

深海海洋动力环境原位实时监测系统研究^①

张海燕^{②*} 李欣^{③*} 李康^{*} 宋忠强^{*} 李培良^{**}

(^{*} 中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)

(^{**} 中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100)

摘 要 针对海底观测网中海洋动力环境参数的长期实时监测问题,研究和设计了深海海洋动力环境原位实时监测系统。该系统采用温盐深仪(电导率、温度、深度(CTD)测量系统)、声学多普勒流速剖面仪(ADCP)、声学多普勒流速仪(ADV)、浊度传感器和溶解氧传感器等海洋仪器作为数据采集设备,搭建了以嵌入式 ARM 内核微处理器为核心的硬件平台,基于 Linux 操作系统设计了长期实时监测软件。该深海海洋动力环境原位实时监测系统于 2011 年 4 月至 10 月,在美国蒙特利海湾在接入海底观测试验网——蒙特利加速研究系统(MARS)下连续运行 187 天,试验结果表明该系统可以长期稳定地实时获取海洋动力环境原位数据。

关键词 海底观测网,海洋动力环境,原位实时监测,嵌入式系统, Linux

0 引言

海底观测网是实现深海海洋环境进行长时间监测的深海海底观测平台,通过搭载在这一平台上的原位仪器的长时间的观测,可以获取高时间分辨率数据。深海海洋动力环境原位实时监测系统作为海底观测网的观测节点之一,可对海底表面或者近海底的温度、盐度、深度、浊度、溶解氧、剖面流速和点流速等海洋动力环境参数进行定点原位、长期连续、多要素同步的实时监测^[1]。利用这些监测数据能够进行湍流混合、海底动量通量、热通量和生产力与物质扩散通量之间的相互作用研究,确定在不同的空间及时间尺度和不同环境条件(如潮流、内波混合等)下海底物质扩散的通量变化,有助于提高海底资源勘查效率,增强新资源的预测和发现能力。美国和加拿大在 20 世纪末启动了“海王星(Nep-tune)”计划。美国建立了小型试验观测系统——蒙特利加速研究系统(Monterey accelerated research system, MARS),加拿大建立了维多利亚海底实验网络(Victoria experimental network under the sea, VE-

NUS),对“海王星”计划涉及的相关技术进行了试验,并取得了良好的试验结果^[2]。加拿大“海王星”计划海底观测网在东北太平洋的胡安·德·夫卡(Juan de Fuca)板块铺设了总长达 800km 的海底光电电缆,所联接的各种原位仪器将东太平洋这块海区的深海物理、化学、生物、地质等实时观测信息,源源不断地传回陆地实验室,并通过互联网传给世界各国的终端^[3]。英、德、法、意等欧洲国家和日本、韩国、印度等亚洲国家,也都在建设各自的海底观测网络,具有代表性的有欧洲海底观测网(European sea floor observatory network, ESONET)^[4]和日本的新式实时海底监测网(advanced real-time earth monitoring network in the area, ARENA)^[5]。

我国的海底观测网建设,在“十一五”期间进行了“海底长期观测网络试验节点关键技术”研究,并在“十二五”启动了“海底观测网试验系统”项目。本文介绍的深海海洋动力环境原位实时监测系统,是“十一五”863 项目“海底长期观测网络试验节点关键技术”的子课题“海底原位动力环境监测技术研究”的研究成果之一,其改进设计也正在“十二五”863 项目“海底观测网试验系统”的研究中得到应用。

① 863 计划(2007AA091201, 2012AA09A403)资助项目。

② 女,1968 年生,博士;研究方向:信号与信息处理,嵌入式系统应用;E-mail:hyzhang@ouc.edu.cn

③ 通信作者, E-mail:eleceng@ouc.edu.cn

(收稿日期:2013-05-06)

1 深海海洋动力环境原位实时监测系统硬件平台设计

深海海洋动力环境原位实时监测系统由嵌入式控制板,直流供电模块,温盐深仪即用于测量海水电导率 (conductivity)、温度 (temperature) 及深度

(depth) 三个基本水体物理参数的 CTD 探测系统,声学多普勒流速剖面仪 (acoustic Doppler current profile, ADCP) 和声学多普勒流速仪 (acoustic Doppler velocimeter, ADV) 组成,并在 CTD 系统上搭载了 1 个浊度传感器即光学后向散射点传感器 (optical backscatter point sensor, OBS) 和 1 个溶解氧传感器。系统构成如图 1 中虚线框所示。

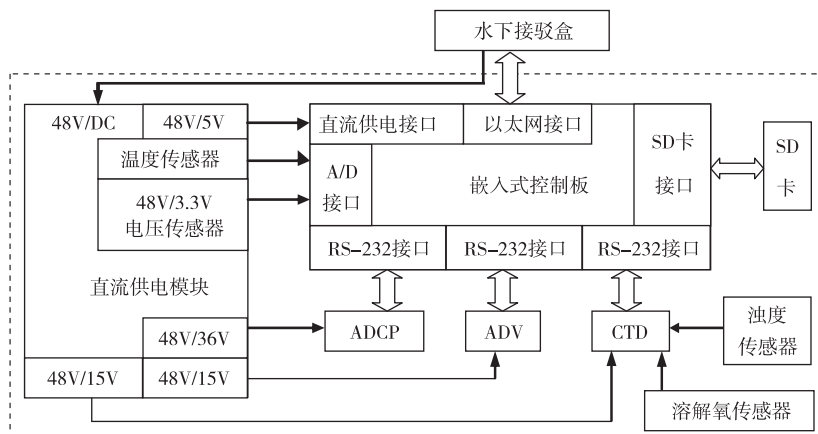


图 1 深海海洋动力环境原位实时监测系统示意图

1.1 传感器选型

温盐深仪选用美国 Sea-Bird 公司生产的 SBE19 Plus V2 型 CTD,并搭载了 2 个输出模拟量的传感器:浊度传感器和溶解氧传感器。工作水深可达 7000m,通过 RS-232 接口,该 CTD 可以返回包括温度、电导率、压力以及 2 个搭载传感器的模拟电压值在内的二进制格式数据包。

声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 选用了美国 RDI 公司生产的 WorkHorse 系列 300kHz 产品,工作水深 6000m。通过 RS-232 接口,它可以返回包括表示流速、相关系数、回声强度和数据可靠性等参数在内的二进制格式数据包。

声学多普勒流速仪 (ADV) 选用挪威 Nortek 公司生产的 Vector 三维点式流速仪,工作水深 6000m。通过 RS-232 接口,它可以返回包括采集时间、供电电压、温度、仪器姿态和流速等参数在内的二进制格式数据包。

1.2 系统各模块供电设计

岸基供电系统通过深水接驳盒和水下湿插拔连接器,向深海海洋动力环境原位实时监测系统提供 +48V/200W 的直流电源。直流供电模块向嵌入式控制板和各个传感器的供电,通过不同的 DC/DC 转换器来实现电压变换以及隔离。

向嵌入式控制板和各个传感器提供不同大小、

不同功率直流电压的同时,直流供电模块还通过电压互感器和温度传感器,将 +48V 直流电压和 DC/DC 转换器附近的温度,提供给嵌入式控制板,作为系统状态参数的组成部分,通过以太网接口传送至岸基服务器。

1.3 嵌入式控制板

嵌入式控制板的微处理器选用了基于 ARM920T 内核的 S3C2440A 芯片。它是韩国 Samsung 电子公司推出的一款 32 位嵌入式微处理器,工作主频可达 400MHz,工作温度范围 -40 ~ +85℃。

嵌入式控制板包括 S3C2440A 微处理器、存储器模块、以太网接口和 JTAG 接口等电路,其中存储器模块包括同步动态随机存储器 (synchronous dynamic random access memory, SDRAM)、NAND FLASH 存储器、NOR FLASH 存储器、安全数码 (SD) 卡接口和通用串行总线 (USB) 接口电路。嵌入式控制板的硬件构成如图 2 所示。

在存储器模块中,由 2 片 4M × 16bit × 4bank SDRAM 构成 16M × 32bit 的同步动态存储器,总容量 64MB;1M × 16bit (2MB) 的 NOR FLASH 用于存放引导程序 U-boot;64M × 8bit (64MB) 的 NAND FLASH 用于存放操作系统、根文件系统和应用程序等。

除了内存模块之外,还设计了外存接口:SD 卡和 USB 接口。在本设计中,SD 卡接口支持的最大

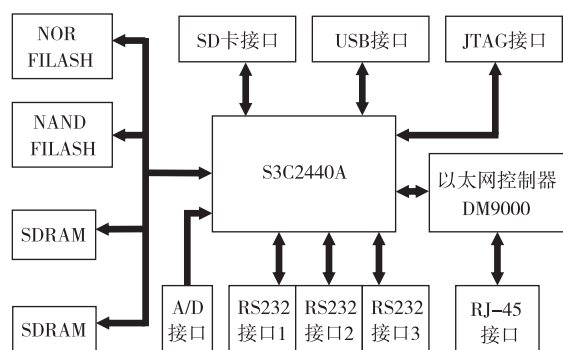


图2 嵌入式控制板硬件构成

容量为4GB,USB接口支持的最大容量为16GB。当以太网传输出现阻塞时,深海海洋动力环境原位实时监测系统会将未能成功传输的数据保存到SD卡或者U盘中。当网络恢复正常传输之后,系统又会将存放在SD卡或者U盘中的数据,通过以太网接口传输至岸基系统。

JTAG接口用于系统的仿真和调试,完成调试之后,该接口便不再使用。

微处理器S3C2440A带有8路模拟电压输入接口,本设计使用其中的2路模拟输入采集直流供电模块的温度和电压信号。温度传感器放置在直流供电模块中发热量最大的DC/DC转换器附近,其传感温度范围为 $-5 \sim +100^{\circ}\text{C}$,温度传感器将其转换成 $0 \sim 3.3\text{V}$ 的模拟电压信号,作为一路模拟信号输入至A/D接口。霍尔电压传感器将直流供电模块的 $48\text{V}/\text{DC}$ 输入电压转换成 12mA 的输出电流,再由 180Ω 精密电阻转换成 2.16V 的直流电压,作为另一路模拟信号输入至A/D接口。该模拟输入电路的直流电压监测范围设计为 $0 \sim 73.3\text{V}$ 。深海海洋动力环境原位实时监测系统会将当前的系统温度和供电电压信息每分钟一次传输至岸基系统,使岸基操作人员能够随时观测到系统的工作状态。

在嵌入式控制板中,采用DAVICOM公司的DM9000作为以太网控制器,它符合IEEE803.3以太网标准,具有发送和接收低通滤波器的10BaseT连接端口和支持10Base2、10Base5和10BaseF的连接单元接口(attachment unit interface,AUI),能够自动生成报头和自动进行循环冗余校验(cyclic redundancy check,CRC),并能够在冲突后自动重发。

S3C2440A具有3个通道通用异步收发器(universal asynchronous receiver/transmitter,UART),通过电平转换电路,嵌入式控制板提供了3个RS-232C接口,分别连接到CTD、ADCP和ADV,实现实时数

据采集。

2 深海海洋动力环境原位实时监测系统嵌入式软件设计

嵌入式软件包括嵌入式系统软件平台的搭建和应用程序的设计。

软件平台采用目前主流的嵌入式操作系统Linux,它具有开源、开发周期短、内核精简、功能强大、运行稳定、系统健壮等优点,可以大大提高在其上运行的应用程序的稳定性。

采用嵌入式C编写的多线程应用程序,具有实时、灵活、可控和自恢复等特点,能够完成对各个传感器的实时数据采集、与岸基系统的即时通信和对系统状态的实时监测等功能,并可以通过岸基系统对深海海洋动力环境原位实时监测系统的数据采集模式进行变更。

2.1 嵌入式系统软件平台搭建

嵌入式系统软件平台的搭建包括嵌入式交叉编译环境的建立、系统引导程序Bootloader的移植、Linux内核的移植和根文件系统的搭建4个部分。

搭建嵌入式交叉编译环境的目的是在功能相对强大的宿主机上建立目标机运行程序的编译环境。本设计所搭建的交叉编译环境,能够在PC机上编译生成运行于ARM处理器(Acorn RISC Machines公司设计的高级精简指令集计算机(RISC)处理器)上的代码。

Bootloader是在启动操作系统之前运行的一段引导程序,目的是初始化系统硬件、映射内存空间、启动操作系统。本设计采用U-Boot作为Bootloader,U-Boot的全称是Universal Boot Loader,它具有支持Linux、开放源码、支持ARM处理器、稳定性和可靠性高、功能设置灵活高效、设备驱动源码丰富以及大量的开发调试文档和强大的网络技术支持等优点。

所谓移植U-Boot,就是根据嵌入式控制板的硬件配置,对一个通用的U-Boot源码进行修改和编译,生成适合于嵌入式控制板硬件环境的引导程序的过程。

Linux内核是Linux操作系统的核心,其功能是管理系统的进程、内存、设备驱动程序、文件和网络系统等。移植Linux内核包括内核配置、内核编译和内核下载几个环节。内核配置就是根据硬件系统中的ARM处理器和外围电路资源,裁剪和定制Linux内核;内核编译和内核下载则是对已经裁剪和

配置完毕的 Linux 内核进行编译生成内核镜像文件,并将其下载(烧写)到嵌入式系统存储器的指定地址中的过程。

根文件系统是 Linux 操作系统中的一种存储器管理机制。Linux 系统引导启动的最后操作之一就是挂载根文件系统,根文件系统是 Linux 系统不可或缺的组件^[6]。常用的 FLASH 文件系统主要有闪存日志型文件系统第 2 版(journalling flash file system version 2,JFFS2)和 YAFFS(yet Another flash file system),本设计采用 YAFFS 文件系统。YAFFS 是一种日志结构的文件系统,是针对 NAND FLASH 设计的。它具有可写入、修改和永久保存文件的特性,并提供损耗平衡和掉电保护的功能^[7]。根文件系统的搭建包括建立和编译根文件系统,以及下载(烧写)镜像文件到嵌入式系统存储器的指定地址中等环节。

2.2 嵌入式应用程序设计

在搭建嵌入式软件系统平台的基础上,根据深海海洋动力环境原位实时监测系统的应用需求,开发应用程序。

在 Linux 系统下,采用嵌入式 C 编写多线程应用程序,能够使嵌入式系统并发完成与各个传感器的通信和数据传输、与岸基系统的即时通信、系统状态的实时监测以及应急处理等功能,提高了应用程序的实时性和响应速度。

应用程序由主线程、数据接收线程、数据发送线程和系统监测线程组成。

主线程负责应用程序的初始化、对各个传感器的初始设置、启动其他线程以及与岸基系统的即时通信等。主线程流程图如图 3 所示。

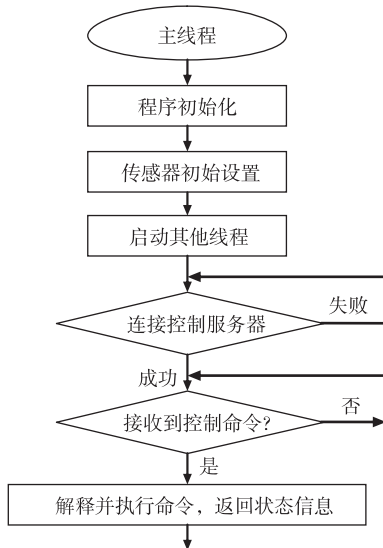


图 3 主线程流程图

应用程序使用 TCP/IP 协议与岸基系统中的控制服务器进行通信,嵌入式系统与控制服务器建立连接和数据传输,都是通过 Socket 接口来实现的。Socket 也称为套接字,它是一种文件描述符,应用程序通过 Socket 向以太网发送请求或者应答以太网的请求。

岸基系统通过控制服务器向嵌入式系统发送更改系统日期和时间、初始化各个传感器、更改采集模式、启动采集程序等命令,应用程序在接收到命令后,向控制服务器返回一个响应信息,同时解析并执行相关命令。

数据接收线程负责接收各个传感器的数据,并将数据写入循环缓冲区,供数据发送线程处理。由于本设计中串口与各传感器一一对应,程序依次循环接收各传感器的数据。为保证数据的实时性,程序中使用非阻塞的 Select() 函数。Select() 函数会在规定的时间内检测预定的文件描述符。当在规定的时间内没有数据交互时,该函数会自动退出,执行后续操作,实现 I/O 的非阻塞读写。

数据发送线程主要完成循环缓冲区内数据的发送、数据的应急存储以及与岸基系统通信协议的实现。数据接收线程与数据发送线程工作在生产者-消费者模式,数据接收线程将数据实时地写入到循环缓冲区内,而数据发送线程将数据取出并发送。当循环缓冲区的数据大于缓冲区容量的一半时,说明数据发送不够流畅,为保证数据安全、不丢失,数据发送线程将数据暂存到 SD 卡中,当数据发送正常之后,再从 SD 卡中读出发送,并将已经成功发送的数据从 SD 卡中删除。数据接收线程的工作流程如图 4 所示。

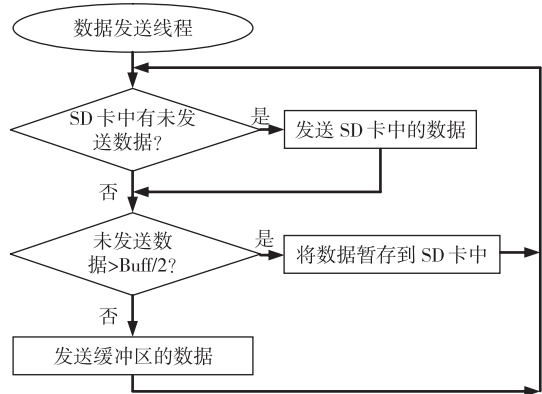


图 4 数据发送线程流程图

为保证发送数据的实时、可靠和高效,采用基于停止-等待-编号-超时的通信规程。嵌入式系统

发送的数据帧格式如图 5 所示。其中,子网 ID 和节点 ID 由岸基系统统一分配,传感器 ID 表明该帧数据来自那个传感器,记录数则说明该帧共有多少条完整的记录,帧计数由 3 个字节组成,表明该帧的序号。 N 字节数据是特定传感器采集的数据,校验和为前面 $N+8$ 个字节的累加和,并对 256 取模。

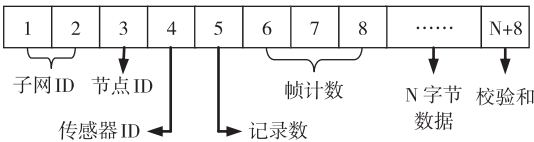


图 5 嵌入式系统发送的数据帧格式

岸基系统应答的帧格式如图 6 所示。其中,子网 ID 和节点 ID 与数据帧中的含义相同,标志字节表明数据帧校验和正确与否,0x06 表示请求发送下一帧,0x15 表示请求重传该帧数据,其他数字无效;帧计数表明是对哪一帧的应答。

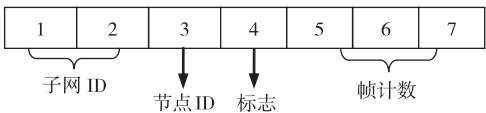


图 6 岸基系统发送的应答帧格式

系统监测线程主要负责监视应用程序的运行情况,捕捉运行错误信息。当发现程序运行出现致命错误时,关闭程序并重新建立程序运行环境。

为了保证主线程运行良好,并与岸基系统保持正常通信,在主线程中定义了一个全局变量。由这个变量来标识主线程的运行状态,系统监测线程随时读取这个变量来判读主线程的运行状况。另外,岸基系统每隔一定时间还向嵌入式系统发送至少一个数据包,用以表示连接的存在。系统监测线程也依此判读主线程与岸基系统的连接状态。

3 海底观测网试验与结果

在浙江嵊山岛成功进行浅海海试和对系统进行改进优化的基础上,2011 年 4 月 21 日,在美国蒙特利海湾(Monterey Bay),深海海洋动力环境原位实时监测系统成功接入美国试验观测系统 MARS 海底观测试验网,并连续运行了 187 天,获得了大量的海底动力环境原位数据。在海试期间,通过互联网可以实时地观测到这些原位数据。该系统于 2011

年 10 月 24 日成功回收。

图 7 和图 8 分别是该系统在美国蒙特利海湾投放和海底接驳的照片。

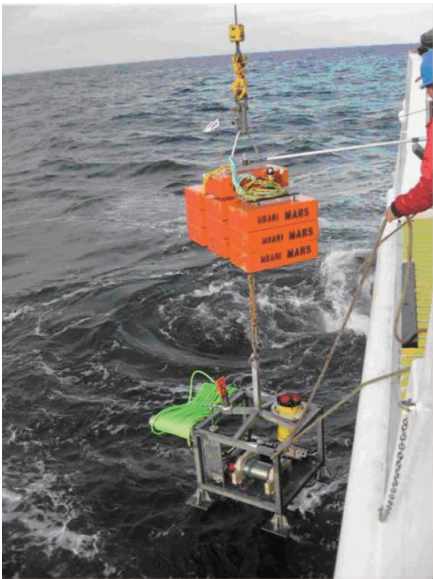


图 7 投放深海海洋动力环境原位实时监测系统



图 8 深海海洋动力环境原位实时监测系统的海底接驳

图 9 和图 10 是从 187 天的声学多普勒流速剖面仪(ADCP)数据中截取的 9 月 5 日-10 月 1 日的数据(u 分量和 v 分量),流速单位 mm/min。ADCP 的测量深度为 836 ~ 882m,垂直分层 60 层,间隔 2m,测量精度 2min。发现在蒙特利海湾底部,流速有随深度增加而增大的现象,而且从上到下 u 分量和 v 分量都具有明显的半日潮流特征。

图 11 是从 187 天的声学多普勒流速仪(ADV)

数据中截取的 9 月 5 日 - 16 日的数据,流速单位 m/s 。ADV 距离海底高度 1.4m ,测量底边界层的高频三维的瞬时流速,测量频率 64Hz ,连续测量 1min ,

间隔 2min 。发现在蒙特利海湾底边界层, u 、 v 方向上的瞬时流速可超过 0.5m/s ,远远大于垂直速度 w ,有很强的底边界流。

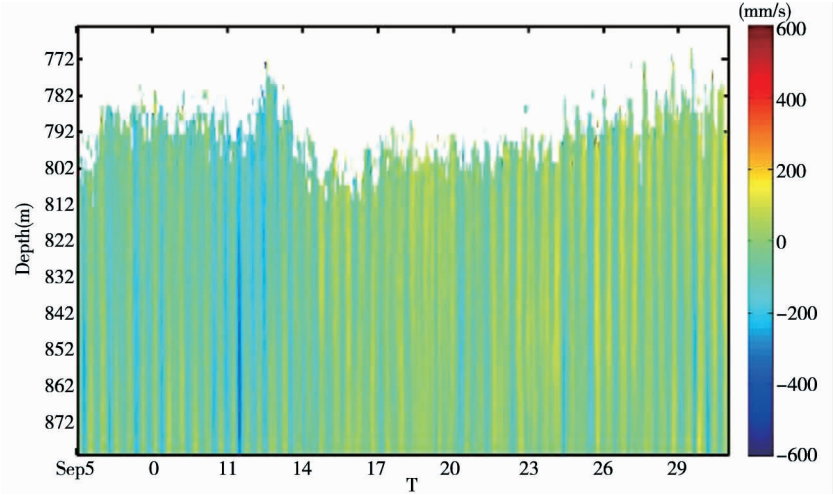


图 9 ADCP 在蒙特利海湾测得的平均流速 u 分量

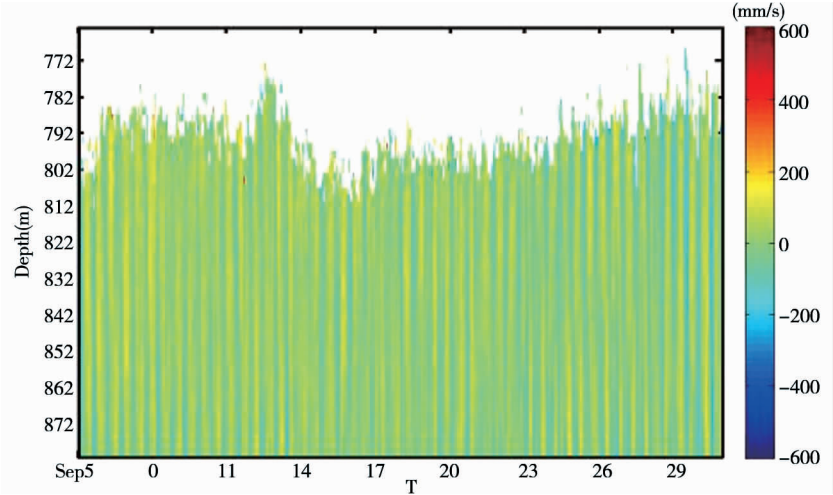


图 10 ADCP 在蒙特利海湾测得的平均流速 v 分量

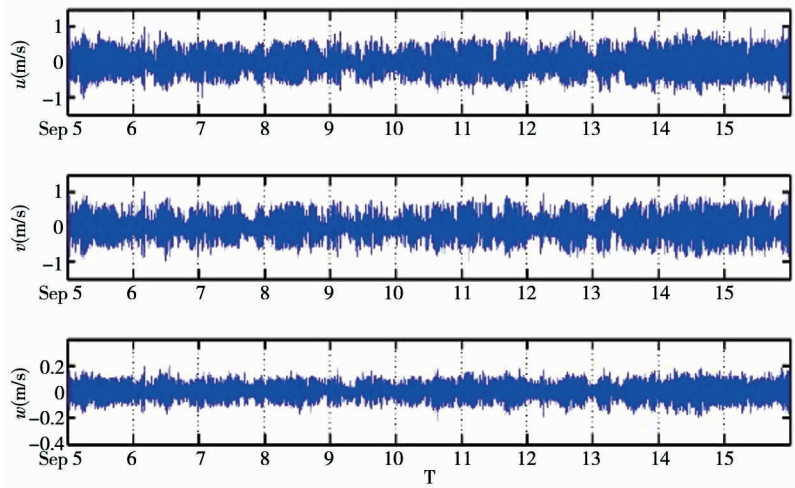


图 11 ADV 在蒙特利海湾测得的瞬时流速

美国明尼苏达大学高级研究员 Kang Ding 博士对此次试验的成功给出如下评述:“这是一个实实在在的进步,它使得中国的深海观测跨出了实质性的第一步,你们这个小组起了很关键的作用。”

科技部网站和科学网也高度评价这次海试“是我国自主研发海底观测节点关键技术的首次深海试验,也是严格遵循 MARS 网接入标准,并在国际海底观测网上进行的首次实战演练,同时此次试验也是 MARS 网上首次接入由外方研制关键节点及观测设备开展的海试。海试将有效验证我国海底观测网关键技术的性能指标,客观评价技术发展现状,并将为我国深海海底观测网技术的发展和下一步观测试验网的建设积累宝贵的经验。”

4 结 论

深海海洋动力环境原位实时监测系统的成功研制,和成功接入美国 MARS 海底观测试验网以及半年多的稳定运行,表明该系统在技术上已经达到实用的程度。其改进设计也已经作为“十二五”863 项

目“海底观测网试验系统”中的一个重要节点正在得到应用。

参考文献

- [1] 曹志敏,安伟,于新生等. 现代海底热液活动异常条件探测关键技术研究. 高技术通讯,2006,16(5):545-550
- [2] 罗续业,李彦. 海王星海底长期观测系统的技术分析. 海洋技术,2006,25(3):15-18
- [3] Barnes C, Best M, Johnson F, et al. Transforming the ocean sciences through cabled observatories: NAPTUNE-canada project. Marine Technology Reporter, 2008. 30-36
- [4] Priede I G, Solan M, Mienert J, et al. ESONET-European Sea Floor Observatory Network. Proceedings Oceans ' 04 Kobe, Japan, 2004, 2155-2163
- [5] 高艳波,李慧青,柴玉萍等. 深海高技术发展现状及趋势. 海洋技术,2010,29(3):119-124
- [6] 陈立定,梁联冠. 嵌入式 Linux 文件系统的实现及其简单应用. 微电脑应用,2009,25(8):59-64
- [7] 秦贵和,徐华中,王磊. ARM9 嵌入式技术及 Linux 高级实践教程. 北京:北京航空航天大学出版社,2005. 56-89

Research on a system for in situ real-time monitoring of deep ocean dynamical environments

Zhang Haiyan*, Li Xin*, Li Kang*, Song Zhongqiang*, Li Peiliang**

(* College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(** College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract

A system for detection of deep ocean dynamical environments was designed and implemented for long-term real-time monitoring of the ocean dynamical environment parameters in sea floor observatory networks. The system uses the marine instruments such as a conductivity, temperature, depth (CTD) detector, an acoustic Doppler current profiler (ADCP), an acoustic Doppler velocimeter (ADV), a turbidity sensor and a dissolved oxygen sensor as data acquisition devices, and sets up an embedded ARM (the acorn RISC machines) core microprocessor as the hardware platform. Its long term and real time monitoring software was designed based on the Linux operating system. From April to October in 2011, the in situ real-time monitoring system for detection of deep ocean dynamical environments ran for 187 days in the Monterey accelerated research system (MARS) on the Monterey Bay, USA. The experimental results show that the system can stably obtain the in situ data of ocean dynamical environments for a long term.

Key words: sea floor observatory network, ocean dynamical environment, in situ real-time monitoring, embedded system, Linux