

核磁共振成像技术实验

复旦大学物理系 王前

摘要 (Abstract)

针对目前核磁共振成像技术教学中存在的问题, 纽迈公司成功地开发了专门用于核磁共振成像技术教学的NMI20 台式核磁共振教学成像仪。本文详细介绍了利用该仪器所做的一系列实验。原理性实验主要包括电子匀场的调节、硬脉冲FID序列测量拉莫尔频率、反转恢复法测 T_1 、硬脉冲CPMG序列测量 T_2 ; 在理解了仪器各参数的调节规律的基础上, 我们分别利用自旋回波序列成像和权重成像对芝麻及油水进行了成像实验。

关键词: 核磁共振成像 硬脉冲 FID 序列 拉莫尔频率 自旋回波

(一) 引言 (Introduction)

在现代无创伤的医疗活动以及大脑高级认知功能研究中, 磁共振成像技术 (magnetic resonance imaging, MRI) 正发挥着日益重要的作用。这是因为MRI技术安全无创伤, 能同时进行功能检测和解剖定位, 较其他成像技术有很大的优势。MRI成像的先决条件是被成像样品中的原子核必须具有磁性, 而这种磁性源于原子核本身的自旋运动。因此, 对原子核等微观粒子的自旋属性进行的深入研究是量子力学取得的重要成果之一, 客观上也是MRI得以产生的理论基础。本文首先从理论上解释核磁共振现象的物理机理, 弛豫与核磁共振信号的关系, 然后以实验所得系列图像详细说明在NMI20台式核磁共振教学成像仪上进行的这一系列原理性及成像实验。

(二) 核磁共振及其成像的基本原理 (Theoretical Part)

1. 核磁共振现象

原子由原子核与核外电子构成。原子核内的核子 (质子和中子) 有相对运动, 也有自旋运动。原子核的自旋可以粗略的理解为原子核绕自身的轴向转动, 它是具有方向性的角动量矢量。具有自旋角动量的原子核周围存在一个微观磁场, 是一个磁偶极子, 称为原子核的自旋磁矩, 用矢量 μ 表示。通常, 原子核的核磁共振信号远远小于电子顺磁共振的信号。

单个自旋核在磁场中除了不断绕自身轴作转动之外, 还以磁场为轴作进动。进动的快慢 (即频率) 遵循拉莫尔公式: $\omega_0 = \gamma B_0$, γ 称为旋磁比。要使自旋系统发生核磁共振, 必须使入射射频电磁波的频率与拉莫尔频率相等。另外, 同种核的进动频率与所处的磁场强度成正比, 这是利用三维线性梯度场进行核磁共振空间定位的基本理论。

核磁共振研究的是大量的自旋核的集合。将所有单个自旋核的磁矩进行矢量求和, 可以得到总体的磁化矢量, 即宏观磁化矢量 \mathbf{M} 。对置于外磁场中的自旋核系统, 沿着垂直于外场的方向施加一频率与拉莫尔频率相同的射频电磁场 \mathbf{B}_1 , 则宏观磁化矢量既要以 \mathbf{B}_0 为轴进动, 同时还要在 \mathbf{B}_1 的作用下以 \mathbf{B}_1 为轴章动。在垂直于外场的方向施加与拉莫尔频率相等的射频电磁波, 即可使得宏观磁化矢量发生偏转, 此即核磁共振现象。偏转的角度取决于射频场的大小 \mathbf{B}_1 和脉冲宽度 τ 。根据射频脉冲的选择特性还将其分为硬脉冲和软脉冲。

2. 弛豫与核磁共振信号

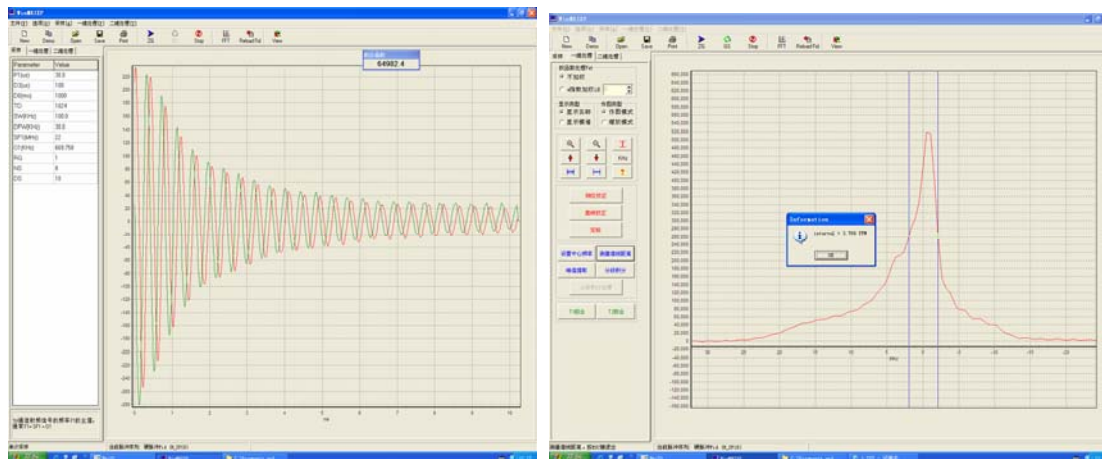
自旋核子群受到射频激励后, 宏观磁化矢量失去平衡, 偏离Z方向, 使得 M_z 减小, 同时出现横向磁化分量 M_{xy} 。射频停止后, 核子群系统要从非平衡状态恢复到平衡状态, 分别包括纵向磁化矢量的恢复和横向磁化矢量的恢复两个过程, 分别称为 T_1 弛豫和 T_2 弛豫。最终弛豫应包含三种运动: ①横向磁化逐渐减小; ②纵向磁化逐渐增加; ③总体磁化矢量还不停地以拉莫尔频率做圆周运动。如果在正发生弛豫的区域外环绕一封闭线圈, 根据法拉第电磁感应定律, 线圈内将感生出微弱的电动势, 这就是核磁共振信号。可以获取该电动势作为重建图像的NMR信号, 该信号是一个自由振荡衰减信号, 称为FID (free induction decay) 信号。

(三) NMI20Analyst台式核磁共振成像仪及相应实验结果

1. 核磁共振主磁场均匀性的调整

在NMRI中，要进行空间编码（层选脉冲、相位编码和频率编码），就要在静磁场上叠加微弱的梯度磁场。静磁场的均匀性越差，偏差越大，图像质量越差。如果静磁场不均匀，在叠加梯度磁场后，层位信号将发生偏离，引起图像失真和畸变。当FID信号的拖尾越长，即FID衰减包络线越缓，表示磁场均匀性越高。实验步骤如下：

- (1) 将装有适量油样品的试管小心放入探头线圈相应位置处；
- (2) 在应用程序界面上单击Demo按钮，选中硬脉冲FID序列，输入预设参数；
- (3) 单击GS按钮，通过调整 SF_1 及主频偏移量 O_1 的大小，直到找到FID信号为止，具体图像如下左图所示：

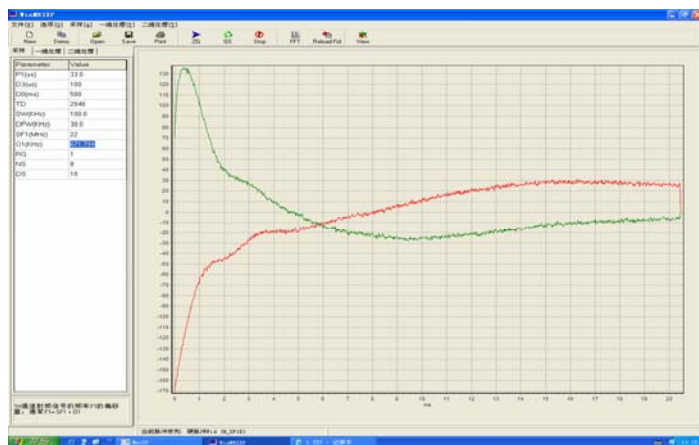


- (4) 单击stop按钮，点击FFT将FID信号进行Fourier变换，单击一维处理，再单击“相位校正”，点击增减按钮直到FFT变换后的曲线均在基线以上呈左右对称状态，最后点击“测量谱线距离”测出信号峰的半高宽度。如上右图，主磁场的均匀性: 3.769 ppm；

2. 硬脉冲FID序列测量拉莫尔频率

宏观磁化矢量的弛豫可以通过Bloch方程进行描述和求解，但此过程中包含着一个固定的进动项。而进动项并不对信号幅值产生任何影响，采用旋转坐标系能够方便地描述宏观磁化矢量的弛豫过程。实验室坐标系中的NMR信号在旋转坐标系中就消除了进动项。当旋转坐标系的旋转频率与拉莫尔频率完全相同时，线圈采集到的FID信号中的拉莫尔频率成分就可被完全过滤掉，呈现出来的是一条呈指数规律递减的曲线。

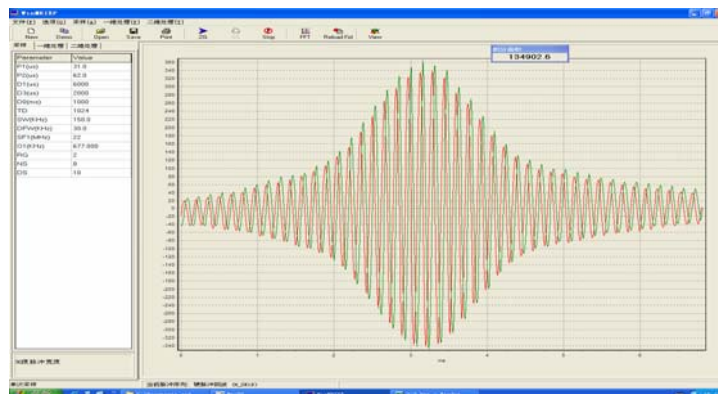
因此，在上述实验1的基础上，通过不断修改射频脉冲的中心频率，同时观察屏幕上的FID信号。当FID信号的振荡频率逐步减小到基本上不出现振荡时，说明此时的射频中心频率就是拉莫尔频率。下图就是达到共振状态时的形状及频谱：



此时，射频场中心频率：
 $SF_1(MHz) + O_1(KHz) = 22671.794KHz$
即为该样品的拉莫尔频率。

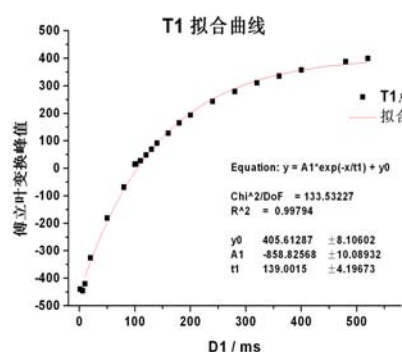
3. 硬脉冲回波序列确定硬脉冲射频

在使系统处于核磁共振实验状态后，选择Demo下的硬脉冲FID序列，并调节 P_1 的值使信号幅值最大。再选择Demo下的硬脉冲回波序列，通过调节 O_1 、 D_1 、 SW ，使回波完全出现在信号窗口，FID信号尽量少进入信号窗口，同时使回波中心处于采样时间的中心处。将90度脉冲宽度 P_1 设置为第一步找到的数值， $P_2 \approx 2 P_1$ 。调节后的最佳效果如下图所示：



4. 反转恢复法测 T_1

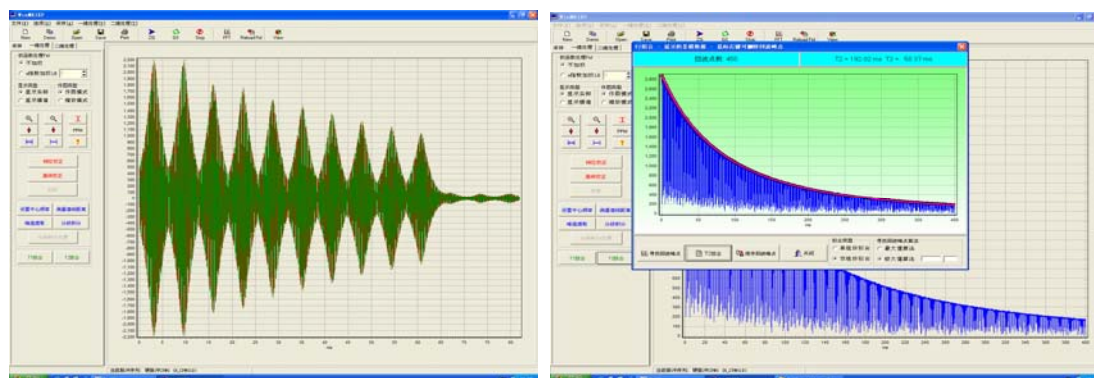
在核磁共振常规脉冲序列当中，反转恢复 (inversion recovery) 是较为常见的一种序列。该序列首先施加一个180度射频脉冲，使纵向磁化矢量强度 M_z 反转到主磁场的反方向，然后该磁化矢量强度以 T_1 时间常数进行自由弛豫。经过一段时间后， M_z 有所减小，此时沿水平方向上再施加一个90度射频脉冲，检测并记录此时产生的FID信号。将该序列中180度和90度两个射频脉冲之间的间隔时间定义为反转时间 T_1 ， T_1 是反转恢复序列的一个重要参数。

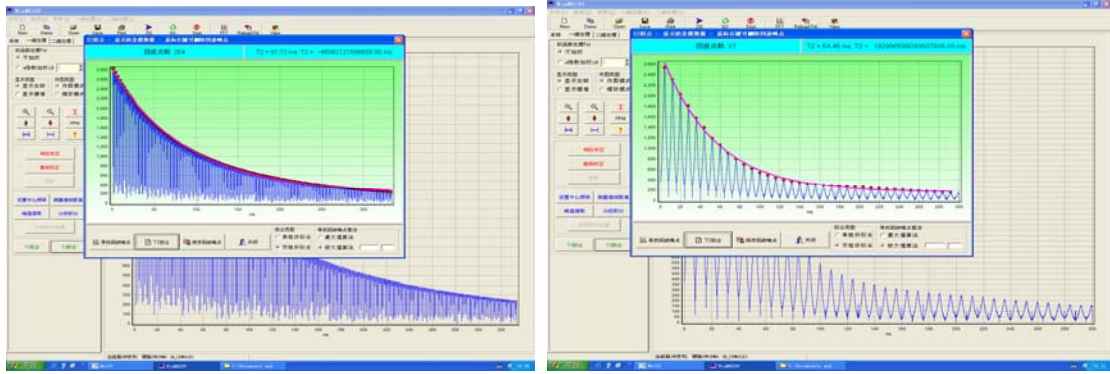


在实验中，我们通过改变反转时间 D_1 的值，每次改变后都重复进行累加数据采集和傅立叶变换，并记录对应的频谱峰值，将两者进行拟合，得右上图所示结果。在此情形下，反转时间 $T_1 \approx 139\text{ms}$ 。

5. 硬脉冲CPMG序列测量 T_2

硬脉冲CPMG序列，主要由一个90度射频脉冲和多个180度射频脉冲，及各自的回波信号组成，其最主要的一个参数就是回波个数 $C1$ 的设置。左下图为 $C1$ 为10的波形。确定了 $C1$ 的值后，将累加次数设定为8次，单击ZG采集信号(实验过程中根据回波显示的情况可对 TD 、 SW 和 $D2$ 进行调节使得显示窗口能够显示出所有回波信号)。对上述采集的信号完成后，利用软件自带的工具进行拟合，取 $C1$ 不同值时的实验结果如下：

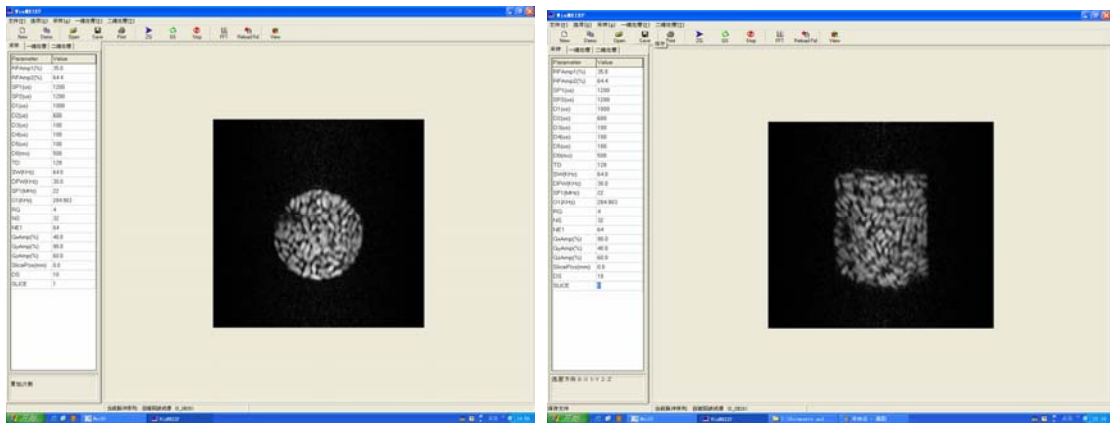




6. 自旋回波序列成像

自旋回波脉冲序列首先用90度射频脉冲激励样品物质，在它的作用下，宏观磁化矢量迅速倒向XY平面上，因此，90度射频脉冲是SE序列的准备脉冲。之后再施加一个选层梯度 G_s 作用在样品上，以选择并激发某一个特定层面，接下来是一个180度脉冲，其主要作用是改变XY平面内质子的进动方向，使失相的质子重新相位重聚，此时吸收180度脉冲射频能量后的质子，将在后面以自旋回波的形式放出能量，从而产生自旋回波信号。

实验中，将装有 2g 芝麻样品的试管放入磁体柜上方样品槽内。调整好磁场均匀性，找到拉莫尔频率及 90 度和 180 度幅值 RF_{amp1} 、 RF_{amp2} 。单击工具栏上的 new 按钮，选择软脉冲自旋回波序列并进行累加采集。对计算机自动给出的 K 空间数据矩阵进行傅立叶变换、调整图像显示颜色后，得到如下两幅对芝麻样品的成像图（左图 SLICE=1、右图 SLICE=0）：



7. 自旋回波权重像

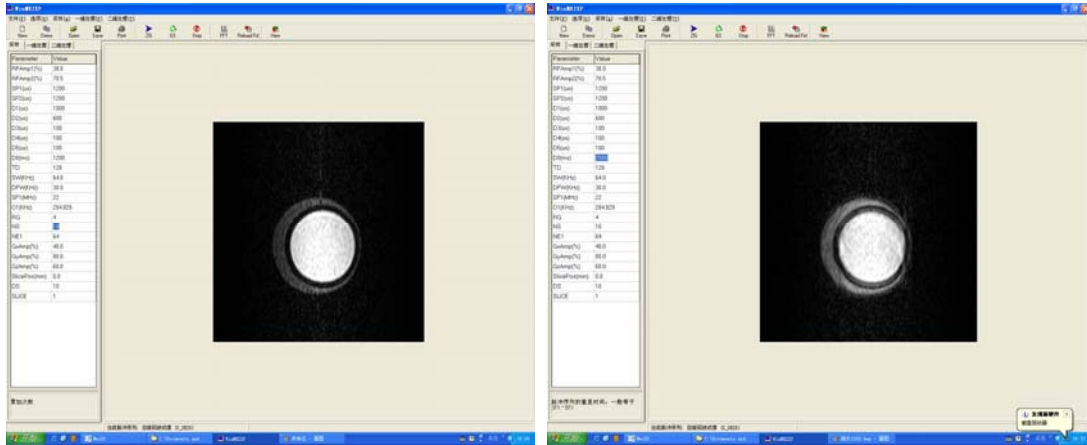
由自旋回波序列成像原理可知，采集到的回波信号强度表达式为：

$$S_{se}(T_E, T_R) \approx AN(H)(1 - e^{-T_R/T_1})e^{-T_E/T_2}$$

式中， $N(H)$ 为体积内自旋氢核的数目， A 为增益， T_1 和 T_2 都是样品的弛豫时间，在场强确定后，基本上固定不变。我们可以通过控制和改变重复时间 T_R 和回波时间 T_E 改变信号幅值，进而改变样品组织在图像上的灰度。因此，所谓参数加权图像，实际上就是通过选择合适的 T_R 和 T_E ，来实现参数对样品组织最终信号的影响权重，以突出或者强调该参数。

实验中，将直径 8mm 的试管装约 10ml 高大豆油样品后放入直径 10mm 装有少量自来水的试管。同样，调整仪器使系统处于核磁共振实验状态，寻找到 90 度脉冲幅值 RF_{amp1} 和 180 度脉冲幅值 RF_{amp2} 。通过改变参数 D_0 的值，采集信号并重建图像，观察图像改变情况，总结重复时间对图像权重的影响。以下两幅图分别为 $D_0=1200$ 和 2500 时得到的图像：

（左图 $D_0=1200$ ，右图 $D_0=2500$ ）



以上实验结果说明，当参数 D_0 的值逐步增加时，水的部分逐渐变亮，大豆油的灰度（相对纯水）变暗，增加了水的权重。

（四）总结（Conclusion）

本文中，我们在理解了核磁共振产生的物理机理的基础上，利用纽迈公司开发的用于核磁共振成像技术教学的NMI20台式核磁共振教学成像仪，进行了一系列原理性及成像实验，包括电子匀场的调节、拉莫尔频率的测定、反转恢复法测 T_1 、硬脉冲CPMG序列测 T_2 ，以及对芝麻和分层油水混合物的核磁共振成像。在实验过程中，我们加深了对核磁共振的理解，把理论和实际操作联系起来，得到了和理论相符的实验结果。

（五）致谢（Acknowledgement）

感谢复旦大学物理实验中心余熹老师对本文中实验提出的宝贵意见，也非常感谢实验合作伙伴孙午炯同学在实验过程中的指正和启发性的讨论。

参考书目（Reference）

- 【1】《近代物理实验补充材料》复旦大学物理实验教学中心.上海.2009
- 【2】《核磁共振成像技术实验教程》科学出版社 汪红志、张学龙、武杰编著