

基于海底钻机的多功能原位测试系统 开发与应用

陈奇¹, 耿雪樵¹, 万步炎², 罗柏文², 石志鹏³

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760;

2. 湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 武汉磐索地勘科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于海底钻机的原位测试是一种新型的海底地层测试方式. 结合“海牛号”60 m 海底钻机的实际工况需求, 研制一套以静力触探为技术基础的多功能原位测试仪, 可以在水下 2 000 m 的海底实现对锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力、温度、电阻率和视频的原位信息采集. 本文从测试方法、系统结构、探头传感器、数据采集等方面进行了详细介绍, 现场试验显示多功能原位测试仪能够按照预定设计完成原位测试的全部功能, 采集的数据与海床式静力触探系统对比具有极强的一致性.

关键词: 海底钻机; 原位测试; 静力触探

中图分类号: TU415

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2017)03-0010-06

Multi-function in-situ tester development based on seabed drill rig

Chen Qi¹, Geng Xueqiao¹, Wan Buyan², Luo Bowen², Shi Zhipeng³

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China;

2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Wuhan Peneson Geological Exploration Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: The in-situ testing based on the seabed drill rig is a new way to place sensors into the earth. Combined with the actual working condition of seabed drill rig, a set of multi-function in-situ tester based on cone penetration testing (CPT) was developed, which was able to capture tip-resistance, sleeve-friction, pore-pressure, temperature, electrical-resistivity and video under 2 000 m water. The test method, system architecture, cone and test sensors, and data acquisition were described in detail. The field test confirmed that the in-situ tester work properly in accordance with a predetermined design, and the test data is consistent with the data of seabed CPT system.

Keywords: seabed-drill rig; in-situ test; CPT

温度、压力等原位测试数据是海洋地质调查的重要内容,也是海洋油气、天然气水合物及固体矿产等资源勘查和海洋工程勘察的重要参数. 获取海底地层的温度、压力等原位数据一般需要将安装有多种传感器的原位测试探头贯入待测地层之中,可以在贯入过程中采集数据(路径法),也可以在贯入预定位置后采测数据(定点法). 为了将原位测试探头贯入待测地层,近年来,世界部分海洋强国在海底钻机中增加原位测试功能是一种较为成功的尝试,提供了一种新型的原位测试探头贯入方式^[1-3].

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0307500); 国家自然科学基金资助项目(51705145; 51779092)

通信作者: 陈奇(1981-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋地质装备与岩土机电工程研究. E-mail: qenchi@126.com

在国家“十二五”863计划支持下,湖南科技大学联合广州海洋地质调查局、中国科学院海洋研究所共同申请并研发了一套可工作于水下3 000 m,钻探取样深度达60 m的“海牛号”深海海底钻机,并在此基础上开发了一套“基于海底钻机的原位测试仪”,在我国首次实现了基于海底钻机的原位测试。

1 国内外研究与应用现状

原位测试探头贯入待测地层的方法多种多样,也对应于多种贯入设备^[4],如重力贯入式——依靠重力将原位测试探头贯入至地层之中,典型设备如德国布莱梅大学研制的FF-CPT坠落式触探系统^[5];海床贯入式——依靠较为大型的水下电动或液动设备将原位测试探头贯入至地层之中,典型设备如荷兰范登堡公司的ROSON海床式静力触探系统^[6];井下贯入式——依靠海洋钻机,以钻孔孔底为基准将原位测试探头贯入至地层之中,典型设备如广州海洋地质调查局研制的基于Downhole工艺的海底静力触探系统^[7];平台贯入式——将陆地的触探系统安装在相对于海底静止的平台上实现贯入。

在海底钻机中增加原位测试系统实现了海床贯入式和井下贯入式的有机结合。首先,“海牛号”海底钻机是一种钻探系统完全工作于海底(海床面)的钻探设备,具备了海床式贯入设备的所有优势:触探基准唯一、贯入路径连续、便于后期数据处理;其次,原位测试仪工作于钻井井下,借助钻杆的导向,可以实现大深度探测^[5],探头贯入至钻探未扰动的孔底沉积物开展真正的原位测试,测试数据真实、可靠。

鉴于上述优点,世界上主流的海底钻机均配置了原位测试系统,如英国地质调查局(BGS)研制的RockDrill-2,澳大利亚BENTHIC公司研发的PROD(Portable Remotely Operated Drill),德国教育研究部与布莱梅州政府共同出资建造的MeBo(Meeresboden-Bohrgerät),美国Williamson& Associates公司研制的ACS(Automatic Coring System)和A-BMS,美国HELIX CANYON OFFSHORE公司研发的ROVDrill,加拿大CELLULA公司的CRD100等等。测试信息包括力、热、光、电、声等多学科领域的地层参数,最大测试深度突破100 m^[1]。

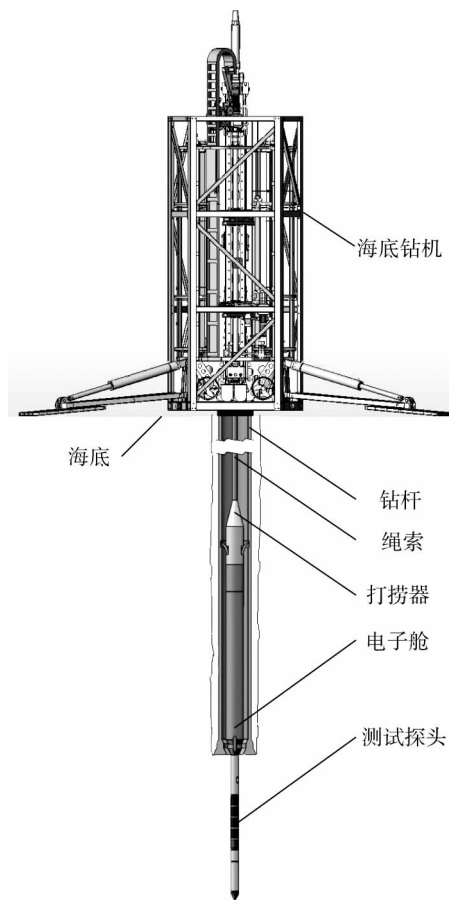


图1 基于海底钻机的原位测试系统原理图

2 基于海底钻机的原位测试仪开发

2.1 操作工序与设计需求

“基于海底钻机的原位测试仪”是一套以多功能静力触探为基础,并安装在“海牛号”海底钻机内部的自容式仪器,工作原理如图1所示,具体的操作工序如下:

- 1) 钻机机械手将原位测试仪移动至钻探井口,开始数据采集记录;
- 2) 通过钻机的绳索打捞器将原位测试仪下放至钻柱底部,同时绳索取芯机构的轴向定位装置与钻杆的定位槽卡紧,用以在贯入过程中提供贯入反力;
- 3) 回收绳索打捞器至钻机本体,之后利用钻机给进油缸和钻杆将原位测试仪的探头贯入至海底沉积物,在贯入路径上采集地层的锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力、电阻率、土体图像等原位测试数据;
- 4) 探头贯入至预定的地层后停止贯入,采用定点法采集温度、孔隙水压力等参数的原位消散数据;
- 5) 继续贯入或利用绳索打捞器将原位测试仪提升至钻机本体;
- 6) 钻机机械手将原位测试仪移至取芯管库固定卡位,停止数据采集记录。

作为海底钻机可随时调用的一个功能模块,原位测试既要保证地层原位数据的可靠采集,又要保证与海底钻机在机械结构和通讯系统上的配合与兼容,具体的要求主要包括:

- 1) 机械结构要求。(1)总长度 ≤ 2 m,便于将原位测试仪安放在钻杆库中;(2)探测仪外径 $\leq \Phi 73$ mm,

便于在钻杆中下放和回收;(3)探头外径 $\leq \Phi 60$ mm,便于探头从钻头中伸出与缩回;(4)探头长度 ≤ 600 mm,探头部分在工作时将直接贯入至海底沉积物,为保证安全,长度应该在不影响测试效果的前提下尽量缩短。

2)电气与测控要求.电池供电、SD卡存储或水下无线通讯至钻机本体;待机时间不小于2个月,工作时间不小于1周,满足海底钻机一次出海试验的周期。

3)测试参数与精度要求.锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力、电阻率、温度和土体摄像;综合测试精度优于0.5%,土体摄像不小于30万像素。

2.2 系统总体设计

根据设计需求,基于海底钻机的原位测试仪机械结构如图1所示,主要包括耐压电子舱、钻井液导流套、多功能原位测试探头3大部分,而与钻机绳索打捞器对接的轴向定位器部分则直接使用取芯钻具的结构,耐压电子舱的上部采用螺纹与轴向定位器连接。

电子舱在满足外径 $\Phi 73$ mm的前提下,着重考虑了舱体的材料选型和耐压密封结构,材料选用导磁性能较好的不锈钢,可以通过电子舱内部的干簧管检测电路与钻杆库卡槽上的磁铁共同确定工作状态,便于测控电路及时响应各种状态的改变;电子舱内部安装有电池组、数据采集和存储电路,用于对探头传感器供电,同时采集地层数据并保存在内存中;电子舱与探头之间采用水密接插件连接。

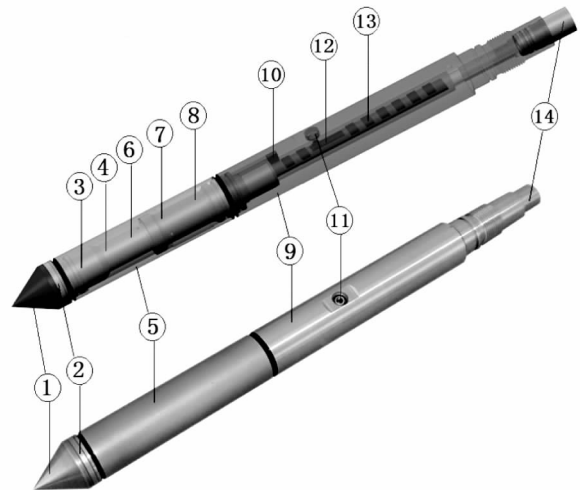
钻井液导流套位于电子舱与原位测试探头之间,主要起到3个方面的作用:整个原位测试仪下放到孔底时的轴向定位,与轴向定位器一起限制整个仪器在钻杆内的轴向运动;电子舱与原位测试探头之间的变径,探头按照国际标准外径为35.7 mm,但电子舱内部安装有电池、采集电路等直径较大,必须通过变径实现连接;变径圆台面上的凹槽用于导流钻井液,当钻机给进油缸带动钻杆向下运动时,钻杆周边地层的摩擦力不容忽视,足够大时甚至可以完全抵消给进力,此时在钻杆内给予一定压力的钻井液可以大大降低地层对钻杆的摩擦力,使得原位测试能够达到更深的地层。

多功能原位测试探头是直接与土体接触并获得土体相关信息的核心部件,自行开发的原位测试探头以国际标准的静力触探探头为基础,并进行相关功能扩展,如图2所示,最终满足在水深2 000 m海域实施钻探地层的原位测试。

2.3 原位测试探头开发

在海底工作的多功能原位测试探头需要在陆地探头有关外型尺寸、材料选择、内部结构、加工精度、传感性能、电路性能、通用接口、标定记录等方面的基础上重点考虑防腐、耐压、密封以及数据校正等问题,孔隙水压力传感器还要考虑大量程静水压力对高精度孔隙水压力测量的影响,图2所示为海洋数字式多功能静力触探探头三维图及实物照片,该探头已获得国家实用新型专利(ZL201020281748.0)。

常规的三桥静力触探探头一般只能获得锥尖阻力、侧壁摩擦力和孔隙水压力3个土体力学指标,为了在锥进的过程中获得更多的参数,自主研发的多功能探头增加了温度、探头倾斜、土体摄像、电阻率等功能,其中温度、探头倾斜与土体摄像的传感器安装位置如图2所示,均位于力学检测传感器的后部,其中温度传感器采用导热硅胶紧贴于探头尾管的内壁;探头倾斜传感器采用X,Y双轴倾斜芯片直接安装在电路板上,通过X和Y轴的倾角即可计算出探头轴线Z与铅垂线的倾斜夹角;土体摄像的照明和图像采集部分安装在电路板上,对应的尾管处安装有高强度玻璃并做耐压密封处理;电阻率探头则采用四个环型电极的方式进行测量,与之对应的将增加探头的长度,具体的测量原理,机械结构及实现方式详见文献[8]。



1-锥尖; 2-透水圈; 3-孔隙水压力传感器; 4-空心顶柱;
5-侧壁摩擦筒; 6-端阻应变桥; 7-侧压筒; 8-侧阻应变桥;
9-尾管; 10-温度传感器; 11-蓝宝石玻璃; 12-摄像头;
13-检测电路板; 14-水密电缆接头

图2 自主研发的海洋数字式多功能静力触探探头

2.4 数据采集与通讯

数据采集模块的功能框图如图3所示,主要包括信号调理电路、模数转换电路、中央处理电路、通讯电路、数据存储电路、时钟电路、加速度电路、启停控制电路、视频编码电路和视频存储电路。数据采集模块中大多采用了较为常规的电子电路,但结合整套原位测试仪的测试方法和工作过程,启停控制电路、加速度电路、时钟电路在数据采集模块中起到了至关重要的作用。

2.4.1 启停控制电路

由于原位测试仪是一个独立的自容式仪器,因此在电池供电方式下实现启停控制是实现节省耗电量、延长工作时间的重要措施。结合海底钻机的原位测试方法及工作过程,设计了一种非接触式的启停控制电路,即在钻机本体内安放原位测试仪的卡位位置安装强磁,而在电子舱内部对应的位置安装强磁检测电路^[9]。

当原位测试仪安放于钻机本体的卡位时,数据采集电路处于休眠状态,功耗极其微弱,可实现长达1年的待机状态;当机械手抓取原位测试仪至井口时,强磁检测电路由于无法连续的实现对强磁的检测识别,将立即触发数据采集电路从待机状态进入数据采集的工作状态;而当完成原位测试后,原位测试仪被机械手移回至原来的卡位,强磁检测电路检测到连续的强磁,就使数据采集电路再次从工作状态进入待机状态。

2.4.2 加速度电路

基于海底钻机的原位测试仪以静力触探为技术基础,而静力触探的国内外标准规范均要求探头在海底沉积物中必须实现 $2 \text{ cm/s} \pm 10\%$ 的匀速贯入,否则测试数据的真实性和可靠性会受到影响,为此,海底钻机的给进油缸安装有精度优于 1 mm 的磁致伸缩位移传感器并采用开环控制系统实施速度控制。然而,海底钻机作为非专业的静力触探贯入设备,开环的速度控制方式往往难以获得较好的控制精度,因此,采集电路中增加了加速度传感器及其检测电路,通过实时的加速度数据可以校正探头非匀速贯入时的误差,尤其是对探头锥尖阻力和侧壁摩擦力造成的影响^[10-12]。

2.4.3 时钟同步电路

原位测试的目的是要获得测试数据与地层深度的对应关系,但自容式原位测试仪自身无法获得地层深度,而只能以时间为基准记录所采集到的测试数据,地层深度的获得则只能依靠钻机给进油缸的位移测量传感器,因此就需要采用时间同步法开展数据采集。在测试过程中,钻机以时间为基准记录测试深度,原位测试仪以时间为基准记录测试数据,待所有数据整合到一起时消掉时间变量,即可得地层深度与测试数据的对应关系。

采用时间同步法进行数据采集的关键是原位探测仪的时间基准必须与海底钻机的时间基准保持同步,尽量减少误差,因此在原位探测仪和海底钻机的测控系统都使用相同的高精度时钟芯片,消除时间的计时误差;并在每个航次出行前对原位探测仪和海底钻机的时钟进行校正,消除时间的基准误差^[13-14]。

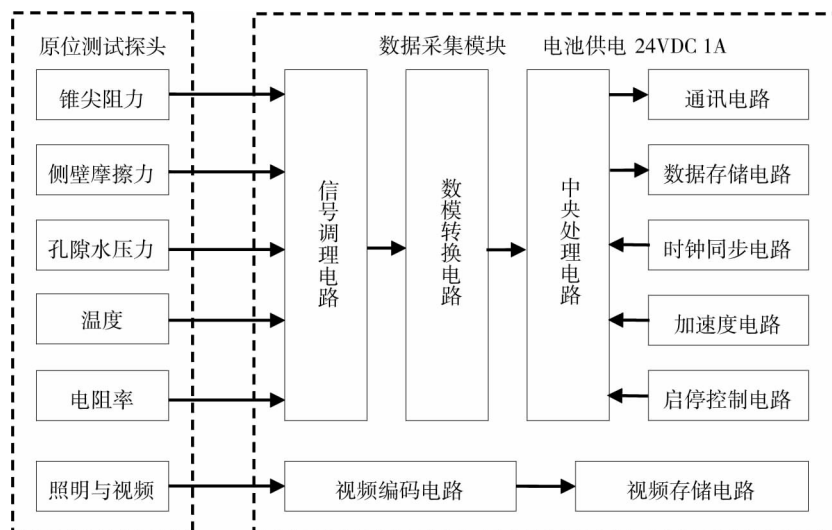


图3 探头传感器及其数据采集模块框图

2.5 数据采集软件开发

海底原位测试系统的工艺流程控制是决定海上试验成败的关键,因此必须设计出十分周密的工艺流程控制方案.工艺流程的设计中,需要重点考虑投放原位探测仪的时机、锥进的开始、暂停、继续与终止,探头的回收、孔隙水压力消散试验等等过程.在明确具体的工作流程之后,开发了一套海底原位测试系统测控软件,可以被海底钻机测控软件随时调用,其主界面如图4所示.

软件的主要功能包括:锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力、电阻率、温度等地层信息的与地层深度或时间的对应显示与记录;按照“工程-孔位-深度”的体系建立数据存储格式,可以实现数据的查询、回放及导入导出;数据存储符合国际通用的 CPT Pro 数据处理软件的接口;数据采集通道的报警设置、显示设置等等.与此同时,由于土体摄像采集的数据为视频,与本软件的数据体系存在较大差异,因此在电子舱内的存储模块中直接使用 SD 卡进行存储,待原位测试仪回收至甲板后再读取图像数据.

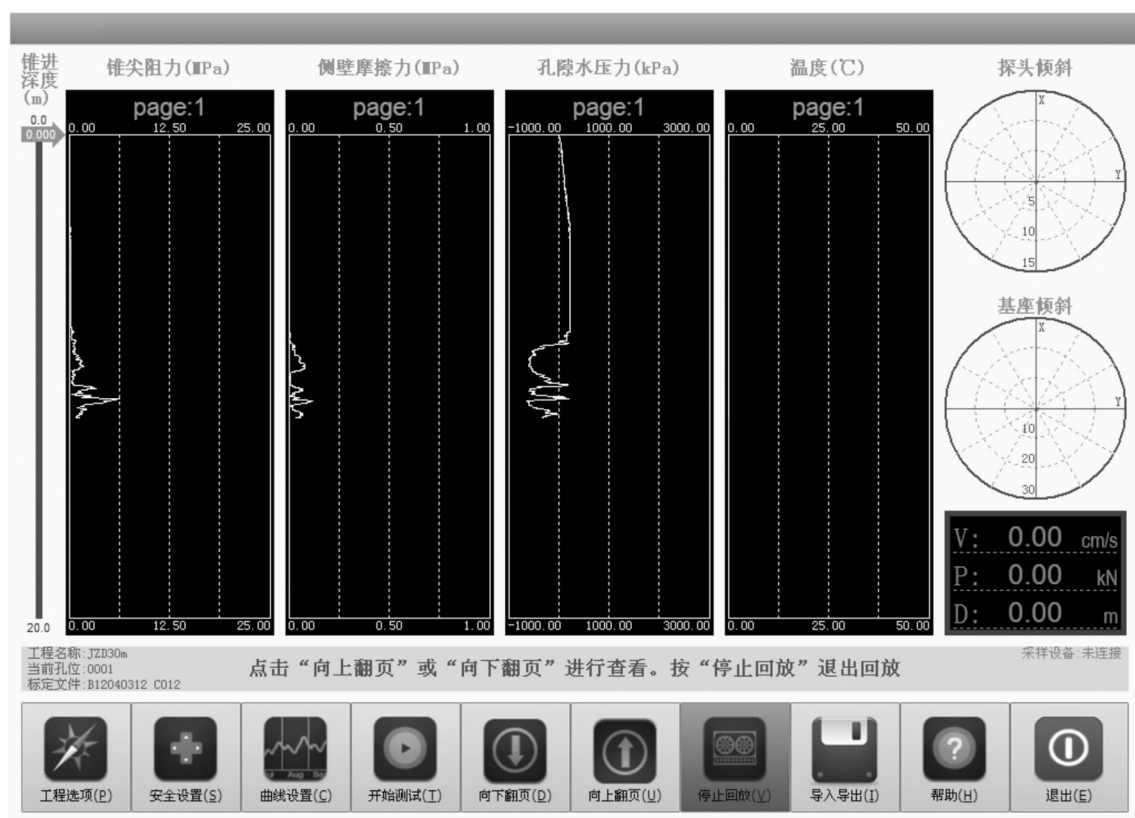


图4 海底原位测试系统测控软件及数据曲线

2.6 海底原位测试系统驱动接口研究

借助于钻机已有的机械与液压执行机构,将多功能探头贯入到海底沉积物的预定深度开展原位测试时,静力触探技术需要探头以 $2 \text{ cm/s} \pm 10\%$ 的匀速贯入到海底沉积物中,这点在土力学测试中极其重要,因此要求海底钻机的进给执行机构在位置检测与速度控制精度方面达到较高的性能.本钻机给进油缸配置的位移传感器获取钻杆贯入位移和速度的精度优于 1 mm ,完全可以满足对探测深度检测的要求.执行原位测试时,原位探测仪被绳索打捞工具下放至钻孔孔底,然后原位探测仪的轴向定位装置产生预定动作与钻杆卡紧,为原位测试探头贯入沉积物提供必要的反力;探测过程完成之后,需要将原位探测仪采集的各项数据传输至海底钻机的测控系统中,之后再通过光电复合缆传输至甲板计算机进行显示和分析.

3 海上试验与数据分析

海上试验是检验项目成果最重要的环节,是对整套原位测试仪的综合性能测试.2015年5月和7月,“基于海底钻机的原位测试仪”安装于“海牛号”海底钻机,搭载“海大号”科学考察船在厦门外海域完成浅海域海上试验,并在台湾海峡以南海域完成最终的深海域海上试验,如图5所示.

厦门外海域的浅海第一次试验中,原位测试仪与海底钻机结合顺利完成第一根钻杆对应深度的测试,但加接第二根钻杆时,由于浅海深海水较浑浊,甲板的监控视频无法看清机械手持杆、对接等过程,因此被迫放弃后续工作;鉴于第一次试验的情况,“海大号”考察船向台湾海峡方向移至水深超过 30 m 的海域,此处海水的能见度明显好转,且结合水流的作用,钻机钻探造成的浑浊也迅速被冲走,为原位测试提供了较好的水下工况,此次试验共级联 3 根钻杆,完成了钻杆加接的工作流程;台湾海峡以南的深海试验,水深达 3 109 m,试验过程与浅海试验相似,探测深度达到 12.8 m,测试曲线如图 4 所示,其中 9 m 以浅基本为淤泥,锥尖阻力和侧壁摩擦力变化不明显,至 9 m 以后锥尖阻力、侧壁摩擦力和孔隙水压力变化较为明显,根据土力学知识基本判断 9 m 以后进入砂层,尤其是孔隙水压力变小是较好的证据。

4 结论

基于海底钻机的多功能原位测试仪的现场试验验证了所研制的原位测试仪与海底钻机的结合是一种成功的尝试,所研制的原位测试仪能够以海底钻机为平台,并按照预定程序在海底实现对锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力、温度、电阻率和视频的原位采集;现场试验中,该原位测试仪与 ROSON 海床式静力触探系统所采集的锥尖阻力、侧壁摩擦力、孔隙水压力三项参数对比,具有极强的一致性,也证明原位测试探头及其传感器、数据采集的各项性能均达到了实用化水平,可以与海底钻机所适用的钻探共同完成海底的地质调查等任务,有力扩展了“海牛号”60 m 海底钻机海底原位探测能力,对提升我国海洋资源开发核心竞争力具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张汉泉, 陈奇, 万步炎, 等. 海底钻机的国内外研究现状与发展趋势[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2016, 31(1): 3-7.
- [2] Sevn P, Peter M H, Thomas K. Shallow drilling of seafloor hydrothermal systems using the BGS rockdrill[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2005(23): 175-193.
- [3] Freudenthal T, Wefer G. Scientific drilling with the sea floor drill rig MeBo[J]. Scientific Drilling, 2007(5): 63-66.
- [4] 陈奇, 徐行, 石要红, 等. 国内外海底静力触探的技术研究与进展[J]. 南海地质研究, 2009(1): 14-16.
- [5] Stegmann S, Mörz T, Kopf A. Initial Results of a new Free Fall-Cone Penetrometer (FF-CPT) for geotechnical in situ characterisation of soft marine sediments[J]. Norwegian Journal of Geology, 2006(86): 199-208.
- [6] 陈奇, 徐行, 张志刚, 等. 用于海洋地质调查的 ROSON-40kN 型海底 CPT 设备[J]. 工程勘察, 2012(9): 30-34.
- [7] 陈奇, 石要红, 潘毅, 等. 基于 Downhole 工艺的海底静力触探及其设备研制[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 74-75.
- [8] 陈奇, 张志刚, 杨楠, 等. 海洋数字式多功能静力触探探头的开发和应用[J]. 工程勘察, 2016, 44(6): 18-23.
- [9] 龙克文, 颜天宝, 龙义全, 等. 磁性接近开关应用关键技术[J]. 日用电器, 2013(12): 50-52.
- [10] 周海涛, 董全林, 周卫宁. ADS1256 在多路高精度加速度计数据采集中的应用[J]. 航空电子技术, 2009(4): 15-18.
- [11] 张乔斌, 欧阳群, 崔明洋. 基于 ADS1256 的舰船电场测量系统研究[J]. 微计算机信息, 2010, 26(20): 49-50.
- [12] 张铭存, 肖忠祥, 杨岩. 基于 ADS1256 的地震数据采集电路设计[J]. 现代电子技术, 2013(24): 134-135.
- [13] 孔亚广, 孙祥祥. 基于 ARM 的 IEEE1588 精密时钟同步协议的实现[J]. 计算机应用, 2013, 33(s1): 315-317.
- [14] 陈大峰, 白瑞林, 邹骏宇. 嵌入式设备的精确时钟同步技术的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(4): 82-85.
- [15] 赵伟. 深海非接触式双向信号传输技术研究[D]. 杭州: 浙江大学. 2004: 39-52.
- [16] 王毅凡, 周密, 宋志慧. 水下无线通信技术发展研究[J]. 通信技术, 2014(6): 589-594.



图5 原位测试仪海试照片