

核磁共振测井的预极化分析与优化

李 新^{1,2}, 王志战¹, 李三国¹, 肖立志²

(1. 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院, 北京 100101; 2. 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:分析核磁共振预极化的必要性与设计原理,针对现有预极化方法不能兼顾较大 T_1 范围与极化效率的问题,提出一种基于过极化、欠极化和调理磁场的分级快速预极化改进方法。利用 Bloch 极化方程,在特定运动速度与 T_1 范围条件下完成预极化场的优化设计。结果表明,该方法不但可以有效节省核磁共振运动测量过程中的极化时间,而且具有适用 T_1 范围广的优势,能够为核磁共振测井传感器与脉冲序列设计提供新的思路 and 重要依据。

关键词:核磁共振测井; 运动测量; 预极化; Bloch 方程

中图分类号:P 613.83

文献标志码:A

引用格式:李新, 王志战, 李三国, 等. 核磁共振测井的预极化分析与优化[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014,38(5):75-81.

LI Xin, WANG Zhizhan, LI Sanguo, et al. Analysis and optimization of pre-polarization methodology for NMR logging[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(5):75-81.

Analysis and optimization of pre-polarization methodology for NMR logging

LI Xin^{1,2}, WANG Zhizhan¹, LI Sanguo¹, XIAO Lizhi²

(1. SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China;

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

Abstract: The requirement for NMR measurement in moving state is an essential feature of NMR techniques in highly time-constrained conditions, such as NMR logging, downhole and on-line NMR analysis. It's of significance to introduce pre-polarization to shorten the waiting time, then to increase measurement efficiency in these NMR applications. The theoretical mechanism and design principle of NMR pre-polarization were discussed. Based on existing pre-polarization schemes, a fast three-step pre-polarization technique was proposed. The static B_0 fields for pre-polarization consist of an over-polarization field, an under-polarization field and a field for adjustment. By employing a numerical simulation procedure based on Bloch equations, the individual fields in this scheme are optimized and improved under a given movement velocity condition. Efficiency and applicability analysis results demonstrate that this new pre-polarization design and its corresponding optimization methodology can improve the waiting time significantly for a wide T_1 components range (0-4.5 s), which can provide insights and supports for new moving NMR logging sensor and pulse sequences design.

Key words: NMR logging; scanning; pre-polarization; Bloch equation

核磁共振测井技术能够准确确定储层孔隙度,在定量评价储层流体特性方面具有独特优势^[1-2]。石油井下作业具有高成本和高风险的特点,核磁共振测井必须采用运动测量模式以满足高时效性的要求^[3-4],这也是核磁共振井下流体分析和在线检测等技术的必备特征^[5]。核磁共振测井是时间(时序)

驱动的^[6-7],要求待测地层进入敏感区域时达到特定极化状态,合理的预极化机制设计是核磁共振测井仪器设计中的关键环节。目前,核磁共振测井预极化主要基于额外预极化磁场。Hürlimann 等提出预极化磁场与探测区磁场强度相等的方法^[8-9]相对简单有效,但预极化效率不高。Prammer 基于加入强

预(过)极化磁体增大信号量的思想^[10]发展出一级强磁场预极化方法提高核磁测井速度^[11-12],这种方法极化效率很高,常针对长 T_1 进行优化设计,但适用流体纵向弛豫时间范围受限。随后 Prammer 等人提出两级预极化方法^[13],在强预极化磁场之后加入一级稳定(欠极化)磁场,将过极化量快速拉近探测区域的目标极化量^[14]。Prammer、Bouton 和 Masak 等人将其应用于核磁共振井下流体分析仪器^[15-17];Wu 等人优化拓宽了其适用 T_1 范围(2~3 s)^[18]。由于地层条件和流体复杂多样,纵向弛豫时间还受到岩石复杂孔隙分布影响,现有方法还存在一定的适用局限性,发展兼顾极化效率和适用宽 T_1 范围地层流体的预极化方法是必然趋势。笔者基于对现有方法的分析,提出一种改进的分级快速预极化方法,利用数值模拟针对特定运动条件进行参数优化。

1 快速预极化原理

核磁共振测井预极化设计的关键在于利用特定磁场组合操控纵向磁化矢量(平行极化静磁场方向)随时间的变化关系。核磁共振测井期间,传感器磁场与被测地层之间发生相对运动,地层流体自旋系统先后经历不同强度的多个磁场区域,这相当于对自旋系统施加时变静磁场。此时,纵向磁化量的变化规律满足下式^[8]:

$$M_z(r, t) = \frac{\chi}{\mu_0} \cdot \frac{1}{T_1} \int_0^{\infty} \exp(-t/T_1) B(r + vt) dt. \quad (1)$$

式中, M_z 为纵向磁化量; r 为自旋位置; t 为极化时间; χ 为磁化率; μ_0 为真空中的磁导率; T_1 为纵向弛豫时间; v 为测井速度(方向垂直静磁场方向,此处用标量简化表示)。

核磁共振敏感区与传感器的相对位置是固定的,预极化磁场组合对地层的极化作用存在时间先后顺序,可按阶段依次考虑。当自旋系统处于不随时间变化的单一静磁场中时,根据 Bloch 方程^[19-20],高能态原子核通过向周围分子释放能量,跃迁到低能态,纵向磁化量 M_z 逐渐增加达到热平衡值 M_0 ,其变化规律符合 $M_z(t)/M_0 = 1 - \exp(-t/T_1)$;当撤销热平衡系统的磁场时,低能态原子核从周围分子吸收能量跃迁到高能态,其衰减变化规律符合 $M_z(t)/M_0 = \exp(-t/T_1)$,如图1所示。计算自旋从一个磁场进入另一个磁场时这两种机制同时作用,其极化量随时间变化同时受两个磁场特性控制。

核磁共振测井预极化优化原则为:当自旋完成预极化后、即将进行核磁共振测量的时刻满足以下

条件:①极化量与探测区域相等或尽量接近;②对较宽范围 T_1 弛豫组分均有较好极化效果;③预极化期间的极化时间(运动长度)尽量短。

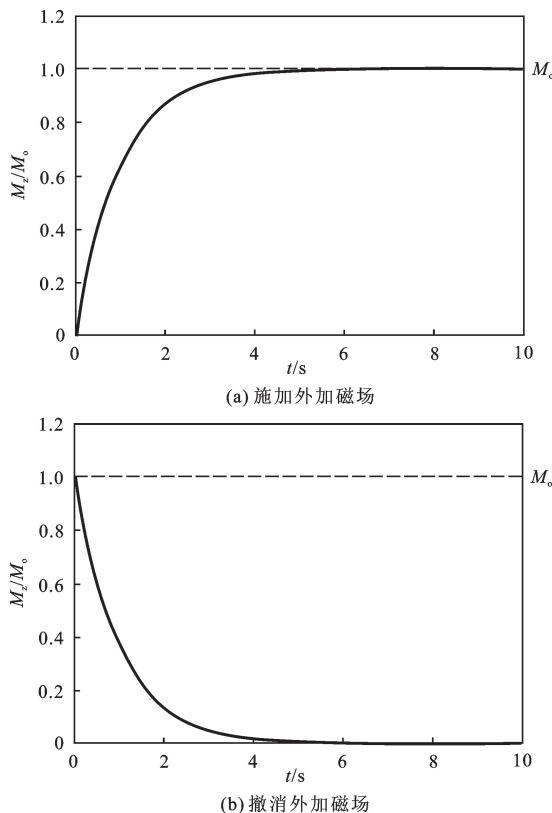


图1 施加和撤消外加磁场时的磁化量变化规律

Fig. 1 Magnetization evolution when a B_0 field is applied or removed

2 现有预极化方法分析

2.1 探测磁场延长极化方法

预极化磁场强度与探测区磁场相等的方法简单明了(图2(a))^[8-9],能够适应很高的运动速度。根据 Bloch 方程可知,此时欲达到 $M_z(t)/M_0$ 的极化率所需时间 $t = -T_1 \ln(M_z(t)/M_0)$ 。预极化磁场长度 L_{pre} 主要由地层 T_1 、运动速度 v 和目标极化程度 $M_z(t)/M_0$ 决定, $L_{pre} = -vT_1 \ln(M_z(t)/M_0)$ 。

地层流体的 T_1 范围分布较宽,原油的 T_1 组分可达4.5 s,此时达到99.33%的极化率所需极化时间 $t = 5T_1 = 22.5$ s, $L_{pre} = 66.7$ cm($v = 3$ cm/s)。这种传统方法的优点在于所有 T_1 组分的磁化量上限均为 M_0 ,预极化磁场调整参数只有 L_{pre} 一项;其不足之处在于磁体利用率较低,预极化时间过长。

2.2 差异化磁场预极化方法

2.2.1 强磁场一级预极化

强磁场一级预极化是指在探测区域之前利用一

级强磁场快速提升磁化量以实现预极化^[15-17](图2(b))。这种预极化模式下,待测地层经过预极化磁场作用后、即将进入探测区域时刻的极化率为

$$\frac{M_z(t)}{M_0} = \frac{B_{\text{pre}}}{B_0} (1 - \exp(-t/T_1)). \quad (2)$$

式中, B_0 为探测区磁场强度; B_{pre} 为预极化磁场强度, $B_{\text{pre}} > B_0$ 。

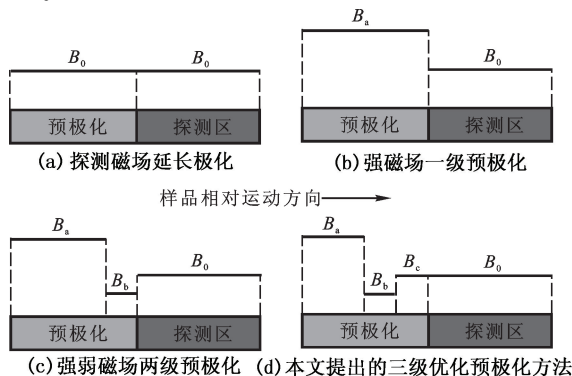


图2 核磁共振测井的预极化方法示意图

Fig. 2 Diagram of pre-polarization methods for NMR logging

优化时,将式(2)整理得到 $t = -\ln(1 - (M_z(t)/M_0)B_0/B_{\text{pre}})T_1$, 给定极化程度 $M_z(t)/M_0$ 、 T_1 和磁场相对数值即可得所需预极化时间。通常, B_{pre} 取 2.0 ~ 2.5 倍 B_0 , 若取 $B_{\text{pre}} = 2.17B_0$ 、 $T_1 = 4.5$ s, 则极化程度达到 99.33% 时所需极化时间 $t = 2.75$ s。可见, 这种方法对长 T_1 时间组分极化效率很高。其不足在于式(2)决定了此时的极化时间与 T_1 一一对应, 因此只能针对单一或较窄 T_1 组分优化, 当 T_1 弛豫分布较宽时适应性不好。

2.2.2 强弱磁场两级式预极化

在上述强预极化磁场与探测磁场区域之间再加入一级强度相对弱于探测区域的稳定(欠极化)磁场^[13]形成两级预极化方法(图2(c)), 将过极化量快速拉低靠近探测区域的目标极化量^[14], 扩展了适用的纵向弛豫范围^[18]。自旋在过极化磁场 B_a 中经历时间 t_a 的极化后, 再进入欠极化磁场 B_b 经历时间 t_b 极化时的极化率为

$$\frac{M_z(t_a + t_b)}{M_0} = \frac{B_a}{B_0} (1 - \exp(-t_a/T_1)) \times \exp(-t_b/T_1) + \frac{B_b}{B_0} (1 - \exp(-t_b/T_1)). \quad (3)$$

因式(3)无法直接求解, 根据长 T_1 组分所需极化时间权重较大的事实, 首先正演长 T_1 组分在两段已知预极化磁场下的极化量分布, 再按照极化目标值确定磁场最优组合。相对于一级预极化方法, 这

种方法的适用范围有所拓宽。然而, 由于短 T_1 组分的极化量对磁场变化非常敏感, 致使预极化结束时刻的短弛豫组分极化量完全由第二级欠极化磁场决定, 仍无法完全满足地层流体 T_1 分布范围(尤其是短弛豫组分)的预极化要求。

3 新型分级预极化方法的数值分析与优化

3.1 新型预极化方法描述

提出一种三级预极化改进方法。沿仪器相对运动方向的三级阶梯状预极化磁场分别为过极化场 B_a 、欠极化场 B_b 和调理极化场 B_c , 三者磁场强度设计具有一定差异 ($B_a > B_c > B_b$), 如图2(d)所示。快速预极化步骤与磁化量变化规律依次为: ①待测地层进入过极化磁场 B_a , 其磁化量随着时间的增长而增加, 离开 B_a 时刻达到过极化状态; ②待测地层进入欠极化磁场 B_b , 磁化量随着时间的增长而减小, 离开 B_b 时刻降至目标极化量附近; ③待测地层进入调理磁场 B_c , 离开 B_c 时逼近目标极化量(预极化完成); ④待测地层进入目标探测磁场进行激发检测。

当各级磁场强度确定后(不失一般性, 按目标探测磁场强度归一化后的定量数值为 $B_a : B_b : B_c = 2.17 : 0.82 : 1$), 主要优化对象(或可控变量)变为满足最优原则的各级最优极化时间, 这在确定的速度下等价于各级磁场长度(顶端效应可忽略时对应于磁体阵列长度)。首先以地层进入预极化磁场的先后顺序对计算中的物理量做如下定义: ①过极化磁场 B_a 的长度为 L_a , 待测地层离开 B_a 阵瞬间的磁化量 $M_z(t_a)$, 其中 $t_a = L_a/v$; ②待测地层随即进入欠极化磁场 B_b 的长度为 L_b , 离开 B_b 瞬间的磁化量为 $M_z(t_b)$, 其中 $t_b = (L_a + L_b)/v$; ③待测地层随即进入长度为 L_c 的调理磁场 B_c , 离开 B_c 瞬间的磁化量为 $M_z(t_c)$, 其中 $t_c = (L_a + L_b + L_c)/v$ 。

3.2 差异化分级预极化优化

根据 Bloch 方程可知, 极化时间主要消耗在长 T_1 组分上, 首先针对较长单一 T_1 值将问题简化, 计算地层以特定速度经过 B_a 和 B_b 后的极化量, 得到 L_a 与 L_b 待选组合; 根据地层流体的复杂 T_1 组分范围, 依次深入考察待选组合对不同 T_1 分布范围的适应情况, 基于仿真结果确定最优 L_a 与 L_b 长度; 据分析结果证明引入调理磁场的必要性, 计算复杂 T_1 流体达到特定极化程度所需要的 L_c , 完成三级极化方法优化。

3.2.1 过极化与欠极化磁场优化

根据电缆式核磁共振测井及井下核磁共振流体

分析仪应用需求,模拟分析过程中假定 $v=3\text{ cm/s}$,其他应用领域也可按本文方法扩展。极化时间主要花费在长 T_1 组分,理想单一 $T_1=4\text{ s}$ 的地层经过过极化场 B_a 和欠极化场 B_b 后的磁化矢量 $M_z(t_b)$ 随 L_a 和 L_b 的变化关系如图 3 所示。对于较短的 L_a ,磁化量随 L_b 的增长而增大;对于较长的 L_a ,磁化量随 L_b 的增长而减小。对于任意的 L_b ,磁化量总随 L_a 的变长而增加。为了便于观察,将图 3(a) 结果投影到二维平面得到等势图 3(b),可见引入 L_b 之后则需要更长的 L_a 才能使磁化量达到目标量 1。图 3(b) 中 $M_z(t_b)=1$ 等势线为一条光滑曲线,提取其对应的 L_a 与 L_b 组合为满足要求的待选组合。

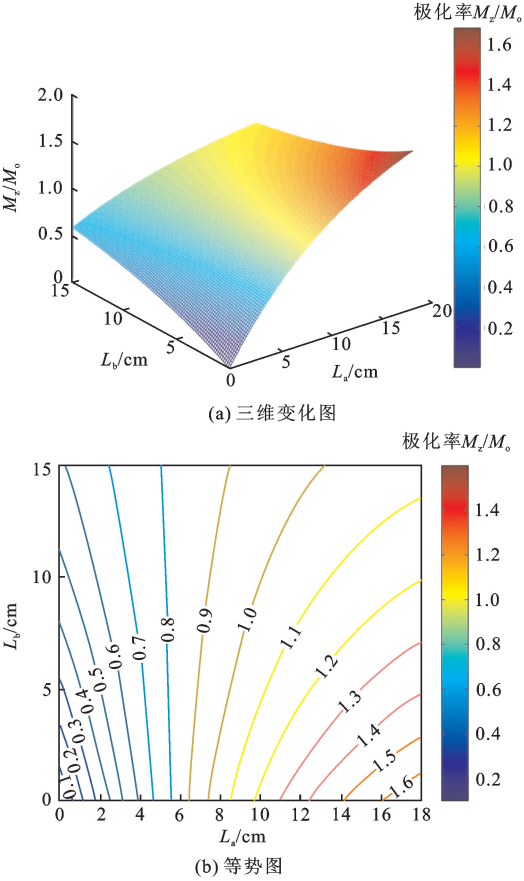


图 3 磁化矢量 $M_z(t_b)$ 随 L_a 和 L_b 的变化规律 ($T_1=4.5\text{ s}$)

Fig. 3 Evolution of $M_z(t_b)$ with respect to L_a and L_b for $T_1=4.5\text{ s}$

地层中的不同流体成分具有不同的 T_1 分布范围。地层水的 T_1 较短、 T_1 分布谱宽范围较窄;纯烷烃、纯油或轻质原油的 T_1 分布都是单峰,而一般原油的弛豫时间分布更为复杂^[21];钻井液滤液的 T_1 范围也较宽^[22]。因此,需要将上述单一 T_1 条件下的计算结果逐步外推,考察对复杂流体组合的适应性。首先将流体 T_1 分布扩展至中等跨度,但仍基本

保持在较长 T_1 范围段 ($2.0\sim4.5\text{ s}$),得到磁化量分布规律如图 4(a) 所示。

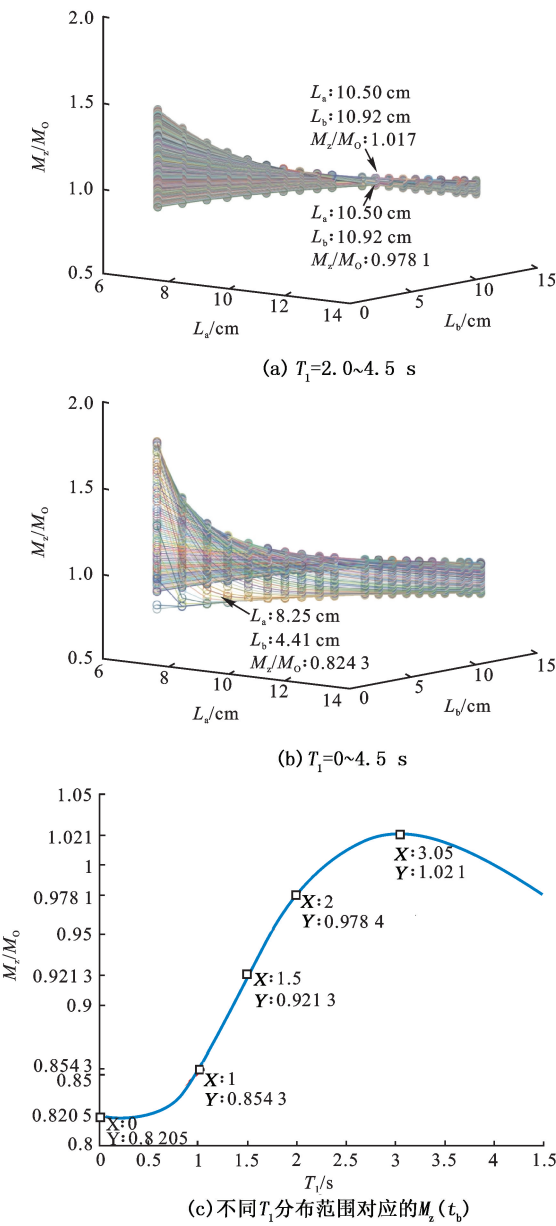


图 4 不同 L_a 和 L_b 组合时的磁化量演化过程

Fig. 4 Evolution of magnetization with respect to L_a and L_b for different T_1

图 4(a) 表明不同 T_1 的地层流体经过 L_a 和 L_b 段时具有不同的极化量,但整体变化存在规律:极化曲线随着 L_a 和 L_b 的增加逐渐聚焦在 ($10.50\text{ cm}, 10.92\text{ cm}$) 附近,这正是引入欠极化磁场的作用特点。在该位置上,不同 T_1 组分的极化量均处于目标值 1 附近 ($97.81\%\sim101.70\%$),达到了较好的预极化效果。据此可确定该位置为此 T_1 分布范围下的最优长度组合 $(L_{aopt}, L_{bopt}) = (10.50\text{ cm}, 10.92\text{ cm})$ 。

考察在上述二级极化最优组合条件下,更短毫

秒级 T_1 短弛豫组分的极化特征。将流体 T_1 范围扩大至 $T_1=0.0 \sim 4.5$ s (理论上无法取得 0 s, 此处表示无需极化时间) 后的极化量变化规律如图 4(b) 所示。此时, 相当大部分短弛豫组分只快速极化至 82.00% 左右, 并一直保持到最后 (图 4(b)), 出现了欠极化现象。图 4(c) 为不同 T_1 对应的 $M_z(t_b)$ 的分布。当 $1.5 < T_1 < 4.5$ s 时, $92.07\% < M_z(t_b) < 102.00\%$; 当 $T_1 < 1$ s 时的 $M_z(t_b)$ 不足 85.37%; 特别是 $T_1 < 0.5$ s 之下组分的极化量只有 82.00%, 相当于欠极化磁场 B_b 单独存在时的效果。这是由于短 T_1 所需极化时间很短、其极化程度易随磁场变化而变化造成的, 证明了引入第三级调理磁场将磁化量逼近期望值的必要性。

3.2.2 调理磁场优化

基于两级预极化场 B_a 和 B_b 的优化结果 (L_{aopt} , L_{bopt}), 设计第三级调理磁场 B_c 。地层流体 T_1 组分为 $0.0 \sim 4.5$ s 时, 磁化量随 L_c 的变化规律如图 5 所示。

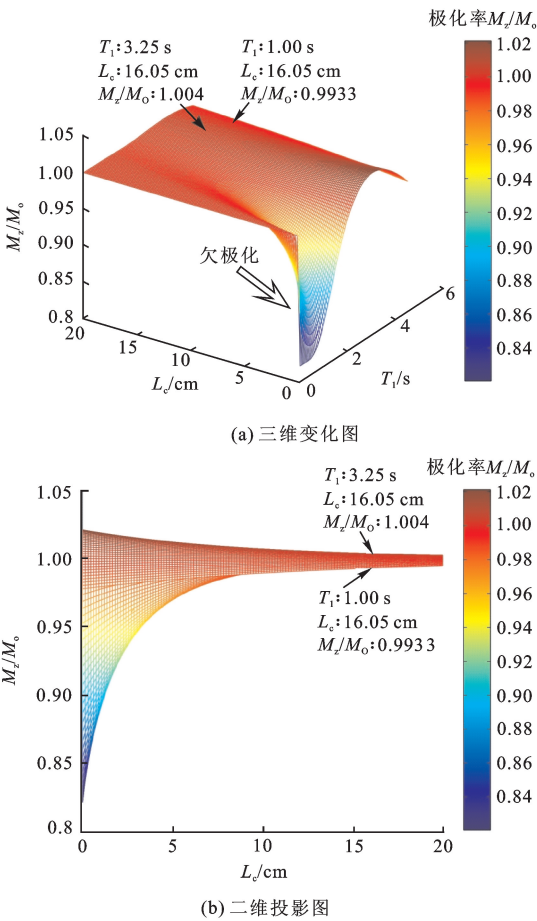


图 5 不同 T_1 的极化量 $M_z(t_c)$ 随 L_c 的变化关系
Fig. 5 Evolution of $M_z(t_c)$ with respect to L_c for different T_1

随着 L_c 的增加, 欠极化和过极化磁化量同时朝着目

标磁化量 1 靠近, 不同 T_1 组分的变化速率虽然有所差异, 但最终都逐渐达到 100% 附近, 引入调理磁场的聚焦效果明显。结果分析发现, 在 $L_c = 16.05$ cm 时, 所有磁化量的分布范围为 99.33% ~ 100.40%, 满足设计要求 (工业标准为 $100 \pm 1\%$)。

综上可知, 基于上述方法和流程对预极化机制进行优化, 确定了三级预极化场 (B_a , B_b , B_c) 的最优长度分别为 (L_{aopt} , L_{bopt} , L_{copt}) = (10.5 cm, 10.92 cm, 16.05 cm)。整个预极化系统总长度为 $L = L_{aopt} + L_{bopt} + L_{copt} = 37.47$ cm。

3.3 整体效果分析

3.3.1 预极化效率分析

单一长 T_1 组分 ($T_1 = 4.5$ s) 以速度 $v = 3$ cm/s 经过整个预极化场系统 (B_a , B_b , B_c) 时, 极化量随极化时间 t 的变化关系如图 6 所示。总预极化时间 $t_c = 12.49$ s 时的极化程度就达到了 99.33%, 如图 6 中 D 点所示。若采用传统延长探测磁场的极化方法, 所需时间长达 22.50 s ($5T_1$), 如图 6 中 A 点所示。优化后效率明显提高, 极化时间可节省 44.49%。

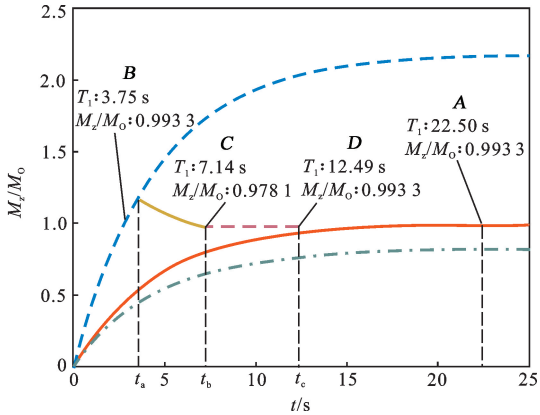


图 6 不同预极化机制的效率对比
Fig. 6 Efficiency comparison among different pre-polarization methods

3.3.2 弛豫时间适用范围分析

将流体组分扩展为 $T_1 = 0.0 \sim 4.5$ s 时的磁化量总体变化规律如图 7 所示。图 7 横坐标分别为极化时间 t 和 T_1 组分。在图 7(a) 三维分布图上, 能够更清晰地看出每个 T_1 组分对应的极化量随极化时间的变化规律。短 T_1 组分对应的极化量随磁场变化非常快, 曲线形态几乎呈直角折线变化。优化后的预极化场组合将所有 T_1 组分的极化量范围控制在 99.33% ~ 100.40% (图 7(b)), 对 $0.0 \sim 4.5$ s 分布范围内的 T_1 组分均有较好的适应性。

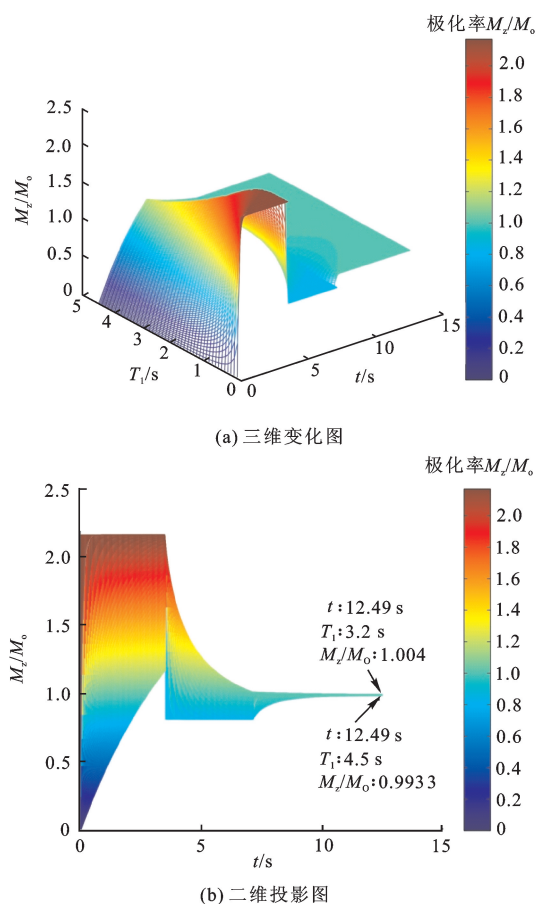


图7 优化后不同 T_1 组分的极化量总体变化规律

Fig.7 Overall evolution of magnetization after optimization for different T_1

4 结 论

(1) 预极化效果与预极化场强和长度有关,合理的预极化机制能够大幅缩短极化时间;不同预极化机制对不同的 T_1 组分有其适用性,应根据应用范围(T_1 长短和分布宽窄)优选方法。

(2) 极化时间主要消耗在长 T_1 组分上,应作为主要优化对象。短弛豫组分的极化过程非常快,主要受末端预极化场控制;差异化分级预极化场的最后一级必须与检测磁场具有相同强度,才能使短弛豫组分聚焦达到预期极化效果。

(3) 提出的改进快速预极化方法兼顾了极化效率与 T_1 范围,结合分级预极化场的参数优化过程,为核磁共振测井传感器和脉冲序列设计提供了新的思路。算例显示, $T_1 = 0 \sim 4.5$ s、 $v = 3$ cm/s 条件下的预极化效率较同样满足(2)要求的探测磁场延长方法提高近一倍,优越性明显。

(4) 极化方法对封闭式(核磁共振井下流体分析仪器)和单边核磁共振系统(电缆和随钻核磁共

振测井仪器)均适用。预极化磁场长度主要由磁体长度决定,工程应用中还应注意考虑具体磁体有限长度的影响。

参考文献:

- [1] COATES G R, XIAO L Z, PRAMMER M G. NMR logging principles and applications [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1999.
- [2] DUNN K J, BERGMAN D J, LATORRACA G A. Nuclear magnetic resonance petrophysical and logging application [M]. New York: Elsevier Science, 2002.
- [3] 刘双惠, 肖立志, 胡法龙, 等. 核磁共振测井地层界面响应特征研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1262-1269.
LIU Shuanghui, XIAO Lizhi, HU Falong, et al. Studies on NMR logging responses at formation boundary [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1262-1269.
- [4] 李新, 肖立志, 黄科, 等. 随钻核磁共振测井的地层界面响应特征[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2862-2869.
LI Xin, XIAO Lizhi, HUANG Ke, et al. Nuclear magnetic resonance logging-while-drilling response at formation boundary [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2862-2869.
- [5] 胡海涛, 肖立志, 吴锡令. 核磁共振测井仪探头设计中的数值方法[J]. 物理学报, 2012, 61(14): 149302.
HU Haitao, XIAO Lizhi, WU Xiling. Numerical method of designing nuclear magnetic resonance logging device sensor [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(14): 149302.
- [6] 李新, 肖立志, 刘化冰, 等. 优化重聚脉冲提高梯度场核磁共振信号强度[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 147602.
LI Xin, XIAO Lizhi, LIU Huabing, et al. Optimization of nuclear magnetic resonance refocusing pulses to enhance signal intensity in gradient B_0 field [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 147602.
- [7] 肖立志. 井下极端条件核磁共振探测系统研制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(5): 44-56.
XIAO Lizhi. Design and implementation of NMR system in downhole extreme conditions [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 44-56.
- [8] HÜRLIMANN M D. NMR logging tool and method for fast logging: United States, 6140818[P]. 2000-10-31.
- [9] MCKEON D, MINH C C, FREEDMAN R, et al. An improved NMR tool design for faster logging [R]. SPWLA 40th Annual Logging Symposium, Paper CC, 1999.

[10] KLEINBERG R L, GRIFFIN D D, FUKUHARA M, et al. Borehole measurement of NMR characteristics of earth formations; United States, 5055787[P]. 1991-10-08.

[11] PRAMMER M G, BOUTON J, CHANDLER R N, et al. A new multiband generation of NMR logging tools [R]. SPE 49011, 1998.

[12] PRAMMER M G, BOUTON J, CHANDLER R N, et al. Theory and operation of a new multi-volume NMR logging system [R]. SPWLA 40th Annual Logging Symposium, Paper DD, 1999.

[13] PRAMMER M G, BOUTON J, MASAK P. Magnetic resonance fluid analysis apparatus and method; United States, 2002/0140425 A1[P]. 2002-10-03.

[14] SEIFERT D J, AKKURT R, AL-DOSSARY S, et al. Nuclear magnetic resonance logging while drilling, wireline, and fluid sampling [R]. SPE 105605, 2007.

[15] PRAMMER M G, J BOUTON, MASAK P. The Downhole NMR fluid analyzer [R]. SPWLA 42th Annual Logging Symposium, Paper N, 2001.

[16] BOUTON J, PRAMMER M G, MASAK P, et al. Assessment of sample contamination by downhole NMR fluid analysis [R]. SPE 71714, 2001.

[17] MASAK P, BOUTON J, PRAMMER M G, et al. The downhole magnetic resonance fluid analyzer [R]. SPWLA 43th Annual Logging Symposium, Paper GGG, 2002.

[18] WU B S, XIAO L Z, LI X, et al. Sensor design and implementation for a downhole NMR fluid analysis laboratory [J]. Petroleum Science, 2012,9:38-45.

[19] BLOCH F. Nuclear induction [J]. Physical Review, 1946,70(7/8):460-474.

[20] BLOCH F, HANSEN W W, PACKARD M. The nuclear induction experiment [J]. Physical Review, 1946,70(7/8):474-485.

[21] BROWN R J S. Proton relaxation in crude oils [J]. Nature, 1961,189(4762):387.

[22] COOLIDGE J E, RITCHIE I, GAMSON B W. NML resolves difficult logging problems [R]. SPWLA 3th Annual Logging Symposium, Paper K, 1962.

(编辑 修荣荣)