

新型核磁共振孔隙介质分析仪的研制

肖立志, 于慧俊, 刘化冰, 李 新, 郭葆鑫, ANFEROVA S, ANFEROV V

(中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:研制一种新型低场核磁共振孔隙介质分析仪,通过对不同直径岩样的实际测量,可以快速提供含流体孔隙介质的 T_2 分布, T_1 分布, T_1-T_2 和 $D-T_2$ 二维分布等重要信息,证实了仪器的合理性,有效性,及便捷性。采用 Halbach 磁体和可变尺寸开槽法拉第屏蔽螺线管天线,方便了样品制备和探测效率。低成本线性功率放大器的输出功率可达 250 W,能够满足线圈激励要求,并降低成本。有源场效应管组成的隔离电路工作频率较宽,具有通用性。射频三极管组成的负反馈放大电路作为前置放大电路的第一级保证接收回路的低噪声设计,三极管集电极电流由运放为核心的虚拟电流源,使电路设计简化。DSP 和 FPGA 作为主控电路的运算和逻辑控制单元,使回波信号提取和脉冲序列时序生成更灵活。

关键词:核磁共振分析仪; 低场; 孔隙介质; Halbach 磁体; 探测效率

中图分类号:P 631.64

文献标志码:A

A novel low field nuclear magnetic resonance analyzer for porous media

XIAO Li-zhi, YU Hui-jun, LIU Hua-bing, LI Xin, GUO Bao-xin, ANFEROVA S, ANFEROV V

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A novel low field nuclear magnetic resonance (NMR) analyzer for porous media was presented. The analyzer permits analysis on water-saturated full cylindrical cores either in the laboratory or at the oil-well field with one-dimensional or two-dimensional measurements, and it can provide T_2 distribution, T_1 distribution and 2D T_1-T_2 maps. The rock test results show that porous media including rock can be measured accurately by one dimensional and two dimensional methods via the analyzer. The sensor consists of an improved Halbach magnet and exchangeable solenoid coils with slotted Faraday shielding. The low cost, linear power amplifier built in IRF510 and IRF640 produces power up to 250 W with gain of about 50 dB. The active de-coupler uses MOSFET controlled by digital circuit to protect the receiver channel. The gain of wideband preamplifier is 56 dB; the first stage utilizes a low noise wideband discrete RF transistor so that the noise introduced by the preamplifier is negligible. The digital signal processor (DSP) and field programmable gate array (FPGA) are employed to obtain the flexible logic control and powerful data processing, to generate all timing and control signal based on one-dimensional or two-dimensional pulse sequence and obtain the echo train data with digital phase sensitive detection (DPSD).

Key words: NMR analyzer; low field; porous media; Halbach magnet; measurement efficiency

低场核磁共振分析仪在孔隙介质测试中已经广泛应用。岩石是一种重要的孔隙介质,核磁共振岩心分析可以提供孔隙度、渗透率等参数,还能够对孔径分布、孔隙连通性等进行测量分析,因而在储层评价和测井机制研究中发挥重要作用^[1-3]。同时,二维核磁共振技术的迅速发展进一步拓展了核磁共振在岩心等孔隙介质分析中的应用^[4,5]。目前国内外低

场核磁共振分析仪磁体多采用 H 型结构,对样品的直径和长度有一定限制,更换样品时,由于电导率差异,天线阻抗和谐振频率会发生变化^[6],为保证测量结果的准确性需要对调谐电路进行调谐,增加了实验复杂度。笔者提出并研制一种新型低场核磁共振孔隙介质仪,通过实际测量,快速提供含流体孔隙介质的 T_2 分布, T_1 分布, T_1-T_2 和 $D-T_2$ 二维分布等

收稿日期:2012-12-05

基金项目:国家“863”项目(2013AA064605)和引智基地项目(B13010)

作者简介:肖立志(1962-),男,教授,博士,主要从事石油测井和极端条件核磁共振探测及其应用的研究。E-mail: xiaolizhi@cup.edu.cn。

重要信息。仪器采用 Halbach 磁体和可变尺寸开槽法拉第屏蔽螺线管天线,使探测效率得以提高。

1 传感器设计

核磁共振分析仪传感器由磁体和天线组成,分别产生核磁共振测量中的 B_0 静磁场与 B_1 射频场。磁体采用改进型 Halbach 磁体结构,由两组磁体阵列组成^[7-9]。每组磁体阵列包含 24 块尺寸为 $40\times40\times100\text{ mm}^3$ 的钕铁硼磁体,组合形成一个半径 $R_1=160\text{ mm}$ 的磁环,其磁体排列和磁场分布如图 1(a) 所示。通过调整两组磁体阵列之间的间隔来优化整个磁体系统内部静磁场 B_0 的均匀度,采用有限元软件模拟得到选取 17 mm 为最优的磁体排列间隔。最终所制作的磁体静磁场强度为 103.8 mT ,对应的氢核拉莫尔频率为 4.42 MHz ,整个磁体系统质量 $W=40\text{ kg}$ 。在中心对应半径 $R_2=12\text{ mm}$,长度 $L=40\text{ mm}$ 的区域内其磁场梯度 $G=1\text{ mT/cm}$;在中心对应半径 $R_3=60\text{ mm}$,长度 $L=100\text{ mm}$ 的区域内静磁场梯度 $G=3\text{ mT/cm}$ 。

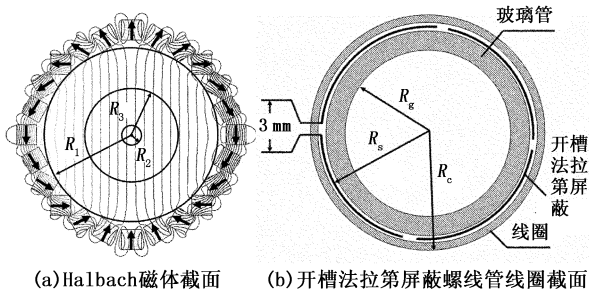


图 1 Halbach 磁体和开槽法拉第屏蔽螺线管线圈截面图
Fig.1 Halbach magnet and solenoid coil with slotted Faraday shielding

采用经典的螺线管线圈作为天线,用以提供轴向上与静磁场 B_0 相垂直的 B_1 射频场。为避免样品与线圈之间的电场耦合对调谐电路阻抗和频率的影响,在样品和线圈之间加入开槽法拉第屏蔽。由于该屏蔽的使用,在更换样品时无需重新调谐,使得测量更加方便。针对半径为 12 mm 的标准岩心样品,设计了半径 $R_c=15\text{ mm}$ 、长度 $L=30\text{ mm}$ 和匝数为 20 的线圈。此线圈采用 0.8 mm 粗的铜线,缠绕在半径为 $R_g=14\text{ mm}$ 的玻璃管上。开槽法拉第屏蔽的半径为 $R_s=15\text{ mm}$ 、开槽个数为 4、开槽宽度为 3 mm 。开槽法拉第屏蔽螺线管的截面图如图 1(b) 所示。所设计的 15 mm 线圈其品质因数为 40,电感为 $9.4\text{ }\mu\text{H}$ 。根据被测样品的尺寸,可以更换半径范围为 $15\sim65\text{ mm}$ 的射频线圈,对半径为 12 mm 的标

准岩心到半径为 60 mm 的全直径岩心进行测量分析。

2 电子系统设计

核磁共振分析仪的工作原理是通过天线发射一系列特定频率且强度、持续时间和间隔时间满足核磁共振脉冲序列时序要求的大功率射频脉冲,激发样品中的氢核产生核磁共振现象,之后通过天线接收产生的微弱自旋回波信号^[10]。由于核磁共振岩心分析仪采用同一天线来完成射频脉冲的发射和回波信号的接收,需设计专门的电路来对接收回路进行高压隔离保护。

核磁共振分析仪电子线路由功率放大电路、隔离电路、前置放大电路、带通滤波电路、主控电路和电源组成,如图 2 所示。

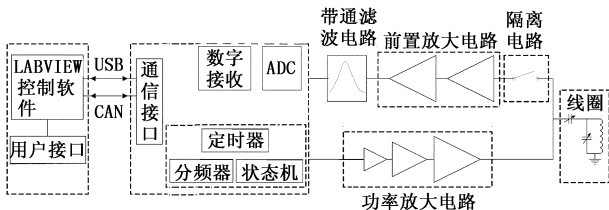


图 2 核磁共振分析仪电子线路框图
Fig.2 Block diagram of NMR analyzer circuits

2.1 功率放大电路

功率放大电路采用低成本金属氧化物场效应管(MOS 管)实现线性功率放大,其原理如图 3 所示。功率放大电路由三级放大器组成,第一级放大器采用宽带高动态范围射频放大器 MAV-11SM+,第二、三级放大器分别采用低成本 MOS 管 IRF510 和 IRF640。第一级和第二级放大器、第二级和第三级放大器、第三级放大器和天线之间通过阻抗变换变压器 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 相连, $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 的初次级匝数比分别为 $3:1$ 、 $2:1$ 、 $1:2.5$ 。第二级、第三级放大器采用 B 类推挽式线性放大设计,所有 MOS 管通过 MOS 管驱动器 EL7202CS 来提供栅极电压。为避免在回波采集期间,功率放大电路对接收回路造成噪声干扰,MOS 管驱动器由发射门控信号控制从而保证电路只在脉冲发射时有功率输出。使用 Agilent 公司的 MSO6032A 示波器、Tektronix 公司的 AFG3021B 信号发生器和 Bird 公司的 250 W 、 $50\text{ }\Omega$ 负载对所开发的功率放大电路进行了系统测试。将功率放大电路的输入信号幅值固定为 500 mV ,改变输入信号的频率测量得到电路的输出功率随频率的变化曲线如图 4 所示。可以看出在仪器工作频率范

围内其功率可达 250 W,增益约为 50 dB。

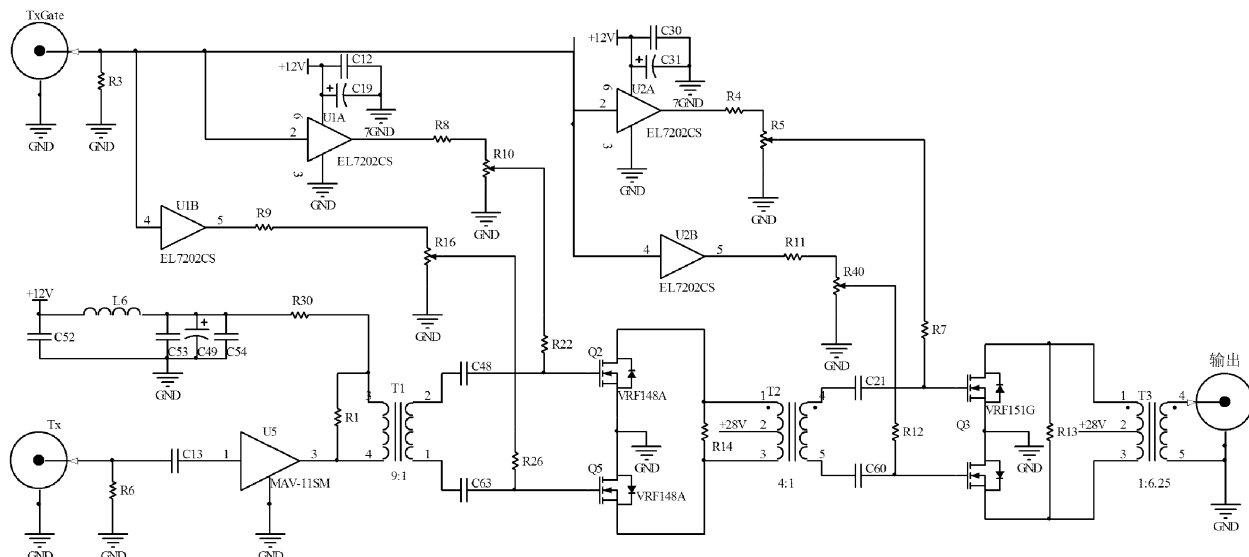


图 3 功率放大电路原理图

Fig.3 Schematic of power amplifier

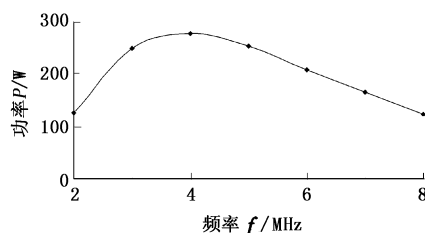


图 4 功率放大电路频率曲线

Fig.4 Frequency characteristic curve of power amplifier

2.2 隔离电路

射频脉冲的发射和回波信号的接收采用同一天线,脉冲发射时天线两端的电压为几百伏,而回波信号的幅值在几微伏至几百微伏之间,所以在前置放大电路与天线之间需要隔离电路来进行高压隔离保护。隔离电路在脉冲发射、能量泄放和回波接收这三种不同的状态下工作,其原理框图如图 5 所示。

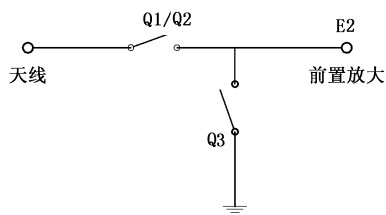


图 5 隔离电路框图

Fig.5 Block diagram of separation circuit

在射频脉冲发射阶段,MOS 管 Q1 和 Q2 断开,Q3 闭合,前置放大电路的输入端与天线断开且短接到地,由此来保护前置放大电路和减少前置放大电路的饱和和恢复时间;在脉冲发射完成 2 μ s 后进入能量泄放

阶段,MOS 管 Q1、Q2 和 Q3 闭合,这三个场效应管的导通电阻串联在一起并联在天线两端,将天线的 Q 值变低来快速泄放天线中储存的能量从而减小天线的恢复时间;在回波信号接收阶段,MOS 管 Q1 和 Q2 闭合,Q3 断开,回波信号进入前置放大电路进行放大。

2.3 前置放大电路

前置放大电路是电子线路中非常重要的电路模块,关系到整个仪器的信噪比和最终的数据质量。核磁共振回波信号非常微弱,其幅值在几微伏至几百微伏之间,这就要求前置放大电路具有很高的增益和很低的噪声。

前置放大电路的低噪声设计原则是获得最小的噪声系数。由级联放大器的噪声系数公式即弗里斯公式可知,第一级放大器的噪声系数和增益对整个仪器的噪声性能起着决定性的作用^[11]。本设计为由两级放大组成的低噪声宽带放大电路,第一级放大采用以低噪声、高宽带射频三极管 BFP183W 为核心的负反馈放大电路来保证前置放大电路获得尽可能低的噪声和较高的增益,三极管的集电极电流由运算放大器组成的虚拟电流源提供;第二级放大以电流反馈型放大器 AD8011 为核心,其原理如图 6 所示。Q1 的集电极连接到由电阻 R52、R51 和运放 U1 组成的虚拟基准源,进而,Q1 的静态集电极电流由电阻 R53 和 R54 决定。Q1 的静态集电极电流近似为 4.3 mA,增益由 R13 和 R12 的阻值决定其值为 40 dB。D3、D4、D5 和 D6 在脉冲发射时对三极管

Q1 进行保护;同时在脉冲发射时通过控制 MOS 管 Q2 将前置放大电路的输入短接到地对前置放大电路进行保护进而减小电路的饱和恢复时间。为避免由于控制脉冲快速关断产生振铃进而影响前置放大电路的恢复时间,来自主控电路的控制信号要经电阻 R25、R26、R27 和电容 C44 后变为“软控制脉冲”。第一级放大器使用铁盒和铜盒在电路板上进行双层屏蔽,整个电路安装在屏蔽铝盒内以减小外界的电磁干扰。同时设计了带通滤波电路来减小前置放大电路所引入的宽带噪声。带通滤波电路为由

四阶低通和四阶高通组成的八阶巴特沃斯有源滤波器,其通带频率为 4.4 ~ 4.6 MHz。使用 Agilent 公司的 MSO6032A 示波器、Tektronix 公司的 AFG3021B 信号发生器和 Telonic Berkeley 公司的 8120S 步进衰减器(最大衰减为 100 dB),对前置放大电路进行系统测试。将前置放大电路的输入信号幅值固定为 1 mV,以 1 MHz 为步进值改变输入信号的频率得到电路的频率特性曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,前置放大电路在 1 ~ 25 MHz 的频率范围内增益基本稳定,约为 56 dB。

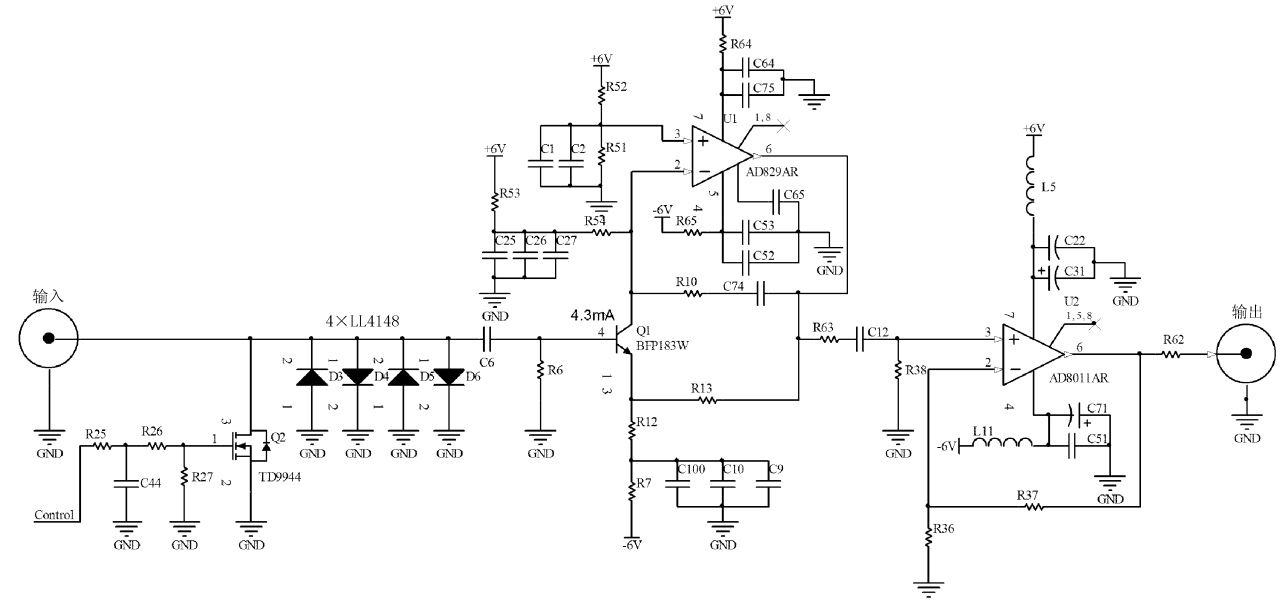


图 6 前置放大电路原理图
Fig. 6 Schematic drawing of preamplifier

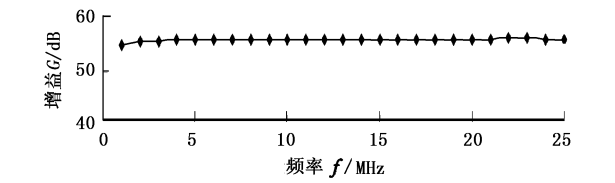


图 7 前置放大电路的频率特性曲线
Fig. 7 Frequency characteristic curve of preamplifier

2.4 主控电路

主控电路是仪器的控制和采集核心,产生所有的时序和控制信号,对放大后的回波信号进行采集和处理,完成与上位机的通信等,主要由数字信号处理器(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA)、直接数字频率合成器(DDS)、模拟数字转换器(ADC)和静态随机存取存储器(SRAM)组成,其框图如图 8 所示。DSP 通过通用串行总线 2.0 (USB2.0) 或控制器局域网(CAN)总线实现与上位机的通信,通过并行总线实现与 FPGA 的通信,通过数字相敏检波算法处

理数字化的回波信号获取回波串数据。FPGA 按照一维或二维脉冲序列的时序要求,产生发射、隔离和回波采集等控制命令,并使用内部存储单元实现 14 位,存储深度为 8192 的同步先入先出(FIFO)存储器。ADC 将放大后的模拟回波信号转换为数字信号,其采样时钟由 FPGA 提供,同时此时钟也作为 FIFO 存储器的写使能信号。DDS 为脉冲序列的生成、仪器控制和回波采集等提供基准时钟;DDS 的输出取决于拉莫尔频率,其频率是 8 倍的拉莫尔频率。

FPGA 作为脉冲序列生成器,实现了测量横向弛豫过程的 CPMG 脉冲序列、测量纵向弛豫过程的反转恢复脉冲序列、测量纵向过程和横向弛豫过程的纵向弛豫编辑脉冲序列、测量横向弛豫过程和扩散系数的扩散编辑脉冲序列和多维 CPMG 脉冲序列,各寄存器参数可通过上位机软件灵活更改。同时 FPGA 作为控制逻辑核心,按照特定脉冲序列的

时序要求,在 90° 和 180° 脉冲发射期间产生发射门控信号和发射脉冲;在脉冲发射和天线恢复期间产生两路隔离控制信号和一路前放控制信号。为满足

线性功率放大电路对输入信号的要求,发射脉冲经钳位放大器和四阶巴特沃斯低通滤波器后将方波信号转换为幅值为 500 mV 的正弦信号。

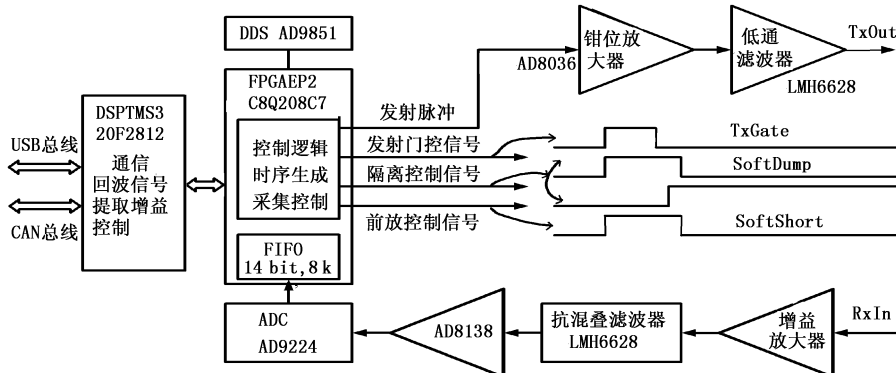


图8 主控电路框图

Fig. 8 Block diagram of main control circuit

为了提高回波数据的信噪比和降低对抗混叠滤波器的要求,采样频率定为8倍的拉莫尔频率。本设计采用 Analog Devices 公司研制的14位,最高采样频率为65 MHz的高精度高速模数转换器AD9244。AD9244为流水线结构单电源供电的并行CMOS模数转换器;输入信号幅值可以设定为1 V和0.5 V。为保证采集部分具有很高的信噪比,ADC输入采用差分输入,输入信号幅值选定为1 V。为适应大的信号动态范围,设计了36 dB的程控增益放大器,并以6 dB步进量连续调节,控制码为3位。根据对信号频率范围和信噪比的要求,设计了八阶巴特沃斯有源带通滤波器,通带频率为4.4~4.6 MHz。

核磁共振回波信号的信噪比低,利用回波信号和噪声不相关的特点,采用基于相关检测的数字相敏检波算法可以得到回波信号的幅度和相位信息^[12,13]。其基本原理是相位差为 90° 的两路参考信号 $\sin(\omega t)$ 和 $\cos(\omega t)$ 与带有噪声的回波信号 $\sum A \cos((\omega + \Delta\omega)t + \varphi) + n(t)$ 相乘产生具有一定相位差的直流分量和倍频分量,经积分器滤除倍频分量和降低噪声后,通过算术运算得到回波的幅度和相位信息。积分器采用分段式累加平均方式来实现。

整个主控电路的工作流程为: DSP通过USB2.0或CAN总线接收来自于上位机的频率字、测量模式(T_2 测量、 T_1 测量或 T_1-T_2 测量等)和测量参数(极化时间、 180° 脉冲宽度、回波间隔、回波个数和平均次数)等信息,并通过并行总线将这些数据发送给FPGA。FPGA产生满足特定脉冲序列的时序和控制命令,并在回波采集期间启动采集,同时将ADC转换后的数据暂存在FPGA内部的FIFO存储器中。

在本次回波采集完成后由FPGA产生中断信号, DSP接收到中断信号后将暂存在FIFO中的数据读出,并进行数字相敏检波处理得到此回波的实部和虚部信息,并保存到SRAM存储器中,处理完成后等待下一次回波采集,如此反复,直到达到设定的回波个数,一次回波串数据采集结束,然后将采集到的回波串数据上传给上位机进行预处理和反演等。

3 系统测试

以孔隙度为13.2%,渗透率为 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩岩心为被测样品,对该新型核磁共振岩心分析仪进行了系统测试。用抽真空加压饱和实验装置对岩心样品进行抽真空和加压饱和处理,经CPMG脉冲序列测量刻度后,得到的核磁共振孔隙度为12.5%,利用SDR模型计算得到的核磁共振渗透率为 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

采用纵向弛豫编辑脉冲序列对该样品进行 T_1-T_2 分布测量^[14],采集参数如下:回波间隔 $t_E = 0.16$ ms,采用对数均匀布点方式在0.5~2000 ms范围内对 T_1 编辑时间进行布点35个。其中在5个 T_1 编辑时间下的回波串衰减曲线如图9(a)所示,其信噪比为207(叠加48次)。对采集到的回波串数据进行二维反演,得到的 T_1-T_2 分布如图9(b)所示。从图9(b)中可以看出,弛豫时间 T_1-T_2 分布主要集中在短弛豫时间的范围内,表明该岩石孔隙类型以小孔隙为主,因此渗透率相对较低。在孔隙的弛豫机制中,相较于纵向弛豫时间,横向弛豫时间还受到了扩散项的影响,因此二维分布的 T_1/T_2 值大于等于1。

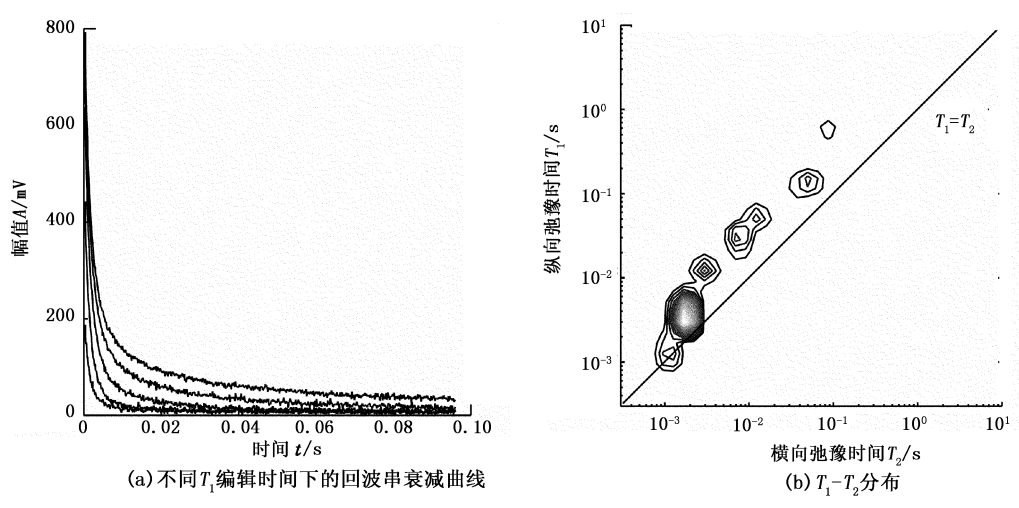


图 9 砂岩样品核磁共振测量结果

Fig. 9 NMR experimental result of sandstone sample

4 结 论

- (1) 研制了一种新型低场核磁共振孔隙介质分析仪,岩样测量证实了其有效性和便捷性。
- (2) 仪器传感器由 Halbach 磁体和开槽屏蔽法拉第屏蔽天线组成,使样品直径不受限制且样品对线圈调谐电路的频率和阻抗影响较小,更换样品时无须重新调谐。
- (3) 低成本线性功率放大器的输出功率可达 250 W,满足线圈激励要求,降低仪器成本;有源场效应管组成的隔离电路工作频率较宽,具有通用性。
- (4) 射频三极管组成的负反馈放大电路作为前置放大电路的第一级保证接收回路的低噪声设计,三极管集电极电流由运放为核心的虚拟电流源使电路设计大大简化。
- (5) DSP 和 FPGA 作为主控电路的运算和逻辑控制单元,使回波信号提取及脉冲序列时序生成更灵活。

参考文献:

[1] SONG Y Q, RYU S, SEN P N. Determining multiple length scales in rocks [J]. Nature, 2000,406:178-181.

[2] SONG Y Q. Pore sizes and pore connectivity in rocks using the effect of internal field [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2001,19:417-421.

[3] SONG Y Q. Novel NMR techniques for porous media research [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2003, 21: 207-211.

[4] LEU G, FORDHAM E J, HURLIMANN M D, et al. Fixed and pulsed gradient diffusion methods in low-field core analysis [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2005,

23:305-309.

[5] WASHBURN K E, CALLAGHAN P T. Tracking pore to pore exchange using relaxation exchange spectroscopy [J]. Physical Review Letters, 2006,97,175502.

[6] VAN HETEREN J G, HENKELMAN R M, BRONSKILL M J. Equivalent circuit for coil-patient interactions in magnetic resonance imaging [J]. Magnetic Resonance Imaging, 1987,5:93-99.

[7] RAICH H, BLUMLER P. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR mandhalas [J]. Concepts Magn Reson 23B, 2004,1:16-25.

[8] ANFEROVA S, ANFEROV V, RATA DG, et al. Mobile NMR device for measurements of porosity and pore size distributions of drilled core samples [J]. Concepts Magn Reson 23B, 2004,1:26-32.

[9] ANFEROVA S, ANFEROV V, ARNOLD J, et al. Improved Halbach sensor for NMR scanning of drill cores [J]. Magn Reson Imag, 2007,25:474-480.

[10] COATES G, XIAO L Z, PRAMMER M. NMR logging principles and applications [M]. Houston: Gulf Professional Publishing Company, 2000.

[11] 高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004:80-98.

[12] 戴逸松. 测量低信噪比电压的数字相敏解调算法及性能分析 [J]. 计量学报, 1997,18(2):126-132.

DAI Yi-song. The performance analysis of digital phase sensitive detection algorithm used to measure voltage at low signal-noise ratio [J]. Acta Metrologica Sinica, 1997,18(2):126-132.

(下转第 82 页)