

海底有缆在线观测系统研究与应用综述

翟方国¹, 李培良², 顾艳镇¹, 李欣¹, 陈栋², 李琳¹, 孙利元³, 刘子洲¹,
姜庆岩², 吴文凡¹

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 3. 山东省水生生物资源养护管理中心, 山东 烟台 264000)

摘要: 获取高质量海洋观测数据是维护国家安全和权益、保障人类生存与可持续发展、应对全球气候变化、开发利用海洋资源、防灾减灾等的重要基础。随着海底观测技术的发展, 海底有缆观测已成为地球观测的第三个平台。通过借鉴国内外海底观测网的成熟技术, 设计研发单节点海底有缆在线观测系统, 主要包含海底观测、电力信息传输和陆上人机交互信息管理等三个子系统, 具有高度可扩展性, 可根据监测需求集成安装常用的各类海洋观测仪器和水下高清摄像头, 从而实现海洋环境和水下生物资源的原位、长期、连续、稳定的在线观测。研发的海底有缆在线观测系统构造简单、扩展性强、经济成本低, 已广泛应用于山东省海洋牧场观测网的海洋生态环境和渔业资源、辽东湾的冬季海冰、海洋牧场与海上风电的融合效应、河流入海口水质、海上溢油等不同领域的业务化监测中, 为我国海洋生态环境保护与修复、海洋资源开发利用、海洋防灾减灾等提供了高质量的科学数据支撑。海底有缆在线观测系统是业务化海洋在线观测技术领域里的创新研究, 具有重要科学意义和广泛应用前景。

关键词: 海底有缆观测; 海洋环境; 海底观测网; 在线监测; 防灾减灾

中图分类号: P715 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)08-0014-15

DOI: 10.11759/hyxx20200331003

海洋科学是一门基于观测的科学, 海洋观测不但是海洋科学研究的基础, 而且是海洋资源开发、海洋环境污染防治、海洋灾害预警和全球气候预测等社会服务的重要支撑。随着科学技术的不断发展, 海洋观测日益多元化、立体化和实时化, 新型观测技术、观测装备和观测网络等层出不穷^[1-6]。传统的海洋观测主要是以调查船、潜标和浮标为主的海基观测和以卫星遥感、航空观测为基础的天基观测。相比于调查船走航式观测, 潜标和浮标可以对海洋环境信息进行原位和长期连续观测, 且部分潜标和浮标观测结果已实现实时传输和展示。例如, 中国科学院海洋研究所于 2015 年初步建成世界上最大规模的热带西太平洋潜标科学观测网^[7], 并联合中国科学院声学研究所通过卫星中继实现了潜标观测数据的实时传输和展示^[8]。另一方面, 卫星遥感和航空遥测等天基观测只能得到海洋表面的参量信息, 而不能观测海洋内部的变化。随着海底观测技术的发展, 借助于海底线缆为水下观测仪器供电并传输观测数据, 海底有缆观测真正实现了海洋环境的原位、长期、连续、实时观测, 并继地面/海面 and 天空之后成为地

球观测的第三个平台^[5,9]。除了借助线缆进行电力供应和数据传输, 从而摆脱了船时与舱位、电池寿命、天气和数据延迟等的局限外, 海底有缆观测还可实现海底多节点、多传感器设备的同步观测, 因而受到各国海洋科学研究与业务监测的青睐^[3-4, 9-10]。

海底有缆观测最早开始于 20 世纪 70 年代末。1978 年, 日本利用同轴电缆在御前崎地区建造了长达 125 km 的地震仪线性阵列, 主要用于地震及海啸的实时监测^[11]。迄今为止, 日本、加拿大、美国、欧洲各国等均已建设大型有缆海底观测网络^[3, 10, 12-13]。

收稿日期: 2020-03-31; 修回日期: 2020-04-28

基金项目: 三亚崖州湾科技城管理局重大科技项目(YZ2019ZD0X); 浙江省重点研发计划(2020C03012); 国家重点研发计划 (2019YFD0901305); 国家自然科学基金项目(41776012)

[Foundation: Major Science and Technology Project of Sanya YZBSTC, No. YZ2019ZD0X; Key Research & Development Project of Zhejiang Province, No. 2020C03012; National Key Research & Development Program of China, No. 2019YFD0901305; National Science Foundation of China, No. 41776012]

作者简介: 翟方国(1984-), 男, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 主要从事海洋动力与生态过程的研究, 电话: 15275209482, E-mail: gfzhai@ouc.edu.cn; 李培良, 通信作者, 教授, 主要从事近海水文生态环境动力学的观测和数值预报研究, 电话: 15964239596, E-mail: lipeiliang@zju.edu.cn

例如,日本经过两个阶段的长期建设于 2015 年完成用于地震和海啸的密集海底电缆观测网(Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis, DONET),集成海底地震仪、海啸压力计、声学多普勒测流剖面仪、温盐深测量仪、水听器等关键设备和传感器。加拿大已建成和运行两套海底观测网,分别是东北太平洋时间序列水下网络实验海底观测网(North-East Pacific Time-Series Undersea Networked Experiments, NEPTUNE)和维多利亚水下试验海底观测网(The Victoria Experimental Network Under the Sea, VENUS)^[12, 14]。NEPTUNE 是世界上第一个区域尺度的、多节点、多传感器、多水深的综合性有缆海底观测网,而 VENUS 是近岸尺度的海底观测网,两者合并组建为国际上规模最大、技术最先进的综合性海底长期观测网——加拿大海底观测网。美国从 1996 年开始到目前已建成约 10 套海底有缆观测网,均有各自特定的科学目标,例如蒙特里加速研究系统(Monterey Accelerated Research System, MARS)海底观测网等。欧洲海底观测网(European Seafloor Observatory NETwork, ESONET)计划在北冰洋、大西洋、地中海和黑海等 10 个海区建立有缆海底观测网。我国海底观测网起步较晚,目前台湾地区已建成以海底地震及海啸预警为主要目标的水下观测网^[15],大陆地区已建成东海小衢山海底观测系统^[16]、东海摘箬山海底观测系统和南海海底观测网^[10, 17]。

现存的海底观测网均较好地实现了海洋环境的原位、长期、连续和实时观测,对于地球科学基础研究、地震和海啸等灾害预警均具有非常重要的科学意义和实践价值。但是海底观测网普遍存在建设和维护费用高昂、需要很多参与部门的协调分工、效率低下、管理复杂等问题^[4, 10],无法满足小区域不同领域的科学研究及海洋资源开发、海洋污染防治、海洋灾害预警、海上突发事件应急等社会服务的需求。因此设计研发一种建设方便易维护、经济性好,且能长期、稳定、连续、定点、实时观测海洋环境和安全运行的观测设备十分迫切。我们在多年技术创新和实际观测经验积累的基础上,研制完成一种新型的海底有缆在线观测系统,该系统不但充分继承了海底大型观测网的优点,而且易于建设维护、经济性好,可以依托沿岸观测站或者远海工程平台获取不同时间尺度的海洋水文、动力、生物、地质和化学等方面的观测数据,为不同领域的海洋科学研

究及社会服务提供强有力支撑。

1 海底有缆在线观测系统的设计与构成

1.1 系统构成

海底有缆在线观测系统的核心目的是实现海洋环境的原位、长期、连续和实时观测,同时兼顾观测设施的易建设、易维护、低成本和较好的安全性。为此,和国内外大型的海底观测网不同,海底有缆在线观测系统在设计上采用单节点,并使用电缆进行电力和信息的双向传输。在充分借鉴国家“863”海底观测网成熟技术的基础上,通过技术创新进一步提高了水下观测设备的能源供给和高带宽数据传输能力、优化了海底多元观测设备控制及数据采集性能,从而使整个系统在保留海底观测网实时性和稳定性等优点的基础上,具有更好的扩展性、适用性和经济性^[18]。按照功能划分,海底有缆在线观测系统主要由海底观测子系统、电力信息传输子系统和控制中心人机交互信息管理子系统三部分组成(图 1)。下面将分别介绍这三部分的构成和功能。

1.2 海底观测子系统

海底观测子系统是海底有缆在线观测系统的核心部分,是系统长期、连续、稳定、可靠运行的关键,负责海底观测仪器设备的集成搭载与数据采集控制、海底电缆的接入连接与安装固定。根据功能划分,海底观测子系统主要包含海底观测平台、海底观测设备传感器和多元数据采集控制单元等 3 部分(图 2)。

海底观测平台的功能主要是固定和保护各观测设备传感器和多元数据采集控制单元,是实现原位和长期连续观测的重要保障。因此,它的设计需要综合考虑多方面因素,例如防腐蚀、防拖曳、防倾斜、防淤泥、防生物附着等。为此,海底观测平台采用 316L 不锈钢制造,具有优异的耐腐蚀性,同时各类观测设备传感器与多元数据采集控制单元的安裝均采用尼龙夹座,并加装专门设计的牺牲阳极,进一步有效防止不同金属材质之间的电化学反应。平台框架总体尺寸约为 1.7 m×1.7 m×0.6 m,水中重量不小于 150 kg,呈四边三角锥状,底盘相对较大,外罩防拖网,无易钩挂结构,能够较好地减少底层海流的影响并避免渔网拖拉刮倒。质心和浮心配置合理,在姿态发生倾斜时会产生较大的回复力矩并保持平

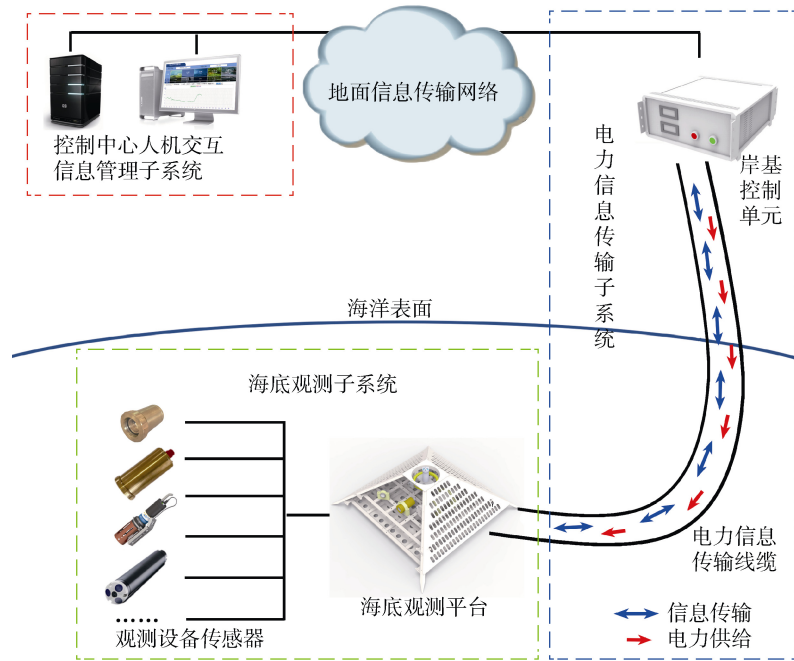


图 1 海底有缆在线观测系统构成图

Fig. 1 Schematic diagram of the submarine cable online observation system

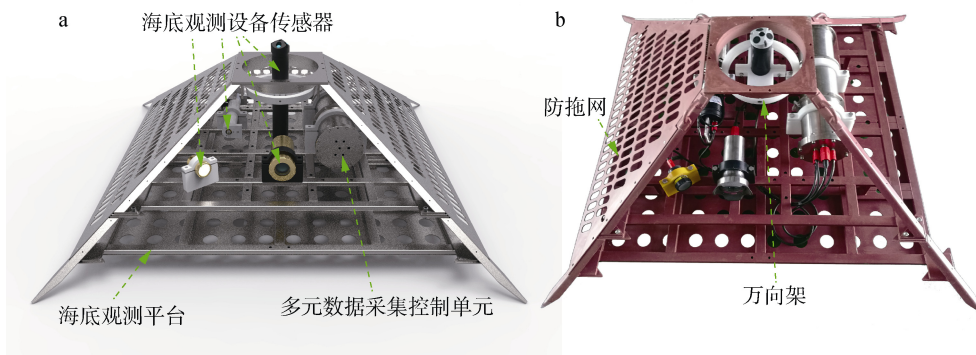


图 2 海底观测子系统效果图(a)和实物图(b)

Fig. 2 The design sketch (a) and physical map (b) of the submarine observation subsystem

注: 图 b, 红色材料为防生物附着涂层

稳, 从而使得系统具有良好的抗倾覆能力。平台框架共分上下两层, 独立设计, 上层用于安装各类观测设备传感器和多元数据采集控制单元, 并与下层相隔 20 cm, 可有效防止海底淤泥向上浸到上层从而影响观测设备传感器的数据采集。为了尽可能减少生物附着, 平台框架表面涂敷专门涂料。尽管如此, 随着使用时间的增加, 仪器和平台框架表面的生物附着依然会慢慢增强, 因此需要定期维护保养。平台框架上下两层的链接主要通过卡槽及螺栓, 上层各类设备安装孔可以调节并有预留, 从而大大提高了现

场组装效率和未来扩展能力。整体结构布局紧凑, 尺寸和重量较小, 因此无需大型船只和吊装装备即可完成现场布放。

海底观测平台可以根据科学研究和业务监测的实际需求安装固定不同类型的观测设备传感器, 例如多参数水质测量仪、声学多普勒测流剖面仪、叶绿素荧光计、浊度计、营养盐测量仪、高清摄像头等, 以实现海洋水文、动力、生化等环境参数和水下生物资源状况的长期、连续和实时观测。声学多普勒测流剖面仪或者其他测流设备通过万向架固定在

平台顶部,从而保证始终垂直向上观测海水的流速和流向剖面。此外,平台还可选装水下发光二极管(light emitting diode, LED)灯和腐蚀监测仪等辅助设备。水下 LED 灯可为水下高清摄像头提供充足光源,保证水下生物资源状况的视频质量。腐蚀监测仪可实时记录海底观测子系统海水腐蚀情况,以保证系统的正常稳定运行。

多元数据采集控制单元是海底观测子系统的核心组成部分,类似海底观测网的接驳盒^[3],一方面通过电力信息传输线缆连接岸基控制单元,另一方面连接各观测设备传感器,负责各观测设备传感器的电源供给和监测数据的采集、融合与传输,是保证系统整体长期稳定运行的重要关键(图 3)。所以如何设计多传感器集成控制方式与多元数据融合传输是一个核心问题,也是海底有缆观测的关键技术^[10]。在借鉴“863”海底观测网成熟技术的基础上,多元数据采集控制单元创新性地引进在其他行业已有广泛应用的控制器局域网络(controller area network, CAN)总线分布式集成、模块化控制技术,针对所搭载集成的设备传感器分别设计独立的 CAN 控制模块,实现各设备传感器的电源供给和数据采集。各模块之间相互隔离,既满足不同设备对功耗的差异化需求,又极大地降低了系统的耦合性,不会因为单台设备传感器的工作异常而影响系统整体稳定运行。鉴于 CAN 总线集成控制方式的优势,多元数据采集控制单元目前可扩展支持多达 32 个水下仪器接口模块,远远多于加拿大和美国等多节点海底观测网每个节点支持的水下仪器接口模块数^[3]。例如,加拿大的

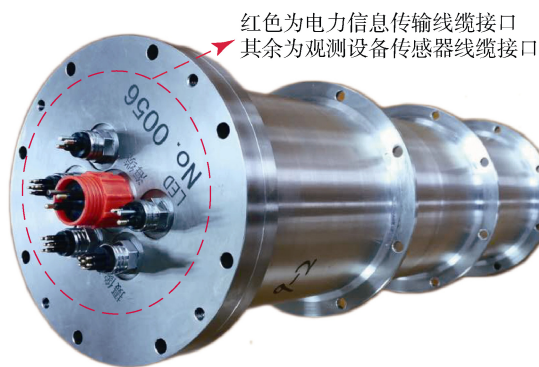


图 3 多元数据采集控制单元外观图

Fig. 3 Appearance of the multivariate data acquisition control unit

VENUS 和 NEPTUNE 海底观测网每个节点可支持的水下仪器设备分别为 8 个和 10 个^[3]。因此,我们研发的多元数据采集控制单元不但稳定、易维护,而且二次扩展性较强。其外壳采用钛合金材质,并加装专门设计的牺牲阳极,目前设计的工作水深为 600 m,使用寿命长达 10 年,从而保证在浅海大陆架区域具有较好的适用性。

1.3 电力信息传输子系统

电力信息传输子系统由岸基控制单元(图 4a)和电力信息传输线缆构成,其中岸基控制单元既是海底观测子系统的能源供给站,又是整个海底有缆在线观测系统的信息中转站。一方面,岸基控制单元通过接入市电或者太阳能电源为海底观测子系统持续提供电力,同时配备商业不间断电源(uninterrupted power supply, UPS),以避免电力突发中断。在海底有缆观测中,高压直流输电技术也是一项关键技术,需综合考虑海底观测子系统的用电需求和电力长距离传输产生的压降。海底观测子系统离岸距离越远,即线缆传输距离越长,供电需求越大。本文研发的岸基控制单元将输入电力转化为 380 V 直流输出,可满足离岸 10 km 以内海底有缆观测的需求。该直流输出电压远低于大型海底观测网主干直流输出电压。例如美国 MARS 海底观测网、加拿大 NEPTUNE 海底观测网和我国三亚海底观测网主干直流电压均为 10 kV^[5, 10, 19]。以上设计在有效解决海底观测节点长期稳定工作所需能源供给的同时亦极大降低了建设、运行和维护成本。另一方面,岸基控制单元通过无线或者有线方式接入地面信息传输网络(图 1)。海底观测数据首先通过电力信息传输线缆到达岸基控制单元,经过初步质控和存储备份后再经由地面网络传输至控制中心信息管理子系统进行存储、分析、展示和应用。同时,岸基控制单元也可经由地面网络接收控制中心发出的指令并传输给海底观测子系统,从而实时更改观测设备传感器的参数设置,以更好地满足科学研究和业务监测的需求。

电力与观测数据的在线传输也是海底有缆在线观测的关键技术^[8]。不管是国内外大型的海底观测网还是单节点海底有缆在线观测系统,电力信息传输线缆均是重要组成部分,需在复杂多变的海洋环境中实现电力和观测数据信息的长期、远距离、稳定传输。因此,电力信息传输线缆的设计需要综合考虑电力传输的压降、观测数据的传输速率及线缆整体

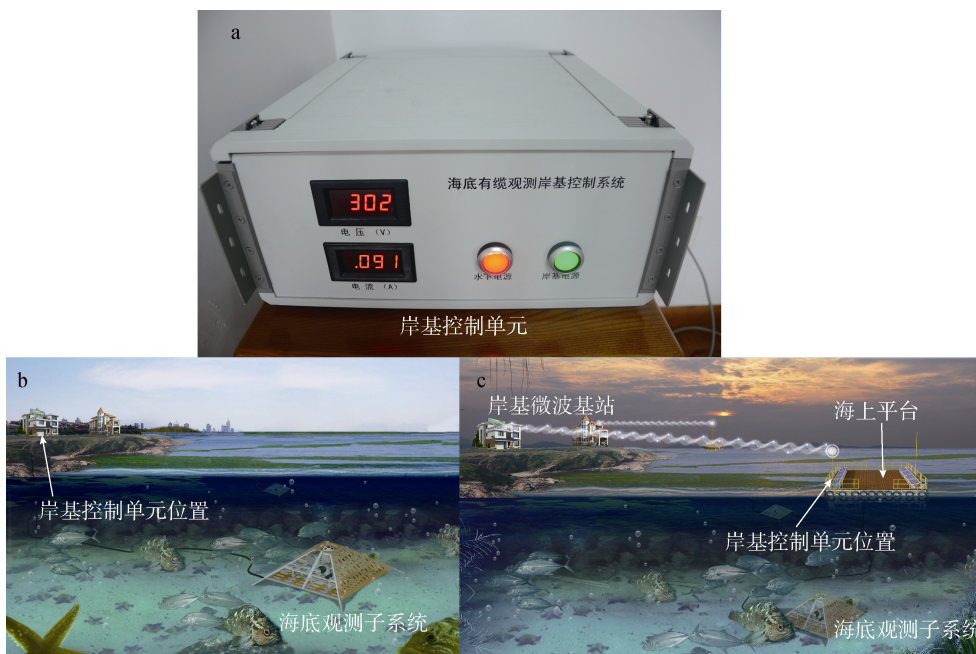


图 4 岸基控制单元实物图(a); 岸基控制单元位于陆地上的工作效果图(b); 岸基控制单元位于海上平台时使用微波中继的工作效果图(c)

Fig. 4 Photo of the shore-based control unit (a); design sketch when the shore-based control unit is located on land (b); design sketch when the shore-based control unit is located on offshore platform (c)

的抗破断力和耐磨性等不同因素。国际海底观测网的水下主干线缆早期采用同轴电缆^[11], 现在均为光电复合缆^[10]。为了降低经济成本, 海底有缆在线观测系统的电力信息传输线缆采用两芯电缆设计, 在实现电力传输的同时, 亦作为观测数据信息载波传输的媒介。因此, 海底有缆在线观测系统的实际应用距离亦取决于线缆长距离传输对数据信息传输速率的影响。现场试验和实际应用表明, 当传输距离在 10 km 时, 我们所用两芯电缆的供电功率仍可达 300 W、数据信息传输速率可达 5.6 Mbps, 能有效满足多元观测数据及水下高清视频的实时传输需求。电缆外加装了内外防护层和钢丝编织防护层, 使得线缆整体的抗破断力大于 20 kN, 并具有极好的耐磨性, 可在动力环境复杂的近海海域保持较长的使用寿命。

岸基控制单元通常位于无人值守但安全的岸基站, 并接入稳定市电和无线或者有线网络, 从而实现电力与观测数据信息的双向稳定传输(图 4b)。随着海底观测子系统布放位置离岸距离的增大, 电力信息传输线缆相应增长, 岸基控制单元直流输出电压和数据信息传输带宽亦要相应增大。因此, 当海底观测子系统布放位置离岸较远时, 为了降低成本,

岸基控制单元至地面网络的连接亦可采用海上平台微波中继的方式。如图 4c 所示, 依托海上平台放置岸基控制单元, 接入太阳能发电系统为海底观测子系统进行供电。岸基控制单元通过成熟的微波技术与岸基微波基站连接并进行数据信息传输, 岸基微波基站接入地面网络与控制中心连接。微波中继的方式在满足观测数据信息稳定传输的同时, 亦极大降低了建设和运行成本, 扩大了海底有缆在线观测系统的适用范围。

1.4 人机交互信息管理子系统

智能化是未来海洋观测发展的重要趋势之一。在海底有缆在线观测系统中, 控制中心的人机交互信息管理子系统是实现海洋观测与应用智能化的关键部分。借助一系列软件和大型数据服务器, 信息管理子系统不但可以实时接收、存储、分析和展示水下观测数据、生物活动高清视频, 还可以实时查看海底观测设备传感器的工作状态, 以保证观测设备的长期稳定运行(图 5)。人机交互设计可以实现用户对海底观测设备传感器的远程控制, 例如重新启动、更改观测参数设置等等, 以更好地满足多学科科学研究、业务监测和突发事件应急的需求。

在我国所有省份中,山东省最早开展了现代化海洋牧场的信息化建设,布局建设了具有世界先进水平的海洋牧场观测网。十多年前,大规模的近海养殖和过度捕捞,导致山东省海底“荒漠化”区域显著增大。为了改善海洋生态、养护渔业资源,山东省于 2005 年率先启动了“渔业资源修复行动计划”,实施以人工鱼礁、增殖放流为主的渔业资源修复行动^[23]。据不完全统计,截至 2017 年,山东省已扶持建设海洋牧场(人工鱼礁)项目 138 个,其中省级以上海洋牧场示范项目 55 个,取得了明显的生态、经济和社会效益。但同时,海洋生态灾害造成的生态和经济损失日益显著,如黄海冷水团异常导致虾夷扇贝产量骤降、夏季高温低氧导致刺参大

规模死亡等。

为了解决海洋牧场生态环境及渔业资源“测不准、看不见、不可控”等难题,山东省于 2015 年底启动了“海洋牧场观测网”建设项目。我们在山东省海洋局和原山东省海洋与渔业厅的指导下,为海洋牧场建设海底有缆在线观测系统,对海洋生态环境和渔业资源进行原位、长期、连续和实时在线监测^[24]。在观测系统建设的基础上,山东省还建设了海洋牧场岸基“四个一”配套工程:一室(监控室)、一厅(展示厅)、一院(研究院)和一馆(体验馆),构建了现代化海洋牧场智能监测体系。截至 2019 年,山东省海洋牧场观测网已覆盖 20 多个海洋牧场,业务化稳定运行达 4 年有余(图 6)。

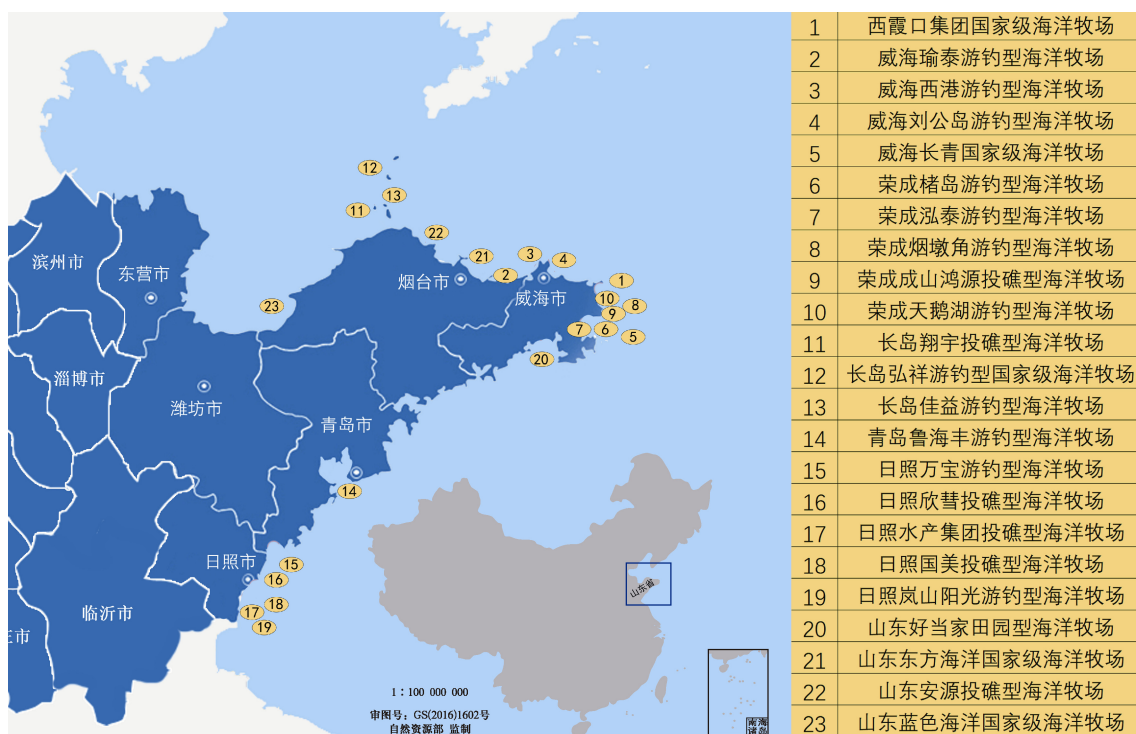


图 6 山东省海洋牧场观测网分布图(截至 2019 年)

Fig. 6 Distribution of the marine ranch observation network in Shandong Province (Up to 2019)

所有海洋牧场的海底有缆在线观测系统均集成安装了多参数水质仪、水下高清摄像头和 LED 灯,部分海洋牧场的观测系统还安装了声学多普勒流速剖面仪,不但实时在线观测海水温度、盐度、溶解氧、叶绿素、海水剖面流速和流向等环境参数,同时还可以实时播报水下生物的高清视频(图 5)。同时成立观测网数据中心,由我们负责海洋牧场观测网的日常运行、定期维护和数据产品的应用研发,每年编写观

测网运行报告。为了提高海洋牧场观测网的信息化和智能化水平,我们还开发构建了互联网网站和手机应用程序(application, APP),可实时展示所有海洋牧场的海底观测数据和水下高清视频,并为不同用户提供差异化服务。基于长期连续的观测数据,我们探讨了海洋牧场海水溶解氧生态模型^[25]、海洋生态及动力环境的时间变化规律及其影响机制^[26-29]等问题,特别是针对部分海域频发的低氧、赤潮等海洋生

态灾害开展了形成机理和预警预报技术研发。通过观测网的建设,山东省海洋牧场真正实现了海洋生态环境和生物资源的“可视、可测、可控、可预警、可评估”,为山东省现代化海洋牧场的生态环境安全保障、灾害预警预报、生物资源评估、生态承载力评估、管理决策等提供高质量数据支撑,为全国现代化海洋牧场的信息化建设树立了典范^[23]。

2.2 其他区域近海海洋环境监测

随着陆地资源的逐渐枯竭,人类社会开发和利

用海洋的活动日益增多,海洋环境的压力也日益严重,人类海上活动的安全保障、防灾减灾、海洋环境的保护与管理等已受到国际社会特别是沿海国家的广泛关注和高度重视。我国从 20 世纪 70 年代开始开展海洋环境监测,时至今日,已从最初的单一海洋环境污染监测发展为大面布局与功能区环境问题、防灾减灾、海上安全保障等相结合的监测^[30]。目前,除了构建山东省海洋牧场观测网之外,海底有缆在线观测系统还广泛应用于我国其他区域的近海海洋环境监测(图 7)。

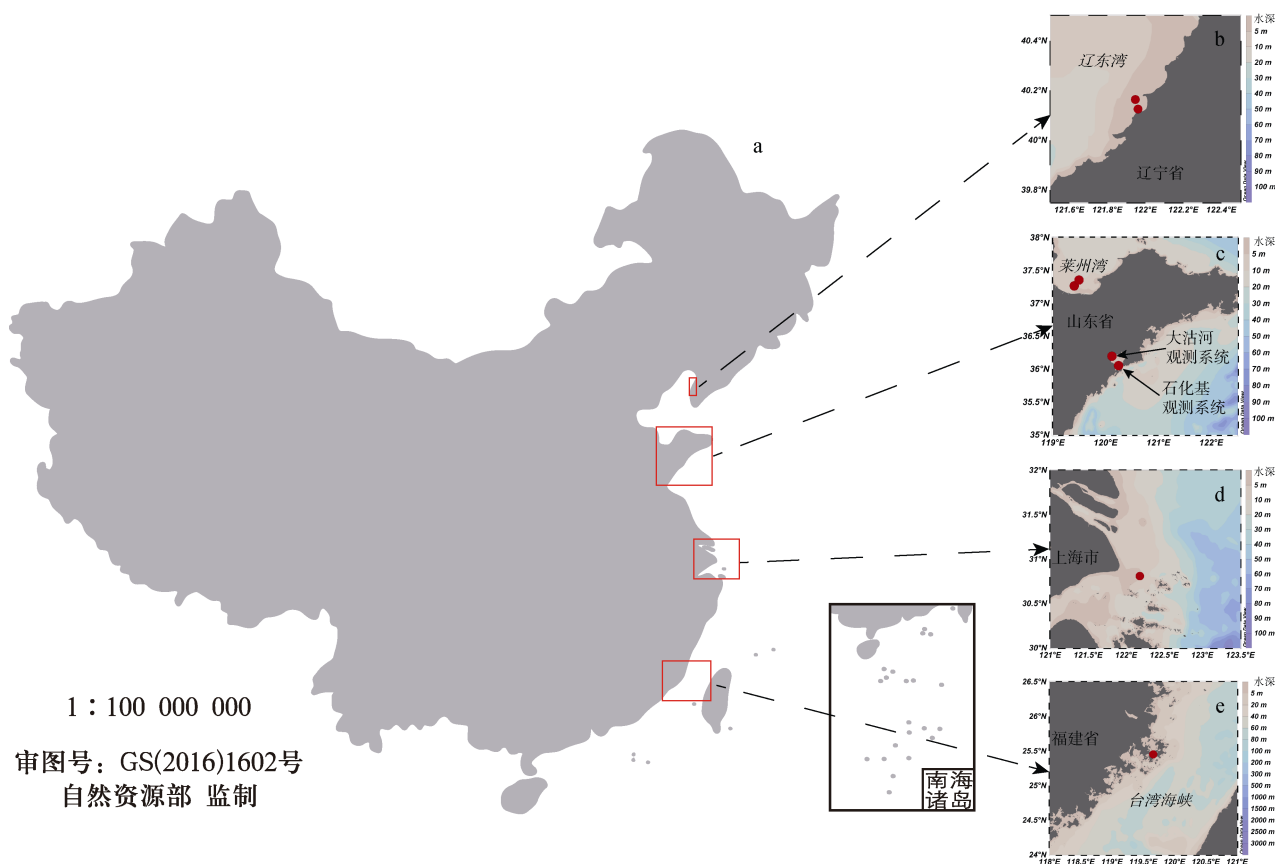


图 7 我国(a)、辽宁省(b)、山东省(c)、上海市(d)、福建省(e)近海海底有缆在线观测系统布放位置分布图(截至 2019 年)
Fig. 7 Spatial distributions of the submarine cable online observation systems in offshore areas of China (a), Liaoning Province (b), Shandong Province (c), Shanghai City (d), and Fujian Province (e) (Up to 2019)

2.2.1 辽宁省近海海洋环境监测

我国渤海辽东湾是海洋灾害的多发区和重灾区之一。自 1989 年我国第一次发布《中国海洋灾害公报》以来,统计数据显示风暴潮、海冰、海浪等海洋灾害已经给辽宁省造成了大量的直接经济损失、人员伤亡、养殖及农田淹没、海产品损失、海岸工程破坏和渔船损失等。海洋灾害已成为威胁辽东湾沿海人民生命财产安全、制约辽宁省海洋经济持续稳

定发展的重要因素之一。因此,对风暴潮、海冰、海浪等海洋灾害的预警预报和应急响应能力亟待提高。

2017 年 8 月,我们在辽宁省海洋环境预报与防灾减灾中心的指导下于营口市白沙湾海洋观测站附近海域布放了我国第一套基于海洋观测站的海底有缆在线观测系统并实现业务化运行(图 7b)。该观测系统集成安装了多参数水质仪和声学多普勒波浪流

速剖面仪,实现海水深度、温度、盐度、海水剖面流速和流向、海表面波浪等水文和动力环境参数的连续在线监测。冬季时,辽东湾海域冰情严重,传统的海洋环境观测手段面临许多实际困难、甚至无法开展。而海底有缆在线观测系统的海底观测平台位于海底,可最大限度避开冬季严重冰情的潜在威胁,从而实现海洋环境要素的全天候实时业务化观测。2019年12月,我们根据自然资源部北海预报中心的监测需求于该海域布放了第二套海底有缆在线观测系统(图7b),除了对海洋水文和动力等环境要素进行全天候实时观测外,还增加了对冬季海冰的业务化实时观测,结合数据分析可实现对海冰的短期预报。截至目前,两套海底有缆在线观测系统均业务化运行稳定,为该海域的海洋防灾减灾提供了高质量数据支撑和科学指导。我们还开发建设了互联网网站,可获取和展示历史及实时观测数据,极大提升了辽宁省海洋观测及灾害预警能力。

2.2.2 山东省近海海洋环境监测

除了海洋牧场观测网,我们还针对山东省海洋环境监测的不同需求分别于青岛市胶州湾海域和潍坊市莱州湾海域布放了共计4套海底有缆在线观测系统(图7c)。

(1) 青岛市胶州湾海洋环境在线监测

2011年,国务院批准实施了《山东半岛蓝色经济区发展规划》,山东半岛蓝色经济区建设由此上升为国家海洋发展战略和区域协调发展战略的重要组成部分,青岛市也成为蓝色经济区建设改革发展的试点城市。为此,青岛市发展和改革委员会组织编制了《青岛市蓝色经济区建设发展总体规划框架(2009—2015)》,强调建设海洋环境监测网络,保护和修复海洋生态环境,并增强海洋防灾减灾能力。在此基础上,青岛市于2014年出台了《青岛市胶州湾保护条例》,进一步要求强化监测网络建设,提高卫星航空遥感、远程视频以及在线自动监测能力。为了有效保护胶州湾及邻近海域的海洋生态环境,从而保障青岛市蓝色经济区和海洋生态文明示范区建设的顺利进行,青岛市于2015年正式启动“青岛市海洋环境在线监测系统建设”项目。我们根据青岛市海洋与渔业局的要求于2016年11月在胶州湾大沽河入海口布放了1套海洋环境海底有缆在线观测系统。大沽河是青岛市的“母亲河”,是汇入胶州湾的重要河流。大沽河海底有缆在线观测系统集成安装了多参数水质仪、声学多普勒波浪流速剖面仪和

国际先进的水下高光谱分析仪,除了对海水温度、盐度、水深、海水剖面流速和流向、海表面波浪、溶解氧、浊度、pH、叶绿素等常规的水文动力生态环境参数进行业务化实时在线监测外,还同时在线监测化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)、总有机碳(total organic carbon, TOC)、硝氮等海水化学环境参数。李兆钦等^[31]利用长期观测数据分析了大沽河入海口底层海水溶解氧浓度的时间变化特征和影响机制,并指出大沽河水质总体良好。

为了进一步强化胶州湾海洋环境的在线监测能力,同时保障青岛市“蓝色海湾”整治行动的顺利实施,我们在青岛市海洋与渔业局的指导下于2018年12月在石油石化工业园区附近海域布放了1套海底有缆在线观测系统。针对该海域潜在的溢油风险,观测系统集成安装了多参数水质仪、声学多普勒波浪流速剖面仪和多环芳烃传感器,在实时监测海洋常规水文动力生态环境参数的同时,亦在线监测水中油多环芳烃的浓度变化情况。

在海底有缆在线观测系统建设的基础上,我们还开发了互联网网站和手机APP。目前这两套观测系统均划归青岛市生态环境局管理,业务化运行稳定,为胶州湾海洋生态环境的治理与修复、海洋各类灾害预防预警等提供了高水平信息化支撑和科学指导。

(2) 潍坊市海洋牧场与海上风电融合区海洋环境在线监测

随着世界各国对能源安全、生态环境、气候变化等问题的日益重视,风电的发展和建设已成为国际社会推动能源转型发展、应对全球气候变化的重要手段。我国是海洋大国,海洋牧场和海上风电产业均是海洋经济的重要组成部分。杨红生等^[32]指出海洋牧场与海上风电融合发展是现代高效农业和新能源产业跨界融合发展的典型代表,是综合利用海洋空间、集约节约用海的创新思路,对推动新旧能源转换具有重要意义。

国外较早开始了海洋牧场与海上风电融合的研究与实践。2000年,以德国、荷兰等为代表的欧洲国家开始实施海上风电和海水增养殖结合的研究与实践。2016年,亚洲国家韩国开始开展海上风电与海水增养殖结合研究,实践表明海藻和双壳贝类等海洋经济生物在海上风电建设区有明显增加。而我国还未曾开展相关研究与实践^[32]。2019年初,山东

省政府印发实施了《山东省现代化海洋牧场建设综合试点方案》，明确提出在我国渤海和黄海组织开展海洋牧场与海上风电融合发展试验，将海上风电底座“鱼礁化”，通过比对试验，验证海上风电建设对海洋牧场生物行为和生物多样性的影响，以及两者兼顾发展的可能性。为此，我们于2019年5月在潍坊市莱州湾海洋牧场海域依托两处海上风电测风塔布放建设了两套海底有缆在线观测系统。因为海上风电测风塔离岸距离较远，所以岸基控制系统均安装于测风塔上并以微波中继的形式与岸上网络连接(图4c)。海底观测平台集成安装了多参数水质仪、声学多普勒流速剖面仪、水听器、水下高清摄像头和LED灯，实现了海洋水文动力生态环境参数、水下生物资源和水下噪声的业务化同步实时监测，为深入研究海上风电的建设和运行对海洋环境、初级生产力和海洋牧场生物等的综合作用机制提供了科学数据支撑，对客观评估海洋牧场与海上风电融合建设的科研、生态、经济和社会价值，健全海洋牧场与海上风电融合发展风险预警防控体系和应急预案机制等均具有重要意义。

2.2.3 上海市近海海洋环境监测

上海市地处长江入海口，南临杭州湾。所辖海域包含长江口的大部分和杭州湾北部，既有陆源河流输入，又受黑潮、台湾暖流等海流影响，其中长江为我国第一大河，其年径流量达9142亿 m^3 ，年均携沙量约为4.8亿t。同时，上海市是我国最大的工商业城市，其港口、航道、围填海、桥梁、风电等大型海洋(海岸)开发利用活动强度大，致使该海域成为我国近岸海域人类活动影响最大的区域之一。受河流径流、季风、潮流、近海和大洋环流、人类活动等共同影响，水文动力生态环境极其复杂。“十二五”期间每年的监测数据表明，上海市所辖海域海水无机氮和活性磷酸盐严重超标，水体富营养化严重，海水水质常年劣于四类水质，长江口生态监控区亦处于亚健康状况^[33]。

为了改善周边海域的海洋生态环境，上海市制订了海洋生态环境监测的年度工作计划，重点做好近岸水质和生态监控区的监测工作。为此，我们在上海市海洋环境监测预报中心的指导下于2019年9月在大轸山岛附近海域布放建设了海底有缆在线观测系统(图7d)。受长江径流和潮流的影响，目标海域海水动力较强、泥沙含量较高，因此观测系统集成安装了多参数水质仪、声学多普勒波浪流速剖面仪、大

量程浊度计、水下高清摄像头、水下LED灯等传感器设备，实现了海洋水质动力环境参数和水下高清视频的业务化实时监测。同时还进行了在线监测的信息化建设，开发建立了互联网网站和手机APP，极大提升了上海市海洋环境实时监测、实时评价、即时预警和动态管控能力，为海洋生态环境的治理与修复提供了强有力的数据支撑及技术保障，同时亦为进一步开展海洋环境的大规模在线监测提供示范和依据。

2.2.4 福建省近海海洋环境监测

福建省位于我国东南部，与东海和南海相接，隔台湾海峡与台湾岛相望，海岸线曲折，总长度居全国第二位，海域面积达13.6万 km^2 ，大于陆地面积。海洋经济发展条件得天独厚，因此在总的经济建设中占据重要地位。据统计，2000年时，海洋经济总产值占全省生产总值的11.7%，并居全国第三位^[34]；2015年时，海洋经济生产总值占全省生产总值的比重增至26.95%^[35]。但同时，受全球气候变化和人类活动等的影 响，该海域海洋灾害频发，主要有台风、风暴潮、巨浪、赤潮、溢油、海平面上升、海岸侵蚀等。随着海洋经济的快速发展，海洋灾害造成的损失也日益严重。谢欣等^[35]统计指出，在2009—2016年间，海洋灾害共造成直接经济损失高达181.48亿元，死亡(含失踪)人数高达70人，分别占全国的20.8%和11.46%，是我国海洋灾害的重灾区。

统计显示，给福建省造成损失比较大的海洋灾害主要是风暴潮、海浪和赤潮灾害。因此，加强海洋灾害的基础研究、建立健全防灾减灾的立体监测和预警预报体系已成为福建省发展海洋经济、建设“海洋强省”和“海洋经济大省”的重要内容。2014年4月，我国启动了“海洋减灾综合示范区”建设，福建省成为国家首批海洋减灾示范区建设省份之一^[36]。2019年，在已有海洋环境立体监测网的基础上，为了进一步提升海洋防灾减灾能力，我们根据福建省海洋预报台的监测需求于7月在平潭综合实验区附近海域布放建设了一套海底有缆在线观测系统(图7e)。该观测系统集成安装了多参数水质仪、声学多普勒波浪流速剖面仪、水下高清摄像头和LED灯，实现了该海域海洋水文动力生态环境参数和水下生物资源状况的全天候业务化在线观测。由于观测平台和电力信息传输线缆均位于海底，所以海底有缆在线观测系统能很好的避免该海域频发的大风、巨浪等海洋灾害的破坏，从而实现极端海洋灾害期间海洋动

力环境和生态环境的连续实时在线观测,为海洋灾害基础研究和预警预报体系建设提供高质量科学数据支撑。同时,该观测系统亦配备 1 台浅水声学释放器,结合甲板单元保障了海底观测平台的顺利布放和回收。

3 发展趋势与建议

作为海洋观测的第三大平台^[5, 9],海底有缆观测日益受到世界沿海各国的高度重视。随着相关科学技术的发展,近海海底有缆观测将呈现以下发展趋势。

(1) 实际应用表明,相比于国内外大型海底观测网,本文研发的海底有缆观测系统构造简单,易于建设、运行和维护,能以较低的经济成本摆脱传统海基和空基观测的局限,从而实现海洋环境多元参数的原位、长期、连续、稳定、实时和智能化观测,代表了近海业务化海洋在线观测技术领域的发展趋势,将来会更加广泛地应用到近海海域多学科科学研究和自然灾害、生物资源等的业务化在线监测中。

(2) 立体化、多元化和实时化是海洋科学观测发展的趋势。近海海洋科学研究和业务化监测亦需要组成多元、数据实时的智能化立体观测网。随着物联网和人工智能技术在海洋观测领域的广泛应用,海底有缆观测将会与传统的海基和空基观测系统互联,通过统一数据标准,形成覆盖近岸、区域等不同尺度的层次化、综合化与智能化的跨介质立体观测网络。

(3) 获取高质量数据是海洋观测的根本,而数据的深度挖掘则是进一步关心海洋、认识海洋、经略海洋的重要基础。随着海底有缆观测技术和跨介质立体组网技术的发展与应用,立体、多元、实时观测数据的增加速度将显著加快,未来将利用大数据、“互联网+”等多学科高新技术对观测数据进行深度挖掘,以更好地服务基础科学研究和海洋防灾减灾、资源开发利用等业务化工作的不同需求。

鉴于海底有缆观测的众多优势,国家在重视大型海底科学观测网建设的同时,亦应加大对近海海底有缆在线业务化观测的支持力度,进一步加强科研院所、业务化监测部门、企业之间的产学研联合互动,加强国际合作与交流,通过技术创新,针对不同海域的多学科基础研究、海洋生态系统、防灾减灾、海洋生物资源等不同监测需求研发差异化在线监测装备,并推广应用;突破近海跨介质立体组网

关键技术与装备,加强顶层协调和设计,综合海底有缆在线观测和其他传统海基、空基观测手段,集成建立智能化立体观测网络;深度挖掘大数据,通过海洋灾害形成机理、海洋生物与环境耦合特征机理等多学科基础研究深化对海洋的认识,开发高质量数据产品以满足人类不同海上活动的需求。

4 结语

本文系统总结了海底有缆在线观测系统的系统构成及研究应用。通过对在线观测的创新研究,海底有缆在线观测系统是业务化海洋观测技术领域里的一个崭新应用,真正实现了海洋环境及水下生物资源的实时在线“可测、可视”。

海底有缆在线观测系统为单节点,主要包含海底观测、电力信息传输和控制中心人机交互信息管理等三个子系统。海底观测子系统布放于海底,由海底观测平台、海底观测设备传感器和多元数据采集控制单元等部分组成,具有高度可扩展性,可根据监测需求集成安装常用的各类海洋观测仪器和水下高清摄像头,从而实现海洋环境和水下生物资源的长期、连续和实时业务化观测。电力信息传输子系统由岸基控制单元和电力信息传输线缆构成,负责海底观测子系统的能源供给和数据信息的双向传输。借助于控制中心的人机交互信息管理子系统,科研人员或者业务监测人员在陆地上不但可以实时接收、存储、分析和展示水下观测数据、生物资源高清视频,还可以实时查看海底观测设备传感器的工作状态,并发送指令对其进行远程控制,以更好地满足多学科科学研究、业务监测和突发事件应急的需求。

自 2015 年起,山东省开始利用海底有缆在线观测系统组网构建世界先进水平的“海洋牧场观测网”,至今已覆盖 20 多个海洋牧场,遍布山东半岛周边海域。在此基础上,通过硬件基础设施建设和软件开发,构建了现代化海洋牧场智能监测体系。海洋牧场观测网至今已业务化稳定运行 4 年有余,一定程度上解决了海洋牧场生态环境及渔业资源“测不准、看不见、不可控”的难题,为全国现代化海洋牧场的信息化建设树立了典范。此外,海底有缆在线观测系统还被应用于辽东湾冬季海冰、海上风电建设区生态环境和生物资源、河流入海口水质、溢油、泥沙悬浮物、海洋灾害等的业务化监测中,为海洋生态环境保护与修复、海洋资源开发利用、海洋防灾减灾等

提供了高质量的科学数据支撑。自建成之日起,我们均按照要求对这些观测系统进行维护,以保障它们的业务化稳定运行。这些应用表明,相比于国内外大型海底观测网,海底有缆在线观测系统构造简单,易于建设、运行和维护,扩展性强,能以较低的经济成本实现海洋环境多元参数的原位、长期、连续、稳定、实时和智能化观测,在近海区域的多学科科学研究和业务化监测中具有很好的适用性。

海底有缆在线观测系统是业务化海洋在线观测技术领域里的创新研究,亦代表了国内外近海业务化海洋在线观测技术领域的发展趋势。国家应加大对近海海底有缆在线业务化观测的支持力度,通过科研院所、业务化监测部门、企业之间的产学研联合互动,加强技术创新和装备研发,综合海底有缆在线观测和传统的海基与空基观测手段,构建我国近海跨介质立体智能化观测网络,并深度挖掘大数据,为我国近海多学科基础研究和各类海上活动提供更好的数据产品,为我国海洋强国战略的顺利实施保驾护航。

参考文献:

- [1] 李健, 陈荣裕, 王盛安, 等. 国际海洋观测技术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.
- [2] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2401-2414.
Wang Bo, Li Min, Liu Shixuan, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2401-2414.
- [3] 陈建冬, 张达, 王潇, 等. 海底观测网发展现状及趋势研究[J]. 海洋技术学报, 2019, 38(6): 95-103.
Chen Jiandong, Zhang Da, Wang Xiao, et al. Research on the State-of-the-Art and Trends of seafloor observatory[J]. Journal of Ocean Technology, 2019, 38(6): 95-103.
- [4] 陈鹰. 海洋观测方法之研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 182-188.
Chen Ying. On the ocean observing methodology[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 182-188.
- [5] 李风华, 路艳国, 王海斌, 等. 海底观测网的研究进展与发展趋势[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 321-330.
Li Fenghua, Lu Yanguo, Wang Haibin, et al. Research progress and development trend of seafloor observation network[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 321-330.
- [6] 刘长华, 张曙伟, 王旭, 等. 三锚式浮标综合观测平台的研究和应用[J]. 海洋科学, 2020, 44(1): 148-156.
Liu Changhua, Zhang Shuwei, Wang Xu, et al. Research and application of three-anchor buoy integrated observation platform[J]. Marine Sciences, 2020, 44(1): 148-156.
- [7] 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. Initial establishment of China's scientific observing network in Western Tropical Pacific Ocean[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 258-263.
- [8] 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 a deep-sea scientific observation network in the western Pacific[J]. Oceanologia et Limnologia Sinca, 2017, 48(6): 1471-1479.
- [9] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志, 2007, 29(3): 125-130.
Wang Pinxian. Seafloor observations: The third platform for Earth System observation[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(3): 125-130.
- [10] 朱俊江, 孙宗勋, 练树民, 等. 全球有缆海底观测网概述[J]. 热带海洋学报, 2017, 36(3): 20-33.
Zhu Junjiang, Sun Zongxun, Lian Shumin, et al. Review on cabled seafloor observatories in the world[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(3): 20-33.
- [11] Suyehiro K, Mikada H, Asakawa K. Japanese seafloor observing systems: Present and Future[J]. Marine Technology Society Journal, 2003, 37(3): 102-114.
- [12] 马伟锋, 崔维成, 刘涛, 等. 海底电缆观测系统的研究现状与发展趋势[J]. 海岸工程, 2009, 28(3): 76-84.
Ma Weifeng, Cui Weicheng, Liu Tao, et al. Present status and development tendency of submarine cable-connected observation system[J]. Coastal Engineering, 2009, 28(3): 76-84.
- [13] 汪品先. 海洋科学和技术协同发展的回顾[J]. 地球科学进展, 2011, 26(6): 644-649.
Wang Pinxian. Coupled development in marine science and technology: A retrospect[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(6): 644-649.
- [14] 吴自军, 周怀阳. 加拿大海底科学长期观测网的研究进展[J]. 工程研究, 2016, 8(2): 131-138.
Wu Zijun, Zhou Huaiyang. Research Advances of Ocean Networks Canada[J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 131-138.

- [15] Chen G Y, Liu C C. Evaluating the location of Tsunami sensors: Methodology and Application to the northeast coast of Taiwan[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences Journal*, 2009, 20(4): 563-571.
- [16] 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等. 东海海底观测小衢山试验站[J]. *科学通报*, 2011, 56(22): 1839-1845.
Xu Huiping, Zhang Yanwei, Xu Changwei, et al. Coastal seafloor observatory at Xiaoqushan in the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(22): 1839-1845.
- [17] 张伙带, 张金鹏, 朱本铎. 国内外海底观测网络的建设进展[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(11): 64-70.
Zhang Huodai, Zhang Jinpeng, Zhu Benduo. World progress of undersea observation networks[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(11): 64-70.
- [18] 陈栋, 李欣, 李培良. 基于观测网的海底动力环境监测系统的设计与实现[J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(2): 21-26.
Chen Dong, Li Xin, Li Peiliang. Design and implementation of the seabed dynamic environment monitoring system based on ocean observing network[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(2): 21-26.
- [19] Barnes C R, Best M M R, Johnson F R, et al. Challenges, benefits, and opportunities in installing and operating cabled ocean observatories: Perspectives from NEPTUNE Canada[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2013, 38(1): 144-157.
- [20] 陈勇. 中国现代化海洋牧场研究与建设[J]. *大连海洋大学学报*, 2020, 35(2): 147-154.
Chen Yong. Research and construction of modern marine ranching in China[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, 35(2): 147-154.
- [21] 杨红生, 霍达, 许强. 现代海洋牧场建设之我见[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(6): 1069-1074.
Yang Hongsheng, Huo Da, Xu Qiang. Views of modern marine ranching[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(6): 1069-1074.
- [22] 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. *水产学报*, 2019a, 43(4): 1255-1262.
Yang Hongsheng, Zhang Shouyu, Zhang Xiumei, et al. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019a, 43(4): 1255-1262.
- [23] 刘一霖, 林国尧, 宋长伟, 等. 山东省海洋牧场建设对海南省的启示[J]. *中国渔业经济*, 2019, 37(4): 62-66.
Liu Yilin, Lin Guoyao, Song Changwei, et al. Inspiration of marine ranching construction in Shandong Province[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2019, 37(4): 62-66.
- [24] 王志滨, 李培良, 顾艳镇. 海洋牧场生态环境在线观测平台的研发与应用[J]. *气象水文海洋仪器*, 2017, (1): 13-17.
Wang Zhibin, Li Peiliang, Gu Yanzhen. Development and application of the online observation platform for the ecological environment of marine ranching[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2017, (1): 13-17.
- [25] 孟鑫, 王冬, 李培良, 等. 海洋牧场溶解氧生态模型初探[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(5): 120-126.
Meng Xin, Wang Dong, Li Peiliang, et al. Preliminary study on the DO Eco-Model in the Ocean Ranch[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36(5): 120-126.
- [26] 陈耀祖, 高磊, 刘子洲, 等. 山东半岛海洋牧场潮汐特征分析[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(4): 719-727.
Chen Yaozu, Gao Lei, Liu Zizhou, et al. Tidal characteristics of marine pastures around Shandong Peninsula[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(4): 719-727.
- [27] 李兆钦, 李欣, 孙利元, 等. 刘公岛海洋牧场底层海水溶解氧浓度的变化特征[J]. *海洋与湖沼*, 2019a, 50(1): 86-99.
Li Zhaoqin, Li Xin, Sun Liyuan, et al. Analysis of the temporal variations of dissolved oxygen concentration in seawater in the bottom of the Liugong Island Marine Pasture[J]. *Oceanologia ET Limnologia Sinica*, 2019a, 50(1): 86-99.
- [28] 刘鹏霞, 刘子洲, 宋新, 等. 鲁海丰海洋牧场流场特征分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2019, 49(8): 10-18.
Liu Pengxia, Liu Zizhou, Song Xin, et al. Analysis of the current characteristics in Luhai Feng Marine Ranch[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(8): 10-18.
- [29] 刘禹铨, 刘子洲, 顾艳镇, 等. 威海市天鹅湖海洋牧场底层海水溶解氧浓度时间变化特征[J]. *海洋科学*, 2019, 43(9): 41-53.
Liu Yucheng, Liu Zizhou, Gu Yanzhen, et al. Feature research for temporal variability of the bottom water dissolved oxygen concentration in the marine ranch of Swan Lake, Weihai[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(9): 41-53.
- [30] 李潇, 许艳, 杨璐, 等. 世界主要国家海洋监测情况及对我国的启示[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(3): 474-480.
Li Xiao, Xu Yan, Yang Lu, et al. Marine environmental monitoring in major countries of the world and its enlightenment to China[J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(3): 474-480.
- [31] 李兆钦, 李欣, 孙利元, 等. 大沽河口底层海水溶解氧浓度分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2019b, 49(9): 23-33.
Li Zhaoqin, Li Xin, Sun Liyuan, et al. Analysis of the dissolved oxygen concentration in bottom of seawater in the Estuary of Dagu River[J]. *Periodical of Ocean*

- University of China, 2019b, 49(9): 23-33.
- [32] 杨红生, 茹小尚, 张立斌, 等. 海洋牧场与海上风电融合发展: 理念与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019b, 34(6): 700-707.
Yang Hongsheng, Ru Xiaoshang, Zhang Libin, et al. Industrial convergence of marine ranching and offshore wind power: Concept and Prospect[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019b, 34(6): 700-707.
- [33] 伦凤霞, 田华, 何金林. 上海市海洋环境监测现状研究[J]. 海洋开发与管理, 2017, (1): 97-100.
Lun Fengxia, Tian Hua, He Jinlin. The status of marine environmental monitoring in Shanghai[J]. Ocean Development and Management, 2017, (1): 97-100.
- [34] 黄发明, 欧阳芳. 福建沿海主要海洋灾害与防灾减灾对策[J]. 福建地理, 2002, 17(1): 15-18.
Huang Faming, Ou Yangfang. The main marine disasters and its prevention and mitigation in Fujian coast[J]. Fujian Geography, 2002, 17(1): 15-18.
- [35] 谢欣, 陶爱峰, 张尧, 等. 福建省典型海洋灾害时空分布特性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2018, (4): 21-30.
Xie Xin, Tao Aifeng, Zhang Yao, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of typical marine disasters in Fujian Province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018, (4): 21-30.
- [36] 陈新平, 曾银东, 李雪丁, 等. 海洋灾害应急管理体系研究——以连江海洋减灾综合示范区为例[J]. 海洋开发与管理, 2019, (3): 38-44.
Chen Xinping, Zeng Yindong, Li Xueding, et al. Emergency management system of marine Hazards: A case study of the Lianjiang comprehensive demonstration zone against Marine Disasters[J]. Ocean Development and Management, 2019, (3): 38-44.

Review of the research and application of the submarine cable online observation system

ZHAI Fang-guo¹, LI Pei-liang², GU Yan-zhen¹, LI Xin¹, CHEN Dong², LI Lin¹,
SUN Li-yuan³, LIU Zi-zhou¹, JIANG Qing-yan², WU Wen-fan¹

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 3. Shandong Hydrobios Resources Conservation and Management Center, Yantai 264000, China)

Received: Mar. 31, 2020

Key words: submarine cable observation; ocean environment; submarine observation network; online monitoring; disaster prevention and mitigation

Abstract: High-quality ocean observational data is an important foundation for safeguarding national security and rights, ensuring human survival and sustainable development, responding to global climate change, developing and utilizing marine resources, preventing and mitigating disasters, and so on. With the development of submarine observational technologies, cable observation has become a third platform for earth monitoring. Based on the mature technologies of submarine observation networks at home and abroad, a single-node cable online observation system has been designed and developed. It includes three subsystems: submarine observation, power and information transmission, and onshore human-machine interactive information management. According to the monitoring needs, various instruments and underwater high-definition cameras can be integrated to conduct in-situ, long-term, continuous, and stable online observation of the marine environment and underwater biological resources. The submarine cable online observation system has a simple structure, strong expandability, and low economic cost. Therefore, it has been used to construct the Marine Ranch Observation Network in Shandong Province to operationally monitor the marine ecological environment and fishery resources. It has also been widely applied for online monitoring of winter sea ice in Liaodong Bay, fusion effects of marine ranches and offshore wind power development, water quality at river estuaries, and oil spills at sea. These online observations provide continuous, high-quality scientific data for marine ecological and environmental protection and restoration, resource development and utilization, and disaster prevention and mitigation. The submarine cable online observation system is an innovative research development in the field of commercial ocean online observational technology, and carries important scientific significance and broad application prospects.

(本文编辑: 丛培秀)