

海底大地电磁数据采集器

邓 明 魏文博 谭捍东 金 胜 董浩斌 邓靖武

中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘 要 进行海底大地电磁数据采集,需借助于专用的水下探测设备。虽然大地电磁测深法无论是仪器或是测量手段在陆地上的应用已较为成熟,但把该方法移植到海洋中,还需解决一些与海洋探测有关的工程技术问题。主要包括:水下电场信号的提取,海底环境的监测,仪器在非实时监控运行中的纠错对策以及测量部件的密封承压等等。在研制海底大地电磁数据采集器的过程中,采用先进的材料工艺,高精度的电子线路,可靠的软件编程以及牢固的器件安装结构,有效地解决了上述技术问题。用所研制的仪器首次在我国海域进行了探测试验。

关键词 大地电磁 海洋探测 数据采集 GPS 同步 密封承压

文章编号 0001 - 5733(2003)02 - 0217 - 07 中图分类号 P631 收稿日期 2002 - 03 - 17,2002 - 12 - 10收修定稿

COLLECTOR FOR SEAFLOOR MAGNETOTELLURIC DATA

DENG MING WEI WENBO TAN HANDONG JIN SHENG DONG HAOBIN DENG JINGWU

School of Geophysical Prospecting and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract Special prospecting instruments is used when the marine magnetotelluric prospecting is carried out. Both instruments and methods of the magnetotelluric prospecting on land are mature. When these methods are transplanted to the ocean, some engineering techniques about measurement on the seafloor must be solved. They include the picking up of the electric field signal, the monitoring of the environment on the seafloor, the error correction of the instrument in the non-real time monitor status, the pressurization and seal of the measurement unit, etc. In the development of the collector for seafloor magnetotelluric data, advanced technology about material, high precision electrocircuit, the reliable method of developing software and the firm structure of the instruments are use to solve the techniques effectively. The instruments were used to measure the magnetotelluric data firstly in Chinese sea area.

Key words Magnetotelluric, Marine prospecting, Data acquisition, GPS synchronization, Seal and pressure bearing.

1 引 言

20 世纪 80 年代,电磁方法在国外被应用于湖底或海洋探测^[1,2]。从时间上看,它远落后于其他地球物理方法,如人工地震、重力、磁法等。我国在 20 世纪 90 年代以前对海洋电磁法的研究尚属空白。其中有人认识上的原因,也有探测技术尚未成熟

的原因。随着海洋地球物理研究的深入,人们逐渐发现,在一些使用地震方法效果不佳的地区,如火山岩覆盖区,碳酸盐岩、珊瑚礁等分布区,以海底岩石电性为主要研究对象的电磁法却能提供出有价值的信息。而海洋高科技的发展,给探测技术以极大的推进,这为电磁法走进海洋领域提供了契机。在诸多电磁分支方法中,大地电磁测深法以其利用天然场源、投资相对低廉以及海上作业相对容易开展等

基金项目 国家“863”计划研究项目(820 - 03 - 04),(2002AA615020)。

作者简介 邓 明,男,副教授,1956 年生,1982 年毕业于中国地质大学地球探测与信息技术专业,主要从事地学仪器的教学和科研工作。
E-mail:dengming@cugb.edu.cn

优点首先引起了人们的关注. 近十几年来, 西方学者在海洋 MT 方面逐渐走向成熟. 南太平洋的 Tasman 计划^[3], 其测线长约 360km; 北太平洋的 Juan de Fuca 计划^[4], 其测区面积达 25 万 km², 可见研究区域在不断地扩大. 至今为止, 世界上最长的 MT 测线西起檀香山, 东止加州的 Point Arena, 横跨东太平洋, 全长约 4000km^[5]; 而最大的探测深度达到了上地幔^[6]. 尽管海洋 MT 的成果令人瞩目, 然而也必须看到, 海底探测具有风险和难度, 由于仪器原因所造成的测量失败事件时有发生, 与陆上仪器相比, 海洋 MT 仪器的故障概率要高得多^[7]. 另外, 从所收集到的资料看, 目前国外水下 MT 测量的电极距一般为 6~10m^[8], 仪器观测灵敏度在 0.02 μ V/m 左右^[9], 投放深度最深达水下 4958m^[7], 而水下工作时间最长者为 3 年零 7 个月^[10]. 从这些数据推测, 国外的海洋 MT 仪器无论是在分辨率、稳定性还是在水下承压、防腐技术等方面, 都达到了相当高的水平.

我国对海洋 MT 的研究始于 20 世纪 90 年代末, 其中, 仪器开发是主要的研究内容之一.

测量海底大地电磁场, 遇到的问题首先是海水对信号的衰减作用^[11], 由此造成海底的信号幅值比陆地上微弱得多, 频率成份以中、低频为主. 其次, 当仪器系统自由下沉到达海底时, 仪器中各传感器的方位、水平姿态、仪器周围的环境条件等都难以控制, 这些都将影响数据采集的结果, 应在数据处理时予以适当校正. 因而, 在采集海底大地电磁场信号的同时, 需记录仪器在海底的状态信息. 另外, 由于仪器在海底工作, 还必须解决承压、密封等一系列问题. 所有这些, 都给电路设计、元器件和零部件的选择以及制作工艺水平等提出很高的技术要求.

2 数据采集器的功能与技术指标

2.1 主要功能

同步测量海底两个电场分量 (E_x 、 E_y) 和 3 个磁场分量 (H_x 、 H_y 、 H_z) 的时间序列数据;

分时测量与海底环境相关的状态信息, 如方位、倾斜、振动、温度等;

分不同频段定时采集, 自动改变采样率;

自动存储采集数据;

自动纠错.

2.2 主要技术指标

采集信号频带宽度: 100~0.0001Hz;

电场观测灵敏度: 0.02 μ V/m;

磁场观测灵敏度: 0.3V/nT;

同步计时精度: 10 μ s;

闪存电子盘容量: 168M;

采样率从 0.25~8192ms, 每档以倍数递增, 共 15 种可选, 在海底常用的采样率是 1ms、16ms 和 256ms 三种.

3 电场传感器件

海洋 MT 较陆上 MT 在电场信号提取手段上有更高的技术难度. 陆上测量时, 每路电场信号通过一对埋入地下的测量电极被送入电路采集通道, 磁场信号则通过磁传感器做同样的传输处理. 就传感器而言, 当用途从陆地往海下转移时, 电与磁相比, 磁的问题较容易解决. 只要把每个磁传感器装进非磁性材料的承压密封舱内, 水下磁场信号的检测就可以进行了. 然而, 电场传感器的移植问题就不那么简单, 它不但要考虑承压密封, 还要考虑如何通过海水接触途径提取被测信号. 由于海底可观测到的电场信号幅度只有微伏级, 因而要求海底的测量电极比陆上的同类产品具有更高的灵敏度和稳定性.

水下测量环境决定了电场信号必需经过从液相介质到固相介质的传递过程, 由于非同相介质相互接触会引起电化学噪声^[12], 这对观测微弱的海底电场信号是极为不利的. 因此, 寻找一种在海底高压环境下极化电位小且稳定的电极材料是研制工作的第一步. 大量的实验表明, 将银-氯化银 (Ag-AgCl) 按某一比例配方以粉末冶金工艺制成的电极在海水中具有良好的电化学性能, 这从 Ag-AgCl 本身的导电机制可定性加以说明. 其一, Ag 在实验室条件下较容易提炼成纯态, 从而排除了由于杂质造成的“电池效应”^[13] (这是噪声源之一), 且纯银在温度大体不变的环境下 (如海底环境) 电化学稳定性较好; 其次, 海水导电的物质载体是 Cl⁻ 离子, AgCl 与海水接触后, 在固相与液相的接触面上, 参与导电的主要载体是同一化学成份, 这就使得电化学噪声降到最低. 自主研发的海底电场传感器结构如图 1 所示.

图中, Ag-AgCl 电极的外型为圆柱体, 它是将 Ag-AgCl 化学粉剂在 98MPa 的压力模具内挤压成型, 并经盐酸活化处理后制成的. 图中示意, 在序号 10 的位置上, 有一圈特殊密封胶, 在该位置的左边, 电极周围充满海水, 而右边, 由于有密封胶的隔离, 保证了信号引线部分不出现浸水. 电极座与腔体间, 通过序号 11 所示的 O 型圈实现密封. 腔体的外

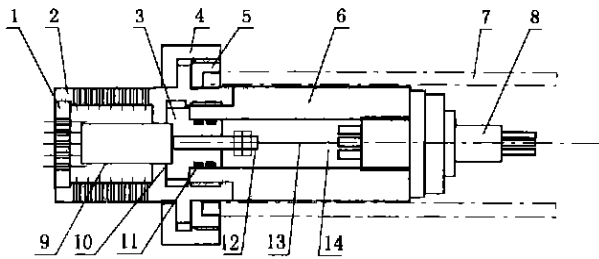


图1 海底电场传感器装配图

图中数字表示:1. 电极保护盖;2. 电极保护罩;3. 电极座;4. 锁母;5. 螺套;6. 外壳;7. ABS管;8. 多芯水密接插件;9. Ag-AgCl 电极;10. 密封胶;11. O型圈;12. 银棒;13. 信号引线;14. 腔体。

Fig. 1 The installation diagram of geoelectric field sensor for seafloor survey

壳由 ABS 材料制成。电极保护罩为圆柱形多孔罩,其作用除了保护电极在海上作业时不易碰损外,主要是减缓海水与电极的相对运动。在某一海区,虽然宏观上海水的氯离子浓度不变,可以认为 Ag-AgCl 电极周围的 Cl⁻ 离子是一个固定值。然而微观上,当海水与电极之间有相对运动时,电极周围的双电层很难维持平衡^[14],借助于一个蜂窝状多孔外罩,可有效地解决这一问题。螺套和锁母起安装固定作用,每个电场传感器由一根测量臂将其伸展到离仪器主体 5m 远的位置。测量臂是管状的,在臂的顶端,螺套与 ABS 管固紧,锁母再与螺套拧接,把电场传感器牢牢地予以固定(如图 1 所示)。

室内压力模拟试验表明,该电场传感器可承受

7.5MPa 的环境压力;水下电极稳定性试验也表明(见图 2),在有昼夜温差变化的情况下,连续 48h 观测所记录到的极差变化仅有 0.1mV 左右。可以说,该传感器基本符合海底电场测量的技术要求。

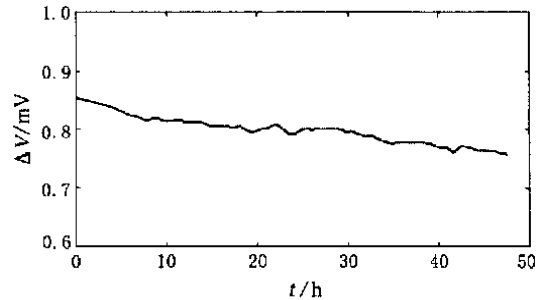


图2 海底电场传感器极差稳定性测试曲线

Fig. 2 The stability of the electrodes potential

除了电场传感器是自行开发以外,磁场传感器是借用现有陆上使用的产品。而海底环境测量所需的器件,如温度、方向、倾斜、振动等传感器,均在现有产品基础上进行了部分技术改造,以使其具有抗颠簸、低功耗和小型化的特点,适应海下设备有关装配和运行的特殊要求。

4 硬件电路的工作原理

测量海底大地电磁场 5 个场分量和海底环境状态信息的硬件原理简示于图 3。

采集电路由 6 个通道组成。1~5 通道观测大地电磁信号。第 6 通道为辅助通道,记录海底的环境

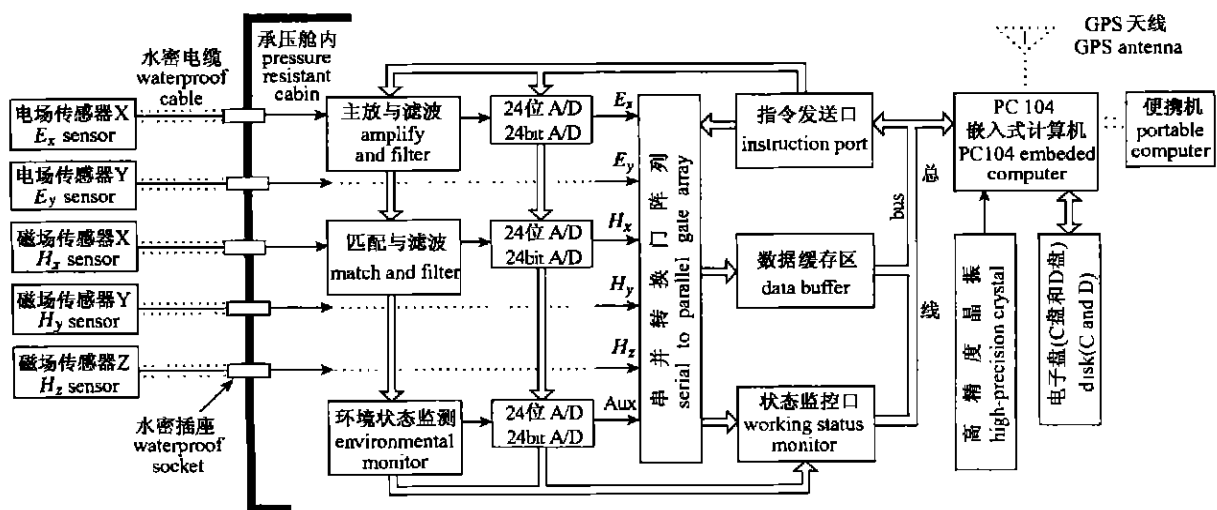


图3 海底大地电磁数据采集器硬件原理图

Fig. 3 The hardware diagram of marine magnetotelluric measurement

与状态信息. 仪器的主控单元是 PC104 嵌入式计算机. 为满足远距离参考测量的时间同步要求,并考虑到海底环境下无法接收 GPS 信号的实际情况,对原 PC104 中的实时钟模块(RTC)进行了技术更新,用高精度晶振的分频脉冲给 RTC 提供计时基准,使计算机的独立记时精度精确到微秒级.

海上投放作业之前,先在船甲板上进行仪器的 GPS 对钟和电路的初始化,通过便携计算机给 PC104 下载有关的采集指令,设置好测量起始时间、采样率、滤波选择、记录长度等参数. 在完成密封与装配工作后,仪器被投入大海.

在海底,一旦采集时间到,在同步脉冲的驱动下,各电磁通道按同一节拍启停采样窗口. 在目前的海洋试验中,本采集器选择 3 种不同的采样率进行信号观测,即对于 100~1Hz、1~0.01Hz 和 0.01~0.0001Hz 等 3 个频段的信号,分别以 1ms、16ms 和 256ms 的速率记录采集结果. 所有被测数据最终通过总线存放于电子盘中.

5 采集软件的容错技术

海底大地电磁信号采集是在测量周期长、海况变化无常的时空条件下进行. 由于作业环境、海上施工效率以及生产成本等各方面因素的制约,对放置在海底的仪器系统无法进行实时监控,由此给测量过程带来了不可预测性. 因此,电路的容错设计是不可忽视的.

5.1 模数转换器运行状态的监控

为能检测出微伏级的有用信号,采集电路中使用了高精度的 24 位模数转换器. 这种灵敏度高的转换芯片,其分辨率与抗干扰性难以实现完美结合. 一旦遇到较大的干扰,如强烈振动,电源抖动等,芯片内部的逻辑时序就可能出错. 典型故障通常表现在单值数据输出,甚至无数据输出. 对此类故障的解决办法是,通过主控计算机的某一个接口,专门对 5 个采集通道的各模数转换器实施监控. 监控程序的运行过程见图 4.

如图 4,程序进入监控状态后,主控计算机先读监控口的信息. 若发现异常,即进行连续观察与判断,以便确认异常真实存在. 个别异常有可能是瞬时的,芯片的正常状态可自行恢复. 而对于非瞬时异常的情况,就需要程序介入,对错误状态进行修复. 这时,计算机发出调控命令,将所有模数转换器强制复位. 尔后,各转换单元按统一节拍重新同步

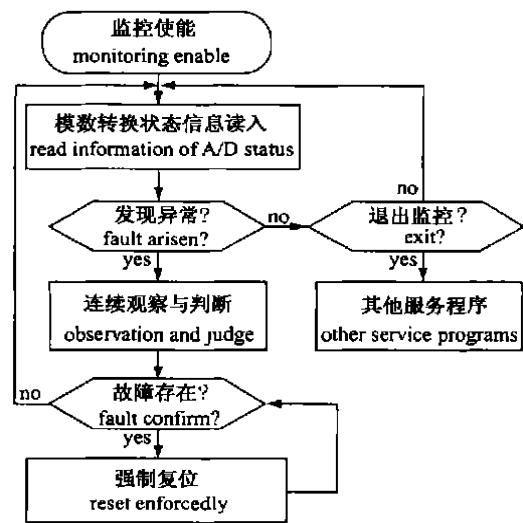


图 4 模数转换状态的监控过程

Fig. 4 The monitor and control process of analog digital conversion status

启动,以恢复正常的工作状态.

5.2 计算机重新启动问题的补偿措施

计算机的重新启动问题是海洋测量中的特殊例子. 这种现象在一般的地学测量中很少见,出错原因与强烈振动有关. PC104 虽是专为工控场合设计的,有较强的抗干扰能力. 但在剧烈颠簸的场合,如海上投放过程和下沉触底瞬间,出错的情况时有发生. 此时若没有补救措施,计算机将回到当前工作盘的提示符下,等待键盘命令的输入. 于是,海底的仪器系统只停留于等待状态,不再进行数据采集. 显然,这种情况需设法避免. 所采取的纠错对策是设计一条新的运行路径,避免计算机处于待机状态,而自动沿该路径进入采集程序. 为实现这一思路,硬件上,给计算机配备两个电子盘. 软件上,图 5 可说明此技术方案的实施过程.

主控计算机在正常启动情况下, BIOS 将当前工作盘引导至 C 盘. 在电路初始化阶段,操作人员在 C 盘上设置与海底测量有关的采集参数,并在键入采集执行命令前,将 C 盘的批处理命令修改为自动作业模式. 由于所设置的批命令已代替了人工键入的功能,当遇到计算机重新启动时,系统将自动进入采集状态,海底测量继续进行. 重新启动所造成的采集中断也只是短暂的.

数据采集完成后,回收回到船甲板上的仪器在数据回放前,需解除批命令,否则对 C 盘的操作将难以进行. 借用另一个电子盘(D 盘),在 D 盘上恢复 C 盘的原键盘命令输入模式,使 C 盘的存储数据得以回放.

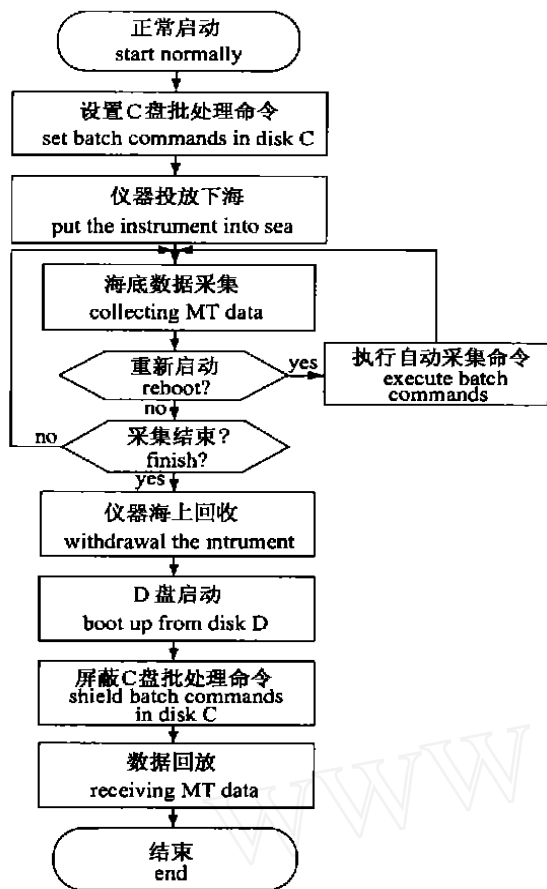


图5 用两个电子盘实现自动批处理作业的运行过程

Fig. 5 The procedure of carrying out batch program automatically by using two flash memories

6 数据采集器的安装结构

数据采集器承压密封舱设计为圆柱形,制造材料为LC4超硬铝。其外部表面经防腐工艺处理,内部有效空间约 $(\phi 180 \times 1000) \text{ mm}^3$ 。舱内划分为若干小舱。安装结构如图6所示。

7块电路板呈层迭式排放,每块电路板面积为 $(90 \times 96) \text{ mm}^2$,大小与PC104主机板相同。环境监测传感器件和电路板一起,整体被固定在与左端盖相连的圆柱形铝框架中。电池与右端盖相连并固定。这种安装结构使拆装较为方便。左、右端盖扣紧密封后,整套数据采集器可以在500m水深的高压环境下安全工作。

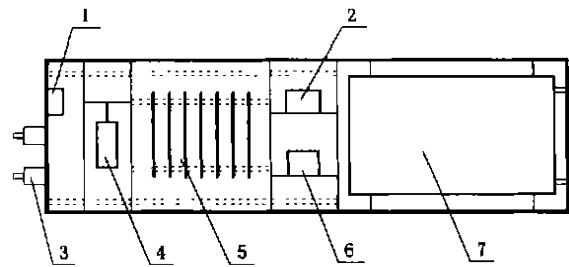


图6 数据采集器安装结构示意图

图中数字表示:1. 温度传感器; 2. 振动传感器; 3. 水密插座; 4. 方位传感器; 5. 电路板; 6. 倾斜传感器; 7. 电池。

Fig. 6 Installation diagram of data acquisition instrument

7 海洋试验

试验海区在我国台湾海峡以东,地理坐标为N25°42.33'、E122°33.79'。本数据采集器在百余米水深的海底连续工作了6天,成功地采集到5个分量的海底大地电磁场数据(部分实测结果见图7)。

时间序列曲线图7(a~c)分别对应的采样率为1ms、16ms和256ms。从曲线形态看,5个场分量有较好的相关性,这是大地电磁信号的特征之一;从信号幅度看,低采样率所测取的信号具有相对较大的幅值,这和理论预测的情况相符^[15];由图可见,垂直磁场分量 H_z 很小,表明本区域海底以下水平层状介质的物性较均匀,这与大部分海洋沉积环境的地质现象是吻合的。因而可以说,所观测到的信号是真实的海底大地电磁场信息。

图7(d)是该测量点实测数据的一维反演结果,图中表明,该点海底表层很薄,仅40m厚,电阻率0.6 m;第二层是高阻层,底界深度为8.5km,电阻率1700 m;从8.5~60km,地层电阻率降低为1200 m;其下,随着深度继续增大,地壳电阻率上升到2700 m。

除大地电磁信号测量以外,我们还从辅助信息测量中了解到了本测量点海底环境和仪器方位的一些基本情况。知道了该海区的海底地形由西北往东南倾斜,倾斜角度约0.5°。海底水温约7℃,本采集器的方位偏角为NE13°等等。

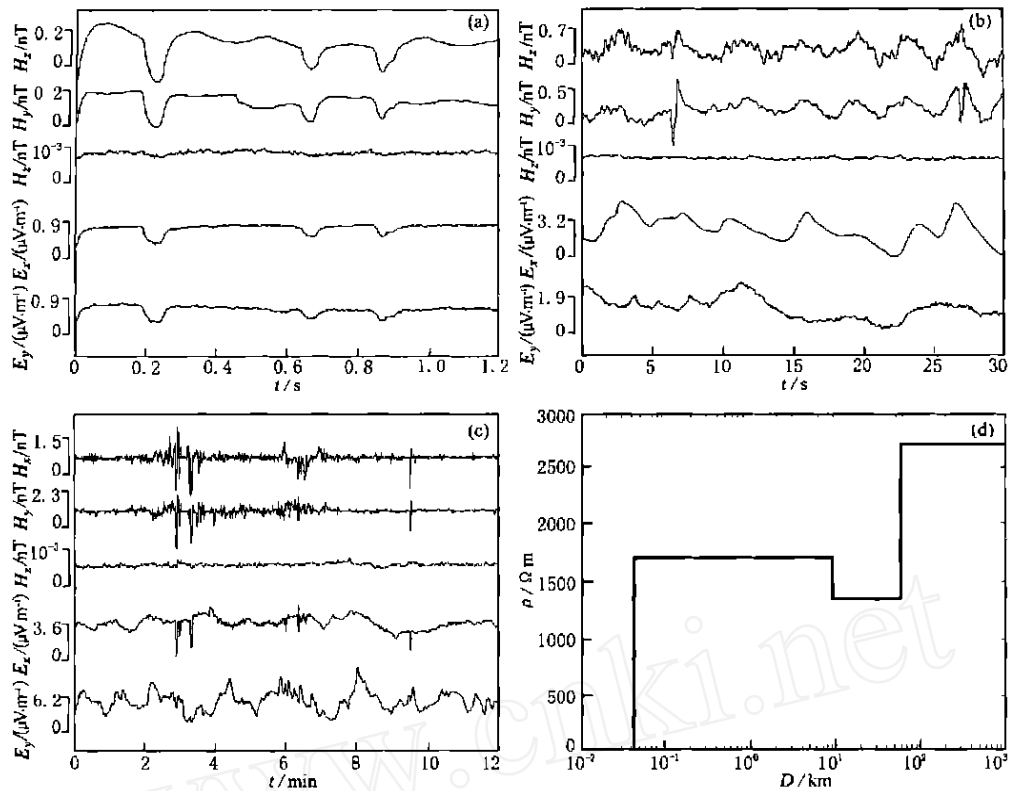


图 7 实测的海底 MT 时间序列信号及其一维反演结果

Fig. 7 The magnetotelluric time series acquired on the seafloor and their results of the 1D inversion

8 结 语

数据采集器的研制成功确保了海洋 MT 探测得以顺利开展. 在研制方案中,有以下 4 个特点.

1) 开发新型的海底电场传感器^[16]. 其中,以 Ag-AgCl 制作的水下测量电极可得到较好的测试效果.

2) 设计智能化、高灵敏度、高集成度的电路系统. 采用 PC104 嵌入式计算机、24 位 A/D 转换器和大规模集成门阵列芯片可达到所需的电路指标.

3) 编写针对海底测量环境的采集驱动软件. 着重解决采集状态监控以及消除因计算机重新启动导致的测量中断等问题.

4) 研制专用的承压密封舱^[17],给整套仪器提供安全的水下工作空间.

本课题得到了中国石油天然气总公司徐水石油物探仪器厂罗维炳教授以及中国船舶总公司青岛七二五研究所张焕荣高级工程师的技术支持. 在此表示诚挚的谢意.

参考文献

- [1] Schultz A, Booker J R, Larsen J C. Lakebottom magnetotellurics. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**:10639 ~ 10649
- [2] Chave A D, Constable S C, Edwards R N. Electrical exploration methods for seafloor. In: M N Nabighian. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, 1991, 931 ~ 934
- [3] Ferguson I J, Filloux J H, Lilley F E. A seafloor magnetotelluric sounding in the Tasman Sea. *Geophysical Research Letters*, 1985, **12** (9): 545 ~ 548
- [4] White S N, Chave A D, Filloux J H. A look at Galvanic distortion in the Tasman Sea and Juan de Fuca Plate. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1997, **49**:1373 ~ 1386
- [5] Lizarralde D, Chave A, Schultz A. Northeastern Pacific mantle conductivity profile from longperiod magnetotelluric sounding using Hawaii-to-California submarine cable data. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(B9): 17837 ~ 17854
- [6] Evans R L, Tarits P, Chave A D. Asymmetric electrical structure in the mantle beneath the East Pacific rise at 17 S. *Science*, 1999, **286**: 752 ~ 756
- [7] Chave A D, Luther D S, Filloux J H. Observations of the boundary current system at 26.5 N in the subtropical North Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 1997, **27**: 1827 ~ 1848
- [8] Nolasco R, Filloux J H. Magnetotelluric imaging of the Society Islands

- hotspot. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(B12): 30287 ~ 30309
- [9] Schultz A, Kurtz R D, Chave A D. Conductivity discontinuities in the upper mantle beneath a stable craton. *Geophysical Research Letters*, 1993, **20**(24): 2941 ~ 2944
- [10] Ikuko Fujii, Chave A D. Motional induction effect on the planetary-scale geoelectric potential in the eastern North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(C1): 1343 ~ 1359
- [11] 陈伯镛, 李桂香. 海洋高技术. 上海: 上海科学技术出版社, 1994. 173 ~ 174
- CHEN Boyong, LI Guixiang. *The High Technology of Marine*. Shanghai: Shanghai Technology Press, 1994. 173 ~ 174
- [12] 吴浩青, 李永舫. 电化学动力学. 北京: 高等教育出版社, 1998. 30 ~ 50
- WU Haoqing, LI Yongfang. *Electrochemistry Dynamics*. Beijing: Higher Education Press, 1998. 30 ~ 50
- [13] 郭鹤桐, 覃奇贤. 电化学教程. 天津: 天津大学出版社, 2000. 81 ~ 107
- GUO Hetong, TAN Qixian. *Tutorial of Electrochemistry*. Tianjin: Tianjin University Press, 2000. 81 ~ 107
- [14] 李 荻. 电化学原理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999. 21 ~ 23
- LI Di. *Theory of Electrochemistry*. Beijing: Beijing Aeronautical University Publishing House, 1999. 21 ~ 23
- [15] 魏文博, 邓 明, 谭捍东等. 利用海底大地电磁探测研究南海地壳电性结构的必要性. 见: 苏纪兰主编. 南海环境与资源基础研究前瞻. 北京: 海洋出版社, 2001. 123 ~ 132
- WEI Wenbo, DENG Ming, TAN Handong, et al. The Necessity of research the electric structure of the crust in the South China sea by using seafloor magnetotelluric prospecting. In: SU Jilan ed. *Prospect of Basic Research of Environment and Resource in the South China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 2001. 123 ~ 128
- [16] 中国地质大学(北京). 海底电场传感器组件. 发明人: 邓明, 魏文博, 金 胜. 中国专利 ZL 00250110.4, 2001-6-23
- China University of Geosciences (Beijing). The marine electrical sensor. Inventor: DENG Ming, WEI Wenbo, JIN Sheng. Chinese Patents ZL 00250110.4, 2001-6-23
- [17] 中国地质大学(北京). 海底电磁测量仪器承压舱. 发明人: 魏文博, 邓 明. 中国专利 ZL 00254753.8, 2001-6-23
- China University of Geosciences (Beijing). The pressure bearing cabin of the marine magnetotelluric prospecting instrument. Inventor: WEI Wenbo, DENG Ming. Chinese Patents ZL 00254753.8, 2001-6-23

《地球物理学报》稿约

《地球物理学报》创刊于 1948 年, 是中国地球物理学会、中国科学院地质与地球物理研究所联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物。主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理, 以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文。中文版为双月刊, 在国内外发行, 并由美国地球物理学家联合会(简称 AGU) 同步发行英文网络版。作者和读者对象主要为从事地球物理学、地球科学及其他相关学科的国内外科技工作者和大专院校师生。

《地球物理学报》荣获第二届国家期刊奖和中国科学院优秀期刊特别奖, 2001 年进入“中国期刊方阵”被评为“双高期刊”。为中国科技信息研究所信息分析中心、中国科学院引文数据库等的统计源期刊和 SCI 等国际检索系统源期刊。

1 主要栏目

- 1.1 学术论文 报道我国以及国际地球物理各分支学科及相关边缘、交叉学科的重要研究成果, 包括具有创新性的基础研究和应用基础研究成果, 以及具有重大应用价值的研究成果。一般不超过 6000 字。附中、英文摘要约 300 字, 关键词 3—8 个。
- 1.2 综述或评述 介绍国内外地球物理学和相关交叉学科在某一领域或某一专题的最新研究进展或评述。6000 字以内, 其余要求同 1.1。
- 1.3 研究短论 快捷报道地球物理学领域和相关交叉学科某项研究的重要阶段性成果, 或主要结论, 或重要发现。3000 字左右。
- 1.4 科学论坛 开展对地球物理学和相关交叉学科以及对本刊文章某一学术观点的讨论, 一般 3500 字以内。
- 1.5 学术动态 国内外有关地球物理学学术活动的报道。一般 800 字以内。“1.2”-“1.5”为不定期栏目。

2 稿件要求

- 2.1 文稿观点明确, 论据可靠, 层次分明, 论述精练, 语言准确, 符合规范, 求真反伪, 文责自负。
- 2.2 量、符号和单位 采用国家标准《量和单位》。量符号、代表变动性数字的符号以及坐标轴的符号均排斜体; 矢量、张量排黑斜体; 量符号的下标, 凡用以上符号者排斜体, 其他情况排正体。量符号在文中首次出现时, 必须给出其量名称及单位。单位一律采用国际符号, 排正体。地球物理学中常用的数学符号(自然对数的底 e , 圆周率 π , 转置 T , 虚数 i , d 中的 dx 中的 d , ∂x 中的 ∂ 等) 均排正体。外文缩写词必须符合国际规范, 在文中第一次出现时要说明中文含义。
- 2.3 图件 附最必要的图, 一般不超过 6 幅, 每幅注明图号。要求图件具科学性, 符合规范, 清晰美观, 能直接用于制版。坐标轴标目的书写以规范形式“量符号/单位”表示, 如 f / Hz , $v / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。图中内容要中、英文并列给出。对于涉及国界的图件, 必须绘制在地图出版社出版的最新地图上, 或通过 www.sbsm.gov.cn 下载。在正文中标示图的位置(画框示意), 框的下方写明图号、图题和图注(中、英文并列)。
- 2.4 表格 采用三线表, 必要时加辅线。表号和表题置于表的上方(中、英文并列)。表中量和单位的标示形式同图。表直接列于文中, 勿另置。注意表与图的内容勿重复。
- 2.5 参考文献 遵循著作权法, 凡引用他人资料、数据、方法、图表以及结果、结论的, 必须注明出处, 列出文献, 涉及版权事宜作者自负。参考文献的著录格式本刊采用“顺序编码制”, 著录格式详见“《地球物理学报》文后参考文献著录格式”。
- 2.6 提交文稿研究工作的基金来源、编号, 以及 100 字以内的第一作者简介。

3 注意事项

- 3.1 来稿一式 3 份, 计算机打印。
- 3.2 投稿者可建议 3—5 名评审者(请注明学位、职称、研究领域、单位和通讯处), 以及要求回避的评审者。供编辑部参考。
- 3.3 来稿如不符合以上要求, 将退作者修改后再投。自留稿件底稿, 刊用与否恕不退稿。作者收到本刊回执后 3 个月未接到采用通知时, 可自行处理, 双方有约定者除外。勿一稿多投。
- 3.4 来稿一经发表, 酌寄稿酬并酌收版面费。赠送抽印本 20 份及样刊。

来稿请寄: “100101 北京 9701 信箱《地球物理学报》编辑部”。E-mail: actageop@mail.igcas.ac.cn