

文章编号: 1001-1749(2023)04-0478-06

航空瞬变电磁全时域全空域快速成像

郑建波, 李美艳

(西安外事学院工学院, 西安 710077)

摘要: 航空瞬变电磁法以其快速高效的优点已获得广泛应用,然而航空瞬变电磁采样密集,数据量巨大。为了实现航空瞬变电磁观测数据的快速解释,开展航空瞬变电磁快速成像算法研究。利用反函数定理建立成像迭代格式,并在成像过程中考虑发射源高度和观测时间的影响,进而实现航空瞬变电磁全时域全空域快速成像。这里首先给出了全时域全空域成像理论和实现方法,然后对航空瞬变电磁装置进行了介绍,最后建立了典型采空区模型,利用开发的航空瞬变电磁全时域全空域视电阻率成像方法进行数据成像,成像结果与真实模型基本一致,验证了方法的有效性。

关键词: 航空瞬变电磁; 全时域; 全空域; 成像

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.04.08

0 引言

航空瞬变电磁法将电磁探测装置搭载在飞机上,通过发射线圈进行大功率发射,激发地下感应涡流,通过观测断电间歇感应涡流产生的二次磁场的空间和时间分布特征,对地下目标进行快速电磁探测。由于该方法具有快速、高效、受地形影响小等特点,已被广泛应用于矿产勘查、环境地质调查等诸多领域^[1-5]。由于航空瞬变电磁法在探测过程中进行连续采样,获得海量观测数据,因此具有较高的分辨率。然而,海量数据量也给航空瞬变电磁数据解释带来了巨大困难。为了能够实现航空瞬变电磁数据的快速解释,成像方法成为了首选^[6-9]。航空电磁在数据采集过程中,飞行高度会随着地形起伏发生变化,观测时间跨度大,这给传统的成像方法提出了挑战。为此,笔者提出了一种航空瞬变电磁全时域全空域快速成像方法,进而建立了一套不受观测装

置、观测时间和飞行高度限制的通用成像系统。

全时域全空域视电阻率成像思想最早由张莹莹等^[10]提出。该方法起初被应用于电性源地空瞬变电磁数据电阻率成像中,通过对偏移距、发射源位置、电流方向等参数的影响进行分析,建立视电阻率迭代格式实现了全时域、全空域电阻率成像。赵越等^[11]将该方法应用于大定源回线地空瞬变电磁电阻率成像中;武军杰等^[12]利用全时域、全空域视电阻率成像方法实现了电性源地一井瞬变电磁数据解释;曾友强等^[13]进一步将其应用于金矿水害探测当中。笔者将全时域、全空域电阻率成像思想引入到航空瞬变电磁数据成像领域,建立一套通用的航空瞬变电磁快速成像方法。

1 电阻率成像理论

1.1 航空瞬变电磁探测原理分析

航空瞬变电磁系统利用飞机作为移动搭载平

台, 利用多匝线圈作为发射源, 向地下发送一次电磁激发信号, 然后在一次场断电间歇测量由地下介质中感应涡流产生的二次磁场。当地下存在电性异常体时, 观测的二次磁场将发生畸变, 因此通过分析二次磁场的空间和时间分布规律就可以实现对地下电性结构的探测。以地下含水采空区探测为例, 由于采空区充水后, 相对周围岩石介质表现为低阻特征, 即采空区与周围大地介质间存在明显的电性差异, 这种巨大的电性差异, 将导致观测的二次磁场在空间上表现为正异常, 在时间上表现为慢衰减特征, 这就是利用航空电磁法探测地下结构的物理机理。利用视电阻率成像方法, 便可以将二次磁场的空间和时间分布特征转化为地下结构的电性分布特征, 进而揭示地下目标体的三维空间分布。

1.2 时间域航空电磁数值模拟方法

均匀大地表面, 一维频率域航空电磁响应由下式给出^[14]。

$$H_z(\rho, h, z, \omega) = \frac{m}{4\pi} \left\{ \frac{3z_+^2 - R_+^2}{R_+^3} - T(z_-) \right\} \quad (1)$$

式中: ρ 为大地电阻率; h 为飞行高度; z 为接收点坐标; ω 为角频率; m 为发射磁矩; $z_{\pm} = h \pm z$; $R_+ = \sqrt{r^2 + z_+^2}$; r 为接收线圈半径; $T(z_-)$ 是 0 阶贝塞尔积分。利用汉克尔变换技术可以完成式(1)中 $T(z_-)$ 的计算。

这里采用阶跃电流发射波形, 其满足:

$$I(t) = \begin{cases} I_0 & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

即在 0 时刻之前供稳定电流, 在 0 时刻突然断电。我们采用正弦变化方法将频率域航空电磁响应 $H_z(\rho, h, z, \omega)$ 转换到间域, 获得二次场

$$B_z(\rho, h, z, t) = \mu \sqrt{\frac{2t}{\pi}} \int_0^{\infty} \text{Im} \left[\frac{H_z(\rho, h, z, \omega)}{i\omega} \cdot \sqrt{\omega} \right] J_{1/2}(\omega t) d\omega \quad (3)$$

其中: $\text{Im}[\]$ 表示取虚部; $J_{1/2}$ 为 0.5 阶贝塞尔函数, 再次利用汉克尔变换即可完成时间域航空电磁阶跃响应计算。

1.3 全时域全空域视电阻率成像方法

当航空电磁系统数据采集结束后, 可以获得准确的装置参数和观测信息, 包括飞行高度 h , 接收点坐标 z 和观测时间 t , 此时观测数据 $B_z(\rho, h, z, t)$ 成为了一个只与地下电阻率 ρ 有关的物理量, 现将其改写为 $B(\rho)$ 。通过大量数值实验可以发现 $B(\rho)$ 响应是关于电阻率 ρ 的单调函数。根据反函数定理可知, 必然存在一个电阻率值 ρ 唯一对应着一个 $B(\rho)$

值。为此, 我们给出一个电阻率初值 ρ_0 , 然后在 ρ_0 点对 $B(\rho)$ 进行级数展开

$$B(\rho) = B(\rho_0) + B'(\rho_0)(\rho - \rho_0) + \frac{1}{2!} B''(\rho_0)(\rho - \rho_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} B^n(\rho_0)(\rho - \rho_0)^n \quad (4)$$

为了建立迭代格式, 我们忽略高阶项, 只保留其线性主部, 建立视电阻率迭代格式为式(5)。

$$\rho_i = \Delta\rho_i + \rho_{i-1} \quad (5)$$

其中 $\Delta\rho_i$ 是电阻率修正量, 由式(6)给出。

$$\Delta\rho = \frac{B(\rho, c, t) - B(\rho_{i-1})}{B'(\rho_{i-1})} \quad (6)$$

利用式(5)进行多次迭代后, 当满足式(7)条件时, 迭代结束。

$$\left| \frac{B_{\text{obs}} - B(\rho_i)}{B_{\text{obs}}} \right| < \epsilon \quad (7)$$

其中: B_{obs} 是实际观测数据; $B(\rho_i)$ 是电阻率为 ρ_i 的半空间模型航空电磁理论响应, $B(\rho_i)$ 由式(3)计算; ϵ 是迭代终止误差。

由于在式(3)中, 同时考虑了飞行高度和观测时间的影响, 因此基于上述迭代格式的视电阻率成像结果将不再受到飞行高度和观测时间的影响, 实现全时域全空域视电阻率成像, 获得更加精确的地下电性分布信息。

2 航空瞬变电磁装置

航空瞬变电磁探测装置如图 1 所示^[15], 主要包括飞行器装置(图 1 中的直升机)、吊舱、供电系统、发射系统(包括发射机和发射线圈)、接收系统(包括接收机和接收线圈)、辅助系统(提供飞行时必要的辅助信息, 包括高度、经纬度)等, 飞行器下方挂着吊舱, 吊舱承载着发射和接收线圈。供电系统、接收机及辅助系统这三部分放在机舱内, 发射机可置于机舱或者吊舱内。对于航空瞬变电磁系统来说, 发射系统至关重要, 笔者重点介绍发射系统关键技术。

发射系统^[16]电源取自直升机的直流发电机, 而发射系统最终的发射波形是如图 2 所示的双极性梯形波, 即要实现从直流到交流的转换, 所以主电路采用如图 3 所示的全桥逆变器。在图 3 中, S1~S4 为全控型电力电子器件, 实际工作时, S1 和 S4 为一组, S2 和 S3 为一组, 同一组开关的导通和关断时间是一致的, 通过交替控制两组开关的导通和关断时

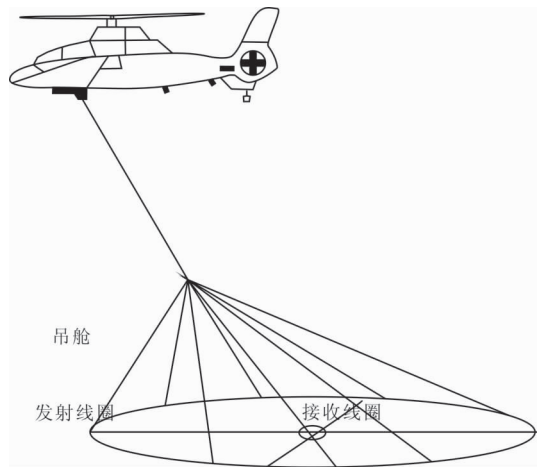


图 1 航空瞬变电磁装置

Fig. 1 Aerial transient electromagnetic device

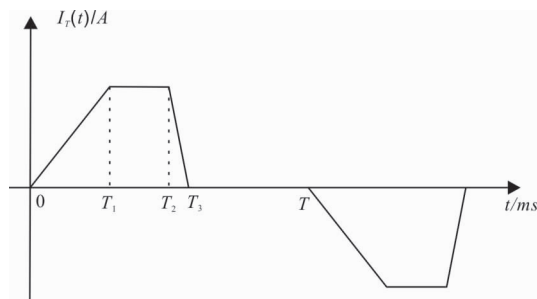


图 2 双极性梯形波电流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bipolar trapezoidal wave current

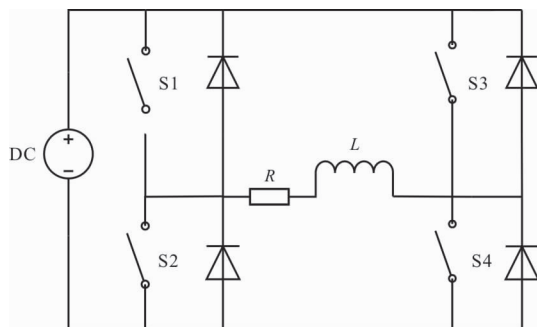


图 3 航空瞬变电磁发射桥路拓扑图

Fig. 3 Aerial transient electromagnetic launch bridge topology

刻,实现输出波形为双极性梯形波。全控器件的控制脉冲基于 PWM(脉冲宽度调制)原理实现,具体过程如下:根据输出双极性梯形波的电流幅值及每一部分的持续时间,依据电阻和电感的伏安特性方程计算出每一段所对应的输出电压,然后以此输出电压波形作为调制波,以三角波作为载波,准确计算出每个开关器件的导通和关断时刻。

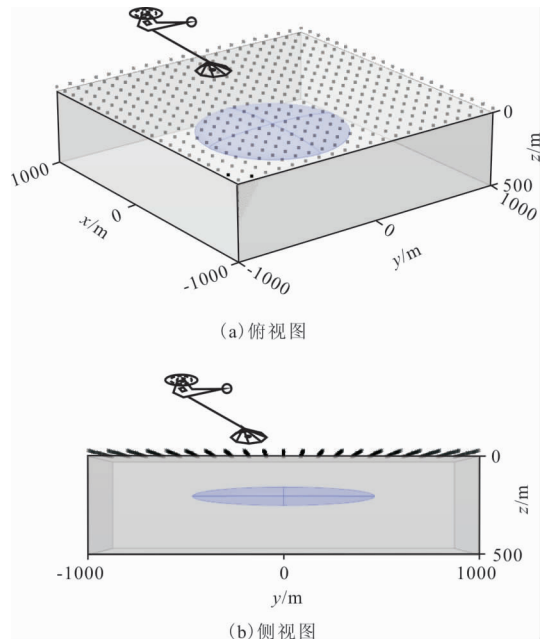


图 4 不同角度视图的采空区模型

Fig. 4 Goaf models with different angles of view

3 理论模型验证

笔者以采空区探测为例,进行理论模型验证。在煤矿采煤结束后,通常会撤去支护,留下一个空腔,此时地下水会沿着地下裂隙进入。此外,随着时间增加,由于重力作用,地下空腔还会出现垮塌,进而形成采塌陷空区。在没有采空的地方,地下岩石比较致密,导电性较差,表现为高阻特性。而采空区通常充水,导电性较好,表现为低阻特性。为了模拟采空区特征,设计了如图 4 所示的采空区模型。

一个电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{m}$ 的低阻椭球体采空区埋藏在 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 的高阻围岩中。地下采空区的长轴半径为 500 m ,短轴半径为 50 m 的椭球体,中心埋深为 200 m 。采用航空电磁装置进行探测,其发射线圈为一边长为 17.5 m 的正 12 边形,线圈匝数为 5 匝,发射如图 2 所示的双极性梯形波,峰值发射电流为 435 A 。单个梯形波供电时长 $T_3=4 \text{ ms}$,其中上升沿时间为 0.2 ms ,平顶沿时间为 3.6 ms ,下降沿时间为 0.2 ms 。两个双极性梯形波之间的断电时长为 16 ms ,因此单个波形总时长 $T=20 \text{ ms}$ 。在每个梯形波断电后观测地下产生的纯二次场。进行面积性测量,点距和线距均为 100 m ,整个测区共有 $21 \times 21=441$ 个测点,观测断电后 $10 \mu\text{s} \sim 10 \text{ ms}$ 对数等间隔的 31 个时间道的数据。利用齐彦福^[17]

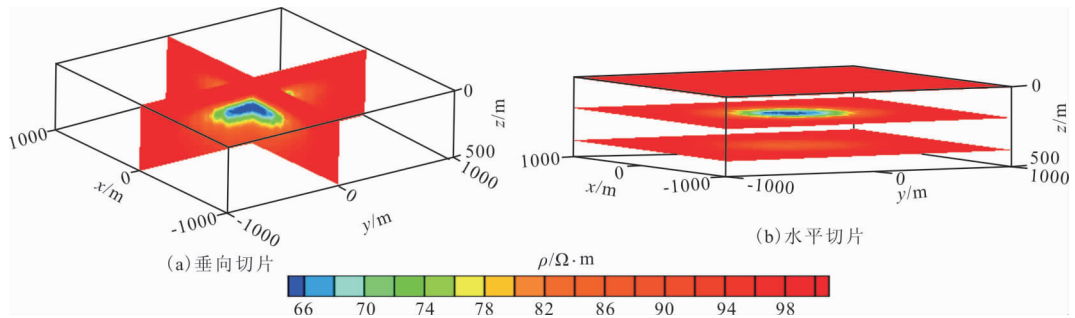


图 5 全域视电阻率切片图

Fig. 5 Global apparent resistivity slice map

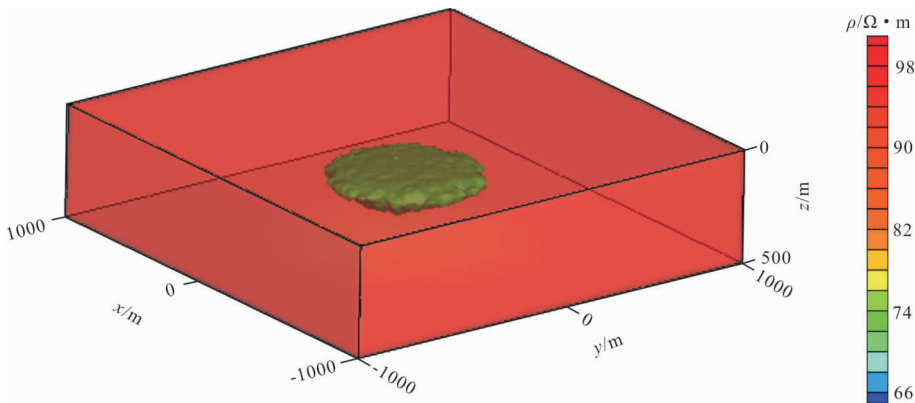


图 6 全域视电阻率三维透视图

Fig. 6 3D perspective view of global apparent resistivity

在 2017 年开发的有限元正演程序模拟理论模型航空电磁观测数据。在获得正演数据后,采用笔者开发的航空电磁全域视电阻率成像方法进行数据成像。对于所有测点、所有时间道的初始模型均采用 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 的均匀半空间模型。该数值算例在 PC 机上进行,CPU 主频 3.2 GHz,计算机内存 64 GB。

图 5 和图 6 展示了视电阻率成像结果,可以看出,全域视电阻率成像技术能够清晰反映出地下电性分布情况。从图 5 可以看出,在椭球体中心位置的视电阻率最低。随着距离增加,视电阻率逐渐升高,逐渐趋于背景围岩电阻率。对比图 4 和图 6,我们可以看到笔者开发的任意发射波形全域视电阻率可以很好地反应出地下电性信息,准确地恢复了地下良导椭球体的形状、位置和尺寸,这为后续地质解释提供了基础,本次成像共耗时 7min。

4 结论

笔者针对航空电磁采样密集,数据量巨大的特

点,成功建立了一套航空瞬变电磁全时域全空域快速成像算法。利用时间域航空电磁观测响应与地下介质电阻率间的单调关系,利用反函数定理建立了视电阻率迭代格式,从而实现了考虑装置形式和观测时间的航空瞬变电磁全时域全空域快速成像。通过将成像方法应用于理论采空区模型,结果显示成像结果可以很好地反映地下采空区的真实分布,从而验证了算法的可靠性。

参考文献:

- [1] 宿晓明,李世华. 黑龙江小兴安岭丽林—清水地区利用航空瞬变电磁法找矿前景分析[J]. 世界有色金属, 2021(21):71—72.
SU X M, LI S H. Prospect analysis of airborne transient electromagnetic prospecting in Lilin Qingshui area, Xiaoxing'an Mountains, Heilongjiang province [J]. World Nonferrous Metals, 2021(21): 71—72. (In Chinese)
- [2] 彭莉红,江民忠,程莎莎,等. 航空瞬变电磁法在新疆阿

- 奇山地区铅锌多金属找矿中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2019, 55(05): 1250—1260.
- PENG L H, JIANG M Z, CHENG S S, et al. Application of the ATEM method to prospecting lead—zinc polymetallic ores in the Aqishan area, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5): 1250—1260. (In Chinese)
- [3] 何怡原, 梁盛军, 连晟. 基于航空瞬变电磁法的宝清地区含水分布特征研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(05): 2126—2133.
- HE Y Y, LIANG S J, LIAN S. Investigation of water distribution in Baoqing area using airborne transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 33(5): 2126—2133. (In Chinese)
- [4] 彭莉红, 张策, 骆燕, 等. 航空瞬变电磁法在塔源二支线铅锌铜矿床的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(6): 797—805.
- PENG L H, ZHANG C, LUO Y, et al. The applications of airborne transient electromagnetic method in the Erzhexian Pb—Zn—Cu deposit of Tayuan[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(6): 797—805. (In Chinese)
- [5] 赵思为, 尹小康, 张振雄, 等. 半航空瞬变电磁法在某滑坡探测中的应用研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(6): 767—774.
- ZHAO S W, YIN X K, ZHANG Z X, et al. Application of semi—airborne transient electromagnetic method in landslide detection[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(6): 767—774. (In Chinese)
- [6] SENGPIEL K P. Approximate inversion of airborne EM data from a multilayered ground[J]. Geophysical Prospecting, 1988, 36(4): 446—459.
- [7] HUANG H, FRASER D C. The differential parameter method for multifrequency airborne resistivity mapping[J]. Geophysics, 1996, 61(1): 100—109.
- [8] SENGPIEL K P, SIEMON B. Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration[J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1983—1992.
- [9] HUANG H, RUDD J. Conductivity—depth imaging of helicopter—borne TEM data based on a pseudolayer half—space model[J]. Geophysics, 2008, 73(3): F115—F120.
- [10] 张莹莹, 李貅, 姚伟华, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁法多分量全域视电阻率定义[J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2745—2758.
- ZHANG Y Y, LI X, YAO W H, et al. Multicomponent full field apparent resistivity definition of multi—source ground—airborne transient electromagnetic method with galvanic sources[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2745—2758. (In Chinese)
- [11] 赵越, 李貅, 王祎鹏. 大回线源瞬变电磁全域视电阻率定义[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1856—1863.
- ZHAO Y, LI X, WANG W P. Full—domain apparent resistivity definition for large—loop TEM[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(4): 1856—1863. (In Chinese)
- [12] 武军杰, 李貅, 智庆全等. 电性源地—井瞬变电磁全域视电阻率定义[J]. 地球物理学报, 2017, 60(4): 1595—1605.
- WU J J, LI X, ZHI Q Q, et al. Full field apparent resistivity definition of Borehole TEM with electric source[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(4): 1595—1605. (In Chinese)
- [13] 曾友强, 谢国胜, 智庆全, 等. 小回线源 TEM 法全域视电阻率成像在某金矿水害中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(2): 0826—0831.
- ZENG Y Q, XIE G S, ZHI Q Q, et al. Application of small loop source TEM method for full—domain apparent resistivity imaging in water damage of a gold mine[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(2): 0826—0831. (In Chinese)
- [14] 殷长春, 黄威, 贲放. 时间域航空电磁系统瞬变全时响应正演模拟[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3153—3162.
- YIN C C, HUANG W, BEN F. The full—time electromagnetic modeling for time—domain airborne electromagnetic systems[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3153—3162. (In Chinese)
- [15] 姜健. 时间域航空电磁法双波形发射电路研制[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- JIANG J. Development of dual waveform transmitting circuit for Time—domain airborne electromagnetic method[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (In Chinese)
- [16] 李琳琳. 半航空瞬变电磁发射机关键技术研究[D]. 成

都: 成都理工大学, 2015.

LI L L. Study on the Key Technology of the GREATER TEM Transmitter[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology 2015. (In Chinese)

[17] 齐彦福, 殷长春, 刘云鹤, 等. 基于瞬时电流脉冲的三维时间域航空电磁全波形正演模拟[J]. 地球物理

学报, 2017, 60(1): 369—382.

QI Y F, YIN C C, LIU Y H, et al. 3D time-domain airborne EM full-wave forward modeling based on instantaneous current pulse[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(1): 369—382. (In Chinese)

Aerial transient electromagnetic all-time-domain and all-spatial fast imaging

ZHENG Jianbo, LI Meiyuan

(Department of Engineering, Xi'an International University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Airborne transient electromagnetic method has been widely used because of its fast and efficient advantages. However, the airborne transient electromagnetic system samples intensively, resulting in vast data. In order to realize the rapid interpretation of the survey data, we carry out research on the rapid imaging algorithm of airborne transient electromagnetic data. The inverse function theorem is used to establish the iterative format, and the influence of the transmitter height and the observation time channels are both considered in the imaging process. Then, we realize the rapid full-time and full-space imaging of the airborne transient electromagnetic data. In this paper, we first present the theory and implementation method of full-time and full-space imaging. Then, we introduce the airborne transient electromagnetic device. Finally, we establish a typical goaf model and apply the imaging method proposed in this paper to the synthetic data. The imaging results are consistent with the actual model, which verifies the effectiveness of our imaging method.

Keywords: airborne transient electromagnetic; full-time domain; full-space domain; imaging