

$E-E_\varphi$ 广域视电阻率定义的改进方法及场特性识别

柳建新^{1,2,3}, 佟铁钢^{1,2,3}, 刘春明^{1,2,3}, 周文斌^{1,2,3}, 蒋奇云^{1,2,3}

(1. 中南大学 有色资源与地质灾害探测湖南省重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 中南大学 地质调查研究院, 长沙 410083)

摘 要: 广域电磁法采用均匀大地表面水平电偶源的全区精确表达式定义广域视电阻率, 与卡尼亚视电阻率相比, 能更好地反映地电模型的电性特征。利用广域视电阻率定义方法定义了 $E-E_\varphi$ 方式的广域视电阻率、远区视电阻率及近区视电阻率, 考虑观测方位角的影响, 同时得出了 $E-E_\varphi$ 观测装置的装置系数和电磁响应函数。对 3 层介质的 A 型、Q 型、K 型和 H 型的一维正演计算分析表明: $E-E_\varphi$ 观测装置的广域电磁法的观测方位角的影响相当于 $\varphi=90^\circ$ 时观测坐标系的旋转, 通过适当的校正, 任意 φ 角的测深曲线更能真实地反映地电断面随深度的客观变化, 综合 3 种不同视电阻率的分析, 能够较好地识别人工源频率域测深中电磁场不同的渐近特性。基于 $E-E_\varphi$ 方式的广域电磁法扩大了观测范围, 具有更好的应用前景。

关键词: 广域电磁法; $E-E_\varphi$ 装置; 电磁响应函数; 视电阻率; 人工源频率测深

中图分类号: P631.3

文献标志码: A

Recognition of electromagnetic field asymptotic properties and improved definition of wide field apparent resistivity on $E-E_\varphi$ array

LIU Jian-xin^{1,2,3}, TONG Tie-gang^{1,2,3}, LIU Chun-ming^{1,2,3}, ZHOU Wen-bin^{1,2,3}, JIANG Qi-yun^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Non-Ferrous Resources and Geological Hazard Detection,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Research Institute of Geological Survey, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Wide field electromagnetic method defines the apparent resistivity by the accurate expression of full-zone of horizontal electric dipole source in homogeneous earth surface. Compared with the Cagniard apparent resistivity, it can preferably show the electrical characteristics of geoelectric model. The computational formula of the improved apparent resistivity of $E-E_\varphi$ array in the wide field electromagnetic method, near-zone apparent resistivity and far-zone apparent resistivity is defined, the influence of observed azimuth is considered and the coefficient of the observation array and electromagnetic response function is obtained by the pattern of wide field electromagnetic apparent resistivity definition. Based on the calculation and analysis of curve A, curve Q, curve K and curve H of three-layer model in 1-D forward modeling, the influence of observation azimuth (φ) is equal to the rotation of the coordinate system at $\varphi=90^\circ$ in the wide field electromagnetic sounding of the $E-E_\varphi$ array. Through proper calibration, the sounding curve of the arbitrary angle azimuth (φ) can more truly show the objective change of geoelectric section with the depth. Through comprehensive analysis of three different apparent resistivities, the different asymptotic characteristics of electromagnetic field in the

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ3011); 国家自然科学基金资助项目(41374119, 41227803, 41174103); 中国地质调查局科研资助项目(资[2011]03-01-64); 教育部博士点基金资助项目(20110162130008); 国家科技支撑计划资助项目(2011BAB04B08); 国家科技基础性工作专项(2013FY110800)

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-06-30

通信作者: 佟铁钢, 讲师, 博士; 电话: 15973127829; E-mail: tongtiegang@csu.edu.cn

controlled source frequency sounding method can be well identified. The wide field electromagnetic sounding method based on the observation of $E-E_\phi$ array can expand the observed scope, and has better prospect of application.

Key words: wide field electromagnetic method; $E-E_\phi$ array; electromagnetic response function; apparent resistivity; controlled source frequency sounding

在电磁法勘探过程中,通过适当地引入视电阻率的定义,可使视电阻率响应曲线比观测的场值更好地反映地下电性界面的存在,这是电磁法较之于其他方法的独特之处^[1]。在频率域电磁法中有多种电阻率定义方法^[2-3],它们多是基于均匀半空间模型。然而,人工源频率域电磁法中均匀半空间表面电磁场值与电阻率之间存在着复杂的隐函数关系,难以用解析方法求出电阻率与场之间的显示反函数,因此,通常使用各种近似定义。它们分别反映了场的不同渐近特性,只表现为场的“对立性”。

在哲学意义上,电磁场是对立统一体。应考虑电磁场的“统一性”,定义一种全区视电阻率,能够将波区和近区、中间区的视电阻率定义有机地统一起来,并随电距离的变化,自适应地反映场的不同渐近特性,从而达到直观地反映地电断面的垂向电性变化的目的^[4]。殷长春和朴化荣^[1]根据视电阻率定义的基本原则,对电磁法中多种视电阻率定义做了比较,指出全区视电阻率优于近似视电阻率。方文藻等^[5]采用将均匀半空间场的精确公式与远区公式比较,求得一个校正系数 K ,将远区定义视电阻率乘上校正系数 K ,即可求得全区定义视电阻率值,该方法简便且容易实现。毛先进和鲍光淑^[6]提出全区视电阻率的直接算法,方法简明且精确。汤井田等^[4,7]先后提出多种全区视电阻率定义,均形象地反映了地下介质的变化特征,其中阻抗实部等效电阻率,曲线假极值有所压低, E_y 定义的全区视电阻率,具备频率测深的意义,且计算简便。

何继善院士认为测量水平电偶极源产生的电场 E_x 的方法较为实用,提出了采用计算机利用迭代法或逆插值法来计算提取的广域视电阻率计算^[8-10]。广域视电阻率是用适合于全域的公式计算视电阻率,完美地体现了人工源频率电磁场的对立性与统一性,更能直观地反映出地电断面随深度的客观变化。广域电阻率与 2^n 序列伪随机信号相结合,便形成最新的 2^n 序列伪随机信号-广域电磁法,它可以将两者的优点充分发挥出来^[11-12]。

殷长春^[13]通过任意角度频率域正演计算发现:对于相同的极距、同一地电断面,各种视电阻率响应均

受布极方式即 θ 角的影响,并且影响主要发生在中间区和 s 区, s 区影响最严重,波区不受 θ 角影响。作者通过对两种坐标系下的均匀半空间的电磁场表达式的分析,提出了一种改进的 $E-E_\phi$ 方式定义的广域视电阻率,可以消除方位角的影响,同时通过对改进的视电阻率定义过程的仔细分析,使用一维正演模拟能够较好实现人工源频率域电场的划分,界定出相应的远区、过渡带及近区,便于今后在实际工作中对广域电磁法测深曲线的定性认识。

1 $E-E_\phi$ 方式的广域视电阻率定义

如图1所示,在准静态极限条件下,一水平电偶极子(接地导线)位于地表,选取公共坐标原点位于偶极子中心的柱坐标系和直角坐标系, x 轴与偶极距方向相同(即 $\phi=0^\circ$ 的方向, ϕ 为观测点与偶极子连线的方向夹角), y 轴垂直偶极矩 $P(P=Id_L, I$ 为谐波电流, d_L 为偶极子的长度)方向, z 轴垂直向下。略去推导过程,在这里直接给出谐波电偶极子在地表时,仅以测量电场的 ϕ 方向分量(即 $E-E_\phi$ 装置)的表达式为例来说明广域电阻率的定义过程^[8,10,14]:

$$E_\phi = \frac{Id_L}{2\pi\sigma r^3} \sin\phi \cdot [2 - e^{ikr}(1 - ikr)] \quad (1)$$

式中: E_ϕ 为测点处垂直收发连线方向的电场值, r 为观测点到偶极子中心的距离, σ 为半空间的介质电导率, k 为波数。

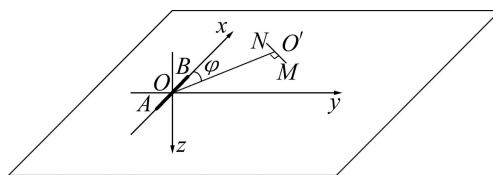


图1 均匀半空间中坐标系示意图

Fig. 1 Coordinate system on homogeneous half-space

式(1)是均匀大地表面上水平电偶源的 E_ϕ 的严格、精确的表达式。根据式(1)可以定义广域意义上的视电阻率。

我们发现, 式(1)中与方位角有关的函数只有一个正弦函数^[15], 通过校正, 可以得到不受观测方位影响的任意方位角上的电场分量:

$$E_\varphi = E_{\varphi=90^\circ} \cdot \sin \varphi, \varphi \neq 90^\circ \quad (2)$$

在实际工作中或者正演理论计算时, 利用式(2)来定义新的校正的实测电场或理论计算所得电场, 即:

$$E_\varphi^{\text{After}} = \frac{E_\varphi^{\text{Before}}}{\sin \varphi} = \frac{Id_L}{2\pi\sigma r^3} \cdot [2 - e^{ikr}(1 - ikr)], \varphi \neq 0^\circ \quad (3)$$

式(3)是关于大地电阻率的一个复杂的隐函数, 不能直接计算得到视电阻率。

首先, 令:

$$F_{E-E_\varphi}(ikr) = [2 - e^{ikr}(1 - ikr)] \quad (4)$$

式(4)被定义为 $E-E_\varphi$ 装置的广域电磁法的电磁响应函数。

设大地电阻率为 $\rho=1/\sigma$, 将式(4)代入式(3), 式(3)便可以改写为

$$E_\varphi^{\text{After}} = \frac{E_\varphi^{\text{Before}}}{\sin \varphi} = \frac{Id_L}{2\pi\sigma r^3} \cdot F_{E-E_\varphi}(ikr), \varphi \neq 0^\circ \quad (5)$$

再令:

$$K_{E-E_\varphi} = \frac{2\pi r^3}{Id_L} \quad (6)$$

式(6)可以定义为 $E-E_\varphi$ 装置的广域电磁法提取视电阻率装置系数, 与直流电阻率法的装置系数类似。将式(6)代入式(5), 整理可得 $E-E_\varphi$ 装置的广域视电阻率:

$$\rho_a^{E-E_\varphi} \Big|_\varphi^{\text{After}} = K_{E-E_\varphi} \cdot E_\varphi^{\text{Before}} \cdot \frac{1}{F_{E-E_\varphi}(ikr)} \quad (7)$$

式(7)定义的广域视电阻率提取公式是难以用解析方法求出的电阻率与场之间的复杂的隐函数表示关系, 可以使用计算机利用迭代法或逆插值法来计算提取广域视电阻率^[16-18]。

考虑到实际观测的 $E_\varphi^{\text{Before}}$ 可以通过观测两点之间的电位差(即 ΔV_{MN})计算所得, 因而有

$$E_\varphi^{\text{Before}} = \frac{\Delta V_{MN}}{MN} \quad (8)$$

在上述校正视电阻率推导过程中, 可以看出, 校正后所得视电阻率公式较校正前的视电阻率公式没有观测方位角的影响, 如果在均匀半空间介质或层状介质中, 在保持 MN 不变的情况下, 校正后的电磁可以理解为在直角坐标系逆时针旋转($90^\circ - \varphi$)后计算没有旋转前的 $\varphi=90^\circ$ (即 $\sin \varphi=1$)时的电场大小。在实际测量中, 以此计算视电阻率的方法是可行的。

2 人工源频率域电磁场特性及场区电阻率

在人工源频率测深中, 根据集肤厚度 $\delta=503\sqrt{\rho/f}$ 与极距的比值(r/δ)划分 3 个场区(即远区场、过渡带和近区场)。近区场只能做变距测深, 远区场只能做变频测深, 中间场兼而有之。3 个场区在实际工作中都会遇到, 灵活地运用它们的特性, 可以获得满意的地质效果。当固定收发距 r 、通过改变频率来探测地下不同深度构造时, 所得的频率响应的视电阻率曲线可以分成 3 段: 首支(高频段)可能属于远区场观测, 尾支(低频段)可能属于近区场观测, 中间大部分落在中间场, 是频率测深主要利用的区域。

从电磁响应函数的式(4)和装置系数的式(6)出发, 可以得到相应的远区视电阻率公式和近区视电阻率公式。

假设 1:

如果令电磁响应函数式(4)中的 $e^{ikr}(1-ikr) \rightarrow 0$, 代入式(5)中, 可得近似的远区视电阻率公式:

$$\rho_a^{E-E_\varphi} \Big|_\varphi^{\text{After, YQ}} \approx K_{E-E_\varphi} \cdot E_\varphi^{\text{After}} \cdot \frac{1}{2} = \frac{\pi r^3}{Id_L} \Big|_\varphi^{\text{After}} \quad (9)$$

假设 2:

如果令电磁响应函数式(4)中的 $e^{ikr}(1-ikr) \rightarrow 2$, 即 $F_{E-E_\varphi}(ikr)=1$, 代入式(5)中可得近似的相应近区视电阻率公式:

$$\rho_a^{E-E_\varphi} \Big|_\varphi^{\text{After, JQ}} \approx K_{E-E_\varphi} \cdot E_\varphi^{\text{After}} = \frac{2\pi r^3}{Id_L} \Big|_\varphi^{\text{After}} \quad (10)$$

从式(9)和式(10)可以看出: 式(10)是式(9)的 2 倍。校正后的远区和近区视电阻率公式同样不受观测方位角的影响。

3 数值计算结果分析

通过以上定义,使用新的视电阻率式(7)、式(9)及式(10)对一维情况进行计算,验证其效果(见图2~图5)。注意到当 $\varphi=0^\circ$ 时, $E_\varphi=0$,因此,在进行测点位置选择时,应特别注意。

在模型计算中,偶极距 $d_L=1\ 000\text{ m}$,收发距 $r=4\ 000\text{ m}$,电流 $I=10\text{ A}$,频率为广域电磁仪的使用范围, $f_{\min}=0.011\ 718\ 75\text{ Hz}$, $f_{\max}=8\ 192\text{ Hz}$,频率个数为40,且在数值计算过程中均保持不变。

A模型:

地电参数: $\rho_1=1.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_2=10.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_3=100.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $h_1=50\text{ m}$, $h_2=500\text{ m}$ 。

Q模型:

地电参数: $\rho_1=100.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_2=10.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_3=1.0$

$\Omega\cdot\text{m}$, $h_1=150\text{ m}$, $h_2=500\text{ m}$ 。

从图2和图3可以看出, $\varphi=90^\circ$ 时, $\rho_a^{E-E_\varphi}$ 视电阻率不受方位角 φ 的影响。当收发距一定时,随着观测 φ 的变化, r 相应地变化(一般情况下 r 大于收发距),视电阻率的首支(远区)没有变化,尾支(近区)随着 r 的增大渐近收敛至一个固定的值,随电距离的增加,广域视电阻率自适应由非波区特性转变到波区特性。

K模型:

地电参数: $\rho_1=5.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_2=200.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_3=5.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $h_1=100\text{ m}$, $h_2=50\text{ m}$ 。

H模型:

地电参数: $\rho_1=100.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_2=10.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $\rho_3=100.0\ \Omega\cdot\text{m}$, $h_1=200\text{ m}$, $h_2=50\text{ m}$ 。

图4和图5中,JQ代表近区,YQ代表远区,GDD代表过渡带,GY为广域,应用3种不同方式定义的视电阻率,可以在视电阻率曲线上大致划分出偶极源电磁场的3个场区,当基底为高阻时更为有效,基底

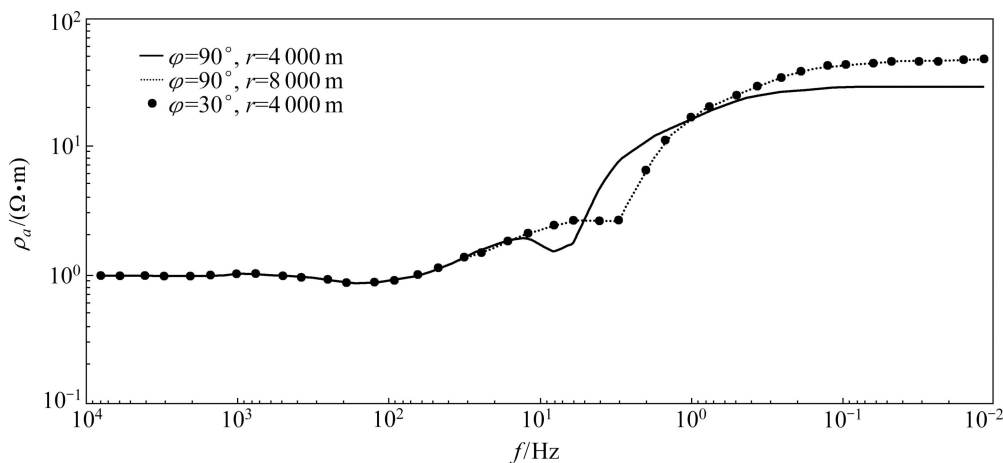


图2 A型测深曲线

Fig. 2 Comparison of type A model

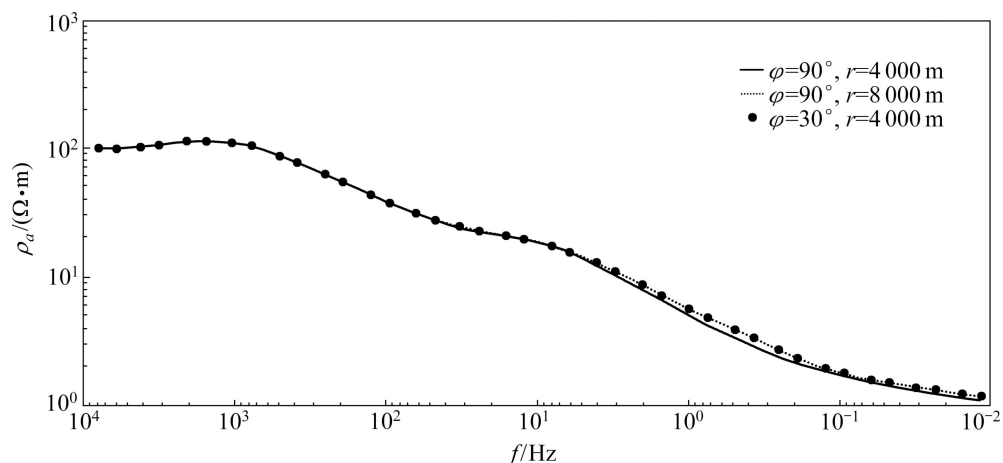


图3 Q型测深曲线

Fig. 3 Comparison of type Q model

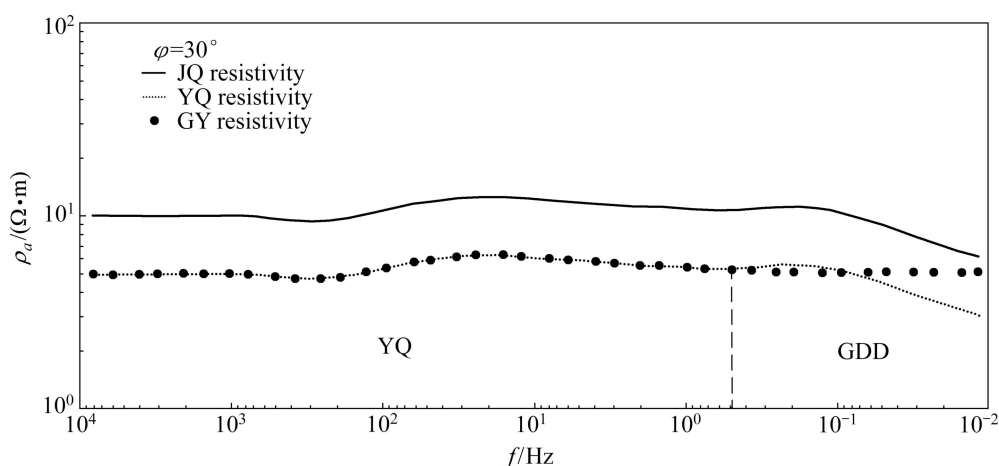


图4 三层模型 K 型曲线

Fig. 4 Curve K of three-layer model

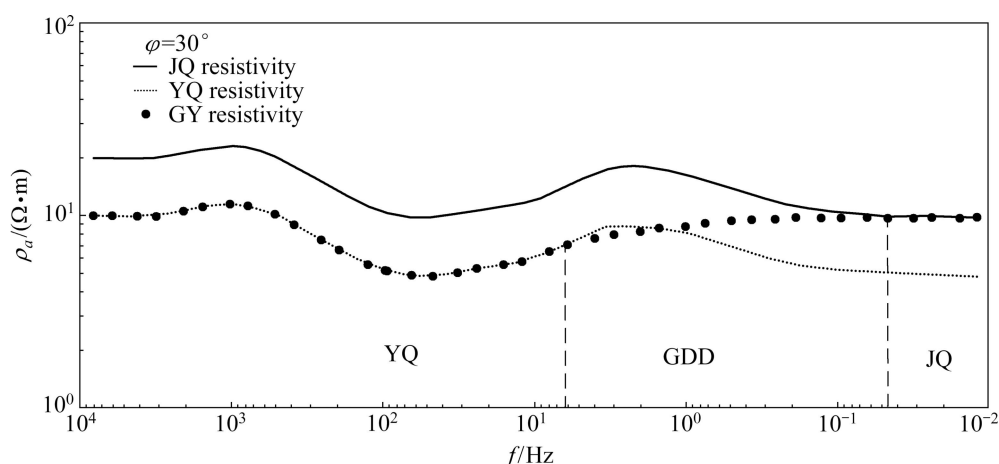


图5 三层模型 H 型曲线

Fig. 5 Curve H of three-layer model

基底为低阻时, 视电阻率曲线一般表现出远区和中间区。广域视电阻率在全场区都可以更好地反映地电模型。

4 结论

1) 校正后得到的 $E-E_\varphi$ 方式视电阻率可以消除观测方位的影响, 能够直观真实反映地电断面随深度的客观性变化。同时, 也能使该装置下的广域电磁法较其他装置的方法的勘探范围得到扩大。

2) 通过对电磁函数的分析得到近区和远区的近似视电阻率计算公式。当收发距 r 固定时, 可以在理论或实测中获得频率域人工源电磁法在远区、过渡带和近区的划分和识别。当基底为高阻时, 场表现出的渐近特性更加明显, 容易识别 3 个场区, 可以为实测

频率范围的选择提供依据, 提高工作效率。

3) 根据地质任务的需要, 可以实现 r 方向和 φ 方向的正交测量, 并且两者得到的校正视电阻率不受方位角的影响, 实现突破传统意义上的正交观测装置。

REFERENCES

- [1] 殷长春, 朴化荣. 电磁测深法视电阻率定义问题的研究[J]. 物探与化探, 1991, 15(4): 290-299.
YIN Chang-chun, PIAO Hua-rong. A study of the definition of apparent resistivity in electromagnetic sounding [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1991, 15(4): 290-299.
- [2] CAGNIARD L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting [J]. Geophysics, 1953, 18(1): 605-635.
- [3] GOLDSTEIN M A, STRANGWAY D W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded-electric dipole source [J]. Geophysics, 1975, 40(4): 669-683.

- [4] 汤井田, 何继善. 水平电偶极频率域测深中全区视电阻率定义新方法[J]. 地球物理学报, 1994, 3(4): 543-552.
TONG Jing-tian, HE Ji-shan. A new method to define the full-zone resistivity in horizontal electric dipole frequency sounding on a layered earth [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 3(4): 543-552.
- [5] 方文藻, 李貅, 李予国, 冯兵. 频率域电磁法中视电阻率全区定义[J]. 西安地质学院学报, 1992, 14(4): 81-86.
FANG Wen-zao, LI Xiu, LI Yu-guo, FENG Bing. The whole-zone definition of apparent resistivity used in the frequency domain electromagnetic methods [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 1992, 14(4): 81-86.
- [6] 毛先进, 鲍光淑. 水平电偶源频率域电磁测深全区视电阻率的直接算法[J]. 中南工业大学学报, 1996, 27(3): 254-257.
MAO Xian-jin, BAO Guang-shu. A direct algorithm for full-wave apparent resistivity from horizontal electric dipole frequency sounding [J]. J Cent South Univ Technol, 1996, 27(3): 254-257.
- [7] 汤井田, 周聪, 张林成. CSAMT 电场 y 方向视电阻率的定义及研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 552-558.
TANG Jing-tian, ZHOU Cong, ZHANG Lin-cheng. A new apparent resistivity of CSAMT defined by electric field y -direction [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 552-558.
- [8] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
HE Ji-shan. Wide field electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [9] 王顺国, 熊彬. 广域视电阻率的数值计算方法[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(4): 380-383.
WANG Shun-guo, XIONG Bin. Numerical calculation methods of wide field apparent resistivity [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 34(4): 380-383.
- [10] 何继善. 广域电磁测深法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1065-1072.
HE Ji-shan. Wide field electromagnetic sounding methods [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065-1072.
- [11] 何继善, 佟铁钢, 柳建新. a^n 序列伪随机多频信号数学分析及实现[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(6): 1666-1671.
HE Ji-shan, TONG Tie-gang, LIU Jian-xin. Mathematical analysis and realization of a^n sequence pseudo-random multi-frequencies signal [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(6): 1666-1671.
- [12] 周蓼文, 凌帆. $E-E_x$ 广域电磁法探测火山岩油气藏的实验研究[J]. 油气地球物理, 2012, 10(3): 56-59.
ZHOU Bi-wen, LIN Fan. $E-E_x$ wide field electromagnetic method experiment research in exploring volcanic rock reservoirs [J]. Petroleum Geophysics, 2012, 10(3): 56-59.
- [13] 殷长春. 任意角度频率域测深正演计算及应用[J]. 物探化探计算技术, 1991, 13(2): 129-138.
YIN Chang-chun. Forward calculation and application of frequency domain sounding at any azimuth [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 13(2): 129-138.
- [14] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
TANG Jing-tian, HE Ji-shan. Controlled source audio-frequency magnetotelluric method and its application [M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [15] 佟铁钢. E-Hz 广域电磁方法研究[D]. 长沙: 中南大学地球科学与信息物理学院, 2010.
TONG Tie-gang. Study on E-Hz wide-field electromagnetic method [D]. Changsha: School of Geosciences and Info-Physic, Central South University, 2010.
- [16] 佟铁钢, 柳建新. 一种新型 CSAMT 观测参数的计算方法[J]. 物探化探计算技术, 2009, 31(3): 210-213.
TONG Tie-gang, LIU Jian-xin. A new calculation method of CSAMT observation parameter [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 31(3): 210-213.
- [17] 佟铁钢, 刘春明, 何继善. CSAMT 全区电阻率法数值模拟机应用探讨[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1855-1860.
TONG Tie-gang, LIU Chun-ming, HE Ji-shan. Numerical simulation and application discussion of the CSAMT full-zone resistivity method [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1855-1860.
- [18] 熊彬. 大回线瞬变电磁法全区视电阻率的逆样条插值计算[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(4): 515-519.
XIONG Bin. Inverse spline interpolation for the calculation of all-time resistivity for the large-loop transient electromagnetic method [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(4): 515-519.

(编辑 彭超群)