第46卷第3期 2022年6月

doi: 10.11720/wtyht.2022.1478

罗贤虎,邓明,邱宁,等.MicrOBEM:小型海底电磁接收机[J].物探与化探,2022,46(3):544-549.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1478 Luo X H,Deng M,Qiu N, et al.MicrOBEM: a micro-ocean-bottom electromagnetic receiver[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(3): 544-549.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1478

MicrOBEM:小型海底电磁接收机

罗贤虎1,邓明2,邱宁3,4,孙珍3,4,王猛2,景建恩2,陈凯2

(1.广州海洋地质调查局海洋技术方法研究所,广东广州 510760;2.中国地质大学(北京)地球 物理与信息技术学院,北京 100083;3.南海海洋研究所中国科学院边缘海与大洋重点实验室,广 东广州 511458;4.南海海洋研究所南方海洋科学与工程广东省实验室(广州),广东广州 511458)

摘要:海底电磁接收机主要用于海底大地电磁与可控源电磁信号高精度观测。针对现有海底电磁接收机(OBEM-Ⅲ型)体积大、功耗大、成本高等不足,开展了小型化、低功耗、低成本方面的技术研究。MierOBEM 小型海底电磁接收机开发了新的低功耗控制单元、低功耗前置放大器,配置了低功耗磁通门传感器,采取先进的电源管理技术,使得整机功耗由现有海底电磁接收机(OBEM-Ⅲ型)的1600 mW下降至500 mW(搭载感应式磁传感器配置)以内。针对传统的声学释放器昂贵、笨重(需要匹配更多的浮力材料)等问题,通过集成水声通讯模块,并增加外置的电腐蚀释放装置方式实现释放回收,MierOBEM 仅需一个直径为17 in(1 in=2.54 cm)的玻璃浮球作为浮体,大幅降低仪器的体积和硬件成本,提升了设备的集成度和作业效率。MierOBEM 的体积(不含测量臂等)相比 OBEM-Ⅲ减少 3/4,功耗减少 2/3,成本降低 1/2,并于 2021 年 3 月在南海南部开展了深水大地电磁试验,其大地电磁测量功能得到初步验证,具有小体积、低功耗、低成本的优势。

关键词:海底大地电磁;小型海底电磁接收机;水声通讯

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2022)03-0544-06

0 引言

海底大地电磁测深(magnetotelluric,MT)即是把 观测仪器布置在海底,测量天然场源的电磁场,其以 平面波向海洋及海底穿透并在海底以下介质中感生 出与地下电性结构相关的大地电磁场,经过后期数 据预处理得出测深曲线(视电阻率和阻抗相位的频 率响应),进而研究海底以下不同深度上介质的导 电性差异,根据不同地质体或地质构造的电性差异 推断地质结构,达到解决地质问题的目的。MT 是 一种天然场源方法,具有设备相对简便、施工简单、 不受高阻层屏蔽的影响、对深部流体等低阻层反映 灵敏、探测深度大(可以达到下地壳和上地幔)的优 势^[1]。MT测深根据工作水深与探测深度不同,主 要运用的信号频率范围为10⁻⁵~100 Hz,现有的案例 工作水深近 6 000 m,探测深度近 150 km 以深^[2]。 因此在电磁法众多的方法分支中,MT 已成为海底 深部结构探测的首选方法,也是少数具备岩石圈深 度探测能力的地球物理方法^[3]。

鉴于海底 MT 方法的大探测深度,对高导电异 常敏感,低海上作业成本等优势,在洋底扩张脊^[4]、 俯冲带^[2,5]、海底地幔上升流^[6]、油气资源调查^[7-8] 等海洋底构造地质研究领域取得了显著成效,已成 为海洋地质—地球物理领域研究的热点。海底电磁

收稿日期: 2021-08-27; 修回日期: 2022-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目"拖曳式海洋可控源电磁法电场运动噪声压制与信号增强方法研究"(42174081)、"海底 MT 的运动海水电 磁噪声分离方法研究"(41804071);南海 U 形海疆线综合研究团队项目"U 型海疆线—U boundary in the South China Sea" (2019BT02H594);广东省基础与应用基础研究基金项目"南海珠江口陆坡天然气水合物的电磁和地震联合反演解释研究" (2021A1515011526)

第一作者:罗贤虎(1971-),男,教授级高工,主要从事海洋电磁法及热流探测技术研究工作。Email:luoxianhu@163.com

通讯作者:陈凯(1984-),男,副教授,主要从事海洋电磁法仪器开发及应用工作。Email:ck@ cugb.edu.cn

接收机(ocean bottom electromagnetic receiver, OBEM)用于海底 MT 信号观测,原始数据质量直接 关系到方法技术的探测效果^[9]。当前国外同行在 设备小型化方面取得了重要进展,美国 Quasar 公司 生产的小型海底电磁接收机 Qmax EM3^[10]是当前小 型海底电磁接收机中的优秀代表,采用电容电极技 术,无需电场测量臂,整机体积仅约为 0.5 m×0.5 m× 0.5 m。日本神户大学^[11]开发的低功耗磁测系统, 适用于海底长期观测,整机功耗仅为 26 mW,但缺点 是不具备电场测量能力。中国地质大学(北京)最 早于 2017 年^[12]开展了小型电场接收机的研制,受 限于功耗水平,并且浮力受限,不支持安装感应式磁 传感器,还不具备磁场测量能力,无法独立完成 MT 测量工作。

在当前海底 MT 探测需求的驱动下,针对现有海 底电磁接收机^[13]存在的外围尺寸大、电源功耗大、 制造成本高等问题,广州海洋地质调查局联合中国 地质大学(北京)启动了小型海底电磁接收机(micro ocean bottom electromagnetic receiver, MicrOBEM)的 研发工作,重点针对小体积、低功耗、低成本开展研 究工作。采取了如下方案:① 小体积层面,传统的 声学释放器笨重且昂贵,采用集成水声通讯 OEM 板 结合外置的电腐蚀脱钩器方案,所需浮力大幅降低, 玻璃球数量由原有的4个减至单个:②低功耗层 面,新研制低功耗采集电路、前放电路,整机功耗约 至 500 mW(感应式线圈配置),为原来的 1/3,功耗 的降低节省了电池数量进而减少浮力需求:③低成 本方面,无需传统声学释放器、减少玻璃球数量,整 机硬件成本降至一半;④ 具备磁通门传感器扩展功 能,为长周期大地电磁测量奠定了基础,配置磁通门 传感器时整机功耗仅为 200 mW; ⑤ 开发了回收信 标,集成 LED 模块,方便夜间回收打捞,进一步提升 海上作业效率。

1 硬件原理

MicrOBEM 结构见图 1,主要包括玻璃浮球、数 据采集舱、感应式磁传感器舱、磁通门传感器舱(选 装)、电极测量臂、电场传感器(电极)、水声换能器、 框架、水泥块、水密电缆、电腐蚀脱钩器、信标浮球 等。其中玻璃浮球用于提供浮力,数据采集舱内置 采集电路、水声通讯板;感应式磁传感器舱内置感应 线圈,实现水平磁场分量测量;磁通门传感器舱内置 磁通门传感器,实现三轴正交磁场信号测量;4 支测 量臂和电场传感器实现电场分量测量;水声通讯板、 换能器和电腐蚀脱钩器组成设备的声学释放单元; 各个电气单元之间通过耐压水密电缆相连;信标浮 球用于打捞时的位置指示,提升打捞效率。



图 1 MicrOBEM 实物照片 Fig.1 Photo of MicrOBEM

1.1 数据采集舱

数据采集舱内置采集电路和锂电池组。为降低 结构复杂度,整个采集舱单边开孔,仅引出了必要的 仪器接口,包括电场传感器接入口、磁场传感器接入 口、通信与充电接口、水声通讯换能器接口等。采集 舱内结构如图2所示,左侧为电池组(BAT),右边为 采集舱与外部的单边接口。采集舱内部从左往右所 示电路模块依次为:水声通讯电路(ATM)、电场前 置放大电路(AMP)与采集电路(ACQ)。

数据采集舱内电路(图3)主要包括电场前置放 大器、采集模块、水声通讯模块。电场前置放大器完 成3通道电场信号低噪声放大。采集模块支持10 通道测量,电场、感应式线圈、磁通门各占用3通道, 另有1通道备用。水声通讯板与外置的换能器配 合,实现水声测距、电腐蚀开关,采集模块在水声模 块的控制下输出恒流源,驱动电腐蚀脱钩器。甲板



图 2 数据采集舱结构 Fig.2 Structure diagram of data acquisition module



Fig.3 Diagram of data acquisition module

单元为舱内电路提供 GPS 授时、DC 充电电源、USB 通讯。电池组位于采集舱的后端不开孔一侧,共有 两组。为保证仪器因电量不足停止采集后释放功能 不受影响,电池组采用分别供电的模式,其中一组电 池为采集电路供电,另一组电池连接水声通讯电路。 水声通讯电路静态功耗约 165 μA,配置了 10 Ah 电 池组,最大限度地保证了水声通讯的安全可靠性。

1.2 采集电路

采集电路实现信号采集、存储、传输及时间记录 等功能,包括微控制器 MCU 模块、模数转换模块、时 钟模块、电源模块、数据存取模块。PC 端通过 USB 接口与采集电路交互。数据采集电路原理框图如图 4,MCU 直接管理多个 ADC,并将数据写入 TF 卡。 时间信息来自甲板盒中外置的 GPS 模块,通过 MCU 预留给模块的串口进行时间数据的读取。为使采集 电路与上位机直接实现通讯,设计了一个 USB Hub 模块,实现 USB 与串口的转换。同时 PC 端也可通 过 USB Hub 访问 TF 卡,实现数据的下载与上传,实 测数据平均下载速度达 18 MBps 以上。电池组为 6 串 18650 型电池设计,满电 25.2 V,经 DC/DC 至各 模块供电。

1.3 前置放大器

斩波放大器原理与 OBEM-III^[13]中用到的放大 器基本一致,所不同的是:① 修订了供电电压,±7 V 供电改为±2.8 V 供电,消耗电流由 10 mA 降为 5 mA;② 更新了时钟发生电路,进一步降低功耗;③ 更新了信号耦合变压器,提升了输入阻抗,噪声水平 基本不变,压缩了体积,PCB 尺寸为直径 68 mm,高 度约 15 mm。小型化、低功耗改造后,但也牺牲了一 定的量程,量程由 8.5 mVpp^[6]减小至 5 mVpp,导致 动态范围有所减小。

1.4 水声释放

传统的声学释放器笨重且成本高,小型化首要 目标就是解决声学释放器的笨重问题,采用定制的 水声通讯板+换能器+电腐蚀脱钩器方案。水声通 讯板直径 68 mm,高约 50 mm,与水声甲板单元配合 实现测距、电腐蚀开关功能。水声通讯板收到电腐 蚀开命令后,使能恒流源,电流约为 0.5 A,腐蚀片约





30 s 后熔断。

水声甲板单元也进行了小型化改造,见图 5,借 助 WIFI 与手机端进行通讯, Android 手机端运行 APP 程序,实现状态查询、测距、电腐蚀开关命令, 无需外围的键盘、LCD 等部件,进一步简化海上作 业。手机端 APP 界面见图 6,完成测距、电腐蚀开关 的指令传达与状态显示。



图 5 水声释放甲板单元原理框



图 6 水声释放甲板单元 APP 界面截图 Fig.6 Screenshot of the APP menu of acoustic release deck unit

1.5 主要技术指标

通道^[9]:10(电场、感应式磁传感器、磁通门各 3 通道,备用 1 通道);

测量带宽:10000s~100Hz;

本底噪声^[11]:电场:优于 0.1 nV/m/rt(Hz)@ 1Hz;磁通门:优于 10 pT/rt(Hz)@1Hz;感应线圈:优 于 0.1 pT/rt(Hz)@1Hz;

功耗:小于 500 mW(3E+水平感应线圈配置), 小于 200 mW(3E+磁通门传感器配置);

水下工作时间^[13]:30 d 连续采集(3E+水平感 应线圈配置)+90 d 待机;

最大工作水深:6000m;

存储空间:64 GB;

时漂:优于5ms/d;

通道动态范围:E:>110 dB,H:>120 dB,B:> 120 dB(@fs=300 Hz); 平均数据下载速度:>18 MB/s;

软件功能:支持用户操控仪器、数据下载、状态 查询、数据浏览、数据分析及格式转换输出。

2 海上试验

为评估新研制的 MicrOBEM 在深水条件下的性能,团队携带两台小型海底电磁接收机(编号 HA、HC)于 2021年3月15日~4月15日搭载中国科学院南海海洋研究所实验二号科考船在南海南部开展了第一次深水 MT 测量实验。本航次的任务之一为大地电磁测深,作业工区见图7,水深约为1400~2000m,测线长度约180 km, MicrOBEM 共布设了5个站位。全部站位采样率均设置为150 Hz、增益设置为低增益档各站位明细见表1,其中S5站位受电。缆故障影响,经数据评估无效,进行了重新布放。图8展示了S3站位的部分 MT 时间序列,持续时间约4500 s。E,&B_x分量幅值相比 E_x&B_y分量较强,电场峰峰值达400 nV/m,磁场峰峰值达10 pT。4通道水平分量之间相关性较高。

借助 OBEM_PRO 软件将各站位挑选的时间序 列数据转为SSMT2000软件所兼容格式,输出TS4



工区地图

站位图

图 7 工区站位布置 Fig.7 Work area layout

表 1 海底 MT 站位投放点坐标

Table 1 Point coordinates of seafloor MT station

序号 站位名 水深/m 仪器编号 备注 1 S1 1932 HA 2 S2 1975 HC 3 S3 1826 HA 4 S4 1693 HA 5 S5 1400 HC 数据无效 6 S5A 1400 HA 补做					
1 S1 1932 HA 2 S2 1975 HC 3 S3 1826 HA 4 S4 1693 HA 5 S5 1400 HC 数据无效 6 S5A 1400 HA 补做	序号	站位名	水深/m	仪器编号	备注
2 S2 1975 HC 3 S3 1826 HA 4 S4 1693 HA 5 S5 1400 HC 数据无效 6 S5A 1400 HA 补做	1	S1	1932	HA	
3 S3 1826 HA 4 S4 1693 HA 5 S5 1400 HC 数据无效 6 S5A 1400 HA 补做	2	S2	1975	HC	
4 S4 1693 HA 5 S5 1400 HC 数据无效 6 S5A 1400 HA 补做	3	S3	1826	HA	
5 S5 1400 HC 数据无效 6 S5A 1400 HA 补做	4	S4	1693	HA	
6 S5A 1400 HA 补做	5	S5	1400	HC	数据无效
	6	S5A	1400	HA	补做





和 TBL 文件;借助 SSMT2000 软件进行阻抗估算,输 出 MT 文件;借助 MTEditor 软件查看 MT 文件,对于 结果不合格的数据重新挑选数据再次进行处理;对 于数据质量较好的文件进行功率谱编辑并输出 EDI 文件。图9给出了5个站位数据预处理结果,S4站 位的 yx 和 S5站位的 xy 模式数据较差外,其余测深 曲线数据质量较好,大部分站位低频至1000 s 以 低。

本次海上试验经历6次深水(1400~1975m)测试,回收率100%,小体积、低成本的电腐蚀熔断方

案的可靠性得到验证。6次深水测试除 S5 站位(通 道故障)数据无效外,经补做,5 站位都获得有效数 据,其中3 站位测深曲线质量较好,整机的测量方案 得到验证,但测量通道的可靠性需要进一步加强。 经测试,2000m水深条件下,下沉耗时 60 min,速度 为 33 m/min;上浮耗时 80 min,上浮速度约为 25 m/ min,为提升仪器上浮速度,浮力配比需要进一步改 善。本航次最长水下作业时间 8 d,更长时间测试有 待后续完成,最大水深为 1 975 m,更深水深条件测 试有待后续完成。



图 9 五个站位 MT 测深原始数据曲线

Fig.9 MT sounding raw data curves of five stations

3 结论

1)围绕小型化海底电磁接收机研制需求,开展

了低功耗采集电路研制工作,整机功耗由原来的1 600 mW 降至 500 mW。集成水声通讯方案,抛弃了 传统的声学释放器,使得整机在体积、成本方面大幅 降低。

2)2000 m 级深水 MT 测试验证了仪器的可靠

性与稳定性,获取较好的 MT 数据。更深水域、更长时间测试有待进一步验证。

3) MicrOBEM 支持磁通门传感器,磁通门完成 更低频段磁场测量,为未来长周期 MT 测量奠定了 硬件基础。目前 MicrOBEM 已小批量生产 20 台,服 务于海洋底深部构造研究和水下目标检测任务。

致谢:感谢中国科学院南海海洋研究所、南方海 洋科学与工程广东省实验室(广州)南海U形海疆 线综合研究团队项目(2019BT02H594)和人才团队 引进重大专项(GML2019ZD0104)提供的航次船时, 感谢广东省重点领域研发计划项目 (2020B1111520001)提供的相关船载探测技术的支 持;感谢实验2号轮全体船员支持。

参考文献(References):

- Constable S C. Marine electromagnetic induction studies [J]. Surveys in Geophysics, 1990, 11(2/3): 303-327.
- [2] Naif S, Key K, Constable S, et al. Melt-rich channel observed at the lithosphere-asthenosphere boundary [J]. Nature, 2013, 495: 356-359.
- [3] Ichiki M, Baba K, Toh H, et al. An overview of electrical conductivity structures of the crust and upper mantle beneath the northwestern Pacific, the Japanese Islands, and continental East Asia
 [J]. Gondwana Research, 2009, 16(3/4): 545 562.
- [4] Johansen S E, Panzner M, Mittet R, et al. Deep electrical imaging of the ultraslow-spreading Mohns Ridge [J]. Nature, 2019, 567: 379-383.

- [5] Worzewski T, Jegen M, Kopp H, et al. Magnetotelluric image of the fluid cycle in the Costa Rican subduction zone [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(2): 108-111.
- [6] Key K, Constable S, Liu L, et al. Electrical image of passive mantle upwelling beneath the northern East Pacific Rise [J]. Nature, 2013, 495: 499-502.
- [7] 魏文博,邓明,温珍河,等.南黄海海底大地电磁测深试验研究
 [J].地球物理学报,2009,52(3):740-749.
 Wei W B, Deng M, Wen Z H, et al. Experimental study of marine magnetotellurics in southern Huanghai[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52(3), 740-749.
- [8] Key K W, Constable S C, Weiss C J. Mapping 3D salt using the 2D marine magnetotelluric method: Case study from Gemini Prospect, Gulf of Mexico [J]. Geophysics, 2006, 71(1): B17-B27.
- [9] Constable S C. Review paper: Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding [J]. Geophysical Prospecting, 2013, 61: 505 – 532.
- [10] Quasar Federal System, QMax EM3[EB/OL].(2010-06)[2020 -09]. http://quasarfs.com/downloads/QuasarGeo-QMax-EM3-Datasheet.pdf
- [11] Ogawa K, Matsuno T, Ichihara H, et al. A new miniaturized magnetometer system for long-term distributed observation on the seafloor [J]. Earth Planets & Space, 2018, 70(1)111-119.
- [12] Chen K, Deng M, Luo X, et al. A micro ocean-bottom E-field receiver [J]. Geophysics, 2017, 82(5): E233 – E241.
- [13] 陈凯,景建恩,赵庆献,等.海底可控源电磁接收机及其水合物 勘查应用[J].地球物理学报,2017,60(11):4262-4272.
 Chen K, Jing J E, Zhao Q X, et.al. Ocean bottom EM receiver and application for gas-hydrate detection[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(11):4262-4272.

MicrOBEM: a micro-ocean-bottom electromagnetic receiver

LUO Xian-Hu¹, DENG Ming², QIU Ning^{3,4}, SUN Zhen^{3,4}, WANG Meng², JING Jian-En², CHEN Kai²

(1.Institute of Marine Technology Methods, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510076, China; 2.School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 3.Key Laboratory of Marginal Sea Geology of CAS, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 511458, China; 4.Southern Ocean Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Nanhai Ocean Institute, Guangzhou 511458, China;

Abstract: Ocean bottom electromagnetic receivers (OBEMs) are mainly used for high-precision observation and measurement of magnetotelluric signals and controlled-source electromagnetic signals at the sea bottom. To overcome the shortcomings of large volume, high power consumption, and high cost of the existing OBEMs (OBEM-III type), this study conducted technical research regarding miniaturization, low power consumption, and low cost. As a result, the overall power consumption of the existing OBEMs (OBEM-III type) has been reduced from 1 600 mW to 500 mW or less (by equipment of inductive magnetic sensors) due to the development of a lowpower control unit and preamplifier, the installation of low-power fluxgate sensors, and adoption of advanced power management technology. Traditional acoustic releasers are expensive and bulky and require more suitable buoyant materials. By integrating the underwater acoustic communication module and being equipped with the external erosion wearing release device, the MicrOBEMs make release and recovery possible using only a 17-inch glass sphere, thus greatly reducing the volume and hardware cost of the instrument and improving the integration and operation efficiency of devices. Compared to the OBEM-III type, the volume, power consumption, and cost of the newly developed MicrOBEMs are reduced by 3/4, 2/3, and 1/2, respectively. A deep-water geomagnetic test was conducted in March 2021 in the southern South China Sea, preliminarily verifying the geomagnetic measurement function of the MicrOBEMs and reflecting that the MicrOBEMs have the advantages of small size, low power consumption, and low cost.

Key words: marine magnetotelluric; micro ocean bottom electromagnetic receiver; acoustic telemetry modem (本文