引文格式:党亚民,杨强,薛树强,等.海洋水下导航定位基准站网研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(8):1548-1561.DOI:10.13203/j.whugis20260079

Citation:DANG Yamin,YANG Qiang,XUE Shuqiang,et al.Research Progress on Marine Underwater Navigation and Positioning Reference Station Network[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(8):1548-1561.DOI:10.13203/j.whugis20260079

海洋水下导航定位基准站网研究进展

党亚民[1] 杨 强[1] 薛树强[1] 赵 爽[1,2]

1 空间基准全国重点实验室,中国测绘科学研究院,北京,100039

2 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院,山东 青岛,266580

摘 要:海洋大地测量基准是海洋开发必须的高技术领域,受到全球主要海洋国家的高度重视,美国、日本、欧盟、加拿大、俄罗斯等国家自20世纪60年代已开启海洋大地测量基准的研制与布设,目前已基本掌握了海洋水下导航定位基准站网建设相关技术。中国的海洋水下导航定位基准站网建设起步较晚,目前仅在南海3 000 m水深海域开展了水下基准站网建设试验。系统介绍了全球主要海洋国家在海洋水下导航定位基准站研制、海底基准网建设,以及海洋水下导航定位应用服务关键技术最新进展,分析了中国未来海洋水下基准建设存在问题站研制,探讨了中国海洋水下基准站网研制、建设与应用服务发展方向。

关键词:无缆水下基准站;海底基准网;卫星导航-声学;基准网维护;水下导航定位

中图分类号:P223 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-03-11

DOI:10.13203/j.whugis20260079 **文章编号**:1671-8860(2026)08-1548-14

Research Progress on Marine Underwater Navigation and Positioning Reference Station Network

DANG Yamin[1] *YANG Qiang*[1] *XUE Shuqiang*[1] *ZHAO Shuang*[1,2]

1 State Key Laboratory of Space Datum, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China

2 College of Oceanography and Informatics, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: The marine geodetic datum is a critical high-tech field essential for ocean development, attracting significant attention from major maritime nations worldwide. Countries such as the United States, Japan, the European Union, Canada, and Russia have been engaged in the development and deployment of marine geodetic reference frameworks since the 1960s, and have largely mastered the technologies associated with constructing underwater navigation and positioning reference station networks. In contrast, the construction of such underwater positioning and navigation reference station networks in China started relatively late. Currently, experiments on underwater reference station network construction have only been conducted in the South China Sea at water depths of 3 000 m. This paper systematically reviews the latest advancements in key technologies related to the development of underwater navigation and positioning reference stations, the construction of marine reference networks, and the application services for underwater navigation and positioning in major maritime countries. It analyzes the existing challenges in China's future underwater geodetic reference construction and discusses the developmental directions for the research, development, construction, and application services of China's underwater reference station networks.

Key words: wireless underwater reference station; seabed reference network; GNSS-acoustic; mainte-

基金项目:国家重点研发计划(2024YFB3909702,2024YFB3909700);空间基准全国重点实验室自主研究课题(SKLSD2025-ZZ-03);中国测绘科学研究院基本科研业务费项目(AR2501)。

第一作者:党亚民,博士,研究员,主要研究方向为大地测量基准与地球动力学。dangym@casm.ac.cn

通信作者:杨强,博士,研究员。yangqiang@casm.ac.cn

nance of reference network; underwater navigation and positioning

海洋大地测量基准是陆海空天一体化国家空间基准体系的重要组成部分[1]。随着技术进步,各国海洋活动空间维度逐渐增加,水下航行器及水下平台运行、海底测绘、深海探测、资源勘探等活动日益频繁[2]。为了更好地维护海洋权益、发展海洋经济、保护海洋环境与探索海洋奥秘,迫切需要长时序、连续的海底观测资料[3],这也就需要稳定的高精度海洋大地测量基准。

与陆地大地测量基准相比,海洋大地测量基准构建技术发展较晚。由于其技术难度较大,当今只有日本、美国、欧盟、加拿大等国家具备较为成熟的研究与建设技术。海洋水下大地测量基准网(以下简称海洋水下基准网)主要由漂浮于海面的浮标(水面基准站)、悬浮与水中的潜标(水中基准站),以及坐底式海洋水下导航定位基准站(海底基站)组成[4]。其中,海洋水下导航定位基准站(以下简称水下基准站)是构建海洋大地测量基准,特别是海底大地测量基准的核心基础设施。水下基准站类似于陆地上的全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)卫星,为波浪滑翔机、自主水下航行器(autonomous underwater vehicle,AUV)、载人潜器等水下目标提供高精度位置服务的核心设施,其系统组成融合了声学、通信、控制等多领域技术。

20世纪60年代,美国科学家提出了构建海洋水下基准网的构想,并开展了技术试验[5]。Spiess教授于1985年首次提出了由GNSS技术与声学(Acoustic)技术组合的GNSS-Acoustic(GNSS-A)技术,成为海洋水下基准网建设新方法[6]。随着GNSS-A技术逐渐成熟并实际应用,自20世纪80年代起,美国开展了海洋水下基准网系统初步探索,系统由海面上布设的三角形浮标以及投放海底的应答器组成,进行了水下潜器导航服务试验[7-8]。1991年,加拿大太平洋地质中心在太平洋西北部的胡安·德富卡板块海域首次建立了位于海底的坐底式水下基准站[9]。当前,美国、日本、欧洲各国、加拿大、俄罗斯等国家以不同形式建立了海洋基准网,并研制了各类水下基准站,其中美国、日本技术处于全球领先地位。

中国在此领域起步较晚,目前还处于技术追赶阶段。在“十三五”期间,科学技术部支持了“海洋大地测量基准与海洋导航新技术”等项目,研制出了3 000 m深海坐底式水下基准站,但其有效服务范围仅有12 km左右。“十四五”期间,在多个国家重点研发计划项目、国家实验室“问海计划”项目等支持下,海底基站驻留工作能力和服务有所提升,设计驻留工作时间超1 a,服务范围达30 km[10-12]。

本文主要介绍当今代表性海洋国家在水下基准站研制、海洋基准网构建与维持等方面的最新研究进展,并探讨中国海洋大地测量基准领域未来发展方向。

1　国内外水下基准站研制进展

根据水下基准站供电形式、布设方式等,大致可以分为有缆坐底式水下基准站、无缆坐底式水下基准站、锚系式水下基准站、移动式水下基准站、海面浮标式基准站等。

1.1　有缆坐底式水下基准站

有缆水下基准站通过电缆进行供电和光缆进行信息传输,电缆与陆地相连,将位于水下的传感器通过电缆进行连接,并通过接驳盒进行数据传输。有缆式水下基准站具有供电和传输连续、可靠的优点,可长期连续工作和进行大量信息传输,实现海底长期、连续观测数据采集与监测。如图1所示。

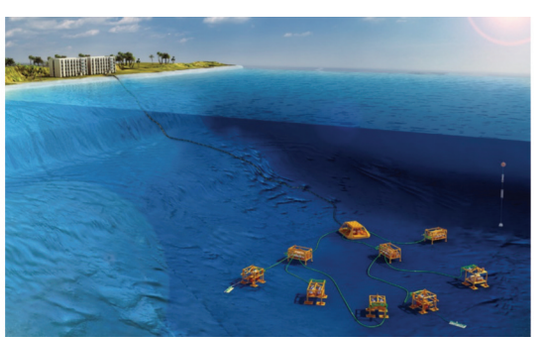


图1　海洋有缆水下基准站布设示意图[13]

Fig. 1　Schematic Diagram of the Deployment of Ocean Cable Underwater Reference Stations[13]

早期水下基准站均采用有缆式。例如美国2016年建成的海洋观测网络通过约880 km的海底光电缆连接了7个科学节点,每个节点可提供高达8 kW的功率和10 Gbit/s的带宽。日本建立的高密度地震-海啸实时观测网(dense oceanfloor network system for earthquakes and tsunamis,DONET)及其升级版DONET2海底观测网系统,在日本纪伊半岛以南海域共设有300 km和450 km的海底光电缆,分别设置5个和7个观测节点[14-15],如图2所示(https://emso.eu/observatories-node/smartbay/)。

有缆坐底式水下基准站主要通过固定部署



图2 欧洲有缆式水下基准站系统组成

Fig. 2 Consists of a Cable-Based Underwater Reference Station System in Europe

在海底的传感器节点、声学信标及中继设备构建水下定位网络,通过水面平台实现跨介质通信与导航。该系统作为水下“GNSS卫星”,周期性发射声学信号(频率500 Hz ~ 16 kHz),其主要功能是为AUV/无人潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV)提供定位基准。信标一般为圆柱形或盘状结构(直径0.5~2 m),通过锚系固定于海床,深度覆盖500~6 000 m。系统具有时间同步模块(纳秒级精度),确保信号相位一致。采用多频段设计,低频(500 Hz)覆盖30 km以上,高频(16 kHz)用于近距离高精度定位。外壳采用钛合金/复合材料分段式设计耐压壳体,抗压等级大于等于60 MPa(6 000 m水深)。基座利用通水孔与牺牲阳极防腐蚀组合,可适应泥沙底质。

1.2 无缆坐底式水下基准站

随着高性能锂电池、水下通讯信标等技术的发展,无缆水下基准站得到发展。有缆水下基准站网在通信和能源供给方面具有显著优势,但需在海底铺设电缆,存在造价高、覆盖范围有限、观测装置难以迁移等问题。无缆水下基准站则以其结构简单、灵活、低成本,逐渐成为构建海底基准网的主流基础设施。当前无缆式水下基准站已经得到广泛应用,美国、日本在基准站系统研发和基准网布设方面都处于国际领先地位。无缆式水下基准站除了提供高精度海底定位、水下声学通信服务外,还应用在海洋权益维护、海洋资源调查和海洋环境监测等海洋活动中,如图3所示(https://www.aoml.noaa.gov/first-cruise-in-three-years-south-atlantic-meridional-overturning-circulation-project/)。



(a) 美国 (b) 日本[16]

图3 无缆式水下基准站

Fig. 3 Cable-Free Underwater Reference Station

中国当前水下基准站主要是无缆坐底式框架结构设计,由浮体及不锈钢安装框架、系统控制及数据采集模块、供电单元、声呐单元、探测声呐单元,以及水位计、重力仪等其他配套组件构成。中国无缆式水下基准站开展了“三段式模块化架构”设计,融合声学定位、跨介质通信与智能控制技术,兼顾深海适应性与多任务协同能力[17-20]。中国当前多传感器海底综合基准站集成了声呐、惯导、压力、姿态等多源传感器,实现以声学为主、多源传感器融合下的水下导航工作模式,如图4所示。

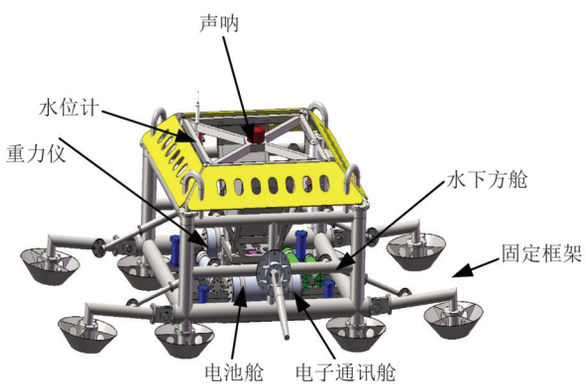


图4 多传感器融合基准站组成设备

Fig. 4 Multi-sensor Fusion Reference Station Component Equipment

无缆式水下基准站要求保持坐底稳定,并可发射声学基准信号。主要组件包括声学应答器/信标,多频段设计(500 Hz~16 kHz),低频覆盖30 km、高频实现近程厘米级定位;采用自重沉底或设立海底永久底座方式,确保强流环境下坐底稳定性;钛合金壳体耐压大于等于20 MPa(支持6 000 m水深);蓄电池供电,采用低功耗唤醒机制,休眠能耗小于等于2.5 mW,支持声学指令唤醒(作用距离大于等于1 km)。

1.3 锚系式水下基准站

锚系式水下基准站(潜标基准站)是一种以锚链链接悬浮在水体中、区别于直接坐底的水下基准站,相比物理海洋观测中广泛采用的传统水下潜标,锚系式水下基准站还搭载了声学测距、通信等设备,可实现声学距离观测[21],可为水下目标提供相对距离参考。美国自20世纪50年代初开始发展水下潜标技术,到目前已基本实现了水下信号实时传输,在海洋环境监测、水下目标导航定位等方面都开展了广泛应用[22-23]。

水下潜标通常主要包括以下结构:(1)声学应答器/信标,这是其作为“基准站”的核心,能够响应

水下目标的询问信号,提供两者之间的斜距观测值,供水下目标进行相对定位;(2)传感器阵列,包含电导率-温度-深度传感器、声学多普勒流速剖面仪;(3)浮标单元,提供系统正浮力,内置数据存储模块;(4)配重系统,可编程释放装置实现自主上浮;(5)保护框架,采用防腐结构以及防渔网设计等[24-25]。水下潜标系统示意图如图5所示。

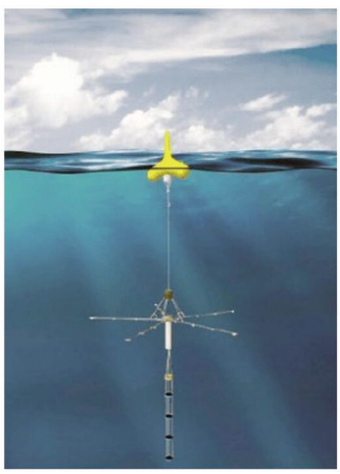


图5　水下潜标系统示意图

Fig. 5　Schematic Diagram of Underwater Buoy System

1.4　移动式水下基准系统

移动式水下基准系统主要指以多AUV、水下滑翔机协同定位系统为代表的基准系统,其技术特点是基准服务系统可在水下移动,同时可为其他移动设备提供导航定位服务。具有代表性的系统是日本东京大学研制的分布式海底水下AUV系统[17],如图6所示,该系统主要组成如表1所示,系统工作流程图如图7所示。

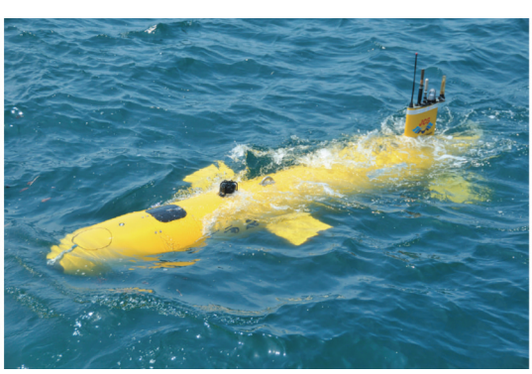


图6　日本移动式水下基准系统[25]

Fig. 6　Japanese Mobile Underwater Reference System[25]

除了日本以外,美国、欧洲等国也部署了多种移动式水下基准系统,如瑞士的集群协同定位系统Hydromea VERTEX AUV具有低成本批量部署优势,且无需固定海底基站。英国近岸高精度超短基线(ultra short baseline,USBL)定位系统Sonardyne ScoutPro具备动态校准功能,安装了全向信标,自动校正声速剖面误差与多路径效应。德国EvoLogics S2C R系统布设声学换能器阵列,水平全向波束设计,支持48~17 kHz多频段,实现斜距精度0.01 m,主要应用在遥控水下机器人/AUV跟踪、潜水员监测、海底设备部署等方面。

表1　多AUV协同定位系统结构

Table 1　Multi-AUV Cooperative Localization System Structure

组件	功能	交互逻辑
地标AUV	坐底提供基准位置,发射声学信标	首节点布设,后续角色轮换
运动AUV	接收信标信号,执行测绘任务	降落后处理数据并压缩传输
附属AUV	扩展测绘范围,接力传递定位信息	接收运动AUV压缩后的数据包

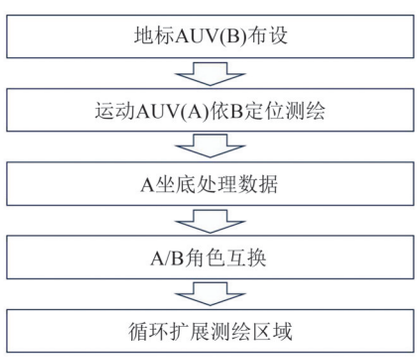


图7　系统工作流程图

Fig. 7　System Workflow Diagram

俄罗斯利用“勇士-D”深潜系统作为海底基准核心定位节点,承担AUV导航基准与数据中继,可与AUV协同开展水下导航定位服务。其工作流程包括海底站布设、AUV下潜接收声学信号、结合自身惯性导航系统(inertial navigation system,INS)及多普勒计程仪(Doppler velocity log,DVL)数据解算位置、任务完成后返回海底站上浮。

1.5　海面浮标式基准站

海面浮标站是构建海洋大地测量基准的关键水面枢纽,承担着连接GNSS卫星信号与水下声学信号的桥梁作用。浮标站通常由浮体平台、GNSS接收天线(双频实时动态测量(real-time kinematic,RTK))、姿态传感器、无线电通信设备,以及水下声学换能器(发射/接收)组成,具有机动性强、布设灵活的特点,可作为海面移动基准站使用。浮标通过GNSS确定自身高精度三维坐标,并将该坐标通过水声链路广播给水下基准

站或潜器。在GNSS-A技术中,浮标是水面信标,其与船载/海底声学设备的组合是实现水下绝对定位的核心。

综上所述,水下基准站已由早期依赖海底电缆的有缆固定站发展到如今以无缆坐底站和长续航潜标为主流,并向集群化移动基准演进;功能上由单一的信标发射向通导一体化、多传感器融合、智能唤醒方向发展。中国在"十三五"至"十四五"期间,突破了3 000~6 000 m级耐压舱、长寿命电池、低功耗声学调制解调器等关键技术,但在核心芯片等方面上仍需追赶国际先进水平。

2 国内外海洋水下基准站网建设进展

当前水下基准站网建设主要以美国、日本、欧洲等发达国家为代表,中国目前建成了试验性站网。本文对当今主要海洋水下基准站网发展与建设情况进行了梳理。

2.1 美国

2000年,美国通过了海洋观测计划立项(ocean observatories initiative,OOI)[18],开展了海底观测网建造工作。2016年,美国国家科学基金会宣布,OOI海底观测网正式投入使用。OOI布设了总共约880 km海底电缆,在海底安装了7个基准站,从而将陆地基准延伸到海底。如图8所示。

美国于2015年提出了深海定位导航系统研制计划,其核心目标是开发一种不依赖传统声学浮标或预置海底信标的水下精确定位系统。该系统可提供跨越海洋盆地的全方位、强大的定位功能,其旨在利用低频声源(可能是固定的声学信标)与水面无人舰艇等平台组成网络。通过融合水声信号与水面平台的卫星定位信息,实现在广阔深海区域为水下平台(如潜艇、UUV)提供连续、隐蔽的米级定位精度。但是由于该计划目前处于保密状态,对其具体情况了解有限。

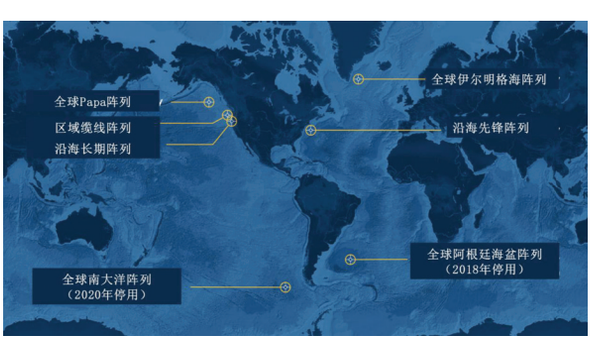


图8 美国OOI系统[19]

Fig. 8 USA OOI System[19]

2.2 日本

日本的海底基准网建设在数量和技术上均处于全球领先水平[20]。日本采用"陆地大地测量延伸"原则,构建了水下基准站网。其首先布设一等控制点,再加密形成二/三等网,重点覆盖地震断裂带(如日本南海海槽)。如图9所示。

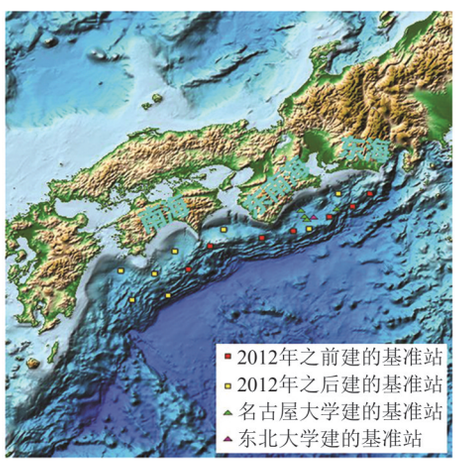


图9 日本南海海槽海底基准网的分布[4]

Fig. 9 Distribution of the Seabed Benchmark Network in the Nankai Trough, Japan[4]

日本自2003年开始实施"区域先进实时地球监测网"计划,建立了8个坐底式水下基准站。2006年,日本开始建立DONET系统。2012年日本东北大地震后,日本又沿日本海沟布设了20个坐底式水下基准站,沿日本南海海槽新建了8个坐底式水下基准站[24-26]。

2.3 欧洲

为研究海洋科学问题,英国、法国、德国、荷兰等欧洲国家共同建立了欧洲多学科海底及水体观测系统(European multidisciplinary seafloor and water-column observatory,EMSO),包括14个区域设施,其中3个为试验站(https://emso.eu/observatories/#map)。该网络建有15个有缆坐底式水下基准站,不仅可应用于水下导航定位,还开展了欧洲周边的整体海域环境长期综合监测[27-31]。如图10所示。

2.4 加拿大

加拿大自2013年起将东北太平洋海底联合试验网和维多利亚海底试验网合并,建立了加拿大海底观测网(ocean network Canada,ONC)。ONC包括了5个坐底式水下基准站,覆盖水深从20~2 600 m[32-33]。加拿大积极参与全球海底大地基准网建设,可为水面及水下的各类设备提供时间和空间信息。

加拿大在该领域显著的特点是军民技术的深

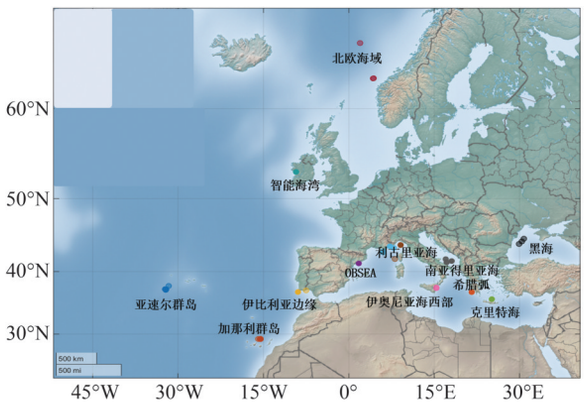


图 10　EMSO 分布

Fig. 10　EMSO Distribution

度融合与协同发展。例如,OSI海事系统最初为商业用途开发电子海图技术,后成功转向国防领域,其综合导航和战术系统现已服务于全球25个北约及其他盟国海军。这种军民技术的转化与融合推动了关键技术的不断突破和应用场景的扩展。

2.5　俄罗斯

俄罗斯水下基准网主要部署在北极大陆架,依赖水下多信标组网,又称水下 GLONASS,其主要优势在于冰层适应性,主要服务于大型海上天然气平台等,支撑了海洋油气勘探与管线监测。该系统采用分体供电架构,其中水下/冰封信标采用高密度锂电池(续航超6个月),海面浮标采用太阳能板和蓄电池组合供电,支持卫星通信不低于1 000次。跨介质通信链路包括水声通信(10 km范围)、浮标无线电中继,以及GLONASS卫星回传。

系统水面段设施采用了GNSS浮标,集成了超短波电台与卫星通信天线,水下段通过电缆连接声学换能器,实现AUV与岸基/空基控制站的实时通信与操控。水下设施采用钛合金耐压壳体(耐压大于等于80 MPa),集成水声模块(500 Hz～16 kHz多频发射器)、GLONASS接收器、“信使-D1M”卫星通信组件。接收卫星定位信息,可为AUV提供亚米/米级位置修正,通过声学链路回传数据至水面。另外,在北极冰封条件下,采用加固塑料外壳,内置电池与声学唤醒模块,用于AUV航向校准与紧急求救信号中继。

2.6　中国

中国早期海底观测主要集中在油气勘探、海洋地质与地球物理观测、海洋生态环境保护等,其导航定位服务能力相对较差[34-36]。作为海洋水下基准网建设,在“十三五”“十四五”期间通过多个国家重点研发计划项目支持,开展了海底基准试验网建设,在南海3 000 m水深处,初步建成了由3个水下基准站构成的海底试验网[37-38]。

在科技部重点研发计划项目和其他工程支持下,中国目前已初步建成水下北斗原型系统(图11)。该系统通过在海底布设无缆水下基准站,海面通过水面浮标或无人/有人船,与中国北斗卫星系统进行立体组网,构建了中国首个海洋水下基准网,该系统在中国南海3 000 m水深进行了试验。

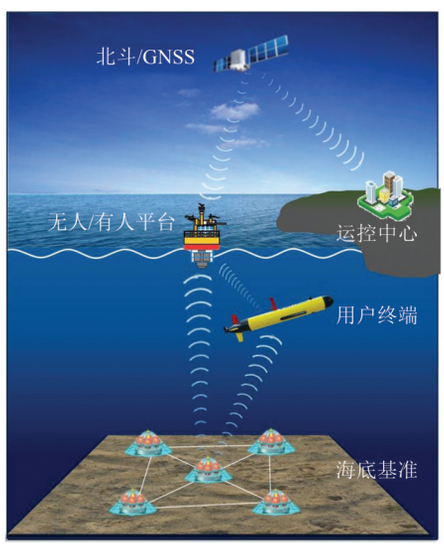


图 11　中国水下北斗原型系统

Fig. 11　China Underwater BeiDou Prototype System

需要注意的是,当前世界主要海洋国家建立的海底网络更多的是由水下观测站组成,而不是提供水下导航定位服务的水下基准站。但是,这种利用已有海洋观测网,利用其现有的布设、维护能力增加海洋水下基准站,从而形成水下基准网的做法,值得中国借鉴。中国也有海洋观测网[2,10,13],如果能将部分站点改造或新增水下基准站,可加快中国水下基准网建设规模,极大拓展中国海洋水下导航定位服务能力。

3　海洋水下基准站网布设、服务与维持方法

水下基准站的布设、服务与维持是一项复杂的系统工程,它融合了海洋测绘、水下声学、导航定位等多个领域的技术。不同于陆地基准站建设,海洋环境下水下基准站是建成后整体布放到水下或海底,其服务与维护也是无人情况下开展。常用水下基准站布设、服务与维持方法如图12所示。

3.1　水下基准站布设与回收

水下基准站的布设核心技术环节可以概括为两个阶段[38-39]:(1)运输与投放。通常由作业船

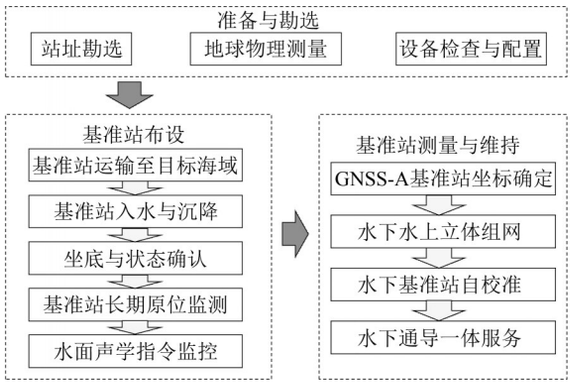


图12 水下基准站布设、服务与维持

Fig. 12 Deployment, Service, and Maintenance of Underwater Reference Stations

只将基准站运抵目标海域,使用船上的起吊装置和绞车钢缆将基准站缓缓吊放至水面。在投放过程中,需密切关注海况,选择海况较好的窗口期作业,确保基准站平稳入水,避免与船体发生碰撞。(2)沉降与坐底。基准站依靠配重块(通常与释放器机制关联)在水中自由沉降,直至海底。在此过程中,基准站内部的压力传感器等可以辅助确认其最终坐底状态。成功坐底后,基准站会开始其长期原位监测与导航服务任务。

任务完成后或需要维护时,则需要对水下基准站进行回收,主要技术环节包括:(1)回收指令触发与上浮。当需要回收基准站时,作业船只通过发射声学指令触发基准站上的声学释放器工作,释放器会抛弃配重块,解除基准站与海底的锚系连接。随后,在浮球或基准站自身浮材提供的浮力作用下,基准站开始上浮。(2)水面找寻与回收。基准站(或与其连接的浮球及通信缆)浮出水面后,如何快速发现它是一个挑战。除了通过GNSS自身标定位置并结合USBL等声学定位手段辅助,一些系统会配备烟火信号等视觉标识或无线电示位标,以便在视线不良时也能被迅速定位。作业船只靠近后,利用捞钩或起重机将其回收至甲板。若遇到无释放器或释放器失灵的情况,也可能需要采用特殊的打捞回收方法。

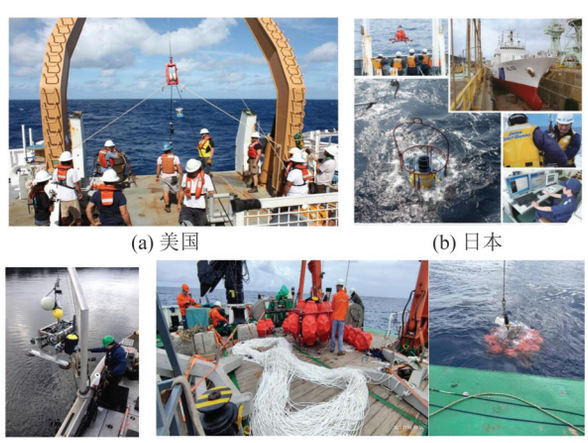
受复杂海洋环境影响,水下基准站在布设与回收过程中存在较大的风险,需要特别关注:

1)导航与定位精度。无论是布放时的精准投送,还是回收时的成功找寻,都离不开高精度的导航定位。这通常涉及GNSS-A定位技术(即利用GNSS确定水面位置,通过声学手段传递到水下),以及USBL、DVL和INS等组合导航方法。

2)安全保障。布设与回收过程受海况影响大,需选择合适天气窗口,并确保释放器等关键设备的可靠性,制定应急预案。例如,针对释放器可能失灵的情况,研究人员设计了特殊的打捞回收方法以应对。

3)环境保护与适应性。基准站设计需考虑对海底环境的影响,例如进行防泥沙处理。同时,其结构材料和防腐措施也要能适应长期的海水腐蚀。

各国水下基准站布设如图13所示(https://globalocean.noaa.gov/research/ocean-reference-stations-oceansites/;https://www1.kaiho.mlit.go.jp/chikaku/kaitei/sgs/pamphlet_180629-3.pdf;https://www.oceannetworks.ca/observatories/physical-infrastructure/cabled-networks/)。其中,中国于2019年在南海约3 000 m水深海域开展了首次海底大地测量基准构建与服务试验,为中国海洋大地测量基准建设提供了技术支撑,积累了海底基准网建设工程经验(图13(d))。



(a) 美国 (b) 日本

(c) 加拿大 (d) 中国3 000 m水深水下基准站南海布设

图13 水下基准站系统设备布放

Fig. 13 Deployment of Equipment for the Underwater Reference Station System

3.2 水下基准网构建技术

水下基准站布设完成后,首先需要完成高精度水下基准站坐标确定,从而建立海洋水下基准网[40-41]。GNSS-A方法当前是解算水下基准站坐标最成熟、应用最广的方法[42-50]。其基本原理是:首先利用水面基站(母船或浮标)上安装的GNSS天线解算水面基站坐标;然后将水面基站坐标传递安装在船底的声学换能器上,再由换能器发射声学信号,水下基准站接收到声学信号后,发回应答信号。通过测量值与计算值之间的传播时间差平方和为最小约束,开展海底基准点坐标的最优估计,从而精确获取海底基准点坐标[38]。计算如下:

$$\sum_{i=1}^{N}\left(T_i^{\mathrm{Obs}}-t_i^{\mathrm{Cal}}\left(x_0;x;c\right)-\delta t_i-\varepsilon_i\right)\rightarrow\min \tag{1}$$

式中,T_i^{Obs}表示声学信号往返时间测量值;t_i^{Cal}表示计算得到的信号往返单程时间之和;x_0、x分别表示船底换能器坐标和水下基准站坐标;δt_i表示声速误差引起的时间延迟误差;c表示参考声速场剖面;ε_i表示偶然误差。

可以通过海面-海底联合平差的方法,构建水下基准站网之间的基线关系。海面-海底基准网联合平差方法的观测方程可表达为[51]:

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{A}_Y\boldsymbol{\Phi}_p+\boldsymbol{B}_Y\boldsymbol{\Phi}^d+\varepsilon_{\mathrm{speed}}+\varepsilon_{\mathrm{other}} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{Y}$为观测向量;$\boldsymbol{A}_Y$为与海底端有关的设计矩阵;$\boldsymbol{\Phi}_p$为海底应答器的坐标参数;$\boldsymbol{B}_Y$为与海面端有关的设计矩阵;$\boldsymbol{\Phi}^d$为海面端的坐标参数;$\varepsilon_{\mathrm{speed}}$为声速误差相关项;$\varepsilon_{\mathrm{other}}$为其他误差相关项。

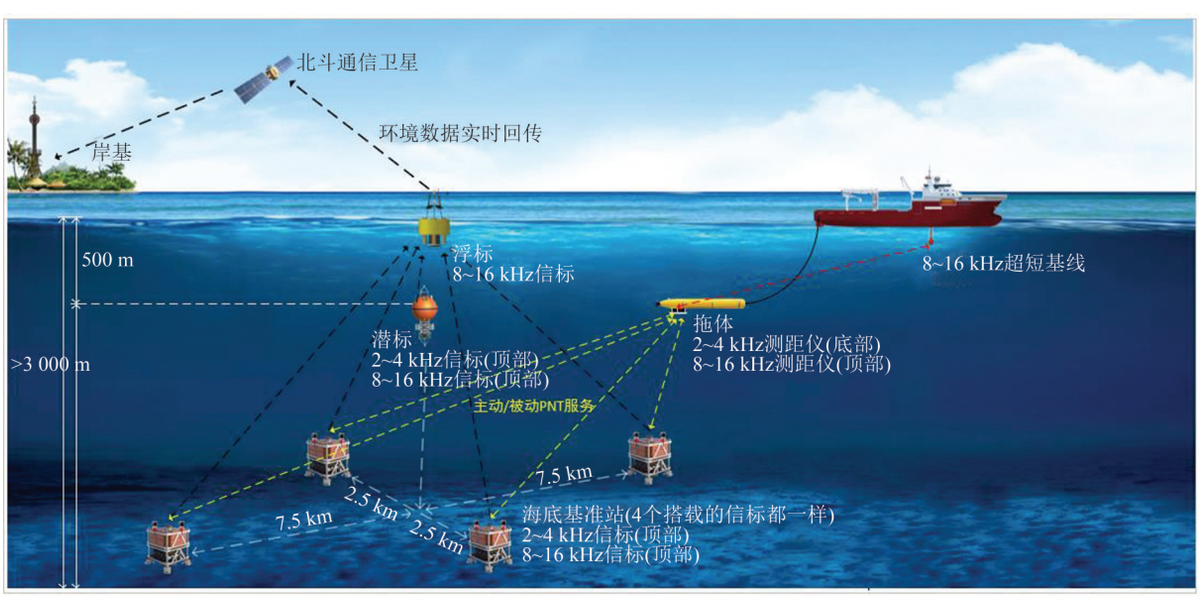
近年来,中国国内团队自主研发了GNSS-A综合海底高精度定位软件平台,构建了全球海洋重力异常模型、声线误差修正模型和水下差分定位等一系列新模型,使海底空间基准定位精度显著提高。

中国测绘科学研究院薛树强团队[52-55]先后攻克了海底基准网优化、观测模型优化等关键技术,研究了中国首套水下北斗原型系统,构造了海洋控制网优化模型,构建了基准传递与动态精化模型,建立了中国首个深海基准网,实现了中国海底基准构建技术从0到1的重大突破。

哈尔滨工程大学研究团队[56-57]先后突破了深海高精度定位、海底长基线综合定位等技术瓶颈,研制的具有自主知识产权的水声综合定位系统,深海水下定位精度可达0.3 m。另外,自然资源部第一海洋研究所、山东大学、武汉大学、大连舰艇学院、中国石油大学(华东)、中国科学院声学研究所等多个团队也在GNSS-A定位导航方法上开展了深入研究[58-64]。这使得中国当前在水下导航定位技术方法上总体已经达到国际先进水平,为中国建立高精度海洋水下基准网奠定了坚实的理论与方法基础。

3.3　水下基准服务

利用水下基准网开展水下导航定位服务,主要通过提供声呐、惯导、压力、磁力等多源传感器信号,实现向水下潜器等的导航定位(图14),其中主要以声学信号为主[48,65]。



注:PNT(positioning,navigation and timing)表示定位、导航与授时。

图14　海底基准网导航定位服务示意图

Fig. 14　Schematic Diagram of Navigation and Positioning Services Provided by the Seabed Reference Network

水下基准站导航定位服务以水下基准站发射声呐信号为主,其服务原理与卫星导航相似(见图15)。设基准站声呐发射时刻t_s的待定坐标为$(x(t_s),y(t_s),z(t_s))$,信号到达第j个导航目标的空间坐标为(X_j,Y_j,Z_j),在信号接收时刻t_r的待定坐标为$(x(t_r),y(t_r),z(t_r))$,则主动式声呐观测方程为[66]:

$$L_j=T_j\times c_0=F_j\left[x(t_{s,j}),y(t_{s,j}),z(t_{s,j});x(t_{r,j}),y(t_{r,j}),z(t_{r,j})\right]+\varepsilon_j,\ j=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

式中,L_j表示距离观测值;T_j与c_0分别表示声学信号往返程传播时间与传播速度;$t_{s,j}$、$t_{r,j}$分别表示对第j个目标发射声学信号的时刻与目标接收到第j个声学信号的时刻;ε表示随机噪声。

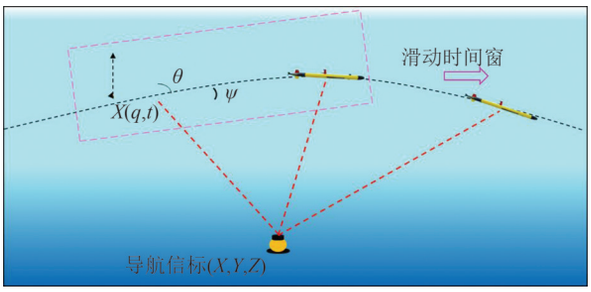


图15 声学导航定位测速模型

Fig. 15 Acoustic Navigation, Positioning, and Velocity Measurement Model

实际服务中,水下基准站完成导航及通信等服务需要发送5种信号:信标唤醒信号、身份验证信号、服务请求信号、通导信号、服务确认信号。

3.4 水下基准站维持关键技术

海洋水下基准站维持,其核心目的是对抗复杂的海洋环境干扰,确保基准站自身作为"已知参考点"的绝对准确性和长期稳定性[18,67-69]。除了基准站各项设备、电池的长期运行能力外,基准站网的自校准技术是开展海底控制网长期维持的关键技术。海底基准站自校准技术是指水下基准站利用自身装备、辅助设备或组网技术,实时或定期地检测、修正其内部传感器误差和外部定位基准变化的过程[70]。

为了实现水下基准站自校准,发展出了一系列技术方法:

1)水面GNSS校准方法,这是获得基准站绝对坐标的最直接、最准确的手段。对于有缆或可回收的基准站,可通过水面浮标搭载GNSS接收机进行实时差分定位(如RTK),从而精确确定基准站的天线/声中心位置。对于坐底式基准站,可在布放和回收时进行精密GNSS测量。

2)对于无缆式海底基准站网,可采用组网互校准方法。在多个基准站组成的网络中,各站之间定期进行两两之间的声学测距。由于所有站的理论坐标是已知的,实际测距值与理论计算值之间的差异(闭合差)可以反演出每个站的坐标修正量和钟差参数。对于海底多测站,顾及声速结构时空变化误差的海底控制网参数设置:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{d}\tau_1 \\ \mathrm{d}\tau_2 \\ \vdots \\ \mathrm{d}\tau_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & & & B \\ & A_2 & & B \\ & & \ddots & B \\ & & A_k & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_k \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中,X_k表示各测站独立坐标参数;Y表示多测站公共声速参数;A和B表示坐标、声速参数对应的系数矩阵,通过海底运动约束条件方程进行联立,实现对海底多基站的联合标校解算;k表示第k个海底基准站;ε_k是第k站的随机误差。

海洋水下基准站的自校准是一个多技术融合、持续进行、软硬件结合的系统工程。通过上述方法,才能确保水下基准站这个"灯塔"自身足够明亮和稳定,从而为整个水下定位导航网络提供坚实可靠的基础。

海洋水下基准站网的布设、服务和维持技术持续进步,例如多传感器融合定位、"永久底座+更换基站"维持模式、AI智能化健康管理与误差补偿等新方法、新技术被不断提出,中国依托国家重点研发计划、重大科技专项等也不断进行技术攻关,与日本、美国等国的技术差距逐步缩小。

4 中国未来海洋基准发展趋势展望

以美国、日本为代表的水下导航定位基准国际领先水平已基本具备了低成本、低功耗、大规模部署、长期驻留能力,基准服务能力呈现了多技术分层协同技术优势,当前正在以信标基准、AI通信、跨介质中继为核心,从单一功能节点向感知、通信、决策一体化智能PNT服务逐步推进[71]。

相比之下,中国目前水下基准站与海底基准网建设还处于局部试验阶段,与欧美国家已大规模应用服务相比,在技术成熟度、应用服务能力等多个方面还存在一定的差距。且中国目前在深水核心传感器(如光纤陀螺)仍依赖进口,美欧凭借AI通信与深潜技术保持高端市场壁垒。主要存在的问题包括:

1)中国目前水下基准站存在功耗大、成本高、布设水深较浅等问题。中国水下基准站目前只开展了3 000 m水深试验,一般由3~5个基准站组成小范围网络,尚未构建大范围长期运行的海底基准站网,这与美日等发达国家平均5 000 m水深、多年长期布设还存在较大差距。

2)中国现有水下基准站功能较为单一,通讯能力有待提高,水下通导一体化有待深入研究。当前中国还存在水下声学信号传输带宽窄、传播速度慢、信道复杂等技术瓶颈问题需要解决,海底基准站、浮标基准站和潜标基准站之间信号传输能力亟待加强。

3)中国海洋立体基准网体系尚未形成,总体上看,中国当前的试验网络在水下目标导航定位服务方面,存在精度较低、覆盖范围较小、持续时间有限等问题。且中国目前构建的水下试验网并没有包括水下潜标基准站,尚未形成海洋立体

服务能力。

4)中国水下基准站与海底基准网标准体系不完善[72]。不同于陆地基准构建,中国水下基准和水下位置服务尚未形成完善的标准体系,其提供的基准服务尚缺乏统一、权威的技术标准。

针对中国水下基准存在的问题,中国当前正在积极开展低功耗、低成本与通导一体,实用化、智能化弹性PNT水下基准站研制与水下基准网建设工作。通过模块化架构、北斗融合与边缘智能三大创新,逐步在深海组网效率与多平台协同上形成中国独有的技术优势,以支撑中国海洋发展战略。

1)自主研制基于国产元器件的低功耗、低成本信标与水下综合基准站工作,实现长期驻留(3年以上)、大规模布设(6站以上)、深海(水深大于5 000 m)、大范围服务(大于100 km)等水下基准网研制与布设。

2)通信导航一体化海洋PNT综合服务体制将成为中国水下基准站研制的主要攻关目标。从通导信号、网络和应用服务等方面设计通导融合体制,基站采用一体化波形设计,减少通导功能间切换和传输时延的开销,终端继承北斗短报文特色,实现系统协同导航特色应用服务。

3)构建由位于海面的浮标基准站、潜标基准站和位于海床上的坐底式海底基准站组成的海洋立体基准网,打造中国海洋立体无缝海洋基准网,通过终端网络化,编队之间组成局域网、基站之间形成广域网,实现具有分级覆盖能力的远程精准导航定位服务,将极大提升中国海洋大地测量基准服务能力、精度和范围。

4)构建完善的海底基准技术标准和技术体系。在海洋基准软硬件研制、海洋基准构建与服务方面,形成系统化标准体系,实现海洋基准与陆地基准统一,从而构建中国法定、权威的陆海一体化空间基准。

综上所述,中国需要充分借鉴各国海洋水下基准建设和成熟经验,在软硬件研制、水下精密定位技术等多个关键领域还需要持续加大科研投入与攻关,向“空天地海一体”立体海洋空间基准构建与服务演进,在中国及全球关键海域建立海洋立体时空基准,为国家“海洋强国”战略实施提供坚实的基础。

参　考　文　献

[1] 杨元喜,薛树强,徐天河,等. 海洋大地测量基准与水下导航[M]. 北京:科学出版社, 2022.
YANG Yuanxi, XUE Shuqiang, XU Tianhe, et al. Marine Geodetic Datum and Underwater Navigation [M]. Beijing: Science Press, 2022.

[2] 吴立新,陈朝晖,林霄沛,等. “透明海洋”立体观测网构建[J]. 科学通报, 2020, 65(25): 2654-2661.
WU Lixin, CHEN Zhaohui, LIN Xiaopei, et al. Building the Integrated Observational Network of “Transparent Ocean”[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(25): 2654-2661.

[3] 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. Seaflooor Observatories: The Third Platform for Earth System Observation [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29(3): 125-130.

[4] 刘经南,陈冠旭,赵建虎,等. 海洋时空基准网的进展与趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 17-37.
LIU Jingnan, CHEN Guanxu, ZHAO Jianhu, et al. Development and Trends of Marine Space-Time Frame Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 17-37.

[5] SPIESS F N, LOUGHRIDGE M S, McGEHEE M S, et al. An Acoustic Transponder System[J]. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 1966, 13(2): 154-161.

[6] 李林阳,吕志平,崔阳. 海底大地测量控制网研究进展综述[J]. 测绘通报, 2018(1): 8-13.
LI Linyang, LÜ Zhiping, CUI Yang. Summary of the Research Progress of Seafloor Geodetic Control Network[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(1): 8-13.

[7] SPIESS F N. Suboceanic Geodetic Measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(4): 502-510.

[8] SPIESS F N, CHADWELL C D, HILDEBRAND J A, et al. Precise GPS/Acoustic Positioning of Seafloor Reference Points for Tectonic Studies [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1998, 108(2): 101-112.

[9] MCINTYRE M C. Design and Testing of a Seafloor Geodetic System[D]. San Diego: University of California, 1989.

[10] 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.

[11] 杨元喜,刘焱雄,孙大军,等. 海底大地基准网建设及其关键技术[J]. 中国科学:地球科学,2020,50(7):936-945.
YANG Yuanxi, LIU Yanxiong, SUN Dajun, et al. Seafloor Geodetic Network Establishment and Key Technologies[J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2020, 50(7): 936-945.

[12] 杨元喜,徐天河,薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望[J]. 测绘学报,2017,46(1):1-8.
YANG Yuanxi, XU Tianhe, XUE Shuqiang. Progresses and Prospects in Developing Marine Geodetic Datum and Marine Navigation of China[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(1): 1-8.

[13] 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.

[14] BÜRGMANN R, CHADWELL D. Seafloor Geodesy[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2014, 42: 509-534.

[15] 李林阳,柴洪洲,李姗姗,等. 海洋立体观测网建设与发展综述[J]. 测绘通报,2021(5):30-37.
LI Linyang, CHAI Hongzhou, LI Shanshan, et al. Summary of the Establishment and Development of Marine Stereoscopic Observation Network[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(5): 30-37.

[16] NAKAMURA Y, ISHIKAWA T, AKIYAMA Y, et al. Measurement of the Internal Delay Time of the Seafloor Transponders Deployed in Japan Coast Guard's Seafloor Geodetic Observation[J]. *Report of Hydrographic and Oceanographic Researches*, 2023, 2023(61): 19-27.

[17] KURITA H, SETA H, UMEDA Y, et al. Operation of the Autonomous Underwater Vehicle Gondou[J]. *Report of Hydrographic and Oceanographic Researches*, 2014, 2014(51): 98-105.

[18] 同济大学海洋科技中心海底观测组. 美国的两大海洋观测系统:OOI与IOOS[J]. 地球科学进展,2011,26(6):650-655.
Sea-Floor Observation Group, Marine Science & Technology Center, Tongji University. Two Marine Observation Systems in USA: OOI and IOOS[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(6): 650-655.

[19] 许江宁,林恩凡,何泓洋,等. 水下PNT技术进展及展望[J]. 飞航导弹,2021(6):139-147.
XU Jiangning, LIN Enfan, HE Hongyang, et al. Progress and Prospect of Underwater PNT Technology[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(6): 139-147.

[20] 郑楠. 海底大地基准点高精度定位关键技术研究[D]. 西安:长安大学,2024.
ZHENG Nan. Research on Key Technologies for High Precision Positioning of Seafloor Geodetic Control Points[D]. Xi'an: Chang'an University, 2024.

[21] ZHAO S, YANG Y X, XUE S Q, et al. A Novel GNSS-Acoustic Positioning Model for a Seafloor Hybrid Constellation with Fixed and Moored Beacons[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 9701314.

[22] 禹润田,李昊,冯师军,等. 潜浮标技术发展应用及展望[J]. 气象水文海洋仪器,2022,39(1):112-116.
YU Runtian, LI Hao, FENG Shijun, et al. Development, Application and Prospect of Submarine Buoy Technology[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2022, 39(1): 112-116.

[23] 毛祖松. 海洋潜标技术的应用与发展[J]. 海洋测绘,2001,21(4):57-58.
MAO Zusong. Application and Development of Submarine Marking Technology[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2001, 21(4): 57-58.

[24] 路晓磊,陈默,王小丹,等. 我国海洋水文调查设备的发展历程[J]. 海洋开发与管理,2020,37(9):44-48.
LU Xiaolei, CHEN Mo, WANG Xiaodan, et al. Developing History of Marine Hydrologic Survey Equipment in China[J]. *Ocean Development and Management*, 2020, 37(9): 44-48.

[25] 于非,陈永华,周春,等. 国产深海准实时传输潜标系统设计[J]. 海洋科学,2020,44(7):194-200.
YU Fei, CHEN Yonghua, ZHOU Chun, et al. Design of Deep-Sea Quasi-Real-Time-Communication Submerged Buoy Systems[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(7): 194-200.

[26] MATSUMOTO Y, ISHIKAWA T, FUJITA M, et al. Weak Interplate Coupling Beneath the Subduction Zone off Fukushima, NE Japan, Inferred from GPS/Acoustic Seafloor Geodetic Observation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2008, 60(6): e9-e12.

[27] FUJITA M, ISHIKAWA T, MOCHIZUKI M, et al. GPS/Acoustic Seafloor Geodetic Observation: Method of Data Analysis and Its Application[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, 58(3): 265-275.

[28] MOCHIZUKI M, SATO M, KATAYAMA M. Construction of Seafloor Geodetic Observation Net-

work Around Japan[C]// Interntional Symposium on Underwater Technology (Cat. No. 02EX556), Tokyo, Japan, 2002.

[29] FRIEDE I G, MIENERT J, PERSON R, et al. ESONET—European Sea Floor Observatory Network [C]// Oceans'04 MTS/IEEE Techno-Ocean'04, Kobe, Japan, 2004.

[30] FAVALI P, BERANZOLI L. EMSO: European Multidisciplinary Seafloor Observatory[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 602(1): 21-27.

[31] FAVALI P, BERANZOLI L, MATERIA P, et al. EMSO European Research Infrastructure: Towards an Integrated Strategy for the Observation of the Seafloor and the Water Column[C]//OCEANS 2015-Genova, Genova, Italy, 2015.

[32] 薛树强, 杨诚, 赵爽, 等. 海底大地控制网无人观测系统研究进展[J]. 导航定位学报, 2023, 11(6): 8-21.
XUE Shuqiang, YANG Cheng, ZHAO Shuang, et al. Review of Unmanned Observation Systems for Seafloor Geodetic Network[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2023, 11(6): 8-21.

[33] 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.

[34] 何剑锋, 张芳, 林凌. 我国极地海底观测系统的发展与展望[J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 566-571.
HE Jianfeng, ZHANG Fang, LIN Ling. Development and Prospect of Chinese Polar Seabed Observation Systems[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(5): 566-571.

[35] 董一飞, 罗文造, 梁前勇, 等. 坐底式潜标观测系统及其在天然气水合物区的试验性应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(5): 195-203.
DONG Yifei, LUO Wenzao, LIANG Qianyong, et al. A Newly Developed Bottom-Supported Submersible Buoyant System and Its Testing Application to a Natural Gas Hydrate Area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 195-203.

[36] 于新生, 阎子衿, 朱明亮, 等. 自主式深海海底溶质通量原位观测站研究进展[J]. 海洋科学, 2017, 41(6): 150-161.
YU Xinsheng, YAN Zijin, ZHU Mingliang, et al. Review of Seabed Landers for Monitoring Solute Fluxes in Deep Sea[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(6): 150-161.

[37] 郑翠娥, 张居成, 李昭. 深水高精度水下综合定位系统研制科技报告[J]. 科技创新导报, 2016, 13(5): 164.
ZHENG Cuie, ZHANG Jucheng, LI Zhao. Scientific Report of Deep Sea High Precision Underwater LUSBL Positioning System Project[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2016, 13(5): 164.

[38] 刘焱雄, 李梦昊, 刘杨, 等. 海底大地基准建设技术及其研究进展[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 684-700.
LIU Yanxiong, LI Menghao, LIU Yang, et al. Research Progress of Seafloor Geodetic Datum Construction Technology[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, 40(4): 684-700.

[39] 王澍初, 张飞. 海底观测网深水设备精准定点布放方法研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(1): 39-44.
WANG Shuchu, ZHANG Fei. Research of Precision Deployment for Equipment of Seafloor Observatory Network in the Deep Sea[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2020, 39(1): 39-44.

[40] 张羽, 倪佐涛, 赵飞达. 关于坐底式潜标的设计与布放回收[J]. 科技创新与生产力, 2018, 39(5): 44-47.
ZHANG Yu, NI Zuotao, ZHAO Feida. Design and Launching and Retrieval About Bottom-Supported Subsurface Buoy[J]. *Sci-Tech Innovation & Productivity*, 2018, 39(5): 44-47.

[41] 郑翠娥, 程驰宇, 韩云峰, 等. 基于海底基准的中远程PNT定位导航技术及验证[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(11): 2018-2026.
ZHENG Cuie, CHENG Chiyu, HAN Yunfeng, et al. Medium and remote Range Acoustic PNT Datum Positioning Andnavigation Technology [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(11): 2018-2026.

[42] 陈冠旭, 刘杨, 李梦昊, 等. GNSS-声学海底定位的声速误差处理方法综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(9): 1349-1363.
CHEN Guanxu, LIU Yang, LI Menghao, et al. Review on the Processing Methods of Sound Speed Errors in GNSS-Acoustic Seafloor Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1349-1363.

[43] 马越原, 曾安敏, 许扬胤. 圆走航模式下海底控制点对称差分定位模型及分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(7): 1155-1165.
MA Yueyuan, ZENG Anmin, XU Yangyin. Symmetric Difference Positioning Model and Analysis of Sailing Circle Mode of Seafloor Control Points[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan Uni-*

versity, 2024, 49(7): 1155-1165.

[44] CHADWELL C D, SPIESS F N. Plate Motion at the Ridge-Transform Boundary of the South Cleft Segment of the Juan de Fuca Ridge from GPS-Acoustic Data [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B4): 2007JB004936.

[45] CHADWELL C D. Campaign-Style GPS-Acoustic with Wave Gliders and Permanent Seafloor Benchmarks [C]//The Subduction Zone Observatory Workshop, Boise, USA, 2016.

[46] MCGUIRE J J, COLLINS J A. Millimeter-Level Precision in a Seafloor Geodesy Experiment at the Discovery Transform Fault, East Pacific Rise[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(10): 4392-4402.

[47] WATANABE S I, ISHIKAWA T, YOKOTA Y, et al. GARPOS: Analysis Software for the GNSS-A Seafloor Positioning with Simultaneous Estimation of Sound Speed Structure [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 597532.

[48] YOKOTA Y, ISHIKAWA T, WATANABE S I, et al. Kilometer-Scale Sound Speed Structure that Affects GNSS-A Observation: Case Study off the Kii Channel[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 331.

[49] YOKOTA Y. Quantitative Interpretation of the Ability of the GNSS-A to Monitor Underwater Structure[J]. *The Journal of the Marine Acoustics Society of Japan*, 2019, 46(3): 116-129.

[50] YOKOTA Y, OKUMURA M. Study for Improving Efficiency in Seafloor Geodetic Observation by Means of Multiacoustic Ranging[J]. *Report of Hydrographic and Oceanographic Researches*, 2015, 2015(52): 79-87.

[51] WANG K, ZHAO S, WANG Z J. Joint Adjustment Method of Sea-Surface Transducer and Sea-Floor Transponder for Precise GNSS-Acoustic Underwater Positioning with Round-Trip Acoustic Path [J]. *Advances in Space Research*, 2025, 76(9): 5042-5057.

[52] NAKAMURA Y, YOKOTA Y, ISHIKAWA T, et al. Optimal Transponder Array and Survey Line Configurations for GNSS-A Observation Evaluated by Numerical Simulation[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 600993.

[53] XUE S Q, YANG Y X, YANG W L. Single-Differenced Models for GNSS-Acoustic Seafloor Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(5): 38.

[54] 薛树强, 杨元喜, 肖圳, 等. 全球导航卫星系统-声呐组合观测模型分类体系[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(11): 1857-1868.
XUE Shuqiang, YANG Yuanxi, XIAO Zhen, et al. Global Navigation Satellite System-Acoustic Combined Observation Model Classification System [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(11): 1857-1868.

[55] XUE S Q, YANG Y X. Unbiased Nonlinear Least Squares Estimations of Short-Distance Equations[J]. *Journal of Navigation*, 2017, 70(4): 810-828.

[56] ZHAO S, WANG Z J, NIE Z X, et al. Investigation on Total Adjustment of the Transducer and Seafloor Transponder for GNSS/Acoustic Precise Underwater Point Positioning[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 221: 108533.

[57] 孙大军, 郑翠娥, 张居成, 等. 水声定位导航技术的发展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 331-338.
SUN Dajun, ZHENG Cuie, ZHANG Jucheng, et al. Development and Prospect for Underwater Acoustic Positioning and Navigation Technology [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(3): 331-338.

[58] SUN D J, YU M, ZHENG C E, et al. Improved Seafloor Geodetic Positioning via Sound Velocity Correction Based on the Precise Round-Trip Acoustic Positioning Model[J]. *Marine Geodesy*, 2023, 46(1): 43-61.

[59] WANG J T, XU T H, NIE W F, et al. The Construction of Sound Speed Field Based on back Propagation Neural Network in the Global Ocean[J]. *Marine Geodesy*, 2020, 43(6): 621-642.

[60] 宁津生, 吴永亭, 孙大军. 长基线声学定位系统发展现状及其应用[J]. 海洋测绘, 2014, 34(1): 72-75.
NING Jinsheng, WU Yongting, SUN Dajun. The Development of LBL Acoustic Positioning System and Its Application [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(1): 72-75.

[61] 赵建虎, 陈鑫华, 吴永亭, 等. 顾及波浪影响和深度约束的水下控制网点绝对坐标的精确确定[J]. 测绘学报, 2018, 47(3): 413-421.
ZHAO Jianhu, CHEN Xinhua, WU Yongting, et al. Determination of Absolute Coordinate of Underwater Control Point Taking Waves and Depth's Constraint into Account[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 413-421.

[62] 孙文舟, 殷晓冬, 曾安敏, 等. 附加深度差和水平距离约束的深海控制点差分定位算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1190-1197.

SUN Wenzhou, YIN Xiaodong, ZENG Anmin, et al. Differential Positioning Algorithm for Deep-Sea Control Points on Constraint of Depth Difference and Horizontal Distance Constraint[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1190-1197.

[63] WANG J T, XU T H, LIU Y F, et al. Kalman Filter Based Acoustic Positioning of Deep Seafloor Datum Point with Two-Step Systematic Error Estimation [J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 114: 102817.

[64] 李守军, 包更生, 吴水根. 水声定位技术的发展现状与展望[J]. 海洋技术, 2005, 24(1): 130-135.
LI Shoujun, BAO Gengsheng, WU Shuigen. A Practical Overview and Prospect of Acoustic Positioning Technology[J]. *Ocean Technology*, 2005, 24(1): 130-135.

[65] 赵建虎, 梁文彪. 海底控制网测量和解算中的几个关键问题[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1197-1202.
ZHAO Jianhu, LIANG Wenbiao. Some Key Points of Submarine Control Network Measurement and Calculation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1197-1202.

[66] 薛树强, 杨诚, 卞加超, 等. 无外部信息辅助的主动式声呐时间开窗导航定位模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(2): 296-305.
XUE Shuqiang, YANG Cheng, BIAN Jiachao, et al. Active Sonar Time-Window Navigation and Positioning Model Without External Information Assistance[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(2): 296-305.

[67] 刘经南, 赵建虎, 马金叶. 通导遥一体化深远海PNT基准及服务网络构想[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1523-1534.
LIU Jingnan, ZHAO Jianhu, MA Jinye. Concept of Constructing the Underwater PNT Network with the Abilities of Communication, Navigation and Remote Sensing in the Deep Sea[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1523-1534.

[68] NEWMAN A, BARTLOW N, SCHMIDT D, et al. Future Directions for Seafloor Geodesy[R]. Community Workshop Report, Online, 2021.

[69] 李三忠, 金宠, 戴黎明, 等. 洋底动力学: 国际海底相关观测网络与探测系统的进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 131-143.
LI Sanzhong, JIN Chong, DAI Liming, et al. Marine Geodynamics—Advances and Perspectives of International Oceanfloor-Related Observatory Network and Exploration Technique System[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 131-143.

[70] 赵爽, 薛树强, 王振杰, 等. 海底大地基准站维护方法研究进展[J]. 哈尔滨工程学报, 2026, 40(4): 1-14.
ZHAO Shuang, XUE Shuqiang, WANG Zhenjie, et al. Research Progress on Maintenance Methods of Seafloor Geodetic Reference Stations [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2026, 40(4): 1-14.

[71] National Security Space Office. National Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Architecture Study Final Report[R/OL]. 2008-09-01. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/16923/dot_16923_DS1.pdf.

[72] 翟国君, 吴太旗, 陆秀平, 等. 海洋测绘标准体系建设需求分析与总体方案[J]. 海洋测绘, 2020, 40(1): 1-5.
ZHAI Guojun, WU Taiqi, LU Xiuping, et al. Demand Analysis and General Planning of the Standard System for Marine Surveying and Mapping[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2020, 40(1): 1-5.