

# 重复时间对核磁共振加权成像的影响

金明洲

(复旦大学 光科学与工程系 上海 200433)

## 摘要:

本文简要介绍了自旋回波核磁共振成像的基本原理与方法,并用实验分析了所有可调参数中重复时间 TR 对于 T1、T2 加权成像的影响。

**关键词:** 自由感应衰减, 弛豫, T1、T2 加权

## The Effect of Repetition Time in Magnetic Resonance Weighted Image

JIN Mingzhou

(Dept. of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai, 200433)

**Abstract:** This article briefly describes the fundamental principle and methods of Spin-Echo Magnetic Resonance Image and mainly analyzes the effect of repetition time (TR) in Magnetic Resonance Weighted Image among the tunable parameters experimentally.

**Key words:** Free Induction Decay, Relaxation, T1-weighted, T2-weighted

**引言:** 自 20 世纪四十年代以来,核磁共振成像技术 (Nuclear Magnetic Resonance Imaging, MRI) 因其可以获得样品内部水、油分布的信息而无损于样品的优点,越来越广泛地应用于生物、医疗、勘探、食品等行业。T1、T2 加权成像直接影响水和油对比度,对于判断样品中水和油的含量有重要意义。

## 1 实验原理:

### 1.1 核磁共振与自由感应衰减

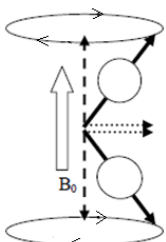


图 1<sup>[1]</sup> 原子核的塞曼分裂

由量子力学理论,核自旋  $I=1/2$  的原子核 (如  $^1\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}$ ) 在恒磁场  $B_0$  中只有 2 种取向,对应  $I = \pm 1/2$ 。两种取向的核磁矩都与磁场作用形成磁力矩,驱动磁矩绕磁场旋转,称为 Larmor 进动。Larmor 进动的频率  $\omega_0$  与  $B_0$  的关系为  $\omega_0 = \gamma B_0$  (1), 式中  $\gamma$  为回磁比。平衡状态时大量核磁矩以相同的频率、无序的相位绕  $B_0$  旋转,形成上下两个均匀锥面。

核磁矩的两种取向之间有一能量差  $\Delta E = \gamma \hbar B_0 = \hbar \omega_0$ , 且上锥面的核磁矩能量较低,所以上锥面核磁矩数目较多。由此,这些核磁矩的总和——宏观磁化矢量  $M$ , 方向向上,与  $B_0$  同向。

如果在垂直  $B_0$  的方向上加一个频率  $\omega$  非常接近于  $\omega_0$  的射频场  $B_1$ , 那么上锥面的核磁矩就有很大的几率会吸收射频场的能量并跃迁到下锥面上,这就是磁共振;宏观上的体现即总磁化矢量  $M$  的角度发生偏转,偏转的角度由脉冲的幅度和时长控制,实验中常用的是 90 度和 180 度脉冲。

射频脉冲结束后,  $M$  经过弛豫会回到平衡位置 (如图 2 所示), 称为自由感应衰减 (Free Induction Decay)。将  $M$  分解为纵向分量  $M_z$  和横向分量  $M_{xy}$ ,  $M_z$  显示了分布在上下锥面核磁矩的数量差,纵向弛豫就是  $M_z$  变大的过程;而  $M_{xy}$  显示了磁矩相位的一致性,横向弛豫就是磁矩相位散开的过程。Bloch 方程指出了宏观磁化矢量  $M$  的纵向分量  $M_z$  和横向分量  $M_{xy}$  分量都是以  $e$  指数衰减的方式弛豫的:

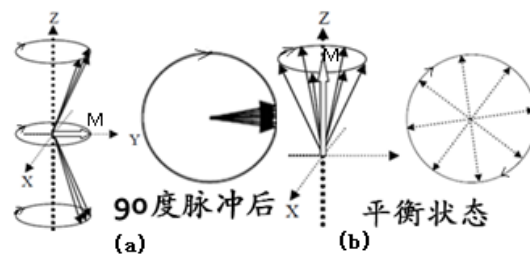


图 2 90 度脉冲后和平衡状态的磁矩方向和相位分布

$$M_z = M_0(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}); \quad M_{xy} = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (2)$$

式 (2) 中,  $M_0$  是磁化矢量的初始值;  $T_1$  为纵向弛豫时间;  $T_2$  为横向弛豫时间。通常  $T_1 > T_2$ 。

### 1.2 自旋回波核磁共振成像原理

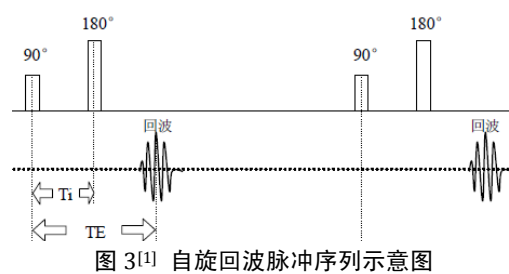
实验中探测的是  $M_{xy}$  的大小。由式 (1) 可得, 同种原子核的 Larmor 进动频率  $\omega_0$  正比于它所受的磁场, 这一性质起到了关键作用。

实验磁场通常不均匀。90 度脉冲使磁矩相位聚集 (如图 2(a)), 但是原子核进动频率有快有慢, 很快相位就分散了, 使合矢量  $M_{xy}$  变小; 这时再加上一个 180 度脉冲将所有磁矩反向, 原本相位领先的磁矩就落到了后面, 再过一段时间, 频率快的磁矩又追上频率慢的磁矩, 相位重新聚集在了一起,  $M_{xy}$  又出现一个峰值。这就是自旋回波。

如果人为在样品上加一个磁场梯度, 使空间每一点对应一个不同的进动频率, 那就能通过改变射频场的频率采集空间不同位置的信息, 再对这些信息进行傅立叶变换和分析组合, 就能得到空间的图像。这就是核磁共振成像的原理。

### 1.3 加权成像

自旋回波序列中, 90 度脉冲中点到回波中点的时间称为回波时间 TE (Echo Time), 而 90 度脉冲到下一次自旋回波脉冲序列的 90 度脉冲之间的时间称为重复时间 TR (Repetition Time), 如图 3 所示。



自旋回波核磁共振成像的像元素强度有以下公式<sup>[2]</sup>:

$$SI(TR, TE) = N(H) \times [1 - 2e^{-\frac{TR-TE}{T_1}} + e^{-\frac{TR}{TE}}] \times e^{-\frac{TE}{T_2}} \quad (3)$$

式 (3) 中,  $K$  为常系数,  $N(H)$  为质子密度,  $T_1$ 、 $T_2$  即纵向和横向弛豫时间。从中可以看出,  $TR \gg T_1$  且  $TE \ll T_2$  时, 像的强度只与质子数密度成正比; 改变 TE、TR 的大小, 就能选择性地体现出  $T_1$  或者  $T_2$  的反差, 即  $T_1$ 、 $T_2$  加权成像。

## 2 实验结果与分析:

### 2.1 玉米油与水的核磁共振成像

实验使用上海纽迈 (Niumag) 电子科技有限公司生产的 NMI-20Analyst 脉冲核磁共振成像分析仪。在试管中装入少量玉米油和水 (图 4 上), 固定 TE 不变, 只改变 TR 的值, 分别等于 100ms、500ms、1000ms、2000ms, 得到的核磁共振成像图显示, 油的亮度几乎不变而水的亮度越来越高 (表 1)。

TR/ms	油亮度 (RGB) /%	水亮度 (RGB) /%
100	60.2	6.0
500	56.0	8.2
1000	56.8	14.4
2000	56.2	24.0

表 1 玉米油与水 MRI 图像亮度随 TR 的变化

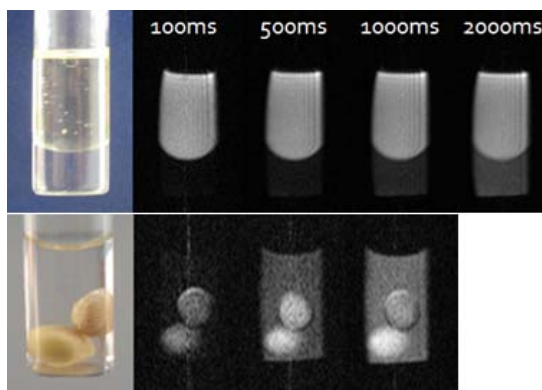


图 4 玉米油与水的实物图与 MRI 图像 (上); 黄豆与水的实物图与 MRI 图像 (下)

### 2.2 黄豆与水的核磁共振成像

对在室温下分别浸泡了 3.5 小时 (下方黄豆) 和 1 小时的黄豆 (上方黄豆) 进行核磁共振成像, 其他参数设置与测定玉米油和水时相同。改变 TR 的值为 100ms、500ms、1000ms。观察到  $TR=100ms$  时, 水的亮度很低, 而且两黄豆的亮度相当;  $TR=500ms$  时, 水与黄豆的亮度都提高, 但是水的亮度提高得更快。并且, 下方黄豆的亮度明显比上方黄豆高;  $TR=1000ms$ , 下方黄豆最亮, 水和上方黄豆的亮度相当, 与  $TR=100ms$  的图像相比变化很大。

### 2.3 实验结果分析

实验中控制了质子数密度和TE的改变，由式（3）可知，造成水、油、黄豆亮度变化的只有TR。得实验中TE约为4ms\*。由表2\*\*得知，TE与三种物质的T1、TR相比都很小，所以式（3）可以近似简化为：

$$SI(TR, TE) = K \times N(H) \times [1 - 2e^{-\frac{TR}{T1}}] \quad (4)$$

从式（4）中可以明显看出，TE很小时，TR的长度与T1在成像中所占的权重是相关的。大致作出信号强度SI关于TR的图（图5）。图中粗实线代表弛豫时间T1较长的水，细线代表弛豫时间较短的油和黄豆。当TR取值很大时，两者的 $e^{-TR/T1}$ 都趋于0，SI与质子密度N(H)成正比；当TR继续减小，T1较小的油和黄豆 $e^{-TR/T1}$ 项增大得比较慢，由式（4）可知信号强度衰减得慢，而相反T1较大的水信号强度衰减就较快，所以T1小的时候，油和黄豆的亮度高而水的亮度低。

物质	T1/ms	T2/ms
水	2392.9	1591.30
油	166.5	69.31
黄豆	117.3	58.86

表2 三种物质的T1、T2值

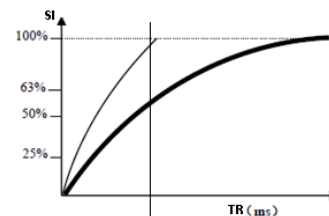


图5<sup>[1]</sup> SI~TR关系的示意图

同样，浸泡时间更长的黄豆吸收了更多的水。如图4（下），在TR较小时，这部分水没有在成像图上起到更大的作用，但是随着TR增长，水的亮度提高，使含水更多的黄豆的像亮度明显提高。这个现象也说明了吸水的黄豆质子密度N(H)会明显增大。

由图5可见，TR越短，短T1和长T1的物质信号强度比越大，相当于增加了T1的权重，也就是T1加权成像。

相应的，我们可以推测，如果TR很大，那么式（4）可以简化为：

$$SI(TR, TE) = N(H) \times e^{-\frac{TE}{T2}} \quad (5)$$

TE的长度影响T2在成像中所占的比重。如果TE越大，那么长T2和短T2的物质信号比就越大，但此时是T2长的物质信号强度越大，这也就是T2加权成像。

所以，在同时含有水和油的样品中，如果需要加强油脂部分的成像亮度时，可以选择T1加权成像，设置很短的TE和较短的TR；当需要加强水部分的成像亮度时，可以选择T2加权成像，设置一个较长的TE和很长TR。

### 3 结论

在TE很短的情况下，TR控制T1在成像中的权重：则TR越小，T1短的物质（如油脂）亮度越高，T1长的物质（如水）亮度越低。在TR很长的情况下，TE控制T2在成像中的权重：TE越长，T2长的物质亮度越高，T2短的物质亮度越低。

### 4 实验讨论

T1、T2加权成像的根本原理仍然是宏观磁化矢量的弛豫差异。水分子分子小，液态水分子化学键少，分子间间距较大，所以依靠自旋-晶格和自旋-自旋作用分散能量的能力较弱，所以弛豫时间较长；相对的，油脂分子较大，化学键多，且分子间作用力比水分子强，分散能量的能力较强，所以弛豫时间较短。

如果要将本实验从定性上升到定量的阶段，还需要解决一些细节问题：在测量黄豆这样有一定空间大小的样品时，成像切片在每个黄豆上的位置不一定完全相同，这就会造成不真实的明暗对比；需要知道像的亮度和信号强度SI的对应关系，只有在线性对应的情况下才能直接将像的亮度作为信号强度；需要知道成像两种物质的质子密度。解决以上问题，我们就能改变TE、TR，对物质进行加权成像，以确定物质在不同样品不同位置的相对含量。相比于普通的测定T1、T2时间来标定样品的方法，这种方

\* TE由软脉冲自旋回波成像脉冲序列各编码时间和死时间相加而得

\*\*表2中数据由作者用NMI-20脉冲核磁共振成像分析仪测得，其中T2由硬脉冲CPMG回波序列测得，T1由反转恢复序列测得。

法还具有能空间定位的优点。

T1、T2 加权成像，具有广泛的应用。估计组织中油脂和水的含量这是医学上判断人体内组织是否发生病变的重要手段，比如癌变的细胞含水量就比正常细胞高很多，通过 T1、T2 加权成像，加强水的成像亮度就能判断组织是否发生癌变。并且这种方法比起其他化学方法而言无毒、速度快、无损人体健康，也可以应用在生物、食品、地质勘探等多个方面，具有深远的意义。

## 5 致谢

与卢宇婷通力合作确保了实验的成功；俞熹老师给予原理和技术上的有力指导，在解答困惑的同时也提出更进一步的问题，促进我们思考。

## 6 参考资料：

- [1]MRI 常规技术和新技术[OL] 临床智库医学网站  
<http://ziyuan.cicaline.com/ebook/view.aspx?idx=8798e1e9-5728-4f70-8168-cec4c30e95e8>
- [2]林向阳 磁共振加权成像技术研究食品的结构特性[J] 食品研究与开发 2006.Vol.27.No.8
- [3]汪红志 核磁共振成像技术实验教程[M] 科学出版社 2008
- [4]复旦大学物理实验中心 “近代物理实验” 补充教材
- [5]戴道宣 近代物理实验（第二版）[M] 高等教育出版社 2006
- [6]磁共振成像的原理（二）[OL] 百度文库 <http://wenku.baidu.com/view/fd0c640c844769eae009ede5.html>