

第一章 电阻率法

1. 概念

电阻率法是以不同岩矿物石之间导电性差异为基础，通过观测和研究人工电场的地下分布规律和特点，实现解决各类地质问题的一组勘探方法。

2. 实质

是通过接地电极在地下建立电场，以电测仪器观测因不同导电地质体存在时地表电场的变化，从而推断和解释地下地质体的分布或产状，达到解决地质问题的目的。

1.1 电阻率法的基础知识

1.1.1 岩矿石电阻率

1. 电阻：导体对电流阻碍作用的大小称为电阻

2. 电阻率：单位长度、单位截面积的材料的电阻大小称为该材料的电阻率

电阻率的基本公式：

$$R = \rho \frac{l}{s} \rightarrow \rho = R \frac{s}{l}$$

3. 电阻率的单位：电阻率 $\rho = \Omega \cdot m$

4. 物质的导电机理：溶液，带电离子，岩石孔隙水溶液等

5. 金属导体：自由电子，如自然铜、金、银和石墨，电阻率低

6. 半导体：“空穴”导电，大多数金属硫化物，金属氧化物，电阻率较低

7. 固体电介质：离子导电，大多数造岩矿物，如石英、云母、方解石、长石电阻率高

8. 矿物电阻率特点：在一定范围内变化，同种矿物有不同的电阻率值，不同矿物也可有相同的电阻率，由矿物组成的岩石和矿石的电阻率也必然有较大的变化范围
9. 岩矿石的电阻率特点：与矿物的电阻率类似，其电阻率值除与组成矿石的的矿物成分、含量有关外，更主要地由矿物颗粒的结构、构造所决定
10. 影像岩矿石电阻率的主要因素：矿物成分，含量及结构与构造，岩矿石的孔隙度、湿度，水溶液矿化度，温度，压力
11. 结构分为：浸染状、细脉状、条带状；影响规律：金属矿物含量增加，电阻率下降，结构：侵染状 > 细脉状 > 条带状；研究意义：关键：连通情况
12. 规律：垂直颗粒长轴方向的电阻率总是大于沿长轴方向的电阻率
13. 为了表征层状岩石的非各向同性程度和平均的导电性，定义其非各向同性系数（各向异性）和平均电阻率
14. 湿度的决定因素：岩石含水量的大小，主要决定于岩石本身的孔隙度及当地的水文地质条件，在潜水面以下，岩石孔隙通常被地下水所充满，此时岩石的湿度便等于其孔隙度
15. 经验公式：Archi阿尔奇公式：

$$\rho = \alpha \phi^{-m} S^{-n} \rho_0$$

影响规律：孔隙度增加，含水量增加，电阻率下降

16. 孔隙度一定时，矿化度增加，溶液离子浓度增加，电阻率下降
17. 影响规律：处于正温区，温度增加，溶解度增加，离子活性增加，电阻率下降
处于负温区，温度下降，离子活性下降，电阻率升高
研究意义：高原冻土区物探及地热勘探中主要关心的影响因素
18. 影响规律：压力增加，胶结度增高，孔隙度下降，电阻率增加；当超过压力极限，岩石破碎，产生微裂隙，产生新的导电通道，电阻率下降
研究意义：深部地质构造研究、地震地质主要关系的问题

总结：

1. 在金属矿产普查和勘探中，岩、矿石中良导电矿物的含量及结构是主要影响因素。

2. 在**水文、工程地质调查和沉积区构造普查、勘探**中，岩石的孔隙度、含水饱和度及矿化度等成了决定性因素。
3. 在**地热研究、地震地质及深部地质构造**研究中，温度及地应力变化却成了应考虑的主要因素。

1.1.1 均匀大地中的稳定电流场

(1) 稳定电流场的基本规律

欧姆定律：恒定电场是用三个相互有联系的物理场 U (电位)、 E (电场强度)和 j (电流密度)来描述的，其间的关系为：

$$I = U/R, E = \rho j$$

适用条件：任何形状的不均匀导电介质和电流密度不均匀分布的条件。

克希霍夫第一定律：稳定电流场除场源外任何一点的电流密度的散度恒等于零。（根据稳定电流场条件和高斯公式可导出以下方程）

$$\nabla \cdot j = 0$$

物理意义：外源头任何处不会有电荷堆积,电流线总是连续的,不会在场中无源处消失,也不会无源而生

$$\nabla^2 U = 0$$

结论：均匀电流场的位满足拉普拉斯方程。

(2) 均匀各向同性半空间点电源的电场

均匀各向同性半空间：设大地表面为水平面，上界面与不导电的空气接触，导电介质充满整个地下空间，且电阻率处处、各方向均相等，这样的介质称为**均匀各向同性半空间**

1. 供电电极：为建立地下电流场，用两个接地电极，向地下供电，这两个接地电极被称为“供电电极”
2. 点电源：当观测点与供电电极之间的距离远远大于供电电极自身尺寸时，可以把每个供电电极看作是一个“点”，电流由该点进入地下或流回电源，将这种点电流源称之为“点电源”
3. 规律：半径相等的地下半球面上，电场强度相等；远离电源点，电场强度按距离平方反比衰减
4. 两个点电源同时供电时，观测点处的电场相当于两个异性点电源单独供电时形成的场的叠加

(3) 电场与电位分布特点

1. 地下电流场在供电电极附近变化剧烈，分布极不均匀
2. 在A、B中间部位，电场变化平缓，可视为均匀场
3. 在A、B的中点，电位 $U = 0$ ，电场 E 出现极小值，但不为零
4. 在AB的中心点左侧 $U > 0$ ，右侧 $U < 0$

(4) 电偶极子的电场

- 电场特点：电位及电场强度不对称

1.1.3 均匀大地电阻率的测定

回顾

1. 均匀各向同性半空间：
地下半空间，电阻率大小与介质的方向、位置均无关
2. 均匀半空间中单个点电源的场：

$$U_M^A = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} \right)$$

分布：地下-同心半球面，地面-同心圆

3. 均匀半空间中两个异性点电源的场：

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

分布：AB中间部位场相对均匀

4. 装置系数：因 K 是与测量装置中各电极相对位置相关的量，电法勘探中称其为装置系数，也叫电极排列系数；均匀大地电阻率公式：

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

物理意义：相当于电阻率定义式中的 S/L

5. 当地质体的大小范围比电极距大得多时，就可以将其视为均匀半无限空间，此时测得的电阻率可认为是该地质体的电阻率，

总结

1. 电阻率计算公式；
2. 装置系数；不同测量装置具有不同的装置系数；
3. 测量电阻率均与介质电阻率的关系：相等；
4. 应用条件：地表水平，介质均匀，各向同性；
5. 电阻率值与测量点位置和供电点位置无关。

1.1.4 非均匀介质中的稳定电流场

(1) 非均匀条件下的稳定大地电流场

1. 地电断面：根据地下地质体 **电阻率的差异** 而划分的垂向界线断面
2. 高阻体：具有向其外部 **排斥电流** 的作用；低阻体具有吸引内部电流的作用
3. 均匀大地电阻率公式：

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

计算条件：地表水平，介质均匀，各向同性

测得的电阻率与介质本身电阻率相等

4. 稳定场的实质：电源 I 和电阻率界面上的积累电荷共同作用，使电场内电荷运动达到动态平衡，形成稳定电流场

与静电场的差别：稳定电流场由动平衡状态的运动电荷所致，而静电场则有静电荷所激发

5. 积累电荷分布特点：稳定电流场在电阻率分界面上的积累电荷呈面状分布，并且不均匀，距场源近处密度大，远处则密度小；积累电荷的密度与场源强度及界面两侧电阻率差等成正比

6. **视电阻率**：当地表不水平或地下介质分布不均匀时，仍然采用均匀介质中的供电方式及测量方式，并采用均匀条件下的电阻率计算公式，计算得到的电阻率值，既不是地下某一地质体的电阻率，也不是岩石的背景电阻率，而是电场有效作用范围内所有介质电阻率的综合影响值，称为“视电阻率”， ρ_s 表示

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

7. **视电阻率的影响因素**：测量装置，电极距，测点的位置，地下介质电阻率分布，测量电极间的大地电阻率
8. 电极MN之间的电位差：导电介质中电场在电场强度方向上形成的电压降
9. 在装置一定时， ρ_s 与MN之间的电流密度和MN之间的电阻值成正比
10. 视电阻率剖面曲线的变化能清楚地反映地下导电性不均匀体地位置及电阻率的相对高低
11. 当地下只有一种岩石时， ρ_s 值等于岩石真电阻率 ρ_1 值；当地下有矿体时，在高电阻率矿体上测得的视电阻率 ρ_s 值，将较围岩电阻率 ρ_1 值大；在低电阻率的矿体上测得的 ρ_s 值，将比 ρ_1 小。

ρ_s 曲线的变化形态不但能反映处地下不均匀体的位置和不均匀体电阻率的相对高低

12. 视电阻率 ρ_s 与地下不均匀体的分布状态和各个不均匀体的真电阻率值都有关。在任何不均匀情况下，视电阻率值与供电电流(I)无关，只与地下不均匀体的情况和各电极的位置或排列方式等有关。
13. 地形起伏会改变地面电流的分布，因此地形对视电阻率有影响

1.1.5 电流密度随深度的变化规律

1. 当AB距离一定时，地面AB的中点电流密度最大
2. 要使得地下 h 深度处电流密度最大，AB距离应取 $AB = \sqrt{2}h$
3. 视电阻率的微分公式：

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

其中， j_0 为正常情况下地表MN之间的电流密度， j_{MN} 为实测地表测量MN之间的电流密度，公式含义：电法勘探实际上是在地表观测正常电流场被地下地质体重新分配前后结果的相对变化

4. 如果想勘探地下 h 深度处的地质体，就让地质体充分影响整个电流场，在地表MN之间观测的电流密度相对变化量即最大
5. 例如：要使100m深处的电流密度最大，则AB极距应稍大于 $100 \times \sqrt{2}$ m
6. 只有地下地质体存在导致地表电流密度相对变化足够大，且能被有效观测到，才能被认定是勘探到地下的地质体
7. 供电极距一定时，AB中点地表电流密度最大： $j_0 = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{1}{L^2}$
8. 供电极距一定时，不能探测太深处的地质体，或者说能达到的探测深度是有限的，要使电流密度比足够大， h/L 的比值不能太大
9. 将AB/2作为电场的影响深度，将AB/4的深度作为勘探深度，考虑的主要因素：仪器的探测精度，抗干扰能力，体积效应
10. 影响深度：该深度范围都是电场的有效作用范围，其中的地质体对观测结果都有影响，或者说观测结果已经包含它们的影响
11. 勘探深度：所用测量装置能获得可靠异常的最大深度

12. 实际在地下介质并不均匀，探测深度不仅与 AB 极距有关，还与地质体的大小、形状、电性密切相关
13. 决定电阻率法勘探深度的因素：供电极距的大小
14. 影响勘探深度的主要因素：地电断面电阻率的分布

1.2 电阻率法的仪器和装备

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

对于 ΔU_{MN} ，测量仪器为：电位差计或接收器；测量电极：铜棒或不极化电极，导线等；

对于 I ，供电电极：铁棒或铜棒电极，供电设备：发送机、供电导线、供电电源

对于 K ，测距定点：GPS、测绳或皮尺

(1) 装备要求

1. 发射设备：电流稳定，输出电压连续可调
2. 接收设备：灵敏度高，有利于整个装备轻便；抗干扰能力强，有效抑制50Hz工频干扰和其他干扰；稳定性好，能适应各种气候条件，保持测量精度；高输入阻抗，在接地条件差的条件下仍能准确测量

1.3 电阻率剖面法

1.3.1 电阻率剖面法概述

1. 电极装置：供电电极AB及测量电极MN的排列形式和移动方式，又可以分为电剖面装置和电测深装置
2. 电剖面法：电阻率剖面法的简称，整个装置电极距保持不变，沿剖面方向整体移动，逐点测量获得地下某一深度沿剖面方向的视电阻率分布
3. 电剖面法常用的电极装置：二极装置，三极装置，联合剖面装置，对称四极装置，中间梯度装置，偶极-偶极装置
4. **二极装置**：B极和N极固定，为无穷远极，AM间保持距离不变，两个极沿测线同时移动，逐点进行测量，测点为AM的中点；测量结果为：一条 ρ_s 曲线
5. **三极装置**：B极固定，为无穷远极，A、M、N间保持距离不变，三个极沿测线同时移动，逐点进行测量，测点为M、N的中点；测量结果：一条 ρ_s 曲线
6. **联合剖面法**：C极固定，为无穷远极，A、M、N、B间保持距离不变，四个极点沿测线同时移动，逐点进行测量，测点为M、N的中点O；测量结果：两条 ρ_s 曲线
7. **对称四极装置**：A、B、M、N四个电极排列在一条直线上，且相对于MN的中点O左右对称分布，数据记录点为MN的中点O；测量结果：一条视电阻曲线
8. **中间梯度装置**：A、B、M、N四个电极排列在一条直线上，M、N在AB中段AB/3范围测量，数据记录点为MN的中点O；测量结果：一条视电阻曲线

1.3.2 电阻率剖面装置与视电阻率异常

1. 变化规律：从0坐标点开始，电阻率值随测点逐渐接近界面而增大，在界面处达到最大值，过界面后断崖式降低至平台；远离界面逐渐减小，最后趋近右侧地下电阻率
2. 勘探意义：异常大小随极距的变化规律可作为实际工作中选择极距的依据
3. **联合剖面法寻找低阻脉状体的效果较好，一般不用于寻找高阻脉状体**
4. **对称四级异常幅度明显低于联合剖面视电阻率异常**
5. 起伏地形对视电阻率的影响及消除：
普遍现象：地形对各种装置的视电阻率都有较大的影响
6. 山脊地形：视电阻率在山顶出现类似低阻异常特征。山顶联剖视电阻率出现低阻交点；**两侧山脚处出现类似高阻“正交点”**；对称四极法在山脊出现极小值，在两侧山脚处出现极大值

7. 山谷地形：视电阻率在谷底出现类似高阻异常特征。谷底联剖视电阻率出现高阻交点；**两侧地形转折处出现类似低阻“反交点”**；对称四极法在谷底出现极大值，在两侧转折部位处出现极小值

8. 地形校正：比值法

$$\rho_s^G = \rho_s(\rho_s^D / \rho)$$

其中 ρ_s^G 为校正后的视电阻率， ρ_s 为实测含地形及异常体视电阻率， ρ_s^D 为纯地形正演计算视电阻率， ρ 为纯地形不含异常体介质平均电阻率(背景介质电阻率)

方法的适应性：可以校正任何装置实测视电阻率

获得途径：有限单元，边界单元法正演，物理模拟

校正关键：如何获得纯地形条件下视电阻率值

9. 联合剖面法应用：**寻找金属矿产，划分岩性分界面，确定构造破碎带倾向**

10. 对称四极法：**寻找地下古河道，确定基岩起伏，探测两种不同电阻率的岩层接触带**

11. 联合剖面法**特殊应用**：判断脉状体的倾向，采用不同极距进行联合剖面观测，利用交点的位移判断脉状体倾向

12. 探测基岩起伏以及地下只有一个电性界面的背斜或向斜构造：**高阻向斜(基岩凹陷)，低阻背斜(基岩隆起)**，(1) 判断基岩相对覆盖层是高阻还是低阻，(2) 根据大极距曲线形态勾画基岩起伏

13. **对称四极法的实际应用**：研究覆盖层下的基岩起伏(向斜或背斜)和对水文、工程地质提供有关**疏松层中电性不均匀体的分布**以及**疏松层下的地质构造**，**划分接触带**，寻找**厚岩层(矿体)**

14. 对称四极法剖面法寻找地下古河道；物性：古河道两侧以及下部岩石由沙粘土组成，电阻率较低；古河床中充填的砂卵石则为高阻；目的：查明古河道的大致位置及走向

15. 复合对称四极剖面法确定基岩的相对起伏；目的：查明基岩起伏以便为工程地质提供有用资料，方法：复合对称四极剖面法

16. 视电阻率异常曲线特点：曲线呈中心对称；低阻异常体的球心上方有极小值，两个视电阻率大于背景电阻率，且有极大值；高阻异常体的球心上方有极大值，两侧视电阻率小于背景电阻率，且有极小值；异常曲线与背景电阻率值交点的横坐标：

$$x = - + \frac{h_0}{\sqrt{2}}$$

17. 中间梯度装置视电阻率平面异常特点：视电阻率平面异常沿测线方向宽度与异常体大小相当；垂直测线方向异常拉长，异常形态不能正确反映异常体形态；平面异常显示出很好的对称性
18. 视电阻率异常主极值与相对电阻率的关系：无论异常体的电阻率的高低与否，**视电阻率异常均不会随电阻率的差异增大而无限增大**，而是趋近相应的饱和值；理想导体球的视电阻率异常为绝缘体球体异常幅值的2倍，寻找良导体比寻找高阻体所得异常更加明显；目标地质体与围岩电阻率有一个量级以上的差异，中间梯度装置即可获得明显的视电阻率异常
19. **利用视电阻率异常确定球体中心埋深**：异常曲线与背景电阻率交点间距法/异常曲线半极点弦长法
20. 中间梯度法对球体的探测深度的条件：(1)3倍均方误差可为有效异常，(2)实际均方误差应小于5.0%，(3)有效异常约为0.15，大于0.15即可认为是有效异常，取可靠异常为0.2
21. 结论：中间梯度装置对球体异常体的**最大探测深度与球体直径相当**，探测结果受异常体大小、相对电性差异、埋深比等多种因素影响
22. 脉状体上的中间梯度异常：中间梯度寻找低阻倾斜脉状体和水平良导体有较好的效果
23. 中间梯度寻找高阻直立脉状体最为有利，对水平高阻体几乎没有效果
24. 中间梯度装置视电阻率地形影响：特点：异常曲线与纯地形起伏呈镜像关系，山脊越高视电阻率越低；中间梯度装置特点：常用于寻找高阻直立或陡倾脉状体；均匀场勘探；一条测线供电，多条线测量，效率高

1.4 电阻率测深法

电测深法概述

1. **电剖面法**：是在测量过程中保持AB不变，使整个或部分装置沿测线移动，逐点观测，以了解某一深度范围内不同电性体沿水平方向或横向分布
2. **电测深法**：是在同一点上逐次扩大供电电极距，以观测测点处沿垂直方向上由浅到深的 ρ_s 变化情况，通过分析视电阻率曲线来了解测点下部沿垂向变化的地质情况，也称为视电阻率垂向测深，简称**电测深**
3. **应用条件**：近于水平层状岩层地下电性分布特征(电性结构)，常用装置：三极电测深，对称四极测深，偶极偶极测深
4. **增加供电电极距，可以增加探测深度**：不断增加供电电极距AB，理论上可以让不同的 h 深度处的电流密度最大，在地面同一点进行测量，能有效获取不同深度位置的视电阻率信息，即电测深

1.4.1 多层水平地层点电流场的电场及视电阻率

- 多层水平地层点电流场的求解条件
 1. 除电源点外，空间各处电位有限且连续，无穷远处为0
 2. 岩层分界面上下连续
 3. 岩层分界面上下，电流密度法向分量连续
 4. 地表面上，电流密度法向分量为0

电阻率转换函数的性质：电阻率转换函数或核函数只与各层电阻率及厚度(层参数)有关，与观测点位无关，是表征地电断面性质的函数

电阻率转换函数的递推公式： $T_1(m)$ 总是指地面的电阻率转换函数，为实现递推计算，规定 $T_i(m)$ 为 i 层以上全部去掉后第 i 层表面的电阻率转换函数

物理意义：从频谱分析的观点看，当电阻率转换函数用它在 x 数轴上的离散抽样值表达式时，相当于滤取了频率高于 $1/(2\Delta x)$ 的谐波成分，这种计算视电阻率的方法称为滤波计算方法， C_k 被称为滤波系数

其中， Δx 为抽样间隔：

1. 六点式抽样间隔： $\Delta x = (\ln 10)/6$ ，直流电法测深

2. 十点式抽样间隔: $\Delta x = (\ln 10)/10$, 频率电磁测深
3. 多层水平地层电测深曲线: 定义: 视电阻率 ρ_s 随着供电电极距($AB/2$)变化的曲线, 称为电测深曲线
- (1) 每个测深点均有一条电测深曲线
 - (2) 曲线以 $AB/2$ 为横坐标, 以 ρ_s 为纵坐标
 - (3) 一般采用双对数坐标 $\log\log$ 绘制
 - (4) 绘制在双对数坐标中的数值为真值
 - (5) $AB/2$ 的值在横轴上近似等间隔分布
4. 纵向电导和横向电阻: 对水平多层地层, 电流平行层面流动时, 地层表现的总电阻相当于各层电阻的并联, 将各层厚度与该层的电阻率之比称为该层的纵向电导; 电流垂直接流动时, 总电阻为各层的电阻串联, 将各层厚度与该层的电阻率之积称为该层的横向电阻
5. 地层的低阻屏蔽作用: 对水平多层地层, 表层介质电阻率远低于下层介质电阻率时, 电流只在上层介质中流动, 而无法到达下层介质
- 地层的高阻屏蔽作用: 对水平多层地层, 表层介质电阻率远高于下层介质电阻率时, 电流无法进入地下的现象称为高阻屏蔽
6. 电测深曲线的等值现象: 不同的地电断面对应的电测深曲线在观测误差允许的范围内可以看作是同一条电测深曲线, 这一现象称为电测深曲线的等值现象。
- 等值现象的本质: 地电断面的层参数决定其视电阻转换函数, 即具有相同视电阻率转换函数的地电断面具有相同的电测深曲线。
7. 同层等值现象: 一条 n 层的电测深曲线对应一组不同参数的 n 层地电断面的现象
8. S等值现象: 一组不同参数的 n 层地电断面的纵向电导相同则其电测深曲线相同。
- S等值现象发生的条件: 第二层很薄(三层介质时)
- S等值现象的物理实质: 当第二层电阻率很小时, 电极距较大时, 在第二层中电流线方向将平行于地层面, 第二层“吸收”的电流决定于其纵向电导 S_2 , 只要纵向电导不变, 同时改变层厚度 h_2 和电阻率 ρ_2 , 电流在各层中分布规律基本不变, 引起地表测量电极MN之间的电位差基本不变, 因而观测到的电测深曲线不变。
- 结论: 对多层地电断面, 只要保持第二层以下总纵向电导 S 相同, 测深曲线即相同

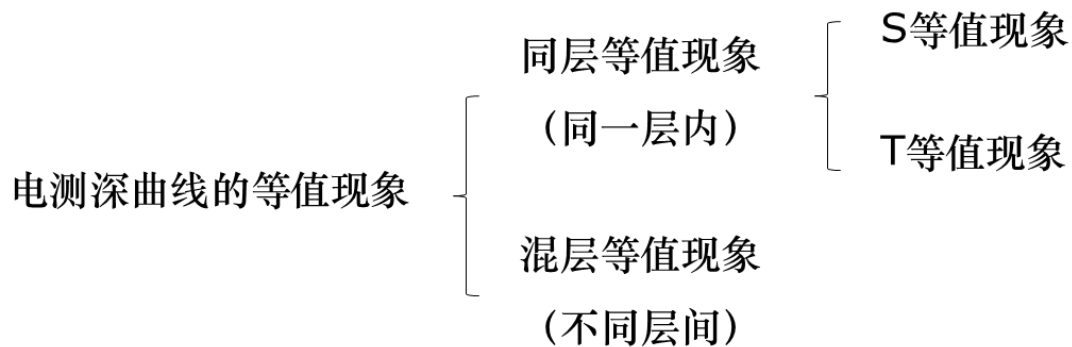
9. T等值现象：一组不同参数的 n 层地电断面的横向电阻相同则其电测深曲线相同。

T等值现象发生的条件：第二层很薄(三层介质时)

T等值现象的物理实质：当第二层电阻率很大时，电极距较大时，在第二层中电流方向将平行于地层面，第二层“排斥”的电流决定于其横向电阻 T_2 ，只要横向电阻不变，同时改变层厚度 h_2 和电阻率 ρ_2 ，电流在各层中分布规律基本不变，引起地表测量电极MN之间的电位差基本不变，因而观测到的电测深曲线不变。

结论：对多层地电断面，只要保持第二层以下总纵向电阻 T 相同，测深曲线即相同

10.



11. 混层等值现象：一条电测深曲线对应一组不同参数的不同层数地电断面的现象。

结论：解释水平多层电测深曲线时必须结合地质资料，准确把握层数和曲线类型

12. 定量解释的目的：确定电测深曲线所反映的电性层或电性标志层的层参数（各层厚度以及各层电阻率）

13. 解释途径：计算机自动解释；人工手动解释

14. 解释方法：最优化数值反演；理论曲线量板

15. 运用情况：目前应用较广泛；以往使用较多

寻找使一组模型，使对应的理论曲线与实测曲线之间的拟合差最小

最优化数值反演：在数学上求多变量函数极小值的一种方法

反演：由测量数据推算相应的地球物理模型

16. 电测深曲线最优化反演实现途径：

(1) 直接拟合电测深 ρ_s 曲线的最优化反演；

(2) 拟合电阻率转换函数曲线的最优化反演

反演过程的关键：如何根据过程**修正理论模型**继续进行迭代运算。

17. 拟合转换函数/拟合视电阻率：由初始模型计算，再用数字滤波方法得到

18. 由于电法勘探的体积影响，在有限地质体的顶部，以及在其旁侧均可测到有效的视电阻率异常

19. 有限地质体上测深曲线的形态较水平层上复杂，它不但与地电参数及地质体的形态、产状有关，还与测点位置及布极方位有关，故不宜将水平层上电测深的有关结论任意推广到有限地质体上
20. 等视电阻率断面图的形态与地质体形态不同，但二者存在一定关系，进行地质解释时可以充分利用，但不可直接套用
21. 极距的选择原则：
- (1) 最小的供电极距 AB 应能使测得的视电阻率曲线首支为水平的线段；以便能直接获得表层的厚度和其电阻率
 - (2) 最大供电极距应能满足勘探深度的要求，并能保证观测到测深曲线的尾支完整，以便可以直接解释最后一个电性层；
22. 电测深成果相关的定性图件：
- (1) **等 $AB/2$ 视电阻率剖面图**：以测点坐标为横轴，选择各测点某一相同供电极距对应的视电阻率值绘制剖面图
 - (2) **等 $AB/2$ 视电阻率平面等值线图**：先将测点平面坐标位置绘制在一定比例尺的图纸上，再将各测点某一相同供电极距的视电阻率值绘制在对应测点处，连接等值线
23. 电测深法的应用条件：近似水平层状的地层
24. 根据地电断面能确定电测深曲线的类型，并能定性的绘出电测深曲线
25. 对单独一条电测深曲线，能判断出其类型，并能根据其类型推断地下电性层的层数、各相邻层间电阻率的相对大小及第一层和底层的电阻率值。
26. 电测深应用实例：
- (1) 寻找地下水以及划分不同含水区；
 - (2) 研究解决工程地质问题
 - (3) 矿产勘查

1.5 高密度电阻率法

1.5.1 高密度电阻率法概述

1. 高密度电阻率法：是一种**阵列式勘探技术**，本质上**仍属于电阻率法**
2. **跑极与测量方式**：测量时将全部电极(几十至百只)置于测点上，利用程控转换开关和微机工程电测仪便可实现**电极快速和自动跑极与测量**，实现高效数据采集
3. 装置形式与极距：通过程控开关灵活改变数据采集装置和极距，获得不同装置下的测量数据
4. 数据显示与处理：能直接对数据进行处理，并显示地电断面的各种图示结果
5. 勘探技术的优势：集**电测深**和**电剖面**法于一体，是一种**多装置、多极距的组合勘探技术**，它具有**一次布极**即可进行**多种装置数据自动采集**，并能通过求取比值参数突出异常信息的特点

高密度电阻率法的主要特点

1. 一次性完成所有电极的布设，减少了因电极频繁移动引起的故障和干扰，为实现数据的快速和自动采集奠定了基础
2. 能进行多种电极排列方式的扫描测量，可以获得较丰富的地电断面结构特征的地质信息；
3. 野外数据采集实现了自动化或半自动化，不仅采集速度快，而且避免了由于手工操作所出现的错误；
4. 可直接对测量结果进行预处理并显示剖面形态，脱机处理后还可自动绘制和输出各种成果图件
5. 与传统的电阻率法相比，成本低、效率高，信息丰富，解释方便。勘探能力显著提高
6. 高密度电法仪器 - 集中式/**分布式**，最适合于同时做电阻率和激发极化测量；数据质量高，信噪比高
7. 高密度电阻率法的装置形式：
高密度电阻率法的电极排列原则上可以用**二极方式**，由于采用二极装置必须增设**两个无穷远极**、给实际工作带来很大不便；当测量电极逐渐远离供电电极时，电位测量幅度变化较大、需经常改变电源。不利于自动测量方式的实现；**因此高密度电阻率勘探中常采用三电位电极系**

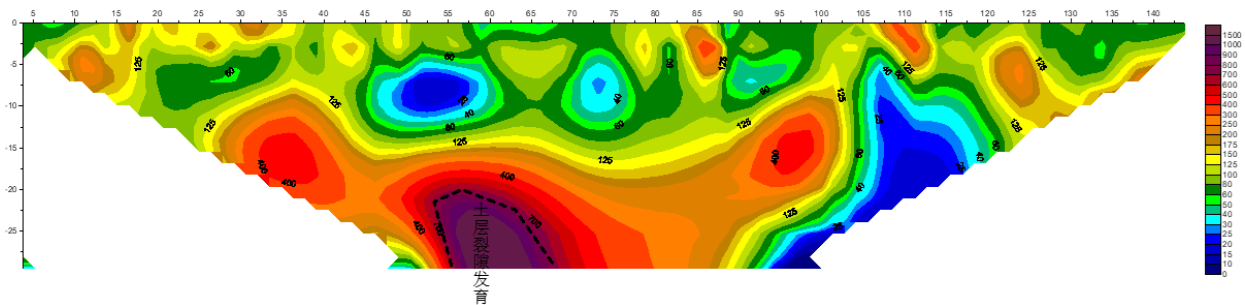
8. 三电位电极特点：三电位电极系是将温纳四极、偶极和微分装置按一定方式组合后所构成的一种统一测量系统。
9. 三电位电极优点：在实际测量时，只须利用 **电极转换开关**、便可将每四个相邻电极进行一次组合。从而在一个测点便可获得多种电极排列的测量参数。
10. 比值参数 λ ：反映了沿剖面**水平方向的变化率**，视电阻率断面只反映了基底的起伏变化，而 λ 比值断面同时反映了起伏基岩中的低阻构造
11. 比值参数 T_s ：在反映地电结构的分布形态方面远较相应排列的视电阻率断面图要清晰和明确的多
12. 多电极系统：可以同时联结并控制几十甚至几百根电极

1.5.5 高密度电阻率法的资料解释

1. 高密度电阻率法的资料解释：

- (1) 滑动平均
- (2) 计算统计参数、均值、方差
- (3) 计算电极调整系数
- (4) 视参数分级

2. 统计处理结果一般采用灰度图来表示，由于它表征了地电断面每一测点视电阻率的相对变化，因此该图在反映地电结构特征方面将具有更为直观和形象的特点。



3. 比值换算方法：比值换算是想改善**测量结果**对**地电结构**的**分辨能力**，前面我们给出了两种比值参数并讨论了它们的基本特性， λ 参数对局部低阻体分辨能力强，而 T 参数对局部高阻体的分辨能力强。

4. 采用高密度电阻率法测量的物性前提,是利用组成地下介质层间的电性差异:采空区和巷道为特高阻,灰岩层为高阻,煤层呈中到相对高阻,灰岩层和未开采煤层横向较均匀且分布范围一般很大,充水的巷道呈低阻但范围很小。地表通过不同电极距的布设可采集到反映地下不同点、不同深度的视电阻率值,而视电阻率值即蕴含着各种地质体的分布信息,采用计算机对数据进行处理、影像成图和综合分析解释,即可确定出地下采空区和巷道的大小、形状、分布范围以及在地表的投影位置
5. 实际应用: 1) 煤田采空区探测中的应用; 2) 地下水调查; 3) 铁路、公路的地基勘察; 7) 污水管道的探测; 8) 水库、河流堤坝渗漏情况的无损检测

1.5.6 高密度电阻率法的实际应用

1. 最大探测深度 -- 没有无穷远极: 大约是最大排列长度的20~30%, 例如, 温纳、施伦贝格、和偶极-偶极排列。
2. 最大探测深度 -- 有无穷远极: 大约是最大排列长度的50~60%, 例如, 单极-单极、单极-偶极排列。
3. 平均分辨率大约是电极距的一半。
4. 高密度电法在落水洞及不良地质环境调查中的应用

思考题

1. 层状岩石模型的纵向电阻率和横向电阻率公式的是如何得到的?

答:

总纵向电导: 各层厚度与该层的电阻率之比, 称为该层的纵向的纵向电导, 电流垂向流动时, 总电阻为各层的电阻串联

$$S_i = \frac{h_i}{\rho_i}, S = \sum_{i=1}^n S_i$$

横向电阻: 将各层厚度与该层电阻率的乘积累加

$$T_i = h_i \rho_i, T = \sum_{i=1}^n T_i$$

2. 简述稳定电流场满足的两个基本定律，并导出稳定电流场电位所满足的方程
答：

(1) 欧姆定律：

$$I = \frac{\Delta U}{R}, E = \rho j$$

(2) 克希霍夫第一定律：

$$\nabla \cdot j = 0$$

稳定电流场中电位方程——拉普拉斯方程：

$$E = -\nabla U, j = E/\rho$$

$$j = -\nabla U/\rho$$

$$\nabla \cdot j = \nabla \cdot (-\nabla U) = \nabla^2 U = 0$$

结论，均匀电流场的位满足拉普拉斯方程，转换到直角坐标系则有：

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

3. 试导出地下倾斜偶极子的电位与电场强度表达式，偶极子轴线与地面夹角为 α ，中心深度为 h ，并分析场的特点

答：

$$\cos \theta = \cos(\alpha + \beta) = \frac{1}{R}(x \cos \alpha - h \sin \alpha)$$

其中， θ 为点M到偶极中心的连线R与偶极轴间的夹角， β 为R与地面间的夹角

代入原式：

$$U = \frac{I\rho}{2\pi R_A} - \frac{I\rho}{2\pi R_B} = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{R_B - R_A}{R_A R_B} \right) = m \frac{\cos \theta}{R^2}$$

故等于：

$$U = m \frac{x \cos \alpha - h \sin \alpha}{R^3}$$

其中，

$$R = \sqrt{h^2 + x^2}$$

则有：

$$U = m \frac{(x \cos \alpha - h \sin \alpha)}{(h^2 + x^2)^{3/2}}$$

其中，

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

电场强度表达式为：

$$E = -\frac{\partial U}{\partial x} = -m \frac{(h^2 - 2x^2) \cos \alpha + 3hx \sin \alpha}{(h^2 + x^2)^{5/2}}$$

电场特点：电位及电场强度不对称

4. 在均匀介质条件下，用两个供电电极在地面供电，假设供电电流为 I ，供电电极距长度为 $2L$ ，在地下什么位置电流密度最大，该深度对应的这一电极距有何实际勘探意义？

答：

对于电极中垂线上深度为 h 处的一点有：

$$\begin{aligned} j_h &= j_M^A + j_M^B \\ j_h^A &= \frac{I}{2\pi(L^2 + h^2)} = j_h^B \\ j_h &= 2j_h^A \cos \alpha = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{L}{(L^2 + h^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

观察发现，当 $h \rightarrow 0$ ， j_h 电流密度最大，

$$\frac{\partial j_h}{\partial L} = \frac{I}{\pi} \cdot \frac{h^2 - 2L^2}{(h^2 + L^2)^{5/2}} = 0$$

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

即 $AB = 2L = \sqrt{2}h$ 时，AB 中心距离地面 $h = \sqrt{2}L$ 深度处的电流密度最大，

实际勘探意义：若想探测 h 深度处的地质体，就选用合适的供电电极距使 h 深度处的电流密度达到最大，从而地表 MN 之间观测的电流密度相对变化量更大

5. 利用视电阻率的微分公式，推导中间梯度法在球体上方的电阻率表达式，并绘制低阻球体的视电阻率等值线平面图(忽略)

6. 什么是电阻率测深法，主要的装置形式有哪些？

答：

简述：是在 **同一点上** 逐次扩大供电电极距，以观测测点处沿垂直方向上由 **浅到深的 ρ_s 变化** 情况，通过分析视电阻率曲线来了解测点下部沿垂向变化的地质情况，也称为视电阻率垂向测深，简称 **电测深**

主要装置形式：三极电测深，对称四极测深，偶极偶极测深

7. 试绘制出二层和三层地电模型对应的视电阻率测深曲线，并说明各个视电阻率测深曲线的类型。

答：PPT 页码185

二层断面的电测深曲线类型：(D型和G型)，D: $\rho_1 > \rho_2$ ，G: $\rho_1 < \rho_2$

三层断面的电测深曲线类型，H: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ ，K: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ，A: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ ，

Q: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$

多层断面的电测深曲线类型

四层 电性层组成的地电断面，按 **相邻各层电阻率的组合关系**，其电测深曲线有 **8** 种不同的类型

每种电测深曲线的类型由 **两个字母** 表示。

第一个字母 表示断面中的 **前三层**（即第一、二、三层）所对应的电测深曲线类型；

第二个字母 表示断面中的 **后三层**（即第二、三、四层）所对应的电测深曲线类型。

四层断面的8种曲线类型：

HK ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)

KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)

HA ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)

KQ ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)

AA ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$)

QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$)

AK ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$)

QQ ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$)

8. 为什么说当第 n 层电阻率极高时，水平 n 层视电阻率测深曲线尾支在双对数坐标中具有 45° 渐近线？

答：

9. 什么是电测深曲线的等值现象，如何解释三层介质视电阻率曲线的 S_2 和 T_2 等值现象。

答：

等值现象：不同的地电断面对应的电测深曲线在观测误差允许的范围内可以看作是同一条电测深曲线，这一现象称为电测深曲线的等值现象

S等值现象的物理实质：当第二层电阻率很小时，电极距较大时，在第二层中电流方向将平行于地层面，第二层“吸收”的电流决定于其纵向电导 S_2 ，只要纵向电导不变，同时改变层厚度 h_2 和电阻率 ρ_2 ，电流在各层中分布规律基本不变，引起地表测量电极MN之间的电位差基本不变，因而观测到的电测深曲线不变。

T等值现象的物理实质：当第二层电阻率很大时，电极距较大时，在第二层中电流方向将平行于地层面，第二层“排斥”的电流决定于其横向电阻 T_2 ，只要横向电阻不变，同时改变层厚度 h_2 和电阻率 ρ_2 ，电流在各层中分布规律基本不变，引起地表测量电极MN之间的电位差基本不变，因而观测到的电测深曲线不变。

10. 高密度电法与常规电法相比有什么不同？其主要优势是体现在哪些方面？

答：

- (1) 减少因电极频繁移动引起的故障和干扰，更快实现数据采集
- (2) 进行多种电极排列方式的扫描测量，可以获得较丰富的地电断面结构特征
- (3) 成本低、效率高，信息丰富，解释方便

11. 高密度电法常采用哪些装置形式？各有什么特点？

答：

- (1) 三电位电极系，特点：在实际测量时，只需利用电极转换开关，便可将每个四个相邻电极进行一次组合，从而在一个测点便可获得多种电极排列的测量参数

12. 高密度电阻率法经常采用哪些比值参数？利用比值参数作图解释有何优点？

答：

(1) 比值参数 λ ，反映地电结构能力方面所作的模拟实验，视电阻率断面只反映了基底的起伏变化

(2) 比值参数 T_s ，由于这两种电极排列在同一地电体上所获参数总是具有相反的变化规律，用该参数所绘的比值断面图，在反映地电结构的分布形态方面较相应排列的视电阻率断面图要清晰和明确得多

比值换算是想改善测量结果对地电结构的分辨能力，前面我们给出了两种比值参数并讨论了它们的基本特性， λ 参数对局部低阻体分辨能力强，而 T 参数对局部高阻体的分辨能力强。

13. 高密度电阻率法通常用于解决哪些地质问题？

答：

(1) 煤田采空区探测中的应用

(2) 地下水调查

(3) 铁路、公路的地基勘查

(4) 古墓勘察

(5) 污水管道的探测