

doi: 10.11720/wtyht.2017.3.15

许新刚,徐正玉.地—井瞬变电磁响应三维时域有限差分模拟[J].物探与化探,2017,41(3):496–504.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.15>
Xu X G,Xu Z Y.Three-dimensional finite difference time domain simulation for down-hole transient electromagnetic method[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(3):496–504.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.15>

地—井瞬变电磁响应三维时域有限差分模拟

许新刚¹,徐正玉²

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116; 2.东华理工大学 核工程与地球物理学院,江西 南昌 330013)

摘 要:地—井瞬变电磁法是利用地表发射、井中接收瞬变场响应来实现查找深部矿产资源的一种方法。在时间域有限差分算法的基础上,以回线源为激发源,采用非均匀网格剖分技术,对均匀半空间和倾斜板状体、含有低阻覆盖层的倾斜板状体进行了数值模拟。通过对比分析表明:均匀半空间中,响应极大值随观测时间延迟而减小;早期主要反映围岩响应特征,异常体响应特征在晚期表现出来;场源位于中心位置激发时,异常体响应可以很好地体现出来,当场源位于右侧位置,则要选取较长的观测时间降低周围围岩的影响,使异常体的响应特征显示出来;低阻覆盖层对异常响应的影响在整个观测时间范围内都存在,削弱了异常体的响应特征。研究作为定性分析地—井 TEM 响应特征和资料解释提供了参考。

关键词:地—井瞬变电磁法;时域有限差分法;数值模拟;异常响应特征;低阻覆盖体

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)03-0496-09

0 引言

地—井瞬变电磁法将发射回线布置在井孔上方或附近,在回线内供以脉冲电流激发电磁场,用接收探头在钻孔中逐点测量因电流关断后地下地质体感应产生的瞬变电磁二次场,来进行深部地质勘探^[1-2]。20 世纪 80 年代,加拿大、澳大利亚等国家开始对地—井瞬变电磁法进行理论与应用研究,并取得理想成果。其中,A. V. Dyck^[3]总结了地—井 TEM 方法在金属矿勘查中的解释方法;J. Macnae 和 G. Staltari^[4]阐述了在导电背景下,地—井 TEM 响应的特征规律;在理论方面,P. A. Eaton 和 G. W. Hohmann^[5],R. C. West 和 S. H. Ward^[6]以长导线为激发源,采用积分方程法研究二维、三维地—井 TEM 响应特征。近年来,我国对地—井瞬变电磁法理论与应用研究也取得进步。其中,张杰^[7]等阐述了地—井瞬变电磁法在探测深部盲矿和追踪矿体延伸方向具有良好效果。国内正演研究正在深入并取得一些成果,但是这些成果是基于地—井瞬变电磁异常解释

系统软件和 EMIT Maxwell 4.0 软件实现的,以张杰^[8]、戴雪平^[9]为代表;孟庆鑫^[10]使用了有限差分方法对地—井瞬变电磁进行数值模拟,但只局限于在二维地质条件下对地—井瞬变电磁响应进行分析研究,而有关用数值方法模拟地—井瞬变电磁法三维正演的文章国内则很少。由于地—井瞬变电磁法的独特性,国内外对其理论研究较少,还没有形成完整的理论体系,理论发展滞后。而在资料解释时缺少足够的正演理论资料借鉴,因此使得三维地—井瞬变电磁法正演模拟成为急需解决的问题。

针对上述情况,笔者在前人研究的基础上^[11-18],对典型倾斜板状体地质—地球物理模型进行了三维地—井瞬变电磁场特征分析研究,所做工作可为定性研究地—井 TEM 响应特征和资料解释提供可靠依据。

1 理论基础

1.1 差分方程

在忽略位移电流条件下,均匀各向同性且无源

收稿日期: 2016-06-14

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ14487);放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开发基金资助项目(RGET1308);国家自然科学基金项目(41004048,41164003,41304097,41264004)

作者简介:许新刚(1988-),男,在读博士生,现主要从事地球物理勘探研究工作。Email:xuxingang@126.com

的线性介质中电磁场的麦克斯韦方程为^[19]

$$\nabla \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = - \frac{\partial \boldsymbol{B}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} ,$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},t) ,$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{0} ,$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = \boldsymbol{0}$$

并且: $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r},t) = \mu \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t)$, $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},t) = \sigma \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)$ 。

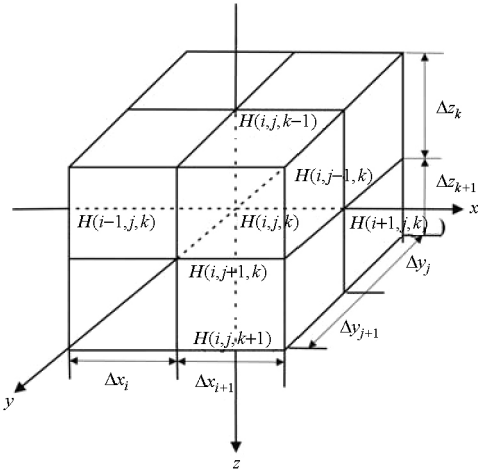


图 1 有限差分中网格单元模型

由以上 6 式推导出瞬变电场的扩散方程:

$$\nabla^2 \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = \sigma \mu \frac{\partial \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} , \tag{1}$$

以上各式中, $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t)$ 为电场强度, $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t)$ 为磁场强度, $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r},t)$ 为磁感应强度; $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},t)$ 为电流密度, μ 和 σ 为介质的磁导率和电导率。

在计算中,采用非均匀网格剖分技术对模型区域进行网格剖分(图 2a),对异常体部分采用步长小的细网格剖分,其他空间部分采用粗网格剖分。设三维均匀半空间介质大小为 1 000 m×100 m×1 000 m;异常体处网格剖分步长为 2.5,其他网格步长选取为 5;异常体规模大小为 200 m×10 m×50 m,倾斜 45°位于钻井下端,距井下端距离为 100 m,其中, ZK1 井深 500 m, ZK2 井深 400 m, ZK3 井深 300 m,井与井之间相距 100 m。

将无限大空间区域连续的磁场值用各个小长方体节点上的场值近似代替,对式(1)两边取旋度并采用高斯公式化简;磁场对时间、空间的偏导数用中心差分格式近似代替,采用时域有限差分进行差分离散,最后化简得^[20]:

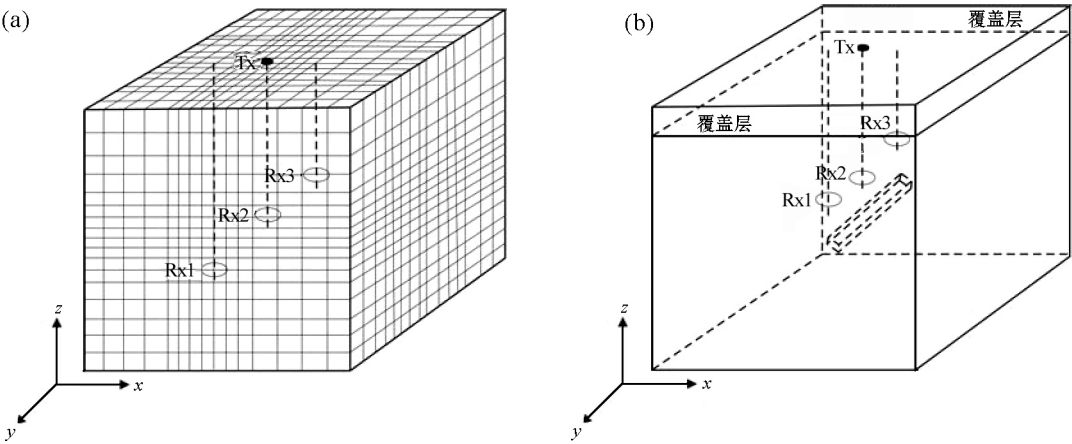


图 2 有限差分网格剖分图和模型示意

$$\begin{aligned} \boldsymbol{H}_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{1 - 6\bar{r}_{i,j,k}}{1 + 6\bar{r}_{i,j,k}} \boldsymbol{H}_{i,j,k}^{n-1} + \frac{2\bar{r}_{i,j,k}^x}{1 + 6\bar{r}_{i,j,k}} \left[\frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} \boldsymbol{H}_{i-1,j,k}^n + \frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} \boldsymbol{H}_{i+1,j,k}^n \right] + \\ & \frac{2\bar{r}_{i,j,k}^y}{1 + 6\bar{r}_{i,j,k}} \left[\frac{\Delta y_{j+1}}{\Delta y_j} \boldsymbol{H}_{i,j-1,k}^n + \frac{\Delta y_{j+1}}{\Delta y_j} \boldsymbol{H}_{i,j+1,k}^n \right] + \frac{2\bar{r}_{i,j,k}^z}{1 + 6\bar{r}_{i,j,k}} \left[\frac{\Delta z_{k+1}}{\Delta z_k} \boldsymbol{H}_{i,j,k-1}^n + \frac{\Delta z_{k+1}}{\Delta z_k} \boldsymbol{H}_{i,j,k+1}^n \right] , \end{aligned} \tag{2}$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta x}_i = & (\Delta x_i + \Delta x_{i+1})/2, \quad \bar{\Delta y}_j = (\Delta y_j + \Delta y_{j+1})/2, \quad \bar{\Delta z}_k = (\Delta z_k + \Delta z_{k+1})/2, \\ r_{i,j,k}^x = & \Delta t / (\mu \bar{\sigma}_{i,j,k} \Delta x_i \Delta x_{i+1}), \quad r_{i,j,k}^y = \Delta t / (\mu \bar{\sigma}_{i,j,k} \Delta y_j \Delta y_{j+1}), \quad r_{i,j,k}^z = \Delta t / (\mu \bar{\sigma}_{i,j,k} \Delta z_k \Delta z_{k+1}), \\ \bar{\sigma}_{i,j,k} = & \frac{1}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})(\Delta y_j + \Delta y_{j+1})(\Delta z_k + \Delta z_{k+1})} [\sigma_{i,j,k} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_k + \sigma_{i+1,j,k} \Delta x_{i+1} \Delta y_j \Delta z_k + \\ & \sigma_{i,j+1,k} \Delta x_i \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \sigma_{i+1,j+1,k} \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1} \Delta z_k + \sigma_{i,j,k+1} \Delta x_i \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \\ & \sigma_{i+1,j,k+1} \Delta x_{i+1} \Delta y_j \Delta z_{k+1} + \sigma_{i,j+1,k+1} \Delta x_i \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1} + \sigma_{i+1,j+1,k+1} \Delta x_{i+1} \Delta y_{j+1} \Delta z_{k+1}] 。 \end{aligned}$$

在编程中,以式(2)迭代公式为基础,进行数值模拟计算磁场,其他参数均为计算系数。

1.2 场源与边界条件

将均匀半空间介质中回线源解析解作为初始条件加入,负阶跃脉冲信号激发下大回线源激发的瞬变场解析解为^[19]:

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{I}{\mu_0 \sigma a^3} \left[3\text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}}(3\theta a + 2\theta^3 a^3) \right] e^{-\theta^2 a^2},$$

(3)

式中:erf 为误差函数, a 为大回线源半径, I 为供电电流。采用非均匀网格剖分技术时,初始时间和

最小网格步长之间必须满足下面的数学关系,才能保证算法的稳定性^[20]:

$$\Delta t_{\max} = \mu \min(\bar{\sigma}_{i,j,k}) \min^2(\Delta)/6,$$

(4)

式中: $\min(\Delta)$ 为计算模型中最小网格步长,初始时刻的选取不能超过最大值。为了保证算法的稳定性,选取初始时刻 $t_1 = 1.0472 \times 10^{-7} \text{ s}$, $t_2 = 2 \times 1.0472 \times 10^{-7} \text{ s}$ 参与计算。廖式吸收边界条件^[21]以精度高优点被广泛的应用在数值模拟中。杨海燕推导了修正的廖式吸收边界条件,该边界条件对边界处磁场处理较好。修正后廖式吸收边界条件公式如下^[20]:

$$\left. \begin{aligned} \Phi(x_{\min}, y_b, z_b, t + \Delta t) &= \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \gamma^j C_j^N \Phi[x_{\min} + j\alpha \Delta x_j, y_b, z_b, t - (j-1)] \\ \Phi(x_{\max}, y_b, z_b, t + \Delta t) &= \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \gamma^j C_j^N \Phi[x_{\max} - j\alpha \Delta x_j, y_b, z_b, t - (j-1)] \\ \Phi(x_b, y_{\min}, z_b, t + \Delta t) &= \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \gamma^j C_j^N \Phi[x_b, y_{\min} + j\alpha \Delta y_j, z_b, t - (j-1)] \\ \Phi(x_b, y_{\max}, z_b, t + \Delta t) &= \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \gamma^j C_j^N \Phi[x_b, y_{\max} - j\alpha \Delta y_j, z_b, t - (j-1)] \\ \Phi(x_b, y_b, z_{\min}, t + \Delta t) &= \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \gamma^j C_j^N \Phi[x_b, y_b, z_{\min} + j\alpha \Delta z_j, t - (j-1)] \\ \Phi(x_b, y_b, z_{\max}, t + \Delta t) &= \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} \gamma^j C_j^N \Phi[x_b, y_b, z_{\max} - j\alpha \Delta z_j, t - (j-1)] \end{aligned} \right\}$$

(5)

式中: (x_b, y_b, z_b) 为 X 边界上的场点坐标; C 为介质中的电磁波传播速度; α 是控制吸收角度,通常情况下取 1; N 为阶数; r 为反射系数; C_j^N 为二项系数。具体参数取值可以参考文献[20]。

2 地—井 TEM 响应特征模拟

2.1 算法验证

图 3 给出了均匀半空间中感应电位解析解与数值解及感应电位相对误差曲线。在直角坐标系下,设三维均匀半空间介质大小为 $1\,000 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$,网格步长选取为 5,均匀半空间电阻率为 $100 \, \Omega \cdot \text{m}$,场源选用边长为 100 m 矩形回线源激发,回线中通入电流 10 A ,将接收探头置于钻孔中接收地下地质体感应产生的异常响应。初始时刻选取为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ s}$,时间迭代 2 000 次。电脑处理器采用英特尔奔腾处理器,内存 3 G,运行一次需要 112 s。在程序编制中,输入激发场源位置坐标和计算时间,输出计算感应电位值。从图 3a 中可以看出:三维有限差分计算的数值解与一维解析解曲线基本吻合,每个时刻的相对误差基本控制在 2% 内,相对误差曲

万方数据

线随着时间的增大而逐渐变大。这说明了三维有限差分算法具有比较高的精度,满足三维地—井瞬变电磁法数值模拟的精度要求。

2.2 均匀半空间介质地—井 TEM 响应

图 4 为均匀半空间中不同时刻瞬变电场等值线。图中显示:随观测时间延长,均匀半空间感应产生的瞬变场像“烟圈”一样,逐渐向下向外扩散,这个和 Nabighian 的描述是一致的¹⁹。瞬变电场在空间处的各个场值随时间推移而减小。其中均匀半空间的电阻率为 $100 \, \Omega \cdot \text{m}$,ZK1、ZK2、ZK3 表示钻井,钻井中充满空气,电阻率为 $10\,000 \, \Omega \cdot \text{m}$,场源中心与 ZK2 位置重合。

图 5 给出了不同钻孔中接收的不同时刻均匀半空间响应曲线。图中曲线至上而下展示了 $0.995 \sim 1.047 \text{ ms}$ 共 6 个不同时刻的响应曲线。从图中分析得出:在钻孔中接收到的响应均能反映出均匀半空间中的特征,随观测时间延长,磁场响应值逐渐变小,磁场最大值位置逐渐向下移动。这说明瞬变电场极大值随时间延长逐渐向下移动,这与图 4 的描述是一致的。

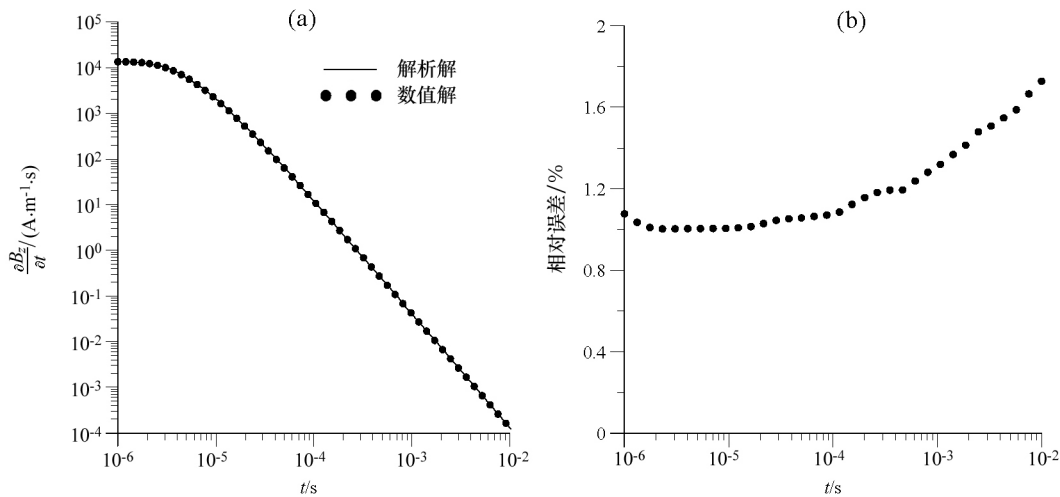


图3 均匀半空间解析解与数值解对比(a)及其相对误差曲线(b)

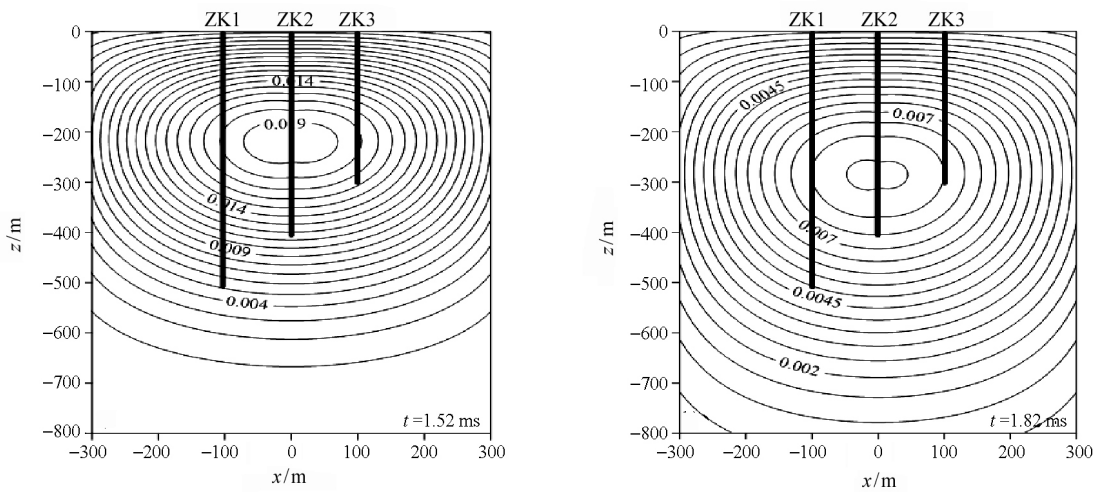


图4 不同时刻的瞬变电场等值线

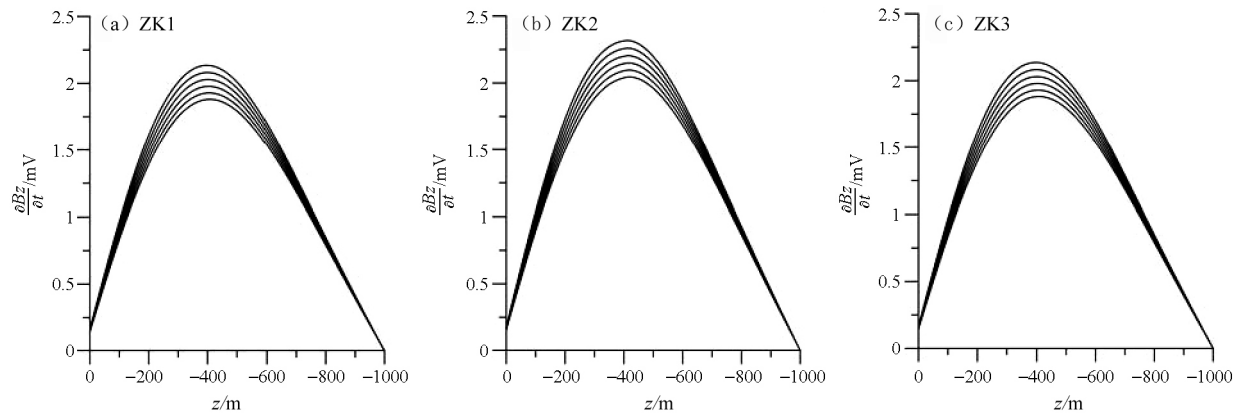


图5 均匀半空间中不同钻孔接收的地—井 TEM 响应曲线

2.3 倾斜板状体地—井 TEM 响应

图6为倾斜板状体三维地质模型。设倾斜板状体的长×宽×高分别为200 m×10 m×50 m,倾斜位于钻井下端,距井底100 m;ZK1深500 m,ZK2深400 m,ZK3深300 m,井间距100 m。设倾斜板状体的电

阻率为5 Ω·m,均匀半空间的电阻率为100 Ω·m,钻井中充满空气,电阻率为10 000 Ω·m,场源激发位置如图中所示。
图7为均匀半空间中倾斜板状体不同时刻瞬变电场的等值线。从图中分析得出:在时间t=1.52 ms

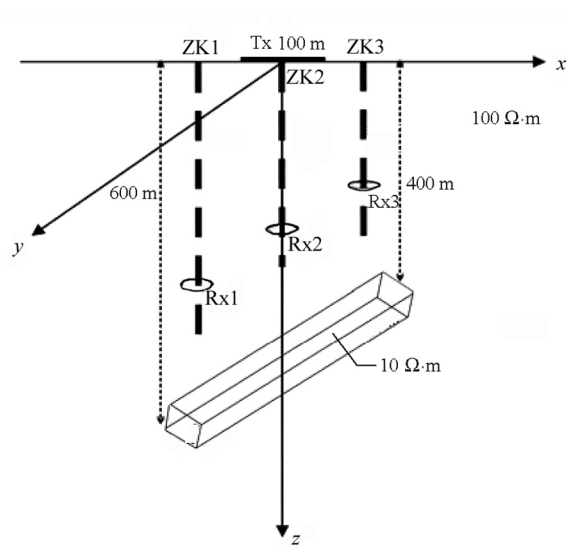


图 6 倾斜低阻板体三维模型图(源在中心)

时,瞬变场扩散到低阻异常体时,等值线发生明显畸形;瞬变场扩散速度减慢,衰减减弱,并且受到低阻体的影响,向低阻体弯曲;到时间 $t=1.78\text{ ms}$ 时,瞬

变场已经绕过地质体继续向前传播,等值线弯曲的方向正好反映出低阻体倾斜的方向。钻孔的影响在早期时比较明显,后期几乎消失,对低阻体影响较小。这是因为在数值模拟中,钻井直径较小,且内部充满电阻率较大的空气,而瞬变电场对高阻体具有很强的穿透能力。

图 8 表示在不同时刻在钻孔中接收的响应曲线。图中曲线至上而下展示了 $0.838\sim0.942\text{ ms}$ 共 6 个不同时刻的响应曲线。从图 8b 分析可知,在较早时刻,所接收到的响应主要反映的均匀半空间的信息,这是因为在早期时刻瞬变场还没有传到低阻体处,没有产生涡流场;在 0.290 ms 之后,低阻体的响应开始表现出来;随着观测时间的增加,均匀半空间的响应逐渐减小,同时低阻体的响应逐渐变大;在 500 m 处,曲线出现弱弱的“拐点”,这是由于低阻体产生涡流场引起的。从图 8c 看出,由于低阻体的上端离场源较近,在同一个时刻,瞬变场先传到低阻体上端,低阻体产生涡流场,形成涡流场的极大值。

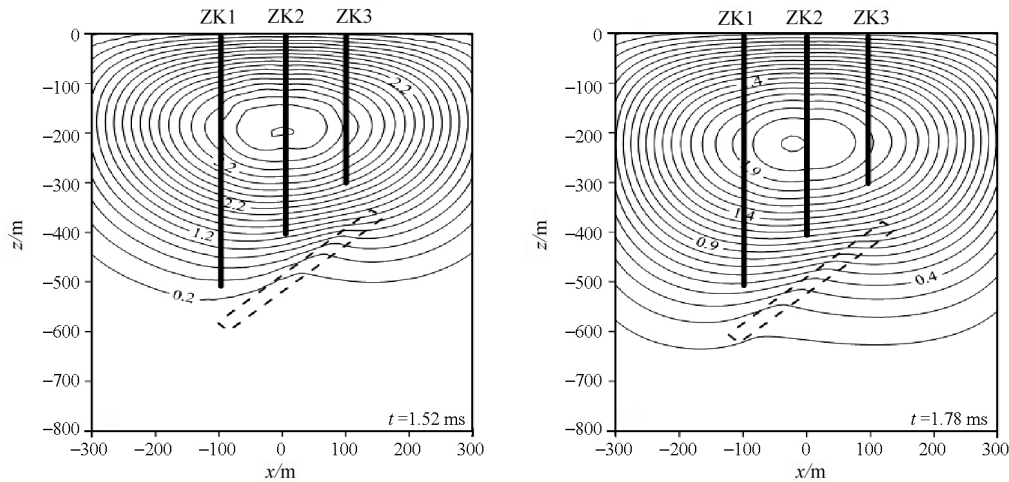


图 7 不同时刻的瞬变电场等值线图(源在中心)

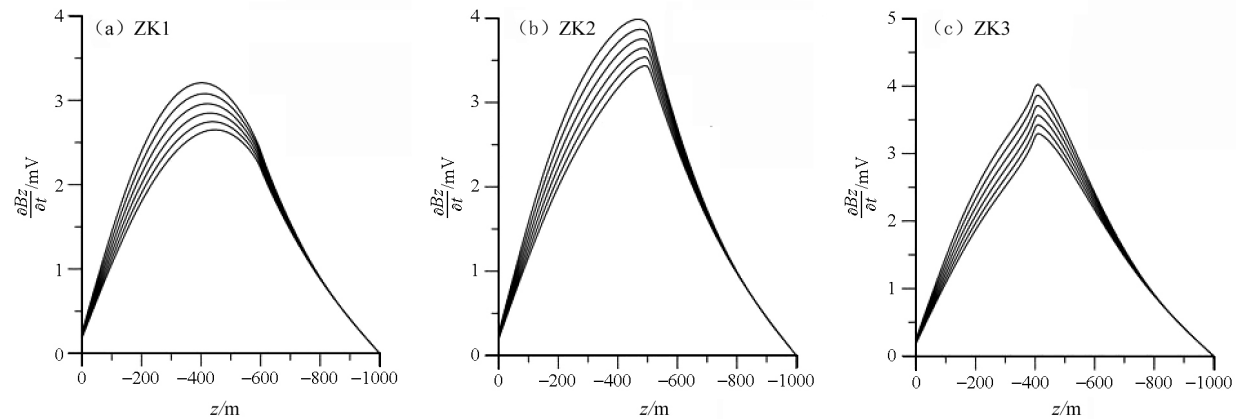


图 8 均匀半空间中倾斜板状导体的地—井 TEM 响应曲线(源在中心)

所以,在 ZK3 中接收的响应比较明显;在 400 m 处,曲线出现明显的“拐点”。从图 8a 看出,所接收的响应基本上反映的是周围围岩的信息;因为电磁场在传播过程中,有一部分能量消耗已经消失,另一部分还没有及时传到,所以,接收到的信息主要是反映周围围岩情况。

图 9 表示场源位于 ZK3 右侧 50 m 处激发,其他模型参数均与图 6 中相一致。

图 10 表示为场源位于 ZK3 右侧 50 m 处激发时,倾斜板状体不同时刻瞬变电场的等值线。从图中分析得出:在时间 $t=2.62\text{ ms}$ 时,瞬变场扩散到异常体处,等值线发现畸形,扩散速度减慢;当时间 $t=4.84\text{ ms}$ 时,瞬变场已经扩散到整个区域,“烟圈”极大值向下移动。瞬变场的扩散规律与场源在中心时的规律大致相同,只是瞬变场传播的时间比场源在中心时的时间要一点,反映低阻体的时间长一点,早期时,钻孔对场的传播影响较小,后期则完全没有影响。

图 11 表示场源位于 ZK3 右侧 50 m 时,曲线自

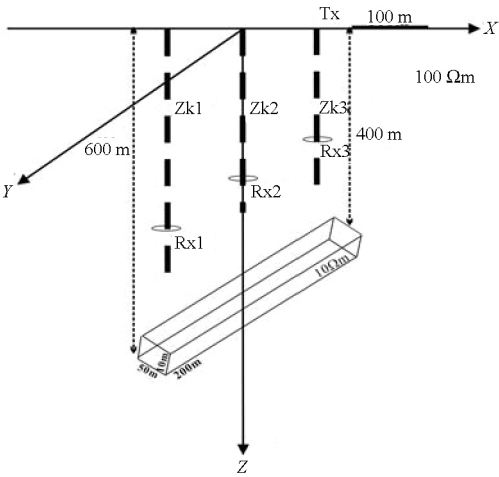


图 9 倾斜低阻板体三维模型图(源在右侧)

上而下展示了在 $0.838 \sim 0.942\text{ ms}$ 时刻所接收到的响应曲线。从图 11b、c 中可以看出:随着观测时间的延迟,在 $t=0.732\text{ ms}$ 时刻,低阻体的响应就表现出来,曲线出现极大值,产生“拐点”。这是因为瞬变场扩散到低阻异常体,低阻异常体感应出涡流场,

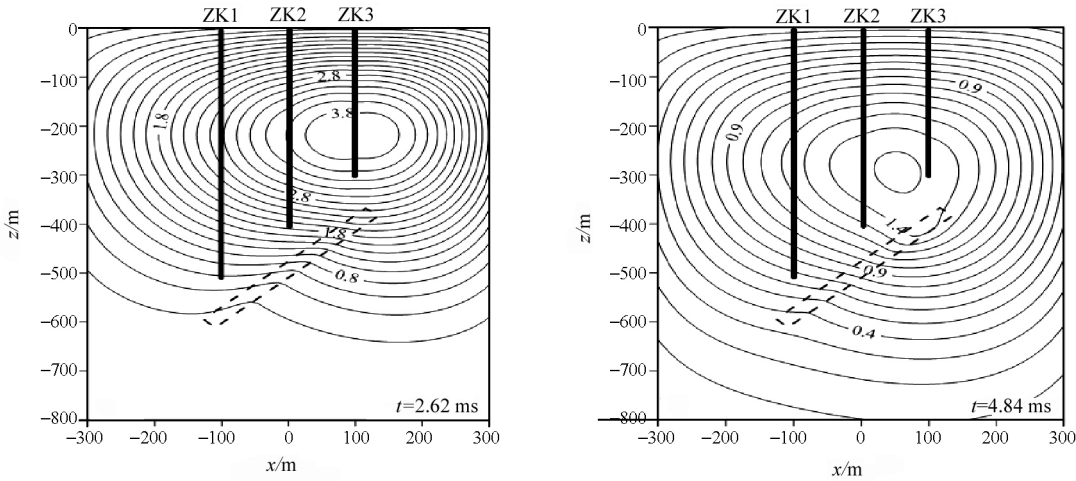


图 10 倾斜板状体不同时刻的瞬变电场等值线(源在右侧)

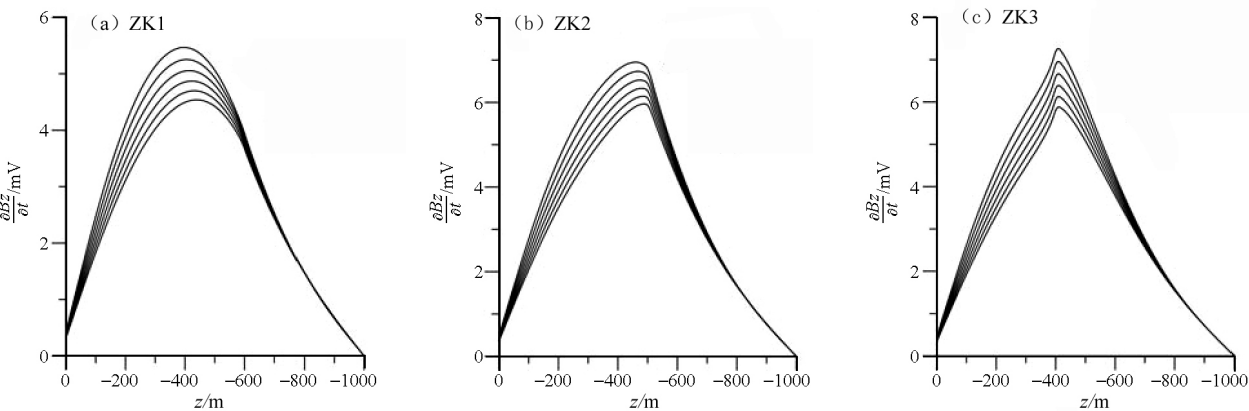


图 11 均匀半空间中倾斜板状导体的地—井响应曲线(源在右侧)

低阻异常体响应与均匀半空间响应相互之间叠加形成总响应,随着延时的增加,总场响应逐渐减弱。从曲线中看出,在 400 m 和 500 m 处,曲线出现“拐点”;从图 11a 中看出,因为 ZK1 位置离场源最近,所以在早期时刻,接收到的响应主要是由围岩产生的,反映均匀半空间的信息;在晚期时刻,低阻异常体的响应开始表现出来,在 $t = 1.252\text{ ms}$ 时刻,曲线在 600 m 处出现微弱的异常。

通过分析图 8、图 11 得出:地—井瞬变电磁响应受低阻体埋深深度和场源位置影响。在场源位置和电阻率参数不变的情况下,地—井瞬变电磁响应与低阻体埋深深度成反比关系;在低阻体埋深深度和电阻率参数不变的情况下,地—井瞬变电磁响应与场源到低阻体之间距离成反比关系。

2.4 含有覆盖层倾斜板状体地—井 TEM 响应

图 12 表示为含有低阻覆盖层的倾斜板状体三维地质模型。在表层增加了厚 50 m、电阻率为 $10\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 的低阻覆盖层,其他模型参数与图 6 的模型参数一样。

图 13 表示为含有低阻覆盖层时不同时刻的瞬变电场的等值线。从图中分析得出:在时间 $t = 2.60\text{ ms}$ 时,由于瞬变场对低阻体的穿透能力较弱,因此主要集中在低阻覆盖层中,向下传播的能量较弱,所以当传播到低阻异常体时,等值线发生微微的挤压,低阻体异常较弱。当时间 $t = 4.02\text{ ms}$ 时,“烟圈”的极大值还主要分布在覆盖层与围岩的分界面处,低阻体的异常响应不是很明显。因此,在实际工作中,通过增加发射电流或线圈面积,延长观测时间,减小周围的干扰,对提高探测结果有很大的帮助。

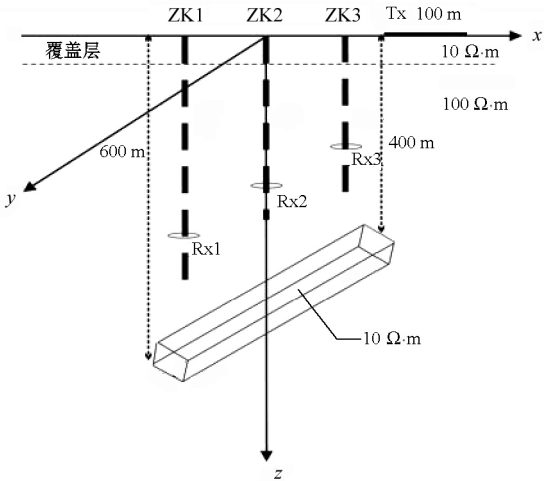


图 12 含有低阻覆盖层倾斜低阻板体的模型(源在右侧)

图 14 表示为含有低阻覆盖层时,曲线自上而下分别为 1.2 ~ 1.3 ms 时刻钻孔所接收的响应曲线。与图 10a、b、c 相比,倾斜板状体的响应在总响应中更加不明显。在整个观测过程中,覆盖层对总响应都产生明显的影响。这是因为覆盖层离场源较近,首先在其内产生涡流场。随着时间的扩散和衰减,对下部倾斜板状体激发涡流并随时间扩散衰减。低阻覆盖层的影响比周围围岩影响更大,因此需要更长的观测时间才能在响应曲线中分辨出异常体响应。从图 14b、c 中看出:瞬变电场主要集中在覆盖层中扩散,因此需要更长的观测时间,且异常体的响应很弱。图 14a 反映的是在 ZK1 中接收的响应异常,由于离场源距离最远,加上覆盖层的影响,所以异常体的响应几乎没有显示出来。

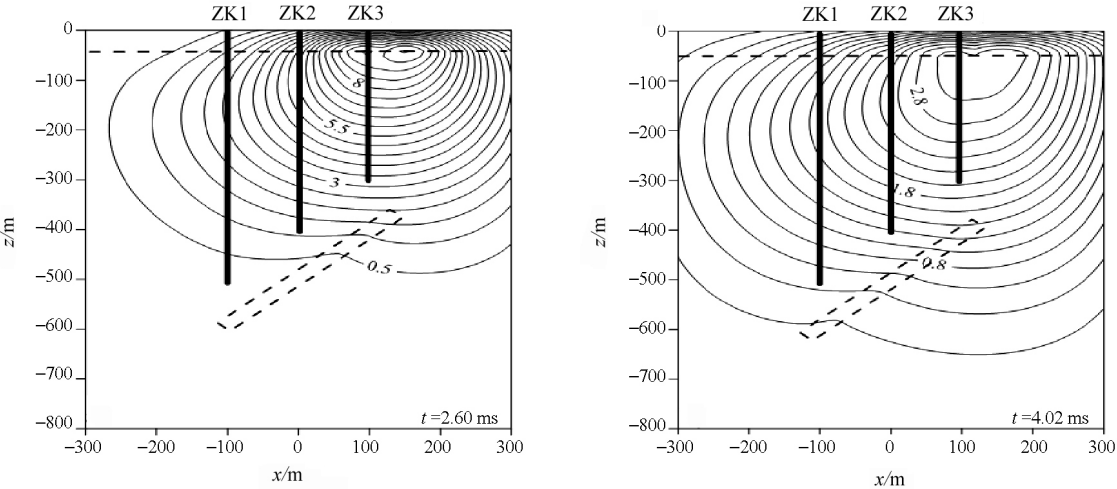


图 13 含有覆盖层的不同时刻的瞬变电场等值线(源在右侧)

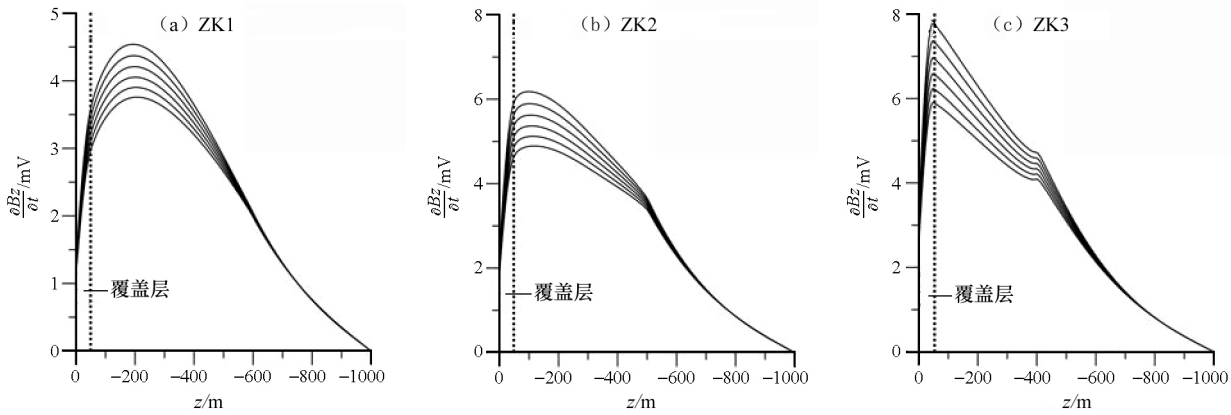


图 14 均匀半空间中含有低阻体覆盖层的倾斜板状导体的地—井响应曲线(源在右侧)

3 结论

以时域有限差算法为基础,选用负阶跃脉冲信号激发下大回线源作为激发源,在截断边界处选用修正的廖式吸收边界条件,模拟在地—井观测方式下,对均匀半空间中倾斜板状体、含有低阻覆盖层的倾斜板状模型进行了数值模拟,对异常响应进行深入分析,最后对比总结取得以下结论:

1) 模拟了均匀半空间响应特征,分析得出响应极大值随观测时间延迟而减小,为分析异常体响应特征做好铺垫。

2) 模拟了倾斜板状体响应特征,分析得出当场源位于中心位置激发时,异常体响应可以很好地体现出来;当场源位于右侧位置激发时,在同一时刻接收的异常响应较弱,要选取较长的观测时间降低围岩的影响,使异常体的响应特征显示出来。早期时主要反映均匀半空间响应特征;晚期主要反映异常体响应特征。

3) 模拟了含有低阻覆盖层倾斜板状体的响应特征,分析得出低阻覆盖层对瞬变响应的影响在整个观测时间范围内都存在,削弱了异常体的响应特征,使之需要更长的延时才能有效地分辨出异常体特征。本文所做的工作为定性研究地—井 TEM 响应特征和资料解释提供了依据参考。

参考文献:

[1] 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版社,1998.
[2] 牛之璉.时间域电磁法勘探[M].长沙:中南大学出版社,2007.
[3] Dyck A V, West G F. The role of simple computer models in interpretations of wide-band, drill-hole electromagnetic surveys in mineral exploration[J]. Geophysics, 1984, 49(7):957-980.
[4] Macnae J, Staltari G. Classification of sign changes in Borehole TEM decays[J]. Exploration Geophysics, 1987, 18(3): 331 -

339.
[5] 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.
[6] West R C, Ward S H. The borehole transient electromagnetic response of a three-dimensional fracture zone in a conductive half-space[J]. Geophysics, 1988, 53(11):1469-1478.
[7] 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.
[8] 张杰.地—井瞬变电磁异常特征分析及矢量交会解释方法[D].北京:中国地质大学(北京),2009.
[9] 戴雪平.地—井瞬变电磁法三维响应特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
[10] 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.
[11] 宋维琪.3D 瞬变电磁场有限差分正演计算[J].石油地球物理勘探,2000,35(6):751-756.
[12] 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.
[13] 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.
[14] 岳建华,杨海燕,胡搏.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.
[15] 董浩,魏文博,叶高峰,等.基于有限差分正演的带地形三维大地电磁反演方法[J].地球物理学报,2014,57(3):939-952.
[16] 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.
[17] 谭捍东,余钦范,John Booker,等.大地电磁法三维交错采样有限差分数值模拟[J].地球物理学报,2003,46(5):705-711.
[18] 杨海燕,邓居智,张华,等.矿井瞬变电磁法全空间视电阻率解释方法研究[J].地球物理学报,2010,53(3):651-656.
[19] 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.
[20] 杨海燕.矿用多匝小回线源瞬变电磁场数值模拟与分布规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2009.
[21] 廖振鹏,周正华,张艳红.波动数值模拟中透射边界的稳定实现[J].地球物理学报,2002,45(4):533-545.

Three-dimensional finite difference time domain simulation
for down-hole transient electromagnetic method

XU Xin-Gang¹, XU Zheng-Yu²

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Nuclear Engineering and Geophysics, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: As one of the effective methods used in geological prospecting, the down-hole transient electromagnetic method is a geo-physical survey method in search for mineral resources, which measures the transient electromagnetic field in a borehole by placing the receiving coils in the borehole. In this paper, based on time domain finite difference algorithm, the authors used a loop source and non-uniform grid, developed a 3D simulation program, and simulated the response of the uniform medium half space, inclined conductor, and inclined conductor with overburden. According to the comparative analysis, the maximum value of response decreases with delay time in uniform half space; in the early period of transient electromagnetic survey, it mainly reflects the response of the surrounding rock; in the late period, abnormal response of the conductor can be obviously displayed. When the source is in the central position, the abnormal response conductor can be reflected, and when the source is in the right position, the need to extend the observation time can be observed in response to abnormal conductor. The impact on overburden conductor is reflected in the entire observation time, making the abnormal response of the conductor ambiguously displayed. The authors studied the work and provide the reference for the down-hole TEM abnormal response characteristics and data interpretation.

Key words: down-hole TEM; finite-difference time-domain method; numerical simulation; anomaly response characteristics; low-resistivity overburden

(本文编辑:沈效群)