

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 1599
亓庆新,席振铎,徐昱,等. 等值反磁通瞬变电磁法天线零磁通面位置的确定方法[J]. 物探与化探,2022,46(6):1540–1544. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 1599](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1599)
Qi Q X,Xi Z Z,Xu Y,et al. A method for determining the position of zero magnetic flux plane of antennae using the opposing-coils transient electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(6):1540–1544. [http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022. 1599](http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1599)

等值反磁通瞬变电磁法天线零磁通面位置的确定方法

亓庆新¹,席振铎²,徐昱³,木仁²

(1. 湖南五维地质科技有限公司,湖南 长沙 410205; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083;3. 湖南省计量检测研究院,湖南 长沙 410014)

摘 要: 确定零磁通面几何位置是等值反磁通瞬变电磁法探测系统的关键。为此,提出了一种调零方法:用等值反磁通瞬变电磁仪连续发送固定频率的双极性方波,接收机实时采集接收天线的时域信号,并使用离散傅里叶变换分别计算出粗调、细调和微调接收天线位置的最小功率谱密度(A_1 、 A_2 、 A_3),当 $A_1>A_2>A_3$ 时,接收天线处于零磁通面。发送 20 kHz 双极性方波试验的结果表明,当 $A_1>A_2>A_3$ 时,二次场衰减信号过渡过程得到明显改善。该方法可为高性能等值反磁通瞬变电磁仪器的设计和制造提供参考。

关键词: 等值反磁通;瞬变电磁;零磁通面;功率谱密度

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)06-1540-05

0 引言

瞬变电磁法^[1-3](TEM),也称时间域电磁法,在地球物理勘探领域中是一种非常重要的人工源电磁法^[4-5]。TEM 受地形影响小、施工效率高,广泛应用于地热、煤炭、水资源、矿产勘查、工程勘查、地质灾害调查、地质环境调查、考古探测、军事探测、城市管线检测等诸多方面^[6-8],近几年已逐渐向大深度矿产^[9]和油气资源勘探^[10-11]方向发展。此方法以电磁感应原理为基础,通过不接地回线向地下发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场的激励下,地下地质体将产生感应涡流,感应涡流产生的二次磁场不会随一次磁场消失而立即消失,在一次脉冲磁场间歇期间利用天线或接地电极观测二次磁场,通过研究感应二次场响应幅值和衰减速度变化规律,从而达到探测目标体空间展布的目的^[12-13]。

在实际应用中,发射线圈与接收线圈作为相邻线圈,两者之间会发生互感现象,在关断一次场后,接收线圈受一次场变化影响会产生感应电动势,而

且此一次场电动势通常比二次场在接收线圈中产生的电动势大得多,并难以区分、无法剔除,导致瞬变电磁法在浅层探测中出现盲区^[14-16],严重干扰早期接收信号精度。Smith 等^[17]、嵇艳鞠等^[18]、Walker 等^[19]通过对瞬变响应和发射电流波形的实时监测,再根据数值计算方法把接收信号中受一次场影响产生的感应信号剔除,获得纯二次场响应,但是实际勘探中受地质条件等原因影响,线圈大小和位置与理论值存在偏差,导致计算值与实际感应值不符;范涛等^[20]研究了多匝小线圈的自感和互感引起的接收信号失真问题,采用曲线偏移的方法修正信号;杨海燕等^[21]根据场源提出了一种新型圆锥型瞬变电磁场源装置,可减弱线圈间的互感耦合,提高浅部探测能力。总之,在浅层瞬变电磁法中,收发线圈的互感尚没有较理想的解决方案,因此导致的早期信号失真而产生浅层探测盲区的问题依然存在。

为了消除一次场对接收线圈的影响,实现瞬变电磁早期纯二次场响应观测,提出了等值反磁通瞬变电磁法(opposing coils TEM,简称 OCTEM)。这是一种新型的瞬变电磁法,其原理与传统的瞬变电磁

法一致,不同的是:OCTEM 以等值反磁通的规律作理论依据,采用通以大小相同、方向相反电流的大小相同、平行共轴的天线作为发射源发射一次场,在反向对偶磁源的正中间平面接收二次场信号,测量地下纯二次场的响应^[22]。根据矢量叠加原理,正负反向磁源产生的一次场始终存在至少一个磁场的垂直分量为零的平面,该位置称为等值反磁通的零磁通面。由于需要将接收天线设置在所述的等值反磁通零磁通面,因此对于等值反磁通瞬变电磁法的零磁通面的位置确认就显得尤为重要。目前,等值反磁通瞬变电磁法的零磁通面的位置确认一般采用机械调节接收天线的位置,通过目测二次场衰减曲线早期没有比较明显的过渡过程(明显畸变),来定性判断零磁通面的位置。但是,这种方法主观性较大,无法科学、准确地确认零磁通面的位置。为此,本文提供了一种能够快速、准确对零磁通面位置进行确定的方法。

1 零磁通调零方法原理

采用等值反磁通瞬变电磁仪,连续发射频率为 f 的信号到发送天线,同时实时采集接收天线的接收信号。频率 f 的取值规则为: $\frac{f_s}{N_{\text{FFT}}} < f < \frac{f_s}{4}$ (f_s 为采样频率, N_{FFT} 为快速傅里叶变换 FFT 的点数, f 为 $\frac{f_s}{N_{\text{FFT}}}$ 的整数倍)。然后,实时对接收信号进行离散傅里叶变换 (DFT, 也可以采用快速傅里叶变换 FFT), 得到带宽为 Band 的频谱数据 (建议带宽 Band 的取值范围为 $0 \sim 2f$)。根据得到的频谱数据,实时提取频点 f 的功率谱密度 A , 形成 A 随时间的变化曲线。调整接收天线的位置,直至实时接收的 A 达到功率谱密度曲线的最小值时,此时接收天线的位置即为等值反磁通瞬变电磁法中零磁通面的位置。

根据上述频率的取值规则,本次实验以 20 kHz 频率为例,在等值反磁通调零模式发送 20 kHz 双极性方波,使用式 (1) 对采集的数据进行离散傅里叶变换,计算出 0~40 kHz 的频谱数据:

$$x_k = \text{DFT}[x_n] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp(-\frac{2\pi}{N}nk) \quad (1)$$

式中: x_n 为采集的离散时间序列; N 为变换区间长度; k 为谐波序号, $k=0,1,\dots,N-1$ 。

信号的平均功率 P_{avg} 为

$$P_{\text{avg}} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2}{N} \quad (2)$$

根据帕塞瓦尔定理 (Parseval's theorem) 有:

$$\sum_n |x_n|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2 \quad (3)$$

可以得出:

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} |X_k|^2 \quad (4)$$

考虑到功率谱密度 (PSD), 平均功率有:

$$P_{\text{avg}} = \sum_{k=0}^{N-1} \text{PSD}_k \Delta f \quad (5)$$

式中: $\Delta f = f_s/N$, 因此可得:

$$\text{PSD}_k = \frac{|X_k|^2}{Nf_s} \quad (6)$$

式中, PSD 的单位为 V^2/Hz 。

对 PSD 取对数,使振幅较低的成分相对高振幅成分得以拉高,以便观察掩盖在低幅噪声中的周期信号:

$$\text{PSD}_k^{\text{dB}} = 10 \lg \frac{|X_k|^2}{Nf_s} \quad (7)$$

式中: PSD_k^{dB} 的单位为 dB/Hz 。取 20 kHz 频点的功率谱密度 A , 此时的 A 称为调零系数。调节接收天线正、反磁通大小,当接收天线处于零磁通面时,调零系数最小。

2 零磁通调零方法应用

本次测试使用自主研发的等值反磁通瞬变电磁仪。此电磁仪分为主机和天线两部分,天线设计采用微线圈发射(线圈直径不超过 2 m)、中心回线接收的一体机装置,即将 2 个多匝小线圈分为 2 段串联安装在接收骨架上作为发射天线,正中间平面放置接收天线,上下线圈导线材料、绕制方法、匝数、大小都相同。采用微线圈发射可以在浅层得到高聚集度能量的一次场,能保证浅层探测的激励场,而收发一体机装置能保障每个测点发射一次场以及发射、接收相对位置的一致性,不仅大大减小了野外施工布线误差,还降低了由记录点位置不同导致的二次场误差。除此之外,线圈一体机装置的设计使在实际勘探工作中无需野外布线,既节省时间、降低成

本,又能在高密度扫面测量工作中实现快速移动,提高了效率,有利于实现高精度的浅层勘探。

本次实验选取编号为 1、2 的 2 台等值反磁通瞬变电磁仪进行实验,发射 50% 占空比双极性方波,实际发射波形见图 1,近似线性关断。

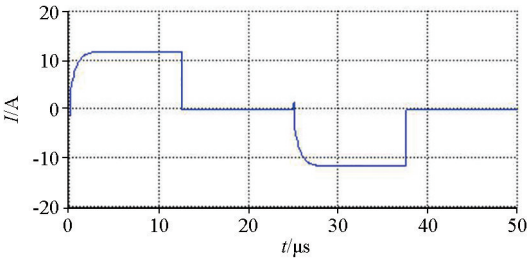


图 1 发射电流波形
Fig. 1 Send current waveform

通过天线上的调零旋钮实时调整接收天线的位置,直至实时接收数据的功率谱密度 A 位于功率谱密度曲线的第 N 个极小值时 (N 为自然数),此时接收天线的位置即为等值反磁通瞬变电磁法中零磁通面的位置。首先大幅调节接收天线的上下位置,同时观测采集数据的功率谱密度曲线,如果功率谱值逐渐增大,则向相反方向调节;当功率谱密度明显下降至一个极小值 $A1$ 后上升时,则继续向同一方向调节天线位置,开始细调;当功率谱密度再次出现一个极小值 $A2$ 时,此时改变调节方向,进入微调,直至对应的极小值为细调调零系数 $A3$,应 $A3 < A2 < A1$;此时调零完毕,调零次数应不少于 3 次 (即至少找到第

三个极小值)。

对 2 台仪器进行上述的调零操作,实时调整天线上的调零旋钮,得到如图 2 所示的仪器随时间变化的功率谱曲线。在调零前后分别进行一次数据采集,并绘制成如图 3 所示的 2 台仪器衰减曲线对比。计算出 2 台仪器每个取样道调整前与调整后的数值差异的百分比,绘制随时间变化的百分比图 (图 4)。

根据图 3 和图 4 可以看出,调零前的数据曲线在早期过渡现象明显,经过幅度起伏较大的过渡过程后数据曲线才变得平滑。经过调零后,早期的过渡过程得到了抑制,采集信号比较平滑,振荡减弱,对于中、晚期则无明显影响,能够符合野外工作条件,可以用于实际勘探任务。

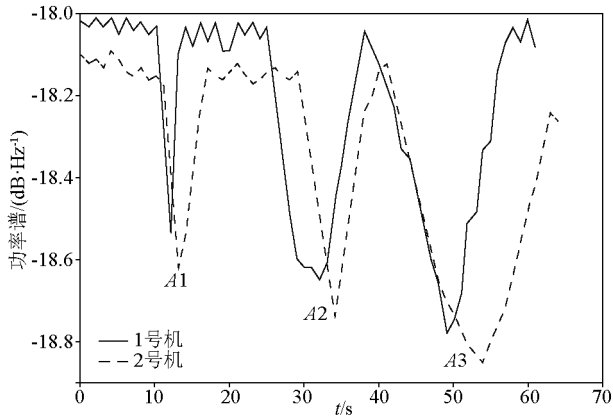
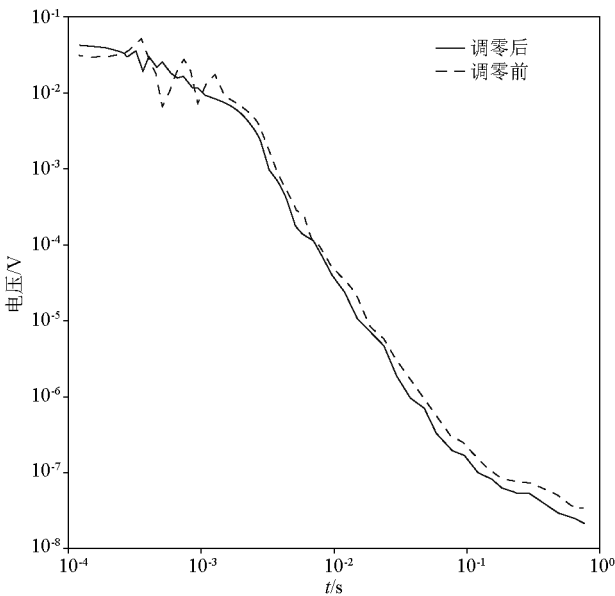
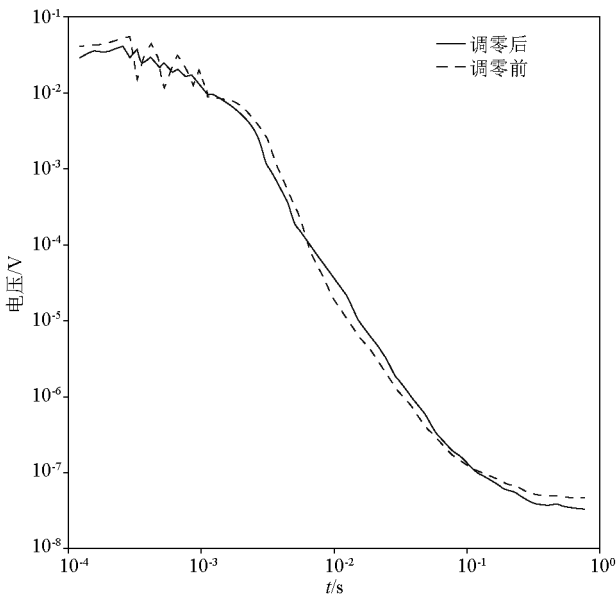


图 2 功率谱曲线
Fig. 2 Power spectrum curve



(a) 1 号机



(b) 2 号机

图 3 衰减信号数据曲线对比
Fig. 3 Comparison diagram of attenuation signal data curve

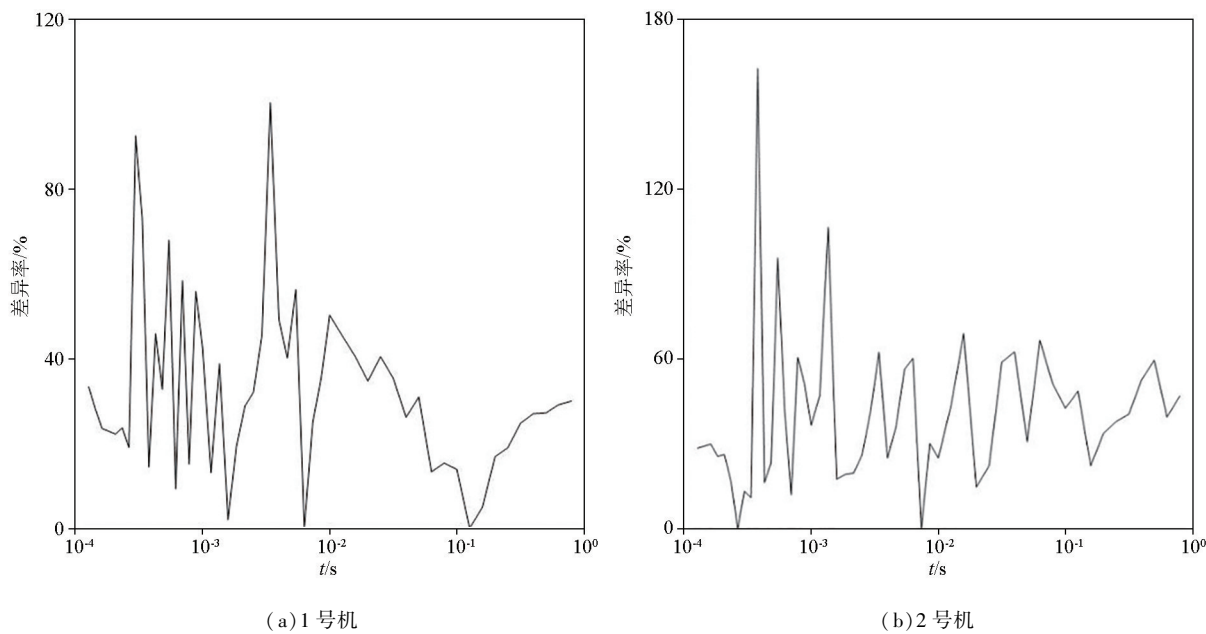


图 4 调零前后数值差异
Fig. 4 Percentage chart of numerical difference before and after zero adjustment

3 结论

通过实时采集接收信号,并进行离散傅里叶变换得到频谱数据,获得功率谱密度随时间变化的曲线,并根据其变化确定零磁通面的位置。通过对实际研制的等值反磁通仪器进行测试,得出如下结论:

- 1)使用此方法确定零磁通面位置,精度高,测试方法简便可行。
- 2)使用此方法可准确找到零磁通面位置,抑制早期的过渡过程,减弱早期信号的振荡幅度。
- 3)此零磁通面位置确定方法可为高性能等值反磁通瞬变电磁仪器的设计和制造提供参考。

参考文献 (References) :

[1] Wait J R. On the theory of transient electromagnetic sounding over a stratified [J]. Canadian Journal of Physics, 1972, 50 (11): 1055-1061.

[2] Kaufman A A, Keller G V. Frequency and transient sounding[J]. Elsevier Methods in Geochemistry & Geophysics, 1983.

[3] Nabighian M N. Quasi-static transient response of a conducting half-space; An approximate representation[J]. Geophysics, 1979, 44(10): 1700-1705.

[4] Nabighian M N, Macnae J C. Time domain electromagnetic prospecting methods [M]//Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, 1991: 427-520.

[5] 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 B Y. Practical transient electromagnetic method prospecting in near zone of magnetic dipole source [M]. Beijing: Geological

Publishing House, 1998.

[6] 李貅,郭文波,李毓茂. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2000, 22(3): 35-38.

Li X, Guo W B, Li Y M. Application TEM to exploration of water gushing channelway in coal field[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2000, 22(3): 35-38.

[7] Eyórssón E. The Transient Electromagnetic method (TEM) in geothermal exploration; Processing and 1D inversion of a TEM sounding from Reykjanes, SW-Iceland [J]. Indiana University Mathematics Journal, 2015, 49(1): A35.

[8] 嵇艳鞠,林君,朱凯光,等. 利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 828-833.

Ji Y J, Lin J, Zhu K G, et al. Underground water prospecting by Transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 828-833.

[9] 薛国强,李貅,底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195-1200.

Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1195-1200.

[10] 薛国强,于景邠. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319-326.

Xue G Q, Yu J C. New development of TEM research and application in coal mine exploration [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 319-326.

[11] 底青云,朱日祥,薛国强,等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128-2138.

Di Q Y, Zhu R X, Xue G Q, et al. New development of the electromagnetic (EM) methods for deep exploration [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2128-2138.

[12] 闫述,薛国强,陈明生. 大回线源瞬变电磁响应理论研究回顾及展望[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 941-947.

Yan S, Xue G Q, Chen M S. Review and perspective of theoretical study on Large-loop TEM response [J]. Progress in Geophysics,

2011,26(3):941-947.

[13] 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,2002:102-105.

Li X. Theory and application of transient electromagnetic sounding [M]. Xi'an;ShaanXi Science and Technology Press,2002:102-105.

[14] Telford W M, Geldart L P,Sheriff R E. Applied geophysics[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1990.

[15] 嵇艳鞠,林君,于生宝,等. ATTEM 系统中电流关断期间瞬变电磁场响应求解的研究[J]. 地球物理学报,2006,49(6): 1884-1890.

Ji Y J,Lin J,Yu S B,et al. A study on solution of transient electromagnetic response during transmitting current turn-off in the AT-TEM system[J]. Chinese Journal of Geophysics,2006,49(6): 1884-1890.

[16] 王华军. 阻尼系数对瞬变电磁观测信号的影响特征[J]. 地球物理学报,2010,53(2):428-434.

Wang H J. Characteristics of damping coefficient effect on transient electromagnetic signal [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010,53(2):428-434.

[17] Smith R S,Balch S J. Robust estimation of the band-limited inductive limit response from impulse-response TEM measurements taken during the transmitter switch-off and the transmitter off-time[J]. Geophysics,2000,65(2):476-481.

[18] 嵇艳鞠,林君,王忠. 瞬变电磁接收装置对浅层探测的畸变分析与数值剔除[J]. 地球物理学进展, 2007,22(1):262-267.

Ji Y J, Lin J, Wang Z. Research on distortion of whole transient field in shallow transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics,2007,22(1): 262-267.

[19] Walker S E,Rudd J. Extracting more information from on-time data: SEG Extended Abstracts[C]//20th Geophysical Conference, 2009:1-8.

[20] 范涛,赵兆,吴海,等. 矿井瞬变电磁多匝回线电感影响消除及曲线偏移研究[J]. 煤炭学报,2014,39(5):932-940.

Fan T,Zhao Z,Wu H,et al. Research on inductance effect removing and curve offset for mine TEM with multi small loops[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(5):932-940.

[21] Yang H Y,Li F P,Yue J H,et al. Cone-shaped source characteristics and inductance effect of transient electromagnetic method[J]. Applied Geophysics;English Version,2017(1):165-174.

[22] Xi Z Z, Long X, Huang L, et al. Opposing-coils transient electromagnetic method focused near-surface resolution [J]. Geophysics, 2016,81(5):E279-E285.

A method for determining the position of zero magnetic flux plane of antennae using the opposing-coils transient electromagnetic method

QI Qing-Xin¹,XI Zhen-Zhu²,XU Yu³, MU Ren²

(1. Hunan Wuwei Geological Technology Co. , Ltd. ,Changsha 410205,China;2. School of Geosciences and Info-Physics,Central South University, Changsha 410083,China;3. Hunan Institute of Metrology and Test,Changsha 410014,China)

Abstract: Determining the geometric position of the zero magnetic flux plane is the key to the detection system of the opposing-coils transient electromagnetic method (opposing-coils TEM). Given this, a zeroing method was proposed in this study. First, an opposing-coils transient electromagnetometer was used to continuously send the bipolar square wave of fixed frequency. Then, the receiver collected the time domain signals of the receiving antenna in real time, and the discrete Fourier transform was used to calculate the minimum power spectral density (A1, A2 and A3) at the roughly-, finely-, and micro-tuned receiving antenna positions. When A1>A2>A3, the receiving antenna was in the zero magnetic flux plane. Finally, the test results of transmitting 20 kHz bipolar square wave showed that the transition process of the attenuation signals of the secondary field can be significantly improved under the condition of A1>A2>A3.

Key words: opposing coils;TEM;zero magnetic flux plane;power spectral density

(本文编辑:沈效群)