深海综合观测浮标研制及其在热带西太平洋的应用

陈永华, 于　非, 张林林, 王富军, 刘庆奎, 姜　斌, 姜静波, 倪佐涛, 李晓龙, 胡贺岗, 任　强

(中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 目前尽管国内近海浮标实现了产品化, 但深远海尚无定型可靠的深海综合观测浮标系统, 基于此, 中国科学院海洋研究所设计制作了深海综合观测浮标系统, 其浮标体为柱台型结构, 采用单点锚泊系留。整个系统主要由浮标体、系留子系统、观测子系统、数据采集处理控制子系统、通信子系统、供电子系统、检测子系统、安全报警子系统和岸基数据接收处理子系统等 9 部分组成。浮标系统通过搭载不同类型的传感器, 实现对风速/风向、气温、相对湿度、气压、能见度、雨量、波浪、表层水温、表层盐度、表层溶解氧、表层叶绿素、表层浊度、剖面流速流向、剖面温盐深(最大深度可达 1 000 m)、方位及浮标位置等要素进行实时观测, 从而完成对海洋气象、水文和水质等要素的长期、连续、自动监测, 并支持铱星和北斗等卫星通信方式, 将观测数据实时的传输到岸基数据接收处理系统。近年来, 深海综合观测浮标系统在热带西太平洋海域连续进行了 4 次海上应用, 每次应用时间长达 1 a。它提供了第一手的大洋上层和海气界面长时间序列的实时连续观测资料, 促进了关于气候变化和深海大洋的研究工作。所研制的深海浮标达到目前国际同类产品(美国 ATLAS 浮标、日本 TRITON 浮标)的先进水平, 并且在水下感应耦合传输等方面进行了创新, 形成了自有特色。

关键词: 深海综合观测; 浮标系统; 剖面温盐深流; 锚泊系统; 水下数据感应耦合传输

中图分类号: O432　**文献标识码**: A　**文章编号**: 1000-3096(2020)08-0215-08

DOI: 10.11759/hykx20200327005

气候变化是世界各国面临的紧迫问题, 海洋与气候变化密切相关。大气层的水分 80%以上来自海洋。海洋上表层 3 m 的海水所含的热量相当于整个大气层所含热量的总和, 海洋从低纬度区向极地方向输送的热量与大气环流相当。海洋中的碳储量占地球系统的 93%, 海洋每年从大气中吸收的二氧化碳约占全球二氧化碳年排放量的 1/3, 目前海洋的碳储量日趋饱和[1]。对全球气候变化的研究, 离不开海洋调查的基本数据的支持, 尤其是长时间序列资料的获得, 而锚系观测浮标是实时获取长期连续海洋观测资料的主要手段之一[2]。锚系式海洋观测浮标是一种用于获取海洋气象、水文、水质、生态、动力等参数的漂浮于海面的自动化监测平台, 它是随着科技发展和海洋环境监测、预报及海洋科学研究的需要而迅速发展起来的新型海洋环境监测设备, 具有长期、连续、全天候自动观测等优点, 为海洋环境安全保障、海洋科学研究、海洋经济和海上军事活动等提供服务, 具有重大意义, 因此受到世界各国的极大重视和大力发展[3]。它是海洋观测中最重要、最可靠、最稳定的手段之一, 是海洋观测资料四大来源之一[4]。“十三五”规划纲要明确提出, 要统筹规划国家海洋观(监)测网布局, 推进国家海洋环境实时在线监控系统和海外观(监)测系统建设, 逐步形成全球海洋立体观(监)测系统, 加强对海洋生态、海洋动力、海洋气象等观测研究。

国外海洋资料浮标的发展始于 20 世纪 20 年代, 发展至今已经取得了大量成果。当前, 美国、加拿大、挪威等海洋科技强国的通用型海洋资料浮标观测技术已趋成熟, 功能较为齐全, 可靠性高、精度高、稳定性好, 而且形成了功能多样的产品系列, 并制定了相应海洋环境监测规范和标准, 已经在各沿

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-04-17

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2016YFC1402602 和2017YFC1403406); 山东省重大科技创新工程项目(2018SDKJ0105), 鳌山科技创新计划课题(2015ASKJ01-03); “科学”号高端用户项目资助(KEXUE2019G07)

[Foundation: Key Research and Development of Science and Technology Program, No. 2016YFC1402602, No. 2017YFC1403406; Major Project of Science and Technology Innovation of Shandong, No. 2018SDKJ0105; Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No. 2015ASKJ01-03; The Senior User Project of RV KEXUE, No. KEXUE2019G07]

作者简介: 陈永华(1976-), 男, 山东枣庄人, 博士, 研究员, 主要从事海洋装备研发与系统集成技术研究, E-mail: chenyonghua@qdio.ac.cn

海国家实现了长期业务化运行[4]。海洋资料浮标观测技术业务应用的优秀代表是美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的国家资料浮标中心(National Data Buoy Center, NDBC), 其管理的海洋资料浮标遍布全球, 锚系浮标包含了从 1.5 m 到 12 m 直径的多个系列, 这些浮标长年工作于海上, 提供了大量珍贵的海洋现场观测数据[5]。世界气象组织(WMO)和政府间海洋学委员会(IOC)的数据浮标合作小组(DBCP)也管理着众多的海洋资料浮标, 用于全球气象预报等领域[6]。国外已经建立了大区域、高密度、多参数、多功能的海洋浮标监测网, 以实现海洋环境的区域/全球观测。具有原始创新和高技术水平的各种专用浮标观测技术发展迅速。

我国的锚系浮标观测技术也取得了长足的进步, 目前已经形成了直径从 15 m 到 3 m 的产品系列, 近海通用型观测浮标已实现业务化运行[4], 构建了近海浮标观测网, 浮标本体技术水平与国际相当。而深海观测浮标尽管发展有限, 但近年来也开展了一系列研发与应用, 比较典型的有中国科学院海洋研究所和自然资源部第一海洋研究所等单位研制的深海观测浮标。下面对中国科学院海洋研究所研制的深海综合观测浮标系统特点及其在热带西太平洋的应用情况予以介绍。

1 系统设计与制作

如图 1 所示, 深海综合观测浮标包括浮标体、系留子系统、观测子系统、数据采集与控制子系统、供电子系统、通信子系统和陆基支撑数据接收处理子系统等, 浮标体下部通过电转环等连接装置和系留子系统顶端相连接, 气象、表层水文和定位等观测传感器与设备搭载于浮标体上, 剖面观测 CTD 搭载在系留子系统上, 数据采集与控制子系统、供电子系统和通信子系统都位于浮标体上。

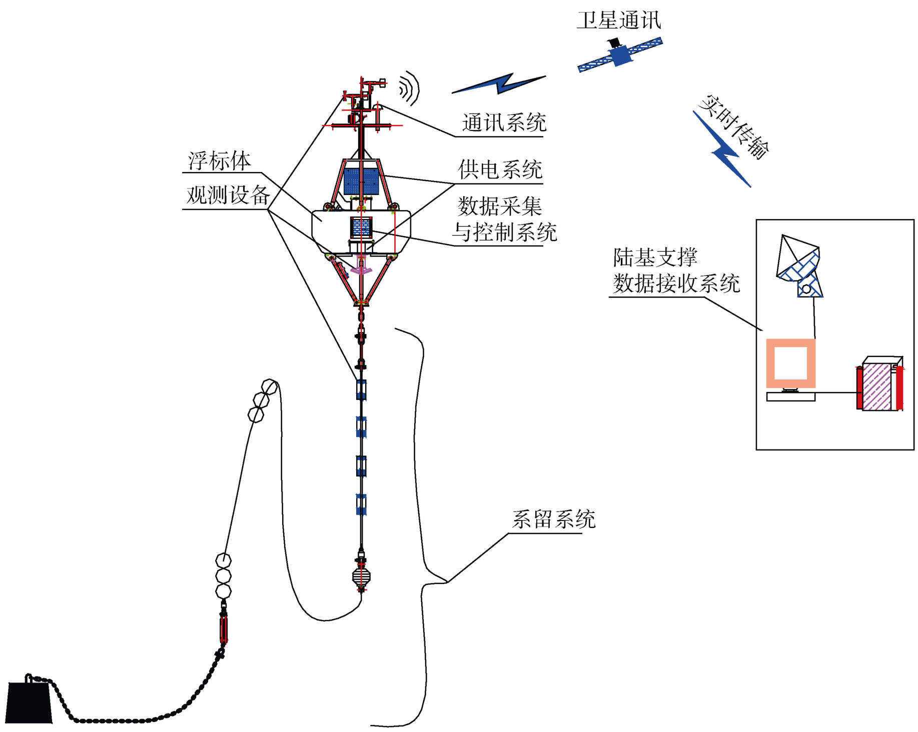

图 1 中国科学院海洋研究所研发的深海观测浮标系统结构组成图

Fig. 1 Structural diagram of the deep-sea observation buoy system developed by the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS)

1) 浮标体所有: 主体为金属结构支撑, 其中上部塔架为高强度耐腐蚀的铝合金材料, 中心密封舱和底部支架选用优质不锈钢材料, 中间外圈为浮力浮体, 选取合适的浮力材料, 充分考虑标体的抗风浪能力和随波性。

2) 系留子系统: 应用浮标工程原理, 对系留系统进行应力分析, 根据投放海区的海洋环境状况, 确定各部分极限应力条件。并充分利用目前国际上

成熟的锚系材料，设计松弛式或紧绷式系留结构。松弛式锚系结构有利于缓冲风浪流对浮体和锚系的冲击力，相同条件下对锚泊缆需承受破断力的要求小；紧绷式系留结构有利于水下观测设备姿态和位置的保持，并节约缆系长度(松弛式系留结构中，缆系一般是水深的 1.3~1.5 倍)。

3) 观测子系统：深海浮标的观测要素包括气象要素和水文要素。气象观测参数包括：气温、气压、湿度、风速、风向、雨量、长波辐射和短波辐射等。水文要素包括上层海洋(0~400 m)的流速、流向、温度、盐度、深度等。各观测要素的传感器应选用技术相对成熟的、适用于长期布放的海洋传感器产品，观测精度达到国际同类产品的水平。其中，气象观测设备多选用美国 R. M. Young 公司和芬兰维萨拉产品；水下感应耦合观测设备多选用美国海鸟公司和加拿大 RBR 公司产品；海流计多选用美国 RDI 产品。

4) 数据采集和控制子系统：它由采集处理装置、数据传输装置、存储装置、供电装置、检测装置、断电保护装置等组成。充分参考我国《海洋调查规范》和《海洋监测规范》，设计具有自主知识产权的深海浮标数据采集和控制子系统，并进行低功耗和双备份处理。此子系统采用基于 ARM 处理器和嵌入式实时操作系统组合而成的装置，以 ARMCortex-M3 处理器为内核的意法半导体公司 32 位单片机 STM32 为控制器，该芯片采用哈弗架构，拥有独立的指令总线和数据总线，设计有多通道 AD 采集和各种主流通讯方式、低功耗休眠模式，强大的数据处理能力和丰富的片内资源满足了当前多种方式复杂的数据采集和控制需求，并且搭配外围电路可扩展多路 RS232 和 RS485 等接口，满足各种主流海洋传感器的通讯与控制需求，实现了对海洋要素的数据采集和通信系统的控制。软件方面，控制器移植了嵌入式实时操作系统 μC/OS-III，实现了对数据采集与控制系统的多任务管理、定时器管理、存储器管理、中断管理等功能管理，不仅使采集和控制性能大幅度提高，而且其抗干扰能力和低功耗控制能力也显著增强。

5) 通信子系统：考虑到数据安全需求，深海浮标通信首先考虑采用国产通信卫星来实现，目前在西太平洋海域可用的国产卫星只有北斗卫星；若国产卫星无法覆盖，再考虑采用国外卫星通讯。并将其建立起与数据采集和控制子系统的通信接口，确保数据的实时传输和双向通讯。

6) 供电子系统：采用太阳能和蓄电池组合供电方案，另外为保证深海浮标长期连续工作，电量设计足够的冗余，保证在 60 d 不充电的情况下，蓄电池电量足够使用。

7) 检测子系统：配置专门的检测软件与野外作业笔记本，其与数据采集和控制子系统连接后，可对浮标状态、连接设备等进行自动检测。

8) 安全报警子系统：基于深海观测浮标长期连续安全工作的需要，其上安装有安全警报系统，获取位置、锚灯、进水与否和电压等信息，并向陆基站报告，当浮标系统有位置移动、锚灯夜间不发光和舱体内进水等情况时，系统会向岸站发出报警信号。

9) 陆基支撑数据接收子系统：包括卫星接收装置、岸基数据接收处理软件和数据接收处理服务器等。岸基数据接收处理软件主要实现浮标数据的接收、初步处理和数据库管理，并具有向海上工作浮标发送控制命令功能。

所设计的深海综合观测浮标系统的本体技术指标见表 1。观测要素的技术指标如表 2 所示。

表 1　深海综合观测浮标系统本体技术指标
Tab. 1　Technical parameters of the deep-sea buoys

指标名称	指标值
浮标体尺寸	ϕ2.4 m ×h1.0 m
最大工作水深	10 000 m
剖面最大观测水深	1 000 m
观测通讯周期	10 min、0.5 h、1 h 等(可选)
观测要素	海洋气象(风速、风向、气温、相对湿度、气压、雨量、能见度、太阳辐射量); 表层要素(水温、盐度、溶解氧、浊度、叶绿素、pH 值); 剖面要素(1 000 m 以内温盐深、流速、流向)。
维护周期	≥1 a
数据接收率	≥95%
设计海上工作时间	≥10 a(不含气象等观测设备)

表 2　深海综合观测浮标系统观测要素指标

Tab. 2　Observed characteristics of the deep-sea buoys

参数类别	具体参数	测量范围	测量准确度	分辨率
气象	风速	0~80 m/s	V≤20 m/s: ±1 m/s V>20 m/s: ±5% m/s	0.3 m/s
	风向	0°~360°	±10°	0.5°
	气温	–50~+50℃	±0.3℃	0.1℃
	气压	600~1 100 hPa	±1 hPa	0.01 hPa
	相对湿度	0~100%	±2%	1%
	雨量	0~50 mm		2 mm
	能见度	10~20 000 m	±10%~±15%	
方位	方位	0°~360°	±10°	1°
水文	水温	–5~+45℃	±0.01℃	0.001℃
	电导率	0~70 mS/cm	±0.01 mS/cm	0.001 mS/cm
	波高	0.2~25 m	±(0.3+0.1H) m	0.1 m
	波周期	3~30 s	±0.5 s	0.1 s
	波向	0°~360°	±10°	1°
	流速	±5 m/s	±0.5%	1 mm/s
	流向	0°~360°	±10°	1°
水质参数	叶绿素	0.1~400 μg/L	±1%	0.01 μg/L
	浊度 $_{FTU}$	0~1 000	±0.2%	0.03
	溶解氧	0~20 mg/L	±0.1%	0.002 mg/L

2　感应耦合剖面观测数据传输的设计与实现

深海综合浮标剖面观测数据水下到水面浮标体的传输是深海观测浮标系统的关键技术，所设计的剖面温盐深的观测数据在水下传输到海面浮标体的方式是感应耦合式，它是在浮标平台的下端通过电转环连接水上磁环到浮标体内的数据采集与控制分系统，包塑钢缆两端接触海水，通过海水与包塑钢缆构成的传输回路将指令传输至水下每一个 CTD 测量节点(带有感应耦合的 CTD)，每个节点又按照此回路将数据回传至数据采集与控制子系统[7]，如图 2 所示。

这样，采用感应传输技术只需系留的包塑钢缆和海水就可以完成数据实时传输，从而大大降低传输介质的造价。此外，仪器与传送数据的系留缆无直接连接，而是将系留缆放入对接的两部分耦合磁环内，所以装拆非常方便，不需要破口进行直接的电气连接，对系留缆无任何损坏，不会影响其强度。但由于浮标体在海面风浪流的作用下，会不停的振荡和旋转，需要解决的关键问题是浮标平台下端的磁环连接到浮标体内的数据线防止和连接卸扣等发生绞缠，进而可能会损坏数据缆，致使无法进行水下数据传输。这里通过水下电转环来实现此功能。

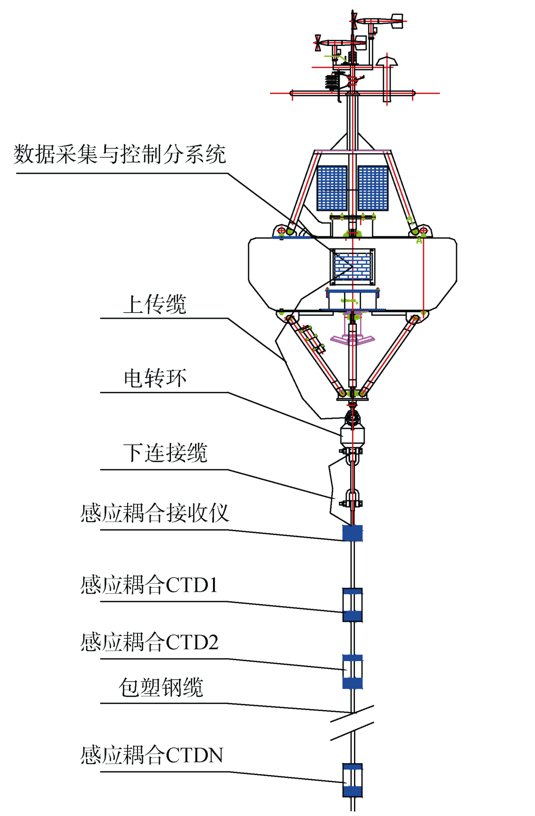

图 2　浮标系统剖面 CTD 感应耦合传输图

Fig. 2　Schematic diagram of the inductive coupling CTD

如图 3 所示，此水下电转环下端的下连接缆连接感应耦合接收仪，上传缆进入浮标体内的数据采集与通信子系统，电转环的底托可以自由旋转，其主要功能为：(1)易于卸载扭转载荷：在其底托和上封盖的的环眼分别连接浮标锚泊系统和浮标体，当锚泊系统和浮标体有扭转载荷时，底托和上封盖可相对转动，卸去扭转载荷；(2)转动中进行信号传输：密封壳体内部固定滑环，滑环浸泡于密封油中，可以在转动的情况下，进行通信和电能传输，从而实现感应耦合信号的传输。

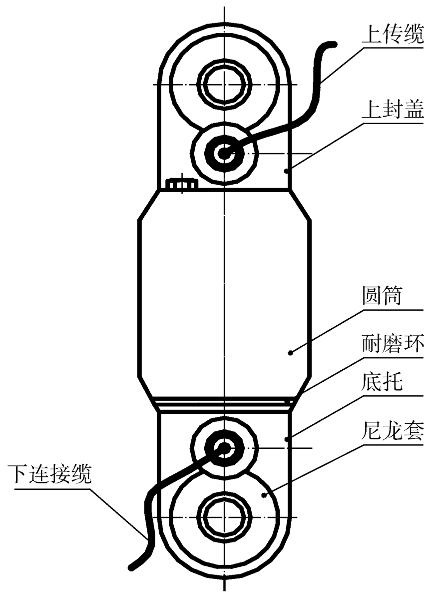

图 3 水下电转环结构图

Fig. 3 Structure of the underwater electric rotating ring

在热带西太平洋布放的深海综合观测浮标的感应耦合 CTD 的分布如表 3 所示。

表 3 感应耦合 CTD 的排布

Tab. 3 Arrangement of the inductive coupling CTD

仪器名称	仪器编号	工作方式	所在水深/m
CTD-IM	#1	耦合式	1
CTD-IM	#2	耦合式	10
CTD-IM	#3	耦合式	30
CTD-IM	#4	耦合式	50
CTD-IM	#5	耦合式	70
CTD-IM	#6	耦合式	120
CTD-IM	#7	耦合式	190
CTD-IM	#8	耦合式	260
CTD-IM	#9	耦合式	330
CTD-IM	#10	耦合式	400

3 深海综合观测浮标在热带西太平洋应用

中国科学院海洋研究所于 2015 年底和 2017 年、2018 年和 2019 年连续完成多套深海观测浮标在热带西太平洋布放与观测应用，除 2015 年布放 1 套系统外，后续年份在热带西太平洋保持两套深海综合观测浮标在位工作。为获得关键海区的海气通量及海洋上层热含量数据，中国科学院海洋研究所在热带西太暖池区布放综合观测浮标系统 1 套；为预测南海(东亚)夏季风爆发早(强)晚(弱)及中国季风降水引起的旱涝分布特性，在靠近巴布亚新几内亚的海域保持 1 套深海综合观测浮标在位运行，具体布放位置如图 4 所示。

两个站位的工作水深均超过 4 000 m，系统维护时间为 1 a。除了 2015 年布放的深海综合观测浮标系统，由于不明原因丢失外，后续布放的深海综合观测浮标系统均正常工作满 1 a 时间。

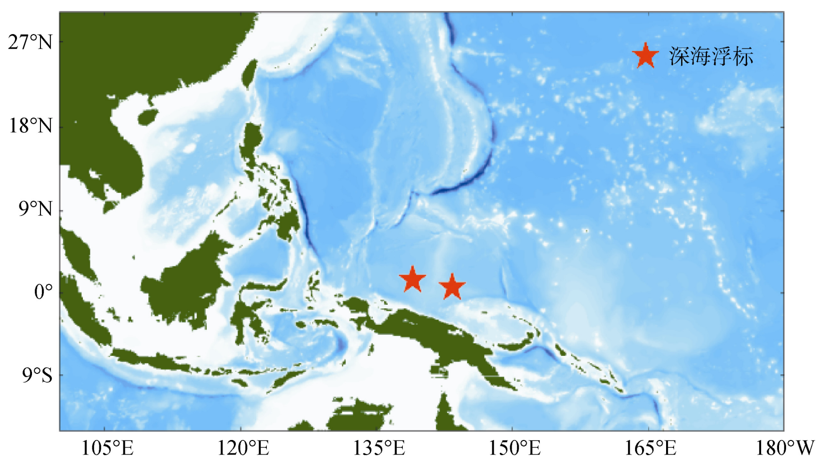

图 4 深海综合观测浮标布放站位

Fig. 4 Locations of the comprehensive deep-sea observation buoys

其中，一般在每年年底对上一年布放的浮标观测系统进行维护更新，如 2018 年底对 2017 年布放的热带西太平洋深海观测浮标系统进行了回收，并在西太海域进行了 2 套深海观测浮标系统的再布放。

中国科学院海洋研究所所获取的数据有力的支撑了气候和海洋科学研究，深海观测浮标部分数据见图 5。

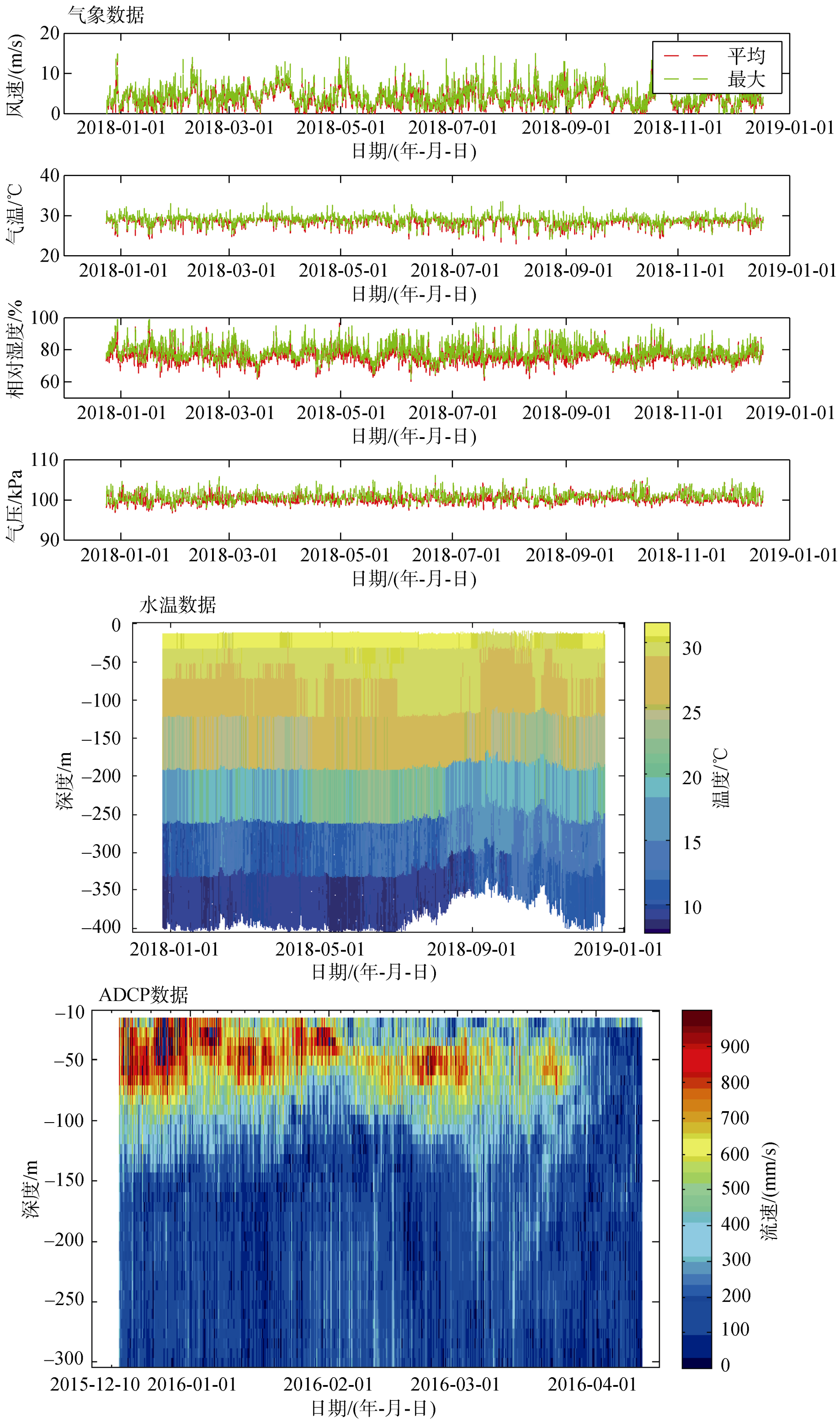

图 5　深海浮标部分观测数据

Fig. 5　Partial data from real-time observation buoys

统计近 1 年的数据，数据获取率为 98.6%(包含补发数据)，有效数据超过 90%。所获取的实时长期、高准确度、高分辨率数据可涵盖对中小尺度，如内波、内潮、表层及次表层中尺度涡、亚中尺度、大洋环流等海洋动力过程的研究，对其海洋现象的生消过程机制进行探讨，进而对研究海洋不同尺度过程中的能量转换等具有重要意义。

4 总结

深海锚泊资料浮标是实时获取深海大洋长期连续观测资料的主要手段之一，中国科学院海洋研究所研制了具有我国自主知识产权的深海多参数实时传输锚系浮标系统。其观测要素种类、观测频次、应用水深和系统维护时间等性能指标达到目前国际同类产品(美国 ATLAS 浮标、日本 TRITON 浮标)的先进水平，并且在水下感应耦合传输、感应耦合缆系制作和海上布放操作等方面进行了创新，形成了自有特色。其中，水下感应耦合传输采用电转环作为中继，既消除了浮标体和感应耦合缆之间的扭矩，又能进行感应耦合信号传输；感应耦合传输缆采用双护套制作模式，大大增强了其耐磨性，从而增强其水下感应耦合传输的可靠性；浮标系统的布放回收形成规范化操作，大大提高了其工作效率，节省了船时。所研制的深海综合观测浮标在热带西太平洋海域开展了数年的海上应用，包括水下感应耦合传输等浮标整体系统工作稳定，为海洋科学研究和海洋环境预报等提供了数据支撑。

参考文献：

[1] 吴湘玉. 深海海洋环境监测发展评述及规划探讨[D]. 北京：中国科学院研究生院, 2011.
Wu Xiangyu. Research on technology and system development of deep sea environmental monitoring[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.

[2] 王军成. 海洋资料浮标原理与工程[M]. 北京：海洋出版社, 2013: 1-50.
Wang Juncheng. Principle and Engineering of Ocean Data Buoy[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013: 1-50.

[3] 李民, 刘世萱, 王波, 等. 海洋环境定点平台观测技术概述及发展态势分析[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 36-42.
Li Min, Liu Shixuan, Wang Bo, et al. Review and analysis on the development of ocean environment observation technologies based on mooring platforms[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34(3): 36-42.

[4] 王波, 李民, 刘世萱, 等. 海洋资料浮标观测技术应用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2401-2414.
Wang Bo, Li Min, Liu Shixuan, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 35(11): 2401-2414.

[5] 美国国家资料浮标中心(NDBC)[EB/OL]. [2014-06-06]. http://www.ndbc.noaa.gov/.

[6] Pacific Marine Environmental Laboratory.全球热带系泊浮标阵列[EB/OL]. [2019-01-16].https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/.

[7] 高国彩. 实时传输温盐链潜标系统关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2015.
Gao Guocai. Study on the key technologies for the real-time transmission temperature salinity and depth chain subsurface buoy system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.

Design and development of deep-sea buoys and their applications in the tropical western Pacific

CHEN Yong-hua, YU Fei, ZHANG Lin-lin, WANG Fu-jun, LIU Qing-kui, JIANG Bin, JIANG Jing-bo, NI Zuo-tao, LI Xiao-long, HU He-gang, REN Qiang

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Mar. 27, 2020

Key words: deep-sea integrated observation; buoy system; profile temperature, salt, depth, and current; mooring system; underwater inductively coupled data transfer

Abstract: Although domestic offshore buoys have been commercialized, as yet, no reliable comprehensive deep-sea observation buoy system is available. To address this problem, the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences designed and manufactured a comprehensive deep-sea observation buoy system. The body of this system has a pedestal structure that is moored from a single point. The entire system has nine components, including the buoy body, the mooring, the observation subsystem, the data-acquisition processing and system control subsystem, the communication subsystem, the power-supply subsystem, the test subsystem, the security-alarm subsystem, and the shore-based data-receiving and -processing subsystem. The buoy is equipped with a range of different sensors for observing wind speed and direction, air temperature, relative humidity, air pressure, visibility, rainfall, waves, surface water temperature, surface salinity, surface dissolved oxygen, surface chlorophyll, surface turbidity, profile velocity and direction, profile temperature, salinity, and depth (maximum depth can reach 1 000 m), direction, and buoy position, among other factors. This system is designed to perform long-term, continuous, and automatic monitoring of marine meteorological, hydrological, and water quality parameters. Via satellite communication systems such as Iridium and Beidou, observation data is transmitted to the shore-based data-receiving and -processing system in real time. In recent years, this deep-sea integrated observation buoy system has been used in four consecutive sea applications in the tropical western Pacific, with each application lasting up to one year. This system provides first-hand real-time continuous observation data to facilitate research on climate change and other topics in the deep ocean. The advanced design of this deep-sea buoy rivals that of similar products around the world (e.g., the United States' Atlas buoy and Japan's Triton buoy). Furthermore, we have achieved innovations in underwater inductive-coupling data transmission.

(本文编辑：刘珊珊)