

# 中国地质调查局地质调查技术标准

DD2009 — XX

---

## 电性可控源音频大地电磁法 技术规程

（报批稿）

中国地质调查局

---

2009 年 4 月



# 目 次

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语、缩略语及符号.....	1
3.1 电性可控源音频大地电磁法.....	1
3.2 缩略语.....	2
3.3 常用术语、符号及计量单位.....	2
4 应用范围及条件.....	2
4.1 应用范围.....	2
4.2 应用条件.....	3
5 技术设计.....	3
5.1 资料收集与踏勘.....	3
5.2 工作装置及参数选择.....	3
5.3 测网选择.....	3
5.4 工作精度.....	4
5.5 生产前试验.....	4
5.6 设计书主要内容.....	4
6 仪器设备.....	5
6.1 基本要求.....	5
6.2 检测与标定.....	5
6.3 使用与维护.....	6
7 野外工作.....	6
7.1 电阻率参数测定.....	6
7.2 测网布设.....	6
7.3 场源布设.....	6
7.4 接收装置布设.....	7
7.5 安全措施.....	7
7.6 数据采集.....	8
7.7 质量检查与评价.....	8
7.8 野外资料验收.....	9
8 资料处理与解释.....	10

8.1 资料处理.....	10
8.2 资料解释.....	11
9 成果报告编写.....	12
9.1 编写要求.....	12
9.2 报告主要内容.....	12
9.3 主要图件.....	12
附录A （资料性附录） CSAMT法测量装置、方式、范围及模式.....	13
A.1 测量装置.....	13
A.2 标量测量方式、范围.....	13
A.3 矢量测量方式、范围.....	14
A.4 张量测量方式、范围.....	14
A.5 测量模式.....	15
附录B （资料性附录） 均匀半空间表面水平电偶源的电磁场公式.....	16
B.1 CSAMT法常用公式.....	16
B.2 均匀半空间表面水平电偶源的电磁场公式.....	16
附录C （资料性附录） CSAMT法的电磁噪声分类、检测与压制.....	19
C.1 电磁噪声分类.....	19
C.2 电磁噪声的检测及压制.....	19
附录D （资料性附录） CSAMT法工作参数的选取.....	21
D.1 收发距.....	21
D.2 探测深度.....	22
D.3 最低工作频率.....	22
附录E （资料性附录） CSAMT法曲线影响因素及特征.....	24
E.1 CSAMT法曲线影响因素.....	24
E.2 CSAMT法曲线基本特征.....	24
附录F （资料性附录） CSAMT法仪器设备主要技术指标要求.....	28
附录G （资料性附录） 导线或仪器设备绝缘性、电极接地电阻与极差检测方法.....	29
G.1 导线或仪器设备绝缘性检测.....	29
G.2 电极接地电阻检测.....	30
G.3 极差检测.....	30
G.4 检测记录.....	30
附录H （资料性附录） CSAMT法野外观测工作记录.....	31
附录I （资料性附录） CSAMT数据处理方法.....	32
附录J （资料性附录） CSAMT数据解释方法.....	33
主要参考文献.....	34

# 前 言

可控源音频大地电磁法（简称CSAMT法）是二十世纪七十年代发展起来的电磁测深技术。该方法采用人工场源，与天然源大地电磁测深法相比，具有信噪比高、快速高效等优点。二十世纪八十年代以来，该方法已经在我国能源、金属与非金属等矿产资源勘查以及水文、工程、环境、灾害地质调查等多个领域得到广泛应用。为规范CSAMT法在国内的运用，进一步提高工作质量和应用水平，编制本标准。

本标准的附录A、附录B、附录C、附录D、附录E、附录F、附录G、附录H、附录I及附录J是资料性附录。

本标准由中国地质调查局提出和归口管理。

本标准起草单位：中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、中南大学等。

本标准起草人：孙鸿雁、雷达、汤井田。

本标准由中国地质调查局负责解释。



# 电性可控源音频大地电磁法技术规程（报批稿）

## 1 范围

本标准规定了电性可控源音频大地电磁法的技术设计、仪器设备使用与维护、野外施工、质量评价、资料处理与解释、成果报告编写等工作的技术要求。

本标准主要适用于地质勘查中的电性可控源音频大地电磁法工作。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

以下的标准条款通过本标准的引用成为本标准的条款，其最新版本适用于本标准：

GB / T 14499-1993 地球物理勘查技术符号

GB / T 18314-2001 全球定位系统（GPS）测量规范

DZ / T 0069-1993 地球物理勘查图图式图例及用色标准

DZ / T 0153-1995 物化探工程测量规范

DD 2005-03 岩矿石物性调查技术规程

## 3 术语、缩略语及符号

### 3.1 电性可控源音频大地电磁法

电性可控源音频大地电磁法（以下简称CSAMT法）是通过有限长接地导线电流源向地下发送不同频率的交变电流，在地面一定范围内测量正交的电磁场分量，计算卡尼亚电阻率〔见公式（1）〕及阻抗相位〔见公式（2）〕，达到探测不同埋深地质目标体的一种频率域电磁测深方法。

$$\rho^{E_x/H_y} = \frac{1}{5f} |E_x / H_y|^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\varphi^{E_x/H_y} = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y} \dots\dots\dots (2)$$

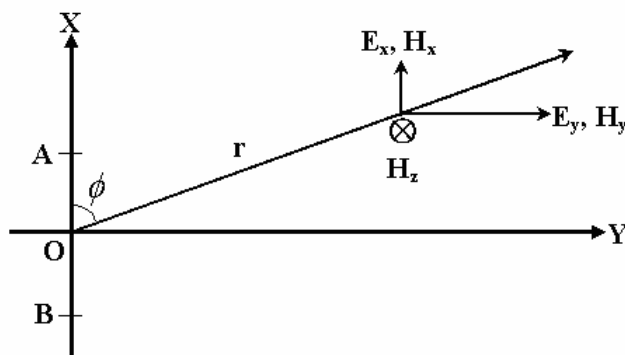


图1 CSAMT 法测量的电磁场各分量及坐标系

CSAMT 测量有三种测量装置，即赤道装置、轴向装置、 $E_y/H_x$  装置（参见 A.1 章）。

CSAMT 法有标量、矢量和张量三种测量方式，测量的各个电磁场分量及坐标系见图 1 所示。依据电磁场分量分布特征和信噪比要求，标量、矢量和张量测量范围各不相同（参见 A.2、A.3、A.4 章）。各个电磁场分量常用计算公式参见附录 B。本标准仅涉及 CSAMT 标量、矢量测量两种方式。

根据供电电极、接收电极和测线布设方向相对于地质构造走向的关系，CSAMT 有 TM（Transverse Magnetic）和 TE（Transverse Electric）两种测量模式（参见 A.5 章）。

### 3.2 缩略语

#### CSAMT

英文全称 Controlled Source Audio-frequency MagnetoTellurics，简称 CSAMT，中文称可控源音频大地电磁法。

### 3.3 常用术语、符号及计量单位

常用术语、符号及计量单位见表 1。

表1 常用术语、符号及计量单位

项号	术语名称	符号	计量单位
1	供电电极长度	$\overline{AB}$	m, km（米或千米）
2	供电电流强度	$I$	A（安培）
3	接收电极长度	$\overline{MN}$	m（米）
4	收发距	$r$	m, km（米或千米）
5	趋肤深度	$\delta$	m, km（米或千米）
6	探测深度	$D$	m, km（米或千米）
7	电场	$E$	mV / km（毫伏 / 千米）
8	磁场	$H$	nT, T（纳特或特斯拉）
9	相位	$\varphi$	mrad, degree（毫弧度或度）
10	电阻率	$\rho$	$\Omega \cdot m$ （欧姆·米）
11	电导率	$\sigma$	S / m（西门子 / 米）
12	接地电阻	$R$	$\Omega$ （欧姆）
13	磁导率	$\mu$	H / m（亨利 / 米）

## 4 应用范围及条件

### 4.1 应用范围

- 4.1.1 用于立体地质填图，探测地下立体电阻率结构。
- 4.1.2 用于固体矿产勘查，探测某些与金属、非金属矿产有关的地质构造和地质目标体。
- 4.1.3 用于能源矿产勘查，探测与油气、煤炭、放射性矿产有关的地质构造和地质目标体。
- 4.1.4 用于水文、工程、环境、灾害地质调查，探测与其有关的地质目标体。
- 4.1.5 探测其它有电阻率差异的目标体。



## 4.2 应用条件

4.2.1 目标体与围岩存在明显的电阻率差异。

4.2.2 目标体有足够的规模，观测的异常信号可以从干扰场或背景场中分离出来。

4.2.3 无强烈的电磁干扰。

4.2.4 地形地貌条件适合开展工作。

## 5 技术设计

### 5.1 资料收集与踏勘

5.1.1 编写设计前，应根据工作任务要求，收集相关的地质、地球物理、地球化学、钻探及测绘等资料。

5.1.2 收集测区主要岩矿石电阻率参数资料。

5.1.3 实地踏勘测区地形、地貌、交通、气象、居民点、植被等条件，调查测区电磁干扰源并对电磁干扰情况进行估计（参见附录C）。核对已收集的地质、物化探、测绘等资料。

### 5.2 工作装置及参数选择

#### 5.2.1 工作装置

综合考虑地质任务、测区地质构造特征、地形地貌、噪声水平、仪器设备性能等条件，选择合适的装置形式（参见A.1章）。

#### 5.2.2 工作频段

测量使用的工作频率范围依据勘查任务目标拟探测的最大深度和测区介质的平均电阻率初步确定（参见D.3章）。实际测量时，所使用的最低频率应比估算的频率再低1~3个频点并进入过渡区，最好通过试验最终确定。

#### 5.2.3 收发距

依据是否满足远区测量、介质电阻率、信噪比等因素确定（参见D.1章）。在保证一定的信噪比前提下，收发距 $r$ 应尽可能满足远区测量条件。 $r$ 通常按目标体最大埋深 $h_{\max}$ 的4倍以上设计。

#### 5.2.4 供电极距

供电电极长度 $\overline{AB}$ 应保证足够的信噪比，通常 $\overline{AB}$ 取1~3km。

#### 5.2.5 接收极距

接收电极长度 $\overline{MN}$ 根据所勘查的地质目标体规模和电信号的强弱确定。 $\overline{MN}$ 过大会降低对目标体的分辨率， $\overline{MN}$ 过小会降低观测质量。

### 5.3 测网选择

5.3.1 测网应根据地质任务、工作性质、勘查对象和地形地貌合理选择，点线距应能良好反映目标地质体（参照GB/T 18314-2001 全球定位系统(GPS)测量规范；DZ/T 0153-1995 物化探工程测量规范）。CSAMT法常用比例尺和测网密度见表2。

5.3.2 测点的平面点位误差在工作比例尺成果图上应不大于2mm；高程误差当勘查对象的最小埋深超过50m时不得超过最小埋深的2%，当勘查对象的最小埋深不足50m时应小于1m。

5.3.3 测线方向要尽可能垂直于探测地质目标体的走向（TM测量模式时）。

5.3.4 测线尽量与已有的地质、物化探勘探线和钻孔位置等重合。

5.3.5 测线位置应尽量避免高压线等电力设施，以及大的村镇、厂矿区、山峰和狭窄的沟谷。

5.3.6 测点、测线号编排规则：采用相同比例尺，测线左端为小号、右端为大号，点线号通常应以自西向东、自南向北增大的顺序编排。

表2 测网密度表

比例尺	线距 (km)	点距 (km)
1:100000	1~4	0.5~1
1:50000	0.5~2	0.25~0.5
1:25000	0.25~1	0.1~0.25
1:10000	0.1~0.5	0.05~0.1
1:5000	0.05~0.25	0.02~0.05
1:2000	0.02~0.1	0.01~0.02

#### 5.4 工作精度

5.4.1 工作精度应根据勘查地质任务、测区噪声水平以及其它因素进行设计。

5.4.2 工作精度分为两档（见表3），并依据7.7.4条中公式（7）与公式（8）来衡量。卡尼亚电阻率用均方相对误差来衡量；与卡尼亚电阻率不同，阻抗相位以 200 mrad为界，大于 200 mrad的阻抗相位用均方相对误差来衡量，小于 200 mrad的阻抗相位则用均方误差来衡量。电磁干扰很强的地区，可以分区设计精度或适当放宽，并由设计书另行规定。

表3 工作精度表

误差值 档次	参数	卡尼亚电阻率	阻抗相位	
		均方相对误差	均方相对误差 (>200 mrad)	均方误差 (≤200 mrad)
I		7%	10%	50 mrad
II		15%	20%	50 mrad

#### 5.5 生产前试验

在新区应用条件不明或测区地质条件比较复杂时，开工初期应选择有代表性的地段进行方法试验研究，在条件许可时，可在已知地质剖面上进行试验研究。试验目的：通过实测测区标志层或目标体的异常响应，了解地下介质、工作参数和场源对CSAMT测深曲线的影响以及曲线分布特性（参见附录E），为施工方案设计提供依据或检验施工方案的正确性；通过实测测区电磁干扰信号，判断电磁干扰源的类型、强度、频率分布范围和干扰时段等特征，为如何避开、减少或压制电磁干扰场的影响提供方法依据（参见附录C）；与此同时通过实测验仪器设备的性能等。在生产试验基础上，依据试验结果对技术设计做进一步修改和补充。

#### 5.6 设计书主要内容

- 目的任务；
- 测区概况，地质、地球物理特征，以往工作评价；
- 方法技术、仪器设备、技术指标、工作量及质量要求；
- 工作部署；
- 数据处理与解释；
- 安全生产、组织与管理；
- 提交成果内容及时间；
- 经费预算；
- 有关附图及附表。

## 6 仪器设备

### 6.1 基本要求

6.1.1 仪器设备的主要性能指标应达到 CSAMT 方法技术的要求（参见附录 F）或设计书的要求，不符合要求的仪器设备不得用于生产。

6.1.2 仪器设备（发射机、接收机、磁探头、发电机组等）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。

6.1.3 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、使用中应轻拿轻放，以及防尘、防雨、防冻、防曝晒。

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

6.1.5 供电电极 A、B 材质要坚固耐用、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做电极，其规格和数量可根据工区接地条件及供电电流强度选定。金属棒电极一般长度为 60cm~100cm，直径为 1.6cm~2.2cm 为宜。在接地电阻较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。一般供电导线应选用内阻小、绝缘性能好、轻便、强度高的多芯全铜导线，其内阻应小于  $8\Omega/\text{km}$ 。当电压为 500V 时，供电导线的绝缘电阻应大于  $2\text{M}\Omega/\text{km}$ 。

6.1.6 接收电极 M、N 应采用电化学性能稳定、极差变化小的不极化电极。接收导线也应选用内阻小、绝缘性能好、拉力强的耐磨导线，当电压为 500V 时，接收导线的绝缘电阻应大于  $5\text{M}\Omega/\text{km}$ 。

### 6.2 检测与标定

6.2.1 每个测区工作前和工作期间应视工期长短定期对接收机、发射机及附属设备进行调节检测。接收机具有自检功能的，应定期进行自动校准检测。磁探头应定期进行标定（标定方法可依据各个仪器自带的说明书的规定）。仪器设备各项指标合格后方可进行野外工作。

6.2.2 同一型号两台及两台以上接收机在同一测区野外工作前，应进行多台仪器一致性对比试验。

6.2.2.1 仪器一致性对比应在野外条件下，选择电磁干扰小的地段进行单点全频段测定。

6.2.2.2 仪器一致性由某测点  $m$  台仪器观测的卡尼亚电阻率总均方相对误差  $\varepsilon_{\text{一致性}}$  来衡量，计算公式为：

$$\varepsilon_{\text{一致性}} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{ij}^2 / (L-n)} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$V_{ij}$ ——第  $j$  台仪器在第  $i$  频点卡尼亚电阻率观测值与  $m$  台仪器在第  $i$  频点上卡尼亚电阻率观测值平均值的相对误差， $V_{ij} = (\rho_{ij} - \overline{\rho_i}) / \overline{\rho_i}$ ；

$\rho_{ij}$ ——第  $j$  台仪器在第  $i$  频点卡尼亚电阻率观测值；

$\overline{\rho_i}$ —— $m$  台仪器在第  $i$  频点卡尼亚电阻率观测值平均值， $\overline{\rho_i} = \sum_{j=1}^m \rho_{ij} / m$ ；

$m$ ——参加一致性观测的仪器台数；

$n$ ——参与一致性试验的观测频点数；

$L$ ——相对误差  $V_{ij}$  的总个数  $L = m \times n$ 。

一致性试验的 $\varepsilon_{\text{一致性}}$ 应不大于设计工作精度的2/3, 否则应从参加试验的 $m$ 台仪器中找出偏离均方误差 $\varepsilon_{j\text{偏}}$ 大的某仪器不予使用, 或经调节该仪器性能后达到一致性要求时方可使用。

6.2.2.3 从参加一致性试验的 $m$ 台仪器中找出 $\varepsilon_{j\text{偏}}$ 大的仪器可采用以下公式:

$$\varepsilon_{j\text{偏}} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n (\rho_{ij} - \bar{\rho}_i)^2 / (n-1)} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$\rho_{ij}$ ——第 $j$ 台仪器在第 $i$ 频点的卡尼亚电阻率观测值;

$\bar{\rho}_i$ —— $m$ 台仪器在第 $i$ 频点上的卡尼亚电阻率观测值的平均值,  $\bar{\rho}_i = \sum_{j=1}^m \rho_{ij} / m$ ;

$m$ ——参加一致性观测的仪器台数;

$n$ ——参与一致性试验的观测频点数。

## 6.3 使用与维护

6.3.1 接收机、发射机、发电机组应配有专职操作员, 野外工作期间严格按仪器使用说明书和操作规程进行使用与维护。

6.3.2 每天工作前必须对发电机组、发射机进行预热除潮处理, 特别是在潮湿、寒冷天气或发电机组、发射机长期未使用情况下务必进行预热除潮处理。发射机预热除潮要在发电机组运行约10分钟后再打开电源, 一般低速运行预热除潮时间夏天约20分钟, 冬天至少要30分钟。发射机的预热应在低电压、小电流下进行, 确保可在大电流或高压条件能正常工作后才能使用大功率供电工作。

6.3.3 发射机工作时最大工作电压和电流一般不应超过额定值的80%。

6.3.4 发电机组要定期更换滤清器及机油, 轴承部位要及时加注润滑油, 工作期间应保持通风系统畅通。发电机组的冷却系统工作不正常必须停止供电并进行检修, 直至正常后再继续使用。

6.3.5 发射机供电结束后, 发电机组、发射机冷却系统应继续运行足够的时间散热冷却, 以防损毁发射机。

6.3.6 仪器设备应定期保养检查。发生故障时应及时检修, 检修合格后方可继续使用。

6.3.7 仪器设备检修须由熟悉仪器设备性能的专业人员进行, 应填写完整检修记录并存档。

## 7 野外工作

### 7.1 电阻率参数测定

为了解释需要, 应有针对性进行电阻率参数测定。可进行标本、露头测定或小极距测深, 以及电测井和井旁测深(参照DD 2005-03 岩矿石物性调查技术规程)。

### 7.2 测网布设

根据设计书布设测网, 当设计的测点位置遇到陡崖、居民区、变电所及其它工业设施等障碍物时, 可在1/2点距范围内将测点平移到合适的地方以避免障碍, 并记录实际点位座标。

### 7.3 场源布设

7.3.1 供电电极A、B点位的地理位置既要尽可能满足远区观测的条件, 又要使 $\overline{AB}$ 尽可能平行于测线方向布设, 其方位误差应小于3°。

7.3.2 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。

**7.3.3** 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。

**7.3.4** A、B 极下或与测区间应尽量避免已知金属矿、煤矿、湖泊、溶洞和局部高阻隆起等可能引起场源效应的已知地质体。

**7.3.5** A、B 布设完毕后，应检查供电导线是否有漏电情况（参见 G.1 章）、A、B 极是否正确连接、接地情况是否良好（参见 G.2 章），各连接点是否牢固。

#### **7.4 接收装置布设**

**7.4.1** 接收导线应贴地布设，避免因风吹使导线晃动产生电磁干扰。

**7.4.2** 接收电极 M、N 不允许埋设在流水、污水处或废石堆上，极坑内不得留有砾石和杂物；地表干燥时，应提前向坑内浇水以减小接地电阻；测点岩石裸露时，应填以湿土，并使电极底部与湿土有良好的接触。接收电极的接地电阻一般应低于  $2k\Omega$ ，如遇基岩裸露地区，可适当放宽，但不应大于  $10k\Omega$ 。

**7.4.3** 接收电极 M、N 处遇到人文设施（如人工导体、金属栏杆、管道、供电线路、无线电塔、铁路、钻井、道路等）时，应适当平移，以减小干扰。

**7.4.4** 磁探头应垂直于接收电极  $\overline{MN}$  方向布设，采用罗盘仪定位，方位误差应小于  $2^\circ$ ；磁探头应水平放置，为避免较大的误差，应使用长度大于  $40cm$  的水平尺校准；磁探头应紧贴地面放置或固定在专用的非金属材料制成的支架上。风天为避免震动产生噪声，应将磁探头埋入地面以下。

**7.4.5** 磁探头到接收机的距离应大于  $7m$ ；磁探头布设应远离高压输电线、远离有车辆行驶的道路等干扰源，观测期间所有人员和车辆应远离磁探头并停止使用所有通讯设备。

**7.4.6** 采用共磁道测量方式观测时，为施工方便，接收机、磁探头应尽可能布设在多道电极排列中间。

**7.4.7** M、N 极布设完毕后，还应检查接收导线是否有漏电情况（参见 G.1 章）。

**7.4.8** M、N 极和磁探头布设完毕后，应检查接收电极、磁探头是否正确连接，检查接收电极接地是否良好（参见 G.2 章），各连接点是否牢固。

**7.4.9** M、N 极布设完毕后，还应检查接收电极间直流电位差的稳定性（参见 G.3 章）。

#### **7.5 安全措施**

**7.5.1** 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。

**7.5.2** 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。

**7.5.3** 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。

**7.5.4** 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。

**7.5.5** 发电机组运行期间，不得添加燃油。

**7.5.6** 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。

7.5.7 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。

7.5.8 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。

7.5.9 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。

7.5.10 布线需要经过水域时,除处理好导线外,应保证过水安全、严禁徒手托拽导线涉水(或泅渡);水上或冰上作业必须制定相应的安全制度和应急措施。

## 7.6 数据采集

7.6.1 数据采集前,操作员应确保接收机与发射机的时钟处于同步状态;操作员应检测接收电极和磁探头接地和连通情况,确保接收电极接地良好、其间的直流电位差稳定,磁探头工作正常。

7.6.2 在供电之前,应观测噪声水平,根据噪声情况,设定叠加次数。供电观测时,应停止无线电通信。当工频干扰较严重时,可选取陷波滤波器抑制噪声。强干扰条件下应选择避开干扰严重的时间段采集数据。当干扰较小时,单个频点一般至少取两次读数;在干扰较强时,应增加观测读数次数,直到符合 7.6.3 条要求时,方可进行下一个频点的测量。

7.6.3 单频点多次观测的卡尼亚电阻率读数中最大值与最小值之相对误差应符合下列要求:

$$\left[(\rho_a^{\max} - \rho_a^{\min})/(\rho_a^{\max} + \rho_a^{\min})/2\right] \times 100\% \leq \sqrt{2nM} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$\rho_a^{\max}$ ——某频点观测的卡尼亚电阻率读数中最大值;

$\rho_a^{\min}$ ——某频点观测的卡尼亚电阻率读数中最小值;

$n$ ——某频点卡尼亚电阻率的读数个数;

$M$ ——设计的工作精度。

7.6.4 观测时要做野外观测现场工作记录(参见表 H.1),应使用铅笔记录。除按规定记录点、线号等信息外,还应记录观测点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,要求字迹清晰。

7.6.5 同一测线需改变场源位置时,应至少有 2~3 个覆盖观测点,改变场源位置前后两次观测的卡尼亚电阻率和阻抗相位曲线形态应大体一致或基本重合。当曲线形态、数值差别较大时要调整场源,重新观测。

7.6.6 收工后应及时将当天采集的数据全部传入计算机,经检查确认无丢失遗漏数据后,另存盘备份并设定为唯一标识,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。

## 7.7 质量检查与评价

7.7.1 系统检查观测应在同一场源、不同操作员、重布接收排列、不同时间、不同供电电流进行,测量全部工作频段。

7.7.2 检查观测点数不得少于全区观测点总数的 3%,并在测区内大体均匀分布,在异常区段必须有一定数量的检查点。

7.7.3 在全区检查观测的数据中剔除明显畸变频点后,以单个物理点为单位,计算各个频点的卡尼亚电阻率或阻抗相位相对误差  $m_i$ , 编制  $m_i$  统计表并绘制  $m_i$  分布曲线。 $m_i$  计算公式为:

$$m_i = [(A_{ai} - A'_{ai})/(A_{ai} + A'_{ai})/2] \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$A_{ai}$ ——第  $i$  频点原始观测卡尼亚电阻率或阻抗相位;

$A'_{ai}$ ——第  $i$  频点检查观测卡尼亚电阻率或阻抗相位。

7.7.4 单个物理点  $l$  检查观测结果按以下各式计算误差, 并应满足设计工作精度要求。

a. 阻抗相位大于 200mrad 时, 卡尼亚电阻率和或阻抗相位用均方相对误差  $M_l$  按公式 (7) 计算:

$$M_l = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n m_i^2} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$m_i$ ——第  $i$  个频点的卡尼亚电阻率或阻抗相位相对误差;

$n$ ——检查观测并参与统计的频点数。

b. 阻抗相位小于等于 200mrad 时, 卡尼亚电阻率仍用均方相对误差  $M_l$  按公式 (7) 计算, 而阻抗相位使用均方误差  $\varepsilon_l$  按公式 (8) 计算:

$$\varepsilon_l = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_{ai} - \varphi'_{ai})^2}{2n}} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$\varphi_{ai}$ ——第  $i$  个频点的原始观测阻抗相位数据;

$\varphi'_{ai}$ ——第  $i$  个频点的检查观测阻抗相位数据;

$n$ ——检查观测并参与统计的频点数。

当同点质量检查结果出现下列情况之一者, 应确定该点为质量不合格:

- a) 误差超过设计工作精度的频点数大于该物理点频点总数的 1 / 3;
- b) 误差超过 2 倍设计工作精度的频点数大于该物理点频点总数的 5%;
- c) 误差超过设计工作精度的观测值在相邻的 3 个频点上连续出现;
- d) 误差大于设计工作精度。

7.7.5 全区系统检查观测质量用  $M$  衡量,  $M$  是在各个测深点质量评价基础上由卡尼亚电阻率和阻抗相位均方相对误差  $M_l$  (或均方误差  $\varepsilon_l$ ) 按公式 (9) 统计得出, 统计时不得剔除单个物理点系统检查确定为质量不合格的检查点。全区数据质量合格应满足的条件是: 质量不合格的检查点数不超过被评价区域内检查点总数的 1 / 3; 全区  $M$  应满足设计工作精度的规定。  $M$  的计算公式为:

$$M = \pm \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{l=1}^k A_l^2} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$A_l$ ——第  $l$  个物理点的均方相对误差或均方误差;

$k$ ——全区系统检查观测的全部物理点数。

7.7.6 当质量不合格的检查点数超过被评价区域内检查点总数的 1 / 3 时, 可增加系统检查工作量 (可直至总工作量的 20%) 后进一步统计, 但系统检查观测精度仍旧达不到合格标准时, 不得再增加检查工作量, 确定为此测区全部观测资料作废。

## 7.8 野外资料验收

### 7.8.1 验收内容

#### 7.8.1.1 原始资料

- a) 野外观测记录;
- b) 测地数据 (电子文档);
- c) 电阻率参数测定记录;
- d) 原始和检查数据 (电子文档);
- e) 仪器设备检测记录 (电子文档)。

#### 7.8.1.2 基础资料

- a) 电阻率参数统计表;
- b) 卡尼亚电阻率和阻抗相位测深曲线图和拟断面图 (电子文档);
- c) 质量检查点误差统计表及曲线;
- d) 实际材料图 (测网位置、检查点位置、场源位置、物性测定点位等);
- e) 野外工作小结;
- f) 其它相关资料。

#### 7.8.2 验收要求

7.8.2.1 承担单位先行验收合格后,应提前向项目委托单位提交验收申请,委托单位组织验收组对野外资料进行验收,并形成书面意见。

7.8.2.2 野外资料验收合格后,方可结束野外工作。

### 8 资料处理与解释

#### 8.1 资料处理

8.1.1 资料处理的目的是压制 CSAMT 数据中的各种噪声的影响,如仪器噪声、天然电磁噪声与人文噪声,或校正由地质噪声(静态位移、地形影响)以及非平面波引起的过渡区畸变等,从各种叠加场中分离、突出或增强地质目标体的场信息或趋势,以利于后续的解释。

8.1.2 根据地质目标体的特点和任务要求,在一个测区内往往要进行不同的数据处理,具体什么处理方法有效应该通过试验选择,应选择更加符合测区的地质条件或先验模型的特点、更有利解决测区问题的最佳方法。一般的处理方法包括:数据编辑、静态位移校正、地形校正及过渡区校正等。

8.1.2.1 数据编辑是压制由仪器噪声、风噪声、天然电磁噪声和人文噪声引起的明显畸变。应根据野外观测工作原始记录的信息、原始卡尼亚电阻率曲线和阻抗相位曲线趋势特征、误差统计表或分布曲线,对受干扰大、噪声强的数据做合理的编辑(剔除或圆滑)处理。曲线出现7.7.4条所述的严重畸变,经过处理后,仍不能使用的物理点应报废。

8.1.2.2 静态位移校正主要用于消除近地表局部导电性不均匀体引起的静态位移效应。在校正静态效应时可参考利用阻抗相位资料进行识别,依据地质构造和地形起伏情况,判断静态效应及其严重程度,并选取利用相位实测数据、空间滤波法、小波多尺度分析等适当的静态校正方法(参见I.1章)谨慎地结合测区已知资料进行校正。

8.1.2.3 地形校正是用于消除由于地形起伏引起的卡尼亚电阻率曲线和阻抗相位的畸变。对地形复杂地区,宜采用合适的方法做地形校正,例如比值法校正,或者选取带起伏地形反演的二维、三维软件(参见I.2章)进行反演以直接校正地形影响。

8.1.2.4 过渡区校正主要用于改正卡尼亚电阻率在过渡区由于非平面波效应产生的畸变。可根据解释工作需要,选用有效的方法,如利用等效电阻率全频域视电阻率近场校正方法、分段逼近全频域视电阻



率的近场校正方法等（参见 I.3 章）对过渡区数据进行校正，从而提取出过渡区数据中“隐藏”的有用频率测深信息，使其得到有效利用。

**8.1.3** 为判别多重资料处理过程的真实可靠性，应检查处理过程正确与否，并将处理结果与原始资料进行比较，还应对多重处理引进的误差进行评估。正确可靠的处理结果应是确保原始数据中的固有真实信息或趋势不但不会丢失，相反是得到保留或增强。

## **8.2 资料解释**

**8.2.1** 资料解释的目的是在资料处理的基础上，通过资料解释过程对电磁场包含的固有真实信息作出客观合理的地质推断。解释工作的主要步骤是定性解释、定量解释和综合地质解释。实际解释工作中，资料处理、定性解释、定量解释和综合地质解释需要交叉或反复进行，使资料解释工作逐步深化。

**8.2.2** 定性解释是根据初步建立的地质—地球物理模型和标志，对卡尼亚电阻率和阻抗相位异常的性质、规模及起因进行分析判定。定性解释通常采用从已知到未知的类比法和模型对比法等，有时还需运用定量计算的结果来支持定性的结论，定性解释要多次反复进行。

**8.2.2.1** 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。

**8.2.2.2** 根据测区地质图标出的岩性、本区实测物性或邻区的物性，进行半定量正演估算，判断异常的性质、规模和起因。

**8.2.2.3** 对某些可以定量反演的异常进行定量反演，求取电性异常体的埋深形态和物性参数，与已知地质体的相应参数进行对比，来判断异常的性质、规模和起因。

**8.2.2.4** 与收集到的地质、地球化学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。

**8.2.3** 定量解释是在定性解释基础上，建立反演初始模型，选取已有的相关反演软件（参考附录J），运用各种定量反演的方法求取电性异常体的物性参数和几何参数。

**8.2.3.1** 定量解释要尽可能利用测区内实测的物性参数、已有地质勘探控制的地下地质情况以及其他物探资料作为约束条件和先验控制信息，并利用定性解释的分析结论或认识建立反演初始模型，以减少定量反演的多解性。初始物性参数选取不当或约束条件不足将影响定量反演结果的正确性。

**8.2.3.2** 在地形平缓、简单层状或横向电阻率变化不太大的地电条件下，一般选用一维反演方法求取物性参数确定电性异常体的性质和起因，并定量推断电性异常体的埋深、规模、形态及产状。

**8.2.3.3** 对地形起伏较大和横向电阻率变化较大地电条件下的成果资料，一般选用带地形的二维、三维反演方法。利用电阻率—深度断面图或不同深度电阻率平面图、电阻率立体图等成果图件，结合钻探、硃探等地质勘探资料，分析并最终确定电性异常体的性质和地质起因，定量推断电性异常体的埋深、规模、形态及产状。

**8.2.4** 综合地质解释是在定性解释和定量解释的基础上，依照勘查目标任务要求，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。

**8.2.5** 根据定性、定量和综合地质解释结果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。

## 9 成果报告编写

### 9.1 编写要求

9.1.1 报告要实事求是，内容全面，重点突出，论述及推断有据且充分，文字简练，逻辑严密，结论客观明确。

9.1.2 报告附图、附表、附件要规范、合理、美观，文字说明简练、清楚。

9.1.3 勘查工作若是分阶段完成的，要提交阶段性成果报告；全面完成后，提交最终成果报告。

### 9.2 报告主要内容

- a) 地质任务及完成情况；
- b) 工作区概况及以往工作评价；
- c) 工作区地质及地球物理特征；
- d) 野外工作方法技术、仪器设备和质量评述；
- e) 资料处理；
- f) 解释推断；
- g) 结论和建议。

### 9.3 主要图件

- a) 实际材料图（测网位置、检查点位置、场源位置、物性测定点位等）；
- b) 典型测深曲线、拟断面图；
- c) 电阻率—深度断面图，对面积性工作，可根据需要加附不同深度电阻率平面图、电阻率立体图；
- d) 推断地质断面图；
- e) 推断地质平面图；
- f) 其它推断的图件。

附 录 A  
(资料性附录)  
CSAMT 法测量装置、方式、范围及模式

### A.1 测量装置

依据观测的电磁场分量的平面覆盖范围和接收电极相对供电电极的位置不同，CSAMT 法工作有三种测量装置，即赤道装置（观测  $E_x/H_y$ ，接收电极分布在供电电极中垂线两侧约  $45^\circ$  张角的扇形区域内，参见图 A.2a）；轴向装置（观测  $E_x/H_y$ ，接收电极分布在供电电极轴向线两侧约  $30^\circ$  张角的扇形区域内，参见图 A.2a）； $E_y/H_x$  装置（观测  $E_y/H_x$ ，接收电极分布在交于供电电极中点的两条斜对称轴两侧约  $40^\circ$  张角的扇形区域内，参见图 A.2b）。

在同样条件下，赤道  $E_x/H_y$  装置与轴向  $E_x/H_y$  装置、 $E_y/H_x$  装置相比其测量信号强度大，生产效率高，野外通常选用赤道  $E_x/H_y$  装置。

### A.2 标量测量方式、范围

#### A.2.1 标量测量方式

标量测量方式利用单一场源观测两个场分量（ $E_x$ 、 $H_y$  或者  $E_y$ 、 $H_x$ ），即一个电场和一个磁场分量（见图 A.1a）。在磁场均匀、地质情况简单的地区，可测量多个电场和共用一个磁场分量（见图 A.1b）。

标量测量方式一般用于探测一维层状介质和走向已知的二维地质目标体。标量测量方式成本较低、生产效率高，在野外实际工作中经常使用。

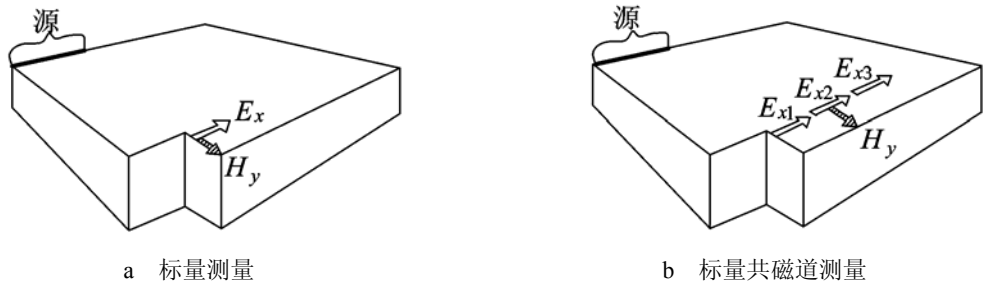


图 A.1 CSAMT 法标量测量方式

#### A.2.2 标量测量范围

**A.2.2.1 赤道  $E_x/H_y$  装置测量范围：**一般在供电电极中垂线两侧  $E_x$  或  $H_y$  场平面覆盖范围内各  $30^\circ$  张角、且收发距  $r \geq 4\delta$  的两个扇形区域（见图 A.2a 阴影区）。低频测量时张角适当减小。

**A.2.2.2 轴向  $E_x/H_y$  装置测量范围：**一般在供电电极轴向线两侧  $E_x$  或  $H_y$  场平面覆盖范围内各  $15^\circ$  张角、且收发距  $r \geq 5\delta$  的两个扇形区域（见图 A.2a 阴影区）。低频测量时张角适当减小。

**A.2.2.3  $E_y/H_x$  装置测量范围：**一般在交于供电电极中点的两条斜对称轴的两侧  $E_y$  或  $H_x$  场平面覆盖范围内各  $25^\circ$  张角、且收发距  $r \geq 3\delta$  的四个扇形区域（见图 A.2b 阴影区），低频测量时张角适当减小。

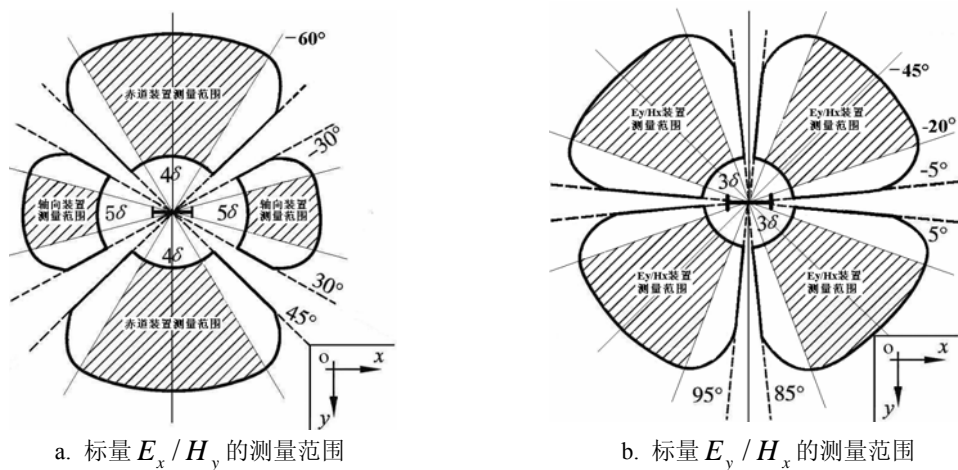


图 A.2 CSAMT 法标量测量范围

(图中竖线方向为地质构造走向)

### A.3 矢量测量方式、范围

#### A.3.1 矢量测量方式

矢量测量方式利用单一场源测量四个或五个场分量 ( $E_x$ 、 $E_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ ，有时加测  $H_z$ 。见图 A.3)。

矢量测量方式一般用于探测地下二维和三维地质目标体。

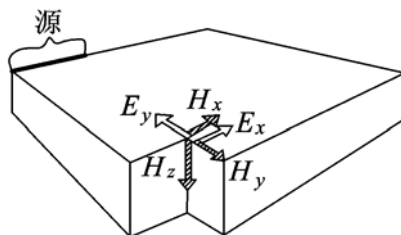


图 A.3 CSAMT 法矢量测量方式

#### A.3.2 矢量测量范围

矢量测量范围：应为  $E_x/H_y$  和  $E_y/H_x$  平面覆盖范围相重叠区域 (见图A.4a和图A.4b) 内更窄小的区域。

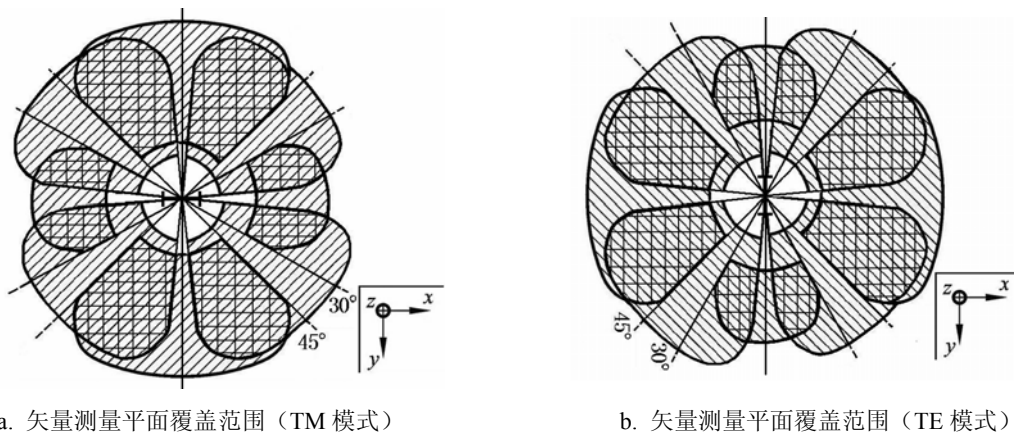


图 A.4 CSAMT 法矢量测量平面覆盖范围

(图中竖线方向为地质构造走向)

### A.4 张量测量方式、范围

#### A. 4.1 张量测量方式

张量测量方式利用两个分开（见图 A.5a）或重叠的场源（见图 A.5b）测量十个场分量（ $E_{x1}$ 、 $E_{x2}$ 、 $E_{y1}$ 、 $E_{y2}$ 、 $H_{x1}$ 、 $H_{x2}$ 、 $H_{y1}$ 、 $H_{y2}$ 、 $H_{z1}$ 、 $H_{z2}$ ）。

张量测量方式可提供更多的信息，一般用于探测地下复杂（二维、三维）或各向异性的地质目标体。但由于其价格昂贵和生产效率很低，实际工作中较少使用，往往用快捷、经济的标量或矢量测量代替。

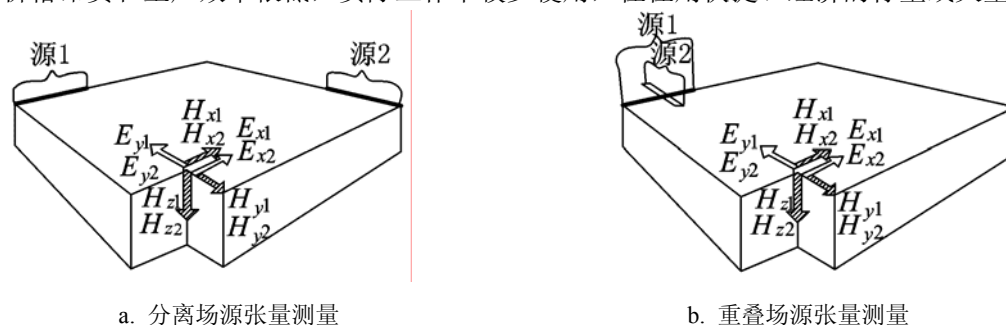


图 A.5 CSAMT 法张量测量方式

#### A. 4.2 张量测量范围

张量测量范围：应是两个互相正交场源的矢量测量平面覆盖范围相重叠区域（图A.6的8个小阴影区域）中更窄小的区域。

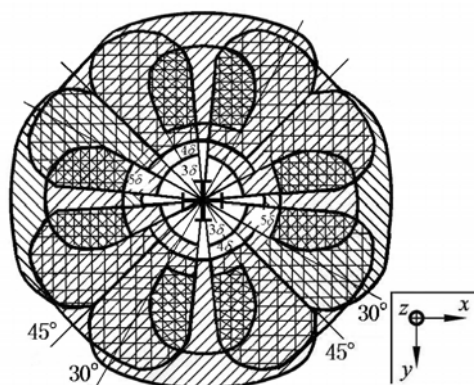


图 A.6 CSAMT 法张量测量平面覆盖范围

### A. 5 测量模式

#### A. 5.1 两种测量模式

根据供电电极、接收电极和测线布设方向相对于地质构造走向的关系，CSAMT有TM（Transverse Magnetic）和TE（Transverse Electric）两种测量模式。

#### A. 5.2 TM模式

供电电极、接收电极和测线方向垂直于二维地质构造走向布设（参见图A.4a）。TM模式横向分辨能力较强，观测的电场受静态位移和地形影响较严重。

#### A. 5.3 TE模式

供电电极、接收电极和测线方向平行于二维地质构造走向布设（参见图A.4b）。TE模式垂向分辨能力较高，与TM模式相比，观测的电场受静态位移和地形影响较小。

## 附录 B

### (资料性附录)

#### 均匀半空间表面水平电偶源的电磁场公式

##### B.1 CSAMT法常用公式

卡尼亚 (Cagniard) 电阻率:

$$\rho^{E_x/H_y} = \frac{1}{\mu\omega} |E_x / H_y|^2$$

上式采用CGSM单位制。在实际工作中, 常使用MKS制单位, 即电阻率用 $\Omega \cdot m$ 、电场用mV / km、磁场用nT、时间用秒(s)作单位。另外取岩石中的磁导率 $\mu$ 与空气的磁导率 $\mu_0$  ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ) 相同, 得到

$$\rho^{E_x/H_y} = \frac{1}{5f} |E_x / H_y|^2 \quad (\text{欧姆} \cdot \text{米}) \quad \text{..... (B.1)}$$

阻抗相位:

$$\varphi^{E_x/H_y} = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y} \quad (\text{毫弧度或度}) \quad \text{..... (B.2)}$$

趋肤深度:

$$\delta = \sqrt{2\rho/(\mu\omega)} = 503\sqrt{\rho/f} \quad (\text{米}) \quad \text{..... (B.3)}$$

探测深度:

$$D \approx \delta/\sqrt{2} = 356\sqrt{\rho/f} \quad (\text{米}) \quad \text{..... (B.4)}$$

波长:

$$\lambda = 2\pi\delta \quad (\text{米}) \quad \text{..... (B.5)}$$

传播常数:

$$k = \sqrt{-i\omega\mu/\rho} = \sqrt{-i}\sqrt{\omega\mu/\rho} = (1-i)\sqrt{\omega\mu/(2\rho)} \quad \text{..... (B.6)}$$

##### B.2 均匀半空间表面水平电偶源的电磁场公式

$$E_x = \frac{I\overline{AB}\rho}{2\pi r^3} [3\cos^2\phi - 2 + (1+kr)e^{-kr}] \quad \text{..... (B.7)}$$

$$E_y = \frac{I\overline{AB}\rho}{2\pi r^3} 3\sin\phi\cos\phi \quad \text{..... (B.8)}$$

$$H_x = \frac{I\overline{AB}}{4\pi r^2} \sin\phi\cos\phi [8I_1K_1 - kr(I_0K_1 - I_1K_0)] \quad \text{..... (B.9)}$$

$$H_y = \frac{I\overline{AB}}{2\pi r^2} [(1-4\sin^2\phi)I_1K_1 + \frac{kr}{2}\sin^2\phi(I_0K_1 - I_1K_0)] \quad \text{..... (B.10)}$$

$$H_z = \frac{2I\overline{AB}}{4\pi r^4 k^2} \sin\phi [3 - (3+3kr+k^2r^2)e^{-kr}] \quad \text{..... (B.11)}$$

###### B.2.1 近区 ( $|kr| \ll 1$ ) 近似计算公式

$$E_x = \frac{I\rho\overline{AB}}{2\pi r^3} (3\cos^2\phi - 1) \quad \text{..... (B.12)}$$

$$E_y = \frac{3I \overline{AB} \rho}{4\pi r^3} \sin 2\phi \dots\dots\dots (\text{B.13})$$

$$H_x = \frac{I \overline{AB}}{4\pi r^2} \sin \phi \cos \phi \dots\dots\dots (\text{B.14})$$

$$H_y = \frac{I \overline{AB}}{4\pi r^2} (2 \cos^2 \phi - 1) \dots\dots\dots (\text{B.15})$$

$$H_z = \frac{I \overline{AB}}{4\pi r^2} \sin \phi \dots\dots\dots (\text{B.16})$$

B.2.2 远区 ( $|kr| \gg 1$ ) 近似计算公式

$$E_x = \frac{I \overline{AB} \rho}{2\pi r^3} (3 \cos^2 \phi - 2) \dots\dots\dots (\text{B.17})$$

$$E_y = \frac{3I \overline{AB} \rho}{2\pi r^3} \sin \phi \cos \phi \dots\dots\dots (\text{B.18})$$

$$H_x = \frac{-3I \overline{AB}}{2\pi r^3 k} \sin \phi \cos \phi = -(1+i) \frac{3I \overline{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \sin \phi \cos \phi \dots\dots\dots (\text{B.19})$$

$$H_y = \frac{I \overline{AB}}{2\pi r^3 k} (3 \cos^2 \phi - 2) = (1+i) \frac{I \overline{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} (3 \cos^2 \phi - 2) \dots\dots\dots (\text{B.20})$$

$$H_z = i \frac{3I \overline{AB} \rho}{2\pi r^4 \omega\mu} \sin \phi \dots\dots\dots (\text{B.21})$$

对于赤道装置, 当  $\phi=90^\circ$  时:

$$E_x = -\frac{I \overline{AB} \rho}{\pi r^3} \dots\dots\dots (\text{B.22})$$

$$H_y = -\frac{I \overline{AB}}{\pi r^3 k} = -(1+i) \frac{I \overline{AB}}{2\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \dots\dots\dots (\text{B.23})$$

$$H_z = i \frac{3I \overline{AB} \rho}{2\pi r^4 \omega\mu} \dots\dots\dots (\text{B.24})$$

对于轴向装置, 当  $\phi=0^\circ$  时:

$$E_x = \frac{I \overline{AB} \rho}{2\pi r^3} \dots\dots\dots (\text{B.25})$$

$$H_y = \frac{I \overline{AB}}{2\pi r^3 k} = (1+i) \frac{I \overline{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \dots\dots\dots (\text{B.26})$$

B.7~B.26 式中:

$r$  ——收发距 (米或千米)

$\phi$  —— $r$  与  $\overline{AB}$  夹角 (度)

$\overline{AB}$  ——供电电极长度 (米或千米)

$I$  ——电流强度 (安培)

$E$  ——电场振幅 (伏特 / 米)

$H$  ——磁场振幅 (纳特或特斯拉)

$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , 空气磁导率 (亨利 / 米)

$\sigma = 1/\rho$ ，大地电导率（西门子 / 米）

$\omega = 2\pi f$ ，角频率（赫兹）

$\rho = 1/\sigma$ ，大地电阻率（欧姆·米）



## 附录 C (资料性附录)

### CSAMT 法的电磁噪声分类、检测与压制

#### C.1 电磁噪声分类

依据电磁噪声的来源,电磁噪声种类可分为天然电磁噪声和人文电磁噪声。无论在时间还是空间上,两类噪声的分布常常混杂在一起。

对于卡尼亚电阻率和阻抗相位的观测而言,当观测点处于上述“电磁噪声”源的“远区”就可将其看作是有用场源[就像大地电磁法(MT)和音频大地电磁法(AMT)一样];当观测点处于“电磁噪声”源的“近区”,或单独利用电场或磁场分量计算视电阻率时,上述“电磁噪声”源才形成干扰。

依据电磁噪声的强度,电磁干扰区一般可分为强干扰区、中强干扰区和一般干扰区。在强干扰区,大多数测点的CSAMT法观测数据几乎无法利用。在中强干扰区,相当一部分测点的CSAMT法数据经过处理尚能利用解决测区的主要地质问题,其余测点的数据只能被删除。在一般干扰区,大多数测点的数据经过处理均能用于解决相关的地质问题,被删除的测点较少。对于强干扰区,原则上CSAMT法数据不能使用,对于中强干扰区,虽然CSAMT可以开展工作,但全区的误差会大些,具体指标和要求需在设计中规定。

##### C.1.1 天然电磁噪声

天然电磁噪声(作为MT或AMT测量的场源)主要来自雷电活动,特别是与雷暴有关的闪电。由于地球上时刻有雷暴发生,所产生的电磁场在世界范围内传播,它们基本是不可控的、也不知其源的具体位置,其规律也不清。天然电磁噪声引起的电磁场在CSAMT法常用工作频段(1Hz~1kHz)内能量较高,其场强度大体与CSAMT法场源产生的电磁场强度相当。由于天然电磁场噪声的这一频段正好与CSAMT法较低频段工作频率重合,因此在地球上的任何地带都存在天然电磁场噪声对CSAMT法测量信号的影响。

##### C.1.2 人文电磁噪声

人文电磁噪声是指距观测点很近的人类文化设施有关的电磁噪声,主要包括动力电网和通讯电缆、矿山轨道或工业用电、铁路控制信号、地下管(道)线及游离电流、有线广播网、潜水泵、大功率发射台等设施产生的电磁干扰噪声。我国工业用电的频率为50Hz,其干扰噪声为频率稳定的50Hz及其谐波电平。在靠近动力线地段,干扰噪声电平可达几十至几百毫伏甚至更大。在工矿区,常有无规律的强脉冲,这些脉冲可能来自动力用电的开关转换过程,也可能来自高压电网的电晕放电,其强度往往比CSAMT法场源产生的电磁场还要强,有时可将有效信号淹没,对CSAMT数据造成很大的干扰。一般低压输电线及民用电网对于CSAMT法并不造成很强的干扰。

#### C.2 电磁噪声的检测及压制

##### C.2.1 电磁噪声的检测

在新区CSAMT法设计前,应该到实地踏勘,了解观测点附近的文化设施,判断电磁干扰源的类型、位置以及它们的工作时段,可以利用便携式宽频数字示波器、频谱仪(或其它便携设备)检验测区电磁

噪声（ $E$  和  $H$  场）的分布频率范围和振幅强度等。根据踏勘或检测掌握的电磁噪声信息，确定工作区属于那类干扰区，从而为在工作区避开、减少或压制电磁噪声的干扰制定合理工作方案。

### C.2.2 电磁噪声的压制

为克服或压制电磁噪声干扰，现代地球物理仪器在技术设计上采取了相应的抗干扰措施，例如多次叠加技术、去假频滤波技术、工频陷波技术、高通滤波技术等。尽管如此这些措施仍旧不能完全压制某些能量很高、随机的强干扰信号。因此，为获取较高质量的野外数据，保证勘探工作质量，一方面要求野外操作员在野外现场数据采集过程中，能够正确判断测区噪声的分布特点，进而采取灵活有效的措施避开或压制电磁噪声的影响，例如改变叠加次数、分时采集或协调断电等；另一方面要求室内资料处理人员也应根据测区电磁噪声特点，采取适当的方法对数据中的电磁噪声进行压制，譬如剔除、圆滑或做各种滤波处理等。

附 录 D  
(资料性附录)  
CSAMT 法工作参数的选取

### D.1 收发距

CSAMT法远区测量，由于有限场源的使用使平面上允许采集数据的范围受到限制。限制因素有三个：1) 最小收发距  $r_{\min}$ ，它受到进入近场的限制；2) 最大收发距  $r_{\max}$ ，它受到最小可探测信号的限制；3) 信号强度与偏离场源中垂线方位角  $\phi'$  的依赖关系。因此，要保证所使用的工作频率均在远区，且在目标最大探测深度处信号强度足够强，需要对收发距进行估算。

当测区大地岩性参数未知时，为保证在“远区”工作，经验上通常按  $r \geq 4h_{\max}$  ( $h_{\max}$  为目标体最大埋深) 来设计收发距  $r$ ，即  $r$  约在5~10km范围内。在特高阻地区相比较低阻地区会过早地进入过渡区，因此在特高阻地区既要考虑增大最低频率也要考虑进一步加大收发距满足远区工作条件。

#### D.1.1 最小收发距

在CSAMT测量中，收发距是以趋肤深度为标准来确定，若要求观测在远区进行，则对于赤道装置测量，要求  $r_{\min} > 4\delta$  ( $\delta$  为趋肤深度)，对于轴向装置测量，要求  $r_{\min} > 5\delta$ ；如果允许在近场观测，则可放宽到  $r_{\min} > 0.5\delta$ 。若已知测区大地平均电阻率和最小工作频率，可根据图D.1估计  $r_{\min}$  大小。

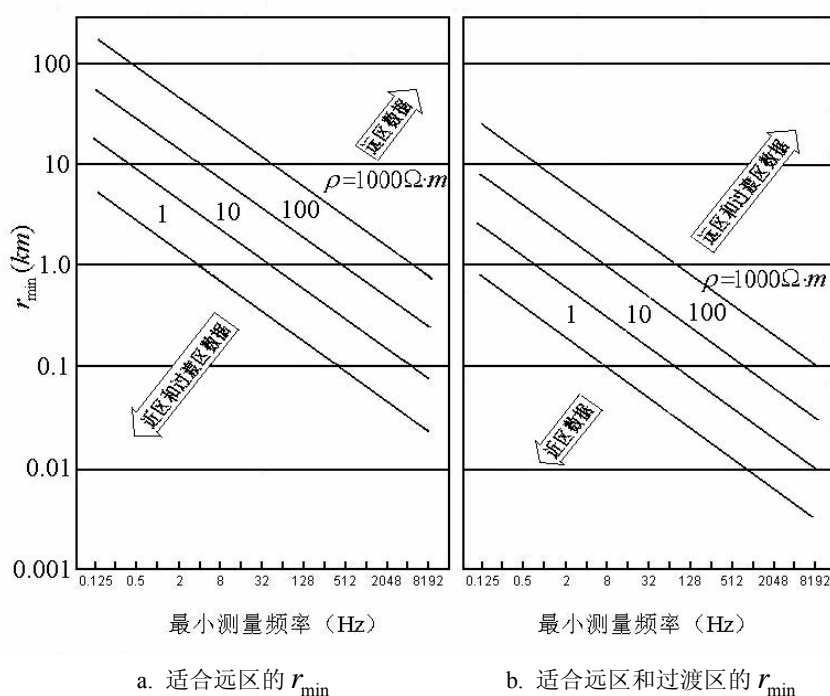


图 D.1 确定最小收发距的列线图

#### D.1.2 最大收发距

根据远区水平电场公式，

$$E_{\phi} \approx \frac{I \overline{AB}}{\pi \sigma r^3} \sin \phi \quad \text{..... (D.1)}$$

对于赤道测量装置，当收发距  $r \gg \overline{AB}$  时，有

$$r_{\max} \approx \left( \frac{I \overline{AB} \rho \sin \phi}{\pi E_{\min}} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$I$  ——电流强度 (安培)

$\sigma$  ——大地电导率 (西门子 / 米)

$\rho$  ——大地电阻率 (欧姆·米)

$\overline{AB}$  ——供电电极长度 (千米);

$E_{\min}$  ——为在一定噪声条件下可探测到的最小电场信号强度 (微伏 / 千米);

$r_{\max}$  ——最大收发距 (千米)。

估算最大收发距  $r_{\max}$  示例:

若  $\rho$  为  $10\Omega \cdot m$ ,  $I = 30A$ ,  $\overline{AB}$  长度  $2km$ , 赤道  $E_x/H_y$  装置 ( $\phi = 90^\circ$ ) 测量, 外界随机噪声水平  $10\mu V$ , 当  $E_{\min} = 0.1\mu V/km$  时 (假定最低信噪比为 1: 100, 目前的 CSAMT 数字采集系统可在信噪比为 1: 100 时随机噪声条件下经过叠加和平均得到最小准确信号), 由 D.2 式可计算得到  $r_{\max} = 12.4km$ 。 $r_{\max}$  随电阻率增高和噪声水平降低而增大, 反之则减小。事实上, 仪器观测系统本身的分辨率由于各种噪声的存在,  $E_{\min}$  一般应大于  $0.5\mu V/km$ , 因此实际  $r_{\max}$  应小于  $12.4km$  才能观测到最小准确信号。

## D.2 探测深度

在技术设计中, 首先要对测区内大地平均电阻率有一个恰当的估计, 这个估计可根据收集或采集的岩 (矿) 石物性样品的电阻率值、测井电阻率值, 以及测区以往经验来估计, 然后可根据经验公式 (D.3) 初步估算所要勘查的地质目标有效探测深度, 公式 (D.3) 说明探测深度与大地电阻率和信号频率有关。图 D.2 是根据公式 (D.3) 计算的简便列线图。估算有效探测深度  $D$  的近似公式为:

$$D \approx \delta / \sqrt{2} = 356 \sqrt{\rho / f} \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

$\delta$  ——趋肤深度 (米);

$\rho$  ——大地电阻率 (欧姆·米);

$f$  ——工作频率 (赫兹);

$D$  ——探测深度 (米)。

## D.3 最低工作频率

技术设计中, 根据勘查地质目标深度的要求在确定最大探测深度后, 可根据最大探测深度估算所需要的最低工作频率  $f_L$ 。

$$f_L = (356/D)^2 \cdot \rho \dots\dots\dots (D.4)$$

当大地电阻率已知时, 保证在远区测量的最低工作频率  $f_L$  与可探测到最小信号时的收发距  $r_{\max}$  有关, 因此可根据公式 (D.5、D.6) 来进一步估算  $f_L$ 。计算  $f_L$  的经验公式为:

$$f_L = 4.0 \rho / r_{\max}^2 \quad (\text{适于远区数据}) \dots\dots\dots (D.5)$$

$$f_L = 0.06 \rho / r_{\max}^2 \quad (\text{适于远区和过渡区数据}) \dots\dots\dots (D.6)$$

这两个公式假定最低信噪比为 1: 100。

D.4~D.6 式中:

$D$  ——探测深度 (米);

$r_{\max}$  ——最大收发距（千米）；

$\rho$  ——估计的测区大地平均电阻率（欧姆·米）；

$f_L$  ——最低工作频率（赫兹）。

通常，为保证不漏掉所要探测的地质目标体，要求野外应测到比最低工作频率  $f_L$  还要低几个频率，以确保适合的探测深度。

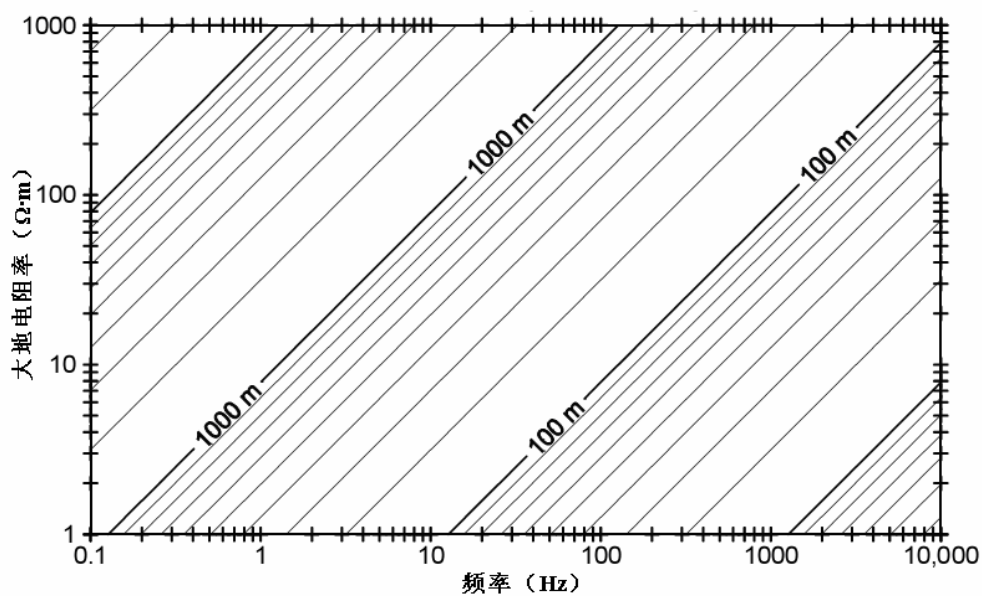


图 D.2 估算有效探测深度的列线图

附 录 E  
(资料性附录)  
CSAMT 法曲线影响因素及特征

### E.1 CSAMT法曲线影响因素

电磁场各个分量(参见公式B.7~B.21)的强度与收发距 $r$ 和波数 $k$ 有关。在似稳状态下,波数 $k = \sqrt{i\omega\mu/\rho} = (1-i)\sqrt{\omega\mu/2\rho}$ 。 $k$ 中包含地下介质和工作频率等参数,并以趋肤深度的形式表示出来。即:

$$kr = (1-i)r/\delta$$

$$\text{令 } p = r/\delta \dots\dots\dots (E.1)$$

称 $P$ 为“电距离”或“感应数”, $P$ 实质是以趋肤深度 $\delta$ 为单位表示的收发距。因此可以借助于参数 $P$ 来划分场源的远近,即:

电距离“近”(  $p \ll 1$ )时的场区称为“近区”;

电距离“远”(  $p \gg 1$ )时的场区称为“远区”或“平面波场区”;

电距离介于前两者之间(  $p \approx 1$ )的场区称为“过渡区”。

由 $p = r/\delta = r\sqrt{\omega\mu/2\rho}$ 不难看出,感应数 $P$ 的“大”或“小”,或场区的“远”和“近”不但与大地电阻率 $\rho$ 有关,而且与收发距 $r$ 和圆频率 $\omega$ 等工作参数有关。图 E.1 示出均匀大地条件下,随 $r$ (见图 E.1a)、 $\rho$ (见图 E.1b)及方位角 $\phi' = \pi/2 - \phi$ (见图 E.1c)等参数的变化,对电场 $E_x$ 、磁场 $H_y$ 和卡尼亚电阻率 $\rho_{xy}$ 曲线的“近区”、“过渡区”和“远区”的影响。

图 E.1a 表明收发距 $r$ 的影响(固定 $\rho$ )。在“近区”, $\rho_{xy}$ 仅与几何参数 $r$ 有关,并非反映真实大地电阻率,随 $r$ 的增大“过渡区”的位置向低频处偏移; $E_x$ 、 $H_y$ 与频率无关(饱和)。 $E_x$ 从“近区”到“远区”均按 $1/r^3$ 衰减,而 $H_y$ 从“近区”按 $1/r^2$ 衰减逐渐过渡到“远区”按 $1/r^3$ 衰减, $E_x$ 、 $H_y$ 的强度均随 $r$ 增加而减小。

图 E.1b 表明大地电阻率 $\rho$ 的影响(固定 $r$ )。在“近区”,因 $E_x$ 与 $\rho$ 成正比、 $H_y$ 与 $\rho$ 变化无关,造成 $\rho_{xy}$ 虚假按 $45^\circ$ 上升,随 $\rho$ 愈大其“过渡区”的位置向高频处偏移。在“过渡区”到“远区”, $E_x$ 和 $H_y$ 均按 $1/r^3$ 衰减。

图 E.1c 表明方位角 $\phi' (= \pi/2 - \phi)$ (固定 $\rho$ )的影响。在“近区”, $\rho_{xy}$ 有改变,在“远区” $\rho_{xy}$ 不受 $\phi'$ 的影响。当 $\phi'$ 角增大(偏离中垂线)导致 $r$ 加大时,从而 $E_x$ 、 $H_y$ 场幅值降低。

对图 E.1 的曲线分析说明,所谓“近区”、“过渡区”、“远区”是由大地介质和工作参数的综合影响决定的。一般在野外,当 $\rho$ 已知时,根据地质任务,可以改变 $r$ 或 $\omega$ ,获得预期的探测深度并满足在“远区”观测的要求。在良导介质中,在较宽的频带范围,用不太大的 $r$ 就可以使测区位于“远区”;反之,在高阻介质中,在同样的频带范围内,很难保证“远区”条件,这时必须增大最低频率或加大 $r$ 才能满足“远区”条件。

### E.2 CSAMT法曲线基本特征

电性 CSAMT 法通常观测四个分量,即:电场振幅 $E_x$ 、电场相位 $\varphi_E$ 、磁场振幅 $H_y$ 、磁场相位 $\varphi_H$ 。卡尼亚电阻率和阻抗相位可从上述分量中计算出来。图 E.2 示出了有限场源条件下,均匀大地模型和层

状大地模型上 CSAMT 各分量测深曲线的基本特征。

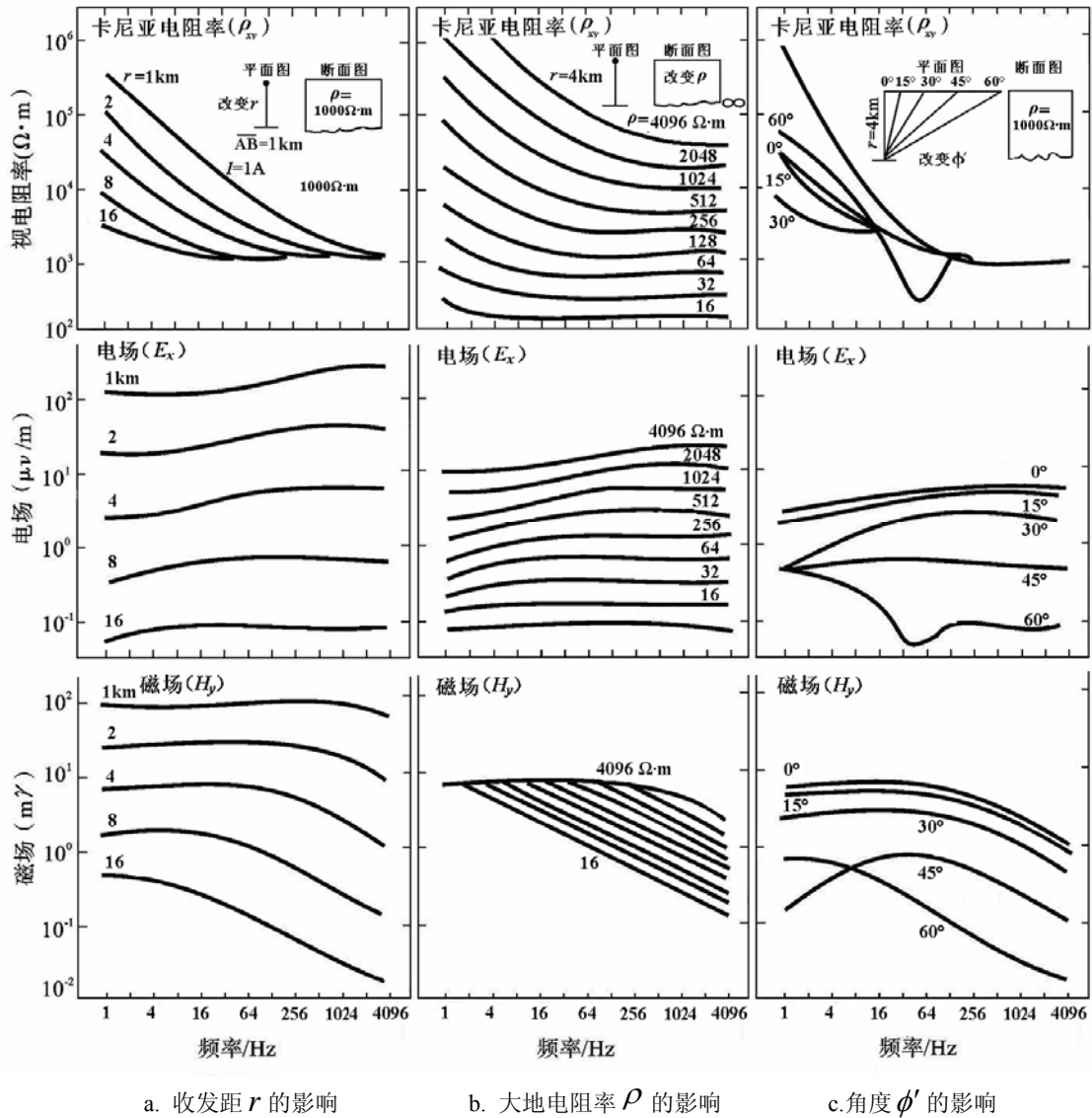


图 E.1 介质或工作参数对  $E_x$ 、 $H_y$  和  $\rho_{xy}$  曲线的影响

$E_x$  受源效应影响很大。无论是均匀大地还是层状大地， $E_x$  在过渡区和远区对大地电阻率变化敏感，而在近区电场曲线呈现与频率无关的饱和现象。

$\varphi_E$  在非极化均匀大地情况下，除了在过渡区不为零，在其它处  $\varphi_E$  均为零，因为在过渡区  $\varphi_E$  与  $E_x$  曲线的斜率变化有关；在层状大地条件下，由于电阻率差异引起斜率变化， $\varphi_E$  通常不为零。

$H_y$  也受源效应的影响，在近区饱和，在均匀大地条件下，远区的斜率角为  $27.5^\circ$ 。但  $H_y$  对大地电阻率变化没有  $E_x$  那么敏感。

$\varphi_H$  在均匀大地情况下，在远区为  $-\pi/4 \text{ rad}$ ，而在近区为零。在过渡区则介于零与  $-\pi/4 \text{ rad}$  之间。在层状大地情况下， $\varphi_H$  曲线变得比较复杂，出现过渡区“低谷”。

卡尼亚电阻率  $\rho_{xy}$  只在远区是正确的，由于在过渡区和近区  $\rho_{xy}$  公式无效，则所计算的视电阻率不能真实反映地下电阻率变化，在近区呈  $45^\circ$  直线。

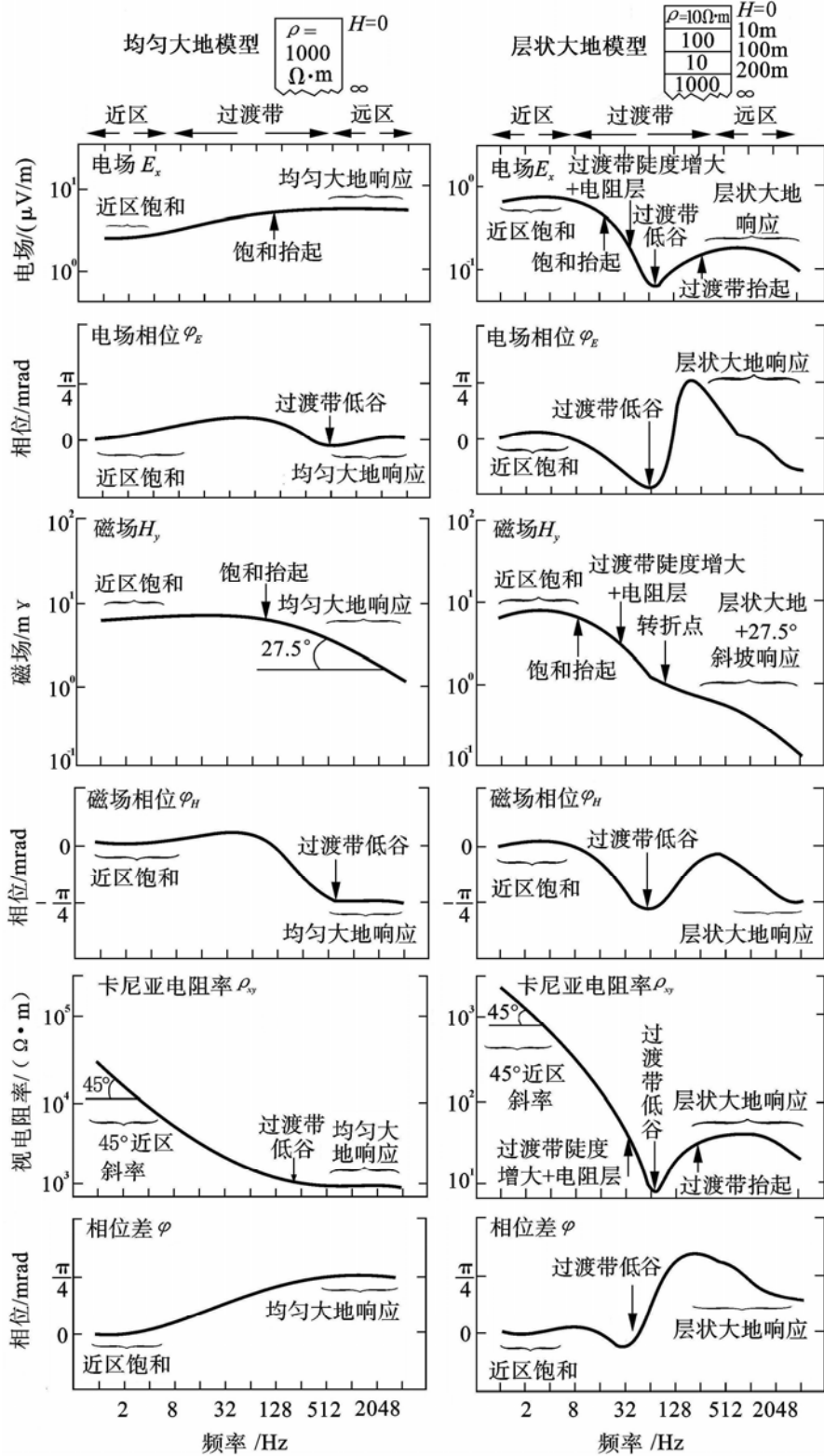


图 E.2 CSAMT 法曲线基本特征

在均匀大地时, 阻抗相位  $\varphi$  ( $\varphi_E - \varphi_H$ ) 在远区为  $\pi/4 \text{ rad}$  ( $785 \text{ mrad}$ ), 在近区为零。而在层状大地上,  $\varphi$  在远区并不总是  $785 \text{ mrad}$ ,  $\varphi$  与  $\rho_{xy}$  对数的斜率近似成线性正相关, 高于  $\pi/4 \text{ rad}$  的值反应上层电阻率高于下层电阻率; 低于  $\pi/4 \text{ rad}$  的值反应上层电阻率低于下层电阻率。

上述条件下, 概括起来 CSAMT 测深曲线有以下基本特征:

在近区,  $E_x$  与  $H_y$  饱和不随频率变化, 且  $H_y$  与大地电阻率无关,  $\rho_{xy}$  随频率降低而均匀地增大,



$\varphi$  趋于零。CSAMT 测深在近区仅是几何尺寸的函数，因此近区数据并不能经校正提取出“隐藏”的有用频率测深信息。

在过渡区，均匀大地时， $E_x$ 、 $H_y$  各分量从近区的特性较均匀地过渡到远区的特性。对于层状大地（或二维、三维），过渡区电磁场的特性比较复杂， $E_x$  表现为急陡的拱起—低谷—回升的特征， $H_y$  则显示出一定的弯曲。 $\rho_{xy}$  受二者的综合影响则表现为醒目的“低谷”，即虚假  $\rho_{xy}$  降低，在低谷的低频一侧常伴有一个假的斜坡，趋向其近区频段， $\varphi$  呈现与  $\rho_{xy}$  的斜率有关的明显变化。在过渡区， $E_x$  与  $H_y$  均与频率和大地电阻率有关，所以含有“隐藏”的可利用的频率测深信息。

在远区，所有电磁场参数均表现为随大地电阻率的变化而变化，如同大地电磁测深法（MT）一样，可以实现频率测深的目的。

以上是仅对均匀大地和层状大地 K 形曲线数值计算结果的分析，野外由于受到各种干扰因素的影响以及地质构造的复杂性，实测 CSAMT 测深曲线往往更加复杂。但是若掌握了各个场分量的基本分布特征，有助于对野外实测 CSAMT 测深曲线的识别和判断。

附 录 F  
(资料性附录)

**CSAMT 法仪器设备主要技术指标要求**

CSAMT 法接收机、发射机及磁探头的主要技术指标要求分别列于表 F.1、F.2 及 F.3。

表 F.1 接收机主要技术指标要求

参数	技术指标	备注
输入阻抗	10 MΩ	
动态范围	120 db	
最小检测信号	0.05 μV	
频率范围	0.01Hz ~ 10kHz	根据工作任务选择
A / D 模数转换	16 ~ 24 位	
时基同步精度	恒温晶体振荡器 OCXO 老化率 < ±5×10 <sup>-9</sup> / 24 小时	
工作温度	-20℃ ~ +45℃	
湿度	0 ~ 80%	

表 F.2 发射机主要技术指标要求

参数	技术指标	备注
输出电压范围	100 V ~ 1000 V	
频率范围	0.01Hz ~ 10k Hz	根据工作任务选择
发送电流	≥10 A	根据工作任务选择
功率	≥10 kW	根据工作任务选择
时基同步精度	恒温晶体振荡器 OCXO 老化率 < ±5×10 <sup>-9</sup> / 24 小时	
工作温度	-20℃ ~ +45℃	
湿度	0~80%	

表 F.3 磁探头主要技术指标要求

参数	技术指标	备注
频率范围	0.01Hz ~ 10k Hz	根据工作任务选择
噪声水平	1200 μV (1200 fT) per √Hz (在 1Hz) ; 20 μV (20 fT) per √Hz (一般 > 60Hz 时)	
通频带灵敏度	100mV/ γ (mV/nT)	

附 录 G  
(资料性附录)

导线或仪器设备绝缘性、电极接地电阻与极差检测方法

G.1 导线或仪器设备绝缘性检测

G.1.1 绝缘性例行检测

- a) 一个独立测区的观测工作之前和结束之后应进行漏电检测；
- b) 每日开工与收工，新测站布设或极距变换以及导线被迫浸水作业应进行漏电检测；
- c) 在水系发育、空气潮湿地区或雨季作业应进行漏电检测；
- d) 在遇到观测数据不稳或发生畸变时，应进行漏电检测。

G.1.2 绝缘性检测方法

导线或仪器设备的绝缘性检测应用兆欧表测定，检测方法参见图G.1。检查仪器设备绝缘电阻时，兆欧表E端接设备外壳，L端接于仪器接线柱上；检查导线对地绝缘电阻时，兆欧表E端接地，L端接于被检查的线路上；检查导线绝缘电阻时，兆欧表E端接导线最外层绝缘层上，L端接线芯上。

供电导线的漏电检查可轮流断开供电电极，测量其漏电电流。当供电线系统有微弱漏电时，要求因漏电引起的等效电流应小于 $\pm 1.5\%$ ，等效电位差应小于 $\pm 1.5\%$ 。供电导线的绝缘电阻应满足6.1.5条的要求。

测量导线的漏电检查一般可在测站设一电极，分别与M和N线串接成回路，然后断开M或N极，测量其漏电电流。导线的绝缘电阻应满足6.1.6条的要求。测量导线不允许漏电，若漏电应立即予以排除。

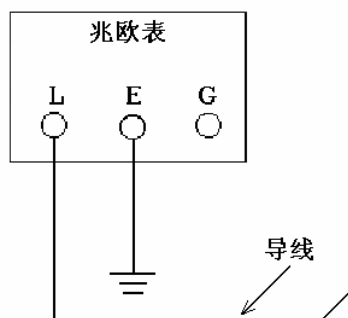


图 G.1 导线对地绝缘电阻的检测

应注意事项：

- a) 不能在线路、电缆或仪器带电的情况下测量其绝缘电阻。测量前被测线路或仪器必须切断电源和负载，并进行放电；已用兆欧表测过的仪器若要再次测量，则必须先接地放电。
- b) 兆欧表测量时要远离大电流导体和外磁场。
- c) 与被测设备的连接导线应使用兆欧表专用线或绝缘强度高的单芯多股软线，连接导线不要绞在一起，以免影响测量准确度。
- d) 测量过程中，如果指针指向“0”位，表示被测设备短路，应立即停止转动手柄。
- e) 测量过程中手或身体不得触及被测量线路、电缆或仪器，以防触电。
- f) 漏电检查时应通知所有在线人员。

g) 进行漏电检查的电源电压一般应小于 300V，潮湿地区应小于 180V。

## G.2 电极接地电阻检测

供电电流从接地的供电电极E向周围大地散流时，土壤呈现的电阻值R叫接地电阻。常规测量接地电阻的原理电路见图G.2。供电电极E处的接地电阻R等于E点与接地电极P点间的电位U与通过接地电极C点流入大地中电流I的比值 $R=U/I$ 。为减少测量误差，电压U应使用高内阻电压表或电位计型接地电阻测量仪测量。

供电电极的接地电阻是两个电流引线接地点之间的电阻；而接收电极的接地电阻是两个电位引线接地点之间的电阻。

供电电极的接地电阻测量一般可在开始供电前，断开连接在发射机输出端的供电导线，接入电阻测量仪进行测量。供电电极的接地电阻应满足工作所需电流的要求。

接收电极的接地电阻测量一般可通过仪器自带的功能测量，也可以通过断开连接在接收机输入端的接收线，接入电阻测量仪进行测量。接收电极的接地电阻应满足7.4.2条的要求。

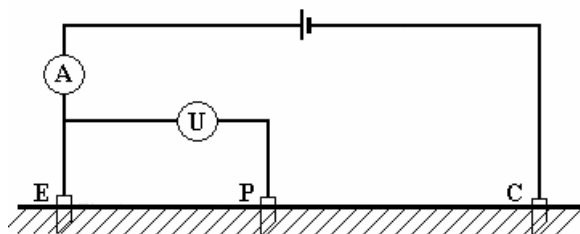


图 G.2 接地电阻测量原理图

## G.3 极差检测

不极化电极极差测量，在室内可将多个不极化电极放在盛有少量水的塑料盆中，用电压表逐个测量两个不极化电极彼此之间的直流电位差约10~30秒，极差稳定者较好，其值变化应 $\leq 10\%$ 。在野外可用电压表测量两个接地不极化电极之间的直流电位差约10~30秒，其值变化应 $\leq 10\%$ 。对电位差变化较大的不极化电极进行技术处理使之性能稳定，否则将不合格者剔除。

## G.4 检测记录

仪器设备或导线的漏电、绝缘性检查，以及电极接地电阻、极差检测的结果均应记录在野外观测工作记录表中。

附 录 H  
(资料性附录)  
CSAMT 法野外观测工作记录

表 H.1 野外观测工作记录表

工区: _____					
$A$ 极坐标: _____ $B$ 极坐标: _____					
工作装置几何参数: $\overline{AB}$ : _____ m $\overline{MN}$ : _____ m					
接收机型号及编号: _____ 发射机型号及编号: _____					
操作员: _____ 记录员: _____ 日期: _____ 天气: _____					
点号 / 线号	收发距 (m)	频率范围 (Hz)	数据块标识	测点描述 (地质描述、地形地物、电磁干扰源等)	备注

附 录 I  
(资料性附录)  
CSAMT 数据处理方法

目前国内外常用的 CSAMT、MT 数据反演方法 (参见表 I.1、I.2、I.3)

表 I.1 静态位移校正方法

序号	名称		参考文献	备注
1	相位空间滤波方法		(1)何继善等编译, 1990, 可控源音频大地电磁法, 中南工业大学出版社, 长沙, P.110-111. (2)罗延钟, 万乐, 1996, 可控源音频大地电磁法, 电法勘探新进展, 地质出版社, 北京, P.39-40.	
2	空间滤波方法	平衡移动平均空间滤波 (TMA)	Zonge Engineering & Research Orgnazition, Inc., 2000, ASTATIC Documentation Version 3.10.	
3		定长滑动平均空间滤波 (FLMA)	Zonge Engineering & Research Orgnazition, Inc., 2000, ASTATIC Documentation Version 3.10.	
4		自适应空间滤波 (AMA)	Torres-Verdin, Bostick, 1992, Principles of spatial sursace electric field filtering in magnetotellurics: electromagnetic array profiling (EMAP), Geophysics, Vol.57, P.603-622.	
5		中值空间滤波	罗延钟, 万乐, 1996, 可控源音频大地电磁法, 电法勘探新进展, 地质出版社, 北京, P.37-39.	
6	小波多尺度分析方法		汤井田, 何继善著, 2005, 可控源音频大地电磁法及其应用, 中南大学出版社, 长沙, P.197-200.	

表 I.2 地形校正方法

序号	名称	参考文献	备注
1	比值法	Michel Chouteau and Karl Bouchard, 1988, Two-dimensional terrain correction in magnetotelluric surveys, Geophysics, Vol.53, P.854-862.	
2	二维带地形反演方法	Scott MacInnes, Mykle Raymond March, 2006. Zonge Engineering and Research Organization, Inc. SCS2D DOCUMENTATION ZONGE Data Processing Two-Dimensional, Smooth-Model CSAMT Inversion version 3.00	
3	三维带地形反演方法	国土资源部“十五”重点科技项目《多参数反演技术》研究成果报告——带地形的 MT 三维反演方法研究(师学明, 2005, 中国地质大学(武汉))	

表 I.3 近场校正方法

序号	名称	参考文献	备注
1	等效电阻率全频域视电阻率近场校正法	汤井田, 何继善编著, 2005, 可控源音频大地电磁法及其应用, 中南大学出版社, 长沙, P.77-80.	
2	分段逼近全频域视电阻率近场校正法	罗延钟, 万乐, 1996, 可控源音频大地电磁法, 电法勘探新进展, 北京, 地质出版社, P.31-37.	

附 录 J  
(资料性附录)  
CSAMT 数据解释方法

CSAMT法使用有限长接地导线电流源向地下发送不同频率的交变电流，通常是在地面一定范围内——“远区”测量正交的电磁场分量，计算卡尼亚电阻率及阻抗相位，达到探测不同埋深地质目标体的目的。由于采用了人工控制的有限长接地导线电流源，限于现有台式计算机内存和运算速度，使CSAMT法数据反演问题变得复杂，目前尚未见关于CSAMT全频域二、三维反演算法的文献发表。目前国内外常用的CSAMT、MT数据反演方法（参见表J.1、J.2、J.3）除一维问题外，二维或三维正反演问题，都是在“远区”假设条件下，采用MT的算法针对CSAMT远区数据进行反演。

表 J.1 GDP-32 系统 CSAMT 数据解释方法软件

序号	方法软件名称	参考文献	备注
1	SCSINV (圆滑模型一维反演)	Scott MacInnes, Mykle Raymond, April 2006. Zonge Engineering and Research Organization, Inc. SCSINV Documentation Zonge Data Processing Smooth-Model CSAMT Inversion version 2.20.	包括数据处理模块（详见美国 Zonge Engineering and Research 组织 GDP-32 II 电法工作站相关文件。）
2	CSINV (一维反演方法)	Scott MacInnes, Mykle Raymond, June 2006. Zonge Engineering and Research Organization, Inc. CSINV Documentation Zonge Data Processing One-dimensional CSAMT Inversion Version 7.00.	
3	SCS2D (二维圆滑反演方法)	Scott MacInnes, Mykle Raymond March, 2006. Zonge Engineering and Research Organization, Inc. SCS2D Documentation Zonge Data Processing Two-Dimensional, Smooth-Model CSAMT Inversion version 3.00.	

表 J.2 V8 系统 CSAMT 数据处理解释方法软件

序号	方法软件名称	参考文献	备注
1	Bostick 反演	加拿大 Phoenix Geophysics 公司 V8 电法工作站相关文件	包括 CSAMT 数据处理软件 CMT-PRO (可控源类方法数据处理手册, 凤凰公司中国联络处版本号: 200801v3.2.1)
2	CMTX-SW (CSAMT 二维数据反演软件)	加拿大 Phoenix Geophysics 公司 V8 电法工作站相关文件	
3	MT 模型的一维反演	加拿大 Phoenix Geophysics 公司 V8 电法工作站相关文件	
4	MT 模型的二维带地形反演	加拿大 Phoenix Geophysics 公司 V8 电法工作站相关文件	

表 J.3 国内部分 MT 数据解释方法软件

序号	方法软件名称	参考文献	备注
1	地球物理资料综合处理解释一体化系统——MT 二维处理与反演子系统	中国石油大学(北京)研制(全国电法及电磁法勘探正反演软件推优会, 浙江大学, 2005 年 4 月 12~13 日.)	包括 MT 数据处理方法模块
2	MT 二维处理与反演软件	成都理工大学研制(全国电法及电磁法勘探正反演软件推优会, 浙江大学, 2005 年 4 月 12~13 日.)	包括 MT 数据处理方法模块
3	三维平地形 MT 快速松弛反演算法	谭捍东, 余钦范, John Booker, 魏文博, 2003, 大地电磁法三维快速松弛反演, 地球物理学报, 6 期。	
4	三维起伏地形带散度校正的 MT 矢量有限元(VFEE++)法	国土资源部“十五”重点科技项目《多参数反演技术》研究成果报告——带地形的 MT 三维反演方法研究(师学明, 2005, 中国地质大学(武汉))	

### 主要参考文献

- [1] 何继善等编译,可控源音频大地电磁法,长沙,中南工业大学出版社,1990.
- [2] 汤井田,何继善著,可控源音频大地电磁法及其应用,长沙,中南大学出版社,2005.
- [3] 朴化荣编著,电磁测深法原理,北京,地质出版社,1990.
- [4] 李金铭,罗延钟主编,可控源音频大地电磁法,电法勘探新进展,北京,地质出版社,1996.
- [5] A. A. 考夫曼,G. V. 凯勒著,王建谋等译校,频率域和时间域电磁测深,北京,地质出版社,1987.
- [6] 石昆法著,可控源音频大地电磁法理论与应用,北京,科学出版社,1999.
- [7] 陈乐寿,王光镔编著,大地电磁测深法,北京,地质出版社,1990.
- [8] 地质调查标准汇编——地球物理勘查第一分册,中国地质调查局,2006.
- [9] 地质调查标准汇编——地球物理勘查第二分册,中国地质调查局,2006.
- [10] Zonge Engineering & Research Orgnazition, Inc., 2000, Astatic Documentation Version 3.10.
- [11] Torres-Verdin, Bostick, 1992, Principles of spatial sursace electric field filtering in magnetotellurics: electromagnetic array profiling (EMAP), Geophysics, Vol. 57, P. 603-622.
- [12] Michel Chouteau and Karl Bouchard, 1988, Two-dimensional terrain correction in magnetotelluric surveys, Geophysics, Vol. 53, P. 854-862.
- [13] Scott MacInnes, Mykle Raymond, April 2006. Zonge Engineering and Research Organization, Inc. SCSINV Documentation Zonge Data Processing Smooth-Model CSAMT Inversion version 2.20.
- [14] Scott MacInnes, Mykle Raymond, June 2006. Zonge Engineering and Research Organization, Inc. CSINV Documentation Zonge Data Processing One-dimensional CSAMT Inversion Version 7.00.
- [15] Scott MacInnes, Mykle Raymond March, 2006. Zonge Engineering and Research Organization, Inc. SCS2D Documentation Zonge Data Processing Two-Dimensional Smooth-Model CSAMT Inversion version 3.00.
- [16] 美国 Zonge Engineering and Research 组织 GDP-32 II 电法工作站系列文件.
- [17] 加拿大 Phoenix Geophysics 公司 V8 电法工作站系列文件.
- [18] 标准化工作导则——第 1 部分:标准的结构和编写规则,中华人民共和国国家标准,2000.
- [19] 物探化探遥感勘查技术规程规范编写规定,中华人民共和国地质矿产行业标准,1997.
- [20] 电偶源频率电磁测深法技术规程,中华人民共和国地质矿产行业标准,2006.
- [21] 大地电磁测深法技术规程,中华人民共和国地质矿产行业标准,1997.
- [22] 可控源声频大地电磁法勘探技术规程,中华人民共和国石油天然气行业标准,2002.
- [23] 连续电磁剖面法勘探技术规程,中华人民共和国石油天然气行业标准,1997.
- [24] 石油大地电磁测深法技术规程,中华人民共和国石油天然气行业标准,1999.
- [25] 大地电磁测深仪使用与维护,中华人民共和国石油天然气行业标准,2000.
- [26] 煤炭电法勘探规范,中华人民共和国煤炭行业标准,2000.