

文章编号: 1001-1749(2010)06-0617-04

# 层状介质上双频激电的电磁耦合效应

王顺国, 熊 彬

(中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 从电偶极子谐波变电磁场的基本公式出发, 研究了层状介质上双频激电的电磁耦合特点。经研究表明, 用中梯、偶极装置观测层状介质, 电磁耦合随任意层电阻率值变大而减小; 随低阻层的相对变薄而变小; 随收发距的减小而减小。此外, 用中梯测量时, 电磁耦合在  $AB$  (供电电极距) 中部最强, 远离中部时耦合效应会逐渐减小; 且供电电极距越小、离主测线越远, 电磁耦合也越小。而用偶极测量时, 供电电极距的变化对电磁耦合的影响比中梯小。

**关键词:** 双频激电; 电磁耦合效应; 层状介质

**中图分类号:** P 631.3+25 **文献标识码:** A

## 0 前言

随着激发极化法的不断发展, 电磁耦合这一问题越来越受到地球物理勘探工作者的重视。在电磁测深中, 电磁耦合含有一定地下介质的电学信息, 是电磁测深中的有用信号, 但电磁耦合在双频激电测量中是一种很强的干扰因素, 尤其在低阻覆盖区和大极距测量时, 严重影响了勘测深度与精度, 从而阻碍了激电法的推广<sup>[1]</sup>。为解决这一问题, 对电磁耦合效应进行研究是有必要的。

二十世纪中期, 国外开始深入研究激电测量中的电磁耦合效应, 并得到很多可贵结论。例如: Millett<sup>[2]</sup> 公布了在均匀半空间表面上, 偶极装置测量时实用电磁耦合计算对照表; Sunde<sup>[3]</sup> 推导了水平层状大地表面上接地导线间电磁耦合的理论解; Wynn 等<sup>[4]</sup> 改进了低阻覆盖区的激发极化勘探技术, 并提出了一种去耦的方法; Dey 等<sup>[5]</sup> 详细论述了二层介质在频率域和时间域偶极、三级装置的电磁耦合情况; Hohmann<sup>[6]</sup> 依据偶极装置, 计算出了二层模型的电磁耦合; Zonge<sup>[7]</sup> 提出高频激电效应弱而电磁效应强, 低频则反之, 据此可以利用多频测量进行校正; Pelton<sup>[8]</sup> 将感应耦合近似看作  $C = 1$  的 Cole-Cole 模型, 从观测的总响应中去掉, 以

达到校正的目的。在国内, 战克等<sup>[9]</sup> 对变频法中电磁耦合规律进行了分析, 并提出了校正方法; 何继善等<sup>[10]</sup> 从电磁耦合的时域特性着手, 提出利用时间特性分离并克服电磁耦合的方法; 熊彬等<sup>[11]</sup> 针对均匀半空间, 研究了中梯测量时二种布线方式的电磁耦合效应。作者在本文从电偶极子谐波变电磁场的基本公式出发, 用 Fortran 语言进行了中梯、偶极装置下多种模型的电磁耦合计算。

## 1 基本理论

图1及下页图2分别表示中梯、偶极装置示意图。 $AB$  是供电电极,  $ab$  是测量电极。发送电极和接收电极间的阻抗可以表示为式(1)<sup>[12]</sup>。

$$Z = Q(r_{Aa}) - Q(r_{Ab}) + Q(r_{Bb}) - Q(r_{Ba}) + \cos(\theta) \int_A^B \int_a^b P(r) ds dS \quad (1)$$

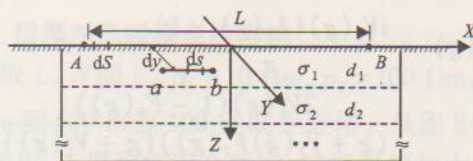


图1 中梯装置

Fig. 1 Central gradient array



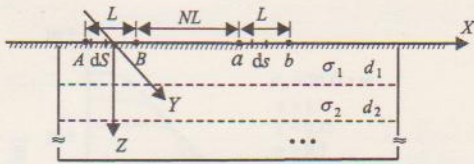


图2 偶极装置

Fig. 2 Dipole - dipole array

在式(1)中:

$$P(r) = -\frac{I}{2\pi\sigma_1} \left\{ \frac{2i}{\delta_1^3} \int_0^\infty f_3(g) J_0(gD) dg + \frac{1}{r^3} [1 - (1 + \gamma_1 r) e^{-\gamma_1 r}] \right\} \quad (2)$$

$$Q(r) = -\frac{I}{2\pi\sigma_1} \left\{ \frac{1}{\delta_1} \int_0^\infty f_7(g) J_0(gD) dg - \frac{1}{r} \right\} \quad (3)$$

其中  $\delta_1 = \sqrt{2/\mu_0\omega\sigma_1}$  为趋肤深度,在准静态假设下,  $\gamma^2 = i\mu_0\omega\sigma_1$ 。  $D = r/\delta_1$ , 而  $r_{Aa}$  为 A 到 a 的距离,  $r_{Ab}$ 、 $r_{Ba}$ 、 $r_{Bb}$  同理,  $\theta$  是 AB 与 ab 的夹角。

$\sigma_j(\omega) = \sigma'_j(\omega) + i\sigma''_j(\omega)$ , 为第 j 层频率为  $\omega$  的复电导率, 当  $\omega = 0$  时, 有  $\sigma_j(0) = \sigma'_j(0)$ 。

$$V_j(g) = \sqrt{g^2 + 2i\sigma_j(\omega)/\sigma_j(0)} \quad (4)$$

$$E_j(g) = (1 - e^{2d_j V_j(g)/\delta_1}) / (1 + e^{-2d_j V_j(g)/\delta_1}) \quad (5)$$

$$F_j(g) = \frac{V_{j+1}(g) F_{j+1}(g) + V_j(g) E_j(g)}{V_j(g) + V_{j+1}(g) F_{j+1}(g) E_j(g)} \quad (6)$$

$$L_j(g) = \frac{\sigma_j(\omega) V_{j+1}(g) L_{j+1}(g) + \sigma_{j+1}(\omega) V_j(g) E_j(g)}{\sigma_{j+1}(\omega) V_j(g) + \sigma_j(\omega) V_{j+1}(g) L_{j+1}(g) E_j(g)} \quad (7)$$

对于最底层, 存在  $F_m(g) = L_m(g) = 1.0$ , 作者在文中取  $m = 2$ 。

$$f_3(g) = \frac{g V_1(g) (1 - F_1(g))}{(g + V_1(g) F_1(g)) (g + V_1(g))} \quad (8)$$

$$f_7(g) = \frac{i V_1(g) (L_1(g) - 1)}{g} + \frac{2 V_1(g) (1 - F_1(g))}{(g + V_1(g) F_1(g)) (g + V_1(g))} \quad (9)$$

由于文中  $\theta = 0$ , 所以公式(1)可以简化为

$$Z = Q(r_{Aa}) - Q(r_{Ab}) + Q(r_{Ba}) - Q(r_{Bb}) + \int_A^B \int_a^b P(r) ds dS \quad (10)$$

可以利用阻抗的模, 也可以利用相位计算视电阻率, 作者选用模对电磁耦合效应进行分析, 有

$$F_s = \frac{|Z(f_0)| - |Z(f_1)|}{|Z(f_0)|} \cdot 100\% \quad (11)$$

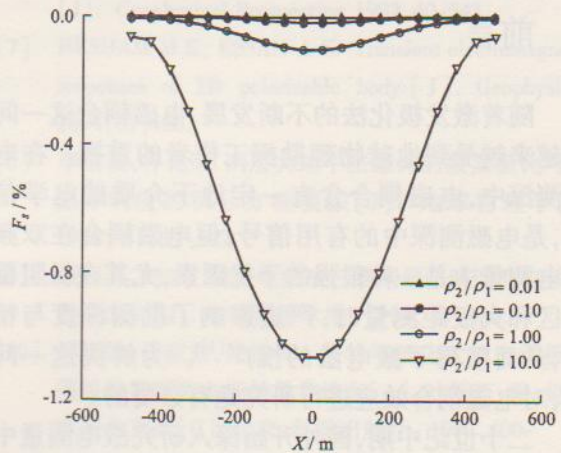
其中  $f_0$  表示低频;  $f_1$  表示高频。

为了便于解释, 作者在文中用相同的频率(低频  $f_0 = 1/13$  Hz, 高频  $f_1 = 1$  Hz)和二层模型进行研究, 上层介质的电阻率为  $\rho_1$ , 层厚为  $h_1$ ; 下层介质的电阻率为  $\rho_2$ 。

## 2 中梯装置

### 2.1 电阻率对电磁耦合的影响

取  $h_1 = 200$  m、 $AB = 1$  km、 $ab = 50$  m、 $\rho_2 = 100$   $\Omega$ m、 $\rho_1$  从 10 000  $\Omega$ m 到 10  $\Omega$ m 以 10 为倍数逐减。从图 3 可以看出, 当  $\rho_2$  不变, 而  $\rho_1$  由小变大时, 电磁耦合效应逐渐减小, 且图 3 中表明在中间位置, 电磁耦合效应最强; 远离中部时电磁耦合效应会逐渐减小。反之,  $\rho_1$  不变,  $\rho_2$  由小变大时电磁耦合效应也减小。

图3  $F_s$  随第一层介质电阻率变化的剖面图Fig. 3 Curves of  $F_s$  with the changes of resistivity to first layer

### 2.2 层厚对电磁耦合的影响

取  $AB$ 、 $ab$  同上,  $\rho_1 = 10$   $\Omega$ m、 $\rho_2 = 100$   $\Omega$ m,  $h_1$  从 200 m 到 500 m 以 100 m 间距逐增。从图 4(见下页)可以看出, 上层为低阻介质时, 随层厚的加大, 电磁耦合效应增强; 反之, 上层为高阻介质时, 随层厚的加大, 电磁耦合效应减弱。由此可知, 当层厚变化时, 电磁耦合效应随低阻层的相对变薄而变小。

### 2.3 供电极距 $AB$ 变化对电磁耦合的影响

取  $h_1 = 200$  m, 对  $\rho_1 = 100$   $\Omega$ m、 $\rho_2 = 1$  000  $\Omega$ m



的模型,极距  $AB$  从 1 000 m 到 1 300 m 以 100 m 间距逐增。从图 5 中可以得出结论:电磁耦合效应随极距  $AB$  的增大而明显增大。对  $\rho_1 > \rho_2$  的模型,可以得到相同的结论。

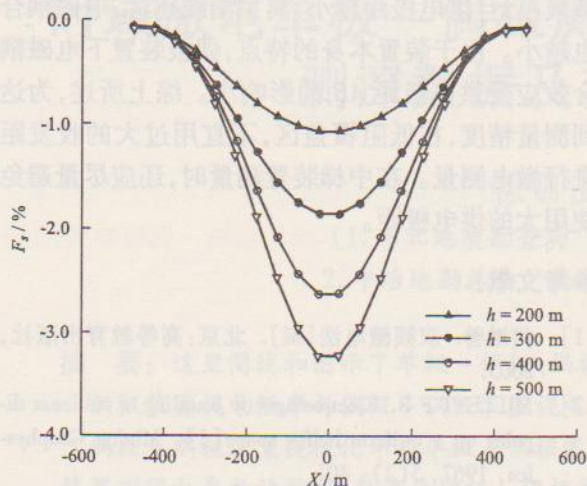


图 4  $F_s$  随第一层介质厚度变化的剖面图

Fig. 4 Curves of  $F_s$  with the changes of thickness in the first layer

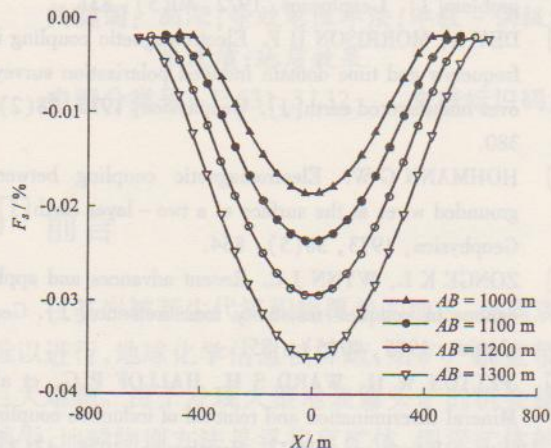


图 5  $F_s$  随极距  $AB$  变化的剖面图

Fig. 5 Curves of  $F_s$  with the changes of power-supply polar distance

#### 2.4 $AB$ 与 $ab$ 间距 $dy$ 对电磁耦合的影响

取  $h_1$  同上,对  $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ 、 $\rho_2 = 1\,000 \Omega\text{m}$  的模型,  $AB$  与  $ab$  间距  $dy$  以 20 m、30 m、40 m、50 m 变化。从图 6 看出,随间距  $dy$  的增大,电磁耦合效应减小。对  $\rho_1 > \rho_2$  的模型,可以得到相同的结论。

### 3 偶极装置

#### 3.1 电阻率对电磁耦合的影响

取  $L = 100 \text{ m}$  (如图 2,为供电极距),  $N = 1, 2,$

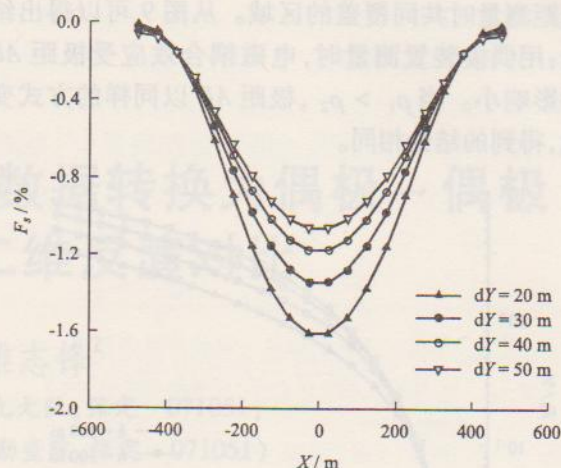


图 6  $F_s$  随  $AB$  与  $ab$  间距  $dy$  变化的剖面图

Fig. 6 Curves of  $F_s$  with the changes of parallel distance between  $AB$  and  $ab$

...、18 (为间隔系数),  $h_1 = 200 \text{ m}$ ,  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ , 使得  $\rho_1$  从  $10\,000 \Omega\text{m}$  到  $10 \Omega\text{m}$  以 10 为倍数逐减。从图 7 看出,  $\rho_2$  不变,  $\rho_1$  由小变大时电磁耦合效应减小;反之,  $\rho_1$  不变,  $\rho_2$  由小变大时电磁耦合效应也减小。并且,随着收发距的增大,电磁耦合增大。

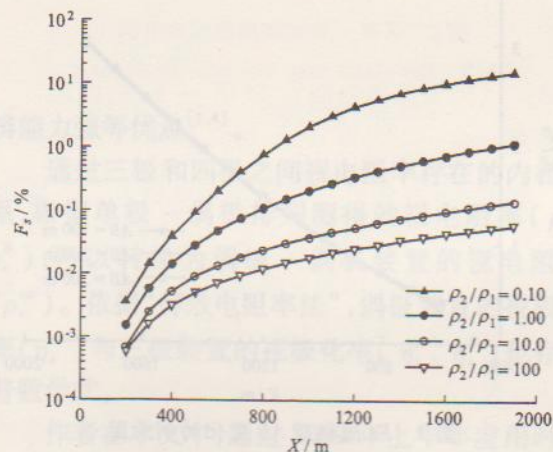


图 7  $F_s$  随第二层介质电阻率变化的剖面图

Fig. 7 Curves of  $F_s$  with the changes of resistivity in the second layer

#### 3.2 层厚对电磁耦合的影响

取  $L, N$  同上,  $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ,  $h_1$  从 200 m 到 500 m 以 100 m 间距逐增。从图 8 (见下页)看出,上层为低阻介质时,随层厚的加大,电磁耦合效应增强;反之,上层为高阻介质时,随层厚的加大,电磁耦合效应减弱。

#### 3.3 供电极距 $AB$ 变化对电磁耦合的影响

取  $h_1 = 200 \text{ m}$ ,  $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ , 极距  $AB$  以 100 m、200 m 到 300 m 变化,取这三种供电



极距测量时共同覆盖的区域。从图 9 可以得出结论:用偶极装置测量时,电磁耦合效应受极距  $AB$  的影响小。当  $\rho_1 > \rho_2$ , 极距  $AB$  以同样的方式变化,得到的结论相同。

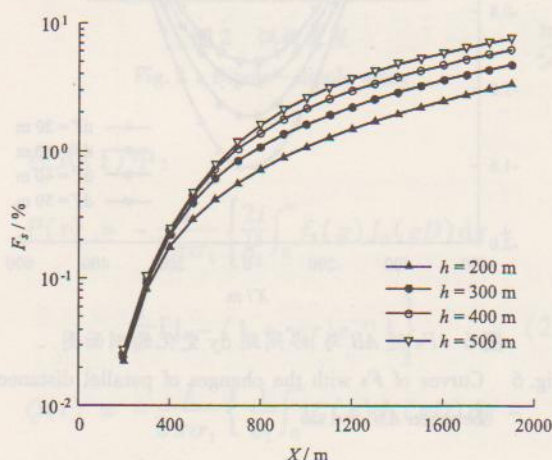


图 8  $F_s$  随第一层介质厚度变化的剖面图

Fig. 8 Curves of  $F_s$  with the changes of depth in the first layer

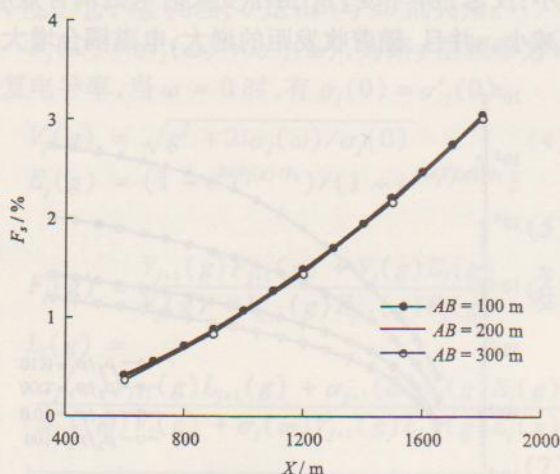


图 9  $F_s$  随极距  $AB$  变化的剖面图

Fig. 9 Curves of  $F_s$  with the changes of power-supply polar distance  $AB$

## 4 结论

在激电法适用的低频范围内,均匀半空间上的电磁耦合效应随频率的增大、收发距的增大,以及电阻率的降低而增大,这些规律有利于野外施工和去除电磁耦合干扰。由于层状介质上观测亦存在电磁耦合,所以对它的研究可以进一步去除这种干扰和指导野外施工。作者研究了二层介质时,中梯装置和偶极装置下多种参数变化对电磁耦合效应的影响。对于这二种装置,若电阻率变化,电磁耦合效应随任意层介质电阻率变大而减小;若层厚变

化,电磁耦合效应随低阻层的相对变薄而变小。在用大收发距进行激电测量时,测量结果受电磁耦合的影响较大。另外,中梯测量时,电磁耦合在  $AB$  (供电极距) 中部最强,远离中部时耦合效应会逐渐减小;且供电极距越小、离主测线越远,电磁耦合也越小。由于装置本身的特点,偶极装置下电磁耦合效应受供电极距  $AB$  的影响小。综上所述,为达到测量精度,在低阻覆盖区,不宜用过大的收发距进行激电测量。在中梯装置测量时,还应尽量避免使用大的供电极距。

## 参考文献:

- [1] 何继善. 双频激电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [2] MILLETT F B. Electromagnetic coupling of collinear dipoles on a uniform half-space[J]. Mining Geophysics, 1967, 5(2): 401.
- [3] SUNDE E D. Earth conduction effects in transmission systems[M]. New York: Dover, 1968.
- [4] WYNN J C, ZONGE K L. Electromagnetic Coupling, its intrinsic value, its removal and the cultural coupling problem[J]. Geophysics, 1972, 40(5): 831.
- [5] DEY A, MORRISON H F. Electromagnetic coupling in frequency and time domain induced polarization surveys over multilayered earth[J]. Geophysics, 1973, 38(2): 380.
- [6] HOHMANN G W. Electromagnetic coupling between grounded wires at the surface of a two-layer earth[J]. Geophysics, 1973, 38(5): 854.
- [7] ZONGE K L, WYNN J C. Recent advances and applications in complex resistivity measurements[J]. Geophysics, 1975, 40(5): 851.
- [8] PELTON W H, WARD S H, HALLOF P G, et al. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP[J]. Geophysics, 1978, 43(3): 588.
- [9] 战克, 王继伦. 变频法中电磁耦合的近似校正方法[J]. 地质与勘探, 1981, 17(4): 40.
- [10] 何继善, 熊彬, 鲍力知, 等. 激发极化观测中电磁耦合的时间特性[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 886.
- [11] 熊彬, 余云春. 双频激电法感应耦合的数值计算与分析[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(1): 30.
- [12] KAUHAIKUA J, ANDERSON W L. Programs EMCUP and SCHCOPL computation of electromagnetic coupling on a layered halfspace with complex conductivities[C]. U. S. Geological Survey Open-File Report 79-1430, 1979: 91.

作者简介: 王顺国(1987-), 男, 甘肃永登人, 硕士, 主要从事电磁法数值模拟及反演成像方面的研究。