

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.01.010

三分量阵列感应共面线圈系井眼影响研究^{*}

张妙瑜^{1,2} 郭宝龙¹ 仵杰²

(1. 西安电子科技大学 智能控制与图像工程研究所 西安 710071;

2. 西安石油大学 电子工程学院 西安 710065)

摘 要:三分量阵列感应测井仪器是测量复杂地层信息的重要工具,消除共面线圈系的井眼影响是仪器设计与应用的关键。应用有限元软件,数值计算分析居中井眼中三分量阵列感应的共面线圈系与共轴线圈系的响应特性,对比共面线圈系实验室建模仿真与现场试验结果。结果表明:除最短子阵列,其余共面子阵列的井眼影响与共轴子阵列显著不同,井眼影响导致测井响应为负值;最长子阵列虽然井眼影响小,但趋肤效应影响严重,地层电导率测量范围比共轴线圈系小得多。通过计算分析共面线圈系在井眼周围不同泥浆和地层电导率时的涡流分布特性,揭示了共面线圈系与共轴线圈系差别较大的原因。提出新的2发1收线圈系结构,从几何因子角度分析了它在减小井眼影响、降低测井负响应等方面的优势。研究成果为三分量阵列感应测井仪器的研制和应用奠定了理论基础。

关键词:三分量阵列感应测井;共面线圈系;井眼影响

中图分类号: TN98; P631.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.20

Study of borehole effect of tri-axial array induction on coplanar coil system

Zhang Miaoyu^{1,2} Guo Baolong¹ Wu Jie²

(1. Institute of Intelligent Control and Image Engineering, Xidian University, Xian 710071, China;

2. School of Electronic Engineering, Xian Shiyou University, Xian 710065, China)

Abstract: The tri-axial array induction logging tool is an important tool for measuring complex formation information, but the key of design and application is to eliminate borehole effects of coplanar coil systems. The response characteristics of coplanar coil systems and coaxial coil systems of the tri-axial array induction are analyzed numerically in the center hole by the FEM, and field experiment results are compared with modeling simulation on the coplanar coil systems. The results show that the borehole effects of coplanar coil systems are significantly different from that of coaxial coil systems besides the shortest sub-array. The borehole effect causes the negative logging response. For the longest sub-array, although the borehole effect is week, its skin effect is serious and the measurement range of formation conductivity is smaller than that of the coaxial coil systems. It reveals the reason that the greater difference is occurred between the coplanar coil systems and the coaxial coil systems through the eddy current distribution of coplanar coil systems around the borehole at different mud and formation conductivity. A new coil system which has two transmitters and one receiver is raised and its advantages are analyzed on the decreasing borehole effect and reducing negative response from the geometrical factor. The research lays a theoretical basis for the development and application of the tri-axial induction logging tool.

Keywords: tri-axial array induction logging; coplanar coil system; borehole effect

1 引 言

发射和正交接收线圈组成,最初设计思想是通过测量薄交互层的水平电导率和垂直电导率来获取砂岩和泥岩电导率。实际上,由于直接测量到地层张量电导率,因此还可以获取地层的倾角和方位角等丰富的信息^[1]。三分量

三分量阵列感应测井仪器的线圈系探头由3个正交

收稿日期:2016-07 Received Date: 2016-07

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(41474108)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2013JM5011)、2014年国家级大学生创新创业训练计划(201410705033)资助项目

阵列感应测井仪器的提出使人们更准确地认识井眼周围地层的三维特性,既可用于直井,也可用于斜井和水平井^[2]。但是,由于仪器的共面线圈系产生的电流沿井眼纵向向空间流动,比共轴线圈系形成的水平面涡流复杂得多,不再具有关于仪器轴的旋转对称性^[3],因而受井眼环境影响严重。文献[4]对三分量感应测井仪器在水罐模拟装置中进行了数值模拟;文献[5]指出由于共面线圈系复杂的电磁场分布,它的响应特性完全不同于共轴线圈系。

本文将建立三维数值计算模型,计算研究居中井眼中三分量阵列感应测井共面线圈系的井眼影响,详细分析共面线圈系与共轴线圈系响应特性不同的原因,为仪器设计和测井解释提供理论依据。

2 基于 COMSOL 的模型建立和网格剖分

2.1 地层模型的建立

本文研究的地层模型是最基本的径向三层模型,仪器、井眼和地层,不考虑纵向围岩影响。三分量阵列感应测井仪器的线圈系由8个三分量子阵列组成,居中置于井中,如图1所示。井眼为无限长,地层无论是径向还是纵向都是无限大的。选取直角坐标系(x, y, z),发射线圈位于坐标原点。 z 方向称为纵向,与其垂直的 x 和 y 称为水平方向。水平发射线圈与水平接收线圈处于同一平面,因此称为共面线圈系。由于共面线圈系产生的电磁场比共轴线圈系复杂的多,目前本文只研究居中时共面线圈系测井响应的井眼影响。

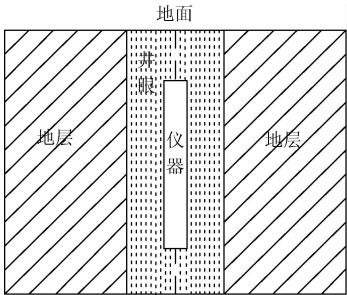


图1 三分量阵列感应测井模型剖面
Fig.1 Profile of the tri-axial array induction logging

2.2 三分量阵列感应测井仪器

传统感应测井仪器的线圈系轴线与仪器轴(z 轴)是重合的,只有 z 方向的线圈,因此只能测量水平方向的电导率,对于具有电各向异性特征的油藏测量结果显示,其提供的电阻率信息非常有限。该仪器的线圈系结构如图2(a)所示^[6]。而三分量感应测井仪的线圈系由 $x、y、z$ 3个相互正交的线圈组成,因此可以同时探测水平方向和垂直方向的电导率。其中 z 向线圈的探测方法与传统仪器相同,只能探测水平电导率,而 x 向和 y 向线圈由于

其信号穿越了垂直方向的地层,产生的仪器响应的大小主要取决于垂直方向的地层电导率,因此能探测垂直电导率^[7]。本文研究的三分量阵列感应测井仪器包含8个子阵列,其位置分布类似于阵列感应测井仪器^[8],每组子阵列由发射线圈、接收线圈和屏蔽线圈组成,只是每一位置均有3个正交线圈,如图2(b)所示。表1是三分量阵列感应测井各子阵列共面线圈系的参数。

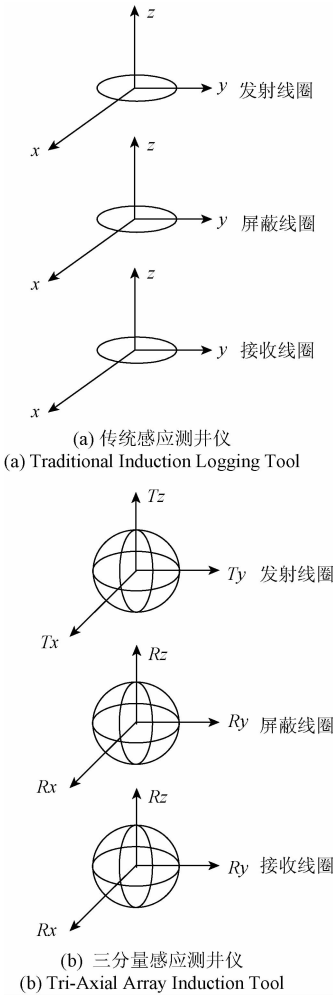


Fig.2 Schematic diagram of coils configuration

表1 三分量阵列感应测井各子阵列共面线圈系的参数
Table 1 Parameters of sub-array in the tri-axial array induction logging

子阵列	主接收线圈		屏蔽线圈	
	L/m	匝数	L/m	匝数
1	0.15	50	0.074 82	-8
2	-0.225 0	62	-0.150 11	-20
3	0.300 0	74	0.223 89	-32
4	-0.3750	40	-0.301 73	-21
5	0.525 0	34	0.377 0	-16
6	-0.675 0	80	-0.526 67	-38
7	0.975 0	124	0.673 86	-42
8	1.800 0	124	1.351 45	-54

2.3 三分量阵列感应测井的视电导率

在感应测井中,发射线圈施加交变电流,线圈的半径相对于接收线圈距离小得多,可等效为磁偶极子源^[9],此时,磁偶极子源产生的电磁场满足的 Maxwell 方程为^[10]:

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon_f \vec{E} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu \vec{H} + \vec{M}_T \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $\vec{H}$ 为磁场强度 (A/m); $\vec{E}$ 为电场强度 (A/m); ω 为电流变化的角频率 (rad/s); ϵ_f 为复介电常数 $\epsilon_f = \epsilon - j\omega/\sigma$, 其中 ϵ 为介电常数 (F/m), σ 为地层电导率 (S/m); μ 为磁导率 (H/m); $\vec{M}_T$ 为磁偶极子 ($A \cdot m^2$)^[11]。

每个三分量子阵列的感生电动势均为张量电压^[12]:

$$\vec{\bar{V}} = \begin{bmatrix} V_{xx} & V_{xy} & V_{xz} \\ V_{yx} & V_{yy} & V_{yz} \\ V_{zx} & V_{zy} & V_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: V_{ij} 的第一个下标表示发射方向,第二个下标为接收方向。在均匀地层中,电磁场具有很好的轴对称性,即, $V_{xy} = V_{yx}$, $V_{xz} = V_{zx}$, $V_{yz} = V_{zy}$ 。此外,在均匀地层中, xx 和 yy 完全一致,即 $V_{xx} = V_{yy}$ 。本文只给出 V_{zz} 、 V_{xx} 和 V_{xy} 磁场分量,其他按照对称性得到^[12]。

$$V_{zz} = \frac{-j\omega\mu N_{Tz}N_{Rz}A_{Tz}A_{Rz}I_{Tz}}{2\pi L^3} e^{-jkL} (1 + jkL) \quad (4)$$

$$V_{xx} = \frac{-j\omega\mu N_{Tx}N_{Rx}A_{Tx}A_{Rx}I_{Tx}}{4\pi L^3} e^{-jkL} [1 + jkL + k^2 L^2] \quad (5)$$

$$V_{xy} = \frac{-j\omega\mu N_{Tx}N_{Rx}A_{Tx}A_{Rx}I_{Tx}xy}{4\pi L^5} e^{-jkL} [3(1 + jkL) - k^2 L^2] \quad (6)$$

式(4)~(6)中,第一个下标表示发射线圈方向,第二个下标表示接收线圈方向。 N_{Tz} 、 N_{Rz} 、 N_{Tx} 、 N_{Rx} 为 z 方向和 x 方向发射、接收线圈的匝数, A_{Tz} 、 A_{Rz} 、 A_{Tx} 、 A_{Rx} 为 z 方向和 x 方向发射和接收线圈的面积, I_{Tz} 、 I_{Tx} 为 z 方向和 x 方向发射线圈的电流强度, L 为发射线圈与接收线圈之间的距离, k 为波数, $k^2 \approx -j\omega\mu\sigma$ 。

本文研究各向同性地层中三分量阵列感应测井的响应机理,其交叉分量很小^[13],可以忽略。 xx 和 yy 分量相同,因此以下研究中只考虑 zz 和 xx 分量,对应的电导率分别为^[12]:

$$\sigma_{zza} = \frac{2j}{L_{zz}^2 \omega \mu} [e^{-jkL_{zz}} (1 + jkL_{zz}) - 1] \quad (7)$$

$$\sigma_{xxa} = \frac{-2j}{L_{xx}^2 \omega \mu} [e^{-jkL_{xx}} (1 + jkL_{xx} - k^2 L_{xx}^2) - 1] \quad (8)$$

式(7)和(8)中, L_{zz} 和 L_{xx} 表示共轴双线圈系 (Tz , Rz) 和共面双线圈系 (Tx , Rx) 发射线圈与接收线圈之间的距离。对于三线圈系子阵列,共轴和共面线圈系的视电导率公式均为^[12]:

$$\sigma_a = \frac{\frac{N_T N_R}{L_{TR}} \sigma_{aTR} + \frac{N_T N_B}{L_{TB}} \sigma_{aTB}}{\frac{N_T N_R}{L_{TR}} + \frac{N_T N_B}{L_{TB}}} \quad (9)$$

式中: N_T 、 N_R 和 N_B 分别是发射、接收和屏蔽线圈的匝数, L_{TR} 和 L_{TB} 是发射分别与主接收和屏蔽的距离, σ_{aTR} 和 σ_{aTB} 分别是双线圈系 TR 和 TB 确定的视电导率。

2.4 网格剖分

根据图1中模型特点和计算要求,将求解区域分为仪器棒、井眼、地层3个部分。磁偶极子源产生的电磁波近似为球面波,在几何建模中的外边界选择球形。考虑当求解区域电导率很小时,能量损失小,电磁辐射远,计算精度可能达不到,因此在球形边界的外面加一层完美匹配层(PML)。同时,由于共面线圈系的特殊性,本文提出如下的剖分方法。

1) 磁偶极子源的处理。在发射源 Tx 附近能量较密集,需要足够密的网格^[14]。以发射源 Tx 为原点,做连接各接收点的辅助线,每一段赋予固定单元数的分布,使得剖分的网格与能量变化趋势一致。

2) 交界面的处理。 x 方向的磁偶极子源在导电地层中感应出环形涡流,该涡流沿井轴流动,因此井眼和地层交界面的处理尤为重要。模型中,井眼穿过有限地层边界,终止于 PML 边界。井眼内的网格剖分即使很远处剖分也是很密的,而地层和它不同,地层范围很大,在远处网格剖分可能会变得很稀疏,如何使网格剖分很好的衔接在一起很重要。处理方法:将井眼与地层的交界面, PML 与有限地层交界面选用三角形网格单独剖分,控制最大和最小尺寸;对于整个区域内,通过控制最大增长率,使网格按场的分布达到由密及疏的渐变式来满足剖分要求。图3所示为三分量阵列感应测井模型的网格剖分图。

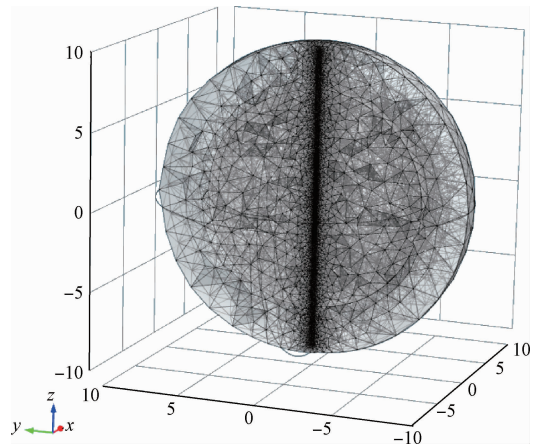


图3 网格剖分图

Fig. 3 Mesh generation

要确保计算的精确性,首先要验证网格剖分的合理性。取模型全部区域的参数为相同值,将数值计算结果与解析解比较。表1是在标准8 in 井眼中,整个区域电导率取0.001 S/m,各个子阵列解析解与数值解的相对误差结果比较。从表2可看出,最大相对误差小于1.300 0%,说明模型的建立和网格的剖分是合理的。

表2 均匀地层各子阵列数值解与解析解的比较

Table 2 Comparison of analytic solution with numerical solution for sub-arrays in homogeneous formation

子阵列名	解析解/ (S·m ⁻¹)	COMSOL 解/ (S·m ⁻¹)	相对误差/%
子阵列1	9.982 3×10 ⁻⁴	1.010 3×10 ⁻³	1.194 0
子阵列2	9.971 8×10 ⁻⁴	1.001 5×10 ⁻³	0.432 5
子阵列3	9.961 3×10 ⁻⁴	9.977 7×10 ⁻⁴	0.163 9
子阵列4	9.951 0×10 ⁻⁴	9.965 7×10 ⁻⁴	0.147 0
子阵列5	9.923 0×10 ⁻⁴	9.972 0×10 ⁻⁴	0.491 5
子阵列6	9.913 5×10 ⁻⁴	9.965 9×10 ⁻⁴	0.526 5
子阵列7	9.879 2×10 ⁻⁴	9.941 3×10 ⁻⁴	0.624 4
子阵列8	9.768 9×10 ⁻⁴	9.897 0×10 ⁻⁴	1.293 9

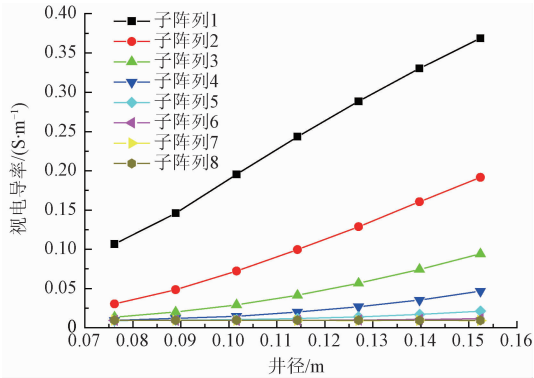


图4 z 方向视电导率随井径影响曲线
Fig. 4 Curve of apparent conductivity changing with well diameter in direction z

3.1.2 泥浆、地层电导率的影响

图5(a)~(d)分别给出了8 in 井径时子阵列1、3、5和8的z方向视电导率与泥浆电导率和地层电导率的关系曲线,由图5可以看出,各子阵列的视电导率随着泥浆电导率和地层电导率的变化,表现出的特点是短子阵列

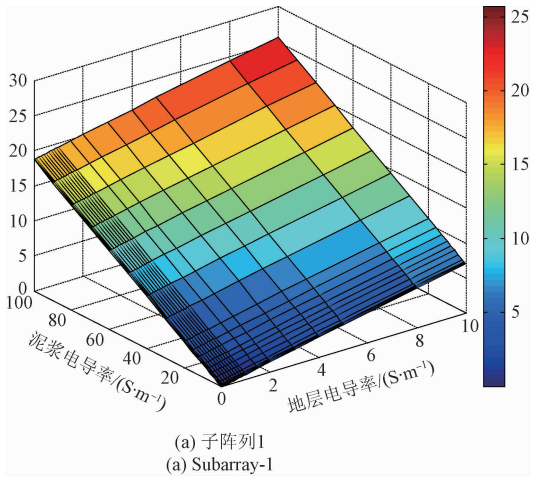
3 井眼影响

文献[4]中对三分量感应测井仪器在水罐模拟装置中进行了数值模拟,研究了电流在各向同性地层中的分布特性。但是,对于仪器在实际测量时受井眼的影响程度没有涉及。本文通过对比三分量阵列感应测井x方向与z方向的响应特征,详细研究井眼大小、泥浆和地层电导率的变化对三分量感应测井响应的影响,深入分析水平方向响应特性的影响机理。计算模型参数如下:井径6~12 in,仪器半径0.045 m,发射电流1 A,频率为13 000 Hz^[15],根据常用情况,泥浆电导率取0.01~100.0 S/m,地层电导率取0.001~10.0 S/m。

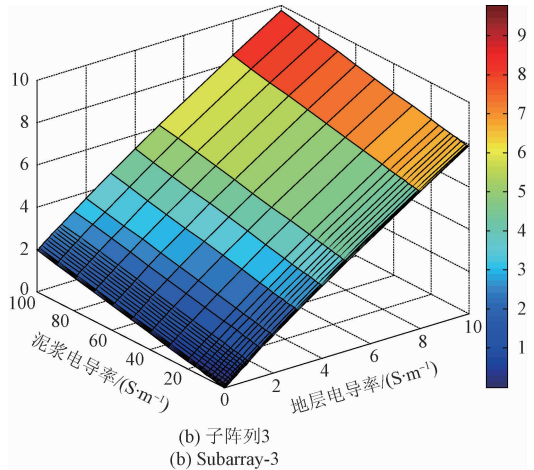
3.1 z 方向测井响应特性分析

3.1.1 井径变化影响

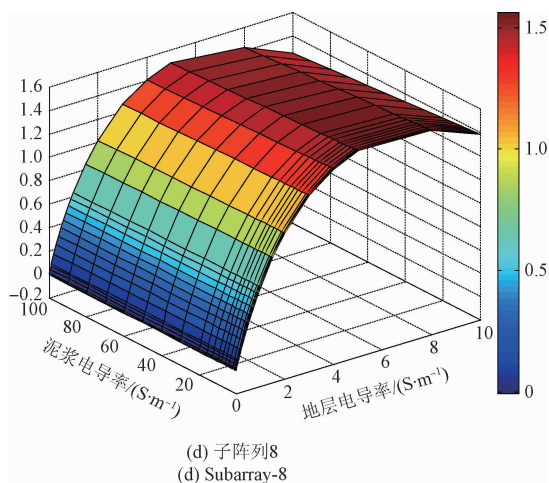
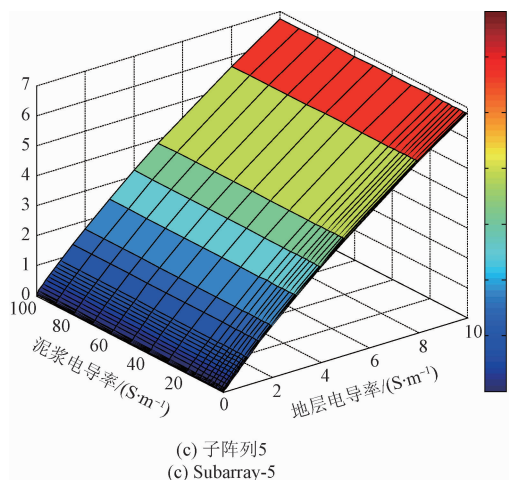
取泥浆电导率(σ_m)与地层电导率(σ_l)的比分别为 $\frac{\sigma_m}{\sigma_l}=0.1、1、10、100、1\ 000$,井眼直径分别为6、7、8、9、10、11、12 in(1 in=2.54 cm)时计算得到z方向视电导率,研究井径变化对三分量阵列感应测井各子阵列响应的影响规律。图4所示为 $\sigma_m=1.0\text{ S/m}$ 、 $\sigma_l=0.01\text{ S/m}$ 时各子阵列视电导率随井半径变化的曲线,从图4知,各子阵列的视电导率随着井径的增大单调增大,阵列越长,增大的斜率减小。在目前参数下,子阵列1的井眼影响最明显,近似随井径变化线性增大;子阵列6、7、8的影响很小,可以忽略。这些特性与直观想象是一致的。



(a) 子阵列1
(a) Subarray-1



(b) 子阵列3
(b) Subarray-3

图5 z 方向子阵列响应特性Fig. 5 Responses characteristics of the subarray-1, 3, 5, 8 in direction z

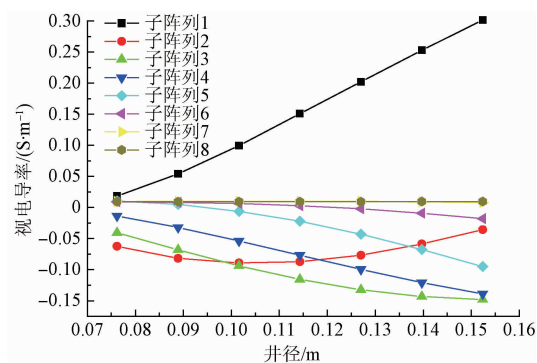
的响应随泥浆电导率增加近似线性增大,阵列越长,受泥浆电导率的影响越小;随地层电导率增大,短子阵列近似线性增大,随长度增加,趋肤效应严重,非线性明显。图5(c)显示子阵列5随泥浆电导率的影响已经不明显,也就是说8 in井眼,子阵列6、7、8的测量信号几乎不受泥浆电导率变化的影响。图5(d)表明由于趋肤效应影响严重,子阵列8出现了明显的非线性,当地层电导率大于5 S/m,视电导率随着地层电导率的增大而减小。这些特征也是阵列感应测井常规影响效果。

3.2 x 方向测井响应特性分析

3.2.1 井径变化影响

取与图4相同的井径,计算 x 方向发射 x 方向接收的测井响应,图6所示给出了8个子阵列的响应,与 z 方向对比, x 方向的视电导率曲线具有如下特点。

1) 最短子阵列1和长阵列7、8的响应特性和 z 方向表现出相同的特征。子阵列3、4、5、6的电导率变化与 z

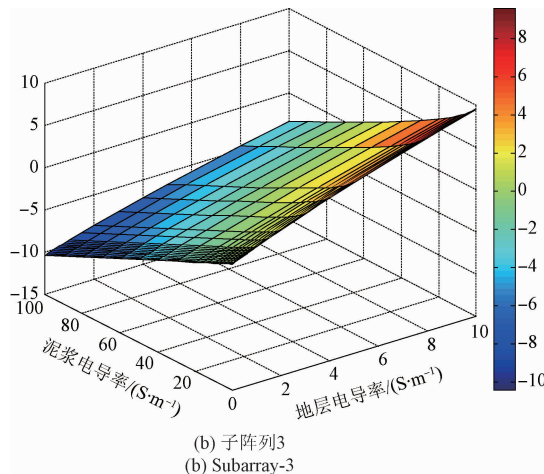
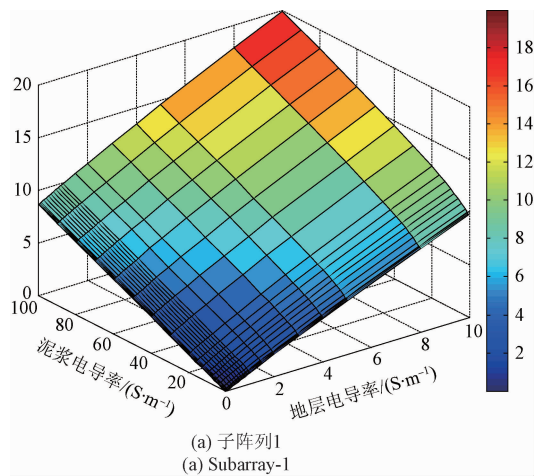
图6 x 方向视电导率随井径影响曲线Fig. 6 Curve of apparent conductivity changing with well diameter in direction x

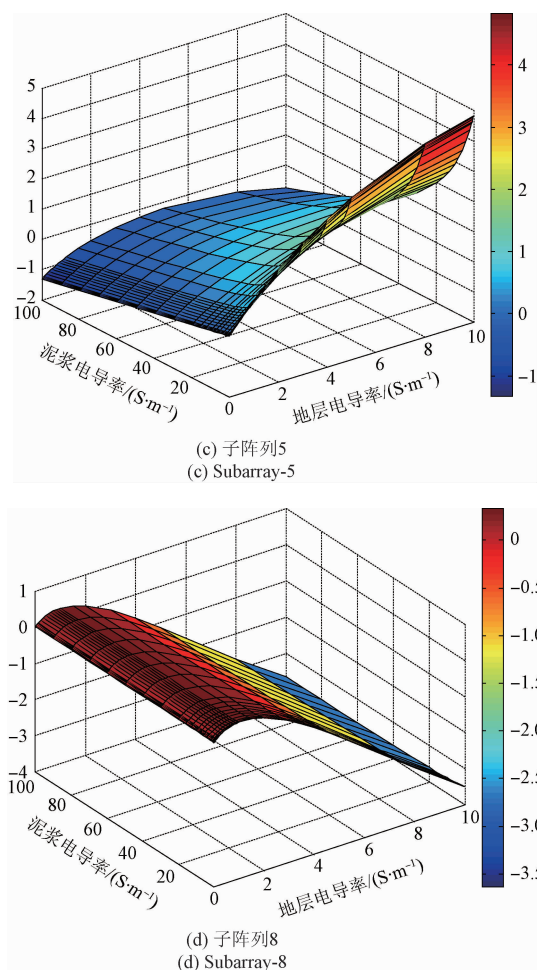
方向的变化趋势截然不同,随着井径的增大而减小。

2) 子阵列2比较特殊,视电导率曲线表现为凹函数,在井径小于7 in时随井径的增大而减小,大于7 in时随井径的增大而增大。

3.2.2 泥浆、地层电导率的影响

图7(a)~(d)分别为子阵列1、3、5、8的 x 方向视电导率曲线,其井眼影响特征与 z 方向显著不同。



图7 x 方向子阵列响应特性Fig. 7 Responses characteristics of the subarray-1, 3, 5, 8 in direction x

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;地层电导率增大产生趋肤效应影响比 z 方向严重。

2) 短阵列1,与 z 方向具有相同的特性。在给定地层电导率下,视电导率随着泥浆电导率的增大而线性增大,但泥浆电导率对 x 方向的影响小于 z 方向。当地层电导率为 0.001 S/m ,泥浆电导率为 100 S/m 时, x 方向的视电导率为 8.62 S/m ,而 z 方向为 18.73 S/m 。

3) 短阵列3的 x 方向视电导率的变化与 z 方向截然不同,视电导率随着泥浆电导率的增大近似线性减小且出现负值,子阵列2、4表现出同样的现象。

4) 子阵列5的视电导率变化与 z 方向也存在较大区别。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。子阵列6的视电导率变化特性与子阵列5类似。

5) 与 z 方向一样, x 方向的子阵列8不受泥浆电导率影响,但是其趋肤效应十分严重。当地层电导率大于 0.6 S/m 时视电导率随着地层电导率的增大线性减小,而 z 方向达到 8 S/m 时才会出现减小的趋势。这说明三分量阵列感应测井的 x 方向测量范围小于 z 方向。

4 仿真及现场试验结果

为了测试水平测量信号响应特性分析的正确性,将实际三分量感应测井仪器在试验井现场试验结果与仿真结果进行比较。首先根据 z 方向的测井数据选择一段较厚的地层建立地层模型,然后正演计算 x 方向测井响应。

该试验井建成时间较长,泥浆已经与地层混合均匀,可不考虑侵入的影响,只有上、下围岩和井眼影响;井径 6 in ,泥浆电阻率 $10 \Omega \cdot \text{m}$ (电导率 0.1 S/m)。取一井段 $245 \sim 261 \text{ m}$,提取模型参数如下:目的层厚度 7.8 m ,电导率为 0.058 S/m ;上围岩电导率为 0.012 S/m ;下围岩电导率为 0.016 S/m 。图8所示为共面线圈系测井响应的计算机仿真结果与现场试验结果的对比图,实际三分量感应测井仪器的水平线圈系只有4个长阵列,即子阵列5~8,故图中给出与它对应的子阵列的仿真结果。

1) 图8(a)是子阵列5~8在有井眼影响和无井眼影响时响应特性的对比曲线。当三分量感应测井仪器移动至 253.175 m 时,子阵列5无井眼影响时的视电导率值为 0.0500 S/m ,有井眼影响时为 0.0478 S/m ;子阵列8无井眼影响时的视电导率值为 0.0300 S/m ,有井眼影响时为 0.0299 S/m ,可以得出阵列越短,井眼影响越大,与图7中 x 方向响应特性吻合,也与 z 方向的影响特性一致。但同时可以得出,有井眼影响时的视电导率值小于无井眼时的视电导率,这是与 z 方向的影响特征截然不同的,并且其差值除了在边界处有波动外,基本上保持恒值。

2) 图8(a)除了显示出测井响应的井眼影响,还清楚地呈现了围岩影响的特征,下面以最长子阵列8为例说明围岩影响规律。

(1) 仪器从图中右边向左边移动,当发射线圈接近目的层(图中 a 段),受高电导率目的层影响,涡流增强,响应逐渐上升。发射线圈到达目的层交界面时,响应出现峰值,图中 A 点。

(2) 屏蔽线圈进入目的层而主接收线圈还未进入目的层(图中 b 段),高电导率目的层使屏蔽线圈影响增大,响应快速下降并且出现了负值。接收线圈到达目的层交界面时,响应出现谷点,图中 B 点。

(3) 整个线圈系进入目的层中(图中 c 段),主接收影响增大,响应曲线不断上升,达到最大,其值的大小取决于目的层层厚,若目的层较厚,该值反映目的层响应特

性;若目的层较薄,该值为围岩影响最小值。

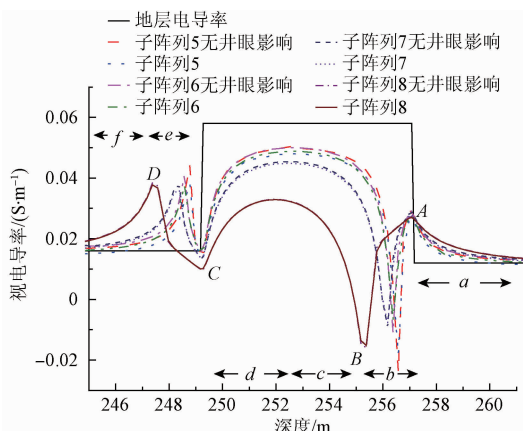
(4)线圈系继续向左边移动(图中 d 段),受低电导率围岩影响,涡流减弱,视电导率曲线不断下降。发射线圈到达目的层另一交界面时,响应出现谷点,图中 C 点。

(5)屏蔽线圈进入低电导率围岩层而主接收线圈仍在目的层时(图中 e 段),屏蔽作用减弱,曲线略有上升。接收线圈离开目的层交界面时,响应出现峰值,图中 D 点。

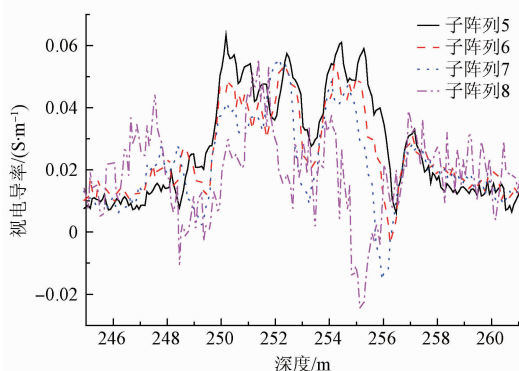
(6)接收线圈进入低电导率围岩层(图中 f 段),主接收影响降低,响应曲线不断下降,最终等于围岩层的响应。

通过以上分析, AC 和 BD 的峰值深度均为 7.8 m ,可以利用发射线圈或者主接收线圈识别边界,计算层厚。

3)图8(b)是相同子阵列的现场试验结果,与图8(a)一致,响应在约 256 m 处出现突变,说明此处是层交界面; 248 m 处曲线没有明显峰值或谷点,说明交界面不是突变,可能是逐渐过渡的。 $249\sim 257\text{ m}$ 曲线有波动,



(a) 建模仿真结果
(a) Modeling simulation results



(b) 现场试验结果
(b) Field experiment results

图8 同一地层中共面线圈系建模仿真与
现场试验结果对比

Fig. 8 Comparison of modeling simulation and field experiment results for coplanar coil systems in the same formation

不是均匀目的层。这些特征表明,通过三分量感应仪器的共面线圈系测井曲线的变化特征可以识别电阻率突变层的边界。

5 响应特性机理分析

前面的分析表明,三分量阵列感应测井响应中, x 方向的响应特性与 z 方向存在显著差异。以下从电磁场理论出发,以三线圈系为例,分析三分量感应测井共面线圈系的响应机理。图9所示为 x 方向发射线圈在 yo 截面形成的电流线。它们是与发射线圈中心同心的涡流。接收线圈接收的信号包括两部分,第一部分由与接收线圈同心的涡流产生,与 z 方向接收原理一致,是所需要的信息。第二部分由发射线圈与接收线圈之间的涡流产生,它们没有围住接收线圈,在接收线圈中产生的磁力线与第一部分相反,抵消了第一部分的接收信号。随线圈间距、井径和泥浆电导率的增大,抵消的程度增加。抵消的程度同时还与屏蔽线圈的位置和匝数有关。这就是为什么不同长度子阵列在不同井径和泥浆电导率时变化趋势不一样的原因。图8显示泥浆电导率为 1 S/m ,地层电导率为 0.01 S/m 时的涡流分布。很明显,只有正入射感应电流穿过了地层和泥浆的边界,斜入射感应电流的切向分量在井眼中流动,出现明显的回流涡流,导致井眼影响增大。

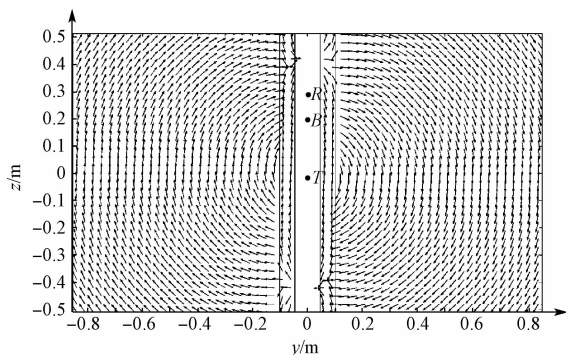


图9 σ_m 为 1.0 S/m , σ_t 为 0.01 S/m 时的电流分布

Fig. 9 Current distribution at $\sigma_m = 1.0\text{ S/m}$, $\sigma_t = 0.01\text{ S/m}$

目前商用的三分量感应测井仪器分别是 Baker Atlas 公司的三分量感应测井仪器 3DEX 和 Schlumberger 公司的三分量阵列感应测井仪器 Scanner-Rt。3DEX 使用多频聚焦方法减小井眼影响;Scanner-Rt 采用在线圈系之间布置金属电极来抑制井眼中的电流,从而减少井眼效应,其效果比多频聚焦好,但仪器结构复杂^[16]。

本文提出了一种新的共面3线圈系子阵列结构,它由2个发射和1个接收线圈组成。3个线圈的缠绕方向一致,2个发射线圈串联。8个子阵列组成三分量阵列感应测井仪器。图10所示为子阵列7的新共面线圈系布

置方式, T_x^1 为主发射线圈, T_x^2 为副发射线圈, R 为接收线圈。

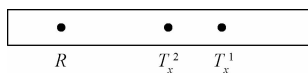


图10 新线圈系布置方式

Fig. 10 Schematic diagram of coils arrangement of new coil system

这种共面线圈系结构,增大接收信号,减小趋肤效应影响,将井眼影响由非线性转变为线性,便于用与直井相似的基于数据库的井眼校正方法消除井眼影响,极大地减弱了文献[16]中指出的现有三分量感应测井的技术缺陷:在仪器偏心、泥浆电阻率低、侵入带电阻率低、地层电阻率高等情况下出现负响应影响。图11所示为2发1收子阵列7与目前1发2收共面线圈系的径向微分几何因子对比图。可以看出,1发2收时,负值响应区域大,且非线性影响;2发1收时,明显减少了负值区域,响应近似线性变化。新线圈系的详细分析将另文发表,以此为基础的三分量阵列感应测井仪器正在申请发明专利。

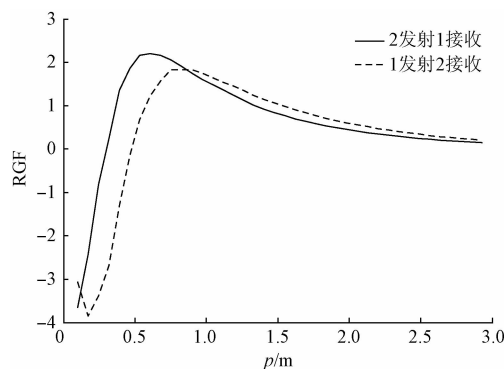


图11 不同子阵列结构的径向微分几何因子

Fig. 11 Differential geometry factors on the radial direction of the different sub-array

6 结论

通过计算在居中情况下,三分量阵列感应测井共面线圈系与共轴线圈系的响应特性,分析它们的井眼影响,可以得出以下结论。

1) 三分量阵列感应测井共面线圈系的井眼影响与共轴线圈系存在显著的差别,主要表现在以下两方面:

(1) 固定地层和泥浆电导率,只有最短子阵列1随井径增大近似线性增大,井眼影响小于共轴线圈系,其余子阵列均与共轴线圈系不同,响应为负值,随井径的变化趋势与子阵列间距有关。影响规律与共轴线圈系相同的是

子阵列间距越长,井眼影响越小。

(2) 标准8 in 井眼中,泥浆和地层电导率同时变化时,不同电导率对比度,不同间距共面线圈系的井眼影响只有子阵列1与共轴线圈系相似,其余子阵列不但与共轴线圈系差别较大,而且相互间也明显不同。子阵列8虽然井眼影响小,但趋肤效应影响大,测井适用的电导率范围小于0.5 S/m,明显比共轴线圈系小(共轴线圈系的电导率适用范围小于8 S/m)。

2) 建模仿真与现场试验结果对比,可以利用三分量感应共面线圈系的发射线圈或者主接收线圈识别地层边界,计算层厚。

3) 通过计算分析交变电磁场中的涡流流动特性表明,地层和泥浆电导率数值和对比度,共面线圈系的间距与匝数均影响涡流流动轨迹,从而影响接收信号大小,揭示了共面线圈系响应特性与共轴线圈系不一样的机理。

4) 提出新的2发1收线圈系结构,结合几何因子表明该结构井眼影响由非线性转变为线性,有效降低了现有三分量感应测井共面线圈系负响应问题。

本文的研究结果为三分量感应测井仪器的研制提供了理论基础。

参考文献

- [1] 作杰,许亮.三分量感应水平线圈系在薄层中的响应特性研究[J].地球物理学进展,2013,28(4):1935-1942.
WU J, XU L. The response characteristics of the horizontal coil of the three components induction logging in thin layers [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(4): 1935-1942.
- [2] 作杰,李星根,李凡.基于LabVIEW的阵列感应多平信号发射与接收特性研究[J].电子测量技术,2014,37(11):68-74.
WU J, LI X G, LI F. Transmitting and receiving characteristics of multi-frequency signal of the array induction based on the LabVIEW software [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(11): 68-74.
- [3] 作杰,陈斐.水罐中水平线圈系井眼影响研究[J].测井技术,2014,38(2):158-164.
WU J, CHEN F. The borehole effect of horizontal coil in water tank [J]. Well Logging Technology, 2014, 38(2): 158-164.
- [4] WANG H M, BARBER T, CHEN K C, et al. Triaxial induction logging: Theory, modeling, inversion and interpretation [C]. SPE International Oil & Gas Conference and Exhibition, Beijing: Society of Petroleum Engineers, 2006: 1-19.

- [5] WANG H N, POMAN S, YANG SH W, et al. Numerical modeling of multicomponent induction well-logging tools in the cylindrically stratified anisotropic media [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 1134-1147.
- [6] 张志刚, 马欢波, 刘耀伟. 阵列侧向测井井眼影响分析[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4): 25-30.
ZHANG ZH G, MA H B, LIU Y W. Borehole effects analysis of array lateral logging tool [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014, 33(4): 25-30.
- [7] 张森. 三分量感应测井仪的刻度和数据处理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
ZHANG S. Research on calibration and data processing of the three component induction logging instrument [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [8] ZHOU M S, LIU R. Triaxial induction tool response in 1D layered biaxial anisotropic formation [C]. SEG Annual Meeting, 2014: 643-648.
- [9] 仵杰, 魏庆, 段雁超, 等. 三维数值计算中感应测井仪器加源方式的讨论[J]. 石油仪器, 2012, 26(4): 18-20.
WU J, WEI Q, DUAN Y CH, et al. Discussion on source of the induction logging tool in the three-dimensional numerical calculation [J]. Petroleum Instrument, 2012, 26(4): 18-20.
- [10] 龙玲, 陈庆, 刘飞. 电磁波随钻测量干扰信号消除算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2144-2151.
LONG L, CHEN Q, LIU F. Research on eliminating interference signal algorithm of EM-MWD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 2144-2151.
- [11] 姜玉林, 丁文斌. 改进的电磁流量计干声电势计算方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1883-1889.
JIANG Y L, DING W B. Improved induced potential calculation method of electromagnetic flowmeter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1883-1889.
- [12] 白彦. 三维感应测井刻度与井眼影响研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2011.
BAI Y. A study on calibration and borehole effect of three-dimensional induction logging [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2011.
- [13] WANG G L, BARBER T, WU P. A new model for understanding triaxial induction response in dipping cross bedded formations [C]. SPWLA 56th Annual Logging Symposium, 2015: 1-25.
- [14] 仵杰, 王昭. 基于 COMSOL Multiphysics 的半空间阵列感应测井仪刻度校正仿真[J]. 石油工业计算机应用, 2011, 72(4): 11-13.
WU J, WANG ZH. Simulation on calibration of the array induction logging tool in the half space based on COMSOL Multiphysics [J]. Computer Applications of Petroleum, 2011, 72(4): 11-13.
- [15] 边海龙, 苏义脑, 李林, 等. 连续波随钻测量信号井下传输特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 983-988.
BIAN H L, SU Y N, LI L, et al. Downhole information transmission characteristic analysis of measurement while drilling (MWD) continuous wave signal [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 983-988.
- [16] 张国艳, 肖加奇, 洪德成. 层状各向异性地层三维感应测井响应快速反演[J]. 测井技术, 2013, 37(5): 488-491.
ZHANG G Y, XIAO J Q, HONG D CH. A fast inversion method of 3D induction logging responses layered anisotropic formation [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(5): 488-491.

作者简介



张妙瑜, 2003 年于西安工业大学获得学士学位, 2010 年于西安石油大学获得硕士学位。现为西安电子科技大学智能控制与图像工程研究所攻读博士, 主要研究方向为电磁测井理论。

E-mail: myzhang1028@163.com

Zhang MiaoYu received B. Sc. from Xi'an Technological University in 2003 and M. Sc. from Xian Shiyou University in 2010, respectively. She is currently a Ph. D. candidate in the Institute of Intelligent Control and Image Engineering, Xidian University. Her main research direction is electromagnetic logging theory.



郭宝龙, 1984 年、1988 年和 1995 年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为西安电子科技大学教授, 主要研究方向神经网络、模式识别与智能信息处理。

E-mail: blguo@xidian.edu.cn

Guo BaoLong is a professor in Xidian University. He received B. Sc., M. Sc., and Ph. D. all from Xidian University in 1984, 1988 and 1995, respectively. His research interests include neural networks, pattern recognition, and intelligent information processing.



仵杰,1986 年和 1989 年于西北工业大学获得学士和硕士学位,1997 年于西安交通大学获得博士学位,现为西安石油大学教授,主要研究方向为电磁计算和测井信号的数值计算。

E-mail: wujie@xsyu.edu.cn

Wu Jie is a professor in Xi'an Shiyou University. He received B. Sc. and M. Sc. from Northwestern Polytechnical University in 1986 and 1989, and Ph. D. from Xian Jiaotong University in 1997, respectively. His research interests include computational electromagnetics and numerical calculation in logging signal.

R&S 先进 IC 测试方案,全面助力万物互连时代的 IC 设计应用

——R&S 公司成功举办 2016 射频集成电路测试技术研讨会

近日,罗德与施瓦茨公司在北京、上海和深圳三地成功举办了"2016 年 R&S 射频集成电路测试技术研讨会"。260 多名来自各种 IC 设计企业的用户代表参加了本次研讨会,共同交流和分享了 IC 测试领域的产品和方案,不仅提升了罗德与施瓦茨在 IC 行业的产品竞争力,而且对整个 IC 设计行业的发展和进步起到了促进作用。

在本次活动上,R&S 的技术专家详细介绍了其领先的针对 IoT 和通用 IC 设计与测试的产品和解决方案,包括最新 IoT 芯片测试技术,通用无线收发芯片测试技术,无线芯片的时域测试技术,放大器芯片设计优化与测试技术,收发芯片内部电路测试难点及解决方案等,涵盖了 IoT、射频微波 IC、THz、在片测试及各种微波电路的测试优化等。同时,还在现场展出了网络分析仪、信号源、信号与频谱分析仪、示波器、噪声系数分析仪等明星产品,用于各种方案的演示和交流。

研讨会受到了业界众多 IC 设计和测试开发人员的广泛支持和欢迎,甚至不少高层管理人员也亲自来到现场参与沟通和交流。来宾不仅认真听取专家的技术方案介绍,还积极地在展台仪器边进行交流和互动,了解

详细的技术方案、指标和应用。

集成电路产业是国家战略性新兴产业,是国民经济和社会信息化的重要基础。当前我国集成电路产业发展处于关键时期,国家高度重视我国集成电路产业的发展并出台了一系列政策。《国家集成电路产业发展推进纲要》和《中国制造 2025》的出台,为我国集成电路产业实现跨越式发展注入了强大动力,中国集成电路产业面临着前所未有的发展机遇。可以预见,未来十年将是中国 IC 产业发展的又一个黄金十年。

罗德与施瓦茨公司(R&S 公司)作为全球最大的电子和无线移动通信测试设备厂商之一,自进入中国的 30 多年来,罗德与施瓦茨在无线通信、国防军工、通用电子领域提供了大量品质卓越的测试设备和先进的技术解决方案,为中国电子行业的发展起了极大的推动作用,同时也树立了 R&S 非常好的口碑和形象。R&S 的产品和方案也正是 IC 产品设计和开发所需要的重要一环。R&S 本次研讨会专门针对 IC 企业需求和当前应用热点而设计,R&S 的产品及 RFIC 测试解决方案能够为客户提供便利和帮助,助力 IC 企业的发展。