

一种动电探测器电极系的数值模拟研究^①李丰波^{②*} 鞠晓东* 卢俊强* 贺海龙** 解 辉**

(* 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

(** 中国石油集团测井有限公司华北事业部 任丘 062552)

摘 要 用数值模拟方法研究了动电探测器在实际地层条件下的性能。首先分析了一种新型阵列式动电测井探测器电极系的设计依据及特点,建立了正演模拟模型,然后采用二维有限元法对动电探测器电极系的测井响应进行了数值模拟研究,并建立了在均质地层条件下点电极电场响应校验模型,分析了均质、高阻、低阻等地层以及不同层厚下的响应。分析结果表明,探测器对高阻地层及低阻地层的响应明显,能有效区分油层和水层。当层厚为 1m 时能有效划分油水界面;当层厚为 0.5m 时能非常准确地确定目的层中点的位置。此研究有助于指导动电探测器的设计、参数优化以及实际测井资料的处理。

关键词 数值模拟,动电测井,有限元法,动电效应,震电效应

0 引 言

动电测井技术具有潜在应用价值。动电测井以含流体多孔介质中双电层动电效应机制^[1,2]为理论基础,利用声信号和电信号在孔隙地层中相互耦合、相互转换的特性以期获得能反映孔隙地层渗流特性等地质参数信息的动电测井信号,形成一种新的测井方法,为复杂储层的油气勘探和储层评价服务。双电层动电效应直接反映了渗流现象的物理机制,动电测井将有别于传统的渗透率确定方法,将可以直接地测量储层渗透率^[3]。理论和实验研究表明^[4-14],利用动电效应还可以有效区分油水界面,探测与储层有关的地质参数,以及探测裂缝带、地层结构特性等。但国内外对动电测井方法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,尚未见到能实际应用于现场测井的动电测井仪器的报道,也没有见到直接针对动电测井探测器的研究成果,因而无法获得井下地层真实的动电信号,这就制约了理论研究的进一步发展,另外动电测井理论研究水平也无法得到很好的体现和验证,因此对实际探测器的研究就显得尤其重要。

在实际测井探测器的研发过程中,可以采用数值模拟方法^[15,16]对仪器设计进行分析研究,优化仪器的结构设计,也可以通过数值模拟的方法来考察探测器的性能,然后为实际探测器的设计提供相关设计参考。这种探测器设计思路非常具有科研应用价值。为了考察这种新型的阵列式电极系的性能,本文主要研究动电探测器电极系的电场响应,让动电探测器工作在电发射—电测量模式,目的是把动电效应转换形成的复杂多物理场耦合问题简化为单场问题来求解,使问题简化的同时更具针对性。然后分析不同地层条件下的动电电极系的测井响应。

1 动电测井探测器电极系结构

图 1 为动电探测器电极系部分的结构示意图。图中 A、B 为供电电极,充当电发射激励源,可以向

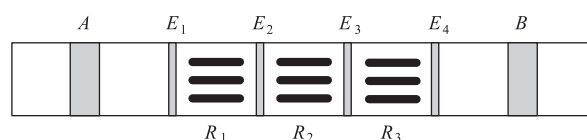


图 1 动电探测器电极系结构示意图

① 国家自然科学基金(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)和中国石油大学(北京)基本科研基金(KYJJ2012-05-07)资助项目。

② 男,1985 年生,博士生;研究方向:地球物理测井及仪器;联系人,E-mail:lfphd@163.com
(收稿日期:2013-10-08)

井中发射声频交变电(磁)场,其中 A 为主供电电极, B 为回流电极,并假设参考电极在无穷远处。 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。动电测井的主要目的是在井孔内通过声波换能器激发声场诱导产生动电效应后,通过测量电极阵列接收声电转换后的电信号,从而获得井旁多孔介质地层中的动电信号。

由于震电效应是可逆的,即在含流体多孔介质地层中施加人工电(磁)场,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形成弹性波,可以引发动电效应的逆效应——电震效应。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,然后通过布置在 E_1E_2 、 E_2E_3 及 E_3E_4 三对测量电极中间位置的三个声波接收器阵列 R_1 、 R_2 、 R_3 来测量电震效应产生的声波信号,同时,也可以通过测量电极来检测此时井中电位及其电位差值。电位主要受泥浆电阻率及井旁地层电阻率的影响,可以有效反映出井旁地层的性质。

这一新型动电电极系的主要特点是可以实现连续测量,以实现与声波接收换能器深度对齐,还可以形成不同电极距的连续差分式电位梯度。当发射大功率声波信号而激发产生动电效应(产生动电信号)时,此时计算测量电极阵列的响应对研究孔隙地层的动电效应是非常有意义的。

2 正演模拟问题的数学模型及求解域

石油测井中,井下地层介质大都具有旋转对称性,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。如果采用柱坐标系 (r, φ, z) , 则三维电场分布问题可以简化为二维子午面 (r, z) 上的电场分布问题。如果介质和电极系的位置还具有对 $z=0$ 平面的反射对称性,这时还可进一步将求解区域缩小到 $z \geq 0$ 的半子午面内。因为动电探测器电极系也具有旋转对称性,所以三维电场分布问题可以简化为二维问题来求解。本文以 AMNB 电极系(A 、 B 为供电电极, M 、 N 为测量电极)中点 O 为坐标原点,在径向上考虑井眼的影响,在轴向上考虑上、下围岩的影响,建立包含动电探测器电极系的非均质地层模型,其示意图见图 2。

在图 2 中,井眼半径为 $\frac{d_h}{2}$, 电极系半径为 r_0 , 设井眼中泥浆的电阻率为 R_m , 目的地层的层厚为 h ,

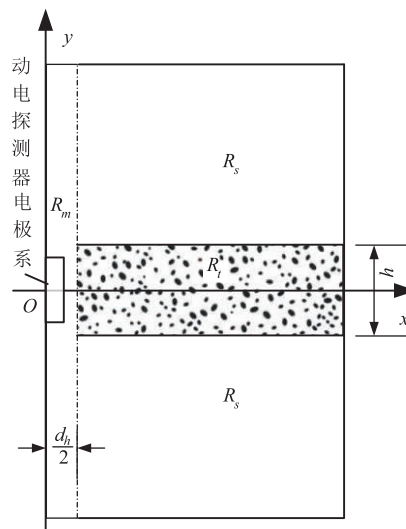


图 2 动电探测器电极系及地层模型示意图

目的地层电阻率为 R_i , 上下围岩的电阻率为 R_s 。将井眼中的电极系去掉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 。

在二维稳态传导电流场问题中,动电探测器电极系的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 , 下面给出其应满足的条件。

(1) 求解域 Ω 内

电阻率 R 为常数的每一个区域内任一点, 满足

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial r} \right) + r \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 R 表示介质电阻率, 分别为 R_m 、 R_i 、 R_s ; U 为标量电位。

式(1)反映的是电流守恒方程, 在 $r \neq 0$ 处, 等价于电流密度矢量 $\vec{J}$ 的散度为零, 即 $\nabla \cdot \vec{J} = 0$ 。在 $r = 0$ 边界处, 有 $\frac{\partial U}{\partial r} = 0$ 。在整个求解域 Ω 内, 包括不同介质分界面上的点, 式(1)均满足, 比柱坐标系中电位函数 U 的拉普拉斯方程更具有适用性。

(2) 求解域的边界 Γ 上

测量电极 M 、 N 表面电位为已知常数, 且应为等位面, 在无穷远边界 Γ_∞ 处电位为 0。边界条件可描述为

$$\begin{cases} U|_{\Gamma_i} = U_i, i = M, N \\ U|_{\Gamma_\infty} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

在电极间的绝缘(玻璃钢外壳)边界上无电流流过, 满足 $\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial n} = 0$ 。供电电极 A 、 B 表面上电流连

续,满足

$$2\pi r_0 \int_{r_i} \frac{1}{R_m} \cdot \frac{\partial U}{\partial n} dl = I_i, i = A, B \quad (3)$$

式中 $\vec{n}$ 为边界表面相对求解区域的外法线方向向量, R_m 为井眼中泥浆电阻率, dl 为子午面上电极表面的线元。

3 电极系电场分布函数

依据声波接收换能器阵列的间距要求,模拟的动电探测器电极系的尺寸结构设计为 $\frac{0.1}{A}0.3\frac{0.02}{E_1}0.3\frac{0.02}{E_2}0.3\frac{0.02}{E_3}0.3\frac{0.02}{E_4}0.3\frac{0.1}{B}$, 单位均为米(m),记录点为电极系的中点。各电极中心间距均为0.3m,供电电极 A 、 B 的长度为0.1m,测量电极的长度均为0.02m。动电探测器的半径 r_0 为0.052m。

测量电极阵列 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 实际测量时主要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,以实现连续测量,形成不同电极距的连续差分式电位梯度。本文以靠近电极系中点 O 的一对测量电极 E_2 、 E_3 为例,来推导其电场分布函数,分析其测井响应。为了不失一般性,将其重新命名为 AMNB 电极系,如图 3 所示。其结构相应表示为 $\frac{0.1}{A}0.6\frac{0.02}{M}0.3\frac{0.02}{N}0.6\frac{0.1}{B}$ 。AMNB 电极系的深度记录点为 O 。

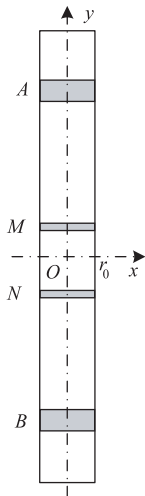


图3 AMNB 电极系结构示意图

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} 。反映了动电电极系电场分布的特点,跟井旁地层的性质有关。

由于 AMNB 电极系电极的尺寸比电极间的间距要小得多,所以可以将 A 、 M 、 N 、 B 电极看成是点电极。在均匀各向同性介质中,点电极所形成的电场是有源无旋场,点电极 A 所形成的电场的等位面是以 A 为球心的球面,球面上的电流密度的模相等。描述该场的物理量有电场强度矢量 $\vec{E}$ 、电流(传导电流)密度矢量 $\vec{J}$, 以及标量电位 U , 且满足

$$\vec{E} = \frac{RI}{4\pi r^2} \vec{e}_r \quad (4)$$

式中 $\vec{e}_r$ 表示由 A 指向 r 方向的单位矢量。

在恒定电(流)场中,标量电位 U 等于电场强度矢量 $\vec{E}$ 的 E_r 分量沿 r 方向的积分,即

$$U = - \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int E_r dr = - \frac{RI}{4\pi} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{RI}{4\pi r} + C \quad (5)$$

故标量电位为 $U = \frac{RI}{4\pi r} + C$ 。因为恒定电(流)场的无穷远处边界条件为 $U_\infty = 0$, 即当 $r \rightarrow \infty$ 时, $U_r = 0$, 所以积分常数 $C = 0$ 。故均匀各向同性介质中点电极的电位分布表达式为 $U = \frac{RI}{4\pi r}$, 则介质的电阻率表达式为 $R = 4\pi r \frac{U}{I}$ 。

假设参考电极在无穷远处,且电位为零,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 应该分别等于电极 A 、 B 在 M 、 N 处的电位和,则有

$$\begin{cases} U_M = \frac{RI}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \\ U_N = \frac{RI}{4\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \\ \Delta U_{MN} = \frac{RI}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,介质电阻率为

$$R = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (7)$$

令

$$K = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (8)$$

则有

$$\begin{cases} R = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \\ K = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \end{cases} \quad (9)$$

其中 K 为仪器刻度系数,单位为 m ,亦称之为电极系数。通常将电极系在实际地层中测量得到的电位差值 ΔU_{MN} 按照式(9)计算得到的电阻率称为视电阻率(apparent resistivity),用 R_a 表示,以区别于介质的真实电阻率 R ,即

$$R_a = K \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (10)$$

那么,在均匀各向同性介质中,显然有 $R_a = R$ 。且由式(9)可知,在均匀各向同性介质中,电极系数 K 为

$$K = \frac{RI}{\Delta U_{MN}} \quad (11)$$

式中 R 为介质电阻率, I 为供电电流大小。

在分析电极系的电场响应前,需要对电极系进行仪器刻度,即求出电极系数 K 。我们在均质地层条件下,依据我们所建立的数学模型并根据式(11),通过有限元法计算得出了电极系数为 11.8596。然后再依据式(10)来求解其视电阻率 R_a 。

4 点电极的电场响应验证分析

为了验证本文提出的基于有限元法的正演模拟方法的可靠性和计算精度,我们首先分析了在各向同性均质地层介质中点电极的电场响应。

以点电极 A 为坐标原点,设宽度为 35m,高度为 70m,令介质的电阻率 $R = 1\Omega \cdot m$,模拟径向无限远和轴向无限厚的均质地层模型,从而建立点电极电场响应校验模型。点电极 A 发出稳定电流 I ,其电流大小为 $I = 1A$ 。在该模型中,点电极 A 产生的电场的电位必须满足以下条件:

(1)在靠近点电极 A 处,电位 U 按照 $U = \frac{RI}{4\pi r}$

趋近于无穷大,即 $U_r|_{r \rightarrow 0} \rightarrow \infty$

(2)在无穷远处,电位 U 满足边界条件 $U_r|_{r \rightarrow \infty} \rightarrow 0$

本文在计算机 CPU 为 Intel Pentium 4,主频为 3.00GHz,内存为 4GB DDR2 的平台下开展相关的计算工作,由于将三维问题简化为二维问题来求解,

采用二维有限元模型可减少计算量。

本文选取径向上距离点电极 A 0~0.5m 路径上的电位值计算结果(P11)与解析解做对比分析,其结果见图 4。

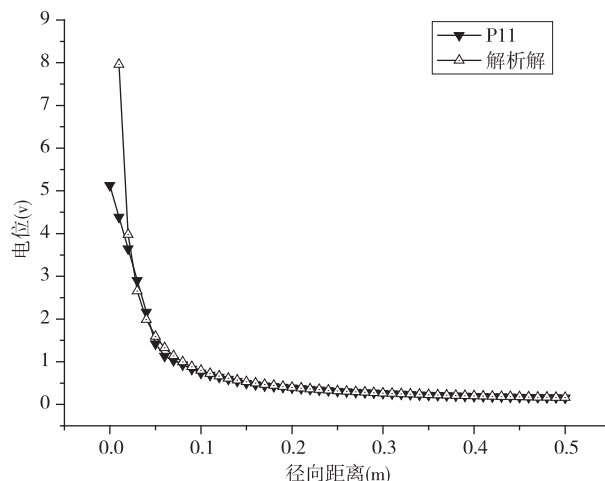


图 4 点电极数值解与解析解结果

在图 4 中,P11 为有限元数值解,解析解由表达式 $U = \frac{RI}{4\pi r}$ 求出,其中 $R = 1\Omega \cdot m$, $I = 1A$ 。

在距离点电极 0.1~0.5m 区间的结果误差很小,随着距离的增加,数值解的结果也趋近于 0,符合点电极远场电位趋近于零的规律;在距离点电极 0~0.1m 距离间(即靠近点电极的近场区域),接近于解析解的结果,也基本符合近场电位趋近于无穷大的规律。鉴于此,再进一步优化这一模型的有限元单元剖分,致力于进一步提高靠近点电极的近场区域的求解精度。同样选取径向上距离点电极 A 0~0.5m 路径上的电位值结果(P12)与解析解进行对比分析,其结果见图 5 所示。

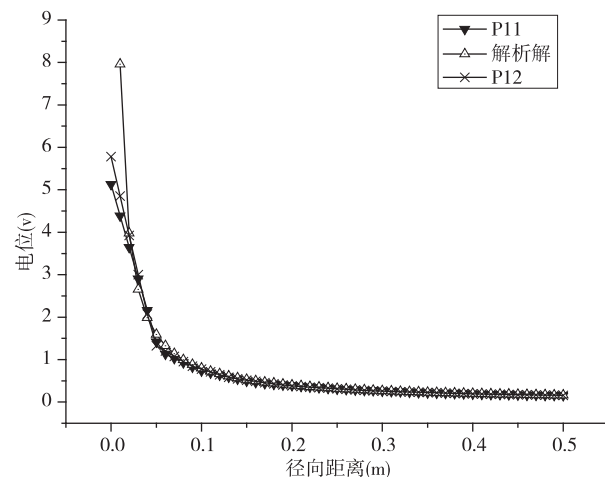


图 5 优化后点电极数值解与解析解结果

由图5可知,相比于P11对应的模型,优化了靠近点电极的近场区域数值解的求解精度,在近场区域P12的计算结果比P11更接近于解析解;在远离点电极的远场区域,P11和P12计算结果一致性非常好。

以上分析表明,本文所建立的有限元数值模型是合理的可靠的,具有一定的计算精度。

5 不同地层条件下的测井响应分析

5.1 均质地层的响应

为了进行校验和对比,我们首先模拟了均质地层中的电极系测井响应。模拟条件为围岩电阻率 R_s 、目的地层电阻率 R_t 、井眼中泥浆电阻率 R_m 均为 $1\Omega\cdot m$,则地层可以视为各向同性的均质地层。计算结果如图6所示。

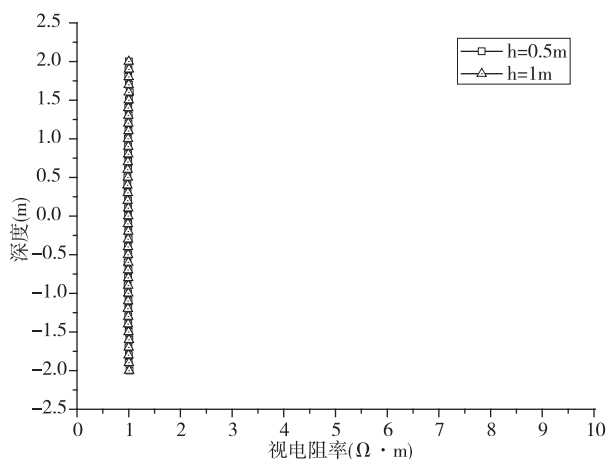


图6 均质地层视电阻率响应曲线

本文模拟了目的层层厚分别为0.5 m和1 m时的地层响应。从图6可以看出,两条视电阻率曲线一致性很好,并且其数值解的值均约为 $1\Omega\cdot m$,约等于均质地层的真实电阻率值,其数值解的结果在误差允许的范围内,是比较可靠的。

5.2 高阻地层的响应

若目的地层为高阻地层,则一般可视为含油的储集层,即油层。

模拟的条件为在层厚 $h = 1\text{ m}$ 时, $R_t/(R_s = R_m) = 5:1$ 和 $R_t/(R_s = R_m) = 10:1$ 时的高阻地层测井响应,计算结果如图7所示。

如图7所示,横轴表示视电阻率 R_a 的值,纵轴表示仪器记录点所处的深度值,0为坐标原点参考点。

由图可知,在高阻地层的上下分界面处(即 $h =$

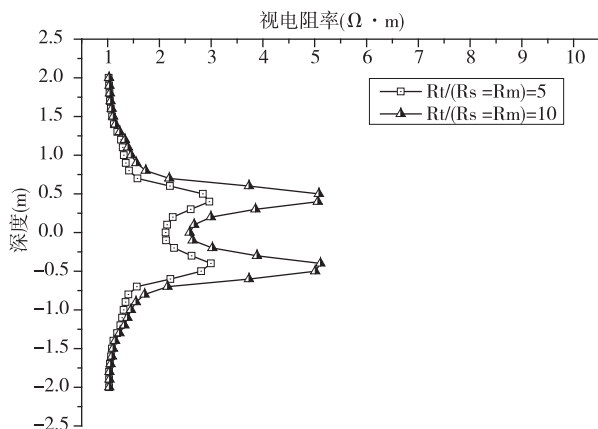


图7 高阻地层视电阻率响应曲线

$\pm 0.5\text{ m}$),视电阻率曲线出现极大值,而在高阻地层的中点出现极小值。同时,视电阻率曲线也可以反映出高阻地层电阻率 R_t 越大,对视电阻率的贡献就越多。

在上提测井的过程中,随着仪器逐渐靠近高阻层下边界,当供电电极A进入高阻层中时会产生增阻效应,视电阻率会逐渐变大,在下边界处取得极大值。继续上提仪器,由于供电电极A逐渐靠近高阻层上边界,增阻效应的影响会减弱,视电阻率则会逐渐变小,在高阻地层中点处取得极小值,因为此时供电电极A已穿出高阻层,供电电极B尚未进入高阻层,高阻层的屏蔽效应最大。仪器记录点穿过地层中点后A电极会逐渐远离高阻地层,但B电极会逐渐靠近,其对地层的测井响应相似,所以高阻层视电阻率响应曲线是关于目的地层对称的一条曲线。

当仪器远离高阻层后,受高阻层影响逐渐减弱,视电阻率曲线主要反映的是围岩的电阻率值,从曲线上看逐渐靠近 $1\Omega\cdot m$ 。

当目的层层厚 $h = 0.5\text{ m}$ 时,我们模拟了探测器对高阻薄层的测井响应,见图8。

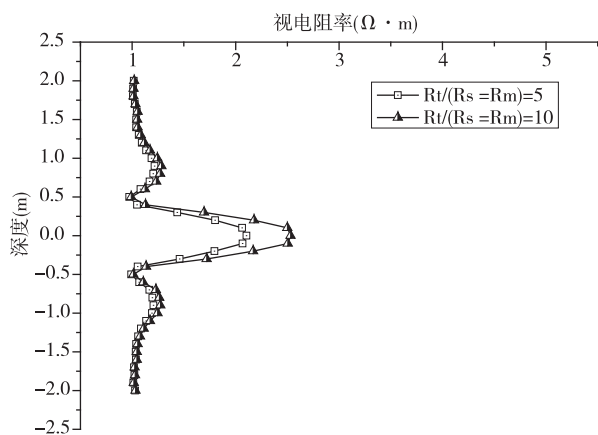


图8 高阻薄层视电阻率响应曲线

在图 8 中,视电阻率响应曲线依然是关于目的地层中点对称的一条曲线。由于目的地层厚度小于探测器的电极距,曲线形状也出现了差异,此时在目的地层中点取得视电阻率的极大值,地层的分界面尚不能明显地判断出来。但是,仍然可以正确地识别目的层的中点。

5.3 低阻地层的响应

若目的地层为低阻地层,则一般可视为含水层,即水层。我们模拟条件为 $h = 1\text{m}$, $R_t/(R_s = R_m) = 1:5$ 和 $R_t/(R_s = R_m) = 1:10$ 时低阻地层测井响应。

由图 9 可知,在低阻地层的上下分界面处(即 $h = \pm 0.5\text{m}$)附近,有很大的负异常值出现,而且视电阻率响应曲线同样关于目的地层对称。

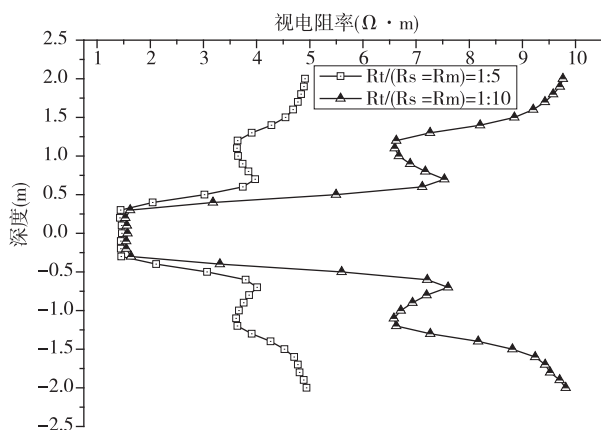


图 9 低阻地层视电阻率响应曲线

在上提测井过程中,在低阻地层的下分界面附近 -0.3m 处出现低阻拐点,在低阻地层中点处取得电阻率的极小值。在 -0.3m 拐点处,供电电极 A 应处于低阻地层的上分界面。当仪器继续上提,在低阻地层中点处(即 0m 处)出现极小值,而此时供电电极 A 已经穿出低阻地层, A 、 B 电极关于低阻地层中点对称。根据动电探测器的电极距可以确定此时电极 A 位于 0.75m 处,而电极 B 则位于 -0.75m 。此时可根据 $\pm 0.3\text{m}$ 出现的拐点结合动电探测器的电极距来确定地层的分界面,即

$$|-0.3| + h/2 = 0.75 \quad (12)$$

据此可得知 $h' = 0.9\text{m}$ 。但是已知的模拟条件为 $h = 1\text{m}$,据式计算可得出低阻地层的分界面附近的拐点在理论上应该在 $\pm 0.25\text{m}$ 处,与实际计算的结果偏差了 0.05m ,考虑到模拟测井操作的上提深度步长为 0.1m ,没有取到 $\pm 0.25\text{m}$ 处的值。所以修正后,可得出 $h'' = 1\text{m}$,据此可判断出低阻地层的上下分界面在 $\pm 0.5\text{m}$ 处。

当模拟条件为 $h = 0.5\text{m}$ 时,模拟了探测器对低阻薄层的测井响应,见图 10 所示。

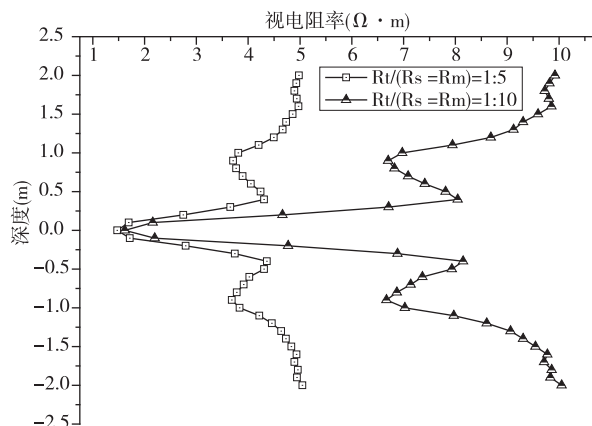


图 10 低阻薄层视电阻率响应曲线

由图 10 可知,探测器对低阻薄层的测井响应曲线依然关于目的地层中点对称,并且在地层中点取得极小值,接近于地层真实电阻率 $1\Omega \cdot \text{m}$ 。但此时地层的分界面已经不能较直观的分辨,这主要受到探测器电极距的影响。但是根据曲线形状,在地层的上下分界面附近,仍然有一个极值点出现,再结合地层中点取得极小值的深度位置,仍可以定性判断地层的分界面。

6 结论

将数值模拟研究方法应用到动电探测器的研发过程中,可以优化设计、提高研发效率。同时还可以在实验室条件下通过数值模拟的手段来考察研究探测器在实际地层中的性能,体现了这种综合设计方法的科研应用价值。通过对点电极电场响应的数值解和解析解的对比分析,验证了本文所建立的正演模拟方法的可靠性。对采用二维有限元法模拟均质地层、高阻地层、低阻地层等不同地层条件下的动电电极系的测井响应的分析表明,探测器对高阻地层及低阻地层的响应明显,能有效区分油层和水层。当层厚为 1m 时,能有效划分油水界面,高阻地层的响应更为灵敏。当层厚为 0.5m 时,由于受到仪器电极距的影响,虽然不能明显地区分油水界面,但是能非常准确地确定目的层中点的位置。本文研究结果可用以指导实际的动电测井探测器的研究,以及对动电测井仪器刻度和取得的测井资料的分析,具有较重要的意义。本文在所建立数学模型的基础上,分析考察了这种新型探测器电极系的性能,下一

步要做的工作是开展声电转换响应和电声转换响应的进一步研究,本研究也为此奠定了基础。

参考文献

- [1] Glover P W J, Jackson M D. Borehole electrokinetics. *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 Geophys Res*, 2006, 111(B1): B1304
- [3] Holloway L, Singer J, Stuart-Bruges W, et al. Electrokinetic logging has the potential to measure permeability. *Petrophysics*, 2006, 47(5): 427-444
- [4] Zhu Z, Toksoz M N, Burns D R. Electroseismic and seismoelectric measurements of rock samples in a water tank. *Geophysics*, 2008, 73(5): E153-E164
- [5] Zhu Z, Toksoz M N. Seismoelectric and seismomagnetic measurements in fractured borehole models. *Geophysics*, 2005, 70(4): F45-F51
- [6] Zhu Z, Haartsen M W, Toksoz M N. Experimental studies of electrokinetic conversions in fluid-saturated borehole models. *Geophysics*, 1999, 64(5): 1349-1356
- [7] Mikhailov O V, Queen J, Toksoz M N. Using borehole electroseismic measurements to detect and characterize fractured (permeable) zones. *Geophysics*, 2000, 65(4): 1098-1112
- [8] 石昆法. 震电效应原理和初步实验结果. 地球物理学报, 2001, (5): 720-728
- [9] 陈本池, 牟永光, 狄帮让等. 井中震电勘探模型实验研究. 石油物探, 2003, (1): 35-38
- [10] 张元中, 肖立志, 楚泽涵等. 模型井声电效应的实验研究. 岩石力学与工程学报, 2004, (14): 2434-2438
- [11] 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. 地球物理学报, 2003, (02): 259-264
- [12] 胡恒山, 王克协. 井孔周围轴对称声电耦合波: 声电效应测井数值模拟(II). 测井技术, 2000, (01): 3-13
- [13] 胡恒山, 王克协. 井孔周围轴对称声电耦合波: 理论(I). 测井技术, 1999, (06): 427-432
- [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. 地球物理学进展, 2004, (3): 641-644
- [15] 高杰, 柯式镇, 魏宝君等. 电法测井数值模拟现状及发展趋势分析. 测井技术, 2010, (01): 1-5
- [16] 罗水亮, 陶果. 用大型有限元软件 ANSYS 处理电法测井的电磁场问题. 测井技术, 2004, (06): 409-502

Numerical modelling study of an electrode array for electrokinetic detectors

Li Fengbo^{*}, Ju Xiaodong^{*}, Lu Junqiang^{*}, He Hailong^{**}, Xie Hui^{**}

(^{*} State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249)

(^{**} Division of Northern China, China Petroleum Logging CO. LTD. , Renqiu 062552)

Abstract

The numerical modeling technique was applied to a study of the performance of an electrokinetic detector in different stratum environments. Firstly the design basis and characteristic of a new type of electrode array for electrokinetic detectors for logging was analyzed, and a forward modeling model was established. Then, the logging responses of the electrode array were simulated with the two-dimensional finite element method, and a model for verification of electrodes' electric field responses in the condition of homogeneous formation was founded. Finally, the different logging responses in the strata of homogeneity, high resistance, low resistance, and the ones with different thicknesses, were analyzed so as to investigate the performance of electrokinetic detectors. The results show that the electrode array can effectively distinguish an oil layer from a water layer, the interface between the two layers can be effectively found when the layer thickness is 1m, and the position of the midpoint of the target layer can be accurately determined when the layer thickness is 0.5m. This work is significant in guiding the design of electrokinetic detectors, optimizing parameters and processing real logging data.

Key words: numerical modeling, electrokinetic logging, finite element method, electrokinetic effect, seismoelectric effect