

脉冲核磁共振与成像

王艺霖*

物理学院 学号:2200011456

摘要: 本实验基于核磁共振(NMR)技术,通过脉冲核磁共振和核磁共振成像的实验,研究了不同脉冲序列对弛豫时间和成像效果的影响。实验包括利用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG)序列和反转恢复(Inversion Recovery, IR)序列测量样品的横向弛豫时间(T_2)和纵向弛豫时间(T_1),并对结果进行拟合分析;此外,还进行了 T_2 加权的核磁共振成像,观察了不同浓度的 CuSO_4 溶液及其成像特征。实验结果表明, T_2 和 T_1 随样品浓度增加而减小,且 T_2 加权成像对不同浓度溶液的分辨能力显著。通过本实验,深入理解了 NMR 和 MRI 技术在科学研究和医学诊断中的应用价值。

关键词: 脉冲核磁共振, 核磁共振成像, NMRI

I. 引言

1946年,费利克斯·布洛赫和爱德华·珀塞尔独立发现了核磁共振现象,并因此共同获得了1952年的诺贝尔物理学奖。自那时以来,NMR技术迅速发展,应用领域不断扩大。1960年代,NMR成为有机化学中确定分子结构的标准工具。1970年代,Jean Jeener提出的二维核磁共振(2D NMR)技术,使得对复杂分子的结构解析成为可能。1980年代,核磁共振成像(MRI)技术的突破性进展,使其成为医学影像学的重要手段之一。

MRI是一种基于NMR原理的医学成像技术,通过检测人体内水分子和其他成分的NMR信号来生成详细的内部结构图像。MRI技术的核心是利用梯度磁场和射频脉冲来编码空间信息,使得不同组织的NMR信号产生差异,从而形成高对比度的图像。MRI的主要成像序列包括 T_1 加权成像、 T_2 加权成像和质子密度成像。

* e-mail: wylin@stu.pku.edu.cn; mobile number: 15837187296

NMR 和 MRI 技术在多个领域有广泛应用。在有机化学和生物化学中，NMR 用于确定分子的三维结构、研究分子动力学和相互作用；在材料科学中，NMR 用于研究固体材料的微观结构和动力学行为。在医学领域，MRI 是最重要的无创成像技术之一。它在神经科学、心血管疾病、肿瘤学和肌肉骨骼系统疾病的诊断和研究中发挥着关键作用。

本实验利用脉冲核磁共振，对横向和纵向弛豫时间分别进行测量。同时进行 T_2 加权的核磁共振成像，分析影响成像结果的因素。

II. 理论

具有非零磁矩的原子核在外磁场 B_0 的作用下产生分裂，此时如果在垂直 B_0 的方向上施加一个频率为 ν 交变磁场并且满足 $h\nu$ 等于能级间距，则可以引起核能态在两个分裂能级之间的跃迁，也就是发生核磁共振。

对于外磁场 B_0 中的宏观物体，其宏观磁矩的平衡态是与外磁场方向平行的，如果某种外界因素使得磁矩偏离 B_0 的方向，那么总磁矩 M 会绕着 z 轴（ B_0 方向）旋转，并且逐渐恢复到平衡态，这个过程即为弛豫过程。弛豫过程可以分解为两个方向上的弛豫：平行于外磁场方向的纵向弛豫，和垂直外磁场方向的横向弛豫。纵向弛豫时间用 T_1 表示，取决于自旋-晶格相互作用；而横向弛豫时间用 T_2 表示，不仅取决于自旋-晶格相互作用，还与自旋-自旋相互作用有关。

利用脉冲核磁共振测量横向弛豫时间 T_2 的基本原理是自旋回波法，可以有效地消除磁场不均匀对测量结果的影响。施加 $\frac{\pi}{2}$ 脉冲后核磁矩开始绕 z 轴旋进，由于核磁矩所在位置的磁场不同导致相位也不同，经过 τ 时间后施加一个 π 脉冲，这样原本相位超前的核磁矩现在相位落后，反之亦然，于是再经过 τ 时间之后核磁矩会再次处于相同相位，产生磁矩的极大值，多次改变 τ 测量回波信号的峰值即可求得 T_2 。在实际测量中，更为简单的做法是使用 CPMG 序列脉冲，也就是 $\frac{\pi}{2} - \tau - \pi - 2\tau - \pi - 2\tau - \pi \dots$ 的系列脉冲来测量

T_2 .

利用脉冲核磁共振测量纵向弛豫时间 T_1 则采用 IR 序列脉冲，也就是 $\pi - \tau - \frac{\pi}{2}$ ，并通过多次改变 τ 的大小来测量纵向弛豫过程的进行，从而利用 $M_z = M_0(1 - 2e^{-\frac{\tau}{T_1}})$ 来测量了 T_1 .

由于射频场只能激发频率匹配的核磁矩，所以当磁场具有一定的梯度时，就可以人为控制激发特定空间位置的核磁矩，利用这一特点，就可以设计一定的编码方式来使得样品的空间密度信息被编码到核磁共振的信号中，再经过反演就可以得到样品的密度分布，这就是所谓的核磁共振成像 (Nuclear Magnetic Resonance Imaging, NMRI). 编码方式是 NMRI 技术的核心. 一种基本的方法如下：

1. z 选层：加 $B_z = zG_z$ ，此时有共振条件：

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

通过控制 G_z 的大小和脉冲带宽就可以选择性地激发特定 z_0 横截面附近的核.

2. y 相位编码：撤去脉冲结束时撤去 G_z ，加 t_y 时间的 $B_z = yG_y$ ，从而使不同 y 处的核具有不同的附加相位：

$$\omega_y t_y = \gamma G_y y t_y$$

3. x 频率编码：加 $B_z = xG_x$ ，类似相位编码，有：

$$\omega_x t_x = \gamma G_x x t_x$$

至此就完整地实现了空间编码，由于每次测量需要改变不同的 t_y ，多次测量之后才能反演出关于 y 方向的信息，而 x 方向的信息可以在每次测量中进行 FFT 得到，所以 y 编码被称为相位编码，而 x 方向编码被称为频率编码.

III. 实验

A. 实验装置

本实验使用纽迈公司生产的核磁共振成像技术实验仪进行实验，并配备有相应的软

件来操作并采集数据，可以做到自动化调节测量共振频率、 $\frac{\pi}{2}$ 脉冲时间，自动产生 *CPMG,IR* 等序列，极大地简化了实验操作的流程。

B. 实验内容

1. 调节仪器

打开仪器进行预热，等待 90 分钟开始正式采集数据，在等待仪器预热期间熟悉操作流程。仪器预热完成后，根据仪器使用手册对共振频率、 $\frac{\pi}{2}$ 脉冲时间进行测量，并使用 *SE* 序列脉冲观察回波信号。

2. 使用 *CPMG* 序列脉冲测量横向弛豫时间 T_2 。

3. 使用 *IR* 脉冲序列脉冲测量纵向弛豫时间 T_1 。

4. 打开脉冲成像软件，调节参数并定位，对样品进行核磁共振成像。样品分别为：（1）浓度为 0.5% 的 CuSO_4 溶液；（2）玻璃三棱柱放置于（1）中溶液中；（3）玻璃六棱柱放置于（1）中溶液中；（4）盛有浓度为 0.5% 的 CuSO_4 溶液的小试管放置于盛有浓度为 1% 的 CuSO_4 溶液的大试管中；（5）盛有浓度为 0.5% 的 CuSO_4 溶液的小试管放置于盛有浓度为 2% 的 CuSO_4 溶液的大试管中。

IV. 结果与讨论

1. 回波信号

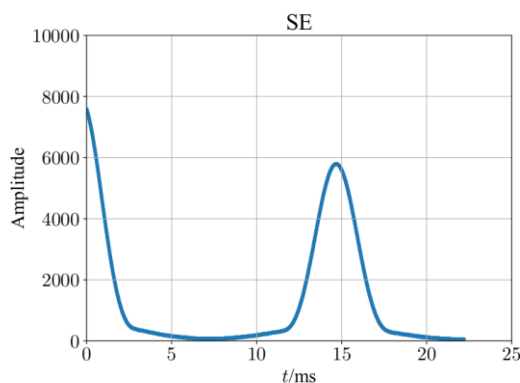


图 1 自旋回波信号

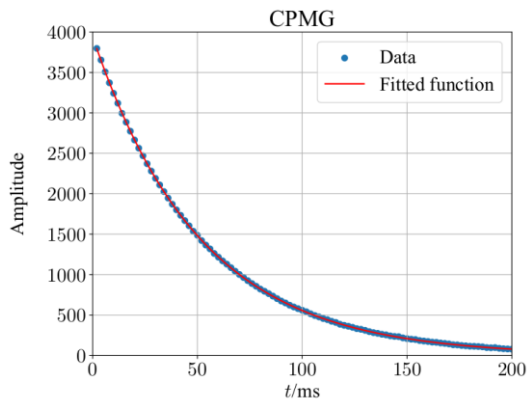
使用 SE 序列脉冲，可以观察到脉冲回波的信号，但是由于无法确定脉冲初始的高度和时间，所以不能直接利用自旋回波的信号对 T_2 进行测量。

2. 使用 $CPMG$ 序列脉冲测量横向弛豫时间 T_2

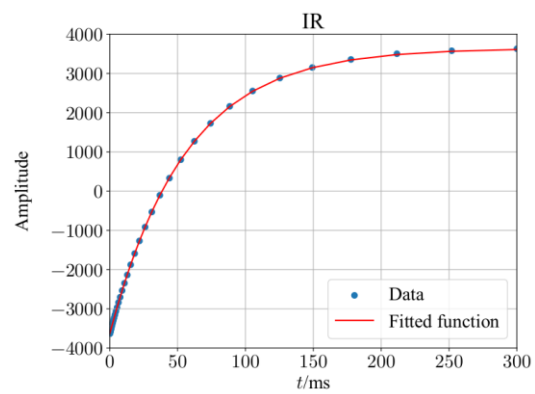
使用 $CPMG$ 序列脉冲测量 T_2 的图像如图 2.(1)-(3)a 所示，对数据的拟合结果如表 1 所示。

3. 使用 IR 序列脉冲测量纵向弛豫时间 T_1

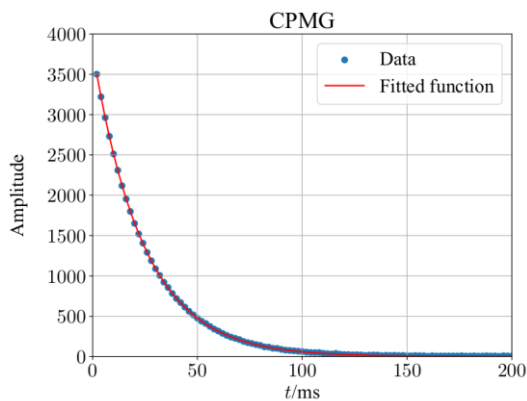
使用 IR 序列脉冲测量 T_1 的图像如图 2. (1)-(3)b 所示，对数据的拟合结果如表 1 所示。



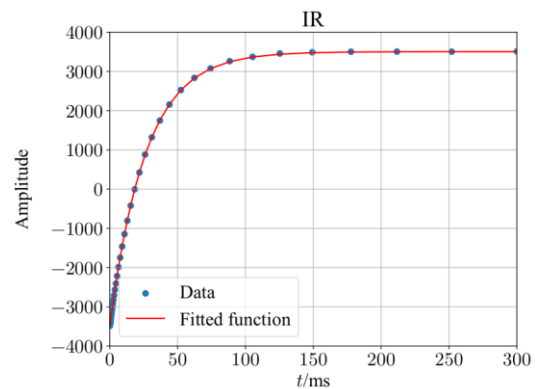
(1) 0.5%CuSO₄ CPMG



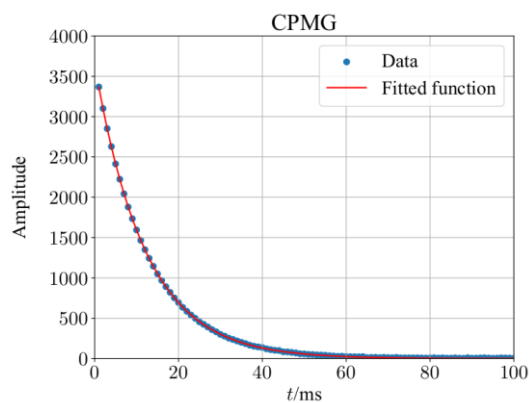
(2) 0.5%CuSO₄ IR



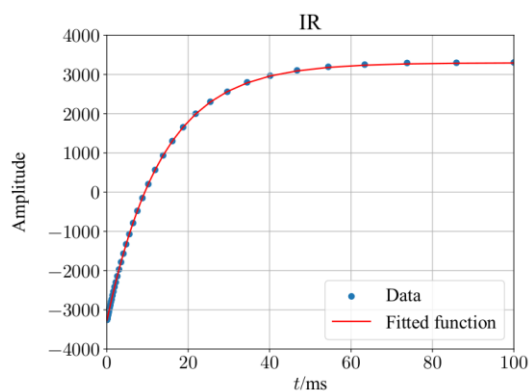
(3) 1%CuSO₄ CPMG



(4) 1%CuSO₄ IR



(5) 2%CuSO₄ CPMG



(6) 2%CuSO₄ IR

图 2 弛豫时间测量图像

表 1 弛豫时间拟合结果

样品浓度	T ₁ /ms	T ₂ /ms
0.50%	55.59	51.01
1%	26.61	24.06
2%	13.48	12.03

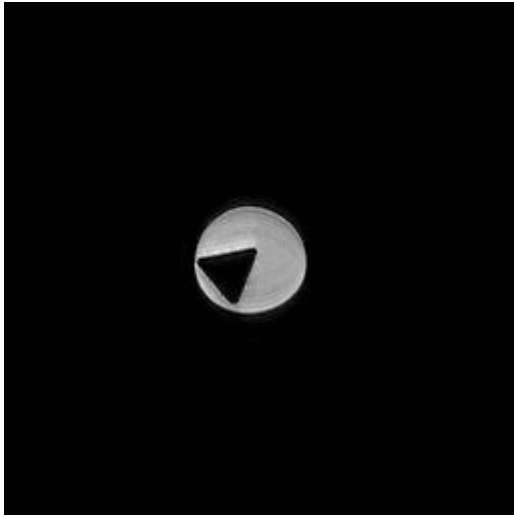
4. 对弛豫时间测量结果的分析

从表中可以看出，随着浓度的增加，弛豫时间也在不断缩短。另外，横向弛豫时间比纵向弛豫时间要小，这是因为横向弛豫时间不仅受自旋-自旋相互作用的影响，还受到自旋-晶格相互作用的影响。

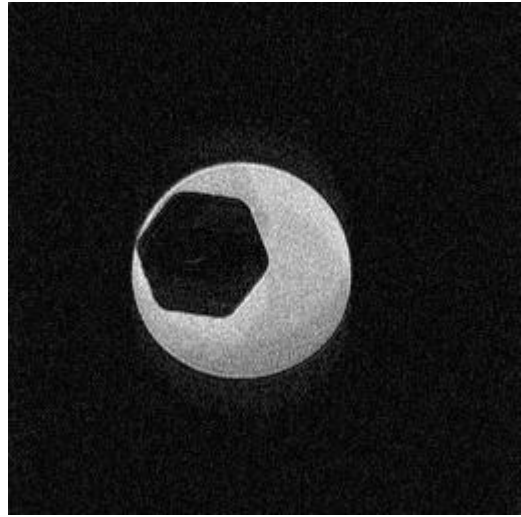
5. 核磁共振成像



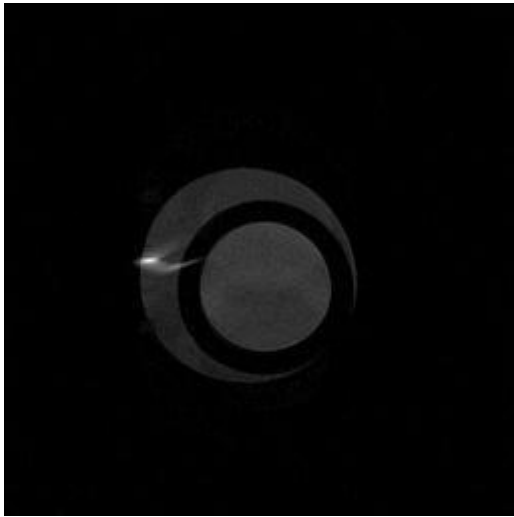
(1)



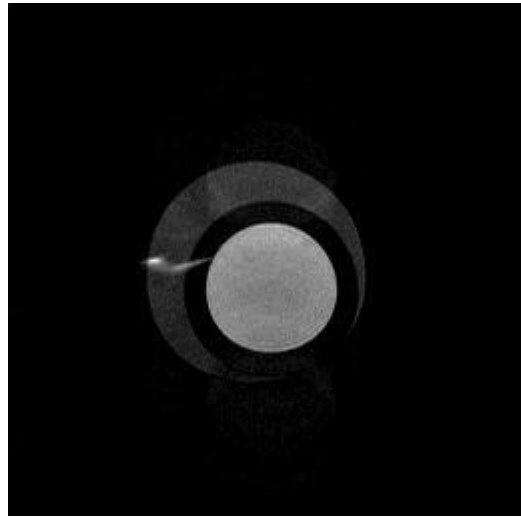
(2)



(3)



(4)



(5)

图 3 核磁共振成像，图像的含义见III.B.4

核磁共振成像中，反演后得到的结果的表达式为 $\rho(x,y) \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_R}{T_1}}\right) \cdot e^{-\frac{T_E}{T_2}}$ ，在实验过程中有 $T_R \gg T_1$ ，所以结果为 $\rho(x,y) \cdot e^{-\frac{T_E}{T_2}}$ 。

从图 3 的(1-3)中我们可以看出，由于玻璃的密度大于水，且由于自旋-晶格作用更强， T_2 更短，所以在核磁共振图中玻璃呈现出黑色。而从图 3 的(4,5)则显示了 T_2 加权对于成像的影响，浓度越高， T_2 越短，成像也就颜色越深。

V. 结论

本实验成功利用脉冲核磁共振技术测量了不同浓度 CuSO_4 溶液的横向弛豫时间和纵向弛豫时间，并通过拟合分析验证了弛豫时间与溶液浓度的关系。实验结果显示，随着 CuSO_4 浓度的增加， T_1 和 T_2 均呈现出减小的趋势，这与自旋-自旋和自旋-晶格相互作用强度增加有关。同时，通过 T_2 加权的核磁共振成像，观察到了不同浓度溶液在成像中的差异，进一步验证了 T_2 弛豫时间对成像效果的影响。

在 NMR 成像实验中，我们使用了不同浓度的 CuSO_4 溶液进行样品成像。成像结果显示，高浓度溶液的成像信号较弱，而低浓度溶液的成像信号较强，这与 T_2 加权成像的特性相符。由此可见， T_2 加权成像在区分不同物质的弛豫特性方面具有显著优势，适用于临床和科研中的高对比度成像需求。

综上所述，本实验通过对脉冲核磁共振技术的应用，验证了 T_1 和 T_2 弛豫时间的测量方法和成像序列对成像效果的影响。实验不仅加深了我们对 NMR 技术基本原理的理解，还展示了其在科学研究和临床诊断中的广泛应用潜力。

[1] 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.

思考题

1. 装着样品的圆形试管的一维剖面图应该是什么样子的曲线？

理想情况下，应该是一个平顶矩形，也就是信号强度在试管内各位置基本一致，而在试管外为0.

2. 实空间图像的空间分辨率由什么因素决定？

z 方向上的分辨率主要由梯度场的强度和射频脉冲的带宽决定， x 方向上的分辨率主要由时间采样率和采样矩阵的大小决定， y 方向上的分辨率主要由采样矩阵的大小（也就是 $\{t_y\}$ ）决定。此外，分辨率还共同受到来自脉冲序列设计等因素的影响。

3. 如何实现被 T_2 加权的核密度 $\rho(x, y, T_2)$ ？

选择较长的重复时间 T_R ，从而使得 T_1 的效应几乎被消除，反演后所得到的就是 T_2 加权的核密度 $\rho(x, y, T_2) = \rho(x, y) e^{-\frac{T_E}{T_2}}$ 。