

空芯线圈电阻阻尼匹配技术研究

刘莹莹, 刘俊杰, 吴珊, 余洋, 李文杰, 李军峰

中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000

时间域航空电磁法仪器设备具有探测深度大、测量精度高的技术特点, 是我国急需的快速高效的大深度矿产勘查技术装备。时间域航空电磁测量系统接收的二次场信号具有宽带(0~25kHz)、高动态范围($n \times 100 \sim 10^9 V$)的特点, 一般采用稳定性高的空芯线圈来接收。

空芯线圈作为接收系统中传感器的主体部分, 是系统的信号来源, 既要有较高的灵敏度和品质因数, 以实现微弱信号的测量; 又不能自激或时间常数过大造成信号的失真。为了实现该目标, 阻尼型接收线圈传感器研制通常需要一个阻尼电阻来匹配, 空芯线圈的阻尼匹配技术在其中发挥着重要作用, 是接收线圈研制的重点内容之一。

本文基于空芯多匝接收线圈的理论研究, 重点考虑了前级放大器的接收线圈与并接影响, 改进了时间域航空电磁感应空芯线圈的等效理论模型, 并根据新的模型推导了阻尼匹配公式的计算方法。测试结果表明, 本文给出的阻尼匹配方法在时间域航空电磁接收线圈中具有较高的准确性。

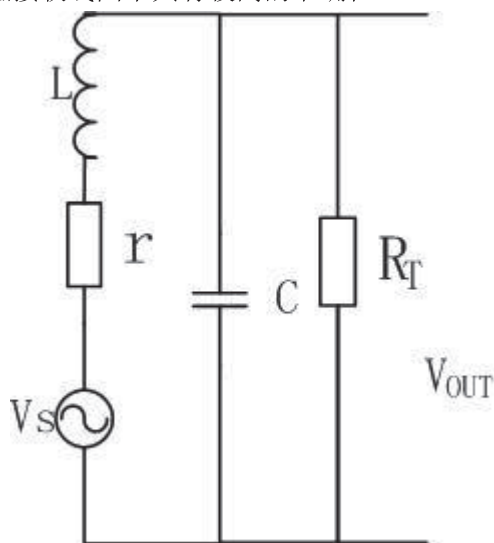


图 1 经典的空芯线圈等效模型

1 经典等效模型及经验匹配公式

一般的, 接收线圈可以等效为内阻 R 、电感 L 和分布电容 C 的二阶低通电路^[1]。如对所示电路的瞬态响应进行分析, 根据基尔霍夫定律可以得到:

$$V_s(t) = LC \frac{d^2 V_0(t)}{dt^2} + \left(\frac{L}{R_T} + rC \right) \frac{dV_0(t)}{dt} + \left(1 + \frac{r}{R_T} \right) V_{out}(t) \quad (1)$$

针对这种经典等效模型, 吉林大学研究了阻尼匹配计算方法。在公式(1)的基础上, 推导了临界阻尼状态下的阻尼计算经验公式^[2]:

所示。针对这种经典等效模型, 吉林大学研究了阻尼匹配计算方法。在公式(1)的基础上, 推导了临界阻尼状态下的阻尼计算经验公式^[2]:

对所示电路的瞬态响应进行分析, 根据基尔霍夫定律可以得到:

$$V_s(t) = LC \frac{d^2 V_0(t)}{dt^2} + \left(\frac{L}{R_T} + rC \right) \frac{dV_0(t)}{dt} + \left(1 + \frac{r}{R_T} \right) V_{out}(t) \quad (1)$$

针对这种经典等效模型, 吉林大学研究了阻尼匹配计算方法。在公式(1)的基础上, 推导了临界阻尼状态下的阻尼计算经验公式^[2]:

$$R_T = \frac{-r \pm \sqrt{r^2 + \left(4 - \frac{r^2 C}{L} \right) \frac{L}{C}}}{4 - \frac{r^2 C}{L}} \quad (2)$$

根据传统地面 TEM 线圈的制作经验, 线圈电

注: 本文得到基金项目:863 计划课题【(2013AA063903)】课题、地质矿产调查项目项目【(12120113099400)、【12120113098900)】项目资金帮助。

收稿日期: 2013-03-13; 改回日期: 2013-03-31; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 刘莹莹, 男, 1986 年生。学士, 助理工程师。主要从事航空物探仪器研制。Email:liuyingying@igge.cn。

感 L 一般为几 H, 分布电容在几十 pF, 线圈内阻在几 K 到 10K 之间, 因此 r^2C/L 是一个可以忽略的值, 线圈内阻 r 较小也是可忽略的值^[2]。公式(2)化简可得到如下常用公式 (3):

$$R_T \approx \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

2 空芯线圈等效模型及阻尼匹配公式的改进

在时间域航空电磁线圈研制过程中, 受到体积重量的限制, 线圈的单圈面积不能过大, 为了保证大接收面积, 往往接收线圈的圈数会很大, 线圈内阻 r 也会变大, 如果按照公式 (3) 来计算, 不考虑线圈内阻 r 及分布电容 C_0 , 阻尼电阻的计算会产生较大的偏差, 因此公式 (3) 并不适合时间域航空电磁接收系统中接收线圈的阻尼电阻计算。

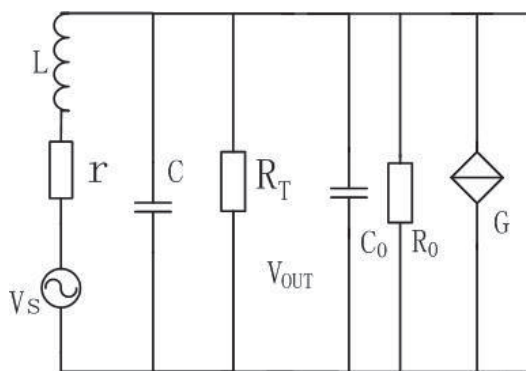


图 2 改进后电路的阻抗匹配等效模型

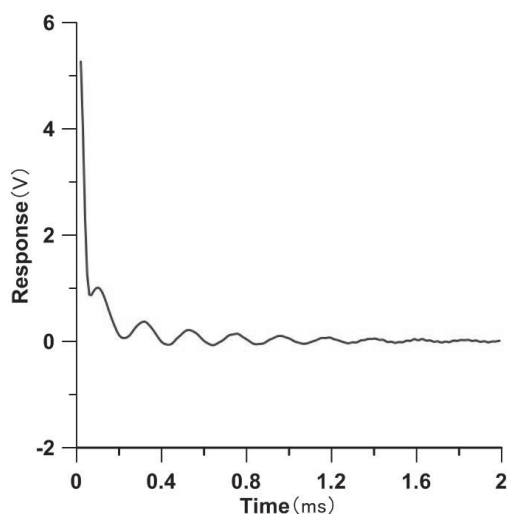


图 3 经验公式的阻尼匹配

为了得到精准的阻尼电阻, 对等效电路进行改进, 如图 2 所示, 需考虑与线圈并接的前置放大器

引入的分布电容影响, 此时接收线圈的分布电容变为 $C+C_0$ 。考虑到接收线圈的分布电容不能直接通过仪器测量得到, 而线圈的自振频率 f_0 可直接准确测量 (如阻抗分析仪), 使用分布电容 C 参与计算也带来一定的误差, 因此用线圈的自振频率 f_0 代替线圈的分布电容来直接参与计算。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_0)}} \quad (4)$$

由此, 对改进型的等效电路进行瞬态分析后, 推导出阻尼电阻计算的改进型公式如式 (5) 所示。

$$R_T \approx \frac{\pi f L}{\sqrt{1 + f^2 4\pi^2 L C_0}} - \frac{r}{4} \quad (5)$$

3 实际测试结果

图 4 给出了经验公式 (3) 和改进公式 (5) 计算得到的匹配阻尼电阻匹配线圈后, 在阶跃信号下的响应曲线。经验公式 (3) 计算得到的阻尼电阻较大, 传感器处于欠阻尼状态, 发生了振荡。而用改进公式求取的匹配电阻得到了较好的效果 (参见图 4), 衰减曲线没有震荡。

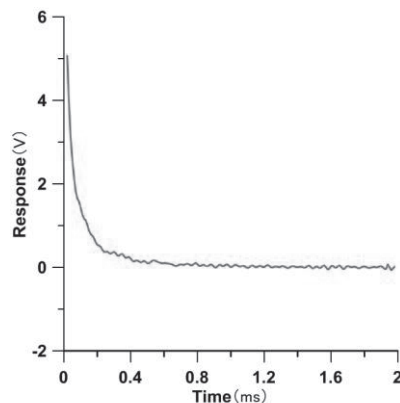


图 4 改进型公式的阻尼匹配

4 总结

综上所述, 在类似时间域航空电磁接收系统中多匝、单圈面积小、宽带的空芯线圈阻尼电阻计算应用中, 线圈内阻 r 不可忽略、并接放大器带来的分布电容变化以及线圈的分布电容不易直接测量得到, 经验公式 (3) 不适合此类应用。本文给出的阻尼匹配计算改进公式 (5) 考虑了经验计算公式忽略的电路参数带来的影响, 计算得出的阻尼电阻较为准确, 更适合此类线圈, 避免信号畸变。