

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208792

## 半航空瞬变电磁探测能力及影响因素研究\*

朱文杰<sup>1,2,3</sup> 刘丽华<sup>1,2</sup> 柯振<sup>1,2,3</sup> 姜龙斌<sup>1,2</sup> 晏使楚<sup>1,2</sup> 刘小军<sup>1,2</sup>(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094; 2. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190;  
3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

**摘要:** 半航空瞬变电磁法通过在地面布设发射源,在空中使用无人机搭载接收线圈获取二次场信号实现对地下结构的探测,然而在实际应用过程中其探测能力会受到接收高度、水平偏移距等因素的影响。针对这一问题,开展半航空瞬变电磁响应空间分布特征研究。首先通过均匀大地模型和层状大地模型的正演计算,采用控制变量的方法分析不同因素对半航空瞬变电磁响应的影响;其次通过含异常体模型的正演计算,分析异常体埋深、电阻率等参数对半航空瞬变电磁勘探地下目标体能力的影响。研究表明,接收高度和水平偏移距对半航空瞬变电磁响应的影响主要集中在早期,随着接收高度或者水平偏移距的增加,早期垂直感应电动势幅值逐渐降低,且回线源外响应出现极性反转现象;半航空瞬变电磁响应曲线在不同电阻率地层中表现出不同的衰减速率,这表明其对地层电阻率变化有着较好的识别作用;半航空瞬变电磁响应曲线中可以体现出地下目标体的埋深及电阻率变化,证明了半航空瞬变电磁对不同异常体的分辨能力。

**关键词:** 半航空瞬变电磁;响应特征;三维正演;中心回线

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Research on the response of semi-airborne transient electromagnetic

Zhu Wenjie<sup>1,2,3</sup> Liu Lihua<sup>1,2</sup> Ke Zhen<sup>1,2,3</sup> Jiang Longbin<sup>1,2</sup> Yan Shichu<sup>1,2</sup> Liu Xiaojun<sup>1,2</sup>(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;  
2. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
3. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The semi-airborne transient electromagnetic realizes the detection of underground structures by arranging loop source on the ground and using UAV equipped with receiving coils to get signals. However, the response will be affected by the flight height and reception offset in the actual application. Aiming at this problem, the research on the spatial distribution of semi-airborne transient electromagnetic response is carried out. Firstly, the influence of different factors on the electromagnetic response is analyzed by using the method of control variables with the forward calculation of the uniform earth model and the layered earth model. Secondly, through the forward calculation of the model with abnormal body, the influence of parameters such as the buried depth and resistivity of the abnormal body on the ability of the semi-airborne transient electromagnetic exploration underground target body is analyzed. The results show that the effects of flight height and offset on the semi-airborne transient electromagnetic response are mainly concentrated in the early stage. With the increase of the flight height or the offset, the amplitude of the early vertical induced electromotive force gradually decreases, and the polarity reversal phenomenon occurs in the external response of the loop source. The response curve shows different decay rates in different resistivity formations, which indicates that it has a good identification effect on the formation resistivity change. The response curve can reflect the buried depth and resistivity of underground target body, which proves the ability of semi-airborne transient electromagnetic to distinguish different objects.

**Keywords:** semi-airborne transient electromagnetic; response characteristics; three-dimensional forward; loop source

## 0 引言

近年来,瞬变电磁法因其探测深度大、灵敏度高的特点

得到了快速的发展,在资源勘探、隧道超前预报、城市建筑等领域发挥了重要作用<sup>[1-4]</sup>。半航空瞬变电磁法采用地面发射、空中接收的工作方式,通过布设在大地表面的接地回

收稿日期:2022-01-07

\* 基金项目:国家自然科学基金(41904161,61827803)项目资助

线或接地导线向地下发射一次场,无人机搭载的接收线圈接收地下感应涡流所激发的二次场,对观测数据进行反演解释以获取地下电性结构信息<sup>[5]</sup>。半航空瞬变电磁法结合了传统航空瞬变电磁法和地面瞬变电磁法的特点,相比地面瞬变电磁法具有更好的地形适应性,相比航空瞬变电磁法探测深度更大。除大地电阻率、发射源参数等影响传统地面瞬变电磁法探测能力的因素外,半航空瞬变电磁法还受到接收高度、水平偏移距等因素的影响。为了更好地将半航空瞬变电磁法应用到实际探测工作中,需要对半航空瞬变电磁响应规律进行研究。

正演模拟是研究瞬变电磁响应规律的一种有效途径。根据正演维度的不同,瞬变电磁正演可分为基于理论解析解的一维正演和基于有限单元法、有限差分法方法的二、三维正演,其中三维正演由于能获得更高的解释精度成为了近年来瞬变电磁正演研究的热点与核心<sup>[6-10]</sup>。Wang等<sup>[11]</sup>首次给出了可用于求解麦克斯韦方程组的三维时域有限差分算法,对三维瞬变电磁响应进行了数值模拟。殷长春等<sup>[12]</sup>采用张量格林函数的体积分方法对三维瞬变电磁响应进行正演模拟。孙怀凤等<sup>[13]</sup>对Wang等所提出的时域有限差分算法进行了改进并实现了全波形的三维正演。邱稚鹏等<sup>[14]</sup>采用非正交网格时域有限差分法进行三维正演模拟并分析地形与源的相对位置对电磁响应的影响。姚伟华<sup>[15]</sup>采用矢量有限元法对倾斜低阻板状体进行三维正演计算并分析其响应特征。李瑞雪等<sup>[16]</sup>采用矢量有限元法与积分方程法混合的方式降低单元矩阵阶数,提高了瞬变电磁三维正演计算速度。然而从上述研究中可以看出,现阶段对于半航空瞬变电磁法的研究大都集中于正反演精度和速度的提高,对于接收高度、水平偏移距等因素在半航空瞬变电磁响应中影响特征的研究则相对较少。在半航空瞬变电磁法的实际探测过程中,所接收到的观测信号与接收高度和水平偏移距有着很大的相关性,因此有必要分析不同观测参数条件下的半航空瞬变电磁响应特征,以便指导实际工作中装置的各种参数选择。同时,研究半航空瞬变电磁响应空间分布特征对于提高数据质量以及后续的资料解释有着重要意义。

基于此,利用ANSYS Maxwell软件对半航空瞬变电磁探测能力及观测参数等影响因素进行了分析。通过对均匀半空间模型、层状大地模型以及低阻异常模型的三维建模和正演模拟,采用控制变量的方法分析不同模型下半航空瞬变电磁响应曲线特征以及接收高度、水平偏移距等因素的影响特征。并利用半航空瞬变电磁探测系统进行野外实验以验证理论仿真的正确性。

## 1 基本理论及三维正演精度验证

### 1.1 基本理论

均匀、有耗、非磁性媒质中的麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, $\sigma$ 为电导率, $t$ 为时间, $\epsilon$ 为介电常数。

为了简化麦克斯韦方程组的求解过程,通常定义标量势和矢量势进行计算:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -\nabla \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为矢量磁位函数, $\varphi$ 为标量电位函数。将式(2)与麦克斯韦方程组相结合,得到如下偏微分方程组:

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} \\ \nabla^2 V - \mu \epsilon \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mu$ 为磁导率。利用有限元法对上述偏微分方程组进行求解即可获得空间中任一点磁势与电势的值,进而根据式(2)求出空间中电磁场场值。

### 1.2 仿真精度验证

为了分析利用ANSYS Maxwell软件进行半航空瞬变电磁三维正演响应计算的正确性和精度,建立均匀半空间模型进行三维正演模拟并与一维解析解进行对比。仿真模型由空气、线圈、均匀大地3部分组成,大地电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ ,空气电阻率为 $1.0 \times 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 。模型采用正方形回线作为发射源,回线边长为100 m,中心位置与坐标原点重合,发射电流大小为10 A,在 $t=0$ 时刻关断电流,关断方式为线性关断,关断时间为 $1 \mu\text{s}$ 。图1为均匀半空间模型一维滤波解,从图1中可以看出,理想情况下电流断开后空间中感应电压呈指数衰减,衰减速度较快,难以对不同响应特征进行识别。为了更好地对半航空瞬变电磁探测能力进行研究,在后续仿真中采用双对数坐标轴代替线性坐标轴。

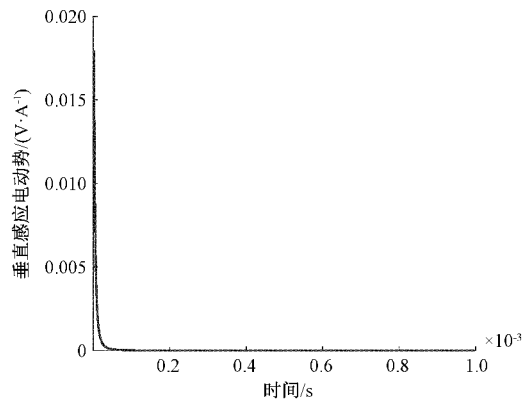


图1 均匀半空间模型解析解(线性坐标轴)

图 2 为均匀半空间模型三维正演计算与一维解析解对比结果。从图 2 中可以看出,本文有限元解与一维解析解所得时域衰减曲线吻合较好,其中有限元解在  $10 \mu\text{s}$  之前由于电流关断时间的影响与解析解存在一定误差,但整体误差处于合理范围内。

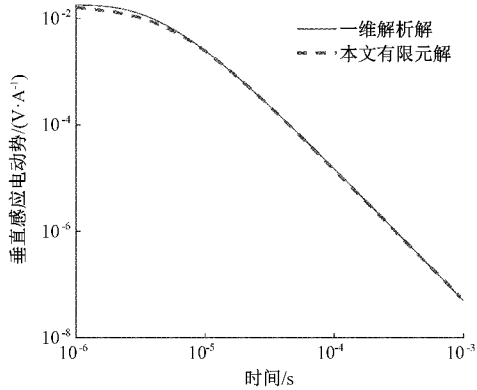


图 2 三维正演误差分析

## 2 三维正演数值实验

### 2.1 均匀半空间模型响应分析

为研究接收高度、水平偏移距对中心回线半航空瞬变电磁响应的影响,采用控制单一变量的实验方法,在给出发射源参数、大地电阻率等条件的情况下,设计不同接收高度、不同水平偏移距的均匀半空间模型并进行三维正演计算。首先研究不同接收高度对半航空瞬变电磁响应的影响。采用与前文相同的模型参数,保持大地电阻率、空气电阻率与发射源参数不变。网格剖分方式选择手动剖分,对包含发射源的中心区域进行加密,网格大小与发射源距离成正比。水平偏移距设置为 0 m,接收高度分别设置为 0、20、50、100 m,其结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,接收高度对半航空瞬变电磁响应的影响主要集中在早期,垂直感应电压早期幅值随着接收高度的增加而降低,随着时间的增加,接收高度的影响逐渐减弱,晚期衰减曲线趋向于重合。

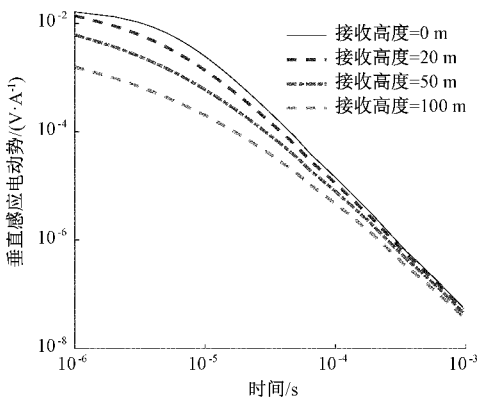


图 3 均匀半空间模型不同接收高度响应对比

保持其他条件不变,接收高度设置为 20 m,水平偏移距分别设置为 0、20、50、100 m 以研究不同偏移距对半航空瞬变电磁响应的影响。其结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,偏移距对半航空瞬变电磁响应的影响主要集中在早期,随着偏移距的增加,垂直感应电动势早期幅值逐渐降低,到晚期之后衰减曲线基本重合。当观测点位于发射源外时,衰减曲线出现尖锐拐点,这是由于在结果处理过程中场值和电压值均取了真实值的绝对值,因此在其数值的正负交界处会形成尖锐的拐点。

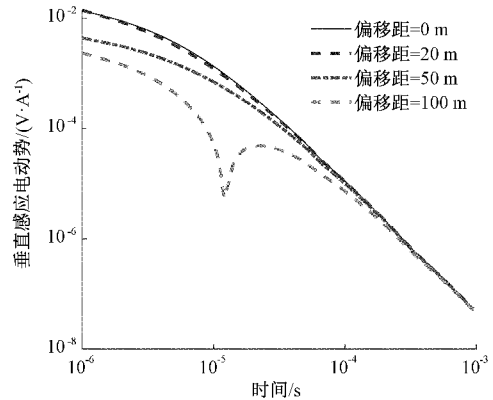
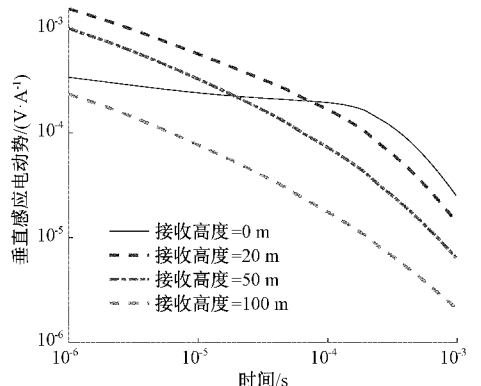


图 4 均匀半空间模型不同偏移距响应对比

### 2.2 层状大地模型响应分析

在实际地质勘探过程中,大地电阻率往往处于层状分布状态,不同地层电阻率各不相同。为更好地研究半航空瞬变电磁探测能力,设计低阻薄层模型及高阻薄层模型进行三维正演计算并对其衰减电压曲线进行分析。

保持发射源参数等条件设置不变,薄层高度设置为 50 m,低阻薄层电阻率为  $1 \Omega \cdot \text{m}$ ,高阻薄层电阻率为  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ ,下方均匀大地电阻率均设置为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。层状大地模型正演结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,半航空瞬变电磁可以有效地识别层状大地模型不同地层之间电阻率的差异,衰减电压曲线在不同电阻率层中表现出不同的下降梯度。其原因是电磁场在高电阻率地层中衰减较快,低电阻率地层中衰减较慢。相较于高阻薄层模型,半航空瞬变电磁对低阻薄层模型的识别更加明显。



(a) 低阻薄层覆盖模型响应(不同接收高度)

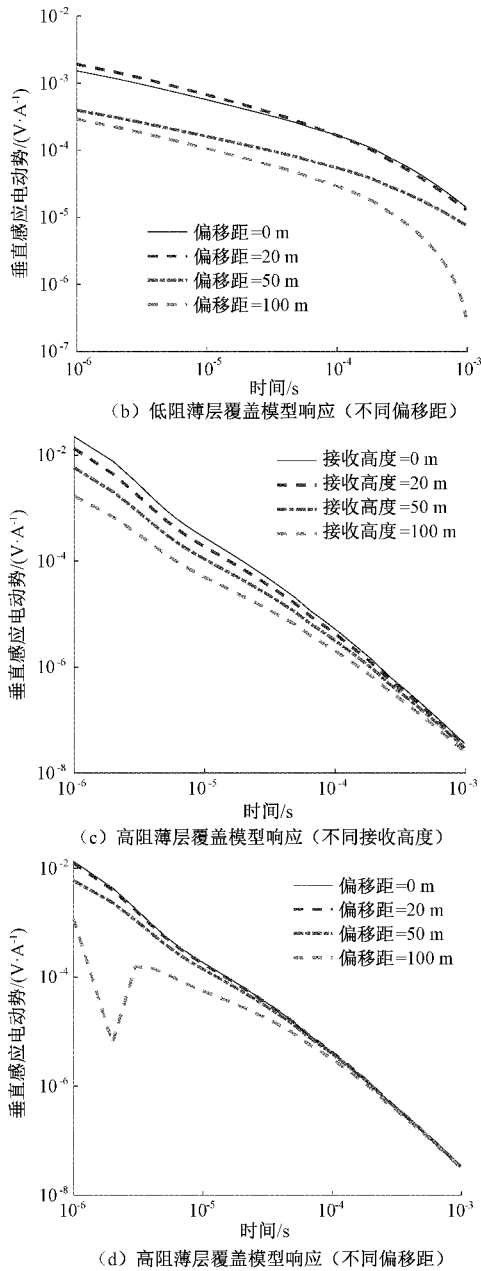


图5 层状大地模型响应曲线对比

从接收高度变化的角度来看,两种地层模型早期受到的影响明显大于晚期。从水平偏移距变化的角度来看,回线源内部影响规律与均匀半空间模型基本一致,即早期随着偏移距的增加,衰减电压幅值降低,晚期曲线趋向于重合;回线源外部两种层状大地模型表现出相反的影响规律,低阻薄层模型出现极性反转的时间较均匀半空间模型更晚,高阻薄层模型出现极性反转的时间较均匀半空间模型更早。因此,在实际半航空瞬变电磁探测过程中可以从衰减电压曲线梯度变化和回线源外极性反转时间两个角度识别层状大地模型电阻率的变化。

### 2.3 异常体模型响应分析

为研究半航空瞬变电磁对地下低阻异常体的探测能力,在均匀半空间模型的基础上,于回线源下方放置三维低阻异常体,异常体尺寸为  $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 50\text{ m}$ ,埋深为  $50\text{ m}$ ,电阻率为  $0.05\ \Omega \cdot \text{m}$ 。保持其他实验条件设置不变,其三维正演响应结果如图6所示。

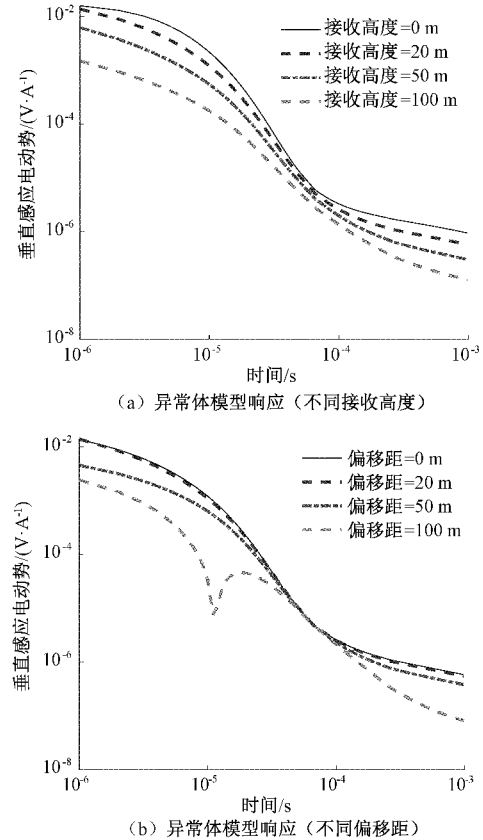


图6 异常体模型响应曲线对比

从图6中可以看出,异常体模型正演结果与均匀大地模型正演结果存在一定差异。早期由于电磁场还未扩散到异常体所在位置,异常体模型正演所得衰减电压曲线与均匀半空间模型基本相同,随着时间的推移,电磁场逐渐向大地深处扩散,在异常体内部感应出涡流,此时空间中二次场响应发生变化。与均匀半空间模型瞬变电磁响应呈指数衰减不同,晚期异常体模型瞬变电磁响应衰减速率放缓,可以明显识别出异常体存在。接收高度与水平偏移距对异常体响应的影响与均匀大地模型表现一致:主要集中在早期,晚期影响逐渐消失,回线源外出现极性反转现象。

在实际探测工作中,异常体埋深、电阻率都处于未知状态。为研究异常体不同埋深、不同电阻率对半航空瞬变电磁响应的影响,设计对照模型。以原异常体模型为参照物,增加埋深对照组与电阻率对照组。埋深对照组保持其他实验条件设置不变,埋深设为  $200\text{ m}$ ,电阻率对照组除异常体电阻率设为  $1\ \Omega \cdot \text{m}$ 外,其他实验参数不变。接收高度设为  $20\text{ m}$ ,水平偏移距设为  $0\text{ m}$ ,其实验结果如图7所示。

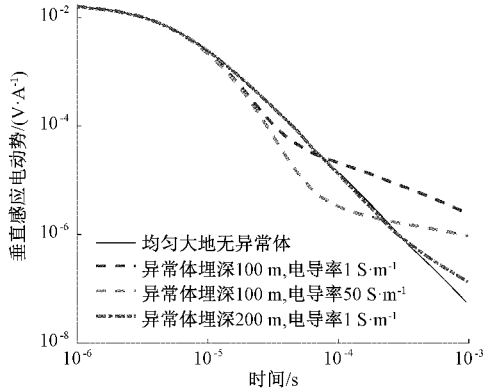


图 7 不同参数异常体模型响应对比

从图 7 中可以看出,异常体模型半航空瞬变电磁早期响应曲线与均匀半空间模型响应曲线基本重合,这是由于早期电磁场还未传播到异常体所在位置。在异常体埋深相同的情况下,随着异常体与大地电阻率之间差异的提高,响应曲线的偏离度也在增加,这说明异常体与大地电阻率之间的差异越高,探测效果越好。在异常体电阻率相同的情况下,随着异常体埋深的增加,响应曲线偏离的起始点向后移动,这说明异常体埋深深度越大,响应越偏向于后期。图 7 结果整体说明,半航空瞬变电磁法对地下低阻异常体的存在有着较好的识别作用,可以根据响应曲线对其埋深和电阻率进行大致判断。

### 3 野外实验

为验证半航空瞬变电磁法在地质结构勘探中的实际应用效果,项目组在河北省怀来县开展野外勘探实验。图 8 为本次实验场地规划图,整个实验区域为 5 km×5 km,选取其中较为平坦区域进行回线源的布设以及接收系统设备的性能测试。

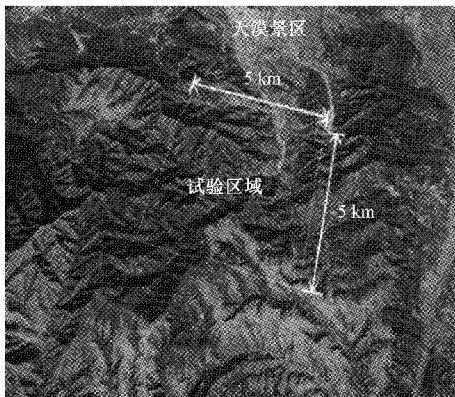
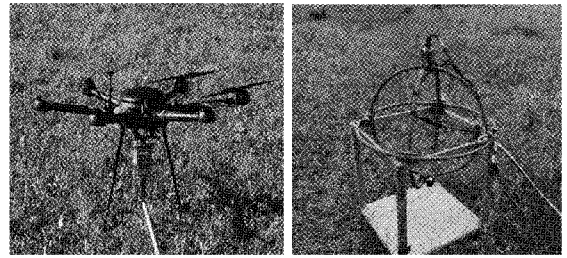
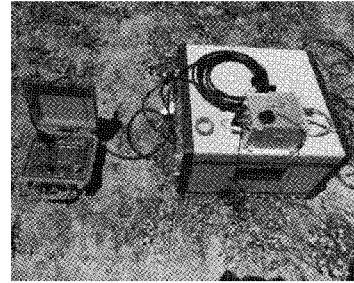


图 8 实验场地规划

本次实验所使用的半航空瞬变电磁探测设备主要由两部分构成,包含回线源导线、地面大功率发射机及电源的发射系统和包含多旋翼无人机、三份量磁接收线圈的接收系统,主要设备如图 9 所示。



(a) 多旋翼无人机 (b) 三分量接收线圈



(c) 地面发射系统

图 9 实验现场图

与理论正演计算不同的是,在实际半航空瞬变电磁法的探测过程中,其瞬变电磁响应会受到地形因素的影响。为了尽可能地降低地形对半航空瞬变电磁响应的影响,本次试验将发射源布置在平坦地形,这是由于地形影响具有距离衰减的特性,当发射源与地形保持一定距离时,地形影响可以被忽略。本次实验采用沿测线飞行的数据接收方式,在回线内外共划分 8 条测线,循环飞行 4 个周期。所得实测数据中除了瞬变电磁二次场响应外还有干扰噪声的存在,半航空瞬变电磁探测数据中噪声主要包括天电噪声、运动噪声和人文噪声。为提取数据中的有用信号以及抑制噪声,采用正负极性叠加法和小波去噪法对数据进行噪声压制处理。经过去噪的测点实验数据如图 10 所示。从图 10 中可以看出,在发射电流断开后,空间中垂直感应电动势突然上升并在之后以指数形式衰减,这与理论仿真中瞬变电磁响应的衰减趋势相同,证明半航空瞬变电磁野外实验结果与理论仿真预期相符。

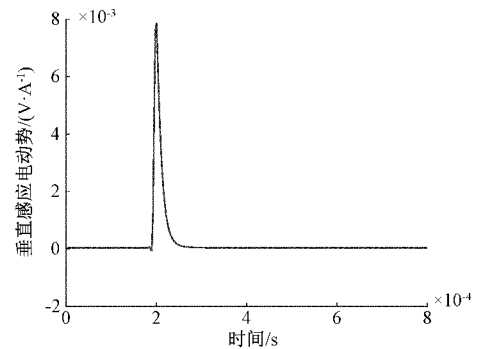


图 10 实验衰减电压曲线

## 4 结 论

本文对半航空瞬变电磁探测能力及接收高度、水平偏移距等影响因素进行了研究,通过对均匀半空间模型、层状大地模型以及异常体模型进行建模、计算,探讨其衰减电压曲线特征,并通过野外实验的方式分析了半航空瞬变电磁法实际探测能力。结果表明:

1)半航空瞬变电磁法对地下目标体具有较好的识别作用。随着异常体埋深的增加,半航空瞬变电磁响应拐点出现的时间点延后;随着异常体电阻率的减小,半航空瞬变电磁响应与均匀大地响应差异增大,识别效果更好。

2)接收高度以及水平偏移距等影响因素对均匀半空间模型、层状大地模型以及异常体模型瞬变电磁响应的影响基本一致。接收高度主要影响早期衰减电压幅值,随着接收高度的增加,衰减电压幅值降低,晚期趋向于重合;水平偏移距早期在回线源内使得早期衰减电压幅值随着偏移距的增加而减小,回线源外出现正负极性反转现象,晚期影响逐渐消失。

3)半航空瞬变电磁法对不同电阻率分层大地有着较好的识别效果,其衰减电压曲线在不同地层中表现出不同下降梯度,随着电阻率的增大,下降速率随之增大。

以上研究可以为半航空瞬变电磁勘探方案设计提供参考。本文研究场景为平坦地形状况,但在实际勘探过程中,有时地形也会对半航空瞬变电磁响应产生一定的影响,下一步作者将针对半航空瞬变电磁地形效应展开研究。

## 参考文献

- [1] MOGI T, JOMORI A, JOMORI N, et al. Development of grounded electrical source airborne transient EM (GREATEM) survey system and its application to investigating a volcano structure [J]. Accounting Business & Financial History, 2011, 21(1): 95-114.
- [2] 刘晓青,张涛.基于瞬变电磁法的传感器设计及仿真研究[J].电子测量技术,2019,42(5):123-127.
- [3] 高晓萌.基于有限元的二维各向异性地层中大地电磁响应[J].电子测量技术,2021,44(1):83-87.
- [4] 林君,贾文枫,皮帅,等.小尺寸 TEM 非共面偏心自补偿零耦合收发技术研究[J].仪器仪表学报,2020, 41(8):150-159.
- [5] 嵇艳鞠,王远,徐江,等.无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用[J].地球物理学报,2013, 56(11):3640-3650.
- [6] 许洋毓,林君,李肃义,等.全波形时域航空电磁响应三维有限差分数值计算[J].地球物理学报,2012, 55(6):2105-2114.
- [7] 李建慧,朱自强,鲁光银,等.回线源瞬变电磁法的三维正演研究[J].地球物理学进展,2013,28(2):754-765.
- [8] 李貅,戚志鹏,薛国强,等.瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像[J].地球物理学报,2010, 53(12): 3005-3011.
- [9] 赵越,李貅,王祎鹏,等.三维起伏地形条件下航空瞬变电磁响应特征研究[J].地球物理学报,2017, 60(1): 383-402.
- [10] 秦策,王绪本,赵宁.基于二次场方法的并行三维大地电磁正反演研究[J].地球物理学报,2017, 60(6): 2456-2468.
- [11] WANG T, HOHMANN G W. A finite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 1993, 58(1):1646.
- [12] 殷长春,刘斌.瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究[J].地球物理学报,1994,(S2):486-492.
- [13] 孙怀凤,李貅,李术才,等.考虑关断时间的回线源激发 TEM 三维时域有限差分正演[J].地球物理学报, 2013,56(3):1049-1064.
- [14] 邱稚鹏,李展辉,李墩柱,等.基于非正交网格的带地形三维瞬变电磁场模拟[J].地球物理学报,2013, 56(12):4245-4255.
- [15] 姚伟华.瞬变电磁法矢量有限元三维正演研究[D].西安:长安大学,2015.
- [16] 李瑞雪,王鹤,席振铎,等.瞬变电磁快速三维正演[J].中南大学学报(自然科学版),2016, 47(10): 3477-3482.

## 作者简介

朱文杰,硕士研究生,主要研究方向为半航空瞬变电磁探测。

E-mail:807587999@qq.com

刘丽华(通信作者),博士,研究员,主要研究方向为地球物理电磁法探测技术与系统设计研究。

E-mail:lhliu@mail.ie.ac.cn