

海底观测网络研究进展*

李正宝, 杜立彬, 刘杰, 吕斌, 曲君乐, 王秀芬

(山东省科学院 海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001)

通讯作者: 李正宝, E-mail: lizhengb@gmail.com

摘要: 海底观测网络已成为海洋科学研究的重要数据获取平台. 首先简要介绍了世界各国在海底观测网络研究领域的发展历史, 然后对各国海底观测网络的研究进展进行了详细介绍, 指出了海底观测网络系统的关键技术和初步解决方案, 探讨了海底观测网络下一步的发展.

关键词: 海底观测网络; 关键技术; 进展; 展望

中文引用格式: 李正宝, 杜立彬, 刘杰, 吕斌, 曲君乐, 王秀芬. 海底观测网络研究进展. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (1)): 148-157. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13016.htm>

英文引用格式: Li ZB, Du LB, Liu J, Lü B, Qu JL, Wang XF. Research development of seafloor observatory network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (1)): 148-157 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13016.htm>

Research Development of Seafloor Observatory Network

LI Zheng-Bao, DU Li-Bin, LIU Jie, LÜ Bin, QU Jun-Le, WANG Xiu-Fen

(Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Science Academy, Qingdao 266001, China)

Corresponding author: LI Zheng-Bao, E-mail: lizhengb@gmail.com

Abstract: Seafloor observatory network has been an important data acquisition platform in marine scientific research. This paper provides a brief introduction to the history of seafloor observatory network system, followed by detailed description of the progress from the different countries round the world on seafloor cable observatory network systems. It also explores future development of the seafloor observatory network with a discussion on the key technologies and preliminary solutions employed in seafloor observatory network system.

Key words: seafloor observatory system; key issue; development; development tendency

海洋占地球表面积的 71%, 蕴藏着丰富的资源, 已成为世界各国激烈争夺的重要战略目标. 由于缺乏有效的观测手段, 目前人类对海洋尤其是深海的认知依然肤浅. 继海洋调查船和遥感卫星之后, 海底观测网络成为人类探测深海的第 3 个重要平台^[1]. 海底观测网络能够长期、实时、连续地获取所观测海区海洋环境信息, 为人类认识海洋变化规律、提高对海洋环境和气候变化的预测能力提供支撑, 对于海洋减灾防灾、海洋生态系统保护、气候变化应对、资源/能源可持续开发利用、海洋权益维护、海上航运和国防安全等具有重大的战略意义^[2].

本文回顾了海底观测网络的发展历史, 分析和研究了国内外海底观测网络的建设成果, 指出构建海底观测网络系统的关键技术和初步解决方案, 探讨海底观测网络下一步的发展方向, 以期对世界和我国海底观测网络建设有所借鉴.

1 国外海底观测网络系统发展现状

20 世纪末以来, 美国、欧洲各国、日本等国家和地区凭借在海洋观测领域的先发优势, 纷纷投入巨资开展

* 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(2013AA09A411); 海洋公益性行业科研专项经费(201105030, 201305026); 山东省自然科学基金(ZR2012FL14)

收稿时间: 2013-05-02; 定稿时间: 2013-08-22

海底观测网络关键技术研究,构建海底观测网络,以海底观测网络为平台的科学、技术和国防安全的国际竞争日渐激烈.

1.1 美国海底观测网络

美国是最早开展海底观测研究和建设的国家,早在冷战时期美国海军就开始了海底网络的研究和应用.早期美国建立的海底观测系统有 SOSUS^[3],LEO-15^[4,5],H2O^[6]等,但它们都是单一科学节点的海底观测系统.1998年,美国提出了“海王星”海底观测网络计划(the North East Pacific Time—Integrated Undersea Networked Experiment,简称 NEPTUNE)^[7],1999年6月加拿大的科研机构加入其中,海底观测网络系统正式开始规划实施.为了进行原型实验和技术储备,美国和加拿大分别建立小型实验观测系统 MARS(Monterey Accelerated Research System)^[9]和 VENUS(Victoria Experimental Network Under the Sea)^[10].

MARS 系统于 2007 年已完成了电力和通信两用光缆的铺设、所有水下观测仪器设备及相关装置的安装,并主要开展水下光缆的供电和数据通信方面的研究.如图 1 所示,MARS 主要由岸基基站、供电系统、光电复合缆、水下节点(接驳盒)和水下观测仪器组成.MARS 系统部署海域最大水深约 900m,在海底深 1m 的泥层中共埋设 52km 长的光电复合缆,作为能量和数据传输的物理介质.在光电复合缆末端连接一个 4×3.7×1.2m 的主节点,并针对不同的观测项目设置多个次级接驳盒作为枢纽.每个次级接驳盒均搭载多个观测仪器,如 CTD、流速仪等.该网络由岸上基站向各个观测点供应电力,采用岸基高压直流传输方式将 10kV 直流高压电能传输到水下节点中,由高压-中压、中压-低压两级降压模块处理后得到水下设备可用的 375V 和 48V 电能.

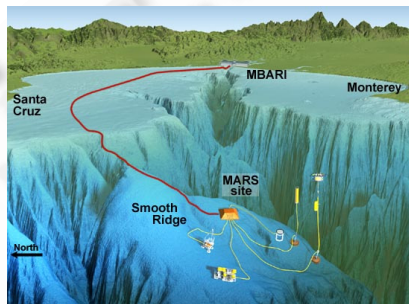


Fig.1 MARS network structure diagram (cited from <http://www.mbari.org/mars/>)

图 1 MARS 网络结构示意图(引自 <http://www.mbari.org/mars/>)

NEPTUNE 是美国华盛顿大学的约翰·德莱尼和美国著名的伍兹霍尔海洋研究所的科学家们于 1998 年共同提出的,其后,加拿大的科研机构加入其中^[8].海王星计划在环绕胡安·德·夫卡板块 500km×1000km 的海域铺设 3000km 长的海底光电复合缆,进行为期 25 年的海底实时观测.观测参数包括深海物理、化学、生物、地质的实时信息,通过光纤传回到岸基基站,并通过互联网传给世界各国的终端.NEPTUNE 的北段由加拿大在其海岸外建设,南段由美国在其海岸外建设.具体的海底观测网络布局如图 2 所示.

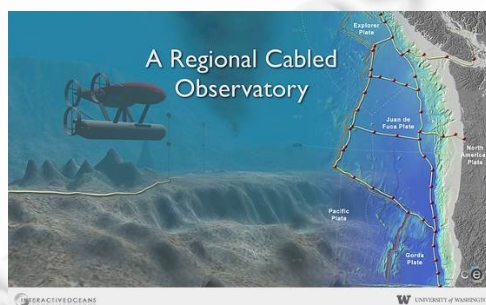


Fig.2 NEPTUNE network layout (cited from <http://www.neptunecanada.ca/>)

图 2 海王星计划网络布局图(引自 <http://www.neptunecanada.ca/>)

海王星计划主要开展 3 个领域的研究:一是板块构造运动研究,主要用于地震预测、海啸预警及其所产生的影响;二是研究海洋对气候的影响以及南部富氧洋流,用于揭示气候变化的反应及其对生物变化的影响;三是深海生态系统研究,主要观察深海中的生物群落、能量和营养物质的循环途径以及生态系统在自然环境发生变化时的响应。

NEPTUNE 包括水下部分和陆地部分(如图 3 所示)。水下部分计划设立 30 个海底观测节点,每个节点将安装水文仪器、物理化学传感器、水下移动平台、地震仪、海底钻头等传感器阵列,利用水下光电复合缆组成海底观测网络,实现与深海环境动力过程的实时交互。水上部分建立岸基基站,负责陆上能源供应、海底数据接收存储、数据产品发布等。

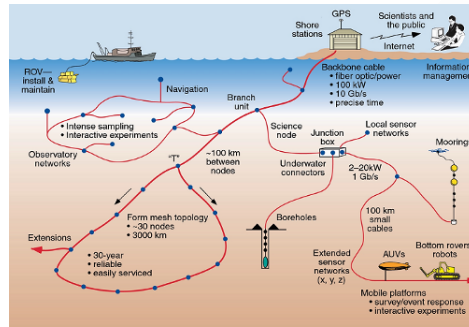


Fig.3 NEPTUNE network structure (cited from Ref.[2])

图 3 NEPTUNE 的网络结构示意图(引自文献[2])

经过多年的方案论证后,美国于 2009 年通过了“海洋观测行动”(ocean observatories initiative,简称 OOI)计划^[11],建设一个基于网络的海洋观测系统(如图 4 所示)。该系统于 2011 年开始布放海底光电复合缆,计划 2015 年完成整个网络的建设。OOI 充分利用传感器、计算速度、通信带宽、互联网资源、小型化、基因组分析、高清晰成像、机器人和数据同化建模可视化技术等领域的最新发展成果,建立一个传感器分布全球的近实时观测网络。在近海、公海和海底等位置观测气候变化、生态系统的变化、海洋酸化和碳循环等复杂的海洋过程,提高环境变化预测水平,对生物多样性、海岸生态系统和气候效应研究也具有重要的意义。OOI 共分 3 级,即海岸观测系统、区域观测系统和全球观测系统^[12]。



Fig.4 OOI observing location (cited from <http://www.oceanobservatories.org>)

图 4 OOI 设备分布图(引自 <http://www.oceanobservatories.org>)

OOI 全球观测系统主要是在全球范围内部署浮标系统,用于测量热量、水分和动量等海气通量,整个水柱的物理、生物和化学性质,海底地球物理观测等,研究海洋对气候变化的应对和作用。这一部分工作由伍兹霍尔

海洋研究所、俄勒冈州立大学和斯克里普斯海洋学研究所负责。

NEPTUNE 从属于 OOI 区域海底观测系统,计划在区域海洋中长时间、自适应地观测一系列物理、化学、地质等参量和生物过程,弥补传统的船上观测的缺陷。该部分工作由华盛顿大学负责。

OOI 海岸观测系统将加强和扩大现有的沿海观测资产,通过整合锚系浮标、电缆、地面雷达、水下机器人、空中和卫星传感器、船舶等资源,研究大/中尺度的沿海海洋环流极端变化、物料平衡(例如大陆架间的营养和碳通量)、生态系统的稳定性和变化、沿海形态、海滩侵蚀和其他人为尺寸的海陆相互作用。该部分工作由伍兹霍尔海洋研究所、俄勒冈州立大学和斯克里普斯海洋学研究所负责。

OOI 通过网络基础设施组件,将以上分布式系统连接起来,形成一个多代理和国际性的观察网络,以创建复杂的实时和离线分析。该部分工作由加州大学圣地亚哥分校负责。

1.2 加拿大海底观测网络

加拿大目前正在建设和使用的海底观测网络系统主要包括 VENUS 和海王星计划加拿大部分(NEPTUNE Canada)。这两个网络是维多利亚大学的姊妹项目,拥有很多相同的设计理念,很多 NEPTUNE Canada 的实验都是在 VENUS 上进行的。

2001 年,加拿大维多利亚大学开始主持建立 VENUS 计划。2007 年 8 月,VENUS 开始铺设海底光电缆,11 月完成了第 1 阶段的光电缆铺设和仪器安装,并与 Internet 接通。VENUS 系统分别在维多利亚地区的 Saanich 海湾(约 80m 水深)、Georgia 海峡 170m 和 287m 水深处布设了 3 个节点。Saanich 海湾节点作为一个海洋技术实验平台,可以对海洋观测研究技术、设备进行原形测试,同时也连接有硝酸盐传感器、沉积物捕获器、数字摄像机、回音探测器等仪器设备。在 Georgia 海峡的两个节点上接入了声学分析器、声学多普勒流速剖面仪、溶解氧传感器、浑浊度传感器、水中听音器、CTD 等 10 余种海洋观测设备(如图 5 所示)。VENUS 项目对外开放,全世界的海洋科学家都可以向其提交自己的研究实验计划,并可实时获取研究数据。



Fig.5 VENUS network location (cited from <http://venus.uvic.ca/>)

图 5 VENUS 海底观测网络系统布设示意图(引自 <http://venus.uvic.ca/>)

NEPTUNE Canada 从 2007 年开始进行海底光电缆和观测仪器安装铺设,2009 年投入使用,目前已经安装了 5 个水下节点(计划再增加 1 个),成为世界上首个区域光缆海底观测网络(如图 6 所示)^[13]。全世界的科研人员可以通过互联网实时查询和下载该系统的观测数据。NEPTUNE Canada 的主要研究包括海底地壳运动、海底热液活动、海洋过程与气候变化、深海生态系统等^[14,15]。

NEPTUNE Canada 从温哥华岛西岸出发,穿过大陆架进入深海平原,向外延伸到大洋中脊的扩张中心,共布设了长达 800km 的光电复合缆组成海底观测骨干网络,整个观测范围为水下 17m~2660m,采用高压直流供电模式,供电能力达到 10kV/60kW,数据传输能力为 10Gb/s。骨干网采用环路拓扑结构,能量和数据可以双向传输,提

高了系统的可靠性.

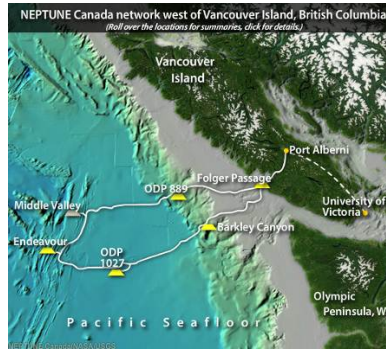


Fig.6 NEPTUNE Canada structure (cited from <http://www.neptunecanada.ca/>)

图6 NEPTUNE Canada 结构示意图(引自 <http://www.neptunecanada.ca/>)

NEPTUNE Canada 目前已经安装了 5 个节点,分别为 Folger Passage(17m~100m),Barkley Canyon(400m~653m),ODP889(1250m),Endeavour(2300m),ODP1027(2660m),在新的经费支持下计划安装 1 个新的节点(Middle Valley,2400m).这些海底观测节点通过分支单元和骨干网连接,通过二级降压模式将电缆传输来的高压电进行降压,供水下接驳盒使用.每个节点周围连有数个接驳盒,接驳盒通过分支光电缆与观测仪器和传感器相连.整个系统现在连接有上百个观测传感器,进行水下实时连续的观测,并通过光纤实时地将观测数据传向岸基基站.

1.3 欧洲海底观测网络

2004 年,欧洲 14 个国家共同制定了“欧洲海底观测网计划(The European Sea Floor Observatory Network,简称 ESONET)”^[16],在大西洋与地中海精选 10 个海区设站建网(如图 7 所示),进行长期的海底观测.针对从北冰洋到黑海不同海域的科学问题,承担一系列科学研究项目,诸如评估挪威海冰的变化对深水循环的影响以及监视北大西洋地区的生物多样性和地中海的地震活动等.该计划将涵盖从北冰洋到黑海的所有欧洲水域,也将探寻从冷水珊瑚到泥火山等大量神秘的自然现象.与 NEPTUN 不同,ESONET 是由不同地域间的网络系统组成的联合体.该项目将根据实际情况逐渐探求发展完整的网络系统,在 20 年后具备监视整个欧洲周边海域的强大能力.

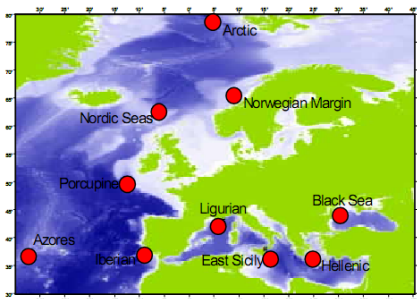


Fig.7 ESONET location (cited from Ref.[16])

图7 ESONET 观测海域分布图(引自文献[16])

2002 年~2007 年,欧洲完成了 ESONET-CA 计划^[17],该计划首次对欧洲海洋观测能力进行了评估,允许对 ESONET 的潜在利益相关者进行鉴定,制定了观测节点的第 1 级配置定义.在以上研究的基础上,欧洲于 2007 年~2011 年开展了 ESONET-NoE 计划^[18],目的是推动对环欧洲长期多学科深海观测网络的实施和管理^[19].2007 年开始的欧洲多学科海底观测计划(European Multidisciplinary Seafloor Observatory,简称 EMOS)^[20],计划建立 5 个节点,提升 ESONET 的数据获取能力,预计 2016 年进入正式操作阶段.筹备阶段(EMSO-PP)是为期 4 年的项目,

其主要目标是建立 EMSO 的法律和管理框架。

1.4 日本海底观测网络

DONET 网络^[21]是日本开展的海底观测项目,主要用来实现对地震和海啸的实时连续监测,网络节点的分布如图 8 所示。第 1 阶段从 2006 年开始,2011 年完成建设。该网络以 15km~20km 为间隔,在海底布置 20 个科学节点,每个科学节点连接多个高精度的海底地震仪、强震仪、水中地震检波器、温度计和压力传感器等多种海底观测仪器,监测范围涵盖伊豆半岛近海东南海地震震源区^[23]。DONET 主干网上可以承载 3kW 电力输送,主干网对每个科学节点的输入功率为 500W,科学节点与基站之间的最高数据传输率达到 600Mbit/s。网络建成后,DONET 数据通常发送到日本气象厅(JMA)和美国国家地球科学和防灾研究所,目前压力表传感器已经用于日本气象厅的海啸警报,并监测到 2011 年日本东太平洋海域地震、2012 年苏门答腊岛北部西海岸的地震、2012 年日本 Sanriku 海岸地震等。

2012 年,日本在南开震源区开始 DONET2 的建设,主干网络将于 2013 年开始铺设,计划于 2015 年完成。

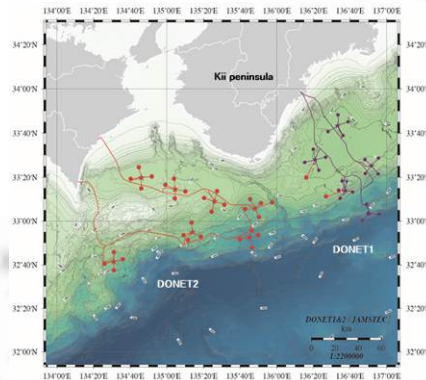


Fig.8 DONET network node's location (cited from <http://www.jamstec.go.jp/donet/e/>)

图 8 DONET 网络节点分布图(引自 <http://www.jamstec.go.jp/donet/e/>)

2 我国海底观测网络研究进展

我国在“十一五”期间开展了海底长期观测网络关键技术的研究。2009 年 4 月,同济大学等科研单位在上海附近海域进行了海底观测组网技术的实验,并且建立了中国第一个海底综合观测实验与示范系统——东海海底观测小衢山试验站^[24]。该试验站由海洋登陆平台及传输控制模块、1.1km 海底光电复合缆、基站及特种接驳盒组成(如图 9 所示),接驳盒外接 ADCP,CTD,OBS 等多种观测仪器。同济大学等国内高校研制的海底观测节点在 2011 年 4 月已与美国 MARS 网络并网成功^[25]。2011 年,山东省科学院海洋仪器仪表研究所在青岛胶州湾海洋岸边试验站开展了海底观测网络岸边实验^[26]。

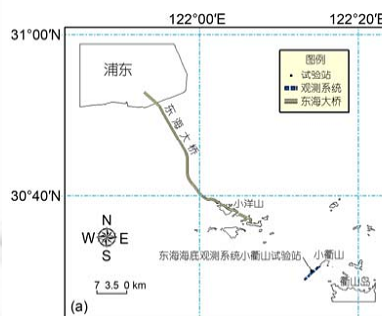


Fig.9 Xiaoshan Observing Station (cited from Ref.[25])

图 9 小衢山试验站(引自文献[25])

2007年,台湾地区开始执行“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,简称MACHO)”^[27,28],并于2011年11月完成建设后正式运行.MACHO从宜兰县头城镇向东南外海铺设1条全长45km的海底光电复合缆,并在深度约300m的海底设置1个科学观测节点,连接地震仪、海啸压力计、温盐仪与水听器等仪器设备,通过海底光电缆24小时连续实时地将监测数据传送到陆上监测站,不仅能够加强对地震与海啸活动的监测,还可长期提供海洋科学观测数据^[29].

3 海底观测网络关键技术

海底观测网络将观测仪器长期放置在水下,实现长期、实时和高分辨率的原位观测.本节对构建和保障海底观测网络长期稳定运行的关键技术进行分析,并总结了目前国内外的相关解决方案,希望对未来的研究工作有一定的借鉴和参考价值.

3.1 能源供应技术

电能是海底观测网络正常运行的基础.目前针对单个科学观测节点的能源供应已有很好的解决方案,但对于包含多个观测节点的海底观测网来说,海底电缆长度达到几百甚至上千千米,需要的电能比较大且要长期供电,具有一定的难度,当前国际上通常采用高压电缆供电方式.

高压输电可以采用直流电和交流电两种方式,考虑到单位长度电缆的电阻影响和绝缘因素,传输的电压要低于10kV~15kV.采用交流电存在容抗损耗大补偿昂贵、水下降压设备体积巨大等限制,通常采用直流并联供电法^[27,30,31].这种能源供应方式虽然取得了较好的工作效率,但仍存在最大传输的能量受到线路特性和负载分布影响、负载变化时会导致电压变化等缺点.同时,随着供电距离的增大,在水下降压、能源监控管理、中继器保护、错误定位隔离^[32]等方面存在较多的问题.需要研究者研制小型化高压直流降压设备、设计开发电能分配管理系统,提高海底观测网络能源供应能力和容错能力,实现海底观测网络的远距离能源供应与供电故障处理^[33].

3.2 海底接驳技术

海底接驳技术通常用于将水下仪器设备和海底骨干网连接,提供能源和信号传输.海底接驳盒是专门研制的海底接驳装置,一般具有中继功能、数据通信功能、控制指令传输功能、电能转换和分配功能、接口规范转换功能、自监控功能、即插即用功能^[34,35].在进行海底接驳盒设计时,需要考虑多种影响因素.接驳盒放置在海底,耐压、耐腐蚀和防水是首要考虑的问题.为了提供更好的安全防护,小型化和防拖网设计成为考察接驳盒性能的重要技术指标;海底观测网络采用湿插拔技术对观测仪器和传感器动态增减和维修,实现能在水下湿插拔的配对接口是接驳盒接口设计的重点^[2].接驳盒给水下设备提供机械和电子连接接口,对电能和数据信号进行集中、转换和处理.电能转换器、数据通信装备成为接驳盒的基本功能单元,研制能够可靠地工作于海底的电路系统,是接驳盒设计的核心内容之一^[36].接驳盒的结构设计、材料选择、内部散热等问题也是考虑的重点.接驳盒还可能有很多辅助功能,如水声通信实现于水下潜器、水声传感器网络的连接,需要设计辅助接口以满足功能的扩展^[37].

3.3 网络基础设施

网络基础设施主要包括用于岸基能源供应的电能供给设备、信号传输设备、数据分析处理设备和数据储存设备等^[2],实现对整个海底观测系统的远程监控管理.电能供给设备主要解决岸基能源供应和电能监控问题,通过故障处理系统以保障水下设备的正常运行,数据分析处理设备和数据存储设备主要负责收集、处理、存储大量不同类型的数据,一般可以采用成熟的商业解决方案降低运行风险.开发相应的数据管理系统负责收集、管理、存放、分发数据,处理和显示数据,设计高效的通信协议以提高水下观测数据的完整率,用软件工具来分析多学科、大空间范围、间断的数据并实现数据和界面的标准化^[38].建立网络基础设施是保证系统正常运行以及收集来的数据具有更广泛的应用的关键.

3.4 工程布设技术

海底观测系统中骨干光电复合缆的敷设是海底观测系统安全可靠运行的前提.在整个海底观测系统的建设过程中,需要重点考虑路由设计与选择、敷设工程两个方面^[39].在开展路由设计和选择的过程中,应以骨干网规划和设计任务书为依据,依照路由稳定可靠、走向科学合理、易施工维护及抢修的原则,进行多方案设计.在现有地形地貌、海底地质调查的基础上,考虑海况和涉海活动,确定出经济合理的路由选择方案.海底光电复合缆的安装分为直接敷设和埋设两种,考虑路由选择方案,确定出经济、合理的敷设技术方案,选用相应的光缆和施工方式进行施工布放.

4 海底观测网络系统研究展望

当前建设中的海底观测系统,各国也都处在起步阶段,我国也紧跟国际发展趋势,开展了相关的研究.作为一个新的研究领域,海底观测网络系统仍存在较多的技术难点和问题亟待解决.本节对海底观测网络的下一步研究进行展望:

(1) 随着电子技术、能源供应技术、仪器仪表等相关科学技术的发展,海底观测网络向网格化、易维护性、可扩展性、接口通用性和标准化、自维护性和强容错能力的方向发展,并在可靠性、观测时间跨度和测量精度等方面有更大的提高.

(2) 需要针对海底长期实施观测的需求,开展适用于海底观测网络的新型传感器.传统的海洋传感器在测量原理、能源供应、长期工作稳定性等方面存在缺陷,需要开展适用于长期海底观测的传感器,以提高海底观测网络的探测能力和可维护性.

(3) 加强不同网络之间、不同国家之间的合作.海底观测网络要加强和海面浮标网络、陆基和天基网络的数据共享,以提高对地球的观测能力.不同国家之间加强国际合作,充分利用互联网络的国际并联能力,实现各国海底观测网络建设的技术交流和数据共享.

(4) 我国要加快和国外相关机构的技术交流合作,吸收和借鉴国外的先进经验,并加大投入,组织力量重点攻关其关键技术(尤其是深海观测技术),尽快建成我国自己的海底观测网络系统,并建立专门的管理机构进行日常维护管理、数据分析处理和产品数据发布,这对我国赶超国外海洋科学研究发展、提高在海洋观测和海洋技术领域的能力有着重要的意义.

5 结 论

海底观测网络系统是一种新的深海大洋海底信息获取技术,在基于海洋观测的海洋科学研究中,可以对重点地区进行大区域、长时间、跨尺度、多途径的综合观测研究,具有传统技术不可比拟的优势.因此,大力发展海底观测网络系统对推动我国的海洋科学研究、资源勘探和海洋气候研究具有重大的意义.在本文中,我们着重介绍了国内外海底观测网络研究的最新成果,分析探讨了海底观测网络研究中的关键技术问题和初步的解决方案,展望了海底观测网络在未来的发展方向,期望能借此推动我国对海底观测新技术的关注与研究.

References:

- [1] Wang PX. Seafloor observatories: The 3rd platform for earth system observation. *Chinese Journal of Nature*, 2007,29(3):125-130.
- [2] Chen Y, Yang CJ, Tao CH, *et al.* Seafloor Observatory Network. Beijing: Ocean Press, 2006. 68-69.
- [3] <http://www.fas.org/irp/program/collect/sosus.htm>
- [4] Von Alt CJ. Leo-15: An unmanned long term environmental observatory. In: Proc. of the OCEANS'92. 1992. 849-854.
- [5] Glenn CS, Schofield OM, Barrier H, Petrecca RF, Dobarro JA, McLean SD. LEO-15 observatory—The next generation. *OCEANS*, 2005,1:657-661.
- [6] Pettitt RA Jr, Harris DW, Bailey WB, Jolly J, Hobart E, Chave AD, Duennebie F, Butler R, Bowen A, Yoerger D. The Hawaii-2 observatory. *Oceanic Engineering*, 2002,27(2):245-253.
- [7] Delaney JR, Chave AD. NEPTUNE A fiber-optic 'telescope' to inner space. *Oceanus*, 2000,42(1):10-11.

- [8] Rodgers DH, Maffei A, Beauchamp PM, Massion G, Chave AD, McGinnis TM, Gaudet S, Wilcock WSD, Kirkham H. NEPTUNE regional observatory system design. *OCEANS*, 2001,3:1356–1365.
- [9] Monterey Bay Aquarium Research Institute. The MARS ocean observatory testbed. 2008. <http://www.mbari.org/mars/>
- [10] <http://venus.uvic.ca/>
- [11] Ocean Leadership. OOI regional scale nodes. http://www.oceanleadership.org/ocean_observing
- [12] OOI Final Network Design. <http://www.oceanobservatories.org/>
- [13] <http://www.neptunecanada.com/>
- [14] Li JR, Xu HP. NEPTUNE Canada. *Advances in Earth Science*, 2011,26(6):656–661.
- [15] Barnes C, Best M, Johnson F, *et al.* Transforming the ocean sciences through cabled observatories: NAPTUNE-Canada Project. *Marine Technology Reporter*, 2008. 30–36.
- [16] Priede IG, Solan, M, *et al.* ESONET—European sea floor observatory network. In: *Proc. of the Oceans 2004 Kobe*. 2004. 2155–2163.
- [17] Priede IG, Solan M. European SeaFloor observatory network. FINAL REPORT, EVK3-CT-2002-80008, Version 3.0.
- [18] <http://www.esonet-noe.org/>
- [19] Puillat I. Open-Sea observatories: A new technology to bring the pulse of the sea to human awareness. 2012. http://cdn.intechopen.com/pdfs/33939/InTech-Open_sea_observatories_a_new_technology_to_bring_the_pulse_of_the_sea_to_human_awareness.pdf
- [20] <http://www.emso-eu.org/>
- [21] <http://www.jamstec.go.jp/donet/e/>
- [22] Kawaguchi K, Kaneda Y, Araki E. The DONET: A real-time seafloor research infrastructure for the precise earthquake and tsunami monitoring. In: *Proc. of the OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*. IEEE, 2008. 1–4.
- [23] Yoshiroyuki K. Japan's advanced real-time ocean observatory network. *Recent Developments in World Seismology*, 2011,11:5–6.
- [24] Xu HP, Zhang YW, Xu CW, *et al.* Coastal seafloor observatory at Xiaoqushan in the East China Sea. *Chinese Sci. Bull.*, 2011, 56(22):1839–1845.
- [25] Peng XT, Zhou HY, Wu BC, *et al.* Test China node on monterey accelerated research system (MARS). *Advances in Earth Science*, 2011,26(9):991–996.
- [26] <http://www.sdoi.com/>
- [27] 許樹坤, 李昭興, 劉家瑄, 等. 台灣東部海域海底電纜觀測系統建置規劃. <http://scman.cwb.gov.tw/eqv5/research/45vol/MOTC2CWB2952E225.pdf>
- [28] Hsu S-K, Lee C-S, Shin T-C, Liu C-S, Huang B-S, Kuo B-Y, Lin C-H, Tang D, Chang H-Y, Kuo C-H-J. Marine cable hosted observatory (MACHO) project in Taiwan. In: *Proc. of the Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*. 2007. 305–307.
- [29] NEC. 海底地震儀观测系统. <http://www.nec.com/en/case/twqd/ch/index.html>
- [30] Lu S, El-Sharkawi MA, Kirkham H, Howe BM. NEPTUNE power system: Startup power supply for 10kV to 400V Dc-Dc converters. In: *Proc. of the Applied Power Electronics Conf. and Exposition*. 2006.
- [31] Howe BM, Chan T, Sharkawi ME, Kenney M, Kolve S, Liu CC, Lu S, McGinnis T, Schneider K, Siani C. Power system for the MARS ocean cabled observatory. In: *Proc. of the Scientific Submarine Cable 2006 Conf*. 2006. 7–10.
- [32] Chan T, Liu CC, Howe BM, *et al.* Fault location for the NEPTUNE power system. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2007,22(2): 522–531.
- [33] Chen YH, Yang CJ, Li DJ, Jin B, Chen Y. Development of a direct current power system for a multi-node cabled ocean observatory system. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 2012,13(8):613–623.
- [34] Lü F, Peng XT, Zhou HY, *et al.* Design of a prototype system for cabled seafloor observatory networks. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012,33(5):1134–1139.
- [35] Lu HL, Li DJ, Yang CJ, *et al.* Design and implementation of underwater junction box prototype system for deep seafloor observatory network. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010,44(1):8–13.
- [36] Peng AW. OceanWorks experience in the design and building of cabled ocean observatories. [http://www.oceanworks.com/admin/sitefile/1/files/OceanWorks-Experience-in-the-Design-and-Building-of-Cabled-Ocean-Observatories\(1\).pdf](http://www.oceanworks.com/admin/sitefile/1/files/OceanWorks-Experience-in-the-Design-and-Building-of-Cabled-Ocean-Observatories(1).pdf)

- [37] Howe BM, McGinnis T. Sensor networks for cabled ocean observatories. In: Proc. of the Int'l Symp. on Underwater Technology. IEEE, 2004. 113-120.
- [38] Ma WF, Cui WC, Liu T, Hu Z. Present status and development tendency of submarine cable-connected observation system. Coastal Engineering, 2009,28(3):76-84.
- [39] Xu HP, Jiang EZ, Xu CW, Liu D, Qin RF. Underwater observation system and engineering design. Science, 2012,64(6):19-22.

附中文参考文献:

- [1] 汪品先.从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台.自然杂志,2007,29(3):125-130
- [2] 陈鹰,杨灿军,陶春辉,等.海底观测系统.北京:海洋出版社,2006.68-69.
- [14] 李建如,许惠平.加拿大“海王星”海底观测网.地球科学进展,2011,26(6):656-661.
- [24] 许惠平,张艳伟,徐昌伟,李建如,刘丁,覃如府,罗胜卿,范代读.东海海底观测小衢山试验站.科学通报,2011,56(22):1839-1845.
- [25] 彭晓彤,周怀阳,吴邦春,吕枫,等.美国 MARS 海底观测网络中国节点试验.地球科学进展,2011,26(9):991-996.
- [34] 吕枫,彭晓彤,周怀阳,岳继光,何斌.缆系海底观测网原型系统设计.仪器仪表学报,2012,33(5):1134-1139.
- [35] 卢汉良,李德骏,杨灿军,等.深海海底观测网络水下接驳盒原型系统设计与实现.浙江大学学报:工学版,2010,44(1):8-13.
- [38] 马伟锋,崔维成,刘涛,胡震.海底电缆观测系统的研究现状与发展趋势.海岸工程,2009,28(3):76-84.
- [39] 许惠平,姜恩祝,徐昌伟,刘丁,覃如府.海底观测系统及其工程布设.科学,2012,64(6):19-22.



李正宝(1981—),男,山东微山人,博士,副研究员,主要研究领域为水声传感器网络,海底观测网络,海洋环境监测技术.
E-mail: lizhengb@gmail.com



吕斌(1980—),男,助理研究员,主要研究领域为电子工程,软件系统.
E-mail: lvbin20031@163.com



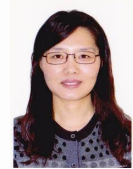
杜立彬(1976—),男,博士,研究员,主要研究领域为海洋环境立体监测.
E-mail: dulibinhit@yahoo.com.cn



曲君乐(1960—),男,高级工程师,主要研究领域为机械设计,仪器仪表.
E-mail: qujunle@163.com



刘杰(1985—),男,助理研究员,主要研究领域为机械设计.
E-mail: liujie0232@163.com



王秀芬(1972—),女,助理研究员,主要研究领域为机械电子.
E-mail: wxfsun2005@163.com