瞬变电磁测深中数据处理偏差及修正方法

龙建钢1,2,谢兴楠1,3,吴小平1,2,柳建新1,2

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院,湖南 长沙 410083;2. 有色资源与地质灾害探查湖南省 重点实验室,湖南 长沙 410083;3. 华东有色地质勘查局,江苏 南京 210007)

摘要:瞬变电磁测深方法中通常采用阶跃波激励方式的模型进行处理。在实际应用中,为了便于重复观测,一般 采用方波形式进行激励,采用阶跃波模型进行数据处理和解释;这种处理方式理论上存在比较大的偏差。为了修 正这种偏差,通过理论计算,建议采用单脉冲电磁测深方法来处理方波激励源的电磁测深结果。实例分析表明,该 方法是可行的。

关键词:阶跃波;方波;电磁响应;单脉冲电磁测深方法;视电阻率 中图分类号: P631.3
立献标识码: A
文章编号: 1000 - 8918(2011)04 - 0553 - 04

瞬变电磁测深是地球物理勘探中一种比较常用 的时间域测深方法。由于电磁场的复杂特性,在实 际应用和解释中,往往采用阶跃波激励的模型作为 研究和解释时间域的电磁场响应的基本模型。但在 实际的电磁测深应用中,却采用方波的方式进行激 励。显然,方波的激励方式和阶跃波的激励方式的 电磁响应有着很大区别。方波的激励可以看成是2 个相隔一定时间段的反向阶跃波激励的合成,这样, 如果采用方波的激励方式,却采用单个阶跃波激励 的电磁响应来解释观测结果,显然就会出现很大的 偏差;特别是在信号本身就非常弱小的晚期,这种偏 差就会被进一步放大。如何规避、修正这种偏差,在 瞬变电磁测深方法处理中意义重大。

1 理论分析

图 1 显示两个反向的阶跃激励波形,图 1a 是在 t = -T 时刻的升阶跃波激励源的波形,而图 1b 则 显示的是在t = 0 时刻的降阶跃波激励源波形。无 论是数学理论计算还是物理直观分析,都很容易得 到方波激励信号的电磁响应。

图 1c 显示,方波的跃变激励可以看成是 2 个阶 跃激励的叠加合成。如果将方波激励的下降跃变的 时刻计为 t,那么上升跃变的激励时刻就会变成 t + T时刻,假定上升阶跃激励的电磁响应为f(t),显然 下降 阶 跃 激 励 的电 磁 响 应 就 是 -f(t)。图 1 a 显示,在时间轴对应t时刻的电磁响应应该是



图1 系列波形

f(t+T),而从图 1b 可以得到时间轴对应的 t 时刻 的电磁响应应该是 -f(t)。因此,可以很容易地得 到方波激励的电磁响应为

$$f^{\rm squ}(t) = f^{\rm step}(t+T) - f^{\rm step}(t) , \qquad (1)$$

写成电场(E)和磁场(H)的响应形式就是

$$E_{\varphi}^{\text{squ}}(t) = E_{\varphi}^{\text{step}}(t+T) - E_{\varphi}^{\text{step}}(t) , \qquad (2)$$

$$\frac{\partial H_z^{\text{sequ}}(t)}{\partial t} = \frac{\partial H_z^{\text{sequ}}(t+T)}{\partial t} - \frac{\partial H_z^{\text{sequ}}(t)}{\partial t} \,\,. \tag{3}$$

式中,上角标 squ 表示方波, step 代表阶跃波。

2 方波激励源的电磁响应及视电阻率

均匀半空间的磁偶极子阶跃波激励源的时间域 电磁场响应为^[9]

收稿日期:2010-04-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2011BAB04B08)、中国地质调查局科研项目(资[2011]03-01-64);有色资源与地质灾害探查湖南省重 点实验室项目(2010TP4012-6)、矿产资源与灾害探查湖南省高校创新团队项项目([2008]244)

$$E_{\varphi}(t) = \frac{3P_{M}\rho_{1}}{2\pi r^{4}} \Big[\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u \Big(1 + \frac{u^{2}}{3} \Big) e^{-\frac{u^{2}}{2}} \Big],$$
(4)

$$\frac{\partial B_{z}(t)}{\partial t} = \frac{9P_{M}\rho_{1}}{2\pi r^{5}} \Big[\sqrt{\frac{2}{\pi}} u \Big(1 + \frac{u^{2}}{3} + \frac{u^{4}}{9} \Big) e^{-u^{2}/2} - \Phi(u) \Big],$$
(5)

式中, $\Phi(u)$ 为概率函数, P_M 为激励源的偶极矩, ρ_1 为均匀半空间电阻率。由此,可以得到单脉冲激励 源的时间域电磁响应

$$E_{\varphi}^{x}(t) = \frac{\partial E_{\varphi}(t)}{\partial t} = \frac{P_{M}\rho_{1}}{2\pi\sqrt{2\pi}r^{4}t}u^{5}e^{-u^{2}/2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial B_{z}^{*}(t)}{\partial t} = \frac{P_{M}\rho_{1}}{2\pi\sqrt{2\pi}r^{5}t}u^{5}(u^{2}-2)e^{-u^{2}/2}, \quad (7)$$

$$u = \frac{2\pi r}{\tau}, \tau = 2\pi \sqrt{\frac{2\rho t}{\mu_0}} = \sqrt{2\pi\rho t \times 10^7}_{\circ}$$

图 2 所示为不同脉宽的方波激励下的均匀无限 半空间的电磁响应。可以看到,随着方波脉冲宽度 逐步加大,电磁响应曲线逐渐接近阶跃波的电磁响 应;而随着方波脉冲宽度逐步变窄,电磁响应曲线逐 渐接近单脉冲的电磁响应。





从式(2)、式(3)可知,在瞬变电磁测深方法中, 使用方波激励时的电磁响应结果去近似阶跃波激励 源的电磁响应时,就相当于忽略了一个提早时刻为 *T* 的反向阶跃激励的电磁响应,也就是人为地降低 了电磁响应的数值。 根据时间域电磁测深方法中的晚期视电阻率 (磁偶极子激励)公式^[9]得知,视电阻率与电磁响应 的 2/3 次幂成反比例。也就是说,当采用方波激励 信号的电磁响应来近似阶跃激励源的电磁响应时, 人为地降低了电磁响应的数值,也就是相当于人为 增高了视电阻率的数值。

图 3 为不同脉宽方波激励时,用阶跃波晚期电 场、磁场视电阻率公式计算的结果。可以看出,无论 是根据电场还是磁场计算得到的晚期视电阻曲线, 都与理论的阶跃波激励的视电阻率值有偏差。随着 方波脉宽的逐步变窄,电阻率曲线的畸变会逐步变 大,早期和晚期的变化更加厉害,中部稍好,但也有 问题。所有的视电阻率都比理论计算的阶跃波激励 视电阻率要高,特早期和特晚期变化要比中间部位 严重。





在进行电磁测深方法处理时,通常是把大地当 成线性时来看待的,因此,在处理将方波激励源近似 为阶跃波激励源的电磁响应时,从大地的电磁响应 来看,它由2个相反的阶跃激励合成。

3 数据修正及处理方法

假定采用阶跃波激励时的时间域电磁响应为 g(t),δ函数波形激励源激励时的时间域电磁响应为 s(t),方波(时间宽度为 T)激励时的时间域电磁响 应为 f(t),则有 s(t) = g(t),f(t) = g(t+T) - g(t),

从而可以得到

$$f(t) = g(t + T) - g(t) = \int_{t+T}^{t+T} g'(t) dt = \int_{t}^{t+T} s(t) dt_{\circ}$$
(8)

从式(8)可以看到,方波激励源信号的时间域电磁 相应是相应一个方波宽度的时间段范围内的单脉冲 (δ函数)激励源的时间域响应的总和(积分)。当 方波激励信号脉宽比较窄时,单脉冲激励信号源的 电磁响应变化不大,可以将式(8)简化为

$$f(t) = \int_{t}^{t+T} s(t) dt \approx T * s(t)$$
(9)

由式(6)和式(7)可以得到

$$\rho = \mu_0 r \bigg/ \bigg\{ 2t \bigg[\frac{\partial B_z^x(t)}{\partial t} \bigg/ E_\varphi^x(t) + \frac{2}{r} \bigg] \bigg\}_{\circ} \quad (10)$$

式(10)是单脉冲激励源方式激励下的时间域视电 阻率计算公式。由式(9)可以看出,方波激励源的 电磁响应与单脉冲激励源的电磁响应成正比关系, 这样,磁场响应和电场响应的比率就会一致。也就 是说,用方波激励源信号的电磁场响应代入式(10) 中,可以得到单脉冲激励方式的视电阻率。因此在 使用方波激励源进行激励时,可以采用单脉冲激励 源的电磁测深方法进行处理和解释结果,而最好不 要采用阶跃波激励源的解释方法。

图 4 显示的是在电阻率为 100 Ω · m 的均匀无 限半空间表面的磁偶极子的情形,各种波形的激励 源按照单脉冲电磁测深的视电阻率公式计算的视电 阻率及误差。从图中看,无论是阶跃激励的电磁响 应,还是方波激励的电磁响应,视电阻率的相对误差 都没有超过 10%,并且随着时间的推移呈指数规律 减小。其中误差最大的是阶跃波的激励响应,它在 一定时间后,相对误差稳定在 1% 左右;而对于方 波,脉宽越窄,误差越小,且随时间减少越快。



图4 各种电磁响应的单脉冲视电阻率(上)及其相对误差(下)

4 实例分析与结论

(m·Ω)/

图 5a 是湖南某地采用 LOTEM 方法实测的视电 阻率曲线。测区位于某金属硫化矿的有效矿床的上 部,由于地处山麓,地表浮土层较厚,浮土下是泥盆 纪灰岩层,下面是侵入的花岗岩体及接触带,矿床就 在接触带中。地表浮土电阻率约为 500 ~1 000(电 阻率单位: $\Omega \cdot m$,下同),泥盆纪灰岩层电阻率平均 为 2 000 ~4 000,下层接触带及岩体电阻率为 600 ~ 800。从实测图形中很难看出地下电性结构分布情 况。可以按照均匀半空间、两层、三层的模型来设计 反演初始模型。如果模型按均匀半空间设计,得到 的解为 150,显然与实际情况不符。当采用两层模 型时,反演结果是上层电阻率 450,下层电阻率 88, 上层深度 800 m,也很难与实际相符。采用三层模 型,反演结果为, $\rho_1 = 605$, $\rho_2 = 2$ 800, $\rho_3 = 450$, $h_1 =$ 400 m, $h_2 = 100$ m, 上层 400 m 的浮土层显然与实



图 5 湖南某地实测(a)及修正后(b)的视电阻率曲线

际情况难符合。

图 5b 是采用笔者介绍的修正方法进行修正后 的视电阻率曲线,图中很容易看到这是一个三层介 质的时间域测深曲线,通过设置三层模型进行反演, 得到结果为: $\rho_1 = 883$, $\rho_2 = 3$ 212, $\rho_3 = 656$, $h_1 = 72$ m, $h_2 = 450$ m。这一结果与实际情况基本吻合。

通过这个实例可以看到,当采用方波激励源,而 依然套用阶跃波的视电阻率计算时,整个视电阻率 的曲线形态都会发生变化,给反演时进行模型选择 带来干扰;而采用单脉冲电磁测深方法,获得了好的 效果,证明这个修正方法是行之有效的。

参考文献:

- [1] Combrinck M. Analysis of numerical differentiation methods applied to time domain electromagnetic(TDEM) geophysical data in the S-layer differential transform [J]. Computer & Geosciences, 2009,35:1563 1573.
- [2] Michael S Z, Dmitriy A. Pavlov Analysis and interpretation of anomalous conductivity and magnetic permeability effects in time domain electromagnetic data Part II: Sµ-inversion[J]. Journal of Applied Geophyics, 2001, 46:235-248.
- [3] Effhimios T, Michael S Z, Kazushige Wada, et al. Toshiaki hara fast imaging of TDEM data based on S-inversion [J]. Journal of Ap-

plied Geophyics, 2000, 43:15-32.

- [4] 薛国强,李貅.瞬变电磁测深早期数据的修正[J].地球物理学 进展,2008,23(1).
- [5] 考夫曼・凯勒. 频率域和时间域电磁测深[M]. 北京:地质出版社,1987.
- [6] 韩自豪,魏文博,张文波. 华北煤田瞬变电磁勘探深度研究[J]. 地球物理学进展,2008,23(1).
- [7] 滕吉文.当代地球物理学研究的核心科学问题和发展导向 [J].地球物理学进展,2008,23(3).
- [8] 王华军.时间域瞬变电磁法全区视电阻率的平移算法[J].地 球物理学报,2008,51(6).
- [9] 吴小平,何继善,柳建新.电磁波的阻抗变换作用对地质雷达 探测效果的影响[J].地球物理学进展,2006,21(1).
- [10] 吴小平, 柳建新, 段无悔,等. 地形畸变对偶极—偶极电阻率测 深拟断面图的影响[J]. 地球物理学进展,2010,25(2).
- [11] 吴小平,柳建新,段无悔,等.一种实用的时间域电磁测深解释 方法[J]. 地球物理学进展,2010,25(3).
- [12] 许诚,白登海,丁艳飞.低感应数条件下大地电导率测量方法研 究[J]. 地球物理学进展,2010,25(4).
- [13] 吴小平,柳建新,雒志峰.一种多尺度电磁测深方法[J].地球 物理学进展,2010,25(5).
- [14] 强建科,罗延钟,汤井田,等. 航空瞬变电磁法的全时域视电阻 率计算方法[J]. 地球物理学进展, 2010,25(5).
- [15] 李貅,威志鹏,薛国强,等.瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓 成像[J].地球物理学报,2010,53(12).

DEVIATION OF DATA PROCESSING IN TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SOUNDING AND ITS CORRECTION

LONG Jian-gang^{1,2}, XIE Xing-nan^{1,3}, WU Xiao-ping^{1,2}, LIU Jian-xin^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Changsha 410083, China; 3. East-China Mining and Geology Group Co., LTD for Non-Ferrous Metals, Nanjing 210007, China)

Abstract: The transient electromagnetic sounding method is often processed with the step wave model by using square pulse wave activate source. This operation will result in obvious deviation in theory. The authors suggested using single pulse (function) active source electromagnetic sounding method for processing data and explaining the square pulse active source. Practice shows that this means is feasible.

Key words: step wave; Ssquare wave; response of electromagnetic field; single pulse transient electromagnetic sounding method; apparent resistivity

作者简介:龙建钢(1963-),男,湖南桃江人,硕士,主要从事时间域电磁方法研究。