

[引用格式] 宋雨泽, 李红志, 乔正明, 等. 有缆海底观测系统进展及发展建议 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(1): 121-127.

有缆海底观测系统进展及发展建议

宋雨泽^{1,2,3}, 李红志^{1,2*}, 乔正明¹, 薛彩霞^{1,2}, 李超^{1,2}, 赵文璇¹

(1. 国家海洋技术中心, 天津, 300112; 2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室, 天津, 300112; 3. 天津大学 建筑工程学院, 天津, 300072)

摘要: 有缆海底观测系统具备长期、原位、在线观测的技术优点, 在海洋基础科学研究、资源与能源勘探开发利用、海洋灾害预报预警、海洋环境保护、航海与军事海洋环境保障等方面有广泛应用。阐述和总结了国内外有缆海底观测系统发展现状, 分析了有缆海底观测系统关键技术、应用场景和数据衍生服务, 从有缆海底观测系统顶层设计、创新发展、差异化研发, 以及拓展有缆海底观测数据应用领域等方面提出了未来发展的具体建议, 以期对我国海底观测系统的发展提供有益的借鉴。

关键词: 有缆海底观测; 海洋环境; 在线监测; 高质量观测数据

中图分类号: U665; P715.5

文献标识码: R

文章编号: 2096-3920(2023)01-0121-07

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2022-0091

Progress and Development Suggestions of Cabled Seafloor Observation System

SONG Yu-ze^{1,2,3}, LI Hong-zhi^{1,2*}, QIAO Zheng-ming¹, XUE Cai-xia^{1,2}, LI Chao^{1,2}, ZHAO Wen-xuan¹

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. Key laboratory of Ocean Observation Technology, Ministry of National Resources, Tianjin 300112, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The cabled seafloor observation system possesses the technical advantages of long-term, in-situ, and online monitoring, and it has been widely used for basic marine scientific research, exploration, development and utilization of resources and energy, marine disaster forecasting and warning, marine environmental protection, navigation, and military marine environmental protection. The development status of the cabled seafloor observation system at home and abroad is described and summarized, and analyses of the key technologies, application scenarios, and data derivative services of the cabled seafloor observation system are presented. Specific suggestions for future development are proposed in terms of top-level design, innovative development, differentiated research, and development of the cabled seafloor observation system, as well as expanding the application field of cabled seafloor observation data, so as to provide a useful reference for the development of the seafloor observation system in China.

Keywords: cabled seafloor observation; marine environment; online monitoring; high-quality observation data

0 引言

有缆海底观测系统是将海洋观测监测调查仪器安装在海底, 采用海底光电复合缆(电缆)向海底

观测系统供应电能和收集信息, 实现对海洋环境全天候、长期、连续的自动观测。有缆海底观测系统观测范围包括海底地壳深部、海底表面、海水水体及海面, 观测内容涉及物理、化学、地质和生物

收稿日期: 2022-12-08; 修回日期: 2023-01-01.

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC3104600)。

作者简介: 宋雨泽(1986-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为海底观测系统研发。

* 通信作者简介: 李红志(1975-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为海洋观测。

水下无人系统学报 sxwrxtb.xml-journal.net

121

等多学科领域,该系统可应用于海洋基础科学研究、资源与能源勘探开发利用、海洋灾害预报预警、海洋环境保护以及航海与军事海洋环境保障等领域,为科研和生产提供资源与能源的开发与利用,为海洋预报、海洋防灾减灾、海洋科学理论重大突破提供试验平台和技术支撑^[1]。

有缆海底观测系统利用光电复合缆(电缆)传输电能和获取海洋环境数据信息,可将各种海洋观测、监测、调查仪器设备联网进行数据汇集,其功能打破了传统海床基观测系统、潜标观测系统、移动观测系统受制于能源和通信限制不能长时序获取海洋数据的劣势,实现了海洋环境长期、实时、连续的原位观测^[2-4]。有缆海底观测系统在大规模组网传感器后,即组成了复杂的海底观测网络。海底观测网络的提出和实施,使得大范围、长时间、连续、立体的海洋观测成为可能,为深入了解地球内部的地质演变过程、海洋宏观尺度物理化学变化、地震监测、海啸预报等科学研究提供了一种全新的研究途径^[5-7]。

1 有缆海底观测系统组成

典型的有缆海底观测系统组成如图1所示,由岸基站、光电复合缆(电缆)、主接驳盒、次接驳盒和科学仪器平台组成。

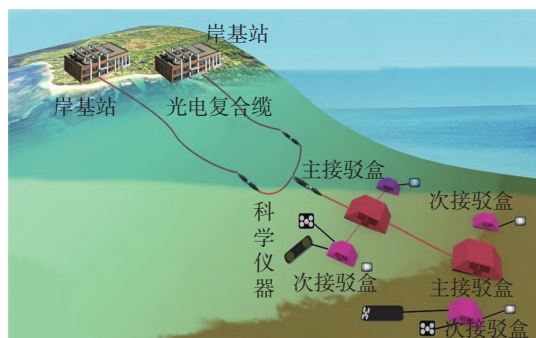


图1 有缆海底观测系统组成

Fig. 1 Composition of cabled seafloor observation system

1.1 岸基站

岸基站负责海底观测系统的供电、电能管理、数据汇集处理、状态显示和存储分发。岸基站配备直流电源,可将交流动力电转换为海底观测系统需要的高压直流电,并通过海底光电复合缆(电缆)传输至水下主接驳盒,为主次接驳盒及其前端

传感器供电。岸基站配备有电能监控系统,可实时监控海底观测网各设备的电流和电压,及时发现并隔离故障。部署在岸基站服务器上的软件系统具备分析处理观测数据、存储和数据发布功能^[8]。

1.2 光电复合缆(电缆)

光电复合缆(电缆)负责水下电能传输和数据通信,是有缆海底观测系统和整个海底观测网的“血管”和“神经”^[9]。通常情况下,深远海底观测网海缆必须采用光电复合缆来实现数据通信和电能传输,而近岸海底观测网也有应用光电复合缆或电缆来实现数据通信和电能传输的功能。

1.3 接驳盒

接驳盒是有缆海底观测系统水下部分的核心,具备中继和电能分配功能,按照电能变换层级可以将接驳盒划分为主接驳盒和次接驳盒。一般来说,受限于水下光电连接器造价较高、电磁干扰影响接驳盒控制系统等因素,光电复合缆在进入主接驳盒前往往需要先进行光电分离^[10],将光纤和电缆分开,光电分离后的缆线通过光电分离舱的后盖,水密光、电连接器分别与主接驳盒连接。主接驳盒将岸基站供电电源的高压直流电转换为次接驳盒的输入电压,通过主接驳盒电水密连接器和电水密电缆与次接驳盒连接,实现电能和数据的传输。通常情况下,一般采用水下遥控机器人(remote operated vehicle, ROV)通过插拔水密连接器实现主、次接驳盒的连接。次接驳盒的主要功能是中继和分配,通过次接驳盒将主接驳盒输送过来的电能转换为适用于科学传感器的电压。应用区域分布较广的有缆式海底观测系统在主接驳盒或海缆中会配备中继器和分支器,用于海底数据通信信号放大和海底观测系统分支。

1.4 科学仪器平台

科学仪器平台可以根据应用领域搭载观测、监测、调查、物探和生物化学科学传感器,如声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)、波潮仪、温盐深传感器(conductive-temperature-depth, CTD)、海底地震仪(ocean bottom seismometer, OBS)、多参数水质仪、声呐以及水下显微成像仪等,科学仪器平台通过水密电缆与次接驳盒连接,实现了各类数据、图像和视频的实时连续观测。

2 国外发展现状

世界各国对于海底观测的重视程度逐渐加强,自20世纪八九十年代开始,美国、加拿大、日本、欧洲等发达国家和地区先后投入大量经费建设海底观测系统。海底观测系统也从有缆海底观测试验系统逐步发展为区域海底观测网络、大型海底观测网络,由单一的海啸、地震、水文观测要素逐渐扩展为物理、化学、生物、地球物理和地质等多要素综合观测,兼顾科学研究和军事海洋领域应用。如近年来建成的美国海洋观测计划(ocean observation initiative, OOI)体系下的区域海底观测网,加拿大海洋观测网(ocean networks Canada, ONC)、日本海沟海底地震海啸观测网(seafloor observation network for earthquakes and tsunamis along the Japan Trench, S-net)均属区域性海底观测网。

2.1 美国 OOI

2016年,美国 OOI 全面建成使用,包括区域网(regional scale nodes, RSN)、近岸网(coastal scale nodes, CSN)、全球网(global scale nodes, GSN)三大部分。其中 RSN 为最主要的一部分,为有缆式海底观测网,RSN 投资金额接近1.5亿美元,位于东太平洋胡安·德富卡板块(Fuan de Fuca),定位为板块尺度观测网,主要针对观测水圈、海气界面和海底生物圈的各种过程。该系统由华盛顿大学负责运行,光电复合缆总长度900 km,配备7个海底主接驳盒,布设于3 000 m水深位置,每个海底主接驳盒功率为8 kW^[11]。

2.2 日本 S-net

继地震海啸密集海底网络系统(dense ocean-floor network system for earthquakes and tsunamis, DONET)后,日本于2015年建成了S-net,该观测网总长度5 700 km,为直流恒流供电模式,由6大系统组成,每个观测系统包括800 km海缆和25个地震海啸观测点,每个观测系统由2个岸基站进行供电和数据接收。该系统的布设加强了日本对地震和海啸的预警能力^[12-15]。

3 国内发展现状

国内有缆海底观测系统的研发自本世纪初开始起步,典型的以同济大学东海小衢山海底观测系统、浙江大学摘箬山岛海底观测系统、中国科学

院声学研究所南海海底观测网试验系统、台湾东部海域电缆式海底地震仪及海洋物理观测系统建设计划(marine cable hosted observatory, MACHO)等近岸小型海底观测系统为代表。随着有缆海底观测系统技术日趋成熟,我国在2017年适时启动了“国家海底科学观测网项目”,在我国东海和南海构建大型海底科学观测网,以提升我国海洋科学基础研究能力。

3.1 同济大学海底观测网

2009年,同济大学在东海小衢山建立了中国第1个海底有缆试验站,位于洋山国际深水港东南约20 km的小衢山岛附近。试验站采用双层铠装海底光电复合缆连接水密接插头,实现能源自动供给和通信传输等。利用安装在海洋平台上的光伏电池为试验站提供不间断的能源供应。现场海洋观测数据通过光电复合缆传输到平台后,经码分多址(code division multiple access, CDMA)无线网络实时发送到实验室服务器^[16-17]。2017年,由同济大学牵头的“国家海底科学观测网项目”^[18]正式立项,该项目计划在我国东海和南海关键海域建设基于光电复合缆连接的海底科学观测网,实现对我国边缘海典型海域从海底到海面全方位、综合性、实时的高分辨率立体观测^[19-21]。

3.2 台湾 MACHO 海底地震及海洋物理观测系统

2011年,台湾地区建成MACHO海底地震及海洋物理观测系统,该系统在宜兰县向东南外海铺设了1条全长45 km的海底光电复合缆,并在约300 m深的海底设置1个科学观测节点,连接OBS、海啸压力计、CTD与水听器 etc 仪器设备,加强地震与海啸活动的监测,并长期提供海洋科学观测数据^[22]。

3.3 南海海底观测网试验系统

2016年,中国科学院声学研究所南海海域建成了南海海底观测网试验系统,通过光电复合缆为深海观测平台提供能源供给和通信传输链路,实现南海区域海底环境多参数实时、连续观测。海底观测系统离岸距离约200 km,搭载CTD与ADCP,可实时采集观测数据^[23-24]。

3.4 中国海洋大学海洋牧场有缆海底观测系统

近年来中国海洋大学组织研制了单节点式有缆海底观测系统,该系统主要依托海洋牧场养殖

平台开展近距离海洋环境在线监测,具备水质、温盐以及视频摄像等要素的在线观测能力,并在山东省多个海洋牧场进行了示范应用。通过获取的水下牧场图像为渔业养殖提供技术支持,在海洋牧场水质监测与渔业灾害防治领域起到了科学示范作用^[25]。

3.5 国家海洋技术中心蓬莱近岸海底观测系统

2007 年以来,国家海洋技术中心在国家“863”计划、国家海洋公益性行业科研专项、海洋可再生能源专项支持下,开始研制有缆海底观测系统。从初期短距离直流 60 V 供电的单节点模式,逐步发展到 220 V 交流输电和 375 V 直流输电双节点(类主、次接驳盒)并与海床基观测平台组网模式,由双节点组网模式逐渐发展为多节点海底接驳盒(主、次接驳盒)组网。2018 年,国家海洋技术中心在国家海洋公益性行业专项的支持下,在山东蓬莱近海海域建立了水下长期在线生态环境定量监测系统。该系统由 1 套主接驳盒和 2 套次接驳盒组成了一整套海底环状观测网络。系统挂载了水文、水质、地震以及视频观测等多源传感器,并对单极负压供电技术、电能转换及状态监控、海底接驳等关键技术进行了试验验证。经过多年的发展基本具备了有缆海底观测系统研发及组网能力。

4 国内外技术进展对比

目前,美国、加拿大、日本等西方国家均已建成并运行有区域级海底观测网,组网了大量的多源传感器,并在离岸千米级公里开展了业务应用。国内海底观测系统研发起步虽然较晚,但经过十余年的发展,已逐渐由单一海底观测系统发展至系统组网,在一定程度上已经具备了组网海底观测系统的能力,并启动了区域级海底观测网的建设工作。但在技术发展过程中,也存在一定的差距,如亟需突破高精度、高稳定性的海洋传感器和水下湿插拔连接器等关键核心技术,国内外主要技术进展比较见表 1。

5 有缆海底观测系统关键技术分析

从有缆海底观测系统功能组成来看,系统包括岸基站、光电复合缆、接驳盒(主、次)和科学仪器集成平台,系统开发过程中涉及到供电技术、接驳盒结构设计、状态监控及故障诊断隔离技术、信息

表 1 国内外有缆海底观测技术进展对比

Table 1 Comparison of cabled seafloor observation technology progress at home and abroad

项目类别	国外	国内
长期运行	美国、加拿大、日本已实现长期运行	暂无
结构复杂度	复杂	中等
通信方式	光电复合缆、电缆、同轴电缆	光电复合缆、电缆、同轴电缆
离岸距离	500~1 000 km	较短
可实现的观测任务	地震、海啸、水文等多要素在线观测	具备大规模组网能力
观测范畴	强大	适中
功能	强大	适中
关键技术突破情况	已突破	部分高精度、高可靠性水下传感器、湿插拔水密连接器依靠进口
观测设备数量	大量	中等
定义	区域级大型观测网	近岸近海应用较多,区域网在建
数据应用	多学科数据融合	现阶段较单一

传输与管理等关键技术。

5.1 供电技术

现阶段,海底观测系统在国际上通用的是单极负压直流供电模式。采用此种供电方式原因如下:岸基站通过光电复合缆对海底接驳盒进行供电,传统的输电形式分为交流系统和直流系统。相比直流输电,长距离交流输电中电缆容抗较大,容易导致无功功率损耗,需要串联电容补偿器以消除无功损耗。海底观测系统供电采用直流输电形式不受容抗和感抗的影响,只考虑电阻损耗即可。另一方面,因交流输电功率与相位角关联,当供电系统有扰动时,供电功率不稳定,同时长距离输电将增加阻抗,降低输送功率,为提高供电系统稳定性必须串联电容补偿减少阻抗,增加串联电容将增加输电线路成本。综上,海底观测系统采用直流输电可以降低能量损耗和成本。

直流输电系统分为单极供电和双极供电。单极供电模式利用 1 根电缆和海水组成回路,结构简单,双极供电是通过 2 根线缆分别传输电能。从稳定性上来讲,双极供电稳定性较好,若 1 根线缆发生故障可以通过单极供电实现输电。由于双极供电需要 2 根电缆,应用于长距离海底观测系统上,不具备成本优势,一般在近岸短距离时可采用双极供电模式。单极供电采用单导体线缆不但可以降低海缆成本,同时也降低了线路的损耗^[26]。单极供电分为正极性供电和负极性供电,海底观测

系统一般采用负极性供电,负极性供电采用海水作为正极,单根电缆作为负极,即在海底接驳盒上设置阴极(镀铂钛材质),岸基站设置阳极(高硅铬铁),实现单极负压供电,这种供电模式可以避免正压供电导致海底接驳盒成为阳极,出现机械结构快速腐蚀的问题。

从供电形式上区分,直流供电还分为恒流供电和恒压供电,2种供电形式在国内外海底观测系统均有应用,也具有各自的优缺点。例如,恒流供电模式抗故障能力较强,如海缆出现短路故障,电流恒定不变可以保障海底接驳盒和后端观测仪器正常工作;恒压供电模式对于海底观测系统的扩展有较强优势,适合大规模海底观测网应用,但抗故障能力较弱。比较2种供电模式各自特点,从扩展海底观测网应用范围角度考虑,直流恒压供电系统在大规模海底观测网建设上更具优势。

目前,国内外较为通用的有缆海底观测系统(网络)岸基站供电电压为10 kV或2 kV(长距离输电适用),供电电压依据离岸距离确定,也有部分输电距离较短的近岸海底观测系统采用-375 V直流输电。电能输送至水下后通过光电分离和电能变换为接驳盒数据采集监控及后端多源传感器供电。

5.2 接驳盒结构设计

接驳盒结构设计即接驳盒的密封、耐压、散热设计,抗倾覆设计,防腐蚀设计,防生物附着设计以及防渔业拖网设计。其中,密封耐压设计是海底接驳盒性能的基础性保障。在散热设计方面,因高压(超高压)至中低压转变过程中,约10%的电能转变为热能,特别是在超高压输电过程中,接驳盒舱内温度会较高,极易导致舱内机电元器件寿命减损。为解决舱内散热问题,目前海底观测系统按照电能损耗分析,可以借助接驳盒机械结构、舱体和海水构成热通路及时散热;对于超高压供电大规模海底观测网,则多采用电源舱冲油浸泡配合使用气体补偿器解决电源舱散热问题^[26-27]。

5.3 状态监控及故障诊断隔离技术

接驳盒通过长距离的海缆连接下一级设备,扩展设备种类众多,容易发生短路等故障,同时,接驳盒供电也面临诸多故障。大部分故障是由不同系统的接驳导致,所以在各个独立的接驳端口进行故障诊断和隔离可有效降低故障对整个系统的影响,尽可能提高接驳盒供电整体可靠性。采用模

块化设计的接驳盒,尽可能对每一部分进行状态监控和故障隔离,是保障快速查找故障原因的有效途径。例如,接驳盒最常见的供电故障主要包括过压故障、过流故障和接地故障^[28-29],当监测到接驳盒内部某一路供电异常故障情况时,通过远程监控可以自动强制供电隔离,保障其他传感器和供电线路正常工作^[30]。

5.4 信息传输和管理

对通信及控制信号的处理、贮存、传输与管理是接驳盒的关键任务,海底观测系统通过前端传感器获取观测、监测和调查数据,这些传感器数据通过水密接插件传送至接驳盒,由接驳盒存储和处理后,发回岸基站;同时控制信号通过光电复合缆传输到海底接驳盒中,由海底接驳盒中的管理和控制主控电路模块、通信模块进行处理,最后将可用的控制信号通过水密接插件分别传输到各个传感器中,从而实现信息传输和管理工作。

6 有缆海底观测系统应用场景和衍生服务分析

有缆海底观测系统与海床基座底观测系统的最大区别是可在线获取海洋数据,在科学研究、海洋观测、水下探测及目标识别、生态预警监测以及海洋牧场渔业养殖等方面具有显著的优势,系统可依托海上工程平台、岸基海洋观测站点建设,具备多源传感器扩展的功能。

在科学研究方面,我国海域辽阔,具有海陆相互作用强、泥沙含量高、海水浑浊度大、生态灾害频发、地球动力活跃、资源丰富、海底灾害多和人类活动影响大的特点,通过传统的岸海空天观测平台难以获取第一手原位观测资料,应用有缆海底观测系统,可有效针对海陆物质交换与生态效应、海水运动与海底稳定性、海域碳循环过程、海底地震与海底流体研究、板块构造、多尺度动力过程与能量物质输送机理、天然气水合物的形成演化机理及其生态环境效应、海洋多尺度动力过程、海底沉积过程、海洋声场变化规律研究等海洋基础科学开展研究。

在海洋地震、海啸、地质监测应用方面,通过应用有缆海底观测系统组网地震、海啸(压力)传感器,可实时对海啸、地震进行监测和预警,有益于提升我国预警自然灾害的能力。

在生态预警监测方面,有缆海底观测系统可针对浒苔、绿潮、赤潮、水母、毛虾等致灾海洋生物聚集引发的海洋环境污染、核电站冷源取水口堵塞等相关生态灾害进行在线监测,相较航次调查、无人机遥测等手段,更具优势。

在海洋观测方面,通过有缆海底观测系统可获得剖面海流、波浪、潮位、温、盐等连续实时的海洋动力要素,为长期离岸海洋观测数据的获取提供了新的途径。

数字化和智能化是未来海洋观测领域的重要发展方向。通过有缆海底观测系统获取的原位观测数据衍生的服务产品种类较多,在应用方面可以通过物理海洋数值模式进行海洋预报,对致灾海洋生物、海冰的漂移路径进行预测分析;通过机器学习构建生态灾害预警模型;在智慧水利、智慧水文、水源地监测中构建泥沙输移动力学模型和水质预测模型等,服务于经济社会发展。

7 我国有缆海底观测系统关键技术突破方向

相较于美国、加拿大、日本等先进的区域海底观测系统,我国有缆海底观测系统的研发还存在一定的差距,应着重从以下3个方面开展突破:

1) 突破水下湿插拔连接器技术壁垒。我国科技人员经过多年的科技攻关,基本实现了水密干插拔连接器的国产化。但湿插拔连接器目前是海洋领域核心“卡脖子”技术,国内海底观测系统应用的湿插拔连接器主要生产商为西门子公司和ODI公司的产品,亟需加大自主研发科技攻关力度和投入,加速推进水下湿插拔连接器国产化进程,避免我国深海探测核心器件受制于人。

2) 开发适用于长期工作的高可靠性水下传感器技术,延长水下传感器维护周期。有缆海底观测系统及网络长期布设在海底环境中,较岸站设备、浮标观测设备的维护存在维护成本高、作业难度大的风险,开发适用于海底环境的高可靠性、维护周期长、高稳定性的传感器是未来海底观测传感器的发展趋势。

3) 发展与研究海洋观测大数据处理技术,利用人工智能实现观测数据的深度挖掘,通过数据衍生服务助力海洋经济产业发展。当今世界是信息爆炸的时代,开展海洋观测数据和海底观测数

据的多源异构融合,充分运用人工智能等技术手段拓展海洋大数据应用领域,从而服务于海洋防灾减灾、科学研究等领域。

8 发展建议

海底有缆观测系统作为海洋观测的第三大平台^[31],愈来愈受到世界先进海洋国家的高度重视。我国在发展过程中,需要充分借鉴国外的先进经验,为国家海洋权益维护、海洋防灾减灾、海洋生态环境保护与修复、海洋资源开发利用等提供高质量的科学数据支撑。

1) 加强我国有缆海底观测系统发展规划和顶层设计。立足国家当前和未来对有缆海底观测系统的宏观需求,制定有缆海底观测系统发展战略规划和实施计划,适应新需求和技术发展趋势,加强海底有缆在线观测和岸基、海基、空基等传统观测手段的深入融合,把有缆海底观测系统发展纳入国家海洋观测网发展规划和业务化海洋观测体系。借鉴国外有缆海洋观测系统发展经验,不断更新和完善需求论证,持续优化有缆观测系统顶层设计,提升观测能力。

2) 加强有缆海底观测仪器装备的原创性基础性创新。提高仪器设计、结构、材料及辅助通用(通信、能源、防护)等基础技术的自主创新能力,实现核心技术自主可控,形成具有自主特色的高可靠性、低功耗及低成本的拳头产品。加快技术与应用的结合,实现应用需求和产品优化的快速迭代。

3) 研发不同需求下的差异化有缆在线监测装备。加强产学研用的联合互动,对仪器开发、应用推广、维护服务等各个阶段给予支持,针对不同场景的应用需求,研发差异化有缆在线监测装备^[25]。加强国际合作与交流,积极参与全球有缆海底观测计划,提升我国在全球海洋观测领域的影响力。

4) 拓展有缆海底观测数据应用领域。系统开展有缆海底数据采集汇聚、融合分析和智能挖掘,建立有缆海底在线观测数据库和专题保障系统,开发海洋高质量数据产品以满足不同海上活动需求。

参考文献:

- [1] 盛景荃. 上海建成中国第一套海底观测组网技术系统[J]. 华东科技, 2009(7): 42.
- [2] Favali P, Beranzoli L. Seafloor Observatory Science: A Review[J]. Annals of Geophysics, 2006, 49: 515-517.

- [3] 陈鹰, 杨灿军, 陶春辉, 等. 海底观测系统[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [4] 陈鹰, 杨灿军, 顾临怡, 等. 基于载人潜水器的深海资源勘探作业技术研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(11): 38-42.
Chen Ying, Yang Can-jun, Gu Lin-yi, et al. DSV-Specific Tool-Box for the Deep-Sea Resources Exploitation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(11): 38-42.
- [5] 汪品先. 从海底观察地球-地球系统的第三个平台[J]. 自然杂志, 2007, 29(3): 125-130.
Wang Pin-xian. Seafloor Observatories: The Third Platform for Earth System Observation[J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(3): 125-130.
- [6] 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.
- [7] 陈鹰, 连斑, 黄豪彩, 等. 海洋技术基础[M]. 北京: 海洋出版社, 2018.
- [8] 陈鹰, 瞿逢重, 宋宏, 等. 海洋技术教程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012.
- [9] 何成波, 吴学智. 基于海底光缆通信网的海底观测网拓扑应用研究[J]. 通信技术, 2019, 52(6): 1415-1421.
He Chen-bo, Wu Xue-zhi. Submarine Observation Topology Application Based on Submarine Optical Cable Communication Network[J]. Communications Technology, 2019, 52(6): 1415-1421.
- [10] 吕枫, 彭晓彤, 周怀阳, 等. 缆系海底观测网原型系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1134-1149.
Lü Feng, Peng Xiao-tong, Zhou Huai-yang, et al. Design of a Prototype System for Cabled Seafloor Observatory Networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1134-1149.
- [11] 封锡盛, 李硕, 王晓辉, 等. 海底观测网[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [12] 陶智. 海底观测网络现状与发展分析[J]. 声学及电子工程, 2014(4): 45-49.
- [13] Suyehiro K, Mikada H, Asakawa K. Japanese Seafloor Observing Systems: Present and Future[J]. Marine Technology Society Journal, 2003, 37(3): 102-114.
- [14] Takagi, Uchida R, Nakayama N, et al. Estimation of the Orientations of the S-net Cabled Ocean-Bottom Sensors[J]. Seismological Research Letters, 2019, 90(6): 2175-2187.
- [15] Kawaguchi K, Kaneda Y, Araki E. The DONET: A Real-time Seafloor Research Infrastructure for the Precise Earthquake and Tsunami Monitoring[C]//Oceans 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. Kobe: IEEE, 2008.
- [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.
- [17] 杜立彬, 李正宝, 刘杰, 等. 海底观测网络关键技术研究进展[J]. 山东科学, 2014, 27(1): 1-8.
Du Li-bin, Li Zheng-bao, Liu Jie, et al. Key Technology Advances on Seafloor Observatory Networks[J]. Shandong Science, 2014, 27(1): 1-8.
- [18] 新华社. 我国将建设国家海底科学观测网[EB/OL]. (2017-06-08)[2022-12-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-06/08/content_5200886.htm.
- [19] 晏庆, 崔浩贵, 张晓, 等. 海底观测系统技术进展与发展趋势[J]. 科技创新导报, 2020, 17(14): 236-239.
- [20] 吕枫, 周怀阳. 缆系海底科学观测网研究进展[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(2): 139-154.
Lü-feng, Zhou Huai-yang. Progress of Scientific Cabled Seafloor Observatory Networks[J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 139-154.
- [21] 同济大学海洋与地球科学学院. 海底观测大科学工程[EB/OL]. [2022-12-02]. <https://mgg.tongji.edu.cn/10105/list.htm>
- [22] Hsu S K, Lee C S, Shint T C, et al. Marine Cable Hosted Observatory(MACHO) Project in Taiwan[C]//2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. Tokyo, Japan: IEEE, 2007.
- [23] 常永国, 张飞, 郭永刚, 等. 南海深海海底观测网试验系统海底动力观测数据集[J]. 中国科学数据, 2019, 4(4): 48-55.
Chang Yong-guo, Zhang Fei, Guo Yong-gang, et al. The Ocean Dynamic Datasets of Seafloor Observation Network Experiment System at the South China Sea[J]. China Scientific Data, 2019, 4(4): 48-55.
- [24] 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 Jun-jiang, Sun Zong-xun, Lian Shu-min, et al. Review on Cabled Seafloor Observatories in the World[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(3): 20-33.
- [25] 翟方国, 李培良, 顾艳镇, 等. 海底有缆在线观测系统研究与应用综述[J]. 海洋科学, 2022, 44(8): 14-28.
Zhai Fang-guo, Li Pei-liang, Gu Yan-zhen, et al. Review of the Research and Application of the Submarine Cable Online Observation System[J]. Marine Sciences, 2022, 44(8): 14-28.
- [26] Howe B M, Kirkham H, Vorpérian V. Power System Considerations for Undersea Observatories[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2): 267-275.
- [27] 俞志贤, 王红霞, 杨爱梅. 海底观测网络系统用接驳设备的水密方式[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2013(1): 45-46.
Yu Zhi-xian, Wang Hong-xia, Yang Ai-mei. The Watertight Manner of the Junction Devices for Seafloor Observatory Systems[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2013(1): 45-46.
- [28] 乐业清. 海底观测网络科学仪器插座模块机械结构的设计和研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [29] 杨灿军, 张锋, 陈燕虎, 等. 海底观测网接驳盒技术[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10): 172-179.
Yang Can-jun, Zhang Feng, Chen Yan-hu, et al. Technologies of Junction Box for Seafloor Observation Network[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 172-179.
- [30] Li C, Li Y, Zhu R, et al. Design of a Cabled Seafloor Observatory for Marine Ecological Environment Monitoring[J]. Marine Technology Society Journal, 2021, 55(2): 17-24.
- [31] 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 Feng-hua, Lu Yan-guo, Wang Hai-bin, et al. Research Progress and Development Trend of Seafloor Observation Network[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 321-330.

(责任编辑: 许妍)