

doi: 10.11720/wtyht.2017.1.14

任志平,李貅,戚志鹏,等.地面核磁共振三维响应影响因素[J].物探与化探,2017,41(1):92-97.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.14>

Ren Z P, Li X, Qi Z P, et al. An analysis of factors affecting SNMR 3D response[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(1): 92-97. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.1.14>

地面核磁共振三维响应影响因素

任志平^{1,2}, 李貅¹, 戚志鹏¹, 赵威¹, 智庆全¹, 刘磊¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安石油大学 电子工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 传统的核磁共振激发场的计算中, 很少考虑三维地下介质的电性变化以及发射线圈姿态对激发场的影响, 笔者借助地面核磁共振三维有限元正演模拟, 开展了核磁共振三维响应影响因素分析。首先, 基于三维有限元方法实现了非均匀介质条件下地面核磁共振激发场的计算, 以便于分析介质电性变化对核磁共振响应的影响; 其次, 在源的加载过程采用近似函数来等效场源的作用, 使之能够适用于不同发射回线激发的情况, 进而利用旋转矩阵实现垂直地磁场分量的计算; 最后通过不同条件下核磁共振响应的计算, 分析了盖层电阻率、含水背景电阻率、局部不均匀体以及发射线圈姿态等参数对核磁共振信号的影响。计算结果表明: 核磁共振响应对高阻盖层电阻率变化不敏感; 低阻含水背景对核磁共振响应的影响较大; 异常体规模越大, 对核磁共振响应的影响越大, 对于一定规模的异常体, 低阻条件下的核磁共振响应差异明显; 与电性参数变化相比, 不同的发射线圈姿态对核磁信号影响更大, 野外应考虑线圈姿态影响。

关键词: 地面核磁共振; 三维正演; 有限元; 非均匀介质; 线圈姿态

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2017)01-0092-06

0 引言

核磁共振方法是目前唯一能够直接探测水源的地球物理方法^[1], 在确定含水层深度、厚度及含水量大小方面具有较强的探测能力, 成功应用于地下水探寻、水文地质调查、滑坡灾害监测等多个领域。

与传统的地球物理找水方法相比, 核磁共振找水具有高分辨、高效率、信息量丰富和解唯一等优点^[2], 但实际勘探过程中也存在很多因素制约着核磁共振找水的探测效果。国内外的物探人员为此展开了一系列研究, 其中围绕介质导电性影响这一典型问题, Braun 和 Yaramanci^[3-4] 尝试利用核磁共振信号的相位信息反演获得电性分布, 在理论模型的建立与验证方面取得了一定的试验效果。但在实际工作中, 受环境干扰影响, 相位信息信噪比较低, 反演结果的可信度不高。Hertrich 和 Yaramanci^[5-6] 利用电测深法获得地下介质的电性模型, 基于模拟退

火法实现了核磁共振方法和电测深方法的联合反演。Vouillamoz J^[7] 将电测深和核磁共振联合解释方法应用于缅甸沿海含水层的确定。在国内, 许多学者也认识到地下介质导电性对核磁共振响应应具有较大的影响, 林君^[8-11] 等对核磁共振信号多种影响因素进行了总结分析; 翁爱华^[12-13] 等分析了层状介质条件下核磁共振响应的规律, 指出导电性是产生地面核磁共振相位信号的先决条件, 并专门针对介质电性等效方法的合理性进行了讨论。为了避免地层导电性的影响, 胡祥云^[14] 等学者提出利用全局优化算法同时反演电阻率与含水率, 万玲^[15] 等在利用遗传算法实现了瞬变电磁与核磁共振的联合反演的同时提供了介质的电阻率与含水率。然而上述正反演研究均以一维层状模型为研究对象, 并未考虑介质的三维变化。实际水的储存结构一般来讲都比较复杂, 特别是对于裂隙水、岩溶水、孤立水体等局部三维含水构造, 一维核磁共振的正反演方法不再完全适用复杂地电条件, 因此有必要对复杂地质环境

收稿日期: 2015-11-23; 修回日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41174160); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB036002)

作者简介: 任志平(1980-), 男, 博士, 长安大学地质与测绘学院地球探测与信息技术专业博士研究生。Email: renzp@xysu.edu.cn

下三维核磁共振开展研究。

笔者利用频率域电磁场比较成熟的有限元法进行核磁共振三维正演,考虑了地下介质电性不均匀性对核磁响应的影响,通过加载电流源的方式,实现不同回线激发场的计算。在此基础上分析不同因素对核磁响应的影响,为后期核磁共振资料解释奠定基础。

1 核磁共振三维正演基本原理

核磁共振找水过程中,向地面铺设的线圈中馈送拉莫尔频率的正弦电流进行激发,在撤去外加磁场后,将释放出等于拉莫尔频率的自由衰减信号,其初始振幅可以表示为:

$$E_0(q) = \frac{\omega_0 M_0}{I} \int B_{\perp} \sin\left(\gamma \frac{B_{\perp}}{I} q\right) n(r) dv, \quad (1)$$

其中: ω_0 为拉莫尔角频率, M_0 为单位体积水的磁矩, I 为发射线圈中通入的电流强度, $B_{\perp}$ 为外加磁场垂直于地磁场的分量, $n(r)$ 代表空间固定位置的含水率, γ 为氢质子的磁旋比, q 为发射脉冲矩。

由式(1)可知自由衰减信号的初始振幅与含水率、原子核磁旋比和外加磁场沿地磁场分量的大小等因素有关。在地电参数确定的前提下,若要获得初始振幅,必须进行激发场 $B_{\perp}$ 的计算。

1.1 基于三维有限元的激发磁场分布计算

在仅存在外加电性源、时谐情况下,假定谐变因子为 $\exp(i\omega t)$,电磁场所满足的 Maxwell 方程组为:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= i\omega\mu\mathbf{H}, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \sigma\mathbf{E} - i\omega\varepsilon\mathbf{E} + \mathbf{J}_s, \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为电场和磁场矢量, ω 为激励源的角频率, ε, μ, σ 分别为介电常数、磁导率及电导率, $\mathbf{J}_s$ 为外加电流源的电流密度。由于不存在磁荷和面电流密度,磁场在内部电性界面上同时具有法向和切向连续性。为通用起见,在外边界上 S_2 给出磁场的第三类边界条件为

$$\hat{n} \times (\nabla \times \mathbf{H}) + \gamma_h \hat{n} \times (\hat{n} \times \mathbf{H}) = \mathbf{V}, \quad (3)$$

其中: $\hat{n}$ 为 S_2 的外法向单位向量, $\mathbf{V}, \gamma_h$ 为关于边界条件的已知量。利用代入法消去式(2)中电场项,即可得到磁场满足的双旋度方程

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} - k^2 \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{J}_s, \quad (4)$$

其中, $k^2 = \omega^2 \varepsilon \mu + i\omega \mu \sigma$ 。根据变分原理,通过求解泛函(5)的驻点,能够获得满足方程(4)和边界条件(3)的磁场解

$$F(\mathbf{H}) = \frac{1}{2} \iiint_V [(\nabla \times \mathbf{H}) \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) -$$

$$k^2 \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}] dv - \iint_{S_2} \mathbf{H} \cdot (\nabla \times \mathbf{J}_s) dv. \quad (5)$$

假定剖分单元内部物性均匀,并设单元节点 i 上的磁场 3 个分量分别为 H_{xi}, H_{yi}, H_{zi} , 则对剖分后的所有单元,求解变分问题式(5)的驻点等价于求解方程组(6)

$$\begin{cases} \frac{\partial F(H_x)}{\partial H_{xi}} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial F_e}{\partial H_{xi}^e} = 0, \\ \frac{\partial F(H_y)}{\partial H_{yi}} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial F_e}{\partial H_{yi}^e} = 0, \\ \frac{\partial F(H_z)}{\partial H_{zi}} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial F_e}{\partial H_{zi}^e} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

其中: n 为剖分单元个数, e 为单元编号,对所有单元进行组合并强加驻点条件得:

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = [N_{ij}] \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} [K_{xx}] &= \iiint_{V_e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} - k^2 N_i^e N_j^e \right) dv \\ &= [N_y] + [N_z] - k^2 [N_{ij}], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [K_{yy}] &= \iiint_{V_e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} - k^2 N_i^e N_j^e \right) dv \\ &= [N_x] + [N_z] - k^2 [N_{ij}], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [K_{zz}] &= \iiint_{V_e} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} - k^2 N_i^e N_j^e \right) dv \\ &= [N_y] + [N_x] - k^2 [N_{ij}], \end{aligned}$$

$$[K_{pq}] = - \int_{V_e} \frac{\partial N_i^e}{\partial q} \frac{\partial N_j^e}{\partial p} dv = [N_{pq}]$$

$$p, q = x, y, z; p \neq q$$

通过对式(7)的求解,可以得到空间中任意点的磁场强度。

在利用节点有限元法求解式(2)时,为了规避计算电流密度的旋度或电场法向不连续的问题,一般先计算电场或矢量势,然后通过求导来获取磁场值。为了提高计算精度,笔者直接利用有限元法计算磁场值,引入空间分布伪 δ 函数^[16]等效细导线源产生的场效应(图1),通过将源分布于一定范围内,直接求解总场值。图1中参数 τ 控制了源分布的宽度和幅值,空间 (x_0, y_0, z_0) 处电流强度为 I 、沿着 y 方向的导线源,其电流密度的分布可以表示为 $J_y = I\delta_\tau(x-x_0)(z-z_0)$, 这样对电流密度求旋度的运算可

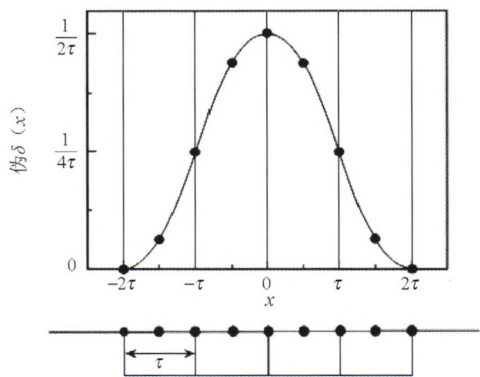


图 1 伪 δ 函数分布

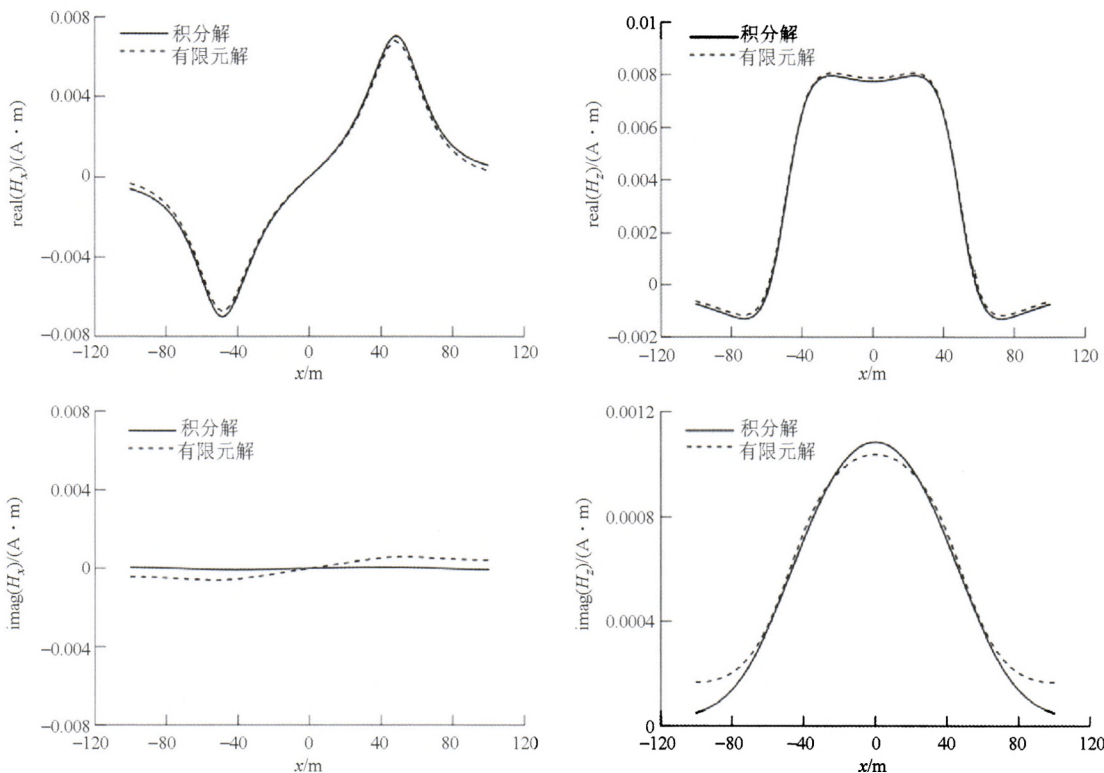


图 2 有限元解和积分求解比较

2 三维核磁共振响应特征分析

为了进一步了解地面核磁共振三维响应特征,针对覆盖层介质、含水背景电阻率、局部不均匀体参数变化以及不同线圈姿态条件下的核磁共振响应进行了数值模拟。计算时,取地磁场强度 48 000 nT,磁倾角 60°,磁偏角 0°,拉莫尔频率 2 350 Hz,发射线圈边长 20 m,线圈中心位于地面(0,0)处。

2.1 覆盖层介质对核磁共振响应的影响

为考查盖层介质电性参数变化对核磁共振响应的影响,对不同覆盖层介质电导率条件下,核磁共振响应振幅随发射脉冲矩的变化规律进行了模拟,

转换为对伪 δ 函数的导数运算。

由于地磁场同时包含地磁倾角 I 和地磁偏角 D ,激发场垂直地磁场分量 $B_{\perp}$ 的表示较为复杂。在获得地下磁场分布后,利用旋转矩阵^[17]可以简化 $B_{\perp}$ 计算,获得 $B_{\perp}$ 后,即可实现核磁共振的三维正演。

1.2 有限元算法验证

为了验证有限元算法的正确性,计算了激励电流频率为 2 350 Hz 时,半径为 50 m 的回线源在电阻率为 100 $\Omega \cdot \text{m}$ 的半空间频率响应,与积分公式求出的场值进行了对比。如图 2 所示,除导线附近位置,有限元计算结果和积分公式求解基本一致。

地电模型如图 3 所示。其中第二层介质中的含水体大小为 40 m×40 m×15 m,含水率为 10%,固定参数 $h_1=15 \text{ m}$, $\rho_2=100 \Omega \cdot \text{m}$ 。当 $h_2=20 \text{ m}$,盖层电阻率

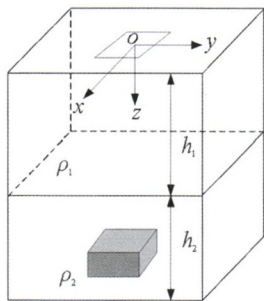


图 3 三维单含水体地电模型

ρ_1 分别为 1、2、10、100、500 $\Omega \cdot \text{m}$ 时,计算得到的核磁共振初始振幅响应曲线如图 4 所示。

由图可见,随着盖层电阻率变大,核磁共振响应的最大振幅相应增大,当盖层电阻率从 100 $\Omega \cdot \text{m}$ 增加到 500 $\Omega \cdot \text{m}$ 时,磁共振响应曲线基本重合,表明核磁响应对高阻覆盖层的变化不敏感,但是相同模型在不同低阻覆盖层条件下,核磁共振响应差别明显,尤其当电阻率小于 10 $\Omega \cdot \text{m}$ 时,盖层电性变化对核磁响应影响较大,因此在反演过程中应充分考虑实际探测环境下低阻覆盖层对解释结果的影响。

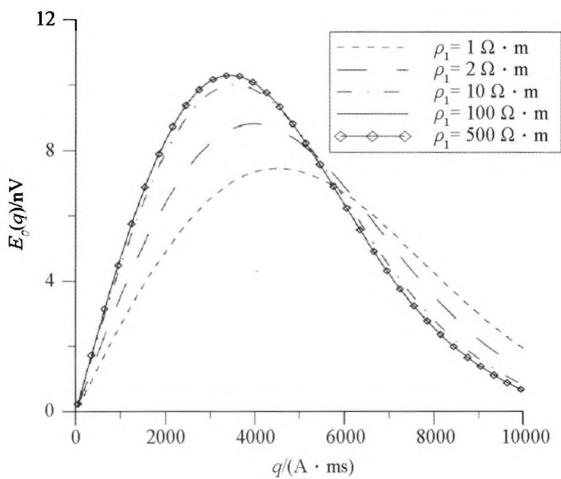


图 4 覆盖层电阻率对核磁共振响应的影响

2.2 含水体背景电阻率对核磁共振响应的影响

不同的地层背景电阻率会对电磁波信号产生不同程度的衰减,直接影响到探测信号的强度和探测距离,因此有必要了解含水体所在地层电性参数变化对核磁共振响应的影响。沿用图 3 的计算模型,保持含水体规模及含水率参数不变,当 $\rho_1 = 20 \Omega \cdot \text{m}$, $h_1 = 10 \text{ m}$, $h_2 = 20 \text{ m}$ 时,对地层背景电阻率 ρ_2 为

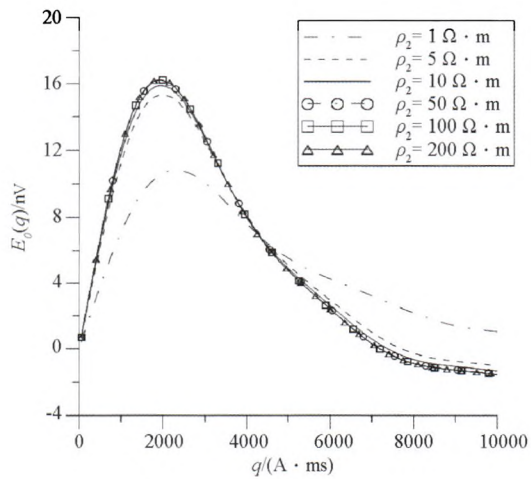


图 5 背景电阻率对核磁共振信号的影响

1、5、10、50、100、200 $\Omega \cdot \text{m}$ 等不同情况进行计算,相同线圈在不同地层背景电阻率下接收到的核磁共振响应曲线如图 5 所示。由图可见,不同含水体背景电阻率下磁共振响应曲线形态基本相同,高阻背景下核磁响应曲线间的差别较小,随着地层背景电阻率增高,当含水体所在地层电阻率大于 50 $\Omega \cdot \text{m}$ 时,背景电阻率对响应信号带来的影响可忽略不计,而电阻率越低,核磁响应曲线的最大振幅越小,说明电磁波在低阻介质中能量损耗较大,随着背景电阻率减小,磁共振响应差异逐渐增大,低阻背景对核磁响应的影响愈发明显。

2.3 局部不均匀体对核磁共振信号的影响

实际勘探过程中地下可能存在多个异常体,下面分析局部不均匀体对核磁共振信号的影响。给定模型如图 6 所示,在均匀半空间中含有 2 个异常体,模型参数设置如下:均匀半空间背景电阻率为 100 $\Omega \cdot \text{m}$, 1#异常体中心点位置坐标为 (0,0,10), 2#异常体大小为 40 m×40 m×15 m, 中心点位置坐标为 (0,0,30), 电阻率为 20 $\Omega \cdot \text{m}$, 含水率为 10%。分别考察 1#异常体的大小、电阻率变化对核磁共振响应的影响。首先固定 1#异常体电阻率为 10 $\Omega \cdot \text{m}$, 改变异常体规模,核磁共振响应如图 7a 所示,而固定 1#异常体尺寸为 80 m×80 m×15 m, 改变 1#异常体电阻率分别为 1、10、50、100、500 $\Omega \cdot \text{m}$, 核磁共振响应如图 7b 所示。

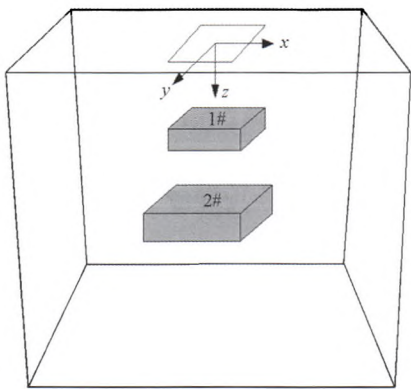


图 6 局部异常体模型

从图中可以看出:当异常体规模相对发射线圈较小时,局部异常对核磁共振响应影响不大;当异常规模相对发射回线不可忽略时,给定模型电阻率分布,随着局部异常体规模的增加,异常对核磁响应的影响逐渐显现。当异常体规模较大时,逐渐改变异常体电性参数,其变化规律与覆盖层电阻率对核磁共振影响类似。

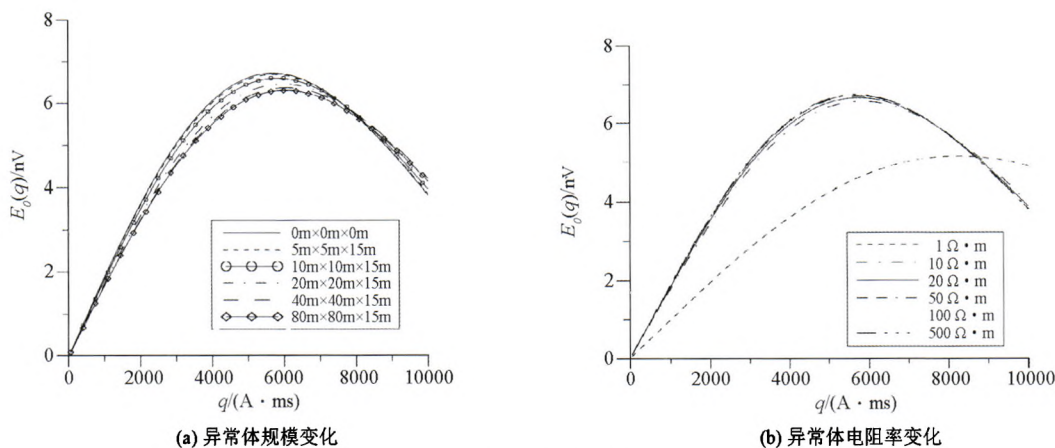


图 7 局部不均匀体对核磁共振的影响

2.4 线框姿态对核磁共振响应的影响

分析发射线圈姿态的改变对核磁共振响应的影响规律。固定发射线圈边长为 20 m, 均匀半空间中设置单一含水体, 含水体体积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 10\text{ m}$, 电阻率为 $40\text{ }\Omega \cdot \text{m}$, 含水率为 20%, 含水体中心点位置坐标为 $(0, 0, 15)$, 针对不同均匀半空间的电阻率, 分别计算了线圈布置在 xy 平面, 线圈法向指向 z 轴时与线圈布置在 yz 平面, 线圈法向指向 x 轴时的核磁共振响应, 如图 8 所示。

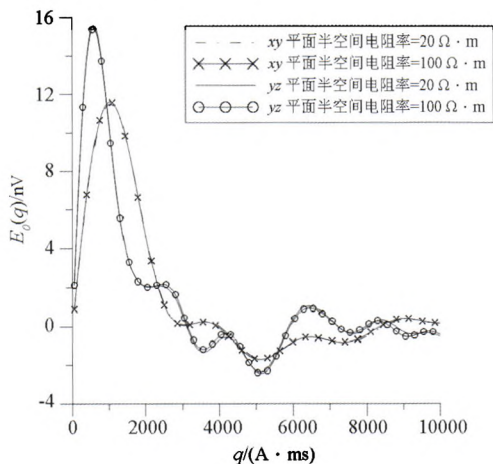


图 8 不同线框姿态下的核磁共振响应对比

从图中可知: 两种情况下磁共振响应的形态基本类似, 但是在 yz 平面观测的初始振幅最大值大于在 xy 平面观测的初始振幅的最大值, 线圈的倾向对核磁信号影响远远超过了半空间电阻率变化所产生的影响, 因此在野外工作时应考虑地形造成的线圈倾斜对核磁响应的影响。

3 结论

根据核磁共振找水理论, 利用有限元方法计算

了三维空间频域激发场的分布, 改进了源的加载方法, 实现了地面核磁共振的三维正演, 与积分公式解的对比验证了文中三维有限元正演方法的有效性和准确性。在此基础上分析覆盖层电阻率、含水体背景电阻率、局部异常体参数以及线圈姿态变化下的核磁共振响应特征, 数值模拟结果表明:

1) 盖层电阻率对核磁共振响应具有一定影响, 尤其是在低阻覆盖地区, 覆盖层影响尤为明显。因此, 进行核磁共振解释工作时, 必须考虑低阻覆盖的电性分布。

2) 含水体背景电阻率信息是影响核磁共振探测效果的一个重要因素, 高阻背景介质中核磁共振响应难以分辨地层电阻率的变化, 而背景电阻率越小, 核磁共振响应差异越大, 会产生较大的测量误差。

3) 较小的异常体规模对核磁共振响应影响不大。当异常体规模较大时, 随着异常体电阻率增大, 核磁共振初始振幅最大值逐渐增大, 但异常体电阻率变化对初始振幅信号的影响逐渐减弱。

4) 线圈姿态会影响核磁共振响应的初始振幅, 特别是在地形起伏严重地区, 地形起伏会改变发射线圈的选取方向, 进而对核磁共振响应产生较大的影响。相比之下, 电性参数的变化对核磁响应影响不大, 除非是在极低阻地区, 需要考虑介质电性的影响。

三维核磁共振响应特征的数值计算可用于研究复杂环境下地层电性、线圈特性对磁共振响应的影响, 为地层电阻率校正、三维空间下含水体的正演计算和反演解释提供了理论依据, 为核磁共振找水的应用打下良好基础。

参考文献:

- [1] 许小强,程顺有. 地球物理找水方法概述[J]. 地下水,2007,29(3):28-29.
- [2] 林君. 核磁共振找水技术的研究现状与发展趋势[J]. 地球物理学进展,2010,25(2):681-691.
- [3] Braun M, Yaramanci U. Inversion of resistivity in magnetic resonance sounding[J]. Journal of Applied Geophysics,2008,66(3):151-164.
- [4] Braun M, Hertrich M, Yaramanci U. Study on complex inversion of magnetic resonance sounding signals[J]. Near Surface Geophysics,2005,3(3):155-163.
- [5] Hertrich M, Braun M, Yaramanci U. Magnetic resonance soundings with separated transmitter and receiver loops[J]. Near Surface Geophysics,2005,3(3):141-154.
- [6] Hertrich M, Yaramanci U. Joint inversion of surface nuclear magnetic resonance and vertical electrical sounding[J]. Journal of Applied Geophysics,2002,50(1):179-191.
- [7] Vouillamoz J, Chatenoux B, Mathieu F, et al. Efficiency of joint use of MRS and VES to characterize coastal aquifer in Myanmar[J]. Journal of Applied Geophysics,2007,61(2):142-154.
- [8] 林君,蒋川东,段清明,等. 复杂条件下地下水磁共振探测与灾害水源探查研究进展[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2012(5):1560-1570.
- [9] 孙淑琴,赵义平,林君,等. 用地面核磁共振方法评估含水层涌水量的实例[J]. 地球物理学进展,2008,23(4):1317-1321.
- [10] 孙淑琴,林君,张世雄. 导电性对地面核磁共振信号的影响研究[J]. 物探化探计算技术,2005(2):127-130.
- [11] 林君,蒋川东,林婷婷,等. 地下工程灾害水源的磁共振探测研究[J]. 地球物理学报,2013(11):3619-3628.
- [12] 翁爱华,王雪秋,刘国兴,等. 导电性影响的地面核磁共振反演[J]. 地球物理学报,2007,50(3):890-896.
- [13] 翁爱华,李舟波,王雪秋. 层状导电介质中地面核磁共振响应特征理论研究[J]. 地球物理学报,2004,47(1):156-163.
- [14] 戴苗,胡祥云,吴海波,等. 地面核磁共振找水反演[J]. 地球物理学报,2009,52(10):2676-2682.
- [15] 万玲,林婷婷,林君,等. 基于自适应遗传算法的 MRS-TEM 联合反演方法研究[J]. 地球物理学报,2013,56(11):3728-3740.
- [16] Herrmann R B. SH-wave generation by dislocation sources-a numerical study[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,1979,69(1):1-15.
- [17] 蒋川东,林君,段清明,等. 二维阵列线圈核磁共振地下水探测理论研究[J]. 地球物理学报,2011,54(11):2973-2983.

An analysis of factors affecting SNMR 3D response

REN Zhi-Ping^{1,2}, LI Xiu¹, QI Zhi-Peng¹, ZHAO Wei¹, ZHI Qing-Quan¹, LIU Lei¹

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In view of the problem that the traditional calculation of surface nuclear magnetic resonance (SNMR) excitation field seldom considers various three-dimensional subsurface electric properties and different forms of launcher, the authors carried out surface NMR three-dimensional finite element modeling which premeditates the impact of a conductive medium. First, based on the three-dimensional finite element method, the authors realized the calculation of surface NMR excitation field under the condition of inhomogeneous medium. An approximate function was adopted to replace field source, so that it could be applied to different cases of transmitter loop. Then, the vertical component of excitation field was obtained through rotation matrix. Finally, the NMR response under different conditions was calculated. Several typical models were designed to analyze the effect of cap rock resistivity, formation resistivity, inhomogeneous medium and transmitter coil posture on SNMR signal. Numerical simulation shows that nuclear magnetic resonance is not sensitive to the change of the high cap rock resistivity. Low formation resistivity has great effect on SNMR response. The larger the inhomogeneous medium, the greater the SNMR response. For a certain size of the local inhomogeneous body, the difference between the SNMR response curves under the condition of low resistance is obvious. The coil posture should be considered in the field because it considerably impacts the NMR signal, and the coil orientation should be considered because the influence of the coil orientation on the magnetic signal is greater than electrical parameters.

Key words: SNMR; 3D forward; finite element; inhomogeneous medium; coil orientation

(本文编辑:王萌)