

倾斜井三分量阵列感应的测井 数字孪生系统响应研究

张妙瑜¹, 张欣月¹

1. 西安石油大学电子工程学院, 西安市, 陕西省, 中国。

摘要

三分量阵列感应测井同时测量九个磁场分量, 其丰富的分量信息可用于提取地层电阻率、地层倾角等信息。本文使用 COMSOL 有限元软件建立三分量阵列感应共面线电流源发射—接收仪器模型。利用 Compiler 功能编译输出 .exe 文件, 通过 MATLAB 软件执行输出, 研究斜井中共面线圈系的测井响应, 考察仪器周围涡流, 揭示不同测井响应的影响机理。研究表明, 三分量阵列感应共面线电流源响应计算模块挂在测井数字孪生平台运行稳定, 仪器共面响应取决于电导率对比度、倾角等因素。当倾角变化时, 泥浆电导率基本不影响视电导率, 地层电导率对子阵列 3 影响较大; 受共面线圈系本身结构影响, 长阵列视电导率出现负值; 感应电流的 yoz 面箭头流线图解释了倾斜地层中测井曲线出现展宽现象的本质。

关键词: 三分量阵列感应测井; 共面影响因素; 倾角; 电导率

简介

常规感应测井仪器只有 Z 方向的线圈, 只能测量水平方向的平均电阻率。三分量感应测井系统分别在 X、Y、Z 三个方向布置三组相互垂直发射—接收线圈对, 可直接测量地层的水平电阻率和垂直电阻率, 通过测量两个交叉分量还可得出地层的倾角和方位, 从而可以为储层评价提供更准确的信息^[1]。

王昌学等利用有限差分方法模拟了垂直井中的多分量感应测井响应; 汪宏年等将数值模式匹配算法推广到水平分层和柱状分层并存的复杂非均匀各向异性地层中多分量感应测井响应数值模拟中, 取得了非常好的数值结果; Hou 等进一步利用基于耦合势的有限差分方法模拟了倾斜井中多分量感应主分量的测井响应^[2]。

本文使用 COMSOL 有限元软件建立三分量阵列感应共面线电流源发射—接收仪器模型, 利用 Compiler 编译输出 .exe 文件, 使用 Matlab 执行调用、挂在测井数字孪生平台, 研究倾斜井三分量阵列感应的测井数字孪生系统响应, 确定测井数字孪生系统主要参数, 并对精度和稳定性进行分析; 研究斜井中共面线圈系的测

井响应, 考察仪器周围涡流, 揭示不同测井响应的影响机理。

理论

严格的感应测井理论是建立在 Maxwell 方程的基础之上。感应测井中, 通以交变电流的发射线圈在空间产生的是时谐电磁场。时谐电磁场的 Maxwell 方程为^[3]:

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -i\omega B \\ \nabla \times H &= i\omega D + J \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \cdot D &= \rho_v\end{aligned}$$

各向同性媒质中, 场量间的关系为

$$\begin{aligned}D &= \epsilon E \\ B &= \mu H \\ J &= \sigma E\end{aligned}$$

本模型 COMSOL 模型开发器中方程形式为:

$$\begin{aligned}\nabla \times H &= J \\ B &= \nabla \times A \\ J &= \sigma E + j\omega D + J_e \\ E &= -j\omega A\end{aligned}$$

E 表示电场强度, 单位为 V/m; H 表示磁场强度, 单位为 A/m; B 表示磁感应强度, 单位为 (Wb/m²); D 表示电位移矢量, 单位为 C/m²; ρ_v 表示体电荷密度, 单位为 C/m³; J 表示磁流密度矢量, 单位为 A/m²; μ 表示磁导率, 单位为 H/m, 真空中的磁导率为 μ₀ = 4π × 10⁻⁷ H/m; ε 表示介电常数, 单位为 F/m。

本文研究三分量阵列感应共面线圈系的测井响应。如图 1 所示是共面三线圈系结构, T、B 和 R 分别是发射线圈、屏蔽线圈、接收线圈, 线圈缠绕匝数分别为 N_T、N_B、N_R, 其对应线圈面积为 A_T、A_B、A_R, 发射线圈到屏蔽线圈间的距离为 L_{TB}, 发射线圈到接收线圈间的距离为 L_{TR}, 线圈移动位置如表 1 所示。

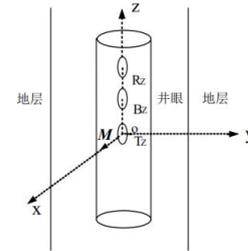


图 1. 是共面三线圈系结构

发射线圈中的交变电流在接收线圈中产生的电动势为:

$$V_{xTR} = \frac{i\omega\mu I_T N_T A_T N_R A_R}{4\pi L_{TR}^3} e^{ikL} (1 - ikL - k^2 L^2)$$

发射线圈中的交变电流在屏蔽线圈中产生的电动势为:

$$V_{xTB} = \frac{i\omega\mu I_T N_T A_T N_B A_B}{4\pi L_{TB}^3} e^{ikL} (1 - ikL - k^2 L^2)$$

发射线圈中的交变电流在接收线圈中产生的仪器常数为:

$$K_{xTR} = \frac{\omega^2 \mu^2 I_T A_T A_R N_T N_R}{8\pi L_{TR}}$$

发射线圈中的交变电流在屏蔽线圈中产生的仪器常数为：

$$K_{xTB} = \frac{\omega^2 \mu^2 I_T A_T A_R N_T N_B}{8\pi L_{TB}}$$

发射线圈中的交变电流在接收线圈中产生的电导率为：

$$\sigma_{xTR} = \frac{V_{xTR}}{K_{xTR}}$$

发射线圈中的交变电流在屏蔽线圈中产生的电导率为：

$$\sigma_{xTB} = \frac{V_{xTB}}{K_{xTB}}$$

三线圈系的加权平均视电导率为：

$$\sigma_{xxa} = \frac{\frac{N_T N_R}{L_{TR}} \sigma_{xTR} + \frac{N_T N_B}{L_{TB}} \sigma_{xTB}}{\frac{N_T N_R}{L_{TR}} + \frac{N_T N_B}{L_{TB}}}$$

其中， I_T 是电流强度， ω 是电流变化的角频率， μ 是磁导率。

表 1.三分量阵列感应测各子阵列线圈系参数

子阵列	线圈系位置		共面线圈系匝数	
	主接收线圈 (z/m)	屏蔽线圈 (z/m)	主接收线圈 /匝	屏蔽线圈 /匝
1	0.150	0.07482	50	-8
2	0.225	0.15011	62	-20
3	0.300	0.22389	74	-32
4	0.375	0.30173	40	-21
5	0.525	0.3770	34	-16
6	0.675	0.52667	80	-38
7	0.975	0.67386	124	-42
8	1.800	1.35145	124	-54

斜井阵列感应测井数值计算方法研究

本文主要应用于三维模型、物理场接口为磁场(mf)、频域的研究中。

模型建立

以基本的径向两层地层为研究对象，经过多次试验，将圆柱的半径设置为趋肤深度的三倍，本文的地层的半径为 200m，高为 400m，井眼半径为 0.1016m，高为 26m，仪器半径为 0.03m，高为 6m，仪器倾角设为 30°、45°、60°，围岩的电导率为 0.001 至 10.0S/m，井眼中设有泥浆，泥浆电导率为 0.01 至 100.0S/m，仪器的电导率为 0.000001S/m。如图 2 所示，本模型在 yoz 面发射线圈的法线与 x 轴重合，屏蔽和接收线圈与发射线圈共面，位置随子阵列 1-8 源距移动。

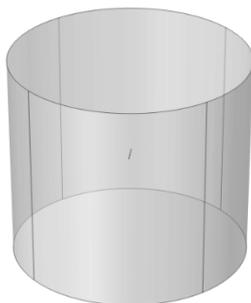


图 2. COMSOL 建立的倾斜井两层地层模型

网格剖分

网格剖分是 COMSOL 计算中非常重要的一个部分，好的网格剖分不仅可以保证解的有效性，而且可以节约计算时间。三维测井数值计算中，整体模型的网格剖分一般遵循从内到外，从小到大的原则，具体可按图 3 所示：

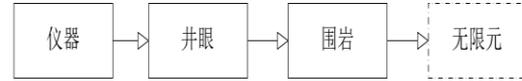


图 3.数值测井网格剖分顺序

分析上图所示三维倾斜井阵列感应测井模型特征，得出如下网格剖分方法^[4]：

(1) 仪器整体的剖分采用自由四面体网格，设定网格最大尺寸与最小尺寸，通过控制网格增长率达到网格剖分密度均匀，本模型中最小单元 0.01m，最大单元 0.5m。

(2) 井眼处的网格剖分是网格剖分的一个难点，剖分时易发生重叠混乱，所以在几何中需要做一个差集，利用围岩减去井眼辅助，再重新设置一个井眼，即可更好的划分域，实现地层网格与仪器网格的完美衔接。本模型中最小单元 0.05m，最大单元为 1m。

(3) 围岩的网格剖分在过渡域的基础上可适当增大网格尺寸，最小单元 8m，最大单元 40m。按照上述方法，对所建倾斜井阵列感应测井模型进行网格剖分，结果如图 4 所示。

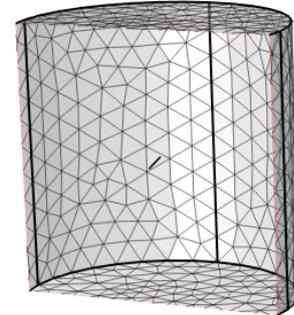


图 4.网格剖分图

仿真 APP 的使用

应用 COMSOL 平台中 APP 开发器，将建立好的模型通过制作表单的方式，利用 Compiler 功能生成可执行文件(.exe)，如图 5 所示，在仿真 APP 里可以进行数值调控，输入参数可变且结果也可在表格里输出，在 MATLAB 里通过 system 函数调用.exe 文件也可控制参数的写入读出，整个过程如图 6 所示，在 MATLAB 中写入所需参数并保存为.txt 文件后，即可在 COMSOL 中将参数读入，生成的数据通过 MATLAB 进行计算后保存为 Excel 文件输出。



图 5. 编译好的 exe 文件

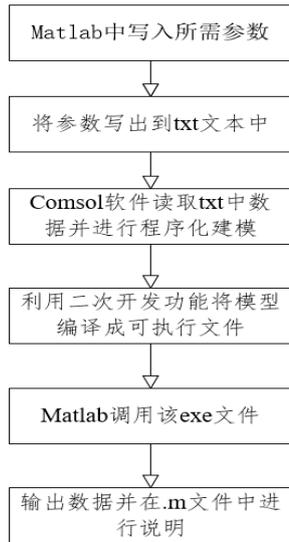


图 6. 阵列感应测井数字孪生系统计算流程图

模型有效性分析

为了验证模型的可靠性和网格剖分的适用性，对计算结果进行分析。将 COMSOL 计算的 8 个阵列的数值解与解析解进行对比分析，以验证模型的有效性。取均匀地层电导率为 1S/m，仪器倾角为 0 度，工作频率为 20KHz 时，计算测井响应的数值解，图 7 是共面线圈系子阵 1、5、8 的视电导率数值解与解析解对比图，如表 2 所示，子阵列 1-8 的解析解与数值解基本吻合，最大相对误差为 0.92655%，说明建立的模型和网格剖分可用于非均匀、仪器倾斜的响应特性计算。

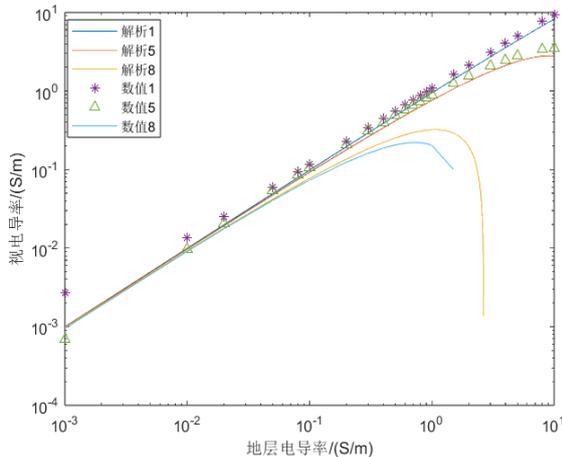


图 7. 共面线圈系视电导率图

表 2. 数值解与解析解的相对误差分析

子阵列	数值解 (S/m)	解析解 (S/m)	相对误差
1	0.9218	0.9303	0.92655%
2	0.8881	0.8897	0.17257%
3	0.8482	0.8489	0.0826%
4	0.8085	0.8091	0.07156%
5	0.7005	0.7013	0.12462%
6	0.6662	0.6666	0.04533%
7	0.5415	0.5417	0.03994%
8	0.1859	0.1860	0.04972%

径向非均匀共面响应分析

图 8-11 为子阵列 1、3、5、8 不同仪器倾角时，泥浆和地层电导率对测井响应的影响和角度变化对比图，可以看出^[5-7]：

(1) 各子阵列的响应特性存在较大不同，但整体上，随阵列越长，泥浆的影响越小。

(2) 短阵列 1，在 30°、45° 和 60° 时受倾角影响不明显，视电导率随泥浆电导率线性增大；地层电导率也出现了同样的线性影响，当泥浆电导率为 0.01S/m，地层电导率为 0.001S/m 时，视电导率最小，为 0.0027S/m。

(3) 短阵列 3 的共面线圈系视电导率在大于 45° 的情况下影响明显，当地层电导率为 0.001S/m，泥浆电导率为 100S/m 时，45° 倾角共面线圈系的视电导率最小为 -3.429 S/m，60° 倾角共面线圈系的视电导率最小为 -3.467 S/m，视电导率随着泥浆电导率的增大线性减小且出现负值。

(4) 子阵列 5 随倾角变化的视电导率变化不太明显。当泥浆电导率较小时，视电导率随着地层电导率增大而非线性增大。随泥浆电导率增大，视电导率减小，出现负值，不随地层电导率增大而增大。此时测量值几乎不能反应地层信息。

(5) 共面线圈系的子阵列 8 不受泥浆电导率影响，但是其趋肤效应十分严重。地层电导率大于 0.7 S/m，随地层电导率的增大，视电导率线性减小；当地层电导率为 0.7 S/m，泥浆电导率为 0.01S/m 时，30° 倾角共面线圈系的视电导率 0.2206 S/m，45° 倾角共面线圈系的视电导率 0.2206 S/m，60° 倾角共面线圈系的视电导率为 0.2205S/m。可见，共面线圈系的子阵列 8 受仪器倾角的改变影响不大。

响应机理分析

三分量阵列感应测井响应中，X 方向共面线圈系的响应特性受仪器倾角影响明显^[8]。以下从电磁场理论出发，以三线圈系为例，分析三分量阵列感应测井共面线圈系的响应机理。图 12 是地层电导率为 1S/m，泥浆电导率为 10S/m，仪器倾斜角度为 45° 时，共面发射线圈在 yoz 截面形成的涡流分布流线图，箭头的方向表示涡流方向，箭头的聚集程度表示涡流的强弱。发射线圈附近沿井壁出现明显的回流涡流；随着线圈间距增大，斜入射感应电流的切向分量形成的回流也导致井眼影响增大，随线圈间距、井径和泥浆电导率不同，影响的程度不同。

图 13 是 J_{iz} 和 J_{iy} 的一维感应电流密度曲线，通过读取对应井眼位置，0° 时井眼大小为 0.2032m，45° 时数值显示为 0.287m，井眼大小展宽，其展宽值与井眼的倾角有关。

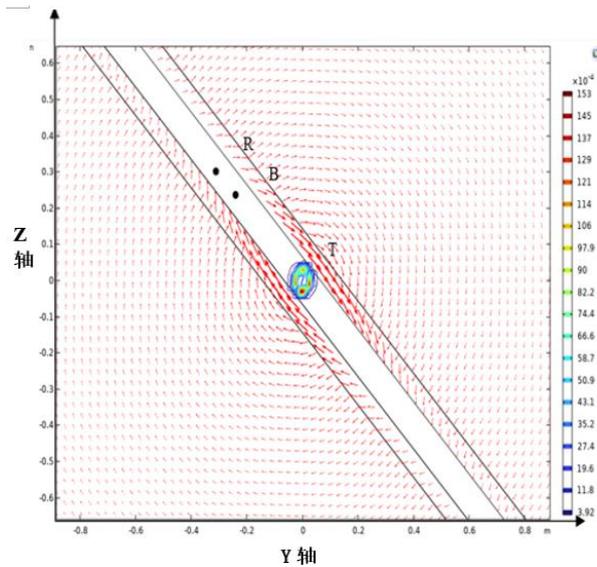


图 12.子阵列 3 的 45° 涡流分布流线图

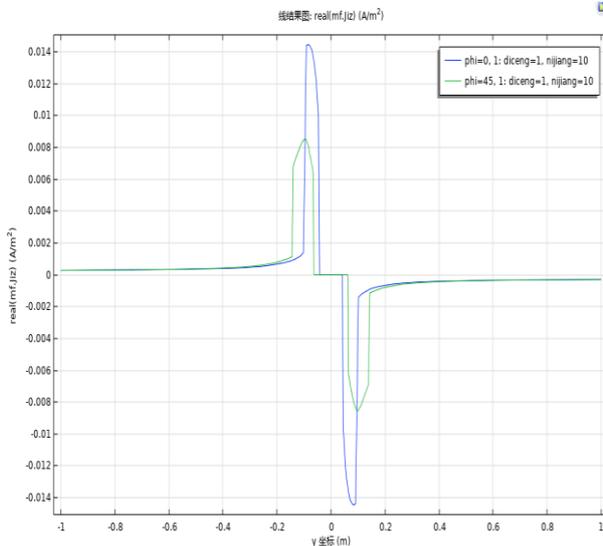


图 13.(1) J_{iz} 一维感应电流密度曲线图

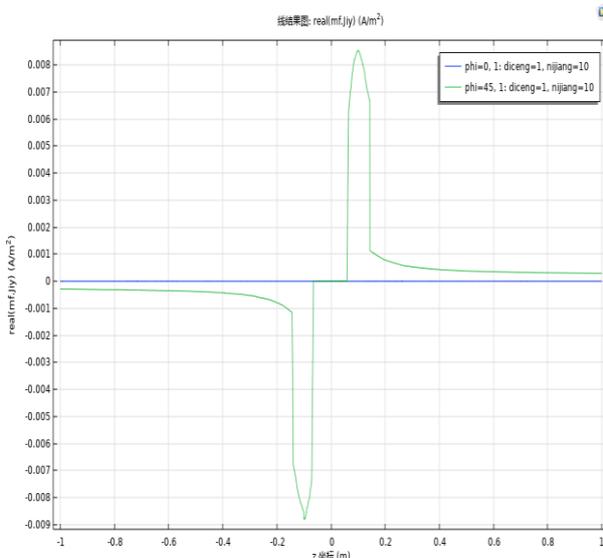


图 13.(2) J_{iy} 一维感应电流密度曲线图

结论

本文建立两层径向层状地层中倾斜井响应的正演计算, 研究倾斜井三分量阵列感应的测井数字孪生系统响应, 使用 MATLAB 软件执行 COMSOL APP 开发者中的 Compiler 功能生成的 .exe 文件, 并最终生成 MATLAB 可执行文件后挂载在测井数字孪生平台运行稳定。在该系统上计算斜井三分量阵列感应仪器在不同泥浆电导率、不同地层电导率和仪器倾角对测井响应的影响, 当倾角变化时, 泥浆电导率基本不影响视电导率, 地层电导率对子阵列 3 影响较大; 受共面线圈系本身结构影响, 长阵列视电导率为负值。考察发射线圈周围和各线圈之间的涡流分布, 在发射线圈附近沿井壁出现明显的回流涡流; 随着线圈间距增大, 斜入射感应电流的切向分量形成的回流导致井眼影响增大, 随线圈间距、井径和泥浆电导率不同, 影响的程度不同。

参考文献

- [1] 张妙瑜. 复杂地层中三分量阵列感应测井方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2019.
- [2] 张焯, 商庆龙, 林藜, 等. 倾斜井各向异性地层中多分量感应测井响应的有限体积模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S2): 417-423.
- [3] 季新标, 李爱勇, 丰扬, 等. 三分量感应测井仪线圈设计探讨 [J]. 中国仪器仪表, 2022, (03): 78-84.
- [4] 李宇腾. 水平井阵列感应测井正反演方法与应用研究[D]. 西安石油大学, 2017.
- [5] 刘小玉, 江有宏, 白彦, 等. 三维感应线圈系极性检测方法 with 试验研究 [J]. 测井技术, 2024, 48 (03): 348-354.
- [6] 肖丽, 范晓敏, 张丽华, 等. 感应测井线圈系探测特性数值模拟实验 [J]. 中国教育技术装备, 2023, (14): 57-59.
- [7] 邓少贵, 刘天淋, 蔡联云, 等. 基于多分量感应测井的地层水平电阻率快速提取方法及应用 [J]. 地球物理学报, 2021, 64 (06): 2199-2209.
- [8] 仵杰, 史盼盼, 陈延军, 等. 阵列感应测井在斜井和水平井中的响应特性[J]. 测井技术, 2016, 40(02): 152-160.
- [9] 王钰楠. 阵列感应测井的倾角影响特性研究 [D]. 西安石油大学, 2018.
- [10] 张鹏. 利用三维感应测井交叉分量探测地层相对倾角方法研究[D]. 燕山大学, 2023.

致谢

本文受 2024 年度陕西省科技计划面上项目: 融合数字孪生的大斜度井/水平井动态建模与参数估计 (2024JC-YBMS-241) 的支持。

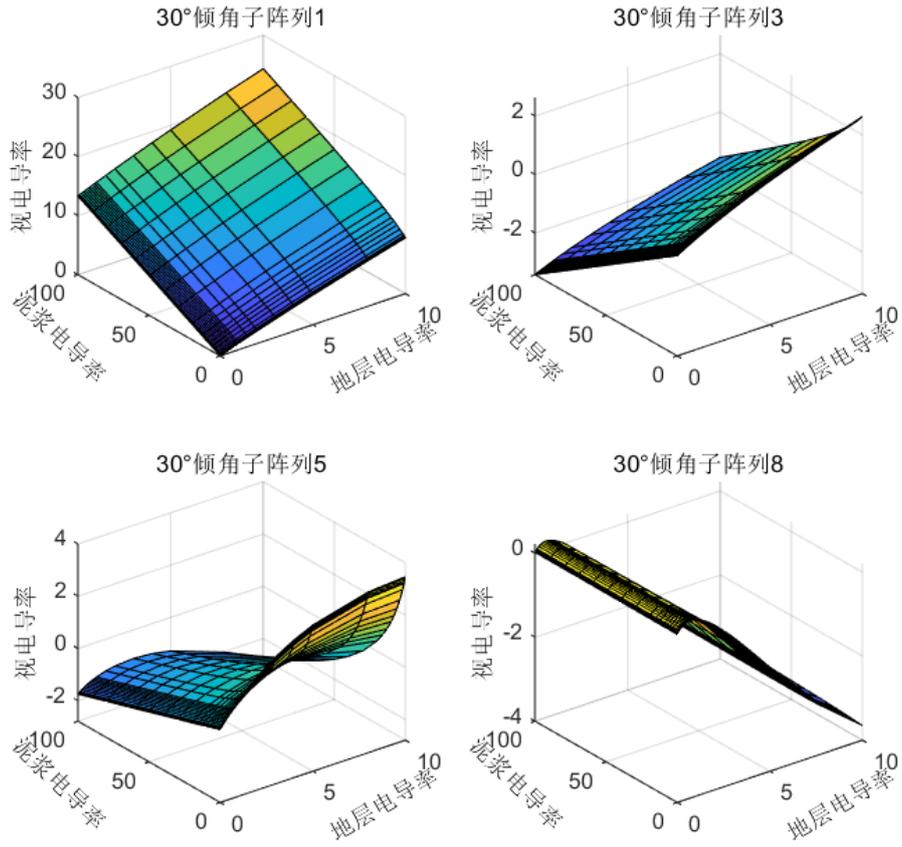


图 8.30 度倾角子阵 1、3、5、8 视电导率图

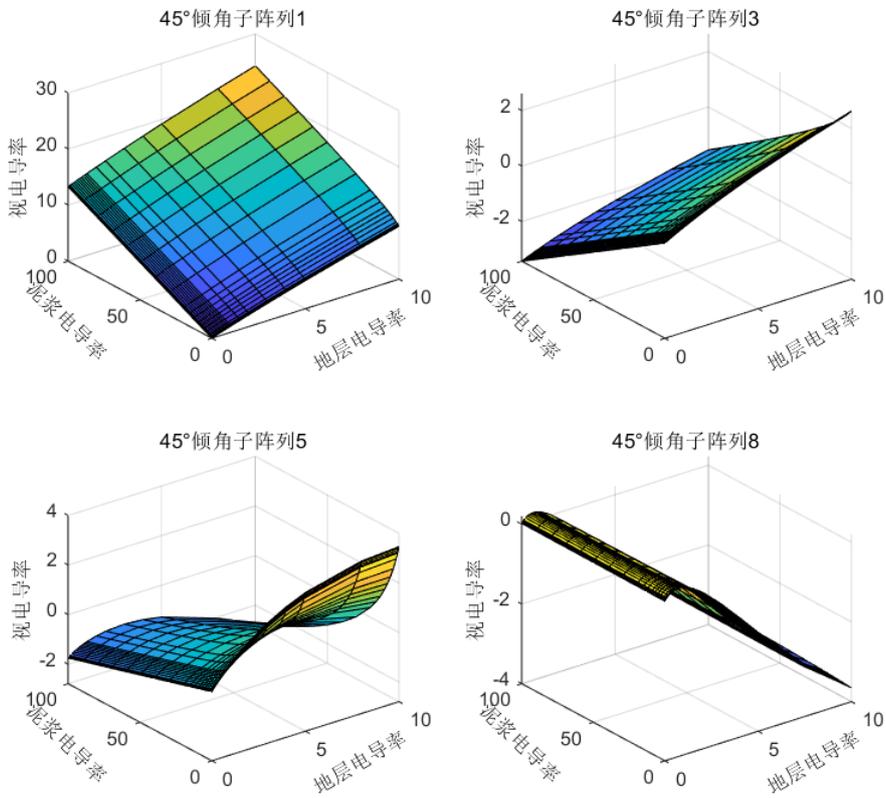


图 9.45 度倾角子阵 1、3、5、8 视电导率图

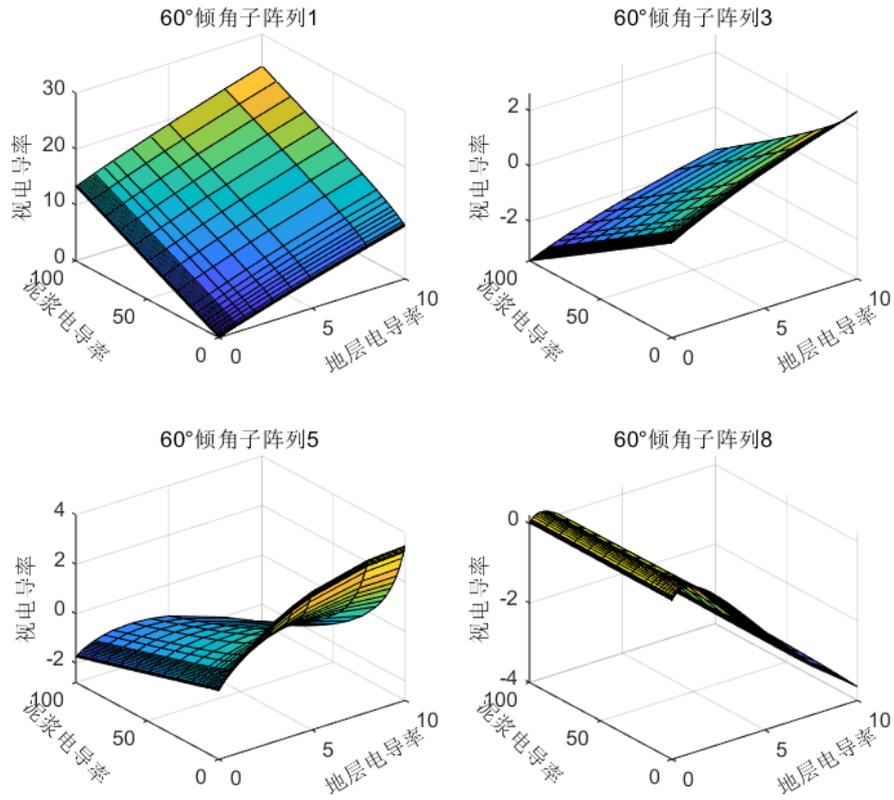


图 10.60° 倾角子阵 1、3、5、8 视电导率图

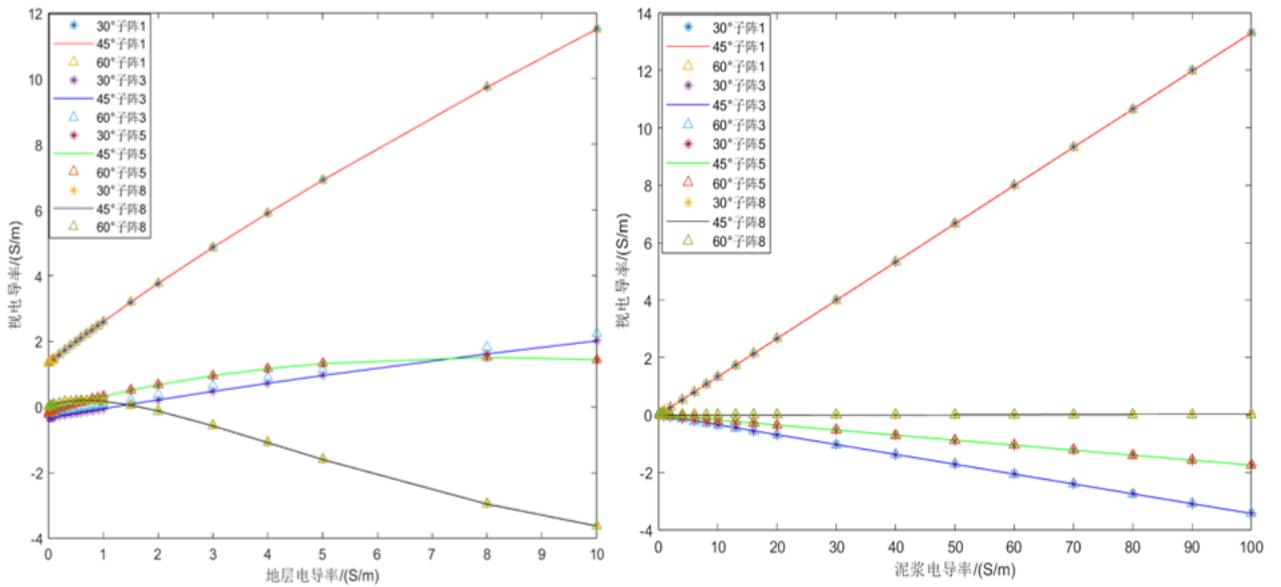


图 11.子阵列 1、3、5、8 角度变化对比图