

《地磁学与地电学》

第一讲 绪论

陈 涛

**地球物理学院
中国石油大学（北京）**

2024/5/7

个人信息

- 姓名：陈涛
- 手机：18811590238
- 电子邮件：geophysics@aliyun.com (提交作业)
- GitHub：<https://geogoku.github.io/> (发布作业, PPT)
- 办公室：地质楼602北侧
- 答疑时间：周三下午

参考书籍

- 1、《应用地球物理教程 - 电法、放射性》
- 2、《石油电法勘探》
- 3、《构造电法勘探》
- 4、《地电场与电法勘探》 李金铭
- 5、《实用近区磁源瞬变电磁勘探》
- 6、《可控源音频大地电磁法及其应用》
- 7、《电法勘探教程》

其它资料

期刊：

地球物理学报

地球物理学进展

Journal of Geophysical Research: Solid Earth

Geophysical Journal International

Geophysics

地电部分

第一讲 绪论

第二讲 电磁基本知识

第三讲 岩矿石的电磁性质

第四讲 直流电法

第五讲 电磁法（交流电法）

第六讲 正演数值模拟与反演

第七讲 电法数据的解释与应用

课前测试

□ 谈谈你对电的认识

□ 有关电的物性参数



课前知识

地球物理不同方法的物性基础

- 重力——密度
- 磁法——磁化率
- 电法——电阻率/磁导率/介电常数/极化率
- 地震——速度
- 地热——温度
- 核——放射性半衰期

目录

第一节 地电学回顾

1. 地电学回顾

- 1830 R. W. Fox 发现自然电位
- 1835 R. W. Fox 用自然电位法找到硫化矿
- 1867 Charles Mateucci 发现大地电流
- 1880 C. Barus 发明不极化电极
- 1883 FRED Brown 提出二电极地电阻值测量找矿
- 1900 Daft 和 Williams 提出交流电法勘探

- 1910 Leimbach 和 Lowy 提出无线电频率电流勘探
- 1912 Schlumberger 发明激发极化法。
- 1916 F. Wenner 提出四电极地电阻值测量法，温纳装置诞生。现代电阻率法开始。
- 1917 Harry W. Conklin 发明电磁法
- 1924 Hunkel 提出交流电法勘探相位测量法
- 1925 Sundber 成功开展电磁法

1. 地电学回顾

- 1830年，在Cornwall（康沃尔，英格兰郡名，加拿大城市名）地区，Rober（罗伯特）W Fox发现自然电位与含铜矿脉有关，从而开创了电法勘探找矿的先河。

1. 地电学回顾

- 到1835年，Rober W. Fox发现在铜矿上有由于化学反应产生的电流。这实际是自然电位。根据 Kelly 的描述，“是他第一个用电法勘探方法发现硫化矿体的”。其后1882年，Carl (卡尔) Barus 在内华达州的Comstock Lode 开展了一系列的实验，发现自然电位法可以用于隐伏硫化矿体的勘探工作。

1. 地电学回顾

- Barus的最大贡献是他在电法勘探工作中首先使用不极化电极进行电位测量。

1. 地电学回顾

- Fred II Brown (佛瑞德布朗) 在1883到1891年间、Alfred Williams和Leo Daft在1897年，都设法测量了不同矿体的电阻率差异，他们的测量方法还申请了专利。

1.地电学回顾

- 1900年，N S Osborne(奥斯本)在同一个地区进行了等位线测量工作。但第一个采用主动源工作（通过可控源激发大地，然后测量人工电场）的电法勘探方法是由Schlumberger(施伦贝尔热)(本书高密度法中提到)于1912年完成。但他那时实际开展的是直流等位线技术。

1. 地电学回顾

- 1912年，Schlumberger首先将电法勘探用于商业性勘探中。1913年他又绘制了第一张金属矿勘探的自然电位平面等值线图，并于1918年发表。该图描绘出法国Sain-Bel矿区的硫黄铁矿的形态。

1. 地电学回顾

- 1914年，美国地质调查局的Roger C Wells(罗杰)首先解释了自然电位现象产生的化学机理。但至到1924年，kelly才将自然电位方法引入加拿大和美国。

1. 地电学回顾

- 视电阻率的概念是由美国标准化局的Wenner和 Schlumberger于1915年左右同时提出的。

1. 地电学回顾

- 1917年，Harry W Conklin在世界上拥有电磁法勘探的第一个专利，从而揭开了电磁法勘探的漫漫发展历程。

这些开端，揭开了电阻率法、激发极化法、大地电磁测深法和瞬变电磁法的发展之路。

1. 地电学回顾

- Wenner采用的是等间距的电极排列（现在被称为Wenner装置），而Schlumberger采用的装置中电位电极间距非常小从而可以测量出供电电极中点的电位梯度即电场强度（现在该装置被称为Schlumberger装置）。
- 据Sumner (1976) 考证，Conrad Schlumberger是第一个描述激发极化的人，时间大概在1920年，尽管宁愿将其称为自然电位法。
- Harry W Conklin是一位美国矿业工程师，他1917年申请了第一个电磁法勘探方法的专利。1925年，Sundberg电磁法勘探方法成功应用于实际勘探，从而成为利用水平线圈进行电磁法勘探的先驱。这样在由瑞典人Lundberg和Sundberg培育起来的电磁法走在了前面。接着，1931年，Bieler-Watson提出了测量靠近水平大发射回线附近磁场椭圆极化的方法。

1. 地电学回顾

- 在1920~1930年间，电法勘探发展迅速。但其后，却进步缓慢。在二次世界大战后，电法勘探取得较大的发展。然而，整个电法勘探的数据解释方法一直却比较落后，直到上个世纪80年代，计算机用于二维和三维电磁边值问题的正演和反演，这种状况才有所改观

1. 地电学回顾

地电学是以地球为研究对象的一门应用电学。它通过研究大气、海洋和固体地球表面和内部的电场分布来揭示地球内部岩石的电学性质、温度变化、以及地壳和上地幔的物质结构。踏着在这些先驱者的足迹，电法勘探缓慢发展起来，并在二次大战后取得长足进步。

早在十九世纪人们就观测到固体地球表面有电流流动，后来又发现大气和海洋中也有电流流动。1940年查普曼和巴特尔斯在他们的著作《地磁学》中，把地电学部分集中成为一章，并命名为“地电流”，其中主要包括大地电场、自然电场、电法勘探和海洋中的电流等内容。1951年克拉耶夫把上述内容编成《地电原理》一书，其中主要包括大气电性、大气电场、海水电性、岩石电性、大地电场、自然电场、有源直流电场和直流电法勘探等内容。

1. 地电学回顾

二十世纪初，地电学的重点转向电法勘探。

电法勘探是以岩、矿石电学性质的差异为基础，通过观测和研究与这些差异有关的电场或电磁场在空间和时间上的分布特点和变化规律，来查明地下地质构造和寻找有用矿产的一类勘查地球物理方法。

在各类勘查地球物理方法中，电法勘探的变种或分支方法是最多的。可以利用岩石在导电性、导磁性、介电性、电化学活动性及激发极化特性等方面的差异。就场的性质而言，可以利用人工场，也可以利用天然场，可以利用直流电，也可利用不同频率的交流电。

1.地电学回顾

地电学和电法勘探

前者应用地电观测的数据资料，研究地球内部电性及电场分布等具有全球性质的大尺度物理现象和一般原理；而后者则主要是应用这些原理寻找有用矿产或解决诸如构造、工程、水文或环境等小尺度的地质问题。

但是，由于地电学和电法勘探有着共同的理论基础—电学，和共同的研究对象——地球，因而它们又是紧密联系，相辅相成的。

电法勘探主要应用于普查和勘探各种金属和非金属矿产，勘查石油、天然气、煤田，以及在解决各种水文地质、工程地质问题方面，灾害预测，环境监控，城市建设及考古等方面。

目录

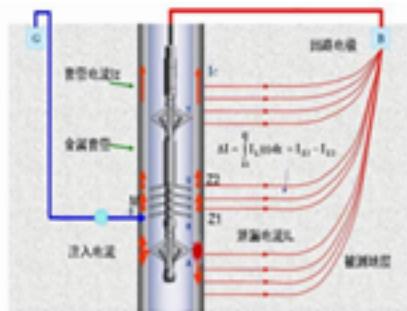
第一节 地电学回顾

第二节 电法分类

2. 电法分类

■ 按照观测的空间位置

- ✓ 航空电法
- ✓ 地面电法
- ✓ 海洋电法
- ✓ 地下或井中电法



2.电法分类

■ 按照应用领域

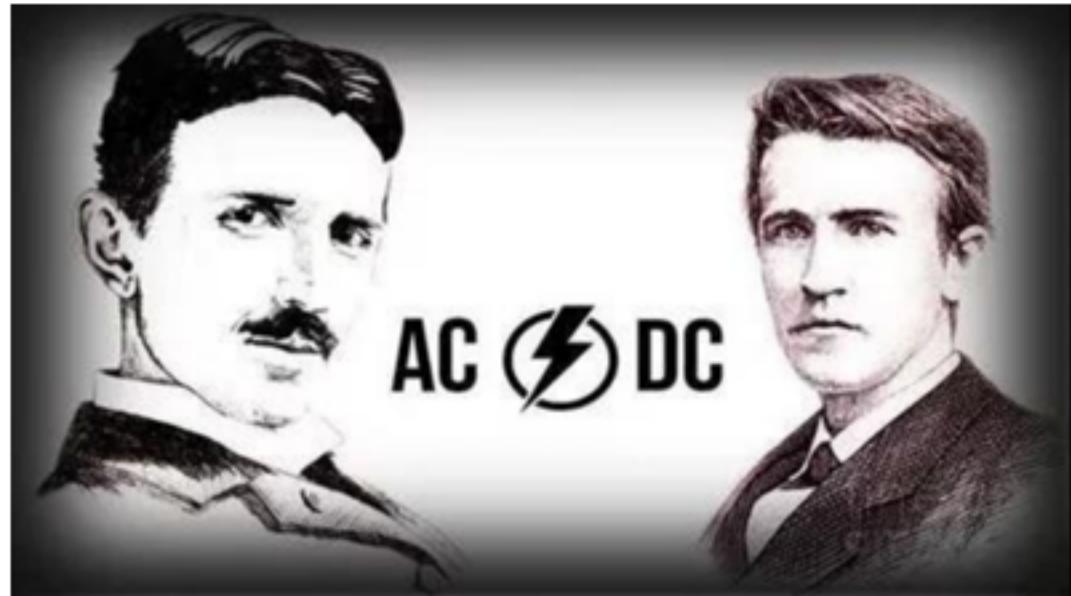
- ✓ 金属电法
- ✓ 石油电法
- ✓ 煤田电法
- ✓ 水工环电法



2. 电法分类

■ 按使用和观测电磁场的时间特性

- ✓ 直流电法
- ✓ 交流电法



2. 电法分类

■ 按场源类型

- ✓ 人工源

连续波场或谐变场（低于数万赫兹）：连续波场可分为回线场、动源偶极场、半定源偶极场和长导线场，偶极场又有近区（感应区）和远区（波区）之分；

瞬变脉冲场：瞬变脉冲场也有回线场和偶极场；

辐射场：辐射场主要按波段分，目前已利用的有长波电台的辐射场；频率范围为 $10\text{ k} - 400\text{ k}$ ，地下井中透视的发射场，频率范围在 $1.5 - 200\text{ MHz}$ 以及雷达波。

- ✓ 天然场源

天然音频磁场和大地电磁场



2. 电法分类

■ 为什么电法种类繁多

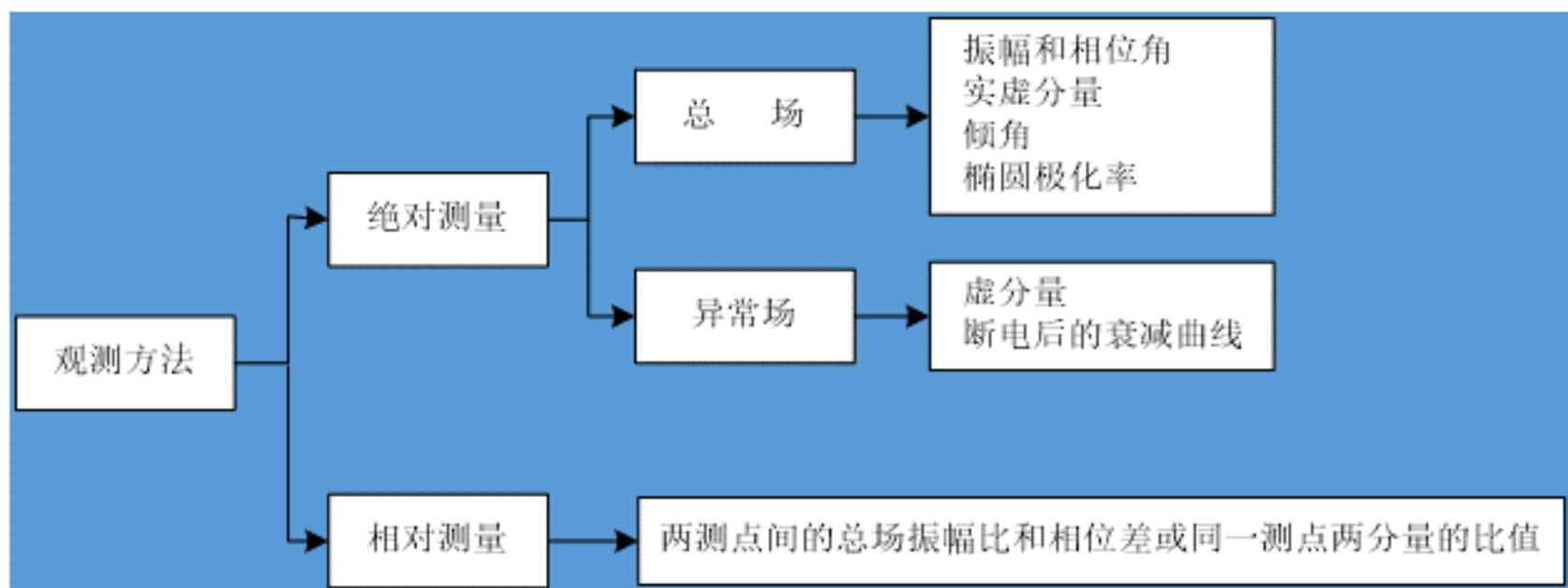
电(磁)法的类型比较多，不下几十种

- ✓ 观测方法多样
- ✓ 观测空间范围大
- ✓ 场源种类多

2. 电法分类

■ 为什么电法种类繁多

- ✓ 观测方法多样



目录

第一节 地电学回顾

第二节 电法分类

第三节 应用领域

3. 应用领域

地球物理学

- 应用地球物理
- 固体地球物理
- 行星（空间）地球物理

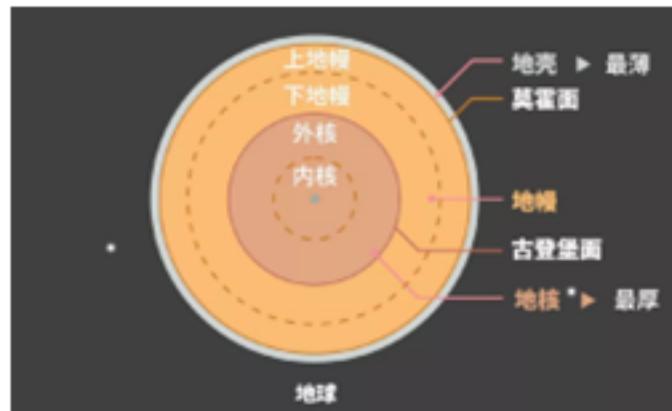
3. 应用领域

■ 应用地球物理

能源矿产：油气、煤矿等

金属矿产：金、银等

非金属矿：盐类、石墨等



3. 应用领域

■ 应用地球物理

水文：找水、湿地监测

环境：海水入侵、土壤修复

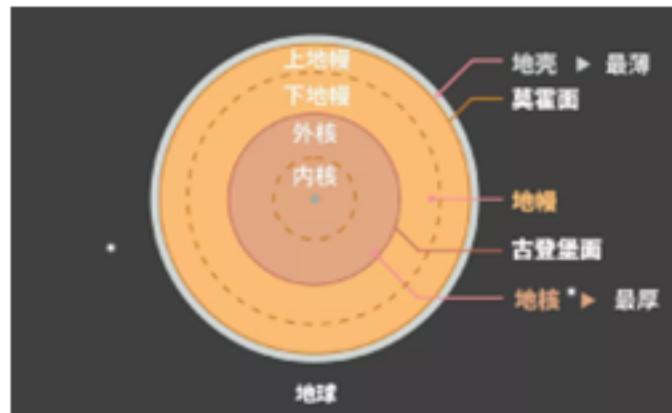
工程：管线探测、隧道超前预测

灾害：滑坡监测

农业：灌溉、根系研究

考古：沉船

军事：雷达、通讯、UXO



3. 应用领域

■ 固体地球物理

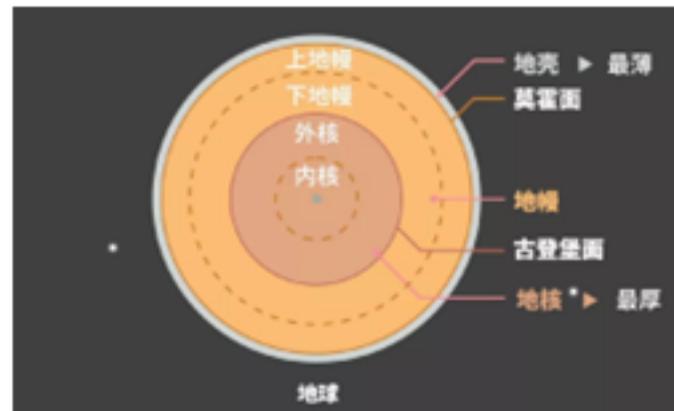
下地壳

地幔

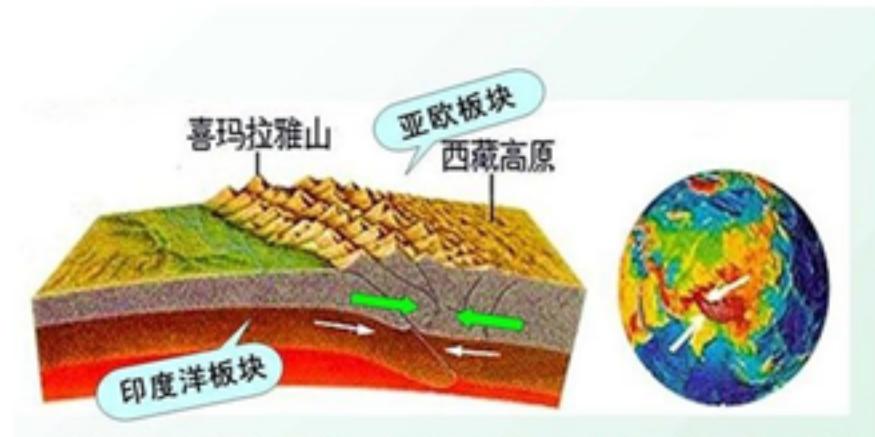
南极冰盖

火山

青藏高原隆生



地球的演化



3. 应用领域

■ 行星地球物理

行星的内部结构

行星地质及宜居性演化

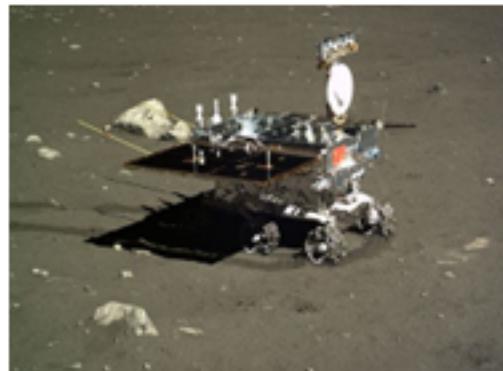
资源 (氦-3, 稀土)

探月工程

探火工程

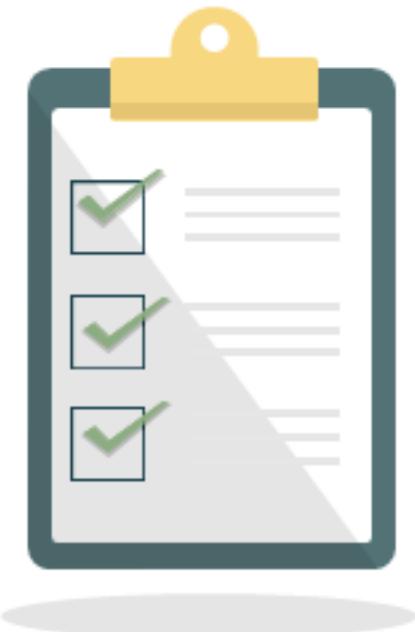


研究对象是星辰大海



小节

- ✓ 地电学和电法勘探的异同
- ✓ 电法勘探的分类



《地磁学与地电学》

第二讲 电磁场基本理论

陈 涛

**地球物理学院
中国石油大学（北京）**

2024/5/7

课前测试

□ 电法分类

□ 电法为什么可以找水



符号说明

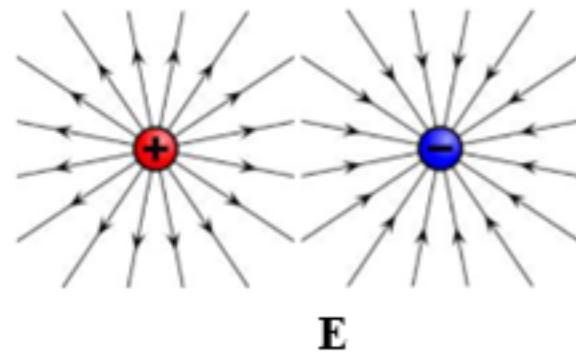
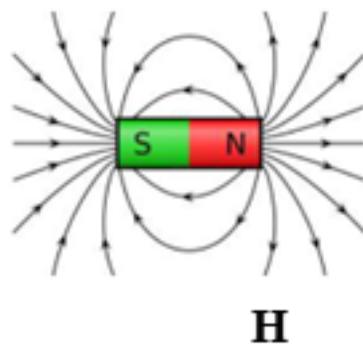
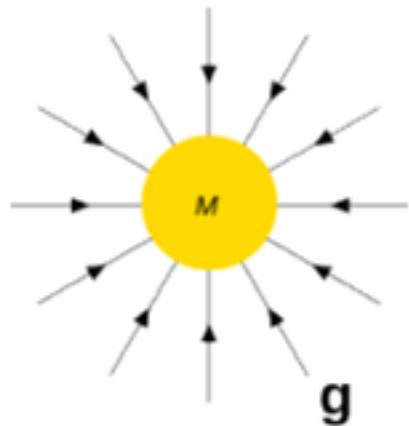
标量采用斜体，矢量和矩阵采用加粗字母

名称	符号
磁化率	κ
磁场强度	H
磁感应强度	T
磁化强度	M
磁矩	m
磁位	U
引力位	V

目 录

第一节 电场

1. 电场



- 正质量
- 北极和南极
- 正电荷和负电荷
- 没有外部激励源
- 没有外部激励源
- 有外部激励源

1. 电场

	重力场	磁场	电场
力	$F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$	$F_m = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_{m_1}q_{m_2}}{r^2}$	$F_e = \frac{kq_1q_2}{r^2}$
场强度	$g = \frac{Gm}{r^2}$	$H = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_m}{r^2}$	$E = \frac{kq}{r^2}$
位/势	$g = \nabla V$	$H = -\nabla U_m$	$E = -\nabla U_e$
	$V = G \frac{m}{r}$	$U_m = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_m}{r}$	$U_e = \frac{kq}{r}$



目 录

第一节 电场

第二节 电磁场

2. 电磁场

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

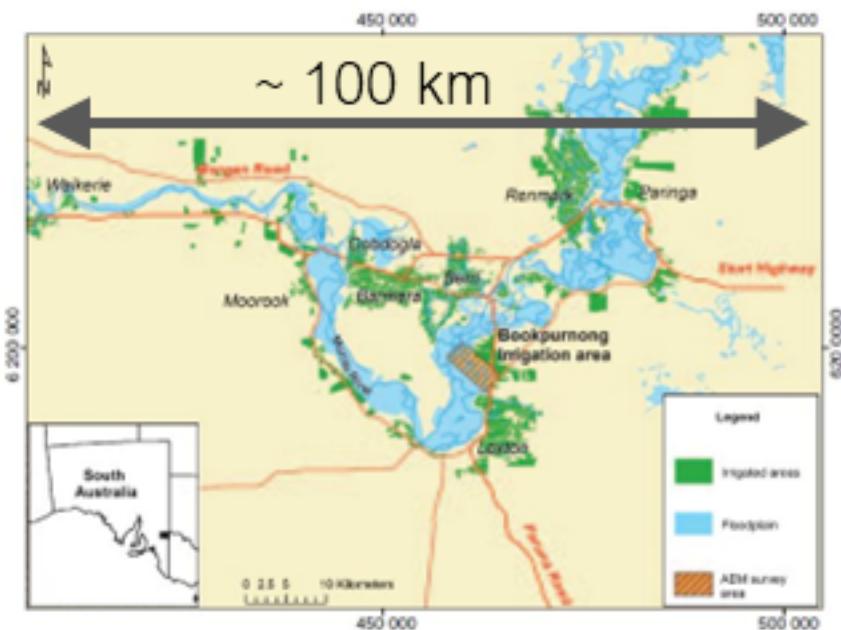
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

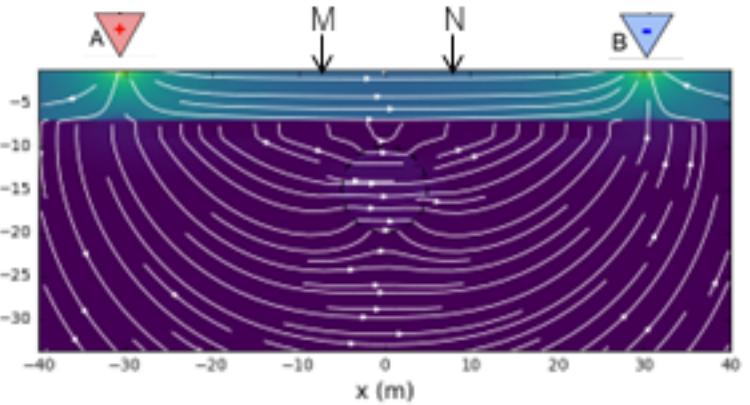
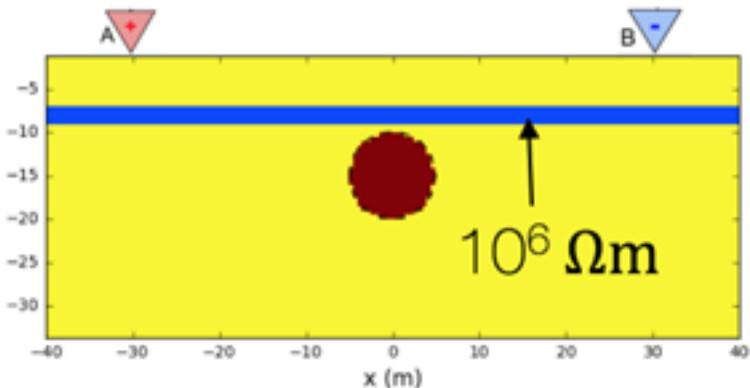
$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

2. 电磁场

Large areas to be covered



Resistive layer “shields” target



Rugged terrain

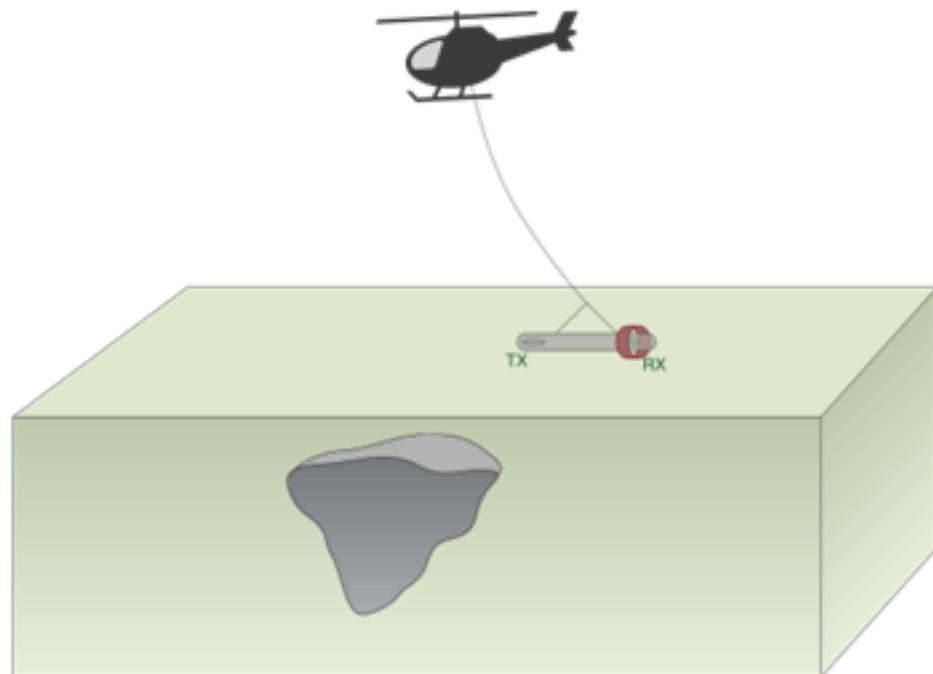


Hard to inject



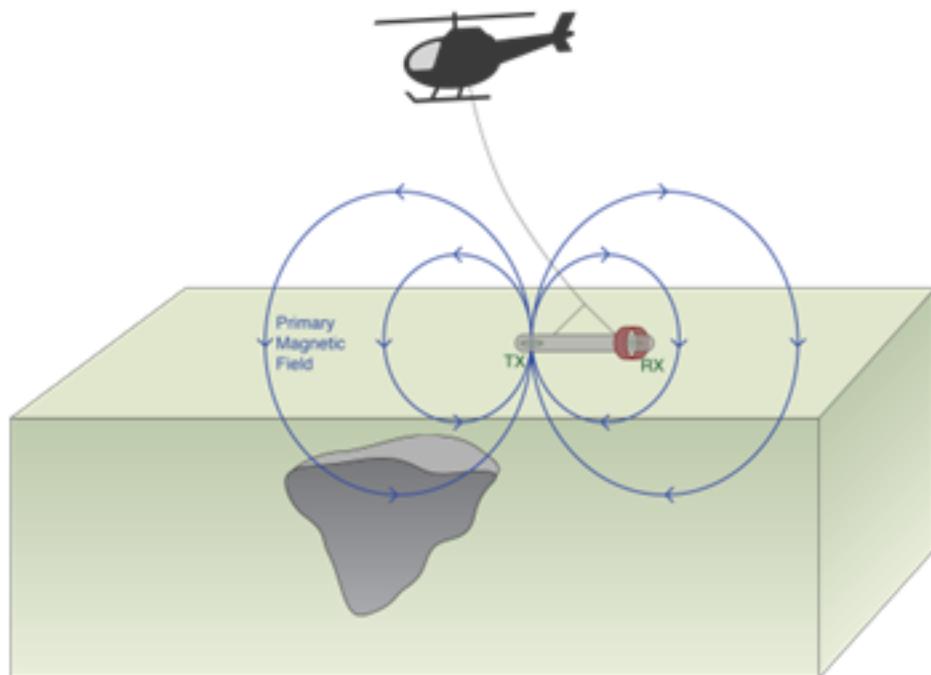
2. 电磁场

- Setup:
 - transmitter and receiver are in a towed bird



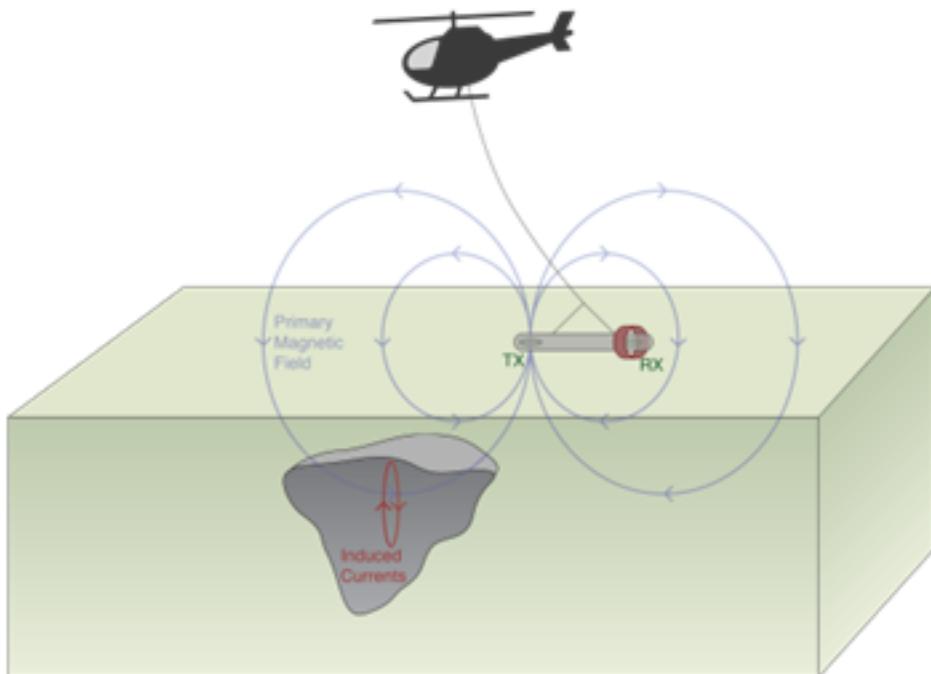
2. 电磁场

- **Setup:**
 - transmitter and receiver are in a towed bird
- **Primary:**
 - Transmitter produces a primary magnetic field



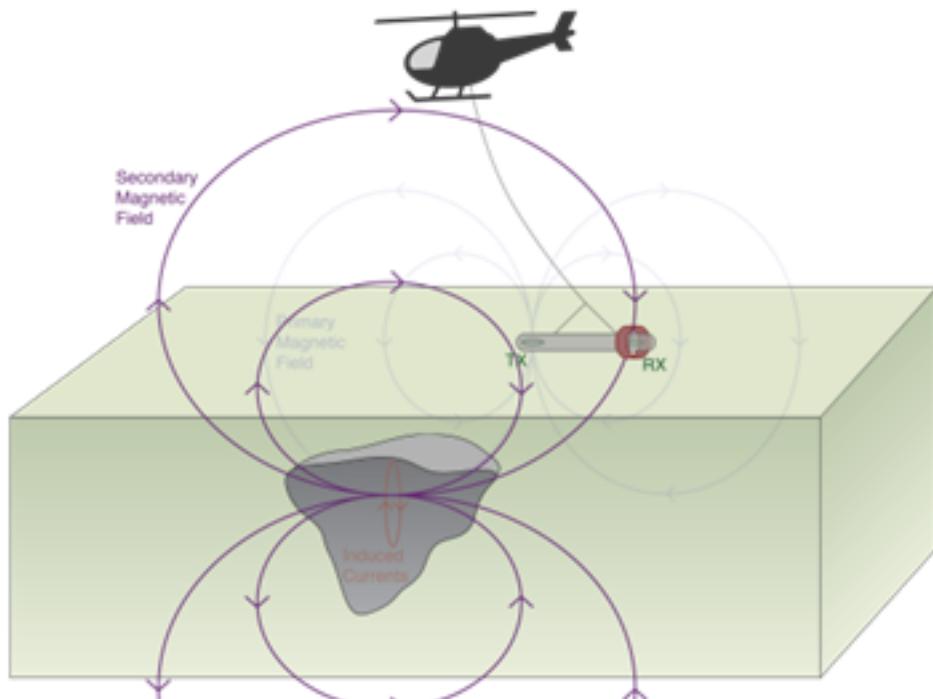
2. 电磁场

- **Setup:**
 - transmitter and receiver are in a towed bird
- **Primary:**
 - Transmitter produces a primary magnetic field
- **Induced Currents:**
 - Time varying magnetic fields generate electric fields everywhere and currents in conductors



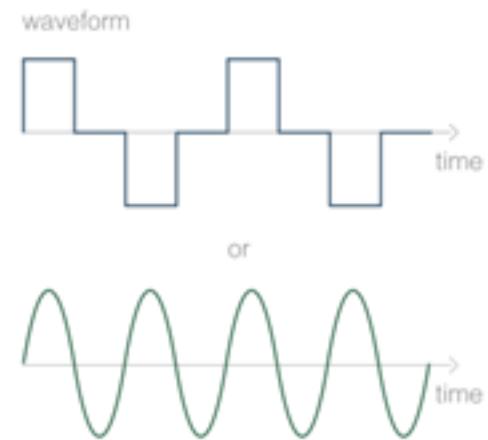
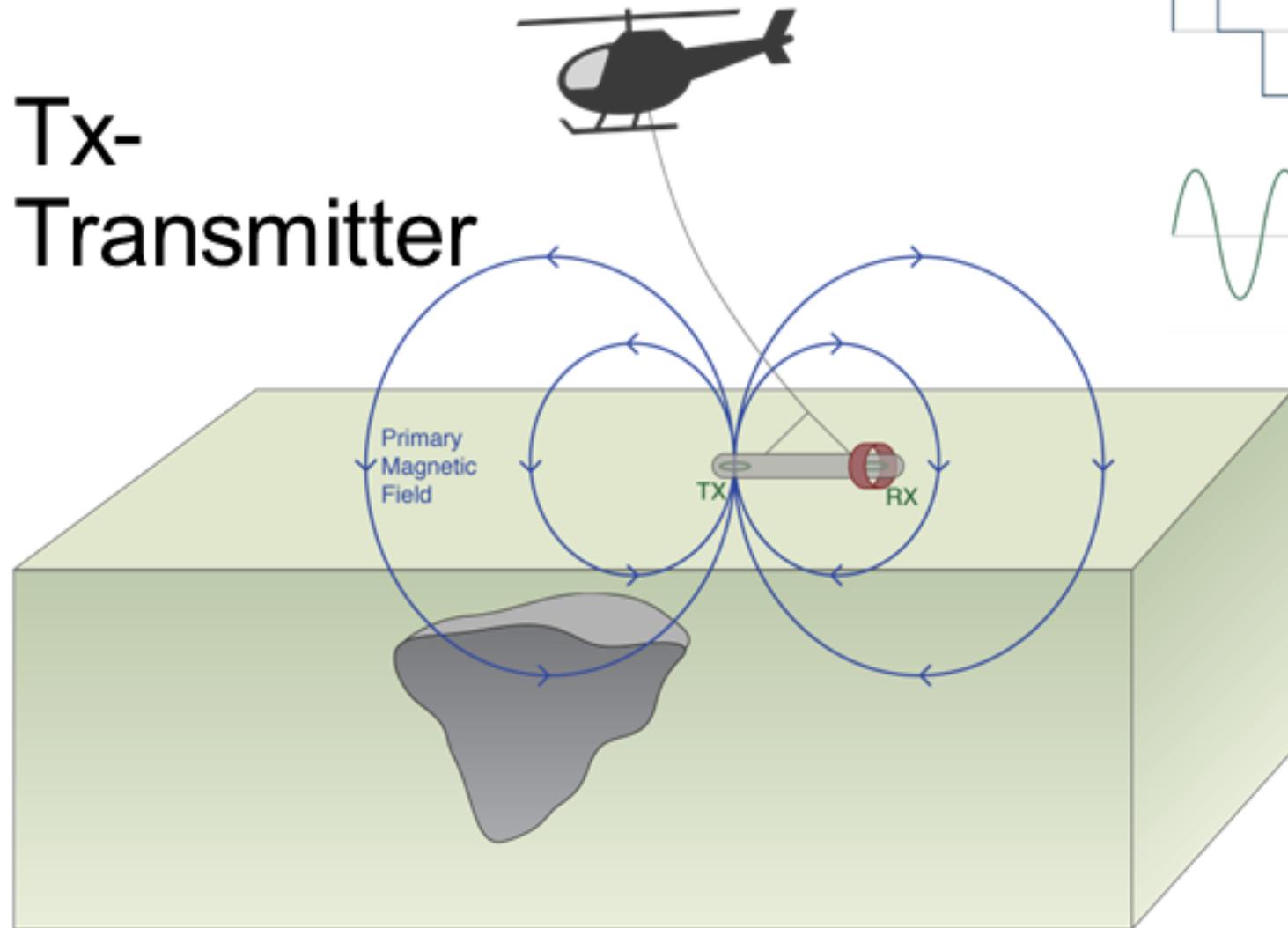
2. 电磁场

- **Setup:**
 - transmitter and receiver are in a towed bird
- **Primary:**
 - Transmitter produces a primary magnetic field
- **Induced Currents:**
 - Time varying magnetic fields generate electric fields everywhere and currents in conductors
- **Secondary Fields:**
 - The induced currents produce a secondary magnetic field.



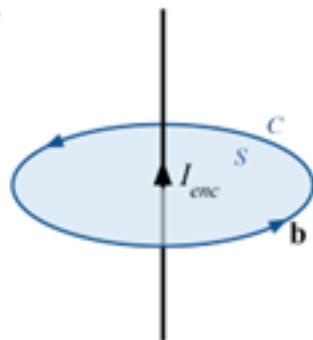
2. 电磁场

Tx-
Transmitter



2. 电磁场

Wire



$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I_{enc}}{2\pi r} \hat{\phi}$$

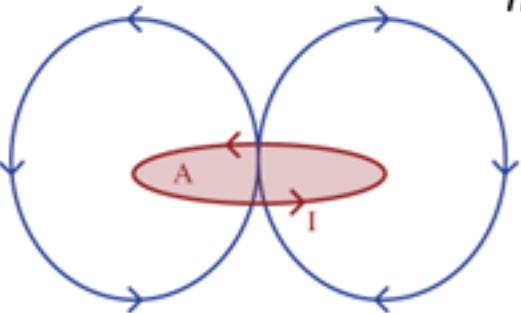
右手准则

Current loop

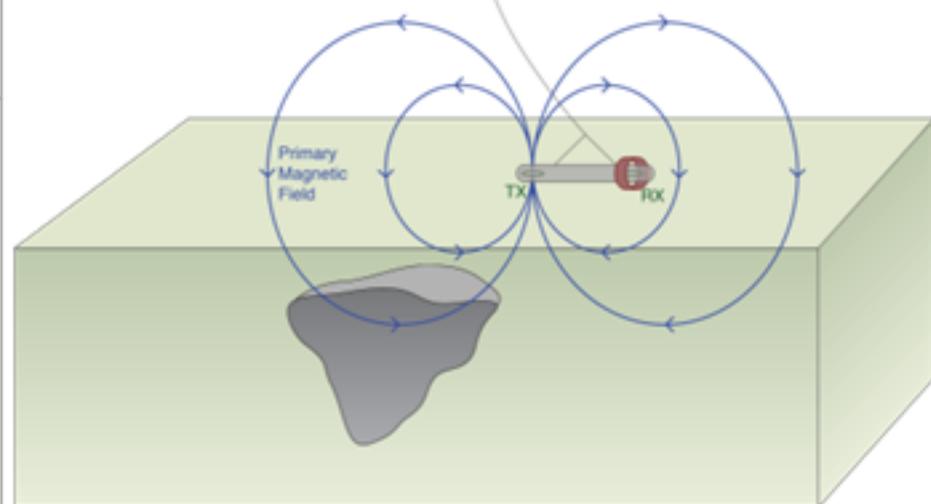
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 m}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \hat{r} + \sin \theta \hat{\theta})$$

$$m = IA$$

Primary
Magnetic
Field



Ampere's Law



$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

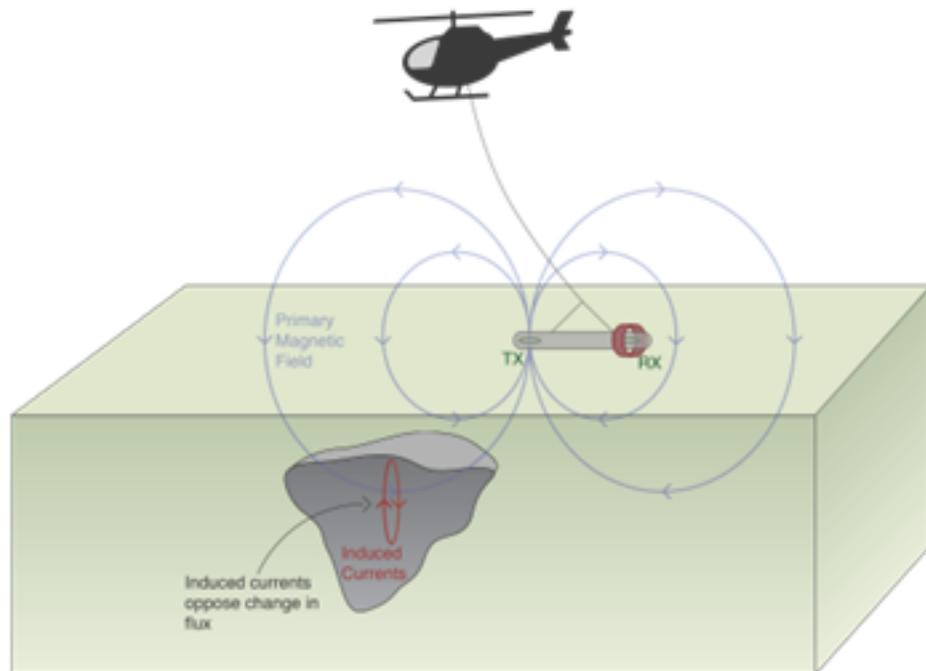
2. 电磁场

$$\nabla \times \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

Ohm's Law

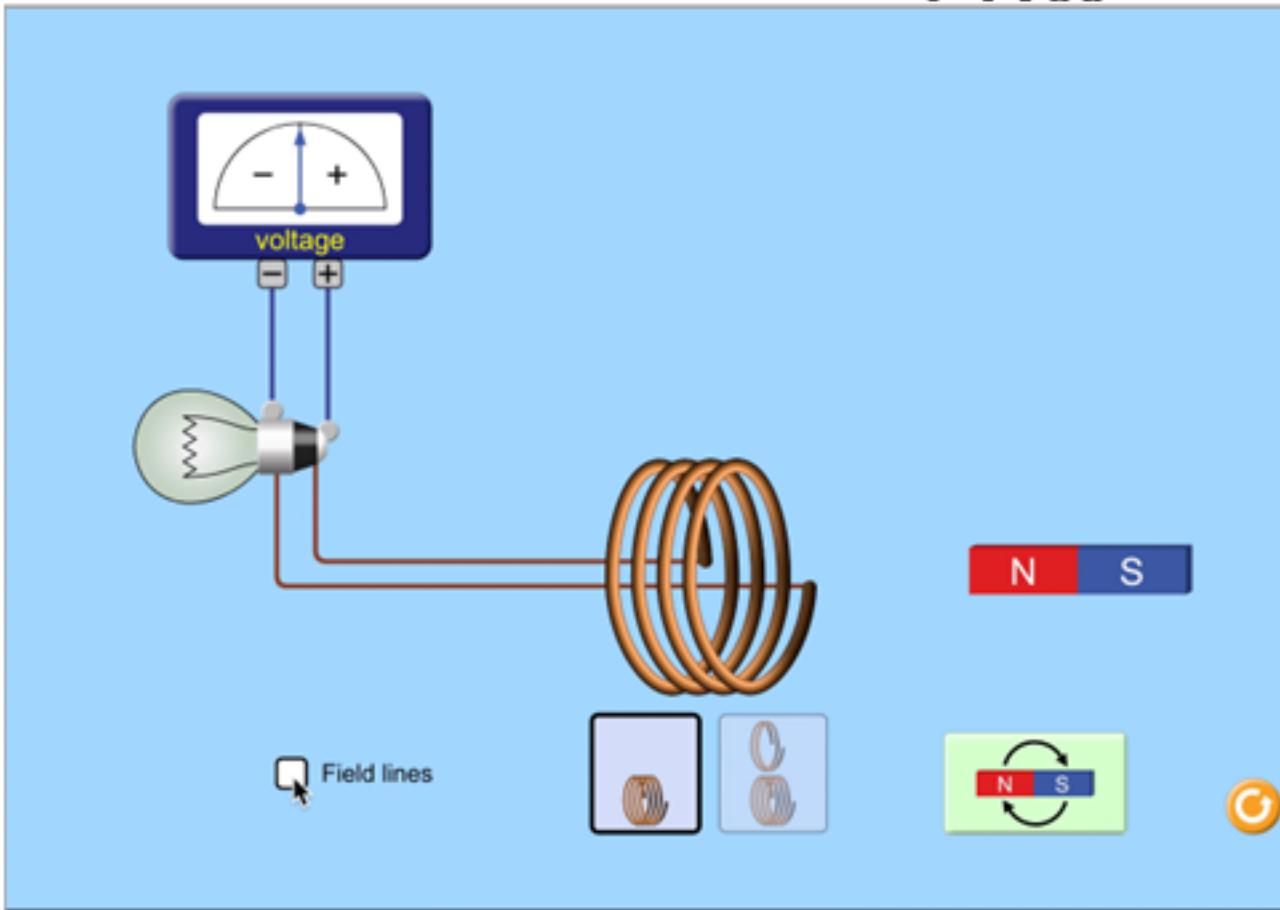
$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{e}$$

Faraday's Law



2. 电磁场

Faraday's
Law



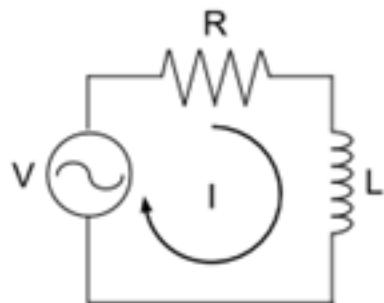
2. 电磁场

Magnetic Flux

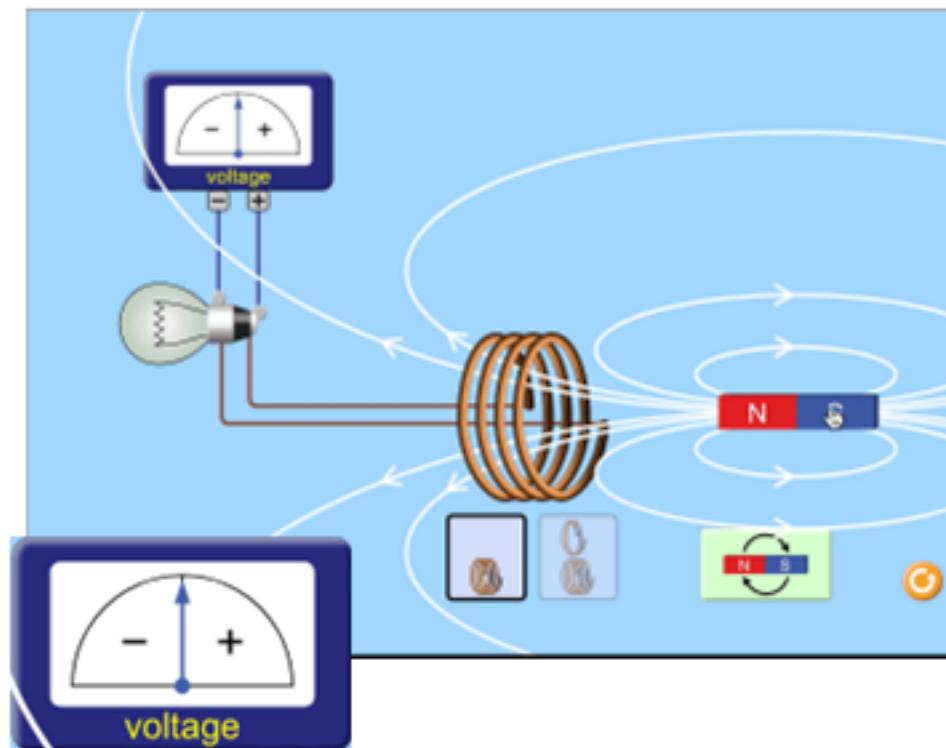
$$\phi_{\mathbf{b}} = \int_A \mathbf{b} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, da$$

Induced EMF

$$V = EMF = -\frac{d\phi_{\mathbf{b}}}{dt} = 0$$



Faraday's Law



$$\nabla \times \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

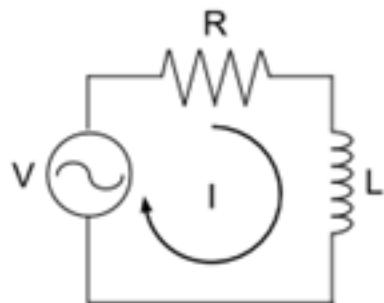
2. 电磁场

Magnetic Flux

$$\phi_b = \int_A \mathbf{b} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, da$$

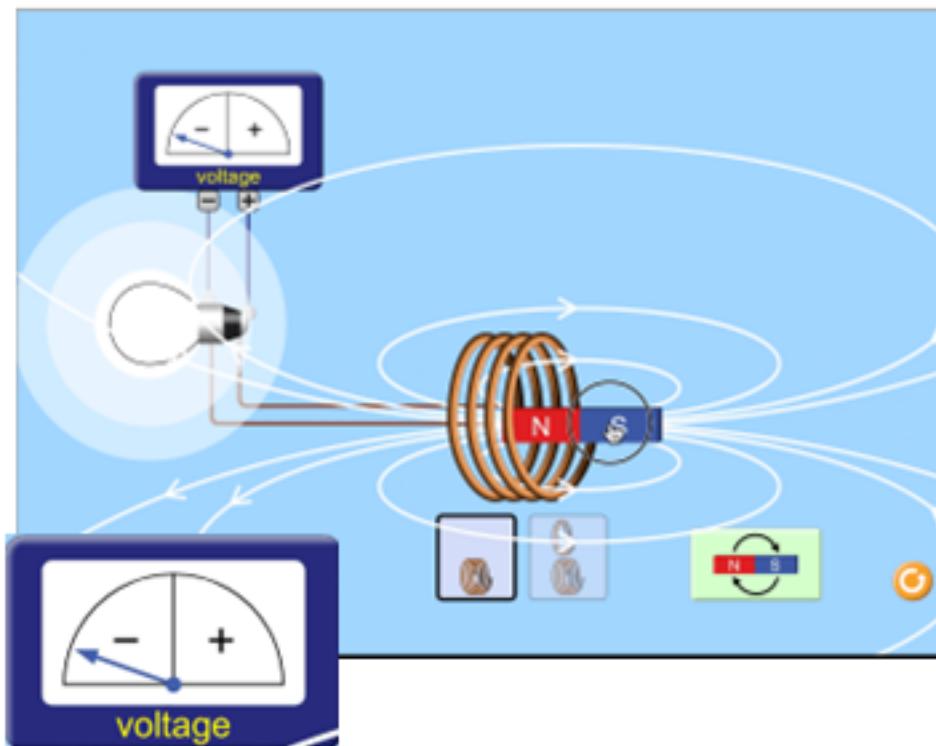
Induced EMF

$$V = EMF = -\frac{d\phi_b}{dt} < 0$$



Faraday's Law

$$\phi_b : \uparrow$$



$$\nabla \times \mathbf{e} = - \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

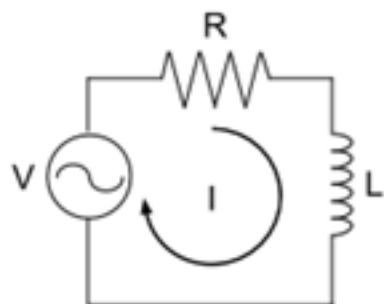
2. 电磁场

Magnetic Flux

$$\phi_b = \int_A \mathbf{b} \cdot \hat{\mathbf{n}} da$$

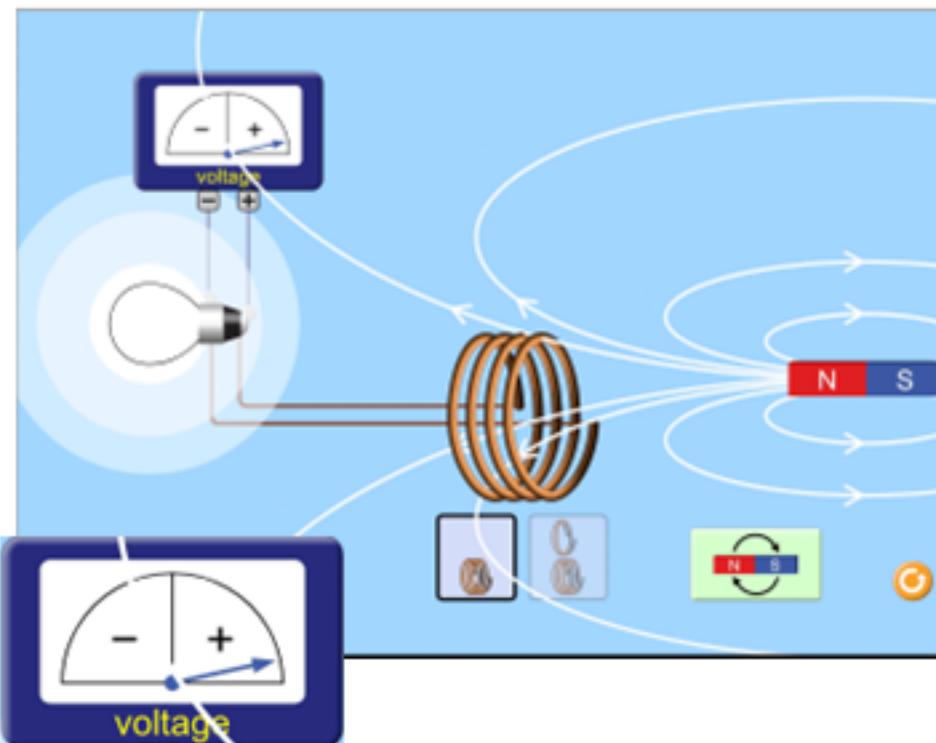
Induced EMF

$$V = EMF = -\frac{d\phi_b}{dt} > 0$$



Faraday's Law

ϕ_b : ↓



$$\nabla \times \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

2. 电磁场

2 Apps:

- Harmonic
- Transient

$$\nabla \times \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

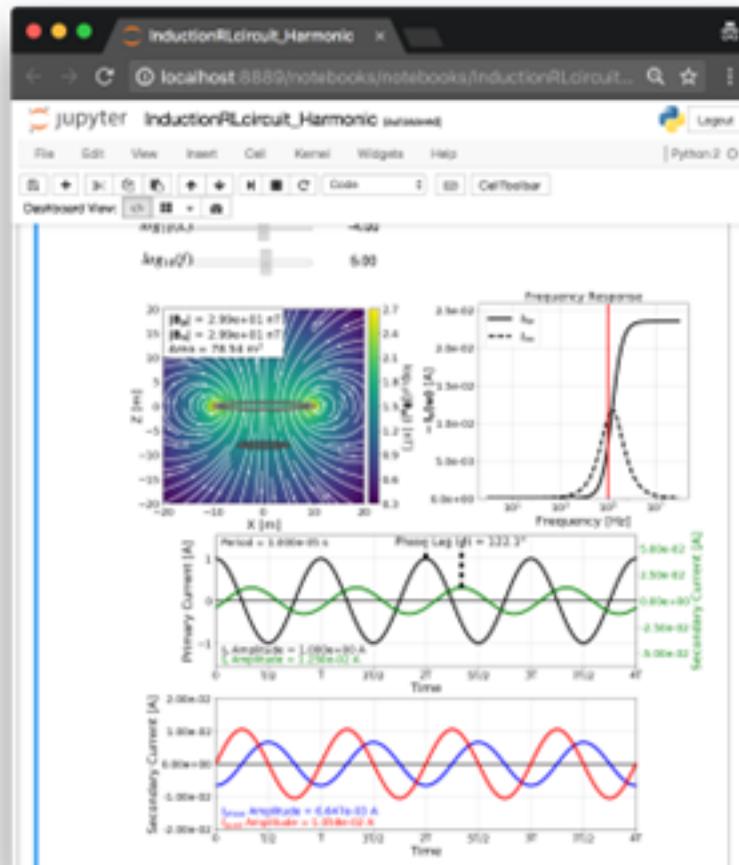
$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{e}$

↓
 B_p

Target
R, L

$I_p(t)$

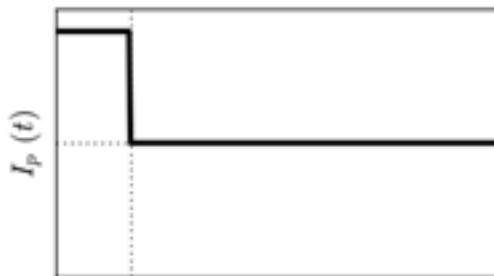
Faraday's Law



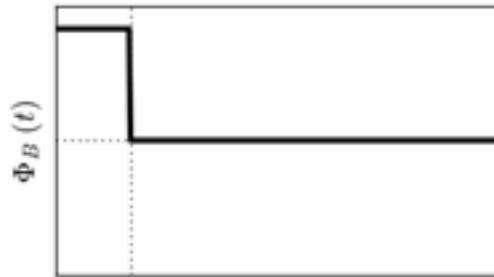
2. 电磁场

Faraday's Law

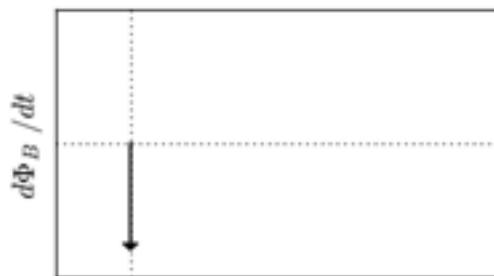
Primary currents



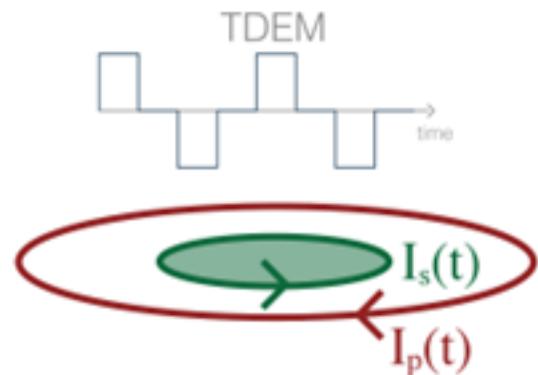
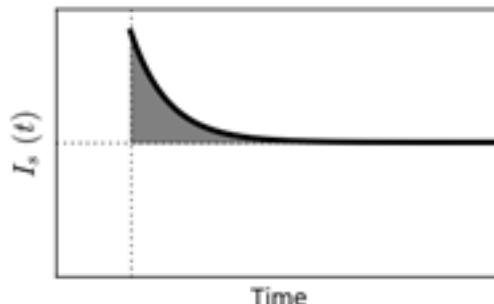
Magnetic flux



Time-variation of magnetic flux



Secondary currents



$$I_s(t) = I_s e^{-t/\tau}$$

$$\tau = L/R$$

Basic Equations: Quasi-static

Time



Frequency



Faraday's
Law

$$\nabla \times \mathbf{e} = - \frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - i\omega \mathbf{B}$$

Ampere's
Law

$$\nabla \times \mathbf{h} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + i\omega \mathbf{D}$$

No Magnetic
Monopoles

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

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

Constitutive
Relationships
(non-dispersive)

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{e}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\mathbf{b} = \mu \mathbf{h}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{d} = \epsilon \mathbf{e}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

* Solve with sources and boundary conditions

目 录

第一节 电场

第二节 电磁场

第三节 梯度、散度和旋度

3. 梯度、散度和旋度

■ ∇ 算子

怎么读？

Nabla



3. 梯度、散度和旋度

■ ∇ 算子

∇ 符号是1837年爱尔兰物理学家和数学家哈密尔顿（W.R. Hamilton，建立哈密尔顿力学和提出四元数的大牛）首次提出的，但是并没有说明 ∇ 符号的读音。

1884年，当物理学家威廉·汤姆森（William Thomson，热力学之父）想研究一下梯度时，苦于不知其读音。当时，汤姆森教授正在美国的约翰·霍普金斯大学（Johns Hopkins University, JHU）开一个系列讲座，于是他就写信问亚历山大·格拉汉姆·贝尔（Alexander Graham Bell，电话之父）。

3. 梯度、散度和旋度

■ ∇ 算子

贝尔回信说，早些年，他的学长詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）曾经告诉贝尔，他为 ∇ 发明了一个十分有趣的发音，叫作“纳布拉（Nabla）”。Nabla原指一种希伯来竖琴，外形酷似倒三角。具体事情经过如下：

1870年，麦克斯韦的儿时好友，物理学家彼得·台特（Peter Guthrie Tait，将四元数发挥到化境的大牛）正在研究哈密尔顿的四元数，其中有很多 ∇ 符号。于是麦克斯韦写信给台特建议说，“亲爱的台特，如果腓尼基的王子卡德摩斯向腓尼基的教授们问这个符号的读法，那么他们肯定会说这个符号读作纳布拉。”1871年，麦克斯韦写信问台特，“你还在弹那个纳布拉琴吗？”麦克斯韦还写了一首歪诗献给台特，诗的题目是《至纳布拉琴圣手》（To the Chief Musician upon Nabla）。

3. 梯度、散度和旋度

■ 梯度

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{k}$$

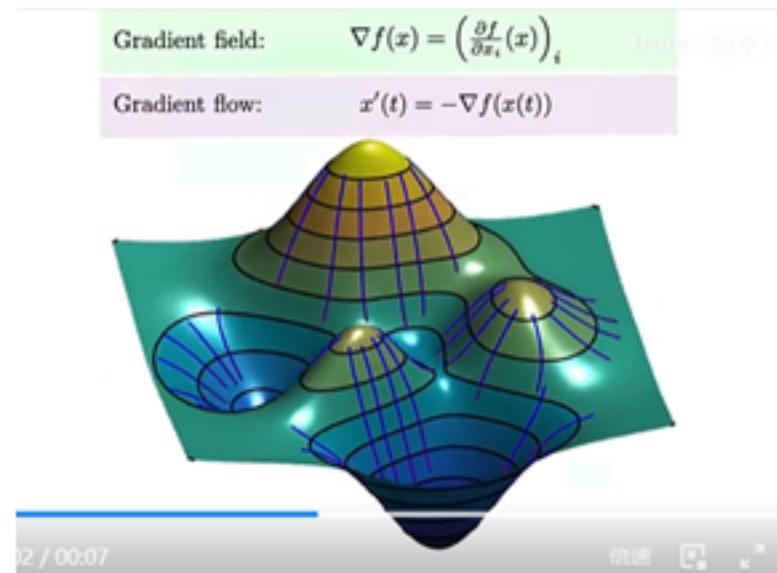
将标量（0阶张量）变成矢量（1阶张量）

3. 梯度、散度和旋度

■ 梯度

梯度物理意义为：在某个场中，某点某物理参数**增加最快的方向**，梯度大小就是**增加率**。

举个例子，我们站在山脚爬山时（此山只有一个山峰），我们迈步第一步的方向有无数个，若想走最短路程到达山顶，此时应沿梯度方向迈出，以此类推，直至到达山顶。

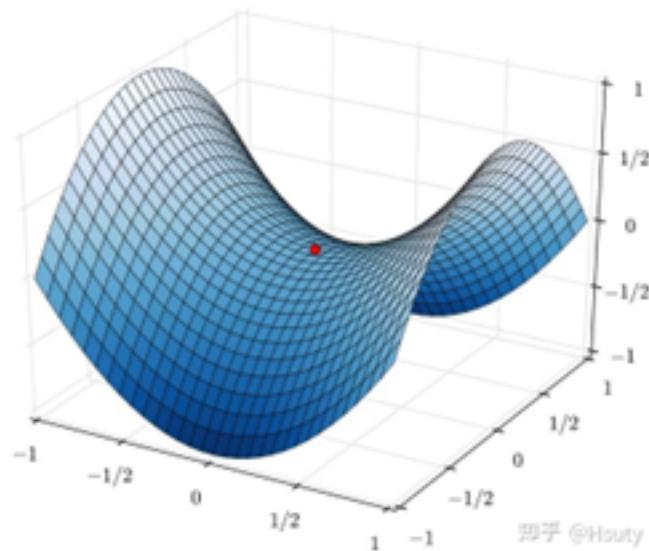


3. 梯度、散度和旋度

■ 梯度

梯度物理意义为：在某个场中，某点某物理参数**增加最快的方向**，梯度大小就是**增加率**。

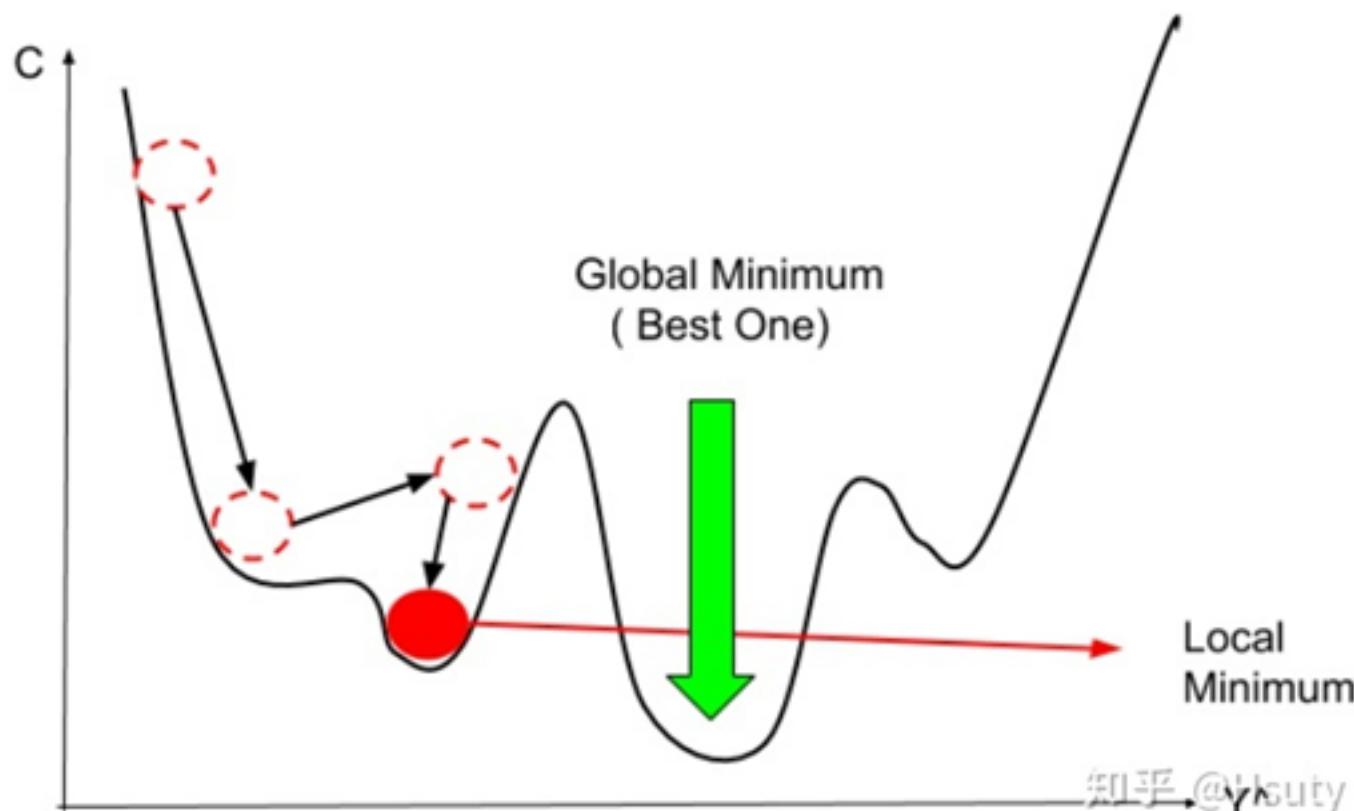
- ✓ 从此爬山过程易得，若某点梯度为 0，那这个点可能是极值点（极大或极小）
- ✓ 或为鞍点(在某一方向是极大值，另一方向又是极小值)，这种情况在最优化问题里面就比较讨厌了



知乎 @HouTy

3. 梯度、散度和旋度

■ 梯度



3. 梯度、散度和旋度

■ 梯度

$$\mathbf{f} = f_1 \mathbf{i} + f_2 \mathbf{j} + f_3 \mathbf{k}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$$

$$\nabla \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

将矢量（1阶张量）变成矩阵（3阶张量）

3. 梯度、散度和旋度

■ 散度

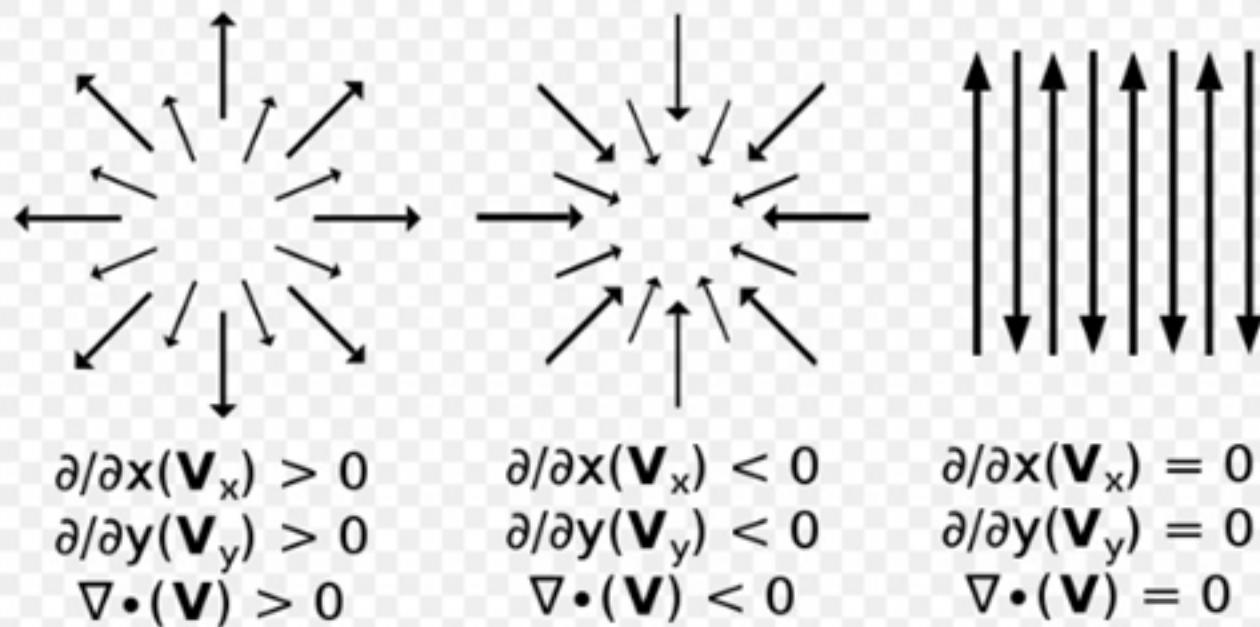
物理意义：定量给出向量场中任一点是否为源点或汇点

$$\operatorname{div} \mathbf{F} = \nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

将矢量（1阶张量）变成标量（0阶张量）

3. 梯度、散度和旋度

■ 散度



知乎 @Hsuty

3. 梯度、散度和旋度

■ 旋度

物理意义：当空间位置改变时，场方向“扭曲”的速率，即矢量场旋转的趋势

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{F}(x, y, z) &= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \\ &= \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right) \mathbf{k}\end{aligned}$$

3. 梯度、散度和旋度

■ 常用等式

$$\nabla^2 f = \nabla \cdot \nabla f = \Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\nabla^2 \mathbf{f} = (\nabla^2 f_x, \nabla^2 f_y, \nabla^2 f_z)$$

$$\nabla^2 \mathbf{f} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{f}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{f})$$

3. 梯度、散度和旋度

■ 常用等式

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{F}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) - \nabla^2 \mathbf{F}$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = 0$$

$$\nabla \times (\nabla \varphi) = \mathbf{0}$$

$$\nabla \times (\varphi \mathbf{F}) = \nabla \varphi \times \mathbf{F} + \varphi \nabla \times \mathbf{F}$$

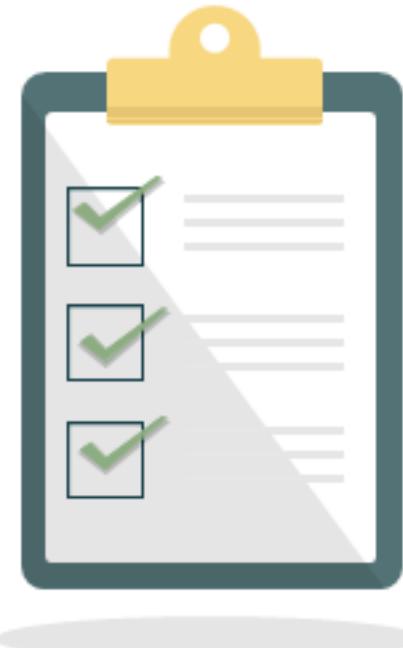
$$\nabla \cdot (\varphi \mathbf{F}) = (\nabla \varphi) \cdot \mathbf{F} + \varphi (\nabla \cdot \mathbf{F})$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{F} \times \mathbf{G}) = (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \mathbf{G} - \mathbf{F} \cdot (\nabla \times \mathbf{G})$$

$$\nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{F}) = ((\nabla \cdot \mathbf{F}) + \mathbf{F} \cdot \nabla) \mathbf{v} - ((\nabla \cdot \mathbf{v}) + \mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{F}$$

小节

- ✓ 电场
- ✓ 麦克斯韦方程组
- ✓ 梯度、散度、旋度



《地磁学与地电学》

第三讲 岩矿石的电磁性质

陈 涛

**地球物理学院
中国石油大学（北京）**

2024/5/7

课前测试

- 电法勘探的分类

- 为什么电法勘探种类繁多

- 阐述你对岩矿石电磁特性的认识



课前知识

回忆绪言中我们讲到，电法勘探利用的岩石电磁学性质主要有：导电性、导磁性、介电性、极化性（电化学活动性）

一般情况下，研究目标（或介质）与其周围介质的电磁性差异愈大，在其周围空间产生的电（磁）场的变化愈明显，即异常明显。

目 录

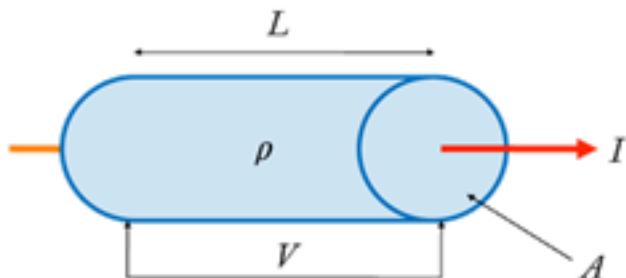
第一节 电阻率/电导率

1. 电阻率/电导率

在电法勘探中表征物质导电性的参数是电阻率 ρ 或电导率 σ

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

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$



当： $L=1\text{ m}$, $S=1\text{ m}^2$ 时： $R = \rho$

某种物质的电阻率被定义为电流垂直流过 1 m^3 的立方体均匀物质时，所表现的电阻（ Ω ）值。电阻率的单位为欧姆·米，记作 $\Omega\cdot\text{m}$ 。电导率为电阻率的倒数，其单位为西门子/米，记作 S/m ，物质的导电性越好，其电阻率值便越小，电导率便越大，反之亦然。

1. 电阻率/电导率

■ 导电机理

固体矿物导电机理	金属导体	各种天然金属均属于金属导体 自然金 ($2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) 自然铜 ($1.2-30 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)
	半导体	大多数金属矿物均属于半导体 ($10^{-6}-10^6 \Omega \cdot \text{m}$)
	固体电介质 (绝缘体)	绝大多数造岩矿物 (大于 $10^6 \Omega \cdot \text{m}$) 如：辉石、长石、石英、云母、方解石等

按载流子的性质，导体又可以分为电子导电的金属导体和离子导电的固体电解质两类。

1. 电阻率/电导率

■ 矿物的电阻率

岩石和矿石都是矿物组成，按导电机制不同，固体矿物可分为三种类型，即**金属导体、半导体和固体电解质**。

✓**金属导体**：各种天然金属：自然金、自然铜；石墨
具有很小的电阻率（小于 $10^{-6} \Omega \cdot m$ ）

✓**半导体**：大多数金属矿物，电阻率变化范围较大（ $10^{-6} \sim 10^6 \Omega \cdot m$ ）

✓**固体电解质**：绝大多数造岩矿物，如辉石、长石、石英
云母、方解石等，均属于固体电解质，其
电阻率都很高（大于 $10^6 \Omega \cdot m$ ）

1. 电阻率/电导率

■ 矿物的电阻率

常见半导体矿物的电阻率值

矿物名称	电阻率 ($\Omega \cdot m$)	矿物名称	电阻率 ($\Omega \cdot m$)
斑铜矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	赤铁矿	$10^{-3} \sim 10^6$
磁铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	锡石	$10^{-3} \sim 10^6$
磁黄铁矿	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	辉锑矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	软锰矿	$10^0 \sim 10^3$
黄铁矿	$10^{-3} \sim 10^0$	菱铁矿	$10^0 \sim 10^3$
方铅矿	$10^{-3} \sim 10^0$	铬铁矿	$10^0 \sim 10^6$
辉铜矿	$10^{-3} \sim 10^0$	闪锌矿	$10^3 \sim 10^6$
辉钼矿	$10^{-3} \sim 10^0$	钛铁矿	$10^3 \sim 10^6$

1. 电阻率/电导率

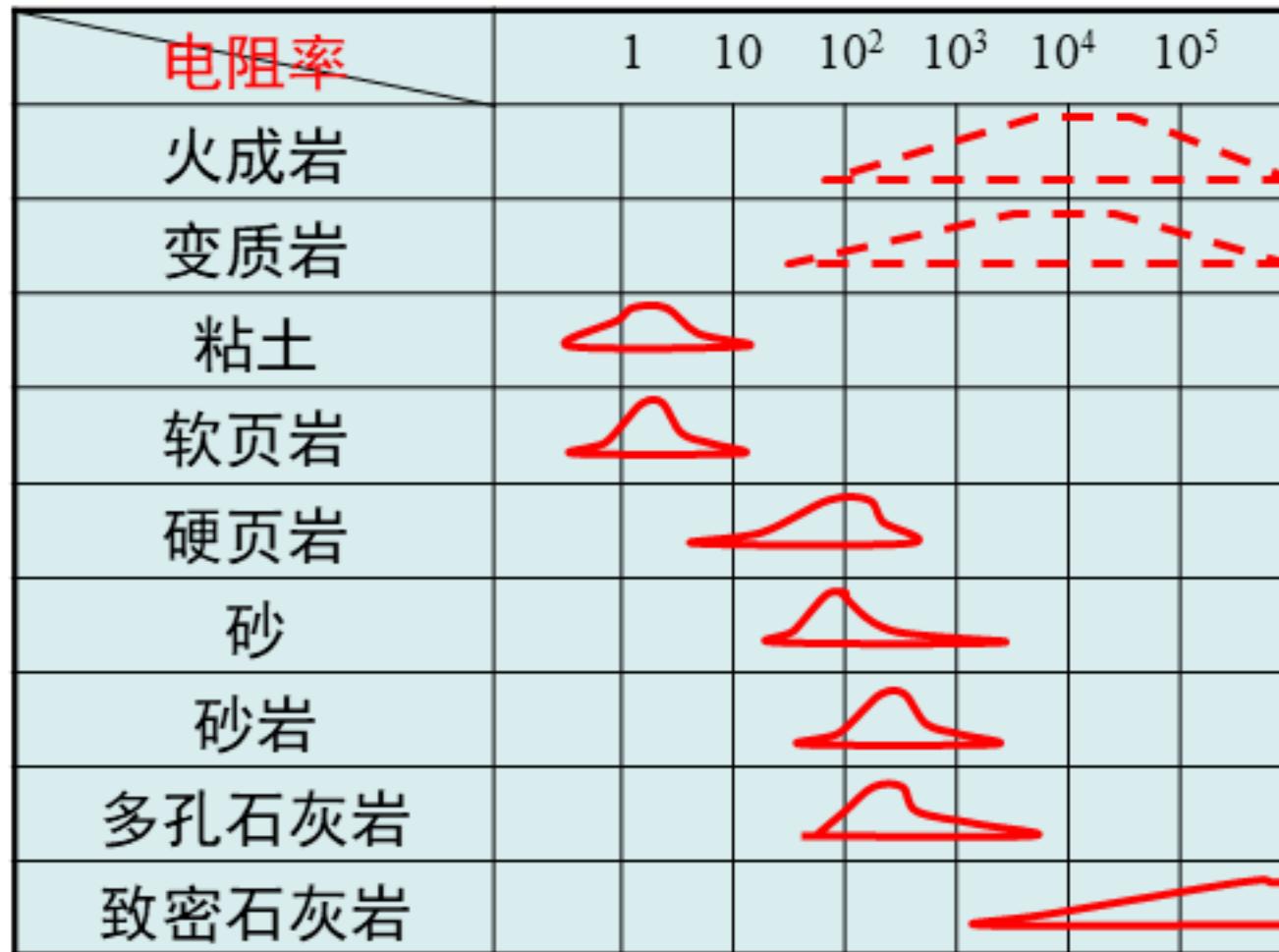
■ 矿物的电阻率

由上述可知，矿物电阻率值是在一定范围内变化的，同种矿物可有不同的电阻率值，不同矿物也可有相同的电阻率值。因此，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。

1. 电阻率/电导率

■ 岩石的电阻率

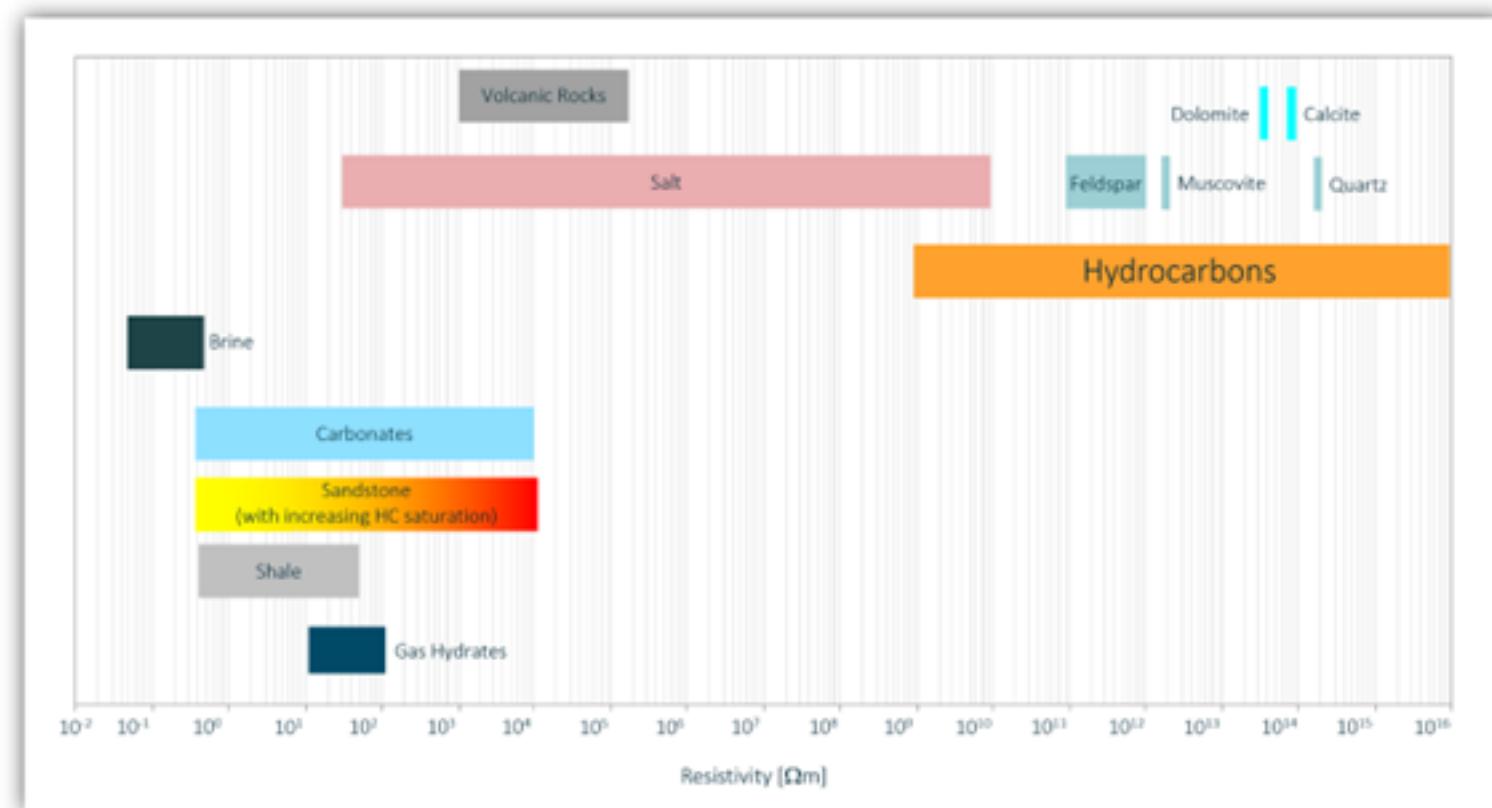
常见岩石电阻率



1. 电阻率/电导率

■ 岩石的电阻率

油气勘查中的电导率

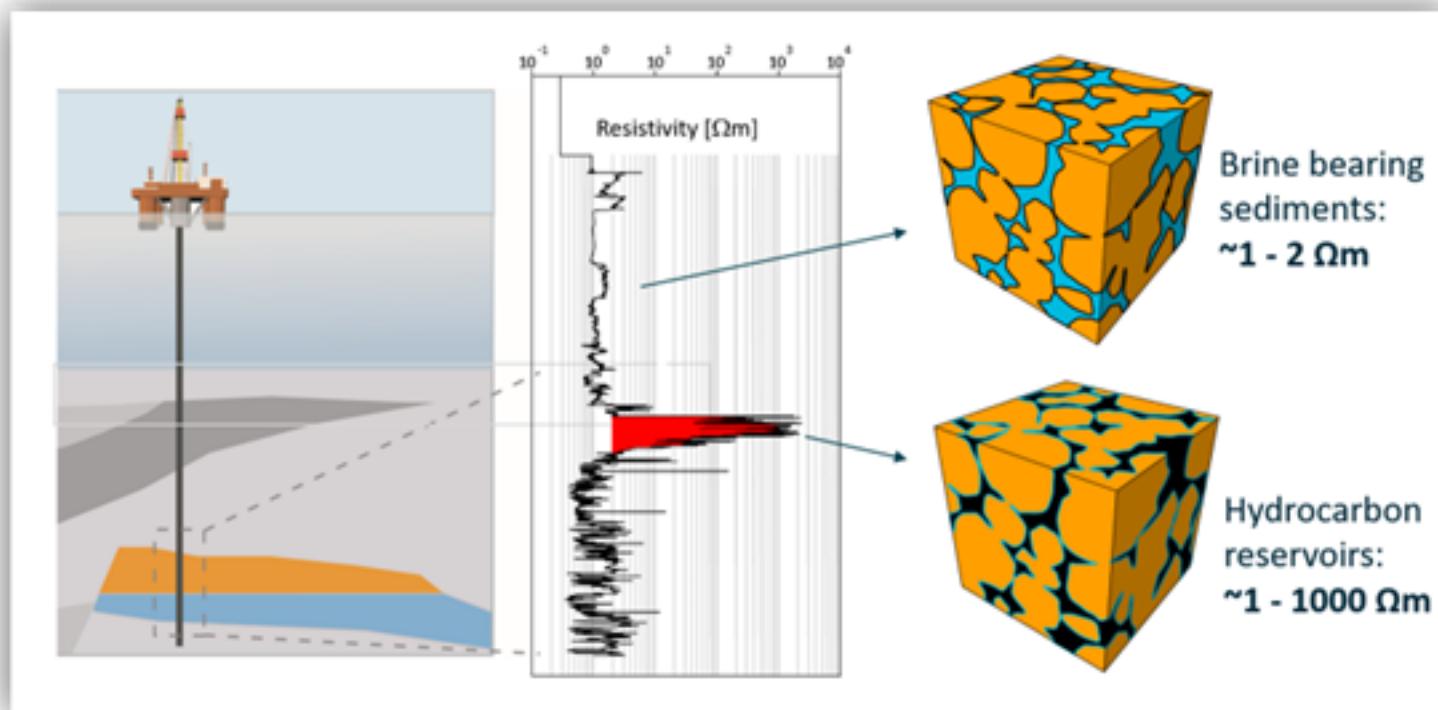


Commercial oil & gas discoveries are predominantly highly resistive when contrasted to background.

1. 电阻率/电导率

■ 岩石的电阻率

油气勘查中的电导率



Hydrocarbon filled sediments exhibit significantly higher resistivities than brine filled sediments and pose a resistivity anomaly that can be mapped using electromagnetic methods. Integrated with other types of geophysical data, such as well and seismic data, marine EM methods are powerful exploration tools.

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素



1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素

成分和结构



为了研究不同结构岩、矿石的电阻率与其成分和含量的关系，假设胶结物的电阻率为 ρ_1 ，矿物颗粒的电阻率为 ρ_2 ，则岩（矿）石电阻率 ρ 与 ρ_1 、 ρ_2 及矿物颗粒的百分体积含量 V 有关，并且不同形状的矿物颗粒，其关系不同

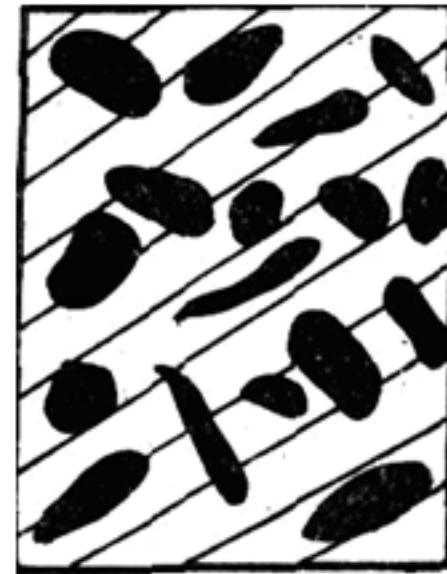
1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

根据等效电阻率的近似理论，不同结构岩、矿石的电阻率分别有如下关系式：

- ✓ 当岩、矿石的矿物颗粒为球形时，
其电阻率表达式为

$$\rho = \rho_1 \frac{(\rho_1 + 2\rho_2) - (\rho_1 - \rho_2)V}{(\rho_1 + 2\rho_2) + 2(\rho_1 - \rho_2)V}$$



1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

✓ 针状颗粒：若岩、矿石的矿物颗粒为针状（近似于拉长的旋转椭球体 $a=b<<c$ ）时，岩、矿石的电阻率具有方向性。沿着矿物颗粒长轴和垂直矿物颗粒长轴方向，岩、矿石电阻率的表达式分别为

$$\rho_t = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + (1-V) \rho_2}$$

$$\rho_n = \rho_1 \frac{\rho_1 + \rho_2 - (\rho_1 - \rho_2)V}{\rho_1 + \rho_2 + (\rho_1 - \rho_2)V}$$

由上两式可知，总有关系 $\rho_n \geq \rho_t$



1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

✓ 圆片状颗粒：若岩、矿石的矿物颗粒为片状（近似于压扁的旋转椭球体 $a=b$, $c \approx 0$ ）时，沿着片状矿物面和垂直于片状矿物面的方向上，岩、矿石的电阻率可分别表示为

$$\rho_t = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + \rho_2 (1 - V)}$$

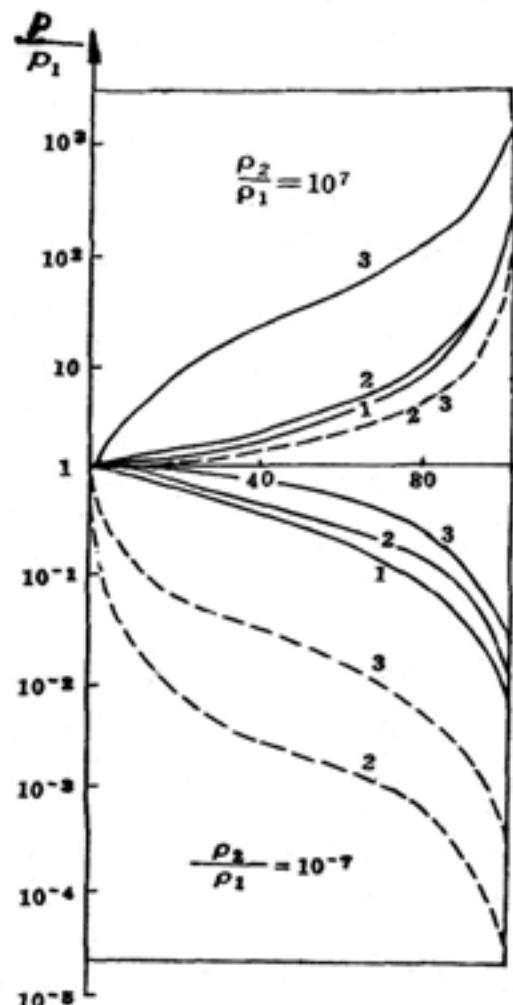
$$\rho_n = \rho_1 (1 - V) + \rho_2 V$$

由上两式可知，总有关系 $\rho_n \geq \rho_t$



1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

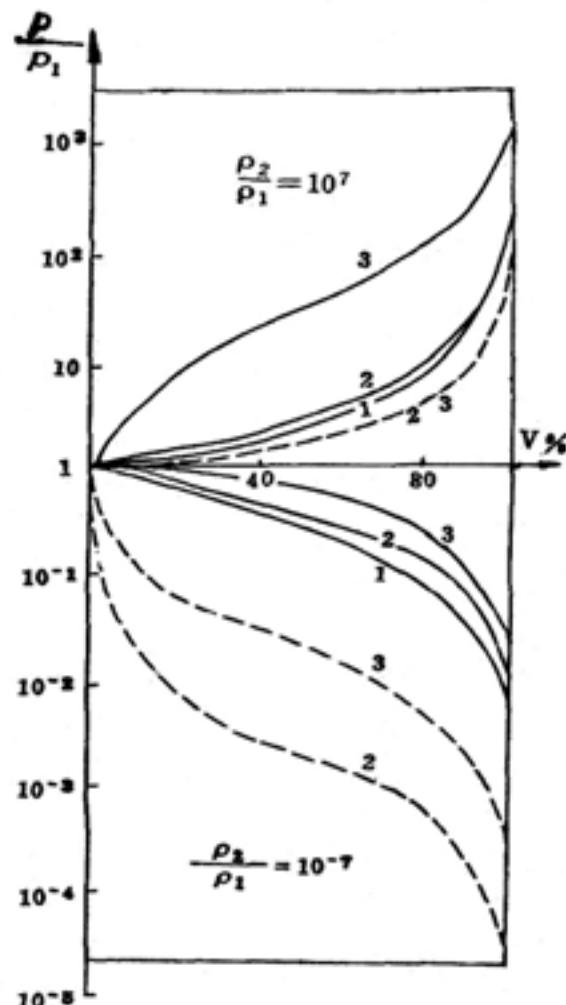


岩矿石电阻率与矿物颗粒体积含量的关系曲线
1-球状颗粒 ($a=b=c$) ; 2-针状颗粒
($a=b=1/40c$) ; 3-片状颗粒 ($a=b=40c$) 。虚线为纵向电阻率 ρ_t ; 实线为横向电阻率 ρ_n

在球形矿物颗粒的情况下，不论矿物本身为高阻还是低阻，当体积含量不太大 ($V<60\%$) 时，整体岩、矿石的电阻率 ρ 受 ρ_2 之影响甚小，其值接近胶结物电阻率 ρ_1 ；仅当颗粒体积含量相当大 ($V\geq 80\%$) 时， ρ_2 才对 ρ 有明显作用。这是由于颗粒体积含量不大时，各颗粒是相互分离的，而胶结物却是彼此连通的，故矿物颗粒对整体岩、矿石电阻率的影响不大，此时胶结物起主要导电作用。

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

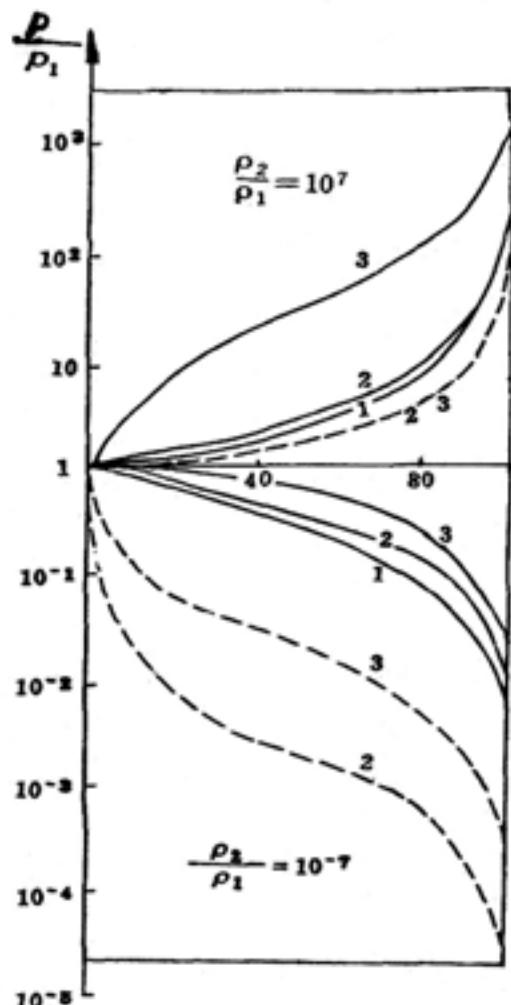


岩矿石电阻率与矿物颗粒体积含量的关系曲线
1-球状颗粒 ($a=b=c$) ; 2-针状颗粒
($a=b=1/40c$) ; 3-片状颗粒 ($a=b=40c$) 。虚
线为纵向电阻率 ρ_l ; 实线为横向电阻率 ρ_n

当颗粒体积含量相当大，以致彼此连通时，矿物颗粒的电阻率 ρ_2 便对岩、矿石的电阻率有明显影响。可见，岩、矿石中某种组成部分对整体岩、矿石电阻率影响的大小，主要决定于它们的连通情况：**连通者起的作用大，孤立者起的作用小**。例如，浸染状金属矿石，胶结物多为彼此连通的造岩矿物，故整个矿石表现为高阻电性；又如含水砂岩，其胶结物为彼此相连、导电性好的孔隙水，故含水砂岩的电阻率通常低于一般岩石的电阻率。

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构



岩矿石电阻率与矿物颗粒体积含量的关系曲线
1-球状颗粒 ($a=b=c$) ; 2-针状颗粒
($a=b=1/40c$) ; 3-片状颗粒 ($a=b=40c$) 。虚线为纵向电阻率 ρ_t ; 实线为横向电阻率 ρ_n

对于片状和针状结构的岩矿石，不论 $\rho_1 > \rho_2$ ，还是 $\rho_1 < \rho_2$ ，总是 $\rho_n > \rho_t$ 。这表明，片状或针状结构的岩、矿石电阻率具有明显的方向性，即各向异性。对比图中三种不同结构岩、矿石的曲线可以看出：含良导片状或针状矿物颗粒的岩、矿石之横向电阻率 ρ_n 与含同样体积的球形颗粒的岩矿石电阻率相差不大，而其纵向电阻率 ρ_t 却明显低于含球形颗粒岩、矿石的电阻率值；含高阻片状（或针状）颗粒岩、矿石纵向电阻率 ρ_t 与含同样体积的球形颗粒的岩、矿石电阻率 ρ 和针状颗粒的岩、矿石横向电阻率 ρ_n 均相差不多，而其 ρ_n 却明显大于球形或针状结构的岩、矿石电阻率。

1. 电阻率/电导率

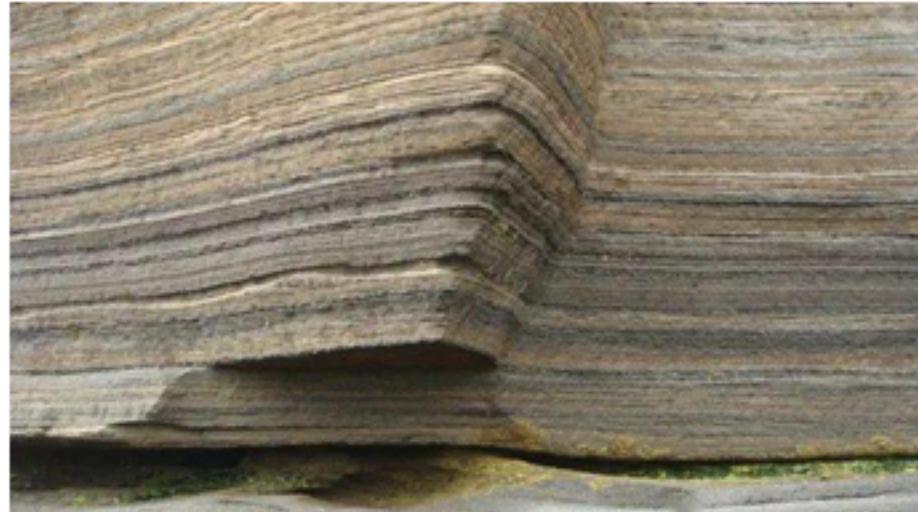
■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

自然界含片状或针状良导矿物的网脉状或细脉状金属矿石，沿网脉或细脉方向的电阻率值明显低于同等金属矿物含量的浸染状矿石的电阻率值；而含片状、树枝状高阻矿物（如石英脉）的岩石，垂直于岩脉方向上的电阻率值往往很高。因此，一般情况下，岩、矿石的结构构造比矿物颗粒含量对岩、矿石电阻率的影响更大些。

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

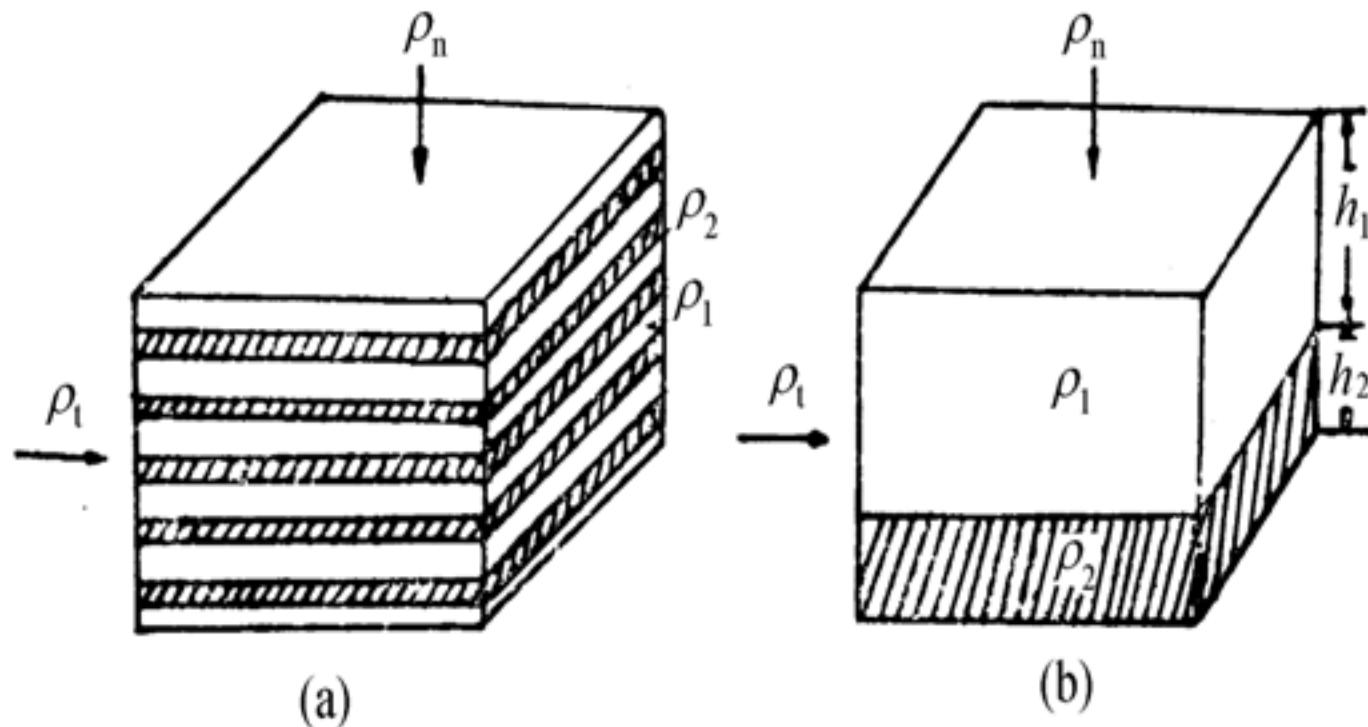
在自然界中，大多数沉积岩和一部分变质岩，由于沉积和构造挤压作用，往往使两种或多种不同电性的薄层交替成层，形成层状构造。在一般情况下，层状岩石的电阻率也具有方向性。



1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素

成分和结构



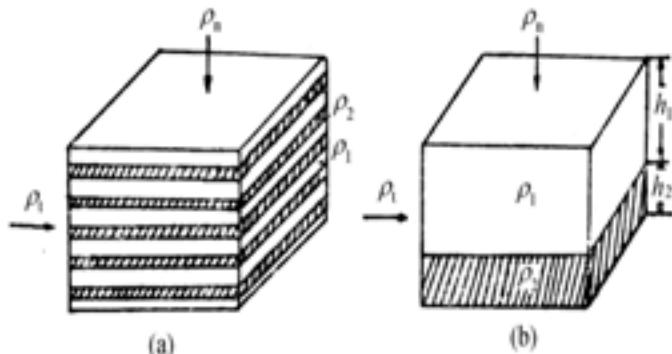
层状结构岩石模型

(a) 实际岩石； (b) 等效模型

1. 电阻率/电导率

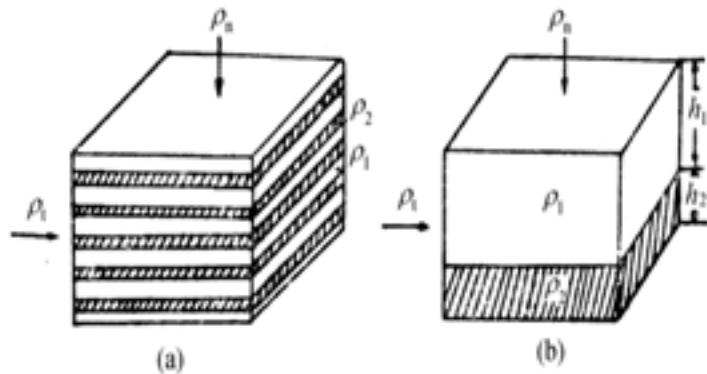
■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

若两种电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 的薄层岩石交替成层，它们的总厚度分别为 h_1 和 h_2 ，则可按电阻并联和串联的关系，得到沿层理方向和垂直层理方向的电阻率



$$\rho_t = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}}$$
$$\rho_n = \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{h_1 + h_2}$$

电阻串联 ρ_n 方向: $R_n = R_1 + R_2$



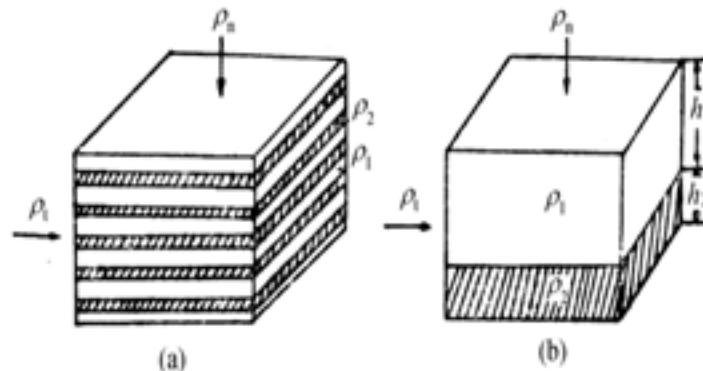
$$\rho_n \frac{h_1 + h_2}{S_1} = \rho_1 \frac{h_1}{S_1} + \rho_2 \frac{h_2}{S_2}$$

$$\rho_n (h_1 + h_2) = \rho_1 h_1 + \rho_2 h_2$$

$$\rho_n = \frac{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}{h_1 + h_2}$$

电阻并联 ρ_t 方向

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



$$R_1 = \rho_1 \frac{l}{l \times h_1} = \frac{\rho_1}{h_1}$$

$$R_2 = \rho_2 \frac{l}{l \times h_2} = \frac{\rho_2}{h_2}$$

$$\rho_t = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}}$$

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

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 λ 和平均电阻率 ρ_m 分别为

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \quad \rho_m = \sqrt{\rho_n \cdot \rho_t}$$

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 成分和结构

岩石名称	λ	ρ_n/ρ_t	岩石名称	λ	ρ_n/ρ_t
层状粘土	1.02~1.05	1.04~1.00	泥质页岩	1.41~2.25	2.2~5.0
层状砂岩	1.1~1.6	1.20~2.56	无烟煤	2.0~2.55	4.0~6.5
泥质板岩	1.1~1.59	1.20~2.5	石墨碳质页岩	2.0~2.8	4.0~7.84

几种常见岩石的非各向同性系数 λ 和 ρ_n/ρ_t 值

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 水份、孔隙度

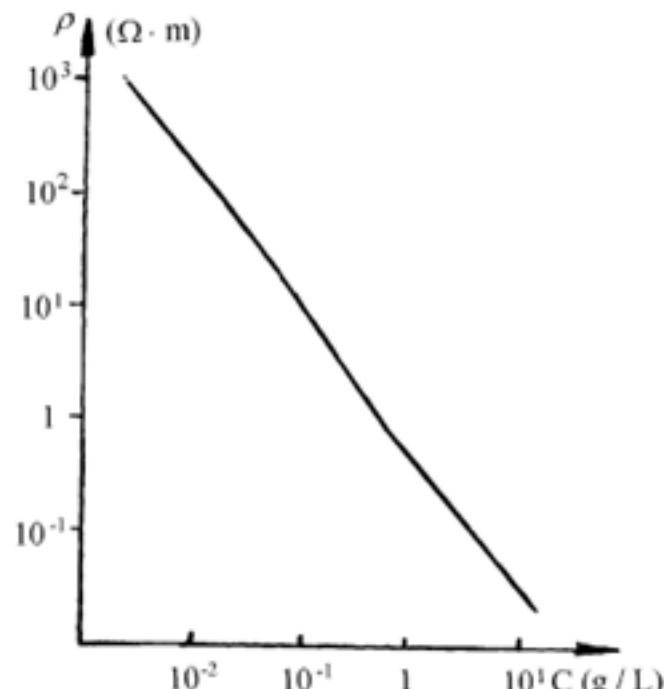
名称	电阻率 ($\Omega \cdot m$)	名称	电阻率 ($\Omega \cdot m$)
雨水	>1000	地下水	<100
河水	0.1~100	矿井水	1~10
海水	0.1~10	深层盐渍水	0.1~1

几种常见天然水的电阻率

天然水的电阻率一般处在 $10^{-1} \sim 10^3 \Omega \cdot m$ 范围，其高低主要取决于总矿化度。

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 水份、孔隙度



食盐溶液电阻率变化与浓度的关系曲线

因为不同盐的离子迁移率大体相同，因此电解质化学成分对电阻率的影响较小。

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 水份、孔隙度

岩、矿石所含水份的多少（或湿度大小）对其电阻率有较大影响。一般湿度大的岩石电阻率较低，而湿度小或干燥岩石的电阻率较高。

岩石湿度的大小，主要决定于岩石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。

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 水份、孔隙度

分 类	岩石名称	孔隙度 (%)	分 类	岩石名称	孔隙度 (%)	
沉 积 岩	土壤	20.0~69.4	火 成 岩	玄武岩	18.7~	
	砂	15.0~63.2		安山岩	6.0~	
	粘土	10.1~62.9		辉长岩	0.4~1.9	
	砾石	20.2~37.7		花岗岩	0.4~4.1	
	页岩	1.5~44.8		辉绿岩	0.2~5.1	
	砂岩	2.0~18.4		闪长岩	0.4~4.0	
	灰岩	0.7~10 ^①		正长岩	0.9~2.9	
变 质 岩	结晶石灰岩	0.9~8.6	① 带有喀斯特溶洞的灰岩孔隙度可达 $n \cdot 10\%$ 。			
	片麻岩	0.4~7.5				
	大理岩	0.1~2.1				

常见岩石孔隙度的测定结果，它可作为估计潜水面以下岩石湿度的一个参考资料。

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 水份、孔隙度

处于潜水面以上的岩石，因大气中的水分通过降雨、雪可渗入地下，也并非完全干燥。在渗透过程中，由于岩石颗粒对水的吸附作用，岩石孔隙中能保存一部分水分。**一般孔隙直径越小，吸水性越强，岩石的湿度便越大，故粘土的电阻率较低。**

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 水份、孔隙度

现以孔隙中充满水分的石英砂岩为例，确定湿度对岩石电阻率影响的近似数量关系。由于水的电阻率 $\rho_{\text{水}}$ 较砂粒的电阻率 ρ_2 低得多 ($\rho_{\text{水}} \ll \rho_2$)，考虑到岩石中体积含水量或湿度 $\omega = 1 - V$ ，故可得岩石的电阻率为

$$\rho = \rho_{\text{水}} \frac{2 + V}{2(1 - V)} \quad \rho = \rho_{\text{水}} \frac{3 - \omega}{2\omega}$$

当湿度较小时，岩石电阻率几乎与湿度成反比，此时 ω 的微小变化，可引起 ρ 的很大变化；此外， ρ 与 $\rho_{\text{水}}$ 约成正比。

1. 电阻率/电导率

- 影响岩矿石电阻率的因素 水份、孔隙度

用来表示岩石电阻率与湿度、孔隙度、饱和度关系的公式：

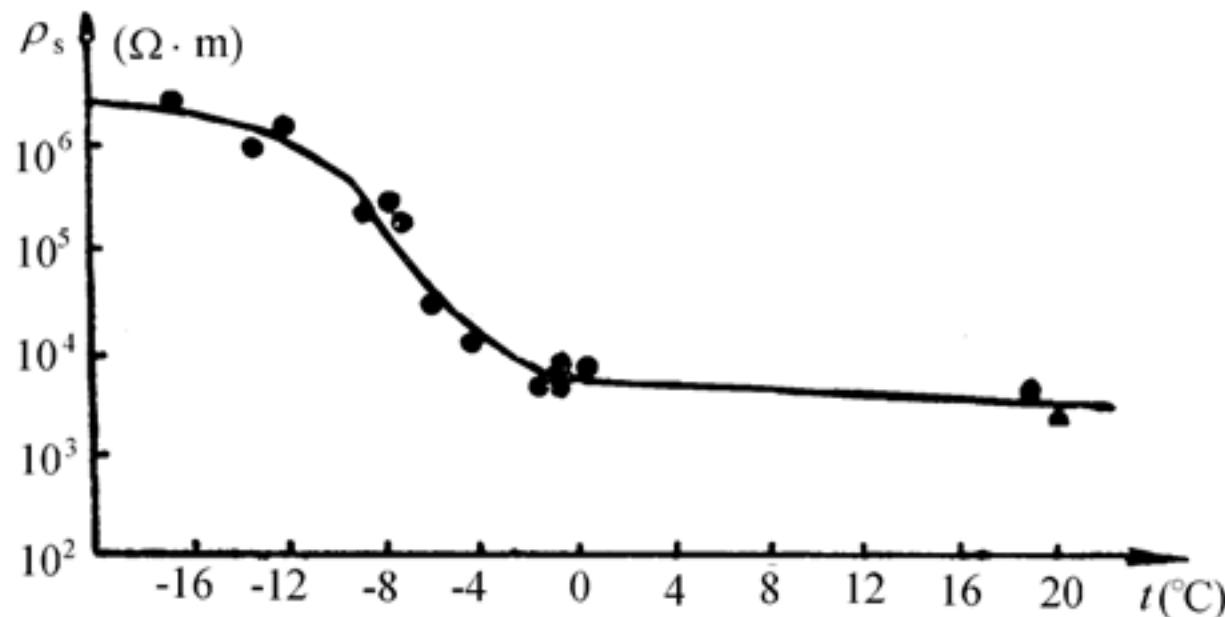
$$\rho = a\varphi^{-m} S_w^{-n} \rho_w$$

——阿尔奇公式，Archie (1942)

应用时需要注意适合的条件

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 温度

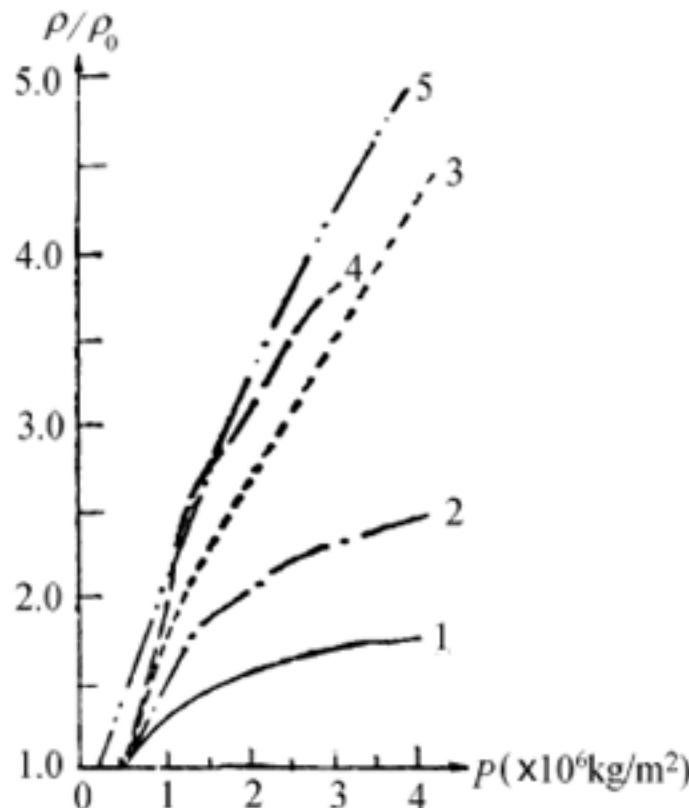


含水砂岩电阻率随温度变化的实验曲线。砂岩孔隙度为12%，湿度 $\omega=1.5\%$

随温度的增高，电阻率下降

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素 压力



1. 薄膜胶结, 胶结度12%;
2. 孔隙胶结, 胶结度20%;
3. 孔隙胶结, 胶结度28%;
4. 孔隙胶结, 胶结度25%;
5. 基底胶结, 胶结度35%

随压力的增大，电阻率下降

不同胶结度的粘土质砂岩的 ρ/ρ_0-P 曲线

1. 电阻率/电导率

■ 影响岩矿石电阻率的因素

影响岩矿石电阻率的因素是多方面的：

- ✓ 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。
- ✓ 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。
- ✓ 在**地热研究、地震地质**及深部地质构造研究中，温度及压力变化却成了应考虑的主要因素。

目 录

第一节 电阻率/电导率

第二节 磁导率

2. 磁导率

磁导率 (μ) 用来表征岩矿石的导磁性，它是磁感应强度 B 与磁场强度 H 之间的比例系数。

$$B = \mu H$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 为真空磁导率， μ_r 为相对磁导率

2. 磁导率

表 1-1-9 常见矿物的 μ_r 值

矿 物	μ_r	矿 物	μ_r
磁铁矿	5	黄铁矿	1.0015
磁黄铁矿	2.55	方解石	0.999987
钛铁矿	1.55	石英	0.999985
赤铁矿	1.05	角闪石	1.00015

除少数**铁磁性矿物外**（磁铁矿、磁黄铁矿和钛铁矿），其他矿物的磁导率都与1近似，相当于真空磁导率

2. 磁导率

■ 影响岩矿石磁导率的因素

铁磁矿物的含量

矿物的磁性可分为三类：
抗磁性、顺磁性和铁磁性。
前两类的相对磁导率均约
等于1，铁磁性的相磁导率
数值约为2-5。

考虑电磁法的工作对象时，
一般可以认为**介质是无磁性的**
的，并在进行电磁法的数
值模拟的时候，**磁导率一般**
也是取真空磁导率。

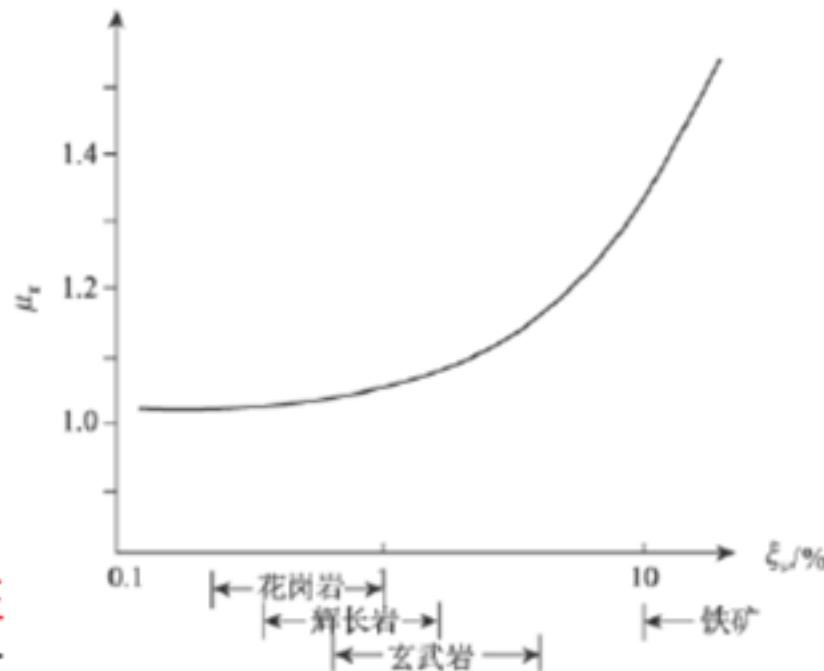


图 1-1-10 岩矿石的相对磁导率 μ_r 与
磁铁矿体积含量 ξ_v 之间的关系

目 录

第一节 电阻率/电导率

第二节 磁导率

第三节 介电常数

3. 介电常数

介电常数 (ε) 用来表征物质的介电性，在高频电磁法中，有着重要的作用。

$$D = \varepsilon E$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

其中 $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F/m}$ 为真空介电常数， ε_r 为介质的相对介电常数，量纲为一，它与物质成分、结构、湿度及外场频率有关。

3. 介电常数

■ 影响岩矿石介电常数的因素 矿物的含量

表 1-1-7 常见矿物和纯水等的相对介电常数值

矿物名称	ϵ_r	矿物名称	ϵ_r	矿物名称	ϵ_r
普通辉石	6.9 ~10.3	磷灰石	7.4 ~10.5	方铅矿	17.9
硬石膏	5.5 ~6.3	重晶石	7.0 ~12.2	闪锌矿	7.9 ~69.7
长石	4.5 ~6.2	钾盐	4.8	锡石	23
白云母	6.2 ~8.0	石膏	5.0 ~11.6	铝钒	50 ~74
黑云母	6.2 ~9.3	刚玉	11.0 ~13.2	纯水	80
石英	4.2 ~5.0	绢云母	19.6 ~25.4	冰	3 ~4.3
方解石	7.8 ~9.5	赤铁矿	25.0	石油	2.0 ~2.7

表 1-1-8 常见岩石的相对介电常数值

种类	岩石	ϵ_r	种类	岩石	ϵ_r
火成岩	花岗岩	7 ~12	变质岩	片麻岩	8 ~15
	正长岩	13 ~14		大理岩	3
	闪长岩	8 ~9	沉积岩	石灰岩	15
	橄榄岩	10 ~11		砂岩	9 ~11
	玄武岩	12		土壤	2 ~32

3. 介电常数

■ 影响岩矿石介电常数的因素 湿度

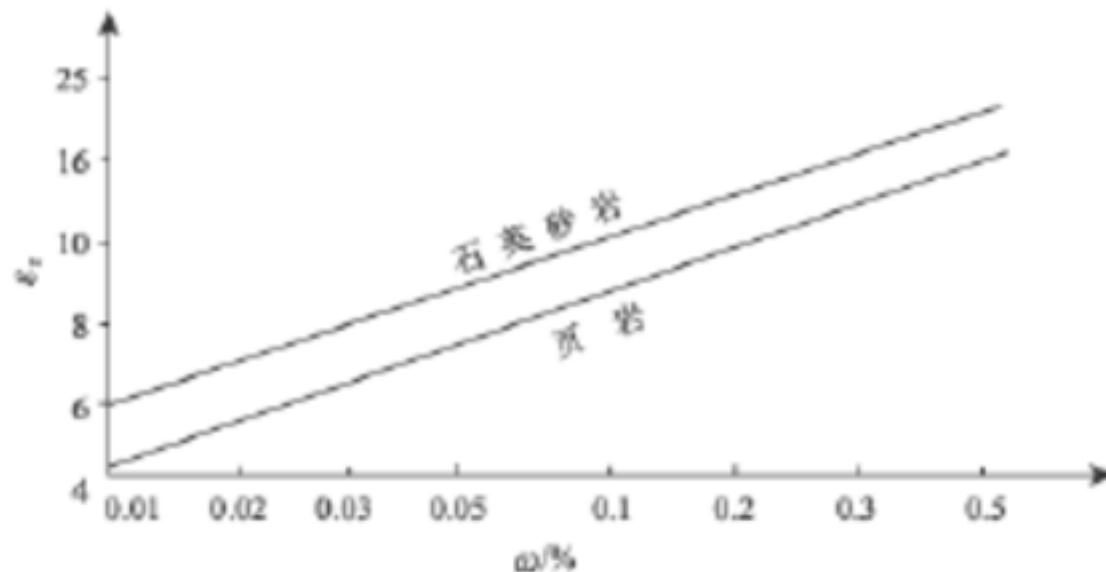
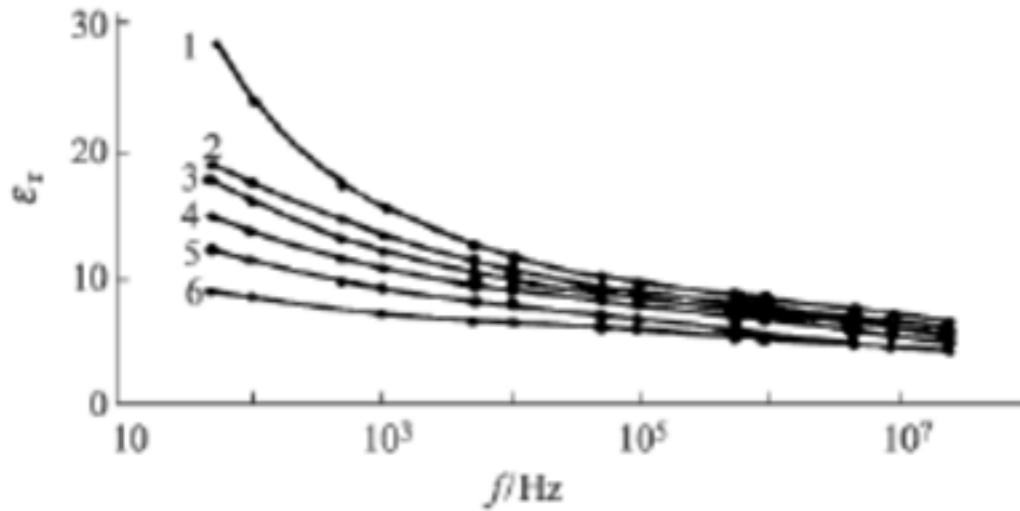


图 1-1-8 介电常数与湿度的关系

3. 介电常数

■ 影响岩矿石介电常数的因素 频率



$f < 10^6 \text{ Hz}$, ϵ_r 随频率增加减小

$f > 10^6 \text{ Hz}$, ϵ_r 与频率无关

图 1-1-9 岩石介电常数与频率的关系曲线

- 1—辉绿岩； 2—闪长岩； 3—辉长岩；
- 4—辉岩； 5—正长岩； 6—花岗岩

目 录

第一节 电阻率/电导率

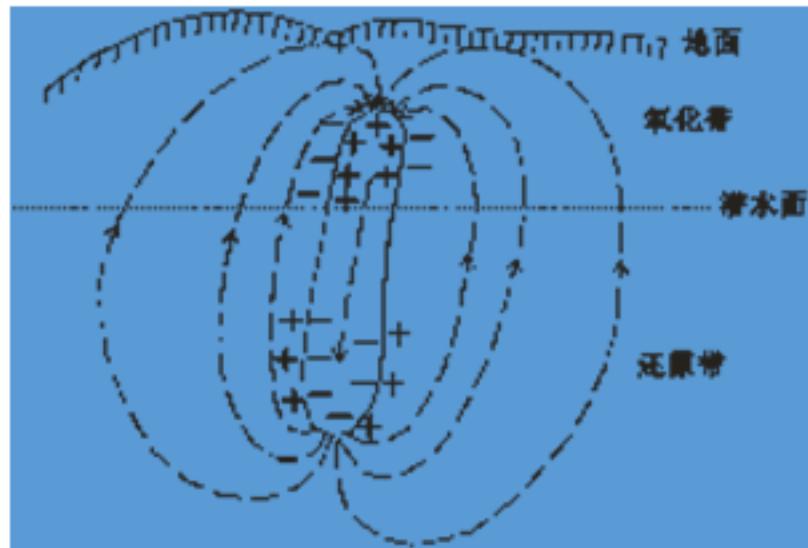
第二节 磁导率

第三节 介电常数

第四节 极化率/复电阻率

4. 极化率/复电阻率

- ✓ 岩矿石的自然极化特性
- ✓ 岩矿石的激发极化特性
- ✓ 岩矿石的压电和震电效应



电子导电体的自然极化和自然电场

4. 极化率/复电阻率

■ 电子导体的自然极化

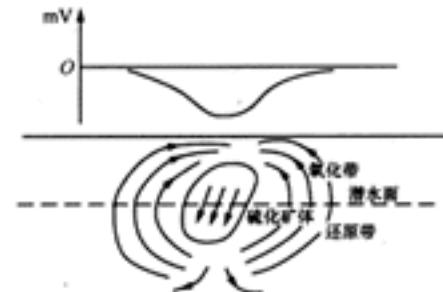
电子导体的自然极化产生了氧化还原电场，它是自然电位测量中自然电场的重要组成部分。

当电子导体和溶液接触时，由于热运动，导体的金属离子或自由电子可能有足够大的能量，以致克服晶格间的结合力越出导体而进入溶液中。从而破坏了导体与溶液的电中性，分别带异性电荷，并在分界面附近形成偶电层，该偶电层的电位差称为所论电子导体在该溶液中的电极电位，它与导体及溶液的性质有关。

若导体及其周围的溶液都是均匀的，则界面上的偶电层也是均匀的，这种均匀、封闭的偶电层不会产生外电场。

如果导体或溶液是不均匀的，则界面上的偶电层呈不均匀分布，产生极化，并在导体内、外产生电场引起自然电流。这种极化所引起电流的作用是减弱极化导体或溶液的不均匀性。若不能继续保持原有导体或溶液的不均匀性，则因极化而引起的自然电流会随时间逐渐减小，以至最终消失。

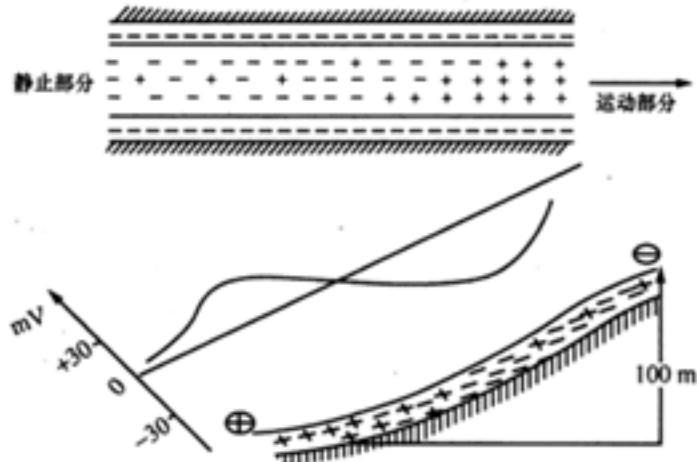
因此，电子导体周围产生稳定电流场的条件是：导体或溶液具有不均匀性，并有某种外界作用保持这种不均匀性，使之不因极化放电而减弱。



4. 极化率/复电阻率

■ 离子导体的自然极化

- ✓ 过滤作用
- ✓ 扩散作用

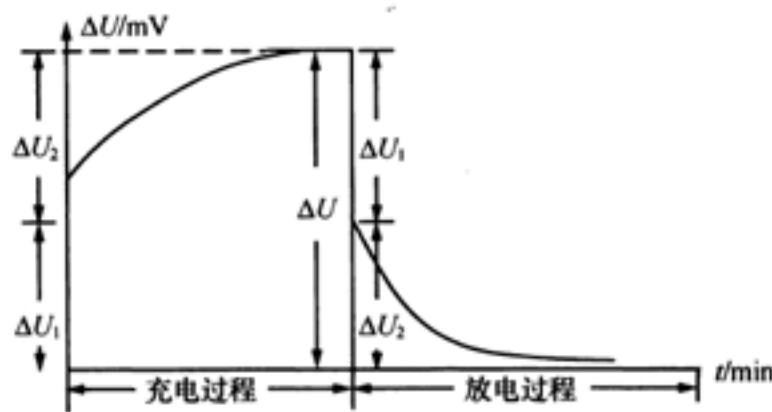
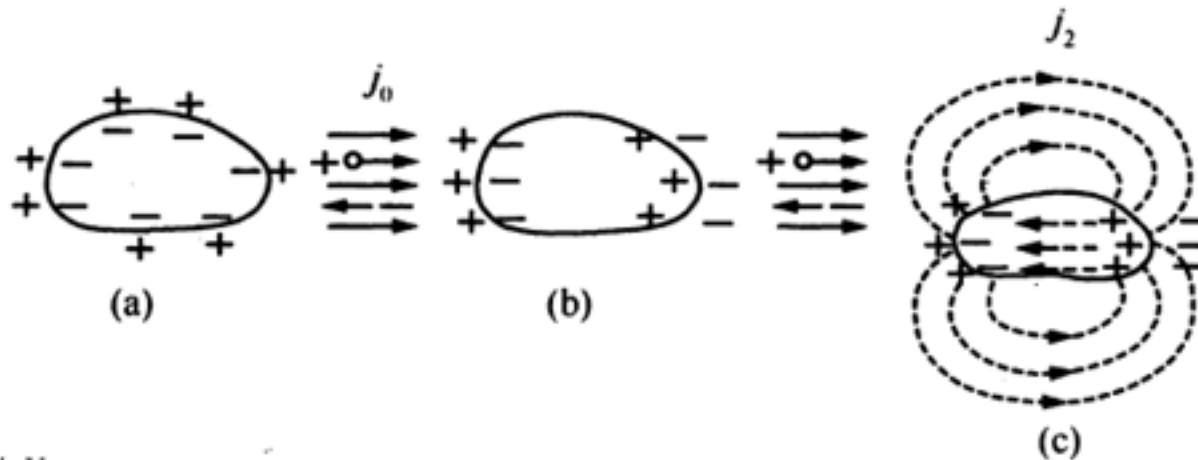


离子迁移率 (单位, $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 观测温度, 25°C)

正 离 子	迁移率	负 离 子	迁移率
	$(10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$		$(10^{-4} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
H^+	36.2	OH^-	20.5
Na^+	5.19	Cl^-	7.91
K^+	7.61	NO_3^-	7.40
Ba^+	6.60	SO_4^-	8.29
Ca^+	6.16	-	-

4. 极化率/复电阻率

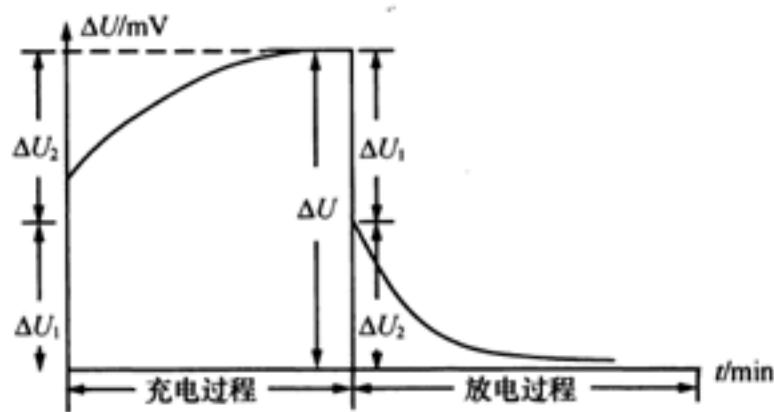
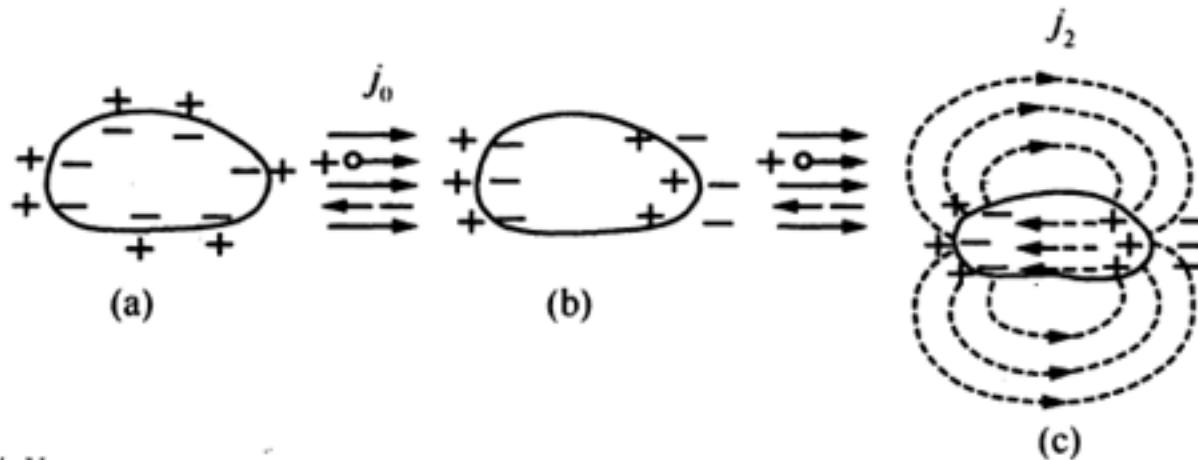
■ 岩矿石的激发极化特性



$$\eta(T, t) = \frac{\Delta U_2(T, t)}{\Delta U(T)} \times 100\%$$

4. 极化率/复电阻率

■ 岩矿石的激发极化特性

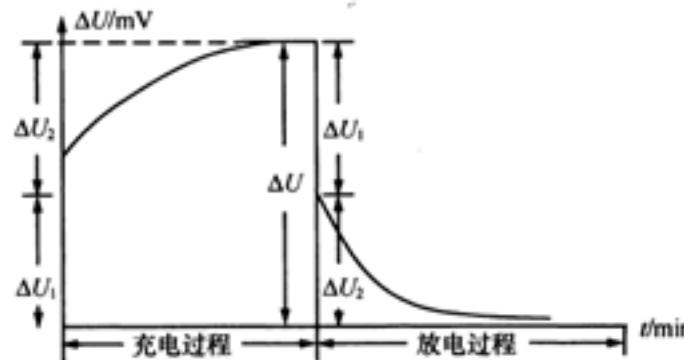


$$\eta(T, t) = \frac{\Delta U_2(T, t)}{\Delta U(T)} \times 100\%$$

4. 极化率/复电阻率

■ 影响岩矿石极化性质的因素

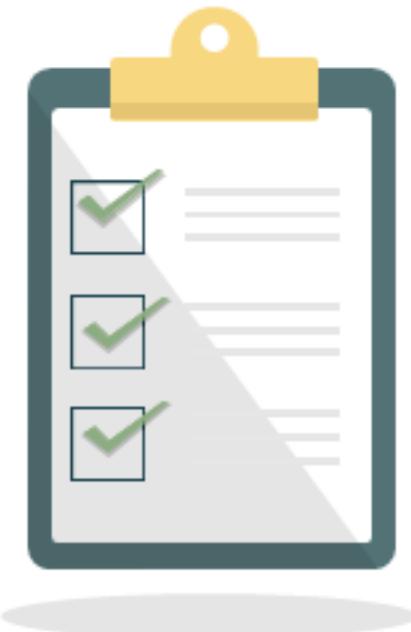
除充、放电时间之外，体极化岩矿石的极化率还与岩矿石的成分、含量、结构及含水性等多种因素有关。我国物探工作者对大量矿化岩矿石标本作了系统观测，研究了多种因素对岩矿石极化率的作用规律。结果表明在诸多因素中，影响地下矿化岩石或矿石极化率的主要因素是岩矿石中电子导电矿物的含量和岩矿石的结构、构造。



$$\eta(T,t) = \frac{\Delta U_2(T,t)}{\Delta U(T)} \times 100\%$$

小节

- ✓ 岩矿石的电磁特性
- ✓ 电阻率
- ✓ 磁导率
- ✓ 介电常数
- ✓ 极化率/复电阻率



课后习题

- 按照激发场源，电法的分类
- 谈谈你感兴趣的应用场景
- 麦克斯韦方程组的物理意义
- 梯度、散度、旋度的物理意义
- 岩矿石的电磁性质
- 影响岩矿石电阻率的因素



课程结束

陈涛

