

广西地方标准

《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》

编制说明

二〇二四年九月

目 录

一、任务来源、起草单位和主要起草人.....	1
二、制定标准的必要性和意义.....	2
三、主要起草过程.....	5
四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规的关系，与有关国家标准、行业标准的协调情况.....	8
五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、试验验证的论述.....	10
六、重大分歧意见的处理依据和结果.....	52
七、标准实施的措施.....	52
八、其他应当说明的事项.....	53

一、任务来源、起草单位和主要起草人

(一) 任务来源

根据《广西壮族自治区交通运输厅关于下达 2022 年度广西交通运输标准化项目计划的通知》(桂交科教发〔2022〕27 号),《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》列入 2022 年度广西交通运输标准化项目计划,项目编号为 2022-24。根据《广西壮族自治区市场监督管理局关于下达 2022 年广西地方标准制修订项目计划的通知》(桂市监函〔2022〕1903 号),由广西壮族自治区交通运输厅提出,广西交通设计集团有限公司、山东大学、广西龙马高速公路有限公司、广西新发展交通集团有限公司共同起草的广西地方标准《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》被批准立项为广西地方标准,项目编号为 2022-1479。

(二) 起草单位和主要起草人

广西地方标准《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》项目任务下达后,广西交通设计集团有限公司成立了标准编制工作组,制定了标准编写方案,明确任务职责,确定工作技术路线,开展标准研制工作,具体标准编制工作由广西交通设计集团有限公司、山东大学、广西龙马高速公路有限公司、广西新发展交通集团有限公司相关人员配合。

本标准负责起草单位:广西交通设计集团有限公司

本标准参与起草单位:山东大学、广西龙马高速公路有限公司、广西新发展交通集团有限公司。

本标准主要起草人:孙怀凤(项目负责人)、毛承英、刘东、蓝日彦、李敦仁、叶琼瑶、黄显全、苏伟胜、张诺亚、邓胜强、周小生、赖增伟、柳尚斌、李洋溢、邹前、李宗文、刘锐、唐正辉、李祖能、徐龙旺、郑梓强、林炳臣、贤有汞、甘力、姚宇洪。

本标准编制分工：

1) 广西交通设计集团：编制总负责，制定工作大纲和编制大纲；

2) 山东大学：负责整个项目的技术及组织协调工作，调研半航空瞬变电磁法国内外研究现状、技术应用，负责编制半航空瞬变电磁法术语和定义、基本规定、技术设计、数据质量评价、附录；

3) 广西龙马高速公路有限公司：协助制定工作大纲和编制大纲，编制半航空瞬变电磁法野外数据采集、数据处理与解释；

4) 广西新发展交通集团有限公司：协助制定工作大纲和编制大纲，编制半航空瞬变电磁法数据预处理、报告编写。

二、制定标准的必要性和意义

峰丛洼地遍布广西全区，岩溶强发育，地质条件非常复杂。在隧道掘进施工中，突水、突泥和塌方等地质病害易发常发，这些地质病害往往与地质构造、软弱结构面、岩溶发育带等不良地质要素相联系，因此如何在勘察、设计阶段，查明这些不良地质要素，是隧道前期地质勘探中的工作重点。尽可能详细的地质资料除对隧道选线提供支持外，对隧道施工过程中可能遇到的主要地质病害，有针对性地进行提前支护设计或者施工前有预案，减少工程建设造价，提高施工进度，确保项目建设和运营安全等方面都具有十分重要的现实意义。

公路隧道勘察通常分工勘、初勘、详勘三个阶段，主要方法包括除收集已有地质资料外，还可以使用地质调绘、钻探、物探三种主要方法。

地质调绘是隧道工程地质勘察中最基本的勘察方法，运用地质、工程地质理论及有关学科知识对地质体、地质现象进行详细观察描述，以查明隧址区工程地质条件的空间分布和各要素之间的内在联系，并按照精度要求将它们如实地反映在一定比例尺的地形底图上。它具有经济、快速、有效等特点，是其他勘察工作的基础和依据，尤其是在岩溶地区公路工程地质勘察中，应主要查明

该地区的地质岩性、地质构造、岩溶地下水状况、岩溶发展状况等，是岩溶地区公路工程地质勘察工作的关键。工程地质调绘和岩溶地质调查，自始至终应贯穿地质选线理念。然而，地质调绘对于覆盖层厚、基岩露头少的路段，无法通过地面调查获得准确地质信息，难以发现隐伏地质构造。即使基岩露头多的路段，地表地质情况并不能代表隧道围岩情况，尤其是对于一些埋深大的隧道尤为突出。

钻探是隧道勘察必不可少的手段，其最大优势是直接揭露钻孔位置地层分布、岩体风化破碎程度、地质构造发育情况等。然而，该方法成本高、效率低，受交通、地形等限制，隧道勘察一般仅布置少量钻孔，在地层简单，分层性好，地形起伏小的隧道区，少量钻孔尚可基本查明隧道工程地质条件，但长大深埋隧道往往地质条件较复杂，钻孔往往仅为一孔之见，并不能简单地连成连续的地质剖面。对于地形复杂的区域，钻探设备无法到达，往往无法实施。

物探方法因效率高、成本低等优点广泛用于隧道勘察。它凭借仪器观测地球物理场的变化，以查明地下的地质问题，而并非直接观测研究地表出露的地质构造和岩(矿)体。目前，隧道物探勘察主要采用地面物探方法（包括高密度电法、电测深法、充电法、浅层地震法、电磁法等）和井中物探方法（声波测井、钻孔电视和CT等）。与钻探类似，对于地形复杂的区域，物探设备同样无法到达，也无法实施。

复杂地形隧道勘察已经成为现在区内高速公路等交通基础设施建设的亟需解决的关键难题。

无人机载半航空瞬变电磁是一种新兴的物探方法，该方法通过无人机挂载接收探头在隧道线位上方飞行获取数据，不需要操作员和设备到达复杂地形的山上，为复杂地形隧道勘察提供可行性解决方案。

半航空瞬变电磁，是一种将瞬变电磁的发射设备置于地面，通过飞行器挂载接收装置在空中进行连续数据采集的地球物理方法。该方法最早由

Nabighian 在其撰写的《勘查地球物理电磁法》提出，但由于航空瞬变电磁在西方的快速发展，该方法并没有引起重视，相关的研究较少。直到 20 世纪 90 年代才陆续出现不同的半航空瞬变电磁系统用于开展试验和对比研究。

Nittinger 和 Cherevatova 等在 DESMEX 项目中提出了一种新型的利用地面电偶源进行信号发射，使用直升机搭载三轴线圈和磁通门进行电磁数据采集的半航空频率域电磁勘探系统，并于 2018 年在德国 Saxothuringian 的古代锑开采区进行了勘探实验。

嵇艳鞠等利用 BP 神经网络对电性源半航空瞬变电磁数据进行电阻率反演成像研究，李貅等研究了电性源半航空瞬变电磁逆合成孔径成像方法，张莹莹等定义了单辐射场源以及多辐射场源电性源半航空瞬变电磁全域视电阻率，并根据等效导电平面原理，讨论了多场源下半航空瞬变电磁法的快速成像方法，戚志鹏等提出了接地导线源半航空瞬变电磁 y 分量磁场的全域视电阻率定义。

在 2014 年举办的 EMIW 会议上，孙怀凤重点介绍了基于飞艇的半航空瞬变电磁试验；2018 年，孙怀凤和宿传玺以广西岩溶地区为背景，利用三维时域有限差分法进行了浅层岩溶半航空瞬变电磁响应规律和试验研究；孙怀凤和吴启龙在 2019 年研究了不同接收参数下半航空瞬变电磁的响应规律，并将该方法成功应用至广西壮族自治区贺州至巴马高速公路（都安至巴马段）达默隧道工程；陈成栋和孙怀凤在 2020 年基于瞬变电磁二次场在不同地电介质下的衰减性质给出了半航空瞬变电磁探测区域划分函数，指导野外勘探方案设计。

该方法在国内理论研究和装备的研究进展相对缓慢，直到近几年才有发展，我国学者先后使用无人飞艇、无人机等开展相关的试验研究。但该方法的应用缺乏行业规范，现场实验和工程应用几乎空白。

自 2018 年开始，广西交通设计集团有限公司联合山东大学、广西龙马高速公路有限公司、广西新发展交通集团有限公司先后在都安至巴马高速公路、来宾至都安高速公路、天峨至巴马高速公路等开展试验、测试与应用工作。

半航空瞬变电磁探测的提出及成功应用，突破了国外航空物探的技术壁垒和高额门槛，填补复杂地形无可利用勘察手段的国际空白，开辟了极具“中国特色”的工程勘察创新道路。该方法在多条高速公路两阶段设计成功应用，多处大型岩溶的揭露强有力地验证了半航空瞬变电磁法在复杂地形区域岩溶隧道勘察的有效性、准确性和极高的工程应用价值，为隧道安全建设保驾护航。

截至目前该项技术已在全国 40 余条复杂地形隧道推广应用，取得了显著的社会和经济效益。未来该方法有望结合国家重大需求，应用于地质灾害预测、矿产资源勘察、水文地质调查、环保监测等其他领域，市场前景广阔、推广潜力巨大。

三、主要起草过程

（一）成立标准编写组，召开编写组第一次工作会议

本标准根据各单位承担内容、编制任务等成立标准编写组，并组织编写组召开了第一次工作会议，主要形成了以下内容：

1. 主编单位筹建编写组，明确主编人员和参编人员的职责和分工。
2. 建立编写单位内部审查制度。
3. 学习有关政策法规和标准化制度文件。
4. 研究起草标准工作大纲和编制大纲。
5. 形成第一次工作会会议纪要。

（二）收集整理文献资料

本标准起草人员的前期研究工作分为资料调查与研究、工程案例及数据收集检验、总结完善 3 个步骤进行：1、调研了国内外大量的半航空瞬变电磁探测的基础理论研究、数据处理方法、正反演算法、公路隧道的工程实际案例和相关的标准及研究成果；2、搜集了国内及广西地区部分公路隧道半航空瞬变

电磁探测项目的案例及数据资料；3、对搜集到的理论研究资料和工程案例资料进行分类整理和研究，为下一步的规范研究提供必要的指导和技术支撑。标准编制工作组收集了半航空瞬变电磁法应用的相关文献资料。主要有：

- GB/T 14499 地球物理勘查技术符号
- GB/T 50585 岩土工程勘察安全标准
- CH/Z 3001 无人机航摄安全作业基本要求
- DZ/T 0153 物化探工程测量规范
- DZ/T 0280 可控源音频大地电磁法技术规程
- DB45/T 2148 公路工程物探规范

殷长春. 航空电磁理论与勘查技术 [M]. 北京: 科学出版社. 2018.

陈成栋. 半航空瞬变电磁数据采集设计和数据校正研究 [D]. 山东大学, 2021.

张莹莹. 地空瞬变电磁法逆合成孔径成像方法研究 [D]. 长安大学, 2016.

Chen, C., Sun, H., 2020. Characteristic analysis and optimal survey area definition for semi-airborne transient electromagnetics. J. Appl. Geophys. 180, 104134.

Sun, H., Chen, C., Yang, Y., Lan, R., Deng, S., Li, D., 2022. Motion noise remove for secondary-field semi-airborne transient electromagnetic data. Journal of Applied Geophysics.

Huaifeng Sun, Nuoya Zhang, Dunren Li, Shangbin Liu, Qiongyao Ye, 2023 The first semi-airborne transient electromagnetic survey for tunnel investigation in very complex terrain areas, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 132, 104893

(三) 研讨确定标准主体内容

标准编制工作组在对收集的资料进行整理研究之后，标准编制工作组召开了标准编制会议，对标准的整体框架结构进行了研究，并对标准的关键性内容进行了初步探讨。经过研究，标准的主体内容确定为术语和定义、总则、基本规定，半航空瞬变电磁探测涉及的技术设计、仪器设备及使用维护、野外数据采集、数据质量评价、数据预处理、数据处理与解释、报告编写，以及附录等内容。

（四）召开大纲评审会、形成征求意见初稿

为确保本标准的编写工作有序开展，编写工作组在前期大量的研究工作的基础上，于2022年8月上旬完成了《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》的编制大纲和工作大纲，并经内部评审讨论后，于2022年8月28日召开了大纲外部评审会，评审会针对大纲共提出了15条建议和意见。根据大纲评审专家的意见，以修改完善后的大纲作为项目的工作指导，编写工作组开展了标准正式的编写工作，并于2022年12月下旬完成了工作组讨论稿。2023年3月15日召开征求意见初稿讨论会，对工作组讨论稿进行会审，根据会审意见修改后形成征求意见稿。

（五）开展征求意见，完善形成预审稿

为确保本标准的可行性和适用性，于2023年8月10日向社会公开征求意见，于2023年11月15日，完成征求意见工作，并对征集到的意见进行汇总处理。2023年11月20日，根据征求反馈的意见进行修改完善后形成预审初稿，并聘请专家进行审稿。2024年1月20日，按照审稿专家意见进行修改完善后形成预审稿。2024年2月29日，主编单位内部再次组织内审组对预审稿进行审查，项目组根据内审意见进行修改完善，形成最终预审稿。

（六）召开预审会，形成技术审查稿

2024年3月25日，组织专家召开预审会，项目组根据预审会专家意见修改完善后形成技术审查初稿。2024年5月16日，主编单位内部组织内审组对技术审查稿进行审查，项目组根据内审意见进行修改完善，形成正式技术审查

稿。

（七）召开技术审查会，形成报批稿

2024年8月22日，组织技术审查会，项目组根据预审会专家意见修改完善后形成报批初稿。

（八）标准发布

标准于2024年9月30日获广西壮族自治区市场监督管理局批准发布，并于2024年12月1日正式实施。

四、制定标准的原则和依据，与现行法律、法规的关系，与有关国家标准、行业标准的协调情况

（一）制定标准的原则和依据

本标准的编制遵循国家、行业和广西壮族自治区现行有关标准的规定。编写工作组充分调研了国内外及广西地区目前公路隧道应用半航空瞬变电磁探测的理论方法、实际案例、数据资料及研究成果，研究和分析了国内外及广西地区公路隧道半航空瞬变电磁探测的标准建设的现状，以及国内外半航空瞬变电磁法的理论研究、算法开发的发展趋势和该项技术的工程应用效果。经过编写工作组成员讨论，确定标准编制遵循以下基本原则：

（1）规范性原则

本标准是按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则第1部分：标准化文件的结构和起草规则》进行编写。

（2）科学性原则

本标准分析了国内外关于半航空瞬变电磁方法理论研究和工程应用的现状和特点，结合国内及广西地区公路隧道中半航空瞬变电磁法的实施现状，在此基础上对已发布的相关标准进行整理、归纳和分类，建立了科学、实用、合理的广西地区公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规范。

(3) 承接性原则

本标准术语、符号、条文尽量与相应国家、国际、行业和地方标准的规定内容相一致，条文未出现自相矛盾的地方。标准技术内容与国家、国际、行业和地方标准兼容，未出现冲突，保证了一致性。标准技术内容中引用其他标准时，已明确指出所引用标准的内容或名称，增强了标准的可读性和可操作性。

(4) 适用性原则

本标准的起草充分调研了国内外、广西壮族自治区地区半航空瞬变电磁方法的应用现状，征求了高校、公路管理、设计院、施工单位等领域的专家意见。编写组在此基础上进行过反复讨论和修改，编制此标准。标准内容针对性强，可操作性高，易于推广。

(二) 标准与现行法律、法规的关系，与有关国家、行业标准的协调情况

经查阅，目前在全国没有任何关于“公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规范”及类似的国家、行业、地方、团体标准。

目前现行的瞬变电磁规范仅为地面磁性源、地面电性源的瞬变电磁的行业和地方标准，分别为《地面电性源瞬变电磁法地球物理勘查技术规程》

(DB41/T 2106—2021)、《地面磁性源瞬变电磁法技术规程》(DZ/T 0187—2016)。半航空瞬变电磁探测属于地面发射、空中接收，与地面瞬变电磁法地面发射接收的探测模式不同，且针对隧道领域开展应用，参数设计与仪器设备技术要求也有所不同，地面瞬变电磁的相关规范无法指导在公路隧道工程中开展半航空瞬变电磁探测工作。《公路工程物探规程》(JTG/T 3222—2020)和《公路工程物探规范》(DB45/T 2148—2020)仅规定了地面瞬变电磁法的相关技术规范，并未有针对半航空瞬变电磁探测工作的有关技术规定，均无法指导在公路隧道工程中开展半航空瞬变电磁探测工作。

国外也未有针对此方法的国家、行业、地方、团体标准，仅有相关学术文献和专利进行研究成果阐述，规范性和适用性有待考量，仅能参考和借鉴，不

能作为标准使用。

本规范的发射源布设等方面的部分工作与可控源音频大地电磁发射源布设类似，可以参考《可控源音频大地电磁技术规程》（DZ/T 0280-2015）相关规定和技术要求。

标准编制组承诺：本标准的各项指标不低于国家强制性标准和国家推荐性标准，内容与现行的法律、法规及强制性标准无冲突。标准的编写符合 GB/T 1.1-2020 的要求。

五、主要条款的说明，主要技术指标、参数、试验验证的论述

（一）标准主要条款的说明

广西地方标准《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》主要章节内容包括：范围、规范性引用文件、术语和定义、符号、基本规定，探测技术设计、仪器设备使用及维护、野外数据采集、数据质量评价、数据预处理、数据处理与解释、报告编写、成果验收，以及附录等内容。

本标准的编制遵循国家、行业和广西壮族自治区现行有关标准的规定。编写工作组充分调研了国内外及广西地区目前公路隧道半航空瞬变电磁探测的实际案例、数据资料及研究成果，研究和分析了国内外及广西地区半航空瞬变电磁探测相关标准建设的现状，以及国内外半航空瞬变电磁法的发展趋势和新技术的应用状况。在此基础上结合广西地区公路隧道半航空瞬变电磁探测项目的工作经验，形成了广西地区公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规范。

1、标准名称

本标准名称为《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》，本标准名称一方面界定了其应用范围为公路隧道设计与施工阶段地质勘察，另一方面限定了其应用对象为半航空瞬变电磁探测技术。

2、范围

本条对半航空瞬变电磁探测的适用范围进行了规定。

峰丛洼地遍布广西全区，岩溶强发育，地质条件非常复杂。在隧道掘进施工中，突水、突泥和塌方等地质病害易发常发，这些地质病害往往与地质构造、软弱结构面、岩溶发育带等不良地质要素相联系，因此如何在勘察、设计阶段，查明这些不良地质要素，是隧道前期地质勘探中的工作重点。尽可能详细的地质资料除对隧道选线提供支持外，对隧道施工过程中可能遇到的主要地质病害，有针对性地进行提前支护设计或者施工前有预案，减少工程建设造价，提高施工进度，确保项目建设和运营安全等方面都具有十分重要的现实意义。

复杂地形隧道勘察已经成为现在区内高速公路等交通基础设施建设的亟需解决的关键难题。无人机载半航空瞬变电磁是一种新兴的物探方法，该方法通过无人机挂载接收探头在隧道线位上方飞行获取数据，不需要操作员和设备到达复杂地形的山上，为复杂地形隧道勘察提供可行性解决方案。半航空瞬变电磁相关研究及在复杂地形区域开展公路隧道勘察是主编、参编单位共同开展的研究课题，目前已经获得了初步成功，为了指导后续的应用与推广，拟计划编写该项规范。

3、术语和定义

为规范公路隧道半航空瞬变电磁探测工作过程中术语和定义的使用，本章对涉及的各项术语和定义做了详细的描述和规定。

第 3.3 条，定义了接收线圈的功能，半航空瞬变电磁法的接收线圈通常为多匝空心线圈。

第 3.1.14 条，定义了姿态，该定义描述了线圈坐标系与地理坐标系间的相对关系，包括线圈旋转位置的三个自由度，即线圈坐标系与地面惯性坐标系

之间的夹角，可用横滚角、俯仰角、偏航角三个角表示。

4、一般要求

第 4.1 条：为保证探测工作质量，确保探测数据能够准确反映测区地电分布，确保半航空瞬变电磁法在该测区的可行性和有效性，规定了公路隧道半航空瞬变电磁探测中探测目标体、测区探测环境应具备的必要条件。

第 4.2 条：由于广西多数山区属于无人区，不具备踏勘和开展地面物探的条件，地质资料空白，可采用不受地形条件限制的半航空瞬变电磁法获取地下电性结构分布。为确保半航空瞬变电磁法在探测区域具备可行性，探测结果具备有效性，并可指导勘察设计及施工，在不明确该方法是否合适或附近无类似案例的情况下，建议在开展探测工作前进行方法试验，评估方法的可行性、有效性，并开展相应的现场试验工作。

第 4.3 条：规定了测区和测线设计的基本原则，测区和测线设计需根据隧道探测区域、地形条件、探测任务等进行合理划分，以满足探测需求。

第 4.4 条：半航空瞬变电磁探测常规的发射源布设方案包括接地长导线源和大回线源，大回线源需要在平坦的地形条件下布设，广西高速公路隧道修建的区域多为地形极端复杂、岩溶遍布的地区，在地形复杂区域优先选择接地长导线源；因此本文件仅考虑接地长导线源的发射源布设工作，若选用大回线源，建议参考本文件 5.3 中的相关规定，在现场开展相关的试验工作，确认可用后再开展探测工作。

第 4.5-4.6 条：为确保探测工作安全推进，在开展野外探测试验前期需要依照附录 A 的规定判断仪器设备可以达到野外工作标准方可使用；参与探测工作的人员需明确与本项工作有关的各项技术要求，合理统筹安排探测工作；开展探测工作前必须要进行必要的安全检查和仪器检查测试，最大化降低作业过程中的安全隐患。

第 4.7 条：半航空瞬变电磁探测工作大多为野外作业，自然条件比较差，

加之探测过程中需要使用高压电等，安全隐患众多。电池、电瓶等废弃物以及使用无线电通信工具会对环境造成一定的污染。因此，野外探测工作中应遵守国家有关安全生产法规和环境的法规，注重安全生产和环境保护。

5、探测技术设计

第 5.1 节：开展公路隧道半航空瞬变电磁探测工作前应尽可能多的收集必要资料，以保证探测方案设计的合理性，充分了解测区水文地质概况、已有的物化钻探资料，对后期数据处理、地质解释、成果验证、结论建议等提供可靠依据。本条列出了开展探测工作前需要收集的资料。

第 5.2 节：野外探测工作开展前需进行踏勘工作，本条规定了踏勘工作的主要内容，并在评估并确认方法有效性的基础上，确定测区范围、测线间距、发射源位置、工作参数、压制电磁干扰的措施等，涉及无人机飞行区域与权限，还应了解测区空域管理的禁飞区和限飞区、无人机作业及保障条件等，最后根据上述资料编写正式的工作设计书。

第 5.3 节：为确保半航空瞬变电磁探测工作在公路隧道设计和施工过程中具备指导性和有效性，能够依据探测结果实现目标异常探测、规避灾害风险源、指导隧道设计和施工方案的调整，需开展方法可行性、有效性分析，必要时还应进行现场试验，本节规定了开展方法试验的基本规定。

第 5.4 节：为确保半航空瞬变电磁探测野外探测工作质量，提高工作效率，达到目标异常有效探测的目的，需对测区进行合理设计，本节对测区范围确定原则、测区分区、测线间距确定等方面的详细要求进行了明确。

第 5.5-5.6 节：发射端和接收端是半航空瞬变电磁探测工作设计的主要内容，合理的发射和接收设计能够提高探测结果质量和工作效率。发射端需具备良好的接地条件，发射线源设计需同时满足探测深度和地形的要求，以保证足够的信噪比。接收端需依据测区位置和工作目的进行合理规划，从航线设计、飞行高度、飞行速度、无人机起降点、导航定位等工作进行设计，以确保无人机在接收

端能够高效开展探测工作，且探测结果有效合理。

第 5.7 节：半航空瞬变电磁探测结果需满足一定的工作精度，以确保探测结果的准确性，本节规定了工作精度分级及误差要求。

第 5.8 节：完成前期准备和测区设计的相关工作后，需开展野外探测工作的设计书撰写，有计划、有指导地开展野外探测工作，本节规定了设计书编写的具体内容和基本要求。

6、仪器设备使用及维护

为保证野外探测工作中安全作业，需对仪器使用和维护做出具体要求，包括仪器设备的主要技术指标、仪器的管理与维护、仪器安全使用等。主要包括野外探测工作时发射装置、接收装置、无人机使用、维修、保养需遵循的规范和要求。

7、野外数据采集

第 7.1 节：开展野外数据采集工作前，需在作业现场开展相应的准备工作。包括电阻率参数确定、飞行现场管理、飞行环境、噪声调查和仪器准备。

第 7.1.1 条：为确保后期数据解释和反演结果的准确合理，应在条件允许的情况下对测区及周边主要地质体开展电阻率参数测定，测定数量应达 3 组以上。测定方法可选用标本、露头测定或小极距测深，以及电测井和井旁测深等方法。

第 7.1.2 条：本条规定了飞行现场的布设和安全规定，无人机作业过程应严格按照《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》的有关规定执行。

第 7.1.3 条：本条规定了野外作业需收集的环境条件。

第 7.1.4 条：为定性了解工作区内噪声分布规律，设计抗噪措施，提高数据质量，提高数据解释精度，规定了公路隧道开展半航空瞬变电磁野外探测工作时需进行噪声调查，并明确了噪声调查的内容。

第 7.1.5 条：本条规定了开展半航空瞬变电磁野外探测工作时发射端和接

收端布设、野外工作使用的仪器设备的相关准备工作。

第 7.2 节：保证野外探测工作的顺利、有序开展，确保安全生产，需对人员进行培训，仪器使用需要合乎规范，现场工作需及时做好记录。本节规定了公路隧道开展半航空瞬变电磁野外探测工作时的基本工作内容，以及参与人员与仪器使用的要求。

第 7.3 节：开展半航空瞬变电磁野外探测工作时，数据采集工作完成后须对数据进行质量检查，确保数据质量可用于后续的处理和解译工作，其中规定了重复性检查、连续性检查的相关工作内容与技术指标要求。

第 7.4 节：开展探测工作时，需要把生态环境保护理念贯穿于项目立项、设计、实施、恢复和验收全过程、各环节，充分考虑“地质、经济、技术、环境”四要素及区域资源环境承载力，对探测工作可能造成的生态环境影响进行评估，需进行绿色勘查作业。本条规定了公路隧道开展半航空瞬变电磁野外探测工作时需执行的环保措施。

第 7.5 条：为确保人员和设备的安全，规定了公路隧道开展半航空瞬变电磁野外探测工作时需采取的必要安全措施，包括仪器的安全使用与维护、无人机安全驾驶、应急情况处置等。

8、数据质量评价

公路隧道半航空瞬变电磁数据采集工作完成后，需对质量检查合格的数据进行质量评价，进一步评估其数据质量是否可用于后续的数据处理和解释。规定了数据 GNSS 轨迹评价和数据连续性评价的质量检查标准和内容。

9、数据处理与资料解释

第 9.1 节：公路隧道半航空瞬变电磁数据完成质量检查和评估后，合格的数据需通过去噪、叠加、抽道、积分完成数据预处理，提高数据质量，方可用于数据处理和成像解释工作。本章规定了预处理涉及的主要步骤和每一步的具

体实施方法，包括天电噪声、运动噪声的去除，数据叠加和时窗积分。

第 9.1.2 条：天电主要由甚低频电磁波组成，其产生的原因主要有两个方面：太阳的磁暴和赤道附近的雷电作用。由于天电噪声在时间域半航空瞬变电磁数据中持续时间短和信号强度大的特点，因此其无论是沿着测线还是在某测点的数据上均表现出“毛刺”的特征，而 α -trimmed 均值滤波器作为一种非线性滑动窗口滤波器，其可以在保证数据完整性的前提下对数据中的“毛刺”进行有效去除。

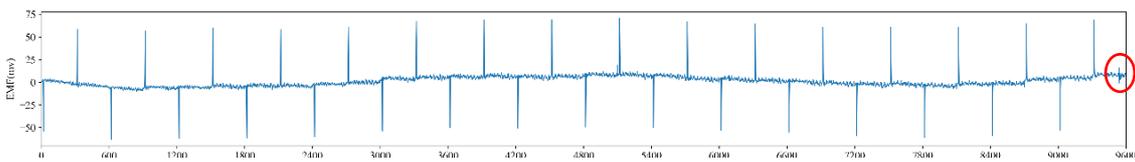


图 1 天电噪声（图中红圈处）

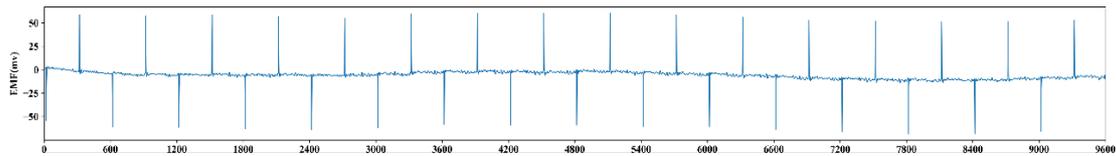


图 2 α -Trimmed 均值滤波器滤波后数据

第 9.1.3 条：在半航空瞬变电磁数据采集过程中，接收线圈是通过一定长度（5m~10m）的软绳悬吊在无人机下方，由于飞行时无无人机的抖动以及自然风力的影响，接收线圈会在空中产生自旋以及偏转运动，即运动噪声，从而使晚期采集数据偏离于 0 并导致较大的数据误差，影响后续的数据成像及解释工作。运动噪声在频率上表现为低频，且与有效信号频段相比，区别较大。常用的小波分解和多项式拟合去噪方法对纯二次场数据进行去噪，有效恢复原始数据状态。

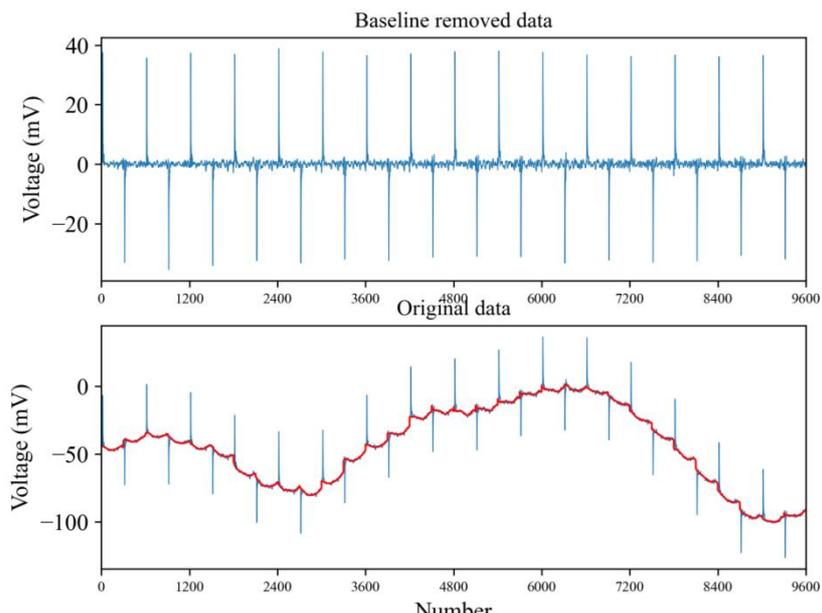


图 3 运动噪声去除后数据（上）、以及原始数据（下）对比图

第 9.1.5 条：由于半航空瞬变电磁数据可近似看作单点多次采集，多次数据采集的目的是后期进行数据叠加，从而压制数据中含有的随机噪声。数据叠加是通过对采集到的多周期数据按照叠加原理实现的。具体参数和实现过程应根据发射波形、发射基频、采样频率等参数进行设计。

第 9.1.6 条：时窗积分的目的是在时间道上获得合理的瞬变电磁衰减曲线并进行数据处理。半航空瞬变电磁数据可根据探测需求选择不同间距的时窗进行积分，参数设置根据实际采集参数设置进行确定，包括开始时间和结束时间以及积分时窗个数。

第 9.1.7 条：由于地形变化往往会引起电性剖面的畸变，甚至产生假异常。因此，仅在地形极其复杂的条件下考虑地形校正。可通过激光雷达等测绘技术获取测区地形数据，通过数值建模及三维正演计算地形引起的异常响应，在反演过程中通过三维带地形反演以去除地形效应，获得地下异常体真实响应，有助于提升数据解释的准确性。若地形条件一般，可不进行地形校正。

第 9.2-9.3 节：为确保半航空瞬变电磁探测采集的数据可用于公路隧道设计和施工两阶段的技术指导，需对数据进一步可视化处理，本章规定了数据处理与解释包含的主要内容和基本原则，包括视电阻率计算、数据成像，以及根

据数据和图像进行资料解释、定性定量判断。

10、成果报告编写

为系统总结探测工作及探测成果，需要在完成野外探测工作和数据处理与解释后撰写成果报告，撰写成果报告前需要进行野外工作验收，验收合格后方可撰写报告。本章规定了成果报告的编写要求、报告主要内容大纲、需包含的必要图件等。

11、附录

附录文件主要为半航空瞬变电磁探测工作装置、仪器技术指标、最优探测区域设计方法、视电阻率计算、野外工作记录及质量评价、野外工作验收、成果报告编写等提供参考资料性文件，包括半航空瞬变电磁探测仪器设备主要技术指标（规范性）、最优探测区域设计方法（资料性）、设计书编写内容与要求（资料性）、飞行数据野外记录表（资料性）、飞行数据质量评价（资料性）、单辐射场源半航空瞬变电磁探测法视电阻率计算公式（资料性）、野外工作验收要求及判定标准（资料性）、成果报告主要内容（资料性）。

（二）半航空瞬变电磁探测主要技术指标、参数试验验证

目前针对复杂地形条件下半航空瞬变电磁法的理论研究、软件开发、硬件研发等工作还处于起步阶段，国外由于航空瞬变电磁发展成熟，半航空瞬变电磁推广应用较少，相关研究较为匮乏。结合我国资源勘探和基础设施建设逐渐向着地形极端复杂的西南地区推进，开展半航空瞬变电磁法的方法研究和应用推广势在必行。编写组成员针对半航空瞬变电磁理论、方法、软件、硬件的关键技术开展了大量的调研与研究，形成了系统性的技术成果体系。

（1）半航空瞬变电磁探测最优探测区域设计理论

为合理规划探测区域、满足勘察任务需求，提出基于衰减率函数的半航空瞬变电磁有效观测区域设计方法，建立了包含收发距、目标埋深、背景电阻

率的最优探测区域设计方程，实现半航空瞬变电磁观测系统科学、合理设计。

与可控源音频大地电磁或长偏移距瞬变电磁在远区观测不同，半航空瞬变电磁法采用较小的偏移距获得较大的信噪比。针对半航空瞬变电磁地面长导线源激发、空中接收的新型装置形式，通过半航空瞬变电磁正演理论获取地下感应电流场分布，并进行 footprint 和敏感度分析，提出了数据能量比定义，评估数据质量。同时，研究了该勘探装置形式下的主要有效探测区域以及其不同衰减时间、不同偏移距和不同接收点相对源位置下的分布特点和规律。

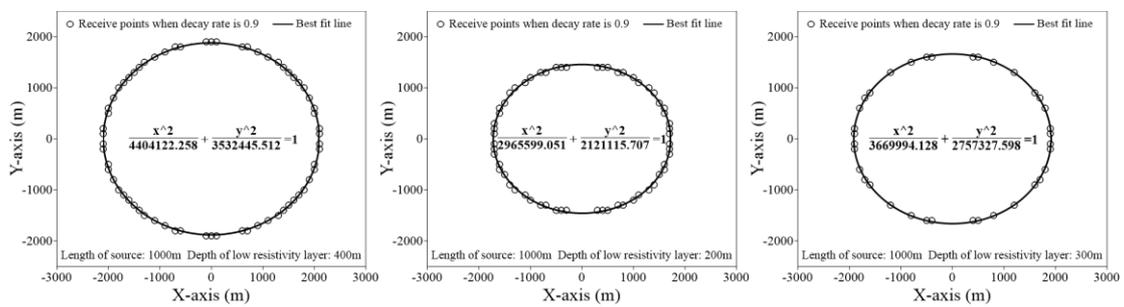


图 4 对照组 1: 研究不同低阻层埋藏深度下对边界分布的影响

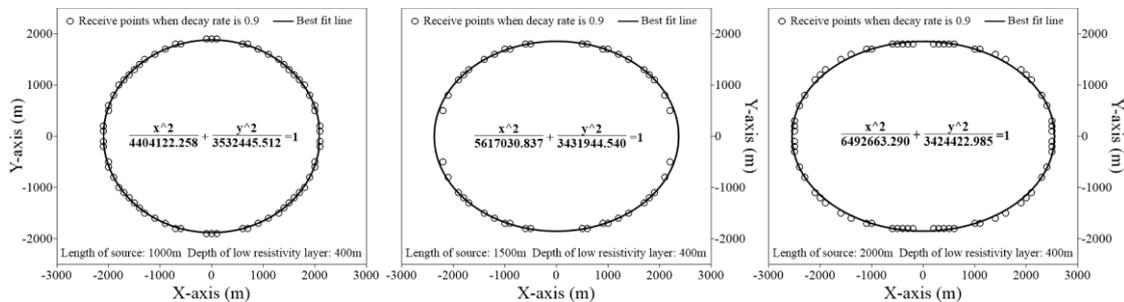


图 5 对照组 2: 研究不同导线源长度下对边界分布的影响

此外，根据瞬变电磁二次场的衰减原理，利用定义的标准衰减率进行最优观测区域的划分，提取区域边界分布信息，利用数值模拟计算不同埋藏深度和不同导线源长度下的边界分布，并采用最优曲线进行拟合，经总结归纳得到勘探区域边界方程划分适合与非适合勘探区域并总结归纳得到区域边界分布方程对观测区域进行优化设计，建立了包含收发距、目标埋深、背景电阻率的最优探测区域设计方程（公式(1)），实现半航空瞬变电磁观测系统/科学、合理设计。

$$\frac{x^2}{(1100 + 2h)^2 + L^2} + \frac{y^2}{(1100 + 2h)^2} = 1 \quad (1)$$

该研究成果可支撑 6.4-6.6 节的探测区域设计和发射与接收设计的相关技术要求，以及附录 C 中最优探测区域设计的基本规定。

(2) 基于 BEDS-FDTD 半航空瞬变电磁快速正演算法

理论研究方面，为解决半航空瞬变电磁快速正反演计算的问题，开发了半航空瞬变电磁三维快速正演方法，针对半航空瞬变电磁非紧凑观测系统带来的网格数量多、复杂地形剖分难度大、计算时间长等问题，研究了隐式时域有限差分正演方法，包括全波形激励方法、卷积完全匹配层吸收边界、直接拆分算法等。

采用 Centered difference (CD) 对 Maxwell 偏微分方程进行空间离散，采用一阶 Backward Euler (BE) 方法对常微分方程进行时间离散，使时间步长突破 CFL 限制；引入 Direct Splitting (DS) 策略将电磁场分量解耦，并将大型稀疏矩阵降阶和重构为一系列低阶且主对角占优的三对角矩阵，加快方程求解效率；而且，为了减少模型尺寸，针对上述改进的全新方程，本研究采用双线性变换方法 (bilinear transform, BT) 推导了复频率偏移完全匹配层 (complex frequency shifted perfectly matched layer, CFS-PML) 吸收边界，形成瞬变电磁三维正演全新算法：BEDS-FDTD。采用 von Neumann 方法测试了新算法在有耗介质中、非均匀时间步长下的稳定性。为验证算法的可行性和计算精度，将 BEDS-FDTD 算法用于模型实验，并将模拟结果与层状模型的半解析解进行了对比，BEDS-FDTD 算法的计算精度能够满足数值模拟和工程应用的需要；同时对新算法的计算效率进行了分析，当采用 Tesla A100 GPU 计算时， $50 \times 50 \times 50$ 网格数目的模型仅用 10s，即使网格数目增加到 $200 \times 200 \times 200$ ，也仅需 224s (如下图所示)。

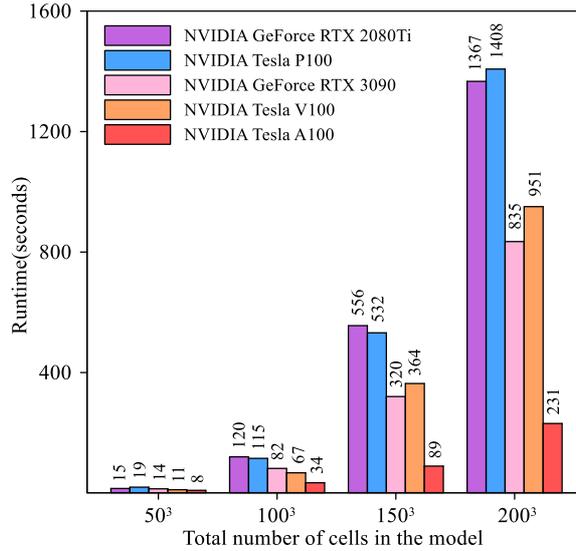


图 6 BEDS-FDTD 算法计算速度对比

该研究成果可支撑第 11 章数据处理与解释的视电阻率计算和第 6 章方法试验中探测方法可行性、可行性分析及正演计算的相关内容，可利用该算法对探测区域工况进行快速正演模拟计算，评估半航空瞬变电磁在该工况下的可行性及有效性。

(3) 基于 ARM 双 MCU 架构的半航空瞬变电磁专用接收系统

目前国内缺乏半航空瞬变电磁探测的专用接收系统，编写组成员近年来在半航空瞬变电磁探测硬件研发取得了一系列成果。研发的半航空瞬变电磁接收机采用全时域数据采集方式，高速、连续不间断地采集信号。为满足二次场弱信号的测量，开发了高稳定性、高分辨率、高信噪比以及高精度同步等特性的接收系统。

研制了双 CPU 架构的高采样率、全波形半航空瞬变电磁采集系统，采用 256ksps 采样率进行高质量数据采集，具备 24bit 的 ADC 采样位数，提高整体数据的采样精度；使用 DMA 和 SDRAM 技术实现高速采样和数据存储，搭载 FATFS 文件系统，实现对 SD 文件创建，读写等功能；数据采集完成后设计通过 WIFI/USB2.0 等方式进行数据传输；采用电池充电式供电模式，使用低噪声、高共模抑制比的线性电源进行系统供电，并配备 LED 电池电量显示。系统数据采集时，为确保收发系统信号精准同步，使用 GPS 秒脉冲的方式进行时间戳校

准同步。为保证用户实时把控接收机状态，加入系统状态 LED 指示灯，分别用来指示储存状态、SD 卡状态、电源供电是否正常，PPS 秒脉冲是否正常，WIFI 状态等。主要技术参数见表 1。



图 7 接收机主板



图 8 接收机主机

表 1 接收机主要技术参数

指标	参数
采样类别	连续采集
采样速度/位数	256ksps/24bit
噪声水平	<10 μ V/RMS
同步方式	PPS 秒脉冲
续航时间	\geq 8h
USB 传输速度	1MB/s
动态范围	60dB
重量	0.65kg

由于半航空瞬变电磁二次场信号幅值相对较小，这就要求接收线圈需要较高的信噪比。研制了多层交错式瞬变电磁差分接收线圈，使用多层交错式差分绕制方法来提高信噪比和线圈的灵敏度，通过特定绕制方法提高空心感应线圈的带宽。通过调节线圈阻尼来降低二次场信号的失真度和提高动态跟随特

性，动态跟随特性的提高有助于降低信号延时，增加探测精度。为解决模拟信号远距离传输问题，采用全差分传输方式来降低共模信号的干扰。融合 GPS、北斗定位和高精度陀螺仪实时获取线圈姿态，可实现线圈状态的数字重现。



图 9 接收线圈姿态及调理电路模块实机

表 2 接收线圈主要技术参数

指标	参数
有效面积	11, 200m ²
系统带宽	≥40kHz
姿态系统	9 轴陀螺仪/气压/温度
姿态/GNSS 采样率	5Hz
定位精度	2m
动态范围	60dB
噪声水平	<3nV/sqrt (Hz)
灵敏度	>0. 1mV/nT

地空电磁法数据采集正确性的关键需要发射系统和接收系统必须高精度同步。相比于时钟同步和有线连接同步技术，PPS 秒脉冲同步技术具有精度高和无连线的优点。开发了通用电流记录单元，采用 PPS 秒脉冲同时驱动发射的开启和接收的采集。电流同步单元中可通过 PPS 秒脉冲实现绝对时间戳与接收系统数据对表，实现收发数据的精准匹配，电流同步单元使本技术涉及的半航空瞬变电磁接收系统兼容目前市面已有的大功率瞬变电磁发射系统。

研发的半航空瞬变电磁接收系统及电流同步器的相关硬件技术成果支撑了第七章及附录 B 中关于仪器技术指标选取、使用与维护的相关内容及相关规定。

表 3 电流同步器主要技术参数

指标	参数
采样速度/位数	256ksps/24bit
电流最小分辨率	<1mA
测量量程	±60A
电流测量精度	≤±1%

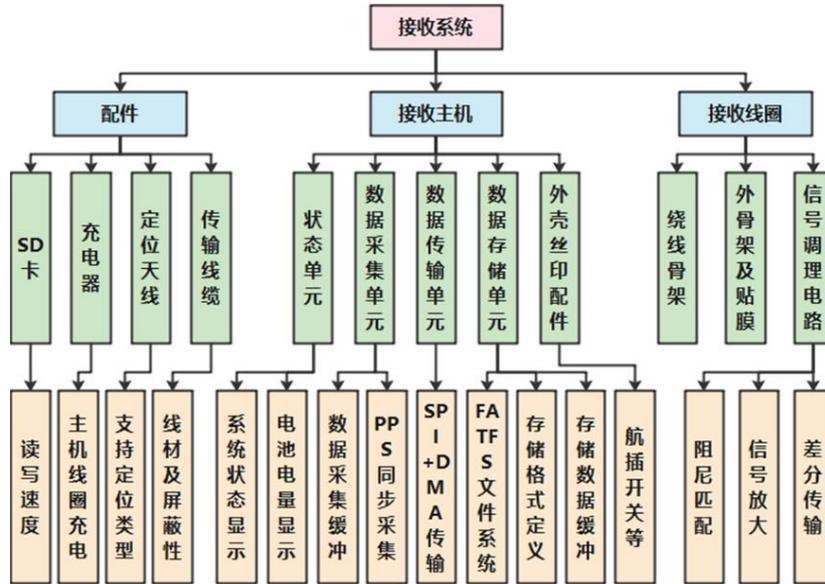


图 10 半航空瞬变电磁接收系统功能及组分

(4) 半航空瞬变电磁数据预处理基本流程及软件平台

由于半航空瞬变电磁法将接收线圈通过无人机悬吊在空中进行数据采集工作，相比于传统的地面瞬变电磁法，观测数据中的噪声成分更为丰富，例如天电噪声、线圈运动姿态噪声以及航速变化和无人机飞行震动产生的噪声等。同时，由于半航空瞬变电磁法的装置形式以及理论方法与其他电磁勘探类方法存在巨大的差异，因此亟需从半航空瞬变电磁数据的最原始数据出发，针对数据包含的噪声进行噪声去除及数据校正等工作，之后对处理后的电磁数据进行数据质量评价和筛选工作，并最终综合上述数据处理流程形成针对半航空瞬变电磁的数据校正处理基本流程，如下图所示，并针对此预处理流程开发了航线自动规划软件、基于 PyQT 架构的数据预处理软件平台。

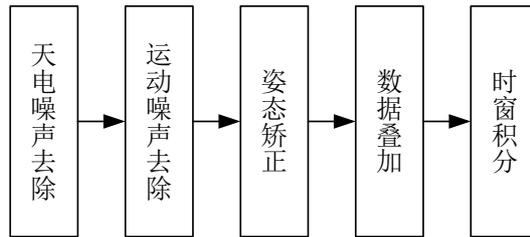


图 11 半航空瞬变电磁数据预处理基本流程

航线自动规划软件可依据测区地理特征自动生成航线 KML 文件，同步上传至飞控平台，实现自动巡航。在数据预处理软件开发上，针对数据的复杂性进行天电噪声去除、运动噪声去除、姿态校正等数据校正工作，通过理论研究、算法实现，建立了半航空瞬变电磁数据预处理标准流程，开发了基于 PyQT 架构的数据预处理软件平台，可一站式去除天电噪声、运动噪声、随机噪声等，可进行自动姿态矫正、自定义时窗数据叠加和抽道积分。数据预处理全流程可视化，可进行多任务批处理，多结果对比。其中天电噪声采用 α -trimmed 均值滤波器去除，运动噪声采用小波分解、多项式拟合等方法进行去除，姿态校正采用基于法向矢量的方法进行自动校正。

软件平台基于 PyQT 架构进行构建，实现了项目管理、数据库操作、数据可视化和数据处理等基本功能，结合多进程并行框架可以高效地存储和处理海量数据，能为多种地球物理数据提供存储管理支持，支持数据库数据的多维可视化。解决了地球物理软件中维护难度大、功能可扩展性差等技术难题，能够适应快速发展的地球物理技术，减少重复性工作并提高软件开发效率，提高软件的可用性和生命周期。

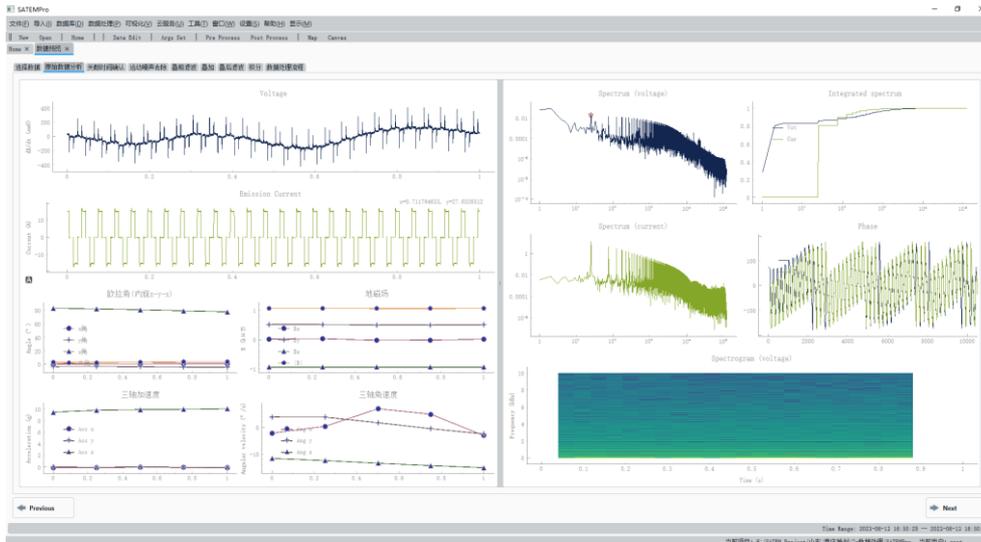


图 12 软件用户界面

上述研究成果可支撑第十章数据预处理的相关内容及规定，并且为实际工程应用提供了操作方面、界面友好的预处理平台，方便工程人员使用。

（三）半航空瞬变电磁探测在公路隧道领域的工程应用

编制组自 2018 年开始在广西区内针对复杂地形岩溶隧道勘察难题开展半航空瞬变电磁探测研究与应用，已在广西 4 座高速公路，60 余座高风险岩溶隧道开展应用，取得了显著的成果，为隧道设计与施工提供可靠的地球物理资料，为隧道顺利贯通保驾护航。以下为编制组在广西区内的半航空瞬变电磁探测典型应用案例。

1、广西贺州-巴马高速公路达墨隧道半航空瞬变电磁探测

达墨隧道隶属广西贺州至巴马高速公路（都安至巴马段），位于河池市大化瑶族自治县江南乡达默村南侧约 140m，右线长度 2826m，最大埋深约 369.1m；左线，长度 2877m，属长隧道，最大埋深约 375.6m。本项目位于广西西部地区的都阳山山脉南端及西南翼，经过河池市都安县、大化县、巴马县等地，隧道周边多耸山峻岭，地形崎岖，隧道沿线为广西主要河流红水河，是一条古老的岩溶沟槽，隧道周边岩溶极其发育，并通过实地调研和无人机航拍发现了几处明显的岩溶露头，并收集了与隧道相关的地质资料和以往物化探资

料，辅助进行设计。项目开展前期，对隧道周边区域进行充分的踏勘选点，选取了几处地势平坦、距离隧道进出口较近的起飞点，在距离隧道 1km 附近的区域

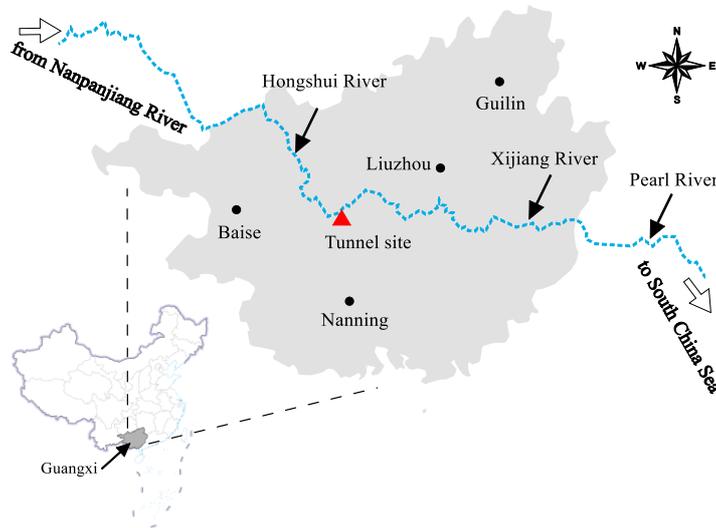


图 13 达墨隧道地理位置

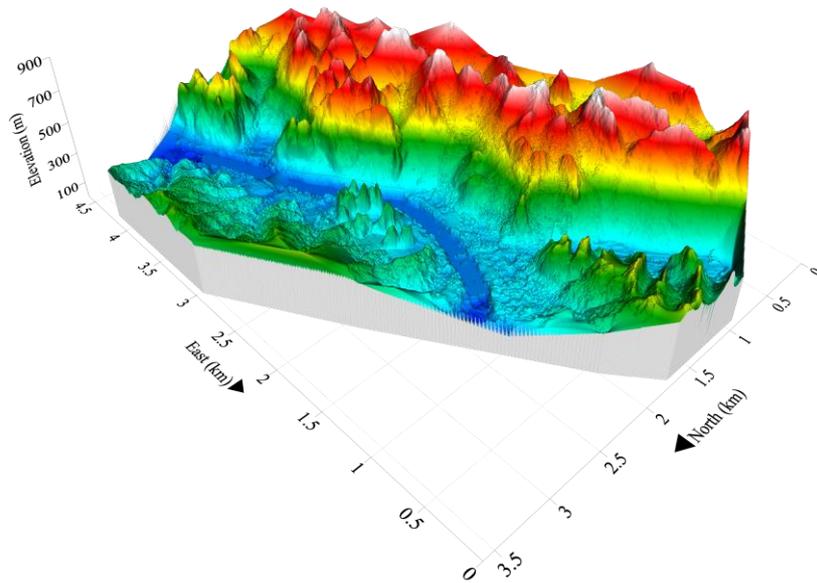


图 14 基于倾斜摄影模型生成的三维地表模型

山东大学于 2018 年 07 月进场参与项目实验，为半航空瞬变电磁探测的首次现场实验，旨在验证该方法在实际工程的可行性及应用价值。在大化县开展了为期 2 个月的现场实验，并于 2018 年 12 月提交探测报告。根据隧道分布特点，将测区划分为两个部分，整体航线分为进口段和出口段两部分，发射源位

于隧道东南侧，垂直距离约 1km，发射源长度约为 1.5km，发射源走向与隧道走向近乎平行，在地形条件允许的情况下将发射源尽量沿直线进行布设，探测区域设计如图 16 所示。

(1) 野外踏勘

野外踏勘的主要目的是寻找供电极的位置、飞机起降点位置，为后期的发射源设计和接收端设计做准备。在实际踏勘之前，通过 Google Earth 上查看隧道沿线附近的情况，如图 15，隧道沿线北侧是红水河，河的走向与隧道沿线方向基本上平行，考虑到低阻河水对电磁波的屏蔽作用，供电极的布设位置就只能在河的南侧寻找。项目成员沿着隧道沿线两侧进行了多次实地踏勘，一条线路是隧道北侧沿着红水河的乡村公路，一条是在隧道南侧的盘山公路。考察的供电电极标准是布线是否安全，布设发射极能否和大地接触良好；考察飞机起降点位置的标准是起降地点是否平整，来往车辆多寡。



图 15 隧道沿线卫星图与实地踏勘选点

(2) 发射端设计

隧道沿线长度直线距离为 2821 米，隧道与红水河之间的乡村公路，这条公路是隧道施工方唯一的材料供给通道，负责工程材料的运输，而且这条路还担负着附近乡镇与外界交通的任务，因此这条公路交通繁忙，车流不息，考虑到危险因素，这条公路上并不适合布置发射源。在隧道的北侧没有合适的地方，而在隧道的南侧有一条盘山公路，经过小组成员实地踏勘发现，这里车辆

来往不多，距离隧道 1 公里左右的 A、B 两点与隧道基本平行，而且此处有村民在山脚下的农田，表层覆盖有相当深度的土，便于电极的布设和向大地的供电，考虑上述多项原因，将发射源位置布置在 A、B 两点。供电电线的布设如图 16 所示，沿着半山腰的山路布设，直线距离 1.2 公里，实际布设线长 1.5 公里。

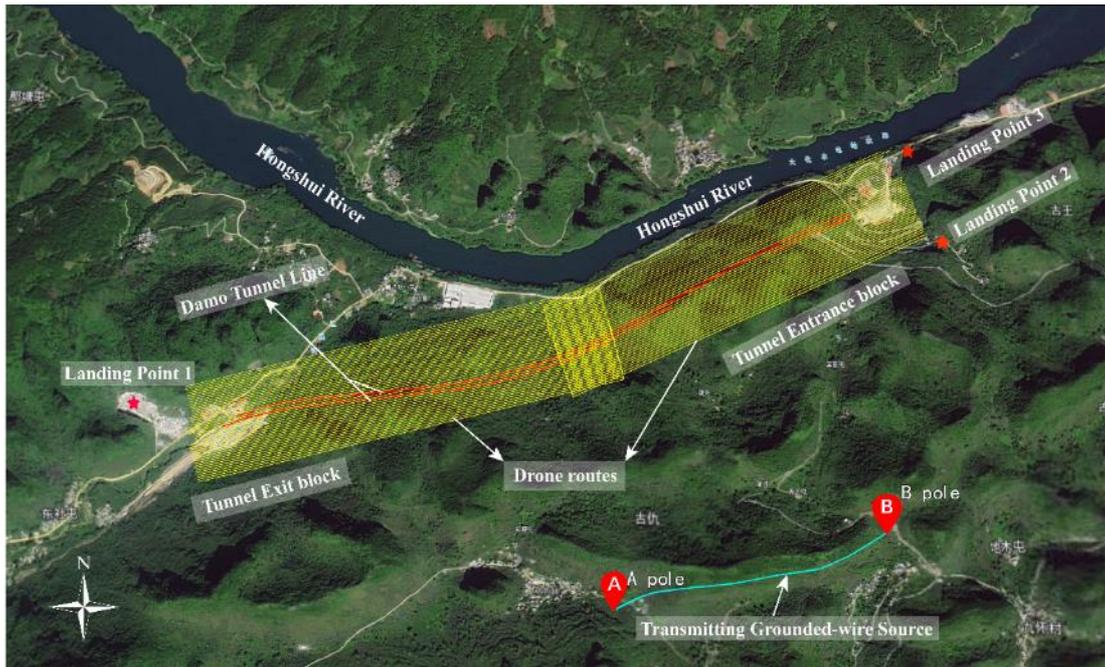


图 16 达墨隧道飞行设计规划



图 17 发射端电极坑挖设及电极埋设

(3) 接收端设计

由于现场实际地形条件限制，无人机起降点的可选范围有限，同时考虑到无人机滞空时间有限，电池只够无人机吊载线圈飞行大约 15min，考虑到上述因素，而且考虑到隧道沿线走向的形状特点，将整体航线分为进口段和出口

段两大部分，如图 16 所示，进口段有两个起降点，出口段一个起降点，两个区域基本与隧道沿线相平行，在中间重叠大约 280 米的区域，设置重叠区域的目的：一、保证测线能够连续，不因为进、出口段区域的设置而断开；二、提供给无人机一个协调转弯、线圈调整姿态的区域。进、出口段区域各设置了 21 条航线，航线长度在 $3\text{km} \sim 3.5\text{km}$ 之间，包括飞出的路线、中间姿态调整区域和返航路线，相邻两条航向之间的间距为 10 米，同一条航线飞出路线、返航路线之间的距离是 70 米，飞行速度根据经验和现场试验综合考虑选为 5 米/秒；飞行高度的选择更加复杂一些，会根据航线距离山体远近而调整，为了确保无人机的飞行安全，根据经验需要航线与山体的距离最少 100 米，因此，在飞行前需要将航线在 Google Earth 上绘出并检查，确保规划的航线是安全可靠的。最后在无人机地面控制端 iPad 上将 Google Earth 的航线导入（如图 18），图中 S 处为无人机航线起始点，蓝色圆点处为结束点，在左下方的两个白色的圆点处是无人机需要转弯的地方，考虑到如果转弯过快过猛，会导致线圈摆动幅度过大，因此在此处将转弯模式设置为协调转弯，设置转弯半径，使得航线在此处圆滑过渡。

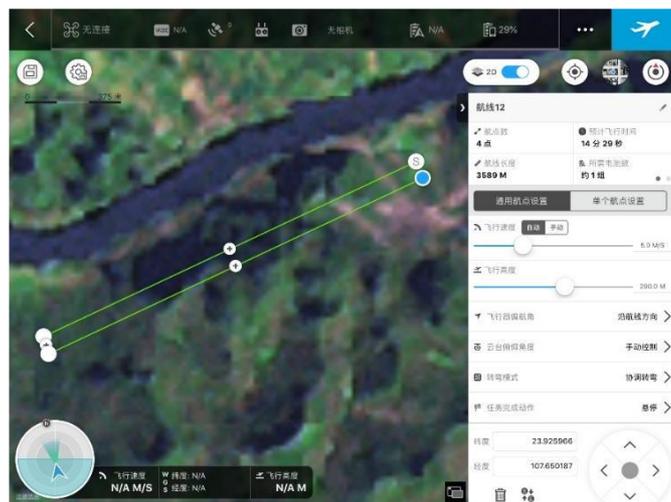


图 18 DJ 地面站航线规划

(4) 仪器技术指标

位置	名称	型号	主要参数
发射端	发射机	EMT6000	发射电流>10A
	汽油发电机	HJD25000T	25kw
接收端	接收机	TEM31	连续采集
	飞行平台	Wind8	载重 10kg
	飞行平台	M600 Pro	载重 6kg
	接收线圈	TEM31-10000	有效面积 1万 m ²



图 19 M600 Pro 六旋翼无人机



图 20 TEM31 接收机



图 21 EMT6000 电磁发射机



图 22 HJD25000T 发电机

(5) 野外数据采集

根据初步准备工作，制定详细工作规划，A、B 极为发射端，C 极为接收端，选定 A、B、C 极位置后，明确具体的人员分工及工作安排。初步制定每天的工作任务及注意事项，并在工作前一天制定明确的飞行计划，提前向空域管理部门报备下一天的飞行计划。

A、B、C 极均准备完毕后，A 极连接发射机，发电机以及接地电极后，准备开始发射工作。设置发射机参数，发射电压 750V，接地电阻 60Ω，发射频率 25Hz。

确保所有工作环境安全后开始瞬变电磁信号发射。

供电 A 极成功发射电流后,接收端开始对设计飞行航线依次进行数据采集,由于飞机起飞过程要从起降点到达设计飞行航线起点区域,受飞行速度惯性和风力的影响接收线圈会来回摆动,接收端 C 飞行员观察员要关注线圈的姿态,在线圈摆动基本稳定后方可开始飞行任务,观察员记录好飞机到达设计航线起点、终点的时间点,为后续数据处理提供依据。按照上述步骤,在进口段和出口段两个起降点,对设计的航线进行逐条数据采集工作,在此过程可根据飞行区域的海拔高度适当调整飞行高度参数。

接收机参数设置,采集通道设为 1,数据采集方法设为 FTEM,采集模式设为 SR-GPS,叠加次数设为 64 次,采集频率 25Hz。

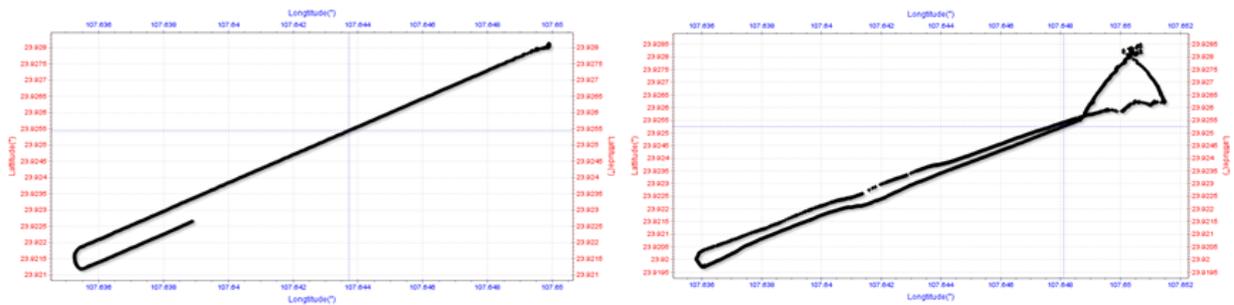


图 23 GPS 信息不完整 (左) 与轨迹不吻合 (右) 的数据



图 24 飞行平台搭载信号接收设备

此次数据采集工作在达墨隧道出口端和出口端共飞行 84 条航线，其中发射和接收频率为 25Hz 的 42 条，接收和发射频率为 12.5Hz 的 42 条，飞行测线约 280km。对采集后的数据进行了数据质量评估和数据预处理工作。数据质量评估工作包括：GPS 轨迹信息筛选、数据基线筛选、数据信噪比质量筛选。数据预处理工作包括选取对数据完整性保护程度较高的 α -Trimmed 均值滤波器对半航空数据中的天电噪声进行去除；对比了小波去噪和多项式拟合对数据去噪的效果，最终选用多项式拟合的方法对数据中的基线进行去除。最后对去噪后的数据进行抽道叠加和时窗积分获取最终的衰减电压数据，再将衰减电压数据通过程序计算获取视电阻率，对隧址区探测数据进行三维视电阻率成像，并对隧道埋深高程、隧道中轴线部分做电阻率切片，最终划定低阻异常区，结合已有地质资料和物化钻探资料进行地质解译，分析隧道沿线岩溶风险区。

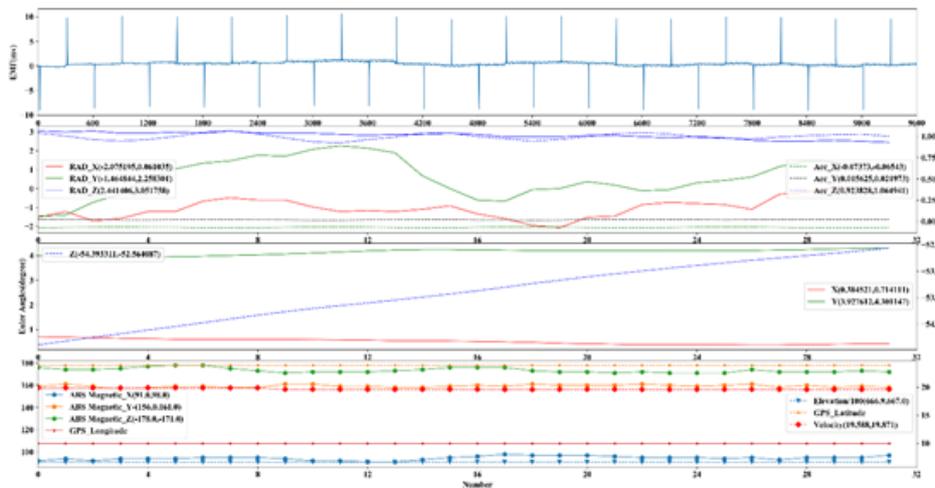


图 25 质量较好的原始数据质量信息

选择去噪方法时对比了小波分解去噪和多项式拟合的对比效果。小波分解是在时间域（或空间域）和频率域之间转换信号的常用工具，其可以通过一组小波基函数将连续信号分解为一系列的小波分解系数。由于运动噪声基本分布于低频段，因此经小波分解后，通过剔除可能包含运动噪声的小波分解系数并利用剩余的小波系数对数据进行重构，即可达到去除运动噪声、获取有效信号的目的。

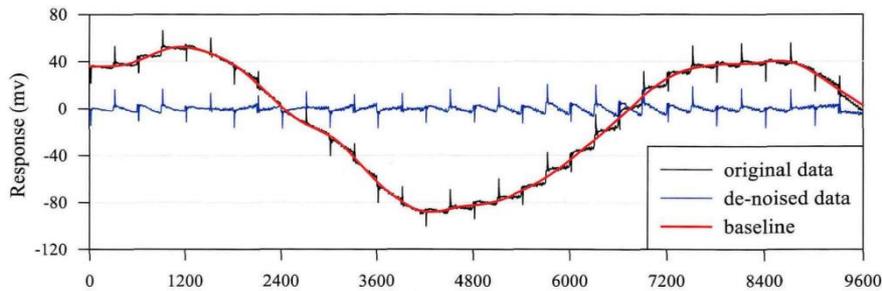


图 26 原始数据与小波分解 (db7, level 1-9) 去噪结果对比图

分析数据去噪结果可以明显发现分周期去噪可以取得更好的去噪效果，特别是在运动噪声较弱的信号段，但在包含较强运动噪声的前半段数据，由于分解等级较高且数据量较少，去噪效果较差。此外，我们并不建议使用单周期数据进行小波分解去噪处理，主要原因在于单个周期内的数据量对于小波分解来说太少，导致分解后得到的小波系数难以分离运动噪声和有效信号。总而言之，小波分解去噪可以消除大部分的运动噪声并取得不错的去噪结果，但是由于纯二次场采集数据中存在的周期偏移，使得该去噪方法应用至运动噪声较强的数据时不仅难以有效去除运动噪声，反而会在各周期数据衔接处引入额外的数据误差。

多项式拟合方法是对许多离散并震荡的数据进行拟合并获取最能符合数据趋势的多项式方程表达式。对于半航空瞬变电磁数据来说，除有效数据（主要为“尖峰”）外，其主要由运动噪声和随机背景噪声组成。由于运动噪声的低频段分布特性，它可以被看作是除有效信号外数据的整体趋势，而随机背景噪声则可以看作为在此趋势基础上的数据振荡。因此，利用多项式拟合获取最能描述除有效数据外信号的整体趋势，通过从原始数据中去除上述趋势即可达到去除运动噪声的目的。

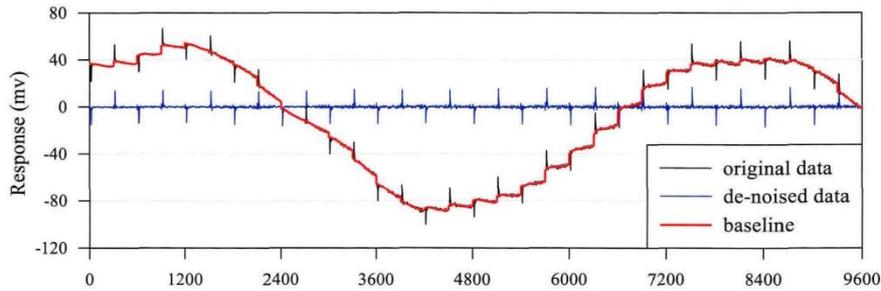


图 27 原始数据与多项式拟合去噪结果对比图

从图中展示结果可以明显看出经去噪处理后，运动噪声基本完全去除。同时，多项式拟合去噪效果要明显优于小波分解去噪的结果，解释如下：首先，在多项式拟合去噪中选用了单个周期数据进行方程式拟合的策略，可有效避免纯二次场信号中数据偏移对去噪效果的负面影响，尽管小波分解也可以应用该策略，但单周期数据数量不足以满足小波分解所要求的数据数量级，而多项式拟合则没有类似限制；此外，若基于数据整体进行小波分解去噪，各周期衔接处的数据偏移不仅会对去噪效果产生负面影响，还会引入额外的数据误差。综合上述分析，针对半航空瞬变电磁纯二次场采集数据中运动噪声的去除多项式拟合去噪要明显优于小波分解去噪方法，且多项式拟合去噪结果足以满足后续数据处理及解释的要求。

（6）探测结果分析

对半航空瞬变电磁探测的结果与已有地质资料进行了对比，如图 28 所示，可以看出：①已知地质资料标出的 3 处落水洞，其中 2 处与物探结果吻合；②已知地质资料标出的 2 处断层中，有一处物探资料显示为低阻异常区，另一处断层区域物探资料未见明显异常；③已知地质资料标出的岩溶发育区位于隧道出口黄牛洞附近，与物探资料显示的低阻异常区吻合。

同时结合隧道左右洞中轴线纵向视电阻率切片与地质开挖验证，多处低阻异常区与岩溶揭露情况吻合，例如 ZK416+644 处的涌泥和 ZK416+833 的竖向溶洞揭露均位于左洞低阻异常区内；K416+670 揭露的溶洞与右洞低阻异常区吻合。同时，结合 2020 年隧道开挖的围岩分级情况，探测结果与围岩分级一致性较高，

进一步证实了半航空瞬变电磁法在复杂地形隧道勘察领域的可行性和极高的工程应用价值，在设计和施工阶段开展该方法的探测有助于在隧道建设前期规避岩溶、富水区等不良地质灾害，为隧道安全建设保驾护航。

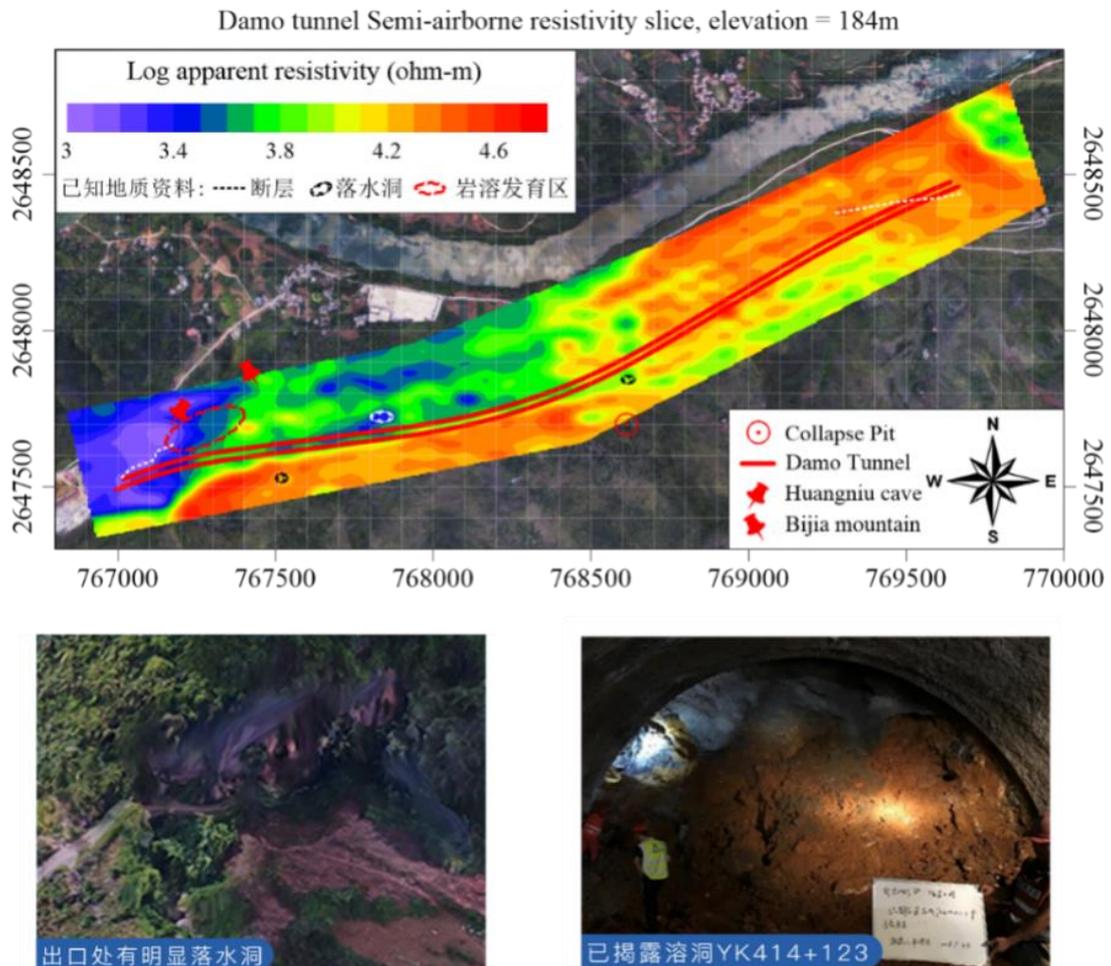


图 28 隧道标高 184m 横切片探测结果及地质验证对比

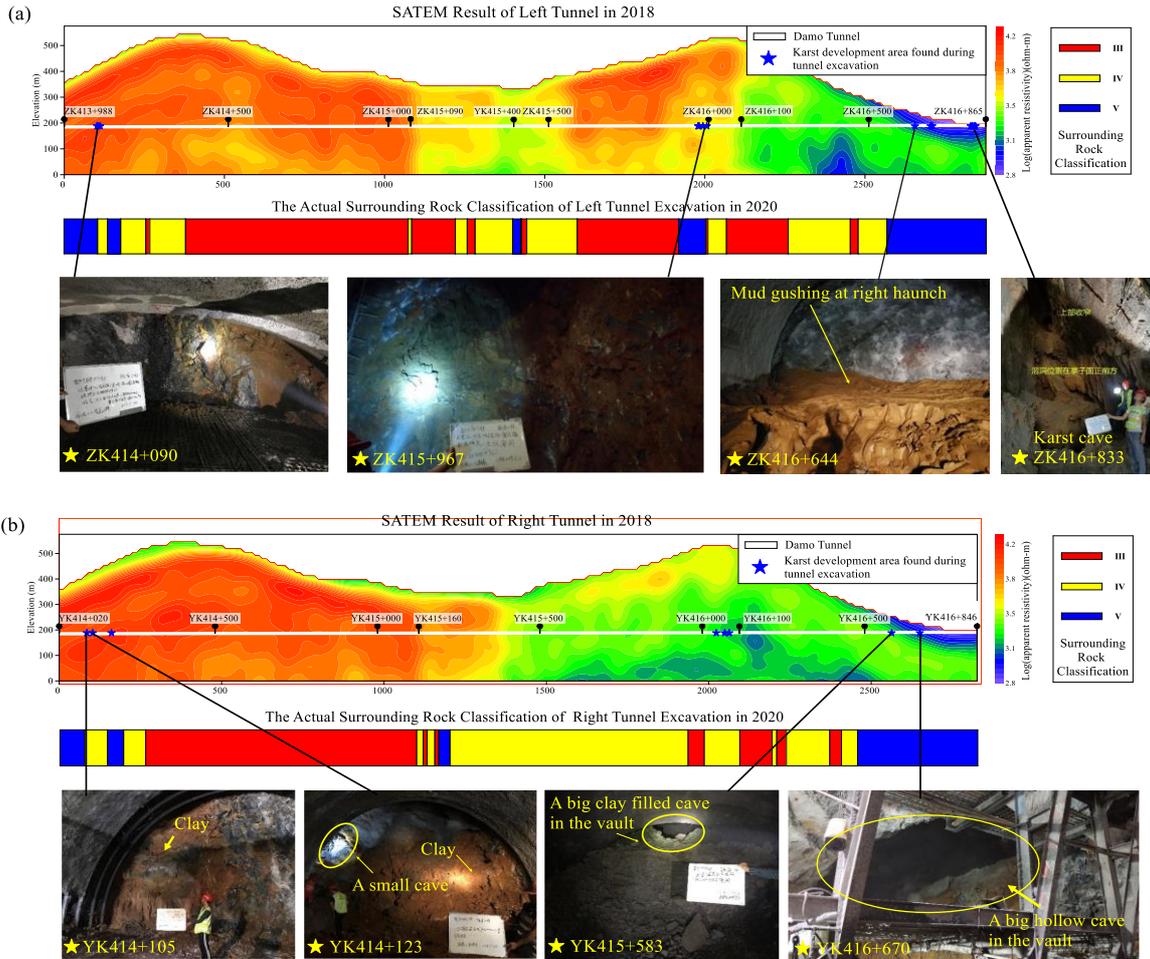


图 29 隧道左右洞纵切片探测结果及地质开挖验证

2、广西来宾-都安高速公路龙湾 2 号隧道岩溶风险勘察应用

龙湾 2 号隧道起点位于来宾市凤凰工业园区北面约 2.9 公里，顺接贺州至巴马高速公路（象州至来宾段）终点，为双洞分离式越岭特长隧道，与多条交通枢纽互通。主线共有隧道 18 座，其中特长隧道 5 座，长道隧道 11 座，隧道单洞累计长 43.5km，隧道占路线长 33%其中龙湾 2 号隧道长 5.2km，为本项目最长隧道。

隧道区属岩溶峰丛地貌，山体连绵起伏，地形起伏较大，山脉走向多呈北东-南西向，与红水河基本平行，同时隧道沿山脉走向展布，与红水河亦平行。隧址区地面高程在 110m~675m 之间，相对高差 565m，地形起伏大，山体覆盖层较少，基岩大面积出露。隧道进洞口路段斜坡相对较陡，坡度一般为 40°~60°，出

口段较平缓，坡度一般为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ ，隧道洞身前半段高、后半段低，局部山体呈陡崖状，山上植被以灌木和杂草为主。山涧洼地分布较多，洼地中多可见消水洞。



图 30 龙湾 2 号隧道地理位置及探测飞行设计

本次探测试验的主要目的为在龙湾 2 号隧道开展半航空瞬变电磁勘探，完成踏勘、探测方案设计、野外数据采集及数据预处理与解释，用于指导划分岩溶发育高风险段落。本次半航空瞬变电磁野外飞行试验，龙湾 2 号隧道工区的半航空瞬变电磁数据的采集共飞行测线 48 条，总飞行长度为 99km。主要探测工作如下所述。

(1) 野外踏勘

在进行探测方案设计之前，首先需要开展的工作为野外踏勘，其主要目的是寻找供电极的位置、飞机起降点位置，为后期的发射源和接收端设计做准备。在实际踏勘之前，通过 Google Earth Pro 查看隧道沿线附近的情况，如下图所示。

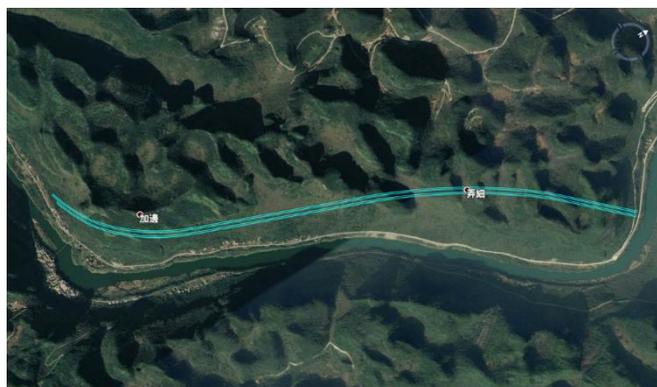


图 31 隧道线位

隧道沿线东侧是红水河，河的走向与隧道沿线方向基本上平行。考虑到河水作为低阻体对电磁波有屏蔽作用，故只能在隧道线位西侧寻找供电电极的布设位置。



图 32 小组成员踏勘

小组成员沿着隧道线位西侧的盘山公路进行了多次实地踏勘，考察布设发射极能否和大地接触良好，布线是否安全。同时考虑飞机起降点海拔与线位距离是否满足飞行要求，地形是否平整，来往车辆多寡。

(2) 发射端设计

开展野外的数据采集工作时将人员及设备分为 3 组，其中 A、B 极负责发射端相关工作，C 极负责接收端相关工作。

隧道单洞线位设计长度为 5135 米，线位西侧盘山公路经过映山村，经小组成员反复踏勘论证发现，此处村中住户稀少，几乎没有车辆往来，距隧道线位垂向距离 1 公里有余。但由于隧道过长，线源场无法合理覆盖隧道线位，故将隧道分为进口段与出口段两部分，分设为进口段以及出口段两个线源。

进口段发射源选点与设计如下：在映山村村委会北偏东 200 米及 1200 米左右，有两块本村村民耕地，耕地土层厚约 60 公分，便于电极的布设和向大地的供电。且两处耕地连线与隧道线位近似平行，相距 1.2 公里，经过综合考虑，将 AB 极分设在这两块耕地中。如下图 33 所示。

AB 极间有道路、农田、山丘，为保证发射源质量，供电电缆尽量取直贴地。

过路口时将电线架高防止路过汽车、摩托车碾压电缆；过砂石路面时则将电缆裹套胶管后埋于地下。

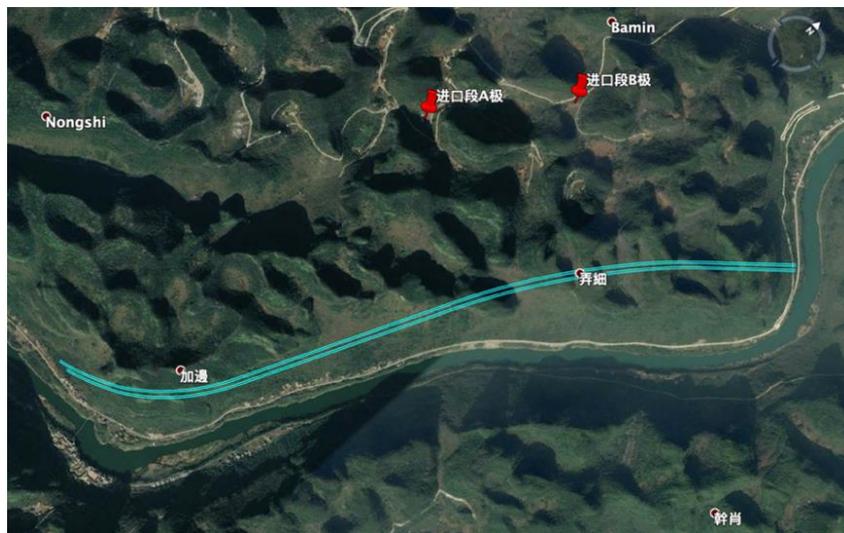


图 33 进口段发射电极选择



图 34 路口架设电缆



图 35 砂石路埋藏电缆

最终确定进口段布线长度约为 1.2 公里，如下图所示。



图 36 进口段发射源布设

出口段发射源选点与布设如下：出口段线源选址较为复杂，由于适合区域处在山谷之中，无汽车能够通行的道路，小组成员咨询本地村民后，经过多次探勘论证。最终决定将出口段发射源 A 极布置在村委会南侧 100m 左右的耕地中，B 极布置在 A 极西南约 1.2 公里处，如下图所示。



图 37 出口段发射电极选择

AB 极间全为山路，供电电缆全部贴地放置。但由于车辆无法到达 A 极周围，发射仪器只能放置于距 A 极 300 米左右的土路上，恰与供电电缆相距不足 10 米，便于电缆与仪器连接。



图 38 发射端设计及仪器安放位置

最终确定出口段布线长度约为 1.2 公里，如下图 16 所示。

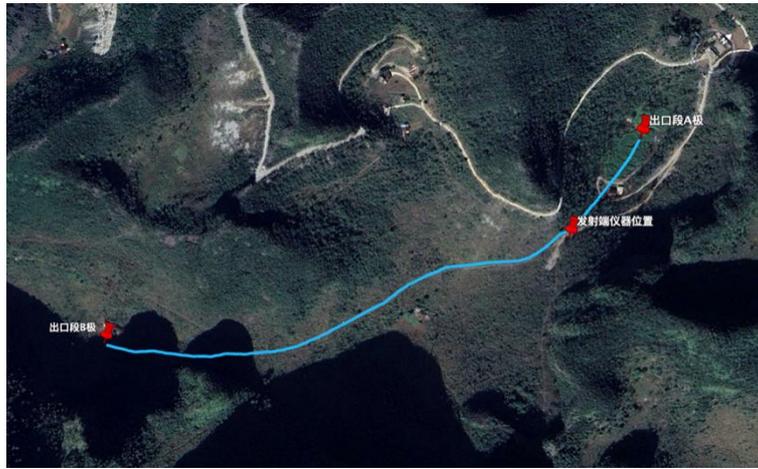


图 39 出口段供电电缆布设

(3) 接收端设计

本次半航空瞬变电磁勘探的龙湾隧道 2 号线隧道总长为 5.8km，且实际地形复杂，无人机起降点选取的限制较大，同时考虑到隧道走线存在一定弧度的形状特点和无人机电池容量的限制（吊载线圈仅能飞行 15min），因而将整个隧道勘探区域分为 A、B、C、D 四个区块分别进行探测，其中 A、B 区域位于隧道出口端，C 和 D 区域位于隧道进口端。

如图中所示，因地形以及勘探区域的限制，设置点 P1 作为 A 区域的起降点，点 P2 作为 B 区域的起降点，点 P3 作为 C、D 区域的起降点，并在图中标示出了各个起降点对应的区域的起始端。



图 40 隧道勘探区域及航线规划

各勘探区域航线分布基于与隧道中心线相平行，并保证有一定长度的勘探区域重叠区，主要原因如下：一、保证勘探区域的划分处的数据冗余度进而保证勘探结果的可靠性，二、为无人机转弯提供调整线圈姿态区域。根据探测要求，各区域的航线数量均为 12 条，相邻两条航线之间间距为 10m，各航线飞出路线和返航路线之间间距为 60m（航线规划为 U 型）。其中，A、D 区航线长度约为 1.8km，飞行速度设置为 8m/s，B、C 区航线长度约为 2.4km，飞行速度设置为 10m/s。由于在无人机飞行过程中，为保证线圈在采集数据的过程中不产生较大的姿态变化，需要确保航线的飞行海拔高度是不变的，因而在进行航线规划时，为保证无人机的飞行安全，会根据航线距离山体远近而调整。根据经验，航线与山体的距离最少为 100 米，因此，在飞行前需要将航线在 Google Earth 上绘出并检查，确保规划的航线是安全可靠的，之后在无人机地面控制端 iPad 上将 Google Earth 的航线导入，完成航线规划工作。

（4）仪器设备规格

位置	名称	型号	主要参数
发射端	发射机	EMT6000	发射电流>10A
	汽油发电机	HJD25000T	25kw
接收端	接收机	TEM31	连续采集
	飞行平台	Wind8	载重 10kg
	飞行平台	M600 Pro	载重 6kg
	接收线圈	TEM31-10000	有效面积 1 万 m ²



图 41 M600 Pro 六旋翼无人机



图 42 TEM31 接收机



图 43 EMT6000 电磁发射机



图 44 HJD25000T 发电机

(5) 数据采集

A、B、C 极均准备完毕后，A 极连接发射机，发电机以及接地电极后，准备开始发射工作。设置发射机参数，发射电压 750V，接地电阻 60Ω，发射频率 25Hz。确保所有工作环境安全后开始瞬变电磁信号发射。

供电 A 极成功发射电流后，接收端开始对设计飞行航线依次进行数据采集，由于飞机起飞过程要从起降点到达设计飞行航线起点区域，受飞行速度惯性和风力的影响接收线圈会来回摆动，接收端 C 飞行员观察员要关注线圈的姿态，

在线圈摆动基本稳定后方可开始飞行任务，观察员记录好飞机到达设计航线起点、终点的时间点，为后续数据处理提供依据。按照上述步骤，在进口段和出口段两个起降点，对设计的航线进行逐条数据采集工作，在此过程可根据飞行区域的海拔高度适当调整飞行高度参数。

接收机参数设置，采集通道设为 1，数据采集方法设为 FTEM，采集模式设为 SR-GPS，叠加次数设为 64 次，采集频率 25Hz。



图 45 飞行平台搭载信号接收设备

此次数据采集工作在隧道出口端和出口端共飞行 48 条航线，飞行测线约 99km。对采集后的数据进行了数据质量评估和数据预处理工作。数据质量评估工作包括：GPS 轨迹信息筛选、数据基线筛选、数据信噪比质量筛选。数据预处理工作包括选取对数据完整性保护程度较高的 α -Trimmed 均值滤波器对半航空数据中的天电噪声进行去除，选用多项式拟合的方法对数据中的基线进行去除。最后对去噪后的数据进行抽道叠加和时窗积分获取最终的衰减电压数据，再将衰减电压数据通过程序计算获取视电阻率，对隧址区探测数据进行三维视电阻率成像，并对隧道埋深高程、隧道中轴线部分做电阻率切片，最终划定低阻异常区，结合已有地质资料和物化钻探资料进行地质解译，分析隧道沿线岩溶风险区。

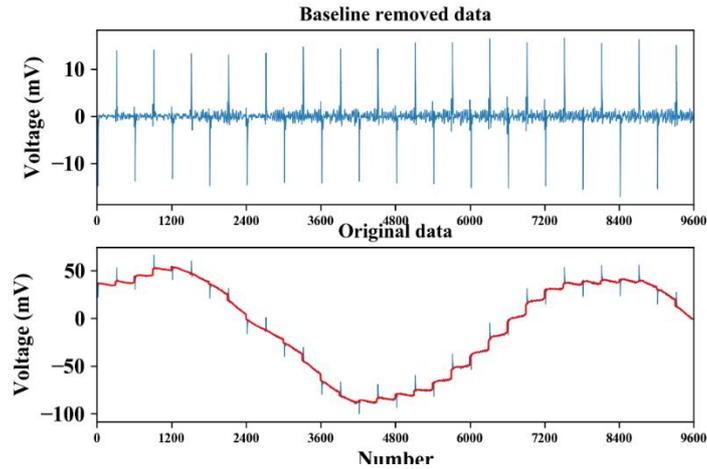


图 46 基线去除后数据、基线以及原始数据对比图

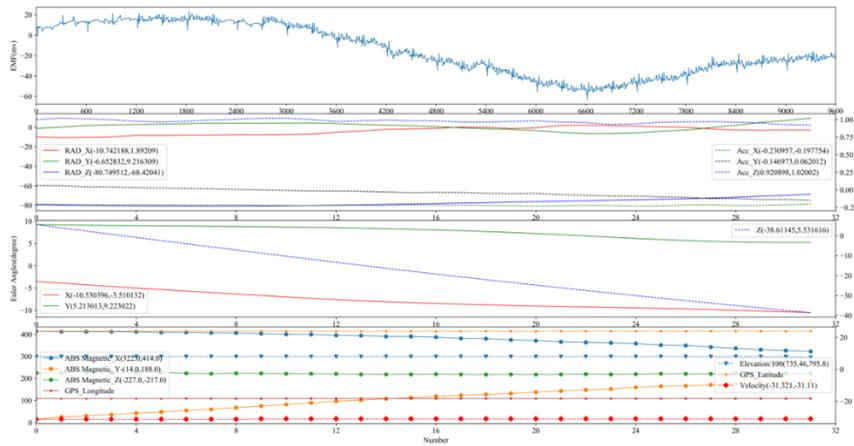


图 47 原始数据质量信息

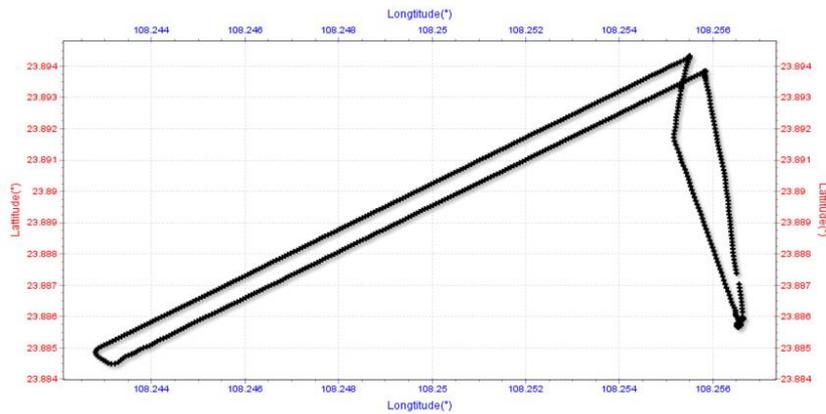


图 48 GPS 信息完整的数据

(6) 探测结果分析

山东大学于 2020 年 8 月完成半航空瞬变电磁探测工作，提交成果报告，并预测 YK341+780-800 附近有明显的低阻异常区，存在溶洞发育的可能性。2021

年4月29日，施工至YK341+805揭露近10万方大型溶洞，与半航空瞬变电磁探测结果吻合。

溶洞位于掌子面右后方，尺寸：85m×47m×25m 隧道进口右洞掌子面掘进至YK341+805位置时，于掌子面右侧揭露一大型溶洞，该溶洞纵向长约85米，高约47米，隧道从其左上角穿越，纵向约有25米左右暴露在溶腔中。现将现场勘察情况及初步探测结果如下：



图 49 隧道区 3D 卫星图



图 50 溶洞发育位置及形状示意图

经过深入溶洞底部现场勘察，并结合三维激光仪扫描结果，获得初步勘察成果如下：溶洞为一类似狭长的椭圆柱状空腔，纵向长度约85米，最宽处约26米，最高约47米，隧道纵向与溶洞纵向斜交角度约 50° ，隧道从其左上角穿过，隧道裸露于空腔中的纵向长度约25米。溶洞内壁附着薄层黄褐色黏土，湿润且粘手，底部覆盖黏土填充物。洞内不时有滴水，且洞壁、洞顶及洞底填充物上都有

明显的滴水、渗水痕迹。除洞顶分布有几处小型溶管，洞周各处未发现溶管或消水洞。溶洞位置与探测结果对比如下：

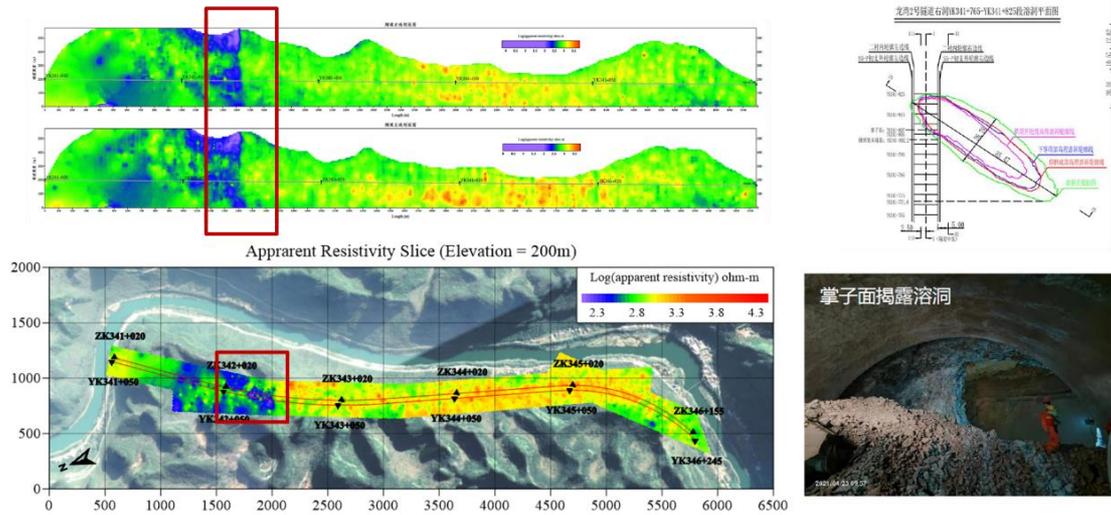


图 51 溶洞位置与探测结果对比

3、广西天峨-巴马高速公路半航空瞬变电磁探测

天峨至巴马高速公路《广西高速公路网规划（2018-2030）》布局方案中“纵10线”天峨（黔桂界）至北海高速公路的重要组成部分。天巴高速全线四分之三的隧道位于喀斯特地貌区，主线隧道为三车道标准断面设计，是目前广西区内在建隧道断面最大的高速公路项目之一，地下暗河、溶洞众多，主线桥隧比高达66.6%，主线隧道50座共49997.5米，沿线地形起伏大，隧道洞口多位于崇山峻岭间，地形十分复杂，给隧道勘察带来巨大困难。

为查明天巴高速沿线长隧道地岩溶等不良地质灾害，山东大学受广西龙马高速公路有限公司委托，于2021年6月至8月在全线20条隧道开展半航空瞬变电磁探测工作，山东大学于砦牙1号隧道、勤兰隧道、东兰1号隧道、纳合村2号隧道、甲篆3号隧道等高风险隧道中成功预测多处岩溶异常，共探明29处岩溶，准确率高达85%，在施工阶段提前圈定危险区，极大的避免了隧道建设过程中的人员和财产损失，为隧道安全建设保驾护航。



图 52 半航空瞬变电磁法在天巴高速隧道勘察应用情况

本次探测工作采用的仪器及指标如下，接收系统采用的山东大学自主研发的半航空瞬变电磁接收系统，发射系统采用了加拿大凤凰 TUX-30 发射机。

表 4 发射端仪器设备指标

名称	型号	主要参数
发射机	TXU-30	发射电流 > 10A
柴油发电机	TDK27000TE	最大功率 23.5KVA

表 5 接收端仪器设备指标

接收系统主要指标	接收系统主要参数
采样类别	连续采集
采样速度/位数	256KSPS/24bit
同步方式	PPS 秒脉冲
仪器本地噪声（叠加）	小于 1uV
动态输入范围	120dB
存储容量及续航	32G/8h
线圈有效面积	56 m ²
线圈带宽	大于 40KHz
理论定位精度	2.5m
系统重量	小于 3.5kg



图 53 接收系统



图 54 TXU-30 大功率发射机



图 55 TDK27000TE 发电机

勤兰隧道测区位于破碎灰岩地层中，受断层影响较大，岩溶较为发育。为准确查明本测区内隐伏不良地质灾害，采用了综合勘察技术，主要包括地质勘察、半航空瞬变电磁法（SATEM）、隧道内地震超前勘探（SAP）和探地雷达（GPR）。该方法最大限度地发挥了多地球物理方法的优势，实现了探测精度和范围的互补性，提高了预报结果的可靠性。首先，在隧道开挖前，应用 SATEM 划定了研究区视电阻率异常带的分布范围和深度。SATEM 方法主要用于掌握隧道路线范围内的地质信息，探测长度可达数公里。SATEM 结果可以提供大型含水岩溶构造的粗略分布范围，并提示隧道开挖的整体风险水平。然后，在挖掘过程中使用 SAP 和 GPR 来调查详细的地质条件，如岩性变化、断裂带的界面和溶洞的位置。在应用过程中，成功探测到了一个断裂带和一个大型泥质充填型溶洞，证明了该综合勘察技术的有效性。

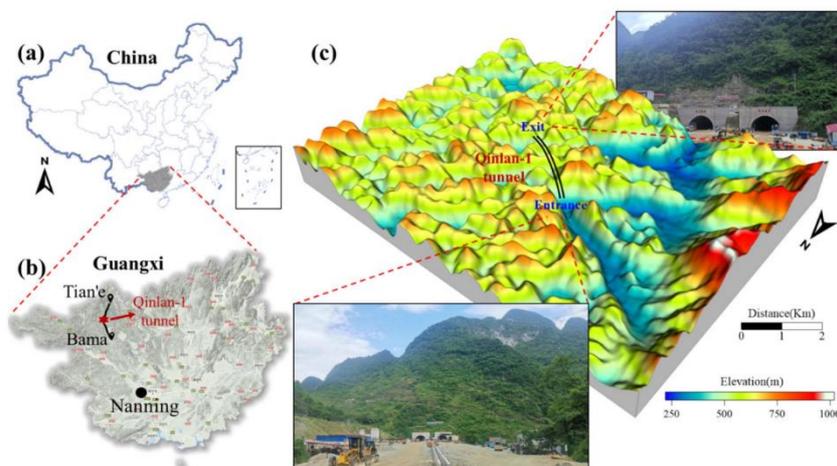


图 56 勤兰隧道地理位置及地形情况

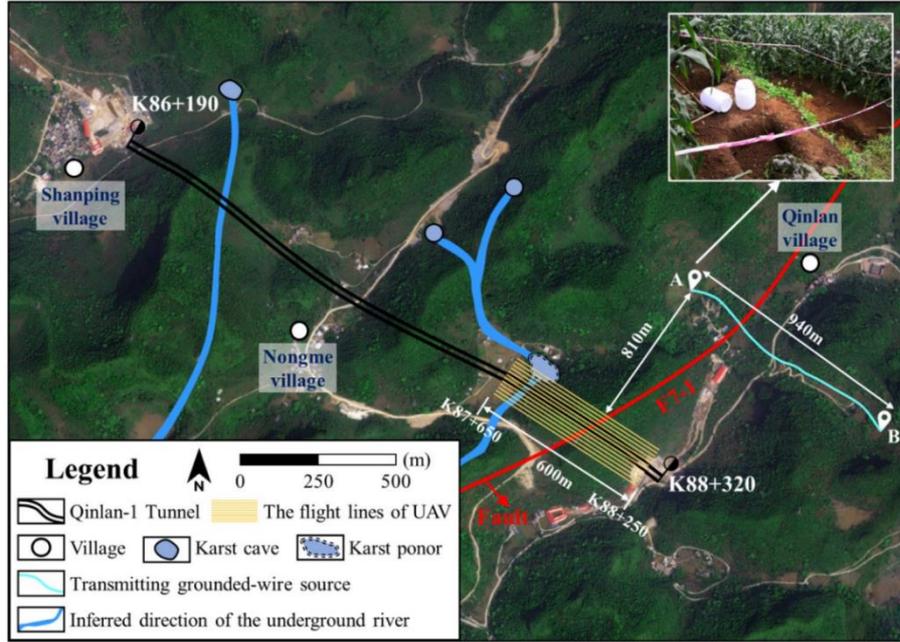


图 57 勤兰隧道探测区域设计

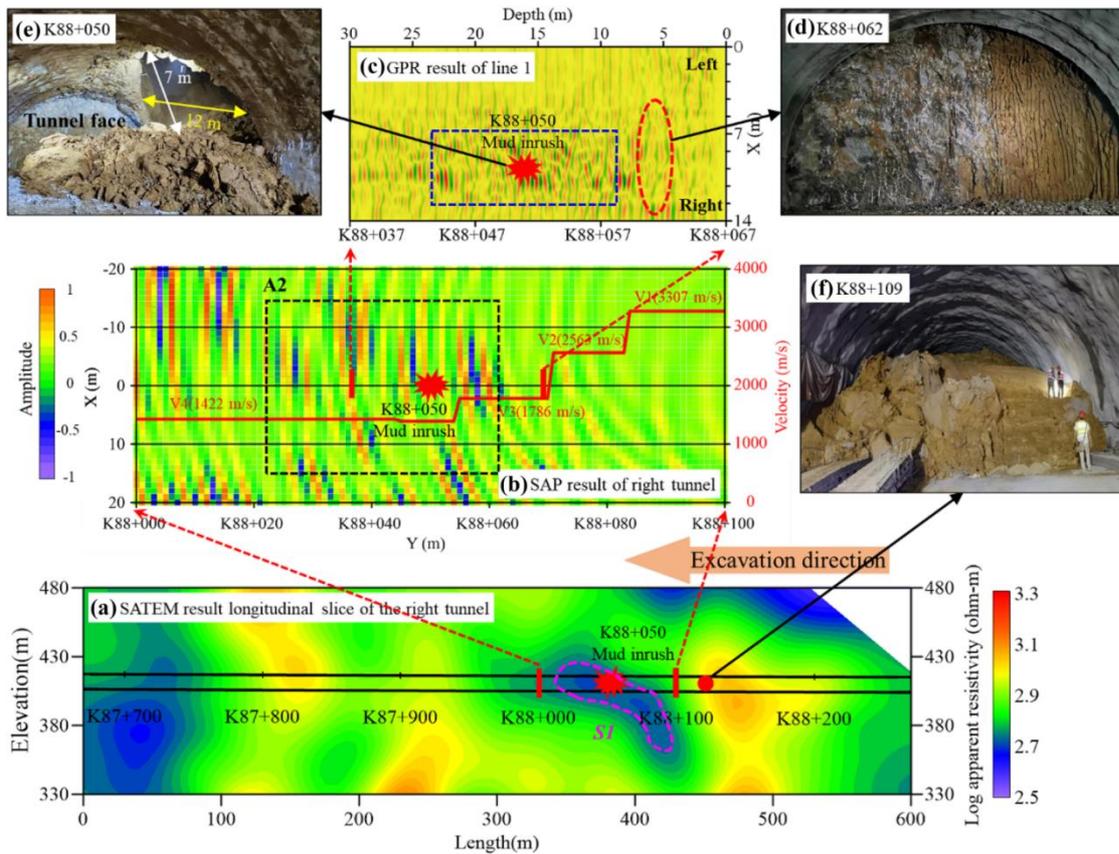


图 58 勤兰隧道半航空瞬变电磁、探地雷达、SAP 探测结果与开挖结果验证

此外，除勤兰隧道外，在砦牙 1 号隧道也揭露了 4 处大型岩溶，均与半航空瞬变电磁探测结果相吻合，如图 59 所示。



图 59 岩牙 1 号隧道岩溶揭露与探测结果对比

六、重大分歧意见的处理依据和结果

本标准研制过程中无重大分歧意见。

七、标准实施的措施

(1) 加强宣传与推广

积极开展标准宣传和推广工作，通过多种途径向社会展示标准的重要性和实用性，提高公众对标准的认知度和参与度，进一步推动标准的实施和推广。

(2) 开展标准培训

及时组织相关培训，向各级政府、企事业单位、专业人员以及公众展示标准的理解和应用培训，提高相关人员的标准意识和实操能力。

(3) 加强实施监督和检查工作

配合相关职能部门加强标准的实施监督和检查工作，确保标准的正确执行。监督和检查内容包括标准宣传、标准实施、标准执行结果等，对于发现的问题及时指导和纠正。

(4) 发放标准

标准正式颁布实施后，及时向主管部门、业主单位、勘察设计单位、施工

单位等相关方免费发放一定数量的标准文件，便于其及时收到标准，使用标准。

(5) 加强标准更新和修订

向社会提供标准使用过程中问题反馈渠道，接受标准使用单位或个人提出的问题，必要时择机进行修订或补充修订说明，让标准更符合实际需求，更好地推广落实。

八、其他应当说明的事项

无

广西地方标准《公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程》

标准编制组

2024年9月26日