

DOI: 10.3901/JME.2015.10.172

海底观测网接驳盒技术*

杨灿军 张 锋 陈燕虎 李德骏 金 波

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 利用海缆和接驳盒将布放在海底表面及海洋内的用于科学观测的仪器连成一个网络,并与陆地的因特网和电力网有机连接而组成的可实现长期、连续、实时的原位观测的海底观测网已经成为海洋科学研究的重要平台。研究和介绍海底观测网接驳盒所涉及的关键技术,包括接驳盒的电能供给及变换、高带宽通信与高精度对时、供电故障诊断与隔离、水下封装与设计等。基于所研究技术的接驳盒样机成功地进行水池和高压模拟试验、浅海运行试验、和深海组网试验等系列试验,并验证相关技术:基于直流变换的电能分配和供给方式可应用在海底观测网上;点对点的主干网光纤通信及多级树形结构的通信架构可满足海底观测网需求;独立端口的过电压、过电流和接地故障的诊断和隔离可提高系统的整体可靠性;模块化的封装结构和可维护的分离结构可降低成本并提高了系统的可维护性。

关键词: 海底观测网; 直流供电; 对时; 故障诊断与隔离

中图分类号: TH137

Technologies of Junction Box for Seafloor Observation Network

YANG Canjun ZHANG Feng CHEN Yanhu LI Dejun JIN Bo

(The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: By using submarine cable and junction box to wire the science instruments deployed on the seafloor or in the water column into a network and combining with the terrestrial Internet and power grid to form the seafloor observation network that enables long-term, continual, real-time and in-situ ocean observing has become an important platform for ocean science research. The key technologies for designing junction box are studied and presented, including power transmission and conversion; high bandwidth communication and precise timing; power fault detection and isolation; and sealing and construction design. Based on the studied technologies, some prototypes of the junction box are built. Tests like water tank and high pressure simulative tests, shallow sea operation trial, and deep sea operation trial are carried out successfully and validated the relative technologies: Power distribution and management method based on DC power conversion can be applied on seafloor observation network; point to point communication on trunk cable via optical fibers and multi-stage tree communication structure could satisfy its requirement; detecting and isolating over-voltage, over-current and ground faults on individual port can enhance the reliability of the system; and modularized design and detachable structure could lower the cost and make it maintainable.

Key words: seafloor observation network; DC power; timing; fault detection and isolation

0 前言

传统的海洋尤其是深海观测手段大多依赖于载人潜器和采样器的工作范围,以及观测装备的电池和信息存储能力,难以满足日益增长的科学需求,

可实现长期、连续、实时和原位观测的海底观测网已经成为当前海洋观测技术的研究热点。在海底敷设长距离、多支路的光电复合海缆网路,各网路终端连接一个或多个用于电能与信息分配、管理和控制的接驳盒,所有布置在海底及海水中的科学仪器可以连接到接驳盒上以获取电能供给和信息通路,从而形成一个可实现海洋“透明化”的海底观测网络^[1-7]。而作为观测网的网络节点,接驳盒是整个海底观测网的核心部件,其功能主要包括:① 电能的

* 国家自然科学基金青年基金(51409229)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51221004)、浙江省自然科学基金(LQ14E070002)和国家高技术研究发展计划(863 计划, 2012AA09A402, 2013AA09A414)资助项目。20140609 收到初稿, 20150129 收到修改稿

高低压变换；② 电能的分配、管理；③ 近 10 年来，海底观测网在欧美及日本获得了一定的研究进展，相应的接驳盒技术也取得了发展。HUGO、H2O 和 ACO 是建立在通信中继器技术基础上的单接驳盒观测系统^[8-10]，采用恒流供电系统，接驳盒实现恒流到恒压的变换，而通信方式则采用串行传输方式，只能用于小功率低带宽的观测设备。同样，日本的用于灾害监测的 DONET 网络采用了恒流供电技术，由于该技术具有极高的故障容错能力，因此适合于地震带区域的应用^[11]。但恒流供电方式不易于扩展应用，同时其使用功率增加时，供电电压也需要相应提高，难以实现大功率观测网。LEO-15 和 MVCO 是两个用于近岸的科学观测网络^[12-13]，采用交流输电的方式，接驳盒实现交流-直流变换，通信方式则可结合串行通信和以太网通信两种方式以适应多种设备。该方式采用交流供电，易于扩展，输送功率也相应提高，但交流供电系统需要三或四根传输导体，其输电损耗和敷缆成本随着输电线路变长或者输送功率变大而明显增加。相对于前面两种方式，直流恒压供电的方式更易于实现扩展和大功率应用，并可采用单导体电缆进行远距离输电而以海水作为回路，不但可以降低海缆成本，同时也降低了线路的损耗^[14]。考虑到海底观测网的应用目标、需求和范围，新兴的海底观测网均采用了恒压供电的方式，如加拿大 VENUS、NEPTUNE、美国的 MARS、Kilo Nalu 观测系统、正在建立的美国的 RSN 以及欧盟多国计划共建的 ESONET^[15-20]。对于通信，基于 TCP/IP 协议的以太网通信逐渐被新的观测网所采纳。

在中国，海底观测网技术研究刚刚起步，在 2009 年，同济大学在东海小衢山建立了中国第一个近海观测站，但离真正意义上的具有可扩展，大规模的观测网仍有很大差距^[21]。在国家高技术研究发展计划的资助下，浙江大学从 2007 年开始进行了通用性海底观测网接驳盒技术研究^[22]，并实现了直流 2 kV 与 10 kV 供电的主接驳盒样机和 375 V 供电的次接驳盒样机^[23]，于 2010 年 9 月份在中国东海进行了 10 kV 海底观测系统的浅海海试^[24]，于 2011 年 4 月至 10 月在美国加利福尼亚州的蒙特雷湾进行了次接驳盒与美国 MARS 观测网联网对接试运行^[25]，均取得了成功。从 2012 年开始，中国多所院校联合攻关大规模海底观测网技术，在南海和东海分别建立应用型观测网。在 2013 年 5 月，中国科学院在南海三亚附近建立了一个 2 km 长的示范性海底观测网。

本文就所研究的接驳盒技术展开详述。首先，

在第 1 节介绍了海底观测网架构和接驳盒在观测网中的功能；在第 2 节对接驳盒设计的技术如电能供应系统、通信系统和对时、故障诊断与隔离和机电封装等分别展开研究和介绍；样机实现与海试试验等将在第 3 节进行阐述；最后，在第 4 节对接驳盒技术研究进行总结。

1 海底观测网架构

如图 1 所示为海底观测网架构，其中水下部分由海缆、接驳盒、科学仪器三类设施组成。主干海缆为铠装的光电复合海缆，其中光纤是信息传输的介质，而铜导体是高压直流电能的传输载体。光电复合缆具有多个分支，每个分支形成一路单独的支路，其终端为一个主接驳盒；主接驳盒可扩展多路分支，进而可以接驳多个次接驳盒；次接驳盒可提供多路标准端口，为科学仪器接入观测网的接口。三者隶属关系如图 2 所示。表 1 为接驳盒系统的电气与通信特性。

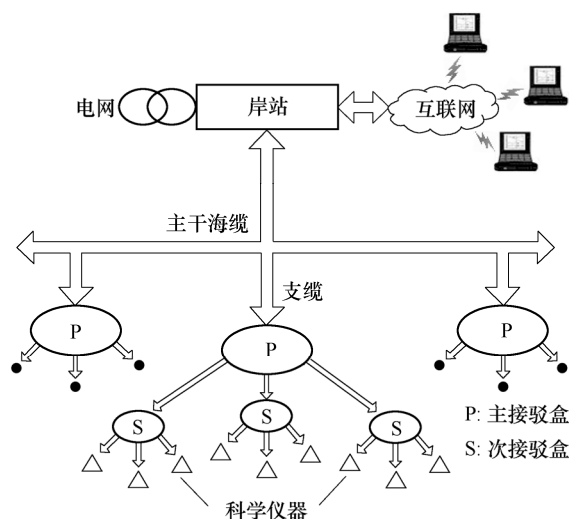


图 1 海底观测网架构

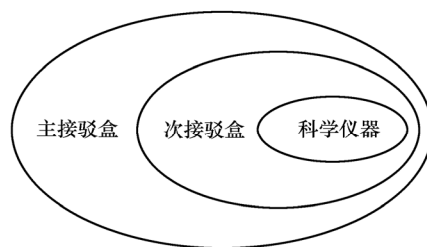


图 2 主次接驳盒与科学仪器隶属关系

依据两类接驳设备，可实现两层接驳的海底观测网络，满足长距离，多接驳点的需求。由于接驳盒为水下长期应用的设施，其使用场合和需求与陆地有着较大的差别：① 可靠性，因为水下尤其是深

表 1 接驳盒系统的电气与通信特性

类型	水平				
	输入电压 U/V	输出电压 U/V	单端口输出功率 P/W	端口通信方式	端口通信速率
主接驳盒	-2 000~-10 000	375	500~2 000	TCP/IP 或光以太网	100 Mbit/s 或 1 Gbit/s
次接驳盒	375	48/24	250~500	TCP/IP、串行通信	10/100 Mbit/s
科学仪器	48/24	无	无	TCP/IP、串行通信	10/100 Mbit/s 或更低

海的设施维护成本极高,甚至超过接驳盒的制造成本,因此,长期稳定运行是第一要求;② 水下电气设施必须封装在抗腐蚀耐高压的腔体中,而腔体空间体积随着深度变大而受到限制,面临着内部器件散热、布局、抗干扰等问题;③ 系统运行在水环境中,极易产生接地、漏电等故障,故障检测和隔离比陆地环境的设备具有更高的要求。

因此,接驳盒技术是涉及多学科集成的技术,各个部分因功能有所不同而涉及技术有所区别。

(1) 主接驳盒:作为海底观测网主要节点,连接在主干缆上,为支缆的源端,需要实现主干缆上的高传输电压到次级扩展电压的变换,以进行次级网络小范围电能传输,同时需要实现主干缆上的光信号通信到电信号通信的转换,对主节点上所有信息进行中转和汇总。

(2) 次接驳盒:为科学仪器连接终端,可提供多路标准的水下接口,为仪器提供不间断电能和高带宽的以太网通信。作为仪器接驳终端,次接驳盒具有自我保护能力,以保证其可靠性。

2 技术组成

接驳盒是一个机电集成度极高的系统,其主要难点在于电能供给系统、通信、故障诊断与隔离,而作为一个大型水下可扩展设备,其机电封装及接口也是设计难点。

2.1 电能系统

电能系统是接驳盒的最关键技术之一。由于使用环境为水下乃至深海,使用场合异于陆地,使得海底观测网的电能系统结构具有自身特点。

(1) 海底观测网观测区域较大,使用数十至数百 km 长的输电缆。当采用交流系统时,输电缆上的寄生电感和电容使得系统的无功功率增加,降低了可输送的有功功率以及供电系统稳定性,这使得交流供电系统不适合应用在大型海底观测网,同时交流变电设施往往体积庞大,极大地限制了其在深海的应用,因此,海底观测网的电能系统选择直流输电结构。

(2) 海缆尤其是深海海缆生产技术难度大、成

本高,单芯海缆无论在性能上还是在成本上均比多芯海缆具有优势,同时直流输电可采用“单芯输电-海水回流”的输电方式,可降低系统复杂程度。

(3) 采用单线输电时,需要使用地极与海水形成回流通路。通常,地极分为需要定期更换的消耗型阳极和无须更换的惰性阴极。为便于维护,阴极应用在海底端而阳极应用在岸基端,这使得海缆的输电电压为负压形式。

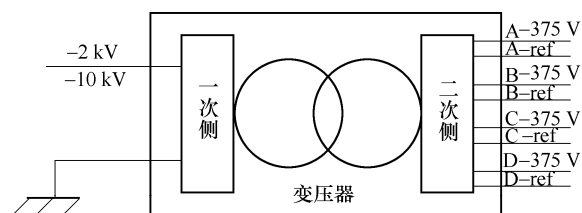
(4) 远距离电能传输时,输电线上的电能损耗与输电电压的平方成反比。为降低供电线上的损耗,采用高压进行远距离输电,输电电压根据多因素决定,可归结为

$$U \geq f(L, P, \rho, U_{\min}) \quad (1)$$

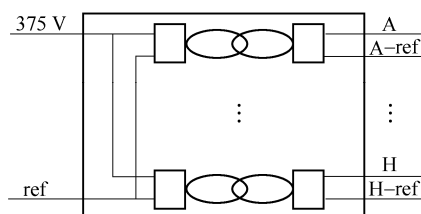
式中, L 为输电线路等效距离; P 为总使用功率; ρ 为线路单位长度阻抗; U_{\min} 为主接驳盒最小输入电压。

综上所述,海底观测网的电能传输采用了高压、直流、负压、单端供电的输电方式。如-10 kV 的供电电压可应用于数百 km 数十 kW 的海底观测网上。

水下科学仪器大多采用低压直流供电,接驳盒必须配备 DC/DC 电能变换器对高压电进行电压变换。对于主接驳盒,其受电端为次接驳盒,提供的电压为扩展传输电压。沿用当前欧美国家的观测网模式,采用 375 V 作为扩展传输电压,故需要将-2~-10 kV 转换为 375 V。如图 3a 所示主接驳盒电能变换结构,通过变压器变压隔离的方式,输入端的高压电能变换 375 V 低压电能,并被分为四路以驱动四个次接驳盒^[26]。对于次接驳盒,其受电端为观测仪器,为适应大部分水下科学仪器,次接驳盒提供的电压为 48 V/24 V 两种可控的常规电压,故需要将 375 V 转换为 48 V/24 V。由于次接驳盒所的外接端口终端为各种仪器,考虑到接驳仪器负载特性和可靠性的不确定性,为避免相互干扰以及便于隔离故障仪器,次接驳盒采用八路物理隔离变压结构,每路输出对应一个独立的端口。如图 3b 所示次接驳盒电能变换结构,有别于主接驳盒单变压器结构。



(a) 主接驳盒电能变换结构



(b) 次接驳盒电能变换结构

图 3 接驳盒电能变换结构

对于水下电能变换系统如主接驳盒的高压电能变换, 即使其转换效率高达 90%, 当转换功率为 10 kW 时, 腔内仍然会产生 1 kW 的功率, 若不进行散热处理, 温度将急剧上升, 影响电能系统的寿命。考虑到电能系统需要封装在狭小的耐压腔体中, 为提高散热效果, 采用了灌充绝缘散热油加缓压装置的气液结合的方式来实现电能系统的热耗散^[27]。

2.2 通信系统

作为数据传输的媒介, 高带宽通信是海底观测网获得海量实时数据的前提。海底观测网面向的对象为各类水下观测设备和应用仪器, 数据吞吐量范围从几个字节每秒到几十兆每秒, 不同仪器具有不同的通信协议。为了统一标准, 所有端口均可提供高带宽的以太网接口, 同时部分甚至可通过远程控制配置而实现以太网通信和串行通信切换, 以适应某些特殊需求的观测设备。图 4 为海底观测网的高带宽通信架构。

光纤通信是远距离高带宽通信的最佳选择。岸站与各个主接驳盒间的主干网上采用了光纤通信的方式, 可实现千兆网的通信速率。不同于主干网电能供给的总线式分布, 光纤通信使用点对点通信, 一对光纤对应一个独立的主接驳盒, 既保证带宽容量又可以避免光纤受损后影响其他主接驳盒。虽然光纤可实现数十公里的远距离通信, 但是海底观测网主干网可达数百公里, 远超过光纤通信有效距离。对于超过光纤通信距离极限的结构, 可通过增加光放大器或者光纤中继器的方式来提高通信距离, 从而实现海底观测网全范围的高带宽通信。使用光放大器可增加 50% 左右的点对点通信距离, 若每隔 60~80 km 增加一个光纤中继器, 可延续通信距离至上万 km。在主接驳盒中, 光信号转换为以太网

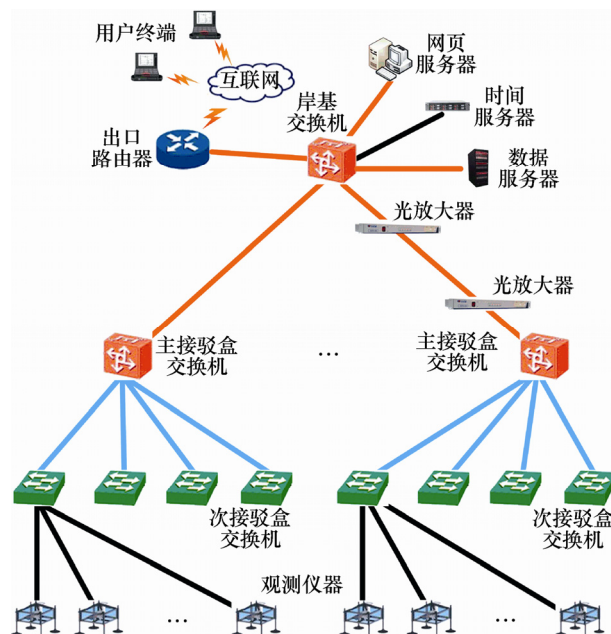


图 4 海底观测网通信架构

电信号, 并通过三层交换机或者路由器实现四路以上的网管路由。通过配置端口, 可选择千兆或者百兆的下行网络。而在次接驳盒中, 通过二层交换机或者路由器实现八路以上的网管路由, 并可配置端口以选择 10/100 Mbit/s 的通信速率。部分特殊端口甚至可配置实现串行口通信, 如 RS232、RS422 和 RS485 等目前不少水下仪器所使用的通信协议。通过这种自上而下的树形结构的分层管理和控制, 可对每个节点和分支进行独立控制, 同时又可设置访问权限以保证网络配置的安全, 避免错误操作引起 IP 地址冲突等。

在大型通信网络尤其是海洋科学观测型网络, 时间标准在一些研究中非常重要, 如地震海啸信号监测、移动物体速度监测、水下载体协同监测等。为提供精准的时间, 海底观测网需要与陆地时间基准保持一致。与陆地时间服务系统不同的是, 海底观测网只有在岸基站通过卫星同步的方式提供唯一的时间基准, 然后将时间信号通过网络传达到海底观测网终端。在观测仪器获得时间信号之前, 信号经过了多个交换机、长距离光纤路径和铜质传输路径等, 不可避免地产生较大的延时。为实现高精度的时间服务, 有以下两种方法。

(1) 通过网络时间协议 (Network timing protocol, NTP) 的方式提供时间基准。NTP 协议可以使计算机和时钟源(时间服务器、石英钟、全球定位系统等)进行同步, 一般采用客户/服务器的工作模式, 通过客户机和服务器之间的往返 NTP 报文来确定两地时钟的差值和报文在网络中传输的延时,

从而对时间进行校准。该方法对网络的硬件要求较低,时间的同步是通过软件的方式实现,精度受到网络结构和负载影响,往往只能达到 ms 级别。

(2) 通过精确时钟同步协议(Precision timing protocol, PTP)的方式提供时间基准。支持 PTP 协议的系统将被分为多个节点,每个节点代表一个 IEEE 1588 时钟,时钟之间通过网络相连,并由网络中最精确的时钟以基于报文传输的方式同步所有其他时钟。而在经过路由器或交换机等设备时,需要对时间数据包进行软件或者硬件报文标记。基于 PTP 协议的系统可提供高精度时间基准,精度可达 μs 级别甚至 ns 级别,但对硬件设施要求较高,需要所有路由设备或者交换设备支持 IEEE 1588V2 协议,成本较高。此处采用了同时支持 NTP 和 PTP 协议的方式,对于具备 PTP 协议支持的观测仪器提供 PTP 时间基准,而对于无法满足 PTP 协议的仪器则通过软件的方式或者提供秒脉冲的方式来获得 NTP 级别的时间基准。

2.3 供电故障监测与隔离

主接驳盒和次接驳盒均通过长距离的海缆连接下一级设备,扩展设备种类众多,大部分为未经过严格测试的试验性装备,容易发生各种故障尤其是短路故障,因此,接驳盒供电面临多种类型的故障。因大部分故障均起因于不同的系统的接驳,所以在各个独立的接驳端口进行故障诊断和隔离可有效降低故障对整个系统的影响,尽可能提高接驳盒供电整体可靠性。接驳盒最常见的供电故障主要分为过电压故障、过电流故障和接地故障。

(1) 过电压故障引起的主要原因有两个,一是长距离线路电能传输时,若负载发生较大幅度的波动,线路寄生电感容易引起电压尖峰;二是在切断负载时,若负载特性呈感性,由于电感电流不能突变而在供电端口处引起电压尖峰。通常,过电压会造成元器件的永久性损坏,必须严格控制过电压现象。对于前者,通常发生在次级接驳盒的输入端。当主级接驳盒为远距离的次级接驳盒供电时,若次级接驳盒负载发生较大波动如负载断开,因长距离线路存在寄生电感,其存储的电感电能释放而导致次级接驳盒输入电压升高。为解决此类过电压现象,可增大输入电容来消除电压尖峰。对于 2 km 的扩展距离,经仿真分析得知,当输入电容达到 50 μF 时,电压峰值低于 400 V,超调量低于 7%。对于后者原因,通常出现在次级接驳盒输出端。当关断负载时,若负载呈感性,电感电流不能突变导致开关的寄生电容与该电感谐振,由于开关的寄生电容很小,则开关两端会产生非常高的电压尖峰,足以造

成开关损毁。因此,必须在输出端并联反向的续流二极管,同时在开关上并联电容以获得更好的缓冲效果。

(2) 超过额定值的电流会降低电能系统的寿命,甚至直接造成电能系统崩溃,需要对过电流故障进行严格处理。过电流故障引起原因主要有四个,如用电设备负载特性呈容性时,启动瞬间,浪涌电流大于额定电流;用电设备运行中出现大功率波动,使得供电电流超过额定值;用电设备系统出现故障,引起大电流;用电设备和输电线路出现明显击穿或者短接故障,引起短路。无论哪种原因引起过电流故障,其表现形式均体现在接驳端口的电流增大并超出额定值。通过在端口上实时检测电流,并对电流值进行判断,在电能系统允许的范围内建立相应的判断标准,如次接驳盒的 48 V 输出额定值电流值为 5 A、过电流值为 7 A、短路值为 40 A,当电流值达到过值 1 s 时,或者电流值达到短路值并维持时间超过 5 ms 时,均判断为过电流故障,控制系统将自动切断该路输出以确保接驳盒系统不受影响。

(3) 在海底观测网中,所有端口中直流供电的正、负端均与海水完全隔离,这与陆地设备完全不同。原因主要有两个,首先,端口间相互电气隔离,可以防止相互干扰;其次,当正端或者负端因某些故障如漏水、防水绝缘等级下降、隔离措施失败等原因直接与海水连接,由于只有一端与海水接触,该供电端口没有经过海水形成回路,仍然可以保持正常供电。但存在着潜在的短路风险,当另外一端同样出现接地故障时,即可造成短路故障。虽然有短路故障保护功能,但大部分时候输电线与海水间的阻抗并不处于完全短路状态,而是存在一个较大的阻抗,此时供电仍然正常,只是供电电流增加而没有达到过电流状态,系统无法识别非正常运行,此时系统监测到的功率数据有误。此外正负端的接地电流会对输电缆或者接头等造成电化学腐蚀,进一步降低输电线与海水间的绝缘能力并损坏触点,最终导致短路。常规运行下,为了提高系统可靠性,不允许接地故障存在。为了准确判断接地故障,实时测量每个接驳端口的两个供电端的接地电阻,通过对接地电阻阻值大小进行接地故障判断。并将测量信息反馈到岸站控制中心并提示警报,由用户对接地故障进行人为隔离。

2.4 机电封装及接口

在海洋环境中,机电封装是确保电气系统能够工作的屏障。在水下尤其是深海环境,机械封装的腔体要求具有高强度、耐腐蚀性等性能。由于海底观测网设备为水下长期应用设备,设计使用寿命为

20 年以上,需要选用高强度的耐腐蚀性强的材料。其中钛合金材料的屈服强度高达 825 MPa,是不锈钢的 3.8 倍,而耐腐蚀性远高于不锈钢或者其他金属材料,是接驳盒的耐压腔体最佳材料。由于接驳盒的内部设备体积庞大,若使用单个腔体来封装所有器件,体积非常庞大,腔体加工难度大、成本高,同时抗干扰能力差。因此设计时采用了模块式的结构,即整个系统根据功能分为多个部分并封装在不同的腔体中,如主接驳盒电气部分包括高压电能变换系统和控制系统等,而次接驳盒包括低压电能变换系统和控制系统。通过模块化的结构,既降低了封装腔体的设计难度和制造成本,同时由于钛合金材料和海水具有较强的隔离电磁辐射能力,在一定程度上降低了电能变换系统和控制系统间的相互干扰力。

为避免频繁的海上交通、渔业作业、水下生物等对接驳盒造成破坏,除了抗压和抗腐蚀性,接驳盒要具有一定的抗外界破坏能力。此外,接驳盒设计使用寿命为 20 年,但由于系统复杂,需要进行定期维护或者升级,因此,接驳盒设计需要考虑可维护性。针对这些需求,设计了具有防拖塔外形、底座可分离的接驳盒结构。如图 5 所示为一个主次综合的接驳盒(在研制阶段,主接驳盒和次接驳盒合并),封装了高压电能变换系统、低压电能变换系统和控制系统的三个钛合金耐压腔体悬挂在一个浮力块上,并与水下湿插拔接口面板组成接驳盒主体,

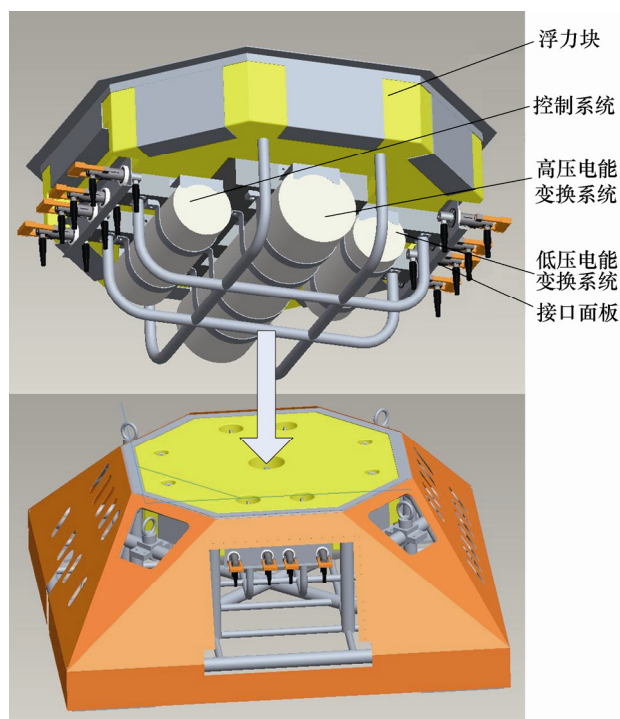


图 5 接驳盒结构

整体在空气中质量达 2 t,而在水中质量仅为 30~50 kg。接驳盒主体可装载在一个与铠装海缆固定在一起的防拖塔底座上,其与防拖塔底座的电气和通信连接是通过两个水下湿插拔接头连接。实际应用时,接驳盒主体由水下无人机器人(Remote operated vehicle, ROV)携带并布放到底座上,并由 ROV 完成接驳盒主体到铠装海缆、仪器设备到接驳盒接口的湿插拔连接,通过 ROV 的水下操作完成海底观测网组网。

3 系统试验

根据研究的技术,实现了不同的样机并进行了相关的试验。

(1) 2 kV 供电的接驳盒系统,包括一个主接驳盒和一个次接驳盒,最大供给功率为 2 kW。主接驳盒由一个 2 kV 高压电能变换系统和一个控制系统组成,次接驳盒由一个低压电源系统和一个控制系统组成。该系统进行了实验室环境试验,包括水池试验和高压舱模拟试验(模拟 4 000 m 水深),测试了接驳盒各项功能,验证了相关技术的可行性。

(2) 10 kV 供电的接驳盒系统,包括一个主接驳盒和一个次接驳盒,最大供给功率为 10 kW。主接驳盒有一个 10 kV 高压电能变换系统和一个控制系统组成,次接驳盒由一个低压电源系统和一个控制系统组成。与 2 kV 供电的样机相比,该套系统各项指标增加,包括输入电压、输出功率、通信能力等。并进行了各项测试,图 6 为实验室环境试验示意图,为便于试验,图 6 中接驳盒为主次综合的接驳盒,使用了 1 km 长的光电复合铠装海缆连接接驳盒和岸基的电源和服务器等设备,而三个用于测试接驳盒功能的设备连接到接驳盒上,其中,仪器 2 和仪器 3 分别为同济大学和海洋大学研制。水池试验进一步验证了各项技术。2010 年 9 月份,该系统成功布放在浙江舟山嵊山岛海域(E122°50'10", N30°42'10")并进行了连续运行,图 7 为高压电能变换系统腔体内部温度与水温的对比监测图。在 2011 年 4 月份,次接驳盒样机被布放在美国 Monterey 海湾 890 m 水深处(图 8),并连接到美国 MARS 海底观测网上,实现了并网运行,成为中美首次在海底观测网上的合作。该次接驳盒连续无故障运行六个月,在一定程度上验证了技术的可行性和可靠性。

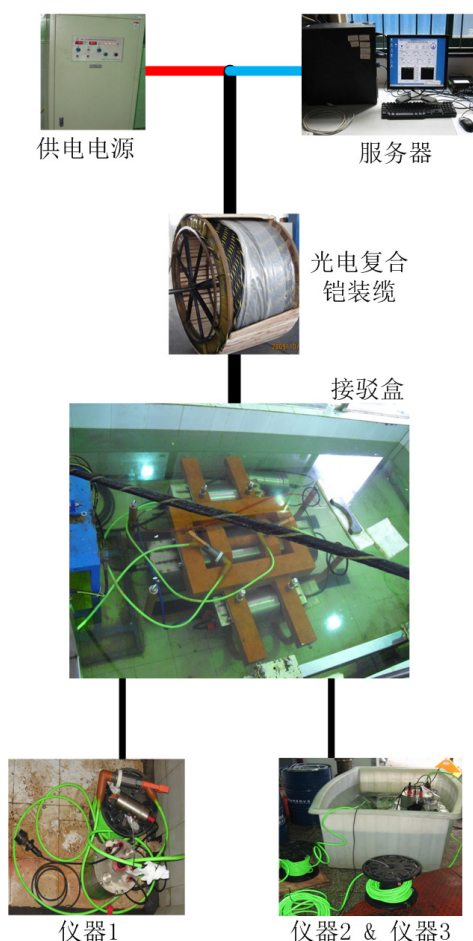


图6 2 kV 供电的接驳盒水池试验示意图

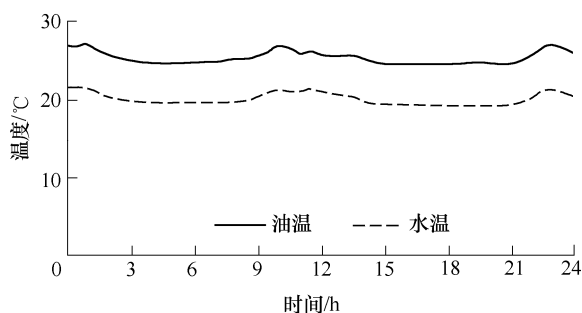


图7 高压电能变换系统腔体内部温度监测



图8 次级接驳盒在 Monterey 海湾的布放

4 结论

本文对海底观测网接驳盒所涉及的技术进行了研究和归纳, 得出以下结论。

(1) 基于直流变换的电分配和供给方式可应用在海底观测网上。

(2) 点对点的主干网光纤通信以及多级树形结构的通信网络架构可满足海底观测网需求。

(3) 独立端口的过电压、过电流和接地故障的诊断和隔离可提高系统的整体可靠性。

(4) 模块化的封装结构和可维护的分离结构可降低成本并提高了系统的可维护性。

参 考 文 献

- [1] FAVALI P, BERANZOLI L. Seafloor observatory science: A review[J]. Annals of Geophysics, 2006, 49: 515-567.
- [2] 陈鹰, 杨灿军, 陶春辉, 等. 海底观测系统[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
CHEN Ying, YANG Canjun, TAO Chunhui, et al. Deep sea observatory system[M]. Beijing: Ocean Press, 2006.
- [3] 陈鹰, 杨灿军, 顾临怡, 等. 基于载人潜水器的深海资源勘探作业技术研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(11): 38-42.
CHEN Ying, YANG Canjun, GU Linyi, et al. GSV-specific tool-box for the deep-sea resources exploitation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(11): 38-42.
- [4] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 8-18.
LIU Shaojun, LIU Chang, DAI Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 8-18.
- [5] 王建军, 秦华伟, 魏双丰, 等. 一种新型静水压力海底沉积物取芯器能量转换效率研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(12): 138-143.
WANG Jianjun, QIN Huawei, WEI Shuangfeng, et al. Research on energy conversion efficiency of new hydrostatic seafloor sediment corer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 138-143.
- [6] CHAVE A D, WATERWORTH G, MAFFEI A R, et al. Cabled ocean observatory systems[J]. Marine Technology Society Journal, 2004, 38(2): 30-43.
- [7] HOWE B M, CHAO Yi, ARABSHAHI P, et al. A smart

- sensor web for ocean observation: Fixed and mobile platforms, integrated acoustics, satellites and predictive modeling[J]. IEEE Journal Selected Topics in Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3: 507-521.
- [8] DUENNEBIER F K, HARRIS D W, JOLLY J, et al. HUGO: The Hawaii undersea geo-observatory[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(3): 218-227.
- [9] PETITT R A, HARRIS D W, WOODING B, et al. The Hawaii-2 observatory[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2): 245-253.
- [10] HOWE B H, LUKAS R, DUENNEBIER F, et al. ALOHA cabled observatory installation[C]//Proceeding of OCEANS 2011, Sep. 19-21, 2011, Waikoloa: 1-11.
- [11] KAWAGUCHI K, KANEDA Y, ARAKI E. The DONET: A real-time seafloor research infrastructure for the precise earthquake and tsunami monitoring[C]//OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, Apr. 8-11, 2008, Kobe: 1-4.
- [12] VONALT C, DELUCA M P, GLENN S M, et al. LEO-15: Monitoring & managing coastal resources[J]. Sea Technology, 1997, 38(8): 10-16.
- [13] AUSTIN T C, EDSON J B, MCGILLIS W R, et al. A network-based telemetry architecture developed for the Martha's vineyard coastal observatory[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2): 228-234.
- [14] HOWE B M, KIRKHAM H, VORPÉRIAN V. Power system considerations for undersea observatories[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2002, 27(2): 267-275.
- [15] DELANEY J R, HEATH G R, HOWE B M, et al. NEPTUNE: Real-time, long-term ocean and earth sciences at the scale of a tectonic plate[J]. Oceanography, 2000, 13(2): 71-79.
- [16] DEWEY R, TUNNICLIFFE V. VENUS: Future science on a coastal mid-depth observatory[C]//Proceeding of 3rd International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technology, Jun. 25-27, 2003, Tokyo: 232-233.
- [17] FAVALI P, BERANZOLI L. EMSO: European multidisciplinary seafloor observatory[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A, 2009, 602(1): 21-27.
- [18] PAWLAK G, De CARLO E H, FRAM J P, et al. Development, deployment, and operation of Kilo Nalu nearshore cabled observatory[C]//Proceedings of Oceans 2009, May 11-14, 2009, Bremen: 133-142.
- [19] PERSON R, BERANZOLI L, BERNDT C. ESONET: An European sea observatory initiative[C]//OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, Apr. 8-11, 2008, Kobe: 1215-1220.
- [20] TAYLOR S M. Transformative ocean science through the VENUS and NEPTUNE Canada ocean observing systems[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A, 2009, 602: 63-67.
- [21] 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.
- XU Huiping, ZHANG Yanwei, XU Changwei, et al. Coastal seafloor observatory at Xiaoqushan in the East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(22): 1839-1845.
- [22] 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[J]. 浙江大学学报, 2010, 44(1): 8-13.
- LU Hanliang, LI Dejun, YANG Canjun, et al. Design and implementation of underwater junction box prototype system for deep seafloor observatory network[J]. Journal of Zhejiang University, 2010, 44(1): 8-13.
- [23] CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, et al. Study of a DC power system for a multi-node cabled ocean observatories system[J]. Journal of Zhejiang University Science C, 2012, 13(8): 613-623.
- [24] CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, et al. Study on 10kVDC powered junction box for cabled ocean observatory system[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(2): 265-275.
- [25] CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, et al. Design and application of a junction box for cabled ocean observatories[J]. Marine Technology Society Journal, 2012, 46(3): 50-63.
- [26] 陈燕虎, 杨灿军, 李德骏, 等. 基于模块堆叠的同步整流变换器[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 62-65.
- CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, et al. Study of a synchronous rectifier converter based on module-stack[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 62-65.
- [27] 陈燕虎, 杨灿军, 李德骏, 等. 海底观测网接驳盒电源散热机理研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 121-127.
- CHEN Yanhu, YANG Canjun, LI Dejun, et al. Study the heat dissipation mechanism of the junction box's power system for seafloor observatory system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 121-127.

作者简介: 杨灿军, 男, 1969 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为深海机电装备, 人机交互。

E-mail: ycj@zju.edu.cn

陈燕虎(通信作者), 男, 1983 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为海底观测网技术。

E-mail: yanhuchen@zju.edu.cn