

# COMSOL CONFERENCE

2017 BEIJING



## 基于COMSOL的钻头电阻率仪器 RAB探测特性研究

汇报人：李铭宇

作者：李铭宇  
康正明  
李君建



1

研究背景

2

仪器简介

3

数值计算

4

结果分析

5

结论



# 研究背景

---

国外的随钻测井技术相对成熟，各大公司都推出了自己的随钻电阻率测井仪器，但我国的高端随钻装备仍处于起步阶段，目前尚未达到规模化生产和应用。

通过对已经成熟的仪器进行仿真，可以指导我们后续仪器的研发生产以及实际资料的处理解释。





## 仪器简介

---

- RAB简介
- 仪器结构和测量原理

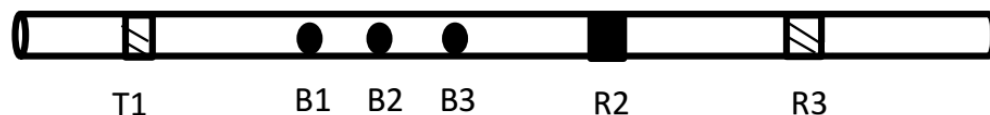
## RAB简介

RAB(Resistivity At Bit)是斯伦贝谢下属的Anadrill公司研制的**钻头电阻率**测井仪，其**最大特点**是利用钻头作为供电电极，从而测量钻头处的地层电阻率。用钻头作为电极，在泥浆侵入或井眼可能损坏之前，就可以**测量5至10cm**薄层的电阻率。

### RAB特点：

1. **良好的**垂向分辨率；
2. 可以得到用于**构造分析**的图像；
3. 方位测量信息，测量点**靠近钻头**；
4. 受高倾角**影响小**；
5. **不能**在非导电井眼中工作；
6. 探测深度**较浅**。

### 仪器结构



仪器结构示意图

T1----上发射线圈;

B1 , B2 , B3----纽扣电极;

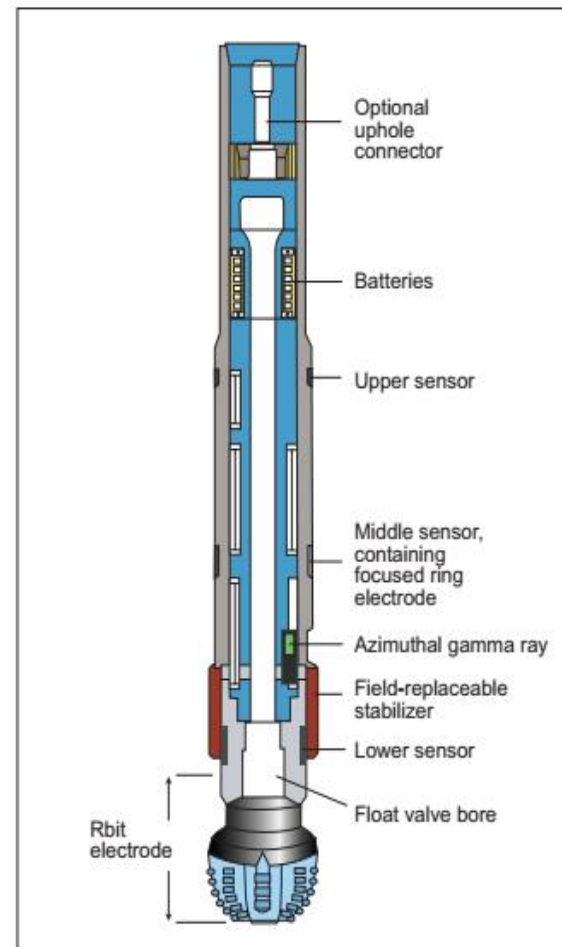
R2----环状电极;

R3----下接收线圈。

三个纽扣电极用于成像 ;

环状电极用于获得侧向电阻率 ;

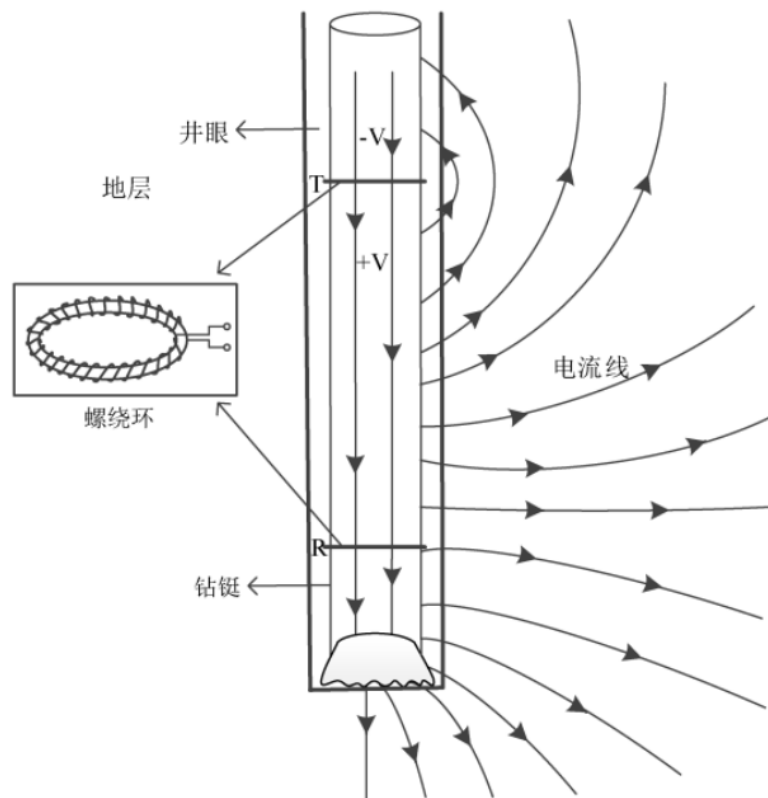
下接收线圈用于钻头电阻率测量。



Schematic illustration of the Resistivity-at-the-Bit tool (LWD-RAB).

### 测量原理

仪器采用**螺绕环激励**的方式，忽略实际生产中钻柱的电导率，将其视为**理想导体**，假设发射器上方和下方的钻柱部分是一对正负等量电位差的**等电位面**，采用**直流法**，忽略测量频率的影响，可以将螺绕环在钻铤和地层中产生电流的方式等效为一个延长的**电压偶极子**，电流从钻头发射，流向钻头下方地层，用于测量钻头电阻率。右图为含螺绕环的钻头电阻率测井原理示意图。



钻头电阻率测量基于**欧姆定律**，地层视电阻率的计算公式为

$$R_a = K \frac{U}{I}$$





## 数值计算

---

- 数值模拟方法
- 建立模型及网格剖分
- 计算结果验证

## 数值模拟方法

直流电测井满足以下**基本方程**  $\nabla \cdot (\sigma \nabla u) = 0$

式中  $\sigma$  为地层电导率,  $u$  为地层中的电位场。

在直角坐标系下, 地层电阻率  $R$  的电位场  $u(x, y, z)$  满足下面**变分方程**

$$F(u) = \frac{1}{2} \iiint_{\Omega} \frac{1}{R} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz - \sum_E I_E U_E \rightarrow \min$$

式中  $F(u)$  为  $u(x, y, z)$  的泛函,  $\Omega$  为求解区域,  $U_E$  为钻铤和纽扣电极上的电压,  $I_E$  为纽扣电极和接收线圈接收到的电流。

通过对其进行**离散化**, 可以得到求解的刚度矩阵。电阻率  $R$  分布满足:

$$R = \begin{cases} R_m, & \text{在井眼中} \\ R_{xo}, & \text{在侵入带中} \\ R_s, & \text{在围岩层中} \\ R_t, & \text{在原状地层中} \end{cases}$$

## 数值模拟方法

当钻铤看做完美导体时，发射螺绕环上下钻铤形成恒压，因此钻铤上电压 $U$ 满足**第一类边界条件**，无限远地层和钻铤表面电位满足以下边界条件：

$$\begin{cases} u = 0, & \text{无穷远地层} \\ u = C, & \text{发射螺绕环下方钻铤表面} \end{cases}$$

式中 $C$ 为固定常数，相当于螺绕环在钻铤上感应出的电压值，下面计算中取1。通过对 $F(u)$ 进行离散化，可以得到每个单元的表达形式：

$$F(u) = \sum_{e=1}^{e_0} F_e(u)$$

将求解的所有单元的节点合起来形成要求解的**刚度矩阵**：

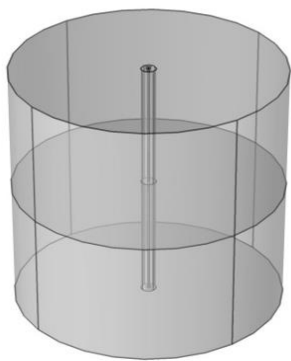
$$[K][X] = [S]$$

$K$ 为总刚度矩阵， $X$ 为要求解的未知量， $S$ 为施加条件。

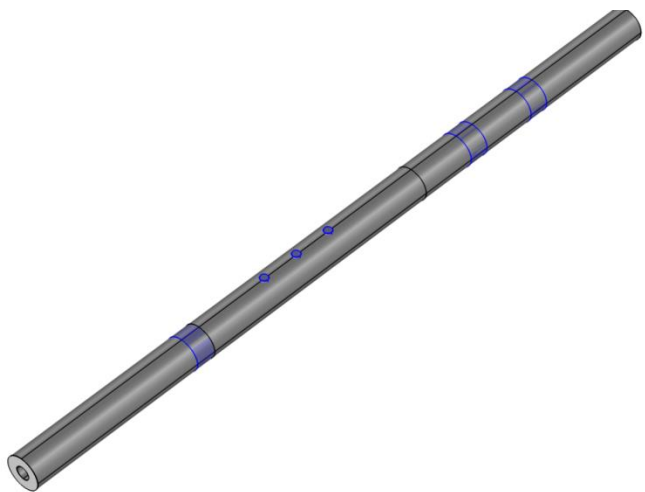
采用**广义最小余量法(FGMRES)**对方程组求解。

## 建立模型及网格剖分

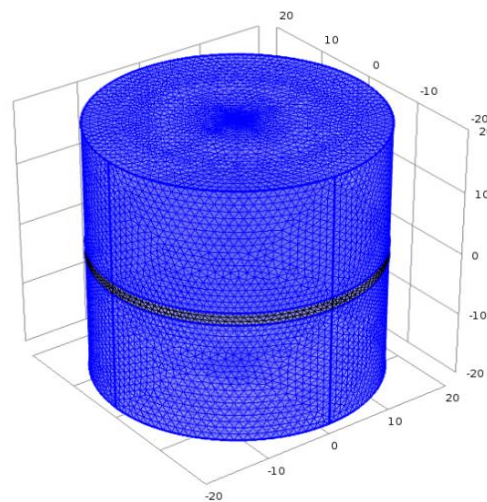
基于上述**有限元理论**建立了2D和3D地层模型，并考虑了钻铤结构的**实际尺寸**。模型全部由**自由四面体网格**来剖分，其中钻铤，井眼和目的层部分网格剖分密一些。网格尺寸从源中心向外依次变大，合理控制最大网格尺寸和最小网格尺寸，使得既能达到计算需要的精度，又能有效地节省计算机内存资源。在钻铤和井眼界面处使用**边界层**处理。模型**总自由度个数**为 80 万至 100 万。



三维地层模型

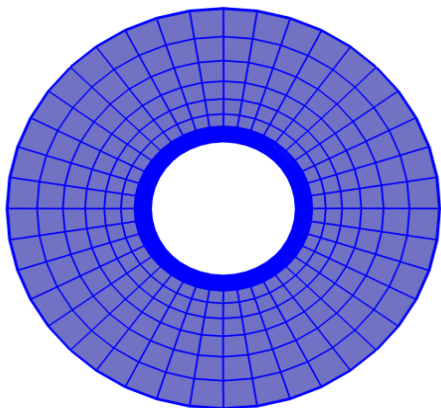


仪器结构建模

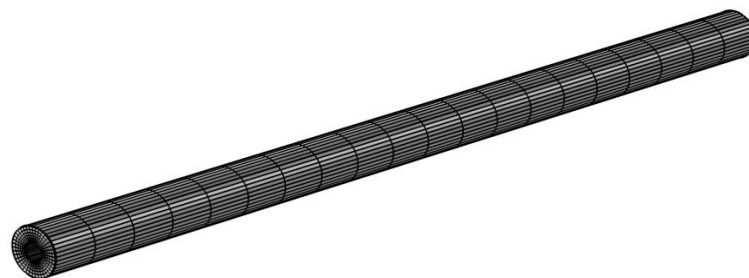


地层模型网格剖分

## 建立模型及网格剖分



钻铤---扫略网格

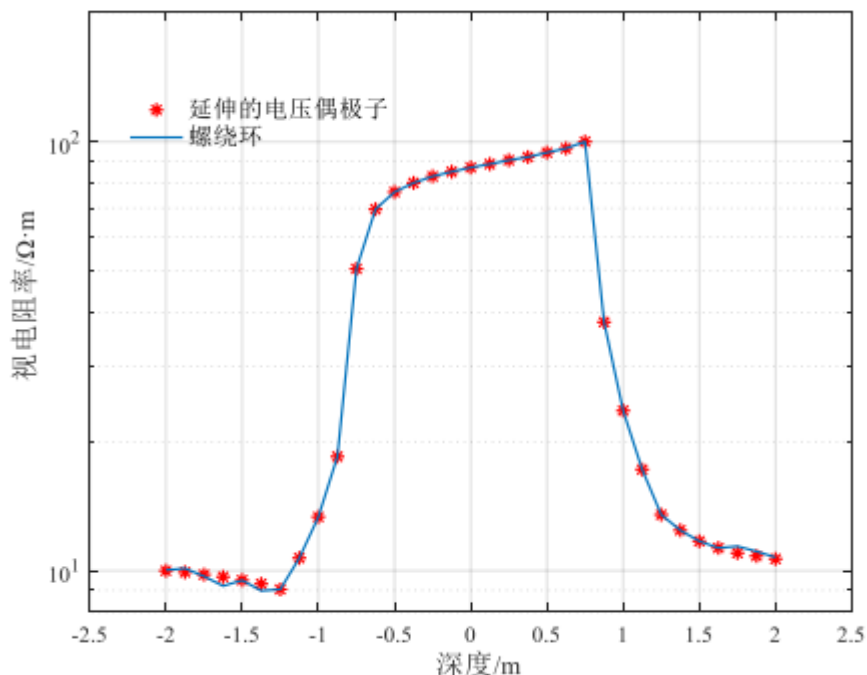


**扫略体网格划分算法是**：首先给源面划分面网格，自动进行，不需要事先人为划分面网格，然后沿柱体或旋转体棱线扫掠贯穿整个柱体或旋转体生成多层体网格(三棱柱体单元和六面体单元)。



采用扫略方式形成网格是一种非常好的方式，对于复杂几何实体，经过一些简单的切分处理，就可以自动形成规整的六面体网格，减少了计算量。

## 计算结果验证



利用 3D FEM，建立三层地层模型，分别计算了**激励源**为螺绕环结构和延伸的电压偶极子两种不同情况，图中延伸的电压偶极子在三层地层中的测井响应曲线与螺绕环激励源在三层地层中的测井响应曲线**几乎重合**，**最大误差**小于 3%。模拟曲线形态与 RAB 仪器在三层地层中的测井曲线**形态一致**，验证了该方法的**适用性**。



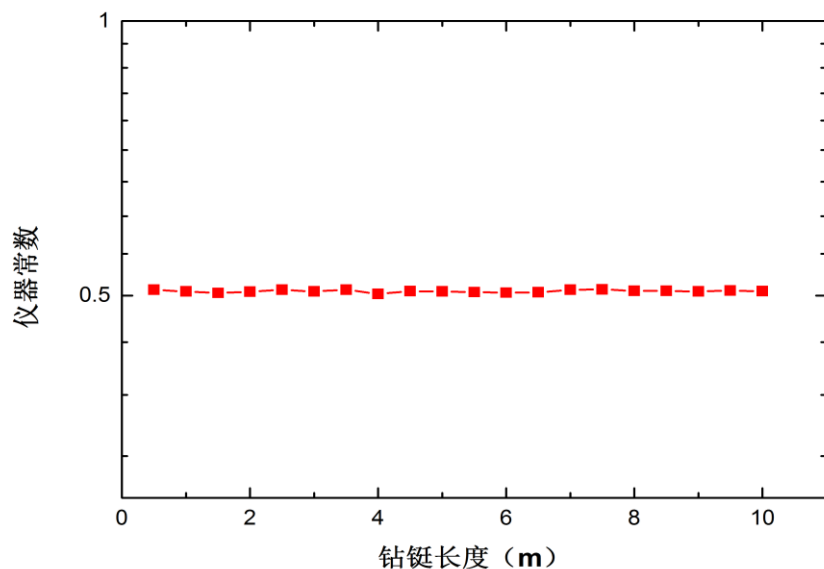
## 结果分析

---

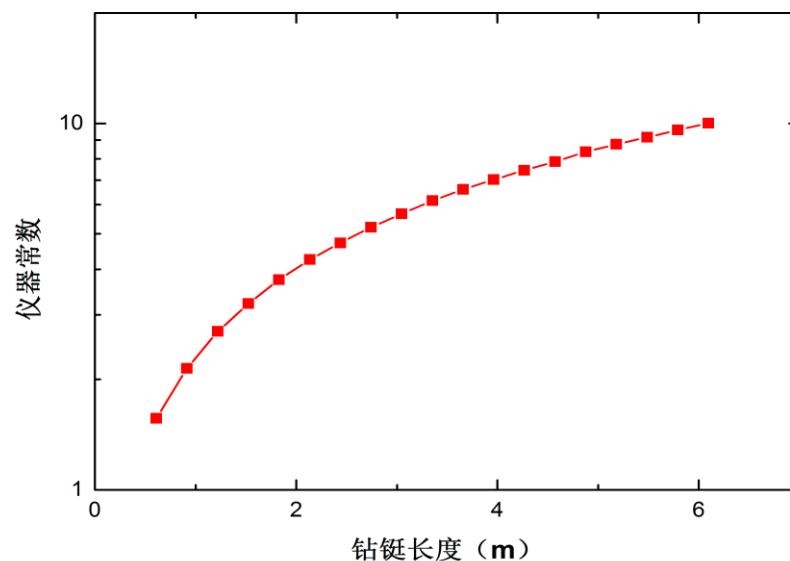
- 钻铤长度对仪器常数的影响
- 钻铤长度与钻头测量结果的关系
- 水基泥浆和油基泥浆工作模式分析

### 钻铤长度对仪器常数的影响

发射螺绕环上方钻铤长度



最下方接收螺绕环下方钻铤长度



钻头测量R3的仪器常数主要**取决于**接收螺绕环下方钻铤的长度。



## 钻铤长度与钻头测量结果的关系

在仪器实际的生产中，在接收螺绕环下方R3可能挂接其他仪器，从而导致接收螺绕环下方钻铤的长度增大，当其长度增加到一定程度时，钻头测量无法反映出地层的电阻率。

图中：

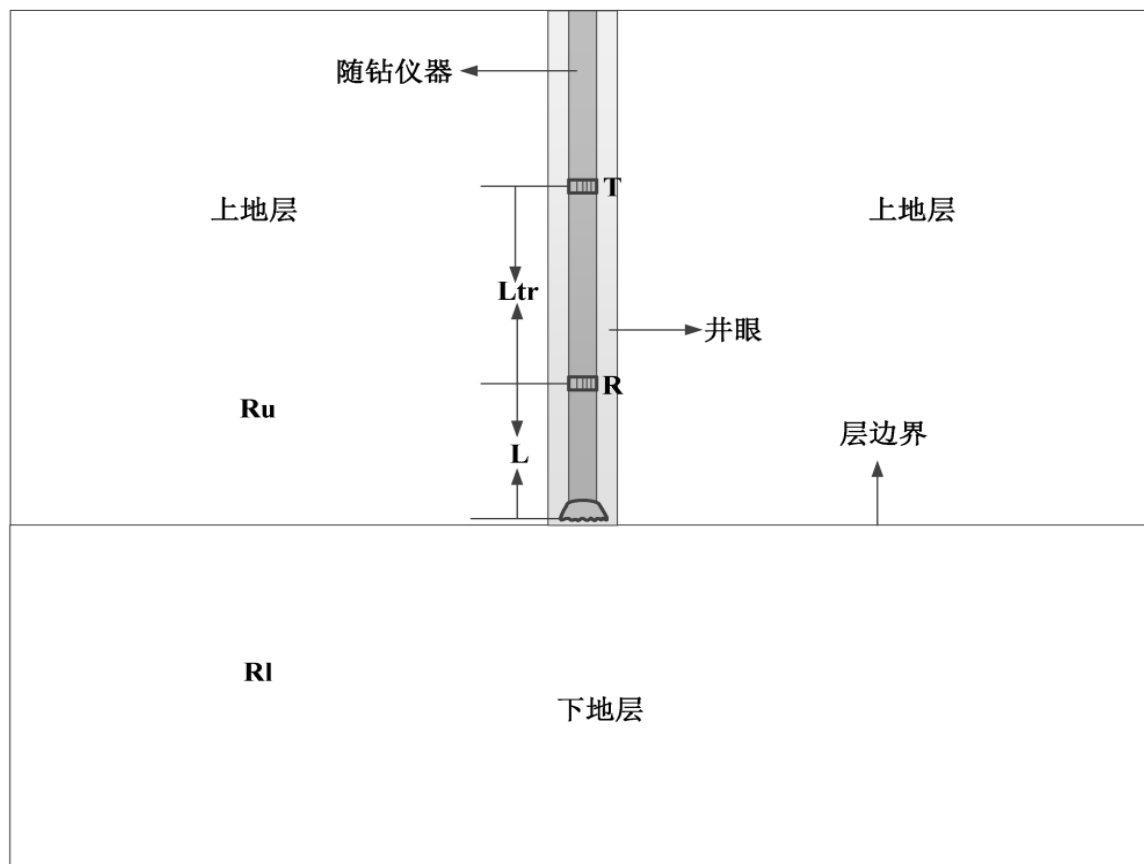
$R_u$ ----钻头上方地层电阻率；

$R_l$  ----钻头下方地层电阻率；

$L_{tr}$ ----仪器源距；

$L$  ----下部钻铤长度。

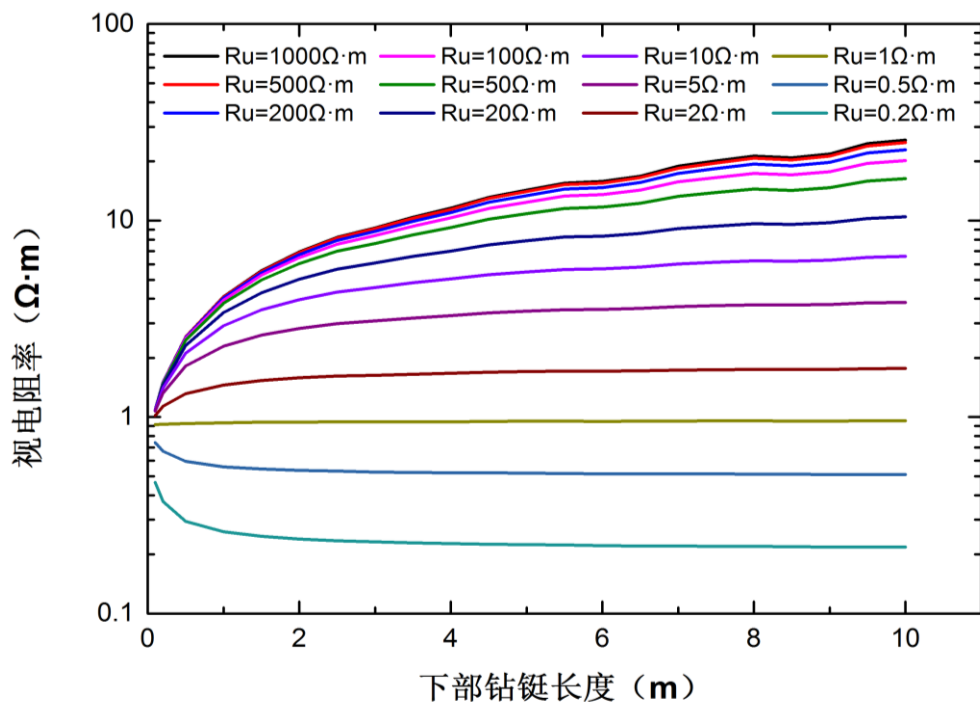
模拟时， $R_l = 1\Omega \cdot m$ 。



模拟模型示意图

### 钻铤长度与钻头测量结果的关系

水基泥浆  $R_m = 0.1 \Omega \cdot m$



$R_u < R_l$  时：

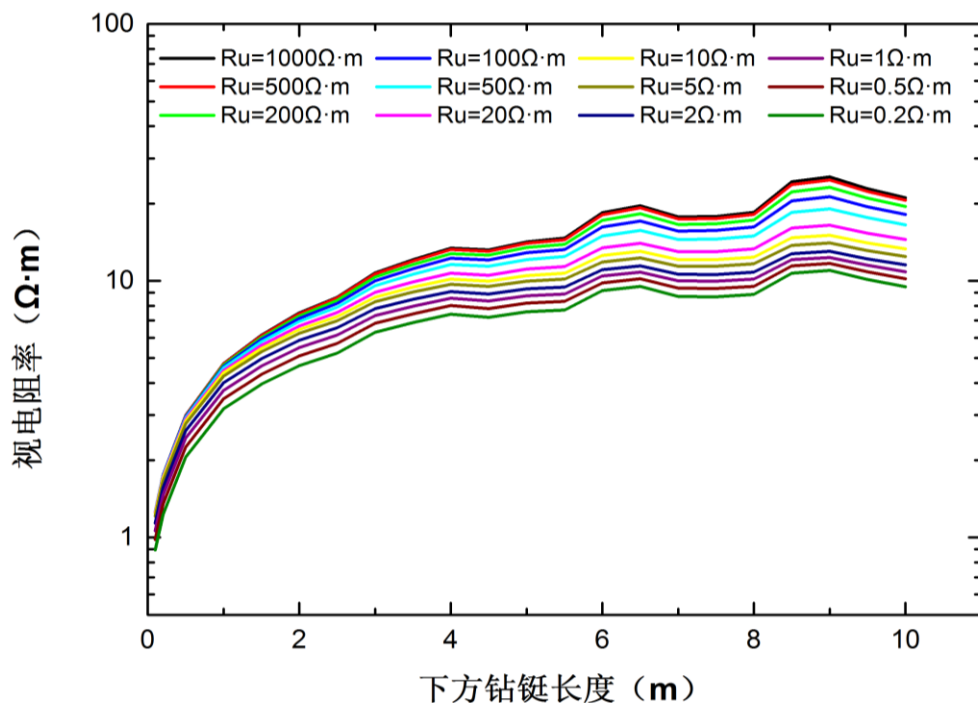
当钻铤长度较小时，钻头测量可以定性反应钻头下方地层电阻率信息。随着钻铤长度的增大到2m，钻头测量基本无法反应钻头下方地层电阻率信息，相反能够定量反应出钻头上方地层电阻率信息。

$R_u < R_l$  时：

当钻铤长度较小时，钻头测量可以定性反应钻头下方地层电阻率信息。随着钻铤长度的增大，钻头测量基本无法反应钻头下方地层电阻率信息，相反能够定性反应出钻头上方地层电阻率信息。

### 钻铤长度与钻头测量结果的关系

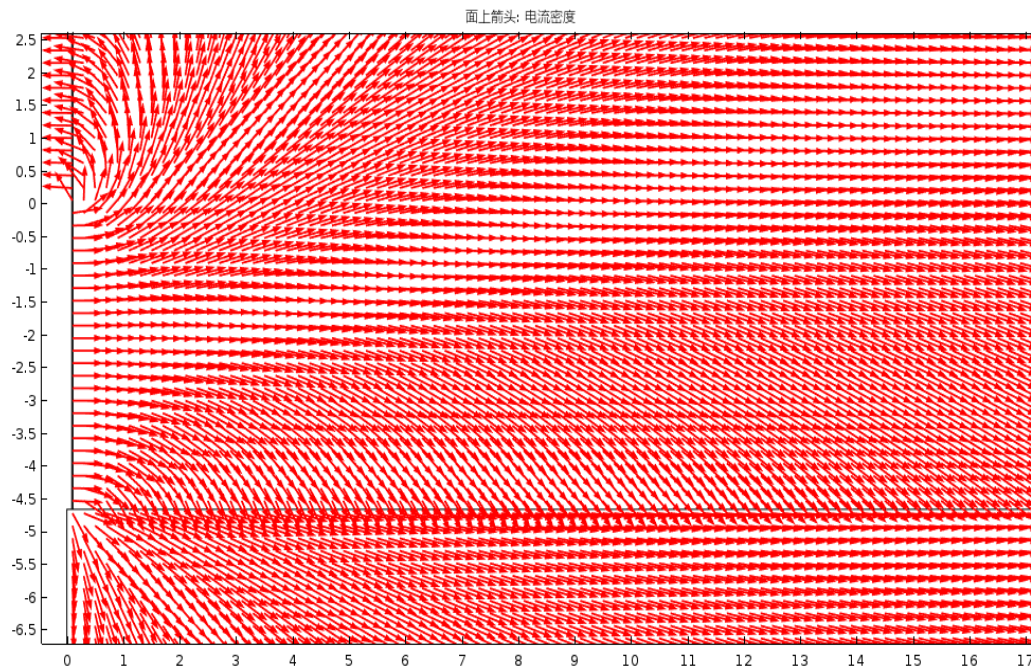
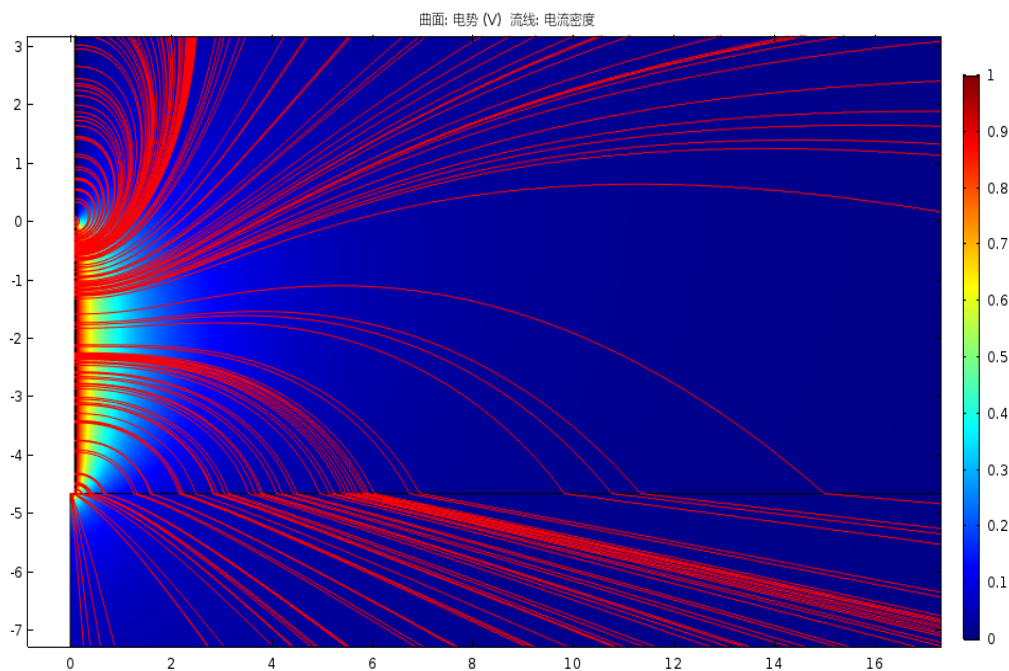
油基泥浆  $R_m = 500\Omega \cdot m$



钻铤长度不断增大时，不同  $R_u$  相差不是特别大，也没有不断接近钻头上方地层电阻率值，而是不断增大，**无法反应**出任何地层电阻率信息，只是与泥浆电阻率取值有一定的关系。

### 水基泥浆和油基泥浆工作模式分析

通过云图和电流线方式揭示钻头测量采用油基泥浆和水基泥浆时的不同机理。下面两图为水基泥浆时电势与电流密度分布。



**对于水基泥浆:**

$$R_m = 0.1 \Omega \cdot m$$

$$R_u = 100 \Omega \cdot m$$

$$R_l = 1 \Omega \cdot m$$

# 目录

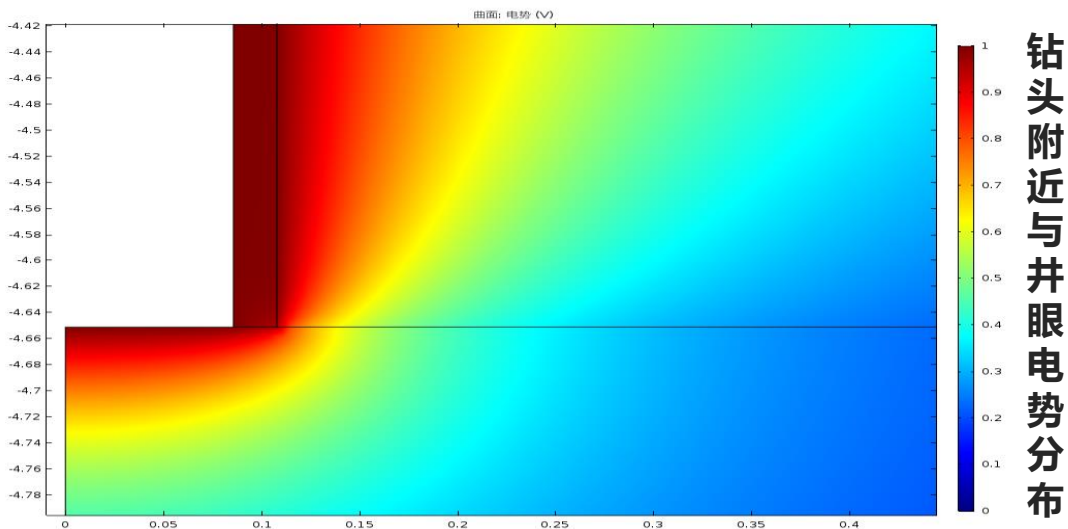
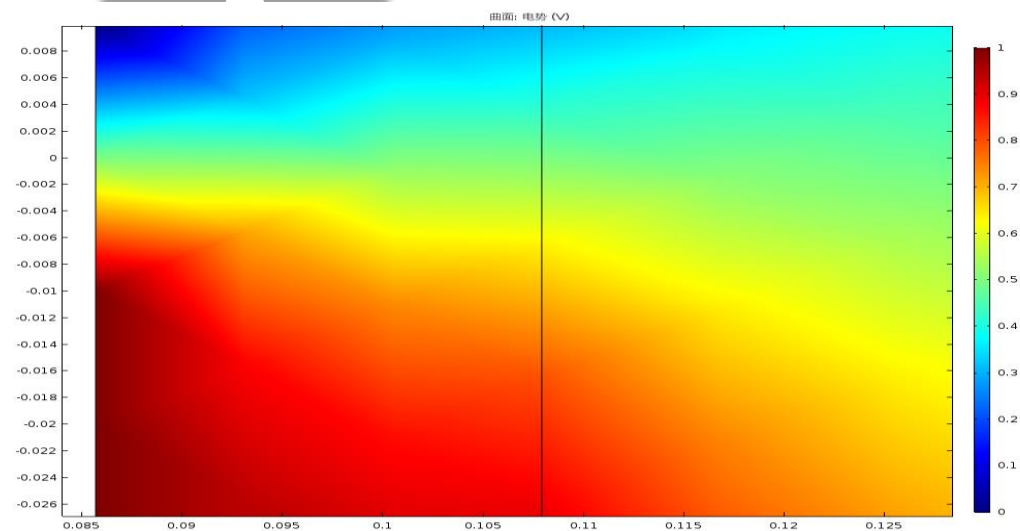
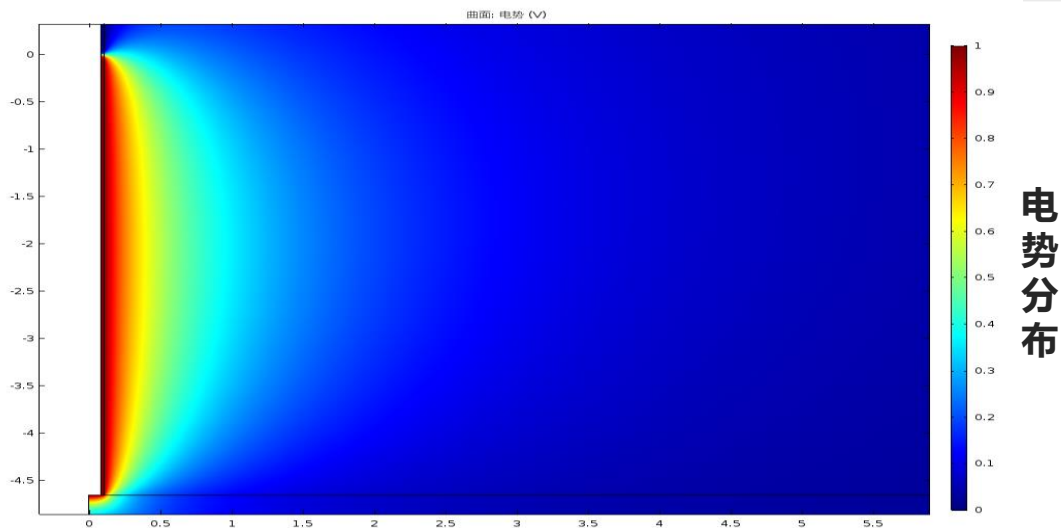
Part 1

Part 2

Part 3

Part 4

Part 5



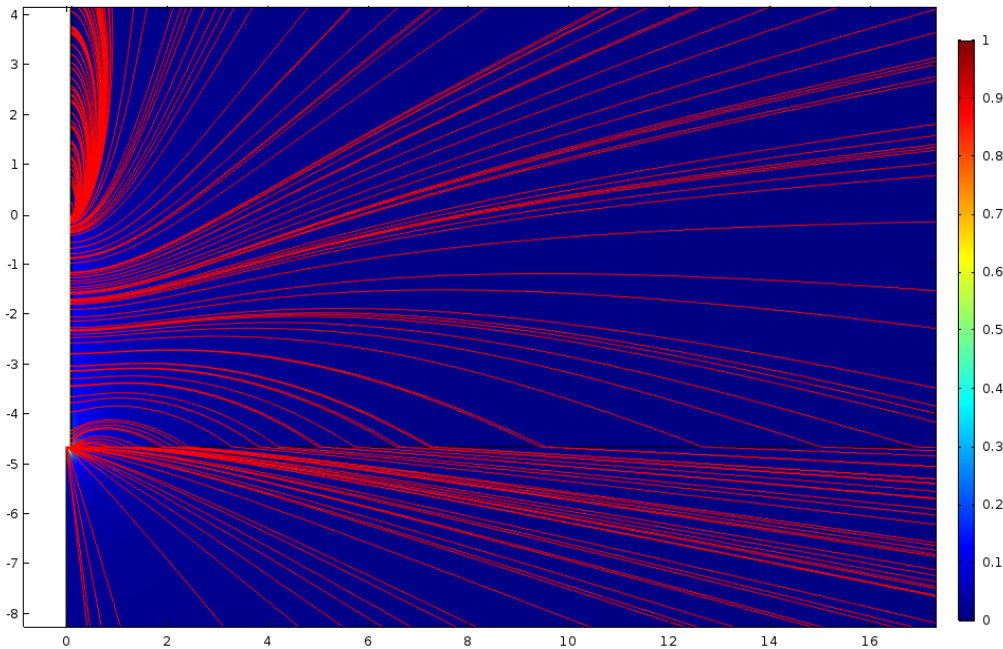
## 发射螺绕环附近与井眼电势分布

水基泥浆情况下，很大一部分电流从井眼向外流向钻头上层地层，其流入方向**不仅仅局限于**钻头下方地层，而且发射螺绕环下部电势**分布均匀**。



### 水基泥浆和油基泥浆工作模式分析

曲面: 电势 (V) 流线: 电流密度



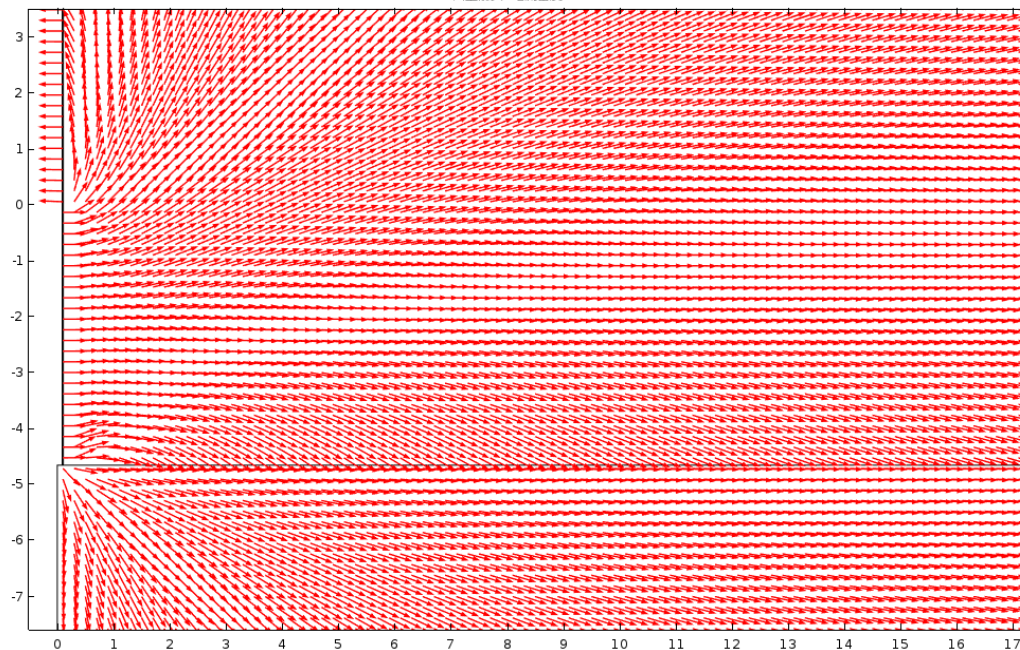
对于**油基泥浆**:

$$R_m = 1000\Omega \cdot m$$

$$R_u = 100\Omega \cdot m$$

$$R_l = 1\Omega \cdot m$$

面上箭头: 电流密度



上面两图为油基泥浆时电势与  
电流密度分布。

# 目录

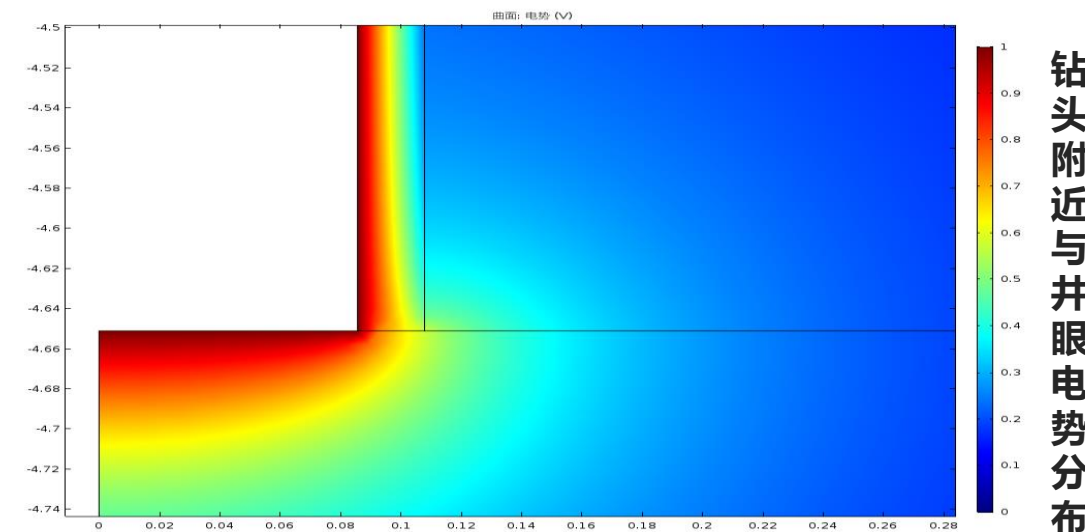
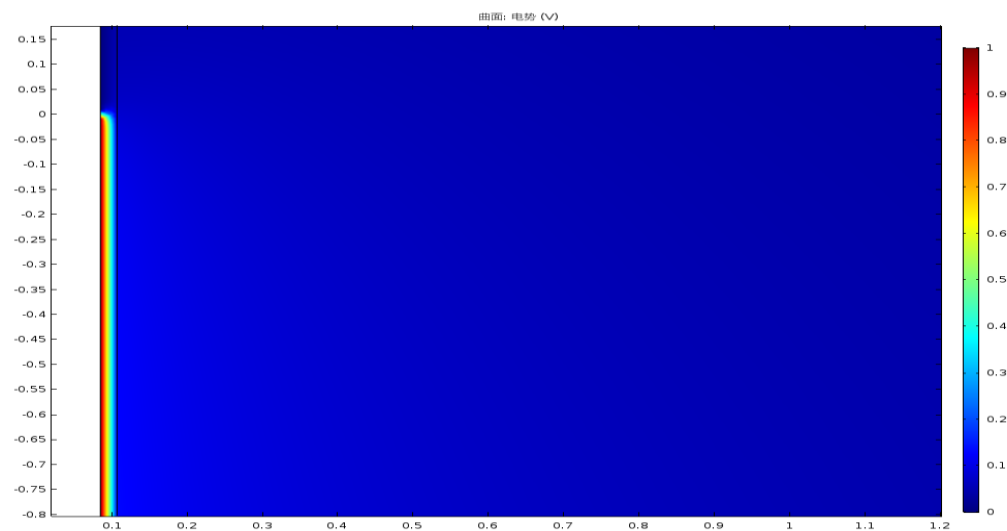
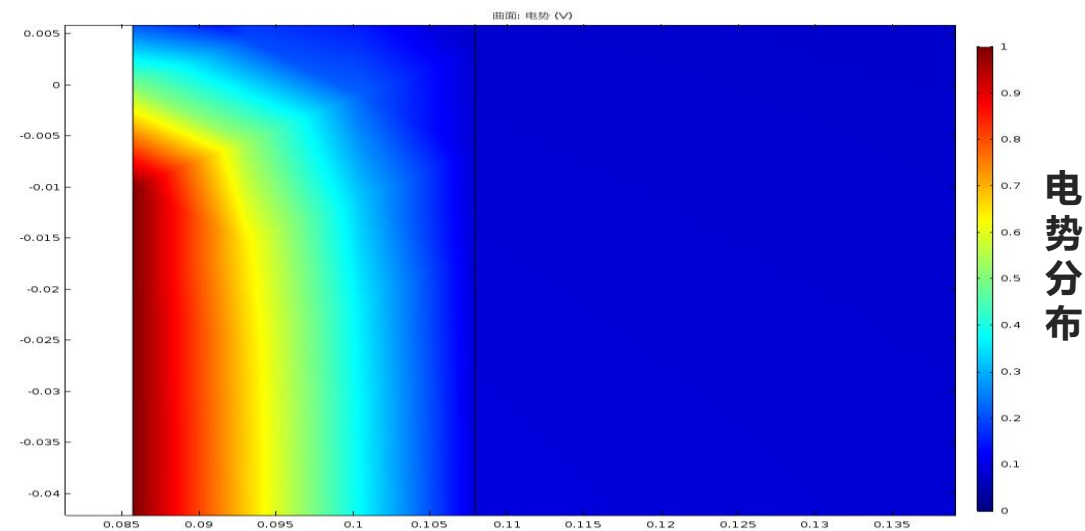
Part 1

Part 2

Part 3

Part 4

Part 5



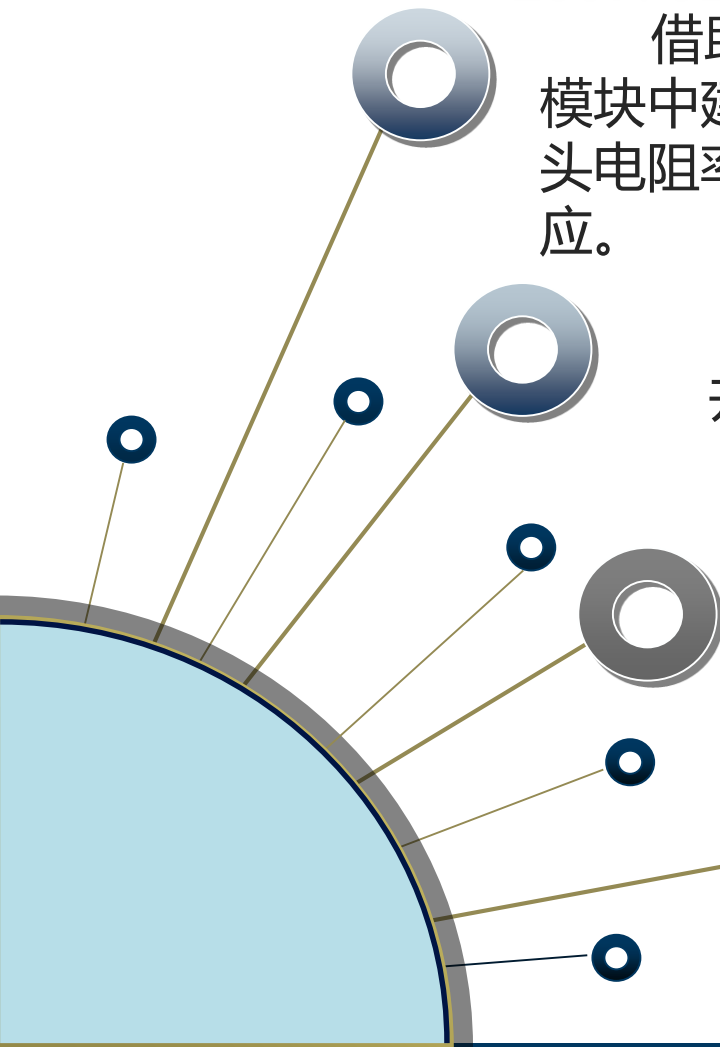
油基泥浆情况下，很小一部分电流从井眼向外流向钻头上方地层，其流入方向**仅仅局限于**钻头下方地层。



# 结论

---





借助COMSOL MULTIPHYSICS仿真平台，在DC模块中建立了三维模型，考查了斯伦贝谢公司的随钻钻头电阻率测井仪RAB在油基泥浆和水基泥浆中的测井响应。

通过COMSOL WITH MATLAB实现脚本加载模型并控制数据按一定格式输出为文本文件。

随钻钻头电阻率测井仪器常数主要与下部钻铤长度有关。

RAB在水基泥浆和油基泥浆中均适用，在油基泥浆中应用效果更好。

# COMSOL CONFERENCE

2017 BEIJING



## 感谢聆听

Thanks for listening!