文章编号 1005-0388(2006)02-0284-04

瞬变电磁法浅层探测技术①

于生宝 王 忠 嵇艳鞠 林 君
(吉林大学智能仪器与测控技术研究所, yushengbao2000@163.com, 吉林 长春 130026)

摘 要 从理论上推导发射电流关断时间对瞬变电磁法勘探结果的影响,给出均匀半空间大地模型重叠回线互阻抗计算方法,分析阶跃关断与线性关断早期瞬变响应的区别,讨论了线性非零关断瞬变电磁法发射信号对浅层探测结果的影响。利用 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)实现瞬变电磁法发射电路,减小发射机关断时间,使之接近理想的阶跃函数,消除非零关断的影响,解决了加大发射电流与快关断的矛盾。实验结果表明,减小发射电流关断时间,可以提高瞬变电磁浅层勘探结果分辨率,减小瞬变电磁法勘探盲区。

关键词 瞬变电磁,关断时间,探测盲区
中图分类号 TH762 **文献标识码** A

Time domain transient electromagnetic shallow prospecting

YU Sheng-bao WANG Zhong JI Yan-ju LIN Jun
(*Institute of Intelligent Instrument and Measurement Technology, Jilin University, yushengbao2000@163.com, Changchun Jilin* 130026, *China*)

Abstract The effect of turn-off time of transmitting current on transient electromagnetic exploration is derived theoretically, the mutual-impedance of coincident loop in uniform half-space is evaluated, the difference effect of step turn-off and linear turn-off on early transient signal is analyzed, and the effect of linear nonzero turn-off of transmitting current on shallow subsurface sounding is discussed. A insulated-gate bipolar transistor (IGBT) is used in transient electromagnetic transmitter system to shorten turn-off time. The turn-off waveform is designed to approach ideal step function to eliminate the effect of nonzero turn-off and solve the conflict between strengthening transmitter and rapid switching. The experimental results indicate that shortening turn-off time can enhance resolution of transient electromagnetic for shallow subsurface sounding and reduce the blind zone of transient electromagnetic sounding.

Key words transient electromagnetic, turn-off time, blind zone

1 引 言

电磁方法是浅部环境与工程探测的重要手段,就目前来说,所有浅部探测方法均是由相应的深部探测方法发展而来的[1]。电磁方法分两大类:频率域电磁方法(如 MT)和时间域电磁方法(如 TEM)。近地表目标探测对于电磁方法来说是一个难题,而这一范围却与人类活动极为密切,地下 2～100m 左

① 收稿日期:2004-10-09

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

右的深度范围是频率域方法的一个弱视区(或半盲区)。对于时间域来说,探测深度是由观测时间的早晚决定的,目前时间域瞬变电磁法(TEM)仪器记录的几乎全部是晚期信号,或者在数据处理时仅采用了晚期信号,这种情况将产生两种后果:第一,它损失了 TEM 方法探测浅部结构的能力,因为浅部结构的信息主要由早期信号携带;第二,它降低了 TEM 方法的分辨能力,因为关断电流的影响将使瞬变响应发生畸变[2],因此,从地表到地下 20m 左右也是瞬变电磁法探测的半盲区。瞬变电磁法发射机输出信号的关断沿近似为抛物线或指数函数,用实际的关断沿进行解释非常困难,实际中都是用理想的阶跃函数近似解释,但结果会与实际情况有很大差异[2]。要探测浅层目标体,有效的办法就是减小发射电流的关断时间。

2　非零关断的影响

瞬变电磁法中一般假定电流关断是一个理想的阶跃函数,如图 1(a)所示,但实际上不可实现,由于发射线圈的非零闭环响应和发射机特性决定,电流的下降需要一定时间,下降方式可能是线性,也可能是按抛物线或指数规律,这里只就线性关断进行讨论,如图 1(b)所示。通常瞬变电磁法的算法都是与发射电流和关断时间有关,且假定电流关断如图 1(a)所示。

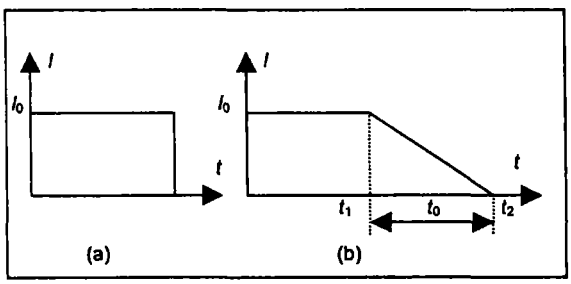


图 1　阶跃关断与线性关断波形

在层状大地介质中,半径为 a 和 b 同心圆形线圈瞬变电磁互阻抗 $Z(t)$ 计算公式为[3]:

$$Z(t) = -\pi\mu ab\int_0^\infty L_p^{-1}[I(p)\,pA_0(P,p,\lambda)]\cdot J_1(\lambda a)\,J_2(\lambda b)\,\mathrm{d}\lambda \qquad (1)$$

(据 A P Raiche. 1984.)。式中 $A_0(P,p,\lambda)$ 为层状结构大地阻抗函数,P 为厚度与其电阻率的乘积,p 为与 $-\mathrm{j}\omega$ 对应的拉普拉斯算子,ω 为角频率,λ 为汉克尔逆变换的积变量,$I(p)$ 为归一化的电流波形拉普拉斯变换,L_p^{-1} 为关于 p 的拉普拉斯逆变换,J 为贝赛尔函数[3]。

当发射线圈与接收线圈用相同的回线时(半径为 a),即采用重叠回线,引入几何因子:

$$Q(\xi,K) = J_1^2(\xi) = J_1(\lambda a)\,J_2(\lambda b)$$

$K=\rho'a$,$\xi=\lambda a$ 代入方程(1)并简化为:

$$Z(t) = -\pi\mu a\int_0^\infty L_p^{-1}[I(p)\,pA_0]\,Q(\xi,K)\,\mathrm{d}\xi \qquad (2)$$

线性关断电流如图 1(b)所示,其表达式为:

$$I(t) = \begin{cases} 1 & t < t_1 \\ \dfrac{t_2 - t}{t_2 - t_1} & t_1 < t < t_2 \\ 0 & t > t_2 \end{cases}$$

其拉氏变换为:

$$I(p) = L_p[I(t)] = \frac{1}{p}\left[1 - \frac{\mathrm{e}^{-pt_1}}{p(t_2 - t_1)} + \frac{\mathrm{e}^{-pt_2}}{p(t_2 - t_1)}\right.$$

代入方程(2)中并设:

$$G_0(t) = L_p^{-1}(A_0)$$

$$G_1(t) = L_p^{-1}[p^{-1}A_0\mathrm{e}^{-pt_1}](t_2 - t_1)^{-1}$$

$$G_2(t) = L_p^{-1}[p^{-1}A_0\mathrm{e}^{-pt_2}](t_2 - t_1)^{-1}$$

方程(2)可以简化为:

$$Z(t) = -\pi\mu a\int_0^\infty [G_0(t) - G_1(t) + G_2(t)]\cdot Q(\zeta,K)\,\mathrm{d}\xi \qquad (3)$$

在实际地球物理勘探中,相对于 t_0 来说 t_1 是足够大的,初始时间一般选择 $t_1 = 0$,其中 $G_0(t)$ 是稳态电流 I_0 响应,与关断时间无关,可以忽略。平移电流波形坐标原点至 (t_1, I_0) 点,方程(3)可以化为:

$$Z(t) = \pi\mu a\int_0^\infty L_p^{-1}\left[\frac{A_0(1 - \mathrm{e}^{-\delta p})}{\delta p}\right]Q(\xi,K)\,\mathrm{d}\xi \qquad (4)$$

其中:$\delta = t_2 - t_1$

将 $F(t,\xi) = -L_p^{-1}\left[\dfrac{A_0}{p}\right]$ 代入方程(4)可以简化为:

$$Z(t) = \frac{\pi\mu a}{\delta}\int_0^\infty [F(t-\delta,\xi) - F(t,\xi)]\,Q(\xi,K)\,\mathrm{d}\xi \qquad (5)$$

若 $q = \sigma\mu a^2 p/\xi$　　$\tau = t/\sigma\mu a^2$

由 $L_p^{-1}[f(p)] = \dfrac{\xi}{\sigma\mu a^2}F(\xi\tau)$ 知:

$$F(\xi\tau) = -L_q^{-1}\left[\frac{A_0(q)}{q}\right] = -L_p^{-1}\left[\frac{A_0(p)}{p}\right]$$

根据 A P Raiche 的计算结果[3],使用同步线圈,并进行拉普拉斯变换、展开贝赛尔函数,方程(5)最终可以简化成如下形式:

$$Z(t) = \frac{2\mu a}{t}\sqrt{\pi}\,X^{\frac{3}{2}}$$

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(-1)^k(2k+2)!X^k}{k!(k+1)!(k+2)!(2k+5)!}T_z(\alpha,k) \tag{6}$$

其中:

$$T_z(\alpha,k)=\frac{1}{\alpha(k+\frac{3}{2})}\left|\frac{1}{(1-\alpha)^{k+\frac{3}{2}}}-1\right|$$

$$\alpha=\delta/t \qquad X=\alpha\mu a^2/4t$$

当 $\alpha\to 0$ 时, $T_z(\alpha,k)\to 1$, $Z(t)$ 即为阶跃函数关断的响应。

从方程(6)中可以看出关断时间 $t_0=t_2-t_1$ 对早期互阻抗有较大影响,如图 2 所示,视电阻率为 1000Ω·m 的均匀半空间模型在不同关断时间的响应, $t_0=0$ 的曲线反映了视电阻率早期和中期内的下降特性,最后接近均匀半空间的电阻率,随着关断时间 t_0 的增加,早期视电阻率误差也逐渐增大,然后随时间增加逐渐接近均匀半空间电阻率,图 3 给出同一均匀半空间模型线性关断与阶跃关断视电阻率比值(K_t)随时间变化曲线,更直观地给出线性关断电流的关断时间对早期视电阻率的影响[4]。

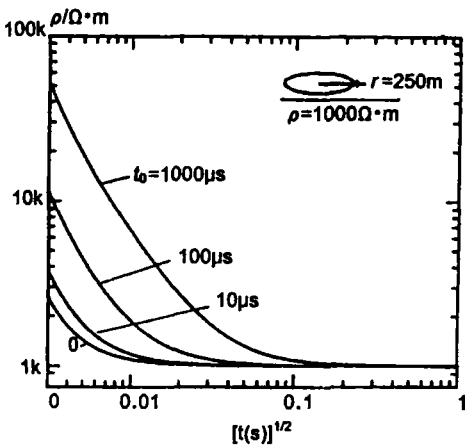


图 2 均匀半空间模型关断时间对视电阻率的影响

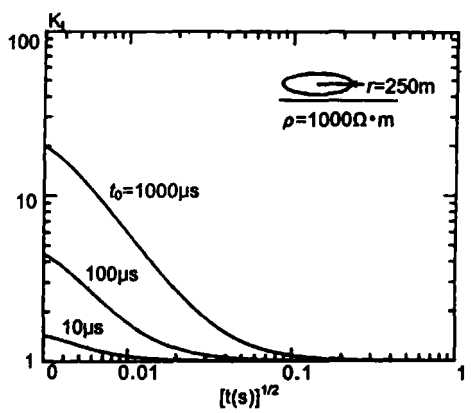


图 3 均匀半空间模型线性关断与阶跃关断视电阻率比

3 测试与应用

在地矿部"九·五"重点项目《同步测量技术及其在电法中的应用》中采用 IGBT 及双桥式逆变电路实现了瞬变电磁发射机,关断时间达 1.2μs(纯电阻负载)。关断时间测试结果如表 1(测试仪器: TEKTRONIX 100M 示波器;输出电压 20V;负载 4×100m 线圈;输出频率 12.5Hz;测试次数 20×6 次)。

表 1 关断时间测试

负载电阻(Ω)	7	5	4	2.8	1.5	1
输出电流(A)	3	4	5	7	13	20
关断时间(μs)	36	48	64	80	160	400

为了验证系统在浅层工程探测中的有效性,在长春市郊某地进行了城市活断层探测。活断层是导致多种地质灾害,特别是地震、崩塌、滑坡、地表错断的重要根源,对地面设施、建筑破坏力极大,因此,城市活断层探测对于工程安全性评价、减灾防灾具有重要意义。为验证瞬变电磁法发射电流关断时间对浅层勘探结果的影响,采用快关断浅层瞬变电磁探测系统对该活断层进行了探测,由于测区宽度有限,只能铺设 10m 的线框,采用了重叠回线装置,发射回线为边长 10m 的正方形线圈,接收回线的面积 100m^2,点距为 10m,发射电流为 6.2A,发射频率为 25Hz,关断时间 $t_0=18\mu s$。并与常规瞬变电磁探测结果进行了对比。图 4 给出常规瞬变电磁法解释结果与浅层瞬变电磁法解释结果对比图。从视电阻率的断面图中可以看出浅层瞬变电磁探测方法对近地表的电性变化信息有了一定反映,从测线 680m 处高程为 -10m 开始至测线 640m 处高程为 -50m 之

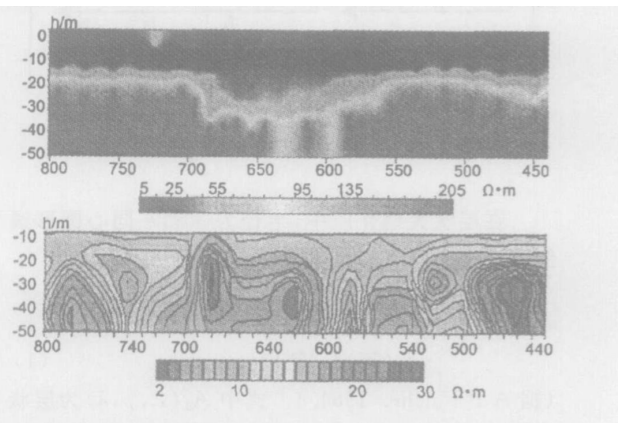


图 4 蔡家村城市活断层常规瞬变电磁结果(上,据曾昭发 2003)与浅层瞬变电磁法解释结果剖面(下)对比

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间,断层反映清楚。勘探结果在距地面 10m 以下准确反映了活断层的信息,比常规瞬变电磁法提高了浅层分辨能力。

4　结论

传统电磁法一般假定关断电流波形是理想的阶跃函数,电磁法发射机电流关断时间大约为 50μs～300μs,如果忽略了关断时间,解释结果中早期视电阻率就会产生很大误差,如图 3 推导结果及图 4 实际应用所证明,关断时间越长,影响越大,被测对象电阻率越大,影响也越大,关断后,影响随时间增加而减小[4]。为了使解释结果准确可靠,一种方法是在处理瞬变电磁数据时进行校正,从数据中消除关断时间的影响,通过曲线匹配进行数据解释。另一种方法尽量减小发射机关断时间,使之接近理想的阶跃函数,消除非零关断的影响。

参考文献

[1] M N Nabighian. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics[M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 1987, 402～431.

[2] 白登海.瞬变电磁法中两种关断电流对响应函数的影响及其应对策略[J].地震地质,2001, 23(2):245～251.

[3] A P Raiche. The effect of ramp function turn-off on the TEM response of layered earth[J]. Exploration Geophysics, 1984,15(1):37～41.

[4] D V Fitterman, W L Anderson. Effect of transmitter turn-off time on transient soundings[J]. Geoexploration, 1987, 24(2):131～146.

[5] 朱凯光等. 基于 MATLAB 的高频谐变电磁场的数值计算[J].电波科学学报, 2002, 17(3):224～228.
K G Zhu, *et al*.. Numerical computation of high frequency electromagnetic fields under MATLAB[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002,17(3):224～228.

[6] 于生宝等. 瞬变电磁法中发射机关断时间的影响研究[J].石油仪器,1999,12(6):15～17.

[7] 程德福.近区磁源瞬变电磁法信号检测技术研究[D].长春:吉林大学博士论文,2002,17～35.

[8] 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:吉林大学博士论文,2004.40～55.

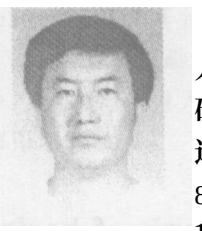
[9] Hesham M. El-Kaliouby § and Essam A Eldiwanyz. Transient electromagnetic responses of 3D polarizable body[J]. Geophysics, 2004,69(2): 426～430.

[10] 白登海等.时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003,46(5): 697～704.

[11] 唐新功,胡文宝.层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应[J]. 石油地球物理勘探,2000, 35(5):628～633.

[12] 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,2002,75～90.

[13] 闫述等.瞬变电磁场的直接时域数值分析[J]. 地球物理学报,2002, 45(2):276～282.



于生宝　(1963 -),男,吉林人,吉林大学智能仪器与测控技术研究所,教授,博士 毕业于俄罗斯远东国立技术大学,主要参与完成 863 计划、国家十五科技攻关、自然科学基金项目 5 项,主持部级项目 1 项,学校项目 1 项;获国家发明专利 2 项,实用新型专利 1 项;获教育部科技进步 2 等奖 1 项、吉林省科技进步 1 等奖 1 项。主要研究方向:地球物理仪器。



王　忠　(1979 -),男,山东人,博士研究生,吉林大学智能仪器与测控技术研究所,助教。



嵇艳鞠　(1972 -),女,黑龙江人,博士,吉林大学智能仪器与测控技术研究所,副教授。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net