

瞬变电磁法中数据取样处理方法的研究

嵇艳鞠,林君,程德福,于生宝

(吉林大学 智能测控技术研究所,吉林 长春 130026)

摘 要: 通过对瞬变电磁法中信号检测技术的研究,针对密集均匀分布的多点数据采集方式,提出对原始数据进行近似等对数间隔(1.2 倍关系)抽道取样并采样数据窗内的数据进行几何平均的算法,可提高信号对噪声的抑制能力。

关键词: 瞬变电磁法;数据取样方法;信号检测;

中图分类号: P631.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 8918(2003)02 - 0142 - 04

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,近年来已经成功地应用于金属矿、石油、煤气勘查等工程探测方面。它的仪器系统更新较快。如何将野外瞬变信号有效可靠地采样记录下来,一直是一个比较关键的技术。由吉林大学研制的 ATEM- 瞬变电磁系统采用“密集均匀分布多点采样”的数字取样方式,提高了对瞬变电磁信号的检测能力,可获得信噪比较高的二次场信号,完整、准确地反映地电断面结构。采用 ATEM- 系统在新疆土屋铜矿开展了试验工作,取得较好效果。

1 瞬变电磁信号的特点

瞬变电磁测深是一种时间域电磁勘探方法,它利用某种发射装置向地下发送一次脉冲磁场,在一次场间歇期间接收由地下异常地质体产生的感应电磁场(二次场),根据二次场随时间衰减的特征,对异常地质体的电性、规模、位置等作出某种程度的判断。

通常为了资料解释方便,需要绘制典型测点数据的衰减曲线、测线数据的剖面曲线、测区的视电阻率断面图等,为此,提供响应的晚延时数据在对数—对数或对数—线性坐标的曲线非常必要^[1]。

瞬变电磁场信号具有如下几个特点。

(1) 信号的动态范围大,同一个观测点早期到晚期的信号幅值从 $n \times 10^5 \mu\text{V}$ 变到 $0. n \mu\text{V}$ 。

(2) 信号的频带宽,信号频率从 $n \sim n \times 10^4 \text{ Hz}$ 。

(3) 信号衰减快,在早期,信号幅值高且衰减速度很快;而晚期的信号很弱,已达微伏数量级,并且衰减速度慢得多。

瞬变电磁信号在早、中、晚期的衰减速度差别相当大,在很宽的时间范围内为了不失真、准确地确定瞬变电磁信号的衰减特性,除了在足够宽的时间范围内必须有足够的取样道外,各取样道之间的间隔及取样数据窗口宽度应随取样道不同而有所改变。在早期,信号幅值高而且衰减速度快,因此取样时间的间隔及取样窗口的宽度都必须相当窄才能保证足以精确地分辨信号的衰减特性;在晚期,取样间隔及窗宽应增大,以适应弱信号慢衰变的特性。

2 瞬变电磁信号检测的方法

目前,国内外瞬变电磁系统很多,也采用了不同的方式。从目前各种仪器的分析来看,主要有 3 种方式:模拟积分取样、数字化叠加取样、模拟积分—数字化叠加取样。采用数字积分技术在每一个采样周期内可采样数很多(如 1 024,2 048 点)。硬件电路上不再需要 N 个积分器,大大简化了电路,节省了元器件及电路的调试过程。

(1) 模拟积分取样方式。Geonics 公司的 EM-37 系列就是采用模拟积分取样方式,在电路上采用多个积分器,分时段对信号进行采集。优点是采样精度高,缺点是电路设计复杂、对电路的精度要求也最高,信号的特点是取样的起始时间、取样窗口宽度及取样次数由时标信号确定,通常取样时间、取样次数

固定。^{2~4}

(2) 数字化叠加取样。数字化叠加取样是当前最流行的一种采样方式,其工作原理是对信号进行全波形密集均匀分布的多点采样,然后送入计算机进行数字处理,再进行软件积分。这种方式优点是使用灵活,电路简单,在计算机中可利用不同方法进行处理,增加仪器的功能和信号的检测。加拿大 CRONE 公司 PEM 系统、国内 WDC-2 型接收机及我们所研制的 ATEM- 型接收机均采用这种方式。

(3) 模拟积分—数字化叠加取样。该方法综合了上述 2 种工作方式,特点是晚延时数据精度高,早延时数据分辨率低。澳大利亚 SIROTEM 系统就采用这种方式。

3 数字化叠加取样中的取样道处理方法

综合上述瞬变电磁信号的特点,有限规模的导体响应在晚期按简单的指数规律衰减

$$i(t) = K / e^{-t/\tau}。$$

式中, K 为与时间无关的系数; τ 为导体的时间常数, $i(t)$ 为有限规模的导体响应。为了更好地反映地质信息,对数据的处理应遵循二次场变化规律。

在 ATEM- 瞬变电磁系统中,接收机采用“密集均匀分布多点采样”的数字取样方式^[5],采样率为 $10 \mu\text{s}$,采样窗口从 $10 \mu\text{s} \sim 2 \text{s}$ 可设。这样,在 1 个测点上可采集 2 000 个数据。为了提高数据的检测能力,对全波采集的数据进行了近似对数等间隔抽道取样处理,根据需要可以采用 $10^{0.05}$, $10^{0.1}$, $10^{0.2}$ 等不同对数间隔^[6]。

3.1 等对数间隔(数据窗不连续)

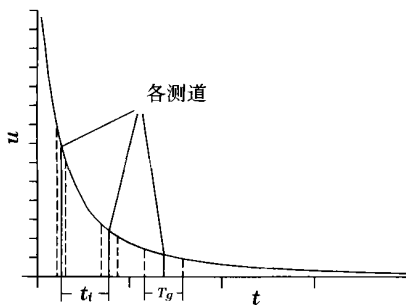


图 1 中心时间和数据窗等对数间隔

首先定原始衰减曲线取样道的中心时间,然后以 $10^{0.1}$ (即 1.26 倍关系) 为等对数间隔,先确定各取样道的中心时间 t_i ,再确定数据采样窗口宽度 T_g ,数据窗宽也以 $10^{0.1}$ 为等对数间隔,原理见图 1。

这种方式的优点为取样道的中心时间严格遵循对数等间隔;缺点是数据窗口不连续,丢失数据,对

于曲线相同数据点数取样道数变少。由于用数字方式采集,以 $10 \mu\text{s}$ 的采样率,数据窗口宽度不为整数,致使取样窗不严格遵循对数间隔。在这种抽道方法中,数据窗内数据平均方式采用的是算术平均。

3.2 等对数间隔(数据窗连续)

当数据采样间隔为等对数间隔 $10^{0.1}$ 即 1.26 倍时,若起始点数为 8,每一个数据窗的起始点为 $8 \times 1.26^{n-1}$,数据窗宽为 $8 \times (1.26^n - 1.26^{n-1})$, $n = 0, 1, 2, \dots, N$, N 由原始曲线的终止点决定。第一取样道起始点为 8,数据窗宽就为 $1.26 \times 8 - 8 = 2.08$,采样数为 2 个,采样数据为 8、9 两个时刻的数值进行计算。下一个数据窗口起始点为 $8 \times 1.26 = 10.08$,窗宽为 $8 \times (1.26)^2 - 8 \times 1.26 = 2.62$,取 2 个数据进行计算;实际上,数据窗起始点为 $8 \times 1.26 = 10.08$,而终止点为 $8 \times (1.26)^2 = 12.7$,应取 10, 11, 12 这 3 个数据进行计算。这种计算方法致使数据窗宽误差变大,每次数据窗宽前后误差各为 1 个点,前后时间误差最大各差 $10 \mu\text{s}$ 。在这种抽道方法中,取样道的中心时间、数据窗口均不能严格遵循等对数间隔,而且误差变大。

3.3 近似对数等间隔

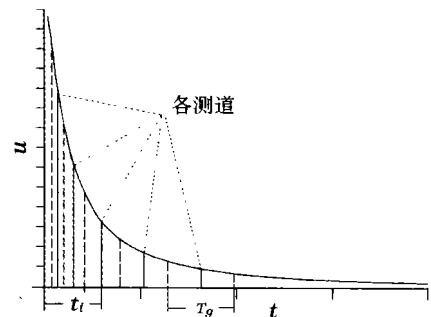


图 2 中心时间和数据窗近似等对数间隔

为了克服前两种抽道方法的缺点,我们提出了近似对数等间隔进行抽道,其原理如图 2 所示。数据窗宽为 1.2 倍的关系,比较接近对数间隔 $10^{0.1}$ (1.26 倍),使计算误差变小。在这种方法里,我们先定前一测道的起始点,计算数据窗宽 T_g ,决定该取样道内的参加的数据个数,再由前一个数据窗宽定下一测道的起始点,对数间隔可根据需要设定。这样,即保证数据窗连续,又保证了取样道的中心时间、数据窗宽之间的关系遵循 1.2 倍间隔。

若起始点数为 8,数据窗宽就为 $1.2 \times 8 = 9.6$,采样数为 1 个,在采样时,将起始点 8 包括在内,和 9 一起参与计算,下一个数据窗口起始点为 9,终止点为 $9 \times 1.2 = 10.8$,窗宽为 $10.8 - 9 = 1.8$,将取 9 和 10 这 2 个数据进行计算,这样,数据窗宽度有一

定误差,每次最大误差为 1 个点,时间误差最大差 10 μs ,使中心时间比较接近 1.2 倍的对数近似等间隔。在这种抽道算法中我们采用几何平均。可以看到,数据窗宽的误差同采样率有直接的关系,若采样率提高到 5 μs 或更小 $\rightarrow 1 \mu\text{s}$,那么在数据窗参加平均的采样点数变多,并且数据窗宽的误差也变小。为此,提高数据的采样率是必要的。表 1 给出了各取样道的采样数及中心时间数据。

表 1 各取样道的采样数及中心时间数据 ms

取样道	采样数	中心时间	取样道	采样数	中心时间
1	2	0.0849	14	24	1.3032
2	3	0.1097	15	29	1.5678
3	3	0.1398	16	35	1.8873
4	4	0.1747	17	42	2.2718
5	5	0.2196	18	50	2.7312
6	6	0.2745	19	60	3.2805
7	7	0.3395	20	72	3.9396
8	8	0.4144	21	87	4.7334
9	10	0.5042	22	104	5.6871
10	12	0.6141	23	125	6.8305
11	14	0.744	24	150	8.2036
12	17	0.8987	25	180	9.8513
13	20	1.0835			

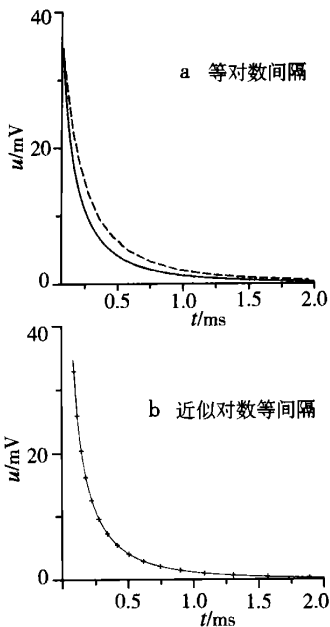


图 3 2 种抽道方法效果对比

图 3 为采用中心时间和数据窗近似等对数间隔与近似对数等间隔 2 种方法的抽道曲线对比,可以看出图 3b 中的曲线拟和的比较好,误差不大。

4 提高瞬变电磁信号对噪声的抑制能力

在瞬变电磁仪器系统中,采用发射占空比为 1

的双极性脉冲电流及多次累加的数字取样方式来抑制低频电磁、风动噪声、前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是很有效;但对于在一次观测时间内可能发生数次的突发性高值噪声,如雷电及电力用电转换时将产生的突发性随机干扰电平,采用上述方法并不能取得效果^[7]。因此,在后期数据处理过程中,为了有效去掉这种噪声,我们采用了先剔除高值数据后,再对每个取样道内的信号进行累加,得到观测值,在进行信号累加时我们采用了 2 种方法,即几何平均和算术平均 2 种。

瞬变电磁信号晚延时数据在双对数坐标下遵循线性变化,这是我们采用几何平均进行处理数据的主要依据。表 2 为 2 种算法的部分结果对比,事实证明,几何平均值比算术平均值小,同原始曲线拟和的比较好,累加误差小于算术平均累加。

表 2 不同算法处理的感应电压数据结果 μV

取样道/ms	几何平均	算术平均	原始数据
0.0849	32912.3	32959	31205
0.1097	25906.79	25973.33	25858
0.1398	20399.62	20435.67	20372
0.1747	16176.84	16214.75	15670
0.2196	12568.1	12602.4	12546
0.2745	9613.972	9643.667	9385
0.3395	7286.685	7310.143	7279
0.4144	5484.853	5502.625	5374
0.5042	4062.026	4079.6	4002
0.6141	2934.966	2948.417	2900
0.744	2099.788	2109.286	2070
0.8987	1475.951	1483.765	1467
1.0835	1022.762	1028.85	1016
1.3032	708.8738	713.3334	718
1.5678	477.8813	480.8967	489
1.8873	319.9216	322.343	318
2.2718	210.6566	213.0239	199
2.7312	141.1484	142.4401	139
3.2805	93.771	94.6501	112
3.9396	62.3286	62.9445	66
4.7334	44.4584	45.7242	52
5.6871	30.6159	33.2501	32
6.8305	25.3396	27.9841	28
8.2036	18.4939	20.8468	24
9.8513	14.6332	18.039	15

5 结语

在 ATEM 瞬变电磁系统中信号取样方式采用了数字化叠加取样,其具有简化电路结构,同时又可全波形密集均匀多点采样等优点。在处理数据时,为了抑制突发性的随机干扰高电值噪声,我们提出采用近似对数等间隔(1.2 倍)抽道处理方式,在数据窗内对采样值进行几何平均的累加方法,该方

法对抑制这类噪声有较好的效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 林君. 甚早期时间域电磁法——VETEM[J]. 国外地质勘探技术,1997,(6):1-5.
- [3] Lin Jun. Sensitivity analysis and comparison of frequency-domain electromagnetic system configurations[R]. ISAPE '2000, China, 2000.
- [4] 于生宝,林君. 瞬变电磁法中发射机关断时间的影响研究[J]. 石油仪器,1999,13(6):15-17.
- [5] Lin Jun, Cheng Defu, Liu Guoxing, et al. Development of the array transient electromagnetic system and its experiments[J]. Journal of geoscientific research in northeast asia, 2000, 3(1):99-106.
- [6] Lin Jun, Li Tonglin, Yu Shengbao. Non-Uniform sampling and robust stacking of transient electromagnetic signal, international conference on signal processing[R]. ICSP '98, Beijing, 1998.
- [7] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1992.

SAMPLING AND PROCESSING TECHNIQUES OF DIGITIZED SIGNALS IN TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD

J I Yan-ju, L IN Jun, CHEN G De-fu, YU Sheng-bao

(Institute of Intelligent Measurement and Control Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: This paper studies signal acquisition and processing techniques in the transient electromagnetic method. The densely and uniformly distributed original data are sampled at the interval of approximative logarithm (about 1.2 times of equal logarithm). By means of geometrical average in sampling window, the SNR (Signal-to-Noise Ratio) is improved.

Key words: transient electromagnetic method; method of data samples; signal detection technique

作者简介: 嵇艳鞠(1972-),女。1997年毕业于长春科技大学测试计量技术及仪器专业,现为该院讲师,博士研究生,主要从事瞬变电磁法仪器的研究和数据正反演研究。

服务信息 ·

岩 矿 石 物 性 服 务

物化探研究所物性实验室一直从事岩矿石物性的调查与研究,取得了大量的科研及生产成果,并积累了较先进的各种物性参数的测试设备。现承担地质大调查项目《全国岩石物性数据库建库》的公益性工作,已积累了河北、河南、山西、陕西、江西、宁夏等六省区 19 万条区域岩矿石物性数据。以此为基础,物化探所物性实验室将继续服务于地质勘探事业,提供多方位的岩矿石物性服务。

物性数据服务: 免费提供公益性物性数据。

物性测试服务: 提供岩矿石规格化样品加工,物性参数(电阻率、极化率、磁化率、剩磁强度及方向、

密度、弹性波速等)的测试。

物性研究服务: 根据特定的地质勘探任务,提供物性工作设计、野外样品采集、室内测试研究等辅助性的物性工作。

联系人:李 磊

地址:河北省廊坊市金光道物化探研究所物性实验室

邮编:065000

Tel:0316-2212703

E-mail: lxwjjuan@heinfo.net