

doi: 10.11720/wtyht.2017.1.20

武军杰,李貅,智庆全,等.电性源地—井瞬变电磁异常场响应特征初步分析[J].物探与化探,2017,41(1):129-135.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.20

Wu J J, Li X, Zhi Q Q, et al. A preliminary analysis of anomalous TEM response characteristics in borehole with electric source transmitter[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(1): 129-135. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.20

电性源地—井瞬变电磁异常场响应特征初步分析

武军杰^{1,2}, 李貅¹, 智庆全², 邓晓红², 张杰², 王兴春², 杨毅²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 地—井瞬变电磁法是在地面发射、井(钻孔)中接收的装置形式,能够利用已有钻孔使接收探头深入地下更加接近目标体,获得更加可靠的信息。该装置对于深部低阻体,尤其当存在低阻覆盖层、矿化等地质干扰情况下,对于规模不大的深部良导矿体的探测能力较强。相对于磁性发射源,电性发射源勘查范围更广,适合地形起伏矿区开展工作。本文旨在通过研究电性发射源条件下钻孔中地下电性界面的异常特征,为实际勘查工作的定性分析提供参考。文中通过一维模型正演模拟对三分量瞬变响应异常特征进行了初步分析,结果表明,由于瞬变响应总场中叠加了背景场和异常场的响应,曲线形态复杂,仅在中晚期道电界面反映明显;而异常场曲线形态相对简单,对电性界面反映明显;整体上水平分量的异常显示度高于垂直分量。通过数值模拟分析获得了对于电性源地—井 TEM 钻孔中三分量曲线形态的初步认识,验证了电性发射源条件下地—井 TEM 对于确定电性界面的有效性,能够为进一步研究提供参考。

关键词: 地—井瞬变电磁法;异常场;三分量响应;电性源

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)01-0129-07

0 引言

电磁法是地球物理勘探方法中寻找金属矿的重要方法,在目前的金属矿勘查中得到了广泛的应用,并已取得了良好的应用效果。但是对于深部找矿,由于电磁法本身存在体积效应,而且矿体埋深越大在地面体积效应越明显,地面电磁法勘探对于深部矿体的分辨能力并不理想。井中物探则具有深部找矿优势,井中观测受近地表的干扰小,由于探头接近深部矿体,能够获得更加可靠的信息。

井中瞬变电磁法是一种有效的深部金属矿体的勘查方法。井中瞬变电磁法通常是地—井装置,即在地面发射,利用专用探头在钻孔(井)中接收瞬变电磁响应的装置形式,能获得钻孔周围数百米范围内的有用地质信息,从而提高找矿效果。在地面电

磁法工作因矿体深度太大,或者受电性干扰因素(如导电覆盖、浅部硫化物、地表矿化地层等)影响大的地区,井中 TEM 法的优势就更加突出^[1]。

地—井 TEM 法的发射源可分为磁性源和电性源。其中磁性源是指不接地回线源,电性源是指接地双极线源。对于磁性源地—井 TEM 法的研究较多^[2-6],目前在三维正演模拟及数据处理解释方面已经取得了一定的进展^[7-10],而对于电性发射源地—井 TEM 研究不多。研究表明,电性发射源在深部勘探中具备较大的潜力^[11-13]。大功率接地发射源的辐射范围较大^[14-16],可兼顾发射源辐射区的多个钻孔,可在很大程度上降低施工难度,提高工作效率。本文旨在研究地面电性发射源条件下井中三分量瞬变响应的异常特征规律,以了解该装置对于电性分界面的分辨能力,为实际矿区深部找矿提供参考。文中给出了电性源地—井 TEM 的正演计算方

收稿日期: 2016-06-15;修回日期: 2016-09-03

基金项目: 基础性公益性地质矿产调查专项(DD20160046);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(AS2015J09、AS2012P03)

作者简介: 武军杰(1979-),男,高级工程师,在读博士,主要从事瞬变电磁方法研究工作。Email: wujunjie@igge.cn

通讯作者: 李貅(1958-),男,教授,博士生导师,主要从事瞬变电磁场的理论与应用方面的研究。Email: Lixiu@chd.edu.cn

法,并对均匀半空间及一维、三维理论模型进行了计算。计算结果表明,电性源地—井瞬变电磁法对于电性分界面反应灵敏,对异常体反映可靠。

1 正演计算方法

建立如图 1 所示的层状地电模型,每层的参数由其电阻率值 ρ_i 和顶面 z 坐标值 z_i 确定。采用右手直角坐标系,并假定谐变因子为 $e^{-i\omega t}$,则电磁场所满足的控制方程为:

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B} \tag{1}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{E} + \mu \mathbf{J}_s \tag{2}$$

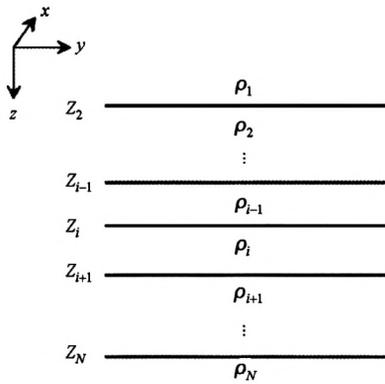


图 1 全空间中一维模型示意

其中, μ 为磁导率, ω 为角频率, \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 分别为电场和磁场, \mathbf{J}_s 为源电流密度。

在库伦规范条件下,可引入磁矢量势:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \tag{3}$$

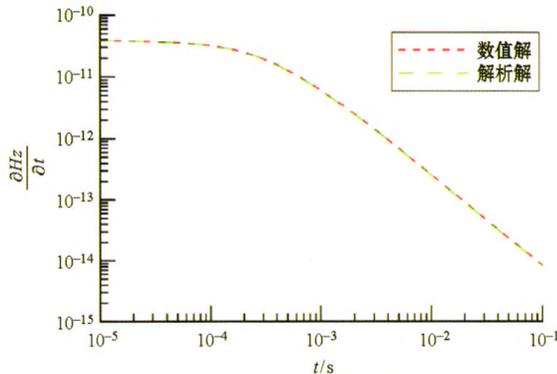
$$\mathbf{E} = i\omega \mathbf{A} + \frac{1}{\mu\mu_0} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}). \tag{4}$$

对于图 1 所示的全空间一维地电模型,任意位置的电偶极子产生的磁矢量势^[17]可以通过汉克尔变换获得:

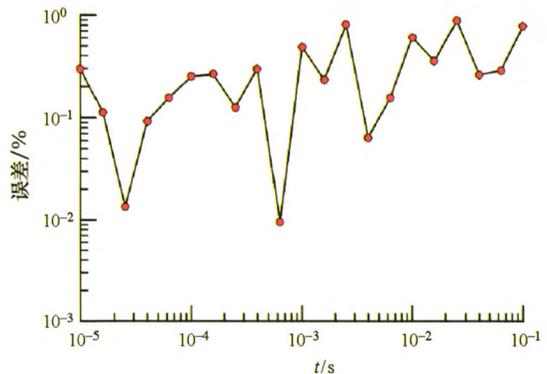
$$\mathbf{A}(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \hat{\mathbf{A}}(\lambda, z) J_0(\lambda r) \lambda d\lambda, \tag{5}$$

其中, J_0 为 0 阶第一类贝塞尔函数, r 为水平收发距。求得式(5)后,由式(3)、(4)即可获得一维的全空间电磁响应。而对于三维模型,则采用 FDTD 时域有限差分的三维正演计算方法^[18]。

为验证一维正演公式(数字滤波法)计算的准确性,利用均匀半空间上电偶极子响应的解析解^[19]进行了对比,以 H_z 分量为例分析计算精度和误差分布特征。计算参数为:均匀半空间电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$,发射源 $AB=100 \text{ m}$,发射电流 1 A , AB 中心 O 点坐标 $(0, 0, 0)$, $A(0, -50, 0)$, $B(0, 50, 0)$,测点坐标 $(500, 50, 0)$ 。图 2 给出了数字滤波解及解析解的对比结果,并绘制了误差曲线。结果表明,数值解与解析解的相对误差不超过 1%,能够满足计算需求。



(a) 数值解和解析解对比



(b) 相对计算误差

图 2 数字滤波法的计算准确性验证结果

2 模型计算

电性源地—井 TEM 装置是利用接地导线在地面发射,在钻孔(井)中接收的装置形式(如图 3 所示)。在该装置中通过接地导线向地下供以电流,对地下目标体进行激发,利用探头在钻孔中接收三分量瞬变响应。为检验在不同地电条件下该装置的应用效果,针对均匀半空间、一维层状模型以

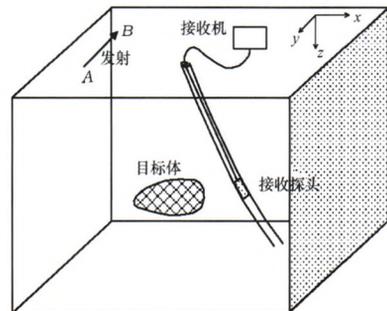


图 3 电性源地—井 TEM 装置示意

及三维模型进行正演模拟。

2.1 均匀半空间模型

均匀半空间模型电阻率 $500 \Omega \cdot \text{m}$, 发射源 $AB=100 \text{ m}$, AB 中心点坐标为 $(0,0,0)$, A 点坐标 $(0,50,0)$, B 点坐标 $(0,-50,0)$, 钻孔平面坐标为 $(500,50)$, 钻孔为直孔, 深度为 400 m , 接收点沿钻孔测量。正演计算 3 个分量瞬变响应。

图 4 为均匀半空间模型井中三分量瞬变响应

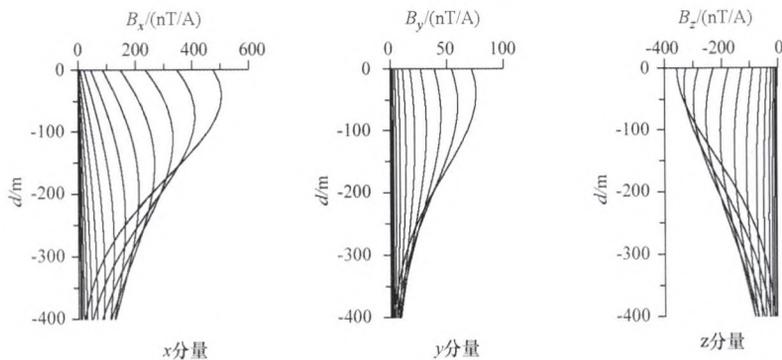


图 4 均匀半空间中钻孔三分量瞬变响应曲线

2.2 一维层状模型

一维层状介质中地—井 TEM 正演模拟选择两层 D、G 型以及三层 A、K、Q、H 型地电模型。发射源 $AB=100 \text{ m}$, AB 中心点坐标为 $(0,0,0)$, A 点坐标 $(0,50,0)$, B 点坐标 $(0,-50,0)$, 钻孔平面坐标为 $(500,50)$, 钻孔为直孔, 深度为 400 m , 接收点沿钻孔测量。正演计算三分量瞬变响应。模型参数见表 1。

表 1 一维层状模型参数

类型	$\frac{\rho_1}{\Omega \cdot \text{m}}$	$\frac{H_1}{\text{m}}$	$\frac{\rho_2}{\Omega \cdot \text{m}}$	$\frac{H_2}{\text{m}}$	$\frac{\rho_3}{\Omega \cdot \text{m}}$
D	500	200	50		
G	50	200	500		
A	50	200	200	100	500
K	50	200	500	20	50
Q	500	200	200	100	50
H	500	200	50	20	500

图 5 为一维理论模型地—井装置三分量瞬变响应曲线。图中给出了 6 种模型的三分量瞬变响应, 可以看出: D 型、H 型模型的水平分量 x 、 y 分量曲线能够明显反应 200 m 处界面, z 分量曲线反应不明显; 其他类型断面的三分量曲线对于界面反应均不明显。这是因为在此种装置条件下异常场和背景场的响应叠加在了一起, 而且主要以背景场响应为主。

图 6 为不同类型层状介质在消除背景场后的异常场三分量曲线。整体来看, 对于各层状模型的三分量曲线, 水平分量 (x 、 y) 对于界面的反应更加灵

敏一些, 在高低阻的分界面处反应明显。而 z 分量仅对 K、H 型地层的异常特征较为明显, 其他模型虽有异常显示, 但不能显示界面所在。图中可以看出, G 型和 A 型曲线略有差异, 但形态类似, 难以区分。D、Q、H 三模型水平分量曲线在第一层界面以上形态相同, 呈正值并随深度逐渐增大, 当深度在界面处再增加, 曲线值变小 (Q 型) 甚至出现反号 (D、H 型)。测点深度继续增加到第二个界面后, Q 型再次出现界面显示, 其值继续变小并最终变为负值。H 型在第二个界面下方呈现明显负值异常显示。G、A、K 型模型三分量曲线整体上呈负值异常。在第一层界面处均对应负极大值, 后幅值逐渐减小, 仅 K 型水平分量曲线出现反号现象。

曲线。图中给出了 x 、 y 、 z 分量曲线, 可以看出曲线自地面向地下呈现出先增加后减小的特征, 其极大值位置随着时间推移向深部移动, 早期道信号在深部甚至出现反转, 总体形态较为复杂, 而且不同时间道的曲线形态随时间道是变化的。曲线反映了均匀半空间背景场的形态与电性发射源产生的场的分布、钻孔与源的相对位置关系以及时间道有关。

通过上述曲线特征对比, 可看出不同模型的三分量曲线特征不同, 根据曲线特征可以推断层间电阻率变化情况。当然, 以上模型的曲线特征规律是与发射源、水平分量的定义有关的。

2.3 均匀半空间中赋存三维低阻板体

2.3 均匀半空间中赋存三维低阻板体

三维模型选择均匀半空间中的板体模型 (图 7)。正演模拟使用 FDTD 三维正演程序^[18]。发射源 $AB=110 \text{ m}$, AB 中心点坐标设为 $(0,0,0)$, A 点坐标 $(0,-60,0)$, B 点坐标 $(0,50,0)$, 三个钻孔平面坐标分别为 $(150,0)$ 、 $(200,0)$ 、 $(300,0)$, 钻孔为直孔, 深度为 300 m , 接收点沿钻孔测量。三维板体尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 电阻率 $1 \Omega \cdot \text{m}$, 顶界面埋深

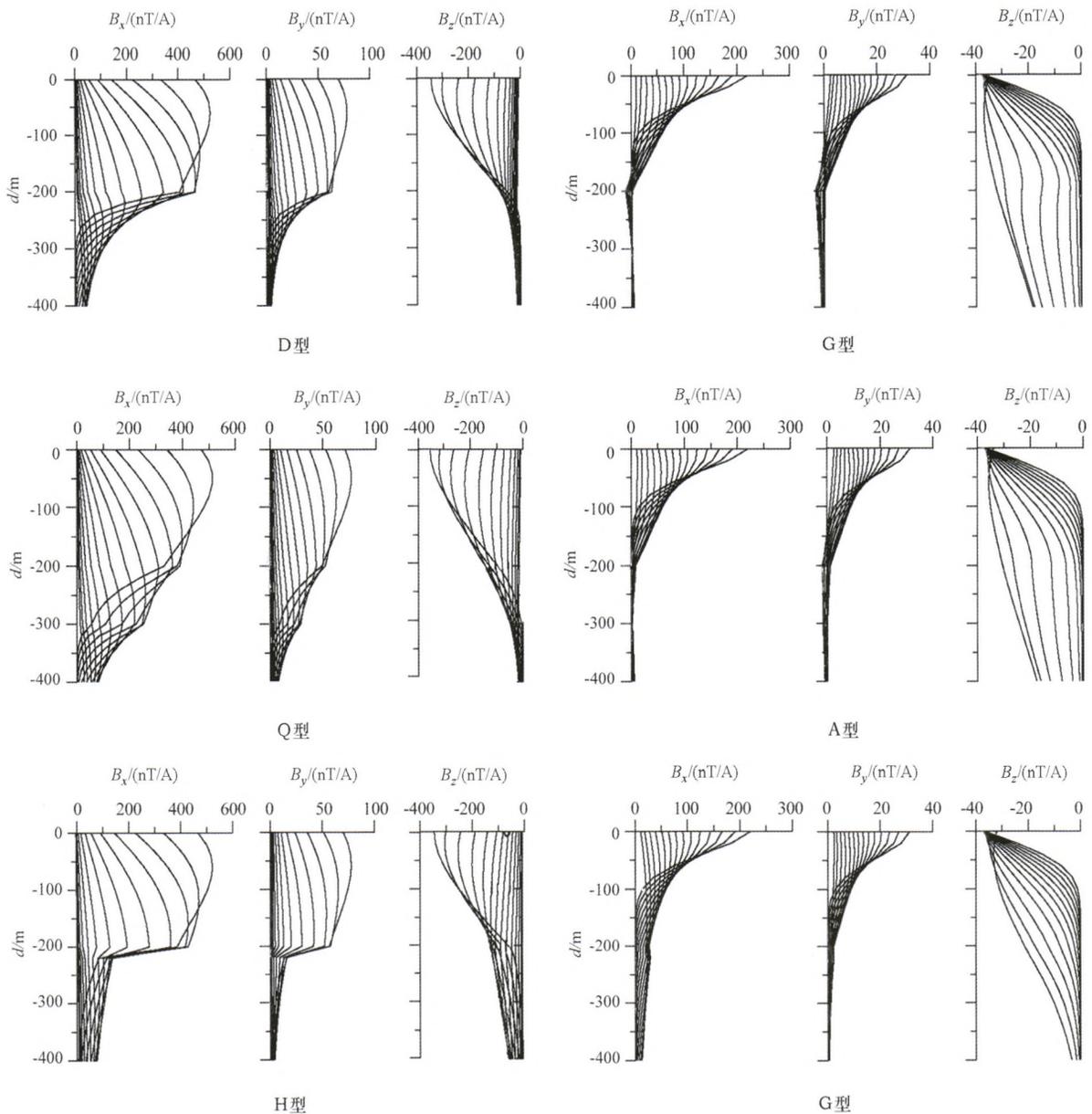


图5 一维模型地—井三分量瞬变响应曲线

200 m, 均匀半空间电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 。

图8为钻孔1的三分量瞬变响应曲线。钻孔1穿过板体中心,该钻孔的三分量曲线均在板体位置出现明显异常。这是由于接地源发射后低阻板体受一次场激发产生二次场,低阻板体的聚流作用使得其附近的感应磁场增强,板体位置处3个分量响应幅值均有一定程度的增大。由于板体产生的二次场磁力线的分布特点,使得 x 分量在板体界面处变向,并且板体上方的符号为负,下方为正(这与 x 分量定义有关),正、负极值点分别对应板体的顶界面和底界面。 y 分量整体为负,在板体界面处出现异常显示。 z 分量响应曲线整体为正,在板体位置出现正异常,异常中心对应板体纵向中心。

图9为钻孔2的三分量瞬变响应曲线。钻孔

2位于低阻板体边缘的外侧,该钻孔的 x 、 z 分量曲线在板体位置出现异常, y 分量曲线无明显异常显示。分析其原因,是由于低阻板体的聚流作用使得穿过板体的电流密度增大,而使得其周围电流密度降低,从而造成板体外部磁场幅值变小,因此, x 、 z 分量曲线均在板体位置出现负异常,幅值减小。

随着钻孔与板体距离增大,钻孔3的三分量响应曲线中均无明显异常显示,如图10所示。可以看出:由于低阻板体的聚流作用使得板体外部电流密度降低,在距板体一定距离后磁场已不能灵敏显示异常体的存在;距异常体不同距离的钻孔的三分量曲线形态各不相同,这与发射源的位置和二次场随时间的分布特征有关。可以利用钻孔三分量曲线特征来判断异常体与钻孔的位置关系。

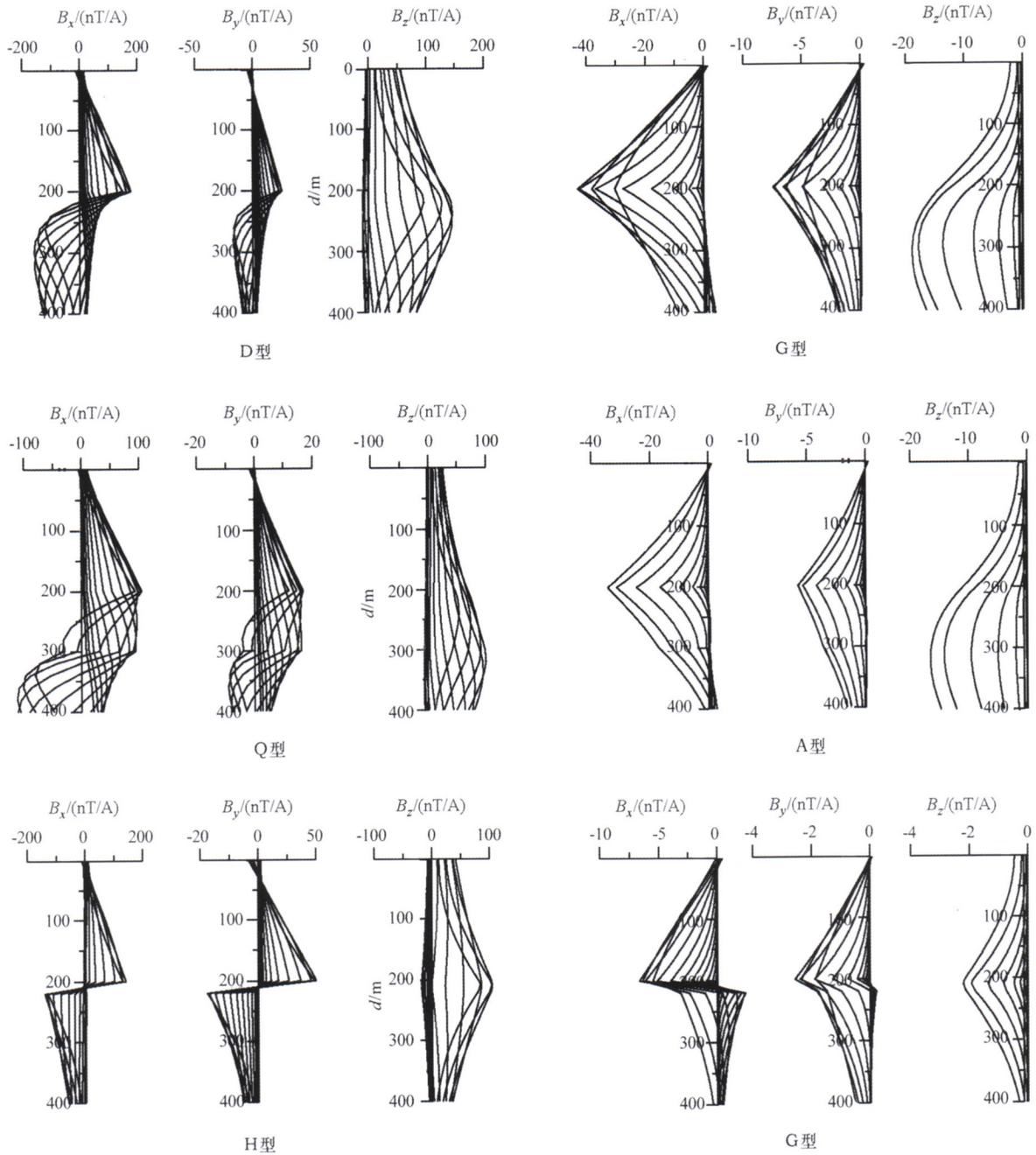


图6 一维模型地—井三分量异常场曲线

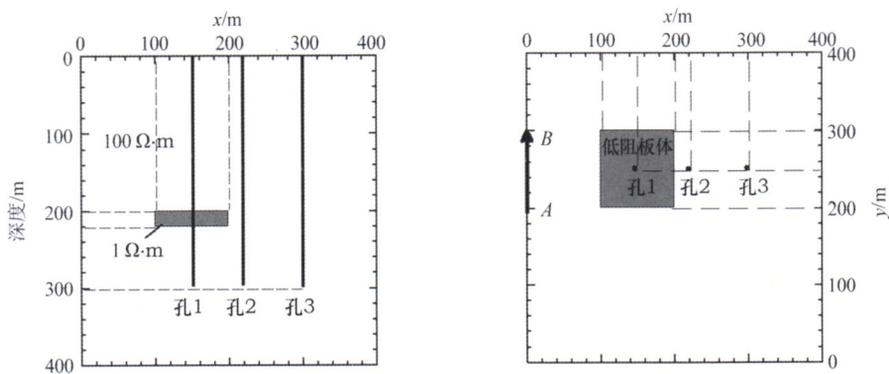


图7 三维正演模型

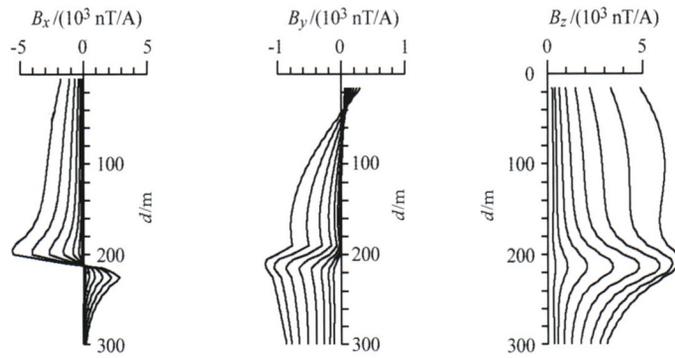


图 8 钻孔 1 中三分量瞬变响应曲线

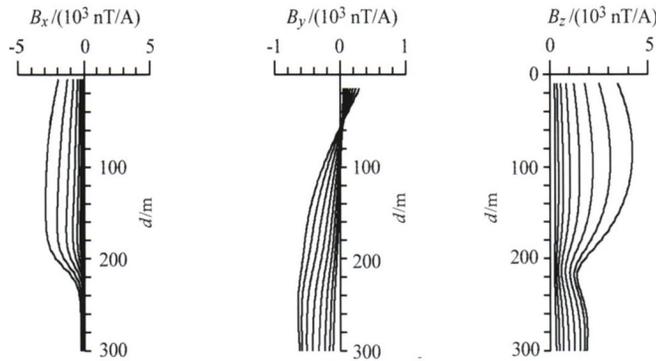


图 9 钻孔 2 中三分量瞬变响应曲线

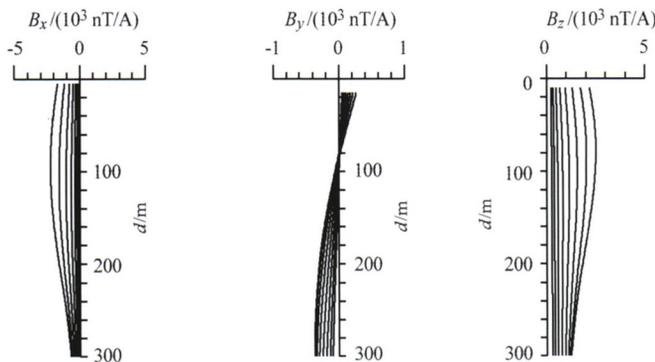


图 10 钻孔 3 中三分量瞬变响应曲线

3 初步结论

针对地—井 TEM 方法的应用现状和实际需求,研究了电性发射源地—井 TEM 装置,为下一步矿区勘查野外施工提供了初步的参考。模型计算结果表明,对于一维层状模型,电性源条件下井中响应曲线能够反映电性界面信息,而异常场瞬变响应曲线特征更加明显。

文中针对三维模型模拟了 3 个位置钻孔的响应,并通过数值计算分析了不同位置钻孔的响应特征,其特征有助于实际勘查中通过异常特征来判别

目标体相对于钻孔的位置。从一维模型和三维模型的计算结果中均可看出,水平分量(x, y)响应对应于界面和低阻体的灵敏度优于垂直分量,这与电性发射源场的分布有关。

参考文献:

- [1] Eadie T, Staltari G. Introduction to down hole electromagnetic methods[J]. Exploration Geophysics, 1987: 247 - 351.
- [2] Barnett C T. Simple inversion of time-domain electromagnetic data [J]. Geophysics, 1984, 49(7): 925 - 933.
- [3] Duncan A C. Interpretation of down-hole transient EM data using current filaments[C]//5th ASEG conference, 1984: 36 - 39.
- [4] Lindsay, Thomas. A simple Interpretation aid for downhole time-domain electromagnetic anomalies[J]. Exploration Geophysics, 1987:

- 349 - 351.
- [5] Cull J P. Rotation and resolution of three-component DHEM data [J]. *Exploration Geophysics*, 1996, 27(3): 155 - 1159.
- [6] Zhang Z, Xiao J. Inversions of surface and borehole data from large-loop transient electromagnetic system over a 1-D earth [J]. *Geophysics*, 2001, 66(4): 1090 - 1096.
- [7] 孟庆鑫, 潘和平. 地—井瞬变电磁响应特征数值模拟分析 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 1046 - 1053.
- [8] 张杰, 王兴春, 邓晓红, 等. 地—井瞬变电磁井旁板状导体异常响应特征分析 [J]. *物探化探计算技术*, 2014, 36(6): 641 - 648.
- [9] 张杰, 邓晓红, 郭鑫, 等. 地—井 TEM 在危机矿山深部找矿中的应用实例 [J]. *物探与化探*, 2013, 37(1): 30 - 34.
- [10] 杨毅, 邓晓红, 张杰, 等. 一种井中瞬变电磁异常反演方法 [J]. *物探与化探*, 2014, 38(4): 855 - 859.
- [11] 薛国强, 闫述, 陈卫营. 接地源短偏移瞬变电磁法研究展望 [J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(1): 177 - 181.
- [12] 薛国强, 陈卫营, 周楠楠, 等. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(1): 255 - 261.
- [13] 于生宝, 贾少华, 李刚, 等. 电性源时间域电磁法大功率发射系统的研制 [J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(7): 49 - 52.
- [14] Strack K M. *Exploration with deep transient electromagnetic method* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1992.
- [15] Mogi T, Kusunoki K, Kaieda H, et al. Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GRETEM) survey of Mount Bandai north-eastern Japan [J]. *Exploration Geophysics*, 2009, 40: 1 - 7.
- [16] 陈卫营, 薛国强, 崔江伟. 电性源瞬变电磁发射源形变对观测结果影响分析 [J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(1): 0126 - 0132.
- [17] Key K. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers [J]. *Geophysics*, 2009, 74(2): F9 - F20.
- [18] 孙怀凤, 李貅, 李术才, 等. 考虑关断时间的回线源激发 TEM 三维时域有限差分正演 [J]. *地球物理学报*, 2013, 56(3): 1049 - 1064.

A preliminary analysis of anomalous TEM response characteristics in borehole with electric source transmitter

WU Jun-Jie^{1,2}, LI Xiu¹, ZHI Qing-Quan², DENG Xiao-Hong², ZHANG Jie², WANG Xing-Chun², YANG Yi²

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: Borehole TEM is a configuration in which the transmitter is on the ground and the receiver probe is in borehole. The receiver can be installed near the orebody through the borehole and hence can obtain more reliable information of the orebody. Borehole TEM is effective for conductive mineralization, particularly in areas where the capability of surface EM for defining a target is limited either by large depths or by interfering conductive bodies such as overburden shallow sulfides and peripheral mineralized horizons. Relative to the magnetic source, the detection depth of electric source borehole TEM is deeper and it is more suitable for deep prospecting in the complex terrain area. Through the study of the borehole TEM response characteristics of electrical source of borehole TEM, the authors aim to provide technical support for the application. Three component response characteristics of half space, 1D, 3D model were analyzed through forward modeling, and its validity for different models was proved in this paper. The results show that, due to the superimposition of the background field and anomaly field response upon transient response of total field, the curve shape is complex, and the electrical interfaces are only obviously reflected at the middle and late stage. The shape of the anomalous field curve is relatively simple, and the electrical interface is obvious; the anomaly of the horizontal component is on the whole higher than that of the vertical component. In this paper, by means of numerical simulation analysis, the authors obtained the preliminary understanding of electrical source of downhole TEM three component curve shape and verified the effectiveness of the electrical interface under the condition of the electrical emission sources. The results obtained by the authors can provide a reference for the further research.

Key words: borehole transient electromagnetic method; anomalous field; three-component response; electric source

(本文编辑:沈效群)