

文章编号: 1674—8247(2023)03—0081—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.03.016

# 无人机地空时频电磁物探在铁路隧道勘察中的应用

冯锡鼎

(中铁二院(成都)建设发展有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**本文介绍了无人机地空时频电磁物探的基本工作原理,并将该方法应用于西渝高速铁路天坪梁隧道勘察中。为验证无人机地空时频电磁物探成果的准确性,采用了地面大地电磁物探(EH4)方法和地质钻探方法进行了验证。研究表明:(1)无人机地空时频电磁物探具备较好的可靠性及准确性,能够较好地反映地下电性结构,有效地探测地下各类地质体;(2)无人机地空时频电磁物探不受地形、地貌限制,具有效率高、成本低的特点,值得在复杂艰险山区铁路隧道勘察中推广。研究成果可为隧道勘察设计提供参考借鉴。

**关键词:**高速铁路;隧道勘察;物探;无人机地空时频电磁物探;西渝高速铁路

中图分类号:U452.1 文献标识码:A

## Application of UAV-based Ground-air Time-frequency Electromagnetic Geophysical Prospecting in Railway Tunnel Investigation

FENG Xiding

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

**Abstract:** This paper introduces the basic working principle of UAV-based ground-air time-frequency electromagnetic geophysical prospecting, and the application of this method in the investigation of Tianpingliang Tunnel of Xi'an-Chongqing High-speed Railway. In order to verify the accuracy of the results of UAV-based ground-air time-frequency electromagnetic geophysical prospecting, the surface magnetotelluric geophysical prospecting (EH4) and the geological prospecting were used for verification. The results of the study show that: (1) The UAV-based ground-air time-frequency electromagnetic geophysical prospecting has good reliability and accuracy, and can better reflect the underground electrical structures and effectively detect various underground geological bodies. (2) The UAV-based ground-air time-frequency electromagnetic geophysical prospecting is not limited by terrain or landform, and has the characteristics of high efficiency and low cost, worthy of being popularized in the investigation of railway tunnels in complex and dangerous mountainous areas. The findings of this paper can provide reference for tunnel survey and design.

**Key words:** high-speed railway; tunnel investigation; geophysical prospecting; UAV-based ground-air time-frequency electromagnetic geophysical prospecting; Xi'an-Chongqing High-speed Railway

近年来,随着铁路建设的发展,长大隧道越来越多,尤其是在复杂艰险山区,长大隧道在铁路中的比

重越来越大。而在复杂艰险山区,由于地形地质条件极其复杂,地表条件恶劣,地面人员难以进入,传统

收稿日期:2022-03-28

作者简介:冯锡鼎(1990-),男,工程师。

引文格式:冯锡鼎. 无人机地空时频电磁物探在铁路隧道勘察中的应用[J]. 高速铁路技术,2023,14(3):81-86.

FENG Xiding. Application of UAV-based Ground-air Time-frequency Electromagnetic Geophysical Prospecting in Railway Tunnel Investigation[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3):81-86.

的地面物探需要耗费巨大的人力财力,且探测区域有限,同时可能存在大面积探测盲区。因此,铁路隧道勘察迫切需要引进新的物探技术设备和方法<sup>[1-3]</sup>。无人机地空时频电磁物探(GATFEN)又称半航空物探,利用地面大功率人工电磁源作为激励场源,通过空中采集磁场信号,实现对大地电性结构的快速勘察。该方法效率高、成本低,兼顾地面方法的探测精度的同时不受地形、地貌限制,能够对地表条件复杂区域进行非接触快速探测<sup>[4-5]</sup>。该方法的出现为复杂艰险山区铁路隧道勘察提供了一种经济有效的物探手段。

本文以西渝高速铁路天坪梁隧道为例,分析探讨无人机地空时频电磁物探在铁路隧道勘察中的具体应用及实际效果。

## 1 探测原理

### 1.1 仪器设备

无人机地空时频电磁物探探测仪器为多功能地空电磁探地系统。该系统包括地面发射系统和机载接收系统2部分。地面发射系统通过编码发射,实现时频域联合测量。系统可实现车载一体化、分体化2种装配模式,车载一体化为定制车身,内部集成包括发电机等全部模块。分体式发射系统各模块可拆分成独立单元,能够提供更灵活的运输及组装方式,在常规车辆无法进入测区时,设备同样可以到达现场。发射系统发射频率范围为0.1~10 kHz,发射波形为伪随机波/方波,同步方式为GPS<sup>[6]</sup>。

机载接收系统一般为基于旋翼无人机的地空电磁接收系统,包括空心线圈感应传感器、多通道接收机和地面检测站3部分,系统基于GPS同步触发,可远程控制时间域与频率域接收的切换,具有低噪声、低功耗、高精度等特点。采样率为31.25 kHz,线圈直径为0.5 m,线圈重量<5 kg,模拟带宽30 kHz,同步方式为GPS。

### 1.2 探测原理

无人机地空时频电磁物探探测原理是在地面布设1台或1组平行等间距分布的接地长导线,根据发射系统位置、发射频率在探测区域正上方沿平行或垂直地长导线方向设计飞行测线,然后启动发射系统并控制接地长导线源向地面激发单频方波或多频伪随机波,同时启动发射电流记录装置,记录发射频率及发射电流并按时间序列存储。机载接收系统在测线正上方固定高度上匀速飞行,GPS远程监控系统控制接收机通过GPS与发射机同步采集空中 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个

方向的响应磁场信号,同时记录接收机的高度 $H$ 及位置坐标 $P$ 并按时间序列存储。各测点的采集数据以存储时间为依据整理,获取采集信号的归一化频谱,并通过全区视电阻率法对数据进行处理,反演解译地下电性结构信息。

该方法将地面电磁法在探测深度方面的优势与航空测量的效率优势有机结合,地面发射系统通过多级级联向地下发射多频伪随机波,激发1次可获得多个频率的信号,大大提高了探测效率,机载接收系统在测区上空测量磁场,能够适应地表结构复杂的环境。同时,该方法减弱了近场影响引起的静态效应,拓展了电磁勘探的探测范围。系统可在测量多个磁场分量的情况下对被测磁场分量进行校正和补偿,提高了磁场测量的信噪比和分辨能力<sup>[7]</sup>。该方法一般观测10 000 Hz到1 Hz的频率范围,理论勘探深度大约在2 km左右。无人机地空时频电磁物探工作原理如图1所示。

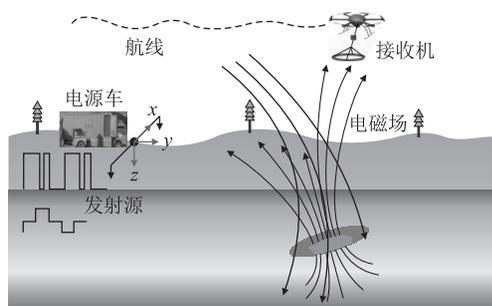


图1 无人机地空时频电磁物探工作原理图

### 1.3 资料处理

通过无人机地空时频电磁物探得到时间域电磁数据。首先对原始数据进行剔除非值、去噪等处理,然后进行全域视电阻率计算与成像,最后生成视电阻率断面图,以此作为数据解释的基本图件和主要依据,数据处理流程如图2所示。

根据视电阻率断面图,结合测区的地质情况全面深入地分析解释,运用地质学的基本原理将地球物理定性和定量解释成果客观合理地转变成推断的地质体或现象,最终确定测区地质情况。

## 2 西渝高速铁路天坪梁隧道应用实例

### 2.1 工程概况

西渝高速铁路是国家《中长期铁路网规划》“八纵八横”中包(银)海通道的重要组成部分<sup>[8]</sup>,西渝高速铁路安康至重庆段北起于秦岭南麓安康盆地,线路由北向南依次穿越“七山”(大巴山脉、铜锣山、华

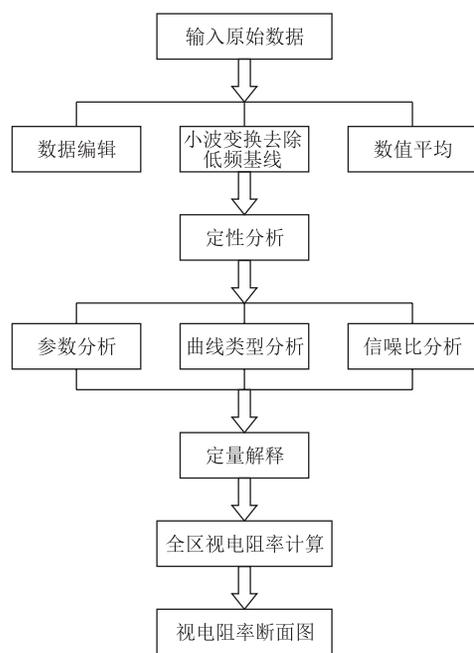


图2 时间域电磁探测数据处理流程图

崆山、中梁山、九顶山、南山、铁峰山),跨越“八水”(月河、汉江、岚河、任河、前河、州河、渠江、嘉陵江)等大江大河。沿线河流切割强烈,山高谷深,地势陡峻,地形复杂,地貌多样,尤其是大巴山区,属强烈切割之中高山地形,巍峨险峻,山坡陡峻,河谷狭窄,长大隧道成群分布,险峻的地形给隧道勘察工作带来极大难度。

天坪梁隧道位于陕西省安康市,隧道全长 12 109 m,最大埋深约 782 m。隧址区属构造剥蚀低中山、中山地貌,地势陡峻,沟谷深切,植被发育,地形坡度  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,地面标高 320 ~ 1 563 m,相对高差达 1 200 m,尤其是 DK 28 + 400 ~ DK 34 + 200 段线路穿越安康蜡烛山,该段地势极为陡峻,悬崖、绝壁屡见不鲜,人员无法到达地表。此外,隧道位于秦岭褶皱系之北大巴山褶皱带,褶皱、断裂构造极为发育,挤压程度强烈。同时,隧址区岩相类型复杂,岩浆活动频繁,出露地层年代较老,岩石普遍变质,出露地层以青白口系、震旦系、寒武系、奥陶系、志留系为主,岩性主要为黏板岩、炭质板岩、绢云板岩、千枚岩、片岩、硅质岩、灰岩等,局部伴有侵入岩零星分布。隧址区煤层瓦斯、软岩大变形、顺层偏压、岩溶、放射性、滑坡、岩堆、危岩落石等不良地质发育,地质条件极为复杂。

由于 DK 28 + 400 ~ DK 34 + 200 段地势陡峻,地表条件恶劣,开展地面物探极为困难,因此,拟通过采用无人机地空时频电磁物探的方式初步查明该段地质条件。

## 2.2 探测经过

根据探测目的及要求,本次探测沿天坪梁隧道 DK 28 + 400 ~ DK 34 + 200 段中线及东、西两侧布置了 3 条测线,总测线长度 17 400 m,物理点距 20 m,测线间距 50 m,测线编号分别为 DK-TPL-W(西线)、DK-TPL(中线)和 DK-TPL-E(东线)。

外业工作共历时 9 d,完成测点 1 164 个(含质量检测点 291 个)。外业物探数据采集工作严格按照 TB 10013 - 2010《铁路工程物理勘探规范》的有关规定进行,在资料采集质检工作时,GAFEM 法检查时与观测时的磁场强度 - 频率曲线形态基本一致,满足《铁路工程物理勘探规范》的规定。

## 2.3 探测成果

经过外业物探数据采集及资料处理,得出隧道西、中、东 3 条测线的视电阻率断面图,如图 3 所示。

对 3 条测线的视电阻率断面图进行对比分析,其视电阻率值及空间分布范围为:

(1)DK 28 + 400 ~ DK 29 + 500 段中线视电阻率整体以高阻为主,中部呈现低阻异常,视电阻率值为 160 ~ 3 980  $\Omega\text{m}$ ;西、东测线视电阻率较高,西测线视电阻率值为 1 000 ~ 10 000  $\Omega\text{m}$ ,东测线视电阻率值为 1 000 ~ 15 800  $\Omega\text{m}$ 。

(2)DK 29 + 500 ~ DK 29 + 930 段 3 条测线视电阻率均较低,中线视电阻率值为 250 ~ 1 000  $\Omega\text{m}$ ,东线视电阻率值为 63 ~ 1 000  $\Omega\text{m}$ ,西线视电阻率值为 158 ~ 1 000  $\Omega\text{m}$ 。

(3)DK 29 + 930 ~ DK 30 + 480 段中线、东线视电阻率较高,中线视电阻率值为 1 000 ~ 25 000  $\Omega\text{m}$ ,东线视电阻率值为 1 000 ~ 10 000  $\Omega\text{m}$ ,西线视电阻率值较低,其值为 158 ~ 398  $\Omega\text{m}$ 。

(4)DK 30 + 480 ~ DK 34 + 400 段视电阻率均较低,但在中部洞身段均存在高阻。中线视电阻率值整体为 63 ~ 1 000  $\Omega\text{m}$ ,DK 32 + 900 ~ DK 33 + 650 段下部视电阻率相对较高,视电阻率值为 398 ~ 10 000  $\Omega\text{m}$ ;东线视电阻率值整体为 63 ~ 1 000  $\Omega\text{m}$ ,DK 32 + 720 ~ DK 33 + 650 下部视电阻率相对较高,视电阻率值为 398 ~ 3 980  $\Omega\text{m}$ ;西线视电阻率值整体为 63 ~ 1 000  $\Omega\text{m}$ ,DK 32 + 870 ~ DK 33 + 820 下部视电阻率相对较高,视电阻率值为 398 ~ 1 585  $\Omega\text{m}$ 。

由图 3 可知,东线、西线视电阻率值与中线视电阻率值基本在同一数值范围内,低阻、高阻分布范围、分布特征基本相似;部分段落存在差异,推测地质条件差异所致;无人机地空时频电磁物探结果具有良好的 consistency。

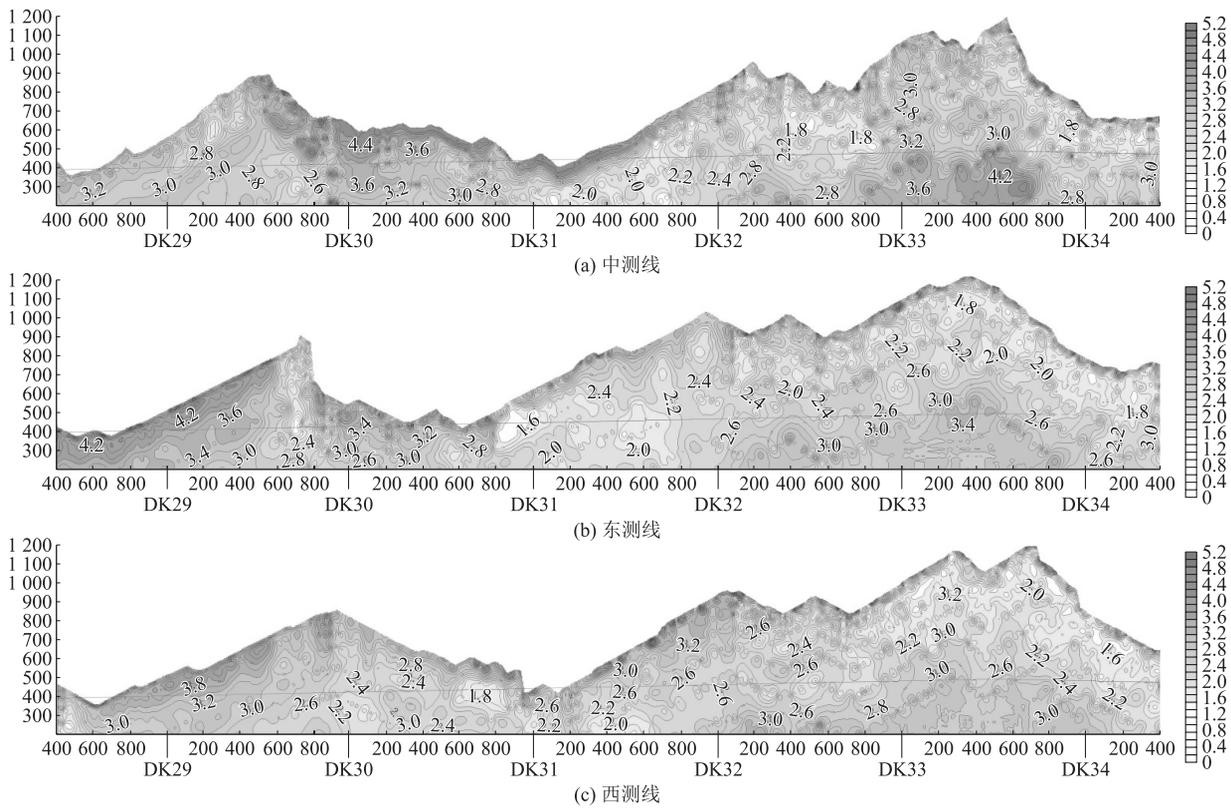


图 3 天坪梁隧道视电阻率断面图 ( $\Omega\text{m}$ )

根据中线视电阻率断面图,结合隧址区区域地质条件进行解译,初步得出以下结论:

- (1) DK 29 + 000 ~ DK 29 + 150 段视电阻率曲线呈现低阻异常,且呈线状延伸,物探推断该段存在断层。
- (2) 隧道 DK 29 + 350 ~ DK29 + 900、DK 30 + 450 ~ DK 31 + 550、DK 31 + 850 ~ DK 32 + 350 段电阻率相对较低,推断属 IV 类异常,基岩岩体破碎,完整性差、裂隙发育,含水可能性较大。
- (3) 隧道 DK 31 + 550 ~ DK 31 + 850、DK 32 + 350 ~ DK 32 + 880、DK 33 + 650 ~ DK 34 + 260 段电阻率低,物探推断属 V 类异常,基岩岩体极破碎、极软弱或富水岩体。
- (4) 隧道 DK 30 + 800 ~ DK 34 + 400 段整体电阻率较低,且物探异常带分布较为集中,需重点关注。

### 2.4 成果对比分析

#### 2.4.1 不同物探方法成果对比

为验证无人机地空时频电磁物探成果资料的可靠性,在天坪梁隧道具备地面物探条件的 DK 29 + 720 ~ DK 31 + 020 段落进行了大地电磁物探(EH4)。大地电磁物探测线沿隧道中线布置,测点间距 20 m,采用 EH4 型仪器采集外业数据,观测频率为 15.8 ~ 79 000 Hz。物探成果对比如图 4 所示。

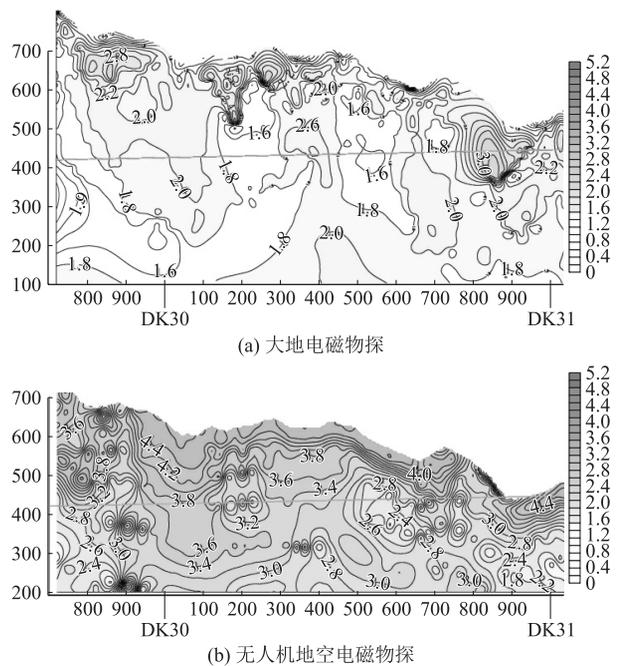


图 4 地空电磁物探与大地电磁物探成果对比图

对物探成果进行对比分析可知:

- (1) DK 29 + 720 ~ DK 29 + 825 段大地电磁物探视电阻率较低,其值为 6.3 ~ 63  $\Omega\text{m}$ ; DK 29 + 720 ~ DK 29 + 895 段无人机地空电磁物探视电阻率较低,其

值为  $100 \sim 1\,000 \Omega\text{m}$ ; 2种方法得到的视电阻率曲线形态基本一致, 均呈左上至右下方延伸的趋势。

(2) DK 29 + 825 ~ DK 30 + 150 段大地电磁物探视电阻率相对较高, 其值为  $63 \sim 250 \Omega\text{m}$ ; DK 29 + 895 ~ DK 30 + 140 段无人机地空电磁物探视电阻率较高, 其值为  $1\,000 \sim 16\,000 \Omega\text{m}$ ; 2种方法得到的视电阻率曲线形态基本一致, 均呈从上至下延伸的趋势。

(3) DK 30 + 150 ~ DK 30 + 450 段视电阻率相对较高, 大地电磁物探视电阻率值为  $40 \sim 158 \Omega\text{m}$ , 无人机地空电磁物探视电阻率为  $630 \sim 1\,585 \Omega\text{m}$ , 视电阻率曲线均呈从上至下延伸的趋势。

(4) DK 30 + 450 ~ DK 30 + 785 段视电阻率值较低, 大地电磁物探视电阻率值为  $40 \sim 100 \Omega\text{m}$ , 无人机地空电磁物探视电阻率为  $158 \sim 1\,000 \Omega\text{m}$ , 视电阻率曲线整体呈从上至下延伸的趋势。

(5) DK 30 + 785 ~ DK 31 + 035 段视电阻率值相

对较高, 大地电磁物探视电阻率值为  $100 \sim 10\,000 \Omega\text{m}$ , 无人机地空电磁物探视电阻率为  $1\,000 \sim 10\,000 \Omega\text{m}$ 。

根据无人机地空时频电磁物探与大地电磁物探成果对比可知, 2种方法获取的视电阻率曲线形态基本一致, 物探低阻、高阻异常分布范围基本一致。

由于物探方法及资料处理方法存在差异, 2种方法的得到的视电阻率值在数量等级上有一定差异。以上结果说明无人机地空时频电磁物探能够较好地反映地下电性结构, 有效分辨地质异常, 具有较好的可靠度。

#### 2.4.2 地质钻探对物探成果的验证

为了验证无人机地空时频电磁物探成果资料的准确性, 针对隧道中线(DK-TPL线)中的物探异常带布置了钻孔进行验证。地质钻探对物探成果的验证如图5所示。

(1) DZ-天坪梁-A02 深孔揭示, 孔深 198 m 深度

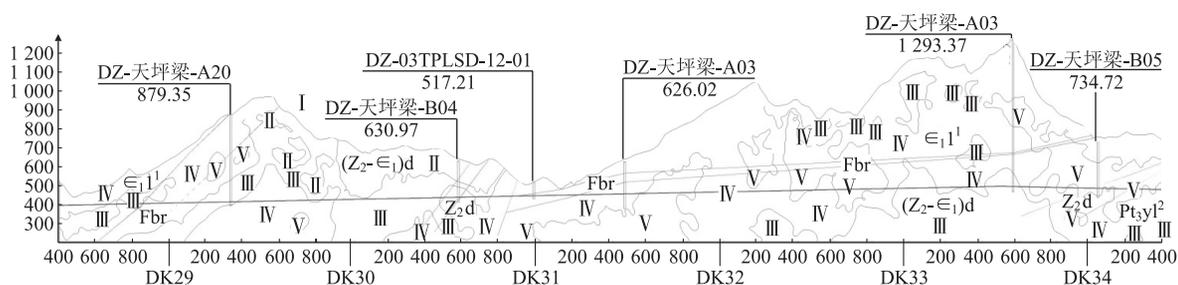


图5 地质钻探对物探成果的验证图

范围内揭示断层破碎带, 岩体极破碎, 与 DK 29 + 000 ~ DK 29 + 150 段视电阻率曲线呈现低阻异常, 且呈线状延伸, 物探推断该段存在断层相符。

(2) DZ-天坪梁-B04 孔在孔深 97 m 处揭示灯影组( $Z_2-\epsilon_1$ )d 硅质炭质板岩与陡山沱组( $Z_2d$ )炭质绢云千枚岩地层界线, 地层界线与该处物探Ⅲ级异常与Ⅳ级异常视电阻率曲线形态基本相符。

(3) DK 30 + 850 ~ DK 31 + 230 段根据地质调绘及钻孔揭示, 该段断裂构造极为发育, 岩体极为破碎; DK 31 + 230 ~ DK 34 + 400 段根据钻孔揭示, 上部存在断层, 岩体破碎, 同时, 该段地下水较为发育, DZ-天坪梁-A03 孔在 117 m 处揭示承压水, 水头高度高于地面约 3 m, 且水量较大。物探推测 DK 30 + 800 ~ DK 34 + 400 整体电阻率较低, 且物探异常带分布较为集中的情况与地质调绘及钻探揭示该段断裂构造及地下水发育情况相符。

地质钻探验证可知, 钻探揭示地质情况与物探成果反映物探异常带基本一致, 无人机地空时频电磁物

探具有较高的准确性。

### 3 结论

西渝高速铁路天坪梁隧道进行无人机地空时频电磁物探, 并采用地面大地电磁物探(EH4)和地质钻探进行了验证, 得出的结论如下:

(1) 无人机地空时频电磁物探能够较好地反映地下电性结构, 能够有效地探测地下各类地质体和隧道地质条件。

(2) 无人机地空时频电磁物探方法不受地形、地貌的限制, 能够极大地提高勘察效率, 节约勘察成本, 且勘察成果具有较好的可靠性及准确性, 值得在复杂艰险山区铁路隧道勘察中推广。

(3) 目前隧道勘察中采用无人机地空时频电磁物探尚处于起步阶段, 需进一步研究提高多功能地空电磁探地系统续航时间、搭载重点、发射频点, 以实现更高效、更高精度的探测。

## 参考文献:

- [1] 李坚. 铁路隧道物探模式探讨[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(2): 63-68, 103.  
LI Jian. Discussion of Geophysical Exploration Pattern for the Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(2): 63-68, 103.
- [2] 郝明, 李志华. 物探技术在越岭隧道选线中所发挥的作用[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(8): 13-17.  
HAO Ming, LI Zhihua. Role of Geophysical Prospecting in Route Selection of Watershed Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(8): 13-17.
- [3] 韩松, 刘黎东, 张连伟. 综合物探技术在铁路隧道勘察中的应用研究[J]. 铁道勘察, 2010, 36(5): 27-30.  
HAN Song, LIU Lidong, ZHANG Lianwei. Discussion on Applications of Comprehensive Geophysical Technique in Railway Tunnel Survey [J]. Railway Investigation and Surveying, 2010, 36(5): 27-30.
- [4] 徐毅, 郑国胜, 朱琦, 等. 地空频率域电磁探测方法在隧道勘察中的应用[J]. 科技与创新, 2019(13): 150-152.  
XU Yi, ZHENG Guosheng, ZHU Qi, et al. Application of Electromagnetic Detection Method in Ground-air Frequency Domain in Tunnel Exploration [J]. Science and Technology & Innovation, 2019(13): 150-152.
- [5] 李辉, 杨曦, 刘跃成, 等. 地空协同时频域电磁探测技术在深埋长隧道地质勘察中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(7): 277-279.  
LI Hui, YANG Xi, LIU Yuecheng, et al. Study on the Application of Ground-air Cooperative Time-frequency Domain Electromagnetic Detection Technology in Geological Exploration of Deep-buried Long Tunnels [J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition), 2019, 15(7): 277-279.
- [6] 黎东升, 腾飞, 周海根. 西渝高铁安康至重庆段天坪梁隧道地空电磁法勘探技术报告[R]. 吉林: 吉林大学, 2021.  
LI Dongsheng, TEN Fei, ZHOU Haigen. Technical Report on Ground-air Time-frequency Electromagnetic Method of Tianpingliang Tunnel of Xian-Chongqing High-speed Railway [R]. Jilin: Jilin University, 2021.
- [7] 李欣, 李成龙, 杜宇本, 等. 斜孔勘探技术在西渝高速铁路采空区勘察中的应用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 67-70.  
LI Xin, LI Chenglong, DU Yuben, et al. Application of Inclined Hole Exploration Technology in Goaf Investigation of Xi'an-Chongqing High-Speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 67-70.
- [8] 崔志强, 胥值礼, 李军峰, 等. 无人机航空物探技术研发应用现状与展望[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(6): 740-745.  
CUI Zhiqiang, XU Zhili, LI Junfeng, et al. The R & D Application of UAV Airborne Geophysical Survey and Its Development Trend [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38(6): 740-745.