

文章编号: 1674—8247(2024)05—0001—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.05.001

# 半航空频率域电磁法针对铁路勘察的研究进展

王仕兴 赵思为 尹小康

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**随着我国铁路网的不断扩展,在高原及艰险山区构建铁路网已成必然。然而,因地势陡峭,部分线位人员无法抵达,常导致关键勘察数据缺失。为解决这一问题,从传统地面勘察转向空中,采用地球物理技术与无人机技术相结合的半航空频率域电磁法。针对高原艰险山区长大深埋隧道的勘察需求,团队自主设计研发了半航空电磁硬件系统,通过与地面方法的同精度对比验证,其结果一致性达到 90% 以上。该技术成功应用于某隧道测区的勘察任务,弥补了因地势陡峭导致的勘察数据空白,有效降低了勘察成本,显著提高了工作效率,为我国铁路勘察工作提供了新的技术路径与方法。

**关键词:**铁路勘察;高原艰险山区;半航空频率域电磁法

中图分类号:U452.1

文献标志码:A

## Research Progress on Semi-aerial Frequency-domain Electromagnetic Method for Railway Surveying

WANG Shixing ZHAO Siwei YIN Xiaokang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** As China's railway network continues to expand, constructing railways in plateau regions and rugged mountainous areas has become a necessity. However, due to steep terrain, certain sections remain inaccessible to field personnel, resulting in gaps in critical survey data. To address this challenge, a shift from traditional ground surveying to aerial surveying has been made. A semi-aerial frequency-domain electromagnetic (FEM) method that combines geophysical technology with drone technology was employed. In response to the demand for surveying long, deeply-buried tunnels in these challenging terrains, we independently designed and developed a semi-aerial electromagnetic hardware system. When compared with ground-based methods, the system demonstrated a consistency exceeding 90%. This technology has been successfully applied in the survey of a specific tunnel area, filling in the data gaps caused by steep terrain. The method significantly reduces survey costs, enhances operational efficiency, and offers a novel technological pathway for railway surveying in China.

**Key words:** railway surveying; plateau and rugged mountainous areas; semi-aerial frequency-domain electro-magnetic method

当前,我国铁路发展已进入新阶段,铁路网密度逐步增大。随着“八纵八横”高速铁路网主通道的陆续

建成投入运行,铁路网络的整体布局日益完善。下一阶段的重点将是进一步加强我国艰险山区的铁路网建

收稿日期:2024-10-08

作者简介:王仕兴(1997-),男,工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科研项目(KDNQ203001)

引文格式:王仕兴,赵思为,尹小康. 半航空频率域电磁法针对铁路勘察的研究进展[J]. 高速铁路技术,2024,15(5):1-7.

WANG Shixing, ZHAO Siwei, YIN Xiaokang. Research Progress on Semi-aerial Frequency-domain Electromagnetic Method for Railway Surveying [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(5):1-7.

设。然而,我国西部大部分艰险山区地形复杂、地势陡峭,沟谷纵横,同时伴有高寒及缺氧等不利条件<sup>[1-2]</sup>。这些因素使得物探、钻探和调绘等技术人员难以到达线位进行勘察工作,导致艰险复杂山区地带存在勘察资料的空缺问题。为填补这一空白,我国技术人员尝试从航空领域寻找解决方案。在此背景下,无人机技术的快速突破和广泛应用成为推动低空经济发展的重要力量<sup>[3]</sup>。即通过将地球物理勘探技术与无人机技术相结合,一种新兴的地球物理勘探方法——半航空电磁法应运而生,有效解决了艰险山区铁路勘察中资料空缺的问题。

半航空电磁法(Semi-airborne Electromagnetic Method, SAEM),亦称地空电磁法(Ground-airborne Electromagnetic Method, GAEM),主要分为时间域瞬变电磁探测和频率域大地电磁探测两类。其中,时间域探测的深度较浅,且易受到外界干扰;相比之下,频率域探测由于采用较低的频点,可通过增加频率域电磁测深点<sup>[4]</sup>,有效提升探测深度,并能够较好地反映地下介质电性差异宏观的对应关系。作者团队自主设计研发了GAEM-1(Ground-airborne Electromagnetic-1)半航空电磁硬件系统,同时设计了一套适用于铁路工程勘察的半航空电磁数据处理系统。将GAEM-1系统应用于实际的铁路隧道勘察,完成了与地面物探及遥感解译的同精度对比验证工作,首次在国内将半航空电磁法技术大规模应用于铁路隧道勘察领域,为今后铁路勘察工作提供了新的勘察手段和工作模式。

## 1 方法原理及仪器设备

### 1.1 方法原理及特点

在半航空频率域电磁探测过程中,首先在地面布设发射源,通过接地导线发射 $2n$ 序列的伪随机波形,在发射源与接收系统之间设定适当距离。在测区内,采用无人机搭载接收系统进行数据采集。接收系统采集的原始数据为电信号 $V$ ,通过数据预处理将其转换为磁场数据,随后对磁场数据进一步处理,提取目标信号,同时生成视电阻率图。最终通过视电阻率图分析地下介质的电性差异,从而获取地质结构的电性分布信息。半航空电磁法探测系统布置情况如图1所示。

半航空频率域电磁法具有如下特点:

- (1)使用人工场源,相较于天然场源,能够提供更高的信号强度。
- (2)通过空中观测磁场分量信号,对地下低电阻目标体的响应更加灵敏。
- (3)与传统地面物探方法相比,半航空频率域电磁法采用地面发射、空中接收的方式进行数据采集。

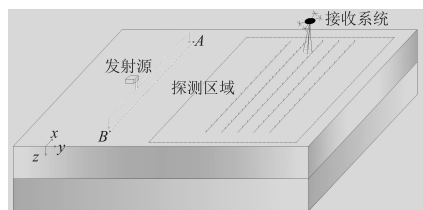


图1 半航空电磁法探测系统布置示意图

在地形复杂的工区,传统地面物探及钻探工作难度较大,部分区域甚至无法进行工作。而基于无人机搭载的半航空频率域电磁设备可以克服地形限制,进行空中探测,有效弥补艰险山区铁路勘察资料的空白。通过半航空频率域电磁法,可对地层岩性分界、地质构造进行探测,尤其能够识别断裂分布位置、破碎带宽度及地层完整性等关键信息。

半航空电磁法在长导线源电磁法勘探中,磁感应接收器可接收空间中包含 $x, y, z$ 三分量磁场信息<sup>[5]</sup>,但空间 $z$ 轴方向上的磁场信号探测深度最大,空间分辨能力最高,故实际应用中重点采用 $z$ 轴分量进行分析处理。基于水平层状垂直分量的磁场响应 $B_z$ 表达为<sup>[6]</sup>:

$$B_z = \left[ \frac{I}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{y}{R} \int_0^\infty (1 + \gamma_{TE}) e^{u_0 z} \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda R) d\lambda dx' \right] \quad (1)$$

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + y^2} \quad (2)$$

$$u_0 = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2} \quad (3)$$

式中: $B_z$ —— $z$ 轴分量的频率域磁场响应(V/m);

$I$ ——发射电流强度(A);

$L$ ——1/2的线源长度(m);

$R$ ——测点位置的偏移距长度(m);

$\gamma_{TE}$ —— $TE$ 模式下的反射系数;

$e$ ——自然常数( $e = 2.718\ 281\ 828\ 459\ 045$ );

$u_0$ ——与介质相关的波传播速度(m/s);

$z$ ——接收线圈离地真高(m);

$\lambda$ ——积分变量;

$J_1$ ——一阶Bessel函数;

$x'$ ——线源上任意一点的坐标;

$k_0$ ——空气介质波数(rad/m)。

### 1.2 仪器设备

国际上具有代表性的半航空电磁设备为Mogi等设计的GREATEM系统(Grounded Electrical Source Airborne Transient EM)<sup>[7-8]</sup>;国内多家科研单位先后研发了多版本半航空电磁法仪器设备,例如吉林大学<sup>[9]</sup>林君院士团队的半航空时频协同探测系统、中国科学院电子学研究所<sup>[10]</sup>研发的直升机搭载的半航空TEM勘探系统(S-ATEM)和成都理工大学<sup>[11]</sup>王绪本

团队研制的线圈传感器、同步采集装置及实时数据处理软件三部分构成的接收系统(SATR)等。

中铁二院工程集团有限责任公司针对国内铁路建设在艰险山区的需求趋势,自主设计研发了 GAEM-1 半航空电磁硬件系统,如图 2 所示。该系统的整体重量小于 4 kg,大幅增加了无人机的滞空时间,从而显著提高了半航空勘探的工作效率。此外,GAEM-1 系统的接收端具备接收半航空瞬变电磁信号和半航空大地电磁信号的能力。经过 CMA 质量检测,GAEM-1 系统整体符合各项硬件指标要求,其磁传感器及接收机的技术参数如表 1、表 2 所示。

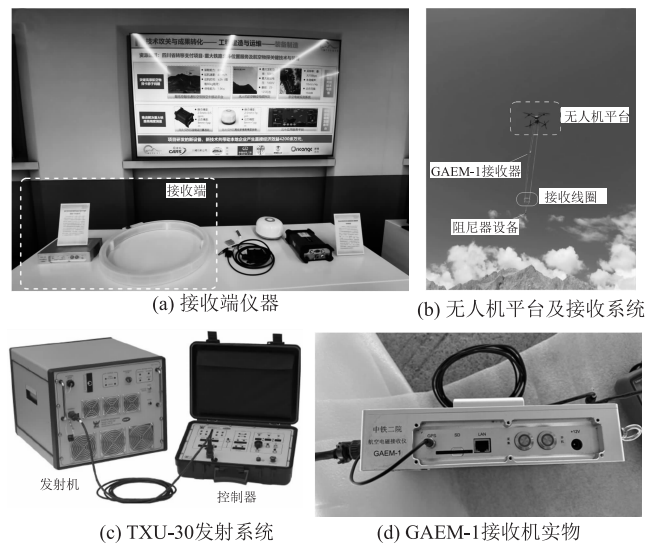


图 2 半航空电磁法探测系统布置示意图

表 1 磁传感器技术参数表

参数	数值
几何参数/m	$\phi 0.5$ (圆型)
重量/kg	0.9
线径/mm	0.25
匝数/匝	1 000
有效面积/m <sup>2</sup>	4 080
电感/H	$1.5(1H=1V\cdot A^{-1}\cdot s)$
线圈电阻/ $\Omega$	945
匹配电阻/ $\Omega$	9 350

表 2 GAEM-1 接收机技术参数表

参数	数值
外观尺寸/cm	$22.5\times 12.5\times 5$
重量/kg	1.2
电源/V	12
通道数量/个	3(ch0、ch1、ch2)
采样率/Kps	250
最大输入信号范围/V	-5~5
增益选择	1、10、100

在大多数艰险山区,受限于飞行高度差、飞行距离以及无人机电池容量等因素,经过多次野外测试,最终

确定 GAEM-1 系统的常用发射频率为 128 Hz、512 Hz、1 200 Hz、2 400 Hz 和 6 400 Hz。数据采集过程中,系统通过傅里叶变换将时间域数据转换为频率域数据,随后根据预设的发射频率提取主频及其二次谐波的频谱信息。这种频率选择和处理方法确保了在复杂地形条件下,能够有效获取地下介质的电磁响应信号,提高了勘探的精度与数据的可靠性。

2 处理系统

2.1 数据预处理

为提高数据处理效率与结果准确性,半航空频率域电磁法的数据预处理分为两个主要模块:质量监控模块和数据处理模块。质量监控模块的作用在于实时监控和评估采集数据的可靠性,确保数据采集过程中的有效性与准确性;而数据处理模块则负责对采集的原始数据进行滤波、去噪等处理,进一步提取有用的地质信息。频率域半航空电磁数据预处理的流程如图 3 所示。该流程图详细描述了从数据采集到处理的各个步骤及其相互关系。

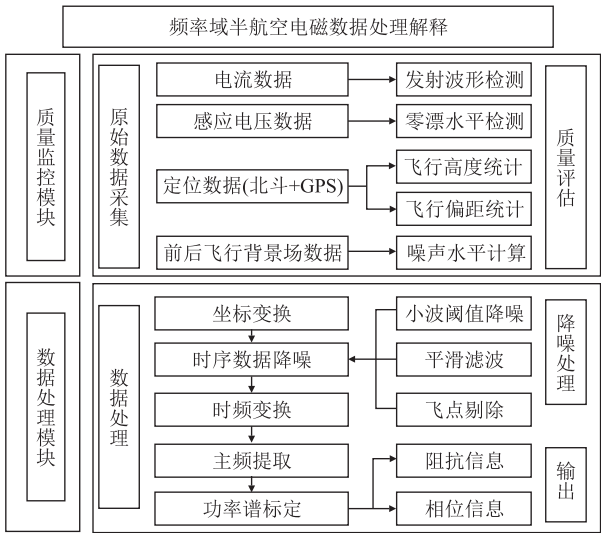


图 3 半航空频率域电磁法数据预处理流程图

质量监控模块主要针对原始数据进行全面的质量评估。初始数据文件由两部分组成:一部分为空中接收机采集的定位数据(北斗/GPS)和电压数据,另一部分为地面采集的电流数据。在数据质量评估中,首先需检查发射波形的稳定性,确保发射信号的连续性和可靠性,同时监测感应电压数据的零漂水平。其次,将接收机采集的定位数据(北斗/GPS)转换为文本格式,便于进一步统计飞行高度和飞行偏距,确保飞行路径的精度和一致性。最后,通过比较飞行前后的背景场数据,计算采集信号的信噪比,以此来判断数据质量的优劣,确保后续数据处理的准确性。采集信号的信噪

比表达为:

$$SNR = 10\log_{10}\left(\frac{V_{\text{signal}}^2}{V_{\text{noise}}^2}\right) = 20 \log_{10}\left(\frac{V_{\text{signal}}}{V_{\text{noise}}}\right) \quad (4)$$

式中:SNR——采集信号的信噪比;

$V_{\text{signal}}$ ——信号强度(V/m);

$V_{\text{noise}}$ ——噪声强度(V/m)。

数据处理模块的目的是对原始数据进行降噪处理并输出反演文件格式,首先将定位数据进行坐标转换,通过小波阈值、平滑滤波、“飞点”剔除对时序数据进行降噪,随后进行时频变化分析,将时间序列转换为频率域信号。将获取的频率域信号进行主频信息提取,根据主频信息提取二次谐波位置的频谱信息。最关键的是进行频率域信号的功率谱标定,因为磁传感器是在频率域标定的,所以要在频率域对电磁场进行校正,包括灵敏度、极距、增益校正,以磁传感器为例,通常不

同频率对应的灵敏度也不同,假设在频率*f*时,磁感应器的灵敏度为*S*,单位为mv/nT,说明每nT的磁信号能感应出1mv的电信号,同时实际记录的数据往往会对原始信号放大,实际放大的倍数称为增益倍数,假设实际磁场记录数据为*H*,增益倍数为*Z*,真实场值*Hr*则为:

$$H \rightarrow Hr \times Z \times S \quad (5)$$

将进行功率谱标定后的频率域信号进行阻抗信息和相位信息输出,即完成数据预处理的流程,为反演解释提供预处理文件。

飞行过程中单测线采集数据的多测道(频率域)剖面示意如图4所示,其中实线表示主频段频率响应信息,虚线表示提取谐波段频率响应信息。飞行测线单数据点的响应曲线及信噪比示意如图5、图6所示。

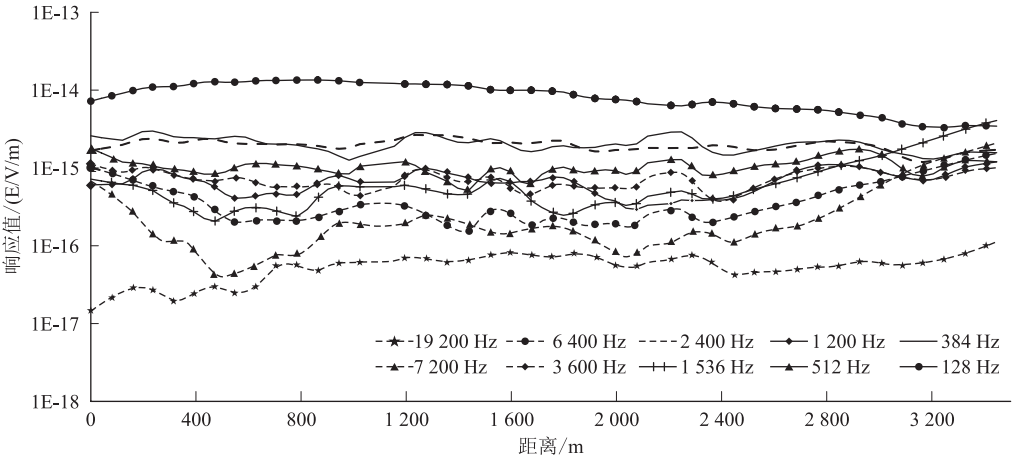


图4 单测线采集数据多测道剖面图

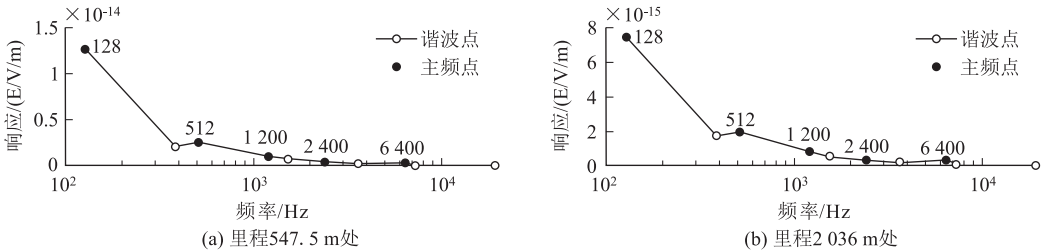


图5 飞行测线单数据点响应曲线图

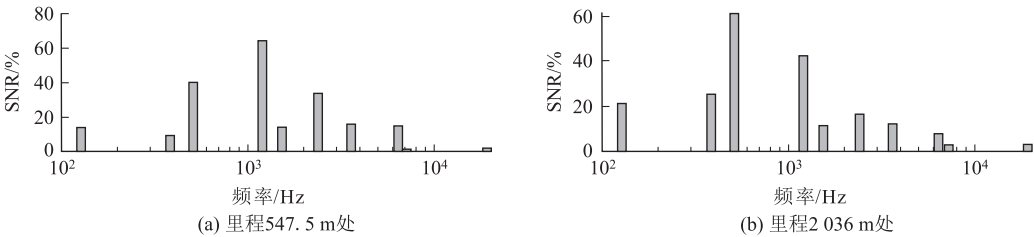


图6 飞行测线单数据点信噪比示意图



## 2.2 反演解释

在工程地球物理勘探中,常用的反演方法大多属于二维反演,其中较为常见的二维反演方法包括 OCCAM<sup>[12]</sup>(奥可姆法)及 NLCC<sup>[13]</sup>(非线性共轭梯度法)等反演方法。OCCAM 反演法的特点是不依赖于初始模型,因此在达到目标拟合差后还会继续迭代,往往导致结果过于光滑,从而丢失部分构造信息;而 NLCC 反演法虽然对初始模型的依赖性较强,但其反演结果具有较高的分辨率,计算速度较快,且只需较小的存储量即可完成反演过程。只要初始模型构建得当,通常能够获得较为可靠的反演结果。在初始模型的构建中,采用 Bostick 拟二维反演结果作为初始模型进行 NLCC 二维反演计算。部分学者通过实验模拟验证了 NLCC 二维反演结果能够更准确地反映断层模型的地电参数<sup>[14]</sup>。这种方法在提高反演精度的同时,确保了反演过程的计算效率,适用于复杂地质构造的高分辨率探测。

NLCC 反演计算的目标函数表达为:

$$\psi(m) = (d - F[m])^T V^{-1} (d - F[m]) + \lambda m^T L^T L m \quad (6)$$

式中: $\psi(m)$ ——目标函数;

$m$ ——模型向量;

$F[m]$ ——正演函数;

$\lambda$ ——正则化因子;

$V$ ——与误差相关的协方差矩阵;

$L$ ——与模型参数相关的二微分矩阵。

NLCC 反演计算迭代过程为:

$$\begin{cases} m_0 = \text{given} \\ \psi(m_j + \alpha_j p_j) = \min \psi(m_j + \alpha p_j) \\ m_{j+1} = m_j + \alpha_j p_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (7)$$

式中: $m_0$ ——初始模型向量;

$m_j$ ——模型向量;

$\alpha_j$ ——搜索步长;

$p_j$ ——模型空间搜索方向。

搜索方向及先验信息矩阵  $C_j$  为:

$$\begin{cases} \beta_j = \frac{g_j^T C_j (g_j - g_{j-1})}{g_{j-1}^T C_{j-1} g_{j-1}} \\ p_0 = -C_0 g_0 \\ p_j = -C_j g_j + \beta_j p_{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots \\ C_j = (\gamma_j I + \lambda L^T L)^{-1} \text{ or } C_j = I \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\beta_j$ ——简化公式;

$g_j$ ——梯度向量(目标函数对参数的导数,用来表示当前点相对于优化方向的变化率);

$C_j$ ——先验信息矩阵;

$p_0$ ——初始模型空间搜索方向;

$C_0$ ——初始先验信息矩阵;

$g_0$ ——初始梯度向量(目标函数对参数的导数,用来表示当前点相对于优化方向的变化率);

$L$ ——与模型参数相关的二微分矩阵;

$L^T$ ——与模型参数相关的二微分矩阵转置;

$I$ ——单位矩阵。

当先验信息不存在时,先验信息矩阵将为单位矩阵  $I$ 。NLCC 反演的计算量主要是梯度的计算和关于步长选取的搜索,当步长使得目标函数满足精度即停止搜索。

## 3 实际应用

### 3.1 隧道1验证对比

隧道1长3450 m,隧道区域为低山地貌,高差起伏较小,相对高差265 m。地表基本无植被,地表覆盖层为第四系全新统风积粉砂(软地基土)、冲洪积圆砾土,下伏基岩为石英片岩,岩体完整性较差。隧道区域穿过一条逆断层,走向290°~300°,倾向南西,倾角为60°~65°,发育宽20~60 m不等的断层破碎带。地下水以构造裂隙水及基岩裂隙水为主,水量较丰富。该区域不良地质条件主要为危岩落石、风沙等,整体工程地质条件差。

为验证 GAEM-1 系统的可靠性,在隧道1中轴线上同时进行了半航空频率域电磁法(GAEM)与地面音频大地电磁法(AMT)的同精度对比验证实验。地面音频大地电磁法使用加拿大凤凰(Phoenix)公司制造的V8系统进行数据采集,观测频率范围11.2~10400 Hz,而半航空电磁法则采用GAEM-1硬件系统进行数据采集。通过两种方法的对比,评估了半航空电磁法在复杂地质条件下的测量精度与数据一致性,从而进一步验证了GAEM-1系统在工程应用中的可靠性与稳定性。

隧道1中线的音频大地电磁法(AMT)探测结果如图7所示,隧道1中线的半航空频率域电磁法(GAEM)探测结果如图8所示。从两者对比可以看出,在里程1400 m段,两种方法均揭示了由浅至深的电阻率突变区域,且该区域反映了相对较低的电阻率值。这一结果与隧道1的地质剖面所揭示的断层位置高度吻合,推测为断层破碎带影响区域,影响带范围为60~100 m,两种方法的电性差异分布显示出极高的吻合度。

隧道1的三维电性结构示意图如图9所示。由图9可知,在断层破碎带前方的小里程段,浅表区域的岩体

表现为极破碎、极软弱或富水的特征;而在断层破碎带后方区域至隧道出口,均呈现低阻异常反应。多条测线的结果显示出较高的一致性,进一步验证了半航空频率域电磁法原理的可靠性,以及 GAEM-1 硬件系统

在复杂地质条件下的稳定性和应用价值。

3.2 隧道2 实际应用

该隧道长 9 140 m,隧道区域为高山峡谷地貌,地表起伏大,相对高差 996 m。地表覆盖层为第四系全新

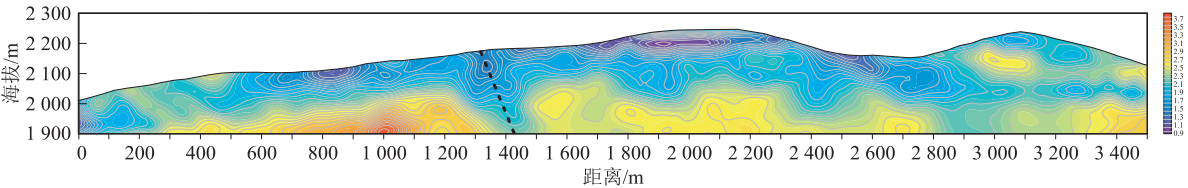


图7 隧道1 中线 AMT 探测结果示意图

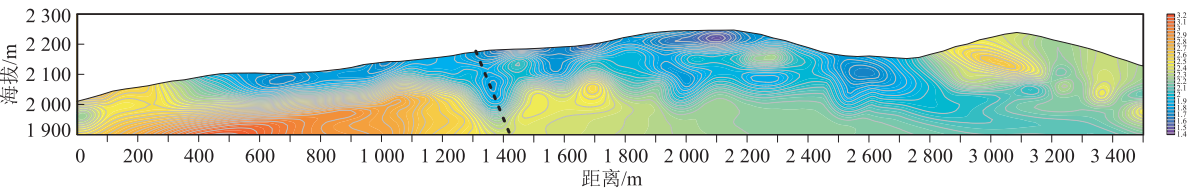


图8 隧道1 中线 GAEM 探测结果示意图

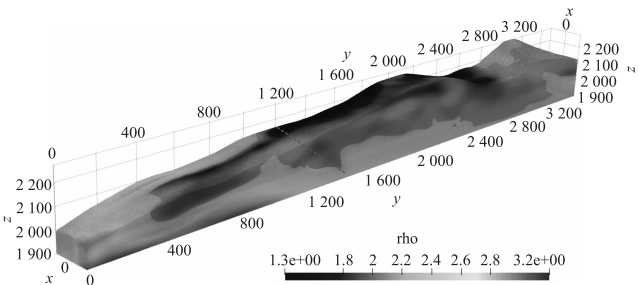


图9 隧道1 三维电性结构示意图

统泥石流堆积层粗角砾土、冲洪积层细圆砾土、坡崩积层风积层砂质粉土,下伏基岩为大理岩、石英片岩夹变粒岩、花岗岩等。隧道地下水主要为基岩裂隙水及大气降雨入渗补给,主要赋存于基岩裂隙中。测区不良地质主要为泥石流、危岩落石、高地温、高地应力(岩爆)等,隧道2 区域工程地质条件较差。

隧道2 的半航空频率域电磁法实际发射源与起飞点的布置如图 10 所示。隧道2 位于我国西北某高原台面上,面临高寒、高海拔及飞行高度差大的严峻挑战。在本次隧道勘探的实际应用中,半航空频率域电磁法布置了 5 处发射极点和 3 处发射源,设计了 8 个起飞点,其中最大飞行高度差达 1 250 m。共布置 5 条航空物探测线,测点间距为 20 m,测线间距为 50 m。主剖面为隧道中线剖面,其余 4 条剖面分别位于右偏 50 m、右偏 100 m、左偏 50 m 和左偏 100 m 处。该测区中线长 9.14 km,包含中线复飞工作,共完成了 45.7 km 的飞行探测工作。

此次隧道2 测区的半航空电磁法工作耗时共 9 d,

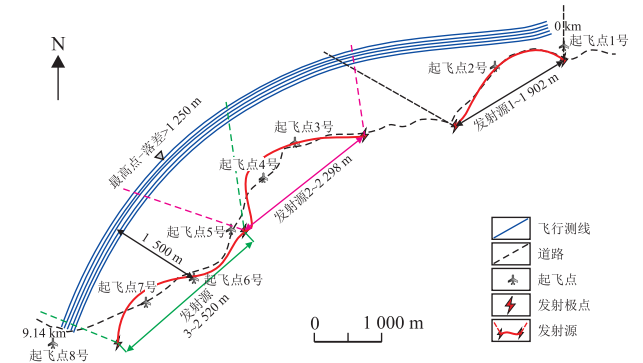


图10 隧道2 半航空频率域电磁法实际发射源及起飞点实际布置图

表3 地面、半航空、全航空系统对比表

方法	地面电磁法	半航空电磁法	全航空电磁法
时域信号峰值/(nT/s)	20 000	500	25
信噪比(SNR)	50 000:1	500:1	25:1
探测良导体(低阻异常)能力	较强	较强	弱
主要设备	地面探测仪器	飞行器 + 地面发射源	飞行器
效率制约因素	地形条件	发射源布置 + 飞行器续航能力	飞行速度 + 天气情况
探测效率/(km/d)	约 0.8	约 6~9	约 50
主要花费	人员开销	飞行器及发射源布置	飞机租赁、飞行员聘请

其中 3 d 用于布设发射源,6 d 用于飞行探测。实际应用表明,半航空电磁法的工作效率远高于常规地面物探方法,尤其在因地势陡峭导致人员无法抵达勘察线位的区域,能够有效弥补勘察资料的空白。地面物探、

半航空电磁法与全航空电磁法的各项指标如表3所示<sup>[15]</sup>。由表3可知,半航空电磁法具有较高的信噪比,且在探测低阻异常方面表现出色。此外,半航空电磁法的工作效率明显较高,一旦建立起完整的半航空野外工作小组,其成本也可得到大幅降低。因此,该方法在高原艰险山区的隧道勘察中是一种高效且经济的地球物理勘探手段。

隧道2中线的 GAEM 探测结果如图11所示,隧道2测区范围内的三维电性结构(实际曲率三维体)如图12所示。通过 GAEM-1 系统,成功探测到了两处

岩性分界区域和一处极为破碎的区域(位于地表冲沟汇流区域)。在里程3500~4000 m区间,解译出的断层破碎带影响区与遥感解译的断层位置高度一致,且进一步修正了断层的倾向。将测区多测线探测结果转换为实际坐标下的三维电性结构展示形式后,能更为清晰地分析测区内的电性差异,进而构建长大深埋隧道的三维电性廊带模型,深入分析不良地质体的空间展布关系。该模型为隧道设计和施工提供了可靠的勘察资料,显著提升了勘探的精度和科学性,为隧道工程的安全性和施工效率提供了重要的技术支持。

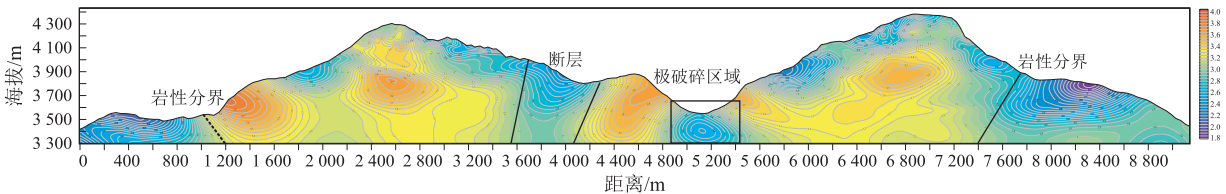


图11 隧道2 GAEM 隧道中线结果示意图

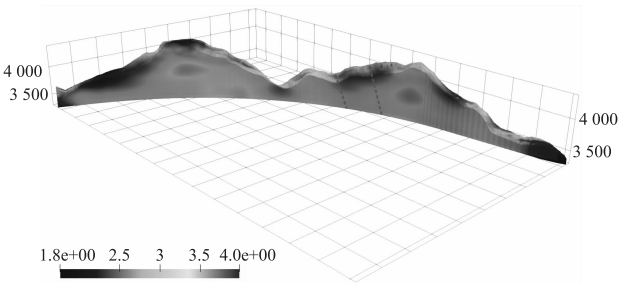


图12 隧道2 三维电性结构示意图(实际曲率三维体)(m)

4 结论

本文通过自主设计研发的 GAEM-1 系统,开展了半航空频率域电磁法的同精度对比实验,并在某高原艰险山区隧道勘察中实际应用,得到主要结论如下:

(1) 中铁二院工程集团有限责任公司研发的 GAEM-1 硬件系统具备重量轻、稳定性强、测量精度高等优势,能够充分满足高原艰险山区铁路隧道勘察的需求。

(2) 半航空频率域电磁法在铁路隧道勘察中的应用,有效解决了由于地势陡峭、技术人员无法抵达线位而造成勘察资料空白的问题。同时,该方法极大地降低了勘察成本,显著提高了勘察效率,为我国铁路勘察工作提供了新的技术思路和应用方法。

现阶段的半航空频率域电磁法采用的是地面发射-空中接收的工作模式,在一定条件下仍受限于地面发射源的布设条件。下一阶段团队将研发 GAEM-2 系统,计划采用全航空模式,即由无人机搭载大功率发射平台与接收系统,从而进一步提升工作灵活性和勘

探效率,推动该技术在复杂地质条件下更广泛的应用。

参考文献:

[1] 张营旭,张广泽,蒋帅,等. 复杂艰险山区铁路隧道精细化工程地质勘察研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(6): 78-83.  
ZHANG Yingxu, ZHANG Guangze, JIANG Shuai, et al. A Study on Detailed Geological Investigation of Railway Tunnel in Challenging Mountain Area[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6): 78-83.

[2] 赵思为,金俊俊,赵文龙. 艰险山区阵列式三维音频大地电磁勘探方法与应用[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(4): 63-68.  
ZHAO Siwei, JIN Junjun, ZHAO Wenlong. An Array-based 3D Audio-frequency Geophysical Exploration Method and Its Application in Challenging Mountainous Areas [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(4): 63-68.

[3] 樊邦奎,李云,张瑞雨. 浅析低空智能网与无人机产业应用[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1441-1450.  
FAN Bangkui, LI Yun, ZHANG Ruiyu. Initial Analysis of Low-altitude Internet of Intelligences (IOI) and the Applications of Unmanned Aerial Vehicle Industry [J]. Progress in Geography, 2021, 40(9): 1441-1450.

[4] 王堃鹏,罗威,曹辉,等. 无人机频率域半航空电磁法三维反演[J]. 地球物理学报, 2021, 64(5): 1759-1773.  
WANG Kunkeng, LUO Wei, CAO Hui, et al. 3-D Inversion of UAV Semi-airborne Electromagnetic Method in Frequency Domain [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(5): 1759-1773.

[5] 林君,薛国强,李貅. 半航空电磁探测方法技术创新思考[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 2995-3004.  
LIN Jun, XUE Guoqiang, LI Xiu. Technological Innovation of Semi-airborne Electromagnetic Detection Method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(9): 2995-3004.

[6] 王仕兴,何可,尹小康,等. 半航空瞬变电磁一维聚焦反演研究[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 410-419.

- [6] WANG Zhenghua, DUENAS-OSORIO L, PADGETT J E. Influence of Scour Effects on the Seismic Response of Reinforced Concrete Bridges[J]. Engineering Structures, 2014, 76: 202 – 214.
- [7] 饶露, 朱华中, 吴天群, 等. 山区普速铁路桥梁冲刷水害整治方案研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(10): 65 – 68.
- RAO Lu, ZHU Huazhong, WU Tianqun, et al. Study on Regulation Scheme of Scouring Water Damage of Ordinary Speed Railway Bridge in Mountainous Area [J]. Railway Engineering, 2021, 61(10): 65 – 68.
- [8] 周外平. 铁路桥梁浅基冲刷防护方案探讨[J]. 铁路工程技术与经济, 2020, 35(1): 33 – 35.
- ZHOU Waiping. Discussion on Shallow Foundation Scour Protection Scheme of Railway Bridge [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2020, 35(1): 33 – 35.
- [9] 靳志伟. 养畜牧铁路特大桥河段冲淤分析与冲刷计算[J]. 内蒙古水利, 2017(5): 31 – 33.
- JIN Zhiwei. Analysis and Calculation of Scouring and Silting in the Reach of Yangmu Railway Bridge[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2017(5): 31 – 33.
- [10] 方理刚, 康家涛, 沈周, 等. 湘黔铁路资水大桥冲刷稳定性计算分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(1): 41 – 45.
- FANG Ligang, KANG Jiatao, SHEN Zhou, et al. Computational Analysis of the Scour Stability of Zishui Bridge on Xiang-Qian Railway [J]. China Railway Science, 2008, 29(1): 41 – 45.
- [11] 李保龙. 通过探测基础刚度评估重载铁路简支梁桥冲刷的影响[J]. 铁道建筑, 2019, 59(7): 12 – 16.
- LI Baolong. Evaluation of Scour Influence for Simply-supported Girder Bridge on Heavy Haul Railway by Detecting Foundation Stiffness [J]. Railway Engineering, 2019, 59(7): 12 – 16.
- [12] 代丰, 林红松, 杨文茂, 等. 中美桥上无砟轨道设计荷载计算方法对比研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 43 – 47.
- DAI Feng, LIN Hongsong, YANG Wenmao, et al. Comparative Study on Calculation Methods for Design Loads of Ballastless Tracks on Bridges Based on Chinese and American Standards [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 43 – 47.
- [13] 张永亮, 杨世杰, 陈兴冲. 基于线桥一体化模型的高速铁路桥梁地震反应分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(4): 23 – 28.
- ZHANG Yongliang, YANG Shijie, CHEN Xingchong. Analysis of Seismic Responses of High-speed Railway Bridges Based on Integrated Track and Bridge Model [J]. Bridge Construction, 2016, 46(4): 23 – 28.
- [14] 李晓波. 减隔震支座及黏滞阻尼器减震效果分析研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 34 – 38.
- LI Xiaobo. Analysis of the Damping Effect of Seismic Mitigation and Isolation Bearings and Fluid Viscous Dampers [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 34 – 38.
- [15] 黄树强, 聂细锋, 张大军, 等. 非对称铁路连续梁桥抗震设计研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 38 – 42.
- HUANG Shuqiang, NIE Xifeng, ZHANG Dajun, et al. A Study on the Seismic Design of Asymmetric Continuous Girder Railway Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 38 – 42.
- [16] GB 50111 – 2006 铁路工程抗震设计规范[S].
- GB 50111 – 2006 Code for Seismic Design of Railway Engineering[S].

## (上接第7页)

- WANG Shixing, HE Ke, Yin Xiaokang, et al. One-dimensional Focusing Inversion of the Semi-airborne Transient Electromagnetic Method and Its Application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 410 – 419.
- [7] Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, et al. Development of Grounded Electrical Source Airborne EM (GREATE)[J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 161 – 164.
- [8] Mogi T, Kusunoki K, Kaieda H, et al. Grounded Electrical-source Airborne Transient Electromagnetic (GREATEM) Survey of Mount Bandai, North-Eastern Japan [J]. Exploration Geophysics, 2009, 40: 1 – 7.
- [9] 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.
- Ji Yanju, WANG Yuan, XU Jiang, et al. Development and Application of the Grounded Long Wire Source Airborne Electromagnetic Exploration System Based on an Unmanned Airship[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3640 – 3650.
- [10] 刘富波, 李巨涛, 刘丽华, 等. 无人机平台半航空瞬变电磁勘探系统及其应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2222 – 2229.
- LIU Fubo, LI Jutao, LIU Lihua, et al. Development and Application of a New Semi-airborne Transient Electromagnetic System with UAV Platform[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 2222 – 2229.
- [11] 王仕兴, 易国财, 王绪本, 等. 基于分段二分搜索算法的半航空瞬变电磁电导率深度快速成像方法研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1317 – 1324.
- WANG Shixing, YI Guocai, WANG Xuben, et al. Research on the Semi-airborne Transient Electromagnetic Conductivity Depth Rapid Imaging Method Based on Segmented Binary Search Algorithm[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1317 – 1324.
- [12] DE GROOT-HEDLIN C, CONSTABLE S. Occam's Inversion to Generate Smooth, Two-dimensional Models from Magnetotelluric Data [J]. Geophysics, 1990, 55(12): 1613 – 1624.
- [13] RODI W, MACKIE R L. Nonlinear Conjugate Gradients Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion[J]. Geophysics, 2001, 66(1): 174 – 187.
- [14] 康敏, 胡祥云, 康健, 等. 大地电磁二维反演方法分析对比[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 476 – 486.
- KANG Min, HU Xiangyun, KANG Jian, et al. Compared of Magnetotelluric 2D Inversion Methods[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(2): 476 – 486.
- [15] SMITH R S, ANNAN A P, MCGOWAN P D. A Comparison of Data from Airborne, Semi-Airborne, and Ground Electromagnetic Systems [J]. Geophysics, 2001, 66(5): 1379 – 1385.