大回线源瞬变电磁法最小探测深度的分析与估算

薛国强[1]，宋建平[1]，阎仕农[1]，阎　述[1,2]

(1. 西安交通大学电子与信息学院，西安　710049；2. 煤炭科学研究总院西安分院，西安　710054)

摘要：由于线圈的自感耦合作用，使瞬变电磁早期时间道信号严重失真。为研究瞬变电磁早期信号的特性，分析了瞬变电磁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，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不可分辨的“盲深度”。作者提出了不同线框大小和不同介质电阻率情况下，估算瞬变电磁能探测的最小深度的方法并给出了估算结果。所研究成果对进一步研究瞬变电磁早期场的附加效应打下了基础。同时得出的瞬变电磁最小探测深度的结论对野外生产工作具有指导意义。

关键词：回线源；瞬变电磁；最小探测深度；线圈自感；暂态过程

中图分类号：P631　　**文献标识码**：A

Abstract: Because of the self-transition of the loop the early signal of transient electromagnetic method (TEM) is greatly abnormal. In order to study the characteristics of the early signal with TEM the transient process of transient electromagnetic loop is discussed and the theoretical equation for the self-transient signal is given. The amplitude and the decay time scope of different loop are calculated. It is indicated that a lind depth exists with TEM. The minimum detecting depth by the said method is presented for the different media and the loop sizes. The calculation method and the results are also given, which lay a foundation for the further study on the additional effect of the early field and for the guide to the field inspection.

Key words: loop source; transient electromagnet; minimum detecting depth; self-transition of loop; self-transient course

1　引言[1,2]

瞬变电磁法是利用阶跃波或其它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，从而解决地质问题。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迭加而成，一次发射可以同时完成不同深度的信息探测，所以该方法以探测效率高，分辨能力强等特点广泛用于工程勘察中。

通常所说的瞬变电磁对目标层的探测深度，主要是指瞬变电磁的最大探测深度。即由于趋肤效应的存在，瞬变电磁法有一个探测深度的极限。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，一种是来自地下的电磁感应信号，一种是线圈本身的自感。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，但它比有用信号衰减也快得多，所以总存在一个使瞬变电磁没法分辨有用信号的时间范围。

如何进行信号分离，提高瞬变电磁的浅层分辨能力，是一个难点，目前研究的深入程度还不够。而从定量上搞清楚线圈自感的影响时间范围及瞬变电磁的最小探测深度，可有利于问题的研究。文献[6]给出了一种方法，它是根据分析均匀半空间下有用信号与干扰信号幅度相等时的时间作为最早可分辨时间的，然后展开对最小深度的计算。本文通过对回线线圈的自感信号的理论解析式和衰减曲线特征进行分析，找出自感信号的影响幅度和范围，作者根据信号的衰减特性，提出一种直接可用的估算方法，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计算公式及估算结果。以利于研究早期信号的分离及利于指导野外生产。

2　线圈暂态分析[3~6]

2.1　发送线圈的自感

文中以单匝线圈为例，计算线圈的自感。线圈的自感分为内感和外感。设内自感为 L_{in}，外自感为 L_{ex}，L 为线圈的总自感强度。单位为 mL/H。

收稿日期：2003-05-14；**修订日期**：2003-08-11

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.

作者简介：薛国强（1966 - ），男（汉族），山西临猗人，工程师.

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

当线圈为环状时，R 为圆环的半径，r_0 为导线材料的半径，当 $R \gg r_0$ 时：

$$L_{in} = \mu/(8\pi) \cdot 2R\pi = \mu R/4 \tag{1}$$

$$L_{ex} = R\mu\left[\ln(8R/r_0) - 2\right] \tag{2}$$

$$L = L_{ex} + L_{in} \tag{3}$$

当线圈为方框时，a 为方框的边长，$a \gg r_0$ 时：

$$L_{in} = \mu/(8\pi) \cdot 4a = \mu a/(2\pi) \tag{4}$$

$$L_{ex} = \frac{2\mu a}{\pi}\left[\ln\frac{2a}{r_0(\sqrt{2}+1)} - 2 + \sqrt{2}\right] \tag{5}$$

$$L = L_{ex} + L_{in} \tag{6}$$

在（2）和（4）中，磁导率 $\mu = \mu_0\mu_r \approx \mu_0$，近似等于真空中的磁导率。

文献[4]则把（6）式写成如下形式：

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

本文主要是利用这一式子对不同长度的线圈的电感进行计算的。

2.2 线圈暂态过程分析

线圈相当于等效 RCL 回路，即可看成是由一个电阻电感和电容组合成的电路。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。当突然断开或接通加入电路中的电源之时，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。写出回路方程：

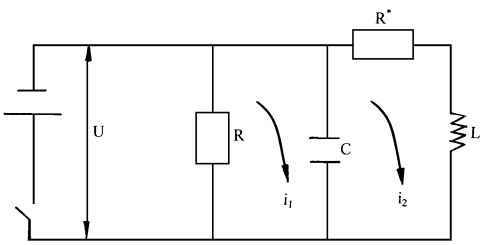


图 1　单匝线圈的等效回路

$$IR - i_1\frac{1}{pC} + i_2\frac{1}{pC} = 0 \tag{8}$$

$$i_2\left(pL + \frac{1}{pC} + R^*\right) - i_1\frac{1}{pC} = 0 \tag{9}$$

p 是阶跃源的谱。

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

经过域的变换，得到时间域方程。

断电后的自感电流为：

$$i_1(t) = 2Imte^{-mt} \tag{10}$$

断电后的自感电压为：

$$U(t) = 2IRmte^{-mt} \tag{11}$$

m 是一个常数，它与导线材料和长度有关，$m = 1/\sqrt{LC}$，单位为 S^{-1}

文中计算时，采用较常用的线材：导线横截面半径 $r_0 = 0.73$mm，电阻为：0.3Ω/100m，L 用式（7）计算，等效电容 C 为：$C_{RCL} = 4LC_1$，C_1 为每米长度的线圈电容，计算中其取值为：$C_1 = 160 \times 10^{-9}$F。

为判断自感信号的变化特性，对式（11）求时间导数，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，自感信号增大，当 $t = 1/m$ 时，$U(t)$ 达到极大值，当 $t > 1/m$ 时曲线迅速衰减到零。

3　最小深度的计算

由文献[1,6]可以分析出：在瞬变电磁的早期，电磁感应有用信号幅值很小，而自感信号幅值很大，在通常情况下，该信号要比有用信号大三个数量级，所以自感信号会淹没有用信号。并且电磁感应信号常常衰减很慢，而线圈的自感信号由高值向低值却衰减很快。作者认为：当自感信号的值衰减到与有用信号的值相等或相当时，瞬变电磁法有可能识别出有用信号。根据这一特点，作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。

作者分别计算了 50 ×50（L ×L），100 ×100（L ×L），200 ×200（L ×L），600 ×600（L ×L）四种野外常用的装置情况下的自感信号随时间衰减值，下面给出 600 ×600（L ×L）时自感信号电压的计算结果（单位：V）（如表 1），对表 1 所示的计算值画成衰减曲线图（如图 2）。图 2 中横坐标为时间，纵坐标为电压值的对数值。

600 ×600（L ×L）回线装置下的自感信号随时间衰减值　（单位：V）　　**表 1**

t（μs）	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
U（t）	63.35	58.51	50.84	40.26	30.6	22.62	16.62	11.67	8.21	5.27	3.95	2.71	1.85
t（μs）	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	
U（t）	1.25	0.85	0.57	0.38	0.25	0.168	0.11	0.083	0.05	0.03	0.023	0.016	

从表 1 和图 2 中可以看出：600 ×600（L ×L）回线装置下自感信号在早期快速衰减，到 11.5μs 时，其能量从 63.35V 衰减到 0.05V，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。

对四种不同大小的线圈的自感信号的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（t_{end}）列成表 2。

从表 2 中数据可知：由于线圈的大小不同，早期信号中的自感信号衰减速延时间不同，即有用信号的可识别时间延迟不同。线框越大，延时越长，线框越小，延时越短。但都比较接近，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

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

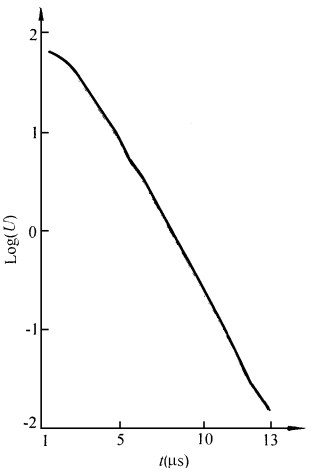


图 2　600 ×600（L ×L）回线装置的自感信号随时间衰减曲线

小的线圈的自感信号衰减时间延迟时间要比表 1 结果大，当浅层介质电阻率较小时，情况相反。

均匀半空间下不同线圈不同电阻率的最早可分辨时间延迟　　表 2

线圈边长（L ×L）	50 ×50	100 ×100	200 ×200	600 ×600
t_{end}（μs）	10	10.5	11	11.5

不同线圈不同电阻率情况下的最小探测深度表（单位 m）　　表 3

线圈边长（L ×L）	ρ（Ωm）				
	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

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。其计算公式如下[6]：$h_{min} = \sqrt{t_{min} \cdot \rho}$。

t_{min} 的单位是 μs，ρ 的单位是 Ω·m，h_{min} 的单位是 m。并把计算结果列为表 3。

从表 3 数据分析可知：地下介质的电阻率不同，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。

4　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。线圈的自感信号比有用信号衰减快得多。目前对瞬变电磁早期信号的研究较少，文中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有意义的结论：通常用的回线源装置下，回线的自感信号衰减延迟为 10μs，瞬变电磁的最小探测深度为 1～50m；最小探测深度地表介质电性影响比回线尺寸影响大。所计算结果及结论对生产具有指导作用。同时为瞬变电磁早期信号的研究打下一定的基础。

本文只分析了简单情况下发射线圈的自感，对于发送线圈和接收线圈之间的互感作用没有进行分析。这一工作正在不断完善。

参　考　文　献

[1] 方文藻，李予国，李貅. 瞬变电磁测深法原理［M］. 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［M］. 西安：陕西科学技术出版社，2002.

[3] A. Akaufmam and P. Hoekstra. Electromagnetic Soundings［M］. Amsterdam，Elsevier 2001.

[4] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探［M］. 北京：地质出版社，2000.

[5] 牛之琏. 时间域电磁法原理［M］. 长沙：中南工业大学出版社，1992.

[6] F. Kamenetsky and Chr. Oelsner. Distortions of EM transients in coincident loops at short-time-delay. Geophysical Prospecting［J］. 2000，48（6）：983～993.

（上接第 37 页）

（3）受冻土层处理过程及工程建设过程中应加强监测，发现异常立即停止施工，并研究进一步的处理措施。

参　考　文　献

[1] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册（第三版）. 北京：中国建筑出版社，1992.

[2] 岩土工程勘察规范（GB50021-2001）. 中华人民共和国国家标准. 北京：中国建筑出版社，2002.

[3] 冻土地区建筑地基基础设计规范（JGJ118-98）. 北京：中国建筑出版社，1998.

[4] 冻土工程地质勘察规范（GB50324-2001）. 北京：中国计划出版社，2001.

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