

磁共振成像原理与序列应用虚拟仿真实验教学指导书

一. 实验课程简介

磁共振设备是技术含量和附加值最高的医学影像设备之一，是当前显示大脑结构和功能过程最重要的可视化工具。《磁共振成像原理与序列应用虚拟仿真实验》项目基于临床采集的真实数据与强大的仿真模型，以虚拟空间与对象的方式将磁共振成像各个层面与步骤精准还原；操作界面上去除不必要的细节，又保留了实际最重要的要素。此仿真系统与课程实现了对磁共振成像全流程全知识点的系统性覆盖和梳理，帮助学生形成直观而连贯的认识，全面、系统地掌握这一成像技术；不受机时的限制进行充分的学习与试验，掌握序列选择与成像参数调整的技巧。

(一) 实验内容

本虚拟仿真实验围绕“磁共振成像”这一主题，设计了4个递进的实验环节，“磁共振物理基础”和“磁共振信号基础”从微观的角度演示磁共振物理的知识点，“成像设备和成像原理认知”展示了磁共振扫描间的硬件设施与布局，以及K空间的形成和生成磁共振影像的过程，“磁共振虚拟扫描和成像质量评估”模拟了真实磁共振扫描的过程，包括线圈选择、序列选择、参数确定等多个。

(二) 实验教学方法

1. 教学方法

(1) 翻转课堂法：

学生为中心的教学理念贯穿是实验课程全过程，实验旨在培养学生自主学习、独立思考解决问题的能力，学生是课堂的主人，实验课程平台知识角提供了实验内容涉及的所有知识点，并配有详实的实验操作说明书，学生能自主学习并实验，另外磁共振领域的最新的文献和科技新闻都会进行定期更新，学生自主阅读，拓宽视野，启发学生的思考。

(2) 项目式教学法：

本实验课程探索了基于项目式的教学理念、尝试更加适应双一流高校国际化教学和科研建设的教学模式，在虚拟扫描环节，实验目标是设计三个特定案例扫描的方案，以问题为核心，学生自发地去学习相关知识，理解不同序列的特点与作用，理解各个参数背后的作用机制，进而多次调整优化扫描效果图象，并通过虚拟扫描这一实践探究来验证自己的思考。项目式的教学不仅能帮助学生自主学习，更能锻炼学生的思考能力和活用知识和综合解决问题的能力。

(3) 合作学习法：

在独立完成所有实验内容后，学生组建小组，思考讨论实验过程中遇到的问题，合作学习教学法目的在于培养学生的沟通表达能力，学生自己组织组内讨论，轮流当领导者，协调组内成员的讨论秩序，并需要归纳总结观点，锻炼了学生的理解和交流的能力，为今后学生进行与他人协作、团队合作或是管理打下了基础。

2. 前期准备

本虚拟仿真实验配合《医学成像原理》中磁共振部分，学生在进行虚拟仿真实验

前应已经上过相关理论知识内容的课时，知道拉莫尔频率、磁旋比、RF 脉冲等磁共振物理名词的含义，对空间编码的概念和方法及 K 空间的定义有初步的认识。了解典型参量的加权，典型的成像脉冲序列，图像质量的评价，磁共振技术在医学和脑科学等领域的应用。

3. 实验过程

第一步：开始实验前，学生应当先下载《知识点文档》、《实验指导书》和《实验报告》。

第二步：学生可以先浏览《知识点文档》，了解实验大致涉及的知识点，并进行知识预习，遇到陌生的概念需要重新查看相关课本与课件。

第三步：《实验指导书》详细地介绍了实验操作，引导学生进行实验操作，包括每个步骤中可能用到的按键及其功能的介绍，学生需要自主根据《实验指导书》的操作引导，完成四个模块的实验，必要的数据记录表格和一些需要从查阅的资料表均已经在《实验报告》中给出，学生在操作的过程中依据提示记录数据，并进行计算，最后将答案填入仿真实验系统，《实验报告》用于辅助学生进行实验计算，不计入最后的评分。首页有论坛链接，学生可以进行课程相关问题的讨论，课程负责老师也会参与论坛。

第四步：在实验课时的最后，学生点击首页的考试系统，完成测试卷的考核，系统对其答案进行自动评分。

（三）成绩考核

考核共分为两个部分，实验操作部分系统根据学生的操作进行自动判分，具体评分标准如下表 1 所示；考试系统设有 10 道选择题和 5 道计算题考察学生对知识点理解的情况，学生提交答卷后系统自动批阅。实验操作占比 80%，考试得分占比 20%，学生最终的得分由这两部分加权决定。

二. 各环节教学指导

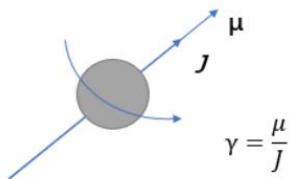
1、本环节内容

- (1) 探究 B₀ 主磁场对原子核的影响
- (2) 验证拉莫尔频率公式
- (3) 未知元素种类的预测

2、本环节教学知识点

(1) 核自旋：原子核由一定数量的质子和中子（统称为核子）组成，这些核子处于复杂的共同运动状态，尤其表现为绕其中心轴的自转，即自旋，荷电粒子自旋产生两个同轴物理量，即自旋角动量和自旋磁矩。

(2) 磁旋比：由于电荷体的自旋轴与其等效电流环同轴，即自旋角动量和自旋磁矩是同轴矢量，因此，自旋角动量和自旋磁矩相差一个被称为磁旋比的比例常数，磁旋比对于每一种原子核是恒定的常数，且磁旋比有可能为负数，意味着磁矩和角动量的方向相反。



μ 为图示电荷体的等效电流环产生的磁矩， J 为自旋角动量。

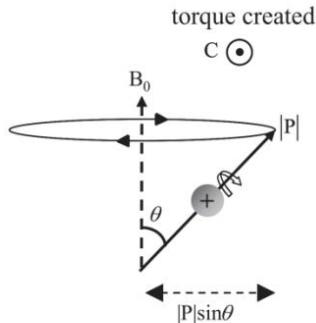
没有外加磁场时，质子的磁矩随机指向各方向；微观基本磁向量的和 $\sum \vec{\mu}$ 为零，宏观磁向量大小为0 ($\vec{M}=0$)。受外部磁场 \vec{B}_0 作用时，质子的自旋角动量方向和该磁场方向在同一直线上，部分方向与磁场方向同向，部分反向。宏观磁向量 \vec{M} 随之出现，但其实质子实际上并不是严格沿 \vec{B}_0 方向排列的，而是按一定的角频率并以一定的夹角各自绕 \vec{B}_0 旋转，即进动：

$$\omega_0 = \gamma B_0,$$

该公式为拉莫方程，其中 ω_0 称为拉莫角频率或进动角频率，它与 B_0 成正比， γ 为磁旋比。

(3)拉莫尔进动：一个自转的物体绕某一中心（以与自转相同的方向）旋转，拉莫尔进动是指电子、原子核和原子的磁矩在外部磁场作用下的进动。

(4)拉莫频率：磁矩在磁场中进动的回转频率。



3、答疑与讨论

本环节可以就以下问题进行答疑与讨论：

1. 主磁场大小通常是多少？约为地磁场的多少倍？
2. MRI 显示哪几种图像？如何定位？图像的三个轴，哪个轴是主动控制的？哪个轴是被动测量的？

（二）磁共振信号形成

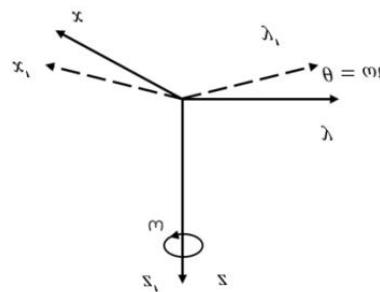
1、本环节内容

- (1)认识旋转坐标系的作用
- (2)理解 RF 脉冲与弛豫的概念，学习弛豫时间的测量方法
- (3)验证部分饱和效应并思考其原理

2、本环节教学知识点

本环节可以就以下知识点进行重点讲解：

(1)旋转坐标系：处于 B_0 磁场中的所有质子以恒定的角速度环绕 z 轴进动，如图所示，因此建立一个以角速度绕 z 轴转动的坐标系来考察和分析磁矩进而磁矢的运动，静止坐标系简称 L 系，转动坐标系简称 R 系。让学生认识到旋转坐标系能排除进动本身的视觉干扰，更清晰地观察 RF 脉冲对磁矢的作用。



(2)射频脉冲：在热平衡状态，质子系合成的磁矢是平行于 B_0 的常矢，不随时间变化且不带有信息。它的测量既无意义也无法实现。只有横向磁矢能够被测量。横向磁矢通过 RF 线圈所建立的 RF 磁场的激励产生；它的测量也是通过 RF 线圈来实现。RF 场对质子系的激励是向平衡态的系统馈送满足磁共振条件的能量，打破了平衡，使原本数量稍多的低能态质子在吸收了 RF 能量后跃迁到高能态，低能态质子数量减少，导致 z 向 M 减小，围绕 z 轴进动的磁矩数上下完全相等，净的 z 向磁矢为 0，RF 场的聚相作用使进动磁矩偏向一边，产生了净的横向磁矢。当 RF 脉冲撤销后，组成横向磁矢的各磁矩的局部磁场强度不同造成进动频率不同所引起的散相，使横向磁矢消失。RF 脉冲撤销后，组成纵向磁矢的质子在高、低能态的粒子数回复到平衡态时的值，即 z 向磁矢又被恢复。

(3)弛豫：多粒子系统从非平衡状态回复到平衡状态的过程称为弛豫(relaxation)。自然界的系统有两个基本的倾向：稳定系统趋于能量最小状态；稳定系统趋于熵最大。MRI 系统的这两个倾向分别代表着两个弛豫过程。一个是系统从高能态到低能态的恢复，能量最小趋向，这个恢复称为纵向弛豫或 T1 弛豫(T1 relaxation)；另一种是横向磁矢从有到无的回复，增熵趋向(从有序到无序)，例如，90°脉冲激励后磁矢位于 xoy 平面，RF 撤销后组成这个横向磁矢的各个磁矩由于散相使横向磁矢恢复到 0，这个恢复称为横向弛豫或 T2 弛豫(T2 relaxation)。纵向弛豫和横向弛豫是相互独立的两个过程。

(4)部分饱和效应：RF 脉冲激发后，已位于 xy 平面内的磁矩不会再吸收 RF 能量参与下一次信号的形成，只有 T1 弛豫中已经恢复的部分能形成下一次信号，故能观察到短期内激发两次 RF 脉冲，后一次产生的 M_x 明显要小于前者，这就是部分饱和效应。

3、答疑与讨论

本环节可以就以下问题进行答疑与讨论：

- 部分饱和效应产生的原因是什么？
- 对于两种物质比如水和脂肪，T1 和 T2 的值均不同，如何设置 TR、TE，才能突出两者的对比度？
- 实际测量过程中，与 B0 平行方向的 Mz 分量无法直接测量，只能测量横向磁矢 Mxy 的大小，思考如何进行 Mz 的计算

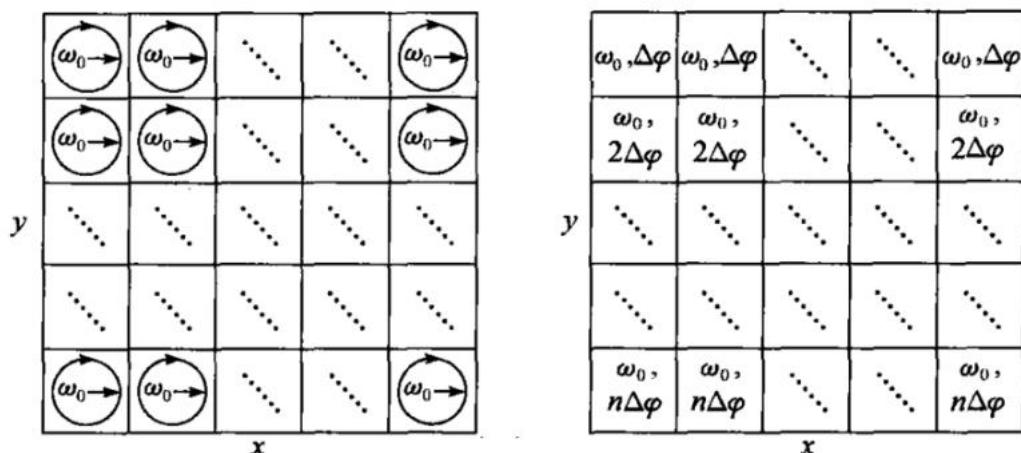
(三) 成像设备和原理认知

1、本环节内容

- 探究磁共振扫描间布局构造
- 探究磁共振硬件设备的组成结构和多种类型的线圈
- 理解 K 空间的形成机制

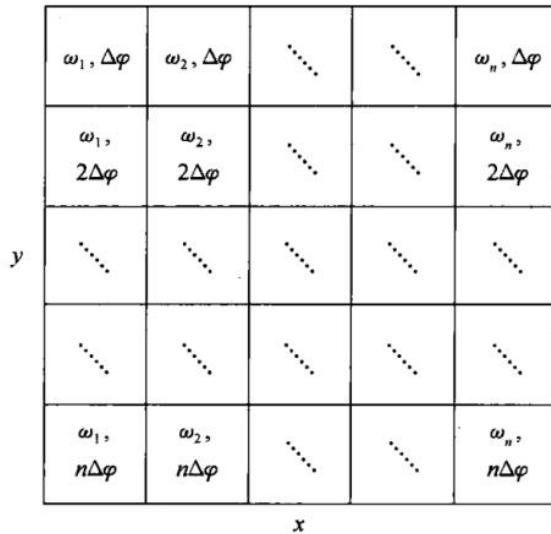
2、本环节教学知识点

- 成像设备包括：外壳、超导磁体、线圈集成架、梯度线圈、射频发射线圈、隔音罩、肩部线圈、躯干线圈、头部线圈。
- K 空间：K 空间又称 Fourier 表象空间，是和 (x, y, z) 位形空间（或称图像空间、实验室空间）相对应的空间频率空间。
- 选层编码：选层编码又称为断层定位编码。MRI 可以在任意方向选择断层。通常约定是将与 z 向垂直的面称为断面，由线性磁场梯度 Gz 和 z 实现断层的选择。
- 相位编码：选定 了成像层面之后，在这个 2D 平面上还有个定位问题。在一个层面的定位由相位编码和频率编码两个步骤完成。RF 脉冲的激励完成后，所选断层的磁矢都有相同的进动频率和相位，如左图所示。开启相位编码梯度磁场，网格最上一行所处位置的磁场最强，故其进动频率最快，持续一段时间后，其相位处于最前；相反最下一行所处位置的磁场最弱，故其进动频率最慢，持续相同时间后，其相位处于最后。Gy 梯度场关闭后，各行间相位差依然保持不变。这样就实现了 y 位置的编码。



- 频率编码：频率编码相位编码完成了被选断层的一个方向（比如前面描述的 y 方向）的信息的定位。还有一个方向（如 x 方向）的信息需要被定位，这个定位通过频率编码来实现。在信号读出时段施加 Gx 梯度磁场，与相位编码的情况类似，施加梯度磁场 Gx 使得 x 方向上不同点具有不同的磁场，从而使得不同 x 所代表

的列具有不同的进动频率，最左边一列的进动频率最低，最右边一列的进动频率最高。完成了相位编码和频率编码的二维空间点的相、频分布如下图所示，相、频编码实现了二维平面点的定位。



3、答疑与讨论

本环节可以就以下问题进行答疑与讨论：

1. 画图描述三个方向的梯度线圈发射射频脉冲形成的梯度场与 B0 场的位置关系。
2. 对头部进行 10 层扫描，描述三个梯度线圈开关流程以及 K 空间的填充过程。

（四）磁共振虚拟扫描和成像质量控制和评估

1、本环节内容

- (1)熟悉医院进行磁共振扫描的基本流程，以及操作界面
- (2)根据扫描任务，自主设计扫描方案

2、本环节教学知识点

本环节可以就以下知识点进行重点讲解：

(1)磁共振扫描安全：安全性问题是 MRI 系统应用的一个重要问题。MRI 系统存在可能对人体造成刺激或伤害的装置或信号，不加注意很容易发生事故。
飞弹效应：由于 MRI 系统的磁场非常强，故任何铁磁体如果不小心带入安装了 MRI 系统的房间都会带来灾难性的后果。靠近 MRI 的铁磁体在强大磁力的吸引下会像飞弹一样飞向 MRI 的主磁场空间，其冲击力和破坏性和炸弹无异。
植入物体的禁忌：与前述的 飞弹效应相关的是人体植入物的禁忌。如果人体有铁磁性物体的植人物，那是绝对禁止 MRI 检查的。心脏起搏器佩戴者也是绝对禁止 MRI 检查的。
射频安全：MRI 系统的 RF 能量可以使人体组织发热。
幽闭恐惧症：由于被查者处于 MRI 系统的狭窄的孔道内，往往有较强烈的被封闭、被限制的感觉，故有的人会产生极度紧张的感觉，这就是所谓的幽闭恐惧症。系统工作时产生的噪声会进一步加剧被检者的不适感。

(2)磁共振扫描序列：磁共振成像序列指成像过程中的射频脉冲、梯度脉冲、MR 信号采集等参数进行有逻辑、有目的的排序，从而使采集到的 MR 信号有诊断价

值。常见的磁共振成像序列包括 SE 序列、GE 序列、IR 序列、FSE 序列、EPI 序列。

(3)图像质量评价：①空间分辨率：空间分辨率表示了成像系统在高对比度下观察细微结构的能力，空间分辨率越高，越能显示图像细节部分，图像越清晰。

②信噪比：图像的信噪比应该等于信号与噪声的功率谱之比，但通常功率谱难以计算，有一种方法可以近似估计图像信噪比，即信号与噪声的方差之比，信噪比越高图像质量越好。③对比度：对比度指的是一幅影像中，不同类型的组织结果图像中明暗差别情况，不同组织的灰度反差越大，越能清晰地分辨不同组织。

(4)化学位移：脂肪成的像相对于水模的空洞有一定的位移。这是因为脂肪相对于水有一定的“化学位移”——氢质子的拉莫尔频率有一定的差异，在频率编码方向引入了额外的比例相位差。

3、答疑与讨论

本环节可以就以下问题进行答疑与讨论：

- 1.脂肪抑制和水抑制的原理是什么？
- 2.已知不同组织的 T1、T2 值，在 SE 序列中如何设计 TR、TE，突出两两的对比度。
- 3.化学位移产生的机制是什么？分析化学位移对成像效果有哪些影响？