2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2268-2283
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

王曦曜,孙怀凤,周正,等. 2026. 瞬变电磁等效电路模型及关键参数影响特征分析. 地球物理学进展,41(5):2268-2283,doi:10.6038/pg2026JJ0243.

WANG XiYao, SUN HuaiFeng, ZHOU Zheng, *et al*. 2026. Equivalent circuit model of transient electromagnetic and influencing characteristics analysis of key parameters. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2268-2283,doi:10.6038/pg2026JJ0243.

瞬变电磁等效电路模型及关键参数影响特征分析

Equivalent circuit model of transient electromagnetic and influencing characteristics analysis of key parameters

王曦曜[1,2,4],孙怀凤[1,2,4*],周正[1,2,4],陈磊[1,2,3,4],刘玉超[1,2,4],张诺亚[1,2,4],卢绪山[1,2,4]

WANG XiYao[1,2,4], SUN HuaiFeng[1,2,4*], ZHOU Zheng[1,2,4], CHEN Lei[1,2,3,4], LIU YuChao[1,2,4], ZHANG NuoYa[1,2,4], LU XuShan[1,2,4]

1. 山东大学隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室,济南 250061
2. 山东大学岩土与地下工程研究院,济南 250061
3. 山东省地质调查院,济南 250014
4. 山东大学地球电磁探测研究所,济南 250061

1. *State Key Laboratory for Tunnel Engineering*, *Shandong University*, *Jinan* 250061, *China*
2. *Institute of Geotechnical and Underground Engineering*, *Shandong University*, *Jinan* 250061, *China*
3. *Shandong Institute of Geological Survey*, *Jinan* 250014, *China*
4. *Laboratory of Earth Electromagnetic Exploration*, *Shandong University*, *Jinan* 250061, *China*

摘 要 瞬变电磁观测信号受激励源方式、地质体电导率、发射部分与接收部分的耦合方式、接收线圈的阻尼特性、接收线圈的感性和容性参数等因素的综合影响.在研究瞬变电磁响应规律的时候,一般考虑理想情况,不考虑上述系统参数,从而导致实际观测的瞬变电磁信号很难与理论计算值完全吻合.本研究提出了瞬变电磁仪的等效电路模型,搭建瞬变电磁发射系统、地质体、接收系统的等效电路,并通过建立"发射源-地质体-接收线圈"三部分之间的两两互感与耦合关系,开发了地面中心回线源瞬变电磁基本过程仿真系统.该系统充分考虑发射单元的参数(发射回线电感及分布电容、关断时间)和接收单元的参数(内阻、匹配电阻、电感、分布电容),通过任意改变单一参数或多个参数就可以研究这些参数对瞬变电磁衰减曲线的影响,并将模型输出结果与由接收线圈控制方程得到的理论输出结果对比完成精度验证.在此基础上,研究了关断时

Abstract The signal of transient electromagnetic observation is influenced by the excitation source mode, geological body conductivity, coupling mode between the emitting part and the receiving part, damping characteristic of the receiving coil, and the capacitive and inductive parameters of the receiving coil, among other factors. When studying the laws of transient electromagnetic response, it is generally assumed that the above system parameters are ideal and not considered, which makes it difficult for the actual transient electromagnetic signal to match the theoretical calculated value. This study proposed a model of transient electromagnetics, set up an equivalent circuit of the transient electromagnetic emitting system, geological body, and receiving system, and developed a basic process simulation system for ground central loop source TEM by establishing the mutual inductance and coupling relationship between the emitting source, geological body, and receiving coil. The system fully considers the parameters of the emitting unit (the inductance and distributed capacitance of the emitting coil and the switching time) and the parameters of the receiving unit (internal resistance, matching resistance, inductance, and distributed capacitance), and by arbitrarily changing a single parameter or multiple parameters, the influence of these parameters on the transient electromagnetic attenuation curve can be studied. The output results of the

收稿日期 2025-11-12; **修回日期** 2026-03-06. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 国家自然科学基金地质联合基金项目(U2444213)和泰山学者工程联合资助.

第一作者简介 王曦曜,男,2001 年生,硕士研究生,主要从事瞬变电磁相关仪器研究. E-mail: 202335144@mail.sdu.edu.cn

***通讯作者** 孙怀凤,男,1982 年生,教授,博士生导师,主要从事电磁地球物理方法与仪器相关的教学与科研工作. E-mail: sunhuaifeng@email.sdu.edu.cn

间、发射回线电感电容、接收线圈阻尼因子及阻抗特性对瞬变电磁接收信号的影响,结果表明在发射端减小关断时间、回线电感、电容均有利用提升信号质量,在接收端,接收线圈阻抗特性是决定接收信号的主要因素,并得出了接收线圈阻为稍稍欠阻尼与临界阻尼状态时接受信号质量较好的结论.最后,通过设置仪器的实测参数进行了瞬变电磁信号仿真,并与该仪器的实际数据进行了对比,实测对比结果进一步验证了搭建的瞬变电磁仿真系统的可靠性,有助于推动瞬变电磁高效参数研究与仪器优化.

关键词　瞬变电磁;等效电路模型;阻尼比;分布电容;关断时间

中图分类号　P631

文献标识码　A

doi:10.6038/pg2026JJ0243

CSTR:32085.14.pg2026JJ0243

model are compared with the theoretical output results obtained from the receiving coil control equation to complete the accuracy verification. Based on this, the effects of the switching time, emitting coil inductance and capacitance, receiving coil damping factor, and impedance characteristics on the transient electromagnetic receiving signal are studied. The results indicate that reducing the turn-off time, loop inductance, and capacitance on the transmission end helps improve signal quality. On the receiving end, the impedance characteristics of the receiving coil are the main factor determining the received signal. It was concluded that the signal quality is better when the receiving coil resistance is slightly underdamped or critically damped. Finally, the transient electromagnetic signal is simulated by setting the instrument's measured parameters, and it is compared with the actual data of the instrument. The developed model can be used for calibration of the measured parameters and signals of the instrument, as well as forward design of the instrument. The comparison with measured results further verified the reliability of the developed simulation system for TEM, contributing to the advancement of efficient parameter research and instrument optimization in TEM applications.

Keywords　Transient electromagnetic; Equivalent circuit model; Damping ratio; Distributed capacitance; Cutting-off time

0　引　言

瞬变电磁法(Transient Electromagnetic Method, TEM)利用发射源向地下发送瞬时电流脉冲,产生变化的磁场,地下电导率差异导致感应出不同响应的电磁信号,接收线圈记录并分析反射信号,推断地下构造及特征.我国瞬变电磁的发展始于20世纪70年代,最早被应用于金属矿探测,TEM方法具有观测纯二次场(杨洋等, 2022)、适应性强、灵敏度高和分辨率强的特点,几十年来,人们在瞬变电磁的基础理论(陈曙东等, 2014)、仪器研制(薛国强等, 2023)、设备优化(鲍明晖等, 2014; 付国红等, 2025)、正演计算(姜晓腾等, 2024; 柳尚斌, 2022; 孙怀凤等, 2024)、反演技术(Liu *et al*., 2022; 孙怀凤等, 2019)、噪声处理(McLachlan *et al*., 2023; Sun *et al*., 2022)等方面进行了一系列的研究与工作,使得瞬变电磁的仪器设备不断更新,数据处理方法日益完善.目前,瞬变电磁法已被广泛应用于矿产资源勘查(陈中山等, 2022; Jang and Kim, 2015; Ruth *et al*., 2020)、地下水探测(Fan *et al*., 2022)、采空区调查(Yan *et al*., 2016; Yu *et al*., 2023)、隧道超前预报(Sun *et al*., 2023)、浅水区异常体勘探(赵越等, 2023)、地质灾害预警(Liu *et al*., 2023; 武军杰等, 2023)等诸多地球物理近地表勘探领域并取得了良好的效果.

近年来,瞬变电磁发展迅速,应用领域日益广泛,瞬变电磁的参数分析与设备优化愈显重要,目前针对瞬变电磁信号的影响因素的分析多为理论模型的搭建与计算(Li *et al*., 2020)和针对瞬变电磁某一部分进行单参数的分析(杨海燕等, 2007),很少有从整个瞬变电磁工作系统进行接收信号影响因素研究的工作.21世纪以来,人们一直在寻求直观、简明、高效描述瞬变电磁场响应特征与变化规律的方法,以指导瞬变电磁设备的优化设计与探测数据的解释与处理,然而,由于瞬变电磁的分布变化规律受发射系统(Kozhevnikov *et al*., 2023)、接收系统(Davidenko *et al*., 2023; Lin *et al*., 2022; 王浩文, 2019)、探测目标体的电性参数(Monteiro Santos *et al*., 2009)、背景电阻率(曹华科等, 2022)及空间参数(郑梓强等, 2024)等多方面的综合影响,且瞬变电磁各收发系统之间的互感影响复多变,难以形成明确的指导公式,为理论分析与解释带来了较大的阻碍.本文利用Simulink,搭建了完整的瞬变电磁仿真过程,用于分析发射、接收信号,并给出参数选取与优化建议.

1　瞬变电磁基本原理与理想信号模型

瞬变电磁法探测原理如图1,其通过在地面布置发射回线,向发射回线中通以稳定电流,当电流在某一瞬间突然关断,地下的电性和磁性介质会对这个瞬变电磁场产生响应,地下物质的电导率、磁导率等参数决定了它们对瞬变电磁场的响应速度和幅

度,在一定距离处的接收线圈来接收地下介质对瞬变电磁场的响应,接收线圈测量到的信号反映了地下介质的电导率和磁导率分布.由于瞬变电磁场在不同电导率介质中的传播速度不同,因此接收到的信号可以获得有关地下电性结构信息.

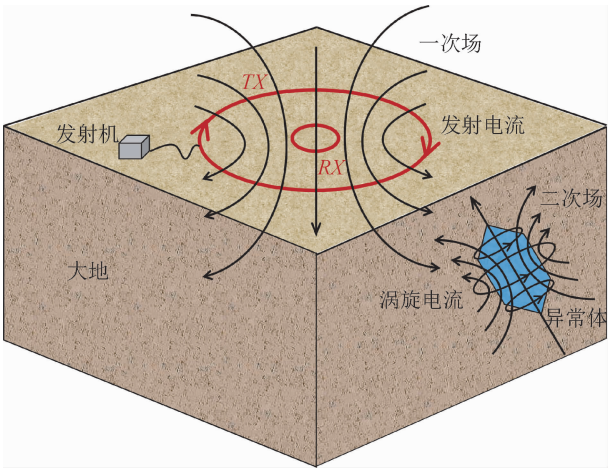


图 1 瞬变电磁原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transient electromagnetic principle

图 2 为瞬变电磁法矩形脉冲的关断过程,发射电流采用线性关断.整个接收过程中的电磁感应信号可分为发射回线对接收线圈的一次场信号,以及地下涡流对接收线圈的二次场信号两部分.

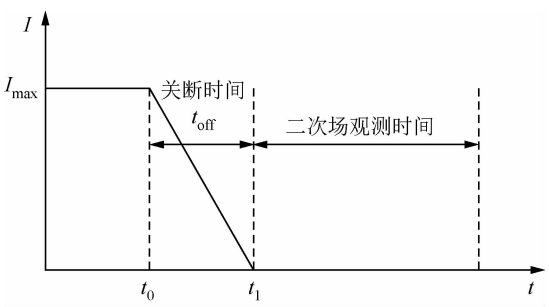


图 2 发射电流关断过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the emission current shutdown process

理想情况下,图 2 发射的电流波形所形成的一次场理想感应电压如下(嵇艳鞠, 2004):

$$V_1(t)=\begin{cases}0 & t\leqslant t_0\\ \dfrac{M_{12}I_{\max}}{t_{\text{off}}} & t_0<t<t_1\\ 0 & t\geqslant t_1\end{cases}, \tag{1}$$

其中 t_0、t_1 为线性关断的起止时刻,M_{12} 为发射源与接收线圈的互感系数,$I_{\max}$ 为发射电流,t_{off} 为关断时间.

二次感应电压主要是由地下导电体激发的二次涡流形成的,接收线圈中来自于地下介质的二次场理想电压 $V_2(t)$ 如下(嵇艳鞠, 2004):

$$V_2(t)=\begin{cases}-\dfrac{I_{\max}M_{1o}M_{2o}}{L_o t_{\text{off}}}e^{-\frac{t}{\tau_d}} & t_0<t<t_1\\ \dfrac{I_{\max}M_{1o}M_{2o}}{L_o t_{\text{off}}}\left(1-e^{-\frac{t_{\text{off}}}{\tau_d}}\right)e^{-\frac{(t-t_{\text{off}})}{\tau_d}} & t\geqslant t_1\end{cases}, \tag{2}$$

式中 M_{1o} 为发射源与地下地质体的耦合系数;M_{2o} 为地下地质体与接收线圈的耦合系数;L_o 为地下地质体的等效电感,τ_d 为地下地质体的时间系数,与地质异常体的关系为 $\rho=\mu_0 a^2/(\pi^2\tau_d)$,其中 ρ 为地质异常体的电阻率,a 为地下导电球体的半径.

2 瞬变电磁探测的电路概化模型

在实际测量过程中,由发射源电感与电容的存在,使实际关断电流与理论值存在差异,且由于接收线圈中感性、容性元件的存在,导致线圈中的信号不能及时达到理论值,会形成测量的动态误差(闫建勇, 2020),为研究相关参数对一次场、二次场信号的影响,需明确瞬变电磁各部分结构与相关物性参数.

瞬变电磁探测可以概化为图 3 中发射源、地质体、接收线圈三个 LCR 电路相互作用的过程.其中 R_1、L_1、C_1 为发射源的电阻、电感、电容;R_o、L_o、C_o 为

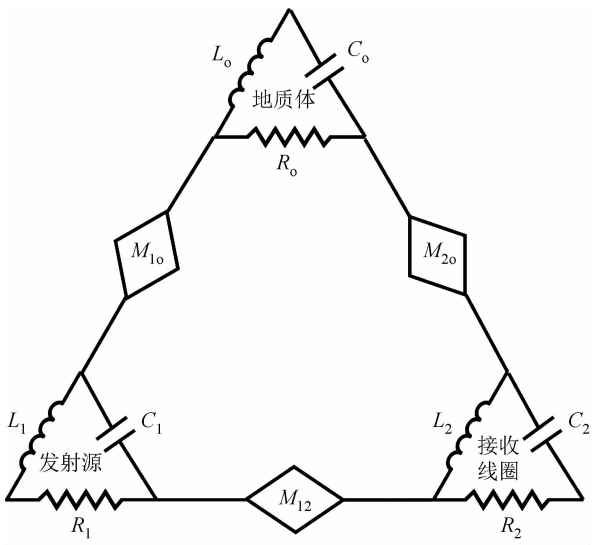


图 3 瞬变电磁探测概念化模型

Fig. 3 Transient electromagnetic probe conceptual model

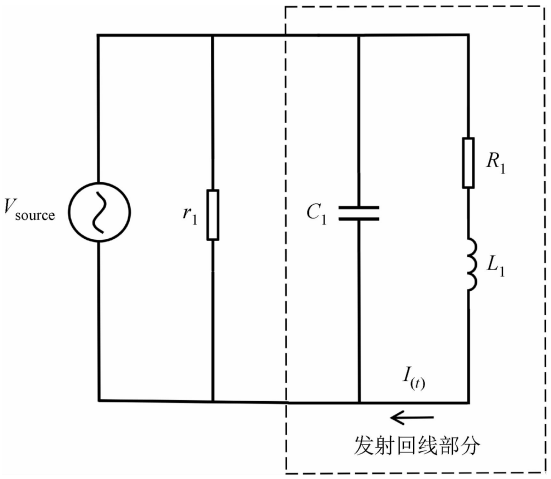


图 4　发射回线等效电路图

Fig. 4　Equivalent circuit of emission loop

地质体的电阻、电感、电容;R_2、L_2、C_2 为接收线圈的电阻、电感、电容;M_{1o}、M_{2o}、M_{12} 为发射源与地质体、地质体与接收线圈、发射源与接收线圈之间的互感.

2.1　发射源

瞬变电磁方法中的回线源是一种常见的发射源类型,通常由导线绕制为单匝或多匝圆形或方形回线,总长度从几米到几百米不等,通过在回线中施加电流来产生瞬变电磁场. 瞬变电磁发射回线的等效电路模型如图 4 所示.

该电路模型中,R_1、L_1、C_1 分别表示发射源的电阻、电感、分布电容,r_1 为发射回线阻尼电阻,$I_{(t)}$ 表示发射电流,V_{source} 表示发射电压.

用于瞬变电磁的发射回线一般由多股铜芯软电线绕制而成,多股铜芯软电线通常由多股铜丝作为导电体,外部由柔软绝缘硅胶等材料包裹,常用的发射回线布置形式与导线截面如图 5.

发射回线的电阻会影响发射电流的强弱与稳定性,高电阻会增加信号的噪声并降低接收信号的强度、甚至可能导致信号失真,从而影响测量结果的精度与可靠性,由电阻定律,发射回线电阻可由式(3)计算:

$$R_1 = \rho \frac{l}{S} = \rho_1 \frac{4l_1}{\pi N_1 d_1^{\ 2}}\ , \tag{3}$$

其中,ρ_1 为长导线源所选导体材料(一般为铜)的电阻率,l_1 为发射回线的长度,N_1 为导体丝股数,d_1 为导体丝直径.

由安培环路定律,通电长发射回线周围会产生一个环绕回线的磁场,而法拉第电磁感应定律说明,变化的磁场会引起电场的感应电动势,自感包括内自感与外自感两部分,其大小取决于导线的形状、匝数、电流的强度以及导线周围形成的磁场的强度,当发射回线为单匝时,可用式(4)来估算回线源的电感(李军峰和李文杰, 2007):

$$L_1 = \mu_0 \mu_t a \left[\ln\left(\frac{8r}{a}\right) - 1.75 \right]\ , \tag{4}$$

式中,μ_0 为真空磁导率,大小为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m,μ_t 为发射回线导体材料相对磁导率,r 为发射回线的半径,a 为发射回线半径,计算方法为 $a = d_1\sqrt{N_1}$.

当采用多匝发射回线时,可用式(5)来估算回线源的电感(李军峰和李文杰, 2007):

$$L_{1n} = n_1 \mu_0 \mu_t a \left[n_1 \ln\left(\frac{8r}{a}\right) - (2n_1 - 1.25) \right]\ , \tag{5}$$

其中,n_1 表示发射回线的匝数,其余参数与前文一致.

发射回线通电后,导线上的电荷会在导线表面

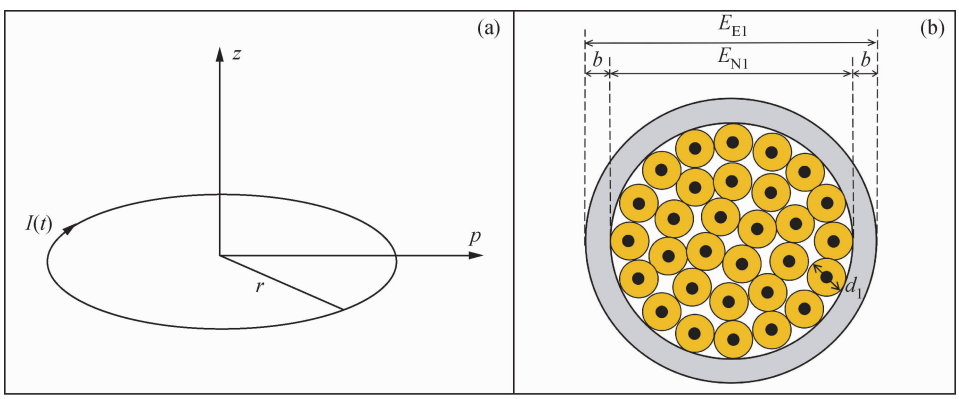


图 5　发射回线模型

(a)发射回线布置形式;(b)导线截面.

Fig. 5　The model of emission loop

(a) Layout form of emission line; (b) The section of conducting wire.

分布,这些电荷会在导体表面形成一个等势体.而导线周围的空间则会存在一个电场,这个电场可以用来存储电荷,这样在导线和地面之间形成一个电容,电容的大小可以由式(6)来估算(Chen *et al*., 2017):

$$C_1 = \frac{\pi a \varepsilon_0 \varepsilon_a N_b}{N_a - 1}, \tag{6}$$

式中,ε_0 为真空介电常数,其值为 8.85×10^{-12} F/m,ε_a 为导体外部绝缘材料相对介电常数,N_a 为发射回线层数,N_b 为发射回线每层匝数.

进行实际地质体勘探工作时,回线源电感的数量级一般在 10^{-3} H 左右,分布电容数量级一般在 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ F 左右,具体取决于匝数、形状、材料以及导线周围的环境条件等,回线源的电感与分布电容会影响发射电流波形、上升与关断时间,进而影响接收信号的质量,因此研究发射回线电感与分布电容对发射电流的影响十分重要.

2.2 接收线圈

接收线圈是瞬变电磁接收部分的核心组件,接收线圈的参数会直接决定接收信号与数据采集的质量,进而影响后续的数据处理、反演成像的工作,对勘探的效果起着至关重要的影响.

接收线圈是测量瞬变电磁场对时间变化率值的传感器,其等效的 LCR 电路如图 6.

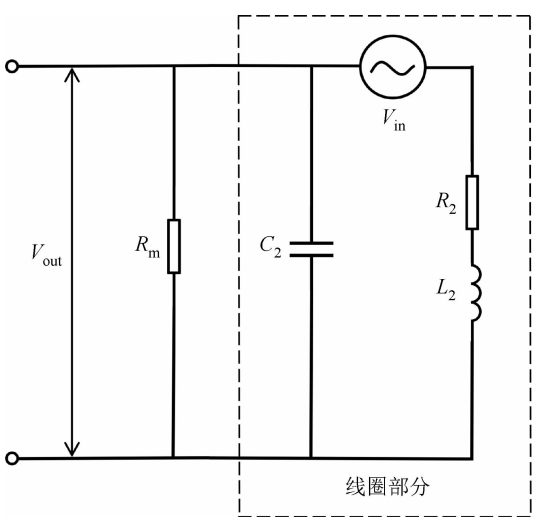


图 6 空芯多匝接收线圈等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit of hollow multi-turn receiving coil

该电路模型是一个线性时不变动态二阶系统,其中 R_2、L_2、C_2 分别表示接收线圈的内阻、电感、分布电容;R_m 为调节系统阻尼比与增加系统稳定性的外接匹配电阻,通常远大于线圈内阻;V_{in}、V_{out} 分别表示接收系统的输入与输出的电压信号,由基尔霍夫电流与电压定律,分析电路节点与回路可得到 V_{in}、V_{out} 之间的关系,相关推导公式如下式所示:

$$V_{in} - L_2 \frac{di}{dt} - iR_2 = V_{out}, \tag{7}$$

$$i = C_2 \frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_m}, \tag{8}$$

$$V_{in} = L_2 C_2 \frac{d^2 V_{out}}{dt^2} + \left(\frac{L_2}{R_m} + R_2 C_2 \right) \frac{dV_{out}}{dt} + \left(1 + \frac{R_2}{R_m} \right) V_{out}. \tag{9}$$

将式(9)可整理为式(10),得到瞬变电磁接收线圈二阶动态系统时间域上的控制方程:

$$\frac{d^2 V_{out}(t)}{dt^2} + \left(\frac{1}{R_m C_2} + \frac{R_2}{L_2} \right) \frac{dV_{out(t)}}{dt} + \frac{R_2 + R_m}{R_m L_2 C_2} V_{out(t)} = \frac{V_{in(t)}}{L_2 C_2}. \tag{10}$$

为了方便后续分析与仿真模型的搭建定义参数 ω_r 为接收线圈二阶系统的谐振角频率,ω_n 为接收线圈 LCR 电路部分的谐振角频率,ζ 为线圈二阶系统的阻尼因子(阻尼比),具体表达式如式(11)、(12)所示,并将以上参数代入式(10)得式(13):

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2} \left(\frac{R_2}{R_m} + 1 \right)} = \sqrt{\left(\frac{R_2}{R_m} + 1 \right)} \cdot \omega_n, \tag{11}$$

$$\zeta = \frac{R_m R_2 C_2 + L_2}{2 \sqrt{L_2 C_2 R_m (R_2 + R_m)}}, \tag{12}$$

$$\frac{d^2 V_{out(t)}}{dt^2} + 2\zeta \omega_r \frac{dV_{out(t)}}{dt} + \omega_r^2 V_{out(t)} = \omega_n^2 V_{in(t)}. \tag{13}$$

由式(13)计算出系统输出量 V_{out} 与输入量 V_{in} 的拉普拉斯变换之比,即得到接收线圈二阶动态系统的频率域传递函数 $H(s)$,用于表征接收线圈的输入输出特性之间的关系,其表达式如下:

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_r s + \omega_r^2}. \tag{14}$$

对上述传递函数再进行拉普拉斯逆变换,即可得到接收线圈二阶动态系统的脉冲响应函数 $H(t)$,脉冲响应函数是系统时域动态特性的重要指标,可以体现系统的延迟,振荡和抑制等特性,接收系统的时域输出 $V_{out}(t)$ 即为系统时域输入与脉冲响应函数的卷积:

$$H(t) = \mathcal{L}^{-1}[H(s)], \tag{15}$$

$$V_{out}(t) = H(t) * V_{in}(t). \tag{16}$$

瞬变电磁多采用感应式空心多匝线圈,由导线

在骨架上绕制而成,以两段三层多匝空心圆形线圈为例,其截面如图 7 所示.

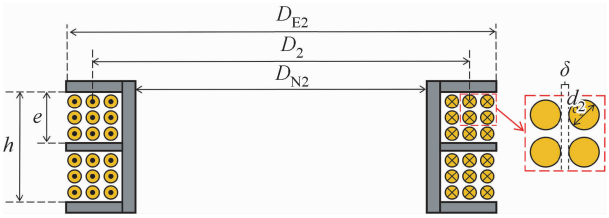


图 7　空芯多匝接收线圈截面形式

Fig. 7　The section form of hollow multi-turn receiving coil

线圈内阻指的线圈本身绕线总电阻值,控制线圈内阻对于控制接收信号的电阻热噪声、减小测量的动态误差具有重要意义,所以通常选用电阻率较低的材料来减少线圈内阻,通常采用铜导线作为绕线材料,线圈整体绕线内阻可由式(17)来计算:

$$R_2 = \rho \frac{1}{S} = \rho_2 \frac{4N_2 D_2}{d_2^2}, \tag{17}$$

式中,ρ_2 为线圈绕线材料的电阻率,N_2 为线圈匝数,D_2 为线圈直径,d_2 为导线线径.

当电流通过多匝线圈时会在线圈中产生自感电动势,而自感电动势又会抑制线圈中的电流,造成测量过程中的动态误差,通常用自感来描述线圈产生自感电动势的能力,可由式(18)来估算多匝空心接收线圈的电感(滕飞等, 2023):

$$L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r d_2 N_2^2}{4} \times \left[\ln\left(\frac{8d_2}{\bar{l}}\right) - 1.73 \right], \tag{18}$$

式中,U_2 为线圈截面等效半径,μ_r 为接收线圈导线材料相对磁导率,$\bar{l}$ 为接收线圈平均绕线周长,可近似取 $\bar{l} = \pi \times D_2$.

当线圈中有电流通过时,由于电阻的存在,会引起压降,从而在各匝线圈之间产生寄生电场. 这种现象导致线圈内部储存一定量的能量,这种能量储存效应被称为分布电容. 分布电容的数值不仅取决于线圈材料、形状、匝数、直径等参数,还与绕行方式密切相关,实际试验过程中通常采用测量的方式来获得分布电容的数值,这里提供了一个分布电容近似估算的方法,如式(19)所示,用于未获取实际测量结果时接收线圈分布电容的估算(滕飞等, 2023).

$$C_2 = 0.118n \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 \bar{l} e (N_2 - 1)}{m\delta N_2^2} + 0.088m \frac{(N_2 - 2)}{N_2^2} \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_S \bar{l}}{e} h, \tag{19}$$

其中,n 表示接收线圈绕线层数,m 表示接收线圈段数,ε_1 表示导线材料相对介电常数,ε_S 表示接收线圈骨架材料相对介电常数, e 为线圈骨架槽间宽度,δ 为线圈每层间距,h 为线圈骨架高度.

接收线圈电感的数量级一般在 10^{-3} H 左右,分布电容数量级在 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ F 左右(许伟强, 2024),由式(19)可知,接收线圈的段数、层数、每层间距以及骨架的几何参数也会影响接收线圈的分布电容,因此亦可以从调整绕线结构、设计更合理的线圈骨架等角度减小线圈分布电容,减少容性因素对接收信号的干扰.

2.3　互感耦合关系

瞬变电磁的发射-地质体-接收的能量传递与传播是一个复杂的过程,在表征瞬变电磁场能量转换与传播的等效电路之间的关系时,可由互感耦合电路来描述,互感耦合电路包括发射源与接收线圈之间、发射源与地质体之间、地质体与接收线圈之间的感应模块电路,常用的重叠回线装置基本无漏磁,且对于地面回线源瞬变电磁收发装置,其发射回线与大地、接收线圈与大地之间也可近似认为无漏磁(刘世蕾等, 2020),则仿真时可假设发射源与接收线圈、发射源与地质体、地质体与接收线圈之间均为全耦合(耦合系数 $k = 1$),则用于表征瞬变电磁部分之间的能量传递的感应电流可由式(20)、(21)、(22)描述:

$$i_{TR} = -kM_{12}\frac{dI}{dt} = -\sqrt{L_1 L_2}\frac{dI}{dt}, \tag{20}$$

$$i_{TO} = -kM_{1o}\frac{dI}{dt} = -\sqrt{L_1 L_o}\frac{dI}{dt}, \tag{21}$$

$$i_{OR} = -kM_{2o}\frac{dI}{dt} = -\sqrt{L_2 L_o}\frac{dI}{dt}, \tag{22}$$

式中,i_{TR}、i_{TO}、i_{OR} 分别表示发射源与接收线圈、发射源与地质体、地质体与接收线圈之间的感应电流,L_o 表示地质体的等效电感,$\frac{dI}{dt}$ 表示源电流随时间的变化率. 式(20)、(21)、(22)较为理想的描述了重叠回线装置下瞬变电磁各部分之间的能量传递关系,忽略了发射回线与接收线圈之间干涉的影响,若为分离回线装置,则需要进一步根据实际测试结果与经验公式确定耦合系数.

3　瞬变电磁 Simulink 仿真系统

按照前述的等效电路模型建立瞬变电磁基本部分仿真系统,按照各部分之间的感应电流的互感耦合关系搭建互感电路模块,用于将连接基本部分子

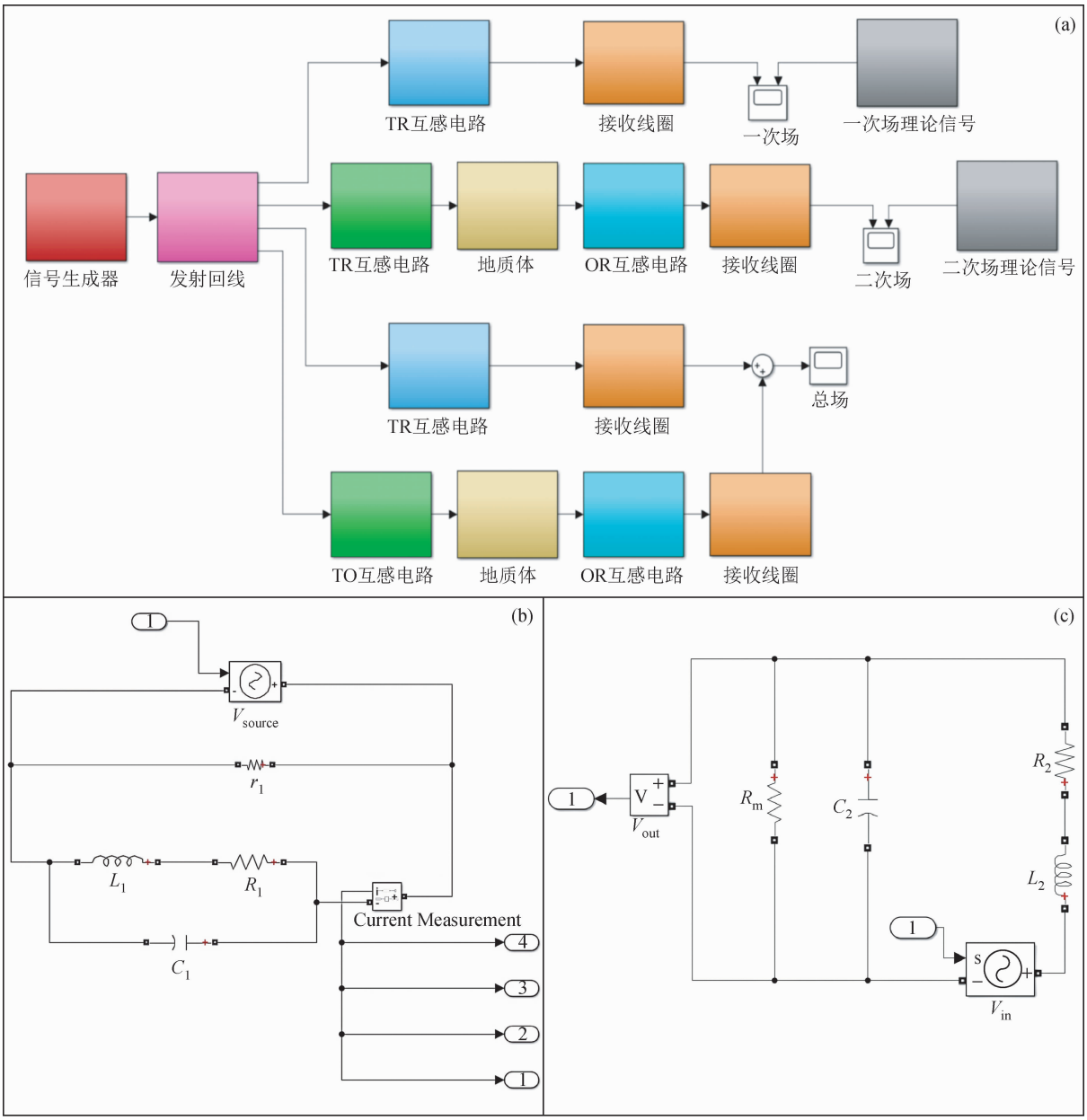


图 8 瞬变电磁 Simulink 仿真系统

(a)系统整体结构;(b)发射回线子系统;(c)接收线圈子系统.

Fig. 8 Simulink simulation system of transient electromagnetic

(a) Overall system structure; (b) Subsystem of emission loop; (c) Subsystem of receiving coil.

系统,建立发射系统、地质异常体、接收系统之间涡旋电流场及其相互计算关系的仿真系统,适用于地面中心回线源瞬变电磁信号仿真.为了便于分析,设计了用于计算各部分基本等效电路元件物理量的计算模块与用于后续分析的阻尼比、谐振频率实时计算更新单元,实现输入瞬变电磁发射回线匝数、发射回线长度、接收线圈线径、接收线圈直径等基本物性参数即可自动计算获取一次场、二次场、总场仿真信号,为研究多种因素对瞬变电磁场的响应规律与分布特性提供一种简单方便的途径.所搭建的瞬变电磁 Simulink 仿真系统如图 8 所示.

图 8a 中发射源、地质体、接收线圈以及各部分之间的互感电路均由前文中介绍的等效电路及概念化模型搭建,其中发射回线与接收线圈子系统具体如图 8b、c 所示,一次场、二次场理论信号模块均按前文介绍的公式搭建;信号生成器用于模拟的发射机的发射信号,包括阶跃信号、线性关断信号、非线性关断信号等,后续研究采用线性关断信号,信号生

成器与发射源连接,发射源的信号经 TR 互感电路后被接收线圈接收,则输出信号为纯一次场信号;发射源中的瞬变信号经 TO 互感电路在地质体中产生涡旋电流,涡旋电流信号被作为接收线圈的输入信号时,输出信号为纯二次场信号;当接收线圈的输入信号是发射源与地质体共同作用的信号,则输出结果就是我们所观测到的瞬变电磁总场信号. 利用 Simulink 的 Scope 模块可对输出的一次场、二次场以及总场信号与理论信号进行同步、对比与量测,为仿真结果提供了可视化的分析工具.

4　精度验证

为了验证搭建的瞬变电磁 Simulink 模型的准确性并为后续研究的提供保障,我们将瞬变电磁 Simulink 模型的总场输出结果与前文中式(16)介绍的线圈二阶动态系统控制方程的总场卷积理论信号进行了对比验证. 设置发射电流 24 A,不考虑关断时间,发射电流为负阶跃信号,在 0 时刻关断,则负阶跃电流的表达式为:

$$I=\begin{cases}24\ , & t<0\\ 0\ , & t\geqslant 0\end{cases}. \tag{23}$$

在此发射信号下,将瞬变电磁总场仿真结果与由接收线圈输入信号与脉冲响应函数做卷积得到的总场解析解对比,对比结果如图 9 所示.

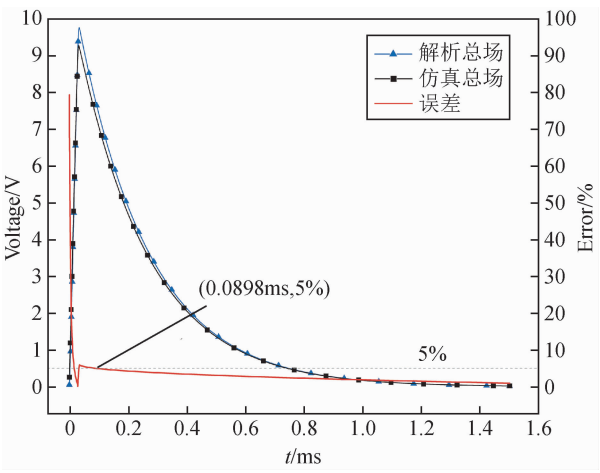


图 9　仿真总场与解析总场对比

Fig. 9　Comparison between simulated total field and analytical total field

由图 9 可以看出,瞬变电磁总场信号的仿真结果与控制方程所得的解析解在总场信号的上升沿误差较大,到达信号幅值点后即在总场信号下降沿,仿真总场曲线与理论总场曲线基本重合,误差呈现略微下降趋势,并且 0.0898 ms 之后的误差始终小于 5%.

分析 Simulink 仿真得到的总场曲线与理论总场曲线,我们认为导致这种情况的原因在于:(1)仿真条件设置,为仿真时间考虑,在仿真求解器选择上,本 Simulink 仿真系统采用的是步长为 $1e^{-8}$ s 的定步长求解器,在离散系统下,仿真曲线是由求解器根据一系列数据点拟合而成的,而理论曲线是完全连续的曲线,具有更高的数学精度,这会导致二者出现略微的误差. (2)理论公式认为的发射回线发出的电流是理想阶跃信号,而仿真过程中,虽然发射机(信号生成单元)生成理想阶跃信号,但由于发射机中微量电感与电容的存在,使得发射电流与理想负阶跃电流存在略微差异,由图 9 可知,仿真的总场幅值略低于理论总场幅值,且二者总场曲线在上升沿存在一个从很大逐渐减小的误差,具体表现为仿真曲线上升沿整体斜率更小,且仿真曲线上升沿整体滞后于解析曲线,这些都印了本条推测. 仿真信号无法达到完全理想化是引起仿真曲线与解析曲线二者差异的主要原因. (3)元件参数的精确性,仿真元件的精度与理论计算精度存在差距,从发射到接收仿真要经历一系列模型,这些误差都会在仿真过程中积累,这也会导致仿真结果与理论结果存在差异.

5　不同参数的仿真结果与影响分析

本部分将利用搭建的瞬变电磁发射-地质体-接收 Simulink 仿真系统,进行对瞬变电磁接收信号影响影响较大的几个关键参数的研究与分析,分别是发射回线的电感与电容、发射机的关断时间、接收线圈的阻尼比、以及接收线圈本身的阻抗特性.

5.1　发射回线电感、电容的影响

关断电流的波形也是瞬变电磁法勘探中十分重要的影响因素,它影响着瞬变电磁一次场的大小和范围以及地质体涡旋电流的形态,也涉及到许多瞬变电磁理论计算的假设,由于理想瞬变电磁系统需要一个快速关断的电流脉冲,比如方波,但由于发射回线自身电感、寄生电感、寄生电容、分布电容的存在,它们会共同形成一个 LC 谐振电路,造成关断电流的衰减或者震荡,还会在早期时间道引入噪声,掩盖微弱的二次场信号,影响探测的深度、分辨率以及信噪比.

研究发射回线电容电阻对关断电流的影响时,设定信号生成器供电电流 I 为 24 A,发射电压 840 V,信号开始关断时刻位于采样时间的 1/2 处,关断时

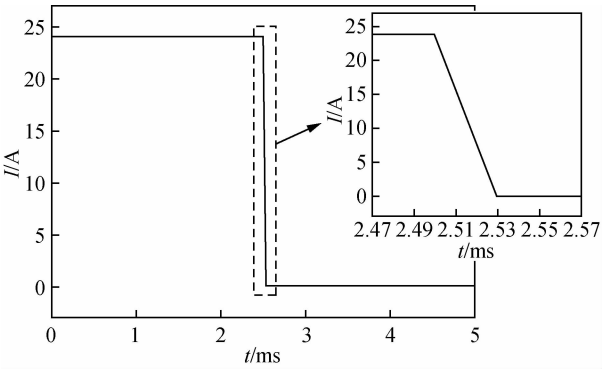


图 10 仿真线性关断信号

Fig. 10 Simulate linear shutdown signal

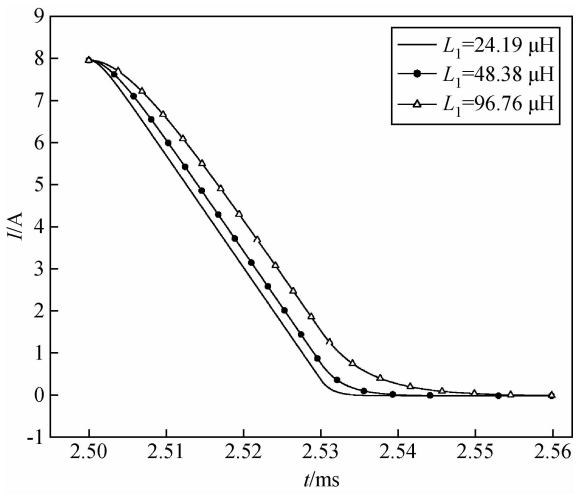


图 11 不同发射回线电感值下的电流关断波形

Fig. 11 The current shutdown waveform under different emission loop inductance values

间为 30 μs,关断时间内信号生成器信号理想线性下降,其仿真输出波形如图 10 所示.

为研究发射回线电感与电容对关断电流波形的影响,通过调整发射回线的匝数、长度以及回线的导体丝直径等基本参数改变发射回线的电感与电容,并通过调节发射机电感与电容使发射系统电感电容为单一变量,即可实现单独研究发射回线电感与电容对回线中关断电流波形的影响.

设置发射机电感 50 μH,并控制发射系统总电容为 50 nF,图 11 为发射回线电感值分别为 24.19 μH、48.38 μH、96.76 μH 时的关断电流波形,从图中可以看出,随着发射回线的电感值增大,关断时间变长,发射回线电感值为 96.76 μH 时实际回线中的电流关断时间明显大于 30 μs,回线中电流衰减速度下降,这会增大接受回线中一次场信号对二次场信号产生的干扰,而由图 12 可以很好验证这一点,发射回线的电感越大,瞬变电磁一次场与二次场信号响应速度越慢,电感变化对二次场的影响更为明显,电感改变不仅改变了二次场上升沿与下降沿的斜率,还显著影响着二次场信号的幅值,发射回线电感值越低信号幅值越高,从式(4)、(5)中可以看出,可以采用优化发射回线布置形式,使发射回线更接近圆形,采用更低相对磁导率的导线材料等方式以此减小发射回线的电感.

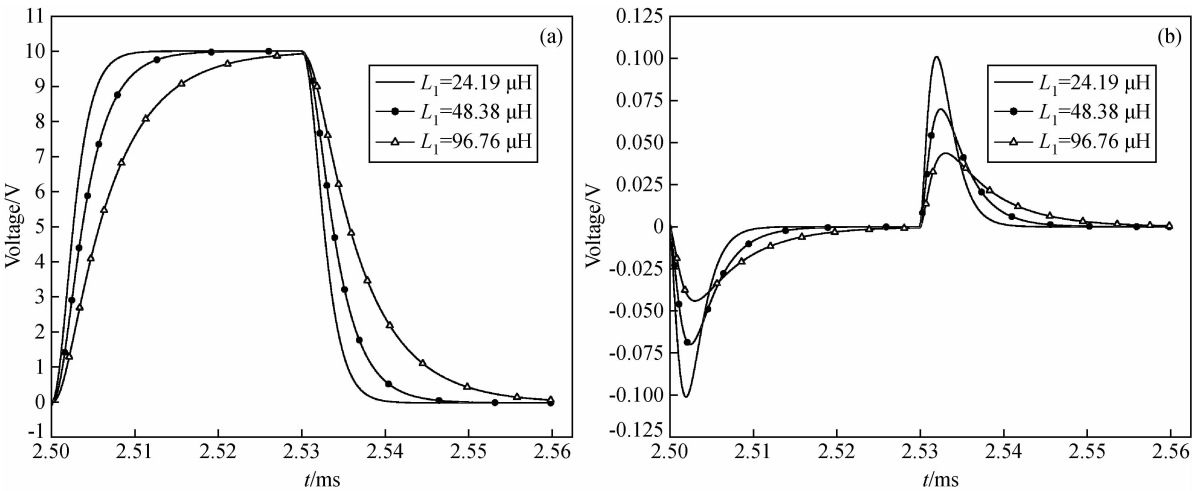


图 12 不同发射回线电感值下的接收信号

(a)一次场信号;(b)二次场信号.

Fig. 12 The received signal under different emission loop inductance values

(a) The signal of primary field; (b) The signal of secondary field.

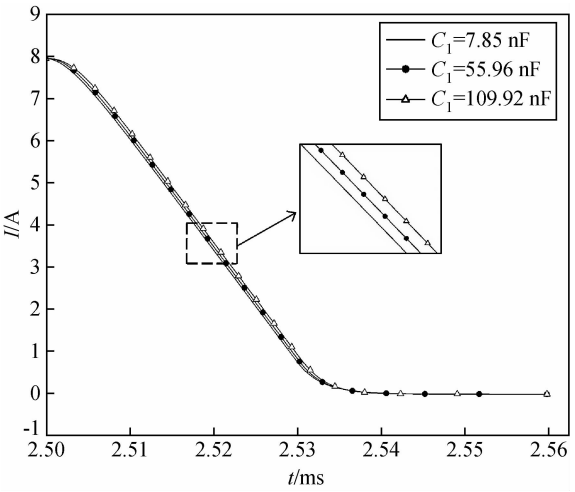


图 13　不同发射回线分布电容值下的电流关断波形

Fig. 13　The current shutdown waveform under different emission loop distributed capacitance values

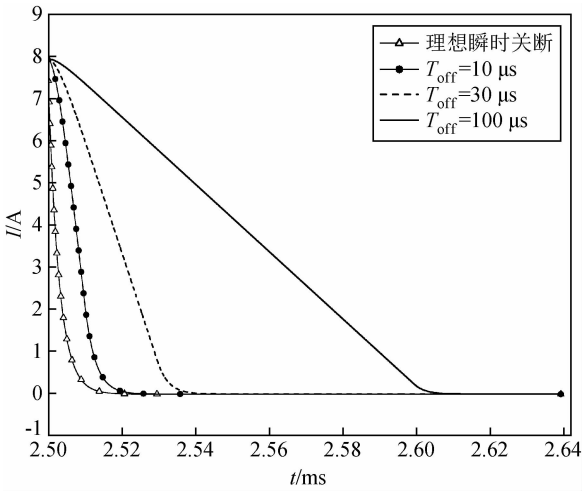


图 15　不同关断时间下的电流关断波形

Fig. 15　The current shutdown waveform under different shutdown time

设置发射机电容 10 nF,并控制发射系统总电感为 150 μH,图 13 为发射回线分布电容分别为 7.85 nF、55.96 nF、109.92 nF 时的仿真电流关断波形,图 14 为发射回线不同分布电容下的瞬变电磁一、二次场信号,由图中信息可知,在发射回线分布电容合理取值范围下,随着发射回线的电容值增大,电流关断的下降速度逐渐减缓,一次场与二次场信号响应速度以及幅值也会略微下降,但相较于发射回线电感的变化,加之发射回线分布电容本身数量级较小,其分布电容对电流关断时间与波形的影响相对较弱,在实际应用中我们还是需要尽量控制发射回线的电容以减小其带来的影响,由公式(6)建议优化发射回线搭接形式以减小分布电容.

5.2　关断时间对接收信号的影响

发射机是瞬变电磁法发射系统的重要组成部分,它的关断时间作为衡量发射机的性能的重要参数,直接关系到发射回线中的电流关断波形,进而影响接收信号的频谱特性和时域响应以及瞬变电磁后处理过程中的数据解释与反演精度,多年来,人们针对发射机的关断时间做了大量努力与改进,以提高

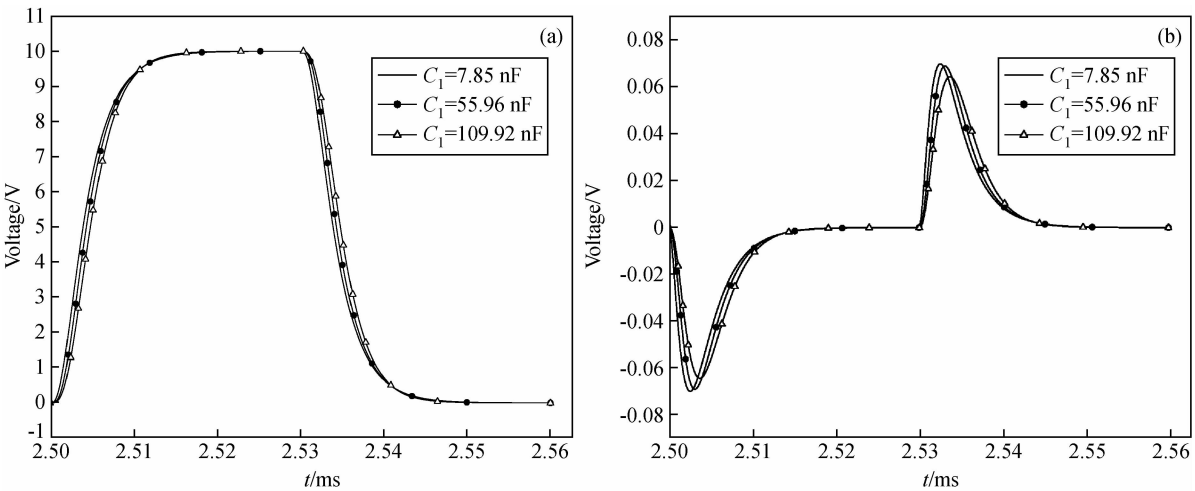


图 14　发射回线不同分布电容值下的接收信号

(a)一次场信号;(b)二次场信号.

Fig. 14　The received signal under different emission loop distributed capacitance values

(a) The signal of primary field; (b) The signal of secondary field.

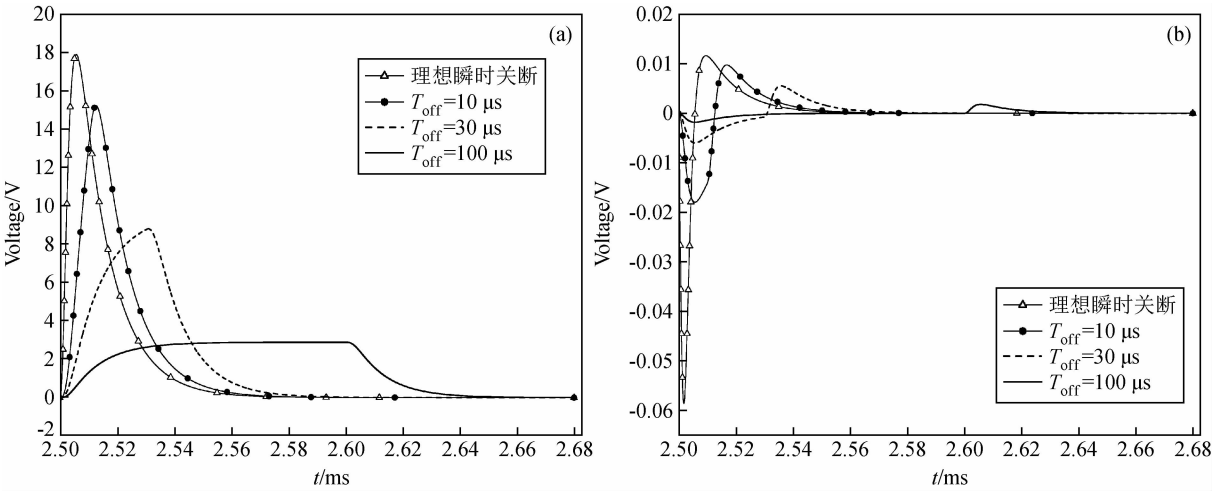


图 16 不同关断时间下的接收信号

(a)一次场信号;(b)二次场信号.

Fig. 16 The received signal under different shutdown time

(a) The signal of primary field; (b) The signal of secondary field.

接收信号的数据质量与勘探效果.

同样设定信号生成器供电电流 I 为 24 A,发射电压 840 V,信号开始关断时刻位于采样时间的 1/2 处,关断时间内信号生成器信号理想线性下降,并加入关断时间为 0 下的理想情况作对比,通过调整信号生成器的信号下降时间,即可研究关断时间对发射系统电流关断波形与瞬变电磁接收信号的影响.

图 15 为不同关断时间下的发射回线电流关断波形,从图中可以看出,收到发射机以及发射回线中感性与容性元件的影响,发射回线中的电流关断波形与发射机的理论关断波形不一致,在关断时间的初期与晚期波形斜率明显减小,导致实际电流关断时间长于发射信号关断时间.

图 16 为关断时间对一次场(a)与二次场(b)信号的影响,从图中可以看出,关断时间不仅影响一次场与二次场信号的响应速度,并且显著影响一次场与二次场信号的幅值,关断时间为 0 的理想关断条件下,一次场与二次场响应最快,信号幅值点越高,在其他条件相同的情况下,关断时间越长,接收信号响应越慢,幅值越小.

5.3 接收线圈阻尼比对接收信号的影响

接收线圈是测量瞬变电磁信号的重要组件,研究其响应特性对于瞬变电磁装备研发与校准具有重要意义,接收线圈的阻尼比作为影响接收线圈性能的重要参数,研究其变化对瞬变电磁接收信号质量的影响是进行接收线圈优化的重要一环.

设定发射机的发射电压为 840 V,信号开始关断时刻为 2.5 ms,关断时间内信号生成器信号理想线性下降,在瞬变电磁动态信号测量中,接收线圈中存在的电容、电感等容性、感性元件导致线圈中不能及时达到理论值,会形成测量中的动态误差.

阻尼比是一个反映接收线圈二阶动态等效电路的综合指标,是接收信号的形态质量的决定因素.由前文给出的公式(12)可知,接收线圈的阻尼比主要由其内阻 R_2,电感 L_2,分布电容 C_2 以及外接的匹配电阻 R_m 决定,而 R_2、L_2、C_2 是由接收线圈的材料、匝数、尺寸、线径及绕制方式等相关参数决定,而通常情况下,线圈外接匹配电阻 R_m 远大于其内阻 R_2,根据电阻并联的关系,接收线圈等效电路总电阻 $R=\frac{R_2R_m}{R_2+R_m}\approx R_2$,通过调节匹配电阻 R_m 的值,即可在保证电路总电阻值即接收信号幅值基本不变的情况下,改变接收线圈的阻尼系数,研究接收线圈阻尼比瞬变电磁接收信号的影响.

瞬变电磁整个接收过程的电磁感应信号可以分为一次场信号(关断中)与二次场信号(完全关断后)两部分,由图 17a 可以看出,在一次场信号的接收时间段中,欠阻尼情况下,响应速度与阻尼比负相关,阻尼比越小,输出信号的上升速度与衰减速度越快,但同时曲线震荡越明显,一次场信号畸变越严重.随着阻尼比的不断增大,震荡现象不断受到抑制;当到达临界阻尼时接收信号刚好不再发生振荡,

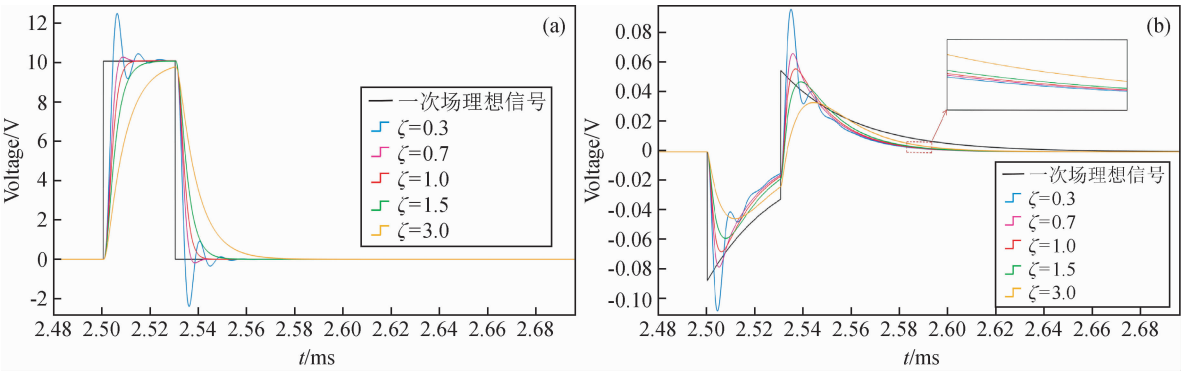


图 17　接收线圈不同阻尼比下接收信号

(a)一次场信号;(b)二次场信号.

Fig. 17　The received signal under different damping ratios of receiving coil

(a) The signal of primary field; (b) The signal of secondary field.

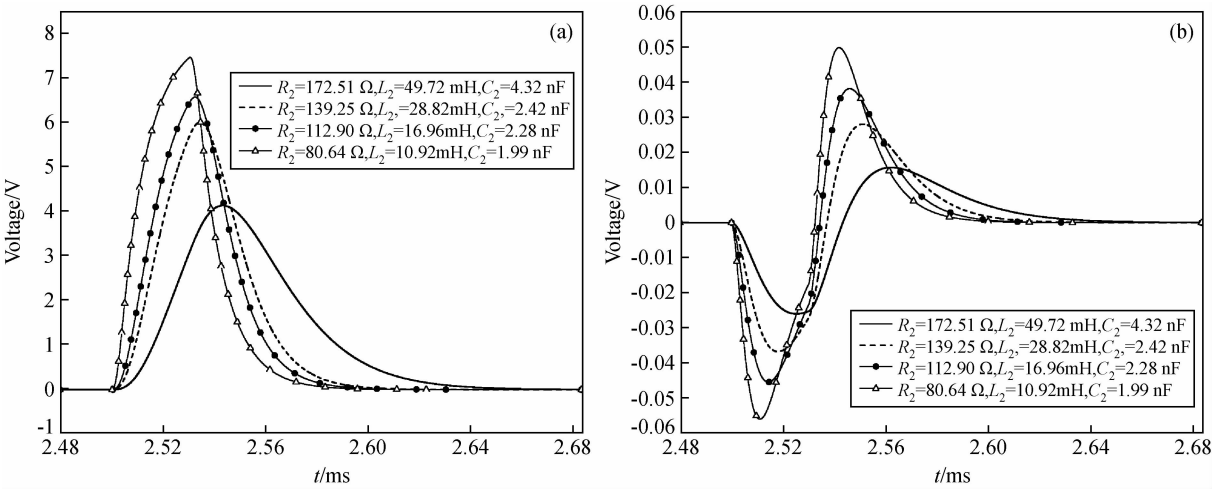


图 18　接收线圈不同阻抗特性下接收信号

(a)一次场信号;(b)二次场信号.

Fig. 18　The received signal under different impedance characteristics of receiving coil

(a) The signal of primary field; (b) The signal of secondary field.

与瞬变电磁理想一次场信号拟合程度较高;在过阻尼情况下,输出幅值明显受到压制,且上升速度与衰减速度都很慢,出现较长的过渡过程,与理论信号的拟合效果较差.

接收线圈阻尼比对于二次场信号的影响与一次场类似,从图 17b 可以看出,接收线圈欠阻尼状态下,阻尼比越小,二次场响应速度越快,振荡越明显;临界阻尼状态下二次场信号不再发生振荡,与理想二次场信号差异较小;而过阻尼状态下,二次场信号无论是响应速度还是信号幅值都会受到压制.

5.4　接收线圈阻抗特性的影响

接收线圈的基本物性参数如材料、匝数、直径、线径都是决定其阻抗特性的直接要素,而接收线圈的阻抗特性又会直接影响瞬变电磁感应信号. 通过在搭建的系统中调整接收线圈的匝数、直径与线径,可以获得一系列的接收线圈的电阻、电感及电容值,对比接收信号的输出结果,从而研究接收线圈阻抗特性对瞬变电磁接收信号的影响.

设定发射机的发射电压为 840 V,信号开始关断时刻为 2.5 ms,关断时间 30 μs,发射回线电阻、电感、电容分别固定为 0.5 Ω、200 μH、30 nF,调节接收线圈基本参数,并通过调节每一组 LCR 值下的外接匹配电阻的阻值,使接收线圈阻尼状态始终保持临界阻尼,从而获得图 18 中接收线圈不同阻抗特

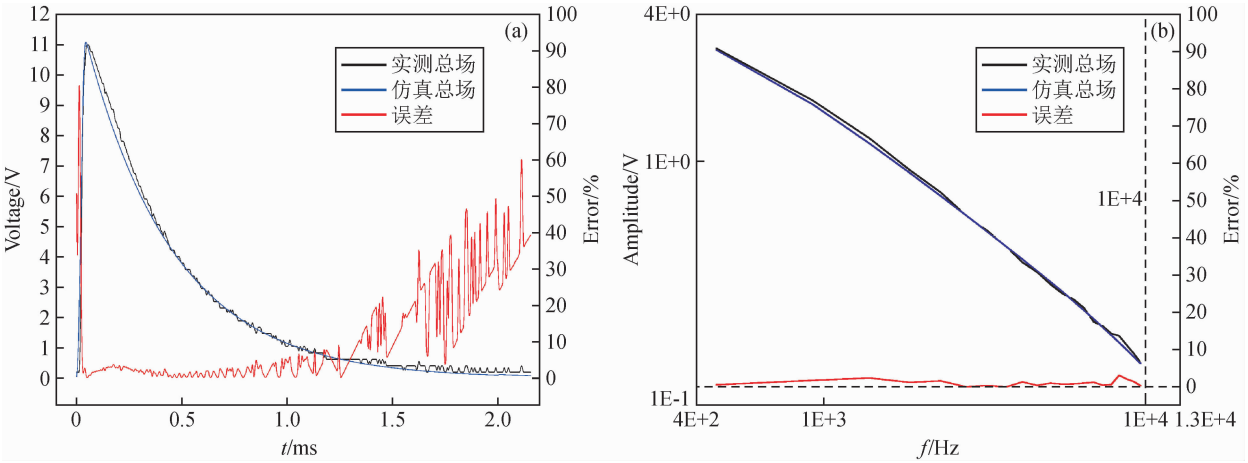


图 19 仿真总场与实测总场对比

(a)时间域对比;(b)频率域对比.

Fig. 19 Comparison between simulated total field and measured total field

(a) The comparison of time domain; (b) The comparison of frequency domain.

性下的瞬变电磁接收信号,由图中信息可知,接收信号的幅值主要由其阻值决定,信号幅值与接收线圈电阻呈现负相关的关系,而其上升沿与下降沿的斜率主要受其电感值影响.接收线圈电阻越小,信号幅值越高,产生的电阻热噪声越低,其感应信号受噪声的影响越小,而接收线圈的电感与电容是引起信号动态误差的主要因素,越小的电感与电容越有利于处理瞬变电磁的观测数据、提升探测质量.

6 实测对比

为进一步验证搭建的瞬变电磁 Simulink 仿真系统的准确性及其对实际仪器的指导意义,我们利用前文描述的瞬变电磁发射回线与接收线圈设计了实测试验,测试场地为校内仪器研发室,为减小对测试结果的影响,测试时已切断周围大概率电源.将发射回线平置于地面,接收线圈置于发射回线中央,利用示波器对采集的信号进行波形分析与测量,最终获得实测数据.仿真端,调节系统中发射回线模块与接收线圈模块的物性参数与实际相同,发射电流 12 A,发射机关断时间 31 μs,0 时刻为电流关断时刻,关断时间内电流线性下降至 0,获得总场仿真信号.仿真总场信号与实测总场信号如图 19.

由对比结果可知,仿真的瞬变电磁总场信号从整体波形与走向上与实测总场信号拟合情况较好,但从误差曲线分析,总场信号初期与晚期阶段的误差较大,信号中段误差控制较好,0.5 ms 附近时间范围内仿真结果对比实测的误差一度控制在 5% 以内.

分析结果我们认为导致出现这种情况的主要原因如下:(1)环境因素干扰,实测环境的变化是复杂多变、难以预测的,测量过程会受到温度、湿度、地磁场脉动等因素的干扰,而 Simulink 的仿真假设在理想无干扰的环境下进行.在实测过程中发射回线与接收线圈的电阻、电感、电容也不是一个固定值,而是会随着试验的进行和周围环境因素的变化而变化,而 Simulink 仿真所设置的收发装置的电性参数是固定的一个值.(2)噪声干扰,由于传感器与示波器精度有限,仿真值在晚期已衰减到仪器精度可观测范围之外的量级,在时间域已无法具体研究造成二者差异的其他具体原因,在时间域领域已难以继续研究造成二者差异的原因,由于瞬变电磁有效信号通常认为集中在低频段(周杰, 2021),故考虑采用时频转换算法将实测信号转换到频率域,并截取 0~10 kHz 频段,得到图 19b 所示的二者频率-振幅曲线,由图中信息可知,仿真曲线与实测曲线在瞬变电磁有效信号频段范围内拟合程度较高,二者误差控制在 10% 以内,验证了时间域的实测与仿真曲线晚期出现较大误差是由噪声干扰所致的推测,这是误差出现的核心原因.(3)仿真条件与仿真参数设置误差,如关断时间实测过程中测量精度有限,且关断时间并不是一个稳定的数值,仿真时设置的关断时间同实际关断时间存在出入,这是二者时间域对比图 19a 中最早期误差较大的重要因素之一,再如实测前利用 LCR 数字测量的发射与接收回线电阻、

电感精度不足,利用频谱分析仪测量并计算的发射与接收回线分布电容不准确.(4)互感耦合电路误差,仿真时利用经验公式搭建的互感耦合电路与真实情况存在差距,实测过程中即便是在地面重叠回线装置下,发射回线-接收线圈、发射回线-地质体、地质体-接收线圈之间也难以达到全耦合,即在公式(20)~(22)中,耦合系数 k 难以保持为1,而是略小于1.

由于引起仿真数据与实测数据误差既有实测过程的干扰也有仿真设置的不当,故考虑从两方面分别对带来误差的原因进行排除与改善,我们提出了以下解决措施:(1)对测量过程中的收发回线的电性参数进行动态测量,以动态数据作为仿真时电路元件的输入.(2)实测采集数据时对采集系统添置低通滤波器或对采集的数据进行叠加降噪,最大限度降低高频噪声的干扰,再与仿真曲线进行对比分析.(3)发射回线-接收线圈互感耦合电路中的互感系数可以不采用式(20)的经验公式计算,而是采用先将发射回线与接收线圈串联接测得其总电感,再分别测量发射回线与接收线圈的电感,最后利用公式(24)计算其互感作为仿真输入结果(牛福龙,2008),会进一步提高仿真数据的可靠度,减小误差:

$$M_{12}=\frac{|L_{1+2}-L_1-L_2|}{2}, \tag{24}$$

式中,L_{1+2} 为发射回线与接收线圈串接测量的总电感,L_1 为发射回线电感测量值,L_2 为接收线圈电感测量值.

7　结　论

本文通过搭建瞬变电磁收发系统与地质体的等效电路,并利用推算公式搭建了电路中物理量的计算模块,实现了定义瞬变电磁基本物性参数即可进行简便高效的瞬变电磁全过程的仿真的目的,在通过瞬变电磁总场理论信号精度验证的基础上,对发射端与接收端的关键参数进行了定性分析,得出以下结论:

(1)发射回线的电感与电容值的大小会直接影响发射电流的关断时间与波形,进而对瞬变电磁一次场与二次场产生干扰,降低采集的数据质量,且相较于分布电容,发射回线电感对电流关断的影响更加明显;发射电流的关断时间对接收信号也有显著影响,关断时间越长,瞬变电磁一次场与二次场响应越慢,信号的幅值越低.在实际操作的过程中,建议在满足发射磁矩的要求下,通过优化发射回线搭接形式以减小发射端感性、容性参数的影响,同时起到减小关断时间影响的效果.

(2)接收线圈的阻抗特性是影响瞬变电磁信号的核心因素.改变接收线圈基本物性参数后引起的接收线圈电阻、电感、电容的变化直接决定了接收信号衰减曲线的波形特性,减小接收线圈电阻可以显著降低接收信号的电阻热噪声,而降低电感与电容均有利于提升探测数据质量,这为瞬变电磁接收线圈的优化提供了思路.

(3)接收线圈的外接匹配电阻会影响接收线圈的阻尼状态,接收线圈阻尼比过小,导致一次场与二次场接收信号振荡越明显,偏离理论信号越严重,而阻尼比过大,会导致接收信号响应速度与幅值下降明显,与理论信号的拟合程度越低,所以实际工作中,建议将接收线圈通过调节匹配电阻将阻尼比控制在临界阻尼或稍稍欠阻尼的状态,既能保证信号响应速度与信号幅值,减少噪声等因素的影响,又能有效避免信号的明显振荡,提高采集的数据质量.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Bao M H, Yu C G, Wang Q, *et al*. 2014. Research of TEM on Transient Process of Small-coil Device. Chinese Journal of Engineering Geophysics (in Chinese), 11(3): 366-369, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2014.03.017.

Cao H K, Qi Z P, Li X, *et al*. 2022. Transient electromagnetic apparent resistivity calculation considering turn-off time and shallow resolution analysis of different waveforms. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(4): 1704-1716, doi: 10.6038/pg2022FF0562.

Chen S D, He S, Zhang S. 2014. Calibration of ground transient electromagnetic system. Progress in Geophysics (in Chinese), 29(2): 660-667, doi: 10.6038/pg20140225.

Chen S D, Guo S X, Wang H F, *et al*. 2017. An improved high-sensitivity airborne transient electromagnetic sensor for deep penetration. Sensors, 17(1): 169, doi: 10.3390/s17010169.

Chen Z S, Yin Q Z, Geng L J, *et al*. 2022. Optimization of ground detection method for small closed coal mine. Progress in Geophysics (in Chinese), 37(1): 367-373, doi: 10.6038/pg2022FF0138.

Davidenko Y, Hallbauer-Zadorozhnaya V, Bashkeev A, *et al*. 2023. Semi-airborne UAV-TEM system data inversion with S-plane method—case study over Lake Baikal. Remote Sensing, 15(22): 5310, doi: 10.3390/rs15225310.

Fan Y, Lu K L, Li X, *et al*. 2022. Mapping coal water-filled zones using multi-radiation source transient electromagnetic pseudo-seismic born approximation imaging and apparent resistivity imaging in Gansu, China. Journal of Applied Geophysics, 203: 104717, doi: 10.1016/j.jappgeo.2022.104717.

Fu G H, Wang Z Y, Cheng H, *et al*. 2025. Research on ultra-fast turn-off methods and techniques for TEM. Progress in Geophysics (in Chinese), 40(2): 758-764, doi: 10.6038/pg2025II0071.

Jang H, Kim H J. 2015. Mapping deep-sea hydrothermal deposits with an in-loop transient electromagnetic method: insights from 1d

forward and inverse modeling. Journal of Applied Geophysics, 123: 170-176, doi: 10.1016/j.jappgeo.2015.10.003.

Ji Y J. 2004. All-time secondary electromagnetic field extraction in high resolution transient electromagnetic system for subsurface Imaging [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chang'chun: Jilin University.

Jiang X T, Sun H F, Liu D, *et al*. 2024. Three-dimensional forward modeling and response analysis of semi-airborne transient electromagnetic with arbitrary anisotropy based on finite volume method. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(5): 2046-2058, doi: 10.6038/pg2024HH0168.

Kozhevnikov N, Sharlov M, Pestyurin T, *et al*. 2023. Testing transient electromagnetics systems on the ice cover of Lake Baikal. Journal of Applied Geophysics, 212: 104985, doi: 10.1016/j.jappgeo.2023.104985.

Li H, Qi Z P, Li X, *et al*. 2020. Numerical modelling analysis of multi-source semi-airborne TEM systems using a TFEM. Journal of Geophysics and Engineering, 17(3): 399-410, doi: 10.1093/jge/gxz119.

Li J F, Li W J. 2007. A calculatiom method of self-inductance of tranmiting coil for AEM system. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 29(S1): 17-20.

Lin T T, Zhou K, Cao Y M, *et al*. 2022. A review of air-core coil sensors in surface geophysical exploration. Measurement, 188: 110554, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110554.

Liu R, Sun H F, Liu D, *et al*. 2023. A joint application of semi-airborne and in-tunnel geophysical survey in complex limestone geology. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(6): 226, doi: 10.1007/s10064-023-03251-y.

Liu S B. 2022. Efficient 3D forward modeling method and L-BFGS inversion for transient electromagnetic based on backward Euler and direct-spliting scheme [Ph. D. thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University.

Liu S B, Wang Y X, Sun H F, *et al*. 2022. Asynchronous MMC PSA inversion of transient electromagnetic data. Exploration Geophysics, 53(6): 602-619, doi: 10.1080/08123985.2022.2027730.

Liu S L, Zhang Y, Yue J H. 2020. Application of Simulink in transient process analysis of transient electromagnetic field. Coal Geology & Exploration (in Chinese), 48(2): 209-215, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.031.

McLachlan P, Christiensen N B, Grombacher D, *et al*. 2023. Evaluating the impact of correlated noise for time-lapse transient electromagnetic (TEM) monitoring studies. Near Surface Geophysics, 21(5): 333-342, doi: 10.1002/nsg.12262.

Monteiro Santos F A, Perea H, Massoud U, *et al*. 2009. Using tensorial electrical resistivity survey to locate fault systems. Journal of Geophysics and Engineering, 6(4): 390-400, doi: 10.1088/1742-2132/6/4/007.

Niu F L. 2008. The calculation of the total inductance when several series-wound loops are connected. Journal of Lanzhou University of Arts And Science (Natural Sciences Edition) (in Chinese), 22(4): 97-99, doi: 10.13804/j.cnki.2095-6991.2008.04.017.

Ruth S C, Kirui M, Mariita N, *et al*. 2020. ID inversion of magnetite data used to study the resistivity structure of the Olkaria oil field. Journal of Petroleum and Mining Engineering, 3(7), 1-10.

Sun H F, Zhang N Y, Liu S B, *et al*. 2019. L1-norm based nonlinear inversion of transient electromagnetic data. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(12): 4860-4873, doi: 10.6038/cjg2019M0690.

Sun H F, Chen C D, Yang Y, *et al*. 2022. Motion noise remove for secondary-field semi-airborne transient electromagnetic data. Journal of Applied Geophysics, 202: 104676, doi: 10.1016/j.jappgeo.2022.104676.

Sun H F, Zhang N Y, Li D R, *et al*. 2023. The first semi-airborne transient electromagnetic survey for tunnel investigation in very complex terrain areas. Tunnelling and Underground Space Technology, 132: 104893, doi: 10.1016/j.tust.2022.104893.

Sun H F, Hu S S, Liu S B, *et al*. 2024. 3D forward modeling software development for transient electromagnetic based on FDTD method. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(6): 2368-2382, doi: 10.6038/pg2024HH0445.

Teng F, Wang P F, Wang Y, *et al*. 2023. Design of the three-component coil sensor for semi-airborne frequency domain electromagnetic detection. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(1): 430-441, doi: 10.6038/cjg2022P0847.

Wang H W. 2019. Research on transient electromagnetic small-loop detection technology [Ph. D. thesis] (in Chinese). Chongqing: Chongqing University.

Wu J J, Zhi Q Q, Li X, *et al*. 2023. Loop source semi-airborne TEM system and its application in landslide detection. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(4): 1758-1770, doi: 10.6038/cjg2022P0960.

Xu W Q. 2024. Analysis and parameters optimization for semi-airborne transient electromagnetic receiving coils [Master's thesis] (in Chinese). Ji'nan: Shandong University.

Xue G Q, Wu X, Chen W Y. 2023. Research of the short-offset TEM (SOTEM) system. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(8): 3514-3523, doi: 10.6038/cjg2023Q0890.

Yan J Y. 2020. Study on the influence of transient electromagnetic coils based on Simulink [Master's thesis] (in Chinese). Xu'zhou: China University of Mining and Technology.

Yan S, Xue G Q, Qiu W Z, *et al*. 2016. Feasibility of central loop TEM method for prospecting multilayer water-filled goaf. Applied Geophysics, 13(4): 587-597, doi: 10.1007/s11770-016-0586-5.

Yang H Y, Yue J H, Hu W W, *et al*. 2007. The characteristics of the early signal in TEM affected by self-induction of multiturn coil. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 29(2): 96-98, doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2007.02.003.

Yang Y, Zhang H, Zhou C Y, *et al*. 2022. Motion noise removal method of semi-airborne transient electromagnetic pure secondary field data based on least square inversion. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(6): 2351-2364, doi: 10.6038/cjg2022P0301.

Yu C T, Zhang X, Chen W Y, *et al*. 2023. Detection of water-enriched goaf via the semi-airborne transient electromagnetic method. Journal of Applied Geophysics, 212: 105011, doi: 10.1016/j.jappgeo.2023.105011.

Zhao Y, Sun H F, Liu J, *et al*. 2023. Technology of shallow sea magnetic sources TEM detection and its application. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(6): 2768-2777, doi: 10.6038/pg2023GG0551.

Zheng Z Q, Liu R, Sun H F, *et al*. 2024. On sensitivity detection area and analysis of influence factors for semi-airborne transient electromagnetic method. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(10): 3946-3958, doi: 10.6038/cjg2024R0562.

Zhou J. 2021. Development of ground transient electromagnetic three-component receiving system [Master's thesis] (in Chinese). Chengdu: Chengdu University of Technology.

附中文参考文献

鲍明晖, 余慈拱, 王谦, 等. 2014. 瞬变电磁法小线圈装置过渡过程影响研究. 工程地球物理学报, 11(3): 366-369, doi: 10.3969/j.issn.1672-7940.2014.03.017.

曹华科, 戚志鹏, 李貅, 等. 2022. 考虑关断时间的瞬变电磁视电阻率计算及不同波形浅层分辨特征分析. 地球物理学进展, 37(4): 1704-1716, doi: 10.6038/pg2022FF0562.

陈曙东, 何胜, 张爽. 2014. 地面瞬变电磁系统标定的理论研究. 地球物理学进展, 29(2): 660-667, doi: 10.6038/pg20140225.

陈中山, 殷全增, 耿丽娟, 等. 2022. 关闭小煤矿采空区地面探测方法优选. 地球物理学进展, 37(1): 367-373, doi: 10.6038/pg2022FF0138.

付国红,王战英,程辉,等.2025.瞬变电磁极速关断方法与技术研究.

地球物理学进展,40(2):758-764,doi:10.6038/pg2025II0071.

嵇艳鞠. 2004. 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[博士论文]. 长春:吉林大学.

姜晓腾, 孙怀凤, 刘东, 等. 2024. 基于有限体积的半航空瞬变电磁任意各向异性三维正演及响应规律分析. 地球物理学进展, 39(5): 2046-2058, doi: 10.6038/pg2024HH0168.

李军峰, 李文杰. 2007. 航空电磁发射线圈自感系数的精确计算. 物探化探计算技术, 29(S1): 17-20.

柳尚斌. 2022. 基于后推欧拉与直接分解的瞬变电磁三维高效正演方法及 L-BFGS 三维反演[博士论文]. 济南:山东大学.

刘世蕾, 张莹, 岳建华. 2020. Simulink 在瞬变电磁场暂态过程分析中的应用. 煤田地质与勘探, 48(2): 209-215, doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.031.

牛福龙. 2008. 多线圈串接时总自感系数的计算. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 22(4): 97-99, doi: 10.13804/j.cnki.2095-6991.2008.04.017.

孙怀凤, 张诺亚, 柳尚斌, 等. 2019. 基于 L1 范数的瞬变电磁非线性反演. 地球物理学报, 62(12): 4860-4873, doi: 10.6038/cjg2019M0690.

孙怀凤, 胡杉杉, 柳尚斌, 等. 2024. 复杂模型瞬变电磁三维 fdtd 正演软件开发. 地球物理学进展, 39(6): 2368-2382, doi: 10.6038/pg2024HH0445.

滕飞, 王鹏飞, 王宇, 等. 2023. 半航空频率域电磁探测三分量线圈传感器设计. 地球物理学报, 66(1): 430-441, doi: 10.6038/cjg2022P0847.

王浩文. 2019. 瞬变电磁小回线探测技术研究[博士论文]. 重庆:重庆大学.

武军杰, 智庆全, 李貅, 等. 2023. 回线源地-空瞬变电磁系统及其在滑坡探测中的应用. 地球物理学报, 66(4): 1758-1770, doi: 10.6038/cjg2022P0960.

许伟强. 2024. 半航空瞬变电磁接收线圈参数分析与优化[硕士论文]. 济南:山东大学.

薛国强, 武欣, 陈卫营. 2023. 短偏移瞬变电磁探测系统研究. 地球物理学报, 66(8): 3514-3523, doi: 10.6038/cjg2023Q0890.

闫建勇. 2020. 基于 Simulink 的瞬变电磁装置影响研究[硕士论文]. 徐州:中国矿业大学.

杨海燕, 岳建华, 胡文武, 等. 2007. 多匝回线的自感对瞬变电磁早期信号的影响特征. 物探化探计算技术, 29(2): 96-98, doi: 10.3969/j.issn.1001-1749.2007.02.003.

杨洋, 张衡, 周长宇, 等. 2022. 基于最小二乘反演的半航空瞬变电磁纯二次场数据运动噪声去除方法. 地球物理学报, 65(6): 2351-2364, doi: 10.6038/cjg2022P0301.

赵越, 孙怀凤, 刘佳, 等. 2023. 浅海磁性源瞬变电磁探测技术及其应用研究. 地球物理学进展, 38(6): 2768-2777, doi: 10.6038/pg2023GG0551.

郑梓强, 刘锐, 孙怀凤, 等. 2024. 半航空瞬变电磁探测敏感区域研究与影响因素分析. 地球物理学报, 67(10): 3946-3958, doi: 10.6038/cjg2024R0562.

周杰. 2021. 地面瞬变电磁三分量接收系统的研制[硕士论文]. 成都:成都理工大学.