

全球有缆海底观测网概述*

朱俊江¹, 孙宗勋¹, 练树民¹, 殷建平¹, 李智刚²

1. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016

摘要: 近期有缆海底观测网发展迅猛, 世界各国包括加拿大、美国、日本和欧洲国家都依据自己的科学目标, 建立了相应的有缆海底观测网。文章针对不同国家有缆海底观测网系统的组成和建设分别做了概述和评论。从 1978 年开始到现在, 日本成功建设了 10 条有缆海底地震观测网, 从早期同轴电缆作为主干电缆, 发展到使用光电缆连接水下设施。加拿大成功建成近岸尺度和区域尺度两条有缆海底观测网。美国 2012 年成功建成目前世界上最长的一条区域海底观测网(约 900km)。欧洲国家也正在开展在 10 个海区建立有缆观测网。跟随国外的步伐, 我国和我国台湾地区也建立了自己的海底观测站(东海小衢山)和有缆观测网(中国台湾妈祖)。文章依据世界上已经建立的有缆海底观测网, 分析认为与全球有缆观测网布设有关的遥控水下机器人是关键技术, 并探讨了海底观测网今后的发展和面临的挑战。

关键词: 有缆海底观测网; 海底光电缆; 遥控水下机器人; 科学节点; 接驳盒

中图分类号: P756.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2017)03-0020-14

Review on cabled seafloor observatories in the world

ZHU Junjiang¹, SUN Zongxun¹, LIAN Shumin¹, YIN Jianpin¹, LI Zhigang²

1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

Abstract: Marine cabled seafloor observatories have been constructed and developed quickly recently in the world. Based on scientific requirements and objectives, many countries, including Canada, United States of America, Japan, and European countries, have built up cabled seafloor observatories, respectively. Infrastructures and progresses of different cabled seafloor observatories constructed by different countries were outlined and reviewed in this paper. Since 1978, 10 cabled seafloor observatories in Japan have been successfully built using coaxial cables at the beginning and using fiber-optical cables recently. One near-coast seafloor observatory and one regional-scale observatory were built in Canada. Two seafloor observatories were organized and managed by the Ocean Network Canada (ONC), and both are maintained by the University of Victoria. In 2012, the longest regional cabled seafloor observatory in the world (nearly 900 km long) was deployed in the USA. Cabled seafloor observatories in Europe have been planned to cover different ocean regions. In China, cabled seafloor observatories were built in Taiwan (MACHO) and in the East China Sea (Xiaoqushan). Based on these cabled seafloor observatories in the world, we proposed important technologies required by ocean networks, and suggested that remotely operated vehicles play key roles when cabled seafloor observatories are reconstructed. Finally, the development and challenge of cabled seafloor observatories are discussed, including some key notes and questions that should be considered by decision-makers when a new cabled

收稿日期: 2016-10-07; 修订日期: 2016-11-25。殷波编辑

基金项目: 广州市科技计划项目(一般项目)(201607010220)

作者简介: 朱俊江(1976—), 男, 甘肃省永昌县人, 副研究员, 主要从事海洋地质与地球物理研究。E-mail: jzhu@scsio.ac.cn

*感谢两位审稿人提出的宝贵意见, 同时感谢中国科学院南海海洋研究所、中国科学院沈阳自动化研究所和中国科学院声学研究所三亚海底观测示范网建设和筹备组的大力支持和配合。

Received date: 2016-10-07; **Revised date:** 2016-11-25. Editor: YIN Bo

Foundation item: Guangzhou Science and Technology Project (201607010220)

Corresponding author: ZHU Junjiang. E-mail: jzhu@scsio.ac.cn

seafloor observatory will be prepared and developed in China.

Key words: marine cabled seafloor observatory; seafloor fiber-optical cable; remotely operated vehicle; scientific node; junction box

近年来, 世界各国都加快了深海观测和海底传感器技术研发的步伐, 特别重视海洋探测、水下声通讯、海底矿产资源勘探等深海技术。目前海底观测网主要可分为无缆锚系-浮标系统和有缆观测网系统两大类(NRC, 2000)。根据观测技术可划分为海底观测站、观测链和海底观测网络(陈鹰 等, 2006)。

日本是最早建立有缆观测网的国家, 1979 年建成 Tokai 海区观测网, 1986 年建成 Boso 海区地震观测网(Joseph, 2011)。近年来日本继续建设更为宏伟的有缆观测网, 如密集海底地震和海啸网络系统(DONET)(图 1、表 1)。尽管早期使用笨重的同轴电缆作为主干水下电缆, 但系统框架较为完整, 总体是由岸基站、海底电缆和水下仪器(海底地震仪、海啸计)组成。美国和加拿大也是较早提出筹建海底观测网计划的国家, 其中最为成熟的有加拿大的海王星海底观测网(NEPTUNE)和金星海底观测网(VENUS); 美国的火星观测网(MARS)和海洋观测计划-区域尺度节点观测网(OOI-RSN)(图 1)。同时, 欧洲国家也积极加入到海洋观测网建设的热潮中,

如欧洲海底观测网(ESONET)。近年中国以及中国台湾地区也相应建立了有缆海底观测网络, 如中国台湾的妈祖观测网(MACHO)(许树坤 等, 2005; 李昭兴 等, 2010)和东海小衢山观测站(许惠平 等, 2011; 张艳伟 等, 2011)。

有缆海底观测网遵循海洋科学技术的协同发展(汪品先, 2011), 是继地面/洋面和空间之后的第三个观测平台(汪品先, 2007), 对大洋洋底动力学的研究有一定的推动作用(李三忠 等, 2009a、2009b)。传统海洋调查受到观测时空尺度和传感器的制约, 不能很好地解决海洋中发生的现象和过程的细节(Dickey et al, 2005), 有缆海底观测手段的出现将有助于这一关键问题的解决。有缆观测网的优点是能够提供不间断电力支撑, 实现长期、连续、实时的海洋立体观测, 获取不同时间、空间尺度的海洋过程数据, 为不同领域的海洋科学家研究突发性事件的过程(如台风、地震和海啸、海底滑坡)提供翔实和精确的数据, 包括数月几年周期的过程和全球尺度长期过程数据。有缆海底观测网的缺点是平台

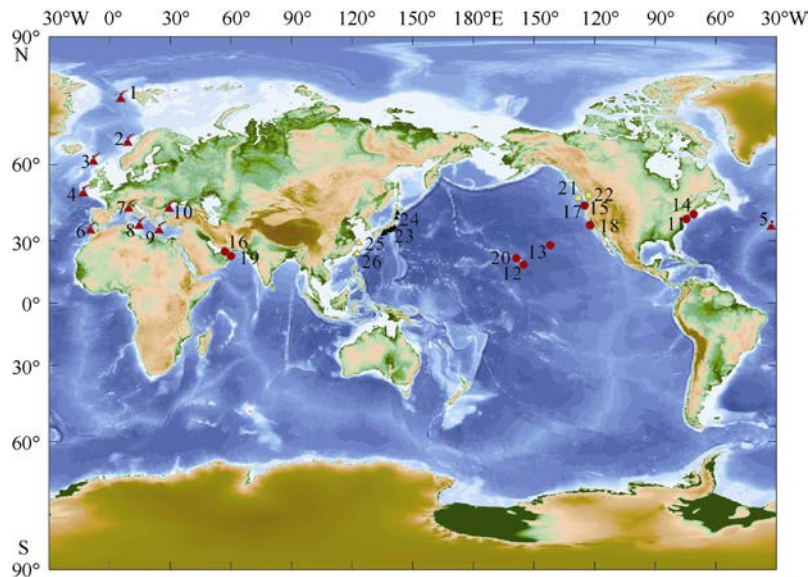


图 1 全球有缆海底观测网分布图

图中红三角为欧洲海底观测网(ESONET)位置: 1. 北冰洋观测网; 2. 挪威大陆边缘观测网; 3. 北海观测网; 4. 东北大西洋波克潘(Porcupine)观测网; 5. 大西洋中脊亚速尔(Azores)观测网; 6. 伊比利亚大陆边缘观测网; 7. 利古里亚海观测网; 8. 西西里岛东部海底观测网; 9. 地中海希腊 Hellenic 观测网; 10. 黑海观测网。红圆点为美国海底观测网: 11. 长期生态系统观测系统(LEO-15); 12. 夏威夷海底火山观测网(HUGO); 13. 夏威夷-2 观测网(H2O); 14. 马萨葡萄园岛海岸带观测网(MVCO); 15. 蒙特利湾海底长期三分量海底地震台站(MOBB); 16. 灯塔海洋研究计划 期(LORI-); 17. 火星观测网(MARS); 18. 海洋观测计划-区域尺度节点观测网(OOI-RSN); 19. 灯塔海洋研究计划 期(LORI-); 20. 阿罗哈观测网(ACO)。黄色方形为加拿大海底观测网: 21. 海王星海底观测网(NEPTUNE); 22. 金星海底观测网(VENUS)。黑色三角形为日本海底观测网: 23. 密集海底地震和海啸网络系统(DONET); 24. 日本其他观测网(参照图 2 和表 1)。黄色三角形为中国海底观测网: 25. 小衢山海底观测站(XQ); 26. 中国台湾妈祖海底观测网(MACHO)

Fig. 1 Distribution map of cabled seafloor observatories in the world

表 1 日本有缆海底观测网络

Tab. 1 Cabled seafloor observatories in Japan

序号	位置	观测网布设单位	建设年度	电缆长度/km	备注
1	御前崎	日本气象厅	1979	120	同轴电缆
2	胜浦	日本气象厅	1986	96	同轴电缆
3	伊东	东京大学地震研究所	1993	28	光电缆
4	平冢	防灾科学技术研究所	1996	127	光电缆
5	釜石	东京大学地震研究所	1996	123	光电缆
6	室户	日本海洋科学和技术厅	1997	125	光电缆
7	钏路	日本海洋科学和技术厅	1999	242	光电缆
8	室户	日本海洋科学和技术厅	2006	300	光电缆
9	御前崎	日本气象厅	2008	220	光电缆
10	纪伊半岛	日本海洋科学和技术厅	2010	450	光电缆

注: 数据来源于文献 Joseph (2011)和 http://www.nec.com/en/global/ir/library/pr_archive.html

固定, 可移动性差, 需要结合船载海洋观测和卫星、移动浮标观测相结合。本文试图从日本、加拿大、美国、欧洲国家最近几年的有缆海底观测网介绍和分析出发, 寻找建立适合我国建设长期有缆观测网的经验和方法, 从全球角度分析和探讨我国建立观测网的迫切性和建立观测网的科学目标和意义。

1 国外有缆式海底观测网概述

1.1 日本有缆海底观测网

日本高校和科研院所非常重视海底地震和海啸的监测以及研究。1979 年日本气象厅建立了两条同轴电缆的在线类型海底地震观测网(表 1 和图 2a、2b、2c)。系统主要使用 96~120km 长的同轴电缆做为主干网络的电力和信息传输介质, 水下设备由多个海底地震仪和海啸压力计组成(表 1)。九十年代后期由于海底光纤电缆技术的发展, 东京大学地震研究所(ERI)分别布设了两条海底地震观测网, 都使用了光纤电缆做为主干网, 随后日本海洋科学和技术厅(JAMSTEC)布设了其他 4 条海底地震观测网(表 1)。早期由于同轴电缆价格昂贵, 在部分海底通讯电缆废弃的机遇下, 一些科学家意识到利用海底废弃长距离电信电缆去建立海底地震观测系统将是一个绝佳的机会(Nagumo et al, 1989; Walker, 1991)。1997 年 1 月东京大学地震研究的科学家在环太平洋电缆上建立了海底地震观测站(Kasahara et al, 1998、2001)(图 2d)。1997 年 3 月日本海洋科学和技术厅建成了第一条光纤电缆的海底观测网(Momma et al, 1997)。尽管利用废弃电缆去建设地震观测网, 其布设过程与维修海底电缆的过程几乎是一样的, 但是费用仍然很昂贵, 废弃电缆的使用寿命也是一个致命的弱点, 很快这样的方法也被重新布设光纤电缆

所取代。2006 年在日本文部省资助下, 开始建设 DONET, DONET 第一期建设在室户(Muroto)海区, 主要目的是监测地震和海啸, 建立大范围实时海底观测的基础设施, 形成一个高密度的网络, 以开展大范围、高精度的连续观测, 其中海底的 20 个地震台站于 2011 年布设完成(表 1)。DONET 第二阶段从 2010 年开始建设, 计划在纪伊半岛安装 29 个地震观测台站, 2 个岸基站, 7 个节点, 450km 长的主干光电缆, 2013 年开始海底布设, 2015 年系统开始运转(图 2e)。水下关键设备主要是海底地震仪、海啸压力计和主干光电缆末端多传感器平台。多传感器平台主要由一些测量环境参数的传感器组成, 如测流计、声学多普勒测流剖面仪(ADCP)、温盐深测量仪(CTD)、温度探针、水听器、照相设备和石英压力计等(图 2f)。

日本海底观测网的主要特点是起步早, 从笨重昂贵的同轴电缆到轻巧的光电缆为海底主干电缆。观测网以监测地震和海啸为主要目的。观测网规划比较长远, 组网技术成熟, 由日本电气股份有限公司(NEC)做技术支撑。

1.2 加拿大有缆海底观测网

加拿大有缆海底观测网主要由加拿大海洋网络(ONC)负责和管理, 目前旗下已经建成和运转 2 个有缆海底观测网络: NEPTUNE 和 VENUS (Taylor, 2008)。这 2 个观测网络都由加拿大维多利亚大学运转和维护, 数据通过网络从无人岸基站传输到数据中心(Barnes et al, 2008; Pirenne et al, 2009)。

NEPTUNE 是世界上第一个大区域尺度的、多节点、多传感器的有缆海底观测网(Taylor, 2008; Barnes et al, 2008; Taylor, 2009)。2008 年至 2009 年首先完成了 800km 长的多节点环形主干网建设。从岸基站艾伯尼港(位于温哥华岛)开始, 观测网穿越

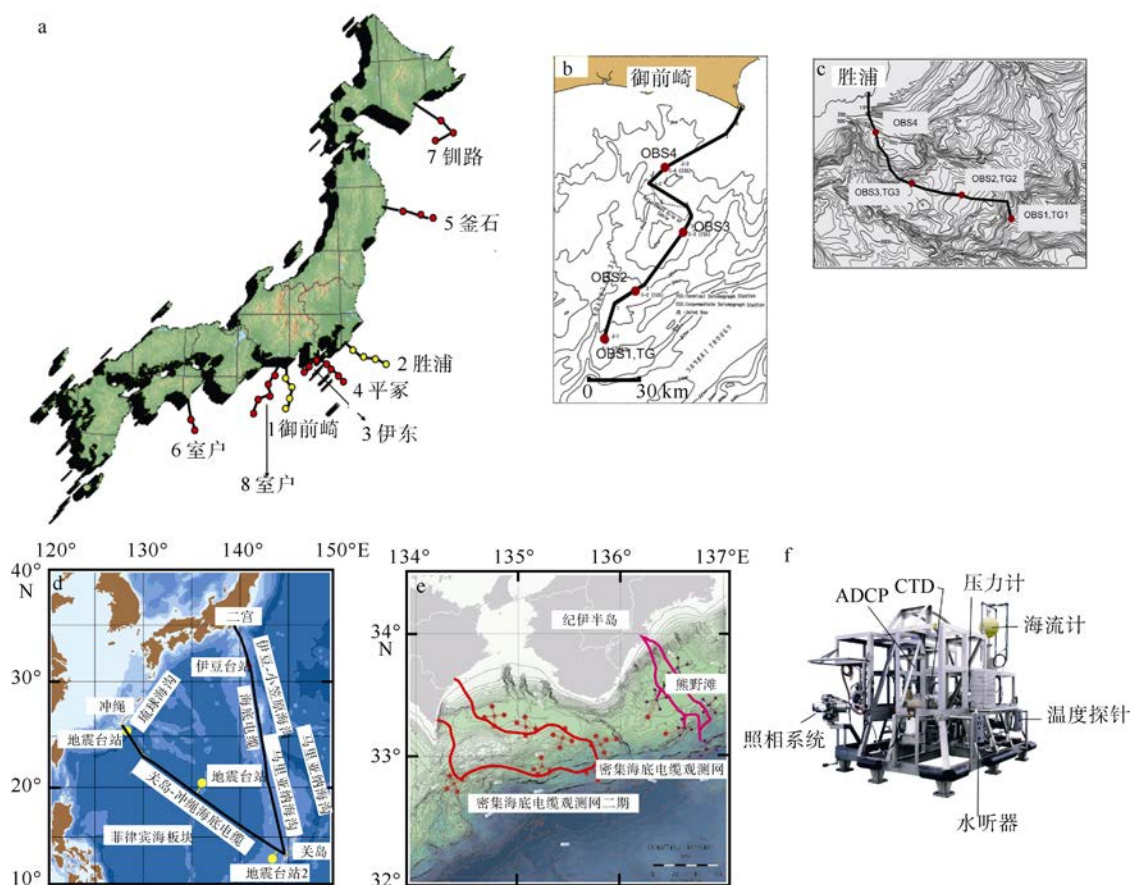


图 2 日本有缆海底观测网概述

a. 从 1979 年至 2008 年日本海域布设的 8 条有缆观测网示意图, 详细情况见表 1; b. 1979 年布设的御前崎(Omaezaki)同轴电缆观测网; c. 1986 年布设的同轴电缆观测网示意图, OBS 为海底地震仪台站, 黑线为海底电缆, 黑点为台站位置; d. 1997 年在电信环太平洋电缆(trans Pacific cable-1)安装的海底地震仪台站; e. 密集海底地震和海啸网络系统(DONET)的一期和二期布局; f. 主干光电缆末端多传感器平台示意图。资料来源自 Momma 等(1997)、Kasahara 等(1998、2001)和 Joseph (2011)

Fig. 2 Infrastructure of cabled seafloor observatories in Japan

了海岸带、大陆斜坡带、深海平原和大洋扩张脊等不同的地质构造环境(图 3)。该系统水下有 6 个科学主节点, 目前 5 个节点正式使用, 系统提供 10kW 的电力和 $4\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}$ 的数据传输能力(Barnes et al, 2008; Pirenne et al, 2009)。该区域观测网由 5 个主要科学主题驱动: 1) 板块构造运动及地震动力机制; 2) 海底洋壳中的流体通量和增生楔内的天然气水合物; 3) 海洋和气候动力机制及其对海洋生物的影响; 4) 深海生态系统动力机制; 5) 工程及计算研究(Taylor, 2008; Barnes et al, 2008)。

VENUS 是一个近岸尺度的海底观测网, 2006 年在萨尼奇入口布设了一条 4km 长的单节点网。科学节点投放在 100m 水深处, 系统布设在有氧和缺氧转换带的峡湾内, 光电缆登陆点位于加拿大渔业和海洋科学研究所(Barnes et al, 2008)(图 4a)。2008 年在佐治亚海峡布设了第二条 40km 长的双节点观测网, 2 个科学节点从弗雷泽三角洲延伸到穿过大部分佐治亚海峡

(图 4a)。依据观测网布设的位置, 该观测网的科学目的主要集中在海洋动力环流模式; 大洋变化的修复; 次级生产力对环境的反应; 鲸的行为和声学污染; 底栖生物群落的反应; 海底稳定性、侵蚀和沉积; 生态系统反应的早期预警等(Barnes et al, 2008; Aguzzi et al, 2011)。海底布设的仪器主要有 CTD、 O_2 传感器、ADCP、浮游动物声学剖面仪、水听器、沉积物捕获器、照相设备和一些自主研制的仪器。

VENUS 是通过岸基站连接水下科学节点, 通过岸站把数据传输到维多利亚大学数据和管理档案中心(Pirenne et al, 2009), 水下次级接驳盒或称科学仪器界面模块(SIIM)通过次级电缆直连到不同传感器和仪器(图 4b)。NEPTUNE 的水下基础设施主要由 Alcatel-Lucent 公司设计、制造和安装, VENUS 的水下光电缆由 Global Marine System 公司负责安装, OceanWorks 公司为 2 个观测网提供了特殊的网络技术(Barnes et al, 2008; Woodroffe et al, 2008)。

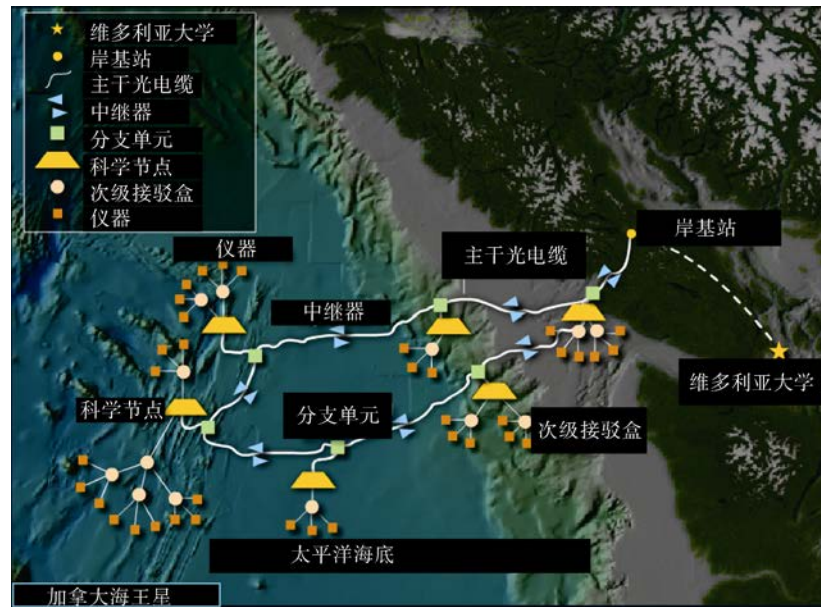


图3 加拿大海王星海底观测网系统结构示意图(资料来源: <http://www.neptunecanada.ca/about-neptune-canada/infrastructure/>)

Fig. 3 Infrastructure of seafloor observatory of Neptune in Canada. Source from <http://www.neptunecanada.ca/about-neptune-canada/infrastructure/>

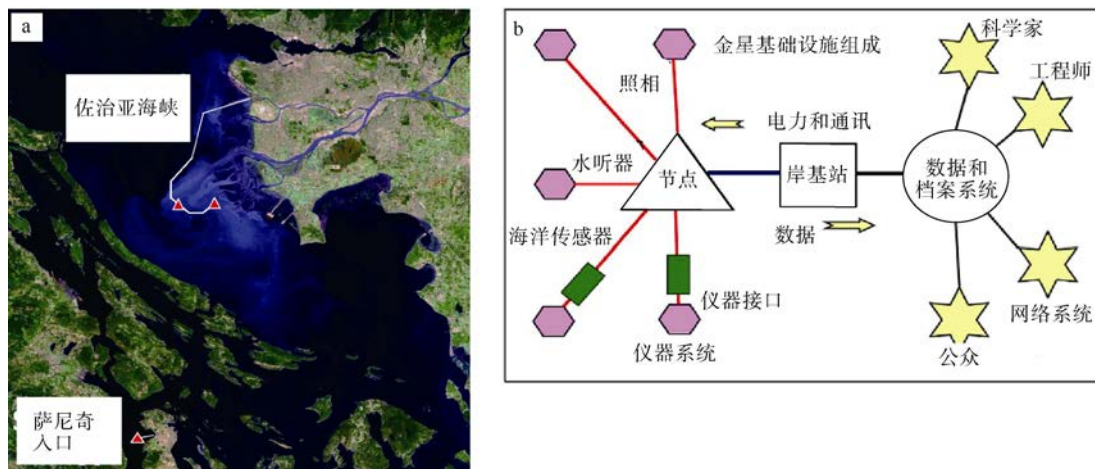


图4 加拿大金星海底观测网系统基本结构示意图[据 Barnes 等(2008)]

a. 金星海底观测网位置图; b. 观测网系统基本结构。图 a 中红三角形表示接驳盒位置; 白色实线表示海底电缆

Fig. 4 Infrastructure of seafloor observatory VENUS. (a) the location map of the VENUS; (b) The infrastructure of the VENUS. After Barnes et al (2008)

加拿大海底观测网的特点是: 在科学目标驱动下, 建立了近海尺度的 VENUS 和区域尺度的 NEPTUNE; 观测网系统完善, 预留和设计了为将来扩充的端口, 开创了全球有缆海底观测网的典范和标准; 核心技术为 SIIM; 观测网组建过程中, 使用了先进的水下机器人——海洋科学遥控操作平台(ROPOS); 观测网数据全球公开。

1.3 美国有缆海底观测网

美国有缆海底观测网起步较早, 截止到目前已经建成大约 10 条有缆海底观测网(表 2)。从 1996 年建设完成的长期生态系统观测系统(LEO-15), 2010 年开始建设的 OOI-RSN, 到 2011 年建设的阿罗哈观

测网(ACO), 每一个观测网络都有各自的特定科学目标。布设的位置也从海岸带、浅海峡谷地带(如 MARS)到大洋的深海区域(如 OOI-RSN)。

1996 年 9 月, 美国新泽西州立大学率先在大西洋新泽西大海湾海岸带布设了 LEO-15。它是比较早的一个有缆海底观测网, 由一条约 9.6km 长的海底光电缆连接科学节点, 系统由布设在 15m 水深的 2 个科学节点组成(von Alt et al, 1992、1997; Forrester et al, 1997)(图 5a)。观测网岸基站设在罗格斯大学的海洋和海岸带科学研究所内(位于塔克顿), 长时间序列数据存储格式为网络通用数据格式 NetCDF (Howe et al, 2002)。

表 2 美国有缆海底观测网

Tab. 2 Cabled seafloor observatories in the USA

序号	观测网名称	布设单位	建设年度	电缆长度/km
1	LEO-15	罗格斯大学	1996	9.6
2	HUGO	夏威夷大学	1997	47
3	H2O	伍兹霍尔海洋研究所	1998	—
4	MVCO	伍兹霍尔海洋研究所	2000	4.5
5	MOBB	蒙特利湾水生研究所	2002	52
6	LORI-	灯塔研发企业	2005	约 120
7	MARS	蒙特利湾水生研究所	2007	52
8	OOI-RSN	华盛顿大学	2010	900
9	LORI-	灯塔研发企业	2010	354
10	ACO	夏威夷大学	2011	—

注：“—”表示无法准确确定海底电缆长度

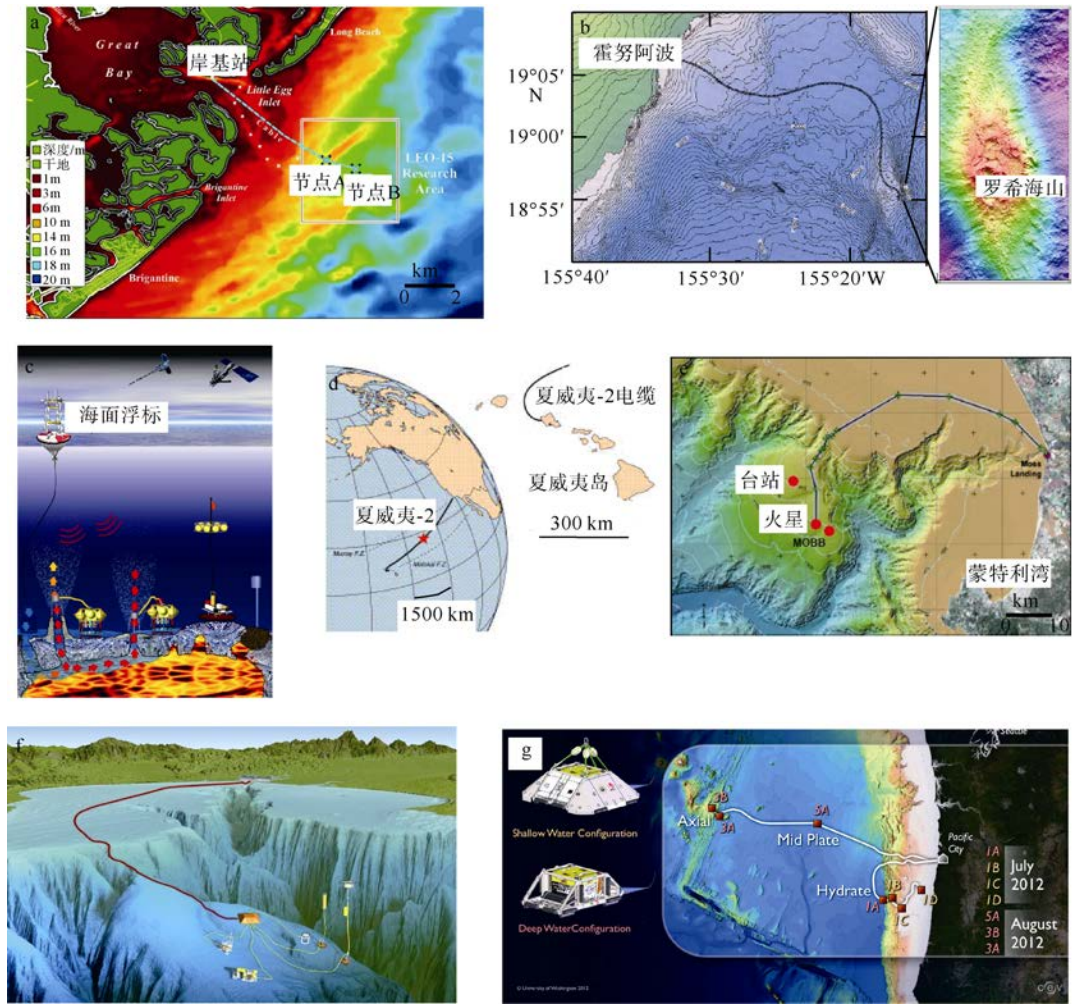


图 5 美国有缆海底观测网系统基本结构

a. 长期生态系统观测网(LEO-15)位置图：方框表示水下节点位置区域；蓝色虚线表示海底电缆的位置；白色点线表示观测点位置。
b. 夏威夷海底火山观测网(HUGO)系统结构图：黑色线条为海底电缆；小图为罗希火山的放大图。
c. 新千年海底观测站(NeMO)示意图。
d. 夏威夷-2 观测网(H2O)位置和电缆位置示意图。
e. 蒙特利湾海底长期三分量地震台站观测网(MOBB)位置示意图：红点表示台站；蓝色实线表示海底电缆位置。
f. 火星观测网(MARS)系统结构示意图：红色线条为海底电缆；其他线条为主要接驳盒与水下各种传感器和设备的连接线。
g. 海洋观测计划-区域尺度节点观测网(OOI-RSN)系统结构示意图：正方形为海底主节点位置；白线条为海底电缆；图中左侧为浅水和深水节点组成

Fig. 5 Infrastructure of cabled seafloor observatories in the USA. (a) the site map of LEO-15 (<http://www.marine.rutgers.edu/mrs/info/leomap.html>); (b) the system structure of NUGO; (c) the site map of NeMO; (d) the site map of H2O; (e) the site map of MOBB; (f) the system structure of MARS; (g) the system structure of OOI-RSN. (<http://www.ooi.washington.edu/story/OOI+Primary+Node+Installation+Begins>)

罗希火山与热点活动有关,位于海底地幔羽的顶部,是夏威夷火山链中最年轻的火山,火山活动活跃,需要在海底观测网开展长期、连续的观测。因此,1997年10月在夏威夷罗希火山顶部布设了一条47km长的海底火山观测网(HUGO),岸基站位于夏威夷的霍努阿波(Duennebie et al, 1997、2002a、2002b)(图5b)。HUGO观测网的科学目标主要是对海底火山及相关的物理海洋、生物、地质和声学现象进行观测。做为海底的一个固定站位,有利于科学家在深海大洋环境场所进行科学研究(Duennebie et al, 2002a、2002b)。载人潜水器Pisces V对HUGO观测网进行布设和维护(Duennebie et al, 2002a)。1998年4月该系统出现故障,不能重新启动,同年10月使用Pisces V插入电池包给主接驳盒,系统电路正常工作,排除了之前认为主接驳盒短路的问题。由于主干光电电缆的短路问题以及昂贵的重新布设费用,2002年观测网被迫停止运转并使用水下机器人回收了所有的观测设备(Duennebie et al, 2002a)。相似于HUGO,1997年在胡安德富卡板块内的洋中脊海山区域也布设了一个新千年海底观测站(NeMO),重点观测热液喷口附近的地质、生物和化学相关的科学内容(图5c)。早期在火山位置布设的观测网虽然都已经停止运转,但是给后续的观测网提供了许多宝贵的经验。

1998年9月,在东太平洋海域,利用废弃的通信电缆布设了夏威夷-2观测网(H2O)(Chave et al, 2002; Duennebie et al, 2002b)(图5d)。H2O建立在距离美国檀香山1750km处,周边2000km范围内没有任何陆地,这一系统的建立,对全球海洋地震台网的覆盖非常有利(Chave et al, 2002)。此观测网使用美国物理海洋研究调查船R/V Thomas G. Thompson和遥控机器人Jason布设水下设备。安装后的两个月,由于破坏性的海流使地震观测中断,1999年9月的维修更新了主接驳盒,同时安装了高频的水听器,观测网进入稳定阶段。数据传输到岸基站马卡哈(Makaha)后,通过网络传输到夏威夷大学马诺阿(Manoa)校区(Duennebie et al, 2002b)。系统主要由地震传感器、声学和环境传感器(包括海流计、温度和压力传感器)组成。H2O的主要科学目标是在远距离、深海地区获取高质量的宽频带地震数据,获取实时高质量的粒子运动和声学数据,频率范围从0.01Hz到100Hz的数据,传感器数据都使用16位的模数转换(Duennebie et al, 2002b; Butler, 2003),地震传感器也被埋藏在海底底部(Duennebie et al., 2002b),同时地震数据传输到美国地震联合会

(IRIS)数据管理中心,便于全球地震学家进行下载和研究(Chave et al, 2002)。2003年5月,由于电缆中断,同年10月的维修航次也没最终解决问题,导致H2O地震观测网最终停止运转。

2000年伍兹霍尔海洋研究所在埃德加顿南岸建立了一个大约4.5km长的马萨葡萄园岛海岸带观测网(MVCO)(Edson et al, 2000)。根据LEO-15观测网的经验,MVCO有2个科学节点,布设在大致7~14.5m水深的海岸带区域,海底光电电缆被埋在海底1~1.5m深度(Austin et al, 2000; Edson et al, 2000)。MVCO使科学家可以直接连续观测海岸带区域在各种环境条件下的环境参数,包括北大西洋强烈风暴的观测、海岸侵蚀、沉积物输运和海岸带生物过程(Austin et al, 2000; Edson et al, 2000)。

2002年4月,蒙特利湾水生研究所(MBARI)和加州伯克利地震实验室(BSL)联合建立了蒙特利湾海底长期三分量地震台站(MOBB)(McGill et al, 2002; Uhrhammer et al, 2002; Romanowicz et al, 2003),布设的主要目的是增加地震台站在海域部分的覆盖,通过联合陆上地震台站数据,更有利于地震震中的确定(Romanowicz et al, 2003)(图5e)。使用遥控机器人Ventana布设了三分量宽频地震仪、温度传感器、海流计和差分压力计,地震仪传感器被安装在海底10cm以下的纤维材料的箱子内,大大减小了海底噪音的干扰(Romanowicz et al, 2003)。地震台站布设在距离蒙特利湾40km处的1000m水深处,目前台站提供的地震数据能够用来确定地震震源机制,分析海底不同源的噪音(Romanowicz et al, 2006)。2009年2月,MOBB连接到MARS,成为真正意义的有缆海底观测网的一部分。

2005年Lighthouse R&D Enterprise公司和德州农机大学的参与者在阿曼海阿布巴卡拉(Abu Bakara)海岸建立了灯塔海洋研究计划期锚系观测网(LORI-I),2010年升级为有缆观测网(du Vall et al, 2011; DiMarco et al, 2012)。LORI-I观测网安装了5个科学节点,水深从67m到1350m,2007年在系统中安装了一个早期海啸预警系统(STEWS)(du Vall et al, 2011; DiMarco et al, 2012)。第二期开始于2010年,在阿拉伯海的瑞斯阿尔汉德海岸建立了LORI-II有缆观测网,总体354km长的主干光电电缆布设在海底,两台柴油发电机作为备用电力(du Vall et al, 2011; DiMarco et al, 2012)。2003年Lighthouse公司在阿曼海的苏丹海岸建立了实时的海洋观测锚系系统,2005年有缆观测系统开始获取数据,主要记录海流流速、压力、温度、盐度、传导率和溶解氧数据(du

Vall et al, 2011)。2007 年热带飓风古努(Gonu)通过北阿拉伯海的 LORI-II 观测网和阿曼海的 LORI-I 观测网, 数据都显示了 12.5d 的震荡波, 记录了热带飓风 Gonu 通过深海的整个过程以及水速、温度、盐度和溶解氧的变化(Wang et al, 2012)。

2007 年 3 月, MBARI 成功布设了 52km 长的 MARS (图 5f)。MARS 是一个布设在约 891m 水深的单一科学节点网络, 总共有 8 个湿插拔端口来连接海底仪器。使用直流对直流转换器将主干光电缆中的 10kV 高电压降压为 400V 和 48V 电压提供给科学用户, 主干网中的最大电量是 10kW (Howe et al, 2006)。MARS 的目标是为美国海洋观测计划(OOI)提供测试基础, 测试新的科学仪器和传感器技术, 检测水下机器人的维护、布放和回收的能力。该项目得到 2002 年美国国家自然基金的资助, 建设期间由于经历了电缆登陆方式的改变(需要水平方向钻)、电缆经过海洋动物保护区需要环境评价、地方许可证并面临财政问题, 直到 2006 年才解决了上面 3 个大问题开始建设。Alcatel 公司开展电缆的布设和安装任务, 经历 2008 年的维修后, MARS 正式运转。目前该观测网由 MBARI 管理和维护。

近年来, 美国开展了海洋观测计划(OOI)。该观测计划包括 4 个组成部分: 全球尺度节点、区域尺度节点、近海尺度节点(ORION Executive Steering Committee, 2005)。OOI 的科学驱动力主要是气候变化、海洋食物网和生物地球化学循环, 海岸带海洋动力学和生态系统, 全球和板块尺度地球动力学, 湍流混合和生物物理相互作用, 流体和岩石相互作用和海底生物圈五大动力(ORION Executive Steering Committee, 2005)。2000 年曾被美国科学家命名为 NEPTUNE 的观测网目前为海洋观测计划—区域尺度节点(OOI-RSN)(Delaney et al, 2000)。2010 年开始进行路由调查, 2011 年 6 月在东太平洋俄勒冈, 布设了长约 900km 的区域尺度节点(OOI-RSN), 2011 年 11 月铺设海底光电缆到岸基站太平洋城(Pacific City), 2012 年布设海底主接驳盒, 2013 年至 2015 年安装次级科学节点和锚系。OOI-RSN 是在科学机遇和需要驱动下建立的, 更为重要的是能够推动科学创新和教育传播(Delaney et al, 2000)。OOI-RSN 总共在海底布设了 7 个科学节点, 其中在水合物洋脊(Hydrate Ridge), 轴状海山(Axial Seamount)和耐力新港线阵列(Edurance Array Newport Line)各布设了 2 个, 在中部板块(Mid-Plate)布设了一个, 同时作为将来一个可扩展的位置。在

水合物洋脊节点, 重点观测天然气水合物系统, 确定天然气水合物对地震响应的时间演化; 确定来自海底的物质通量和对海洋化学的影响; 理解天然气水合物形成和消散与生物地球化学之间的耦合关系。在轴状海山科学节点重点观测活火山的活动, 通过传感器监测在岩浆喷出期间, 火山的膨胀和收缩、热液活动和在喷口处富存的生物群落。在耐力新港线阵列科学节点重点观测在俄勒冈和华盛顿海岸上升流区的沿陆架和跨陆架流的变化。负责管理近海尺度节点的机构有华盛顿大学、伍兹霍尔海洋研究所、俄勒冈州立大学、斯克里普斯海洋研究所、新泽西州立大学、亚利桑那州立大学和加州大学圣地亚哥分校等。

2011 年 5 月夏威夷大学在瓦胡岛的北部 100km, 水深 4726m 处, 布设了 ACO (Duennebie et al, 2008; Howe et al, 2011)。ACO 主要使用了 HUGO 和 H2O 的技术, 利用废弃的跨大洋通讯电缆(HAW-4 SL 280m)建立的观测网, 岸基站设在美国电话电报公司(AT&T)的马卡哈(Howe et al, 2011)。2007 年 2 月, 通讯电缆 HAW-4 中断, 随后在维修过程中, 在电缆中断处连接了水听器和压力传感器。2008 年完成观测系统的部署, 由于电缆和连接器的问题此系统最后以失败告终。2011 年重新成功布设完整的观测系统, 数据以 $3\text{Mb}\cdot\text{s}^{-1}$ 的传输速度从岸基站传送到夏威夷大学(Howe et al, 2011)。2011 年 5 月使用遥控机器人 Jason 布设海底主接驳盒和湿插拔接头, 主接驳盒连接到通讯电缆的终端, 其他传感器连接到主接驳盒, 另外安装了一个 200m 高的锚系系统(Howe et al, 2011)。2011 年 6 月系统开始获取数据, 初步的数据结果显示宽频带和船的声音主要集中在 10Hz, 而海洋动物(蓝鲸或须鲸)很明显集中在 16Hz 的声学数据中(Howe et al, 2011), 但单一的水听器不能准确确定鲸的数量(Oswald et al, 2011)。ACO 作为一个基础设施, 主要是利用废弃的跨大洋通讯电缆来观测深大洋(4726m)的水体属性、海底摄像和声学特征, 从而研究深海平原的随时间变化的生物、物理和化学动力(Howe et al, 2011)。

美国海底观测网的特点主要是在科学驱动下建立了近海尺度的 LEO-15、MVCO 和 MARS 和区域尺度的 OOI-RSN。观测网系统完善, 建立了不同研究重点的网络, 如生态系统网络(LEO-15), 地震和火山观测网(H2O、NeMO 和 HUGO)。不同观测平台相互连接完善成熟, 如浮标、锚系与有缆海底观测网的连接。观测网的建设具有全球性, 包括短期和长期的观

测。观测网使用遥控水下机器人(ROVs)、自主水下机器人(AUVs)和水下滑翔机等高新技术设备。

1.4 欧洲国家有缆海底观测网概述

在美国、加拿大和日本等国的海底观测网计划的引领下,欧洲国家也开始建立自己的观测网。从较早期的无缆移动平台,如1996年的欧洲之星(GEOSTAR)(Favali et al, 2000),到1998年的“SN-1”观测网;观测网持续记录的时间也从开始的20d到7个月(Favali et al, 2000)。同时也研制了一些自主式着落系统,通过船载方式,以 $57\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 自由下落到海底,如荷兰的底部着陆系统“BoBo Lander”,德国的移动着陆系统“Modular Lander”,英国的底部着陆系统“Dobo Lander”和水下摄像系统“Bathysnap”(Person et al, 2006; Favali et al, 2006; Puillat et al, 2012)。这些系统的运行时间主要受到电力和数据存储能力的限制(Person et al, 2006),不能长期进行观测使用。2002年之后开始进入了有缆观测系统的准备工作。

2004年4月,意大利和希腊合作在希腊佩特雷湾铺设了气体控制模量有缆观测网(GMM)(Marinaro et al, 2004、2006、2007)。GMM布设在海底甲烷气体蕴藏的麻点地区,大约离岸站400m,水深42m的位置(Christodoulou et al, 2003)。观测系统主要利用三脚架装置,配备短期的3个 CH_4 传感器、1个 H_2S 传感器和测温盐深的传感器(Marinaro et al, 2004、2006、2007)。2005年1月,甲烷传感器停止工作,系统仅采集了201d的数据,获取了大量甲烷麻点地区的活动数据,为进一步研究甲烷气体的聚集提供了很有价值的资料(Marinaro et al, 2007)。

近年来,欧洲国家也开始启动更为宏伟的欧洲海底观测网(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(Priede et al, 2002、2004)(图6)。10个观测网分别为:1)北冰洋观测网,重点观测极地气候系统,生物多样性;2)挪威大陆边缘观测网,重点观测热盐环流与天然气水合物;3)北海观测网,重点观测低纬度到高纬度热盐输运和湾流;4)东北大西洋波克潘(Porcupine)观测网,重点观测海洋深水环境和深海平原生物多样性;5)大西洋中脊亚速尔(Azores)观测网,重点观测生物多样性和极端环境下的生命;6)伊比利亚大陆边缘观测网,主要监测大陆边缘地震和海啸;7)利古里亚海观测网,其功能类似于MARS;8)西西里岛东部海底观测网,重点观测地震和板块相互作用;9)地中海希腊(Hellenic)观测网,重点观测地震和反转流、深水环境;10)黑海观测网,

主要观测缺氧生态系统和天然气水合物(Priede et al, 2002、2004)。

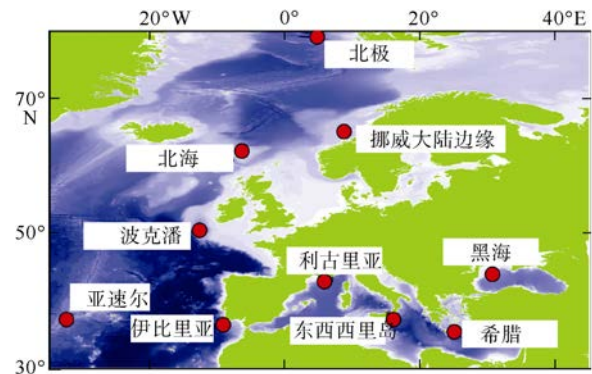


图6 欧洲有缆海底观测网位置[据 Priede 等(2004)]

Fig. 6 Sites of cabled seafloor observatories in Europe. After Priede et al (2004)

ESONET 从2004年开始直接从欧盟获得资金支持,系统计划铺设5000km的主干光电缆,总共经费估计1.3至2.2亿美金。2005—2008年完成设备的研制和开展电缆式、浮标式的仪器试验工作,2009年进入观测状态。ESONET采用有缆和无缆两种观测站系统,获得的数据参考德国国际海洋数据中心的泛古陆“PANGEA”系统管理方式(Priede et al, 2002、2004)。欧洲海底观测网的特点是跨不同海区,有各自的科学意义,观测网发展的平台多,包括早期移动平台和长期有缆观测平台,参与国家众多。

2 国内有缆式海底观测网概述

目前国内海底有缆观测网有东海小衢山观测站(许惠平等,2011;张艳伟等,2011)和中国台湾地区的妈祖有缆海底观测网(MACHO)(许树坤等,2005;李昭兴等,2010)。国内海底观测系统的现状和发展前景也被国内一些学者论述和讨论(李颖虹等,2008、2010;马伟锋等,2009;李三忠等,2009a、2009b;李健等,2012)。我国深海台站建设对将来布设有缆观测网是非常重要的,如西沙台站可以为有缆观测网提供双岸基站,从而实现对系统进行双向供电和数据传输,也可以为主干电缆的登陆提供各种保障(李健等,2012;王盛安等,2015)。

小衢山观测站于2009年建成,系统主要由一个1.1km长的主干光电缆,一个海底接驳盒和3种海底设备组成,海底设备为CTD、ADCP和浊度仪。电力主要通过水文观测平台的太阳能板提供,目前系统仍在运转(许惠平等,2011;张艳伟等,2011)。

MACHO 于 2011 年 12 月建成，第一期已经建成一条主干光电缆 45km 的观测网。海底仪器主要由宽频海底地震仪、加速度地震仪、CTD、水听器和海啸压力计传感器组成。系统功能是用于监测台湾岛东北部的地震和海啸(许树坤 等, 2005; 李昭兴 等, 2010)。中国科学院资助的三亚海底观测示范网也已于 2011 年启动。2012 年 3 月中国科学院南海海洋研究所完成观测网的路由调查。2012 年 11 月主接驳盒和次级接驳盒的水池试验已经成功完成。2013 年 4 月成功铺设 2km 长的主干光电缆。系统由一个科学节点、一个次级接驳盒和水下仪器组成，科学节点布设在 20m 水深处，目前系统已经开始正常运转。

国内有缆海底观测网的特点是发展起步较晚；观测平台集中在浅水区，如东海小衢山观测站在 10m 水深处，MACHO 最深位置在 300m 水深处；连接的海底仪器或传感器数量比较少；重点观测的科学目标比较单一，如 MACHO 仅重点监测地震和海啸，没有化学传感器。

3 有缆海底观测网的关键技术

有缆观测网络在构成上，可以分为岸站、海底光电缆网络(一般为主干光电缆和次级光电缆)、科学节点与次级接驳盒、观测网仪器和传感器等海底设备。根据系统的组成，关键的技术是组网的接驳技术，实现近岸、近海和深海等不同需求的接驳技

术。目前，国际上加拿大的 NEPTUNE 中的接驳盒技术最为成熟和完善，技术主要使用 OceanWorks 企业的核心技术。另外，高压直流输电技术、水下湿插拔连接器技术和水下网络传输与信息融合技术也是有缆观测网的关键技术。对于有缆观测网来说，高压直流输电技术主要受到海底光电缆的单位长度电阻的限制，使用直流并联供电能够使 6.7kW 的电传输到 3000km 的区域海底观测网络中(Howe et al, 2002; Chave et al, 2004)。水下湿插拔连接器技术对于海底传感器和各种设备连接到主、次接驳盒非常关键(陈鹰 等, 2006)。各种物理、化学和生物传感器技术也是有缆观测网中必备的关键技术(陈鹰 等, 2006)。由于海底传感器和设备受到海水压力、温度等环境因素的腐蚀损伤，以及微生物污损等的破坏从而使观测网络寿命减少，因此海底传感器以及设备的防护技术也是观测网中不可忽视的技术。数据的网络传输和安全都需要强大的数据库管理技术，如 NEPTUNE 开发的 Oceans 2.0 软件使观测数据能够实现实时显示。有缆观测网络的布设和回收需要水下机器人的帮助，在系统安装过程中，水下机器人的性能和操作人员的操控能力都是关键技术。已建成的全球有缆海底观测网都使用了水下机器人来安装和维护系统，详细的与有缆海底观测网有关的水下机器人参照表 3 和图 7。

表 3 与全球有缆海底观测网有关的水下遥控机器人和水下载人机器人
Tab. 3 Underwater Remotely Operated Vehicles and Autonomous Underwater Vehicles related to cabled seafloor observatories in the world

序号	观测网名称	水下机器人	最大下潜深度/m	观测网维护单位
1	NEPTUNE	ROPOS	5000	维多利亚大学
2	VENUS	ROPOS	5000	维多利亚大学
3	DONET	海豚	3000	日本海洋科学和技术厅
		贝子	7000	日本海洋科学和技术厅
4	MARS	Ventana	1850	蒙特利湾水生研究所
5	HUGO	Pisces	2000	夏威夷大学
		Jason	6500	夏威夷大学
6	OOI-RSN	海神 3	—	华盛顿大学
		ROPOS	5000	华盛顿大学
7	ACO	Jason	6500	夏威夷大学

注：“—”表示没有准确的数据参考

海底观测网中主要利用的是无人有缆遥控水下机器人，水下机器人有各种类型包括载人潜器、自治水下机器人和遥控水下机器人(封锡盛, 2000; 封锡盛 等, 2013)。国内通过 30 多年的自主研发，也

研制出了多款海洋机器人(封锡盛 等, 2013; 李一平等, 2016)，这些机器人都可以作为我国今后建设有缆海底观测网水下网络维护的基础。通过大洋深水机器人的开发和研制，我国有能力实现自主研发



图 7 全球有缆观测网使用的水下遥控机器人

a. ROPOS; b. Hyper-Dolphin; c. Kaiko-II; d. Ventana; e. Pisces-V; f. Jason

Fig. 7 ROVs used by marine cabled seafloor observatories in the world

的机器人服务于将来的海底观测网。

4 发展趋势和面临的挑战

海洋观测网络一直随着海洋调查技术和调查方

式的变化而改变：遵循海洋调查技术的变化，从船载定点布设锚系，到使用遥控水下机器人布设实时长期海底有缆观测网，如从 OOI 到 VENUS 和 NEPTUNE；遵循海洋调查范围变化，从近海到深海，如从近海尺度的 LEO-15、VENUS 到深海区域尺度的 NEPTUNE、OOI-RSN；技术装备从开始单一的传感器到多参数多传感器包；海底观测网络的主干光电缆长度从开始的几千米到现在的几百千米；供电系统从低压 375V 到高压 10kV；主干网络布局从简单到复杂，从单一科学节点单线路到多节点的复杂环形线路；观测系统不断扩充功能，观测网络的系统构建也日趋完善。

全球有缆观测网已经成功布设在很多海域，预计观测网的寿命是 25a。但是由于高昂的维护费用，需要很多参与部门的协调分工，特别是维护单位必须保证每年的船时。不同传感器的研制和升级也需要根据观测网的发展和科学目标及时做出调整，传感器数据能够得到及时的初步处理和初始成果的展示都需要大数据的处理和显示技术。我国海底有缆观测网才刚刚起步，观测网的建设和维护需要大量相关科研和技术人员的参与，特别是维护海底观测网所需要的 ROVs 技术。该技术目前主要由相关科研单位采取自行研制或与高新技术企业合作研制的模式。建议我国建设海底观测网的相关单位积极准备各种与有缆海底观测网有关的关键技术和人员，加强与全球其他有缆海底观测网维护单位的合作和交流。

参考文献 References

- 陈鹰, 杨灿军, 陶春辉, 等, 2006. 海底观测系统[M]. 北京: 海洋出版社, 1-129. CHEN YING, YANG CANJUN, TAO CHUNHUI, et al, 2006. Deep sea observatory system[M]. Beijing: China Ocean Press, 1-129 (in Chinese).
- 封锡盛, 2000. 从有缆遥控水下机器人到自治水下机器人[J]. 中国工程科学, 2(12): 29-33, 58. FENG XISHENG, 2000. From remotely operated vehicles to autonomous undersea vehicles[J]. Engineering Science, 2(12): 29-33, 58 (in Chinese).
- 封锡盛, 李一平, 2013. 海洋机器人 30 年[J]. 科学通报, 58(增刊): 2-7. FENG XISHENG, LI YIPING, 2013. Thirty years evolution of SIA's unmanned marine vehicles[J]. Chinese Science Bulletin, 58(S2): 2-7 (in Chinese).
- 李健, 陈荣裕, 王盛安, 等, 2012. 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, 31(2): 123-133. LI JIAN, CHEN RONGYU, WANG SHENG'AN, et al, 2012. Development of international marine observation system and construction of deep-sea station in China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 31(2): 123-133 (in Chinese).
- 李三忠, 金宠, 戴黎明, 等, 2009a. 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, 29(5): 131-143. LI SANZHONG, JIN CHONG, DAI LIMING, et al, 2009a. Marine geodynamics — advances and perspectives of international oceanfloor-related observatory network and exploration technique system[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(5): 131-143 (in Chinese).
- 李三忠, 张国伟, 刘保华, 2009b. 洋底动力学——从洋脊增生系统到俯冲消减系统[J]. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 434-443. LI SANZHONG, ZHANG GUOWEI, LIU BAOHUA, 2009b. Marine geodynamics: from mid-oceanic ridge system to subduction factory[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 39(3): 434-443 (in Chinese).
- 李颖虹, 王凡, 王东晓, 2008. 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, 23(3): 274-279. LI YINGHONG, WANG FAN, WANG DONGXIAO, 2008. 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, 23(3): 274-279 (in Chinese).

- Chinese).
- 李颖虹, 王凡, 任小波, 2010. 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, 25(7): 715–722. LI YINGHONG, WANG FAN, REN XIAOBO, 2010. Development trend and strategy of ocean observing capability[J]. *Advances in Earth Science*, 25(7): 715–722 (in Chinese).
- 李一平, 李硕, 张艾群, 2016. 自主/遥控水下机器人研究现状[J]. 工程研究, 8(2): 217–222. LI YIPING, LI SHUO, ZHANG AIQUN, 2016. Research status of autonomous & remotely operated vehicle[J]. *Journal of Engineering Studies*, 8(2): 217–222 (in Chinese).
- 李昭兴, 许树坤, 郭凯文, 2010. 海底地震观测系统咨询研究[C]//“中央气象局地震测报中心”. “中央气象局”地震技术报告集编. 台北: 471–482. LEE CHAOSHINE, HSU SHUKUN, LIU JIAXUAN, et al, 2010. Evaluation research of the submarine cable observation system[C]//“CENTRAL METEOROLOGICAL BUREAU EARTHQUAKE PREDICTION CENTER”. Earthquake technical report of the “Central Meteorological Bureau”. Taipei: 471–482 (in Chinese).
- 马伟锋, 崔维成, 刘涛, 等, 2009. 海底电缆观测系统的研究现状与发展趋势[J]. 海岸工程, 28(3): 76–84. MA WEIFENG, CUI WEICHENG, LIU TAO, et al, 2009. Present status and development tendency of submarine cable-connected observation system[J]. *Coastal Engineering*, 28(3): 76–84 (in Chinese).
- 汪品先, 2007. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志, 29(3): 125–130. WANG PINXIAN, 2007. Seafloor observatories: the third platform for earth system observation[J]. *Chinese Journal of Nature*, 29(3): 125–130 (in Chinese).
- 汪品先, 2011. 海洋科学技术协同发展的回顾[J]. 地球科学进展, 26(6): 644–649. WANG PINXIAN, 2011. Coupled development in marine science and technology: a retrospect[J]. *Advances in Earth Science*, 26(6): 644–649 (in Chinese).
- 王盛安, 龙小敏, 潘文亮, 等, 2015. 基于异地潮位资料和 BP 神经网络的潮位推算研究[J]. 热带海洋学报, 34(2): 1–7. WANG SHENG'AN, LONG XIAOMIN, PAN WENLIANG, et al, 2015. Tide prediction using tide observation at a nearby site based on BP neural network[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 34(2): 1–7 (in Chinese).
- 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等, 2011. 东海海底观测小衢山试验站[J]. 科学通报, 56(22): 1839–1845. XU HUIPING, ZHANG YANWEI, XU CHANGWEI, et al, 2011. Coastal seafloor observatory at Xiaqushan in the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(26): 2839–2845 (in Chinese).
- 许树坤, 李昭兴, 刘家瑄, 等, 2005. 台湾东部海域海底观测系统建置评估[C]//“中央气象局地震测报中心”. “中央气象局”地震技术报告集编. 台北: 45: 361–382. HSU SHUKUN, LEE CHAOSHINE, LIU JIAXUAN, et al, 2005. Evaluation of a configuration of the submarine cable observation system off eastern Taiwan[C]//“CENTRAL METEOROLOGICAL BUREAU EARTHQUAKE PREDICTION CENTER”. Earthquake technical report of the “Central Meteorological Bureau”. Taipei: 45: 361–382 (in Chinese).
- 张友权, 2012. 福建海洋观测示范网建设与应用[J]. 海洋技术, 31(1): 111–114. ZHANG YOUQUAN, 2012. Application and construction of Fujian Province marine observation demonstration network[J]. *Ocean Technology*, 31(1): 111–114 (in Chinese).
- 张艳伟, 范代读, 许惠平, 2011. 东海海底观测网小衢山试验站记录的 2010 年智利海啸信号分析[J]. 科学通报, 56(32): 2732–2740. ZHANG YANWEI, FAN DAIDU, XU HUIPING, 2011. Records of the tsunami induced by the 2010 Chilean earthquake from Xiaqushan seafloor observatory in the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(27): 2957–2965 (in Chinese).
- AGUZZI J, COSTA C, ROBERT K, et al, 2011. Automated image analysis for the detection of benthic crustaceans and bacterial mat coverage using the VENUS undersea cabled network[J]. *Sensors*, 11(12): 10534–10556.
- AUSTIN T, EDSON J, MCGILLIS W, et al, 2000. The Martha's Vineyard coastal observatory: a long term facility for monitoring air-sea processes[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 2000-MTS/IEEE. Providence: IEEE:1937–1941.
- BARNES C R, TUNNICLIFFE V, 2008. Building the world's first multi-node cabled ocean observatories (NEPTUNE Canada and VENUS, Canada): science, realities, challenges and opportunities[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 2008-MTS/IEEE Kobe techno-ocean. Kobe: IEEE: 1–8.
- BUTLER R, 2003. The Hawaii-2 observatory: observation of Nanoearthquakes[J]. *Seismological Research Letters*, 74(3): 290–297.
- CHAVE A D, DUENNEBIER F K, BUTLER R, et al, 2002. H₂O: the Hawaii-2 observatory[M]// BERANZOLI L, FAVALI P, SMRIGLIO G. Science technology synergy for research in the marine environment: challenges for the XXI century, Volume 12. Amsterdam: Elsevier: 83–91.
- CHAVE A D, WATERWORTH G, MAFFEI A R, et al, 2004. Cabled ocean observatory systems[J]. *Marine Technology Society Journal*, 38(2): 30–43.
- CHRISTODOULOU D, PAPTAEODOROU G, FERENTINOS G, et al, 2003. Active seepage in two contrasting pockmark fields in the Patras and Corinth gulfs, Greece[J]. *Geo-Marine Letters*, 23(3/4): 194–199.
- DELANEY J R, HEATH G R, HOWE B, et al, 2000. NEPTUNE: real-time ocean and earth sciences at the scale of a tectonic plate[J]. *Oceanography*, 13(2): 71–79.
- DICKEY T D, BIDIGARE R R, 2005. Interdisciplinary oceanographic observations: the wave of the future[J]. *Scientia Marina*, 69(S1): 23–42.
- DIMARCO S F, WANG Z K, JOCHENS A, et al, 2012. Cabled ocean observatories in sea of Oman and Arabian Sea[J]. *EOS*,

- Transactions American Geophysical Union, 93(31): 301–302.
- DU VALL K, INGLE S, SNIDER J, et al, 2011. Cabled ocean observatories in the sea of Oman and Arabian Sea[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 2011. Waikoloa: IEEE: 1–6.
- DUENNEBIER F K, HARRIS D W, JOLLY J, et al, 2002a. HUGO: the Hawaii undersea geo-observatory[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 27(2): 218–227.
- DUENNEBIER F K, HARRIS D W, JOLLY J, et al, 2002b. The Hawaii-2 observatory seismic system[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 27(2): 212–217.
- DUENNEBIER F K, HARRIS D, JOLLY J, 2008. ALOHA cabled observatory will monitor ocean in real time[J]. Sea Technology, 49(2): 51–54.
- EDSON J B, MCGILLIS W R, AUSTIN T C, 2000. A new coastal observatory is born: Martha's vineyard offers scientifically exciting site[J]. Oceanus, 42(1): 31–33.
- FAVALI P, BERANZOLI L, 2006. Seafloor observatory science: a review[J]. Annals of Geophysics, 49(2/3): 515–567.
- FAVALI P, BERANZOLI L, 2009. EMSO: European multidisciplinary seafloor observatory[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 602(1): 21–27.
- FAVALI P, SMRIGLIO G, BERANZOLI L, et al, 2000. European seafloor observatory offers new possibilities for deep-sea study[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 81(5): 45–49.
- FORRESTER N C, STOKEY R P, VON ALT C, et al, 1997. The LEO-15 long-term ecosystem observatory: design and installation[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 1997-MTS/IEEE. Halifax: IEEE: 2: 1082–1088.
- HOWE B M, CHAN T, EL SHARKAWI M, et al, 2006. Power system for the MARS ocean cabled observatory[C]// MARINE INSTITUTE. Proceedings of the scientific submarine cable 2006 conference. Dublin.
- HOWE B M, KIRKHAM H, VORPERIA V, 2002. Power system considerations for undersea observatories[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 27(2): 267–274.
- HOWE B M, LUKAS R, DUENNEBIER F, et al, 2011. ALOHA cabled observatory installation[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 2011-MTS/IEEE. Waikoloa: IEEE: 1–11.
- JOSEPH A, 2011. Earthquake monitoring for early tsunami warnings[M]// JOSEPH A. Tsunamis: detection, monitoring, and early-warning technologies. London: Academic Press: 125–148.
- KASAHARA J, KAWAGUCHI K, IWASE R, et al, 2001. Installation of the multi-disciplinary VENUS observatory at the Ryukyu Trench using Guam-Okinawa geophysical submarine cable (GOGC: former TPC-2 cable)[J]. JAMSTEC Journal of Deep Sea Research, 18: 193–207.
- KASAHARA J, SATO T, MOMMA H, et al, 1998. A new approach to geophysical real-time measurements on a deep-sea floor using decommissioned submarine cables[J]. Earth, Planets and Space, 50(11/12): 913–925.
- MARINARO G, ETIOPE G, GASPARONI F, et al, 2004. GMM — a gas monitoring module for long-term detection of methane leakage from the seafloor[J]. Environmental Geology, 46(8): 1053–1058.
- MARINARO G, ETIOPE G, LO BUE N, et al, 2006. Monitoring of a methane-seeping pockmark by cabled benthic observatory (Patras Gulf, Greece)[J]. Geo-Marine Letters, 26(5): 297–302.
- MARINARO G, ETIOPE G, LO BUE N, et al, 2007. A cabled monitoring module for gas seepage: the first experiment in a pockmark (Patras Gulf, Greece)[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of 2007 symposium on underwater technology and workshop on scientific use of submarine cables and related technologies. Tokyo: IEEE: 343–348.
- MCGILL P, NEUHAUSER D, STAKES D, et al, 2002. Deployment of a long-term broadband seafloor observatory in Monterey Bay[C]. Washington, D C: American Geophysical Union Fall Meeting.
- MOMMA H, SHIRASAKI Y, KASAHARA J, 1997. The VENUS project-instrumentation and underwater work system[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of the international workshop on the scientific use of submarine cables. Okinawa: IEEE: 103–108.
- NAGUMO S, WALKER D A, 1989. Ocean bottom geoscience observatories: reuse of transoceanic telecommunications cables[J]. EOS, Transactions American Geophysical Union, 70(26): 673–677.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 2000. Illuminating the hidden planet: the future of seafloor observatory science[R]. Washington D C: National Academy Press: 1–135.
- ORION EXECUTIVE STEERING COMMITTEE, 2005. Ocean observatories initiative science plan[C]. Washington D C: Geoscience Professional Services: 1–102.
- OSWALD J N, AU W W L, DUENNEBIER F, 2011. Minke whale (*Balaenoptera acutorostrata*) boings detected at the Station ALOHA cabled observatory[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 129(5): 3353–3360.
- PERSON R, Aoustin Y, BLANDIN J, et al, 2006. From bottom landers to observatory networks[J]. Annals of Geophysics, 49(2/3): 581–593.
- PIRENNE B, GUILLEMOT E, 2009. The data management system for the VENUS and NEPTUNE cabled observatories[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 2009-EUROPE. Bremen: IEEE: 1–4.
- PRIEDE I G, SOLAN M, 2002. European seafloor observatory network[R]. Aberdeen: 1–362.
- PRIEDE M, SOLAN J, MIENERT R, et al, 2004.

- ESONET-European seafloor observatory network[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of the MTS/IEEE techno-ocean'04. Kobe: IEEE: 2155–2163.
- PUILLAT I, LANTERI N, DROGOU J F, et al, 2012. Open-sea observatories: a new technology to bring the pulse of the Sea to human awareness[M]// MARCELLI M. Oceanography. France: InTech Press: 1–40.
- ROMANOWICZ B, STAKES D, DOLENC D, et al, 2006. The Monterey Bay broadband ocean bottom seismic observatory[J]. *Annals of Geophysics*, 49(2/3): 607–623.
- ROMANOWICZ B, STAKES D, UHRHAMMER R, et al, 2003. The MOBB experiment: a prototype permanent off-shore ocean bottom broadband station[J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 84(34): 325–332.
- TAYLOR S M, 2008. Supporting the operations of the NEPTUNE Canada and VENUS cabled ocean observatories[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 2008-MTS/IEEE Kobe techno-ocean. Kobe: IEEE: 1–8.
- TAYLOR S M, 2009. Transformative ocean science through the VENUS and NEPTUNE Canada ocean observing systems[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 602(1): 63–67.
- THE 1996 LOIHI SCIENCE TEAM, 1997. Researchers rapidly respond to submarine activity at Loihi Volcano, Hawaii[J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 78(22): 229–233.
- UHRHAMMER R, ROMANOWICZ B, NEUHAUSER D, et al, 2002. Instrument testing and first results from the MOBB observatory[C]. Washington D C: American Geophysical Union Fall Meeting.
- VON ALT C J, DE LUCA M P, GLENN S M, et al, 1997. LEO-15: monitoring and managing coastal resources[J]. *Sea Technology*, 38: 105–109.
- VON ALT C J, GRASSLE J F, 1992. Leo-15 an unmanned long term environmental observatory[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 1992. Newport: IEEE: 849–854.
- WALKER D A, 1991. Using transoceanic cables to quantify global environmental changes[J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 72(37): 393–398.
- WANG ZHANKUN, DIMARCO S F, STÖSSEL M M, et al, 2012. Oscillation responses to tropical Cyclone Gonu in northern Arabian Sea from a moored observing system[J]. *Deep Sea Research Part : Oceanographic Research Papers*, 64: 129–145.
- WOODROFFE A M, PRIDIE S W, DRUCE G, 2008. The NEPTUNE Canada junction box-interfacing science instruments to sub-sea cabled observatories[C]// INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Proceedings of oceans 2008-MTS/IEEE Kobe techno-ocean. Kobe: IEEE: 1–5.