

核磁共振成像原理及成像质量的简单探讨

杜南

复旦大学物理学系, 上海, 200433

摘要: 核磁共振成像技术是一种革命性的医疗诊断工具。其主要是应用不同质子在外加磁场下施加电磁脉冲使其产生核磁共振信号, 通过适当的测量手段和技术处理, 得到物体内部的影像。本文主要是从原理及实验上对成像过程效果进行分析, 并联系当前的医学实践探讨了其实际应用。

关键词: 核磁共振成像, 医学, 纵向弛豫时间, 横向弛豫时间, 图像对比度, 自旋回波序列

引言

核磁共振成像技术, 英文 Magnetic resonance imaging (MRI) 是利用核磁共振 (nuclear magnetic resonance, 简称 NMR) 原理, 依据所释放的能量在物质内部不同结构环境中不同的衰减, 通过外加梯度磁场检测所发射出的电磁波, 即可得知构成这一物体原子核的位置和种类, 据此可以绘制成物体内部的结构图像的一种技术。随着快速成像技术的发展, 核磁共振成像技术在医学等相关领域的应用越来越广, 特别是在神经, 肌肉与骨骼, 心脏, 癌症成像方面有着至关重要的作用。

我们利用实验室提供的教学用核磁共振成像仪, 对核磁共振及成像的基本原理, 成像的过程及应用, 结合现有的医学资料进行了探讨。

基本原理

原子核携带电荷, 当原子核自旋时, 会由自旋产生一个磁矩, 这一磁矩的方向与原子核的自旋方向相同, 大小与原子核的自旋角动量成正比。将原子核置于外加磁场中, 若原子核磁矩与外加磁场方向不同, 则原子核磁矩会绕外磁场方向旋转, 称为拉莫尔进动。

根据量子力学的原理, 当原子核在外加磁场中接受其他来源的能量输入后, 就会发生能级跃迁, 也就是原子核磁矩与外加磁场的夹角会发生变化。为了让原子核自旋的进动发生能级跃迁, 需要为原子核提供跃迁所需要的能量, 这一能量通常是通过外加射频场来提供的。只有当外加射频场的频率与原子核的拉莫尔进动的频率相同的时候, 射频场的

能量才能够被原子核吸收。因此某种特定的原子核, 在给定的外加磁场中, 只吸收某一特定频率射频场提供的能量, 这样就形成了一个核磁共振信号。

而当涉及到成像, 则还学要对质子的位置进行标定。在成像时我们采用的是额外再添加一个很弱的梯度磁场。添加梯度磁场后, 各个位置的质子的频率和相位就发生了变化。扫描后我们可以根据频率和相位确定它的位置。

在上述测量时, 我们得到的都是时域信号, 但是最终我们为了分析需要得到的是频域信号。对二维图像, 我们就需要进行二维傅里叶变换, 变换后就得到了质子密度的图像。

成像实践

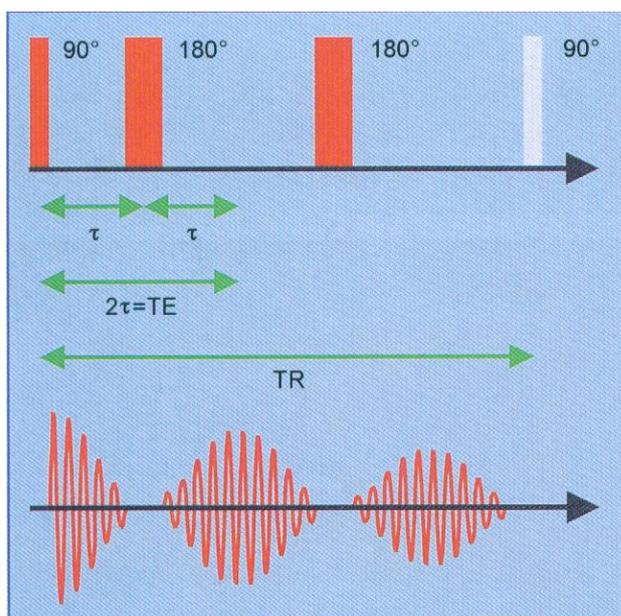


图 1 自旋回波脉冲序列示意图。摘自《医学磁共振》,

Peter A. Rinck。

在实际成像中, 我们采用的是自旋回波成像法。

自旋回波是对所有质子先施加一个 90° 脉冲，这时质子吸收脉冲，自选方向为水平面，但是由于此时质子的频率等属性并不完全一致，所以实际上不同质子的相位是不同的，此时测量，测到的衰减信号并不是真正的自由弛豫衰减信号，而是由于组织内部磁场不均匀造成的衰减，此衰减速度很快，所以很难测量。为了便于测量，我们再施加一个 180° 脉冲，这样所有的信号又会重新获得相同相位，这时测得的信号是真正的弛豫信号。

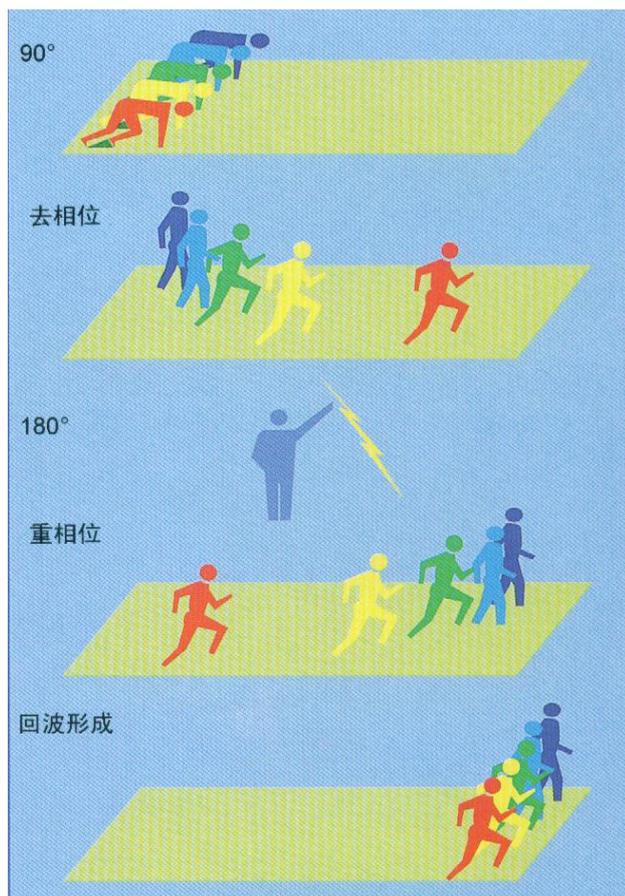


图 2 自旋回波脉冲序列的形成。把这一过程比作一场赛跑。摘自《医学磁共振》，Peter A. Rinck。

这就好比是一场赛跑（见图 2），发令枪响后（ 90° 脉冲），运动员有快有慢跑出，这时候裁判再命令运动员往回跑（ 180° 脉冲），这样原来最快的就变成最后一个了，返回起时大家还是同时抵达。

在实际成像中，我们会先获得一个 K 空间的相位频率图像。具体获得这一图像需要多次测量不同相位的信号。经过二维傅里叶变换，就可以得到质子密度图像。

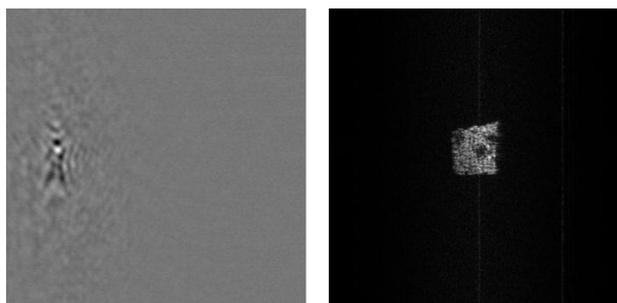


图 3 傅里叶变换前后 K 空间图像与变换后的质子密度图像（芝麻）， $SF_1 = 22\text{MHz}$ ， $O_1 = 677.438\text{KHz}$ ，磁场均匀度 8ppm

图像的成像质量由很多因素决定。首先，磁场的均匀性会对成像的准确与否产生影响。由理论得知，成像时每个质子位置确定是由梯度磁场引起的频率和相位的特征来区分的。如果本来加的匀强磁场的均匀性不好，就会对区分产生较大影响，会影响质子密度图像与质子密度坐标的一一对应。磁场均匀度由下式定义：

$$\text{均匀度} = \frac{\Delta M}{M} \times 1000000 \text{ppm}$$

其中 ppm 为百万分之一。可以看出在 8ppm 的条件下，成像的形状基本较好（基本呈矩形区）。

一个相位的扫描累加次数也会影响成像质量，伴随着扫描的累加，信号强度得到增强，图像会变得清晰。但是这种方法所消耗的时间十分巨大，不适合单独在实际临床应用中采用。

除此之外，纵向弛豫时间 T_1 和横向弛豫时间 T_2 也是十分关键的属性，通过调整 T_1 和 T_2 在成像中的权重可以对对比度产生很大影响，我们将在下面单独讨论。

成像对比度的探讨

在医学应用中，成像对比度和成像速度是两个最关键的属性，由于实验条件，我们更关注的是成像对比度的变化特别是通过改变重复时间 T_R 以及回波时间 T_E （具体定义可以参考[错误!未找到引用源。](#)）进而调整 T_1 和 T_2 在成像中的权重。

我们在自旋回波成像时会给质子施加一个 90° 脉冲，这样本来在竖直方向上的磁矩 \mathbf{M} 就有了水平分量 \mathbf{M}_{XY} ，同时竖直分量 \mathbf{M}_Z 趋向于 0 ，但是当脉冲撤去后， \mathbf{M}_{XY} 和 \mathbf{M}_Z 都会向状态变化，变化过程

分别称为横向弛豫和纵向弛豫，而两个分量恢复到原状态的 63% 的时间就被称作横向弛豫时间和纵向弛豫时间。由于受到各种相关作用影响，固体和运动慢的物体（比如高粘度物体）中，横向弛豫时间 T_2 会比纵向弛豫时间 T_1 明显缩短。

具体到成像的信号强度 SI （最后对应成像的灰度），有公式：

$$SI \approx K \times r \times (1 - e^{-T_R/T_1}) e^{-T_E/T_2}$$

其中 K 代表流动弥散等影响， r 为质子密度。从公式就可以很明显看出，重复时间 T_R 、和回波时间 T_E 对于 T_1 和 T_2 在成像中的权重有着直接的影响，下面我们通过实验来验证。

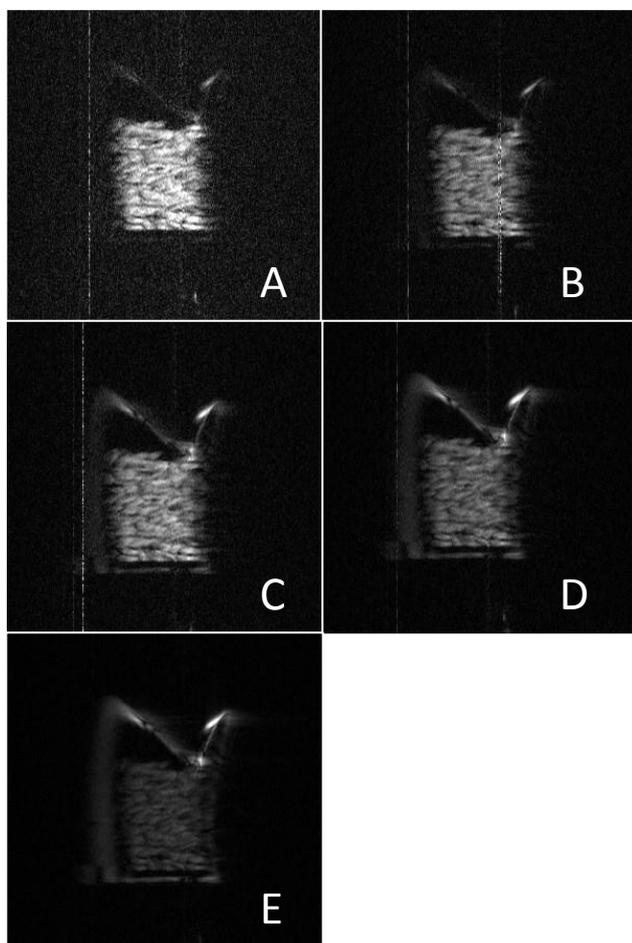


图 4 重复时间对图像对比度的影响。(A)重复时间 100ms。(B)重复时间为 300ms。(C)重复时间为 600ms。(D)重复时间为 1200ms。(E)重复时间为 2400ms。注意观察芝麻与两侧水的灰度变化。

上图为在试管中装入一小瓶芝麻，并在小瓶和试管之间加水所得的图像。从图像上可以看出，伴随着重复时间的增长，图像中水的轮廓逐渐清晰，而芝麻的图像逐渐暗淡。我们可以认为，水与芝麻

的对比度在下降。

由本文之前给出的信号强度的公式可以看出，增大重复时间 T_R ，明显减弱了 T_1 在成像中的权重。据此我们可以认为含水较多的物质在 T_1 权重较大时颜色较暗，而在 T_2 权重较大时颜色较亮。而芝麻含油脂较多，所以说明油脂与水的特性恰好相反。具体联系到实际成像，可根据不同器官的水分和脂肪含量调整 T_R ，以期得到更好的成像效果。

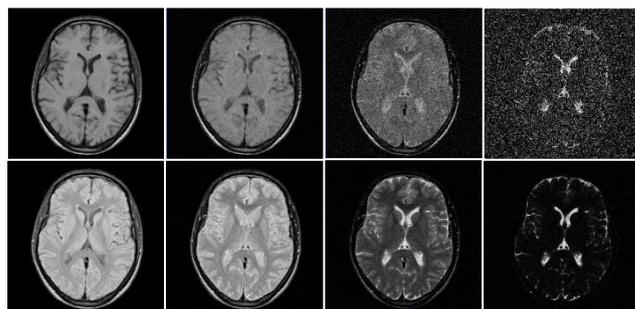


图 5 重复时间和回波时间对成像效果影响。上方一排，重复时间为 500ms，从左至右回波时间依次为 40ms，100ms，200ms，400ms。下方一排，重复时间为 2000ms，从左至右回波时间依次为 40ms，100ms，200ms，400ms。图像为 MR Image Expert 模拟图。

从图 5 和之前的公式中，可以看出对于调整回波时间 T_E ，也有与重复时间类似的效果，即会影响 T_1 和 T_2 的权重。从公式可以看出， T_R 和 T_E 都较大时，成像以 T_2 权重为主，反之则以 T_1 权重为主。

从图 4 和图 5 还可以发现， T_R 和 T_E 对成像对比度有很大影响。比如图 5 中最右侧一列两张图片明显十分不清晰，而中间有几张这很难区分灰质和白质。从原因上分析，之所以对比度差说明信号强度相近，所以当把强度以灰度表示时颜色差异小不容易区分。显然，不同的物质由于质子密度等差异，其信号强度 SI 与 (T_R, T_E) 的关系曲线是不同的，当某个 (T_R, T_E) 取值时，成像的几种物质的曲线可能恰好相交或者在交点附近，此时信号强度就会特别小。这就是图 5 中间有几张灰质白质难以区分的原因。而当 T_R 和 T_E 取值都较大时，信号强度会偏弱，这样不同物质的信号强度也会相差较小，这就是图 5 最右侧一列的图像模糊的原因。

医学实际应用

核磁共振成像技术最大的应用就是医学诊断领域，为了适应诊断领域的要求核磁共振成像技术取得了许多新的发展。

在用自旋回波序列成像时，一个很大的实际问题是成像时间太长，一幅很小的图像往往需要 20 分钟左右，这显然不适合医学应用。梯度磁场序列法可以节约一部分时间，其基本原理与自旋回波序列法一致，只是在质子自旋状态发生变化时，又额外加上一个梯度磁场加快变化的趋势，自然可以节约部分水煎。同时，还可以结合快速小角度激发成像法，即激发时不再使用 90° 脉冲，而是激发到 $\alpha < 90^\circ$ 的角度。通过这些方法的使用可大大加快成像速度。

在上一部分我们探讨了影响对比度的一些因素。在实际成像中，有时可能由于物质本身原因，通过调节参数也很难取得我们希望的成像结果，这时候会使用造影剂。造影剂主要是相对安全的磁性物质。通过使用造影剂，可以改变组织的弛豫时间和磁敏感性。具体使用可以采取口服或者静脉注射等方式。

结论

我们利用实验室现有的资源，先后进行了核磁共振成像技术的基础原理性试验，成像试验，以及探究影响成像质量因素的实验。通过这一过程，我

们掌握了核磁共振成像的原理，得到了重复时间和回波时间与成像对比度的定性关系。当然，实际影响核磁共振成像技术的因素很多，还有待我们继续研究。

致谢

合作者：李鸥

指导教师：俞熹

特别鸣谢：邯郸校区——枫林校区班车司机，极大的方便了我去医科馆查阅资料。

参考文献资料

1. 核磁共振成像技术实验教程，汪红志、张学龙、武杰 编著，科学出版社，2008；
2. 医学磁共振，Peter A. Rinck 原著，宋英儒 翻译，人民卫生出版社，2007；
3. 磁共振成像临床应用入门，靳二虎 主编，人民卫生出版社，2009；
4. MR Image Expert® V2.5, European Magnetic Resonance Forum, 用于进行模拟成像的软件；
5. Wikipeda, www.wikipedia.org;

An Brief Discussion on the Theory of MRI and Its Quality: Based on Our Teaching Experiment

Nan Du

Department of Physics, Fudan University, Shanghai, 200433

Abstract: MRI (Magnetic Resonance Imaging) is a powerful technique in modern medical diagnosis. It uses a powerful magnetic field to align the nuclear magnetization of (usually) hydrogen atoms in water in the body. Radio frequency (RF) fields are used to systematically alter the alignment of this magnetization. This causes the hydrogen nuclei to produce a rotating magnetic field detectable. This signal can be manipulated to construct an image of the body. In the article, we focus the basic theory of MRI and discuss the some important factors that influence the quality of image.

Key words: MRI, Medical diagnosis, spin-echo, picture contrast