

基于积分电路的瞬变电磁信号噪声抑制方法

瞬变电磁测井信号易受外界噪声干扰，严重影响探测准确度。针对这一问题，以瞬变电磁理论为基础，通过对瞬变电磁信号特征进行研究分析，采用积分采样方法实现对瞬变电磁晚期信号的各测道进行检测，从强噪声信号中提取毫伏级信号。并在此基础上，实现对三分量探测信号的同步积分采样。实验结果表明，积分采样方法可以有效改善井下探测系统的信噪比，提高瞬变电磁测井性能。

安百新¹ 刘红兰¹ 杨 柳² 曲晓峰¹ 党 博³/1. 中石化胜利油田分公司石油工程技术研究院 2. 中石化胜利油田分公司纯梁采油厂 3. 西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室

0 引言

瞬变电磁法（TEM）是目前地球物理探测领域一种应用前景非常广阔的新式勘探方法^[1]。与地球物理勘探领域中的其他方法相比，瞬变电磁勘探法有简单易行、信息丰富、准确度较高、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、土地含盐量勘探和地质填图等方面得到了广泛应用。瞬变电磁法属时间域电磁感应方法，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，该二次涡流场中包含了丰富的地质信息。但是，二次电磁场信号往往受到来自瞬变电磁仪自身和外部电磁噪声干扰，使得深部地质目标的瞬变电磁响应被淹没在噪声之中。直接影响了瞬变电磁信号的质量以及后期的数据处理和反演计算等，所以研究影响瞬变电磁信号噪声干扰以及抑

制方法有着重要的现实意义。

1 瞬变电磁理论及其信号特点

1.1 瞬变电磁理论

瞬变电磁理论是由经典电磁学理论衍生出的一种时间域电磁检测方法，不再采用传统的单频连续信号激发源磁场，而是以有间歇的周期性阶跃脉冲信号作为激励。在发射线圈中的脉冲电流 $I(t)$ 关断时，接收线圈和包括金属套管在内的周围地层介质由直接变化的源磁场感应出交变场，称为一次场信号；这种激发方式具有瞬时和平面波场的特点^[2]，其在早期主要由高频信号分量组成，并由于趋肤效应在各介质层表面开始产生感应涡流，反映的是浅层地质信息。随后一次场的感应涡流向介质内部逐步以“烟圈”形式传播，由于其能量衰减变化而在各介质界面上激发出新的电磁场，成为对应的二次场信号。二次场衰减变缓、信号主要为低频分量，反映的则是较深处的地层信息。接收线圈中由二次场变化产生的感应电动势，正是对介质特性参数信息的直接反映，而且在时间上可以与一次感应电动势分开，即不同频率分量的二次场信号有不同的激励—响应延迟，同时具有不同的测深距离。正是基于瞬变电磁原理的以上特点，这一方法在勘探和检测领域得到了相当广泛的应用。TEM的收发波形如图1所示。

1.2 瞬变电磁信号特点

瞬变电磁接收系统所要测量的信号



安百新/工程师

关键词/Keywords

瞬变电磁法。
测井信号。
积分电路。
噪声抑制。
信噪比。

国家自然科学基金项目“瞬变电磁法三分量过套管储层探测方法研究”（51504194）。

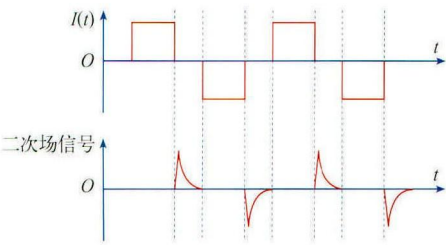


图1 TEM收发波形示意图

与时间有关，是一个随时间呈指数衰减变化的信号。衰减的速度与导体的时间常数有关，良导体初始响应不大，衰减速度慢；非良导体初始响应大，衰减速度快。对于不同的探测深度，所需要的时间范围也不同，探测深度越深，所需要的时间范围跨度就越大^[1]。由于信号是呈指数衰减变化，那么在如此大的时间范围里信号的动态范围也就很大，通常在100 dB以上，信号的衰减规律如图2所示。

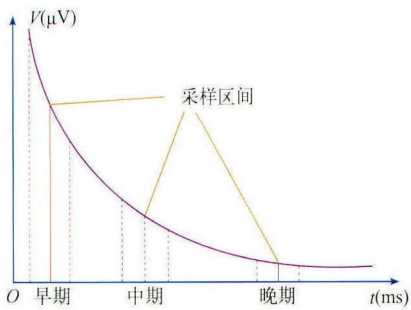


图2 瞬变电磁信号衰减特性示意图

瞬变电磁信号在各个时期变化相当大，跨度可从几伏到几微伏甚至到纳伏级别，早期信号衰减速度快、幅值大，晚期信号幅值小、衰减速度慢，因此对不同时期信号的测量，无论在方式还是方法上都要根据信号特点区别对待。对于早期信号需要很窄的采样间隔和门宽才能准确捕捉信号特性，而对于晚期信号，则需增大采样间隔和门宽以适应其信号微弱且衰减慢的特性。早期信号反映的是井下径向近层地质信息，晚期信号则反映的是井下径向远层地质信息，因此关注的重点应该放在晚期信号的提取分析上。

由于瞬变电磁系统的工作环境是在野外作业，而且其晚期信号十分微弱，必然会受到外部电磁噪声的干扰，也就是说想要得到有效信号就必须使用一定的技术方法和手段抑制和去除噪声干扰。

2 瞬变电磁信号噪声常用抑制方法^[3]

2.1 信号的累加

信号的累加是瞬变电磁系统提高信噪比常见的主要方法之一，累加方法就是把多次周期取样信号逐次地累加起来，最后取其平均值。一般来讲，经过n次取样累加后，可取得n^{1/2}倍的信噪比改善。

2.2 双极性同步采样法抑制噪声

在瞬变电磁仪系统中，为了抑制低频电磁噪声、风动噪声、前一个取样周期剩余信号以及更有效地抑制工业电及其谐波的干扰，往往使用占空比为1/4的双极性脉冲电流作为激励源，在正、负脉冲的间歇时间内观测二次场的瞬变特征。显然，经过这种处理后的值对于有用信号而言是累加的结果，然而对于缓慢衰减或变化的噪声而言，正、负半周期内其采样值的符号相反，两者相加将相互抵消，使输出的干扰电平大大减少。该方法也能抑制工业电及其谐波成分的噪声，这是由于当双极性脉冲电压波形的发送周期为50 Hz或为其谐波周期的整数倍时，其正、负半周期内分别具有完全相同的工业电及其谐波成分的波形，而且符号相反，累加后将被抵消，有效地抑制了工频干扰。但是，该方法对其他频率的干扰不能有效抑制。

2.3 递归统计估算法抑制噪声^[4]

由于激励源采用双极性的脉冲形式，所以消除了直流偏置和50 Hz噪声，于是就可以进一步处理数据，设噪声均值为

$$A_i = f + B_i + E_i \tag{1}$$

式中，f为瞬态响应的振幅；B_i为地磁的振幅；E_i为平均值为0和未知方差为σ²的噪声值。

当B_i和E_i已知时，可以得到

$$\sum \varphi \left(\frac{A_i - m}{\sigma} \right) = 0 \tag{2}$$

式中，m为f的估计值；φ为影响测量值的一系列函数，最简单的情况是φ(x)=x，其解是简单的平均，一般φ(x)是奇函数。

式(2)的递归解可表示如下，当A_{i+1}已知时

$$V_{t+1} = (A_{t+1} - m_t) / \sigma \tag{3}$$

$$m_{t+1} = m_t + \varphi(V_{t+1}) / ta_t \tag{4}$$

$$(t+1)a_{t+1} = ta_t + \varphi(V_{t+1}) \tag{5}$$

式 (5) 可改写为

$$a_{t+1} = a_t + [\varphi(V_{t+1}) - a_t] / (t+1) \tag{6}$$

递归算法需要知道 m 、 a 的初值 m_0 、 a_0 ，可以通过多次测量，用式 (2) 迭代解得 m_0 ，从而即可解得 a_0

$$a_0 = \sum \varphi \left(\frac{A_{t+1} - m_0}{\sigma} \right) / n \tag{7}$$

经 N 次测量后，标准误差可用式 (8) 计算

$$D_{SN} = -\frac{\sigma}{\frac{1}{N^2} a N} \left[\frac{1}{N} \sum \varphi \left(\frac{A_{t+1} - m_t}{\sigma} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

以上几种方法是目前针对瞬变电磁信号常用的几种消除噪声抑制的方法。

3 积分采样电路

基于对瞬变电磁信号特点和瞬变电磁常用噪声抑制方法的分析研究，在信号源选取方面，最终确定使用占空比为 1/4 的双极性方波脉冲作为激励源，这样有效地抑制了低频电磁噪声、风动噪声以及更有效地抑制了前一个取样周期剩余信号。

针对瞬变电磁晚期信号特别微弱，有效信号往往容易被噪声淹没的特点，经过反复分析和实验研究，优化采用了积分采样的方法对产生的噪声干扰进行处理。积分采样正是利用将有用信号累加的手段，提高信噪比，抑制噪声干扰，是 TEM 仪器常用的一种信号采样方法，其能很好地适应瞬变响应早期幅值大、衰减快，而晚期幅值小、衰减慢的特性。采用程控开关对运放和电阻、电容组成的模拟积分电路的采样时间间隔 t_s 和积分窗口门宽 t_w 进行控制，电路原理如图 3 所示^[5]，其中 A 为集成运放。CUP 控制 H1 程控开关的导通，从三路信号中选择一路信号进入积分电路，信号通过限流电阻 R 给反馈电容 C 充电，电容上的电压为输入信号的叠加，即

$$v_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_i}^{t_i+t_w} v_i(t) dt \tag{9}$$

将积分输出信号作为 A-D 芯片的采样输入，CUP 通过控制 H2，使电容两端相接并通过电阻放电，以确保下个积分采样从零状态开始。

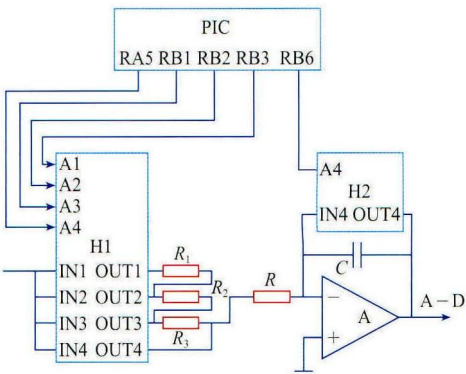


图3 模拟积分采样电路原理

由于积分窗口时间可由程序控制，而门脉冲与抽样函数构成傅里叶变换对，门宽越小其频域主瓣带宽越大。因此对于早期快速衰减的信号，可以选择较小的积分时间，这样门脉冲在频域包络线内的原信号频率成分越多，波形失真越小从而提高了对瞬变信号的分辨率^[6]。对于晚期慢衰减的信号，其幅值与噪声信号量级可能相当，因此可以选择较大的积分窗口时间，使得幅值较小的有用信号累加便于跟踪晚期信号的微小变化；同时对于零均值的加型噪声而言，在积分窗口内的累加可以使正负噪声信号相互抵消，从而有效降低干扰电平，提高了采样信号的信噪比。

由于在实际应用中使用的是三分量探头，所以在此基础上，还要实现对三分量探测信号的同步积分采样。正交放置的三个探头中，横向短探头 B 和 C 信号衰减速度快，纵向长探头 A 信号衰减速度慢（如长探头衰减零点在 50 ms 左右，应视具体问题和环境而定），故如上所述对其进行分时采集时，采样的间隔及积分窗口时长应在不同时期有所不同。横向短探头 B 和 C 信号采样时间间隔 t_s 及积分窗口门宽 t_w 都必须相当窄，以保证准确地分辨信号的衰减特性。纵向长探头 A 采样间隔及门宽应适当增大，以适应弱信号缓慢衰减的特性。因此本系统对横向短探头 B 和 C 采用快速等间隔采样，纵向长探头 A 信号采用近似等对数间隔采样^[7]，采样方法如图 4 所示。在这种采样方法中，

先确定前一取样通道的起始点及数据窗宽，再由这个数据窗宽确定下一采样通道的窗宽，使各个采样窗口的宽度为1.2倍的关系，这样可以适应瞬变信号特点并且有利于对采样值做几何平均等数学处理。

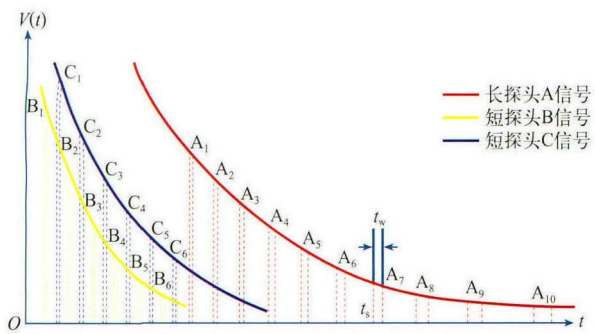


图4 积分采样方案示意图

4 噪声抑制效果分析

4.1 室内电路调试分析

如图5和图6所示，积分前后纵向长探头A信号波形对比，通过积分采样电路积分后的探测信号与进入积分电路前的信号波形差异明显。积分前波形有明显的尖峰，这是由于采样开关瞬间打开而引入的瞬态信号，附加在有用信号中成为无法消除的噪声干扰。在信号采样时间段内，有用信号上毛刺较多，如将其直接通入后面的A-D转换电路，转换后的数字信号受噪声影响较大，无法真实反映原始信号的信息，而且由于晚期信号特别微弱，最后几个采样时段内，有用信号的幅值

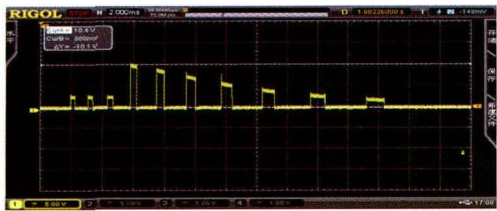


图5 积分之前信号波形

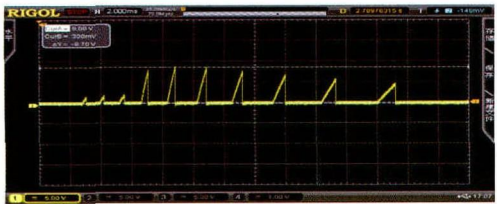


图6 积分之后信号波形

非常小，容易被噪声淹没。通过积分电路进行积分处理之后，有用波形上的毛刺被滤除，噪声明显被抑制，并且最后几个采样时间段内的信号幅值增大，更利于A-D转换电路处理。

图7为瞬变电磁探测仪横向及纵向三个探头组合进行等对数间隔积分采样后调试结果。对比图7调试波形和图4方案示意波形可以看出，通过积分采样的方法，在有效抑制噪声的基础上，保证了三分量探头测取信号的对应性及真实性，对瞬变电磁信号的采集十分有效，能够更好地适应实地测井环境。



图7 近似等对数间隔积分采样

4.2 现场测试数据对比分析

图8和图9分别为胜利油田夏52-211井仪器优化前后测井数据曲线。从图8和图9对实测的数据进行上位机处理后可明显地发现，经积分电路去噪处理后的曲线相对比较光滑，套管接箍及本体等

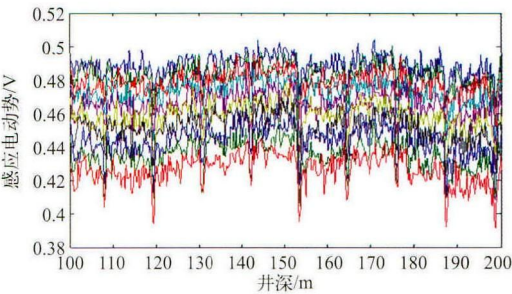


图8 未加积分电路的原始测井数据

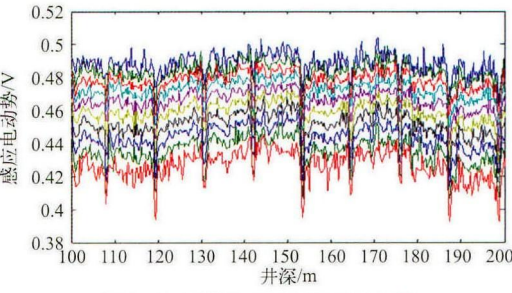


图9 加上积分电路后的测井数据

(下转第31页)

充电对电网冲击的效果。

4) 本文还对储能用于充电站扩容与电池梯次利用方面的经济性作了分析计算, 为求解不同场景下的储能容量配置提供参考。

参考文献

[1] 葛文捷, 黄梅, 张维戈. 电动汽车充电站经济运行分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28 (2): 15-21.

[2] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1998.

[3] 张颖达, 刘念, 张建华, 等. 含电动汽车充电站的风光互补系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (15): 126-133.

[4] Codemo C G, Erseghe T, Zanella A. Energy storage optimization strategies for smart grids [C]. IEEE International Conference, 2013: 4089-4093.

[5] 余岳, 栗梅, 孙尧, 等. 计及电动汽车的微电网储能单元容量优化[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (6): 1261-1267.

[6] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J]. 电网技术, 2009, 33 (20): 38-42.

[7] Lin L, Li L, Jia L. An optimal capacity configuration method of wind/PV and energy storage co-generation system [C]. PES General Meeting | Conference & Exposition, IEEE, 2014.

[8] 滕乐天. 电动汽车充电机(站)设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[9] 常雨芳, 王粟, 黄文聪, 等. 线性规划问题计算机求解方法研究[J]. 软件导刊, 2012, 11 (9): 25-26.

[10] 夏翔, 雷金勇, 甘德强. 储能装置延缓配电网升级的探讨[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24 (3): 33-39.

[11] 刘念, 唐霄, 段帅, 等. 考虑动力电池梯次利用的光伏换电站容量优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (4): 34-44.

(收稿日期: 2016-06-08) **EA**

(上接第25页)

信息可有效区分, 并获取到了部分优化前被掩盖在噪声中的有效信号, 壁厚分辨率由2 mm提高至1 mm, 数据信噪比得到很大提高, 由此能够更准确地识别套管信息并提高测井数据的解释效率。

5 结束语

在瞬变电磁信号噪声抑制方面, 实际测试中只要根据具体情况选择适当方法, 就能有效地抑制电磁噪声的影响。但无论采用哪种方法, 最后运用积分采样方法进行处理, 均可以得到更好的抑制效果。实验结果也表明, 运用积分采样方法对提高信号的信噪比作用明显, 有效信号被累积, 削弱了噪声的影响, 使得实时采集并以软件方式显示的测量信号质量大大提高, 有效地提高了测量数据的质量与解释的可靠稳定性。

参考文献

[1] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工

业大学出版社, 1992.

[2] 嵇艳鞠. 浅层高分辨率全程瞬变电磁系统中全程二次场提取技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[3] 李实, 宋建平, 等. 瞬变电磁仪中几种干扰的消除方法[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35 (4).

[4] Buselli G, Cameron M. Robust statistical methods for reducing sferics noise contaminating transient electromagnetic measurements [J]. Geophysics, 1996, 61 (6): 1633-1646.

[5] 潘浩, 李力, 等. 差分输入双积分电路在热电阻测温中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1312-1315.

[6] 宋汐瑾. 生产井瞬变电磁探测理论与方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

[7] 嵇艳鞠, 林君, 等. 瞬变电磁法中数据取样处理方法研究[J]. 物探与化探, 2003, 27 (2): 142-145.

(收稿日期: 2016-02-18) **EA**