

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2020027

## 井下随钻核磁共振流体分析装置设计与试验验证

李 新<sup>1</sup>, 米金泰<sup>1</sup>, 张 卫<sup>1</sup>, 姚金志<sup>2</sup>, 李三国<sup>1</sup>

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 中石化胜利石油工程有限公司地质录井公司, 山东东营 257064)

**摘 要:** 为了在随钻条件下对井下地层流体类型及特性进行原地实时分析, 以井下随钻应用为约束条件, 提出了井下随钻核磁共振流体分析方法, 仿真分析了钻铤尺寸约束下的物理空间, 优化了小型核磁共振分析装置设计方案; 在此基础上, 研发出适于钻铤空间条件的小型核磁共振流体传感器, 并制作了全尺寸井下随钻流体核磁共振分析仪短节原型机。井下流体样品的  $T_2$  谱试验结果表明, 不同流体信号具有明显的响应特征和高信噪比。井下随钻核磁共振流体分析装置为井下流体分析提供了一种新的测试方法, 也为核磁共振技术在井下随钻测量中的应用奠定了基础。

**关键词:** 随钻测井; 核磁共振; 流体分析; 试验验证

中图分类号: TE927

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)02-0130-05

### Design and Test Verification of NMR Fluid Analysis Device for Downhole Logging While Drilling

LI Xin<sup>1</sup>, MI Jintai<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, YAO Jinzhi<sup>2</sup>, LI Sanguo<sup>1</sup>

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Geologging Company, Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257064, China)

**Abstract:** In order to analyze the type and characteristics of downhole formation fluid in situ under LWD conditions, an analysis method for downhole NMR fluids while drilling has been advanced under the constraining condition of LWD applications, so as to simulate the physical space at the constraint of drill collar size and optimize the design of small NMR analyzer. On this basis, a small NMR fluid sensor suitable for the space condition of downhole drill collar was developed. Then the team created a full-size prototype of a downhole fluid-while drilling NMR analyzer. The  $T_2$  spectrum experiment results of downhole fluid samples showed that different fluid signals had obvious response characteristics and high signal-to-noise ratio. Downhole NMR fluids analyzer while drilling can provide a new and effective test method for downhole fluid analysis, and they lay a foundation for the application of NMR technology in downhole LWD.

**Key words:** LWD; NMR; fluids analysis; experimental verification

准确了解油藏流体性质是油田开发成功的关键<sup>[1]</sup>, 在数千米深的油气井井下建立多功能流体分析系统——“井下流体分析实验室”, 直接对储层流体进行原地实时分析, 对于油气勘探开发至关重要<sup>[2]</sup>。随钻井下流体实验室在钻井过程中提供高精度流体成分数据, 以获得更全面的油藏动态信息, 持续钻进的同时保证最佳的井眼轨迹, 避免钻井井下风险, 确保定向与完井质量<sup>[3]</sup>。

井下油气流体分析技术主要有光学分析法和核磁共振(NMR)分析法。光学分析法能够评价储层污染, 但遇到油基钻井液或者储层流体为油水混合

相时评价效果欠佳。核磁共振技术不受钻井液或储层影响, 能够在储层温度和压力条件下获得地层流体的主要信息<sup>[4-5]</sup>, 还可以评价钻井液对地层的污染程度<sup>[6]</sup>。2000 年, Halliburton 公司推出了井下流体

收稿日期: 2019-06-20; 改回日期: 2020-02-26。

**作者简介:** 李新(1981—), 男, 河北唐山人, 2005 年毕业于中国石油大学(北京)信息与计算科学专业, 2012 年获中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业博士学位, 高级工程师, 主要从事随钻测控技术研究。E-mail: lixin.sripe@sinopec.com。

**基金项目:** 国家科技重大专项“低渗透储层高精度随钻成像技术研究”(编号: 2016ZX05021-002)和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”(编号: 21427812)联合资助。

分析仪 MRLab, 采用 Halbach 永磁体结构产生静磁场, 射频线圈工作频率大约 2 MHz<sup>[7]</sup>, 测量液态氢获取流体信息; 2002 年, Schlumberger 公司提出了核磁共振流体分析仪与光学分析仪相结合的方案, 后来采用光学与核磁共振测井结合的形式进行作业; 2002 年, Halliburton 公司研制出新一代井下核磁共振流体分析仪并商业化<sup>[8]</sup>, 在储层温度和压力条件下测量流体的弛豫时间, 获得气油比、流体黏度等信息。另外, 吴保松等人<sup>[9-10]</sup>开发了多功能电缆式井下核磁共振流体分析试验样机, 研究了在线获取样品信息的探测方法; 陈伟梁等人<sup>[11]</sup>实现了一维和二维时域核磁共振测量。目前, 国内外尚无井下随钻核磁共振流体分析仪器开发和应用的报道。

为此, 笔者提出了井下随钻核磁共振流体分析装置设计方案, 以井下随钻仪器体积为约束条件, 优化设计和研制了随钻小型核磁共振流体分析传感器样机, 开展了流体核磁共振响应信号测试和核磁共振弛豫时间谱分析试验, 验证了方案的可行性。

## 1 随钻核磁共振流体分析装置研制

### 1.1 试验样机总体方案

井下随钻核磁共振流体分析的关键是探测器功能与结构的综合设计, 要求井下核磁共振流体探测器不但能够进行井下随钻核磁共振信号测量, 还要求满足井下钻铤的空间约束条件, 电磁和材料性能适应井下高温环境, 整体结构满足井下机械强度和压力密封要求。

为对钻铤尺寸约束下的物理空间设计进行仿真, 并满足实验室内核磁共振流体探测器的仿真测试需要, 设计了原型样机, 主要由本体、外盖、盖板 and 核磁共振流体探测器等组成 (见图 1)。

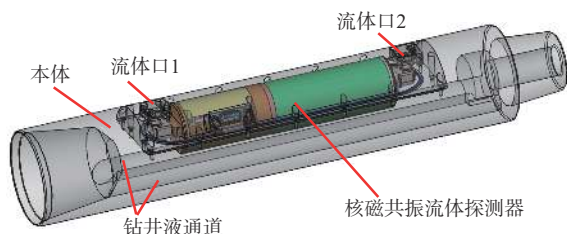


图 1 井下随钻核磁共振流体分析试验样机结构

Fig.1 Structure of NMR fluid analyzer prototype for downhole LWD

将核磁共振流体探测器嵌入短节本体中, 用卡环、螺栓固定。将外盖用螺栓固定在短节上, 外盖与短节之间用 O 形圈密封, 防止液体进入核磁共振

流体探测器。短节长度为 1 100 mm, 外径为 190.0 mm, 符合常用钻铤尺寸, 上下扣形均为 API 标准扣型 (左端为  $\phi 193.7$  mm 正规扣, 右端为 NC50 扣)。钻井液从短节内部的水眼通道流过, 为了适应核磁共振流体探测器的挂接, 采用了偏水眼设计, 兼顾了整体强度和过流面积。为了方便室内测试, 核磁共振流体探测器两端设置了流体口 1 和流体口 2, 用于仿真流体输入和排出探测器的过程。

### 1.2 井下核磁共振流体探测器

#### 1.2.1 磁体设计

井下核磁共振流体探测器呈圆柱形, 主要由高导磁外筒、永磁体、射频线圈、流体管路和调谐匹配电路等部分组成 (见图 2)。由于永磁材料充磁体积的限制, 永磁体在轴向上由 3 段独立的磁块粘结而成, 磁体总长 200.0 mm。永磁材料为钕钴, 具有高居里温度和低温度系数的优点。永磁体组合方案从传统 Halbach 结构发展而来<sup>[12]</sup>, 由 8 个各为 45° 的离散型磁瓦 (内半径 22.5 mm, 外半径 40.0 mm) 组合而成。磁瓦的充磁方向按照双极 Halbach 设置, 起到中心聚磁的作用, 最终在内腔中形成由左至右的 N—S 双极强磁场。

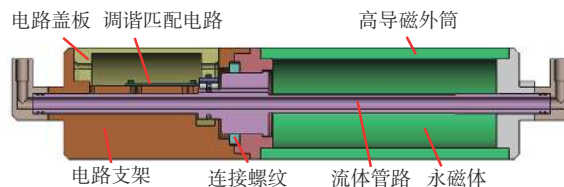


图 2 井下核磁共振流体探测器结构

Fig.2 Structure of downhole NMR fluid detector

理想 Halbach 结构具有外部零漏磁的特点, 为了减小采用离散 Halbach 带来的外部漏磁场, 永磁体外部增加了高导磁材料外壳, 将外部磁力线从 N 极直接导回 S 极进入磁体内部, 实现真正零漏磁的同时, 进一步增强聚磁效果, 并对脆性的钕钴材料提供保护作用。高导磁外壳材料为高磁导率的工业纯铁, 在其外部做了防锈处理, 具有非常高的电导率, 作为屏蔽层为射频线圈提供良好的低噪电磁环境。

核磁共振流体探测器横截面上的磁路设计如图 3(a) 所示, 外壳外径为 100.0 mm, 磁块内径为 45.0 mm。永磁体组合内腔的中心为样品管, 内部容纳流体样品; 外部刻有螺旋槽, 用于容纳和固定漆包线螺旋线圈绕组。永磁组合内壁上设置有电磁屏蔽层, 以防止射频线圈发射的电磁波直接照射到

磁体材料上产生涡流噪声。

利用有限元软件,对探测器的磁路进行仿真分析。磁场中心磁感应强度  $B_0=0.5356\text{ T}$ , 对应 $^1\text{H}$ 氢核共振拉莫尔频率  $f_0=22.81\text{ MHz}$ , 并在磁体中心区域形成了均匀区域。图3(b)为静磁场的二维实际测绘结果,图3(c)和图3(d)分别为沿  $z$  轴和  $x$  方

向上的磁感应强度分布,零点位于永磁组合内腔中心。 $z$  轴和  $y$  轴上  $10.0\text{ mm}$  范围内的磁感应强度与中心完全相同,磁场均匀度非常高。高导磁外壳表面的磁感应强度约为  $10^{-5}\text{ T}$ , 与地磁场强度的量级相同,实现了等效无漏磁,通过套管段时更加安全。

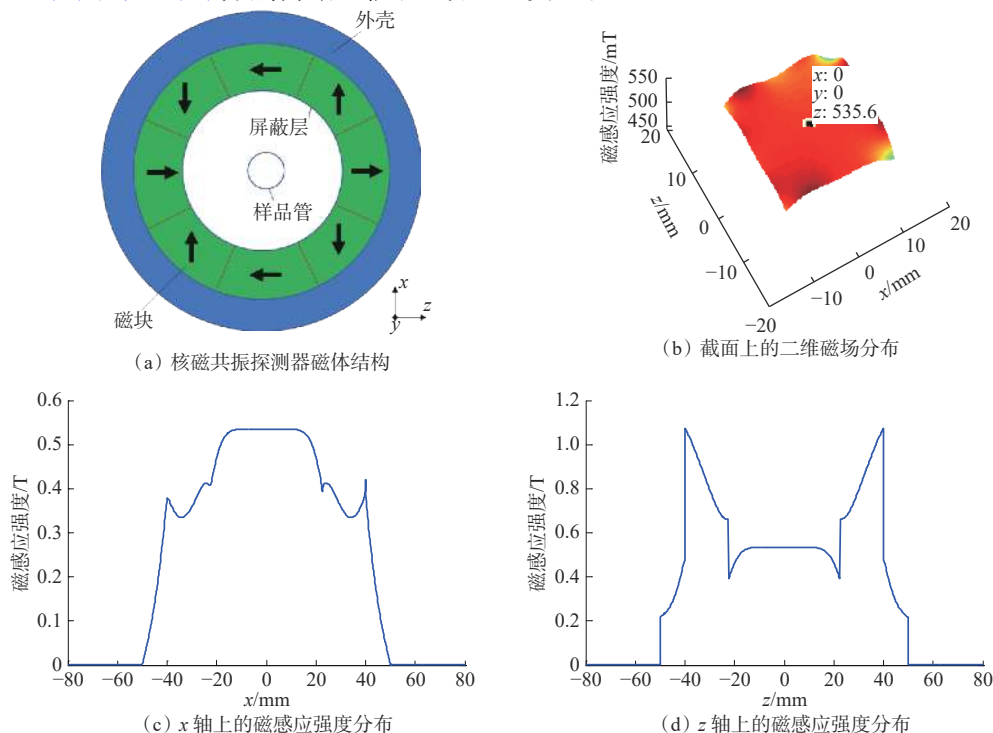


图3 核磁共振流体探测器的磁体结构和磁场分布

Fig.3 Magnet structure and magnetic field distribution of downhole NMR fluid detector

### 1.2.2 射频天线

射频天线由射频线圈和调谐前端组成。射频线圈为螺线管结构,由高温漆包线绕制在特制样品管外侧。样品管材料为聚醚醚酮(PEEK)工业高分子材料,具有良好的耐高温特性和较高的硬度。PEEK 不含氢元素,测量时没有核磁共振信号干扰。样品管外侧留有螺旋槽,便于固定绕线间距。由于射频线圈处于静磁场中,施加高电压射频场时受到磁场的洛伦兹力作用会发生机械振动,产生“振铃”噪声,采用耐高温室内硫化(RTV)胶水将漆包线与样品管粘结牢固。螺线管线圈产生的射频场垂直于纸面(沿  $y$  轴),而静磁场方向平行于  $z$  轴,二者天然呈垂直关系,满足核磁共振条件,利用了螺线管天线高效率的优势。

研制的小型核磁共振流体探测器磁体总成、射频线圈与样品管如图4所示。为减小射频脉冲发射过程中电路的能量损耗,调谐前端高压电容(位于图4(a)内部,无法显示)尽量紧靠射频线圈接线一侧。射频发射时,对天线施加大功率脉冲,谐振电

路各部件中产生高压和较大的瞬间电流,使用 RTV 胶对各电子组件和天线走线进行绝缘隔离保护,以减小天线“振铃”噪声。



图4 井下随钻核磁共振流体探测器的磁体总成、射频线圈与样品管

Fig.4 NMR fluid analysis detector for downhole logging while drilling

井下随钻核磁共振流体探测器组装完毕后,考虑金属部件对射频线圈自身电容电感的耦合影响,利用安捷伦精密阻抗分析仪(型号为 42941A)对射

频天线整体进行了调谐。利用天线前端匹配网络、耐高压固定和微调电容阵列,得到中心谐振频率  $f_{\text{rf}}=22.81$  MHz、品质因数  $Q=45$ 、阻抗  $Z_0=50\ \Omega$ ,与采集电路的频率和阻抗匹配较好。

## 2 核磁共振试验与数据分析

### 2.1 核磁共振信号质量观测

核磁共振回波是瞬态信号,激发核磁共振现象需要探测器满足比较严密的物理条件(静磁场均匀且与射频场垂直,低电磁噪声环境),不仅其电气性能与电子采集系统要良好匹配(频率和阻抗),还要考虑探测器与电子采集系统之间射频信号线的衰减影响。

在电子采集系统上编写了 CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill)脉冲序列时序,利用探测器采集样品自旋回波。经过调试确定 CPMG 脉冲序列主要试验参数:频率 22.81 MHz,等待时间 15 s、回波间隔 1 ms,单回波包罗采集 64 个点,信号叠加 16 次,接收器增益 100。测试时,在纯净水中加入脱水硫酸铜形成硫酸铜溶液,在保持信号量不变的情况下,可以缩短样品的纵向弛豫时间  $T_1$ ,提高测试效率。试验结果表明,获得了高质量、高信噪比( $\text{SNR}=150$ )的核磁共振自旋回波串。对采集的原始数据信号进行回波峰值提取,得到 CPMG 回波信号衰减曲线(见图 5)。

从图 5 可以看出,回波串的包络具有明显的单指数衰减特征;单个回波显示包络光滑、相位稳定,

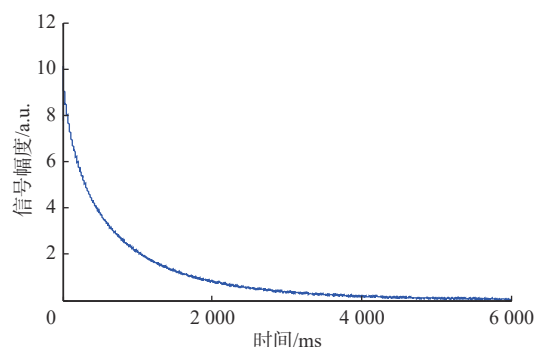


图 5 硫酸铜溶液样品的回波串衰减曲线

Fig.5 Echo attenuation curves in the  $\text{CuSO}_4$  solution sample

表明扫频正确、参数合理,验证了在试验样机制作工艺上采取的压制涡流和“振铃”的做法。

试验样机的回波间隔最小可设定为  $60\ \mu\text{s}$ ,理论上能够探测的横向弛豫时间  $T_2$  达到  $90\ \mu\text{s}$ ,覆盖了非常宽泛的井下流体弛豫时间范围,提高了对  $T_2$  较短的稠油的分辨能力。这一方面受益于探测器具有较高的共振频率,天线上的能量能够快速泻放;另一方面表明选取天线的品质因数  $Q$  值较为合理,在信噪比和回波间隔之间取得了较好的平衡。

### 2.2 流体样品弛豫时间谱试验分析

选取盐水、煤油、白油和水基钻井液(取自胜利油田)等 4 种典型油水样品,考察该试验样机的区分能力。首先测量其 CPMG 回波串,再利用逆 Laplace 正则化反演算法求取横向弛豫时间  $T_2$  分布(见图 6,

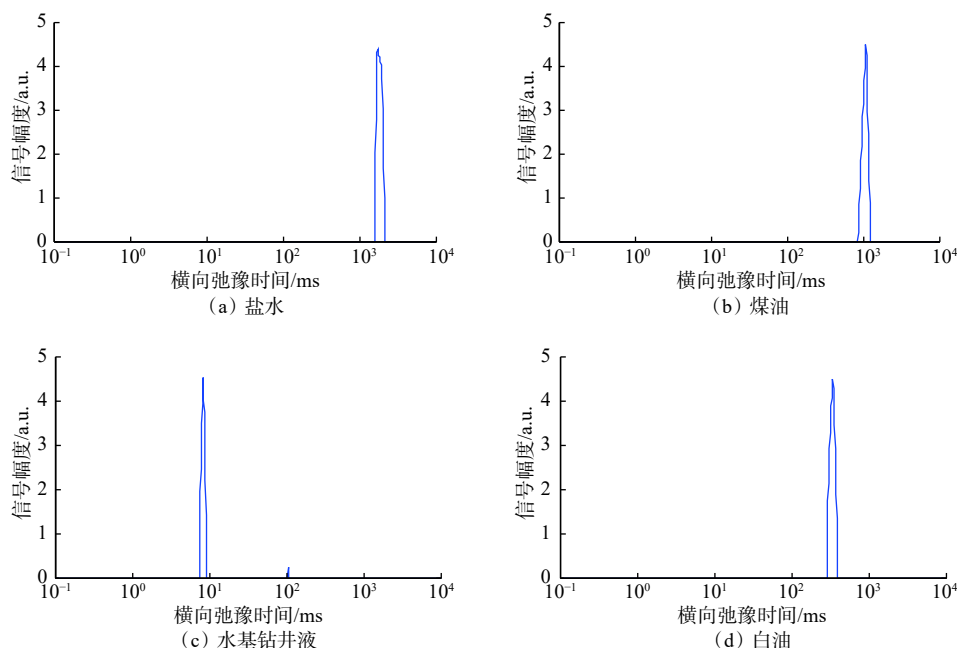


图 6 流体样品及其  $T_2$  谱测量结果

Fig.6 Fluid samples and their  $T_2$  spectrum measurement results



其中横坐标  $T_2$  采用在  $10^{-1} \sim 10^4$  ms 范围内对数平均布点的方式, 纵坐标为不同组分对应的信号幅度)。

孔隙流体的  $T_2$  可表示为:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2\text{bulk}}} + \frac{1}{T_{2\text{surf}}} + \frac{1}{T_{2\text{diff}}} \quad (1)$$

式中:  $T_2$  为横向弛豫时间, ms;  $T_{2\text{bulk}}$  为自由弛豫时间, ms;  $T_{2\text{surf}}$  为表面弛豫时间, ms;  $T_{2\text{diff}}$  为扩散弛豫时间, ms。

从图6可以看出, 盐水、煤油和白油的组分相态相对连续,  $T_2$  谱呈单峰分布。试管中的样品接近理想自由流体状态,  $T_2$  时间主要来自自由弛豫贡献。

计算得到盐水、煤油和白油样品的  $T_2$  分布主峰分别位于 2 000, 1 000 和 350 ms 处, 在各自自由流体弛豫时间  $T_{2\text{bulk}}$  理论范围内。水基钻井液样品取自胜利油田钻井现场, 含有黏土和添加剂。黏土具有非常大的比表面积, 对水具有吸附作用, 使水呈束缚状态, 大大缩短了水的弛豫时间  $T_2$ 。测量结果表明, 水基钻井液的  $T_2$  谱呈双峰分布, 包括 8 ms 处的主信号峰和 100 ms 处的小信号峰, 表明有 2 种  $T_2$  差异较明显的组分。主信号峰 8 ms 位于黏土束缚水范围内, 远小于其他 3 种自由流体的弛豫时间  $T_2$ , 符合分析结果; 小信号峰来自某些含氢元素的微量组分。4 种流体样品的核磁共振  $T_2$  谱信号具有十分明显的特征, 能够互相区分, 因此可以利用  $T_2$  分布与流体黏度等关键参数的对应关系进行井下流体的精细分析和评价。

### 3 结论与建议

1) 根据提出的井下随钻核磁共振流体分析装置设计方案, 设计和研制了小型核磁共振流体分析试验样机, 为构建井下随钻地层流体核磁共振实验室奠定了基础。

2) 研制的核磁共振流体分析装置具有体积小、易便携、磁场强、均匀性高和信噪比高的特点。利用样机进行流体信号质量测试和样品分析, 能够准确区分试验样品流体类型, 测量结果正确可靠, 说明设计方案可行。

3) 形成的核磁共振探测器小型化关键技术解决了检测信息滞后和样品干扰的问题, 为传统地面钻井液录井检测向井下随钻测井发展提供了借鉴。建议继续优化核磁共振探测器尺寸, 形成耐高压技术方案, 并利用多维核磁共振技术进行随钻流体检测先导研究。

### 参考文献

#### References

- [1] 张国栋, 鲁法伟, 陈波, 等. 油基钻井液条件下西湖凹陷低孔低渗储层流体性质随钻快速识别方法 [J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 116-120.  
ZHANG Guodong, LU Fawei, CHEN Bo, et al. A fluid properties while drilling rapid identification method under oil-based drilling fluid conditions for low porosity and low permeability reservoirs in the Xihu Sag[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 116-120.
- [2] 冯永仁, 左有祥, 王健, 等. 地层测试技术及其应用的进展与挑战 [J]. 测井技术, 2019, 43(3): 217-227.  
FENG Yongren, ZUO Youxiang, WANG Jian, et al. Advances and challenges in formation test and practical application[J]. Well Logging Technology, 2019, 43(3): 217-227.
- [3] LEAN J, YING T C, FEY S, et al. Reducing risk and improving efficiency of extended reach drilling through use of sampling while drilling technology[R]. SPE 176126, 2015.
- [4] 杜阳阳, 王燕, 李亚峰, 等. 低孔低渗储层流体性质测录井综合识别方法研究现状与展望 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 571-580.  
DU Yangyang, WANG Yan, LI Yafeng, et al. Research status and outlook of the mud logging and well logging data comprehensive recognition for the low porosity and permeability of the reservoir fluid properties[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 571-580.
- [5] 周义博, 刘卫东, 孙灵辉, 等. 致密油藏水驱可动性研究 [J]. 断块油气田, 2019, 26(2): 244-247.  
ZHOU Yibo, LIU Weidong, SUN Linghui, et al. Research on availability of water flooding in tight oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(2): 244-247.
- [6] 吴保松, 肖立志. 井下核磁共振流体分析实验室及其应用 [J]. 波谱学杂志, 2011, 28(2): 228-236.  
WU Baosong, XIAO Lizhi. Downhole laboratory for nuclear magnetic resonance fluid analysis and its applications[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2011, 28(2): 228-236.
- [7] PRAMMER M G, BOUTON J C, MASAK P. The downhole NMR fluid analyzer[R]. SPWLA 2001-N, 2001.
- [8] PRAMMER M G, BOUTON J C, MASAK P. Magnetic resonance fluid analysis apparatus and method: US23068477[P]. 2002-03-27.
- [9] WU Baosong, XIAO Lizhi, LI Xin, et al. Sensor design and implementation for a downhole nmr fluid analysis laboratory[J]. Petroleum Science, 2012, 9(1): 38-45.
- [10] 吴保松, 肖立志, 刘洛夫, 等. 井下在线核磁共振流体分析实验方法 [J]. 测井技术, 2016, 40(5): 537-540, 555.  
WU Baosong, XIAO Lizhi, LIU Luofu, et al. Measurements for on-line down-hole NMR fluid analyzer[J]. Well Logging Technology, 2016, 40(5): 537-540, 555.
- [11] 陈伟梁. 井下核磁共振流体分析系统优化与快速测量方法及应用研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.  
CHEN Weiliang. Study on probe optimization and rapid measurement method and application for downhole NMR fluid analyzer[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [12] RAICH H, BLÜMLER P. Design and construction of a dipolar Halbach array with a homogeneous field from identical bar magnets: NMR Mandhalas[J]. Concepts in Magnetic Resonance: Part B, 2004, 23B(1): 16-25.