

文章编号: 1001-1986(2020)02-0209-07

# Simulink 在瞬变电磁场暂态过程分析中的应用

刘世蕾<sup>1</sup>, 张莹<sup>2</sup>, 岳建华<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了研究瞬变电磁场分布变化规律, 在理论上推导了不同阻尼状态下的瞬变电磁暂态响应方程, 并采用 Simulink 对瞬变电磁场暂态过程进行模拟仿真, 设计开发了激励电流、发射回线、地质异常体、接收回线等效电路模块和互感关系模块; 系统研究了电感、分布电容和电阻对发射和接收回线等效电路的影响。结果表明: 发射回线的阻尼状态决定了瞬变电磁场激励波形特点, 接收回线的阻尼状态则直接影响瞬变电磁场的衰减特征和观测质量。电路仿真结果对于抑制非地质因素的影响和指导瞬变电磁观测系统设计具有重要意义。

**关键词:** 瞬变电磁法; 暂态过程; Simulink 软件; 模拟仿真

**中图分类号:** P318 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.031



移动阅读

## Application of Simulink in transient process analysis of transient electromagnetic field

LIU Shilei<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>2</sup>, YUE Jianhua<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Resource and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to analyze the distribution and variation law of transient electromagnetic field intuitively, the response equations of transient electromagnetic field under different damping states are theoretically derived, including a modeled transient process of transient electromagnetic field via Simulink. The equivalent circuit modules of excitation current, transmitting loop, geological anomaly body, receiving coil and their mutual inductance modules are developed. The influence of inductance, distributed capacitance and resistance on the equivalent circuit of transmitting and receiving loops are systematically studied. The results indicate a direct determination of the excitation waveform characteristics of the transient electromagnetic field based on the damping state of the transmitting loop, while the damping state of the receiving loop directly affects the attenuation characteristics and the observation quality of the transient electromagnetic field. The circuit simulation results are hugely significant in terms of restraining the non-geological influential factors and guide the design of transient electromagnetic observation system.

**Keywords:** transient electromagnetic methods; transient process; Simulink; analog simulation

瞬变电磁法是井下超前探测的主要方法之一, 在煤矿防治水中发挥着重要作用<sup>[1-5]</sup>。国内外瞬变电磁仪内部固化的重叠或中心回线视电阻率计算公式多为磁偶源晚期近似公式<sup>[6-7]</sup>, 当在煤矿井下采用边长 2~3 m 的小回线装置时, 视电阻率读数与煤层及其顶底板岩层的本征电阻率最大相差几个数量级<sup>[8-13]</sup>。近

二十年来, 人们一直在寻找能够直观、简明地阐述小回线装置瞬变电磁场响应特征的方法, 以期指导仪器开发设计和实测资料处理与解释<sup>[14-17]</sup>。但是, 由于瞬变电磁场的分布变化规律受观测系统和探测目标体电性参数等多种因素的影响, 在整个观测过程中又经历了一次场、二次场成份此消彼长的复杂

收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2020-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41674133)

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(41674133)

第一作者简介: 刘世蕾, 1966 年生, 女, 河南商丘人, 高级实验师, 从事计算机教学科研工作. E-mail: shileiliu@cumt.edu.cn

通信作者: 岳建华, 1964 年生, 男, 山东济宁人, 教授, 博士生导师, 从事电法勘探工作. E-mail: yuejh@cumt.edu.cn

引用格式: 刘世蕾, 张莹, 岳建华. Simulink 在瞬变电磁场暂态过程分析中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 209-215.

LIU Shilei, ZHANG Ying, YUE Jianhua. Application of Simulink in transient process analysis of transient electromagnetic field[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 209-215.

过渡过程，故很难找到像直流电法那样的视电阻率定性公式，来简单明了地说明瞬变电磁场分布特征与其影响因素的关系。

Simulink 是 Mathworks 公司开发的一款嵌入式多域仿真软件，集动态系统建模、仿真和综合分析于一体。Simulink 为用户提供了模块化的设计环境，拥有丰富的标准模块库，还可以自行定义和创建模块。通过简单直观的鼠标操作，从 Simulink 模块库中选用调取标准或自建模块，即可构造出复杂的线性或非线性系统<sup>[18]</sup>。

笔者采用 Simulink 软件的主要功能模块，建立了瞬变电磁法方波激励信号发生器、发射回线、地质体和接收回线的等效电路，研究了一次场、二次场特征及其与等效回路电感、电容和电阻的关系，为抑制非地质因素的干扰影响和指导瞬变电磁观测系统设计提供了一种直观、简便且有效的工具。

### 1 瞬变电磁场暂态过程的状态方程

瞬变电磁场的产生与传播经概念化处理后等效为发射回线、接收回线和地质体 3 个 LR 电路相互作用的过程<sup>[17,19]</sup>(图 1)。图 1 中，TX loop 表示发射回线， $R_1$ 、 $L_1$  为发射回线的电阻、电感；RX coil 表示接收回线， $R_2$ 、 $L_2$  为接收回线的电阻、电感；Earth/target 为大地或探测目标体， $R_3$ 、 $L_3$  为地质体的电阻、电感； $M_{12}$ 、 $M_{13}$ 、 $M_{23}$  分别为发射回线与接收回线之间、发射回线与地质目标体之间以及地质目标体与接收回线之间的互感。

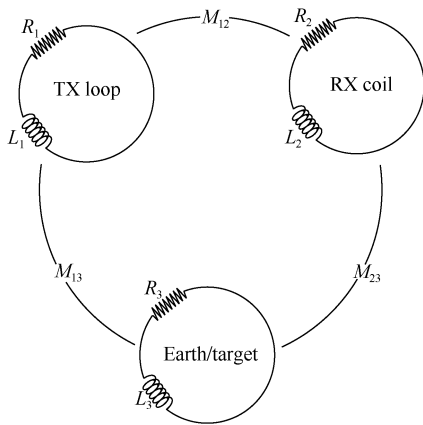


图 1 电磁勘探概念化电感耦合电路

Fig.1 Conceptual inductively coupled circuits for electromagnetic prospecting

考虑分布电容影响的瞬变电磁接收回线等效电路如图 2 所示。图中  $v(t)$  表示接收回线中探测目标体涡旋电流产生的感应电动势， $L$  为接收回线电感， $R$  为接收回线内阻， $C_0$  为接收回线分布电容， $C_a$  为

仪器前置放大器的输入电容， $R_0$  表示接收回线外接的阻尼电阻， $R_a$  表示仪器前置放大器的输入电阻。根据瞬变电磁法工作原理， $v(t)$  是瞬变电磁法地质体涡旋电流场的二次感应电磁场理想观测值，但是实际工作中仪器观测的电压信号是  $u(t)$ ，只有在一次场和回线内阻、电感、电容等非地质因素影响可忽略不计时，二者才趋于一致。

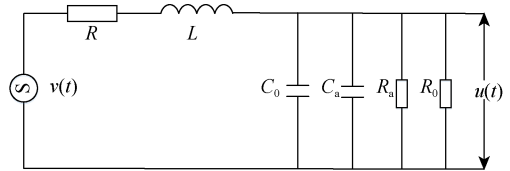


图 2 接收回线等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of receiving coil

一般情况下， $R_0 \ll R_a$ ，故仪器前端放大器电阻  $R_a$  的影响可忽略，且根据电容并联关系，取  $C=C_a+C_0$ ，可将接收回线等效电路简化为图 3。

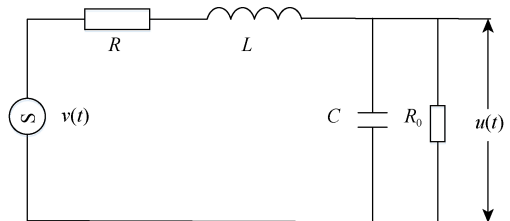


图 3 简化后的接收回线等效电路

Fig.3 Simplified equivalent circuit of receiving coil

简化后的接收回线等效电路状态方程为：

$$v - L \frac{dI}{dt} - IR = u \tag{1}$$

$$I = C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R_0} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)中，得：

$$v(t) = LC \frac{d^2u(t)}{dt^2} + (RC + \frac{L}{R_0}) \frac{du(t)}{dt} + \frac{R + R_0}{R_0} u(t) \tag{3}$$

式(3)可简化为：

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 2\delta \frac{du}{dt} + \omega_p^2 u = \frac{v}{LC} \tag{4}$$

其中，

$$\delta = \frac{1}{2} (\frac{R}{L} + \frac{1}{R_0 C}) \tag{5}$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} (\frac{R}{R_0} + 1)} = \omega_0 \sqrt{(\frac{R}{R_0} + 1)} \tag{6}$$

式中： $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  为接收回线的固有谐振频率； $\omega_p$  为整个接收回路的实际谐振频率。定义阻尼因子为：

$$\zeta = \frac{\delta}{\omega_p} = \frac{R_0 RC + L}{2\sqrt{LCR_0(R + R_0)}} \tag{7}$$

式(4)变为:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + 2\zeta\omega_p \frac{du}{dt} + \omega_p^2 u = \frac{v}{LC} \quad (8)$$

式(8)是二阶非齐次线性常微分方程,其特征方程:

$$\lambda^2 + 2\zeta\omega_p \lambda + \omega_p^2 = 0 \quad (9)$$

方程(9)解的判别式为:

$$\Delta = (2\zeta\omega_p)^2 - 4\omega_p^2 = 4\omega_p^2(\zeta^2 - 1) \quad (10)$$

当  $\zeta > 1$  时,接收回路处于过阻尼状态,方程(9)存在 2 个不相同的实数根  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ,方程(8)的通解为:

$$u = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} [e^{\lambda_1 t} \int e^{-\lambda_1 t} \frac{v}{LC} dt - e^{\lambda_2 t} \int e^{-\lambda_2 t} \frac{v}{LC} dt] \quad (11)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$  为待定常数,以下同。

当  $\zeta = 1$  时,接收回路处于临界阻尼状态,方程(9)有 2 个相同的实数根  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ,方程(8)的通解为:

$$u = (c_1 + c_2 t) e^{\lambda t} + e^{\lambda t} [t \int \frac{v}{LC} e^{-\lambda t} dt - \int \frac{v}{LC} t e^{-\lambda t} dt] \quad (12)$$

当  $\zeta < 1$  时,接收回路处于欠阻尼状态,方程(9)存在两个共轭复数根  $\lambda = \alpha \pm i\beta$  ( $\alpha$ 和 $\beta$ 为常实数),方程(8)的通解为:

$$u = e^{\alpha t} (c_1 \cos \beta t + c_2 \sin \beta t) + \frac{e^{\alpha t}}{\beta} [\sin \beta t \int \frac{v}{LC} e^{-\alpha t} \cos \beta t dt - \cos \beta t \int \frac{v}{LC} e^{-\alpha t} \sin \beta t dt] \quad (13)$$

在临界阻尼状态下,即  $\zeta = 1$  时,由式(7)可得接收回路的阻尼电阻为:

$$R_{0(\zeta=1)} = \frac{1}{RC + 2\sqrt{LC}} \quad (14)$$

假设发射和接收回线之间及其与地质体之间均为全耦合、无漏磁,则表征瞬变电磁场能量传递过程的感应电流  $i_2$  就可由互感系数  $M$  和源电流随时间的变化率决定:

$$v = -M \frac{dI}{dt} = -\sqrt{L_1 L_2} \frac{dI}{dt} \quad (15)$$

式中:  $L_1$ 、 $L_2$  分别表示两个互感电路的电感值;  $\frac{dI}{dt}$  表示源电流随时间的变化率。

综上所述,运用数学解析法求解瞬变电磁场,首先要判定其阻尼状态,求解式(9)得到特征根,然后进行两次积分方可得到形如方程式(11)—式(13)的通解<sup>[20]</sup>;在此基础上,根据瞬变电磁场所满足的初始、边界条件确定  $v(t)$  以及待定系数  $c_1$  和  $c_2$  后,才能求得瞬变电磁场的解析解。这种求解过程十分复杂,即使在均匀大地条件下,其计算工作量也很大。

## 2 暂态过程的 Simulink 仿真电路

与数学解析法不同的是,运用 Simulink 软件进行电路暂态过程分析时,只需在 Simulink 块库中(Simulink Library Browser)选择对应的元件并设定相关参数,构建发射、接收和地质体等效电路的子系统(Subsystem),然后根据电路间的互感耦合关系调用 Simulink 块库中的功能模块将子系统连接起来,就可以直观、简便地建立发射回线、接收回线、地质体涡旋电流场及其相互关系的计算模型,进而实现对瞬变电磁场的仿真模拟。

采用 Simulink 软件仿真模拟瞬变电磁场的基本原理如图 4 所示。其中:① 方波生成模块用于生成阶跃信号,作为发射回线的激励源;② 发射回路中的暂态信号,分别输入到接收回线和地质体的等效电路中,各自表征发射回线与地质体和接收回线间的互感关系;③ 发射回路与地质体的互感信号作为地质体等效电路的输入信号(即地质体的涡旋电流场),地质体涡旋电流场暂态过程的输出信号与接收回线发生互感作用,反映了从良导地质体表面向内

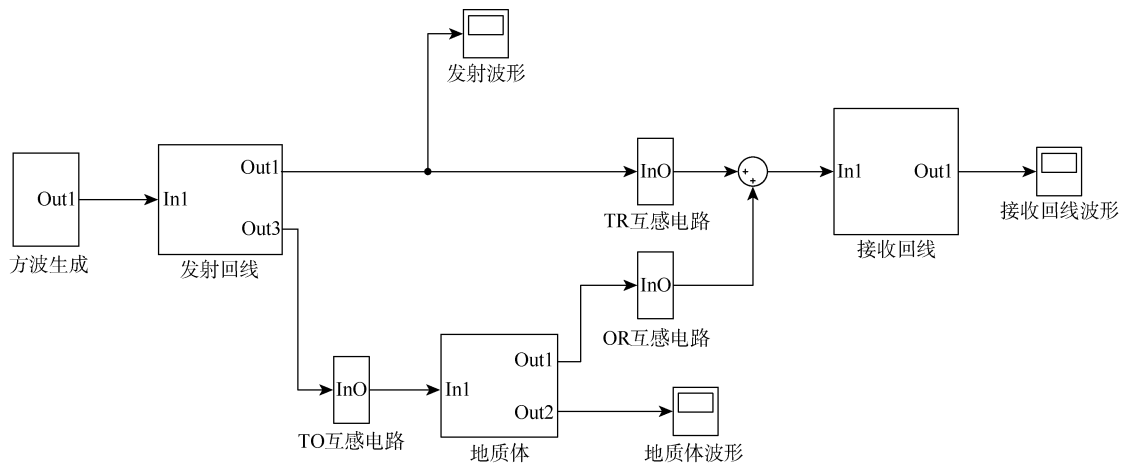


图 4 瞬变电磁场 Simulink 仿真模块

Fig.4 Simulink simulation modules of transient electromagnetic field

扩散衰减的涡旋电流场在接收回线中产生二次感应电磁场的过程；④ 接收回线中可观测到发射回线暂态变化的一次感应场和地质体涡旋电流场的二次感应场，两路信号同时接入接收回路中，即可得到瞬变电磁法的总场信号。式(11)—式(15)所表征的复杂计算过程均可由 Simulink 的功能模块以等效电路及其互感作用的方式直观地构造出来，从而实现对瞬变电磁场感应传播过程的模拟和分析。进一步，通过改变电路参数，可研究回线边长、匝数、阻尼电阻等各种因素对瞬变电磁场的影响，从而为认识和掌握瞬变电磁场分布变化规律提供了一种简单方便的途径。

与图 4 对应的模块化仿真电路如图 5 所示<sup>[19]</sup>。

图 5 中：图 5a 为方波信号发生器；图 5b 为发射回线仿真电路， $I(t)$  为发射电流， $R$  为内阻， $L$  为电感， $C$  为分布电容， $r$  为仪器内阻(亦可为阻尼电阻)；图 5c 为地质体等效仿真电路，其输入信号为发射回线的发射电流信号，输出信号与接收回线相互感应；图 5d 为接收回线等效电路，根据 Signal 输入信号的不同分别模拟仿真一次场、二次场和总场。即若电路输入信号 Signal 为地质体涡旋电流信号，则电路输出信号为纯二次场；若 Signal 为发射回线的发射电流信号，则电路输出纯一次场；若 Signal 是发射回线与地质体共同作用的信号，则电路输出信号为总场。接收回线与发射回线之间、接收回线与地质体之间、地质体与接收回线之间都有一个如图 5e 所

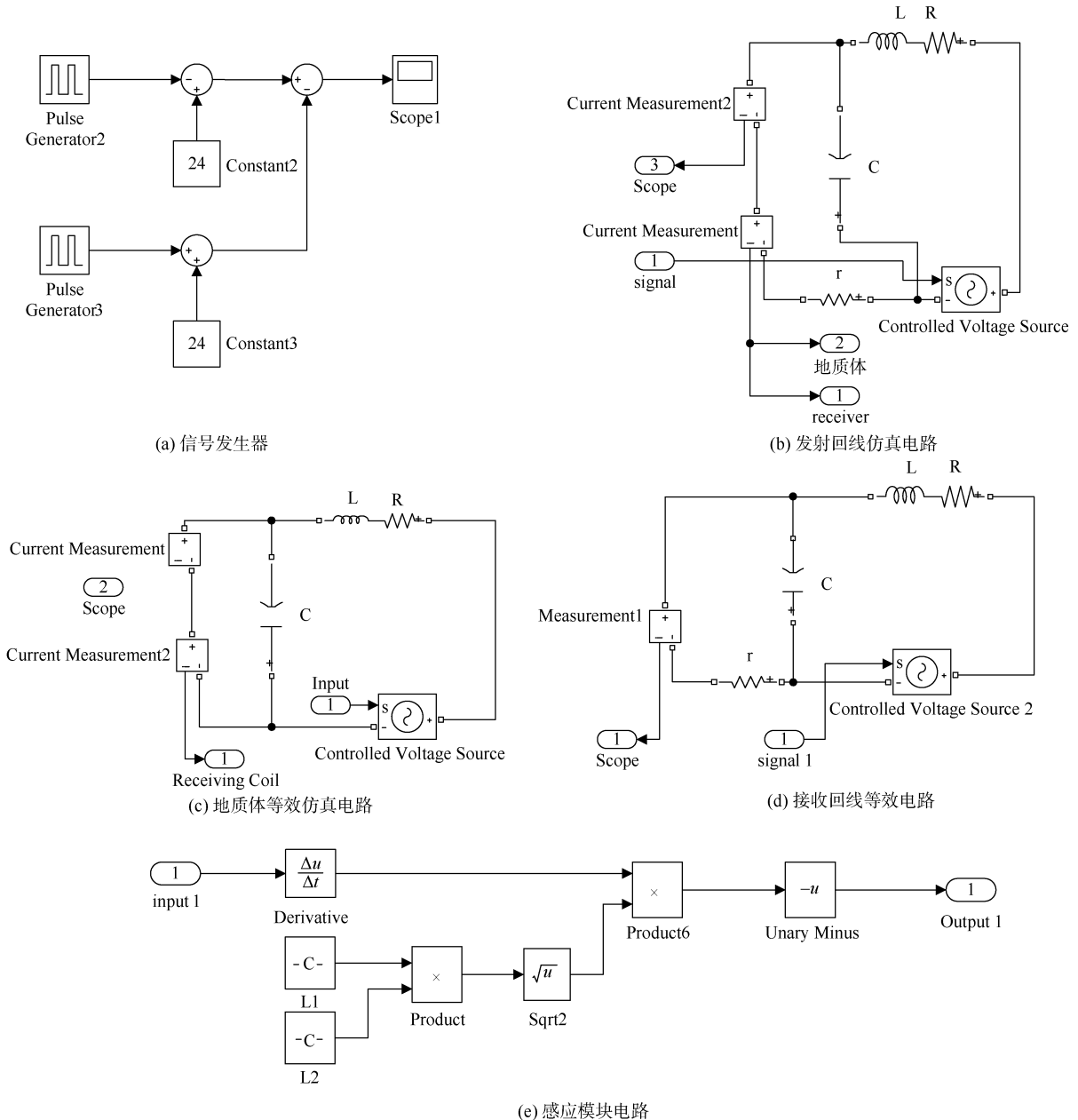


图 5 瞬变电磁场的 Simulink 仿真模块  
Fig.5 Simulink simulation modules of transient electromagnetic field

示的感应模块电路, 实现电路互感关系的仿真。互感模块的输入为源电流, 首先由微分模块 Derivative 计算出源电流的变化率, 然后运用乘法计算器 Product 和平方根模块实现对互感系数的计算; 电流变化率与互感系数通过一个乘法器求积, 再采用反模块 Unary Minus, 便可得到输入端的互感电流信号。Simulink 软件的 Scope 功能模块具有输出显示功能, 在模拟仿真过程中可同步显示发射电流、地质体涡旋电流和接收回线感应电磁信号的波形, 给模拟结果分析提供了可视化工具。

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 发射回线关断电流波形及其影响因素

采用方波供电激励, 设定供电方波的电流  $I$  为 24 A, 脉冲周期为 0.5 s, 占空比为 50%, 相位延迟为 0, 仿真输出波形如图 6 所示, 该波形对应于实际工作中双极性矩形波的半个周期。

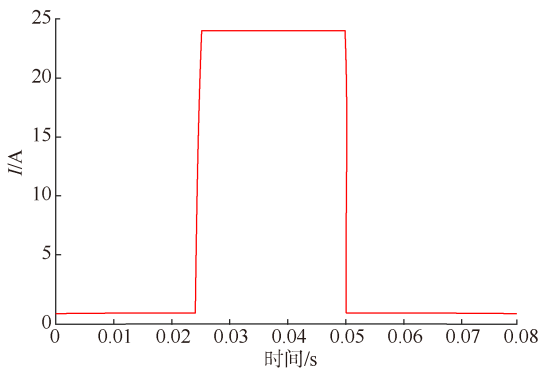


图 6 发射电流输出波形示意图

Fig.6 Output waveform of transmitting current

图 7 为电感值不同时关断电流波形。随着发射回线电感值增大, 关断时间变长, 衰减变慢, 导致接收回线中一次场信号对二次场信号产生干扰影响。

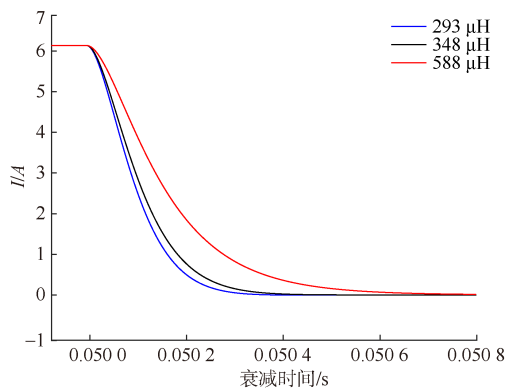


图 7 电感不同时发射回线的关断电流波形

Fig.7 Switching-off current waveform of transmitting loop with different inductance

由图 8 可知, 发射回线的分布电容也对发射波形产生影响。电容越大, 对发射回路的影响越大, 导致更长的关断时间和更慢的电流衰减速度。因此, 为了缩短关断时间, 应减小发射装置的电感和电容。

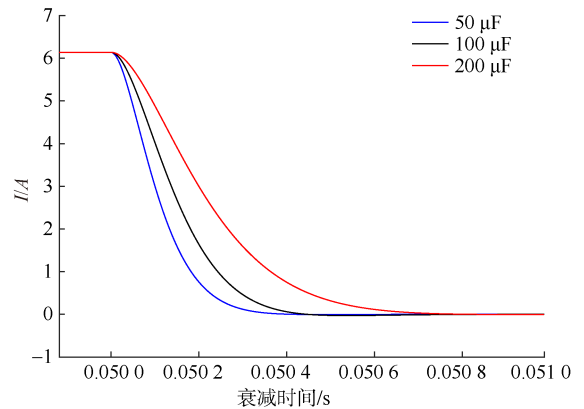


图 8 不同分布电容发射回线的关断电流波形

Fig.8 Turn-off current waveform of transmitting loop with different distributed capacitance

图 9 表明, 当发射回线在临界阻尼状态下工作时可在不出现振荡现象的前提下最大限度地减少关断时间, 一方面可以减少瞬变电磁法的测量盲区, 另一方面又可使地下良导体表面感应产生的涡旋电流场最强。

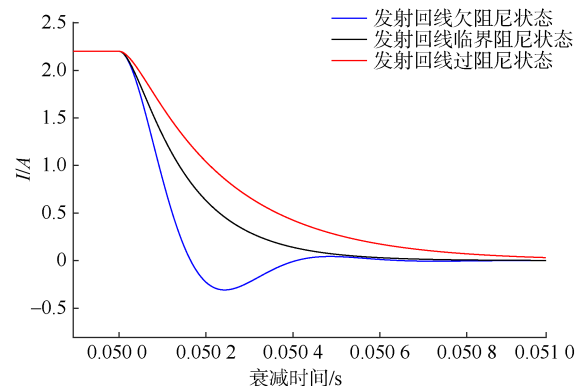


图 9 不同阻尼下发射装置关断电流曲线

Fig.9 Turn-off current curves of transmitting loop in different damping status

#### 3.2 接收回线电磁响应曲线的影响因素

在重点考查接收回线内阻、电感和分布电容对瞬变电磁响应的影响时, 为简单计, 令接收回线等效电路的输入信号为:

$$v(t) = \begin{cases} E, & t \leq 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $E$  为常数。这是一个典型的负阶跃函数, 用于近似代替地下良导体涡旋电流场在接收回线中的感应电动势。3 种阻尼状态对应的归一化响应曲线如图 10 所示。

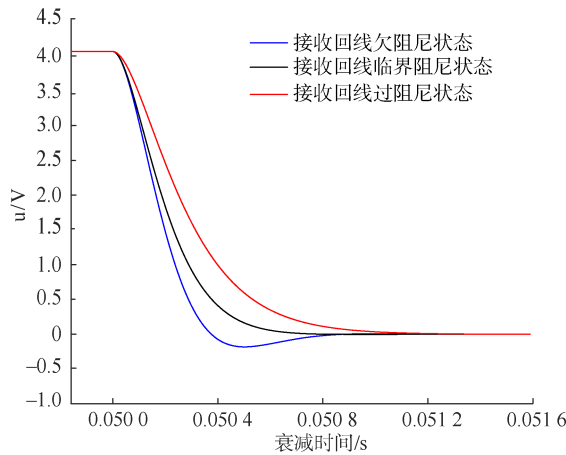


图 10 负阶跃信号激励下接收回线电磁响应曲线  
Fig.10 Electromagnetic response curves of RX coil under a negative step signal excitation

从图 10 可以看出，在过阻尼状态下，负载阻尼小于回线阻尼，负阶跃响应衰减比较缓慢，因而出现较长时间的过渡过程，一次场影响造成瞬变电磁晚期视电阻率公式的计算结果明显低于岩层真电阻率值；在欠阻尼状态下，回线阻尼小于负载阻尼，不足以阻止电磁衰减越过平衡位置，输出波形产生严重畸变，致使观测到的感应电动势发生振荡且出现负值，与瞬变电磁晚期视电阻率公式的假设条件不符；在临界阻尼状态下，接收回路的响应速度最快且不发生振荡，此时接收回路的电感、电容对正常观测的干扰最小，观测结果能够客观地反映探测目标体的瞬变电磁响应。由此可知，在实际工作中，应通过调整阻尼电阻，尽量使接收回路处于临界阻尼状态。

### 3.3 电磁耦合特征

在表征瞬变电磁场能量转换、传播的等效电路中，感应模块分为 3 种类型：① 发射回线与地质体之间的感应模块电路；② 发射回线与接收回线之间的感应模块电路；③ 地质体与接收回线之间的感应模块电路。通过设置耦合系数，可模拟仿真不同装置形式下发射、接收回线及其与地质体之间的电磁耦合关系。如重叠回线装置基本无漏磁，仿真时可选择全耦合系数；若是分离回线装置，则根据经验或实际测试结果确定耦合系数。图 11 为在全耦合以及半耦合状态下一次场电路仿真曲线，全耦合情况下一次场幅值约为半耦合情况下的 2 倍。

需要特别指出的是，3 个暂态过程的互感作用是彼此相互的，如何最大限度地突出来自地下良导体的有效感应信号和最大限度地减小发射回线与接收回线的干涉影响是仪器开发设计者应该努力的方向。

## 4 结论

a. 发射回线电感和电容的大小直接影响关断时

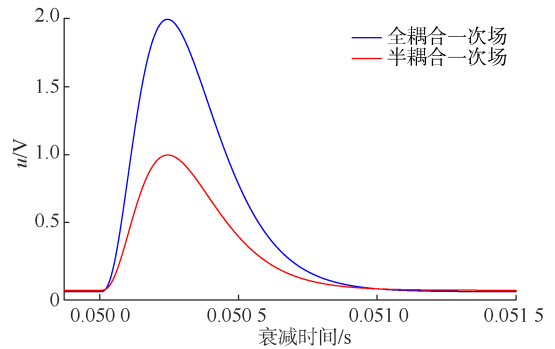


图 11 感应电路不同耦合关系对比  
Fig.11 Comparison of different coupling relations of induction circuits

间，强电感会对瞬变电磁一次场和二次场信号产生干扰，而大电容将减缓电流衰减速度，故在瞬变电磁装置设计中，应设法减小发射装置的电感和电容。

b. 接收回线的阻尼状态决定了观测信号的波形特征。临界状态下，接收回路对探测目标体涡旋电流场的响应速度最快，且不出现振荡现象。因此，在接收回线的设计过程中，应采用接入匹配电阻的方法，使接收装置工作在临界阻尼状态，从而减小回线过渡过程的影响。

c. 采用 Simulink 软件功能模块，通过等效电路设计与仿真分析，可以简单方便地研究瞬变电磁法激励电流、发射回线、地质体、接收回线及其暂态过程之间的互感关系，在此基础上进一步研究回线内阻、电感和分布电容等非地质因素对多匝小回线装置瞬变电磁场的影响，可为矿井瞬变电磁法应用提供理论指导。

致谢：中国矿业大学张河瑞、李锋平、刘海洋、刘彦涛和闫建勇等同学在 Simulink 仿真模块设计和成图过程中参与或提供了帮助，在此一并表示感谢。

请听作者语音介绍创新技术成果  
等信息，欢迎与作者进行交流



OSID 码

## 参考文献(References)

- [1] 王大设, 汪志军, 刘盛东, 等. 基于烟圈效应的 11 点超前探测观测系统设计[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(3): 67-70.  
WANG Dashe, WANG Zhijun, LIU Shengdong, et al. Eleven point observing system in advanced detecting based on smoking ring effect[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(3): 67-70.
- [2] 梁爽. 瞬变电磁法在煤矿水害防治中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(3): 70-73.  
LIANG Shuang. The application of TEM in detecting water hazards in coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(3): 70-73.
- [3] 李洋, 王金平, 魏启明. 瞬变电磁法在井下工作面顶板导水裂隙探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(增刊 1): 66-71.

- LI Yang, WANG Jinping, WEI Qiming. Application of transient electromagnetic method for detecting water-conducting crack in the roof of underground working face[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(S1): 66–71.
- [4] YANG Haiyan, CHEN Shen'en, YUE Jianhua, et al. Transient electromagnetic response with a ramp current excitation using conical source[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 63829–63836.
- [5] YUE Jianhua, ZHANG Herui, YANG Haiyan, et al. Electrical prospecting methods for advance detection: progress, problems, and prospects in Chinese coal mines[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(3): 94–106.
- [6] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007. NIU Zhilian. Principle of time domain electromagnetic method[M]. Changsha: Central-south University Press, 2007.
- [7] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 1998. JIANG Bangyuan. Applied near-zone magnetic source transient electromagnetic exploration[M]. Beijing: Geology Press, 1998.
- [8] 牛之琰. 近区瞬变电磁测深曲线畸变段的消除方法[J]. *煤田地质与勘探*, 1992, 30(1): 60–63. NIU Zhilian. Eliminate method for distorted stage of transient electromagnetic sounding curve in near-zone[J]. *Coal Geology & Exploration*, 1992, 30(1): 60–63.
- [9] 杨海燕, 岳建华. 矿井瞬变电磁法理论与技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015. YANG Haiyan, YUE Jianhua. Study on the theory and technology of mine transient electromagnetic methods[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [10] TANG Hongzhi, YANG Haiyan, LU Guangyin, et al. Small multi-turn coils based on transient electromagnetic method for coal mine detection[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 169: 165–173.
- [11] 杨海燕, 岳建华, 王梦倩, 等. 矿井瞬变电磁法中多匝回线电感对目标体探测的影响[J]. *物探与化探*, 2007, 31(1): 34–37. YANG Haiyan, YUE Jianhua, WANG Mengqian, et al. Effect of multi-turn-coil inductance on object detection in mine transient electromagnetic method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31(1): 34–37.
- [12] 杨海燕, 岳建华, 胡文武, 等. 多匝回线的自感对瞬变电磁早期信号的影响特征[J]. *物探化探计算技术*, 2007, 29(2): 96–98. YANG Haiyan, YUE Jianhua, HU Wenwu, et al. The characteristics of the early signal in tem affected by self-induction of multi-turn coil[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 29(2): 96–98.
- [13] 于景邨. 矿井瞬变电磁法勘探[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007. YU Jingcun. Mine transient electromagnetic exploration[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2007.
- [14] 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, 2004. JI Yanju. All-time secondary electromagnetic field extraction in high resolution transient electromagnetic system for subsurface imaging[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [15] 嵇艳鞠, 林君, 王忠. 瞬变电磁接收装置对浅层探测的畸变分析与数值剔除[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(1): 262–267. JI Yanju, LIN Jun, WANG Zhong. Analysis and numerical removing of distortion intransient electromagnetic receiverdevice for shallow sounding[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(1): 262–267.
- [16] 付志红, 周维维. 瞬变电磁法高动态电流陡脉冲发射电路研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(33): 44–48. FU Zhihong, ZHOU Luwei. Research on high dynamic current steep impulsetransmitting circuitsfor transient electromagnetic methodapplication[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(33): 44–48.
- [17] 马江峰. 瞬变电磁法小回线装置浅层探测技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. MA Jiangfeng. Transient electromagnetic method shallow prospecting technology with small loop device[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [18] KLEE H, ALLEN R. Simulation of dynamic systems with MATLAB and Simulink(Third Edition)[M]. London: CRC Press, 2017.
- [19] EVERETT M E. Near-surface applied geophysics[M]. UK: Cambridge University Press, 2013.
- [20] 张莹. 多匝小回线瞬变电磁场衰减规律及其影响因素研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. ZHANG Ying. Study on attenuation law and influencing factors of transient electromagnetic field in multi-turn small circuit[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

(责任编辑 聂爱兰)