

# 海陆联合大跨度多点位海底大地电磁同步数据采集

## Long-span and Multi-point Synchronizing Data Acquisition for Seafloor Magnetotelluric Based on Union of Marine and Land

邓明/DENG Ming<sup>1,2</sup>, 刘方兰/LIU Fang-lan<sup>3</sup>, 张启升/ZHANG Qi-sheng<sup>1,2</sup>, 陈凯/CHEN Kai<sup>1,2</sup>

1. 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083
3. 广州海洋地质调查局, 广州 510760

1. Geo-detection Laboratory, Ministry of Education, Beijing 100083, China
2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

[摘要] 海底电磁探测是研究海洋基础地质课题和海底矿产资源分布的重要地球物理方法之一。由于大地电磁场存在区域噪声,因而,为压制干扰并获得高质量的场源数据,就需进行带远参考方式的数据采集。在采集过程中,包括陆上基站和海底测网的多台仪器应遵循同一个时间基准和统一的方位坐标。海底大地电磁仪为满足上述要求,其内部配备了高精度时钟源、姿态检测器件以及与海底电磁信息采集相关的自动信号测量与存储电路。海上作业时,科考船沿预定航线,实现仪器的逐点投放。海底测量结束后,通过遥控方式改变海底仪器的浮力性质,使其自动返回海面。近期的海洋试验表明,中国的海底大地电磁探测技术已实现了实用化,可为海洋勘查提供高技术支撑。

[关键词] 海洋探测; 大地电磁; 数据采集; 远参考测量

[中图分类号] P716

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)10-0028-05

收稿日期: 2006-08-20

基金项目: 国家“863”计划课题(2002AA615020)

作者简介: 邓明,男,北京市海淀区学院路29号中国地质大学地球物理与信息技术学院,教授,主要从事地球物理仪器、海洋电磁探测以及深部地电传感技术方面的研究; E-mail: dengming@cugb.edu.cn

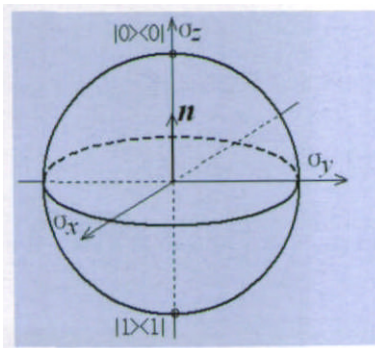


图4 混合态量子系统 Bloch 矢量  $n$

Fig. 4 Bloch vector  $n$  of mixed state in quantum system

### 5 结论

几何代数在物理和工程领域得到越来越多的应用,它直观的表现形式使其产生其他方法不可替代的效果。它在量子信息和量

子计算领域已有很广泛的应用。本文引入量子系统的密度矩阵,并将其表示成几何代数的形式,从而得到纯态量子系统和混合态量子系统的几何代数描述形式。通过几何代数中的极化矢量与 Bloch 矢量比较,可以很容易得到它们之间的对应关系,并得出它们在量子系统的描述上是完全一致的。

### 参考文献(References)

- [1] CHRIS DORAN, ANTHONY. Geometric algebra for physicists[M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2003.
- [2] 邹晖, 陈万春, 殷兴良. 几何代数及其在飞行力学中的应用[J]. 飞行力学, 2004, 22(4): 60-64.
- [3] MICHAEL A NIELSEN, ISAAC L. CHUANG. Quantum computation and quantum information [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2000: 101-105.
- [4] 丛爽. 量子力学系统控制导论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

(责任编辑 胡春华)

**Abstract:** Electromagnetic prospecting on the seafloor is one of the important geophysical methods to research the marine geology topics and the seafloor mineral resources. The data acquisition of remote reference is used to suppress interference and acquire the high quality data due to the magnetotelluric regional noise. The base station on land and surveying net under the water should follow simultaneous observation and the same location coordinates in the acquisition process. In order to solve the problems above, the high-precision clock, detecting posture device and automatic measurement circuit are equipped in marine magnetotelluric instrument. The instruments are placed point-to-point when the ship carries out marine experiments along scheduled routes. The characteristic of instrument floatage changes by remote control to let it automatic return to offing after the acquisition completes. Recent marine experiments indicate that the seafloor magnetotelluric prospecting in China have achieved utility and can offer high technology support in marine prospecting.

**Key Words:** marine prospecting; magnetotelluric; data acquisition; remote reference exploration;

CLC Number: P716

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)10-0028-05

## 1 引言

西方发达国家从 20 世纪 70 年代开始对海底大地电磁探测 (Marine MT) 技术与仪器进行研究。Filloux 用较简陋的, 但却实用的办法探索从水下检测电场和磁场的方法技术<sup>[1]</sup>, 对海底电磁场测量做了开拓性的工作。数年后, 他的研究小组用自己研发的仪器, 在北太平洋进行海底 MT 探测, 试图了解地球与月亮相互间的电磁感应现象<sup>[2]</sup>。Cox 加入到这一研究行列, 他的小组赴大西洋采集 MT 数据。他们共同撰文介绍了各自的试验成果, 给出了海底大地电磁探测可解决宏观地质问题的科学评价<sup>[3]</sup>。1985 年, 由美国、加拿大、日本和澳大利亚的十多所大学联合发起的 Juan de Fuca 计划, 用多台海底大地电磁仪器对美国西海岸外 45°~47°N、229°~234°E 的海区进行勘查, 旨在探明海底 Gorda 板块南北延伸和海底大断层东西分布的情况。在被投放的仪器中, 约有 80% 取得了较满意的测量数据<sup>[4]</sup>。20 世纪 90 年代初期, 一条横跨东太平洋, 由多个测点连接组成的迄今最长的 MT 测线, 西起檀香山, 东到加州的 Point Arena, 绵延数千 km, 海底测量时间长达 2 年多, 获得了从陆架到壳幔, 直至下地幔的岩石物性信息<sup>[5]</sup>。90 年代中期, 在澳大利亚东部海域, 地理位置为 35°~40°S、150°~165°E 范围内, 启动了另一项名为 TPSME 的计划<sup>[6]</sup>, 对海底的古洋脊进行调查, 以追溯该区域曾经发生的地壳运动与演化的历史。其后不久, 来自美国、法国、日本等国的科学家, 对东南太平洋 17°S、110°~116°W 的海底地层构造进行电磁层析成像分析。他们用 47 台大地电磁仪, 在水深超过 4 000 m 的大洋底面采集数据, 通过地形校正及电磁反演算法, 揭示了海底洋中脊的电性成像, 从而找到了该海区地幔结构非对称问题的答案。此项名为 Mantle Electromagnetic and Tomography 的探测试验在美国 Science 杂志上发表后<sup>[7]</sup>, 在国际地学界产生了极大的学术反响。

海底大地电磁探测除在地学基础研究中发挥出巨大作用外, 还在海洋资源调查方面具有独特的用途。海洋环境复杂多变, 不同的海区地质条件迥异。通常情况下, 对海洋进行地球物理勘查, 应采用多种技术手段, 因不同岩性介质所反映的地球物理参数的异常程度各有不同。但在某些特殊情况下, 地下介质的分布规律可能在某一种地球物理参数中得到明显体现。这时, 该种参数所对应的地球物理方法就成为该海区探测的主要方法。比如, 在玄武岩、碳酸盐、盐丘等非沉积地质体分布区, 从地震速度特征上分析, 均属于高速体区域, 其下伏地层构造的地震成像十分困难。尤其当存在产状陡立的构造面时, 即使是当今占主流地位的三维地震勘探也很难得到好结果。然而, 在这种情况下, 岩层的电阻率参数却可以提供重要的地电异常信息。这是因为这些地质分布区的围岩与矿体 (如石油、天然气等) 间存在着较大的电性差异。通过探测电磁场源, 用电磁成像技术获取地下岩层的电性结构, 就可推断地下资源的分布规律。1996-1997 年, 在美国墨西哥湾的地震勘探困难区, 应用大地电磁方法测取电磁场数据, 与地震补充信息联合实施反演, 从而成功地揭示了该海区的地下油储构造界面<sup>[8]</sup>, 这一事件被公认为大地电磁方法解决海洋油气地质问题的典型范例。

我国对海底大地电磁探测的研究虽然起步较晚<sup>[9]</sup>, 但在国家

“863”计划的支持与推动下, 近年已取得显著进展。至目前, 已研发完成具有自主知识产权的海底大地电磁仪<sup>[10]</sup>。在数据处理方法上, 利用理论模拟对海洋电磁噪声进行分析, 研究压制不同尺度海水运动引起的电磁干扰以及由海流、底浪等因素引起磁场传感器振动产生的数据畸变的方法技术; 研究海洋环境中地层电性特征, 建立适合中国海域地质构造特点的海底大地电磁正演理论模型; 进行带陆地或海底远参考信号的资料处理方法研究, 实现带远参考的多站时间序列 Robust 处理<sup>[11]</sup>。

这里需特别指出, 要实现带远参考的多站数据处理, 就必须提供现场采集的数据, 即需要进行海陆联合大跨度、多点海底大地电磁同步数据采集。

## 2 海底大地电磁同步数据采集的海上作业过程

作业示意图见图 1。承担探测任务的远洋科考船沿预定的测线或测网实现阵列式仪器布放。即: 沿测线以少量带磁传感器的五分量测站作为控制基站, 测取 3 个相互正交的磁场分量 ( $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ ) 和 2 个水平正交的电场分量 ( $E_x$ 、 $E_y$ ), 其余多数测站只采集  $E_x$ 、 $E_y$ 。

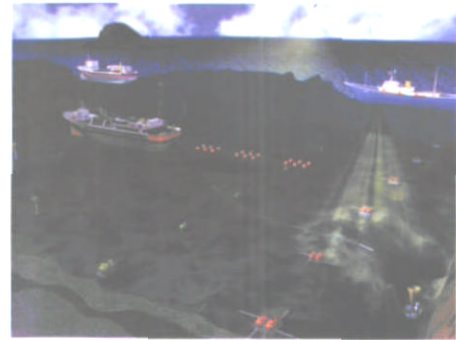


图 1 海底大地电磁探测作业示意图

Fig. 1 The sketch of marine magnetotelluric survey

当作业船到达指定位置时, 需完成 2 项作业任务。投放准备, 这包括仪器工作状态检测、置入数据采集参数、GPS 对钟、安装海底电场传感器、配挂锚系等。其中, 锚系等同于配重, 其作用是依靠自身的重力, 将仪器牵至海底。仪器投放。临投放之前, 先用多波束声纳测量方法扫描海底地形, 并利用抓斗取样, 了解投放点的海底底质; 投放时, 起吊尽可能保持平稳, 利用船舷吊臂把仪器放至海面 (见图 2)。当海水淹没仪器时, 甲板上的工作人员拉开自卸钩<sup>[12]</sup>, 使仪器平稳下沉, 并由声学应答器监测仪器的沉放过程。另外, 在靠近沿海的陆地上布设远参考站, 与海底的仪器一起进行同步数据采集。采集时间视探测深度而定, 当目标锁定于海底十余 km 之内的浅部地层时, 约为数天。

仪器完成数据采集任务后, 作业船回到测站海面, 通过船上的声学应答器甲板单元发射声波信号, 唤醒装配在海底仪器上的声学释放器。之后, 甲板单元继续发射控制指令, 使声学释放器执

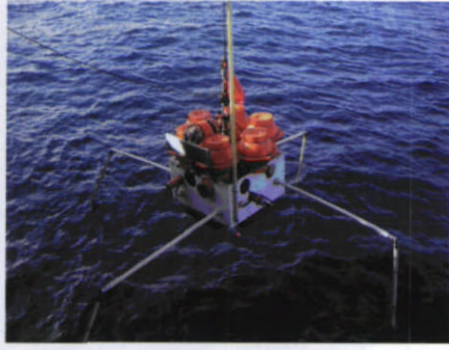


图 2 海底大地电磁仪投放

Fig. 2 Hanging-up the seafloor magnetotelluric instrument and putting it in the sea

行机械脱钩动作, 抛弃锚系。释去负重后, 仪器的浮力性质得以改变, 由负浮力系统变为正浮力系统, 进而自动浮升回到海面。这时可由作业船打捞, 将仪器吊起至船上。

### 3 带远参考海底大地电磁测量的关键技术

#### 3.1 高精度海底应急时钟源

在海底, 由于巨厚的海水层屏蔽了 GPS 信号, 使海底观测不可能简单地利用 GPS 实现同步采集。解决这个问题的办法是: 在仪器内装配高精度时钟源, 时钟稳定度为  $10^{-7}$  s/s。投放前, 仪器在甲板上通过 GPS 校准时钟, 获取国际标准时间; 在海底, 则依靠自己的时钟源计时, 时间误差仅在微秒级。

图 3 展示了该时钟源的电路原理。所选用的时钟芯片为 SD2020, 还用到了外部 INTO、INT1、定时器/计数器 T0、T1 等多个中断源, 其基本技术特征如下。

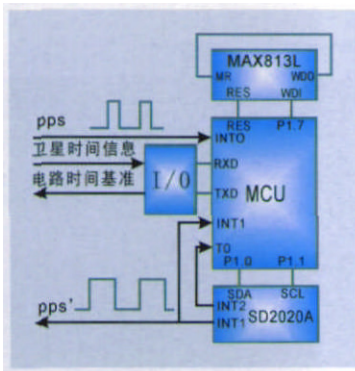


图 3 高精度应急时钟源硬件电路原理图

Fig. 3 The circuit diagram of the highly accurate real-time clock meeting the emergency

1) 利用其可编程串行 UART 的 RXD 接收来自于 GPS 接收机的卫星时间信息, 并利用 TXD 发送时钟数据, 从而体现在甲板上的仪器对钟。

2) P1.0、P1.1 与 SD2020 的 SDA、SCL 相连, 组成虚拟的 I<sup>2</sup>C 总线。

3) INTO 接收来自 GPS 接收机的秒同步信号 pps, 在其上升沿引入外部 INTO 中断, 以接收 GPS 标准时钟信息和实现与 pps' 的相位校准。

4) 计数器 T0 接收来自 SD2020 频率为 32 768 Hz 的方波信号, 计数器溢出时完成写入 SD2020 命令, 以实现准确的秒同步。

5) INT1 信号来自于 SD2020 频率为 1 Hz 方波, 经反向后即成为 pps' 信号, 供给测量电路作为时间基准, 在 INT1 中断服务中, 主要完成读取 SD2020 时钟信息、实现秒同步校验和对钟等的操作。

6) 自动复位电路 MAX813L, 确保时钟源运行的稳定性。

#### 3.2 海底数据采集器的姿态监测

海底大地电磁仪投放后, 自由下沉抵达海底, 受海流和地形影响, 仪器的姿态带有随机性。为了对多测站的电磁数据进行处理, 需进行统一的坐标变换, 以求得同一坐标系下的视电阻率和阻抗相位响应。为此, 必须记录仪器的方位、倾斜状态和受底流推曳所引起的振动等信息。

姿态监测电路原理如图 4。其中方位信息为一维测量, 倾斜信息为二维测量, 振动信息为三维测量, 而温度信息为标量测量。

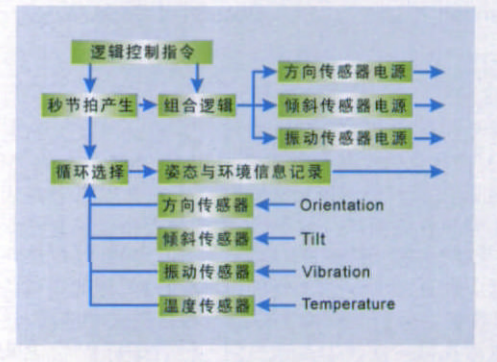


图 4 仪器姿态及海底环境信息测量原理图

Fig. 4 The schematic of collecting instrument gesture and marine environment signal

各路信息由循环选择电路分时选出, 每秒切换 1 路。输出的信号在不同的秒时间段对应着不同的内容。各传感器在测量时的加电控制, 由组合逻辑电路根据不同的测量对象做出供电选择。被测信息顺序进入记录单元。

#### 3.3 海底大地电磁数据采集

为提高采集精度, 采用 24 位模数转换技术<sup>[13]</sup>, 使电场测量灵敏度达  $0.02 \mu\text{V/m}$ , 磁场测量灵敏度达  $0.3 \text{ V/nT}$ 。图 5 标明了从数据转换到数据缓存的工作过程。

如图 5 所示, 6 路信号经 A/D 转换后, 成为 6 条串行数据流。在串并转换门阵列内部, 串行输入数据变成并行输出数据, 数据流成为数据帧。在控制指令的驱动下, 每帧数据按先进先出的原则, 暂存于数据缓存器 FIFO, 并最终经计算机总线被送到闪存电子盘予以保存。除完成串并转换功能外, 在每 6 帧数据(对应 6 路被测信号)之间自动插入标识码, 以防止存数过程中出现数据丢失和数据窜道。

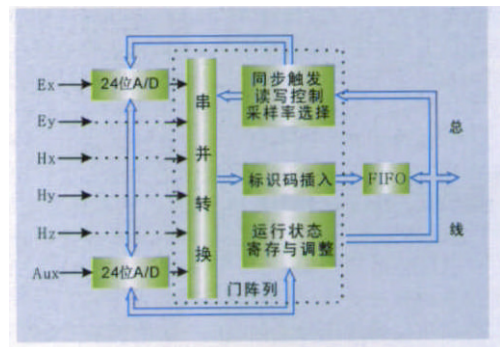


图 5 数据采集电路原理图

Fig. 5 The diagram of data acquisition circuit

A/D 转换器的采样率可选。本仪器选用的是 Crystal 公司生产的 5321 和 5322A/D 转换套片, 片中提供了采样率选择引脚。通过对引脚写入不同的控制码(3 位二进制码), 可选择 0.25 ms、0.5 ms、1 ms、2 ms、4 ms、8 ms、16 ms 等 7 种采样率。针对海底大地电磁场信号以中、低频成份为主的特点, 在测量时分 3 个频段, 分别

以 1 ms、16 ms 和 256 ms 的采样率, 对 100~1 Hz、1~0.01 Hz 及 0.01~0.000 1 Hz 等不同频率范围的信号进行采集。由于芯片可提供的采样率只有 7 种, A/D 转换器在 16 ms 以后已超出其采样范围, 为实现低采样率, 在 FIFO 之后, 对信号进行抗混叠抽样。

### 3.4 超低频信号的抗混叠抽样

抗混叠滤波器的设计就是以可实现频率响应为  $H(\omega)$  的滤波器来逼近理想滤波器  $H_d(\omega)$ 。其主导设计思想是, 在遵从最大误差最小化准则下, 将  $H(\omega)$  的所有抽样皆作为变量, 通过迭代运算得到最优结果来拟合。

线性相位 FIR 滤波器根据其长度  $N$  为奇数或偶数, 冲激响应  $h(n)$  为奇对称或偶对称可分为 4 种情形<sup>[14]</sup>。当取  $N$  为奇数、 $h(n)$  为偶对称时, 拟取有限项级数作数学逼近, 则 FIR 的传递函数可表示为:

$$H(\omega) = \sum_{n=0}^{(N-1)/2} a(n) \cdot \cos(n\omega) \quad (1)$$

$$\text{其中 } a(0)=h\left(\frac{N-1}{2}\right), a(n)=2h\left(\frac{N-1}{2}-n\right) (n=1, 2, \dots, \frac{N-1}{2})$$

为了使通带和阻带的加权误差相等, 取加权函数为:

$$w(\omega) = \begin{cases} \frac{\delta_2}{\delta_1} & |\omega| \leq \omega_c \\ 1 & \omega_s \leq |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\delta_1$  为通带最大误差,  $\delta_2$  为阻带最大误差,  $\omega_c$  为通带截止频率,  $\omega_s$  为阻带截止频率, 且减采样倍数  $M$  满足:  $\omega_c \leq \frac{\pi}{M} < \omega_s$ 。

取式(1)与理想抗混叠滤波器<sup>[15]</sup>之差, 然后乘以式(2)的加权函数, 得加权逼近误差函数为:

$$Er(\omega) = \begin{cases} \frac{\delta_2}{\delta_1} [1 - \sum_{n=0}^{(N-1)/2} a(n) \cdot \cos(n\omega)] & |\omega| \leq \omega_c \\ - \sum_{n=0}^{(N-1)/2} a(n) \cdot \cos(n\omega) & \omega_s \leq |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (3)$$

令  $A=\{\omega|\omega \leq \omega_c\} \cup \{\omega|\omega_s \leq |\omega| \leq \pi\}$ ,  $A$  的取值范围在通带或阻带, 不在过渡带。要使  $H(\omega)$  在满足最大误差最小化准则下逼近  $H_d(\omega)$ , 则:

$$\|Er(\omega)\| = \min_{\omega \in A} [\max_{\omega \in A} |Er(\omega)|] \quad (4)$$

当  $a(n)$  选择某有限项时,  $|Er(\omega)|$  的最大值达到给定的极小值  $\delta$  即认为  $\|Er(\omega)\|$  满足设计要求。

联立(3)、(4), 并利用交错定理<sup>[16]</sup>, 借助计算机进行迭代运算, 迭代过程见图 6。由此求得  $a(n)$ , 从而确定 FIR 抗混叠滤波器的单位冲激响应  $h(n)$ 。

由上述分析可知, 在 CPU 运算速度许可的情形下, 用实时软件滤波来解决减采样中的混叠问题是快捷、高效的方案。利用上述方法可设计出适合于地电采集的抗混叠滤波器, 并将其嵌入到仪器系统的采集软件中。

前面述及, A/D 转换器的最大采样周期为 16 ms。若想实现 16 M ms 的抽样目的, 可用软件对 16 ms 采样的数据实行 1/M 的抗混叠抽样。结合采集器的特性, 可对 1/M 抗混叠滤波器作如下限定:

每种采样率对应着一个  $\omega_c$  例如对于 256 ms 采样,  $\omega_c \geq 0.01$  Hz;

为实现从 32~8 192 ms 的 9 种倍数递增采样周期, 并采用统一的抗混叠滤波器, 宜使用级联分样技术实现多级减采样; 考虑到 CPU 运算速度及 FIFO 空间的限制, 本仪器所用 FIR 滤波器的阶数经实验选定为  $N \leq 10$ ; 为避免残余混叠效应, 取抗混叠滤波器的陷落深度  $\geq 60$  dB, 同时限定通带误差  $\delta_1 \leq 1\%$ 。

经由上述的设计计算, 可得到各阶单位冲激响应  $h(n)$ :

$$h(0)=h(10)=0.004\ 740\ 944\ 036\ 41$$

$$h(1)=h(9)=0.023\ 762\ 090\ 432\ 50$$

$$h(2)=h(8)=0.065\ 388\ 064\ 142\ 10$$

$$h(3)=h(7)=0.124\ 892\ 151\ 907\ 69$$

$$h(4)=h(6)=0.179\ 936\ 875\ 895\ 57$$

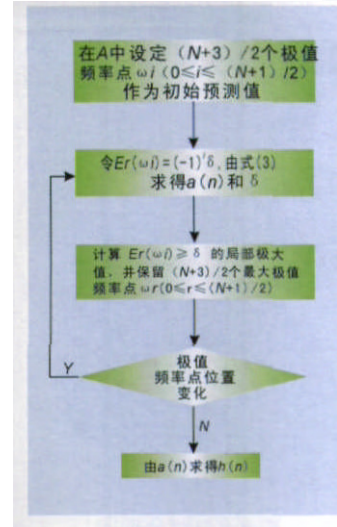


图 6 迭代过程框图

Fig. 6 The block diagram of iterative procedure

$$h(5)=0.202\ 559\ 747\ 171\ 45$$

级联分样抗混叠滤波示意图如图 7。图中仅列出 0~4 级, 分别对应的采样周期是 16 ms、32 ms、64 ms、128 ms 和 256 ms。各级抗混叠滤波器的响应为:

$$y(i) = \sum_{n=0}^N h(n) * x(i-n) \quad (5)$$

上式  $x(i)$  为分样前信号序列,  $y(i)$  为分样后的新序列,  $h(n)$  为抗混叠滤波器的单位冲激响应。

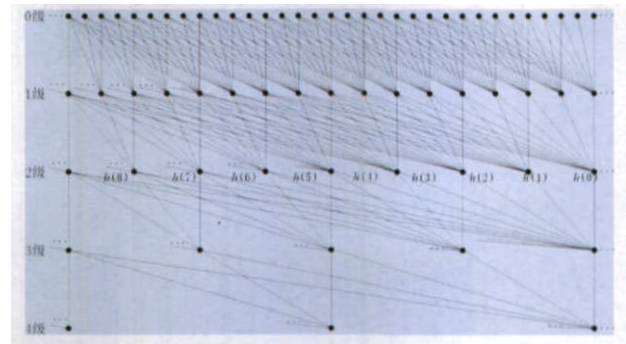


图 7 海底大地电磁仪级联分样抗混叠滤波示意图

Fig. 7 The sketch of anti-aliasing filter using cascade decimation in seafloor magnetotelluric instrument

## 4 海洋试验

前不久, 在南中国海琼东南海域进行了我国首次海陆联合大跨度、多点位海底大地电磁同步数据采集试验。试验搭载海洋四号科学考察船进行。仪器投放点位见图 8。

4 个测站的地理坐标分别位于 18°01.2379' N, 110°32.0635' E, 17°56.9608' N, 110°35.0465' E, 17°52.5032' N, 110°37.1641' E, 16°49.6957' N, 111°17.9464' E 的海底; 水深依次为 166 m、181 m、230 m 和 1 050 m。陆地远参考站设在广东地震局湛江地震台院内, 地理坐标为 21°24.4' N, 110°18.2' E。海上与陆地的联系由卫星通信实现。

作业现场显示, 仪器投放和回收成功率达到 100%。每套仪器在海底采集 3 d 数据, 工作状态良好, 4 个海底试验点都采集到高质量的海底大地电磁场数据。数据采集完成后, 仪器均顺利返回海面(见图 9)。

经数据处理后, 海底的电性成像见图 10。

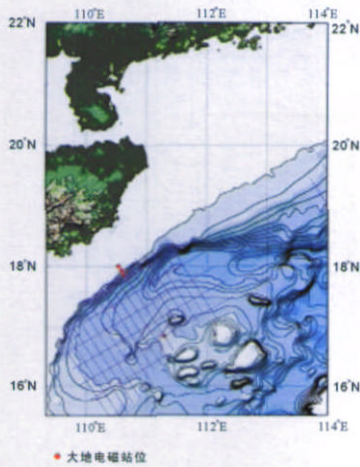


图8 海试位置图

Fig. 8 The position of marine experimentation

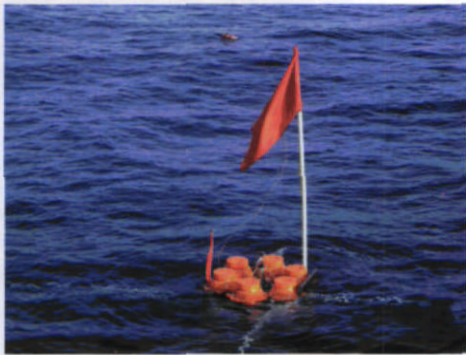


图9 海底大地电磁仪返回海面

Fig. 9 The withdrawal of the marine magnetotelluric instrument

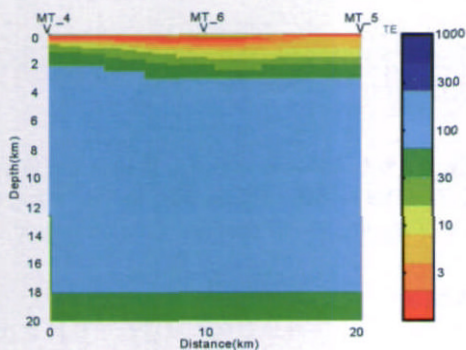


图10 海底大地电磁 $X_Y$ 模式二维反演电阻率模型图

Fig. 10 The  $X_Y$  mode two-dimension inversion resistivity modeling of the marine magnetotelluric

成像反演的电阻率模型图较清晰地反映了被测点位由浅到深的介质导电性的变化规律,揭示了被测海区地表以下的物质分层情况,这是国内海洋电磁探测首次取得的具有地质意义的电磁成像模型。

## 5 结论

1) 海陆联合大跨度、多点位海底大地电磁同步数据采集,是以岸上1个基站,海底多个测点组成的测线或测网所实施的对天然电磁场源的观测与记录。基站与每个测点通过卫星进行通讯。所有仪

器按同一个时间基准工作,独立完成数据采集。由此阵列式测量方式所获得的数据,因有同一的时间轴,故每测点之间可以相互参考,既压制了区域性的背景干扰,又有利于多种反演算法的实施。

2) 数据采集必须在海底进行。海面设备投放阶段,为确保仪器能抵达海底,应使其为负浮力系统。利用仪器底部配挂锚系,可实现仪器沉放的目的。在设备回收阶段,应设法改变海底仪器的浮力性质,使其成为正浮力系统,才可实现设备顺利返回。锚系的设计除考虑配重因素,还顾及减少海流推曳影响、避免机械脱钩误动作、摆脱海底淤泥吸附等措施。

3) 高精度应急时钟源、海底环境参数监测、超长周期电磁场测量以及抗混叠抽样等技术,体现了海底微弱地学信号检测的特殊性。与陆上测量大地电磁场的情况相比,技术范围明显拓宽,有更高的探测难度。这些技术的应用反映了海洋学科与电子、信息等相关学科交叉渗透的发展趋势。

4) 中国首次海陆联合大跨度多点位海底大地电磁同步数据采集试验的成功,表明海底大地电磁探测在中国已经实现了实用化。在未来的海洋勘查中,该技术将能发挥出其独特的优势。海底电磁成像将是人们揭示海洋深部奥秘的一种高技术手段。

(致谢:本试验搭载海洋四号科学调查船进行,该船提供了航行保障、海上作业以及后勤服务等各方面的支持,使试验得以圆满成功。谨向参试的全体同志表示诚挚的谢意。)

## 参考文献(References)

- [1] FILLOUX J H. Techniques and instrumentation for the study of natural electromagnetic induction at sea[J]. Phys Earth Planet Inter, 1973(7): 323- 328.
- [2] FILLOUX J H. North pacific magnetotelluric experiments. Electromagnetic induction in the earth and moon [M]. edited by U. Schmucker. Center for Academic Publications Japan. 1980: 33- 44.
- [3] COX C S, FILLOUX J H, GOUGH D I, et al. Atlantic lithosphere sounding. Electromagnetic induction in the earth and moon[M]. edited by U. Schmucker, Center for Academic Publications Japan. 1980: 13- 32.
- [4] BOOKER J R, CHAVE A D. Introduction to the special section on the EMSLAB- Juan de fuca experiment[J]. J Geophys Res, 1989, 94: 14093- 14098.
- [5] LIZARRALDE D, CHAVE A, SCHULTZ A. Northeastern pacific mantle conductivity profile from long - period magnetotelluric sounding using Hawaii - to - California submarine cable data [J]. Journal of geophysical research. 1995, 100(B9): 17837- 17854.
- [6] WHITE S N, CHAVE A D, FILLOUX J H. A look at Galvanic distortion in the Tasman Sea and Juan de Fuca plate [J]. J Geomag. Geoelectr, 1997, 49: 1373- 1386.
- [7] EVANS R L, TARITS P, CHAVE A D. Asymmetric electrical structure in the mantle beneath the east pacific rise at 17 °S [J]. Science, 1999, 286: 752- 756.
- [8] KERRY W KEY, STEVEN C CONSTABLE, CHESTER J WEISS. Mapping 3D salt using the 2D marine magnetotelluric method: Case study from Gemini prospect, Gulf of Mexico[J]. Geophysics, 2004, 71: B17- B27.
- [9] 魏文博, 邓明, 谭捍东, 等. 我国海底大地电磁测深技术研究的进展[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 131- 137.
- [10] 邓明, 魏文博, 邓靖武. 五分量海底大地电磁仪总成[P]. 中国: ZL00250105, 2001- 08.
- [11] 柳建新, 严崇斌, 何继善, 等. 基于相关系数的海底大地电磁阻抗 Robust 估算方法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 241- 245.
- [12] 邓明, 高绍勤. 上拉式索控脱钩器[P]. 中国: ZL00250105, 2001- 08.
- [13] 邓明, 邓靖武, 魏文博, 等. 四阶  $\Delta$  过抽样电路原理及其在微弱地学信号检测中的应用[J]. 地学前缘, 2001, 9(4): 417- 421.
- [14] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 188- 192.
- [15] 郑君里, 应晋珩, 杨为理. 信号与系统(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 228.
- [16] 奥本海姆 A, 谢弗 R W. 离散时间信号处理[M]. 黄建国, 刘树棠, 译. 北京: 科学出版社, 1998: 338- 389.

(责任编辑 胡春华)