

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^[1]。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^[2] 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^[3] 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^[4] 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^[5] 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^[6] 依据偶极装置, 计算出了二层模型的电磁耦合; Zonge^[7] 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^[8] 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^[9] 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^[10] 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^[11] 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)^[12]。

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

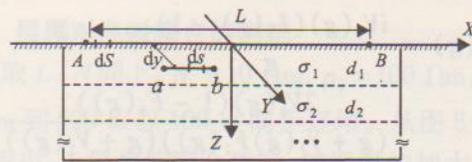


图1 中梯装置

Fig.1 Central gradient array

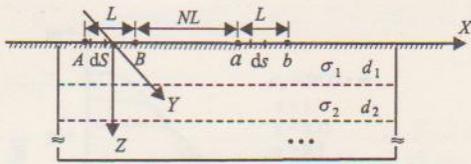


图2 偶极装置

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 $\delta_1 = \sqrt{2/\mu_0\omega\sigma_1}$ 为趋夫深度,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, θ 是 AB 与 ab 的夹角。

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

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

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

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

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

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 ρ_1 , 层厚为 h_1 ; 下层介质的电阻率为 ρ_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、 $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ 、 ρ_1 从 $10\,000 \Omega\text{m}$ 到 $10 \Omega\text{m}$ 以 10 为倍数逐减。从图 3 可以看出,当 ρ_2 不变,而 ρ_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, ρ_1 不变, ρ_2 由小变大时电磁耦合效应也减小。

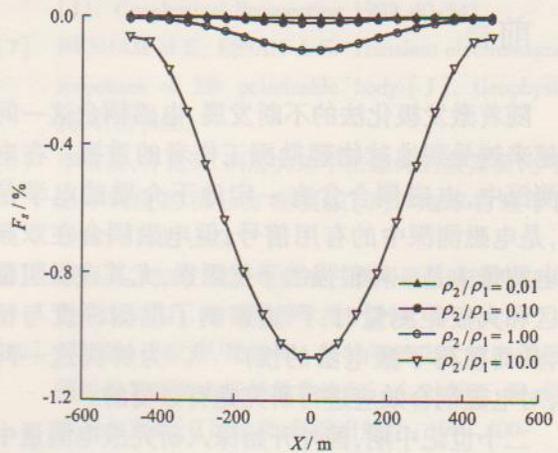


图3 F_s 随第一层介质电阻率变化的剖面图

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, $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$ 、 $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, h_1 从 200 m 到 500 m 以 100 m 间距逐增。从图 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 $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ 、 $\rho_2 = 1\,000 \Omega\text{m}$

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。

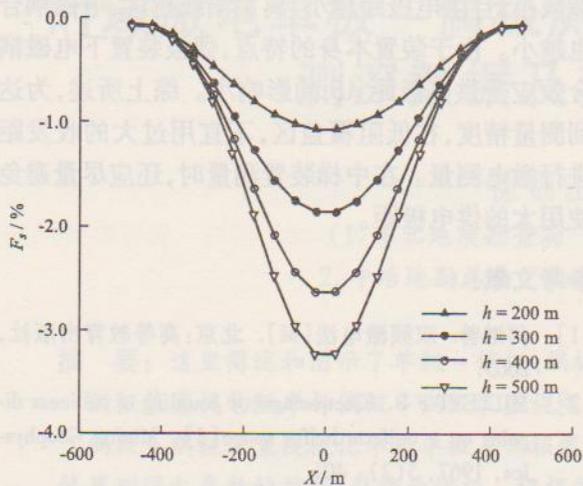


图 4 F_s 随第一层介质厚度变化的剖面图
Fig. 4 Curves of F_s with the changes of thickness in the first layer

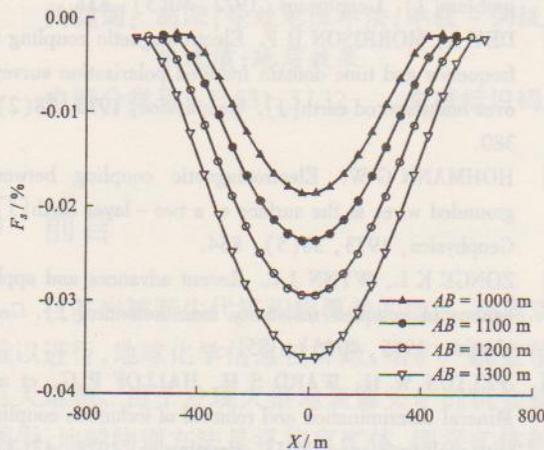


图 5 F_s 随极距 AB 变化的剖面图
Fig. 5 Curves of F_s with the changes of power - supply polar distance

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), $N = 1, 2,$

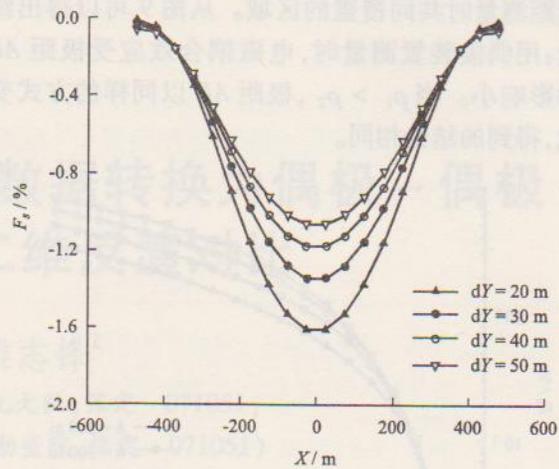


图 6 F_s 随 AB 与 ab 间距 dy 变化的剖面图
Fig. 6 Curves of F_s with the changes of parallel distance between AB and ab

...、18 (为间隔系数), $h_1 = 200 \text{ m}$, $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$, 使得 ρ_1 从 $10\ 000 \Omega\text{m}$ 到 $10 \Omega\text{m}$ 以 10 为倍数逐减。从图 7 看出, ρ_2 不变, ρ_1 由小变大时电磁耦合效应减小;反之, ρ_1 不变, ρ_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。

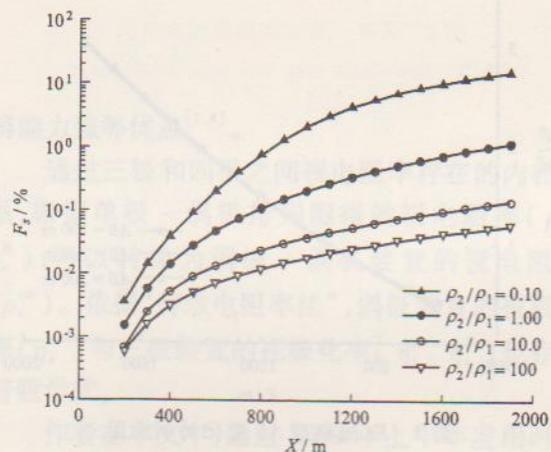


图 7 F_s 随第二层介质电阻率变化的剖面图
Fig. 7 Curves of F_s with the changes of resistivity in the second layer

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。

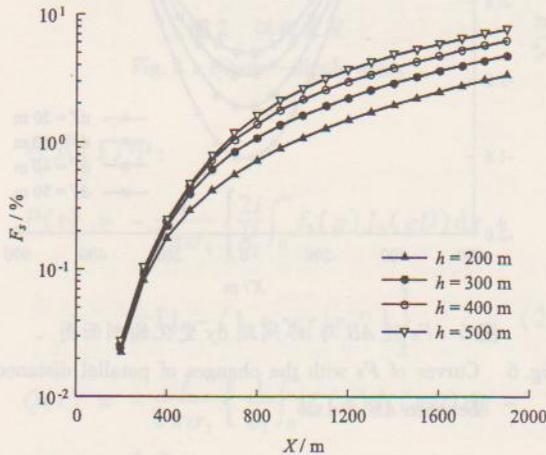


图 8 F_s 随第一层介质厚度变化的剖面图
Fig. 8 Curves of F_s with the changes of depth in the first layer

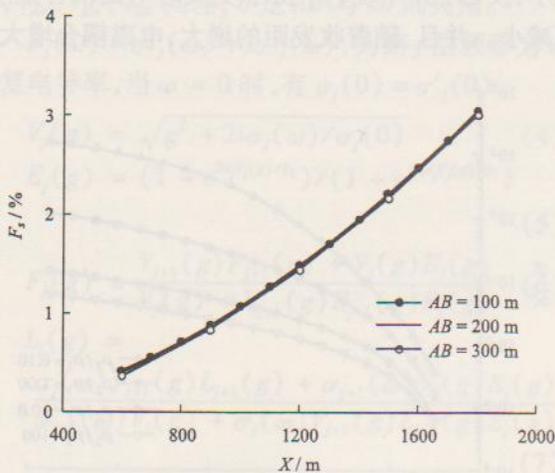


图 9 F_s 随极距 AB 变化的剖面图
Fig. 9 Curves of F_s with the changes of power-supply polar distance AB

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] KAUAHIKAUA J, ANDERSON W L. Programs EMCUPL 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。