

矿井瞬变电磁法中多匝回线电感对目标体探测的影响

杨海燕, 岳建华, 王梦倩, 刘志新
(中国矿业大学 资源学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 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, 讨论了多匝线圈与单匝线圈的自感系数的关系, 得出线圈自感信号振幅的理论表达式, 推导了单匝和多匝回线的电感公式, 分析了回线匝数和回线边长的变化对目标体响应曲线的影响。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, 同时为提取早期数据的研究提供参考。

关键词: 瞬变电磁法; 线圈自感; 关断时间

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2007)01-0034-04

早期的瞬变电磁法研究, 在发射回线中通以单脉冲电流, 用示波器照像记录瞬变过程, 这种系统的重量大, 灵敏度低。随着新技术的应用, 如今发射机所发射的电流波形通常是具有一定重复频率的矩形波和梯形波(图1a、b), 这种波形分别为 SIROTEM、PRO TEM、PEM 和数种国产系统所采用。当发射机接上发射回线时, 实际输出的波形并非如此。由于回线的 L (电感)、 C (电容)、 R (电阻) 特性, 输出的电流波形为图1c所示。波形前沿呈指数上升, 后沿呈斜阶跃下降。呈斜阶跃下降的这段电流叫做关断电流, 这段时间称为关断时间(t_r)。关断时间除与仪器内部所采取的线路有关外, 还受回线的电性和大地电性的影响。关断时间对瞬变电磁场的影响是严重的, 它不仅影响了瞬变电磁法探测浅部结构的能力, 而且降低了瞬变电磁法的分辨能力。而关断时间与回线的电感特性密切相关。据笔者所知, 已经发表的关于单匝线圈的自感系数的计算方面的文章仍然很少, 从多匝回线的电感出发研究其对早期信号的影响的文章也少之又少。针对上述情况, 笔者从矿井瞬变电磁法常用的多匝回线装置出发, 推导多匝回线的电感系数, 并初步探讨多匝回线的电感对目标体探测的影响因素。

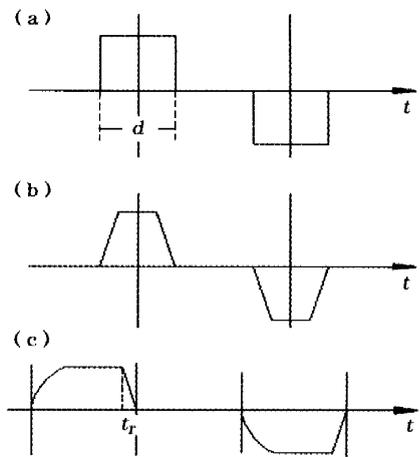


图1 实际发射电流波形

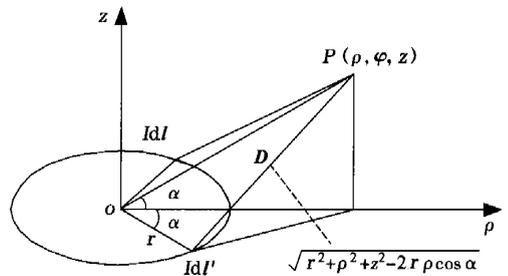


图2 电感系数的自感计算模型

1 多匝回线的电感系数

1.1 单匝回线的自感系数

设圆回线半径为 r , 导线半径为 a , 回线中通以电流 I 。由圆回线的轴对称性, 选用圆柱坐标系, 坐标原点位于线圈中心, z 轴与线圈轴线重合(图2)。

对称 ρoz 面的电流元 Idl 及 Idl' 在场中任意点 P

(ρ, φ, z) 处产生的磁位相等, 为 $dA'_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl}{D} e_\varphi$,

从而电流元 Idl 及 Idl' 在 P 点的磁位

$$dA_P = 2 \left(\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{Idl}{D} \cos\alpha \right) e_\varphi,$$

收稿日期: 2006-04-28; 修回日期: 2006-11-15

基金项目: 博士点基金资助(No: 20050290501); 中国矿业大学青年科研基金资助(No: D200409)

$$D = \sqrt{r^2 + \rho^2 + z^2 - 2r\rho\cos\alpha}$$

式中, μ_0 为真空磁导率, D 为源点与场点间的距离。由于元长度 $dl = r d\alpha$, 因而整个圆回线在点 P 处产生的磁位为

$$A_p = \int dA_p = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{r \cos\alpha d\alpha}{D} e_\varphi \quad (1)$$

$$\text{令 } \alpha = \pi + 2\theta, k^2 = \frac{4r\rho}{z^2 + r^2 + \rho^2},$$

则(1)式变为

$$A_p = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \sqrt{\frac{r}{\rho}} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right] e_\varphi, \quad (2)$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}},$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta,$$

式中, $K(k)$ 为第一类完全椭圆积分, $E(k)$ 为第二类完全椭圆积分。当 $k^2 < 1$ 时, 完全椭圆积分的计算方法有 3 种: 级数展开法、算术几何平均法、近似计算公式法; 当 k 等于或非常接近于 1 时, 对应于通常的计算精度, 可采用近似公式^[1]

$$K(k) = \ln \frac{4}{\sqrt{1 - k^2}}, \quad E(k) = 1.$$

在单匝回线的自感系数的计算过程中, 回线中的电流被看成集中在其几何轴线上, 则圆回线的闭合内边线内任意点处的磁位为

$$A_p = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \sqrt{\frac{r}{r-a}} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right] e_\varphi,$$

从而穿过由闭合内边线所围面积中的磁通为

$$\Phi = \int_{\text{内平面}} A_p \cdot dl = \int_0^{2\pi} A_p (r-a) d\varphi =$$

$$\frac{2\mu_0 I}{k} \sqrt{r(r-a)} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right],$$

圆回线的外自感为

$$L_0 = \frac{2\mu_0}{k} \sqrt{r(r-a)} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right],$$

式中, $k = \sqrt{\frac{4r(r-a)}{(2r-a)^2}} \approx \sqrt{1 - \frac{a^2}{4r^2}}$ 。由于 $r \gg a$, 因此取 $k \approx 1$, 此时, $K(k) \approx \ln \frac{8r}{a}$, $E(k) = 1$ 。于是 $L_0 \approx$

$\mu_0 r \left(\ln \frac{8r}{a} - 2 \right)$, 而圆回线的内自感为 $L_i = \frac{\mu_0 r}{4}$, 故单匝圆回线的自感为

$$L = L_0 + L_i = \mu_0 r \left(\ln \frac{8r}{a} - 1.75 \right). \quad (3)$$

1.2 单匝回线的互感系数

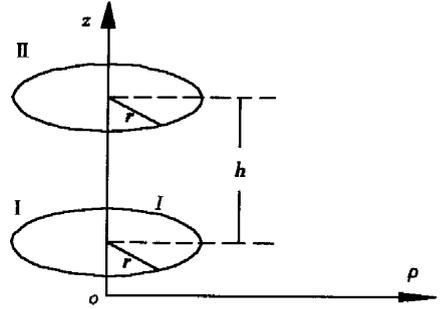


图3 电感系数的互感计算模型

如图 3, 2 个半径均为 r 的平行回线, 间距为 h , 当回线 I 中通入电流 I 时, 由式(2)可得线圈 II 中任意点处的磁位为

$$A_{II} = \frac{\mu_0 I}{\pi k} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right] e_\varphi,$$

从而互感系数为

$$M = \left(\int_0^{2\pi} A_{II} \cdot r d\varphi \right) / I = \frac{2\mu_0 r}{k} \left[\left(1 - \frac{1}{2}k^2\right) K(k) - E(k) \right],$$

式中, $k = \sqrt{\frac{4r^2}{4r^2 + h^2}}$ 。当 $h \rightarrow 0$, 即两回线间距离可以忽略时, $k \approx 1$, 此时同前文所述采用近似公式得

$$M \approx \mu_0 r \left(\ln \frac{8r}{a} - 2 \right). \quad (4)$$

1.3 多匝回线的电感系数

多匝回线由多个单匝回线串联而成, 可以等效为 1 个自感回线。由于各匝回线的形状、大小均相同, 因而每匝回线的自感系数及任意两匝回线间的互感系数都应相等, 则多匝圆回线的电感系数为

$$\begin{aligned} \bar{L} &= nL + n(n-1)M = \\ &= n\mu_0 r \left[n \ln \frac{8r}{a} - (2n-1.25) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

式中, n 为回线的匝数。

由于装置的磁矩 ($m = nSI$) 决定勘探深度, 因此, 匝数 (n)、发射电流 (I) 相等, 面积 (S) 相同的多匝圆回线装置和多匝方形回线装置, 勘探的深度也应相同。边长为 b 的方形回线, 与其等磁矩的圆回线的半径 $r = b/\sqrt{\pi}$ 。将 $r = b/\sqrt{\pi}$ 依次代入(3)、(4)、(5)式, 可得方形回线的自感、互感和 n 匝回线的电感系数分别为

$$L' = \frac{\mu_0 b}{\sqrt{\pi}} \left(\ln \frac{8b}{a\sqrt{\pi}} - 1.75 \right),$$

$$M' = \frac{\mu_0 b}{\sqrt{\pi}} \left(\ln \frac{8b}{a\sqrt{\pi}} - 2 \right),$$

$$\bar{L}' = \frac{n\mu_0 b}{\sqrt{\pi}} \left[n \ln \frac{8b}{a\sqrt{\pi}} - (2n - 1.25) \right].$$

将 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 带入以上各式,有

$$L' = 7.09 \times 10^{-7} \times b \left[\ln \frac{4.51b}{a} - 1.75 \right], \quad (6)$$

$$M' = 7.09 \times 10^{-7} \times b \left[\ln \frac{4.51b}{a} - 2 \right], \quad (7)$$

$$\bar{L}' = 7.09 \times 10^{-7} \times nb \left[n \ln \frac{4.51b}{a} - (2n - 1.25) \right]. \quad (8)$$

2 关断时间及其对导电球体的影响公式

在 SIROTEM 和 PROTEM 等发射机中,关断时间随回线的电感 L 、电阻 R 而改变,SIROTEM 手册中给出了关断时间 t_i 的计算公式

$$t_i = \frac{L}{R} \ln \frac{2U}{U + 1.5}, \quad (9)$$

式中, U 为回线电压, L 按(8)式计算。

将半径 r 、电导率 σ 的球放在边长为 $2l$ 的方形发射回线场中,在回线平面以下深 h 处(到球心)。如果埋深 h 或回线大小比球的半径大得多(2~3倍),则可以近似地认为球体内的一次场是均匀的,在数值上等于球中心的回线场垂直分量。设发射回线中的电流阶跃地下降到零,则关断时间对导电球体响应的影响公式为^[2]

$$\varepsilon = \frac{A(l_h)}{\tau} (e^{-t_i/\tau} - e^{-t_i+d/\tau}), \quad (10)$$

$$A(l_h) = \frac{l_h^3}{(1 + l_h^2)^2 (1 + 2l_h^2)}, \quad l_h = \frac{l}{h},$$

$$\tau = \frac{1}{\pi^2 \alpha}, \quad \alpha = \frac{1}{\sigma \mu_0 r^2}.$$

式中, d 为脉冲的宽度, τ 为球体的时间常数, α 为球的信号的衰减指数。

3 对目标体探测的影响特征

应用上面所推导的回线电感公式(8)、(9)、(10),从2个角度来研究多匝回线电感对目标体探测的影响特征:①回线边长、线材均不变,依次增加线圈匝数;②回线线材、匝数不变,不断增大回线边长。实际计算中始终假设导电球体的半径、埋深、球体相对于发射回线的位置不变,并满足球体埋深或回线大小比球的半径大得多(2~3倍)。发射回线采用较常用的线材,导线铜心半径为 1.73 mm,此种导线单位长度(m)电阻为 $3 \times 10^{-3} \Omega$ 。

图4a为不断增加线圈匝数时关断时间对球体响应的影响曲线。从图中可以看出,发射回线匝数

的不断增长,使关断时间对球体影响的响应值也相应增加;曲线虽起伏较大,但仍有明显的规律性。响应曲线的影响值由2部分组成,一部分表现在曲线上部各节点值,它们近似为1条直线,另一部分各节点值的连线也近似为1条直线,表现在曲线的下端;2条直线的斜率不同,也就意味着关断时间对响应曲线的影响程度不同。观察(8)、(9)式不难看出,在其他条件保持不变的条件下,线圈的电感和关断时间是匝数的二次函数,反映在影响曲线上即为曲线在匝数变化时的起伏。

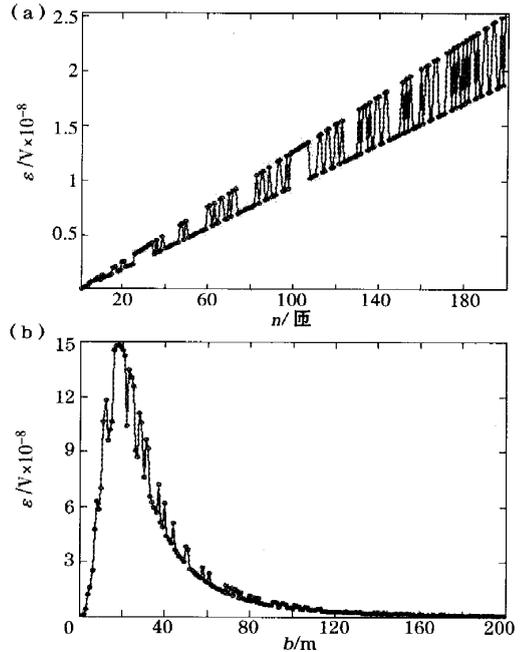


图4 关断时间对球体响应的影响曲线

图4b为当多匝回线边长不断增大时关断时间对球体响应的影响曲线。由于线圈的电感和关断时间是线圈边长的二次函数,因此相邻节点处的曲线值依然产生图4a所示的起伏,对整支曲线而言变化较大。当回线边长为20m左右时,相应的关断时间对响应曲线的影响达到最大,在此之前响应曲线的影响随回线边长的增加而增大,之后而减小。这说明了回线边长 < 20 m 时,响应曲线受多匝回线间的互感影响较大;当回线边长 > 20 m 时,随着回线边长的增加且匝数保持不变,线圈的自感值在整体电感中的比重逐渐大于线圈间的互感。

4 结论

多匝回线的等效自感系数不能简单地看作等于每一个回线孤立存在时的自感系数之和,不能忽略各个回线间的互感作用。磁矩相等的多匝回线与

方形回线的电感系数相同。

笔者推导了多匝线圈的电感公式,并分析了关断时间对导电球体响应曲线的影响,当线圈的边长不变而逐渐增加线圈的匝数时,导电球体的响应曲线随之成正比例增加。由于多匝线圈的电感和关断时间是匝数的二次函数,使曲线在匝数变化时在相邻节点上发生起伏。当线圈匝数不变而边长不断增大时,响应曲线在回线边长为 20 m 左右时达到最大值;当边长 < 20 m 时,响应曲线的影响随回线边长的增加而增大,当边长 > 20 m 时,这种影响随回线

边长的增加而减小。其原因是,匝数不变、回线边长的变化使自感和互感在整体电感中的比重发生变化,即当边长 < 20 m 时互感比重大,而边长 > 20 m 时自感比重大。

参考文献:

- [1] 倪光正,杨仕友. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] 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.

THE INFLUENCE OF THE INDUCTION OF MULTI-TURN COILS FOR TEM ON THE DETECTION OF BURIED OBJECTS IN UNDERGROUND MINES

YANG Hai-yan, YUE Jian-hua, WANG Meng-qian, LIU Zhi-xin
(College of Mineral Resources and Environment Sciences, CUMT, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Due to the self-transition of the loop, the early signal of TEM suffers great distortion. In order to study characteristics of the early signal with TEM, the authors formulated self-induction formulae for single coil and multi-turn coils, deduced theoretical expressions for the amplitude of the loop self-induction signal, and gave the induction of single coil and multi-axial coils. The response curve of buried object affected by the coils and the length of loop's change are also studied. The results obtained lay a foundation for further studies of the additional effect of the early field and can serve as reference data for further researches.

Key words: transient electromagnet; self-induction of loop; turn-off time

作者简介: 杨海燕(1980-),男,2004年毕业于中国矿业大学理学院信息与计算科学专业,现为中国矿业大学资源学院应用地球物理专业博士研究生,研究方向:电磁法勘探。

上接 28 页

3D INVERSION OF GRAVITY ANOMALY: AN APPLICATION OF THE APPARENT DENSITY IMAGERY TECHNOLOGY

XU Shi-zhe¹, CAO Luo-hua², YAO Jing-jin²

(1. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

Abstract: The continuation of the observed gravity anomaly on an undulate terrain to the mean horizontal plane is carried out. Then the gravity field on this plane is separated by cutting the method into several fields caused by strata at different depths. Gravity fields resulting from different strata are downward continued to the corresponding depths, and the density of the strata is inverted. The density obtained by this method is the approximate density contribution of the strata, and is called apparent density imagery. In downward continuation of the gravity field, a new continuation method, i. e., iteration approach, is used. The process of continuation is stable and has a relatively great depth of continuation. This continuation technology does not need to solve linear algebraic equation system and can overcome the computation time bottleneck which hinders the application of 3D inversion to practice. For a data set of 71 × 81 points, it takes 10s for 3D inversion on a 1.73 GHz PC. A real case in a certain area of Xinjiang is presented to demonstrate the effect of applying this method to inversion.

Key words: gravity anomaly; 3D inversion; apparent density imagery; fast inversion

作者简介: 徐世浙(1936-),男,1956年长春地质学院地球物理勘探系毕业,中国科学院院士,主要研究方向:计算地球物理,重磁资料处理和反演。