

# 第3章 激发极化法

## # 3.1 激发极化法的理论基础

1. **激发极化效应**：物质在充电和放电过程中产生**随时间缓慢变化的附加电场**的现象，称为激发极化效应（简称**激电效应**，Induced Polarization, IP）。
2. **极化**：在一定的条件下，某些物质或系统的正、负电荷发生分离，而使其电性偏离原平衡状态，称这种状态为极化。
3. **极化类型**：
  - (1) 自然电场条件下：自然极化
  - (2) 人工电场条件下：激发——使其极化(激发极化)
4. **激发极化法**：是以地下岩矿石在**激发极化效应差异**为基础，通过观测和研究大地激电效应探查地下地质情况和寻找有用矿产的一种电法勘探，又称激电法
5. **激发极化分类**：
  - (1) 直流电——直流(时间域)激发极化法
  - (2) 低频交流电——交流(频率域)激发极化法
6. **重要性**：激电法是地球物理勘查的基本方法之一
7. **应用领域**：金属或非金属固体矿产勘查；地下水资源勘查；油气藏勘查等

### 岩石和矿石的激发极化机理

- 电子导体的激发极化机理

1. 自然条件下，平衡电位：稳定的双电层的电位，记为 $\epsilon_T$

## 2. 双电层:

- (1) 紧密层: 正电荷紧密排列
- (2) 扩散层: 正电荷可自由扩散

## 3. 特点: 双电层整体显示电中性

## 4. 有外电场激励时, 有外电流激励(激发), 双电层电荷转移和重新分布(极化)

## 5. 电荷转移规律:

(1) 导体内: 电场驱动, 自由电子逆向转移; 电流流入端负电荷堆积, 形成“阴极”; 电流流出端, 正电荷堆积, 形成“阳极”。

(2) 导体外(溶液中): “阴极”附近正离子聚集; “阳极”附近负离子聚集

由于电化学反应(离子交换)速度较慢, 而致界面两侧异性电荷堆积, 破坏平衡电位

## 6. 过电位的变化过程: 过电位一旦建立, 必然要通过周围的溶液放电, 当新过电位产生和放电最终达到平衡时, 过电位趋于稳定值, 充电结束

## 7. 外电场撤销, 不能产生新过电位, 且继续放电, 最终消失, 恢复平衡电位

## 8. 电荷转移和化学反应速度有限, 建立平衡需要时间, 因此有迟缓性

### • 离子导体的激发极化机理

## 1. 模型: 粘土矿物颗粒; 双电层形成机理: 粘土矿物颗粒“吸附”负离子(成固相, 不能自由移动); 负离子又“吸引”溶液中的正离子, 形成双电层

## 2. 极化与放电过程:

- (1) 外电场驱动; 阳离子转移, 双电层形变;
- (2) 外电场撤销, 双电层复原

## 3. 薄膜极化; 条件: 粘土矿物颗粒间孔隙直径与扩散层厚度相当

## 4. 双电层形成机理: 与双电层形变双电层形成类似

## 5. 极化过程: 外电场驱动, 窄孔隙处, 电流流出端阳离子堆积; 宽孔隙处相反。形成化学浓度梯度和电势垒。

## 6. 放电过程: 外电场撤销, 浓度梯度恢复平衡, 电势垒放电, 双电层复原

## 7. 电渗析: 在外电场的作用下, 粘土矿物中的铝、镁离子被强行“拉”入溶液中的现象

## 8. 极化与放电过程：

- (1) 外电流驱动，铝、镁离子（阳离子）被“拉”入溶液中；
- (2) 外电流撤销后，铝、镁离子重新回到粘土矿物颗粒内部，形成激电效应

## 9. 三种形式，粘土矿物均扮演着重要角色。

实验资料证明，不含粘土矿物的离子导体物性标本均不能产生明显的激发极化效应。

# 稳定电流场中的岩石和矿石的激发极化特性

## 1. 激发极化的类型：

- (1) 面极化：激发极化效应发生在极化体与围岩溶液的界面上；
- (2) 体极化：极化单元成体分布在整个极化体中；

注意：“面极化”和“体极化”只具有**相对意义**。从微观上看，**所有激发极化都是面极化**。野外观测到的激电效应是**无数微小单元**（电子导体或/和离子导体）的整体激电效应，且**无法区分**，也可认为是一种“体极化”效应。

## 2. 面极化实验现象总结：金属矿石和石墨一类的电子导体能产生明显的过电位。供电电流不同时，过电位也不同。

## 3. 时间特性：

- (1) 过电位充放电总体趋势相同
- (2) 放电与充电曲线呈倒像相似
- (3) 大电流密度时，充电时间短

## 4. 其他特性：

- (1) 小电流时，过电位与电流密度成正比，阴、阳极极化均势；
- (2) 大电流时，过电位与电流密度不成正比，阴阳极曲线分离，显示阳极优势或阴极优势；

## 5. 体极化特性：

## 6. 极化率：激发极化效应产生的二次场电位差在极化总场电位差中所占的份额（百分比），记为 $\eta$ ，无量纲

# 交变电流场中的岩矿石激发极化性质

1. 稳定电流场：电场随时间变化 ----- 时间域电法；
2. 交变电流场：电场随频率变化 ----- 频率域电法
3. 幅频特性：总场幅值随频率变化曲线；
4. 相频特性：总场电位差相对于供电电流的相移随频率变化曲线。
5. 总场随频率变化特点：总场幅值随频率增大而减小，低频强，高频弱；
6. 相差随频率变化特点：总中频取得相位差极值，高频和低频相位差均出现极小值，极限情况相差为0，即二次场与供电电流同步变化。

### 不同岩矿石幅频与相频特性：

1. 各种岩矿石具有不同的频率特性
2. 时间域充、放电快的岩石在高频段总场快速衰减，并取得相位极值；
3. 时间域充、放电慢的岩石在低频段总场快速衰减，并取得相位极值；
4. 存在激电效应时，交流电阻率是频率的复变函数，故称复电阻率

### 频率特性与时间特性的关系

1. 时间域视电阻率：

$$\rho(T) = K \frac{\Delta U(T)}{I(T)}$$

2. 电法勘探中：大地导电和激电效应可视为“线性”和“时不变系统”，满足拉普拉斯变换，利用拉氏变换可实现时-频转换，即频率域激电和时间域激电在本质上是是一致的。

### 体极化特性和频率特性的定量描述

- 柯尔-柯尔模型(Cole-Cole):

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\}$$

## 描述频率域激电效应的参数

### 1. 复电阻率频谱:

$$\rho(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\}$$

特点: 能获得比较丰富的激电信息; 实际勘探工作效率很低, 不利于普查

### 2. 频散率:

$$P(f_D, f_G) = \frac{|\Delta \tilde{V}(f_D)| - |\Delta \tilde{V}(f_G)|}{|\Delta \tilde{V}(f_G)|} \times 100\%$$

### 3. 参数特点:

- (1) 极限频散率与极限极化率相等;
- (2) 极限和非极限频散率和极化率具有相同的性质, 可用极限极化率表示
- (3) 变频激电法既是采用频散率作为勘探参数的。

### 4. 复电阻率的相位:

$$\rho(i\omega) \Rightarrow \varphi$$

物理意义: 激电效应导致的总场电位差相对供电电流发生的相位移

### 5. 参数特点:

- (1) 激电效应越强, 相位移越大;
- (2) 相位移与频谱曲线的斜率或电场幅值随频率变化的变化率近似成正比
- (3) 可以测量相位移实现相位激电勘探 (测量相位困难, 暂未实用化)

## 岩矿石的极化率与频散率

### • 极化率 $\eta$ :

$$\eta(T, t) = \frac{\Delta V_2(t)}{\Delta V(T)} \times 100\%$$

### • 频散 $P$ :

$$P = \frac{\Delta V_{f_1} - \Delta V_{f_2}}{\Delta V_{f_2}} \times 100\%$$

1. 岩、矿石的 $\eta$ 和 $P$ 除了与观测时的充、放电时间有关外，还与岩矿的成分、含量、结构及含水性有关。
2. 金属矿、石墨化和碳化地层的 $\eta$ 和 $P$ 都较高，可达 $\eta \sim \eta \times 10\%$ ；岩石（不含电子导体） $\eta$ 和 $P$ 通常很低，一般为2~3%，少数能达4~5%。
3. 视参数：视极化率、视频率散率、视复电阻率、视相位
4. 视参数的含义：在电场有效作用范围内各种岩、矿石极化率或频散率的综合影响值——视极化率或视频率散率。
5. 无论是面极化还是体极化，极化率参数均能较好地衡量岩（矿）石的激发极化性质，具有普适性。测量条件不同时，不能简单对比！
6. 影响岩石极化率参数的因素：  
岩石的成分，含量，结构，含水性
7. 常见岩矿石的极化率：
  - (1) 岩石：一般小于 2%，个别能达到 4% - 5%；
  - (2) 块状或浸染状硫化物矿：普遍较高，大于 10%；
  - (3) 石墨及石墨化岩石：分布跨度大，0.5% - 30%；
  - (4) 氧化矿：很低，小于 2%。
8. 视极化率 $\eta_s$ 和视频率散率 $P_s$ 的影响因素
  - (1) 装置类型
  - (2) 极化体的导电性
  - (3) 装置相对于极化体的位置
  - (4) 充放电时间(或采用的信号频率组合)

## 激发极化场的计算和模拟方法

### • 面极化电场的计算与模拟方法

1. 结论：激电二次场在球外的分布于一个位于球心的电流偶极子的电场相同。
2. 电偶极距随参数变化特点：

- (1) 与激发电流密度成正比，激发电流越大，偶极矩越强；
- (2) 与球体半径平方成正比，即球体表面积越大偶极矩越强；
- (3) 与面极化系数成正比；
- (4) 随异常体相对电阻率减小单调增加，即极化体的导电性越好，激电效应越强

### 3. 面极化场的模拟方法

- (1) 解析法
- (2) 数值计算，理论数值模型，计算机求解
- (3) 物理模拟（实验室水槽模型，或物理模型）

### 4. 面极化场模拟的特点：

- (1) 与由于引入了不连续的电位边界条件，与电阻率法相比模拟难度大，计算量大；
- (2) 求频率域参数时，面极化系数 $k$ 是频率的复变函数，数值计算需要用复数类型；
- (3) 按一定比例模拟时，边界条件须作相应的比例缩放处理；
- (4) 实际模型实验时，模拟过程较难控制，模拟结果常大于实际测量结果

### • 体极化电场的计算

1. 只要无激发极化的一次场电位表达式中各个介质的电阻率使用等效电阻率替换，便可得到体极化总场电位。
2. **结论：**体极化球体激电二次场在球外的分布与一个位于球心的电流偶极子的电场相同。其强弱由等效电流偶极子的电流偶极矩确定。
3. **二次场与各参量的关系：**
  - (1) 随外电流密度增大而增强
  - (2) 极化球体的体积越大，二次场越强
  - (3) 球体的极化率越大二次场越强
  - (4) 良导体和高阻极化体二次场都趋于零，中等导电极化体二次场最强

## # 3.2 激发极化法的仪器设备

---

### 时间域激发极化法的仪器

- 供电部分——发送/发射器

1. 电源变流器：直流变交流；
  2. 变压器：升高电压；
  3. 整流器：获得高压直流电；
  4. 换向器：切换输出正负极性；
  5. 程序控制器：控制电流、电压、换向、占空时间控制等。
- 接收机

## 交流激发极化法的仪器

- 发射
  1. **逆变器**：直流变换为低频方波电流；
  2. **稳流器**：控制输出电流稳定；
  3. **保护电路**：系统过载自动保护；
  4. **程序控制器**：产生低频信号、稳流脉冲、保护信号等使各部分协调工作。
  5. **信号源**：多频振荡器，一个主频，可控输出一系列分频信号，可作为控制器的时钟也是输出信号的源。
- 接收
  1. **前置放大**：接收输入信号、滤除50Hz及其倍频干扰；
  2. **主放大器**：将有效输入信号放大到一定量级；
  3. **检波电路**：将放大的信号变换成直流信号；
  4. **读数电路**：由比较和基准电路组成，实现直读视频率散率。
  5. **电源**：蓄电池，干电池箱、发电机+整流源；
  6. **发射机**：用于向地下发送信号或供电的装置；
  7. **激电接收机**：用于数据采集；
  8. **不极化电极**：固体不极化电极；
  9. 供电电线及接收线。
- **野外常用的测量装置和工作方法**：与电阻率法相同。联合剖面、中间梯度和电测深装置；交流激电法常用偶极装置。



## # 3.3 激发极化法的常用装置及其激电异常

---

### 中间梯度装置

#### (1)球形极化体中梯激电异常（围岩不极化）

##### 1. 主剖面视极化率异常特点：

- (1) 异常幅度与球体体积成正比
- (2) 异常幅度与相对电阻率关系复杂
- (3) 异常幅度与极化体极化率成正比
- (4) 异常幅度极值处于球心在地面的投影点

##### 2. 视极化率异常曲线特点：

- (1) 曲线呈中心对称
- (2) 在球心上方有极大值，两侧各有一个小于大于背景极化率的极小值；
- (3) 极化球体视极化率异常幅度与相对电阻率关系复杂；
- (4) 异常曲线与背景电阻率值交点的横坐标

$$x = \pm \frac{h_0}{\sqrt{2}}$$

- (5) 估计球体埋深——异常曲线半极值点弦长法

## 思考题

---

1. 什么是激发极化效应？

答：物质在充电和放电过程中产生随时间缓慢变化的附加电场的现象，称为激发极化效应（简称激电效应，Induced Polarization, IP）。

2. 试简述目前关于电子导体与离子导体激发极化机理基本假说的主要内容。

3. 试写出视极化率、视频率散率、视激电率的表达式，并说明各参量的具体含义。

答：

(1)视极化率 $\eta_s$ ：

$$\eta_s = \frac{\Delta V_2}{\Delta V} \times 100\%$$

(2)视频率散率 $P_s$ ：

$$P_s = \frac{\Delta V_{f_1} - \Delta V_{f_2}}{\Delta V_{f_2}} \times 100\%$$

(3)视激电率 $G_s$ ：

$$G_s = \rho_s^* - \rho_s$$

其中 $\Delta V_2$ ：断电后测得的剩余电压

$\Delta V$ ：施加的总电压。

$\Delta V_{f_1}$ ：在频率  $f_1$  下测得的电压变化。

$\Delta V_{f_2}$ ：在频率  $f_2$  下测得的电压变化。

$\rho_s^*$ ：视电导率，通常通过表面测量得到的电导率值。

$\rho_s$ ：真实电导率，通过更精确的方法或更深层的测量得到的电导率值。

4. 试利用中间梯度装置在球体主剖面上的视极化率近似公式推导出球体埋深与半极值弦长、拐点弦切距之间的关系

答：

5. 什么是等效电阻率法

答：用于测量地下不同深度的电阻率分布。这种方法通过在地表施加电流并测量电位差来推断地下岩层或矿体的电性特征，从而识别地下结构的变化。这种方法在地质勘探、环境研究、水文地质以及工程地质等领域有广泛应用。

6. 为什么说岩石均匀极化时地形不会导致视极化率的假异常？

(1) **均匀电性分布**：在均匀极化的岩石中，极化率在整个区域内是一致的。这意味着无论电极布置在何处，电极间的电压变化率都是一致的。均匀的电性分布使得地形变化对测量结果的影响可以忽略。

(2) **电场均匀分布**：当极化率均匀时，施加的电场在地下介质中的分布也相对均匀。因此，地形对电场分布的影响较小，不会显著改变电位差的测量结果。

(3) **对称性和均匀性**：由于极化特性的均匀性，电极所测得的电压变化反映的是均匀介质的整体性质，而不是局部地形变化。这种对称性和均匀性使得任何局部地形对测量的影响都被整体均匀的电性所平滑掉，从而不会产生假异常。

8. 激发极化法与电阻率法的优点和缺点

优点：

- (1) 不仅能发现致密块状金属矿体，还能用于寻找浸染状矿体
- (2) 能区分电子导体和离子导体产生的异常
- (3) 地形起伏不会产生假异常

缺点：

- (1) 矿化（黄铁矿化、石墨化的岩层）岩层产生强激电异常
- (2) 电磁耦合干扰给交流激电法资料的解释带来困难

9. 激发极化法与电阻率法的相比具有哪些异同点？

答：