

## 雷琼地区滩海 MT 勘探可行性试验研究

张全胜<sup>1,2</sup>, 王家映<sup>1</sup>, 叶景艳<sup>2</sup>, 王 磊<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;

2. 江苏省有色金属华东地质勘查局八一四队, 镇江 212005)

**[摘要]**为了进一步加快雷琼地区徐闻区块石油勘探进度,我们做了滩海 MT 技术论证。由于在海底密封、调整磁探头很困难,在技术论证中采用了磁电分离采集技术。文章从理论和实际资料两个方面阐述了大地磁场具有相对稳定性;利用 Chave、Filloux 推导的海底-海面水平电场与磁场关系式,处理了磁、电采集站分离不同距离和不同海水深度情况下在雷琼地区滩海采集的 MT 资料,通过与临近陆上 MT 结果对比,证明磁电分离采集技术是可行和有效的。

**[关键词]**滩海 大地电磁测深 磁电分离采集 可行性试验

**[中图分类号]**P631.3 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2006)01-0064-04

## 0 引言

21 世纪将是“海洋的时代”,海洋资源,包括海洋矿产资源的勘探开发已成为当今社会极为关注的领域。为了进一步加快雷琼地区徐闻区块石油勘探进度,查明区内地层分布及构造特征,将需要对该区开展滩海大地电磁(MT)测深概查工作。因此,首先要论证滩海 MT 工作的可行性和有效性。

本次滩海 MT 试验,位于徐闻地区水深 0~30m 的海域。从查阅已发表的文献看,在该滩海水域,采用加拿大 PHOENIX 公司生产的具有 GPS 同步功能的 V5-2000 系统进行试验,尚属首次。

国内一些单位曾在淡水湖、滩海、浅海开展了一些试验探索和勘探工作,其经验值得借鉴。1990 年中国地质大学(武汉)物探系在大庆进行过水上 MT 试验;1994 年华东地质勘查局 814 队与大庆物探公司在黑龙江省茂兴湖作过冰上 MT 试验;1994 年同济大学海洋地质系利用 V5 仪器、浙江石油勘探处利用西德仪器在太湖水域分别做过水下 MT 测深点试验。以上工作均在淡水中进行,没有进行大规模勘探。1997 年长春科技大学在辽河滩海地区水深 0~5m 的水域进行了 5 条测线 MT 勘探工作,取得了较好的地质效果<sup>[1]</sup>。中国地质大学、中南大学、广州海洋地质调查局、同济大学的研究人员联合开发研制了海底 MT 勘探仪器,并在东海、南海某海域进

行了海底 MT 测深点的试验工作,取得很大的进展,但数据采集质量依然不很理想。国家“863”计划已经将海洋 MT 列入海洋高科技之列<sup>[2]</sup>。

## 1 大地电磁测深法原理

理论上讲,海洋或滩海大地电磁测深同于陆地大地电磁测深,只是由于海水作为流动导电介质,使海洋 MT 的测量及噪声较陆上更复杂。

在常规大地电磁测深法中,某一频率的张量阻抗是采用最小二乘法原理估算的,最终可以通过求解以下方程组实现<sup>[3,4]</sup>:

$$\begin{aligned} E_x H_x^* &= Z_{xx} H_x H_x^* + Z_{xy} H_y H_x^* \\ E_x H_y^* &= Z_{xx} H_x H_y^* + Z_{xy} H_y H_y^* \\ E_y H_x^* &= Z_{yx} H_x H_x^* + Z_{yy} H_y H_x^* ; \\ E_y H_y^* &= Z_{yx} H_x H_y^* + Z_{yy} H_y H_y^* \end{aligned} \quad (1)$$

式中各项表示功率谱的算术平均值。若令:

$$\mathbf{E} = [E_x \quad E_y]^T \quad \mathbf{H} = [H_x \quad H_y]$$

$$\mathbf{H}^* = [H_x^* \quad H_y^*] \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

则式(1)写为矩阵形式为:  $[\mathbf{E} \mathbf{H}^*] = \mathbf{Z} [\mathbf{H} \mathbf{H}^*]$

所以有:  $\mathbf{Z} = [\mathbf{E} \mathbf{H}^*] [\mathbf{H} \mathbf{H}^*]^{-1}$  (2)

若设置远参考道<sup>[4]</sup>,则,

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{E} \mathbf{R}^*] [\mathbf{H} \mathbf{R}^*]^{-1} \quad (3)$$

其中, R 为远参考道的磁场或电场。

**[收稿日期]**2005-02-21; **[修订日期]**2005-06-16 **[责任编辑]**曲丽莉。

**[第一作者简介]**张全胜(1964年~),男,1985年毕业于原中南矿冶学院,获学士学位,在读博士生,高级工程师,现主要从事电磁勘探应用研究。

## 2 磁、电场分离采集技术的可行性

John F. Hermance 1975 年提出了大地电流 - 大地电磁法,以后并在海滩和地热区获得了良好的应用<sup>[5,6]</sup>。这里所谓的磁、电场分离采集技术就是大地电流 - 大地电磁法。其基本出发点是,在不大的区域内,大地磁场变化不大,大地电场的变化反映了地电结构的变化。因此,可以用一个点的磁场来代替一个不大测区的磁场。

水下密封、调整磁探头很困难,宜采用磁电分离采集技术。即将由 H - box、磁棒等组成的磁场测量系统布设到海边地质构造比较简单、人文干扰较小地段;而将由 E - box、电极、电缆组成的电场测量系统通过密封置于海底。磁电分离采集方法是否可行,需作理论与试验论证。

在均匀或水平层状模型条件下,当初始场是平面波时,地面处总磁场水平分量恒为一次磁场的两倍,而与地下介质电阻率随深度的变化无关<sup>[7]</sup>。由此得到一个重要结论:在这种条件下地面处测量的磁场分量  $H_y$  并不带有任何与地下介质电性分布有关的信息,只有电场的水平分量与地下地电断面有关。实际上 CEMP 正是基于磁场的稳定性这一事实从 MT 方法发展而来的<sup>[3]</sup>。

我们曾在云南思茅做试验研究了大地磁场的变化情况。云南思茅地区地形切割严重,地质构造相当复杂。在该区选择 sb02 - 015 点和 sb14 - 007 点,两点相距 140Km,同时观测两地的电磁场  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$  和  $E_x'$ 、 $E_y'$ 、 $H_x'$ 、 $H_y'$ ,见图 1。

图 1 显示两点磁场分量一致性很好,而电场分量有较大差异。

## 3 海底电磁场校正

理论证明<sup>[3]</sup>,水平层状介质的某一界面下的阻抗与上覆层无关,因此若磁电测量处在同一深度同一水平界面上,可以直接利用(2)或(3)式计算海底阻抗。但对于磁电分离采集方式,电场在海底测量,磁场在陆上测量,这时平面电磁波通过海洋时振幅发生衰减,尤其对于高频段,因此必须对电磁波进行校正。校正电磁波有两种方式:(1)将水底测到的电信号恢复到海水表面测量结果;(2)将陆上测到的磁信号转换到水底测量结果。在试验中我们采用了第二种方法。

Chave, Filloux(1984)给出了海底对海面的水平电场和磁场的关系式<sup>[8]</sup>:

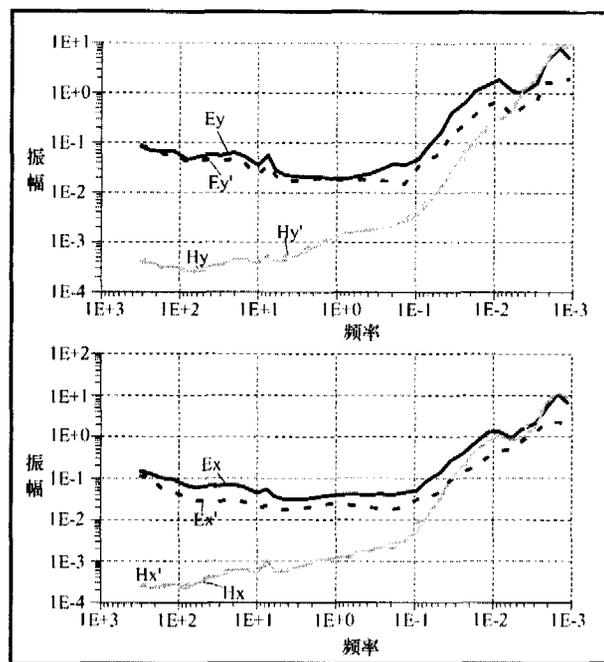


图 1 相距 140km 两测点相应电磁场分量曲线对比图

$$E_{af} = E_{sa}(1 + R_L^{PM})e^{-\gamma_0 h} / (1 + R_L^{PM} e^{-2\gamma_0 h}) \quad (4)$$

电场衰减系数为

$$C_e = (1 + R_L^{PM})e^{-\gamma_0 h} / (1 + R_L^{PM} e^{-2\gamma_0 h}) \quad (5)$$

$$B_{af} = B_{sa}(1 - R_L^{PM})e^{-\gamma_0 h} / (1 - R_L^{PM} e^{-2\gamma_0 h}) \quad (6)$$

磁场衰减系数为

$$C_b = (1 - R_L^{PM})e^{-\gamma_0 h} / (1 - R_L^{PM} e^{-2\gamma_0 h}) \quad (7)$$

其中,  $R_L^{PM} = \{SQR[R_2] - SQR[R_1]\} / \{SQR[R_1] + SQR[R_2]\}$ , 为 PM 模式的海底反射系数;  $\gamma_0 = (i\omega\mu_0\sigma_0)^{1/2}$  是感应参数或复数趋肤深度的倒数,是频率的函数;  $h$  为海底深度,  $R_1$  和  $R_2$  分别为海水和海底的电阻率<sup>[1]</sup>。

由(5)、(7)式可以计算不同  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $h$  组合下衰减系数振幅和相位的曲线,由计算结果可得到以下几个结论:①观测频率越低,衰减系数越小;②海水电阻率  $R_1$  越低,衰减系数越大;③海底电阻率  $R_2$  越低,衰减系数越小;④水深  $h$  越大,衰减系数越大。

## 4 海滩 MT 试验

### 4.1 使用的仪器设备

在本次试验中使用了加拿大 PHOENIX 公司生产的 V5 - 2000 仪器多套,该仪器具有以下特点:

1) 采用 GPS 同步,最多可接收到 8 颗卫星,同步时间精确到  $10^{-13}$ s,确保磁场和电场精确同步采集;

2) 信号采用 24 位 A/D 转换,大大提高了数字化精度;

3) 限波、滤波均以数字电路实现;

4) 重量轻, 便携式;

5) 工作温度:  $-30^{\circ} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.2 工区位置及概况

雷琼地区的自然地理环境较为复杂, 其中徐闻区块属于广东省雷州半岛的南部, 且皆为玄武岩台地, 地势较为平坦。陆区火山口屡见, 河湖众多, 城镇与村落星罗棋布。整个区块属于亚热带气候, 常年高温多雨, 年平均气温  $22.9^{\circ}\text{C}$ , 年平均降雨量为  $1929.9\text{mm}$ 。台风季节一般在  $8 \sim 10$  月份, 每年约有  $3 \sim 4$  次台风进入该区域, 最大风力在 12 级以上。

试验选在离海岸  $0 \sim 30\text{km}$  海域进行, 水深为  $10 \sim 30\text{m}$ , 海流较大, 船舶驻定相对困难, 电极布设为“L”型。由于高导电率的海水相当于一个低阻层, 单位长度上的电场信号强度相应减弱。因此, 我们把电极距加大到  $150 \sim 200\text{m}$  左右。

#### 4.3 磁、电采集站间距试验

电采集站置于海水中, 磁站在陆上移动, 分别距电采集站  $5\text{km}$ 、 $10\text{km}$ 、 $20\text{km}$ 、 $30\text{km}$  进行 4 次采集, 计算功率谱, 评价采集效果。

图 2 为距电采集站  $5\text{km}$ 、 $10\text{km}$ 、 $20\text{km}$ 、 $30\text{km}$  的磁站与同步采集的电站计算的视电阻率曲线对比图。由图可见, 4 种距离方式的视电阻率数值接近, 曲线形态特征一致, 上支均为 KHK 型, 下支为 KH-KH 型, 因而从实践上证实了磁场在水平方向上的稳定性。

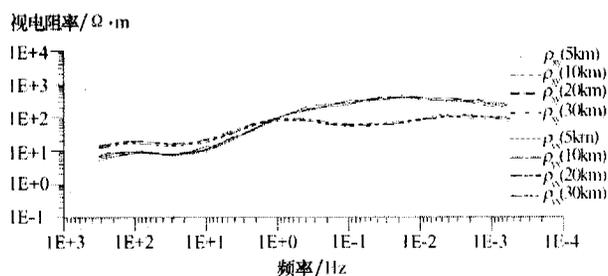


图 2 磁、电采集站间距试验对应的视电阻率曲线对比图

#### 4.4 不同海水深度 MT 采集试验

滩海试验点位选择在乌石以西海面。磁站布置于岸上, 电采集站分别布置于距海岸  $5\text{km}$  (水深约  $8\text{m}$ )、 $15\text{km}$  (水深约  $23\text{m}$ )、 $20\text{km}$  (水深约  $28\text{m}$ ) 处。

三次采集试验结果视电阻率曲线形态比较清晰 (图 3、图 4、图 5), 首尾支曲线离差小, 中频段离差较大; 并且随着海水深度的增加, 其中频段离差增大。原因有二: (1) 中频段天然电磁场相对较弱; (2) 风浪和涌浪引起的噪声影响。

图 6 为陆上 MT 测深点, 为 I 级品点, 其视电阻

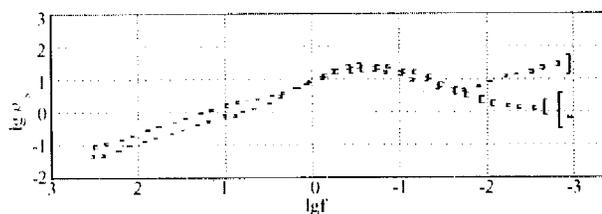


图 3 距岸 5Km 采集视电阻率曲线 (水深 8m)

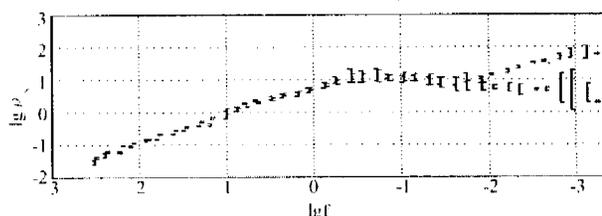


图 4 距岸 15Km 采集视电阻率曲线 (水深 23m)

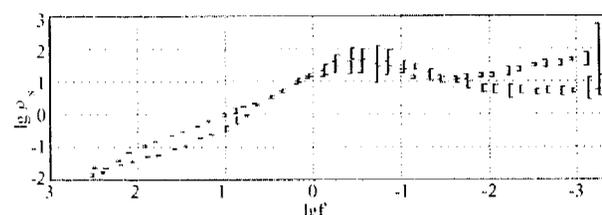


图 5 距岸 20Km 采集视电阻率曲线 (水深 28m)

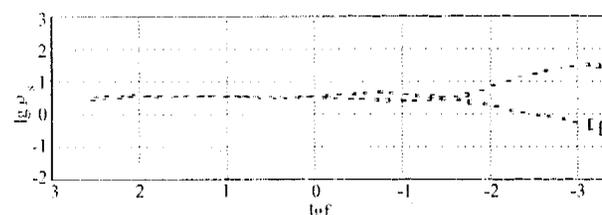


图 6 陆上电磁采集站视电阻率曲线

率首支曲线比较平直。而 3 个海上测点的视电阻率曲线首支段下掉, 并且随着海水深度的增加, 其首支段离差增大, 其原因是电场通过高导的海水而衰减所致。经式 (5) 校正后可较好地消除其影响。图 7、图 8、图 9 分别为 3 个海上采集点校正后的曲线形态。显然, 校正后的视电阻率曲线首支已上抬到正常位置, 与陆上点相比较, 其主体形态吻合较好。

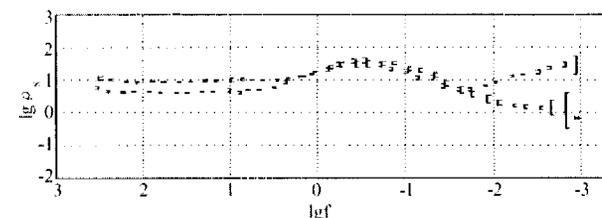


图 7 距岸 5Km 采集视电阻率改正后曲线 (水深 8m)

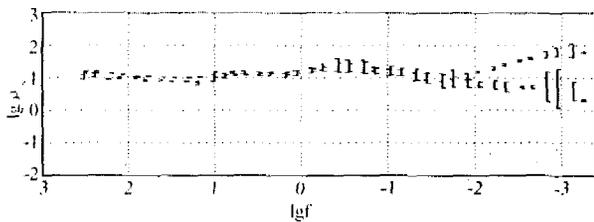


图2 距岸 15Km 采集视电阻率改正后曲线(水深 23m)

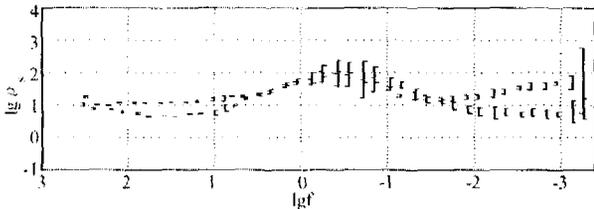


图9 距岸 20Km 采集视电阻率改正后曲线(水深 28m)

## 5 结语

通过本文的分析论证,可以得到以下几点认识:

1) 采用磁、电分离采集技术进行滩海 MT 勘探是可行和有效的。

2) 滩海 MT 试验资料(海水深 0 ~ 30m),虽比陆地测点品质稍差些,但总体上讲,其视电阻率曲线形态比较清晰、规律性较强,反映了海底下介质电性变化规律,可以用于处理解释。

3) 对于滩海 MT 试验资料,中频段曲线误差棒较大,有时出现蹦跳现象,这是由于中频段天然电磁信号相对较弱,加上风浪和涌浪形成的电磁噪声干扰的结果。改善中频段资料质量,是滩海 MT 工作的重点和难点。在后续的外业采集和数据处理中需要高度重视这一现象,通过远参考和 Robust 估算等方法压制噪声,提高数据质量<sup>[9~17]</sup>。

4) 滩海 MT 勘探的施工难度和风险较陆地大

得多,施工人员和仪器装备需要更加注意安全。

### [参考文献]

- [1] 李桐林,林君,王东坡,等. 海陆电磁噪声与滩海大地电磁测深研究[M]. 北京:地质出版社,2001.
- [2] 魏文博. 我国大地电磁测深新进展及展望[J]. 地球物理学进展,2002,17(2):245~254
- [3] 王家映. 石油电法勘探[M]. 北京:石油工业出版社,1992
- [4] 杨生,鲍光淑,张全胜. 远参考大地电磁测深法应用研究[J]. 物探与化探,2002,26(1):61~66
- [5] John F Hermance, Richard E Thayer. The telluric - magnetotelluric method[J]. Geophysics(1975) 40. 664
- [6] John A Stodt, Gerald W Hohman, Sam C Ting, The telluric - magnetotelluric method in two - and three - dimensional environments[J], Geophysics(1981) 46: 1137.
- [7] 陈乐寿,王光镔. 大地电磁测深法[M]. 北京:地震出版社,1990
- [8] Chave A D, Filloux J H. Electromagnetic induction field in the deep ocean off California; oceanic and ionospheric sources[J]. Geophys. J. R. Astr., 1984, 77: 143~171
- [9] Egbert G D, Booker J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. Geophys J Roy Astr Soc., 1986, 87: 175~194
- [10] Sutarno D, Vozoff K. Robust M - estimation of magnetotelluric impedance tensors[J]. Expl Geophys., 1989, 22: 383~398
- [11] Chave A D, Thomson D J, Ander M E. On the robust estimation of power spectra, Coherences and transfer functions[J]. J Geophys Res., 1987, 92: 633~648
- [12] 张全胜,王家映. 大地电磁测深资料的去噪方法[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(增刊)
- [13] 李桐林,翁爱华,林君. 海洋环境中大地电磁测深阻抗的 ROBUST 估计[J]. 长春科技大学学报,1999,29(1)
- [14] 柳建新,严家斌,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)
- [15] 杨生,鲍光淑,张少云. MT 法中利用阻抗相位资料对畸变视电阻率曲线的校正[J]. 地质与勘探,2001, (6): 242~45
- [16] 许建荣,朱春生,杨生. 哈尔滨 - 尚志 MT 阵列剖面研究[J]. 地质与勘探,2004, (4): 64~69
- [17] 胡玉平,鲍光淑,敬荣中. 一种改善 MT 低频数据质量的方法及其应用[J]. 地质与勘探,2002, (3): 46~48

## A FEASIBILITY TEST OF OFFSHORE MAGNETOTELLURIC PROSPECTING IN THE LEIQONG AREA

Zhang Quan - sheng<sup>1,2</sup>, Wang Jia - ying<sup>1</sup>, Ye Jing - yan<sup>2</sup>, Wang Lei<sup>2</sup>

(1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

2. No. 814 Team, Eastern - China Bureau of Nonferrous Geology Exploration, Zhenjiang 212005)

**Abstract:** In order to further speed up progress of oil prospecting in the Xuwen section of Leiqong area, the technique argumentation for offshore MT project is needed. Magnetolectricity separation collection technique is adopted, because it is very difficult to seal, orientate and level the magnetic inductor which used to measure seabed magnetic field. This paper theoretically expounds telluric magnetic field is relatively stable, and uses MT prospecting case to prove it. Relation between seabed electric field and sea surface magnetic field, deducted by Chave and Filloux (1984), is used to process the data collected by the test in which magnetic station and electric one are separated different interval and seawater depth. In contrast with land results, magnetolectricity separation technique is further proved feasible and valid.

**Key words:** offshore, magnetotelluric sounding, magnetolectricity separation collection, feasibility test