

DH404A0 型
核磁共振实验系统
使用说明书

北京大华无线电仪器厂

目 录

1. 概述	2
2. 技术指标	2
3. 工作原理	3
4. 安装及使用	7
5. 实验内容	9
6. 仪器的故障现象及检查	11
7. 成套性	12
8. 储存	12
9. 质量保证	12

1. 概述

核磁共振实验仪是根据高等院校近代物理实验教学而设计的一套最适用的演示系统。可做观察 ^1H 的 NMR 吸收信号；测定 ^{19}F 的核磁距；以及用 NMR 方法测量磁场等实验项目。本系统具有造型美观，使用简单，可靠、耐用等特点。由于本仪器采用调节电流的方式调节磁场，所以磁场强度的调节较为方便，同时，实现了磁场强度宽范围可调。是高等院校近代物理实验教学较为适用的演示仪器。

2. 技术指标

2.1 磁场恒流源

- (1) 最大输出电压： $\geq 30\text{V DC}$
- (2) 输出电流调节范围： $0\sim 3.0\text{A DC}$
- (3) 源效应： $\leq 1\times 10^{-3}+5\text{mA}$
- (4) 电流表指示精度：1.0 级 ± 1 字

2.2 扫场

- (1) 最大输出电压： $\geq 10\text{V}$ (AC 有效值)
- (2) 输出电流调节范围： $0.2\sim 0.5\text{A}$ (AC 有效值)
- (3) 相位调节范围： $\geq 180^\circ$

2.3 振荡频率： $10\sim 14\text{MHz}$

2.4 样品： CuSO_4 水溶液： $\Phi 5$ ；聚四氟（固体）： $\Phi 4\times 40$

2.5 电磁铁最大磁场强度：大于 4500 高斯

2.6 电磁铁调制磁场范围： $20\sim 200$ 高斯

2.7 预热时间：30 分钟

2.8 电源电压： $\text{AC } 220\text{V}\pm 10\%$ 50Hz

2.9 最大功耗：200VA

2.10 连续工作时间： $> 8\text{h}$

2.11 工作环境：

环境温度： $0^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$

相对湿度：0~95%

2.13 外形尺寸：

主机(核磁共振仪)：410×425×140

磁铁：305×195×195

2.13 重量：

主机(核磁共振仪)：13.5Kg

电磁铁：20.5Kg

3.工作原理

对于质子数和中子数或其一为奇数的原子核有核自旋，其核磁 μ 与核自旋角动量 I 成正比，可写为：

$$\mu = g \times \mu_N \times I \quad (1)$$

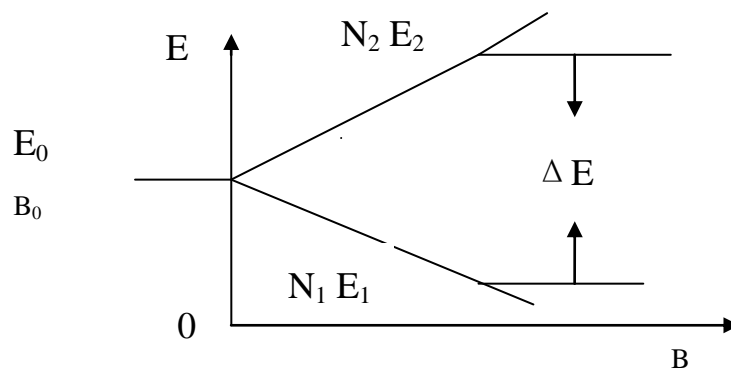
式中 g 为无量纲比例因子称为 g 因子，对于氢核 $g_n=5.5856947$ ，而常数 $\mu_N=qh/2m_p \times C$ 称之为波尔核磁矩，式中 q 为电子电荷， m_p 为电子质量， C 为光速， h 为普朗克常数。

当核自旋系统在恒定的直流外磁场 B_0 中时，由于核自旋和磁场间的相互作用，核能级发生塞曼能级分裂。对于氢核此类 $I=1/2$ 的简单系统，原能级仅分裂成上、下两个能级 E_2 、 E_1 。如图一所示。发生塞曼分裂时，上下两能级间能量差与 g_n 和 B_0 之积成正比，可写成：

$$E_2 - E_1 = \Delta E = g_n \times \mu_N \times B_0 \quad (2)$$

若在垂直于恒定磁场 B_0 方向上，加一角频率为 ω ($10^6 - 10^9 \text{Hz}$) 的射频磁场 $B_1 \cos \omega t$ ，当射频量子能量 $\omega \times h$ 与 ΔE 相等时即满足：

$$\Delta E = g_n \times \mu_N \times B_0 = \omega_0 \times h \quad (3)$$



3
图一 塞曼核能级分裂

时，即发生能级间的核自旋粒子由 E_2 到 E_1 的受激跃迁和由 E_1 到 E_2 的发射跃迁，此两种方向相反的跃迁几率相等且与 B_1^2 成正比，核自旋系统吸收射频磁场能量，呈共振吸收，此时核自旋系统处于非平衡状态。式（3）称之为核磁共振条件，可改写为：

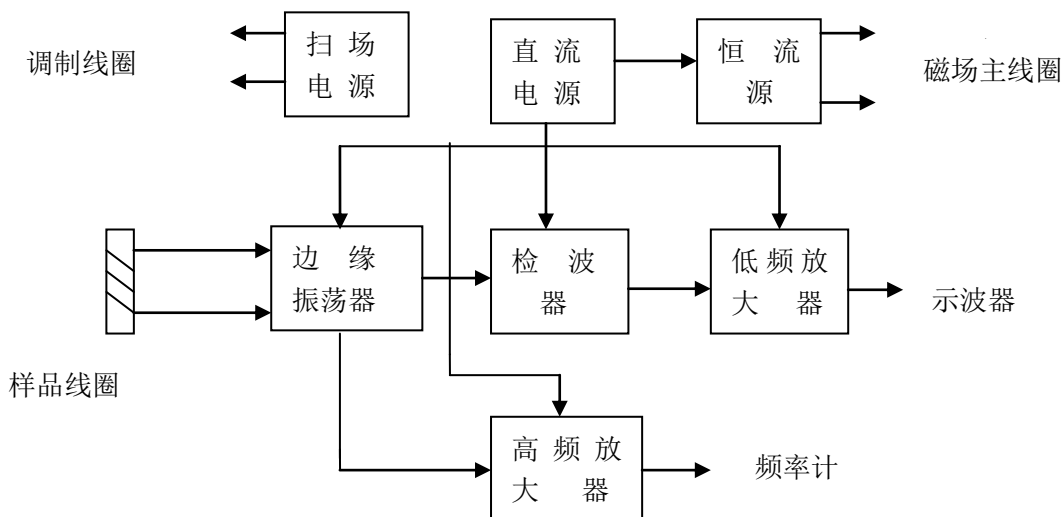
$$\omega_0 = B_0 \times \gamma \quad (4)$$

当射频磁场停止作用后，核自旋系统自动经历驰豫过程，通过自旋与晶格之间、自旋与自旋之间的相互作用，逐步由非平衡状态恢复到平衡状态。

本装置就是根据此原理配备的核磁共振实验系统，由样品探头、电磁铁及核磁共振仪等几部分构成，外配频率计和示波器即构成完整的核磁共振实验系统，实验系统接线如图九所示。

3.1 核磁共振实验仪

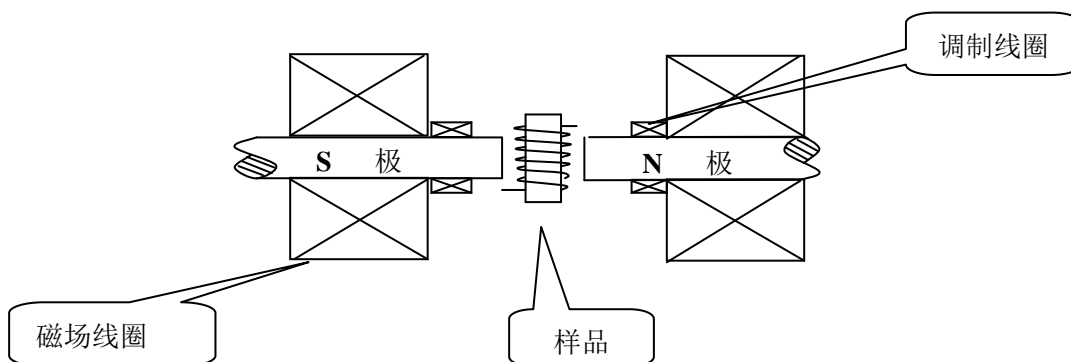
核磁共振实验仪通过样品探头一方面提供射频磁场 B_1 ，另一方面通过电子电路对 B_1 中的能量变化加以检测，以便观察核磁共振现象。核磁共振仪的方框图见图二。图中边缘振荡器产生射频振荡，其振荡频率由样品线圈和并联电容决定。所谓边缘振荡器是指振荡器被调谐在临界工作状态，这样，不仅可以防止核磁共振信号的饱和。而且当样品有微小的能量吸收时，可以引起振荡器的振幅有较大的相对变化，提高了检测核磁共振信号的灵敏度。在未发生核磁共振时，振荡器产生等幅振荡，经检波器输出的是直流信号，经低频放大器隔直输出到示波器 Y 轴，显示为一条直线。当满足共振条件发生核磁共振时，样品吸收射频场的能量，使振荡器的振荡幅度变小，因此，射频信号的包络变成由共振吸收信号调制的调幅波，经检波，放大后，就可以把反映振荡幅度大小变化的蝶形共振吸收信号检测出来，并由示波器显示。直流电源为各部分提供工作电压。



图二 核磁共振原理使用方框图

3.2 电磁铁及调制线圈

如图三所示，电磁铁由恒流源激励产生恒磁场，可以通过调节恒流源的激励电流，从而调节其磁场强度，实现磁场强度从几到几千高斯的范围内连续可调。通过面板上数字电流表（A）显示磁场线圈中



图三 电磁铁及调制线圈

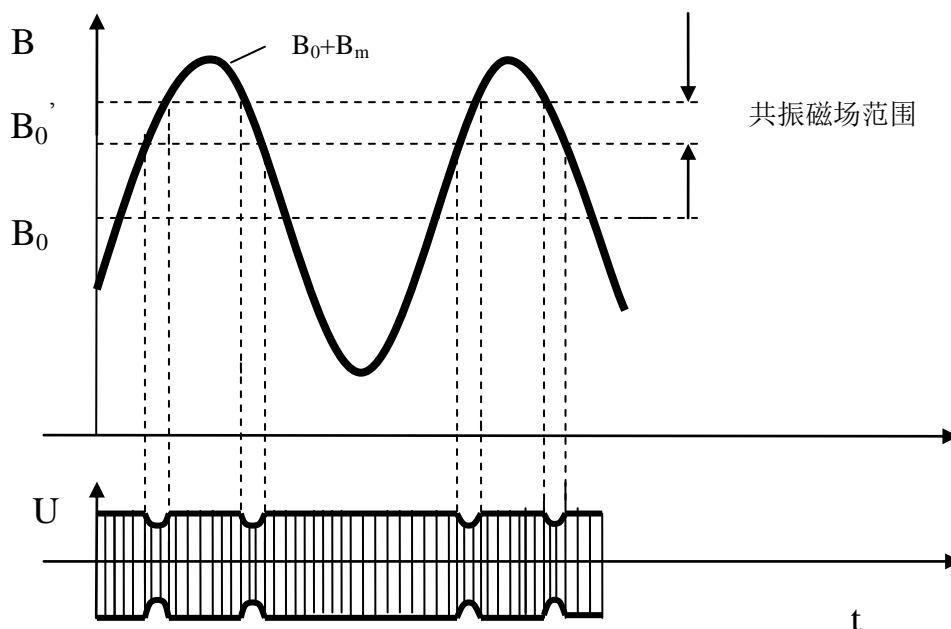
电流的大小，以表征磁场的强度。采用恒流源作激励，保证了磁场高度的高度稳定。调制线圈由扫场电源激励产生一个弱的低频（50Hz）交变磁场 B_m 与稳恒磁场 B_0 叠加，使得样品中的 ^1H 核在交流调制信号的一个周期内，只要调制场的幅度及频率适当就可以在示波器上观测到稳定的核磁共振吸收信号。“扫场电流”数字电流表，指示流过调制线圈中电流的大小。

从原理公式：

$$\omega_0 = \gamma \times B_0$$

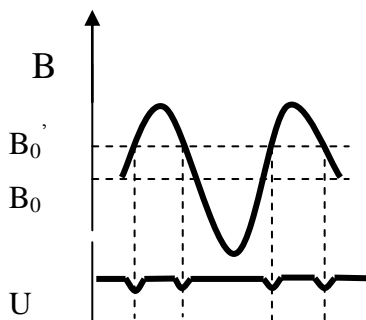
可以看出，每一个磁场值只能对应一个射频频率发生共振吸收，而要在十几兆赫的频率范围内找到这个频率是很困难的，为了便于观察共振吸收信号，通常在稳恒磁场方向上迭加一个弱的低频交变磁场 B_m ，如图四所示（上图为 B_0 和 B_m 迭加后变化的情况，下图为射频场 B_1 振荡电压幅值随时间变化的情况，图中的 B_0' 为某一射频频率对应的共振磁场）。此时样品所在处所加的实际磁场为 B_0+B_m ，由于调制磁场的幅值不大，磁场的方向仍保持不变，只是磁场的幅值随调制磁场周期性的变化，则核磁矩的拉莫尔旋进角频率 ω_0 也相应地在一定范围内发生周期性的变化。即：

$$\omega_0 = \gamma \times (B_0 + B_m) \quad (5)$$

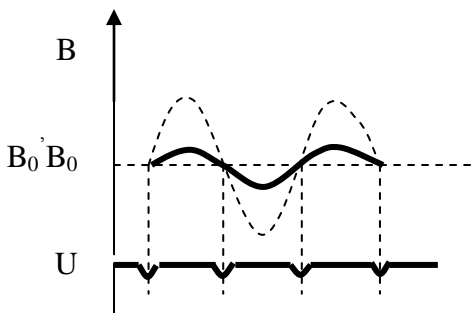


图四 电压与磁场关系图

此时只要将射频场的角频率 ω' 调节到 ω_0' 的变化范围内，同时调制场的峰——峰值大于共振场的范围，就可能发生核磁共振，用示波器可观察到共振吸收信号，因为只有与 ω_0' 相应的共振吸收磁场范围被 (B_0+B_m) 扫过的期间才能发生核磁共振，可观察到共振吸收信号，其

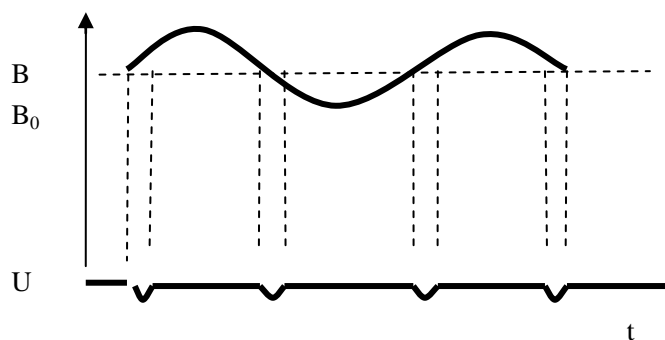


图五 电压与磁场关系图



图六 磁场与电压关系图

他时刻不满足共振条件，没有共振吸收信号。磁场的变化曲线在一周期内与 B_0' 两次相交，所以在一周内能观察到两个共振吸收信号。若在示波器上出现间隔不等的共振吸收信号，这是因为对应射频磁场频率发生共振磁场的 B_0' 的值不等于稳恒磁场的值，其原理如图五所示。这时如果改变稳恒磁场 B_0 的大小或变化射频场 B_1 的频率，都能使共振吸收信号的相对位置发生变化，出现“相对走动”的现象。若出现间隔相等的共振吸收信号时，如图六所示，则其相对位置与调制磁场 B_m 的幅值无关，并随 B_m 幅值的减小，信号变低变宽，如图七所示，此时即表明 B_0' 与 B_0 相等。



图七 电压与磁场关系图

4. 安装及使用

4.1 前面板各功能简介：

(1) 磁场：磁场强度调节钮。本装置由于采用电磁铁作为激励磁场，磁场强度与电磁铁线圈中的激励电流成正比，场强的变化只需改变电磁铁的激励电流即可。本系统磁场激励电流的调节范围为 0 至 3A, 可实现宽范围场强的调节。数字

电流表(A)指示电磁铁的激励电流。该电流由“磁场”接线柱输出。

(2) 扫场: 调制磁场调节旋钮。通过调节流过调制线圈中电流的大小, 调节调制场的幅度, 可使共振信号的宽度在水平方向发生变化并可以改变尾波的节数。通常, 此旋钮顺时针调到底, 使扫场电流保持最大, 以便可以较好的观测共振信号。前面板上的“扫场电流”指示流过调制线圈的电流大小。其输出由前面板“扫场”接线柱输出。

(3) 调相: 通过调节输入示波器的X轴信号(50Hz)的相位, 以调整蝶形共振信号在示波器上的相对位置。

(4) 边振调节: 用于调节边缘振荡器的边缘振荡状态和信号幅度。

(5) 频率调节: 用于调节边缘振荡器的振荡频率。

4.2 使用方法

(1) 按图九连接系统。将样品探头小心的插入磁铁上的探头座内。通过随机配送的样品专用电缆(短电缆)与磁共振仪“样品”插座可靠连接。本系统所用示波器应具有外触发(X—Y)工作方式功能, 数字频率计最高测量频率应不低于40MHz。系统各部分连接应可靠、牢固。

注意: 确保磁场和扫场连线正确, 以防损坏电磁铁和系统。

(2) 示波器采用X-Y(外扫描)工作方式, 其X轴灵敏度设定在2~5V/DIV之间, 并通过随机配送的电缆连接到磁共振仪“X轴”输出插座上, 示波器Y轴灵敏度为可在0.1~2V/DIV之间进行设置, 通过随机配送的电缆连接到仪器“Y轴”输出插座上。

(3) 打开电源开关, 此时仪器磁场电流表(A)有显示。为延长系统使用寿命, 关机前, “磁场”和“扫场”旋钮应反时针旋到底, 再关机。

(4) 调节“磁场”旋钮, 使磁场电流表(A)指示为1.5A至2.1A左右(仅供参考)。顺时针调节“扫场”旋钮至最大, 扫场电流表指示为0.3至0.7A左右。此时在上示波器上可以看到带有噪声的扫描线, 表示系统已进入工作状态。若数字频率计有频率指示, 表明边缘振荡器已起振。若数字频率计指示为“0”, 则调节“边振调节”或“频率调节”旋钮, 直到有频率指示。再通过调节“频率调节”旋钮, 示波器上即可观测到核磁共振信号。出现共振信号后, 再细调“边振调节”, “磁场”调节钮, 移动探头的位置, 使共振信号达到最佳。在示波器采用外触发方式时, 当出现共

振信号后,调节“调相”旋钮,可调节两个共振波形在示波器上的相对位置,以方便观测。若示波器采用内触发方式时,此旋钮失效。

(5) 在仪器调节和使用过程中,可能会出现低频干扰,可通过将装置各部件外壳相连,接地或调整仪器布局等方法来解决。由于产生低频干扰的原因比较复杂,消除也较困难,具体采用什么措施好,需要通过实验,根据不同情况,选择不同的方法。当改变样品或者改变振荡频率后,应通过调“边振调节”,重调振荡器工作状态。经实验,本机 ^1H 的共振频率调在 ___ MHz, 磁场电流为 ___ A; ^{19}F 的共振频率为 ___ MHz 附近, 磁场电流为 ___ A, 时实验效果较好。

(6) 本仪器样品探头固定座左右和上下位置已调好并固定,用户在使用时,一般不需调整。由于仪器在运输或搬动时,可能发生变动,为了观测到更好的共振吸收波形,根据情况,用户可自行调整。

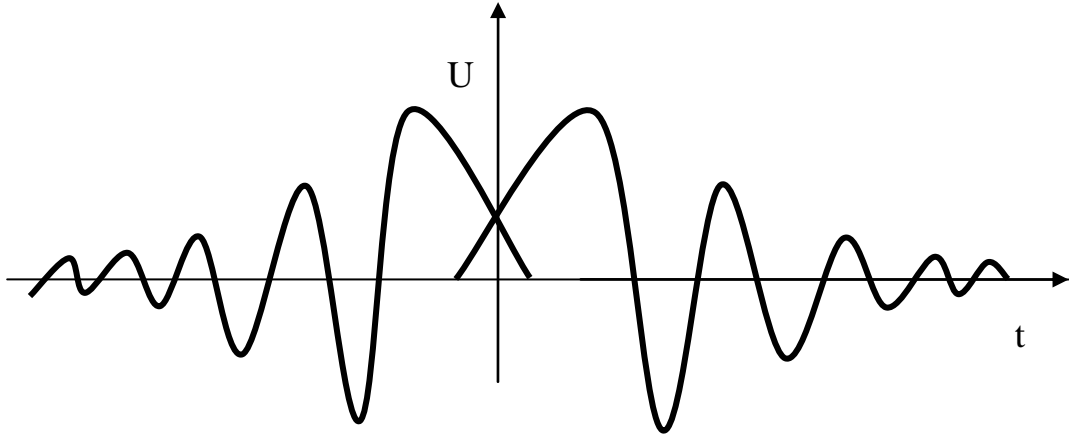
(7) 本仪器随机配备水 ^1H 和氟 ^{19}F 样品各一个。

5. 实验内容

5.1 用水做样品,观察质子 (^1H) 的核磁共振吸收信号,并测量磁场强度。本仪器是采用连续波方式产生 NMR,用自插法检测 NMR 信号,实验时,首先把水样品探头通过专用电缆(短电缆)接到共振仪“样

品”插座上,并把这个含有样品的线圈放到稳恒磁场中。线圈放置的位置必需保证使线圈产生的射频磁场方向与稳恒磁场方向垂直,然后接通电源,使射频振荡器发生某个频率的振荡,并连续不断的加到样品线圈上,这时根据 NMR 条件 $\omega = \gamma \times B_0$ (ω 为射频场电磁波的角频率, B_0 为稳恒磁场的强度, γ 为核的旋磁比)。

可以通过固定 ω 而逐步改变 B_0 或固定 B_0 而逐步改变 ω 办法,使之达到共振点。同时,让一小的 50HZ 正弦交流电加到磁铁的调制线圈上,并同时分出一路,通过移相器接到示波器的水平输入轴,以实现二者的同步扫描,当磁场扫描到共振点时,可在示波器 (X-Y 外出发扫描工作方式) 上观察到如图八的两个对称的蝶型信号波形,它对应于调制磁场 B_m 一周内发生两次核磁共振,再细心的把波形调节到示波器荧光屏的中心位置上并使两峰重合,这时质子共振频率和磁场满足条件 $\omega = \gamma \times B_0$ 。



图八 共振信号

测量磁场时，示波器采用内扫描法进行观测，X轴灵敏度为5毫秒/度，Y轴灵敏度可根据信号幅度大小在0.1—0.5V/div之间选择，此时在示波器上可见到间隔不等的蝶形共振吸收信号。此时，微调“频率调节”旋钮，使各信号间隔相等即相邻两信号的时间间隔应为10毫秒，其原理如第2节所述。记录下此时的振荡频率 F_H ，即与待测磁场相对应的共振频率，由于质子旋磁比已知($\gamma_H=2.67522 \times 10^8 \text{MHz/T}$)，所以只要测出 F_H 即可由公式：

$$B_0 = \frac{\omega}{\gamma_H} = \frac{2\pi F_H}{\gamma_H}$$

计算出被测磁场强度。式中频率的单位为MHz，磁场强度位为高斯。

5.2 用聚四氟乙烯棒做样品，观察 ^{19}F 的核磁共振现象，并测定其旋磁比，g因子和核磁矩。

由于本 ^{19}F 的核磁共振信号比较弱，观察时要特别细心，应缓慢调节磁场或射频频率，找到共振吸收信号，并调节到间隔相等，用4.1节所述的测量方法测量出 ^{19}F 的共振频率 f_F ，磁场 B_F 用 ^1H 核磁共振的方法测定或用高斯计测出磁场 B_F ，即可由公式：

计算出 ^{19}F 的旋磁比 γ_F ，因质子的旋磁比 γ_H 已知， f_F 和 f_H 分别为 ^{19}F 和

$$\gamma_F = 2\pi \frac{f_F}{B_F} = \frac{f_F \gamma_H}{f_H}$$

^1H 的核磁共振频率。

由 $\mu_I = g \times \text{PI} \times \mu_N / h$ 和 $\mu_I = \gamma \times \text{PI}$ 可知：

$$g=\gamma h/\mu_I$$

又 $PI=HI$ 所以有:

$$\mu_I=gI\mu_N$$

其中, $h=h/2\pi$, h 为普朗克常数, $h=6.62608\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$; I 为自旋量子数, ^{19}F 的 I 值为 $1/2$; $\mu_N=5.0579\times 10^{-27}\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$ 。

由于电缆和引线等分布参数的影响,测量出的频率和实际共振频率有误差,实测频率相对要低。实验时,请注意。

6. 仪器的故障现象及检查

6.1 开机后无任何显示, 检查电源是否正常, 保险丝是否烧断。

6.2 调节“磁场”旋钮, 磁场电流指示“A”不变化, 或达不到所需要的电流, 检查与电磁铁的连线是否正确。若电流有突然增大现象, 一般是磁场电位器损坏。

6.3 调节“扫场”旋钮, 扫场电流指示不变化。检查与电磁铁的连线是否正确。用交流电压表检查扫场接线柱是否有电压输出, 若无输出电压输出, 一般是“扫场”调节电位器损坏。

6.4 样品线圈的几何形状和绕线状况, 对吸收信号的质量影响较大, 在安放时应小心插入到电磁铁的样品插孔内, 防止变形及破碎。

6.5 适当提高射频幅度可提高信噪比, 然而, 过大的射频幅度会引起振荡器的自激。

6.6 若示波器显示共振波形而相位不能调节, 一般是调相电位器损坏。

7. 成套性

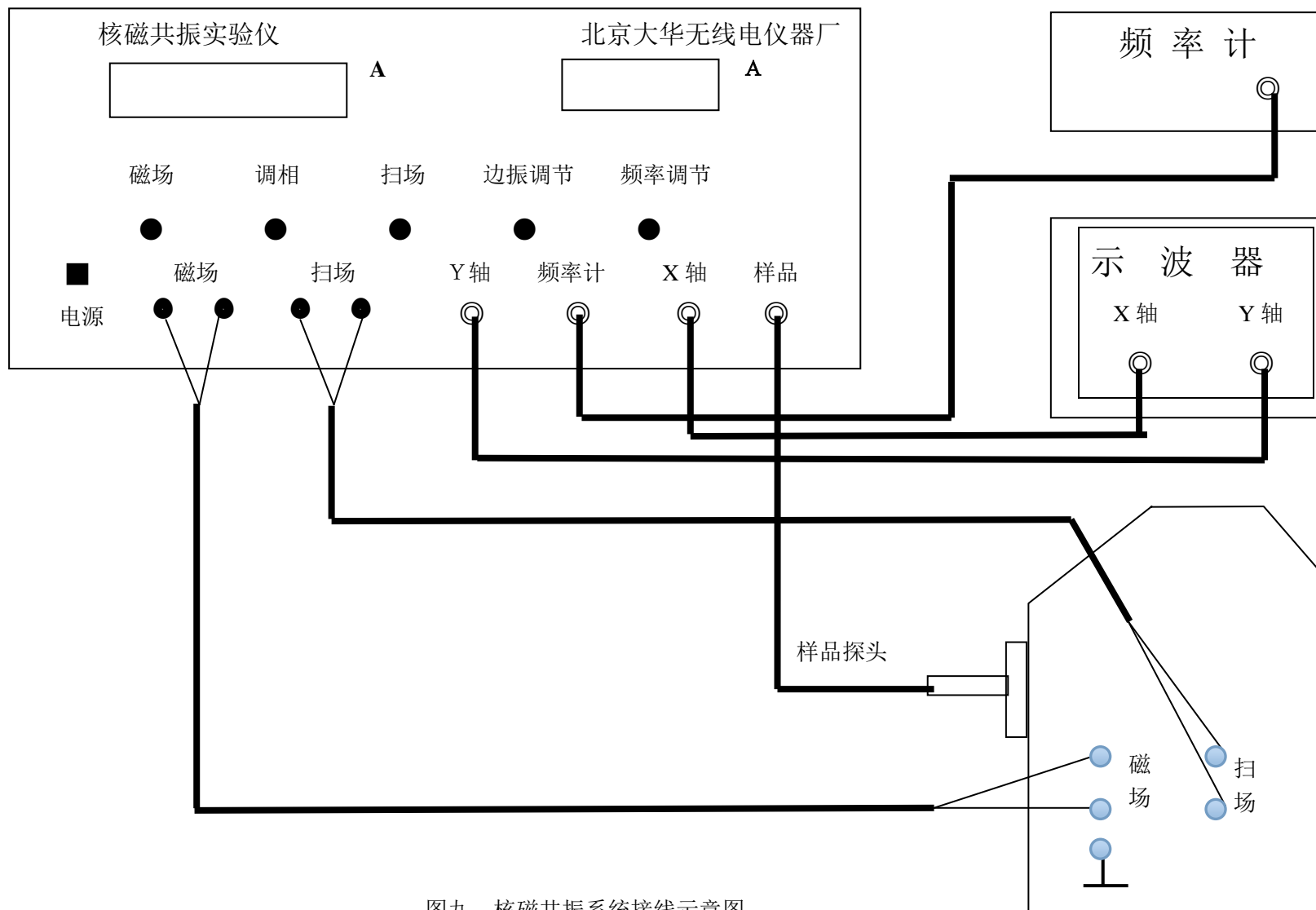
序号	名 称	型 号	数量	备 注
1	核磁共振实验仪		1	
2	电磁铁		1	
3	样品探头		2	水和氟样各一支
4	电缆		4	
5	连接线		4	
6	电源线		1	
7	保险管	BGXP-1 2A	2	
8	说明书		1	

8. 储存

- (1) 温度： -40—+55℃
- (2) 相对湿度： 20—90%（温度+40℃）

9. 质量保证

自发货之日起十二个月内,如用户遵守运输、贮存和使用规则,而产品质量低于技术条件的规定,本厂负责免费修理。



图九：核磁共振系统接线示意图