

国产深海准实时传输潜标系统设计

于 非¹, 陈永华¹, 周 春², 张孝薇³, 邓 锴⁴, 韩云峰⁵, 刘岩松¹, 刘庆奎¹,
王 蓓¹, 胡贺岗¹, 姜静波¹, 倪佐涛¹, 姜 斌¹, 李晓龙¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 3. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 4. 中国科学院声学研究所, 北京 100190; 5. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨, 150001)

摘要: 基于海洋环境安全保障、海洋环境预报和海洋科学研究的需要, 开展国产深海准实时传输潜标系统的设计, 重点进行锚泊系统水动力分析、观测设备工作同步性、准实时通讯系统安全可靠和系统低功耗等整体技术设计; 开展轻型感应耦合传输缆制作、大深度感应耦合传输和智能收发通讯等数据实时通讯技术的研究; 进行适用于准实时传输潜标系统的多种国产设备的稳定性和可靠性优化、规模化集成和系统化的应用示范, 形成半潜升降式准实时通讯潜标与浮子式准实时通讯潜标各 1 套。所设计的准实时传输潜标系统集成 1 台抗污染 CTD、19 台感应耦合 CTD、8 台感应耦合 T、4 台感应耦合传输的 ADCP、2 台单点海流计和 6 台感应耦合数据传输仪, 并配有 2 套声学释放器; 潜标系统本体设计含有 3 个水下流线型浮体、1 套通讯浮子、1 套准实时卫星通讯装置(半潜式水下绞车或海面浮子)和 1 套锚泊缆系, 可实现深达 2 000 mm 的剖面温盐深和海流等海洋要素的高频率、多要素、多层次的长期连续观测和数据准实时传输, 以便对科学问题解决和海洋环境安全保障等提供及时的数据支撑。

关键词: 深海潜标; 准实时传输; 国产化; 大深度剖面温盐深流观测; 潜标浮体

中图分类号: P715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)07-0194-07

DOI: 10.11759/hyxx20200327004

潜标是海洋环境监测中最可靠、最准确的手段之一, 在应用海域范围、观测数据质量以及海上军事监测和预警上具有显著优势, 可为深海动力环境预报与海洋军事环境保障提供资料支撑。潜标技术于 20 世纪 50 年代初首先在美国开展, 随后, 世界海洋强国也相继开展研究和应用, 目前在大型海洋研究项目中常常布放大量的潜标系统。我国于 20 世纪 70 年代开始海洋潜标技术研究, 于 1982 年正式立项研制千米测流潜标系统。之后经过 20 多年发展, 我国自主潜标观测技术取得了突飞猛进的发展^[1]。目前在西太平洋、东印度洋和南海已建立起大洋潜标观测网络。随着海洋环境预报和海洋环境安全保障需求的提高, 对海洋环境数据的实时获取要求不断提升, 准实时传输潜标技术被提出^[2]。它集潜标与浮标的技术优势, 既可进行深海水文环境要素长期连续、定点多层隐蔽监测, 又可及时将测量数据传送到地面数据中心, 具有系统集成度高、观测隐蔽性好、不易遭受破坏、数据时效性强等特点。

美国大型海底观测计划(the Ocean Observatories

Initiative, OOI)中, 潜标准实时通讯方式有两种。一种是通过海底电缆^[3], 另一种是通过 Glider 中继。前者仅适用于近岸观测, 后者则适用于密集分布的潜标阵列, 对于单套深海潜标或空间距离较大的阵列则均不适用。华盛顿大学研发的浮子式准实时潜标, 同样主要应用在浅海观测中^[4]。国内, 中国船舶重工集团公司第七一〇研究所等在“十一五”863 课题支持下, 率先开展潜标数据实时传输的研发, 研发了可连续弹射海面通讯浮标的潜标观测系统^[5]。中国海洋大学在“十二五”863 计划支持下, 进行了深水定时卫星通信潜标系统的自主研发工作, 于 2015 年 12 月

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-04-29

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2017YFC1403401 和 2016YFC1402602); 中国科学院科研装备研制项目(YZ201522, YZ201625); “科学”号高端用户项目资助(KEXUE2019G07)

[Foundation: Key Research and Development of Science and Technology Program, No. 2017YFC1403401, No. 2016YFC1402602; Major Scientific Research Equipment R & D Projects of Chinese Academy of Sciences, No. YZ201522, No. YZ201625; The Senior User Project of RV KEXUE, No. KEXUE2019G07]

作者简介: 于非(1969-), 男, 山东青岛人, 博士, 研究员, 主要从事物理海洋与海洋观测技术研究, E-mail: yuf@qdio.ac.cn

进行了布放测试, 获得了初步成功^[6]。中国科学院海洋研究所在中科院先导专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”等的支持下, 于 2015 年研制了基于卫星通信的实时传输潜标观测系统^[7]; 2016 年后的 4 年里, 不断进行升级, 每年都在西太平洋海域进行规模化的应用。

尽管国内一些单位开展了潜标实时化的工作, 但仍存在一些问题: (1)实时传输要素少: 一般只传输 ADCP 数据和少量 CTD 数据; (2)实时观测深度浅: 极少数实现深海观测数据实时传输, 多数实现的是海洋上 1 000 m 观测数据的实时传输; (3)国产化率低: 几乎所有的观测设备和声学释放器等均为进口, 只是缆绳等采用国产, 国产化率很低。另外, 我国自主研制的海洋仪器设备(如 CTD、ADCP 和声学释放器等), 其实实验室测量精度和可靠性等技术指标已经与国外同类产品不相上下, 但由于缺乏海上工作的稳定性、可靠性, 并且现场观测精度难以保证, 所以实际应用较少。这也是在当前深海大洋调查活动中, 国产海洋仪器使用较少的主要原因。甚至在研制中的自动剖面浮标、潜标、水下滑翔机等, 使用的温度、电导率和压力传感器等, 也大多是从国外进口。基于海洋环境安全保障、海洋环境预报和海洋科学研究的需要, 本文详细介绍了半潜升降式与浮子式两型准实时通讯潜标系统的设计, 说明了其关键技术与创新点, 并结合国产感应耦合 CTD 设备集成测试应用情况, 证明了系统全部采用国产设备具有可行性, 并为实际应用打下良好基础。

1 系统设计

基于海洋科学研究与海洋环境安全保障的需求, 重点进行锚泊系统水动力分析、观测设备工作同步性、准实时通讯系统安全可靠和系统低功耗等整体设计技术优化; 开展轻型感应耦合传输缆研制、大深度感应耦合传输和智能收放通讯等数据实时通讯技术的研究; 进行适用于准实时传输潜标系统的多种类国产设备的稳定性和可靠性优化设计、规模化集成和系统化应用示范, 形成半潜升降式准实时通讯潜标与浮子式准实时通讯潜标各 1 套。

所设计的半潜升降式准实时通讯潜标结构如图 1 所示。

如图 1 所示, 此系统包括 1 套通讯测量浮子、1 套子浮体(集成半潜式智能水下绞车)、2 个主浮体、3 段感应耦合传输系统、32 套感应耦合同步测量设

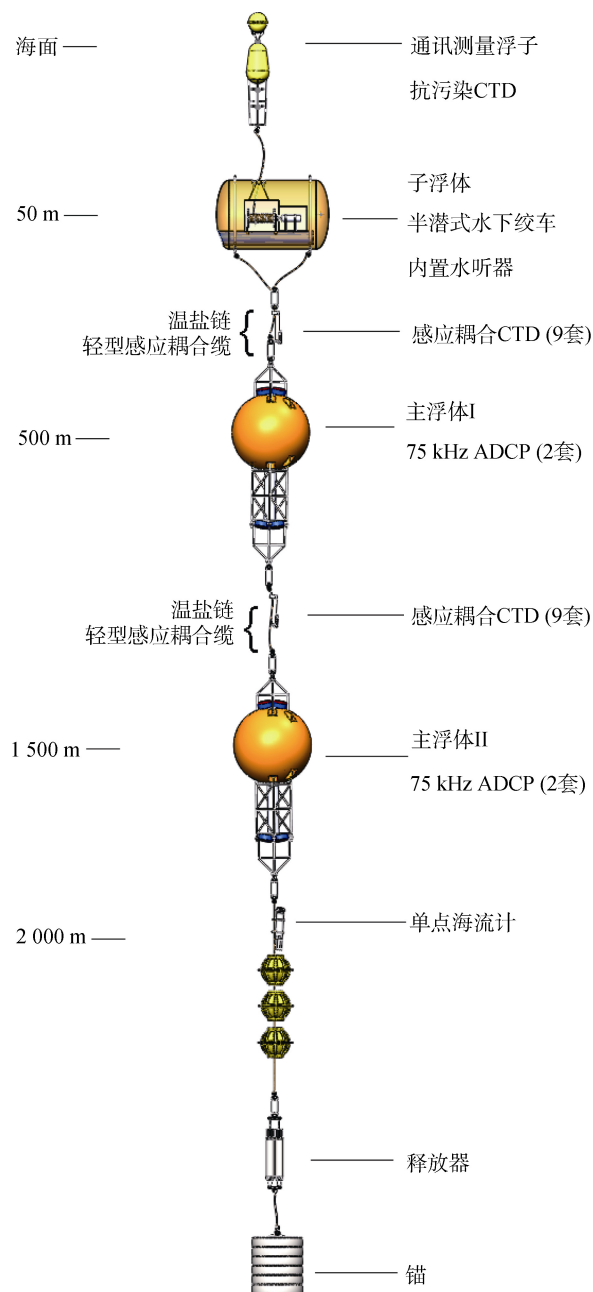


图 1 半潜升降式准实时通讯潜标结构组成

Fig. 1 Diagram of the structure of the semi-submersible lifting quasi-real-time-communication submerged buoy

备、锚泊缆系(含 2 个并联释放器)和 1 套数据接收系统等。2 个主浮体上分别集成 2 个 ADCP 和数据采集与通信装置, 子浮体上搭载半潜式智能水下绞车, 锚系同步测量设备包括 19 套感应耦合 CTD 和 1 套单点声学海流计, 所有观测数据通过感应耦合或水声通讯传输传到子浮体内, 借助水听器检测海面是否安全。若安全, 半潜式水下绞车释放通讯测量浮子, 通讯测量浮子除了搭载卫星通讯系统, 还装有 1 套

抗污染 CTD 和单点海流计,在其运行过程中进行子浮体到海面之间的剖面要素观测,当通讯测量浮子运行至海面时,将所有观测数据传回岸站,通讯测量浮子继续潜伏至子浮体,等待下一次数据通讯。

浮子式准实时通讯潜标系统如图 2 所示。

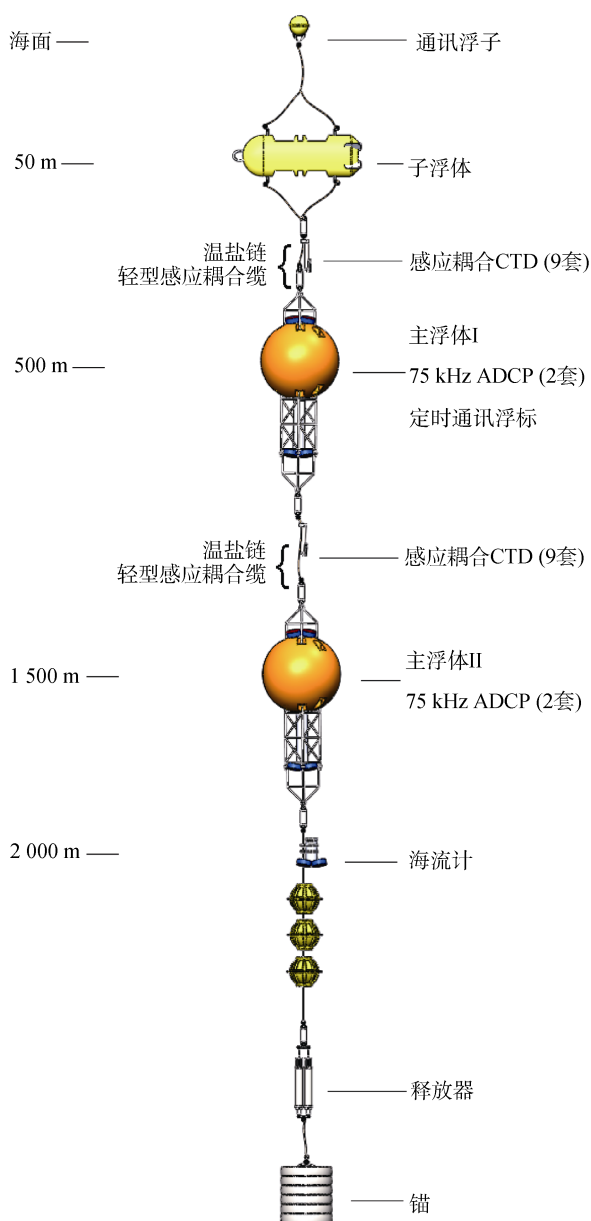


图 2 浮子式准实时通讯潜标结构组成

Fig. 2 Diagram of the structure of the floating quasi-real-time-communication buoy

此准实时传输潜标系统主要由实时卫星通信浮标、子浮体、主浮体 I、主浮体 II、温盐深链、ADCP、深水单点海流计、并联声学释放器和锚等组成。水下 2 000 m 以内采用感应耦合等进行传输(温盐深

链及 ADCP、深水单点海流计),实现剖面数据的实时采集,数据在 2 个主浮体内汇总存储后通过中继的子浮体,利用实时卫星通信浮标将数据回传到岸基实验室;若实时卫星通信浮标受到破坏,由主浮体释放定时卫星通信浮标,将数据分段回传至岸基实验室。

两型准实时传输潜标系统设计集成 1 台抗污染 CTD、19 台感应耦合传输温盐深测量仪(ICTD)、8 台感应耦合传输温度测量仪(IT)、4 套带感应耦合传输的 75 kHz 声学多普勒剖面流速仪(IADCP)、1 套单点海流计和 6 台感应耦合数据传输仪(Inductive Cable Coupler, ICC),可实现深达 2 000 m 的剖面温盐深和海流等海洋要素的高频率、多要素、多层次的长期连续观测和数据准实时获取,以便对科学问题解决和海洋环境安全保障做出贡献。

两型准实时传输潜标系统的具体工作流程如图 3 和图 4。其具体技术指标见表 1。

2 关键技术与创新点

深海数据的实时传输对海洋预报系统的完善和科研成果的加速产出意义重大,我国虽然突破了近海和大洋水下数据实时传输这一“卡脖子”技术,实时数据成为海洋预报和保障系统的数据源头,但还存在 3 个关键环节急需突破。

1) 基于科学需求和国产观测设备规模化应用的深海准实时潜标系统总体方案设计:根据不同的科学目标应用需求,和大批量集成应用国产 CTD、ADCP、单点海流计、声学释放器等观测仪器设备,科学合理研究制定两型准实时传输锚系观测潜标系统总体方案。重点解决深海复杂锚泊系统水动力优化设计、批量国产观测仪器设备集成、大深度多节点观测数据准实时通讯、系统可靠性和低功耗等关键技术,满足观测应用需求。每型准实时传输锚系观测潜标系统包括支撑载体(3 个水下流线型浮体、1 套通讯浮子和半潜式水下绞车等)、锚泊缆系(电转环、张紧锤、深水浮球、释放回收单元、包塑钢缆和凯夫拉绳等)、观测传输单元(剖面温盐深、剖面海流、感应传输系统和实时通讯装置)和陆基支撑系统,国产化率 95%以上,可为批量国产观测仪器提供长期系统的科学观测应用和比测试验平台。

2) 大深度剖面温盐流多要素同步测量和数据实时传输技术:根据深海潜标剖面温盐流多要素同步

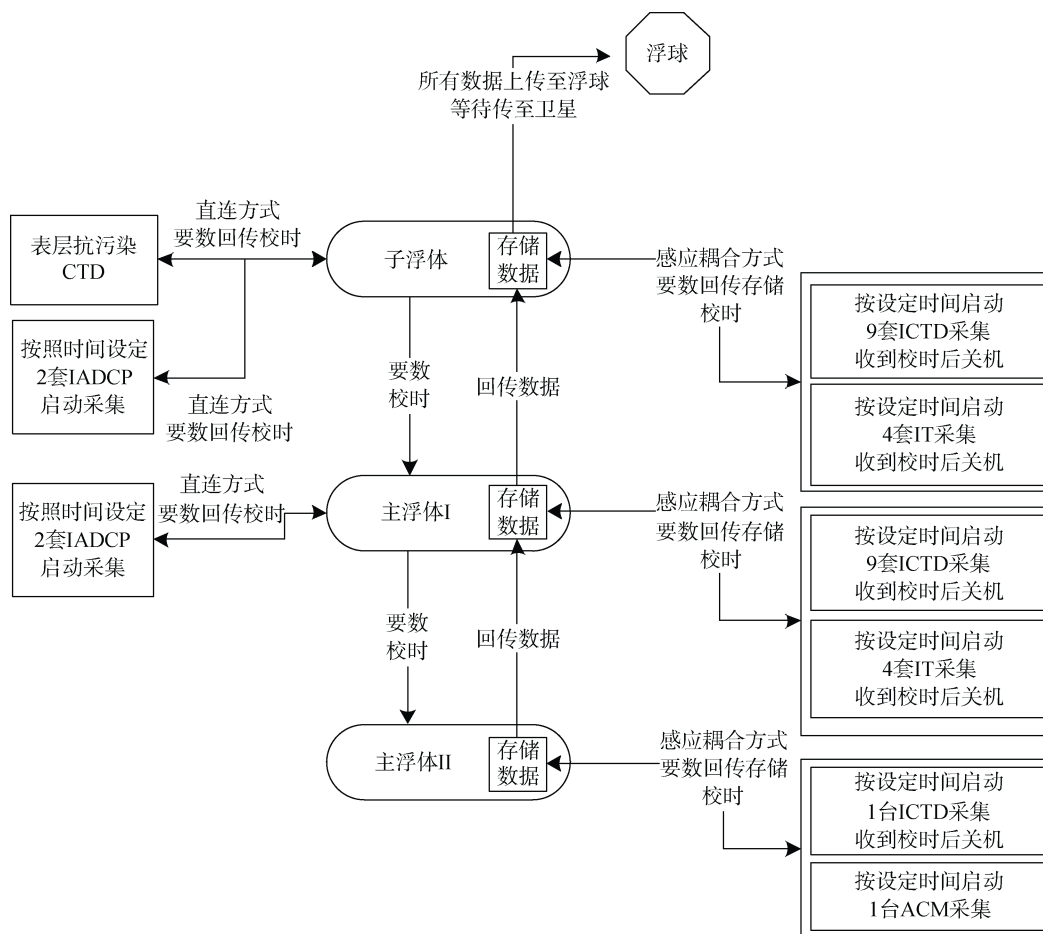


图 3 半潜升降式准实时潜标工作流程图

Fig. 3 Flow chart of the functions of the semi-submersible lifting quasi-real-time-communication submerged buoy

测量和数据实时传输的需求,突破轻型感应传输缆制作、大深度高可靠感应传输和多方式卫星通讯等,实现多设备同步测量,并将整个剖面的观测数据实时传到海面后传回岸站。两种类型的准实时潜标剖面最大观测水深 2 000 m,各集成 20 套 CTD、8 套单点海流计,4 套 ADCP 和 1 套单点海流计,温盐深和海流观测同步测量采样周期 1 h,同步测量时间误差小于 30 s,卫星通讯频次不小于 2 次/d,其中,半潜升降式准实时通讯潜标借助于半潜升降式绞车每天通讯 2 次,浮子式准实时通讯潜标依托始终漂浮于海面上的通讯浮子,每隔 4 h 进行一次数据通讯。

3) 深海准实时潜标系统可靠性技术:根据深海潜标安全可靠布放、回收和长期(不小于半年)可靠在位运行的需求,重点解决深海浮体和轻型锚系系统在位运行可靠性、半潜式绞车智能升降、水声通信可靠性、声学释放器可靠性、通信浮体运行可靠性、卫星通信可靠性、安全布放回收方案设计等关键技

术,实现潜标系统安全可靠布放、回收和长期可靠在位运行。

此系统设计的创新点体现在以下方面:

(1) 国内首次基于多方式实现准实时通讯的两型锚系潜标系统设计:在深海自容潜标的基础上,结合海洋科学研究和环境安全保障需求,应用半潜式智能升降平台、高可靠通讯浮子和水下定时发射通讯浮子等多种数据准实时传输技术,设计了两型深海准实时通讯锚系观测潜标系统,实现深海观测数据准实时传输。其中,半潜升降式准实时通讯锚系观测潜标系统适用于非安全区域,主要用来研究台风传播机理和及其对海洋环境的影响,其通讯浮子长时间潜伏水下,在需要通讯时,通过子浮体上水听器对海面进行噪声检测,并结合压力信号,检测海面海况。若安全,通讯浮子浮出水面进行数据通讯,通讯完成后,又潜伏水下隐藏,大大增加了系统的安全性。浮子式准实时通讯锚系观测潜标系统适

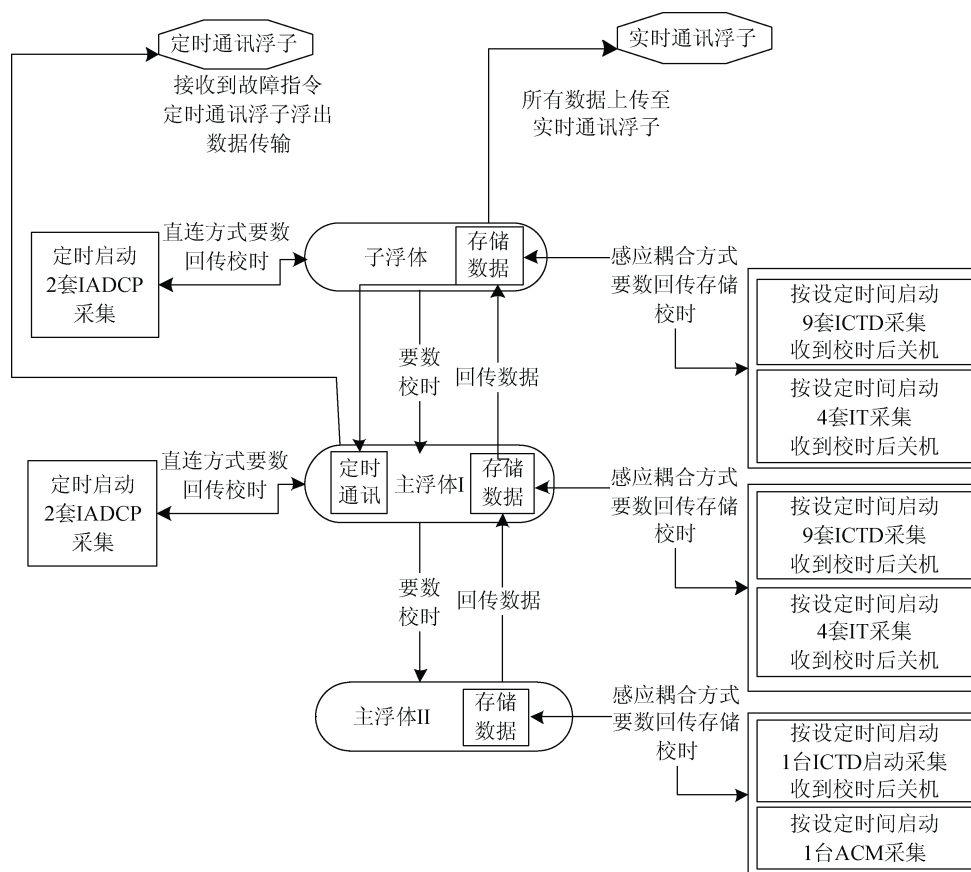


图 4 浮子式准实时潜标工作流程图

Fig. 4 Flow chart of the functions of the floating quasi-real-time-communication buoy

表 1 准实时传输潜标系统技术指标

Tab. 1 Technical mooring parameters

指标名称	指标值
通讯频次	≥2 次/d
剖面最大观测深度	≥2 000 m
同步测量周期	1 h
同步测量时间误差	30 s
国产化率	≥95%
设计海上工作时间	≥6 Mon

用于相对安全的海区，主要对海洋中尺度涡现象进行观测，通讯浮子一直漂浮在海面，随时可以进行海陆间数据通讯，同时，在水下的主浮体上，还装有若干定时通讯浮子，若海表面通讯浮子受到破坏，则定时释放水下定时通讯浮子，以确保数据的准实时传输。

(2) 国内首次开展 2 000 m 剖面的多要素同步测量和实时传输技术研究：国内首次采用具有自主知识产权的高可靠承拉导电转环、高可靠轻型感应耦合传输缆、感应耦合传输 CTD、感应耦合数据传输

仪等技术装备，开展感应耦合传输信道特征参量与海洋环境影响关系研究，进行低温、高压等深海环境下感应耦合传输信道参量优化，解决多传感器同步采集、微弱信号提取、智能化编码和调制解调、多传输节点传输时序等关键技术，实现大深度多节点水下温盐深流多要素观测设备同步测量，并将整个剖面的观测数据实时传到海面后传回岸站。

(3) 国内首次实现基于潜标实时观测系统的双向智能通讯、加密观测和数据质控：根据自主深海潜标系统对台风过境与内孤立波等科学现象观测、防灾减灾等应用需求，本设计在国内首次开展了基于潜标系统的智能双向通讯、智能加密观测、观测仪器设备运行状态监控、观测数据质量控制等关键技术研究，确保了观测数据质量，实现了科学研究与业务应用观测需求。

(4) 国内首次实现基于潜标系统国产设备的大批量应用：首次基于深海锚系观测平台大批量集成应用国产 CTD、ADCP、单点海流计、声学释放器等仪器设备和深海潜标浮体等国产潜标主要部件，国

产化率 95%以上,应用国产新型防生物附着等技术,为批量国产观测仪器提供长期系统的科学观测应用和比测试验平台,目标实现国产仪器实用化。

3 感应耦合 CTD 设备集成测试

为检验轻型感应耦合传输缆、水下长距离通信缆、国产感应耦合仪以及国产 CTD 设备的工作性能,组成了深海实时传输潜标系统并进行了深海测试,其结构如图 5 所示。

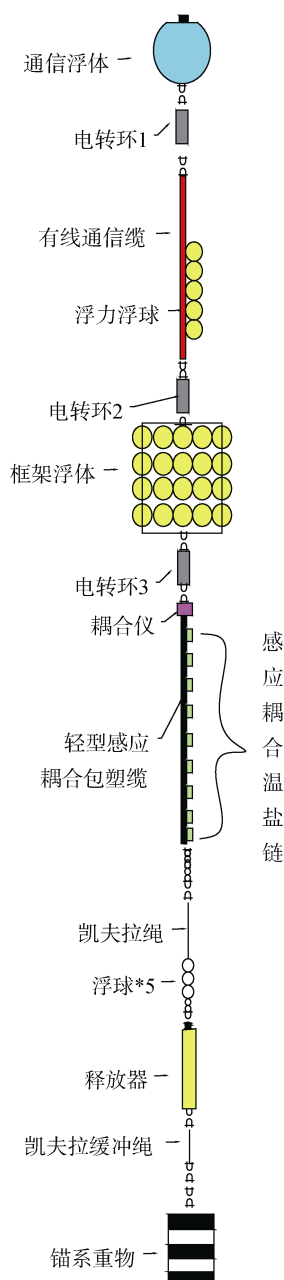


图 5 国产感应耦合 CTD 深海实时潜标测试系统

Fig. 5 Diagram of the domestic deep-sea real-time submarine test system inductively coupled CTD

如图 5 所示,深海实时传输潜标测试系统由海面通信浮体、水下长距离通信缆、浮力浮球、主浮体、轻型感应耦合传输缆、感应耦合传感器(5 套感应耦合 CTD 和 5 套感应耦合温度仪)和感应耦合仪等构成,10 套感应耦合传感器实现水下 350 m 到 1 000 m 多的温盐深剖面观测,并将观测数据依靠感应耦合传输的方式汇集到主浮体内的数据采集舱,而后通过水下长距离通信缆以有线的方式传送给海表面通信浮体,由其借助卫星通信方式传回岸站。此系统所有设备和传感器均为国产。借助中国科学院海洋研究所 2018 年西太平洋实时科学观测网航次,该系统于 2018 年 12 月 14 日由“科学”号科考船成功布放,持续开展稳定工作。于 2019 年底进行了系统回收,感应耦合温度和感应耦合温盐深传感器工作稳定,数据获取率达到 99.6%,有效数据占比达到 99.8%。数据连续性和稳定性较好。

后续将增加集成国产化的系列仪器设备:水下驱动机构、潜标主浮体、ADCP、单点海流计和声学释放器等,构成两型准实时传输潜标系统,进行整体系统测试和应用。

4 总结

基于实时传输潜标观测的重要性和国产海洋观测仪器的不足,我们计划通过研发多层温盐深准实时集成观测技术、大深度长距离海流观测技术、深海声学释放技术和半潜式水下升降与实时传输技术等准实时传输深海剖面锚系观测潜标系统相关的多种技术与装备,从而形成两型具有自主知识产权的准实时传输深海剖面锚系观测潜标系统,为深海大洋科学研究和海洋环境安全保障等提供数据支撑,也将为我国应对气候变化以及为防灾减灾提供技术支撑,具有重要的科学价值和社会效益。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵忠生, 袁志伟, 黄磊, 等. 深海潜标 ADCP 的实时数据传输[J]. 海洋科学, 2012, 36(8): 94-97.
Zhao Zhongsheng, Yuan Zhiwei, Huang Lei, et al. Real-time data transmission of the ADCP installed on subsurface mooring system[J]. Marine Sciences, 2012, 36(8): 94-97.
- [3] 吴自军. 美国大型海底观测计划(OOI)正式启动运行[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 134.
- [4] Alford M H, McGinnis T, Howe B M. An inductive

- charging and real-time communications system for profiling moorings[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2015, 32(12): 2243-2252.
- [5] 中国船舶重工集团 710 研究所. 新型实时传输潜标系统[J]. *军民两用技术与产品*, 2006, (1): 17.
- [6] Xu Ming, Tian Jiwei, Zhao Wei, et al. An improved timed communication buoy system[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2017, 51(4): 23-30.
- [7] 汪嘉宁, 王凡, 张林林. 西太平洋深海科学观测网的建设和运行[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(6): 1471-1479. Wang Jianing, Wang Fan, Zhang Linlin. Construction and operation of a deep-sea scientific observation network in the Western Pacific[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1471-1479.

Design of deep-sea quasi-real-time-communication submerged buoy systems

YU Fei¹, CHEN Yong-hua¹, ZHOU Chun², ZHANG Xiao-wei³, DENG Kai⁴, HAN Yun-feng⁵, LIU Yan-song¹, LIU Qing-kui¹, WANG Bei¹, HU He-gang¹, JIANG Jing-bo¹, NI Zuo-tao¹, JIANG Bin¹, LI Xiao-long¹

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 4. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 5. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Received: Mar. 27, 2020

Key words: deep-sea submerged buoy; quasi-real-time transmission; localization; observation of temperature, salinity, depth and current in deep-sea section; submerged floating body

Abstract: One of the most reliable and accurate methods for monitoring the marine environment is the ocean submerged buoy. Submerged buoys work underwater and their observations complement those of sea-surface buoys to achieve stereoscopic observation of the marine environment. To make forecasts for the dynamic deep-sea environment and safeguard the marine military environment, real-time data is required. As such, the development of a quasi-real-time fixed-point continuous observation system is both urgent and necessary. In this study, we designed a domestic deep-sea quasi-real-time-transmission submerged buoy system. We focused on performing a hydrodynamic analysis of the anchoring system, synchronizing the observation equipment and optimizing the overall design technologies used to ensure the safety, reliability, and low power consumption of the quasi-real-time communication systems. We investigated real-time transfer technologies such as the manufacture of light inductively coupled transmission cables, deep-sea inductive coupling transmission, and intelligent receiving and transmitting communications. In addition, we studied their applications in deep-sea areas to test their stability and reliability, and developed two types of real-time submerged buoys. The quasi-real-time-communication submerged buoy system integrates 1 anti-pollution conductivity-temperature-depth (CTD) sensor, 19 inductively coupled CTDs, 8 inductively coupled water temperature (T) sensors, 4 inductively coupled transmission acoustic Doppler current profilers (ADCP), 2 single-point ocean current meters, 6 inductively coupled data transmission instruments, and 2 sets of acoustic release transponders. The body of the submerged buoy system contains three underwater streamlined buoys, one set of communication floats, a quasi-real-time satellite communication device (semi-submersible underwater winch or sea surface float), and a mooring system. The deep-sea quasi-real-time-communication submerged buoy system obtains high-frequency, multi-element, multi-level, long-term, continuous observation data such as temperature and salt depth and ocean current data at a depth of 2 000 m, which is transferred to a shore-based lab in quasi-real-time for solving scientific problems and providing timely data to ensure safety in the marine environment.

(本文编辑: 刘珊珊)