

论瞬变电磁测深法的探测深度

薛国强

(西安交通大学电子与信息学院)

摘 要

薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 575~578

文中分析了瞬变电磁发送线圈等效回路的暂态过程, 得出线圈自感信号振幅的理论表达式, 认为线圈自感信号的衰减不仅与时间有关, 而且与等效回路的材料有关; 计算了不同大小线圈的自感信号的幅值和衰减时间范围, 得出了瞬变电磁测深法对地探测时存在一个最小深度的结论。由于电磁信号在地下传播时不断衰减, 瞬变电磁测深法有一个最大探测深度。对大小不同的线框和不同介质电阻率等常用装置及典型地电情况, 给出了估算瞬变电磁能探测的最小和最大探测深度的方法及估算结果。得出的结论对野外生产具有指导意义。

关键词 瞬变电磁 最小探测深度 最大探测深度 线圈自感 信号衰减

引 言

瞬变电磁法是利用阶跃波或其他脉冲电流场源激励大地产生过渡过程场, 断电瞬间在大地中形成涡旋交变电磁场, 测量这种由地下介质产生的二次感应电磁场随时间变化的衰减特性, 从而达到解决地质问题的目的^[1]。由于瞬变电磁所发射的阶跃脉冲实际上是由各种高频和低频谐波叠加而成, 一次发射可以同时完成不同深度的信息探测, 所以此方法的探测效率高。

由于瞬变电磁场在介质中传播时能量不断地衰减, 具有趋肤效应, 当能量衰减到一定程度时就不可分辨, 所以此方法具有最大探测深度。一般情况下都是根据关断时间和趋肤深度来估计探测深度, 但探测深度受各种因素影响, 如目标层大小及电性、目标层异常与地质噪声的分离程度、电磁噪声电平, 所以估算探测深度时应考虑上述影响因素。

通常所说的瞬变电磁对目标层的探测深度, 主要指瞬变电磁的最大探测深度。但还有一个不被人们关注的问题, 那就是最小探测深度, 即瞬变电磁对地探测时还存在一个不可探测的“盲深度”。因为不论是发送线圈还是接收线圈本身都有一个固有的过

渡过程, 接收线圈所接收的信号有两种: 一种是来自地下的电磁感应信号, 另一种是线圈本身的自感及发送线圈的自感影响。在瞬变电磁接收信号的早期时间道中, 线圈自感信号比有用信号大得多, 但比有用信号衰减也快得多, 所以总存在一个使瞬变电磁无法分辨有用信号的时间范围。对这一问题的讨论和定量估计, 目前较少引起人们的关注。

如何进行信号分离, 研究瞬变电磁早期信号特征, 提高瞬变电磁的浅层分辨能力, 这是一个难点^[2]。在研究这一问题之前, 必须定量确定线圈自感的影响时间范围及瞬变电磁的最小探测深度。本文就是基于这一情况, 对均匀半空间条件下瞬变电磁响应信号和线圈的自感信号进行分析和对比, 找出自感信号的影响幅度和范围, 计算出可分辨有用信号的最早时间, 给出了估算瞬变电磁能探测的最小深度的方法和公式及估算结果。同时分析了最大探测深度的影响因素, 计算了不同情况下瞬变电磁方法的最大探测深度。

最小探测深度分析与计算

线圈暂态过程分析

线圈相当于等效 RCL 回路, 即可看成是由一个

本文于 2003 年 9 月 16 日收到。
基金项目: 国家自然科学基金(49974026), 教育部“教育振兴行动计划”资助项目。

电阻电感和电容组合成的电路^[3~5],如图1所示。图中 R^* 是线圈的电阻, R 是匹配电阻, C 是等效电容, U 是发送电压, L 为自感,它与线圈的形状、大小及周围的介质有关。当突然断开或接通电路中的电源时,这个电路中的电流将从原来的状态向着新的稳定状态变化,这种变化过程不可能瞬时内完成,中间存在一个过程,其回路方程为

$$IR - i_1 \frac{1}{pC} + i_2 \frac{1}{pC} = 0 \quad (1)$$

$$i_2 \left(pL + \frac{1}{pC} + R^* \right) - i_1 \frac{1}{pC} = 0 \quad (2)$$

$$i_1 = \frac{p^2 + m^2}{p(p+m)^2} = \frac{p}{(p+m)^2} + \frac{m^2}{p(p+m)^2}$$

经过域的变换,得到时间域方程

$$i_1(t) = 2Imte^{-mt} \quad (\text{断电后线圈的自感电流}) \quad (3)$$

$$U(t) = 2IRmte^{-mt} \quad (\text{断电后线圈的自感电压}) \quad (4)$$

上述式中: p 是阶跃源的谱; m 是一个常数, $m = 1/\sqrt{LC}$,单位为 s^{-1} 。

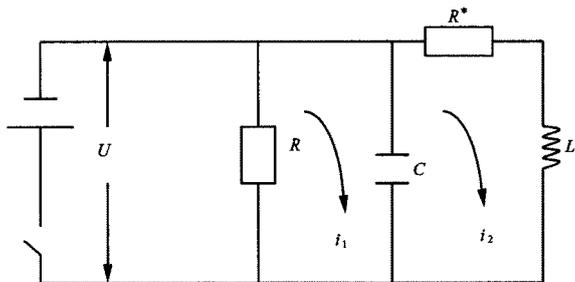


图1 单匝线圈的等效回路图

为判断自感信号的变化特性,经过对式(4)求导,可知线圈自感信号的衰减规律:当 $t=0$ 时, $U(t)=0$;随着时间的增加,当 $t=\frac{1}{m}$ 时, $U(t)$ 达到极大值;当 $t>\frac{1}{m}$ 时曲线迅速衰减到零。对于不同的材料, m 值并不相同。

在文中计算时, L 采用如下的式子^[4]

$$L = 22.28 \times 10^{-7} \left[\ln \left(\frac{a}{r_0} \right) - 1.75 \right] \quad (5)$$

其中: a 为方框的边长, $a \geq r_0$,采用较常用的线材 $r_0 = 0.73\text{mm}$;等效电容 $C_{RLC} = 4LC_1$, C_1 为每米长度的线圈电容,计算中取值为 $160 \times 10^{-9}\text{F}$ 。

最小深度的计算

电磁感应信号衰减很慢,而线圈的自感信号却衰减很快。根据这一特点,笔者定义自感信号衰减三个数量级时的时间为最早可分辨时间,其所对应的深度为最小探测深度。具体计算步骤如下:

- (1)对于一定的导线材料,根据式(5)计算材料电感;
- (2)在已知材料电感和给定电容的情况下,计算参数 m ;
- (3)根据参数 m ,利用公式 $t = \frac{1}{m}$,算出 $U(t)$ 达到极大值时所对应的时间;
- (4)根据式(4),算出 $U(t)$ 的极大值;
- (5)算出 $U(t)$ 极大值的千分之一值;
- (6)根据式(4),由步骤(5)的结果算出时间,这一时间即为最早可分辨时间 t_{\min} ,它的单位是 μs ;
- (7)依据下式

$$h_{\min} = \sqrt{t_{\min} \rho}$$

计算出最小探测深度,式中: h_{\min} 为最小探测深度,单位为 m ; ρ 为表层电阻率,单位为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

笔者分别计算了 $50\text{m} \times 50\text{m}$, $100\text{m} \times 100\text{m}$, $200\text{m} \times 200\text{m}$, $600\text{m} \times 600\text{m}$ 四种野外常用的装置情况下的自感信号随时间衰减值,表1和图2给出了 $600\text{m} \times 600\text{m}$ 时的计算结果(单位: $1 \times 10^1\text{V}$)和衰减曲线。

从表1和图2中可以看出, $600\text{m} \times 600\text{m}$ 回线装置下自感信号在早期快速衰减,到 $11.5\mu\text{s}$ 时,其能量从 6.335V 衰减到 0.005V ,已经衰减了三个数量级,这一时间认为是有用信号的最早可分辨时间。

对四种不同大小线圈的自感信号衰减分别进行了计算,把各自的信号衰减至其极大值千分之一时的时间列成表2。由表2可知,线圈的大小不同,早期信号中的自感信号衰减延迟时也不同,即有用信

表1 600m×600m回线装置下的自感信号随时间衰减值

$t/\mu\text{s}$	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
$U(t)/\text{V}$	6.335	5.851	5.084	4.026	3.06	2.262	1.662	1.167	0.821	0.527	0.395	0.271	0.185
$t/\mu\text{s}$	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	
$U(t)/\text{V}$	0.125	0.085	0.057	0.038	0.025	0.0168	0.011	0.0083	0.005	0.003	0.0023	0.0016	

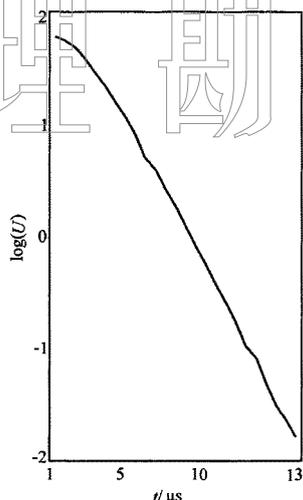


图 2 600m×600m 回线装置的自感信号随时间衰减曲线

号的可识别时间延迟不同。线框越大,延迟时越长;线框越小,延迟时越短。但它们都比较接近,基本上在 10μs 左右。应当指出,自感信号的衰减时间与浅层地下介质有关。当浅层电阻率较高时,同样大小的线圈自感信号衰减时间延迟要比表 1 中的结果大;当浅层介质电阻率较小时,情况相反。

把表 2 列出的时间定义为最早可分辨延迟时间,也就是忽略线圈自感影响时的时间下限值,这一时间所对应的探测深度为最小探测深度。

表 2 均匀半空间条件下不同线圈的最早可分辨时间延迟(单位 μs)

线圈边长(m×m)	50×50	100×100	200×200	600×600
$t_{end}(\mu s)$	10	10.5	11	11.5

表 3 为不同线圈在不同电阻率情况下的最小探测深度。由表 3 可知,不同线圈大小和不同近地表电阻率值的自感信号的穿透深度不一样,即最早可识别有用信号的穿透深度不同。线框越大,电阻率越高,瞬变电磁可探测的最小深度大,即瞬变电磁法的“盲深度”大;线框越小,电阻率越小,情况相反。其主要原因是低阻介质对早期高频段的吸附作用强。

表 3 不同线圈不同电阻率情况下的最小探测深度(单位 m)

线圈边长 (m×m)	$\rho/(\Omega \cdot m)$				
	1	10	50	100	200
50×50	3.16	10	22.36	31.6	44.72
100×100	3.24	10.24	22.91	32.4	45.82
200×200	3.31	10.48	23.45	33.16	46.90
600×600	3.39	10.7	22.4	33.91	47.95

最大探测深度的分析与计算

最大探测深度公式

涡旋场在大地中主要以扩散形式传播,在这一过程中,由于趋肤效应,高频部分主要集中在地表附近,且其分布范围是源下面的局部,而低频部分传播到深处,且分布范围逐渐扩大。传播深度和传播速度分别为

$$h = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t/\sigma\mu_0} \quad (6)$$

$$V_z = \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (7)$$

其中: t 为传播时间; σ 为介质电导率; μ_0 为真空中的磁导率。

由式(6)得

$$t = 2\pi \times 10^{-7} h^2 / \rho \quad (8)$$

在中心回线下,时间与表层电阻率、发送磁矩之间的关系为

$$t = \mu_0 \left[\frac{(M/\eta)^2}{400(\pi\rho_1)^3} \right]^{1/5} \quad (9)$$

其中: M 为发送磁矩; ρ_1 为表层电阻率; η 为最小可分辨电压,它的大小与目标层几何参数、物理参数和观测时间段有关。求解式(8)、式(9),可得

$$h = 0.55 \left(\frac{M\rho_1}{\eta} \right)^{1/5} \quad (10)$$

由式(10)可知,瞬变电磁的探测深度与发送磁矩、覆盖层电阻率及最小可分辨电压有关。此式为野外工程中常用来计算最大探测深度的公式。

最大探测深度的计算结果

利用式(10),即可根据野外工作常用的装置及发送电流(不同边长线圈、不同发送电流、不同电阻率)算出瞬变电磁探测深度,如表 4、表 5 所示。

从表 4 和表 5 的数据分析可知,增大电流或增大发送线框,即增大发送磁矩,就可增大探测深度,

表 4 最大探测深度计算结果表(单位:m)

线圈边长 (m×m)	$\rho/(\Omega \cdot m)$				
	1	10	50	100	200
50×50	75.5	120.2	165.9	190.6	218.9
100×100	100.1	158.7	218.9	251.5	288.9
200×200	132.1	209.4	288.9	331.8	381.2
600×600	164.4	253.9	448.3	515.0	591.6

注:最小可分辨电压为 0.5nV/m², I=10A

表5 最大探测深度计算结果表(单位:m)

线圈边长 (m×m)	$\rho/(\Omega \cdot m)$				
	1	10	50	100	200
50×50	87.7	138.1	190.6	218.9	251.5
100×100	115.0	182.2	251.5	288.9	331.8
200×100	151.7	240.5	331.8	381.2	437.9
600×600	235.5	373.2	515.0	591.6	679.5

注:最小可分辨电压为 $0.5nV/m^2, I=20A$

反之亦然。同样,介质的电阻率大探测深度也大,这是因为电磁场在高阻介质中传播时,受介质的吸附作用小,即能量损耗小,所以传播的距离较远。

结 论

由于线圈有暂态过程的存在,使瞬变电磁早期信号畸变。文中从定性和定量上分析和计算了线圈自感信号的衰变规律,找出其时间延迟范围,试图通过一定条件下的近似方法,来确定不同线圈和不同地电情况下的过渡过程所引起的探测深度范围的变化。通过计算和对计算结果的分析得出的结论是:通常用的回线源装置下,回线的自感信号衰减延迟为

$10\mu s$,瞬变电磁的最小探测深度为 $1\sim 50m$;最小探测深度受地表介电性影响比回线尺寸的影响大。

根据瞬变电磁场在地层中的扩散传播规律,导出了瞬变电磁最大探测深度公式,并对不同情况进行了计算,计算结果及结论对生产具有指导作用。影响瞬变电磁探测深度的因素很多,文中只做了几种情况下的定量分析,如何提高瞬变电磁法的探测能力,在方法研究和资料处理中还有许多工作要做。

参 考 文 献

- [1] 方文藻,李予国,李貅.瞬变电磁测深法原理.西安:西北工业出版社,1993
- [2] 李貅.瞬变电磁测深的理论与应用.西安:陕西科学技术出版社,2002
- [3] Akaufmam A and Hoekstra P. Electromagnetic Soundings. Amsterdam: Elsevier, 2001
- [4] 蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探.北京:地质出版社,1998
- [5] 牛之琰.时间域电磁法原理.长沙:中南工业大学出版社,1992
- [6] Kamenetsky F and Oelsner C. Distortions of EM transients in coincident loops at short-time-delay. *Geophysical Prospecting*, 2000, 48(6): 983~993

(本文编辑:冯小球)

· 消息 ·

反射系数无约束反演新技术——开发地震与高分辨率处理

在地震采集数据为 $1ms$ 采样并采用本技术处理时,剖面频带可展宽至 $10\sim 250Hz$,可分辨 $3\sim 4m$ 厚的小砂体;当采用 $2ms$ 采样处理时,剖面频带可展宽至 $10\sim 125Hz$,可分辨 $6\sim 7m$ 厚的砂体。

技术详情可参见网址 <http://liuqy39.myrice.com> 主页,或者按下面信息联系。

单位:天津奥来尔石油科技有限公司

地址:天津塘沽区外滩聚宝大厦 804 室 邮编:300450

联系人:刘企英 刘征宇

电话:022-25818348,022-25305348 手机:13820399721

传真:022-25305348

Email: lqy95@sohu.com