

《地磁学与地电学》

第四讲 直流电法

陈 涛

地球物理学院
中国石油大学（北京）

2025/4/7

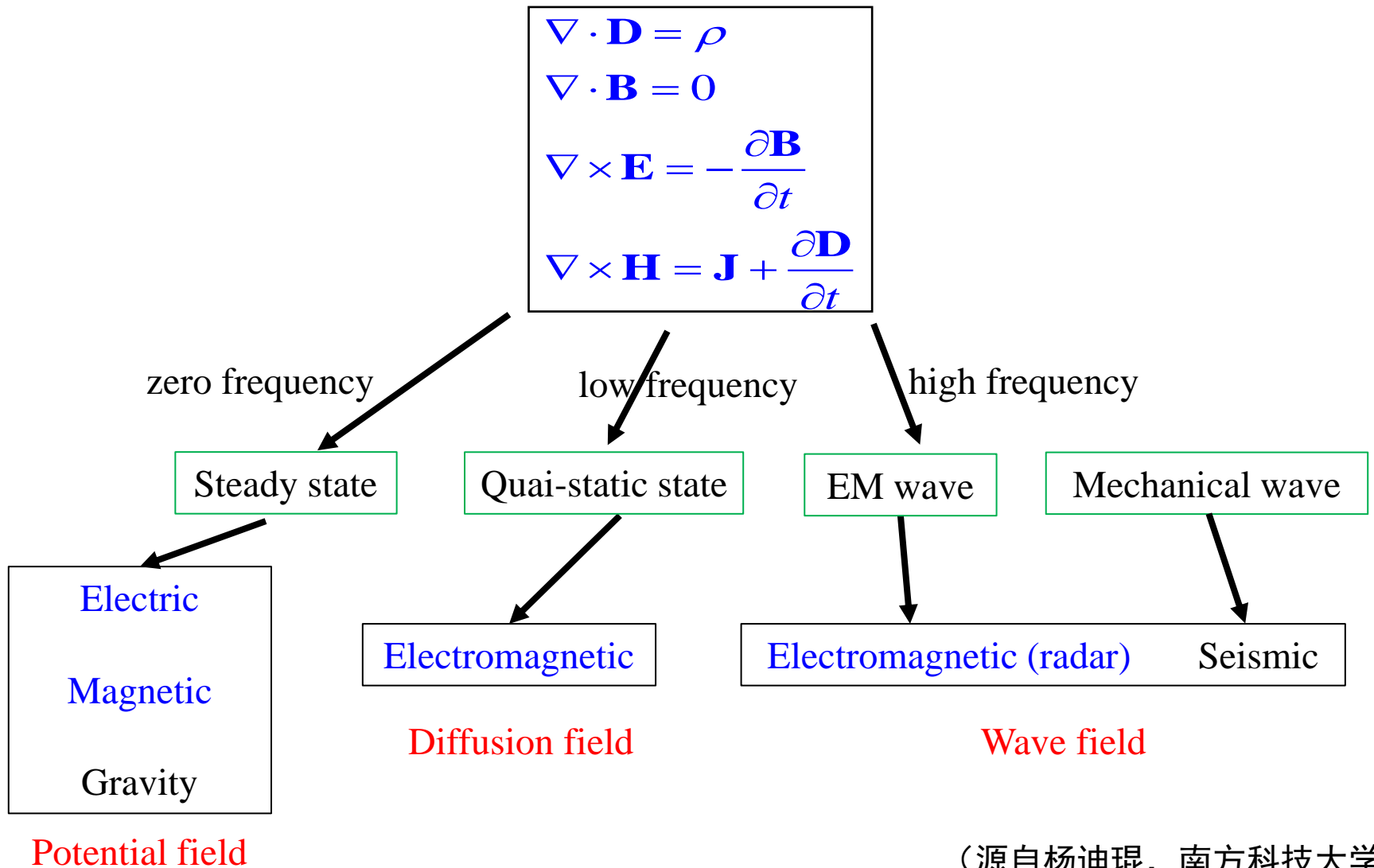
课前测试

□ 电法勘探的分类

□ 表征岩矿石电磁性质的参数

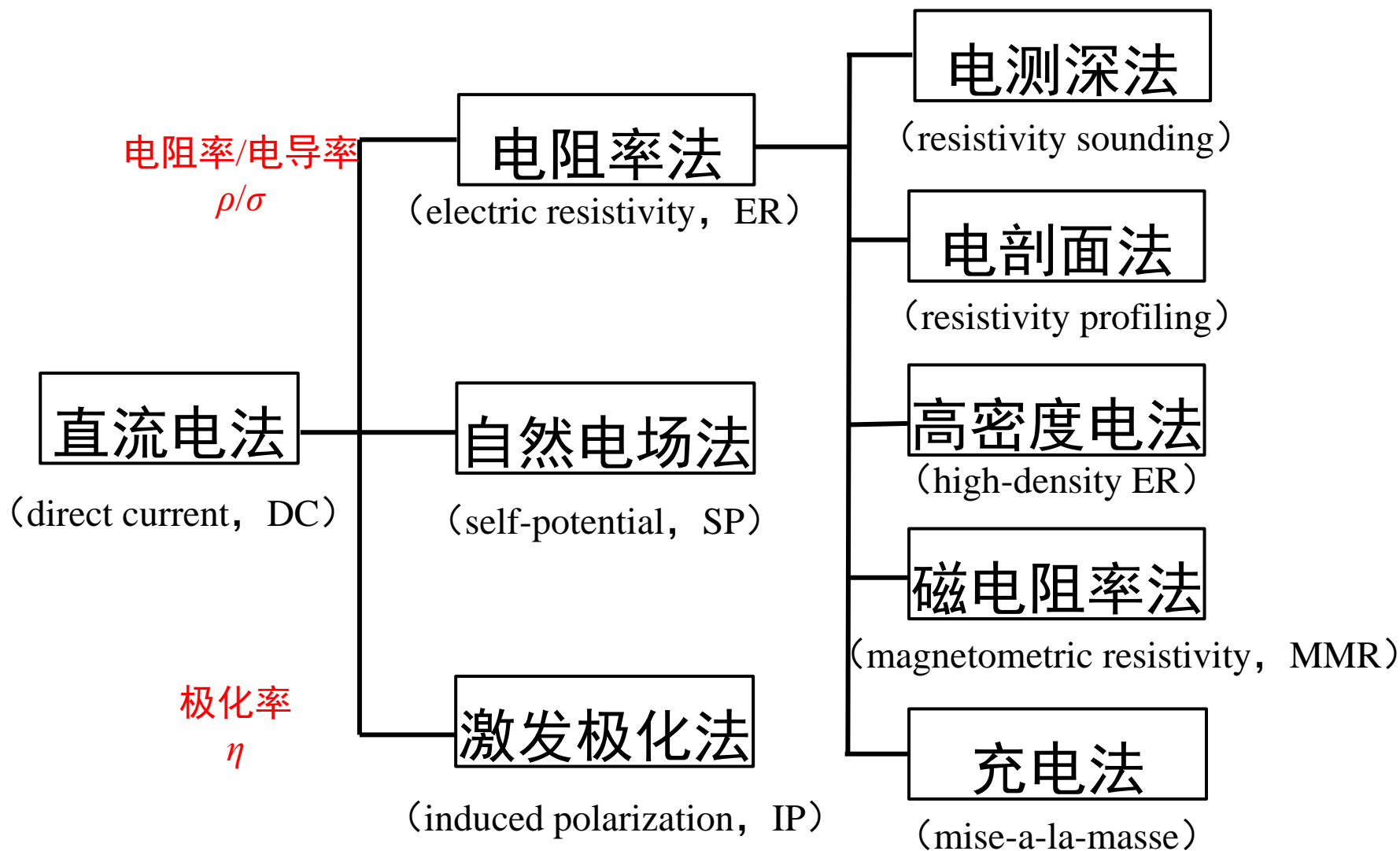


课前知识



(源自杨迪琨, 南方科技大学)

课前知识



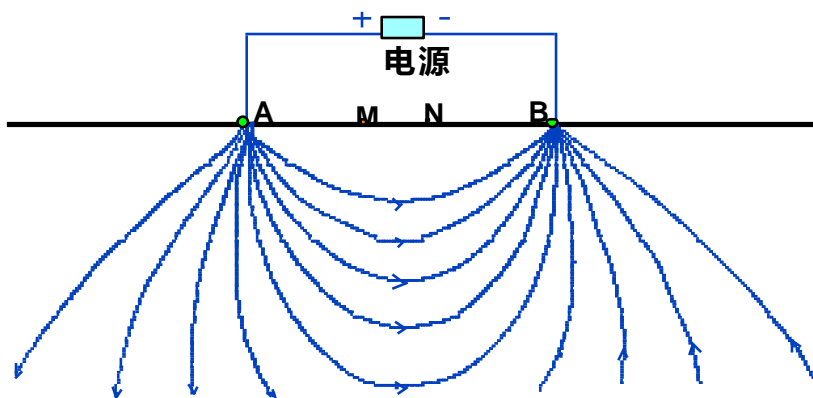
课前知识

在地球表面，除了存在局部稳定的**自然电场**外，我们还可以**通过电极向地下供直流电**以建立**稳定电场**，然后测量电极附近的电场分布。由于此电场与**地下介质的性质**及分布有关，因而可以据此研究地下介质的分布状态及变化规律，这类方法称为**直流电法（DC）**。直流电法中以岩、矿石**电阻率差异**为基础，通过研究稳定电场在地下半空间的分布规律来寻找矿产或解决其它地质问题的方法，称为**电阻率法（ER）**。

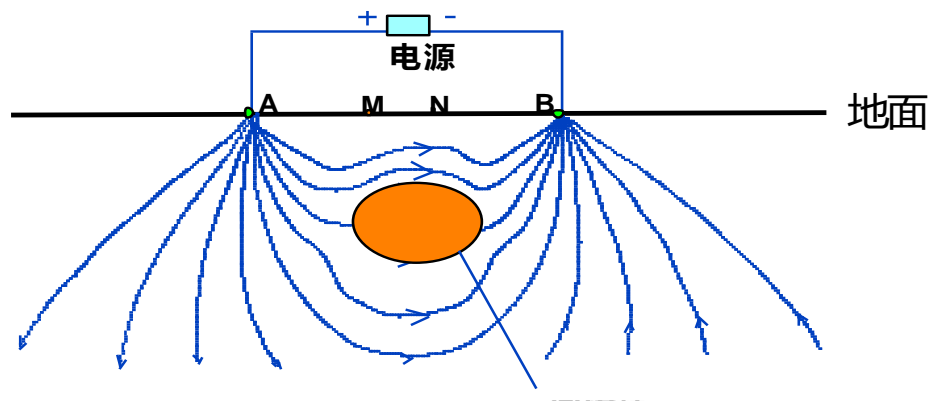
课前知识



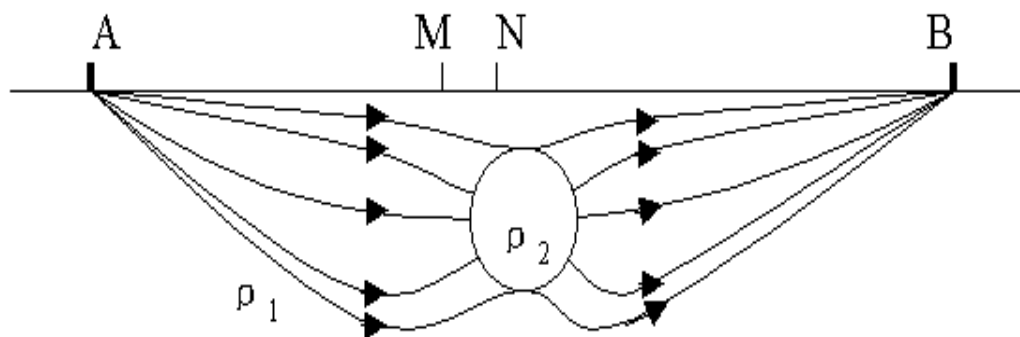
课前知识



均匀半空间



均匀半空间填充
高阻异常体



均匀半空间填充
低阻异常体

目 录

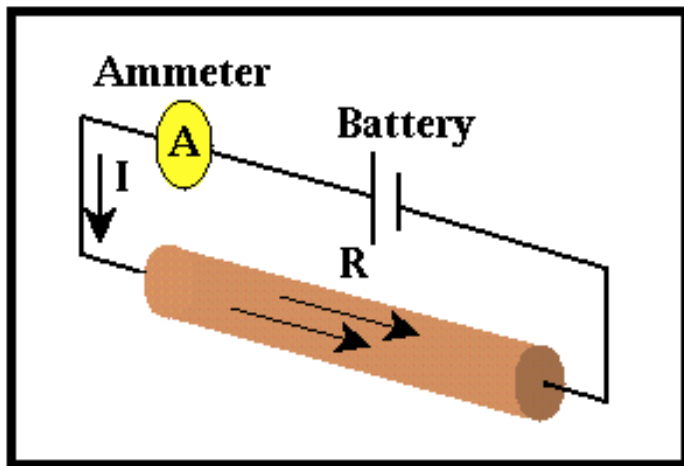
第一节 电阻率法

1. 稳定电流场的基本定律

1. 稳定电流场的基本定律

■ 欧姆定律

宏观形式：一段**均匀导体**上的电流强度*I*与这段导体两端的电位差 ΔU 成正比，而与其电阻成*R*反比，即：



$$\Delta U = IR$$

应用条件：这段**均匀导体**的横截面内，**电流密度是均匀的**。

1. 稳定电流场的基本定律

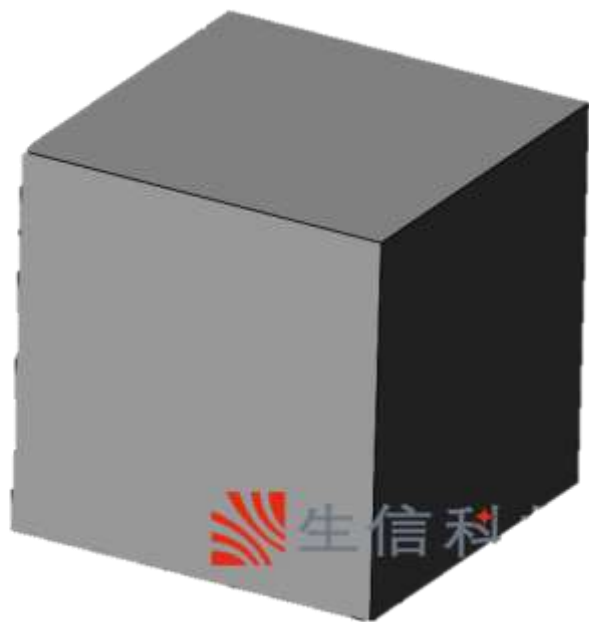
■ 欧姆定律

微分形式：导电介质中任意一点的电流密度矢量 \mathbf{j} ，其方向与该点的电场强度矢量 \mathbf{E} 一致，其大小与电场强度成正比，而与该点电阻率 ρ 成反比

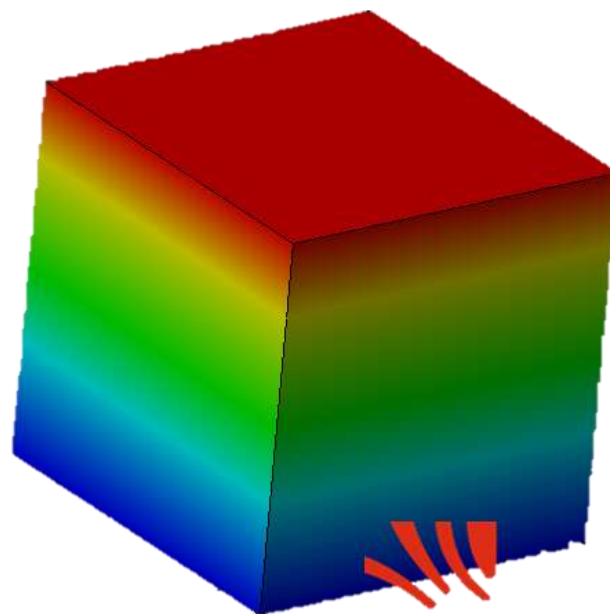
$$I = \frac{\Delta U}{R} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{j} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} = \sigma \mathbf{E}$$

应用条件：适合于任何形状的不均匀导电介质和电流密度不均匀分布的情况。在各向同性介质中， ρ 为标量。在各向异性介质中， ρ 为张量。

各项同性 VS 各项异性



ρ 为标量

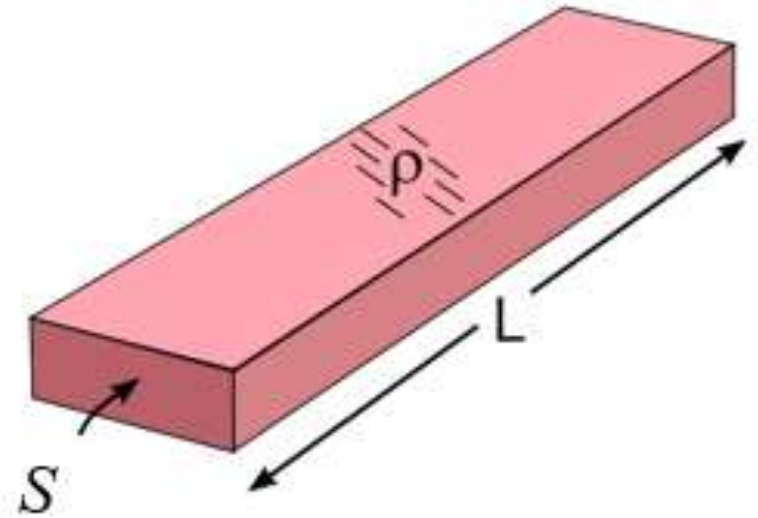


ρ 为张量

宏观形式→微分形式

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

$$\Delta U = IR = \frac{I \rho L}{S}$$



$$\mathbf{E} = \mathbf{e} \frac{\Delta U}{L} = \mathbf{e} \frac{I \rho L}{LS} = \mathbf{e} \rho \frac{I}{S} = \mathbf{e} \rho j = \rho \mathbf{j}$$

$$\mathbf{j} = \frac{\mathbf{E}}{\rho} = \sigma \mathbf{E}$$

1. 稳定电流场的基本定律

■ 基尔霍夫定律

地中电流的连续性

对于稳定电流场，包含电流强度为 I 的电流源在任意闭合面的通量表达式为

$$\oiint_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} dS = I$$

S 为包围电流源的闭合曲面， \mathbf{n} 为面元 dS 的单位法线矢量。上式即电荷守恒定律，它表明电荷既不能无中生有，也不能消灭。

1. 稳定电流场的基本定律

■ 基尔霍夫定律

地中电流的连续性

如果 S 面中不包含电流源，上式成为

$$\oiint_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} ds = 0$$

说明在稳定电流场中电流是连续的，即在任何一个闭合面内，无正电荷或负电荷的不断积累。其微分形式为：

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

在稳定电流场中，任何一点电流密度的散度恒等于零。

要从积分形式转换到微分形式，我们需要用到散度定理（也叫高斯定理）。散度定理将闭合表面上的通量积分与曲面所包围体积内的散度体积积分联系起来，数学表达式为：

$$\oint_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} ds = \int_V (\nabla \cdot \mathbf{j}) dV$$

其中：

- V 是由闭合曲面 S 所包围的体积；
- $\nabla \cdot \mathbf{j}$ 是电流密度向量 \mathbf{j} 的散度，表示单位体积内电流的“发散”程度。

根据图像中的积分形式 $\oint_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{n} ds = 0$ ，将其代入散度定理，我们得到：

$$\int_V (\nabla \cdot \mathbf{j}) dV = 0$$

这表明，对于任意的闭合曲面 S 所包围的体积 V ，散度 $\nabla \cdot \mathbf{j}$ 的体积积分为零。

1. 稳定电流场的基本定律

■ 基尔霍夫定律

稳定电流场的势场性

电流在空间的分布是稳定的，即不随时间而改变。因此，它和静电场一样是一种势场。在稳定电流场中任一点 M 处的电位 U ，等于将单位正电荷从 M 点移到无限远处，电场力所作的功

$$U = \int_M^{\infty} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

电场强度与电位有关系

$$\mathbf{E} = -\nabla U$$

1. 稳定电流场的基本定律

■ 基尔霍夫定律

稳定电流场的势场性

势场是一种无旋场，在地中由导电岩石组成的任一闭合回路中，电流场所作的功恒等于零，即

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

其微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

Stokes' theorem 是推导的关键，它将一个向量场沿着闭合曲线的线积分与其旋度在该曲线所包围曲面上的积分联系起来。数学表达式为：

$$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{I} = \iint_S (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{A}$$

1. 稳定电流场的基本定律

■ 均匀介质中稳定电流场的微分方程

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \qquad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} \qquad \mathbf{E} = -\nabla U$$

$$\nabla \cdot \mathbf{j} = \nabla \cdot \sigma \mathbf{E} = -\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = 0$$

在电导率均匀的介质中， σ 为常数，上式变为

$$\nabla^2 U = 0$$

在均匀介质中，稳定电流场的电位满足拉普拉斯方程

1. 稳定电流场的基本定律

■ 均匀介质中稳定电流场的微分方程

直角坐标系 (x, y, z)

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$$

圆柱坐标系 (r, φ, z)

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$$

球坐标系 (r, φ, θ)

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0$$

1. 稳定电流场的基本定律

■ 地中稳定电流场的边界条件

第一类边界条件（极限条件） 无穷远/无穷近

✓ 当观测点离供电点 $A(I)$ 很远时, $r \rightarrow \infty$, $U = 0$

✓ 当观测点离供电点 $A(I)$ 很近时, $r \rightarrow 0$, $U \approx \frac{I\rho}{2\pi r}$

第二类边界条件（地面条件） 地面与空气交界面

$$j_n = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial n} = 0$$

在地面上（除 A 点外）电流密度法向分量等于零。如果不为零，则电流就要流入空气。

1. 稳定电流场的基本定律

■ 地中稳定电流场的边界条件

第三类边界条件（衔接条件） 界面两侧 ρ 有限时

✓ 电位连续：

$$U_1 = U_2$$

✓ 电流密度法向分量连续：

$$j_{1n} = j_{2n} \longleftrightarrow -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = -\frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial n}$$

✓ 电场强度切向分量连续：

$$E_{1t} = E_{2t} \longleftrightarrow \frac{\partial U_1}{\partial t} = \frac{\partial U_2}{\partial t} \longleftrightarrow j_{1t} \rho_1 = j_{2t} \rho_2$$

为了推导这一点，我们在界面处构造一个小的“高斯柱体”(Gaussian pillbox)，其底面和顶面分别位于介质1和介质2中，侧面垂直于界面，高度非常小（如图所示）。

- **高斯柱体的体积积分：**对电荷连续性方程 $\nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ 在柱体内进行体积分：

$$\iiint_V \nabla \cdot \mathbf{j} dV = 0$$

根据散度定理，体积分可以转换为面积分：

$$\oiint_{\partial V} \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A} = 0$$



- **面积分贡献：**

- 底面（在介质1中，面积为 ΔA ，法向量为 $-\hat{n}$ ）：贡献为 $-\mathbf{j}_1 \cdot \hat{n} \Delta A$ 。
- 顶面（在介质2中，面积为 ΔA ，法向量为 \hat{n} ）：贡献为 $\mathbf{j}_2 \cdot \hat{n} \Delta A$ 。
- 侧面：由于柱体高度趋于零，侧面面积趋于零，侧面贡献可以忽略。

总面积分为：

$$(\mathbf{j}_2 \cdot \hat{n} - \mathbf{j}_1 \cdot \hat{n}) \Delta A = 0$$

电荷不积累：在稳态情况下，电荷不会在界面处积累。如果法向分量不连续（即 $j_{1n} \neq j_{2n}$ ），就会导致电荷在界面处堆积（因为流入和流出的电流不等），这违反了稳态假设。

电流的连续性：法向分量 j_n 表示电流通过界面的流量，连续性保证了电流在界面处不会中断。

在静电场中，麦克斯韦方程之一为：

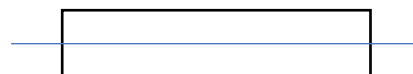
$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

这表明电场 \mathbf{E} 是一个无旋场，可以引入电势 ϕ ，使得 $\mathbf{E} = -\nabla\phi$ 。我们需要证明切向分量 $\mathbf{E}_{1t} = \mathbf{E}_{2t}$ 。

为了推导这一点，我们在界面处构造一个小的闭合回路（矩形回路），其长边平行于界面（沿切向），短边垂直于界面，短边长度趋于零（如图所示）。

- **环路积分：**对 $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ 应用 Stokes' theorem:

$$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{A} = 0$$



- **环路贡献：**

- 底边（在介质1中，长度为 Δl ，方向为切向 \hat{t} ）：贡献为 $\mathbf{E}_1 \cdot \hat{t} \Delta l = E_{1t} \Delta l$ 。
- 顶边（在介质2中，长度为 Δl ，方向为 $-\hat{t}$ ）：贡献为 $\mathbf{E}_2 \cdot (-\hat{t}) \Delta l = -E_{2t} \Delta l$ 。
- 两侧边：由于侧边长度趋于零，侧边贡献可以忽略。

总环路积分为：

$$E_{1t} \Delta l - E_{2t} \Delta l = 0$$

$$E_{1t} = E_{2t}$$

1. 稳定电流场的基本定律

■ 地中稳定电流场的边界条件

第三类边界条件（衔接条件） 界面两侧 ρ 有限时

$$\dot{j}_{1n} = \dot{j}_{2n}$$

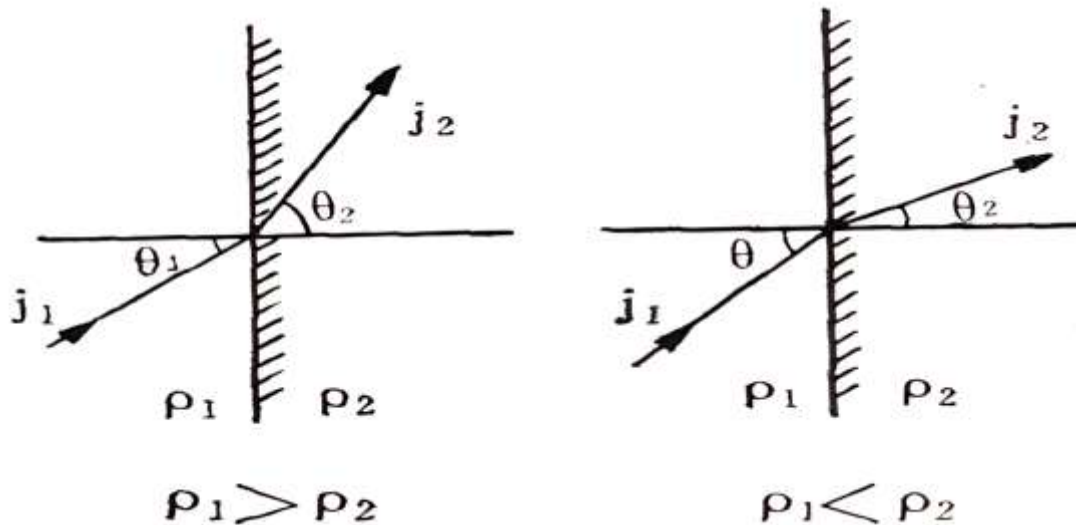
$$\dot{j}_{1t}\rho_1 = \dot{j}_{2t}\rho_2$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\dot{j}_{2t}}{\dot{j}_{1t}} = \frac{\dot{j}_{2t} / \dot{j}_{2n}}{\dot{j}_{1t} / \dot{j}_{1n}} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1}$$

1. 稳定电流场的基本定律

■ 地中稳定电流场的边界条件

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1}$$

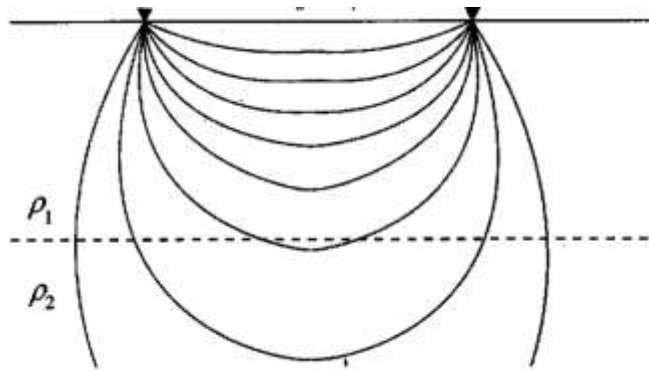


电流密度在分界面上的变化

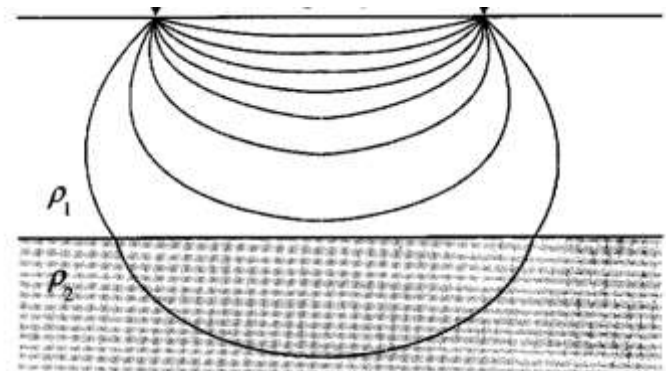
1. 稳定电流场的基本定律

■ 地中稳定电流场的边界条件

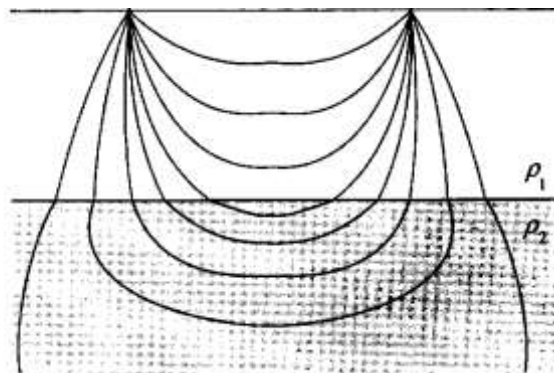
$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1}$$



$$\rho_2 = \rho_1$$



$$\rho_2 > \rho_1$$



$$\rho_2 < \rho_1$$

目 录

第一节 电阻率法

1. 稳定电流场的基本定律
2. 简单介质中点电源的电场

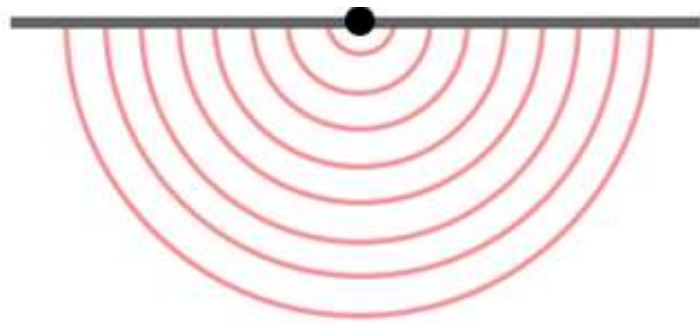
2. 简单介质中点电源的电场

■ 简单介质



Full-Space

- 电阻率均匀
- 全空间
- 各向同性



Half-Space

- 电阻率均匀
- 半空间
- 各向同性

2. 简单介质中点电源的电场

■ 全空间一个点电源的电场

在直流电法工作中，为建立地下电场，总是需要两个**接地的电极A和B**，电流从A极输入地下，又通过B极从地下流出，形成闭合电路。这两个电极称为**供电电极**。当两电极的大小比它们与观测点的距离小得多时，可以把这两个电极看成两个“点”，所以它们被称为**点电源**。

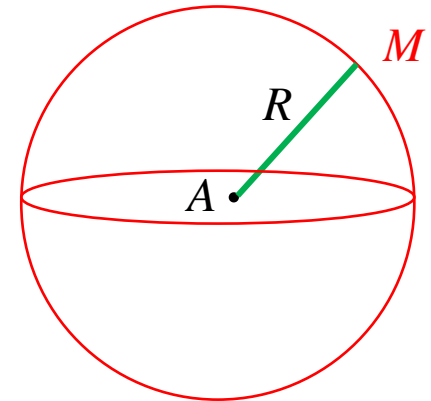
如果我们着眼于研究某一个电极周围的电场，可将另一个电极置于很远，以至在研究范围内其影响可忽略不计的地方，这个距离在数学上称为无穷远，这时我们研究范围内的电场就是一个**点电源的电场**。

2. 简单介质中点电源的电场

■ 全空间一个点电源的电场

点电流源的电位满足Laplace方程：

$$\nabla^2 U = 0$$



假设在电阻率为 ρ 的均匀各向同性的无限介质中，有一点电流源 A ，其电流强度为 I ，求距离 A 点为 R 处 M 点的电位公式。

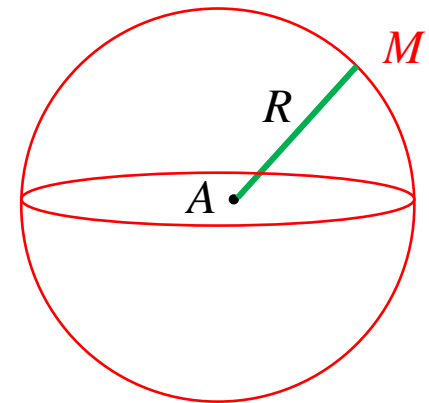
此问题具有球形对称性，故选用球坐标，把原点置于 A 点。由于任一点的电位与方位角 φ 和极角 θ 无关：

2. 简单介质中点电源的电场

■ 全空间一个点电源的电场

点电流源的电位满足Laplace方程：

$$\nabla^2 U = 0$$



$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial U}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} = 0$$



$$\frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial U}{\partial R} \right) = 0$$

2. 简单介质中点电源的电场

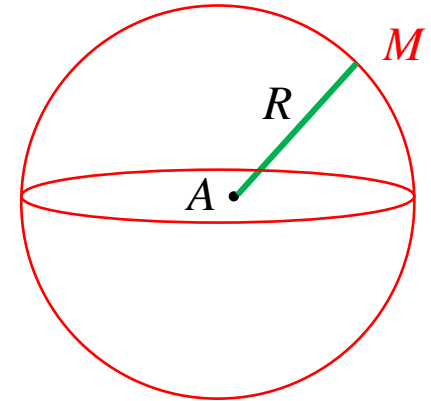
■ 全空间一个点电源的电场

$$\nabla^2 U = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \frac{\partial U}{\partial R} \right) = 0$$

$$R^2 \frac{\partial U}{\partial R} = C_1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial U}{\partial R} = \frac{C_1}{R^2}$$

$$U = -\frac{C_1}{R} + C_2 \quad \Rightarrow \quad U|_{R \rightarrow \infty} = 0, \quad C_2 = 0, \quad U = -\frac{C_1}{R}$$



2. 简单介质中点电源的电场

■ 全空间一个点电源的电场

$$U = -\frac{C_1}{R}$$

由于电流强度为 I ， 电流密度 $j = \frac{I}{4\pi R^2}$

$$j = \frac{1}{\rho} E = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial U}{\partial R} \right) = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{C_1}{R^2} \right)$$

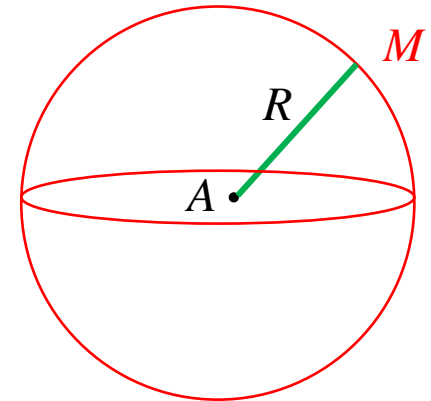
$$E = -\nabla U$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\rho} \left(-\frac{C_1}{R^2} \right) = \frac{I}{4\pi R^2}$$

$$\Rightarrow C_1 = -\frac{I\rho}{4\pi}$$



$$U = \frac{I\rho}{4\pi R}$$



2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间一个点电源的电场

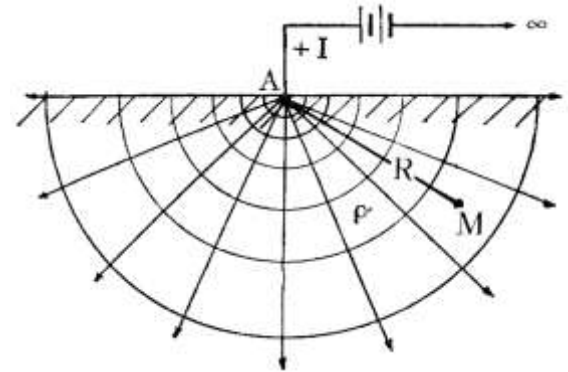
电流源在地表

$$U = -\frac{C_1}{R}$$

半无限介质中，**电流密度应较无限介质中大一倍**，则有（镜像法或虚源法）

$$j = \frac{I}{2\pi R^2} \quad j = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{C_1}{R^2} \right) \quad \Rightarrow C_1 = -\frac{I\rho}{2\pi}$$

$$\longrightarrow U = \frac{I\rho}{2\pi R} \quad E = \frac{I\rho}{2\pi R^2}$$



2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间一个点电源的电场

电流源在地下

$$U = -\frac{C_1}{R}$$

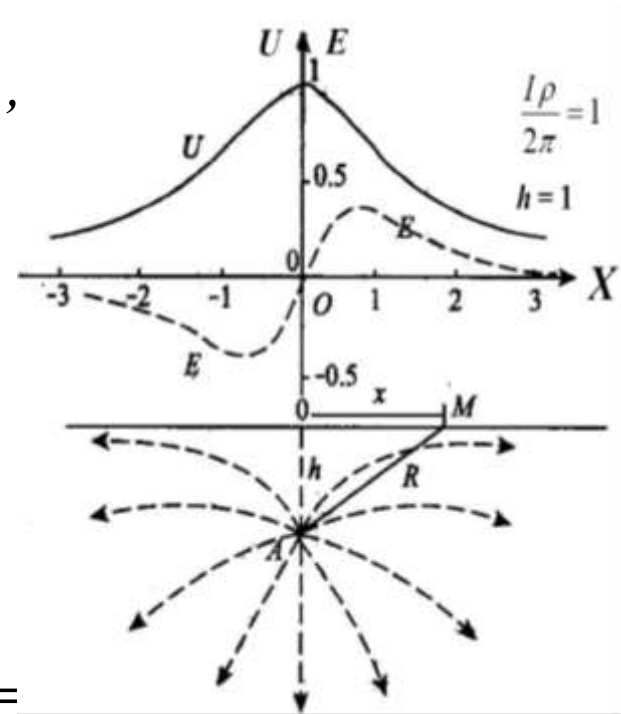
镜像法求解（关于地面对称的虚点源 A' ）

$$U = \frac{I\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$$

R' 为虚点源至观测点 M 的距离

M 在地面上时, $R = R'$

$$U = \frac{I\rho}{2\pi R} = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{h^2 + x^2}}$$



2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间一个点电源的电场

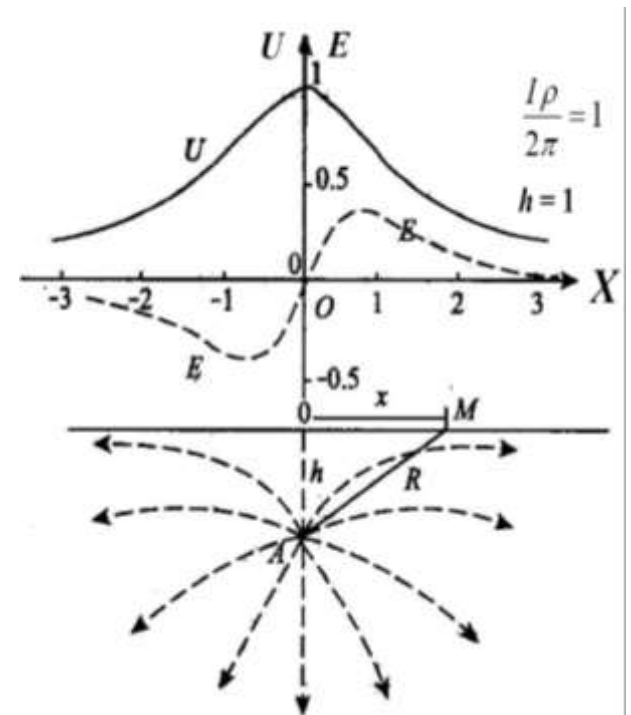
电流源在地下

沿X方向的电场强度 E_x 和电流密度 j_x

$$U = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{h^2 + x^2}}$$

$$E = -\nabla U \Rightarrow E_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{x}{(h^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$j = \frac{E}{\rho} \Rightarrow j_x = \frac{I}{2\pi} \frac{x}{(h^2 + x^2)^{3/2}}$$



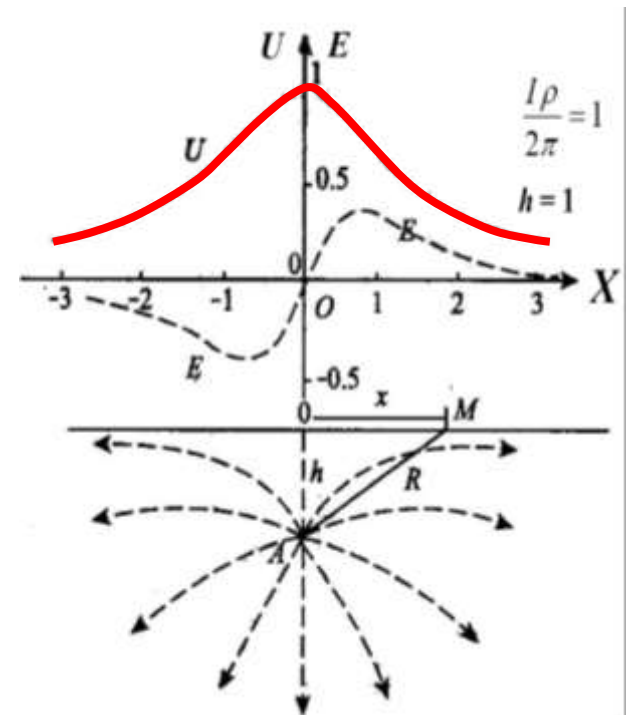
2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间一个点电源的电场

电流源在地下

$$U = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{h^2 + x^2}}$$

- ✓ 在A的正上方电位具有极大值，向两边逐渐减小
- ✓ 在 $x = \pm\sqrt{3}h$ 两点，电位等于极大值的一半
- ✓ 在 $x = \pm h/\sqrt{2}$ 两点，为电位曲线的拐点位置



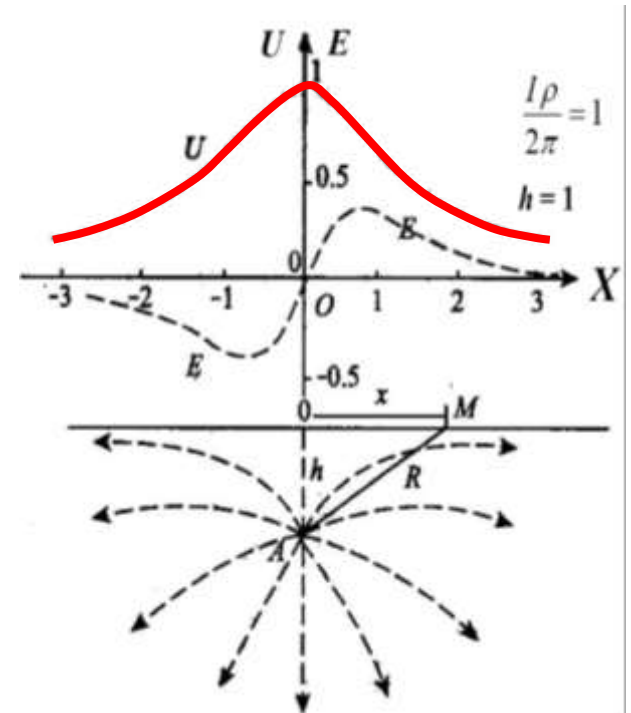
2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间一个点电源的电场

电流源在地下

$$U = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{h^2 + x^2}}$$

如果在地面上进行二维观测，电位是怎样变化的？



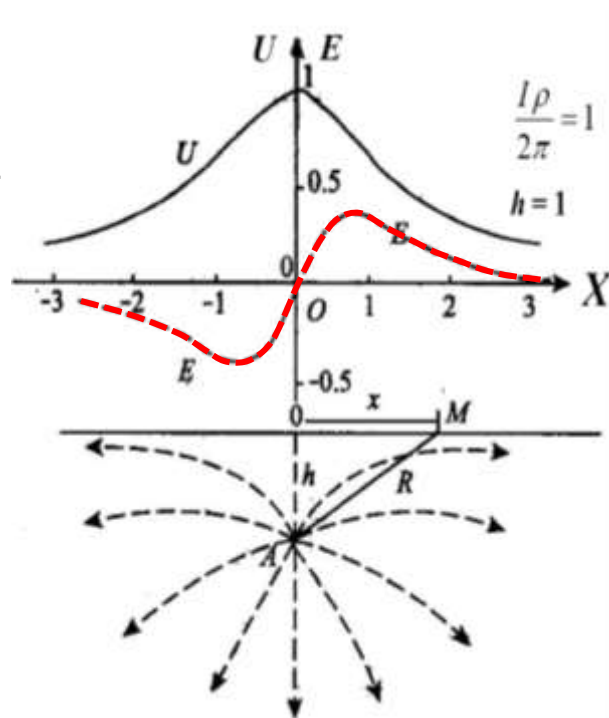
2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间一个点电源的电场

电流源在地下

$$E_x = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{x}{(h^2 + x^2)^{3/2}} \quad j_x = \frac{I}{2\pi} \frac{x}{(h^2 + x^2)^{3/2}}$$

- ✓ 在 $x=0$ 处，电场强度等于零
- ✓ 两侧的电场强度 E 曲线以 O 点反对称，
- ✓ 在电位曲线的拐点处，电场强度出现极值
- ✓ 在 $x=0$ 和 $\pm\sqrt{1.5}h$ 的地方， E 有三个拐点
- ✓ 电流密度的分布规律与电场强度完全相同，两者差系数 ρ

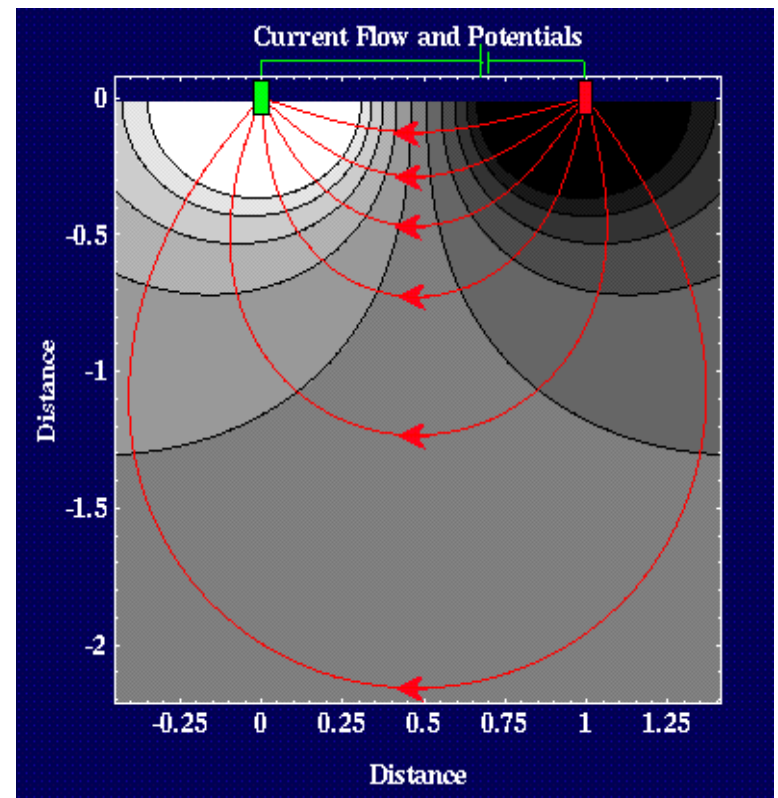


2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间两个异性点电源的电场

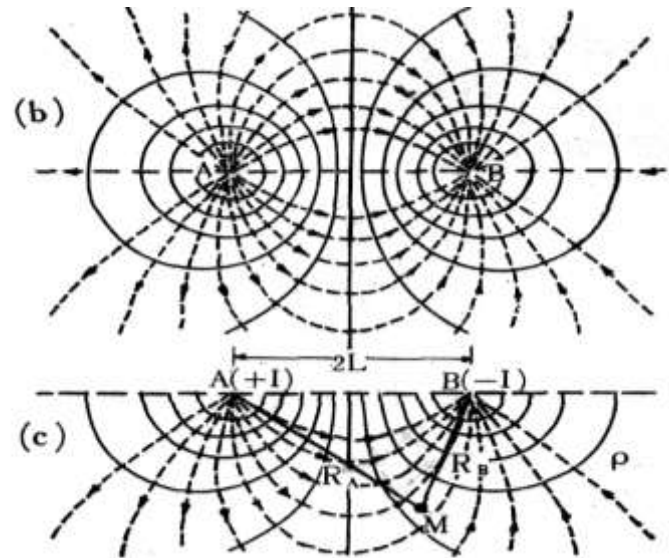
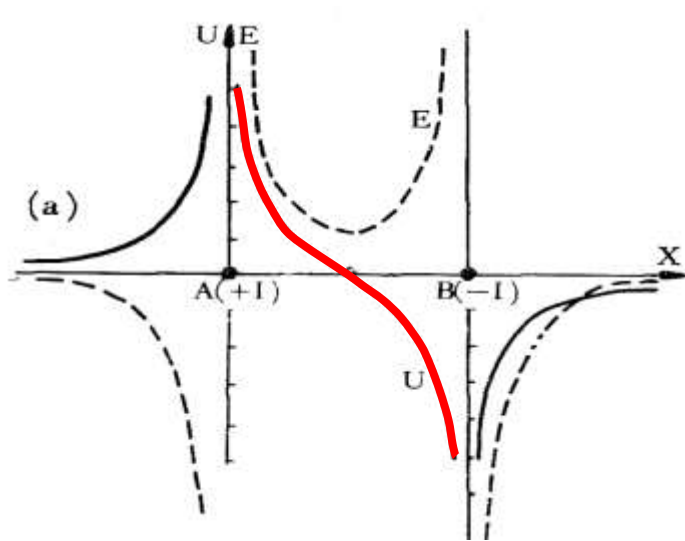
点电源 A 和 B 相距 $2L$ ，分别以 $+I$ 和 $-I$ 向地下供电，根据电场的迭加原理，便可写出 A 、 B 两电极在 M 点形成的电位：

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right)$$



2. 简单介质中点电源的电场

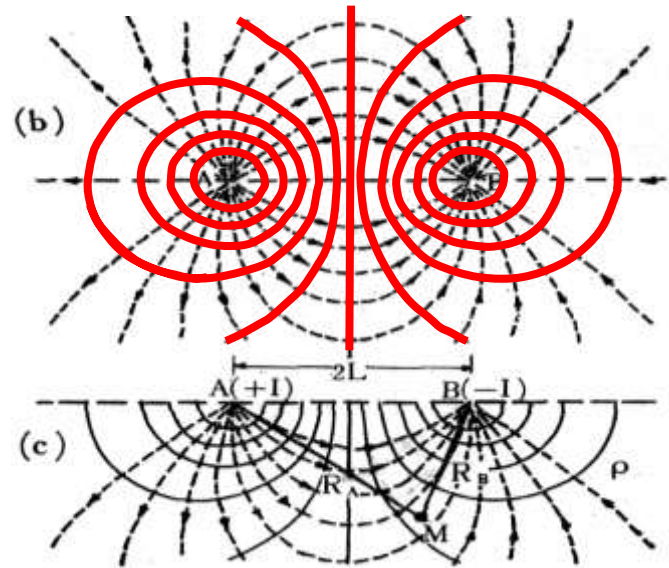
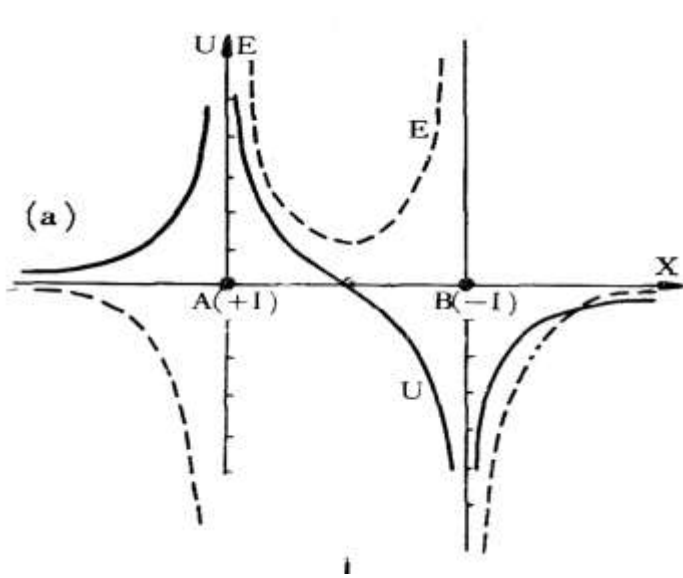
■ 半空间两个异性点电源的电场



(a) 为地面A、B连线上电位及电场强度的变化曲线。越靠近电极，电位变化越快。即在A电极附近电位迅速增高，在B电极附近电位迅速降低，而在AB中间的1/3~1/2地段电位变化较慢，在AB中点电位为零。

2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间两个异性点电源的电场



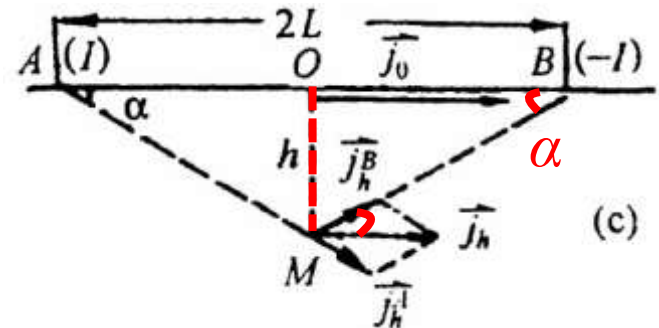
(b) 在地面上观测，电位及电场强度变化曲线

(c) 在垂直剖面中观测，电位及电场强度变化曲线

2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间两个异性点电源的电场

半空间电流密度 $j = \frac{I}{2\pi R^2}$



在地表AB连线的中点O处，AB两电极形成的电流密度为：

$$R = L \quad \longrightarrow \quad j_0 = j_0^A + j_0^B = 2j_0^A = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{1}{L^2}$$

在深度为h的点上（O点下方），AB两电极形成的电流密度为：

$$j_h = 2j_h^A \cos \alpha = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{L}{[h^2 + L^2]^{3/2}}$$

2. 简单介质中点电源的电场

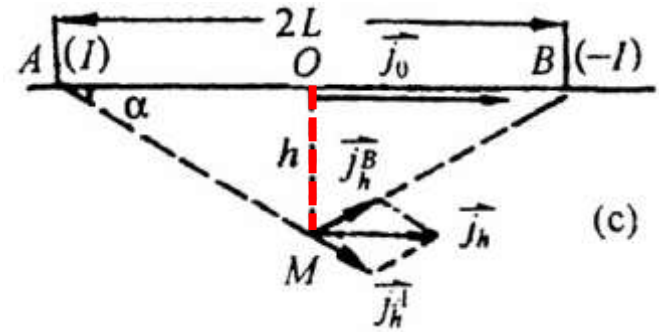
■ 半空间两个异性点电源的电场

$$j_h = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{L}{[h^2 + L^2]^{3/2}}$$

求取电流密度的极值 —— 求导

$$\frac{\partial j_h}{\partial L} = \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{I}{\pi} \frac{L}{[h^2 + L^2]^{3/2}} \right) = \frac{I}{\pi} \frac{h^2 - 2L^2}{[h^2 + L^2]^{5/2}} = 0$$

$$\Rightarrow L = 1/\sqrt{2}h \text{ 或者 } AB = 2L = \sqrt{2}h$$



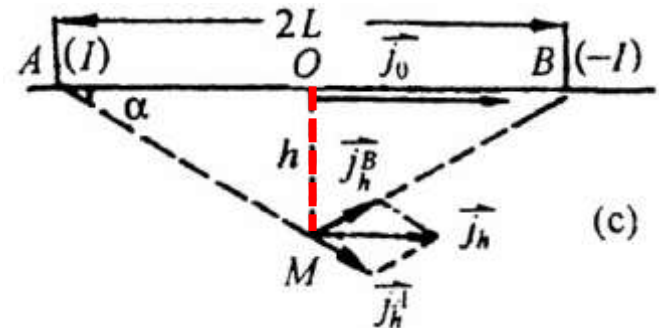
2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间两个异性点电源的电场

$$L = 1 / \sqrt{2} h$$

$$\dot{j}_h = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{1}{\left[3/2\right]^{3/2} \sqrt{2} h^2}$$

即当 $AB=1.414h$ 时， h 深处的电流密度最大



地下矿体的存在和分布必须能引起地表电场有明显改变才能测出，因此，总是希望有较多的电流流入地下。为此应适当选择电极距，使所要了解的深度上电流密度最大。

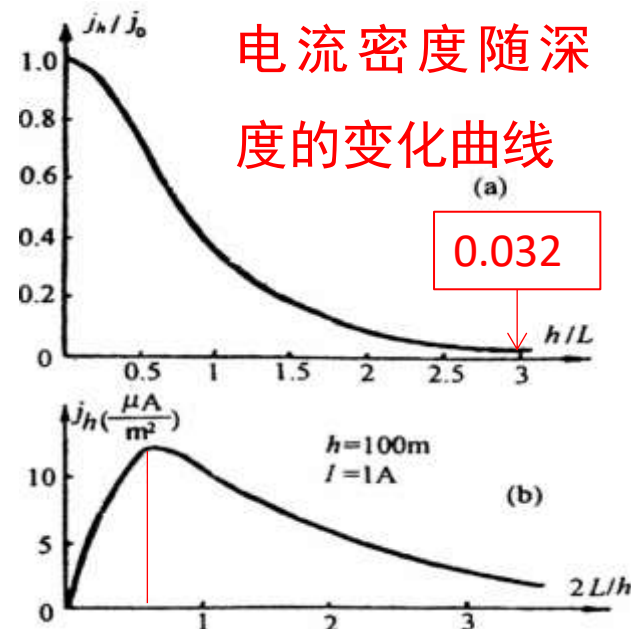
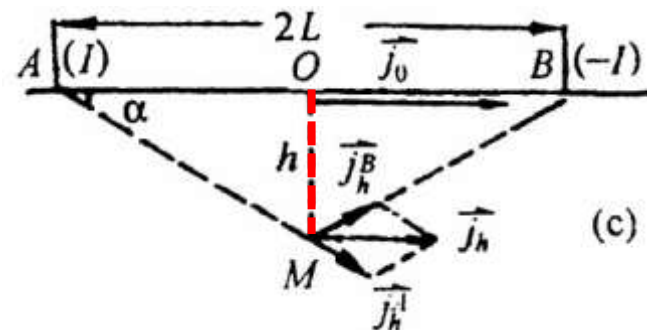
2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间两个异性点电源的电场

$$j_0 = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{1}{L^2} \quad j_h = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{L}{[h^2 + L^2]^{3/2}}$$

$$\frac{j_h}{j_0} = \frac{1}{[1 + (h/L)^2]^{3/2}}$$

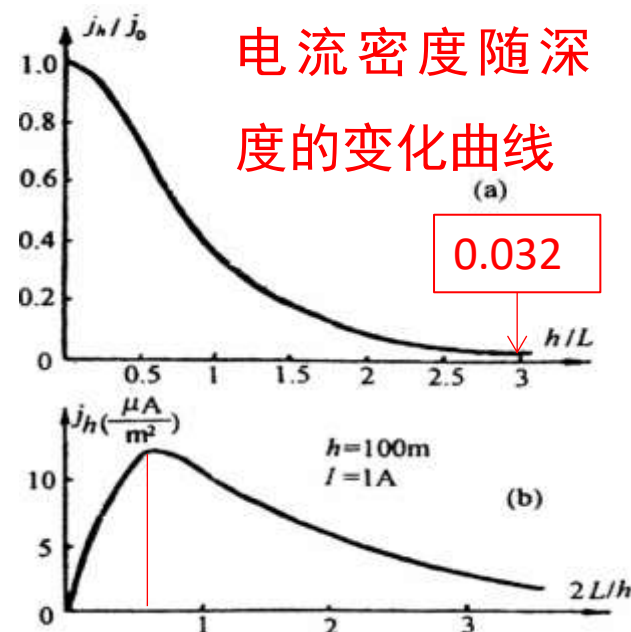
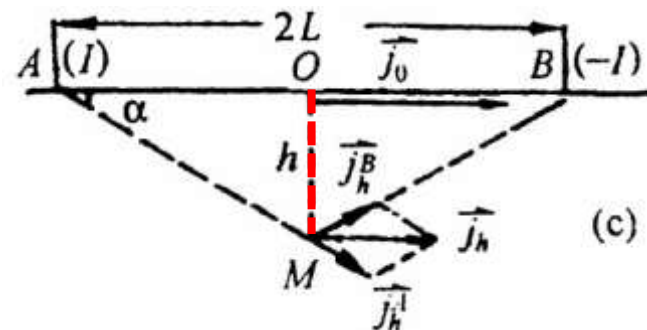
- ✓ 随着深度 h 的增大，电流密度衰减很快；
- ✓ 加大供电电极距可以增大探测深度；
- ✓ $\frac{L}{h} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ 时， j_h 最大



2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间两个异性点电源的电场

研究地下电流随深度的分布规律对电法勘探来说具有重大的意义。因为我们只能通过观测地面电场的畸变规律来判断地下具有明显电阻率差异的地质体的赋存状态。而地面电场与地下电流有着密切的关系，当地下电流的分布改变时，地下电场将随之改变，这些变化必将影响地面电场的分布。从这个意义上说，地下电流实际上起着传递深部信息的作用。流入地下深处的电流越多，反映到地面上的深部信息就越强，对探测深部地质情况就越有利。



2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间偶极电流源的电场

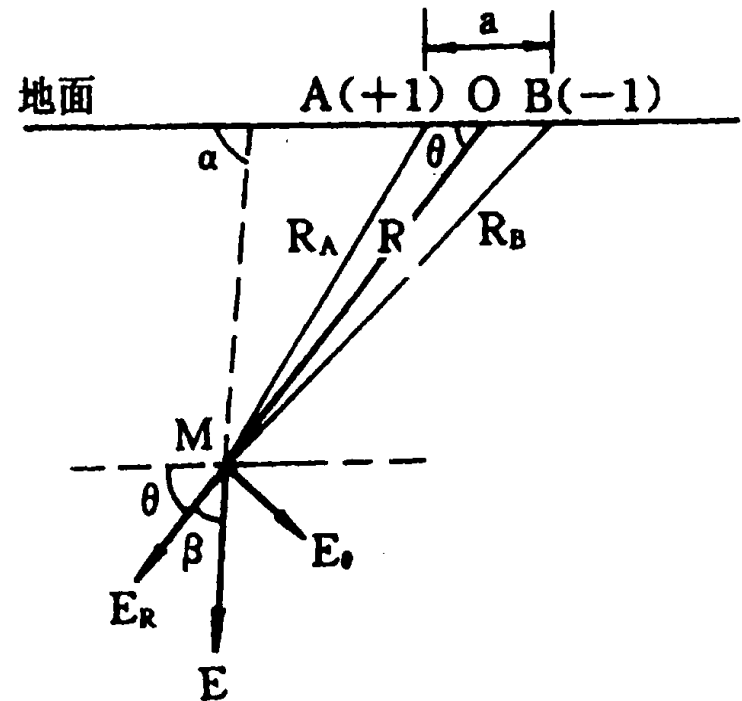
地中任一点电位为：

$$U = \frac{I\rho}{2\pi R_A} - \frac{I\rho}{2\pi R_B}$$

$$= \frac{I\rho}{2\pi} \frac{R_B - R_A}{R_A R_B}$$

$$\approx m \frac{\cos \theta}{R^2}$$

$$m = \frac{I\rho}{2\pi} a$$



m 为偶极源的偶极矩
 a 为AB间的距离

2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间偶极电流源的电场

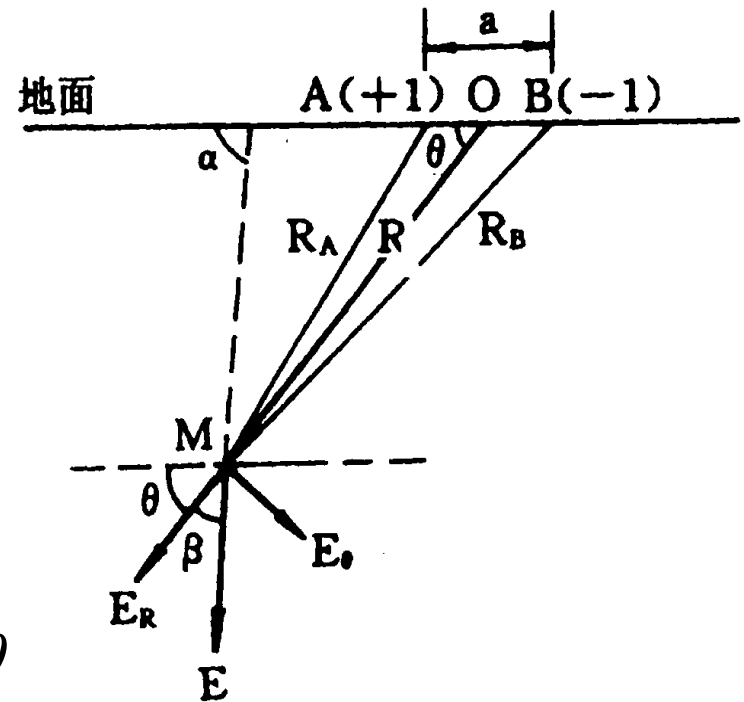
$$U = m \frac{\cos \theta}{R^2}$$

M 点的电场强度可分解为沿
径向 OM 的 E_R 和垂直径向方
向的 E_θ

$$E_R = -\frac{\partial U}{\partial R} = \frac{2m}{R^3} \cos \theta$$

$$E_\theta = -\frac{\partial U}{\partial S} = -\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{m}{R^3} \sin \theta$$

$$E = \sqrt{E_R^2 + E_\theta^2} = \frac{m}{R^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}$$



2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间偶极电流源的电场

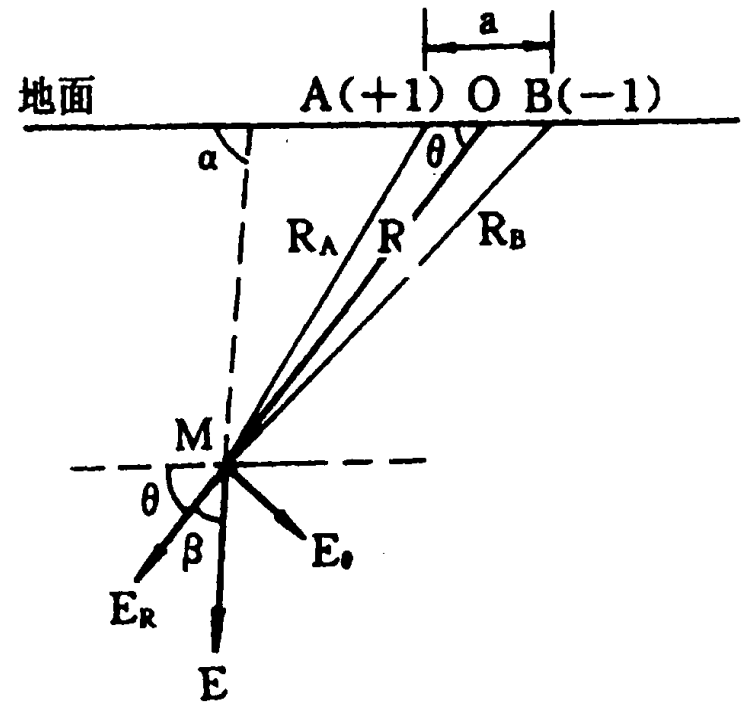
$$U = m \frac{\cos \theta}{R^2}$$

$$E_R = \frac{2m}{R^3} \cos \theta$$

$$E_\theta = \frac{m}{R^3} \sin \theta$$

$$E = \frac{m}{R^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}$$

$$j_R = \frac{2m}{\rho R^3} \cos \theta \quad j_\theta = \frac{m}{\rho R^3} \sin \theta \quad j = \frac{m}{\rho R^3} \sqrt{3 \cos^2 \theta + 1}$$



2. 简单介质中点电源的电场

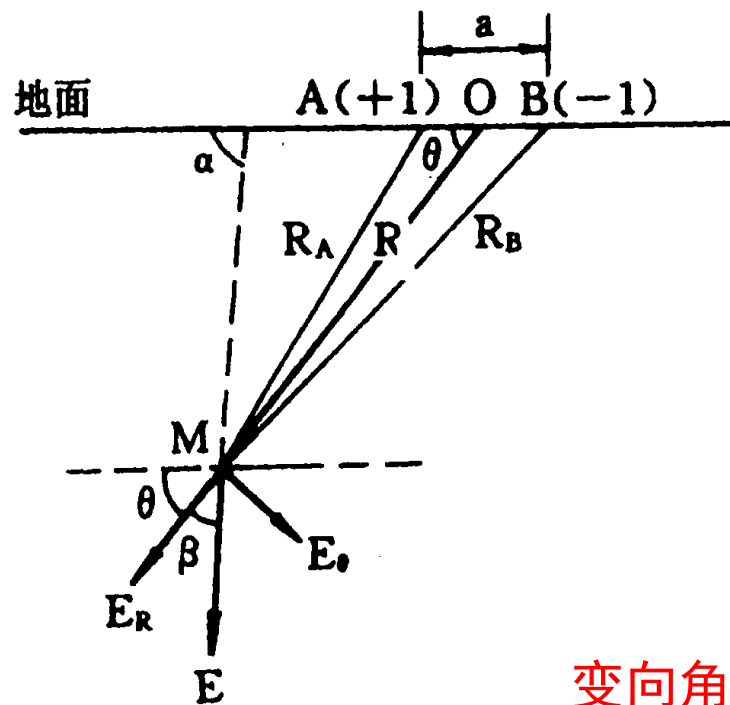
■ 半空间偶极电流源的电场

为了解电场在地中分布的方向变化，设 E 和 E_R 的夹角为 β ， E 和地面夹角为 $\alpha = (\beta + \theta)$ ，便可写出：

$$\tan \beta = \frac{E_\theta}{E_R} = \frac{1}{2} \tan \theta$$

$$\tan \alpha = \tan(\beta + \theta) = \frac{3 \tan \theta}{2 - \tan^2 \theta}$$

当 $2 - \tan^2 \theta = 0$ 时，即 $\theta_0 \approx \pm 54^\circ 44'$ ， $\alpha = \pi / 2$ ，将此时的 θ 记作 θ_0 ；
当 $\theta < \theta_0$ 时， $\alpha < \pi / 2$ ； $\theta > \theta_0$ 时， $\alpha > \pi / 2$ ；



2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间偶极电流源的电场

当测点 M 位于地面时，则有

$$U = \frac{m}{R^2}$$

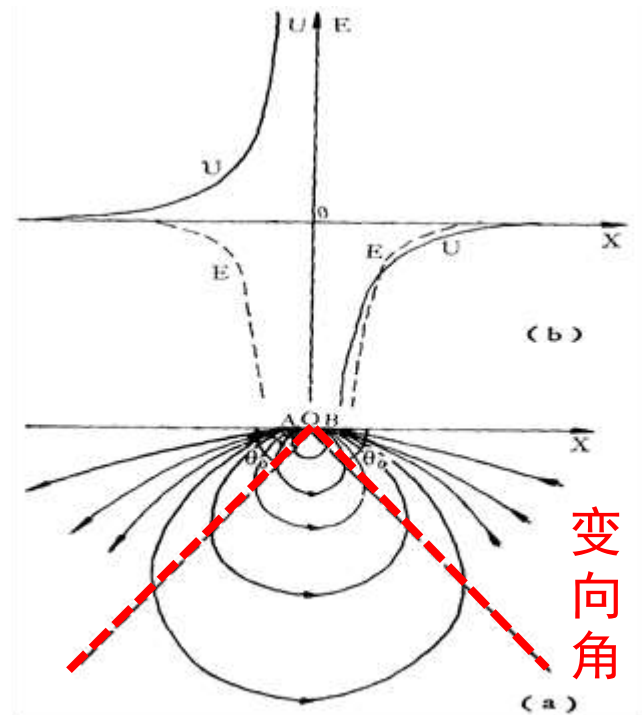
$$E = \frac{2m}{R^3}$$

$$j = \frac{2m}{\rho R^3}$$

$$U = \frac{I\rho}{2\pi R}$$

$$E = \frac{I\rho}{2\pi R^2}$$

电场强度（电流密度也一样）随测点远离偶极源时衰减很快（与 R 三次方成反比），而电位则衰减较慢（与 R 平方成反比）。但均较一个点电源的电场衰减快。

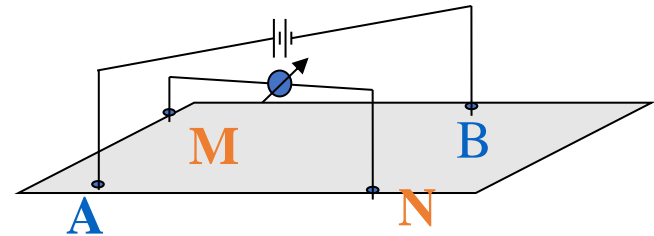


2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间地下电阻率的确定

地面水平，地下为均匀、无限、各向同性介质，将A、B两供电电极与电源相连，并向地下供入电流强度为 I 的电流时，则地表任意两测量电极M和N的电位：

$$\begin{cases} U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \\ U_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \end{cases}$$



$$\begin{aligned} \Delta U_{MN} &= U_M - U_N \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \end{aligned}$$

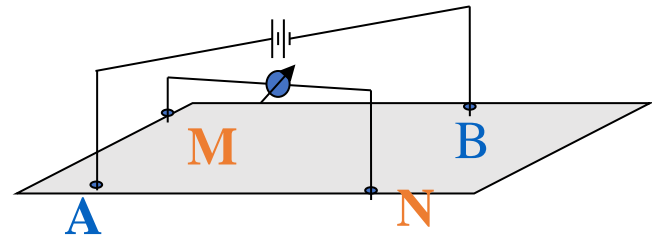
2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间地下电阻率的确定

得到用点电极测量均匀大地电阻率的表达式：

$$\rho = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$



K 称为**电极排列系数**（**装置系数**），其**单位为米**，是一个仅与各电极间空间位置有关的量。

2. 简单介质中点电源的电场

■ 半空间地下电阻率的确定

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

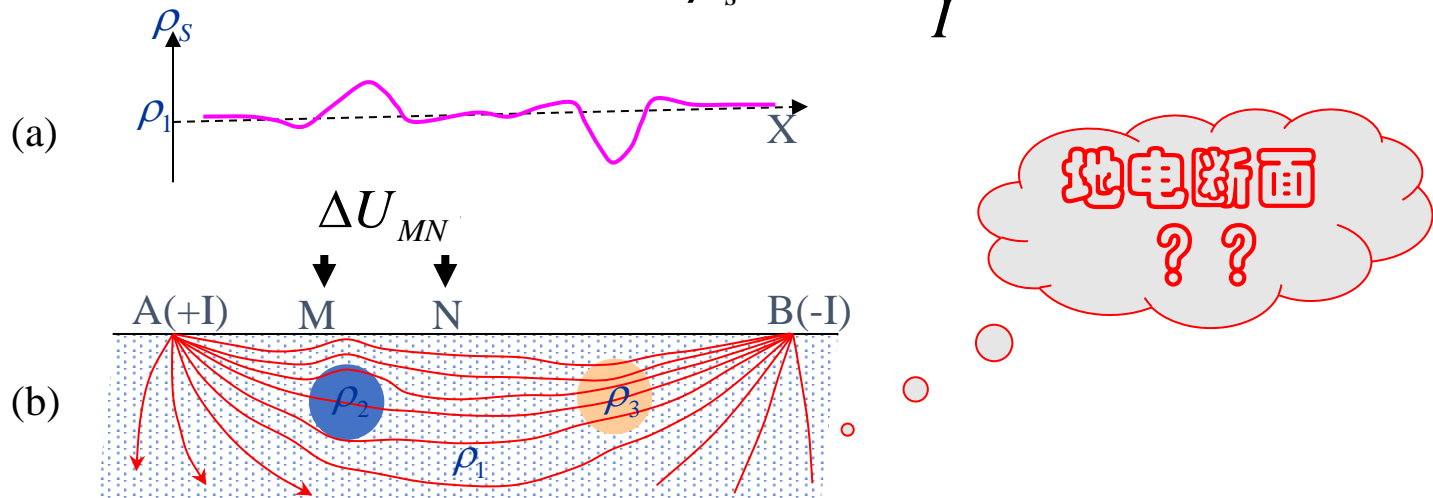
地面水平，地下为均匀、无限、各向同性介质

实际工作中常常不能满足这些条件，地形往往起伏不平，地下介质也不均匀，各种岩石相互重叠，断层裂隙纵横交错，或者有矿体充填其中。

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$



电阻率不均匀时地下电流分布示意图

在自然界中，地下地质情况是复杂的，各种不同岩(矿)石分布是不均匀的。在电法勘探中，常把按电阻率划分的地质断面称为**地电断面**。

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率

$$\rho = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

地面水平，地下为均匀、无限、各向同性介质

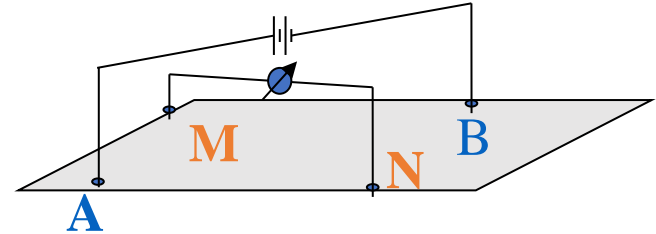
$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

地面水平，虽然不是岩石的真电阻率，但却是地下电性不均匀体和地形起伏的一种综合反映。

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率

视电阻率的微分形式



设地面水平， M 、 N 电极间距 MN 很小， MN 间电场强度可视为均匀的，因此， MN 间电位差：

$$\Delta U_{MN} = \int_N^M E_{MN} dl = \int_N^M j_{MN} \rho_{MN} dl = j_{MN} \rho_{MN} MN$$

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \frac{j_{MN} MN}{I} \rho_{MN}$$

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率

视电阻率的微分形式

设均匀各向同性半无限介质的电阻率为 ρ ， MN 间电流密度为 j_0

$$K \frac{j_0 MN}{I} \rho = \rho$$



$$\frac{K \cdot MN}{I} = \frac{1}{j_0}$$

$$\rho_s = K \frac{j_{MN} MN}{I} \rho_{MN}$$

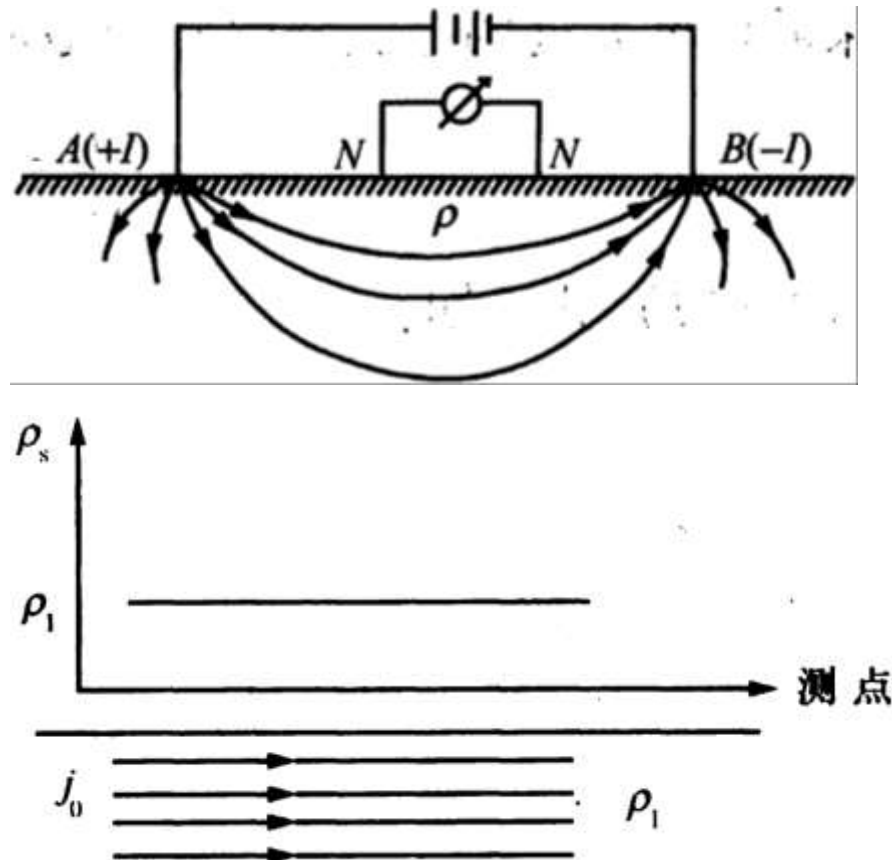


$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN}$$

视电阻率的微分形式

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率



$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN}$$

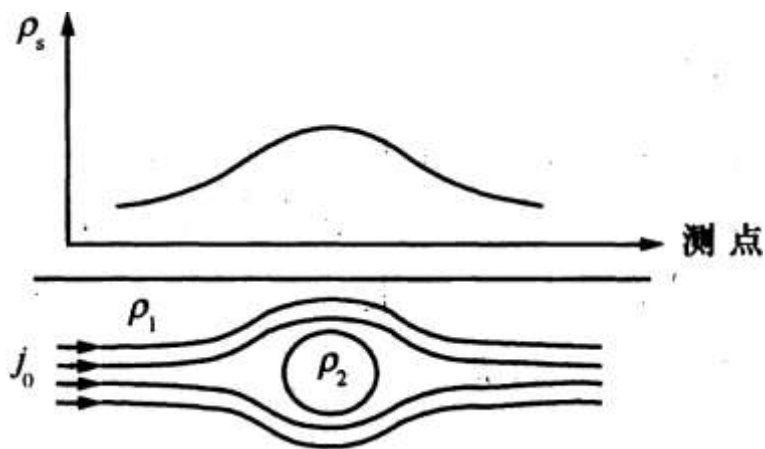
- ✓ 观测范围在 $AB/3$ 以内;
- ✓ 电流线是相互平行的;
- ✓ $j_{MN} = j_0$;
- ✓ $\rho_{MN} = \rho_1$;
- ✓ $\rho_s = \rho_1$

在均匀介质中

视电阻率 = 真电阻率

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率



在高阻体上方， ρ_s 曲线具有极大值，远离高阻体 ρ_s 逐渐减小至 ρ_1

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN}$$

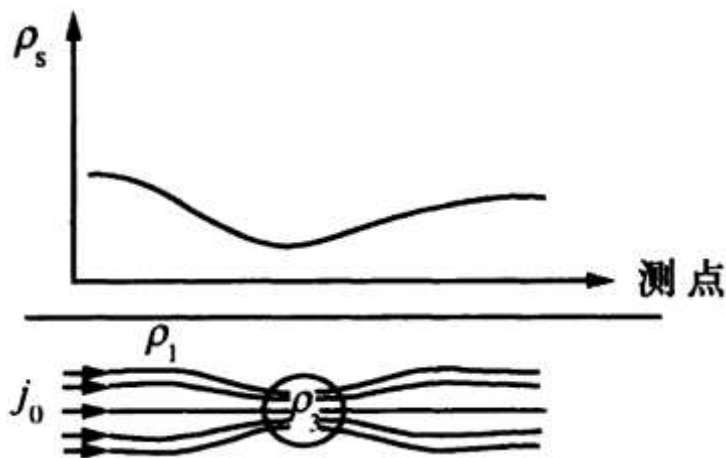
- ✓ 电场因高阻体存在而产生了畸变；
- ✓ 测量电极 MN 位于高阻体上方时：

$$\begin{aligned} &\checkmark j_{MN} > j_0, \rho_{MN} = \rho_1 \\ &\rho_s > \rho_1 \end{aligned}$$

- ✓ 随 MN 向球体两侧不断地移动，高阻体对电场的影响亦随之减小；
- ✓ 当 MN 离开高阻体足够远时，高阻体对电场已不能施加影响， $\rho_s = \rho_1$

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率



在低阻体上方， ρ_s 曲线具有极小值，远离低阻体 ρ_s 逐渐增大至 ρ_1

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN}$$

- ✓ 电场因低阻体存在而产生了畸变；
- ✓ 测量电极 MN 位于低阻体上方时：

$$\begin{aligned} &\checkmark j_{MN} < j_0, \rho_{MN} = \rho_1 \\ &\rho_s < \rho_1 \end{aligned}$$

- ✓ 随 MN 向球体两侧不断地移动，低阻体对电场的影响亦随之减小；
- ✓ 当 MN 离开低阻体足够远时，低阻体对电场已不能施加影响， $\rho_s = \rho_1$

2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率

- 当地下为均匀介质时，电场不产生畸变，此时的电场就是正常电场，其视电阻率曲线为平行于横轴的一条直线；
- 在均匀介质中存在电性不均匀体（高、低阻体）时，电场将产生强烈的变化，对应地在高、低阻体上方出现视电阻率值大于或小于其围岩电阻率值，我们称其为视电阻率异常；
- 电阻率法就是根据视电阻率异常来推断地下是否存在电性不均匀体的，这就是电阻率法的物理实质。

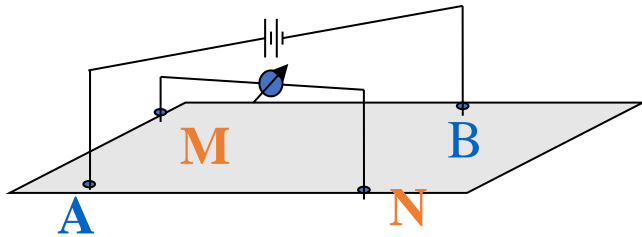
2. 简单介质中点电源的电场

■ 视电阻率 $\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN} \quad \rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$

- ✓ 上边视电阻率关系式中的装置系数与电极的排列有关，无论地表是否平坦，装置系数中的距离都用**水平距离**，因此，在地形起伏较大的地区，**水平距离的测定和计算**也是电阻率测量得到准确结果的关键。
- ✓ 电场有效作用范围；视电阻率与供电电流大小无关，只与**地下介质的电阻率与电极的位置及排列**方式有关；
- ✓ 地下有多重电阻率不同的岩体存在时， ρ_s 值为所有岩体综合作用的结果。

2. 简单介质中点电源的电场

■ 观测与物性



$$\begin{aligned}\Delta U_{MN} &= U_M - U_N \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)\end{aligned}$$

观测是 ΔU_{MN}

物性是 ρ

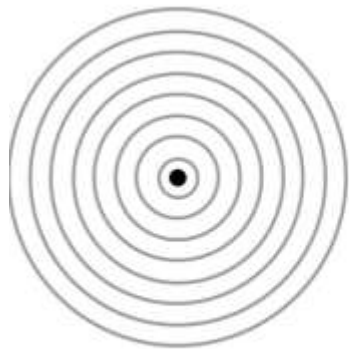
目 录

第一节 电阻率法

1. 稳定电流场的基本定律
2. 简单介质中点电源的电场
3. 复杂介质中点电源的电场

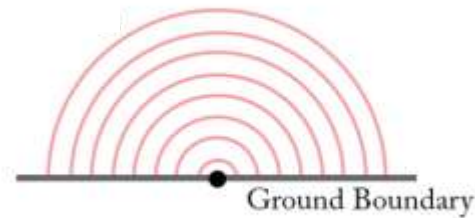
3. 复杂介质中点电源的电场

■ 简单介质



Full-Space

- 电阻率均匀
- 全空间
- 各向同性



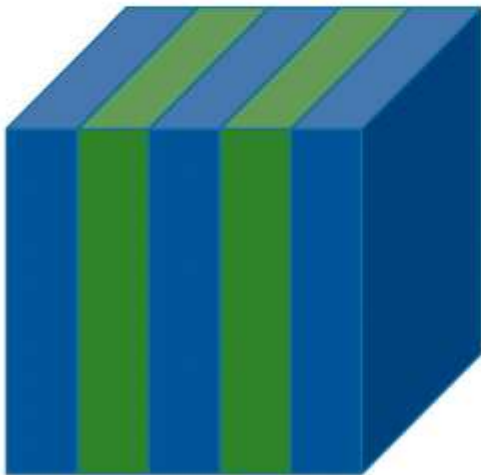
Half-Space

- 电阻率均匀
- 半空间
- 各向同性

3. 复杂介质中点电源的电场

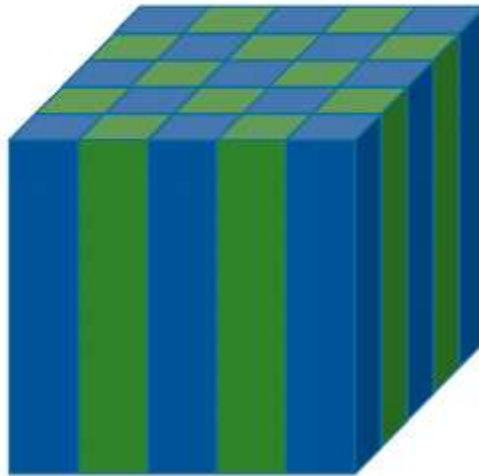
■ 复杂介质

1D



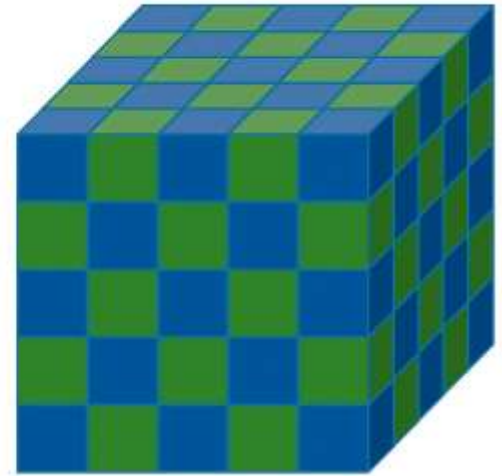
- 电阻率层内均匀
- 半空间
- 各向同性

2D



- 电阻率截面内均匀
- 半空间
- 各向同性

3D

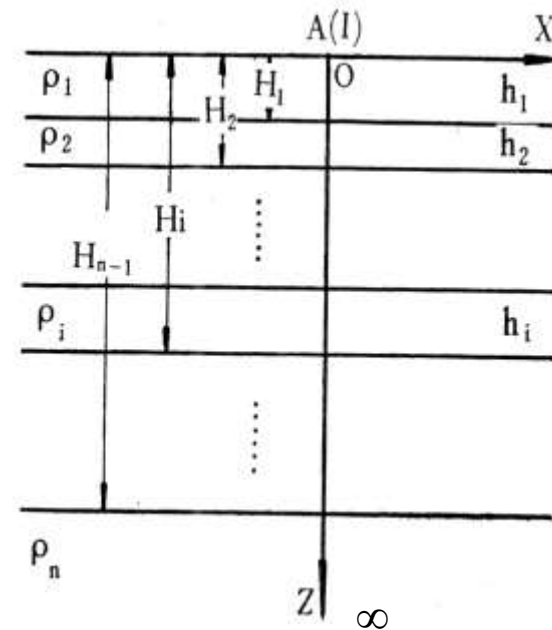


- 电阻率单元内均匀
- 半空间
- 各向同性

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

- ✓ 假定地面是水平的，在地面以下有 n 层水平层状地层
- ✓ 各层电阻率 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$
- ✓ 各层厚度 $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$
- ✓ 各层底面至地面的距离 $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$
- ✓ 在 A 点有一点电流源供电，其电流强度为 I



求取各个层位的电位

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

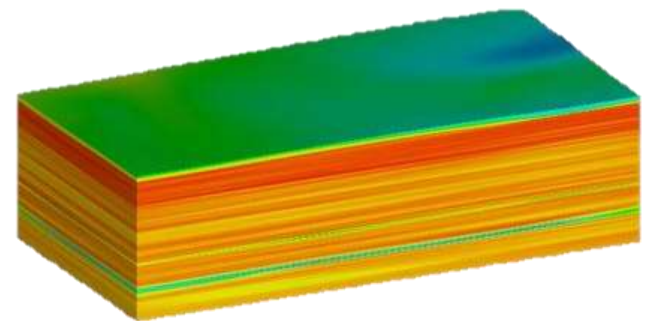
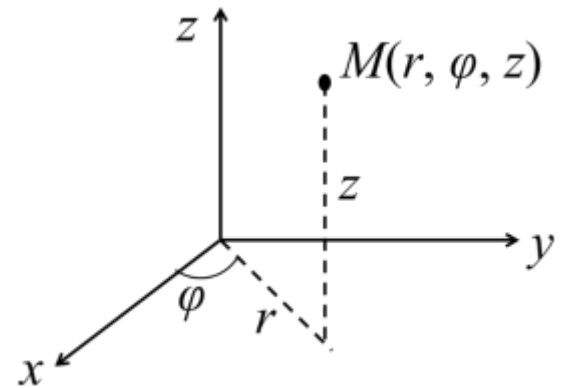
首先将拉普拉斯方程写为柱坐标形式：

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$$

由于介质的对称性， U 仅与 r ， z 有关：

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0$$

利用分离变量法 $U(r, z) = R(r)Z(z)$



3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

$$-\frac{1}{R(r)}\left[\frac{d^2R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dR(r)}{dr}\right] = \frac{1}{Z(z)}\frac{d^2Z(z)}{dz^2}$$

由于等式两边分别是 r, z 的函数，要恒等，必须等于一个常数，不妨设为 m^2 ，注意 m^2 为任意常数：（ m 不一定是整数，是实数）

$$-\frac{1}{R(r)}\left[\frac{d^2R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dR(r)}{dr}\right] = \frac{1}{Z(z)}\frac{d^2Z(z)}{dz^2} = m^2$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

$$\begin{cases} \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + m^2 R(r) = 0 & \text{零阶贝塞尔方程} \\ \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} - m^2 Z(z) = 0 & e^{mz} \quad e^{-mz} \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} \text{边界条件} \end{array} \begin{cases} j_{1n} = j_{2n} \\ E_{1t} = E_{2t} \\ U_1 = U_2 \end{cases} \quad \text{界面上没有自有电荷}$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解 贝塞尔函数

有关**贝塞尔函数**：是数学上的一类特殊函数的总称。通常单说的贝塞尔函数指第一类贝塞尔函数（Bessel function of the first kind）。一般贝塞尔函数是下列常微分方程（一般称为贝塞尔方程）的标准解函数 $y(x)$ ：

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - n^2) y = 0$$

这类方程的解是**无法用初等函数系统地表示**。由于贝塞尔微分方程是二阶常微分方程，需要由两个独立的函数来表示其标准解函数。典型的是使用**第一类贝塞尔函数**和**第二类贝塞尔函数**来表示**标准解函数**：

$$y(x) = c_1 J_n(x) + c_2 Y_n(x)$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解 贝塞尔函数

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - n^2)y = 0 \qquad y(x) = c_1 J_n(x) + c_2 Y_n(x)$$

$$J_n(x) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{x^{n+2m}}{2^{n+2m} m! \Gamma(n+m+1)} \quad (n \text{ 为正整数或零})$$


$$\Gamma(n+m+1) = (n+1)(n+2)(n+3)\cdots(n+m)$$

$$Y_n(x) = \lim_{\alpha \rightarrow n} \frac{J_{\alpha}(x) \cos \alpha \pi - J_{-\alpha}(x)}{\sin \alpha \pi} \quad (n \text{ 为整数})$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解


$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + m^2 R(r) = 0 \quad r^2 m^2 \frac{d^2 R(r)}{m^2 dr^2} + rm \frac{dR(r)}{mdr} + r^2 m^2 R(r) = 0$$


$$R(r) = C_1 J_0(mr) + C_2 Y_0(mr)$$

由于 $r \rightarrow 0$, $Y_0(mr) \rightarrow \infty$, 得到 $C_2=0$, $R(r) = C_1 J_0(mr)$

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} - m^2 Z(z) = 0$$

$$Z(z) = e^{\pm mz}$$


$$Z(z) = D_1 e^{mz} + D_2 e^{-mz}$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

$$U(r, z) = R(r) Z(z)$$

$$R(r) = C_1 J_0(mr)$$

✓ 在第一层介质中，电位 $U(r, z)$ 为：

$$Z(z) = D_1 e^{mz} + D_2 e^{-mz}$$

$$U(r, z) = C_1 J_0(mr) [D_1 e^{mz} + D_2 e^{-mz}] = J_0(mr) [A_1 e^{mz} + B_1 e^{-mz}]$$

✓ 在第二层介质中，电位 $U(r, z)$ 为：

$$U(r, z) = J_0(mr) [A_2 e^{mz} + B_2 e^{-mz}]$$

✓ 在第 i 层介质中，电位 $U(r, z)$ 为： $U(r, z) = J_0(mr) [A_i e^{mz} + B_i e^{-mz}]$

✓ 在第 n 层介质中，电位 $U(r, z)$ 为： $U(r, z) = J_0(mr) A_n e^{mz}$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

由于 m 的任意性，电位拉普拉斯方程的通解为：

$$U(r, z) = \int_0^{\infty} \left[A(m)e^{-mz} + B(m)e^{mz} \right] J_0(mr) dm$$

—— $A(m)$ 、 $B(m)$ 是待定系数

下面详细分析 $A(m)$ 、 $B(m)$ 的确定过程，主要以

- ① 地面的源电流极限条件；
- ② 层间交界面条件；
- ③ 最底层的辐射条件，无穷远条件；

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

$$R = \sqrt{r^2 + z^2}$$

① 地面的源电流极限条件； $R \rightarrow 0$ $U \approx \frac{I\rho_1}{2\pi R}$

地面与空气交界面 $j_n = -\frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U}{\partial n} = 0$

② 层间交界面条件: 电位连续，电流密度法向分量连续，
电场强度切向分量连续

$$U_1 = U_2 \quad \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial U_1}{\partial n} = \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial U_2}{\partial n} \quad \frac{\partial U_1}{\partial t} = \frac{\partial U_2}{\partial t}$$

③ 最底层的辐射条件： $R \rightarrow \infty$, $U = 0$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

$$U(r, z) = \int_0^\infty [A(m)e^{-mz} + B(m)e^{mz}] J_0(mr) dm$$

第一层电位：

- 在源附近时, $R = \sqrt{r^2 + z^2} \rightarrow 0$ 时, $U(r, z) = \frac{\rho_1 I}{2\pi R}$
- $R = \sqrt{r^2 + z^2} \rightarrow \infty$ 时, $U(r, z) = \int_0^\infty [Ae^{-mz} + Be^{mz}] J_0(mr) dm = 0$
- 因此, 在第一层中电位表达式为:

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi R} + \int_0^\infty [A_1(m)e^{-mz} + B_1(m)e^{mz}] J_0(mr) dm$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

第一层电位： 确定系数 $A_1(m)$, $B_1(m)$

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi R} + \int_0^\infty [A_1(m)e^{-mz} + B_1(m)e^{mz}] J_0(mr) dm$$

- 地面上任意一点的电流密度法向分量等于零

$$\left. \frac{\partial U_1}{\partial z} \right|_{z=0} = \int_0^\infty [B_1(m) - A_1(m)] J_0(mr) m dm = 0 \quad \longrightarrow \quad B_1(m) = A_1(m)$$

$$\longrightarrow \quad U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi R} + \int_0^\infty A_1(m)(e^{mz} + e^{-mz}) J_0(mr) dm$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

第一层电位：

$$U_1 = \frac{\rho_1 I}{2\pi R} + \int_0^\infty A_1(m)(e^{mz} + e^{-mz})J_0(mr)dm$$

应用韦伯—莱布尼兹积分 $\frac{1}{R} = \frac{1}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \int_0^\infty e^{-mz} J_0(mr)dm$

→
$$U_1 = \int_0^\infty \left[\frac{\rho_1 I}{2\pi} e^{-mz} + A_1(m)(e^{mz} + e^{-mz}) \right] J_0(mr)dm$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

第二层至第 n 层的电位：

- 第二层至 $n-1$ 层的电位为：

$$U_i = \int_0^\infty \left[A_i(m) e^{-mz} + B_i(m) e^{mz} \right] J_0(mr) dm$$

- 第 n 层时， $z \rightarrow \infty$ ， $U_n = 0$ ，故 $B_n(m) = 0$

$$U_n = \int_0^\infty A_n(m) e^{-mz} J_0(mr) dm$$

- 下面利用各层的边界连续条件确定系数 $A_1(m)$ ， $A_i(m)$ ， $B_i(m)$ ， $B_n(m)$ 。


3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

第二层至第 n 层的电位：

- 各层的边界连续条件：电位连续，电流密度法线分量连续
- 对第一个界面：

① 电位连续： $U_1^+|_{z=H_1} = U_2^-|_{z=H_1}$


$$\int_0^\infty \left\{ \frac{\rho_1 I}{2\pi} e^{-mH_1} + A_1(m) \left[e^{-mH_1} + e^{mH_1} \right] \right\} J_0(mr) dm$$
$$= \int_0^\infty \left[A_2(m) e^{-mH_1} + B_2(m) e^{mH_1} \right] J_0(mr) dm$$

3. 复杂介质中点电源的电场


■ 层状模型电位的通解

第二层至第 n 层的电位：

$$j = \frac{E}{\rho} = -\frac{\nabla U}{\rho}$$

• 对第一个界面：

② 电流密度法向分量连续： $j_{1n}^+ = j_{2n}^- \big|_{z_1=H_1}$


$$\begin{aligned} & \frac{1}{\rho_1} \int_0^\infty \left\{ -\frac{\rho_1 I}{2\pi} e^{-mH_1} + A_1(m) \left[e^{-mH_1} + e^{mH_1} \right] \right\} m J_0(mr) dm \\ &= \frac{1}{\rho_2} \int_0^\infty \left[-A_2(m) e^{-mH_1} + B_2(m) e^{mH_1} \right] m J_0(mr) dm \end{aligned}$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

第二层至第 n 层的电位：

• 对第 i 个界面：

① 电位连续： $U_i^+ \Big|_{z=H_i} = U_{i+1}^- \Big|_{z=H_i}$

$$\int_0^\infty \left[A_i(m) e^{-mH_i} + B_i(m) e^{mH_i} \right] J_0(mr) dm = \int_0^\infty \left[A_{i+1}(m) e^{-mH_i} + B_{i+1}(m) e^{mH_i} \right] J_0(mr) dm$$

② 电流密度法向分量连续： $j_{i,n}^+ \Big|_{z=H_i} = j_{i+1,n}^- \Big|_{z=H_i}$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\rho_i} \int_0^\infty \left\{ -A_i(m) e^{-mH_i} + B_i(m) e^{mH_i} \right\} m J_0(mr) dm \\ &= \frac{1}{\rho_{i+1}} \int_0^\infty \left[-A_{i+1}(m) e^{-mH_i} + B_{i+1}(m) e^{mH_i} \right] m J_0(mr) dm \end{aligned}$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

第二层至第 n 层的电位：

• 对第 n 个界面：

$$j = \frac{E}{\rho} = -\frac{\nabla U}{\rho}$$

① 电位连续： $U_{n-1}^+ \Big|_{z=H_{n-1}} = U_n^- \Big|_{z=H_{n-1}}$

$$\int_0^\infty \left[A_{n-1}(m)e^{-mH_{n-1}} + B_{n-1}(m)e^{mH_{n-1}} \right] J_0(mr) dm = \int_0^\infty \left[A_n(m)e^{-mH_{n-1}} \right] J_0(mr) dm$$

② 电流密度法向分量连续： $j_{n-1,n}^+ \Big|_{z=H_{n-1}} = j_{n,n}^- \Big|_{z=H_{n-1}}$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\rho_{n-1}} \int_0^\infty \left\{ -A_{n-1}(m)e^{-mH_{n-1}} + B_{n-1}(m)e^{mH_{n-1}} \right\} mJ_0(mr) dm \\ &= \frac{1}{\rho_n} \int_0^\infty \left[-A_n(m)e^{-mH_{n-1}} \right] mJ_0(mr) dm \end{aligned}$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

- 由于 r 和 m 的任意性，上面连续性条件中所有的积分号都可以去掉；
- 另外，由于电测深工作是在地面进行的，故只需解出 $A_1(m)$
- 求解上边的线性代数方程组，可求出 $A_1(m)$ 系数：
- 对于2层：

$$A_1^{(2)}(m) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \frac{K_{12} e^{-2mh_1}}{1 - K_{12} e^{-2mh_1}} \quad K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解 $U_1 = \int_0^\infty \left[\frac{\rho_1 I}{2\pi} e^{-mz} + A_1(m)(e^{mz} + e^{-mz}) \right] J_0(mr) dm$

• 对于3层:

$$A_1^{(3)}(m) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \frac{K_{12} e^{-2mh_1} + K_{23} e^{-2m(h_1+h_2)}}{1 - K_{12} e^{-2mh_1} - K_{12} e^{-2m(h_1+h_2)} + K_{12} K_{23} e^{-2mh_2}}$$

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

$$K_{23} = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2}$$

电反射系数

• 地面上($z=0$)电位表达式:


$$U_1(r, 0) = \int_0^\infty \left[\frac{\rho_1 I}{2\pi} + 2A_1(m) \right] J_0(mr) dm$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

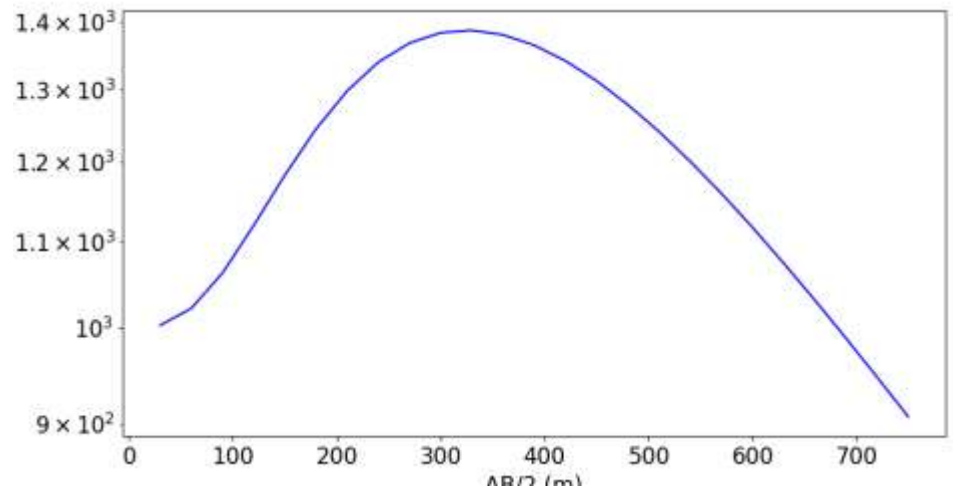
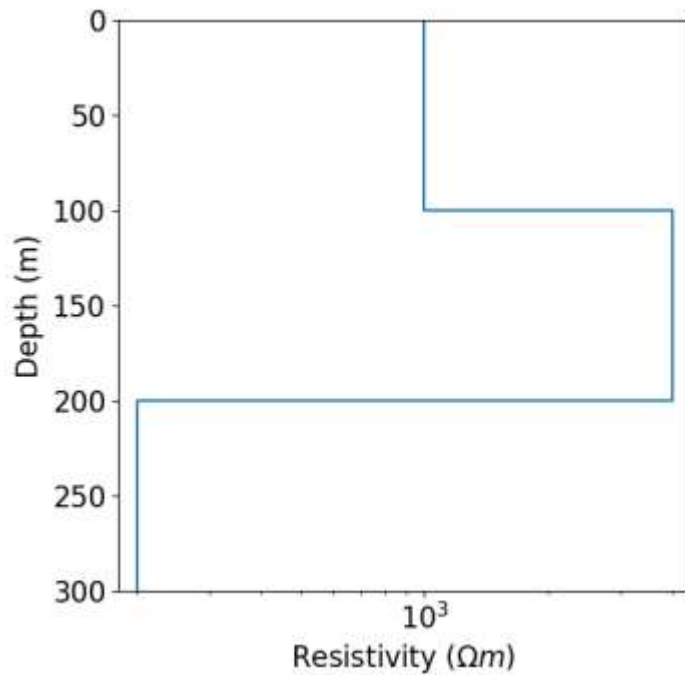
$$U_1(r, 0) = \int_0^{\infty} \left[\frac{\rho_1 I}{2\pi} + 2A_1(m) \right] J_0(mr) dm$$

$$\text{令: } A_1(m) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} A(m)$$


$$U_1(r, 0) = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \int_0^{\infty} [1 + 2A(m)] J_0(mr) dm$$

3. 复杂介质中点电源的电场

■ 层状模型电位的通解

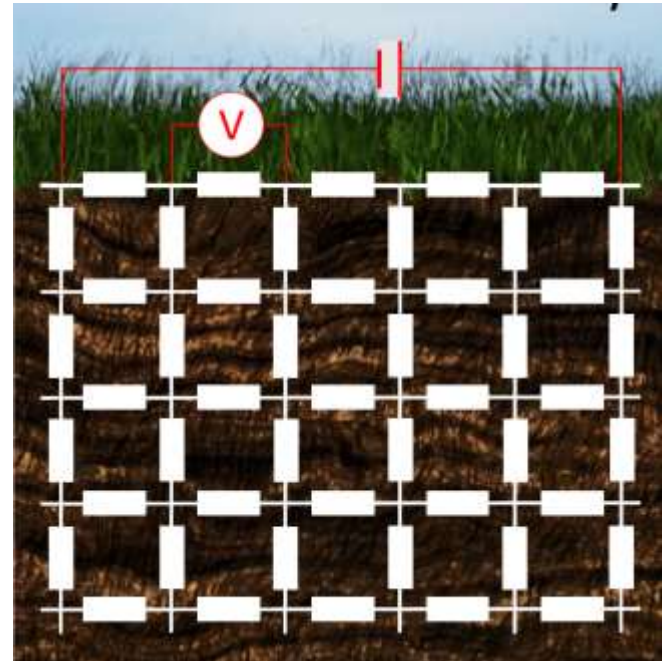


3. 复杂介质中点电源的电场

■ 2D、3D介质

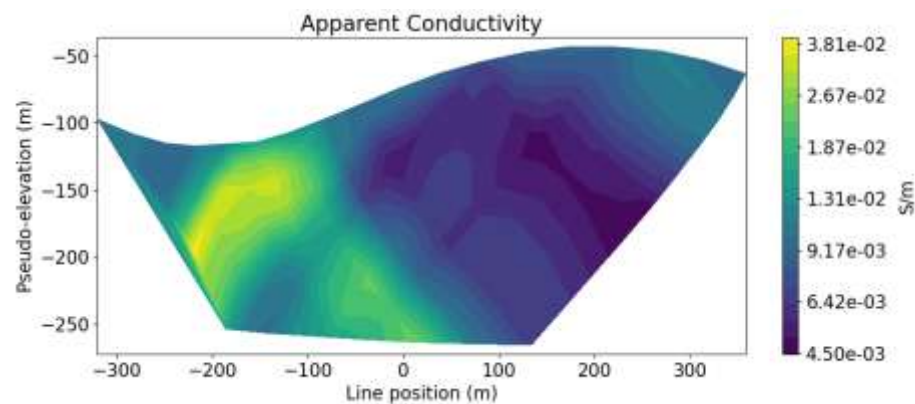
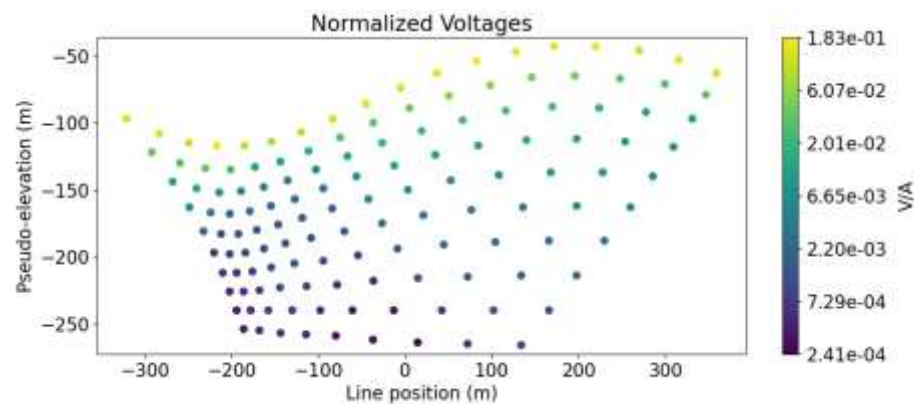
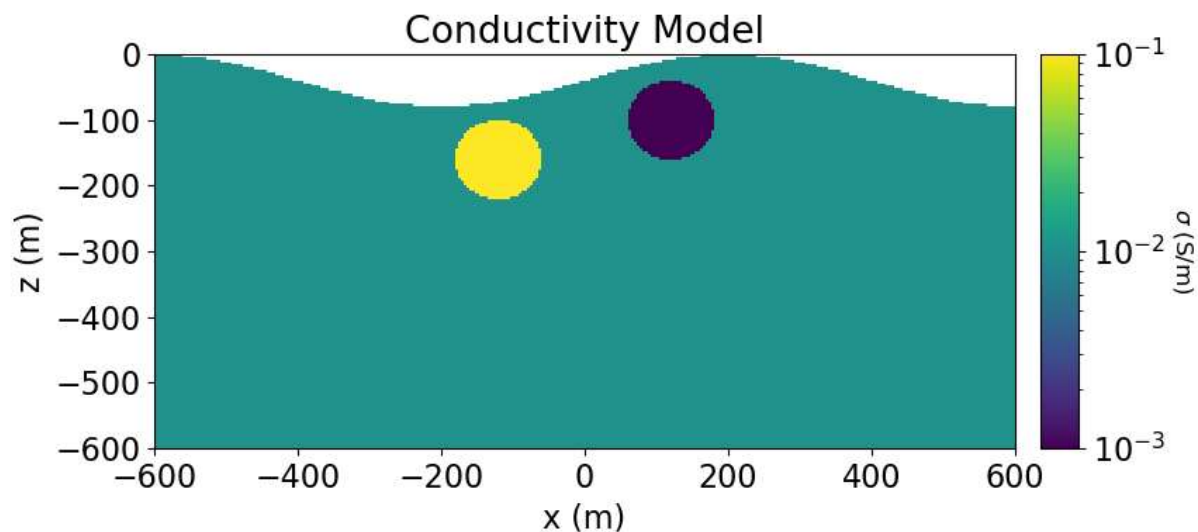
$$\nabla \cdot \sigma \nabla U = -I \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0)$$

- ✓ 有限差分法
- ✓ 有限元法
- ✓ 有限体积法
- ✓ 电路分析法



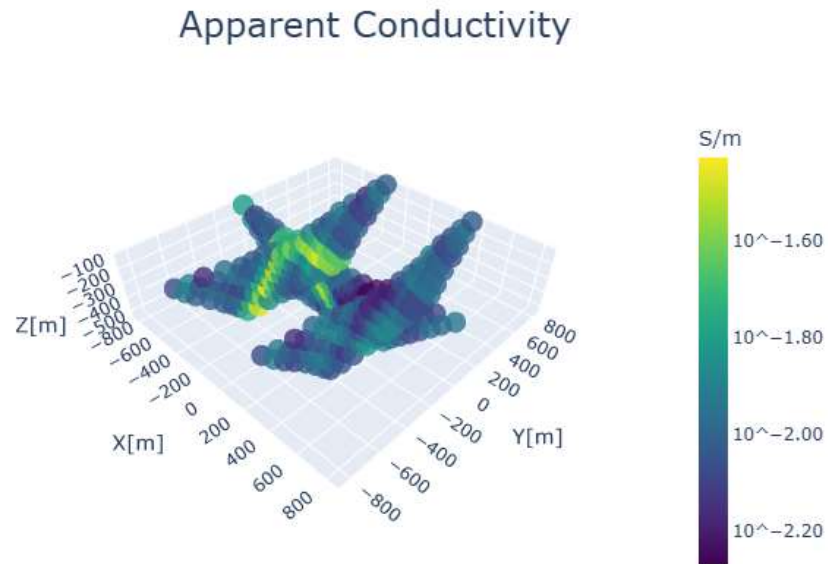
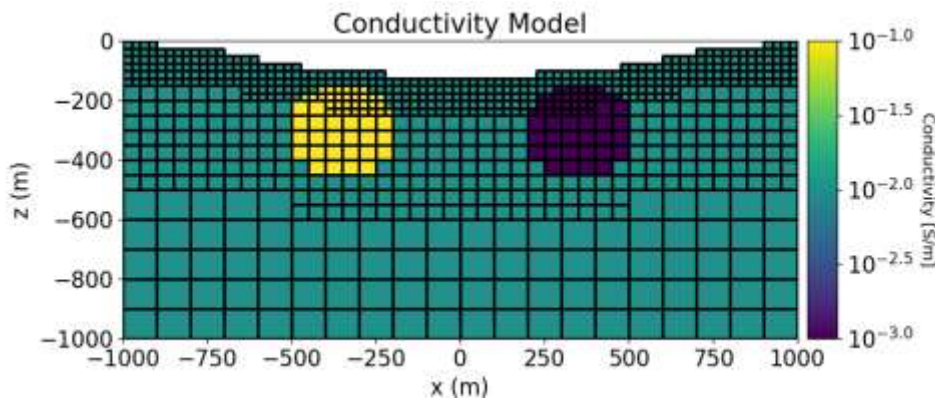
3. 复杂介质中点电源的电场

■ 2. 5D正演模拟



3. 复杂介质中点电源的电场

■ 3D正演模拟

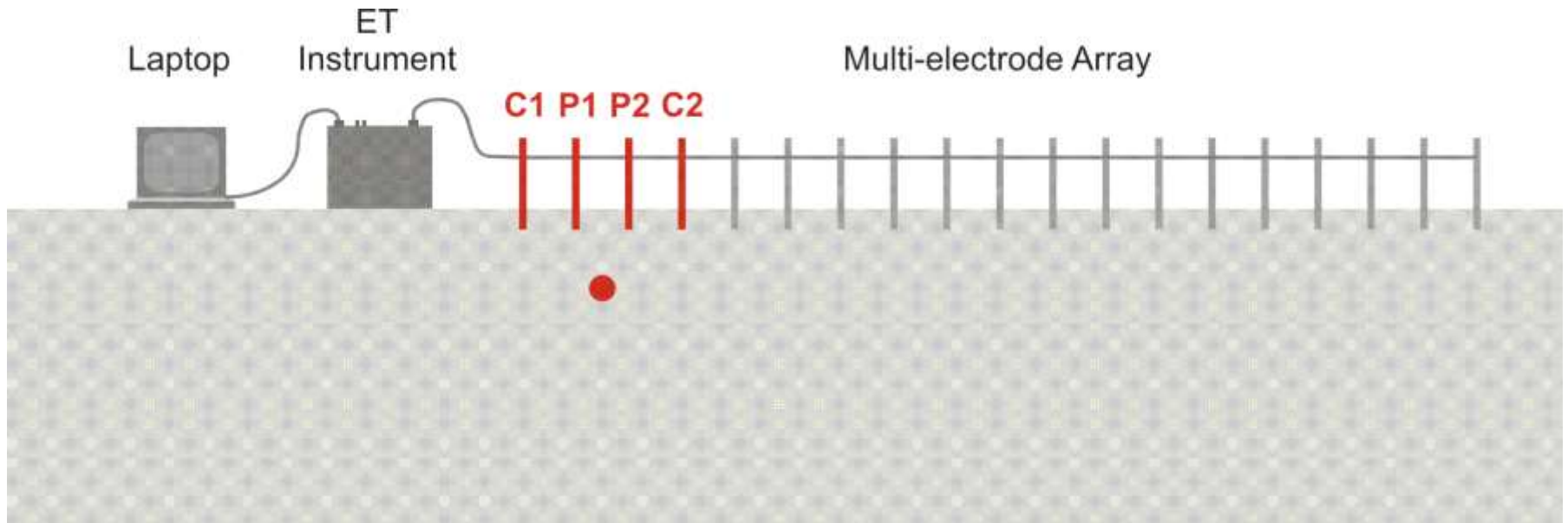


目 录

第一节 电阻率法

1. 稳定电流场的基本定律
2. 简单介质中点电源的电场
3. 复杂介质中点电源的电场
4. 电法观测装置

4. 电法观测装置



电极的移动、电极之间的距离变化

装置（电极阵列）是实施电阻率测量时的不同电极排列。电极阵列的开发是为了提高现场测量效率，使数据解释更容易。

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

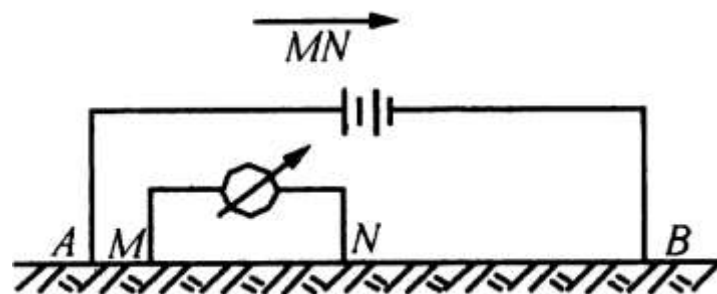
电阻率剖面法：简称电剖面法，用供电电极（ A 、 B ）向地下供电，同时在测量电极（ M 、 N ）间测量电位差（ ΔU_{MN} ），并计算出视电阻率（ ρ_s ）。各电极可沿选定的测线同时（或仅测量电极）逐点向前移动和观测。剖面法常用于探查地下一定深度范围内的横向电性变化，以此解决多种地质问题。

4. 电法观测装置

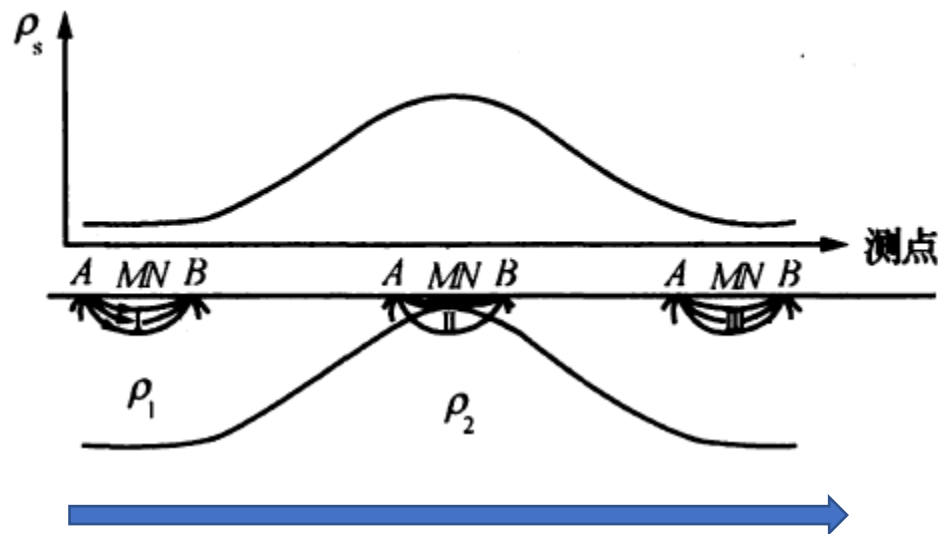
■ 电阻率剖面法

特点：供电电极 AB 不动，测量电极 MN 在 AB 中间 $AB/3$ 范围内沿测线逐点移动，观测 MN 间的电位差 ΔU_{MN} ，并利用下式计算视电阻率

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$
$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$



中间梯度法



4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

方法特点：研究地电断面横向变化的一类方法——采用固定的电极距，沿剖面移动电极装置，观测一定深度范围内视电阻率沿剖面的变化。

解决主要地质问题：探测产状陡立的高、低阻体，如划分不同岩性接触带、追索断层及构造破碎带。

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

- ✓ 常用的几种电剖面法装置形式，视电阻率曲线特征
- ✓ 电剖面法野外常见问题

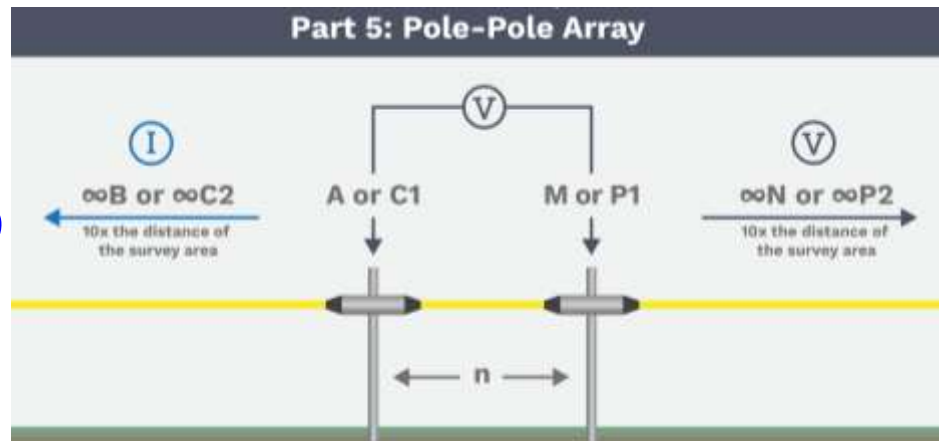
4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

两极装置（单极-单极装置）

供电电极 B 和测量电极 N 均置于“无穷远”处**接地**。

这里所指的“无穷远”具有相对概念，如对 B 极而言，若相对 A 极在 M 极产生的电位小到实际上可以忽略时，便可视 B 极为无穷远；对 N 极而言，若 A 极在 N 极产生的电位相对 M 极很小以至可以忽略时，便认为 N 极位于无穷远，并取那里的电位为零。因此，二极装置实际是一种测量电位的装置。



$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad K_{AM} = 2\pi AM$$

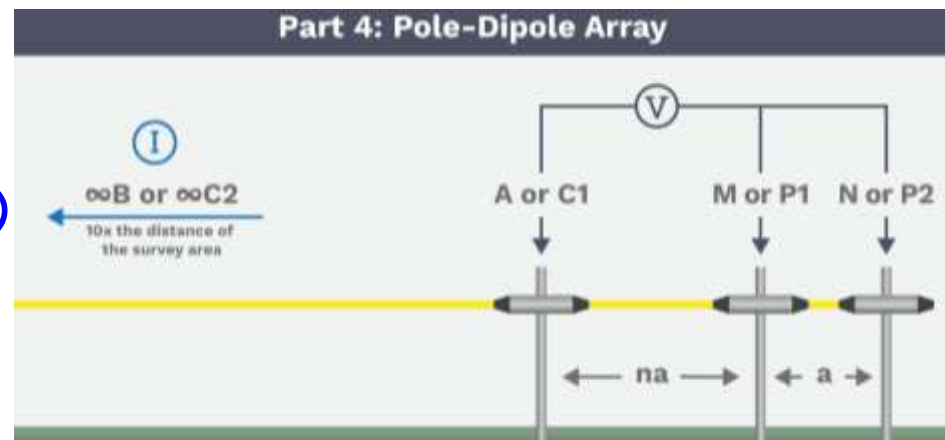
4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

三极装置（单极-偶极装置）

三极装置的特点是，供电电极B置于无穷远处接地，

N与A、M 处于一条直线，三极装置通常取MN的**中点**作为**记录点**，三极装置的视电阻率表达式为：



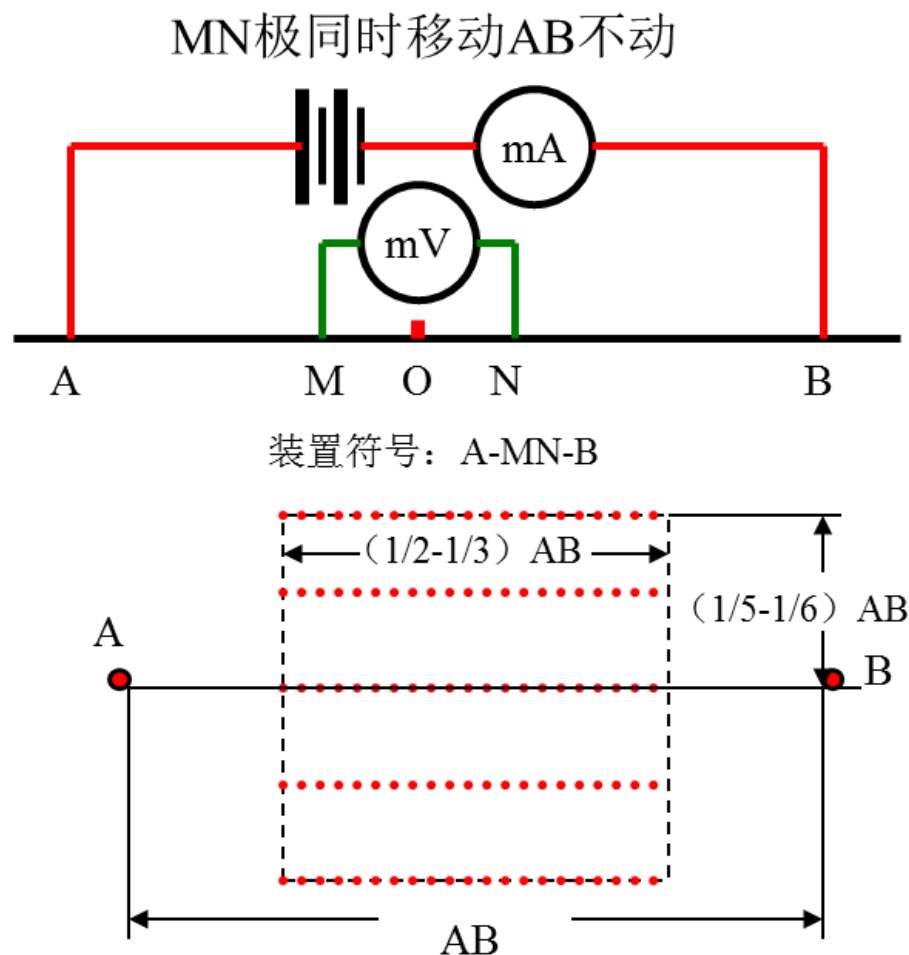
$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad K_{AMN} = \frac{2\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$$

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

中间梯度装置

- ✓ 中梯装置的A、B供电电极距通常为 $(30\sim 50)MN$ 。工作时 **AB不动**，测量电极 **MN** 在供电电极中部 $1/3AB$ 之间的范围内 **同时移动**，逐点测量。
- ✓ **MN** 也可在 **AB** 所在测线 $1/6AB$ 范围内 **旁测线上观测**，一次供电同时在几条测线上观测，大大提高工作效率。

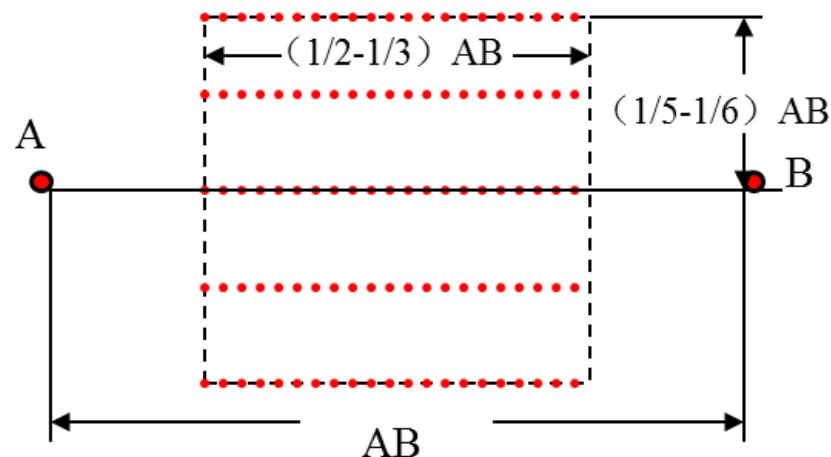


4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

中间梯度装置

- ✓ 主测线，旁测线 MN 移动均需在 $1/3AB$ 范围内移动；
 - ✓ 电极装置系数 K 不是常数，需提前计算好；
 - ✓ 中梯对寻找陡倾的**高阻岩脉**效果较好，而对于陡倾的**低阻地质体**则效果差
- 为什么要在 $1/3AB$ 范围内测量？



$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

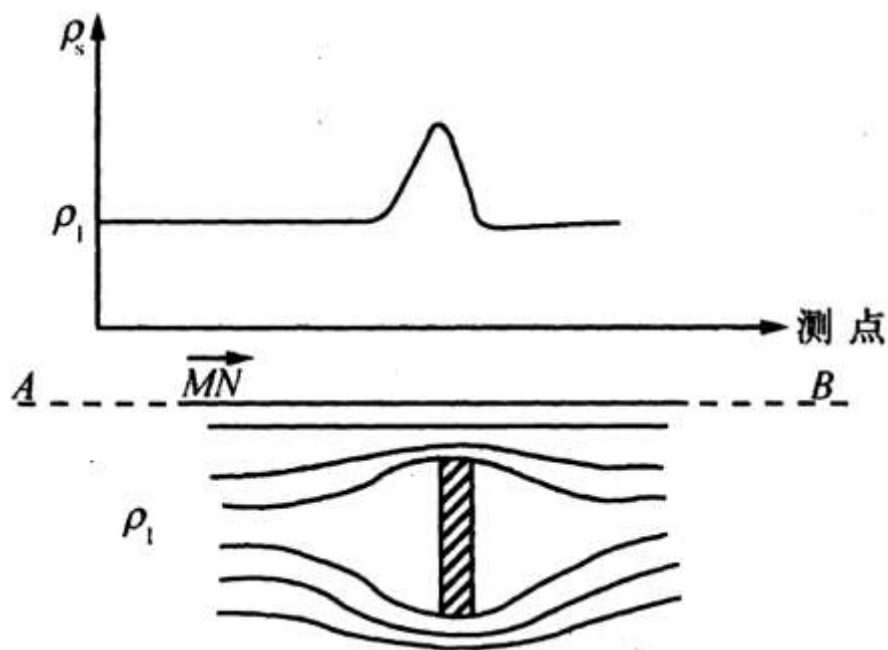
$$K_{MN} = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

中间梯度装置

直立高阻薄脉 ρ_s 曲线特征



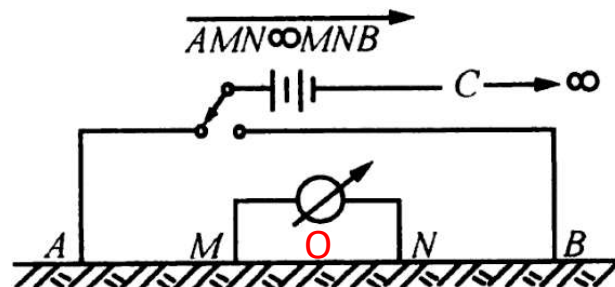
- ✓ 直立高阻脉阻挡电流线；
- ✓ 电流线从其上下方低阻层中通过；
- ✓ 高阻脉上方电流密度增大；
- ✓ 视电阻率升高；

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \rho_{MN}$$

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

联合剖面装置 ($AMN \infty MNB$)

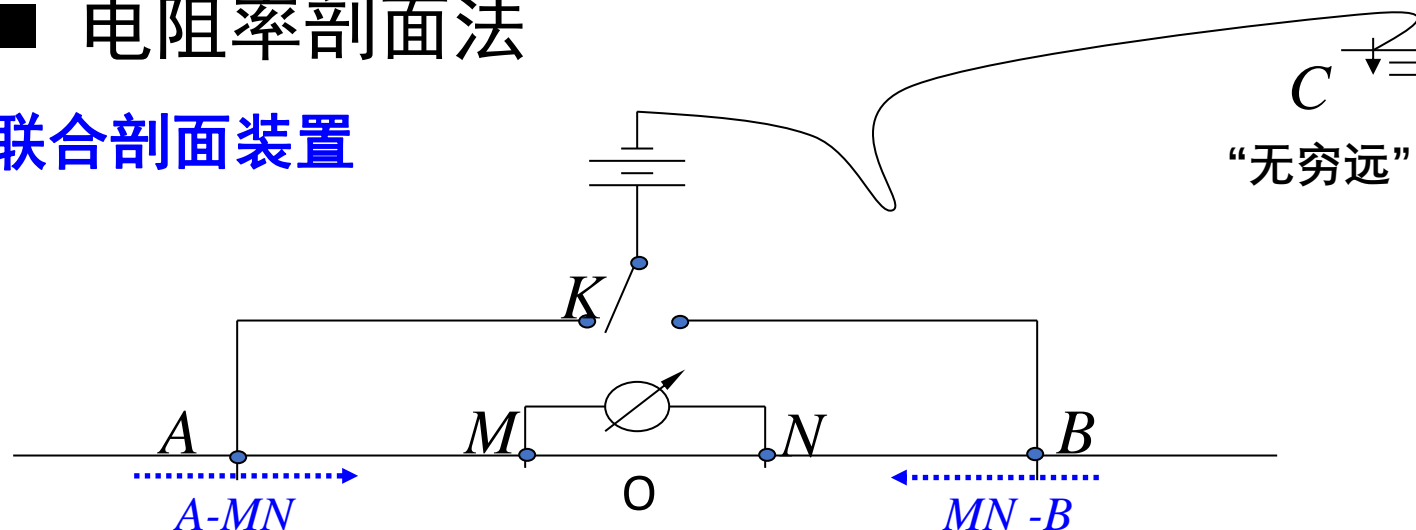


- ✓ 由两个三极装置联合组成，故称为联合剖面装置；
- ✓ AMN 为一个三级装置， MNB 为一个三级装置；
- ✓ A, B 均为点源的正极，电源负极 C 位于无穷远处，电源正极可接 A ，也可接 B ；
- ✓ 电极排列以测点 O 呈左右对称， $AO = BO, MO = NO$ ， $OC \geq 5AO$
- ✓ 联合剖面法对于寻找低阻、陡倾的矿脉（或含水断裂破碎带）有较好的效果，采用不同极距的联合剖面测量可以了解矿体向深部延伸的情况。

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

联合剖面装置



横向分辨能力强，
异常明显；适合于
水文、工程地质及
构造找矿。

装置相对笨重，地
形影响大；解释时
具体分析。

$$AO = BO > 3h; \quad MN = 1/3 \sim 1/5 AO$$

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

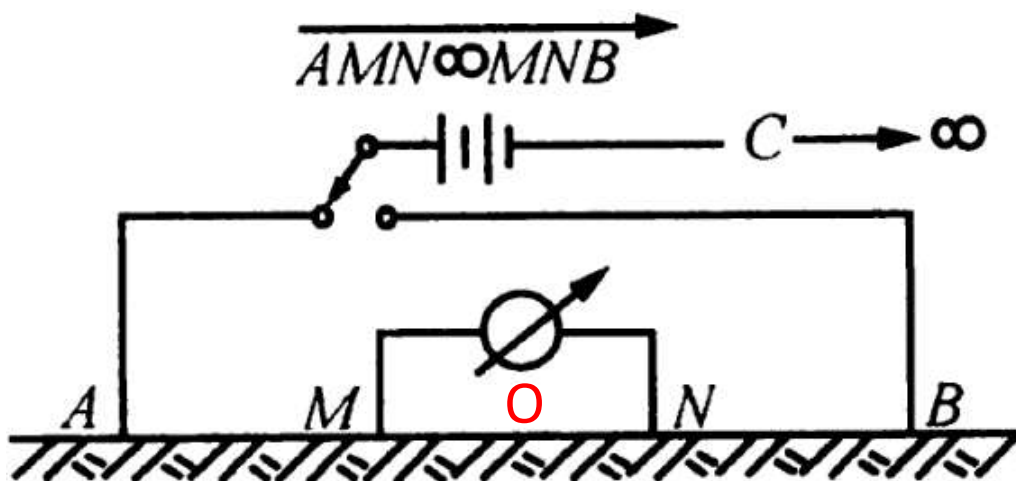
联合剖面装置

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}^{A/B}}{I}$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

$$K_{AMN} = \frac{2\pi \cdot AM \cdot AN}{MN}$$

$$K_{MNB} = \frac{2\pi \cdot MB \cdot NB}{MN}$$



4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

联合剖面装置

几种规则形状地质体联合剖面 ρ_s 曲线分析

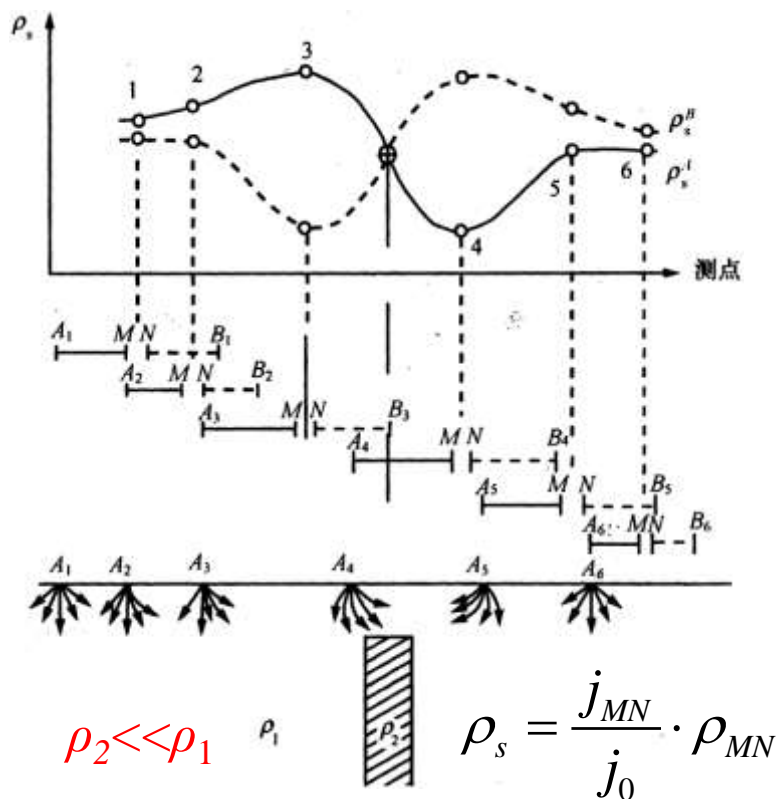
- ✓ 良导直立薄脉 ρ_s 曲线分析及其特征；
- ✓ 高阻直立岩脉 ρ_s 曲线特征；

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN}$$

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

良导直立薄脉



- 位置1: $j_{MN} = j_0$, $\rho_{MN} = \rho_1$

$$\rightarrow \rho_s^A = \rho_1$$

- 位置2: $j_{MN} > j_0$, $\rho_{MN} = \rho_1$

$$\rightarrow \rho_s^A > \rho_1$$

- 位置3: $j_{MN} > j_0$, $\rho_{MN} = \rho_1$

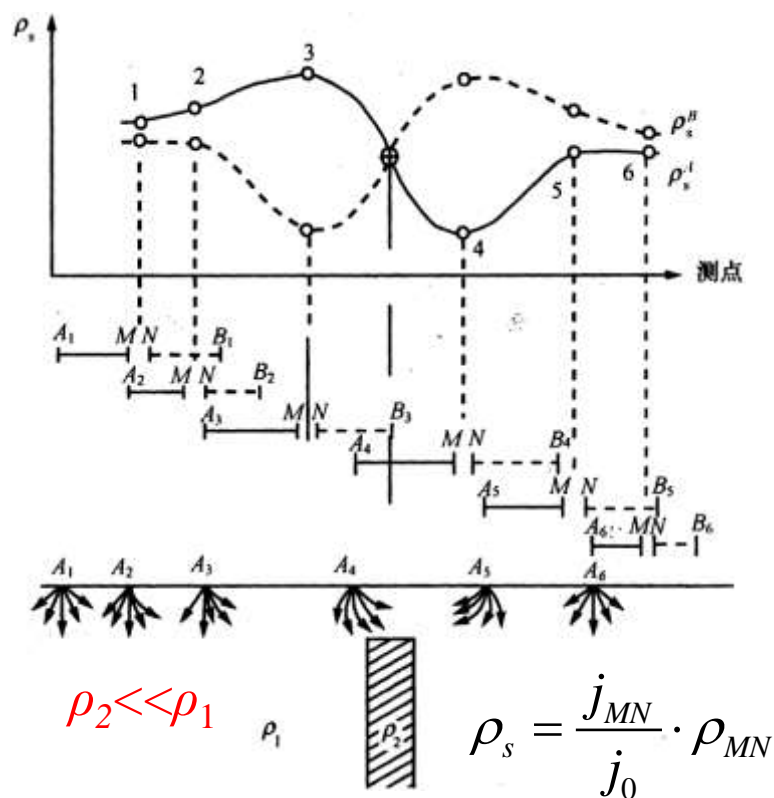
$$\rightarrow \rho_s^A > \rho_1$$

ρ_s^A 取得极大值

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

良导直立薄脉



- 位置4: $j_{MN} < j_0$, $\rho_{MN} = \rho_1$

$$\rightarrow \rho_s^A < \rho_1$$

ρ_s^A 取得极小值

- 位置5: $j_{MN} < j_0$, 但 j_{MN} 比位置4处大, ρ_s^A 升高

- 位置6: $j_{MN} = j_0$, $\rho_{MN} = \rho_1$

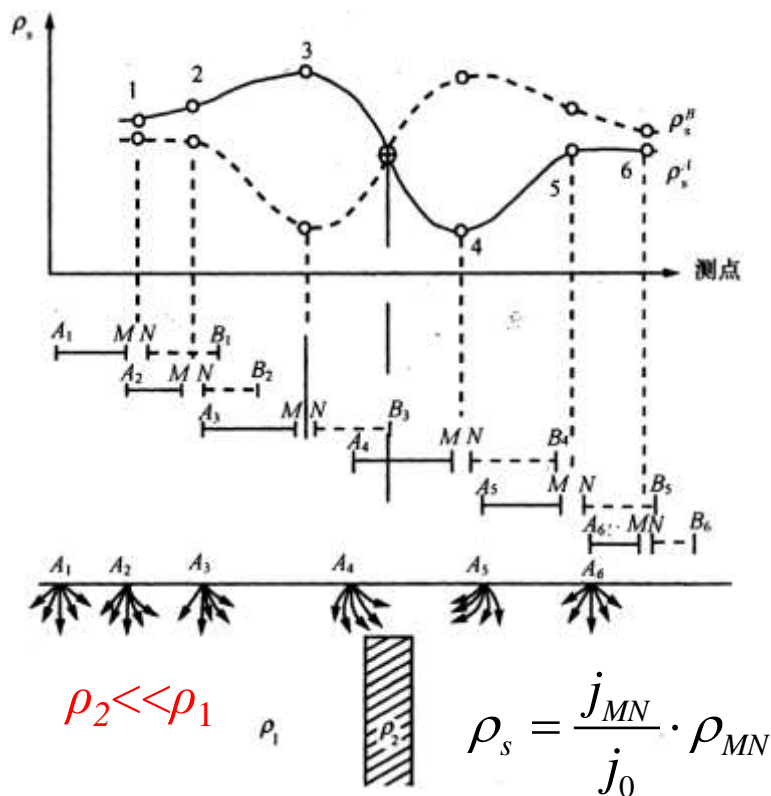
$$\rightarrow \rho_s^A = \rho_1$$

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

良导直立薄脉

联合剖面装置



● 可以类似的分析 ρ_s^B 曲线

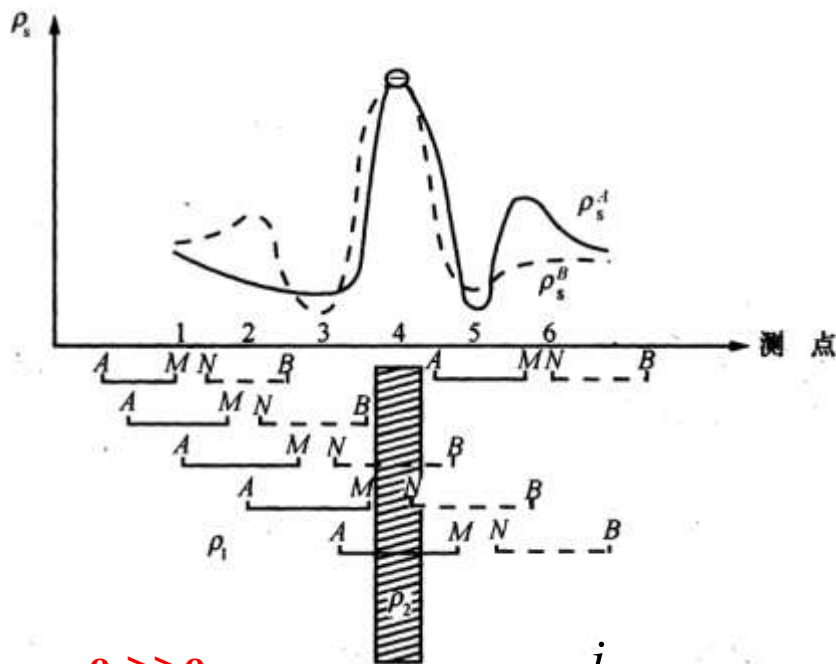
● ρ_s 曲线特征:

- ρ_s^A 与 ρ_s^B 曲线相交与矿脉上方;
- 交点两侧二曲线呈两翼张开状态;
- 左侧 $\rho_s^A > \rho_s^B$
- 右侧 $\rho_s^A < \rho_s^B$
- 可以利用低阻正交点的位置来确定良导脉在地面上的投影位置。

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

高阻直立薄脉



$\rho_2 \gg \rho_1$

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN}$$

联合剖面装置

● 高阻脉排斥电流；

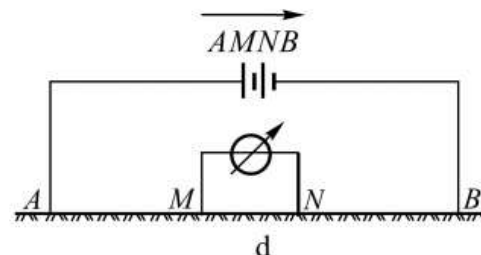
● ρ_s 曲线特征：

- ρ_s^A 与 ρ_s^B 曲线交点视电阻率值远高于围岩电阻率值（高阻反交点）；
- 左侧 $\rho_s^A < \rho_s^B$ ，右侧 $\rho_s^A > \rho_s^B$
- 交点位置对应高阻脉在地面上投影；
- 交点两侧二曲线呈两翼闭拢状态；

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

球体的视电阻率异常



对称四极

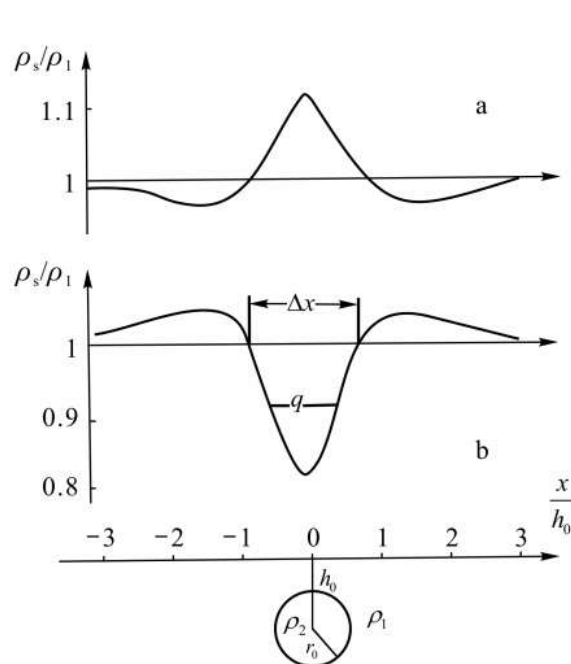


图 1.2.4 球体主剖面上中梯法的 ρ_s 曲线

a— $\mu_2 = 10$; b— $\mu_2 = 0.1$, $h_0 = 2r_0$

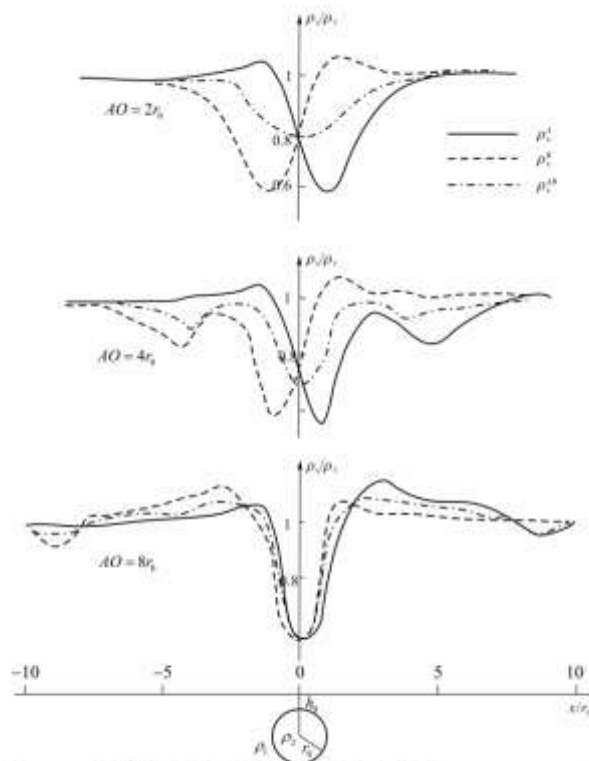


图 1.2.16 低阻球体上联剖和对称四极剖面法的 ρ_s 曲线 ($\mu_2 = 0.05$; $h_0 = 1.5r_0$)

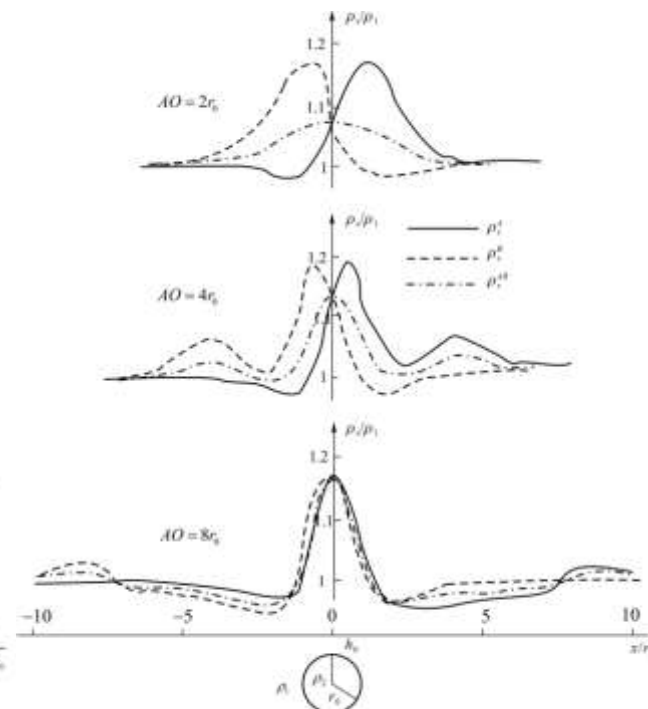


图 1.2.17 高阻球体上联剖和对称四极剖面的 ρ_s 曲线 ($\mu_2 = 5$, $h_0 = 1.5r_0$)

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法

球体的视电阻率异常

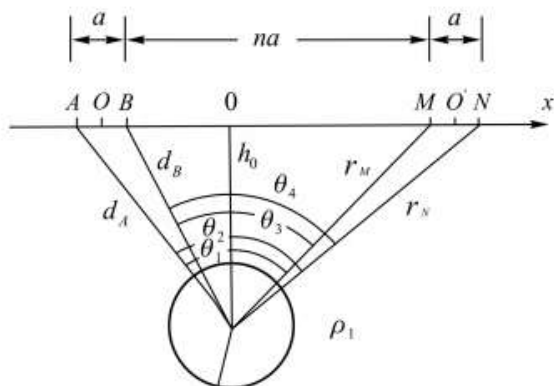
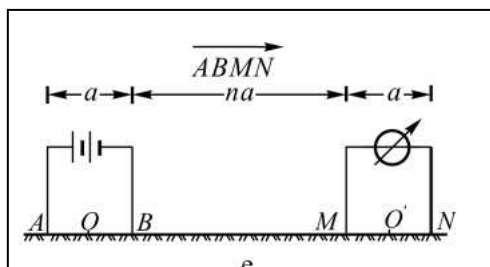


图 1.2.19 球体上偶极装置的电位计算

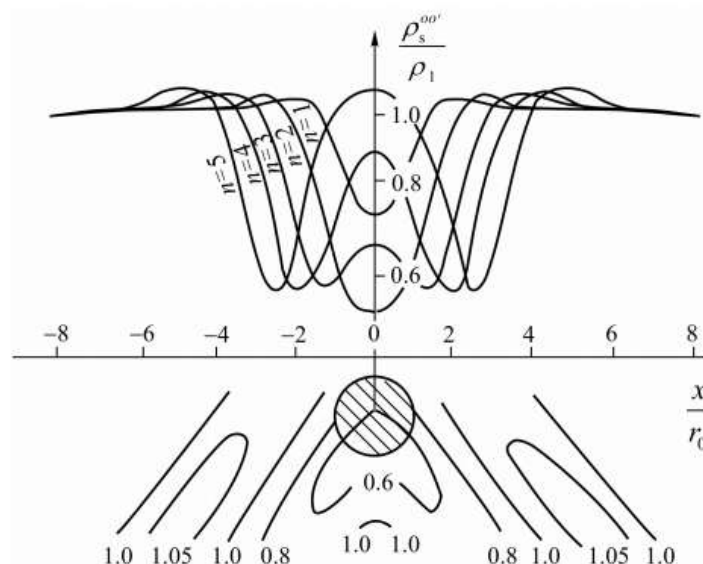


图 1.2.21 低阻球体上偶极剖面法的 ρ_s 剖面曲线与等值线断面图

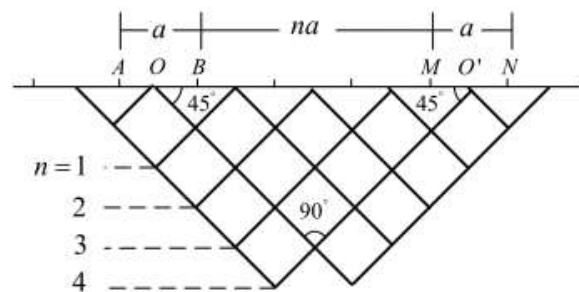
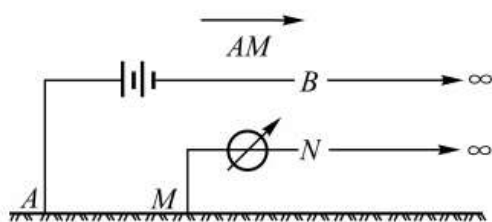


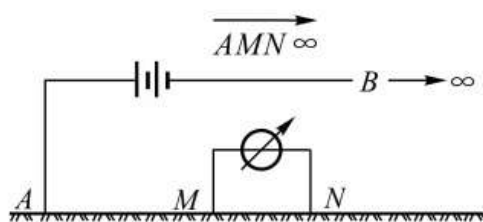
图 1.2.20 偶极剖面法等值断面图的绘制方法示意图

4. 电法观测装置

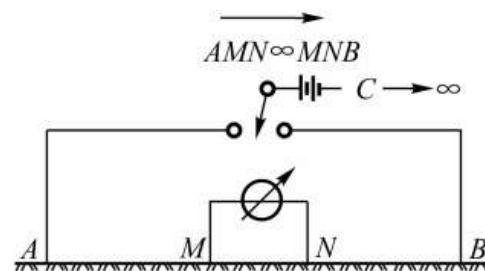
■ 电阻率剖面法



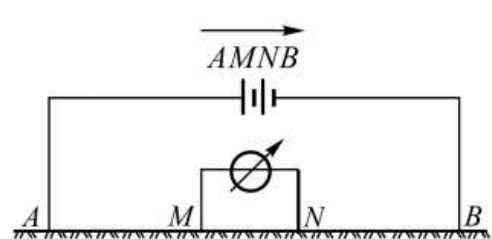
a



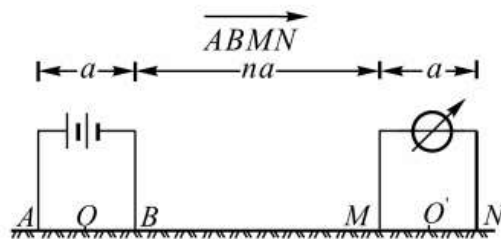
b



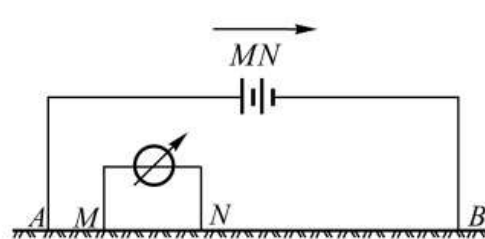
c



d



e

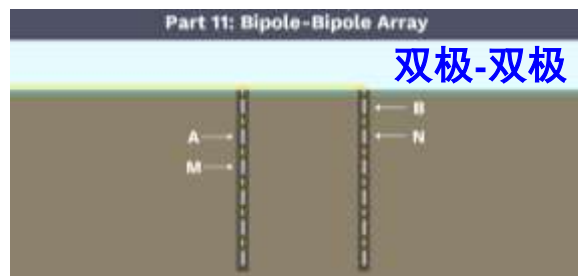
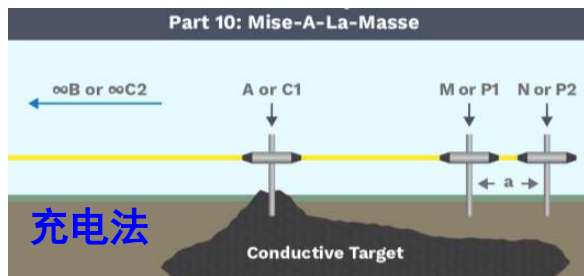
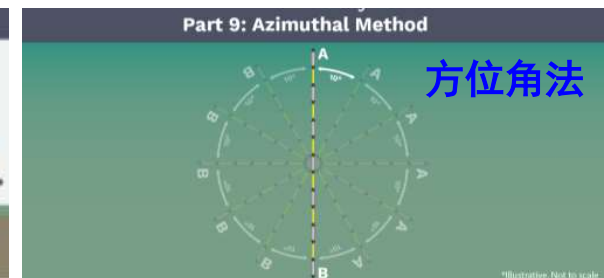
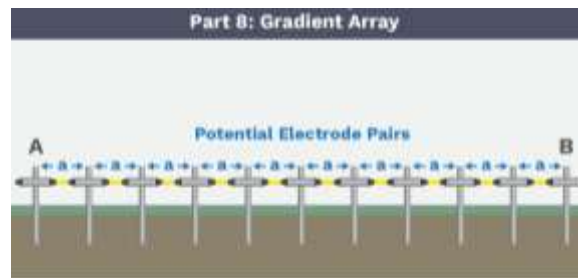
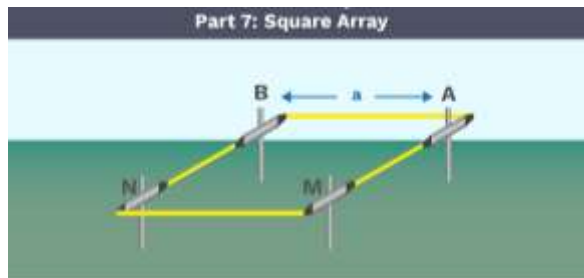
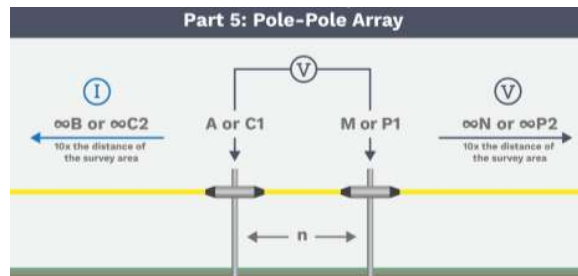
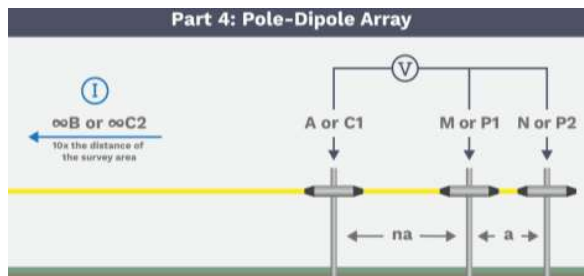
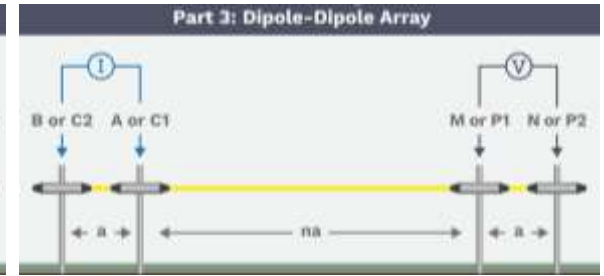
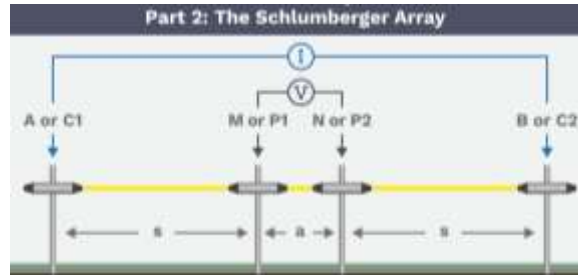
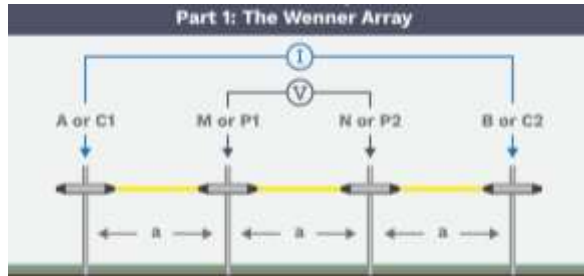


f

常见装置

a—二极装置；b—三极装置；c—联合剖面装置；
d—对称四极装置；e—偶极装置；f—中间梯度法装置

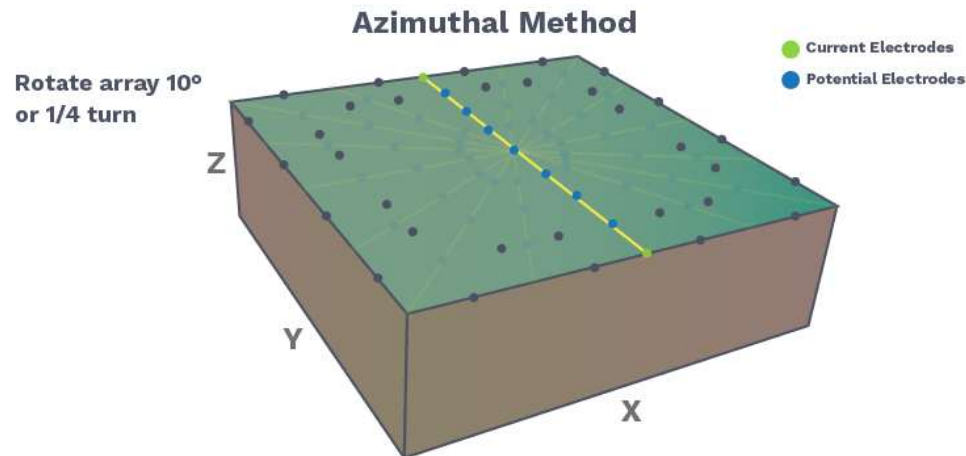
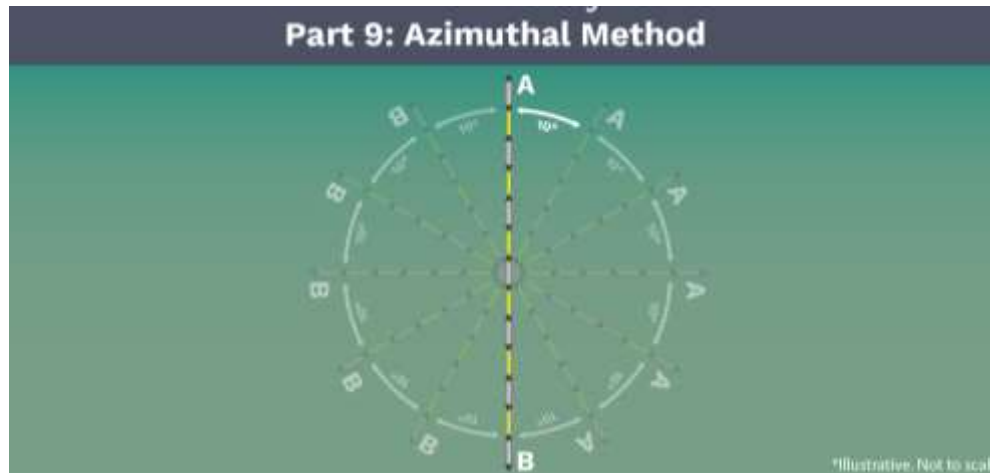
4. 电法观测装置



常见装置

4. 电法观测装置

■ 电阻率剖面法



方位角法

4. 电法观测装置

■ 电测深法

电测深法是以地下岩（矿）石的**电性差异**为基础，人工建立地下稳定直流电场或脉动电场，通过逐次**加大供电（或发送）与测量（或接收）电极极距**，观测与研究**同一测点下垂直方向不同深度范围岩（矿）层电阻率的变化规律**，以查明矿产资源或解决与深度有关的各类地质问题的一组直流电法勘探方法。

电阻率测深法应用：勘探石油；煤田地质构造；水文地质问题；金属矿床；解决浮土厚度；基岩起伏；估算矿体埋深。

应用条件：岩层水平或缓倾斜（倾角小于 20° ），并有明显的电性差。

特点：划分不同深度的电性层，求出各层的厚度及电阻率。

4. 电法观测装置

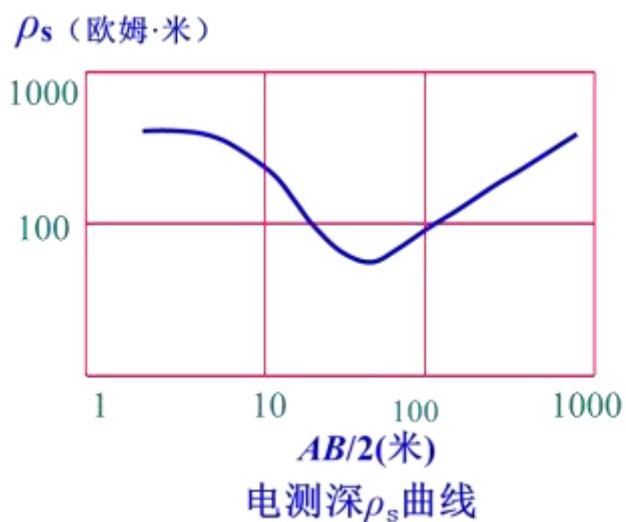
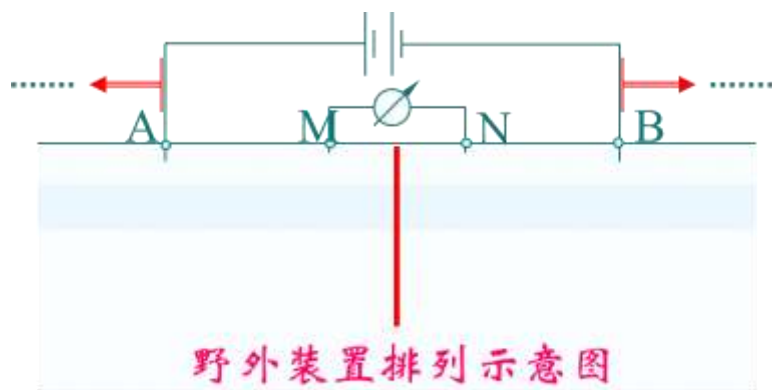
■ 电测深法

勘探目的：了解某一地区垂直向下由浅到深的视电阻率等方面的地质变化的情况，从而提出了电测深这一方法。

勘探方法：是基于在同一个测点上逐次扩大电极距，使探测深度逐渐加深，这样便可得到观测点处沿垂直方向的变化情况。

4. 电法观测装置

■ 电测深法



如图常用的对称四极测深是以测点为中心， AB 极距对称于测点向两旁按一定倍数增加， MN 分段固定（另一种方法是 MN 与 AB 极距保持固定比例）可测出每一 AB 极距下的 ρ_s 值，用双对数坐标纸绘制电测深曲线。

4. 电法观测装置

■ 电测深法

引起 ρ_s 曲线变化主要因素：各电性层的厚度、电阻率的大小、层数的多少以及电极距的长短。

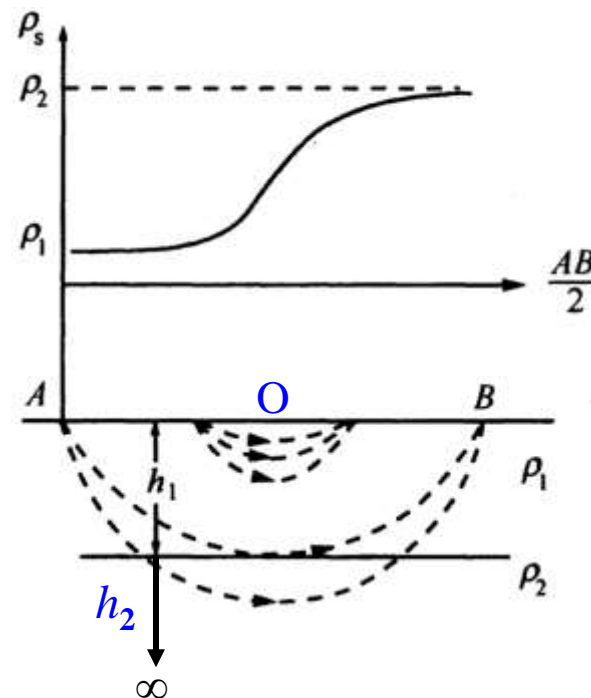
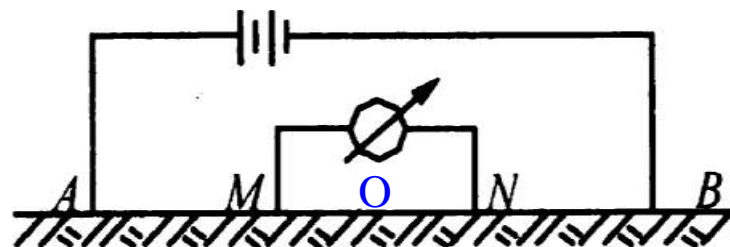
电测深法最合适的探测对象：水平或相当平缓（倾角不超过20度）的岩层。在这种条件下，可以定量地求出各电性层的厚度和电阻率。

4. 电法观测装置

■ 电测深法

根据电极排列又可分为对称四级测深、三级测深及偶极测深，实际工作中常用的是**对称四级测深**。

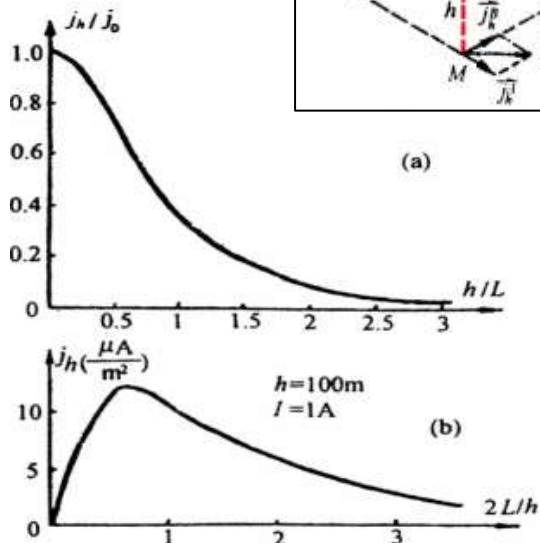
$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$
$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$





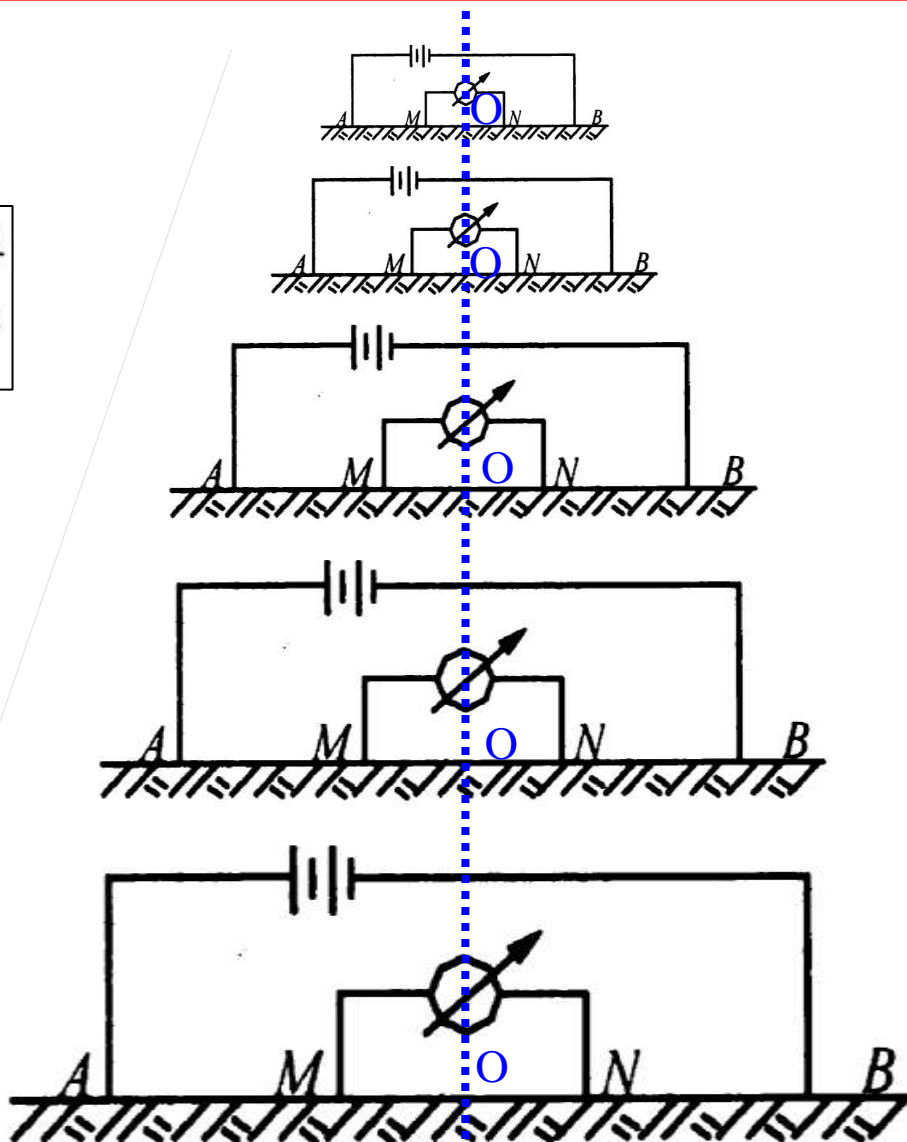
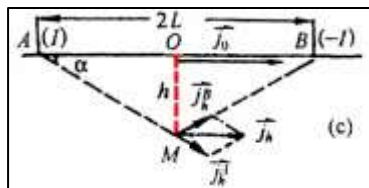
4. 电法观测装置

■ 电测深法



$$j_h = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{L}{[h^2 + L^2]^{3/2}}$$

$$L=AB/2$$




观测顺序

4. 电法观测装置

■ 电测深法

测量原理

- ✓ 基本出发点：勘探深度  供电极距大小
- ✓ 在同一测点，不断扩大供电极距 AB 距离，可以了解
岩石电阻率随深度的变化情况
- ✓ 以二层电测深曲线为例，说明电测深法的基本原理

4. 电法观测装置

■ 电测深法

测量原理

地下介质： $\rho_1, h_1; \rho_2, h_2 \rightarrow \infty; \rho_1 < \rho_2$

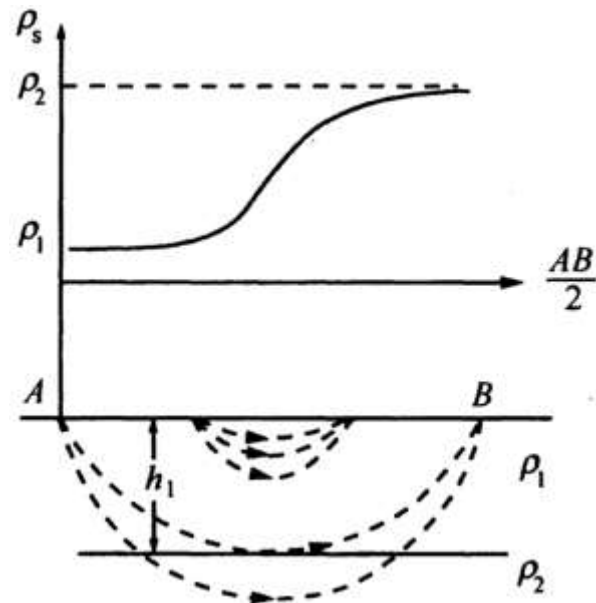
测点： AB 中点 O ， $AMONB$ 为一条直线

测量量： $\Delta U_{MN}, I$

分析： $AB/2 \ll h_1$ ， $AB/2$ 增大， $AB/2 \gg h_1$

$AB/2 \ll h_1$ ，近似为均匀无限大介质

$j_{MN} = j_0, \rho_{MN} = \rho_1 \rightarrow \rho_s = \rho_1$



$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN}$$

4. 电法观测装置

■ 电测深法

测量原理

地下介质： $\rho_1, h_1; \rho_2, h_2 \rightarrow \infty; \rho_1 < \rho_2$

测点： AB 中点 O ， $AMONB$ 为一条直线

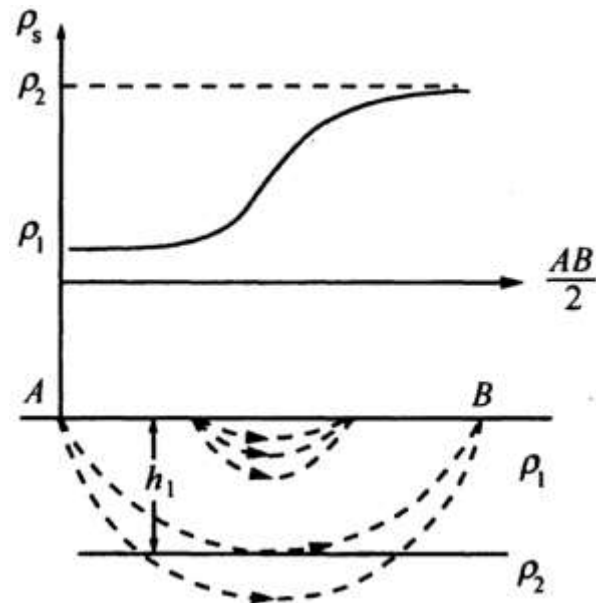
测量量： $\Delta U_{MN}, I$

分析： $AB/2 \ll h_1$ ， $AB/2$ 增大， $AB/2 \gg h_1$

$AB/2$ 增大，电流穿透至第二层，

$\rho_1 < \rho_2$ 排斥电流，使得 $j_{MN} > j_0$ ，

$\rho_{MN} = \rho_1 \rightarrow \rho_s > \rho_1 \rightarrow AB/2 \uparrow, \rho_s \uparrow$



$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN}$$

4. 电法观测装置

■ 电测深法

测量原理

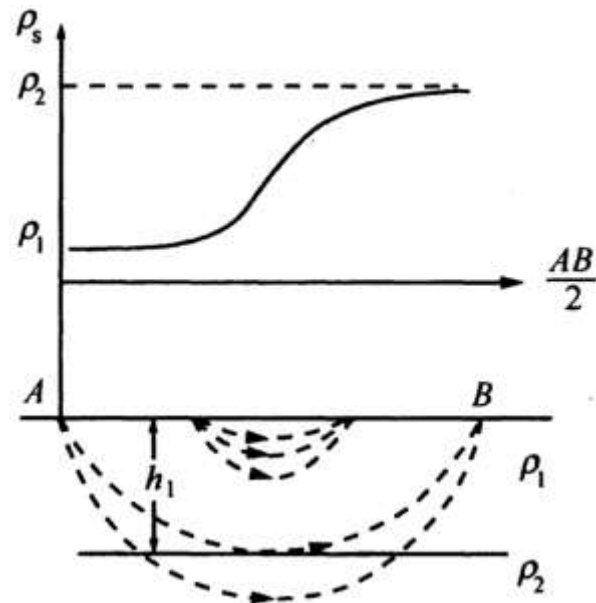
地下介质： $\rho_1, h_1; \rho_2, h_2 \rightarrow \infty; \rho_1 < \rho_2$

测点： AB 中点 O ， $AMONB$ 为一条直线

测量量： $\Delta U_{MN}, I$

分析： $AB/2 \ll h_1$ ， $AB/2$ 增大， $AB/2 \gg h_1$

$AB/2 \gg h_1$ ， AB 控制的电流深度远大于 h_1 ， h_1 与其相比仅是很薄的一层，近似认为电场均匀分布在第二层介质中。均匀介质中电阻率等于该层岩石的真电阻率，即 $\rho_s = \rho_2$



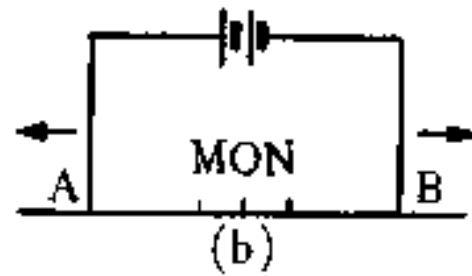
$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

$$\rho_s = \frac{j_{MN}}{j_0} \cdot \rho_{MN}$$

4. 电法观测装置

■ 电测深法

Schlumberger电测深法



这种装置排列的特点是，供电电极 AB 的间距较大，测量电极 MN 较小，且放置在 AB 中间的 $1/3$ 的位置，测量时逐渐拉大 AB ，使探测深度增大。其视电阻率表达式为：

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

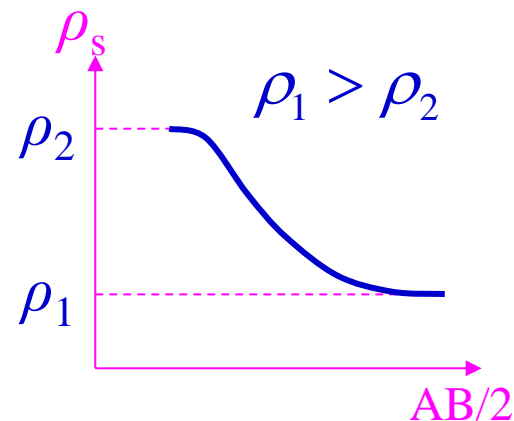
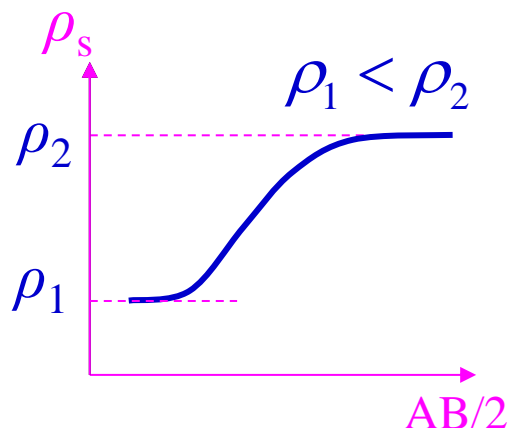
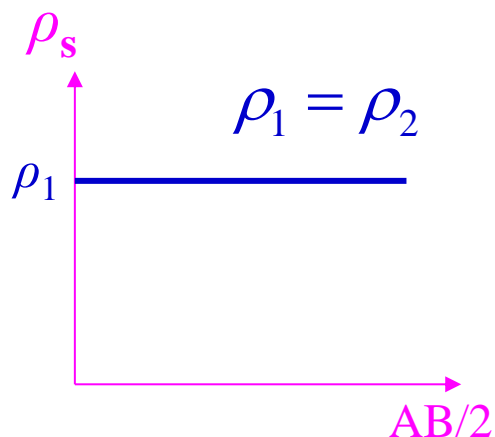
$$K = 2\pi \frac{AM \cdot AN \cdot BM \cdot BN}{MN(AM \cdot AN + BM \cdot BN)}$$

4. 电法观测装置

■ 电测深法

Schlumberger电测深法 水平两层电测深曲线

水平两层断面包括三个数： ρ_1 、 ρ_2 及 h 。两曲线基本形态的是 ρ_1 和 ρ_2 两者之大小关系。它们可能有如下两种关系：



4. 电法观测装置

■ 电测深法

Schlumberger电测深法 水平三层电测深曲线

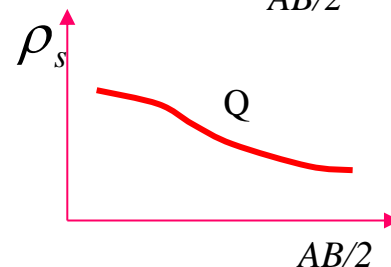
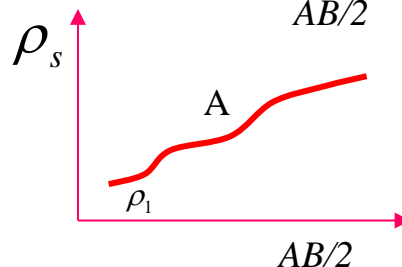
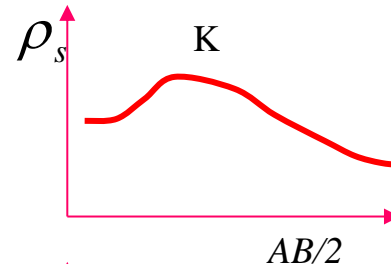
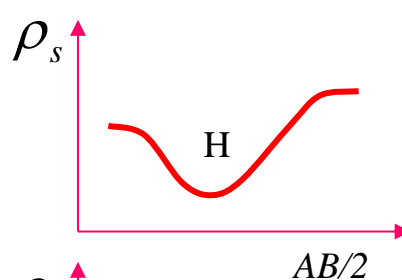
水平两层断面包括三个数： ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 及 h_1 、 h_2 。三层曲线较二层曲线复杂，但决定三层曲线基本形态的 ρ_1 、 ρ_2 和 ρ_3 三者之大小关系。它们可能有如下四种关系：

H型三层曲线： $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$

A型三层曲线： $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$

K型三层曲线： $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

Q型三层曲线： $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

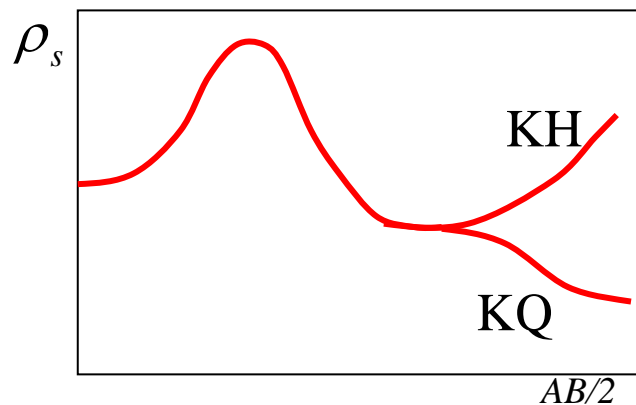
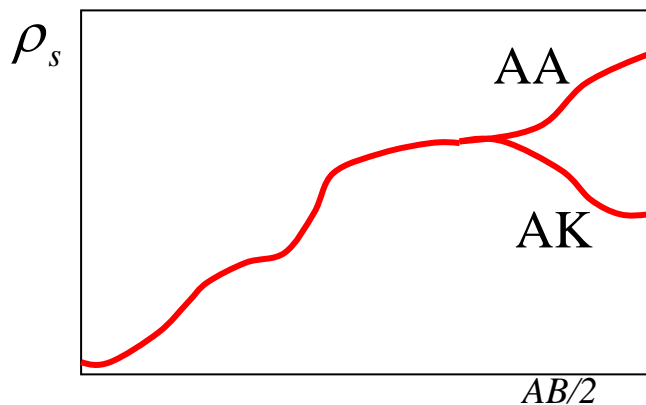
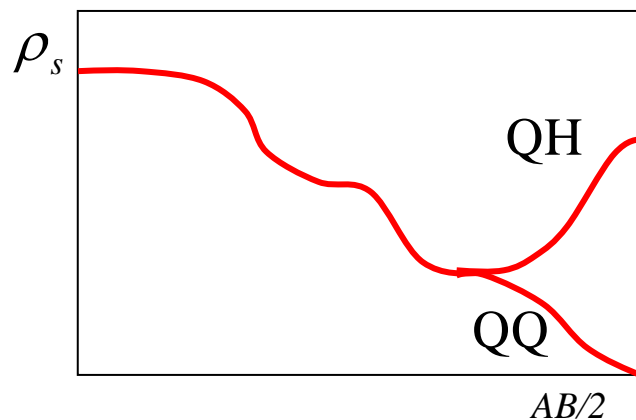
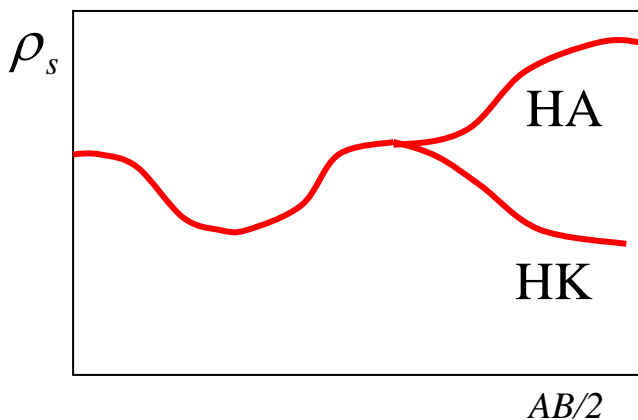


4. 电法观测装置

■ 电测深法

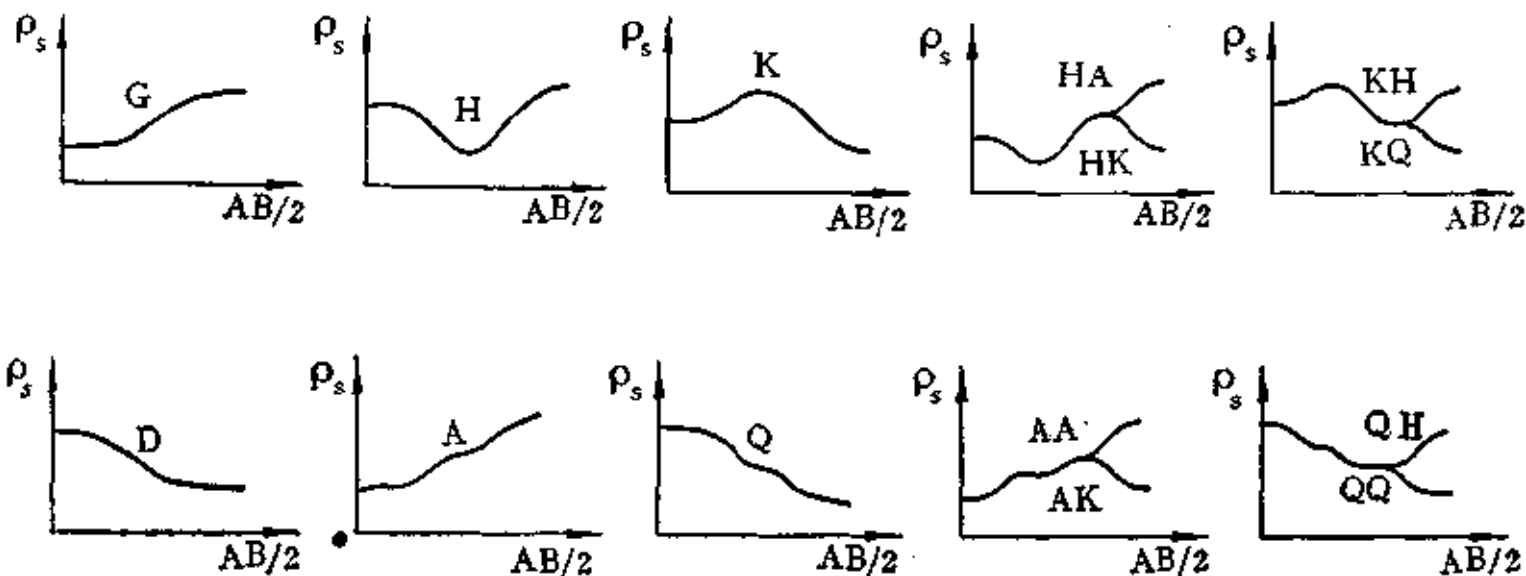
Schlumberger电测深法

四层模型——8种典型曲线



4. 电法观测装置

■ 电测深法



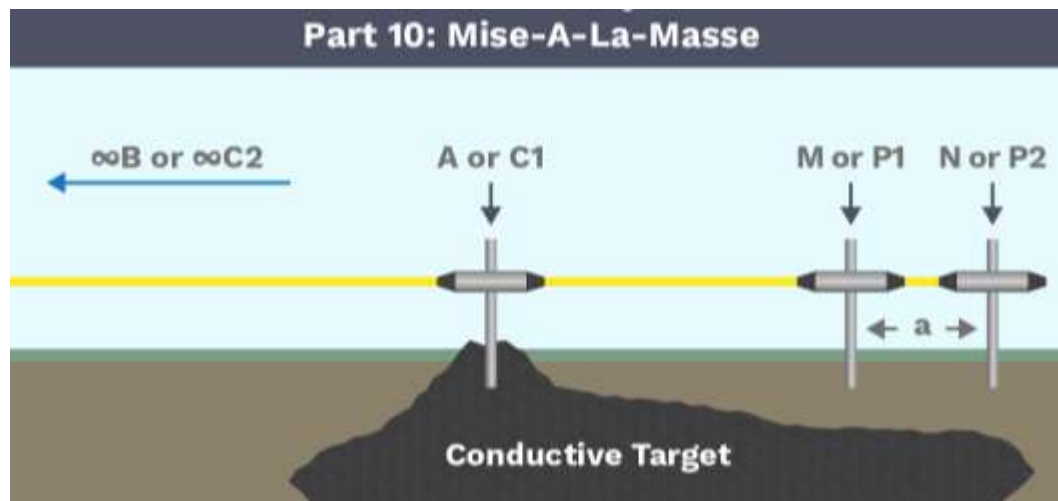
(a)
$$\frac{\rho_1 \quad h_1}{\rho_2}$$

(b)
$$\frac{\frac{\rho_1 \quad h_1}{\rho_2 \quad h_2}}{\rho_3}$$

(c)
$$\frac{\frac{\frac{\rho_1 \quad h_1}{\rho_2 \quad h_2}}{\rho_3 \quad h_3}}{\rho_4}$$

4. 电法观测装置

■ 充电法



当围岩电性均匀时，等位面的形状与矿体的形状有密切关系，在矿体附近密集的等位面形状即反映了矿体的形状。等位面与地面的交线就是等位线，如果在地面上通过充电后测量追索出等位线的形状便可确定矿体的位置、形状及大小，这就是充电法的基本原理。

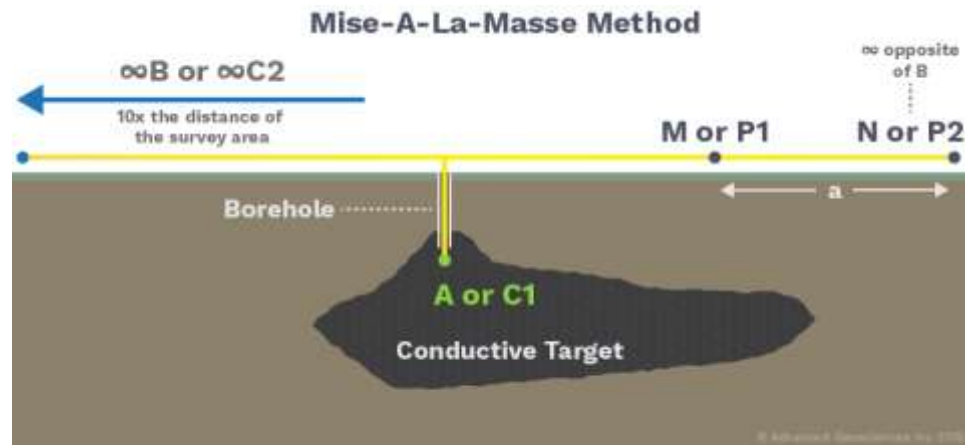
4. 电法观测装置

■ 充电法

如果在钻探过程中发现了矿体，MALM方法可能很有用。

使用MALM可以更精确地进行勘探和挖掘。

供电电极A需要接到矿体上——矿体必须具有良好的露头，良好的导电性，围岩电阻率均匀、地形平坦。

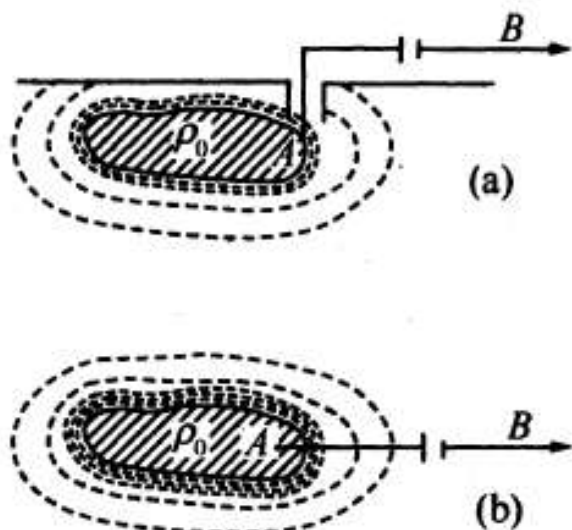


4. 电法观测装置

■ 充电法

充电法工作原理

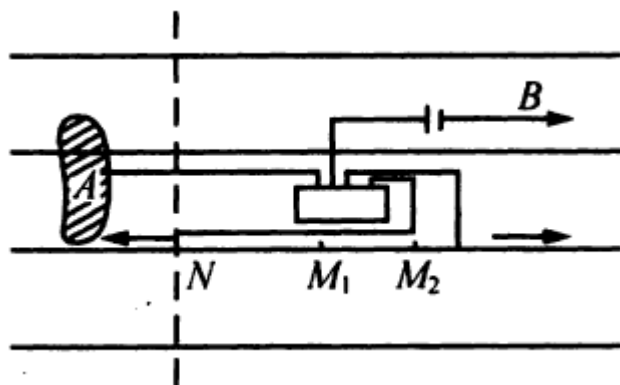
理想条件下认为矿体的电阻率 $\rho_0=0$ ，围岩电性均匀，其电阻率为 ρ_1 ，则矿体内部不会产生电位降，矿体内部及其表面电位均是相等的；电流经过围岩时会产生电位降，靠近矿体的等位面密集，远离矿体的等位面稀疏；等位面与地面的交线为等位线，在地面上测量出等位线的形状，即可确定矿体的位置，形状及范围大小。



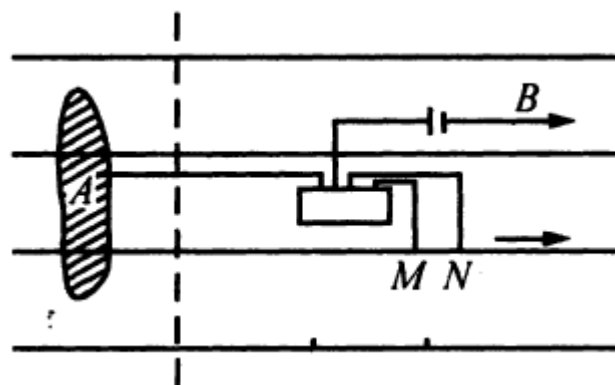
充电良导体周围的等位线分布图

4. 电法观测装置

■ 充电法



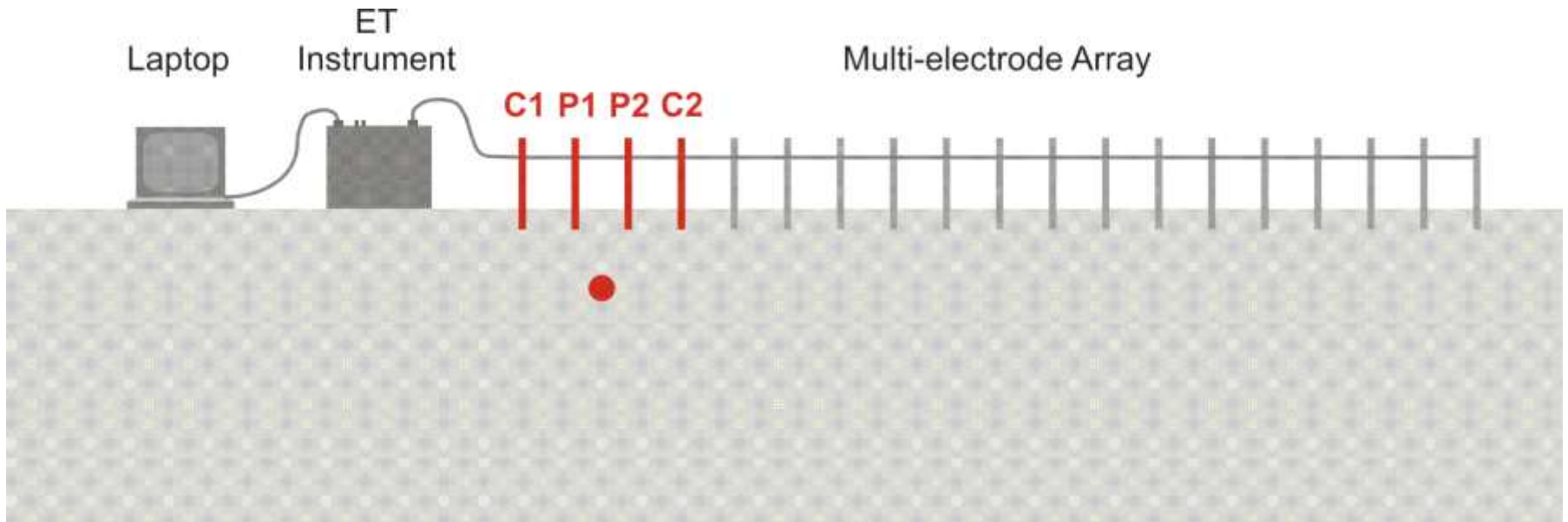
电位观测法：测量电极 N 位于充电电极无穷远处，可视为其电位为零；沿测线各点放置测量电极 M ，观测 MN 的电位差，即 M 极所在点的电位值。



电位梯度观测法：保持 MN 间距不变，测量 MN 之间的电位差，计算电位梯度值 $\Delta U_{MN}/MN$ ，注意移动 MN 时电极的前后顺序不要改变。

4. 电法观测装置

■ 高密度电法



4. 电法观测装置

■ 高密度电法

高密度电阻率法属于电阻率法的范畴，它是在常规电法勘探基础上发展起来的一种勘探方法，仍然是以岩土体的电性差异为基础，研究在施加电场的作用下，地下传导电流的变化分布规律。相对于传统电法而言，高密度电阻率法具有数据采集密集、生产效率高、观测精度高和分辨率高的特点，利用程控电极转换器，由微机控制选择供电电极和测量电极，实现了高效率的数据采集，已经成为常规物探方法之一，另一方面计算机数据处理与成像技术，又把大量烦琐的数据计算、成像处理变得极为快速准确，极大的提高了勘探效率。

4. 电法观测装置

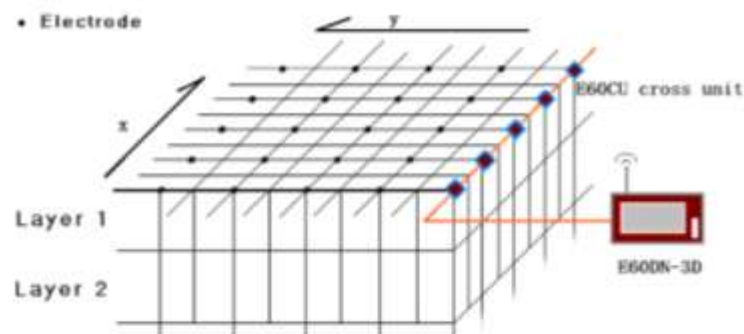
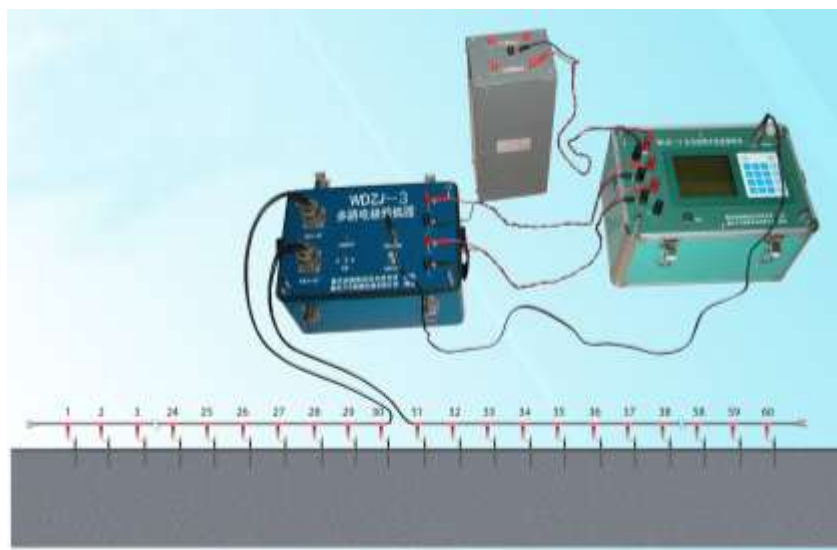
■ 高密度电法



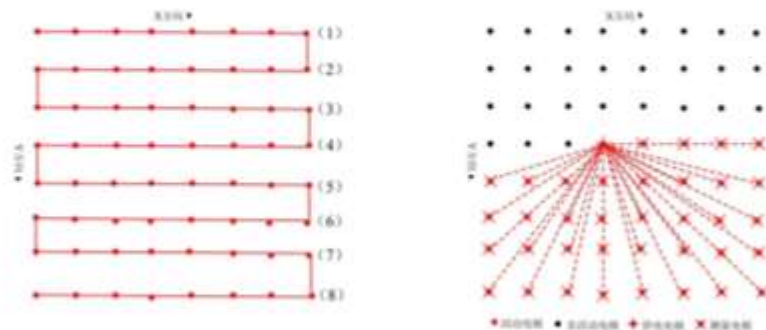
高密度电阻率法主机

4. 电法观测装置

■ 高密度电法



非交叉采集站的串/并行采集方式和分拟采集模型



常规串行采集方式

并行采集方式

电极阵列 (电极*站)	8*8	16*16	32*32	64*16	64*8
总电极数	64	256	1024	1024	512
数据点	2016	32640	523776	523776	131328
常规采集时间 (小时)	0.84	13.6	218.24	218.24	547.47
并行采集时间 (小时)	0.105	0.8	6.6125	3.6275	0.96

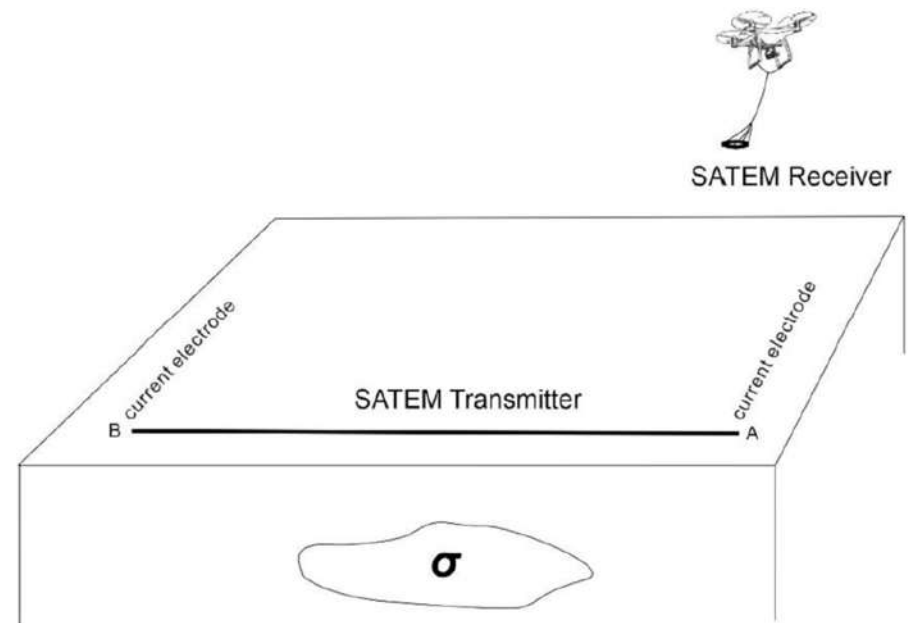
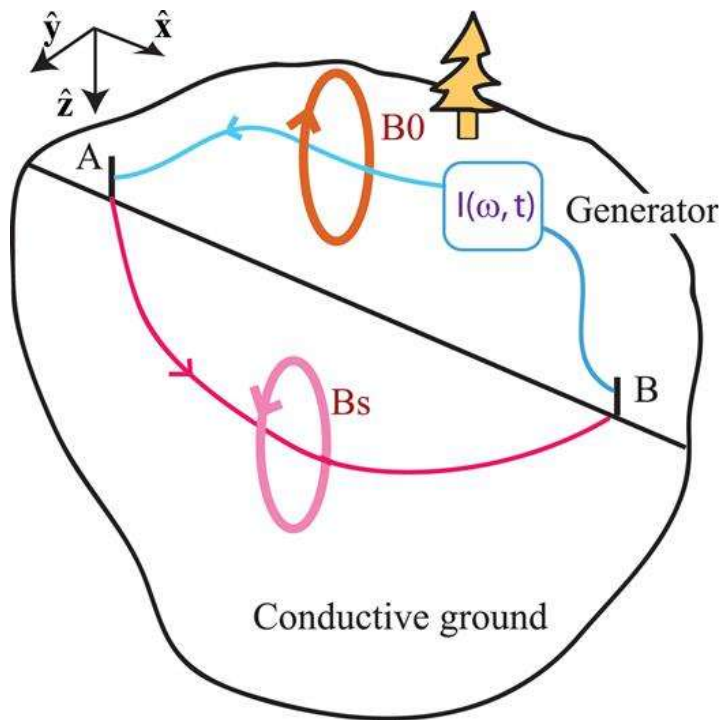
4. 电法观测装置

■ 高密度电法

探测效率和成功率，而且一次布极可以完成纵、横向二维勘探过程，既能反映地下某一深度沿水平方向岩土体的电性变化，同时又能提供地层岩性沿纵向的电性变化情况，具备电剖面法和电测深法两种方法的综合探测能力。因此该探测方法与其它物探方法相比推广应用速度极快，目前在金属与非金属矿产、地质构造、水文地质、工程灾害地质、考古、岩溶洞穴景观资源等各领域得到了广泛的推广应用，解决了诸多实际问题，产生了极大的社会效益及经济效益。

4. 电法观测装置

■ 磁电阻率法 (magnetometric resistivity, MMR)



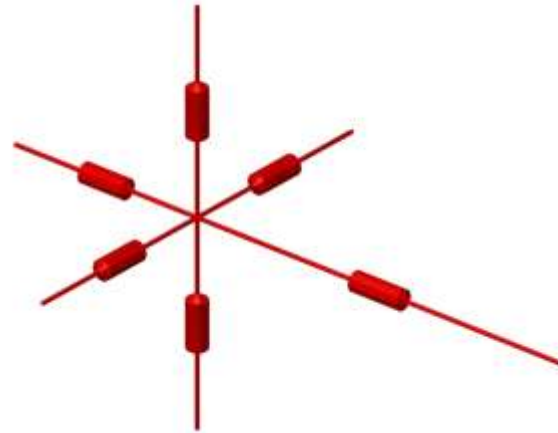
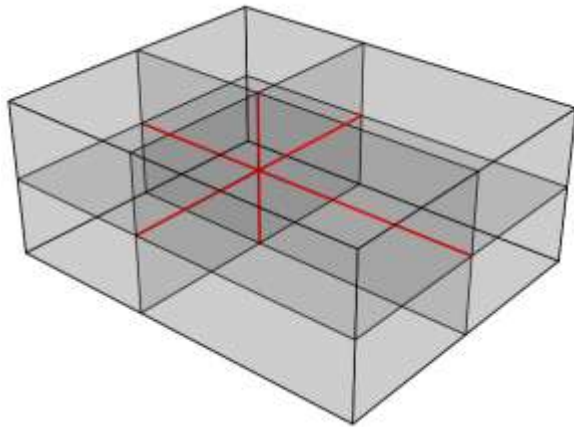
探测效率高，接地条件宽松

4. 电法观测装置

■ 磁电阻率法 (magnetometric resistivity, MMR)

Simulation procedures

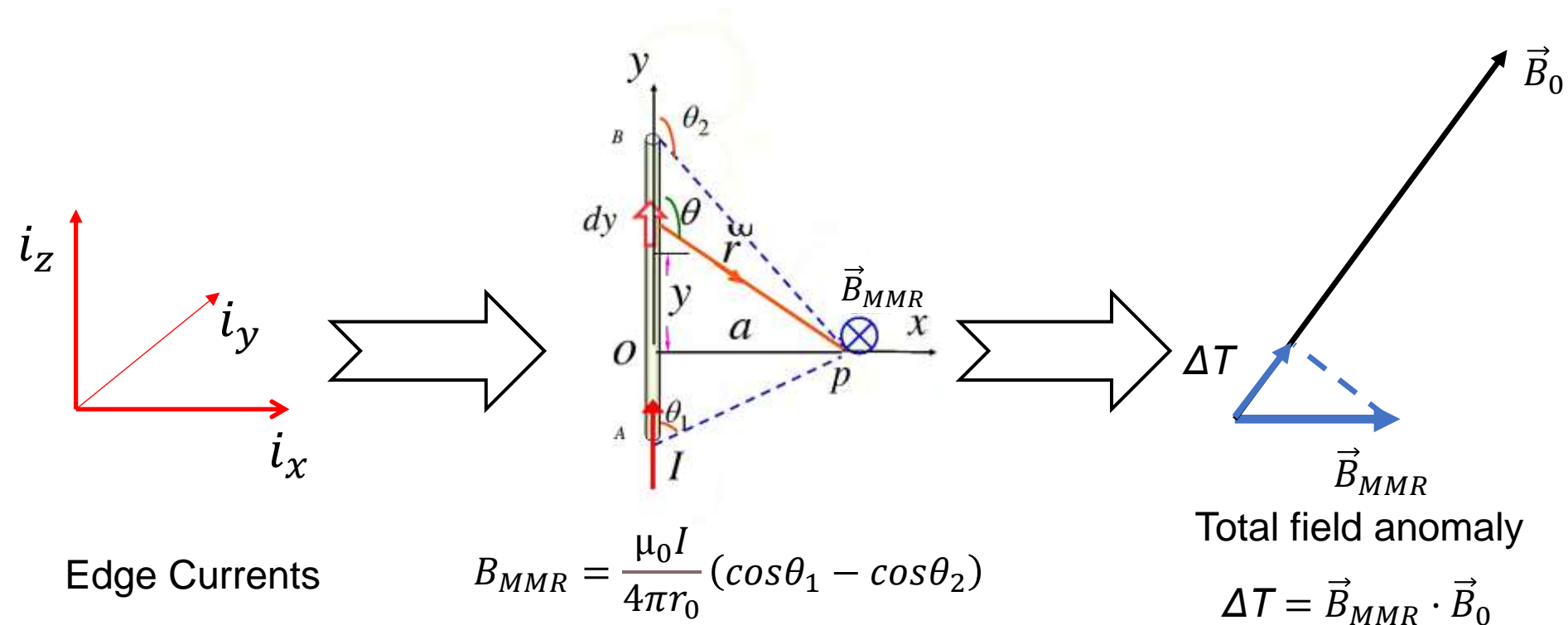
Step 1: using equivalent Resistor network (RESnet) to solve a 3D problem on a 3D rectilinear mesh.



4. 电法观测装置

■ 磁电阻率法 (magnetometric resistivity, MMR)

Step 2: Obtaining the magnetic field at each observation point.



4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

电极



4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

电极

- ✓ 导电性较好的**铜电极**
- ✓ 铜极尺寸：一般直径2 cm，长度50~70 cm，入土深度30~50 cm
- ✓ 电极布设：
 - 测量电极必须使用**同一类型电极**，测量和供电电极不能混用
 - 加大电极与土壤的接触面积
 - 减少电极附近介质的电阻率（浇水减小接地电阻）
 - 电极穿透冻土层
 - 多根电极并联，加大供电电流



4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

电源



80KW



15KW

4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

电源

- ✓ 电源电压视勘探深度和电位差大小而定
- ✓ 电阻率法一般 $45\text{ V} \sim 450\text{ V}$
- ✓ 在实际中，常将电池串联/并联，以加大供电电流
- ✓ 漏电：漏电可发生在供电线路（包括电源）、测量线路和仪器等各部位。除仪器和控制面板漏电容易在操作中发现外，其他部位的漏电不经专门检查很难发现，如不注意，将严重影响观测质量。

4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

测网、比例尺

测网及比例尺应根据地质任务及地质—地球物理条件决定。如果是查明工区地下构造及基岩起伏情况，测线方位应与估计的地质构造走向垂直，而测线长度则须大于预计的构造宽度。如进行普查，则只需一条测线。若为详查，则需在估计的最小而有意义的构造延伸范围内布置3—5条测线。测点间距离一般与探测地层的深度相近即可，并要考虑勘探的性质与要求。当进行普查时，必须在所能探测的最小构造范围内，至少布置2—3个测深点。

4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

供电/测量电极距

$\frac{AB}{2}$ (m)	1.5	2	3	4.5	6	9	12	15	20	30	45	60	90	120	150	200	300	450	600
$\frac{MN}{2}$ (m)	← 0.5			→						3	→								
					←	→						←	→			20	→		

在AB改变的一段范围内MN不变，当AB增大时，再将MN增大，在两种MN交替处的“接头点”，同一AB对两种MN都进行观测，以慢圆滑曲线。

另一种方案是 保持定值，AB与MN同步增加，这种方案称为等比测深。

4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

测点位置及布极方向

测点位置在平原可任意选择，如交通方便可选在沿公路、小路等地。在山区进行测深时，测点应选在尽量平坦的地带，即以最大 $MN/2$ 为半径的范围内地形起伏不超过 20° 的地段。中心点附近要求介质较均匀，所有的测量电极均必须布置在同一种介质中，避免通过接触带。

4. 电法观测装置

■ 野外常见问题

测点位置及布极方向

关于布极方向，在平原地区，当各层分界面及标准层顶板的倾角不超过几度时（ $\leq 5^\circ$ ）， AB 线的方向可任意选定。这时，极距的方向便沿着公路、小道以利布线和搬站的方便。当分界面倾角超过10度时，应沿岩层走向选定 AB 线方向，还应结合地形特点，在坡度不大的斜坡上，布极方向应与地形等高线大致平行。在山谷中，布极方向应与山谷走向一致，同时 AB 电极应尽量避免通过电性显著变化地带，如沟谷、河流、石崖、大断裂带等，以防止和减小地表电流屏蔽和非各向同性等的影响。

在有限体上进行电测深时，拉线方向对曲线有明显影响，对于良导体，一般应平行走向布极。

4. 电法观测装置

■ 结果图示

对电测深 ρ_s 曲线的定性解释是获得测区地质结论的重要组成部分。它可提供所获 ρ_s 曲线的地电断面情况，该地电断面与地质断面间的关系以及测区地质构造的定性概念，更重要的是可帮助人们选择和制定定量解释的方法和步骤以及应该注意的问题。通常是根据曲线的特征绘制反映测区电性变化的各种定性图件以说明测区的地质构造特征。

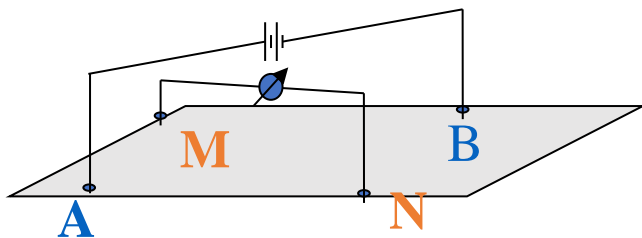
目 录

第一节 电阻率法

1. 稳定电流场的基本定律
2. 简单介质中点电源的电场
3. 复杂介质中点电源的电场
4. 电法观测装置
5. 电法数据处理

5. 电法数据处理

■ 视电阻率



$$\begin{aligned}\Delta U_{MN} &= U_M - U_N \\ &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)\end{aligned}$$

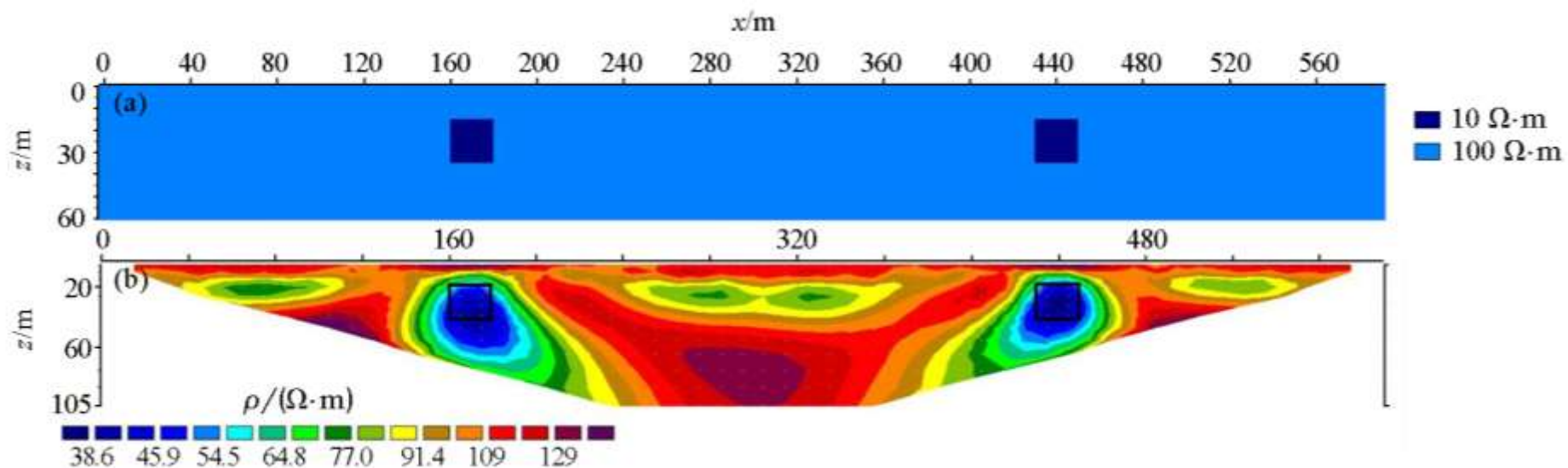
观测是 ΔU_{MN}

物性是 ρ

$$\rho_s = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

5. 电法数据处理

■ 视电阻率



5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

地形及表土不均匀对联合剖面曲线的影响

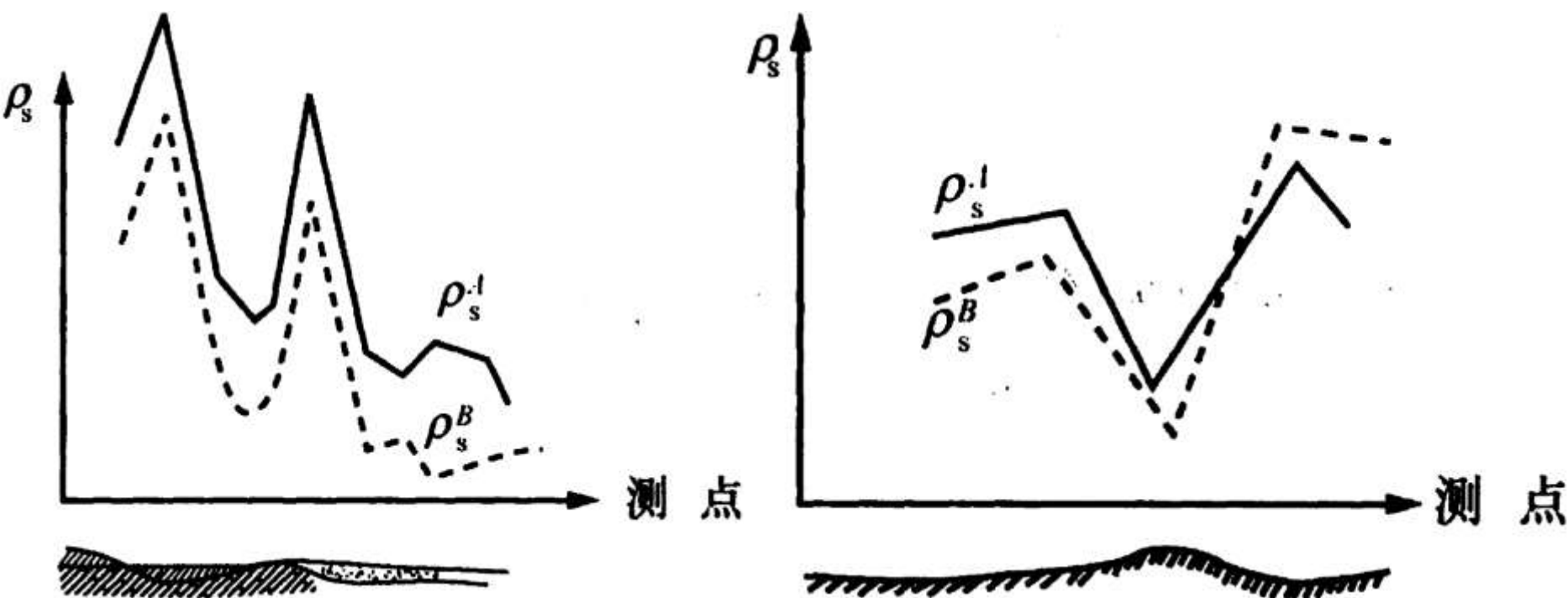
- ✓ 表土电阻率不均匀对 ρ_s 曲线的影响；
- ✓ 山脊山谷地形对 ρ_s 曲线的影响；

5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

联合剖面装置

表土电阻率不均匀对 ρ_s 曲线的影响——双支同步跳跃



表土不均匀对 ρ_s 曲线的影响

5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

表土电阻率不均匀对 ρ_s 曲线的影响——双支同步跳跃

如何消除双支同步跳跃现象？——比值法

- 对每一个测点皆取 ρ_s^A 与 ρ_s^B 的相互比值;
- 得到 $F^A = \frac{\rho_s^A}{\rho_s^B}$, $F^B = \frac{\rho_s^B}{\rho_s^A}$ 来消除表土电性不均匀的影响;
- F^A 为消除表土电阻率不均匀影响后的 ρ_s^A 的数值;
- F^B 为消除表土电阻率不均匀影响后的 ρ_s^B 的数值;

5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

联合剖面装置

表土电阻率不均匀对 ρ_s 曲线的影响——双支同步跳跃

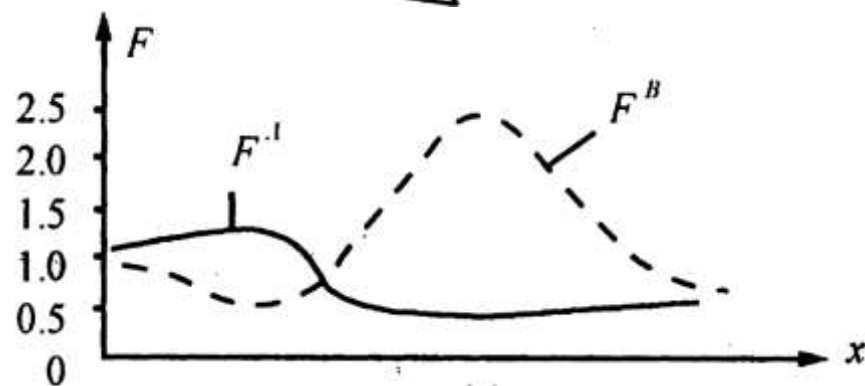
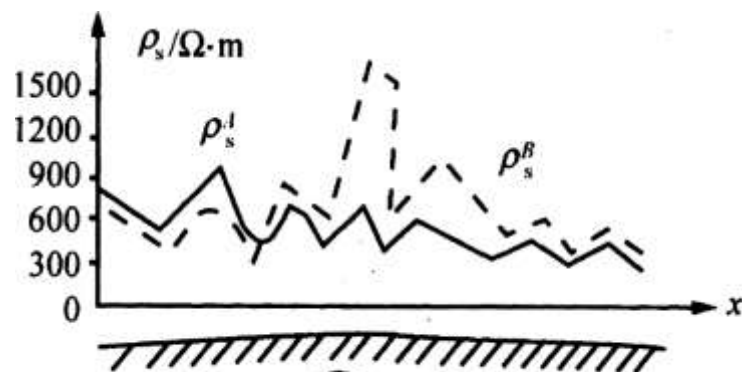
如何消除双支同步跳跃现象？

比值法！

表土电阻率不均匀对联合剖面 ρ_s 曲线的影响及其消除

(a) ρ_s^A 与 ρ_s^B 曲线；

(b) F^A 与 F^B 曲线；

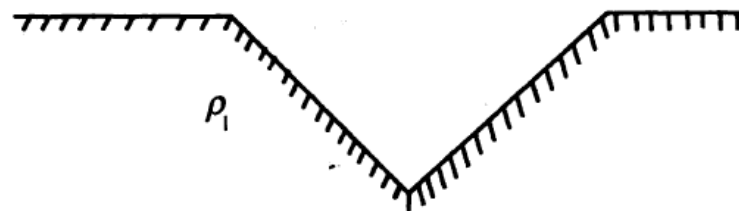
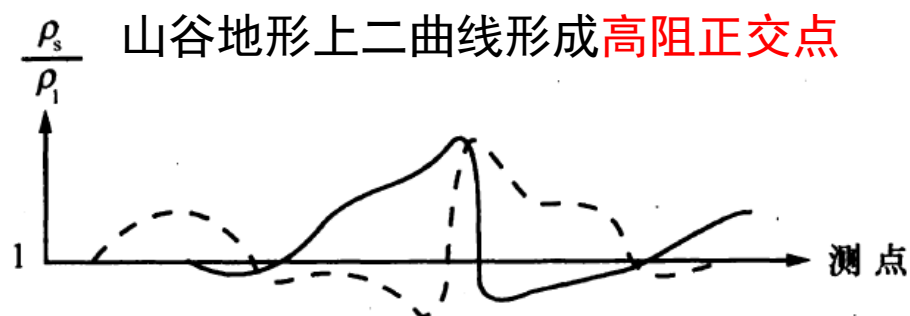
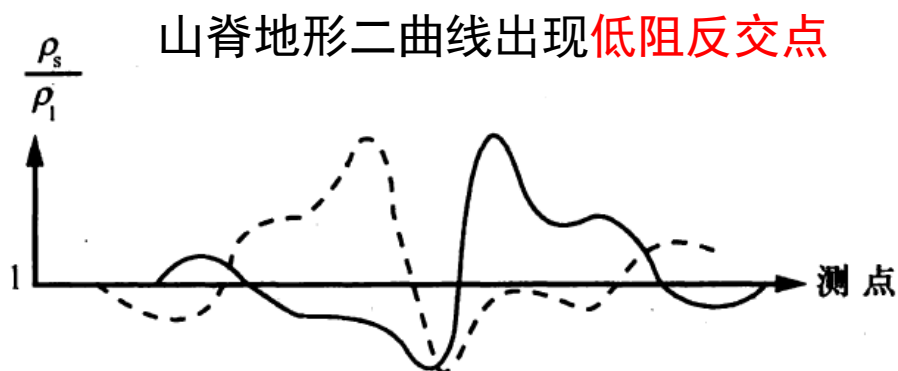


5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

联合剖面装置

山脊山谷地形对 ρ_s 曲线的影响



地形对 ρ_s 曲线的影响

5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

山脊山谷地形对 ρ_s 曲线的影响

- 在实际地质条件下：
 - ✓ 山脊岩石坚硬， ρ_s^A 与 ρ_s^B 交点的电阻率也不是很低；
 - ✓ 山谷浮土较厚，潮湿， ρ_s^A 与 ρ_s^B 交点的电阻率值不是很高；
 - ✓ 曲线的形态、交点电阻率值高低，均易给人造成矿体异常的错觉；
 - ✓ 对联合剖面曲线进行分析时必须要考虑地形对联合剖面曲线的影响！

5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

山脊山谷地形对 ρ_s 曲线的影响

如何克服地形的影响？—— 模型试验校正法（比较法）

- ✓ 把野外实际情况按比例缩小在土槽中（土壤电阻率 ρ_0 ）；
- ✓ 通过模型实验得出纯地形影响的视电阻率曲线；
- ✓ $\rho_s^{\text{地形}} / \rho_0$ —— 校正系数；
- ✓ 实测电阻率值 / 校正系数 —— 消除了地形影响。

5. 电法数据处理

■ 电阻率剖面法

山脊山谷地形对 ρ_s 曲线的影响

如何克服地形的影响？—— 模型试验校正法（比较法）

$\rho_s^{\text{实测}}$ —— ρ_s 的实测值；

$\rho_s^{\text{地形}}$ —— 纯由地形引起的 ρ_s 值；

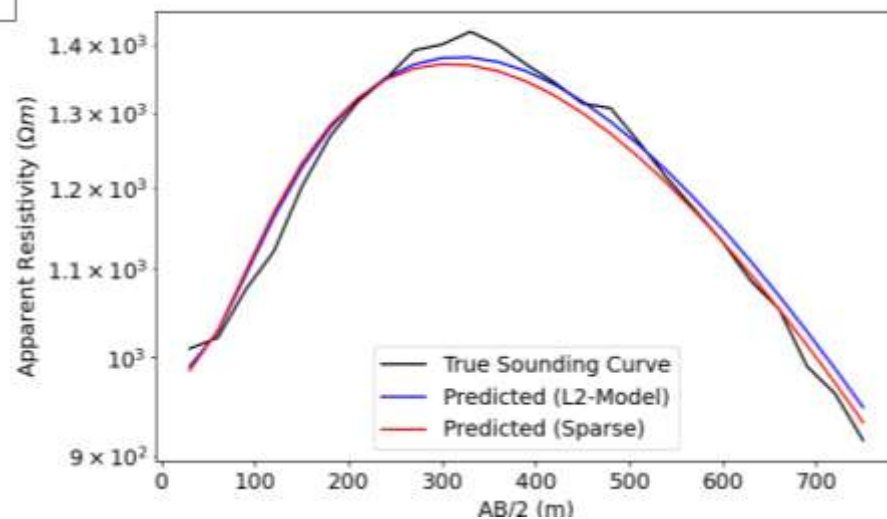
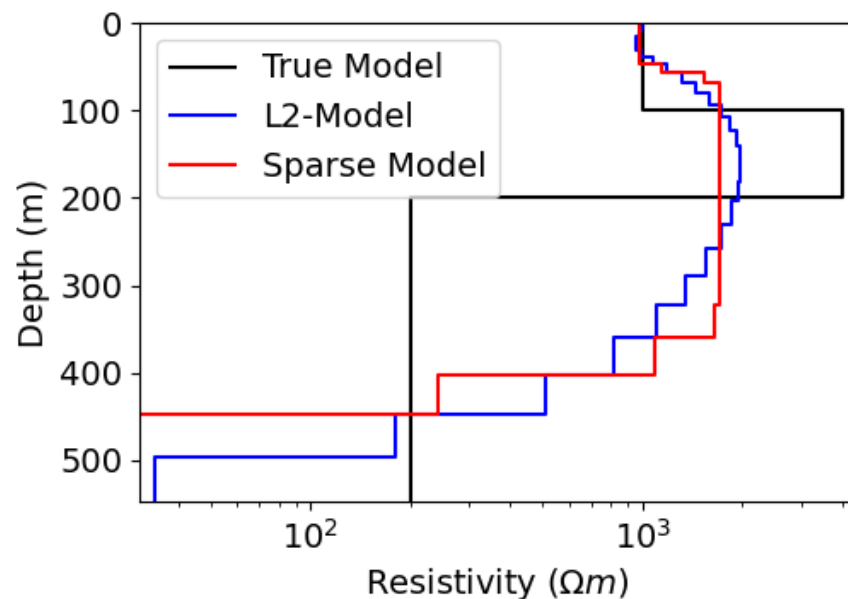
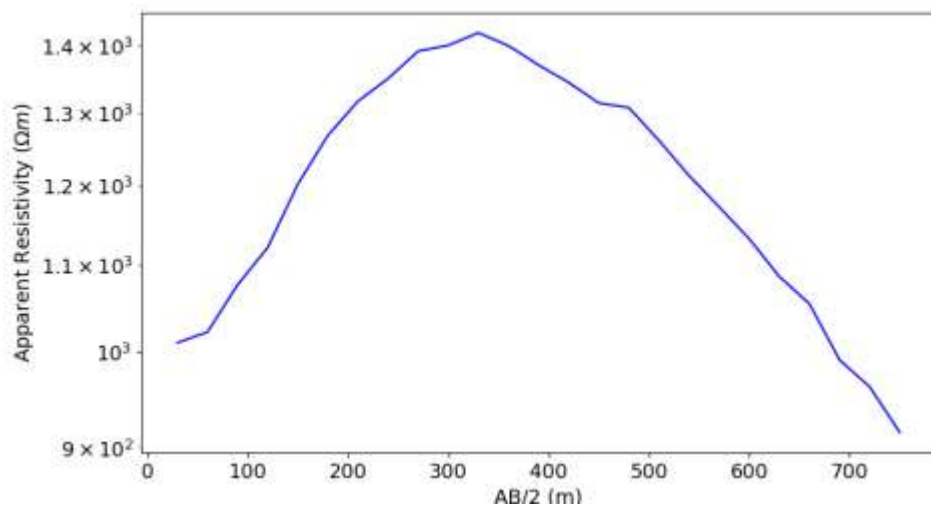
ρ_0 —— 纯介质的电阻率值；

$\rho_s^{\text{改}}$ —— 消除了地形影响后的 ρ_s 值

$$\rho_s^{\text{改}} = \frac{\rho_s^{\text{实测}}}{\rho_s^{\text{地形}} / \rho_0}$$

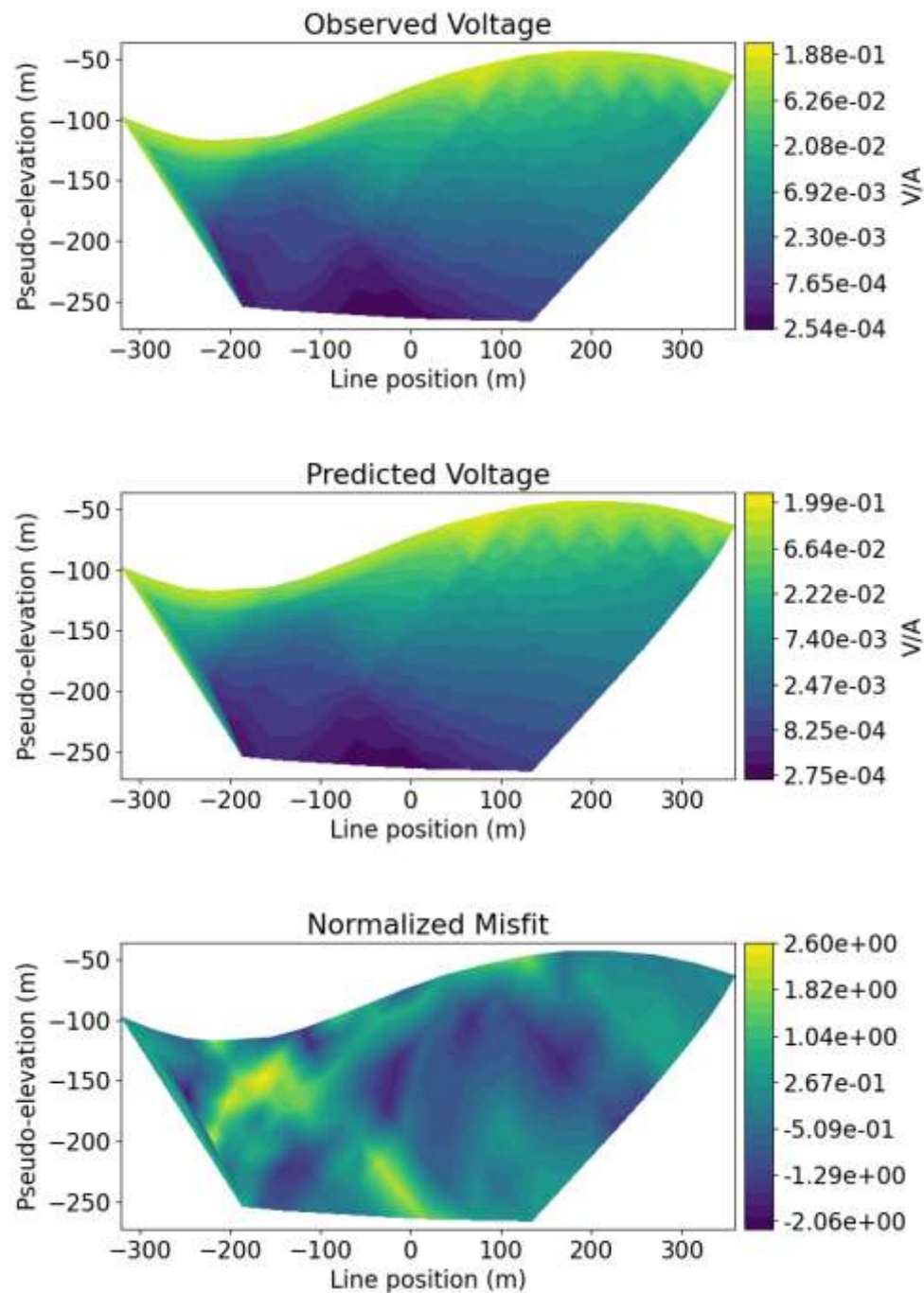
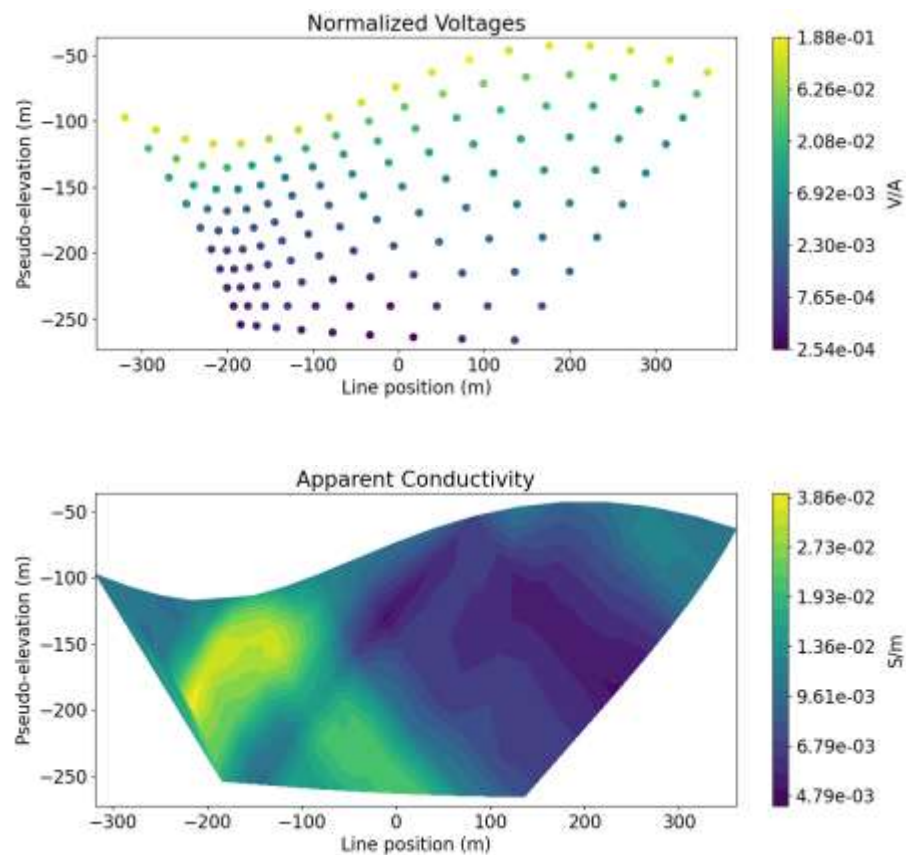
5. 电法数据处理

■ 1D测深曲线反演



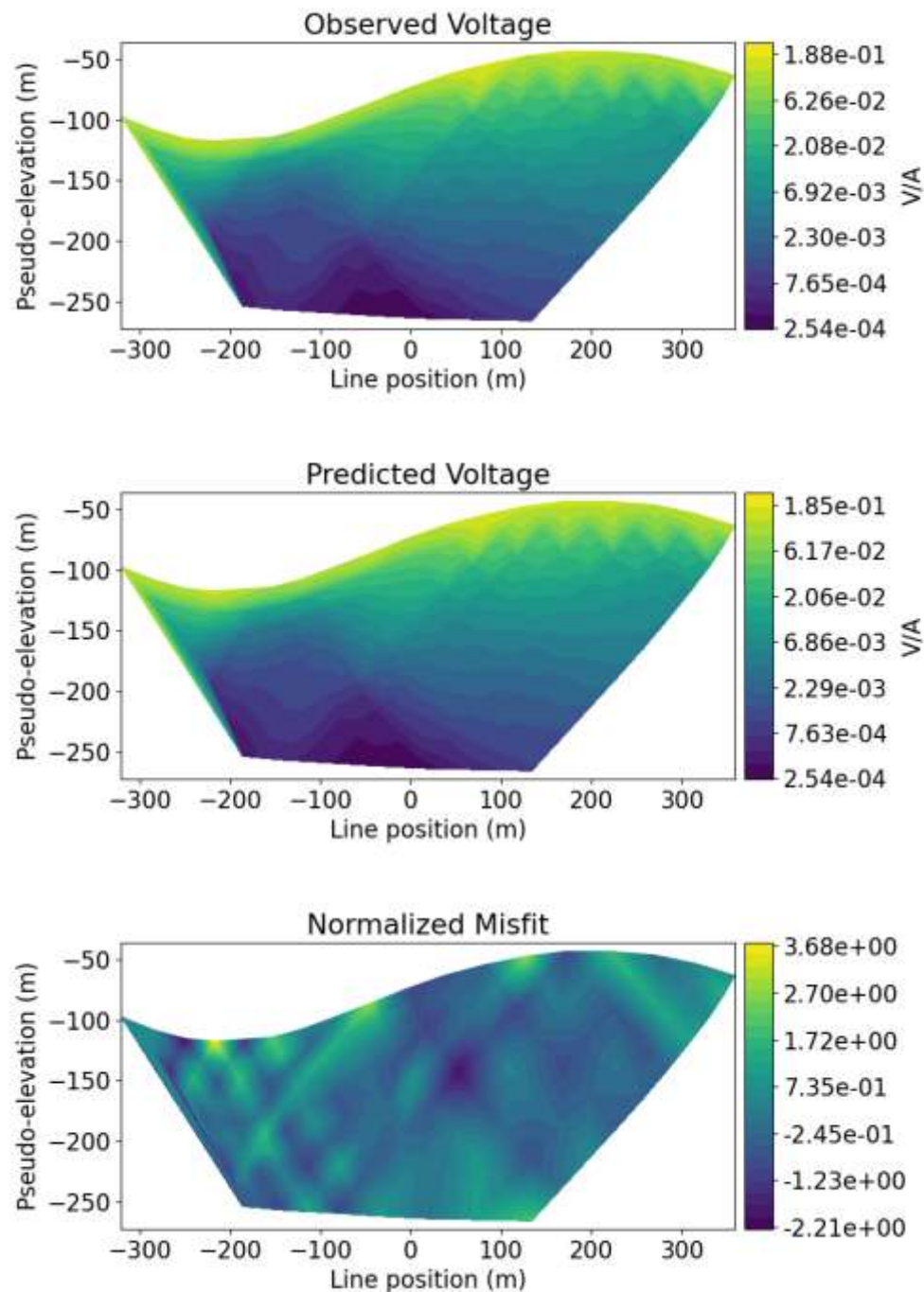
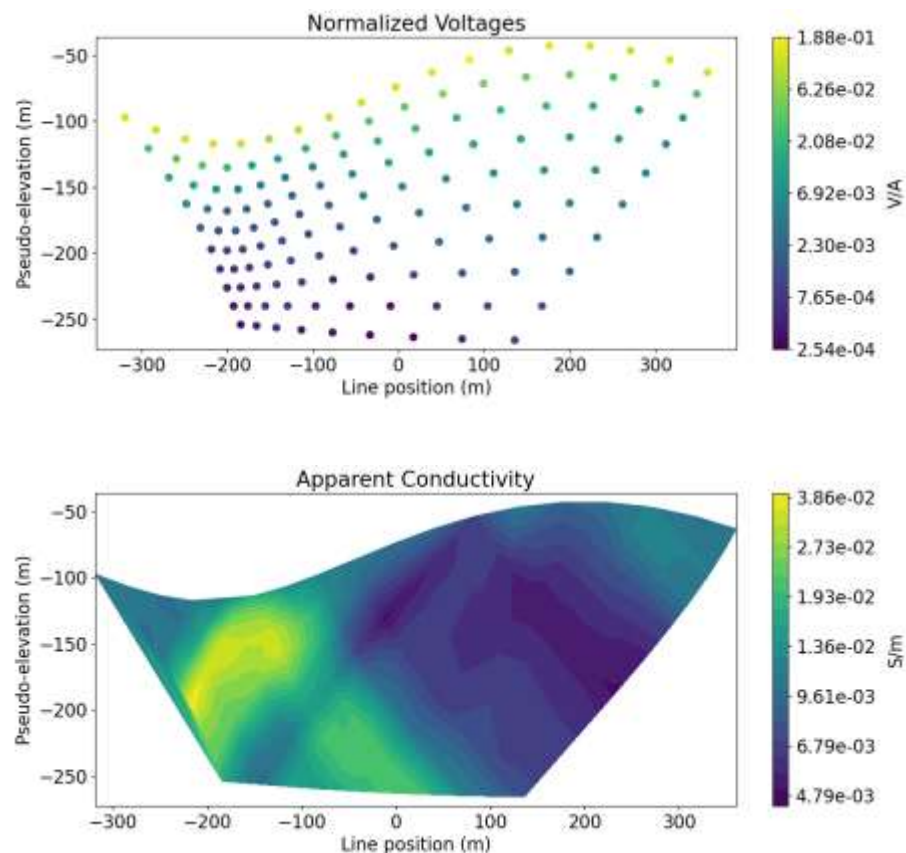
5. 电法数据处理

■ 2. 5D反演



5. 电法数据处理

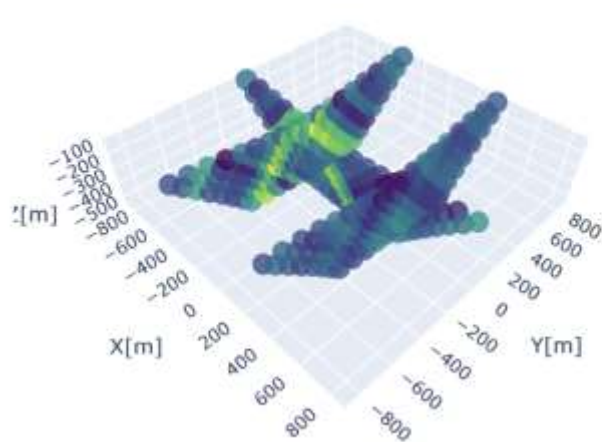
■ 2. 5D反演



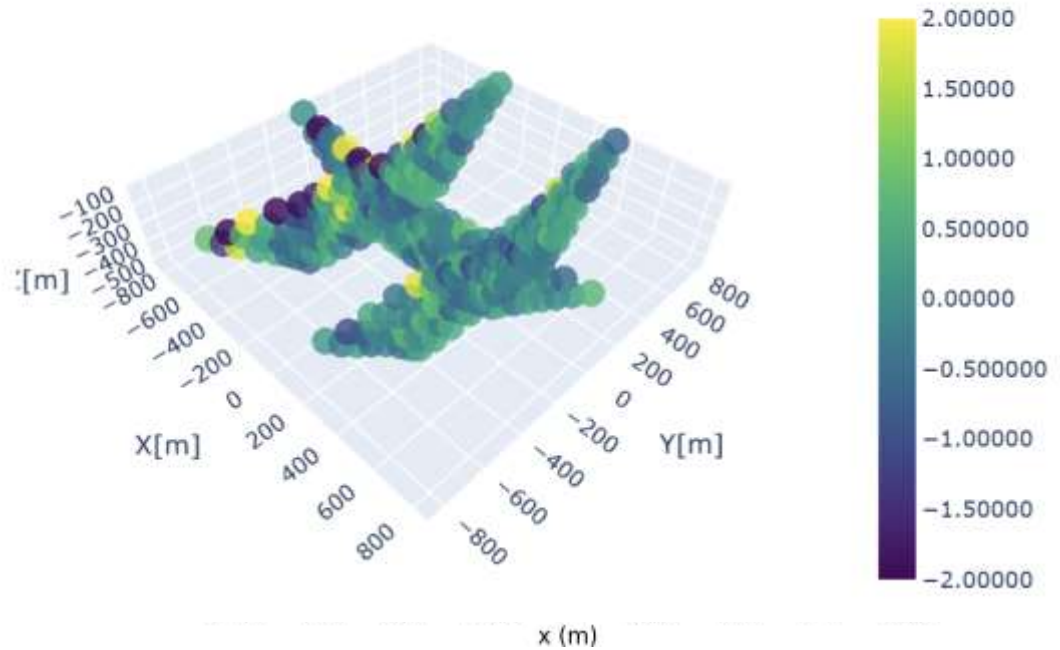
5. 电法数据处理

■ 3D反演

Apparent Conductivity



True Conductivity Model
Normalized Data Misfit

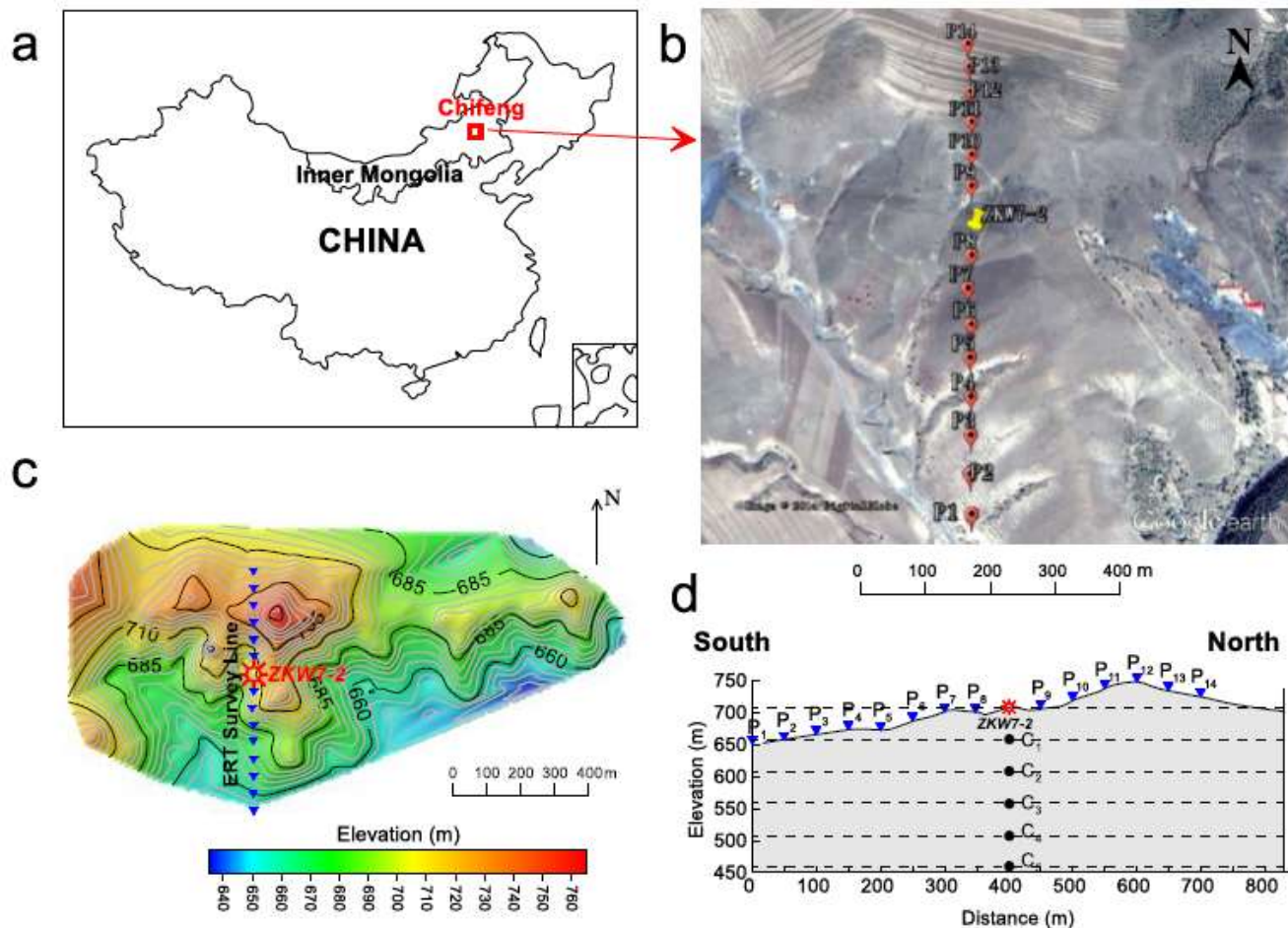


目 录

第一节 电阻率法

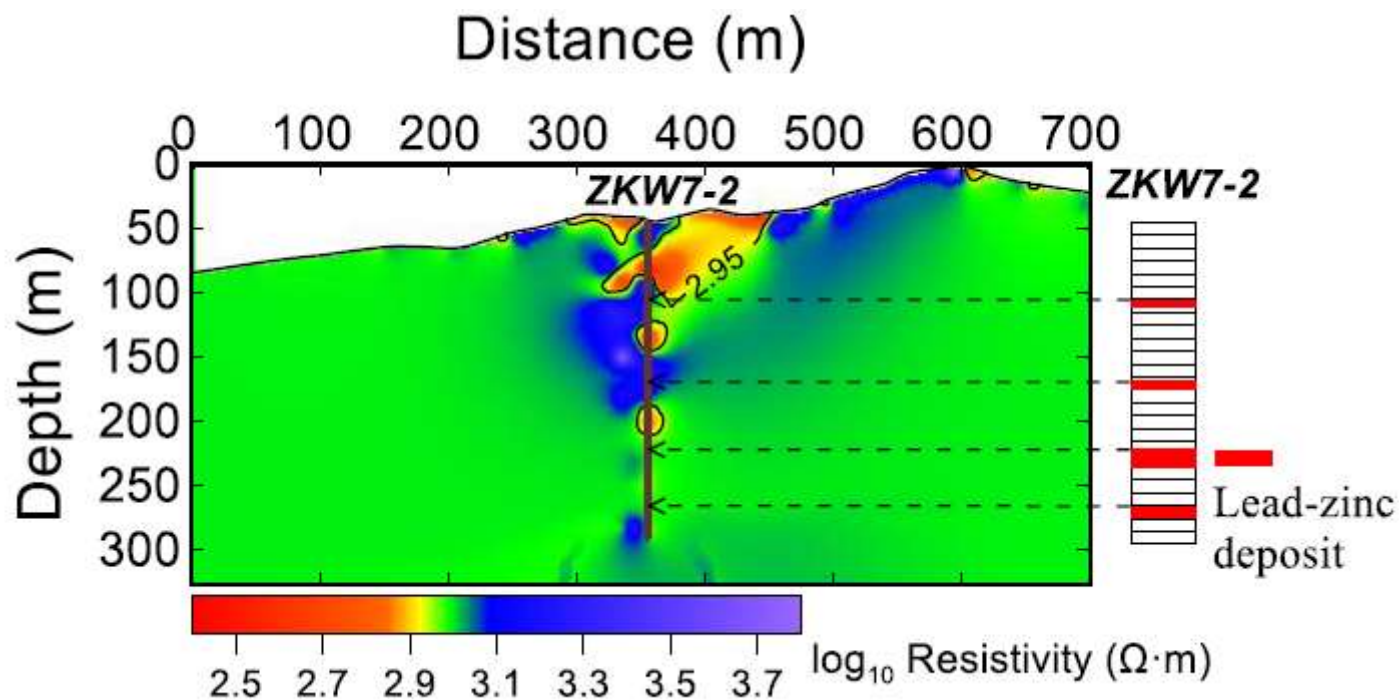
1. 稳定电流场的基本定律
2. 简单介质中点电源的电场
3. 复杂介质中点电源的电场
4. 电法观测装置
5. 电法数据处理
6. 应用

5. 电法数据处理



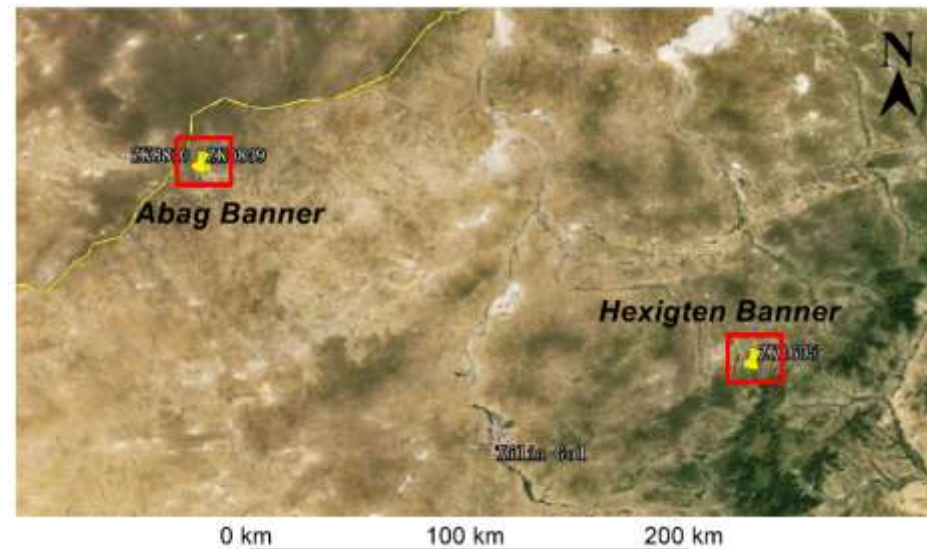
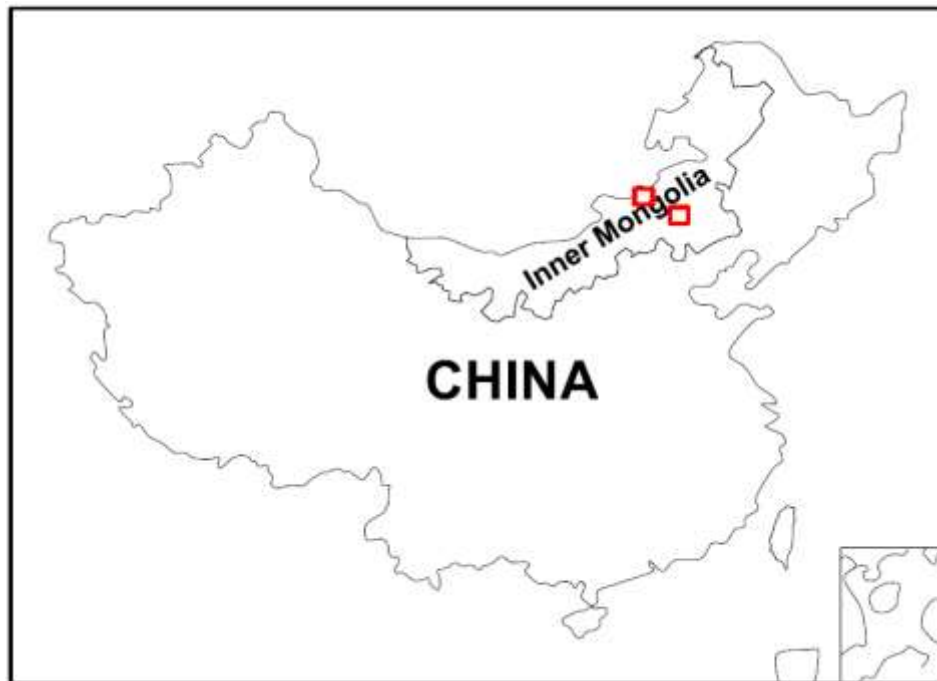
5. 电法数据处理

■ 金属矿勘探



5. 电法数据处理

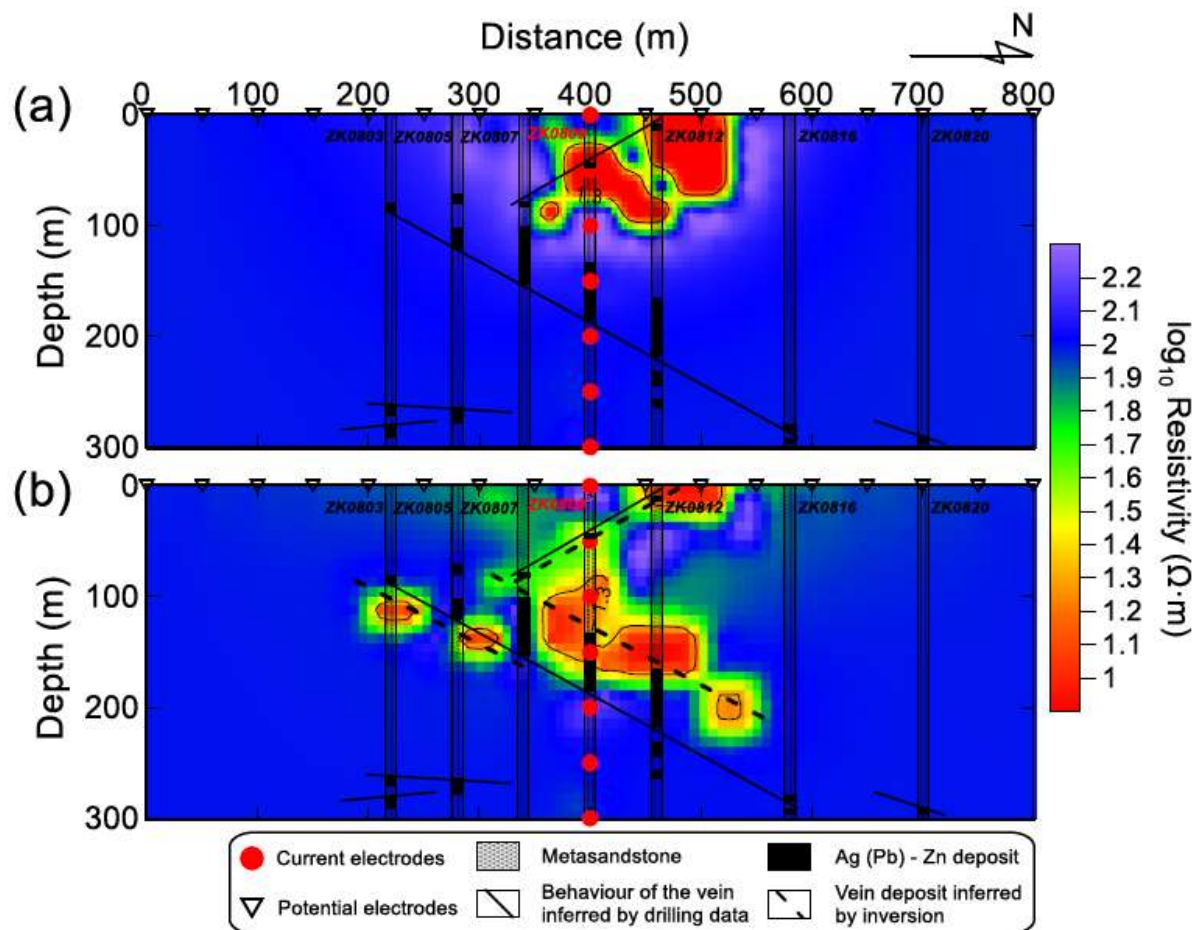
■ 金属矿勘探



阿巴嘎旗与克什克腾旗测区位置

5. 电法数据处理

■ 金属矿勘探

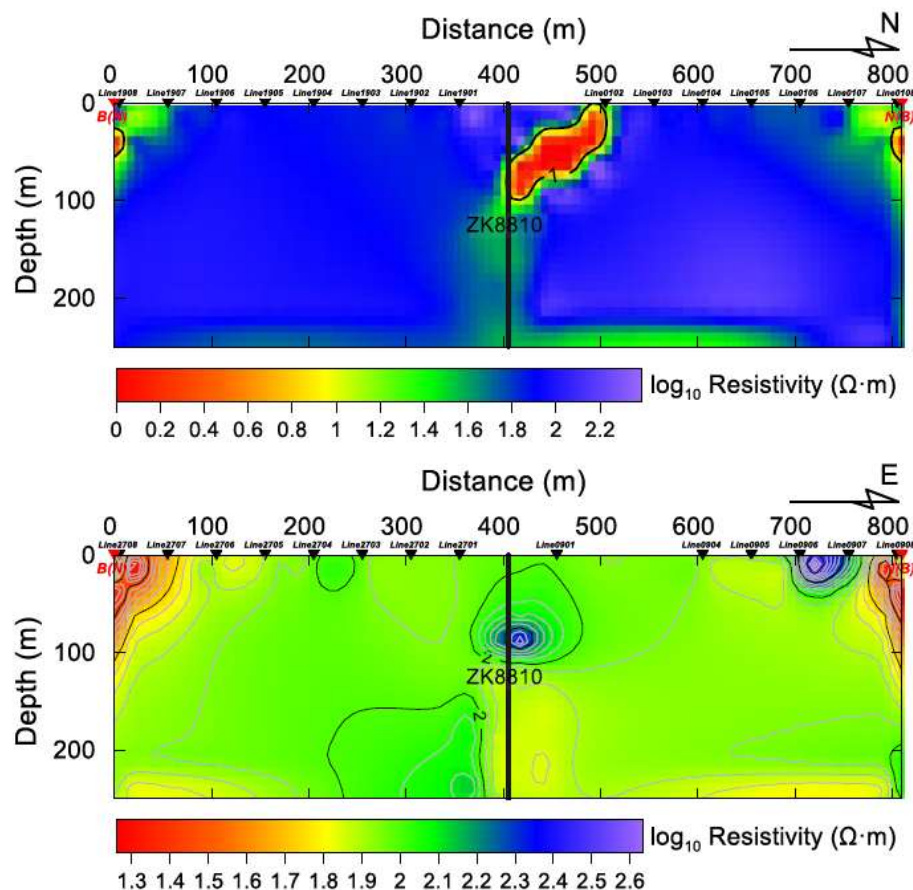
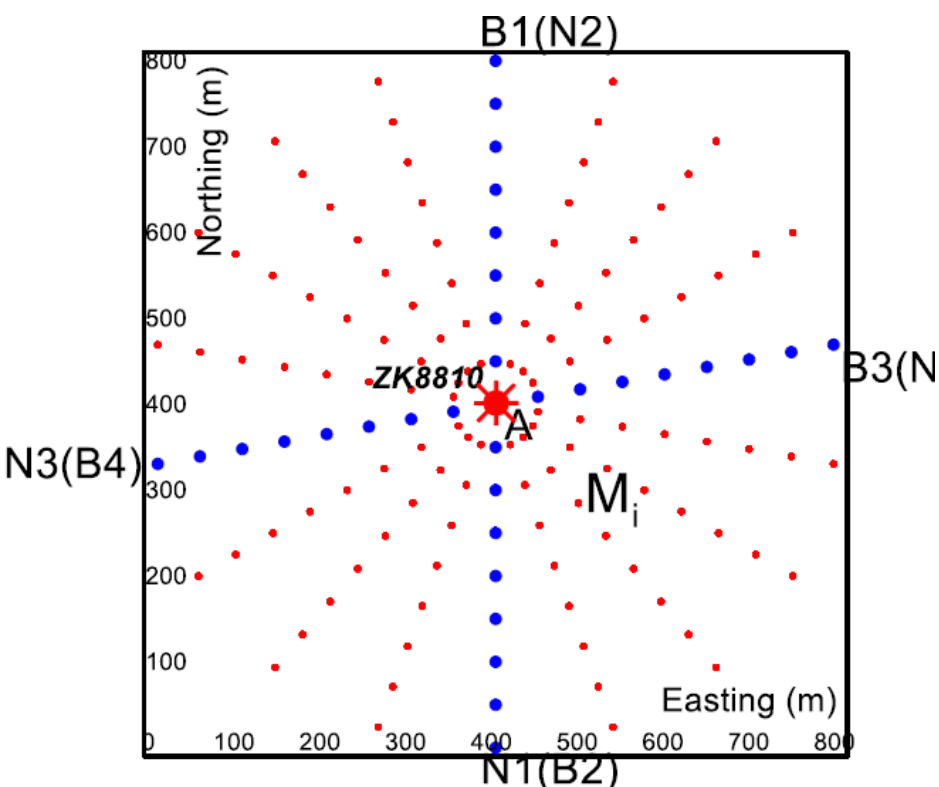


反演结果中所圈定的矿脉信息与钻孔资料所推断的矿脉信息在0m~200 m之间有很好的 consistency, 而反演结果在250 m以下区域则很难揭示出更多的矿脉信息。对比两种反演结果可以看出, 加入先验信息约束的反演可以更准确的圈定地下矿脉的信息。

电阻率法反演结果(a)未加入约束条件反演(b)加入约束条件的反演

5. 电法数据处理

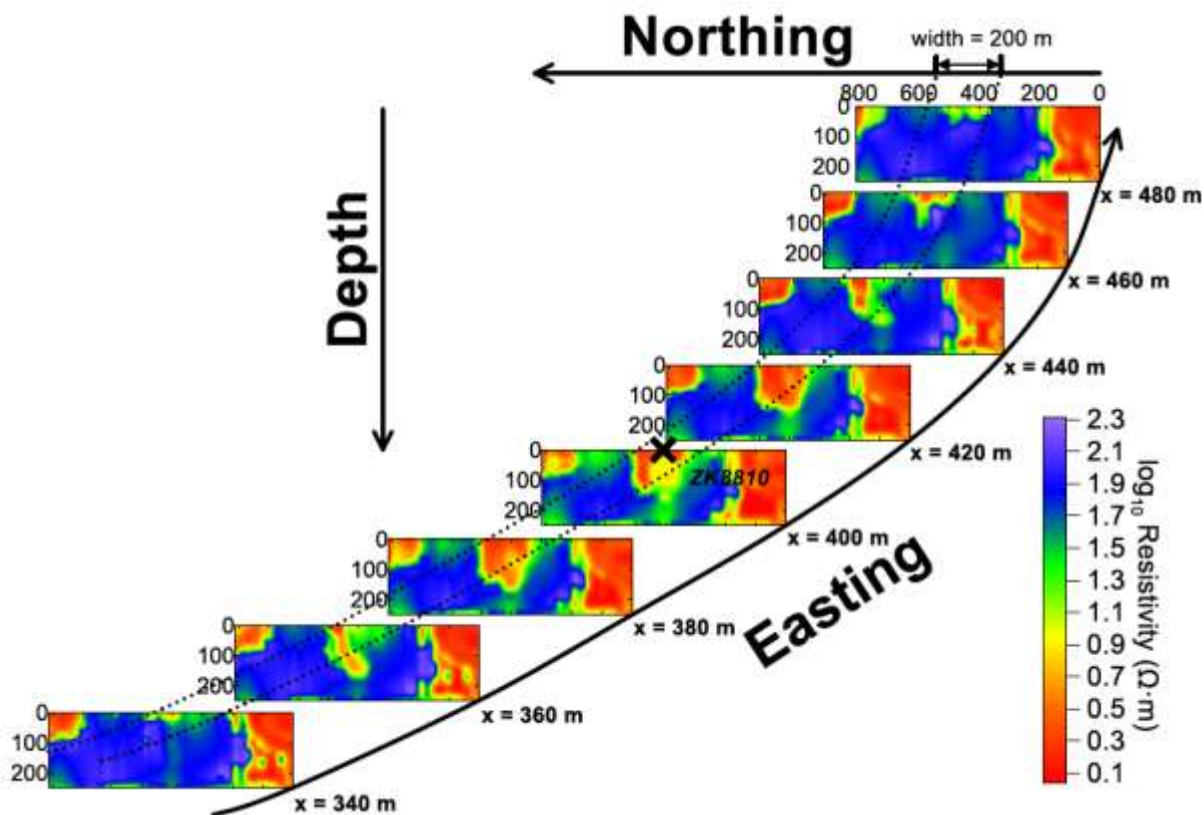
■ 金属矿勘探



从南北方向测线反演结果可以看出矿脉向南倾，倾角大约 45° ，而从东西方向测线反演结果中无法获取更多的矿脉信息。从两条测线反演结果可以推断矿脉规模较小，而为了获取地下更详细的信息，我们布设了面积性测网采用同样的电极装置如图5-13所示进行了三维反演解释。

5. 电法数据处理

■ 金属矿勘探



在 x 方向上 $x = 340$ m~480 m处有小规模低阻体聚集于井口附近。走向上跨度为140 m，倾向上跨度为200m左右。由于可能存在边界效应影响，所以在测区南部边界上聚集的低阻带信息为不可靠信息，可以进一步对该测区南部进行更细致法勘探工作已验证是否存在大规模的矿藏资源。

5. 电法数据处理

■ 海底永久冻土

永久冻土是常年低温地面 ($<0\text{ }^{\circ}\text{C}$)，存在于陆地上，也存在于北极大陆架的大部分下方。在上一个冰河时代之后，海平面上升淹没了海底永久冻土层，捕获了温室气体和有机碳，如果释放，可能会影响全球气候。然而，海底永久冻土的分布受到很好的限制，人们对地热能和海洋热量和盐流融化的速度知之甚少。



5. 电法数据处理

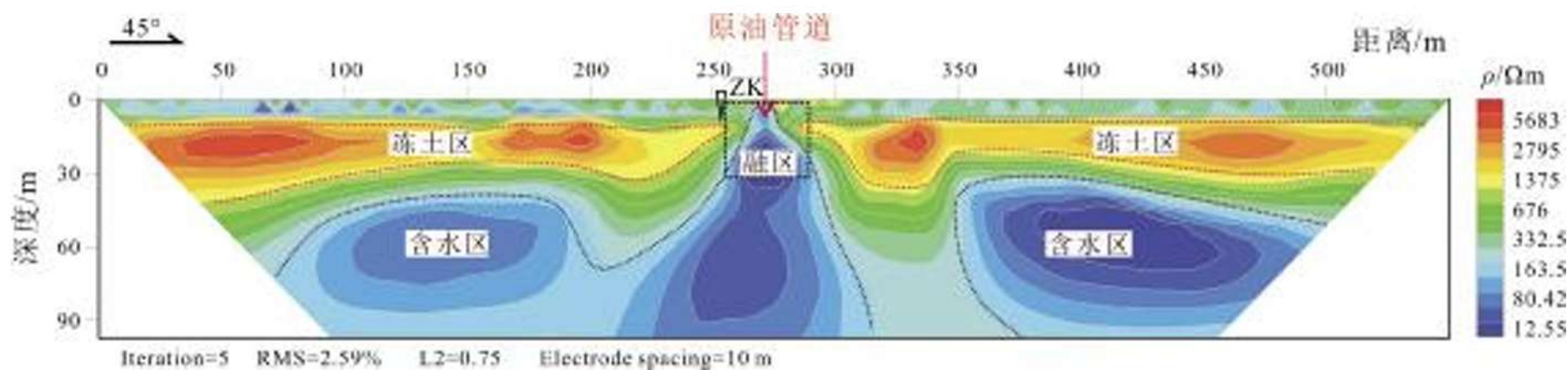
■ 海底永久冻土



当沉积物孔隙水结冰时，电阻率可以增加几个数量级，从而可以检测到解冻-冻结的永久冻土界面。海上 ERT 检验通常涉及在船后拖曳配备至少 13 个电极的电缆。牵引电缆上的两个电极向海水或沉积物中注入电流，并在不同的电极对距离处测量电压。这种电极分布在移动的船只后面会产生多个电探测，当执行反演后，这些电探测可以生成 2D 电阻率曲线。因此，可以推断出海床以下的最佳电阻率分布，从而可以量化自上而下的海底永久冻土融化速率。

5. 电法数据处理

■ 海底永久冻土



小节

- 稳定电流场
- 简单介质中点电源的电场
- 电法观测装置
- 电法数据处理



课后习题

- 为什么要在AB中间进行观测
- 电测深为什么可以获取不同深度的信息



课程结束

陈涛

