

大介电常数地层中多分量感应测井响应研究*

洪德成[†] 杨善德

(吉林大学物理学院, 长春 130012)

(2010年10月7日收到; 2010年12月7日收到修改稿)

研究大介电常数对多分量感应测井的影响, 并通过不同磁场分量的组合量来同时提取地层电阻率和介电常数以及地层纵向边界信息, 实现地层参数的重构, 直观识别烃源岩地层.

关键词: 多分量感应测井, 大介电常数, 组合量, 直观解释

PACS: 91.60.Pn, 91.25.Qi, 41.20.-q

1. 引言

电法测井是应用最为广泛的含油气饱和度测井方法, 它通过对地层电导率、介电常数非均质分布状况的探测来提取含油气饱和度以及油气可流动信息. 感应测井仪器的源频率一般为几十千赫兹, 通过测量发射—接收线圈的感应电动势来提取地层电导率, 典型地层的相对介电常数一般在 80 (纯水的相对介电常数值) 以下, 对测井响应的影响往往被忽略掉. 在以往的研究中发现某些泥岩层段的感应测井响应会出现异常, 测井曲线的虚部信号明显沿负值方向偏离零, 当时人们还不能对这种异常做出合理的解释. 近年来 Andersson 等人通过深入分析发现是该泥岩层段的大介电常数导致了这种异常, 并给出了泥岩层出现大介电常数的物理解释^[1]. 这类泥岩层含有大量有机质, 地质上称为烃源岩 (source rock), 它并不是目前可开发的油气储层, 但识别和探测这类地层仍有一定的现实意义.

多分量感应测井仪器是近 10 年来针对砂-泥岩薄交互层组这类等价宏观电各向异性油储层发展起来的新型感应测井仪器, 它由三个相互垂直的发射线圈和与其平行的接收线圈组成, 可同时测量接收点的全部磁场分量, 与发射线圈相对应的九个磁场分量可表示为完整的二阶张量, 提供丰富的地层信息^[2]. 砂-泥岩薄交互层组这类低阻油储层的电阻率各向异性对测井响应影响明显, 而相对介电常

数一般都比较小, 对感应测井响应的影响可以忽略. 除去直耦信号后的多分量感应电动势虚部信号一般比实部信号小 1—2 个量级, 信噪比差, 已发表的文章只关注地层电阻率各向异性及测井环境对实部信号的影响, 并通过对不同分量的实部信号反演地层参数^[3-5]. 多分量感应测井响应比较复杂, 资料解释困难, 我们在以往的研究中发现不同分量的某种组合量, 有的具有很好的边界效应, 便于重构地层的几何结构, 有的与地层参数关系简单, 便于电参数视值解释^[6]. 本文研究含大介电常数各向同性地层中多分量感应测井仪器不同测井分量实部和虚部响应特征, 并构造组合量来提取地层的电阻率和介电常数, 直观识别烃源岩层.

2. 方法原理

图 1 是多分量感应测井仪器基本结构单元示意图, 为屏蔽与介质参数无关的直接耦合信号, 提高感应信号的测量精度, 实际的感应测井仪器需在发射线圈 T 和主接收线圈 R1 之间与主接收线圈 R1 串联一组反向缠绕的接收线圈 R2 (补偿线圈), 通过调节其位置, 使补偿后的测量信号强度在空气中为零. 发射和接收线圈的尺寸一般远小于其发射点到接收点的距离 (源距), 在测井响应的模拟计算中可将发射线圈源等价于磁偶极子, 接收线圈的感应电动势 V 可用接收点处垂直线圈平面的磁场分量 H_{\perp} 来描述. 感应电动势与磁场之间的关系为

$$V = i\omega\mu s H_{\perp}, \quad (1)$$

* 吉林大学基础科研业务费 (批准号: 201100001) 资助的课题.

[†] E-mail: hongdc@jlu.edu.cn

其中 $\omega = 2\pi f$, f 是仪器采用的源频率, μ 是介质磁导率(这里取为真空磁导率 $\mu = \mu_0$), s 为接收线圈的面积. 接收线圈可测量与三个发射线圈相对应的

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} & H_{xz} \\ H_{yx} & H_{yy} & H_{yz} \\ H_{zx} & H_{zy} & H_{zz} \end{bmatrix},$$

第一下标代表发射方向, 第二下

标代表接收方向. 经补偿后的磁场信号为

$$H = H_1 - \frac{L_2^3}{L_1^3} H_2, \quad (2)$$

其中 H_1 是主线圈接收的磁场, L_1 是主源距; H_2 是补偿线圈接收的磁场, L_2 是补偿源距.

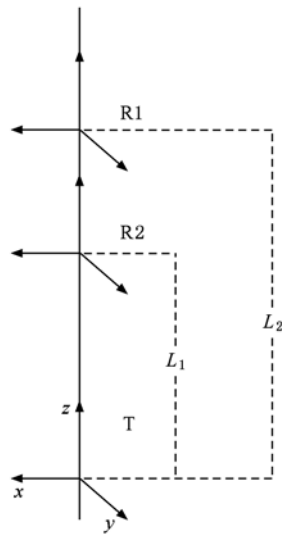


图1 多分量感应测井仪器基本结构单元示意图

2.1. 均匀介质中的测井响应

在均匀各向同性介质中只有三个主分量 H_{xx} , H_{yy} 和 H_{zz} 不为零, 且有 $H_{xx} = H_{yy}$, 测井响应与地层电参数之间的关系一般是非线性的(见附录 A). 介质中的电磁波可用与电参数有关的波数 k 来描述,

$$k = \sqrt{i\omega\mu\sigma + \omega^2\mu\varepsilon} = \sqrt{i\omega\mu\sigma + \omega^2\mu\varepsilon_r\varepsilon_0}, \quad (3)$$

ε 是介质的介电常数, 真空介电常数 $\varepsilon_0 \cong 8.8542 \times 10^{-12}$ F/m, ε_r 是由介质性质决定的无量纲相对介电常数. 接收线圈处的磁场表述为波数 k 的泰勒展开

$$H_{zz} = \frac{1}{2\pi L_1^3} \left[\frac{1}{2} k^2 (L_1^2 - L_2^2) + \frac{1}{3} i k^3 (L_1^3 - L_2^3) + o(k^4) \right], \quad (4)$$

$$H_{xx} = \frac{1}{4\pi L_1^3} \left[\frac{1}{2} k^2 (L_1^2 - L_2^2) + \frac{2}{3} i k^3 (L_1^3 - L_2^3) + o(k^4) \right], \quad (5)$$

(4)与(5)式的第一项正比于 k^2 , 即地层电导率 σ 和介电常数 ε 的线性项, 而共面分量 H_{xx} 中波数 k^3 的权重是共轴分量 H_{zz} 中的两倍, 这导致了 H_{xx} 与电参数之间的非线性关系比 H_{zz} 的更严重. 当地层电阻率较高和相对介电常数较小时, 可略去(4)和(5)式的高阶项, 满足低频近似

$$H_{zz} \approx \frac{1}{4\pi L_1^3} (L_1^2 - L_2^2) i\omega\mu(\sigma - i\omega\varepsilon_r\varepsilon_0), \quad (6)$$

$$H_{xx} \approx \frac{1}{8\pi L_1^3} (L_1^2 - L_2^2) i\omega\mu(\sigma - i\omega\varepsilon_r\varepsilon_0), \quad (7)$$

得到地层电导率 σ 和介电常数 ε 的近似表达式. 而当地层电阻率较低或相对介电常数较大时, (4)和(5)式中的高阶项不可忽略, 由低频近似(6)和(7)式求解得到的地层参数需要做相应的趋肤效应校正. 利用磁场分量的组合量求解地层参数是处理多分量感应测井资料一个好的途径^[6]. 由(4)和(5)式联立消去 k^3 项得

$$H_{zz} - H_{xx} = \frac{1}{4\pi L_1^3} \left[\frac{1}{2} k^2 (L_1^2 - L_2^2) + o(k^4) \right], \quad (8)$$

其第一项仍为电参数的线性项, 与分量 H_{xx} 和 H_{zz} 相比, 组合量 $(H_{zz} - H_{xx})$ 与地层电参数之间的非线性关系更弱, 更容易满足低频近似

$$H_{zz} - H_{xx} \approx \frac{1}{8\pi L_1^3} (L_1^2 - L_2^2) i\omega\mu(\sigma - i\omega\varepsilon_r\varepsilon_0), \quad (9)$$

为便于与地层电参数相比较, 通常将磁场除去与仪器参数有关的常数项后得到电导率量纲的测井响应

$$\sigma_{ij}^a = \frac{H_{ij}}{K_{ij}} \approx \sigma - i\omega\varepsilon_r\varepsilon_0, \quad (10)$$

其中

$$K_{xx} = K_{yy} = \frac{i\omega\mu}{8\pi L_1^3} (L_1^2 - L_2^2),$$

$$K_{zz} = \frac{i\omega\mu}{4\pi L_1^3} (L_1^2 - L_2^2),$$

$$K_{xx} = K_{zz} = -\frac{i\omega\mu}{16\pi L_1^3} (L_1^2 - L_2^2), \quad (11)$$

相应地, (9)式改写为

$$2\sigma_{zz} - \sigma_{xx} \approx \sigma - i\omega\varepsilon_r\varepsilon_0, \quad (12)$$

其虚部信号中 $\sigma_0 \equiv \omega\varepsilon_0$ 具有电导率的量纲, 由于 ε_0 的值非常小, σ_0 一般远小于地层的电导率 σ (0.5—10000 mS/m), 例如, 当感应测井仪器源频率 f 为 26 kHz 时

$$f = 26 \text{ kHz} \Rightarrow \sigma_0 \cong 1.45 \mu\text{S/m}, \quad (13)$$

可见,介电常数对感应测井响应能否产生足够的影响,取决于地层相对介电常数 ϵ_r 的大小. 一般情况下,典型地层的相对介电常数 $\epsilon_r < 80$ (纯水的相对介电常数),这时介电常数对感应测井响应的影响可以忽略,而当 $\epsilon_r > 10000$ 时,介电常数会对感应测井响应产生明显的影响. 由(10),(12)式可知,介电常数只包含在实部信号的高阶项中,对实部信号的影响小;虚部信号的线性项与介电常数成正比,所受影响会比较大.

2.2. 水平层状模型中的测井响应

我们用水平层状模型来模拟地层电参数的纵向分布,研究在忽略井眼和泥浆侵入环境下地层电参数和纵向边界对测井响应的影响. 水平层状介质中电磁场的积分解析解已经由文献[7,8]给出,附录中给出了水平层状地层中多分量感应测井响应各分量的积分表达式. 在垂直井中,地层参数具有圆柱对称性,只有三个主分量 σ_{xx}, σ_{yy} 和 σ_{zz} 不为零,且共面分量 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$. 近年来,随着科技的发展和生产实际的需要,倾斜井在油田的开发中越来越多. 在倾斜井中,地层模型不再具有圆柱对称性,介质中的电磁场是个三维问题. 测量时仪器绕自身旋转,测井响应一般是仪器方位角 φ 的函数,我们通常将实测资料转换到方位角 $\varphi = 0$ 后做进一步的资料处理^[9],此时,与 y 方向有关的交叉分量 $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \sigma_{zy} = \sigma_{yz} = 0$. 远离边界处主分量 σ_{xx}, σ_{yy} 和 σ_{zz} 的测井响应与垂直井中的相同,没有新的响应特征,但在边界附近共面分量 σ_{xx} 和 σ_{yy} 受邻层影响不同,随着角度的增大测井响应曲线会有所分离;组

合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$ 的纵向分辨率在任意井眼斜角 α 下都比主分量 σ_{xx}, σ_{yy} 和 σ_{zz} 的高,且非线性关系更弱,有利于地层电参数的提取^[10]. 通过数值模拟,我们发现与 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$ 相比,组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{yy})$ 在各向同性层状地层中有更好的边界性质和更高的纵向分辨率. 交叉分量 σ_{zx} 和 σ_{xz} 在边界附近的响应随着井眼斜角 α 的增加而增大,其组合量 $(\sigma_{zx} - \sigma_{xz})$ 响应更单纯,峰值与地层边界有更好的对应关系^[6]. 受补偿线圈的影响,理论上 $(\sigma_{zx} - \sigma_{xz})$ 的峰值位置并不刚好对应地层纵向边界位置,但可根据源距大小做相应的理论校正,实际资料的直观解释中,考虑到测井环境及噪声等因素的影响,取其峰值位置为纵向边界是合理的.

3. 数值模拟

从上面的分析中我们看到,大的介电常数会对测井响应产生影响,合理地利用多分量感应测井资料可同时提取地层的电导率和介电常数信息. 本节通过数值模拟分析测井响应及其组合量对地层电参数的探测灵敏度以及非均质地层中的测井响应特征,综合利用不同的测井响应组合量实现地层参数的重构. 取仪器的主收发线圈的源距 $L_1 = 39$ in, 补偿线圈源距 $L_2 = 27$ in (1 in = 2.54 cm), 源频率 $f = 26$ kHz, 在仪器方位角 $\varphi = 0^\circ$ 的条件下考察感应测井分量及其组合量的响应特征. 图2给出了各向同性均匀介质中主分量 $\sigma_{xx}(\sigma_{yy})$ 和 σ_{zz} 及其组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$ 的虚部和实部对电参数的探测灵敏度.

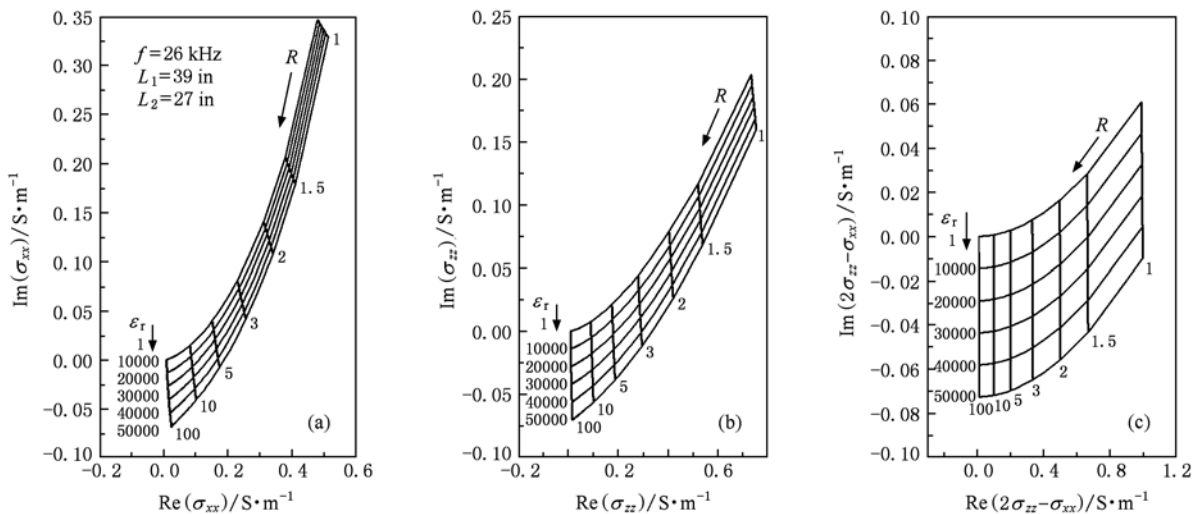


图2 均匀介质中各分量及其组合量实、虚部对电参数的探测灵敏度

可以看出在典型地层电导率范围内磁场 σ_{xx} 和 σ_{zz} 及其组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$ 的实部信号强度都大于零. 当地层电阻率较高, 相对介电常数 $\epsilon_r = 1$ 时, 其虚部信号强度接近零, 并随着介电常数的增加而沿负值方向增大, 这一响应特征可以直观识别较高阻的大介电常数地层, 比较图 2(a), (b) 和 (c) 可知, 组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$ 与地层参数非线性关系最弱, 可适

用的电阻率范围大; 当地层电阻降低时, 虚部信号幅度会向正值方向增大, 这是测井响应受到趋肤效应影响的结果. 图 3 和图 4 给出了一个 10 层模型中磁场分量 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{zx}$ 和 σ_{xz} 及其组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx}), (2\sigma_{zz} - \sigma_{yy}), (\sigma_{zx} - \sigma_{xz})$ 随垂直深度 (TVD) 变化的测井响应模拟, 井眼斜角 α 分别为 0° 和 60° , 地层电参数见表 1, 层厚为 30 ft (1 ft = 0.3048 m).

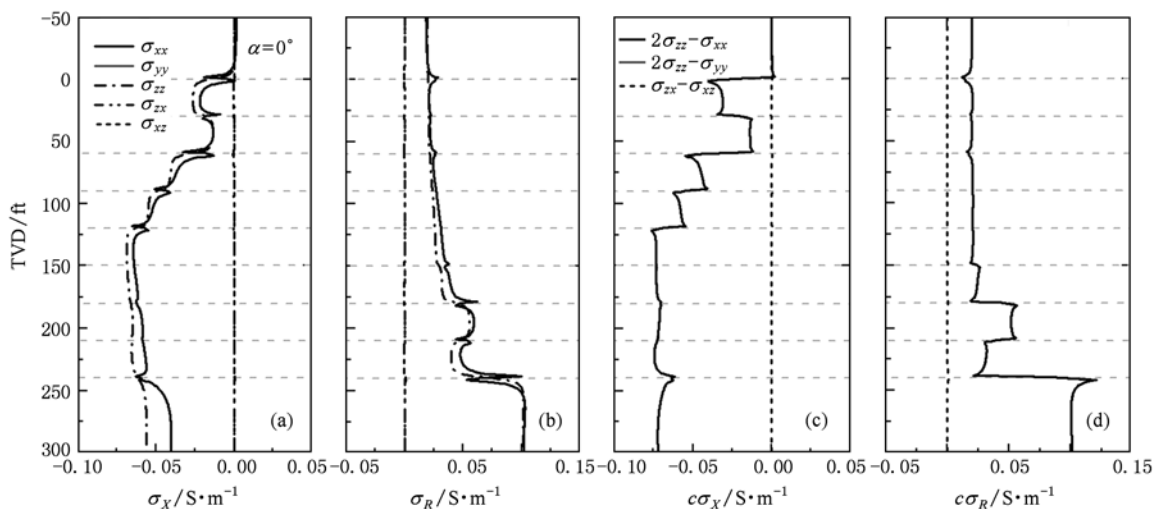


图 3 等厚模型中各分量感应及组合量 ($C\sigma$) 的响应模拟, $\alpha = 0^\circ$

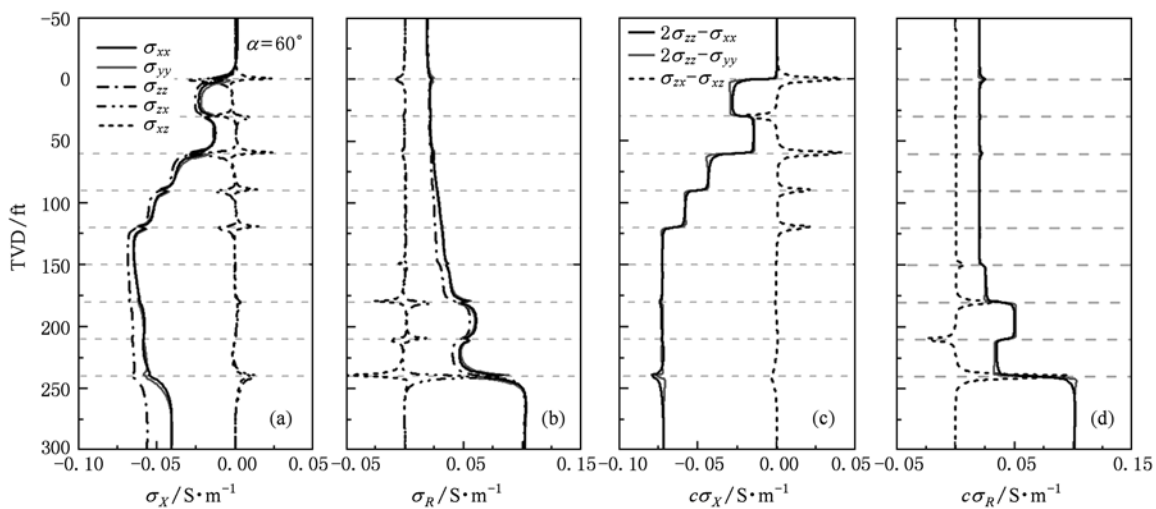


图 4 等厚模型中各分量感应及组合量 ($C\sigma$) 的响应模拟, $\alpha = 60^\circ$

表 1 10 层等厚模型的电参数

上边界 d/ft	电阻率 $R/\Omega\cdot\text{m}$	相对介电常数 ϵ_r	上边界 d/ft	电阻率 $R/\Omega\cdot\text{m}$	相对介电常数 ϵ_r
$-\infty$	50	1	120	50	50000
0	50	20000	150	40	50000
30	50	10000	180	20	50000
60	50	30000	210	30	50000
90	50	40000		10	50000

通过对实部和虚部响应的对比分析以及(10), (12)式可知,实部信号主要反应地层电导率信息,虚部信号主要反应地层介电常数信息. 共轴分量 σ_{zz} 的实部和虚部测井响应在边界处都比较平滑,而共面分量 σ_{xx} 和 σ_{yy} 受邻层影响大,在边界两侧出现反向的“犄角”,有明显的边界效应,随着角度的增加,图4中共面分量的“犄角”明显变小;组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$ 和 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{yy})$ 的实部和虚部有很好的纵向分层能力,垂直深度120—300 ft段地层相对介电常数不变,其虚部响应也基本保持不变,说明它们受地层电导率影响要比主分量 σ_{zz} 和 σ_{xx} 的小得多,有利于地层介电常数的提取. 比较图3(c), (d)和图4(c), (d)可看出,随着角度的增加,组合量响应曲线更“方框化”,纵向分辨率更高. 由图4(c) (d)可看出,组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{yy})$ 的响应形态比 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{xx})$ 的更规则. 图3中井眼斜角 $\alpha = 0^\circ$,交叉分量 σ_{zx} 和 σ_{xz} 的实部和虚部测井响应都为零. 图4中交叉分量 σ_{zx} 和 σ_{xz} 的实部和虚部在边界附近出

现较大的峰值,主要反映来自边界的信息. 组合量 $(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})$ 的曲线形态更简单,其峰值与边界位置都有很好的对应关系;地层介电常数不变时,实部响应在边界处的峰值与两侧电导率的反差成正比,测井仪器由高层阻层进入低阻层时,峰值为正,反之,为负;地层电阻率不变时,虚部响应在边界处的峰值与相对介电常数之差成正比,测井仪器由小介电常数进入大介电常数层时,峰值为负,反之,为正. 值得注意的是,组合量 $(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})$ 的实部和虚部在边界附近测井曲线的走向和峰值大小与地层电导率反差、相对介电常数反差以及地层的电阻率高低和介电常数大小同时有关^[11],虚部响应受上述因数共同影响较大,但实部响应主要与电导率反差有关,在资料直观解释中可用它来确定边界位置以及边界两侧地层电阻率的相对高低. 图5和图6分别给出了 α 为 0° 和 60° 时9层不等厚模型的测井响应模拟和地层相对介电常数、电阻率的视值及与其真值的相对误差(百分比). 垂直井中,交叉分量及其

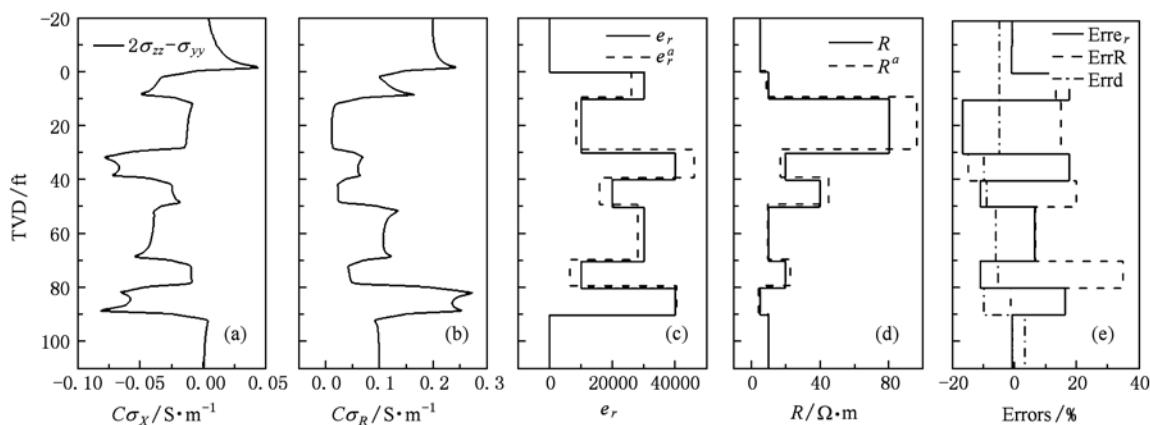


图5 9层模型中组合量 $(2\sigma_{zz} - \sigma_{yy})$ 的测井响应及地层参数的重构, $\alpha = 0^\circ$

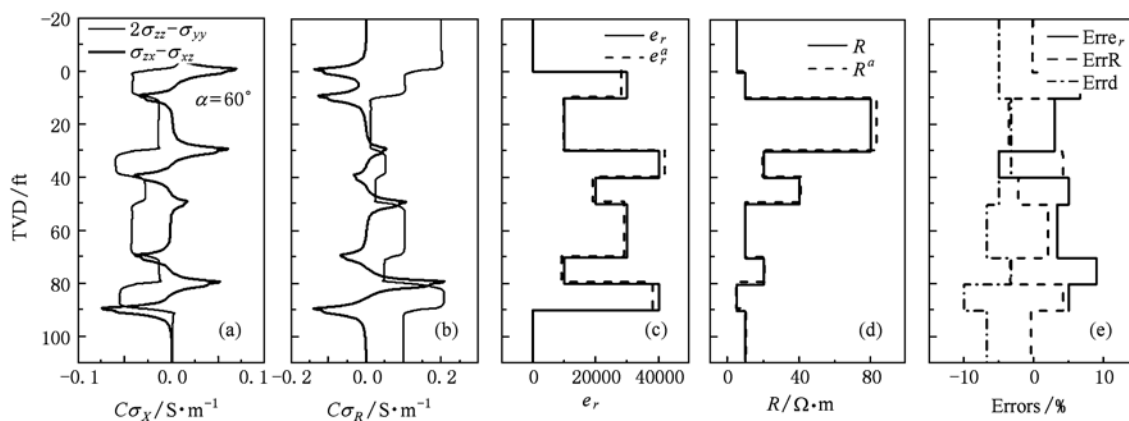


图6 9层模型中组合量 $(C\sigma)$ 的测井响应及地层参数的重构, $\alpha = 60^\circ$

组合量都为零,纵向边界位置可由组合量 ($2\sigma_{zz} - \sigma_{yy}$) 的实部信号相邻“犄角”的中点位置来确定,地层相对介电常数视值由其虚部信号除去常数因子 $-\omega\epsilon_0$ 来确定,地层电阻率视值由其实部信号来确定. 斜度井中,纵向边界位置可由交叉分量组合量 ($\sigma_{zx} - \sigma_{xz}$) 实部信号的峰值位置得到. 比较图 5 和图 6 中的资料直观解释结果的相对误差可知倾斜井比垂直井的资料视值解释效果好,这是由于随着井眼斜角 α 的增加,测井响应的纵向分辨率变高. 地层电参数也可由图 2(c) 的二维图同时确定,或者做进一步的多参数非线性反演,同时顾及邻层的影响.

4. 结 论

在含有大介电常数的各向同性地层中,规格化到电导率量纲的主分量测井响应实部信号主要与地层的电导率有关,虚部信号主要与地层的大介电常数有关. 组合量 ($2\sigma_{zz} - \sigma_{yy}$) 的实部和虚部响应比其分量的有更高的纵向分辨率和弱的趋肤效应,便于提取地层的电阻率和相对介电常数视值;在倾斜井中组合量 ($\sigma_{zx} - \sigma_{xz}$) 的实部和虚部响应主要反映边界信息,与边界位置有很好的对应关系. 综合利用不同的组合量可以实现地层参数的重构,直观识别含有大介电常数的烃源岩,并为进一步的非线性反演提供好的初始值.

附录 A 介质中的磁场表达式

均匀各向同性介质中,三个相互垂直的磁偶极子激发的磁场有空间变换的等价性,考虑到接收线圈位置和方向的不同,多分量感应测井磁场分量的表达式为

$$H_{zz} = \frac{1}{2\pi L^3}(-ikL + 1)e^{ikL}, \quad (\text{A1})$$

$$H_{xx} = H_{yy} = \frac{1}{4\pi L^3}(k^2 L^2 + ikL - 1)e^{ikL}, \quad (\text{A2})$$

$$H_{zx} = H_{xz} = H_{xy} = H_{yx} = H_{zy} = H_{yz} = 0. \quad (\text{A3})$$

Chew 等^[7]用 TE, TM 波分解方法推导了水平层状模型中的电磁场,通过磁场振幅的递推,引入广义反射系数,消除了 e 指数因子的发散项,保证了磁场积分数值计算的稳定性. 这里给多分量感应测井响应的积分表达式,便于参考. 以地层法相分量为 z 轴引入柱坐标系 (ρ, θ, z) , 电磁场法相分量的积分表达式为

$$E_z = -\frac{1}{4\pi}\omega\mu(M_x \sin\theta - M_y \cos\theta) \int_0^{+\infty} k_\rho^2 \frac{e^{i\alpha z}}{k_z} J_1(k_\rho \rho) dk_\rho$$

$$\equiv \int_0^{+\infty} \tilde{E}_z dk_\rho,$$

$$H_z = \frac{1}{4\pi} \left[(M_x \cos\theta + M_y \sin\theta) \int_0^{+\infty} k_\rho^2 \frac{\partial}{\partial z} e^{i\alpha z} \times J_1(k_\rho \rho) dk_\rho + M_z \int_0^{+\infty} ik_\rho^3 \frac{e^{i\alpha z}}{k_z} J_0(k_\rho \rho) dk_\rho \right] \\ \equiv \int_0^{+\infty} \tilde{H}_z dk_\rho, \quad (\text{A4})$$

其中 \tilde{E}_z, \tilde{H}_z 为频率域电磁场法相分量; $k_z = \sqrt{k^2 - k_\rho^2}$, k_ρ 为积分变量; J_ν 为 ν 阶贝塞尔函数, M_x, M_y 和 M_z 是三个相互垂直的磁偶极子强度. 在多层模型中,第 n 层电磁场法相分量频率域表达式改写为

$$\tilde{E}_{n,z} = -\frac{1}{4\pi}(M_x \sin\theta - M_y \cos\theta)\omega\mu k_\rho^2 \frac{1}{k_{n,z}} J_1(k_\rho \rho) F_n^{\text{TM},h},$$

$$\tilde{H}_{n,z} = \frac{1}{4\pi} \left[(M_x \cos\theta + M_y \sin\theta) k_\rho^2 J_1(k_\rho \rho) F_n^{\text{TE},h} + M_z ik_\rho^3 \frac{1}{k_{n,z}} J_0(k_\rho \rho) F_n^{\text{TE},v} \right], \quad (\text{A5})$$

其中 F 为电磁场传播项,上角标 TM, h 表示与水平磁偶极子相对应的 TM 波的传播项,其余类推. 令发射源所在位置为坐标原点,所在 m 层的传播项 F_m 可统一表达为

$$F_m^+ = A_m^+ (e^{ik_{m,z}z} + \tilde{R}_{m,m+1} e^{ik_{m,z}(2d_m-z)}) \quad z > 0,$$

$$F_m^- = A_m^- (e^{-ik_{m,z}z} + \tilde{R}_{m,m-1} e^{ik_{m,z}(z-2d_{m-1})}) \quad z < 0,$$

(A6)

其中 A 为振幅,上标“+”代表上行波,“-”代表下行波, $\tilde{R}_{m,m+1}$ 为 $m+1$ 层对 m 层的广义反射系数. 振幅 A 是广义反射系数 \tilde{R} 的函数,对应于不同的传播项 F , 表达式略有不同. 通过振幅 A 的递推,可得到全空间的电磁场. 限于篇幅,递推关系式和广义反射系数 \tilde{R} 的表达式参考文献[7], 这里只给出 (XOZ) 平面的磁场分量的积分表达式

$$H_{xx} = \frac{M_x}{4\pi} \int_0^{+\infty} \left[\frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial}{\partial z} F_n^{\text{TE},h} + \frac{ik_n^2}{k_{n,z}} F_n^{\text{TM},h} \right) \times J_1(k_\rho \rho) + k_\rho \frac{\partial}{\partial z} F_n^{\text{TE},h} J_0(k_\rho \rho) \right] dk_\rho, \quad (\text{A7})$$

$$H_{yy} = \frac{M_y}{4\pi} \int_0^{+\infty} \left[-\frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial}{\partial z} F_n^{\text{TE},h} + \frac{ik_n^2}{k_{n,z}} F_n^{\text{TM},h} \right) \times J_1(k_\rho \rho) + k_\rho \frac{\partial}{\partial z} F_n^{\text{TE},h} J_0(k_\rho \rho) \right] dk_\rho, \quad (\text{A8})$$

$$H_{zz} = \frac{M_z}{4\pi} \int_0^{+\infty} \frac{ik_\rho^3}{k_{n,z}} F_n^{\text{TE},v} \cdot J_0(k_\rho \rho) dk_\rho, \quad (\text{A9})$$

$$H_{zx} = \frac{M_z}{4\pi} \int_0^{+\infty} \left(-\frac{ik_\rho^2}{k_{n,z}} \frac{\partial}{\partial z} F_n^{\text{TE},v} \right) J_1(k_\rho \rho) dk_\rho, \quad (\text{A10})$$

$$H_{xz} = \frac{M_x}{4\pi} \int_0^{+\infty} k_\rho^2 F_n^{\text{TE},h} J_1(k_\rho \rho) dk_\rho, \quad (\text{A11})$$

$$H_{xy} = H_{yx} = H_{zy} = H_{yz} = 0, \quad (\text{A12})$$

由此得到地层坐标系下的磁场张量 \hat{H} , 为提高计算速度, (A7) — (A11) 式的积分可由快速汉克尔变换技

术^[12]和利用高阶窗函数结合连分式展开^[13]等快速算法实现. 倾斜井中的测井响应可通过对磁场张量 \hat{H} 做如下旋转变换得到^[14]:

$$\hat{H}' = R_\varphi R_\alpha \hat{H} R_\alpha^T R_\varphi^T, \quad (\text{A13})$$

其中

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix},$$

$$R_\varphi = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

- [1] Adersion B I, Barber T D, Lüling M G, Sen P N 2006 47th SPWLA Annual Logging Symposium Veracruz, Mexico, June 4—7 2006 000
- [2] Rabinovich M, Tabarovsky L 2001 42 th SPWLA Annual Logging Symposium Houston, United States, June 17—20 2001 HH
- [3] Wang H N, Tao H G, Yao J J, Chen G B, Yang S W 2008 Chinese J. Geophysics **51** 1591 (in chinese) [汪宏年、陶宏根、姚敬金 2008 地球物理学报 **51** 1591]
- [4] Rabinovich M, Gonfalini M, Rocque T, Corley B, Georgi D, Tabarovsky L, Epov M 2007 48 th SPWLA Annual Logging Symposium Austin, Texas, United States, June 3—6 2007 CC
- [5] Wang T, Yu L, Fanini O 2003 Geophysics **68** 1510
- [6] Hong D C, Yang S D 2009 Chinese J. Geophysics **52** 1121 (in chinese) [洪德成、杨善德 2009 地球物理学报 **52** 1121]
- [7] Chew W C (Translated by Nie Z P, Liu Q H) 1992 *Waves and Fields in Inhomogeneous Media* (Electronic Industry Press) pp105—108 (in Chinese) [周永祖著 聂在平、柳清伙译 1992 非均匀介质中的场与波(电子工业出版社)第 105—108 页]
- [8] Zheng H X, Ge D B 2000 Acta Phys. Sin. **49** 1702 [郑宏兴、葛德彪 2000 物理学报 **49** 1702]
- [9] Zhang Z Y, Yu L, Kriegshauser B, Chunduru R 2001 42 th SPWLA Annual Logging Symposium Houston, United States, June 17—20 2001 Q
- [10] Rosthal R, Barber T, Bonner S, Chen K-C, Davydycheva S, Hazen G, Homan D, Kibbe C, Minerbo G, Schlein R, Villegas L, Wang H, Zhou F 2003 44 th SPWLA Annual Logging Symposium Galveston, Texas, United States, June 22—25 2003 QQ
- [11] Minerbo G N, Omeragic D, Rosthal R A 2005 U S Patent **6** 969 994 B2
- [12] Andersion W L 1979 Geophysics **44** 1287
- [13] Chen G B, Wang H N, Yao J J, Han Z Y, Yang S W 2009 Acta Phys. Sin. **58** 1608 (in Chinese) [陈桂波、汪宏年、姚敬金、韩子夜、杨守文 2009 物理学报 **58** 1608]
- [14] Zhdanov M, Kennedy D, Peksen E 2001 Geophysics **42** 588

Multi-component induction logging response in large dielectric formation *

Hong De-Cheng[†] Yang Shan-De

(The Center for Theoretical Physic, Jilin University, Changchun 130021, China)

(Received 7 October 2010; revised manuscript received 7 December 2010)

Abstract

Wireline induction logs operating at a frequency of some tens of kHz are used to detect the resistivity of hydrocarbon reservoir. The dielectric constant of typical formation is usually smaller than that of pure water and its effect is negligible for induction log. However some peculiar rocks including organic matter named source rock have large dielectric permittivities caused by polarization, which can lead the traditional induction logging to have an unusual log response. Multi-component induction logging is new log method and has been developed in nearly ten years, which can provide more information about formation than traditional axial instrument and has large potential applications. In this paper, we study the effect of large dielectric constant on multi-component induction logging response and extract the information about resistivity and dielectric permittivity through the different combinations, there by realizing the formation parameters reconstruction and intuitive recognition for the hydrocarbon source rock.

Keywords: multi-component logging, large dielectric permittivity, combination, intuitive explanation

PACS: 91.60.Pn, 91.25.Qi, 41.20.-q

* Project supported by the Basic Research Program of Jilin University (Grant No. 201100001).

[†] E-mail: hongdc@jlu.edu.cn