

ICS 07.060

CCS D 10



T

团体标准

T/CI 927—2025

扩频激电法技术规程

Technical specifications for spread-spectrum induced polarization method

2025 - 03 - 17 发布

2025 - 03 - 17 实施

中国国际科技促进会

发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 应用条件	2
6 技术设计	3
7 仪器设备	7
8 野外工作	10
9 资料处理与解释	15
10 成果报告编写	17
附录 A（规范性） 标本电性测量要求	19
附录 B（资料性） 扩频激电法勘探应用流程	21
附录 C（资料性） 数据采集质量改善方法	23
附录 D（资料性） 扩频激电法野外记录表参考格式	24
附录 E（资料性） 扩频激电法原理	26
参考文献	29

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。

本文件由中国国际科技促进会提出并归口。

本文件起草单位：长沙巨杉智能科技有限公司、中南大学、中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司、江苏省海洋地质调查院、贵州省有色金属和核工业地质勘查局地质矿产勘查院、中国科学院地质与地球物理研究所、江苏华东地质环境工程有限公司、安徽省勘查技术院、湖南省地球物理地球化学调查所、江苏省矿产地质调查大队、甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院、内蒙古地质工程有限责任公司、江西省地质局第五地质大队、贵州省有色金属和核工业地质勘查局物化探总队、甘肃省有色金属地质勘查局兰州矿产勘查院、湖南省地质调查所、中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心、兰州资源环境职业技术大学、核工业北京地质研究院、湖南省遥感地质调查监测所、江苏省地质勘查技术院、湖南省水文地质环境地质调查监测所、江苏省新能源地质调查大队、湖南省核地质调查所、湖南省工程地质矿山地质调查监测所、中国冶金地质总局西北地质勘查院、青海省第三地质勘查院、辽宁省物测勘查院有限责任公司、湖北省地质局第一地质大队、甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院、甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院、华东冶金地质勘查局物探队、广西壮族自治区地球物理勘察院、山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队、山东省煤田地质局物探测量队、内蒙古有色地质矿业(集团)综合普查有限责任公司、浙江省有色金属地质勘查院、河北省煤田地质局第二地质队、黑龙江省地球物理地球化学勘查院、陕西地矿物化探队有限公司、河南省第七地质大队有限公司、江西省地质局第一地质大队、湖南省国土空间调查监测所、云南省核工业二〇九地质大队、中国有色金属长沙勘察设计院有限公司、广东省地质调查研究院、山西省地质调查院有限公司、四川省冶金地质勘查院、华东冶金地质勘查局八一地质队、青海省第五地质勘查院、沈阳地球物理勘察院有限责任公司、中化地质矿山总局河南地质局、湖南省城市地质调查监测所、核工业二三〇研究所、湖南省交通规划勘察设计院有限公司。

本文件主要起草人：陈儒军、姚红春、杨轮凯、卢卯、何兰芳、周欣、张凯、周杰、申瑞杰、肖俊平、李荣亮、李彦军、鄢毛毛、米晓利、刘梁、陈思文、羊春华、成爽、王洪、刘春明、郭振威、郭东宝、曹创华、王灿、罗维斌、刘祐、杨尚义、龚术、王军成、何峰、刘海彬、汪硕、赵理芳、程云涛、杨云见、曾伟、杨伟、李进、王金海、蒋丽丽、熊远鹏、徐富文、谢玉福、张健、任喜荣、陈光椿、莫亚军、尹召凯、白锦琳、胡家源、牛兴国、吴义、上官拴通、向华、孙文志、白顺宝、刘建利、王明明、黄建权、李明陆、刘晓峰、王元洪、倪进鑫、刘江山、余越星、周栋良、李保辉、严易会、谭方玉、柴培琪、胥溢、张波、高士银、李兆祥、唐海军、梁本旺、吴頔、黄朝宇、姚宁沛、刘旭、唐喜、马鑫、李松柏、李叶飞、卢胜辉、储书武、陈政、钟明峰、陶沐云、王沛恩、刘强、陶城、易隆科、范运岭、柴世松、段书新、王凯、肖扬、李金龙、王明、强秋平、王洪亮、屈挺、李星江、刘华建、李瑞波、冒我冬、周志杰、乔得福、曹思、杜成额、张叶鹏、肖新星、王红、柳震、赵显志、袁昌盛、王海、郝昱贵、李帅、邬远明、周钦渊、周正宝、何禹、吴岩、孟小杰、张华、邓子豪、黄思思、胡再元。

引 言

0.1 目的意义

自扩频激电法被提出以来，该方法已在国内超过二十个省份以及国外如巴基斯坦、乌干达等国家得到广泛应用。然而，作为一种新方法，当前缺乏统一的扩频激电法技术规范，为此制定此文件，旨在规范技术设计、仪器要求、野外工作方法及数据处理的技术标准，为扩频激电法在项目设计、实施、验收等各阶段提供技术依据，进而推动该方法在国内及国际市场的应用与普及。

0.2 相关专利情况说明

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及到本文件6.4、9.1中相应内容的相关专利（CN202211105664.5）地质勘探方法、装置、数据采集系统及相关设备，以及6.5、9.1相关专利（CN202310394021.5）一种利用扩频信号获取激电参数的方法、装置、介质和设备的使用。

本文件的发布机构对该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺，愿意同任何申请人在公平、合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。

表1中列出的专利权人持有本文件涉及的专利。

表1 持有本文件涉及的专利的专利权人相关信息

专利持有人	地址
长沙巨杉智能科技有限公司	长沙市望城经济技术开发区普瑞西路858号金荣企业公园C9-501
中南大学	湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

扩频激电法技术规程

1 范围

本文件规定了扩频激电法工作的应用条件、技术设计、仪器设备、野外工作、资料整理与解释、成果报告编写等工作的程序与要求。

本文件适用于矿产资源、水文、工程、环境、灾害地质、考古等调查中，用于探测与周围介质存在电性差异的勘查领域的扩频激电法工作，也适用于在区域地质调查中，用于划分地层、岩体、构造及蚀变带范围的勘查工作。

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 18314 全球导航卫星系统(GNSS)测量规范
- DZ/T 0069 地球物理勘查图图式图例及色标
- DZ/T 0070 时间域激发极化法技术规程
- DZ/T 0073 电阻率剖面法技术规程
- DZ/T 0153 物化探工程测量规范
- DZ/T 0281 相位激发极化法技术规程
- DZ/T 0368 岩矿石标本物性测量技术规程
- DZ/T 0391 地球物理勘查基本术语

3 术语和定义

DZ/T 0391界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

扩频信号 spread spectrum signal

一种伪随机 m 序列信号，其标准时序信号由在 $-A$ 、 $+A$ 两个值上变化的阶跃波形组成，在频谱中的能量集中在主频频点上，主频频点在线性频率上等间距分布。

3.2

扩频激电法 spread spectrum induced polarization method

通过供电电极向地下供入含有多个频率的扩频电流信号，在地面观测接收电极间电位差以及发射的供电电流，计算出多个频率的视电阻率、视频率散率、视相位和视扩频相位，达到探测地下介质不同频率空间电性变化的一种频率域激发极化法。

3.3

视扩频相位 spread spectrum phase

利用两个频率的相位值计算出的能够反映介质极化效应强弱的一个参数。

3.4

基频 fundamental frequency

扩频信号的基础频率，也是扩频信号中最小的主频频率。

3.5

阶数 order

反应扩频信号中主频频点数量的一个参数。

注：假设扩频信号的阶数为 k ，则扩频信号的主频频点数量为 $N = 2^{k-1}$ 。

3.6

频率融合 frequency fusion

将多个主频频率融合在一起，以增强信号能量、提高数据信噪比的一种方法。

3.7

极距组合 electrode spacing combination

将阵列采集的相邻通道按照一定规则进行组合，以增加信息量、提高反演精度的一种方法。

3.8

中间梯度装置 gradient array

利用大极距AB供电时，在AB供电电极之间电场变化不大的区域用测量电极扫面以发现激电异常分布规律的激电采集装置。

3.9

通用偶极-偶极装置 general dipole-dipole array

阵列式扩频采集中，隔离系数可以为任意实数的偶极-偶极测深装置。

3.10

通用三极装置 general pole-dipole array

在阵列式激电数据中，隔离系数可以为任意实数的三极测深装置。

3.11

通用四极装置 general quad-pole array

包含通用偶极-偶极装置和多中间梯度装置的一种阵列式扩频激电数据采集装置。

3.12

采集点 acquisition point

同一对供电点A、B和同一对接收点M、N所对应的包含横向、纵向位置信息的虚拟点位。

注：每个采集点的A、B、M、N点位置完全相同，且理论上只有唯一的一组视电性参数。

4 符号

下列符号适用于本文件，其余符号按照GB/T 14499执行。

A : 供电点位置A。

B : 供电点位置B。

M_x : 排列中第 x 个接收电极位置。

MN : 相邻接收电极的距离 (m)。

AB : 供电点之间的直线距离 (m)。

OB : 测线中心点与供电点B的直线距离 (m)。

h : 探测地质体的顶部埋深 (m)。

K_i : 第 i 个通道的装置系数。

N_a : 扩频激电组合频率的数量。

ε : 均方误差。

m : 均方相对误差。

cp_j : 第 j 个频点的视扩频相位 (mrad)。

ρ_j : 第 j 个频点的视电阻率 ($\Omega \cdot m$)。

5 应用条件

开展扩频激电法工作应同时满足以下条件：

- a) 勘探目标与周围介质存在明显的电性差异；
- b) 勘探目标体在地表能够引起可测量的异常；
- c) 勘探目标体引起的异常能从干扰背景中分辨出来；
- d) 具备能够开展工作的地形条件和接地条件；
- e) 勘探目标体深度小于 2000 m。

6 技术设计

6.1 资料收集

设计编写前，应根据工作目的和任务的要求，收集下列资料：

- a) 测区的人文、气象、交通条件等相关资料；
- b) 测区的地形、地貌、水系分布、土壤、植被情况等资料；
- c) 测区的干扰因素种类、干扰程度和分布范围等资料；
- d) 测区与工作任务的地质、地球物理、地球化学、钻探、测绘及工程设计等资料；
- e) 测区与工作任务的岩矿石电阻率、极化率等物性参数资料；
- f) 其他相关资料。

6.2 野外踏勘

在测区首次开展工作时，应先进行现场踏勘，踏勘一般包括以下内容：

- a) 测区内地形、地貌、交通、人文、经济、气象等工作条件；
- b) 测区内的干扰源类型和大致分布情况；
- c) 核对已收集的地质、地球物理、地球化学和测绘资料；
- d) 根据已有地质资料，了解测区围岩及目标体的分布情况，采集不同区域和不同类型的岩矿石标本，并按附录 A 的测量要求测量标本电性特征；
- e) 根据现场工作条件评估预布置测线方案的可行性。

6.3 方法有效性、可行性分析

6.3.1 在技术分析和设计过程中，可以从以下几方面资料进行方法有效性分析：

- a) 相邻测区或其他类似测区已有的地质、地球物理资料；
- b) 测区或其他与测区岩(矿)石类似地区的已有物性参数资料；
- c) 以测区物性参数为基础的正演计算或者模拟实验结果；
- d) 野外踏勘资料和现场试验结果。

6.3.2 在新区应用条件不明或测区地质条件较为复杂时，开工前应开展方法有效性试验，通过现场试验工作确定扩频信号的施工参数。具体的勘探应用流程可参考附录 B。

6.4 扩频激电主要装置选择

6.4.1 中间梯度装置

中间梯度装置见图1，参数选择如下。

- a) AB 距的选择应根据目标体埋深和测线长度合理布置，应通过理论计算或野外试验选择。
- b) MN 距应根据目标体规模、接收信号强度和仪器分辨率来确定，一般取 $\frac{AB}{300} \leq MN \leq \frac{AB}{30}$ 。
- c) 当工作目的仅限于发现异常时， MN 的观测范围应限于装置中部 AB 距三分之二范围内；当工作目的还包括划分地层、圈定矿化蚀变带时， MN 的观测范围应限于装置中部 AB 距三分之一范围内。
- d) 当测线长度超出 AB 距三分之二范围，需移动 A、B 极，并在相邻测段重复观测 2 个~3 个测点；
- e) 当一线供电多线观测时，旁测线与主测线的最大距离应不超过 AB 距的五分之一。
- f) 供电线应放于两条测线中间，以减小电磁耦合影响。
- g) 第 i 个通道的装置系数计算公式为：

$$K_i = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM_i} + \frac{1}{AM_{i+1}} + \frac{1}{BM_i} + \frac{1}{BM_{i+1}}} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

AM_i ——为电极 A 与电极 M_i 的距离；

BM_i ——为电极 B 与电极 M_i 的距离。

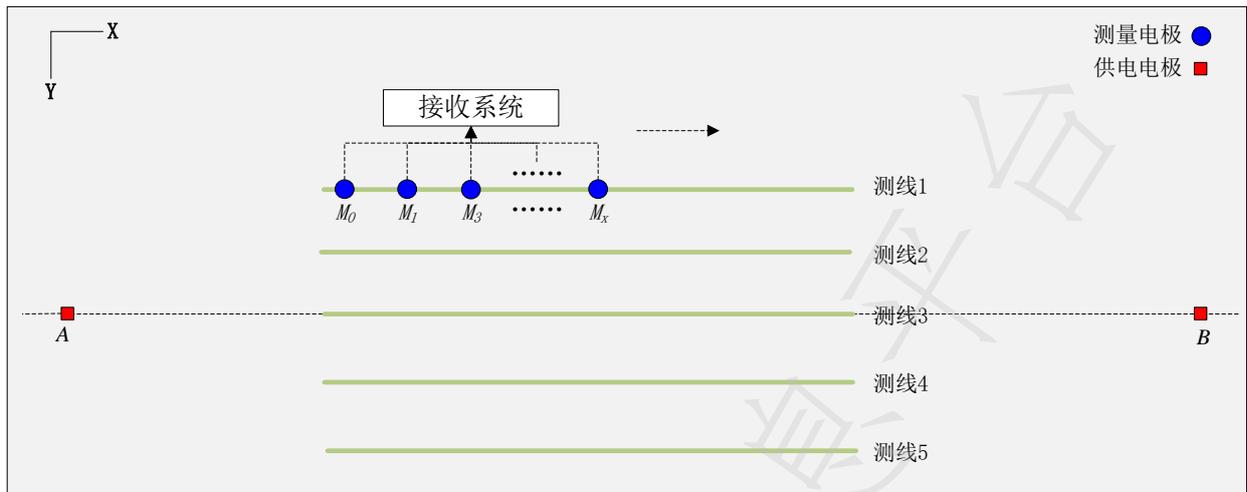


图1 中间梯度装置示意图

6.4.2 通用偶极-偶极装置

通用偶极-偶极装置见图2，假设最大探测深度为 h ，则参数选择如下。

- a) 供电电极为 A、B，供电电极距为 a ；接收电极为 $M \sim M_x$ ，组成 $(x-1)$ 个测点，测点极距为 c ；最大收-发电极距为 b 。
- b) 一般取 $a=2c$ ，为增强观测信号强度，可以增大供电电极距 a 。
- c) 最大收发电极距 b 与 a 、 c 、 h 有关，应保证 $(\frac{a}{2} + b + x \times c - \frac{c}{2}) \geq 2 \times h$ ，即：

$$b \geq (4 \times h - a - (2 \times x - 1) \times c) \div 2 \dots\dots\dots (2)$$

- d) 第 i 个通道的装置系数计算公式为：

$$K_i = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM_i} - \frac{1}{AM_{i+1}} - \frac{1}{BM_i} + \frac{1}{BM_{i+1}}} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

AM_i ——为电极A与电极 M_i 的距离；

BM_i ——为电极B与电极 M_i 的距离。

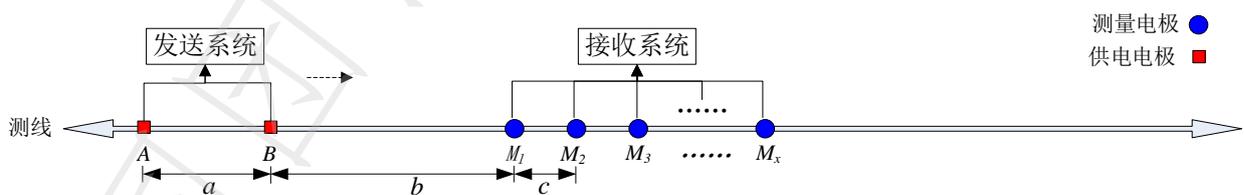


图2 通用偶极-偶极装置示意图

6.4.3 通用三极装置

通用三极装置见图3，假设最大探测深度为 h ，则参数选择如下。

- a) $M \sim M_x$ 是接收电极，组成 $(x-1)$ 个测点，测线总长度应不小于 $\frac{3}{2}h$ 。
- b) A是测线上的供电点，以测线中点O为中心向两边对称跑极供电，最大收发距 AM_x 应不小于 $3h$ 。
- c) 无穷远 B 尽可能布设在测线的中垂线上，它与测线的距离为 OB 。当 B 点位置参与反演时， OB 应不小于 $3h$ ；当 B 点位置不参与反演时， OB 应不小于 $8h$ ，且 B 控制的测线长度应不超过 $2h$ 。
- d) 当测线长度超出 B 点控制范围时，应将测线分为多条短测线，每条短测线单独布设无穷远 B 进行测量，完成测量后再合并数据。

- e) 当测线中垂线上无法布设 B 点时, 可沿测线平行方向偏移 $\frac{OB}{20}$, OB 为 B 点与测线的垂距; 相邻供电点距离 $A_i A_{i+1}$ 在测线内一般为 2 倍接收极距, 在测线外一般为 4 倍接收极距, 当需要提高纵向分辨率时, 可进一步加密供电点;
- f) 第 i 个通道的装置系数为 K_i , 不考虑位置 B 的装置系数见公式 (4), 考虑位置 B 的装置系数见公式 (5)。

$$K_i = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM_i} - \frac{1}{AM_{i+1}}} \dots\dots\dots (42)$$

$$K_i = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM_i} - \frac{1}{AM_{i+1}} - \frac{1}{BM_i} + \frac{1}{BM_{i+1}}} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

AM_i ——为电极 A 与电极 M_i 的距离;
 BM_i ——为电极 B 与电极 M_i 的距离。

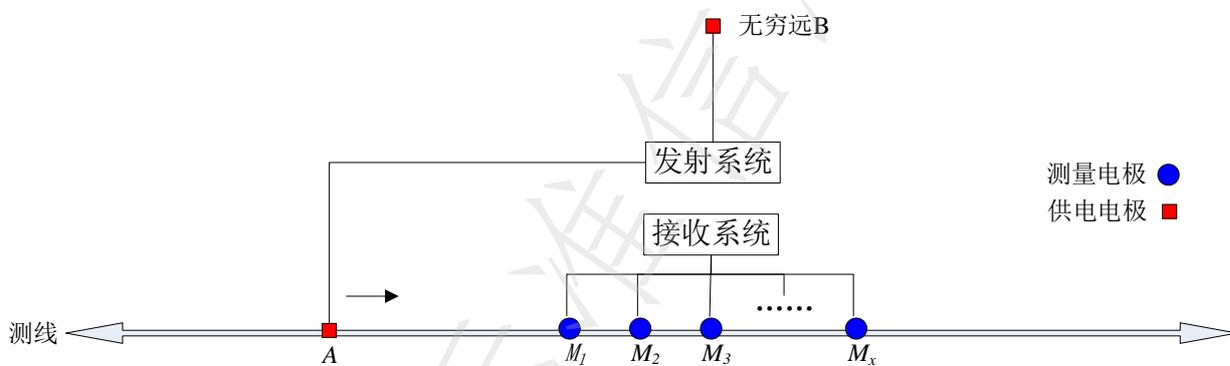


图3 通用三极装置示意图

6.4.4 通用四极装置

通用四极装置见图4, 假设最大探测深度为 h , 则参数选择如下:

- a) $M_1 \sim M_x$ 是接收电极, 组成 $(x-1)$ 个测点, 测线总长度应不小于 $\frac{3}{2}h$;
- b) A 为测线中点左侧供电点, B 为测线中点右侧供电点, A、B 以测线中点对称, 最大 AB 距应不小于 $6h$;
- c) 相邻供电点距离 $A_i A_{i+1}$ 或 $B_i B_{i+1}$ 在测线内一般为 2 倍接收极距, 在测线外一般为 4 倍接收极距, 当需要提高纵向分辨率时, 可进一步加密供电点;
- d) 第 i 个通道的装置系数计算公式为:

$$K_i = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM_i} - \frac{1}{AM_{i+1}} - \frac{1}{BM_i} + \frac{1}{BM_{i+1}}} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

AM_i ——为电极 A 与电极 M_i 的距离;
 BM_i ——为电极 B 与电极 M_i 的距离。

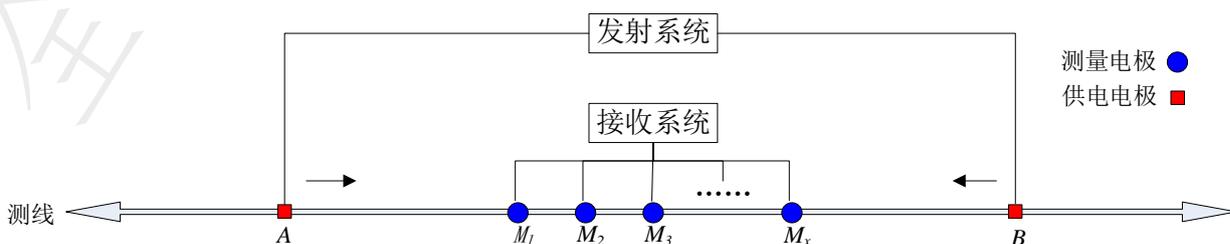


图4 通用四极装置示意图

6.5 扩频激电参数选择

6.5.1 基频选择

选择扩频信号的基频应综合考虑信噪比、目标体频谱激电响应、异常衬度等因素，原则上通过试验或理论分析确定，常用的基频为1/16 Hz。

6.5.2 波形阶数选择

选择扩频波阶数应综合考虑测区干扰情况、岩矿石频谱特征等因素，原则上选择的波形阶数应确保数据具有高信噪比，同时又能区分出目标岩矿体的极化异常，常用的波形阶数为5。

6.5.3 融合频率数选择

在干扰较大的测区，宜进行频率融合。使用频率融合时，每个组合频率融合的主频数量 m 应根据测区干扰情况进行设置，融合后的组合频率数一般取 $N_d = N/m$ ，其中 N 为主频数量。原则上干扰越大， m 应越大，但应确保组合频率数 N_d 不小于2，常用的融合频率数为4。

6.6 测区与测网布设

6.6.1 测区范围

测区范围确定方法及原则：

- 测区范围应根据地质条件和勘探目标任务确定；
- 测区范围应保证有足够的背景场以及异常的完整性；
- 测区范围宜尽可能包含已知矿体、钻孔和露头验证信息；
- 测区边界原则上应规整，避免零碎和参差不齐。

6.6.2 测线及测点设计

测线及测点应按照以下原则进行设计。

- 测线方向尽量垂直于探测目标体或待查证物化探异常走向；目标体（待查证异常）走向非单一时，尽量垂直或大角度相交于主目标体走向。
- 测线尽量与已知地质剖面及物化探剖面重合，并尽可能通过已知信息点。
- 点线距尽可能清晰地刻画地质目标体，线距不大于目标体走向长度，点距不大于2倍目标体宽度。
- 测点号、测线号以自西向东、自南向北增大的顺序编排。

6.6.3 比例尺和测网密度

比例尺和测网密度应根据勘探任务、目标体规模及装置类型确定，应确保目标体异常的完整性和连续性。常用工作比例尺和相应测网密度见表2，穿过异常的测线、测点数还应满足表3的要求。

表2 常用工作比例尺和测网密度表

比例尺	线距/m	点距/m
1: 25 000	250	50~100
1: 10 000	100	20~50
1: 5 000	50	10~20
1: 2 000	20	5~10

表3 穿过异常的测线、测点数

普查		详查	
测线条数	每条测线上的测点数	测线条数	每条测线上的测点数
≥2	≥3	≥3	≥5

6.6.4 测地要求

测地工作要求按照GB/T 18314、DZ/T 0153执行。

6.7 工作精度确定

6.7.1 工作精度分为 I、II、III 三级（见表 4）。工作精度应根据勘探任务、测区干扰情况等因素进行设计，以取得地质效果为原则。

表4 工作精度表

精度级别	视电阻率均方相对误差, %	视扩频相位均方误差/mrad
I	1.0	3.0
II	3.0	10.0
III	6.0	20.0

6.7.2 在干扰较大的测区，可以分区设计工作精度。通过试验证明在可满足勘探任务要求的情况下，可以放宽精度要求，但需要在设计书中明确指出。

6.8 设计书编写

根据勘探任务要求，全面收集踏勘、地质、地球物理、测绘及钻探等资料，在该基础上编写设计书，具体内容如下。

- a) 前言：包括项目背景、目的任务、工作范围、交通及自然地理条件等。
- b) 测区地质、地球物理特征：包括地质特征和地球物理特征，其中地质特征包括区域地质特点、测区地质特征、勘探目标及围岩的地质特征；地球物理特征需要阐述该测区、邻区或类似地质环境下各岩(矿)石的电阻率、激发极化参数特征，同时需要分析区内干扰情况，指出本方法在该区域应用的有利和不利条件。
- c) 工作部署：包括技术路线、选用的方法技术、工作量及工作安排等。
- d) 工作方法和技术要求：包括参照执行的技术规程、测地方法与技术要求、仪器与技术要求、野外工作要求、质量检查方法与要求、数据预处理和反演、室内资料综合整理等内容。
- e) 项目组织与管理：包括组织管理制度、人员组成以及设备配备等内容。
- f) 经费预算：包括预算编制依据、采用的费用标准、预算计算方法及预算表等内容。
- g) 质量与安全保障措施：包括安全保障、质量管理办法及环保措施。
- h) 预期成果与提交资料：阐述开展勘探项目后的预期成果，列出提交的成果资料。

7 仪器设备

7.1 主要仪器设备的选择

7.1.1 在编写设计书时，应根据勘探任务和地形地质条件确定仪器的型号和数量。应尽可能使接收机一次性覆盖整条剖面，进行阵列式同步采集。

7.1.2 扩频激电采集系统应选择性能稳定且具有安全保护功能的发送系统及灵敏度高、噪音水平低、抗干扰能力强的接收系统。

7.2 主要仪器设备的性能指标要求

7.2.1 采集系统

采集系统包括了发射系统和接收系统，由接收机、线缆、电极、发送机、直流电源、电流站等设备组成，共同完成扩频激电的野外数据采集。整个系统的具体技术要求如下：

- a) 支持无线分布式阵列式实时采集和监控；
- b) 支持扩频信号发送及检测功能；
- c) 能够实时计算和显示多个频点的视电阻率、视电阻率散率及视扩频相位；
- d) 支持接地电阻测量功能；
- e) 支持多极距组合功能；
- f) 支持多频融合生成组合频率的功能。

7.2.2 接收机

接收机具体技术要求如下：

- a) 本底噪音应优于 $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 0.1 Hz ;
- b) 测量电位最高分辨率应优于 0.5 uV ;
- c) 0.1 Hz 的相位测量精度应优于 0.5 mrad ;
- d) 支持 GNSS (Global Navigation Satellite System) 同步, 同步精度优于 40 ns 。

7.2.3 发送机及直流电源

发送机及直流电源的具体技术要求如下。

- a) 支持发送扩频波信号, 最大频点数应大于 3 个。
- b) 发射基础频率的频率范围应包括 $\frac{1}{256} \text{ Hz} \sim 1 \text{ Hz}$ 。
- c) 支持 GNSS 同步, 同步精度优于 40 ns 。
- d) 应具有恒流、恒压功能, 10 min 内电流振幅波动范围小于 1% 。
- e) 可手动调整供电电压及供电电流的大小, 并能实时显示。
- f) 应具备过压、过流、过温及断电保护功能。
- g) 设备功率大小应根据勘探深度来确定, 设备最大功率一般取 $P=10 \times h$ 来计算, 其中 P 为设备支持的最大功率 (单位为 W), h 为设计勘探深度 (单位为 m)。当遇到低阻背景区或强干扰时, 应选择更大功率的发送设备。

7.2.4 电流站

电流站的技术要求如下:

- a) 宜采用无接触的霍尔传感测量方式测量电流;
- b) 电流测量精度应优于 1% ;
- c) 0.1 Hz 的相位测量精度应优于 0.5 mrad 。

7.2.5 供电线缆

供电线缆的技术要求如下:

- a) 供电线缆应采用拉力强、电阻小、绝缘高的耐磨导线;
- b) 当供电电压为 500 V 时, 每公里导线的绝缘电阻不小于 $2 \text{ M}\Omega$;
- c) 导线耐压值应高于最大供电电压, 内阻一般不超过 $10 \text{ }\Omega/\text{km}$;
- d) 应选择多芯全铜导线, 导线截面积 S 应满足公式 (7):

$$S \geq \frac{I}{10} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

S ——导线截面积, 单位为平方毫米 (mm^2);

I ——电流, 单位为安培 (A)。

7.2.6 供电电极

供电电极的技术要求如下。

- a) 移动供电电极应选择导电性好且抗氧化能力强的金属棒, 如铜棒、不锈钢棒等。综合考虑便携性和效果, 一般选择长度为 $300 \text{ mm} \sim 400 \text{ mm}$, 直径为 $10 \text{ mm} \sim 30 \text{ mm}$ 的电极。
- b) 固定供电电极应选择铜板、铁丝网、铝箔等具有较大接触面积的片状金属。
- c) 当需要较大的供电电流工作时, 应用多个电极并联供电, 并保证电极与并联导线接触良好。

7.2.7 辅助工具

辅助工具的技术要求如下:

- a) 供电电极 A、B 之间的通断可通过测量 A 端导线与 B 端导线之间的电阻和直流电压来判断, 一般采用万用表或兆欧表来测量;
- b) 当 AB 距离小于 50 m 时, 可直接利用万用表测量 AB 之间的电阻, 电阻值等于正向测量电阻和反向测量电阻的平均值;
- c) 当 AB 距离大于 50 m 时, 应采用兆欧表测量 AB 之间的电阻。

7.3 仪器的使用与维护

7.3.1 一般要求

在开展野外工作时，使用和维护仪器的基本要求如下：

- a) 仪器设备应严格按照操作(使用)说明书的规定使用、维护和管理；
- b) 主要仪器设备应建立使用、检查和维修档案，并由专人负责；
- c) 仪器存放场所应保持通风、干燥以及无腐蚀性气体，在使用和运输过程中应注意防水、防震；
- d) 仪器经过长时间的存储或者运输后，在开展工作前应开展检查测试，确保仪器的各项功能、性能、指标满足要求；
- e) 在运输仪器设备前，应仔细清点设备，填写设备清单，并将设备清单和快递单号发送给收件人；
- f) 收件人在收到仪器设备时，应及时对照设备清单清点设备，数量有异时应及时反馈；
- g) 所有电池或者带电池仪器设备在长期存放时，应定期充电；
- h) 仪器设备发生重大故障后，经检修、校准后方可用于生产。

7.3.2 接收机

接收机的使用和维护基本要求如下：

- a) 输入信号幅值不能超过接收机的最大量程，应特别注意当供电电极位于接收电极之间或距离接收电极较近时的信号幅值；
- b) 供电电极应与接收电极保持一定距离，一般不小于 5 m；
- c) 在布设完接收机后，应在接收机上套上雨布，避免暴晒或者淋雨；
- d) 接插件松动后应及时反馈给维修人员进行维护。

7.3.3 发送机与直流电源

发送机与直流电源的使用和维护基本要求如下：

- a) 启动发送信号前，应先将电流值设置为 0，启动发送后再从 0 开始逐步加大，直到达到需要的电流值；
- b) 仪器工作时，电流与电压不能超过仪器额定值；
- c) 所有设备都应在通风、避雨和遮阳处工作；
- d) 仪器与大地之间应用绝缘物品隔开，如绝缘垫、木箱等。

7.3.4 不极化电极

7.3.4.1 不极化电极的具体技术要求如下：

- a) 极差应小于 3 mV；
- b) 单个电极内阻小于 200 Ω 。

7.3.4.2 使用和维护不极化电极的基本要求如下：

- a) 在完成野外工作后，应用浸泡了饱和盐水的海绵包裹电极底部，或直接将电极下半部分浸泡在饱和盐水中；
- b) 在开展工作前，应先测量不极化电极极差和电阻，确保电极参数满足要求；
- c) 不极化电极延长线与接收线缆连接处应经常打磨锈迹，避免氧化后接触不良。

7.3.5 供电电极

使用和维护供电电极的基本要求如下：

- a) 在项目开展工作前，应利用砂纸对金属棒进行打磨，并检查金属棒与连接导线是否导通；
- b) 使用前，应检查连接导线的裸露铜线是否氧化；
- c) 供电电极应存放于阴凉、干燥处。

7.3.6 线缆

使用和维护线缆的要求如下：

- a) 线缆应存放于阴凉、干燥处；

- b) 在项目开展工作前，应提前检查线缆的裸露接头处是否氧化，如有氧化，则需打磨或剪掉该氧化段导线；
- c) 导线外观应保持完好，避免机械损伤，使用期间应定期维护；
- d) 线缆使用前应进行漏电检查，对于长度为 $D(\text{km})$ 的导线，供电导线对地绝缘电阻 R_0 应满足 $R_0 \geq 2/D (\text{M}\Omega)$ 。

7.3.7 发电机

使用和维护发电机的要求如下：

- a) 发电机运输时，应卸下电池，放干内部所有油液；
- b) 发电机应安排专人维护，应按使用说明书定期检查并维护，特别是机油的更换；
- c) 发电机不应长时间超负荷运转。

8 野外工作

8.1 工作准备

8.1.1 技术准备

在开展工作前，应进行技术准备，具体要求如下：

- a) 根据勘探任务以及测区情况，拟定野外的施工任务及施工顺序；
- b) 组织技术人员学习勘探设计及相关规范，明确勘探技术要求。

8.1.2 仪器准备

在开展工作前，应进行仪器准备，具体要求如下：

- a) 根据勘探设计要求，备齐全部仪器、施工工具、原始记录表，明确物品管理维护人员；
- b) 在室内，按规范要求和相关说明书对所有仪器、线缆、电极等设备进行检查维护，包括仪器功能指标测试、线缆通断测量、线缆裸露部分及金属电极的打磨等；
- c) 当存在两台及以上仪器时，在开工前应进行仪器一致性检查，合格仪器方能投入使用。

8.1.3 一致性测试

每个测区施工开始前和施工结束后都应进行仪器一致性测试，以保证仪器工作正常，具体要求如下。

- a) 在干扰较小的区域任意划定一条测线，测线上布置连续的 N 个测点， N 为单台仪器的通道数；
- b) 在测点范围外供电，供电点应离测点足够近，以确保接收信号具有足够的信噪比，一般要求每个通道接收到的主频振幅都能达到 50 mV 以上。
- c) 所有仪器依次测量 N 个测点的视电阻率和视扩频相位参数，利用测量结果计算每台仪器每个通道的一致性误差。视电阻率的一致性误差为均方相对误差 m_i ，如公式(8)所示；视扩频相位的一致性误差为总均方误差 ε_i ，如公式(9)所示。

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\eta_{ij} - \bar{\eta}_i}{\bar{\eta}_i} \right)^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$\varepsilon_i = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{(\eta_{ij} - \bar{\eta}_i)^2}{2n}} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

η_{ij} —— 第 j 台仪器第 i 个通道的原始观测数据；

$\bar{\eta}_i$ —— 第 i 通道所有仪器的观测平均值；

n —— 参与测量的仪器数量。

- d) 每台仪器的每个通道都应满足表 5 的一致性误差要求，如果出现全部仪器不合格的情况，则应剔除较大误差的仪器重新计算，剔除的仪器为不合格仪器，不能参与施工。

表5 一致性误差要求

视电阻率均方相对误差 (%)	视扩频相位总均方误差/mrad
1.0	3

8.1.4 日常施工准备

在项目开展过程中，每日都应进行日常施工准备，具体要求如下。

- a) 离开驻地前，应检查施工设备及记录表等是否携带齐全。
- b) 到施工现场后，应先连接供电电极，检查供电导线是否导通，再断开供电电极，检查供电导线绝缘电阻是否满足要求；对于长度为 $D(\text{km})$ 的导线，供电导线对地绝缘电阻 R_0 应满足 $R_0 \geq 2/D (\text{M}\Omega)$ 。
- c) 仪器设备应尽早开机，确认设备能够正常通信，卫星定位、定时信号能够正常锁定。

8.2 接收系统布设

8.2.1 接收电极布设

接收电极为接收信号的传感器，布设的具体要求如下。

- a) 接收电极应使用不极化电极。
- b) 电极坑中心位置与设计位置偏差不能超过极距的 1 %。
- c) 当遇特殊地形无法埋放电极时，可对电极位置进行偏移，但需将电极实际位置输入到控制软件中校正装置系数 K ；电极最大偏移量为：沿测线方向不大于 0.5 倍极距，沿垂直测线方向需同时不大于 0.5 倍极距和 0.5 倍线距；在允许偏移范围内仍然无法埋放电极，则丢弃该电极对应的测点。
- d) 电极坑应避免底部为水泥、裸露岩石及碎石堆等接地不好的位置，接地电阻应小于 5 k Ω ；当遇到大范围的沙土和碎石等特殊地貌时，最大接地电阻可放大到 10 k Ω 。
- e) 电极坑一般挖成圆柱形，深度应比接收电极高出 5 cm，直径大于电极直径，但不应超过极距的 1 %。
- f) 埋放电极时，应先在电极坑底部用饱和盐水与泥土搅拌为米粥状态的稀泥，再将电极下半部分插入稀泥中，上半部分用干泥土掩埋压实。
- g) 电极底部套有橡胶套时，埋放前应取下，收取时再将橡胶套套上。

8.2.2 接收线缆布设

接收线缆布设的具体要求如下：

- a) 布设线缆前应检查接收线缆的方向，靠近接收仪器的方向为小测点方向，远离接收仪器方向为大测点方向；
- b) n 个通道接收仪器对应的接收线缆包括 $n+1$ 个接头，相邻两个接头组成一个通道，从接收仪器往外的线缆第 i 和第 $i+1$ 个接头对应仪器第 i 通道；
- c) 接收电极和接收线缆布设完成后，应及时接上接收仪器，并通知控制端操作员测量接地电阻，电阻正常后方可开始下一条线缆的布设；
- d) 因地形原因导致接收线缆抽头够不着接收电极时，可使用导电线延长接收电极的连接线，以使其能够接上接收线缆；
- e) 将接收电极连接上接收线缆前，应先确保连接处不存在锈化；
- f) 在做阵列式测深工作时，接收线缆和接收电极布设完成后可放置在测线上直到测深工作完成。

8.2.3 接收仪器布设

接收仪器布设的具体要求如下。

- a) 接收仪器应从控制端位置从近向远开始摆放，便于控制端操作员及时测量已摆放仪器的状态；
- b) 接收仪器应摆放在该仪器的第 1 个接收电极附近，摆放位置应尽可能开阔，以使 GNSS 能够快速锁定。当仪器所在位置无法锁定时，可将仪器放于其他开阔位置锁定后，在不关机的情况下放回原位置。
- c) 仪器的无线通信天线应摆放于尽可能高的位置，以使得仪器相互之间能够良好通信。一般放置在三脚架、竹竿或者树枝上。
- d) 仪器摆放完成后，应及时接上接收线缆并开机，通知控制端操作员查看无线通信信号、GNSS 状态以及接地电阻是否正常，所有状态正常后方可布设下一台接收仪器。

- e) 当控制端操作员无法发现接收仪器或者无线信号强度不足时,应在本仪器和上一台仪器之间架设中继站,用于信号的中转。

8.3 发射系统布设

8.3.1 供电线布设

供电线布设的具体要求如下:

- 供电线应尽量避免开城镇、村庄及公路等人多车多的路线,在经过河流、公路等障碍物时应采取架空、埋土、上覆减速带等临时性措施;
- 供电线应尽可能远离测量线,一般应离开测量导线 20 m 以上,必要时可通过试验确定;
- 收放供电线时,应随时检查线缆外观情况,出现表皮破损或扭结时,应进行修补处理;
- 放线过程中应使线缆处于放松状态,避免线缆承受拉力。当线缆处于紧绷状态时,应及时查明原因并解决;
- 采用供电线架跑极时,应用专项试验测试供电线架的影响,满负载供电线架接入与不接入产生的视扩频相位偏差绝对值超过 1 mrad 时,则应将供电线架上未放完的线缆以“之”字形完全放开。

8.3.2 移动供电电极布设

移动供电电极布设的具体要求如下。

- 移动供电电极是需要测线上不断移动的电极,一般使用铜棒或不锈钢棒。
- 电极应避免开裸露岩石、砂石、沙土等接地条件不好的区域。当设计点位无法布设时,可进行适当偏移并将实际点位输入控制软件中。阵列三极测深和阵列四极测深要求沿测线垂向偏移不超过 $\frac{L_1}{10}$,沿测线方向偏移不超过 $\frac{L_2}{2}$,其中 L_1 为该供电点与最近接收电极的距离, L_2 为该供电点与相邻供电点的距离;阵列偶极-偶极测深只能沿测线方向偏移,偏移距离不超过 $\frac{L_3}{10}$, L_3 为供电电极距最近接收电极的距离。
- 电极数量应根据供电位置、接地条件及干扰强度等确定,一般收发距越远、接地条件越差、干扰强度越大的位置需要的移动电极数量越多。较为常用的规则是接收线缆范围内使用不少于 10 根供电电极,接收线缆范围外使用不少于 40 根供电电极。
- 所有电极应以不小于 10 cm 间隔均匀布设在以供电点为圆心的圆中,电极间最大距离不超过 $\frac{L_{AB}}{20}$, L_{AB} 为供电电极 AB 之间的距离。
- 电极应尽可能深地打入地下,并浇上适当盐水。当接地电阻仍然较大时,可先挖电极坑、浇盐水、将底部泥土搅拌成稀泥,再打入电极来降接地电阻。

8.3.3 固定供电电极布设

固定供电电极布设的具体要求如下。

- 固定供电电极为不经常移动的电极,如无穷远点 B、面积性中梯测量的 AB 供电点,一般使用铜板、铝箔或者铁丝网等金属片作为固定供电电极。
- 电极应避免开裸露岩石、砂石、沙土等接地条件不好的区域。当设计点位无法布设时,可进行适当偏移并将实际供电位置输入控制软件中,无穷远 B 偏移不超过 B 点与测线垂距的 5%,中梯测量的 A、B 点偏移不超过 AB 距的 5%。
- 电极由多个金属片通过金属导线并联而成,金属片的尺寸一般为 1 m×0.5 m,每块金属片单独埋放于电极坑中,电极坑深度不小于 30 cm。金属片埋放步骤为:
挖坑→浇盐水→将底部泥土搅拌成稀泥→用金属片平铺在稀泥上→用泥土覆盖全部金属片→浇盐水→将金属片上的泥土搅拌为稀泥→利用泥土将电极坑填平。
- 所有电极坑应均匀对称分布在供电点的四周,相邻电极坑之间距离不小于 20 cm,电极坑边缘的最大距离应小于 $\frac{L_{AB}}{20}$, L_{AB} 为供电电极 AB 之间的距离。
- 电极坑数量由需要的供电电流和接地条件决定,当接地电阻大于设计值时应不断增加电极坑数量,直到接地电阻满足要求为止。测量接地电阻的方法为:将电极坑均分为两组,组内电极用金属导线并联,测量出两组电极坑之间电阻 R_d ,则 $\frac{R_d}{2}$ 为所有电极坑的接地电阻。

8.3.4 直流电源及发送机操作

直流电源及发送机操作的具体要求如下：

- a) 发送系统连线前，应先关闭电源，避免触电；
- b) 直流电源输出端和发送机输入端的正负端口应严格对应，多次核查；
- c) 在发送系统处于工作状态时，非操作人员不应靠近设备；
- d) 当 AB 端供电电流为 0 时，应立即停止发送，用万用表和欧姆表检查 AB 端电阻，排除问题后方可继续供电。

8.4 数据采集

8.4.1 采集流程

在布设完发射系统和接收系统后，按以下流程进行数据采集：

- a) 检查各接收机的仪器状态是否正常，包括无线通信信号强度、GPS 状态、接地电阻等；
- b) 测量接地电阻和自然电位，并保存数据；
- c) 检查发送机连线是否正确，测量 AB 电阻是否满足要求；
- d) 通知跑极人员与供电点位保持安全距离，准备供电；
- e) 启动发送机发送电流信号；
- f) 启动接收机开始采集数据；
- g) 填写班报表，并实时查看采集结果的误差是否满足要求，满足则停止接收机的采集；
- h) 停止发送机发送电流信号；
- i) 通知跑极人员跑极换线；
- j) 接收到跑极人员完成跑极的通知；
- k) 继续执行步骤上述 a) ~ 步骤 j)，直到完成剖面测深工作或者面积测量工作。

8.4.2 采集要求

数据采集过程的具体要求如下。

- a) 数据采集过程中应实时查看计算的视电阻率误差及视扩频相位误差，满足设计精度误差要求的通道为合格通道。当叠加次数达到 3 次以上且所有通道全部合格，方可停止采集，否则应持续采集，直到采集时间达到 20min。数据质量不佳时，可利用附录 C 所列的方法来改善数据质量。
- b) 当供电点位于接收线缆内时，可能会出现部分饱和通道，应当在本次采集完成后再发射一次小电流，以获得附近通道的数据。
- c) 供电点在接收线缆内时，供电点两边通道的视扩频相位值会出现反相的现象（相差约 3140mrad），同一边接收通道的视扩频相位值不应该出现反相，如果某一通道出现反相，则应检查接收电极是否断开。
- d) 当发送机断电后，应确保发送电压小于 36V、发送电流为 0A 后，方能通知跑极人员移动供电电极。
- e) 发送机供电前一定要通知跑极人员，并在得到跑极人员可以供电的答复后方可供电。

8.4.3 原始记录要求

在数据采集过程中，应填写野外班报记录表，具体的要求如下：

- a) 野外班报记录表应包含测区、时间、操作人员、仪器、采集参数等基本信息，参考记录格式见附录 D；
- b) 记录表应使用中等硬度的 2H 铅笔进行书写，使用正楷字体填写记录项，且字迹应清晰工整；
- c) 当记录项填写错误时，切勿擦除涂改，应用横线划去记录项（应确保原始记录可清晰辨认），并在下方填写正确记录；
- d) 不同测区、不同装置、不同日期的观测数据，应记录在不同的记录表中；
- e) 对出现异常数据的测点，应检查周边环境，分析原因，并在记录表的备注栏里予以说明；
- f) 在布置测线时，应记录可能会影响测量结果的干扰源（如高压线、变压器、厂房等）及特殊地形（如河流、沟壑、碎石堆、基岩裸露等），记录信息包括目标物位置、大小及名称等。

8.5 资料整理

完成数据采集后，应对每日的资料进行整理，具体要求如下：

- a) 当日的资料应及时检查归档，确保资料齐全规范；
- b) 矫正有偏移的电极位置，并同时备份矫正前的数据以便检查核对；
- c) 导出每个频点的视电阻率和视扩频相位，对测深数据成拟断面等值线图，对扫面数据成平面等值线图，检查等值线图是否存在点状跳变、条带状跳变等异常，出现异常时应排查原因。

8.6 日常验收

野外工作时，每日应进行日常验收，具体要求如下：

- a) 应当日对原始记录表进行检查验收，检查记录表各栏目是否正确、清晰、完整，专人履行签字等验收手续；
- b) 野外观测的视电阻率、视扩频相位及误差数据应当日归档整理，并处理成图，确保数据质量满足要求，当出现异常点时，应核对班报记录表，查明原因，原因不明的异常应及时返工检查；
- c) 所有纸质原始记录应当日拍照存档，电子数据应在其他硬盘上至少保存 1 份备份；
- d) 应每日对项目检查点数量、检查点质量等进行统计核对，未达到要求比例时应及时补充检查点；
- e) 野外采集的全波形原始时序数据应保存于仪器中，在完成每条测线的测量工作后及时导出，并归档保存；
- f) 在确认下载的数据完整无遗漏且已备份后，方可删除仪器中的原始数据。

8.7 质量检查与评价

8.7.1 质量检查方法

为了确保采集数据的可靠性，应进行数据质量检查，具体的检查方法如下：

- a) 一个测区的野外工作质量应通过系统质量检查来评价，质量检查的对象为采集点，每个被检查的采集点称为质量检查点；
- b) 面积性工作的质量检查点不低于总采集点的 3%，剖面性工作的质量检查点不低于总采集点的 5%，且检查点应尽可能在时间上和空间上大体分布均匀；
- c) 对明显异常区和疑似人为干扰段应安排检查点，确保异常可靠性；
- d) 系统检查应做到在同采集点以不同时间、不同操作员的方式进行观测；
- e) 系统质量检查结果应统计到专门的统计报表中，检查点总误差应不低于设计精度，确认测区及附近存在明显强干扰源时，检查点总误差可放宽至设计精度的 1.5 倍，当质量仍不符合要求时，则相应范围内的原始观测资料应作废品处理。

8.7.2 误差计算方法

系统检查观测结果应按以下各式计算误差。

- a) 视电阻率采用均方相对误差衡量精度，计算方法如公式(10)：

$$m = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\eta_i - \eta'_i}{\bar{\eta}_i} \right)^2} \times 100\% \dots\dots\dots (30)$$

式中：

η_i —— 第 i 点的原始观测数据；

η'_i —— 第 i 点的检查观测数据；

$\bar{\eta}_i$ —— 第 i 点 η_i 与 η'_i 的平均值；

n —— 参与统计计算的点数。

- b) 视扩频相位采用均方误差衡量精度，计算方法如公式(11)：

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta'_i)^2}{2n}} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

- η_i ——第*i*点的原始观测数据;
- η'_i ——第*i*点的检查观测数据;
- n* ——参与统计计算的点数。

8.8 安全管理

为了保障施工安全的主要注意事项如下:

- a) 开展野外工作前,项目组应对所有人员进行安全教育,考核合格后方可开展工作;
- b) 发送设备应由专业人员操作,且操作人员应持有相应等级的电工证书,不应与工作无关的其他人员接近发送设备;
- c) 操作人员应严格按照仪器使用说明进行操作,严格按照供电和停电的流程与跑极人员沟通;
- d) 供电线缆应定期检查,外观异常的导线应及时修复或更换,接头处应使用高压绝缘胶布包裹;
- e) 供电线缆经过城镇、村庄及路口时,应安排专人看守,并设置清晰的高压警示标志;
- f) 固定供电点周边应布设安全警示带,放置醒目的安全警示牌,并安排专人看守;
- g) 针对陡坎、河流及丛林等危险区域,应制定相应的安全作业制度和应急措施;
- h) 雷雨天气应停止野外作业,布设的仪器设备应提前做好防雨措施。

8.9 野外资料验收

8.9.1 验收资料

测区的野外工作完成后,应及时进行野外资料验收,验收资料包括:

- a) 野外观测班报记录表;
- b) 仪器设备检查记录;
- c) 电极坐标数据表;
- d) 测地检查点误差统计表;
- e) 扩频激电原始数据表;
- f) 扩频激电检查点误差统计表;
- g) 实际材料图;
- h) 野外工作小结;
- i) 其他相关资料。

8.9.2 验收原则

符合设计要求及相关规范的资料,予以验收。下列情况的原始观测结果应不予验收:

- a) 伪造的观测结果;
- b) 测地数据不符合要求的测点观测结果;
- c) 采用不符合要求的仪器设备所观测的结果;
- d) 主要技术指标不满足设计要求的测量结果。

9 资料处理与解释

9.1 资料处理

9.1.1 数据预处理

数据预处理一般为设备配套软件,主要用于将野外采集的原始数据转换为反演软件的输入数据,主要过程如下:

- a) 读入各供电点的采集记录文件,按供电点位置和测量点位置进行排序;
- b) 对各主频频率,进行频率融合处理,提高信噪比;

- c) 对同一采集点多次采集的数据进行合并，仅保留误差最小的数据；
- d) 对所有通道数据进行极距组合处理，提高信息量；
- e) 剔除畸变或者统计误差过大的数据点；
- f) 将各采集点各频点的视电阻率、视扩频相位等参数按照反演软件要求的格式导出数据文件。

9.1.2 频率融合处理

频率融合是将扩频信号各主频频率合并成一个组合频率的数据处理方法，主要用于提高数据信噪比，具体融合方法见附录E。频率融合时应选择合适的主频融合数量，以使数据质量满足要求，同时使生成的组合频率数尽可能多，常用的融合频率数为4。

9.1.3 极距组合处理

极距组合是将阵列同步采集的各通道进行合并的一种方法，主要用于提高反演精度。极距组合应包括从2倍极距到N倍极距的所有组合，其中N为阵列式同步采集的总通道数。一般设平移步长为1倍极距，当数据量过大时导致反演内存过大或者反演时长过长时，可适当增加平移步长，但最大平移步长不超过 $i \times L$ ，其中 i 为当前极距组合的倍数， L 为单倍极距长度。

9.1.4 数据反演

数据反演要求如下：

- a) 反演的电性参数应包括电阻率和相位，并利用电阻率模型约束相位参数的反演；
- b) 应导出不少于 2 个频点的视电阻率和视扩频相位，利用带地形及误差反演的激电软件进行反演；
- c) 应根据测点距、反演深度和地质资料等信息合理设置网格化的节点数和层数；
- d) 反演迭代次数应考虑采集数据质量，当数据质量较差时，不应迭代过多次数。

9.2 资料解释

9.2.1 定性解释

定性解释的主要任务是分析电性异常的特征，并根据地质背景、物性资料、地形地物、反演拟合度、频点相似度、异常形态等信息分析异常起因，筛选出由目标体引起的可靠异常。

9.2.2 定量解释

定量解释需要在定性解释的基础上进行，通过特征连续性、频点相似度及地质资料等信息，推断地下电性空间分布，确定异常体的位置及规模。

9.2.3 综合解释

综合解释需要综合已有地质、钻探、地球物理、地球化学等资料，综合分析，将电性成果解释为地质属性和特征，并在此基础上提出异常验证的建议。

9.3 图件编制

9.3.1 一般要求

图件编制的一般要求如下：

- a) 编绘图件所采用的数据应经过验收，且质量符合设计要求；
- b) 图件编绘应满足 DZ/T 0069 中的要求；
- c) 图件中的字体、符号及表格等应清晰可辨识；
- d) 图件的比例尺原则上应与设计比例尺一致，当图件过大或过小时，可在征得甲方同意后适当调整；
- e) 同一测区同种方法相同电性参数的图件比色应一致，且应尽可能让冷暖色调分布均匀，并确保异常突出。

9.3.2 主要图件

9.3.2.1 实际材料图

绘制实际材料图的具体要求如下：

- a) 主要内容包括测区范围、测点、检查点、标本采集位置等信息；
- b) 应尽可能在地质底图上进行绘制，当不存在测区地质图时，应使用卫星地图作为绘制底图；
- c) 图中不同勘探方法的测点应使用不同的符号表示，标识符号叠加后应确保仍然能够识别。

9.3.2.2 拟断面图

绘制拟断面图的具体要求如下：

- a) 视电阻率参数的等值线应取等比间隔(即使用视电阻率的对数值进行成图)，色标和等值线间隔的设置以突出异常为标准；
- b) 视扩频相位的等值线应取线性间隔，色标和等值线间隔的设置以突出异常为标准；
- c) 拟断面图的横坐标为测点相对坐标，纵坐标根据装置类型使用不同的值。通用三极测深装置的纵坐标设置为 $\frac{P_A}{5}$ ，其中 P_A 表示移动供电 A 的相对坐标(最小号接收电极位置为 0 坐标)；通用四极装置的纵坐标设置为 $\frac{L_{AB}}{5}$ ，其中 L_{AB} 表示供电点 AB 的距离；通用偶极-偶极装置的纵坐标设置为 $\frac{P_C}{2}$ ，其中 P_C 表示 AB 中点 C 的相对坐标(最小号接收电极位置为 0 坐标)。

9.3.2.3 反演断面图

绘制反演断面图的具体要求如下：

- a) 反演的电阻率断面图等值线应取等比间隔(即使用电阻率的对数值进行成图)，色标和等值线间隔的设置以突出异常为标准；
- b) 视扩频相位的反演结果一般转换为了极化率，极化率等值线应取线性间隔，色标和等值线间隔的设置以突出异常为标准；
- c) 反演断面图的横坐标为反演输出的位置，纵坐标为反演输出的深度。

9.3.2.4 平面图

绘制平面图的具体要求如下：

- a) 视电阻率参数的等值线应取等比间隔(即使用视电阻率的对数值进行成图)，色标和等值线间隔的设置以突出异常为标准；
- b) 视扩频相位的等值线应取线性间隔，色标和等值线间隔的设置以突出异常为标准；
- c) 平面图的坐标系应尽可能采用 CGCS2000 坐标系，如遇保密要求等特殊情况，可使用自定义坐标系，但应确保比例尺一致，X 轴方向为正东，Y 轴方向为正北。

9.3.2.5 综合成果图

综合成果图应包括电阻率参数、激发极化参数、地质简图及推断目标体。针对不同探测目的，可适当增加内容，但应确保重点突出，且各图形元素清晰、能辨识。

10 成果报告编写

10.1 编写要求

- 10.1.1 成果报告应基于野外验收合格的数据和资料，以及其它正式发表的报告、文献、专著等公开资料。
- 10.1.2 成果报告应在项目开展过程中同步编写，并应在设计书或者合同规定的时间内完成。
- 10.1.3 成果报告应层次分明、重点突出、逻辑清晰、内容翔实，相应推断应有理有据，结论客观明确。
- 10.1.4 所有图件、附表应符合规范要求，图中元素应清晰可见，文字说明应清楚、明确。

10.2 报告主要内容

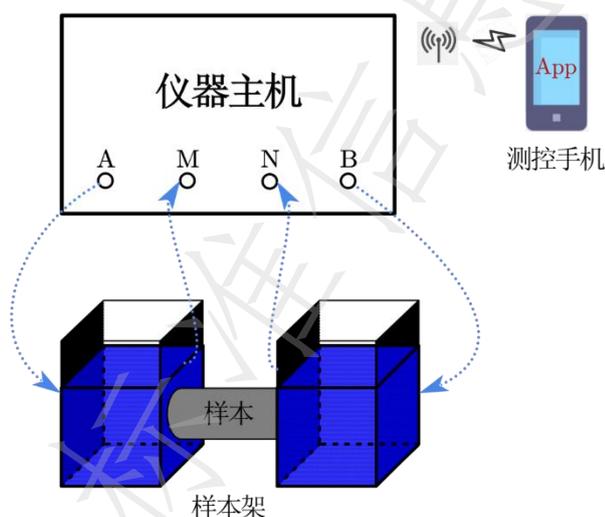
主要内容应包括序言、测区地质及地球物理特征、工作方法技术与质量评价、解释推断、结论与建议、附图附表等内容，其余未尽事宜执行 DZ/T 0070、DZ/T 0073、DZ/T 0281。

全国团体标准信息平台

附录 A (规范性) 标本电性测量要求

A.1 测量原理

图A.1为通用标本测量的示意图，图中测控手机主要用于标本参数输入、数据回收、结果计算及图形显示，仪器主机主要用于信号发射、数据采集、数据存储及传输，样板架主要用于固定标本。测量的基本原理为：仪器主机先通过A、B向标本供电，再测量供电电流I和标本两端MN之间的电压 U_{MN} ，然后通过公式 $R=U_{MN}/I$ 获得标本复电阻R，最后再利用 $\rho=R \times S/L$ 算得标本的复电阻率，其中S为标本的截面积，L为标本的长度。



图A.1 标本测量示意图

A.2 测量技术要求

标本电性测量技术要求如下：

- a) 标本应加工成圆柱状或立方体，长度一般不超过 15cm，截面积一般不超过 16cm^2 ；
- b) 样品的表面应光滑、平整，内部没有天然的或因机械加工而产生的裂缝。
- c) 标本应在水中浸泡 24 小时以上，取出时应擦干标本表面水渍，用绝缘胶或保鲜膜密封标本周围，之后方可测量；
- d) 标本架中的溶液应为饱和硫酸铜溶液，电极应使用铜片；
- e) 标本架的渗透片一般为素陶板，要求渗透性合适；
- f) 标本架与标本接触处的材质选用海绵，确保标本耦合良好；
- g) 测量结果应包括电阻率频谱响应曲线和相位频谱响应曲线，一般测量频率范围为 0.01 Hz ~ 1000 Hz，10 倍频的测量频点数不小于 5；
- h) 每块标本都应拍照存档，便于后期进一步分析；
- i) 通过标本的电流应尽可能小，一般不大于 0.1 mA，以减少电化学反应产生的干扰；
- j) 对于有较大异常或重点关注的岩(矿)石标本，应进行重复测量，确保结果的可靠性；
- k) 其他未尽事项执行 DZ/T 0368 中的相关要求。

A.3 仪器要求

仪器应满足以下要求：

- a) 输入阻抗不小于 $10^{12} \Omega$ ；
- b) 测量频率范围应包括 0.01 Hz ~ 1000 Hz；

- c) 支持自动扫频，且扫频密度可控；
- d) 阻抗相位精度应优于 0.1 mrad；
- e) 阻抗振幅测量精度应优于 1 %；
- f) 阻抗测量范围应包括 $10^{-1}\Omega \sim 10^9\Omega$ 。

全国团体标准信息平台

附录 B
(资料性)
扩频激电法勘探应用流程

B.1 勘探应用说明

为了便于技术人员更好地理解和应用本文件，特编写该附录资料，对扩频激电法应用的主要流程进行简要介绍。本附录内容基于以下假设条件完成：

- a) 根据已有资料和踏勘情况，可以开展扩频激电法勘探；
- b) 设计勘探剖面长度为 2 km，勘探深度为 1000 m，点距为 40 m，根据岩矿石标本 SIP 响应，选择 1/16Hz 基频的 5 阶扩频波作为激励信号；
- c) 使用的勘探设备为长沙巨杉智能科技有限公司生产的扩频激电采集系统 GS2IP。

B.2 设计勘探装置

B.2.1 综合考虑施工复杂度、接收信号强度以及纵向分辨率等，选择通用三极装置进行测量(见章节6.4.3)，并根据技术参数进行接收点和供电点的设计。

B.2.2 设计接收点：根据剖面长度2 km及点距40 m可以计算出总测深点数为50个，因单台GS2IP接收机包含6个通道(外接7个电极，相邻电极为1道)，故整条剖面共需9台接收机。以接收线的起点为相对0坐标，则各仪器的电极布设位置如表B.1所示，表中“仪器_电极”表示仪器编号和该仪器外接的电极编号，如“s5_3”表示第5号仪器的第3个外接电极，“s1_7&s2_1”表示该点同时布设第1台仪器的第7个外接电极和第2台仪器的第1个外接电极。由于9台仪器共有54个通道，而测深点点数为50个，所以最后一台仪器s9只使用了2道，后面4道并未使用，在采集时可将对应的通道设置为无效道。

表 B.1 仪器各电极位置布设表

相对位置(m)	0	40	80	120	160	200
仪器_电极	s1_1	s1_2	s1_3	s1_4	s1_5	s1_6
相对位置(m)	240	280	320	360	400	440
仪器_电极	s1_7&s2_1	s2_2	s2_3	s2_4	s2_5	s2_6
相对位置(m)	480	520	560	600	640	680
仪器_电极	s2_7&s3_1	s3_2	s3_3	s3_4	s3_5	s3_6
相对位置(m)	720	760	800	840	880	920
仪器_电极	s3_7&s4_1	s4_2	s4_3	s4_4	s4_5	s4_6
相对位置(m)	960	1000	1040	1080	1120	1160
仪器_电极	s4_7&s5_1	s5_2	s5_3	s5_4	s5_5	s5_6
相对位置(m)	1200	1240	1280	1320	1360	1400
仪器_电极	s5_1&s6_1	s6_2	s6_3	s6_4	s6_5	s6_6
相对位置(m)	1440	1480	1520	1560	1600	1640
仪器_电极	s6_7&s7_1	s7_2	s7_3	s7_4	s7_5	s7_6
相对位置(m)	1680	1720	1760	1800	1840	1880
仪器_电极	s7_7&s8_1	s8_2	s8_3	s8_4	s8_5	s8_6
相对位置(m)	1920	1960	2000			
仪器_电极	s8_7&s9_1	s9_2	s9_3			

B.2.3 设计供电点：通用三极装置的供电点包括无穷远供电点B和移动供电点A，其中B点固定不动，只需布设一次，移动供电点A位于测线上，需要不断移动。B点按照规程要求，应布设在测线中垂线上，且

与测线的垂距OB不小于3倍深度h(B点位置参与反演),考虑到冗余,我们一般取 $OB=5h$,即B点距测线5 km。按规范要求,最大收发距不小于 $3h$,所以A的最大位置与最小接收电极的距离应大于3 km,A的最小位置与最大接收电极的位置也应大于3 km,线内的A点一般位于相邻接收电极的中点,在线内按2倍接收极距移动,在线外按4倍接收极距移动。为了便于表示A、B位置,建立一个参考直角坐标系,以接收点的O坐标为坐标原点,测线大号方向为x方向,x方向逆时针旋转 90° 的方向为y方向。B设计的相对坐标为(1000, ± 5000),单位为m,当设计位置附近无法布设或接地条件较差时,可根据规程要求将OB延长或将B点沿平行测线方向偏移。因所有A点都位于测线上,所以其相对坐标y都为0,相对坐标x如表B.2所示。当需要更高的反演分辨率时,也可对供电点进行加密。

表 B.2 移动供电点 A 的跑极坐标表

单位为米

供电点A的跑极坐标									
-1020	-860	-700	-540	-380	-220	-60	20	100	180
260	340	420	500	580	660	740	820	900	980
1060	1140	1220	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780
1860	1940	2020	2180	2340	2500	2660	2820	2980	3140

B.3 数据采集

在完成勘探装置设计后,首先布设好无穷远B和供电线,再布设接收电极、接收线缆和接收机,之后可以在测线上进行A点跑极(跑极顺序无特殊要求)。每次供电,所有接收机同步采集,并将数据实时传回到GS2IP系统的控制中心,技术人员通过控制中心查看所有通道的视电阻率、视扩频相位及统计误差,在误差符合要求后,停止数据采集,并将数据文件以SRS二进制文件格式存在控制中心。当完成所有移动供电点A的跑极后,该条剖面测量完成。

B.4 数据处理

数据处理采用GS2IP系统配套的SipProc软件,该软件可以合并所有野外采集的SRS文件,并自动进行极距组合、频率融合、高程添加等处理,同时根据设置的参数范围和误差阈值剔除无效点,最后生成能够直接输入反演软件的数据格式。1/16Hz的5阶扩频信号共包括1/16Hz、2/16Hz……15/16Hz、1Hz共16个主频信号,软件默认进行4频融合,频率融合后变为0.15625Hz、0.40625Hz、0.65625Hz、0.90625Hz共4个组合频率,每个频率都有对应的数据文件,文件中包含该频率的视电阻率、扩频相位及统计误差。

B.5 数据反演

数据反演主要作用是将所有测点及供电点对应的视电阻率、视扩频相位转换为不同位置、不同深度的电阻率和极化率信息。基于扩频激电法高密度、大深度采集的特点,一般采用俄罗斯的ZonRes2D/ZondRes3D软件作为扩频激电的反演软件。该软件具有反演可靠性高、支持数据量大等特点,同时支持地形校正、任意装置输入、迭代监控的功能,目前已被大量应用于扩频激电法的勘探项目中。在反演时应单独对每个组合频率的数据进行反演,分别获得4个频点的电阻率剖面和极化率剖面。

B.6 资料解释

首先,根据地质背景、反演拟合度、频点相识度等信息筛选出由目标体引起的可靠异常;其次,根据特征连续性、频点相似度及地质资料等信息,推断地下电性空间分布,确定异常体的位置和规模;最后综合地质、钻探、岩矿石标本的SIP响应等资料,综合分析,将电性成果解释为地质属性和特征,并在此基础上提出异常验证的建议。

附录 C
(资料性)
数据采集质量改善方法

C.1 提高信噪比的方法主要包括：

- a) 增大供电电流，以增强接收有效信号的强度，该方法为最优选择；
- b) 采用阵列式同步观测去噪；
- c) 延长数据采集时间，以增加叠加次数；
- d) 采集时段可避开干扰强度大的时间段；
- e) 改变观测装置，同等条件下各观测装置信号强度由强到弱分别为：通用四极装置、通用三极装置、通用偶极-偶极装置；
- f) 采用更高的基础频率进行测量；
- g) 增加单个组合频率的融合主频数量。

C.2 当视频散率和视扩频相位出现大量的负值时，说明存在较强的电磁感应耦合干扰。减小电磁耦合干扰的方法主要包括：

- a) 供电线与测量导线拉开一定距离布设，一般应大于 20 m；
- b) 供电线和测量线交叉点应垂直摆放；
- c) 采用更低的基础频率进行测量；
- d) 改变观测装置，同等条件下各观测装置电磁感应耦合效应由弱到强分别为：通用偶极-偶极装置、通用三极装置、通用四极装置；
- e) 避免雨后作业，同时绕过潮湿地段布设导线。

C.3 减小接地电阻的方法主要包括：

- a) 增加供电电极的数量；
- b) 对表面氧化的供电电极进行打磨清理后再使用；
- c) 在供电电极周边大面积浇灌盐水，以扩大电极与大地的横向接触面积；
- d) 增大供电电极的插入深度，以扩大电极与大地的纵向接触面积；
- e) 选择接地良好的位置布设供电电极；
- f) 在碎石堆或裸露基岩等区域，宜大面积覆盖泥土并浇灌盐水后再插入电极。

附录 E (资料性) 扩频激电法原理

E.1 方法简介

扩频激电法是一种基于扩频通信理论,采用无线分布式阵列采集技术开展频谱激电勘探的一种方法。相对常规激电法,该方法具有勘探深度大、施工效率高、探测精度高、矿与非矿区分能力强的优点,其主要特点包括:

- a) 小电流即可进行大深度勘探;
- b) 数据信息量达到常规激电方法的 10 倍以上;
- c) II 级地形 1km 深度的勘探效率可达常规方法的 10 倍;
- d) 频域分辨率达到常规方法的 2 倍,具备区分矿与非矿能力。

E.2 施工装置

E.2.1 扩频激电法采用的装置是在常规电阻率法装置上延伸的阵列式装置,常用的装置有中间梯度装置、通用偶极-偶极装置、通用三极装置、通用四极装置,各装置布极方法及参数要求见 6.4。一般中间梯度装置一般用于面积性测量,其余三种装置用于二维剖面测深。二维剖面测深装置中,通用偶极-偶极装置接收信号强度较弱,受电磁耦合影响较小;通用三极装置接收信号强度中等,受电磁耦合影响中等;通用四极混合装置接收信号强度较大,受电磁耦合影响较大。野外工作中,一般采用通用三极装置。

E.2.2 在二维剖面测量时,应尽可能一次性布设完所有接收点,以提高测量效率,但当接收机数量不足时,也可将测线分段测量,测量完成后再合并数据进行反演,得到整条测线的反演剖面图。

E.3 扩频信号

E.3.1 扩频信号是一种包含多种主频信号的伪随机信号,其能量主要集中在主频频点上,且大体分布均匀,主频频点在线性坐标上呈等间距分布,主频数量 $N = 2^{k-1}$,其中 k 为扩频波的阶数。主频频率值的计算公式为 $f_i = f_1 \times i$,其中 f_i 为第 i 个主频的频率值, f_1 为扩频波的基频。图 E.1 为常用 5 阶扩频波的时序图和振幅频谱图,图中信号基频为 1/16Hz,时序图共包含了 3 个周期的扩频波,波形中只包括 -1V 和 1V 两个电平,在频谱图上可以看出信号能量集中分布在线性等间距的主频频点上,且大体分布均匀。

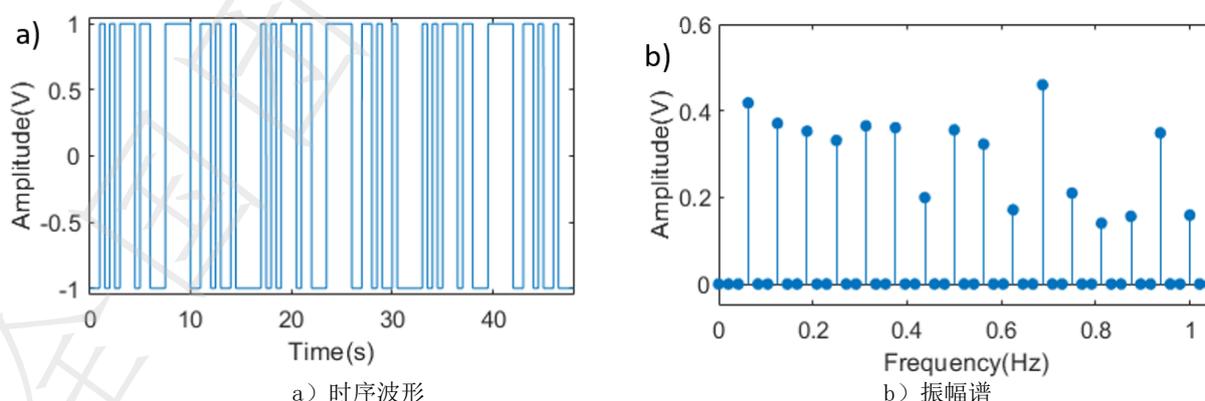


图 E.1 5 阶扩频波的时序波形和振幅谱

E.3.2 一般基频 f_1 的取值范围为 $\frac{1}{256}$ Hz ~ 1 Hz,且取值只能为 2^n ,其中 n 为整数。基频越高,受电磁耦合感应影响越强,但受人文干扰影响越弱。所以在强干扰、弱电磁耦合感应的测区应选择更高的基频,而在弱干扰、强电磁耦合感应的测区应选择更低的基频。

E.4 扩频参数计算方法

在数据处理时,可以直接提取扩频信号中的主频信号,并利用常规频谱激电计算方法计算出每一个主频的复电阻率,从而得到多个电阻率信息和极化率信息。但在实际勘探时,为了提高抗干扰能力,一般会对相邻主频信号进行融合以增强信噪比,融合后的频率称为组合频率。每个组合频率融合的主频数量 m 可根据测区干扰情况进行预设,一般干扰越大, m 应越大,融合后的组合频率数 $N_d = N/m$,其中 N 为主频数量。每个组合频率能够算得1个视电阻率和1个视相位,相邻两个组合频率能够求得1个视频散率和1个视扩频相位,所以单个测点一次采集能够同时获得 N_d 个复电阻率振幅(视电阻率)、 N_d 个视相位、 N_d-1 个视频散率、 N_d-1 个视扩频相位,各参数的具体计算过程如下。

- a) 首先,对采集的扩频电压时序数据和扩频电流时序数据进行傅里叶变换,并抽取各主频频点的频谱值,再计算扩频信号各个主频的复电阻,第 i 个主频的复电阻 X_i 的计算公式为:

$$X_i = U_i/I_i \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

U_i ——采集站电压信号的第 i 个主频频谱值;

I_i ——电流站电流信号的第 i 个主频频谱值。

- b) 再计算各组合频率的频率值,第 j 个组合频率的频率值 F_j 的计算公式为:

$$F_j = \sum_{i=p}^{p+m-1} (w_i \times f_i) \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

p ——起始主频的索引值 $p = (j-1) \times m + 1$;

w_i ——第 i 个频率加权值(一般取值为 $\frac{1}{m}$);

f_i ——第 i 个主频的频率值。

- c) 计算各组合频率的复电阻,第 j 个组合频率的复电阻 C_j 计算公式为:

$$C_j = \sum_{i=p}^{p+m-1} (w_i \times X_i) \dots\dots\dots (E.3)$$

式中 C_j 的相位值即为第 j 个组合频率的视相位,第 j 个组合频率的视电阻率 ρ_j 为:

$$\rho_j = k \times |C_j| \dots\dots\dots (E.4)$$

式中:

k ——电法装置系数。

- d) 利用相邻组合频率的复电阻计算视频散率,第 j 个组合频率的视频散率 f_s_j 为:

$$f_s_j = (|C_j| - |C_{j+1}|)/|C_j| \dots\dots\dots (E.5)$$

- e) 利用相邻组合频率的视相位计算视扩频相位,第 j 个组合频率的视扩频相位值 cp_j 为:

$$cp_j = (r \times \varphi_j - p)/(1 - r) \dots\dots\dots (E.6)$$

式中:

φ_j ——第 j 个组合频率的视相位(mrad);

r ——组合频率的频率比值,表示为公式(E.7):

$$r = F_{j+1}/F_j \dots\dots\dots (E.7)$$

p —— φ_{j+1} 参考 φ_j 做的相位矫正,表示为公式(E.8):

$$p = \begin{cases} \varphi_{j+1}, & (\varphi_j - 1000\pi \leq \varphi_{j+1} \leq \varphi_j + 1000\pi) \\ \varphi_{j+1} - 2000\pi, & (\varphi_{j+1} > \varphi_j + 1000\pi) \\ \varphi_{j+1} + 2000\pi, & (\varphi_{j+1} < \varphi_j - 1000\pi) \end{cases} \dots\dots\dots (E.8)$$

- f) 视极化率 η_j 可以由公式(E.9)计算获得近似结果:

$$\eta_j \approx cp_j/10 \dots\dots\dots (E.9)$$

式中:

η_j ——第 j 个频点的视极化率, %;

cp_j ——第 j 个频点的视扩频相位, (mrad);

- g) 通过以上方式，求得多个组合频率的视电阻率、视相位、视频散率、视扩频相位、视极化率，再分析这几个参数在频域上的变化规律，可进行矿与非矿区分。通过增大主频融合数 m 可以提高信噪比，增强系统的抗干扰能力；通过减小主频融合数 m 可以提高各参数在频域中的分辨率，增强矿与非矿的区分能力。

E.5 极距组合处理

极距组合是一种将相邻2个或者多个通道组合成一个通道的方法，用于增加中深部信息量，提高反演精度。图E.2为极距组合示意图，图中“电极位置”为布设的阵列式接收电极的位置，利用相邻通道电压叠加获得不同极距的新测点数据，利用1个通道采集的原测点数据作为1倍极距测点数据，利用2个相邻通道的数据叠加获得“2倍极距”的测点数据，利用3个相邻通道的数据叠加获得“3倍极距”的测点数据，以此类推，直到达到能叠加的最大通道数。叠加的通道不应包含无效通道，比如数据饱和通道、包含供电点的通道等。

极距组合应包括从2倍极距到N倍极距的所有组合，其中N为阵列式同步采集的总通道数。一般设平移步长为1倍极距，当数据量过大时导致反演内存过大或者反演时长过长时，可适当增加平移步长，但最大平移步长不超过 $i \times L$ ，其中 i 为当前极距组合的倍数， L 为单倍极距长度。

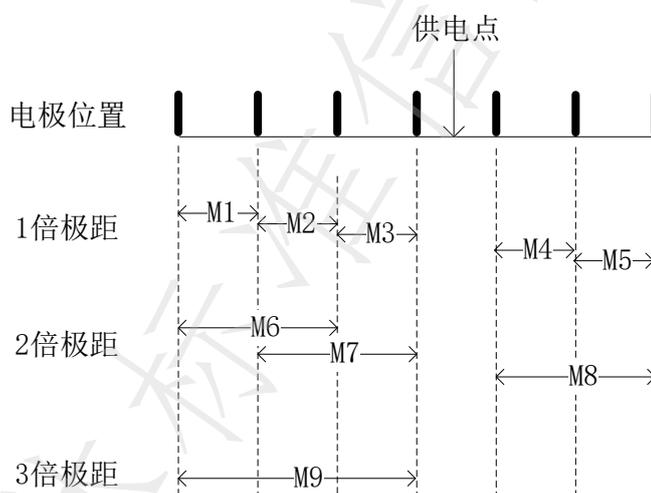


图 E.2 阵列式采集的极距组合示意图

参 考 文 献

- [1] 傅良魁. 激发极化法. 北京:地质出版社, 1982
- [2] 罗延钟, 张桂清. 频率域激电法原理. 北京:地质出版社, 1996
- [3] 李金铭. 激发极化法方法技术指南. 北京:地质出版社, 2004
- [4] 何继善. 双频激电法. 北京:高等教育出版社, 2006
- [5] 刘卫强, 吕庆田, 林品荣等. 多周期全波形激电抗干扰数据处理方法及在大规模探测中的应用分析[J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3934-3949.
- [6] Bleil D F. Induced polarization: a method of geophysical prospecting[J]. Geophysics, 1953, 18(3): 636-661.
- [7] Liu W, Chen R, Cai H, et al. Correlation analysis for spread-spectrum induced-polarization signal processing in electromagnetically noisy environments[J]. Geophysics, 2017, 82(5): E243-E256.
- [8] Revil A, Vaudelet P, Su Z, et al. Induced polarization as a tool to assess mineral deposits: A review[J]. Minerals, 2022, 12(5): 571.
- [9] Ahmad J, Chen R, Ahmed I, et al. Spread Spectrum Induced Polarization (SSIP) Survey for the Qiushuwan Copper-Molybdenum Deposits in Southern Henan Province, China[J]. Minerals, 2024, 14(9): 934.
- [10] Ullah F, Zhou X, Chen R, et al. Cu-Polymetallic Deposit Exploration under Thick Cover in Gucheng-Yaxi Area Using Audio-Magnetotelluric and Spread-Spectrum-Induced Polarization[J]. Minerals, 2024, 14(8): 846.
- [11] Revil A, Ghorbani A, Jougnot D, et al. Induced polarization of clay-rich materials—Part 1: The effect of desiccation[J]. Geophysics, 2023, 88(4): MR195-MR210.
-