

新一代海底光缆综合信息传输网技术发展现状

魏巍¹,王增²,张伟³,何如龙¹,舒畅¹,樊诚¹,乔小瑞¹

(1.海军工程大学 电子工程学院,武汉 430033; 2.军事科学院 系统工程研究院 北京 100141; 3.海军工程大学 研究生院,武汉 430033)

摘要:新一代海底光缆通信网将既具有传统海底光缆通信网的通信功能,又能为海底用户提供即插即用、稳定可靠的信息传输和电能供给,可作为海底观测、导航定位和海底通信等应用系统的共用信息基础设施。着眼于构建新一代海底光缆通信网,为服务未来海底各类预制系统、无人自主系统所需的水下物联网开展预先基础研究,介绍了最新的海底光缆信息传输网及其相关设备的最新发展情况、该领域的发展趋势,最后指出了当前海底光缆网络面临的困难。

关键词:海洋信息;海底光缆;信息网络;观测网;水下通信;水下物联网

中图分类号:TN913.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0061-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development status of new generation submarine optical cable integrated information transmission network technology

WEI Wei¹, WANG Zeng², ZHANG Wei³, HE Rulong¹, SHU Chang¹, FAN Cheng¹, QIAO Xiaorui¹

(1. Engineering College of Electronic, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China; 3. Postgraduate Schools, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The new generation of submarine optical cable communication network will not only have the communication function of the traditional submarine optical cable communication network, but also provide plug and play, stable and reliable information transmission and power supply for submarine users. It can be used as a common information infrastructure for application systems such as submarine observation, navigation and positioning, and submarine communication. Focusing on the construction of a new generation of submarine optical cable communication network, this paper carries out preliminary basic research for the underwater internet of things required to serve various submarine prefabricated systems and unmanned autonomous systems in the future, introduces the latest development of the latest submarine optical cable information transmission network and its related equipment, as well as the development trend in this field, and finally points out the difficulties faced by the current submarine optical cable network.

Key words: marine information, submarine optical cable, information network, observation network, underwater communication, internet of underwater things

0 引言

海洋信息网络是发展海洋经济、维护国家海洋权益的基础设施。其中,海底光缆网络是重要组成部分,

收稿日期:2021-08-12。

基金项目:国家某项目资助。

作者简介:魏巍(1983—),男,博士,讲师,主要研究方向是水下无线光通信、海缆系统工程和海洋信息网。参与了国家重大海洋信息工程建设,公开出版图书2部,主持撰写国军标3部,以第一作者身份在国内外期刊发表论文20余篇。



在海洋资源开发、海洋防灾减灾、海洋生态环境保护、海洋科学研究和国家安全等领域有着广泛的应用。国务院印发的《“十三五”国家信息化规划》在重大任务和重点工程“陆海空天一体化信息网络工程”中明确要求推进网络设施建设,提出“推动海洋综合观测网络由水面向水下和海底延伸”。在政策、技术和市场等多重因素推动下,我国海底科学观测、导航定位和通信等海底光缆综合信息传输网络即将开展规模建设^[1]。目前,最常见的海底光缆通信网和海底光缆观测网都为海底光缆传输网的一种应用形态,这种网络还包括基于海底光缆的警戒网和导航定位授时网。

魏巍,王增,张伟,等;新一代海底光缆综合信息传输网技术发展现状

海底光缆综合信息传输网络是陆地信息与通信技术(ICT)在海洋领域的应用和延伸。目前,在建的海底光缆网络主要有海底通信网、海底观测网、海底警戒网和海底导航定位授时网4种类型。随着近几年国内有中继海光缆技术的成熟应用,以海底光缆网络作为信息和电能传输平台的各类海洋业务系统也在自我更新换代。例如:由于缆系海底观测网有中继节点,传输距离更远;岸基远程供电能力的提升,海底用电设备越来越多样化;数字化的海底预警系统可把数据处理单元转移到岸基,从而简化海底系统结构,提高可靠性;我国的导航定位授时系统通过海底光缆将导航定位授时信息在海底传递给水下平台。

未来,水下物联网要求传输系统高带宽、低延迟且易于接入,以海底光缆网络作为基础承载网络来构建未来水下物联网是必然选择,在此基础上接入各类海底预制系统、无人自主系统和业务系统都需要新一代海底光缆综合传输网络。本文从当前国内外各种海底光缆信息传输网的发展现状、相关设备发展情况以及该领域的发展趋势3个方面进行介绍。

1 网络发展现状

1.1 海底光缆网络发展现状

美国、加拿大和日本等西方发达国家和地区在海底光缆综合信息网的规划建设方面已经先行一步,先后建成了或正在建设本国的海底光缆信息网,并应用于水下潜艇作战、水下声纳探测等民用或军事领域,成为水下通信、水下预警探测和海洋环境监测不可或缺的信息传输保障手段。国外在海底光缆通信网、海底观测网和海底警戒网3个领域全面发展。

国外在海底光缆通信网方面技术发展成熟,海底光缆通信系统规模商用,囊括了全球95%的互联网通信。全球国际互联网带宽年增长率保持在30%左右,2013–2017年约增长196 Tb/s,截至2018年8月已达到295 Tb/s,全球数据中心互联和互联网服务带宽需求的持续增长推动了海底光缆的加速建设;此外,截至2020年,全球已投入使用海底光缆超过400条,总长度达 1.2×10^5 km,其中40%为2000年前建设完成,此部分海缆已逐步进入使用周期的尾声。2016年,跨太平洋、跨大西洋和亚欧间海缆系统已开始进行升级换代,海缆建设已进入一个新旧更替的窗口期。在2016–2020年,全球部署的海底光缆系统有107个,全长超过 4×10^5 km,总价值超过138亿美元。我国登陆的国际海缆共9条,登陆站共5个,带宽超过40 Tb/s。

目前,海底光缆通信系统新技术发展应用有4个方向:①单纤对容量更大。近几年系统建设单波速率许多能达到200 Gb/s、300 Gb/s,单纤对容量超过20 Tb/s,未来单波速率将会朝着400 Gb/s、600 Gb/s方向发展。②纤对数更多。有中继海缆系统的纤对数从以前的8对以内增加到现在的16对,未来将朝着24对及32对发展。③传输距离更长。以跨太平洋海缆为例,以往系统最长是美国西岸到上海,设计直达距离为 1.1×10^4 km;未来新系统到香港、新加坡,设计直达传输距离分别将达到 1.3×10^4 km、 1.5×10^4 km以上。④网络更灵活。海底光缆系统的水下光电分支器从最早期的固定上下光纤,到前几年可实现固定上下预设波段,近期将发展到能灵活上下任意波长的可重构光分插复用器(ROADM),使得系统组网更为灵活。

国内外海底光缆观测网在文献[2–5]中有较详细的介绍,本文不做累述。但近年来,国外出现了在海缆通信系统中融合观测功能的趋势。例如,分布式声传感(DAS)是一种将光纤转换为声波传感器的新兴技术,它能利用已有的海底光缆进行地震监测。文献[6]报道了沿比利时近海海底光缆DAS阵列对微震、局部表面重力波和远震地震的观测。2020年,法国阿尔卡特海底网络公司(ASN)建设的巴西到欧洲海缆通信系统被PHILIPPE D等人^[7]宣称是全球首条智能海底光缆,该系统在Madeira分支中运用了DAS光纤,可在不影响通信传输和系统整体设计寿命的前提下实时地收集地震、火山和海洋生态等信息。在美国位于蒙特利湾加利福尼亚州莫斯兰丁市近海20 km长的海底光缆火星观测网(MARS)上,文献[8]采用DAS技术观测了断层活动的时间和空间。2021年2月,文献[9]报道了海底通信公司(Subcom)在为谷歌建造的美国到拉美的居里(Curie)系统上进行的实验,通过监测常规光通信信道的偏振,成功地在连接加利福尼亚州洛杉矶和智利瓦尔帕莱索的 1×10^4 km长的海底电缆上感应到地震和海洋涌浪的压力信号(这意味着海啸感应的可能性)水波。该方法不需要专门的设备、激光源或专用光纤,可将普通的海底光缆通信系统升级成监测地震和海啸的网络。

1.2 海底光缆军事网络发展现状

近些年,美军一直在研究将海底光缆综合信息传输网相关技术用于水下通信、警戒探测和导航定位等领域,突破了自主探测及决策技术、自主导航定位技术和水下作战局域网动态组网技术等。2015年,美军建成近海海底持续监视网(PLUSNet)^[10],该网络利用海底

光缆实现海底节点与岸基之间的信息传输。岸基设备通过海底光缆能够对海底节点进行控制、管理,实现海洋环境观测、水下威胁监视跟踪(水下警戒)、水中兵器中继制导以及水下/水面信息传输,并对水下设备供电。在此基础上,美国海军提出了部队网(FORCEnet)^[11]发展框架和技术途径。该网络综合采用了海底光缆、高速近程水声、远程低速水声、自浮式光缆、水下蓝绿激光、水下无线电、水面无线电、卫星及其它可扩展的水下/水面通信介质。海底光缆通信和水声通信构成了 FORCEnet 体系中海底部分的主干传输网络,并接入各类探测、导航等海底固定式传感节点,实现了通信指挥、水下警戒、海底观测和水下导航定位等功能。

2 设备发展现状

海底光缆综合信息传输网组网所需核心设备主要包括海缆网络传输设备、海底节点设备、海底有中继缆和双极性缆及海缆网络配电系统等。随着海缆通信网和观测网建设需求的牵引,这些设备近几年发展迅速。

2.1 海缆网络传输设备

海缆网络传输设备包括岸基终端传输设备和海底光中继器,它们都朝着更高的传输容量方向发展。2015年前,其核心技术基本被欧洲的原阿尔卡特朗讯(ASN)、美国 Subcom 和日本电气公司(NEC)等国际少数大公司垄断;2015年后,我国的华海通信(原华为海洋)、烽火海洋打破了以中继器为核心的国际技术垄断。

岸基终端传输设备基本与陆地系统类似,并已发展成熟。目前,主要采用波分复用技术实现大容量传输,每对光纤可传输 128 波双向信号,单波传输速率可达 100 Gb/s 或 200 Gb/s。海底光中继器用于深远海跨洋传输,其采用光放大技术,最大输出功率为 22.5 dBm。3000 km 以内的有中继海底光缆通信系统单个跨段长为 100~150 km,3000 km 以上系统单个跨段长为 75~100 km。系统可根据需要支持 6~12 纤对,工作电流为 0.5~1.5 A,功耗小于 50 W(一般在 25 W 左右),采用高压恒直流供电方式。我国部分单位研制的海底光中继器技术性能与国外设备性能相当。2020 年 3 月,国内华海通信发布了 16 纤对的海底中继器,并在香港到海南的海缆系统中投入使用。2021 年 3 月,日本 NEC 在其传统的四级泵浦冗余技术基础上已完成 24 纤对海底中继器的认证。目前,海底光中继器在波分复用技术增益效率较高的 C 波段已经接近能力极限。

从当前的技术趋势来看,空分复用(SDM)中的多纤对产业链和技术都非常成熟,且容量提升显著,是未来几年内提升海缆系统容量最有效的方式。此外,SDM 技术中的多芯光纤和少模光纤复用技术也是提升海缆系统容量的方式。下一步,海底中继器还将采用 C+L 双波段放大、喇曼+掺铒光纤放大器混合放大技术来进一步提高系统传输能力。

2.2 海底节点设备

纵观海底节点设备的发展趋势,主要朝着更高的耐压等级、供电功率以及更复杂的供电拓扑网络方向发展。供电功率由最初的 6 kV/6 kW 发展到现在的 10 kV/60 kW,并且正朝着更高的供电能力发展;供电拓扑由最初的单链路网络到树形网再到目前国内外较普遍的环形网,下一步发展方向为网格网。海底节点设备主要是海底观测网中使用的接驳盒^[12-17],分为骨干节点设备(主接驳盒)和接入节点设备(次接驳盒)。这 2 个系统都是单链供电网络,其接驳盒是在海底通信中继器基础上研制而成,采用恒流供电(实现恒流到恒压的变换)和串行通信的方式。上世纪末,为了监测近海的海洋生态环境,美国伍兹霍尔海洋研究所(WHOI)突破了近岸海洋交流供配电技术,研制出交流供电式海底接驳盒,用于长期生态系统观测系统(LEO-15)^[18]和马萨葡萄园岛海岸带观测网(MVCO)这 2 个小型的海洋综合监测系统。接驳盒实现了交流到直流变换,采用串行通信和以太网通信相结合的方式。这种交流供电方式易于扩展,系统输电功率也较大,但由于采用海底电缆输送三相交流电,其电缆较粗重,输电距离不宜过长。2006 年,加拿大维多利亚大学突破了海底中压恒压直流供配电技术,研制出具备通用接口的恒压供电的接驳盒,建成位于加拿大维多利亚海峡的大型近海海洋综合监测系统—金星海底观测网(VENUS),其包含 3 个骨干节点设备,每个节点有 4 个仪器设备接口为科学仪器提供电力和数据通信,工作水深为 350 m。其中,Georgia Strait 的节点距海岸 30~40 km,通过岸站供电进行数据通信。2007 年,在美国喷气推进实验室(JPL)的帮助下,美国华盛顿大学和蒙特雷湾海洋研究所(MBARI)解决了海底高压电能变配电问题,成功研制了 10 kV 恒压供电接驳盒,建成位于蒙特雷湾 900 m 水深的 MARS 监测系统,用于科学仪器测试,并于 2009 年完成了系统的安装、运行。加拿大海王星海底观测网(NEPTUNE)^[19]采用了 5 个主节点设备,每个主节点设备具有 2.5 Gb/s 带宽数据传输能力,并可以管理和分配 10 kW 的电源给

魏巍,王增,张伟,等:新一代海底光缆综合信息传输网技术发展现状

各种不同电压的仪器设备,为系统的设备配置提供了极大的灵活性,且还可以切换为 6 kW 的 400 V 高压供电模式。2011 年,日本和美国先后掌握了海底大功率恒流供电技术,成功研制了恒流供电式海底接驳盒,建成了以地震监测和地震引起的海啸监测为主、其它科学观测目标为辅的 DONET 海底观测网及其合并组网形态 S-NET^[20]和 ACO 海洋监测系统。2016 年,美国建成的“海洋观测网”(OOI)^[21]采用了 7 个海底主节点,每个节点可提供 8 kW 能量和 10 Gb/s 带宽双向通信。接入节点设备方面最出名、最成熟的是欧特海洋(OceanWorks)公司的科学仪器界面模块(SIIM)^[21],其最新型 SIIM-3000SC 可提供 10 个仪器界面端口,其中 8 个用于低压小功率(12~48 V, 60~240 W)输出;2 个用于高压大功率(375 V, 1875 W)输出,每个低压输出端口允许的最大输入电流为 5 A。

在国内,“十一五”期间,在科技部 863 计划的资助下,同济大学、浙江大学^[22]等高校承担了“海底长期观测网络试验节点关键技术”项目,在“东海海底观测实验示范网”中研制了具有 10 kV/10 kW 的供电能力和 1 Gb/s 的数据传输能力的主节点设备;“十二五”期间,中国科学院南海海洋研究所、中国科学院声学研究所和中国科学院沈阳自动化研究所联合研制的“南海海底观测实验示范网”中研制的主节点工作电压达到恒压 10 kV^[23]。东海和南海的海底观测实验示范网也经历了由单链路网络到树形网的演进,下一步将要建成的国家科学观测网都是环形网设计。2018 年,国内海兰信收购了 OceanWorks,其主接驳盒能提供主干恒压 10 kV/10 kW 的供电能力和 10 Gb/s 的数据传输能力。2019 年,中船海洋研制出了 10 kV/15 kW、40 Gb/s 的主接驳盒以及低压 300 W、中压 2 kW 的次接驳盒。

2.3 海底有中继光缆和双极性光缆

通信光纤正朝超低损耗、大有效面积方向发展。超低损耗、大有效面积光纤 G.654E 陆地光缆已开始在我国骨干光缆网络上规模应用,但由于海底光缆应用条件和要求相对陆地光缆更为苛刻,对海底光纤性能的一致性和可靠性要求极高,因此超低损耗、大有效面积光纤是海底有中继光缆的一项关键技术。以美国的 Subcom、欧洲 ASN 和耐克森以及日本的 NEC 及其子公司 OCC 公司为代表的四大海缆厂商,已成功研制损耗小于 0.154 dB/km、有效截面积为 150 μm^2 的海底有中继光缆,并已规模商用。目前,国内光纤厂商也成功开发出损耗小于 0.160 dB/km、有效面积为 130 μm^2

的产品,具备商用的基础,但离国际先进水平尚有一定差距,仍然需要更多的可靠性验证才能使用。随着国际互联网带宽需求的持续增加,海底光缆通信网的有中继海缆当前正朝多芯光纤(MCF)和少模光纤(FMF)2 个方向发展。考虑到海底光缆信息网的电能传输的需求,海底有中继光缆的另一个关键技术是在尺寸和重量适合施工的前提下,如何进一步提高工作电压,同时降低直流电阻,这对海底光缆绝缘耐压的可靠性和导电层铜管焊接工艺提出了很高的要求。目前,国际部分领先企业已有直流电阻为 0.7 Ω/km 左右的产品,国内部分厂商已研制出 32 芯有中继海底光缆的工作电压为 20 kV、直流电阻不大于 0.9 Ω/km 。

国外双极性光缆主要应用于观测网中,典型产品是日本 OOC 的双极性海缆,采用双层铜管结构,其外径为 $\Phi 29$ mm,外层导体直流电阻不大于 0.8 Ω/km ,内层导体直流电阻不大于 1.0 Ω/km ,工作电压为 3 kVDC,工作电流为 1 A,缆破断力为 100 kN。考虑到日后的扩展,国内大部分厂商对于海底双极性光缆的技术指标需求倾向于使用电压为 10 kVDC 和电流为 10 A 以下。在缆型结构上,国内有 2 种趋势:一是双层铜管结构,该结构的优势是类似现有轻型铠装(LWP)海缆结构,由于是同心结构,无需对现有生产线做大的改造,制造工艺成熟,缺点是高压大电流时由于发热的影响,接头盒的处理更复杂,绝缘能力会下降;二是双导体结构,优势是接头盒处理简单,缺点是不但需要改造生产线,其外径、重量等指标同等电气要求下相对前者更大、更重,且抗拉、抗冲击和反复弯曲等机械性能还需要全面验证。

2.4 海缆网络供配电系统

海缆网络供配电系统主要包括岸基的海底光缆远程供电设备(PFE)和位于海底的主/次节点中的电能转换分配单元,这些设备在物理部署上是分离的,但在设计上往往需要从供配电网络系统的角度来综合考虑。传统的海底光缆通信系统采用高压恒直流供电方式,岸基远供电源设备供电电压可达 15 kV,供电电流为 0.6~1.0 A。在海底观测网中,网络结构较为复杂,以树型为主,需根据网络情况选择恒流、恒压供电方式。欧美一般采用恒压直流供电方式,可实现 10 kV/60 kW 的供电能力。MARS 观测网、VENUS 观测网和 NEPTUNE 观测网^[24~26]是恒压直流供电的典型代表,其中加拿大 NEPTUNE 观测网于 2009 年投入使用,主干线全长 800 km,岸基远程 PFE 输出高达 10 kV/60 kW,主干线高压电源在主接驳盒处变换为 375 V 中压,在次接驳

盒变换为低压为海底设备提供供电。因考虑到海底常出现地震,为了提高系统的可靠性,日本的 ARENA^[27]、DONET 和 S-NET 海底地震观测网海底观测网均采用高压恒直流供电方式。其中,2011 年投入运行的 DONET 观测网,主缆采用 1 A 恒流供电,在每个主节点处通过恒定电流/恒定电压(CC/CV)变换为接驳设备供电,网络节点数最大为 20,全网功耗为 3 kW。在 PFE 方面,国外广泛采用的是美国斯派曼公司(SPELLMAN)的 PFE,其最大电压为 15 kV、最大供电功率为 22.5 kW,具备了高压保护设计、电源模块的冗余保护、电压自动调整和故障告警与定位等优势。其中,高压保护模块具有滤波保护、浪涌保护、高压泄放保护、海洋接地故障检测、接地保护和电源模块在线 N+1 保护等功能。国内已经开发出用于观测网的 PFE 样机,浙江大学、同济大学等在内的高校开始研究海底观测网技术,先后研制出了低压供电、400 V 供电、2000 V 供电和 10 kV 供电的接驳盒,先后建设了东海小衢山近海观测站、舟山海底观测示范网,并于 2016 年在南海完成了我国深远海海底观测网示范系统建设。这些观测网中的 PFE 采用恒压供电,电源处理方式类似国外,可提供 10 kV/10 kW 的恒压输出。近年来,国内也有高校和科研院所对观测网的恒流供电进行研究和试验,取得了初步成果,已完成样机研制并用于海底光缆通信网的恒流电源,可提供 0~1.5 A、6 kV 的恒流输出。2021 年 4 月,香港到海南的海底光缆通信系统中采用国产 PFE 的最大输出电压为 18 kV、最大输出功率为 27 kW。

3 发展趋势

3.1 统一体制实现网络融合

各类海缆信息网络耗资大、周期长,多方、多单位甚至多国联合实施相关项目已成常态。目前,在海洋观测、海缆通信等业务网络中分别独立建设了海底光缆通信网,这导致重复建设,浪费了本就紧缺的海缆路由资源、海缆登陆点资源,增加了整体建设成本。近 2 年,欧洲和美国已经出现了在海底光缆通信网上融合地震和海啸观测功能的趋势,国内方面也在公开倡议基于通用的海洋观测平台,提高资源利用效率,实现不同学科背景、不同学术思想和不同层次的研究力量协同,旨在以学科交叉的形式高效推进领域发展^[28]。未来将会根据不同类型、不同功能和不同领域的业务网络使用需求,统一信息传输和电能供给技术体制,提供通用标准接口,统一建设海底光缆综合信息传输

网,为各业务网络构建共用信息基础设施,实现海底信息网络的融合传输。

3.2 栅格组网提高抗毁性能

各种自然灾害和海洋经济活动对海底光缆网络存在巨大威胁。海底光缆网络的拓扑结构从早期的点对点链式网向目前环形网发展,如早期的 MARS、VENUS 观测网和加拿大的 NEPTUNE 观测网最开始都是岸对海的链式网,逐渐演变成岸对岸的环线网;国内东海和南海的观测实验网络也都是如此,下一步我国的海底观测网也规划采用环形网拓扑。可靠的海缆切换方法对于建立永久、可靠和鲁棒性高的海底观测网是必要的^[29],随着带 ROADM 功能的海底分支、水下波长选择开关阵列等技术的发展和成熟,海底光网络正在进一步向栅格网演进,以提高海底光网络的抗毁性能。

3.3 即插即用实现按需扩展

海底光缆综合信息网是水下通信、海底探测、海洋观测和导航定位等水下信息的公共传输平台,需要满足这些水下信息网络不同时期建设、规模扩展的要求。随着水下物联网(IoUT)和海底“支撑海洋科学观测的海缆通信技术(SMART Cable)”概念的兴起,伴随着近程水声通信、水下无线光通信、电磁通信和水下湿插拔连接器等无线或有线、声光电接入方式的发展,海底光缆网将从早期封闭、不可扩展的网络朝能够支撑相关设备(即插即用、灵活动态组网)的方向发展,以提高海底光缆网络的可接入性和可扩展性。

3.4 综合防护提升网络安全

海底光缆及相关设备在深海环境工作的布设成本高昂、维护难度大,且面临自然灾害和海洋作业破坏等安全威胁。传统的海缆防护手段主要是采用时光域反射仪的光传输性能检测和线路故障定位,仅能实现事后维修,不能对安全威胁提前预警;另一方面,随着国外“吉米卡特”号潜艇海底光缆窃听力量的增强,海底光缆系统也不再是完全安全的网络。2021 年 3 月,美国战略与国际问题研究中心(CSIS)发布《保护海底网络安全:决策者入门指南》^[30],建议美国政府发展海底光缆网络的“零信任”(zero-trust)先锋技术,包括先进的物理层加密和入侵检测技术,确保美国海缆网络在“不值得信任的环境中”也能安全运行。

因此,海底光缆网络也需要发展包括海面路由危害监视、海缆线路扰动感应等线路安全和光码分多址加密、噪声隐藏加密等信息安全的综合防护手段,提高网络安全防护能力。

3.5 高压、大功率和多端分布式供电

目前,各类网络的供电距离一般在 100 km 以内,供电功率一般不超过 15 kW,无法满足多业务协同全覆盖的应用需求。未来,随着在海缆网络接入更多水下业务终端,水下功率需求必将大幅增加,采用超高压、大功率和多端分布式供电将是一种发展趋势。

4 结束语

目前,海底光缆信息网络的技术研究围绕着 2 个核心问题:高可靠性和大功率供电。由于海底设备的维修成本高昂,海底光缆信息网络的水下设备对可靠性的要求非常高。如果按国际电信联盟(ITU)对传统的海底光缆通信系统水下设备(海缆、中继器和分支器等)25 年的使用寿命要求,目前的各类水下节点设备都无法满足。因此,需要研究从顶层结构设计到传输供电体制,再到器件选型等核心问题,提高系统的可靠性。

另一大挑战在于如何向水下远距离地输送大功率高压电能,目前存在以下 3 点困难:

①国内各类网络总体上还是使用进口的岸基远程供电设备,在当前的国际环境下,需要尽快实现自主可控,完成国产化替代;虽然国内已有几家单位已生产出原型机,但还需要更多安全防护功能和可靠性测试(在本文修改期间,国产化的 PFE 已经通过国际验证并应用在了香港-海南国际海缆系统中)。

②有中继海底光缆(海底光电复合缆)是按照给海底中继器供电设计的,其设计耐高压不超过 15 kV(一般工作耐压 10 kV),供电距离一般只有几十 km,而且缆径很粗、自重重,使用水深不深。目前,全球最深的海底光电复合缆在意大利撒丁岛海域,水深不超过 1800 m。因此,需要专门设计适用于长距离、深水深、小缆径和耐高压的有中继海底光缆来传输高压电能。

③水下节点的直流供电技术还需要突破,尤其是满足 20 kV 以上的小尺寸高可靠性的各类恒流转恒压、恒压转恒压和恒流转恒流模块技术。

致谢:本文撰写过程中得到了华海通信技术有限公司、烽火海洋网络工程、亨通海洋网络公司、中天科技集团等单位的支持,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 王文跃,刘泰.助力海洋强国 我国海底观测网进入规模建设期[N]. 人民邮电,2018-11-15(15).
- [2] CHAVE A D, ARROTT M, FARCAS C, et al. Cyberinfrastructure for

the US ocean observatories initiative: Enabling interactive observation in the ocean[C]//IEEE. Proceedings of Oceans 2009-Europe. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-10.

[3] 吴自军. 美国大型海底观测计划(OOI)正式启动[J]. 运行海洋地质与第四纪地质, 2016, 32(6): 134-138.

[4] TAYLOR S M. 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. 2009, 602(1): 63-67.

[5] 朱俊江,孙宗勋,练树民. 全球有缆海底观测网概述[J]. 热带海洋学报, 2017(3): 20-33.

[6] WILLIAMS E F, FERNÁNDEZ-RUIZ M R, MAGALHAES R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers[J]. Nat Commun. 2019, 10(1): 1-11.

[7] PHILIPPE D. EllaLink & EMACOM launch the"EllaLink GeoLab" SMART submarine cable initiative[EB/OL]. (2020-06-29)[2021-03-15]. <https://ella.link/2020/06/29/ellalink-emacom-launch-the-ellalink-geolab-smart-submarine-cable-initiative/>.

[8] CHENG F, CHI B, LINDSEY N J, et al. Utilizing distributed acoustic sensing and ocean bottom fiber optic cables for submarine structural characterization[J]. Scientific Reports. 2021, 11(5613): 1-14.

[9] ZHAN Z, CANTONO M, KAMALOV V, et al. Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables [J]. Science. 2021, 371(6532): 931-936.

[10] GRUND M, FREITAG L, PREISIG J, et al. The PLUSNet underwater communications system: acoustic telemetry for undersea surveillance [C]//IEEE. Proceedings of OCEANS 2006. Honolulu: IEEE, 2006: 1-5.

[11] 蒋鑫林. 未来海战场综合电子信息系统的发 展思路 - 美国海军“部队网(FORCEnet)”建设特点分析[C]// 中国电子科技集团. 第二十五届全国通信与信息技术发展学术研讨会论文集. 石家庄:中国电子科技集团第五十四研究所, 2010: 32-37.

[12] 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.

[13] 张艳伟, 范代读, 许惠平. 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, 2011, 56(32): 2732-2740.

[14] 杜立彬,李正宝,刘杰. 海底观测网关键技术 研究进展[J]. 山东科学, 2014(1): 1-8.

[15] 刘放. 摘着山岛智能海洋观测网信息系统的 设计与实现 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[16] 李风华,郭永刚,吴立新,等. 海底观测网技 术进展与发展趋势[J]. 海洋技术学报, 2015(3): 15-23.

[17] 杨灿军,张锋,陈燕虎. 海底观测网接驳盒 技术[J]. 机械工程学报, 2015(10): 35-43.

[18] CREED E L, GLENN S, SCHOFIELD O M, et al. LEO-15 Observatory-the next generation [C]//OCEANS 2005 MTS/IEEE, September 17-23, 2005, Washington, USA. New York: IEEE, 2005(1): 657-661.

[19] HAROLD K, PHIL L, CHEN-CHING L, et al. Design of the NEPTUNE power system[R]. Washington: NASA, 2013.

[20] NISHIKAWA T, MATSUZAWA T, OHTA K, et al. The slow earthquake spectrum in the Japan Trench illuminated by the S-net seafloor observatories[J]. Science, 2019, 365(6455): 808-813.

- [21] O W I. OceanWorks_SIIM_3000SC[EB/OL]. (2020-06-29)[2021-03-16]. <http://www.oceanworks.com/our-business/science-environmental/observatorycomponents/>.
- [22] CHEN Y H. Study on 10 kVDC powered junction box for a cabled ocean observatory system[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27: 265-275.
- [23] 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.
- [24] MAFFEI A R, CHAVE A D, MASSION G, et al. NEPTUNE gigabit ethernet submarine cable system[C]//IEEE. Proceedings of OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. New York: IEEE, 2001: 1306-1310.
- [25] WOODROFFE A M, PRIDIE S W, DRUCE G. The NEPTUNE Canada junction interfacing science instruments to sub.sea cabled observatories [C]//IEEE. Proceedings of OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean. New York: IEEE, 2008: 1305-1314.
- [26] 罗续业,李彦. 海王星海底长期观测系统的技术分析[J]. 海洋技术, 2006, 25(6): 15-18.
- [27] SHIRASAKI Y, YOSHIDA M, NISHIDA T, et al. ARENA: a versatile and multidisciplinary scientific submarine cable network of next generation [C]//2003 International Conference Physics and Control(Cat. No.03EX708), June 25-27, 2003, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2003: 226-231.
- [28] 马蕊,赵修涛,柳存根. 海洋水下立体观测技术装备发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 19-25.
- [29] ZHANG Z F, CHEN Y H, LI D J, et al. Use of a coded voltage signal for cable switching and fault isolation in cabled seafloor observatories[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2018, 19(11): 1328-1339.
- [30] 唐璐,张志强. 美国战略与国际问题研究中心建议美国要维持海底网络安全与战略利益[EB/OL]. (2021-03-27)[2021-04-06]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1695380549145592443>.