· 98 ·

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2206044

# 瞬变/谐变一体化的大地电磁收发线圈设计\*

吴文刚 下雷祥 何 勇 陆子渊 刘又嘉 胡 杰 徐 展 戎晓力

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘 要:采用瞬变电磁法和谐变电磁法仪器观测地下空间数据并进行融合处理,能够提高探测成像能力,然而现有的瞬变电磁 法和谐变电磁法仪器独立成套,必须配置多套仪器分次采集。设计了一种可满足瞬变/谐变两种模式使用的小型、大带宽、高灵 敏度大地电磁收发线圈,为便携、浅层高分辨的瞬变/谐变一体化电磁探测系统开发奠定基础。首先,建立了空心线圈传感器等 效电路模型,分析了线圈传感器的灵敏度和噪声特性,制作的传感器经过测试表明,在1125 Hz 处,灵敏度为23.12 mV/nT,等 效磁噪声9.27 pT/√Hz,传感器带宽1 Hz~100 kHz;然后,通过公式和有限元软件对传感线圈偏心放置时收发耦合进行了计 算,确定了收发线圈组合的最佳耦合位置,计算和仿真结果与实际位置分别相差0.21%和0.17%,有效对消了发射磁场(一次 场)。构建了时间域和频率域电磁法探测系统,测试表明,设计的瞬变/谐变一体化收发线圈能够满足时间域和频率域电磁法 两种探测模式使用。

# Design of magnetotelluric transmitter and receiver coils with the integration of transient and harmonic electromagnetic method

Wu Wengang Bian Leixiang He Yong Lu Ziyuan Liu Youjia Hu Jie Xu Zhan Rong Xiaoli

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

Abstract: The use of transient electromagnetic method and harmonious electromagnetic method instrument to observe the underground space data and perform fusion processing can improve the detection imaging ability, but most of the existing transient electromagnetic method and harmonious electromagnetic method instruments are independent sets and must be equipped with multiple sets to separate collection. A small size, large bandwidth and high sensitivity electromagnetism transceiver coil that can meet the use of both transient/harmonic modes is designed to lay the foundation for the development of portable, shallow and high resolution transient/harmonic integrated electromagnetic detection system. First, the equivalent circuit model of the air-core coil sensor is established, and the sensitivity is 23.12 mV/nT, the equivalent magnetic noise is 9.27 pT / $\sqrt{Hz}$  and the bandwidth is 1 Hz~100 kHz. Then, the formula and finite element analysis software are used to calculate the transceiver coupling relation when the sensor coils are placed eccentrically, and the optimal eccentric location of the combination of transceiver coil is determined, the calculation and simulation results differ from actual location by 0.21% and 0.17% respectively, which effectively eliminated the launch magnetic field (primary field). Finally, the time-domain and frequency-domain electromagnetic method systems are constructed, and the test results show that the designed transient/harmonic integrated transceiver coil can meet the needs of time-domain and frequency-domain electromagnetic method systems are constructed, and the test results show that the designed transient/harmonic integrated transceiver coil can meet the needs of time-domain and frequency-domain electromagnetic method; harmonic electromagnetic method; air-core coil sensor; broadband; weak coupling

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

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金(61973165)项目资助

# 0 引 言

用于地下空间探测的瞬变电磁法<sup>[1]</sup>和频率域电磁 法<sup>[2]</sup>仪器各有优势:瞬变电磁法仪器在时间域观测到的 二次场信号包含不同频率分量,反映的地层信息丰富,瞬 变电磁法接收和发射在时间上分开,一次场干扰小,并且 工作频带集中在 30 kHz 以下的低频段,穿透能力强、探 测深度大,但由于关断时间的影响,存在浅层盲区<sup>[34]</sup>;频 率域电磁法探测通过发射一个或多个频率组合的谐变电 磁场,发射的同时观测二次场信号,宽带分布的二次场幅 值相位反演地下空间介质信息;频率域电磁法具有较强 的抗干扰能力,浅层探测能力强,精度高<sup>[5]</sup>,但频率域电 磁法仪器需要复杂的一次场对消设计,其对消效果限制 了深层探测能力<sup>[6]</sup>。利用时间域电磁法和频率域电磁法 仪器联合观测,瞬变谐变数据融合处理能够提高浅层地 下空间的探测成像能力。但是现有的瞬变和谐变电磁法 仪器独立成套,功能分离,必须配置多套仪器多次观测。

瞬变电磁法经过多年的发展较为成熟,如直升机瞬 变电磁探测系统(HTEM),收发线圈同轴共面放置,并使 用直升机装载进行探测,具备探测效率高,成本低等优 点<sup>[7]</sup>,接收信号的响应范围达 140 dB<sup>[8]</sup>,但是发射磁矩 大,由于线圈电感的影响,导致早期信号失真。Xi 等<sup>[9]</sup> 设计的 opposing-coil TEM 系统采用反向补偿发射线圈、 接收线圈和发射线圈同轴非共面放置形式,通过反向补 偿线圈来削弱一次场干扰,具有高灵敏度和横向分辨率, 探测深度为 30~50 m,但反向补偿发射线圈降低了发射 磁矩。王杰等<sup>[10]</sup>研制的地面瞬变电磁探测系统 (GPTEM)采用中心回线装置形式,发射线圈为 300 m× 300 m 的方形线圈,接收线圈为 50 cm×50 cm 的矩形线 圈,发射电流 4 A,经实验验证,GPTEM 系统在油田区具 有良好的探测效果,但发射电流较小,晚期信号信噪 比低。

Geophex 公司研制的 GEM-2 系统<sup>[11]</sup> 是一种经典的 频率域电磁探测仪器,发射线圈、接收线圈和补偿线圈共 面放置,通过接收线圈信号和补偿线圈信号差分的形式 来降低一次场的影响,其工作频段为90~22 000 Hz,系统 灵敏度高,精度高,适用于近地表探测;Qu 等<sup>[12]</sup>设计的 CEM-2 便携式频率域探测系统,采用 GEM-2 的设计思 想,发射线圈、接收线圈和补偿线圈"扁担式"的放置方 式进行一次场补偿,对金属目标具有较好的探测效果。 任同阳等<sup>[13]</sup>研制了一种地空频率域电磁探测系统 (GAFEM),其收发分离,发射波形为 2n 伪随机序列,电 流大小在几十安培,无人平台装载空心线圈传感器接收 二次磁场信号,工作频段1 Hz~10 kHz<sup>[14]</sup>,实地勘测表明 GAFEM 系统具有1 km 深度的探测能力,适用于矿藏资 源勘探等领域。

瞬变谐变数据融合处理提高探测能力的研究,是一 种发展趋势<sup>[15-16]</sup>。但是,目前未见时间域和频率域两种 工作模式一体化的电磁法探测仪器系统技术的报道。通 过以上分析可知,满足时间域和频率域两种工作模式的 一体化电磁探测仪器系统设计主要存在以下难点:由于 接收线圈匝数与其灵敏度的相互制约,需要接收线圈传 感器在满足大带宽的同时具有较高的灵敏度;为了解决 时间域探测下信号动态范围大和频率域探测中二次磁场 信号容易被一次磁场淹没的问题,需要对收发线圈进行 消耦设计。

本文设计了一种瞬变/谐变一体化的小型化、大带 宽、高灵敏度大地电磁收发线圈,解决了瞬变磁场发射和 谐变磁场发射的一次场对消问题,可满足时间域电磁法 和频率域电磁法系统的使用要求。

# 1 探测原理

瞬变/谐变一体化电磁法探测原理如图 1(a)所示, 主要由 PC 机、信号驱动与采集模块、功率放大器、发射 线圈和空心线圈传感器组成。发射线圈是边长为 *l*, 匝数 为 *n*<sub>1</sub> 的矩形线圈,接收线圈是直径为 *d*, 匝数为 *n*<sub>2</sub> 的圆形 空心线圈,收发线圈水平偏心放置。

当发射线圈中通入发射电流时,产生一次磁场 H<sub>p</sub> 对 地下辐射,同时一次场也会耦合到接收线圈中,但接收线 圈相对发射线圈偏心,利用发射线圈内外磁通方向相反 的特性,抵消一次场;地下目标在一次场激发下,产生二 次磁场 H<sub>s</sub>,接收线圈感应二次场。虽然一次场 H<sub>p</sub>远大于 二次场 H<sub>s</sub>,但是在接收线圈中的一次磁场被抵消,仍然 可以检测到纯净的二次磁场信号。

PC 端通过上位机控制信号驱动与采集模块输出驱动信号至功率放大器,功率放大器输出电流激励发射线圈,空心线圈传感器输出的电压信号被信号驱动与采集模块采集到,并保存至 PC 端。

信号驱动与采集模块是基于 FPGA 开发的,用于输出瞬变或谐变驱动信号控制功率放大器、采集空心线圈 传感器输出的电压信号和发射电流信号。

H 桥型功率放大器由两个 SiC 半桥模块 (WAB400M12BM3)构成,最高输出电压为±500 V,最大 输出电流幅值 400 A,如图 1(b)所示, V<sub>DC</sub>为H桥的供电 电源,用于产生稳定的直流电压。瞬变电磁探测时,信号 驱动与采集模块输出正脉冲控制驱动模块 1,Q<sub>1</sub> 管和 Q<sub>4</sub> 管导通,产生单极性方波电流;谐变电磁探测时,信号驱 动与采集模块输出双极性脉冲串控制驱动模块 1 和 2 进 而控制 Q<sub>1</sub>、Q<sub>4</sub> 管和 Q<sub>2</sub>、Q<sub>3</sub> 管交替导通,功放输出双极性 方波电流。



(a) 电磁法探测示意图 (a) Schematic diagram of electromagnetic detection





图 1 电磁法探测示意图及 H 桥功率放大器原理 Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic

detection and H-bridge power amplifier

考虑线圈自身电感的随发射频率的影响,为了获得较大的发射磁矩<sup>[17]</sup>,提高系统的探测能力,发射线圈匝数为3 匝、边长1 m,空心线圈传感器带宽不低于100 kHz、灵敏度不低于1 mV/nT@100 Hz。

# 2 宽频带空心线圈传感器

## 2.1 宽频带线圈传感器

空心线圈传感器结构如图 2(a) 所示,主要由两部分 组成:空心线圈和放大电路。相较于有限带宽的空心线 圈而言,放大电路可被视为其带宽恒定的增益放大器,等 效电路模型如图 2(b)所示。

图 2 中, r 为空心线圈直流电阻, L 为线圈电感, C 为 线圈分布电容, R<sub>m</sub> 为线圈匹配电阻。

根据法拉第电磁感应定律,通过空心线圈传感器的 磁通量发生变化时在线圈中产生的感应电动势可以表 示为:

$$V = -n \frac{\mathrm{d}\emptyset}{\mathrm{d}t} = -GnS \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中: *φ* 为磁通量, *G* 为放大器增益, *n* 为空心线圈匝数, *S* 为单匝线圈面积, *B* 为磁感应强度。进一步得到空心线圈感应电压的幅值为:

$$U = \frac{\pi^2}{2} GnfBD^2$$
 (2)

其中,*f*为发射信号频率,*D*为接收线圈直径。因此, 空心线圈传感器在频率*f*处的灵敏度可以表示为:

$$S_0 = \frac{\pi^2}{2} GnfD^2 \tag{3}$$

式(3)表明,在线圈匝数和直径确定之后,传感器的 灵敏度与放大器增益和频率呈正比关系。



Fig. 2 Air-core coil sensor structure and equivalent circuit model

通过加入匹配电阻来减小线圈的幅度线性误差<sup>[18]</sup>, 空心线圈产生的感应信号在经匹配电阻后与放大器输入 端信号存在以下传递关系:

$$H_{(\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R_m} - \omega^2 LC + j\omega(\frac{L}{R_m} + rC)}$$
(4)

设计制作的空心线圈绕制在直径为 50 cm 的尼龙骨 架上,共 20 匝,分两层绕制,每层 10 匝,电压放大器为 DLPVA-100-F,空心线圈传感器主要参数如表 1 所示。

表 1 空心线圈传感器主要参数 Table 1 Parameter of air-core coil sensor

数值及单位
20 匝
0. 502 m
0.9 Ω
602. 97 μH
233. 12 pF
1.1 kΩ
6.9 nV $\cdot$ Hz <sup>-1/2</sup>
1.6 fA $\cdot$ Hz <sup>-1/2</sup>

空心线圈传感器的内部噪声源分布如图 3 所示,空心线圈传感器噪声主要来源于空心线圈噪声和放大器噪声,具体可分为线圈内阻热噪声 *e*<sub>r</sub>、匹配电阻热噪声 *e*<sub>km</sub>、运算放大器输入端的等效电压噪声 *e*<sub>ni</sub> 和等效电流噪声 *e*<sub>i</sub>。



图 3 空心线圈传感器噪声模型 Fig. 3 Air-core coil sensor noise model



$$e_r = \sqrt{4kTr} \cdot | H_{(\omega)} | \tag{5}$$

$$e_{Rm} = \sqrt{\frac{4kT}{R_m}} \cdot |j\omega L + r| \cdot |H_{(\omega)}|$$
(6)

$$e_{ni} = e_n \tag{7}$$

$$e_i = i_n \cdot | j\omega L + r | \cdot | H_{(\omega)} |$$
(8)

式中:k 为玻尔兹曼常数,T 为电路工作时的开尔文温度, e<sub>n</sub> 为运算放大器的输入电压噪声, i<sub>n</sub> 为运算放大器输入 电流噪声。由此可得空心线圈传感器输入端的总噪 声为:

$$e_{total} = \sqrt{e_r^2 + e_{Rm}^2 + e_i^2 + e_{ni}^2}$$

$$\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2$$

故空心线圈传感器等效磁场噪声水半可以表示为:

$$S_i = \frac{e_{total}}{S_0 \cdot |H_{(\omega)}|}$$
(10)

表1中空心线圈传感器参数代入式(5)、(6)和(8) 中,分别计算线圈内阻热噪声 e<sub>r</sub>、匹配电阻热噪声 e<sub>km</sub>、运 算放大器等效输入电流噪声 e<sub>i</sub>;运算放大器输入端的等 效电压噪声 e<sub>ai</sub> 通过实际测试得到,根据式(9),计算得到 空心线圈传感器的输入端总噪声 e<sub>total</sub>。用电压谱密度的 形式将各噪声源等效在运算放大器输入端,结果如图 4 所示。

图 4 表明,在 1~100 Hz 的频段内,电压放大器的等 效输入电压噪声 e<sub>ni</sub> 占主要成分;随着频率的增加,在



Fig. 4 Air-core coil sensor noise distribution diagram

100 Hz~100 kHz 频段内,空心线圈的匹配电阻热噪声  $e_{Rm}$  逐渐增加,此时传感器的主要噪声源为运放的等效输 入电压噪声  $e_{ni}$  和匹配电阻热噪声  $e_{Rm}$ ;不考虑 1/f 噪声 的影响,传感器总体噪声水平在 4.4 nV/ $\sqrt{Hz}$ @ 1 kHz。

#### 2.2 收发线圈间的去耦设计

发射线圈产生的一次磁场会通过空间耦合到空心线 圈处,淹没微弱的二次磁场信号。为实现一次场高效对 消,收发线圈之间偏心放置,如图 5 所示,利用发射线圈 内外磁通相反的特点实现一次场解耦。



根据收发线圈的放置位置,从收发线圈间的垂直距 离和水平偏心距两个角度进行耦合分析,设定收发线圈 水平偏心距为 L,相对垂直距离为 H。

根据毕奥-萨伐尔定律<sup>[21]</sup>,矩形载流线圈在平面上 一点 *p*(*x*, *y*, *z*)处的磁感应强度垂直分量 *B<sub>z</sub>* 可推导为:

$$B_{z} = \frac{u_{0}I(\frac{l}{2} + y)}{4\pi[(\frac{l}{2} + y)^{2} + z^{2}]} \cdot [\frac{\frac{l}{2} + x}{\sqrt{(\frac{l}{2} + x)^{2} + (\frac{l}{2} + y)^{2} + z^{2}}} + \frac{\frac{l}{2} - x}{\sqrt{(\frac{l}{2} - x)^{2} + (\frac{l}{2} + y)^{2} + z^{2}}}] \cdot \frac{u_{0}I(\frac{l}{2} - y)}{\pi[(\frac{l}{2} - y)^{2} + z^{2}]} \cdot [\frac{\frac{l}{2} + x}{\sqrt{(\frac{l}{2} - y)^{2} + z^{2}}} + \frac{\frac{l}{2} - x}{\sqrt{(\frac{l}{2} - x)^{2} + (\frac{l}{2} - y)^{2} + z^{2}}}] + \frac{u_{0}I(\frac{l}{2} - y)}{\sqrt{(\frac{l}{2} - y)^{2} + z^{2}}}] + \frac{u_{0}I(\frac{l}{2} - x)}{\sqrt{(\frac{l}{2} - y)^{2} + z^{2}}}]$$

$$\frac{u_0 I(\frac{l}{2} - x)}{4\pi [(\frac{l}{2} - x)^2 + z^2]} \cdot [\frac{\frac{l}{2} + y}{\sqrt{(\frac{l}{2} - x)^2 + (\frac{l}{2} + y)^2 + z^2}} + \frac{\frac{l}{2} - y}{\sqrt{(\frac{l}{2} - x)^2 + (\frac{l}{2} - y)^2 + z^2}}] + \frac{u_0 I(\frac{l}{2} + x)}{4\pi [(\frac{l}{2} + x)^2 + z^2]} \cdot [\frac{\frac{l}{2} + y}{\sqrt{(\frac{l}{2} + x)^2 + (\frac{l}{2} + y)^2 + z^2}} + \frac{\frac{l}{2} - y}{\sqrt{(\frac{l}{2} + x)^2 + (\frac{l}{2} - y)^2 + z^2}}]$$
(11)

式中:I为载流导线中的电流, $u_0$ 为真空磁导率,l为矩 形线圈边长。取I=1 A,l=1 m,计算单匝发射线圈在垂 直方向上的磁场分布,如图 6 所示。



Fig. 6 Magnetic field distribution of transmitting coil in vertical direction at different heights

进一步,利用 comsol 有限元仿真软件对不同垂直高度的发射线圈磁感应强度( $B_x$ )进行仿真分析,更加直观的反映了在不同高度,y=0 m 时磁场强度随 x 轴变化的分布规律,如图 7 所示。





# along with x axis at different heights

图 7 可以看出,在  $x = \pm 0.5 \text{ m}$  附近  $B_z$ 出现正负变化; 随着 H 的逐渐增加,  $B_z$  在  $x = \pm 0.5 \text{ m}$  位置的变化率逐渐 变小。因此,将接收线圈放置  $x = \pm 0.5 \text{ m}$  附近的位置,调 整收发线圈的中心距离,可以实现收发线圈的零耦合。 选择收发线圈的垂直距离 H = 0.05 m,对收发线圈的水平 偏心距进行计算。

根据聂以曼公式<sup>[22]</sup>,计算两个线圈间的互感系数:

$$M_{s} = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \oint_{L_{2}} \oint_{L_{2}} \frac{\mathrm{d}L_{i} \cdot \mathrm{d}l_{2}}{r} = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \sum_{i=1}^{n=4} \int_{L_{i}} \oint_{l_{2}} \frac{\mathrm{d}L_{i} \cdot \mathrm{d}l_{2}}{r} \quad (12)$$

式中:r为发射线圈上一点 $Q_1$ 与接收线圈一点 $Q_2$ 的距离, $d_{L_i}$ 为发射线圈上的线元, $d_{L_2}$ 为接收线圈上线元,如图 5 所示。

将发射线圈分为4段,分别计算各段导线与接收线 圈的互感<sup>[23]</sup>:

 $M_{s} = M_{sAB} + M_{sBC} + M_{sCD} + M_{sDA}$  (14) 式中:  $R_{s}$  为接收线圈半径,  $n_{R} \approx n_{T}$ 分别为接收线圈和发 射线圈匝数,  $\varphi$  为  $Q_{2}$  点与坐标系 x 轴的夹角;  $r_{1}$ ,  $r_{2}$ ,  $r_{3}$ ,  $r_{4}$ 分别为 AB, BC, CD, DA 边上  $Q_{1}$  点与接收线圈上  $Q_{2}$  点的 空间距离:

$$r_{1} = \sqrt{H^{2} + (R_{s}\cos\phi - x)^{2} + (R_{s}\sin\phi + L - \frac{l}{2})^{2}}$$

$$r_{2} = \sqrt{H^{2} + (R_{s}\cos\phi - \frac{l}{2})^{2} + (R_{s}\sin\phi + L - y)^{2}}$$

$$r_{3} = \sqrt{H^{2} + (R_{s}\cos\phi - x)^{2} + (R_{s}\sin\phi + L + \frac{l}{2})^{2}}$$

$$r_{4} = \sqrt{H^{2} + (R_{s}\cos\phi + \frac{l}{2})^{2} + (R_{s}\sin\phi + L - y)^{2}}$$
(15)

发射线圈匝数  $n_r = 3$ 、边长 l = 1 m,接收线圈匝数  $n_R = 20$ 、半径  $R_s = 25$  cm,代入式(12)~(15)计算收发线 圈互感。通过有限元软件,计算 H = 0.05 m,L = 0.3 ~ 0.7 m 范围内接收线圈区域的磁感应强度  $B_Z$ 。设定发射电流大小为 1 mA,方向为顺时针,仿真模型如图 8(a) 所示。认为当接收线圈区域的磁感应强度 B 为 0 时,收发线圈零耦合。互感计算结果和仿真结果如图 8(b)





公式计算结果表明,收发线圈垂直高度 H=0.05 m, 水平偏心距 L=0.5840 m 处实现零耦合;有限元仿真计 算结果为 H=0.05 m,L=0.5833 m 处收发线圈零耦合。 有限元软件的求解精度受到网格划分精度的影响,与公 式计算存在0.0007 m 偏差,可以认为公式计算结果与仿 真结果相同。

由于骨架加工、收发线圈装配等存在误差,需要微调 接收线圈来实现零耦合,最终收发线圈的垂直高度 H= 0.05 m,L=0.5828 m,与互感计算结果和有限元软件计 算结果分别相差 0.21%和 0.17%。

# 3 系统搭建及测试

空心线圈骨架使用尼龙材料机加工而成,骨架直径 50 cm,槽宽10 mm,漆包线线径7.9 mm,分两层绕制在尼 龙骨架上,空心线圈后接阻抗调节电路、钳位电路和电压 放大器,制作的线圈传感器实物图如图9(a)所示。

传感器灵敏度测试装置如图 9(b) 所示,将线圈传感器放置在直径 1.5 m,4 匝的圆形线圈的中心区域,并将



(a) 空心线圈传感器实物图(a) Experimental model of air-core coil sensor

(b) 传感器灵敏度测试 (b) Sensitivity test of air core coil sensor

图 9 空心线圈传感器实物及灵敏度测试

Fig. 9 Experimental model and sensitivity test of air-core coil sensor

圆形发射线圈和传感器悬空放置,避免发射线圈与地下 目标耦合引起的二次场被传感器感应到。利用锁相放大 器(Zurich Instrument MFLI 5 MHz) 给圆形发射线圈输入 幅值 0. 2V,频率为*f* 的正弦信号  $x_{(t)} = 0.2 \cdot \sin(2\pi ft)$ 。 利用 $i_{(t)} = x_{(t)}/|Z|$ ,计算得到各频率下的电流大小,其中 *Z* 为发射线圈阻抗。接收线圈区域磁感应强度与发射线 圈中电流的关系为 $k_{(t)} = 3.547$  nT/mA。结合各频率下的 电流 $i_{(t)}$ 和系数 $k_{(t)}$ ,可以得到各频率下接收线圈区域的 磁感应强度 $B_{(t)} = i_{(t)} \cdot k_{(t)}$ 。

传感器噪声水平测试在室内进行,采用锁相放大器 (Zurich Instrument MFLI 5 MHz)测试空心线圈传感器的 噪声水平。传感器输出噪声电压  $V_{noise}$  除以空心线圈传感 器灵敏度  $S_0$  得到传感器等效磁场噪声  $B_n = V_{noise}/S_0$ 。

在户外搭建瞬变/谐变一体化探测系统进行实验。 瞬变模式测试时,驱动功率放大器的脉冲电平为3.3 V, 脉冲宽度2ms,功放输出电压200 V,电压放大器增益为 20 dB,使用24 bit 采集器对传感器输出响应进行单次采 集。谐变模式测试时,首先进行一次场对消测试,将收发 线圈垫高1m左右,以减小发射线圈和地之间的耦合,利 用锁相放大器输出幅值为1 V,频率为f的正弦信号*x*<sub>(*t*)</sub>= 1·sin(2π*ft*)至发射线圈,收发线圈垂直距离*H*=0.05 m, 分别测试偏心距*L*=0m、*L*=0.5000m、*L*=0.5828m和 *L*=0.6000m时接收线圈在1~100kHz内的响应,认为 接收线圈的响应电压仅由一次场引起,图10为谐变模式 一次场对消测试图;进一步测试系统的谐变探测能力,测 试在实验室环境下进行,设置功放输出电压50 V,驱动功 率放大器的脉冲信号串频率为10~50kHz(步长5kHz), 采集器采集空心线圈输出信号和发射电流信号。

# 4 结果与分析

空心线圈传感器灵敏度和等效磁场噪声水平测试结 果如图 11(a)、(b)所示。如图 11(a)所示,在 10 Hz~ 100 kHz 频段内,忽略 50 Hz 的工频干扰,传感器灵敏度



图 10 谐变模式一次场对消测试 Fig. 10 Primary field compensation of harmonic electromagnetic model

与频率基本呈线性关系,在 100 Hz 处灵敏度为 2.23 mV/nT,1 125 Hz 时的灵敏度为 23.12 mV/nT,在低 频时(1~10 Hz),传感器灵敏度与实测结果相差较大。 如图 11(b)所示,线圈传感器在 1 125 Hz 时的等效磁噪 声为 9.27 pT√Hz,从图中还可以看出,放大器自身的噪 声水平远低于空心线圈的噪声水平,引入放大器不会使 线圈噪声恶化;同时,加入放大器后空心线圈的灵敏度得 到了提高,提高了信噪比。



Fig. 11 The test result of air-core coil sensor

瞬变/谐变一体化探测系统瞬变测试结果如图 12 所示,发射电流如图 12(a)所示,发射电流关断时刻值为 135.8 A,关断时间 23 μs。采集单次的瞬变电磁信号进 行 30 kHz 数字滤波、抽道叠加<sup>[24]</sup>等预处理,得到传感器 响应衰减曲线如图 12(b)所示,发射电流关断后,响应的 衰减时间持续到 11 ms,响应信号动态范围达 70.38 dB。



Fig. 12 The test result of transient electromagnetic

谐变模式一次场对消测试结果如图 13(a) 所示, 收 发线圈偏心距 L=0 m 时, 接收线圈中的响应最大, L= 0.5828 m 处的响应最小。取 10 kHz 下的数据, 收发线 圈偏心距 L 逐渐增大, 接收线圈响应值依次为 11.941、 4.294、0.014 和 3.460 mV。以收发线圈偏心距 L=0 m 时 的一次场响应作为参考, 在 10 kHz 时, L=0.5000 m 时接 收线圈响应衰减了-8.88 dB、L=0.5828 m 时衰减了 -58.62 dB, L=0.6000 m 时衰减了-10.76 dB, 其他频率 下一次场衰减如图 13(b) 所示。

谐变模式测试结果如图 14 所示,上位机分别对空心 线圈传感器输出信号和发射电流信号进行正交解调计 算,得到线圈传感器输出信号幅值 U、相位  $\theta_v$ ,发射电流 的幅值 i、相位  $\theta_i$ ,二次磁场的实分量  $I = U/S \cdot \sin(\theta_v - \theta_i)$ ,虚分量  $Q = U/S \cdot \cos(\theta_v - \theta_i)$ ,其中,S 为接收线圈 的灵敏度。图 14(a) 为发射电流幅值,图 14(b) 为解算





得到的二次磁场实虚分量。

## 5 结 论

本文设计了一种瞬变/谐变一体化大地电磁收发线 圈探测系统,将空心线圈传感器与发射线圈偏心放置,利 用发射线圈内外磁通相反的特性,有效抵消空心线圈受 到一次场干扰,实现高灵敏度的微弱二次磁场检测。制 备了一体化收发线圈样机并搭建了探测系统,实际测量 结果表明,空心线圈传感器具备高灵敏度(23.12 mV/nT @1125 Hz),低噪声(等效磁场噪声水平 9.27 pT/√Hz @1125 Hz),宽带宽(1 Hz~100 kHz)等特点;在瞬变和 谐变电磁测试中,分别检测出了良好的电压衰减特性曲 线和二次磁场信号,验证了瞬变/谐变一体化的大地电磁 收发线圈设计的可行性。相较于现有的单一瞬变电磁探 测仪器和频率域电磁探测仪器,设计和搭建的瞬变/谐变 一体化的大地电磁探测系统具有更大的工作带宽、高灵 敏度和低的磁噪声水平,收发线圈的消耦设计简单高效, 系统体积小,便携性强,满足课题组项目需求,但是随着



Fig. 14 The test result of harmonic electromagnetic

探测深度的不断加大,可以进一步提高空心线圈传感器的性能指标,以达到更高的灵敏度和更低的噪声水平,实现更深层地下目标的探测。

# 参考文献

- FU Z, WANG H, WANG Y, et al. Elimination of mutual inductance effect for small-loop transient electromagnetic devices [J]. Geophysics, 2019, 84(3): E143-E154.
- [2] TANG J T, REN Z Y, ZHOU C, et al. Frequencydomain electromagnetic methods for exploration of the shallow subsurface: A review [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2681-2705.
- [3] 曹华科,戚志鹏,李貅,等.考虑关断时间的瞬变电磁视电阻率计算及不同波形浅层分辨特征分析[J].地球物理学进展,2022,37(4):1704-1716.
  CAO H K, QI ZH P, LI X, et al. Transient electromagnetic apparent resistivity calculation considering turn-off time and shallow resolution analysis of different waveforms [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(4):1704-1716.
- [4] 赖刘保,陈昌彦,张辉,等.浅层瞬变电磁法在城市道

路地下病害检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016,31(6):2743-2746.

LAI L B, CHEN CH Y, ZHANG H, et al. Application of shallow transient electromagnetic method in the detection of city road disease [ J ]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6):2743-2746.

[5] 柳建新,刘嵘,郭荣文,等. 电磁法在有色金属矿产勘查中的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(1):261-284.

LIU J X, LIU R, GUO R W, et al. Progress of electromagnetic method in nonferrous metal mineral exploration [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(1): 261-284.

 [6] 周逢道,连士博,刘维,等.一种浅地表探测收发天线的设计分析[J]. 仪器仪表学报,2016,37(12): 2704-2709.

ZHOU F D, LIAN SH B, LIU W, et al. Analysis and design of transmitting and receiving antenna of shallow surface detection system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(12):2704-2709.

- [7] XIAO P, SHI Z, WU X, et al. Improved bucking coil design in helicopter transient electromagnetic system [J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2017, 60: 131-139.
- [8] CHEN S, WANG Y, SHUAI Z. Bucking coil used in airborne transient electromagnetic survey [C]. International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 2012:478-481.
- [9] XI Z, LONG X, HUANG L, et al. Opposing-coils transient electromagnetic method focused near-surface resolution[J]. Geophysics, 2016, 81(5): E279-E285.
- [10] 王杰,张晓培,牛建军,等. 地面瞬变电磁探测系统对 比试验[J]. 地球物理学进展, 2017, 32 (6): 2670-2676.

WANG J, ZHANG X P, NIU J J, et al. Ground transient electromagnetic system contrast test [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6):2670-2676.

[11] 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.

- [12] QU X, LI Y, FANG G, et al. A portable frequency domain electromagnetic system for shallow metal targets detection[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2017, 53: 167-175.
- [13] 任同阳,刘长胜,刘腾,等.频率域地空电磁探测系统 在采空区勘探中的应用[C].2017 中国地球科学联合 学术年会论文集(三十七)——专题 69:利用人工震

源探测地下介质结构及其变化、专题 70:地球物理探测前沿技术,2017:32-34.

REN T Y, LIU CH SH, LIU T, et al. Application of ground-to-air electromagnetic detection system in frequency domain in goaf exploration [C]. Proceedings of the China Earth Sciences Joint Annual Conference (37), 2017;32-34.

- [14] 刘长胜,刘腾,任同阳,等. 地空频率域电磁系统空心 线圈 传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2):140-147.
  LIU CH SH, LIU T, REN T Y, et al. Optimization and design of air-core coil sensor for ground-airborne frequency-domain electromagnetic detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2):140-147.
- [15] 戴亦军,汤文武,曹创华.水平层状介质电磁法数据时 频联合反演[J].物探化探计算技术,2013,35(1): 18-22.

DAI Y J, TANG W W, CAO CH H. Time-frequency joint inversion in electromagnetic method of horizontal layered medium [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 35(1): 18-22.

- [16] 何展翔,胡祖志,王志刚,等. 时频电磁(TFEM)技术: 数据联合约束反演[J].石油地球物理勘探,2020, 55(4):898-905.
  HE ZH X, HU Z ZH, WANG ZH G, et al. Timefrequency electromagnetic (TFEM) technique: Step-bystep constraint inversion based on artificial fish swarm algorithm [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4):898-905.
- [17] 李佳阳. 宽带频率域电磁法探测仪器系统设计及应用[D]. 南京:南京理工大学,2021.
  LI J Y. Design and application of broadband frequency domain electromagnetic detection instrument system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [18] YU S B, WEI Y M, ZHANG J L, et al. Noise optimization design of frequency-domain air-core sensor based on capacitor tuning technology[J]. Sensors, 2019, 20(1):194.
- [19] 刘凯,米晓利,朱万华,等.一种用于 TEM 高灵敏度感 应式磁场传感器设计[J].地球物理学报,2014, 57(10):3485-3492.

LIU K, MI X L, ZHU W H, et al. A design of high sensitivity induction magnetometer for TEM [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10):3485-3492.

[20] PI S, YAN F, ZHANG Y. Optimization and design of wide-band and low-noise air-core coil sensor for TEM system [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 660(1): 012006.

[21] 邝向军. 任意四边形载流线圈的空间磁场计算[J]. 大 学物理,2017,36(4):28-31.

KUANG X J. Calculation of the magnetic field distribution of an arbitrary quadrilateral electric current [J]. College Physics, 2017, 36(4):28-31.

- [22] 刘洋,何圣民.任意空间位置两多边形多匝线圈的互感计算[J].价值工程,2013,32(31):235-237.
  LIU Y, HE SH M. The calculation of mutual inductance of two polygons with multiturn coils at arbitrarily position [J].
  Value Engineering, 2013, 32(31):235-237.
- [23] 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.

 [24] 张爽,綦美南,陈曙东. 瞬变电磁传感器的噪声特性[J]. 地球物理学进展,2014,29(2):966-970.
 ZHANG SH, QI M N. CHEN SH D. Noise characteristics of transient electromagnetic sensor [J].

Progress in Geophysics, 2014, 29(2):966-970.

作者简介



吴文刚,2020年于河南科技大学获得 学士学位,现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁探测仪器。

E-mail: 1103431792@ qq. com

Wu Wengang received his B. Sc. degree in 2020 from Henan University of Science and Technology. He is now a M. Sc. candidate in Nanjing University of Science and Technology. His main research interest includes electromagnetic detection apparatus.



**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 now 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,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** received his Ph. D. from Nanjing University of Science and Technology in 1998. He is now 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.