



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106556876 B

(45)授权公告日 2018.05.15

(21)申请号 201611040142.6

(22)申请日 2016.11.11

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 106556876 A

(43)申请公布日 2017.04.05

(73)专利权人 山东大学
地址 250061 山东省济南市经十路17923号

(72)发明人 李术才 范克睿 李貅 刘斌
戚志鹏 聂利超 刘文韬 刘征宇
李尧

(74)专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

代理人 张勇

(51)Int.Cl.
G01V 3/38(2006.01)

(56)对比文件

CN 102798898 A,2012.11.28,全文.

CN 104375195 A,2015.02.25,全文.

US 2016/0011327 A1,2016.01.14,全文.

CN 105929456 A,2016.09.07,全文.

李貅,等.核磁共振与瞬变电磁三维联合解释方法.《地球物理学报》.2015,第58卷(第8期),2730-2744.

审查员 魏冬

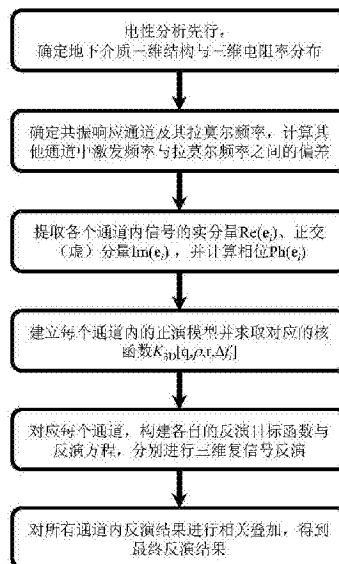
权利要求书3页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,包括:将测区划分地下介质的电性结构与电导率的三维分布特征;确定一个共振响应信号通道的激发频率及其拉莫尔频率,并据此确定其他多个通道中FID信号的激发频率与确定的拉莫尔频率之间的频率偏差;提取各个通道内FID信号的实分量、正交分量并计算对应相位;建立偏共振激发条件下每个通道内的正演模型,求取对应FID信号的响应核函数;构建每个通道内的反演目标函数与反演方程,并对每个通道内的FID信号分别进行三维复信号反演;对每个通道内所得到的反演结果进行相关叠加处理。本发明同时发挥复数FID信号与偏共振激发条件在反演分辨率上的优势。



1. 一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,其特征是,包括以下步骤:

步骤一:根据电法勘探手段及测区内的地质特点,将测区划分地下介质的电性结构与电导率的三维分布特征;

步骤二:确定一个共振响应信号通道的激发频率及其拉莫尔频率,并据此确定其他多个通道中FID信号的激发频率与确定的拉莫尔频率之间的频率偏差;

步骤三:提取各个通道内FID信号的实分量、正交分量并计算对应相位;

步骤四:建立偏共振激发条件下每个通道内的正演模型,求取对应FID信号的响应核函数;

步骤五:构建每个通道内的反演目标函数与反演方程,并对每个通道内的FID信号分别进行三维复信号反演;

具体为:在考虑每个通道内激发频率偏差的基础上,FID信号的实分量与正交分量分别对应各自通道反演方程中响应核函数的实部与虚部;

采用三维复信号反演的方法构建目标函数与反演方程,分别对各通道内的响应信号进行反演,从而得到反应地下含水率与渗透系数信息的局部含水率参数 $m_i(r, T_{2(i)}^*)$ 与 $m_L(r, T_2^*)$;

$m_i(r, T_{2(i)}^*)$ 与 $m_L(r, T_2^*)$ 分别代表第*i*个通道内偏共振激发条件下与拉莫尔频率激发下响应信号的反演结果;

步骤六:对每个通道内所得到的反演结果进行相关叠加处理,得到地下含水体的三维形态分布以及反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $m(r, T_2^*)$ 。

2. 如权利要求1所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,其特征是,在步骤一中,在考虑测区内的地质特点时,根据测区内已有的地质资料分析地下可能的储、导水构造及其三维分布特征。

3. 如权利要求1所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,其特征是,在步骤一中,将测区划分地下介质的电性结构与电导率的三维分布特征时的方法为电法勘探方法,包括:在测区内开展高密度电法或瞬变电磁法电法勘探方法。

4. 如权利要求1所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,其特征是,在步骤二中,具体为:需要在测区内使用多个激发频率进行核磁共振的激发和观测,所观测到的信号被分别记录在多个信号通道中,多个激发频率中的一个应与测区内的拉莫尔频率相等,记为 f_L ,其余激发频率 f_i ($i=1\sim N-1$)相对于拉莫尔频率具有一定程度的偏离 $\Delta f_i = |f_i - f_L|$ 。

5. 如权利要求1所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,其特征是,在步骤三中,FID信号实分量、正交分量的信号提取方法采取正交锁定放大方法,FID信号的相位由其对应的实分量和正交分量求得。

6. 如权利要求1所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,其特征是,在步骤四中,建立偏共振激发条件下每个通道内的正演模型:根据测区中得到的地质资料与地下介质三维电性结构建立反应地下含水率与渗透系数的初始模型。

7. 如权利要求6所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,其特征是,在步骤四中,求取对应FID信号的响应核函数过程为:

根据确定的地下介质电阻率的三维分布建立电性模型,采用矢量有限元的方法进行剖

分离散；

使用三维矢量有限元方法计算出每个通道内对应激发频率下人工射频激发磁场在地下的三维分布；其中，激发频率为拉莫尔频率的通道所对应的 $\Delta f_i=0$ ；

利用三维分布计算出每个通道内FID信号的响应核函数。

8. 如权利要求1所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法，其特征是，在步骤六中，对每个通道内所得到的反演结果进行相关叠加处理的方法为：选取偏共振激发条件下的响应信号对应的反演结果 $m_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 分别与莫尔频率激发下响应信号的反演结果 $m_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 作相关并求取其归一化的互相关系数 $c_i(\mathbf{r})$ ；

之后，利用相关叠加的办法对所有通道内响应信号的反演结果进行相关叠加，从而得到最终反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $m(\mathbf{r}, T_2^*)$ ；

$$c_i(\mathbf{r}) = \frac{\sum_{k=1}^M \mathbf{m}_{L(k)}(\mathbf{r}, T_2^*) \mathbf{m}_{i(k)}(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)}{\sum_{k=1}^M [\mathbf{m}_{L(k)}(\mathbf{r}, T_2^*)]^2 \sum_{k=1}^M [\mathbf{m}_{i(k)}(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)]^2} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{m}_{L(k)}(\mathbf{r}, T_2^*)$ 是拉莫尔频率激发下FID信号所对应的反演结果 $m_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 向量中的第 k 个元素， $\mathbf{m}_{i(k)}(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 是第 i 个偏共振频率激发下的FID信号所对应的反演结果 $m_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 向量中的第 k 个元素， M 是向量 $m_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 与 $m_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 的维数；

$$\mathbf{m}(\mathbf{r}, T_2^*) = \sum_{i=1}^N c_i \mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) \quad (2)$$

9. 如权利要求7所述的一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法，其特征是，利用三维分布 $\mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]$ 计算出每个通道内FID信号的响应核函数 $K_{3D}[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]$ 其表达式为：

$$K_{3D}[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i] = \frac{2\pi f_i M_0}{I_0} |\mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]| \times \left[\sin(\theta_{\text{eff}(i)}) \cos(\alpha_i) + i \sin^2\left(\frac{\theta_{\text{eff}(i)}}{2}\right) \sin(2\alpha_i) \right] \cdot \exp(2i\zeta_{T,R}) \quad (3)$$

核函数 $K_{3D}[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]$ 本身是一个复变函数，其中， q 是核磁共振激发脉冲矩， $\rho(\mathbf{r})$ 是地下介质的三维电阻率分布函数， \mathbf{r} 是地下介质三维坐标， Δf_i 是第 i 个接收通道内的FID信号的激发频率与拉莫尔频率的偏差， f_i 是第 i 个通道的激发频率， M_0 是单位体积内水的静磁化强度常数， I_0 是激发电流强度， $\zeta_{T,R}$ 是由于地下介质的导电性所产生的激发电流与FID信号之间的相位差； $\theta_{\text{eff}(i)}$ 是第 i 个通道内FID信号所对应的有效扳倒角，其表达式为：

$$\theta_{\text{eff}(i)} = \sqrt{\left[\gamma \frac{|\mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]|}{2} \right]^2 + (2\pi\Delta f_i)^2} \cdot \frac{q}{I_0} \quad (4)$$

其中， γ 是水中氢质子的旋磁比常数；

α_i 是第 i 个通道内的响应信号所对应的倾角，其表达式为：

$$\alpha_i = \tan^{-1} \frac{2\pi\Delta f_i}{\gamma \frac{\mathbf{B}_T[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]}{2}} \quad (5).$$

一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法

技术领域

[0001] 本发明涉及应用地球物理领域,具体涉及一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法。

背景技术

[0002] 核磁共振探测是一种通过观测水中氢质子的宏观磁矩在受人工射频磁场激发后所产生的自由衰减信号对地下介质的含水率、渗透特性以及孔隙结构进行直接定量识别的非侵入电磁探测方法。目前,核磁共振探测已经被广泛的应用于地下水探查、石油测井、滑坡检测以及岩石试样检测等诸多勘察、工程以及科学实验领域。核磁共振的产生共振的条件是人工射频磁场的激发频率等于拉莫尔频率。当激发频率与拉莫尔频率之间存在偏差时,所产生的信号称为偏共振响应信号,此时的激发条件称为偏共振激发。

[0003] 对于所观测到的核磁共振自由衰减信号(简称FID信号),目前的解释手段主要有地球物理反演与成像两种。目前,核磁共振的地球物理反演解释多采用传统的基于共振激发条件下的振幅反演方法,反演时数据仅仅用到了FID信号的振幅值。然而,FID信号在多数实际情况下是复数信号,更多地下介质的水力特性信息包含在FID信号的实分量、正交(虚)分量以及相位之中。因此利用复数FID信号进行核磁共振反演(复信号反演)能够更加全面的获取地下介质的水理特性信息。此外,在偏共振的激发条件下,核磁共振反演的分辨矩阵就有更高的分辨能力,尤其是浅层分辨能力。

[0004] 然而在实际应用中,对于如何同时发挥复数FID信号与偏共振激发条件在反演分辨率上的优势这一技术问题,尚未见有成熟的技术方案

发明内容

[0005] 为解决现有技术存在的不足,本发明公开了一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,本发明目的是:利用偏共振激发条件下的多通道复信号进行三维核磁共振反演后,再将各通道反演结果进行相关叠加反演。

[0006] 为实现上述目的,本发明的具体方案如下:

[0007] 一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤一:根据电法勘探手段及测区内的地质特点,将测区划分地下介质的电性结构与电导率的三维分布特征;

[0009] 步骤二:确定一个共振响应信号通道的激发频率及其拉莫尔频率,并据此确定其他多个通道中FID信号的激发频率与确定的拉莫尔频率之间的频率偏差;

[0010] 步骤三:提取各个通道内FID信号的实分量 $\text{Re}(e_i)$ 、正交(虚)分量 $\text{Im}(e_i)$ 并计算对应相位 $\text{Ph}(e_i)$;

[0011] 步骤四:建立偏共振激发条件下每个通道内的正演模型,求取对应FID信号的响应核函数;

[0012] 步骤五:构建每个通道内的反演目标函数与反演方程,并对每个通道内的FID信号

分别进行三维复信号反演；

[0013] 步骤六：对每个通道内所得到的反演结果进行相关叠加处理，得到地下含水体的三维形态分布以及反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $m(r, T_2^*)$ 。

[0014] 进一步的，在步骤一中，在考虑测区内的地质特点时，根据测区内已有的地质资料分析地下可能的储、导水构造及其三维分布特征。

[0015] 进一步的，在步骤一中，将测区划分地下介质的电性结构与电导率的三维分布特征时的方法为电法勘探方法，包括：在测区内开展高密度电法或瞬变电磁法电法勘探方法。

[0016] 进一步的，在步骤二中，具体为：需要在测区内使用多个激发频率进行核磁共振的激发和观测，所观测到的信号被分别记录在多个信号通道中，多个激发频率中的一个应与测区内的拉莫尔频率相等，记为 f_L ，其余激发频率 f_i ($i=1\sim N-1$) 相对于拉莫尔频率具有一定程度的偏离 $\Delta f_i = |f_i - f_L|$ 。

[0017] 进一步的，在步骤三中，FID信号实分量、正交分量的信号提取方法采取正交锁定放大方法，FID信号的相位由其对应的实分量和正交分量求得。

[0018] 进一步的，在步骤四中，建立偏共振激发条件下每个通道内的正演模型：根据测区中得到的地质资料与地下介质三维电性结构建立反应地下含水率与渗透系数的初始模型。

[0019] 进一步的，在步骤四中，求取对应FID信号的响应核函数过程为：

[0020] 根据确定的地下介质电阻率的三维分布建立电性模型，采用矢量有限元的方法进行剖分离散；

[0021] 使用三维矢量有限元方法计算出每个通道内对应激发频率下人工射频激发磁场在地下的三维分布；其中，激发频率为拉莫尔频率的通道所对应的 $\Delta f_i = 0$ ；

[0022] 利用三维分布计算出每个通道内FID信号的响应核函数。

[0023] 进一步的，在步骤五中，具体为：在考虑每个通道内激发频率偏差的基础上，FID信号的实分量与正交分量分别对应各自通道反演方程中响应核函数的实部与虚部；

[0024] 采用三维复信号反演的方法构建目标函数与反演方程，分别对各通道内的响应信号进行反演，从而得到反应地下含水率与渗透系数信息的局部含水率参数 $m_i(r, T_{2(i)}^*)$ 与 $m_L(r, T_2^*)$ ；

[0025] $m_i(r, T_{2(i)}^*)$ 与 $m_L(r, T_2^*)$ 分别代表第 i 个通道内偏共振激发条件下与拉莫尔频率激发下响应信号的反演结果。

[0026] 进一步的，在步骤六中，对每个通道内所得到的反演结果进行相关叠加处理的方法为：选取偏共振激发条件下的响应信号对应的反演结果 $m_i(r, T_{2(i)}^*)$ 分别与莫尔频率激发下响应信号的反演结果 $m_L(r, T_2^*)$ 作相关并求取其归一化的互相关系数 $c_i(r)$ ；

[0027] 之后，利用相关叠加的办法对所有通道内响应信号的反演结果进行相关叠加，从而得到最终反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $m(r, T_2^*)$ 。

[0028] 本发明提出了一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法。同时发挥复数FID信号与偏共振激发条件在反演分辨率上的优势。

[0029] 本发明的有益效果：

[0030] 本发明所提出的技术方案从以下四个层面上提高了反演结果的分辨率：

[0031] (1) 发挥了多通道观测的优势，观测数据量较于传统单一频率(通道) 观测显著提高，从观测数据量层面上提高了反演分辨率；

[0032] (2) 采用了复信号反演方法,接收到的FID信号进行正交分解后,对复数信号进行反演(复信号反演)具有更好的垂向分辨率和抗噪特性;特别是在当大地导电性质较好时,由于将FID信号的正交分量加入了反演过程,复信号反演方法对于深度的分辨程度更高;

[0033] (3) 由于在反演中使用了多通道FID信号;参与反演的数据不仅有拉莫尔频率激发下的响应信号,还有多个偏共振激发下的响应信号;不同频率的偏共振激发对反演分辨能力具有不同程度的提高,特别是浅部的分辨率;

[0034] (4) 多通道反演结果相关叠加方法,对各个通道内的反演结果进行“扬长避短”,压制各个通道内的反演异常,从而得到一个更为清晰而准确的反演结果。

附图说明

[0035] 图1是本发明的实施流程。

具体实施方式:

[0036] 下面结合附图对本发明进行详细说明:

[0037] 本发明公开了一种基于多频偏共振激发的三维核磁共振叠前反演方法,该方法基于共振激发与多频率偏共振激发下的多通道核磁共振响应信号,对每一个通道内的核磁共振响应信号分别进行三维复信号反演;反演后将每个通道内的结果进行相关叠加最终得到最终反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $m(r, T_2^*)$ 。如图1所示,具体步骤为:

[0038] (1) 电性分析先行,结合已有地质资料及电法勘探手段,划分地下介质的电性结构与电导(阻)率的三维分布;

[0039] (2) 确定一个共振响应信号通道及其拉莫尔频率,并据此确定其他多个通道中FID信号的激发频率与拉莫尔频率之间的频率偏差;

[0040] (3) 提取各个通道内FID信号的实分量 $\text{Re}(e_i)$ 、正交(虚)分量 $\text{Im}(e_i)$ 并计算对应相位 $\text{Ph}(e_i)$;

[0041] (4) 建立偏共振激发条件下每个通道内的正演模型,求取对应FID信号的核函数;

[0042] (5) 构建每个通道内的反演目标函数与反演方程,并对每个通道内的FID信号分别进行三维复信号反演;

[0043] (6) 对每个通道内所得到的反演结果进行相关叠加处理,得到地下含水体的三维形态分布以及反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $m(r, T_2^*)$ 。

[0044] 其中,步骤(1)包括以下过程:首先根据测区内已有的地质资料分析地下可能的储、导水构造及其三维分布特征;其次,利用已有电法勘探资料,或在测区内开展高密度电法或瞬变电磁法等电法勘探方法划分地下介质的电性结构与电导(阻)率的三维分布。

[0045] 步骤(2)中的参数确定需要在测区内使用多个激发频率进行核磁共振的激发和观测,所观测到的信号被分别记录在多个信号通道中,通道数记为 N 。多个激发频率中的一个应与测区内的拉莫尔频率相等,记为 f_0 ,其余激发频率记为 $f_i (i=1 \sim N-1)$ 相对于拉莫尔频率具有一定程度的偏离 $\Delta f_i = |f_i - f_0|$ 。

[0046] 步骤(3)中FID信号实分量、正交(虚)分量的信号提取方法可采取正交锁定放大方法,FID信号的相位由其对应的实分量和正交分量求得。由于正交锁定放大方法已是成熟技术,故在此不再赘述。

[0047] 步骤(4)中建立偏共振激发条件下每个通道内的正演模型并求取对应FID信号响应核函数的方法为:

[0048] 1) 根据步骤(1)中得到的地质资料分析与地下介质三维电性结构建立反应地下含水率与渗透系数的初步模型 $m_0(\mathbf{r}, T_2^*)$;

[0049] 2) 根据步骤(1)中确定的地下介质电阻率的三维分布建立电性模型,采用矢量有限元的方法进行剖分离散;使用三维矢量有限元方法计算出每个通道内对应激发频率下人工射频激发磁场在地下的三维分布 $\mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]$;其中,激发频率为拉莫尔频率的通道所对应的 $\Delta f_i = 0$ 。关于矢量有限元剖分离散以及计算方法,由于已是成熟技术故不在此赘述;

[0050] 3) 对所有N个接收通道内的FID信号(包括N-1个偏共振激发下的通道和1个拉莫尔频率激发下的通道),利用 $\mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]$ 计算出每个通道内FID信号的响应核函数 $K_{3D}[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]$ 其表达式为:

[0051]

$$K_{3D}[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i] = \frac{2\pi f_i M_0}{I_0} \left| \mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i] \right| \times \left[\sin(\theta_{\text{eff}(i)}) \cos(\alpha_i) + i \sin^2\left(\frac{\theta_{\text{eff}(i)}}{2}\right) \sin(2\alpha_i) \right] \cdot \exp(2i\zeta_{T,R}) \quad (1)$$

[0052] 核函数 $K_{3D}[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i]$ 本身是一个复变函数,其中,q是核磁共振激发脉冲矩, $\rho(\mathbf{r})$ 是地下介质的三维电阻率分布函数, \mathbf{r} 是地下介质三维坐标, Δf_i 是第i个接收通道内的FID信号的激发频率与拉莫尔频率的偏差, f_i 是第i个通道的激发频率, M_0 是单位体积内水的静磁化强度常数, I_0 是激发电流强度, $\zeta_{T,R}$ 是由于地下介质的导电性所产生的激发电流与FID信号之间的相位差。 $\theta_{\text{eff}(i)}$ 是第i个通道内FID信号所对应的有效扳倒角,其表达式为:

$$\theta_{\text{eff}(i)} = \sqrt{\left(\gamma \frac{\left| \mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i] \right|}{2} \right)^2 + (2\pi\Delta f_i)^2} \cdot \frac{q}{I_0} \quad (2)$$

[0054] 其中, γ 是水中氢质子的旋磁比常数。

[0055] α_i 是第i个通道内的响应信号所对应的倾角,其表达式为:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \frac{2\pi\Delta f_i}{\gamma \frac{\left| \mathbf{B}_T^+[q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i] \right|}{2}} \quad (3)$$

[0057] 步骤(5)中在考虑每个通道内激发频率偏差的基础上,采用三维复信号反演的方法构建目标函数与反演方程,对各通道内的响应信号进行反演;从而得到反应地下含水率与渗透系数信息的局部含水率参数 $m_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 与 $m_L(\mathbf{r}, T_2^*)$; $m_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 与 $m_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 分别代表第i个通道内偏共振激发条件下与拉莫尔频率激发下响应信号的反演结果。

[0058] 所构建的反演目标函数为:

$$\Phi(\mathbf{m}_i) = \left\| \mathbf{D} \left(\mathbf{e}_i - \mathbf{f} \left[\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) \right] \right) \right\|_2^2 + \lambda \left\| \mathbf{C} \left[\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) - \mathbf{m}_0(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) \right] \right\|_2^2 \quad (4)$$

[0060] 对应的反演方程为:

$$[0061] \quad \begin{aligned} & (\mathbf{J}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \Delta \mathbf{m}_i^n(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) \\ & = \mathbf{J}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} (\mathbf{e}_i - \mathbf{f}[\mathbf{m}_i^n(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)]) - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} [\mathbf{m}_i^n(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) - \mathbf{m}^0(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)] \end{aligned} \quad (5)$$

[0062] 其中, $T_{2(i)}^*$ 是第 i 个通道内 FID 信号的弛豫常数, $\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 是所有接收通道内第 i 个通道的模型参数向量, $\mathbf{m}^0(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 是初始参考的模型参数向量, $\mathbf{m}_i^n(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 是第 i 个通道内进行反演迭代式第 n 步的迭代值, $\Delta \mathbf{m}_i^n(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 是第 i 个通道内第 n 次反演迭代时模型参数向量的增量, \mathbf{e}_i 是第 i 个通道内的观测数据向量, $\mathbf{f}[\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)]$ 是正演重建的观测数据向量, \mathbf{C} 是光滑约束矩阵, λ 是正则化参数, \mathbf{D} 是用于加权的观测误差矩阵

$$[0063] \quad \mathbf{D} = \text{diag} \left(\frac{1}{\varepsilon_{i,j}} \right) \quad (6)$$

[0064] 其中, $\varepsilon_{i,j}$ 是第 i 个通道内观测数据向量 \mathbf{e}_i 中第 j 个元素的误差。J 是计算偏导数的雅可比矩阵, 矩阵中的元素 $J_{i,k}$ 为

$$[0065] \quad J_{j,k} = \frac{\partial f_j(\mathbf{m}_i^n)}{\partial m_{i(k)}} \quad (7)$$

[0066] 其中, $f_j(\mathbf{m}_i^n)$ 是第 n 次迭代后模型参数所拟合的响应向量中的第 j 个元素, $m_{i(k)}$ 是第 i 个通道内模型参数向量中的第 k 个元素。在考虑偏共振激发的条件下, 每个通道内的观测数据向量 \mathbf{e}_i 与模型参数向量 $\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 的对应关系为:

$$[0067] \quad \mathbf{e}_i = \mathbf{f}[\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)] = \int_V K_{3D} [q, \rho(\mathbf{r}), \mathbf{r}, \Delta f_i] \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_{2(i)}^*}\right) \cdot \mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) dT_{2(i)}^* d^3r \quad (8)$$

[0068] 步骤 (6) 中对每个通道内所得到的反演结果进行相关叠加处理的方法为: 选取偏共振激发条件下的响应信号对应的反演结果 $\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 分别与莫尔频率激发下响应信号的反演结果 $\mathbf{m}_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 作相关并求取其归一化的互相关系数 $c_i(\mathbf{r})$ 。之后, 利用相关叠加的办法对所有通道内响应信号的反演结果进行相关叠加, 从而得到最终反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $\mathbf{m}(\mathbf{r}, T_2^*)$ 。选取非最佳响应信号对应通道内的反演结果 $\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$, 分别与最佳响应信号的反演结果 $\mathbf{m}_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 作相关并求取其归一化的互(互)相关系数 $c_i(\mathbf{r})$;

$$[0069] \quad c_i(\mathbf{r}) = \frac{\sum_{k=1}^M \mathbf{m}_{L(k)}(\mathbf{r}, T_2^*) \mathbf{m}_{i(k)}(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)}{\sum_{k=1}^M [\mathbf{m}_{L(k)}(\mathbf{r}, T_2^*)]^2 \sum_{k=1}^M [\mathbf{m}_{i(k)}(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)]^2} \quad (9)$$

[0070] 其中, $\mathbf{m}_{L(k)}(\mathbf{r}, T_2^*)$ 是拉莫尔频率激发下 FID 信号所对应的反演结果 $\mathbf{m}_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 向量中的第 k 个元素, $\mathbf{m}_{i(k)}(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 是第 i 个偏共振频率激发下的 FID 信号所对应的反演结果 $\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 向量中的第 k 个元素, M 是向量 $\mathbf{m}_L(\mathbf{r}, T_2^*)$ 与 $\mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*)$ 的维数。最后, 利用相关叠加的办法对所有通道内响应信号的反演结果进行相关叠加, 从而得到最终反应地下含水率与渗透系数的局部含水率参数 $\mathbf{m}(\mathbf{r}, T_2^*)$ 。

$$[0071] \quad \mathbf{m}(\mathbf{r}, T_2^*) = \sum_{i=1}^N c_i \mathbf{m}_i(\mathbf{r}, T_{2(i)}^*) \quad (10)$$

[0072] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

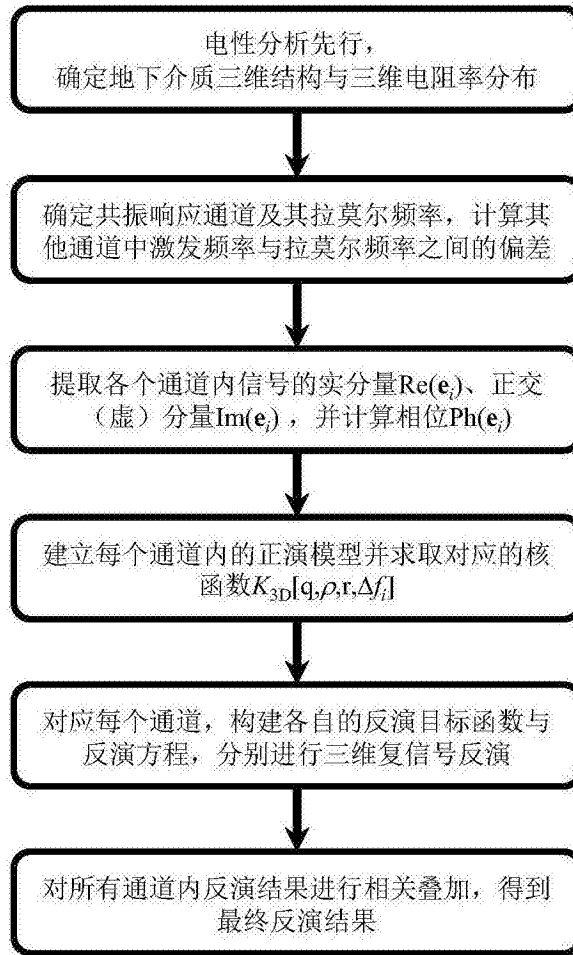


图1