doi: 10.11720/wtyht.2020.0053
刘祖鉴,刘诗华,马一行,等.薄板状导体地-井瞬变电磁场数值模拟及晚期响应特征[J].物探与化探,2020,44(3):685-690.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0053
Liu Z J,Liu S H,Ma Y X,et al.Numerical simulation and late response characteristics of surface-borehole transient electromagnetic field of thin plate[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2020,44(3):685-690.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0053

# 薄板状导体地-井瞬变电磁场数值模拟及晚期响应特征

刘祖鉴[1],刘诗华[1],马一行[2,3],张博洋[4]
(1.中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083; 2.中国地质调查局 发展研究中心,北京 100037; 3.自然资源部矿产勘查技术指导中心,北京 100083; 4.中国科学院 力学研究所,北京 100190)

**摘 要:** 瞬变电磁在导电板状体中的感应涡流进入晚期后涡流分布状况已经趋于稳定,并按指数规律衰减。在等效数学模型中,利用等效涡流法计算晚期瞬变电磁响应更为简便,该方法能计算 1~4 块任意组合体和有导电围岩或覆盖层的响应情况,具有一定的适用性。本文推导了晚期瞬变电磁等效涡流场感应电压的计算方法,通过对 4 种典型地电模型进行数值模拟和晚期异常特征分析,得出以下结论:①在断电延时较短时,导电体异常响应幅值较大,当钻孔从异常体中心位置穿过时,异常形态为单峰正异常响应;随着时间推移,电磁响应逐步衰减。②当钻孔位于矿体边界位置时,水平矿体产生三峰对称状异常,异常峰值为负异常;倾角为 45°时,矿体异常形态出现非对称正负异常,矿体顶侧出现负异常,底侧出现正异常。③相同产状条件下,简单组合板状体异常幅值较单板状体的异常幅值增大,其异常形态符合单板状体的异常响应特征。此项研究成果对利用正演拟合完善地-井瞬变电磁法的后期解释工作以及工区布置参数的确定,如回线大小、剖面长度、发射电流大小等,具有一定的意义。

**关键词:** 地-井瞬变电磁;等效涡流场;导电薄板;磁偶源;响应特征
**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)03-0685-06

## 0 引言

地-井瞬变电磁法(surface-borehole transient electromagnetic method,地-井 TEM)通常采用地面布设的回线源,供以脉冲电流产生激发场,切断场源后由置于钻孔中的探头接收地层和目标体感应产生的二次场,研究分析二次场特征获取关于井旁(底)目标体的信息。由于地-井 TEM 主要通过分析响应特征规律进行工作,因此正演模拟成为重要问题:文献[1-2]应用本征环流法计算地-井 TEM 响应并总结了解释方法,文献[3-5]分别探讨了导电围岩中地-井 TEM 的响应符号变化、观测结果所受影响及三分量接收信号等问题,文献[6]完成了典型导电介质条件下地-井 TEM 响应的物理实验,文献[7]介绍了地面与井中 TEM 的联合应用情况,文献[8-9]研究了 TEM 的地面与井中数据联合反演方法;国内研究者基于等效涡流等方法论述了地-井 TEM 解释原理[10-11],在数值模拟与实际应用方面开展了研究工作[12-14],并在矿井 TEM 方面取得了一定成果[15-16]。

地层介质会影响地-井 TEM 观测结果,接收到的信号受到多种因素制约,响应特征规律较为复杂。瞬变电磁在导电薄板状体中的感应涡流进入晚期后涡流分布状况已经趋于稳定,并按指数规律衰减[2]。在等效数学模型中,多使用本征环流应用于早期和中期的瞬变电磁异常响应计算,而在晚期的计算中,使用等效涡流法更为简便[10-11],对瞬变电

收稿日期: 2020-01-19; 修回日期: 2020-03-12
基金项目: 中国地质调查局项目(DD20191011)
作者简介: 刘祖鉴(1993-),硕士研究生,助理工程师,主要从事综合地球物理方法研究及应用工作。Email: dasliuzj@163.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

磁野外工作的部署具有一定的意义。所谓“等效涡流”表示分布在异常体内 1/N 束的本征电流圈，其模拟结果必然与本征环流的响应及幅值相近。使用等效涡流计算简单便捷，可以对勘探施工阶段遇到的临时问题即时分析解释。虽然该方法只能计算 2~4 块任意组合体和有导电围岩或覆盖层的响应情况，但是仍然可以对过往地质、物性资料进行正演，用来作为前期设计工区如回线大小、剖面长度、点距、发射电流大小等参数的依据；还可利用正演拟合完善后期成果解释等[15-17]。

## 1 晚期地-井瞬变电磁等效涡流场

本文应用磁偶源 TEM 数值计算方法，对薄板状体的晚期等效涡流场进行数值模拟（如图 1），分析响应特征规律，为相关研究提供参考。

设长、短边分别为 $b$、$a$ 的薄板状导体在发射回线（Tx）产生的近于均匀的一次场激励下，薄板体中心部位会产生一个长、短边分别为 $0.7b$、$0.7a$ 的等效涡流，并且位于板状体的中心部位[10]。Tx 回线与等效涡流环之间的互感系数为 $M_1$，等效涡流环与接收回线（Rx）之间的互感系数为 $M_2$，

Tx 的某条边 $l_1$ 和等效涡流与其平行的某条边 $l_2$ 之间的互感系数由 Neumann formula 可得：

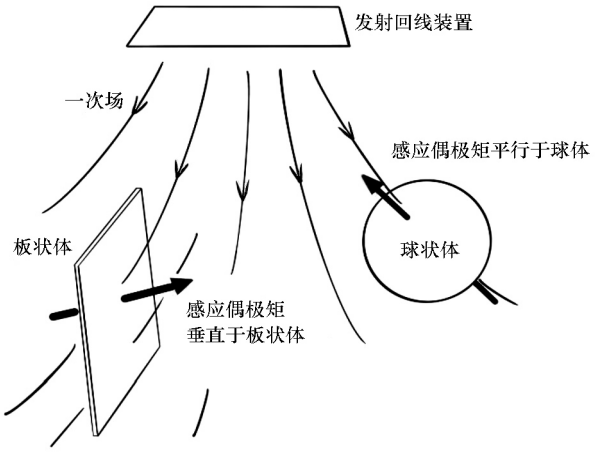


**图 1 涡流在板状体和球状体中运动的示意**

**Fig.1 Schematic diagram of eddy current movement in plate and spheroid**

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_0^{l_1}\int_0^{l_2}\frac{\mathrm{d}l_1 \cdot \mathrm{d}l_2}{R_{12}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int_{x_1}^{x_2}\int_{x_1'}^{x_2'}\frac{\mathrm{d}l_1 \cdot \mathrm{d}l_2}{\sqrt{(l_1 - l_2)^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}}, \quad (1)$$

式中：$R_{12}$ 为 $\mathrm{d}l_1$ 与 $\mathrm{d}l_2$ 间距，$l_1$ 两端的横坐标为 $x_1$、$x_2$，$l_2$ 两端的横坐标为 $x_1'$、$x_2'$；$\Delta Y$ 和 $\Delta Z$ 分别为 $\mathrm{d}l_1$ 与 $\mathrm{d}l_2$ 纵向和垂向的距离，因该式为两条同样走向平行线，故 $\Delta Y$ 和 $\Delta Z$ 的值固定；$\mu_0$ 为磁导率，地层中一般取 $1.256\times10^{-6}$ H/m。式（1）进一步推导可得：

$$\begin{aligned} M = {} & \frac{\mu_0}{4\pi}\left[(x_2 - x_1')\cdot\ln\left(x_2 - x_1' + \sqrt{(x_2 - x_1')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right) - \sqrt{(x_2 - x_1')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right] - \\ & \frac{\mu_0}{4\pi}\left[(x_2 - x_2')\cdot\ln\left(x_2 - x_2' + \sqrt{(x_2 - x_2')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right) - \sqrt{(x_2 - x_2')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right] + \\ & \frac{\mu_0}{4\pi}\left[(x_1 - x_2')\cdot\ln\left(x_1 - x_2' + \sqrt{(x_1 - x_2')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right) - \sqrt{(x_1 - x_2')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right] - \\ & \frac{\mu_0}{4\pi}\left[(x_1 - x_1')\cdot\ln\left(x_1 - x_1' + \sqrt{(x_1 - x_1')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right) - \sqrt{(x_1 - x_1')^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}\right]。 \end{aligned} \quad (2)$$

可以通过 16 次相互计算得到 Tx 各个边与等效涡流环各个边的互感系数，相加即可求出 Tx 与等效涡流环的总互感系数；再用同样的方法计算等效涡流环与 Rx 之间的互感系数。

依据电路原理可知：

$$\Phi_1 = I \cdot M_1, \quad (3)$$

$$\Phi_2 = i_0 \cdot \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \cdot M_2。 \quad (4)$$

式中：$\Phi_1$ 为导体内产生的磁通量，$\Phi_2$ 为 Rx 接收二次场产生的磁通量，$I$ 为 Tx 所通电流，$i_0 \cdot \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}$ 为感应等效涡流，式中感应电流的初始值以及时间常数的经验表达式分别为：

$$i_0 = 0.6 \cdot H_{1n} \cdot a \cdot f_1\left(\frac{b}{a}\right), \quad (5)$$

$$\tau = \mu_0 \cdot S \cdot a \cdot f_2\left(\frac{b}{a}\right)/10。 \quad (6)$$

式中：$H_{1n}$（即 $H_1 \cdot \cos\theta$）为作用于薄板体的一次场法向分量，$H_1$ 为一次场，$\theta$ 为薄板导体与 Tx 所在平面（一般即水平面）的夹角；$S$ 为纵向电导。Rx 产生的感应电压为：

$$V(t) = -\frac{\partial\Phi_2}{\partial t} = -M_2\frac{\mathrm{d}_i(t)}{\mathrm{d}t}。 \quad (7)$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用类似的算法,可以再加上 3 块板状体的响应值,这 4 块板的大小、倾角、走向以及电性参数等可以任意改变或组合[10-11]。

## 2　数值模拟及晚期响应特征

薄板状体的数值模拟采用 400 m×400 m 的矩形发射线圈,位于板状体的正上方。设置了 4 种地电模型,表 1 列出了地电模型的各项参数。

表 1　薄板体瞬变电磁数值模拟参数一览

Table 1　Parameters of transient electromagnetic numerical simulation of thin plate

| 地电模型 | 倾角/(°) | 板状体埋深/m | $\sigma$/(S·m$^{-1}$) | 响应曲线 |
|---|---|---|---|---|
| 水平单板 | 0 | 400 | 1 | 图 2 |
| 倾斜单板 | 45 | 400 | 1 | 图 3 |
| 水平多板(4 块) | 0 | 360,380,420,460 | 1 | 图 4 |
| 倾斜多板(4 块) | 45 | 360,380,420,460 | 1 | 图 5 |

$I$=10 A;　$\sigma_{均匀大地}$ = 0.01 S/m;

钻孔偏移距: A 孔 0 m,B 孔 80 m,C 孔 150 m,D 孔 800 m

地下空间中产生的一次场和二次场均为矢量场,地-井瞬变电磁法为发射源固定、接收点在不同位置观测电磁场响应,因此电磁场的方向,即响应值的“正”、“负”号是研究其规律的一个重要参数,需要明确坐标系来确定异常响应所产生的正负性。参照加拿大 CORNE 公司地-井 TEM 坐标系: 规定井轴分量向上为正,井陉分量按照右手定则规定正方向,本文试验均为直孔,即为笛卡尔右手坐标系。

图 2 中的不同钻孔接收水平单板体的异常响应曲线能够准确反映出该地电模型的层状结构特征: 钻孔垂直穿过异常体时异常形态为单峰正响应,异常体埋深位置出现极值,随着钻孔偏移距的增大,在异常体边缘位置产生三峰对称正负异常,异常峰值为负异常,位于近矿体侧; 随着电磁信号衰减钻孔在远离异常体位置出现单峰负异常。断电延时越短,异常响应的幅值越大,随着时间的增加,异常体二次场电磁强度逐步衰减,不同偏移距的钻孔数据均显示出感应涡流场随着时间增加而逐步扩散的特性。

响应曲线的耦合关系将影响响应特征。图 3 中当钻孔从矿体中心位置穿过时,异常形态同样为单峰正响应,响应峰值反映出矿体深度位置,与水平板状体的异常特征一致。当钻孔位于异常体边界时,异常出现非对称异常,正异常的幅值与负异常相近。当钻孔离矿体较远时,呈现单峰负异常特征,随着瞬变电磁响应逐步衰减,此时不能识别产状的变化。

实际情况中,矿床的形成往往是由多个板状体组合在一起的。由图 4 可以发现,当钻孔垂直穿过异常体中心位置及远离矿体位置时,组合体异常范围反映了 4 块异常体的埋深,同单板异常体一样,表

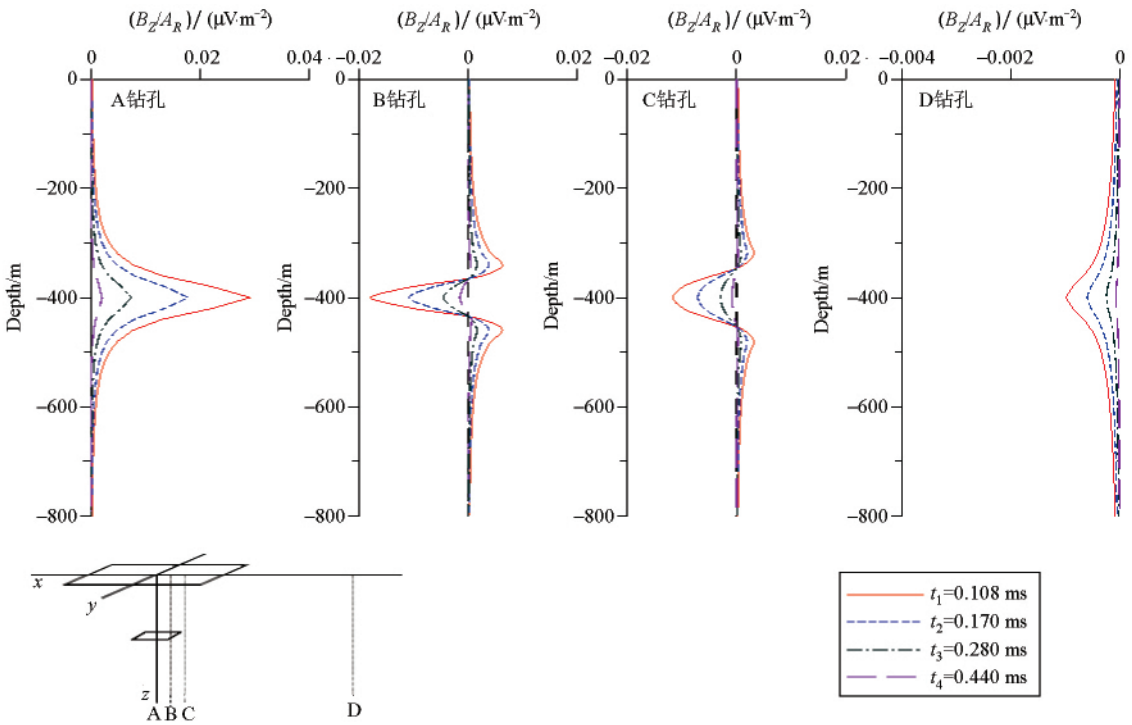


图 2　不同钻孔接收水平单板体模型示意及异常响应曲线

Fig.2　Surface-hole TEM responses for a conductive plate in different dill-hole

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

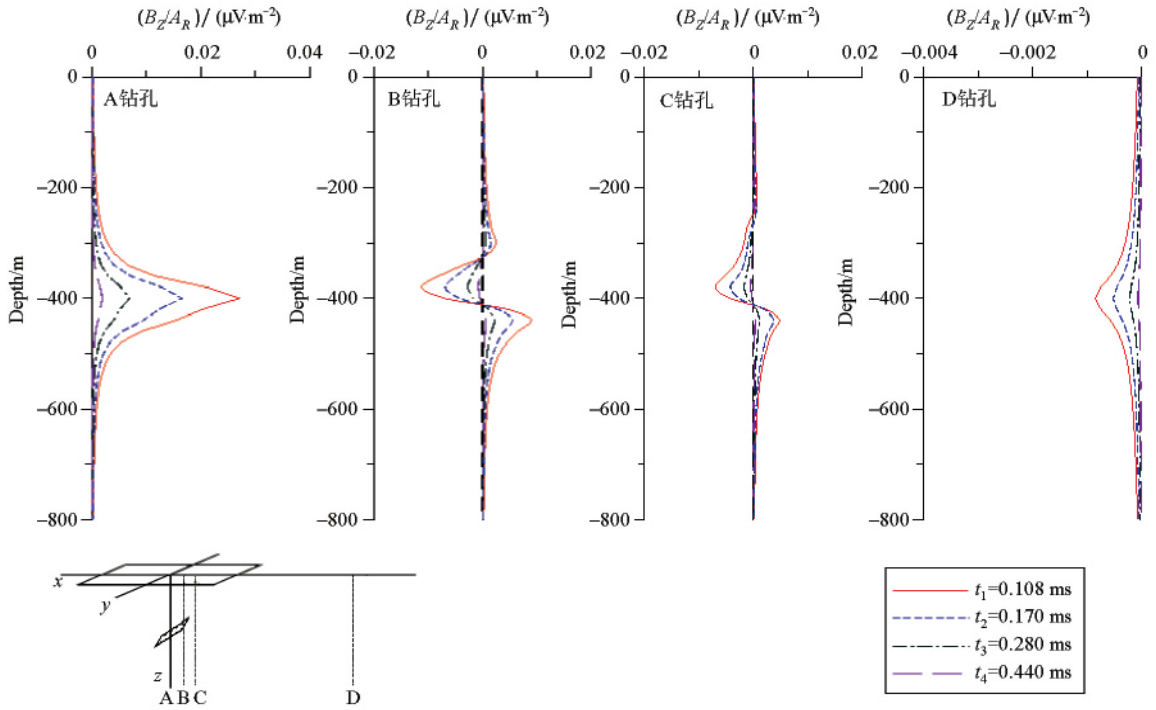


**图 3　不同钻孔接收倾斜单板体模型示意及异常响应曲线**

**Fig.3　Surface-hole TEM responses for a tilt conductive plate in different dill-hole**

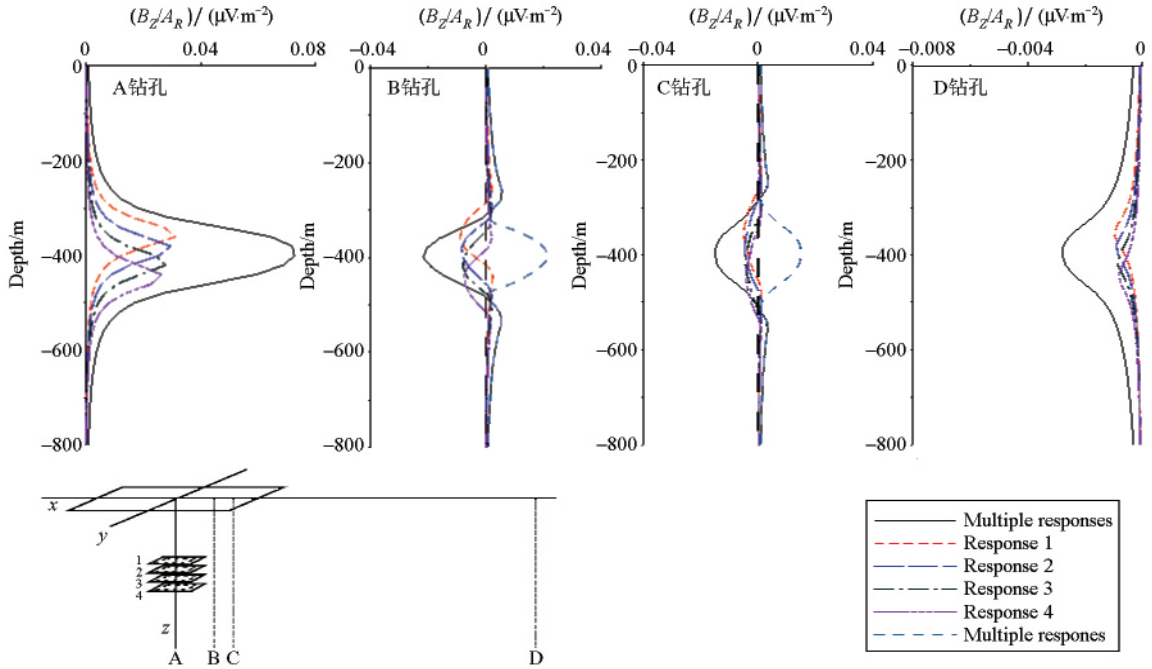


**图 4　不同钻孔接收水平多板体纵向组合模型示意及异常曲线**

**Fig.4　Surface-hole TEM responses for model of multiple conductive plates in different dill-hole**

现为单峰正异常，但曲线变化较为平缓，幅值较单板状体有所增大。当钻孔位于矿体边缘位置时，产生三峰对称正负异常，异常峰值为负异常，异常曲线幅值平缓，组合异常体的响应曲线由于受多板状体涡流场电磁耦合的制约作用，并未出现幅值显著增加的情况。

由图 5 可以发现，当钻孔垂直穿过异常体中心位置及远离矿体位置时，响应曲线满足水平组合体异常特征规律；当钻孔位于矿体边缘位置时，出现非对称异常，且近异常体侧的负异常远大于远离异常体侧的正异常，幅值并未显著增大，曲线变化较平缓。这是由于组合异常体的响应虽然同样受电磁耦

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

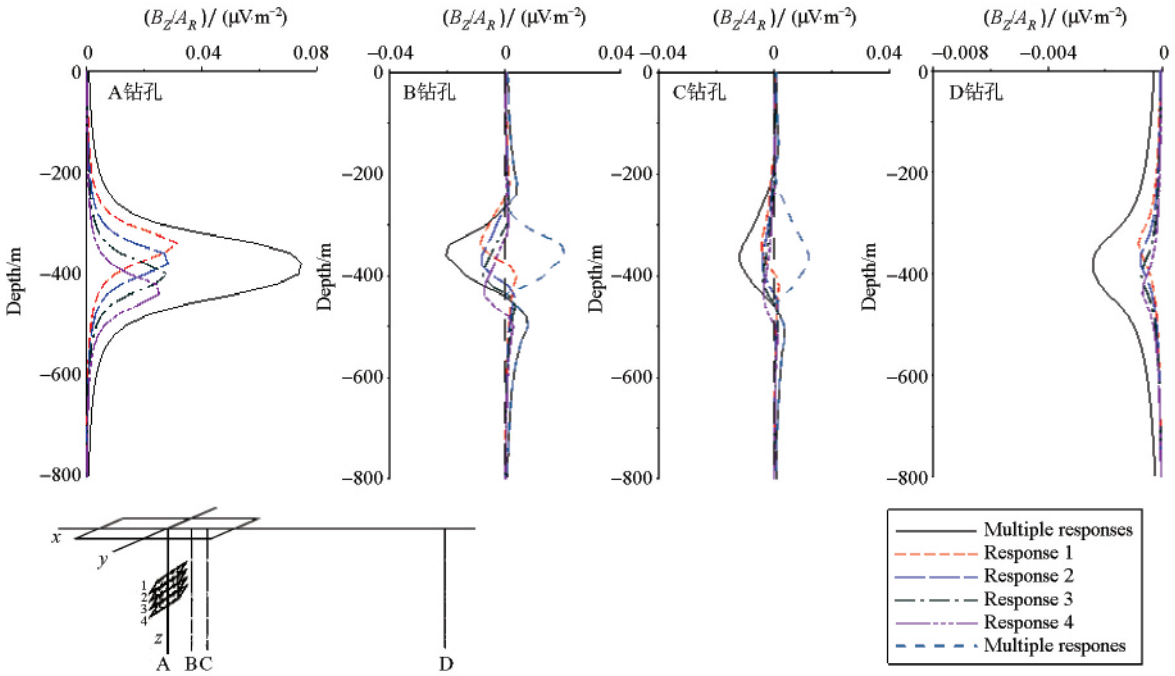


**图 5　不同钻孔接收倾斜多板体纵向组合模型示意及异常曲线**

**Fig.5　Surface-hole TEM responses for model of multiple tilt conductive plates in different dill-hole**

合作用影响,但其组合体的耦合作用远强于因单板状体倾斜而产生的耦合作用,导致曲线不对称性并未如倾角为 45°单板体显著。

## 3　结论

本文利用等效涡流方法进行了 4 种模型在不同产状和钻孔偏移距情况下的瞬变电磁数值模拟,通过分析其晚期响应特征,得出以下结论:

1) 在断电延时较短时,对于导电体异常响应较大,异常形态为单峰正异常响应; 随着时间推移,电磁响应逐步衰减。

2) 当钻孔从矿体中心位置穿过时,异常形态为单峰正异常响应,响应峰极值位于矿体埋深位置。

3) 当钻孔位于靠近矿体边缘位置穿过: 矿体产状为 0°时,产生三峰对称正负异常,异常峰值位于近矿体侧的负异常; 产状为 45°时,异常形态出现非对称正负异常,矿体顶侧出现负异常,底侧出现正异常,顶侧峰值强于底侧峰值。

4) 当钻孔远离矿体时,瞬变电磁响应逐步减弱,表现为单峰负异常,此时不能识别产状的变化。

5) 相同产状条件下,组合板状体异常幅值较单板状体异常的幅值增大,其异常形态符合单板状体的异常响应特征。

## 参考文献( References) :

[1] Dyck A V, West G F. The role of simple computer models in interpretation of wide-band, drill-hole electromagnetic surveys in mineral exploration [J]. Geophysics, 1984, 49: 957-980.

[2] Eadie T, Staltari G. Introduction to downhole electromagnetic methods [J]. Exploration Geophysics, 1987, 18( 3) : 247-351.

[3] Macnae J, Staltari G. Classification of sign changes in Borehole TEM decays [J]. Exploration Geophysics, 1987, 18: 331-339.

[4] Annan A P. The equivalent source method for electromagnetic scattering analysis and its geophysical application [D]. St John´s: Memorial University of Newfoundland, 1974.

[5] Gallagher P R, Ward S H, Hohmann G W. A model study of a thin plate in free space for EM37 transient electromagnetic system [J]. Geophysics, 1985, 50( 6) : 1002-1005.

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

[7] West R C, Ward S H. The borehole transient EM of the three-dimensional fractured zone in a conductive half space [J]. Geophysics, 1988, 53( 11) : 1469-1487.

[8] Buselli G, Lee S K. Modelling of drill-hole TEM responses form multiple targets covered by a conductive overburden [J]. Exploration Geophysics, 1996, 27: 141-153.

[9] 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.
Jiang B Y. Applied near zone magnetic source transient electromagnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.

[10] 牛之琏.时间域电磁法原理 [M] . 长沙: 中南大学出版社,2007.
Niu Z L. The Theory of time domain electromagnetic methods [M]. Changsha: Central South University of Technology Press,

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2007.

[11] 李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2002.
Li X. The theory and application of transient electromagnetic sounding [M]. Xi'an: Shanxi Science Technology Press, 2002.

[12] 张杰,邓晓红,谭捍东,等. 地-井瞬变电磁资料矢量交会解释方法[J].物探与化探,2015,39(3): 572-579.
Zhang J, Deng X H, Tan H D, et al. A study of vector intersection for borehole transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 572-579.

[13] 刘继东,方文藻.用线性数字滤波法计算大回线源在地下形成的瞬变电磁场[J].物化探计算技术,1996,18(3): 231-237.
Liu J D, Fang W Z. The calculation of the TEM field underground generated by a large loop on the ground by means of the linear digital filter method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 18(3): 231-237.

[14] 孟庆鑫,潘和平.地-井瞬变电磁异常特征数值模拟分析[J].地球物理学报, 2012, 55(3): 1046-1053.
Meng Q X, Pan H P. Numerical simulation analysis of surface-hole TEM responses [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(3): 1046-1053.

[15] 丁世荣,方文藻.球形地质体在阶跃磁偶极源激励下的瞬变电磁响应[J].辽宁师范大学学报:自然科学版,1997,20(3):218-223.
Ding S R, Fang W Z. The transient electromagnetic response of a spherical geologic body excited by a step magnetic dipole [J]. Journal of Liao-ning Normal University: Natural Science, 1997, 20(3): 218-223.

[16] 陈锡杰,任怀宗. 钻井中等轴状导体的瞬变电磁响应[J].地质与勘探,1988,24(11):39-43.
Chen X J, Ren H Z. Response of a buried equiaxial conductive body in drill hole transient electromagnetic measurements [J]. Geology and Prospecting, 1988, 24(11): 39-43.

[17] 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(06):641-648.
Zhang J, Wang X C, Deng X H, et al. Borehole transient electromagnetic response characteristics of the borehole-side plate-like conductor [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(6): 641-648.

# Numerical simulation and late response characteristics of surface-borehole transient electromagnetic field of thin plate

LIU Zu-Jian[1], LIU Shi-Hua[1], MA Yi-Xing[2,3], ZHANG Bo-Yang[4]

(1. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural and Resources, Beijing* 100083, *China*; 2. *Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing* 100037, *China*; 3. *Technical Guidance Center for Mineral Resources of Ministry of Natural Resources, Beijing* 100083, *China*; 4. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

**Abstract:** After the induced eddy current in the conductive thin plate is transient, the eddy current distribution has become stable and decays exponentially. In the equivalent mathematical model, it is easier to calculate the late transient electromagnetic response by the equivalent eddy current method. This method can calculate the response of any combination of 1~4 blocks and conductive surrounding rock or cover layer, and has certain applicability. In this paper, the calculation method of late transient electromagnetic equivalent eddy current field induced voltage is deduced. By numerical simulation and typical characteristic analysis of four typical geoelectric models, some results have been obtained: ① When the power-off delay is short, the amplitude of the abnormal response of the conductor is large. When the borehole passes through the center of the abnormal body, the abnormal shape is a single-peak positive abnormal response; with the elapse of time, the electromagnetic response gradually decays. ② When the borehole is located at the boundary of the orebody, the horizontal orebody produces a three-peak symmetrical anomaly, and the anomalous peak value is a negative anomaly; when the inclination is 45°, the anomaly morphology of the orebody exhibits asymmetric positive and negative anomalies, and a negative anomaly appears on the top side of the orebody, with positive anomaly on the underside. ③ Under the same condition, the abnormal amplitude of the simple plate-shaped body is larger than that of the single plate-shaped body, and its abnormal shape conforms to the abnormal response characteristics of the single plate-shaped body. The research results have certain significance for the ground-well transient electromagnetic method to use forward fitting to improve the later interpretation work and to determine the layout parameters of the work area, such as loop size, section length, point distance, and emission current.

**Key words:** surface-borehole transient electromagnetic; equivalent eddy current field; plate; magnetic source; response characteristics

(本文编辑:沈效群)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net