

# 井下极端条件核磁共振探测系统研制

肖立志

(中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 100249)

**摘要:**简要介绍 2005 年至今笔者课题组在井下极端条件核磁共振探测系统研制方面的成果。这里的极端条件是指:高温、高压、仪器体积受到严格限制、测量时处于运动状态、被测样品处于探头之外、低场、低信噪比等。处于井下极端条件的核磁共振探测与常规条件下的核磁共振探测很不相同,需要特殊的探头和测控系统,对降噪及资料处理和解释也提出一系列技术和工艺要求。围绕井下极端条件核磁共振探测的关键科学问题、技术问题、工程问题、工艺问题,介绍解决方法和相应进展,包括探测系统的基本组成与研发流程,探头设计与实现,测控系统设计与实现,降噪方法与效果,数据采集及处理软件的设计与实现。设计制作并测试偏心型和居中型两种探头、全套电子线路及降噪方法、采集与处理软件。所研制的探测系统已经投入到工程化应用,提升了中国石油工业高端技术的水平。

**关键词:**核磁共振;油气探测;极端条件;复杂储层

**中图分类号:**P 631.817 **文献标志码:**A

## Design and implementation of NMR system in downhole extreme conditions

XIAO Li-zhi

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

**Abstract:**The design of nuclear magnetic resonance (NMR) system in downhole extreme conditions was briefly summarized. The extreme conditions here include environments with high temperature (up to 175 °C) and high pressure (up to 68.95 MPa) in a well bore, very restricted space for system size, measurements done in moving conditions, sample outside of the probe with low magnetic field and low signal-to-noise ratio (SNR). NMR systems in downhole extreme conditions are very different from the conventional ones, so the probe and control systems require special consideration. Noise reduction, data processing and interpretation are equally important. The key issues of design and implementation of downhole NMR systems, including design of components of the NMR system and signal flow, design and implementation of probe, monitoring and control system, noise reduction methods and design and implementation of data acquisition and processing software, were discussed. The NMR system proposed and designed was delivered to engineering and application stage, and improved high end instrumentation and technology for China petroleum industry.

**Key words:** nuclear magnetic resonance(NMR); oil and gas prospecting; extreme condition; complex reservoir

核磁共振是一种有效的分析测试方法,已经在许多领域得到成功应用。实践证明,核磁共振在油气和水资源探测中响应特征独特,于 20 世纪 90 年代快速发展成为核磁共振探测技术。与常规电学、声学及核辐射方法相比,核磁共振信号来自地层孔隙流体,包含十分丰富的地层信息,可以用于确定孔隙度、束缚水、渗透率、孔径分布、以及流体特性和含量。核磁共振探测在勘探阶段为流体性质、储层有效性及可采储

量等地层评价基本问题的解决提供有效信息;在开发阶段为剩余油气、采收率以及增产措施效果等产能预测基本问题的解决提供定量数据;在页岩气等非常规油气资源勘探开发中,与元素测井、电成像测井和偶极声波测井一起,构成地质甜点和工程甜点评价不可或缺的新系列。在过去 20 年里,核磁共振探测方法、应用及仪器研制一直是石油测井的前沿领域,受到广泛关注。斯仑贝谢、哈里伯顿和贝克休斯等发

收稿日期:2013-07-05

基金项目:国家自然科学基金(41130417);高等学校学科创新引智基地(111 计划)(B13010)和"863"项目(2013AA064605)

作者简介:肖立志(1962-),男,教授,博士,长江学者,从事石油测井、低场核磁共振方面的研究。E-mail: xiaolizhi@cup.edu.cn.

展了电缆核磁共振测井、随钻核磁共振测井和井下核磁共振流体分析等高端仪器。中国于 20 世纪 80 年代开始关注核磁共振在油气探测中的应用。1996 年至今,引进数十套 MRIL-P 居中型和 MREX 偏心型核磁共振探测仪,CMR 及 MR Scanner 等也在中国主力油田开展服务。大庆、辽河、大港、冀东、华北、四川、长庆、新疆及海上等油田积累了丰富的核磁共振资料和应用实例,在复杂岩性/特殊岩性油气藏、低孔/低渗油气藏、低电阻率/低饱和度油气藏、以及天然气和稠油等储层见到明显效果。但是,中国核磁共振仪器长期依靠进口,价格昂贵,维修费用高,应用技术受制于人。研制拥有自主知识产权的核磁共振测井仪器,发展核磁共振测井技术,是中国油田应用部门之亟需。从 2005 年开始,笔者课题组在科技部“863”和国际合作项目、国家自然科学基金项目、中国石油天然气集团公司、中国海洋石油总公司等支持下,对以石油天然气勘探为目标的极端条件核磁共振探测系统进行了探索和研制,取得实质性进展。本文是这些成果的简要介绍,期望能为核磁共振找油找气技术研究提供参考,同时也为发展核磁共振探测系统提供思路。

### 1 仪器组成及研发流程

极端条件核磁共振探测系统与医学核磁共振成像系统的工作原理类似,但工作条件完全不同。将

一个设计精密的核磁共振探测器放到数千米深的井下,在井筒周围产生静磁场和射频场,建立核磁共振条件,进而对来自地层孔隙流体的核磁共振信号进行观测。通过对观测信号的分析处理,获取地层的岩石物理和流体信息。设计的井下核磁共振探测系统,即核磁共振测井仪(图 1),包括由磁体和天线组

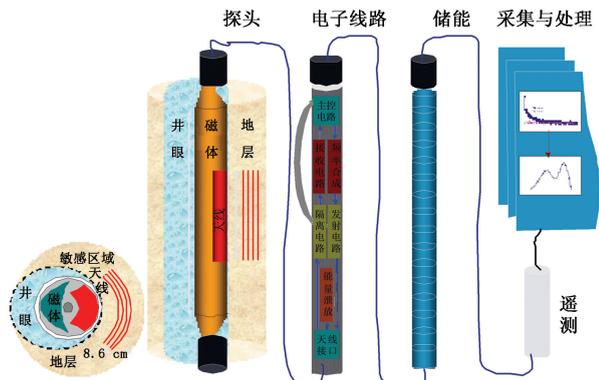


图 1 井下核磁共振探测系统的基本组成

Fig. 1 Composition of downhole NMR system

成的探头,大功率发射和微弱信号检测的电子线路,用于能量存储的储能短节,用于数据传输和控制的数据传输短节以及信号采集与处理的主控和软件系统。由于仪器在井筒中工作,体积受到严格限制,而且始终处于井下高温/高压的恶劣环境之中,为了防止仪器被卡住,同时为了提高探测效率,测量时仪器必须总是处于运动状态。

图 2 为核磁共振探测系统研发流程图。

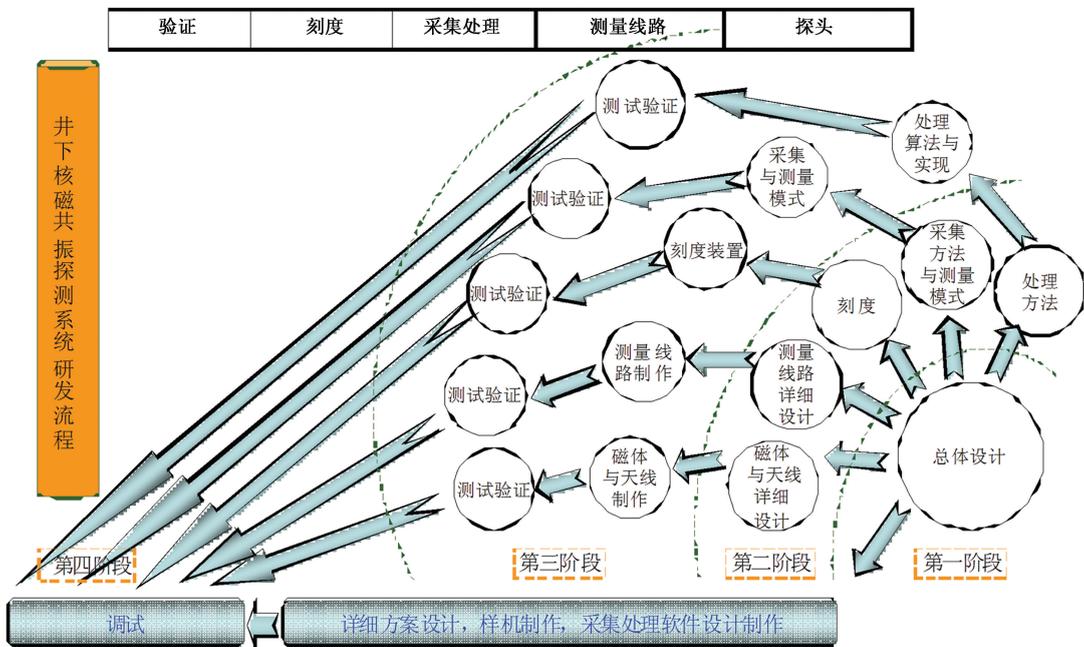


图 2 井下核磁共振探测系统研发流程

Fig. 2 Flow chart of design and implementation for downhole NMR system

研发过程分为4个阶段:①总体方案设计,提出中国复杂油气藏核磁共振探测的目标和技术方案及指标;②对国外专利进行了充分分析,对磁体、天线、发射电路、接收电路、采集软件、处理软件和刻度装置等进行了梳理和详细设计;③对详细方案进行了数值模拟和实验模拟,并对材料和器件的选取及加工工艺等进行系统研究和试验,绘制PCB板和机械图,完成加工制作和单板测试工作;④对仪器进行测试和联调及反复修改优化,完善软件的编写和测试。

## 2 探头设计与实现

核磁共振探测系统的探头设计是一个电磁场问题,同时包含结构的优化设计。在井底极端条件下,通过探头结构和材料优选,建立核磁共振条件,同时具备良好探测特性,是探头设计的目标。结构、材料与工艺面对的问题包括:高温高压条件下的材料特性及其影响分析;磁体材料及结构的优化;天线材料与结构的优化;体积受限条件下静磁场与射频场的正交及信号强度与信噪比的最大化;仪器运动状态测量预极化磁体结构及天线长度的优选。

根据中国复杂油气藏的实际情况,设计并制作了偏心型和居中型两种探头,如图3所示。每种探头包含磁体、天线和骨架三部分。无论贴片壁型还是居中型探头,磁体和天线均分居探头两侧。磁体结构有圆柱形、长方体形以及其他不规则结构;而天线结构一般为半圆柱形、弧形以及其他不规则结构;骨架在探头中根据磁体和天线结构而定。设计磁体和天线时既要考虑在井底条件下静磁场与射频场的正交匹配,增大探测区域,同时还要兼顾探头的整体机械特性与装配工艺要求。材料属性确定后,磁体体积越大,磁场强度越高。由于井眼限制,探头外径不得超过16.24 cm。

数值模拟贯穿于探头设计与实现的整个过程,数值方法的精度与可靠性显得尤为重要。图4(a)~(c)为偏心型探头的静磁场、射频场以及两者的匹配关系;图4(d)~(f)则是居中型探头的静磁场、射频场以及两者匹配关系。模拟结果表明,偏心型探头的磁芯开角对磁体静磁场与天线射频场匹配关系影响很小;条带天线之间的夹角 $\alpha$ 并非越大越好,而是要兼顾射频场等值云图的形态,使探测区域内的极化质子能够被均匀激发。居中型探头的天线尺寸相对很小,在进行有限元计算时,网格剖分难度较大,可以采用1/4圆周区域作为计算区域,减小计算量,提高计算精度。

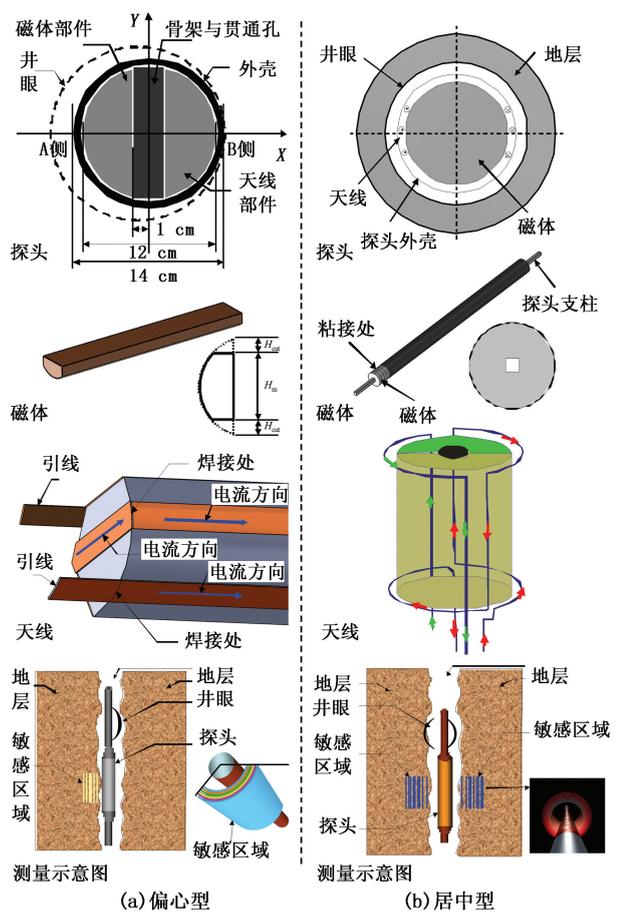


图3 探头结构及其组成示意图

Fig. 3 Schematic drawing of structure of downhole NMR probe

根据静磁场和射频场数值模拟结果得到磁场匹配关系,确定了探头的敏感区域、信号强度以及信噪比,偏心型探头结果如图5所示。图5(a)、(b)显示开角分别为 $90^\circ$ 和 $120^\circ$ 瓦形壳的敏感区域。图5(c)显示屏蔽层对射频场强度的影响(归一化处理)。将磁体用铜箔包裹后,射频场磁路不能通过磁体,只能从主天线与天线回路之间的空间通过,这对天线射频场产生了向X轴正向聚焦的作用,使得射频场强度增大。随着工作频率增大,信号强度增强(图5(d)),且增大天线长度能够明显增大信号强度。图5(e)为不同天线开角所对应的射频场强度随径向深度而变化的趋势(归一化处理),随着天线开角增大,在X轴正方向上射频场强度逐渐减弱。图5(f)为探头运动速度与天线长度之间的关系图版,不同曲线对应于不同的脉冲测量周期 $T_c$ 。从图中可以看出,当 $T_c=0.48$  s,探头以速度 $v=500$  m/h运动时,为保证测量精度,天线长度不能超过67 cm,构成探头设计的强约束条件。

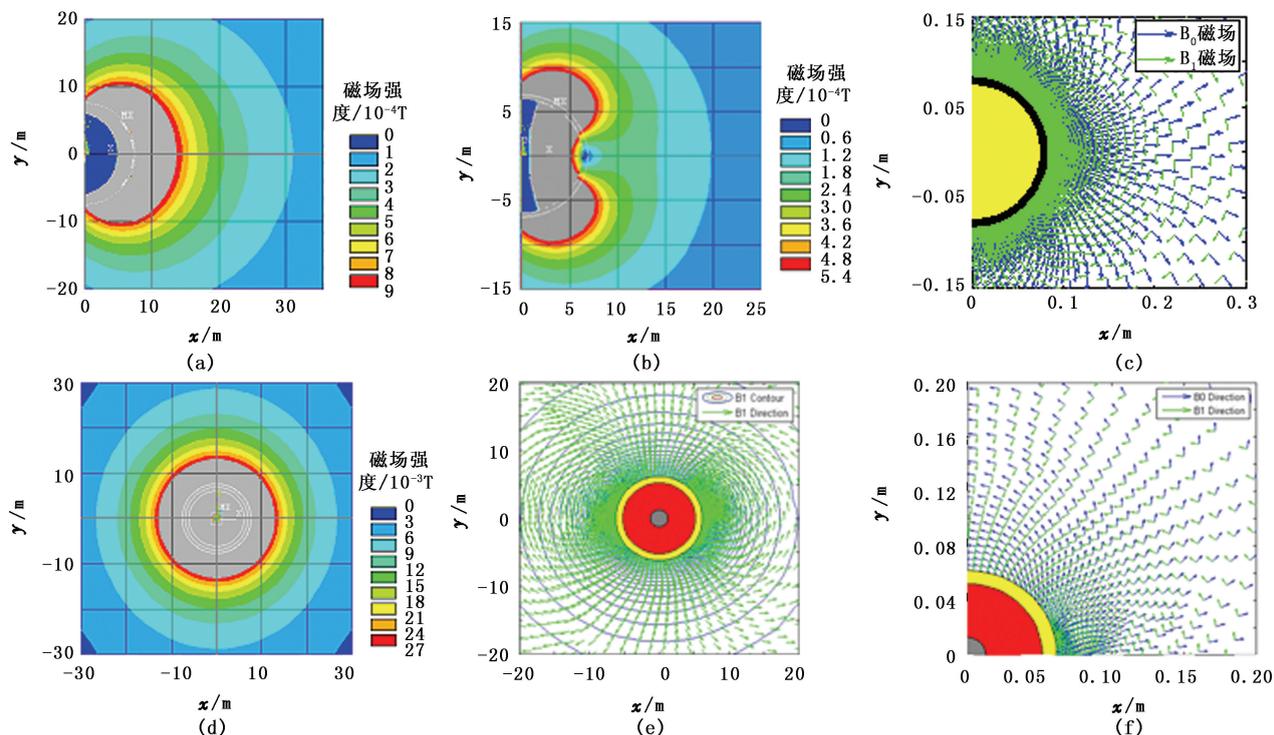


图 4 偏心型和居中型探头静磁场与射频场分布及其匹配关系

Fig. 4 Distribution of static field and RF field of pad tool and centre tool

### 3 测控系统设计及实现

核磁共振探测系统的电子线路包括:功率放大驱动电路、功率放大电路、储能电路、Q-转换驱动电路、Q-转换电路、隔离电路、接收电路、主控电路、天线调谐电路、继电器驱动电路和电源电路等,其框图和信号流程图分别如图 6 和 7 所示。电路设计的技术难点概括为:①超大功率发射;②极低微弱信号检测;③天线能量的快速泄放;④接收回路的宽带高压隔离保护。

功率放大驱动电路将主控电路的 5V CMOS 控制信号放大为大电流的 15 V 控制信号快速打开功率放大电路中的功率 MOS 管;功率放大电路将主控电路的低功率信号放大为具有很大功率的信号激励天线;储能电路在脉冲发射时为功率放大电路提供能量;Q-转换电路在脉冲发射完成后一段时间内减小天线的品质因数以达到快速泄放天线中储存能量的目的;隔离电路在脉冲发射及能量泄放期间对接收电路进行隔离保护;接收电路对天线接收到的微弱回波信号进行低噪声放大;主控电路作为仪器的控制和采集核心,主要功能是按照特定脉冲序列的时序要求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,完成与地面系统的通信等;天线调谐电路在多频测量时完成天线谐振频率

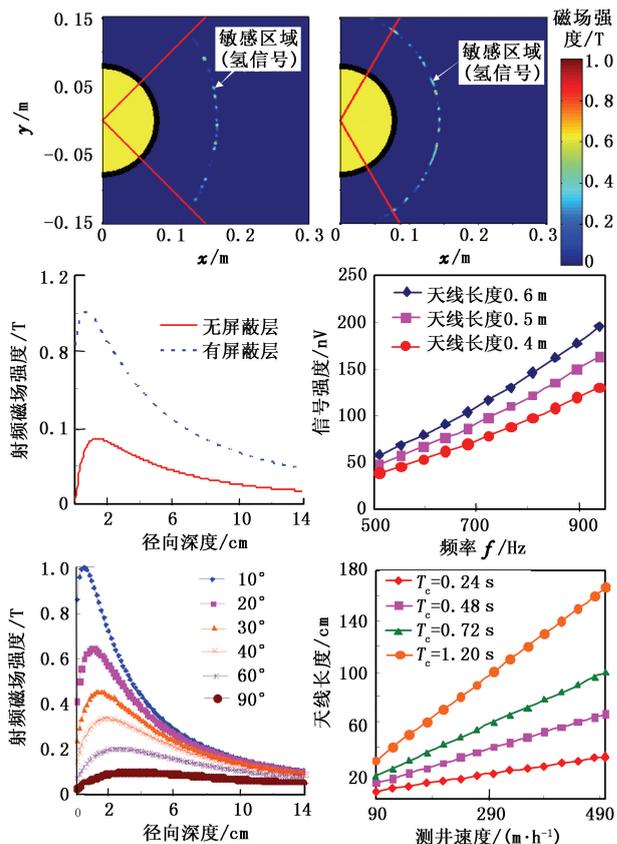


图 5 数值模拟结果分析

Fig. 5 Analysis of numerical simulation results

的切换;继电器驱动电路用于控制天线调谐电路中射频继电器的打开和关断;电源电路为各电路提供电源。

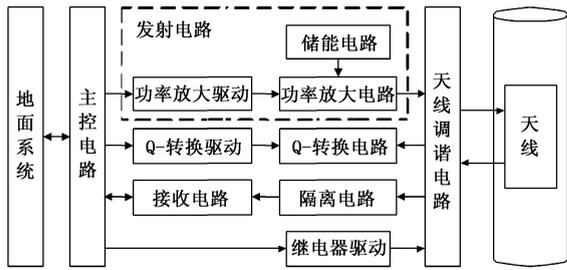


图6 核磁共振探测系统电子线路框图

Fig. 6 Diagram of electronic circuit of NMR system

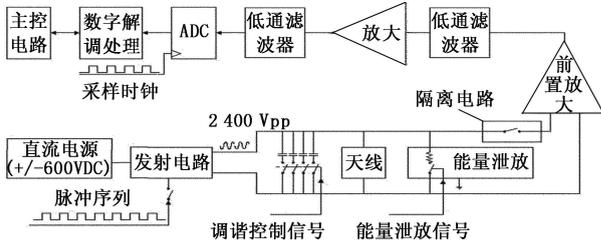


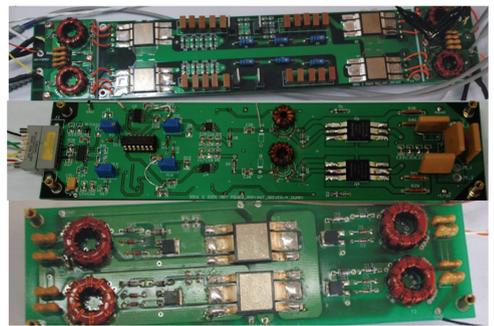
图7 核磁共振探测系统基本信号流程

Fig. 7 Basic signal flow of NMR system

仪器的整个工作流程为:主控电路接收到地面系统的命令后,将相应信息解码并创建指令产生全部时序和仪器所需的所有控制信号。这些信号包括:发射控制信号、Q-转换控制信号、隔离控制信号、采样时钟、采样门控信号和刻度信号等。发射控制信号是由主控电路生成的符合脉冲序列时序要求的具有特定频率的发射脉冲,经功率放大驱动电路后变为大电流的驱动控制信号以快速打开功率放大电路中的射频 MOS 管,将 600 V 直流高压斩波处理后变为峰值为 2 400 V 的大功率射频脉冲。此大功率射频脉冲传输至天线,由天线发射到地层中激励氢核从而产生核磁共振。脉冲发射完成后,通过 Q-转换电路将天线的品质因数降低,从而将储存在天线中的能量迅速泄放掉。能量泄放完成后准备接收回波信号,此时隔离电路允许回波信号进入接收电路。放大后的回波信号由主控电路进行数据采集和数字化处理,使用数字相敏检波算法处理以提取幅度和相位信息,并通过 CAN 总线将数据传送给遥传系统,遥传系统再将数据发送给地面系统。

通过精心设计、元器件筛选和制作,实现了模拟电路和数字电路的全部功能。实物及其测试结果分别如图 8~10 所示。遇到的瓶颈包括材料和元器件的加工及采购等问题。

主控电路采用 DSP+FPGA 嵌入式结构,完成控

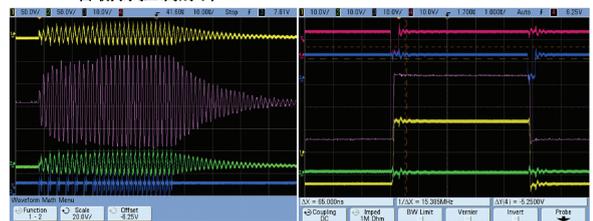


(a) 发射电路测试



(b) 功率放大驱动电路高低位 MOS管栅源控制脉冲

(c) 功率放大驱动电路输出信号



(d) 功率放大电路输出

(e) Q-转换电路MOS控制信号

图8 模拟电路实物及测试结果(发射电路)

Fig. 8 Design and implementation of analog circuit

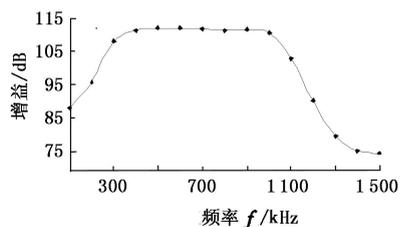
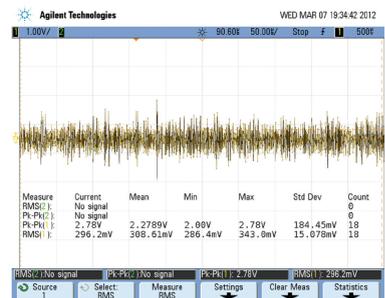


图9 模拟电路实物及测试结果(接收电路)

Fig. 9 Design and implementation of analog circuit

制和数据采集等功能。由主频为 150 MHz 的 TMS320F2812 ( DSP )、EP2C5AT144A7N ( FPGA )、

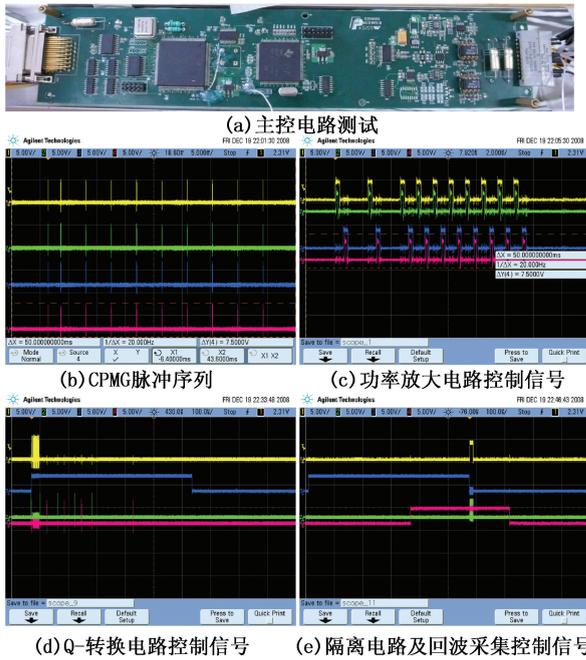


图 10 数字电路实物及测试结果

Fig. 10 Design and implementation of digital circuit

AD9851 (DDS)、AD9244 (ADC)、512 kB 的 SRAM 和 CAN 驱动器等组成基本系统。DSP 用于完成与地面系统的通信和回波信号的采集处理等; FPGA 用于产生所有的时序和仪器控制信号, 产生刻度信号用于仪器扫频和测量过程中增益测量等; DDS 为各时序信号的产生提供基准时钟; ADC 用于将放大后的模拟回波信号转换成数字信号; SRAM 外部存储器作为系统运行时的主要数据存储区域和高速数据采集时的数据缓存区域。主控电路的硬件设计主要分为 DSP、FPGA 和 SRAM 的外围及接口电路设计, 数据采集电路设计, DDS 电路设计和刻度电路设计。仿真结果如图 11 所示。

核磁共振探测系统的电子线路已成功应用于实验室样机。采用单电源双全桥结构的功率放大电路获得两倍的直流电压输出, 输出电压大于 1 kV, 功率大于 1 kW, 满足了天线的激励要求。采用两级 Q-转换设计方案有效缩短天线恢复时间, 可以减小到原来的 1/10; 采用分段式泄放方式防止 MOS 管烧毁。采用有源 MOS 管控制的宽带隔离电路实现对接收回路的高压隔离保护; 采用脉冲充放电式控制 MOS 管导通时间, 满足了不同回波间隔下差异较大的 MOS 管导通时间的要求。采用低噪声原则设计的接收电路, 选用最佳源电阻阻值和天线谐振阻抗相近的低噪声运放作为仪用放大器的差分放大器, 第一级放大器的高增益设计减少了后级电路对总噪声的影响。

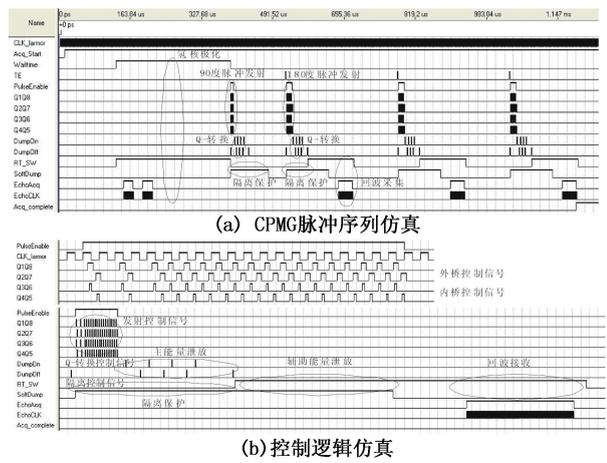


图 11 CPMG 脉冲序列仿真与控制逻辑仿真  
Fig. 11 Simulation of CPMG pulse sequence and control logic

## 4 降噪与仪器调试

### 4.1 噪声来源与降噪方法

井下核磁共振探测过程中噪声无处不在、无时不有, 其频率、幅度、相位随机变化。各种噪声在电路中感应出不同成分, 其频谱覆盖在整个频率范围。噪声用概率密度函数、数学期望、方差、均方值、相关函数、功率谱密度函数等描述。井下核磁共振探测系统噪声可分为 3 类: ①天线检测到的外界干扰; ②振荡电流经过天线时产生的噪声; ③电子元器件产生的噪声。外界环境噪声包括电磁辐射干扰、磁场耦合等; 仪器产生的噪声多为电子元器件产生的热噪声、爆裂噪声等。各种噪声叠加在微弱有效信号中, 信噪比很低。对噪声来源进行了清理, 如图 12 所示。

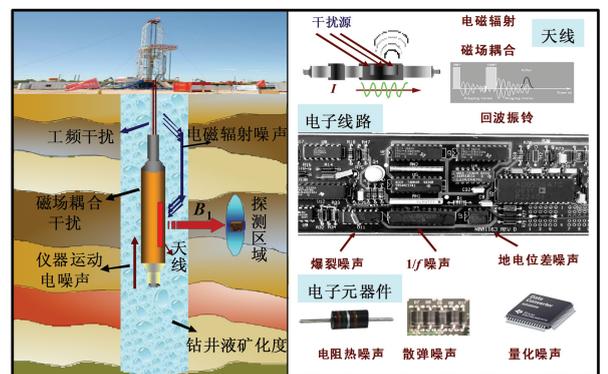


图 12 井下核磁共振探测噪声来源

Fig. 12 Sources of noise from downhole NMR system

降噪是提高信噪比的有效手段。针对井下核磁共振探测系统特点, 提出降噪流程如图 13 所示。由探头采集到的自旋回波信号经过前放和次级增益后将信号幅度放大, 通过 RC 低通滤波器将混叠在信

号中的高频噪声滤除。采用 ADC 将模拟信号转换为数字信号送入数字信号处理芯片内。由于得到的数字信号包含了来源复杂的噪声,基于外界干扰与回波具有不相关的特点,采用 PC-ALE 方法分离回波包络与噪声;由于数字低通滤波器的幅频性能决定了 DPSD 方法对回波幅度和相位的检测能力,在对比分析多种窗函数的滤波性能后,结合回波串呈指数衰减的特征,采用基于 Gaussian 滤波器的 DPSD 方法检测出每个回波包络的幅度和相位;利用小波变换可以在不同尺度、不同分解层次中观测回波串的时频特性,采用小波变换方法将回波串信号进行小波分解,对分解后的细节系数(高频分量)分别采用 SURE 算法和 R-Heursure 算法做阈值降噪,再通过小波重构回波串信号,从而有效抑制噪声对 NMR 测井的影响,提高信号的信噪比。这三个过程分别在回波检测前(PC-ALE)、回波检测(DPSD)和回波检测后(SURE/R-Heursure)实施。

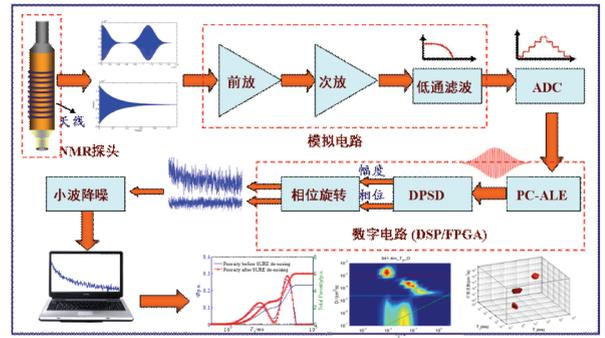


图 13 井下核磁共振探测降噪方法

Fig. 13 Noise reduction method from downhole NMR system

以致密低孔隙度岩心为例,运用 SURE 算法对测量数据做降噪处理,比较回波信号的信噪比及反演后孔隙度变化。采集到的回波信号如图 14(a)所示(信噪比为 7.822),放大后图 14(b),有用信号被淹没在噪声中,数据信噪比较低。选取 Daubechies 小波作为母小波,消失矩、分解层次与原信号平均降噪效果的相关系数,降噪后的回波信号如图 14(c)

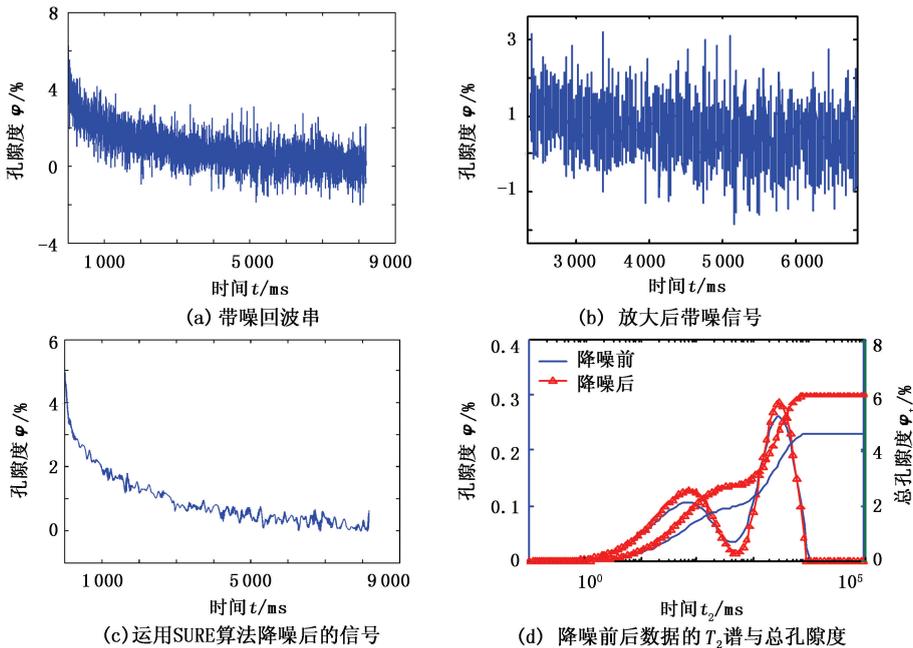


图 14 SURE 算法降噪前后的回波信号及 T<sub>2</sub> 谱与总孔隙度

Fig. 14 Contrast of echo data, T<sub>2</sub> spectrum and total porosity curve before and after noise reduction with SURE algorithm

所示(信噪比为 16.358),原信号中的噪声得到很好的压制。图 14(d)为带噪信号和降噪信号反演后的 T<sub>2</sub> 谱,信噪比的提高有效改善了反演结果。

### 4.2 仪器测试与调试

探测系统性能通过测试与联调进行检验。首先对制作的探头做了全面测试。放在刻度水箱中的探头实物如图 15(a)所示,实测径向静磁场强度

与数值模拟结果的对比如图 15(b)所示,图中给出了轴向 45 cm 和 65 cm 处的静磁场径向分布,两个实测数据具有很好的一致性。数值模拟与实测数据相比,在离探头 0~6 cm 范围内,数值模拟结果比实测数据稍大,随着径向距离的增大,两者差异减小,从变化趋势看,模拟结果与实测数据符合设计要求。

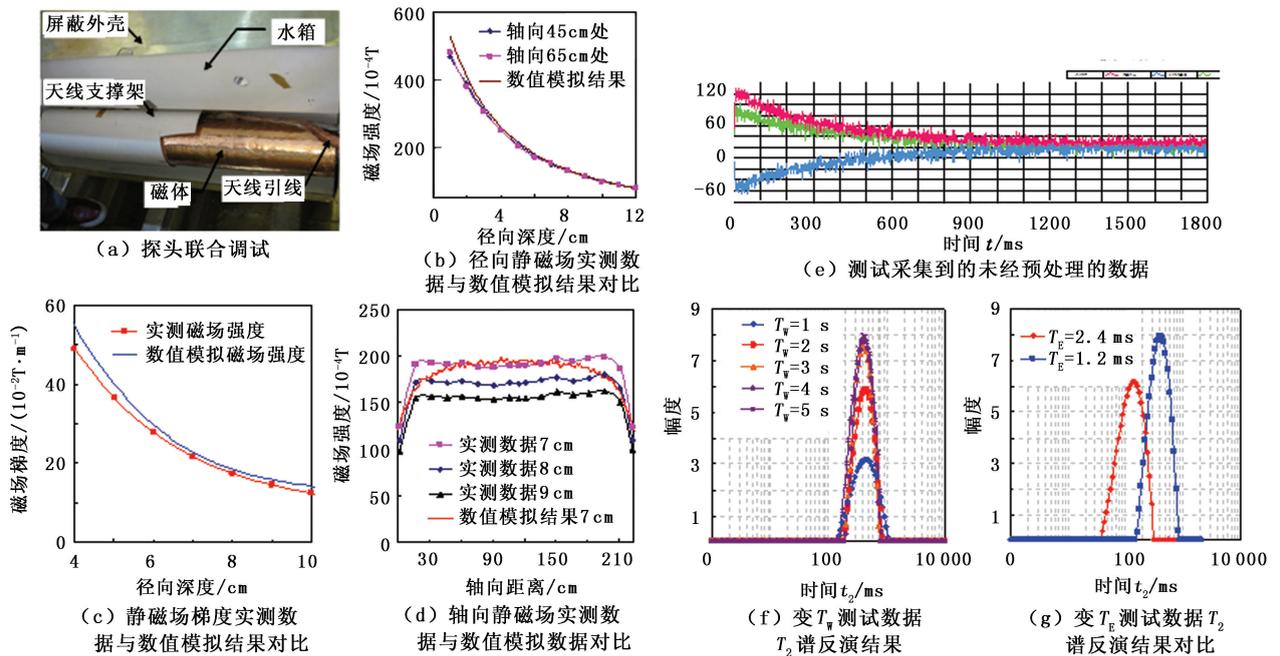


图 15 系统性能测试结果

Fig. 15 Test results of system

图 15(c) 给出实测磁场梯度和数值模拟结果对比, 变化趋势一致。实测磁场梯度在 4 ~ 10 cm 范围内约为 0.13 ~ 0.5 T/m。图 15(d) 给出磁体轴向范围的静磁场分布, 在磁体中间位置磁场轴向分布比较均匀。图 15(e) 为采集得到的原始回波串数据, 设定回波间隔  $T_E = 1.0$  ms, 等待时间  $T_W = 5$  s, 采用不同频率(704, 762, 766 kHz)进行联调。结果显示, 刻度箱中水样的弛豫时间为 300 ~ 500 ms。固定  $T_E = 1.2$  ms, 选择等待时间  $T_W = 1, 2, 3, 4, 5$  s 分别测试, 反演得到的  $T_2$  谱如图 15(f) 所示。随着  $T_W$  增大,  $T_2$  谱的峰值逐渐增大,  $T_W = 3, 4, 5$  s 时,  $T_2$  谱峰值基本不变, 说明此时样品已被完全极化, 而峰值点对应的时间保持在 400 ms。固定  $T_W = 5$  s, 分别取  $T_E = 0.8, 1.0$  ms, 采集的回波串经反演得到的  $T_2$  谱如图 15(g) 所示。联调结果显示, 探头和电子线路均具备良好特性, 验证了设计方案和制作实物的合理性和可靠性。

## 5 资料处理与解释平台设计

### 5.1 处理软件

核磁共振探测系统的数据处理与解释平台十分重要。软件包括数据输入、数据处理以及成果输出三个部分。各部分可以在相应操作系统上选择合适工具进行开发。为了方便软件的功能模块升级, 对三个部分进行单独实现, 减少模块之间的耦合。对

于二次开发接口, 则是将数据输入、数据处理以及成果输出的一些功能或者函数进行打包封装, 供第三方用户调用, 以便实现不同数据处理模块开发。软件总体框架如图 16 所示。

软件界面如图 17 所示, 主要功能包括六个部分: 数据管理、绘图、预处理、流体识别、岩石物理参数计算和工具箱, 并提供二次开发工具和接口, 帮助用户快速实现和测试新算法。

考虑到软件的实用性, 增加数据仪器无关化处理层解耦合不同仪器数据预处理和流体识别处理, 实现模块复用。针对核磁共振数据采集的特殊性, 提出原始数据存储应包括所采集的回波串和所使用的采集模式相关信息。按此思路, 从 CLS、XTF 以及 DLIS 格式核磁共振数据中成功读取回波串数据和采集模式参数, 并转存为所设计的 MAT 格式, 满足了核磁共振数据处理的需要。

把 MAT 格式数据读写以及核磁共振回波串数据识别功能通过精心设计的界面封装为数据处理二次开发工具提供给用户使用, 帮助快速实现和测试各种新的算法。从算法和代码两方面来实现反演处理速度的优化。数值模拟表明, 回波串压缩、矩阵压缩、CPU 并行计算和矩阵的删列 SVD 分解存储可以适用于井下核磁共振数据的  $T_2$  反演处理速度优化; 回波串压缩、基于 GPU 的矩阵压缩以及基于 CPU 并行计算适用于二维、三维反演处理速度优化。

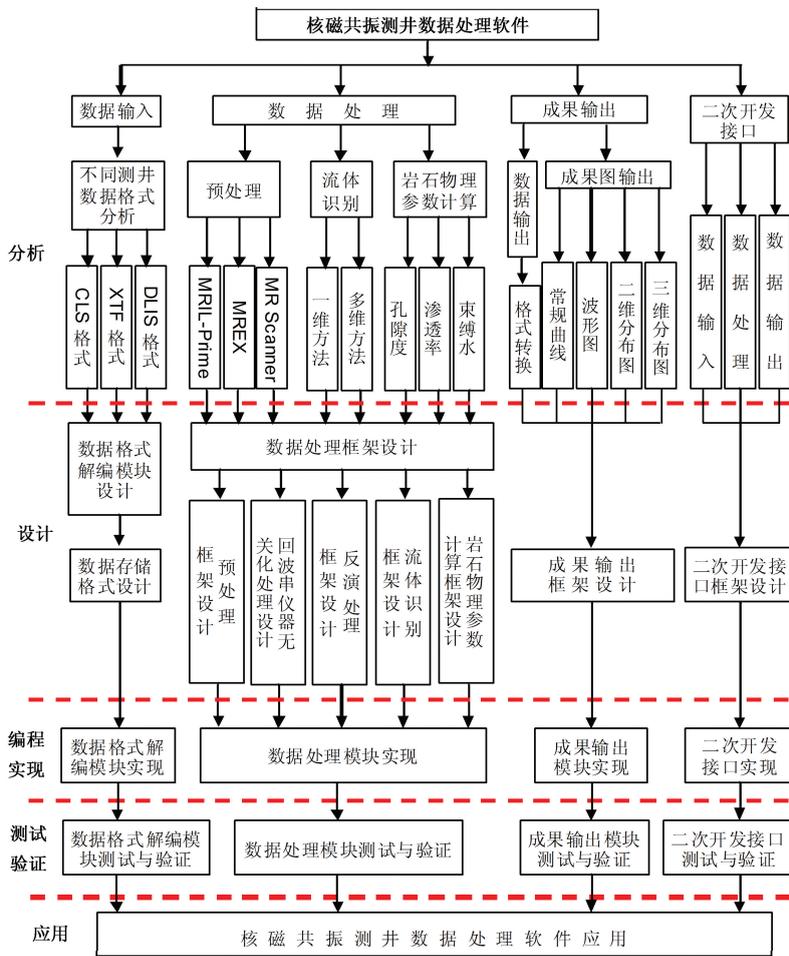


图 16 井下核磁共振探测系统数据处理与解释平台总体框架

Fig. 16 Framework of downhole NMR system data processing software

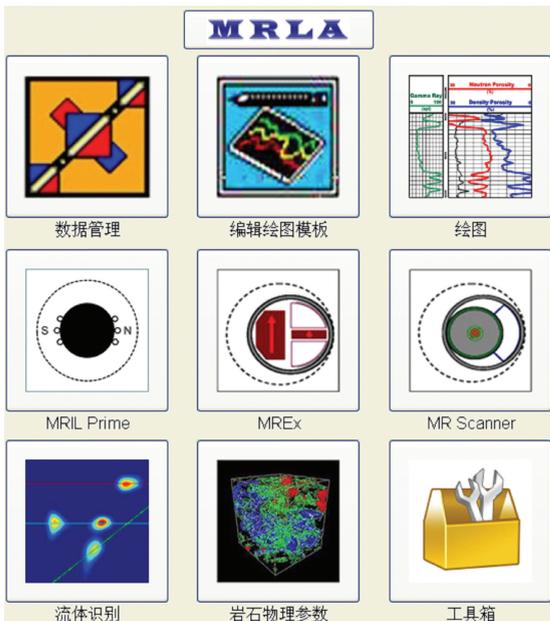


图 17 核磁共振探测系统数据处理软件主界面

Fig. 17 Main interface of data processing software for downhole NMR system

### 5.2 应用实例

(1) MRIL-P 数据处理 A 井数据由 MRIL-P 型仪器 D9TE312 和 DTWE4 模式采集。 $T_{2iml}-D$  处理结果如图 18 所示,只有水的信号。对该井进行试油,1 号层试油结论为油水同层,而 2 号层为水层, $T_{2iml}-D$  分析结果与地层实际情况一致。

(2) MREX 数据处理 B 井数据由 MREX 仪器 PorePerm+Oil 模式采集,一维  $T_2$  反演,1.5 维 SIMET 处理,无法识别油水分界线。新软件  $T_{2iml}-D$  模块处理如图 19 所示,中上部标记 1 处  $T_{2iml}-D$  图中有油信号,下部标记 2 处  $T_{2iml}-D$  图中有水信号,成功地识别出油水界面。

(3) MR Scanner 数据处理 C 井数据由 MR Scanner 仪  $T_1$  Profiling Sequences 采集。原处理结果如图 20 左边的测井图,处理结果显示这一层段含气。但仅仅依靠  $T_1$  分布中大于 1 s 的地方有信号就认为其含有气是很容易出错的,因为当所使用的采集参数不合适时,也会出现这种情况。用新软件对这一井段用  $T_1-T_2$  模块处理,从图 20 右边的  $T_1-T_2$

图可以看到气信号的存在,与后期试油结论一致,仅仅基于  $T_1$  分布的判断要可靠得多。

到试油验证。基于二维分布图可以比一维核磁共振流体识别方法更加清楚地区分油气水,明显提高疑难油气层识别能力,具有很好的应用前景。

软件对各种仪器采集数据进行的二维处理,得

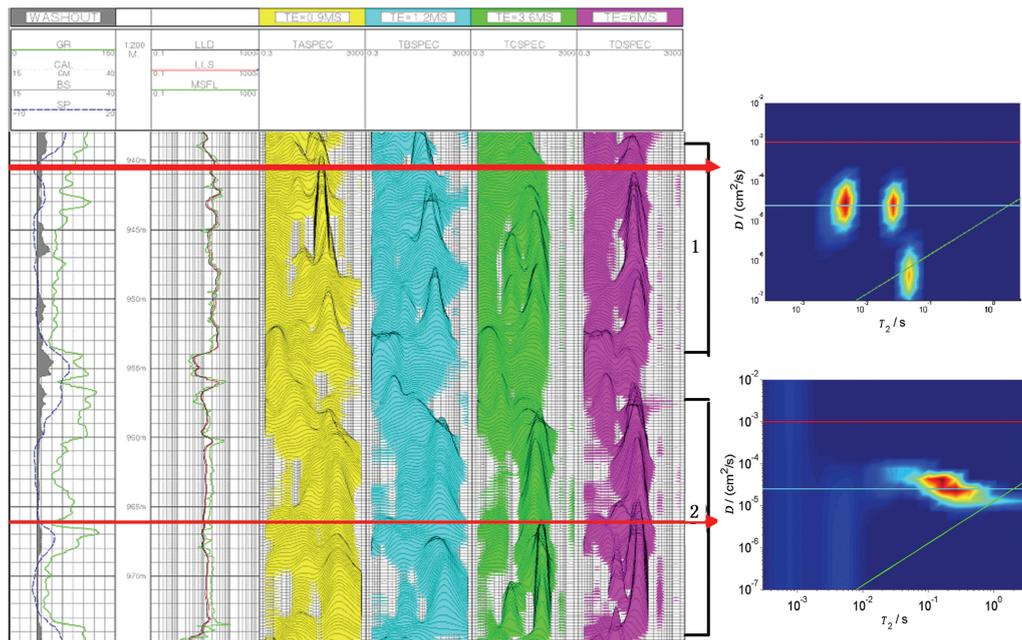


图 18 MRIL-P 数据  $T_{2int}$ -D 处理成果图

Fig. 18  $T_{2int}$ -D distribution processed with data from MRIL-P

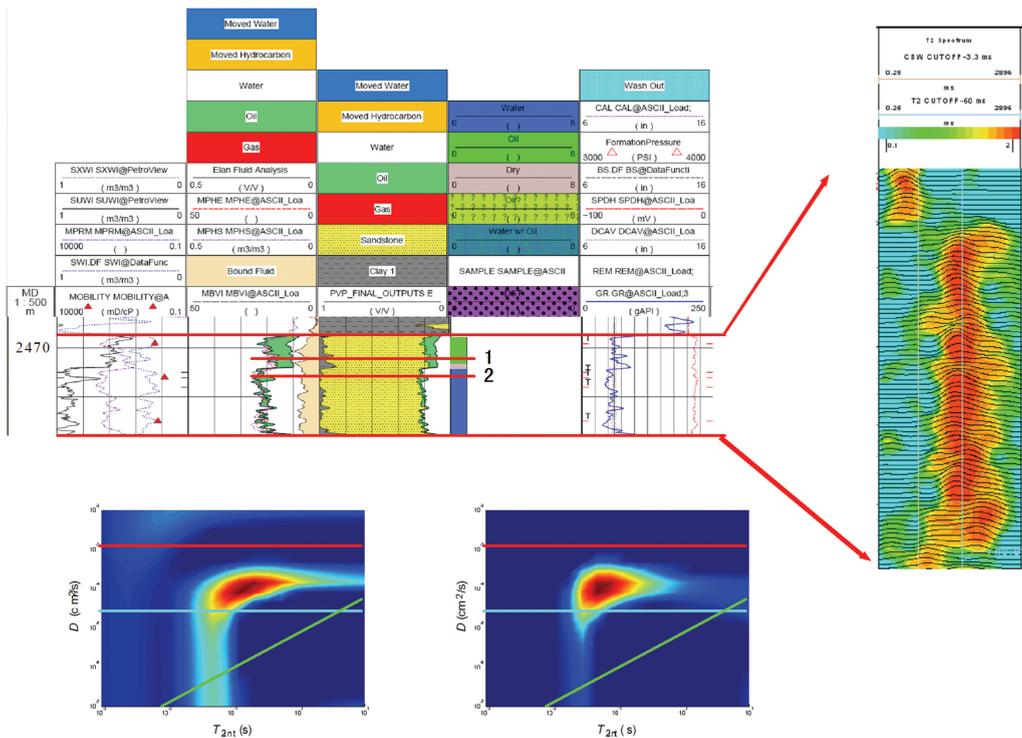


图 19 MREX 数据  $T_{2int}$ -D 处理结果

Fig. 19  $T_{2int}$ -D distribution processed with data from MREX

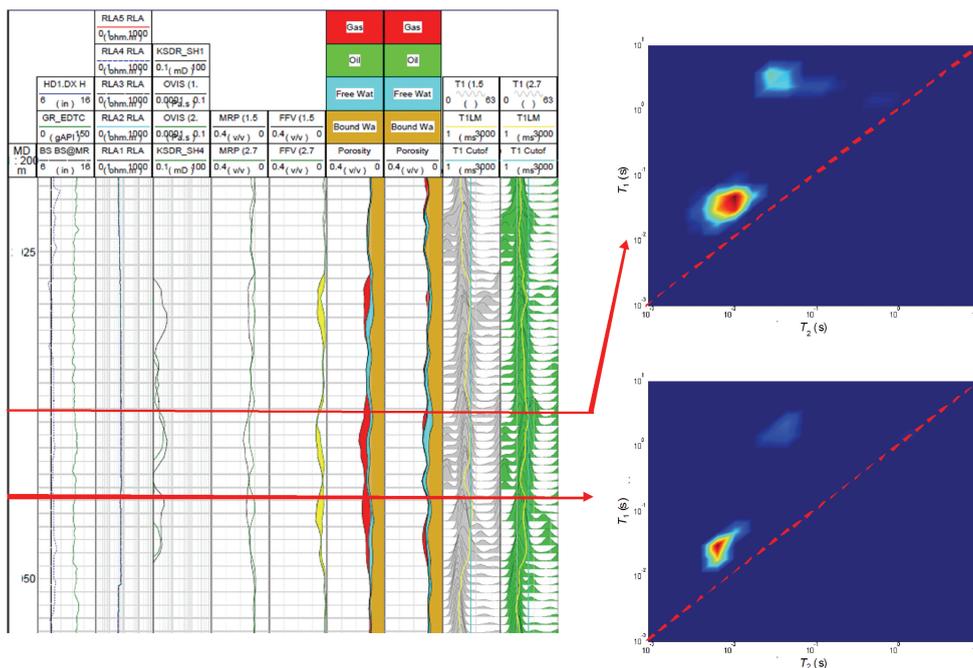


图 20 MR Scanner 数据  $T_1$ - $T_2$  处理结果

Fig. 20  $T_1$ - $T_2$  distribution processed with data from MR Scanner

## 6 结 论

(1) 经过数年努力,完成了井下极端条件核磁共振探测系统的设计、制作与测试,达到工程要求,积累了仪器研制经验。

(2) 设计的井下极端条件核磁共振探测系统已经在企业进入工程化应用阶段,为解决中国复杂油气藏储层测井评价难题提供了有效探测手段。

(3) 核磁共振作为一类重要的科学仪器,其新装置不断发明,在基础科学和高端仪器领域均具有特殊吸引力。通过仪器研制,可以加深对核磁共振前沿理论的理解,加强对核磁共振方法的原始创新。综上所述,极端条件核磁共振探测具有与常规条件核磁共振不一样的科学问题、技术问题、工程及工艺问题。极端条件下首先会遇到磁体和天线等材料方面的挑战;其次是电子元器件方面的挑战;再次是低探测效率和低信噪比方面的挑战;还会遇到标定、数据采集、传输、处理及解释等方面的挑战。这些挑战需要严谨的科学原理、周密的技术思想及巧妙的工程和工艺措施,通过不断尝试和失败才能有效解决。这使得高端仪器研制与前沿基础研究表现出很不一样的创新特点。

**致谢** 2005年开始井下核磁共振探测系统研制,博士生胡法龙、谢然红、廖广志、傅少庆、胡海涛、李新、于慧俊、谢庆明、吴保松、刘化冰和邓峰等参与设计、制作和调试工作。Vladimir Anferov 和 Sofia

Anferova 参与全部工作。中国石油天然气集团公司汤天知、张本庭等,以及中海油服有限公司宋公仆等参与项目管理和设计指导,并给予大力支持和帮助。科技部、国家自然科学基金委、中国石油天然气集团公司、中海油服有限公司等给予资助。在此深表谢意!

### 参考文献:

- [1] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 肖立志, 谢然红, 廖广志. 中国复杂油气藏核磁共振测井理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [3] COATES G R, XIAO L Z, PRAMMER M G. NMR logging principles and applications [M]. Houston: Gulf Professional Publishing, 1999.
- [4] DUNN K J, BERGMAN D J, LATORRACA G A. Nuclear magnetic resonance: petrophysical and logging applications [M]. Pergamon: Elsevier Science, 2002.
- [5] 肖立志. 我国核磁共振测井应用中的若干重要问题[J]. 测井技术, 2007, 31(5): 401-407.  
XIAO Li-zhi. Some Important Issues for NMR Logging Applications in China [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(5): 401-407.
- [6] 胡法龙. 多频核磁共振测井仪磁场分布数值模拟与探头设计[D]. 北京: 中国石油大学地球物理与信息工程学院, 2007.  
HU Fa-long. Probe design and simulation of multi-frequency NMR logging device[D]. Beijing: College of Geo-

- physics and Information in China University of Petroleum, 2007.
- [7] 胡海涛. 电缆核磁共振测井仪探头关键技术研究[D]. 北京:中国石油大学地球物理与信息工程学院, 2012.  
HU Hai-tao. Study of key technology in wireline NMR probe[D]. Beijing: College of Geophysics and Information in China University of Petroleum, 2012.
- [8] 李新. 随钻核磁共振测井仪探头关键技术研究[D]. 北京:中国石油大学地球物理与信息工程学院, 2012.  
LI Xin. Study of key technology in LWD NMR probe [D]. Beijing: College of Geophysics and Information in China University of Petroleum, 2012.
- [9] 谢庆民. 核磁共振测井降噪方法与应用研究[D]. 北京:中国石油大学地球物理与信息工程学院, 2012.  
XIE Qing-ming. Methods and applications of noise reduction in NMR logging [D]. Beijing: College of Geophysics and Information in China University of Petroleum, 2012.
- [10] 傅少庆. 核磁共振测井数据处理软件设计与实现 [D]. 北京:中国石油大学地球物理与信息工程学院, 2012.  
FU Shao-qing. Design and implementation of data processing software in NMR logging [D]. Beijing: College of Geophysics and Information in China University of Petroleum, 2012.
- [11] 于慧俊. 核磁共振测井仪电子线路设计与实现 [D]. 北京:中国石油大学地球物理与信息工程学院, 2012.  
YU Hui-jun. Design and implementation of electronics in NMR logging [D]. Beijing: College of Geophysics and Information in China University of Petroleum, 2012.
- [12] KLEINBERG R L, SEZGINER A, GRIFFIN D D, et al. Novel NMR apparatus for investigating an external sample [J]. *J Magn Reson*, 1992, 97(3): 466-485.
- [13] SONG Y-Q, VENKATARAMANAN L, HÜRLIMANN M D, et al.  $T_1$ - $T_2$  correlation spectra obtained using a fast two-dimensional Laplace inversion [J]. *J Magn Reson*, 2002, 154(2): 261-268.
- [14] SUN B, DUNN K-J. Probing the internal field gradients in porous media [J]. *Phys Rev E*, 2002, 65(5): 051309(1-7).
- [15] SUN B, DUNN K-J, BILODEAU B J, et al. Two-dimensional NMR logging and field test results [R]. SP-WLA 45th Annual Symposium, Paper KK, 2004.
- [16] SUN B, DUNN K-J. A global inversion method for multi-dimensional NMR logging [J]. *J Magn Reson*, 2005, 172(3): 152-160
- [17] DUNN K-J, LATORRACA G A, WARNER J L. On the calculation and interpretation of NMR relaxation time distribution [R]. SPE 28367, 1994.
- [18] BERGMAN D J, DUNN K-J. NMR of diffusing atoms in a periodic porous medium in the presence of a nonuniform magnetic field [J]. *Phys Rev E*, 1995, 52(6): 6516-6535.
- [19] HÜRLIMANN M D. Effective gradients in porous media due to susceptibility differences [J]. *J Magn Reson*, 1998, 131(2): 232-240.
- [20] SONG Y-Q, VENKATARAMANAN L, HURLIMANN M D, et al.  $T_1$ - $T_2$  correlation spectra obtained using a fast two-dimensional laplace inversion [J]. *J Magn Reson*, 2002, 154(2): 261-268.
- [21] 胡海涛, 肖立志. 电缆核磁共振测井仪探测特性研究[J]. *波谱学杂志*, 2010, 27(4): 572-583.  
HU Hai-tao, XIAO Li-zhi. Investigation characteristics of NMR wireline logging tools [J]. *Chinese J Magn Reson*, 2010, 27(4): 572-583.
- [22] 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 Xin, XIAO Li-zhi, HU Hai-tao. Characteristics of NMR logging while drilling tools [J]. *Chinese J Magn Reson*, 2011, 28(1): 84-92.
- [23] HU H, XIAO L, WU X. Corrections for downhole NMR logging [J]. *Petroleum Science*, 2012, 9(1): 46-52.
- [24] YU H J, XIAO L Z, Li X, et al. Novel detection system for NMR logging tool [R]. 2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, ICSPCC, 2011: 1-4.
- [25] 肖立志, 胡海涛, 李新, 等. 核磁共振测井仪的探头磁体、探头和核磁共振测井仪: 中国, 102331588A [P]. 2012-01-25.
- [26] 肖立志, 黄科, 李新, 等. 消除振铃的核磁共振回波串获取方法: 中国, 2102330548A [P]. 2012-01-25.
- [27] 肖立志, 吴保松, 于慧俊, 等. 核磁共振流体分析仪探头以及核磁共振流体分析仪: 中国, CN102444400A [P]. 2012-05-09.
- [28] 肖立志, 于慧俊, 刘化冰, 等. 核磁共振分析仪滑台和核磁共振分析仪: 中国, CN102608145A [P]. 2012-07-25.
- [29] 肖立志, 黄科. 深度维核磁共振反演获取横向弛豫时间谱的方法及装置: 中国, CN102608664A [P]. 2012-07-25.
- [30] 王忠东, 肖立志, 刘堂宴. 核磁共振弛豫信号多指数反演新方法及其应用 [J]. *中国科学(G)*, 2003, 33(4): 323-332.
- [31] WANG Zhong-dong, XIAO Li-zhi, LIU Tang-yan. New inversion method with multi-exponent and its application [J]. *Science in China(G)*, 2003, 33(4): 323-332.
- [31] 廖广志, 肖立志, 谢然红, 等. 孔隙介质核磁共振弛豫测量多指数反演影响因素研究 [J]. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 932-938.

- LIAO Guang-zhi, XIAO Li-zhi, XIE Ran-hong, et al. Influence factors of multi-exponential inversion of NMR relaxation measurement in porous media[J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(3):932-938.
- [32] 谢然红, 肖立志, 刘家军, 等. 核磁共振多回波串联反演方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2913-2919.
- XIE Ran-hong, XIAO Li-zhi, LIU Jia-jun, et al. A method for multiple echo trains jointing inversion of NMR relaxation measurements [J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(11):2913-2919.
- [33] 谢然红, 肖立志. 核磁共振测井探测岩石内部磁场梯度的方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(5):1341-1347.
- XIE Ran-hong, XIAO Li-zhi. NMR logging probing the internal magnetic field gradients of rocks [J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(5):1341-1347.
- [34] 谢庆明, 肖立志, 廖广志. SURE 算法在核磁共振信号去噪中的实现[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2776-2783.
- XIE Qing-ming, XIAO Li-zhi, LIAO Guang-zhi. Application of SURE algorithm to echo train de-noising in low field NMR logging [J]. Chinese J Geophys, 2010, 53(11):2776-2783.
- [35] 谢然红, 肖立志.  $(T_2, D)$  二维核磁共振测井识别储层流体的方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2410-2418.
- XIE Ran-hong, XIAO Li-zhi. The  $(T_2, D)$  NMR logging method for fluids characterization [J]. Chinese J Geophys, 2009, 52(9):2410-2418.
- [36] XIE Ran-hong, XIAO Li-zhi. Advanced fluid-typing methods for NMR logging [J]. Petroleum Science, 2011, 8:163-169.
- [37] WU Bao-song, XIAO Li-zhi, LI Xin, et al. Sensor design and implementation for a down-hole NMR fluid analysis laboratory [J]. Petroleum Science, 2012, 9(1):38-45.

(编辑 修荣荣)

(上接第 37 页)

- [14] 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学, 等. 致密砂岩气藏成藏过程的物理模拟实验[J]. 地质论评, 2007, 53(6):844-849.
- JIANG Fu-jie, PANG Xiong-qi, JIANG Zhen-xue, et al. Physical simulation experiment of gas charging in tight sandstone [J]. Geological Review, 2007, 53(6):844-849.
- [15] 姜福杰, 庞雄奇, 武丽. 致密砂岩气藏成藏过程中的地质门限及其控气机理[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 49-54.
- JIANG Fu-jie, PANG Xiong-qi, WU li. Geologic thresholds and its gas-controlling function during forming process of tight sandstone gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1):49-54.
- [16] 庞雄奇, 李素梅, 金之钧, 等. 排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2004, 29(4):384-390.
- PANG Xiong-qi, LI Su-mei, JIN Zhi-jun, et al. Geochemical evidences of hydrocarbon expulsion threshold and its application [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(4):384-390.
- [17] 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1995:1-270.
- [18] 庞雄奇, 邱楠生, 姜振学, 等. 油气成藏定量模拟[M]. 北京:石油工业出版社, 2005:193-200.
- [19] 周海民. 断陷盆地油气成藏动力学与含油气系统表征——以渤海湾盆地南堡凹陷为例[M]. 北京:石油工业出版社, 2005:10-39.
- [20] 范柏江, 董月霞, 庞雄奇. 有效源岩的精确厘定及其排烃量:以南堡凹陷为例[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2012, 43(1):229-237.
- FAN Bo-jiang, DONG Yue-xia, PANG Xiong-qi. Establishment of effective source rock and hydrocarbon expulsion quantity: taking Nanpu sag for example [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(1):229-237.

(编辑 徐会永)