

锚定式海洋水体剖面观测技术的研究与应用

刘长华, 王春晓, 王 旭, 贾思洋

(中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 介绍了国际上基于海底观测网、浮标和海床基等设施的锚定式海洋水体剖面观测的技术手段, 国内西太平洋深海科学观测网、南海潜标观测网和中国科学院近海观测研究网络三大体系中应用的锚定式海洋水体剖面观测技术手段, 通过对这些技术特点的分析, 指出一些国际上较为成熟的锚定式海洋水体剖面观测技术手段并不适用于我国近海的水体剖面观测, 自主研发的基于大浮标的锚定式水体剖面观测技术在我国近海则较为实用, 能够长期稳定地运行, 而且应用前景广阔。

关键词: 剖面观测; 锚定式; 近海

中图分类号: P715 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2019)12-0139-09

DOI: 10.11759/hyhx20191021001

海洋科学的发展依赖于观测技术的进步, 当前海洋观测科学发展的趋势呈现三个特点: 一是观测范围的扩大, 在横向上逐渐由点向面拓展, 在纵向上逐渐由水面、海底延伸至全水层的剖面观测, 二是获取数据的特点发生变化, 观测数据从延时性数据演变为实时性或近实时性的数据, 三是对海洋现象和规律力求更加精细的描述与刻画。针对海洋水体剖面观测的实现手段基本上包括两种, 一种是基于船基走航式的剖面观测, 一种是基于锚定装置实现的定点海洋水体剖面观测, 本文重点介绍后者。

锚定式海洋水体剖面观测, 即通过锚定装置获取剖面水体观测在时间上和空间上的连续数据, 该观测技术起源于 20 世纪七八十年代, 当时学术界就提出了将传感器安装于锚系缆绳上, 通过上下滑动反复观测垂向剖面水体中各项参数的方法^[1], 该技术的能源采用碱性电池驱动, 于 1981 年 2 月 2 日—3 月 16 日, 在百慕大海区 20~250 m 深度范围内, 共进行为期 6 周时间的连续观测, 往复测量剖面超过 500 条, 通过这些宝贵数据对该海域的风、波浪和内波的关系进行了研究, 开创了海水水体剖面观测研究的先河。

后期, 随着对水体剖面观测技术研究和应用的日益深入, 科学家发现从观测的深度范围角度而言, 在近海表一定深度范围内进行水体剖面观测相较于在深海开展类似工作, 难度更大, 这主要是由于观测设备在海洋表面受波浪、强海流和生物附着的影响更大, 而且近海表的海洋观测设备遭受人为和过往

船只破坏的概率更高, 因此从海洋水体剖面观测技术应用伊始, 面向深海范围的水体剖面观测技术发展更为迅速, 技术手段呈现多样化、智能化, 尤其是在观测设备借助的载体和能源供给方面更是形式多样, 对比而言, 反而针对近海表或者近海海域水体剖面的观测技术手段发展滞后, 而且在深海中已经成功实现剖面水体连续观测的技术应用于近海表或近海海域, 均未取得好的应用效果。这也是锚定式水体剖面观测技术的一个发展特点。本文主要就国际和国内已经研究应用的锚定式海洋水体剖面观测技术作一个简单梳理, 并就其技术特点作初步分析, 进而提出适合我国近海海洋水体剖面观测的技术方法。

1 国际上锚定式水体剖面观测技术的发展与现状

为实现对海面以下水体进行长期、连续的锚定式剖面观测, 国际上众多海洋研究机构和海洋仪器设备公司已经作了大量开创性的工作, 在观测方法的设计思路提供了很好的借鉴, 同时也获得了许多极其宝贵的观测数据。

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2019-11-14

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(41876102); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA1906020303)

[Foundation: Study of Multi-Factors Real-Time Observation Technology for Profiles of Offshore Waters, No. 41876102; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA1906020303]

作者简介: 刘长华(1977-), 男, 山东临邑人, 正高级工程师, 博士, 主要从事海洋观测技术方面的研究, E-mail: lch@qdio.ac.cn

1.1 基于海底观测网的锚定式水体剖面观测技术的研究与应用

对海洋水体剖面数据的获取方式有很多种,首先是基于海底观测网而建立的锚定式水体剖面观测技术,这是一种典型且综合性强的剖面观测技术实现方式,这种剖面观测技术显著的优点是能源供给充足和获取数据的实时传输有保障,并且获取的剖面数据可与海底网的其它观测设备获取的数据结合,从本质上说,该种水体剖面观测技术是海底观测网整套系统的一部分,是海底观测网在水体剖面上的技术延伸。在这方面技术和应用最突出的是美国。美国自 20 世纪 80 年代就建立了全国永久性海洋立体观测系统,美国 NSF(National Science Foundation)的海洋观测计划(Ocean Observatories Initiative, OOI)即构建的近岸观测网络系统与海底观测网络相结合模式,成为一个立体系统的海洋观测网络。还有在卡罗莱纳州海区建立的海洋观测预报系统(Garo-COOPS),该系统涵盖有锚定式的水体剖面观测设备,可获取水体中海流等数据^[2];对于近岸海水观测的长时间生态观测计划(LEO-15),研究者可实时查看海水表层、底层和剖面水体中的温度、盐度、叶绿素、可溶有机物、粒度、波高、流速等相关数据^[3]。2000 年美国开始的 MVCO(Martha's Vineyard Coast Observation)计划以及 2002 年美国开始的 MARS(Monterey Accelerated Research System)蒙特里加速研究系统,其建设内容均为建设一个长期稳定的深海观测平台,通过搭载各种海洋观测设备进行水体的剖面观测^[4]。另外还有由美国和加拿大联合发起的 VENUS (Victoria Experimental Network Under the Sea)观测网等^[5],其部分功能均是实现水体剖面数据的获取。

当然,在目前已知的包括正在建设的海底观测网中,最著名的是“海王星”(NEPTUNE Canada)海底观测网,“海王星”是世界上第一个深海海底大型联网观测站,“NEPTUNE”全名为“North-East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments”,译为“东北太平洋时间序列海底联网试验”,简称“海王星”。该观测网 1998 年由美国开始实施,1999 年加拿大加入^[6],早期的设计规划为建立 3 000 km 的光纤电缆,光纤电缆可持续提供电能并能进行高速的数据传输,这些光纤电缆将上千套海洋观测设备联结,并通过 30 个关键节点进行联网,海洋观测设备可对剖面水体、海底和地壳进行长期的连续观测,观测设计年限为

25 年^[7]。但是,美国由于资金问题中断建设,加拿大则一直坚持投入建设,并按期完成了最初设计的海底观测网北段,即北美太平洋海岸外的胡安·德·夫卡板块最北部,即现在我们所见到的“NEPTUNE-Canada”,因此,到 2009 年 12 月 8 日又由加拿大正式宣布开始启用该海底观测网。目前实际建设完成的“海王星”海底观测网络观测区域海底和海底上层的水体中分布有大约 400 个各种传感器,这些传感器通过 800 km 长的海底光电缆联结,将该海区的物理、化学、生物、地质的实时观测信息,源源不断地传回陆地实验室。该海底观测网对水体的观测是其主要观测内容之一,水体剖面的观测范围在垂向上从海表下 17~2 660 m,观测内容主要有海洋物理、海洋生物、光学等,采用两种观测手段,一种是将观测设备直接系留于从海底向上延伸的锚系链上,每隔一定距离系留一组观测设备,这些传感器的能源和数据传输即通过光纤电缆完成,这类剖面观测设备的维护和更换主要通过水下机器人进行操作;第二种水体剖面观测手段是通过垂向剖面器(Vertical Profiler System, VPS)实现,垂向剖面器是一种通过上下移动进行水体剖面观测的平台,搭载有 10 余种传感器,可观测温度、盐度、溶解氧、营养盐、海流、浮游生物和大型鱼类等,整套平台系留于位于海底的海床基上,通过上下升降可对海底以上 400 m 范围内的水体进行剖面观测^[8-9]。从上述来看,“海王星”海底观测网在观测技术层面上,汇集了当前国际上海洋观测技术的精华,在水体剖面观测方面的应用仅是整个系统的一部分,其他诸如水下热插拔的接驳盒技术,对天然气水合物的监控技术,新洋壳形成、海底火山地震活动的监测技术,甚至履带式全方向运动的遥控水下爬行器观测平台的应用等,均是目前开展海洋观测的最先进技术手段,客观地说,“海王星”海底观测网是目前全球真正意义上的海底观测网络^[10-11]。

另外目前国际上其他国家和海洋研究机构也开展了众多海洋观测网建设,2003 年日本启动的 ARENA (Advanced Real-Time Earth Monitoring Network in the Area)深海地震观测网;2004 年由欧洲 14 国启动的 ESONET(The European Sea Floor Observatory Network)欧洲海底观测网计划,该计划对环绕欧洲 14 个国家的 11 个深海观测点和 1 个近海岸站点进行长期监测,观测的目标主要为欧洲开展系列海洋科研项目作支撑,如评估挪威海海冰的变化对深水循环的影响以及监视北大西洋地区的生物多样性和地中海

的地震活动等^[4]。

上述海底观测网的建设内容均涵盖有大量的锚定式水体剖面观测技术的研究和应用,虽然这些观测网计划对水体剖面观测的应用各有特色,且目的不同,但总体而言,“海王星”海底观测网对水体剖面观测技术的系统性和先进性更加突出,能够充分代表当今基于海底观测网的锚定式水体剖面观测技术的最先进水平。

另外,从应用的成功和技术特点分析,基于海底观测网的锚定式水体剖面观测技术更加适用于深海的剖面水体观测,不适用于近海,尤其是渔业捕捞频繁的我国近海区域。

1.2 基于浮标的锚定式水体剖面观测技术的研究与应用

利用锚系式浮标进行海洋观测是目前进行海洋科学研究,获取长序列、定点观测数据的常规手段,因此借助浮标作为载体,实现水体的剖面观测也是一种思路,浮标载体在水体剖面观测实现的过程中一般作为剖面观测能源的供给者和获取数据实时传输的中介者。此类实践始于 20 世纪九十年代,法国海洋科学家首次尝试,研制了通过改变浮力实现升降功能的定点剖面测量平台 YoYo,最大工作水深可达 1 000 m,可连续循环工作 200 次,平台上可以装载多种不同类型的传感器,系统通过声学传输和卫星通信实现观测数据实时传输^[12-13]。1998 年,美国伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)与一家海洋技术公司合作,开始生产 McLane 锚定式剖面仪,采用电机驱动,搭载有温盐深传感器和声学海流计,观测数据保存在剖面仪中,待系统回收后获取,实质上该类设备属于一种自容式剖面仪,不能实现实时的数据传输功能,随着新技术的应用,McLane 锚定式剖面仪通过采用感应耦合技术与海表浮标结合,将观测数据实时传输到水面浮标,然后通过卫星发射到岸站^[14]。2000 年,挪威 SAIVAS 公司研制了 APB5 无线缆自动剖面分析浮标,该浮标可以搭载 CTD 传感器进行剖面参数的自动观测,观测数据通过短波进行无线传输,对电量的需求极低,这种无线传输技术解决了所有传统线缆的长期磨损问题,而且剖面数据的传输是在传感器露出水面后,与短波电台的信号握手后进行的,这种频繁的传感器露出水面方式大大提高了传感器的防污能力。2010—2011 年,SAIVAS 公司利用研发成熟的 APB5

剖面浮标,结合挪威海洋研究所研发的 Welfaremeter 软件,在挪威的鲑鱼养殖场和水文监测站分别进行了样机测试,均取得了不错的应用效果^[15]。

20 世纪 90 年代美国加州大学 Scripps 海洋研究所发明的 Wirewalker 型波浪动力剖面浮标,该剖面浮标利用海面波浪作为动力,进行自由上浮式的剖面测量,采用全机械结构设计,爬行不消耗电能,可长时间持续工作,剖面浮标可集成多种水文、水质传感器进行海水剖面观测,最低仅需要 1~3 kn 的风所产生的波浪即可开始工作,可以快速连续地获取海面至水下 50~100 m 范围内的剖面数据^[16]。由于该剖面浮标可使用海面波浪动力进行连续的剖面测量且不需要外接能源,对于捕捉海洋里面快速变化的小尺度现象,获取无间断、完整的长时间尺度的数据有非常大的优势,因此在近 10 年内,Wirewalker 研制样机在北太平洋、印度洋海域及南中国海域进行了自由漂流式剖面测量和近海大陆架的锚定式剖面测量,总共完成了超过 50 万次的剖面测量,经过了严酷的考验,取得了巨大成功^[17]。

2000 年中期,加拿大 Bedford 海洋研究所,研制出了名为“海马”(Sea Horse)的垂直剖面观测系统。该系统与 Wirewalker 类似,利用海浪能量,驱动传感器观测平台沿着锚定钢缆上浮和下沉,“海马”系统下潜深度可至水下 200 m,可配置温、盐、深和浊度传感器^[18]。

1.3 基于海床基绞车的锚定式水体剖面观测技术的应用

将海床基作为基座,将绞车固定于海床基,利用绞车的收放牵引水下观测平台的升降,实现水体剖面的观测是一种自下而上的设计思路,日本 NGK OCEAN 公司专为“海王星”海底观测网设计和制造的近海底垂直剖面测量平台,就是此种设计方案;在近海浅水区域,采用此种设计方案搭载的观测平台载有 10 种不同设备,从海底向海面移动时,可实现近海水体的剖面观测,并可控制绞车释放足够长的缆绳,使上端浮球露出水面,浮球中配置有卫星通讯终端,出水后通过卫星通信方式将观测到的水体剖面数据传送到岸站^[19]。由加拿大牵头,美国、德国、英国科学家共同参与研制的 SeaCycler 垂直剖面观测平台,也应用了类似的海床基水下绞车技术,并使用卫星通信来传输数据。该种类型的平台最大特点是抗恶劣海洋环境能力强,2011 年在加拿大某

海域进行 SeaCycler 垂直剖面观测平台的海上试验,剖面观测平台在 5.5 m 浪高的海况下仍然正常工作,并获取到了完整的水体剖面观测数据^[20]。

2 国内锚定式水体剖面观测技术的发展与现状

我国在水下观测系统技术方面的发展状况较国外落后很多,在观测技术方面除一些通信技术和中心控制技术外,其他如传感器技术、系统结构设计技术和能源供给技术等均落后世界水平 5 年以上^[21]。这基本上就确定了国内在水体剖面观测的落后现状,虽然整体情况不容乐观,但我国在水下观测系统技术的研制方面也作了许多尝试,并取得了显著进步。我国在 2004 年初步研制了适用于极区冰盖下的锚定式垂直剖面测量装置,具有温度、盐度、海流剖面数据获取功能,并可利用声学进行数据传输,在南海进行了海试^[22-23]。2007 年国家海洋技术中心研制了利用动力驱动的水体剖面观测系统,中船重工 710 研究所研制了一种采用可控浮力实现观测系统升降的深海定点垂直剖面观测系统,观测装置可沿系留缆上下升降,进行剖面水体数据的往复获取^[24-25]。2008 年中国科学院海洋研究所参照加拿大的“海马”,研制了波浪能驱动的水体剖面观测系统,该系统是一种波浪驱动式垂直剖面测量平台,该平台通过高效的波浪能传递装置,采用特殊的棘爪驱动结构,可以完全依靠波浪的能量在水表面以下特定的深度循环往复运动^[26]。利用潜标进行水体剖面观测的技术,我国起步较晚,初期以研制自容式潜标系统为主,布放水深有限,随着应用需求的增大和技术的进步,我国潜标的研究进展较快,最大布放水深可达到 6 000 m,但观测内容主要为剖面海流,比较单一,且核心传感器还依赖于进口,我国科学家主要进行平台的设计和研发。利用海床基进行水体剖面观测的目的主要解决海床基动力要素综合自动监测系统的实时监控^[27]。

自 2008 年以来,我国在观测技术方面的进步更是成绩斐然,主要是通过西太平洋深海科学观测网、南海潜标观测网和中国科学院近海观测研究网络三大体系的构建和完善,全面、系统提升我国在海洋观测网建设、海洋观测技术研发等方面的能力和水平,甚至在某些海洋观测技术的研发与集成方面已经站在了该领域的国际前沿,逐渐呈现出系统性突破初

露端倪的态势。

2.1 西太平洋深海科学观测网及其锚定式水体剖面观测技术

中国科学院海洋研究所在战略性先导专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”的支持下,在热带西太平洋区域,自主建立了国际领先的西太平洋深海科学观测网,该观测区域拥有全球海洋中最大的暖水体-热带西太平洋暖池、全球最强劲的 Walker 环流和 Hadley 环流的对流中心和上升流分支,暖池在赤道太平洋上的东西移动及相应的大气环流变化,通过季风系统深刻影响着我国气候的变化^[28-30]。西太平洋深海科学观测网 2013 年开始规划建设,2014 年开始船基的综合考察和第一批潜标布放,2015 年成功回收第一批潜标,获取到宝贵的第一批潜标数据,2016 年,再次成功实现了潜标维护和数据回收,标志西太平洋深海科学观测网已经实现稳定运行,并成功进行了深海潜标数据的实时化传输,破解了深海潜标实时数据传输这一海洋观测技术难题。西太平洋科学观测网经过多年的建设,已经建设完成 20 套深海潜标、4 套大型浮标,通过这些设备稳定获取到大量的连续观测数据,使我国深海连续和实时观测能力稳步提升^[31]。

西太平洋科学观测网在水体剖面观测技术应用的深海潜标数据实时回传方面取得重要突破,科学家通过融合感应耦合和水声通信技术,实现深海潜标最上面的一个距离海表面还有 400~500 m 浮体,与卫星进行实时通讯,将潜标实时获取的深海水体剖面数据及时地通过卫星传回陆地实验室,截至 2017 年 9 月,深海数据已成功连续实时回传 260 天,数据回传率 95% 以上,创造了国内外有明确文献记录实时获取深海数据的最长工作时间^[31]。

2.2 南海潜标观测网及其锚定式剖面观测技术

南海是我国建设海洋强国的核心战略海区,是我国进行深海研究的天然实验室,自 2009 年以来,中国海洋大学在南海连续布放潜标观测系统,构建了国际上规模最大的区域潜标网—南海潜标观测网,完成了南海深海盆地潜标观测的全覆盖,观测海域横跨吕宋海域、南海深海盆、南海东北部和西北部陆坡陆架区,实现了对南海大尺度环流、中尺度涡、小尺度内波、微尺度混合等多尺度海洋动力过程的

长期连续观测。截至 2017 年,南海潜标网累计布放潜标 304 套次,回收成功率 100%,目前南海潜标网保持同时在位观测潜标 42 套,获取的观测数据支撑了众多南海多尺度动力过程的重要科学发现,对南海海洋科学规律的认知又提升到一个新的水平,尤其是为南海环境安全保障、资源开发利用、环境保护和气候变化应对提供了丰富、重要的平台和数据支撑。南海潜标网在水体剖面观测技术方面突破了水下观测平台沿缆往复稳定可靠运动控制技术和水下剖面测量等关键技术,可实现近实时的水体剖面参数卫星传输^[32-33]。

2.3 中国科学院近海观测研究网络及其锚定式剖面观测技术

2007 年开始,中国科学院在创新三期中部署建设了近海海洋观测研究网络,重点对我国东海、黄海、南海北部海域进行长期定点综合观测,该网络是中国科学院五大基础系统建设的重要组成部分,由黄海海洋观测研究站、东海海洋观测研究站、胶州湾海洋生态系统定位研究站、西沙海洋观测研究站、南沙海洋观测研究站、大亚湾海洋生物综合试验站、海南热带海洋生物实验站、牟平海岸带环境综合试验站、黄河三角洲滨海湿地生态试验站共 9 个科学院野外台站以及中国科学院开放航次断面组成,实现点-线-面结合,空间-水面-水体-海底一体化的多要素同步观测,同时兼有全面调查与专项研究功能,为海洋科学研究和区域海洋经济发展提供坚实的数据支撑和保障^[34]。

在水体剖面观测技术的研究和应用方面,隶属于中国科学院近海观测研究网络的黄海站和东海站作了大量工作,其中在黄海站首先开展了自容式水体剖面观测的应用,自 2009 年 5 月开始,在北黄海长海县附近海域开始布放水体剖面观测浮标,该种剖面观测采用浮标锚系系留自容式传感器的方式,从水下 2 m 开始,每隔 2 m 在包塑缆锚系上安装 1 台自容式传感器,自海面至海底共安装 18 台传感器,可同时获取 18 层海水的海洋环境参数,这些环境参数具体包括水温、盐度、浊度、叶绿素、溶解氧,海面上配置的直径 2 m 钢制浮标体的底部加装有剖面海流计,可进行全水层剖面的海流观测,整套系统构成自容式水体剖面观测浮标,目前该浮标系统已经稳定运行 10 年,已经连续获取到 121 个月的剖面观测数据,但采用自容式垂直剖面观测方式存在明

显的技术缺陷,即只能定期进行设备回收和数据提取,不能进行剖面观测数据的实时传输和查看^[35]。

为解决水体剖面观测数据实时传输问题,黄海站采用感应耦合技术,于 2018 年 5 月建设完成一套感应耦合垂直剖面综合观测浮标系统并在威海荣成海域顺利布放,该系统既对海表面各观测参数进行实时观测,又通过先进的水下感应耦合传输技术实现了剖面水体中水温、盐度、深度、浊度、叶绿素、溶解氧、pH 值等多参数的长期、定点、连续、实时观测,具有结构简单、功耗低、传输距离远、可靠性高、装拆方便且安装位置可任意更换、后期维护工作成本低、工作难度较小等诸多优点。目前,该系统已经在威海荣成附近海域连续稳定运行超过 16 个月,获取常规观测数据 88.2 万余条,垂直剖面观测数据达 14.5 万余条。

东海站的水体剖面观测技术应用更加丰富和多样化,并且在近海海域的应用中取得了一些具有显著代表性和影响力的成果,首先是基于 10 m 浮标载体的锚链式自容式剖面观测系统的试验,为满足定点海域长期水体观测数据的需求,东海站依托 1 套 10 m 直径的综合海洋观测研究浮标,从 2014 年 10 月至 2015 年 11 月,开展了连续 13 个月的垂直剖面全水层观测系统试验,采用锚链 10、20 和 30 m 水深处挂载自容式传感器的方式,获取到 8 个周期共 412 d, 518 万条的有效剖面观测数据,剖面观测参数有水温、盐度、深度、浊度、叶绿素和溶解氧^[36]。试验充分证明了依托大浮标进行锚链式剖面观测方法的实用性和可推广性。

其次东海站研制了国内首套超大型浮标三锚式浮标综合观测平台,三锚式浮标综合观测平台在观测技术方面是一项创新性的应用工程,浮标综合观测平台直径 15 m,是国内首套直径最大、观测参数最全、智能化程度最高的海上综合观测和试验平台(图 1),整个平台主要由浮标主体、锚泊系统和传感器等部分组成,采用三锚固定观测系统方式,克服了单锚浮标系统随潮、流作用,活动范围较大,在进行剖面参数长期观测时锚系易与剖面观测系统发生纠缠等缺点;同时,该平台预留多种观测井、仪器舱,可根据实际应用或科学需求,以及针对突发生态灾害等问题,进行短期的专项观测,是实用、简易的海上试验综合观测平台。在具体观测内容和方式上,具有海气界面观测、通量观测、水面观测、水体观测、海底观测等多项综合观测以及应急生态灾害

专项监测诸多功能于一体的特点。该平台的应用解决了我国近海获取实时、长期和连续的剖面水体数据的观测技术难点,为建立涵盖海洋大气、海洋表层、剖面水体和海底的全尺度观测体系弥补了关键一环,是一种适应目前我国近海海洋观测需求的创新性海洋综合观测平台,大大提升中国近海海洋观测研究网络的观测能力,为我国海洋科学基础研究、防灾减灾等提供更加丰富、完备的数据支撑。



图1 三锚式浮标综合观测平台实际运行图

Fig. 1 The current running situation of three-anchor buoy integrated observation platform

东海站第三项涉及水体剖面观测的技术研发是进行刚性剖面观测技术-自由伸缩式智能化剖面观测浮标系统的研制和应用。该系统充分利用大型海洋综合观测浮标在位生存能力强的优势,能够在无人值守条件下,采用智能控制与自由伸缩式刚性结构体技术结合的方式进行海洋剖面观测,可对剖面水体的水温、电导率、深度、浊度、叶绿素、溶解氧、pH值等多参数要素进行长期、定点、连续、实时观测(图2)。该系统的一个显著特点是智能判断,浮标系统的智能控制功能采用了AI技术,根据浮标上配置的各类传感器获取的实时数据对海况进行判断,从而对伸缩装置的运行状态进行自动控制,实现自主智能控制对水面下一定深度水体的多项环境参数进行长期、连续、定点、实时观测。自由伸缩式智能化剖面观测浮标系统还进行了多项技术创新,包括采用太阳能-波浪能多源组合供电模式、视频实时监控功能、多层通量风的观测功能等。该浮标系统具有安全稳定、推广性强、可利用现有的浮标观测网络构建一个观测范围广阔的水体垂直剖面观测网络系统的优势,有效增加和拓展我国近海水体剖面

观测的深度和内容,为海洋基础和应用等学科研究的深入开展,取得突破性、创新性研究成果起到更加全面的系统支撑作用。



图2 基于大型浮标的自由伸缩式海洋剖面观测系统示意图和实际照片

Fig. 2 The schematic and photo of free-retractable ocean profile observation system based on large buoy

3 问题与展望

水体剖面观测技术的发展和应用的海洋科学自身发展对海洋系统认识和了解的必然趋势,海洋科学家对海洋的研究不仅仅停留在海表面或海底局部数据的获取,而是从海面以上的大气、海水水体、海底,甚至海底地壳的全方位观测数据的需求,因此发展水体剖面水体的观测技术十分重要^[37]。

通过几十年的研究,国际上锚定式水体剖面观测技术先从单一的需求开始,逐渐演变为多学科的多种需求为主,水体剖面观测技术逐渐成熟,其应用所获取的数据类型也趋向于多元化、复杂化,而且观测体系的建立往往水体剖面数据的获取成为核心内容,诸如“海王星”海底观测网等大型国际海洋观测网络的建立,水体的剖面观测应用即是其核心观测内容。我国的锚定式水体剖面观测技术主要依赖于三大网络体系的建设和发展,在深远海中实现锚定式水体的剖面观测较近海困难少,尤其是受人为破坏的影响小,西太平洋深海科学观测网和南海潜标观测网中的锚定式水体剖面观测技术的实现主要难点在于水下通讯和数据传输,而中国科学院近海观测研究网络中锚定式水体剖面观测技术的实现主要难点除了水下通讯之外,更多的需要考虑近海渔民海上作业的影响甚至破坏等问题,当然近海一般不存在数据传输的问题。因此看来,国际上使用较好

的浅水区域进行锚定式水体剖面观测的设备和技術,如基于海床基绞车的锚定式水体剖面观测技術在我国近海則不适用^[36-37],基于浮标的锚定式水体剖面观测技術一个明显的特点是所使用的浮标载体一般很小,浮标体直径一般在 0.5~1.5 m,因此在我国近海的应用中,往往会被渔民的生产作业所干扰甚至破坏,在无人看护的状况下,不能长期使用。根据我国国情自行研发的基于大浮标的锚定式水体剖面观测技術則能够较为长期地稳定运行,针对我国近海的现状较为实用,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] Eriksen C C, Dahlen J M, Shillingford J T. An upper ocean moored current and density profiler applied to winter conditions near Bermuda[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C10): 7879-7902.
- [2] Leonard L, Moss M, Durako M, et al. The coastal ocean research and monitoring program (CORMP): A user-driven sub-regional ocean observation system in southeastern North Carolina[R]. Hawaii: American Geophysical Union, 2006.
- [3] Sathyendranath S. IOCCG Report No.3: International ocean colour coordinating group remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters[R]. Dartmouth: IOCCG Project Office, 2000.
- [4] 李健, 陈荣裕, 王盛安, 等. 国际海洋观测技術发展趋势与中国深海台站建设实践[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(2): 123-133.
Li Jian, Chen Rongyu, Wang Sheng'an, et al. Development of international marine observation system and construction of deep-sea station in China[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2012, 31(2): 123-133.
- [5] 李颖虹, 王凡, 任小波. 海洋观测能力建设的现状、趋势与对策思考[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(7): 715-722.
Li Yinghong, Wang Fan, Ren Xiaobo. Development trend and strategy of ocean observing capability[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7): 715-722.
- [6] 李建如, 许惠平. 加拿大“海王星”海底观测网[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(6): 656-661.
Li Jianru, Xu Huiping. NEPTUNE-Canada[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 656-661.
- [7] Taylor S M. Transformative ocean science through the VENUS and NEPTUNE Canada ocean observing systems[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2009, 602(1): 63-67.
- [8] Barnes C, Best M, Johnson F, et al. Transforming the ocean sciences through cabled observatories: NEPTUNE-Canada Project[R]. Victoria, Canada: University of Victoria, 2008.
- [9] Barnes C, Best M, Johnson F, et al. Final installation and initial operation of the world's first regional cabled ocean observatory (NEPTUNE-Canada)[J]. *Canadian Meteorological and Oceanographic Society Bulletin*, 2010, 38(3): 89-96.
- [10] 李彦, Moran K, Pirenne B. 加拿大“海王星”海底观测网络系统[J]. *海洋技术学报*, 2013, 32(4): 72-75.
Li Yan, Moran K, Pirenne B. An overview of the undersea network engineering from NEPTUNE Canada[J]. *Ocean Technology*, 2013, 32(4): 72-75.
- [11] Christopher R B, Mairim R B, Fern R J, et al. Challenges, benefits and opportunities in installing and operating cabled ocean observatories: Perspectives from NEPTUNE Canada[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 28(1): 144-157.
- [12] Dominique M, Daniel V, Frederic P. Application of the novel nucleic acid dyes YOYO-1, YO-PRO-1, and PicoGreen for flow cytometric analysis of marine prokaryotes[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, 62(5): 1649-1655.
- [13] 陈永华, 李思忍. 区域性海洋要素持续测量平台新技术概述[J]. *海洋科学*, 2009, 33(4): 76-80.
Chen Yonghua, Li Siren. A general review of a new platform technique for sustained observations of ocean elements[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(4): 76-80.
- [14] Doherty K, Frye D E, Liberatore S P, et al. A moored profiling instrument[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(11): 1816-1829.
- [15] Kolding M S, Sagstad B. Cable-free profiling buoy, real-time oceanographic profiles from low-maintenance buoy[J]. *Sea Technology*, 2013, 54(2): 10-12.
- [16] Rainville L, Pinkel R. Wirewalker: An autonomous wave-powered vertical profiler[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2010, 18(6): 1048-1051.
- [17] Pinkel R, Goldin M A, Smith J A, et al. The Wirewalker: A vertically profiling instrument carrier powered by ocean waves[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28(3): 426-435.
- [18] Hamilton J, Fowler G, Beanlands B. Long-term monitoring with a moored wave-powered profiler[J]. *Sea Technology*, 1999, 40(9): 68-69.
- [19] Delaney J R, Chave A D. NEPTUNE: A fiber-optic telescope to inner space[J]. *Oceanus-Woods Hole Mass*, 2000, 42(1): 10-11.
- [20] Send U, Fowler G, Siddall G, et al. SeaCycler: A moored open-ocean profiling system for the upper ocean in extended self-contained deployments[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2013, 30(7): 1555-1565.
- [21] 李民, 刘世莹, 汪波, 等. 海洋环境定点平台观测技

- 术概述及发展态势分析[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 36-42.
- Li Min, Liu Shixuan, Wang Bo, et al. Review and analysis on the development of ocean environment observation technologies based on mooring platforms[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 36-42.
- [22] 商红梅, 张少永, 沈高山. 极区冰盖下定点剖面测量系统[J]. 海洋技术, 2006, 25(3): 23-26.
- Shang Hongmei, Zhang Shaoyong, Shen Gaoshan. Underwater/Under-ice fixed-point profiling system[J]. Ocean Technology, 2006, 25(3): 23-26.
- [23] 徐良波, 朱旭, 郭文生. 定点垂直升降剖面测量系统[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(S): 205-207.
- Xu Liangbo, Zhu Xu, Guo Wensheng. Vertical lift section measuring system at fixed point[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2008, 23 (S): 205-207.
- [24] 朱心科, 金翔龙, 陶春辉, 等. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. 机器人, 2013, 35(3): 376-384.
- Zhu Xinke, Jin Xianglong, Tao Chunhui, et al. Discussion on development of ocean exploration technologies and equipments[J]. Robot, 2013, 35(3): 376-384.
- [25] 张云海, 汪东平, 谭华. 我国海洋环境综合监测装备与技术发展综述[C]//中国海洋学会. 中国海洋学会2013年学术年会第14分会场海洋装备与海洋开发保障技术发展研讨会论文集. 上海: 中国海洋学会, 2013: 151-162.
- Zhang Yunhai, Wang Dongping, Tan Hua, et al. The development trends of marine fishing equipment and technology in China. [C]//Chinese Society for Oceanography. Proceedings of the Symposium on Marine Equipment and Marine Development Support Technology at the 14th Branch of the 2013 Annual Meeting of Chinese Society for Oceanography. Shanghai: Chinese Society for Oceanography, 2013: 151-162.
- [26] 陈永华, 李思忍, 龚德俊, 等. 波浪驱动式海洋要素垂直剖面持续测量搭载系统[J]. 海洋工程, 2008, 26(3): 89-93.
- Chen Yonghua, Li Siren, Gong Dejun, et al. Awave-driven vertical profiler for sustained observations of ocean elements[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(3): 89-93.
- [27] 齐尔麦, 张毅, 常延年. 海床基海洋环境自动监测系统的研究[J]. 海洋技术, 2011, 30(2): 84-87.
- Qi Ermai, Zhang Yi, Chang Yannian. Research on the seabed based automatic environmental monitoring system[J]. Ocean Technology, 2011, 30(2): 84-87.
- [28] 王凡, 汪嘉宁. 我国热带西太平洋科学观测网初步建成[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 258-263.
- Wang Fan, Wang Jianing. China's tropical western Pacific scientific observation network was initially built[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 258-263.
- [29] 王凡, 胡敦欣, 穆穆, 等. 热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应[J]. 地球科学进展, 2012, 27(6): 595-602.
- Wang Fan, Hu Dunxin, Mu Mu, et al. Structure, variations and climatic impacts of ocean circulation and the warm pool in the tropical Pacific Ocean[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(6): 595-602.
- [30] 王凡, 汪嘉宁, 张林林, 等. 主流系与西太平洋暖池变异机制研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1145-1155.
- Wang Fan, Wang Jianing, Zhang Linlin, et al. Research progresses in the variability of Western Pacific main current system and warm pool[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1145-1155.
- [31] 汪嘉宁, 王凡, 张林林. 西太平洋深海科学观测网的建设和运行[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1471-1479.
- Wang Jianing, Wang Fan, Zhang Linlin. Construction and operation of the western Pacific deep-sea scientific observation network[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1471-1479.
- [32] 田纪伟, 赵玮, 周春, 等. “南海潜标观测网”成功实现南海深海盆全覆盖. 2017 年度中国海洋与湖沼十大科技进展[EB/OL]. [2018-01-05]. http://www.sohu.com/a/216918286_726570.
- Tian Jiwei, Zhao Wei, Zhou Chun, et al. 'South China Sea submarine observation network' successfully achieves full coverage of the South China Sea deep basin. Ten major scientific and technological advances in Oceanologia et Limnologia Sinica in 2017[EB/OL]. [2018-01-05]. http://www.sohu.com/a/216918286_726570.
- [33] 陈连增, 雷波. 中国海洋科学技术发展 70 年[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 3-22.
- Chen Lianzeng, Lei Bo. Marine science and technology development over the past 70 years in China[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 3-22.
- [34] 李颖虹, 王凡, 王东晓. 中国科学院近海海洋观测研究网络建设概况与展望[J]. 中国科学院院刊, 2008, 23(3): 274-279.
- Li Yinghong, Wang Fan, Wang Dongxiao. The general situation and prospects of the construction of offshore marine observation and research network of CAS[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2008, 23(3): 274-279.
- [35] 刘长华, 王春晓, 贾思洋, 等. 锚泊式海洋剖面观测浮标系统[J]. 海洋科学, 2014, 38(8): 99-102.
- Liu Changhua, Wang Chunxiao, Jia Siyang, et al. The system of mooring marine profiling observation buoy[J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 99-102.
- [36] 刘长华, 王春晓, 贾思洋, 等. 基于 10 米浮标载体的锚链式剖面观测系统实践之一: 自容式采集方式[J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 94-99.

Liu Changhua, Wang Chunxiao, Jia Siyang, et al. Anchor chain-type profiling observationsystem based on 10m buoy: Self-contained acquisition mode[J]. Marine Sciences, 2016, 40(8): 94-99.

[37] 海洋地质国家重点实验室(同济大学). 海底观测: 科

学与技术的结合[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.
State Key Laboratory of Marine Geology (Tongji University). Seafloor Observation: The Combination of Science and Technology[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011.

Research and application of anchor-type profile observation technology of marine water

LIU Chang-hua, WANG Chun-xiao, WANG Xu, JIA Si-yang

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Received: Oct. 21, 2019

Key words: profile observation; anchor-type; offshore

Abstract: This paper introduces the anchor-type profile observation technical of marine water in the world, which is applied to seafloor observation network, buoy and seabed-base, and applied to the Western Pacific deep sea scientific observation network, the South China Sea submarine observation network and the offshore observation and research network of the Chinese Academy of Sciences in China. By analyzing technical feature, it concluded that some mature anchor-type profile observation technical of marine water internationally are not suitable for the observation of water profile in China's offshore waters. The anchor-type profile observation technique attached the large buoy, which is developed independently, is more practical in China's offshore waters, which can operate stably for a long time, and has a broad application prospect.

(本文编辑: 刘珊珊)