

# 《磁共振成像原理与序列应用》实验指南

## 一、实验目的

本实验项目依托生物医学工程国家级实验教学示范中心（东南大学），根据《医学成像原理》磁共振成像部分的大纲及关键知识点，结合磁共振在医学领域的应用情况，构思了“磁共振物理基础”、“磁共振信号形成”、“成像序列与 K 空间演示”、“扫描和成像质量控制和评估”四个模块实验。通过本次实验，学生应当获得的知识与能力如下：

- (1) 理解核自旋、旋磁比、拉莫尔频率和进动等物理概念，掌握磁共振现象的原理，理解磁共振的基本机制，了解其宏观现象的描述；
- (2) 掌握单个磁矩的合成、宏观磁化向量（磁矢）、旋转坐标系、RF 脉冲、磁矢的弛豫（ $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_2^*$ ）、回波的形成、TE、TR 的概念，以及部分饱和效应的机制；
- (3) 了解磁共振序列的基本定义和典型成像脉冲序列的流程，掌握空间编码的概念和方法，K 空间的定义和图像重建的典型方法和过程；
- (4) 通过虚拟扫描的实验，掌握成像过程序列选择和参数设定技巧，以及图像质量的评估指标，了解磁共振技术在生物医学和脑科学等领域的应用。

## 二、实验原理

本虚拟仿真实验围绕“磁共振成像”这主题，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 空间的形成和磁共振影像的重建过程，“扫描和成像质量控制和评估”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。共设置了 19 个实验步骤，具体实验原理和结构见图 1。

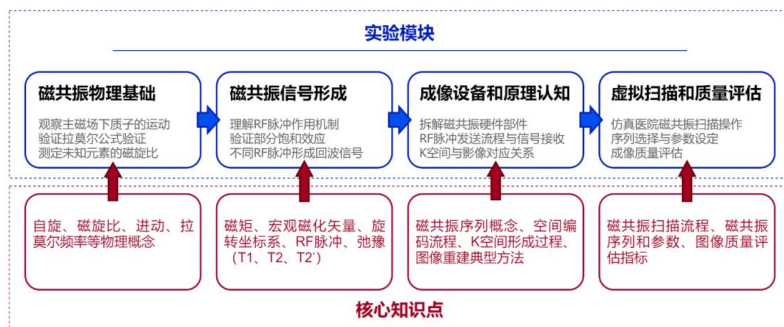


图 1 实验设计总体框图

### 三、步骤引导

#### 进入系统

在浏览器中输入本实验项目的网址：<http://xnfz.seu.edu.cn/exp/272.html> 即可打开本实验项目，输入自己的邮箱、电话号码或者学号以及密码，点击登录即可开始实验。



图 2 实验登录界面

本实验共有 4 个模块，共 19 个交互性步骤。实验界面功能按键：



图 3 实验主界面

“实验简介”——跳转到实验背景介绍模块

“磁共振物理基础”——跳转到磁共振物理基础模块

“磁共振信号基础”——跳转到磁共振信号基础模块

“成像设备和原理认知”：

- 磁共振成像设备认知——跳转到场景漫游和设备认知模块
- K 空间演示——跳转到磁共振成像系统认知模块

“扫描和成像质量控制和评估”：

- 学习模式——带有问卷和过场动画的虚拟扫描
- 实验模式——多个扫描案例实验

“帮助”——显示操作提示，提示实验操作的基本技能

“知识角”——相关知识提示

“AI 机器人”——打开 AI 指引

“联系我们”——查看开发者联系方式

“音效”——设置音效

“地图”——显示小地图

“历史记录”——显示扫描历史记录

在主界面下，学生能通过键盘和鼠标控制移动和视角，在扫描间内自由探索，观察磁共振扫描间的布置与扫描仪外观。

在每个模块的实验操作过程中，左侧伸缩框提供了当前步骤的提示，右侧伸缩框显示当

前步骤的进度，学生可以随时打开查看，查看完将其隐藏，继续完成实验。

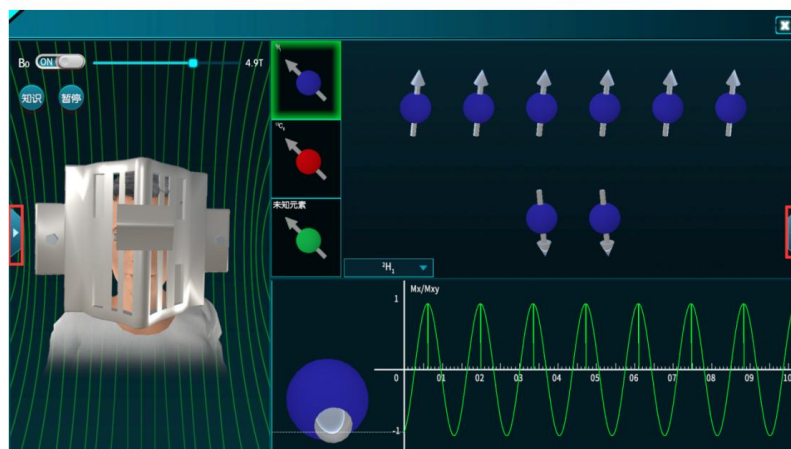


图4 左右两侧伸缩提示框打开按钮

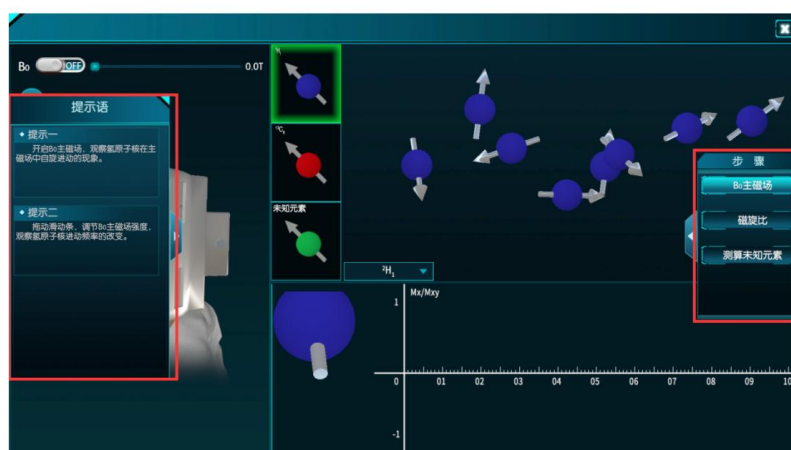


图5 左侧为当前步骤提示，右侧为步骤进度

## 模块一：磁共振物理基础

### ■ 步骤 1：探究 $B_0$ 主磁场对原子核进动频率的影响

进入界面，左上方开关可控制  $B_0$  的开关状态，滚动条可控制  $B_0$  场的大小，并实时显示  $B_0$  当前的读数。默认状态下， $B_0$  场关闭，可见原子核自旋方向凌乱的排布，并随热运动随机地改变方向。开启  $B_0$  场后，原子核自旋按平行、反向两种状态有序的排布，并且出现自旋进动现象。

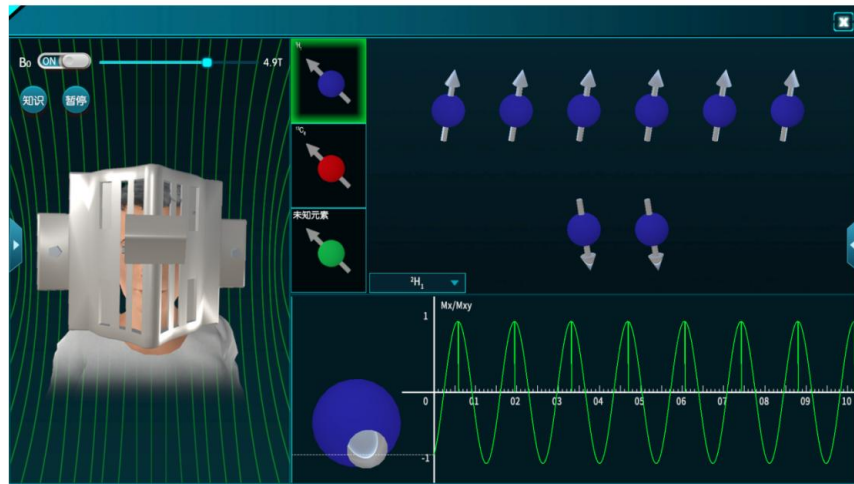


图 6 开启  $B_0$  后  $^1H$  的进动与波形

拖动滚动条调节  $B_0$  场的强度，原子核自旋进动的旋转速度随之变化，波形也随之变化。

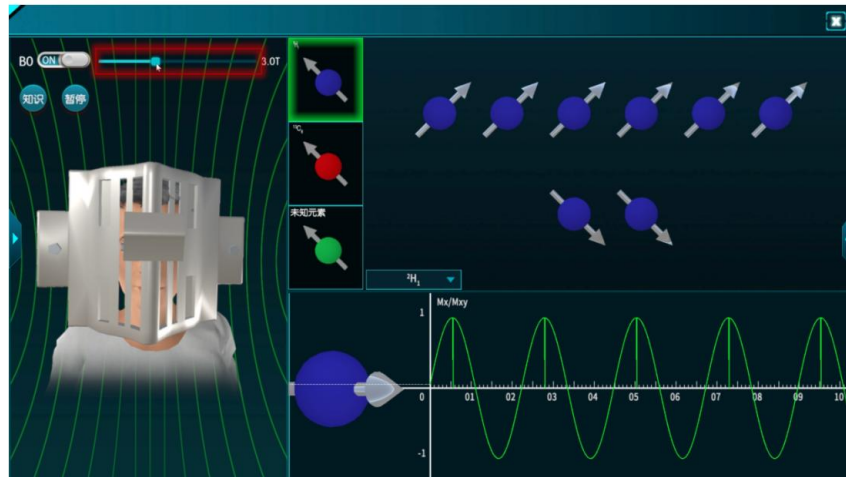


图 7 调节  $B_0$  的强度后  $^1H$  进动波形改变

■ 步骤 2: 探究  $B_0$  主磁场对不同种类的原子核进动的影响

拉莫尔频率公式:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

其中  $\omega_0$  称为拉莫尔角频率或进动角频率, 它与  $B_0$  成正比,  $\gamma$  为磁旋比。点击“知识”按钮, 可以查阅不同元素的磁旋比表。

学生先将原子核种类选为  $^1\text{H}$ , 通过拉莫尔频率公式和电磁波频率波长推导出波长的计算公式, 代入主磁场强度  $B_0$  和磁旋比  $\gamma$ , 计算出当前波长的理论值。

再在波形上测量出当前波长的实际值, 若与理论值接近, 则可以验证拉莫尔公式。

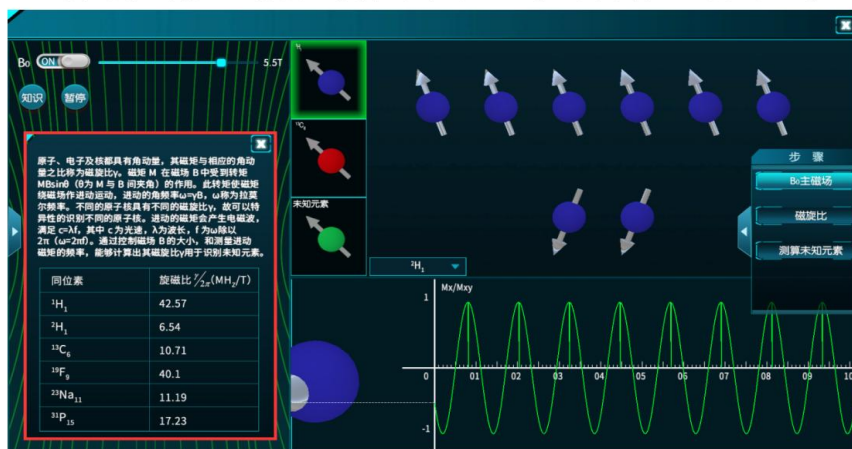


图 8 不同种类质子的磁旋比表

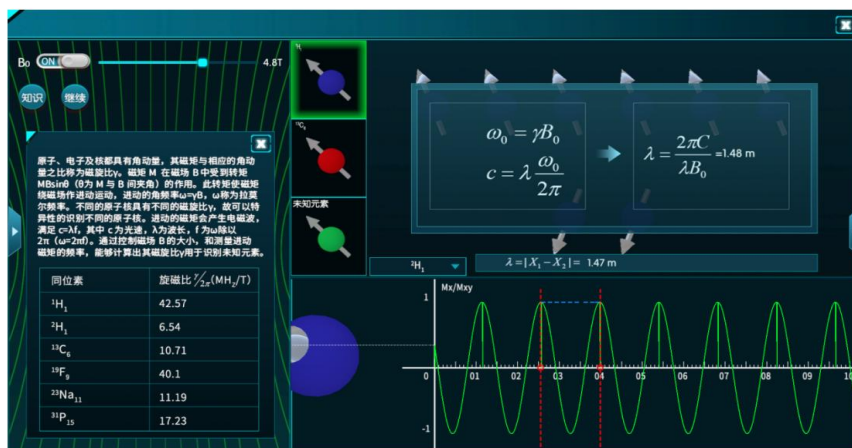


图 9  $^1\text{H}$  的进动波长理论值公式推导和实际值测量

切换元素为 $^{13}\text{C}$ ，重新调节主磁场 $B_0$ 强度，观察到进动频变化规律与前一种 $^1\text{H}$ 原子核不同，这是因为不同原子核的磁旋比不一样。再次用之前推导的公式计算出 $^{13}\text{C}$ 进动波长的理论值，并与在波形中测出的实际值对比，若与理论值接近，则可以验证拉莫尔频率公式。

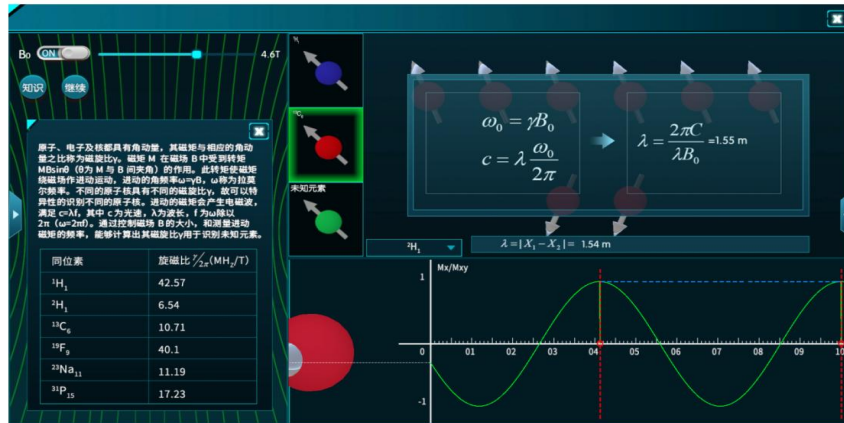


图 10  $^{13}\text{C}$ 的进动波长理论值公式推导和实际值测量

■ 步骤 3: 未知元素种类的测算

1. 选择“未知元素”进行波形观察，点击“暂停”按钮，暂停质子进动。

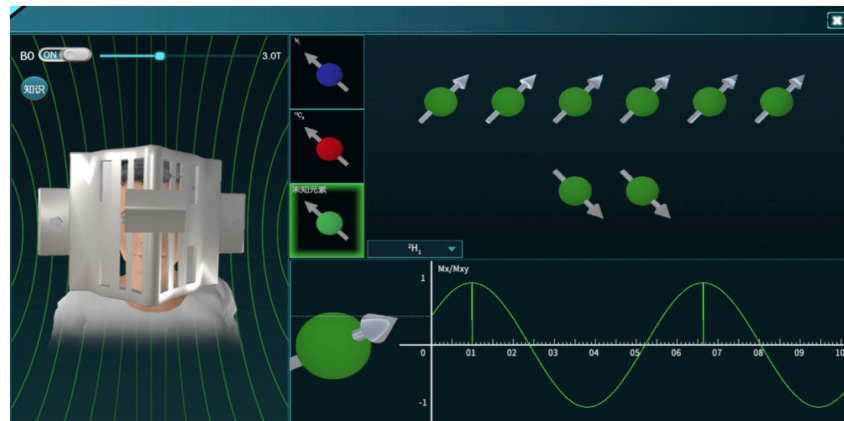


图 11  $B_0$ 开启后未知元素的进动与波形

2.查看原始公式并点击“推导公式”按钮，得到只包含测量值和常数的 $\gamma$ 计算式。

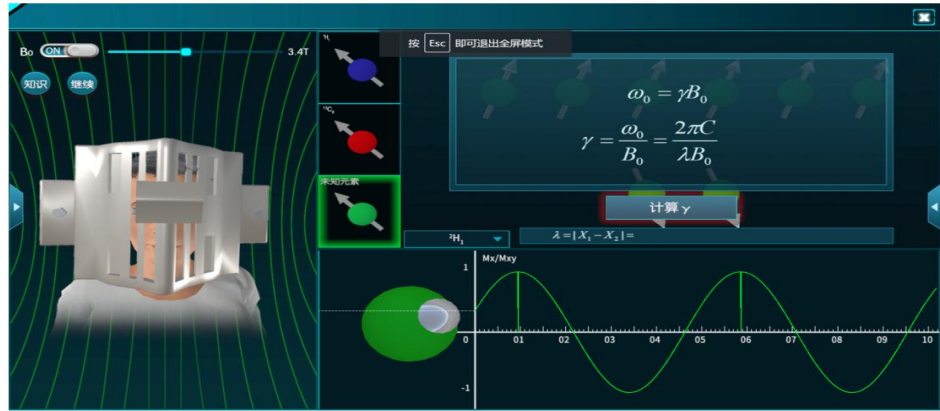


图 12 由拉莫尔频率公式推得的磁旋比计算式

3.点击“开始测量”。在波形中选中两个相邻的波峰  $X_1$  和  $X_2$ ，其距离为波长，单位为米。

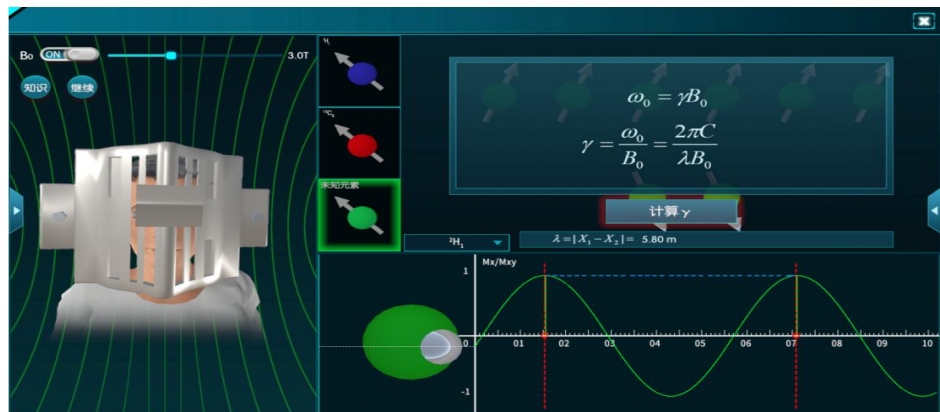


图 13 量取一个周期的起始点与终点并代入算式

4.点击“计算 $\gamma$ ”按钮，通过计算式得到未知元素的磁旋比 $\gamma$ 。

5.将求得的 $\gamma$ 对照知识点中各个核素的磁旋比，从下拉菜单中选择正确的未知元素种类。

原子、电子及核都具有角动量，其磁矩与相应的角动量之比称为磁旋比 $\gamma$ 。磁矩  $M$  在磁场  $B$  中受到转矩  $M \times B \sin\theta$  (为  $M$  与  $B$  间夹角) 的作用。此转矩使磁矩绕磁场作进动运动，进动的角频率 $\omega = \gamma B$ ， $\omega$ 称为拉莫尔频率。不同的原子核具有不同的磁旋比 $\gamma$ ，故可以特征性的识别不同的原子核。进动的磁矩会产生电磁波，满足  $c = \lambda f$ ，其中  $c$  为光速， $\lambda$  为波长， $f$  为 $\omega$ 除以  $2\pi$  ( $\omega = 2\pi f$ )。通过控制磁场的不同，和测量进动磁波的频率，能够计算出其磁旋比 $\gamma$ 用于识别未知元素。

知识 继续

未知元素

计算  $\gamma$

$\omega_0 = \gamma B_0$

$\gamma = \frac{\omega_0}{B_0} = \frac{2\pi C}{\lambda B_0} = 2\pi \cdot 17.23$

$\lambda = |\lambda_1 - \lambda_2| = 3.15m$

同位素 旋磁比  $\gamma_{\text{核}} (\text{MHz/T})$

$^1\text{H}_1$	42.57
$^2\text{H}_1$	6.54
$^{13}\text{C}_6$	10.71
$^{19}\text{F}_9$	40.1
$^{23}\text{Na}_{11}$	11.19
$^{31}\text{P}_{15}$	17.23

图 14 未知元素回答选框

## 模块二：磁共振信号形成

### ■ 步骤 4：认识旋转坐标系

进入界面，中上部主视图宏观的磁化向量（磁矢），右侧显示了微观分散的磁矩以及磁矩向量的合成。

在实验室坐标下观察，在 $B_0$ 场的作用下，原子核的自旋以拉莫尔频率进动。实验室坐标系下能观察到完整的运动。

点击开启左上角的旋转坐标系开关，在旋转坐标系下，自旋角动量变为零，进动被屏蔽。

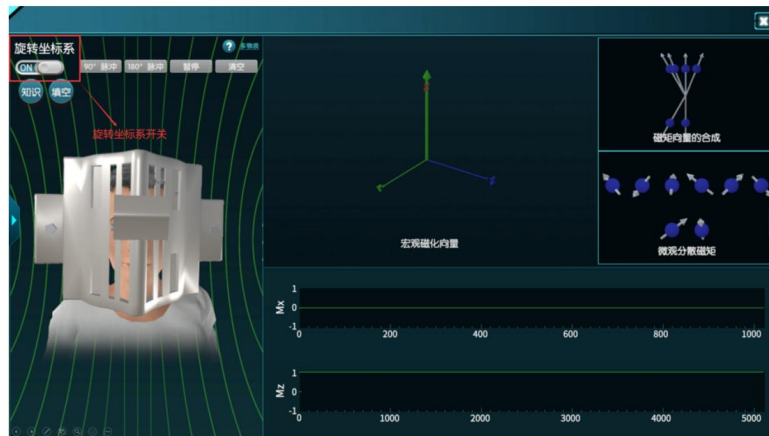


图 15 “磁共振信号形成”模块主界面和旋转坐标系开关

### ■ 步骤 5：理解 RF 脉冲与弛豫，测量 $T_1$ 弛豫时间

1.查看原始公式并点击“推导公式”按钮，通过  $T_1$  弛豫反指数模型推导  $T_1$  计算式。

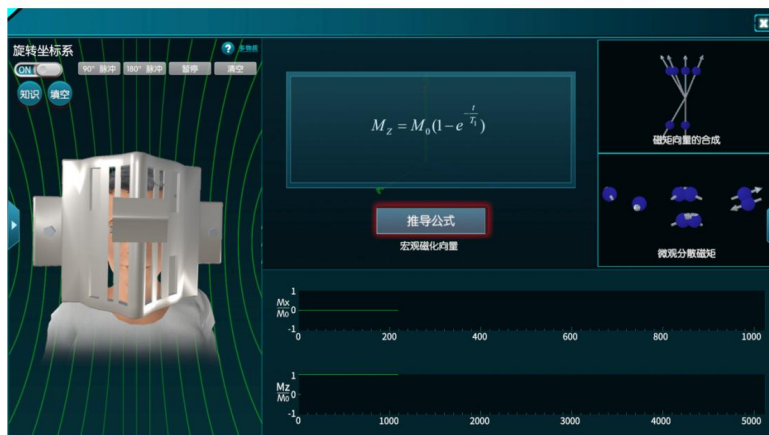


图 16 原始  $T_1$  弛豫公式

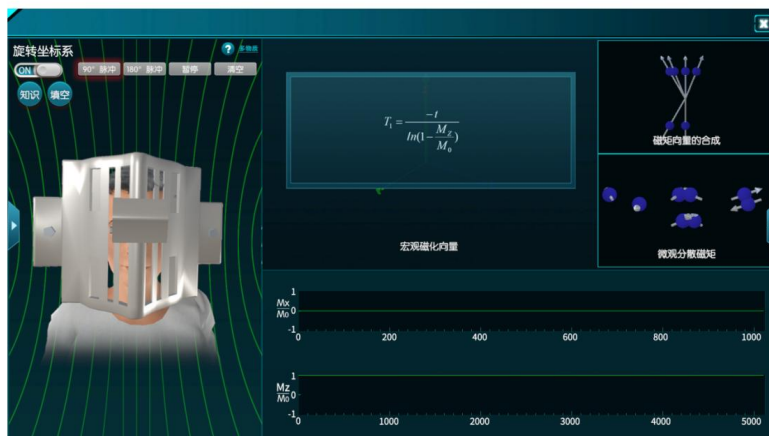


图 17 推导得的  $T_1$  的计算式

2.在施加 RF 脉冲之前，宏观磁矢横向分量为 0，纵向分量为最大。

点击“90°脉冲”按钮，发射相应的 RF 脉冲。微观的磁矢自旋方向发生跃迁和聚相，在宏观磁矢上则体现为倾倒了 90°。纵向磁矢突变为 0 后缓慢地恢复，这就是  $T_1$  弛豫。

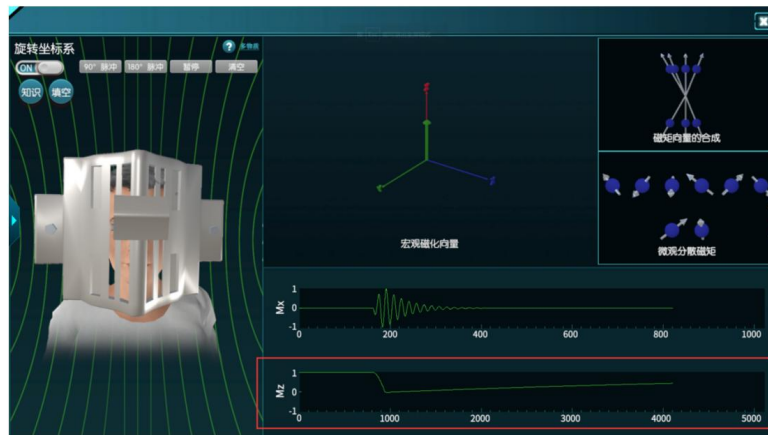


图 18 T<sub>1</sub> 弛豫波形示意图

在波形窗口可以观察到 Mz 的幅值突变后开始缓慢弛豫。暂停自旋，在弛豫曲线上选取两个点，测量对应的 Mz 幅值和时间值 t，分别为 (t<sub>1</sub>, M<sub>z1</sub>/M<sub>0</sub>) 和 (t<sub>2</sub>, M<sub>z2</sub>/M<sub>0</sub>)。

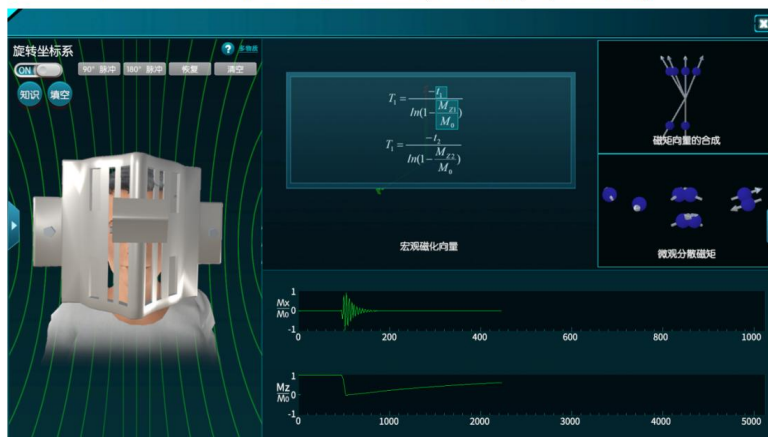


图 19 量取数据示意图

3. 将测得两点的的数据带入 T<sub>1</sub> 计算式，计算得到 T<sub>1</sub>。对比计算结果与选项，选择下拉选单中正确的 T<sub>1</sub> 值。

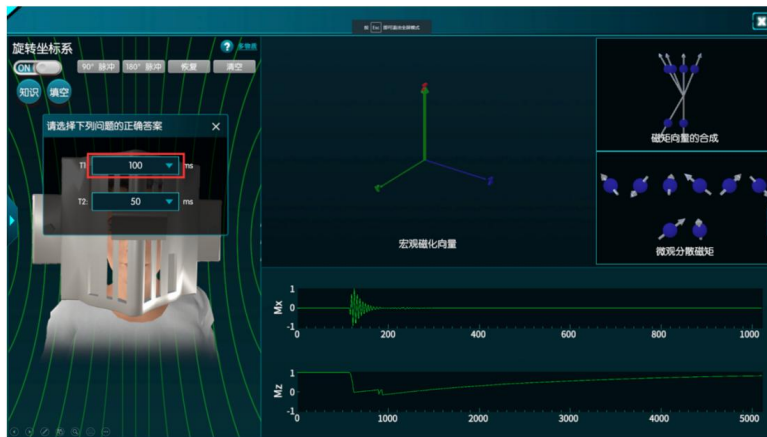


图 20 T<sub>1</sub> 弛豫时间回答选框

■ 步骤 6: 验证部分饱和效应

点击一次“90°脉冲”后，若间隔较短时间内再次点击一次“90°脉冲”可观察到类似的  $M_x$  信号变化，但是幅值小于第一次。这是由于已位于  $xy$  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  $T_1$  弛豫中已经恢复的部分能形成下一次信号，这就是部分饱和效应。

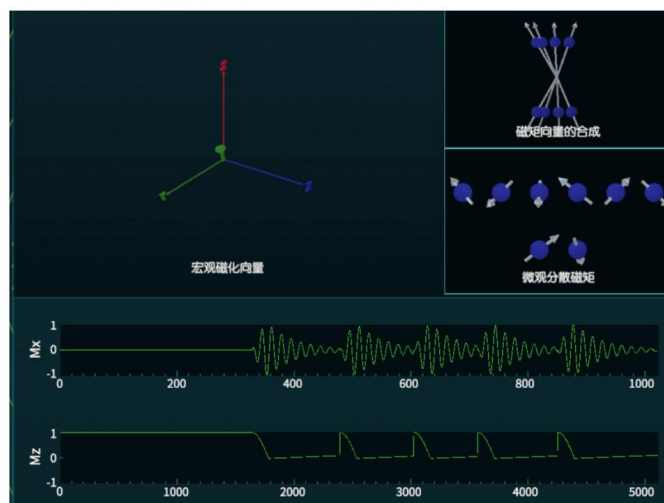


图 21 部分饱和效应演示

■ 步骤 7: 多次回波的形成, 测量  $T_2$  弛豫时间

1.  $T_2^*$ 弛豫一方面是由于分子的热运动等随机因素, 还有一方面是由于局部的磁场不均一性等确定因素。随机因素导致的横向磁矢弛豫是不可逆的, 而磁场不均一性造成的弛豫, 实际上是因为使得不同位置的原子核自旋频率有差异引起的散相。

点击“180°脉冲”按钮将相位差异的前后顺序颠倒, 让原本领先的“快”的磁矩排到最后, 反过来追赶“慢”的磁矩, 那么会在某一个时刻所有(没有受随机因素影响的)磁矩的相位能够会聚, 形成第二次幅值的峰值, 随后又再次散相, 幅值减到 0。这就是回波的形成。

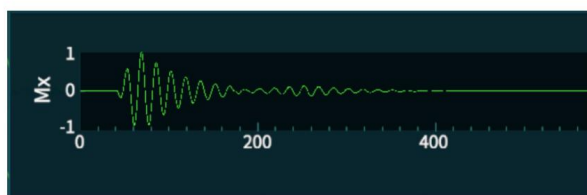


图 22 回波信号演示

2. 由原始自由感应衰减公式推导  $T_2$  计算式。

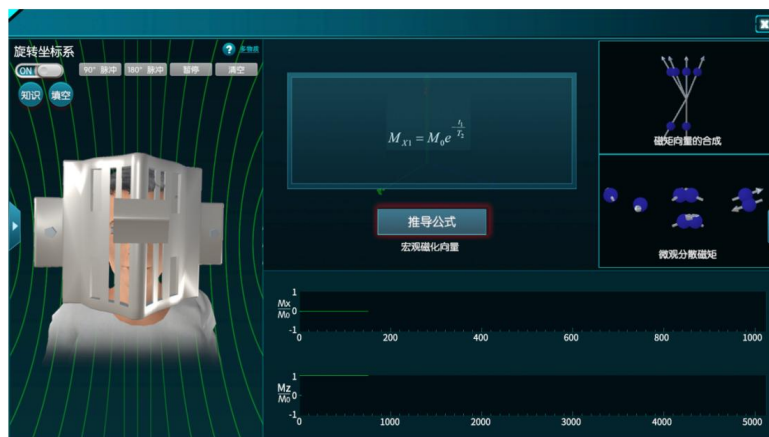


图 23 原始自由感应衰减公式

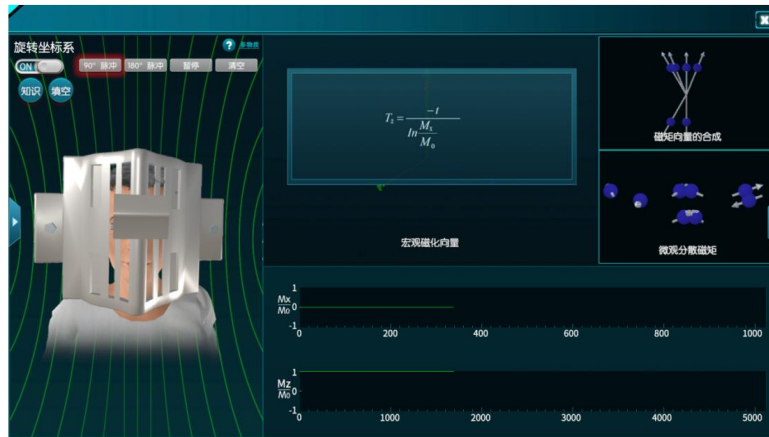


图 24 推导得的  $T_2$  计算式

3. 发射  $90^\circ$  RF 脉冲。随后再发射 2 次以上  $180^\circ$  RF 脉冲，得到两次  $M_x$  回波。

4. 在  $M_x$  信号曲线上测量回波峰的幅值与时间点，代入  $T_2$  计算式。

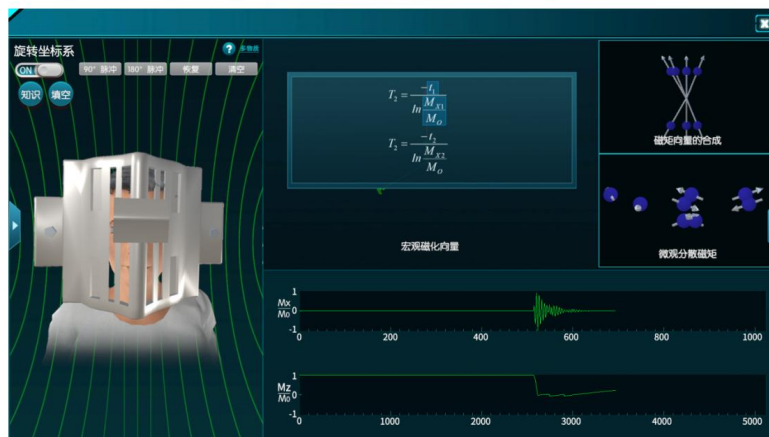


图 25 量取坐标并代入算式

求出该物质的  $T_2$  弛豫时间的值。并在左上角的填空中选择正确的答案。

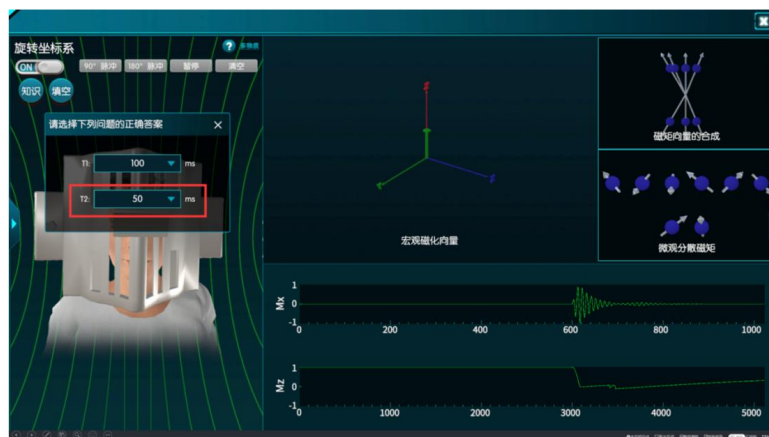


图 26  $T_2$  弛豫时间回答选框

### ■ 步骤 8：提高思考题

多选排序题：实际磁共振成像时， $M_z$  的值无法测量，只能通过  $M_x$  (和  $M_y$ ) 的信号来获得信息。如何只从  $M_x$  信号计算该物质的  $T_1$  和  $T_2$  值？学生根据思考结果，对需要的步骤进行选择并排序，最后选择正确的排序。

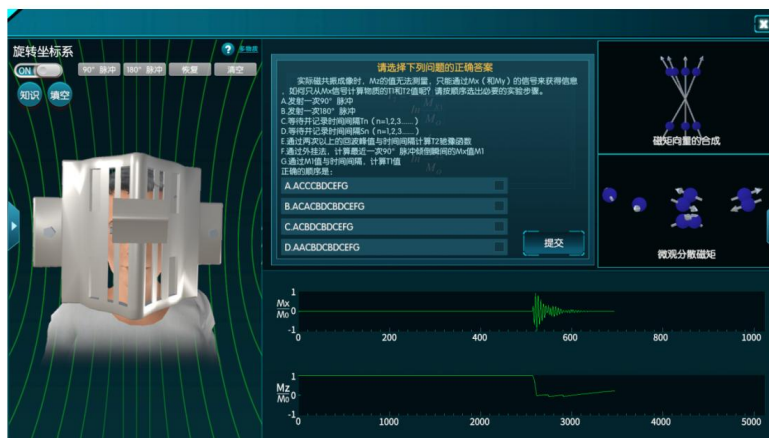


图 27 多选排序题

### 模块三：成像设备和原理认知

#### 磁共振成像设备认知

##### ■ 步骤 9：探究磁共振扫描间布局构造

学生能通过键盘和鼠标控制移动和视角，在扫描间内自由探索，从各个角度观察磁共振扫描间的布置与扫描仪外观。按键方式如下：



图 28 操作提示帮助

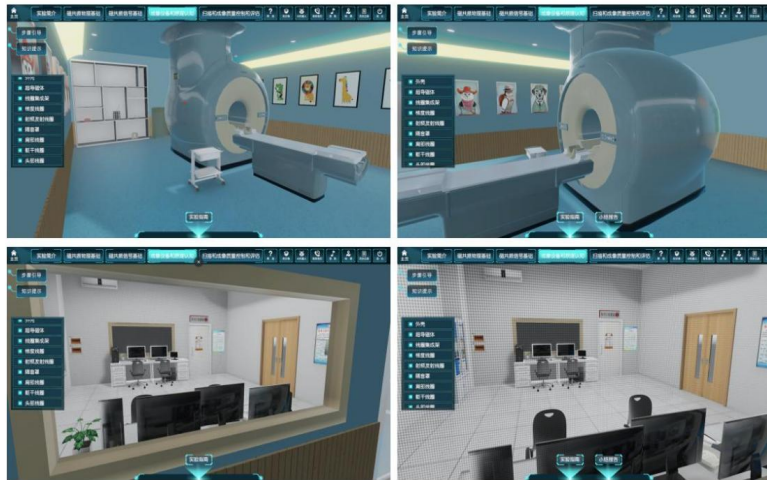


图 29 扫描间场景漫游

### ■ 步骤 10: 磁共振设备的硬件组成

通过左侧复选列表,可以将各部件透明化。可以查看磁共振各个主要零件的结构,以及互相之间的安装关系;同时在弹出的窗口中可以查看讲解和相关知识。弹出窗口中的单独建模也可以拖动旋转缩放,便于观察结构细节。

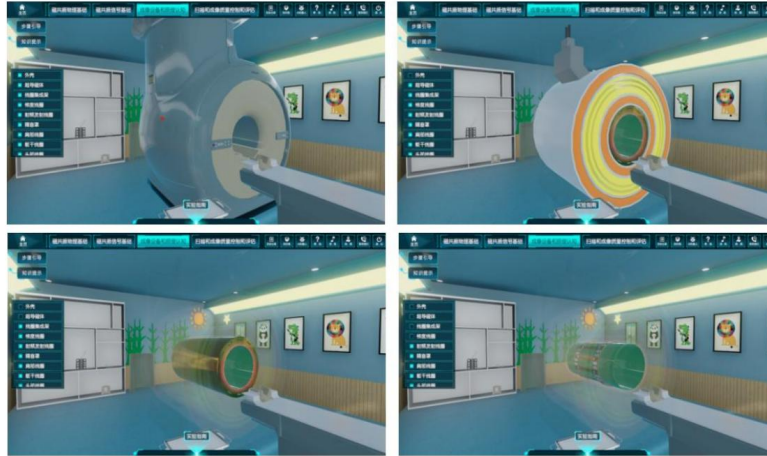


图 30 选择隐藏部分部件

点击左侧列表可查看各个部件的详细功能介绍。

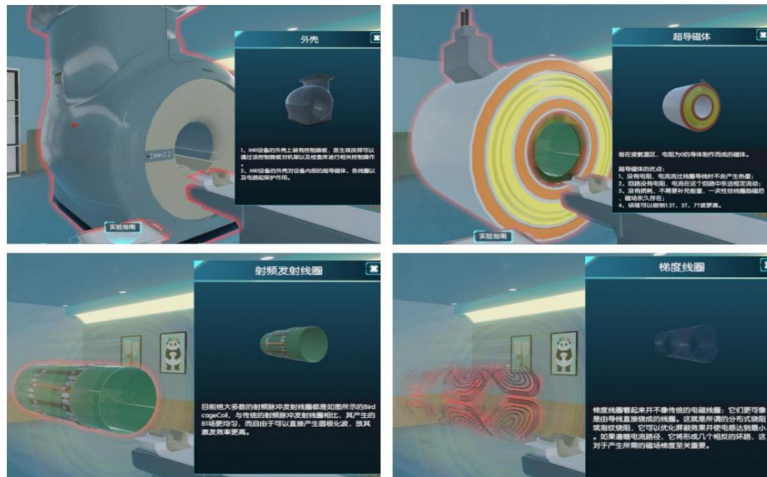


图 31 磁共振设备部件介绍

## K 空间演示

### ■ 步骤 11: K 空间形成与图像重建

患者头上戴着的是头部线圈用于接收信号。左上方两台信号发生器，右上方是示波器和 K 空间。右下方是重建的图像。

点击“发送脉冲”按钮，开启序列发射与信号接收循环。

#### (1) 选层编码

RF 线圈向患者头部发射脉冲时，Z 轴方向梯度磁场开启，在患者垂直轴方向上选出特定的一层。

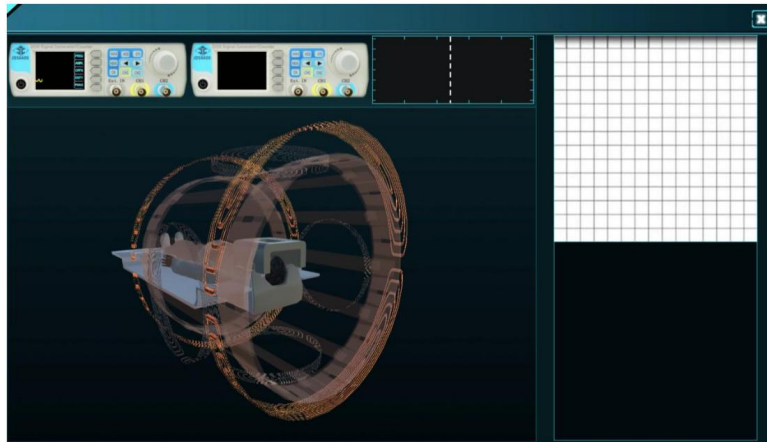


图 32 选层梯度线圈开启

(2) 相位编码

X轴梯度线圈开启一段时间后关闭，所选层面进行相位编码。

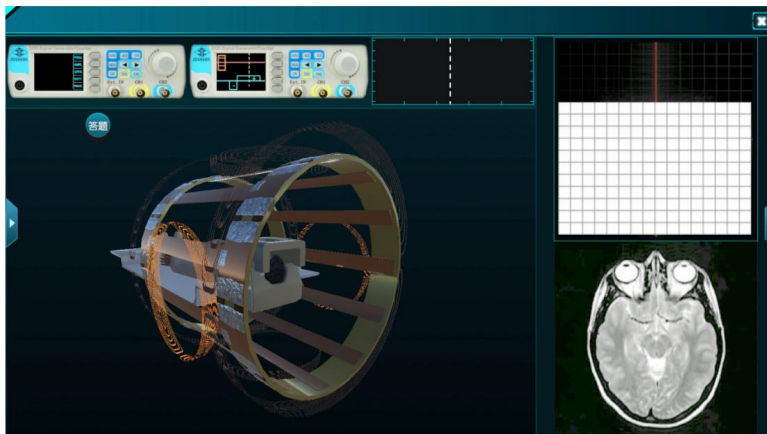


图 33 相位编码梯度线圈开启一段时间后关闭

(3) 回波信号的读取与 K 空间填充

患者头部线圈高亮，同时从头部向外释放 RF 脉冲，到达头部线圈的边界后消失。在接受回波信号的过程中，Y轴方向的梯度线圈开启，进行频率编码。此时 K 空间同步填充一行，重建图像也同步更新。

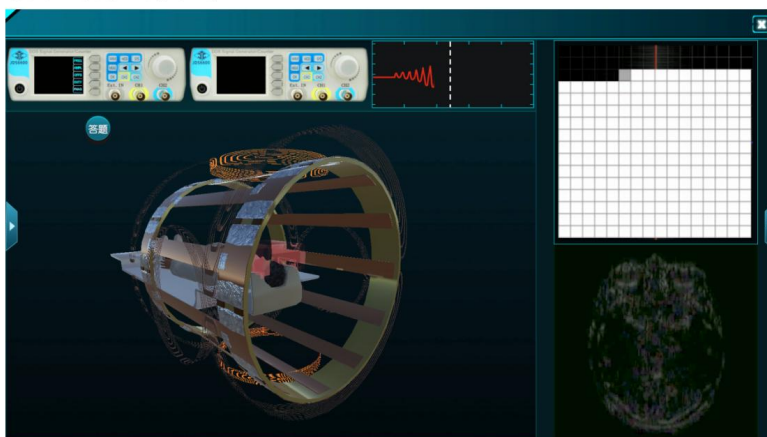


图 34 接收回波信号时频率编码梯度线圈开启

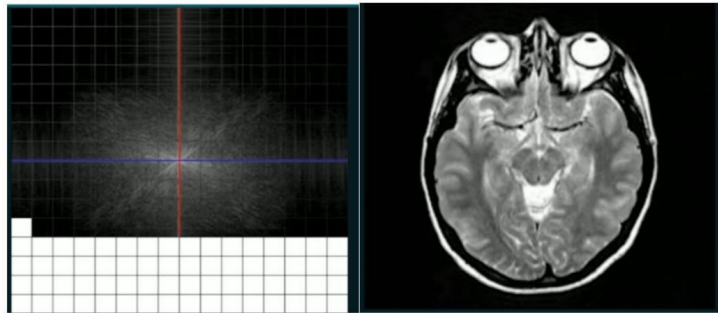


图 35 K 空间填充过程和重建的图像

K 空间总共有 16 行，故上述 3 个步骤循环重复 16 次，K 空间填充完毕。

■ 步骤 12: K 空间（频域）滤波实验

点击“频域滤波”按键，学生可通过滚动条选择 K 空间一定范围的频率成分，对应生成部分重建的图像。K 空间高频成分和低频成分对应重建出的是图像的何种部分，并完成填空题。

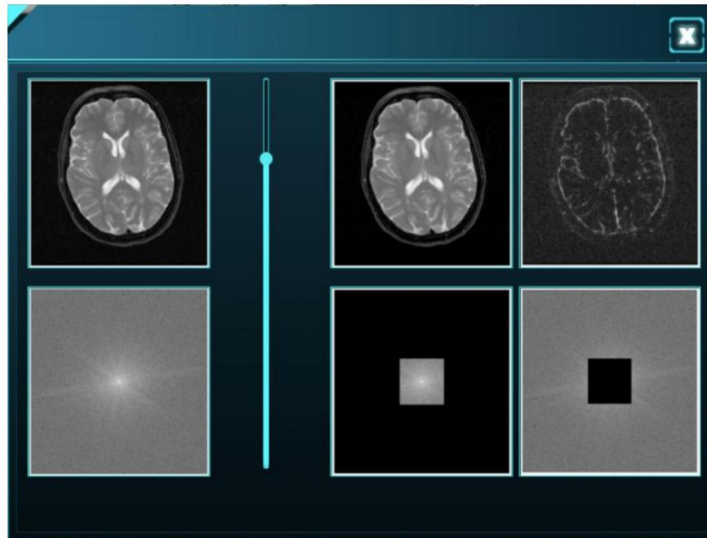


图 36 频域滤波效果

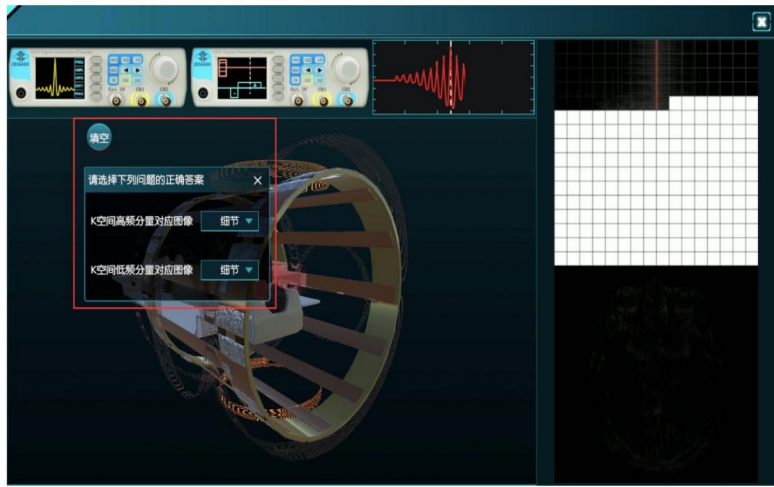


图 37 图像频域空间填空题

## 模块四：扫描和成像质量控制和评估

### 学习模式

#### ■ 步骤 13：磁共振扫描安全检查和体线圈选择



图 38 患者与医生交流场景

学习模式还原了临床实践中磁共振扫描的完整流程，学生扮演医生与技师的角色，决定患者是否需要进行磁共振扫描，且扫描前技师与患者必须进行相关注意事项的确认，如病人体内是否有金属植入医疗辅助装置，是否有纹身等。



图 39 磁共振扫描安全确认问卷

扫描技师通知患者进入扫描间，根据患者扫描部位选择信号接收线圈，并将患者送入磁体中，进行定位。



图 40 射频线圈选择

#### ■ 步骤 14: 学习模式下参数设定与扫描

有三个序列可选择：Survey 定位序列、T<sub>1</sub> 加权序列、T<sub>2</sub> 加权序列。在进行 T<sub>1</sub> 或 T<sub>2</sub> 扫描前，必须先使用定位序列快速获取大脑图像以确定 FOV。



图 41 技师操作间

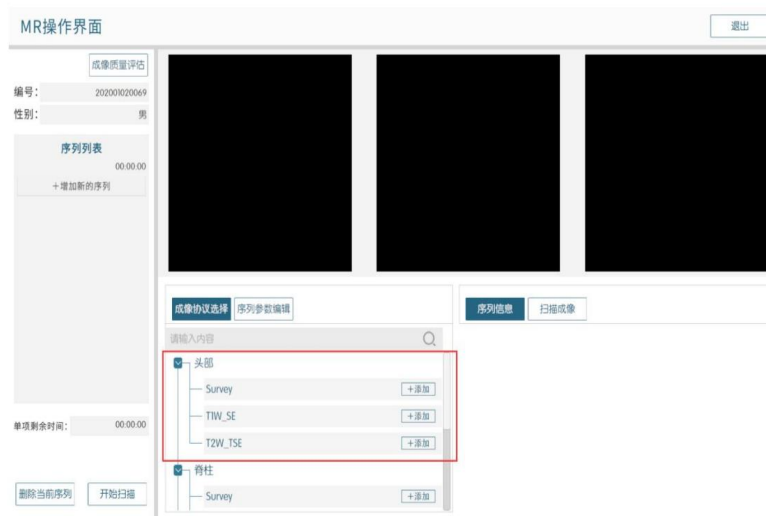


图 42 学习模式下序列列表选择

序列参数如下:

- (1) 相位分辨率 ( $N_{PE}$ )、频率分辨率 ( $N_{FE}$ ): 这两个参数为固定值, 不可更改
- (2) 相位视场 ( $FOV_{PE}$ )、频率视场 ( $FOV_{FE}$ ): 拖动选框, 系统自动更改这两个参数值

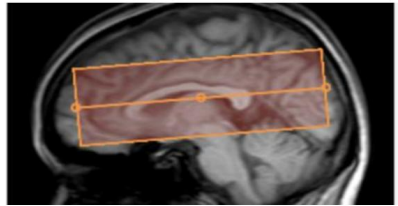


图 43 可拖动的 FOV 选框

- (3) 主磁场大小 (T)、重复时间 TR (ms)、回波时间 TE (ms)、反转时间 (ms)、接收带宽 (kHz)、翻转角 ( $^{\circ}$ )

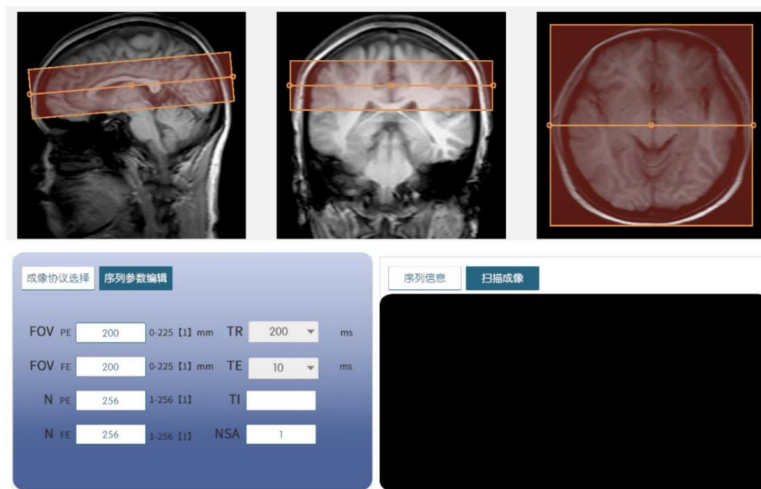


图 44 学习模式下磁共振扫描参数设定

学生进入虚拟扫描界面后，按照扫定位像、拖动调整定位框、选择序列、设定序列参数、进行扫描的顺序进行操作。可多次调整不同参数，进行扫描效果比对，选择一个最满意的结果进行方案提交。

### 实验模式

实验模式侧重不同序列的应用，共有三个案例：正常案例、肿瘤案例、体膜案例。

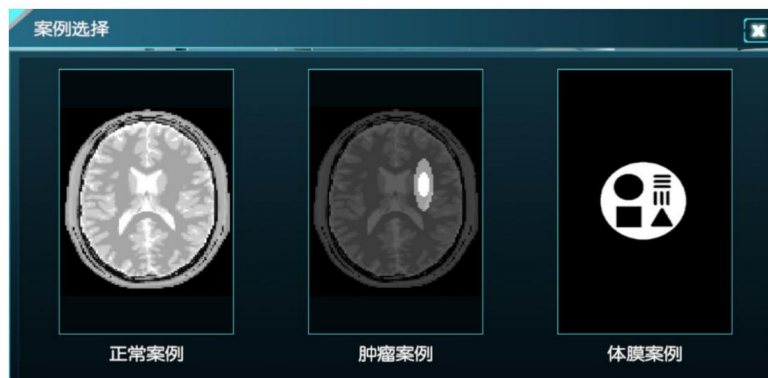


图 45 实验模式下案例选择

共有 5 个序列可供选择：自旋回波序列、反转恢复序列、梯度回波序列、平面回波序列、快速自旋回波序列。单击橙色按钮，可以看到序列的信息简介，供学生选择参考。

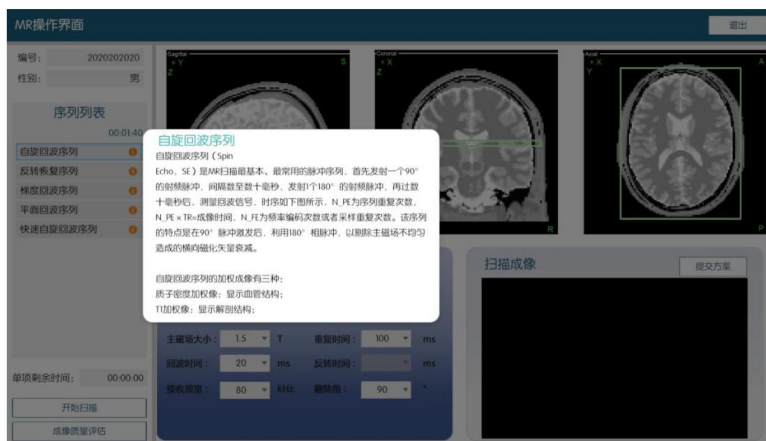


图 46 实验模式下序列选择

扫描参数如下序列参数：

- (1) 相位分辨率 ( $N_{PE}$ )、频率分辨率 ( $N_{FE}$ )：数值固定，不可更改
- (2) 主磁场大小 (T)、重复时间 TR (ms)、回波时间 TE (ms)、反转时间 (ms)、接收带宽 (kHz)、翻转角 ( $^{\circ}$ )

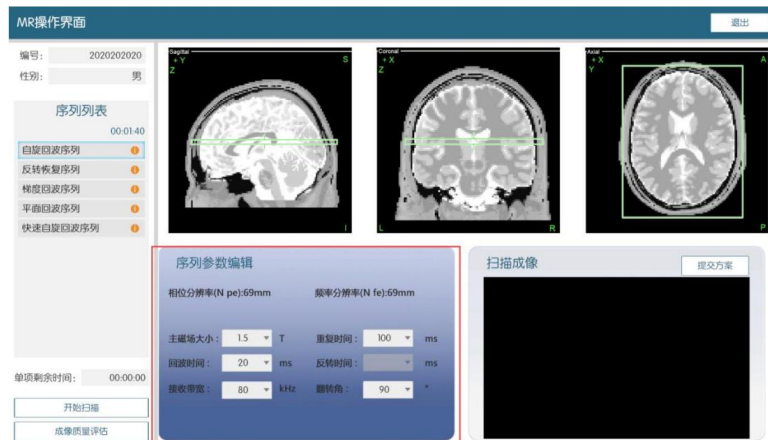


图 47 实验模式下磁共振扫描参数设定

学生选择序列，填写序列参数后点击“开始扫描”按钮，在几秒钟后，将在右下角的扫描成像框中呈现扫描结果，点击“提交方案”，系统将对扫描结果进行信噪比、对比度、扫描时间三维度评估，给出图像质量评价结果，共分优、良、中、差四个等级。学生可多次根据当前任务重新选择序列、更改参数进行扫描，直至获得最好的成像效果。

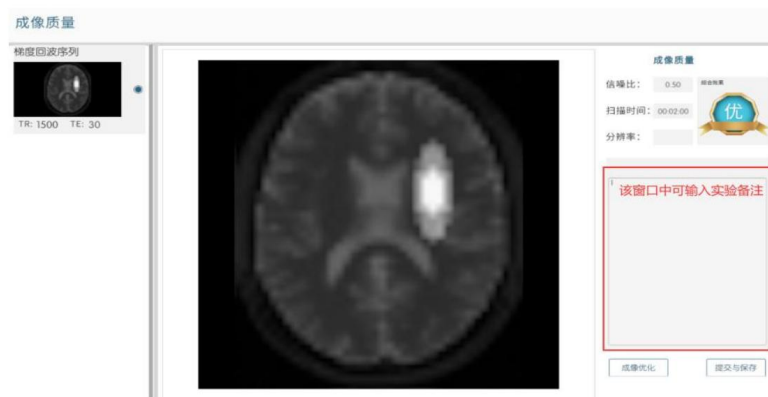


图 48 成像质量评估界面

在评估结果处，可输入扫描备注，或实验思考，将一并生成至最终的实验报告中。输入完后点击“提交与保存”。

■ 步骤 15: 正常案例扫描

正常案例任务: 选择不同序列, 并尝试 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、PD 加权成像突出灰质、白质、脑脊液的对比度。

表 1 部分人体组织 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 值 (B<sub>0</sub>=1.5T/3T)

组织	T1/ms (1.5T)	T2/ms (1.5T)	T1/ms (3.0T)	T2/ms (3.0T)
白质	790	90	1100	60
灰质	920	100	1600	80
脑脊液/水	≥4000	≈2000	>=6000	≈1600
脂质	290	160	360	130
骨骼肌	870	60	1420	30
肝脏	500	50	800	40
软骨	1060	42	1240	37

表 2 加权成像的参数选取参考原则

加权类型	TR	TE
PD	长	短
T1	短	短
T2	长	长



图 49 不同参数扫描结果示例

扫描完成后, 点击“提交方案”, 系统将对扫描结果进行信噪比、对比度、扫描时间三维度评估, 评估结果影响最终得分, 学生可多次重新选择序列、更改参数进行扫描, 直至获

得最满意结果。

■ **步骤 16: 肿瘤案例扫描**

**肿瘤案例任务:** 选择多种序列并调整参数突出肿瘤核心区、水肿区与正常脑组织的对比度。



图 50 不同参数肿瘤扫描结果示例

扫描完成后，点击“提交方案”，系统将对扫描结果进行对比度、扫描时间、肿瘤核心区、水肿区与正常脑组织的对比度评估，评估结果影响最终得分，学生可多次重新选择序列、更改参数进行扫描，直至获得最满意结果。

■ **步骤 17: 体模案例扫描**

**体模案例任务:** 调整多种参数完成脂肪抑制和水抑制效果，提高实验中涉及水—脂肪化学位移的测量。



图 51 体模示意图



图 52 脂肪抑制示意图

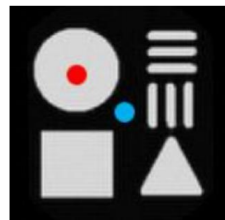


图 53 水抑制示意图

注：图 51 为“水—脂肪”体模（圆柱整体为水模，内部长方体、三角柱等几何体为脂肪）

**STIR 脂肪抑制序列:** 在 IR 序列中脂肪抑制中  $T_1$  值（0 点值）等于脂肪  $T_1$  值的 69% 时，可以最大程度抑制脂肪信号。学生需要使得图 52 中的红色区域尽可能接近 0，同时蓝色区

域不应该过低，调整获得自己最为满意的脂肪抑制图像并提交。

FLAIR 水抑制序列：由于水的  $T_1$  较长，取较长的  $T_1$ ，可以在 IR 序列中抑制水的信号。学生需要使图 53 中的蓝色区域灰度尽可能接近 0，同时红色区域像素值不应过低。调整获得自己最为满意的水抑制图像并提交。

■ 步骤 18：化学位移的测定



图 54 化学位移示意图

图 55 化学位移计算填空

图 54 中可见，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。根据二维傅里叶变换的平移性质：

$$f(x - x_0, y - y_0) \leftrightarrow F(u, v)e^{-j2\pi(ux_0/M + vy_0/N)}$$

可知，在重建的图像中会出现频率编码方向的位移。

已从图像中测得位移的像素距离，再根据成像参数在图 55 中填入设定带宽和频率编码分辨率，计算出脂肪与水的化学位移，填入并提交。

完成四个模块后，可在小结报告中查看自己的得分情况。



图 56 小结报告查看实验得分



图 57 小结报告实例图

■ 步骤 19: 撰写实验报告, 总结思考