

基于水平共面一发双收磁偶极装置的瞬变电磁早期二次场信号提取研究



Pre-pub. online: www.geojournals.cn/georev

王家明¹⁾, 李海侠¹⁾, 刘慧鹏²⁾

1) 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明, 650031;

2) 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 昆明, 650216

内容提要:在瞬变电磁探测中,通常认为一次场衰减迅速,晚期接收到的总场信号主要由地质体引起的二次场信号构成,所以常用晚期信号开展勘探。笔者等以导电环模型为基础开展了模拟仿真,对不同延时情况下二次场信号的响应进行分析,得出早期二次场信号幅值比晚期更强的结论,在浅层勘探中更具优势。由于早期总场信号中一次场较强,导致难以准确提取出地质体引起的二次场。为有效提取早期二次场信息,笔者等结合发射线圈在空间中的磁感应分布特征与磁偶极装置收发分离的特性,引入了参考线圈,并通过数字补偿的方法对接收线圈中的一次场进行压制。经过与传统磁偶极装置的实验对比,笔者等提出的一发双收装置和二次场提取方法可对一次场信号进行有效压制,使早期二次场异常信息得以凸显。通过对地下管线的探测试验,证实了本文所提出的装置与方法在实际工作中能够取得较好的探测效果。

关键词:瞬变电磁法;水平共面磁偶极装置;数字信号补偿;一次场压制

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, TEM)是一种基于电磁感应原理的时间域人工源电磁探测方法(Nabighian, 1992; 牛之琏, 2007; 薛国强等, 2007),通过二次场的变化来实现对异常体的识别(Liu Huipeng et al., 2024)。多匝小回线装置在浅层地质信息探测方面具有显著优势(杨海燕等, 2019; 徐正玉等, 2022),在探测过程中,可以根据实际需求调整发射框架大小和发射电流强度,以满足不同目标体的探测要求。对于城市地下构建物的探测通常需要便携性,发射线圈与接收线圈间的距离较近,导致接收信号中一次场过强,二次场信息难以提取(Ji Yanju et al., 2007; 席振铎等, 2016; 皮帅, 2021)。因而,压制一次场的影响对于小回线装置瞬变电磁探测具有重要意义。

在探测过程中,接收线圈同时接收到发射线圈产生的一次电磁场和异常体涡流产生的二次场,此时接收到的信号为连续的模拟信号,可采用模拟信号补偿方式对一次场进行压制。模拟信号补偿的优点是可以直接降低采集信号中的一次场,利用数据采集的精度最大程度获取二次场信息。模拟信号补

偿最早应用于频域电磁仪器中(柳建新等, 2017),在磁偶极发射线圈与接收线圈间增加补偿线圈,用于对接收线圈中的一次场进行压制(Won et al., 1996, 2003)。针对瞬变电磁探测装置,许多学者设计了不同种类的模拟信号补偿方式来压制一次场,如Kuzmin和Morrison(2014)设计了同心共面Bucking线圈来弱化一次场;席振铎等(2016)利用双线圈源构建零磁通接收平面以压制一次场对接收线圈的作用;林君等基于发射线圈内外垂直磁场极性相反的原理(Fu Zhihong et al., 2019; 林君等, 2020; 胡雄武等, 2023),构建内外总磁通量趋近于零的零磁通装置来压制一次场。上述装置皆属于模拟信号补偿方法,虽然能够明显压制一次场的影响,但却面临着制造工艺以及装配精度等方面的限制(Rashed, 2016; Liu Huipeng et al., 2024),导致实际测量响应与理论值出现偏差,并且这种偏差无法通过后期的数据处理予以消除,进而对探测精度产生影响。基于此问题,王忠等提出了一种基于全程采样数据减去一次场理论值的数字补偿方法(王忠等, 2005; Ji Yanju et al., 2007),不过该方法的效果

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42064005)的成果。

收稿日期:2024-05-11; 改回日期:2024-12-31; 网络首发:2025-01-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.011

作者简介:王家明,男,1999年生,硕士研究生,地球探测与信息技术专业;Email: 2548078901@qq.com。通讯作者:刘慧鹏,男,1983年生,博士,正高级工程师,主要从事地质矿产、化探、物探综合勘查;Email: hp_liu@chinalco.com.cn。

在很大程度上依赖于准确的一次场理论值。

对于水平共面磁偶极装置,接收线圈中的一次场随收发距离的增大而减小。利用此优势,笔者等基于导电环模型针对磁偶极装置进行仿真,对一次场信号在不同延时情况下的衰减特征进行分析,在此基础上提出合理的信号补偿方法对一次场进行有效压制,对于提升浅层地质体的异常识别能力具有重要意义。

1 磁偶极装置的信号衰减规律

1.1 磁偶极装置导电环探测模型的建立

小回线瞬变电磁法常采用增加回线匝数的方式来提高其灵敏度和信噪比(周逢道等,2006)。然而,这种方法会导致发射回线与接收回线之间的互感显著增加。笔者等借鉴了导电环模型(张爽等,2014),通过量化接收回线中一次场响应和二次场响应的大小,来分析由一次场互感引起的早期信号畸变规律对信号解释的影响。建立如图1所示偶极-偶极 TEM 系统的探测模型,该模型由发射回线(TX)、接收回线(RX)和模拟地下异常体涡流的导电方环(CR)组成。

图1中, M_{TR} 、 M_{TC} 、 M_{CR} 分别为回线TX与RX、TX与CR、CR与RX之间的互感系数,发射回线TX与接收回线RX的长宽分别为20 cm和10 cm,导电方环CR的长宽分别为 $2a$ 和 $2b$,装置与CR之间的垂直距离为100 cm,TX与RX的水平距离为130 cm,TX与CR的水平投影距离为82.5 cm。发射电流的关断过程会激发导电环产生涡流,形成二次场响应(林君等,2020)。由于回线之间存在耦合作用,接收回线会受到发射回线产生的一次场响应信号和涡流产生的二次场响应信号的叠加影响。

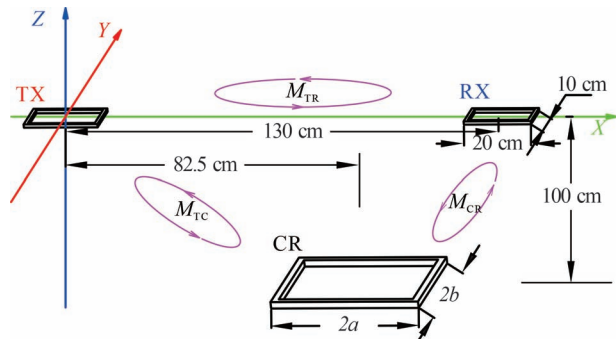


图1 基于导电环的模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model based on conductive ring

应用 Neumann 公式(Davey et al., 1995)计算空间中两个多匝矩形回线之间的互感系数:

$$M = \frac{n_1 n_2 \mu_0}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{dx_1 dx_2 + dy_1 dy_2 + dz_1 dz_2}{R} \quad (1)$$

式中, n_1 、 n_2 分别为 l_1 、 l_2 两个互感回线的匝数; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率; R 为源点到场点的距离:

$$R = \sqrt{(x_1 - (T_x \pm X'))^2 + (y_1 - (T_y \pm Y'))^2 + (z_1 - T_z)^2} \quad (2)$$

式中, T_x 、 T_y 、 T_z 为矩形线圈 l_2 的中心坐标。

1.2 模型响应

在实际工作中,发射回线属于感性负载。由于激发源波形在该回线中会发生相应变化,电流无法立即关断,所以发射波通常呈现为斜阶跃关断状态(图2)。因此,需对斜阶跃激励下的瞬变响应展开研究。其关断电流函数为:

$$I(t) = \begin{cases} I_0 \left(\frac{t_0 - t}{t_0} \right) & (0 < t \leq t_0) \\ 0 & (t_0 < t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, I_0 为电流幅值; t_0 为关断时刻。

根据法拉第电磁感应定律,在接收回线上耦合产生的响应为:

$$u_1(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = - NM_{TR} \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

式中, N 为接收回线匝数; M_{TR} 为收发回线之间互感系数; I 为发射电流。

导电环上产生的感应电流 I_c

$$L_c \frac{dI_c}{dt} + R_c I_c = -M_{TC} \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

在接收线圈中感应到的二次场时域信号 $u_2(t)$

$$u_2(t) = - NM_{CR} \frac{dI_c}{dt} \quad (6)$$

式中, M_{TC} 为发射回线与导电方环之间的互感; M_{CR}

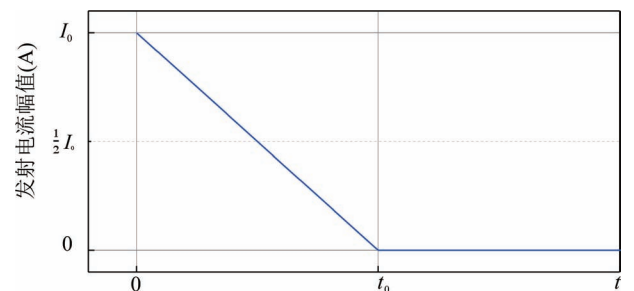


图2 电流斜阶跃关断示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oblique step turn off of current

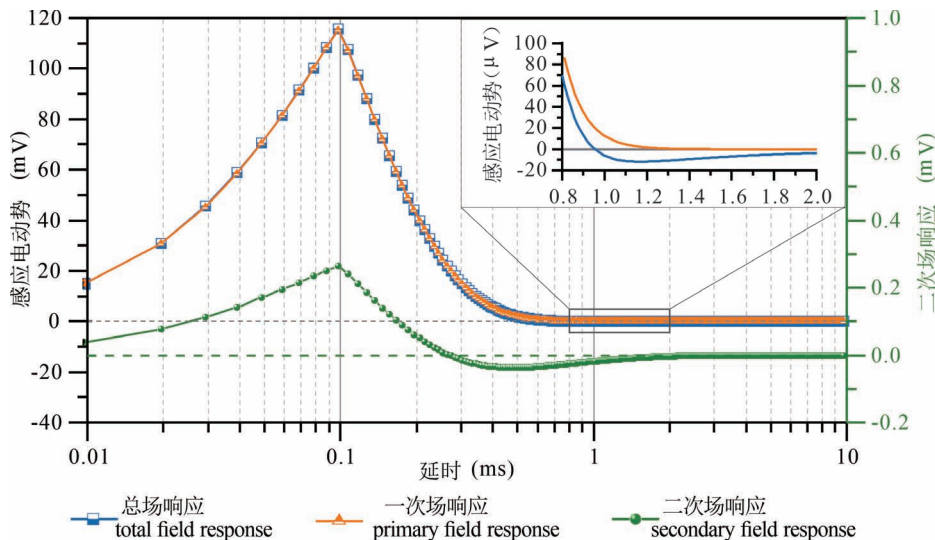


图3 偶极—偶极装置典型响应曲线

Fig. 3 Typical response curve of dipole-dipole device

为导电方环与接收回线之间的互感; L_c 为导电方环的寄生电感; R_c 为导电方环的等效内阻。

接收机采集的感应电动势 $U(t)$ 与感应电动势 $u(t)$ 之间的转化关系,可用空心接收线圈的系统传递函数表示(王华军,2010):

$$H(s) = \frac{U(s)}{u(s)} = \frac{1}{LC(s^2 + 2\xi\omega_p s + \omega_p^2)} \quad (7)$$

式中,阻尼系数 $\delta = \xi\omega_p = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{L} + \frac{1}{R_0 C} \right)$; 谐振频率

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(\frac{r}{R_0} + 1 \right)}.$$

则接收回线的响应包含 2 部分:即涡流产生的二次场响应 $u_2(t)$ 和发射回线的一次场响应 $u_1(t)$, 则 $U_0(t)$ 的响应表达式(皮帅,2021)为

$$U_0(t) = L^{-1} \left\{ \frac{L[u_1(t) + u_2(t)]}{s^2 LC + s \left(\frac{L}{R_0} + rC \right) + \frac{r + R_0}{R_0}} \right\} \quad (8)$$

式中, $U_0(t)$ 为接收回线中的总场响应; $u_1(t)$ 发射回线产生的一次场时域响应信号; $u_2(t)$ 为模拟导电环产生的涡流二次场时域响应信号; L 为寄生电感; r 为等效内阻; C 为等效分布电容; R_0 为匹配电阻。

图 3 展示了偶极装置在特定给定条件下的瞬变响应曲线。其计算参数如下:接收线圈寄生电感为 0.312 H, 内阻为 111.35 Ω , 等效分布电容为 7.226 pF; 发射电流 $I_0 = 1$ A, 关断时间 0.1 ms, 导电环内阻 0.05 Ω , 电感 30 μH ; 回线间互感 $M_{RC} = 4.82$

μH ; $M_{TR} = -18.8 \mu\text{H}$; $M_{TC} = 0.294 \mu\text{H}$ 。

由图 3 可知,偶极装置的瞬变响应曲线具有以下特点:首先,瞬变电磁总响应曲线在衰减过程中会出现负值,这是由晚期一次场消失后的二次场所引起的。其次,多匝小回线装置的理论二次场响应曲线并非单调衰减曲线。依据导电环模拟结果,自关断时刻 0.1 ms 后,随着延时的增加,一次场的影响逐渐减弱,总场信号中二次场信号所占比例不断增大,总场与二次场响应之间的差异亦随之减小。然而,早期的二次场信

号更为强烈,同时也包含更多的浅部异常体信息。因此,提取早期二次场信号对于突出异常体细节、实现超浅层勘探至关重要。

2 基于数字补偿的早期二次场的提取方法

笔者等所述的数字补偿技术,借助高精度模数转换器件(ADC),将参考线圈与接收线圈的模拟信号先行转换为数字信号。依据毕奥—萨伐尔定律,求取参考线圈与接收线圈中一次场的转换系数,即装置放大倍数 C_0 。结合实际测得的参考线圈感应电动势,利用该转换系数能够计算出接收线圈中的二次场信号大小,从而达成信号补偿之目的。

2.1 二次场的提取原理

根据法拉第电磁感应定律可知,对实测的响应电压信号从电流开始关断时刻到晚延时刻期间内进行积分,可以得到全程总磁感应强度。此时,一次场仅存在关断期间,总感应恰好等于一次场与二次场的矢量和:

$$\frac{1}{Sn} \int_0^{t_0} V(t) dt = B_1(t) + B_2(t) \quad (9)$$

式中: S 为单匝接收线圈的有效面积; n 为接收线圈的匝数; $B_1(t)$ 为接收线圈中心点一次磁感应强度; $B_2(t)$ 为接收线圈中心点二次磁感应强度。

在水平共面一发双收装置中对一次场的压制表现为:

$$V_c(t) = Sn \left[\frac{\partial B_{1c}(t)}{\partial t} + \frac{\partial B_{2c}(t)}{\partial t} \right] \quad (10)$$

$$V_j(t) = SnC_0 \left[\frac{\partial B_{1j}(t)}{\partial t} + \frac{\partial B_{2j}(t)}{\partial t} \right] \quad (11)$$

式中: C_0 为装置放大倍数; $V_c(t)$ 为参考回线感应电动势; $V_j(t)$ 为接收回线感应电动势; 由于装置设计满足一次激励场的抵消条件有:

$$C_0 * B_{1j}(t) = B_{1c}(t) \quad (12)$$

当产生涡流的地质体处于参考线框和接收线框中心时, 可认为两回线接收到的二次场响应近似相同

$$\mu_0 \frac{\partial H_2(t)}{\partial t} = \frac{\partial B_{2c}(t)}{\partial t} = \frac{\partial B_{2j}(t)}{\partial t} \quad (13)$$

则水平共面一发双收装置获得的二次场响应为

$$\frac{\partial H_2(t)}{\partial t} = \frac{1}{Sn\mu_0} \cdot \frac{V_j(t) - V_c(t)}{(C_0 - 1)} \quad (14)$$

在水平共面一发双收装置中, 通过引入参考回线以抵消一次场。这要求理论上参考回线和接收回线的参数必须一致, 否则信号会由于过渡过程的影响不同而导致一次场响应抵消不充分, 或引入新的干扰变量。因此, 需要对采集的数据进行校正以消除回线过渡过程的影响。在实验中, 可以利用并联谐振的原理来测试接收回线的分布参数(图4)。

在接收回线分布参数测量实验中, 信号发生器输出正弦波形, 保持输出电压幅值不变, 逐步调节其频率, 将示波器探头连接到电阻 R_0 的两端, 当 R_0 上的电压幅度达到最小, 说明此时的频率是该接收回线的谐振频率。此时信号发生器输出频率 f , 则分布电容 C 为

$$C = \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{1}{2\pi f} \right)^2 \quad (15)$$

提高测得谐振频率 f 的精准度有利于最大程度降低过渡过程影响。至此, 电路中的参数便都可以

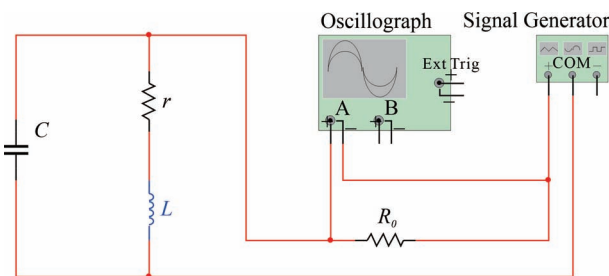


图4 谐振法测量回线分布电容

Fig. 4 The resonance method measures the distributed capacitance of the loop

通过测量得到, 根据式(16)还原感应电动势 $V(t)$ 。

$$V(t) = LC \frac{d^2 U(t)}{dt^2} + 2\delta LC \frac{dU(t)}{dt} + LC\omega_p^2 U(t) \quad (16)$$

2.2 水平共面一发双收装置设计

为了实现对早期二次场的有效提取, 笔者等借鉴了 SkyTEM 系统 (Auken et al., 2007) 与 ATTEM (Ji Yanju et al., 2007) 对一次场的压制思想。首先引入参考线圈, 以实时获取包括一次场在内的背景噪声, 随后从采集的数据中减去背景噪声, 从而得到二次场信号。

对于发射回线, 可由 Biot-Savart 定律的积分公式计算其空间任意一点 $P(x, y, z)$ 的磁感应强度:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{Idl \cdot e_R}{R^2} \quad (17)$$

式中: I 是电流强度; e_R 为电流元指向待求场点的单位向量; R 是源点到场点的距离; μ_0 为真空磁导率, 其值为 $4\pi \times 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1}$ 。

由于发射线框与接收线框平行, 接收回线只会对一次场的 z 方向分量有响应, x, y 方向分量 $B_x = 0, B_y = 0$, 所以只讨论一次场的 z 分量 B_z 对接收回线的影响, 可将单匝线圈拆分成四条线对空间点 P 的积分累加:

$$B_{z_1} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{b-x}{(b-x)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{a+y}{\sqrt{(a+y)^2 + (b-x)^2 + z^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{(a-y)^2 + (b-x)^2 + z^2}} \right]$$

$$B_{z_2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{a-y}{(a-y)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{b+x}{\sqrt{(a-y)^2 + (b+x)^2 + z^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{(a-y)^2 + (b-x)^2 + z^2}} \right]$$

$$B_{z_3} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{b+x}{(b+x)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{a+y}{\sqrt{(a+y)^2 + (b+x)^2 + z^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{(a-y)^2 + (b+x)^2 + z^2}} \right]$$

$$B_{z_4} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{a+y}{(a+y)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{b+x}{\sqrt{(a+y)^2 + (b+x)^2 + z^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{(a+y)^2 + (b-x)^2 + z^2}} \right] \quad (18)$$

式中: 矩形线框的长宽分别为 $2a$ 和 $2b$ 。对于多匝发射回线可推导空间任意一点 P 的磁感应强度为:

$$B_z = n_r * (B_{z_1} + B_{z_2} + B_{z_3} + B_{z_4}) \quad (19)$$

以发射电流为 1 A, 线框的长和宽分别为 0.2 m 和 0.1 m, 电流方向为逆时针的发射回线为例, 计算

出在 $Z=0$ 平面的小回线发射线圈外磁场强度分布规律,结果如图 5 所示。

在线框外部,磁感应强度皆为负值,并且在线框边界处,磁感应强度的数值变化最为急剧。为进一步分析磁感应强度随 X 值的变化趋势,绘制 $Y=0$ 剖面的磁感应强度曲线,如图 6a 所示。

在图 6 中,发射线圈内部范围的中心区域($X=0$ 处),磁感应强度的变化相对较为平缓。随着 X 值的增大,垂直磁感应强度 B_z 逐渐增强,并在 $X=0.1$ 的左极限位置呈现出最大值。当 X 值持续增加,在到达线圈边界($X=0.1$ 处)时,磁感应强度的极性发生转变,且在 $X=0.1$ 的右极限位置出现最小值。随着自变量 X 的取值不断增大,在发射线圈的外部范围,磁感应强度呈现单调递增的态势(图 6b),并逐渐趋近于零值。

基于磁感应强度的单调变化特性,提出压制一次场干扰的解决方案,即在发射线圈与接收线圈之间的红色虚线处(图 6b)引入水平共面的参考线圈,其结果如图 7 所示。一发双收装置采用相同规格的参考线圈与接收线圈,同步接收发射线圈产生的一次场,依据毕奥萨-伐尔定理计算不同收发距下的磁通比值,并将其作为对接收线圈信号的电信号放大倍数,使得两个线圈所接收的一次场感应电动势相等,再经过标定获取各延时道次的转换系数。通过这种模拟与数字信号综合补偿的方式,可使接收线圈采集的一次场信号与参考线圈中的一次场信号实现精准抵消,进而获取由地下涡流产生的二次场响应。

2.3 对一次场的理论压制效果分析

瞬变电磁仪器通过采集全波形信号,利用正反叠加原理可压制 50 Hz 工频干扰(向锡斌等, 2024)。因此,在本文所模拟的干扰场景中无需考虑 50 Hz 工频的影响。将供电期数据进行剔除,仅对断电期数据进行模拟分析处理。通过模拟,得到一个未受噪声影响的理想二次场信号(图 8e)。为

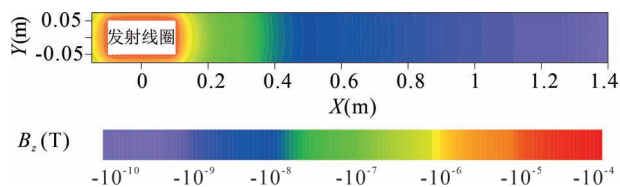


图 5 发射回线外部磁感应强度分布

Fig. 5 External magnetic induction intensity distribution of emission loop

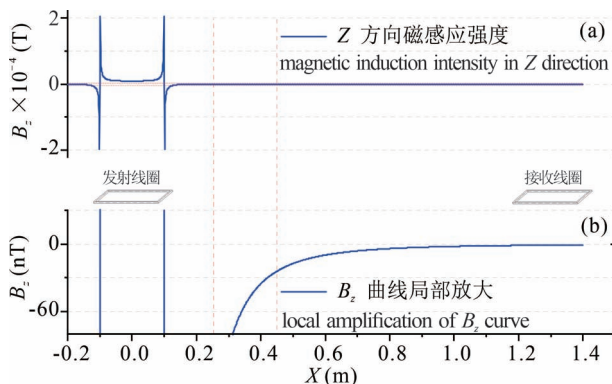


图 6 发射磁感应强度 B_z 随 X 轴的变化分布:

(a) B_z 随 X 的变化分布;(b) B_z 的局部放大

Fig. 6 Distribution of emission magnetic induction intensity B_z with x-axis variation:(a) Distribution of B_z with X ;(b) Local amplification of B_z



图 7 水平共面一发双收装置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of horizontal coplanar one-transmitting and dual-receiving device

验证一发双收装置对一次场的压制效果,先将白噪声干扰信号(图 8c 和 8d)分别加入到模拟参考线圈信号和模拟接收信号中,从而形成一个含有噪声的瞬变电磁信号。

$$V_c(t) = x(t) + y(t) + z_1(t) \quad (20)$$

$$V_j(t) = C_0 \left[\frac{x(t)}{C_0} + y(t) + z_2(t) \right] \quad (21)$$

其中 t 表示时间(单位/秒), $x(t)$ 为模拟一次场信号, $y(t)$ 为模拟二次场信号, $z(t)$ 为噪声信号, C_0 表示装置中接收线圈电信号放大倍数。

此时,参考线圈中的模拟信号为(图 8a),接收线圈中的模拟信号为(图 8b),以模拟实际环境中存在的电磁干扰。随后,结合式(14)可得到压制一次场信号后所剩余的二次场信号,图 8f 展示了压制后的效果。

结果显示,通过理论计算总场数据并向其中添加噪声,成功地实现了在含噪情况下对一次场干扰的消除。对比图 8e 与 8f,二者随时间的变化趋势基本一致。这表明参考线圈的引入成功抵消了线圈中的一次场。但从图 8f 的晚期信号来看,噪声幅值

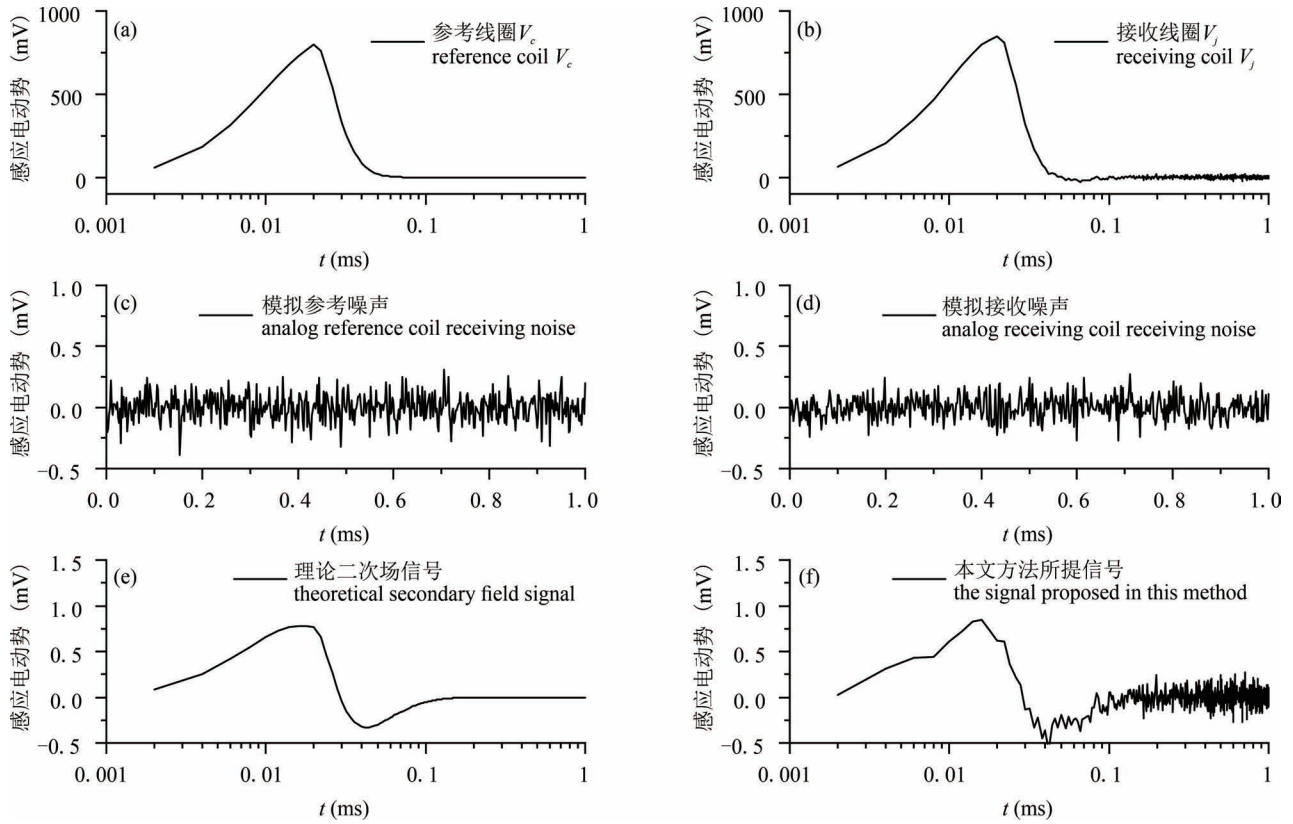


图8 仿真含噪情况下一发双收装置对一次场干扰的压制效果:(a)参考线圈含噪总场信号;(b)接收线圈含噪总场信号;(c)参考线圈所获噪声信号;(d)接收线圈所获噪声信号;(e)理论二次场信号;(f)一发双收装置所提取二次场信号

Fig. 8 Simulates the suppression effect of one-transmitting and dual-receiving device on primary field interference under noisy conditions:(a) Reference coil total field signal with noise;(b) Receiving coil total field signal with noise;(c) Noise signal obtained by the reference coil;(d) Receiving the noise signal obtained by the coil;(e) Theoretical secondary field signal;(f) The secondary field signal extracted by the one-transmitting dual-receiving device

仍处于 ± 0.25 mV 区间。这一现象说明一发双收装置对于压制一次场信号具有明显效果,但在降低噪声干扰上作用并不明显,需要对两线圈所得信号进行一定的降噪处理,以提高信号质量。

3 应用效果分析

为验证二次场提取的有效性和实用性,选择已知的目标体并结合实际城市地下构筑物探测工程开展应用测试工作。

3.1 系统组成与实验测试

依据图7的装置制作出测试样机,如图9所示。实验中将发射波形设定为双极性矩形波,发射频率选定为12.5 Hz,发射磁矩为 $24 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。其接收测量部分由便携主机加以控制,该便携主机具有24位的A/D转换器,动态范围120 dB,且设定的采样率为102.4 k Sample/s。水平共面一发双收装置由3个尺寸为 $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的矩形小线圈构成。设计接收线圈与参考线圈的等效面积均为 19.96 m^2 ,发射线圈与接收线圈之间的距离为130 cm。接收机对接收线圈信号进行106.1倍的信号放大处理。

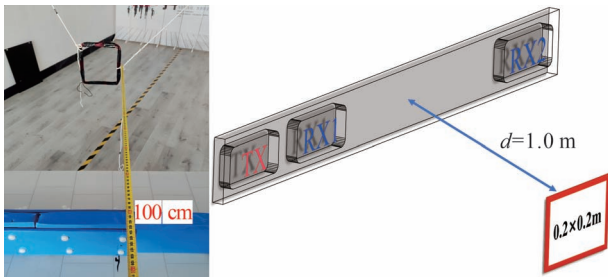


图9 室内测试照片

Fig. 9 Indoor test photos

为了验证设计装置的合理性,在室内进行验证实验。在测试过程中,将共面一发双收装置直立摆放。如图9所示,探测目标是尺寸为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 、匝数为30匝的铜线方框。参考线框与接收线框相对于铜线方框的水平投影距离相等。该装置与铜线方框的垂直距离为 1.0 m 。

利用导电环模型所得理论二次场响应与一发双收装置实测响应进行对比。仿真模型所需参数如下:接收线圈内阻为 $111.35\ \Omega$,电感为 0.312 H ,通过谐振法测得回线的等效分布电容为 7.2256 pF ;发射电流 $I_0 = 10\text{ A}$,斜阶跃关断时间 $78\ \mu\text{s}$,铜线方框的内阻为 $0.09\ \Omega$,自感 $89\ \mu\text{H}$;线圈间互感 $M_{RC} = 2.489\ \mu\text{H}$, $M_{TR} = -1.840\ \mu\text{H}$, $M_{TC} = 0.029\ \mu\text{H}$ 。对铜线框涡流引起的瞬变电磁二次场响应进行测试,所得结果如图10所示。图中,粉红色虚线为接收线圈所测总场信号,绿色实线为一发双收抵消的一次场信号,蓝线为通过一发双收装置实际测量并提取出的二次场响应信号,黄线为利用导电环模型对铜线框进行模拟所产生的理论二次场响应信号。二者对比可知,该装置借助参考回线能够快速提取由铜线方框涡流引起的早期二次场信号,且二次场响应曲线与理论模拟所得二次场曲线趋势基本一致。

3.2 针对已知目标体的测试

为了验证此装置探测已知目标体的有效性,在地面开展了针对已知汽车的探测实验。本次实验在距离汽车约 3 m 的测线上开展,传感器直立,朝向汽车方向,移动速度 0.3 m/s ,测试方式如图11所示。

传统的磁偶极装置接收到的感应电动势如图12a所示,受到一次场的影响,难以对地面汽车进行

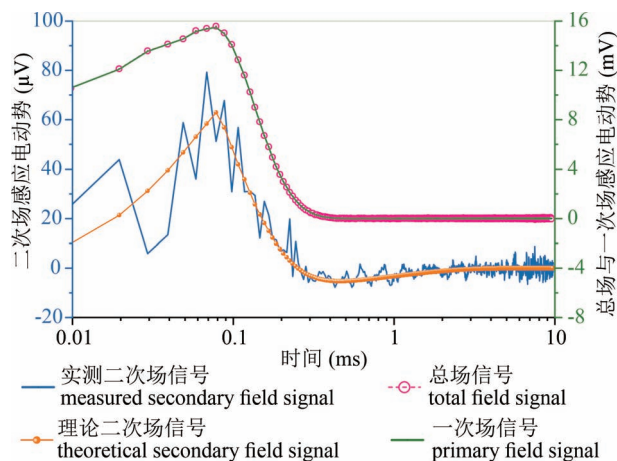


图10 铜线框的二次场响应曲线

Fig. 10 The secondary field response curve of copper wire frame

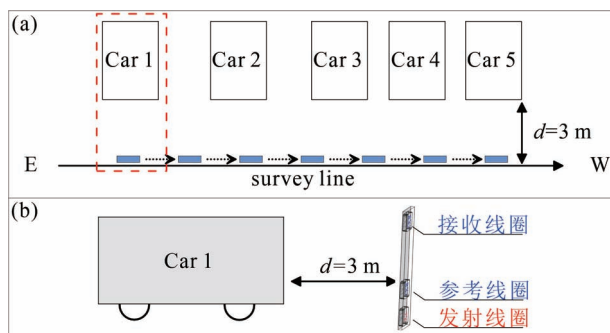


图11 探测汽车的实验示意图:(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 11 Experimental sketch of detecting automobiles:

(a) top view; (b) side view

分辨。相比之下,所提出的装置获取的感应电动势如图12b所示,其实测感应电动势异常(高值)清晰,分别对应于测线水平距离 4 m 、 7 m 、 10 m 、 12.5 m 至 14.5 m 处,与实际汽车位置吻合。对比两种装置的探测结果可见,本文所提出的装置相较于传统偶极装置,在压制早期一次场信号方面表现突出,对低电阻率异常目标体的识别能力更强。

为了进一步对图12中一发双收装置对一次场信号的抵消程度进行量化,将收发距为 1.3 m 的磁偶极装置所接收的瞬变响应信号作为包含一次场信号的对比目标。分别选取延时为 $t = 0.09\text{ ms}$ 与 $t = 0.24\text{ ms}$ 数据作为研究对象,并通过公式“压制率 $= \frac{(V_{\text{偶极}} - V_{\text{一发双收}})}{V_{\text{偶极}}} \times 100\%$ ”,计算了一发双收装置相对于磁偶极装置的一次场压制情况,其结果如图13所示。

在图13中,两条曲线在 X 轴方向上表现出相同的变化规律,即在仅有背景噪声存在的情况下,一发双收装置对一次场的压制率均保持在 98% 左右;而当存在低阻异常时,该装置对一次场的压制率在数值上会有所下降。对一次场的总体压制能力能够达到 90% 以上。

3.3 针对地下管线的探测实验

本次试验将地下排水管道作为探测目标。由于混凝土排水管线内含有钢筋,故而应呈现出低电阻率的特性。测线布置情况如图14a所示,其中虚线框部分代表已知管线的埋置位置。在垂直于管道延伸的方向上布置了四条测线,采用连续测量模式,采集时长为 149 s 。应用烟圈反演理论(Nabighian, 1992; 李锋平等,2016)计算公式如下:

某时刻烟圈垂直深度:

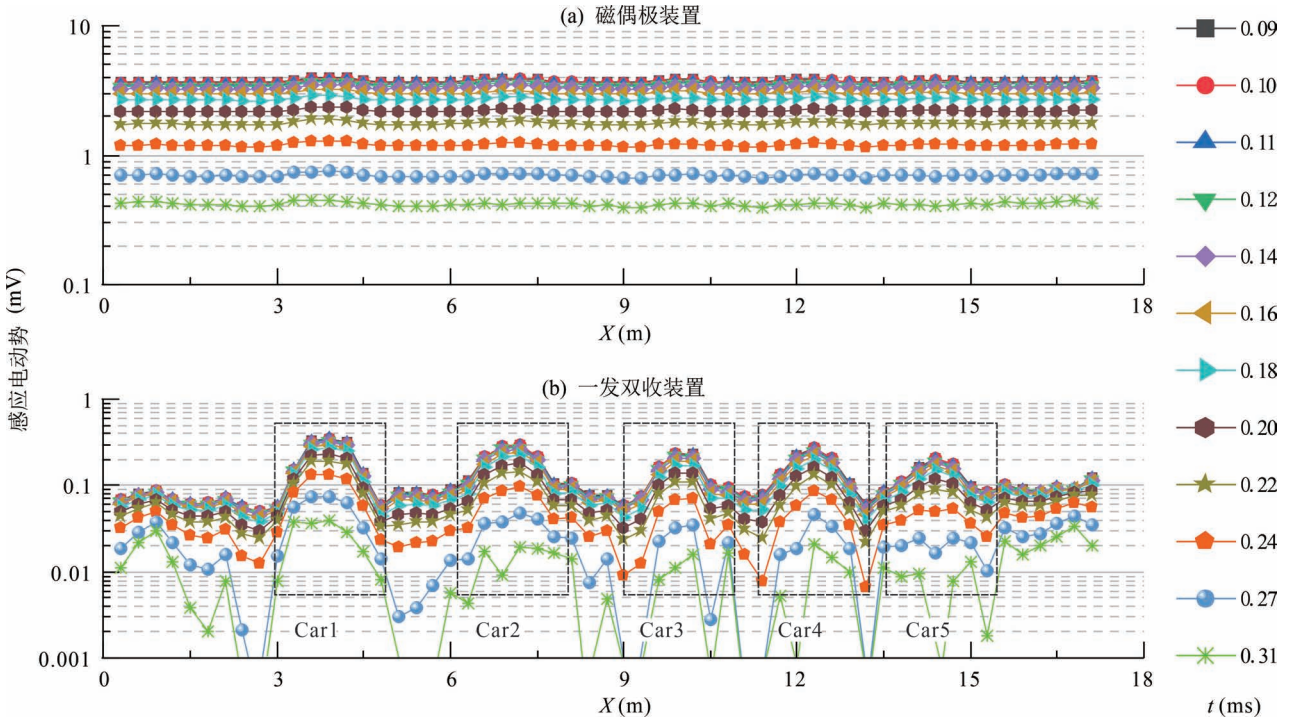


图 12 对比不同装置获取的感应电动势

Fig. 12 Comparison of induced electromotive forces obtained by different devices

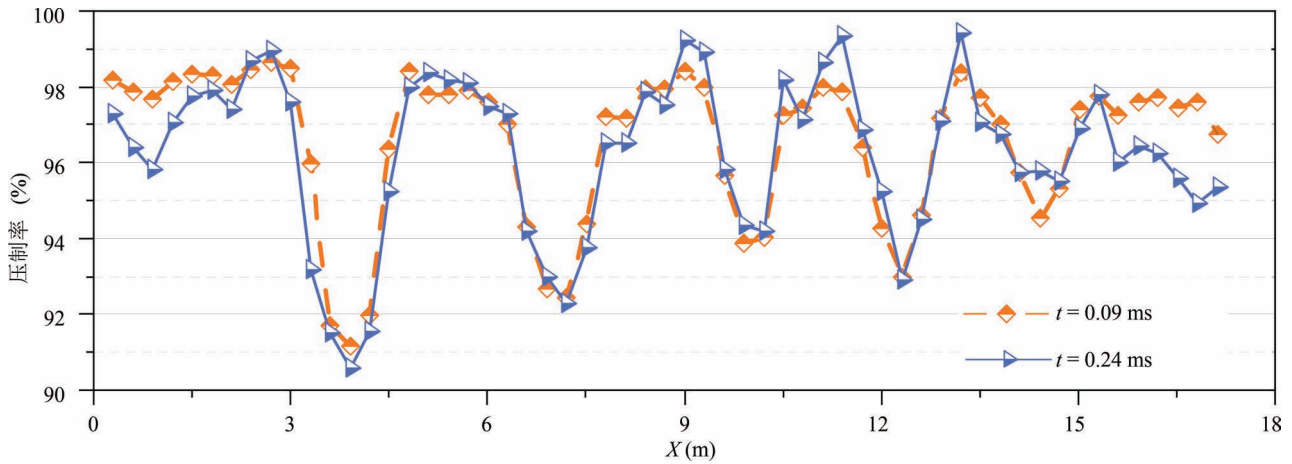


图 13 一发双收装置对一次场压制比例

Fig. 13 Suppression ratio of primary field by one-transmitting and dual-receiving device

$$d_r = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t\rho}{\mu_0}} \quad (22)$$

一维烟圈反演的似电阻率和似深度为

$$\rho_r = 4 \left[\frac{\sqrt{t_j \rho_j} - \sqrt{t_i \rho_i}}{t_j - t_i} \right]^2 t_{ji} \quad (23)$$

$$H_r = 0.441 \frac{(d_{r1} + d_{r2})}{2} \quad (24)$$

其中, t_j, t_i 为两相邻时间道的采样时间, $t_j > t_i$, ρ_j, ρ_i 为两相邻时间道的全区视电阻率。 t_{ji} 是 t_j 和 t_i 的算术平均值。 ρ_r 称为似电阻率, 区别于真电阻率和传统定义的视电阻率。

在虚线框内电阻率出现明显的低值异常(图 14b), 该低值异常与已知管线平面位置具有较好的对应关系。

借助 Voxler 软件对烟圈反演数据进行三维可

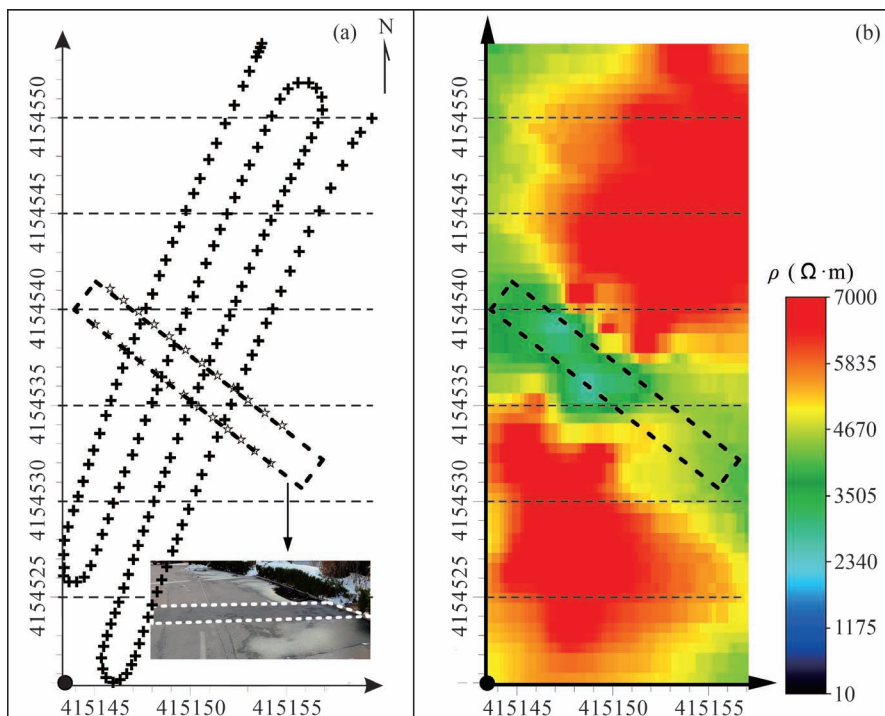


图 14 电阻率等值线图及推断解释:(a)地面探测实际工作点位;
(b)电阻率图($Z = -2.4$ m)

Fig. 14 Apparent resistivity contour plot and inference interpretation;

(a) Actual working point of ground detection; (b) Resistivity diagram ($Z = -2.4$ m)

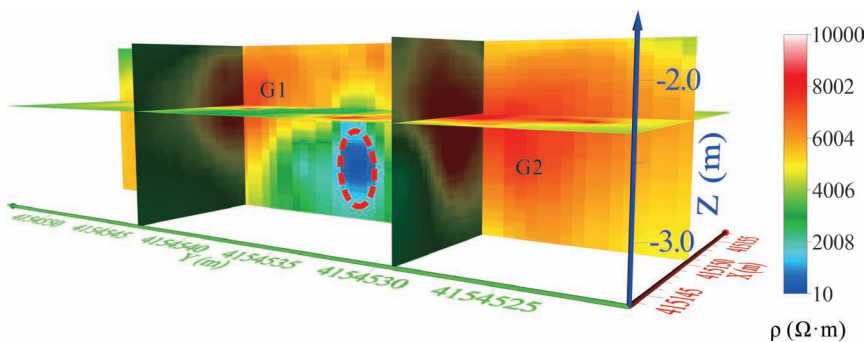


图 15 不同深度视电阻率三维切片图

Fig. 15 Three-dimensional slice diagram of apparent resistivity
at different depths

可视化成图,结果如图 15 所示。分析表明,在地下 2.0 m 以内,电阻率呈均匀层状分布,未观测到异常情况。进一步对地下 2.0~3.2 m 的数据进行剖析,如图 15 所示,出现了两个电阻率高值区 G1 和 G2,推测其是由第四系人工堆积层中的高电阻率花岗岩所导致。结合图 14b,在北方方向坐标 4154540 m 处存在一个呈西北—东南方向延伸的柱状低阻体,该异常体的埋深于 2.4~3.0 m。通过与钢筋混凝土排水管线的实际水平位置进行对比,可以确定该低

阻异常是由该管线引起的。由于采用“烟圈”理论计算的深度在浅层误差比较大(Ji Yanju et al., 2007),且从图 15 的低阻数据可知,在深度 2.4~3.0 m 范围内,电阻率呈现相对低阻状态,阻值处于 10~200 Ω 。相较于含金属管线引发的低阻情况,其反演结果的电阻率比实际值高出约 1~2 个数量级。依据公式(22),烟圈扩散距离的平方与视电阻率成正比例关系,由此可合理推断出管线实际埋深距离应略小于烟圈反演结果所显示的数值。

4 结论

通过对导电环模型进行仿真模拟,发现磁偶极装置接收到的总场信号中,早期一次场的信号较强,导致二次场信息难以提取。然而,早期的二次场信号幅值相对于晚期更强,更有利于浅层勘探。为了能够有效提取出早期信号中的二次场信息,笔者等提出了水平共面一发双收磁偶极装置以及模拟补偿与数字补偿相结合的二次场提取方法,通过室内测试以及与理论计算的对比分析,证实了此装置和方法的有效性。通过对已知汽车和地下管线的探测实验,本文所提出的装置和一次场压制方法,相对于传统偶极装置对异常体具有更强的识别能力,对一次场的压制可达到 90% 以上,适合于城市地下金属构筑物的便携式探测。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 胡雄武, 陈人峻, 张平松, 吴荣新, 付茂如, 周昊钰. 2023. 瞬变电磁共中心零磁通线圈研制与试验. 煤炭学报, 48(2): 918~930.

- 李锋平, 杨海燕, 邓居智, 汤洪志, 刘少光, 谢石文, 董萌萌. 2016. 地面瞬变电磁法一维烟圈反演技术研究. 地球物理学进展, 31(2): 688~694.
- 林君, 贾文枫, 皮帅, 张洋. 2020. 小尺寸 TEM 非共面偏心自补偿零耦合收发技术研究. 仪器仪表学报, 41(8): 150~159.
- 柳建新, 严发宝, 苏艳蕊, 曹创华. 2017. 便携式近地表频率域电磁法仪器研究现状与发展趋势. 地球物理学报, 60(11): 4352~4363.
- 牛之琰. 2007. 时间域电磁法原理. 长沙: 中南大学出版社, 1~298.
- 皮帅. 2021. 基于偏心补偿的城市地下空间瞬变电磁探测系统研制. 导师: 林君. 长春: 吉林大学硕士学位论文; 1~73.
- 王华军. 2010. 阻尼系数对瞬变电磁观测信号的影响特征. 地球物理学报, 53(2): 428~434.
- 王忠, 嵇艳鞠, 林君, 于生宝, 周国华. 2005. 全程瞬变电磁系统的浅层探测实验研究. 吉林大学学报(地球科学版), 35(S1): 95~98.
- 席振铎, 龙霞, 周胜, 黄龙, 宋刚, 侯海涛, 王亮. 2016. 基于等值反磁通原理的浅层瞬变电磁法. 地球物理学报, 59(9): 3428~3435.
- 向锡斌, 李海侠, 刘慧鹏. 2024. 半航空瞬变电磁干扰特征与降噪研究. 地质论评, 70(6): 2281~2294.
- 徐正玉, 付志红, 廖先, 刘旭华, 张静, 邵奎. 2022. 基于小回线瞬变电磁法的病害体精细探测应用分析. 地球物理学进展, 37(2): 892~901.
- 薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展. 地球物理学进展, 22(4): 1195~1200.
- 杨海燕, 岳建华, 李锋平. 2019. 斜阶跃电流激励下多匝小回线瞬变电磁场延时特征. 地球物理学报, 62(9): 3615~3628.
- 张爽, 刘紫秀, 陈曙东. 2014. 瞬变电磁传感器阻尼特性的标定研究. 地球物理学报, 57(2): 662~670.
- 周逢道, 林君, 刘长胜, 王艳, 周国华, 李慧. 2006. 浅海底瞬变电磁法接收天线频率特性研究——带宽对浅层分辨的影响. 地球物理学进展, 21(4): 1342~1345.
- Auken E, Foged N, Christiansen A V, Sørensen K. 2007. Enhancing the resolution of the subsurface by joint inversion of x- and z-component SkyTEM data. ASEG Extended Abstracts, 2007(1): 1~4.
- Davey K, Morris T, Shaaf J, Rote D. 1995. Calculation of motion induced eddy current forces in null flux coils. IEEE Transactions on Magnetics, 31(6): 4214~4216.
- Fu Zhihong, Wang Haowen, Wang Yao, Fu Nengyi, Tai Hengming, Qin Shanqiang. 2019. Elimination of mutual inductance effect for small-loop transient electromagnetic devices. Geophysics, 84(3): E143~E154.
- Hu Xiongwu, Chen Renjun, Zhang Pingsong, Wu Rongxin, Fu Maoru, Zhou Haoyu. 2023. Development and experiment of transient electromagnetic common center-zero-flux coil. Journal of China Coal Society, 48(2): 918~930.
- Ji Yanju, Lin Jun, Wang Zhong. 2007. Analysis and numerical removing of distortion in transient electromagnetic receiver device for shallow sounding. Progress in Geophysics, 22(1): 262~267.
- Kuzmin P V, Morrison E B. 2014. Bucking coil and b-field measurement system and apparatus for time domain electromagnetic measurements; US8400157B2. 2013-03-19.
- Li Fengping, Yang Haiyan, Deng Juzhi, Tang Hongzhi, Liu Shaoguang, Xie Shiwen, Dong Mengmeng. 2016. One-dimensional smoke ring inversion technology of ground transient electromagnetic method. Progress in Geophysics, 31(2): 688~694.
- Lin Jun, Jia Wenfeng, Pi Shuai, Zhang Yang. 2020. Research on non-coplanar eccentric self-compensation zero-coupling receiving-transmitting technology for small size TEM. Chinese Journal of Scientific Instrument, 41(8): 150~159.
- Liu Huipeng, Liu Jianxin, Wang Fang, Qian Leiyun, Liu Rong. 2024. Digital signal compensation and sounding depth analysis of portable frequency-domain electromagnetic exploration system. Sensors, 24(2): 566.
- Liu Jianxin, Yan Fabao, Su Yanrui, Cao Chuanghua. 2017. Research status and development trend of the portable near-surface FDEM instrument. Chinese Journal of Geophysics, 60(11): 4352~4363.
- Nabighian M N. 1992. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Zhao Jingxiang, Wang Yanjun Trans. Beijing: Geological Publishing House.
- Niu Zhilian. 2007. Principle of time domain electromagnetic method. Changsha: Central South University Press, 1~298.
- Pi Shuai. 2021. Development of transient electromagnetic detection system for urban underground space based on eccentricity compensation. Changchun: Jilin University Master Thesis.
- Rashed M. 2016. Rolling ball algorithm as a multitask filter for terrain conductivity measurements. Journal of Applied Geophysics, 132: 17~24.
- Wang Huajun. 2010. Characteristics of damping coefficient effect on transient electromagnetic signal. Chinese Journal of Geophysics, 53(2): 428~434.
- Wang Zhong, Ji Yanju, Lin Jun, Yu Shengbao, Zhou Guohua. 2005. Experimental study on shallow detection of whole transient electromagnetic system. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 35(S1): 95~98.
- Won I J, Keiswetter D A, Fields G R A, Sutton L C. 1996. GEM-2: A new multifrequency electromagnetic sensor. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1(2): 129~137.
- Won I J, Oren A, Funak F. 2003. GEM-2A: A programmable broadband helicopter-towed electromagnetic sensor. Geophysics, 68(6): 1888~1895.
- Xi Zhenzhu, Long Xia, Zhou Sheng, Huang Long, Song Gang, Hou Haitao, Wang Liang. 2016. Opposing coils transient electromagnetic method for shallow subsurface detection. Chinese Journal of Geophysics, 59(9): 3428~3435.
- Xiang Xibin, Li Haixia, Liu Huipeng. 2024. Study on semi-airborne transient electromagnetic interference characteristics and noise reduction. Geological Review, 70(6): 2281~2294.
- Xu Zhengyu, Fu Zhihong, Liao Xian, Liu Xuhua, Zhang Jing, Shao Kui. 2022. Application analysis of detailed detection of diseases based on small loop transient electromagnetic method. Progress in Geophysics, 37(2): 892~901.
- Xue Guoqiang, Li Xiu, Di Qingyun. 2007. The progress of TEM in theory and application. Progress in Geophysics, 22(4): 1195~1200.
- Yang Haiyan, Yue Jianhua, Li Fengping. 2019. The decay characteristics of transient electromagnetic fields stimulated by ramp step current in multi-turn small coil. Chinese Journal of Geophysics, 62(9): 3615~3628.
- Zhang Shuang, Liu Zixiu, Chen Shudong. 2014. Calibration study on the damping characteristics of TEM sensor. Chinese Journal of Geophysics, 57(2): 662~670.
- Zhou Fengdao, Lin Jun, Liu Changsheng, Wang Yan, Zhou Guohua, Li

Hui, 2006. Frequency characteristic of receiver coil in shallow seafloor transient electromagnetic sounding system—The influence of

bandwidth on the low subsurface resolving power. *Progress in Geophysics*, 21(4): 1342–1345.

Research on transient electromagnetic early secondary field signal extraction based on horizontal coplanar one-transmitting and dual-receiving magnetic dipole device

WANG Jiaming¹⁾, LI Haixia¹⁾, LIU Huipeng²⁾

1) *School of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650031;*

2) *China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey, Design and Research Institute Limited, Kunming, 650216*

Objectives: In the process of transient electromagnetic detection, the receiving coil will be disturbed by the primary field, which makes it difficult to accurately extract the secondary field caused by the geological body in the early total field signal. Therefore, the late signal is often used to carry out exploration work. The author intends to design a device and calculation method for extracting early secondary field signals to be applied to shallow exploration.

Methods: Based on the conductive ring model, the influence of the primary field on the secondary field signal under different delay conditions was analyzed. According to the magnetic induction distribution characteristics of the transmitting coil in space, the numerical conditions for the cancellation of the primary field are derived.

Results: The simulation results show that under the influence of the primary field, the earlier the time is, the greater the difference between the total field and the secondary field response is. Through theoretical calculation, the conversion coefficient of the reference coil relative to the primary field in the receiving coil is obtained, and then the primary field in the receiving coil is offset by the digital compensation method. Automobile experiments show that the pressing rate of the primary field can reach more than 90 %.

Conclusions: Compared with the traditional magnetic dipole device, the application of the one-transmitting and dual-receiving device and the secondary field extraction method proposed in this paper can effectively cancel the primary field signal in the total field response, so that the early secondary field signal containing abnormal information can be utilized. It is verified by underground pipeline detection test that the method has a good detection effect in practical work, which is of great significance to improve the ability of shallow geological body anomaly recognition.

Keywords: transient electromagnetic method; horizontal coplanar magnetic dipole device; digital signal compensation; a field suppression

Acknowledgements: This study was supported by the Natural Science Foundation of China (No. 42064005)

First author: WANG Jiaming, male, born in 1999, master student; Email: 2548078901@qq.com

Corresponding author: LIU Huipeng, male, born in 1983, Senior engineer, is mainly engaged in integrated geological and mineral exploration, chemical exploration and physical exploration; Email: hp_liu@chinalco.com.cn

Manuscript received on: 2024-05-11; Accepted on: 2024-12-31; Published online on: 2025-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.011

Edited by: LIU Zhiqiang

