遥感测流

中图分类号: P714      文献标志码: A      文章编号: 1005-9857(2022)05-0106-05

## Development and Application of Current Observation Methods

QIAO Zhengming<sup>1</sup>, SUN Xia<sup>2</sup>, LIU Xing<sup>1</sup>, ZHONG Qiuwen<sup>1</sup>, ZHU Yi<sup>1</sup>, LI Yuchao<sup>1</sup>

(1. Preparation Office of Zhangzhou base of National Marine Technology Center, Xiamen 361007, China;  
2. The Experimental High School Attached To Xiamen University, Zhangzhou 363123, China)

**Abstract:** The classification and name of current observation methods are nonstandard used and non-uniform classified in some professional terms. By referring to the national standards, industry norms and relevant literature, combining with the observation principle, development, application, typical equipment, advantages and disadvantages, the current observation methods were divided into four categories: floating method, fixed-point measurement, aerial measurement and surface remote sensing measurement. Finally, the current observation methods were sorted out and analyzed to provide reference for the industry.

**Keywords:** Current observation, Classification of flow measurement, Flow measurement by floating method, Fixed point flow measurement, The aerial flow survey, Remote sensing flow measurement

### 0 引言

海流是海水大规模相对稳定的非周期性流动<sup>[1-2]</sup>, 是海洋动力环境的重要参数, 对全球气候稳

定、海洋生态系统平衡和海洋开发利用等起着至关重要的作用。因此, 海流观测一直是海洋监测领域所关注的焦点之一<sup>[3-4]</sup>。

为了在恶劣的海洋环境下准确、方便地观测海

收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2022-03-28  
基金项目: 国家自然科学基金面上项目“利用雷达回波资料反演三维空间大气波导结构理论与算法研究”(41775027).  
作者简介: 乔正明, 高级工程师, 研究方向为海洋工程与技术

流,人类自 17 世纪前后开始使用漂流瓶、海冰等漂浮物观测表层海流<sup>[5-6]</sup>,1905 年世界首台机械式海流计厄克曼海流计诞生<sup>[7]</sup>,20 世纪 70 年代末至 80 年代初首台声学多普勒流速剖面仪(ADCP)问世<sup>[8]</sup>,20 世纪 70 年代以来海洋遥感卫星、海洋观测雷达等遥感、探测技术应用于海流观测<sup>[9]</sup>。经过不断的探索和发展,海流观测仪器和观测方法不断丰富和发展,为人类认知海洋、探索海洋、研究海洋和应用海洋奠定了坚实基础。

海流观测有多种分类方法,现行《海洋调查规范第 2 部分:海洋水文观测》(GB/T 12763.2—2007)将海流观测方式分为定点测流、漂流浮标(建议称“漂流浮标测流”)和走航测流,同时规范将海流观测方法分海表面漂移浮标测流(规范中章节标题为“海表面漂移浮标测流”,文中称“海表面漂流浮标”,为了保持一致性且兼顾业界惯用名称,以下称“海表面漂流浮标测流”)、船只锚碇测流、锚碇潜标测流、锚碇明标测流和走航测流 5 种方法<sup>[10]</sup>。其他文献或资料分类方法有:接触式测流和非接触式测流<sup>[11]</sup>;漂流法测流、海流计测流和表层遥感观测<sup>[3]</sup>;浮标漂移测流法、定点观测海流和走航测流<sup>[12]</sup>。目前,对于海流观测仍然存在部分专业术语使用不准确、分类不统一等现象。为了使海流观测分类和命名具有连续性和继承性,避免出现新的混乱,笔者参照相关标准或规范、权威书籍、专业文献等,依据其工作原理或探测性质,结合业界使用经验,在原有分类基础上,对海流观测方法进行了梳理和总结,并对存在争议或不统一的地方给出了相关建议,供读者借鉴和参考。

## 1 海流观测方法

海流观测的主要目的在于掌握它的特性,研究其时空变化和分布,找出其活动规律<sup>[10]</sup>。海流主要观测要素为流速和流向<sup>[10]</sup>。流速指海水在单位时间内流过的距离,单位为 cm/s 或 m/s<sup>[13]</sup>;流向指海水流去的方向,单位为度(°),正北为零,顺时针计量<sup>[10,13]</sup>。

综合不同的海流观测分类方法,以现行国家规范为基础,在兼顾业界其他分类方法的基础上,按照测流方式或原理,本研究将海流观测方法分漂

法测流、定点测流、走航测流和表层遥感测流四大类。

### 1.1 漂浮法测流

漂浮法测流是一种传统的海流观测方法,其通过跟踪漂浮物随海水流动的时空变化来确定海水的流速和流向<sup>[3,5]</sup>。早期的漂浮物通常选择漂浮木板、海面浮冰、漂流瓶或船体,后来使用漂流浮标实现对海流的观测<sup>[14]</sup>。根据测流技术沿革漂浮法测流可分为漂流瓶测流和漂流浮标测流两种。

#### 1.1.1 漂流瓶测流

漂流瓶又称邮瓶,根据其漂移路径及所用时间大致确定海水流速和流向,据此研究海流物质输送、海洋长期气候状况变化等情况,该方法适用于表层流的观测<sup>[12]</sup>。漂流瓶测流是早期认知和研究洋流的重要方法和依据,目前该方法已经很少使用。

#### 1.1.2 漂流浮标测流

漂流浮标测流是随着全球定位和卫星通信技术的进步而发展起来的一种十分有效的大尺度海洋环境监测手段,通过岸站、船载、飞机或者卫星搭载的定位系统跟踪浮标的运动轨迹实现对海流的观测。根据测量水深不同,漂流浮标测流可分为海表面漂流浮标测流和中性浮标测流两种。

(1)海表面漂流浮标测流。海表面漂流浮标又称表层漂流浮标<sup>[15]</sup>,根据其随海水流动的情况来确定海水的流速和流向。主要有两种跟踪定位方法:一是船体跟踪,早期通过航船尾随漂流浮标(如,双联浮筒),并用 GPS 等设备对船体定位,从而获得漂流浮标的位置;二是仪器跟踪,采用卫星定位、雷达跟踪和航空摄影等方法对浮标进行直接定位,改善和提高了漂流浮标的位置测量准确度<sup>[14]</sup>。目前,常用的海表面漂流浮标由水面浮标和水帆组成,水面浮标内装有测量传感器、数据采集控制模块、卫星通信模块和电源等,通过 Argos 数据采集与定位系统或北斗导航系统进行定位和数据传输<sup>[15]</sup>。该方法主要用于 3 m 以浅海流观测,通常应用于海表层大尺度洋流观测。

(2)中性浮标测流。中性浮标会根据要求下潜到设定深度随海水漂流,从而获得海面以下特定深度的海水流速和流向,目前主要有两种定位和通信

方法:一是船载声呐跟踪,可直接跟踪定位浮标在水下的位置<sup>[14]</sup>,浮标不需要反复下潜和上浮,但受水声定位等技术条件限制,该方法定位距离和精度有限,且需随船保障,成本较高;二是卫星跟踪,浮标在预定时间自动上浮至海面,通过卫星完成定位和通信,然后再下潜至设定深度开始新一轮观测循环<sup>[3]</sup>,相对于前者而言该方法摆脱了随船保障和声学定位的制约,不仅节省了成本而且提高了布放的机动性,扩大了作业范围<sup>[16]</sup>。中性浮标一般可实现 2 000 m 以浅,最深 6 000 m 的海流观测<sup>[3,11,14]</sup>。2000 年起实施的 Argo 全球海洋观测计划,使用 Argo 自动剖面浮标(属中性浮标)可测量 2 000 m 以浅的海水温度、盐度和其他特性,并通过浮标的运动轨迹来实现深层流的观测。截至 2021 年 4 月,全球已有近 3 800 个 Argo 浮标在海洋中进行测量工作<sup>[17]</sup>。20 世纪末,为了同时满足垂直剖面温盐参数的循环探测需要,中性浮标逐步演变成搭载温盐等传感器的自沉浮式剖面探测浮标(APEX)<sup>[16]</sup>,扩展了浮标的探测功能。

漂流法测流,尤其是漂流浮标测流,不但可实现对海洋表层流、深层流的观测,通过搭载的不同传感器同时获得海表面风场、波浪场、气温场及不同层深的海水温度、盐度、深度等数据,为海洋实际流场、地转流场、涡动能场和温度场等结构研究提供重要依据。

## 1.2 定点测流

以锚碇船只或浮标、海洋平台、测流固定架等作为承载工具,定点安装或悬挂海流计,实现定点区域海流的长期连续观测。

### 1.2.1 定点台架测流

在浅海海流观测中,以固定台架为承载工具悬挂海流计,使其处于稳定状态,实现对海流准确、长期、连续观测。固定台架一般分两种:一是水面支架,海上平台或其他可借用的固定台架;二是海底台架,放置于海底等边三角形或正棱锥形台架<sup>[12]</sup>。定点台架测流常用机械式海流计和声学海流计。其中,常用机械式海流计有安德拉海流计和直读式海流计,具有成本低、安装方便等特点;常用声学海流计有声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、声学多普

勒海流单点测量仪、声学多普勒流速仪(ADV)、时差式声学海流计等都可用于定点测流,可实现剖面、精细化、大深度测流,同时能测三维流速和弱流,具有技术先进,不破坏流场、测量精度高等特点,在业界得到迅速发展和应用,很快成为海流观测主力军。定点测流可实现小尺度、精细化流速观测,主要用于长期观测、仪器比对、局部流场等研究。

### 1.2.2 船只锚碇测流

以锚碇船为承载工具,利用绞车和钢丝绳悬挂海流计实现海流观测。目前常用的海流计主要有直读式海流计和安德拉海流计<sup>[10]</sup>。该方法通常用于机动定点流速测量,弥补了定点台架测流机动性差的问题,但由于受船体或悬挂装置等影响,观测精度较定点台架测流差。

### 1.2.3 锚碇潜标测流

以锚碇潜标为承载工具,悬挂自容式海流计实现对海流的观测,分锚碇浅水应用型潜标和锚碇深水应用型潜标两种<sup>[10]</sup>。常用海流计有自容式 ADCP 和安德拉海流计。锚碇潜标测流可实现对单层或多层海流的长期连续观测,具有精度高、观测数据连续等特点,同时该方法对自容式海流计的稳定性要求较高,一般布放和回收周期不小于 6 个月。

### 1.2.4 锚碇明标测流

与锚碇潜标测流相比,锚碇明标测流主要增加了水上浮筒部分,其内装有电池盒和闪光装置<sup>[10]</sup>。水上浮筒搭载发射器、电池盒和风速计等装置,实现对海流计状态监测和控制,并可将测流数据实时传回岸站,相较锚碇潜标测流有效地解决了海流计状态无法监测、海流数据获取周期长等问题。

## 1.3 走航测流

以航船、无人潜航器等移动载体为承载工具,搭载走航式 ADCP 等测流仪器实现对航行区域海流的剖面观测<sup>[10]</sup>。该方法可以同时观测不同深度的多层剖面海流,不仅节省时间、效率高,而且观测范围广,且可通过船载发电设备或牵引电缆供电,能实时获取海流数据,实时性高。近年来,走航式 ADCP 最大可探测 880 m~1 000 m 深度的水层流速,得到较为广泛的应用,尤其是在海洋测流方面的应用,实现了全球海域千米海深内的海

流测量,是目前最先进的一种测流方法<sup>[18]</sup>。走航测流比较难以克服的问题有:①外界自然因素容易导致船体晃动,进而影响仪器测量的准确性;②船体产生的噪声也会对设备造成干扰,引起测量结果不准确;③测量时需对坐标、数据进行空间变换、方向修正,对测量船航行稳定性和航速大小要求较高。

## 1.4 表层遥感测流

### 1.4.1 海洋遥感卫星测流

随着卫星遥感技术的发展,从卫星数据中提取海表流场参数的反演算法成为研究热点。海洋遥感卫星从功能上一般分为海洋光学遥感卫星和微波遥感卫星<sup>[9]</sup>。海洋光学遥感卫星主要通过遥感测量海洋水体的可见光和近红外的光谱信息来提取海洋的叶绿素、海平面高度、海表温度和波浪场以及其他污染物质等监测信息,目前用于海流观测较少;海洋微波遥感卫星携带雷达高度计、合成孔径雷达等微波遥感传感器,获得流、浪、海面风速等重要动力参数,据此实现海洋表面风场反演、洋流监测、海洋内波和表面波的测量等。

其中,雷达高度计是一种垂直下视非成像雷达<sup>[19]</sup>,利用卫星正下方的脉冲回波特征,分别测量海面高度、有效波高及后向散射系数,可同时获得流、浪、海面风速等重要动力参数,实现对大洋环流、海洋潮汐和中尺度海洋现象等观测<sup>[9]</sup>。1973年首台星载雷达高度计测高精度1 m,经过40余年的发展,其测量精度达到厘米级,据此反演海流数据精度在近赤道处为30 cm/s,在中高纬地区为5~10 cm/s<sup>[20]</sup>;合成孔径雷达是一种主动式微波遥感系统,其利用卫星运动状态下天线阵列的孔径合成技术,通过测量海面微波后向散射信号及其相位获取海面信息,经数据处理后得到的海面雷达后向散射图像主要与海面粗糙度相关,据此实现海洋表面风场反演、洋流监测、海洋内波和表面波的测量等<sup>[3,9]</sup>。近年来,星载合成孔径雷达发展迅速,空间分辨率可达1 m量级,通过与ADCP现场同步实验及数值模拟结果比较表明,空间分辨率100 m前提下反演的海表流速的均方根误差为0.1 m/s<sup>[21]</sup>。

海洋遥感卫星测流具有大面积同步、全天时、

全天候、高重复频率的海表流场数据观测等特点<sup>[3]</sup>。随着海洋遥感时间、空间和辐射分辨率的提升,海洋遥感测流精度不断提高,在兼顾大尺度、全天候的前提下实现了高精度测量。

### 1.4.2 海洋观测雷达测流

海洋观测雷达测流是现代海流观测技术的重要手段和发展方向,其原理为雷达向海面辐射电磁波,经海洋表面反射后被雷达接收,通过分析其随时空变化情况,得到清晰、实时的海表面高度变化等相关数据,据此反演海流信息<sup>[3]</sup>。常用的以波浪场和流场为观测对象的海洋观测雷达主要有高频地波雷达、X波段测波雷达、C波段多普勒测波雷达或S波段多普勒测波雷达。

其中,高频地波雷达,工作频率3~30 MHz,作用距离300 km以上,利用海洋表面对高频电磁波的一阶散射和二阶散射机制,从回波中提取风场、浪场和流场等信息。目前,国外产品地波雷达观测海流流速和传统测流仪器观测结果均方差约0.1 m/s量级,统计均值为0.132 m/s,最大值不超过0.2 m/s<sup>[22]</sup>;国产OSMAR-S便携式雷达系统与海流计在统一位置海流观测结果对比,其中流速相关系数和均方根误差分别为0.88 m/s和0.103 7 m/s,流向的相关系数和均方根误差则分别为0.98°和15.12°<sup>[23]</sup>。由此表明,雷达观测得到的矢量流速与海流计观测结果吻合得很好;X波段测波雷达,一般安装于船舶、海岸、海岛或海洋平台上,利用回波信号的强弱获取海面波浪信息,海面回波信号会形成明暗相间的条纹影像,通过分析影响序列,获取表面流(场)、波浪(场)等信息,另外该型雷达还用来观测海冰和溢油等<sup>[9,19]</sup>。目前,X波段测波雷达观测海流流速和传统测流仪器观测结果均方差在10 cm/s量级。由于该波段测波雷达的波长为3 cm左右,在使用过程中极易受到降雨、冰雹等天气过程的影响<sup>[19]</sup>;多普勒测波雷达,是一种先进的微波雷达,通过脉冲多普勒原理得到水体质点的速度谱,从而获得海浪和海表面流等参数。该类型雷达工作在C波段或S波段,具有测量精度高、无须标定、可观测不同海况等特点,国内在石油平台上有少量应用<sup>[9]</sup>。

目前,海洋观测雷达测流已逐步从单机观测到多机联网观测,可采用不同的电磁波波段,同时兼顾大范围遥感和高精度测量,弥补了走航测流观测范围有限和海洋遥感测流观测精度难以提高的问题。

## 2 小结

随着科技的不断进步,海流观测技术得到了丰富的发展和提升,各观测手段都有其独特的优势和特点,但也存在局限性,对于漂浮法测流属被动式测流,测流精度不高,适用于大尺度海洋环流观测;对于岸基台站、明标、潜标等定点测流,观测范围以点、面或某一层深海流为主;对于走航式测流,虽然增大了测量范围,提高了观测效率,但受船体晃动等引起的测流误差不可忽视,直接影响测流精度;对于表层遥感测流,虽具有宏观大尺度、快速和高频度动态观测等优点,主要观测或反演表层流,且受分辨率等影响,测流精度不高,同时也易受云量、雨雪、运行轨道或频率等因素影响。

近年来,伴随数字信号的处理技术、水声技术、遥感技术、图形图像处理技术及计算机技术的日益成熟和完善,未来海流观测仍会以走航测流实现大范围、高精度、大断面观测为主,以表层遥感测流和漂流浮标测流实现大范围、不间断观测为辅,以定点测流实现长期、精细化观测为补充,多种测流方法并存的局面,测流设备更加智能化、测流数据更加精细化、测流产品更加专用化。

目前,我国海洋测流技术已取得飞速发展,相关技术已步入世界前列,测流体系相对成熟,行业规范或标准相对齐全,对于海流观测分类或术语的进一步规范和统一是适应新技术新方法的迫切需求,相信在行业人员的不断努力下,我国的海洋探测体系会更加成熟和完善。

## 参考文献

- [1] 吕华庆.物理海洋学基础[M].北京:海洋出版社,2012:83.
- [2] 中华人民共和国机械工业部.ZB Y188—83 海洋仪器术语[S].1984.
- [3] 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.
- [4] 潘云鹤,唐启升.中国海洋工程与科技发展战略研究综合研究卷[M].北京:海洋出版社,2014.
- [5] 姬厚德.国内外海洋测流技术现状与进展[C]//福建省海洋学会学术年会暨海峡西岸经济区建设的海洋科技支撑与海洋资源开发学术研讨会.福州:福建省海洋学会,2008.
- [6] 乔正明,陈超,吴姚振,等.海流计的发展现状及其应用[J].海洋开发与管理,2021,38(12):85—92.
- [7] JENKINS A D,BYE J A T.Some aspects of the work of V.W. Ekman[J].Polar Record,2006,42(220):15—22.
- [8] 刘彦祥.ADCP 技术发展及其应用综述[J].海洋测绘,2016,36(2):45—49.
- [9] 罗续业.海洋技术进展[M].北京:海洋出版社,2015.
- [10] 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.GB/T 12763.2—2007 海洋调查规范第 2 部分:海洋水文观测[S].2008.
- [11] TRUJILLO A P,THURMAN H V.海洋学导论[M].北京:电子工业出版社,2019.
- [12] 陈文霞.海流观测[EB/OL].(2018—03—11)[2021—04—26].<https://www.docin.com/p-2090181999.html?docfrom=rrela>,2018—03—11/.
- [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.GB/T 15920—2010,海洋学术语 物理海洋学[S].2011.
- [14] 张正惕,杨世伦,谷国传.我国海洋测流仪器的发展与现状[J].海洋技术,1999,18(2):17—21.
- [15] 国家海洋局.HY/T 071—2017 表层漂流浮标[S].2017.
- [16] 谢基平.利用 ARGO 浮标提取中层海流信息研究[D].南京:南京信息工程大学,2005.
- [17] Argo 官网.Argo's status[EB/OL].(2021—04—22)[2021—04—26].<https://argo.ucsd.edu/>,2021—04—22.
- [18] 冯硕.基于海洋平台的海流观测系统设计与关键部件研究[D].大连:大连理工大学,2019.
- [19] 王静,唐军武,张锁平.雷达技术在海洋观测系统中的应用[J].气象水文海洋仪器,2012,29(2):59—64.
- [20] 陈卓,任久春,朱谦.基于倾斜测流的浮标海流计原型设计与实现[J].自动化仪表,2019,40(4):85—88.
- [21] 李慧敏.基于多普勒法的 SAR 海表流场反演算法研究[D].青岛:中国海洋大学,2015.
- [22] 朱大勇,李炎,郭小钢,等.高频地波雷达海流验证研究述评[J].热带海洋学报,2013,32(4):1—7.
- [23] 赖叶平,王玉峰,周浩,等.便携式近程高频地波雷达海流对比试验[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(5):32—36.