

近代物理实验

核磁共振及其成像实验



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



实验一 核磁共振及其成像实验

1973年,美国科学家 Paul Lauterbur 发现,把物体放置在一个稳定的磁场中,然后再加上一个不均匀的磁场(即有梯度的磁场),再用适当的电磁波照射这一物体,这样根据物体释放出的电磁波就可以绘制成物体某个截面的内部图像.随后,英国科学家 Peter Mansfield 又进一步验证和改进了这种方法,并发现不均匀磁场的快速变化可以使上述方法能更快地绘制成物体内部结构图像.此外,他还证明了可以用数学方法分析这种方法获得的数据,为利用计算机快速绘制图像奠定了基础.从此核磁共振成像得到了空前的发展.

核磁共振成像技术的最大优点是能够在对身体没有损害的前提下,快速地获得患者身体内部结构的高精确度立体图像.利用这种技术,可以诊断以前无法诊断的疾病,特别是脑和脊髓部位的病变;可以为患者需要手术的部位准确定位,特别是脑手术更离不开这种定位手段;可以更准确地跟踪患者体内的癌变情况,为更好地治疗癌症奠定基础.此外,由于使用这种技术时不直接接触被诊断者的身体,因而还可以减轻患者的痛苦.

核磁共振成像的全称是:核磁共振电子计算机断层扫描术,为了避免人们把这种技术误解为核技术,一些科学家把核磁共振成像技术的“核”字去掉,称其为“磁共振成像技术”(Magnetic Resonance Imaging),英文缩写即 MRI.磁共振成像是根据生物磁性核(如氢核)在磁场中表现的共振特性进行成像的新技术.随着磁体技术、超导技术、低温技术、电子技术和计算机技术等相关技术的不断进步, MRI 技术得到了飞速发展,已成为现代医学影像领域中的重要一员.

本实验要求掌握 MRI 的基本原理和测量方法,了解几种成像参数对图像的影响.

一、实验原理

核磁共振的物理基础是原子核的自旋.早在 1924 年, Wolfgang E. Pauli 就提出核自旋的假设,并为埃斯特曼(I. Esterman)等人于 1930 年在实验上证实.1932 年发现中子后,才认识到核自旋是质子自旋和中子自旋之和,只有质子数和中子数两者或其一为奇数时,核才有非零的核自旋及核磁矩,正是这种磁性核才能产生核磁共振.

1. 核磁共振吸收

对于核自旋量子数 I 不为零的磁性核,其核磁矩 μ 与本征角动量 J 之比被定义为原子核的旋磁比 γ ,其值可正可负,由核的本性决定.实验上常用一个无量纲的比例因子 g 代替 γ ,作为特定核磁矩的实验参数,它被称为**核的 g 因子**(实验测出质子的 $g=5.585$,中子的 $g=-3.82$),其二者关系为

$$\mu = \gamma J = \gamma \hbar I = g \left(\frac{e}{2m_p c} \hbar \right) I = g \mu_N I \quad (1)$$

式中 I 为核自旋矢量, m_p 为质子的质量, c 为光速, $\mu_N = e\hbar/(2m_p c)$ 被定义为玻尔核磁矩或玻尔核磁子,作为核磁矩的单位.由于质子质量比电子质量大三个数量级,故玻尔核磁子 μ_N 比电子的玻尔磁子 μ_B 小三个数量级.

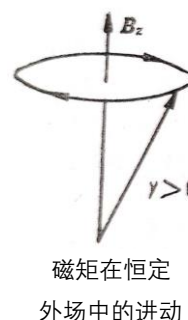
无外磁场时,核自旋为 I 的核处于 $(2I+1)$ 度简并态.在 z 方向外磁场 B_z 作用下,角动量 J 和磁矩 μ 以圆频率 $\omega_0 = \gamma B_z$ 绕 B_z 方向进动, J 在 z 方向的投影 $m_1 \hbar$ 有 $(2I+1)$ 个分立值, m_1 称

为磁量子数, 此时原 $(2I+1)$ 度简并能级发生塞曼分裂, 形成 $(2I+1)$ 个分裂的磁能级 $E = -g\mu_N m_l B_z = -\gamma \hbar m_l B_z$, 相邻两能级间的能量差 $\Delta E = \gamma \hbar B_z = \hbar \omega_0$. 其中 $\omega_0 = \gamma B_z$ 为核磁矩的拉莫尔进动频率. 对 $I=1/2$ 的核, 如氢核、氟核和碳核, 它们是核磁共振中最主要的研究对象, 在磁场中仅分裂为上、下两个能级. 如图 1 (b) 所示。

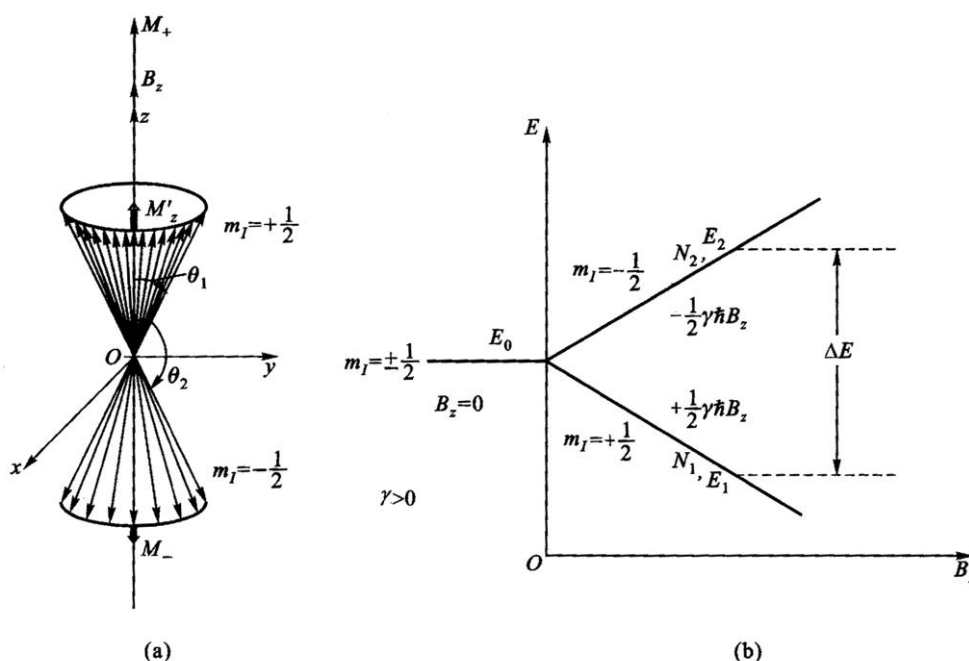
对于由大量 $I=1/2$ 的微观磁矩组成的宏观物质, 布洛赫提出用体积磁化强度 \mathbf{M} 来描述原子核系统被磁化的程度. \mathbf{M} 定义为单位体积内 N 个核磁矩的矢量和, 即

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N \boldsymbol{\mu}_i \quad (2)$$

对于 $\gamma > 0$ 的宏观体系, 在磁场 \mathbf{B}_z 中, 核磁矩 $\boldsymbol{\mu}_i$ 以圆频率 ω_0 沿上、下两个圆锥面绕 \mathbf{B}_z 方向进动, 如图 1(a) 所示, 两个圆锥面与 \mathbf{B}_z 的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 (核磁矩在均匀外磁场中的附加势能为 $U_B = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$), 分别相应于磁量子数 $m_l = 1/2$ 和 $-1/2$, 分裂的核塞曼能级为 E_1 和 E_2 , 如图 1(b) 所示. 而 $E_2 > E_1$, 上、下能级的能量差为 $\Delta E = \gamma \hbar B_z = \hbar \omega_0$, 正比于外磁场 \mathbf{B}_z 和 γ (或



磁矩在恒定
外场中的进动



(a) $I=1/2$ 的核磁矩系统的矢量和; (b) 核塞曼能级分裂

图 1 核磁矩在外磁场中的运动及能级分裂

g). 在热平衡时各能级上的核自旋粒子数遵循玻尔兹曼统计分布. 室温时, 由于 $\Delta E \ll kT$, 上、下能级间粒子数(布居数) 之比可写成

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \approx 1 - \frac{\Delta E}{kT} = 1 - \frac{\hbar \gamma B_z}{kT} < 1 \quad (3)$$

对于 γ 值最大的氢核, 当 $B_z = 1 \text{ T}$ 时, $N_2/N_1 = 0.999993$, 与 1 非常接近, 其粒子数差 ($N_1 - N_2$) 甚小, 要比电子自旋粒子数差小三个数量级以上, 致使核磁共振的固有灵敏度相当低, 这里设总自旋粒子数 $N = N_1 + N_2$.

由于热平衡时, 两能级粒子数差不为零, 因此 \mathbf{M} 在 \mathbf{B}_z 方向的纵向分量 $M_z = M_+ - M_- = (N_1 - N_2)\mu$ 不为零, 才能观察到核磁共振现象. 还由于 $\boldsymbol{\mu}_i$ 绕 \mathbf{B}_z 进动的相位无规则, 即 $\boldsymbol{\mu}_i$ 在圆锥

面上均匀分布, M 在 xy 平面上的横向分量 M_{xy} 为零. 当在垂直于 B_z 方向上再加上一个圆频率为 ω_0 的射频场 B_1 ($B_1 \ll B_z$) 时, 其能量 $\hbar\omega_0$ 等于能级差 ΔE , 就产生能级跃迁, 发生**核磁共振**. 发生核磁共振时, 既存在处于低能态的氢核吸收电磁波能量跃迁到高能态的情况(受激吸收), 也同时存在处于高能态的氢核释放能量回到低能态的情况(受激辐射). 受激吸收和受激辐射统称为受激跃迁, 它们发生的概率是相等的, 但在热平衡状态时, 处于低能态的氢核数量(N_1)多于处于高能态的氢核数量(N_2), 因此样品总的吸收大于总的辐射, 称为**核磁共振吸收**.

在外加射频波作用下产生的受激跃迁使得样品原有的热平衡状态被打破, 样品因吸收了能量而处于激发态, 与此同时, 还存在一个热弛豫跃迁过程, 即处于高、低能态上的氢核会与周围环境(晶格)作用分别跃迁到低、高能态上. 对于热弛豫跃迁, 由高能态跃迁到低能态的概率大于由低能态跃迁到高能态的概率.

2. 核磁共振的宏观表现

处于静磁场 B_0 中(就是前面的 B_z) 的样品, 其磁化强度矢量 M 和静磁场 B_0 是在同一方向的, 由于静磁场强度很大, 而样品的磁化强度矢量 M 又很微弱, 这就使得通过检测 B_0 方向磁场强度的变化来检测 M 变得非常困难, 几乎不可能. 然而, 在射频电磁波的作用下, 样品会发生核磁共振, 样品的 M 也会偏离 B_0 方向(z 轴方向), 这就使得通过检测磁场的横向分量来检测 M 成为可能. 研究磁共振的宏观表现就是要了解样品的变化规律, 从而更好地确定如何检测磁化强度矢量 M .

(1) RF 波的磁矢量-旋转磁场

假定 RF 波的磁矢量线性交变场 B_1' 施加在 x 轴, 其强度 B_1' 的变化规律为

$$B_1' = 2B_1 \cos \omega_0 t \quad (4)$$

式中, $\omega_0 = \gamma B_0$, 即 RF 波的频率和磁性核的旋进频率相同. 由图 2 可以看出, 交变磁场 B_1' 可由两个半径为 B_1 、角速度为 ω_0 的旋转方向相反的磁场 B_1^+ 和 B_1^- 叠加而成, 因为旋转磁场 B_1^+ 和 B_1^- 在 x 轴上的投影方向相同, 大小分别为 $B_1 \cos \omega_0 t$ 和 $B_1 \cos(-\omega_0 t)$, 而它们在 y 轴上的投影大小相同, 方向相反, 正好相互抵消, 所以旋转磁场 B_1^+ 和 B_1^- 在 x 轴上的叠加正好等于 B_1' .

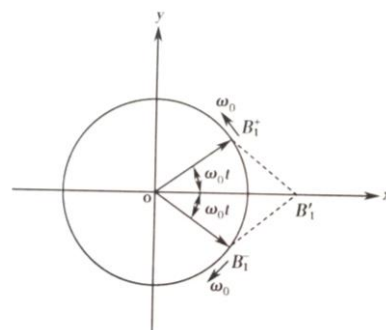


图 2 旋转磁场

两个旋转磁场中, B_1^+ 为逆时针方向, 与拉摩尔旋进方向相反, 该磁场对 μ 的作用可以忽略; B_1^- 为顺时针方向, 与拉摩尔旋进方向相同, 会对 μ 的运动产生影响.

(2) 射频波对样品的激励

在静磁场 B_0 中, 处于热平衡状态的样品, 其磁化强度矢量 M 的大小为 M_0 , 方向与静磁场 B_0 相同, 静磁场 B_0 对 M 的作用力矩为零. 当施加 RF 波时, 其磁矢量 B_1^- 与 M 相互垂直, 于是 B_1^- 与 M 相互作用产生一力矩, 此力矩会使得 M 以角速度 $\omega_1 = \gamma B_1$ 绕 B_1^- 旋进, 旋进的结果使 M 偏离了 B_0 方向. 当 M 偏离 B_0 方向时 M 又要在 B_0 的作用下以角速度 $\omega_0 = \gamma B_0$ 绕 B_0 旋进. 由于 B_1^- 是旋转磁场, 它以角速度 ω_0 绕 B_0 旋转, 因此在 M 看来 B_1^- 也相当于一个静磁场, 这样就能够使 M 在绕 B_0 旋进的同时又能稳定地绕 B_1^- 旋进, 两个稳定的旋进同时进行.

由于 B_1^- 远小于 B_0 , 所以 ω_1 就要比 ω_0 小得多. M 在 B_1^- 和 B_0 的作用下, 其矢端运动轨迹从球面顶点开始以球面螺旋线逐渐展开, M 与 B_0 之间的夹角 $\theta = \gamma B_1 t$, 其中 t 为 B_1^- 的作用时间, 如图 3 所示; 由于 M 偏离了 B_0 方向, 样品就出现了横向磁化矢量 $M_{xy} = M \sin \theta$, M_{xy} 的形成可看作是核磁矩的相位出现不均匀分布, 使得核磁矩在 xy 平面上投影的矢量和

无法相互抵消而致。在 RF 脉冲的作用下，样品产生了磁共振，其宏观表现就是样品的磁化强度矢量 \vec{M} 偏离静磁场 \vec{B}_0 方向 θ 角度， θ 角的大小取决于 RF 脉冲的强度及作用时间，通常，我们以 RF 脉冲的作用效果，把它称为 θ 角 RF 脉冲。在磁共振成像中有两个基本的 RF 脉冲，即 90° RF 脉冲和 180° RF 脉冲。

为说明磁化强度矢量 \vec{M} 在 90° RF 脉冲和 180° RF 脉冲作用下的运动，引入一旋转坐标系 (x', y', z') ，

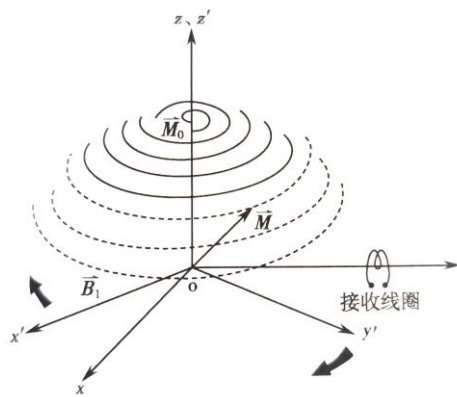


图 3 RF 作用下磁化强度 \vec{M} 的运动

如图 3 所示。旋转坐标系 (x', y', z') 的 z' 轴与固定坐标系 (x, y, z) 的 z 轴重合，其 x', y' 轴绕 z 轴以角速度 ω_0 旋转。在固定坐标系 (x, y, z) 中， 90° 脉冲使得 \vec{M} 偏离 \vec{B}_0 方向 90° 角，其矢端运动轨迹为从球面顶点开始逐渐展开的半球面螺旋线，最后到达 $x'y'$ 平面，见图 4(左上)；而在旋转坐标系 (x', y', z') 中， \vec{M} 在 $y'z'$ 平面上绕 x' 轴偏转 90° 到 y' 轴，此时 $M_{z'}=0, M_{x'y'}=M_0$ ，见图 4(右上)。在固定坐标系 (x, y, z) 中， 180° 脉冲使得 \vec{M} 偏离 \vec{B}_0 方向 180° 角，其矢端运动轨迹为从球面顶点开始逐渐展开的球面螺旋线，最后到达球面的最低点，见图 4(左下)；而在旋转坐标系 (x', y', z') 中， \vec{M} 在 $y'z'$ 平面上绕 x' 轴偏转 180° 到 $-z'$ 轴，此时 $M_{z'}=-M_0, M_{x'y'}=0$ ，见图 4(右下)。

中， \vec{M} 在 $y'z'$ 平面上绕 x' 轴偏转 180° 到 $-z'$ 轴，此时 $M_{z'}=-M_0, M_{x'y'}=0$ ，见图 4(右下)。

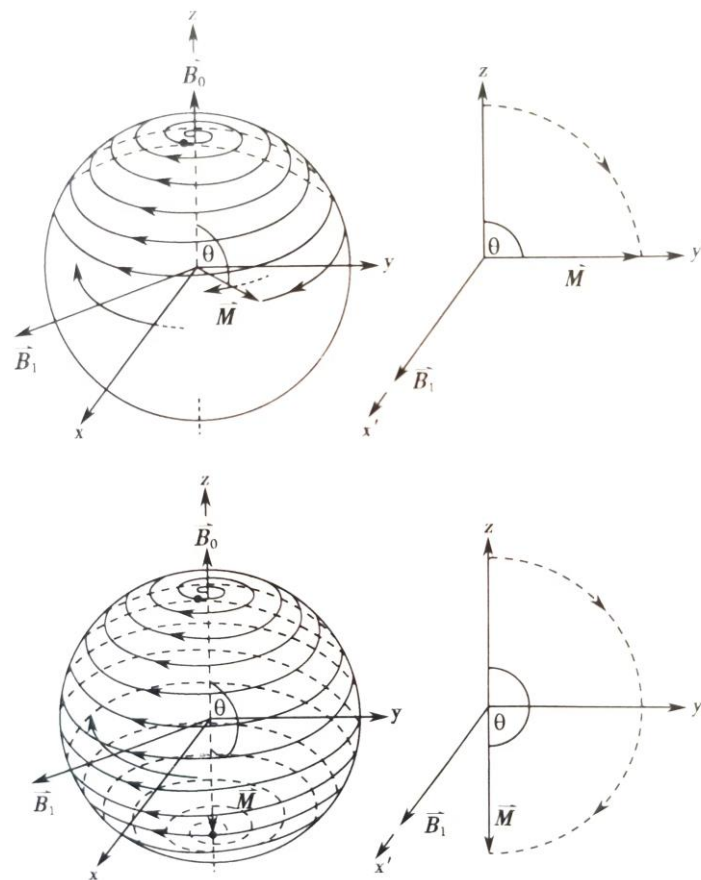


图 4 90° 脉冲和 180° 脉冲及对 \vec{M} 的作用

总结一下，原子核系统在外磁场中发生能级分裂，在一定射频场作用下吸收其能量发生

能级跃迁的现象，叫做**核磁共振**。核磁共振的条件为射频场的能量 $h\nu$ 等于原子核的能级差 ΔE ，即

$$h\nu = \Delta E \quad (5)$$

通过简单变换可以得到核磁共振的条件也是射频场圆频率 ω 等于原子核的拉莫尔进动频率 ω_0 ，即

$$\omega = \omega_0 = \gamma B_0 \quad (6)$$

3. 弛豫过程

弛豫过程是由于物质间相互作用产生的，普遍存在于各种宏观物质中。弛豫可以理解为粒子受到激发后，以非辐射的方式回到基态而达到玻尔兹曼平衡的过程，高能态的核会向周围环境转移能量，使其及时地回到低能态。自旋核周围的局部场的任何波动，只要其频率与自旋核的共振频率相当，均可引起核系统的弛豫，弛豫因涉及到磁化强度的纵向和横向分量被分为纵向弛豫过程和横向弛豫过程，它们具有不同的弛豫机制。

3.1 纵向弛豫

纵向弛豫起因于自旋-晶格之间的相互作用。因为任何宏观样品均可看成 N 个小磁矩的自旋系统和它所依附的晶格系统组成，系统之间不断发生相互作用和能量交换。在纵向弛豫过程中，自旋系统把从射频场吸收的能量（磁能）交给周围环境（晶格），并转变为晶格的热能。由于自旋系统的能量下降，从而使自旋粒子由高能态无辐射地返回低能态（有叫热弛豫，thermal relaxation），导致粒子数差按下式：

$$n = n(0) \exp(-t/T_1)$$

随时间 t 指数下降至零，式中自旋-晶格弛豫时间 $T_1 = 1/(2\overline{P_w})$ ，而 $\overline{P_w} = (P_{12} + P_{21})/2$ ， P_{12} 与 P_{21} 分别为向上和向下弛豫跃迁的概率， P_{12} 略小于 P_{21} ， $\overline{P_w}$ 为自旋-晶格弛豫引起的平均跃迁概率。经历自旋-晶格弛豫时间 T_1 后，粒子数差上升到热平衡时的值 n_0 的 63% ($1 - 1/e$)，使磁化强度纵向分量 M_z 亦随之相应的增加，故 T_1 又称为纵向弛豫时间。 T_1 反映自旋系统粒子数差从非平衡态恢复到平衡态的特征时间常数， T_1 越短，表明自旋-晶格相互作用越强。 T_1 的大小与核的种类、样品的状态和温度有关。对于一般液体，由于分子的布朗运动剧烈， T_1 较短；而对于固体，由于分子热运动受到很大限制， T_1 很长，可长达几小时乃至几天。经过自旋-晶格弛豫， M_z 最终等于 M_0 ，即

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{1}{T_1}(M_z - M_0), \quad M_z = M_0(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (7)$$

自旋-晶格相互作用实际上是由于分子无规则热运动引起的横向局部场的波动而诱发的自旋与晶格间的能量交换过程，只有当此局部弱磁场的频率正好等于 ω_0 时才发生。引起自旋-晶格相互作用的机制有磁偶极-磁偶极相互作用、自旋-旋转相互作用、化学位移各向异性、顺磁物质弛豫及核电四极矩相互作用等，根据弛豫速率的相加性， T_1 的倒数是各种机制引起的弛豫时间倒数之和。

纵向弛豫主要表现为 M_z 的变化，当施加的射频脉冲为 90° 脉冲时，其变化规律如图 5 所示。

3.2 横向弛豫

横向弛豫源于自旋-自旋之间的相互作用，在横向弛豫过程中仅在自旋体系内部（核自旋与相邻核自旋之间）交换能量而不与外界交换能量，故核自旋体系总能量保持不变。与纵向弛豫一样，同样可定义自旋-自旋弛豫时间 T_2 ，它表征由于非平衡态进动位相相关产生的不为零的磁化强度横向分量 M_1 恢复到平衡态时相位无关（相位随机分布）所需要的特征时间，所以也称为自旋-自旋相位记忆时间。由于 T_2 与磁化强度横向分量 M_1 的弛豫时间有关，故也称为横向弛豫时间。自旋-自旋相互作用实质上也是一种磁相互作用。对于液体主要来

自核自旋产生的局部磁场. 当两个氢核间的距离 r 为 2 \AA 时, 相互之间产生的局部磁场约为 10^{-4} T . 在液体中, 由于分子剧烈的布朗运动, 此局部磁场易被抵消, 故 T_2 值较短. 对于固体, 局部磁场主要来自磁偶极-磁偶极相互作用, 由于各核相对位置较固定, 能量易于在核自旋间转移, 故 T_2 特别短. 由于 M_{\perp} 由 M_x 和 M_y 合成, 故在 x, y 和 z 的三个方向上的局部磁场涨落均对 M_{\perp} 的弛豫有贡献, 射频场 B_1 也对 T_2 有贡献, 此外化学交换及扩散等慢过程都对 T_2 亦有贡献. 一般情况下, 横向弛豫比纵向弛豫更强, 故有 $T_1 \geq T_2$, T_2 的理论处理也比 T_1 更为复杂. 此外, 由于 z 方向外磁场空间分布的不均匀性也可看成一个局部磁场, 它对 T_2 的影响也不容忽视. 经过自旋-自旋弛豫, 系统总磁矩在 x, y 方向的分量 M_x 和 M_y 逐渐趋向于热平衡值, 即等于零. 它遵从下式:

$$\frac{dM_x}{dt} = -\frac{M_x}{T_2}, \quad \frac{dM_y}{dt} = -\frac{M_y}{T_2}, \quad M_{xy} = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (8)$$

横向弛豫主要表现为 M_{xy} 的变化, 当施加的射频脉冲为 90° 脉冲时, 其变化规律如图 6 所示.

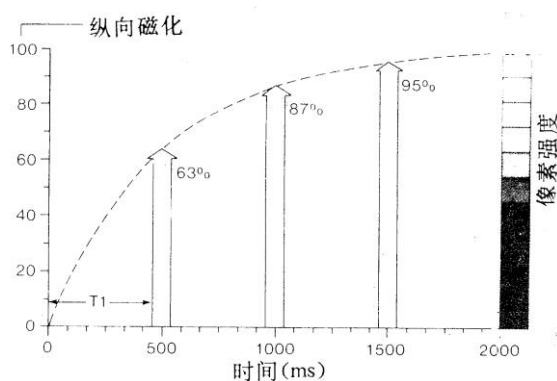


图 5 90° 脉冲后纵向弛豫 M_z 的变化及纵向弛豫时间

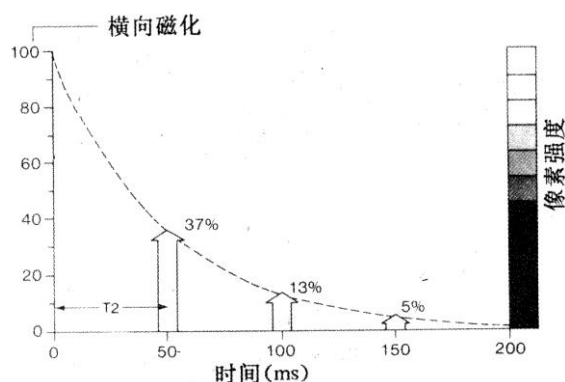


图 6 90° 脉冲后横向弛豫 M_{xy} 的变化及横向弛豫时间

3. FID 信号

90° 脉冲后, 核的磁化矢量终止于与 B_0 垂直的 xy 平面上, 然后以角速度 γB_0 绕 z 方向进动. 这个进动的磁化矢量在样品所在的螺旋管线圈里产生一个交变磁通量, 按法拉第定律, 感应出 RF 电压, 这个 RF 电压在 RF 脉冲终止后 (弛豫过程中) 很容易被检测, 其实只要所施加的 RF 脉冲的载波频率等于或非常接近于质子的进动频率.

为了检测 90° 脉冲后样品在螺旋管线圈中的角频率为 γB_0 的核感应的 RF 信号, 常常把它与来自固定振荡器的频率为 ω 的稳定信号混频 (通过混频电路), 产生频率相当低的 $|\gamma B_0 - \omega|$ 的拍频信号, 就可以在示波器上直接观测. 当然若把 ω 精确调整到等于 γB_0 , 那么拍频频率为零, 则输出是一个直流电压, 它正比于感应信号与参考信号之间相位差的正弦. 在这种模式下, RF 混频器变成了相检波器. 若 ω 稍稍偏离共振条件, 把磁化矢量旋转 90° 仍然是有效的, 这时的拍频信号很容易观测到. 但是 RF 脉冲过后的信号并不永远保持, 有三种不同的因素使之衰减:

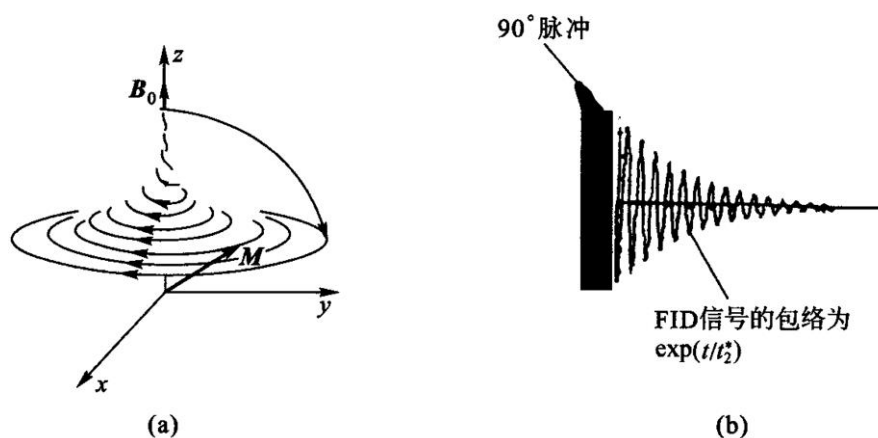
(1) 磁场不可能是绝对均匀, 所以在样品不同部分的原子核以稍稍不同的频率进动, 彼此位相失去同步, 因此逐渐减少样品的净磁化强度.

(2) 任何样品的原子核通常总是位于几种不同的分子环境, 每一种环境的核进动频率都受到稍微不同量的磁偶极相互作用的扰动. 就如第 (1) 种情形那样, 其结果是逐渐地失去相位相干且引起磁化强度衰减.

(3) 核与周围粒子之间的电磁相互作用引起了向上自旋态与向下自旋态之间的跃迁,

而这些自旋的相干合成是旋转在 xy 平面上磁化矢量的表现形式. 其结果是这些相干合成量逐渐衰减, 回到磁化矢量在 z 方向的热平衡态, 因此不再能在线圈里感应信号.

这种在接收线圈里接收到的由衰减的指数调制的振荡的感应信号, 称为自由感应衰减



(a) M 在实验室坐标系中的运动轨迹; (b) 自由感应衰减(即 FID)信号

图 7 90° 射频脉冲之后 M 的表现

(free induction decay, FID). 图 7 示出了射频脉冲关闭后 (弛豫过程中), 磁化矢量 M 在实验室坐标 xyz 中的运动轨迹及接收线圈里接收到的自由感应衰减信号, 即 **FID 信号**。

我们在实验仪器电脑上观察到的信号是通过混频电路实现的旋转坐标系中的 FID 信号, 把高频成分 ω_0 (20 MHz 左右) 过滤掉了, 得到的是 $|\omega - \omega_0|$ (0~4 kHz) 的低频信号。当射频脉冲的频率 ω 与质子拉莫尔进动频率 ω_0 相等时, FID 信号就没有上下振荡, 只剩指数衰减信号了。这时跃迁几率最大, 这时的 FR 脉冲频率就是共振频率。

4. 常用的 NMR 观测方法

为了观察 NMR 现象, 人们根据拉莫尔公式给定的条件采用了多种方法。在实验中使用最多的有扫场法、扫频法和脉冲法等几种。所谓扫场法, 就是保持电磁波的角频率 ω_0 不变, 而连续改变外磁场 B_0 的方法。当场值变到 $B_0 = \omega_0/\gamma$ 时便发生共振吸收。与此相反, 扫频法是固定静磁场强度 B_0 , 并通过连续改变射频场的振荡角频率 ω 来达到共振目的的方法。显然, 当满足 $\omega = \omega_0$ 的条件时将有共振信号检出。扫场法和扫频法均称为连续波法。如果固定磁场, 并以一个能量很高的、含有各种频率成分的宽带脉冲源去覆盖所选区域, 可使全部同类核同时被激发。采用这种原理达到共振目的就是脉冲法。用脉冲法可以获得比前两种方法高得多的信噪比。脉冲法又被称做脉冲傅里叶变换法。扫场法、扫频法和脉冲法在 NMR 波谱分析中均有应用。

医用 MRI 系统中所采用的实际上是一种脉冲激励的定核检测方法。MRI 中不仅固定静磁场 B_0 , 而且固定了扫描频率 ω_0 。因此, 只有满足条件 $\gamma = \omega_0/B_0$ 的核在射频脉冲作用下才发生 NMR。人体内含有大量的 ^1H , 加之它的信号灵敏度很高, 显然应选氢核作为定核。换句话说, MRI 系统就是用体内 ^1H 的分布来成像的, 因此, ω_0 和 B_0 的设置均应满足 ^1H 的共振条件, 即 ω_0/B_0 在数值上要等于氢的旋磁比 γ 。

5. 旋磁比问题

旋磁比 γ 是核的固有属性。也就是说, 原子核不同, γ 就不同。因此, 测定 γ 就可推知样品核的种类。连续波法波谱仪就是根据这一原理来测定核的。这种波谱仪工作时, 外磁场 B_0 自动随时间线性变化(扫场法), 当 B_0 与射频场的频率(常用 60 或 100 MHz)满足拉莫尔方程时, 样品中将出现共振吸收峰。由此实验结果便可计算出对应的旋磁比, 从而得知所测原

子核的种类。

γ 的常用单位有两种。一种是 $\text{rad}\cdot 10^7/(\text{s}\cdot\text{T})$ (对应于角频率 ω)，它主要在 NMR 波谱学中使用。另一种是 MRI 技术中经常使用的 MHz/T (对应于频率 f)。根据各自采用的量纲，两种单位之间是很容易进行换算的。由于 $1 \text{ MHz}=10^6 \text{ Hz}=10^6 \text{ 周/s}$ 、 $1 \text{ 周}=2\pi\text{-rad}$ ，可得出如下的换算式

$$1 \text{ rad}\cdot 10^7/(\text{s}\cdot\text{T}) = 1.591 \text{ MHz/T} \quad (9)$$

$$1 \text{ MHz/T} = 0.628 \text{ rad}\cdot 10^7/(\text{s}\cdot\text{T}) \quad (10)$$

表 1 列出了一些 NMR 核素的旋磁比(两种单位)。表中的所有数据均采用两位有效数字。

原子核	磁旋比	
	$[\text{rad}\cdot 10^7/(\text{s}\cdot\text{T})]$	(MHz/T)
^1H	26.752	42.562
^2H	4.107	6.534
^{14}N	1.934	3.077
^{15}N	2.712	4.315
^{31}P	10.841	17.248
^{13}C	6.728	10.704
^{23}Na	7.080	11.264
^{39}K	1.250	1.989
^{17}O	-3.628	-5.772
^{19}F	25.181	40.063
^{36}Cl	2.624	4.175

6. 自旋回波

自旋回波 (spin-echo) 是哈恩 (Erwin L. Hahn) 在 1950 年最早提出的，最简单的产生自旋回波的脉冲序列为 $90^\circ-\tau-180^\circ-\tau$ 采样。

现在看一下自旋回波是如何产生的。考虑一个包含大量自旋(例如质子)数(例 10^{23} 量级)的典型样品，把它分为 10^6 个系综，每个系综仍然是由巨大数目的质子组成的，在每一个区域内，外磁场的值分布在一个很窄的范围。每一个系综内有一确定的净磁化强度，它们都对总的磁化强度做出贡献。然而第一个 90° 脉冲后，每一个这样的磁化矢量均以稍稍不同的频率作进动，因此彼此逐渐散相。假设经过适当的时间间隔 τ 后，施加一个较之第一个 RF 脉冲双倍宽度的 180° 脉冲，经过 180° 脉冲，重新继续它的进动运动。但现在各个系综间累积的位相差全部精确反转，原先领先的现在等量地落后(相对于平均值)，同时由于进动过程，系综的散相逐渐逆转，再经过相等的时间间隔后，所有的系综回到同相状态，总的磁化强度达到

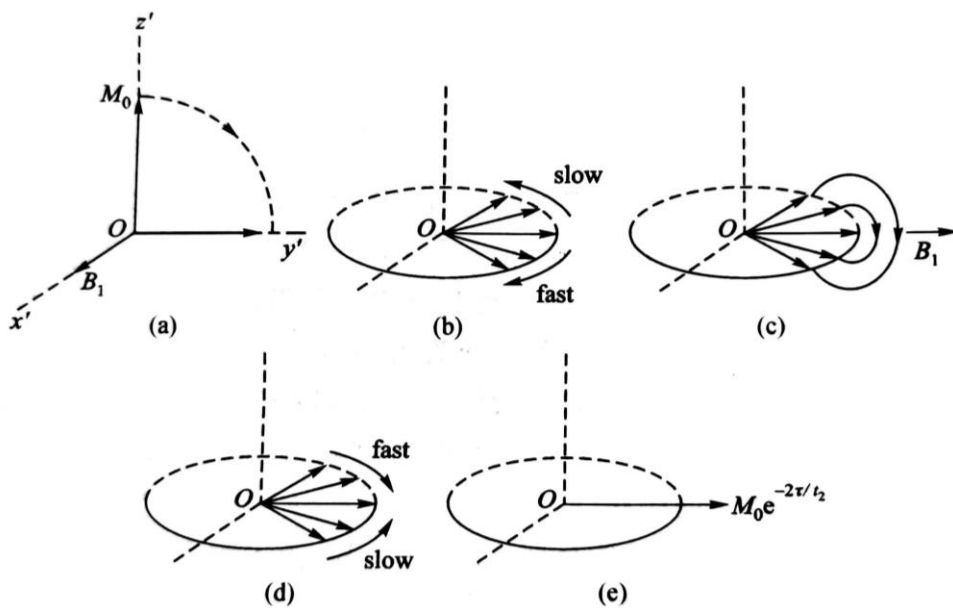


图 8 用经典矢量模型解释自旋回波效应

最大值. 在样品线圈里, 感应出“自旋回波”信号, 回波的幅度通常小于原始的 FID, 原因是热弛豫及扰动核磁矩进动的局域场的随机波动的影响, 使磁化强度的幅度稍有损失, 这些衰减的弛豫时间正是我们希望测量的, 见图 8. 自旋回波方法可以消除磁场的非均匀性的影响, 否则这种磁场的非均匀性会对测量造成很大的误差. 如果二个脉冲序列以不同时间间隔 τ 重复, 回波的高度应按指数 $\exp\left(-\frac{2\tau}{T_2}\right)$ 变化, 见图 9. 据公式

$$M(t) = M_0 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right)$$

用指数迭代法, 可以测定自旋-自旋弛豫时间 T_2 .

使用自旋回波技术有一个必要的假设, 即对某一特定的自旋, 在“重聚焦”180°脉冲前后

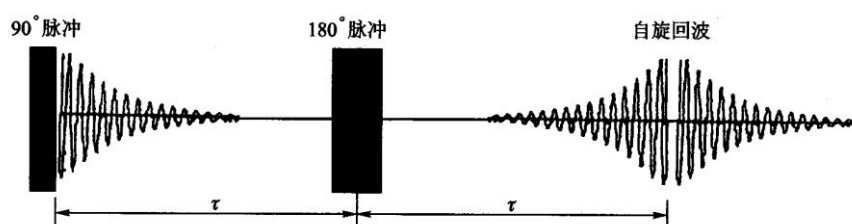


图 9 自旋回波信号的形成(当外加 RF 场稍稍偏离拉莫尔频率时所观测到的 NMR 回波信号, 快速振荡相应于两种频率的拍频)

感受到的恒定磁场必定是相同的. 如果因为布朗运动, 在回波形成之前, 自旋已经扩散到不同的磁场区域, 那么通过 180°脉冲自旋将不能重聚焦.

但用上述的自旋回波脉冲序列来测量 T_2 存在着采样时间较长的缺点, 因为取不同的时间间隔 τ 脉冲序列要重复多次, 每次重复都要等待系统恢复到热平衡状态, 这段时间一般为 $5 T_1$. 后来由 Carr, Purcell, Maiboom 和 Gill 共同提出了新的称为 CPMG 的自旋回波脉冲序列:

$$90_x^\circ - \tau - 180_y^\circ - 2\tau - 180_y^\circ - 2\tau \dots (\text{回波})$$

即在 90_x° 脉冲之后, 在 $1\tau, 3\tau, 5\tau, \dots$ 加上 180_y° 脉冲(下标 x, y 表示所加的射频脉冲的相位), 那么在 $2\tau, 4\tau, 6\tau, \dots$ 就得到自旋回波信号, 这样测 T_2 的时间就可以大大缩短, 当脉冲间隔 τ 取得非常小时, 还可以排除自旋扩散对 T_2 测量的干扰. 另外, 这个脉冲序列还可以克服 180_y° 脉冲不够准确的缺点, 因为偶数个 π 脉冲有补偿不准确度的功能, 使误差不会积累.

7. 硬脉冲和软脉冲

核磁共振成像的射频场是矩形脉冲射频场, 系统发射出中心频率为拉莫尔频率的射频电磁波, 激发样品质子群, 从而发生核磁共振效应. 该电磁波并非单一频率, 而是以拉莫尔频

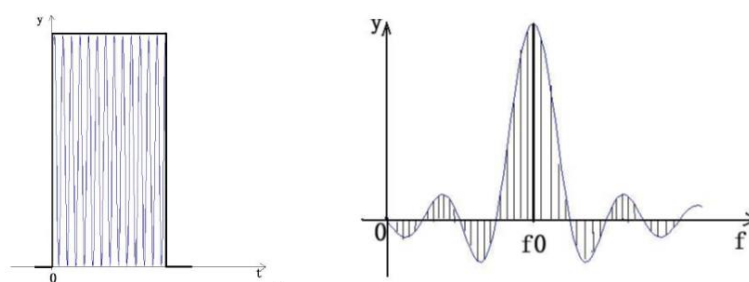


图 10 (a) 强而窄的硬脉冲波形(时间域) (b) 硬脉冲的频谱范围, 很宽(频域)

率为中心，频率具有一定宽度的频带。根据频带宽度和形状的不同，可将射频电磁波分为硬脉冲和软脉冲。硬脉冲是强而窄的脉冲，实际上是由很多频率的正弦波合成的，对应的频谱较宽，可以激发较大范围的质子，选择性差，用在波谱分析中；软脉冲是弱而宽的脉冲，对应的频谱较窄，只能激发较小进动频率范围的质子，选择性较好，用于成像中。如图 10 和图 11 所示。

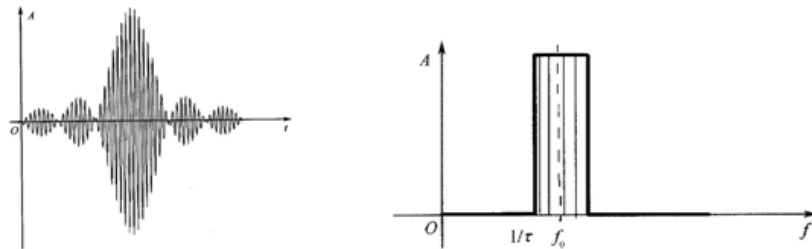


图 11 (a) 5 个耳瓣波形的软脉冲(时间域) (b) 软脉冲频谱范围，很窄(频域)

8. MRI 成像

8.1 磁共振成像过程

虽然从组织的 MR 信号来形成图像是一个复杂的过程，但 MRI 成像过程可简单地归纳如下：首先将受检部分分成若干的薄层，这些薄层称为层面，这个过程叫选片或者选层。每个层面又可以分为由许多被称为体素的小体积组成（图 12）。

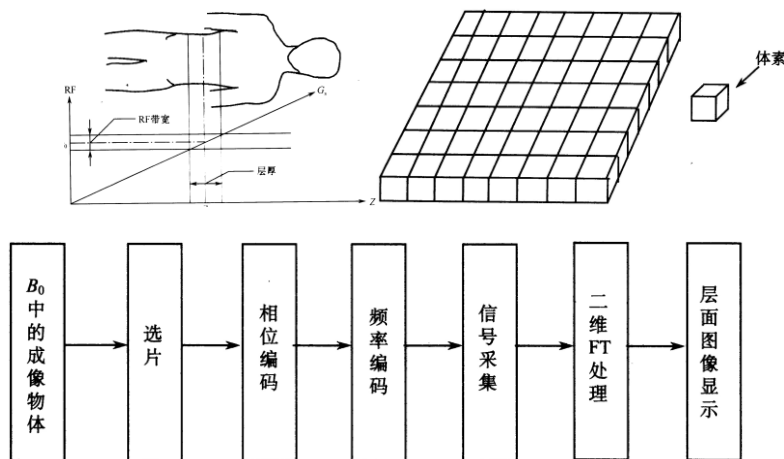


图 12 磁共振成像过程

然后对每一个体素标定一个记号，这个过程称为编码或空间定位。进行 MR 信号采集。再进行解码，得到该层面各个体素 MR 信号的大小，最后根据与层面各体素编码的对应关系，把体素信号的大小显示在荧光屏对应的像素上。信号大小用不同的灰度等级表示，信号大，像素亮度大；信号小，像素亮度小。这样就可以得到一幅断层 MRI 像，具体的过程如图 12 所示。

如何进行空间定位呢：信号源的位置信息由加入的 x 、 y 、 z 轴三个方向的线性梯度场确定。处在外磁场 B_0 中的氢质子无论其在空间位置如何，产生的磁共振的频率都相同，如果在 B_0 上叠加一个梯度场，质子的共振频率将发生变化，由此可以确定信号源的位置，这个过程叫做空间编码，包括选层梯度磁场 G_s 、频率编码梯度磁场 G_f 和相位编码梯度磁场 G_p 。三者在使用时是等效的，可以互换，而且可以使用任意两个梯度场的线性组合来实现某一定位功能，从而实现核磁共振的任意截面断层成像。

8.2 选片 层面的选择

通过线性梯度场的使用，使每一层面的磁场不同(图 13)，那么施加不同频率的射频场，就有不同的层面产生 MR 信号，那不同的层面 1、2、3 就区分出来了。

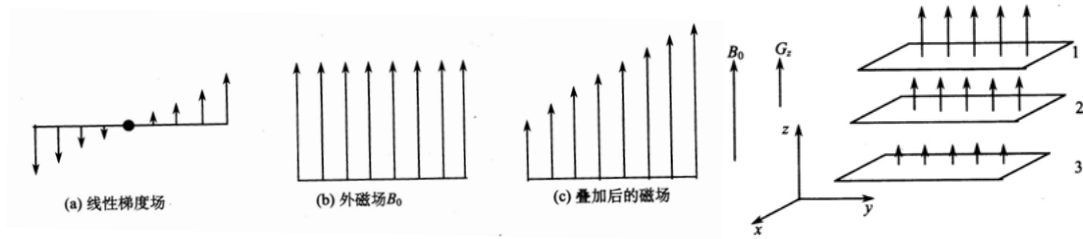


图 13 选层梯度场与外磁场的叠加

如图 14 所示，由于共振频率 $\omega_0 = \gamma B_0$ ，对于处在磁场为 1.54~1.56 T 的人体层面，氢原子的 $\gamma = 42.6 \text{ MHz/T}$ ，如果调节射频脉冲频率范围在 65.604~66.456 MHz，那么只有这个层面产生共振信号，因而所成的像就是这个层面的像。

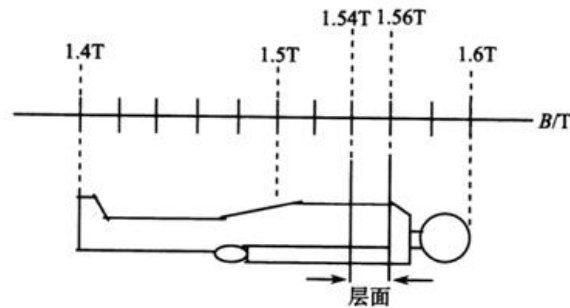


图 14 磁场与层面的对应关系

选层的厚度（即层厚）决定着图像分辨率的高低，层厚薄，同样大小矩阵的体素就小，因而分辨率会高。参见图 14 所示的层厚。层厚取决于二个因素：选层梯度的强度（即梯度场的斜率）和激励射频的频率范围。层厚与射频带宽成正相关，即射频频率范围越大，能够激发的质子层厚就越厚，反之越薄。层厚与梯度场强度反相关，选层梯度场越强，梯度斜率越大，层厚反而越薄。由于射频带宽不能轻易改变，它与其他参数是关联的。因此，临床上主要是通过改变梯度场的强度来达到不同层厚的选择。一般对于较厚的层厚，梯度场强度小，对梯度功放的负荷小。而对于较小层厚成像时，要求较大的梯度场，因此功放也要提供很大的功率输出，而梯度功放一般存在着最大输出功率，因此某型号机器在使用时一般有个极限层厚，即最小层厚的限制。选择比最小层厚还薄的层厚很容易导致梯度功放的损坏。选层的位置可以由调整射频中心频率来实现。选层梯度场要什么时刻施加呢？要与射频场同时施加，即与 90 度脉冲和 180 度脉冲同时施加。

8.3 相位编码 y 轴定位

利用线性梯度场可以对选出的层面进行空间定位。形成 xy 矩阵。以 3×3 的矩阵为例。在没有施加相位梯度磁场时，在均匀磁场 B_0 作用下，9 个体素都以频率 ω_0 进动，信号的相位相同，都为 $\omega_0 t$ 。如图 15 的左侧所示。在 y 方向加上梯度场，最上面一行的磁场变大，频

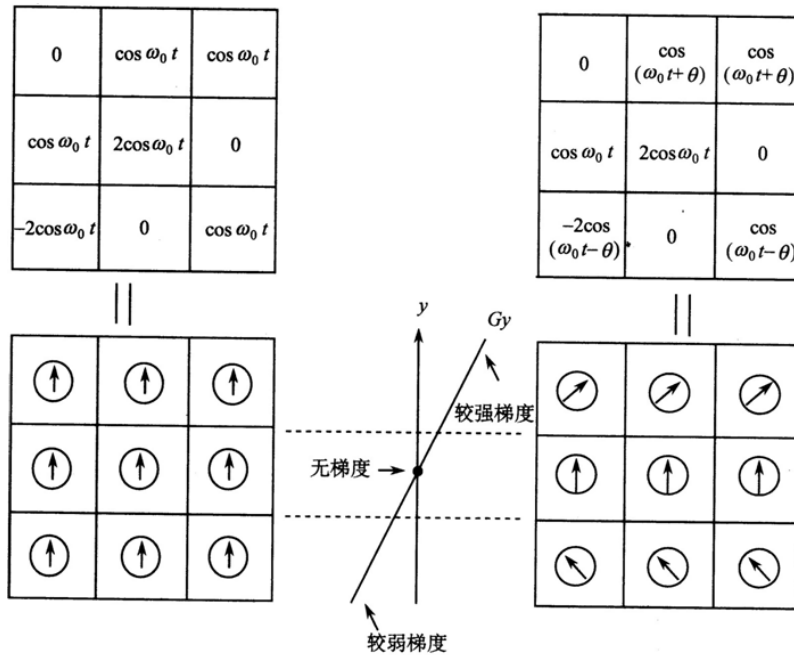


图 15 相位梯度场的作用

率变大，从而相位变大，表示为 $(\omega_0 t + \theta)$ ；中间一行磁场不变，相位不变，还是 $\omega_0 t$ ；最下面一行磁场变小，频率变小，从而相位变小，表示为 $(\omega_0 t - \theta)$ 。如图 15 的右侧所示。这样 y 轴方向三行矩阵不同的位置信息就转变为三个相位信息，用相位来表达空间位置信息，叫做相位编码。相位梯度场作用时间很短，在采样之前就关掉。所以 9 个体素又恢复到频率 ω_0 ，但是三个相位的信息保留下来了，得以确定层面中 y 方向的不同位置。在实际采集信号时，由于采用的是二维傅里叶变换成像方法，相位梯度场需要分别多次施加，每次施加的相位梯度场强弱不同，逐步改变，每次都采集一个信号。施加的次数和 y 方向的矩阵数目相同。比如矩阵为 3 行，就要施加 3 次；矩阵为 256 行，就要施加 256 次。相位梯度场的特点见图 16。

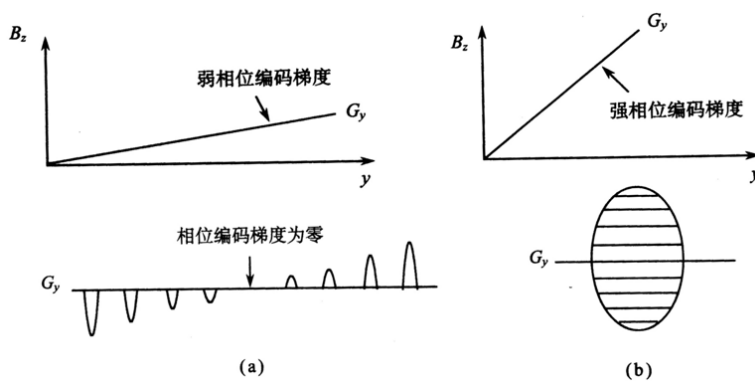


图 16 相位梯度场的不同强度及符号

8.4 频率编码 x 方向定位

以 3×3 的矩阵为例，在磁场 B_0 作用下，9 个体素都以频率 ω_0 进动，但信号强度各不同，信号的总强度为 $4\cos\omega_0 t$ ，如图 17(a) 所示。在 x 方向加上频率编码梯度场，这样不同列的磁

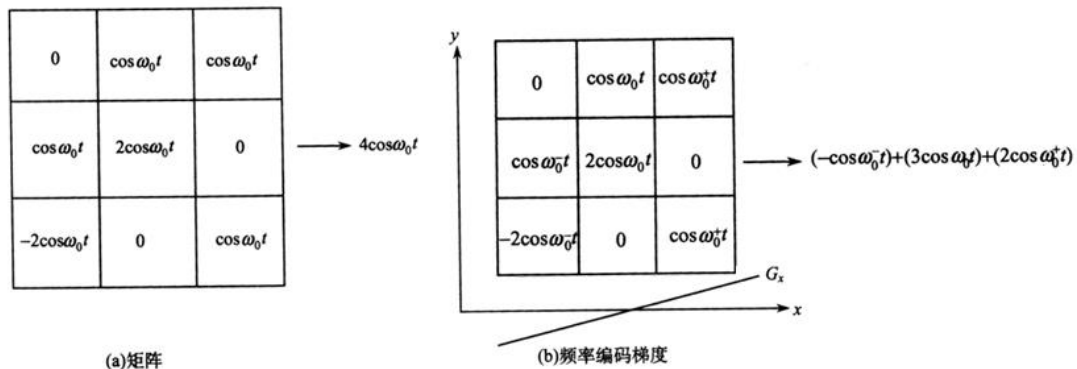


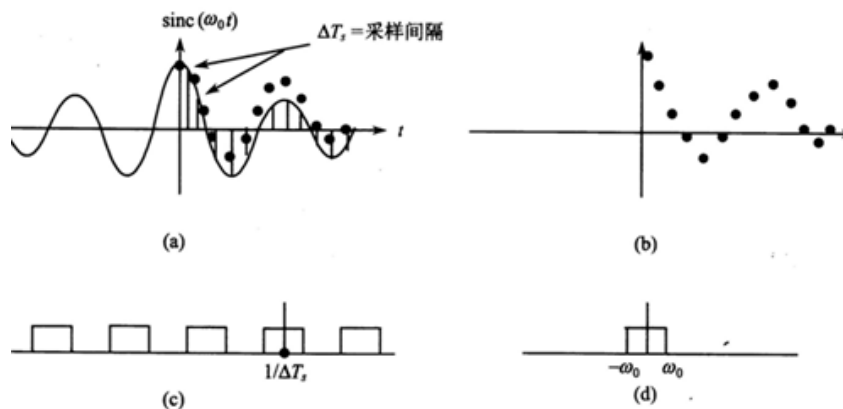
图 17 不同频率编码下，各列的频率不同

场就不同了，如图 17(b) 所示。最左侧一列磁场变小了，体素进动频率也变小了，表示为 ω_0^- ；中间一列磁场大小不变，体素进动频率不变，仍为 ω_0 ；最右侧一列磁场变大了，体素进动频率也变大了，表示为 ω_0^+ 。这样层面矩阵有 3 列，信号有 3 个频率。信号的总强度为 $(-\cos(\omega_0^- t) + 3\cos(\omega_0 t) + 2\cos(\omega_0^+ t))$ 。3 列矩阵用 3 个频率来表达；256 列矩阵用 256 个频率来表达。这样 x 轴的位置信息就转变频率信息。用频率来表达空间位置信息，叫做频率编码。在采样的同时施加频率梯度场，所采集到的信号中就包含了这些不同的频率成分。

经过相位编码和频率编码，采集到的磁共振信号中包含不同的频率成分及相位信息，我们用二维傅里叶变换来处理信号，进行解码，通过灰度变换，可以得到二维断层图像。

6.5 信号采集 采样点数、采样间隔和采样时间

磁共振信号是连续的模拟信号，为了让计算机处理数据，需要把模拟信号变为数字信号。要很好的反应模拟信号，采样点数要足够多。如图 18 所示，连续两个采样点之间的时间间隔称为采样间隔，用 ΔT_s 表示； $1/\Delta T_s$ 称为采样频率用 ν_s 表示。对一个信号采样所需要的时间



图(a)是接收线圈得到的 RF 信号，为 sinc 函数，需要通过采样得到图(b)的数字信号，才能被计算机接收；对图(b)信号进行傅里叶变换，会得到图(c)的一系列方波信号，每个方波的中间位置是 $1/\Delta T_s$ 的倍数；但是实际的模拟信号经过傅里叶变换后应该是图(d)，只有一个方波信号，因此还需要对图(c)的信号做截断处理。

图 18 信号的采集

称为采样时间。采样频率要满足采样定理：如果 ν_{\max} 是信号内最大频率，采样频率必须至少

是信号最大频率的两倍，即 $v_s = 1/\Delta T_s \geq 2v_{max}$ 。为了便于快速傅里叶变换，采样点数一般为 2 的整数次幂，即 32、64、128、256 或者 1024 等。把采集的信号填充到层面矩阵中形成数据空间，记录在计算机中。图 19 显示采集到的 MR 信号填充到数据空间，经过采样后变为数字化的数据空间叫做 K 空间。

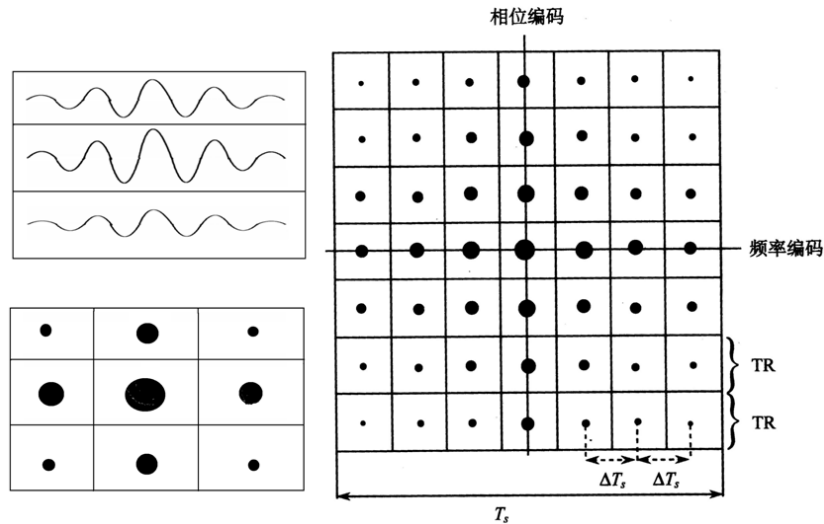


图 19 7×7 矩阵时间域内的 K 空间

7. 成像周期

要得到一幅断层二维图像，需要进行多次采样。每一次信号采集就为一个周期。比如像素矩阵为 128×64 。频率编码数为 128，相位编码数为 64，需要采集 64 次信号，就有 64 个周期。每个周期都施加 128 步频率梯度场和一个大小不同逐步变化的相位梯度场（64 步相位梯度场中的一步），每次得到一个相位信息对应于同样的 128 个频率信息。同时为了提高信噪比，我们还需要累加采集，累积次数为 2 次、4 次等偶数的倍数。因为共振信号为相干信号，如果累加次数为 n ，那么信号强度增加 n 倍，而噪声是随机信号，噪声强度只增加 \sqrt{n} 倍，则信噪比提高 \sqrt{n} 倍。成像周期如图 20 所示。1 个周期的时间为脉冲序列重复时间 TR，

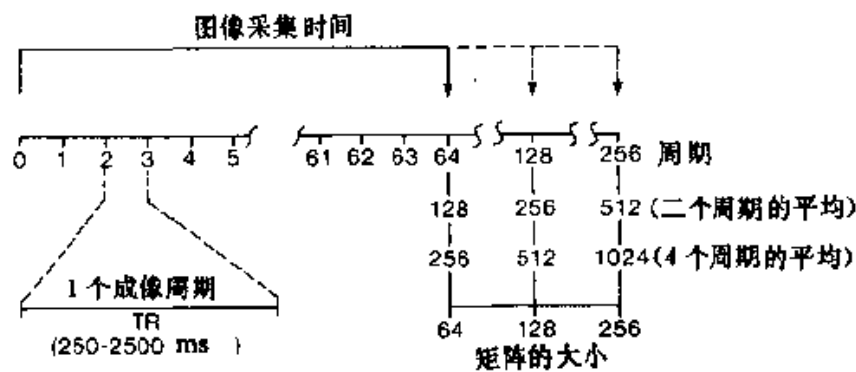


图 20 一幅二维断层图像所需要的周期个数

通常在 250-2500 ms 范围内。相位编码数为 64 的话，就有 64 个周期；相位编码数为 128 的话，就有 128 个周期；相位编码数为 256 的话，就有 256 个周期。累加次数分别为 2 和 4 的话，周期还要分别翻 2 和 4 倍。

总结下来，产生一幅图像需要几个步骤：在一个周期内先施加 RF 脉冲和选层梯度场；再施加相位梯度场；检测信号并同时施加频率梯度场；根据相位编码数 NE(number of

excitation)和累加次数 NS(number of scan)做很多周期的信号采集；储存信号和信号处理得到图像。采集信号所需要的总时间为 $TR \times NE \times NS$ 。TR 为脉冲序列重复时间，NE 为相位编码数，NS 为累加次数。

磁共振成像二代仪器及实验内容

二代磁共振成像实验仪器如图 1 所示。

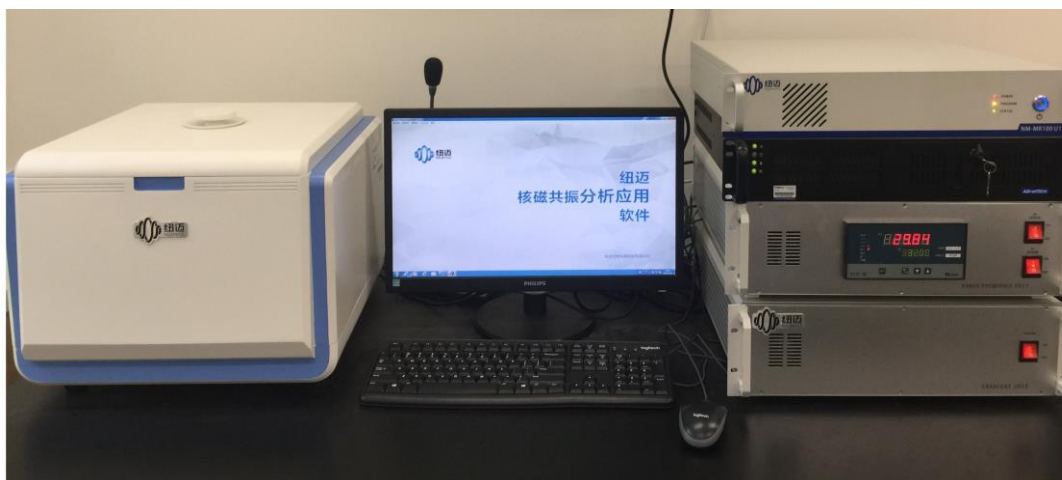


图 1 磁共振成像实验仪器

图中左侧为磁体系统（样品试管放在磁体中央）；中间为显示屏；右侧从上往下依次为谱仪系统、主机、射频单元和梯度单元。磁场由永磁铁提供，大小约为 0.5 T，磁场均匀性在 15 PPM 以下，匀场范围在 1 cm 直径的球内。为保证磁场的稳定性，永磁铁需要恒温在 32°C，程序控温表头在射频单元中显示，绿色温度为设定温度，红色为实际温度，温差要小于 0.01°C。实验样品为标准油样和芝麻，放在直径 15 mm 的试管中，样品在试管中的高度在 1.5 cm 左右，不要超过 1.5 cm，免得超出匀场空间范围，引起伪影。

磁共振成像实验仪器有两个软件，分别为“纽迈核磁共振分析应用软件”和“纽迈核磁共振成像应用软件”。**注意**两个软件不能同时使用。

严格按照实验室告示牌中的顺序开、关机。

实验内容

该实验分为两部分内容，分别使用不同软件。第一部分内容为磁共振成像基本参数和弛豫时间的测定，用“纽迈核磁共振分析应用软件”；第二部分内容为磁共振成像，用“纽迈核磁共振成像应用软件”。

第一部分内容 关于磁共振基本参数及 SE 序列和弛豫时间等

首先在电脑 D 盘建立自己的文件夹。

磁共振成像有三个基本参数，也是系统参数：共振频率、90°脉冲和 180°脉冲。还有采集信号所需要的许多其他参数。这些参数都需要在硬脉冲序列(Q-FID)中测量和熟悉。

一、磁共振成像基本参数的测定（注意放上样品大豆油）。测定共振频率和硬脉冲的 90°脉冲，180°脉冲。

首先打开“纽迈核磁共振分析应用软件”；启动“Default”用户，密码无。

1. 单击菜单中的“数据采集”，出现如下参数设置窗口；

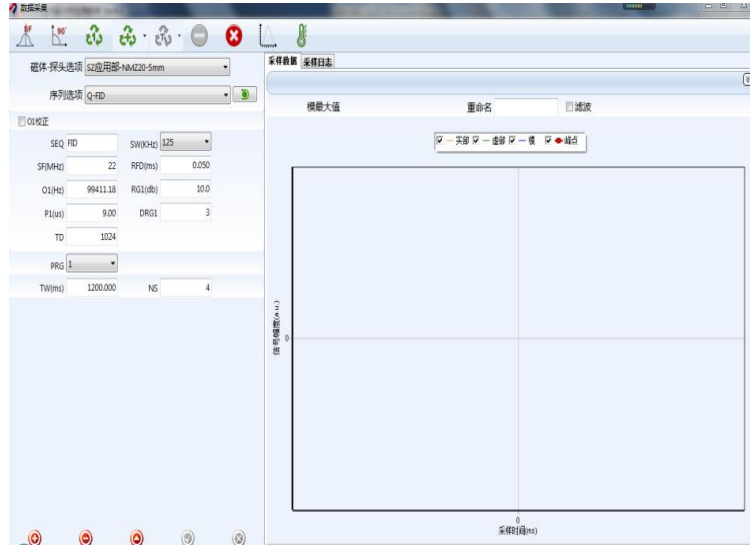


图 2 数据采集及参数设置界面

2. 在参数设置窗口中，序列选项选择 Q-FID（硬脉冲序列）：

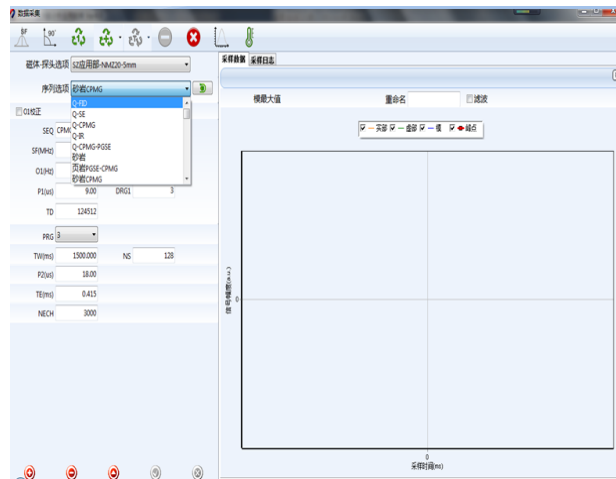


图 3 选择硬脉冲序列

3. 设置模拟增益 RG1 为 20，数字增益 DRG1 为 3，前置放大增益 PRG 为 3，射频延时 RFD 为 0.002-0.02，这个范围内都可以：

参数更改之后，要按  标识以确认参数的更改。

4. 单击 ，进行单次采样，大约采样 10 秒钟后，单击 ，停止采样；

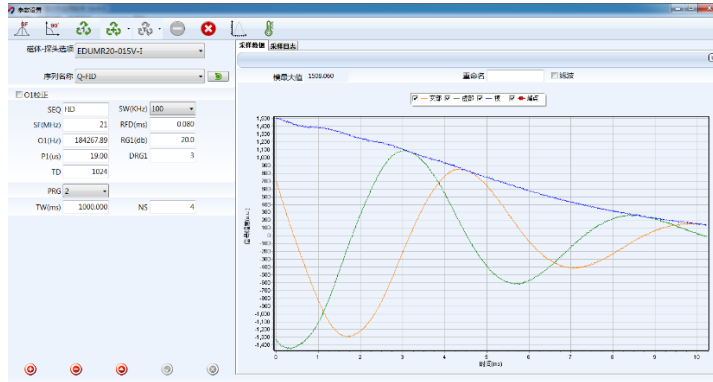



图 4 采样图像

5. 单击 , 软件将自动地寻找中心频率, 即射频信号频率的主值 SF (spectrometer frequency) 加上射频信号频率的偏移量 O1(offset);

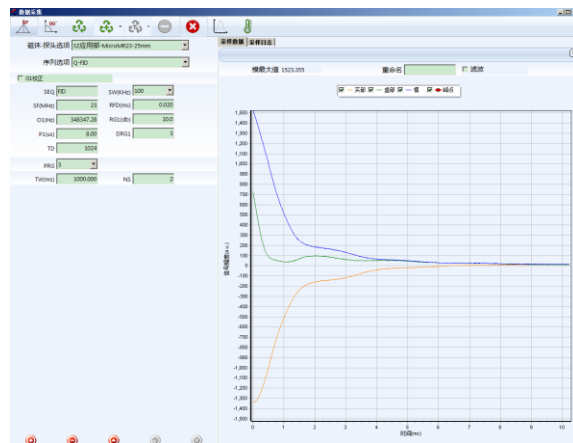



图 5 找到中心频率后的图像

6. 在实验记录本上记下共振频率值, 即 SF 和 O1 的值、波形示意图;
7. 请调出频率为 4 kHz 的 FID 信号. 从 FID 信号估读 T_2^* 的值并记录. (按鼠标左键出现信号缩放功能; 或者直接按住鼠标右键水平拉或者上下拉)。

讨论:

- (1) 该射频信号频率是由仪器自动获得的, 测量原理是什么?
- (2) 共振时的图像 (图 5) 不同于采样时的图像 (图 4), 实部信号和虚部信号没有上下振荡以致于相互重叠, 这是什么原因?

8. 单击 , 弹出脉冲参数设置框 (图 6), 仪器将自动寻找 90 度和 180 度脉冲;

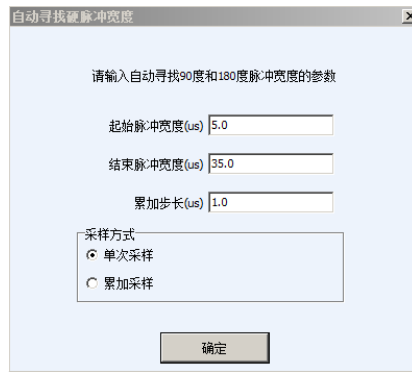


图 6 参数设置对话框

9. 可用默认值，也可适当调整脉宽搜索范围和步长，单击确定采集；

软件自动寻找结果如图 7 所示，图中波峰对应 90° 脉宽(P1)，波谷对应 180° 脉宽 (P2)。若出现多个波峰或者没有波谷，说明搜索范围过大或过小，应重新调整搜索范围；

10. 软件会自动将寻找到的 90° 和 180° 脉宽值 P1 和 P2 记录在数据库中。P2 值在 FID 序列中不显示，在 SE 序列中才显示出来；

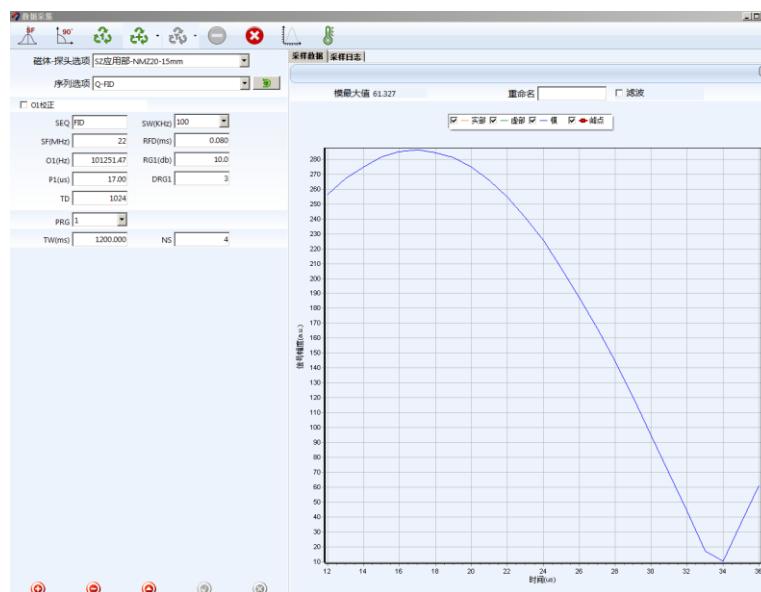


图 7 90° 和 180° 脉宽的自动寻找结果

11. 记录寻找得到的 90° 和 180° 脉宽值。

讨论:

- (1) 90° 和 180° 脉宽值由软件自动得到的，若手动测量应如何操作？
- (2) 180° 脉宽值和 90° 脉宽值的关系如何？原因是什么？

二、自旋回波 (Spin Echo) 的观测，学习 SE 的产生原理. 选择“Q-SE”序列。

FID 实验虽然在设置系统参数时很有效，但是 FID 实验本身有一定的缺陷。它的主要缺

陷在于：通过 FID 序列采样到的信号，不但会随样品的横向弛豫迅速衰减，而且还要受到磁场不均匀性的影响。而对样品成像需要一系列的步骤，需要一定时间；也需要消除磁场不均匀性的影响。因此，一种可以排除磁场不均匀性干扰而且可以控制信号强度衰减时间的脉冲序列将更为实用。SE 序列正是具有排除磁场不均匀性干扰这一性质的脉冲序列。如果在 90 度脉冲后面再加一个 180 度脉冲，就可以产生自旋回波，叫做硬脉冲回波序列。

脉冲序列参数介绍：硬脉冲回波序列的脉冲时序如图 8 所示。

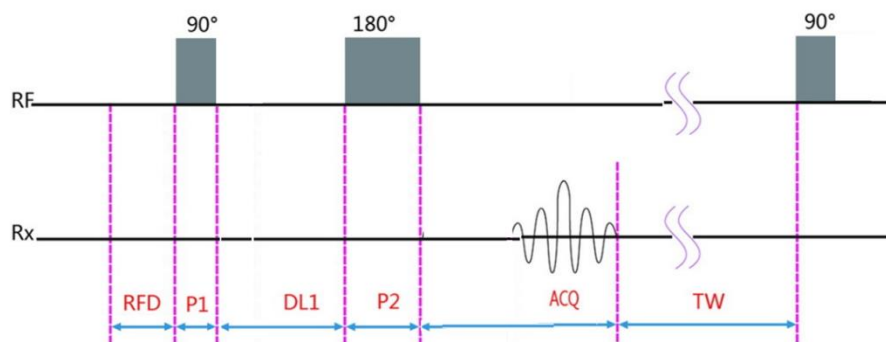


图 8 硬脉冲回波序列

P1	硬脉冲 90 度脉宽
DL1	时延，90 度脉宽结束到下一个 180 度脉宽开始的时间间隔
P2	硬脉冲 180 度脉宽
ACQ	采样时间，由采样点数 TD 和采样频率 SW 决定。ACQ=TD/SW.

时延 DL1

DL1 是指 90 度脉冲与相邻 180 度脉冲之间的时间间隔。

改变 DL1 值可能会影响到 SE 信号的形状，这往往是由于样品内部分子间发生的自扩散和分子交换所引起的。若需要减小分子自扩散对信号的影响，则应该选择比较小的 DL1 值；若需要增大分子自扩散对信号的影响，则应该选择比较大的 DL1 值。通常在测量标准油样时，我们会选择 DL1 值在 0.03~0.05 秒之间以减小分子自扩散对信号的影响。

回波时间 TE (Time of Echo)


回波产生的时间为 TE (Time of Echo)，称为回波时间， $TE = 2DL1 + P2$ 。

2.1 实验内容 产生并观测自旋回波

1. 选择“Q-SE”序列。样品为大豆色拉油，参数可按下表设置。

参数	数值
SW	100 kHz
RFD	0.08 ms
TW	1500 ms
RG1	20
DRG1	3
PRG	2
NS	2
TE	10 ms

注意在硬脉冲回波实验中，TD 值为只读项，软件自动计算；

- 更改共振频率偏离 2kHz，单击  进行重复采样；
- 注意各个增益的选取，使得信号幅度大小合适；
- 观察回波波形，把波形示意图画在记录本上。分别记录不同回波时间 TE 为 5 ms, 30 ms 的 ACQ 时间，并确认 $ACQ = TD/SW$ ；
- 改变回波时间 TE 为 5 ms, 10 ms, 20 ms, 30 ms, 40ms 等其他 10 个值，直到信号幅度减小到初始值的三分之一以下，记录各个回波时间下回波信号模值的幅度，总结回波强度与回波时间的定性关系；
- 根据电脑上 SE 的波形和幅度，估读横向弛豫时间 T_2 。

三、 横向弛豫时间 T_2 的测量，选择 Q-CPMG 序列

CPMG 序列是用来测量样品横向弛豫时间的重要手段之一。该序列是在施加一个 90 度射频脉冲后又施加了很多个 180 度射频脉冲。每施加一个 180 度射频脉冲都会延缓由于磁场不均匀而导致的信号衰减，并且可以在信号的回波峰点处采样到不受磁场均匀性影响的数据。因此，这样的信号采样过程只反映样品的特性而不受磁场均匀性的干扰。所得到的信号往往是符合多条指数曲线叠加规律的一条曲线，是样品中不同的横向弛豫过程的综合反应，可以得出相应的几个不同的 T_2 值。要求出这些 T_2 值，需要选择不同迭代算法，我们就利用仪器软件中自带的反演算法算出。再通过“数据查询”得到各个回波峰值信号，保存该数据，回去自己用 origin 拟合，得出 T_2 ，与计算机给出的 T_2 值做比较。

脉冲序列参数介绍

CPMG 序列的脉冲时序如图 9 所示。

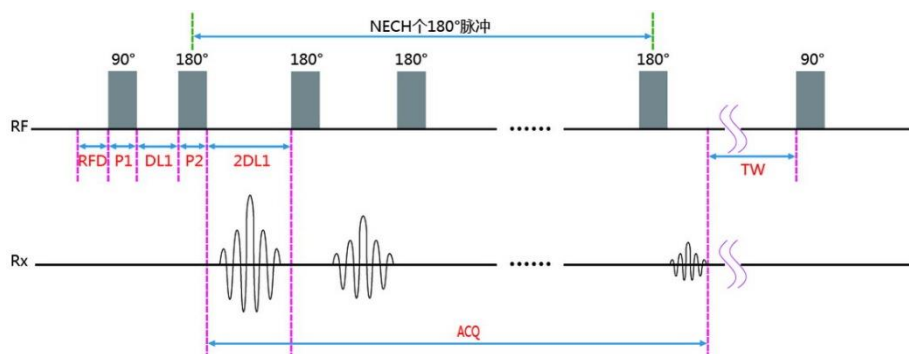


图 9 硬脉冲 CPMG 序列

P1	硬脉冲 90 度脉宽
DL1	时延，90 度脉宽结束到 180 度脉宽开始的时间，180 度脉冲结束到下一个 180 度开始为 2*DL1
P2	硬脉冲 180 度脉宽
NECH	180 度射频脉冲个数
Peaks parity	参与反演的采样点：奇数、偶数以及全部。一般选择全部参与反演

回波个数 NECH

回波个数是指信号采样得到的回波数量，也是用户施加 180 度脉冲的个数。通常情况下，你需要设置足够大的回波个数使信号完全弛豫。NECH 不能太小，这样会丢失样品中的有效信息；NECH 又不能太大，这样不仅降低实验效率还会降低采样信号的信噪比。理论上，NECH 应该是使样品完全弛豫的最小回波数。在进行标准油样实验时，通常情况下我们选择 1000~2000 个回波。

3.1 实验内容：测量大豆油的横向弛豫时间 T_2

1. 选择 Q-CPMG 序列；
2. 参考下表设置参数；

参数	数值
SW	100 kHz
RFD	0.08 ms
TW	1500 ms
RG1	20

DRG1	3
PRG	1
NS	2
TE	0.4 ms
NECH	2000



- 可以适当更改 RG1, DRG1 和 DRG1, 使信号起点处不饱和;
- 参数 TE 和 NECH 非常重要, 与样品的 T_2 相关; 选择合适的值, 可以多试几个值, 使曲线指数衰减并且完全弛豫;
- 单击  进行重复采样;
- 采样结束后, 数据自动保存;
- 在记录本上画出指数衰减信号示意图, 并记录相应的 TE 和 NECH 值;
- 单击  进行反演, 设置合适的反演参数 (图 10), 可以采用默认值;



图 10 反演参数框

- 反演结果如图 11 所示;

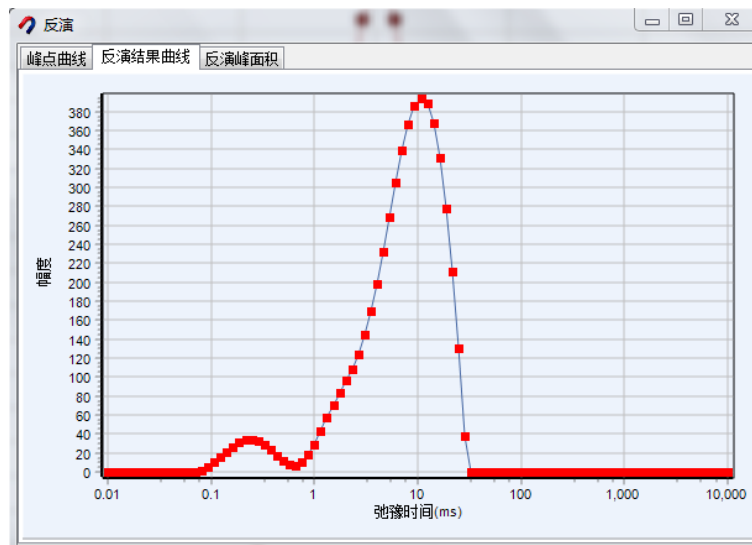


图 11 反演结果

- 查看“反演峰面积”, 峰顶的位置即是 T_2 值, 在实验纪录本上记下 T_2 值;
- 通过软件上部的“数据查询”得到各个回波峰值信号, 保存该数据, 回去自己用 origin 拟合, 得出 T_2 , 与计算机给出的 T_2 值做比较.

注意事项: 选取合适的回波时间 TE 和回波个数 NECH, 使信号衰减快慢合适, 并使信号衰减到接近于零.

讨论:

- 反演曲线的物理意义是什么?
- 为什么有不同的弛豫时间?

四、纵向弛豫时间 T_1 的测量, 选择 Q-IR 序列

样品由受激发状态到恢复平衡状态的过程，称为样品的纵向弛豫，也称作自旋-晶格弛豫，其弛豫的快慢用纵向弛豫时间 T_1 来表征。我们利用反转恢复(Inversion Recovery, IR)序列来测量样品的纵向弛豫时间。首先介绍 IR 序列的脉冲参数；其次给出进行 T_1 测量的实验步骤。

IR 序列由反转脉冲(180 度脉冲)和读出脉冲(90 度脉冲)两部分组成，具体的 IR 序列脉冲时序如图 12 所示。

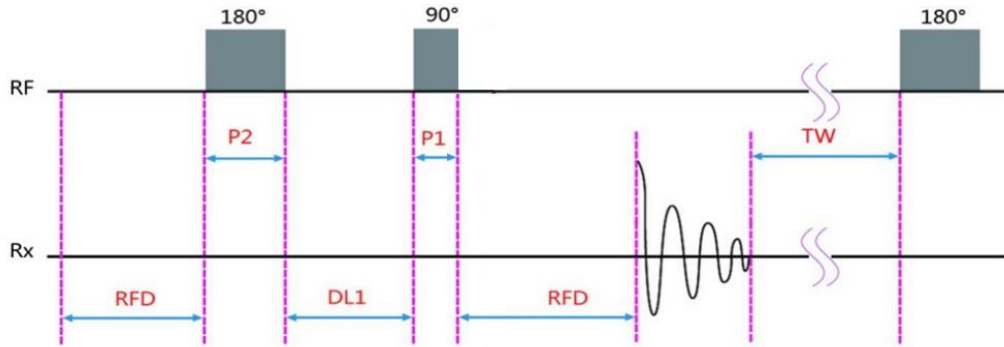


图 12 IR 序列

反转时间数目 NTI

NTI 来描述纵向弛豫曲线所需要的数据点数，也是 DL1 值的个数。NTI 一般应该不小于 20，并可根据弛豫曲线的平滑程度来调节 DL1 值。若弛豫曲线不够平滑应适当增大 NTI 值，但该参数不宜过大（小于 50），否则会花费相当长的实验时间。

时延 DL1

DL1 是指反转脉冲与读出脉冲之间的时间间隔，即 180 度脉冲与 90 度脉冲之间的时间间隔。为了测量 T_1 ，我们需要反复进行 IR 实验，并且每次实验都需要使用不同的 DL1 值。而每改变一次 DL1，将得到一个信号的最大幅值。我们利用不同 DL1 得到的幅值来描述样品的纵向弛豫曲线，其形状由样品的 T_1 值所决定。为了准确描述样品的纵向弛豫曲线，DL1 的变化范围应该从接近零的值一直到使纵向磁化矢量完全弛豫的 DL1 值。在实验中可以通过软件自动设置 DL1 值。操作步骤如下：

- (1) 在参数设置界面中单击“设置 DL1”；
- (2) 在弹出的对话框中单击“自动设置 DL1”后，按下面的“确定”；
- (3) 此时软件会根据对数布点，自动设置 DL1 值。




参数	数值
TD	1024
SW	100 KHz
RFD	0.08 μ s
TW	3000 ms
RG1	20
DRG1	3
PRG	2
NS	4
NTI	20
DL1	自动设置

图 13 设置 DL1

其中 DL1 值，也可以手动输入，在如图 13 所示的界面中，手工输入合适的 DL1 值。
注意：自动设置 DL1 值中，DL1 的最大值为 TW，在设置时，可以适当增加 TW 值，使信号完全恢复，例如在油样中，最大的 DL1 可以设置为 3000 ms-5000 ms。

4.1 测量大豆油的纵向弛豫时间 T_1

1. 选择 Q-IR 序列；
2. 参考上方表格设置参数：设置好 DL1；
3. 单击  开始采样，采样会自动停止；
4. 采样结束后，采样结果如图 14 所示，数据自动保存到数据库；**注意数据一定要饱和。**

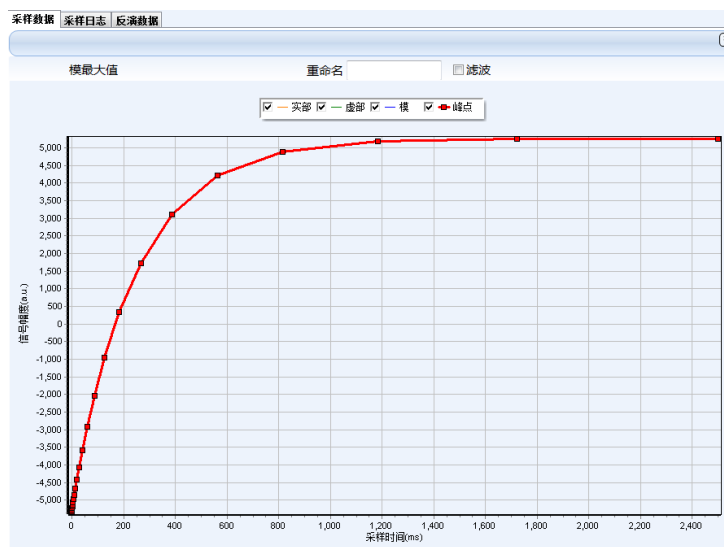



图 14 IR 序列采样结果

5. 单击反演  按钮，设置合理的反演参数；
6. 反演结果如图 15 所示；

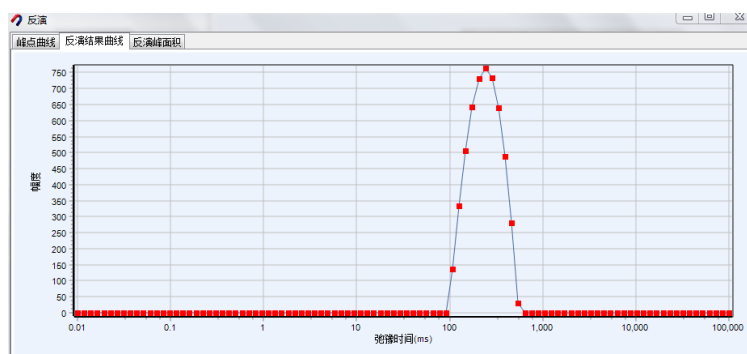


图 15 IR 反演结果

7. 在记录本上画出 IR 序列采样结果曲线示意图；参数 DL1 和 TW 及 T_1 测量结果；
8. 通过“数据查询”得到各个 DL1 下的信号强度，保存该数据，回去自己用 origin 拟合，得出 T_1 ，与计算机给出的 T_1 值做比较。

讨论：

- (1) 测量 T_1 的原理和方法是怎样的？
- (2) 设置不同的 DL1 值的目的是什么？

第二部分实验内容 自旋回波序列成像

关闭“分析软件”，打开“成像软件”。软件界面如图 16 所示。

(仪器同时只允许打开一个软件)

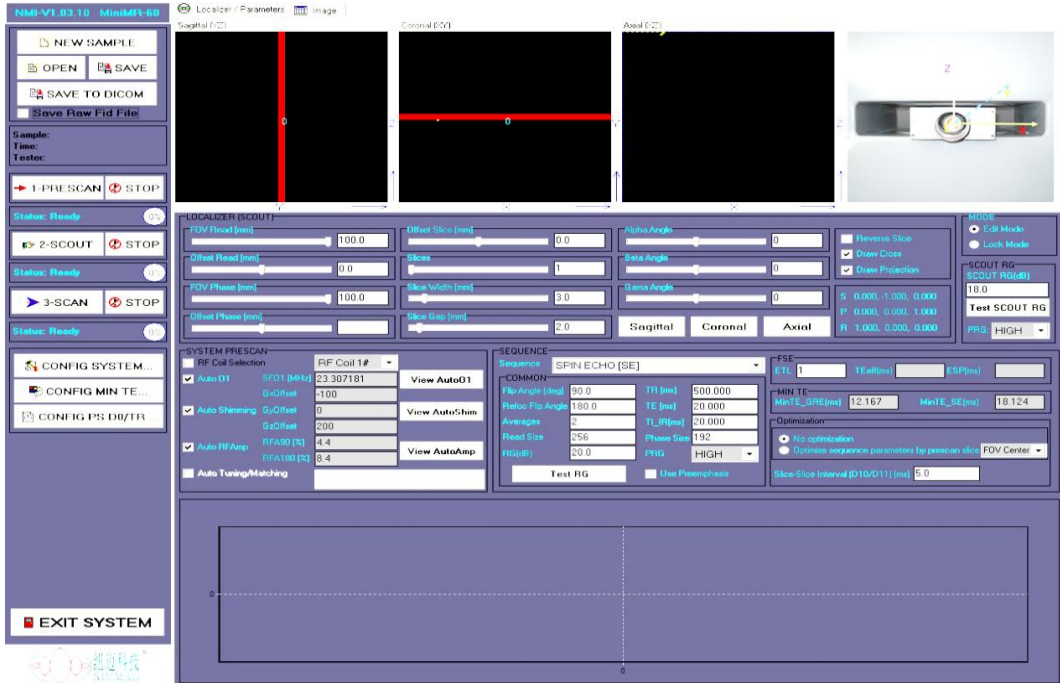


图 16 成像软件主界面

注意： 在采样信号期间不要点击文件打开、保存等文件处理相关操作。出于保护仪器的考虑，如果在采样期间用户进行文件相关操作，那么软件会丢失数据或者自动释放所有资源并关闭。

磁共振成像有不同的脉冲序列成像。自旋回波序列成像是最基本的成像序列，其他各种成像序列都是基于这一序列的发展。自旋回波序列成像首先需要调节三个基本参数：共振频率；软脉冲的 90 度脉冲和 180 脉冲，还包括匀场调节；其次需要设定图像参数，确定成像的具体层面数目及层面大小：层面数目 Slices、层面厚度 Slice Width、层面位置 Offset Slice、成像截面（Sagittal, Coronal, Axial），视野大小 FOV 等。

2.1 大豆油样品的 MRI 成像

仪器默认为自旋回波序列成像。

2.1.1 调节三个基本参数（共振频率、90°脉冲、180°脉冲）及匀场

1. 确保已放入标准油样（大豆油）；

2. 单击 （左侧菜单栏的从上到下第七行按钮）；

（出现的 System Configuration 参数调节界面，如图 17 所示）

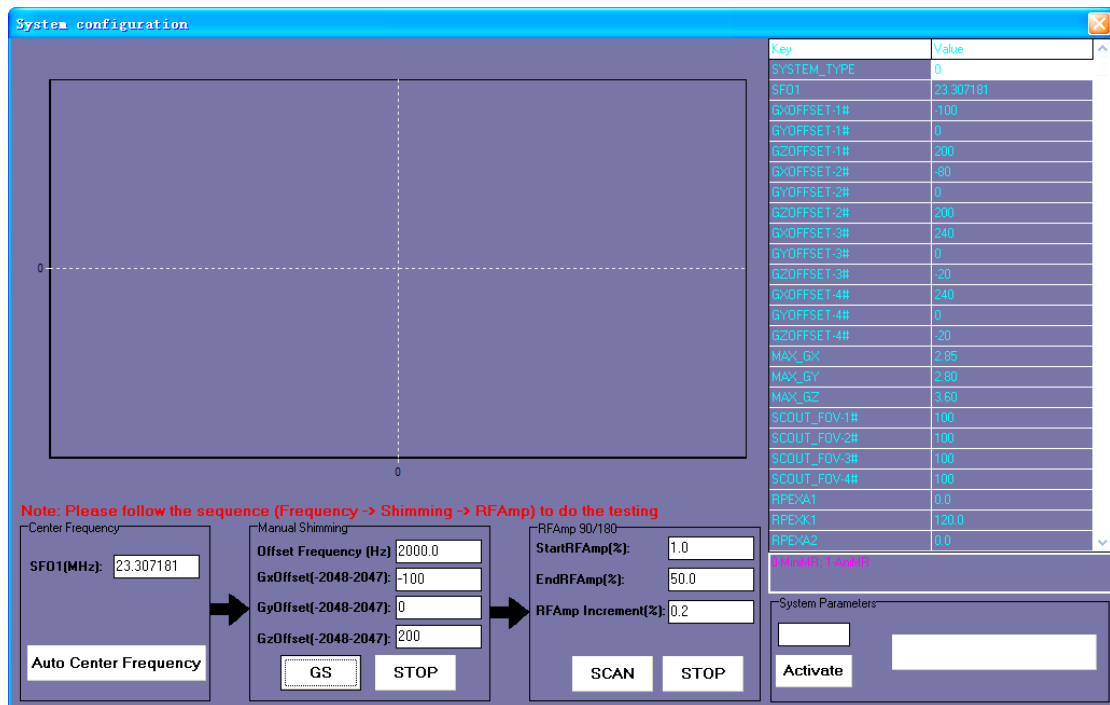


图 17 System Configuration 参数调节界面

(以下按照 Center Frequency→Manual Shimming (电子匀场) →RFamp 顺序逐一调节)

3. 先单击 **Auto Center Frequency** (参数调节界面的第一个按钮);

仪器自动寻找共振频率, 记录 SF01(MHz)的值, 图 18;

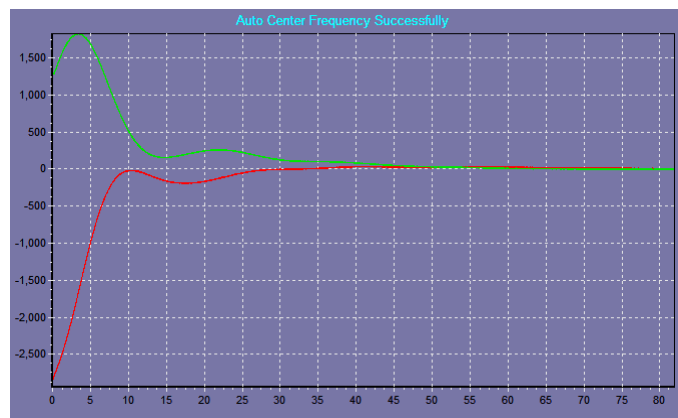


图 18 频率校正后 FID 信号, 红线表示信号的实部, 绿线表示信号的虚部

4. 再单击 **GS** (参数界面中的第二个按钮);

这一步是自动电子匀场调整磁场的均匀性, 图 19 和图 20;

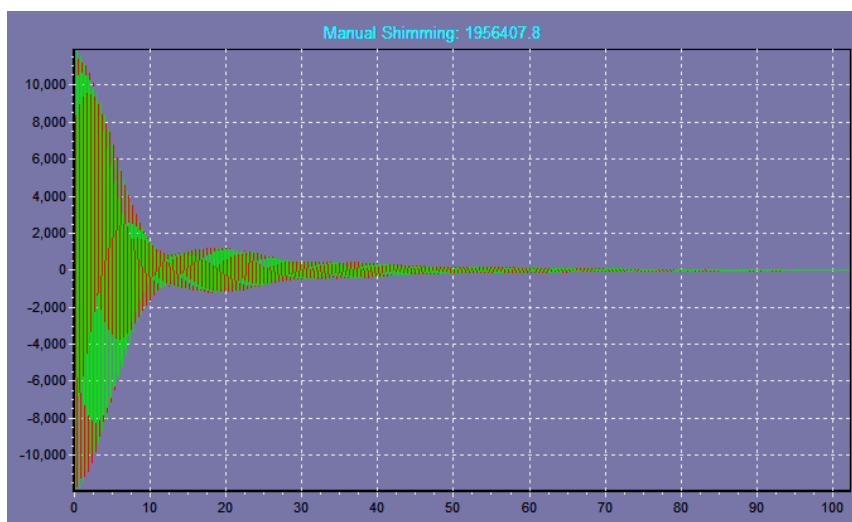


图 19 磁场不均匀时的 FID 信号

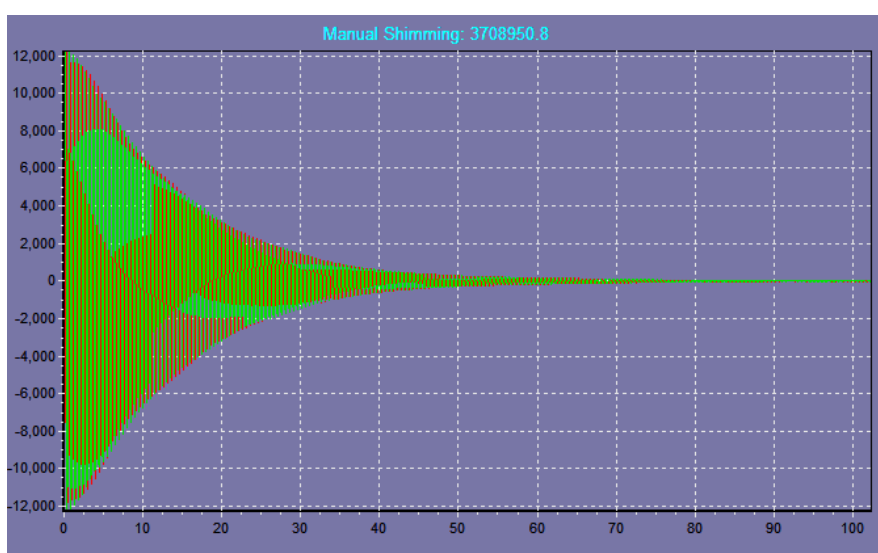


图 20 磁场均匀时的 FID 信号

图 19 中是磁场不均匀的情况，幅值的曲线不是呈指数衰减的形式；图 20 中是磁场均匀的情况，FID 信号呈指数衰减。若磁场不均匀，可手动修改 Gxoffset、Gyoffset、Gzoffset 调节（调节步长为 10，范围在原有数值基础上 ± 100 ）。也可以通过观察 Manual Shimming 是否达到最大值，来判断匀场情况。记录调好的 Gxoffset、Gyoffset、Gzoffset 值。按“STOP”键停止电子匀场。

5. 最后单击 （参数界面中的第四个按钮）。等待扫描结束，软件自动停止。

这一步是调节**软脉冲**的 90° 脉冲和 180° 脉冲的值。软脉冲调节的是信号的幅值（而前面硬脉冲调节的是脉冲宽度）；注意这里的三个参数 StartRFamp(%) 设为 0；EndRFamp(%) 设为 3；RFamp Increment(%) 设为 0.1。扫描结束得到图 21（与前面硬脉冲的一样），找出图中峰值和峰谷的位置（即 90° 脉冲和 180° 脉冲的值）。

6. 记录实验结果和波形示意图.

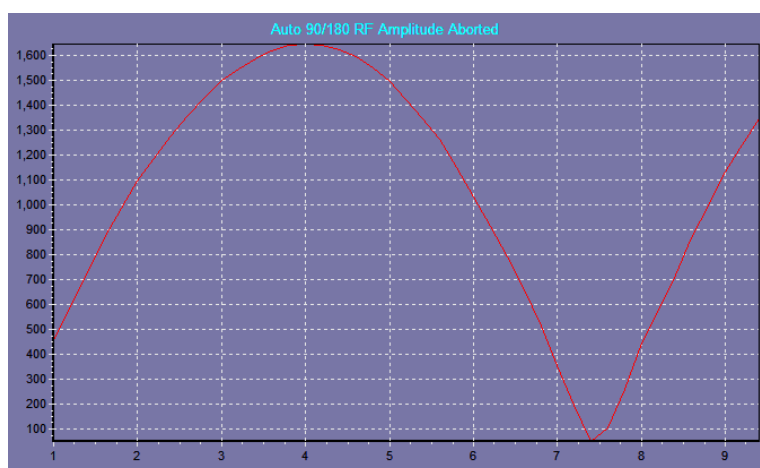


图 21 寻找软脉冲的 90°脉冲和 180°脉冲的信号显示

分析软件使用的脉冲都是硬脉冲，而成像软件使用的脉冲绝大部分都是软脉冲。硬脉冲即矩形脉冲，它的特点是激发能量大，激发的频带宽，可以使整个样品受到脉冲激发；软脉冲通常指 sinc 波脉冲，它的特点是激发能量小，激发的频带窄，只能激发样品一定厚度的某个层面。在使用硬脉冲时，通常固定其脉冲幅度，改变脉冲的脉宽来调整所需要的激发能量(倾角)；在使用软脉冲时，通常固定其脉宽，改变脉冲的幅度来调整所需要的激发能量(倾角)。例如，在自旋回波序列中，其软脉冲序列由 90°软脉冲和 180°软脉冲组成，通常设置 P1 和 P2 同时为 3200 微秒，而通过参数 RFA1 和 RFA2 来调整所需要的 90°和 180°软脉冲的射频能量。

2.1.2 扫描大豆油样品图像

以下按照成像的三个基本步骤1-PRESCAN；2-SCOUT；3-SCAN开始成像。

1. 单击左侧“1-Prescan”按钮，软件自动调节中心频率、电子匀场及寻找软脉冲幅度；

在表1中记录预扫描得到的数据。与前面一步记录的值比较，数值大小一样吗？在这一步中它们是如何测出来的？

2. 单击“2-Scout”按钮，软件开始预扫描。等待结束。

这一步是定位扫描，用较短的脉冲序列重复时间和较小的矩阵等小参数快速得到图像。扫描结束后会在定位像显示区出现图22所示的定位扫描图像（这一步扫描的重复时间TR（TW）一般为200 ms）。

表 1 PRESCAN 数据

SFO1(MHz)	°
Gx offset	°
Gy offset	°
Gz offset	°
RFA90(%)	°
RFA180(%)	°

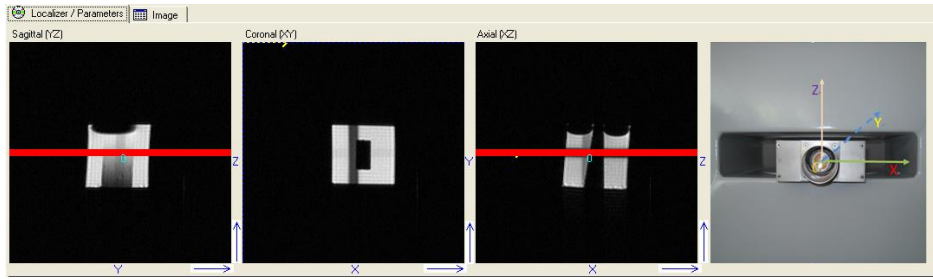


图 22 预扫描后定位像

3. 根据定位扫描图像，确定所要扫的层面及层面参数。设好参数后，单击“3-Scan”按钮，正式扫描。在“图像参数模块”中确定图像参数。如表2所示。

参数有：成像截面（Sagittal YZ, Coronal XY, Axial XZ）、层面个数（1~5层）、层面厚度（0.5~5 mm）及层面间距（0.5~5 mm）、视野大小、位置Offset Slice等参数。

表2 LOCALIZER参数设置

FOV Read(mm)	60
FOV Phase(mm)	60
Slices	4
Slice Width(mm)	2.8
Slice Gap(mm)	1.6

4. 按钮EXPORT IMAGE..., 输出并储存图像。储存在D盘自己的文件夹中。

5. 在表3中记录扫描序列数据。通过图23查到扫描带宽 Sweep Width(SW)参数的值。

表3 Sequence扫描参数数据

Averages	
TR(ms)	
TE(ms)	
Read Size	
Phase Size	
Sweep Width(SW)	

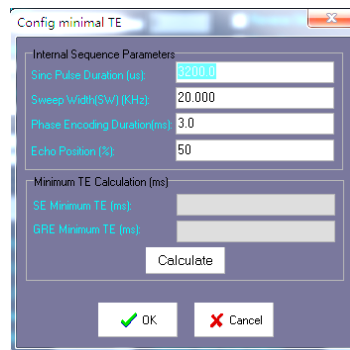


图 23 回波序列的相关参数值

6. 改变层厚Slice Width（0.5-5 mm），保持其他参量不变，重新按“3-Scan”成像。

（观察图像亮度是否有变化，并思考变化的原因）

7. 观察FOV等其他参数对图像形状的影响（选做）。比如改变FOV为30×30，观察图像大小的改变；

8. 记录实验参数和结果，给出图像的示意图。

2.2 芝麻样品的 MRI 成像

1. 放入芝麻样品；

2. 从第二步骤开始成像。“2-SCOUT”；“3-SCAN”，完成成像；

3. 参考表4给出的参数值选择做一个成像截面的图像. 推荐在3×3的窗口下观察图像；

改变选层厚度 Slice Width (0.5-5 mm) 为适当的值, 保持其他参数不变成像. 观察图像分辨率的变化, 说明层面厚度对分辨率的影响及原因；

4. 改变相位编码大小 Phase Size 为 64 或 128, 保持其他参数不变成像. 观察图像的变化, 说明相位编码大小对分辨率的影响及原因 (选做)。

表 4 芝麻图像参数

Slices	2
Slices Width(mm)	3.2
TR(ms)	400/500
Read Size	256
Phase Size	256/192
Averages	4

实验观察 (选做):

三个放大参数的作用可以很容易的观察到. 选择 Q-FID, 调出 2 kHz 的 FID 信号, 分别改变 RG1, DRG1, PRG, 观察信号的变化.

附录: 参数的作用和意义

1. 增益 RG1(receiver gain), 数字增益 DRG1(digital receiver gain), 前置放大 PRG(pre-receiver gain)和射频延时 RFD(RF delay)

探测器接收的 NMR 的信号非常的小, 感应电压只有几微伏, 一般很难观察到, 所以我们需要通过各种增益来放大信号. RG1, DRG1 和 PRG 是不同阶段的放大参数. RG1 是模拟增益, RG1 的增益范围为[-3, 40](实数). RG1 的放大倍数是: $A = 10^{\frac{RG1}{20}}$, 其中 A 是放大倍数. DRG1 是数字信号增益, DRG1 的增益范围为[0, 7] (整数). 如果经过模拟放大后的信号为 S, 我们在显示器上看到的信号强度为 I, 那么它们之间的关系是: $I = 2^{DRG1-3}S$. 如果 RG1 太大, 信号就会失真; 如果 DRG1 太大, 信号强度会超出范围, 信号强度的范围为-65535 到+65535. PRG 是前置放大器增益, PRG 的增益范围为[0, 3].

RFD 是射频延时(0.002-0.5 范围内). RFD 是通过延迟 90°脉冲的施加时间来控制第一个采样点的采样时间的, 它的作用是去除所采集到的信号中射频脉冲信号的影响; 并使 FID 信

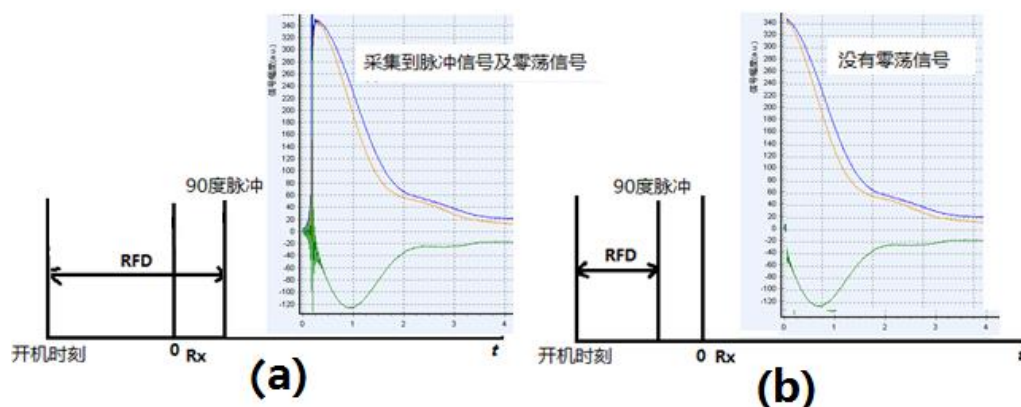


图 F-1 RFD 射频延时定义示意图

号与接收机同步. 它的时间作用顺序如图 F-1 所示. 开机时刻为打开采集信号的开关(按钮), 经过一段固定时间(接收机的死时间)后, 接收机 Rx 从零点“0”开始接收信号. 图 F-1 (a) 是 RFD 大于接收机的死时间, 则所接收到的信号有脉冲信号的影响, 叫做零荡信号. 图 8 (b) 是 RFD 小于接收机的死时间, 则所接收到的信号没有 RF 射频脉冲信号的影响了(但 RFD 也不能太小, 否则采集到的信号起点就已经衰减了. 同步最好.);

2. TD, SW 和 NS 及 TW

信号采样点数 TD, TD 是脉冲序列的采样点数, 尽可能的将 TD 设为以 2 为底的幂函数, 例如: 256, 512, 1024 等.

接收机带宽 SW, SW 是信号采样时, 接收机接收的信号频率范围, 俗称接收机带宽, 是以中心频率为中心的. 假设中心频率为 a, SW 为 b, 则接收机接收信号的频率范围是[a-0.5b, a+0.5b]. 此外, SW 还是信号的采样频率, 在非过采样条件下, 如果 SW 为 100 KHz, 那么仪器将每隔 10 微秒采集一次信号. 值得注意的是, 在大多数实验中, 最好 SW 不要小于 100 KHz, 如果 SW 太小则有可能丢掉部分该样品中的有效信号. 在设置该参数时, 请根据样品实际衰减的快慢来调节 SW 值. 通常情况下, 设置 SW 为 100 KHz. 如果发现信号弛豫速度很快(比如: 固体样品), 则应该增大 SW 为 200 KHz.

重复采样次数 NS, NS 是仪器进行重复采样的采样次数, 每次的采样过程都是独立的, 通常情况下, 重复采样次数应该不少于 4 次. NS 越大, 则采样信号的信噪比会越高 ($SNR \propto \sqrt{NS}$), 当然需要进行采样的时间也会越长. NS 的大小应该根据样品信号本身的强弱来做出判断.

等待时间 TW (Time of Wait), 也叫**脉冲序列重复时间 (TR) (Time of Repeat)**, 加入射频脉冲的时候, 样品中的 ^1H 核吸收能量; 当射频脉冲撤销的时候, 样品中的 ^1H 核释放能量. 需要等待一段时间, 样品才能恢复到原始状态. TW 是重复采样等待时间, 具体的说是前一次采样结束到后一次采样开始的这段时间. 不同的样品等待的时间是不同的, 这是和他们释放能量的速度相关(纵向弛豫时间 T_1). 当然我们可以设置一个很长的时间, 这样可以适应于任何样品, 但是这会浪费很长的时间. 所以设置一个恰当的时间可以提高工作效率. TW 的值一般大于 5 倍的 T_1 .

物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）

<http://phylab.fudan.edu.cn>