

氢质子弛豫过程

孙淑琴 林君 张庆文 嵇艳鞠

(吉林大学 智能仪器与测控技术研究所 吉林 长春 130026)

摘要: 论述了原子核系统磁化强度的弛豫原理, 分析了含水地层中氢质子磁化强度的弛豫过程, 推导出磁化强度的布洛赫方程, 从而给出接受线圈中感应电动势的衰减规律, 通过计算得到磁化强度各分量随时间的衰减过程以及感应电动势的衰减曲线, 分析了纵向弛豫和横向弛豫时间常数与磁化强度各分量和感应电动势的关系。

关键词: 氢质子 核磁共振 拉莫尔频率 磁化强度 感应电动势 弛豫

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2005)02-0153-04

核磁共振是指原子核系统中的核子在稳定磁场和射频磁场的共同作用下, 当射频磁场的频率满足一定条件时原子核系统将吸收射频磁场的能量产生的共振跃迁, 称为核磁共振(nuclear magnetic resonance 缩写为 NMR)。当原子核达到核磁共振状态之后, 射频磁场将被撤除, 此时原子核将会释放射频磁场的能量而回到初始状态, 这个释放能量回到初态的过程将受到弛豫时间的影响, 而弛豫时间则与物质结构或各种地层岩性的成分有关, 因此研究原子核的弛豫过程将有助于分析核磁共振的机理, 进一步推断岩层的性质是十分重要的。笔者主要研究含水地层中的氢质子受激发后的弛豫过程。

1 核磁共振基本原理

在稳定磁场 B_0 的作用下, 原子核系统中各核磁矩都各自以稳定磁场的方向为轴做进动称为拉莫尔(Larmor)进动(图 1)。进动的角速度为 $\omega = \gamma B_0$, 核磁矩 μ 和稳定磁场 B_0 之间的夹角 θ 保持不变, 这种进动频率称为拉莫尔频率。同一能级上的各核磁矩的轨迹相同, 核磁矩的初位相是随机分布的。核磁矩在 xOy 平面上的横向分量的总和为零, 即 $\sum_i \mu_{\perp i} = 0$ 。核磁矩在 z 轴上的纵向分量, 对于自旋量子数 $I = 1/2$ 的系统由 2 部分组成: 一部分是低能级与磁场方向相同, 另一部分是高能级与磁场方向相反。在刚加上磁场时, 各能级上原子核粒子数相等, 则各核磁矩在 z 轴上的纵向分量的总和等于零, 即 $\sum_i \mu_{\perp i} = 0$ (图 2a)^[1]。

物质中的原子核位于原子之中, 原子核处于热

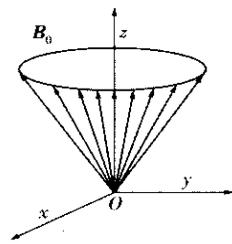


图 1 在稳定磁场中各核磁矩进动位相的随机分布

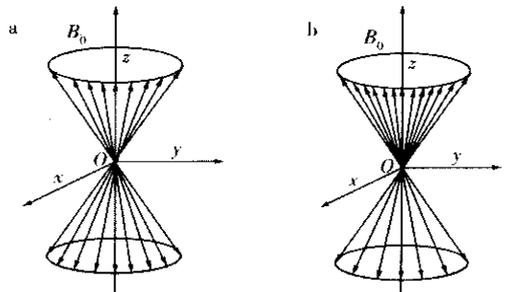


图 2 $I = 1/2$ 原子核系统在刚加上磁场时各核磁矩按能级的分布

运动的晶格包围之中, 宏观系统可认为是由原子核系统和晶格系统组成的, 两系统之间相互作用, 进行能量的交换, 最后达到热平衡态, 这时核粒子数按能级的分布服从波尔兹曼(Boltzmann)分布, 低能级的核粒子数比高能级的多, 使得核磁矩的纵向分量不为零, 即 $\sum_i \mu_{\perp i} \neq 0$ (图 2b), 上下能级间核粒子数的差值 n 随时间 t 的增长趋于平衡态的差值 n_0 , $n = n_0 [1 - \exp(-t/t_1)]$, 式中 t_1 称为自旋-晶格弛豫时间, 也叫纵向弛豫时间。原子核系统的磁化用磁化强度描述, 磁化强度是单位体积样品中核磁矩统计分布的总和。平衡态的磁化强度

$$M_0 = \frac{k}{V} \sum_i \mu_{zi}, \quad (1)$$

式中 k 为 z 轴单位矢量 μ_{zi} 为第 i 个核磁矩的 z 分量, V 为样品的体积。由波尔兹曼分布可求出

$$M_0 = \frac{K(I+1)Ng^2\mu_N B_0}{3kT}, \quad (2)$$

式中 k 为波尔兹曼常数, T 为热力学温度, g 为郎德因子, μ_N 为核磁子, B_0 为稳定磁场。晶格对磁化强度的弛豫作用表示为

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z - M_0}{t_1}. \quad (3)$$

解方程, 并将 $t=0, M_z=0$ 代入, 得 M_z 随时间 t

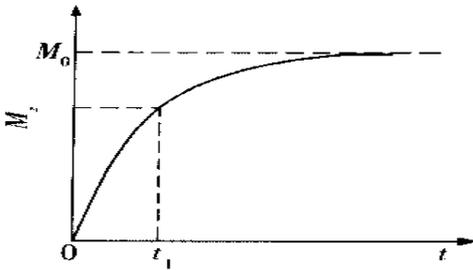


图3 磁化强度随时间的增长

以指数形式增长(图3),

$$M_z = M_0 \times [1 - \exp(-t/t_1)]. \quad (4)$$

在稳定磁场 B_0 的垂直方向上加一个射频磁场, 设射频磁场为 x 轴上一线偏振磁场^[1-2]

$$B_x = 2B_1 \cos\omega t. \quad (5)$$

射频磁场可写成

$$i2B_1 \cos\omega t = B_r + B_l = (iB_1 \cos\omega t + jB_1 \sin\omega t) + (iB_1 \cos\omega t - jB_1 \sin\omega t) \quad (6)$$

其中 B_r 为右旋磁场, B_l 为左旋磁场。

在射频磁场作用下磁化强度将发生变化, 原子核系统的纵向磁化强度 M_z 减小并产生横向磁化强度 $M_{\perp} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$, 并且 M 与 B_0 间的夹角越来越大, 此时原子核系统吸收射频磁场的能量(图4、图5)。磁化强度进动方向与 M 与 B_x 所构成的平面垂直, 指向服从右手定则。设 $B_x \ll B_0$, 当射频磁场的角频率 ω 与围绕稳定磁场进动的角频率 ω_0 相差很大时, 射频磁场的作用可以忽略, 但当 $\omega = \omega_0$ 时, 沿 x 轴振荡的射频磁场的方向与 M 绕 B_0 进动的方向相同时, 将改变 M 绕 B_0 之间的夹角 θ , 使原子核在能级间跃迁, 吸收能量, 产生核磁共振现象, 只有左旋射频磁场对磁化强度起作用。

$$B_l = iB_1 \cos\omega t - jB_1 \sin\omega t \quad (7)$$

产生核磁共振的条件是射频磁场的角频率^[3-4]

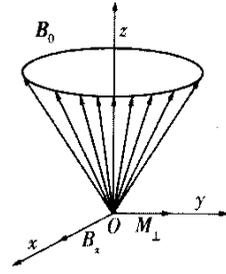


图4 射频磁场使原子核系统产生磁化强度的横向分量

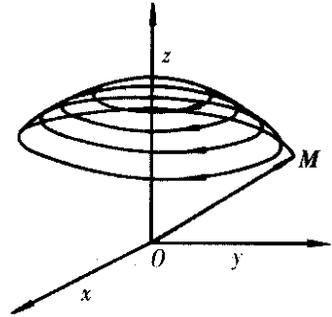


图5 射频磁场使磁化强度偏离 Z 轴并绕 Z 轴进动

$$\omega = \omega_0 = \gamma B_0 = g\mu_N B_0 (2\pi/h) \quad (8)$$

或 $hf = g\mu_N B_0$ 。

原子核系统在外加磁场(包括稳定磁场和射频磁场)作用下的运动方程以磁矩表示为

$$\frac{d\mu}{dt} = \gamma\mu \times B \quad (9)$$

由(1)式有

$$\frac{dM}{dt} = \gamma M \times B \quad (10)$$

如果把射频磁场撤去, 可发现横向磁化强度随时间逐渐消失, 此时原子核系统释放射频磁场的能量。磁化强度的横向分量

$$\begin{cases} dM_x/dt = -(M_x/t_2) \\ dM_y/dt = -(M_y/t_2) \end{cases} \quad (11)$$

将以指数规律随时间衰减而趋于零。指数衰减的特征时间 t_2 反应弛豫过程进行的快慢, 称为自旋-自旋弛豫时间, 或横向弛豫时间。在稳定磁场、射频磁场、自旋-晶格弛豫和自旋-自旋弛豫共同作用下, 原子核系统的磁化强度随时间变化, 这时磁化强度的运动方程

$$\begin{cases} \frac{dM_x}{dt} = \gamma(M_y B_z - M_z B_y) - \frac{M_x}{t_2} \\ \frac{dM_y}{dt} = \gamma(M_z B_x - M_x B_z) - \frac{M_y}{t_2} \\ \frac{dM_z}{dt} = \gamma(M_x B_y - M_y B_x) - \frac{M_z - M_0}{t_1} \end{cases} \quad (12)$$

称为布洛赫(Bloch)方程。其中 M_x 为磁化强度在 x 轴上的分量, M_y 为磁化强度在 y 轴上的分量。

2 含水地层中氢质子的弛豫过程

设稳定磁场为地磁场 B_0 ,在其垂直方向上施加射频磁场 B_1 脉冲 ,频率等于氢质子在地磁场中的拉莫尔频率 ,脉冲宽度 t 为施加射频磁场 B_1 的时间 ,使 $\theta = \gamma B_1 t$,式中 θ 叫扳倒角是地磁场 B_0 与 M 的夹角 $t = \pi/2$ γB_1 叫 $\pi/2$ 脉冲或 90° 脉冲 ,调整 t 或 B_1 使 $\theta = \pi/2$,磁化强度将转向垂直地磁场的方向 ,此时将脉冲停止 ,磁化强度除了围绕射频磁场进动外 ,还要随旋转坐标系绕 z 轴旋转 ,这 2 种运动合成螺旋形运动(图 6)。

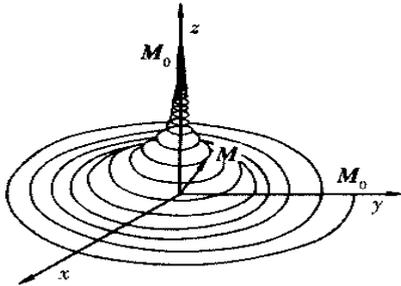


图 6 磁化强度的自由进动衰减

设稳定磁场 $B_0 = k B_0$ (12) 式可改写为

$$\begin{cases} \frac{dM_x}{dt} = \gamma M_y B_0 - \frac{M_x}{t_2} \\ \frac{dM_y}{dt} = -\gamma M_x B_0 - \frac{M_y}{t_2} \\ \frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z - M_0}{t_1} \end{cases} \quad (13)$$

求解(13)式得(14)式

$$\begin{cases} M_x(t) = M_0 e^{-t/t_2} \sin(\omega_0 t) \\ M_y(t) = M_0 e^{-t/t_2} \cos(\omega_0 t) \\ M_z(t) = M_0 (1 - e^{-t/t_1}) \end{cases} \quad (14)$$

上式说明在 90° 脉冲作用后 ,产生了磁化强度的横向分量 ,磁化强度矢量 M 绕恒定磁场 B_0 进动 ,由于弛豫作用磁化强度的横向分量 M_x, M_y 按指数形式随时间衰减 ,衰减的特征时间为 t_2 ,磁化强度的纵向分量 M_z 随时间增长 ,趋向其平衡值 M_0 ,增长的特征时间为 t_1 ,称为磁化强度的自由进动衰减。

如果放置一接收线圈 ,使其轴线与 y 轴方向一致 ,由电磁学公式有^[2]

$$B_y = \mu_0 M_y = \mu_0 M_0 e^{-t/t_2} \cos(\omega_0 t) \quad (15)$$

被磁化的研究对象通过接收线圈的磁通量为

$$\Phi = n_T B_y A \quad (16)$$

式中 n_T 为线圈匝数 , A 为线圈面积。线圈中产生的感应电动势为

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 n_T A \frac{dM_y}{dt} = \mu_0 n_T A M_0$$

$$\left[\omega_0 e^{-t/t_2} \sin(\omega_0 t) + \frac{1}{t_2} e^{-t/t_2} \cos(\omega_0 t) \right] \quad (17)$$

式中括弧内 2 项之比远小于 1 ,可将余弦项忽略 ,得

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 n_T A M_0 \omega_0 e^{-t/t_2} \sin(\omega_0 t) \quad (18)$$

此式是随时间呈周期变化的电动势 ,其角频率 $\omega_0 = \gamma B_0$,其幅度虽时间按指数形式衰减 ,称为自由感应衰减(free induction decay 缩写为 FID)信号(图 7)。当使用地磁场 B_0 作稳定磁场时 ,水是研究对象 , γ 是固定的 , B_0 也不能人为更改 ,要加大感应电动势 ,加大信号 ,只有增大 $n_T A$ 。当 $n_T A$ 一定时 ,感应电动势与时间呈指数规律。

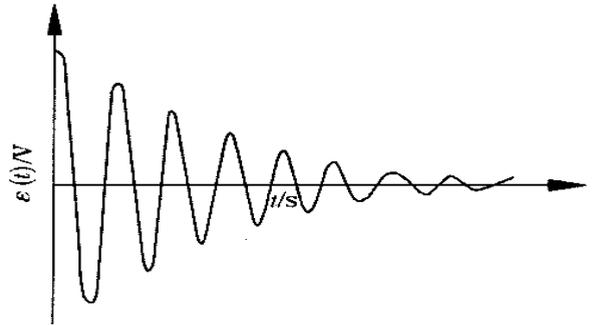


图 7 自由感应衰减信号

3 计算与分析

基于以上的理论分析 ,对公式(14)及(18)在假定不同的横向弛豫时间的情况下 ,分别计算得到磁化强度各个分量 M_x, M_y, M_z 的弛豫规律 ,感应电动势的指数变化规律 ,以此来证实纵向及横向弛豫时间影响衰减的快慢。由理论计算知 :水的纵向弛豫时间 $t_1 = 4.4 \text{ s}^{[5]}$,而横向弛豫时间 t_2 则与含水地层的岩性有一定的近似关系(表 1)^[2,6]。横向弛豫时间越长含水层孔隙度越大。根据表格中的参数 ,选取 t_2 为 0.12, 0.3, 0.6, 1 s 得到 4 组图(图 8)^[7] : a 组中 t_2 值很小 ,磁化强度横向分量 M_x, M_y 衰减最快 ,b 组中 t_2 值稍大 ,磁化强度横向分量 M_x, M_y 衰减变缓 ,c 组中 t_2 值增大 ,磁化强度横向分量 M_x, M_y

表 1 横向弛豫时间与含水地层的近似关系

弛豫时间/ms	含水地层
<30	砂质粘土层
30~60	粘土质砂、很细的砂层
60~120	细砂层
120~180	中砂层
180~300	粗砂和砾质砂层
300~600	砾石沉积
600~1 000	地面水体

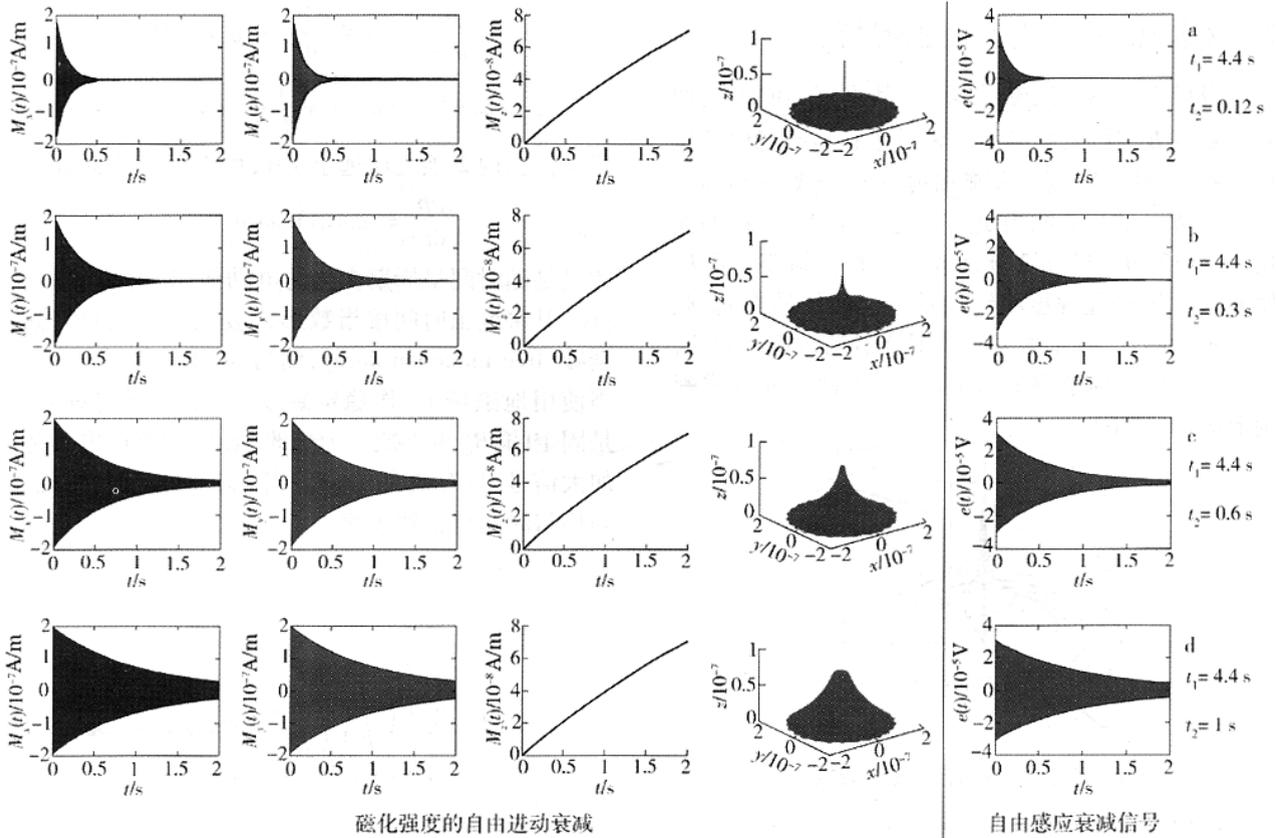


图8 理论计算所得的磁化强度衰减曲线与感应电动势的衰减曲线

衰减更慢，d组中 t_2 值最大，磁化强度横向分量 M_x ， M_y 衰减时间最长，磁化强度的纵向分量 M_z 增长的时间与 t_2 无关只与 t_1 有关。综上所述横向弛豫时间 t_2 对磁化强度的横向分量影响非常明显。 t_2 越大，磁化强度的横向分量衰减越慢。横向弛豫时间 t_2 对感应电动势的影响与上述影响相似。当 $n_T A$ 一定时，横向弛豫时间 t_2 由小变大的过程中感应电动势的衰减时间也由小变大，也预示了地层孔隙度由小变大。 t_2 越小，磁化强度的横向分量衰减越快，感应电动势的衰减也越快，地层孔隙度越小。 t_2 越大，磁化强度的横向分量衰减越慢，感应电动势的衰减也越慢，地层孔隙度越大。磁化强度的3个分量随时间的衰减关系与理论分析相符，三维曲线形状也真实可信。

4 总结

通过上述分析可知，在地磁场和外加激发磁场作用下原子核磁化强度绕恒定磁场进动，由于弛豫作用磁化强度的横向分量以指数形式随时间衰减。含水地层中氢质子的弛豫过程与横向、纵向弛豫时间的关系，证实了理论分析的正确性。

万方数据

参考文献：

- [1] 陈文生. 核磁共振地球物理仪器原理 [M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [2] 潘玉玲, 张昌达. 地面核磁共振找水理论和方法 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- [3] Goldman M, Rabinovich B, Rabinovich M, et al. Application of the integrated NMR-TDEM method in groundwater exploration in Israel [J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 31: 27-52.
- [4] Schirov M, Legchenko A. A new direct non-invasive groundwater detection technology for Australia [J]. Exploration Geophysics, 1991, 22: 333-338.
- [5] 张建中, 孙存普. 磁共振教程 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996.
- [6] Legchenko A V, Shushakov O A. Inversion of surface NMR data [J]. Geophysics, 1998, 63(1): 75-84.
- [7] 张志涌. 精通 Matlab 5.3 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.
- [8] 潘玉玲, 万乐, 袁照令, 等. 核磁共振找水方法的现状和发展趋势 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 105-108.
- [9] 袁照令, 潘玉玲, 万乐, 等. 核磁共振找水方法的应用效果 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2000, 25(2): 132.
- [10] 万乐, 潘玉玲, 袁照令, 等. 地面核磁共振感应系统 (NUMIS) 及其在找水中的应用 [J]. 物探与化探, 1999, 23(5): 330-334.

尽管大多数井段校正效果良好,但还有少部分井段校正效果不太理想,究其原因,是由于该段ICDP与SL所测的伽马曲线差异太大,计算机无法识别该段曲线的相似性所致。

3 结论与问题

ICDP与SL对CCSD-1井的测井数据差异较大,因此在常规的校正处理之前必须进行一系列的预处理才能保证校正的精度。实际资料处理表明,无论使用何种校正方法,均对原始曲线本身的形态相似性要求较高。相关分析校正是一种行之有效的办法,整个过程可使用计算机自动完成,无需人工干

预,在大多数井段完全达到了精度要求,有效地解决的大陆科学钻探测井深度标定的问题,提高了数据处理效率,但是该方法对曲线形态差异较大井段的处理仍有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 罗晓永. 地层倾角数据处理中的深度校正[J]. 测井技术, 1996, 20(1): 65-67.
- [2] 金友春, 邢凤荣, 王艳丽, 等. 同位素注水剖面测井资料深度校正的几种方法[J]. 测井技术, 2002, 26(2): 165-167.
- [3] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.

0 ~ 2000m DEPTH CORRECTION OF CHINA CONTINENTAL SCIENTIFIC DRILLING PROGRESSIVE CCSD-1 WELL

ZENG Chong ,CHEN Chao ,YU Feng ,WU Yun-chao

(Institute of Geophysics and Geomatics ,China University of Geosciences ,Wuhan 430074 ,China)

Abstract : The depth data logged again from China Continental Scientific Drilling (CCSD) progressive CCSD-1 well after the completion of the first 0 ~ 2 000 m drilling plan are different from the data measured last time. Corrections must be made for the veracity of the logging data. In this paper , the logging data were pre-processed before the correction , and several methods were applied for analysis during the correction. The results of correction are satisfactory and fully meet the required precision. It is shown that the correction analysis is an effective method for correction. Nevertheless , the processing of the parts with obvious different logging curve shapes needs further investigation. The whole process is automatically done on computer , and the technique can obviously improve the data-processing efficiency.

Key words : CCSD ; geophysical logging ; depth correction ; correction analysis

作者简介:曾冲(1982-)男,中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院硕士研究生,主要从事地球物理信息处理与研究工作。

上接 156 页

THE INVESTIGATION OF HYDROGEN MACROSCOPIC NUCLEAR RELAXATION

SUN Shu-qin ,LIN Jun ,ZHANG Qing-wen ,JI Yan-ju

(Jilin University Institute of Intelligent Measurement and Control Technology , Changchun 130026 ,China)

Abstract : The relaxation principle of the atomic nucleus system magnetization is discussed in this paper. Relaxation of hydrogen macroscopic nuclear magnetization is analyzed , Bloch equation of nuclear magnetization is given , free induction decay in receiving coil is presented , and relaxation about components of the nuclear magnetization and free induction decay is computed. In addition , the relationship of nuclear magnetization and free induction decay to the longitudinal and transverse time constants is analyzed.

Key words : nuclear magnetic resonance ; nuclear magnetization ; Larmor frequency ; free induction decay ; relaxation

作者简介:作者简介:孙淑琴(1970-)女,吉林大学智能仪器与测控技术研究所在读博士。研究方向:核磁共振找水仪器研制及正反演理论的研究。