

席振铎,徐培渊,龙霞等. 正交水平磁偶源的电磁场分布规律. 地球物理学报, 2011, **54**(6):1642~1648, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.024

Xi Z Z, Xu P Y, Long X, et al. The electromagnetic field distribution generated from the orthogonal horizontal magnetic dipole source. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(6):1642~1648, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.024

## 正交水平磁偶源的电磁场分布规律

席振铎<sup>1</sup>, 徐培渊<sup>1</sup>, 龙霞<sup>2</sup>, 王鹤<sup>1</sup>, 吴娟<sup>1</sup>, 周胜<sup>1</sup>

1 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

2 长沙五维地科勘察技术有限责任公司, 长沙 410205

**摘 要** 正交水平磁偶源是模拟天然场源的较好人工源, 可以方便地实现可控源高频大地电磁张量测量. 正交水平磁偶源的电磁场分布规律是野外工作布置的理论基础, 为此计算了均匀大地模型正交水平磁偶源的电磁场. 计算结果表明: 电磁场水平分量在各个象限都有一相对低值带, 对应的标量视电阻率形成了畸变带, 但张量视电阻率畸变带消失; 张量视电阻率曲线形态显示出近区的低阻、过渡区的高阻隆起和远区趋于真值的规律. 通过野外试验验证理论计算结果, 在无法准确确定地下介质电阻率参数的情况下, 以天然电磁场计算的电阻率为参照对比研究了正交水平磁偶源电磁场的分布规律. 试验结果表明: 正交水平磁偶源与电偶源的电磁场同样的存在近区、过渡区和远区; 在远区, 正交水平磁偶源与测点的相对位置对张量测量结果几乎没有影响, 即在远区可以在任何方位测量; 正交水平磁偶源的布置要考虑收发距的影响, 保证测量在远区进行.

**关键词** 正交水平磁偶源, 张量测量, 张量视电阻率, 浅层勘探

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.024

中图分类号 P630

收稿日期 2010-07-05, 2011-04-07 收修定稿

### The electromagnetic field distribution generated from the orthogonal horizontal magnetic dipole source

XI Zhen-Zhu<sup>1</sup>, XU Pei-Yuan<sup>1</sup>, LONG Xia<sup>2</sup>, WANG He<sup>1</sup>, WU Juan<sup>1</sup>, ZHOU Sheng<sup>1</sup>

1 School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

2 Changsha 5D Geo-survey & Technical CO., LTD, Changsha 410205, China

**Abstract** The orthogonal horizontal magnetic dipole source simulates the natural electromagnetic field well, it conveniently realizes the tensor survey of controlled electromagnetic source in a high frequency band. The field distribution of orthogonal horizontal magnetic dipole source in homogeneous isotropic medium is computed. The result indicates that the horizontal components of the electromagnetic field show a belt of relatively low value in each quadrant, the scalar apparent resistivity shows a distortion belt in the same position, while the tensor apparent resistivity doesn't show distortion belt; The tensor apparent resistivity is low in the near zone and high in the transition region, and tends to the true value in the far zone. Field experiment was carried out to confirm the numerical result. As the true resistivity of test location is unknown, the test result of orthogonal horizontal magnetic dipole source is contrasted to that of the natural electromagnetic field. The result shows that, similar to the electric dipole source, the field of orthogonal horizontal magnetic dipole source also has a near zone, a transition zone, and a far zone. In the far zone, the relative distance of the source and survey station has no effect on the

measurement result, namely, in the far zone measurement can be done in any azimuth. So the influence of separation should be considered to ensure that the measuring is in the far zone.

**Keywords** Orthogonal horizontal magnetic dipole source, Tensor measurement, Tensor apparent resistivity, Shallow exploration

## 1 引言

正交水平磁偶源由两个正交直立的线圈组成,是模拟天然场源的较好人工源,可以方便地实现可控源高频大地电磁张量测量,与接地电偶源相比,其便于发射高频电磁波,能够弥补增强大地电磁场寂静区的信号和压制高频人文电磁波干扰.以正交水平磁偶源为人工源的电磁法,是一种浅层地质勘探方法,其野外布置方便,工作效率高,在解决水文、工程或环境地质中的浅层(近地表)探测与评价问题将发挥重要作用,具有广阔的应用前景<sup>[1,2]</sup>.作为一种频率域可控源电磁法,存在着划分近区场、远区场的问题.在远区,正交水平磁偶源发射的电磁波可以看成近似垂直入射的平面波,通过计算张量阻抗得到张量视电阻率,可以采用常规大地电磁(MT)解释方法进行资料解释;在近区,电磁场不具备平面波的特征,计算得到的张量视电阻率不能反映实际的地电特征<sup>[3]</sup>.因此,正交水平磁偶源的电磁场分布规律是确定野外工作布置技术的理论基础,具有重要的实际意义.

A. Dey、S. H. Ward<sup>[4]</sup>研究了水平层状大地模型上水平磁偶源的电磁场响应情况;Nagendra P. Singh、T. Lal<sup>[5]</sup>研究了水平磁偶源在电导率呈指数变化的层状大地模型上的电磁场响应情况;Andreas Pfaffhuber<sup>[6]</sup>计算了水平磁偶源在一维情况下的电磁场响应及张量视电阻率计算;Li、Pedersen<sup>[7,8]</sup>提出的可控源张量大地电磁法(CSTMT)指出了水平偶极源的转换函数独立于场源的方向和强度.20世纪90年代末,EH-4系统采用了正交水平磁偶源,使正交水平磁偶源进入了实际应用阶段<sup>[9~11]</sup>;Mehrddad Bastani<sup>[12]</sup>提出的EnviroMT system中也采用了正交水平磁偶源.在国内,对于正交水平磁偶源的电磁场分布规律及工作方法技术,尚欠缺系统的研究.EH-4系统的人工源是正交水平磁偶源,昌彦君等<sup>[13]</sup>针对EH-4系统的场源产生的非远区场的数据进行了校正方法的研究.但在实际应用中,国内大都采用天然场源,没能合理的运用正交水平磁偶源.

本文通过理论计算及野外试验,总结出正交水平磁偶源的电磁场分布规律和不同观测位置的张量视电阻率特征,为实现采用正交水平磁偶源的电磁测深法奠定理论基础和指导野外工作场源布置.

## 2 基本理论

推导了水平层状模型时,计算正交水平磁偶源的电磁场的计算公式更具普遍适用性,为实际勘探及快速反演奠定基础.主要采用Ward、Hohman的方法<sup>[14]</sup>,首先计算 $x$ 方向水平磁偶源产生的电磁场,再经过坐标变换得到 $y$ 方向水平磁偶源的电磁场,见图1,叠加形成正交水平磁偶源的电磁场.

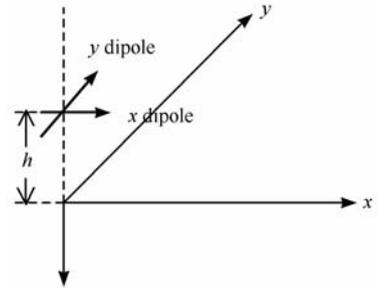


图1 正交水平磁偶源及坐标系示意图

Fig. 1 Orthogonal horizontal magnetic dipole source and coordinate system

根据有源麦克斯韦方程组,为便于求解波动方程,引入谢昆诺夫势函数,水平磁偶源场的势函数如下:

$$A_z(r, z) = -\frac{k_0^2 m}{4\pi} \frac{\partial}{\partial y} \int_0^\infty (1 + r_{TM}) e^{-u_0 h} \frac{1}{\lambda u_0} J_0(\lambda r) d\lambda, \quad (1)$$

$$F_z(r, z) = -\frac{\xi_0 m}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\infty (1 + r_{TE}) e^{-u_0 h} \frac{1}{\lambda} J_0(\lambda r) d\lambda, \quad (2)$$

式中, $m$ 为磁偶距, $z_0$ 为阻抗率, $k_0$ 为波数, $r_{TM}$ 为TM模式的反射系数, $r_{TE}$ 为TE模式的反射系数, $u$ 为等效波数, $h$ 为发射线圈离地高度, $r$ 为收发距, $\lambda$ 为波长.在准静态条件,频率低于100 kHz时,空气中的波数 $k_0 \ll \lambda$ ,地面上TE模式的反射系数为:

$$r_{TE} = \frac{\lambda - \hat{a}_1}{\lambda + \hat{a}_1}, \quad (3)$$

层状介质地表面的复波数的递推公式为:

$$\hat{u}_n = u_n \frac{\hat{u}_{n+1} + u_n \tanh(u_n h_n)}{u_n + \hat{u}_{n+1} \tanh(u_n h_n)}, \hat{u}_N = u_N, \quad (4)$$

对于均匀半空间:  $\hat{u}_1 = u_1$ .

水平磁偶源产生的电磁场由谢昆诺夫势表示为:

$$\mathbf{E} = -i\mu\omega\mathbf{A} + \frac{1}{\sigma - i\mu\omega} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \times \mathbf{F}, \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = -(\sigma - i\mu\omega)\mathbf{F} + \frac{1}{i\mu\omega} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) + \nabla \times \mathbf{A}. \quad (6)$$

式中  $\sigma$  为电导率,  $\mu$  为磁导率,  $\omega$  为角频率. 对于水平层状模型, 在此直接给出  $x$  方向水平磁偶源地表电磁场各水平分量的表达式为:

$$H_x = \frac{m}{4\pi} \left[ \left( \frac{2x^2}{r^3} - \frac{1}{r} \right) I_1 - \frac{x^2}{r^2} I_2 \right], \quad (7)$$

$$H_y = \frac{m}{4\pi} \left[ \frac{2xy}{r^3} I_1 - \frac{xy}{r^2} I_2 \right], \quad (8)$$

$$E_x = -\frac{m}{4\pi} i\mu\omega \left[ \frac{2xy}{r^3} I_3 - \frac{xy}{r^2} I_4 \right], \quad (9)$$

$$E_y = -\frac{m}{4\pi} i\mu\omega \left[ \left( \frac{2x^2}{r^3} - \frac{1}{r} \right) I_3 - \frac{x^2}{r^2} I_4 \right], \quad (10)$$

式中  $E_x$  和  $E_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的电场水平分量,  $H_x$  和  $H_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的磁场水平分量. 其中:

$$I_1 = \int_0^\infty [1 - r_{TE}(\lambda)] e^{-\lambda h} \lambda J_1(\lambda r) d\lambda,$$

$$I_2 = \int_0^\infty [1 - r_{TE}(\lambda)] e^{-\lambda h} \lambda^2 J_0(\lambda r) d\lambda,$$

$$I_3 = \int_0^\infty [1 + r_{TE}(\lambda)] e^{-\lambda h} J_1(\lambda r) d\lambda,$$

$$I_4 = \int_0^\infty [1 + r_{TE}(\lambda)] e^{-\lambda h} \lambda J_0(\lambda r) d\lambda.$$

采用 Guptasarma 和 Singh<sup>[15]</sup> 的数字滤波方法计算汉克尔积分, 采用短的滤波系数, 分别是  $J_0$  为 61 个,  $J_1$  为 47 个.

正交水平磁偶源的张量阻抗计算采用大地电磁法张量阻抗通用计算公式<sup>[16,17]</sup>:

$$Z_{xy} = \frac{E_x^{sy} H_x^{sr} - E_x^{sr} H_x^{sy}}{H_x^{sr} H_y^{sy} - H_x^{sy} H_y^{sr}}, \quad (11)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y^{sr} H_y^{sy} - E_y^{sy} H_y^{sr}}{H_x^{sr} H_y^{sy} - H_x^{sy} H_y^{sr}}. \quad (12)$$

根据张量阻抗可以得到张量视电阻率的表达式:

$$\mathbf{Z} = \frac{\omega\mu}{k} \rightarrow \rho = \frac{1}{\omega\mu} |\mathbf{Z}|^2. \quad (13)$$

### 3 理论计算及结果分析

根据水平层状模型的计算公式, 取其均匀半空

间的特例, 计算了均匀大地模型上正交水平磁偶源的电磁场分布规律, 不同收发距、不同角度、不同地电阻率对张量视电阻率的影响.

#### 3.1 正交水平磁偶源的电磁场分布规律

计算模型基本参数: 发射磁偶矩为  $400 \text{ Am}^2$ , 均匀大地电阻率为  $100 \text{ }\Omega\text{m}$ , 发送线框中心高度为  $1 \text{ m}$ , 发射频率为  $10 \text{ kHz}$ .

正交水平磁偶源的电磁场可以看作是两个相互垂直的水平磁偶源发射的电磁场叠加而成. 单个水平磁偶源产生的电磁场分量存在零带, 而两个场源产生的场叠加后零带将消失. 根据场的对称性, 此处取第一象限为例, 由图 2 可以看出, 正交水平磁偶源产生的电磁场各分量都存在一个相对低值带,  $E_x$ 、 $B_y$  和  $E_y$ 、 $B_x$  的低值带位置不同. 因此, 在图 3 中, 由  $E_x$ 、 $B_y$  计算的标量视电阻率  $\rho_x$  和  $E_y$ 、 $B_x$  计算的标量视电阻率  $\rho_y$  都有一个高阻畸变带, 在远区畸变影响较小, 视电阻率与地电阻率几乎相同. 图 4 中, 张量视电阻率  $\rho_{xy}$  和  $\rho_{yx}$  都没有出现上述畸变带, 证明在电磁场低值带处也可进行张量测量, 与 Li、Pedersen<sup>[7,18]</sup> 计算的相互垂直的电偶源张量视电阻率的结果类似.

因此正交水平磁偶源产生的电磁场各分量存在相对低值带. 标量视电阻率在低值带处产生畸变, 标量测量要分扇区, 避免在畸变处测量. 张量视电阻率则不受低值带影响, 没有出现畸变, 表明在远区, 可以在任何方位进行张量测量.

#### 3.2 张量视电阻率 $\rho_{xy}$ 与收发距、夹角、地电阻率的关系

发射磁偶矩为  $400 \text{ Am}^2$ , 发射频率从  $10 \text{ Hz}$  到  $100 \text{ kHz}$ , 计算了张量视电阻率  $\rho_{xy}$  与收发距、夹角、地电阻率的关系.

图 5a 为不同收发距对张量视电阻率  $\rho_{xy}$  的影响, 地电阻率取  $100 \text{ }\Omega\text{m}$ , 收发距  $r$  取  $100 \sim 500 \text{ m}$ , 在近区和过渡区  $\rho_{xy}$  明显与  $r$  有关, 并不反映地下的真实电阻率. 随着  $r$  的增大, 到达远区的频率变小. 图 5b 为  $y$  坐标固定为  $400 \text{ m}$ , 偏离中垂线不同角度对张量视电阻率  $\rho_{xy}$  的影响, 角度分别取  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ , 随着角度的增大, 收发距也相应增大, 到达远区的频率变小. 不同场源角度时张量视电阻率曲线形态相同. 图 5c 为不同地电阻率对张量视电阻率  $\rho_{xy}$  的影响, 收发距为  $250 \text{ m}$ , 地电阻率取  $10 \sim 3000 \text{ }\Omega\text{m}$ , 随着地电阻率的增大,  $\rho_{xy}$  到达远区的频率也随之增大.

由以上曲线可以看出, 近区张量视电阻率为低

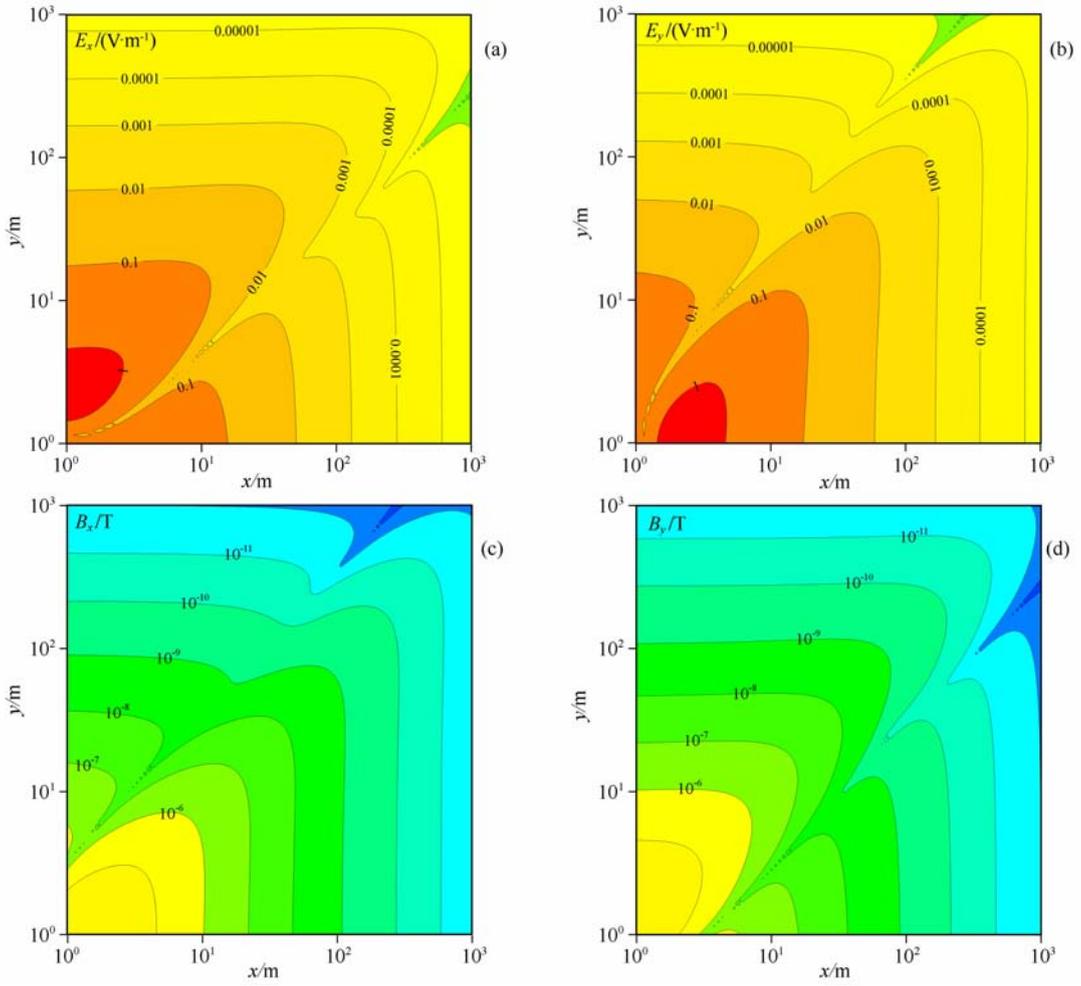


图 2 正交水平磁偶源的电磁场水平分量振幅空间分布示意图

Fig. 2 The amplitude of the horizontal component of the electromagnetic field distribution diagram from the orthogonal horizontal magnetic dipole source

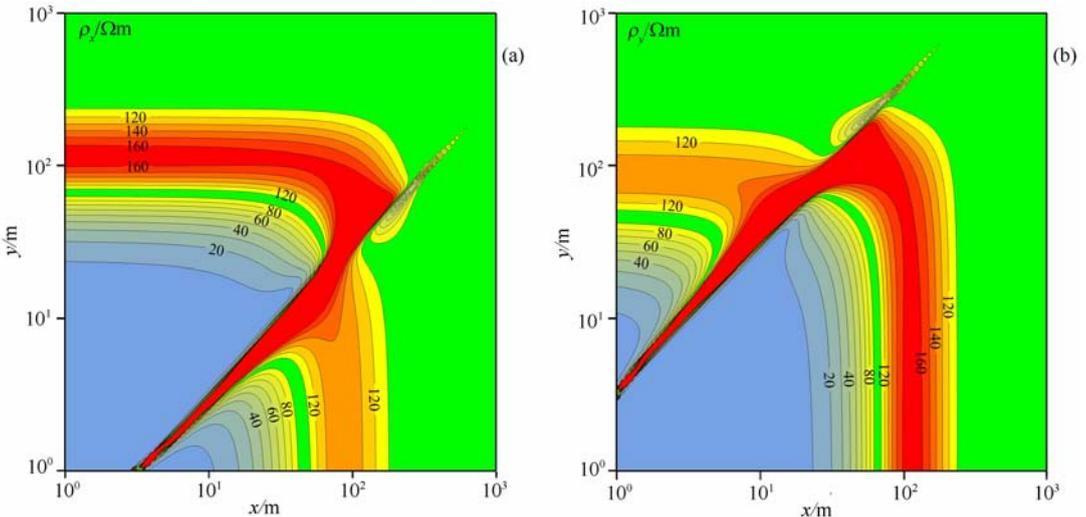


图 3 正交水平磁偶源的标量视电阻率空间分布示意图

Fig. 3 Scalar apparent resistivity distribution diagram from the orthogonal horizontal magnetic dipole source

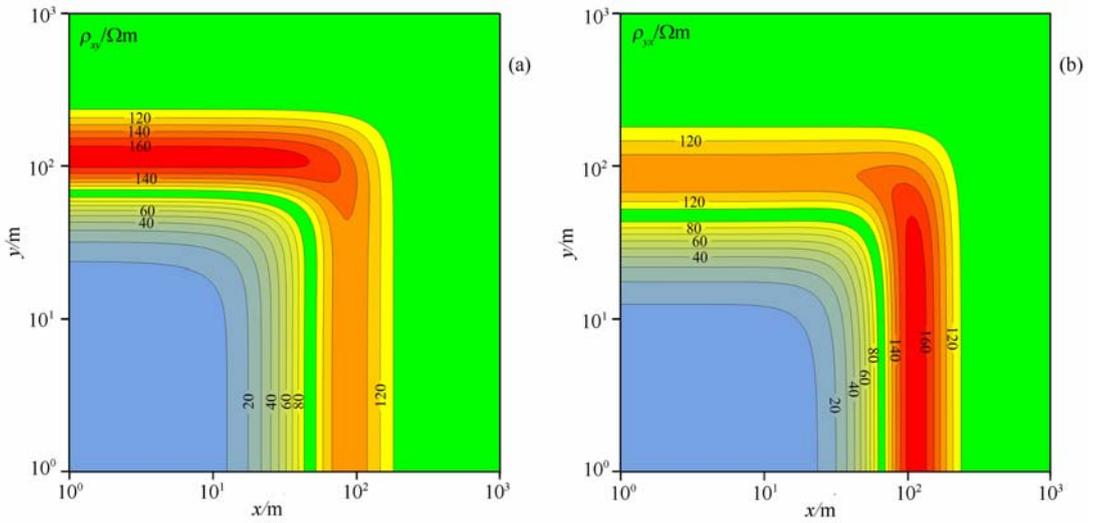


图 4 正交水平磁偶源的张量视电阻率空间分布示意图

Fig. 4 Tensor apparent resistivity distribution diagram from the orthogonal horizontal magnetic dipole source

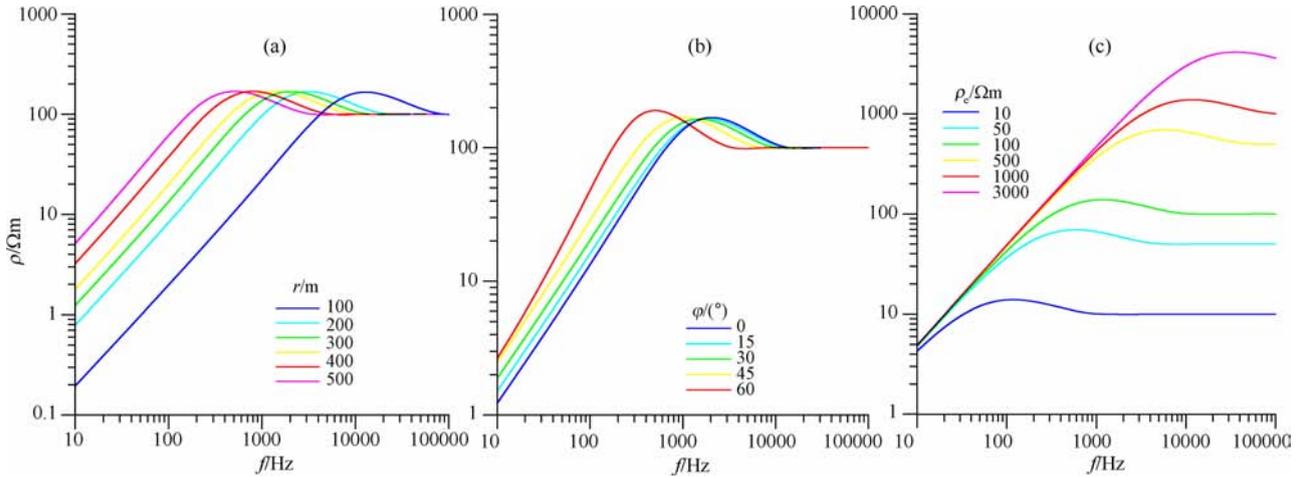


图 5 收发距(a)、场源角度(b)和地电阻率(c)对张量视电阻率的影响

Fig. 5 The influence of separation(a), angle(b) and real resistivity(c) to tensor apparent resistivity

阻;过渡区张量视电阻率为一高阻隆起;远区张量视电阻率趋于真实地电阻率. 因此,要避免在近区和过渡区测量,确保在远区测量,可根据测量的最低频率、地电阻率,合理确定收发距.

### 4 野外试验

为了验证理论计算的结果,设计并进行了野外试验. 试验仪器采用 EH-4 电导率成像系统,发射机功率为 400 Am<sup>2</sup>. 试验地点为长沙市月亮岛. 因无法准确确定地下介质电阻率参数,采用根据天然电磁场计算的电阻率为参照对比研究正交水平磁偶源电磁场分布规律. 试验方案:一是考虑收发距对观测结果的影响,试验中接收机固定,移动发射机;二是考虑场源摆放角度对观测结果的影响,试验中接收机

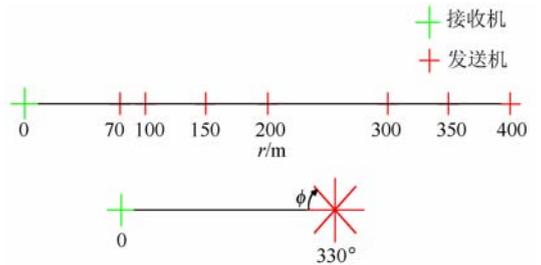


图 6 试验布置图

Fig. 6 Experiment arrangement plan

固定,转动发射天线. 图 6 为试验布置图,图中所示收发距是经挑选的有代表性的点,实际测量时测点更密;发射天线每旋转 10°测量一次.

图 7a 中以电场分量 E<sub>x</sub> 为例的情况,天然场源时,电磁场信号强度低,曲线较平滑. 正交水平磁偶源时,电磁场信号强度明显加强,可以清楚看出场源

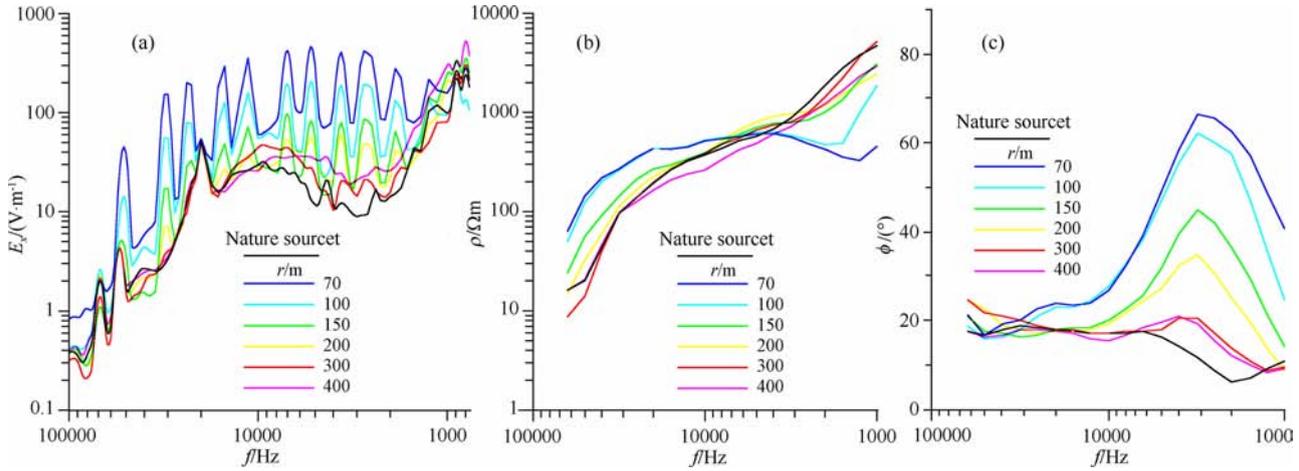


图 7 不同收发距时电场  $E_x$  振幅曲线(a)、张量视电阻率曲线(b)和张量视电阻率相位曲线(c)

Fig. 7 The amplitude curves of electric field  $E_x$  (a), tensor apparent resistivity curves (b) and tensor apparent resistivity phase curves (c) with different separation

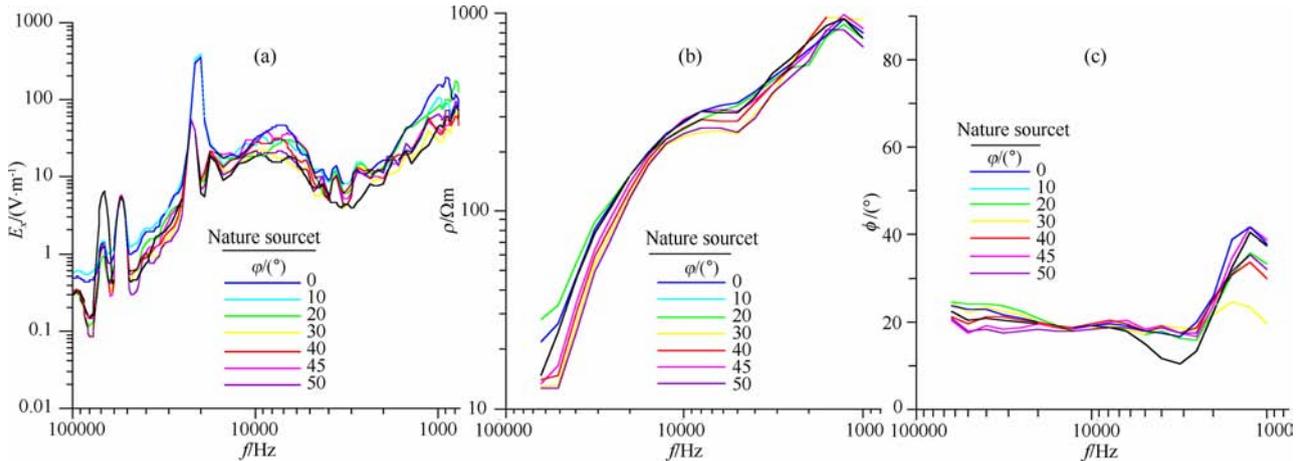


图 8 不同角度时电场  $E_x$  振幅曲线(a)、张量视电阻率曲线(b)和张量视电阻率相位曲线(c)

Fig. 8 The amplitude curves of electric field  $E_x$  (a), tensor apparent resistivity curves (b) and tensor apparent resistivity phase curves (c) with different angle

发射的主要频率分布。随着收发距的增大电磁场信号逐渐减弱,不同频率信号衰减程度不同。

图 7(b,c)是不同收发距时张量视电阻率及其相位曲线,收发距小于 200 m 时,电阻率曲线在低频时往下掉,相位曲线在低频时有明显的隆起,说明测点处于近区。收发距大于 300 m 时,不同场源时的视电阻率曲线、相位曲线形态相近,即可看做进入远区。

图 8a 同样为以电场分量  $E_x$  为例,收发距为 330 m 时,测量在远区进行的情况。场源摆放角度不同时,电磁场各分量曲线形态相似。图 8(b,c)是不同角度下张量视电阻率及其相位曲线,正交水平磁偶源与天然场源时视电阻率曲线形态一致,角度变化对张量视电阻率的影响很小。

根据野外实测数据绘制的曲线图,不同时间段

采集的信号受到的干扰不同,存在一定误差,但整体规律显示很明显,证明试验成功而有效。

## 5 结 论

(1)正交水平磁偶源产生的电磁场在每个象限都有一相对低值带。标量视电阻率在低值带有高阻畸变,标量测量时要分扇区进行。张量视电阻率无畸变,可在远区任何方位进行张量观测。

(2)尽量在远区测量,避免在近区及过渡区测量。根据测量最小频率、地质情况以及实验数据,合理确定收发距。

(3)场源摆放角度对张量视电阻率影响不大,所以张量测量时场源的摆放仅考虑现场条件,与场源

的方向无关.

## 参考文献(References)

- [1] Bastani M, Malehmir A. Delineating hydrothermal stockwork copper deposits using controlled source and radiomagnetotelluric methods; A case study from northeast Iran. *Geophysics*, 2009, **74**(5):167~181
- [2] Zhao G Z, Palshin N, Huang Q H. Recent advances of Geoelectromagnetic methods. *Chinese J. Geophys.*, 2010, **53**(3): 469~473
- [3] 岳瑞永,徐义贤.可控源频率域电方位各向异性与近场效应研究.石油地球物理勘探,2004,**39**(3):342~347  
Yue R Y, Xu Y X. Study on electric azimuth anisotropy of controlled source in frequency domain and near field effects. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese), 2004, **39**(3): 342~347
- [4] Dey A, Ward S H. Inductive sounding of a layered earth with a horizontal magnetic dipole. *Geophysics*, 1970, **35**(4): 600~703
- [5] Singh N P, Lal T. Horizontal magnetic dipole over an inhomogeneous earth model with exponential variation of conductivity. *Pageoph*, 1995, **144**(1):135~153
- [6] Andreas P. Development and test of a controlled source MT method in the frequency range 1 to 50 Hz [Ph. D. thesis]. Berlin: Institute for Applied Geoscience of Berlin Technical University, 2001
- [7] Li X B, Pedersen L B. Controlled source tensor magnetotellurics; Geophysics. *Geophysics*, 1991, **56**(9):1456~1461
- [8] Li X B, Pedersen L B. The electromagnetic response of an azimuthally anisotropic half space. *Geophysics*, 1991, **56**(9): 1462~1473
- [9] EMI ElectroMagnetic Instruments, Inc, Operation Manual For Stratagem systems running IMAGEM, Ver. 2.19, 2007
- [10] 龙霞. EH-4 系统电磁测深数据处理与改进[硕士论文]. 湖南:中南大学地球探测与信息技术系, 2010  
Long X. The improvement methods for data processing in the EH-4 system [Master's thesis]. Hunan: School of Geosciences and Info-physics of Central South University, 2010
- [11] 席振铎,张道军.山东招远大尹格庄金矿电磁测深找矿报告.湖南:中南大学,2010  
Xi Z Z, Zhang D J. MT exploration report about DaYinGeZhuang ZhaoYuan ShanDong Gold Mine. Changsha: Central South University, 2010
- [12] Bastani M. EnviroMT-A new controlled source radiomagnetotelluric system[Doctor's thesis]. Sweden: Department of Earth Sciences of Uppsala University, 2001
- [13] 昌彦君,王华军,罗延钟. EH-4 系统观测资料的非远区场校正研究.吉林大学学报,2002,**32**(2):177~180  
Chang Y J, Wang H J, Luo Y Z. Study of the non far zone field correction for the sounding data of the EH-4 system. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 2002, **32**(2):177~180
- [14] 米萨克 N,纳比吉安. 勘查地球物理电磁法(第一卷 理论). 赵经祥译.北京:地质出版社,1992  
Misac N, Nabighian. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics (Volume 1, Theory)* (in Chinese). Zhao J X Trans. Beijing: Geology Press, 1992
- [15] Guptasarma D, Singh B. New digital linear filters for Hankel J<sub>0</sub> and J<sub>1</sub> transforms. *Geophysical Prospecting*, 1997, **45**: 745~762
- [16] 谭捍东,魏文博.大地电磁法张量阻抗通用计算公式.石油地球物理勘探,2004,**39**(1):113~116  
Tan H D, Wei W B. General use formula in MT tensor impedance. *Oil Geophysical Prospecting* (in Chinese). 2004, **39**(1):113~116
- [17] 陈小斌,赵国泽,汤吉等.网式大地电磁阻抗张量及其影响因素分析.地球物理学报,2008,**51**(1):273~279  
Chen X B, Zhao G Z, Tang J, et al. Impedance tensor of network-MT and the influencing factors. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **50**(1): 273~279
- [18] Ismail N. Controlled source radiomagnetotelluric (CSRMT) applications in environmental and resource exploration [Doctor's thesis]. Sweden: Department of Earth Sciences of Uppsala University, 2001

(本文编辑 胡素芳)