

基于COMSOL的随钻电磁波电阻率仪器 WPR探测特性研究

主讲人： 康正明

中国石油大学（北京）电法测井实验室
2016. 11. 4

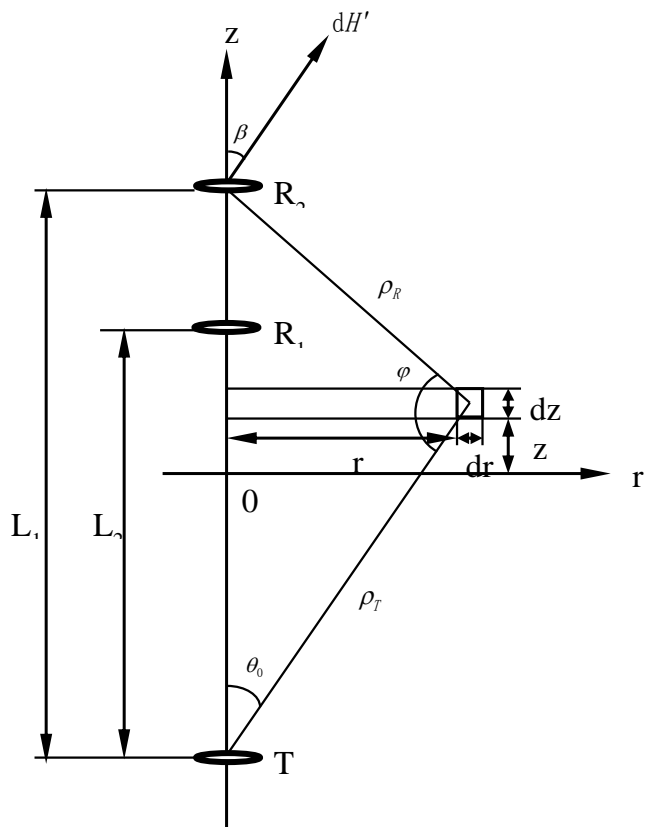
内容提要

- 一、随钻电磁波电阻率测井原理
- 二、几何建模与脚本控制
- 三、物理场分析
- 四、随钻电磁波电阻率正演方法（BiCGStab）
- 五、随钻电磁波电阻率仪器探测特性分析
- 六、结论

一、随钻电磁波电阻率测井原理

1.WPR仪器原理

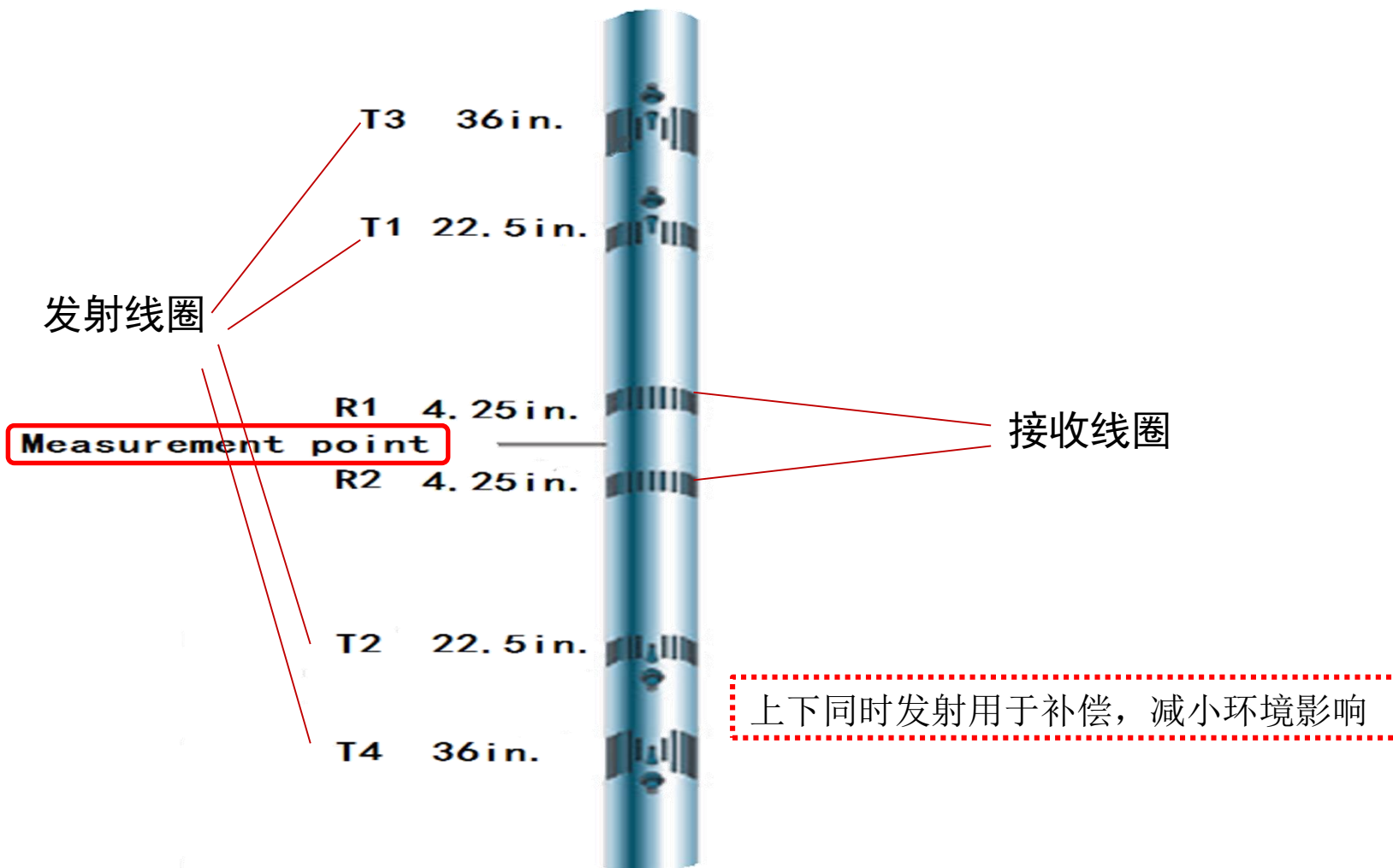
在随钻电阻率测井中，2MHz 电阻率测井成为一种普遍应用的电测井方法，属于**交变电随钻测井**，主要测量地层电阻率参数，常称为电磁波传播电阻率测井。电磁波电阻率测井仪不再有所谓的频蔽线圈，2MHz 的工作频率与感应测井工作频率相比高出两个数量级，提高了有用信号的幅度，相对降低了直耦信号的幅度，两个接收线圈只有距离远近之分，目的均为采集感应电动势信号。



电磁波电阻率测井仪基本结构示意图

一、随钻电磁波电阻率测井原理

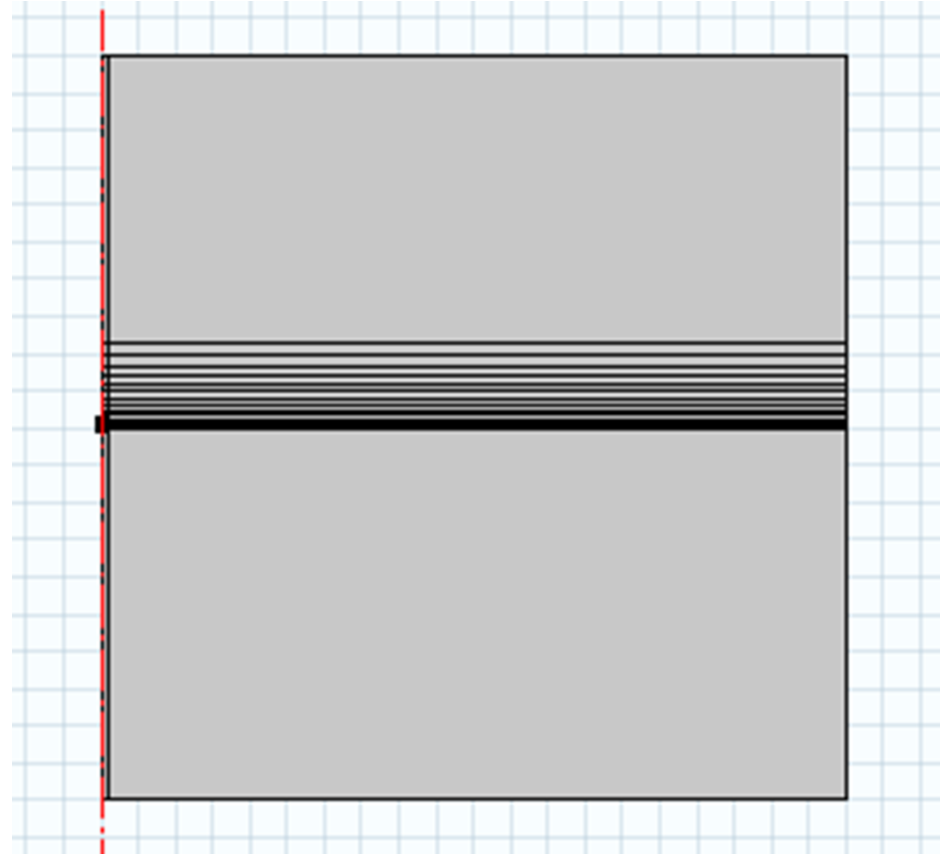
2.WPR仪器结构



二、几何建模与脚本控制

1. 几何建模

在二维轴对称模型中分别建立了均匀无限大地层，三层地层和多层地层。地层模型为 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 。选择 AC/DC 模块中的磁场。通过 LiveLink™ for 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。



多层介质模型

二、几何建模与脚本控制

2.脚本控制

设定

参数

参数

| 名称 | 表达式 | 值 | 描述 |
|--------|-------------|------------|---------------------------------------|
| L0 | 50[m] | 50 m | the thickness of sorrouding formation |
| sigma1 | 10[S/m] | 10 S/m | conductivity of surrouding formation |
| sigma | 1[S/m] | 1 S/m | conductivity of formation |
| Ri | 1.016[m] | 1.016 m | |
| l | 0[m] | 0 m | |
| R1 | 0.52235[m] | 0.52235 m | long receiver1 |
| R0 | 0.30645[m] | 0.30645 m | long receiver0 |
| L1 | 0.2[m] | 0.2 m | the thickness of formation |
| R11 | 0.17945[m] | 0.17945 m | short receiver1 |
| R01 | -0.03645[m] | -0.03645 m | short receiver0 |

名称:

表达式:

描述:

```

1  model=mphopen('三层模型');
2  ModelUtil.showProgress(true);
3  model.hist.disable
4
5  %%
6  %参数设置
7  %z1 0.5 upper coil position
8  %z2 -0.5 lower coil position
9  Ct1=0.1;           %目的层电导率
10 Cs1=0.01;        %围岩电导率
11 model.param.set('sigma',Ct1);
12 model.param.set('sigma1',Cs1);
13 model.param.set('Cm',Cm1);

```

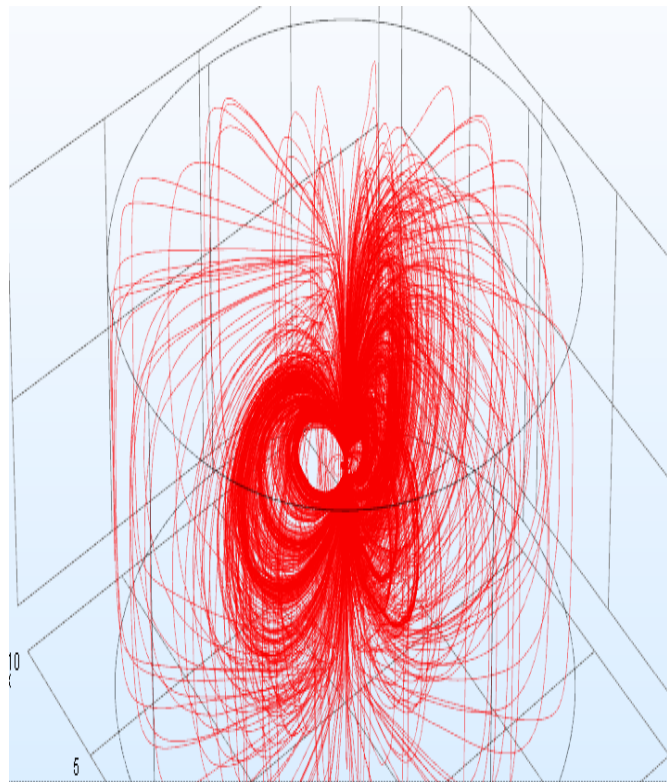
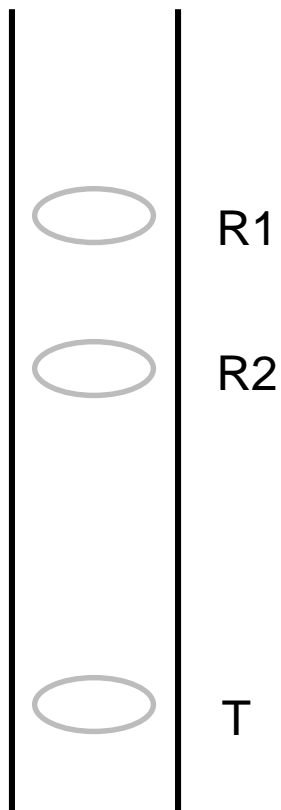
```

Ct      rxo      VB1      VR1      VB2      VR2
0.000100000000000000  0.100000000000000010  0.00000000420552895  0.000000001220020228
0.000177827941003892  0.100000000000000010  0.00000000747860469  0.000000002169536455
0.000316227766016838  0.100000000000000010  0.000000001329904394  0.000000003858039786
0.000562341325190349  0.100000000000000010  0.000000002364938903  0.000000006860660219
0.001000000000000000  0.100000000000000010  0.000000004205506995  0.000000012200100568
0.001778279410038923  0.100000000000000010  0.000000007478481336  0.000000021694793138
0.003162277660168379  0.100000000000000010  0.000000013298352304  0.000000038577193971
0.005623413251903491  0.100000000000000010  0.000000023645535376  0.000000068588750741
0.010000000000000000  0.100000000000000010  0.000000042034007363  0.000000121903436934
0.017782794100389229  0.100000000000000010  0.000000074675888329  0.000000216443360056
0.031622776601683791  0.100000000000000010  0.000000132490707754  0.000000383489143790
0.056234132519034905  0.100000000000000010  0.000000234667875709  0.000000677608228458
0.100000000000000010  0.100000000000000010  0.000000415044311914  0.000001194509119606
0.177827941003892260  0.100000000000000010  0.000000732764304050  0.000002099641910452
0.316227766016837940  0.100000000000000010  0.000001290490613128  0.000003675636799289
0.562341325190349070  0.100000000000000010  0.000002265079974514  0.000006398872482193
1.000000000000000000  0.100000000000000010  0.000003957476957047  0.000011054582842946
1.778279410038922800  0.100000000000000010  0.000006870948377826  0.000018895020007565
3.162277660168379500  0.100000000000000010  0.000011825780786385  0.000031815728355864
5.623413251903491200  0.100000000000000010  0.000020107534634762  0.000052442315439173
10.000000000000000000  0.100000000000000010  0.000033607114241150  0.000083828631072003
17.782794100389228000  0.100000000000000010  0.000054808964293300  0.000128120420631506
31.622776601683793000  0.100000000000000010  0.000086266948318732  0.000183177112997676
56.234132519034908000  0.100000000000000010  0.000128867472905324  0.000236646365912773
100.000000000000000000  0.100000000000000010  0.000178007010895597  0.000260767561301891

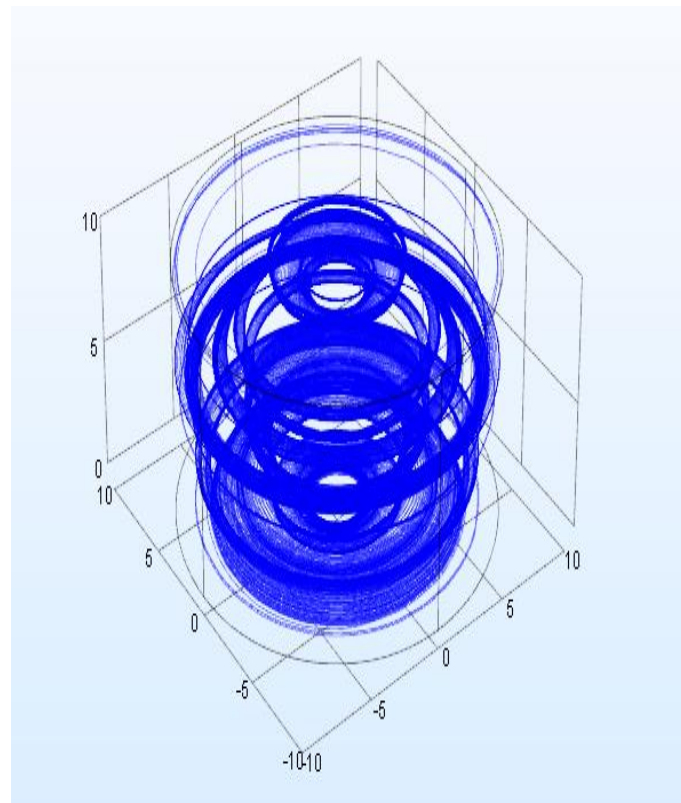
```

三、物理场分析

1. 三维中考察物理场



磁场



电场

四、随钻电磁波电阻率正演方法 (BiCGStab)

1. 正演基本理论

Maxwell 方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_s + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases}$$

本构方程:

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \end{cases}$$

$$\text{令: } \begin{cases} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \end{cases}$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J}_s$$

$$\text{边界条件: } \mathbf{A}|_s = C$$

泛函:

$$F(\mathbf{A}) = \int_V \left\{ \frac{1}{2\mu} \left[(\nabla \times \mathbf{A})^2 - k^2 \mathbf{A}^2 \right] - \mathbf{J}_s \cdot \mathbf{A} \right\} dx dy dz$$

$$\text{刚度矩阵: } [\mathbf{K}][\mathbf{A}] = [\mathbf{P}]$$

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} A_{x1} & A_{y1} & A_{z1} & A_{x2} & A_{y2} & A_{z2} & \dots & A_{xN_0} & A_{yN_0} & A_{zN_0} \end{bmatrix}^T$$

$$[\mathbf{P}] = \begin{bmatrix} P_{x1} & P_{y1} & P_{z1} & P_{x2} & P_{y2} & P_{z2} & \dots & P_{xN_0} & P_{yN_0} & P_{zN_0} \end{bmatrix}^T$$

四、随钻电磁波电阻率正演方法（BiCGStab）

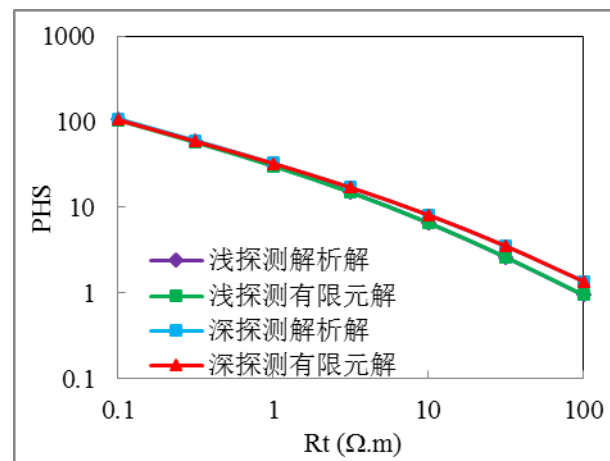
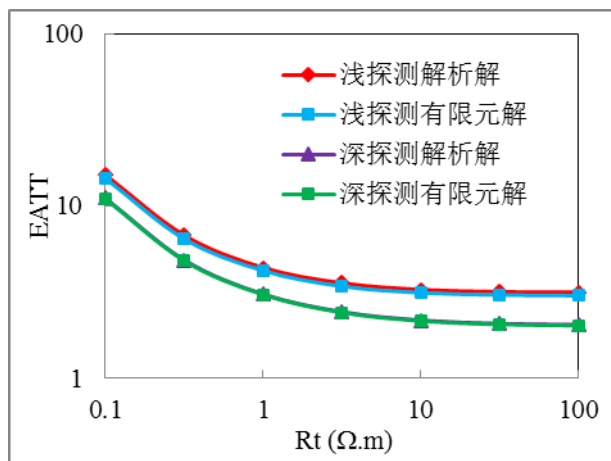
2. BiCGStab简介

稳定的双共轭梯度法（BiCGStab）是介于最速下降法与牛顿法之间的一个方法，它仅需利用一阶导数信息，但克服了最速下降法收敛慢的缺点，又避免了牛顿法需要存储和计算 Hesse1 矩阵并求逆的缺点，共轭梯度法不仅是解决大型线性方程组最有用的方法之一，也是解大型非线性最优化最有效的算法之一。

在各种优化算法中，共轭梯度法是非常重要的。其优点是所需存储量小，具有较好的收敛性，稳定性高，而且不需要任何外来参数。

四、随钻电磁波电阻率正演方法（BiCGStab）

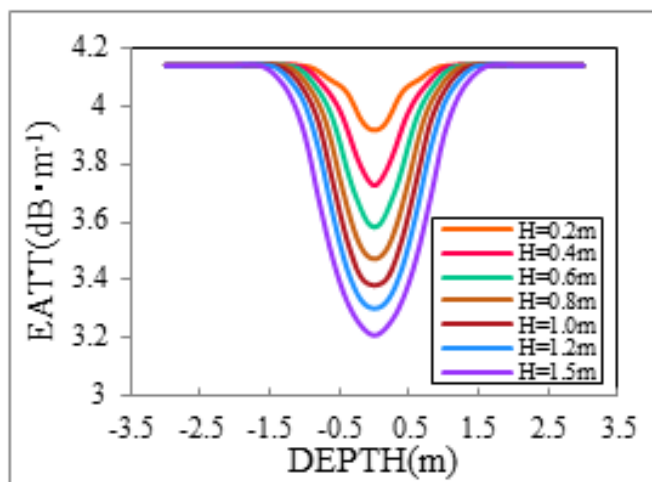
3. 算法验证



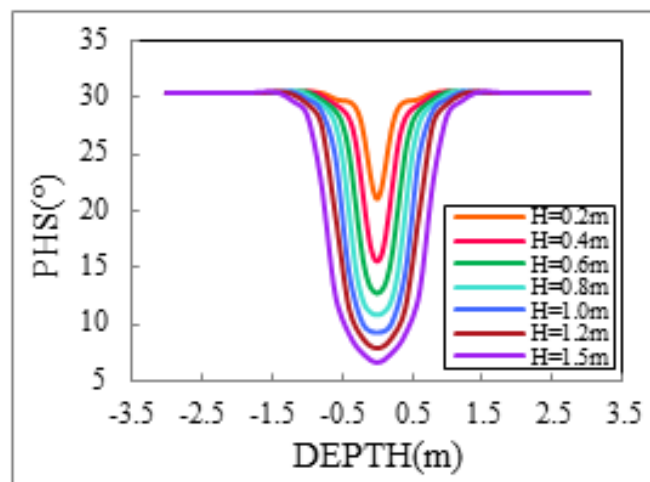
均匀地层下，利用有限元软件模拟了幅度比和相位差随电阻率的关系。有限元解与解析解对比具有较好的一致性。说明了稳定的双共轭梯度法的可靠性。另外通过不同的仿真软件，得到的结果几乎重合，也印证了这一点。

五、随钻电磁波电阻率仪器探测特性分析

1、随钻电磁波测井纵向向探测特性研究



(a)



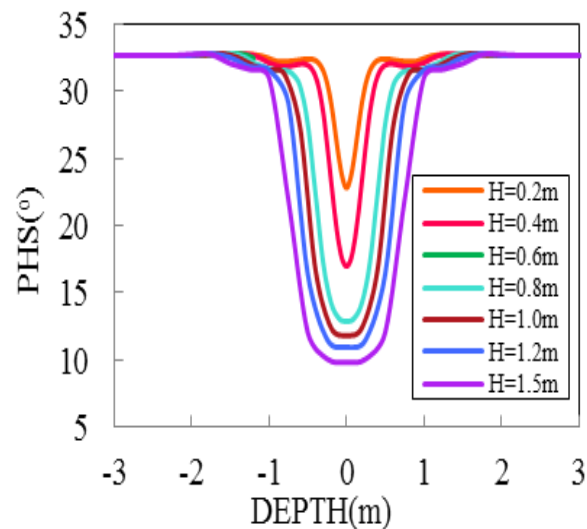
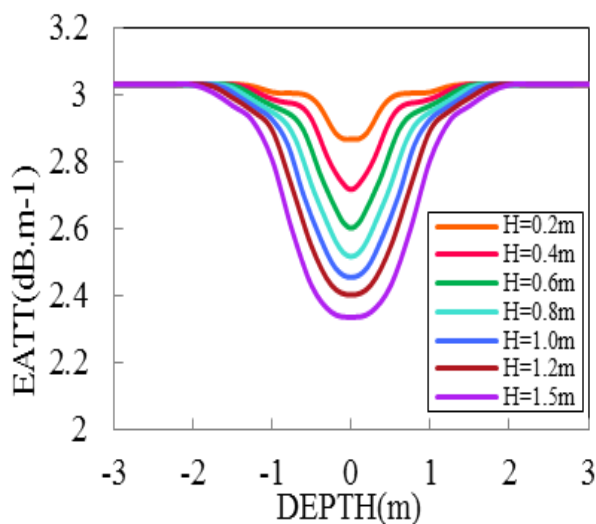
(b)

浅探测模式 (2M)

幅度比和相位差均可以分辨 0.2m 以上的地层，目的层厚度 $\geq 0.4\text{m}$ ，可用相位半幅值点来划分地层。目的层厚度 $\geq 1\text{m}$ ，可用幅度差半幅值点来划分地层。

五、随钻电磁波电阻率仪器探测特性分析

1、随钻电磁波测井纵向向探测特性研究



深探测模式 (2M)

幅度比和相位差均可以分辨 0.2m 以上的地层，目的层厚度 $\geq 0.6\text{m}$ ，可用相位半幅值点来划分地层。目的层厚度 $\geq 1.2\text{m}$ ，可用幅度比半幅值点来划分地层。同时，注意到，地层界面处由于电荷累积，出现“犄角”现象。

五、随钻电磁波电阻率仪器探测特性分析

1、随钻电磁波测井纵向向探测特性研究

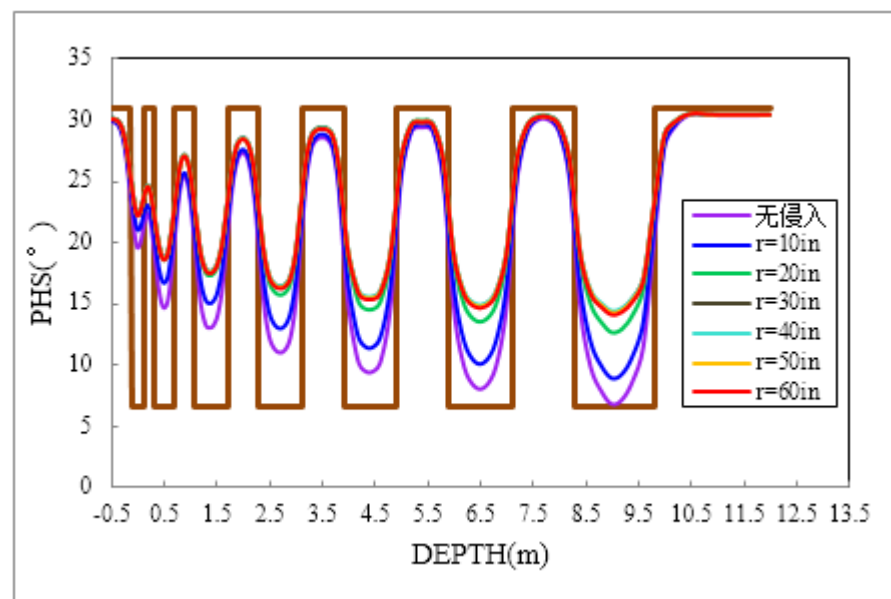
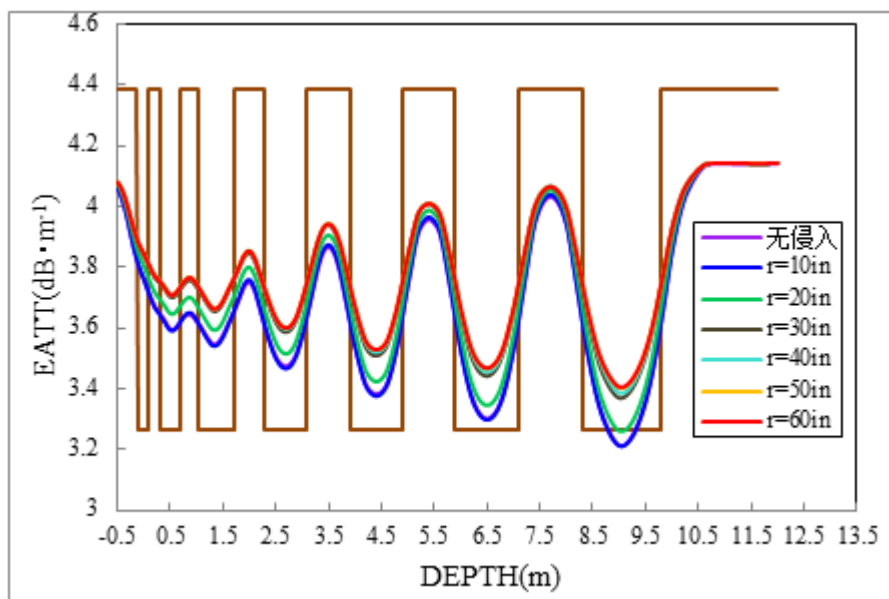
| $R_f = 1 \text{ ohm-m}$ $R_{xo} = 0.5 \text{ ohm-m}$ | 探测深度 | | 垂直分辨率** |
|--|-------------------|-------------------|-----------------|
| | 短源距 半径 | 长源距 半径 | |
| 2 MHz 相位 | 21 in. (533 mm) | 28 in. (711 mm) | 8 in. (203 mm) |
| 400 kHz 相位 | 30 in. (762 mm) | 39 in. (991 mm) | 12 in. (305 mm) |
| 2 MHz 幅度 | 34 in. (866 mm) | 44 in. (1,118 mm) | 8 in. (203 mm) |
| 400 kHz 幅度 | 52 in. (1,321 mm) | 66 in. (1,676 mm) | 12 in. (305 mm) |
| $R_f = 10 \text{ ohm-m}$ $R_{xo} = 0.5 \text{ ohm-m}$ | 探测深度 | | 垂直分辨率** |
| | 短源距 半径 | 长源距 半径 | |
| 2 MHz 相位 | 26 in. (660 mm) | 37 in. (940 mm) | 8 in. (203 mm) |
| 400 kHz 相位 | 36 in. (914 mm) | 49 in. (1,245 mm) | 12 in. (305 mm) |
| 2 MHz 幅度 | 40 in. (1,016 mm) | 53 in. (1,346 mm) | 8 in. (203 mm) |
| 400 kHz 幅度 | 60 in. (1,524 mm) | 76 in. (1,930 mm) | 12 in. (305 mm) |

APS 公司的随钻电磁波测井仪器 WPR 的商业宣传中探测特性，深浅探测模式下幅度比和相位差均可以分辨 0.2m 以上的地层。

五、随钻电磁波电阻率仪器探测特性分析

2、随钻电磁波测井径向探测特性研究

本次模拟所取参数如下：地层电阻率 $R=10\text{ohm.m}$ 围岩电阻率 $R_s=1\text{ohm.m}$ 侵入带电阻率 $R_i=3.33\text{ohm.m}$ 泥浆电阻率 $R_m=1\text{ohm.m}$ 侵入带半径 r 从 10in – 60in

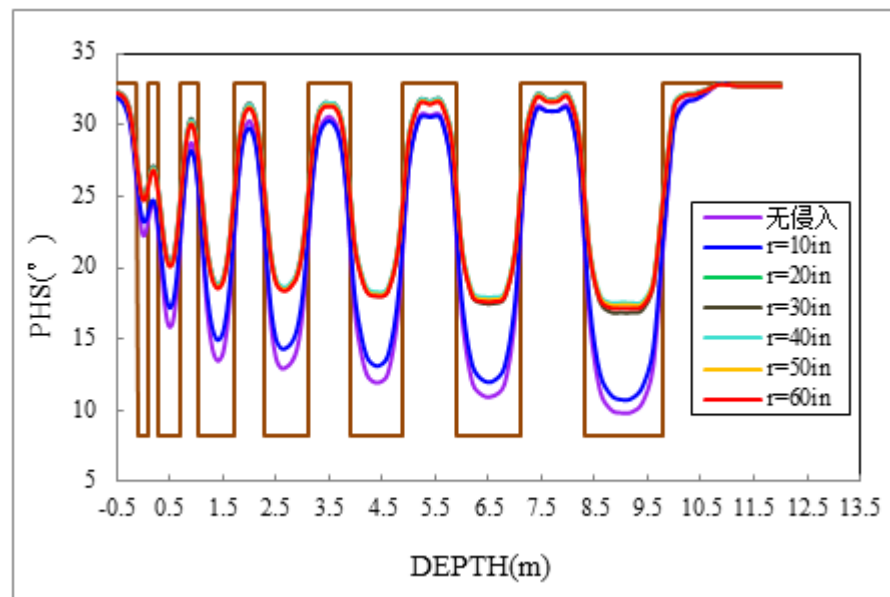
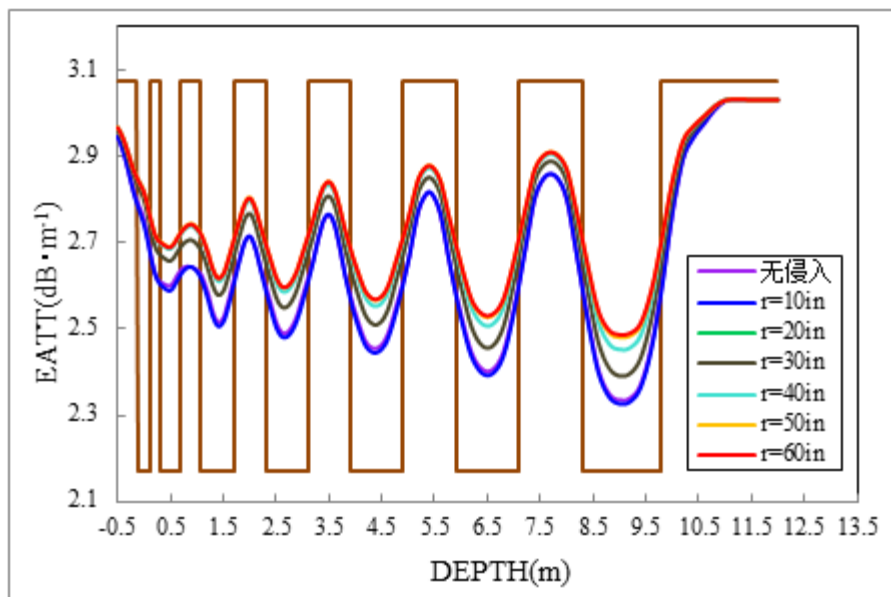


浅探测随钻电磁波测井幅度比地层脉冲图

对于浅探测，相位差和幅度比的探测深度相近，均为 30in 左右

五、随钻电磁波电阻率仪器探测特性分析

2、随钻电磁波测井径向探测特性研究



深探测随钻电磁波测井幅度比地层脉冲图

对于深探测，相位差的探测深度为 30in、幅度比的探测深度为 50in

六、结论

数值仿真结果表明该仪器商业宣传介绍的仪器探测特性在理论上是可行的，对石油公司选择和应用该测井仪器具有参考价值。

THANK YOU!