

$D-T_2$ 二维核磁共振脉冲序列改进设计及性能对比

吴 飞^{1,2}, 范宜仁^{1,2}, 王 帅³, 邓少贵^{1,2}, 邢东辉^{1,2}, 巫振观^{1,2}, 杨培强⁴

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学 CNPC 测井重点实验室, 山东青岛 266580;
3. 大港油田第五采油厂地质研究所, 天津 300280; 4. 上海纽迈电子科技有限公司, 上海 200333)

摘要:针对现有 $D-T_2$ 二维核磁共振脉冲序列无法兼顾扩散系数测量范围和横向弛豫分辨率的难题,在对比 PFG(脉冲梯度场)、STE-PFG(stimulated echo PFG)、BP-PFG(Bi-polar PFG)、改良式 CPMG(Car-Purcel-Meiboom-Gill)、“扩散编程”、多回波间隔 CPMG 脉冲序列技术特点的基础上,提出一种基于脉冲梯度场的两窗口、双变量 $D-T_2$ 改进脉冲序列。PFG、改良式 CPMG、 $D-T_2$ 改进脉冲序列在气水、油水、稠油模型不同信噪比条件下的正反演数值模拟结果表明, $D-T_2$ 改进脉冲序列达到了平衡扩散系数测量范围和横向弛豫分辨率的设计要求,在非常规油气储层的探测和测井评价中具有广泛应用前景,可为推动 $D-T_2$ 二维核磁共振技术的发展提供有利条件。

关键词:二维核磁共振; 扩散系数; 横向弛豫分辨率; 脉冲梯度场; 双变量; 改进脉冲序列; 数值模拟

中图分类号:P 631.813

文献标志码:A

引用格式:吴飞,范宜仁,王帅,等. $D-T_2$ 二维核磁共振脉冲序列改进设计及性能对比[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(1):50-59.

WU Fei, FAN Yiren, WANG Shuai, et al. An improved design of $D-T_2$ 2D NMR pulse sequence and performance comparison [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(1):50-59.

An improved design of $D-T_2$ 2D NMR pulse sequence and performance comparison

WU Fei^{1,2}, FAN Yiren^{1,2}, WANG Shuai³, DENG Shaogui^{1,2},
XING Donghui^{1,2}, WU Zhenguan^{1,2}, YANG Peiqiang⁴

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. CNPC Key Laboratory for Well Logging in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. Geology Institute of the Fifth Oil Production Plant in Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China;
4. Shanghai Niumai Electronic Technology Company Limited, Shanghai 200333, China)

Abstract: In order to solve the difficulties in $D-T_2$ 2D NMR technology that cannot balance the dynamic range of the diffusion coefficient measurements and the transverse relaxation resolution in practical applications, an improved design of $D-T_2$ 2D NMR pulse sequence, based on two "windows" and bivariate on pulsed filed gradient, was proposed, after summarizing the technical characteristics of PFG (pulsed filed gradient), STE-PFG (stimulated echo pulsed filed gradient), BP-PFG (Bi-polar pulsed filed gradient), modified CPMG (Car-Purcel-Meiboom-Gill), "diffusion editing", and multi echo intervals CPMG pulse sequences. The numerical simulation results of different structural models (gas-water, oil-water and heavy oil-water) under different signal-to-noise ratios show that the modified $D-T_2$ pulse sequence balances the diffusion coefficient measurement range and transverse relaxation resolution successfully. The new pulse sequence has wide applications in the exploration and formation evaluation for unconventional reservoir, and will benefit future development of $D-T_2$ 2D NMR technology.

Keywords: 2D NMR; diffusion coefficient; transverse relaxation resolution; pulsed filed gradient; bivariate; modified pulse sequence; numerical simulation

收稿日期:2014-06-12

基金项目:“十二五”国家油气重大专项(2011ZX05020008-002);国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ170463);国家自然科学基金项目(41174009,41474100)

作者简介:吴飞(1986-),男,博士研究生,研究方向为储层岩石物理实验方法与应用。E-mail:feizai123@126.com。

2002年, Sun等^[14]为弥补一维 T_2 谱油气水信号重叠的短板, 将核磁共振波谱学中的二维核磁共振概念应用到石油测井领域, 开创了以 D - T_2 、 T_1 - T_2 为典型代表的二维核磁共振测井技术^[5]。然而随着勘探对象的日益复杂, 现有的 D - T_2 二维核磁共振技术无法兼顾扩散系数测量范围和横向弛豫分辨率^[6-10]。在对比六种常用 D - T_2 脉冲序列的基础上, 笔者提出一种基于脉冲梯度场的两窗口、双变量 D - T_2 改进脉冲序列, 并构造不同储层流体类型的 D - T_2 分布模型, 结合正反演数值模拟, 对比分析 PFG、改良式 CPMG、 D - T_2 改进脉冲序列对天然气、中等黏度原油、稠油的识别能力, 考察 D - T_2 改进脉冲序列的综合性能。

1 D - T_2 基本原理

由于油、气、水扩散系数存在明显差异 (一般 $D_g > D_w > D_o$), D - T_2 二维分布能够有效区分油、气、水, 如图1所示。当核磁测量的等待时间 T_w 足够长时, 梯度场下自旋回波的幅度可表示为

$$\begin{cases} b(t, X) = \iint f(D, T_2) k_T(t, T_2) k_D(X, D) dD dT_2, \\ k_T(t, T_2) = \exp(-t/T_2), \\ k_D(X, D) = F(X, D, G, t, \dots). \end{cases} \quad (1)$$

式中, b 为回波幅度; T_2 为孔隙流体的固有弛豫 (自由弛豫 + 表面弛豫), 本文中 T_2 如无特殊说明均指固有弛豫; $f(D, T_2)$ 为氢核在 (D, T_2) 二维空间的分布; k_T 为与横向弛豫时间相关的核函数; t 为回波时间; k_D 为与扩散系数相关的核函数; X 为加载扩散弛豫的变量。

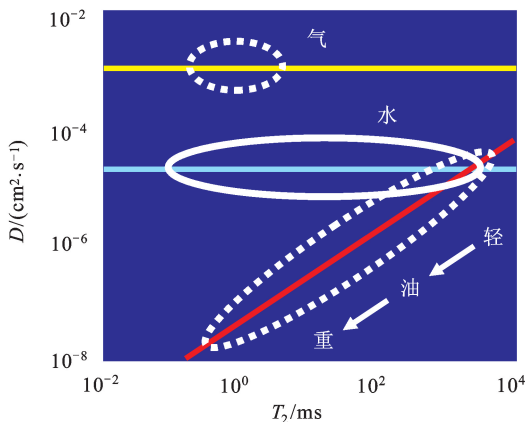


图1 油气水 D - T_2 分布示意图

Fig.1 Petroleum, gas and water D - T_2 distribution diagram

2 D - T_2 脉冲序列改进设计

2.1 D - T_2 脉冲序列发展现状

2.1.1 PFG 脉冲序列

射频场采集时序的第一个窗口持续时间为 t_0 , 在该窗口内 180° 脉冲两侧施加一组对称的脉冲梯度, 用

于加载流体扩散弛豫信息; 第二个窗口用最短回波间隔采集 CPMG 回波串, 采集孔隙流体横向弛豫信息, 如图2(a)所示^[11-12]。PFG 脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left[-\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right) D_p \right] \times \exp \left[-\frac{(i-1)T_E + t_0}{T_{2j}} \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

式中, b_{ik} 表示脉冲梯度为 G_k 时第 i 个回波的幅度; $f(D_p, T_{2j})$ 为扩散系数 D_p 、横向弛豫时间 T_{2j} 对应的孔隙度分量; γ 为氢核的旋磁比; δ 为梯度脉冲持续时间; Δ 为两个梯度脉冲间的间隔; T_E 为后续 CPMG 序列的回波间隔。改变脉冲输出梯度大小, 采集多条 CPMG 回波串, 解谱时将采集的回波串簇利用式(2)联合反演^[13-14], 即可得到储层岩石孔隙流体的 D - T_2 分布, 国产纽迈核磁共振岩心分析仪 MR-DF 的 D - T_2 采集就是采用该序列。

2.1.2 STE-PFG 脉冲序列

将 PFG 脉冲序列的第一个 180° 脉冲替换为两个 90° 脉冲, 对称脉冲梯度施加在第一个和第二个 90° 脉冲、第三个 90° 脉冲和第一个 180° 脉冲之间, 如图2(b)所示^[15]。由于第二个和第三个 90° 脉冲之间的核磁信号衰减为纵向弛豫, 则 STE-PFG 脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^s f(T_{1q}, D_p, T_{2j}) \times \exp \left[-\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right) D_p \right] \exp \left(-\frac{t_1}{T_{1q}} \right) \times \exp \left[-\frac{(i-1)T_E + t_0}{T_{2j}} \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中, $f(T_{1q}, D_p, T_{2j})$ 为纵向弛豫时间 T_{1q} 、扩散系数 D_p 、横向弛豫时间 T_{2j} 对应的孔隙度分量; t_1 为第二个 90° 和第三个 90° 脉冲之间的间隔, 即纵向弛豫的时间; t_0 为第一个窗口中横向弛豫的时间。

当测量对象满足 $T_1 \gg T_2$ 时, 式(3)中的纵向弛豫因子 $\exp(-t_1/T_1) \approx 1$, 此时 STE-PFG 脉冲序列的回波信号衰减可表示为式(2); 改变脉冲输出梯度大小, 采集多条 CPMG 回波串, 解谱时将采集的回波串簇利用式(2)联合反演, 即可得到储层岩石孔隙流体的 D - T_2 分布, 牛津岩心分析仪 GeoSpec2 的 D - T_2 采集就是采用该序列。

当测量对象中含有短弛豫组分 ($T_2 < t_0$) 时, 由式(2)可知, 使用 PFG 脉冲序列时, 梯度作用窗口内短弛豫组分信号衰减过大, 其信号可能湮没在后续 CPMG 回波串的噪声中, 导致 D - T_2 反演谱中短弛豫组分被低估, 甚至缺失; 而 STE-PFG 脉冲序列则克服了这一局限, 通过增大 t_1 、减小 t_0 的方式, 在保证扩散

弛豫信息有效加载的前提下,减小了梯度作用窗口内短弛豫组分的横向弛豫衰减,不过 STE-PFG 的适用条件是 $T_1 \gg T_2$ 。对比式(2)、式(3)可知,在 t_0 、 G 、 δ 相

同时,由于 STE-PFG 增加了持续时间为 t_1 的纵向弛豫窗口,STE-PFG 的扩散弛豫加载时间 Δ 比 PFG 大,因此 STE-PFG 的扩散系数测量范围比 PFG 大。

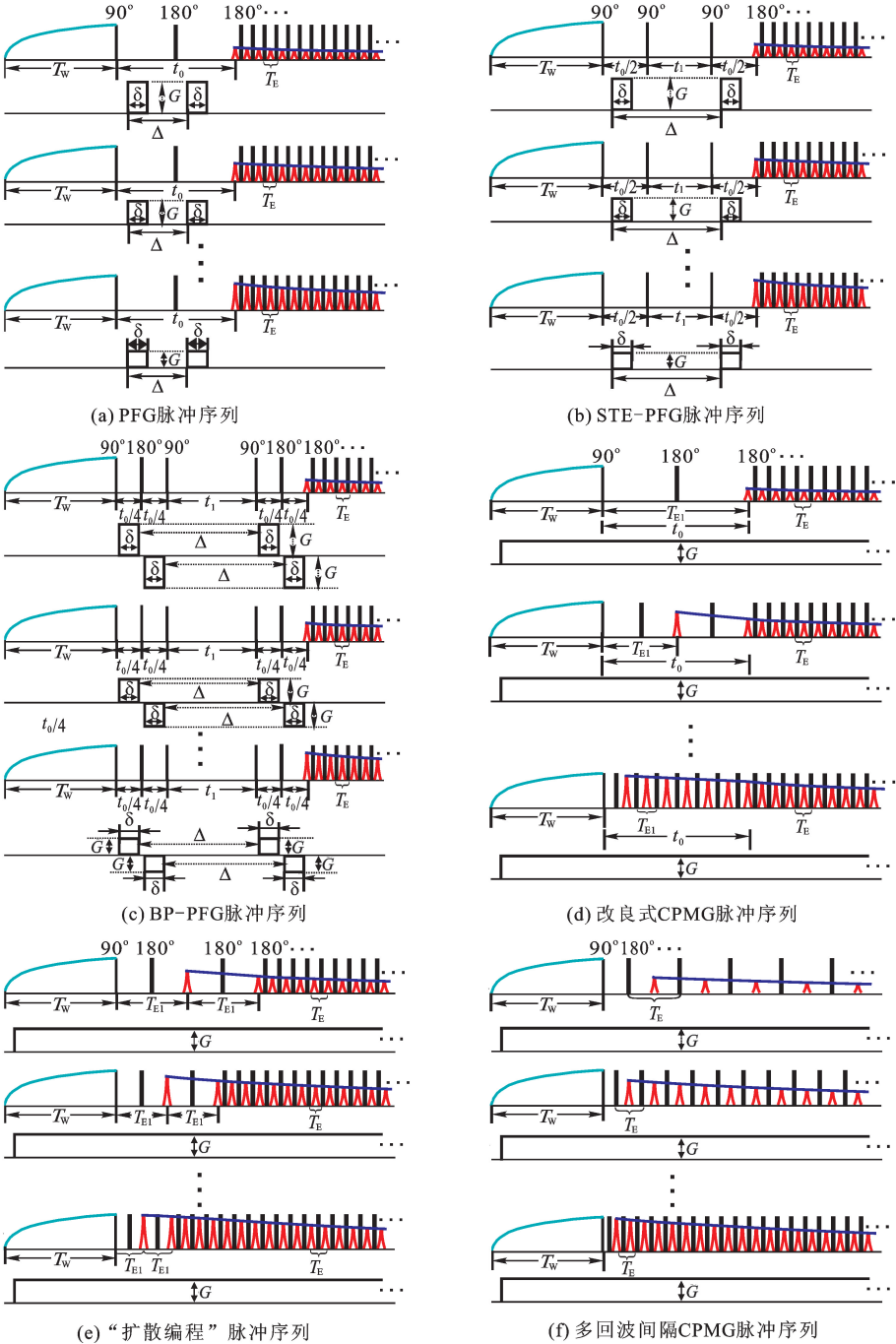


图 2 六种常见 $D-T_2$ 脉冲序列示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of six $D-T_2$ pulse sequences

2. 1. 3 BP-PFG 脉冲序列

在 STE-PFG 脉冲序列基础上,将第一个窗口中横向弛豫的时间进一步划分,脉冲梯度也增加到两对,并且两对梯度脉冲的方向相反,其余的与图 2 (b) 的 STE-PFG 序列相同,如图 2 (c) 所示^[16-18]。曲岩涛等^[19]在自主研制的低场核磁岩心分析仪上

利用 BP-PFG 脉冲序列研究了水驱油过程中的油水分布规律。

BP-PFG 脉冲序列的双梯度设计主要用于克服储层岩石的高内部磁场梯度影响,考虑内部磁场梯度 g_0 时,BP-PFG 脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left[-\frac{(i-1)T_E + t_0}{T_{2j}} \right] \times \exp \left[-4\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{6} - \frac{t_0}{8} \right) D_p \right] \times \exp \left[\frac{-\gamma^2 D_p G_k g_0 \delta t_0 (\delta_1 - \delta_2)}{2} \right] \exp \left(\frac{-\gamma^2 D_p t_0^3 g_0^2}{48} \right),$$

$$i = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中, δ_1 为脉冲梯度距离左侧紧邻扳转脉冲的时间间隔; δ_2 为脉冲梯度距离右侧紧邻扳转脉冲的时间间隔; g_0 为岩石内部磁场梯度。

考虑内部磁场梯度 g_0 时, STE-PFG 脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left[-\frac{(i-1)T_E + t_0}{T_{2j}} \right] \times \exp \left[-\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right) D_p \right] \exp \left\{ -\gamma^2 D_p G_k g_0 \delta \times \left[t_0 \Delta - \frac{2\delta^2}{3} - \delta(\delta_1 + \delta_2) - (\delta_1^2 + \delta_2^2) \right] \right\} \times \exp \left[-\gamma^2 D_p \frac{t_0^2}{4} \left(t_1 + \frac{t_0}{3} \right) g_0^2 \right], i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

对比式(3)~(5)可知,由于内部磁场梯度的作用,回波串幅度衰减增加了两个与 g_0 有关的增强弛豫因子 $E(Gg_0)$ 、 $E(g_0^2)$ 。在 t_0 、 t_1 、 G 、 δ 相同时, BP-PFG 脉冲序列通过设置 $\delta_1 = \delta_2$, 使 $E(Gg_0) = 1$, 与之相对的是, STE-PFG 脉冲序列的 $E(Gg_0) < 1$, 并且 STE-PFG 的 $E(g_0^2)$ 小于 BP-PFG 的 $E(g_0^2)$, 因此 BP-PFG 的双脉冲设计有效降低了岩石内部磁场梯度对 D - T_2 数据采集的影响。

由于 BP-PFG 脉冲序列的独特设计,反演时可忽略内部磁场梯度的影响,其回波幅度为

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left[-\frac{(i-1)T_E + t_0}{T_{2j}} \right] \times \exp \left[-4\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{6} - \frac{t_0}{8} \right) D_p \right], i = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

改变脉冲输出梯度,采集多条 CPMG 回波串,解谱时将采集的回波串簇利用式(6)联合反演,即可得到储层岩石孔隙流体的 D - T_2 分布。

2.1.4 改良式 CPMG 脉冲序列

每条 CPMG 序列在时间轴上分为两个窗口,第一个窗口长度固定为 t_0 ,改变第一个窗口中的回波个数 NE_1 使回波间隔从大变小,加载储层孔隙流体扩散弛豫信息;第二个窗口用仪器的最短回波间隔采集 CPMG 回波信号,将扩散弛豫影响降到最小,采集储层孔隙流体横向弛豫信息,如图 2(d) 所示,该序列最早用于储层岩石内部磁场梯度的研究。恒定梯度场下,改良式 CPMG 脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ik} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left(-\frac{i\gamma^2 G^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^3} \right) \times \exp \left(-\frac{it_0}{NE_{1k}T_{2j}} \right), i = 1, 2, \dots, NE_{1k}; \\ NE_{1k}T_{E1} = t_0 \times \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left(-\frac{\gamma^2 G^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^2} \right) \times \exp \left[-\frac{t_0 + (i - NE_{1k})T_E}{T_{2j}} \right], \\ i = NE_{1k} + 1, NE_{1k} + 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

式中, b_{ik} 代表第一个窗口的回波个数为 NE_{1k} 时第 i 个回波的回波幅度。改变第一个窗口的回波个数,采集多条 CPMG 回波串,解谱时将采集的回波串簇利用式(7)联合反演,即可得到储层岩石孔隙流体的 D - T_2 分布。

2.1.5 “扩散编程”脉冲序列

与改良式 CPMG 序列一样,“扩散编程”脉冲序列在时间轴上也分为两个窗口,不同的是第一个窗口内只包含两个自旋回波,该窗口内的回波间隔从小变大,加载储层孔隙流体扩散弛豫信息;第二个窗口用仪器的最短回波间隔采集 CPMG 回波信号,采集储层孔隙流体横向弛豫信息,如图 2(e) 所示。恒定梯度场下,“脉冲编程”脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ik} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \times \exp \left(-\frac{i}{12}\gamma^2 G^2 T_{E1k}^3 D_p \right) \exp \left(-\frac{iT_{E1k}}{T_{2j}} \right), i = 1, 2; \\ \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left(-\frac{1}{6}\gamma^2 G^2 T_{E1k}^3 D_p \right) \times \exp \left[-\frac{2T_{E1k} + (i-2)T_E}{T_{2j}} \right], i = 3, 4, 5, \dots \end{cases} \quad (8)$$

改变第一个窗口的回波间隔,采集多条 CPMG 回波串,解谱时将采集的回波串簇利用式(8)联合反演,即可得到储层岩石孔隙流体的 D - T_2 分布。MR Scanner 的 D - T_2 二维核磁测井采用“扩散编程”脉冲序列,并取得了不错的应用效果。

2.1.6 多回波间隔 CPMG 脉冲序列

利用常规 CPMG 脉冲序列,无需重新设计脉冲序列,只需改变回波间隔采集多条自旋回波串,如图 2(f) 所示。恒定梯度场下,多回波间隔 CPMG 脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left(-\frac{i}{12}\gamma^2 G^2 T_{E1k}^3 D_p \right) \times \exp \left(-\frac{iT_{E1k}}{T_{2j}} \right), i = 1, 2, 3, \dots \quad (9)$$

变化回波间隔,采集多条 CPMG 回波串,实现 $D-T_2$ 二维数据采集,解谱时将采集的回波串簇利用式(9)联立反演^[20-23],即可得到储层岩石孔隙流体的 $D-T_2$ 分布。MREX 的 PP OIL、PP HEAVY OIL 观测模式、MRIL 新增的四 TE 观测模式均采用多回波间隔 CPMG 脉冲序列,沿用了成熟的 CPMG 序列,降低了 $D-T_2$ 核磁测井仪器的研发成本。

2.2 $D-T_2$ 现有脉冲序列性能对比

上述六种常见 $D-T_2$ 脉冲序列的基本信息及性能对比见表 1。脉冲梯度场得益于高磁场梯度值,

其 $D-T_2$ 脉冲序列具有较大的扩散系数测量范围,但是这类脉冲序列在脉冲梯度作用窗口内没有自旋回波信号,导致其对短弛豫组分的分辨率较低。与之相对的是,恒定梯度场梯度值一般较小,其脉冲序列的扩散弛豫加载能力不如脉冲梯度场,这也是目前核磁共振测井仪器测遇稠油层时 $D-T_2$ 谱中 D 轴产生“拖尾”现象的根源,但是这类脉冲序列在扩散弛豫加载窗口内采集自旋回波信号,或将扩散弛豫信息加载到整条 CPMG 回波串上,因而这类脉冲序列的横向弛豫分辨能力更强。

表 1 六种常见 $D-T_2$ 脉冲序列的基本信息及性能对比

Table 1 Basic information and performance comparison of six $D-T_2$ pulse sequences

序号	序列名称	梯度类型	窗口数目/个	扩散加载窗口是否采集回波	扩散弛豫加载变量	扩散系数测量范围	横向弛豫分辨率
1	PFG	脉冲	2	否	G		
2	STE-PFG	脉冲	2	否	G	2、3	4、5、6
3	BP-PFG	脉冲	2	否	G	√	√
4	改良式 CPMG	恒定	2	是	T_E (1st window)	1	2、3
5	“扩散编程”	恒定	2	是	T_E (1st window)	√	√
6	多回波间隔 CPMG	恒定	1	是	T_E	4、5、6	1

2.3 $D-T_2$ 脉冲序列改进设计

本文中提出一种基于脉冲梯度场的两窗口、双变量 $D-T_2$ 改进脉冲序列,如图 3 所示。

弛豫信息;第二个窗口仍使用仪器最短回波间隔采集 CPMG 回波串,采集储层孔隙流体的横向弛豫信息,并记录第一个窗口的扩散弛豫衰减信息,实现 $D-T_2$ 二维核磁共振数据采集。

由多孔介质核磁共振弛豫理论,可得出图 3 所示 $D-T_2$ 改进脉冲序列的回波幅度为

$$b_{ikq} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{i\gamma^2 G_q^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^3}\right) \times \\ \exp\left(-\frac{it_0}{NE_{1k}T_{2j}}\right), i = 1, 2, \dots, NE_{1k}; \\ NE_{1k}T_{E1} = t_0 \times \\ \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{\gamma^2 G_q^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^2}\right) \times \\ \exp\left[-\frac{t_0 + (i - NE_{1k})T_E}{T_{2j}}\right], \\ i = NE_{1k} + 1, NE_{1k} + 2, \dots. \end{cases} \quad (10)$$

式中, b_{ikq} 代表第一个窗口的回波个数为 NE_{1k} 、脉冲梯度为 G_q 时第 i 个回波的回波幅度; t_0 为第一个窗口的持续时间; T_E 为第二个窗口的回波幅度。改变第一个窗口内的脉冲梯度值和回波间隔,采集多条 CPMG 回波串,解谱时将采集的回波串簇利用式(10)联合反演,即可得到储层孔隙流体的 $D-T_2$ 二维分布。

3 $D-T_2$ 改进脉冲序列性能对比

利用 $D-T_2$ 二维核磁共振正反演数值模拟综合

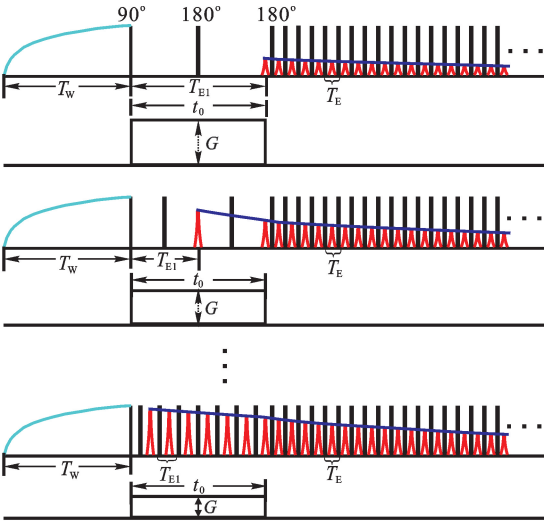


图 3 脉冲梯度场 $D-T_2$ 改进脉冲序列示意图

Fig. 3 Schematic diagram of modified $D-T_2$ pulse sequence on pulsed field gradient

图 3 中 $D-T_2$ 改进脉冲序列的射频采集时序与改良式 CPMG 序列相同,时间轴也分为两个窗口,第一个窗口长度固定为 t_0 ,并在该窗口内采集自旋回波信号,为 $D-T_2$ 反演谱中短弛豫组分 ($T_2 < t_0$) 的有效显示创造条件;不同的是,第一个窗口内的扩散弛豫加载选用脉冲梯度,持续时间 t_0 ,调节第一个窗口内脉冲梯度、回波间隔加载储层孔隙流体的扩散

评估本文中 D - T_2 改进脉冲序列的性能,主要步骤:构建不同储层流体 D - T_2 分布模型,设置采集参数正演 D - T_2 回波数据,回波数据加噪声后使用截断奇异值分解法解谱,对比构造谱与反演谱并计算相对误差。构造气水、油水、稠油 D - T_2 模型,如图 4 所示。对 PFG、改良式 CPMG、 D - T_2 改进脉冲序列进行正反演数值模拟。PFG 脉冲序列基本参数: $G_{\max}=0.8\text{ T/m}$, $G_{\min}=0\%$, $G_{k\max}=100\%$,脉冲梯度最小间隔 1%,

$T_{\text{Emin}}=0.1\text{ ms}$ 。改良式 CPMG 脉冲序列基本参数: $G=0.4\text{ T/m}$, $T_{\text{Emin}}=0.1\text{ ms}$ 。 D - T_2 改进脉冲序列基本参数: $G_{\max}=0.8\text{ T/m}$, $G_{\min}=0\%$, $G_{k\max}=100\%$,脉冲梯度最小间隔 1%, $T_{\text{Emin}}=0.1\text{ ms}$ 。图 4 所示模型的 D - T_2 回波串见图 5,回波数据加噪声后的反演谱见图 6~8 (图中 T_2 谱、 D 谱的黑线是构造谱,红线是反演谱),不同信噪比条件下 D - T_2 反演谱的相对误差及含水饱和度的相对误差见图 9 和图 10。

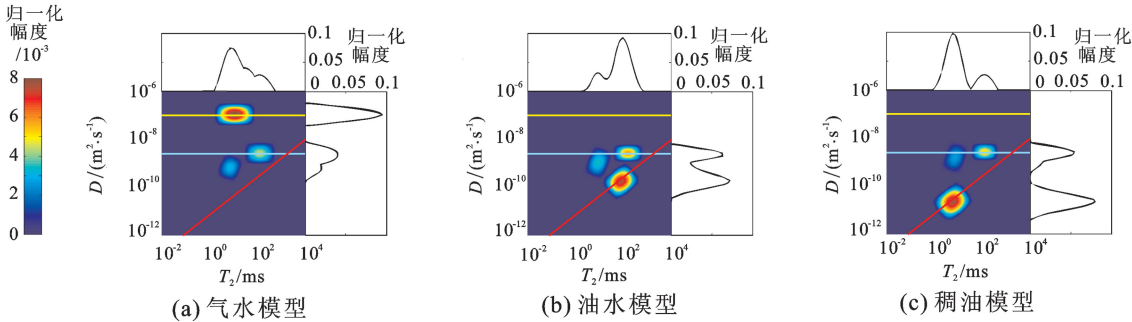


图 4 不同储层流体 D - T_2 构造模型

Fig. 4 D - T_2 structural models of different formation fluid

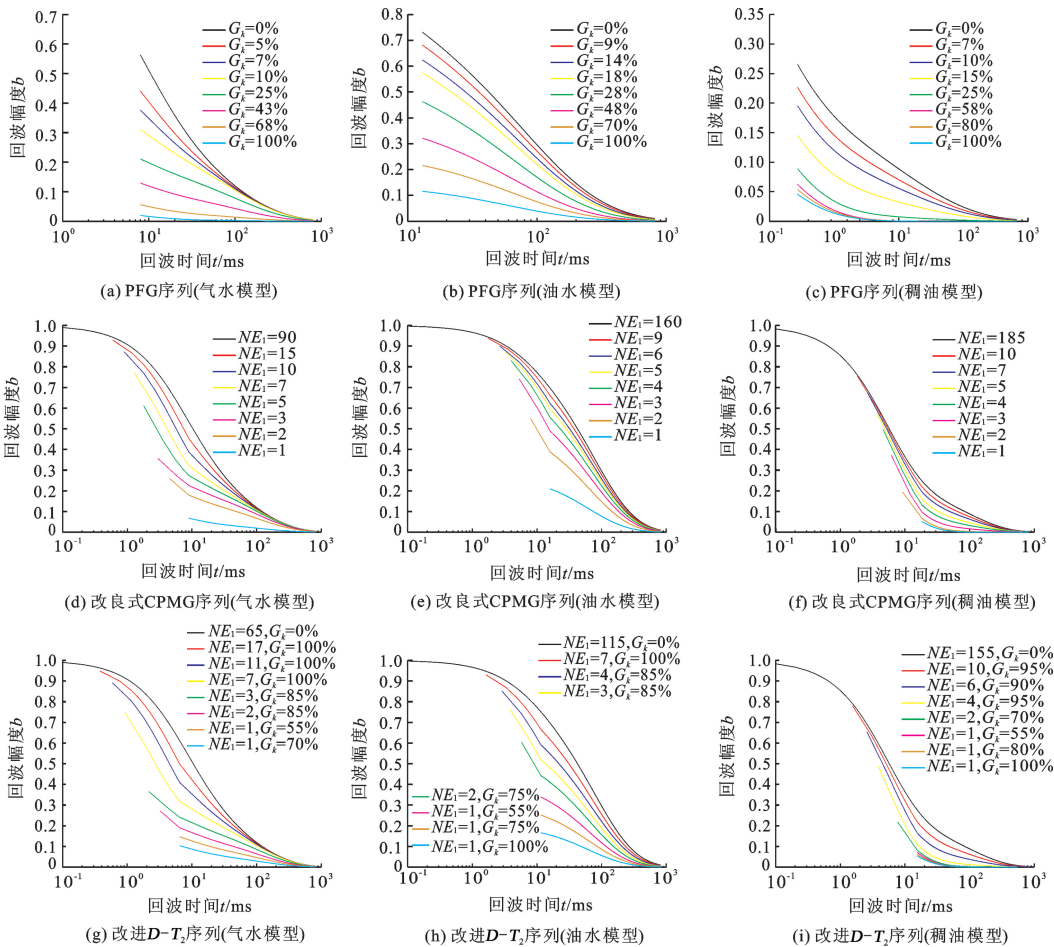


图 5 三种脉冲序列的模拟回波串(无噪声)

Fig. 5 D - T_2 simulated echoes of three D - T_2 pulse sequences ($R_{\text{SN}}=\infty$)

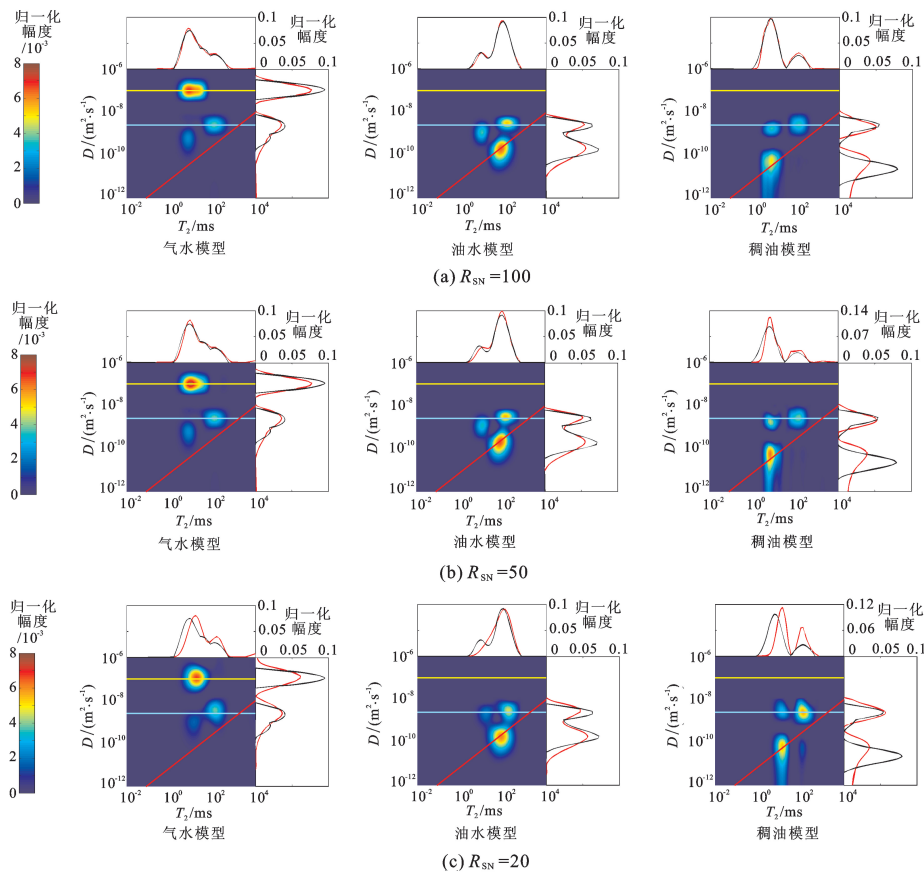


图 6 PFG 脉冲序列 $D-T_2$ 反演谱

Fig. 6 $D-T_2$ inversion spectrums of PFG pulse sequence

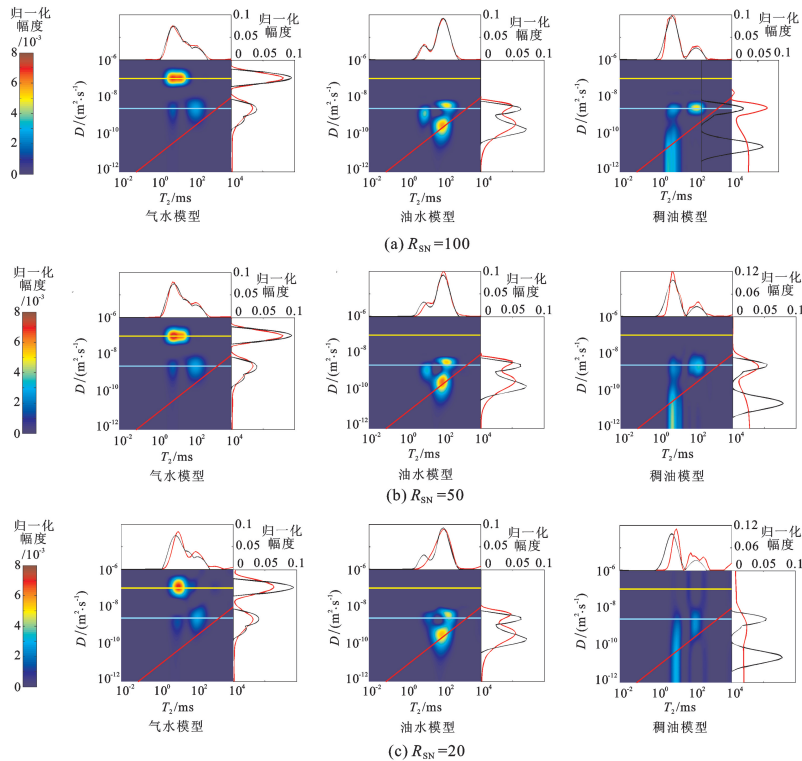


图 7 改良式 CPMG 脉冲序列 $D-T_2$ 反演谱

Fig. 7 $D-T_2$ inversion spectrums of modified CPMG pulse sequence

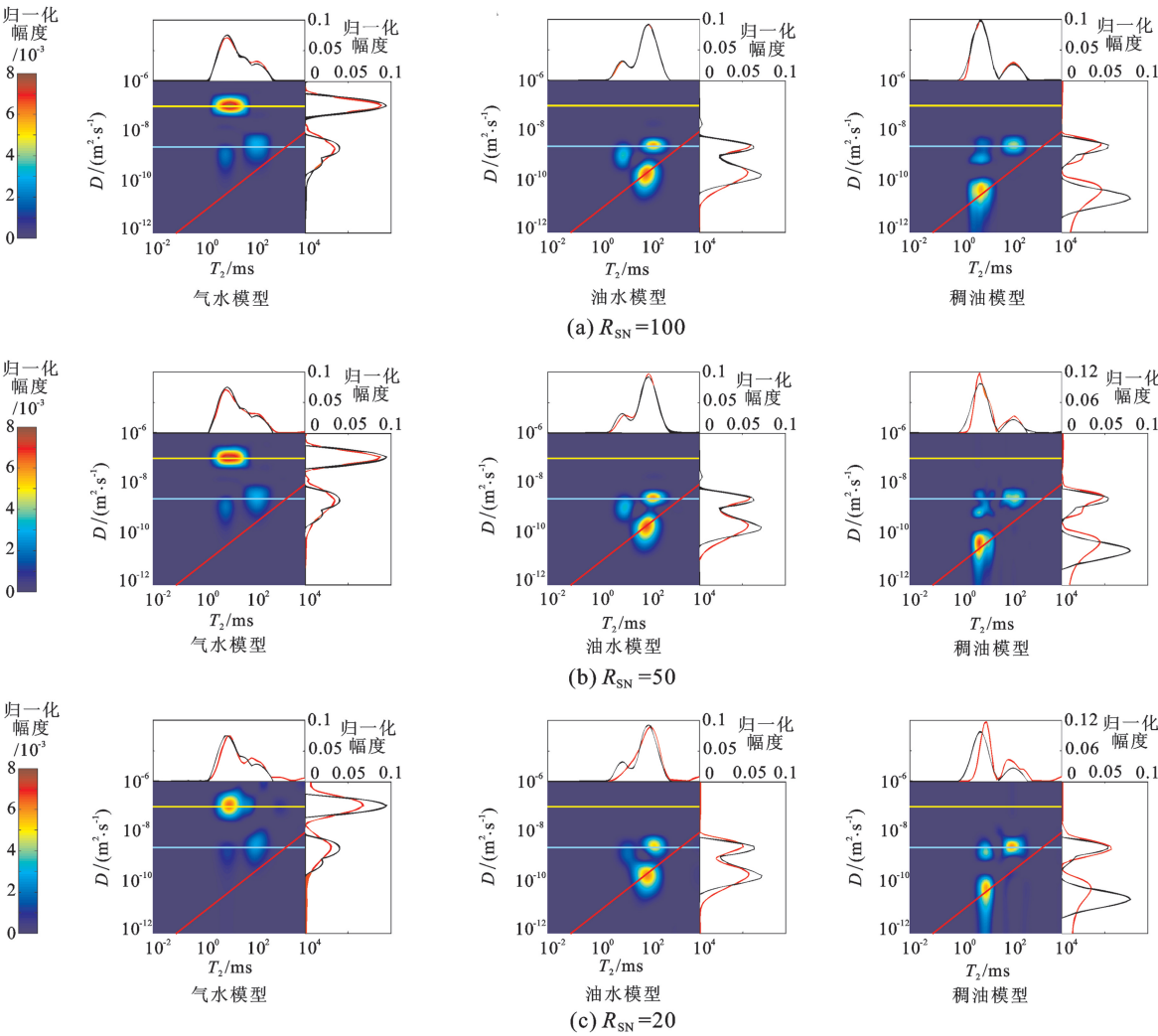


图 8 D - T_2 改进脉冲序列 D - T_2 反演谱

Fig. 8 D - T_2 inversion spectrums of modified D - T_2 pulse sequence

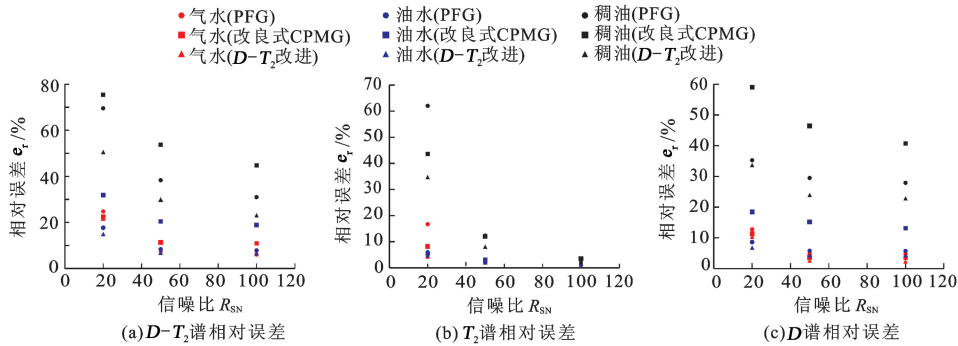


图 9 三种脉冲序列 D - T_2 反演谱的相对误差

Fig. 9 Relative error of inversion spectrums in three pulse sequences

由上述数值模拟结果可知,与改良式 CPMG 脉冲序列相比, D - T_2 改进脉冲序列保持了脉冲梯度场高梯度值的优点,即使流体(天然气、中等黏度原油、稠油)的扩散系数跨越 4 个数量级, D - T_2 改进脉冲序列仍然能够有效识别流体类型,对稠油的识别能力明显优于改良式 CPMG 脉冲序列;与 PFG 脉冲序列相比,

D - T_2 改进脉冲序列保持了恒定梯度场回波采集不间断的优点,其横向弛豫分辨率优于 PFG 脉冲序列;同时, D - T_2 改进脉冲序列的双变量(第一个窗口的脉冲梯度、回波间隔)设计能更好地适应储层岩石孔隙流体性质(扩散系数、横向弛豫时间)的变化。

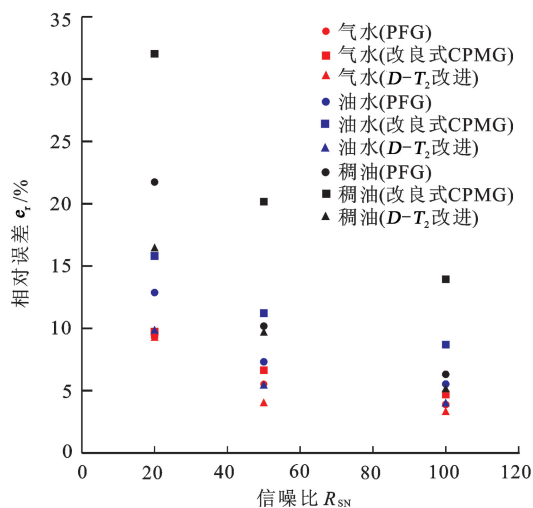


图 10 三种脉冲序列 $D-T_2$ 反演谱含水饱和度相对误差

Fig. 10 Relative error of calculated saturation from inversion spectrums in three pulse sequences

4 结束语

提出一种基于脉冲梯度场的两窗口、双变量 $D-T_2$ 改进脉冲序列。气水模型、油水模型、稠油模型的数值模拟结果初步验证了 $D-T_2$ 改进脉冲序列的可行性;与 PFG、改良式 CPMG 脉冲序列的数值模拟对比结果表明, $D-T_2$ 改进脉冲序列达到了平衡扩散系数测量范围和横向弛豫分辨率的设计目标; $D-T_2$ 改进脉冲序列的双变量设计使采集参数的设置更灵活,能更好地适应储层孔隙流体核磁共振性质的变化,但是双变量设计也增加了 $D-T_2$ 测前设计的工作量及难度,下一步研究重点是借助数值模拟摸索 $D-T_2$ 改进脉冲序列的采集参数调节规律。

参考文献:

- [1] SUN B Q, DUNN K J. Probing the internal field gradients of porous media [J]. Phys Rev E, 2002, 65(5): 051309.
- [2] HURLIMANN M D, VENKATARAMANAN L. Quantitative measurement of two dimensional distribution functions of diffusion and relaxation in grossly inhomogeneous fields [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2002, 157(1): 31-42.
- [3] HURLIMANN M D, VENKATARAMANAN L, FLAUM C. The diffusion-spin relaxation time distribution function as an experimental probe to characterize fluid mixtures in porous media [J]. Journal of Chemical Physics, 2002, 117(22): 10223-10232.
- [4] 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]. Journal of Magnet-

ic Resonance, 2002, 154(2): 261-268.

- [5] 邓克俊. 核磁共振测井理论及应用 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2010: 9-148.
- [6] HURLIMANN M D, FLAUM M, VENKATARAMANAN L, et al. Diffusion-relaxation distribution functions of sedimentary rocks in different saturation states [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2003, 21(3): 305-310.
- [7] SUN B Q, DUNN K J. Two-dimensional nuclear magnetic resonance petrophysics [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2005, 23(2): 259-262.
- [8] 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 Ranhong, XIAO Lizhi. The (T_2 , D) NMR logging method for fluids characterization [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(9): 2410-2418.
- [9] 谭茂金, 邹友龙. (T_2 , D) 二维核磁共振测井混合反演方法与参数影响分析 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 683-692.
- TAN Maojin, ZOU Youlong. A hybrid inversion method of (T_2 , D) 2D NMR logging and observation parameters effects [J]. Chinese Journal Geophysics, 2012, 55(2): 683-629.
- [10] 胡法龙, 周灿灿, 李潮流, 等. 基于弛豫-扩散的二维核磁共振流体识别方法 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 552-558.
- HU Falong, ZHOU C C, LI Chaoliu, et al. Fluid identification method based on 2D diffusion-relaxation NMR [J]. Petroleum Exploration & Development, 2012, 39(5): 552-558.
- [11] STEJSKAL E O, TANNER J E. Spin diffusion measurement: spin echoes in the presence of a time-dependent field gradient [J]. The Journal of Chemical Physics, 1965, 42(1): 288-292.
- [12] STEJSKAL E O. Use of spin echoes in a pulsed magnetic-field gradient to study anisotropic, restricted diffusion and flow [J]. The Journal of Chemical Physics, 1965, 43(10): 3597-3603.
- [13] 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 辑, 2003, 33(4): 323-332.
- WANG Zhongdong, XIAO Lizhi, LIU Tangyan. A new multi-exponential inversion method of NMR relaxation signal and its application [J]. Science in China (Series G), 2003, 33(4): 323-332.
- [14] VENKATARAMANAN L, SONG Y Q, HURLIMANN M D. Solving Fredholm integrals of the first kind with tensor product structure in 2 and 2.5 dimensions [J]. IEEE

- Transactions on Signal Processing, 2002, 50 (5) : 1017-1026.
- [15] TANNER J E. Use of the stimulated echo in NMR diffusion studies [J]. The Journal of Chemical Physics, 1970, 52 (5) : 2523-2526.
- [16] KARLICEK J R F, LOWE I J. A modified pulsed gradient technique for measuring diffusion in the presence of large background gradient[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1980, 37 (1) : 75-91.
- [17] COTTS R M, HOCH M J R, SUN T, MARKERT J T. Pulsed field gradient stimulated echo methods for improved NMR diffusion measurements in heterogeneous systems[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1989, 83 : 252-266.
- [18] VANDUSSCHOTEN D. Flexible PFG NMR desensitized for susceptibility artifacts, using the PFG multiple-spin-echo sequence[J]. Journal of Magnetic Resonance, Series A, 1995, 112 (2) : 237-240.
- [19] 曲岩涛,姜志敏,史京生,等. 水驱油过程的核磁共振二维谱研究[J]. 波谱学杂志, 2012, 29 (1) : 51-59.
- QU Yantao, JIANG Zhimin, SHI Jingsheng, et al. Water flooding studied by measuring NMR two-dimensional distribution function [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2012, 29 (1) : 51-59.
- [20] SUN B Q, DUNN K J. A global inversion method of multi-dimensional NMR logging[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2005, 172 (1) : 152-160.
- [21] 谢然红,肖立志,刘家军,等. 核磁共振多回波串联联合反演方法[J]. 地球物理学报, 2009, 52 (11) : 2913-2919.
- XIE Ranhong, XIAO Lizhi, LIU Jiajun, et al. A method for multiple echo trains jointing inversion of NMR relaxation measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (11) : 2913-2919.
- [22] TAN M J, ZOU Y L, ZHOU C C. A new inversion method for (T_2 , D) 2D NMR logging and fluid typing [J]. Computers & Geosciences, 2013, 51 (2) : 366-380.
- [23] 高阳,肖立志,谢庆明. 基于 BG 理论确定 Phillips 方法的正则化参数并评价反演结果[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38 (3) : 50-56.
- GAO Yang, XIAO Lizhi, XIE Qingming. Evaluating regular parameter of Phillips method and assessing inversions based on BG theory[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38 (3) : 50-56.

(编辑 修荣荣)