

广西壮族自治区地方标准

DB45/T 2899—2024

公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程

Technical code of practice for semi-airborne transient
electromagnetic method for highway tunnels

2024 - 09 - 30 发布

2024 - 12 - 01 实施

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 一般要求 2

5 探测技术设计 3

 5.1 资料收集 3

 5.2 踏勘 3

 5.3 方法试验 3

 5.4 测区设计 3

 5.5 发射端参数设计 4

 5.6 接收端参数设计 4

 5.7 工作精度确定 4

 5.8 设计书编写 5

6 仪器设备使用及维护 5

 6.1 使用与维护 5

 6.2 检查与测试 5

7 野外数据采集 5

 7.1 准备工作 5

 7.2 野外数据采集 6

 7.3 数据质量检查 6

 7.4 环保措施 7

 7.5 安全措施 7

8 数据质量评价 7

 8.1 GNSS 轨迹评价 7

 8.2 数据连续性评价 8

9 数据处理与资料解释 8

 9.1 数据预处理 8

 9.2 资料解释 9

 9.3 数据处理 10

10 成果报告编写 10

 10.1 基本要求 10

 10.2 成果报告主要内容 10

 10.3 成果报告附图 10

附录 A（规范性） 半航空瞬变电磁探测仪器设备主要技术指标 12

附录 B（资料性） 最优探测区域设计方法 14

附录 C（资料性） 设计书编写内容与要求 15

 C.1 前言 15

 C.2 测区地质及地球物理特征 15

 C.3 野外工作方法和技术要求 15

 C.4 资料处理、解释及报告提交 15

 C.5 施工组织管理与措施 15

 C.6 经费 16

 C.7 设计附图 16

附录 D（规范性） 飞行数据野外记录表 17

附录 E（规范性） 飞行数据质量评价 18

附录 F（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 19

附录 G（资料性） 野外工作验收要求及判定规则 21

 G.1 验收要求 21

 G.2 验收依据 21

 G.3 判定标准 21

附录 H（资料性） 成果报告主要内容 23

 H.1 前言 23

 H.2 地质及地球物理特征 23

 H.3 飞行设计与野外采集 23

 H.4 数据质量评价及预处理 24

 H.5 解释推断 24

 H.6 结论及建议 24

 H.7 附图及附表 25

参考文献 26

前 言

本文件按照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》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广西壮族自治区交通运输厅提出并宣贯。

本文件由广西交通运输标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：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。

本文件主要起草人：孙怀凤、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。

公路隧道半航空瞬变电磁探测技术规程

1 范围

本文件界定了公路隧道半航空瞬变电磁探测技术的术语和定义，规定了其探测技术设计、仪器使用与维护、野外数据采集、数据质量评价、数据处理与资料解释、成果报告编写的要求。

本文件适用于广西行政区域内采用半航空瞬变电磁探测技术开展公路隧道地质勘察工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- 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—2010 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—2015 可控源音频大地电磁法技术规程
- DB45/T 2148—2020 公路工程物探规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

半航空瞬变电磁法 semi-airborne transient electromagnetic method

接地长导线源或大回线源向地下发射一次脉冲电磁场，飞行器挂载接收线圈在一次脉冲电磁场关断间隙观测地下介质引起的二次感应电磁场，从而探测地下介质电阻率的一种时间域电磁法。

3.2

发射源 transmitting source

数据采集过程中人工可控制的激励场源，用于向大地发送不同基频的瞬变电磁场。

3.3

接收线圈 receiving loop

数据采集时，接收地下产生的二次感应电磁场信号的传感器。

3.4

飞行高度 flight altitude

无人机飞行时，机身距离地面站的垂直高度。

3.5

偏航距 flight line deviation

实际飞行的测线航迹偏离设计航线的距离。

3.6

收发距 transmitter-receiver offset

测线与发射源中心在水平投影上的距离。

3.7

最优探测区域 optimal survey area

适合采集信号、且可获得有效数据的探测区域。

3.8

接地电阻 ground resistance

发射电流由接地装置一端流入大地再经大地流向另一接收装置时所呈现的电阻。

3.9

天电噪声 sferics noise

由太阳磁暴或赤道附近的雷电作用形成的一种以甚低频电磁波为主的噪声。

3.10

运动噪声 motion noise

无人机飞行过程中线圈摆动引起的噪声。

3.11

全球卫星导航系统 Global Navigation Satellite System, GNSS

在地球表面或近地空间的任何地点为用户提供全天候的三维坐标和速度以及时间信息的空基无线电导航定位系统。

3.12

GNSS 轨迹 GNSS trajectory

接收线圈与无人机在探测过程中通过GNSS测得的飞行轨迹。

3.13

姿态 attitude

接收线圈在飞行探测过程中受无人机飞行状态、速度、风速等因素影响产生的俯仰、摇摆、偏航。

4 一般要求

4.1 公路隧道半航空瞬变电磁探测应满足下列条件：

- 探测目标体与围岩有明显的电阻率差异，能引起能分辨的异常；
- 探测目标体有足够的规模，目标体埋深在探测能分辨范围内；
- 测区内无强烈的电磁干扰，或电磁干扰不产生难以控制的影响，经数据预处理后能得到有效压制；
- 测区内地形地貌条件适合发射源布设。

4.2 在不明确方法是否适用或附近无类似案例的情况下，宜在开展探测工作进行方法试验，评价方法的可行性、有效性。

4.3 应依据探测区域位置、隧道分布范围进行测线设计，测线分布应覆盖隧址区。

4.4 发射源装置形式宜选用接地长导线源或大回线源，在地形复杂区域推荐选择接地长导线源。如选用大回线源，应按 5.3 的规定在现场开展方法试验，确认可用后再开展探测工作。

4.5 探测使用的仪器设备应满足附录 A 和设计书规定的技术指标。

4.6 数据采集前应进行安全检查、仪器检查和测试。

4.7 探测工作过程中应注重安全生产和环境保护。

5 探测技术设计

5.1 资料收集

编写设计书前，收集的资料应至少包括：

- 测区的人文、气象、交通；
- 测区的地形、水系、土壤、植被；
- 测区及邻区的地质、水文、物化探、遥感及测绘。

5.2 踏勘

测区现场踏勘主要内容应至少包括：

- 发射端、无人机起降点选址场地条件；
- 测区地形、水系分布、通视和交通运输等工作条件；
- 探测目标体以及围岩的电性参数；
- 地质和人文干扰因素的种类、强度及分布等情况，测区噪声水平；
- 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。

5.3 方法试验

5.3.1 开展探测设计前，应进行方法可行性分析、方法有效性分析和现场试验。

5.3.2 方法可行性分析应包括下列内容：

- 探测目标体与围岩之间是否存在能分辨的电性差异，探测方法是否具备应用的前提条件；
- 利用滤波、叠加等降噪技术是否能使探测结果满足实际勘探分辨率要求；
- 探测目标体埋深和预测规模大小是否在现行仪器有效探测范围内。

5.3.3 方法有效性分析应包括下列内容：

- 邻区或其他条件类似地区的实际工作效果；
- 正演计算或模拟试验结果；
- 野外现场方法试验结果。

5.3.4 凡属下列情况之一者，应进行现场试验：

- 地区或探测目标体电性特征不明确，未开展过电法类工作；
- 探测目标体与围岩之间的电性差异较小，或探测目标体的规模相对较小或埋深较深，不能确定是否能探测到目标异常响应的地区；
- 测区内存在电磁干扰且对探测结果有较大影响的地段。

5.3.5 试验剖面宜选在地质情况清楚、具有典型地电特征的地段。

5.4 测区设计

5.4.1 隧道长度过长或部分区段弧度较大时，应根据隧道走向的变化情况分区。

5.4.2 测区分区宜遵循下列原则：

- 根据发射源位置、无人机性能等因素对测区分区，分区形状规则并减少航点数量；
- 在地形条件允许的情况下，测区与发射源之间的收发距设计参见附录 B；
- 分区测量时，相邻分区至少重叠 50 m。

5.4.3 测线设计宜符合 JTG/T 3222—2020 中 3.1.5、DB45/T 2148—2020 中第 4 章的规定，并按照下列原则执行：

- 测线以隧道为中心向左右两侧均匀布设，宜与隧道走向平行；

- 单个分区内测线宜为直线；
- 测线间距宜 ≤ 10 m，测线两端超出隧道进出口 50 m；
- 根据探测需要宜加密测线或增加其他走向的测线。

5.5 发射端参数设计

5.5.1 发射源宜平行于测线方向布置。应避开已知的平行断裂构造、矿体、大规模地表及地下水域、高压电线。

5.5.2 发射源长度和发射电流应根据探测任务确定，应保证足够的发射电偶极矩。发射源长度的确定参见附录 B，探测目标体埋深较深时，宜增加发射源长度，探测目标体埋深较浅时，宜减小发射源长度。

5.5.3 每一分区均应布设一个发射源。发射电极和供电导线布置应符合 DZ/T 0280—2015 中 7.3 的规定。发射源的测量工作应符合 DZ/T 0153 的有关规定。

5.5.4 发射源布置完毕后，应检查供电导线是否漏电、是否正确连接、接地情况是否良好、测量接地电阻是否满足探测需求。其中，测量接地电阻应符合以下规定：

- a) 在单侧电极处，将不同电极坑两两相接，或将多个极坑分成两组，分别测量不同极坑组合的接地电阻；当接地电阻较大时，对极坑进行处理，重新选择极坑位置或添加导电溶液或增大接地面积等；
- b) 在满足 a) 要求下，将两端电极以导线相连，再次测量接地电阻，并判定是否能够达到预期发射电流；
- c) 完成 a)、b) 步骤如无法达到预期发射电流，重新选定电极布置位置并重复 a)、b) 步骤，直至满足探测要求。

5.6 接收端参数设计

5.6.1 测线设计应与 5.4.2 一致。

5.6.2 飞行高度应通过分析地形数据、无人机续航能力、飞控参数、气温气压、天气、作业安全等各种因素后综合确定。确保安全的条件下，飞行高度宜超过测区内最高障碍物 50 m。当测区内地面电磁干扰较多时，宜抬高飞行高度，或通过飞行试验确定合理的飞行高度。

5.6.3 飞行速度宜控制在 5 m/s~10 m/s，不应超过 15 m/s，应设置自动巡航速度，除无人机起降外，应避免手动操作。

5.6.4 无人机与接收线圈之间的距离应根据试验确定，在该距离下无人机电磁干扰可忽略或可有效校正。

5.6.5 无人机起降点宜选取地形平坦、地势较高、交通便利、距离航线起（终）点较近的区域。

5.6.6 所用导航定位系统静态定位精度（均方差）和动态定位精度均应优于 ± 2 m。导航精度以偏航距衡量，探测工作中的偏航距应不大于测线线距的 1/5。

5.7 工作精度确定

5.7.1 工作精度的确定应符合下列要求：

- a) 根据工作地区、工作任务及工作装置的特点，以取得较好的地质效果为原则确定工作精度；
- b) 以能够观测与分辨勘查对象所产生的最弱异常为原则，使最大误差的绝对值小于任何有意义异常的 1/3。

5.7.2 根据重复性检查的结果确定工作精度，按式（1）计算的均方相对误差 M 确定，全区观测值允许均方相对误差为 $\pm 20\%$ 。电磁干扰很强的区域，可以分区设计精度或适当放宽，并由设计书另行规定。

5.8 设计书编写

设计应在资料收集的基础上, 经过对测区认真踏勘, 以合同或任务书的要求为依据进行编写。设计书编写内容与要求参见附录C。

6 仪器设备使用及维护

6.1 使用与维护

- 6.1.1 探测装置包括发射装置和接收装置。发射装置包括发射机、发电机组和供电电极等, 接收装置包括接收机、接收线圈、无人机等。仪器的零部件、备件及工具应随仪器保管。
- 6.1.2 供电电极宜选用导电性能良好的材质, 宜选用铁、钢、铜、铝等板状或棒状金属做电极, 其规格和数量宜根据工区接地条件及供电电流强度选定。
- 6.1.3 供电导线内阻要求应符合 DZ/T 0280—2015 中 6.1.5 的规定。
- 6.1.4 仪器存放场所应避免阳光直射, 保持通风、干燥、清洁和无腐蚀气体; 运送、使用中应防尘、防雨、防潮、防暴晒等。
- 6.1.5 仪器应配有专职操作员, 野外工作期间按仪器使用说明书和操作规程进行使用与维护。
- 6.1.6 应建立仪器使用、维护记录档案, 并有专人负责管理和维护。根据仪器的配置、性能指标以及使用说明, 在飞行作业前后详细记录仪器使用中出现的故障和排除故障的措施。
- 6.1.7 发射机与发电机组的使用与维护应符合 DZ/T 0280—2015 中 6.3 的规定。
- 6.1.8 无人机的使用与维护应符合 CH/Z 3001—2010 第 10 章的有关规定。

6.2 检查与测试

- 6.2.1 野外探测使用的仪器应检测、标定合格, 每次开工前, 应进行仪器自检, 自检合格后使用。
- 6.2.2 每次开工前应对仪器及辅助设备进行检查。
- 6.2.3 同一测区如使用 2 台及 2 台以上仪器进行探测时, 应进行一致性检查, 相对误差的计算应符合 DB45/T 2148—2020 中 7.1.3 的规定, 且相对误差不应大于 $\pm 5\%$ 。
- 6.2.4 漏电检查应符合 JTG/T 3222—2020 中 5.1.9 的规定。
- 6.2.5 仪器设备发生故障, 应检修合格后使用, 检修应由熟悉仪器性能、原理、掌握检修技能的人员负责。
- 6.2.6 仪器设备应定期通电检查, 有充电电池的仪器, 应定期维护。

7 野外数据采集

7.1 准备工作

- 7.1.1 应收集测区主要岩性的电阻率参数, 无法收集的宜对测区的主要地质体进行电阻率参数测定。
- 7.1.2 飞行现场管理主要包括:
 - 作业区域应设置明显的警示标志;
 - 无人机起飞和降落时, 工作人员与无人机应保持 5 m 以上的安全距离。
- 7.1.3 收集的环境条件信息应至少包括:
 - 海拔高度;
 - 地形地貌;
 - 地面和空中的风向、风速;

- 环境温度、湿度；
- 电磁环境和雷电；
- 空气含尘量；
- 起降场地地面尘土情况；
- 气象条件。

7.1.4 噪声调查应按照下列程序进行：

- a) 调查测区内噪声主要来源；
- b) 在隧道中心区附近均匀选取设计测线数量的 1/10~1/5 测线（包含隧道中心测线），通过关停发射机，使用无人机搭载接收装置进行数据采集，评估背景噪声；
- c) 对实测结果进行频谱分析，了解噪声的频带与分布特征，确定去噪参数、数据叠加策略及抗噪措施；
- d) 强干扰条件下，选择避开干扰严重的时间段进行数据采集。

7.1.5 仪器设备准备应按照下列规定执行：

- 发射端布设按 5.5 的要求执行；
- 接收端参数设计按 5.6 的要求执行；
- 数据采集前，发射端操作员检查发射端连线与电极的连通情况，确保电极接地良好；接收端操作员确保接收机与发射机的时钟处于同步状态；
- 数据采集前，接收机、接收线圈、导航定位系统工作正常，无人机与飞控平台连接正常，对发电机组进行安全检查和发射测试。

7.2 野外数据采集

7.2.1 探测过程应按照设计书中规定的测区、测线、探测任务安排依次进行数据采集。

7.2.2 发射端工作人员开启发射系统，系统工作正常后通知接收端工作人员，并记录发射电压、发射电流、发射模式、开始和结束发射的时间。

7.2.3 接收端工作人员应在规定的起降点操作无人机和设备。

7.2.4 接收端工作人员应按照设计书设置和检查飞行参数，在数据采集前检查并确保接收机及接收线圈开机且处于正常采集状态，设置完成且检查无误后控制无人机起飞进行数据采集。

7.2.5 数据采集时应做好数据记录（记录模板见附录 D），除按规定记录项目名称、日期、天气、海拔、飞行高度、航速、测线线号、原始数据文件夹、起始时间、结束时间、转弯点坐标、发射电流等信息外，还应在备注栏记录附近可能影响探测结果的地质现象、地形地貌、可能引起噪声的干扰源等，GNSS 及数据检查结果应在完成 GNSS 检查及数据检查后填入表中。

7.2.6 飞行作业中，若发现测线偏航距、飞行高度等不满足设计要求时，应及时停止作业。

7.2.7 飞行作业过程中，每架次数据采集完成后，应检查接收线圈、接收机的仪器状态是否正常。

7.2.8 野外工作过程中，如遇仪器发生故障无法排除时，应立即送修，并做好记录。

7.2.9 完成作业后，应及时将采集的数据传入计算机，经检查确认无丢失遗漏数据后，存盘备份，直至确认所有数据无遗漏并备份成功后方可清除仪器内存储的数据。

7.3 数据质量检查

7.3.1 检查内容

质量检查包括数据重复性检查和连续性检查，应重点检查隧道中心测线及异常地段。

7.3.2 重复性检查

- 7.3.2.1 从测区内均匀选取测线进行重复测量，检查测线应不少于该测区测线总数的 3%且不少于 2 条，应包含隧道中心（或距离隧道线位中心最近）的测线。
- 7.3.2.2 重复性检查应确保检查测线前后两次的测线航迹、飞行高度、发射源位置相同，发射电流尽可能相同。
- 7.3.2.3 经数据预处理后，单条检查测线的检查前后两次数据得到的衰减电压曲线形态应一致，对应时间道的数值接近。观测数据值允许均方相对误差 M 为±20%，按式(1)、式(2)计算。

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{2mn} \sum_{i,j=1}^{i=m,j=n} \left(\frac{A_{ij}-A_{ij'}}{\overline{A_{ij}}} \right)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\overline{A_{ij}} = \frac{A_{ij}+A_{ij'}}{2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- M ——检查测线的均方相对误差，单位为%；
- m ——单条检查测线的测点数，单位为个；
- n ——参加统计的时间道数，单位为个；
- A_{ij} ——第*i*点第*j*时间道的原观测数据值，单位为伏特每平方米（V/m²）；
- A_{ij}' ——第*i*点第*j*时间道检查观测的数据值，单位为伏特每平方米（V/m²）；
- $\overline{A_{ij}}$ ——第*i*点第*j*时间道原观测数据值与检查观测数据值的均值，单位为伏特每平方米（V/m²）。

- 7.3.2.4 检查测线视电阻率剖面与测量测线视电阻率剖面形态应一致。若检查前后视电阻率形态出现较大差异，应检查仪器，重新进行测量。
- 7.3.2.5 检查测线数据与原测线数据均应归档保存。

7.3.3 连续性检查

- 7.3.3.1 检查相邻测线视电阻率剖面的连续性，存在突变的测线及其相邻测线应进行重复测量。
- 7.3.3.2 检查相邻测区拼接处的视电阻率连续性。

7.4 环保措施

- 7.4.1 工作区垃圾应分类收集处理，有毒有害垃圾应进行回收处理。
- 7.4.2 发射端的布设宜避让水域及村庄等，并在发射端布设警戒线。
- 7.4.3 工作结束后，应回收设立的标识牌、警戒线等，并清扫、恢复场地。

7.5 安全措施

- 7.5.1 野外数据采集过程中安全作业与管理应符合 GB/T 50585 的有关规定。
- 7.5.2 发射机、发电机组、接收装置的安全措施应符合 DZ/T 0280—2015 中 7.5 的规定。
- 7.5.3 无人机设备的检查、使用、维护应按照岗位分工负责并相互配合，由具备相应资格、有经验的人员承担。

8 数据质量评价

8.1 GNSS 轨迹评价

- 8.1.1 对采集到的测线数据进行 GNSS 轨迹评价，主要包括测线 GNSS 轨迹信息完整性和实际测线 GNSS 轨迹信息与设计测线的吻合性。

8.1.2 当某条测线 GNSS 轨迹信息不完整时，应重新采集。

8.1.3 利用飞行时记录的 GNSS 轨迹信息绘制航迹，当某条测线 GNSS 轨迹信息完整时，应评估其 GNSS 轨迹信息与设计测线的吻合度，即计算每架次（测量工作完成时，计算全测区）的平均偏航距，按照 5.6.6 中的规定评估测线偏航距，若不满足允许的偏航距要求，应重新采集。

8.1.4 当测线 GNSS 轨迹信息均满足完整性和吻合性时，该测线的 GNSS 轨迹评价合格。

8.1.5 应详细记录每次野外采集的 GNSS 轨迹信息质量和姿态情况，并填入《飞行数据质量评价表》（见附录 E）。

8.2 数据连续性评价

8.2.1 应对每条测线的半航空瞬变电磁数据进行连续性评价，若测线的缺测值超过 5%，应重新采集。

8.2.2 应对每条测线的姿态数据进行连续性评价，将存在下列参数突变的数据剔除：

- 三轴角速度；
- 三轴加速度；
- 俯仰角、滚转角、偏航角；
- 高程。

9 数据处理与资料解释

9.1 数据预处理

9.1.1 一般要求

数据预处理内容主要包括天电噪声去除、运动噪声去除、姿态校正、数据叠加及时窗积分。当测区地形起伏较大时，应进行地形校正。

9.1.2 天电噪声去除

宜选用 α -trimmed 均值滤波器方法去除， α -trimmed 均值滤波器公式见式（3）。

$$X_{\alpha} = \frac{1}{N-2[\alpha N]} \sum_{i=[\alpha N]+1}^{N-[\alpha N]} X_i \dots\dots\dots (3)$$

式中：

X_{α} —— α -trimmed 均值滤波后数据值，单位为伏特每平方米（V/m²）；

N ——窗宽；

α ——裁剪参数；

$[\cdot]$ ——取整函数；

X_i ——排序后数据中的第 i 个数据值，单位为伏特每平方米（V/m²）。

9.1.3 运动噪声去除

宜选用小波分解、多项式拟合等方法去除。

9.2 资料解释

9.2.1 一般要求

9.2.1.1 应以半航空瞬变电磁法的理论及数值模拟为基础，以地质情况与物性条件为前提，结合测区实际施工情况及干扰情况，根据半航空瞬变电磁法的衰减曲线图、多测道剖面曲线图和视电阻率断面图进行异常的定性解释，判断异常的形态与规模。

9.2.1.2 在定性解释的基础上，综合其他地质资料和地球物理资料进行进一步解释。

9.2.1.3 资料解释应遵循以下原则：

- 关注视电阻率异常区，并对其潜在的不良地质体做出推断和解释；
- 考虑各项人文、地质干扰引起的实测数据改变；
- 根据已知资料的增加不断修正、完善解释成果；
- 考虑物探成果的多解性，多方法、多角度进行综合分析。

9.2.2 姿态矫正

9.2.2.1 接收线圈采集过程中姿态示意图见图 1。

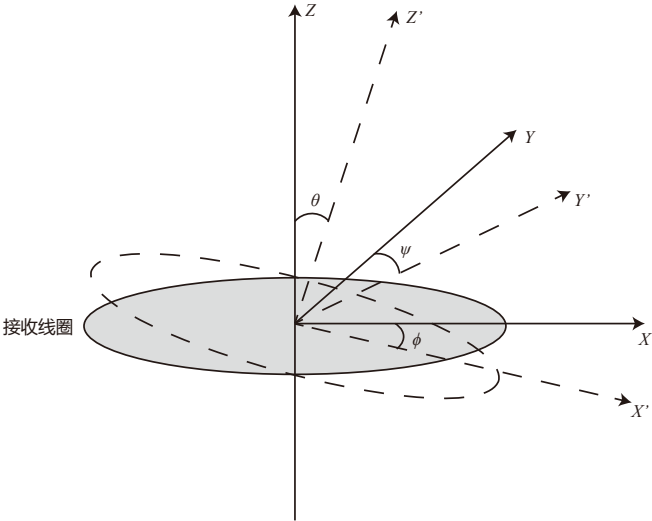


图1 接收线圈姿态示意图（线圈运动方向沿 X 轴）

9.2.2.2 通过姿态数据计算旋转矩阵 R ，利用式(4)对实测数据进行几何校正。旋转矩阵计算见式(5)。

$$B = RB' \cdots \cdots (4)$$

式中：
 B ——实际采集数据；
 R ——旋转矩阵；
 B' ——姿态矫正后数据。

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta \end{bmatrix} \cdots \cdots (5)$$

式中：
 R ——旋转矩阵；
 θ ——线圈俯仰角；

ϕ ——线圈偏航角；

ψ ——线圈滚转角。

9.2.3 数据叠加

对采集的数据应按照叠加原理进行叠加。

9.2.4 时窗积分

宜选用对数等间距时窗积分，参数设置根据实际采集参数确定。

9.2.5 地形校正

宜选用考虑地形起伏的三维反演方法进行反演以直接消除地形影响。当采用一维反演时，可将第一层设置为空气层，测点与地面间的距离为该层的厚度。

9.3 数据处理

9.3.1 视电阻率计算见附录 F。

9.3.2 根据 9.2.1 中计算的视电阻率进行探测区域的三维视电阻率成像。

9.3.3 根据隧道线位高度提取不同高程的视电阻率水平断面图，了解探测区域横向电性分布。

9.3.4 根据隧道中轴线及洞旁线的经纬度坐标，提取相应位置的视电阻率纵断面图，了解隧道洞身周围纵向的电性分布，并结合水平断面图进行综合对比与分析。

9.3.5 针对上述视电阻率水平断面图和纵断面图的分析结果，圈定隧道区域内不良地质体的位置及规模，并绘制隧道中轴线处和隧道设计高程处的地质推断图。

9.3.6 根据需要对视电阻率异常区进行视电阻率断面图的加密提取。

10 成果报告编写

10.1 基本要求

10.1.1 应在野外验收合格后进行，野外验收见附录 G。

10.1.2 报告编写应根据任务书、设计书、设计审查意见书、设计批复意见书、设计调整批复意见书、野外验收意见进行编写，编写内容及格式应符合 GB/T 14499、JTG/T 3222—2020、DB45/T 2148—2020 的有关规定。

10.1.3 应在系统分析收集的各类资料，完成定性、定量解释及综合研究的基础上，提出结论及建议。

10.1.4 报告附图、附表、附件应规范、合理、美观，文字说明简练、清楚。

10.2 成果报告主要内容

成果报告编制的主要内容见附录 H。

10.3 成果报告附图

10.3.1 探测成果图件应包括：

——基础成果图：实际资料图、典型测线数据预处理图、视电阻率平面图、视电阻率断面图；

——解释推断成果图：地质推断平面图、地质推断断面图、其他地质推断图。

10.3.2 探测成果图件数目应符合下列要求：

——视电阻率平面图不少于 3 个不同高程的图件，包含隧道设计高程处视电阻率平面图；

- 不同位置的视电阻率纵断面图不少于 3 件，包含隧道中轴线的视电阻率断面图；
- 地质推断图不少于 3 件，包含隧道中轴线和隧道设计高程处的地质推断图。

附 录 A
(规范性)

半航空瞬变电磁探测仪器设备主要技术指标

A. 1 半航空瞬变电磁法接收机主要技术指标应符合表 A. 1 的规定。

表A. 1 接收机主要技术指标

参数	技术指标
采样率	$\geq 200\text{ kHz}$
噪声水平	$< 100\text{ }\mu\text{V}$
采样位数	$\geq 24\text{ bit}$
工作温度	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$
湿度	$0\%\sim 80\%$

A. 2 半航空瞬变电磁法接收线圈主要技术指标应符合表 A. 2 的规定。

表A. 2 接收线圈主要技术指标

参数	技术指标
噪声水平	$< 20\text{ }\mu\text{V}$
有效面积	$\geq 100\text{ m}^2$
灵敏度	$> 0.1\text{ mV/nT}$
带宽	$\geq 40\text{ kHz}$
工作温度	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$
湿度	$0\%\sim 80\%$

A. 3 半航空瞬变电磁法发射机主要技术指标应符合表 A. 3 的规定。

表A. 3 发射机主要技术指标

参数	技术指标	备注
输出电压范围	$\geq 450\text{ V}$	——
输入电压范围	$220\text{ V}\sim 380\text{ V}$	——
电流测量精度	$\pm 1\%$	——
发送电流	$\geq 5\text{ A}$	——
最大输出功率	$\geq 20\text{ kW}$ (25 $^{\circ}\text{C}$)	或根据要求选择
时间同步精度	$\pm 0.5\text{ }\mu\text{s}$	——
工作温度	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$	——
湿度	$0\%\sim 80\%$	——

A. 4 半航空瞬变电磁法无人机主要技术指标应符合表 A. 4 的规定。

表A. 4 无人机主要技术指标要求

项目	参数	技术指标
飞行器	悬停精度（P-GPS）	垂直：±0.5 m，水平：±1.5 m
	最大旋转角速度	俯仰轴：300° /s 航向轴：150° /s
	最大可承受风速	≥8 m/s
	最大水平飞行速度	≥65 km/h（无风环境）
	工作环境温度	-10℃~+40℃
	湿度	0%~80%
遥控器	通信距离 （无干扰、无阻挡）	≥3 km
	工作环境温度	-10℃~+40℃
	湿度	0%~80%
	等效全向辐射功率（EIRP）	10 dBm @ 900M，13 dBm @ 5.8G，20 dBm @ 2.4G

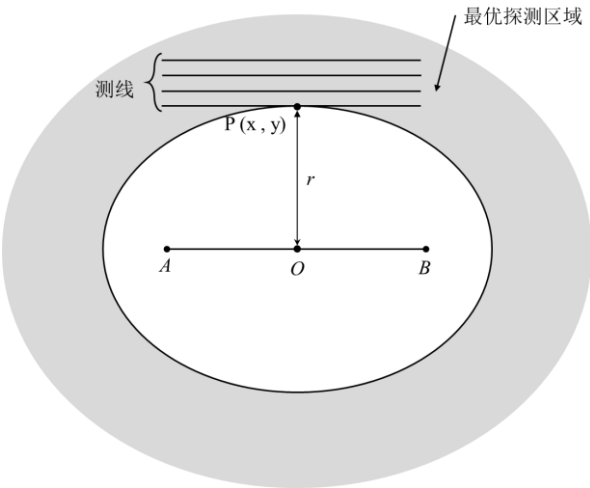
附录 B
(资料性)

最优探测区域设计方法

最优探测区域按式 (B. 1) 进行设计。最优探测区域位置见图B. 1。式 (B. 1) 确定了一个椭圆方程，与发射源距离最近的测线宜位于椭圆边界处，最优探测区域与发射源之间的距离 r 为点 O 与点 P 间的直线距离。若地形条件极其复杂，无法满足式 (B. 1) 布设条件，宜根据实际地形和探测区域位置布设发射源。

$$\frac{x^2}{(1100+2H)^2+L_{AB}^2} + \frac{y^2}{(1100+2H)^2} = 1 \dots\dots\dots (B. 1)$$

式中：
 x ——接收点的横坐标，单位为米（m）；
 y ——接收点的纵坐标，单位为米（m）；
 H ——目标体埋深，单位为米（m）；
 L_{AB} ——发射源长度，单位为米（m）。



图B. 1 最优探测区域与发射源位置示意图 (O 为圆心)

注：P (x, y) 为椭圆边界与测线相切处的切点坐标；A和B均为发射源电极，O为发射源中心；灰色区域为最优探测区域。

附 录 C
(资料性)
设计书编写内容与要求

C.1 前言

应包括以下主要内容：

- 工作目的与任务：任务来源、具体任务、工作目的；
- 测区概况：测区范围、地理坐标及所属行政区划、自然地理、交通、经济、气象、人文干扰、施工条件等情况，项目可行性分析；
- 以往地质工作：简述以往地质、物探工作程度、以往地球物理异常特征、解释推断结果及其依据和存在的主要问题，说明对以往资料的利用情况。

C.2 测区地质及地球物理特征

应包括以下主要内容：

- 地质概况：简述测区地层、构造、岩浆岩及水文地质情况；
- 地球物理特征：提供目标地质体与背景地层物性数据或地质—物理模型，分析半航空瞬变电磁法的有效性及其干扰因素。

C.3 野外工作方法和技术要求

应包括以下主要内容：

- 工作方法：
 - 测区范围确定、发射端和接收端设计及其依据；
 - 仪器设备、工作装置、相关参数选择及其依据等；
 - 电性参数测定工作布置及其依据。
- 工程布置及质量要求：简述比例尺、测线方向、线号编排、设计工作量及质量要求；
- 质量要求。

C.4 资料处理、解释及报告提交

应包括以下主要内容：

- 资料处理：简述资料处理的方法、目的、方案及流程；
- 资料解释：简述资料解释方法、流程及预期成果；
- 报告提交：简述拟提交报告的主要内容和报告提交的时间。

C.5 施工组织管理与措施

应包括以下主要内容：

- 施工组织：简述项目承担单位资质、施工程序、拟投入人员；
- 技术措施：简述本次勘探的特点、技术难点及采取的针对性保障措施；
- 简述安全措施与环保措施等；
- 工作周期及进度安排；
- 应急预案：野外采集作业前，应制定应急预案，其中无人机相关的应急预案应符合 CH/Z 3001—2010 中 9.5 的规定。

C.6 经费

根据需要编制经费预算。

C.7 设计附图

应包括以下主要图件：

- 相应比例尺地形地质图；
- 物探工作布置及其依据图；
- 测区地层、电性标志层综合对比柱状图（作为插图）；
- 典型地质剖面（作为插图）。

附 录 D
(规范性)
飞行数据野外记录表

半航空瞬变电磁飞行数据野外记录见表D. 1。

表D. 1 半航空瞬变电磁飞行数据野外记录表

项目名称					
日期		天气		无人机型号	
仪器型号		飞行高度 (m)		飞行速度 (m/s)	
无人机起降点	Long (X):	Lat (Y):	H:		
发射源A坐标		发射源B坐标		发射电流 (A)	
架次	测线编号	测线开始采集时间		测线结束采集时间	备注
记录员:		操作员:			

附 录 E
(规范性)
飞行数据质量评价

野外采集数据飞行质量评价见表E. 1。

表E. 1 飞行数据质量评价表

测线	GNSS信息 (P/F)	数据完整 (P/F)	姿态 (P/F)	QC结果 (P/F)	重飞 (是/否)	结论 (P/F)	备注

附录 F

(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

在长导线源下的半航空瞬变电磁响应,宜选用剖分叠加有限求和的策略求解。笛卡尔坐标系下,观测点为 M ,假设将接地长导线源 AB 均匀剖分成 n 份(见图F.1), O 为长导线源中心,层状大地单个接地长导线源在空中产生的频率域磁感应强度表达式见式(F.1)~式(F.3)。

$$B_x(\omega) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{I ds_i}{2\pi} \mu_0 \sin \varphi_i \cos \varphi_i \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_0(\lambda r_i) d\lambda \right. \\ \left. - \frac{I ds_i}{2\pi} \mu_0 \sin \varphi_i \cos \varphi_i \int_0^\infty \frac{2\lambda}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_i) d\lambda \right] \dots\dots\dots (F.1)$$

$$B_y(\omega) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{I ds_i}{2\pi} \mu_0 \sin^2 \varphi_i \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_0(\lambda r_i) d\lambda \right. \\ \left. + \frac{I ds_i}{2\pi} \mu_0 (\cos^2 \varphi_i - \sin^2 \varphi_i) \int_0^\infty \frac{2\lambda}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_i) d\lambda \right] \dots\dots\dots (F.2)$$

$$B_z(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{I ds_i}{2\pi} \mu_0 \sin \varphi_i \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_i) d\lambda \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

B ——磁感应强度,单位为特斯拉(T);

ω —— $\omega = 2\pi f$,角频率,单位为弧度每秒;

ds_i ——剖分后单个导线源的微分长度,单位为米(m);

n ——接地长导线源被剖分的份数;

μ_0 —— $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$,真空磁导率,单位为亨利每米(H/m);

I ——发射电流强度,单位为安[培](A);

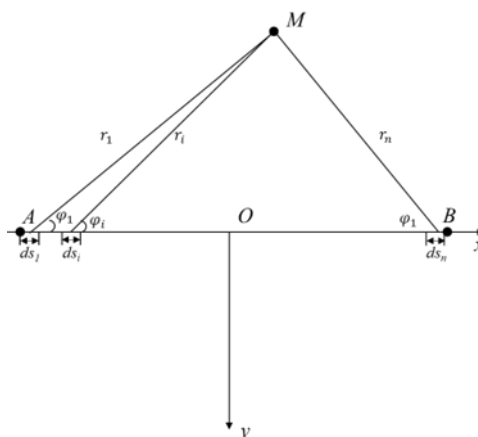
φ_i ——接收点与剖分后电偶源之间的连线与电偶源的夹角,单位为度($^\circ$);

r_i ——接收点与剖分后电偶源之间的距离,单位为米(m);

λ ——几何因子;

$J_0()$ ——0阶第一类贝塞尔函数;

$J_1()$ ——1阶第一类贝塞尔函数。



图F.1 接地长导线源剖分叠加示意图

根据积分变换理论,可得频率域磁感应强度与时间域磁感应强度的变换关系(F.4),联立式(F.4)和式(F.1)~式(F.3)可求得接地长导线源下层状导电介质在空中产生的时间域磁感应强度。

$$B(t) = \text{Im}B(t) + \text{Re}B(t) \dots\dots\dots (\text{F. 4})$$

$$\begin{cases} \text{Im}B(t) = B_0 - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Im}B(\omega)}{\omega} \cos(\omega t) d\omega & (\text{虚部}) \\ \text{Re}B(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re}B(\omega)}{\omega} \sin(\omega t) d\omega & (\text{实部}) \end{cases} \dots\dots\dots (\text{F. 5})$$

式中:

$B(t)$ —— t 时间下磁感应强度,单位为特斯拉(T);

E_0 ——初始电场值,单位为伏特(V);

t ——时间,单位为秒(s);

ω —— $\omega = 2\pi f$,角频率,单位为弧度每秒(rad/s)。

单辐射场源半航空瞬变电磁全域视电阻率根据式(F.1)~式(F.4)求取的磁感应强度分布选用迭代法求解。

附 录 G

（资料性）

野外工作验收要求及判定规则

G.1 验收要求

G.1.1 野外工作完成后应向项目委托单位提出野外工作验收申请。

G.1.2 野外工作结束转入报告编写前,应进行野外工作验收,野外工作验收由项目主管部门或委托单位组织实施。

G.1.3 野外工作验收,应具备以下条件:

- 已完成设计规定的全部野外探测工作;
- 原始资料齐全;
- 已经按有关规定对原始资料进行了整理,质量检查和编目造册,并形成野外工作总结;
- 承担单位已完成初步野外验收。

G.1.4 承担单位应提供下列野外验收资料:

- 任务(委托)书或合同书、技术方案或设计书;
- 野外观测数据记录;
- 各测线的坐标和高程数据(含电子文档);
- 探测成果图件;
- 原始数据;
- 飞行数据质量评价;
- 野外工作总结,包括任务完成情况、质量管理、探测成果、建议与存在的问题等。

G.2 验收依据

项目任务书、设计书、设计审查意见书、设计批复意见、设计调整及批复意见以及相关技术标准。

G.3 判定标准

G.3.1 野外验收的探测成果资料符合以下规定,则判定合格:

- 提交的成果资料齐全,符合归档要求;
- 完成任务书或合同规定的各项任务,成果符合质量要求;
- 测区及测线布设、接收端和发射端参数设置满足设计书要求;
- 原始数据及图件保存完整、无损,记录时间符合设计书的要求,档头各项参数齐全无误;
- 野外观测数据记录填写齐全,对测点周围地形地貌等有草图和描述;
- 数据质量评价记录完整、可靠;
- 各项记录和计算资料完整、齐全、清晰、正确;
- 仪器型号、自检及校验以及仪器性能试验满足附录B的有关要求;
- 采用的技术方法和技术措施符合相关标准的规定、满足技术设计书的要求;
- 野外工作总结内容齐全,能反映工程的全貌,结论明确,建议合理可行。

G.3.2 存在以下情况之一,探测成果资料判定为不合格:

- 仪器设备不合格或使用故障设备采集;
- 原始记录不全;

- 数据存档与内容不符；
- 测区及测线布设不满足任务书要求；
- 未按照要求重复观测和检查观测；
- 探测结果未能反映有效的地质异常信息，或无法用于地质解释。

附 录 H
(资料性)
成果报告主要内容

H.1 前言

H.1.1 工作目的与任务

简述任务来源及任务要求，本次物探测量工作所要达到的地质目的，以及批复下达的工作量。

H.1.2 测区概况

测区概况主要包括以下内容：

- 位置交通情况：包括坐标范围，行政区划及交通情况；
- 自然地理情况：包括地形地貌、山川河流、土壤植被及气候特点；
- 已知地质资料：水文、区域、工程地质。

H.1.3 任务完成情况及主要成果

简述本次工作的起止时间、完成的实物工作量及检查验收情况，取得的主要地质成果及存在问题。

H.1.4 工作参考资料及依据

列举本次工作主要参考的国家、地方、行业标准及相关规定文件。

H.2 地质及地球物理特征

H.2.1 以往地质及物探工作

简述以往开展过的地质及物探工作简况，结合其工作成果和存在问题做出简要评价，同时阐明本次工作的意义。

H.2.2 地质特征

主要包括以下内容：

- 区域水文地质特征，包括区域内地表水、地下水分布特征及规律等；
- 区域地质特征，重点叙述与目标任务有关的地形地貌、地层、构造、岩浆作用、变质作用等。

H.2.3 地球物理特征

在隧址区内，根据以往及本次工作取得的物性参数，对物性特征进行统计计算与分析，对地球物理前提进行分析。根据本次物探测量取得的成果，简要介绍工作区异常分布特征。

H.3 飞行设计与野外采集

H.3.1 飞行设计

包含航区规划、航线设计、飞行高度及飞行速度的确定，以及发射和接收端布设与仪器参数的设计。

H.3.2 野外采集

野外采集包括以下内容：

- 所用仪器、仪器技术参数指标观测、仪器检查调节与性能试验等；
- 试验过程分析及工作参数选择分析；
- 野外观测方法、质量检查、质量评价等。

H.3.3 物性测定

物性标本的采集、测定及质量检查、物性参数的统计等，若条件不允许不增加此部分内容。

H.3.4 资料处理及质量体系和绿色勘查运行

资料处理与质量体系和绿色勘查运行包括以下内容：

- 资料整理：原始资料的检查验收及处理、资料整理方法；
- 数据质量评价：野外采集过程中原始数据质量的表格及内容；
- 图件与表册的编绘：制图精度、编制方法、主要图件和表册；
- 绿色勘查：项目实施过程中绿色勘查措施执行情况。

H.4 数据质量评价及预处理

H.4.1 数据质量评价

对观测到的数据按照第9章的规定进行质量评价，包括GNSS轨迹信息评价、数据连续性评价。

H.4.2 数据预处理

按照9.1的有关规定执行，包括对采集到的数据进行天电噪声、运动噪声的去除，将去噪后的数据进行叠加和时窗积分，必要时进行地形校正。

H.4.3 图件与表册的编绘

按照GB/T 14499的有关规定执行。图件中应包含视电阻率水平切片图、视电阻率纵切片、地质推断图等。表册应包含数据处理中涉及的原始数据、飞行数据质量评价表、质量检查。

H.5 解释推断

H.5.1 异常的识别与分类

异常的识别、异常下限的确定、异常范围圈定、异常分类、异常编号以及异常特征描述。当测区背景值变化较大时，宜分区确定异常下限。

H.5.2 异常的解释推断

H.5.2.1 异常的解释推断是物探工作的重要环节，要在充分研究已有成果的基础上进行。

H.5.2.2 所有圈定的异常均应进行定性解释，对具有重要地质意义、存在隧道设计和施工风险的异常和所有推断的异常应进行定量反演并求取异常源埋深、形态、延伸等要素。

H.5.2.3 对于和本次工作的目的任务紧密相关的部分应详细论述。

H.6 结论及建议

H.6.1 结论

对本次工作所要解决的地质任务提出地质结论并进行评价，说明本次工作的成效。

H. 6.2 问题与建议

说明本次工作中存在的问题与不足。结合探测结果，提出对公路隧道勘察设计的意见和建议，以及下一步查证的建议。

H. 7 附图及附表

H. 7.1 附图应包括但不限于下列内容：

- 实际资料图（工区地理位置、发射源位置和探测区域设计、检查测线位置、物性测定点位等）；
- 典型测线的数据预处理图；
- 隧道视电阻率断面图，包含隧道中轴线处视电阻率断面图；
- 隧道视电阻率平面图，包含设计高程处视电阻率平面图；
- 隧道三维视电阻率图；
- 地质推断图及其它推断的图件。

H. 7.2 附表应包括但不限于下列内容：

- 野外探测原始数据；
- 飞行数据质量评价表。

参 考 文 献

- [1] JTG/T 3222—2020 公路工程物探规程
-