

# 瞬变电磁法三分量测量方法研究

席振铎, 刘剑, 龙霞, 侯海涛

(中南大学 信息物理工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 在不考虑本征电流之间互感的情况下, 研究用本征电流代替涡流计算地表瞬变电磁场的模拟计算方法, 计算均匀半空间中定源装置下薄板导体在不同倾角时的  $X$ ,  $Y$  和  $Z$  3 个分量的响应特征, 并与 1 条已知地质剖面的实测结果进行对比分析。研究结果表明: 除板状体直立外, 薄板导体  $X$  分量的过零点基本上是板状体的中心在地面的投影位置; 当板状体水平或直立时,  $Y$  分量曲线是对称的,  $Z$  分量曲线是反对称的; 当板状体倾斜时,  $Z$  分量和  $Y$  分量曲线都不对称, 在倾斜方向曲线平缓, 响应范围大, 在反方向曲线陡立, 响应范围小, 因此, 用  $X$  分量可以确定异常的中心, 用  $Z$  和  $Y$  分量可以定性判断板状体的倾向; 实测结果与计算结果一致, 说明综合分析  $X$ ,  $Y$  和  $Z$  方向 3 个分量的方法比单分量分析的方法更有助于对异常体的解释。

**关键词:** 瞬变电磁法; 三分量; 本征电流; 薄板导体

中图分类号: P319.1+2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)01-0272-05

## Three-component measurement in transient electromagnetic method

XI Zhen-zhu, LIU Jian, LONG Xia, HOU Hai-tao

(School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Without considering the mutual inductance between eigencurrent and eddy current, the eigencurrent which was instead of eddy current was used to calculate the fixed-loop  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  component transient responses over a thin plate conductor in homogeneous half-space with various plate dip angles. The results show that except for a vertical target the cross-over of  $X$ -component is approximately the projection position of the plate's center. For a horizontal plate, both  $Y$  and  $Z$ -component plots are symmetrical. For a vertical target  $Y$ -component is symmetrical and  $Z$ -component is anti-symmetrical. While for an inclined plate, neither component is symmetrical, it is broad and gentle in the inclination direction but narrow and steep in the other direction. So target location and orientation can be defined qualitatively by three-component measurement. The observed results are coincident with the calculated ones, which proves that the method of unitarily analyzing three-component is better than that for the interpretation of conductor body.

**Key words:** transient electromagnetic method; three-component; eigencurrent; thin plate conductor

瞬变电磁法<sup>[1-4]</sup>(Transient electromagnetic method, 简称 TEM<sup>[5-6]</sup>)是属于时间域的电磁勘探方法, 它是利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲磁场, 在一次脉冲磁场的间歇利用线圈或接地电极观测二次场的方法。人们对瞬变电磁法的研究大多是测量

垂直分量并对其响应特征进行分析, 但由于受仪器限制以及易受噪声等因素的影响导致对水平分量的研究还不够深入。Gallagher 等<sup>[7]</sup>计算了均匀半空间中导电薄板在不同倾角时垂直分量的偶极瞬变响应特征; Adhidjaja 等<sup>[8]</sup>计算了自由空间中定源组合装置下垂

收稿日期: 2008-12-11; 修回日期: 2009-03-16

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAB01B07)

通信作者: 席振铎(1966-), 男, 内蒙古商都人, 博士研究生, 副教授, 从事电磁法勘探理论与应用研究; 电话: 13873150690; E-mail: xizhenzhu@163.com

直分量在导电薄板不同走向长度、不同电导率时的响应特征; Zonge 等<sup>[9]</sup>讨论了水平分量在探测地下管线中的作用; McNeill 等<sup>[10-13]</sup>阐述了测量三分量的意义, 但并没有进一步分析异常体产生的三分量响应特征和规律。由于水平分量提供了一些仅仅通过垂直分量无法得到的有关异常体的信息, 因此, 对水平分量和垂直分量的曲线响应特征及其规律进行综合分析很有必要。尽管均匀半空间是一种理想的地电结构模型, 但对野外情况下地电结构进行分析仍具有借鉴意义。鉴于板状体是野外常见的地质模型, 本文作者用本征电流代替涡流计算均匀半空间中薄板导体产生的磁场三分量曲线响应特征, 并总结不同板状体参数下三分量曲线的响应规律, 然后, 结合 1 条已知地质剖面进行验证。

## 1 三分量响应模拟计算

### 1.1 计算方法

Gallagher 等<sup>[7]</sup>用 15 个本征电流环代替涡流来计算和模拟了薄板导体的电磁响应, 这种计算方法的优点是计算方法简单, 速度快而且准确。由于不考虑本征电流之间的互感, 故薄板导体产生的瞬变响应为所有本征电流各自产生的响应的总和。在早期, 所有的本征电流都会产生瞬变响应, 即  $\frac{dB}{dt} = \sum_{i=1}^n c_i \exp(-t/\tau_i)$ ;

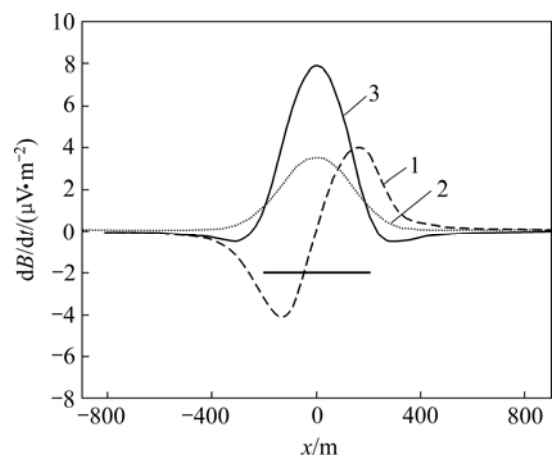
在晚期, 瞬变响应几乎都是由最内层的本征电流引起, 即  $\frac{dB}{dt} = c_1 \exp(-t/\tau_1)$ 。其中:  $n$  为本征电流环的数量;

$t$  为测量时间;  $\tau_i$  为第  $i$  个本征电流的时间常数;  $c_i$  为与板的几何参数和时间常数等相关的脉冲响应的幅度因子。本文作者引用上述算法, 用 Geonics 公司的 MOTEM<sup>[13]</sup>程序和部分本文作者编制的 Matlab 程序计算了均匀半空间中定源装置下薄板导体产生的磁场三分量曲线响应特征。

### 1.2 模拟条件及计算结果

设均匀半空间电阻率为  $500 \Omega \cdot m$ , 发送框面积(长×宽)为  $300 m \times 600 m$ , 以框中心为原点建立直角坐标系, 发送框中心坐标用  $(x, y, z)$  表示。板走向为  $0^\circ$ , 沿走向长为  $400 m$ , 向下延伸  $400 m$ , 纵向电导为  $10 S$ , 板顶部中心坐标用  $(x, y, z)$  表示。倾角沿  $X$  轴正方向顺时针方向旋转,  $Z$  方向以竖直向上为正, 发送电流为  $15 A$ ,  $t=277 \mu s$ , 对薄板导体在不同倾角( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  和  $135^\circ$ )下的三分量曲线响应特征进行模拟计算, 结果见图 1~4。其中: 纵坐标  $dB/dt$  为磁感应强度的微分即

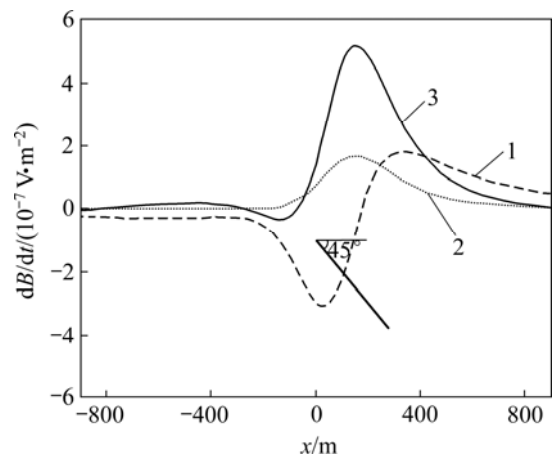
本征电流。由图 1~4 可见: 当板倾角为  $0^\circ$  时, 产生的 3 个分量的响应比其他倾角情况下所产生的相应分量的响应要强得多, 且  $Z$  分量的响应最强,  $X$  分量的响应次之,  $Y$  分量的响应最小; 板倾角为  $90^\circ$  时产生的响应最小; 当板水平时,  $X$  分量响应曲线过零点处对应板的中心在地面的投影位置, 且以其过零点处呈反对称状分布,  $Y$  分量在板的上方表现为单峰异常, 并以  $X$  分量曲线的过零点处呈对称状分布;  $Z$  分量在板的上方表现为 1 个明显的单峰异常极大值, 并在靠近板边缘的处各出现 1 个较小的负异常极小值, 其曲线形态也以  $X$  分量的过零点处呈对称状分布。当板直立时,



1—X分量; 2—Y分量; 3—Z分量

图 1 板体倾角为  $0^\circ$  时的三分量响应

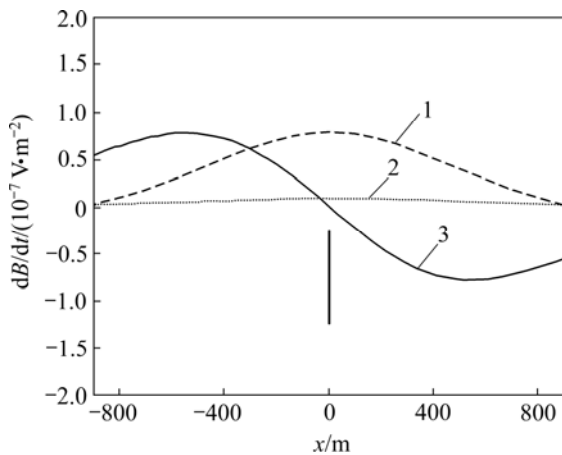
Fig.1 Fixed-loop response of three-component calculated from eigencurrent over a thin plate conductor in homogeneous half-space when plate dip is  $0^\circ$



1—X分量; 2—Y分量; 3—Z分量

图 2 板体倾角为  $45^\circ$  时的三分量响应

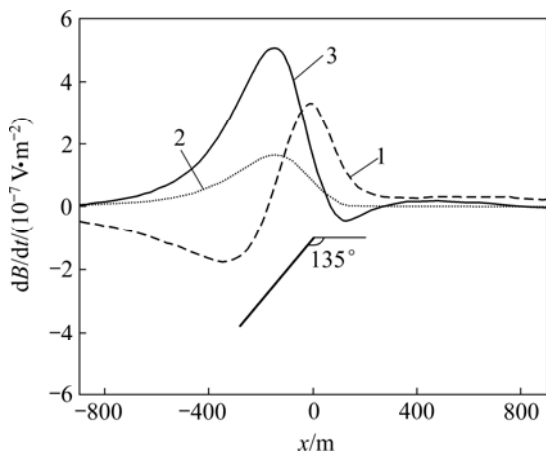
Fig.2 Fixed-loop response of three-component calculated from eigencurrent over a thin plate conductor in homogeneous half-space when plate dip is  $45^\circ$



1—X分量; 2—Y分量; 3—Z分量

图 3 板体倾角为  $90^\circ$  时的三分量响应

Fig.3 Fixed-loop response of three-component calculated from eigencurrent over a thin plate conductor in homogeneous half-space when plate dip is  $90^\circ$



1—X分量; 2—Y分量; 3—Z分量

图 4 板体倾角为  $135^\circ$  的三分量响应

Fig.4 Fixed-loop response of three-component calculated from eigencurrent over a thin plate conductor in homogeneous half-space when plate dip is  $135^\circ$

$X$  和  $Y$  分量在板体上方表现为单峰异常,  $Z$  分量的过零点位置对应板的顶部中心在地面的投影位置, 且以其过零点处呈反对称分布; 当板倾斜时,  $X$  分量曲线的过零点位置仍大致对应板的中心在地面的投影位置,  $Y$  分量曲线分布形态在倾斜侧变化较平缓, 反倾斜侧变化较陡, 据此可以判定板的倾向。虽然  $Z$  分量响应具有在板倾斜侧变化相对平缓, 在反倾斜侧变化相对陡的特征, 但不如  $Y$  分量对板体倾角变化的反映敏感, 且曲线形态比  $X$  和  $Y$  分量的曲线形态复杂。

## 2 实例

### 2.1 地质及地球物理概况

铜山铜矿位于铜陵—安庆成矿带中部, 其构造位置位于姥山背斜的南东翼, 地层为泥盆系—二叠系地层。姥山背斜的总体走向为北东  $50^\circ$ , 在矿床产出部位轴向弯转, 呈向南东突出的弧形。区内断裂构造发育, 以平行褶皱轴向的逆冲断裂、层间伸展滑动引起的构造破碎带和北东向的压扭性断裂为主。花岗闪长斑岩沿上述断裂的交接处侵入, 并沿断裂面和层间滑动面贯入, 引起广泛的接触交代变质、热液蚀变及矿化作用。铜山铜矿现已发现的矿体主要赋存于铜山花岗闪长斑岩体的接触带和层间破碎带内, 主矿体多呈层状, 小矿体多呈透镜状、扁豆状、囊状。沿走向及倾向常出现分支复合、膨胀收缩及尖灭再现现象。主矿体一般连续性较好<sup>[16]</sup>。该区闪长岩电阻率为  $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \Omega \cdot m$ , 大理岩电阻率大于  $1 \times 10^4 \Omega \cdot m$ , 角闪岩电阻率小于  $1 \times 10^3 \Omega \cdot m$ , 金属硫化矿电阻率低于  $1 \text{ k}\Omega \cdot m$ 。由此可见, 测区矿石的电性表现为低阻, 围岩的电性恰好相反, 表现为高阻。良好的电性条件为瞬变电磁法在该区进行找矿提供了有利的地球物理条件。

### 2.2 工作装置

实验采用的仪器是由加拿大 Geonics 公司生产的 PROTEM-67 型瞬变电磁仪。采用大定源回线装置对已知剖面即 13 线进行框内观测。13 线地质剖面见图 5。测线方位为  $NW346^\circ$ , 发送电流为 20 A, 基频为 6.25 Hz, 采用 30 个时窗进行采样, 高精度石英钟晶振同步, 发送框面积(长 $\times$ 宽)为  $200 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ , 关断时间为  $245 \mu s$ , 接收线圈有效面积为  $200 \text{ m}^2$ , 同时接收  $X$ ,  $Y$  和  $Z$  3 个方向的二次场本征电流(即  $dB/dt$ ), 所得结果见图 6~8。

### 2.3 实测结果分析

由图 6~8 可见: 在  $0 \sim 160 \text{ m}$  之间由于地表有厚层灰岩覆盖, 尽管地下约  $600 \text{ m}$  以下有矿体分布, 但由于规模不大且埋深较大, 3 个分量响应均较弱, 但在  $160 \sim 340 \text{ m}$  之间  $X$ ,  $Y$  和  $Z$  3 个分量的响应曲线均表现出较强的异常。 $X$  分量的响应特征表明: 在点位  $260 \text{ m}$  处附近出现的过零点大致对应矿体的中心位置, 且由于过零点左侧矿体厚度较小且埋深较大, 导致过零点左侧的瞬变响应小于右侧响应。由于矿体形态可以近似地看作板状体, 其倾向也与图 7 中  $Y$  分量的响应规律一致, 特别是在晚期表现得尤为明显, 即在倾斜侧

相对平缓, 反倾斜侧陡立; Z分量的响应虽然较X分量和Y分量都要强, 分辨异常的能力也较强, 但是, 图8所示曲线仅能说明在160~340 m段存在异常, 并不能较准确地给出异常体中心和倾向的信息。因此,

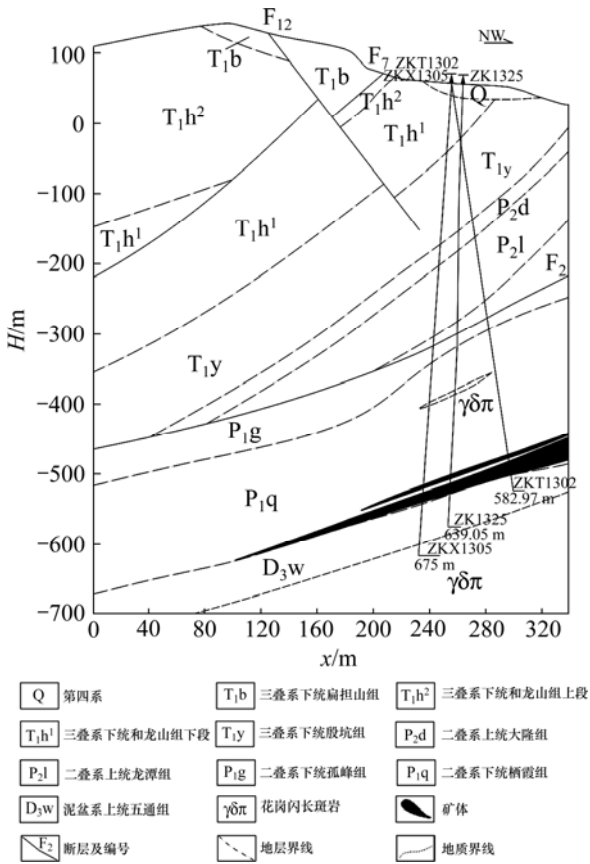
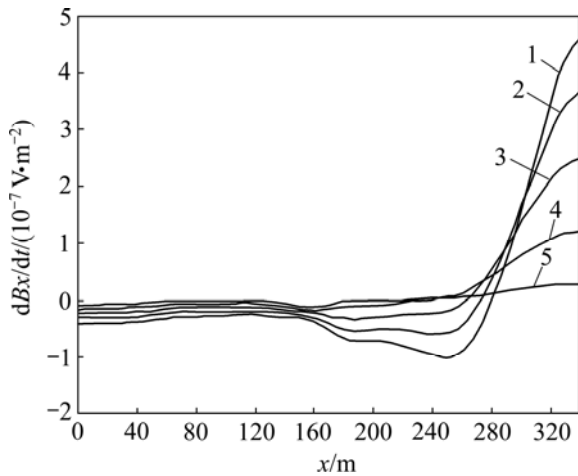


图5 13线地质剖面

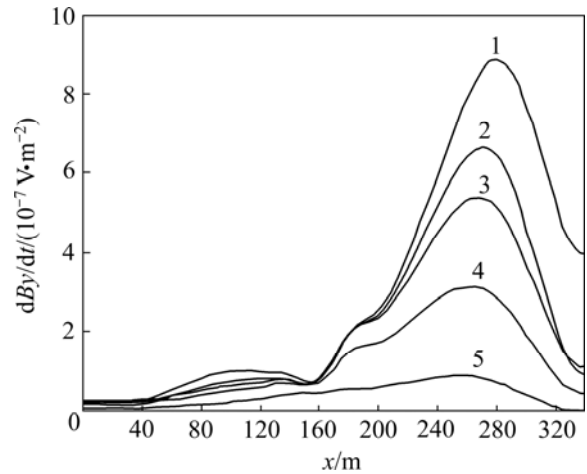
Fig.5 Geology profile for line 13



1—采样时间为5; 2—采样时间为10; 3—采样时间为15; 4—采样时间为2; 5—采样时间为25

图6 13线X分量的响应

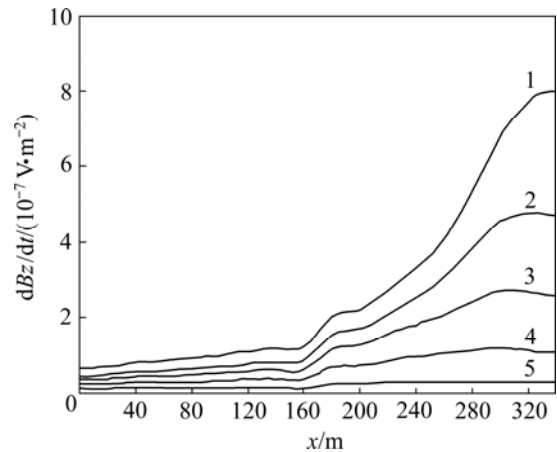
Fig.6 Response of X component for line 13



1—采样时间为5; 2—采样时间为10; 3—采样时间为15; 4—采样时间为2; 5—采样时间为25

图7 13线Y分量的响应特征

Fig.7 Response of Y component for line 13



1—采样时间为5; 2—采样时间为10; 3—采样时间为15; 4—采样时间为2; 5—采样时间为25

图8 13线Z分量的响应特征

Fig.8 Response of Z component for line 13

如果仅测量Z分量并只对其进行分析就可能会丢失一些异常体的重要信息, 而这些信息可以通过对X分量和Y分量进行分析获得。

### 3 结论

(1) 利用X分量的过零点位置可以大致确定板状体中心在地面的投影位置, 利用Y分量可以判断板状体的倾向, 而利用Z分量便于发现异常, 因此, 综合X, Y和Z三个分量的响应特征进行分析可以准

确地对异常进行评价。

(2) 在测量垂直分量的同时,并不需要付出额外的工作量就可以同时获得其他 2 个水平分量的信息,从而为更深入地对这 3 个分量的响应特征及其规律进行研究提供了良好的条件。

(3) 在已知板状体上方定源回线三分量瞬变响应的实际观测结果验证了本文对三分量的响应特征及其规律的分析方法是正确的。因此,应注重将综合三分量瞬变响应特征进行分析的方法应用于找矿工作中。

**致谢** 中南大学牛之珺老师对本文提出了许多宝贵意见,在此深表谢意!

#### 参考文献:

- [1] 牛之珺. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007.  
NIU Zhi-lian. The theory of time domain electromagnetic method[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.
- [2] 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 Bang-yuan. Applied near zone magnetic source exploration of transient electromagnetic method[M]. Beijing: Geology Press, 1998.
- [3] 考夫曼 A A, 凯勒 G V. 频率域与时间域电磁测深[M]. 王建谋, 译. 北京:地质出版社, 1987.  
Kaufman A A, Keller G V. Frequency and transient soundings[M]. WANG Jian-mou, trans. Beijing: Geology Press, 1987.
- [4] 米萨克 N.纳比吉安. 勘查地球物理电磁法[M]. 赵经祥, 译. 北京:地质出版社, 1992.  
Nabighian M N. Electromagnetic methods in applied geophysics[M]. ZHAO Jing-xiang, trans. Beijing: Geology Press, 1992.
- [5] 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 Xiu. The theory and application of transient electromagnetic[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2002.
- [6] 阎述, 陈明生, 傅君眉. 瞬变电磁场的时域数值分析[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 275-283.  
YAN Shu, CHEN Ming-sheng, FU Jun-mei. Direct time-domain numerical analysis of transient electromagnetic field[J]. Chinese J Geophys, 2002, 45(2): 275-283.
- [7] Gallagher P R, Ward S H, Hohmann G W. A model study of a thin plate in free space for the EM37 transient electromagnetic system[J]. Geophysics, 1985, 50(6): 1002-1005.
- [8] Adhidjaja J I, Hohmann G V, Oristaglio M L. Two-dimension time domain electromagnetic response[C]//Technical Program Abstracts and Biographies. 53rd Annual International Soc of Expl Geophys Meeting. Tuls, 1983: 623-626.
- [9] Zonge K L, Carlson N. The utility of horizontal component measurements in random-walk TEM surveys[R]. Tucson: Zonge Engineering & Research Organization Inc, 2002.
- [10] McNeill J D. Why should I measure three components in a time-domain electromagnetic survey[R]. Mississauga: Geonics Limited, 1992.
- [11] 刘金涛, 顾汉明, 胡祥云. 瞬变电磁法三分量解释剖析[J]. 人民长江, 2008, 39: 114-116.  
LIU Jin-tao, GU Han-ming, HU Xiang-yun. Analysis of three-component transient electromagnetic[J]. Yangtze River, 2008, 39: 114-116.
- [12] McNeill J D, Edwards R N, Levy G M. Approximate calculations of the transient electromagnetic response from buried conductors in a conductive half-space[J]. Geophysics, 1984, 49(7): 918-924.
- [13] Chen C S, Chiu W H, Lin C R. Three component time-domain electromagnetic surveying: Modeling and data. Analysis[J]. Piers Online, 2008, 4(4): 475-480.
- [14] Wang T L, Tripp A C, Hohmann G W. Studying the TEM response of a 3-D conductor at a geological contact using the FDTD method[J]. Geophysics, 1995, 60(4): 1265-1269.
- [15] Barnett C T. Simple inversion of time-domain electromagnetic data[J]. Geophysics, 1984, 49(7): 925-933.
- [16] 席振铎. 安徽省铜陵市铜山铜矿接替资源勘查项目物探设计[R]. 长沙:中南大学信息物理工程学院, 2006.  
XI Zhen-zhu. Tongling City, Anhui Province, the geophysical survey design to replace resource of Tongshan copper project[R]. Changsha: School of Info-physics and Geomatics Engineering, Central South University, 2006.

(编辑 陈灿华)