

基于时间域电磁系统的近地表小目标识别

李雅德^{1,2}, 张娟娟¹, 渠晓东^{1,2}, 谢吴鹏^{1,2}, 穆雅鑫^{1,2}

(1. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要:时间域电磁系统被广泛地用于管线探测、考古和未爆物排查等近地表小目标探测领域,但异常目标的特性反演是一个难点,造成探测的虚警率和排查成本大大提升。提出一种三维正交磁偶极子等效模型和一种目标参数综合方法,通过反演等效磁偶极子的时间衰减特性并由此综合出目标的大小、材料和形状等参数。基于所研制出的便携式时间域电磁系统来验证方法的有效性,实验表明,基于磁偶极子时间衰减特性综合出的目标特征均可以有效地对目标进行识别,为近地表小目标特性识别的应用奠定了基础。

关键词: 时间域电磁法; 近地表小目标识别; 磁偶极子; 时间衰减特性

中图分类号: TH763 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Discriminating subsurface anomaly with time domain electromagnetic induction

Li Yade^{1,2}, Zhang Xiaojuan¹, Qu Xiaodong^{1,2}, Xie Wupeng^{1,2}, Mu Yaxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Time domain electromagnetic (TDEM) method is widely used in detecting subsurface objects such as pipelines, unexploded ordnance (UXO) and archaeological studies. But the characteristics inversion of anomaly is still a challenging problem which causes the increase of false alarm rate and cost of labor. This paper proposes a three-dimensional orthogonal equivalent magnetic dipole model and a target parameter synthesis method. With the proposed model and method, the target size, material and shape parameters can be synthesized by the time attenuation characteristics of the equivalent magnetic dipole. The proposed model and method is tested by the developed TDEM system. Experimental results indicate that the model can reproduce the response of subsurface objects, and the parameters of the dipoles can be used to estimate the characteristic of the object. These features can lay solid foundation for identifying subsurface objects.

Keywords: time domain electromagnetic method; subsurface discrimination; magnetic dipole; time decay

1 引言

时间域电磁法是一种人工源电磁探测方法。它向地下发送一次脉冲磁场,在一次激励场关断之后,地下目标激励起的感应涡流将产生随时间变化的二次感应电磁场,此二次场包含目标的信息^[1]。相对于磁法勘探获取数据量小、不利于目标识别的特点^[2-3]和探地雷达勘探需要在深度探测时降低工作频率,从而牺牲探测分辨率的问题^[4-5],时间域电磁法获取目标的信息更为丰富,因此

被广泛用于管线探测^[6]、考古^[7]和未爆物排查^[8]等埋深约0~3 m的小目标探测领域。国外的近地表时间域电磁探测系统比较发达,加拿大Geonics公司的EM61/63^[9-10]单站系统、美国Geometrics公司的MetalMapper^[11]多发多收系统、CRREL (cold regions research and engineering laboratory)开发的MPV (man portable vector sensor)^[12]手持系统等已被广泛地应用于未爆物排查和管线探测等领域。而国内在这方面起步较晚,目前尚无成熟的商业仪器。

但小目标的特性识别仍然是一个难题,若无法判断

引起异常的物体是目标还是其他金属干扰,会大大增加开挖的成本,降低探测的效率^[13]。目前二次场的解析解只适用于均匀的导体球目标^[14]和椭球目标^[15],而数值解的计算量又太过庞大^[16]。建立合适的正演模型替代目标,根据二次场的实际观测值去反演模型参数从而判断目标的特征成为现阶段目标识别的主要途径。Pasion L. R. 等人^[9]提出用两个正交的磁偶极子来等效目标,此模型较为简单且具有明确的物理基础,但是模型只适用于旋转对称的均匀目标,且需要对磁偶极子的时间衰减特性进行参数拟合,对一次场的关断时间和观测时间门的个数与时长提出了较高的要求;Shubitidze F 等人^[17-18]提出用目标表面分布的磁核或者磁偶极子来等效目标,此模型可以表示出较为复杂的物体特性,但是需要提前建立庞大的目标对比库;Grzegoryk T. M. 等人^[19]提出直接对探测区域进行成像,可以将距离很近的多个异常目标区分开,但是不能很好地反映出目标自身的特性。

本文拓展了 Pasion 提出的模型,提出了一种正交三磁偶极子的正演模型,从3个维度上去识别目标的特征,可以区分复杂形状的目标;同时为了避免磁偶极子时间衰减特性的参数拟合对硬件的高要求,本文提出一种目标参数综合方法,直接将反演出的时间衰减特性值进行综合,提取出目标的特征,更无需建立复杂的目标对比库。基于研发的时间域电磁探测系统验证了方法的有效性,实验表明此方法可以提取出目标的位置、倾角、大小、材料、形状等特性,从而可以实现近地表小目标特性的识别。

2 仪器组成与测试

2.1 仪器系统的组成结构与关键技术

本文提出的便携式近地表时间域电磁探测系统主要由线圈、发射电路、接收系统和上位机组成,结构如图1所示。其中线圈部分是最主要区别于常规探测深层地下信息的时间域电磁系统^[20]的部分。

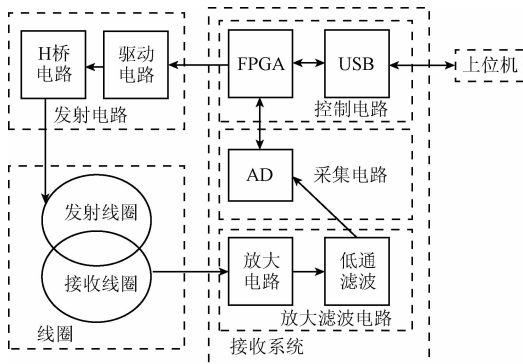


图1 近地表时间域电磁探测系统

Fig. 1 Block diagram of the subsurface TDEM system

发射电路主要由驱动电路和H桥电路^[21]两个部分构成。驱动电路响应FPGA的控制信号,交替地控制H桥中开关管的导通与关闭,从而控制发射线圈与电源回路的通断,辐射出一次脉冲磁场。

为了增强近地表小目标的响应而弱化大地的响应,近地表小目标探测系统一般线圈尺寸较小而匝数较多。采取了如图2所示的线圈配置方式,将发射线圈与接收线圈偏心放置,此时接收线圈靠近发射线圈的部分接收与发射线圈同向的一次场,而远离发射线圈的部分接收反向的一次场,通过合理地选取偏心距,使接收线圈中接收到的一次场几乎为0。此种线圈配置方式几乎没有减小收发线圈与目标的耦合度,却大大减小了收发线圈之间的耦合,从而避免了过冲电流产生的一次场对二次场的干扰,增加了测量精度,提早了观测时间;而且大大减小了一次场关断期间接收线圈中的瞬态响应,避免了接收机的过冲,因此可以进行全时段观测。收发线圈偏心放置和重心放置时接收实测波形如图3所示,可以看出,偏心放置大大减小了接收线圈的瞬态响应幅值(图中重心放置时,接收线圈瞬态响应幅值已经超过AD的采集量程5V),同时减小了发射电流过冲引起的感应电压。系统集成时,线圈应远离电路放置,以避免电路产生的感应场对目标的二次场造成干扰。

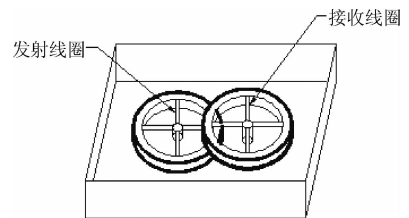


图2 线圈结构示意图

Fig. 2 Sensor's structure

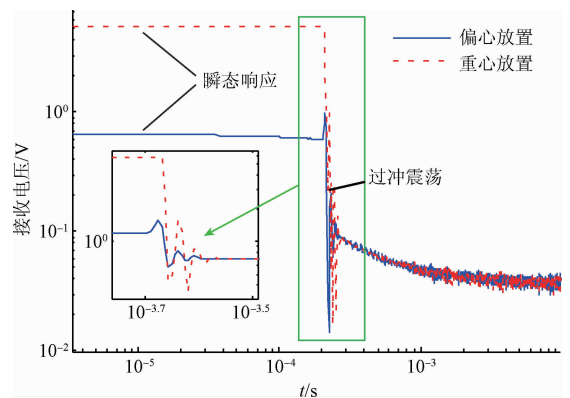


图3 接收波形

Fig. 3 Receiver output waveform

接收系统由放大滤波电路^[22]、采集电路和控制电路组成。将接收线圈收到的感应电压经放大滤波后转换成数字信号到上位机进行实时地显示与存储。

2.2 仪器系统的野外测试

为了验证设备的工作性能,在北京昌平的某农场做了相应的实验。图4所示为测试系统,测试了间隔为2 m的4条10 m测线,表1所示为目标的特征与实际位置信息。选取一次场关断后 6×10^{-4} s的二次场响应值绘制成图,图5所示为测区的时域响应。



图4 时间域电磁系统

Fig. 4 A view of the TDEM system

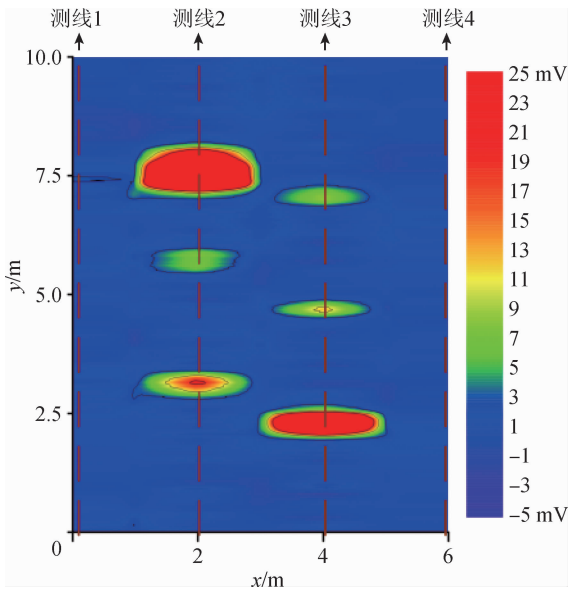


图5 测区的时域响应

Fig. 5 Data acquired at the test site

从图5中可以看出,研制的便携式时间域电磁系统可以很好地区分存在于近地表的6个金属异常并确定出各个异常的水平位置,但是异常目标的特性和目标深度、

朝向等信息则很难从图中得出。而且若观测区域中存在剧烈的局部地形起伏,则可能引起测试系统和地面之间相对位置的变化,从而引入了背景噪声,严重时甚至会形成虚假异常,如图5中(0 m,7.5 m)位置所示。因此在粗略的大面积测区观测之后,为了进一步探究引起异常的目标特征并排除虚假异常,还需要对存在异常的局部区域进行更为详尽的观测与目标反演。

由于地面起伏而引入的背景噪声是影响时间域电磁系统野外测试的最主要噪声源,本系统采用空心轮胎来减弱颠簸,减小地面起伏的影响。为了更进一步地减弱背景噪声,提升观测精度,下一步着手对时间域电磁系统进行以下方面的改进。增加设备的轮径并加入缓震系统,以减弱设备与大地之间的相对位移;增加GPS导航系统和惯性导航系统,以获取系统的位置和姿态等信息,从而对时间域电磁系统进行姿态误差校正。

表1 测试目标的特征与位置

Table 1 characteristics and position of the target

目标号	目标照片	目标大小/cm	X 坐标/m	Y 坐标/m
1		10 × 6	2	3
2		16 × 3	2	6
3		20 × 10	2	7.5
4		35 × 8	4	2.5
5		8 × 5	4	4.5
6		21 × 11	4	7

3 目标识别方法

3.1 目标等效模型

在假设目标被一次场均匀照射时,时间域电磁法中均匀导体球的二次场响应可以解析地等效为一个磁偶极子产生的场^[9]。这个磁偶极子位置在球的中心,方向和一次场平行,大小随时间衰减,如图6所示。

$$B_s(r, t) = B(r) \cdot L(t) \tag{1}$$

$$B(r) =$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \left(3 \left[m \cdot (r - R) \right] \frac{(r - R)}{|(r - R)|^5} - \frac{m}{|(r - R)|^3} \right) \tag{2}$$

$$m = B' \tag{3}$$

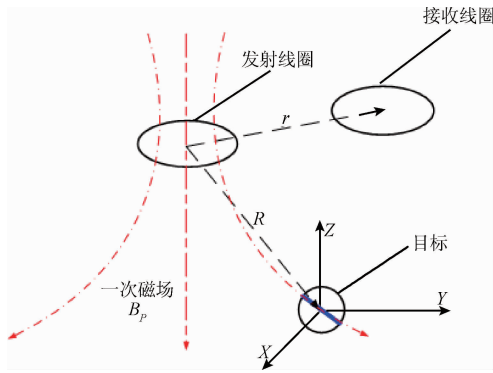


图6 均匀导体球的等效模型

Fig.6 Representation of a homogeneous metallic sphere as a single dipole

式(1)为等效磁偶极子产生的场,其可以分解为空间分布项 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ 和磁偶极子的时间衰减特性 $L(t)$ 两个独立的部分。 $\mathbf{B}(\mathbf{r})$ 是‘单位’磁偶极子(未对一次场值归一化)产生的场,与仪器的参数(线圈参数、发射电流大小等)和目标的位置有关,而与目标自身的特性无关。而时间衰减特征 $L(t)$ 只与目标自身的特性有关。式(3)中的 \mathbf{B}^p 为设备产生的一次磁场在目标中心处的值,可以根据仪器的具体参数用毕奥-萨伐尔定律计算。

因为球目标是一个对称体,一次场关断后其内部产生的涡流也是旋转对称的,所以可以只用一个磁偶极子等效。如果要对任意的三维目标进行识别,则需要多个维度上区分目标,将上述等效模型推广,使用3个重心正交的随时间衰减的磁偶极子来等效目标,每个磁偶极子代表绕着此轴旋转的感应涡流,通过反演3个磁偶极子的特性参数来区别不同的目标。

$$\mathbf{B}_s(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_1(\mathbf{r}) \cdot L_1(t) + \mathbf{B}_2(\mathbf{r}) \cdot L_2(t) + \mathbf{B}_3(\mathbf{r}) \cdot L_3(t) \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_i(\mathbf{r}) =$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \left(3[\mathbf{m}_i \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{R})] \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{R})}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}|^5} - \frac{\mathbf{m}_i}{|\mathbf{r} - \mathbf{R}|^3} \right) \quad (5)$$

$$\mathbf{m}_i = (\mathbf{w}' \cdot \mathbf{B}^p) \mathbf{w}' \quad (6)$$

式(4)代表3个正交磁偶极子产生的二次场,其中每个磁偶极子产生的场同样可以分解为独立的两部分,为单个磁偶极子的空间分布特征式(5)和单个磁偶极子的时间衰减特征 $L_i(t)$ 。式(6)为设备在目标中心处产生的一次场在目标局部坐标分量上(X' 、 Y' 、 Z')的投影,如图7所示。

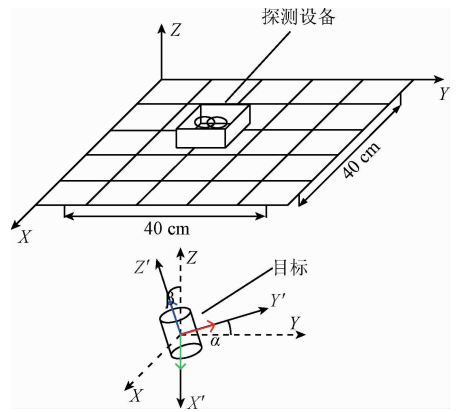


图7 试验场景示意图

Fig.7 Coordinate system for a buried target

目标材质、大小、形状等特性的不同决定其等效磁偶极子时间衰减特性的不同。因此,若能从时间域电磁系统对目标的观测结果中反演出等效磁偶极子的时间衰减特性值,并且不同特征的目标反演出的时间衰减特性差异也足够大,便可以根据等效磁偶极子的时间衰减特征来进行目标识别。利用一种较为简单的方式可以从不同的方位去观测目标,以获取3个正交磁偶极子响应的不同线性组合,然后可以解得单一磁偶极子的时间衰减特性,进而分析目标的特性。

$$\phi = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{B}_{\text{obs}}(t_n) - \mathbf{B}_s(x))\|^2 \quad (7)$$

$$\mathbf{x} = [X, Y, Z, \alpha, \beta, L_1(t_n), L_2(t_n), L_3(t_n)] \quad (8)$$

式(7)中 \mathbf{B}_{obs} 为不同位置处 t_n 时刻的二次场的观测值, \mathbf{B}_s 为正演模型在不同位置的场值, \mathbf{W}_d 为各个观测点的权值矩阵。若其中某些观测点的噪声较高,则可以适当降低这些观测点所占的权值,以减弱噪声的影响。式(8)中 \mathbf{x} 为正演模型中的目标参数(目标位置 X 、 Y 、 Z , 目标倾角 α 、 β 和3个等效磁偶极子 t_n 时刻的时间衰减特性值 $L_1(t_n)$ 、 $L_2(t_n)$ 、 $L_3(t_n)$)。在设定的权值下,通过高斯牛顿迭代使模型的正演值不断地去逼近观测值,当 ϕ 值小于收敛误差时,便认为此时的正演模型参数 \mathbf{x} 为反演出的 t_n 时刻磁偶极子特性参数。

3.2 目标参数综合

在迭代求解获得不同时刻等效磁偶极子值之后,便获得了磁偶极子的时间衰减特性 $L_i(t)$ 。Pasion L. R. 等人^[9]提出用式(9)来拟合磁偶极子的时间衰减特性,然后通过拟合出的参数 k_i 、 α_i 、 β_i 、 γ_i 来判断目标的特征。但拟合 α_i 项一般需要时间衰减特性 10^{-4} s 前的早期响应,这对一次场的关断时间要求较高;而拟合 γ_i 项一般需要时间衰减特性 10^{-2} s 后的晚期响应,这对设备的功率和接收机噪底有着较高的要求。针对这种弊端,本文

提出一种目标参数综合方法,直接将磁偶极子的时间衰减特性值进行综合,提取出目标的特性,而避免了参数拟合的过程。这种方法对观测系统的要求极低,即便没有早期和晚期的时间衰减特性,依然能综合出目标的参数。

$$L_i(t) = k_i(t + \alpha_i)^{-\beta_i} e^{-\gamma_i t} \quad (9)$$

由于等效磁偶极子的时间衰减特性是完全由目标自身的特性决定的,因此求解出3个轴上磁偶极子的时间衰减特性之后,便可以根据这些参数来估计目标的特性。在目标其他的参数保持不变时,目标的大小不同,其内部穿过的一次场磁通量不同,激励场刚刚关断时,目标内部感应出的涡流大小也就不同,对应了不同的等效磁偶极子值,因此用时间衰减特性的早期值来等效目标的大小,如式(10)所示;不同材料的目标,其内部涡流的衰减速率也就不同,对应了等效磁偶极子不同的时间衰减率,以最大等效磁偶极子的时间衰减率来表征目标的材质特性,如式(11)所示;而目标形状的不同则反映在目标的二次场响应在各个方向上的差异,对应了3个等效磁偶极子时间衰减特性之间的差异,目标对称性越好,则磁偶极子的时间衰减特性差异越小,因此依照式(12)来判定目标的对称性;而目标的轴比则反映在磁偶极子时间衰减特性之间的比值上,如式(13)所示。

$$\text{目标大小} = \sqrt{L_1(t_1)} + \sqrt{L_2(t_1)} + \sqrt{L_3(t_1)} \quad (10)$$

$$\text{目标衰减率} = |L_i(t_1)|_{i=1,2,3}^{\max} / L_i(t_n) \quad (11)$$

$$\text{目标对称性} = 100 \cdot \sum_{j=1}^n \frac{|L_2(t_j) - L_3(t_j)|^2}{L_2(t_j)^2} \quad (12)$$

$$\text{目标轴比} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{2 \cdot L_1(t_j)}{L_2(t_j) + L_3(t_j)} \quad (13)$$

式中: $L_i(t_1)$ 为3个磁偶极子的时间衰减特性 $L_i(t)$ 在 t_1 时刻的值, t_1 一般选取为观测时间的早期。 $L_i(t_n)$ 为时间衰减特性在 t_n 时刻的值, t_n 一般选取为观测时间的晚期。对同一系统而言, t_1 和 t_n 的时间选取应该一致。 $L_2(t)$ 和 $L_3(t)$ 一般对应时间衰减特性相似的两个磁偶极子。

值得说明的是,估计出的这些特性只是目标等效磁偶极子参数的综合,它们在很大程度上可以表征目标的一些特性,但这些参数并非和目标的某一个物理特性一一对应。例如反演出的目标大小参数主要和目标的大小有关,但同时也跟目标的厚度有关系。

4 实验验证

因为本文使用的时间域电磁系统为单发单收的单分量观测设备,因此需要移动设备,在不同的位置照射目标并获取目标的二次场,以获得3个正交磁偶极子响应的不同线性组合,进而求解单个磁偶极子的特征参数。

实验场景示意图如图7所示,将设备线圈放置在木

架子上,目标放在架子下,移动线圈在 5×5 的不同网格点对目标进行观测。网格点间距为10 cm。实验照片如图8所示。

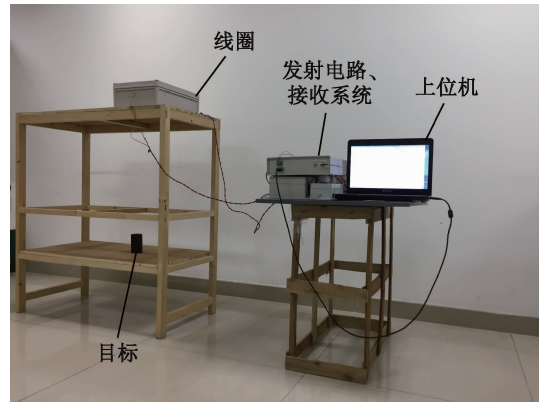


图8 试验场景
Fig. 8 A view of the test site

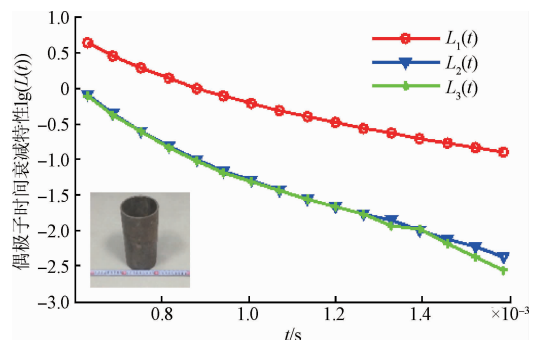
图7中 $X、Y、Z$ 为全局坐标系,而 $X'、Y'、Z'$ 是目标的局部坐标系,等效磁偶极子分别沿着 $X'、Y'、Z'$ 轴。 α 为 Y' 与 Y 轴之间的夹角, β 为 Z' 与 Z 轴之间的夹角。

以表3中的目标2(20 cm圆筒)为例,目标倾斜放置在架子下,真实位置信息和反演的的位置结果如表2所示。

表2 目标2的反演位置对比
Table 2 Estimated position of the target2

位置信息	真实值	反演值
X/cm	0	-0.38
Y/cm	0	-2.26
Z/cm	-33	-30.81
Y' 与 Y 轴夹角 $\alpha/(\circ)$	-45	-40.56
Z' 与 Z 轴夹角 $\beta/(\circ)$	45	42.52

将不同时刻反演出的磁偶极子值绘制成图,得到磁偶极子的时间衰减特性曲线,以此推断出目标的特性。表3中目标2、4、6的时间衰减特性如图9所示,图9中纵轴为等效磁偶极子的值,横轴为一次场关断之后的时间。



(a) 20 cm圆筒的时间衰减特性
(a) Time decay of the 20 cm rod

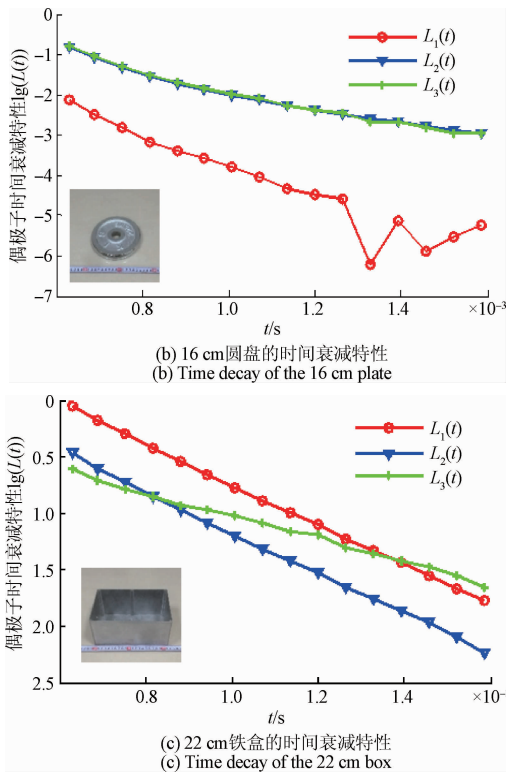


图9 目标的时间衰减特性
Fig.9 Time decay of the target

因为目标2(20 cm 圆筒)是一个旋转对称体,因此其正交于旋转对称轴 Z' 的两个等效磁偶极子是完全对称相等的,反演结果也可以印证这一点, $L_2(t)$ 与 $L_3(t)$ 基本

相等。而且由于目标为筒状,所以旋转对称轴上的等效磁偶极子值要大一些。但在时间的晚期($t > 1.3 \times 10^{-3}$ s),由于二次场信噪比的恶化导致反演的结果误差增大,如图9(a)所示。

目标4(16 cm 圆盘)的时间衰减特性如图9(b)所示,因为其形状为片状,所以垂直于旋转对称轴 Z' 的两个磁偶极子的值要比旋转对称轴上的磁偶极子的值大,而且同样具有对称的特性, $L_2(t)$ 与 $L_3(t)$ 基本相等。由于此目标材质为铸铁,电阻率($\rho = (57 \sim 114) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)相对于目标2的钢材质($\rho = (10 \sim 20) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)要大一些,因此其时间衰减率也要大一些(图9(a)中目标2圆圈标注线衰减不到2个量级,图9(b)中目标4十字(三角)标注线衰减大于2个量级)。在时间的晚期,因为信噪比的恶化,旋转对称轴上的磁偶极子同样存在较大的误差。

而非对称目标的3个磁偶极子则具有互不相同的时间衰减特性, $L_1(t)$ 、 $L_2(t)$ 与 $L_3(t)$ 互不相同。以目标6(22 cm 铁盒)为例,时间衰减特性如图9(c)所示。

表3所示为测试的不同目标信息和根据式(10)~(13)计算出的目标参数结果汇总(为了避免后面的结果分析中反演目标特征与目标实际物理特征的语言描述混淆,用 size 来代替式(10)中的目标大小,用 decay 来代替式(11)中的目标衰减率,用 symmetry 来代替式(12)中的目标对称性,用 ratio 来代替式(13)中的目标轴比)。其中 α 、 β 表示目标摆放的角度信息。实验中所有目标的 t_1 选为 6×10^{-4} s, t_n 选为 10^{-3} s。

表3 目标信息及参数反演结果
Table 3 The parameters of the target and the estimated result

目标序号	目标照片	目标大小/cm	材料	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$	目标大小	目标衰减率	目标对称性	目标轴比
1. 圆筒		10 × 6	钢	0	0	1.424	2.39	0.410	3.30
				-90	-20	1.425	2.54	0.061	2.09
2. 圆筒		20 × 10	钢	0	0	3.833	2.15	1.681	4.93
				-45	-45	3.278	2.13	0.086	2.45
3. 圆筒		18 × 8	钢	0	0	2.479	2.31	1.946	3.88
				270	135	2.180	2.37	0.366	2.59
4. 圆片		2 × 16	铸铁	0	180	1.690	3.33	0.710	0.23
5. 圆片		0.4 × 11	铝	—	0	0.732	1.67	2.906	0.22
6. 长方盒子		22 × 12	钢	225	0	2.510	2.03	5.380	1.54

从表3可以看出 size 的结果基本上可以反映出目标的大小趋势,例如同一形状的桶状物体 1、2、3,目标尺寸越大其 size 结果越大;而 decay 则反映出目标的材料特性,其中目标5为铝($\rho = 2.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot (\text{m})$),所以 decay 的结果 1.67 比钢材质($\rho = (10 \sim 20) \times 10^{-8} \Omega \cdot (\text{m})$)的结果 2 左右小,而哑铃片的材质为铸铁($\rho = (57 \sim 114) \times 10^{-8} \Omega \cdot (\text{m})$),因此其 decay 结果比较大,为 3.33; symmetry 一项则表征物体的旋转对称性,目标 1~4 均为旋转对称体,因此其 symmetry 一项比较小,目标 5 上不对称的通孔破坏了物体的旋转对称性,故其 symmetry 一项略有增加,而目标 6 为长方盒子,没有对称特性,因此其 symmetry 较大;ratio 一项则表示目标的形状,ratio > 1 为柱类物体,ratio < 1 为盘类物体。综合出的目标特性参数在三维坐标系中如图 10 所示,可以将不同特征的目标区分开来,图 10 中实心标注代表 ratio > 1 的柱类目标,空心标注代表 ratio < 1 的盘类目标。

从测试结果中可以看出,同一目标倾斜放置和竖直放置时其 ratio 和 symmetry 两项相差较大,本文认为是由于研制的时间域电磁系统的线圈尺寸较小(直径为 18 cm),因此目标不能被一次场均匀的照射,导致实际目标不能很好地被正交的三轴磁偶极子模型等效,从而产生了误差。

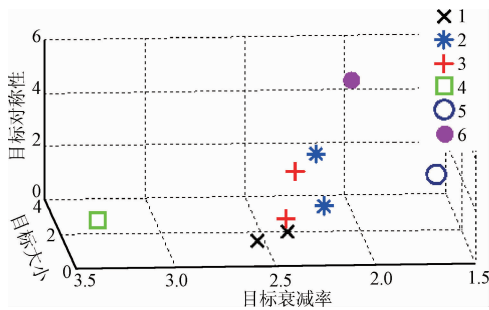


图 10 目标特征对比

Fig. 10 A view of the target features

从图 10 实验结果可以看出,此种方法可以很好地区别出不同的目标特征,为近地表小目标识别的应用奠定了基础。

5 结 论

时间域电磁系统被广泛地用于近地表小目标探测领域,具有探测效率高、设备简单、获取目标信息丰富的特点。本文针对近地表时间域电磁探测中目标特性反演这一难题,提出用 3 个正交磁偶极子产生的场来等效目标中感应涡流产生的二次场,直接通过反演出的时间衰减特性来综合出目标的参数,而避免了参数拟合过程或与目标库比对的过程,大大简化了目标识别的过程。

基于自主研发的时间域电磁探测系统来验证方法的有效性,实验表明,基于磁偶极子时间衰减特性综合出的目标大小、材料和形状等参数均可以有效地对目标进行区分,为今后近地表小目标特性识别的应用奠定了基础。

参考文献

- [1] NABIGHIAN M, PROJECTEDITOR, CORBETT J. Electromagnetic methods in applied geophysics : v. 1. : Theory [M]. Littleton SEG, 1988.
- [2] BRAY M P, LINK C A. Learning machine identification of ferromagnetic UXO using magnetometry [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(2) : 835-844.
- [3] 刘欢,董浩斌,葛健,等. 基于 Overhauser 效应的磁场梯度探测器[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3) : 592-600.
LIU H, DONG H B, GE J, et al. Magnetic field gradient detector based on the nuclear Overhauser effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3) : 592-600.
- [4] ROBLEDO L, CARRASCO M, MERY D. A survey of landmine detection technology [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(9) : 2399-2410.
- [5] SCHREIBER E, PEICHL M, HEINZEL A, et al. Challenges for operational use of ground-based high-resolution SAR for landmines and UXO detection [C]. 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2016: 1-4.
- [6] 张涛,赵弘,王维斌,等. 基于响应面法的瞬变电磁法聚焦线圈优化设计 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(7) : 28-32.
ZHANG T, ZHAO H, WANG W B, et al. Response surface methodology based transient electromagnetic method focusing coil optimum design [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7) : 28-32.
- [7] GODIO A, RANIERI G. Near surface features by TDEM imaging [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008: 190-193.
- [8] HOEKSTRA P. Time domain electromagnetic metal detectors [C]. Proceedings of UXO Forum, 1996: 26-28.
- [9] PASION L R, OLDENBURG D W. A discrimination algorithm for UXO using time domain electromagnetics [J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2001, 6(2) : 91-102.
- [10] BARROW B, BELL T H, MILLER J. Characterization studies of the electromagnetic induction response of compact metallic objects for improved unexploded ordnance/clutter discrimination [C]. Symposium on the

- Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 2000; 819-828.
- [11] SNYDER D D, PROUTY M, GEORGE D C, et al. UXO discrimination at Camp San Luis Obispo with the Metalmapper [C]. 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 2010; 1067.
- [12] FERNÁNDEZ J P, BARROWES B E, GRZEGORCZYK T M, et al. A man-portable vector sensor for identification of unexploded ordnance[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(10): 2542-2555.
- [13] 闫岩, 孙彩堂, 周逢道, 等. BP神经网络曲线识别技术及在探雷上的应用[J]. 中国测试, 2016, 42(3): 90-93.
YAN Y, SUN C, ZHOU F, et al. Curve recognition technology based on BP neural network and its application in landmine detection[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(3): 90-93, 134.
- [14] BARROWES B E, O'NEILL K, GRZEGORCZYK T M, et al. Broadband analytical magnetoquasistatic electromagnetic induction solution for a conducting and permeable spheroid [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2479-2489.
- [15] GRZEGORCZYK T M, ZHANG B, KONG J A, et al. Electromagnetic induction from highly permeable and conductive ellipsoids under arbitrary excitation: application to the detection of unexploded ordnances[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 1164-1176.
- [16] GRIMM R E. Time domain measurements and modeling of UXO[C]. UXO Forum, 2001.
- [17] SHUBITIDZE F, O'NEILL K, BARROWES B E, et al. Application of the normalized surface magnetic charge model to UXO discrimination in cases with overlapping signals [J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 61(3): 292-303.
- [18] SHUBITIDZE F, FERNÁNDEZ J P, SHAMATAVA I, et al. Application of the normalized surface magnetic source model to a blind unexploded ordnance discrimination test[J]. ACES Journal, 2010, 25(1): 89-98.
- [19] GRZEGORCZYK T M, FERNÁNDEZ J P, SHUBITIDZE F, et al. Subsurface electromagnetic induction imaging for unexploded ordnance detection [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 79(3): 38-45.
- [20] 武欣, 薛国强, 陈卫营, 等. 瞬变电磁探测系统(CASTEM)试验对比-安徽颖上大王庄铁矿[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4448-4456.
WU X, XUE G, CHEN W, et al. Contrast test of the transient electromagnetic system (CASTEM) at the Dawangzhuang iron mine in Anhui province[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4448-4456.
- [21] 付国红, 李广, 黄良沛, 等. 水下金属管线探测仪电磁信号发送机设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 584-590.
FU G, LI G, HUANG L P, et al. Design of signal transmitter for underwater metal pipe detector [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2015, 29(4): 584-590.
- [22] 柯丽, 刘晶, 杜强. 基于磁感应的水质电导率检测系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 70-76.
KE L, LIU J, DU Q. Study on water-quality conductivity measuring system based on magnetic induction tomography [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(2): 70-76.

作者简介



李雅德, 2014年于电子科技大学获得学士学位, 现为中国科学院电子学研究所硕士研究生, 主要研究方向为时间域电磁系统研制。

E-mail: 15928961334@163.com

Li Yade received his B. Sc. degree in 2014 from University of Electronic Science and Technology of China. Currently, he is a graduate student in Institute of Electronics, Chinese Academy of Science. His main research interest is time domain Electromagnetic (TDEM) instrument.



张晓娟, 2000年于中国科学院电子学研究所获得博士学位, 现为中国科学院电子学研究所研究员, 主要研究方向为地球物理电法与磁法探测技术。

E-mail: xjzhang@mail.ie.ac.cn

Zhang Xiaojuan received her Ph. D. degree in 2000 from Institute of Electronics, Chinese Academy of Science. Currently, she is a research fellow in Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, and her main research interest is geophysical exploration.