

核磁共振自旋回波成像技术的参数选择

摘要：本文主要讨论了核磁共振回波成像技术中物理参数的意义，以及结合纽迈核磁共振仪所提供的软件，整理各参数对图像的影响，并提出一个实用有效的实验流程设计。

关键词：核磁共振、成像、参数选择

一、引言

纽迈核磁共振实验仪是一套高度封装的实验设备，除了面板上的几个旋钮之外，其他实验参数均通过配套软件设置。高度的封装性易使学生忽略参数的物理意义，从物理实验退化成简单的操作实验。软件中的参数部分为物理参数，另一部分是采样参数，参数的调节对图像产生各种影响的原因各有不同。所以我的工作是对软件中各参数及其与成像的关系进行归纳整理，并提出一个实用有效的实验流程设计，希望能对将来使用到这套设备的同学提供一些参考。

二、实验原理

1. 核磁共振基本原理

A. 拉莫尔旋进：

将一个具有磁矩 μ 的粒子放在恒定磁场 B (μ 、 B 夹角为 θ) 中，它受到力矩 L 的作用，磁矩 μ 会绕磁场 B 旋进。旋进角速度 $\omega = \gamma B$ 。

B. 磁共振条件：

在与横磁场 B 相垂直的 xy 平面内加一弱的旋转频率为 ω_1 的旋转磁场 B_1 ($B_1 \ll B$)，那么磁矩 μ 在以角频率 ω 绕 z 轴旋进的同时，还受到 B_1 的作用而绕 B_1 方向旋进。从旋转坐标系看，其旋进频率 $\omega = \gamma B_1$ ，此旋进使 μ 与 B 之间夹角发生变化。根据磁位能公式 $U = -\mu B \cos\theta$ ，夹角 θ 增加使位能增加。磁矩通过与其周围环境物质的能量交换，释放所吸收的能量，使夹角减小，从而再吸收 B_1 的电磁能量，这样不断持续，就是磁共振显现。磁共振条件就是 $\omega = \omega_1$ 。

C. 自由感应衰减 (FID) 信号

在 xy 平面内的 x 方向加上脉冲射频场 B_1 ，角频率为 ω ，满足磁共振条件，则磁化矢量 M 只能在脉冲场存在时间 t 内远离 z 轴并转过一定角度 $\theta = \gamma B_1 t$ 。当脉冲宽度 t 恰好使 $\theta = 90^\circ$ 或 180° 时，则称该脉冲为 90° 或 180° 脉冲。

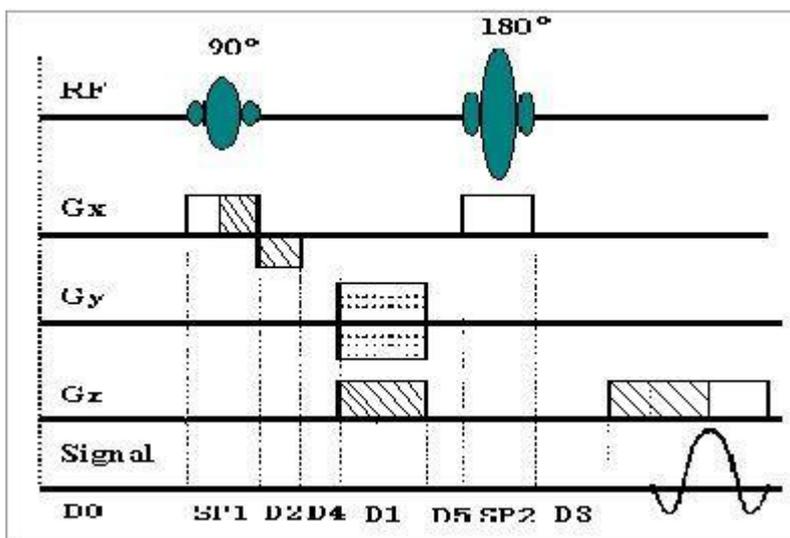
我们若在 y 轴方向安置一个接收线圈，因 90° 脉冲使 M 在 y 轴上最大，即有感应信号产生，其频率与进动频率相同，而震荡幅度的包络线是频率与进动频率相同的指数衰减信号，称为自由感应信号。

D. 自旋回波信号

旋转坐标 $x'y'z'$ 中，在 x' 方向加 90° 脉冲， M 倒在 y' 轴上，脉冲过后， M 在实验室坐标系上绕 z (z') 轴作自由进动。实际各部分有不同的进动频率，将导致 M 总磁化矢量在 $x'y'$ 平面上散开，经过一段时间形成扇形分布。此时在 x' 轴再加 180° 脉冲，所有磁矩以 x' 为轴翻转 180° ，扇形翻转到 $-y'$ 轴附近，但旋转方向不变，经过 T 时间后所有磁矩又集中起来落在 $-y'$ 轴上，从而接收线圈中感应出自旋回波信号。

2. 自旋回波成像实验原理

A. 成像脉冲序列图



B. 选层梯度 G_x

在射频脉冲作用时才开启。具有特定频率的射频脉冲只使体内某一层面内氢质子产生磁共振。

C. 频率编码梯度 G_z

在接收信号期间开启。在层面上沿 x 方向施加一线性梯度场，使各列体素的磁共振信号频率也发生变化。

D. 相位编码梯度 G_y

在频率编码梯度施加前任意时刻施加。在层面上沿 y 轴以不同强度反复 NE 次施加。

同一行体素处于相同磁场中，所以同一行中所有体素中质子进动速率相同，一段时间后造成各行间相位差，关闭后相位差仍保留下来。所以用相位差作为标记，区别 y 轴方向上的不同行。

多个 MR 信号可解决二维傅里叶变换 (2DFFT) 复杂的平衡问题。较强的信号突出相邻两结构间差异，显示细节；较弱的则突出图像的整体对比。

三、 实验软件中参数意义

1. 参数列表

参数	含义	物理参数/采样参数	对图像的影响
RFamp1 (%) RFamp2 (%)	分别为 90° 和 180° 软脉冲幅度	物	若幅值不准确，将使信号强度降低
SP1 (μs) SP2 (μs)	分别为 90° 和 180° 软脉冲宽度，实验中基本不需要调节， $SP1=SP2$	物	
D1 (μs)	相位编码时间；在此时间内施加的是相位	物	

	编码梯度与频率编码梯度的复相位磁场		
D2 (μs)	选层梯度的负梯度时间，D2 约为 SP1 的一半，起复相位作用	物	
D3 (μs)	谱仪的“死时间”，一般设为 100ms，射频信号结束到采集信号开始之间的时间	物	
D4 (μs) D5 (μs)	回波时间 TE，180° 脉冲结束后产生回波峰值的时间，与横向弛豫时间 T ₂ 加权有关	物	信号强度： $S_{se}(T_E, T_R) = AN(H)e^{-T_E/T_2}(1 - e^{-T_R/T_1})$
D0 (ms)	重复时间 TR，与纵向弛豫时间 T ₁ 加权有关	物	
TD	采样点数；FFT 图像横向列数	采	回波图像横坐标宽度：采样时间 = TD/SW
SW (KHz)	谱宽；FFT 图横坐标宽度	采	
DFW (KHz)	数字滤波器的截止频率；此参数数值不应大于 SW	采	图像中出现噪点区域的宽度
SF1 (MHz)	射频信号的频率主值	物	
O1 (KHz)	射频信号的频率偏移量；射频信号的频率 F1 = SF1 + O1	物	
RG	4 档增益调节；也可通过仪器面板上的增益调节旋钮进行增益调节；由于 AD 卡信号限制，应将最大值控制在量程的 70% 左右	采	调节图像信号强度
NS	累加次数；n 次累加后，信噪比为 \sqrt{n} 倍	采	减少噪点
NE1	相位编码步数	采	图像 y 轴方向行数，行数与相位编码梯度的强度无关
GxAmp (%) GyAmp (%) GzAmp (%)	前述各梯度幅度；以实验室坐标系 (y 为向上) 规定的 xyz，并不与序列图一致	物	层厚 $\Delta Z = \Delta f / \gamma G_z$ ； 相位编码梯度和频率编码梯度影响图像与实物的纵横比例

SlicePos (mm)	选片位置 (-5mm~ +5mm)	物	
DS	过采样倍数, 实际采样频率= $SW \times DS$, 实际采样点数= $TD \times DS$; 必须满足采样定理——抽取数据的频率必须不小于信号最高频率的两倍	采	
SLICE	选层方向; 0-x 1-y 2-z	采	选层方向对应方向为选层梯度

2. 优化图像的参数选择

参数对图像的影响主要体现在信号强度、FOV 大小、分辨率三个方面, 同时避免可能出现的伪影。

A. 信号强度及对比度

- 较准确地确定 90° 和 180° 软脉冲大小。
- 设置增益大小 RG , 使样品亮度在较合适的范围。采集过程中观察回波信号的变化, 注意不能过大超出 AD 卡的量程。
- 增加累加次数 NS , 提高信噪比。但要注意 NS 与成像所需时间成正比, 应考虑时间成本。
- 利用 T_1 、 T_2 加权, 根据被测样品的性质设置合适的回波时间与重复时间。
- 选层梯度 (与选层方向对应) 应设较大值, 使选取层厚较薄。注意关注仪器面板上的小灯, 如果小灯跳动说明超出额定值, 应立即停止实验, 改为较小值, 以防烧坏仪器。

B. Field of View——FOV

$$(FOV)_x = SW / (\gamma G_x); (FOV)_y = NE / (2D1 \times \gamma G_y)$$

当 FOV 越大时, 样品在图像中越小。

理论上 $SW / (\gamma G_x) = NE / (2D1 \times \gamma G_y)$ 时, 图像形状不失真, 但由于实际仪器线圈并不完全相同, 所以需要进一步调节。

C. 单个像素反映组织体素的大小——分辨率

$$P_x = SW / (\gamma G_x \times TD); P_y = 1 / (2D1 \times \gamma G_y)$$

P 值越小, 则表示空间分辨率越高, 图像的细节越清晰。

软件默认值为 512×512 , 但实际横坐标尺度应为 TD, 纵坐标为 NE。

D. 伪影消除

- 当出现卷褶伪影, 通过增大 FOV 消除。
- 当出现截断伪影, 通过增大采样时间 (TD/SW) 消除横向伪影, 增大相位编码时间 D1 消除纵向截断伪影

四、实验流程小结

1. 匀场调节

2. 确定拉莫尔频率——SF1 (MHz)、O1 (KHz)

3. 确定 90° 和 180° 软脉冲大小——RFamp1 (%), RFamp2 (%)

由于仪器本身的误差较大, 基本确定在 1% 左右的精度就已足够。同时需要注意的是, 与硬脉冲不同, 软脉冲 (sinc 信号) 的 90° 和 180° 幅值不是 2 倍关系。

4. 自旋回波成像

采用较小的累加次数 NS ，其余设置可按照默认参数，快速采集一幅圆截面图像。

采集过程中观察回波信号幅值(特别是扫到中间时刻附近)，优化增益值设置。关注仪器面板小灯，确认设置的梯度值不超过仪器额定值。

5. 调节参数优化图像形状、分辨率

推荐的步骤为：

i. 调节形状

先固定其他参数，根据图像纵横比的变形，更改相位编码及频率编码的梯度值的比值。经过一次成像后，得到形状不失真的图像，由公式 $[SW/(\gamma G_x)]/[NE/(2D1 \times \gamma G_y)]$ 可大致确定系统误差造成的比值。

ii. 改善 FOV 及分辨率

在保持上述比值不变的条件下，通过综合调节参数，提高横向及纵向分辨率，使样品图像既大又精细。经过成像后若有伪影则须进一步调节。

6. T_1 或 T_2 加权

根据样品性质，确定某种加权方式，突出被测样品。

五、 结语

核磁共振成像技术的图像质量与多个参数相关。本文从成像原理的梳理开始，讨论物理参数的意义；然后对于所有参数进行整理、分类；对于成像质量评价的几方面分别讨论；最后总结出一个较为实用有效的实验流程。希望借此文为将来做此实验的同学提供一些参考，即使实验设备是高度封装的，我们对于其中各参数的意义也必须明确，这样才能为借助仪器进一步设计实验奠定扎实的基础。