

doi: 10.11720/wtyht.2018.1077

易洪春.地—井瞬变电磁响应特征研究[J].物探与化探,2018,42(5):970-976.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1077

Yi H C.Research on response of ground-borehole TEM[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(5):970-976.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1077

# 地—井瞬变电磁响应特征研究

易 洪 春

(中煤科工集团重庆研究院有限公司,重庆 400037)

**摘 要:**地—井瞬变电磁法作为瞬变电磁法的一种装置形式,由于其接收探头在钻孔或井下巷道中,靠近目标异常体,具有电磁干扰小、有用信号强等优点,越来越多地被国内外学者所研究。本文采用时域有限差分法(FDTD),以回线源为激发源,建立含板状体和矩形低阻体的地质模型,从地面—井筒观测方式和地面—巷道观测方式的角度,计算矩形回线源在半空间中产生的地—井瞬变电磁场响应,并对其响应的特征及规律进行研究,研究结果表明当有多个异常体同时存在时,地—井瞬变电磁能够区分出不同的异常体存在,并且能够对不同异常体的埋深和横向位置准确定位,为地—井瞬变电磁法定量解释异常体埋深和位置提供参考依据。

**关键词:**地—井瞬变电磁法;响应特征;数值模拟;定量

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2018)05-0970-07

## 0 引言

随着我国经济的快速发展,浅部的煤炭资源已基本开采殆尽,因此,深部找矿是当前能源开发的重点研究方向。瞬变电磁法是当前寻找深部矿产资源中应用最广的物探方法之一,而地—井 TEM 作为其中一种装置形式,由于其接收探头在钻孔或井下巷道中,靠近目标异常体,具有电磁干扰小、有用信号强、纵横向分辨率高等优点,而使国内外学者对该方法进行了越来越深入的研究。其中 P.A.Eaton 和 G.W.Hohmann<sup>[1]</sup>, S.H.Ward 和 R.C.West<sup>[2]</sup>等人用积分方程法研究了长导线源激发的地—井瞬变电磁场异常响应特征;孟庆鑫<sup>[3-4]</sup>运用有限差分方法研究了均匀半空间中板状导体的地—井 TEM 响应;徐正玉<sup>[5-7]</sup>对覆盖层下含有低阻体的垂直断面进行了地—井 TEM 正演数值模拟。

本文运用二维时域有限差分算法,建立地球物理模型,模拟出地面—井筒观测方式和地面—巷道观测方式下的板状导体的地—井瞬变电磁响应,并通过绘制多测道曲线,定量求得异常构造所处的位

置,为地—井瞬变电磁深部找矿提供可靠的理论依据。

## 1 时域有限差分法基本原理

### 1.1 电场扩散方程与 FDTD 差分方程

设大地为线性、各向同性、非磁性的导电媒质,在准静态近似下无源 Maxwell 方程为<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} \nabla \times E(r,t) = -\mu \partial H(r,t) / \partial t, \\ \nabla \times H(r,t) = \sigma E(r,t), \\ \nabla \cdot E(r,t) = 0, \\ \nabla \cdot H(r,t) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E(r,t)$ 、 $H(r,t)$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$  分别为电场强度、磁场强度、磁导率和电导率,  $r$  为空间矢量,  $t$  为电磁波扩散时间。对式(1)两边取旋度后利用矢量恒等式  $\nabla \times \nabla \times A = \nabla \nabla \cdot A - \nabla^2 A$ , 可导出电场的扩散方程:

$$\nabla^2 E(r,t) - \mu \sigma(r) \frac{\partial E(r,t)}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

求得电场后,根据电场和磁场的关系,可以得到磁场垂直分量:

$$\frac{\partial b_z(t)}{\partial t} = \frac{\partial e_x(t)}{\partial y} - \frac{\partial e_y(t)}{\partial x}; \quad (3)$$

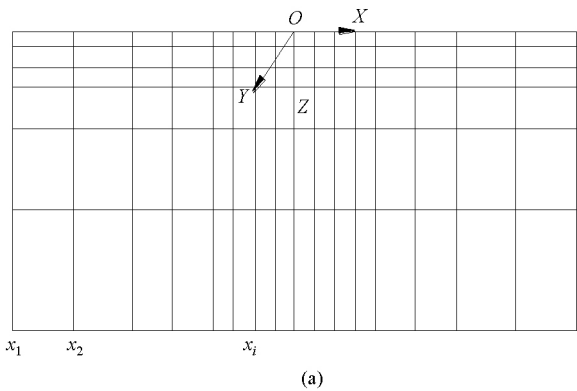
收稿日期: 2017-02-28;修回日期: 2018-04-24

基金项目: 国家十三五重大专项“井下致裂效果范围测定技术与装备”(2016ZX05045004-007)

作者简介: 易洪春(1987-),男,四川射洪人,硕士研究生,主要从事矿井瞬变电磁法勘探与研究。Email:330489541@qq.com

通过推导便可得到 DuFort-Frankel 差方程<sup>[9-11]</sup>:

$$\begin{aligned} E_{i,j}^{n+1} &= \frac{1 - 4\bar{r}_{i,j}E_{i,j}^{n-1}}{1 + 4\bar{r}_{i,j}} + \frac{2r_{i,j}^z}{1 + 4\bar{r}_{i,j}} \cdot \\ &\left( \frac{\Delta z_j}{\Delta \bar{z}_j} E_{i,j+1}^n + \frac{\Delta z_{j+1}}{\Delta \bar{z}_j} E_{i,j-1}^n \right) + \\ &\frac{2r_{i,j}^x}{1 + 4\bar{r}_{i,j}} \left( \frac{\Delta x_i}{\Delta \bar{x}_i} E_{i+1,j}^n + \frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta \bar{x}_i} E_{i-1,j}^n \right), \quad (4) \\ \Delta \bar{z}_j &= \frac{\Delta z_{j+1} + \Delta z_j}{2}, \\ \Delta \bar{x}_i &= \frac{\Delta x_{i+1} + \Delta x_i}{2}, \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} r_{i,j}^z &= \frac{\Delta t}{\mu \sigma_{i,j} \Delta z_j \Delta z_{j+1}}, \\ r_{i,j}^x &= \frac{\Delta t}{\mu \sigma_{i,j} \Delta x_i \Delta x_{i+1}}, \\ \bar{r}_{i,j} &= \frac{r_{i,j}^x + r_{i,j}^z}{2}. \end{aligned}$$

初始时间步由网格扩散时间  $\Delta t = \frac{1}{4} \mu \sigma_{\min} \delta_{\min}^2$  给出,以后随着迭代次数的增加逐步加大。式中  $\sigma_{\min}$  是最小电导率,  $\delta_{\min}$  为最小网格边长。

具体网格差分格式见图 1。

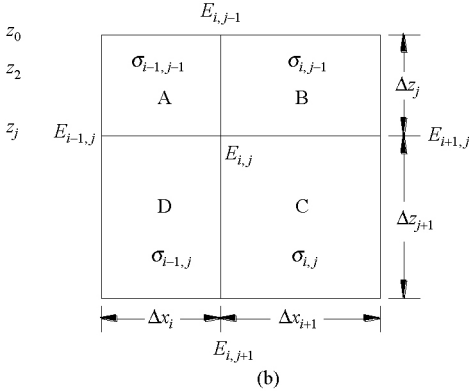


图 1 坐标系与网格 (a) 和矩形网格的五点差分格式 (b)

1.2 Mur 吸收边界条件

本文采用 Mur 吸收边界条件,推导过程见文献[12],以侧边  $x = x_{\max}$  为例,其表达式为:

$$\left( \frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E \Big|_{x = \max} = 0.$$

经推导可得侧边上的节点差分格式。

仍以  $x = x_{\max}$  界为例:

$$E_{\max}^{n+1} = E_{\max-1,k}^n + \frac{c\Delta t - \delta}{c\Delta t + \delta} [E_{\max-1,k}^{n+1} - E_{\max,k}^n], \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为网格节点间距;  $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ ;  $\Delta t$  为时间步进增量,一般取电磁波穿过 1/2 个网格间距的时间即可保持步进稳定,为保证精度,本文选取的  $\Delta t$  更小。

1.3 激励源

时域有限差分算法中,源可利用均质半空间的解析式作为初始条件代入,前提是异常体要有一定的埋深,以满足均质半空间的限制。源的形式可根据需要选择,此次研究选取回线源作为激发源。

回线源均匀半空间介质的解析式推导见文献[8],文中仅列出  $y$  走向所激发的电场解析式的最后结果:

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{I}{\pi \sigma r^2} \left\{ 2\theta^2 z^2 e^{-\theta^2 r^2} + \frac{x^2 - z^2}{r^2} [\operatorname{erfc}(\theta z) - e^{-\theta^2 r^2}] - \right. \\ &\left. \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta z e^{-\theta^2 r^2} \left[ 1 - 2\theta x \left( 1 + \frac{1}{\theta^2 r^2} \right) F(\theta x) \right] \right\}; \quad (6) \\ \theta &= \sqrt{\frac{\mu \sigma}{4t}}, \\ r^2 &= x^2 + z^2. \end{aligned}$$

式中  $F(\theta x)$  为 Dawson 积分。

2 地—井瞬变电磁响应特征

经过 matlab 编程,得到如图 2 所示的不同模型在  $xOz$  平面观测到的垂直磁场对时间的导数  $\partial b_z/\partial t$  的等值线图,其中  $x, z$  分别为水平位置和埋深。图 2a 表示在纵向方向受到 2 个板状低阻体的影响,一个低阻体埋深在 55~60 m,另一个低阻体埋深在 100~105 m 位置(黑线所示),磁场的等值线在低阻体处发生明显变化;图 2b 表示在横向方向受到 2 个低阻体影响,一个低阻体水平位置在 350~400 m,埋深在 80~100 m,另一个低阻体水平位置在 600~650 m,埋深在 80~100 m 位置(黑色方框所示),磁场的

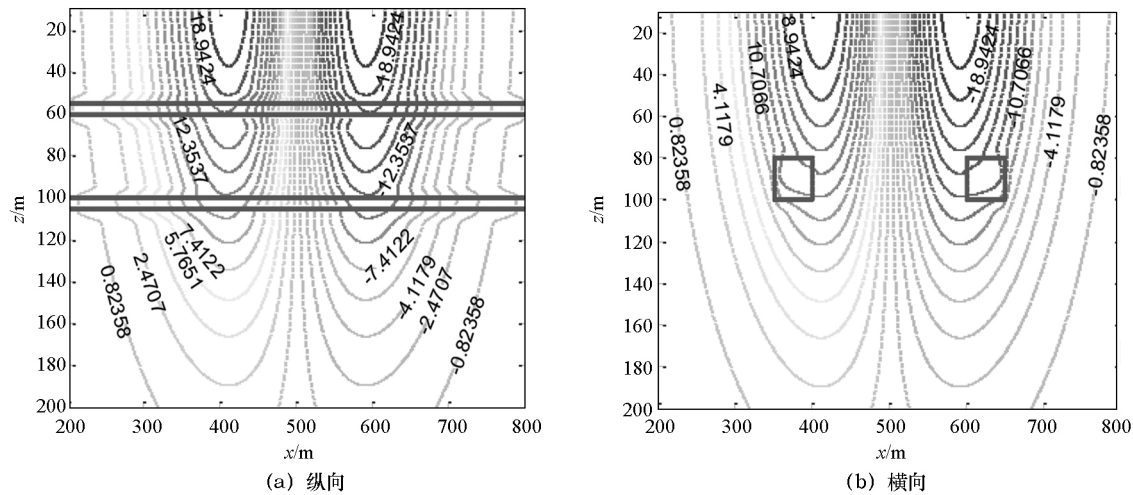


图 2 2 个低阻体的  $xOz$  平面  $\partial b_z/\partial t$  分布特征

等值线在低阻体处发生变化。说明瞬变电磁法在横向和纵向都对低阻体有较好的分辨力。

本文选取两种观测方式对井地瞬变电磁响应特征进行研究:地面—井筒观测方式和地面—巷道观测方式。

2.1 地面—井筒观测方式

所谓地面—井筒观测方式指在地面发射,在井孔或钻孔内接收电磁场的瞬变响应。

图 3 是地面—井筒观测方式示意。发射线框 400 m×400 m,发射电流 1 A。大地电阻率为 100 Ω·m。井孔位于大地介质剖面中心( $x=0$ )处,测量深度 0~500 m,点距 10 m。

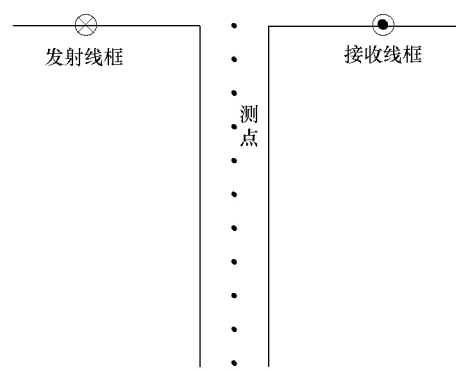


图 3 地面—井筒观测方式示意

图 4 是地—井观测方式下的 TEM 响应曲线。选取 6 个不同时刻的响应组成多测道曲线。

图 4a 为在  $z=200$  m 的深度,含有一个电阻率为 10 Ω·m、厚 0.2 m 的单个板状低阻体的地电模型。在早期,响应幅值较大,随着时间的推移,响应幅值逐渐减弱。极大值出现在涡流场感应最大的地方,本模型在  $z=200$  m 深度有一板状低阻体,故在  $z=200$  m 处出现极大值。并且,局部导体本身的异常

越大(包括异常体大小与电性),电磁场响应的异常幅值就越大。

图 4b 为在  $z=200$  m 和  $z=300$  m 的深度,含两个电阻率都为 10 Ω·m、厚 0.2 m 的组合板状低阻体的地电模型。多测道曲线与图 4a 具有相同的特征,并且出现两个极值,极值点的位置分别在  $z=200$  m 和  $z=300$  m 附近,这与模型中两个低阻薄板的深度相符。故认为地—井观测方式对低阻体的埋深能很好地分辨出来。

2.2 地面—巷道观测方式

所谓地面—巷道观测方式,指在地面发射,在地下巷道中接收电磁场的瞬变响应。为了便于对地下深部的小信号瞬变响应进行研究,笔者借鉴 Greenfield 等<sup>[13]</sup>在对构造扰动煤层内电磁信号的衰减特性进行研究的过程中,引入参数  $E_a$  (单位: dB) 来标定构造扰动煤层和完整煤层中电磁信号的幅值差。沿用参数  $E_a$  的标定形式,但将  $E_a$  重新定义为

$$E_a(x) = H_z(x) - H_{z_0}(x),$$

式中:  $H_z(x)$  表示存在低阻异常体时所测得的垂直磁场值;  $H_{z_0}(x)$  表示在其他参数一样的情况下,去除低阻异常体影响所测得的垂直磁场值,即  $E_a$  可看作低阻异常体的“纯响应”。

图 5 是地面—巷道观测方式示意。发射线框位于地表,大小为 400 m×400 m,发射电流 1 A。大地电阻率为 100 Ω·m。在  $z=400$  m 的深度,  $x=100$  m 处,有一个 0.5 m×0.5 m 大小的低阻异常体,电阻率为 10 Ω·m。布置如 5 所示的 3 条测线,测线  $z$  方向分别在  $z=0$  m、 $z=300$  m 和  $z=500$  m 的位置,测线  $x$  方向都是从 -200~200 m。测点点距 10 m。

图 6 是地面—巷道观测方式下的 TEM 多测道响应曲线。 $x$  轴是测点在  $x$  方向的位置。从磁场的

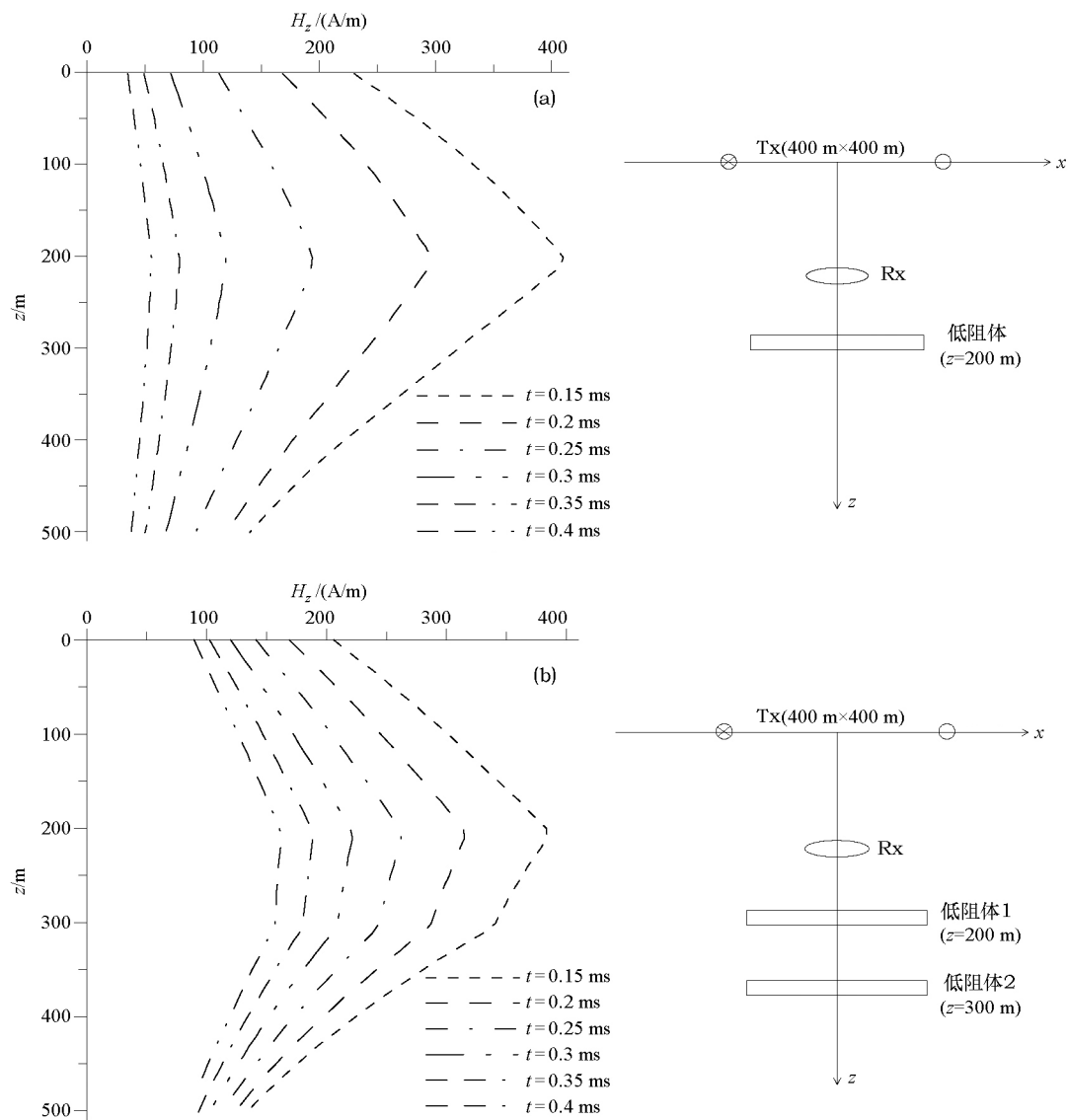


图 4 单个板状导体(a)与组合板状导体(b)的地—井 TEM 响应曲线

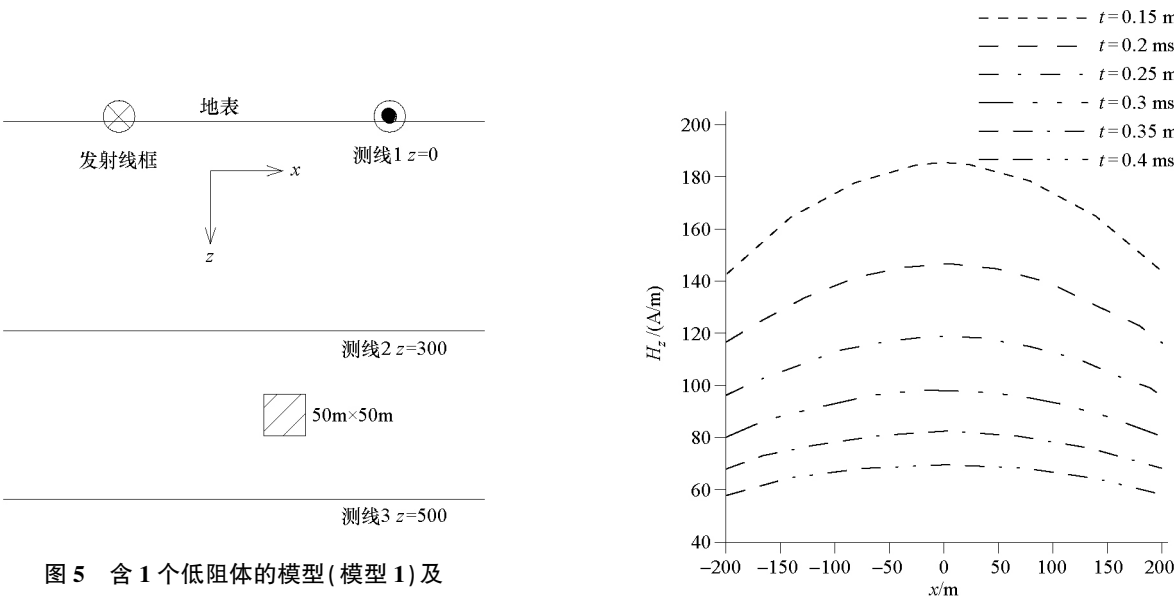


图 5 含 1 个低阻体的模型(模型 1)及地面—巷道观测方式示意

图 6 测线 1( $z=0$  m)  $H_z$  响应曲线(模型 1)

多测道响应曲线上几乎看不出有低阻异常体的反应。

图 7 为测线 1 ( $z=0\text{ m}$ ) 的垂直磁场  $E_a$  多测道响应曲线,在  $x=100\text{ m}$  处相交,正好与低阻异常体所在的横向位置相符。图 8 为测线 2 ( $z=300\text{ m}$ ) 的垂直磁场  $E_a$  多测道响应曲线,在  $x=100\text{ m}$  处相交,正好与低阻异常体所在的横向位置相符。图 9 为测线 3 ( $z=500\text{ m}$ ) 的垂直磁场  $E_a$  多测道响应曲线,曲线在  $x=100\text{ m}$  处相交,正好与低阻异常体所在的横向位置相符。

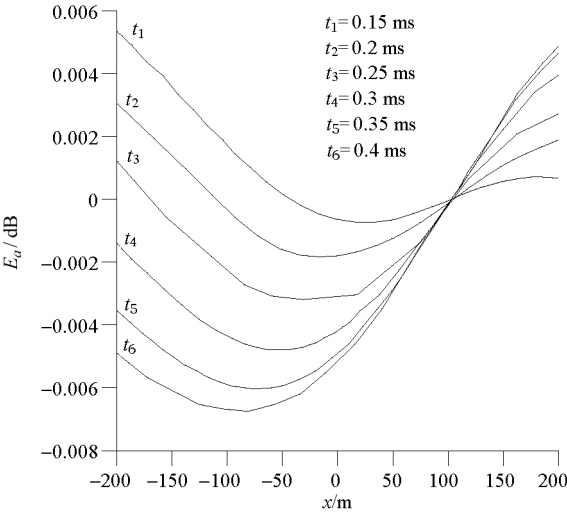


图 7 模型 1 测线 1 ( $z=0\text{ m}$ ) 的  $E_a$  多测道曲线(模型 1)

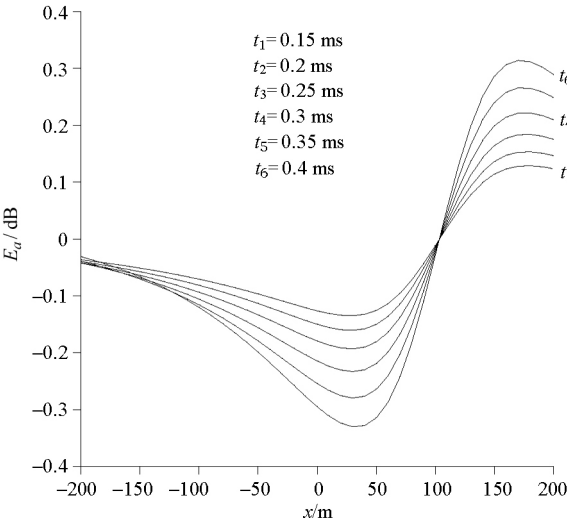


图 8 测线 2 ( $z=300\text{ m}$ ) 的  $E_a$  多测道曲线(模型 1)

与图 6 相比,图 7、8、9 都能明显地区分出低阻异常的横向位置。究其原因,低阻体对电磁场的“吸引”作用使得响应在此处不断增大,并随时间的推移,后时刻的“纯响应”超过前时刻的“纯响应”,故  $E_a$  曲线在此处发生交叉,正好位于异常体附近。

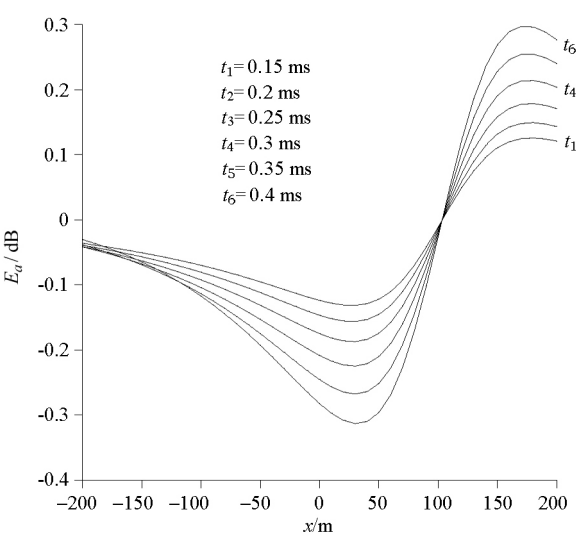


图 9 测线 3 ( $z=500\text{ m}$ ) 的  $E_a$  多测道曲线(模型 1)

与图 7 相比,图 8、图 9 的  $E_a$  值提高了 2 个数量级,说明越靠近低阻异常体,异常响应越大;同时也说明地—井 TEM 相对于常规的地面 TEM,由于接收探头靠近目标异常体,而接收信号具有更强的异常响应。

为了进一步研究地面—巷道观测方式的横向分辨率,重新建立如图 10 所示的地电模型。模型参数与图 5 一致,发射线框位于地表,大小为  $400\text{ m}\times 400\text{ m}$ ,发射电流  $1\text{ A}$ 。大地电阻率为  $100\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。并在  $x$  方向  $x=-100\text{ m}$  处,增加一个与  $x=+100\text{ m}$  处对称的低阻异常体,异常体大小  $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ ,电阻率  $10\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 。同样布置三条测线,测线深度分别在  $z=0\text{ m}$ 、 $z=300\text{ m}$  和  $z=500\text{ m}$  的位置, $x$  方向从  $-200\sim 200\text{ m}$ ,测点点距为  $10\text{ m}$ 。同样选取  $t_1=0.15\text{ ms}$ 、 $t_2=0.2\text{ ms}$ 、 $t_3=0.25\text{ ms}$ 、 $t_4=0.3\text{ ms}$ 、 $t_5=0.35\text{ ms}$ 、 $t_6=0.4\text{ ms}$  6 个时刻的数据进行分析。

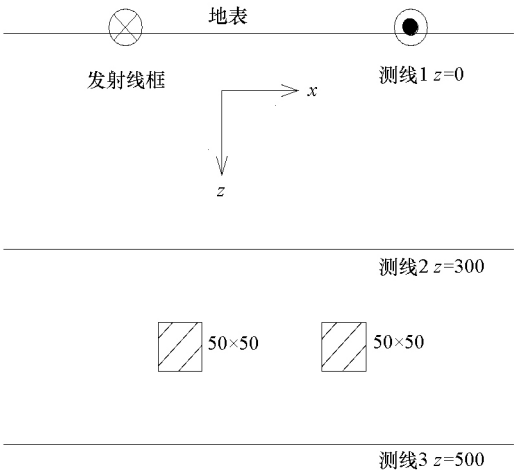


图 10 含两个低阻异常体的模型(模型 2)



图 11 为测线 1( $z=0\text{ m}$ ) 的垂直磁场  $E_a$  多测道响应曲线,曲线有的不相交,有的相交,且交叉点位置不明确。故难以区分出 2 个低阻异常体的具体横向位置。

图 12、图 13 分别为测线 2( $z=300\text{ m}$ )、测线 3( $z=500\text{ m}$ ) 的垂直磁场  $E_a$  多测道响应曲线,图中曲线均分别在  $x=-100\text{ m}$  和  $x=+100\text{ m}$  处相交,相交点清晰明确,并且正好是两个低阻异常体所在的横向位置。

与图 11 相比,图 12、图 13 不仅  $E_a$  响应值较大,并且交叉点清晰明确,对异常体横向位置能准确区分。相对于常规的地面 TEM,地—井 TEM 异常响应大,大大提高了对异常体的分辨率。

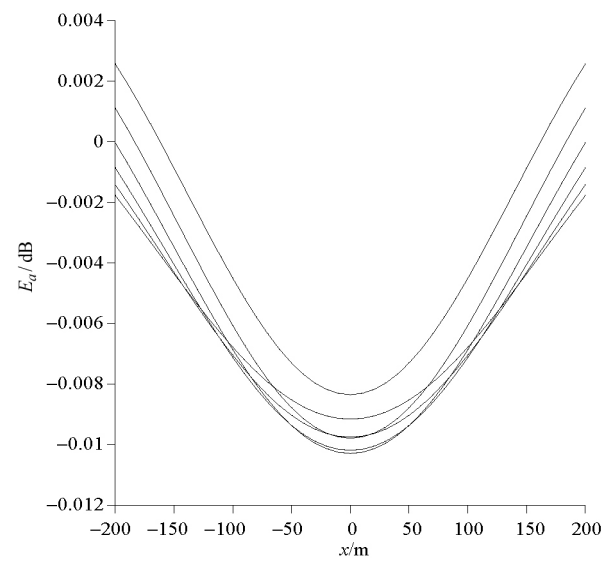


图 11 测线 1( $z=0\text{ m}$ ) 的  $E_a$  多测道曲线(模型 2)

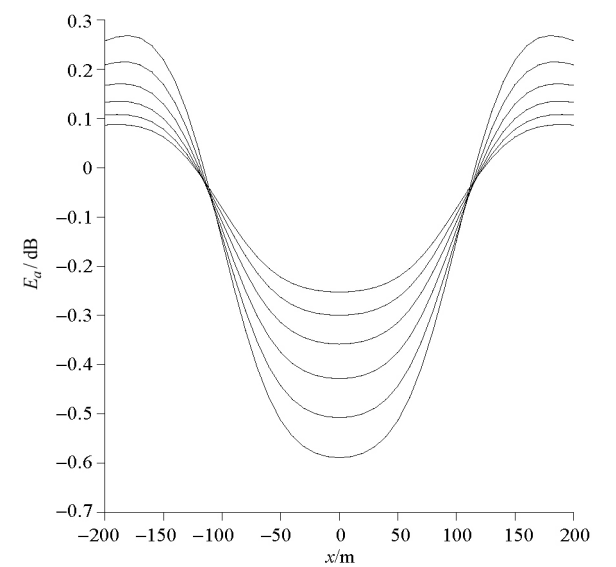


图 12 测线 2( $z=300\text{ m}$ ) 的  $E_a$  多测道曲线(模型 2)

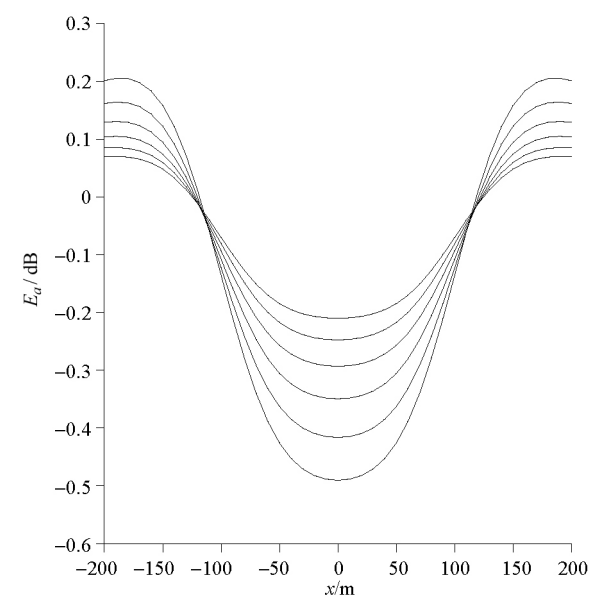


图 13 测线 3( $z=500\text{ m}$ ) 的  $E_a$  多测道曲线(模型 2)

3 结论和讨论

1) FDTD 法是模拟分析瞬变电磁场特征规律的有效方法,利用该方法可以准确地模拟出不同地电模型的瞬变电磁响应特征。

2) 由于地—井瞬变电磁接收探头更接近目标体,相比于常规的地面瞬变电磁,其响应信号更明显,探测分辨率更高。

3) 当有多个异常体同时存在时,地—井瞬变电磁能够区分出不同的异常体存在,并且能够对不同异常体的埋深和横向位置准确定位。该研究结果为地—井瞬变电磁法定量解释异常体埋深和位置提供了参考依据。

4) 文中对于地—井瞬变电磁大深度小异常的定位问题,需要借助  $E_a$  多测道曲线来确定,而对异常体定位的直接算法还不明确,今后作者将对此作进一步研究。

参考文献:

[1] Eaton P A, Hohmann G W. The influence of a conductive host on two-dimensional borehole transient electromagnetic responses[J]. Geophysics, 1984, 49(7): 861-869.

[2] West R C, Ward S H. The borehole transient electromagnetic response of a three-dimensional fracturezone in a conductive half-space[J]. Geophysics, 1988, 53(11): 1469-1478.

[3] 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.

[4] 孟庆鑫,潘和平,牛峥. 大地介质影响下地—井瞬变电磁的正演模拟研究[J]. 中国矿大学报, 2014, 43(6): 1113-1119.

[ 5 ] 徐正玉,杨海燕,邓居智. 垂直接触带影响下地-井瞬变电磁响应研究[ J ]. 地球物理学进展, 2015,30( 3 ):1345 - 1353

[ 6 ] 徐正玉,杨海燕,邓居智,等. 回线源三维地-井瞬变电磁法 FDTD 数值模拟[ J ]. 工程地球物理学报,2015,3:327 - 332.

[ 7 ] 杨海燕,岳建华,徐正玉. 覆盖层影响下典型地-井模型瞬变电磁法正演[ J ]. 吉林大学学报:地球科学版,2016,46( 5 ):1527 - 1537.

[ 8 ] 米萨克 N 纳比吉安. 勘查地球物理电磁法( 第 1 卷 ) [ M ]. 赵经祥,王艳君,译. 北京:地质出版社,1992.

[ 9 ] 闫述,陈明生,傅君眉. 瞬变电磁场的直接时域数值分析[ J ]. 地球物理学报,2002,45( 2 ):275 - 284.

[ 10 ] 岳建华,杨海燕. 矿井瞬变电磁法三维时域有限差分数值模拟[ J ]. 地球物理学进展, 2007, 22( 6 ): 1904 - 1909.

[ 11 ] 杨海燕,岳建华. 磁偶源 2.5 维瞬变电磁场全空间 FDTD 数值模拟[ J ]. 物探与化探,2008,32( 3 ):326 - 330.

[ 12 ] 葛德彪. 电磁波时域有限差分方法[ M ]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.

[ 13 ] Greenfield R J,Wu S T. Electromagnetic wave propagation in disrupted coal seams[ J ]. Geophysics,1991,56( 10 ):1571 - 1577.

Research on response of ground-borehole TEM

YI Hong-Chun

( Chongqing Research Institute of China Coal Technology and Engineering Group ,Chongqing 400037 ,China )

**Abstract:** As a device form of transient electromagnetic method, the ground-borehole TEM is being studied by more and more experts both in China and abroad. It has such advantages as small electromagnetic interference, strong signal for its receiving probe in the drilling or downhole tunnel, and closeness to the target anomaly. In this paper, the author used loop source as the excitation source, and established the geological model using finite-difference time-domain method ( FDTD ) with plate-like body and rectangular low-resistance body. The author calculated the transient response of the rectangular loop source ground-borehole TEM in the half space, and studied its characteristics and laws from the perspective of ground-borehole observation and ground-tunnel observation. The results show that, when multiple anomalies exist simultaneously, the ground-borehole TEM can distinguish different anomalies from the anomalous body and can accurately locate the depth and the horizontal position of different anomalies. The results can provide reference for the quantitative explanation of the depth and location of the anomaly with ground-borehole TEM.

**Key words:** ground-borehole TEM; response characteristics; numerical simulation; quantitative explanation

( 本文编辑:沈效群 )