

$D$ - $T_2$  二维核磁共振脉冲序列及反演方法改进设计

范宜仁 吴飞 李虎 霍宁宁 王要森 邓少贵 杨培强

A modified design of pulse sequence and inversion method for  $D$ - $T_2$  two-dimensional NMR

Fan Yi-Ren Wu Fei Li Hu Huo Ning-Ning Wang Yao-Sen Deng Shao-Gui Yang Pei-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 099301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.099301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.099301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同荷载水平及速率下超软土水相核磁共振试验研究

Nuclear magnetic resonance test and analysis on water phase of the ultra-soft soil under different load level and rate

物理学报.2014, 63(1): 018202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.018202>

多参数背景场误差模型在散射计资料台风风场反演中的应用

Application of the multi-parameters error model in cyclone wind retrieval with scatterometer data

物理学报.2013, 62(15): 159302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.159302>

核磁共振测井仪探头设计中的数值方法

Numerical method of designing nuclear magnetic resonance logging device sensor

物理学报.2012, 61(14): 149302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.149302>

# $D-T_2$ 二维核磁共振脉冲序列及反演方法改进设计\*

范宜仁<sup>1)2)</sup> 吴飞<sup>1)2)†</sup> 李虎<sup>1)2)</sup> 霍宁宁<sup>1)</sup> 王要森<sup>3)</sup>  
 邓少贵<sup>1)2)</sup> 杨培强<sup>4)</sup>

1)(中国石油大学地球科学与技术学院, 青岛 266580)

2)(中国石油大学 CNPC 测井重点实验室, 青岛 266580)

3)(中海油有限公司深圳分公司研究院, 广州 510240)

4)(上海纽迈电子科技有限公司, 上海 200333)

(2014 年 12 月 1 日收到; 2015 年 1 月 26 日收到修改稿)

面对日益复杂的勘探对象,  $D-T_2$  二维核磁共振技术在实际应用中面临无法兼顾扩散系数测量范围和横向弛豫分辨率的困境. 脉冲序列作为  $D-T_2$  二维核磁共振数据采集的核心技术, 其性能优劣直接影响应用效果, 在综合对比 PFG, STE-PFG, BP-PFG、改良式 CPMG, 扩散编程, 多回波间隔 CPMG 脉冲序列性能的基础上, 有效融合脉冲梯度场、恒定梯度场  $D-T_2$  脉冲序列的优点, 本文提出一种基于脉冲梯度场的双变量、两窗口  $D-T_2$  脉冲序列改进设计. 针对两个窗口的  $D-T_2$  二维核磁共振数据反演, 为突破现有反演方法无法兼顾反演精度和解谱效率的瓶颈, 本着第二个窗口回波信号为主、第一个窗口回波信号为辅的原则, 本文提出一种同时使用两个窗口数据参与解谱的联合 TSVD 反演方法. 气水、油水、稠油、油气水模型不同信噪比条件下的数值模拟结果表明, 本文提供的  $D-T_2$  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, 本文提供的联合 TSVD 反演方法也有效平衡了反演精度要求和解谱效率. 文中的  $D-T_2$  改进脉冲序列及联合 TSVD 反演方法在复杂油气藏流体识别和产能预测中具有广泛的应用前景, 可为促进国内  $D-T_2$  二维核磁共振岩心分析技术的发展提供有利条件.

**关键词:** 脉冲序列, 脉冲梯度场, 双变量, 联合 TSVD 反演方法

**PACS:** 93.90.+y, 82.56.Jn, 93.85.Bc

**DOI:** 10.7498/aps.64.099301

## 1 引言

1946 年, 斯坦福大学的 Bloch 和哈佛大学的 Purcell 发现的核磁共振现象为物理、化学、医学、生物工程及食品等行业开创了一项先进的检测技术和手段, 凭借其快速、无损、无侵入、无毒、只对含氢孔隙流体敏感等优点, 从 20 世纪 50 年代起核磁共振技术被引入石油工业领域, 并被列入重点发展技术<sup>[1,2]</sup>. 20 世纪 90 年代初, 随着脉冲核磁共振测井仪器的研制和商业应用, 核磁共振技术在石油勘探领域迎来快速发展期, 以横向弛豫  $T_2$  谱

为代表的一维核磁共振测井技术在油气储层孔隙度、渗透率、饱和度计算, 孔隙结构评价, 流体识别等方面得到成功应用, 为储层评价和产能预测提供了重要信息<sup>[3-14]</sup>; 然而一维  $T_2$  谱油气水信号重叠的短板限制了其应用效果, 随后发展的差谱法 (DSM)、时域法 (TDA)、移谱法 (SSM)、扩散分析法 (DIFAN)、增强扩散法 (EDM) 等流体识别方法都有适用条件<sup>[15-19]</sup>, 严重影响了一维核磁共振测井技术的应用前景<sup>[20,21]</sup>.

为弥补一维  $T_2$  谱油气水信号重叠的短板, Sun 和 Dunn<sup>[22,23]</sup>, Hürllimann 等<sup>[24-26]</sup>, Song 等<sup>[27]</sup> 首次将核磁共振波谱学中的二维核磁共振概念应用

\* 国家科技重大专项 (批准号: 2011ZX05020008-002)、国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2013YQ170463) 和国家自然科学基金 (批准号: 41174099, 41474100) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: feizai123@126.com

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方法及岩心分析技术, 其中  $T_1$ - $T_2$  主要用于气层识别,  $D$ - $T_2$  油水识别效果优于  $T_1$ - $T_2$ , 因此  $D$ - $T_2$  在现场的应用较多 [28]. 经过多年发展,  $D$ - $T_2$  二维核磁共振技术日趋完善, 拓宽了核磁共振测井的应用范围, 提高了储层测井解释评价精度 [29-38]. 然而随着勘探对象的日益复杂, 现有的  $D$ - $T_2$  二维核磁共振技术遇到无法兼顾扩散系数测量范围和横向弛豫分辨率的瓶颈, 同时现有的  $D$ - $T_2$  解谱方法也面临无法兼顾反演精度和解谱效率的约束, 阻碍了  $D$ - $T_2$  二维核磁共振技术的推广应用. 脉冲序列、数据反演方法是  $D$ - $T_2$  二维核磁共振技术的关键技术, 其性能优劣直接影响  $D$ - $T_2$  应用效果, 因此开展  $D$ - $T_2$  改进脉冲序列设计、 $D$ - $T_2$  反演方法改进等研究, 对进一步提高储层测井解释评价精度、完善  $D$ - $T_2$  二维核磁共振技术在复杂油气藏储层评价中的应用具有重要意义.

本文简述了  $D$ - $T_2$  二维核磁共振基本原理, 对比分析了基于脉冲梯度场的 PFG, STE-PFG, BP-PFG 脉冲序列, 基于恒定梯度场的改良式 CPMG, 扩散编程, 多回波间隔 CPMG 序列的优缺点, 在此基础上提出一种基于脉冲梯度场的双变量、两窗口  $D$ - $T_2$  脉冲序列改进设计. 融合  $D$ - $T_2$  二维反演方法解谱效率高、一维反演方法精度高的优点, 设计了适合  $D$ - $T_2$  改进脉冲序列数据反演的联合 TSVD 解谱方法. 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, 考察了  $D$ - $T_2$  改进脉冲序列及联合 TSVD 反演方法的可行性. 本文的相关研究成果为推动国内  $D$ - $T_2$  二维核磁共振技术的进步提供了理论基础和技术支持.

## 2 $D$ - $T_2$ 基本原理

由孔隙介质核磁共振弛豫理论可知, 孔隙流体的横向弛豫机理包括自由弛豫、表面弛豫、扩散弛豫, 如下式所示:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}}, \quad (1)$$

式中,  $T_2$  是孔隙流体的横向弛豫时间;  $T_{2B}$  是横向自由弛豫时间;  $T_{2S}$  是横向表面弛豫时间;  $T_{2D}$  是横向扩散弛豫时间.

自由弛豫, 也称体弛豫, 是流体本身的核磁共振弛豫性质, 它由流体的物理性质 (黏度、化学成分等) 决定, 同时还受温度、压力等环境因素的影响.

表面弛豫是孔隙中的流体分子与固体颗粒表面不断碰撞造成能量衰减的过程, 其表达式如下式:

$$\frac{1}{T_{2S}} = \rho_2 \frac{S}{V}, \quad (2)$$

式中,  $\rho_2$  是岩石横向表面弛豫强度;  $S/V$  是岩石比表面积.

存在固定磁场梯度时, 分子扩散引起的增强横向弛豫速率称为扩散弛豫, 其表达式如下:

$$\frac{1}{T_{2D}} = \frac{(\gamma GT_E)^2 D}{12}, \quad (3)$$

式中,  $D$  是流体的扩散系数;  $\gamma$  是氢核的旋磁比;  $G$  是磁场梯度;  $T_E$  是 CPMG 脉冲序列的回波间隔.

由于储层孔隙中的多相流体受自由弛豫、表面弛豫、扩散弛豫的综合作用, 一维  $T_2$  谱往往发生重叠, 如图 1 所示. 为了准确识别储层流体类型, 需要引入表征孔隙流体性质的另一个参数形成二维判别法; 为此, 测井分析学家引入了核磁共振波谱学中的二维核磁共振概念, 但研究对象和属性参数不同; 二维核磁共振测井研究的是储层岩石, 属性参数是纵向弛豫时间  $T_1$ 、横向弛豫时间  $T_2$  和流体扩散系数  $D$ , 而不是微观分子的化学位移 [21].

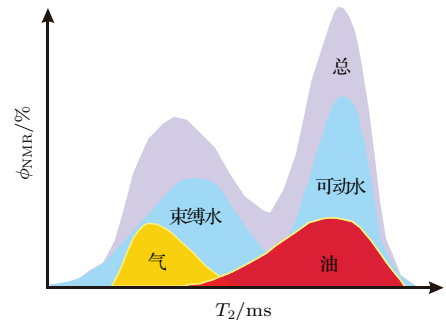


图1 (网刊彩色) 油气水  $T_2$  谱重叠示意图

Fig. 1. (color online)  $T_2$  spectrum overlap diagram of petroleum and water.

得益于油气水扩散系数的明显差异 (一般  $D_g > D_w > D_o$ ),  $D$ - $T_2$  二维分布能够能够有效区分油气水, 如图 2 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

$$b(t, X) = \iiint f(D, T_2) k_T(t, T_2) \times k_D(X, D) dD dT_2, \quad (4)$$

$$k_T(t, T_2) = \exp(-t/T_2),$$

$$k_D(X, D) = F(X, D, G, t, \dots),$$

式中,  $b$  是回波幅度;  $T_2$  是孔隙流体的固有弛豫 (自由弛豫 + 表面弛豫), 文中的  $T_2$  如无特殊说明均指

固有弛豫;  $f(D, T_2)$  是氢核在  $(D, T_2)$  二维空间的分布;  $k_T$  是与横向弛豫时间相关的核函数,  $t$  是回波时间;  $k_D$  是与扩散系数相关的核函数,  $X$  是加载扩散弛豫的变量.

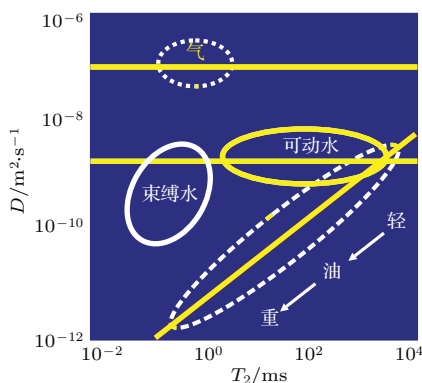


图2 油气水  $DT_2$  分布示意图

Fig. 2.  $D-T_2$  distribution diagram of petroleum and water.

选定梯度磁场类型(脉冲梯度、恒定梯度)后,确定扩散系数加载变量,设计相应的脉冲序列,实现  $D-T_2$  二维核磁共振数据采集,开发对应的解谱方法,就能获取储层孔隙流体的  $D-T_2$  二维分布,用于储层流体识别和饱和度计算.

### 3 $D-T_2$ 脉冲序列分类与对比

$D-T_2$  脉冲序列按照磁场梯度类型可分为脉冲梯度场、恒定梯度场两大类.

脉冲梯度场  $D-T_2$  测量仪器的特点: 用于极化氢核的主磁场是均匀磁场, 使用特制的梯度线圈给样品测试区域施加短时脉冲梯度磁场, 通过变化梯度电流的大小和持续时间调节脉冲梯度输出, 脉冲梯度技术已在高场核磁共振仪器中发展成熟. 脉冲梯度场  $D-T_2$  脉冲序列主要从自扩

散系数测定方法发展演变而来, 其中最传统的是 PFG, STE-PFG 脉冲序列<sup>[39-41]</sup>; 针对特殊用途又在 PFG, STE-PFG 基础上发展了 BP-PFG (Bipolar pulsed filed gradient), MSE-PFG (Multi-spin echo pulsed filed gradient), LED-PFG (Longitudinal eddy decay pulsed filed gradient), DMSE-PFG (Double multi-spin echo pulsed filed gradient) 等脉冲序列<sup>[42-50]</sup>.

恒定梯度场  $D-T_2$  测量仪器的特点: 主磁场是非均匀磁场, 并且梯度大小恒定, 或者在某一测量区域内梯度大小恒定, 如 Halliburton 的核磁共振成像测井仪 MRIL, Baker Atlas 的核磁探测仪 MREX, Schlumberger 的核磁扫描仪 MR Scanner. 恒定梯度场  $D-T_2$  脉冲序列主要包括改良式 CPMG, 扩散编程, 多回波间隔 CPMG 脉冲序列.

为综合对比现有  $D-T_2$  脉冲序列的特点, 本文着重介绍常用的 PFG, STE-PFG, BP-PFG、改良式 CPMG, 扩散编程, 多回波间隔 CPMG 脉冲序列, 这六种  $D-T_2$  脉冲序列的示意图见图 3, 其信息加载和采集示意图见图 4, 其基本信息及性能对比见表 1, 其回波幅度方程见附录.

总体上讲, 得益于高磁场梯度值, 脉冲梯度场  $D-T_2$  脉冲序列具有较大的扩散系数测量范围, 但是该类脉冲序列在梯度作用窗口内没有自旋回波信号, 降低了对短弛豫组分(束缚水, 稠油等)的分辨能力. 与之相对的是, 恒定梯度场梯度值一般较小, 恒定梯度场  $D-T_2$  脉冲序列的扩散弛豫加载能力不如前者, 这也是目前核磁共振测井仪器测遇稠油层(扩散系数小)时  $D-T_2$  二维谱中  $D$  轴产生拖尾现象的根源, 但是该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, 因而该类脉冲序列的横向弛豫分辨能力更胜一筹.

表 1 六种  $D-T_2$  脉冲序列的基本信息及性能对比

Table 1. the basic information and performance comparison of six common used  $D-T_2$  pulse sequences.

序号	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, 3	4, 5, 6
2	STE-PFG	脉冲	2	否	$G$	√	√
3	BP-PFG	脉冲	2	否	$G$	1	2, 3
4	改良式 CPMG	恒定	2	是	$T_E$ (1st window)	√	√
5	扩散编程	恒定	2	是	$T_E$ (1st window)	4,5,6	1
6	多回波间隔 CPMG	恒定	1	是	$T_E$		

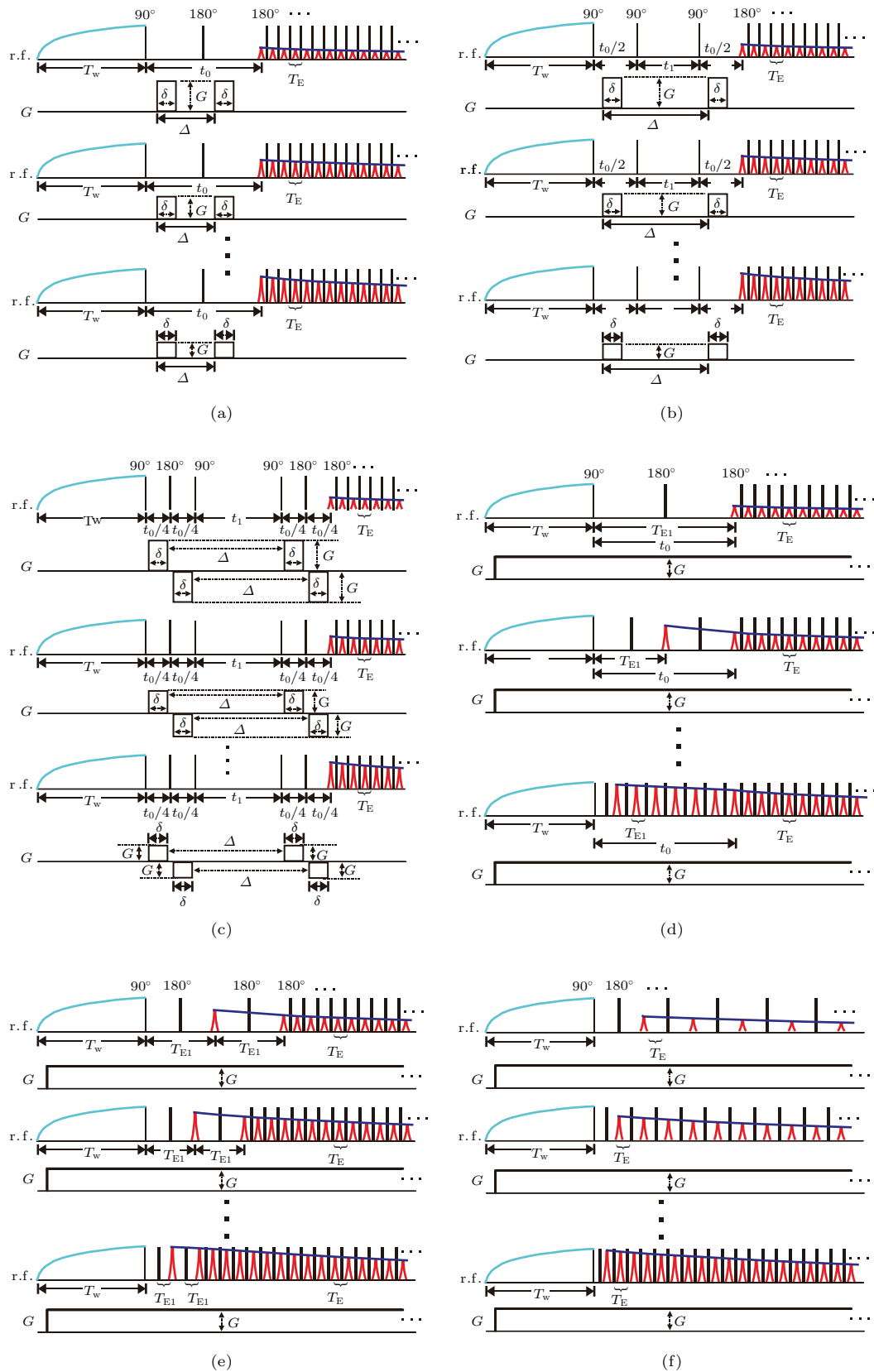


图3 (网刊彩色) 六种常见  $D-T_2$  脉冲序列示意图 (a) PFG 脉冲序列; (b) STE-PFG 脉冲序列; (c) BP-PFG 脉冲序列; (d) 改良式 CPMG 脉冲序列; (e) “扩散编程”脉冲序列; (f) 多回波间隔 CPMG 脉冲序列

Fig. 3. (color online) Schematic diagrams of six common used  $D-T_2$  pulse sequences. (a) PFG pulse sequence; (b) STE-PFG pulse sequence; (c) BP-PFG pulse sequence; (d) modified CPMG pulse sequence; (e) diffusion-editing, pulse sequence; (f) multi-echo interval CPMG pulse sequence.

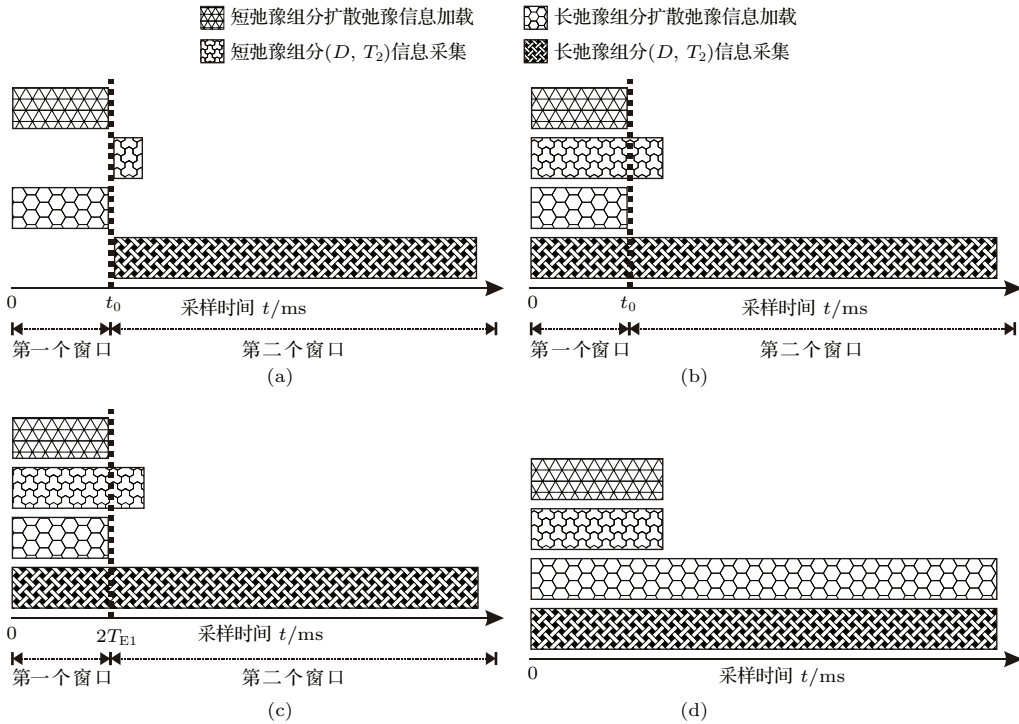


图4 六种常见  $D-T_2$  脉冲序列信息加载和采集示意图 (a) PFG, STE-PFG, BP-PFG 序列; (b) 改良式 CPMG 序列; (c) “扩散编程”序列; (d) 多回波间隔 CPMG 序列  
 Fig. 4. Schematic diagram of information loading and acquisition of six common used  $D-T_2$  pulse sequences. (a) PFG, STE-PFG, BP-PFG pulse sequence; (b) modified CPMG pulse sequence; (c) “diffusion-editing” pulse sequence; (d) multi echo interval CPMG pulse sequence.

### 4 $D-T_2$ 改进脉冲序列

随着国内油气勘探开发的不断深入, 地球物理测井的检测对象越来越广泛, 包括天然气、轻质油、中等黏度原油、稠油、页岩油气、天然气水合物等, 其扩散系数范围为  $10^{-7}—10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ , 横向弛豫时间也从几毫秒变化到数百毫秒。面对如此复杂的测量对象,  $D-T_2$  二维核磁共振脉冲序列必需具备两个特性: 较大的扩散弛豫加载范围, 较高的横向弛豫分辨率。反观目前的  $D-T_2$  脉冲序列, 还没有一种序列能够同时具备上述两个特性, 鉴于此, 本文提出一种基于脉冲梯度场的双变量  $D-T_2$  改进脉冲序列设计, 如图 5 所示。

图 5 所示的  $D-T_2$  改进脉冲序列的射频采集时序与改良式 CPMG 序列 (图 3(d)) 相同, 时间轴分为两个窗口, 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; 与改良式 CPMG 序列不同的是, 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值、回波间隔的双变量加载储层孔隙流体的扩散弛豫信息; 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, 同时将第一个窗口中的扩散衰减记录到第二个窗口采集的回波幅度中, 实现了  $D-T_2$  二维核磁共振数据采集。

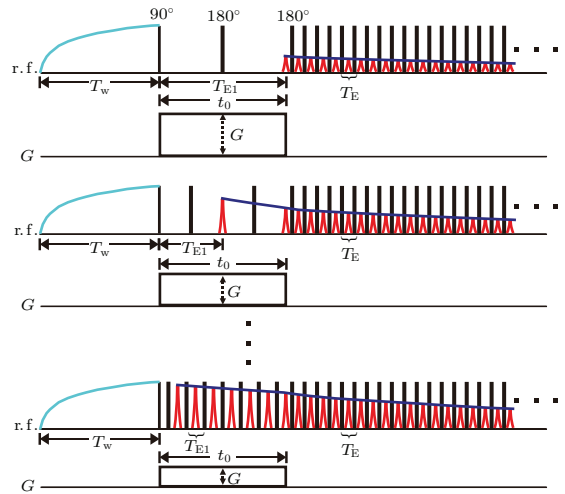


图5 (网刊彩色) 脉冲梯度场  $D-T_2$  改进脉冲序列示意图  
 Fig. 5. (color online) Schematic diagram of modified  $D-T_2$  pulse sequence on pulsed field gradient.

由多孔介质核磁共振弛豫理论, 可推得图 5 所示  $D-T_2$  改进脉冲序列第一个窗口和第二个窗口的回波幅度为

$$b_{ikq} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{i \cdot \gamma^2 G_q^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^3}\right) \exp\left(-\frac{i \cdot t_0}{NE_{1k} \cdot T_{2j}}\right), \\ \quad i = 1, 2, \dots, NE_{1k}; \quad NE_{1k} \cdot T_{E1} = t_0, \\ \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{\gamma^2 G_q^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^2}\right) \exp\left[-\frac{t_0 + (i - NE_{1k}) \cdot T_E}{T_{2j}}\right], \\ \quad i = NE_{1k} + 1, NE_{1k} + 2, \dots, \end{cases} \quad (5)$$

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;  $f(D_p, T_{2j})$  为扩散系数  $D_p$ 、横向弛豫时间  $T_{2j}$  对应的孔隙度分量;  $\gamma$  为氢核的旋磁比;  $t_0$  是第一个窗口的持续时间;  $T_E$  是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 (5) 式联合反演, 即可得到储层岩石孔隙流体的  $D$ - $T_2$  二维分布.

## 5 $D$ - $T_2$ 二维核磁共振联合 TSVD 反演方法

### 5.1 $D$ - $T_2$ 反演方法发展现状

核磁共振数据反演是典型的反问题求解: 基于核磁共振自旋回波响应方程, 代入核磁共振回波串测量数据, 利用相关的数学反演方法求解目标函数的一个最优解, 使拟合回波串与实测回波串的误差最小. 因此,  $D$ - $T_2$  反演就是方程 (4) 的反问题求解, 目标函数是氢核在  $(D, T_2)$  二维空间的分布  $f(D, T_2)$ . 目前,  $D$ - $T_2$  核磁共振数据反演主要分为一维方法和二维方法, 下面针对 PFG, STE-PFG, BP-PFG、改良式 CPMG, 扩散编程, 多回波间隔 CPMG 脉冲序列的数据反演问题, 介绍这两类反演方法.

#### 5.1.1 $D$ - $T_2$ 二维反演方法

PFG, STE-PFG, BP-PFG 脉冲序列借鉴了核磁共振波谱学中分割时间轴的设计思想, 第一个窗口 (梯度作用窗口) 长度固定为  $t_0$ , 消除了反演系数中核函数  $k_T$  和  $k_D$  的耦合关系, 因此方程 (A1), (A5) 可写成矩阵形式

$$B = K_D \cdot F \cdot K_T, \quad (6)$$

式中,  $B$  是  $D$ - $T_2$  实测回波串数据矩阵, 大小是  $r \times s$ ,  $r$  是回波串条数,  $s$  是每条回波串的回波个数;  $K_D$  是  $k_D$  核函数组成的系数矩阵, 大小是  $r \times n$ ,  $n$  是扩散系数  $D$  的布点个数;  $K_T$  是  $k_T$  核函数组成的

系数矩阵, 大小是  $m \times s$ ,  $m$  是横向弛豫时间  $T_2$  的布点个数;  $F$  是目标函数  $f(D, T_2)$  矩阵, 大小是  $n \times m$ .

李新军等<sup>[51]</sup> 提出一种基于迭代 TSVD 的  $D$ - $T_2$  二维反演方法, 其基本原理如下:

将  $K_D$ ,  $K_T$  奇异值分解, 得到

$$\begin{aligned} K_D &= U_{r \times r} \cdot S_{r \times n} \cdot V_{n \times n}^T, \\ K_T &= u_{m \times m} \cdot s_{m \times s} \cdot v_{s \times s}^T, \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $U$ ,  $V$ ,  $u$ ,  $v$  是正交矩阵;  $S$ ,  $s$  是对角矩阵, 并且对角元素从大到小排列.

将  $S$ ,  $s$  的对角元素用测量数据的信噪比 SNR 作截断处理, 得到  $S'$ ,  $s'$ , 则方程 (6) 的解可表示为

$$F = V \cdot S'^{-1} \cdot U^T \cdot B \cdot v \cdot s'^{-1} \cdot u^T. \quad (8)$$

给目标函数  $F$  赋初值, 结合  $F$  的非负约束条件, 利用方程 (8) 迭代求解即可得到测量对象的  $D$ - $T_2$  二维分布  $f(D, T_2)$ .

#### 5.1.2 $D$ - $T_2$ 一维反演方法

改良式 CPMG 脉冲序列, 由 (A6) 式的回波幅度方程可知: 第一个窗口的回波信号, 其反演系数中  $k_T$  和  $k_D$  是耦合关系, 无法用 (6) 式的矩阵表达式; 第二个窗口的回波信号, 其反演系数中  $k_T$  和  $k_D$  的耦合关系消除了, 可以使用 (6) 式的矩阵表达式.

若两个窗口的数据同时参与反演, 其矩阵表达式如下:

$$b = K \cdot f, \quad (9)$$

式中,  $b$  是  $D$ - $T_2$  实测回波信号向量, 大小是  $N \times 1$ ,  $N$  是总回波个数;  $K$  是  $k_D \cdot k_T$  组成的系数矩阵, 大小是  $N \times (n \times m)$ ;  $f$  是目标函数  $f(D, T_2)$  的向量, 大小是  $(n \times m) \times 1$ .

对于方程 (9) 的反演处理技术已经发展成熟, 主要有 TSVD 及其改进算法, 差分进化、遗传算法等智能算法, 各类正则化方法等, 已经在一维核磁共振  $T_2$  谱反演中得到成功应用<sup>[52-59]</sup>, 在  $D$ - $T_2$  数

据反演中也得到拓展应用<sup>[60-64]</sup>, 本文不再赘述; 但是这类一维反演方法在实际处理  $D-T_2$  二维数据时面临提升解谱效率的困扰. 扩散编程和多回波间隔 CPMG 脉冲序列的数据处理方法与改良式 CPMG 脉冲序列类似.

### 5.1.3 $D-T_2$ 反演方法对比

$D-T_2$  二维反演方法和一维反演方法的性能对比主要是解谱效率和反演精度.

举例说明: 改良式 CPMG 序列, 回波串个数 5, 第一个窗口的回波个数 1, 2, 3, 4, 5, 第二个窗口的回波个数 1024, 扩散系数反演布点数 128, 横向弛豫时间布点数 128.

使用一维方法时, 系数矩阵  $K$  的数据个数是: 84131840, 若用单精度浮点存储, 保存这个超大矩阵需要占用系统内存近 0.32 GB, 再加上数据运算占用的缓冲内存, 在单机上完成如此庞大的运算量, 其时间消耗太大; 借助数据压缩技术, 按照特定规律选择部分回波数据参与反演, 虽然可以加快运算速度, 但是测量数据的人为筛选在一定程度上也降低了反演谱精度.

使用二维方法时, 只使用第二个窗口的数据反演, 系数矩阵  $K_D$  的数据个数是 640, 占用内存 2.5 kB, 系数矩阵  $K_T$  的数据个数是 131072, 占用内存 0.5 MB, 单个反演系数矩阵的规模大大缩小, 其与一维反演方法的解谱效率对比高下立判; 不过二维反演方法对第一个窗口数据的人为舍弃降低了反演谱的精度, 当测量对象中  $T_2 < t_0$  的短弛豫组分含量不高时, 这种数据处理方式是可行的, 不过随着勘探对象的复杂化, 这种数据处理方式的实用性将大打折扣.

综上,  $D-T_2$  二维反演方法解谱效率高, 但第一个窗口回波数据的缺失或舍弃影响反演精度;  $D-T_2$  一维方法使用所有回波数据反演, 其精度虽高, 但解谱效率难以与二维方法媲美.

## 5.2 联合 TSVD 反演方法

由 (5) 式可知, 文中  $D-T_2$  改进脉冲序列的数据反演也面临解谱效率和反演精度的抉择难题. 图 6 是  $D-T_2$  改进脉冲序列信息加载和采集示意图, 从图中可知,  $D-T_2$  改进脉冲序列的短弛豫组分 ( $T_2 < t_0$ ) 的信息采集主要集中在第一个窗口内, 若使用二维反演方法只解谱第二个窗口的回波数据, 将导致短弛豫组分含量的低估; 若使用一维反演方

法解谱所有的回波数据, 又无法保证解谱效率. 鉴于此, 本文以 TSVD 方法为整体框架, 提出一种适合  $D-T_2$  改进脉冲序列数据反演的联合 TSVD 反演方法, 其基本原理如下.

由 (5) 式可知,  $D-T_2$  改进脉冲序列第二个窗口回波数据的核函数的耦合关系消除了, 可写成矩阵形式:

$$B_2 = K_D \cdot F \cdot K_T,$$

$$k_D(G, NE_1, D) = \exp\left(-\frac{\gamma^2 G^2 t_0^3 D}{12NE_1^2}\right),$$

$$k_T(i, T_2) = \exp\left[-\frac{t_0 + i \cdot T_E}{T_2}\right], \quad (10)$$

式中,  $B_2$  是第二个窗口的回波信号矩阵, 大小是  $r \times s$ ,  $r$  是回波串条数,  $s$  是每条回波串中第二个窗口的回波个数;  $K_D$  是  $k_D$  核函数组成的系数矩阵, 大小是  $r \times n$ ,  $n$  是扩散系数  $D$  的布点个数, 脉冲梯度  $G$ 、第一个窗口的回波个数  $NE_1$  是扩散弛豫加载变量;  $K_T$  是  $k_T$  核函数组成的系数矩阵, 大小是  $m \times s$ ,  $m$  是横向弛豫时间  $T_2$  的布点个数,  $i$  是回波信号的序号,  $i = 1, 2, 3, \dots, s$ ;  $F$  是目标函数  $f(D, T_2)$  矩阵, 大小是  $n \times m$ .

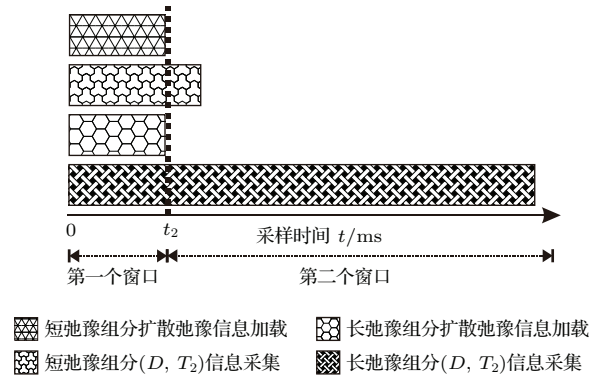


图 6  $D-T_2$  改进脉冲序列信息加载和采集示意图  
Fig. 6. Schematic diagram of information loading and acquisition of modified  $D-T_2$  pulse sequence.

$D-T_2$  改进脉冲序列第一个窗口回波数据的核函数耦合, 其矩阵表示式为

$$B_1 = K \cdot f,$$

$$k(G, NE_1, D, i, T_2) = \exp\left(-\frac{i \cdot \gamma^2 G^2 t_0^3 D}{12NE_1^2}\right) \times \exp\left(-\frac{i \cdot t_0}{NE_1 \cdot T_2}\right), \quad (11)$$

式中,  $B_1$  是第一个窗口的回波信号向量, 大小是  $N \times 1$ ,  $N$  是第一个窗口的总回波个数,  $N =$



$NE_{11} + NE_{12} + \dots + NE_{1r}$ ;  $K$  是耦合核函数  $k$  组成的系数矩阵, 大小是  $N \times (n \times m)$ ,  $i$  是回波信号的序号,  $i = 1, 2, 3, \dots$ ,  $NE_{1k}$ ,  $k$  是回波串的序号,  $k = 1, 2, 3, \dots, r$ ;  $f$  是目标函数  $f(D, T_2)$  的向量, 大小是  $(n \times m) \times 1$ .

由图 6 可知, 第二个窗口回波信号包含的数据多、信息量大, 而且可以用二维反演方法, 计算速度

快; 第一个窗口回波信号只能用一维反演方法, 对短弛豫组分 ( $T_2 < t_0$ ) 的识别很重要, 而且第一个窗口的数据量相对较少, 反演矩阵  $K$  的规模与  $K_T$  大致相当, 计算耗时也不多; 综合考虑两个窗口回波信号的特征, 在第二个窗口回波信号的 TSVD 迭代过程中加入第一个窗口回波信号的反演校正, 形成联合 TSVD 反演方法, 其算法如图 7 所示.

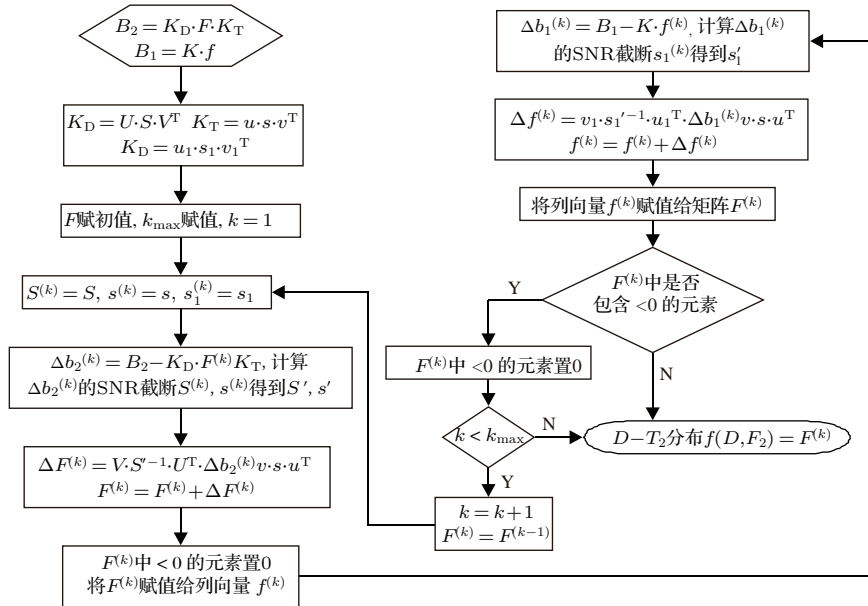


图 7 联合 TSVD 反演算法

Fig. 7. The joint TSVD inversion method.

## 6 数值模拟算例

数值模拟是核磁共振理论研究的常用工具, 在储层核磁共振响应规律、二维核磁共振脉冲序列设计、核磁共振解谱方法开发等研究中发挥着重要作用. 为了验证文中设计的  $D-T_2$  改进脉冲序列及联合 TSVD 反演方法的可行性, 构建气水、油水、稠油、油气水模型 (见表 2, 图 8), 设置采集参

数正演  $D-T_2$  回波串 (见图 9, 模拟参数: 脉冲梯度最大值  $G_{max} = 0.8$  T/m, 第二个窗口的回波间隔 0.1 ms、回波个数 8000 个), 回波数据加噪声后使用联合 TSVD 反演方法解谱 (见图 10, 图中  $T_2$  谱、 $D$  谱的红线是构造谱, 黑线是反演谱), 不同信噪比条件下  $D-T_2$  反演谱与构造谱的相对误差见表 3, 不同信噪比条件下  $D-T_2$  反演谱含水饱和和计算结果见表 4.

表 2 三种不同流体模型的基本参数

Table 2. The basic information of three  $D-T_2$  structural models.

模型类型	油/气峰			束缚水峰			可动水峰		
	$T_{2g}/ms$	$D_g/m^2 \cdot s^{-1}$	$S_o/\%$	$T_{2g}/ms$	$D_g/m^2 \cdot s^{-1}$	$S_{wi}/\%$	$T_{2g}/ms$	$D_g/m^2 \cdot s^{-1}$	$S_{wm}/\%$
气水	21.54	$1.12 \times 10^{-7}$	45.00	8.95	$8.31 \times 10^{-10}$	25.00	155.05	$2.68 \times 10^{-9}$	30.00
油水	64.47	$1.50 \times 10^{-10}$	60.00	11.17	$1.37 \times 10^{-9}$	15.00	193.07	$2.68 \times 10^{-9}$	25.00
稠油	7.20	$2.67 \times 10^{-11}$	50.00	8.96	$1.10 \times 10^{-9}$	20.00	124.52	$2.68 \times 10^{-9}$	30.00
油气水	—	—	60.00	11.15	$1.37 \times 10^{-9}$	15.00	155.05	$2.68 \times 10^{-9}$	25.00

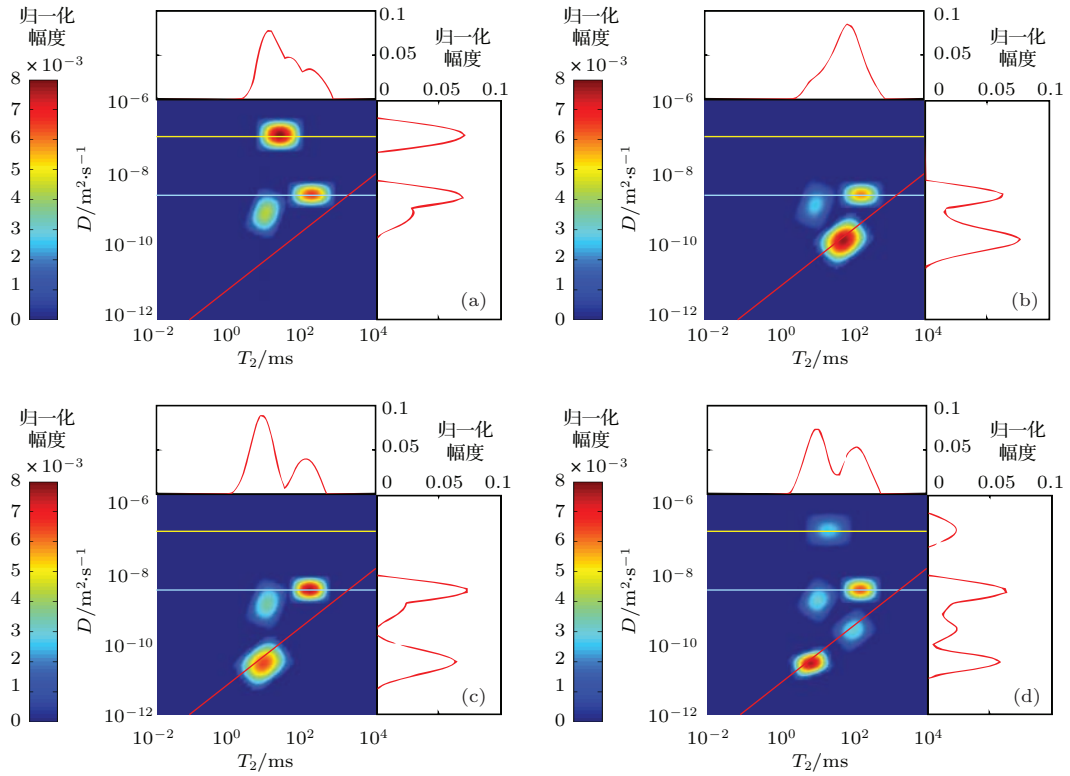


图8 不同储层流体  $D$ - $T_2$  构造模型 (a) 气水模型; (b) 油水模型; (c) 稠油模型; (d) 油气水模型

Fig. 8.  $D$ - $T_2$  structural models of different formation fluid. (a) Gas-water model; (b) Oil-water model; (c) Heavy oil model, (d) Oil-gas-water model.

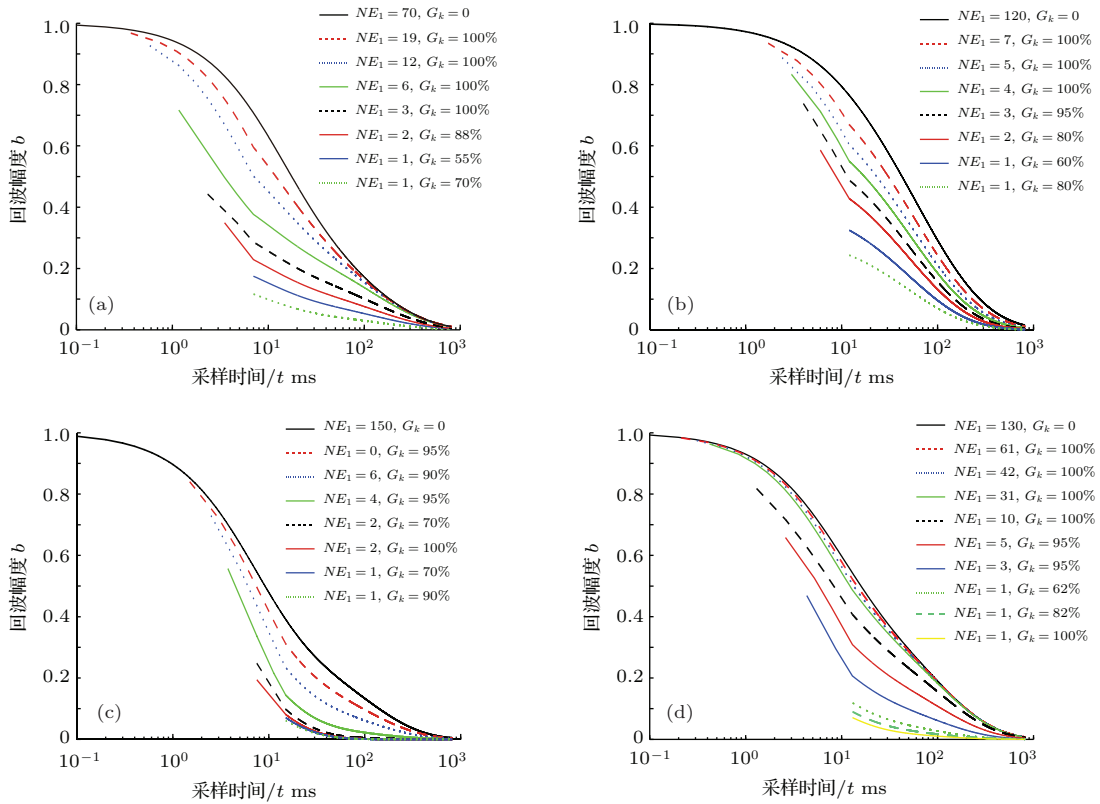


图9  $D$ - $T_2$  模拟回波串 (SNR =  $\infty$ ) (a) 气水模型 ( $t_0 = 7$  ms); (b) 油水模型 ( $t_0 = 12$  ms); (c) 稠油模型 ( $t_0 = 15$  ms); (d) 油气水模型 ( $t_0 = 13$  ms)

Fig. 9.  $D$ - $T_2$  simulated echoes (SNR =  $\infty$ ). (a) Gas-water model ( $t_0 = 7$  ms); (b) Oil-water model ( $t_0 = 12$  ms); (c) Heavy oil model ( $t_0 = 15$  ms); (d) Oil-gas-water model ( $t_0 = 13$  ms).

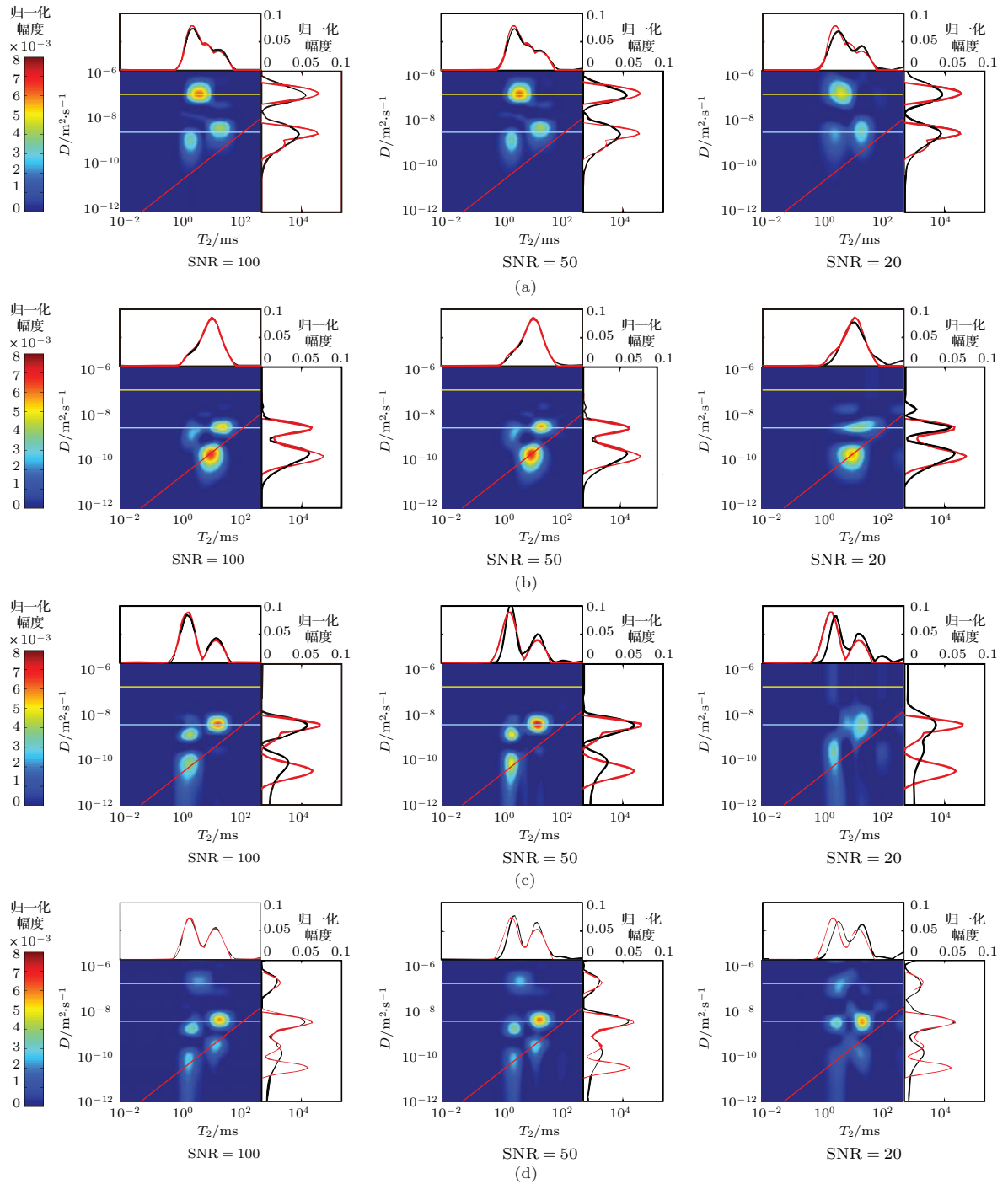


图 10  $D$ - $T_2$  反演谱 (a) 气水模型; (b) 油水模型; (c) 稠油模型; (d) 油气水模型

Fig. 10.  $D$ - $T_2$  inversion distribution. (a) Gas-water model; (b) oil-water model; (c) heavy oil model; (d) oil-gas-water model.

表 3  $D$ - $T_2$  反演谱的相对误差

Table 3. The relative error of  $D$ - $T_2$  inversion distribution.

模型类型	SNR = 100			SNR = 50			SNR = 20		
	$D$ - $T_2$ 谱	$T_2$ 谱	$D$ 谱	$D$ - $T_2$ 谱	$T_2$ 谱	$D$ 谱	$D$ - $T_2$ 谱	$T_2$ 谱	$D$ 谱
气水	11.84	0.28	9.13	12.67	0.58	9.46	28.29	3.27	12.58
油水	7.01	0.10	4.56	7.64	0.19	4.72	19.76	2.96	7.26
稠油	21.00	0.45	20.91	25.85	7.91	22.06	63.94	25.59	45.69
油气水	23.39	0.54	22.60	28.74	7.21	25.48	56.47	25.19	35.83

表4  $D-T_2$  反演谱含水饱和度计算  
Table 4. The calculated water saturation from  $D-T_2$  inversion distribution.

模型类型	$S_w$ 构造 /%	SNR = 100		SNR = 50		SNR = 20	
		$S_w$ 反演 /%	相对误差%	$S_w$ 反演 /%	相对误差%	$S_w$ 反演 /%	相对误差%
气水	55.00	53.72	2.33	53.61	2.53	50.99	7.29
油水	40.00	38.91	2.73	41.48	3.70	37.26	6.85
稠油	50.00	48.75	2.50	52.42	4.84	54.80	9.60
油气水	40.00	38.42	3.95	42.21	5.53	43.89	9.73

综上,即便流体(天然气、中等黏度原油、稠油)的扩散系数跨越4个数量级, $D-T_2$ 改进脉冲序列及联合TSVD反演方法仍然能够有效分辨流体类型;当SNR > 50时, $D-T_2$ 反演谱与构造谱的符合程度较高,而且根据反演谱峰位计算含水饱和度的相对误差 < 5%;当SNR < 50时, $D-T_2$ 反演谱与构造谱的偏差较大,但是根据反演谱峰位计算含水饱和度的相对误差也能控制在10%以内;当流体中含稠油时, $D$ 轴存在一定拖尾现象,但是对流体识别影响不大。

## 7 结 论

1) 现有的PFG, STE-PFG, BP-PFG等基于脉冲梯度场的单变量 $D-T_2$ 脉冲序列的优势是扩散系数测量范围大,不足之处是梯度窗口内不采集回波信号,对短弛豫组分的分辨率低;改良式CPMG,扩散编程,多回波间隔CPMG等基于恒定梯度场的单变量 $D-T_2$ 脉冲序列对短弛豫组分的分辨能力优于前者,但扩散系数测量范围偏小。

2) 面临油气勘探对象日益复杂的挑战,研发扩散系数测量范围广、横向弛豫分辨率高的改进脉冲序列是 $D-T_2$ 二维核磁共振技术的发展趋势。在集成现有技术的基础上,提出一种基于脉冲梯度场的双变量、两窗口 $D-T_2$ 脉冲序列改进设计:高梯度值的脉冲梯度场保证了扩散系数测量范围,在短时持续脉冲梯度窗口内采集CPMG回波,弥补了PFG, STE-PFG, BP-PFG序列梯度作用窗口内没有回波信号的劣势,使之具备了较高的横向弛豫分辨率。

3) 目前两个窗口的 $D-T_2$ 二维核磁共振数据反演主要分为一维方法和二维方法:二维方法解谱效率高,但第一个窗口回波数据的缺失或舍弃降低了反演精度;一维方法使用所有回波数据反演,其精度虽高,但解谱效率难以与二维方法媲美。文中提

供的 $D-T_2$ 二维核磁共振联合TSVD反演方法,本着第二个窗口回波信号为主、第一个窗口回波信号为辅的原则,突破了现有 $D-T_2$ 反演方法无法兼顾解谱效率和反演精度的瓶颈。

4) 气水模型、油水模型、稠油模型、油气水模型的数值模拟结果初步验证了文中设计的 $D-T_2$ 改进脉冲序列及联合TSVD反演方法能够满足复杂油气藏储层测井评价需求,而脉冲梯度、回波间隔(第一个窗口)的双变量设计使 $D-T_2$ 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。

目前本文的研究成果处于理论研究阶段,下一步研究重心是借助数值模拟确定脉冲梯度场最大梯度值、脉冲梯度最大持续时间等仪器关键参数;构造不同储层流体模型,借助数值模拟探索 $D-T_2$ 二维核磁共振改进脉冲序列的采集参数调节规律,为早日实现 $D-T_2$ 二维核磁共振改进技术的推广应用提供更多理论指导和技术支持。

## 附录 A

$D-T_2$  二维核磁共振脉冲序列回波响应方程

1) PFG脉冲序列:射频场采集时序的时间轴分为两个窗口,第一个窗口只有一个自旋回波,持续时间为 $t_0$ ,在该窗口内 $180^\circ$ 脉冲两侧施加一组对称的脉冲梯度,用于加载孔隙流体扩散弛豫信息;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,并且将第一个窗口内的扩散弛豫衰减记录到第二个窗口采集的回波幅度中,为反演获取孔隙流体扩散系数创造条件,如图3(a)所示。

PFG脉冲序列的回波幅度如下式:

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp \left[ -\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left( \Delta - \frac{\delta}{3} \right) D_p \right] \times \exp \left[ -\frac{(i-1) \cdot T_E + t_0}{T_{2j}} \right], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (A1)$$

式中, $b_{ik}$ 代表脉冲梯度为 $G_k$ 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;  $\delta$  为梯度脉冲持续时间;  $\Delta$  为两个梯度脉冲间的间隔;  $T_E$  为后续 CPMG 序列的回波间隔;  $t_0$  为梯度窗口长度. 改变脉冲输出梯度, 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 (A1) 式联合反演, 即可得到储层岩石孔隙流体的  $D$ - $T_2$  分布, 国产的纽迈核磁共振岩心分析仪 MR-DF 的  $D$ - $T_2$  采集就是采用的该序列.

2) STE-PFG 脉冲序列: 将 PFG 脉冲序列的第一个  $180^\circ$  脉冲替换为 2 个  $90^\circ$  脉冲, 对称脉冲梯度施加在第一个和第二个  $90^\circ$  脉冲, 第三个  $90^\circ$  脉冲和第一个  $180^\circ$  脉冲之间, 其余的与图 3(a) 的 PFG 序列相同, 如图 3(b) 所示.

由于在第二个和第三个  $90^\circ$  脉冲之间的核磁信号衰减为纵向弛豫, 因此 STE-PFG 脉冲序列的回波幅度如下式:

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^s f(T_{1q}, D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{t_1}{T_{1q}}\right) \times \exp\left[-\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3}\right) D_p\right] \times \exp\left[-\frac{(i-1) \cdot T_E + t_0}{T_{2j}}\right], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A2})$$

式中,  $b_{ik}$  代表脉冲梯度为  $G_k$  时, 第  $i$  个回波的幅度;  $f(T_{1q}, D_p, T_{2j})$  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;  $\delta$  为梯度脉冲持续时间;  $\Delta$  为两个梯度脉冲间的间隔;  $T_E$  为后续 CPMG 序列的回波间隔;  $t_1$  为第二个  $90^\circ$  和第三个  $90^\circ$  脉冲之间的间隔, 也即纵向弛豫的时间;  $t_0$  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, (A2) 式中的纵向弛豫因子  $\exp(-t_1/T_1) \approx 1$ , 此时 STE-PFG 脉冲序列的回波信号衰减可表示为 (A1) 式; 改变脉冲输出梯度, 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 (A1) 式联合反演, 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  $D$ - $T_2$  采集就是采用的该序列.

当测量对象中含有短弛豫组分时 ( $T_2 < t_0$ ), 由 (A1) 式可知, 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的低估, 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 (A1) 式、(A2) 式可知, 在  $t_0, G, \delta$  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  $\Delta$  比 PFG 大, 因此 STE-PFG 的扩散系数测量范围比 PFG 大.

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, 而且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 3(b) 的 STE-PFG 序列相同, 如图 3(c) 所示.

BP-PFG 脉冲序列的双梯度设计主要用于克服储层岩石的内部磁场梯度, 因此考虑内部磁场梯度  $g_0$  时, BP-

PFG 脉冲序列的回波幅度如下式:

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left[-\frac{(i-1) \cdot T_E + t_0}{T_{2j}}\right] \times \exp\left[-4\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{6} - \frac{t_0}{8}\right) D_p\right] \times \exp\left[\frac{-\gamma^2 D_p G_k g_0 \delta t_0 (\delta_1 - \delta_2)}{2}\right] \times \exp\left(\frac{-\gamma^2 D_p t_0^3 g_0^2}{48}\right), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A3})$$

式中,  $b_{ik}$  代表脉冲梯度为  $G_k$  时, 第  $i$  个回波的幅度;  $\delta$  为梯度脉冲持续时间,  $\delta_1$  为脉冲梯度距离左侧紧邻扳转脉冲的时间间隔,  $\delta_2$  是脉冲梯度距离右侧紧邻扳转脉冲的时间间隔;  $\Delta$  为同向脉冲梯度间的间隔;  $T_E$  为后续 CPMG 序列的回波间隔;  $t_1$  为第二个  $90^\circ$  和第三个  $90^\circ$  脉冲之间的间隔, 也即纵向弛豫的时间;  $t_0$  为第一个窗口中横向弛豫的时间;  $g_0$  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如下式:

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left[-\frac{(i-1) \cdot T_E + t_0}{T_{2j}}\right] \times \exp\left[-\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3}\right) D_p\right] \times \exp\left\{-\gamma^2 D_p G_k g_0 \delta \left[t_0 \Delta - \frac{2\delta^2}{3} - \delta(\delta_1 + \delta_2) - (\delta_1^2 + \delta_2^2)\right]\right\} \exp\left[-\gamma^2 D_p \frac{t_0^2}{4} \left(t_1 + \frac{t_0}{3}\right) g_0^2\right], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A4})$$

式中,  $\delta_1$  为 STE-PFG 序列中脉冲梯度距离左侧紧邻扳转脉冲的时间间隔,  $\delta_2$  是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.

对比 (A2) 式、(A3) 式、(A4) 式可知, 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  $t_0, t_1, G, \delta$  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  $E(g_0^2) < \text{BP-PFG 的 } E(g_0^2)$ , 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, 则 BP-PFG 脉冲序列的回波幅度如下式:

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left[-\frac{(i-1) \cdot T_E + t_0}{T_{2j}}\right] \times \exp\left[-4\gamma^2 G_k^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{6} - \frac{t_0}{8}\right) D_p\right], \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A5})$$

改变脉冲输出梯度, 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 (A5) 式联合反演, 即可得到储层岩石孔隙流体的  $D$ - $T_2$  分布. 曲岩涛

等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.

4) 改良式CPMG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, 同时将第一个窗口中由扩散弛豫引起的衰减记录到第二个窗口采集的回波幅度中, 如图3(d)所示, 该序列最先用于储层岩石内部磁场梯度的研究.

改良式CPMG脉冲序列的回波幅度如下式:

$$b_{ik} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \times \exp\left(-\frac{i \cdot \gamma^2 G^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^3}\right) \exp\left(-\frac{i \cdot t_0}{NE_{1k} \cdot T_{2j}}\right), \\ i = 1, 2, \dots, NE_{1k}; \quad NE_{1k} \cdot T_{E1} = t_0, \\ \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{\gamma^2 G^2 t_0^3 D_p}{12NE_{1k}^2}\right) \times \exp\left[-\frac{t_0 + (i - NE_{1k}) \cdot T_E}{T_{2j}}\right], \\ i = NE_{1k} + 1, NE_{1k} + 2, \dots \end{cases} \quad (A6)$$

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;  $t_0$  为第一个窗口的长度. 改变第一个窗口的回波个数, 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(A6)式联合反演, 即可得到储层岩石孔隙流体的 $D-T_2$ 分布.

5) 脉冲编程脉冲序列: 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采集两个回波, 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、记录扩散弛豫衰减信息, 如图3(e)所示.

脉冲编程脉冲序列的回波幅度如下式:

$$b_{ik} = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{i}{12} \gamma^2 G^2 T_{E1k}^3 D_p\right) \times \exp\left(-\frac{i \cdot T_{E1k}}{T_{2j}}\right), \\ i = 1, 2 \\ \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{1}{6} \gamma^2 G^2 T_{E1k}^3 D_p\right) \times \exp\left[-\frac{2T_{E1k} + (i - 2) \cdot T_E}{T_{2j}}\right], \\ i = 3, 4, 5, \dots \end{cases} \quad (A7)$$

式中,  $b_{ik}$  代表第一个窗口的回波间隔为 $T_{E1k}$ 时第 $i$ 个回波的回波幅度. 改变第一个窗口的回波间隔, 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(A7)式联合反演, 即可得到储层岩石孔隙流

体的 $D-T_2$ 分布. MR Scanner的 $D-T_2$ 二维核磁测井就是采用扩散编程脉冲序列, 并取得了不错的应用效果.

6) 多回波间隔CPMG脉冲序列: 利用常规的CPMG脉冲序列, 无需重新设计脉冲序列, 只要改变回波间隔采集一系列自旋回波串, 如图3(f)所示.

多回波间隔CPMG脉冲序列的回波幅度如下式:

$$b_{ik} = \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^n f(D_p, T_{2j}) \exp\left(-\frac{i}{12} \gamma^2 G^2 T_{E1k}^3 D_p\right) \times \exp\left(-\frac{i \cdot T_{E1k}}{T_{2j}}\right), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (A8)$$

式中,  $b_{ik}$  代表回波间隔为 $T_{E1k}$ 时第 $i$ 个回波的回波幅度. 改变回波间隔, 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(A8)式联立反演, 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.

### 参考文献

- [1] Torrey H C, Korringa J, SeEVERS D O 1959 *Physical Review Letters* **3** 418
- [2] Brown R J S, Gamson B W 1960 *Journal of Petroleum Technology* **219** 201
- [3] Morriss C E, Macinnis J, Freedman R, Smaardyk J, Straley C, Kenyon W E, Vinegar H S, Tutunjian P N 1993 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 37th Annual Logging Symposium* Calgary, Alberta, June 13-16, 1993 GGG
- [4] Dunn K J, LaTorraca G A, Warner J L, Bergman D J 1994 *The Society of Petroleum Engineers (SPE)'s Annual Technical Conference and Exhibition* New Orleans, Louisiana, September 25-28, 1994 28367
- [5] Chang D H, Vinegar H J, Morriss C, Straley C 1994 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 35th Annual Logging Symposium* Tulsa, Oklahoma, June 19-22, 1994 A
- [6] Coates G R, Marschall D, Mardon D, Galford J 1997 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 38th Annual Logging Symposium* Houston, Texas, June 15-18, 1997 QQ
- [7] Kleinberg R L, Boyd A 1997 *The Society of Petroleum Engineers (SPE)'s Annual Technical Conference and Exhibition* San Antonio, Texas, October 5-8, 1997 38737
- [8] Wang W M, Guo H K, Ye C H 2001 *Acta Petrolei Sinica* **22** 40 (in Chinese) [王为民, 郭和坤, 叶朝辉 2001 石油学报 **22** 40]
- [9] Xiao L Z, Liu T Y, Fu R S 2004 *Acta Petrolei Sinica* **25** 38 (in Chinese) [肖立志, 刘堂晏, 傅容珊 2004 石油学报 **25** 38]

- [10] Zhou B, Wang W M, Guo H K, Huang Y Z, Luo X R 2004 *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)* **29** 495 (in Chinese) [周波, 王为民, 郭和坤, 黄延章, 罗晓容 2004 地球科学 (中国地质大学学报) **29** 495]
- [11] He Y D, Mao Z Q, Xiao L Z, Ren X J 2005 *Chinese Journal of Geophysics* **48** 373 (in Chinese) [何雨丹, 毛志强, 肖立志, 任小军 2005 地球物理学报 **48** 373]
- [12] Xie R H, Xiao L Z, Fu S Q, Liu J J, Liu T D 2007 *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* **31** 34 (in Chinese) [谢然红, 肖立志, 傅少庆, 刘家军, 刘天定 2007 中国石油大学学报 (自然科学版) **31** 34]
- [13] Xie R H, Xiao L Z, Fu S Q 2008 *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* **32** 44 (in Chinese) [谢然红, 肖立志, 傅少庆 2008 中国石油大学学报 (自然科学版) **32** 44]
- [14] Gao S S, Ye L Y, Xiong W, Guo H K, Hu Z M 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 128902
- [15] Akkurt R, Vinegar H J, Tutunjian P N, Guillory A J 1995 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 36th Annual Logging Symposium* Paris, June 26–29, 1995 N
- [16] Akkurt R, Marshall D, Eyvazzadeh R Y, Gardner J S, Mardon D, Dunn K J 1998 *The Society of Petroleum Engineers (SPE)'s Annual Technical Conference and Exhibition* New Orleans, Louisiana, September 27–30, 1998 49014
- [17] Mardon D, Gardner J S, Coates G R, Vinegar H J 1996 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 37th Annual Logging Symposium* New Orleans, Louisiana, June 16–19, 1996 K
- [18] Xie R H, Xiao L Z, Liu J J 2011 *Chinese Journal of Geophysics* **54** 2184 (in Chinese) [谢然红, 肖立志, 刘家军 2011 地球物理学报 **54** 2184]
- [19] Li Y, Xiao L Z, Sun H F 2012 *Chinese Journal of Magnetic Resonance* **29** 21 (in Chinese) [李洋, 肖立志, 孙华峰 2012 波谱学杂志 **29** 21]
- [20] Xiao L Z 2007 *Well Logging Technology* **31** 401 (in Chinese) [肖立志 2007 测井技术 **31** 401]
- [21] Xie R H 2008 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: China University of Petroleum (Beijing)) (in Chinese) [谢然红 2008 博士学位论文 (北京: 中国石油大学 (北京))]
- [22] Sun B Q, Dunn K J 2002 *Phys. s Rev. E* **65** 051309
- [23] Sun B Q, Dunn K J 2002 *International Symposium of the Society of Core Analysts* Monterey, CA, September 22–25, 2002 38
- [24] Hürlimann M D, Venkataramanan L 2002 *Journal of Magnetic Resonance* **157** 31
- [25] Hürlimann M D, Venkataramanan L, Flaum C, Speier P, Karmonik C, Freedman R, Heaton H 2002 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 43th Annual Logging Symposium* Oiso, Japan, June 2–5, 2002 FFF
- [26] Hürlimann M D, Venkataramanan L, Flaum C 2002 *Journal of Chemical Physics* **117** 10223
- [27] Song Y Q, Venkataramanan L, Hürlimann M D, Flaum M, Frulla P, Straley C 2002 *Journal of Magnetic Resonance* **154** 261
- [28] Dunn K J 2010 *Nuclear Magnetic Resonance Logging Theory and Application* (Shandong: China University of Petroleum Press) p133–146 (in Chinese) [邓克俊 2010 核磁共振测井理论及应用 (山东: 中国石油大学出版社) 第 133–146 页]
- [29] Hürlimann M D, Flaum M, Venkataramanan L, Flaum C, Freedman R, Hirasaki G J 2003 *Magnetic Resonance Imaging* **21** 305
- [30] Flaum M, Chen J, Hirasaki G J 2004 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 45th Annual Logging Symposium* Noordwijk, Holland, June 6–9, 2004 JJ
- [31] Sun B Q, Dunn K J, Bilodeau B J, Dalen S C V, Stonard S W, Rushaid A 2004 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 45th Annual Logging Symposium* Noordwijk, Netherlands, June 6–9, 2004 KK
- [32] Sun B Q, Dunn K J 2004 *Magnetic Resonance Imaging* **23** 259
- [33] Sun B Q, Oloson M, Baranowski J, Chen S, Li W, Georgi D 2006 *The Society of Petrophysicists and Well Log Analysts (SPWLA)'s 47th Annual Logging Symposium* Veracruz, Mexico, June 4–7, 2006 EE
- [34] Xie R H, Xiao L Z 2009 *Chinese Journal of Geophysics* **52** 2410 (in Chinese) [谢然红, 肖立志 2009 地球物理学报 **52** 2410]
- [35] Shi Y J, Liu T D 2009 *Well Logging Technology* **33** 584 (in Chinese) [石玉江, 刘天定 2009 测井技术 **33** 584]
- [36] Tan M J, Zou Y L, Liu B K, Yang X 2011 *Well Logging Technology* **35** 130 (in Chinese) [谭茂金, 邹友龙, 刘兵开, 杨萱 2011 测井技术 **35** 130]
- [37] Tan M J, Zou Y L 2012 *Chinese Journal of Geophysics* **55** 683 (in Chinese) [谭茂金, 邹友龙 2012 地球物理学报 **55** 683]
- [38] Hu F L, Zhou C C, Li C L, Xu H J, Zhou F M, Si Z W 2012 *Petroleum Exploration & Development* **39** 552 (in Chinese) [胡法龙, 周灿灿, 李潮流, 徐红军, 周凤鸣, 司兆伟 2012 石油勘探与开发 **39** 552]
- [39] Stejskal E O, Tanner J E 1965 *The Journal of Chemical Physics* **42** 288
- [40] Stejskal E O 1965 *The Journal of Chemical Physics* **43** 3597
- [41] Tanner J E 1970 *The Journal of Chemical Physics* **52** 2523
- [42] Karlicek J R F, Lowe I J 1980 *Journal of Magnetic Resonance* **37** 75
- [43] Cotts R M, Hoch M J R, Sun T, Markert J T 1989 *Journal of Magnetic Resonance* **83** 252
- [44] Latour L L, Li L, Sotak C H 1993 *Journal of Magnetic Resonance* **101** 72
- [45] Vandusschoten D 1995 *Journal of Magnetic Resonance* **112** 237
- [46] Mair R W, Cory D G, Peled S, Tseng C H, Patz S, Walsworth R L 1998 *Journal of Magnetic Resonance* **135** 478

- [47] Zhang X, Li C H, Ye C H, Liu M L 2001 *Analytical Chemistry* **73** 3528
- [48] Albina R M, Vladimir D S 2007 *Journal of Magnetic Resonance* **188** 122
- [49] Hunter M W, Jackson A N, Callaghan P T 2010 *Journal of Magnetic Resonance* **204** 11
- [50] Qu Y T, Jiang Z M, Shi J S, Zhu T T, Meng X H, Wang W M 2012 *Chinese Journal of Magnetic Resonance* **29** 51 (in Chinese) [曲岩涛, 姜志敏, 史京生, 朱涛涛, 孟小海, 王为民 2012 波谱学杂志 **29** 51]
- [51] Li X J, Nie S D, Wang Y J, Yang P Q 2013 *Chinese Journal of Magnetic Resonance* **30** 322 (in Chinese) [李新军, 聂生东, 王远军, 杨培强 2013 波谱学杂志 **30** 322]
- [52] Wang W M, Li P, Ye C H 2001 *Science in China (Series A)* **31** 730 (in Chinese) [王为民, 李培, 叶朝辉 2001 中国科学 **31** 730]
- [53] Venkataramanan L, Song Y Q, Hürlimann M D 2002 *IEEE Transactions on Signal Processing* **50** 1017
- [54] Wang Z D, Xiao L Z, Liu T Y 2003 *Science in China (Series G)* **33** 323 (in Chinese) [王忠东, 肖立志, 刘堂宴 2003 中国科学 **33** 323]
- [55] Jiang R Z, Yao Y P, Miao S, Zhang C S 2005 *Acta Petrolei Sinica* **26** 57 (in Chinese) [姜瑞忠, 姚彦平, 苗盛, 张春生 2005 石油学报 **26** 57]
- [56] Pan K J, Chen H, Tan Y J 2008 *Acta Physica Sinica* **57** 5956 (in Chinese) [潘克家, 陈华, 谭永基 2008 物理学报 **57** 5956]
- [57] Lin F, Wang Z W, Li J Y, Zhang X A, Jiang Y L 2011 *Applied Geophysics* **8** 233
- [58] Ito K, Jin B T 2011 *Inverse Problems* **27** 5005
- [59] Gao Y, Xiao L Z, Xie Q M 2014 *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* (自然科学版) **38** 50 (in Chinese) [高阳, 肖立志, 谢庆明 2014 中国石油大学学报 **38** 50]
- [60] Sun B Q, Dunn K J 2005 *Journal of Magnetic Resonance* **172** 152
- [61] Tønning E, Polder D, Callaghan P T, Engelsens S B 2007 *Journal of Magnetic Resonance* **188** 10
- [62] Xie R H, Xiao L Z, Liu J J, Dunn K J 2009 *Chinese Journal of Geophysics* **52** 2913 (in Chinese) [谢然红, 肖立志, 刘家军, 邓克俊 2009 地球物理学报 **52** 2913]
- [63] Tan M J, Zou Y L, Zhou C C 2013 *Computers & Geosciences* **51** 366
- [64] Zhou X L, Nie S D, Wang Y J, Zhang Y L, Yang P Q 2013 *Chinese Journal of Magnetic Resonance* **30** 541 (in Chinese) [周小龙, 聂生东, 王远军, 张英力, 杨培强 2013 波谱学杂志 **30** 541]



# A modified design of pulse sequence and inversion method for $D$ - $T_2$ two-dimensional NMR\*

Fan Yi-Ren<sup>1)2)</sup> Wu Fei<sup>1)2)†</sup> Li Hu<sup>1)2)</sup> Huo Ning-Ning<sup>1)</sup> Wang Yao-Sen<sup>3)</sup>  
Deng Shao-Gui<sup>1)2)</sup> Yang Pei-Qiang<sup>4)</sup>

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) (Research Institute of Shenzhen Branch, CNOOC Co. , Ltd. , Guangzhou 510240, China)

4) (Shanghai Niumag Electronic Technology Co. , Ltd. , Shanghai 200333, China)

( Received 1 December 2014; revised manuscript received 26 January 2015 )

## Abstract

In face of the increasingly complicated exploration targets,  $D$ - $T_2$  2D NMR technology cannot balance the range of diffusion coefficient and transverse relaxation resolution in practice. As the key technique of  $D$ - $T_2$  2D NMR, the property of pulse sequence affects its application. A modified design of bivariate  $D$ - $T_2$  pulse sequence based on pulsed field gradient is proposed after summarizing the technical characteristics of PFG, STE-PFG, BP-PFG, modified CPMG, “diffusion editing” and multi echo interval CPMG pulse sequences, which effectively integrates the advantages of  $D$ - $T_2$  pulse sequences based on pulsed field gradient and constant field gradient. In order to reduce the difficulties that the existing  $D$ - $T_2$  inversion methods cannot balance the inversion efficiency and accuracy, we propose a joint TSVD inversion method which sets the echos from the second window as the main part supplemented by the echos from the first window. Numerical simulation results for gas-water, oil-water, heavy oil and gas-oil-water models in different SNRs indicate that the  $D$ - $T_2$  modified pulse sequence can balance the diffusion coefficient measurement range and transverse relaxation resolution successfully, and the joint TSVD inversion method balances the inversion efficiency and accuracy successfully. Above all, the  $D$ - $T_2$  modified pulse sequence and the joint TSVD inversion method have wide applications in the exploration and formation evaluation for unconventional reservoir, and create favorable conditions for the development of  $D$ - $T_2$  2D NMR technology.

**Keywords:** pulse sequence, pulsed field gradient, bivariate, joint TSVD inversion method

**PACS:** 93.90.+y, 82.56.Jn, 93.85.Bc

**DOI:** 10.7498/aps.64.099301

\* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(Grant No. 2011ZX05020008-002), the National Scientific Instrument Development Project of China(Grant No. 2013YQ170463), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41174099, 41474100).

† Corresponding author. E-mail: [feizai123@126.com](mailto:feizai123@126.com)