

## 核磁共振在测量磁场中的应用

王金山

(北京师范大学)

### 一、核磁共振测量磁场的原理

在磁场的精密测量中,核磁共振法是一种精度最高、量程最宽、探头不大的好方法<sup>[1]</sup>。它是以核磁共振理论与实验技术做为基础<sup>[2-4]</sup>。核磁共振条件为

$$f = (\gamma/2\pi)H_0. \quad (1)$$

对于某种特定的原子核来说, $\gamma$ 是一个常数。因此,核磁共振频率 $f$ 与静磁场强度 $H_0$ 是成正比的线性关系。只要测出 $f$ 的数值,即可得出 $H_0$ 的数值,这样可以把对磁场强度的测量转变为对电磁波频率的测量,从而提高了测量精度。

目前核磁共振测磁法中常用的原子核是氢( $H^1$ ),锂( $Li^7$ ),氘( $H^2$ )。根据它们的 $\gamma$ 值<sup>[5]</sup>得出 $H_0$ 与 $f$ 的关系为

$$\left. \begin{aligned} H_0(\text{氢}) &= 0.23487 \text{ (G/kHz)}f(\text{kHz}), \\ H_0(\text{锂}) &= 0.604222 \text{ (G/kHz)}f(\text{kHz}), \\ H_0(\text{氘}) &= 1.53018 \text{ (G/kHz)}f(\text{kHz}). \end{aligned} \right\} (2)$$

核磁共振信号的信噪比与 $H_0^{3/2}$ 成正比,因此这种方法适合于测量强磁场,而测弱磁场较为困难。当在样品体积范围内磁场均匀性 $\Delta H_0/H_0$ 大于 $10^{-4}$ 时,信号会由于非均匀加宽而消失,从而不能进行测量。为了测量弱磁场和非均匀磁场可采用本文第五节介绍的流动水核磁共振法。

### 二、核磁共振磁强计的基本结构

核磁共振磁强计一般采用自差式核磁共振信号检测方法。仪器的方块图如图1所示。一

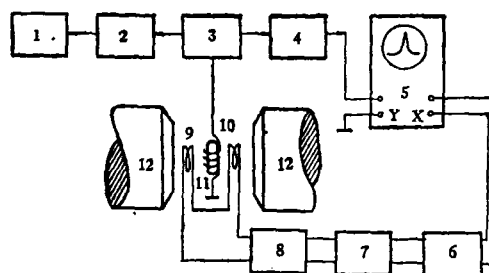


图1 核磁共振磁强计方块图

1. 数字频率计; 2. 宽带放大器; 3. 振荡器和检波器;  
4. 低频放大器 5. 示波器; 6. 相移器; 7. 扫描振荡器;  
8. 功率放大器; 9. 扫描线圈; 10. 样品线圈;  
11. 样品管; 12. 被测磁铁

般用水做为样品,观察其中质子的核磁共振信号。但纯水的纵向弛豫时间 $T_1$ 较长,信号容易饱和,可以水中掺入1%左右的 $CuSO_4$ 或 $FeCl_3$ ,以缩小 $T_1$ 。近年来常用硬橡胶或乳胶等固体样品,观察其中的质子信号。这种样品牢固方便。

核磁共振磁强计的关键部分是振荡器,一般采用边缘振荡器,它的优点是噪声系数较小、对核磁共振信号敏感,并可避免信号饱和,振荡幅度一般为0.1—0.5V。早期都采用电子管电路<sup>[1,6]</sup>,后来普遍采用晶体管电路<sup>[7-9]</sup>,目前常用的电路是鲁宾逊(Robinson)振荡器<sup>[10]</sup>。它的电路如图2所示。这是一个双晶体管限制式振荡器。第一个晶体管构成射极输出器以提高输入阻抗,降低它对谐振回路的分流作用以提高 $Q$ 值,并具有较宽的通带。第二个晶体管构成限制式放大器,它工作在近似于开关状态。它的集电极直接连在第一个晶体管的基极上以加强正反馈。调节电阻 $W_1$ 以及第二个晶体管的工作点,可以把振荡器调到边缘状态。第二级晶

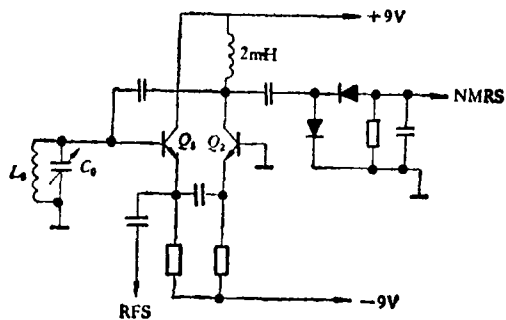


图2 Robinson 振荡器电路图

晶体管工作在非线性区域，其发射结对来自前一级射极的高频信号进行半波检波，从而得到核磁共振信号。但由于这种检波方式的效率较低，这种电路适用于用强信号（如水中的  $H^1$  核），测量中等磁场和较强的磁场。这种振荡器工作在 30—90MHz 范围内较为合适。在 30MHz 以下，工作状态的调整较为麻烦。

Faulkner 等人提出了一个改进的电路<sup>[11]</sup>，如图 3 所示。这个振荡器的特点是两个晶体管工

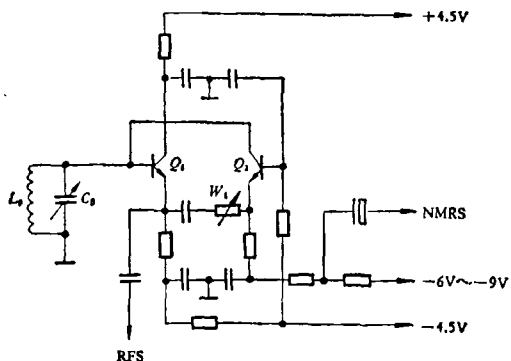


图3 Faulkner 振荡器电路图

作在相同的状态，改变负电源电压可控制振荡幅度。采用两个单独的二极管组成倍加检波电路来检测核磁共振信号。由于这个电路结构简单，提高了检波效率，在 30MHz 以下的范围内工作也比较稳定，所以用它可以测量较低的磁场强度。但在实验中发现它的振荡频率难于超过 30MHz，经过分析认为这是由于选用 2mH 的电感作为第二个晶体管集电极负载所造成的。只要用 2.7kΩ 的电阻代替原来的电感，振

物理

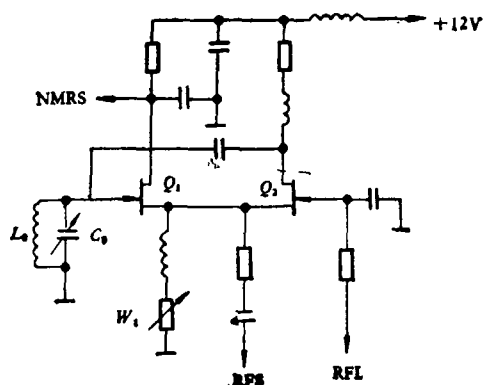


图4 Хандожко 振荡器电路图

荡频率可以扩展到 150MHz 以上。

后来 Хандожко 等人提出了一个用结型场效应管制成的振荡器电路<sup>[12]</sup>，如图 4 所示。它的优点是第一个晶体管既做射频的源极跟随器，又做检波器及第一级低频放大器。由于去掉了单独的检波器，减少了一些产生噪声的因素，又充分利用了两个晶体管的低噪声特性，所以它具有相当高的灵敏度。

此外还有一些电路，例如文献 [13] 提出的电路是用集成电路装成的鲁宾逊振荡器，它的特点是可以自动调节振荡电平，输入阻抗高（采用场效应管），工作稳定可靠。文献 [14] 提出的电路是用一个晶体管装成的振荡器，有比较高的灵敏度。

最初一般都采用可变电容器来改变振荡器的频率，它的缺点是噪声大，使用不便、频率不易提高。目前普遍采用变容二极管，通过改变电压来调节振荡器频率，这样不仅克服了上述缺点，而且还便于实现磁强计的自动化。

磁强计需要有较长的探测杆以便把探头伸到被测磁场中。对自差式振荡器来说探杆就是线圈与可变电容器之间的连接电缆。由于电缆分布电容的影响，振荡器的频率不能做得很高，一般可达 80—90MHz。探杆越长，所能达到的频率越低。如果想在长探杆的情况下达到较高的振荡频率，可采用单独检测式核磁共振磁强计<sup>[15]</sup>，也可采用并联电感的方法（见本文第四节）。

### 三、测量方法与测量精度

图 5 表示由于对磁场的扫描方法和扫描速度不同以及磁场均匀性的不同,核磁共振信号在示波器上会出现各种各样的形状.图 5(a)表示磁场均匀而磁场强度缓慢扫过共振点的情况.图 5(b)表示磁场均匀而磁场强度快速通过共振点的情况,可见由于核弛豫效应而出现了尾波.图 5(c)表示磁场不均匀的情况,可见谱线加宽了.图 5(d)表示磁场很不均匀的情况,

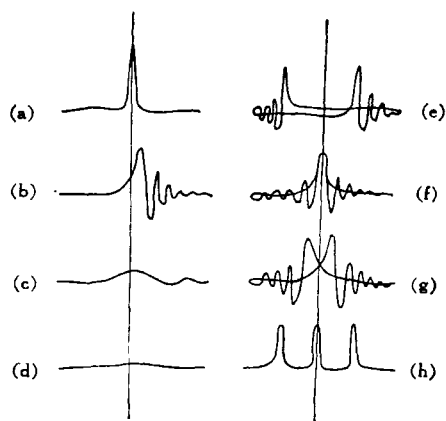


图 5 核磁共振信号的形状

况,可见谱线已被极度加宽而消失.如果磁场与示波器都用同一个扫描振荡器的正弦波进行同步扫描,那么,示波器上将出现两个核磁共振信号,因为扫描的正半周和负半周各出现一个信号.由于两路扫描电压的相位可能不同,这两个信号在示波器上可能不重合,如图 5(e)所示.为了精确测定磁场强度,必须首先调节相移器的相位使这两个信号相重合,然后再调节高频振荡器的频率,使已重合的信号移动到示波器上扫描基线的正中央,如图 5(f)所示.这时读出频率计的数值,才能得到准确的磁场强度的数值.或者如图 5(g)所示,把两个信号的交叉点调节到示波器的正中央也可以进行测量.如果磁场和示波器不是进行同步扫描,而且它们的扫描频率也不相同,那么,示波器上将出现几个信号,而且距离不等.例如图 5(h)表示磁场用正弦波扫描,示波器用锯齿波扫描时

的信号.这时应当调节高频振荡器的频率,使得示波器上各信号之间的距离相等,方可读出频率计的数值来计算磁场强度.如果磁场和示波器都用慢速度的通过零点的锯齿波进行扫描,那么,调节高频振荡器的频率使信号移到示波器中央,如图 5(a)所示,就可以进行测量工作.

由公式(1)可见,核磁共振磁强计的测量精度主要决定于测  $\gamma$  的精度以及测  $f$  的精度.目前测  $\gamma$  的精度可达  $10^{-6}$  的数量级,例如国际上推荐的球形水样品中质子的  $\gamma$  值为<sup>[4]</sup>

$$\gamma_p = 2.6751301(75) \times 10^8 \text{ rad/T} \cdot \text{s} \\ (2.8 \times 10^{-6}). \quad (3)$$

探头中顺磁杂质的影响以及信号位置的调整误差和自差式振荡器的频率稳定性都在  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  数量级<sup>[16]</sup>.用数字式频率计来测量频率的精度很容易达到  $10^{-6}$  以上.因此,用核磁共振磁强计测较低的磁场,精度可达  $10^{-5}$ ;测较高的磁场,精度可达  $10^{-6}$ .如果要测量两点磁场强度的相对比值,其精度还可能提高.

### 四、强磁场与低温磁场的测量

用水做样品的核磁共振磁强计一般的测量范围为 350—15000G.可以用变换样品的方法来达到测量强磁场的目的.我们曾经研制了一个强磁场宽范围核磁共振磁强计<sup>[16]</sup>.它的自差式振荡器的工作频率是 0.9—92MHz.用水做样品可以测量 216—21000G 的磁场;用重水做样品,观察  $\text{H}^2$  核的核磁共振信号,可以测量 1500—140000G 的磁场(根据公式(2)计算得出).用它可以测量电磁铁、永磁铁及超导磁体的室温孔内的磁场强度和均匀性.

在进行超导磁体的实验时,一般所用的低温杜瓦瓶设有室温孔.为了测量场强需要把探头伸到液氮当中的超导线圈中间.这种低温核磁共振磁强计的特殊之处是需要选择能在液氮温度下工作的合适样品.可以采用金属铝或钒做这种样品.在 4.2K 的温度下它们的回磁比除以  $2\pi$  的数值为<sup>[17]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \gamma/2\pi &= 1.11119 \pm 2 \text{ MHz/kG (Al}^{27}\text{)}, \\ \gamma/2\pi &= 1.12555 \pm 1 \text{ MHz/kG (V}^{51}\text{)}. \end{aligned} \right\} (4)$$

文献[18]研究了一个低温核磁共振磁强计。它用铝粉与环氧树脂混合物做样品，探头长度为1.2m，用并联电感的方法使自差振荡器的频率范围扩大为10—120MHz，相应的测场范围为10000—100000G，测量精度为0.1G。它用变容二极管进行电调谐，实现了自动化。文献[17]介绍的方法是把整个振荡器都放在液氮当中，从而避免了探杆过长所引起的问题，但它需要找到能在液氮温度下工作的晶体管。

### 五、弱磁场与非均匀磁场的测量

如上所述，一般的核磁共振磁强计对于200G以下的弱磁场及非均匀磁场不能测量。不久之前，我们试验成功了流水式核磁共振磁强计<sup>[19]</sup>。它非常适合于弱磁场及非均匀磁场的测量，可以很方便地测量0.023—300G的磁场，从而填补了这一段测量空白；它也适用于强磁场和均匀磁场的测量。有些国家已经把这种磁强计做为国家测磁的计量标准。这种仪器的方框图如图6所示。它采用流动水做为样品，水中的质子首先在极化器中被极化，产生一个磁化强度矢量  $M$ ，然后流过被测磁场中的测量线圈，再到达检测磁场中的检测线圈，产生一个稳定的核磁共振信号，在示波器上不断地显示出来。在测量线圈上由信号发生器加一个交变电压，当它的频率满足被测磁场的共振条件时， $M$ 将要减小或改变符号，从而会影响示波器上的核磁共振信号的幅度和极性。根据这一现象读出频率计的数值即可算出被测磁场的强度。

地球磁场强度是0.5G左右。目前测地磁普遍采用预极化方法。它是首先用一个通以大电流的线圈使样品中的质子产生一个很大的  $M$  的横向分量，然后测出它围绕地球磁场方向的自由进动的频率即可算出地磁场强度。它不能进行连续测量。另一种方法是利用核磁双共振方法来增强核磁共振信号强度，从而实现了地对磁场的连续测量。

物理

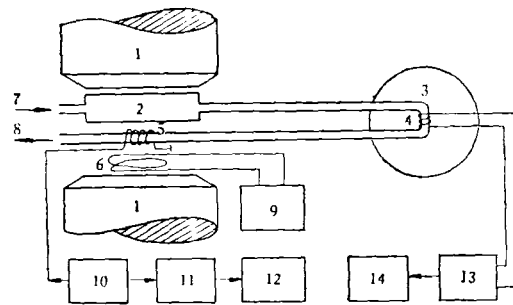


图6 流水式核磁共振磁强计方框图

1. 极化与检测磁场；2. 极化器；3. 被测磁场；4. 测量线圈；5. 检测线圈；6. 扫描线圈；7. 入水口；8. 出水口；9. 扫描振荡器；10. 振荡器与检波器；11. 低频放大器；12. 示波器；13. 信号发生器；14. 频率计

### 六、核磁共振磁强计的自动化

核磁共振磁强计的自动化内容包括频率对磁场的自动搜索、自动锁定、自动跟踪和磁场强度数值的直接显示。用一个锯齿波电压加到变容二极管上使电压逐步升高，以使振荡器频率逐渐变化，就可以达到自动搜索的目的。对磁场加上一个调制，当出现调制频率的倍频时，使锯齿波停止扫描，并对信号进行相敏检波，把输出电压反馈到变容二极管上可以达到自动锁定

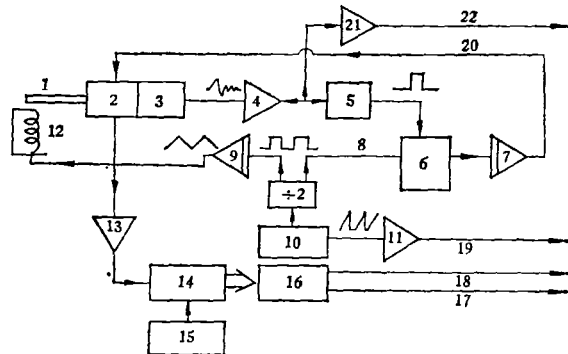


图7 E-500型核磁共振磁强计方框图

1. 探头；2. 射频振荡器；3. 射频检波器；4. 放大器；5. 触发振荡器；6. 相检波器；7. 积分器；8. 参考信号；9. 积分器；10. 锯齿波发生器；11. 缓冲器；12. 磁场调制线圈；13. 前置放大器；14. 计算器；15. 4.25760MHz 时钟；16. 时标电路；17. 数字时标；18. 模拟时标；19. 示波器驱动(X轴)；20. 控制频率电压；21. 缓冲器；22. 示波器驱动(Y轴)。

的目的。当磁场强度变化时，频率可以进行自动跟踪。可以采用改变频率计闸门开放的时间的方法或者采用计算装置来达到直接显示被测磁场强度的数值的目的。

E-500 型核磁共振磁强计的方框图如图 7 所示。它的测量范围是 800—15000G，并具有上述自动化功能。这种仪器也称为核磁共振高斯计 (NMR gaussmeter)。

### 参 考 文 献

[1] 吴桂秀, 物理, 7(1978), 283.  
[2] E. M. Purcell et al., *Phys. Rev.*, 69 (1946), 37.  
[3] F. Bloch et al., *Phys. Rev.*, 69 (1946), 127.  
[4] 王金山, 核磁共振波谱仪与实验技术, 机械工业出版社, (1982).

[5] 沈平等, 物理, 9(1980), 241.  
[6] 张继良, 申秀娟, 原子能科学技术, 12(1962), 895.  
[7] В. А. Гордиенко, *ПТЭ*, 4(1963), 144.  
[8] В. А. Ксенофонов, *ПТЭ*, 1(1966), 197.  
[9] Б. Е. Соболевский, *ПТЭ*, 1(1967), 193.  
[10] F. N. H. Robinson, *J. Sci. Instrum.*, 42 (1965), 653.  
[11] E. A. Faulker, *J. Sci. Instrum.*, 44(1967), 391.  
[12] А. Г. Хандожко и др., *ПТЭ*, 1(1975), 152.  
[13] P. Deschamps, *Rev. Sci. Instrum.*, 48 (1977), 664.  
[14] 吴苍生、韩红光, 物理, 7(1978), 250.  
[15] Д. Чебурков, *Измерит. Техника*, 8(1976), 74.  
[16] 张鹤登等, 仪器仪表学报, 2(1980), 47.  
[17] W. R. Wampler et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 46 (1975), 58.  
[18] Е. Сапунов и др., *ПТЭ*, 2(1979), 202.  
[19] 王金山等, 仪器仪表学报, 2(1981), 66.

## 高速数据采集系统在脉冲放电实验中的应用

刘培铭 何秋英

(中国科学院物理研究所)

### 一、GBH-1 型受控实验装置及其数据采集系统

我们研制成功一台以 TRS-80 微处理机为主机的高速数据采集系统, 并将它用于 GBH-1 型快脉冲放电实验装置, 收到了较好的效果。

GBH-1 型快脉冲放电实验装置, 用于等离子体物理和受控热核聚变研究工作。该装置采用电容器组快脉冲放电方式来产生、加热和约束高温等离子体。主电容器组放电四分之一周期是 8 微秒, 最高放电电压是 20 万伏, 峰值放电电流是几百万安培, 主触发系统的触发电压是 7 万伏, 触发脉冲上升前沿为 50 毫微秒。

我们为 GBH-1 实验装置设计的数据采集系统, 正是在这种强干扰环境中使用的, 以采集 GBH-1 装置中大量瞬变的物理实验数据。我们采用“分块采集”的思想, 即对该装置中产生

的部分物理量由一个小系统采集, 此小系统由一台微处理机和若干采集单元构成, 由若干个小系统构成整个采集系统。这不同于以往那种普遍的设计思想: 一台计算机, 一套完整的采集系统, 在统一系统软件控制下, 对整个实验装置全面进行控制和数据采集。“分块采集”的优点是: 各小系统独立, 增加了可靠性; 易于抗干扰; 适合于物理实验灵活多变的要求; 软件系统十分简单; 价格便宜。小系统也可与大型计算机对接, 进行复杂数据处理。目前我们设计和安装的 15 路高速数据采集系统就是这样一台小系统。

### 二、15 路高速数据采集系统

15 路高速数据采集系统是由 15 路波形存储器、接口和 TRS-80 微处理机组成。

每一路波形存储器是一个独立单元, 可采