



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 113123783 A
(43)申请公布日 2021.07.16

(21)申请号 201911412325.X

(22)申请日 2019.12.31

(71)申请人 中国石油化工股份有限公司

地址 100728 北京市朝阳区朝阳门北大街
22号

申请人 中国石油化工股份有限公司石油工
程技术研究院

(72)发明人 廖东良 路保平 赵文杰

(74)专利代理机构 北京聿宏知识产权代理有限
公司 11372

代理人 吴大建 康志梅

(51)Int.Cl.

E21B 49/00(2006.01)

G06F 30/20(2020.01)

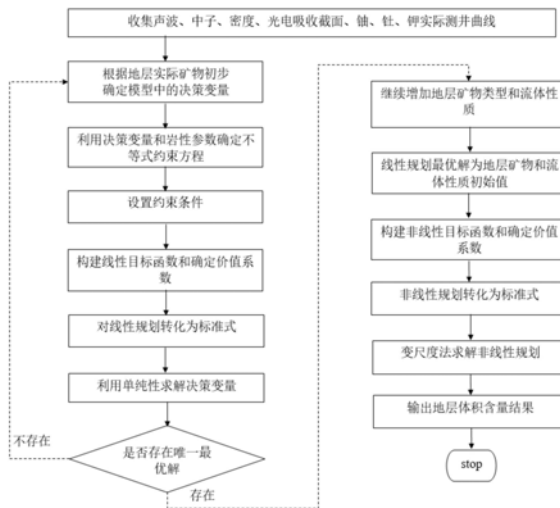
权利要求书4页 说明书15页 附图10页

(54)发明名称

一种精细评价地层体积含量的方法

(57)摘要

本发明提供一种精细评价地层体积含量的方法。利用常规测井资料,通过构造地层体积模型下的常规响应方程,利用线性规划和非线性相结合方法计算页岩地层体积含量。通过构建适当的目标函数,利用测井响应方程的不等式约束,应用单纯性和变尺度算法有利于消除扩径条件下的钻井泥浆的不确定影响,快速、准确地反演地层体积含量,减少了用元素测井等费用昂贵的测井项目,减少了岩心实验确定页岩矿物类型和含量的过程,节省了费用和时间,为加快国内页岩地层勘探、开发起积极作用。



1. 一种精细评价地层体积含量的方法,包括:

- (1) 获得包括实际测井曲线和/或测试数据在内的常规测井资料;
- (2) 根据地层中实际含有和/或可能含有的矿物和/或流体确定决策变量;
- (3) 不考虑井眼环境时,将所述常规测井资料和所述决策变量响应为不等式方程,并以所述不等式方程作为约束条件;
- (4) 考虑井眼环境时,将所述常规测井资料和所述决策变量响应为等式方程,并以所述等式方程作为约束条件;
- (5) 利用所述实际测井曲线与理论计算曲线之差的累计和,构建线性目标函数;
- (6) 将步骤(3)或步骤(4)中所述约束条件和步骤(5)中所述线性目标函数转换为线性规划标准形式;
- (7) 对所述线性规划标准形式进行求解,从而初步得出地层中矿物体积含量和/或流体体积含量,优选为利用单纯形法对所述线性规划标准形式进行求解;
- (8) 判断步骤(7)中所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量是否为最优求解结果;
- (9) 当步骤(7)中所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量不是最优求解结果时,修改所述决策变量,并重复步骤(3)~(8);
- (10) 当步骤(7)中所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量是最优求解结果时,输出线性规划的计算结果;
- (11) 增加实际矿物和/或流体类型,并将步骤(10)中输出的线性规划的计算结果作为非线性规划的初始值;
- (12) 利用实际测井曲线与理论计算曲线之差的累计平方和,构建非线性目标函数;
- (13) 将步骤(3)或步骤(4)中所述约束条件和步骤(12)中所述非线性目标函数转换为非线性规划标准形式;
- (14) 对所述非线性规划标准形式进行求解,从而得出地层中矿物体积含量和/或流体体积含量,优选为利用变尺度法对所述非线性规划标准形式进行求解。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述测试数据包括探测深度和井径中的至少一种;所述实际测井曲线包括自然伽马测井曲线、自然电位测井曲线、补偿声波测井曲线、补偿中子测井曲线、补偿密度测井曲线、光电吸收截面指数测井曲线、铀测井曲线、钍测井曲线和钾测井曲线中的至少一种。

3. 根据权利要求1或2所述的方法,其特征在于,所述不等式方程如式(1)所示:

$$\text{LOG}_j \geq \sum_{i=1}^n V_i \text{MC}_{ij} \quad \text{式(1)}$$

式(1)中, $\sum_{i=1}^n V_i \text{MC}_{ij}$ 为理论计算曲线, LOG_j 表示第j种测井曲线, V_i 表示第i种矿物或流体的体积, MC_{ij} 表示第i种矿物或流体所对应的第j种测井理论数值,其中, $1 \geq V_i \geq 0$,

$$\sum_{i=1}^n V_i \leq 1。$$

4. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其特征在于,所述不等式方程选自式(2)至

式(8)中的至少一种:

$$DEN - \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \geq 0 \quad \text{式(2)}$$

$$AC - \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i \geq 0 \quad \text{式(3)}$$

$$CNL - \sum_{i=1}^n V_i CNL_i \geq 0 \quad \text{式(4)}$$

$$PE - \sum_{i=1}^n V_i PE_i \geq 0 \quad \text{式(5)}$$

$$U - \sum_{i=1}^n V_i U_i \geq 0 \quad \text{式(6)}$$

$$TH - \sum_{i=1}^n V_i TH_i \geq 0 \quad \text{式(7)}$$

$$K - \sum_{i=1}^n V_i K_i \geq 0 \quad \text{式(8)}$$

其中,DEN表示补偿密度测井曲线,AC表示补偿声波测井曲线,CNL表示补偿中子测井曲线,PE表示光电吸收截面测井曲线,U表示铀测井曲线,TH表示钍测井曲线,K表示钾测井曲线, V_i 表示第*i*种矿物或流体的体积, ρ_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿密度, ΔT_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿声波,CNL_{*i*}表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿中子,PE_{*i*}表示第*i*种矿物或流体所对应的光电吸收截面波, U_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的铀值,TH_{*i*}表示第*i*种矿物或流体所对应的钍值, K_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的钾值,且满足

$$1 - \sum_{i=1}^n V_i \geq 0, V_i \geq 0.$$

5. 根据权利要求1-4中任一项所述的方法,其特征在于,所述等式方程如式(9)所示:

$$LOG_j = \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij} + MC_{mf} \Delta V \quad \text{式(9)}$$

式(9)中, $\sum_{i=1}^n V_i MC_{ij}$ 为理论计算曲线,LOG_{*j*}表示第*j*种测井曲线, V_i 表示第*i*种矿物或流体的体积,MC_{*ij*}表示第*i*种矿物或流体所对应的第*j*种测井理论数值,MC_{*mf*}表示泥浆对应的测井曲线的响应值, ΔV 表示井眼扩径或缩径所形成的体积占测井曲线探测体积的比例,其中,

$$\sum_{i=1}^n V_i + \Delta V = 1, 1 \geq V_i, \Delta V \geq 0.$$

6. 根据权利要求1-5中任一项所述的方法,其特征在于,所述等式方程选自式(10)至式(16)中的至少一种:

$$DEN = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i + \rho_{mf} \Delta V \quad \text{式(10)}$$

$$AC = \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i + \Delta T_{mf} \Delta V \quad \text{式 (11)}$$

$$CNL = \sum_{i=1}^n V_i CNL_i + CNL_{mf} \Delta V \quad \text{式 (12)}$$

$$PE = \sum_{i=1}^n V_i PE_i + PE_{mf} \Delta V \quad \text{式 (13)}$$

$$U = \sum_{i=1}^n V_i U_i + U_{mf} \Delta V \quad \text{式 (14)}$$

$$TH = \sum_{i=1}^n V_i TH_i + TH_{mf} \Delta V \quad \text{式 (15)}$$

$$K = \sum_{i=1}^n V_i K_i + K_{mf} \Delta V \quad \text{式 (16)}$$

其中, DEN表示补偿密度测井曲线, AC表示补偿声波测井曲线, CNL表示补偿中子测井曲线, PE表示光电吸收截面测井曲线, U表示铀测井曲线, TH表示钍测井曲线, K表示钾测井曲线, V_i 表示第*i*种矿物或流体的体积, ΔV 表示井眼扩径或缩径所形成的体积占测井曲线探测体积的比例, ρ_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿密度, ΔT_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿声波, CNL_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿中子, PE_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的光电吸收截面波, U_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的铀值, TH_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的钍值, K_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的对应的钾值, ρ_{mf} 表示泥浆对应的补偿密度, ΔT_{mf} 表示泥浆对应的补偿声波, CNL_{mf} 表示泥浆对应的补偿中子, PE_{mf} 表示泥浆对应的光电吸收截面波, U_{mf} 表示泥浆对应的铀值, TH_{mf} 表示泥浆对应的钍值, K_{mf} 表示泥浆对应的钾值, 且满足 $1 = \sum_{i=1}^n V_i + \Delta V$, $V_i \geq 0$ 。

7. 根据权利要求1-6中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述线性目标函数如式(17)所示:

$$\text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (\text{LOG}_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij}) \quad \text{式 (17)}。$$

8. 根据权利要求1-7中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述非线性目标函数如式(18)所示:

$$\text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (\text{LOG}_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})^2 \quad \text{式 (18)}。$$

9. 根据权利要求1-8中任一项所述的方法, 其特征在于, 还包括:

确定所述线性目标函数中的价值系数, 并将所述线性目标函数中的价值系数应用于所述线性规划标准形式; 和/或

确定所述非线性目标函数中的价值系数, 并将所述非线性目标函数中的价值系数应用于所述非线性规划标准形式, 其中,

所述线性目标函数中的价值系数如式(19)所示; 和/或所述非线性目标函数中的价值系数如式(20)所示:

$$C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij} \quad \text{式 (19)}$$

$$C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N LOG_j MC_{ij} \quad \text{式 (20) 。}$$

10. 根据权利要求1-9中任一项所述的方法,其特征在于,步骤(8)中,若所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量均大于等于0,则将所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量判断为最优解。

[0012] $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为决策变量。

[0013] 由于线性规划问题包含等式约束、不等式约束和目标函数,这三个函数组合成增广矩阵。其系数矩阵A的任意一个 $m \times m$ 阶的非奇异的子方阵B(即 $|B| \neq 0$),称为LP问题的一个基阵或基:

$$[0014] \quad B = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$$

[0015] 系数矩阵A中的其他部分称为非基阵:

$$[0016] \quad N = \begin{pmatrix} a_{1,m+1} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m,m+1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} = (p_{m+1}, p_{m+2}, \dots, p_n)$$

[0017] 其中, $P_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为基向量; $X_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为基变量; $P_j (j=m+1, \dots, n)$ 为非基向量; $X_j (j=m+1, \dots, n)$ 为非基变量。

[0018] 采用目标函数最大值,采用增加变量的方式,把不等式转换成等式,因此线性规划问题变为标准形式为:

$$[0019] \quad \text{Max} \quad Z = Z^{(0)} + \sum_{j=m+1}^n \sigma_j X_j$$

$$[0020] \quad \text{s.t.} \quad x_i + \sum_{j=m+1}^n \sigma'_{ij} X_j = b'_i \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$[0021] \quad x_j \geq 0 (i=1, 2, \dots, n)$$

$$[0022] \quad \text{其中, } Z^{(0)} = c_B B^{-1} b$$

$$[0023] \quad \sigma_j = c_j - c_B B^{-1} N$$

$$[0024] \quad \sigma'_{ij} = B^{-1} N$$

$$[0025] \quad b'_i = B^{-1} b_i$$

[0026] 单纯形法(Simplex Method)是1947年由G.B.Dantzig提出,是解线性规划问题最有效的算法之一,且已成为整数规划和非线性规划某些算法的基础。在用单纯形法求解线性规划问题时,为了讨论问题方便,需将线性规划模型化为统一的标准形式。

[0027] 单纯形法求解线性规划问题的计算步骤如下:

[0028] 步骤1:将一般形式转化为标准形式;

[0029] 步骤2:从标准形式中求出初始基可行解,建立初始单纯形表。对标准形式的LP,在约束条件式的变量的系数矩阵中总会存在一个单位矩阵:

$$[0030] \quad (P_1, P_2, \dots, P_m) = \begin{bmatrix} 10. & \dots & 0 \\ 01. & \dots & 0 \\ 001. & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 00. & \dots & 1 \end{bmatrix}, \text{其中: } P_1, P_2, \dots, P_m \text{ 称为基向量,同其对应}$$

的变量 x_1, x_2, \dots, x_m 称为基变量,模型中其他变量 $x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n$ 称为非基变量。

若令所有非基变量为0,求出基变量的值,可以得到初始其可行解,将其数据代入单纯形表中,可以得到初始单纯形表;

[0031] 步骤3:检验各非基变量 X_j 的检验数 σ_j ,如果所有的 $\sigma_j \leq 0$ ($j=1, 2, \dots, n$),则已求得最优解,停止计算。否则转入下一步;

[0032] 步骤4:在所有的 $\sigma_j > 0$ 中,如果有某个 $\sigma_k > 0$,所对应的 x_k 的系数列向量 $p'_k \leq 0$ (即 $a'_{ik} \leq 0, i=1, 2, \dots, m$),则此问题解无界,停止计算。否则转入下一步;

[0033] 步骤5:当有一个以上的检验数大于0时,根据 $\sigma_k = \max \{\sigma_j | a_j > 0, 1 \leq j \leq n\}$,其对应的变量 x_k 作为换入的非基变量,称为换入基变量。又根据最小比值法则计算:

$$\theta = \min \left\{ \frac{b_i}{a_{ik}} \mid a_{ik} > 0, 1 \leq i \leq m \right\} = \frac{b_r}{a_{rk}}$$
,确定 x_r 是换出的基变量,元素 a_{rk} 决定了从一个基

可行解到相邻基可行解的转移去向,称为(取名)主元素。转入下一步;

[0034] 步骤6:以 a_{rk} 为主元进行换基变换,用初等行变换将 x_k 所对应的列向量变换成单位列向量,即同时将检验数行中的第 k 个元素也变换为零,这样从一个基可行解转换到相邻的目标函数值更大的基可行解,可得新的单纯形表。返回步骤2。

[0035] 单纯性解法当所求未知数较少时,通常能得出较好的结果,但如果未知数较多时,线性规划问题常常出现无解的情况。利用常规测井资料来评价地层矿物含量,除了地层矿物未知外,还包含泥浆性质、井眼环境等,未知数较大(大于10以上),对线性规划方法带来一定的挑战。

[0036] 非线性规划的解法常用的有梯度法(又称最速下降法)、牛顿法、抛物线插值法和变尺度法。

发明内容

[0037] 鉴于上述现有技术中存在的问题,本发明的目的在于提供一种精细评价地层体积含量,尤其是地层中矿物体积含量和/或流体体积含量的方法。本发明利用常规测井资料,考虑在不规则井眼条件下,构造地层体积模型下的常规响应不等式方程,通过构建适当的目标函数,设定线性规划中的决策变量、约束条件和价值系数,首先利用线性规划方法中的单纯性方法计算页岩地层体积含量,将该计算结果作为非线性规划反演的初始值,最后利用非线性规划方法进行无约束极值解。应用线性规划和非线性规划相结合有利于消除扩径条件下的钻井泥浆的不确定影响,快速、准确地反演地层体积含量。

[0038] 本发明提供一种精细评价地层体积含量的方法,包括:

[0039] (1) 获得包括实际测井曲线和/或测试数据在内的常规测井资料;

[0040] (2) 根据地层中实际含有和/或可能含有的矿物和/或流体确定决策变量;

[0041] (3) 不考虑井眼环境时,将所述常规测井资料和所述决策变量响应为不等式方程,并以所述不等式方程作为约束条件;

[0042] (4) 考虑井眼环境时,将所述常规测井资料和所述决策变量响应为等式方程,并以所述等式方程作为约束条件;

[0043] (5) 利用实际测井曲线与理论计算曲线之差的累计和,构建线性目标函数;

[0044] (6) 将步骤(3)或步骤(4)中所述约束条件和步骤(5)中所述线性目标函数转换为线性规划标准形式;

[0045] (7) 对所述线性规划标准形式进行求解,从而初步得出地层中矿物体积含量和/或流体体积含量,优选为利用单纯形法对所述线性规划标准形式进行求解;

[0046] (8) 判断步骤(7)中所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量是否为最优求解结果;

[0047] (9) 当步骤(7)中所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量不是最优求解结果时,修改所述决策变量,并重复步骤(3)~(8);

[0048] (10) 当步骤(7)中所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量是最优求解结果时,输出线性规划的计算结果;

[0049] (11) 增加实际矿物和/或流体类型,并将步骤(10)中输出的线性规划的计算结果作为非线性规划的初始值;

[0050] (12) 利用实际测井曲线与理论计算曲线之差的累计平方和,构建非线性目标函数;

[0051] (13) 将步骤(3)或步骤(4)中所述约束条件和步骤(12)中所述非线性目标函数转换为非线性规划标准形式;

[0052] (14) 对所述非线性规划标准形式进行求解,从而得出地层中矿物体积含量和/或流体体积含量,优选为利用变尺度法对所述非线性规划标准形式进行求解。

[0053] 本申请的发明人经研究发现,地层矿物类型、含量复杂,通常要用元素测井资料来准确确定。但由于地层钻开后,存在扩径或缩径现象,尤其是扩径时,测井仪器所探测到测井曲线受到钻井泥浆的影响,同时钻井泥浆侵入地层后使地层的性质发生改变,此时测井曲线不能真实地反映地层信息。通常的做法是对这些曲线进行井眼环境校正,由于泥浆的性质难以确定,所以很难准确地完成井眼环境校正。在此情况下,利用常规测井资料进行最优化反演,实际是进行无约束下的非线性规划反演,得出的地层体积含量存在较大的误差,甚至得出错误的结论。

[0054] 本发明的技术方案利用常规测井资料,通过构造地层体积模型下的常规响应方程,首先利用线性规划方法中的单纯性方法计算页岩地层体积含量,把该计算结果作为非线性规划反演的初始值,最后利用非线性规划方法进行无约束极值解。通过构建适当的目标函数,利用测井响应方程的不等式约束,应用单纯性算法有利于消除扩径条件下的钻井泥浆的不确定影响,快速、准确地提供地层矿物体积含量初始值,为了获得很多的矿物数量和流体性质,利用非线性规划方法进一步求解。减少了用元素测井等费用昂贵的测井项目,减少了岩心实验确定页岩矿物类型和含量的过程,节省了费用和时间,为加快国内页岩地层勘探、开发起积极作用。

[0055] 在本发明的一些优选的实施方式中,所述测试数据包括探测深度和井径;所述实际测井曲线包括自然伽马测井曲线、自然电位测井曲线、补偿声波测井曲线、补偿中子测井曲线、补偿密度测井曲线、光电吸收截面指数测井曲线、铀测井曲线、钍测井曲线和钾测井曲线中的至少一种。

[0056] 在本发明的一些优选的实施方式中,所述不等式方程如式(1)所示:

$$[0057] \quad LOG_j \geq \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij} \quad \text{式(1)}$$

[0058] 式(1)中, $\sum_{i=1}^n V_i MC_{ij}$ 为理论计算曲线, LOG_j 表示第 j 种测井曲线, V_i 表示第 i 种矿物或流体的体积, MC_{ij} 表示第 i 种矿物或流体所对应的第 j 种测井理论数值, 其中, $1 \geq V_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n V_i \leq 1$ 。

[0059] 在本发明的一些优选的实施方式中,

[0060] 所述不等式方程选自下述式(2)至式(8)中的至少一种:

$$[0061] \quad DEN - \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \geq 0 \quad \text{式(2)}$$

$$[0062] \quad AC - \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i \geq 0 \quad \text{式(3)}$$

$$[0063] \quad CNL - \sum_{i=1}^n V_i CNL_i \geq 0 \quad \text{式(4)}$$

$$[0064] \quad PE - \sum_{i=1}^n V_i PE_i \geq 0 \quad \text{式(5)}$$

$$[0065] \quad U - \sum_{i=1}^n V_i U_i \geq 0 \quad \text{式(6)}$$

$$[0066] \quad TH - \sum_{i=1}^n V_i TH_i \geq 0 \quad \text{式(7)}$$

$$[0067] \quad K - \sum_{i=1}^n V_i K_i \geq 0 \quad \text{式(8)}$$

[0068] 其中, DEN 表示补偿密度测井曲线, AC 表示补偿声波测井曲线, CNL 表示补偿中子测井曲线, PE 表示光电吸收截面测井曲线, U 表示铀测井曲线, TH 表示钍测井曲线, K 表示钾测井曲线, V_i 表示第 i 种矿物或流体的体积, ρ_i 表示第 i 种矿物或流体所对应的补偿密度, ΔT_i 表示第 i 种矿物或流体所对应的补偿声波, CNL_i 表示第 i 种矿物或流体所对应的补偿中子, PE_i 表示第 i 种矿物或流体所对应的光电吸收截面波, U_i 表示第 i 种矿物或流体所对应的铀值, TH_i 表示第 i 种矿物或流体所对应的钍值, K_i 表示第 i 种矿物或流体所对应的对应的钾值, 且满足 $1 - \sum_{i=1}^n V_i \geq 0, V_i \geq 0$ 。

[0069] 在本发明的一些优选的实施方式中,

[0070] 所述等式方程如式(9)所示:

$$[0071] \quad LOG_j = \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij} + MC_{mf} \Delta V \quad \text{式(9)}$$

[0072] 式(9)中, $\sum_{i=1}^n V_i MC_{ij}$ 为理论计算曲线, LOG_j 表示第 j 种测井曲线, V_i 表示第 i 种矿物或流体的体积, MC_{ij} 表示第 i 种矿物或流体所对应的第 j 种测井理论数值, MC_{mf} 表示泥浆对应的测井曲线的响应值, ΔV 表示井眼扩径或缩径所形成的体积占测井曲线探测体积的比例, 其

中, $\sum_{i=1}^n V_i + \Delta V = 1, 1 \geq V_i, \Delta V \geq 0$ 。

[0073] 在本发明的一些优选的实施方式中,

[0074] 所述等式方程选自下述式 (10) 至式 (16) 中的至少一种:

$$[0075] \quad DEN = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i + \rho_{mf} \Delta V \quad \text{式 (10)}$$

$$[0076] \quad AC = \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i + \Delta T_{mf} \Delta V \quad \text{式 (11)}$$

$$[0077] \quad CNL = \sum_{i=1}^n V_i CNL_i + CNL_{mf} \Delta V \quad \text{式 (12)}$$

$$[0078] \quad PE = \sum_{i=1}^n V_i PE_i + PE_{mf} \Delta V \quad \text{式 (13)}$$

$$[0079] \quad U = \sum_{i=1}^n V_i U_i + U_{mf} \Delta V \quad \text{式 (14)}$$

$$[0080] \quad TH = \sum_{i=1}^n V_i TH_i + TH_{mf} \Delta V \quad \text{式 (15)}$$

$$[0081] \quad K = \sum_{i=1}^n V_i K_i + K_{mf} \Delta V \quad \text{式 (16)}$$

[0082] 其中, DEN表示补偿密度测井曲线, AC表示补偿声波测井曲线, CNL表示补偿中子测井曲线, PE表示光电吸收截面测井曲线, U表示铀测井曲线, TH表示钍测井曲线, K表示钾测井曲线, V_i 表示第*i*种矿物或流体的体积, ΔV 表示井眼扩径或缩径所形成的体积占测井曲线探测体积的比例, ρ_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿密度, ΔT_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿声波, CNL_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的补偿中子, PE_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的光电吸收截面波, U_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的铀值, TH_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的钍值, K_i 表示第*i*种矿物或流体所对应的钾值, ρ_{mf} 表示泥浆对应的补偿密度, ΔT_{mf} 表示泥浆对应的补偿声波, CNL_{mf} 表示泥浆对应的补偿中子, PE_{mf} 表示泥浆对应的光电吸收截面波, U_{mf} 表示泥浆对应的铀值, TH_{mf} 表示泥浆对应的钍值, K_{mf} 表示泥浆对应的钾

值, 且满足 $1 = \sum_{i=1}^n V_i + \Delta V, V_i \geq 0$ 。

[0083] 在本发明的一些优选的实施方式中, 所述线性目标函数如式 (17) 所示:

$$[0084] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij}) \quad \text{式 (17)}。$$

[0085] 在本发明的一些优选的实施方式中, 所述非线性目标函数如式 (18) 所示:

$$[0086] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})^2 \quad \text{式 (18)}。$$

[0087] 在本发明的一些优选的实施方式中, 上述方法还包括:

[0088] 确定所述线性目标函数中的价值系数, 并将所述线性目标函数中的价值系数应用于所述线性规划标准形式; 和/或

[0089] 确定所述非线性目标函数中的价值系数,并将所述非线性目标函数中的价值系数应用于所述非线性规划标准形式,其中,

[0090] 所述线性目标函数中的价值系数如式(19)所示;和/或所述非线性目标函数中的价值系数如式(20)所示:

$$[0091] \quad C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij} \quad \text{式(19)}$$

$$[0092] \quad C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N LOG_j MC_{ij} \quad \text{式(20)}。$$

[0093] 根据本发明,所述线性规划标准形式有两种方式,

[0094] 其一为:

$$[0095] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})$$

$$[0096] \quad \text{S. t.} \quad LOG_j \geq \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij}$$

$$[0097] \quad 1 \geq V_i \geq 0$$

$$[0098] \quad \sum_{i=1}^n V_i \leq 1$$

$$[0099] \quad \text{任选地,} \quad C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij};$$

[0100] 其二为:

$$[0101] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})$$

$$[0102] \quad \text{S. t.} \quad LOG_j = \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij} + MC_{mf} \Delta V$$

$$[0103] \quad \sum_{i=1}^n V_i + \Delta V = 1$$

$$[0104] \quad 1 \geq V_i, \Delta V \geq 0$$

[0105] 任选地, $C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij}$ 。根据本发明,所述线性规划标准形式还可以用下述两种方式表示,其一为:

$$[0106] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})$$

$$[0107] \quad \text{S. t.} \quad DEN - \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \geq 0$$

$$[0108] \quad AC - \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i \geq 0$$

$$[0109] \quad CNL - \sum_{i=1}^n V_i CNL_i \geq 0$$

$$[0110] \quad PE - \sum_{i=1}^n V_i PE_i \geq 0$$

$$[0111] \quad U - \sum_{i=1}^n V_i U_i \geq 0$$

$$[0112] \quad TH - \sum_{i=1}^n V_i TH_i \geq 0$$

$$[0113] \quad K - \sum_{i=1}^n V_i K_i \geq 0$$

$$[0114] \quad 1 \geq V_i \geq 0$$

$$[0115] \quad \sum_{i=1}^n V_i \leq 1$$

$$[0116] \quad \text{任选地, } C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij};$$

[0117] 其二为:

$$[0118] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})$$

$$[0119] \quad \text{S. t.} \quad DEN = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i + \rho_{mf} V_8$$

$$[0120] \quad AC = \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i + \Delta T_{mf} V_8$$

$$[0121] \quad CNL = \sum_{i=1}^n V_i CNL_i + CNL_{mf} V_8$$

$$[0122] \quad PE = \sum_{i=1}^n V_i PE_i + PE_{mf} V_8$$

$$[0123] \quad U = \sum_{i=1}^n V_i U_i + U_{mf} V_8$$

$$[0124] \quad TH = \sum_{i=1}^n V_i TH_i + TH_{mf} V_8$$

$$[0125] \quad K = \sum_{i=1}^n V_i K_i + K_{mf} V_8$$

$$[0126] \quad \sum_{i=1}^n V_i + \Delta V = 1$$

$$[0127] \quad 1 \geq V_i, \Delta V \geq 0$$

$$[0128] \quad \text{任选地, } C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij} \circ$$

[0129] 根据本发明,所述非线性规划标准形式有两种方式,

[0130] 其一为:

$$[0131] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (\text{LOG}_j - \sum_{i=1}^n V_i \text{MC}_{ij})^2$$

$$[0132] \quad \text{S. t.} \quad \text{LOG}_j \geq \sum_{i=1}^n V_i \text{MC}_{ij}$$

$$[0133] \quad 1 \geq V_i \geq 0$$

$$[0134] \quad \sum_{i=1}^n V_i \leq 1$$

$$[0135] \quad \text{任选地, } C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N \text{LOG}_j \text{MC}_{ij};$$

[0136] 其二为:

$$[0137] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (\text{LOG}_j - \sum_{i=1}^n V_i \text{MC}_{ij})^2$$

$$[0138] \quad \text{S. t.} \quad \text{LOG}_j = \sum_{i=1}^n V_i \text{MC}_{ij} + \text{MC}_{mf} \Delta V$$

$$[0139] \quad \sum_{i=1}^n V_i + \Delta V = 1$$

$$[0140] \quad 1 \geq V_i, \Delta V \geq 0$$

$$[0141] \quad \text{任选地, } C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N \text{LOG}_j \text{MC}_{ij} \circ$$

[0142] 根据本发明,所述非线性规划标准形式还可以用下述两种方式表示,

[0143] 其一为:

$$[0144] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (\text{LOG}_j - \sum_{i=1}^n V_i \text{MC}_{ij})^2$$

$$[0145] \quad \text{S. t.} \quad \text{DEN} - \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \geq 0$$

$$[0146] \quad \text{AC} - \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i \geq 0$$

$$[0147] \quad \text{CNL} - \sum_{i=1}^n V_i \text{CNL}_i \geq 0$$

$$[0148] \quad \text{PE} - \sum_{i=1}^n V_i \text{PE}_i \geq 0$$

$$[0149] \quad U - \sum_{i=1}^n V_i U_i \geq 0$$

$$[0150] \quad TH - \sum_{i=1}^n V_i TH_i \geq 0$$

$$[0151] \quad K - \sum_{i=1}^n V_i K_i \geq 0$$

$$[0152] \quad 1 \geq V_i \geq 0$$

$$[0153] \quad \sum_{i=1}^n V_i \leq 1$$

$$[0154] \quad \text{任选地, } C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N LOG_j MC_{ij};$$

[0155] 其二为:

$$[0156] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})^2$$

$$[0157] \quad \text{S. t.} \quad DEN = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i + \rho_{mf} V_8$$

$$[0158] \quad AC = \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i + \Delta T_{mf} V_8$$

$$[0159] \quad CNL = \sum_{i=1}^n V_i CNL_i + CNL_{mf} V_8$$

$$[0160] \quad PE = \sum_{i=1}^n V_i PE_i + PE_{mf} V_8$$

$$[0161] \quad U = \sum_{i=1}^n V_i U_i + U_{mf} V_8$$

$$[0162] \quad TH = \sum_{i=1}^n V_i TH_i + TH_{mf} V_8$$

$$[0163] \quad K = \sum_{i=1}^n V_i K_i + K_{mf} V_8$$

$$[0164] \quad \sum_{i=1}^n V_i + \Delta V = 1$$

$$[0165] \quad 1 \geq V_i, \Delta V \geq 0$$

$$[0166] \quad \text{任选地, } C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N LOG_j MC_{ij} \circ$$

[0167] 在本发明的一些优选的实施方式中,步骤(8)中,若所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量均大于等于0,则将所得出的地层中矿物体积含量和/或流体体积含量判断为最优解。

[0168] 本发明的有益效果至少在于:

[0169] 页岩地层矿物体积含量解释方法目前主要依赖于国外软件,没有具有独立知识产权的测井解释软件。本专利利用常规测井资料,通过构建适当的目标函数,利用测井响应方

程的不等式约束,应用线性规划和非线性规划相结合有利于消除扩径条件下的钻井泥浆的不确定影响,快速、准确地反演地层体积含量,减少了用元素测井等费用昂贵的测井项目,减少了岩心实验确定页岩矿物类型和含量的过程,节省了费用和时间,为加快国内页岩地层勘探、开发起积极作用。

附图说明

- [0170] 图1是实施例1的评价地层中矿物体积含量的方法流程图。
 [0171] 图2是实施例1中砂岩地层的常规测井曲线。
 [0172] 图3是实施例1中砂岩地层反演体积含量结果图示。
 [0173] 图4是实施例1中利用国外软件对砂岩地层反演体积含量结果图示。
 [0174] 图5是实施例1中页岩地层的常规测井曲线。
 [0175] 图6是实施例1中页岩地层反演体积含量结果图示。
 [0176] 图7是利用国外软件对页岩地层反演体积含量结果图示。
 [0177] 图8是实施例1中灰岩地层的常规测井曲线。
 [0178] 图9是实施例1中灰岩地层反演体积含量结果图示。
 [0179] 图10是利用国外软件对灰岩地层反演体积含量结果图示。
 [0180] 附图中,岩性体积分析一列中涉及到的缩写及其代表的含义为:
 [0181] PORT-总孔隙度;VDOL-白云石;VCLC-方解石;VSML-其它;VPYR-黄铁矿;VPRD-长石;VQVA-石英;VSH-泥质。

具体实施方式

[0182] 以下通过实施例对本发明进行详细说明,但本发明的保护范围并不限于下述说明。

[0183] 下述实施方式中,所涉及到的缩写,例如,DEN、AC和CNL等均具有与上文相同的指代意义,在此不做赘述。

[0184] 实施例1

[0185] (1) 获得常规测井资料,包括深度(图2、图5和图8中第一道)、地层分析(图2、图5和图8中第二道,本实施例在计算时未使用该项数据)、自然伽马测井曲线(图2、图5和图8中第三道)、补偿声波测井曲线(图2、图5和图8中第四道)、补偿中子测井曲线(图2、图5和图8中第五道)、补偿密度测井曲线(图2、图5和图8中第六道)、光电吸收截面指数测井曲线(图2、图5和图8中第七道)、铀测井曲线(图2、图5和图8中第八道)、钍测井曲线(图2、图5和图8中第九道)、钾测井曲线(图2、图5和图8中第十道)和电阻率曲线(图2、图5和图8中第十一道,本实施例在计算时未使用该项数据)。

[0186] (2) 假设某地层包含泥岩、砂岩、灰岩、有机质、黄铁矿和孔隙度等决策变量,即线性规划中基解变量有6个未知数,也即有6个决策变量,具体地,为 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 和 V_6 。

[0187] (3) 不考虑井眼环境时,将所述常规测井资料和所述决策变量响应为不等式方程,并以所述不等式方程作为约束条件,具体地为:

[0188]
$$\text{S. t. } DEN - \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \geq 0$$

$$[0189] \quad AC - \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i \geq 0$$

$$[0190] \quad CNL - \sum_{i=1}^n V_i CNL_i \geq 0$$

$$[0191] \quad PE - \sum_{i=1}^n V_i PE_i \geq 0$$

$$[0192] \quad U - \sum_{i=1}^n V_i U_i \geq 0$$

$$[0193] \quad TH - \sum_{i=1}^n V_i TH_i \geq 0$$

$$[0194] \quad K - \sum_{i=1}^n V_i K_i \geq 0$$

$$[0195] \quad 1 \geq V_i \geq 0$$

$$[0196] \quad \sum_{i=1}^n V_i \leq 1$$

$$[0197] \quad C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij} \circ$$

[0198] (5) 利用实际测井曲线与理论计算曲线之差的累计和, 构建线性目标函数:

$$\text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij}) \quad \text{其中, } MC_{ij} \text{ 值如表1所示。}$$

$$[0199] \quad (6) \text{ 确定所述线性目标函数中的价值系数为 } C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N MC_{ij} \circ$$

[0200] (7) 把测井线性规划问题转换为线性规划标准形式:

$$[0201] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})$$

$$[0202] \quad \text{S. t.} \quad DEN - \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \geq 0$$

$$[0203] \quad AC - \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i \geq 0$$

$$[0204] \quad CNL - \sum_{i=1}^n V_i CNL_i \geq 0$$

$$[0205] \quad PE - \sum_{i=1}^n V_i PE_i \geq 0$$

$$[0206] \quad U - \sum_{i=1}^n V_i U_i \geq 0$$

$$[0207] \quad TH - \sum_{i=1}^n V_i TH_i \geq 0$$

$$[0208] \quad K - \sum_{i=1}^n V_i K_i \geq 0$$

$$[0209] \quad 1 \geq V_i \geq 0$$

$$[0210] \quad \sum_{i=1}^n V_i \leq 1$$

$$[0211] \quad C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N MC_{ij} \circ$$

[0212] (8) 利用单纯形法对所述线性规划标准形式进行求解,从而初步得出地层中矿物体积含量和/或流体体积含量,如图3、图6和图8中第一道所示。

[0213] (9) 增加实际矿物/和或流体类型,并将步骤(8)中输出的线性规划的计算结果作为非线性规划的初始值;

[0214] (10) 利用实际测井曲线与理论计算曲线之差的累计平方和,构建非线性目标函数:

$$[0215] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})^2 \circ$$

$$[0216] \quad (11) \text{ 确定非线性目标函数中的价值系数 } C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N LOG_j MC_{ij} \circ$$

[0217] (12) 把测井非线性规划问题转换为非线性规划标准形式:

$$[0218] \quad \text{Min} \quad F = \sum_{j=1}^N (LOG_j - \sum_{i=1}^n V_i MC_{ij})^2$$

$$[0219] \quad \text{S. t.} \quad DEN - \sum_{i=1}^n V_i \rho_i \geq 0$$

$$[0220] \quad AC - \sum_{i=1}^n V_i \Delta T_i \geq 0$$

$$[0221] \quad CNL - \sum_{i=1}^n V_i CNL_i \geq 0$$

$$[0222] \quad PE - \sum_{i=1}^n V_i PE_i \geq 0$$

$$[0223] \quad U - \sum_{i=1}^n V_i U_i \geq 0$$

$$[0224] \quad TH - \sum_{i=1}^n V_i TH_i \geq 0$$

$$[0225] \quad K - \sum_{i=1}^n V_i K_i \geq 0$$

$$[0226] \quad 1 \geq V_i \geq 0$$

[0227]
$$\sum_{i=1}^n V_i \leq 1$$

[0228]
$$C = \sum_i^n \sum_{j=1}^N LOG_j MC_{ij}。$$

[0229] (13) 利用变尺度法对所述线性规划标准形式进行求解,从而得出地层中矿物体积含量和/或流体体积含量,如图3、图6和图8中第二道所示。

[0230] 表1. 地层矿物和流体含量测井曲线响应骨架值

测井曲线	泥质		硅质		钙质		黄铁矿	有机质	气	水	泥浆
	伊利石	蒙脱石	石英	长石	方解石	白云石					
DEN	2.9	2.88	2.65	2.52	2.71	2.87	4.99	1.2	0.25	1.1	X
AC	56	56	55.5	69	46.5	41.5	39.2	174	215	185	X
CNL	21	44	-2	-3	-1	1	-3	60	70	50	X
PE	3.45	2.04	1.81	2.86	5.08	3.14	21.48	0.28	0.1	1.6	X
U	8.73	4.4	4.79	1.5	13.77	9	0	24	0	1.9	X
TH	10-25	14~24	2	10	0	0	0	0	0	0	X
K	3.51~8.31	0~1.5	0	14	0	7	0	0	0	0	X

[0232] 该地层包含砂岩地层、页岩地层和灰岩地层,以下是各自的处理结果。

[0233] 计算结果显示砂岩地层、页岩地层和灰岩地层的曲线道是一致的。图4、图7和图10为国外软件利用元素测井资料和常规测井资料联合解释的结果。图2、图5和图8中第十一道为优化反演的目标函数。图3、图6和图9中第一道为线性规划的计算结果,第二道为以线性规划结果作为约束条件,运用非线性规划优化解释方法得出的评价结果。详细说明如下:

[0234] 1.1砂岩地层反演体积含量结果

[0235] 图3为砂泥岩地层利用线性规划求解初始矿物和流体条件,从图中看出,第一道线性规划方法计算出以砂岩、泥岩和孔隙流体为主,以线性规划结果作为约束条件,运用最优化解释方法得出如第二道所示的矿物成分和流体性质;线性规划计算结果与结合非线性规划优化解释结果相比较,非线性规划优化解释结果增加了束缚水体积含量和少量的灰岩矿物,孔隙度相对减小,而砂岩的体积含量相对增加,与图4中国外软件利用元素测井资料和常规测井资料联合解释的结果一致性较好。

[0236] 1.2页岩地层反演体积含量结果

[0237] 图6为页岩地层利用线性规划求解初始矿物和流体条件,从图中看出,第一道线性规划方法计算出以砂岩、泥岩为主,还包含有机质、灰岩和孔隙流体,以线性规划结果作为约束条件,运用最优化解释方法得出如第二道所示的矿物成分和流体性质;线性规划计算结果与结合非线性规划优化解释结果相比较,非线性规划优化解释结果增加了束缚水体积含量和孔隙度相对减小,而砂岩的体积含量相对增加,声波时差、补偿中子、密度、光电吸收截面指数、铀、钍和钾测井曲线的实际测量数值与构造曲线数值匹配良好,并且优化结果与图7中国外软件利用元素测井资料和常规测井资料联合解释的结果一致性较好。

[0238] 1.3灰岩地层反演体积含量结果

[0239] 图9为灰岩地层利用线性规划求解初始矿物和流体条件,从图中看出,第十三道线性规划方法计算出以灰岩为主,还包含少量的砂岩、泥岩和孔隙流体,以线性规划结果作为约束条件,运用非线性规划优化解释方法得出如十四道所示的矿物成分和流体性质;线性

规划计算结果与结合非线性规划优化解释结果相比较,非线性规划优化解释结果砂岩的体积含量相对增加,灰岩含量和孔隙度相对减小,声波时差、补偿中子、密度、光电吸收截面指数、铀、钍和钾测井曲线的实际测量数值与构造曲线数值匹配良好。该段地层井壁稳定性较差,存在一定的扩径现象,导致实际测井曲线受井眼环境影响,利用线性规划方法计算出地层的主要灰岩含量,以及砂、泥岩含量,为非线性规划优化解释提供了准确的初始解释值,有利于准确优化地层矿物含量和流体性质。

[0240] 应当注意的是,以上所述的实施例仅用于解释本发明,并不构成对本发明的任何限制。通过参照典型实施例对本发明进行了描述,但应当理解为其中所用的词语为描述性和解释性词汇,而不是限定性词汇。可以按规定在本发明权利要求的范围内对本发明作出修改,以及在不背离本发明的范围和精神内对本发明进行修订。尽管其中描述的本发明涉及特定的方法、材料和实施例,但是并不意味着本发明限于其中公开的特定例,相反,本发明可扩展至其他所有具有相同功能的方法和应用。

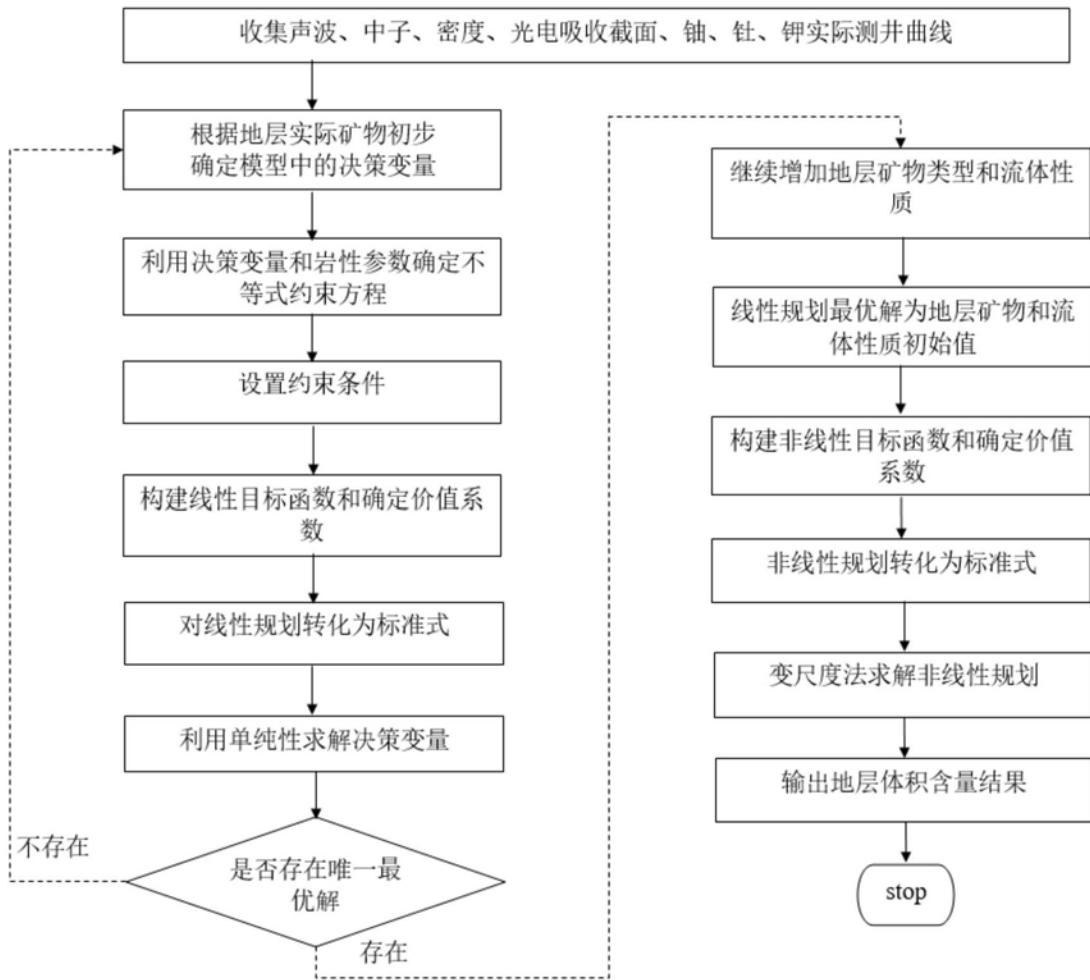


图1

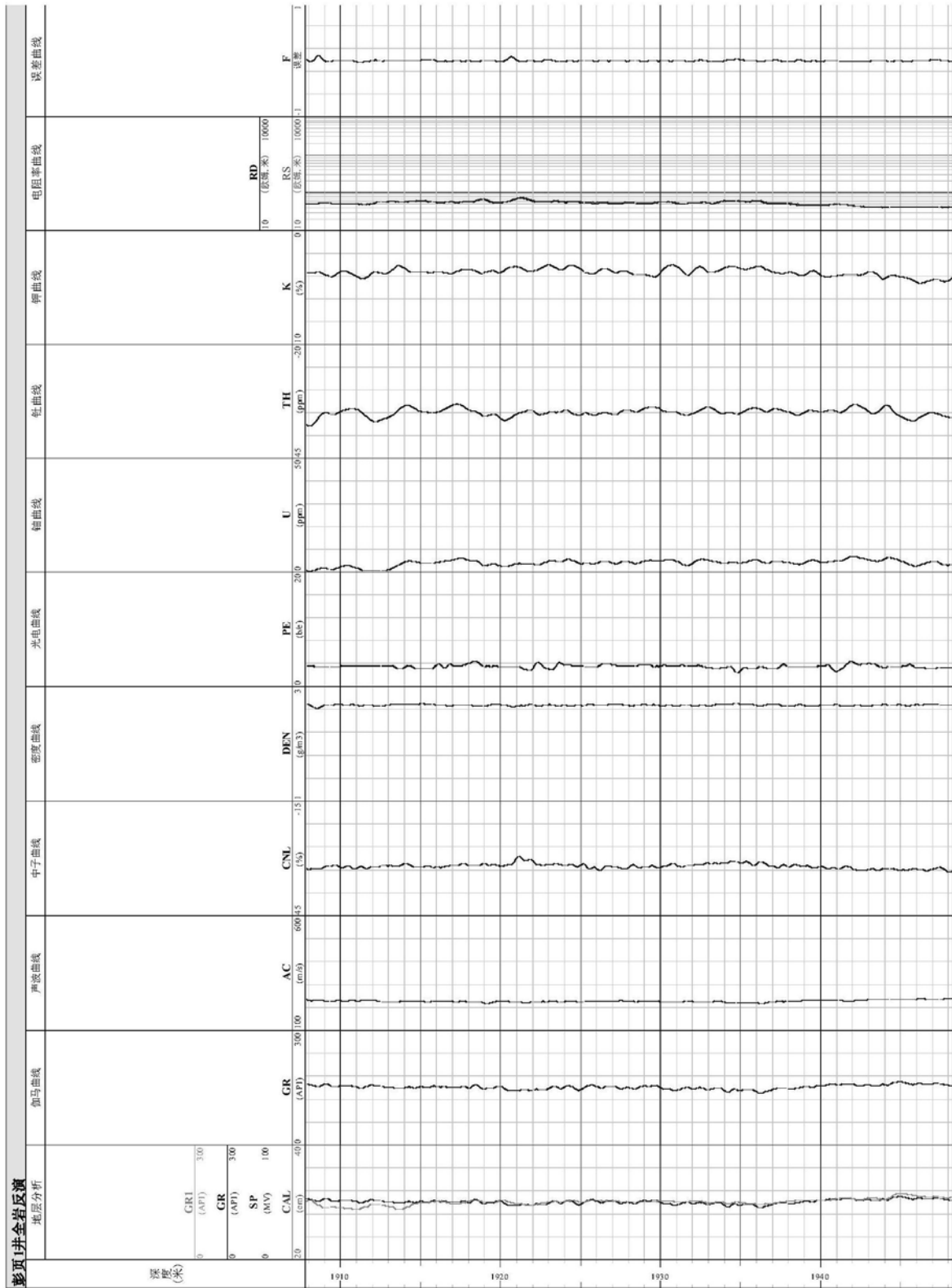


图2

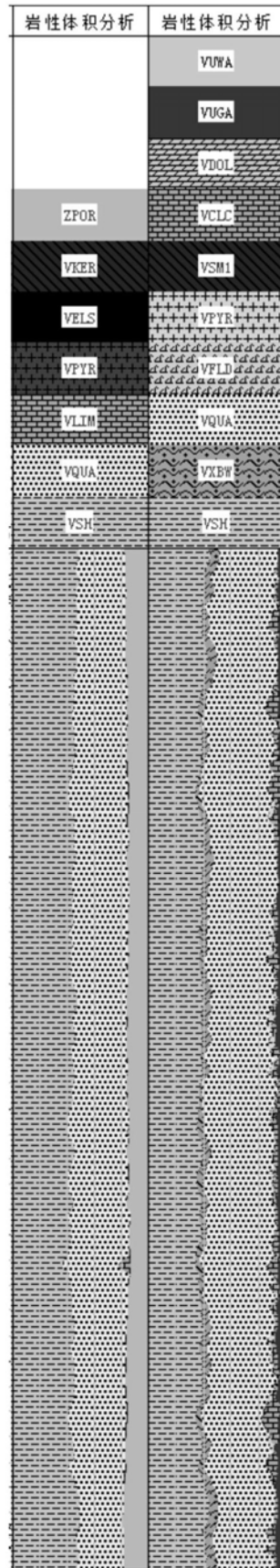


图3

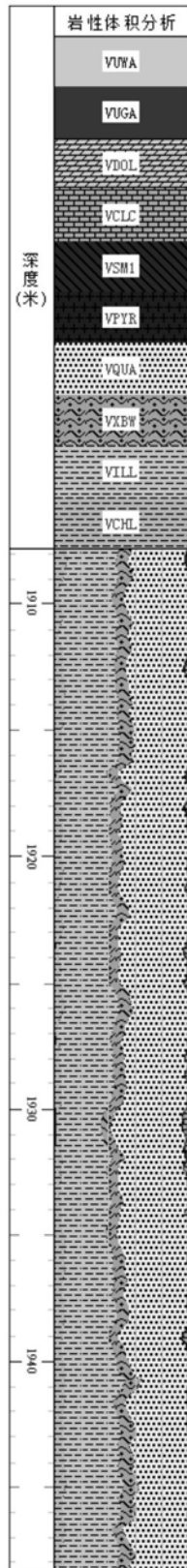


图4



图5

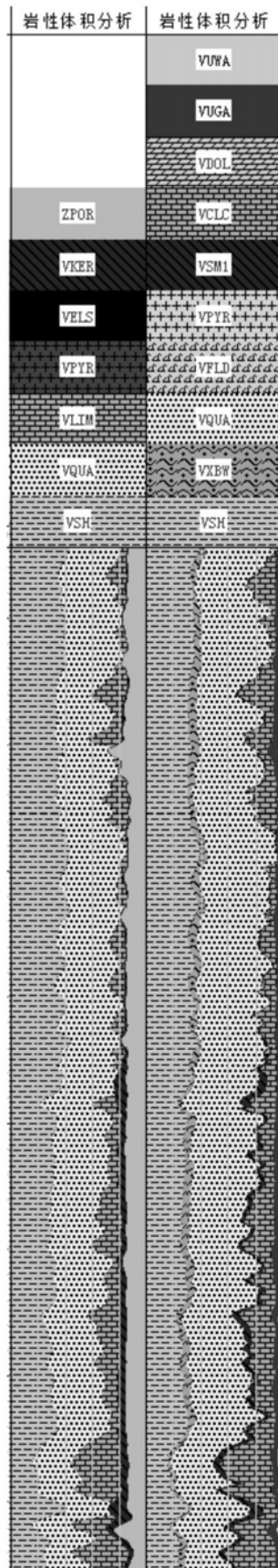


图6

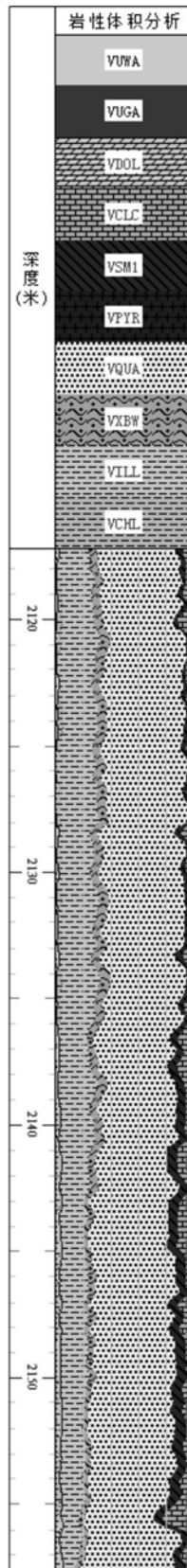


图7

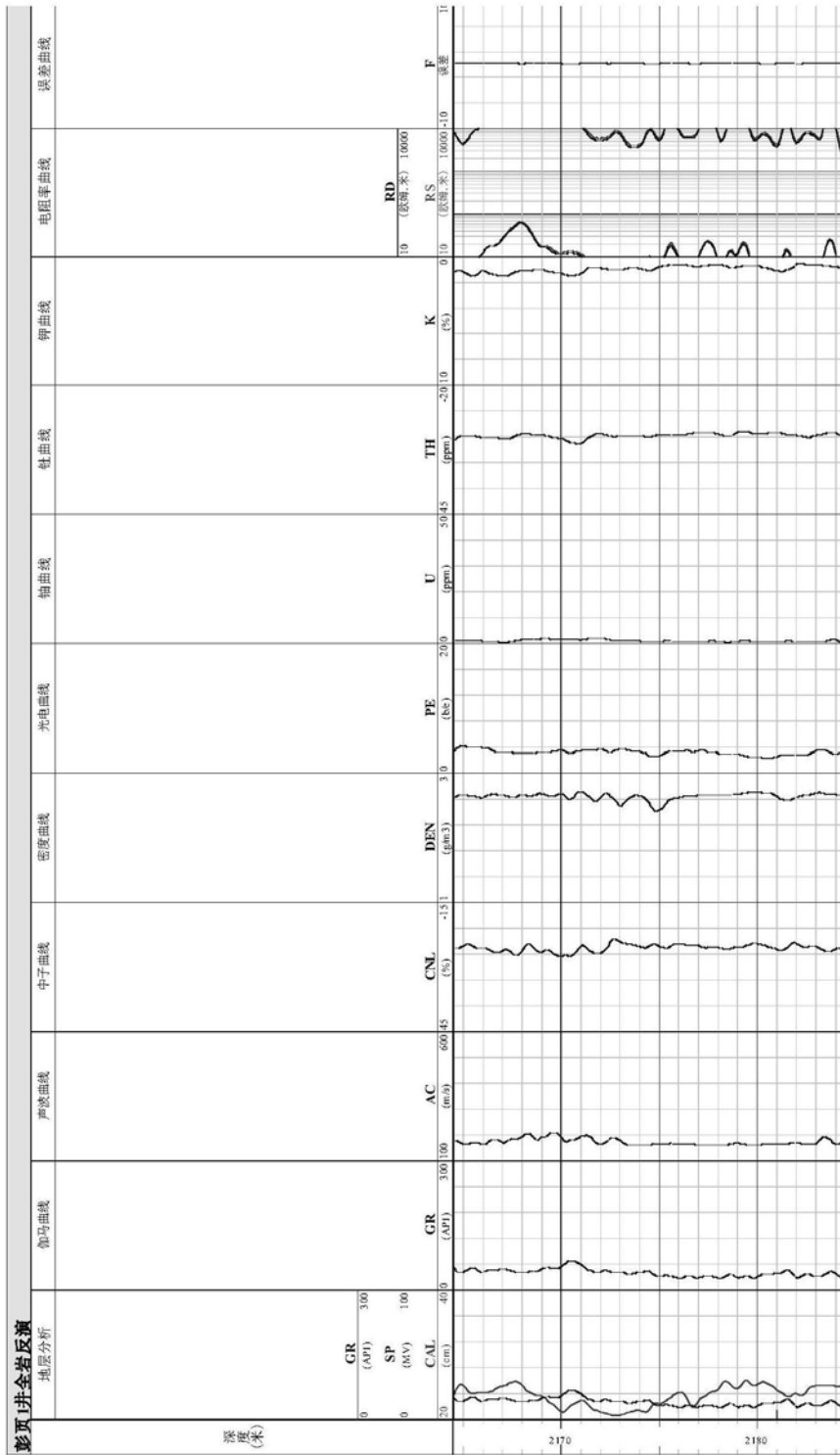


图8

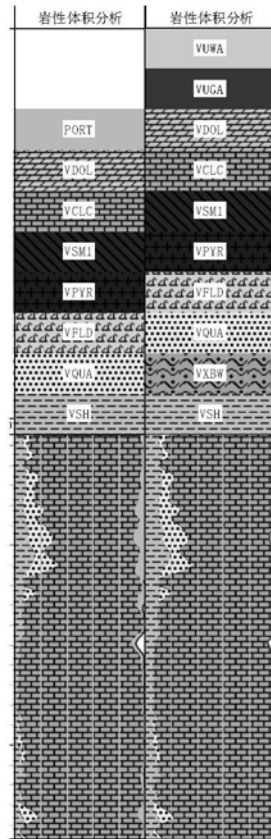


图9

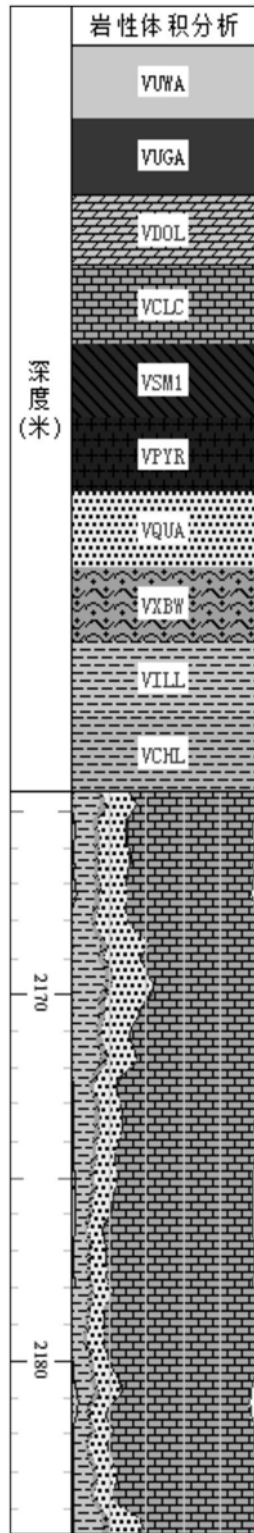


图10