



北京大学物理学院 李健通

脉冲磁共振及核磁共振成像

Bryan

北京大学物理学院 学号：1500066666 *

(日期：2019 年 6 月 7 日)

本实验检验了脉冲磁共振的基本原理，探索了其在核磁共振成像方面的基础应用，利用 JXMRI-S2.1 型磁共振成像仪以自旋回波成像法获取了 CuSO_4 溶液的核磁共振图像。

在此基础上，通过在 CuSO_4 溶液中加入正三角形、正六边形样品后成像，检验了该成像方案的分辨能力；并通过对比不同浓度的 CuSO_4 溶液像，初步验证了 T_2 加权成像原理。

关键词：核磁共振 脉冲磁共振 自由感应衰减 自旋回波 核磁共振成像编码

* masked_email_please_contact@github.com

I. 引言

核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR) 是核磁矩与特定频率的射频场发生共振吸收的现象；激发核与通过相互作用辐射退激，共振频率和退激的时间尺度与物质种类、结构和环境有关，故可利用核磁共振探测物质的结构；通过额外的空间编码，则可用于物质成像，此即核磁共振成像 (NMR imaging, NMRI) 的基本原理。

1971 年美国化学家 P. C. Lauterbur 提出了核磁共振成像的可行思路和方法，其工作 [1] 于 1973 年发表于《自然》杂志，奠定了现代核磁成像基础的基础。在 P. Mansfield 等人的改进下，NMRI 技术不断得到优化，并被广泛应用于医学成像中；NMRI 对人体没有电离辐射损伤，且分辨率高、对比度大。Lauterbur 与 Mansfield 因其在核磁共振成像方面的贡献被授予 2003 年诺贝尔医学奖。

NMRI 的关键是需要对核磁共振信号进行空间编码，解译经过编码的 NMR 信号以得实空间的 NMR 图像，可见编码方式是 NMRI 技术的核心。本实验即在了解脉冲磁共振原理的基础上，探索了基本的空间编码方式。

II. 理论

核磁共振方法有稳态核磁共振和脉冲核磁共振两种，应用于成像时则基本采用脉冲磁共振的方法。具体而言，脉冲核磁共振通过探测核磁系统对短时射频脉冲的响应确定系统的共振特性；设脉冲强度 B' ，作用时间为 τ ，则核磁矩偏离平衡位置：

$$\theta = \gamma B' \tau \quad (1)$$

其中 $\frac{\gamma}{2\pi} = \frac{g\mu_N}{2\pi\hbar}$ 为回旋频率。

此后，经过一段时间的弛豫，磁化强度指数衰减 $M_{xy} \rightarrow 0$, $M_z \rightarrow M_0$ ，纵向 (z)、横向 (xy) 弛豫时间分别记为 T_1 , T_2 ，由于 $M_z = M_0$ 时必有 $M_{xy} = 0$ ，而反之不然，故有 $T_2 < T_1$ 。

II. 理论

利用感应线圈，可检测、分析弛豫过程的自由感应衰减信号 (free inductive decay, FID)，傅立叶分析以得到共振信息。

特别地，若加 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 射频脉冲，使 $\mathbf{M} = M_0 \hat{\mathbf{z}}$ 倒向 xy 平面，经历一段时间 τ 后核磁矩相位离散使得 $M_{xy} \simeq 0$ ，此时再加 π 脉冲可实现重新聚相，得到自旋回波信号 (spin echo, SE)。本实验中成像时探测的信号即为自旋回波信号。

为实现成像目的，须对核磁共振信号进行空间编码；这通过附加线性梯度场 $\mathbf{B}(x, y, z) \parallel \hat{\mathbf{z}}$ 实现。具体而言，

1. **z 选层**：加 $B_z = zG_z$ ，此时有共振条件：

$$\omega = \omega(z) = \gamma(B_0 + G_z z) \quad (2)$$

脉冲带宽 $\Delta\omega$ 限定了 ω 的取值范围，此时只有特定 $z = z_0$ 横断面附近的核将产生共振，其他各层的核均处于非共振状态，对 NMR 信号无贡献。

2. **y 相位编码**：撤去脉冲、 G_z 后，加 $B_z = yG_y$ 使不同 y 处的核磁矩以不同角频率进动，持续 t_y ，可使不同 y 处附加不同的相位：

$$\omega_y t_y = \gamma G_y y t_y \quad (3)$$

即实现了 y 方向的编码。

3. **x 频率编码**：加 $B_z = xG_x$ ，类似相位编码，有：

$$\omega_x t_x = \gamma G_x x t_x \quad (4)$$

即实现了 x 方向的编码。

至此，便完整地实现了空间编码；注意 x, y 方向的编码原理稍有差异，具体而言， $\omega_x(x)$ 可直接由感应信号 $S(t) = S(t_x - t_0)$ 傅立叶变换得到，故称为频率编码；相反， y 方向的信息须通过改变 $G_y t_y$ 多次脉冲得到，故为相位编码。

II. 理论

考虑改变 t_y 多次脉冲得到的序列 $S(t_x, t_y) = S(t)|_{t_y}$, 有:

$$S(t_x, t_y) \propto \iint dx dy e^{i\omega_x t_x} e^{i\omega_y t_y} \rho(x, y) \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \quad (5)$$

这里 $\omega_x t_x, \omega_y t_y$ 正是编码时附加的相位, 注意 t, t_x 线性相关; 对 $S(t_x, t_y)$ 进行二维傅立叶变换, 即得 T_2 加权的核密度 $\tilde{\rho}(x, y)$. 此即成像的基本原理。

III. 实验装置

实验采用 JXMRI-S2.1 型磁共振成像仪及相应的自动化控制软件, 由三组梯度线圈实现信号的空间编码; 使用前仪器须开机预热 ~ 1 h. 样品与磁场的相对位置如图所示; 约定恒磁场沿 z 方向, 则选层梯度沿 x 方向, 即附加 $\mathbf{B}(x, y, z) = xG_x \hat{\mathbf{z}}$, 相应地相位、频率梯度分别沿 y, z 方向。

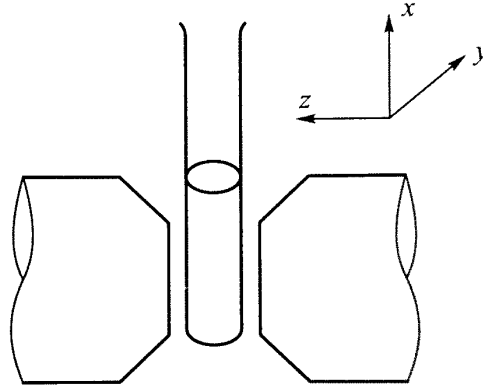


图 1: 磁场与样品的空间坐标约定示意图, 选自 [2].

实验中采用 (截断的) 时域包络 $\sim \text{sinc } \alpha = \frac{\sin \alpha}{\alpha}$ 的软脉冲激发原子核并获取自旋回波信号。软脉冲在频域为矩形脉冲, 即带宽 $\Delta\omega$ 内各频率强度相同, 由于空间编码后共振频 ω 带有空间信息, 采用软脉冲可减少成像时的密度偏差。

III. 实验装置

IV. 结果与分析

实验前首先选用硬脉冲校准质子共振激发频率，作为后续脉冲的中心频率。实验过程中由于永磁体的磁场强度随温度波动，在每次成像前均应重校激发频率。装入样品 0.5 % CuSO_4 溶液，初次校准得到的修正激发频率为：

$$f = 12.705\,383\,\text{MHz} \quad (6)$$

随后切换为软脉冲，观察自由感应衰减信号，通过比较不同参数时的信号强度以确定 $\frac{\pi}{2}, \pi$ 脉冲对应的最佳参数。

本实验中固定脉冲宽度 $\tau = \text{D1} = 1000\,\mu\text{s}$ ，通过调整幅度 $B' \propto \text{D1P}$ 以获取 $\frac{\pi}{2}, \pi$ 脉冲。实测 FID 信号的首个极大、极小分别对应 $\text{D1P} \sim 22, 41$ ，分别对应 $\frac{\pi}{2}, \pi$ 脉冲。以此为参考值设定成像部分 $\text{D1P}, \text{D2P}$ 参数。

在此基础上，设置采样率 $\text{NS} = 16$ ，重校频率后以自旋回波法成像，得：

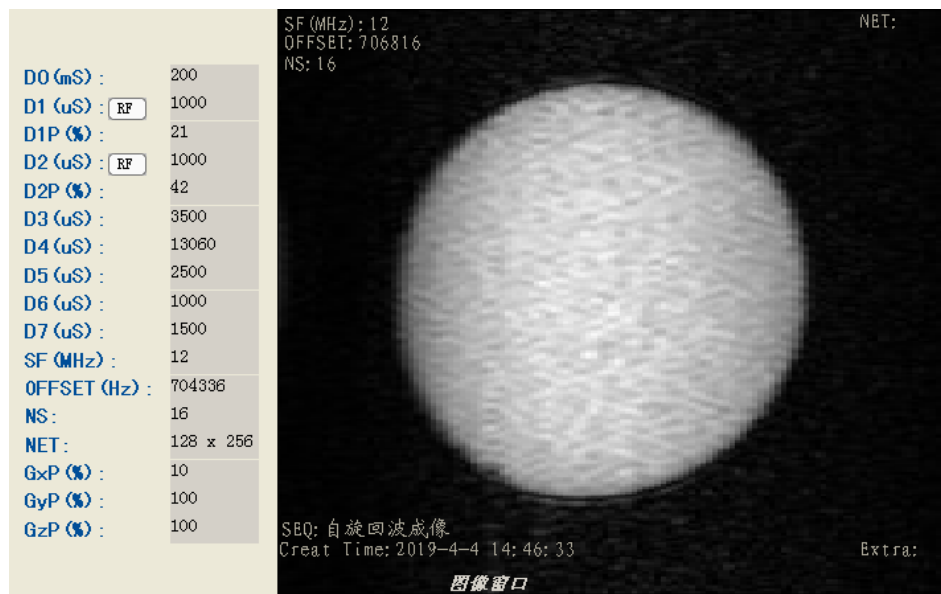


图 2: 0.5 % CuSO_4 溶液 $x = 0$ 截面核磁共振图像及相应参数

随后在试管中加入正三角形、正六边形样品，重校频率、再次成像，结果如下。

IV. 结果与分析

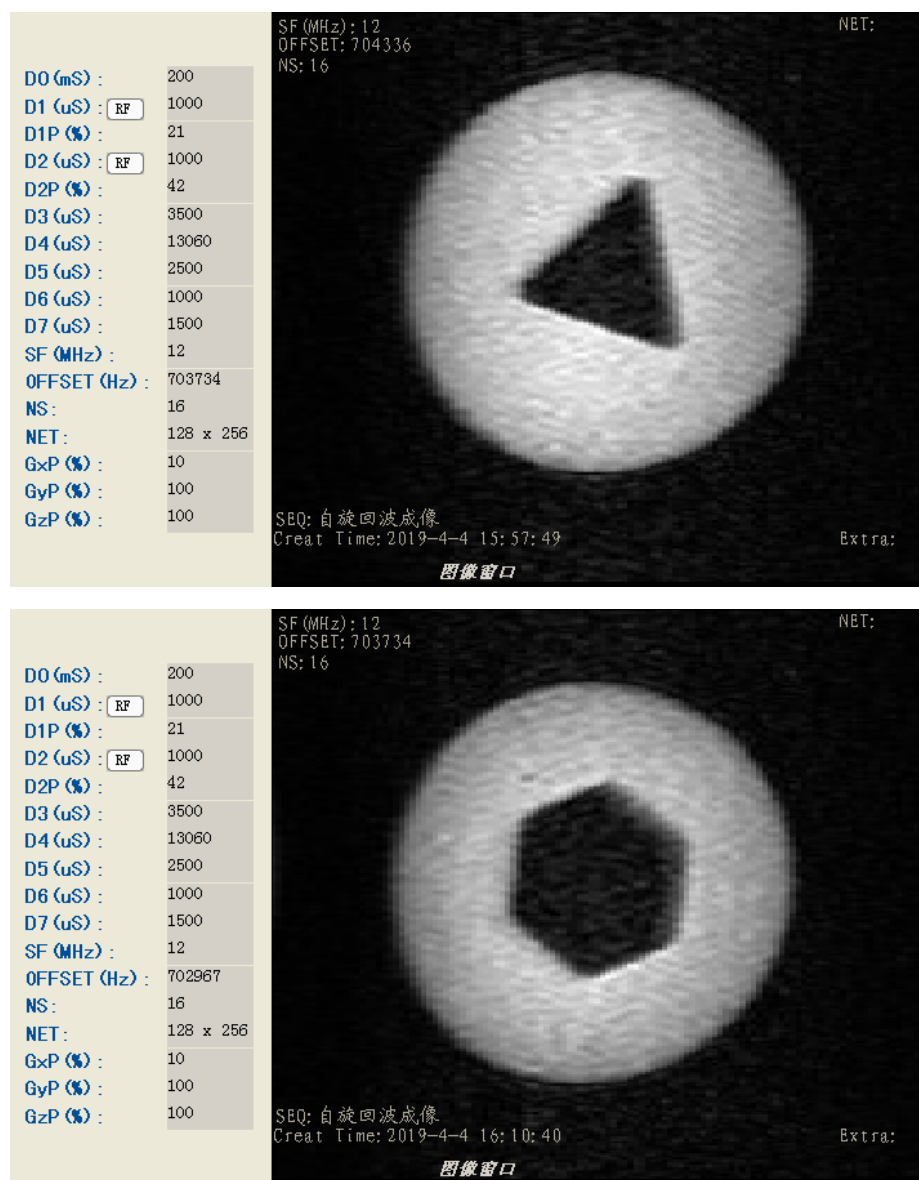


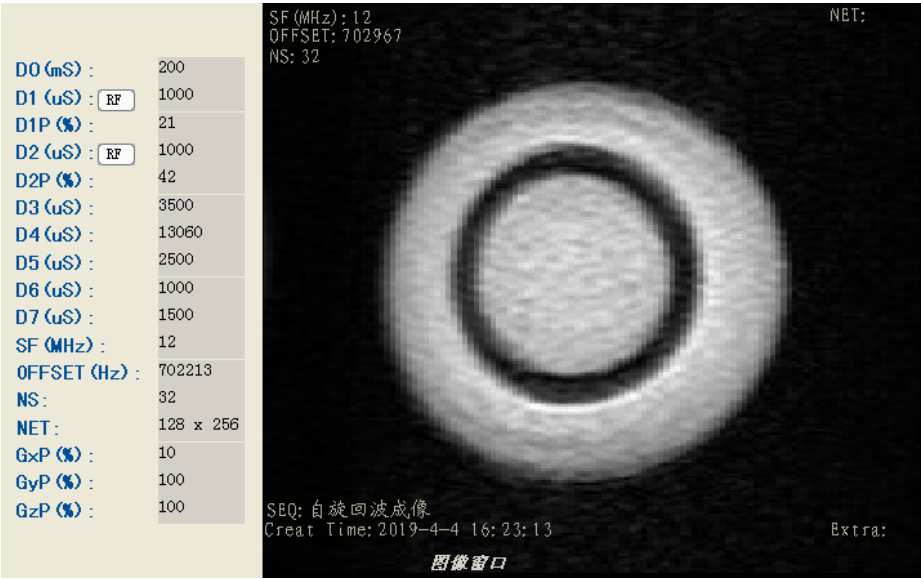
图 3: 0.5 % CuSO₄ 溶液加入正多边形样品后的核磁共振图像以及相应参数

由图可见，正三角形、正六边形各边、角均相当明确，这便验证了该成像方法具有充分高的分辨能力。

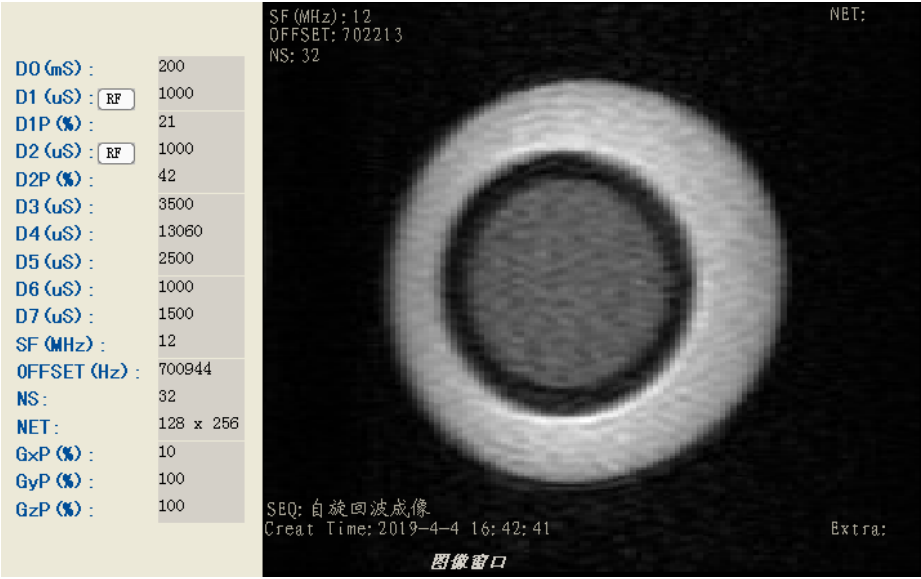
为观察到 T_2 加权效应，须改变样品的 T_2 值，这可以通过引入不同浓度的 CuSO₄ 溶液实现。增大 CuSO₄ 溶液的浓度，水中质子的浓度 $\rho(x, y)$ 基本不变，而顺磁剂 Cu²⁺ 浓度增大，这使得弛豫时间 T_2 显著减小，对应信号减弱。

IV. 结果与分析

实验中，在装有原 0.5 % CuSO_4 溶液的大试管中嵌入另一装有更高浓度 CuSO_4 溶液的小试管以比较 T_2 加权情况，结果如下。



(a) 中心小试管：1 % CuSO_4 溶液



(b) 中心小试管：2 % CuSO_4 溶液

图 4: 0.5 % CuSO_4 溶液加入正多边形样品后的核磁共振图像以及相应参数

IV. 结果与分析

.....

明显可见中心小试管区域（高浓度）较暗，此即 T_2 加权现象；溶液浓度越大，图像变暗的程度越大。

V. 结论

本实验使用小型核磁共振成像仪获得了 CuSO_4 溶液的核磁共振像，利用多边形样品检验了成像的分辨率，并通过比较不同浓度的 CuSO_4 溶液验证了 T_2 加权效应；由此加深了对脉冲核磁共振及其成像原理的理解，掌握了小型核磁共振成像仪的基本使用方法。

VI. 致谢

感谢黄斐增老师的细致指导和耐心帮助；感谢 T_EX - L^AT_EX Stack Exchange¹，助我解决了众多排版问题。

-
- [1] LAUTERBUR P C, et al. Image formation by induced local interactions: examples employing nuclear magnetic resonance[M]. [S.l.: s.n.], 1973.
- [2] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.

¹ <https://tex.stackexchange.com/>