

文章编号:1673-5005(2014)04-0074-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.04.010

新型动电测井仪复合式电极系分析和测试

李丰波^{1,2}, 鞠晓东^{1,2}, 乔文孝^{1,2}, 卢俊强^{1,2}, 门百永^{1,2}

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 北京市地球探测与信息技术重点实验室, 北京 102249)

摘要:对实际探测器复合式电极系进行研究,重点研究动电测井探测器复合式电极系结构、工作原理及电子系统原理及测试等。使用有限元法进行数值模拟,分析电场响应结果并求解出电极系数数值解。其次,分析复合电极系电路系统原理并在实验室对发射和采集系统电路进行上电测试和高温实验。结果表明:这种探测器成功地将不同结构和材料要求的声、电探测器融合在一起,且能实现声、电信号记录点深度对齐;电路系统在高温下工作正常,可以进行下井实验。研究结果为动电测井探测器的研究、实现以及井下现场测试提供理论支持。

关键词:动电测井;震电效应;动电效应;电极系

中图分类号:P 631

文献标志码:A

引用格式:李丰波,鞠晓东,乔文孝,等. 新型动电测井仪复合式电极系分析和测试[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(4):74-80.

LI Fengbo, JU Xiaodong, QIAO Wenxiao, et al. Analysis and testing of a new electrokinetic logging tool composite electrode array[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(4): 74-80.

Analysis and testing of a new electrokinetic logging tool composite electrode array

LI Fengbo^{1,2}, JU Xiaodong^{1,2}, QIAO Wenxiao^{1,2}, LU Junqiang^{1,2}, MEN Baiyong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Key Laboratory of Earth Prospecting and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The composite electrode array in electrokinetic logging detectors was studied, with focuses on its structure, working principle, electronic system principle and testing. A numerical modelling study with the electrode array was carried out using finite element method, then the results in the electric field response were analyzed to solve for the numerical solution of the electrode array coefficient. Next, the electronic circuit principle of the composite electrode array was also analyzed, and power-on test and high temperature experiment with the exciting circuit and data acquisition circuit system were also conducted. The results show that this detector successfully merges acoustic logging and electric logging detectors with different structure and material together, and can align the acoustic and electrical signals in the depth of the record point; the electronic circuit system functions well in high temperature and then can be experiment in downhole. The results also suggest the technique has great feasibility for downhole field tests and analyzing electrokinetic logging tool.

Key words: electrokinetic logging; seismoelectric effect; electrokinetic effect; electrode array

弹性波在含流体多孔介质中传播时会激发产生电磁波信号,称为震电效应或者声电效应。其主要机制是固体与液体交界面上的双电层动电现象^[1-2],

也称为动电效应(electrokinetic effect)。声信号和电信号在孔隙地层中相互耦合相互转换的特性与地层孔隙流体的性质紧密相关。因此,基于动电效应可

收稿日期:2014-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(61102102,11134011,11204380,11374371);国家重大科技专项(2011ZX05020-009);中国石油天然气集团公司项目(2011A-3903,2011B-4001);中国石油大学(北京)基本科研基金(KYJJ2012-05-07);中国石油科技创新基金(2013D-5006-0304)

作者简介:李丰波(1985-),男,博士研究生,主要从事地球物理测井及仪器装备研究。E-mail: lfbphd@163.com。

以发展一种新的动电测井方法,也称为震电测井或声电效应测井等,以期能获得反映地层渗流特性等地质参数的测井信号,为复杂油气勘探和储层评价服务。理论和实验研究表明,动电测井可以应用于探测与孔隙流体有关的地层性质,如渗透率、电导率、孔隙度、黏度、离子浓度等,尤其是对渗透率的测量成为可能^[3-4]。同时,在油水界面和裂缝中更容易产生动电效应,利用动电测井可以识别裂缝储层,还可以有效区分油水界面,这对寻找剩余油分布区具有重要实用价值^[5]。但是,国内外对动电测井的研究目前多集中于理论数值模拟研究和岩石物理实验研究^[6-15],尚未见到能进行井下测量的动电测井仪器,从而也就无法获得井下地层真实的动电测井信号,极大地阻碍了动电测井技术的发展。由此可见,致力于研发一种能进行井下现场测试的动电测井探测器^[16],获得井下地层真实的动电效应信号,具有很大的科研价值和创新意义。在实验室研究探测器样机的过程中,鉴于实验环境及条件的限制,无法制备适合的含流体多孔介质模型井,暂时不具备进行动电效应物理实验的条件,故分别对声探测器部分及电探测器部分进行了测试,其中对实际探测器的电极系及其电路系统进行分析 and 测试是一项重要工作。笔者主要针对实际探测器复合式电极系进行研究,重点研究动电测井探测器复合式电极系结构、工作原理及电子系统原理及测试等,通过电发射(A、B 电极发射电流)——电接收(测量电极接收)模式对探测器进行分析和测试,并基于 ANSYS 分析其电场响应。

1 电极系结构及工作原理

动电测井探测器电极系是一种特殊设计的能进行阵列式测量的复合式电极系,是动电测井仪重要组成部分,其结构示意图如图 1 所示。

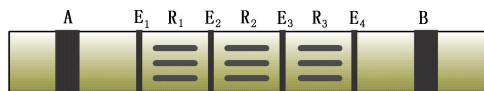


图 1 动电测井仪电极系结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of electrokinetic logging tool electrode array

在图 1 中, A、B 为供电电极, E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 均为测量电极,组合成电信号测量电极阵列。3 个声波接收器阵列 R_1 、 R_2 、 R_3 布置于测量电极中间,并与相邻的两个测量电极等间距。电极系分布于仪器外壳表面,声波换能器位于仪器内部并在外壳表面开有

透声窗。电极系短节的设计首先要考虑电极的绝缘问题,因此传统的声波测井仪器的钢制外壳不再适用。所选材料必须具有良好的电绝缘性,其次还要具有较高机械强度和易加工性,同时还要适应井下恶劣的高温、高压、腐蚀性的工作环境。玻璃钢是一种纤维增强复合塑料,一般指用玻璃纤维增强不饱和聚酯、环氧树脂与酚醛树脂基体,机械强度高,质轻而硬,且不导电,非常符合动电复合电极系的技术要求,故电极系分布在一个玻璃钢材质的仪器外壳上,仪器其他部分如电子仓短节、声波发射短节仍采用通常的钛钢合金。根据声波探测器接收阵列的间距要求,动电探测器电极系尺寸结构设计如下:供电电极 A、B 的长度为 0.1 m,测量电极的长度均为 0.02 m,各电极的中心间距均为 0.3 m,半径 r_0 为 0.052 m。

在含流体多孔介质地层中,孔隙中的流体通常含有带电离子,在固体与液体交界面上容易形成双电层。当在井下进行动电测井时,通过动电测井探测器的声波发射换能器在井中发射声波信号的方式产生弹性波震源,弹性波在传播过程中造成的局部扰动会引起固相波动(包括固体骨架的运动和变形),从而引起渗流现象,激发产生动电效应。伴随着流体的运移,孔隙流体中的净剩电荷也会随之运移,净剩电荷的积聚和运移就会形成电场和磁场。声电转换后产生诱导电磁波场,从而获得井旁多孔介质地层中的动电测井信号。测量电极阵列 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 的首要功能是测量传播到井筒内极微弱的动电信号,同时将 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 4 个电极间的相邻两路信号通过差分放大器接收,采集 3 道电差分信号,即 E_1E_2 、 E_2E_3 、 E_3E_4 对测量电极的差分信号,可以消除共模信号的干扰,提高信噪比。

同时,也可以进行基于动电效应(震电效应)的逆效应——电震效应的测量。在井中通过主供电电极 A 向地层发射一定频率的电流形成人工电(磁)场。在含流体多孔介质地层中,由于人工施加电场的干预,会影响孔隙中带离子的运动,可引起电渗(electric osmosis)现象和固相骨架运动,从而诱导产生弹性波,激发电震效应。当电声转换后产生的弹性波传播到充液井筒中时,可以通过布置在测量电极中间位置的声波接收器阵列 R_1 、 R_2 、 R_3 来测量电震效应产生的声波信号。当供电电极向地层发射电激励信号时,还可以通过测量电极测量此时井中的电位实现类似普通电阻率测井的功能。

由于无法使声、电信号的接收器布置在探测器

的同一位置,声电信号记录点必然存在一个深度差。将声波接收换能器布置于电极中间,一个重要目的是使 E_1E_2 、 E_2E_3 、 E_3E_4 3 对相邻测量电极的差分信号深度记录点与声波接收器阵列 R_1 、 R_2 、 R_3 的记录点在深度上对齐,获得相同深度记录点的声信号和电信号,为动电效应(震电效应)与电震效应理论的进一步研究以及数据处理和分析服务。

2 电极系电场分布函数

测量电极阵列可实现连续测量, E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 电极测量时除了记录各自单端信号,更重要的是通过相邻电极差分方式(E_1E_2 、 E_2E_3 及 E_3E_4) 接收动电信号,可实现不同电极距的连续差分式电位梯度的测量。仪器需要记录的信号有 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 电极的电位值,以及 E_1E_2 、 E_2E_3 、 E_3E_4 电极间的电位差值。各电极测量原理类似,本文中以靠近记录点 O 的一对测量电极 E_2 、 E_3 为例来推导电极系电场分布函数的表达式。为不失一般性,将其重命名为 AMNB 电极系,如图 2 所示,供电电极 A、B 的长度为 0.1 m,测量电极 M、N 的长度为 0.02 m,它们之间的间距分别为 0.6、0.3、0.6 m,点 O 为电极系的深度记录点。

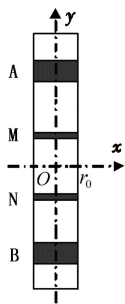


图2 AMNB 电极系结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of AMNB electrode array

测量时通过供电电极 A(正极)、B(负极)向地层施加一定大小的电流,形成电流回路,在井旁地层中形成人工电场。若电极 A 的电流为 $+I$,则电极 B 的电流为 $-I$ 。然后通过测量电极测量 M、N 之间电位差 ΔU_{MN} 。 ΔU_{MN} 反映了电极系电场分布的特点,跟井旁地层性质有关。因电极的尺寸比电极间的间距要小得多,故可将 A、M、N、B 电极视为点电极。由点电极电场分布理论可知,在均匀各向同性介质中点电极所形成的电场的电位 $U = RI/4\pi r$ 。设参考电极在无穷远处,电位为零,测量电极 M、N 表面的电位分别为 U_M 、 U_N ,电极 M、N 之间电位差为 ΔU_{MN} 。由电位叠加原理可知, U_M 、 U_N 应该分别等于点电极 A、B 在 M、N 处电位之和,即

$$\begin{cases} U_M = \frac{RI}{4\pi} \left(\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{BM}} \right), \\ U_N = \frac{RI}{4\pi} \left(\frac{1}{d_{AN}} - \frac{1}{d_{BN}} \right). \end{cases} \quad (1)$$

则测量电极 M、N 之间电位差 $\Delta U_{MN} = \frac{RI}{4\pi} \left(\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{BM}} - \frac{1}{d_{AN}} + \frac{1}{d_{BN}} \right)$ 。其中, d_{AM} 、 d_{BM} 、 d_{AN} 、 d_{BN} 表示电极系的电极距, m。故介质电阻率为 $R = 4\pi / \left(\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{BM}} - \frac{1}{d_{AN}} + \frac{1}{d_{BN}} \right) \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I}$ 。若令 $K = 4\pi / \left(\frac{1}{d_{AM}} - \frac{1}{d_{BM}} - \frac{1}{d_{AN}} + \frac{1}{d_{BN}} \right)$, 则有

$$R = K \frac{\Delta U_{MN}}{I}. \quad (2)$$

其中 K 为仪器刻度系数, m。它只与仪器结构有关,通常也称之为电极系系数。在均匀各向同性介质中,可依据 $K = RI/\Delta U_{MN}$ 通过数值模拟方法求出电极系系数。

3 数值模拟分析

3.1 数学模型分析

井下地层介质大都具有对称性,当井眼垂直穿过水平地层时,井旁介质以井轴为对称轴旋转对称。如采用柱坐标系 (r, ϕ, z) ,则 3 维电场分布问题可简化为 2 维子午面 (r, z) 上的电场分布问题进行处理。动电探测器电极系也具有旋转对称性,故 3 维电场问题可以简化为 2 维问题进行求解。本文中以 AMNB 电极系中点 O 为坐标原点,在径向上考虑井眼的影响,在轴向考虑上、下围岩的影响,建立包含动电探测器电极系的非均质地层电场响应模型,如图 3 所示。其中,井眼半径为 $d_h/2$,电极系半径为 r_0 ,目的地层的层厚为 h ,井眼中钻井液的电阻率为 R_m ,目的地层电阻率为 R_l ,上下围岩的电阻率为 R_s 。

在图 3 所示的地层模型示意图中,将井眼中的电极系去除后的整个区域便是动电探测器电极系电场响应的求解域 Ω ,设其边界为 Γ 。由于恒定电(流)场的电流密度矢量 $\vec{J}$ 的散度为零,即 $\nabla \cdot \vec{J} = 0$,故在电阻率 R 为常数的每个区域内,电位函数 U 满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

在柱坐标系中,其表达式为

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (4)$$

在 2 维子午面(r,z) 内退化为

$$\nabla^2 U = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \tag{5}$$

在 2 维电(流)场问题中,动电探测器电极系测井响应的定解问题是求出一个连续且适当光滑的电位函数 U ,使其满足相应的边界条件。

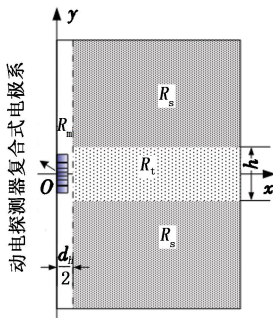


图 3 电场响应数学模型示意图

Fig. 3 Mathematical model of electric field response

3.2 有限元法求解及分析

采用 ANSYS 大型有限元分析平台辅助完成数值模拟部分的计算求解工作。ANSYS 具有很好的二次开发功能,为了满足不同层次的应用需求,ANSYS 提供了 4 种二次开发工具,即参数化程序设计语言(APDL)、用户界面设计语言(UIDL)、用户程序特性(UPFs)、ANSYS 数据接口。用户可以根据自身需要基于标准 ANSYS 进行二次开发,生成具有行业分析特点的 ANSYS 程序。选择 ANSYS Multiphysics 模块进行电极系电场问题分析,通过模拟分析可以评估本文的设计在真实的物理场作用下的工作状态。基于 APDL 语言,编写了整个算例的代码,实现了从有限元模型的建立、网格剖分以及求解的整个功能。

依据图 3 所示的模型示意图,并以此建立电场响应问题的有限元分析模型。以宽 35 m、高 70 m 的模型模拟径向无限远和轴向无限厚的无限大介质地层。选择 2 维实体单元 PLANE67 作为仿真计算单元,然后定义材料属性。有限元单元网格剖分采用三角形单元,并根据电场分布的特点,将电极系周围的有限元单元剖分得密一些^[17],远离点电极的单元相对稀疏一些,建立有限元模型(图 4)。

耦合各个电极表面的节点电压自由度,对供电电极 A、B 施加电流载荷,分别为 $+I$ 、 $-I$ 。然后添加边界约束条件(电压自由度约束),使其满足动电电极系求解域 Ω 及其边界条件 Γ ,然后计算求解。

设 $I = 1\text{ A}$,在地层电阻率 $R = 1\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 的均质地层条件下,计算了动电探测器电极系的电场响应。

其电场电位云图和电流密度矢量图见图 5。

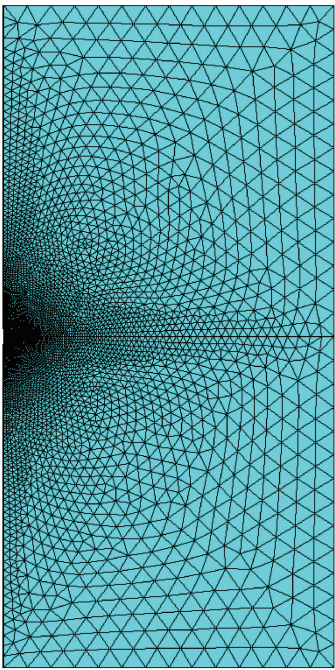


图 4 有限元分析模型

Fig. 4 Finite element analytical model

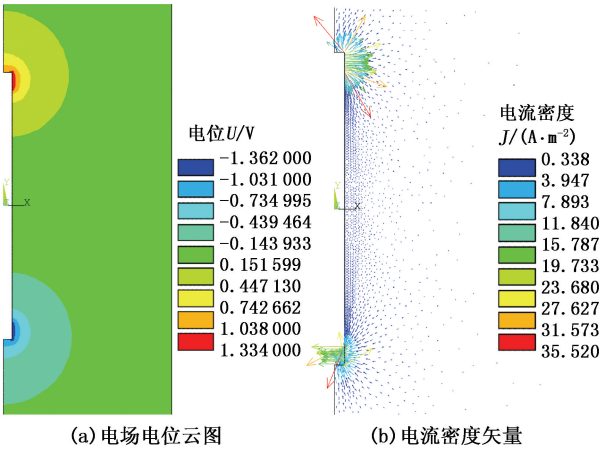


图 5 动电探测器电极系电场响应图

Fig. 5 Electric field response diagram of electrokinetic logging tool electrode array

由图 5(a) 可见,在电极 A 表面电位取极大值,在电极 B 表面电位取极小值。在图 5(b) 中,电流从供电电极 A 出发,经过井旁附近地层介质传导,然后回到 B 电极,形成电流回路。在 A、B 电极周围,电流密度取极大值。在整个井下地层空间内,形成了一个稳态传导电流的电场分布。根据均匀各向同性介质中电极系数表达式 $K = RI/\Delta U_{MN}$,可求解出坐标原点处动电探测器 AMNB 电极系的电极系数 K_{AMNB} 为 12.018 1(小数点后保留 4 位有效数字)。根据均匀各向同性介质条件下,把 A、M、N、B 电极

看成是点电极时推导出的动电探测器 AMNB 电极系数 K 的解析表达式,可求出其近视解析解为 11.3097。

可知电极系数 K 数值解与近视解析解的绝对误差 ΔK 为

$$\Delta K = |K - K_{AMNB}| = 0.7084.$$

(6)

则相对误差 δ_K 为

$$\delta_K = \Delta K / K \approx 6.265\%.$$

(7)

为了减小由于有限元模型网格剖分产生的计算误差,模拟仪器在井中的上提测井操作,步长为 0.1 m,重新编写 APDL 程序,并通过其二次开发工具 UIDL 编写了模拟测井时相应参数设置的人机交互界面,如图 6 所示。它可以设置开始和结束测井的深度位置,还有深度记录点的步长、目的层层厚等工作参数。

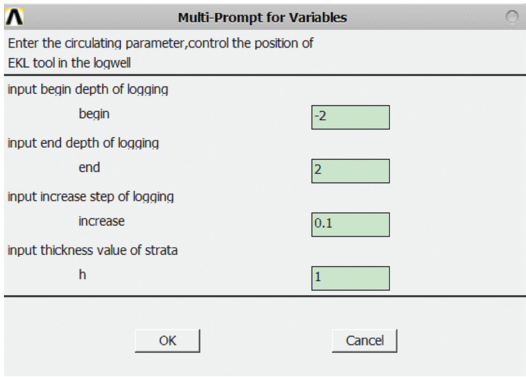


图 6 模拟测井参数设置人机交互界面

Fig. 6 Man-machine interface of simulated logging parameter setting

计算 $-2 \sim 2$ m 深度范围内不同深度位置的电极系数 K ,其结果见表 1。

由表 1 可知,在坐标原点处计算的 AMNB 电极系数即为 12.0181。采取统计数学的方法,对电极系数 K 做算术平均运算,即

$$\bar{K} = \frac{\sum_{-2}^2 K_{depth}}{n}.$$

(8)

式中, $depth$ 表示深度值,取 $-2, -1.9, \dots, 1.9, 2$; n 为样本容量,取 41。由式(8)可计算出电极系数 K 的算术平均值 $\bar{K}_{AMNB} \approx 11.8596$ 。则此时 $\Delta K' \approx 0.5499$, $\delta'_K \approx 4.862\%$ 。相对误差提高了 1.403%,一定程度上减少了有限元计算误差。

在建立数学模型过程中由于要将复杂的实际问题通过数学方法抽象、归结为数学问题,通常对问题做了一些理想化的简化假设,所以数学模型和实际问题往往存在着一定的误差。同时在建立有限元单

元模型时,由于单元网格剖分问题,还有算法的选择等,也会引入计算误差。而且,有限元法的思想就是不断逼近真实解的一种数值解法^[18],理论上也必然存在着一定的误差。在推导电极系数 K 的解析表达式时,将实际电极系近视为点电极,那么推导求出的解析解也只是反应电极的点电极下的特例,这些因素相对于真实值都会产生一定的误差。

表 1 不同深度处计算的 K 值

Table 1 Calculated K value for different depth			
深度 D/m	电极系数 K/m	深度 D/m	电极系数 K/m
- 2.0	11.91867185	0.1	12.01369664
- 1.9	11.75024046	0.2	11.87068399
- 1.8	11.70095953	0.3	11.94568033
- 1.7	11.64455121	0.4	11.96136760
- 1.6	11.64690174	0.5	11.94320826
- 1.5	11.66751339	0.6	11.98364729
- 1.4	11.80897736	0.7	11.89739256
- 1.3	11.87420803	0.8	11.87877937
- 1.2	11.87624873	0.9	11.95088409
- 1.1	12.00919976	1.0	11.91017333
- 1.0	11.96385941	1.1	11.88229998
- 0.9	11.91155890	1.2	11.79601822
- 0.8	11.92544844	1.3	11.85331322
- 0.7	11.82397224	1.4	11.80899580
- 0.6	11.93335527	1.5	11.62877492
- 0.5	11.94594436	1.6	11.55540921
- 0.4	11.95965976	1.7	11.68396184
- 0.3	11.97706932	1.8	11.79160941
- 0.2	11.92742397	1.9	11.80619351
- 0.1	11.94981508	2.0	11.84632551
0	12.01812546		

4 电路系统原理分析及测试

4.1 激励系统分析

电发射激励源为突发式信号源,脉冲持续时间决定了电发射激励源的工作重复频率,并且要求频率、幅度、脉冲个数等参数根据实验测试方案可调,且根据采集到的信号的强弱还可自动调整发射信号的幅度以获得最佳采集信号。A、B 电极发射激励电路原理如图 7 所示。

在图 7 中,FPGA 为 A、B 电极激励电路的逻辑控制器,接收仪器内部总线下发的工作命令及激励脉冲的频率、幅度、脉冲个数等工作参数,译码后产生相应控制信号。同时作为电极激励脉冲的波形发生器,经过数模转换、滤波、功率放大后,可供 A、B 电极相应的激励信号。B 电极的激励脉冲与 A 电极反相,作为负供电电极,也可以将 B 电极接地,直接作为回流电极。通过电流检测电路和放大采集电

路,可以实时采集 A、B 当前的工作电流,从而监控 A、B 电极的实时功率。

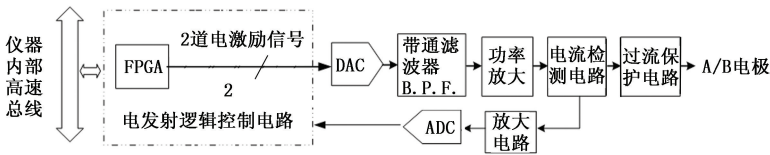


图 7 电极激励电路原理框图

Fig. 7 Electrode exciting circuit block diagram

4.2 采集系统分析

测量电极阵列的电信号采集电路原理图如图 8 所示。

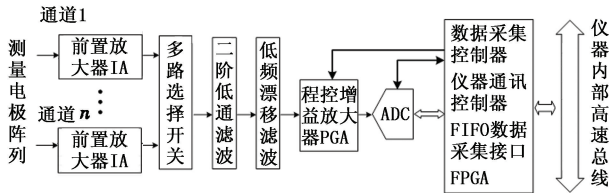


图 8 电信号采集电路原理框图

Fig. 8 Electric signal acquisition circuit block diagram

在图 8 中,电信号采集电路不仅采集测量电极阵列 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 的 4 路单端信号,还采集相邻电极的 3 路差分信号,可以设计至少 3 通道数据采集电路,然后通过多路选择开关实现分时采集。采集通道的增益动态范围为 90 dB,步进为 6 dB,模数转换器每秒采样 5×10^5 次。在微弱电信号采集电路的设计过程中,对噪声的抑制和屏蔽须优先考虑。为了实现对微弱电信号的有效检测,将采集电路模块放置于探测器内部经过特殊设计的承压密封采集电子仓内,然后通过分布在两端的承压盘上的引线实现电气连接,承压盘内侧设有密封橡胶 O 型圈。从测量电极到密封采集电子仓一端的输入插头部分,采用单芯屏蔽线来传输待测信号。FPGA 主要实现数据采集控制器、仪器通讯控制器、FIFO 数据采集接口等功能。采集系统可实现多通道高速高精度同步微弱信号的数据采集功能。

在实验室测试时,探测器是处于空气中的,在 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 以及 A、B 电极间根据供电实际测试情况,连接合适的电阻以模拟电极间的地层介质的电阻值,其测试示意图如图 9 所示,测试时 A 电极供正电,B 电极接地作为回流电极。

若 A、B 电极间电位差为 U ,则各电极表面的电位 $U_{E_n} = U \sum_{i=1}^n R_n / \sum R$,其中 n 取 1,2,3,4。

经过调试,电极系激励及采集系统电路工作正常,较好地实现了预先设计的功能。电路元器件均采用工业级耐高温器件,并在测井仪器专业烘箱中

对电子系统短节进行过 155 ℃ 下 2 h 高温性能测试,能满足现场井下高温环境测试的要求。

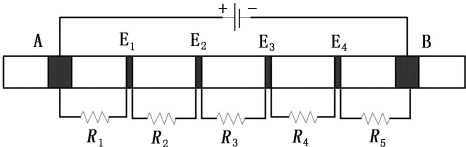


图 9 电极系实验室测试示意图

Fig. 9 Schematic diagram of electrode array laboratory test

5 结束语

在国内外尚未研发出成熟的动电测井仪的背景下,针对一种实际动电测井仪的设计开展研究,阐述了这种新型动电测井探测器的原理并着重分析了可实现连续差分式电位梯度测量的阵列式电极系结构及性能。动电测井涉及到声信号探测和电信号探测,所讨论的动电测井探测器将不同结构和材料要求的声波探测器和电法探测器相结合。相邻电极通过差分方式接收电信号,不仅可消除共模信号的干扰提高信噪比,还可以实现与声波接收换能器阵列深度对齐,获得相同深度记录点的声、电信号。

采用有限元法对动电测井探测器电极系进行了数值模拟研究,分析了电极系的电场响应并求解出了电极系数 K 的数值解为 11.8596,在累积误差允许的范围内,计算结果较为可靠并具有一定的参考意义。对实际电极系电路系统的分析及在实验室的上电测试和高温实验结果表明,电极系的电路系统部分完全可以下井工作。下一步将结合声波探测器性能开展声电转换综合研究和现场测试等。动电测井探测器的研究设计对探测器的进一步研发及动电测井技术的工业化应用都具有参考价值。

参考文献:

[1] GLOVER P W J, JACKSON M D. Borehole electrokinetics [J]. The Leading Edge, 2010,29(6):724-728.

- [2] BLOCK G I, HARRIS J G. Conductivity dependence of seismoelectric wave phenomena in fluid-saturated sediments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 (B1): B1304.
- [3] 王军, 胡恒山, 徐小蓉, 等. 基于动电效应的岩芯渗透率实验测量 [J]. *地球物理学报*, 2010, 53 (8): 1953-1960.
WANG Jun, HU Hengshan, XU Xiaorong, et al. Experimental measurement study on rock permeability based on the electrokinetic effect [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53 (8): 1953-1960.
- [4] HOLLOWAY L, SINGER J, STUART-BRUGES W, et al. Electrokinetic logging has the potential to measure permeability [J]. *PetroPhysics*, 2006, 47 (5): 427-441.
- [5] 陈本池. 震电效应在油气勘探开发中的应用 [J]. *物探与化探*, 2007, 31 (4): 333-338.
CHEN Benchu. A tentative discussion on the application of seismoelectric effect in oil exploration and production [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31 (4): 333-338.
- [6] ZHU Z, TOKSOZ M N, BURNS D R. Electroseismic and seismoelectric measurements of rock samples in a water tank [J]. *Geophysics*, 2008, 73 (5): E153-E164.
- [7] ZHU Z, TOKSOZ M N. Seismoelectric and seismomagnetic measurements in fractured borehole models [J]. *Geophysics*, 2005, 70 (4): F45-F51.
- [8] ZHU Z, HAARTSEN M W, TOKSOZ M N. Experimental studies of electrokinetic conversions in fluid-saturated borehole models [J]. *Geophysics*, 1999, 64 (5): 1349-1356.
- [9] HUNT C W, WORTHINGTON M H. Borehole electrokinetic responses in fracture dominated hydraulically conductive zones [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27 (9): 1315-1318.
- [10] MIKHAILOV O V, QUEEN J, TOKSOZ M N. Using borehole electroseismic measurements to detect and characterize fractured (permeable) zones [J]. *Geophysics*, 2000, 65 (4): 1098-1112.
- [11] 张元中, 肖立志, 楚泽涵, 等. 井孔声电效应转换电磁波的特征 [J]. *地球物理学报*, 2005, 48 (2): 452-458.
ZHANG Yuanzhong, XIAO Lizhi, CHU Zehan, et al. The converted electromagnetic wave characteristics of seismoelectric conversion effect in borehole [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48 (2): 452-458.
- [12] 胡恒山, 刘家琦, 王洪滨, 等. 基于简化的 Pride 理论模拟声电效应测井响应 [J]. *地球物理学报*, 2003, 46 (2): 259-264.
HU Hengshan, LIU Jiaqi, WANG Hongbin, et al. Simulation of acoustoelectric well logging based on simplified pride equations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46 (2): 259-264.
- [13] 胡恒山, 李长文, 王克协, 等. 声电效应测井模型实验研究 [J]. *测井技术*, 2001, 25 (2): 89-95.
HU Hengshan, LI Changwen, WANG Kexie, et al. Experimental study on coupled acoustic and electromagnetic waves in model wells [J]. *Well Logging Technology*, 2001, 25 (2): 89-95.
- [14] 韩学辉, 何亿成, 楚泽涵, 等. 井中震电效应的模拟实验研究 (II): 孔隙饱和岩石部分 [J]. *地球物理学进展*, 2004, 19 (3): 641-644.
HAN Xuehui, HE Yicheng, CHU Zehan, et al. Experiment simulation of seismo-electric in borehole (II): porous saturated media part [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19 (3): 641-644.
- [15] 戴世坤. 双相介质中震电效应和震电波场传播特性 [J]. *勘探地球物理进展*, 2003, 26 (4): 287-289.
DAI Shikun. Characteristics of seismoelectric effects and propagation of waves in two-phase media [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2003, 26 (4): 287-289.
- [16] 卢俊强, 鞠晓东, 乔文孝. 一种声电效应测量井下探测器: 中国, CN201210280746.3 [P]. 2012-08-08.
- [17] 张中庆, 穆林雪, 张雪, 等. 矢量有限元素法在随钻电阻率测井模拟中的应用 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 35 (4): 64-71.
ZHANG Zhongqing, MU Linxue, ZHANG Xue, et al. Application of vector finite element method to simulate logging-while-drilling resistivity tools [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35 (4): 64-71.
- [18] 张国艳, 肖加奇, 肖占山, 等. 三维感应测井仪器在三维井眼环境中的正演模拟 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 37 (3): 63-82.
ZHANG Guoyan, XIAO Jiaqi, XIAO Zhanshan, et al. Forward modeling of 3D induction logging tool in 3D borehole environment [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37 (3): 63-82.

(编辑 修荣荣)