海底底质声学原位测量电路控制系统研究

吕　斌[1], 祁国梁[1], 李官保[2], 王景强[2], 刘　杰[1]

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 介绍了一种液压驱动贯入式海底沉积声学原位测量系统的电路控制单元的研究实现过程, 以及该控制单元在南海北部海底沉积声学调查中的应用。该电路控制单元以 Cortex-A8 处理器为核心, 集成大容量 FLASH 存储器, 与单片机接口控制板进行串口通讯, 实现对声学发射采集单元和机械液压贯入单元的可视化控制和监测。基于该电路控制单元, 海底底质声学原位测量系统兼具自容式和在线式两种工作模式, 可自容记录或实时采集声学原位测量单元在海底的工作状态数据、海底沉积物声速和声衰减系数等声学特性数据。该声学原位测量系统的实验室联调及南海海试结果表明, 使用该电路控制单元对海底底质声学测量过程的监测与控制是有效的, 对精确获取海底底质的原位声学特性有重要作用, 可以促进海底底质声学原位测量系统的产品化。

关键词: 原位测量电路控制系统; 海底沉积物; Cortex-A8; 声学测量

中图分类号: P733. 23　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)05-0032-08

DOI: 10.11759/hykx20170828001

海洋沉积声学作为海洋学、沉积学、地球物理学、海洋工程地质学、水声学的交叉学科, 其相关领域研究仍然保持着海洋学领域前沿科学的地位[1-2]。建立典型海域的海底地声模型、海底声波传播理论、声学性质与物理性质的相关关系、声速和声衰减系数等声学参数的分布规律、声学参数预测方程等课题是海底沉积物的声学特性研究的主要内容, 这些研究必须基于大量精确的测量数据。海底取样测量和原位测量是获取沉积物声学参数的两种主要方式[3-4], 较之取样测量, 原位测量技术可避免取样过程中对沉积物结构的扰动以及沉积物所处温度和压力等环境因素的改变, 因而能够获取更为精确的底质声学特性参数。

国内外已经研制出多套海底沉积声学原位测量系统, 比较有代表性的有声学长矛(acoustic lance)、SAPPA(sediment acoustic & physical properties apparatus)系统、ISSAMS(in situ sediment geo-acoustic measurement system)测量系统等多种海底底质声学原位测量系统[5-14]。声学长矛本身没有电控系统, 它是利用设备本身的自由落体将固定在重力取样器上的声学换能器快速插入沉积物中[5-7], 这种测量方式不仅对沉积物造成很大扰动, 而且当海底底质较硬时, 重力取样管很难插入海底沉积物中, 导致测量失败。SAPPA 系统同样没有电控系统, 它是利用弹簧重锤快速捶击使安装有声学换能器的探杆插入沉积物中[8], 这种方法存在声学长矛同样的缺点。ISSAMS 系统可通过电路控制系统, 利用液压装置将安装有声学换能器的探杆匀速插入沉积物中, 但测量深度只有 0.3 m, 且 ISSAMS 系统需要由船舶甲板操控人员实时控制, 没有自容存储功能[9-11, 14]。国内的海底沉积声学原位测量技术研究起步较晚, 陶春辉等[12]开发出一种多频海底声学原位测量设备, 并进行了海试, 该设备的电控系统只能进行实时控制声学单元, 不具备自容工作模式, 也不能够控制设备的机械贯入单元。郭常升等[13]同样对海底沉积声学原位测量技术进行了相关的实验研究工作, 通过在线模块实时监测海底声学的原位测量过程。由上述发展的几种底质声学原位测量技术可知, 实现对测量过程的可视化控制和状态监测, 兼具自容存储和在线工作模式, 适应不同科考船的缆绳条件, 是海底底质声学原位测量

收稿日期: 2017-08-28; 修回日期: 2017-11-30

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(201405032)

[Foundation: the Ocean Public Welfare Scientific Research Special Appropriation Project, No. 201405032]

作者简介: 吕斌(1980-), 男, 山东日照人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为单片机及嵌入式系统, 深远海探测技术, E-mail: lvbin20031@163.com

技术发展的具体需求，也是实现原位测量系统产品化和底质声学调查业务化的必要条件。

本文针对海底底质声学原位测量技术发展的需求，介绍了一种以 Cortex-A8 处理器为核心的电路控制系统的实现过程。该系统集成必要的硬件资源，可按预先设定的工作参数，实现海底底质声速和声衰减系数自容存储式自动测量与实时在线操控两种工作模式，既可以对声学发射采集单元和机械液压单元进行控制，又可以监测声学原位测量系统在海底的工作状态。此外，本文还介绍了系统联调以及系统在南海北部海域的海试和应用情况。

1 电路控制系统设计

1.1 控制系统总体设计

海底底质声学测量控制系统分为水下监测装置(现场测量系统)和水上控制装置(甲板单元)两部分。其中，水下检测装置用于投放到调查海域，对海底底质声学参数进行原位测量，并可以将其采集到的数据实时地上传至水上控制装置，通过水上控制装置显示给海洋科研人员，从而使海洋科研人员能够实时地获取海底底质声学特性的测量数据，为研究海洋声场环境提供基础数据。

海底底质声学现场测量电路控制系统(图 1 所示)即特指上述的水下监测装置，它主要设置有视频及照明装置、高度计、声学采集单元、控制板、液压驱动装置和探杆等组成部分。其中，视频及照明装置用于照亮和拍摄海底的现场环境，并生成海底影像数据及时地上传至水上控制装置，以便于海洋科研人员实时地观测海底的真实环境。高度计用于测量水下检测装置距离海底的高度，并生成检测信号发送至控制板，经由控制板上传至水上控制装置，以便于海洋科研人员能够准确地判断出水下检测装置是否接近海底，继而在水下检测装置快要触底时，及时地向控制板发出控制指令，以启动液压驱动装置运行，将探杆插入到海底中。在探杆上安装有声学换能器，在探杆插入到海底底质后，通过声学换能器发射和采集穿过海底沉积物的声波信号。同时，在水下检测装置快要触底时，控制板控制声学采集单元启动运行，采集海底的声学参数，并上传至水上控制装置。当探杆上的声学换能器完成对海底沉积物的声学参数的采集工作后，控制板启动液压驱动装置再次运行，控制探杆上提，离开海底，完成本次测量任务。

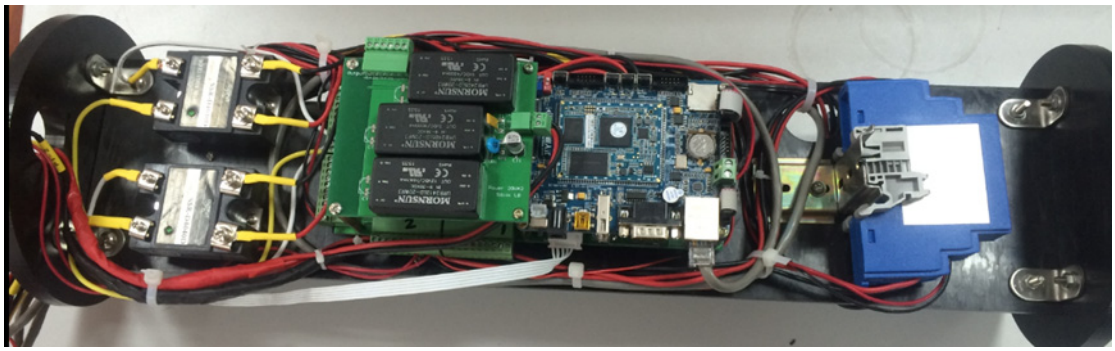


图 1　海底沉积声学原位测量控制系统

Fig. 1　In-situ sediment acoustic measurement control system

1.2 控制系统硬件设计

海底底质声学现场测量控制系统分为水上控制装置与水下检测装置两大部分，其原理框图如图 2 所示，水下检测装置主要包括主控部分、控制对象部分及测量单元部分。

主控部分是水下检测装置的核心，涵盖了电路系统硬件设计的主要内容，包括 ARM 主控板、单片机接口控制板，电源转换板等。

在控制对象部分，为了控制探杆下插和上提，在液压驱动装置中设置有直流电机、液压泵、油缸、下插电磁铁和上提电磁铁等主要组成部分。其中，直流电机接收控制板输出的启停指令，在控制板的控制作用下启动运行，继而驱动液压泵向油缸供油。为了使油缸中的活塞可以在油缸内做往复运动，继而带动与活塞连接的探杆下插或上提，在液压泵与油缸之间设置两条油路，并在其中一条油路上安装下插电磁铁，而在另外一条油路上安装上提电磁铁，通过控制两个电磁铁的开关状态，以改变两条油路的通断状态。为了对下插电磁铁和上提电磁铁的开关状态进行有效控制，采用在下插电磁铁和上提电

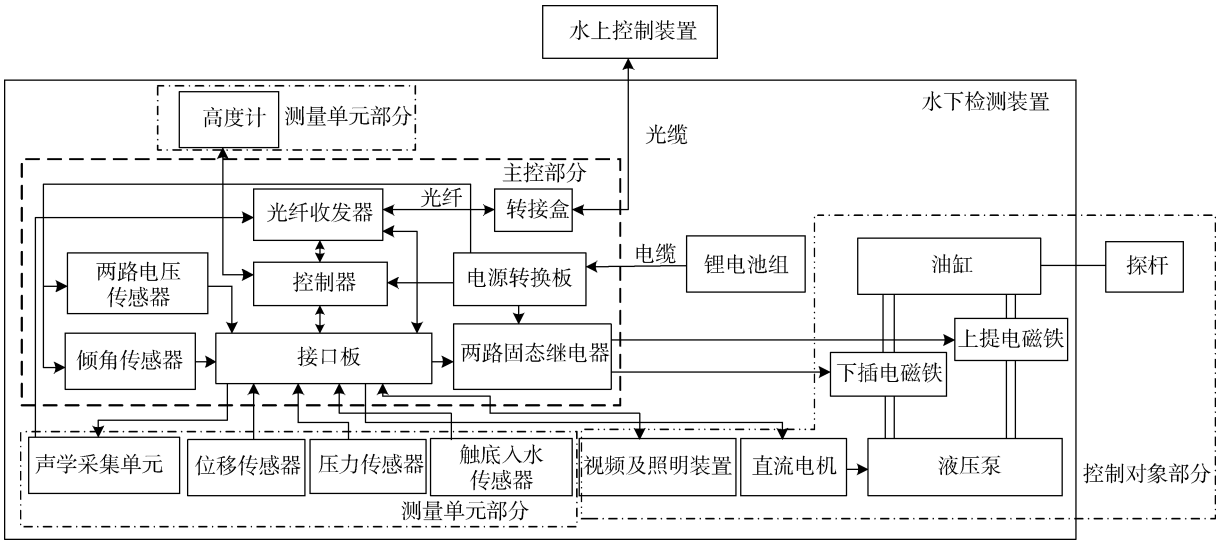


图 2　海底沉积声学原位测量控制系统原理框图

Fig. 2　Diagram of the in-situ sediment acoustic measurement control system

磁铁的供电回路中分别串联固态继电器的方式，构建下插电磁铁和上提电磁铁的供电回路。控制板通过控制两个固态继电器导通或关断，继而改变下插电磁铁和上提电磁铁的开关状态，进而控制探杆下插或上提。

在测量单元部分，为了对探杆插入海底的深度以及回收位置进行准确限位，在油缸中安装有位移传感器，用于检测活塞的运行位置，并生成检测信号发送至控制板。控制板根据位移传感器反馈的检测信号判断探杆的升降位置，通过控制下插电磁铁或上提电磁铁关断，以对探杆的升降位置实现准确限位。在安装有下插电磁铁的油路上还设置有压力传感器，采集油路压力并反馈至控制板，用于对海底地质的硬度以及液压驱动装置是否发生故障实现有效检测。此外，在下插电磁铁和上提电磁铁的供电回路中分别连接一路固态继电器，控制板通过控制固态继电器通断，进而控制下插电磁铁和上提电磁铁打开或关闭。在水下检测装置中还设置有一个倾角传感器，检测水下检测装置的倾斜角度并反馈至控制板。

为了使水下检测装置具有自供电的能力，在水下检测装置中还设置有电池组、电源转换板和电压传感器；电源转换板接收电池组输出的供电电源，并转换成水下检测装置中各用电负载所需的工作电源，为各用电负载供电；电压传感器检测电源转换板输出的工作电压，并反馈至控制板。使海底底质声学现场测量装置在具备现场原位在线检测能力的同时，兼具有传统的自容式自动检测工作模式(即，水下检测装置自动完成海底底质声学参数的采集和保存工作，待打捞上岸后，供科研人员下载、分析的工作模式)，在水下检测装置中还设置有触底入水传感器，其在入水并接触到海底时生成触底信号发送至控制板，以通知控制板可以开始执行海底声学参数的采集工作。

控制板通过接口板接收各类传感器反馈的采集信号，并将接收到的采集信号转换成上传数据，以光通信的方式上传至水上控制装置。在水下检测装置中还设置有光纤收发器和转接盒，控制板将上传数据发送至光纤收发器，经由光纤收发器转换成光信号后，通过光纤传输至转接盒，转接盒将光信号通过光缆上传至的水上控制装置。

1.2.1　ARM 主控板硬件设计

ARM 主控板(如图 3 所示)包括 FET335xS-II 核心板与 OK335xS-II 底板。FET335xS-II 核心板集成 TI 公司的 Cortex-A8 处理器 AM3354，集成的板载 FLASH 存储器，可满足海底声学原位探测嵌入式系统运行 Linux 操作系统的需求。

OK335xS-II 底板主要设计硬件资源包括 1 路百兆以太网接口用于 ARM 主控板与甲板上位机进行以太网通讯，并集成 5 路 UART(1 路 RS-232，3 路 LVCMOS(3.3V)，1 路 RS485)。其中，1 路 RS232 与声学子系统进行通讯；1 路 RS485 与高度计进行通讯；3 路 LVCMOS(3.3V)首先连接单片机接口控制板上的 USART 扩展单元，其中一路 RS232 连接甲板单元，

用于初始设置系统参数，并作为以太网通讯出现故障的冗余后备通讯系统。

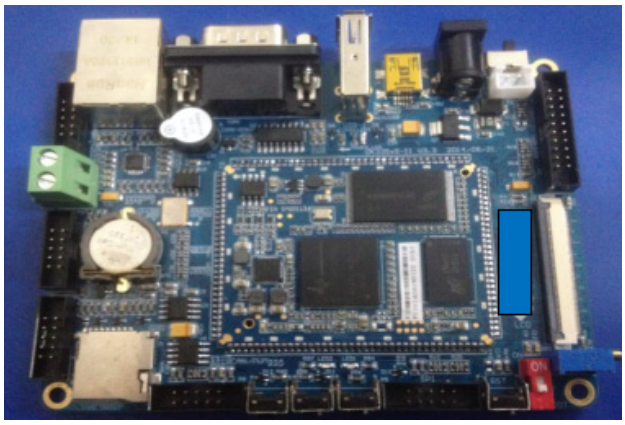


图 3　ARM 主控板
Fig. 3　ARM main control board

1.2.2　单片机接口控制板硬件设计

选用 Microchip 公司的 PIC18F4520 作为核心控制芯片，其 SPI 接口连接 12 位 11 路 ADC TLC2543，读取压力传感器、位移传感器、倾角传感器及电压传感器数据。单片机接口控制板设计有 7 路 GPIO 接口，其中 5 路输出控制下插与上提电磁铁、直流电机和照明与视频开关，另外 2 路用于读取触底和入水传感器的检测输入信号。PIC18F4520 集成的 USART 主控同步串口通讯模块用于与 ARM 核心板进行实时通讯，单片机接口控制板如图 4 所示。

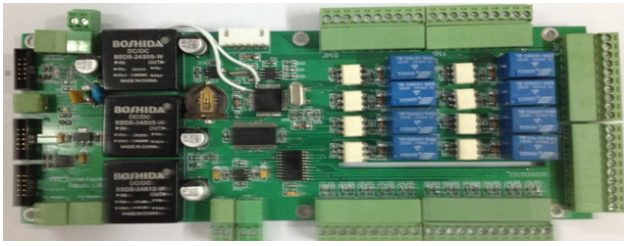


图 4　单片机接口控制板
Fig. 4　MCU interface control board

1.3　控制系统软件设计

海底底质声学现场测量电路控制系统软件设计包括 ARM 核心板 Linux 软件设计和单片机接口控制板的下位机软件设计两部分内容。以 ARM 与 Linux 为核心的嵌入式操作系统设计，增强了控制系统软件多任务并发处理与调度能力，增强了软件功能[15]。

1.3.1　ARM 核心板 Linux 软件设计

ARM 核心板 Linux 软件设计主要包括了 5 个主要部分，如图 5 所示。

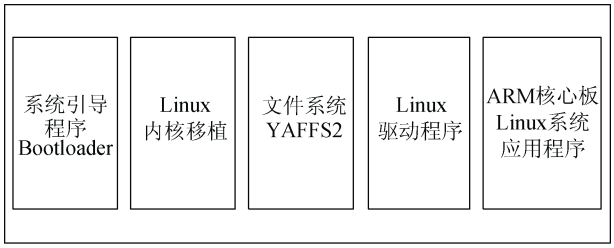


图 5　ARM 核心板软件功能框图
Fig. 5　Shore station software function diagram of the ARM main control board

系统引导程序 Bootloader——用于初始化 ARM 控制板硬件和引导 Linux 系统内核。

Kernel——经裁剪的嵌入式 Linux 内核，Linux 运行的核心部分。

YAFFS2——负责 Linux 操作系统的文件管理。

Driver——Linux 底层驱动程序，包括 FLASH 驱动、以太网控制器驱动、串口驱动、USB 驱动，ADC 驱动，GPIO 驱动，MMC/SD 卡驱动程序等。

应用程序——即 ARM 核心板运行的主程序，该程序建立 2 路 UDP 的 Socket 以太网通讯链路，1 路 UDP 用于定时接收单片机接口控制板采集的各传感器数据，并将数据包上传给水上控制装置；另 1 路 UDP 用于上位机对 ARM 核心板发送各项控制指令及设置系统参数。

1.3.2　单片机接口控制板软件设计

海底底质声学现场测量系统单片机控制软件主要功能包括，实现系统自容工作模式中的触底与延时两种工作方式的控制功能，实时在线模式下的系统控制功能，实时传送、记录和存储系统工作进程、工作状态以及各传感器数据，与 ARM 核心板通过串口交互控制指令与实时测量数据。其中，自容工作模式指的是设置好系统各项工作参数后，设备断电，系统在入水后按设定的参数自动开始工作，并将工作状态记录存储到 FLASH 存储器中，待设备完成工作回收到船上甲板后，等过下载命令，将数据上传到上位机中；而在线工作模式指的是设备入水后，岸上操作人员通过水下视频照明单元，实时操纵控制设备的各部件，完成声学采集等功能。

海底底质声学现场测量系统单片机控制软件有自容和在线两种工作模式，而自容工作模式又有触底和延时两种工作模式，软件主程序流程框图如图 6 所示。进入主程序循环后，首先读取设置的系统参数，当读取到开始工作的指令标志后，软件判断按何种

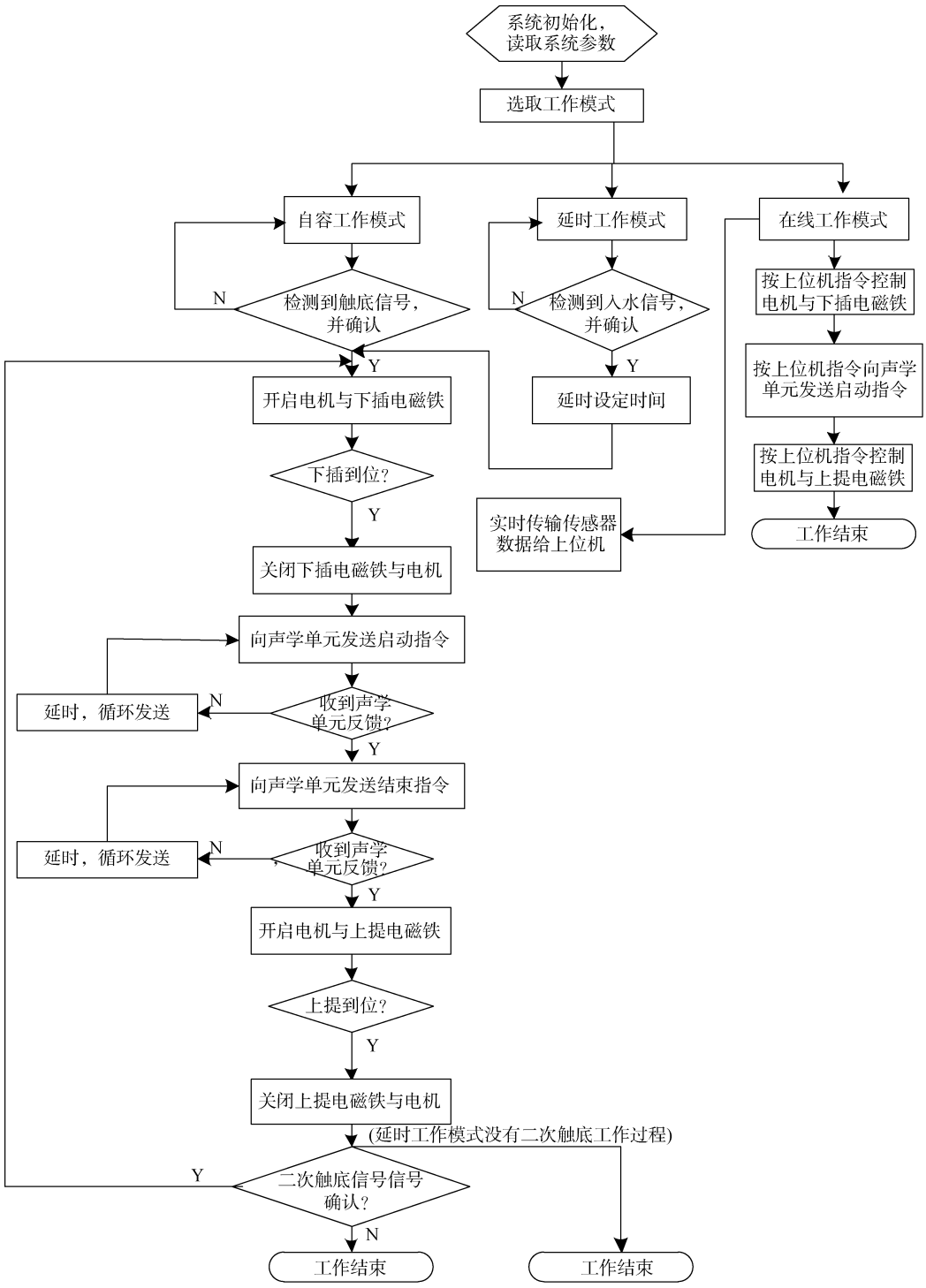


图 6　单片机主程序流程图

Fig. 6　Flow chart of the MCU main program

工作模式运行程序。若系统判断进入自容工作模式，测检测判断触底传感器信号，若检测到触底信号并完成确认，则开启直流电机与下插电磁铁，进而完成控制流程；若未检测到触底信号，则返回等待进行循环判断。若系统判断进入延时工作模式，测检测判断入水传感器信号，若检测到入水信号并完成确认，则按设定的延时时间等待，待延时时间结束后，则开启直流电机与下插电磁铁，进而完成控制流程；若未检测到入水信号，则返回等待进行循环判断。若系统判断进入到在线工作模式，则按上位机控制指

令对直流电机、下插和上提电磁铁、声学单元等进行操控，此时程序开始实时上传并存储各传感器数据及工作状态，直至整个控制流程结束。

1.4 实验室系统联调

实验室系统联调(图 7)内容包括自容与在线两种工作模式下的直流电机、下插与上提电磁铁、声学通讯及视频照明的开关控制，系统参数的设置与读取，触底入水信号的判断，整体设备自动工作流程，数据存储与下载等内容。

经过大量试验及进一步系统优化与改进，海底底质原位声学测量电路控制系统达到了设计要求与海试标准。图 8 为项目组 2016 年 5 月 12 日一次联调试验得到的数据曲线与自容模式工作下的进程记录，当系统判断到触底后，声学探杆最大下插深度 633 mm，下插时液压站最大压力 7.0 Mpa，与声学采集单元成功通讯后，声学探杆上提完成本次测量，上提时液压站最大压力 16.1 Mpa。

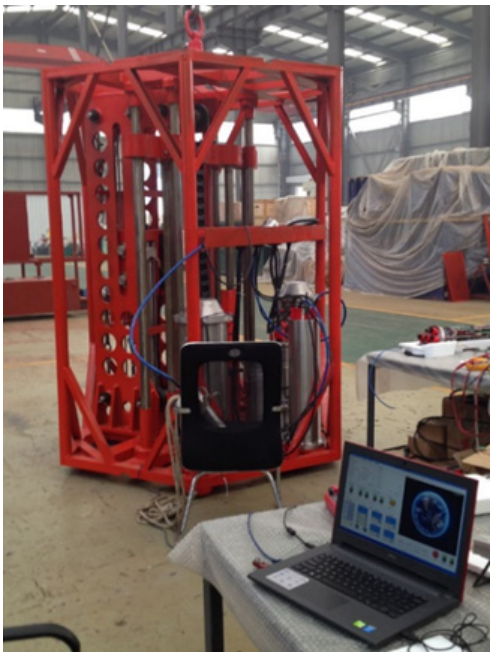


图 7 实验室系统联调

Fig. 7 System test in the laboratory

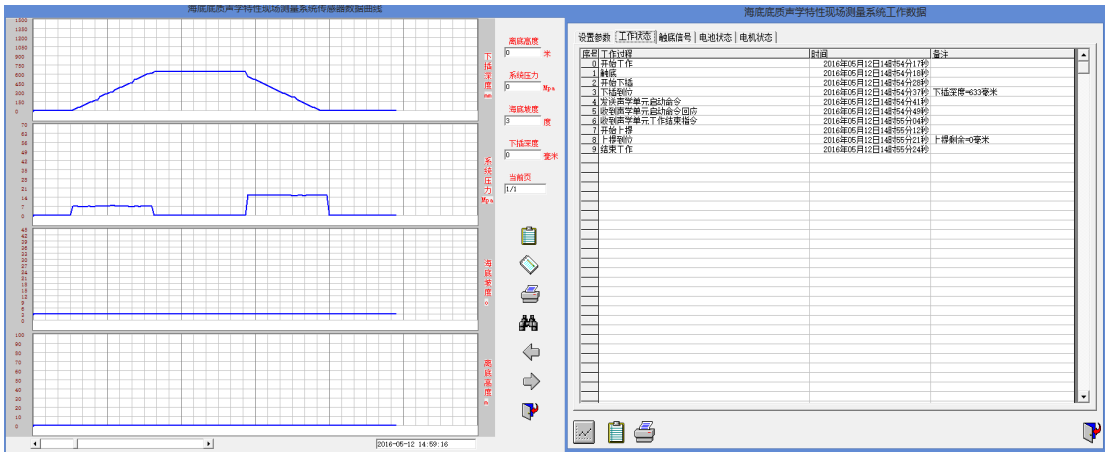


图 8 联调试验数据曲线和工作进程记录

Fig. 8 Data curves and working process records in the system test

2 海试结果

2016 年 7—8 月，搭载“长和号”科考船，利用液压式海底沉积声学原位测量系统，在南海北部进行了 70~1 200 m 水深范围内 16 个站位的海底沉积物声学自容式原位测量，如图 9 所示，获得了表层沉积物的声速和声衰减系数等。2017 年 6 月，搭载“向阳红 01”科考船，利用该测量系统和船载万米光电复合缆，在南海北部深度约为 3 000 m 的区域，进行了底质声学在线控制式原位测量。在两次海试过程中，海底声学原位测量电控系统工作正常，性能稳定。电控系统在自容与在线两种工作模式下，均能实现声学测量的有效控制，并能够监测设备在水下和海底测量过程的工作状态，获取海底不同层位底质的声学特性数据。

3 结语

本文介绍了一种海底底质声学现场测量电路控制系统的软硬件设计与实现过程，以及系统实验室联调与海试应用情况。该电控系统实现了对海底沉积物声速和声衰减系数的原位测量过程控制与实时监控。南海海试中，海底底质声学现场测量系统最大



图 9　南海北部海试
Fig. 9　Sea test in the northern South China Sea

工作水深为 3000 m。使用该系统在南海北部获得了16个站位不同类型沉积物的声学特性原位测量数据，系统在线与自容两种工作模式下，过程控制功能正常、性能稳定。在系统实际应用过程中，发现设备的控制功能还存在一些不足之处，例如缺少直流电机运转、声学探杆下插异常等故障诊断与应急处理功能，控制流程和时序也有待于进一步优化。

参考文献:

[1] Jackson D R, Richardson M D. High-frequency seafloor acoustics[M]. New York: Springer, 2007: 1-5.

[2] 王景强. 海底底质声学原位测量技术和声学特性研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2015.
Wang Jingqiang. Study of the in-situ acoustic measurement technique and geoacoustic properties of marine sediments[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2015.

[3] Richardson M D, Briggs K B, Bentley S J, et al. The effects of biological and hydrodynamic processes on physical and acoustic properties of sediments off the Eel River[J]. California. Marine Geology, 2002, 182(1): 121-139.

[4] 阚光明, 刘保华, 韩国忠, 等. 原位测量技术在黄海沉积声学调查中的应用[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 88-94.
Kan Guangming, Liu Baohua, Han Guozhong, et al. Application of in-situ measurement technology to the survey of seafloor sediment acoustic properties in the Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(3): 88-94.

[5] Fu S S, Wilkens R H, Frazer L N, et al. Acoustic lance: new in situ seafloor velocity profiles[J]. J Acoust Soc Am, 1996, 99(1): 234-242.

[6] Gorgas T J, Kim G Y, Park S C, et al. Evidence for gassy sediments on the inner shelf of SE Korea from geoacoustic properties[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23: 821-834.

[7] Fu S S, Wilkens R H, Frazer L N. In situ velocity profiles in gassy sediments: Kiel Bay[J]. Geo-Marine Letters, 1996, 16(3): 249-253.

[8] Best A I, Roberts J A, Somers M L. A new instrument for making in-situ acoustic and geotechnical measurements in seafloor sediments[J]. Underwater Technology, 1998, 23(3): 123-131.

[9] Buckingham M J, Richardson M D. On tone-burst measurements of sound speed and attenuation in sandy marine sediments[J]. IEEE J Oceanic Eng, 2002, 27(3): 429-453.

[10] Richardson M D, Briggs K B. In situ and laboratory geoacoustic measurements in soft mud and hard-packed sand sediments: implications for high-frequency acoustic propagation and scattering[J]. Geo-Marine Letters, 1996, 16: 196-203.

[11] Thorsos E I, William K L, Chotiros N P, et al. An overview of SAX99: acoustic measurements[J]. IEEE J Oceanic Eng, 2001, 26(1): 4-24.

[12] 陶春辉, 金肖兵, 金翔龙, 等. 多频海底声学原位测试系统研制和试用[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 46-50.
Tao Chunhui, Jin Xiaobing, Jin Xianglong, et al. Development of multi-frequency in-situ marine sediment geoacoustic measuring system[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(2): 46-50.

[13] 郭常升, 窦玉坛, 谷明峰. 海底底质声学性质原位测量技术研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(8): 6-10.
Guo Changsheng, Dou Yutan, Gu Mingfeng. Development of in situ marine sediment acoustic measurement technique[J]. Marine Sciences, 2007, 31(8): 6-10.

[14] 邹大鹏, 阚光明, 龙建军. 海底浅表层沉积物原位声学测量方法探讨[J]. 海洋学报, 2014, 36(11): 111-119.
Zou Dapeng, Kan Guangming, Long Jianjun. Methods of in-situ acoustic measurement of seafloor surface sediment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(11): 111-119.

[15] 吕妙莉. 基于 LabVIEW 的海底沉积物超声测试系统的软件设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2012.
Lü Miaoli. Design of software about marine sediment ultrasonic testing system based on LabVIEW[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2012.

Technology of a circuit control system for in-situ acoustical measurement of ocean floor sediments

LÜ Bin[1], QI Guo-liang[1], LI Guan-bao[2], WANG Jing-qiang[2], LIU jie[1]

(1. Institute of Oceanographic Instrmentation, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266001, China; 2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Aug. 28, 2017
Key words: circuit control system in situ measurement; seafloor sediments; Cortex-A8; acoustic measurement

Abstract: A self-contained circuit control system for in-situ acoustical measurement of seabed sediment using hydraulic driving penetration is introduced. Its application in the northern area of the South China Sea is described in detail. The system used an Cortex-A8 processor and an integrated, large-capacity FLASH memory, which communicated with the microcontroller unit (MCU) interface control board by serial port. It was designed for in- situ video control and monitoring of sound speeds and attenuation coefficients in sea-floor sediments. The circuit control system, which works in either capacitance or online mode, can record acoustical data or measure it in-situ in real time. The acquired data included working-state data of the sea bottom and seabed sediment acoustical characteristics such as sound velocity and acoustic attenuation coefficient. Results from the laboratory and the South China Sea showed that the control system is effective in monitoring and controlling the process of seabed sediment acoustical measurement. It plays an important role in the in-situ measurement of the acoustical quality of the seabed and promotes the design of an underwater in-situ acoustical measurement system.

(本文编辑：刘珊珊)