



T/CECS XXX—20XX

中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会 标 准

铁路隧道航空电磁法勘探规程

Code for airborne electromagnetic exploration of railway tunnels

（征求意见稿）

（在提交反馈意见时，请将知道的相关专利和支持性文件一并附上）

Xxxx 出版社

中国工程建设标准化协会标准

铁路隧道航空电磁法勘探规程

Code for airborne electromagnetic exploration of railway tunnels

（征求意见稿）

T/CECS XXX—20XX

主编单位：中铁二院工程集团有限责任公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：xx 年 xx 月 xx 日

Xxxx 出版社

2023 年·北京

中国工程建设标准化协会公告

第 XXX 号

关于公布《铁路隧道航空电磁法勘探规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发 2021 年第一批协会标准制订、修订计划的通知》（建标协字〔2021〕11 号）的要求，由中铁二院工程集团有限责任公司等单位编制的《铁路隧道航空电磁法勘探规程》，经本协会铁道分会组织审查，现批准发布，编号为 T/CECS**-2023，自 2023 年*月*日起施行。

中国工程建设标准化协会

XXX 年 XX 月 XX 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发 2021 年第一批协会标准制订、修订计划的通知》（建标协字〔2021〕11 号）的要求，为统一铁路航空物理勘探技术要求，提高勘探精度，保障勘探质量，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国内外标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 8 章，主要技术内容包括：总则、术语和符号、基本规定、全航空电磁法、地空电磁法、航空磁测、航空放射性测量、航空重力测量，另有 7 个附录及条文说明。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会铁道分会归口管理，由中铁二院工程集团有限责任公司负责具体技术内容的解释。本规程在使用过程中如有需要修改或补充之处，请将有关资料和建议寄送解释单位（地址：四川省成都市金牛区通锦路 3 号，邮政编码：610031），并抄送中国工程建设标准化协会铁道分会（北京市海淀区三里河路 9 号，邮政编码：100038），以供修订时参考。

主编单位：中铁二院工程集团有限责任公司

参编单位：中国铁路经济规划研究院有限公司

中国铁路设计集团有限公司

核工业航测遥感中心

四川省冶勘设计集团有限公司

西南交通大学

吉林大学

成都理工大学

主要起草人：张广泽 徐正宣 赵思为 冯涛 尹小康 刘康 王哲威 魏栋华 林之恒 甄大勇 罗威 曹云勇 王绪本 李怀渊 王志宏 张志厚 黎东升 赵晓彦 许洋 杨常所 曹策 宋章 伊小娟 张吉 欧阳吉 孟少伟 周超 柴春阳 周海根 高嵩 祁晓雨 金俊俊 贺建军 张硕 周学军 徐学渊 贾杰 舒杨 刘志军

主要审查人：（按章节顺序排序）：

目 次

1 总 则	1
2 术语和符号	2
2.1 术 语	2
2.2 符 号	4
3 基本规定	5
4 全航空电磁法	7
4.1 一般规定	7
4.2 观测设计	7
4.3 仪器设备	8
4.4 数据采集	9
4.5 资料处理与成果解译	11
5 地空电磁法	14
5.1 一般规定	14
5.2 观测设计	14
5.3 仪器设备	18
5.4 资料采集	19
5.5 数据处理与成果解译	21
6 航空磁测	24
6.1 一般规定	24
6.2 观测设计	24
6.3 仪器设备	25
6.4 资料采集	26
6.5 数据处理与成果解译	28
7 航空放射性测量	31
7.1 一般规定	31
7.2 观测设计	31
7.3 仪器设备	34
7.4 数据采集	37
7.5 资料处理与成果解译	39
8 航空重力测量	42
8.1 一般规定	42
8.2 观测设计	42
8.3 仪器设备	43
8.4 数据采集	45
8.5 资料处理与成果解译	49
附录 A 地空电磁法发射数据记录班报	51
附录 B 地空电磁法接收端数据记录班报	52
附录 C 地空电磁仪器系统参数指标	53
附录 D 航空重力仪检测结果记录表	54
附录 E 航空重力仪测量质量统计表	55
附录 F 航空放射性测量记录表格	56
附录 G 航空伽玛能谱测量各项参数计算	59

引用标准名录 错误!未定义书签。

用词说明66

附：条文说明68

Contents

1 Principle	1
2 Terminology and Symbols	2
2.1 Terminology	2
2.2 Symbols.....	4
3 Basic regulations	5
4 Aviation electromagnetic method	7
4.1 General regulation.....	7
4.2 Observation design.....	7
4.3 Instruments and equipment	8
4.4 Data collection	9
4.5 Data processing and result interpretations	11
5 Half-airborne electromagnetic method.....	14
5.1 General regulation.....	14
5.2 Observation design.....	14
5.3 Instruments and equipment	18
Data collection	19
5.5 Data processing and result interpretation.....	21
6 Aeromagnetic survey	24
6.1 General regulation.....	24
6.2 Observation design.....	24
6.3 Instruments and equipment	25
6.4 Data collection	26
6.5 Data processing and result interpretation.....	28
7 Airborne radioactive survey.....	31
7.1 General regulation.....	31
7.2 Observation design.....	31
7.3 Instruments and equipment	34
7.4 Data collection	37
7.5 Data processing and result interpretation.....	39
8 Airborne gravimetry	42
8.1 General regulation.....	42
8.2 Observation design.....	42
8.3 Instruments and equipment	43
8.4 Data collection	45
8.5 Data processing and result interpretation.....	49
Appendix A Ground-air electromagnetic method transmission data recording report.....	51
Appendix B Ground-air electromagnetic method receiver data recording report	52
Appendix C Ground-air electromagnetic instrument system parameters	53
Appendix D Aviation gravimeter test results recording report	54
Appendix E Airborne gravimeter measurement quality recording report	55

Appendix F Airborne radioactivity measurement recording report.....	56
Appendix G Aeronautical gamma spectroscopy measurement parameters calculation.....	59
Explanation of wording.....	66
List of quoted standards	67
Addition: Explanation of provisions	68

1 总 则

1.0.1 为规范铁路航空物理勘探技术要求，丰富复杂艰险山区铁路工程物理勘探方法，提高勘察效率和质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于铁路航空物理勘探工作。

1.0.3 复杂艰险山区铁路航空物理勘探宜采用全航空电磁法、地空电磁法、航空磁测、航空放射性测量和航空重力测量等综合勘察技术，并应综合考虑勘察目的、勘察阶段、地形地质、气候环境、干扰因素、交通条件等因素综合选用航空物理勘探手段。

1.0.4 铁路航空物理勘探应采用综合勘探和综合分析方法，并积极应用新技术、新方法。

1.0.5 铁路航空物理勘探应遵守有关环境保护、水土保持及安全生产等方面的法律、法规。

1.0.6 铁路航空物理勘探除应符合本规程外，尚应符合国家现行的有关强制性标准和中国工程建设标准化协会标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 全航空电磁法 airborne electromagnetic method

将电磁信号接收设备搭载在直升飞机等飞行平台上,观测发射装置激发的人工场源或天然形成的电磁场源在地下地质体产生的感应场信号,并分析其信号进而获取地下介质电性参数和特征。

2.1.2 地空电磁法 ground-air electromagnetic method

在测区附近地面上布设大功率场源,并向地下发射电磁场,在空中利用无人机等飞行平台搭载接收仪,观测地下地质体感应产生的电磁场信号,进而分析获取地下介质电性参数和特征。

2.1.3 航空磁测 aeromagnetic method

将航空磁力仪装载在飞行器上,通过观测和分析岩石、矿石(或其他勘探对象)磁性差异所引起的磁异常,进而研究地质构造、岩性界限以及矿产资源等目标体的分布规律。

2.1.4 航空放射性测量 airborne gamma-ray spectrometric survey

根据天然或人工放射性核素的伽玛射线能量差异,利用航空伽玛能谱测量系统确定地表岩石、土壤和大气中的钾、铀、钍和其它放射性核素含量及其分布的一种方法。

2.1.5 航空重力测量 airborne gravity survey

将航空重力测量系统装载在飞行平台上,通过观测和分析岩石、矿石(或其它勘探对象)密度差异引起地球重力场(异常),进而研究基础地质、矿产及能源等的一种地球物理方法。

2.1.6 正常场 normal field

物理场的相对平稳部分，又称背景场。

2.1.7 异常 anomaly

偏离正常场并超过一定数值的物理场。

2.1.8 物性 physical properties

探测对象所具有的物理性质。

2.1.9 视电阻率 apparent resistivity

在地下介质电阻率不均匀的情况下，用均匀介质的电阻率理论表达式计算得到的等效电阻率值。其数值与介质电阻率、介质形态和观测条件有关。

2.1.10 反演电阻率 inversion resistivity

根据观测的电磁场资料，采用反演方法计算所得到的地下断面电阻率。

2.1.11 资料解译 data interpretation

分析物探数据特征，确定探测对象的几何参数和物性参数，综合研究多种资料，判断引起异常的原因，说明成果的物理意义、地质意义和工程意义。根据解释深入的程度分为定性解释、定量解释和地质解释。

2.2 符 号

H ——磁场强度

dB/dt ——磁场强度随时间的变化率

ρ_s ——视电阻率

σ ——电导率

I ——发射电流为发射电流幅值，

AB ——发射导线长度，

ρ_E ——测区地下平均电阻率，

S_R ——接收系统灵敏度系数，

V_N ——环境噪声电压幅值。

3 基本规定

3.0.1 铁路工程地质勘察遇下列条件时，宜采用航空物理勘探技术：

1 艰险山区，人员难以到达、常规勘察设备运输困难，无法开展常规地面勘察工作。

2 高海拔高寒缺氧无人区或受自然生态环境保护，难以开展常规地面勘察工作。

3 不良地质和特殊岩土发育、线路比选方案较多的地区。

4 地形、地质条件复杂的桥梁、隧道、路基等工点。

3.0.2 铁路航空物理勘探应按收集资料、踏勘、编制计划、资料采集、资料处理、资料解释和报告编写的程序进行。

3.0.3 铁路航空物理勘探前，应收集和分析测区及邻区地质、地球物理、钻探、测绘、地形地貌、水文和气象等资料。

3.0.4 铁路航空物理勘探前，应前往测区现场踏勘，了解飞行作业条件，包括：管制测量区域空域的相关部门、空域繁忙程度、作业机场、夜航条件、空中与地面保障条件、交通条件、气候变化和生活保障等。

3.0.5 铁路航空物理勘探应在保证安全的条件下，采取措施尽量降低飞行高度，以提高地下地质体感应信号的强度。

3.0.6 铁路航空物理勘探技术成果应结合各类航空物探手段进行综合分析。

3.0.7 铁路航空物理勘探资料整理应和铁路勘察成果资料匹配，形成相应的图纸化表达，便于使用。

3.0.8 铁路航空物理勘探宜采用 CGCS2000 国家大地坐标系统和 1985

国家高程基准。

3.0.9 铁路航空物理勘探应进行重复线质量检查，重复线的测线长度应大于总测线长度的 5%。

3.0.10 铁路航空物理勘探仪器设备应定期检查、检定、标定和保养。

3.0.11 铁路航空物理勘探成果资料应及时交付给地质、线路和隧道等专业。

4 全航空电磁法

4.1 一般规定

4.1.1 大高差艰险山区长大深埋隧道地面物探实施困难时，可采用全航空电磁法。

4.1.2 全航空电磁法可分为全航空瞬变电磁法和全航空大地电磁法，探测时应根据隧道埋深选用或联合使用。

4.1.3 全航空电磁法可用于下列地质解译：

- 1 岩体物性差异较大的地层界线。
- 2 地质构造、断层产状和破碎带宽度。
- 3 岩溶发育段落或富水岩体的空间分布特征。

4.2 观测设计

4.2.1 开展全航空电磁法数据采集前，应开展下列工作：

- 1 资料收集与踏勘。
- 2 确定测区范围及测线布置。
- 3 通过现场试验确定飞行高度、速度等飞行参数，以及发射和接收装置工作参数。
- 4 导航定位设备、高度测量设备应进行检查校验，并测试系统灵敏度、波形等参数。

4.2.2 全航空电磁法测线设计，应满足下列要求：

- 1 尽量避开电磁干扰严重区域。
- 2 测线不宜少于 3 条，在线路中线布置 1 条测线，其余测线在两侧对称平行布置测线。

3 最外侧两条测线间距离宜为勘探深度的 2 倍，布设多条测线时线间距向两侧逐渐变大。

4 测线纵向长度应在隧道两端适当外延，每端外延长度应大于勘探深度。

5 飞行过程中宜沿地形平稳、等高飞行，离地高度和飞行速度在安全前提下应尽量小。

4.3 仪器设备

4.3.1 在全航空瞬变电磁法资料采集时，使用物探仪器设备的主要部件和技术指标应符合下列规定：

1 主要部件应包括：发射装置、接收装置、GPS 定位计、雷达高度计以及数据采集与收录系统等。

2 全航空瞬变电磁仪器主要技术指标宜符合表 4.3.1 所列参数的规定。

表 4.3.1 全航空瞬变电磁法勘探仪器设备系统主要技术参数表

参数	技术指标
发射基频	$\leq 30\text{Hz}$
发射磁矩	$\geq 10000\text{Am}^2$
飞行速度	$\leq 100\text{km/h}$
采样率	$\geq 100\text{kHz}$
电流	$\geq 50\text{A}$
关断时间	$\leq 3\text{ms}$

4.3.2 在航空大地电磁法资料采集时，使用物探仪器设备的主要部件和技术指标应符合下列规定：

1 空中接收线圈、GPS 导航定位仪、资料收录系统、高度计等量程范围应满足勘探目的要求。

2 全航空大地电磁仪主要技术指标宜符合表 4.3.2 所列参数的规定。

表 4.3.2 航空大地电磁法勘探仪器设备系统主要技术参数表

参数	技术指标
采样率	$\geq 100\text{kHz}$
测量信号	Hx、Hy、Hz 或 Hz（空中），Hx、Hy（基站）
测量频率	最低频 $\leq 50\text{Hz}$ ，最高频 $\geq 1000\text{Hz}$

4.4.3 在全航空电磁法资料采集中，综合考虑安全性能、飞行高度、续航能力、载重量、吊挂载重等因素选用适宜的直升机作为飞行平台。

4.4 数据采集

4.4.1 全航空电磁法资料采集程序主要包括仪器设备系统组装、地面测试、空中测试及资料采集等，资料采集应按图 4.4.1 流程进行。

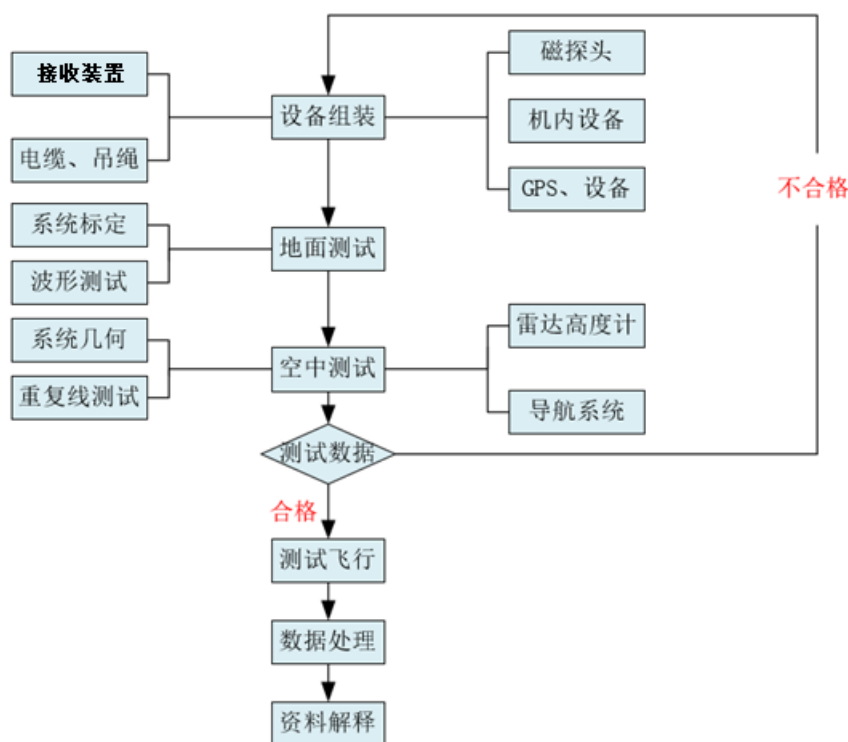


图 4.4.1 航空电磁法资料采集流程图

4.4.2 在全航空电磁法资料采集前，应对雷达高度计进行测试。

4.4.3 在全航空瞬变电磁法资料采集前，应对物探仪器设备系统进行系统灵敏度、系统几何和全波形系统标定等测试，测试应满足以下规

定：

1 系统灵敏度：系统测试灵敏度与系统出厂时灵敏度的比值应小于±10%的误差要求。

2 系统几何：线圈应保持水平姿态，并且发射线圈、接收线圈和补偿线圈应处于最优平面，吊挂结构合理，飞行过程平稳，不同分量的电磁测量参考值均应在正常范围内，变化规律符合实际情况。

3 全波形系统标定：标定文件资料应符合测量系统技术指标。

4.4.4 在全航空瞬变电磁法资料采集时，应先进行背景场测量，再进行测线飞行，最后再次进行背景场测量并符合下列规定：

1 背景场资料采集：每架次测线飞行前后均应进行背景场飞行。首先进行背景场飞行，待第一次背景场飞行完成、第一次测线飞行25~35min 后应进行第二次背景场飞行；待第二次背景场飞行完成、第二次测线飞行一小时后应进行第三次背景场飞行，直至该架次飞行结束。背景场飞行高度宜为800~1000m，飞行时间2~3min。

2 测线飞行资料采集：测线飞行时应沿地形平缓起伏飞行，线圈离地高度应不大于150m，飞行速度≤100km/h。

3 测线资料质量：同一测线沿不同方向飞行采集资料时，电磁响应形态和波形应基本一致。

4 背景场动态噪声：背景场晚期道Z分量dB/dt的噪声水平应小于1nT/s。

4.4.5 在全航空大地电磁法资料采集前，应对物探仪器设备系统进行系统几何、基站线圈脉冲发生器及干扰信号强度、机载线圈脉冲信号器等测试，测试应满足以下规定：

1 系统几何：线圈应保持水平姿态、吊挂结构合理以及飞行过程平稳。

2 基站线圈脉冲发生器及干扰信号强度：基站线圈电磁响应与测试信号的峰值和频率应基本一致，基站附近电力线监测信号强度应小于 1.2dB。

3 机载线圈脉冲信号器：机载线圈电磁响应与测试信号的峰值和频率应基本一致。

4.4.6 在全航空大地电磁法资料采集时，应先进行基站测试，再进行测线飞行。其中，测线飞行应满足下列规定：

1 线圈离地高度：不大于 180m，飞行速度小于 100km/h。

2 测线资料质量：在同一测线采取不同飞行方向采集资料时，电磁响应形态和波形应基本一致。

4.5 资料处理与成果解译

4.5.1 在全航空电磁法资料处理中，应使用全航空电磁法专业资料处理软件系统。

4.5.2 资料处理的最终结果为应包括：

1 由多条测线组合资料处理的线路中线三维联合反演电阻率断面图。

2 全航空瞬变电磁法勘探中线三维反演电阻率断面图。

3 全航空大地电磁法勘探中线三维反演断面图。

4 全航空大地电磁法勘探中线三维反演电阻率断面图。

4.5.3 全航空瞬变电磁法资料处理分为预处理和资料处理两部分，两部分资料处理的主要流程应包括：

1 预处理流程：背景场去除、天电噪声去除、运动噪声去除、抽道。

2 资料处理流程：记录点位置校正、时间常数计算、电阻率深度成像。

4.5.4 全航空大地电磁法资料处理的主要流程应包括：响应计算、视电阻率二维反演、视电阻率三维联合反演。

4.5.5 全航空电磁法资料解释应在综合分析地质调绘、钻探和全航空电磁法勘探资料的基础上，除遵循从已知到未知、先易后难、点面结合、反复认识、定性指导定量的总体原则外，还应符合下列规定：

1 综合分析线路中线三维联合反演电阻率断面图以及地质资料，以物探资料为主、地质资料为辅。

2 考虑反演电阻率断面图中的背景值、低阻异常形态、低阻异常值及其梯度值等因素，对主要地层界线、断层破碎带以及岩体的破碎、软弱、岩溶发育和含水程度进行判释。

3 根据反演电阻率断面图中异常的形态和梯度带位置准定量确定异常边界。

4 结合地质资料，把反演电阻率断面图中向下贯通延伸的电阻率梯度带或向下贯通延伸的条带状低阻异常解释为断层破碎带。

5 根据反演电阻率断面图中电阻率值的相对大小、由低至高，把其余低阻异常和区域分为物探Ⅴ类异常、物探Ⅳ类异常、物探Ⅲ类异常以及物探Ⅱ类区域，分别对应极破碎、极软弱、岩溶强烈发育或富水岩体；破碎、软弱、岩溶中等发育或含水岩体；较破碎、较软弱或岩溶弱发育岩体以及较完整岩体。

4.5.6 根据反演电阻率断面图特征、结合地质资料，应沿线路方向对隧道分段进行解释，解释结果应包括对主要岩性界线、断层破碎带、物探Ⅴ类异常、物探Ⅳ类异常、物探Ⅲ类异常和物探Ⅱ类区域等的划分。

4.5.7 全航空电磁法勘探成果文件中，技术报告应按隧道名称独立编写，报告内容应包含下列内容：

- 1** 任务依据和目的要求。
- 2** 地形地质概况和地球物理特征。
- 3** 资料采集，应包括测线布置、仪器设备、飞行平台、资料采集程序、质量评价等。
- 4** 资料处理，应包括全航空瞬变电磁法和全航空大地电磁法的资料处理主要流程及处理参数等。
- 5** 资料解释，应包括资料解释原则、资料分析和解释结果等。
- 6** 结论与建议。
- 7** 附图。

5 地空电磁法

5.1 一般规定

5.1.1 大高差艰险山区一般隧道地面物探实施困难时，且测区附近适合布设场源时，可采用地空电磁法。

5.1.2 地空电磁法可用于下列地质解译：

- 1 岩体物性差异较大的地层界线。
- 2 地质构造、断层产状和破碎带宽度。
- 3 岩溶发育段落或富水岩体的空间分布特征。

5.1.3 地空电磁法可分为地空频率域电磁法和地空时间域电磁法，探测时应根据探测目的和隧道埋深合理选用。

5.2 观测设计

5.2.1 地空频率域电磁探测应采用赤道装置。测量空中垂直磁场，接收测线分布在供电电极两侧各 120° 倾角的范围之内，如图 5.1.1 所示。

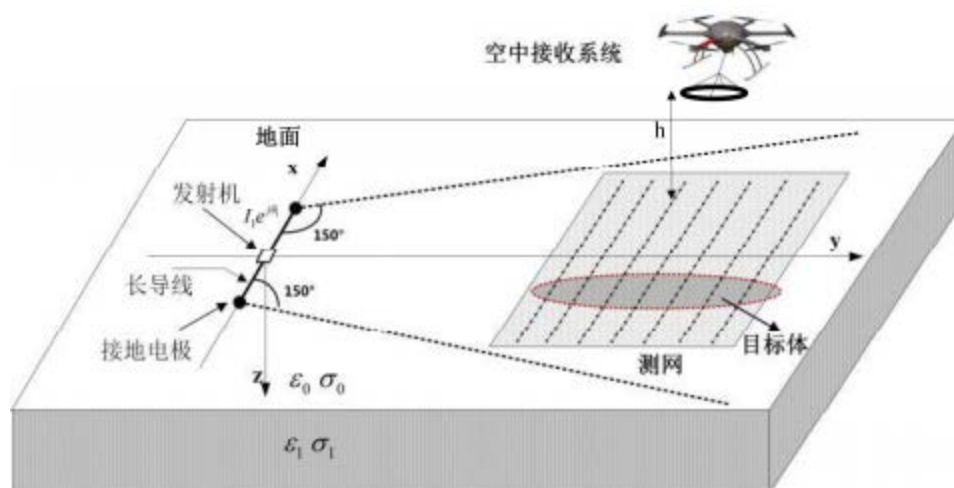


图 5.1.1 地空频率域电磁法测线布置示意图

地空时间域电磁探测采用赤道装置。测量空中垂直电磁场，接收测线分布在供电电极两侧且与供电电极平行，如图 5.1.2 所示。

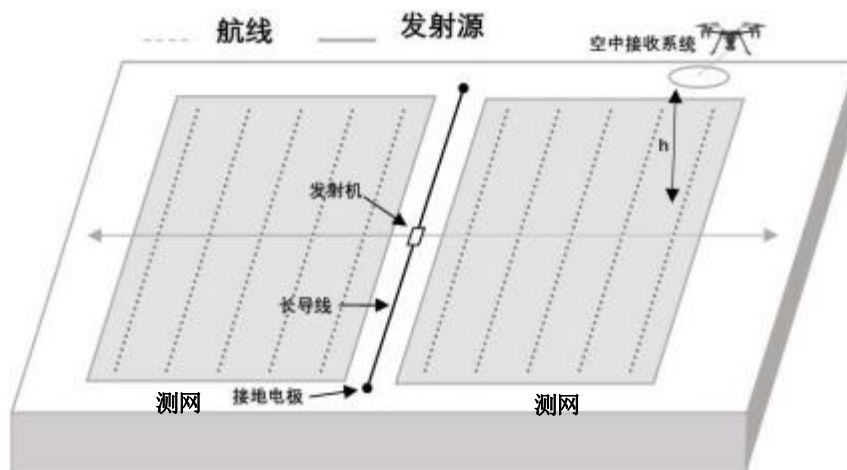


图 5.1.2 地空时间域电磁法测线布置示意图

5.2.2 供电电极长度 AB 应根据实际地形进行设计，频率域方法中供电电极长度应满足辐射全部测网；时间域方法中供电电极长度 AB 应不小于单条测线长度并保证覆盖全部测线，以达到足够的信噪比。AB 极距宜取 1~3km。

5.2.3 收发距离应依据探测深度、测区地层、岩石电阻率、信噪比等因素确定。

1 地空频率域电磁法的收发距应在保证信噪比前提下，收发距 r 应尽可能满足远区测量条件。最小收发距离应大于目标体最大埋深的 3 倍以上，按式 5.2.3-1 计算：

$$r_{\min} > 3h_{\max} \quad (5.2.3-1)$$

式中： $r_{\min}$ ——最小收发距离；

$h_{\max}$ ——目标体最大埋深。

最大收发距离 ($T_{\max}$) 应保证测量信号大于环境噪声，设计原则按式 5.2.3-2 计算：

$$T_{\max} \leq \sqrt[4]{\frac{3IAB\rho_E S_R}{4\pi V_N}} \quad (5.2.3-2)$$

式中：I ——为发射电流为发射电流幅值；

AB ——为发射导线长度；

ρ_E ——为测区地下平均电阻率；

S_R ——为接收系统灵敏度系数；

V_N ——为环境噪声电压幅值；

$T_{\max}$ ——最大收发距离。

在理论设计之后，需通过野外飞行实验，根据具体的噪声水平，进一步确定实际可用的测量范围。

2 地空时间域电磁法接收信号受发射源的一次场影响较大，因此近源端测线与场源距离不宜过小，应不小于 100m，远源端距离场源视空中接收系统能力而定，应保证所需时间道信号宜大于 10db。

5.2.4 工作频段

1 地空频率域电磁法技术设计中，根据勘查地质目标深度的要求在确定探测深度范围后，根据最大探测深度、最小探测深度和测区介质的平均电阻率确定所需的工作频段，其中最低工作频率和最高探测频率按式 5.2.3-3 和式 5.2.3-4 计算。

$$f_L = (356 / h_{\max})^2 \cdot \rho_E \quad (5.2.3-3)$$

式中： $h_{\max}$ ——最大探测深度；

f_L ——最低工作频率；

$$f_h = (356 / h_{\min})^2 \cdot \rho_E \quad (5.2.3-4)$$

式中： $h_{\min}$ ——最大探测深度；

f_h ——最高探测频率；

ρ_E ——平均电阻率；

对于测区介质平均电阻率的估计，可根据收集或者采集的岩石物性样品的电阻率值、测井电阻率值，以及测区以往经验估算。对于高频发射，随着发射频率的增高，发射系统的电抗增加，实际发射电流下降，有效信号减弱，信噪比下降。对于低频发射，在降低发射频率时，由于系统运动噪声在低频较高，信噪比同样会减小。实际测量时，应根据具体的噪声特征，发射系统性能，对设计的频点进行适当调整。

2 地空时间域电磁法在时间域的发射电流频率可以为 6.25Hz、12.5Hz 和 25Hz，对应 120ms、80ms 和 40ms 三个发射电流周期，不同周期用于不同的探测深度。随着发射电流频率的增大，电流周期成倍数减小，因此深度随发射电流频率增大而减小，时域探测中根据电阻率和采样时间计算探测深度按式 5.2.3-5 计算。结合实际探测经验，在探测 200m 内的目标体宜采用 25Hz 发射频率，探测更深的目标体时宜采用 6.25Hz 或更低发射频率。

$$\delta(t) = \sqrt{\frac{2t - t_0}{\mu\sigma}}, \delta(t \leq t_0) = 0 \quad (5.2.3-5)$$

式中： t ——为抽道时间；

t_0 ——发射电流关断时间；

$\delta(t)$ ——视深度；

σ ——大地电导率；

5.2.6 开展地空电磁法数据采集前的准备工作应符合本规程第 4.2.1 条的规定。

5.2.7 地空电磁法野外数据采集除应满足本规程第 4.2.2 条的规定外，

发射源还应布设在构造简单、电性均匀、接地电阻较小的地方，并避开矿山、水域、平行的断裂构造等区域。

5.3 仪器设备

5.3.1 仪器设备的主要性能指标应达到地空电磁方法技术的要求或设计书的要求，不符合要求的仪器设备不得用于生产。

5.3.2 仪器设备应建立专门档案并指定专人负责，严格按照使用说明书的规定使用、维护和管理。

5.3.3 仪器设备存放场所应避开阳光直射，保持通风、干燥、清洁和无腐蚀气体；运送、使用中应轻放，以及防尘、防雨、防冻、防暴晒。

5.3.4 仪器设备长时间存放应定期通电检查，有充电电池的仪器，应定期充放电维护。

5.3.5 供电电极 A、B 应坚固耐用，导电性能良好，可选用铜板、铜丝网、铝箔或采用铁或钢制的金属棒电极，其规格和数量可根据工区接地条件及供电电流强度选定。金属棒电极长度宜为 60cm~100cm，直径宜为 1.6cm~2.2cm。在接地电阻大或需要大供电电流工作的地区，宜用铜板等片状电极。水上施工时，常用铅电极。供电导线的规格和长度应根据用途、电极距大小、供电电流强度和测区自然条件选择。一般供电导线应选择内阻小、绝缘性能好、轻便、强度高的多芯全铜线，其内阻应小于 $8\ \Omega/\text{km}$ 。

5.3.6 地空电磁法仪器设备检测与标定应符合下列规定：

1 每个测区工作前和工作期间应视工期长短对接收机、发射机、无人飞行平台及其附属设备进行检测与标定。接收机具有自检功能的，应定期进行自动校准检测。接收线圈定期进行标定。仪器设备各项指标合格后方可进行野外工作。

2 数据采集开工前和收工后应对发射仪器进行测试，测试其发射脉冲波的前沿上升时间和电流纹波，施工期间定期测试，两次测试间隔不大于一个月，发射脉冲波的前沿上升时间要求小于 2ms，电流纹波应小于发射波幅度的 5%。同时，应调节发射波形、发射频率等参数，检查仪器是否能正常工作，并且稳定可靠。

3 数据采集开工前检查飞行器动力电缆、电池电量、数传天线连接稳定情况、脚架关节健康情况，试飞前进行磁罗盘及遥控器校准，然后进行空载试飞。飞行器起飞时当地风力最大宜不超过 3 级，卫星数量不低于 7 颗星。试飞一条直线航线，其飞行性能应满足设计要求。

5.4 资料采集

5.4.1 地空电磁发射装置正常发射后方可开展资料采集。

5.4.2 接收装置测量飞行应符合下列规定：

1 采用软吊装方式将接收机、接收传感器连接到无人机机体重心上，无人机与接收传感器间垂直距离由无人机噪声和飞行安全应决定。悬吊距离应保证无人机噪声低于检测信号，通常不宜小于 10 米。

2 起飞前应对仪器系统及配套设备进行检查与调节。

3 无人机起飞后，测量仪器操作员要做野外观测现场工作记录：线号、飞行方向，飞行测线各个状态的时刻 (精确到秒)、以及飞行测线观附近影响观测结果的地质现象、地形地貌、可能引起噪声的干扰源等。

4 无人机返航后，仪器操作员应及时检查并记录仪器工作状态和数据记录情况，即时回放记录数据，初步评价接收的记录质量，发现问题及时查找原因并重新采集，并应符合附录 C 规定：

5 同一测线宜多次飞行时，应至少有 50-100m 重复测量，两次重复测量曲线形态应基本重合。当曲线形态、数值差别较大时要检查仪器状态，重新观测。

5.4.3 地空电磁重复线测量飞行数据采集应符合下列规定：

1 现场认为某测线的测量质量较差或对收录的数据有怀疑时以及对数据进行检查时，可安排对这些测线或线段进行重复测量。

2 重复线飞行时，应力求与测线首次飞行时的航向、航迹、离地飞行高度相同。

5.4.4 开展地空电磁法资料采集时，应开展必要的安全措施保障发射和接收端安全。

5.4.5 地空电磁野外数据处理与编录应符合下列规定：

1 每天野外工作结束后，完善数据记录，并保存接收和发射所有数据，并对数据进行说明，形成数据说明电子文档。

2 按照测线对数据进行分类保存，按照测线整理测线相关的数据，编写数据说明。数据说明应包含测量数据列号、测量时间、发射电流频点和幅值等信息。

3 对飞行航迹进行回放，形成野外实际飞行测量航迹图和飞行高度图，并对飞行质量进行评价。

5.4.6 地空频率域电磁法数据采集质量应满符合下列规定：

1 采集到的数据 60%以上频点的磁场数据信噪比至少大于 1.5；

2 采集到的数据中，除少数频点外曲线总体平滑；

5.4.7 地空时间域电磁法数据采集质量应满足下列要求：

1 早期道数据信噪比至少大于 3，晚期道数据信噪比至少大于 1.5；

2 采集到的数据中，除少数频点外曲线总体平滑；

5.4.8 地空电磁法野外资料验收应符合下列要求：

1 原始资料应包括：

- 1) 原始数据；
- 2) 仪器测试记录；
- 3) 接收布极班报、接收操作员记录表、发射操作员记录表。

2 现场处理资料应包括：

- 1) 施工测线图；
- 2) 飞行航迹图；
- 3) 飞行高度图；
- 4) 测线接收数据质量评定表。

3 野外生产工作总结报告应包括：

- 1) 任务来源、地质任务、工区位置、工作量；
- 2) 任务完成情况；
- 3) 仪器测试、使用情况；
- 4) 方法技术及质量情况；
- 5) 质量保证措施；
- 6) 其他。

5.5 数据处理与成果解译

5.5.1 地空时间域电磁法资料处理和解释应符合下列规定：

1 资料预处理应包括：

- 1) 时间域电磁数据的截取、评价和叠加;
- 2) 时间域电磁数据的噪声处理及基线校正;
- 3) 时间域电磁数据的抽道。

2 根据求取的综合叠加信号,转换成随时间变化的视电阻率曲线,求取综合地电参数。

3 电阻率-深度成像处理应包括:

- 1) 对视电阻率曲线进行滤波、压制干扰等处理,得到视电阻率断面;
- 2) 根据已知的测井、地震等资料,分析测区电性相对变化规律,初步了解剖面地质结构;
- 3) 计算得到电阻率-深度断面图、切片图。

4 地质解释应包括:

- 1) 首先对深度-电阻率断面进行标定,可以用于标定的资料有电阻率测井曲线、其他物探信息、岩石物性信息等;
- 2) 根据标定结果对深度-电阻率断面进行地质层位划分;
- 3) 结合先验资料,通过对异常值的追踪与对比,对电阻率-深度断面进行综合地质解释。

5 地空时间域电磁法提交的图件应包括:

- 1) 电阻率-深度断面图;
- 2) 地质、地球物理综合解释剖面图。

5.5.2 地空频率域电磁法资料处理和解释应符合下列要求:

1 数据处理应包括:

- 1) 对曲线进行去噪、叠加;
- 2) 利用发射电流资料对接收数据进行归一化处理;
- 3) 处理离散畸变点, 计算振幅和相位。
- 4) 根据归一化数据求解视电阻率断面图, 绘制测线视电阻率断面图, 多条测线时绘制测区目标层平面图。

2 地质解释应包括:

- 1) 根据初步建立的地质-地球物理模型和标志, 对视电阻率和阻抗相位异常的性质、规模及起因进行分析判定;

- 2) 根据本测区或其他地区在已知各类地质目标体上建立的地质-地球物理概念模型显示的标志 (异常强度、形态、走向、规模、展布特点等) 进行类比来判断异常的性质、规模和起因;

- 3) 与收集到的地质及地球物理等相关资料和测区异常成果资料进行综合研究与对比分析, 判断异常的性质、规模和起因, 预测目标体分布范围;

- 4) 依照目标任务要求, 根据各种地质体的地质-地球物理模型特征, 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, 最终确定地质体或现象的性质、深度、规模、形态、产状及其相互关系;

- 5) 编绘地质地球物理综合解释成果图。与此同时要对资料解释成果的可靠性进行评估, 说明可能存在的问题与不足。

3 频率域提交的图件应包括:

- 1) 视电阻率断面图;

- 2) 电阻率-深度断面图;
- 3) 地质、地球物理综合解释剖面图。

6 航空磁测

6.1 一般规定

6.1.1 大高差艰险山区地面磁测实施困难时可采用航空磁测。

6.1.2 铁路工程航空磁测主要用于地质构造等推断解译, 辅助开展水文地质评价、工程选址稳定性评价、环境地质评价。

6.1.3 航空磁测可分为地球磁场绝对测量、地球磁场相对测量和地球磁场梯度测量, 目前铁路工程航空磁测工作主要采用地球磁场相对测量。

6.2 观测设计

6.2.1 测区范围圈定应符合下列规定:

1 原则上按航空磁测任务和飞行条件、工作地区自然条件、工作量等来确定测区的角点坐标;

2 确定区域性和综合性航空磁测范围时, 应注意构造单元和异常的完整性, 测区范围应囊括要解决的地质任务所涉及的地区范围;

3 确定测区范围, 应与相邻高精度或同精度测量的测区重复 2~3 条测线距的宽度; 测线两端应与相邻高精度或同精度测量的测区重复 3 km~5 km。

6.2.2 测网密度与测量比例尺确定应符合下列规定:

1 测量比例尺一般根据工作任务、探测对象大小、飞行高度和技术设备情况, 以及经济上的合理性等因素, 综合分析测量的预期效果后确定;

2 在测区内,可根据具体条件,分区布设不同间距的测线。无特殊情况,一个测区不多于两种测线间距,即两种测量比例尺;

3 对有特殊要求的航空磁测,应综合考虑测区自然地理、地质、地球物理、飞机、测量仪器和测量方法等因素,以突出测量效果为主,选择合理的测量比例。

6.3 仪器设备

6.3.1 航空磁测应使用灵敏度优于 ± 0.01 nT 的航空磁力仪,配备磁补偿器、数字收录、GPS 或其他满足精度要求的导航定位系统,以获取高质量的航磁测量数据。

6.3.2 机载航磁测系统应符合下列规定:

1 系统组成应包括:

- 1) 航空磁力仪;
- 2) 航磁补偿仪;
- 3) 配备高度测度设备;
- 4) 导航定位设备;
- 5) 数据收录设备,记录设备;
- 6) 辅助设备。

2 航空磁力仪系统安装与检验

航空磁力仪系统在飞机上安装之前,应按仪器设备技术说明书或技术指标进行检查验收,达不到要求时不应进行安装。

3 航空磁力仪系统探头安装方式,可采用固定或软吊方式。

4 航空磁力测地系统及配套设备在安装妥善后,应通电检查和调

节，并在证实状态良好后做不少于 5 h 的地面稳定性试验。

5 数据收录系统选用多参数自动收录设备和数据收录设备，收录系统主要检验内容有：数字收录格式、错漏码率、时间准确性、各道收录同步程度、记录参数、满偏等。

6.3.3 地面基站仪器设备应符合下列规定：

1 仪器设备组成应包括：

- 1) 磁力仪；
- 2) 数据收录设备、记录设备；
- 3) GPS 接收机；

2 应对磁日变测量系统进行检查验收。

6.3.4 野外基地数据预处理系统应符合下列规定：

1 系统组成应包括：

- 1) 数据预处理微机；
- 2) 数据预处理微机软件；
- 3) 打印与绘图设备；

2 应调节好野外基地数据预处理或质量检验系统，检验硬件工作状态和软件功能技术性指标，完成联机与数据处理试验。系统在野外使用时应有专人管理和进行定期维护，并专用于数据处理工作。

6.4 资料采集

6.4.2 在航空磁测空白区首次进行测量时，区域性航空磁测的主测线方向应垂直于或基本垂直于测区内的主要地质构造走向，大比例尺航空磁测的主测线方向应垂直于或基本垂直于探测目标物的走向。

6.4.3 航空磁测飞行高度确定应符合下列规定：

1 航空磁测应在保证安全的条件下，采取措施尽量降低飞行高度，以提高磁异常信息的强度，同时要避免相邻架次或测线的飞行高度差别过大。

2 当测区内地面磁性人文干扰较多时，为减少其影响，可适当抬高平均离地飞行高度。

3 测量离地飞行高度的测量误差应小于实际离地高度的 10%。

6.4.4 航空磁测飞行速度与采样率确定应符合下列规定：

1 航空磁测应尽量选择低空性能好的飞机。当测量系统的数据采样率不高时，应尽量采用低速飞行。

2 数据采集密度主要受航空磁力仪系统的带宽、采样率和测量比例尺的制约，可按式 6.4.4-1 计算最低采样率。

$$n = \frac{v \cdot P}{S} \quad (6.4.4-1)$$

式中：

v —作业飞机的最大速度（m/s），

S ——探测对象的最窄异常宽度（m）。

P ——要求在异常上最少采样点数（次），每个异常至少应由 3 个采样点组成。

3 航空磁测选用 10 次/s 的采样率较合适。采样间距应小于或等于按测量比例尺制图时图上 1 mm 代表的距离数，但最低采样率不应小于 2 次/s。

6.4.5 导航定位及精度应符合下列要求：

1 导航定位方法选择要满足航空磁测对导航定位精度的要求,并考虑测区地理条件和经济合理性。

2 航空磁测使用全球卫星导航定位系统实现导航定位。当使用某一导航定位系统不能满足航空磁测需要的导航定位精度时,应使用更高精度的或组合导航定位系统以满足导航定位要求。

表 6.4.5-1 不同测量比例尺的定位精度

测量比例尺	定位精度/m (均方差)
<1: 250 000	±30
1: 200 000 或 1:250 000	±20
1: 100 000	±15
1: 50 000	±10
1: 25 000	±5
≥1: 10000	±2

3 导航精度要求以每条测线实际飞行的航迹偏离预定测线位置的距离 (即偏航距) 来衡量。对连续偏航大于表 6.4.5-2 中偏航距要求的,按测量比例尺成图长度大于 10 cm 时,应进行补测补测线段两端与合格测线重复长度不得少于 2km, 并且两端都要与控制线相交。

表 6.4.5-2 不同比例尺测量的偏航距

测量比例尺	偏航距
<1: 200 000	≤250 m
1: 100 000	≤200 m
1: 50 000	≤150 m
1: 25 000	≤80 m
>1: 10 000	≤1/3 主测线距

6.5 数据处理与成果解译

6.5.1 航空磁测数据处理应符合下列要求:

1 航磁数据处理应包含原始数据野外现场预处理、原始数据处理和数据转换处理三项工作。

2 数据预处理应在野外作业现场分架次实时完成,利用各类检查、

统计等手段了解数据质量、指导飞行。

3 数据处理应在野外预处理基础上完成测量数据的合并、校正、调平等工作，完成各种基础图件的编制。

4 数据转换处理应利用数据处理后的测量数据，根据地质解释需要，选择不同的位场转换方法进行处理。

5 数据处理过程应包含质量控制措施。

6.5.2 航空磁测成果解译应符合下列要求：

1 铁路工程航空磁测资料在地质构造和隐伏岩体等推断解释的基础上，开展水文地质评价、工程选址稳定性评价、环境地质评价。

2 航磁资料推断解释应遵循从已知到未知，定性解释与定量解释相结合的原则。在推断解释的基础上，编写成果报告和编制相应的推断成果图件。航磁资料推断解释包括对区域磁场和局部异常的解释两部分。

3 区域磁场解释应对磁场进行分区，并研究所反映的区域地质构造特征。

4 局部异常解释需在对测区已知岩体、地层、构造、矿床的地球物理特征进行分析，建立航空物探解释标志的基础上，选编航空物探异常，分析异常的性质、成因及意义，对每个航磁局部异常进行推断解释。

5 航磁异常定量和半定量解释应大致估计磁性地质体形态、产状、空间位置和物性参数。重点航磁局部异常应在定性解释的基础上进行定量计算与解释，已知和推断异常解释结果（位置、埋藏深度、规模等信息）应标注在推断的地质图上；对航磁局部异常进行磁性体顶面埋

藏深度计算。

7 航空放射性测量

7.1 一般规定

7.1.1 大高差艰险山区地面放射性测量实施困难时可采用航空放射性测量。

7.1.2 铁路工程航空放射性测量主要可用于区域地质、水文地质、工程地质、环境地质调查，辐射环境监测及核事故灾害评价等。

7.2 观测设计

7.2.1 测区选择应遵循以下原则：

1 区域地质调查任务的测区，应注意地层或岩性的差别、构造单元的完整性、地质体的规模等因素。

2 水文地质、工程地质、环境地质调查和辐射环境监测及核事故灾害评价等测区，应根据具体任务、工作性质和探测对象等具体情况选择。

7.2.2 测区布置应遵循以下原则：

1 测区范围应大于地质任务所涉及的范围。

2 测区形状应尽量规则。在与相邻测区衔接时，应重复 2~3 条测线的宽度。测区范围较大时，也可考虑分年度安排测区。

7.2.3 测网选择应根据测量目的任务、探测对象大小及特征、飞行高度和技术装备等具体情况确定测网，并考虑其合理性及其经济效益。

7.2.4 测量比例尺选择应根据具体任务要求和地形、地质条件，在测区内可分区布设不同间距的测线。

7.2.5 编写技术设计前，应收集下列与工作任务有关的资料：

- 1 区域地质、水文地质、物探、化探等资料；
- 2 测区的地形、地貌和气象资料；
- 3 其它有关资料。

7.2.6 踏勘应包括以下内容：

- 1 落实作业机场；
- 2 了解生活保障条件和交通情况等。

7.2.7 测线方向选择应遵循如下原则：

- 1 测线方向应尽量垂直于测区内主要地质构造走向或勘查对象的总体走向。
- 2 如测区选在山区，地形高差较大，而且测区内地质构造走向与山系走向一致时，或因日出等原因，允许测线方向与地质构造走向斜交，交角应大于 45° 。
- 3 应根据工作任务、性质和探测对象等具体情况选择测线方向。

7.2.8 飞行高度确定应遵循如下原则：

- 1 执行区域地质调查任务时，应沿地形起伏飞行，平均离地飞行高度应不大于 150m；
- 2 执行水文地质、工程地质、环境地质调查，辐射环境监测及核事故灾害评价等任务时，应根据具体任务和特殊要求确定平均离地飞行高度；
- 3 使用直升机吊挂磁探头进行航空伽玛能谱和航空磁力综合测量时，直升机过山高度应不大于 100m；
- 4 在技术设计书中应明确规定平均离地飞行高度和超高率。

7.2.9 飞行速度确定应遵循如下原则：

1 航空伽玛能谱测量测线飞行中的速度应按所选用的探测器体积确定。执行放射性矿产地质勘查任务，使用晶体探测器的体积为 $3.3 \times 10^{-2} \text{m}^3$ 的航空伽玛能谱仪进行测量时，飞行的速度应不大于 160km/h；使用晶体探测器的体积为 $5.0 \times 10^{-2} \text{m}^3$ 的航空伽玛能谱仪进行测量时，飞行的速度应不大于 240km/h；

2 测线上飞行时应尽量保持匀速飞行。

7.2.10 测线上飞行时的采样速率一般应每秒采样一次。

7.2.11 导航定位方法的选用应遵循如下原则：

1 导航定位方法应满足测量比例尺对导航定位精度的要求。

2 野外测量时，应采用卫星导航定位系统。

3 如接收卫星数目不够或在山区低飞卫星信号受到干扰时，可采用照相或录像等其它定位设备。

7.2.12 偏航距对导航精度要求，应以每条测线测量的实际航迹偏离预定测线位置的距离(即偏航距)来衡量，其最大偏航距应不大于 100m。

7.2.13 数据收录应包括如下主要内容：

1 数据收录内容包括：上、下测晶体的全谱数据，及从全谱数据中提取的总计数率、钾窗计数率、铀窗计数率、钍窗计数率或需要的其它窗数据，大气氦和宇宙射线计数率，雷达高度值，气压高度值，机外温度值，GPS 坐标值或经纬度，基点号，测线号，早晚基线号，日期、时间等。

2 模拟记录内容包括：总计数率,钾、铀、钍窗计数率，雷达高度等。

7.2.14 测量精度在 $4 \times 10^{-6} \text{g/g}$ 铀含量背景下应达到定量确定 $1 \times 10^{-6} \text{g/g}$ 铀含量, 在 $8 \times 10^{-6} \text{g/g}$ 钍含量背景下应达到定量确定 $2 \times 10^{-6} \text{g/g}$ 钍含量, 在 $1 \times 10^{-2} \text{g/g}$ 钾含量背景下应达到定量确定 $2.5 \times 10^{-3} \text{g/g}$ 的钾含量。

7.3 仪器设备

7.3.1 航空伽玛能谱测量系统应包括机载测量系统和地面基站两部分。

7.3.2 机载测量系统应由下列设备组成:

- 1 航空伽玛能谱仪;
- 2 飞行高度测量设备;
- 3 导航定位设备;
- 4 数据收录设备;
- 5 辅助设备。

7.3.3 机载测量系统应满足以下技术要求:

1 探测器体积应根据任务要求, 可使用不同体积的下测探测器。上测探测器体积不应小于 $4.2 \times 10^{-2} \text{m}^3$ 。

2 晶体分辨率用峰值最大幅度二分之一处的宽度(FWHM)与最大峰值能量之比的百分数来表示。对于 ^{137}Cs , 在 0.662MeV 峰时, 晶体分辨率应优于 12%。测量系统连续工作 12h 后, 系统分辨率变化应保持在开始测量值的 $\pm 0.5\%$ 以内。

3 探测器恒温 72h 后, 应调准 ^{137}Cs 和 ^{208}Tl 的峰位, 测量系统再连续工作 7h, 峰位漂移不应超过开始测量值的 $\pm 1\%$ 。对自动稳谱的仪器, 预热后 Tl 的峰位漂移应在 ± 1 道之内。

4 仪器的死时间应不大于 $8 \mu\text{s}$ 。

5 能谱非线性应不大于 1.5%。

6 雷达高度计测量范围应在 0~450m。

7 气压高度计测量范围应在 0~4600m。

8 数据收录设备数据收录设备选用带有多通道、数据校准、处理分析等功能的数据自动收录设备和模拟数据收录设备。

9 数字测温计测量范围应在-40~100℃。

7.3.4 地面基站设备应满足航空放射性测量生产需求。

7.3.5 地面基站的功能是对机载测量系统所收录的数据进行检查、质量评价、格式转换、复制和校准数据的处理。

7.3.6 在安装机载测量系统之前，应对飞机进行放射性本底检查和清除干扰，全面清除飞机上的放射性物质，直至舱内的放射性本底比停机坪本底低 10%，并且进行必要的改装。机载测量系统的安装应符合下列规定：

1 探测器应安装在机舱内向下 120° 的视角范围内屏蔽物尽量少的部位。如使用多个探测器，应尽量集中安装。

2 卫星定位接收天线应安装在仰视角大于 10° 的范围内无遮挡物的位置。

3 仪器的主体、探测器及其它设备应安装在机舱内便于操作和维修的位置，并且符合其说明书的相关规定及其飞行安全的要求。

7.3.7 仪器的检查应包括飞行前检查与飞行后检查。

7.3.8 飞行前的检查应包括如下内容：

1 检查仪器工作状态是否正常；

- 2 检查并调整雷达高度计零点；
- 3 每架次飞行前使用 ^{137}Cs 和 ^{208}Tl 标准源对测量系统进行增益调整。
- 4 检查并清除飞机上的放射性物品；
- 5 检查 GPS 接收机的收星情况，并输入已转换到 WGS-84 坐标的航路点经纬度(或坐标值)及其它需人工设置的参数。如使用其它导航设备，应按各设备规定的要求作好飞行前的准备；
- 6 各项检查情况应及时记入运行记录本。

7.3.9 飞行后的检查应包括如下内容：

- 1 仪器检修员应向值班操作员了解仪器工作情况，并记入运行记录本；
- 2 飞行后不应对仪器进行调整；
- 3 用标准源对测量系统进行检查，以确定系统分辨率、峰位和能谱非线性的变化，并与飞行前的检查结果进行比较。

7.3.10 野外和室内仪器的维护应复合下列要求：

- 1 机载测量系统在野外工作期间，应按说明书的要求进行定期维修和技术指标的检查；
- 2 机载测量系统每工作 100h 后，应对各设备的风扇及电路板除尘一次，对每条晶体进行分辨率和能谱非线性检查，对多道分析器进行阈值检查；
- 3 当野外测量结束后，对恒温稳谱测量系统晶体的温度要分段降低，然后断电。每段降温时间不小于 4h；
- 4 测量系统运回单位后，在室内应及时测量各个晶体的分辨率，

并对整套系统进行保洁和检修；

5 检修好的仪器，应进行 7h 以上的稳定性检查，对各备用部件和电路板也应通电检查，通电时间不小于 6h；

6 仪器在室内保管期间，每 10d 应通电一次，每次运行时间不小于 1h；

7 记录和保存仪器维护检测资料。

7.4 数据采集

7.4.1 野外测量前应做好以下准备工作：

1 野外测量开始前应做好机场筹建、测区申报、生产保障、后勤保障等工作，以保证按时调机；

2 在野外测量开始前，项目负责人应组织技术人员按设计要求，拟定详细的飞行计划；

3 调机后，项目负责人应向机组人员介绍工作任务和测区情况，应组织有关人员参加视察飞行；

4 向机组提供划有测线的地形图、测线 GPS 数据和飞行报表。

7.4.2 每架次飞行之前和飞机落地之后应对仪器的工作状态进行现场检查。

7.4.3 野外测量飞行包括基线飞行、测线飞行、重复线飞行。应包括如下内容：

1 基线飞行要求基线长度为 4km~8km。基线上飞行高度为 120m。在每架次测线飞行前和飞行后进行；

2 测线飞行般沿地形起伏飞行，在局部地形复杂的地区，可采用爬高接线法和下滑飞行法。应尽量避免测线分段测量，如遇特殊情况

分段飞行时，不同架次飞行的线段要加以区分。当进行接线飞行时，要重复 1km 左右。

3 重复线飞行应尽量均匀分布在测区内，重复线的数量应大于总测线数量的 3%。

4 雨天和雨后的第一天不允许飞行。

5 基线和测线应分别编号，同一测区不应重复。每条测线上基点号从小到大累加，不允许颠倒和重复，超出累加范围可重新开始编号。

6 每一架次飞行的原始数据记录介质中，应打上飞行前、后的检查和基线飞行、测线飞行的文件标志，并及时填写记录表。

7 对自动稳谱的仪器，在空中应经常检查稳谱峰位和晶体分辨率。

8 数据收录系统如带有模拟记录器时，操作员应在模拟纸带内侧清楚地填写日期、姓名、各道道号、测线号、测线方向、各种方位标及仪器工作状态。

9 仅带有图形显示设备时，应设置钾计数率、铀计数率、钍计数率、总计数率、雷达高度及 GPS 定位数据等参数，进行空中实时观察和收录。

7.4.4 原始资料的编录应符合下列规定：

1 数据收录系统如带有模拟记录器时，操作员应在模拟纸带内侧清楚填写日期、姓名、各道道号、测线号及方向、各种方位标、对空中出现各种问题的记录。在条件具备时，应记录地质观察情况。如只带有图形显示介质时，则需要正确设置好各种参数，以便空中实时观察并收录在记录介质上，供地面回放检查，并根据需要打印。

2 当带有空中磁带和模拟纸带时，则每个架次的空中磁带和模拟

纸带都应填写标签。填写内容包括测区名、机场、架次号、测线号、基点号、日期、队名、操作员姓名、仪器型号、质量评价、异常号等。

7.5 资料处理与成果解译

7.5.1 数据处理应包括数据编辑、数据滤波、能谱数据的各项修正、能谱数据转换成地面放射性核素含量、数理统计分析等步骤。

7.5.2 数据编辑应按如下方法：

1 测线数据应齐全；

2 在同一测区内不允许出现相同的测线号。如一条测线分为几段测量，应以不同段号区分开；

3 应去除尖峰信号及无线电噪声干扰数据。

7.5.3 数据定位应包括坐标系及投影的选择、中央参考经线及坐标偏移值的选择、定位数据的处理。

7.5.4 定位数据的处理应将 GPS 定位数据的处理应将各基点的 GPS 定位数据换算到选定的坐标系上。

7.5.5 数据滤波应包括如下内容：

1 应对野外生产的数据进行数字滤波，以减少统计噪声或干扰因素的影响；

2 滤波可采用等权滑动平均和不等权滑动平均的方法，也可自行设计数字滤波器。滤波器类型选择和窗口的大小应经过反复试验进行确定。

7.5.8 能谱数据的各项修正应按照下列顺序进行：

1 飞机本底（含仪器本底）修正；

- 2 宇宙射线本底修正；
- 3 剥离修正；
- 4 大气氡修正；
- 5 高度衰减修正；
- 6 各项修正方法及计算公式见附录 G。

7.5.9 修正时应遵照下列技术要求：

1 在进行某项修正后，如出现某窗的某一采样点的计数小于零的情况，应作检查分析，查明原因后将该计数置为零，以免影响后续的修正；

2 在修正过程中，应对中间计算量进行数字滤波。

7.5.10 使用各种修正后的计数率，按附录 G 中公式计算地面的 ^{40}K 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 核素的含量。

7.5.11 应根据早晚基线、相邻测线、相邻架次的情况对数据作适当修正。

7.5.12 按地质单元对全测区各参数作统计，求出最大值、最小值、平均值、均方差等；根据解释需要可选择做主成分分析、方差分析、协方差分析及提取核素分布异常信息等。

7.5.13 能谱数据转换成地面放射性核素含量后，一般情况下应计算 $^{238}\text{U}/^{40}\text{K}$ 、 $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}$ 比值。为防止出现比值失真，钾含量小于 $2.5 \times 10^{-3} \text{g/g}$ 、钍含量小于 $2 \times 10^{-6} \text{g/g}$ 的点不参与比值计算。

7.5.14 推断解释的基本要求应包括如下内容：

1 推断解释是报告编写的基础，推断解释应遵循从已知到未知的原则，在推断解释基础上，编写报告和编制相应的成果图件。

2 区域地质调查，水文地质、工程地质、环境地质调查，辐射环境监测以及核事故灾害评价等，应视工作的特殊要求采用不同的解释方法和技术。

8 航空重力测量

8.1 一般规定

8.1.1 大高差艰险山区地面重力测量实施困难时可采用航空重力测量。

8.1.2 铁路工程航空重力测量主要可用于区域地质、水文地质、工程地质调查等。

8.2 观测设计

8.2.1 测网布置应包括下列内容：

1 测线的布置应根据地质任务、探测对象的大小，异常特点及航空重力异常空间分辨率来确定，以不漏掉主要的探测对象和异常为原则，即至少应有一条测线穿过主要异常，所以测线间距应不大于目标重力异常宽度的一半。

2 区域性航空重力的主测线方向应垂直于或基本垂直于测区内的主要地质构造走向，大比例尺航空重力的主测线方向应垂直于或基本垂直于探测目标物的走向。

3 当航空重力测量比例尺小于或等于 1：100000 时，一个测区使用一个折中的主测线方向。当大于 1：100000 时，在一个测区的不同区段由于地质构造走向改变时，主测线方向也要相应改变，但应不多于两种测线方向。

4 在测区重要地段可加密测线间距进行测量。

8.2.2 测量比例尺应根据任务、探测对象大小、飞行高度和技术设备(空间分辨率、精度等)情况，以及经济上的合理性等因素，综合分析测量的预期效果后确定。

8.2.3 飞行高度确定应考虑以下因素：

- 1** 飞行高度要与测量比例尺相适应。
- 2** 应采用同一高度平飞，高度变化不宜超过设计高度 $\pm 20\text{m}$ ；局部地区可采用沿地形缓起伏飞行的方式以降低整体飞行高度，起伏坡度应不大于 3° 。
- 3** 需要综合考虑与之同时作业的其他航空物探探测的技术要求。
- 4** 选择作业气候条件下飞行比较平稳的高度，提高原始数据测量质量。
- 5** 航空重力测量应综合考虑测量的地质效果，测区的地形条件和飞行时的气流大小，应以较低的同高度平飞为宜。

8.3 仪器设备

8.3.1 设备主要包括：航空重力仪、高精度定位系统（如全球导航卫星系统双频差分移动站系统）数据采集控制系统、导航系统和不间断电源系统等。

8.3.2 应明确设备的各项技术指标，并给出系统集成方案。

8.3.3 仪器设备检测应包括以下主要内容：

1 航空重力系统在飞机上安装之前，须按设计技术指标对航空重力系统进行检查验收。达不到要求时，不得进行安装。检测人员应提供检测试验资料和记录。

2 检测的主要内容：重力静态测量精度应小于或等于 $0.3 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，24h 零点漂移应小于或等于 $5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ，静态定位精度应小于或等于 0.1m 。

3 每三个月至少对仪器设备进行通电检查一次,及时更换蓄电池。

8.3.4 航空重力测量飞机选取应包括以下主要原则:

1 飞机应具有自动驾驶仪,飞行时机械振动不明显影响航空重力的测量精度。

2 机舱中要有足够的空间安装航空重力仪,且航空重力仪可安装在飞。

3 机的重心位置附近。载荷应满足航空物探设备的重量要求。

8.3.5 航空重力测量系统主要包括航空重力仪、导航定位系统及相关辅助设备。航空自由空间重力异常测量精度(或重复线内符合精度)应优于 1×10^{-5} m/s,且必须满足勘查任务的精度要求。使用全球导航卫星系统差分方式进行导航定位时,须使用带有差分方式的双频测地型全球导航卫星系统,观测量应有载波相位,其标称动态精度应满足:平面精度[单位为米(m)] $(0.01 + 1 \times 10^{-6} \times D)$,高程精度[单位为米(m)] $(0.02 + 1 \times 10^{-6} \times D)$ 。D 为基线长度,其单位为米(m)。

8.3.6 测量设备安装应满足以下要求:

1 航空重力仪应安装在飞机重心位置附近,水平偏离应不超过 1 m,须与飞机固定为一体,稳定且有效避开飞机震动对航空重力仪的影响。

2 航空重力仪传感器的纵轴应与飞机纵轴线方向一致,并靠近飞机的轴线。

3 测量航空重力仪传感器到地面的垂直距离[单位为米(m)],测量精度应优于 0.1 m。

4 定位传感器(如全球导航卫星系统天线)应安装在航空重力仪正上方附近,偏离重力仪水平距离不应超过 3 m。

5 定位传感器附近应无干扰源,离电台发射天线的距离应大于 1 m,同时应避免飞机部件对传感器遮挡。

6 在飞机坐标系中,测量定位传感器到航空重力仪传感器的相对坐标偏移 X(右为正)、Y.(前为正)、Z(上为正),测量精度应优于 0.1 m。

7 导航显示器应当安装在飞机前部方便驾驶员监控和操作的位置。

8.4 数据采集

8.4.1 测线测量飞行前应进行指标参数检查, 包括以下主要内容:

1 在测线飞行测量之前,须按设计指标对航空重力系统要求的各项技术指标进行检查验收。达不到要求时,不得进入测线飞行。

2 应预先计算出设计测线端点及导航点坐标(或经纬度)数据,输入导航系统中,检查并确保输入的导航数据无误。

8.4.2 任务下达包括以下主要内容:

1 每架次测量飞行的前一天,项目负责人应以飞行任务书形式向空勤人员正式下达飞行测量任务。

2 飞行任务书中应包括:飞行区号、测线号(含端点坐标值)、飞行高度、飞行速度、飞行示意图及说明、注意事项等。

3 每个飞行任务书内,应有备用飞行任务。

4 飞行人员按飞行任务书要求认真准备次日飞行,熟悉和了解飞行任务中的地形地物、导航点顺序、飞行高度、可能的接线地段、测

线端点坐标及其参数、仪器调节等来研究每条待飞测线的地形情况,根据飞机性能和地形等因素在保证安全的条件下按设计高度飞行。

8.4.3 测量要求应包括以下主要内容:

1 应选择作业区域气流较为平稳的时段实施测量,保持匀速水平直线飞行。

2 采用差分 GNSS 测量时,须保证有 6 颗或以上的卫星进行定位,其 PDOP 值一般应小于 2.5,位置均方差应不大于 1 m。

3 在测量飞行中,空勤人员应集中精力按各自的职责与要求认真作业,做好仪器操作及记录。

4 无人值守飞行时,须明确告知飞行员仪器出现故障时的主要特征,以便出现故障能及时返航。

5 当测线分段测量飞行时,应采用重复接线法,分段重复接线位置中心应在控制线上,衔接应保证大于 5 km 重复。若接线重复区(或段)处于异常区域时,接线应适当延长,每段测线至少要搭接 3 条控制线。

8.4.4 飞行前工作应包括以下主要内容:

1 采用差分 GNSS 系统时,每架次起飞前 40 min 左右,打开差分 GNSS 基准站,检查接收机电池容量及数据卡存储容量,要求不低于连续工作 12 h,能接收到至少 8 颗卫星,并正常采集数据。每次测量时,GNSS 天线的位置、方向和高度保持不变,且天线定向标志指向正北。

2 确认飞机停放在重力基点上,检查航空重力仪工作状态和参数,

将参数抄录在记录表中。

3 保持飞机安静状态,采集航空重力前校数据,采集时间不少于 15 min。

8.4.5 飞行测量期间工作应包括以下主要内容:

1 按照要求采集测量数据,确认一切正常后,通知飞行员起飞。

2 保持设计的飞行地速和高度,飞行动作要柔和、平稳,应保持拐弯或起飞坡度不大于 15%。

3 飞行员应按导航仪指示沿着预先设计好的测线进行飞行。当发生偏航,或飞行高度有偏差时,飞行员修改偏航和高度的动作要小,应平缓过渡到正常航迹。

4 严格遵守操作规程,做好空中飞机颠簸、风速等各项记录,发现并随时记录地表较大的异常体,比如山体、水体等。

5 若出现故障要及时检查和排除,确认无法排除时要通知机组及时返航。要密切观察气流、风力对重力测量的影响,有可能产生报废资料时要及时返航。

8.4.6 飞行后工作应包括以下主要内容:

1 飞行落地后,将飞机停放在重力基点上,航空重力仪供电电源切换到地面电源。

2 检查航空重力仪工作状态和参数,将参数抄录在记录表中(附录 D)。

3 保持飞机安静状态,采集航空重力后校数据,采集时间不少于 40 min。

4 停止数据采集，取出数据卡或拷贝测量数据。

5 备份当天采集的所有数据。

8.4.7 辅助飞行测量应包括以下主要内容：

1 每个测区开始测量飞行之前应安排视察飞行。

2 在开工前，航空重力测量系统需在同一飞行高度（平飞）进行同向和反向多次重复飞行测量，测试和检验系统的动态工作状态，评估系统测量数据的内符合精度。内符合精度合格后才能进入测线飞行测量。

3 选择的测试线其重力异常形态应相对完整且幅度应大于 $20 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ ，长度不小于 40km。

4 应至少完成 2 架次重复线测试飞行，合计有效测线数不少于 5 条。单架次计算和 2 架次合并计算重复测量的内符合精度均要符合设计要求。

5 新航空重力系统第一次执行测量任务前，应与已知航空或地面重力测量剖面进行对比测试，计算评估外符合精度。

8.4.8 航空重力原始资料编录应包括以下主要内容：

1 每架次飞行结束后，操作员应分别提交下列原始数据资料：空中操作员记录表、任务书及领航员表，重力原始测量数据(含前、后校和空中飞行时段采集的重力原始数据)、差分 GNSS 原始数据(含基准站和移动站原始数据)。并及时对原始数据备份、编录和刻盘存储。

2 编录内容应包括：测区名称、机场、架次号、测线号、日期、队名及操作员、使用的主要仪器型号、测量参量、采样率、质量评价等。

8.5 资料处理与成果解译

8.5.1 航空重力数据处理分为野外现场原始数据预处理、数据室内处理和数据转换处理三类。

8.5.2 数据预处理是在野外测量作业现场实时完成的分架次数据处理,主要目的是定位(如差分 GNSS)数据解算,数据质量统计控制、测线自由空间重力异常计算、测量工作量和飞行高度以及偏航距统计。了解测量质量、指导测量飞行,从而达到保证测量质量的目的。

8.5.3 数据室内处理是在野外预处理基础上,完成布格地形改正和调平等工作,最终完成各种基础图件的编制工作。

8.5.4 数据转换处理是利用数据处理后的基础图件数据,根据地质解释工作需要选择不同的位场转换方法进行处理。

8.5.5 推断解释基本要求应包括以下主要内容:

1 航空重力资料推断解释是成果报告编写的基础。推断解释应遵循从已知到未知、定性解释与定量解释相结合的原则。在推断解释的基础上,计算异常深度,编写成果报告和编制相应的成果图件。

2 根据地质任务需要,应全面收集并深入分析研究区最新的地质、矿产、物探、钻探、化探、遥感、物性等资料。

3 应根据需要有针对性地进行航空重力数据位场转换和反演处理,如延拓处理(上延或下延)、垂向导数、水平梯度模拟计算和反演,剩余异常计算、密度体深度计算、密度界面深度反演等处理。

4 航空重力资料推断解释通常包括对区域重力异常和局部异常解释两部分。

- 5** 应结合其他地质资料进行航空重力的定性和定量解释。
- 6** 计算异常深度，并对精度进行评价。

附录 A 地空电磁法发射数据记录班报

A.0.1 地空电磁法发射部分数据，可参照表 A.0.1 记录。

表 A.0.1 地空电磁法发射部分数据记录班报

日期		天气		
工区		操作员		
发射源坐标	起点	终点		
发射过程记录				
时间	测线	发射频率	电压电流	文件名

附录 B 地空电磁法接收端数据记录班报

B.0.1 地空电磁法发接收端数据，可参照表 B.0.1 记录。

表 B.0.1 地空电磁法接收端数据记录班报

日期			天气	
工作			操作员	
发射源			仪器号	
飞行速度			飞行高度	
数据采集				
测线位置	测量时间 (精确到秒)	发射频率	数据名称	备注说明

附录 C 地空电磁仪器系统参数指标

C.0.1 地空电磁法仪器系统参数，可参照表 C.0.1 记录。

表 C.0.1 地空电磁仪器系统参数指标

接收系统主要技术指标		发射系统主要技术指标	
类别	指标	类别	指标
动态范围		输出功率	
噪声水平		输出电流	
采样率		输出电压	
分辨率		频率范围	
频带		供电方式	
同步方式		波形种类	
同步精度		飞行速度	
单次飞行时间		飞行高度	

附录 D 航空重力仪检测结果记录表

D.0.1 航空重力仪检测结果，可参照表 D.0.1 记录。

表 D.0.1 航空重力仪检测结果记录表

测区名称： 仪器型号： 测试地点：

静态定位精度 m					
参数	东向 (X)	北向 (Y)	天向 (Z)	平面 (2D)	立体 (3D)
定位精度要求	$\leq \pm 0.1$	$\leq \pm 0.1$	$\leq \pm 0.1$	—	—
实际观测精度					
注：观测时间应大于或等于 2h。					
航空重力仪静态测量精度					
参数	指标要求	实测指标		测量要求	
静态测量精度 10^{-5}m/s^2	$\leq \pm 0.3$			观测时间应大于或等于 3h	
零点漂移 (24h) 10^{-5}m/s^2	$\leq \pm 5.0$			观测时间应大于或等于 24h	
航空重力测量系统动态测量精度					
测量内容		设计指标	实测指标	测线数条	
重复线内符合精度 10^{-5}m/s^2	第一架次				
	第二架次				
	合并架次				
注：采用重复线内符合精度进行评价，合计重复线应不少于 5 条					

检测者： 检查者： 年 月 日

附录 E

E.0.1 航空重力仪测量质量结果，可参照表 E.0.1 记录。

表 E.0.1 航空重力仪测量质量统计表

测区名称：		仪器型号：				机型/机号：				使用机场：						
架次号	测线号	平飞高度 M (均方差 ≤10m)		卫星数 (≥6) 颗		PDOP 值 (≤2.5)		位置均方 差 M (≤1m)		速度均方 差 m/s (≤0.05 m/s)		稳定平台α (-4'≤α≤4') (°)		交叉点残 差 均方差 10 ⁻⁵ m/s ²		架次零点 漂移 10 ⁻⁵ m/s ²
		平均	均方差	最少	最多	最小	最大	最小	最大	最小	最大	俯仰角	滚动角	单侧线	整架次	

填表者：
检查者：
年 月 日

附录 F

F.0.1 航空放射性测量过程中需记录的班报，可参照本附录中附表记录。

表 F.0.1 飞行报表格式

飞行报表					
年	月	日	由	时	分
驾驶员: _____		领航员: _____		机场名称: _____	
航操员: _____				飞机型号: _____	
测区地形图幅: _____				飞行架次: _____	
飞行测线: _____				飞行气象: _____	
仪器号: _____					
磁带(文件)号: _____					
录像带或胶卷号: _____					
纸带号: _____					
飞行记录					
测线号	方位	特征点号	基点号	测线长 km	备注

表 F.0.2 操作员记录表格式

操作员记录表							
日期: _____		机型机号: _____		模拟记录仪量程			
测区编号: _____		机场名称: _____					
飞行架次: _____		预置高度: _____					
飞行时间: _____ 起飞 _____ 落地 _____							
飞行测线: _____							
机外温度: _____ 始 _____ 终 _____		1 _____ 满量程 _____ 2 _____ 满量程 _____ 3 _____ 满量程 _____ 4 _____ 满量程 _____ 5 _____ 满量程 _____ 6 _____ 满量程 _____					
气 压: _____ 始 _____ 终 _____							
磁带(文件)号: _____ 录像带或胶卷号: _____ 纸带号: _____ 能谱采样率: _____ 磁力仪采样率: _____ 磁力仪灵敏度: _____ 驾驶员: _____ 领航员: _____ 操作员: _____							
飞 行 记 录							
测线号	方位	基点号		测线时间		测线长 km	备注

表 F.0.3 飞行月报表格式

飞行月报表								
工作任务: _____			测 区: _____			机型机号: _____		
时 间: _____			报告单位: _____			报 告 人: _____		
日期	飞行架次	飞行小时	累计飞行小时	测线长度 km	累计测线长度 km	测线飞行小时	效率 km/h	备注

表 F.0.4 基线测量记录表格式

基线测量记录表																		
测 区: _____					机 场: _____													
仪器号: _____					机型机号: _____													
时间: _____ 年 _____ 月 _____ 日					至 _____ 年 _____ 月 _____ 日													
填表单位: _____					项目负责: _____					填表人: _____					单位: _____		计数每秒	
日期	早基线					晚基线					早晚变化%					备注		
	TC	K	U	Th	U_{up}	TC	K	U	Th	U_{up}	TC	K	U	Th	U_{up}			

表 F.0.5 晶体分辨率记录表格式

晶体分辨率记录表														
测 区: _____					机 场: _____									
仪器号: _____					机型机号: _____									
时间: _____ 年 _____ 月 _____ 日					至 _____ 年 _____ 月 _____ 日									
填表单位: _____					项目负责: _____					填表人: _____				
日期	飞行前				飞行后				备注					
	$^{137}_{Cs}\%$		$^{208}_{Tl}\%$		$^{137}_{Cs}\%$		$^{208}_{Tl}\%$							
	下测	上测	下测	上测	下测	上测	下测	上测						

表 F.0.6 能谱峰漂统计表格式

能谱峰漂统计表										
测 区: _____				机 场: _____						
仪器号: _____				机型机号: _____						
时间: _____ 年 _____ 月 _____ 日 _____ 至 _____ 年 _____ 月 _____ 日										
填表单位: _____				项目负责: _____				填表人: _____		
日期	飞行前后	峰位 (道)								备注
		地面检查				漂移				
		$^{137}_{Cs}$		$^{208}_{Tl}$		$^{137}_{Cs}$		$^{208}_{Tl}$		
		下测	上测	下测	上测	下测	上测	下测	上测	

表 F.0.7 飞行高度统计表格式

飞行高度统计表													
测 区: _____				机 场: _____									
仪器号: _____				机型机号: _____									
时间: _____ 年 _____ 月 _____ 日 _____ 午				填表单位: _____									
项目负责: _____				填 表 人: _____									
测线号	测线平均飞行高度	测线总基点数	<120m		120m~150m		150m~210m		210m~300m		>300m		备注
			基点数	%	基点数	%	基点数	%	基点数	%	基点数	%	

附录 G 航空伽玛能谱测量各项参数计算

G.0.1 飞机本底为常数按下式计算：

$$R_{ai} = R_{wi} - R_{ci} \quad (G.0.1)$$

式中：

R_w -----第 i 道的本底计数率的数值，单位为计数每秒(1/s)；

R_a -----第 i 道的飞机本底计数率的数值，单位为计数每秒(1/s)；

R_c -----第 i 道的宇宙射线本底计数率的数值，单位为计数每秒(1/s)。

G.0.2 宇宙射线本底按下式计算：

$$R_{ci} = C^k * C_i \quad (G.0.2)$$

式中：

C^k -----任意一个高度左上(3~6)MeV 能量范围内实测的计数率的数值，单位为计数每秒(1/s)；

C_i -----宇宙射线本底对第 z 道的影响系数。 G 可以通过两个不同高度上本底测量由公式(G.0.3)求得：

$$C_i = \frac{\Delta R_{wi}}{\Delta C} \quad (G.0.3)$$

$$\Delta C = C^2 - C^1 \quad (G.0.4)$$

$$\Delta R_{wi} = R_{wi}^2 - R_{wi}^1 \quad (G.0.5)$$

式中：

C^1 -----第一个高度上(3~6)MeV 能量范围内实测计数率的数值，单位为计数每秒(1/s)

C^2 -----第二个高度上(3~6)MeV 能量范围内实测计数率的数值，单

位为计数每秒(l/s);

R_{wi}^1 ----为第, 道第一个高度本底计数率的数值, 单位为计数每秒(l/s);

R_{wi}^2 ----为第, 道第二个高度本底计数率的数值, 单位为计数每秒(l/s);

由于宇宙射线本底值较小, 故实际数是以 1000 计数每秒(l/s)中的值来表示的。

G.0.3 剥离系数按下式计算:

对于任一模型, 有公式(G.0.6)、(G.0.7)、(G.0.8):

$$\Delta Q_K = \Delta KK * R_K + \Delta KU * R_U + \Delta KT * R_T = \Delta KK * (R_K + \frac{\Delta KU}{\Delta KK} * R_U + \frac{\Delta KT}{\Delta KK} * R_T) \quad (G.0.6)$$

$$\Delta Q_U = \Delta UK * R_K + \Delta UU * R_U + \Delta UT * R_T = \Delta UU * (\frac{\Delta UK}{\Delta UU} * R_K + R_U + \frac{\Delta UT}{\Delta UU} * R_T) \quad (G.0.7)$$

$$\Delta Q_T = \Delta TK * R_K + \Delta TU * R_U + \Delta TT * R_T = \Delta TT * (\frac{\Delta TK}{\Delta TT} * R_K + \frac{\Delta TU}{\Delta TT} * R_U + R_T) \quad (G.0.8)$$

式中:

ΔQ_K 、 ΔQ_U 、 ΔQ_T ----分别为该模型含量减去本底模型含量后的剩余钾、铀、钍含量, 分别用%K、 10%U、10%Th 表示;

R_K 、 R_U 、 R_T ----分别为该模型上钾、铀、钍道计数率减去本底模型上钾、铀、钍道计数率的剩余计数率, 单位为计数每秒(l/s);

ΔKK 、 ΔUU 、 ΔTT ----别为各模型上的钾、铀、钍道的格道, 单位

分别为%/计数每秒、 10^{-6}eU/

计数每秒、 10^{-6}eTh / 计数每秒；

ΔKU 、 ΔKT 、 ΔUK 、 ΔUT 、 ΔTK 、 ΔTU ----分别为各模型上铀对钾、钍对钾、钾对铀、钍对铀、钾对钍、铀对钍的影响，单位为单位含量/计数每秒。

对上述 6 个变量通过解方程得到 6 个剥离系数：

$$S_{\text{KU}} = \frac{\Delta\text{KU}}{\Delta\text{KK}}, S_{\text{KT}} = \frac{\Delta\text{KT}}{\Delta\text{KK}} \text{ 指在钾道中铀和钍的影响；}$$

$$S_{\text{UT}} = \frac{\Delta\text{UT}}{\Delta\text{UU}}, S_{\text{UK}} = \frac{\Delta\text{UK}}{\Delta\text{UU}} \text{ 指在铀道中钍和钾的影响；}$$

$$S_{\text{TK}} = \frac{\Delta\text{TK}}{\Delta\text{TT}}, S_{\text{TU}} = \frac{\Delta\text{TU}}{\Delta\text{TT}} \text{ 指在钍道中钾和铀的影响；}$$

剥离系数还与飞行高度有关，主要是由于空气对伽玛射线的康普顿散射和吸收作用，其中尤以房 T 对计算铀含量有很大关系。因此，它随高度的影响需使用公式(G.0.9)进行修正：

$$S_{\text{UT}}(h) = S_{\text{UT}} + \beta h \quad (\text{G.0.9})$$

式中：

$S_{\text{UT}}(h)$ ----经高度修正的剥离系数；

S_{UT} ----未经高度修正的剥离系数；

h ----飞行高度，单位为米(m)；

β ----修正系数，单位为每米(1/m) o 一般采用经验值 0.000249/m。

此外，任一模型的上测铀道计数仍然受到地面放射性影响，故也存在着康普顿散射修正问题，其修正公式为公式(G.0.10)：

$$R_{\text{U}}^{\text{UP}} = C'_{\text{UK}} * R_{\text{KS}} + C'_{\text{UU}} * R_{\text{US}} + C'_{\text{UT}} * R_{\text{TS}} \quad (\text{G.0.10})$$

式中：

R_U^{UP} ----减去本底模型后的上测铀道计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

R_{KS} ----经剥离后的下测钾道的计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

R_{US} ----经剥离后的下测铀道的计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

R_{TS} ----经剥离后的下测钍道的计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

C'_{UK} ----下测钾道计数率对上测铀道计数率的影响系数，亦称上下测晶体偶合系数（可以通过解方程求得）；

C'_{UU} ----下测铀道计数率对上测铀道计数率的影响系数，亦称上下测晶体偶合系数（可以通过解方程求得）；

C'_{UT} ----下测钍道计数率对上测铀道计数率的影响系数，亦称上下测晶体偶合系数（可以通过解方程求得）

地面灵敏度可从经剥离后的计数率和已知模型含量来求得。

G.0.4 大气氨修正按下式计算：

$$R_{Bi} = \frac{R_{up} - IR_{dw}}{m-1} = \frac{R_{up} - I[R_{us} + (C'_{UK}/C'_{UU}) * R_{ks} + (C'_{UT}/C'_{UU}) * R_{Ts}]}{m-1}$$

(G.0.11)

式中：

R_{Bi} ----大气氨修正值的数值，单位为计数每秒（1/S）；

R_{up} ----上测铀道计数率的数值，单位为计数每秒（1/S）；

R_{dw} ----下测铀道计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

m ----晶体几何系数。其计算公式见公式（G.0.22）；

l ----屏蔽系数。其计算公式见公式（G.0.21）。

$$l = (R_{UP}^L - R_{UP}^W) / (R_{dw}^L - R_{dw}^W) \quad (G.0.12)$$

$$m = R_{UP}^W / R_{dw}^W \quad (G.0.13)$$

式中：

R_{UP}^L ----动态校准带陆地部分经剥离修正后的上测铀道计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

R_{UP}^W ----水体部分经剥离修正后的上测铀道计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

R_{dw}^L ----动态校准带陆地部分经剥离修正后的下测铀道计数率的数值，单位为计数每秒（1/s）；

R_{dw}^W ----动态校准带水体部分经剥离修正后的下测铀道计数率的数值，单位为计数每秒（1/S）。

此外， l 和 m 还与高度有关，见公式（G.0.14）和（G.0.15）：

$$l = l_0 + l_{coef} * h \quad (G.0.14)$$

$$m = m_0 + m_{coef} * h \quad (G.0.15)$$

式中：

l_0 、 m_0 ----地面零米高度的值；

l_{coef} 、 m_{coef} ---- l 、 m 随高度 h 变化的系数，单位为每米（1/m）；

h ---飞行高度，单位为米（m）。

G.0.5 高度修正按下式计算：

$$R^{120} = R^h * e^{\mu(H-120)} \quad (G.0.16)$$

式中：

R^{120} ----空中 120m 高度上经康普顿散射修正后的计数率的数值，单位为计数每秒(l/s)；

R^h ----实际飞行高度 h 时经康普顿散射修正后的计数率的数值，单位为计数每秒(l/s)；

H ----标准大气压、标准温度下的飞行高度，单位为米(m)；

μ ----高度衰减系数，单位为每米(1/m)。 μ 值可用公式(G.0.17)求得。

$$\mu = \frac{\ln R^{120} - \ln R^h}{H - 120} \quad (G.0.17)$$

G.0.6 空中 120m 灵敏度的计算

通过上述一系列修正求得各道的 120m 高度上的计数率和地面已知含量之间关系，即为空中系统灵敏度 S_K 、 S_u 、 S_T (计数每秒/单位含量)。

G.0.7 放射性核素含量的计算

经过上述所有参数确定后，公式(G.0.18)~(G.0.20)就是用于实际含量计算的公式：

$$Q_K = \frac{1}{S_{K1}} * R_{KS} * e^{\mu K(H-120)} \quad (G.0.18)$$

$$Q_U = \frac{1}{S_U} * (R_{US} - R_{Bi}) * e^{\mu U(H-120)} \quad (G.0.19)$$

$$Q_T = \frac{1}{S_T} * R_{TS} * e^{\mu T(H-120)} \quad (G.0.20)$$

式中：

Q_K 、 Q_U 、 Q_T ----分别为钾、铀、钍的含量，分别用%、 10^{-6}eU 、 10^{-6}eTh 表示。

用词说明

执行本规程条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

1. 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

2. 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

3. 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

4. 表示允许有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《岩矿石物性调查技术规程》SL/T 264-2020

《公路工程地质原位测试规程》DD2005-03

《航空磁测技术规范》DZ/T 0142-94

《航空重力测量技术规范》DZ/T 0381-2021

《铁路工程地质勘察规范》TB 10012-2019

《铁路隧道设计规范》TB 10003-2016

《铁路工程岩土分类标准》TB-10077-2019

《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266-2013

《铁路工程不良地质勘察规程》TB 10027-2022

附：条文说明

本条文说明系对重点条文的编制依据、存在问题，以及在执行中应注意的事项等予以说明，不具备与正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规定的参考。为了减少篇幅，只列条文号，未抄录原条文。

4.1.1 川藏线雅安至林芝段线路长度约 1000km，隧道总长约 800km，隧线比约 80%。因地形陡峻和高寒缺氧，物探人员无法到达隧道上方地面开展。过去在内地铁路隧道物探所进行的音频大地电磁法勘探工作，预计拟作隧道物探约一半的段落会出现资料空白，所以亟待采用航空电磁法替代地面音频大地电磁法进行隧道物探。2013 年以来，中铁二院进行了航空物探专题调研，主要结论为：1) 航空物探方法分为航空重力、航空磁法、航空放射性和航空电磁法 4 种大类方法，其中前 3 种大类航空物探方法不能确定所探测目标体的深度，并且其方法资料与岩体的软弱、破碎和含水情况相关性小，即这 3 种方法不能直接解决工程地质问题，因此很少用于工程勘察；2) 航空电磁法又细分为航空瞬变电磁法和航空大地电磁法。一方面，航空电磁法可以确定所探测目标体的深度，并且其资料与岩体的软弱、破碎和含水情况存在一定相关性，即该方法可能解决一些工程地质问题；另一方面，目前国内外绝大部分仪器厂商生产的航空电磁法仪器探测深度一般不超过 300m，而铁路隧道埋深通常大多在 300~800m，因此航空电磁法的探测深度严重偏浅，不能满足铁路隧道探测深度的要求。故航空物探方法至今一直迟迟未用于铁路物探工作中；3) 加拿大 Geotech 公司研发了其技术为世界领先水平的航空瞬变电磁法勘探仪器设备系统（VTEMLite 系统）和航空大地电磁法勘探仪器设备系统（ZTEM 系统），在青海格尔木等高寒山区的矿山物探中，航空 VTEMLite 系统的勘探深度可达 600~800m，其方法资料的分辨率较高；航空 ZTEM 系统的勘探深度可达 2000m，其方法资料的分辨率

较宏观。

综上，为了应对上述受地形气候条件限制、出现大段勘探资料空白的被动局面以及探索新的物探工作模式，2018 年 12 月至 2019 年 5 月，中铁二院在川藏线雅安至昌都段的初测阶段，应用航空 VTEMlite 系统和航空 ZTEM 系统进行隧道的航空瞬变电磁法勘探和航空大地电磁法勘探，通过对 17 座隧道（累计长度约 526 公里）的航空电磁法勘探，宏观探测了隧道的工程地质条件，取得了较好的探测效果。在高寒缺氧、地形陡峻、人员不能到达线位进行地面物探的隧道，航空电磁法在探测主要地层界线、断层破碎带以及线路方案比选等方面发挥了不可替代的作用，它是高寒艰险山区隧道地质勘探的利器。川藏铁路的隧道航空电磁法勘探是我国第一次把航空电磁法应用于工程勘探，也是世界上首次把航空电磁法用于铁路工程勘探，它是工程勘探模式和方法的突破和创新。

一方面，《新建铁路川藏线航空电磁法勘探试验专题成果报告》——5.3 部分的试验结果表明：川藏线雅安至昌都段沿线隧道的岩性主要为砂板岩，属于低电阻率岩性；实际资料显示航空瞬变电磁法的勘探深度一般约为 400m，属于浅层探测，资料分辨率较高；实际资料显示航空大地电磁法的勘探深度约为 2000m，属于中深层探测，但资料分辨率较宏观。铁路隧道勘探的重点是隧道洞身高程及附近位置，川藏线的隧道埋深变化范围非常大，勘探深度为几十米至 2000 余米不等，因此要求必须同时采集浅部和中深部资料的物探资料。另一方面，在航空大地电磁法资料处理中，需要利用航空瞬变电磁法资料的

反演结果作为航空大地电磁法浅部资料的初始模型，再与航空大地电磁法中深部资料进行三维联合反演，最终得到线路中线地下断面的三维联合反演电阻率断面图，通过这种联合反演可获得较为准确的航空电磁法勘探结果。

综上，为保证隧道不同深度资料的完整性和较高分辨率，在铁路隧道航空电磁法勘探中，应进行航空瞬变电磁法和航空大地电磁法两种方法的全覆盖勘探，两种方法资料相互印证、互为补充，浅层资料和中深层资料兼顾。

4.1.2 全航空电磁法在新建川藏铁路实践表明，全航空瞬变电磁法最大探测深度约 400m，分辨率较高；全航空大地电磁法最大探测深度约 2000m，但多解性相对较强。因此，在开展全航空电磁法勘探时，根据隧道埋深综合选用全航空瞬变电磁法和全航空大地电磁法，约 400m 浅埋隧道可以只选择全航空瞬变电磁法，对于深埋隧道须并用两种方法。

4.2.2 复杂艰险山区地质构造往往较为复杂，因此全航空电磁法宜开展三维探测。由于电磁响应具有扩散效应，测线需平行中线布设多条，横向最外侧测线距离为勘探深度的 2 倍，测线纵向在隧道两端外延的长度需大于目标勘探深度。为保证中线附近的探测分辨率，布设多条测线时需满足中间密的要求，两侧向外可逐渐变稀。

5.2.7 地空电磁法发射源的布设应满足以下条件。

- 1 发射源宜布设在构造简单、电性比较均匀的地方。
- 2 供电电极 A、B 点位的地理位置尽可能平行于测线方向布设，

AB 方位误差不宜小于 10° 。

3 A、B 极布置还要考虑交通情况和接地条件。A、B 极应布置在交通较方便、土壤坚实且潮湿、接地条件好的地方。若采用铜板、铜丝网、铝箔等片状电极应平敷在接地点上，并用湿土或沙袋压实。采用多根金属电极时，可将电极布置成放射状、弧形或直线形，并将电极垂直打入接地点，使其与土壤密实接触，电极入土深度约为电极长度 $2/3$ 时，相邻两根电极间隔一般为 $1\sim 2$ 倍电极长度。若表层土壤干燥应采取有效措施减小接地电阻，以满足供电电流要求。

4 A、B 极布置要尽量避开高压线、矿山(洞)上方、暗埋管道、溪流水域、平行的断裂构造等以减少电磁干扰。

5 A、B 布设完毕后，应检查供电导线是否有漏电情况、A、B 极是否正确连接、接地情况是否良好，各连接点是否牢固。

6 发射源电源线绝缘电阻应大于 $500\text{M}\Omega$ ，发射源 AB 接地电阻宜小于 $20\ \Omega$ ，在接地困难地区宜采用多根电极并联、埋置金属铝箔；挖深坑、填黏土、浇盐水等方法降低接地电阻。

7 在完成场源布设后，按照说明书对发射系统进行调节和预热，并测试其功能是否正常。完成后，关闭发射系统，等待发射命令。

8 在收到发射命令后，按说明书调节发射系统，稳定发射后告知接收端。

9 在发射过程中，每次调整电流后，应记录发射电流幅值和相位。在稳定发射过程中，应定时记录发射电流，并检查发射系统工作状态。每次记录发射电流时应标明测量时间。

10 当出现故障时，应及时关闭发射系统，通知接收端，并由专门人员进行检修。排除故障后重新测量。

11 每次测量结束前，接收到采集端结束发射指令后方可停止发射。

5.4.2 地空电磁法接收端飞行器起飞前对仪器系统及配套设备进行检查与调节的主要内容应包括：

(1) 检查悬吊线、起落架等机械结构是否安全可靠；

(2) 接通电源前，检查接收线圈、接收机、无人机的开关位置和电缆连接是否正确。接通电源后，首先检查各电源电压指示是否符合规定，然后检查和调节仪器系统。

(3) 检查每种仪器、设备的工作状态是否正常。待接收系统同步后，在停机坪处采集 2 分钟地面数据，观察场信号强度和噪声水平，确定单点采样时间，初步估计飞行速度，并根据实际结果反馈发射系统操作人员，是否调节电流大小。

(4) 单点采样时间应保证采集数据信噪比大 2。

(5) 观察 GPS 导航卫星个数，观察无人机遥控信号能否正常工作，测试遥控装置，输入人工设置参数及测线功能点位。

5.4.4 地空电磁法需要向地下发射大功率电磁信号，其电压或电流值较高，因此必须采取相应的措施保障安全，主要应包含以下内容。

1 出工前必须对供电导线进行检查，任何损坏和开裂都必须进行及时的修复和替换，接头处应使用高压绝缘胶布包裹。

2 在山区收、放导线经过高压线时，严禁抛抖导线或手持长物，以防高压触电。在供电电极和导线经过的村庄、路口等障碍物的位置，应有明显清晰的高压警示标志，并派专人巡视看管。

3 供电前，操作员必须仔细检测供电线路，确认接线正确、连通

和接地情况良好后，明确发出供电指令，当确认所有工作人员已离开 A、B 极，方可开始供电。

4 供电期间，操作员应密切看护发射机及配套设备，保证其处于正常工作状态并随时处置出现的故障；在改变发射机输出电压挡位、变换频点前，必须退出发射状态；需手动调节。

5 发射机输出电流时，必须平稳缓慢调节；退出发射状态前，必须将输出电流调节钮旋至最小。发电机组运行期间，不得添加燃油。

6 连接或断开供电导线、发射控制器电缆、发射机电源输入电缆时，必须确认发射机是处于停机状态。

7 移动测站前或全天工作结束后，在尚未收到发射机操作员明确断电的指令前，为确保人身安全，不允许任何人接触供电导线和电极。

8 野外作业车辆应配备灭火器、急救箱等；野外人员应配齐可靠的通讯工具；供电系统人员必须使用绝缘胶鞋、绝缘手套等防护用品。

9 雷雨天气，应停止野外作业。突遇雷电，应迅速关机、断开连接仪器设备的所有电缆。

10 无人机每次起飞降落前，所有操作人员均应保持安全距离。

6.3.2 机载航磁测系统航空磁力仪检验主要内容应包含：a) 噪声水平、灵敏度、测磁场准确性及测程范围等.应达到仪器出厂指怀；b) 带宽 $NO.5Hz$ （或阶跃响应上升时间 $<1s$ ）；c) 探头方向差 $<1.0nT$ ；d) 采样率 $N2$ 次/s；e) 一致性要求：备用仪器与使用仪器对比观测：多架飞机同-工区作业时应进行一致性观测，连续 5h 两台仪器测量差值的最大变化 $V0.5nT$ ；f) 稳定性要求：单台磁力仪局部变化的包络线峰峰值，在任意 10s 内应小于 $0.1nT$ 。

航空磁力仪系统探头当采用固定方式安装时，探头所处位置要求

飞机磁场平稳、磁梯度变化小、与机体姿态变化的一致性好、飞机做动作时影响小；探头的支杆或支架、固定螺丝、信号电缆等都必须是无磁性材料。机械强度需符合要求。当采用软吊方式安装时。应选好绞车位置和电缆引出孔，牵引拉力线和刹车装置要牢靠；还须配置对悬吊系统的应急切断装置，确保 E 行安全。软吊电缆长度应保证机场干扰场小于设计的误差要求。当选用硬补偿方法时。磁补偿器线圈中心须与航空磁力仪探头灵敏元件中心重合；磁补偿线圈 X、y、z 三个轴须与航空磁力仪探头灵敏元件三轴互相平行，并注意纠正飞机停放与飞行时机身轴线不一致带来的误差。磁补偿器灵敏元件应装在磁场平稳、梯度小、姿态变化与飞机机身致、距航空磁力仪探头不远、操作方便的位置。当选用软补偿方法时，需要解补偿器适用范围、分辨率、改善率、数据输出率、频率响应；姿态传感器应装在磁场平稳、梯度小，姿态变化与飞机机身一致、检修方便的位置；姿态传感器 X、Y、Z 三轴的向轴应与飞机机身横向、纵向及垂向轴基本平行。

导航定位方法应满足测量比例尺对导航定位精度的要求。当使用 GPS 导航定位时，需对 GPS 的导航定位功能检查校验：设置航距点，实时导航信息，包括偏航距、待飞距、预达时间等。还需检查 GPS 输出定位数据：坐标值、高度、时钟脉冲信息等。雷达测高计、气压高度仪及测温仪主要检查校验格值、灵敏度、测量误差、校正系数等应达到出厂指标。在飞机上安装导航定位系统时，天线安装位置要求通视条件良好，避免机体或其他设备遮挡。若接收卫星数量不够，定位精度降低程度（PDOP）值大于设计要求时，应暂停 6 行测量或选用其他能够满足要求的导航定位方法和设备。

6.5.2 航空磁测资料推断解释根据项目任务目标一般可分为区域性基础地质调查、综合性和专属性固体矿产勘查、油气资源调查、水

文地质工程地质与环境地质评价四种类型。航空磁测基础地质调查主要开展区域性地质构造和隐伏岩体的推断解释,同时也兼顾固体矿产勘查或油气资源调查。综合性和专属性航空磁测固体矿产勘查主要以寻找金属和非金属矿产为主,同时也进行地质构造和隐伏岩体的推断解释.航空磁测油气资源调查以研究含油气盆地和局部构造为主,同时也进行地质构造和隐伏岩体的推断解释。航空磁测水文地质工程地质与环境地质评价在地质构造和隐伏岩体等推断解释的基础上,开展水文地质评价、工程选址稳定性评价、环境地质评价。