

· 工程物探 ·

文章编号:1001-1986(2001)01-0055-04

# 工程勘探瞬变电磁仪关键技术研究

李 实,李创社,张彦鹏,张鹏飞,宋建平

(西安交通大学,陕西 西安 710049)

**摘要:**瞬变电磁勘探法是工程勘探领域里新兴的一种很有前途的测量方法。但是作为一种重要探测工具,瞬变电磁仪的许多关键技术还没有解决,限制了瞬变电磁勘探法在工程勘探领域的应用。本文研究了瞬变电磁仪的硬件和软件设计中的关键技术,并提出了程控接收天线法和早期信号检测法等。

**关键词:**瞬变电磁法;瞬变电磁仪;程控天线;信号检测

**中图分类号:**P631.3<sup>+</sup>25

**文献标识码:**A

## 1 引言

瞬变电磁法(TEM)是目前地球物理探测领域里一种应用前景非常广阔的新的勘探方法。与地球物理勘探领域中的其它方法相比,瞬变电磁勘探法有简单易行、信息丰富、精度较高,而且投资小、见效快和应用广等优点。所以应用领域不断扩大,近年已经在矿藏、油气田勘探中得到了广泛应用,并且正步入工程、地下水及地热勘查等行列,取得了可喜的成果<sup>[1~5]</sup>。瞬变电磁法属时间域电磁感应方法。它利用接地电极或不接地回线通以脉冲电流而在地下建立起一次脉冲磁场,在一次磁场间隙期间,利用探测线圈观测二次涡流场,从而得到地质结构和其分布信息。由于早期信号反映浅部地电特征,晚期信号反映较深部地电特征,这就可以达到测深的目的<sup>[6]</sup>。但是由于受探测仪器和探测方法的限制反映浅部地电特征的早期信号很难准确获得,所以以前TEM主要适用于较深地层地质结构勘探。随着TEM应用领域的不断扩大,特别是在工程物探或浅层勘探等方面的应用,早期信号就显得十分重要了。这就要求瞬变电磁仪具有很快的时间响应,才能够检测到反映浅部地层信息的早期信号。目前国内外生产的瞬变电磁仪多采用单片机系列,它们虽然有很多优点,但也存在一些不足,不利于早期信号检测。如速度慢,影响信号采集的速度和精度;存储量小,无法进行长时间大范围多点工作;界面差,不利于学习掌握和推

广;时间响应慢,早期信号检测有一定的难度。随着对早期信号研究的深入,我们发现接收线圈在一次场消失的瞬间所产生感应电流的暂态过程对早期信号采集的影响也不容忽视。鉴于以上原因,勘探部门要求我们研制一台可用于工程勘探的高性能的瞬变电磁仪。本文介绍了该瞬变电磁仪的硬件设计和软件编程。

## 2 硬件设计<sup>[8]</sup>

工程勘探瞬变电磁仪要求野外实用、体积小、重量轻、功耗低、存储量大、耐高温、耐低温和防水防磁等;瞬变电磁信号的特点是动态范围大,早期信号衰减速度很快,晚期信号很弱,所以仪器应具有分辨率高、抗干扰能力强、采样速度快和动态范围大等特点。由于外界存在较强的各种干扰,所以无论是硬件还是软件都要有很强的消除噪声的能力,以提高采集数据的信噪比。所以设计上我们采用了便携式工控机,其主频在200 MHz以上,内存32 M,硬盘3.2 G,信号采集的速度和精度大大提高,而且可以装配先进的计算机软件和大型计算程序,便于数据管理和实时计算分析。接收线圈在一次场消失的瞬间所产生感应电流的暂态过程对早期信号采集的影响也不容忽视,为了解决这个问题我们使用了一种新的程控天线接收技术。由于信号动态范围大、晚期信号弱,所以采用了多级放大和可编程放大。为消除共模干扰,我们采用高性能的差分对管功率放大器。由于

收稿日期:2000-04-03

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(69978019)

作者简介:李 实(1964—),男,山西太原人,西安交通大学在读博士生,电磁场与微波技术。

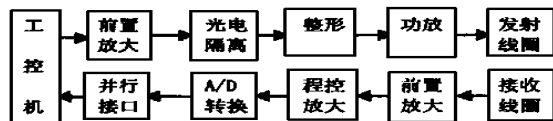


图 1 瞬变电磁仪结构框图

早期信号衰减快,采样间隔应尽可能小,以增加采样点数,所以在软件编程时我们采用了早期信号软件编程采样检测法原理,大大提高了采样精度。

瞬变电磁仪结构如图 1,其硬件系统由工控机、发射电路和接收电路组成。由工控机输出具有一定形状的发射信号,经前置放大、光电隔离、整形和功率放大后加到发射线圈向地下发射一次场。由于地下介质的涡流效应产生二次场向地面传播,通过接收线圈检测二次场信号,再经前置放大、程控放大后进行 A/D 采样。最后通过并行接口传输到工控机进行数据存储和处理。

在发射部分,一般发射电流和发射电压都很大,所以必须光电隔离,以免误操作损害主机;瞬变电磁仪对发射波形的上升沿、下降沿和方波间距要求很高,故所选元器件必须响应速度快、畸变小,并配以相应电路调整;为产生大功率双极性方波,我们采用由 MOSFET 构成的全桥开关电路。在接收部分,为了提高瞬变电磁仪数据采集的精度和速率,减小系统的噪声,必须考虑两方面的阻抗匹配,信号源阻抗与前置放大器源阻抗的匹配和放大器输入电阻抗使接收线圈处于临界阻阻状态的匹配。所以在设计中探测线圈与可编程放大器之间加上了差动前置放大器,以改善系统的噪声性能。为了从根本上解决接收线圈的暂态过程问题,采用了程控接收天线。为满足瞬变电磁信号动态范围的要求,我们在前置放大后接可编程放大器。它和模拟开关相配合,用增益“驱动”和“感受”脚使多工器的闭合电阻从电流通路中移去,从而使闭合电路误差转换成小的零失调误差,这对弱信号测量大有益处。

### 3 程控天线接收技术

#### 3.1 原接收天线存在的问题

TEM 的工作原理是发射线圈中的发射电流,在大地中产生一次磁场,一次场消失时在接收线圈中感应的电压及其暂态过程曲线和大地中二次场在接收线圈中感应的电压曲线叠加,即形成接收线圈实际测得的感应电压曲线。可见它不是单纯的二次场,而是夹杂了接收线圈暂态过程。在一般情况下接收线圈暂态过程比较短,所以不会出现在晚期信号里,但在早期信号里它很大,不容忽视。

通常使用的接收线圈可以近似地看作 LR 电路,接收线圈暂态过程实际上是 LR 电路的暂态过程,即:

$$V_1 = E e^{-\frac{R}{L}t} = E e^{-\frac{t}{\tau}},$$

其中  $\tau = L/R$  称为 LR 电路的时间常数。 $L$  越大  $R$  越小,则时间常数越大,通常人们总是希望接收线圈的增益大些(即  $L$  大),损耗小些(即  $R$  小),从而导致  $\tau$  很大,甚至达到 ms 数量级。但是,为测早期信号我们又希望时间常数越小越好,以缩小暂态过程的影响,便产生了矛盾。我们采用以下几种方法解决。

#### 3.2 抑制解决接收线圈暂态过程的几种方法

##### 3.2.1 数据处理法

接收线圈的暂态过程可以用数据处理的方法来消除。对于一定的接收线圈,其暂态过程的时间常数也是一定的。那么我们就可以把暂态过程曲线事先存入计算机,在后期处理数据时,把它从实测曲线中减去即可。从原理上来说,上述方法是可以实现的。但因为不是实时处理,实际应用中存在以下几个问题:

a. 发射线圈中的发射电流不稳定,发射电池使用时间久了,发射电流会有明显下降。实测曲线也会有明显下降。用一个固定的暂态过程与之相减就会产生误差。

b. 开始采样的初始时刻是根据实际需要而定的,而接收线圈暂态过程是在发射电流的下降沿开始,二者存在时间差。如何把实测曲线中相应的暂态过程减去有一定的难度。

c. 瞬变电磁仪所测的衰减信号变化范围很大,一般早期为 1V 左右,到晚期可以小到 mV 级。如果初级放大为 10 倍,那么即使后面可编程放大的放大倍数为 1,也有可能使早期信号(大约 10 V)超出 A/D 转换的输入电压范围(正负 5 V),造成信号丢失。

##### 3.2.2 接收线圈中设置初级放大法

为了抑制接收线圈的暂态过程,减小时间常数  $\tau$  根据  $\tau = L/R$  只有减小  $L$  或增大  $R$ 。显然增大  $R$  是不现实的,只有减小  $L$ 。即减少线圈匝数和面积,而由此产生的增益损失用初级放大电路来补偿。放大电路一般采用差分放大,以抑制共模干扰信号。初级放大电路部分应放在信号传输之前,这样可以抑制传输过程中产生的干扰。实验证明该方法是切实可行的。

##### 3.2.3 程控接收天线法

前面提到的两种方法对抑制接收线圈的暂态过

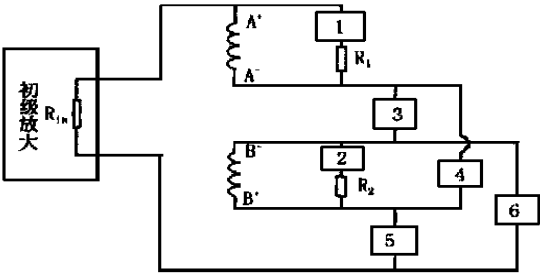


图 2 程控接收天线原理

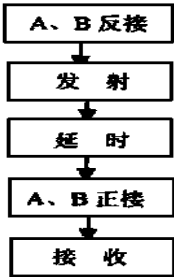


图 3 程序控制流程图

程起到了一定的效果,但它们都没有解决实质问题,即在接收线圈的已经存在的前提下如何削弱它。为了从根本上解决接收线圈的暂态过程问题,我们提出了一种新方法,即采用程控接收天线。

程控接收天线的原理如图 2 所示。其中, A 和 B 是参数完全相同的两个天线,  $A^+$ 、 $A^-$  和  $B^+$ 、 $B^-$  分别为 A、B 的两个输出端; 1、2、3、4、5 和 6 分别为 6 个开关。当 1、2、3 和 5 导通而 4 和 6 断开时, 可以看到线圈 A、B 反接, 彼此相互抵消, 接收线圈总的输出为“0”。当 1、2、3 和 5 断开而 4 和 6 导通时, 可以看到线圈 A、B 正接, 彼此相互叠加, 总的输出为 A、B 感应电压之和。

虽然接收线圈总的输出为零, 但是线圈 A、开关 1 和电阻  $R_1$  以及线圈 B、开关 2 和电阻  $R_2$  仍然分别形成两个电流回路, 它们同样也存在暂态过程。在暂态过程消失之前就转换, 线圈暂态过程的影响仍然起作用。图 2 中  $R_1$  和  $R_2$  很重要, 选得太小,  $\tau$  太大, 暂态过程长; 选得太大甚至断开, 就会产生 LC 振荡, 不同的初始采样时刻, 其实测曲线有正负振荡现象。所以要根据线圈的  $L$  和开关等分布电容  $C$  适当选择  $R_1$  和  $R_2$ , 使其处于临界阻尼状态, 这样暂态过程就会很快消失(如不计关断时间  $t_{off}$ , 我们用的线圈的暂态过程可达  $10\ \mu s$ )。这时再让线圈 A、B 正接, 接收到的将是纯二次场信号。其程序控制流程图如图 3。

4 软件编程

瞬变电磁仪系统软件程序分若干部分, 每部分

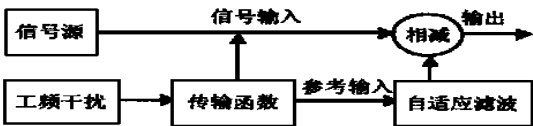


图 4 自适应滤波法示意图

采用模块化和子程序化设计。启动该软件后, 首先对硬件电路初始化进行系统自检, 然后进入工作方式的选择。工作方式主要包括发射方波频率、延时常数、每次采样道数、采样重复次数和数据存储地址等。每发射一个方波后, 经一定延时, 启动 A/D 转换。把 A/D 转换的数据传输到工控机, 存入指定地址。重复以上操作, 直到设定的采样次数为止。下面就软件编程中几个关键问题作简单介绍<sup>[7,8]</sup>。

4.1 早期信号软件编程采样检测法

在瞬变电磁法中, 早期信号衰减很快, 为了获得尽可能多的早期信号, 采样间隔应尽可能小, 以增加采样点数。随着衰减速率的减少, 可适当增加采样间隔, 减少采样点数。但是最小的采样间隔由采样系统本身固有的延迟时间决定, 这样往往使得采样间隔不能很小, 因而丢失一部分早期信号反映的地质信息。为此我们提出了一种方法: 用非实时采样结合软件编程检测早期信号, 而中晚期信号仍用实时采样, 上述采样过程可通过软件编程方法实现<sup>[7,8]</sup>。

4.2 自适应滤波法

瞬变电磁信号检测中, 50 Hz 工频干扰十分严重。用自适应滤波法能够很好地消除它。要实现自适应滤波, 首先必须选择一路参考通道, 从中取出参考信号 50 Hz 工频及其谐波。参考通道的 50 Hz 工频及其谐波应与信号中的 50 Hz 工频及其谐波相对应, 而与信号中的 50 Hz 频率分量无关。使参考信号和受干扰的信号叠加相减, 消除 50 Hz 工频干扰, 如图 4 所示<sup>[9]</sup>。

5 结果讨论

在实际应用中, 我们同时使用了上述接收线圈中设置初级放大法和程控接收天线法, 简称新方法, 而以前使用的方法简称为旧方法。其结果示意如图 5 所示。为了便于比较, 我们把新方法、旧方法和新、旧接收线圈的暂态过程放在同一图里。图中虚线表示新、旧接收线圈的暂态过程, 长划线表示旧方法的测量曲线, 实线表示新方法的测量曲线。从图中可以看出, 在旧接收线圈曲线的早期, 暂态过程占了很大的比例。如继续使用旧方法, 那么将严重影响二次场信号的采集和后期数据处理。而新接收线圈的暂态过程很短, 通过延时使暂态过程结束后再让线圈 A、

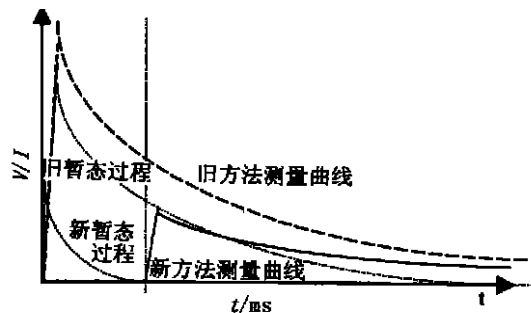


图 5 新旧方法对比示意图

B 正接,接收到的将是纯二次场信号。理论分析表明,纯早期二次场信号与理论结果很好地吻合,这对进一步的反演工作将十分有利。可见这种方法对消除接收线圈的暂态过程的影响和准确获得早期信号是十分有效的。

我们研制的工程勘探瞬变电磁仪中应用了以上几个关键技术。为看其效果,和以前研制的用单片机控制的瞬变电磁仪做了测试比较。其结果如图 6 所示。其中(a)为单片机控制的瞬变电磁仪所测的二次场信号衰减曲线,(b)为工程勘探瞬变电磁仪所测的二次场信号衰减曲线。从图 6 可见,(b)比(a)采样点密并呈规律的衰减曲线,而且一致性好,利于后期数据处理。另外,工控机瞬变电磁仪采用了自适应滤波和实际放大倍数的编程,有效地避免了 50 Hz 工频干扰以及因可编程放大器的理论值与实际值的偏差而造成的曲线阶跃。

## 参考文献

- [1] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 中南工业大学出版社, 1992. 171~172.

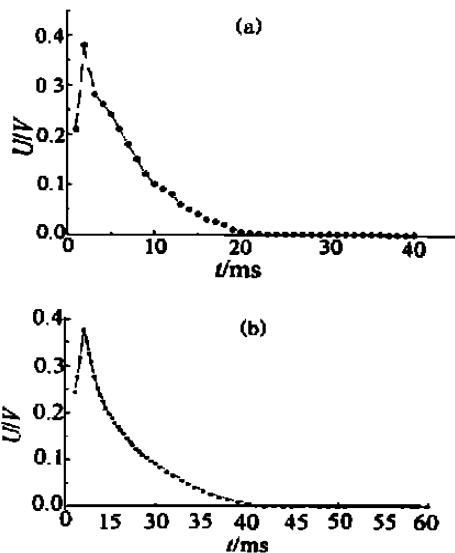


图 6 测试结果比较

- [2] 方文藻. 瞬变电磁测深法原理[M]. 西北工业大学出版社, 1993. 125~133.
- [3] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 地质出版社, 1990. 277~279.
- [4] Spies B P, Frischknecht F C. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics (ed. M N Nabighian) Electromagnetic Sounding [M]. Society of Exploration Geophysicists, 1991. 285~425.
- [5] Raiche A P. The effect of ramp function turn-off on the Tem response of layered earth [J]. Exploration Geophysics. 1984; 15:37~41.
- [6] 陈明生. 电偶源瞬变电磁测深研究(一) [J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(1): 55~59.
- [7] 李创社, 李实等. 瞬变电磁勘探中早期信号的检测方法研究 [J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(2): 58.
- [8] 李 实, 李创社等. 高性能瞬变电磁仪的研制和应用 [J]. 物探与化探, 2000, 24(1): 76~80.
- [9] 曹建章. 三维瞬变电磁场的数值计算及瞬变电磁仪的研制 [D]. 西安交通大学博士论文, 1998.

## Study of the key technology in TEM instrument

LI Shi, LI Chuang-she, ZHANG Yan-peng, ZHANG Peng-fei, SONG Jian-ping  
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

**Abstract:** Transient Electromagnetic Method (TEM) is a kind of promising measure method in the shallow geophysical soundings. As an important detecting tool, there are many key technology to be solved. So TEM soundings is limited in the shallow geologic structure exploration. In this paper, the key technology of hardware and software design in TEM. A new program-controlled antenna and early signal detecting are put forward.

**Key words:** TEM; TEM instrument; Program-controlled antenna; Signal detect

## 地面物探大规模用于确定防水煤柱

兖州矿业(集团)公司兴隆庄煤矿和煤科总院北京开采所共同完成的“特厚煤层综机分层顶水开采条件下提高回采上限试验研究”,系首例将钻孔声速法、超声成相法、数字测井等新方法用于测试“两带”的发育特征。该项目的研究采用了电镜显微技术评价防水煤岩体的质量,以大规模地面物探来确定防水煤柱的基岩面,用温度场监测的方法作为安全预报的手段,从而初步形成了研究覆岩破坏规律的综

合研究技术体系。近期已通过了技术鉴定。其研究成果成功地使兴隆煤矿的防水煤柱垂直高度从原先设计的 80 m 减少到 53 m,提高了资源的回收率,也极大地推动了水体下采煤技术的进步,为指导水体下安全合理开采提供了可靠的新途径,并且取得了显著的经济效益。

(山东邹县兖州矿务局科研所 李剑锋)