

低场核磁共振信号检测电路设计

邹庭浪¹, 孙伟达², 谢建军¹, 郭智勇³, 鄢杨波^{1*}

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波铭瑞中兴电子科技有限公司, 浙江 宁波 315105;

3. 宁波大学 材料科学与化学工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 核磁共振检测以其快速、不破坏样品、直观反映分子结构等优点在诸多领域有着非常广泛的应用。针对核磁共振检测仪器价格昂贵、体积庞大、操作复杂、不便于实现现场检测等问题, 设计了一种面向小型化低成本低场核磁共振仪的核磁共振信号检测电路。所提出的电路使用低噪声前置放大器实现传感信号放大, 基于锁定放大的微弱信号检测技术实现了对核磁共振回波信号的有效检测。实际测试结果表明, 所设计的电路放大倍数高达 20 000 倍, 在高倍噪声的干扰下能够准确检测出幅度在 $5\mu\text{V}$ 及以上的有用信号。所提出的低场核磁共振信号检测电路对于发展低成本核磁共振仪器具有较好的应用价值。

关键词: 低场核磁共振信号检测; 微弱信号检测; 核磁共振

中图分类号: TM937

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 06-0001-08

随着物理、化学及生物等基础研究的发展, 核磁共振检测技术在石油勘探、食品农业、生物医学等领域得到了广泛应用^[1-2]。目前市场上的核磁共振检测仪器主要可分为低场核磁共振检测仪器和高场核磁共振检测仪器^[3-6]。高场核磁共振检测仪器非常昂贵, 而且其体积普遍过于庞大, 不能满足现场检测的要求^[7]。低场核磁共振检测仪器相对便宜, 在市场中有非常多的适用场景^[8-10]。低场核磁共振仪器中的检测装置及控制装置往往没有实现一体化, 这给现场检测带来诸多不便。因此, 低成本一体化低场核磁共振检测仪器是一个重要的发展方向^[11]。

针对现有核磁共振检测仪器价格昂贵、体积庞大、检测不方便等问题, 本文设计了一种低成本、小型化的低场核磁共振信号检测电路。传统上通过仅用放大器直接放大核磁共振信号的方式, 其设计成本较高, 难以有效检测信噪比低、频率高的微弱核磁共振信号, 本文设计的电路成本低、能够在信噪比低、数量级为微伏级的信号中提取出有用

信号, 提高了低场核磁共振检测的便携性和检测效率, 为核磁共振检测仪器的低成本便携式发展提供了新思路。

1 核磁共振检测简介

1.1 核磁共振检测原理

核磁共振检测技术利用原子和外部磁场之间的相互作用, 对产生的不同核磁共振信号进行检测分析, 从而确定被测物质。检测前将检测样品置于均匀的静磁场 B_0 中, 在静磁场作用下, 质子将形成纵向磁化矢量 $M^{[12]}$, 如图 1 所示。

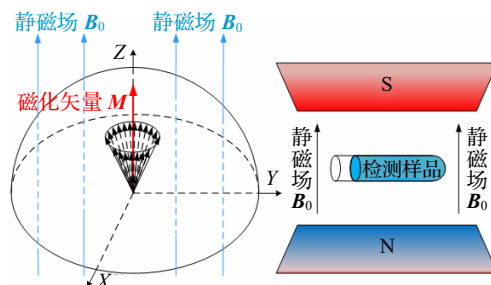


图 1 静磁场作用下质子的状态

收稿日期: 2022-03-10.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(42076193); 浙江省基础公益研究计划(LGF19B050003)。

第一作者: 邹庭浪(1997-), 男, 江西兴国人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统设计. E-mail: 1872217865@qq.com

*通信作者: 鄢杨波(1972-), 男, 浙江奉化人, 博士/副教授, 主要研究方向: 嵌入式系统设计. E-mail: wuyangbo@nbu.edu.cn

线圈施加射频脉冲后, 质子在射频脉冲作用下从低能态跃迁至高能态, 磁化矢量 M 从 Z 轴偏转到 XOY 平面, 如图 2 所示.

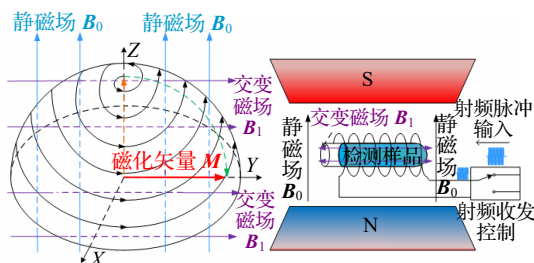


图 2 外加射频脉冲作用后质子的状态

射频脉冲撤销后, 质子将慢慢回归至起始状态^[13]. 在质子回归过程中, 其产生的磁化矢量将切割线圈, 从而在线圈上产生感应电动势, 这就是需要被检测的核磁共振信号, 如图 3 所示.

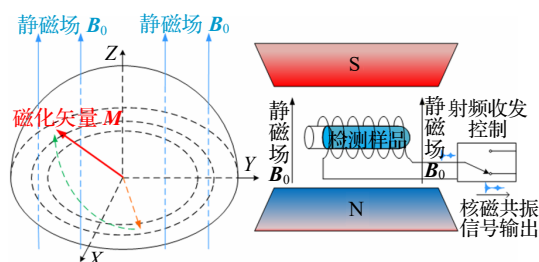


图 3 射频脉冲撤销后质子的状态

1.2 核磁共振检测仪结构

核磁共振检测仪器通常由控制器、射频信号单元、核磁共振检测室和核磁共振信号检测单元 4 个部分组成^[14-15], 其结构如图 4 所示. 核磁共振信号检测单元用于将线圈接收到的核磁共振回波信号进行低噪放大、选频, 然后将信号传输给控制器. 信号检测单元的设计是整个仪器设计的关键, 信号检测单元的性能将直接决定核磁共振检测仪的检测结果.

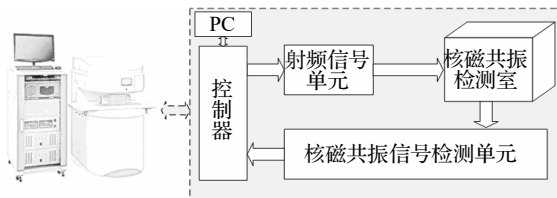


图 4 核磁共振检测仪结构

2 低场核磁共振信号检测电路整体设计

核磁共振回波信号是极其微弱的, 其信号幅度通常是 μV 级别, 频率为 MHz 级别, 信噪比低,

由一系列幅度呈指数衰减的高频小信号构成, 如图 5 所示. 各组回波信号的高频分量频率值等于核磁共振检测的 Larmor 频率, 各组回波信号最大幅值的持续时间即为核磁共振检测的 T_2 时间(横向弛豫时间).

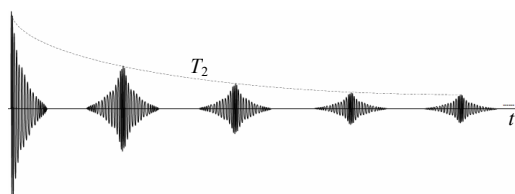


图 5 核磁共振回波信号示意

信号检测电路对线圈接收到的低信噪比的高频核磁共振回波信号进行放大、选频、检波. 低场核磁共振信号检测电路的总体框图如图 6 所示.

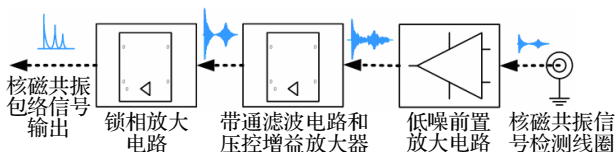


图 6 低场核磁共振信号检测电路总体框图

信号检测电路主要可分为低噪前置放大电路、带通滤波电路和压控增益放大器以及锁定放大电路 3 部分. 低噪前置放大电路主要对核磁共振的微弱回波信号进行低噪放大; 带通滤波电路和压控增益放大器主要对低噪前置放大电路输出的信号进行选频, 根据实际信号的大小调整电路总增益; 锁定放大电路主要对前级电路处理后的核磁共振回波信号依次进行检波、滤波以及低频放大.

3 低噪前置放大电路设计

3.1 运放的噪声模型

运算放大器内部具有很多个噪声源, 其可分为电压类型和电流类型^[16]. 运放内部的多种噪声源中最重要的就是等效输入电压噪声源, 选取跟随器电路对运放的等效输入电压噪声源进行分析, 运放的噪声模型可等效为图 7.

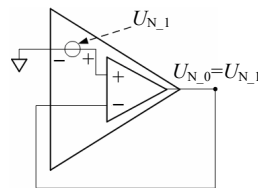


图 7 由跟随器构成的运放噪声模型

运放的同相输入端存在一个噪声电压源, 记作 U_{N_I} , 称为等效输入电压噪声源, 其大小用电压有效值表示^[17]. U_{N_I} 主要由两类噪声构成, 一类为 $1/f$ 噪声, 其电能力密度曲线随着频率的上升而下降, 通常出现在低频段, 其在 $[f_a, f_b]$ 频率范围内的有效值为

$$U_{rms,1/f} = C\sqrt{\ln(f_b/f_a)} \text{ Hz}, \quad (1)$$

式中, C 为 $1/f$ 噪声的噪声电压密度, $V \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 另一类为白噪声, 也叫平坦噪声, 其电能力密度曲线是一条直线, 与频率无关. 在高频段, 白噪声是运算放大器的主要噪声源, 其在 $[f_a, f_b]$ 频率范围内的有效值为

$$U_{rms,wh} = K\sqrt{f_b - f_a}, \quad (2)$$

式中, K 为白噪声的噪声电压密度, $V \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

3.2 噪声的叠加

在含有有效值为 $U_{rms1}, U_{rms2}, \dots, U_{rmsn}$ 的不同噪声源的电路中, 各噪声源的叠加满足以下关系^[17]:

$$U_{rms} = \sqrt{U_{rms1}^2 + U_{rms2}^2 + \dots + U_{rmsn}^2}. \quad (3)$$

结合公式(1)~(3)可得, 在 $[f_a, f_b]$ 频率范围内, 运放的等效输入电压噪声的总有效值为

$$U_{N_I} = \sqrt{C^2 \ln(f_b/f_a) \text{ Hz} + K^2(f_b - f_a)}. \quad (4)$$

3.3 多级放大器级联的噪声

在含级联运放的放大电路中, 各级电路的噪声对电路的影响不一样. 设 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 为各级放大器的噪声系数, $G_1, G_2, \dots, G_n$ 为各级放大器的功率增益, 则电路的总噪声系数 F 满足以下关系^[17]:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}. \quad (5)$$

由上式可知, 当第一级运放的功率增益 $G_1 \gg 1$ 时, 上式近似为 $F \approx F_1$, 这表明级联放大电路的噪声系数主要由第一级放大器决定.

3.4 基于 OPA847 的低噪前置放大器

根据核磁共振回波信号特点, 选用 OPA847 低噪高速运放构成前置放大器. OPA847 在增益 50 倍以上时增益带宽积高达 3.9 GHz, 压摆率可达 $950 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$. 结合前文分析可知, 在本设计中运放 $1/f$ 噪声的影响可以忽略. 因此, 运放的噪声源主要是白噪声, 白噪声是广谱的, f_b 通常远大于 f_a . 结合式(2)和式(4)可得

$$U_{N_I} \approx U_{rms,wh} \approx K\sqrt{f_b}. \quad (6)$$

从数据手册知, OPA847 白噪声的电压密度 K 为 $0.85 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 电路在实际输出时, 噪声的频率上限 f_b 会受到运放的带宽限制, 本文中第一级放大器的放大倍数为 200 倍, 由增益带宽积可知此时运放的带宽约为 19.5 MHz, 这意味着 $f_b \leq 19.5 \text{ MHz}$. 结合公式(6)可得

$$U_{N_I} \approx 0.85 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2} \times \sqrt{19.5 \text{ MHz}} \leq 3.74 \mu\text{V}.$$

由此可见, OPA847 的输入噪声有效值小于 $3.74 \mu\text{V}$, 对比核磁共振回波信号可发现 OPA847 运算放大器产生的噪声几乎可以忽略, 完全满足设计的要求. 低噪前置放大电路如图 8 所示, 电路主要由两个 OPA847 级联而成, 线圈接收到的微弱核磁共振信号经 V_i 端口与低噪前置放大电路的同相端相连, 通过电容 C_i 进行隔直, 放大电路的工作由使能控制信号控制, 整个电路均以 50Ω 阻抗进行匹配.

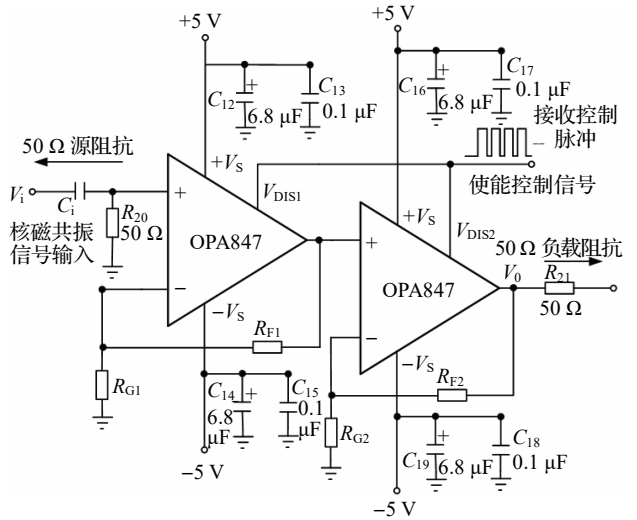


图8 低噪前置放大电路原理

经过低噪前置放大电路之后, 输出信号满足:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_{F1}}{R_{G1}}\right) \left(1 + \frac{R_{F2}}{R_{G2}}\right) V_i. \quad (7)$$

可通过改变 R_{FX} 与 R_{GX} ($X=1,2$) 的比值来改变低噪前置放大电路的总增益. 选择 R_{F1} 为 $2.7 \text{ k}\Omega$, R_{G1} 为 56Ω , R_{F2} 为 750Ω , R_{G2} 为 39Ω , 由公式(7)可知总增益约为 1000 倍.

4 带通滤波电路和压控增益放大器设计

经低噪前置放大电路放大后的回波信号依旧较小且含有很大的噪声, 若该信号直接输入至锁

定放大电路,将无法准确提取出核磁共振的包络信号,因此在进行锁定放大之前还需要进行选频放大.本文设计了带通滤波电路及压控增益放大器,用于滤除带外噪声并进一步放大核磁共振回波信号.

4.1 带通滤波电路设计

经低噪前置放大电路后的回波信号含有大量的噪声,应用高阶带通滤波器可以滤除噪声以提高核磁共振信号的信噪比.本文选用三阶无源带通滤波器实现带通滤波功能.无源带通滤波器利用电感电容谐振的原理来实现滤波功能,其成本非常低,但对其自身电路的电感和电容参数非常敏感,这就导致在设计过程中除了对元器件的精度要求很高以外,还需要关注实际电路板上的寄生参数.电路板上等效出来的寄生参数可通过PCB阻抗计算软件(如CITS25、Si9000等)获得.

由于市面上元器件的参数值基本不可能做到全范围覆盖,必须通过多个元器件串并联的方法才能满足滤波电路中各元器件参数的要求.本文使用Filter滤波器设计软件设计了一款带宽1 MHz,中心频率9.26 MHz的巴特沃斯型三阶无源带通滤波器,如图9所示.所设计滤波器的ADS仿真结果如图10所示.从图10可知,在8.780 MHz到9.770 MHz的频率范围内可认为信号能够正常传输,仿真结果与设计的预期结果基本吻合.

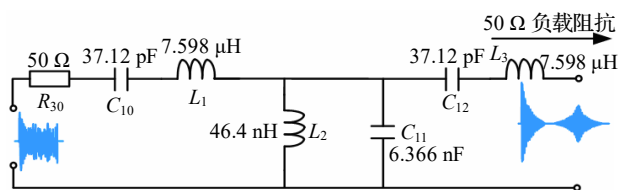


图9 无源带通滤波器电路

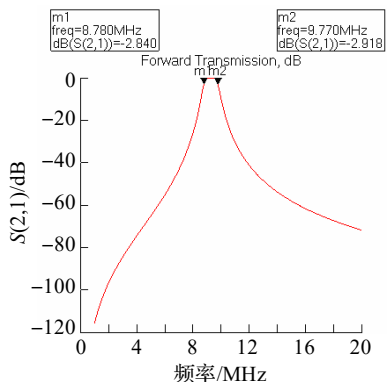


图10 无源带通滤波器 ADS 仿真结果

4.2 压控增益放大器设计

压控增益放大器需要有较大的增益调整范围和足够的带宽,经综合考虑,选用AD603低噪声压控增益高速运算放大器.压控增益放大器的原理如图11所示.AD603可通过改变其相应增益控制引脚的电压值(图11中的 V_G)来改变其实际的放大倍数.

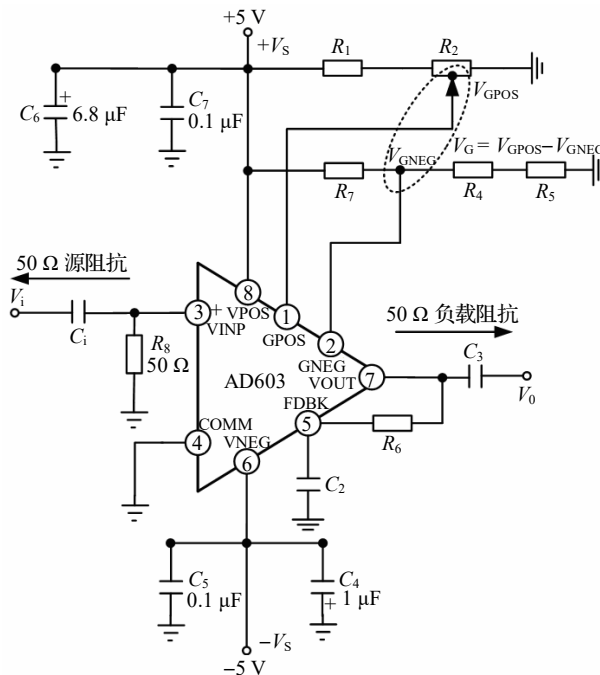


图11 压控增益放大器原理

通过调节图11中电位器 R_2 的可调端,可改变增益控制引脚 V_{GPOS} 上的电压值,进而改变 V_G 的电压值,整个电路的增益(单位: dB)满足:

$$G_{\text{ain}} = 40V_G + 20, \quad (8)$$

式中, $V_G = V_{GPOS} - V_{GNEG}$, V.

5 锁定放大电路设计

锁定放大电路是一种微弱信号放大器,能够检测并放大湮没在背景噪声中的特定频率信号^[18].一般的放大器放大信号的同时也会把噪声放大,不能检出湮没在噪声中的有用信号,而锁定放大电路采用了互相关原理,其利用参考信号(与有用信号同频的信号)和有用信号的相关性以及噪声互不相关的特性,实现抑制噪声的目的^[19].

5.1 锁定放大电路基本原理

针对核磁共振回波信号特点,本文设计了一种锁定放大电路,其原理如图12所示.

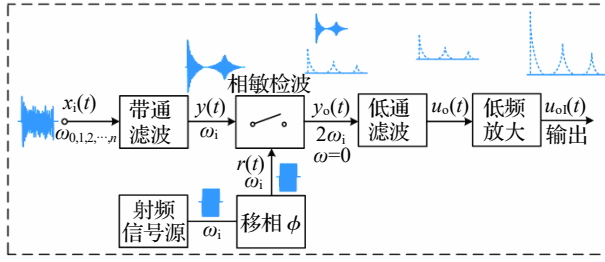


图 12 锁定放大电路原理框图

为满足相敏检波中两输入信号同频的要求, 在相敏检波电路前添加了带通滤波器来滤除前级放大器产生的失调电压和其他频率分量, 带通滤波器为无源带通滤波器, 其设计与前文所述一致. 锁定放大电路首先通过带通滤波器对经前级放大后的回波信号进行选频, 滤除杂波信号, 留下频率等于 Larmor 频率 ω_i 的核磁共振回波信号. 带通滤波器之后的信号 $y(t)$ 经相敏检波后得到与被测信号幅度成正比的直流信号. 相敏检波器实质为一个乘法器, 它将输入信号与参考信号相乘, 得到输入信号与参考信号的差频信号与和频信号, 经过低通滤波器后, 和频信号被滤除, 保留了差频信号, 差频信号与被测信号的振幅成正比. 本文采用一阶无源 RC 低通滤波器, 其上限截止频率 f_h 满足:

$$f_h = 1 / (2\pi RC). \quad (9)$$

令 $y(t)$ (考虑噪声影响) 与参考信号 $r(t)$ 分别为:

$$y(t) = V_s \cos(\omega_i t + \varphi_0) + n(t), \quad (10)$$

$$r(t) = V_r \cos(\omega_i t + \varphi_r), \quad (11)$$

式中, 输入信号与参考信号频率相同, $n(t)$ 为噪声信号:

$$n(t) = V_n \cos(\omega_n t + \varphi_n). \quad (12)$$

相敏检波器的输出 $y_o(t)$ 为:

$$y_o(t) = y(t) \times r(t) =$$

$$\begin{aligned} & V_s V_r \cos[(\omega_i - \omega_r)t + (\varphi_0 - \varphi_r)] / 2 + \\ & V_s V_r \cos[(\omega_i + \omega_r)t + (\varphi_0 + \varphi_r)] / 2 + \\ & V_n V_r \cos[(\omega_n - \omega_r)t + (\varphi_n - \varphi_r)] / 2 + \\ & V_n V_r \cos[(\omega_n + \omega_r)t + (\varphi_n + \varphi_r)] / 2. \end{aligned} \quad (13)$$

因 $\omega_i = \omega_r$, 经低通滤波器后, 输出信号满足:

$$u_o(t) = V_s V_r \cos(\varphi_0 - \varphi_r) / 2. \quad (14)$$

由式(14)可以得到, 经过锁定放大, 输出信号只与输入信号和参考信号的幅值以及两信号相位差有关, 当两信号同相时, 输出信号幅值最大. 噪声信号由于频率与输入信号和参考信号相差较大,

相乘后得到的高频信号被低通滤波器滤除, 可以起到抑制噪声的作用.

5.2 相敏检波电路设计

相敏检波电路本质上是乘法运算实现信号的频谱搬移, 本文选用高性能模拟乘法器芯片 AD835 作为相敏检波电路的核心元件. 相敏检波电路原理如图 13 所示.

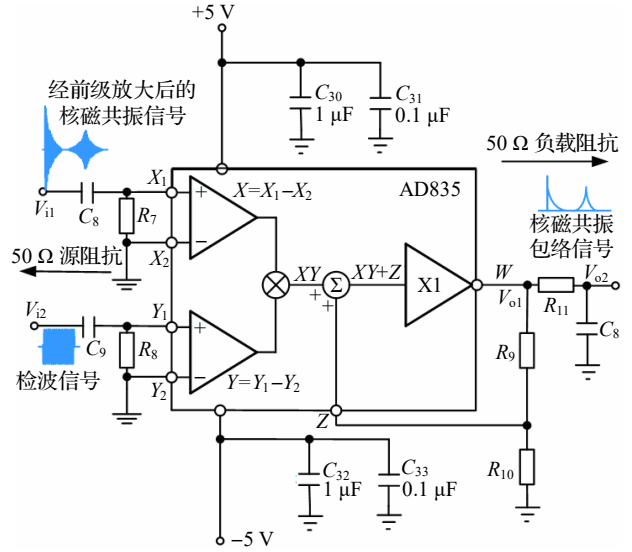


图 13 相敏检波电路原理

经前级放大的核磁共振回波信号在 V_{i1} 口输入, 此时射频信号源将输出检波信号到 V_{i2} 口, 为不影响乘法电路的输出结果, 在两个输入端前添加了 RC 滤波电路(图 13 中 R_7, R_8, C_8, C_9). 经 AD835 芯片之后的信号通过 W 口输出, 此时电路的输入输出关系满足:

$$V_{o1} = (X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)[1 + K / (1 - K)], \quad (15)$$

将 $X_1 = V_{i1}, Y_1 = V_{i2}, X_2 = 0, Y_2 = 0, K = R_{10} / (R_9 + R_{10})$ 代入式(15)可得

$$V_{o1} = V_{i1} V_{i2} (1 + R_{10} / R_9). \quad (16)$$

R_{11} 和 C_8 构成一阶无源 RC 低通滤波器, 由式(13)、(14)可知, 经低通滤波器之后可将乘法器出来的和频分量滤除, 最后只剩下含核磁共振包络信息的差频信号.

5.3 射频信号源设计

射频信号源采用直接数字频率合成(Direct Digital Synthesis, DDS)技术. 本文采用集成的 DDS 芯片 AD9959, MCU 可通过并行数据总线来设定 AD9959 输出信号的频率、幅度及相位. 此外, 射

频信号源输出级外接了具有较高驱动能力的 OPA690 构成电压跟随器, 以提高检波信号的带负载能力. 射频信号源的电路原理如图 14 所示.

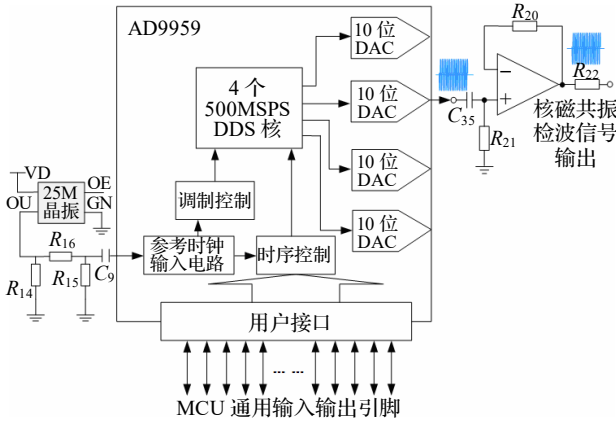


图 14 射频信号源的电路原理

5.4 低频放大电路设计

相敏检波电路输出的包络信号通常是频率很低的信号, 这对运放增益带宽积的要求大大降低. 本文采用 AD8066 对低频的包络信号进行高倍数放大, 低频放大电路采用同相比例运算电路, 其原理如图 15 所示, 输入输出满足:

$$V_o = (1 + R_f / R_{40}) V_i. \quad (17)$$

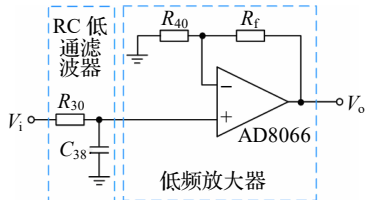


图 15 低频放大电路原理

6 电路测试

6.1 测试方案

6.1.1 测试框图

为对低频核磁共振信号检测电路进行测试, 确定电路测试方案如图 16 所示. 信号检测电路测试分为接收电路(含低噪前置放大电路、带通滤波电路和压控增益放大器)测试、锁定放大电路测试和低场核磁共振信号检测电路整体测试. 为使模拟的核磁共振信号尽可能地贴近实际信号, 本实验在信号发生器的输出级后面加了衰减电路, 经衰减电路的模拟核磁共振信号幅度最低可达 $5\mu\text{V}$ 且信噪比低. 项目确定的低场核磁共振仪器的静磁场约为 0.21 T , 故其 Larmor 频率为 9.26 MHz .

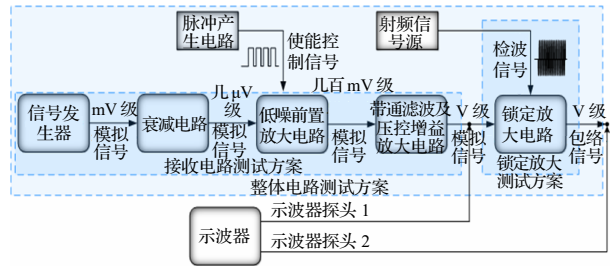


图 16 电路性能测试方案

6.1.2 测试仪器

测试仪器使用情况见表 1.

表 1 测试仪器使用情况

仪器	生产厂家	型号	参数描述
信号发生器	南京盛普仪器	SP1461	100 μHz ~300 MHz
示波器	Tektronix	MDO3022	2.5 GHz 采样率
矢网仪	Keysight	E5063A	100 kHz~18 GHz

6.1.3 测试用辅助电路

为更好地测试电路的性能, 引入了辅助电路, 其包含脉冲产生电路和衰减电路. 脉冲产生电路利用 FPGA 来产生用于控制接收电路通断的方波信号. 衰减电路采用 π 型衰减网络, 利用 PCB 板设计一款 40 dB 衰减电路, 其原理如图 17 所示.

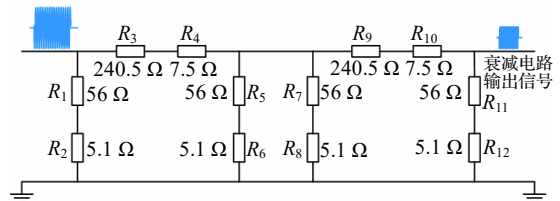


图 17 衰减电路原理

6.2 接收电路测试

核磁共振回波信号幅值通常在几百微伏的数量级, 其波形与调幅波相似. 将信号发生器产生的微弱调幅波进行衰减, 用衰减后的调幅信号测试电路的性能. 图 18 为使用矢量网络分析仪测试无源带通滤波器的测试图, 从图中可知滤波器的选频特性与前面仿真结果一致. 图 19 所示为经衰减电路后输入峰峰值为 $30\mu\text{V}$ 及 $5\mu\text{V}$, 载波频率为 9.26 MHz , 调制信号频率为 1 kHz 的调幅波至接收电路后信号的输出(示波器通道 1 信号). 在设计时, 低噪前置放大电路放大了 1000 倍, 压控增益放大电路放大了 20 倍, 从图 19 可知, 输入峰峰值为 $30\mu\text{V}$ 和 $5\mu\text{V}$ 的调幅波经接收电路放大后其峰峰值分别接近 600 mV 和 100 mV , 其放大倍数均接近

20 000 倍, 达到预期设计目标。

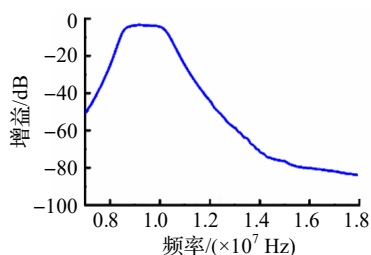
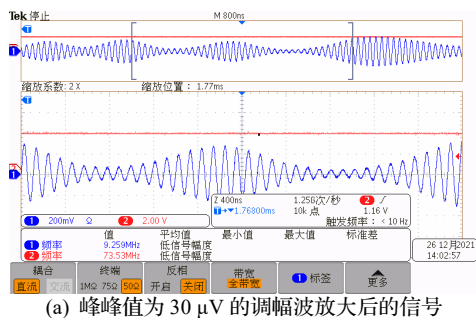
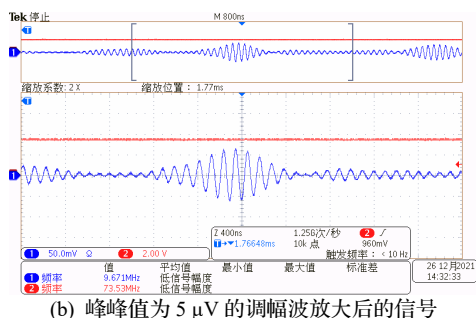


图 18 无源带通滤波器测试图



(a) 峰峰值为 30 μV 的调幅波放大后的信号



(b) 峰峰值为 5 μV 的调幅波放大后的信号

图 19 接收电路测试图

6.3 锁定放大电路测试

使用信号发生器产生载波频率为 9.26 MHz, 调制信号频率为 8 kHz 的调幅波来测试锁定放大电路的性能, 检波信号由射频信号源产生。如图 20 所示, 其中示波器通道 2 信号为输入的调幅波信号, 示波器通道 1 信号为经锁定放大后的输出包络信号, 对比示波器两个通道的信号可知, 经锁定放大电路后, 调幅波的包络信号被提取出来了。

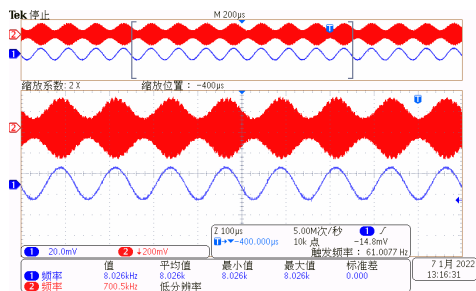
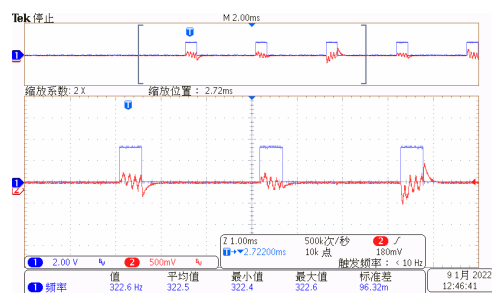


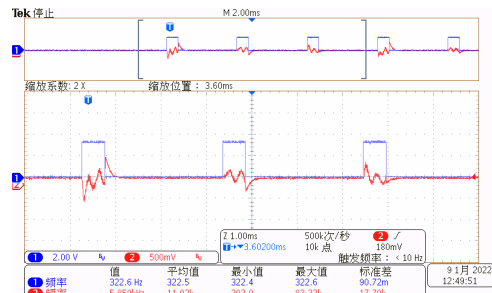
图 20 锁定放大电路测试图

6.4 低场核磁共振信号检测电路整体测试

通过信号发生器产生载波频率为 9.26 MHz, 包络频率为 8 kHz 和 4 kHz, 并经过信号衰减电路的调幅波信号来模拟核磁共振回波信号, 随后将其传递至信号检测电路的输入端。测试结果如图 21 所示, 其中示波器通道 2 信号为信号检测电路提取出来的核磁共振包络信号, 通道 1 信号为脉冲产生电路的使能控制信号。整体测试结果表明, 本文设计的低场核磁共振信号检测电路能够在信噪比低、数量级为 μV 级的信号中提取出有用信号。



(a) 包络频率为 8 kHz 的调幅波经信号检测电路的输出



(b) 包络频率为 4 kHz 的调幅波经信号检测电路的输出

图 21 信号检测电路整体测试图

7 结论

本文设计了一种低场核磁共振信号检测电路, 实现对核磁共振回波信号的有效检测, 且具有低成本、小型化的优点。低场核磁共振信号检测电路采用低噪声运算放大器实现微弱核磁共振回波信号的放大, 采用高阶无源带通滤波器和压控增益放大器实现高信噪比的选频放大, 采用锁定放大技术实现回波信号的包络检波。实际测试结果表明所设计的电路可以实现微伏级微弱信号的检测, 能够满足低场核磁共振检测仪信号检测的需求。所设计的电路结构简单、性能稳定, 对于低场核磁共振检测仪器的低成本便携式发展具有很好的参考价值。

参考文献:

- [1] 张雅洁. 电力用油劣化状态在线监测的核磁共振方法及传感器设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [2] 房鹏祥, 赵世涛. 探讨低场核磁共振技术在食品安全快速检测中的应用[J]. 食品界, 2021(7):85-86.
- [3] 高顺. 微型核磁共振系统的研究与设计[D]. 合肥: 安徽大学, 2020.
- [4] Asfour A. A novel NMR instrument for the *in situ* monitoring of the absolute polarization of laser-polarized ^{129}Xe [J]. Journal of Biomedical Science and Engineering, 2010, 3(11):1099-1107.
- [5] Tsai L L, Mair R W, Rosen M S, et al. An open-access, very-low-field MRI system for posture-dependent ^3He human lung imaging[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2008, 193(2):274-285.
- [6] 吴奇贞. 小型数字化核磁共振主控系统研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [7] 刘敏, 邱雯绮, 孙惠军, 等. 便携式核磁共振谱仪的研究进展[J]. 波谱学杂志, 2014, 31(4):504-514.
- [8] Macovski A, Conolly S. Novel approaches to low-cost MRI[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 1993, 30(2): 221-230.
- [9] Appelt S, Haesing F W, Baer-Lang S, et al. Proton magnetization enhancement of solvents with hyperpolarized xenon in very low-magnetic fields[J]. Chemical Physics Letters, 2001, 348(3/4):263-269.
- [10] Bryden N, Antonacci M, Kelley M, et al. An open-source, low-cost NMR spectrometer operating in the mT field regime[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2021, 332: 107076.
- [11] Sun N, Liu Y, Lee H, et al. CMOS RF biosensor utilizing nuclear magnetic resonance[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(5):1629-1643.
- [12] Sun N, Liu Y, Qin L, et al. Small NMR biomolecular sensors[J]. Solid-State Electronics, 2013, 84:13-21.
- [13] 吴光乐. 核磁共振在石油测井中的应用分析[J]. 石化技术, 2020, 27(7):310-311.
- [14] 杜海龙, 王琦, 周振宇, 等. 单边核磁共振 Halbach 磁体结构设计[J]. 中国测试, 2019, 45(6):96-100.
- [15] 樊萌. 磁共振系统匀场线圈与梯度线圈设计研究[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院), 2021.
- [16] 胡波. 光电检测电路噪声分析与噪声处理[J]. 电子技术与软件工程, 2019(24):76-77.
- [17] 于慧俊, 肖立志, 朱万里, 等. 核磁共振测井仪低噪声模拟接收电路设计[J]. 测井技术, 2013, 37(2):183-186.
- [18] 杨鹏飞, 肖鹏, 张诸宇, 等. 一种基于锁定放大器的微弱信号检测方法[J]. 无线电通信技术, 2018, 44(6):597-600.
- [19] 阳松波, 李仙芝, 程晶晶. 核磁共振测井仪接收机设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(4):54-57.

Design of low field NMR signal detection circuit

ZOU Tinglang¹, SUN Weida², XIE Jianjun¹, GUO Zhiyong³, WU Yangbo^{1*}

(1.Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Mingrui ZTE Electronic Technology Co., Ltd., Ningbo 315105, China;

3.School of Material Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Nuclear magnetic resonance (NMR) detection has been widely used in many fields for its advantages of rapidity, non-destructive sample, and molecular structure visualization. To address the problems with NMR detection instruments, including high price, over-size, complicated operation, and poor operability of field detection, in this paper an NMR signal detection circuit is designed for miniaturized, low-cost low-field NMR instruments. The proposed circuit uses a low-noise preamplifier to amplify the sensing signal. The weak signal detection technique applied in locked amplification effectively detects the NMR echo signal. Test results show that the designed circuit magnifies up to 20 000 times. It can accurately detect useful signals at amplitudes of $5\ \mu\text{V}$ and above under high noise interference. The proposed low-field NMR signal detection circuit has good application value for developing low-cost NMR instruments.

Key words: low field NMR signal detection; weak signal detection; NMR

(责任编辑 韩 超)