

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206043

# 基于一发多收线圈阵列的频域 电磁法未爆弹探测技术\*

陆子渊 何勇 卞雷祥 姬晓婷 胡杰 徐展 戎晓力

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

**摘要:**为了实现未爆弹目标的高效探测及定位,开发了一种小回线激励-阵列式线圈接收的主动电磁探测系统。采用偏心结构的收发线圈配置,实现了一次场的对消。通过接收线圈阵列排布,有效地提高了系统探测效率。提出了一种基于阵列线圈响应差分比较的未爆弹目标水平位置定位方法,并实验验证了可行性。研究表明,探测系统对于典型环状金属柱体的探测深度达到1 m,定位方法的计算值与真值误差在3.76 cm,实现了对未爆弹目标的准确探测和定位。

**关键词:**电磁感应;接收线圈阵列;偏心结构;未爆弹

**中图分类号:** TH763 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.6

## Frequency domain electromagnetic method based on the configuration of single transmitting and array receiving coils for unexploded ordnance detection

Lu Ziyuan He Yong Bian Leixiang Ji Xiaoting Hu Jie Xu Zhan Rong Xiaoli

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to realize the effective detection and localization of the unexploded ordnance, an electromagnetic detection system with small transmitting coil and array receiving coils has been developed. The primary field interference is removed by using the eccentric configuration between the transmitting coil and array receiving coils. Because of the array receiving coils, the detection efficiency of the system is effectively improved. The horizontal location algorithm based on differential comparison of the response of array receiving coils is proposed, and the feasibility is verified by experiments. The research results show that the detection depth of the detection system for the typical annular metal cylinder reaches 1 m, and the location error between the calculated value and the actual value is 3.76 cm. The system and method are able to realize the accurate detection and location of the unexploded ordnance.

**Keywords:** electromagnetic induction; array receiving coils; eccentric configuration; unexploded ordnance

## 0 引言

未爆弹主要是指在战争或军事演练活动结束后仍遗留在各地的未爆炸或已弃置的炸弹等武器<sup>[1]</sup>。这些爆炸物多数被埋于地下且种类繁多、分布情况复杂、危险性高,多年后仍然存在着爆炸的风险<sup>[2-3]</sup>。

电磁法作为近地表探查和定位的主要探测方法,在未爆弹勘探领域具有重要的地位以及广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。电磁法分为瞬变电磁法和频率域电磁法,相比于瞬变电磁法,频率域电磁法具有更小探测盲区,对浅层目标有更好的分辨率,并且可以通过改变发射频率来实现

不同深度的探测<sup>[5]</sup>。Geophex公司设计的GEM2<sup>[6-8]</sup>为收发分置的扁担结构,采用了补偿线圈分离出一次场和二次场,可以探测到地下9 m处直径0.5 m的不锈钢管道;为了更小的几何尺寸,实现对小型目标的探测,在GEM2的基础上设计的GEM3<sup>[9-10]</sup>采用同心圆结构,一对发射线圈产生相位相反的一次场,使得同心圆中心的接收线圈处一次场被对消,实测可以探测到0.4 m深、直径8 cm的金属圆盘。

而相较于单接收线圈设计,采用多个接收线圈往往能在单位时间内扫过更多面积,拥有更高的空间探测效率。Geophex公司研制的GEM-5<sup>[11-12]</sup>由一个矩形发射线圈与7对同轴差分结构的阵列式接收线圈单元组成,同

收稿日期: 2022-11-24 Received Date: 2022-11-24

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61973165)项目资助

轴差分的方式实现了一次场对消,对环境中的电磁干扰等有较好的抑制效果,并且多接收线圈阵列实现了较高的空间探测效率。但同轴差分结构导致整个装置的体积、重量较大。在国内,吉林大学周逢道等<sup>[13-14]</sup>采用单个发射线圈与 5 个 8 字形接收线圈构成阵列式浅地表探测天线,仿真并验证了 8 字线圈对金属异常体的响应,结果表明,阵列式结构提高了系统探测效率。吉林大学的林君等<sup>[15]</sup>和皮帅<sup>[16]</sup>提出了偏心自补偿的收发线圈结构,在单个接收线圈内实现了一次场的抵消,相比于其他一次场补偿结构,偏心结构不会损失发射磁矩<sup>[17]</sup>,并且对线圈精度要求较低,且方便结构调整。

本文研究了基于一发多收线圈阵列的未爆弹目标探测技术,将阵列式接收线圈与偏心结构融合,开发了未爆弹目标探测系统。提出基于多个接收线圈地下目标的精确定位方法。最后,使用该系统进行了目标探测实验,对目标定位方法进行验证。

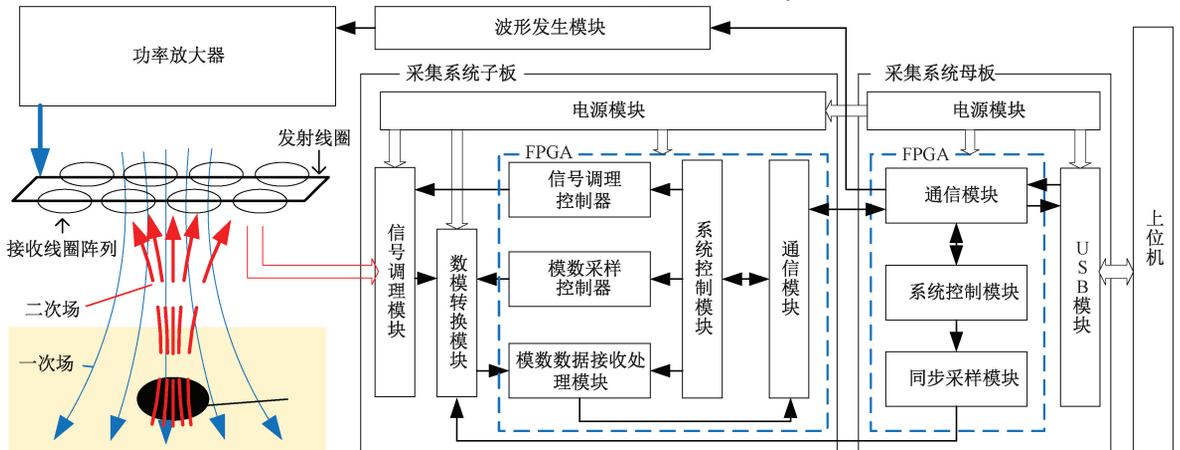


图 1 频率域电磁法探测基本原理及组成

Fig. 1 Principle and composition of frequency domain electromagnetic detection method

基于 FPGA 核心设计的多通道信号采集器包含 1 块母板和 4 块子板,母板负责提供同步信号、与 PC 端通信、给功放输入激励信号等功能。子板集成有 4 片 24 位,采样频率最高为 250 kHz 的模数转换器,同时对 4 路接收线圈的感应电压进行采集。子板与母板通过 SPI 总线进行数据传输,整个系统集成 4 块子板共 16 路信号采集。

由于目标产生的二次场强度随着距离按照三次方关系衰减,传感线圈能采集到的二次场极其微弱,从而其感应电压也很微弱。即使通过偏心结构将一次场对消,在实际实验中二次场信号仍会受到残余一次场、环境噪声及机械振动噪声影响。因此,在 FPGA 内部设计了锁相正交解调的方法,用于微弱二次场信号检测。在频率域电磁法中,接收线圈输出信号由有用信号以及噪声组成,如下式:

## 1 未爆弹探测原理

### 1.1 频率域电磁法探测原理

频率域电磁法探测基本原理及组成如图 1 所示,一发多收线圈阵列由小回线矩形发射线圈和 8 个圆形线圈构成。在发射线圈中通入交变电流  $V_p \sin(\omega t)$  ( $V_p$  为发射线圈中电流的幅值),产生交变激励磁场,称之为一次场,未爆弹中的金属部件在激励磁场作用下,由于涡流效应,目标内部产生感应涡流,返回回波信号,称之为二次场,在接收线圈中体现为目标的有用信号  $V_s \sin(\omega t + \varphi)$ <sup>[18]</sup> ( $V_s$  为线圈接收的有用信号的幅值)。接收线圈除了接收目标返回的二次场,还收到发射线圈的一次场信号。因此,设计了接收线圈横跨在发射线圈两侧的偏心结构,利用发射线圈内外两侧磁场强度方向相反的特性实现一次场抵消。

$$V(t) = V_s \sin(\omega t + \varphi) + N(t) \quad (1)$$

其中,  $V(t)$  为接收线圈输出的信号,  $N(t)$  为噪声。正交锁相解调原理如图 2 所示,其核心是两路乘法器以及低通滤波器。

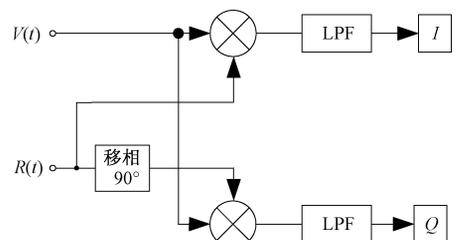


图 2 正交锁相解调原理

Fig. 2 Principle of orthogonal phase lock-in demodulation

与有用信号同频的参考信号  $R(t)$  为:

$$R(t) = V_r \sin(\omega t) \quad (2)$$

其中,  $V_r$  为参考信号的幅值, 将参考信号移相  $90^\circ$ , 则可以得到另一路正交参考信号。

待测信号分别和两路参考信号进入乘法器进行混频, 将同相参考信号与正交参考信号分别与接收线圈输出信号相乘, 并经低通滤波器滤除高频成分得到待测信号的同相分量 (In-phase, I), 也称为实分量。

$$I = \frac{V_s V_r}{2} \cos(\varphi) \quad (3)$$

与正交分量 (quadrature, Q), 也称为虚分量<sup>[19]</sup>:

$$Q = \frac{V_s V_r}{2} \sin(\varphi) \quad (4)$$

数据处理时, 将来自接收线圈的 I、Q 分量关于一次场进行归一化, 得到以百万分之一为无量纲单位的归一化 I、Q 响应  $I_n, Q_n$ , 如下式所定义:

$$I_n = 10^6 \times \frac{I}{I_p}, Q_n = 10^6 \times \frac{Q}{Q_p} \quad (5)$$

其中,  $I_p, Q_p$  表示监测到的发射线圈中电流的实虚分量, 即一次场值<sup>[8]</sup>。

### 1.2 阵列线圈一次场抵消设计

对于频率域电磁法来说, 接收线圈接收磁场主要包含一次磁场和二次磁场, 两部分磁场存在几个数量级的差异, 如果不加处理, 过高的一次场信号会淹没二次场信号, 影响测量结果。因此采用偏心结构来减弱收发线圈之间的耦合。

发射线圈设置为矩形 3 匝线圈, 尺寸为  $1 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ , 线圈电流 5 A。使用有限元软件仿真了矩形发射线圈平面  $z$  方向上的磁场强度分布, 如图 3 所示。可以看出发射线圈内外的磁场强度方向相反, 接收线圈横跨在发射线圈内外具有抵消一次场的可行性。由于收发线圈结构具有中心对称性, 以矩形线圈的中点为原点, 平行于长边为  $x$  轴, 平行于短边为  $y$  轴建立坐标系。配置两组接收线圈, 对一次场抵消效果进行仿真, 简化了接收线圈的匝数, 设置接收线圈的直径为 20 cm, 固定其中心点的  $x$  坐标分别为 12、36 cm。两组接收线圈的位置沿平行于  $y$  轴方向不断行进, 线圈中心点的纵坐标自  $-20 \sim 20 \text{ cm}$  变化。

收线圈内部的一次场磁通量随着线圈圆心  $y$  轴坐标变化如图 4 所示。由图中可以看出, 存在一个位置可以使接收线圈内部磁通为 0, 即可以通过调整接收线圈在  $y$  轴的安装位置从而实现一次场自抵消。由于短轴的影响, 矩形发射线圈 4 个角位置的一次场较大, 因此内外两组线圈内部磁通量过零点的位置不一致, 外侧线圈的过零点会比内侧线圈的过零点稍远。

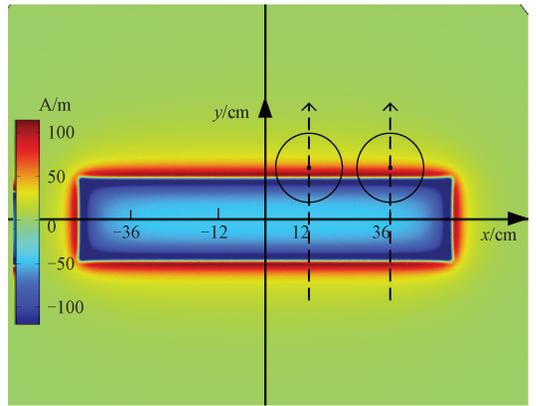


图 3 矩形发射线圈  $z$  方向磁场强度分布

Fig. 3 Distribution of magnetic field intensity in  $z$  direction of rectangular transmitting coil

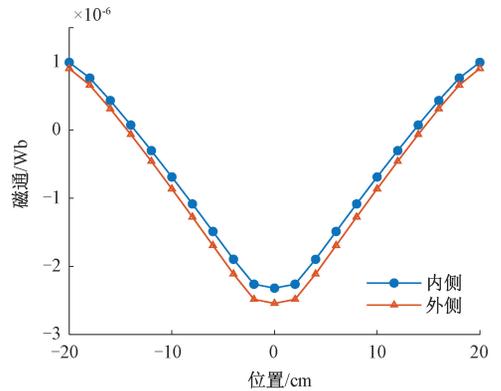


图 4 磁通量随  $y$  坐标变化

Fig. 4 Magnetic flux varies with  $y$ -coordinate

### 1.3 目标水平位置定位方法

由于接收线圈采用  $4 \times 2$  的阵列排布, 以发射线圈中心为原点, 平行于其长边为  $x$  轴, 平行于其短边为  $y$  轴建立坐标系, 并对每个接收线圈进行编号, 相邻接收线圈圆心距为 24 cm, 如图 5 所示。对于同一目标不同位置接收线圈的响应不同, 通过不同线圈之间的响应对比可以得到目标的大致位置。为了得到更加精细的目标位置, 提出了基于多线圈响应差分比较的目标水平位置确定方法, 如下式所述:

$$R_x = \frac{S_{41} + S_{32} + S_{85} + S_{76}}{\sum S_i} \quad (6)$$

$$R_y = \frac{S_{51} + S_{62} + S_{73} + S_{84}}{\sum S_i} \quad (7)$$

$$x = f_x(R_x) \quad (8)$$

$$y = f_y(R_y) \quad (9)$$

其中, 接收线圈的输出分别为  $S_1, S_2, \dots, S_8, S_{ij} = S_i -$

$S_j(i \neq j)$  为阵列中两组接收线圈的输出差值。 $R_x, R_y$  为目标处于某一位置时,各个线圈响应值的计算结果。 $f_x, f_y$  为定位函数,表征了响应值的计算结果与目标坐标之间的关系。

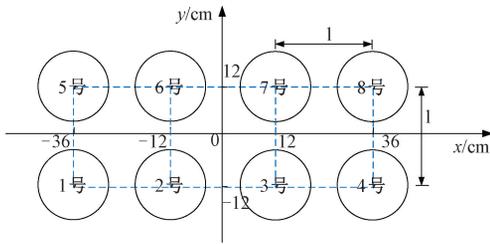


图 5 阵列接收线圈排布

Fig. 5 Arrangement of array receiving coils

定位过程描述如下:在已知测点下放置目标并测得各个线圈对目标的响应,根据式(6)、(7),得到该测点下目标的响应值  $R_x, R_y$ 。预先测定多个测点,拟合各个测点的  $x$  坐标与  $R_x, y$  坐标与  $R_y$ ,得到定位函数  $f_x, f_y$ 。那么,对于未知坐标的目标,则可以将接收线圈测得的响应值计算结果  $R_x, R_y$  带回前述拟合定位函数,求得目标的坐标  $x, y$ 。

## 2 未爆弹探测系统构建

根据图 1 的原理和组成框图,搭建了未爆弹探测实验系统,如图 6 所示。其中,功率放大器指标为:带宽为 0~100 kHz,最大输出电压为  $130V_{pp} (\pm 65 V)$ 、最大输出电流为  $10A_{pp} (\pm 5 A)$ ,并设计有 0.1 V/A 以及 0.05 V/V 的输出电流与电压检测端口用于检测发射电流。

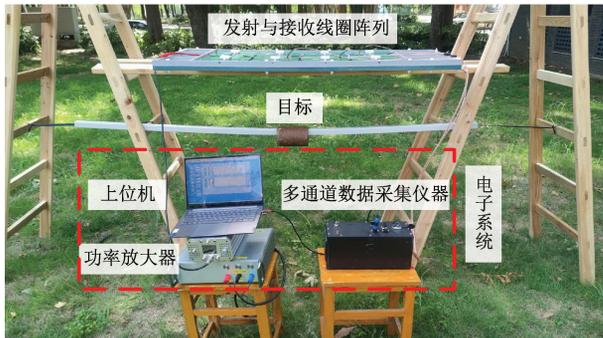


图 6 未爆弹探测系统

Fig. 6 Unexploded ordnance detection system

系统的发射线圈骨架由 PVC 板材一体成型,预先设计有走线槽、接收线圈夹具等结构。相较于型材拼接,一体化加工形成的线圈骨架强度高,整体性好,并且装配难度较低。发射线圈长为 1 m,宽为 0.2 m,匝数为 3 匝,使用  $4 \text{ mm}^2$  导线。将导线嵌入预留的走线槽中,并以环氧

树脂封灌,可以最大程度地减少线圈晃动对探测造成的影响。使用双面 PCB 打印工艺制作接收线圈,相比于漆包线绕制的线圈,PCB 线圈可以实现较小的体积以及更好的一致性。接收线圈共 30 匝,其中正反面各有 15 匝,线圈线宽 0.5 mm,每匝间距 0.25 mm,最外层线圈直径 220 mm。

由于频率域电磁法主要通过探测金属部分来实现未爆弹目标的探测,例如外壳、引信等。因此对于大部分含有金属组成的弹药,例如导弹、炮弹及手榴弹等武器都可以探测。本文主要针对靶场测试中某典型型号弹药,该型号弹药与靶场中大部分武器弹药尺寸较为接近,具有较好的代表性。因此采用长 15 cm,直径 9 cm,壁厚 1 cm 的空心圆柱体模拟该型号未爆弹目标进行实验,其材质为 45#钢。

在探测实验前,需要调整收发线圈之间的相对位置实现一次场对消。将收发线圈架高到离地面 2 m,在没有目标的情况下,沿垂直于发射线圈长边的方向微调接收线圈的位置,使接收线圈内输出电压  $V_{out} \approx 0$ ,此时接收线圈内部的一次场被抵消。

## 3 结果与分析

### 3.1 探测系统性能测试

发射线圈在 0~300 kHz 范围内的阻抗曲线如图 7 所示。

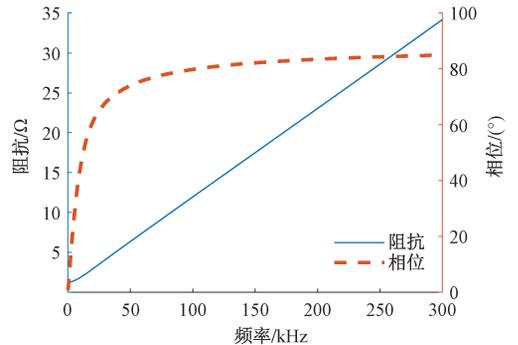


图 7 不同频率下的发射线圈阻抗

Fig. 7 Impedance of the transmitting coil at different frequencies

发射线圈的固有频率为 4.8 MHz,线圈阻抗在固有谐振频率前的频段随频率的增加而增加。上位机控制任意波形发生模块产生正弦激励波形,经功率放大器放大后,驱动发射线圈。采用扫频测量方法,测得功率放大器在不同输出电流、0~300 kHz 频率下的驱动能力,如图 8 所示。结果表明,功率放大器在 0~100 kHz 的频率范围内具有较为平坦的电流输出特性,最大激励电流为 5 A,发射线圈面积为  $0.2 \text{ m}^2$ ,三匝,发射磁矩为  $3 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。

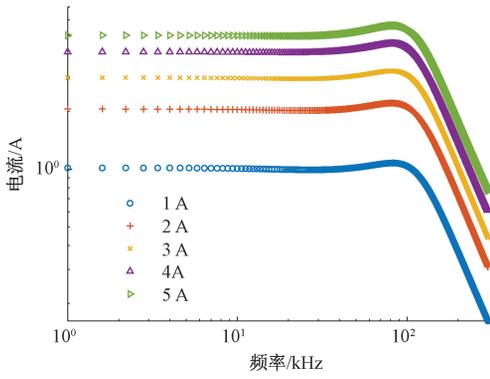
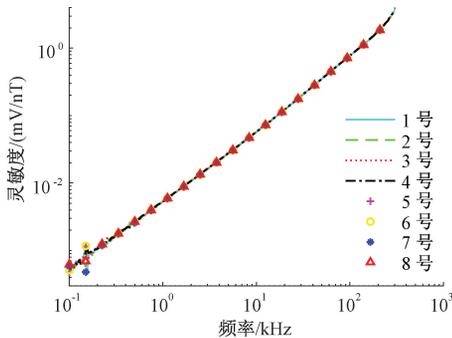


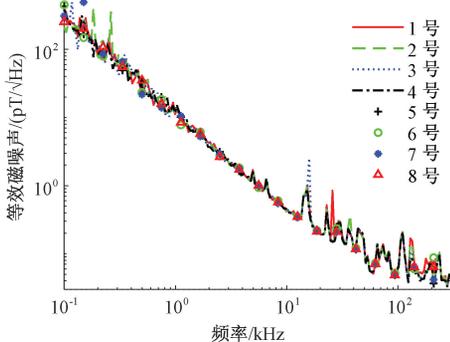
图8 功率放大器输出电流

Fig. 8 Output current of the power amplifier

8个接收线圈的灵敏度与等效磁场噪声曲线如图9所示。从图中可以看出,8个接收线圈的灵敏度曲线及等效磁噪声曲线基本重合,这说明使用PCB加工的接收线圈具有高度的一致性。在0~300 kHz的范围内,接收线圈的灵敏度随激励磁场频率呈线性变化。此外,接收线圈的等效磁噪声随着频率升高而降低,在5 kHz以后即可达到 $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下,因此,在实际探测中,可以适当选用较高的激励频率信号。



(a) 接收线圈的灵敏度  
(a) Sensitivity of the receiving coils



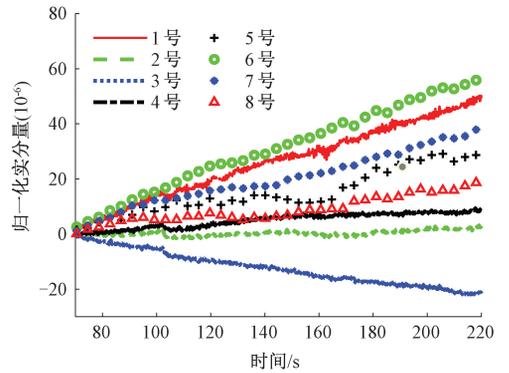
(b) 接收线圈的等效磁噪声  
(b) Equivalent magnetic noise of receiving coils

图9 接收线圈的性能

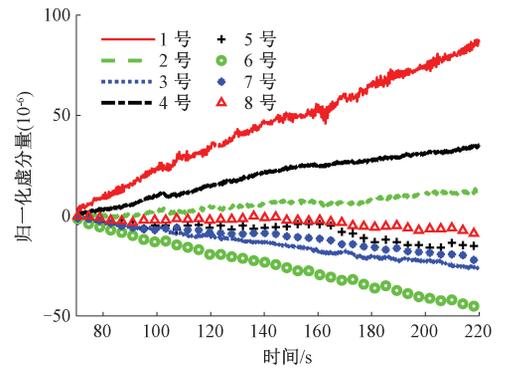
Fig. 9 The performance of receiving coils

### 3.2 零点漂移及校准

实际实验中,接收线圈的一次场对消效果受收发线圈之间的相对位置影响较大,仅靠机械调整难以将各个线圈内的一次场响应完全对消。因此,在没有目标时,对每个通道的偏置值在上位机软件中进行校零。如图10所示为经过校准后,接收线圈阵列在一段时间内的实分量与虚分量输出。可以看出,补偿校零后,各个接收线圈的输出在早期都在零点附近,存在漂移现象,偏置不断增大,这种信号漂移主要是电子设备参数和机械结构等受到环境温度变化或残余应力变化造成的<sup>[20]</sup>。注意到系统的零点漂移变化缓慢,采用截止频率为0.01 Hz高通滤波器去除零点漂移,实际输出效果如图11所示。也就是说,采用高通滤波可以较好地去除实验过程中的零点漂移。



(a) 归一化实分量  
(a) Normalized in-phase component



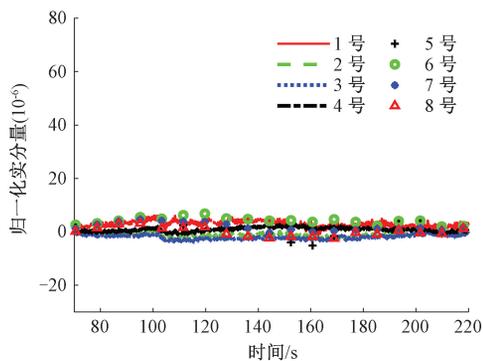
(b) 归一化虚分量  
(b) Normalized quadrature component

图10 没有目标时接收线圈的响应

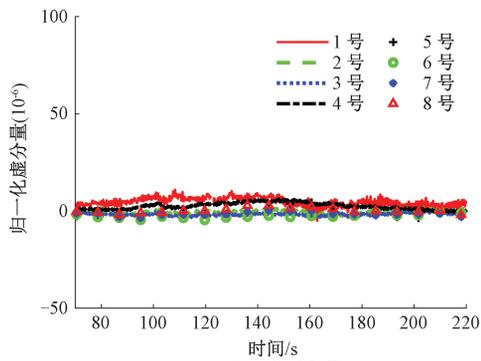
Fig. 10 Response of receiving coils without target

### 3.3 对不同深度目标的探测能力研究

测试目标处于同一坐标下不同深度时接收线圈的响应特性。将目标置于1号线圈正下方0.4~1.6 m不同深度,1~4号接收线圈实分量与虚分量变化特性如图12表示。此时,发射线圈驱动电流为5 A,频率为20 kHz。由图中可以发现,探测系统可以检测到1 m以上深处的目



(a) 归一化实分量  
(a) Normalized in-phase component



(b) 归一化虚分量  
(b) Normalized quadrature component

图 11 各组线圈滤波后实分量与虚分量

Fig. 11 Response of receiving coils after filtering

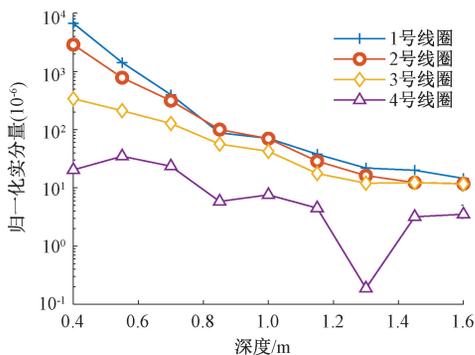
标。在实际实验中,系统对 1.3 m 的目标依旧有较明显的响应。经拟合,二次场响应随着探测深度的 6 次方衰减,对于深于 1.3 m 的目标,各个线圈的响应较低,还存在差异,此时受噪声影响较大,波动较为明显。其中,4 号线圈距离目标最远,响应波动最大,仍能反映一定的下降趋势。

### 3.4 对目标水平位置的定位方法验证

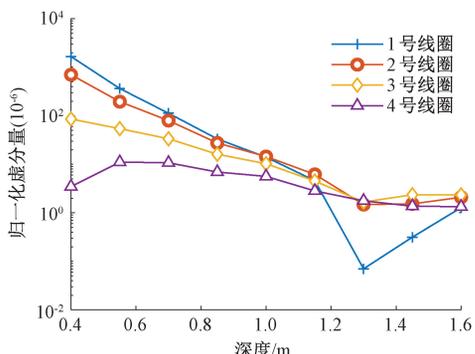
首先,在目标深度为 0.7 m 时,测试了目标处于不同位置时接收线圈的响应。参考图 5,将目标置于 5~8 号线圈下方,其横坐标  $x$  自 -48~48 cm 以 12 cm 为间隔改变,在每一个点下方,5~8 号 4 个线圈的实虚分量响应如图 13 所示。系统发射电流为 5 A,频率 20 kHz。

从图 13 中可以看出,当目标处于不同位置,各个线圈的响应有明显区别。目标位置变化过程中,5 号线圈的响应随坐标改变而下降,与之对比,8 号线圈的响应则在上升,6 号与 7 号线圈的响应则呈现先上升后下降的趋势,并且 6 号线圈达到最大值的位置较 7 号线圈靠前。基本上,线圈的响应达到最大值时,目标就位于该线圈下方。各个线圈的响应对比可以反映目标的大致位置。

使用目标水平位置定位方法来得到目标更加精确的



(a) 归一化实分量  
(a) Normalized in-phase component



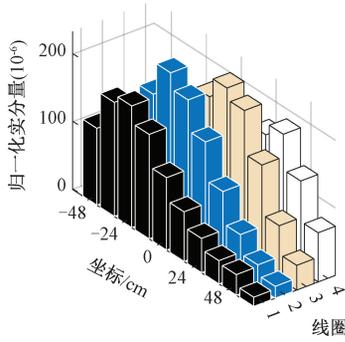
(b) 归一化虚分量  
(b) Normalized quadrature component

图 12 接收线圈对不同深度的目标的响应

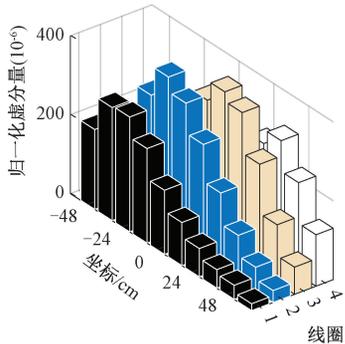
Fig. 12 Response of receiving coils to the ordnance at different depths

位置信息。通过预先测试一系列已知位置的目标响应,并代入式(6)和(7),计算得到不同位置的响应值,得到目标的坐标与其响应值的对应关系。如图 14 所示。可以看出坐标与响应值的对应关系并不是线性的,因此不能简单采用响应值乘以系数对目标的位置做推算,因此需要使用 MATLAB 拟合出定位函数  $f_x, f_y$ 。

为了验证算法可行性,设置了多个测点,测点真实位置分布如图 15 中的“+”号。通过上文得到的对应关系,将每个测点下目标的响应值代入,计算目标的位置,计算结果如图 15“Δ”形表示。可以看出,目标水平位置定位方法计算得到位置与真值差距较小,可以较好地定位目标。同时也发现,在测线的两端误差大于测线中间的误差、竖直方向的误差大于水平方向的误差。这可能是由于当目标位于接收线圈阵列的中心时,目标距离所有的接收线圈都较近,因此线圈的响应值也较高,误差较小,当目标位于线圈阵列的某一端时,目标距离另一端的接收线圈较远,线圈的响应值也较小,误差较大。此外,未爆弹目标探测系统的接收线圈为 4×2 阵列,计算竖直位置时仅 2 个线圈参与计算,这可能导致了竖直位置判断的误差较大。



(a) 归一化实分量  
(a) Normalized in-phase component



(b) 归一化虚分量  
(b) Normalized quadrature component

图 13 接收线圈对不同位置的目标的响应  
Fig. 13 Response of receiving coils to the ordnance at different positions

设各点坐标真值与计算值之间的误差为  $\Delta x, \Delta y$ , 则各点真实位置与计算位置之间的距离误差为:

$$\Delta L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (10)$$

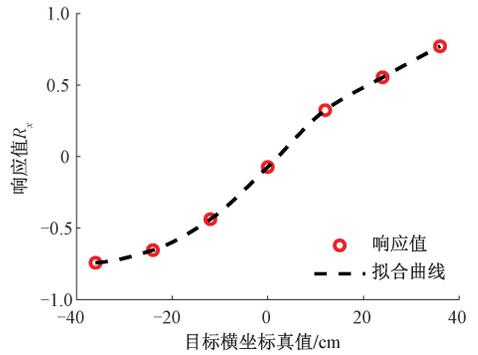
引入标准误差(均方根误差(RMSE))来表示定位误差的平均程度:

$$\delta_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta L^2}{N}} \quad (11)$$

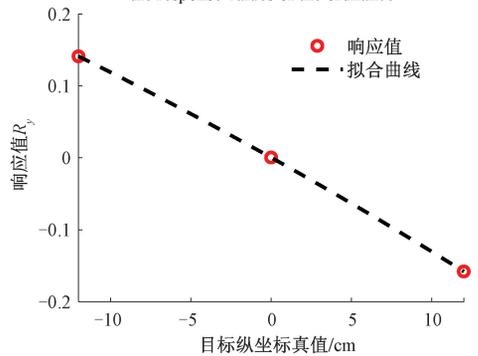
其中,  $N$  为测点个数。由此算得图 15 中对目标的定位标准误差为 3.76 cm。

### 4 结论

本文研究了一种基于一发多收线圈阵列的未爆弹探测技术, 偏心结构的阵列式接收线圈横跨发射线圈内外, 抵消了一次场的影响, 同时阵列接收线圈单位时间内扫过更多面积, 有效提升了区域作业的探测效率。研发了一发多收频率域电磁激励与检测系统样机, 工作带宽达到 100 kHz, 在发射磁矩  $3 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ , 磁场检测极限达到  $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 目标探测实验表明, 该系统可以探测到 1 m



(a) 目标横坐标与其响应值的对应关系  
(a) Correspondence between the horizontal coordinates and the response values of the ordnance



(b) 目标纵坐标与其响应值的对应关系  
(b) Correspondence between the vertical coordinates and the response values of the ordnance

图 14 目标坐标与其响应值的对应关系  
Fig. 14 Correspondence between the coordinates and the response values of the ordnance

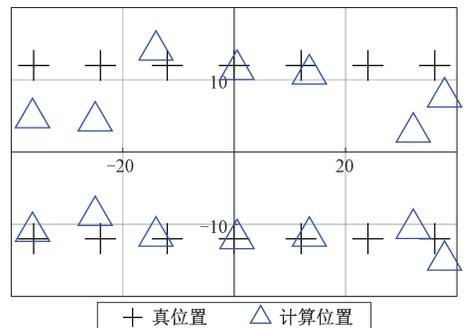


图 15 水平定位方法计算值与真值对比  
Fig. 15 Comparison between the calculated value and the actual value of the horizontal positioning method

以上深度的目标。提出了一种基于多接收线圈阵列的未爆弹目标水平定位方法, 对目标定位的标准误差达到 3.76 cm。

### 参考文献

[ 1 ] 范涛, 程建远, 王保利, 等. 瞬变电磁虚拟波场成像

- 方法及其对未爆炸探测的试验研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2326-2332.
- FAN T, CHENG J Y, WANG B L, et al. Imaging method of TEM pseudo wave-field and application of unexploded ordnance detection [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2326-2332.
- [ 2 ] WEICHMAN P B. Validation of advanced EM models for UXO discrimination [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51 ( 7 ): 3954-3967.
- [ 3 ] MATRICHE Y, FELIACHI M, ZAOUÏ A, et al. An EMI inverting problem for landmine characterization based on improved particle swarm optimization and finite element analysis [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2013, 49: 411-428.
- [ 4 ] 柳建新, 严发宝, 苏艳蕊, 等. 便携式近地表频率域电磁法仪器研究现状与发展趋势[J]. 地球物理学报, 2017, 60(11): 4352-4363.
- LIU J X, YAN F B, SU Y R, et al. Research status and development trend of the portable near-surface FDEM instrument[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(11): 4352-4363.
- [ 5 ] 张博. 基于谐振差分技术的城市地下金属管线电磁探测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- ZHANG B. Research on electromagnetic detection method of urban underground metal pipelines based on resonance difference technology [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [ 6 ] BONOMO N, OSELLA A, MARTINELLI P, et al. Location and characterization of the Sancti Spiritus Fort from geophysical investigations [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 83: 57-64.
- [ 7 ] QU X, LI Y D, FANG G Y, et al. A portable frequency domain electromagnetic system for shallow mental targets detection [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2017(53): 167-175.
- [ 8 ] 何晓萍. GEM-2 数据处理与反演方法研究及其在海冰厚度探测中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- HE X P. The study of GEM-2 data processing and inversion methods for sea-ice thickness detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [ 9 ] TURLAPATY A C, DU Q, YOUNAN N H. A partially supervised approach for detection and classification of buried radioactive metal targets using electromagnetic induction data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 108-121.
- [ 10 ] MULLER H, DOBENECK T V, HILGENFELDT C, et al. Mapping the magnetic susceptibility and electric conductivity of marine surficial sediments by benthic EM profiling [J]. Geophysics, 2012, 77(1): E43-E56.
- [ 11 ] MATRICHE Y, SAÏD M, FELIACHI M, et al. SV-training and kernel change detection algorithm for the abrupt modification in EMI data for buried metallic target localization and identification [J]. Society Journal (ACES Journal), 2015, 1(30): 132-139.
- [ 12 ] FRIEDEL M J, ASCH T H, ODEN C P. Hybrid analysis of multi-axis electromagnetic data for discrimination of munitions and explosives of concern [J]. Geophysical Journal International, 2012, 190: 960-980.
- [ 13 ] 周逢道, 王丹, 郭岭. 基于 8 字形接收线圈的浅地表电磁探测技术 [J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(9): 1-5.
- ZHOU F D, WANG D, GUO L. Shallow surface electromagnetic detection technology based on figure-8 receiving coil [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2021, 40(9): 1-5.
- [ 14 ] 周逢道, 郭群, 郭英杰. 阵列式浅地表电磁探测系统控制模式研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 200-207.
- ZHOU F D, GUO Q, GUO Y J. Research on control mode of array shallow surface electromagnetic detection system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 200-207.
- [ 15 ] 林君, 贾文枫, 皮帅, 等. 小尺寸 TEM 非共面偏心自补偿零耦合收发技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 150-159.
- LIN J, JIA W F, PI SH, et al. Research on non-coplanar eccentric self-compensation zero-coupling receiving-transmitting technology for small size TEM [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 150-159.
- [ 16 ] 皮帅. 基于偏心补偿的城市地下空间瞬变电磁探测系统研制 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- PI SH. Development of transient electromagnetic detection system for urban underground space based on eccentric compensation [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [ 17 ] FU Z, WANG H, WANG Y, et al. Elimination of mutual inductance effect for small-loop TEM devices [J]. Geophysics, 2019, 3(84): 143-154.
- [ 18 ] 张赫. 宽频带低频连续波电磁法仪器的研制 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- ZHANG H. Development of broadband low-frequency continuous-wave electromagnetic method instruments [D].

Changchun: Jilin University, 2012.

- [19] 蔡璨. 基于电磁法的未爆弹多通道同步探测系统研究[J]. 中国测试, 2020,46(12):47-53.
- CAI C. Research on multi-channel synchronous detection system of unexploded projectile based on electromagnetic method[J]. China Measurement & Test, 2020,46(12):47-53.
- [20] 李文杰. 用于频率域航空电磁数据的二维自动调平[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007(4):447-451.
- LI W J. An automatic 2-D data leveling technique for frequency domain airborne electromagnetic survey [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2007(4):447-451.

## 作者简介



**陆子渊**, 2019年于扬州大学获得学士学位, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为未爆弹探测技术。

E-mail: ziyuanlu@njust.edu.cn

**Lu Ziyuan** received his B. Sc. degree from Yangzhou University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate in Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes unexploded ordnance detection technology.



**卞雷祥**(通信作者), 2004年和2009年于重庆大学获得电子科学与技术学士学位和仪器科学与技术博士学位, 现为南京理工大学教授, 主要研究方向为敏感材料磁传感器、地下目标电磁探测与成像技术。

E-mail: lxbian@163.com

**Bian Leixiang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree of electronic science and technology and Ph. D. degree of instruments science and technology from Chongqing University in 2004 and 2009, respectively. He is currently a professor in the School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include sensitive materials, magnetic sensors, and electromagnetic detection/imaging of subsurface exploration.



**何勇**(通信作者), 1998年于南京理工大学获得博士学位, 现为南京理工大学教授, ZNDY国防重点学科实验室主任, 主要研究方向为新型弹药与防护技术等方面。

E-mail: yhe1964@mail.njust.edu.cn

**He Yong** (Corresponding author) received his Ph. D. from Nanjing University of Science and Technology in 1998. He is currently a professor of Nanjing University of Science & Technology, and he is the director of the Ministerial Key Laboratory of ZNDY. His main research interests include new ammunition and protection technology.