




# 高级医学影像分析

## Advanced Medical Image Analysis

王宽全

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

# 第3章 MRI成像原理

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

# 目录

- 概况
- 成像物理条件和基础
- 成像系统

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine


# 目录

- 概况
- 成像物理条件和基础
- 成像系统

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

# 核磁共振成像（MRI）

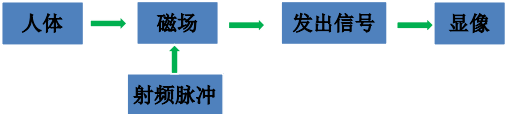
- 一种断层成像技术（这点和CT类似）。
- 基于原子核的磁共振现象发明了MRI。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

# 核磁共振成像（MRI）

- 一种生物磁自旋成像技术，利用原子核（氢核）自旋运动的特点，在外加磁场内，用射频脉冲激发后产生信号，用探测器（接收线圈）检测并输入计算机，经过处理转换在屏幕上显示图像
- 英文简称MRI（magnetic resonance imaging）



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine



## 所有的原子核都可产生核磁吗？

质子为偶数，中子为偶数  $\longrightarrow$  不产生核磁

质子为**奇数**，中子为**奇数**

质子为**奇数**，中子为偶数  $\longrightarrow$  产生核磁

质子为偶数，中子为**奇数**

**结论：质子数和中子数至少一个为奇数**

这样的原子核包括： $^1\text{H}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{19}\text{F}$ 、 $^{23}\text{Na}$ 、 $^{31}\text{P}$ 等百余种元素

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 何种原子核用于MR成像？

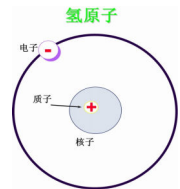
人体磁共振成像选择H的理由：

- 氢原子核最简单，只有一个质子，一个电子，不含中子
- $^1\text{H}$ 是人体最分布最广的原子核，约占人体总原子核的2/3以上
- $^1\text{H}$ 的磁化率在人体磁性原子核中是最高的

➢ 目前生物组织的MRI成像主要是 $^1\text{H}$ 成像

➢ 氢原子核也称为氢质子

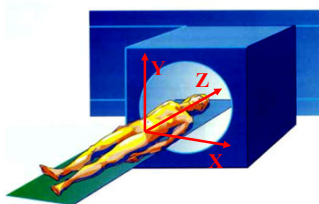
➢  $^1\text{H}$ 的磁共振图像也称为质子像



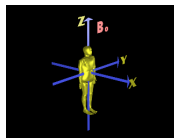
哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 条件二：静磁场



把人体放进大磁场



### ➢ 垂直坐标系

- 用X、Y、Z坐标系来描述磁场的位置
- Z代表 $B_0$ 方向，即**磁力线**方向，常与体轴一致
- X-Y平面代表垂直于磁场方向的平面，三个轴相互垂直

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

- **静磁场**是由磁共振仪器的主磁体产生
- 其强度与方向不变，强度单位 $B_0$
- 主磁体类型：超导、常导、永磁
- **静磁场强度** ( $B_0$ )：1.5-3.0T
- 目前临床上最常用的是**超导MRI**系统

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 进入主磁场**前**质子核磁状态



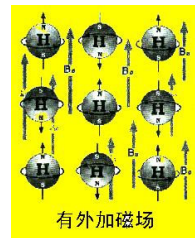
无外磁场

- 人体内的质子不计其数，产生无数个小磁场，这种小磁场的排列是无序杂乱无章的，方向各异，使**每个质子产生的小磁矩相互抵消**。
- 因此，人体自然状态下**无磁性，即没有宏观磁化矢量的产生**。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 进入主磁场**后**质子核磁状态



有外加磁场

进入主磁场后，人体内的质子产生的小磁场不再是杂乱无章，呈有**规律排列**。

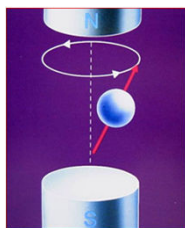
一种是与主磁场平行且方向相同；（低能级）

另一种是与主磁场平行但方向相反。（高能级）。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 进入主磁场后质子核磁状态

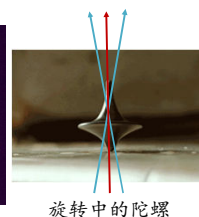
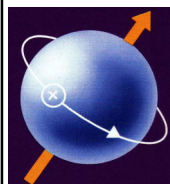


进入主磁场后，无论是处于高能级的质子还是处于低能级的质子，其磁化矢量并非完全与主磁场方向平行，而总是与主磁场有一定角度（构成**旋转进动**）

进动是质子小磁场与主磁场相互作用的结果

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 什么旋转进动？



旋转中的陀螺

磁场中的陀螺

质子除了自旋运动外，还绕主磁场轴进行旋转摆动，我们把质子的这种旋转摆动称为**进动**。这个现象说明原子核磁场是可以摆动的！这是核磁共振现象的基础。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

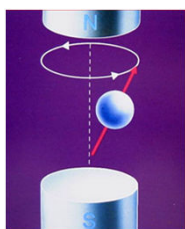
## 摆动频率（Larmor频率）

### • 进动频率（Larmor频率）

### • 计算公式： $\omega = \gamma \cdot B$

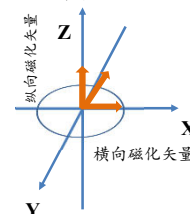
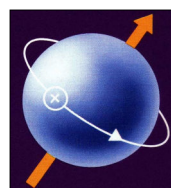
$\omega$ 代表Larmor频率， $\gamma$ 为磁旋比（ $\gamma$ 对于某一种原子核来说是个常数，质子的 $\gamma$ 约为42.5mHz/T）， $B$ 为主磁场的场强，单位为特斯拉（T），

- 从式中可以看出，**质子的进动频率与主磁场强度呈正比。**



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 磁场矢量（磁矩）



矢量：

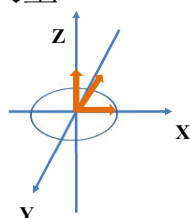
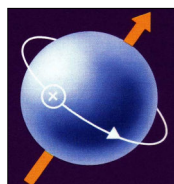
有方向：磁场方向

有大小：场强

有分量：XY平面分量( $M_{xy}$ ，**横向磁化矢量**)和Z轴分量 ( $M_z$ ，**纵向磁化矢量**)

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 磁场矢量



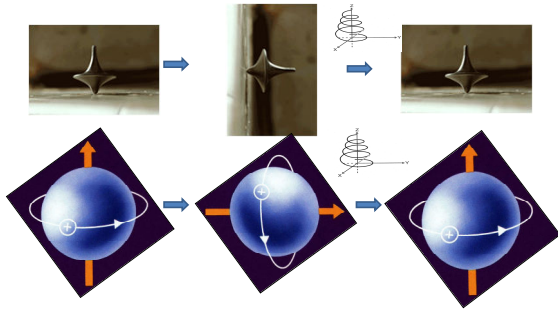
**稳定的核磁矢量不会向外界发出任何信号！**  
无法单独检测，不能用于成像！

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

因此我们要让磁场产生振荡——共振！

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 磁场振荡—磁场偏转

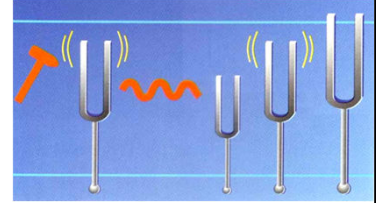


哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 如何产生核磁共振？

### 共振

- 排列起一组音叉，敲击一个音叉振动发声时，组内与之音调相同的音叉就会吸收能量振动发声，这个过程叫做“共振”
- 共振：能量从一个振动着的物体传递到另一个物体，后者以与前者相同的频率振动。共振的条件是相同的频率，实质是能量的传递。

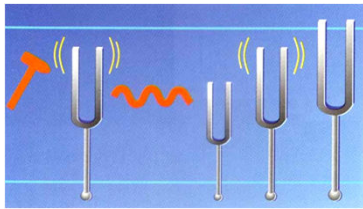


哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

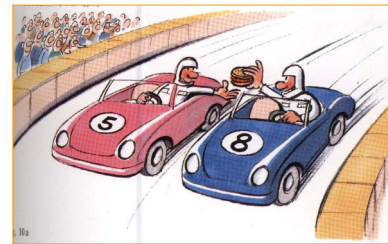
## 如何产生核磁共振？

### 共振

- 照此原理，将一组与氢原子核进动频率相同的电磁波能量发射到质子群上，一旦加大核磁偏转角并产生旋转，即可达到产生振荡磁场的目的。
- 这种射频脉冲的频率必须与氢质子进动频率相同！



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine



当质子频率与射频脉冲频率相同时就能进行能量交换（两辆车速度一样才能交换食物）

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 射频脉冲（RF）

- 射频脉冲（radio frequency, RF）系统产生能量激发质子共振，并接受质子释放的共振信号。

RF系统包括下列组件：

### 组成：

- 射频放大器
- 射频通道
- 脉冲线圈：发射线圈  
接收线圈

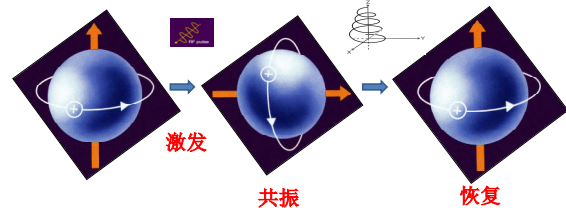
### 作用：

- 激发人体产生共振（广播电台的发射天线）
- 采集MR信号（收音机的接收天线）

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 共振发生过程

- 激发：RF把能量传递给质子（核磁）
- 共振：质子群共振后生成磁化矢量角度偏转
- 恢复：RF消失后磁化矢量角度恢复。

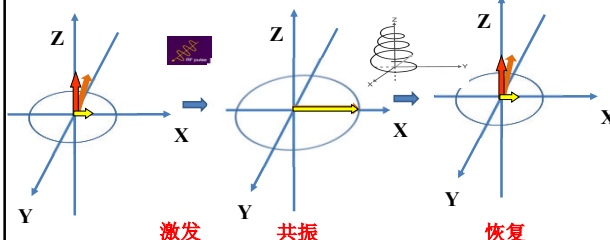


哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine



## 共振发生过程

- 激发: RF把能量传递给质子
- 共振: 质子群共振后生成磁化矢量角度偏转(横向磁化矢量变到最大)
- 恢复: RF消失后磁化矢量角度恢复(纵向磁化矢量逐渐恢复直至最大)



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 核磁弛豫

- 定义: RF脉冲关闭后, 组织的宏观磁化矢量逐步恢复到平衡状态的过程

- 核磁弛豫可分为两个相对独立的部分:

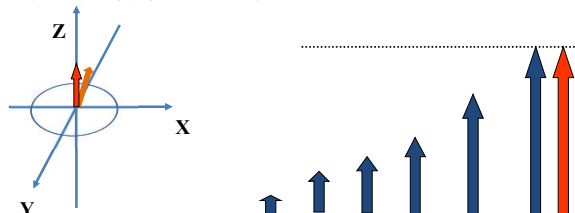
- 横向磁化矢量逐渐变小直至消失, 称为**横向弛豫**
- 纵向磁化矢量逐渐恢复直至最大(平衡状态), 称为**纵向弛豫**

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 纵向弛豫

也称为**T1弛豫**, 是指脉冲关闭后, 在主磁场的作用下, 纵向磁化矢量开始恢复, 直至恢复到平衡状态的过程。

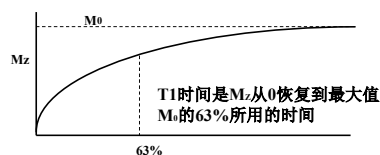


哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 基于纵向弛豫 (T1) 的成像信号

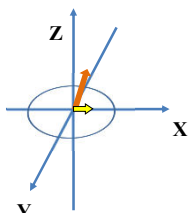
- T1时间 (T1值): 宏观纵向磁化矢量恢复到最大值 ( $M_0$ ) 63% 所用的时间
- 不同的组织由于质子周围的分子自由运动频率不同, 其纵向弛豫速度存在差别, 即T1值不同。人体组织的T1值受主磁场强的影响较大, 一般随场强的增大, 组织的T1值延长。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 横向弛豫



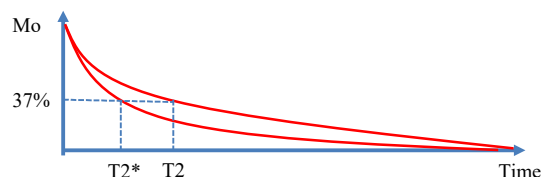
也称为**T2弛豫**, 简单地说, T2弛豫就是横向磁化矢量减少的过程。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 基于横向弛豫 (T2) 的成像信号

- T2时间 (T2值): 横向磁化矢量衰减到最大值 ( $M_0$ ) 37% 所需要的时间。
- 不同组织由于质子受周围微观环境影响不同, **T2值不同**, 即T2弛豫速度不同; T2时间长的组织, 横向弛豫速度慢。不同的场强T2值也会发生变化。



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT • Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

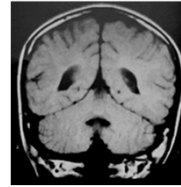
### 人体正常脑组织的T1、T2弛豫时间

弛豫时间 (ms)	脑白质	脑灰质	脑脊液	颅板	脑障
T <sub>1</sub>	780	920	3000	-	260
T <sub>2</sub>	90	100	300	-	84

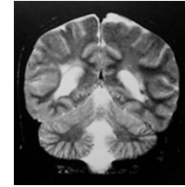
哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

### 基于T1、T2弛豫现象进行的多模态成像



T1WI  
T1加权成像



T2WI  
T2加权成像

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

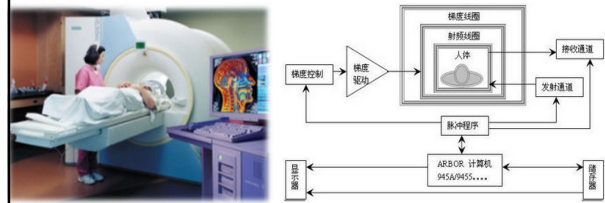
### 目录

- 概况
- 成像物理条件和基础
- 成像系统

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

### 成像系统设计图



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

### 如何把核磁信号转化为图像呢？

图像是有空间位置的，每个像素点有坐标 (X,Y,Z)

由于磁共振接收到的信号是一个总体的信号

不能区分空间的位置

我们需要对其进行空间编码，也就是在 (X,Y,Z) 方向进行编码

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

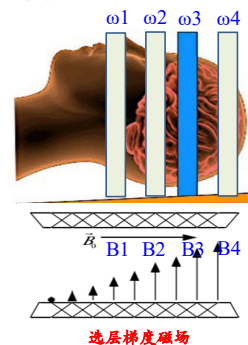
### Z方向—选层（断层）

在Z方向开启梯度磁场（沿着Z轴磁场强度梯度变化），各个位置的Larmor频率不相同，通过施加特定频率的射频磁场就会使得某个层发生共振。

- 进动频率（Larmor频率） $\omega = \gamma \cdot B$

$\omega$ 代表Larmor频率， $\gamma$ 为磁旋比（ $\gamma$ 对于某一种原子核来说是个常数）， $B$ 为主磁场的场强

- 从式中可以看出，质子的进动频率与主磁场强度成正比。

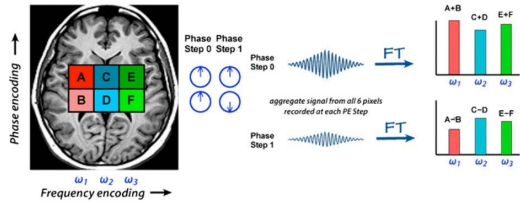


选层梯度磁场

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## XY平面—编码



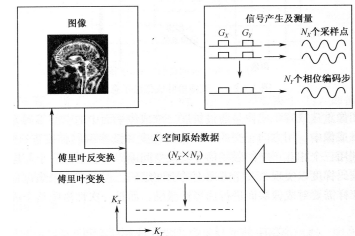
然后是相位编码和频率编码：这个过程比较复杂，相位编码和频率编码的物理过程其实对应了二维傅里叶的数学过程，所以最终接收到的图像就是频率空间K-SPACE。这其实是MRI里面非常fascinating的一个环节：经过空间编码后，你接收到的信号就是频率空间的信号了。它非常的奇妙，当然也不是那么容易就能让人理解。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## K空间

- ◆MRI成像时，需要多次射频激发采集多行数据，将采集到的原始信号数据填入到一个矩阵中，称为K空间
- ◆该空间内的数据对应的是空间位置的空间频率数据
- ◆利用该空间内的数据经过傅里叶反变换，可以得到图像数据
- ◆K空间中的数据点阵与图像的的点阵不是一一对应的，每一个点包括了全层信息



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

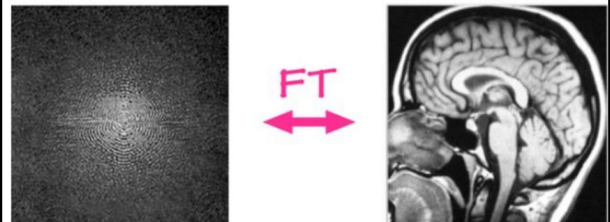
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

- 在磁共振成像（MRI）中，k空间（k-space）是一个重要概念，它是对图像数据的一种频域表示。k空间中的数据通常以一系列复数形式存储，其中每个点代表特定频率成分在图像中的强度和相位。k空间数据通常通过傅里叶变换与图像空间（实际成像数据）相互转换。
- k空间的一个关键特点是它的中心区域包含了图像对比度和低频信息，而边缘区域则包含图像的高频细节和边缘信息。因此，在采集k空间数据时，中心区域的数据对图像质量和对比度至关重要，而边缘区域的数据则对图像细节和分辨率更为关键。
- 在MRI扫描过程中，梯度磁场的作用使得不同空间位置的信号在频域上产生不同的相移。通过调整梯度磁场的大小和方向，可以在k空间中沿特定轨迹进行采样。常见的k空间采样方法包括笛卡尔采样（Cartesian sampling，沿矩形网格采样）和径向采样（Radial sampling，沿射线方向采样）等。
- 采集完k空间数据后，需要通过傅里叶逆变换将其转换为实际的图像数据。在实际应用中，由于时间和硬件限制，k空间数据的采集往往是不完整的。这就需要利用先进的图像重建算法来填补缺失数据，以获得更高质量的图像。人工智能和机器学习技术在此领域发挥着越来越重要的作用，有助于实现更快速、更准确的图像重建。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 图像重建



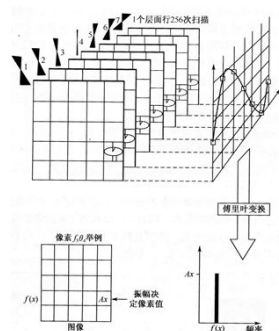
多次相位编码完成之后，K空间被填充完了，经过二维傅里叶逆变换就能得到我们想要的图像了。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## 图像重建详解

- ◆ 二维成像是用方向正交的相位编码梯度和频率编码梯度进行空间编码
- ◆ 三维成像是利用三个相互正交的磁场梯度实现空间编码，它增加一个与层面方向垂直的相位编码梯度以实现第三个方向上的空间编码。一次性激励整个成像容积
- ◆ 三维图像重建或容积成像是通过扩展二维成像平面中的空间编码方向来实现的



哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

## MRI（磁共振成像）的主要关键技术包括：

- 1.超导磁体：强磁场是MRI设备的核心组件，通常由超导磁体产生。超导磁体可以产生高达数特斯拉（Tesla）的稳定磁场，使得水分子在人体内产生可探测的信号。
- 2.射频脉冲与射频接收：射频脉冲用于激发水分子的磁共振信号，随后通过射频接收器（如线圈）检测这些信号。射频脉冲和接收器的设计对于提高信号强度和图像质量至关重要。
- 3.梯度磁场：在主磁场中施加可变梯度磁场，用于对空间进行编码。梯度磁场的快速切换和精确控制对于实现高分辨率和快速成像至关重要。
- 4.脉冲序列：脉冲序列是一系列射频脉冲和梯度磁场切换的时间安排，用于产生特定类型的图像。脉冲序列的设计影响着图像的对比度、分辨率和扫描时间。
- 5.信号处理与重建：对接收到的信号进行处理和重建，以生成二维或三维的图像。这包括去噪、滤波和从频域到空间域的转换（如傅里叶变换）等步骤。
- 6.图像处理与分析：对重建的图像进行分析和处理，以提高图像质量、解析度和对比度。这可能包括图像分割、配准、特征提取和分类等算法。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组

HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine



- 7. 安全性：确保MRI设备在操作过程中的安全性至关重要。这包括磁场强度的限制、射频脉冲功率的控制以及与植入物（如心脏起搏器和金属支架）的相互作用。
- 8. 功能性磁共振成像（fMRI）：fMRI是一种特殊的MRI技术，可以检测大脑活动的变化。通过测量血氧水平依赖信号（BOLD），fMRI可以揭示特定任务或刺激下的大脑活动模式。
- 9. 弥散张量成像（DTI）：DTI是一种利用MRI探测水分子弥散特性的技术，可用于研究神经纤维束的结构和方向。DTI通过分析水分子在各个方向上的弥散性质，可以生成神经纤维的三维表示，有助于了解大脑的解剖结构和神经连接。
- 10. 磁共振波谱（MRS）：MRS是一种利用MRI技术定量测量生物体内代谢物浓度的方法。MRS可用于探测特定生物分子的磁共振信号，为研究细胞代谢和生物化学过程提供信息。
- 11. 磁共振静脉成像（MRA）：MRA是利用MRI技术观察血管结构和功能的方法。通过对比剂或特定脉冲序列的使用，MRA可以清晰显示血管的形态和血流情况，有助于诊断血管疾病。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

- 12. 原位核磁共振：原位核磁共振技术通过在MRI设备中进行手术操作，以实时指导手术过程。这种方法可以为外科医生提供关于解剖结构和病灶的实时信息，提高手术的精确性和安全性。
- 13. 人工智能与机器学习：AI和ML技术在MRI领域的应用日益增多。这些技术可以用于优化图像重建、处理和分析，实现自动化分割、分类和诊断等功能，提高MRI的性能和临床应用价值。
- 14. 平行成像技术：平行成像技术利用多个独立的射频接收器并行接收信号，以减少扫描时间和提高图像质量。这种技术需要复杂的重建算法来合成并行接收到的信号。
- 15. 硬件优化：为了提高MRI设备的性能，研究人员一直在开发更高性能的磁体、射频系统和梯度系统。硬件优化对于实现更高分辨率、更快扫描速度和更好的图像质量至关重要。

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine

谢谢！

哈尔滨工业大学·感知计算研究中心·计算医学课题组  
HIT •Computational Perception Center • Research Group of Computing Medicine