

随钻核磁共振测井探测器构建方法研究

李新^{1,2}, 罗嗣慧², 肖立志^{2*}, 孙哲², 汪正垛²

1 中国石化石油工程技术研究院页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101

2 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

* 通信作者, xiaolizhi@cup.edu.cn

收稿日期: 2019-06-03

国家重大科研仪器研制项目“极端环境核磁共振科学仪器研制”(21427812)和国家科技重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(2016ZX05021-002)资助

摘要 随钻核磁共振测井技术在钻井过程中实时获得油气藏的地球物理信息, 钻井条件下的恶劣环境对随钻核磁共振测井探测器的设计和实现提出挑战。本文探讨了随钻核磁共振探测器设计的基础工程和科学问题, 基于井下条件和核磁共振测量的特殊性研究探测器构建方法。采用居中式测量、旋转对称低梯度静磁场、单一工作频率、适中探测深度、中等敏感区高度等构建适于标准钻铤的探测器实用结构。主磁体基于经典“inside-out”组合, 引入聚焦磁体改善敏感区形状, 利用 2D 和 3D 有限元方法仿真模拟电磁场分布, 研究得到共振频率、静磁场梯度和敏感区等探测特性。磁体组合产生的静磁场旋转对称、梯度中等, 有利于降低仪器轴向和径向对测量的影响。收发线圈由多匝铜带绕螺线管构成, 产生轴对称的射频场, 推导调谐和匹配计算方法得到谐振快速调节图版, 将样机天线阻抗调谐与谱仪系统匹配提高发射效率。在实验室搭建了全尺寸随钻核磁共振测井探测器, 利用自研电路系统联调验证方案。开展了多等待时间和多回波间隔的回波串采集实验, 利用正则化拉普拉斯逆变换得到单相流体样品的横向弛豫时间分布。实验结果表明, 核磁共振回波串信号信噪比良好, 横向弛豫时间分布呈单峰分布并与期望值一致, 验证了探测器构建方法和方案设计。

关键词 随钻核磁共振; 聚焦磁体; 探测器; 梯度磁场

Construction method study of NMR probe for logging while drilling

LI Xin^{1,2}, LUO Sihui², XIAO Lizhi², SUN Zhe², WANG Zhengduo²

1 State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract The nuclear magnetic resonance logging while drilling (NMR LWD) technique has advantages of providing real-time petrophysical information of in-situ oil & gas reservoirs during drilling. However, rigorous and harsh downhole conditions during NMR measurement pose great challenges for NMR LWD sensor design and implementation, including restricted space, motion states and limited downhole power supply. In this paper, fundamental engineering and scientific issues of NMR-LWD sensors are discussed based on special drilling downhole conditions and special features of NMR measurements. Key suggestions for NMR LWD sensor design are proposed. These are mandrel centered-type measurement, axis-symmetric low gradient fields, single frequency, moderate depth of investigation (DOI) and region of interest (ROI) height, a simple and practical assembly structure

引用格式: 李新, 罗嗣慧, 肖立志, 孙哲, 汪正垛. 随钻核磁共振测井探测器构建方法研究. 石油科学通报, 2020, 02: 172–181

LI Xin, LUO Sihui, XIAO Lizhi, SUN Zhe, WANG Zhengduo. Construction method study of NMR probe for logging while drilling. Petroleum Science Bulletin, 2020, 02: 172–181. 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.017

suitable for drill collars. A novel NMR LWD probe design is proposed based on the above understanding, where DOI and ROI are developed by using an optimized magnet configuration and permanent magnetic materials. The main magnet assembly is based on a classical inside-out configuration with a size constraint of a standard 6.75 inch non-magnetic drill collar, which is then improved by utilizing a circular focusing magnet between them. Static magnetic field distributions of the designed NMR sensor are given with 2D and 3D FEM methods. Characteristics were investigated including Larmor frequencies, static magnetic field gradient and sensitive volumes. The static magnetic field B_0z produced by this magnet assembly is rotationally symmetrical with high resonant frequency, signal intensity and a compromised magnetic gradient, which has the advantage of alleviating axial and radial movement effects on measurement. The TR coil is a solenoid made of several turns of copper belts, resulting in an axisymmetric RF B_1 field, which has a natural perpendicular relationship with B_0z . Tuning and matching procedures are also discussed and calculated, several reference charts of capacities combination are given for rapid resonance circuit adjustment. The prototype antenna is tuned to have an impedance of about $500\ \Omega$ consistent with the spectrometer's to improve power transmission efficiency. A full-size prototype NMR LWD sensor was built and tested jointly with the electronic circuits on a testing platform under laboratory conditions. In-house electronics and acquisition systems are used to validate the sensor design. Multi TW and TE CPMG experiments are carried out while the sensor is in a static state. Echo trains are successfully obtained and T2 distribution is demonstrated using 1D inverse Laplace transforms. The echo trains have adequate SNR and all T2 distribution have a single peak in accordance with fluid samples prepared as expected. The results show the NMR LWD design's feasibility and potential.

Keywords nuclear magnetic resonance logging while drilling; focusing magnet; probe; gradient magnetic field

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.02.017

0 引言

核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)测量仪器和方法在物理、化学、材料科学、生命科学和医学等领域中具有广泛应用,尤其在岩石孔隙介质研究领域占有重要地位。目前,核磁共振测井被认为是确定油气储层地质参数最有效的方法之一,其最大的优点是测量得到的地层孔隙度与岩性无关,并具有独特的储层流体(油、气和水)的定性识别和定量评价能力^[1-2]。

随钻核磁共振测井仪工作在极端环境下,代表了井下核磁共振测量的最新进展和方向^[3-4]。目前国际上具有代表性的随钻核磁共振测井仪器主要有:Halliburton公司的MRIL-WD^[5]、Schlumberger公司的proVISION^[6], proVISION Plus^[7]和Baker Hughes公司的MagTrak^[8]。Saudi Aramco与Baker Hughes、Halliburton成功应用了小井眼随钻核磁共振测井仪器^[9-11]。随后Baker Hughes和Schlumberger推出大直径仪器^[12-13],扩展了随钻核磁共振测井的应用范围。

国内外研究人员不断探索新的随钻核磁共振测井探测器结构,以期适应其苛刻的工况条件。李新等系统总结了随钻核磁共振面临的特殊问题和探测器特性^[14-15]。MRIL-WD采用偶极杂散场测量纵向弛豫时间 T_1 的方案,其他商业探测器方案则基于Jackson的“Inside-Out”结构^[16-18]设计,适应钻井过程中仪器随钻具的轴向转动和径向振动^[19]。最近,基于轴对称的

环状梯度敏感区域的三维核磁共振探测器模型设计也被提出^[20],用于地层岩石物理参数非均质性的探测。

本文提出一种新的随钻核磁共振测井探测器方案,基于传统“Inside-Out”结构通过主磁体与聚焦磁体组合实现磁体系统设计。首先给出磁体结构和磁场分布,分析随钻条件下的天线设计特点,讨论频率调谐与阻抗匹配模板,制作探测器原理样机,搭建测试装置,验证了设计方案的合理性和可行性。

1 探测器优化设计与实现

核磁共振测井仪器主要由探测器、电子线路和控制采集处理软件三大系统组成。其中,探测器的设计与制作决定仪器的基本特性、解释模型的建立和测井资料解释应用的可靠性。早期的地磁场测井仪利用天然地磁场作为静磁场,现代核磁共振测井仪探测器均使用永磁体和射频天线的方案:永磁体产生磁场强度远大于地磁场强度的人工静磁场;天线发射交变电磁场,因工作频率处于射频频率范围内被称为射频磁场,同时接收来自地层中的核磁共振信号。

1.1 聚焦型磁体设计与实现

探测器设计的整体方案采用多组磁体结构组合的模式,如图1(a)所示。主磁体结构为两组管状磁体,并相对地放置于钻铤之中,每组管状磁体又分别由多个相同的小磁环组成,沿井轴方向极化充磁,管状磁

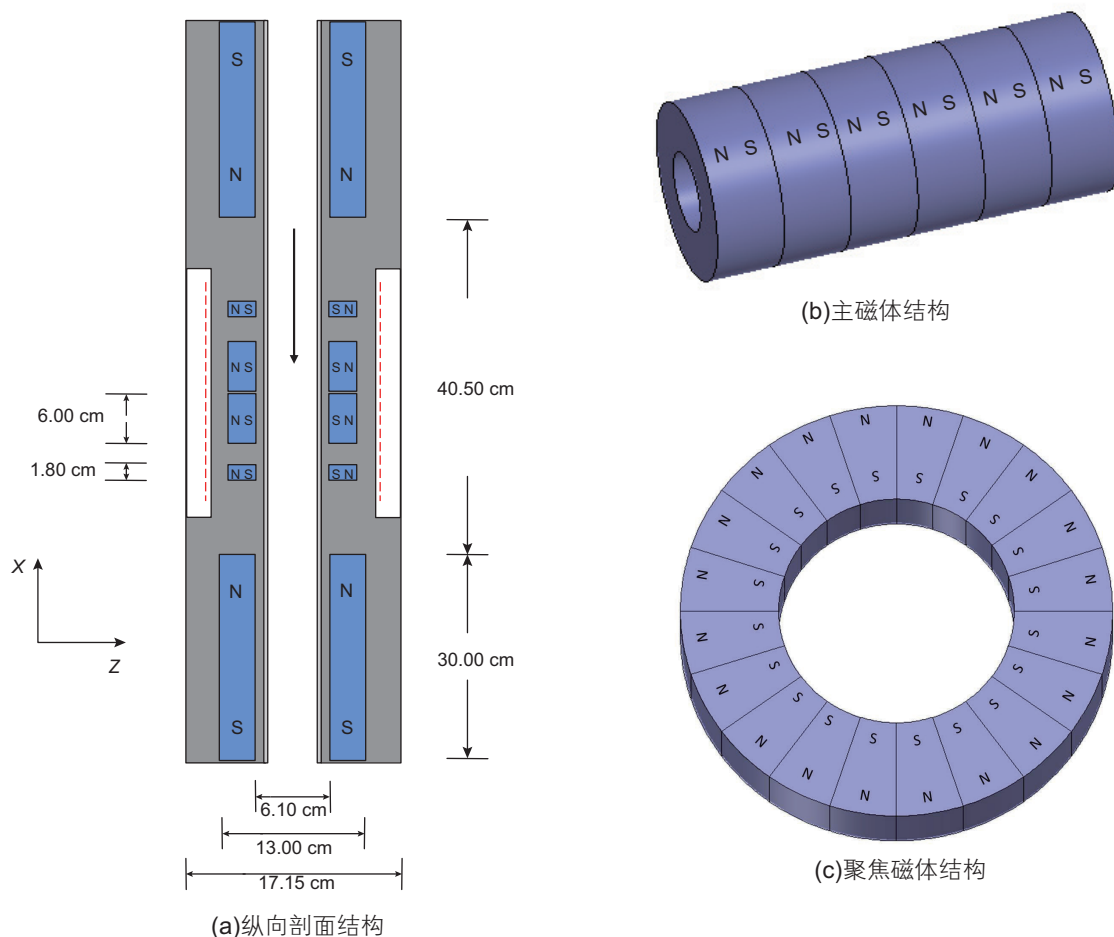


图 1 探测器结构示意图(单位:cm)

Fig. 1 Diagram of NMR probe for new concept implement

体内部作为钻井液循环的通道,如图 1(b)所示。此例中,主磁体的长度为 30 cm,考虑到加工的难度,由长度为 5 cm 的磁环进行组合粘接而成。探测器管状磁体组合的外径 13.0 cm,内径 6.1 cm,满足放置在外直径 17.15 cm 的标准无磁钻铤中的尺寸要求,同时在磁体外部留出厚度为 2.07 cm 的钻铤骨架空间。在探测器的中部,磁场方向由仪器纵轴方向进入地层,环形聚焦磁体以一定规律放置在主磁体之间,通过不同的纵向距离组合优化来调节静磁场的强度、梯度和在井眼附近地层中的分布。聚焦磁体整体为圆环结构,由多个辐向充磁的瓦状型磁体粘接而成。圆心为 S 极,圆周为 N 极,如图 1(c)所示。单组聚焦磁体由 32 片小瓦型磁体构成,单个小磁体开角为 11.25° ,高度分别为 18 mm 和 60 mm。共设计了四组聚焦磁体,每种高度各两组。磁体材料选择高温、高强度、高硬度的钕钴材料。

利用电磁仿真软件考察了磁体系统在旋转坐标系下产生的静磁场分布。核磁共振测井仪探测器体积很

大,在其电磁场的数值模拟中,根据探测器结构特点进行优化。电缆核磁共振测井仪为了满足较快的测速,探测器上下两端使用预极化磁体实现静磁场分布在仪器纵轴方向较长的范围内保持一致。通常认为这种探测器结构在三维空间中垂直于纵轴的每个横截面上的磁场分布是相同的,进而将三维磁场分布问题转化为探测器中心横截面处的平面磁场分布问题。随钻核磁共振测井仪要求轴对称的敏感区形状,可转化为二维轴对称磁场问题。

如图 2 所示,仪器周围与敏感探测地层区域范围内具有相同磁感应强度大小的磁场均处于仪器内部,因此环空中钻井液中的液态氢核不具有与敏感区相同的共振频率,井眼流体对测量结果无影响,信号全部来自于地层敏感区。距仪器中心 $Z = 16\text{cm}$ 敏感区域中静磁场磁感应强度约为 $207.49 \times 10^{-4} \text{ T}$,对应的共振频率约为 883.49 kHz,具有较高的频率和信号强度。此探测深度上的静磁场梯度 ($G=11.88 \times 10^{-4} \text{ T/cm}$) 适中,有利于消除仪器径向振动对测量的影响。敏

感探测区域的纵向高度约为 15 cm, 是该探测器静止测量所能达到的最高地层厚度纵向分辨率。利用数字高斯计空间定位的方式对静磁场分布进行了测量。图 3 为实际测量的磁场与模拟磁场结果的对比。图 3(a) 为磁场强度随着探测深度的变化, 而图 3(b) 则是在 $Z=16$ cm 处, 磁场强度沿着探测器轴向方向上的变化。磁场的纵向实测分布与模拟数值的磁场偏差小于 $\pm 2.5\%$, 验证了设计方案。

1.2 天线与谐振电路

核磁共振探测器的天线是由线圈作为非理想电感

元件 L 与电容 C 组成的 RLC 谐振电路。发射时, 天线中要施加高电压和大电流, 用来产生射频磁场 B_1 , 并持续一段时间, 使测量区域的样品的宏观磁化矢量扳转一定的角度。低场核磁共振电路设计中, 为了避免耦合干扰, 采用收发一体的天线设计方案。考虑到随钻核磁共振测井要在仪器旋转的状态下测量, 因此采用螺线管结构天线, 能产生与径向静磁场天然垂直且轴对称的射频场 B_1 , 并将谐振电路进行频率阻抗调节与电子线路输出阻抗匹配。

图 4 左图展示了四种谐振电路基本结构, 图 4(a) 为简单的串联谐振结构, 谐振时天线的阻抗为

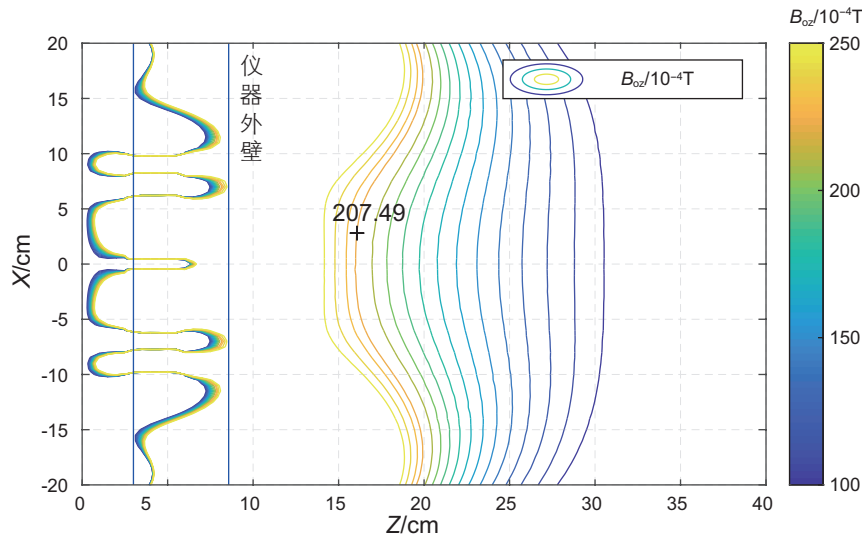
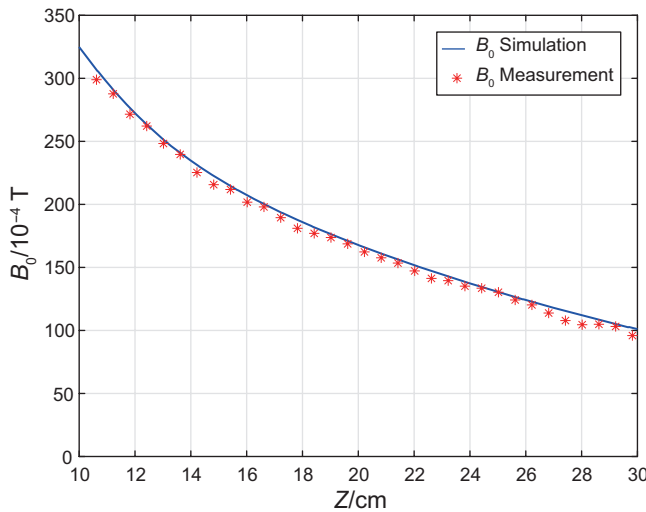
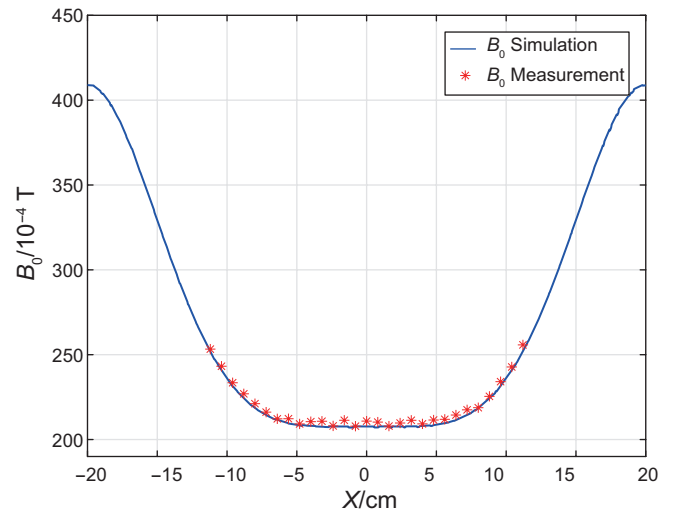


图 2 探头形成的静磁场磁感应强度等势线分布 (纵剖面)

Fig. 2 Static magnetic flux density distribution of the novel sensor



(a) 静磁场磁感应强度与探测深度的关系



(b) 敏感探测深度位置静磁场磁感应强度在纵向上的分布

图 3 静磁场测量结果

Fig. 3 Measurement results of B_0 distribution

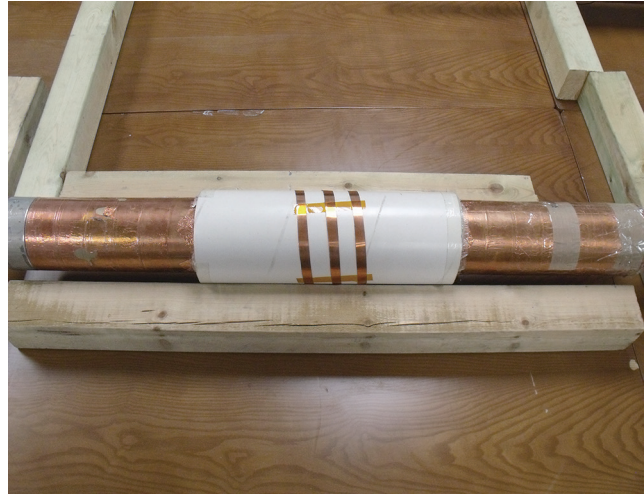
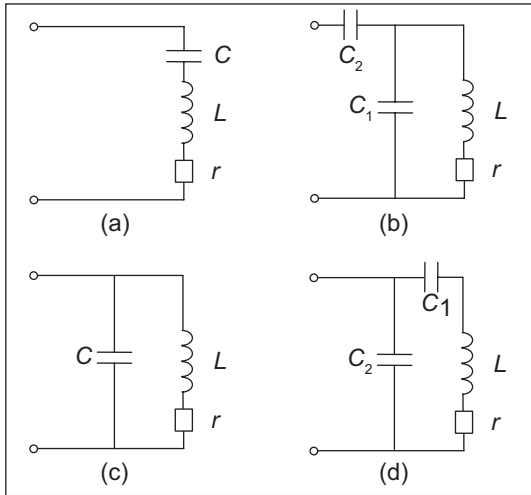


图 4 核磁共振探头谐振电路结构与天线实物

Fig. 4 Tuning circuit structures and NMR probe

$$R_{\text{res}} = \omega_0 L / Q \quad (1)$$

式中, R_{res} 为谐振电路阻抗; Q 为线圈的品质因数; ω_0 为谐振电路角频率。

串联谐振电路对于实际工作中的器件和高 Q 状态来说, 其谐振阻抗通常很小。因此发展出谐振电路图 4(b), 它可以被认为是提高了阻抗的串联谐振结构, 电路中的主电流被 C_1 和 C_2 分流, 电流分配比例为 $C_2 / (C_1 + C_2)$, 该结构由于阻抗范围合理而应用较多。共振状态下, 阻抗(实部)增加程度与电流分配比例的平方成反比关系:

$$R_{\text{res}} = \frac{\omega_0 L}{Q} \cdot \left(\frac{C_1 + C_2}{C_2} \right)^2 \quad (2)$$

C_1 和 C_2 并联作用, 满足关系式 $\omega^2 L (C_1 + C_2) = 1$ 时达到共振状态条件。

图 4(c) 所示中为并联谐振结构, 共振时的阻抗实部为

$$R_{\text{res}} = Q \omega_0 L = (\omega_0 L)^2 / r \quad (3)$$

式中, r 为谐振电路内阻。

该结构对于实际器件性能和高 Q 电路状态来说, 阻抗值偏大。图 4(d) 的谐振电路可看作是被降低了阻抗的并联谐振, 属于电容分压结构。这种结构将线圈两端电压按 C/C_2 的比例分压, 其中 C 为 C_1 和 C_2 的串联组合值

$$C^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1} \quad (4)$$

共振状态下 ($\omega^2 LC = 1$) 天线的阻抗为

$$R_{\text{res}} = (Q \omega_0 L) \left(\frac{C}{C_2} \right)^2 \quad (5)$$

根据上述分析, 结构 4(b) 和 4(d) 在阻抗调节方面

具有相对较强的调谐灵活性, 根据对应谐振电路的阻抗 R_{res} 的计算公式和电子线路部分阻抗的要求, 计算所需要阻抗条件下所需电容值 C_1 和 C_2 , 从而完成阻抗匹配。阻抗匹配主要与电路功率放大器输出阻抗匹配。随钻核磁共振测井属于低场核磁共振范畴, 共振频率通常低于 2MHz, 为了实现较宽的脉冲频率带宽, 天线通常在低 Q 状态下工作。实际测井条件下, 通常需要根据实际情况对天线进行井下调谐。例如, 井底温度的改变影响磁体强度, 进而使敏感区域内氢核的共振频率发生变化, 天线谐振频率也需做相应调整。结构 4(c) 的优点是调整相对灵活和容易, 降低了对备用可调电容阵列和电路的要求, 但对天线设计有一定要求和限制。

利用电路计算方法获得了如图 5 所示的两类实用探头前端调谐图版。调谐中需要注意阻抗匹配过程中容值的变化同时引起谐振频率的偏移, 实际操作中是一个迭代逼近的过程。以天线的 Q 值 100、共振频率 883 kHz 为例, 所得图版能够提供重要指导, 提高调谐效率。图 5(a) 反映了分流电容调节时, 天线电感的变化; 图 5(b) 反映了天线阻抗较小时, 改变图 4(b) 所示电路 C_1 和 C_2 电容, 其阻抗增大的规律; 图 5(c) 反映了分压电容调节时, 天线电感的变化; 图 5(d) 反映了天线阻抗较大时, 改变图 4(d) 所示电路 C_1 和 C_2 电容, 其阻抗降低的规律。天线的品质 Q 由天线本身的电感、内阻和工作频率所决定, 在制作天线时, 先测量电感与内阻得到 Q 值, 与目标阻抗相比, 根据图版就可以得知天线的阻抗需要提升或降低多少, 以及 C_1 和 C_2 的容值需要增加还是减小。

为了实现发射的射频 B_1 场与 B_0 场匹配良好并形

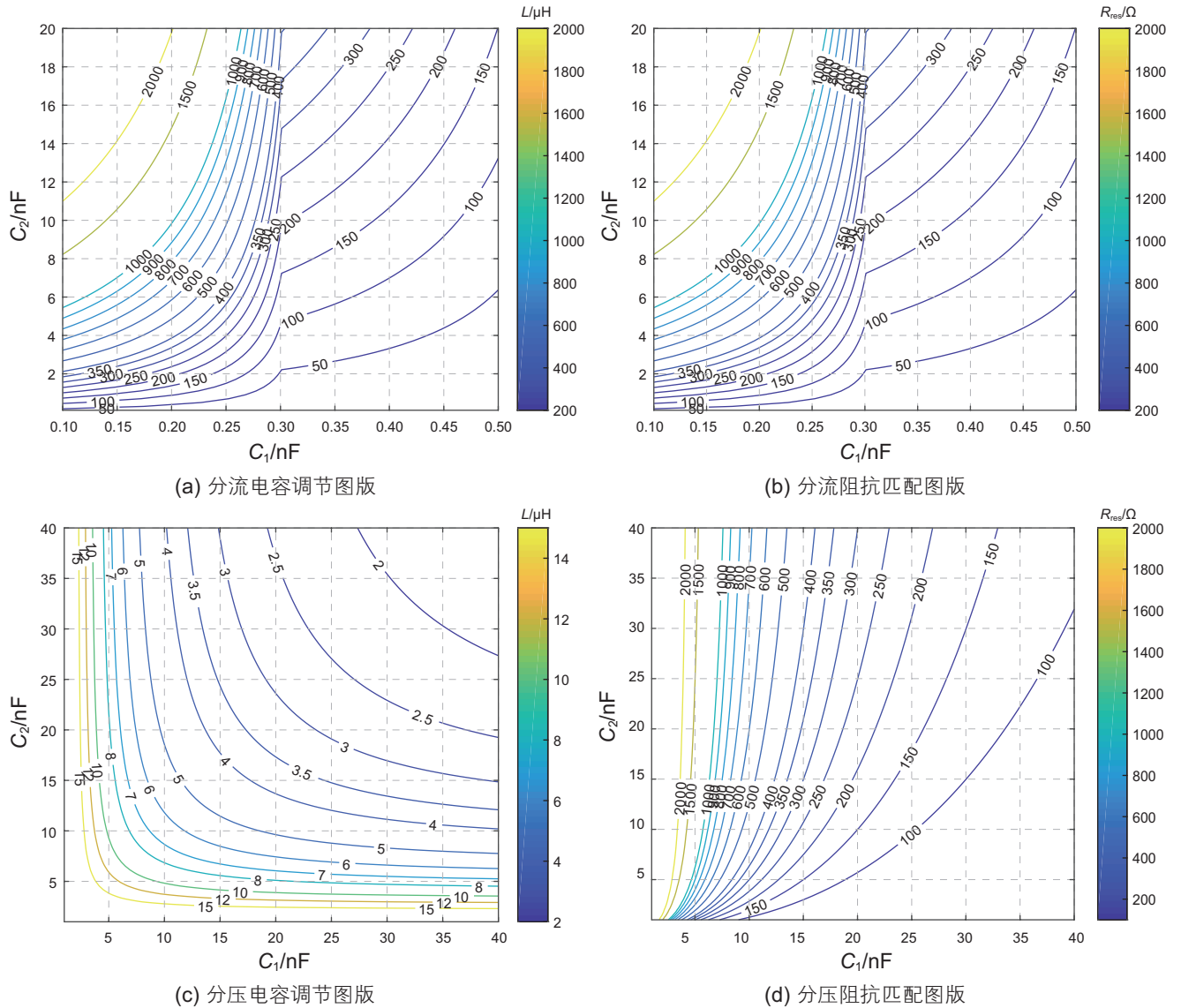


图5 核磁共振探头谐振电路调节图版

Fig. 5 Tuning and matching chart of NMR probe circuits

成圆环(圆柱壳)敏感区,使得地层核磁共振信号来源在轴向方位上没有盲区,从而达到探头随钻具所做轴向旋转运动对测量结果没有影响的目的,设计射频天线基于螺线管结构,测试阶段采用宽度为1.5 cm、厚0.2 mm的紫铜材料在聚氯乙烯(PVC)管状骨架上绕制而成,工程应用阶段设计为采用柔性电路板(FPCB)刻蚀技术制作,起到在探头剧烈机械运动中保护天线电路的作用。通过优化天线结构,增加在纵向上的射频场强度均匀性。

随钻核磁共振测井仪探测器的骨架为无磁金属材料,对天线的电性参数具有很大影响。聚焦磁体位于天线线圈内部,聚焦磁体材料的相对磁导率 $\mu_r \approx 1.1$,

不会起到与磁芯相同的增强 B_1 场的作用,但其电导率 $\sigma = 625$ kS/m,对于频率为883.49 kHz射频磁场产生明显的趋肤效应,显著改变天线电感。测量时将天线安装在磁体和骨架之后,采用整体联合测试获得最接近真实工作状态下的属性值,如图4右图所示。本文设计的天线没有使用磁芯,因此不考虑磁芯的作用。测试电子谱仪阻抗约为500 Ω ,采用图4(d)的调谐匹配电路调节天线阻抗。根据随钻核磁共振测井仪探头样机实施方案设计,采用安捷伦阻抗分析仪E4294A对天线进行测试,测得天线参数为:谐振频率883.00 kHz,电感3.95 μ H,阻抗505.68 Ω ,满足测试要求。

2 探测器的测试与验证

为验证随钻核磁共振探测器设计方案,制作了实验室条件下测试的全尺寸的探头原理型实物,并将探测器与电子仪和信号采集系统进行联合调试,通过刻度装置的信号观测考察探测器设计方案。

2.1 信号采集电子系统方案

根据实验室条件下测试核磁共振测井仪探头的需求和特点,设计开发了一套适用于随钻核磁共振探头测试的数据通讯与采集系统与自主研制的电子线路^[21]组合,搭建了低场核磁共振探测器测试与试验平台,其框图如图 6 所示。

整个核磁共振探头测试平台的工作流程为:(1)数据采集软件设置采集指令;(2)通过信号采集控制模块为井下电子线路的发射电路和接收电路提供控制时序;(3)主控电路控制产生射频信号,经模拟电路功率放大器放大后通过天线将能量以射频电磁波脉冲的形式发射激发核磁共振现象;(4)天线快速切换到接收模式接收核磁共振信号,前置放大器将天线检测到的微弱核磁共振信号放大后进行数字化;(5)信号经过编码传输到总线上,由采集软件通过采集卡接收到计算机中进行一系列数据处理和显示。

核磁共振测量过程中的数据流和软件系统功能如图 6 所示,软件系统采用功能模块化结构:(1)上位机与硬件系统的建立通信,检测仪器硬件状态实施质量控制;(2)编写仪器工作指令、数据采集模式和仪器参

数,控制仪器进行频率扫描、仪器刻度和数据采集工作;(3)对各种观测模式采集得到的核磁共振信号数据进行传输、识别、解码和信号提取;(4)核磁共振信号的预处理、快速反演、直观显示和数据存储。

2.2 测试过程和结果分析

通过实验室搭建的配套测试平台在刻度水箱(长宽高 1.1 m × 0.6 m × 0.6 m)模拟 100%孔隙度地层的条件下观测核磁共振信号。图 7 为实现近均匀场敏感区信号观测的探头实物。为验证设计方案,在刻度测试平台上与电子线路连接,对探头进行联合调试和信号观测。

测试样品为刻度箱内具有一定浓度的 CuSO_4 溶液。通过调节天线两端施加电压改变射频脉冲 B_1 的强度,所有测试对天线两端施加电压均为 940 V, 90° 脉冲持续时间设置为 40 μs 。信号观测方式为标准 CPMG 测量,分别进行了改变测量参数 TW 和 TE 的两组测量,其测量结果如图 8 所示。

在变 TW 测量实验中,设定天线发射频率 $f_0 = 883.0 \text{ kHz}$,脉冲序列参数: $TE = 2.4 \text{ ms}$, $RA = 8$, $TW = 1.7 \text{ s}$ 和 5.1 s 时测得的两组回波串信号如图 8(a)所示。对回波串进行多指数反演后得到的 T_2 分布如图 8(b)所示, T_2 范围 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ s}$,对数布点 100 个。不同 TW 数据得到的 T_2 分布峰值位置一致,约为 1200 ms; TW 越长对应的 T_2 分布的幅度越高,验证了探头的可靠性。

在变 TE 测量实验中,设定 $TW = 8 \text{ s}$,进行改变 TE 的 CPMG 测量,观察回波串信号衰减速率的变化。 $TE = 1.2 \text{ ms}$ 、 2.4 ms 、 3.6 ms 时测得的 3 组回波串信号如

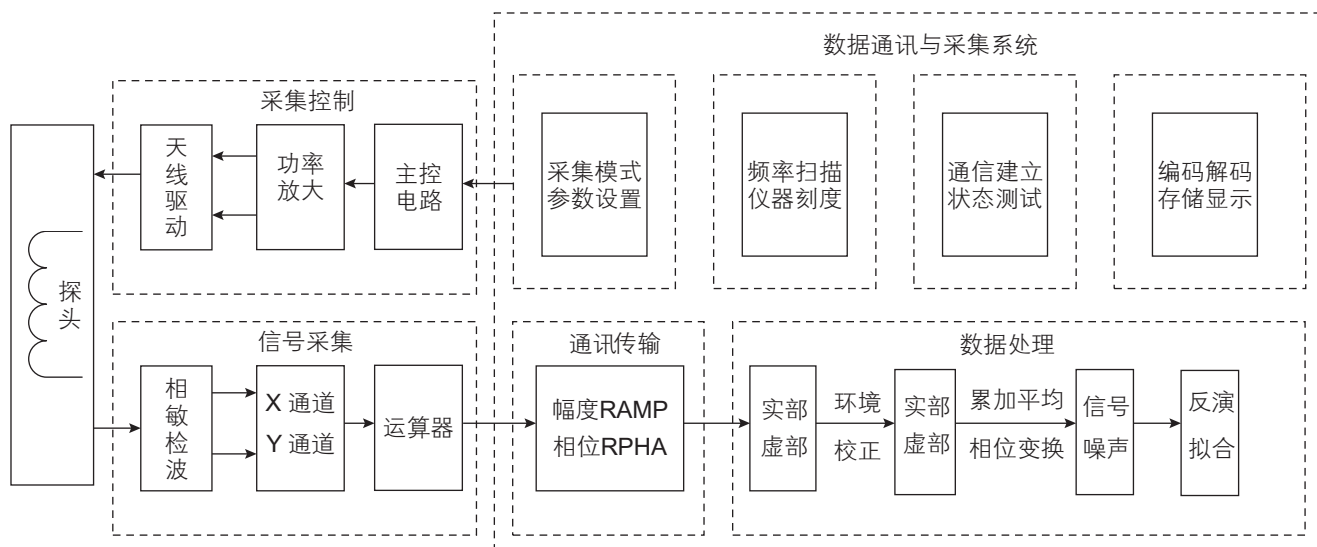


图 6 通讯采集软件功能与数据流

Fig. 6 Data stream and functions of acquisition software



图 7 探测器实物与水箱

Fig. 7 Prototype sensor and water tank

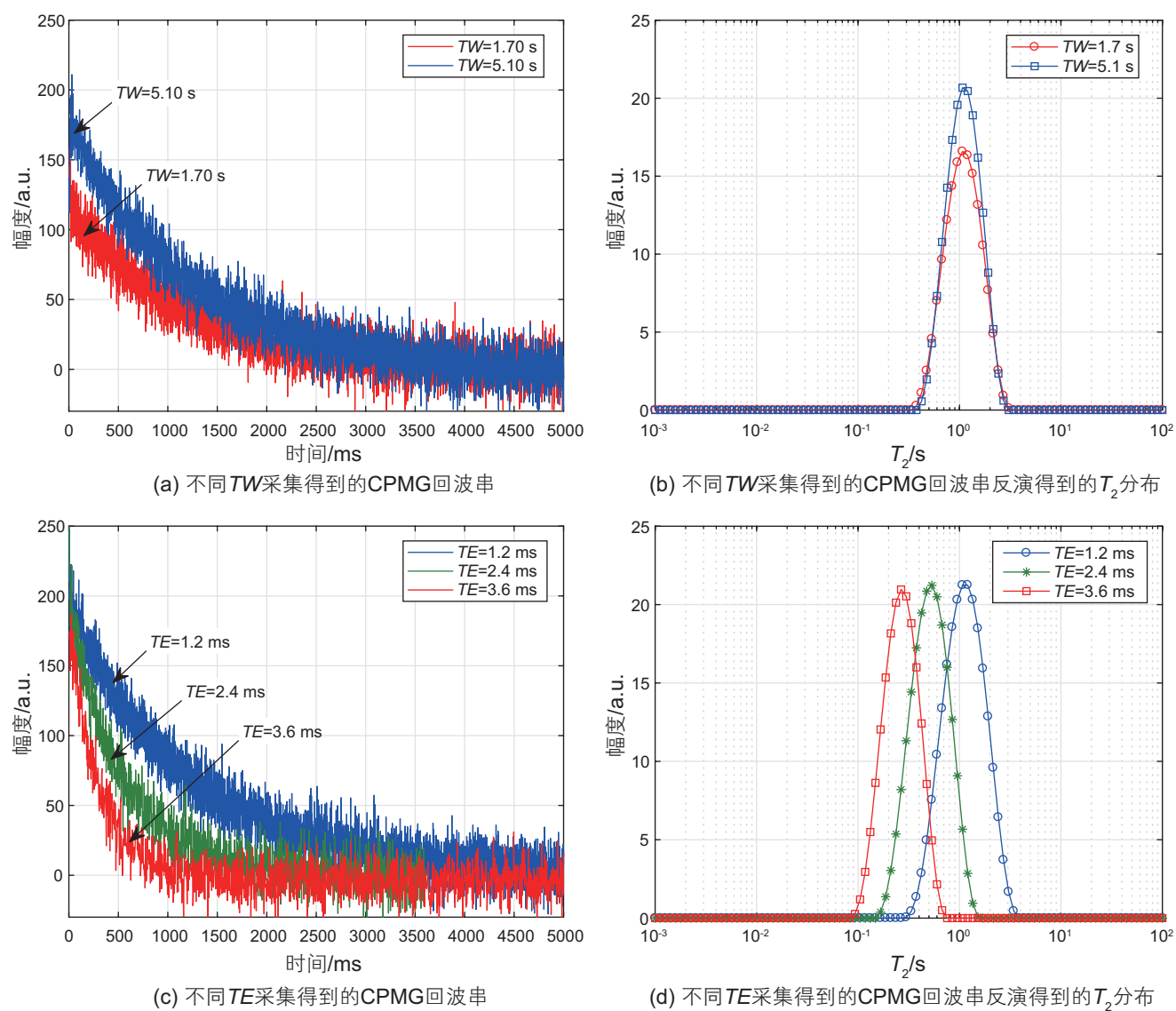


图 8 CPMG 测量结果

Fig. 8 CPMG experimental measurements

图 8(c)所示, $RA = 8$ 。单组回波串信号呈指数衰减规律。敏感区静磁场梯度的存在使较长 TE 值采集得到的回波串信号衰减速率变快, 首波信号幅度略有下降。将回波串进行多指数反演得到的 T_2 分布如图 8(d)所示。反演参数: T_2 范围 $10^{-3} \sim 10^2$ s, 对数布点 100 个。回波串信号衰减速率变快表现为不同 TE 数据分布得到的 T_2 分布峰值向短弛豫方向移动, 分别为 1205 ms、534 ms 和 266 ms, 幅度减小不大, 验证了探头方案的可行性。

3 结论与建议

本文提出一种随钻核磁共振探测器方案, 在标准无磁钻铤尺寸约束范围内, 通过引入聚焦磁体、优化

探测器材料和结构开发新的敏感区域, 制作了全尺寸样机和测试装置, 完成了核磁共振信号测试。

(1) 新探测器采用聚焦环磁体优化主磁体结构, 生成的敏感探测区域共振频率具有较高的频率和信号强度; 静磁场梯度适中, 有利于减小仪器径向振动对测量的影响。

(2) 优化后的探测器具有较深的探测深度, 敏感探测区域在井壁深处仍保持一定高度, 有利于探测原状地层信息。

(3) 建立了天线频率和阻抗的调谐模板, 提高了调节效率; 制作的天线与测试电路匹配良好, 实现了变参数脉冲序列的核磁共振自旋信号静态观测。

(4) 研究探测器在运动条件下的信号响应和影响因素, 搭建测试装置开展对比验证是下一步的工作方向。

参考文献

- [1] ZHOU X, MINH C C, CUI Y J, et al. Feasibility study of deriving water saturation from LWD NMR transverse relaxation time in two Siliciclastic reservoirs in China[C]. SPWLA 60th Annual Logging Symposium, The Woodlands, Texas, USA, 2019.
- [2] XIE R H, XIAO L Z. Advanced fluid-typing methods for NMR logging[J]. Petroleum Science, 2011, 8: 163–169.
- [3] AKKURT R, KERSEY D G, ZAINALABEDIN K. Challenges for everyday NMR: An operator's perspective[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 2006. SPE 102247.
- [4] BITTNER R, KOMAREK F, THERN H F, et al. Magnetic resonance while drilling—a quantum leap in everyday petrophysics[C]. SPE Europe/EAGE Annual Conference and Exhibition, Vienna, Austria, 2006. SPE 100336.
- [5] PRAMMER M G, AKKURT R, CHERRY R, et al. A new direction in wireline and LWD NMR[C]. SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, 2002.
- [6] MUTALIB K H, HAN M, KHOO C Y, et al. LWD NMR for hydrocarbon typing and formation evaluation in a challenging offshore trajectory[C]. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Bali, Indonesia, 2015. SPE176353.
- [7] HEATON N J, JAIN V, BOLING B, et al. New generation magnetic resonance while drilling[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 2012. SPE 160022.
- [8] AI-ZAABI F, AMER M, AI-JABERI S, et al. Advanced real-time reservoir characterization utilizing full magnetic resonance data while drilling a case study from Abu Dhabi[C]. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2018. SPE 193187.
- [9] AKKURT R, MARSALA A F, SEIFERT D, et al. Collaborative development of a slim LWD NMR tool from concept to field testing[C]. SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, AlKhobar, Saudi Arabia, 2009. SPE 126041.
- [10] KRUSPE T, THERN H F, KURZ G, et al. Slimhole application of magnetic resonance while drilling[C]. SPWLA 50th Annual Logging Symposium, The Woodlands, Texas, USA, 2009.
- [11] HURSAN G, SILVA A S, LEE J, et al. Slimhole NMR T1 logging while drilling enhances real-time petrophysics[C]. SPWLA 59th Annual Logging Symposium, London, UK, 2018.
- [12] COMAN R, TIETJEN H, THERN H, et al. New large-hole magnetic resonance logging-while-drilling tool with short inter-echo time and improved vertical resolution[C]. SPWLA 55th Annual Logging Symposium, Abu Dhabi, UAE, 2014.
- [13] BACHMAN N, JAIN V, GUNAWAN Y, et al. A new large hole nuclear magnetic resonance logging while drilling tool for early stage formation evaluation[C]. SPWLA 57th Annual Logging Symposium, Reykjavik, Iceland, 2016.
- [14] 李新, 肖立志, 刘化冰. 随钻核磁共振测井关键问题与应用实例[J]. 测井技术, 2011, 35(3): 200–205. [LI X, XIAO L Z, LIU H B. Key issues and application cases of NMR logging while drilling[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(3): 200–205.]
- [15] 李新, 肖立志, 胡海涛. 随钻核磁共振测井仪探测特性研究[J]. 波谱学杂志, 2011, 28(1): 84–92. [LI X, XIAO L Z, HU H T. Investigation Feature Research of NMR Logging While Drilling[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2011, 28(1): 84–92.]
- [16] COOPER R K, JACKSON J A. Remote (Inside-out) NMR. I. Remote production of region of homogeneous magnetic field[J]. Journal of

- Magnetic Resonance, 1980, 41: 400–405.
- [17] BURNETT L J, JACKSON J A. Remote (Inside-out) NMR. II. Sensitivity of NMR detection for external samples[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1980, 41: 406–410.
- [18] JACKSON J A, BURNETT L J, HARMON J. Remote (Inside-out) NMR. III. Detection of nuclear magnetic resonance in a remotely produced region of homogeneous magnetic field[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1980, 41: 411–421.
- [19] COMAN, R, THERN H, KISCHKAT T. Lateral-motion correction of NMR logging-while-drilling data[C], SPWLA 59th Annual Logging Symposium, London, UK, 2018.
- [20] LUO S H, XIAO L Z, LI X, et al. Design of an innovative downhole NMR scanning probe[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(5): 2939–2946.
- [21] 于慧俊, 肖立志, ANFEROV V, 等. 梯度场核磁共振测井仪电子线路设计[J]. 测井技术, 2012, 36(2): 183–187. [YU H J, XIAO L Z, ANFEROV V, et al. Electronic circuit design of gradient NMR logging tool[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2):183–187.]

(编辑 付娟娟)