

## 水域大地电磁测深中水体对电磁场的影响

许建荣<sup>1,2</sup>, 柳建新<sup>1</sup>, 李爱勇<sup>2</sup>, 杨生<sup>3</sup>, 刘海飞<sup>1</sup>, 瓮晶波<sup>1</sup>

(1. 中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙, 410083;

2. 江苏省有色金属华东地质勘查局 八一四队, 江苏 镇江, 212005;

3. 有色金属矿产地质调查中心 北京中色物探有限公司, 北京, 100045)

**摘要:** 通过研究层状介质条件下水面与水底电磁场的关系, 计算了电磁场的衰减关系式, 获得水体对电磁场信号产生的衰减规律和在电磁信号分离采集的水域大地电磁测深勘探中对实测数据的改正方法。研究表明: 频率越高、水体的电阻率越低, 电磁场信号衰减越严重, 但水体对电场信号和磁场信号的衰减特征不同, 在同等条件下, 磁场信号的衰减幅度远大于电场的衰减幅度, 且受影响的频率范围也较宽, 电场信号的衰减主要取决于水体本身的电阻率和深度, 而磁场信号的衰减不仅与水体本身的电阻率、深度有关, 还与水体下方介质特征有关, 水下介质的电阻率越高, 磁场的衰减越严重; 在电磁信号分离采集的水域电磁测深勘探中, 水域影响可忽略的条件是: 使用 MT 法时水体深度应小于 3 m, 使用 CSAMT 法时水体深度应小于 2 m。

**关键词:** 大地电磁测深; 水域勘探; 电磁场

中图分类号: P631.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2007)03-0567-07

## Liquid effect upon electromagnetic fields in water area MT exploration

XU Jian-rong<sup>1,2</sup>, LIU Jian-xing<sup>1</sup>, LI Ai-yong<sup>2</sup>, YANG Sheng<sup>3</sup>, LIU Hai-fei<sup>1</sup>, WENG Jing-bo<sup>1</sup>

(1. School of Info-Physics Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 40083, China;

2. Team 814, East China Bureau of Nonferrometal Geological Exploration, Zhenjiang 212005, China;

3. Beijing Zhongse Geophysical Exploration Ltd, China Nonferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100045, China)

**Abstract:** By studying the relation of electromagnetic fields and impedance of sill like medium between water surface and water floor, we have gained the attenuation coefficient and the attenuation law of electromagnetic fields in water area. It is obvious that the signals are attenuated worse when the frequency increases, but the liquid attenuation characters upon electric field and magnetic field are different. First, the attenuation amplitude of magnetic field is far greater than electric field in the same condition, and the frequency effect range is wider. Second, the attenuation of electric field not only lies on mostly the character of liquid self (the depth and resistivity of liquid), but also on the media property below the water, that is, the higher the resistivity is the more severe the attenuation of the magnetic field, the attenuation of magnetic field relates to the characters of liquid medium. The condition in which the water effect can be neglected in water MT exploration of electromagnetic signal sampling is as follows: the water depth is less than 3m in MT, 2m in CSAMT.

**key words:** magnetotelluric sounding; water area MT exploration; attenuated law of electromagnetic fields; apart electromagnetic Collection Equipment; correction method

收稿日期: 2006-07-24

基金项目: 国家“863”计划项目(863-820-03-04); 国家自然科学基金资助项目(60672042)

作者简介: 许建荣(1963-), 男, 江苏苏州人, 博士研究生, 教授级高工, 从事应用地球物理勘探工作

通讯作者: 许建荣, 男, 博士研究生, 教授级高工; 电话: 13705280630; E-mail: wt814@sina.com

水域大地电磁测深(MT)泛指在海洋中的 MT 和在 内陆水域(湖泊、池塘、河流等,甚至冬季北方的冰域) 中的 MT 勘探,在海洋 MT 勘探中,原理上将电、磁 信号采集器布设在海底,勘探结果只反映海底以下介 质的电性特征,海水对其没有影响<sup>[1-2]</sup>。但由于海水对 电磁场信号的衰减,使本来就微弱的天然电磁场信号 变得更加十分微弱,所以,仪器设备不仅要考虑防水、 抗压问题,还要考虑仪器信号采集的灵敏度<sup>[3-4]</sup>,因此, 研究水体对电磁场信号的衰减规律很有意义。在内陆 水域进行 MT 勘探时,或者当 MT 勘探项目中有部分 测点布在水域中时,通常作法是:将电极布在水底采 集电场信号,将磁场布设在岸上采集磁场信号。这就 是电磁信号分离采集法<sup>[5]</sup>。由于所采集的电磁信号不 在同一界面上,实测结果必然受到水体的影响,所以, 必须研究其影响规律以及改正方法。

### 1 水面与水底的电磁场关系

对于如图 1 所示的水平层状介质,某一层(*i*)中的 电磁场为<sup>[6-7]</sup>:

$$\begin{cases} E_x = A_i e^{jk_i z} + B_i e^{-jk_i z}, \\ H_y = \frac{1}{z_i} (A_i e^{jk_i z} - B_i e^{-jk_i z}). \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $k_i = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$ ;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  为角频率;  $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m;  $\sigma_i$  为第 *i* 层介质电导率;  $z_i = \frac{\mu\omega}{k_i}$ ;  $z_{i-1} \leq z \leq z_i$ ;  $A_i$  和  $B_i$  为待定系数。  
由式(1)解得  $A_i$  和  $B_i$  为:

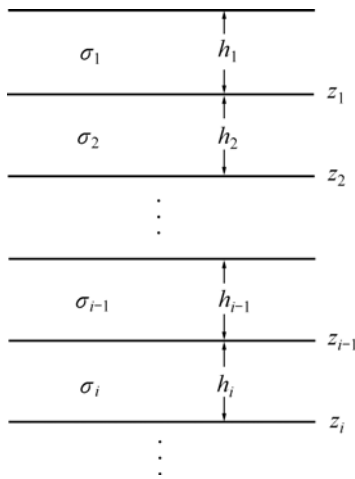


图 1 水平层状介质模型

Fig.1 Horizontal layer model

$$\begin{cases} A_i = \frac{1}{z_i} (E_x + z_i H_y) e^{-jk_i z}, \\ B_i = \frac{1}{z_i} (E_x - z_i H_y) e^{jk_i z}. \end{cases} \quad (2)$$

$$z_{i-1} \leq z \leq z_i$$

以  $E_x^{(i)}$  和  $H_y^{(i)}$  表示第 *i* 层底界面处的电磁场,  $E_x^{(i0)}$  和  $H_y^{(i0)}$  表示第 *i* 层顶界面处的电磁场,则由式(2)可得到:

$$\begin{cases} E_x^{(i)} + z_i H_y^{(i)} = (E_x^{(i0)} + z_i H_y^{(i0)}) e^{jk_i h_i}, \\ E_x^{(i)} - z_i H_y^{(i)} = (E_x^{(i0)} - z_i H_y^{(i0)}) e^{-jk_i h_i}. \end{cases} \quad (3)$$

因边界上切向电磁场的连续性,故存在以下边界 条件:

$$\begin{cases} E_x^{(i0)} = E_x^{(i-1)}, \\ H_y^{(i0)} = H_y^{(i-1)}. \end{cases} \quad (4)$$

在水域大地电磁测深勘探中,水体为第 1 层介质, 将  $i=1$  代入式(3)和式(4),有:

$$\begin{cases} E_x^{(1)} + z_1 H_y^{(1)} = (E_x^{(0)} + z_1 H_y^{(0)}) e^{jk_1 h_1}, \\ E_x^{(1)} - z_1 H_y^{(1)} = (E_x^{(0)} - z_1 H_y^{(0)}) e^{-jk_1 h_1}. \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $h_1$  为水深;  $E_x^{(1)}$  和  $H_y^{(1)}$  为水底电磁场;  $E_x^{(0)}$  和  $H_y^{(0)}$  为水面电磁场。

式(5)给出了水面与水底的电磁场关系。

### 2 水体对电磁场的衰减

电磁场从水面传播到水底时,因介质的吸收发生 衰减,定义电场和磁场的衰减系数  $C_E$  和  $C_H$  为:

$$C_E = \frac{E_x^{(1)}}{E_x^{(0)}}; \quad (6)$$

$$C_H = \frac{H_y^{(1)}}{H_y^{(0)}}. \quad (7)$$

将方程(6)两边同除以  $E_x^{(0)}$ ,两式相加消去  $z_1 \frac{H_y^{(1)}}{E_x^{(0)}}$ ,有:

$$C_E = \text{ch}(jk_1 h_1) + \frac{z_1}{z^{(0)}} \text{sh}(jk_1 h_1). \quad (8)$$

同样,对方程(6)两边同除以  $H_y^{(0)}$ ,两式相减消去

$\frac{E_x^{(1)}}{H_y^{(0)}}$ , 有:

$$C_H = \text{ch}(jk_1 h_1) + \frac{z^{(0)}}{z_1} \text{sh}(jk_1 h_1) \quad (9)$$

其中:  $z^{(0)} = \frac{E_x^{(0)}}{H_y^{(0)}}$ ;  $\text{sh}(jk_1 h_1)$  和  $\text{ch}(jk_1 h_1)$  分别为  $jk_1 h_1$  的双曲正弦函数和双曲余弦函数。

$C_E$  和  $C_H$  是频率的函数, 由式(8)和式(9)可知, 水域对电磁场的衰减不仅与水体的电阻率和深度有关, 而且与水下介质参数有关。下面通过理论模型试验来研究其衰减特征。设计的模型  $M_1$  为 4 层介质, 各层的参数为:

$$\begin{aligned} \rho_1 &= 0.25 \Omega \cdot \text{m}, h_1 = 30 \text{ m}; \rho_2 = 100 \Omega \cdot \text{m}, h_2 = 500 \text{ m}; \\ \rho_3 &= 10 \Omega \cdot \text{m}, h_3 = 1\ 000 \text{ m}; \rho_4 = 100 \Omega \cdot \text{m}. \end{aligned}$$

模型  $M_1$  中的第 1 层模拟水体(海水), 电阻率为  $0.25 \Omega \cdot \text{m}$ , 水深为 30 m。

首先计算出该模型的阻抗函数<sup>[8]</sup>  $z^{(0)}$ , 代入式(10)和式(11), 则可求出该模型条件下电磁场的衰减系数的振幅与相位的频率特性, 见图 2。由图 2 可知:

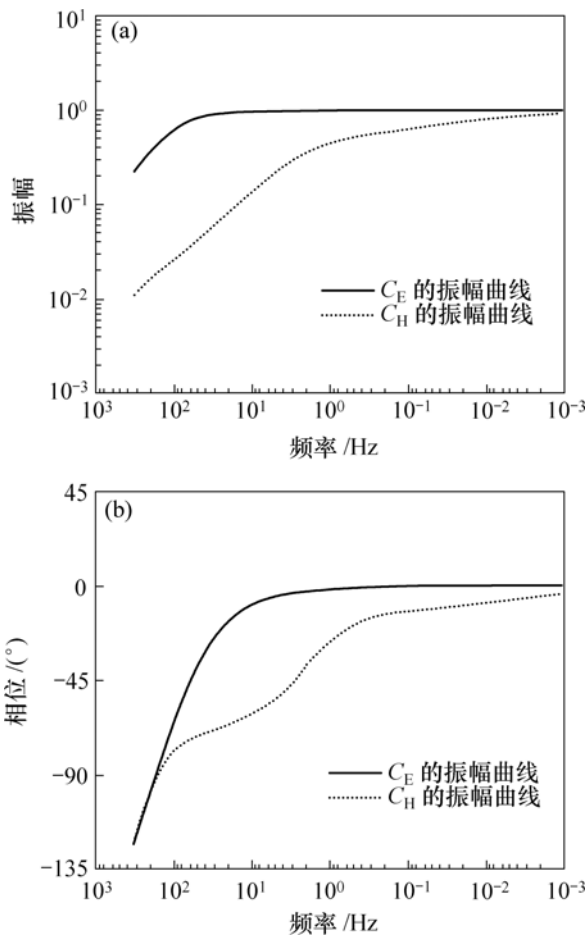


图 2 电磁场衰减系数频率特性曲线

Fig.2 Attenuated coefficient curve of electromagnetic fields

a. 水体使电磁场振幅衰减, 相位滞后, 且频率越高, 这种衰减与滞后越严重;

b. 电场仅高频信号发生衰减和相位滞后, 而磁场信号的衰减频率范围远大于电场信号的衰减频率范围, 影响到中低频的信号;

c. 水体对磁场的衰减大于对电场的衰减。

图 3 所示为图 2 的衰减系数振幅和相位对模型各参数的偏导数随频率的变化曲线。 $\lambda_i = (\rho_1, h_1, \rho_2, h_2, \rho_3, h_3, \rho_4)$ , 反映了模型参数的相对变化对衰减系数的影响特征, 也称为衰减系数对各参数的敏感度。由图 3 可见:

a. 不论是电场的衰减系数还是磁场的衰减系数, 振幅对水体的电阻率偏导数均大于 0, 说明水体的电阻率越小, 衰减系数的振幅也越小, 衰减越严重。而相位对水体的电阻率偏导数也都大于 0, 说明水体的电阻率越小, 衰减系数的相位也越小, 滞后越严重。

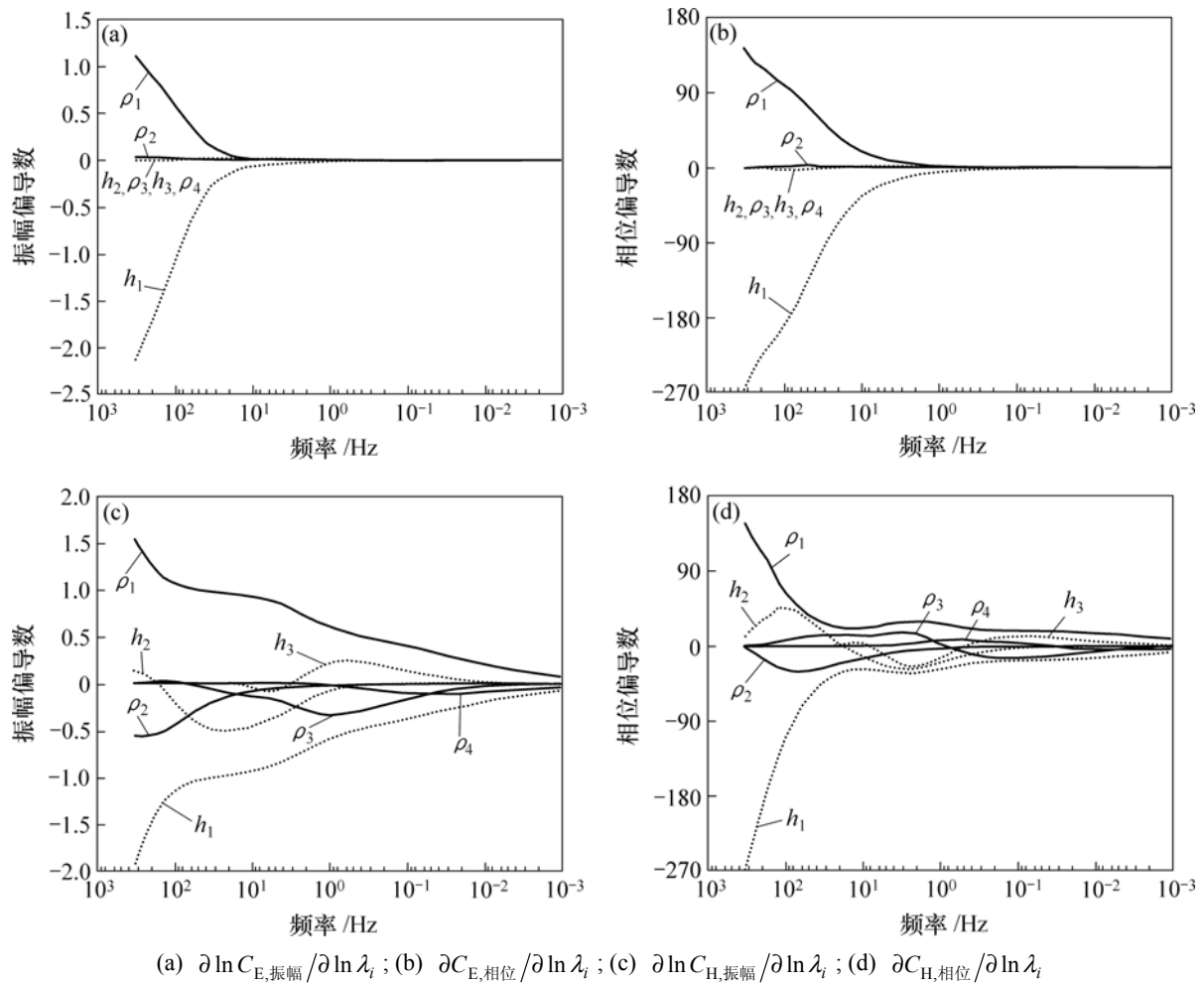
b. 衰减系数的振幅和相位对水域深度  $h_1$  的偏导数和对水体电阻率  $\rho_1$  的偏导数相反, 均小于 0, 说明水域越深, 振幅的衰减和相位的滞后越严重。

c. 水下 3 层介质的参数( $\rho_2, h_2, \rho_3, h_3, \rho_4$ )的偏导数几乎为 0(见图 3(a)和(b)), 说明这些参数的变化几乎不影响电场的衰减系数, 所以说, 水体对电场的衰减主要取决于水体本身的电阻率和深度, 与水下介质特征基本无关。但由图 3(c)和 3(d)知, 磁场的情况比较复杂, 水下各层介质参数对衰减系数都有影响。对于振幅, 对 3 个电阻率参数( $\rho_2, \rho_3, \rho_4$ )的偏导数均小于 0, 同样对  $h_2$  的偏导数也小于 0, 相反, 对  $h_3$  的偏导数大于 0, 考虑到第 3 层为相对低阻层,  $h_2$  变大和  $h_3$  变小均相当于水下介质总体电性增大, 所以, 水下介质的电阻率越高, 磁场信号的衰减越严重。图 3(d)所示的水下各层介质参数对衰减系数相位的影响更复杂。

d. 水体主要对电场的高频信号衰减, 水体深度比水体电阻率影响的频率范围要宽(图 3(a)和(b)), 而对磁场信号的衰减, 虽然总体上高频的衰减大于低频的衰减, 但频带范围较宽, 甚至全频带都有衰减, 不同深度的介质参数影响不同的频段, 深度越深, 影响的频段越低。

### 3 电磁信号分离采集水域 MT 勘探实测资料的改正

目前, 应用常规的大地电磁仪在水域(湖泊、浅海、冰域)进行大地电磁测深勘探时, 因水面不稳定, 难以将电场电极和磁场探头布设在水面进行常规布极的



(a)  $\partial \ln C_{E, \text{振幅}} / \partial \ln \lambda_i$ ; (b)  $\partial C_{E, \text{相位}} / \partial \ln \lambda_i$ ; (c)  $\partial \ln C_{H, \text{振幅}} / \partial \ln \lambda_i$ ; (d)  $\partial C_{H, \text{相位}} / \partial \ln \lambda_i$

图 3 电磁场衰减系数对各模型参数偏导数曲线

Fig.3 Models partial derivative curves of electromagnetic fields attenuated coefficient

MT 勘探。从原理上讲，将电、磁信号传感器全部布设在水底，也可进行信号采集。虽然电场电极容易布置在水底，但磁探头防水、布极困难，难以布在水底，此外，水体对磁场的衰减相当严重，信号很微弱，常规的大地电磁仪难以达到精度要求，所以，目前国内水域大地电磁测深勘探基本上采用电磁分离信号采集方法，在水底布电极采集电场信号，磁场信号在岸上采集。实测参数是水底的电场和相对于水面的磁场以及由此实时计算的视电阻率和阻抗相位，所以，需要将电场和磁场改正到同一界面上(水面或水底)，求得水面或水底的视电阻率和阻抗相位<sup>[9]</sup>。

由电、磁信号分离采集结果直接计算的阻抗为：

$$Z' = \frac{E_x^{(1)}}{H_y^{(0)}} \quad (10)$$

水面的阻抗为：

$$Z^{(0)} = \frac{E_x^{(0)}}{H_y^{(0)}} \quad (11)$$

水底的阻抗为：

$$Z^{(1)} = \frac{E_x^{(1)}}{H_y^{(1)}} \quad (12)$$

已知阻抗后，可由关系式

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega} |Z|^2 \quad (13)$$

计算相应的视电阻率  $\rho_a$ 。由式(6)，(7)和(10)~(12)可得：

$$Z^{(0)} = \frac{Z'}{C_E} \quad (14)$$

$$Z^{(1)} = \frac{Z'}{C_H} \quad (15)$$

虽然式(8)和(9)给出了  $C_E$  和  $C_H$  的表达式，但其中含有未知项  $Z^{(0)}$ ，可由方程(5)重新求取。

给方程(5)两边同除以  $E_x^{(1)}$ , 再将方程(5)中的两式相加消去  $Z_1 \frac{H_y^{(1)}}{E_x^{(1)}}$ , 解得:

$$C_E = \frac{Z'ch(jk_1h_1)}{Z' - Z_1sh(jk_1h_1)}. \tag{16}$$

对方程(5)两边同除以  $H_y^{(0)}$ , 再将方程(5)中的两式相减消去  $\frac{E_x^{(0)}}{H_y^{(0)}}$ , 解得:

$$C_H = \frac{Z_1 + Z'sh(jk_1h_1)}{Z_1ch(jk_1h_1)}. \tag{17}$$

因水体的深度和电阻率可通过实际测量获取,  $Z'$  由实测获得, 所以, 由式(13)~(17)可求出改正后的水面和水底的视电阻率与阻抗相位, 进而进行常规的大地电磁资料处理。

图 4 给出了一个将实测资料改正到水面资料的实例。测点位于我国广东雷琼地区南海海域, 距海岸约 30 km, 海水深 23 m, 海水的电阻率为  $0.25 \Omega \cdot m$ , 对实测信号进行远参考相关处理<sup>[10]</sup>和相位去噪<sup>[11]</sup>, 采用 ROBUST 方法估算阻抗张量<sup>[12-16]</sup>, 计算视电阻率和相

位。由于海水对电场衰减, 使实测的高频视电阻率仅为  $0.02 \Omega \cdot m$  左右, 阻抗相位滞后近  $90^\circ$ , 改正后, 中低频的资料几乎没有变化, 改正的主要是高频参数, 首支视电阻率恢复到  $0.25 \Omega \cdot m$  左右, 与海水的电阻率相符, 阻抗相位恢复到  $45^\circ$ 和 $-135^\circ$ 左右, MT 曲线正常。

通过改正方法求取水底视电阻率和相位, 要求所测原始数据的精度很高, 否则会发散。因原始数据存在噪声, 据实测点数据求水底的视电阻率和阻抗相位时, 其结果较零乱, 难以应用。

本文所指的水域, 除海洋外, 还包括湖泊、河流甚至池塘, 后者不仅水体较浅而且电阻率较高, 与海洋相比, 电场的衰减较弱。在大地电磁测深勘探中, 高频资料的观测误差一般为 5%, 所以, 若水体引起的视电阻率误差小于 5%, 则可忽略水体的影响。根据视电阻率和阻抗的平方关系, 为了保证视电阻率误差小于 5%, 电场的衰减系数不得小于 0.975。

由前所述, 电场的衰减与水体的电阻率呈反比, 与水体深度呈正比。为了说明电场的衰减系数与两者的组合关系, 改变模型 M1 中  $\rho_1$  和  $h_1$ , 计算衰减系数的分布情况。图 5 所示为电场衰减系数振幅的等值线图。

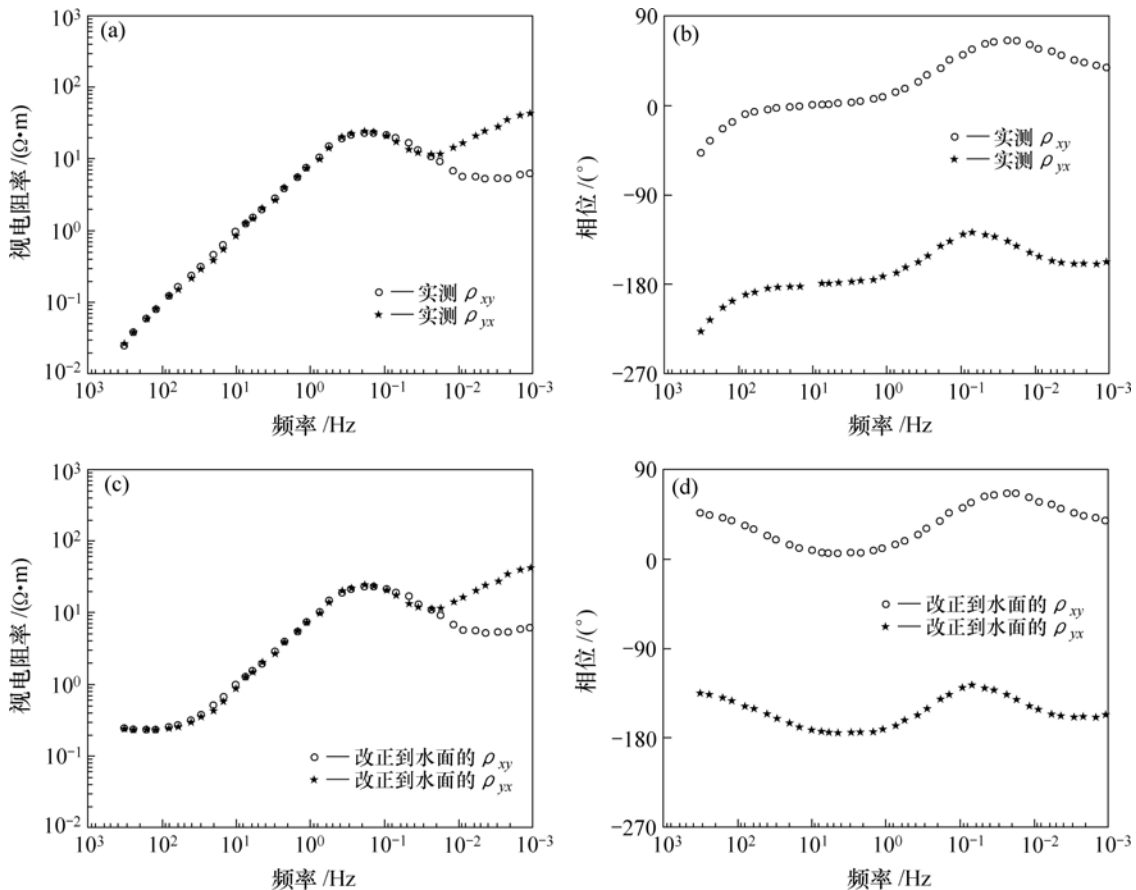
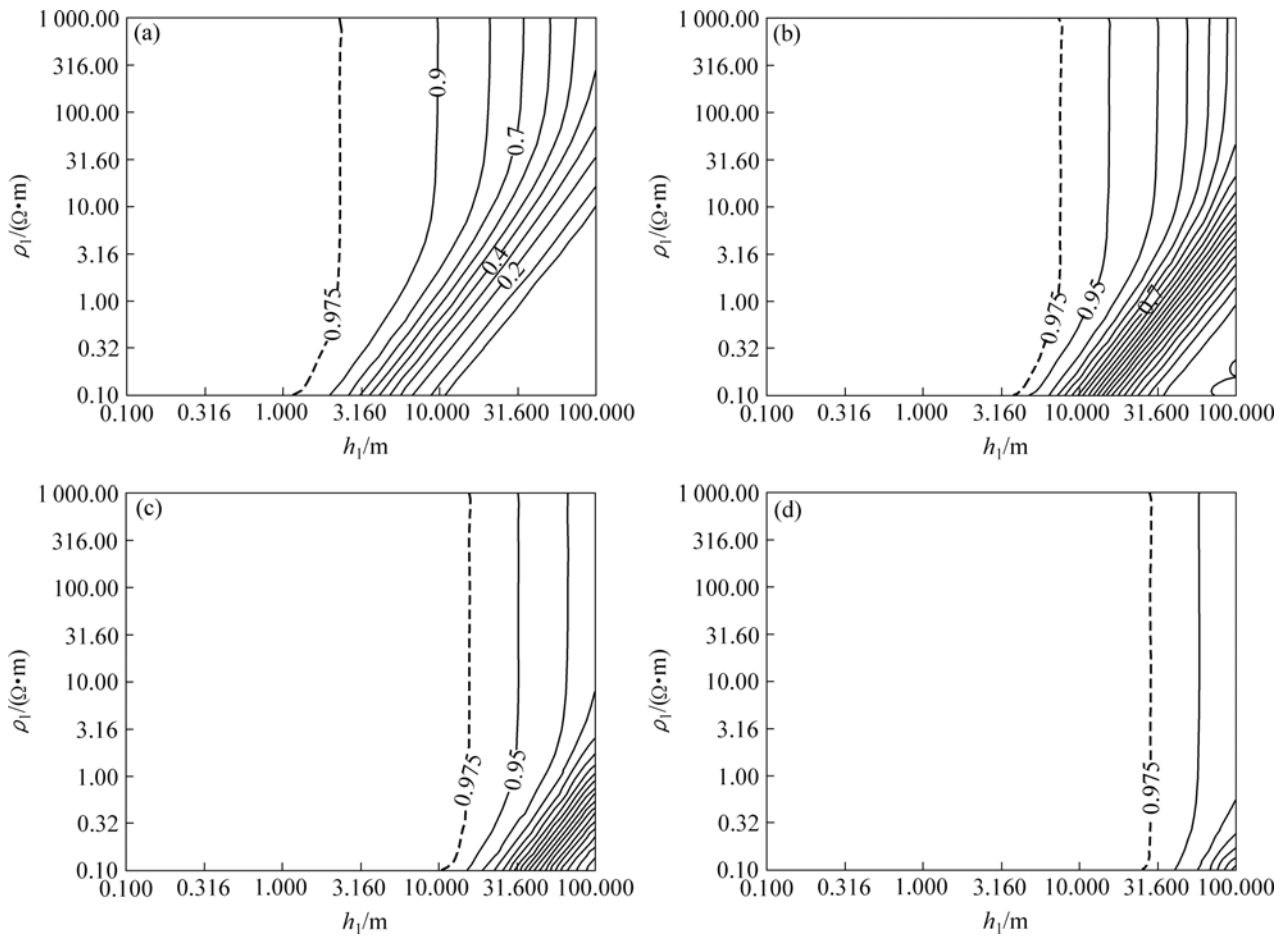


图 4 水深 23 m 时的实测资料和改正资料

Fig.4 Field data and corrected data under water of 23 m



(a) 3 kHz; (b) 300 Hz; (c) 30 Hz; (d) 3 Hz

图 5 频率不同时电场衰减系数随水体电阻率和厚度变化等值线

Fig.5 Isoline of different frequency electric fields attenuated coefficient

由图 5 可知:对于淡水区的 CSAMT 勘探,因淡水的电阻率为  $10\sim 100\ \Omega\cdot\text{m}$ , CSAMT 勘探的最高频率一般为  $3\ \text{kHz}$  左右,所以,当水深小于  $2\ \text{m}$  时,水域的影响可以忽略(图 5(a));对于 MT 勘探,水域影响可忽略的条件是:若观测的最高频率为  $300\ \text{Hz}$ ,则海水水深应小于  $3\ \text{m}$ ,淡水水深应小于  $5\ \text{m}$ (图 5(b));若观测的最高频率为  $30\ \text{Hz}$ ,则水深应小于  $15\ \text{m}$ (图 5(c));若观测的最高频率为  $3\ \text{Hz}$ ,则水深应小于  $30\ \text{m}$ (图 5(d))。

## 4 结 论

a. 通过研究水体上下界面间电磁场函数关系,推出了水底界面上电磁场的衰减系数关系式。水体对磁场的影响远大于对电场的影响。

b. 电场的衰减主要取决于水体本身的电阻率和

深度,而磁场的衰减不仅与水体本身的电阻率、深度有关,还与水下介质特征有关,水下介质的电阻率越高,磁场的衰减越严重。

c. 对于电磁信号分离采集的水域大地电磁测深勘探,推出了应用实测资料计算电磁衰减系数的关系式,利用这一关系式可对实测资料进行改正。

## 参考文献:

- [1] Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting[J]. Geophysics, 1953, 63(6): 605-636.
- [2] Chave A D, Filloux J H. Electromagnetic induction field in the deep ocean off California: oceanic and ionospheric sources[J]. Geophys J R, 1984, 77(2): 143-171.
- [3] 柳建新, 张胜业. 海底大地电磁法数据处理技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004.  
LIU Jian-xin, ZHANG Sheng-ye. Magnetotelluric sounding progressing in sea[M]. Changsha: Central University Press,

- 2004.
- [4] 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.  
WEI Wen-bo. New advance and prospect of magnetotelluric sounding in Chian[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(2): 245-254.
- [5] 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.  
LI Tong-lin, LIN Jun, WANG Dong-po, et al. The oceanic and terrestrial noise and shallow marine magnetotelluric study[M]. Geophysics Press, 2001.
- [6] Kavfman A A, Keller G V. The magnetotelluric sounding method[J]. Elsevier, 1981, 18(3): 595-603.
- [7] Hermance J F, Thayer R E. The telluric-magnetotelluric method[J]. Geophysics, 1975, 40(2): 664-675.
- [8] 陈乐寿, 刘 任, 王天生. 大地电磁测深资料处理与解释[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.  
CHEN Le-shou, LIU Ren, WANG Tian-sheng. The magnetotelluric sounding data processing and interpretation methods[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [9] 杨 生. 电磁信号分离采集水域 MT 勘探视电阻率的计算[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(5): 592-595.  
YANG Shen. Electromagnetic signal in magnetotelluric for computing resistivity[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(5): 592-595.
- [10] 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.  
YANG Shen, BAO Guang-shu, ZHANG Quan-sheng. A study on the application of remote reference magnetotelluric sounding technique[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 26(1): 61-66.
- [11] 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, 29(6): 42-45.  
YANG Sheng, BAO Guang-shu, ZHANG Shao-yun. The correction to aberrant appearance resistivity curve by using impedance phase data in magnetotelluric method[J]. Geology and Prospecting, 2001, 29(6): 42-45.
- [12] Egbert G D, Booker J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. Geophys J Roy Astr Soc, 1986, 87(2): 175-194.
- [13] 柳建新, 严家斌, 何继善, 等. 海底大地电磁数据处理的阻抗 ROBUST 估算方法[J]. 地球物理学报, 2003, 46(2): 334-340.  
LIU Jian-xin, YAN Jia-bing, HE Ji-shan, et al. Robust estimation method of sea magnetotelluric impedance based on correlative coefficient[J]. Chinese J Geophysics, 2003, 46(2): 334-340.
- [14] Sutarno D, Vozoff K. Robust M-estimation of magnetotelluric impedance tensors[J]. Expl Geophys, 1989, 22(4): 383-398.
- [15] 柳建新, 严家斌, 张胜业, 等. 多功能海底大地电磁数据处理软件包[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24(3): 234-239  
LIU Jian-xin, YAN Jia-bin, ZHANG Sheng-ye, et al. Multi-function software package of magnetotelluric data processing for the sea survey[J]. Journal of Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2002, 24(3): 234-239
- [16] 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): 33-37.  
LI Tong-lin, WENG Ai-hua, LIN-Jun. Robust estimation method of sea magnetotelluric impedance based on correlative coefficient[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999, 29(1): 33-37.