

# 一种基于井下硬件平台的反演方法

武雪强 潘浩 李学伟

(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)

**摘要:**井下地层流体核磁分析模块是地层测试器的重要组成部分,受到数据传输带宽的限制,无法将大量回波数据上传到地面进行实时分析,需要在井下硬件平台上完成 T2 谱反演。以 DSP 为主要处理芯片的井下硬件平台,无法在规定时间内完成 SVD(奇异值分解)反演算法。根据反演算法的特点,通过在地面提前求解不同核心矩阵  $A$  的逆矩阵、把多个逆矩阵保存在井下非易失性存储芯片中,使 DSP 的运算时间能够从 10 s 减小到 1.33 s,在 6.6 s 内完成反演算法。在井下地层流体模块硬件平台上进行实验,结果表明,该方法能够有效缩短运算时间,在规定时间内完成反演算法。

**关键词:**地层测试;核磁测井;井下 SVD 反演;多矩阵存储

**中图分类号:** TN911.7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Inversion method based on hardware platform

Wu Xueqiang Pan Hao Li Xuewei

(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The down-hole fluid NMR analysis module is an important part of formation tester measures too large echo data which is constrained by data transmission bandwidth so that it is necessary to complete the inversion of T2 spectrum on the hardware platform. The SVD (singular value decomposition) inversion algorithm can not be completed within the specified time, which is based on DSP as the main processing chip. According to the characteristics of inversion method, solving the inverse matrix of different matrix  $A$  in advance and storing the results in the downhole nonvolatile memory chip make DSP operation time be reduced from 10 s to 1.33 s, in the 6.6 s time to complete the inversion algorithm. The results show that the proposed method can effectively shorten the computation time and complete the inversion algorithm within the specified time on the hardware platform of downhole fluid module.

**Keywords:** formation test; nuclear magnetic resonance logging; downhole SVD inversion; multi matrix storage

### 1 引言

模块式地层测试器通过井下流体分析模块直接对流体进行分析,确定流体性质,为地层评价提供宝贵数据<sup>[1-2]</sup>。目前斯伦贝谢公司研制出光学流体分析模块并在此基础上研制出其他流体分析模块,贝克休斯公司研制出组合式井下流体分析仪 IFX,哈里伯顿公司为 RDT 研发出井下核磁共振实验室<sup>[3]</sup>。我国在这方面的研究起步较晚,但是近年来国内也取得了很大的进展。中海油服推出的地层测试器(EFDT)具有测压、取样、反向注入和流体分析(主要包括密度、电导率和光谱)等功能<sup>[4]</sup>。井下核磁流体分析模块在原状储层温度和压力情况下,测量流体的弛豫时间和扩散系数,为识别地层流体提供精确的流体数

据。该模块与其他井下流体分析模块,可以对井下地层流体做出更为全面的分析,达到精确评价地层的目的。井下流体核磁分析模块测得的大量回波数据受到传输带宽的限制,需要将数据压缩<sup>[5]</sup>。本文提出的方法能够有效压缩数据,达到数据传输带宽要求。

### 2 核磁共振测井原理

原子核在静磁场中被极化,继续施加拉莫尔频率的交变脉冲,原子核会吸收能量,产生核磁共振现象。在停止施加交变脉冲后,原子核会由高能态恢复到平衡态,这个过程叫做弛豫。横向弛豫时间为区分空腔流体提供重要依据,是测井的主要目标。测量的方法常采用通用脉冲序列发生器产生 CPMG 脉冲序列<sup>[6]</sup>。

CPMG 脉冲序列为 90°脉冲后,等待时间  $\tau$ ,施加第一个 180°脉冲,然后等待  $2\tau$  时间,施加第二个 180°脉冲,依此类推,直到第  $n$  个 180°脉冲。在两个 180°脉冲之间,会激发出测井所需要的回波信号。由 CPMG 脉冲序列激发产生的回波信号如图 1 所示。

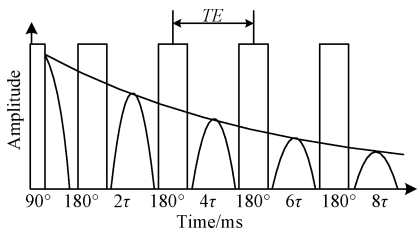


图 1 CPMG 脉冲序列激发产生的回波信号

单个孔隙流体的横向弛豫时间按单指数规律衰减,储存流体中包含大小不同的空隙流体。核磁测井仪器在测量储层流体的过程中,得到回波衰减信号  $M(t)$  是一系列指数衰减信号的叠加,即:

$$M(t) = \sum M_i(0)e^{-t/T2_i} \quad (1)$$

式中:  $M(t)$  为  $t$  时刻测量回波衰减曲线;  $M_i(0)$  为第  $i$  个空隙流体回波的初始值;  $T2_i$  为第  $i$  个横向弛豫分量的衰减时间常数。不同流体介质下的多指数衰减规律如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

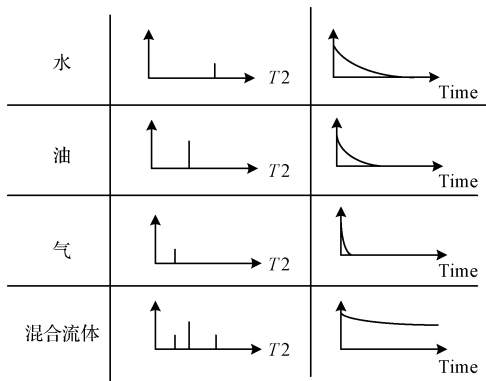


图 2 不同流体介质下的多指数衰减规律

井下地层流体核磁分析模块以流体中的氢核为研究对象,采用 CPMG 自旋回波的方法来获得地层中氢核发生核磁共振后的回波衰减信号。根据测得的回波衰减信号,得到反映空隙流体特性的  $T2$  谱信息,需要采用一定的算法对回波信号进行数据处理。由回波衰减曲线到  $T2$  谱反演的示意如图 3 所示。

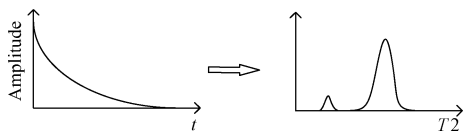


图 3 回波衰减曲线到  $T2$  谱反演的示意

### 3 $T2$ 谱反演

#### 3.1 SVD 反演算法

核磁共振的横向弛豫时间呈多数衰减规律:

$$\sum_{i=1}^m x_i e^{-t_j/T2_i} = g_j \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (2)$$

式中:  $m$  为布点个数;  $n$  为回波个数;  $t_j$  为采集时间,是回波间隔的整数倍;  $x_i$  为第  $i$  个弛豫分量的初始幅度;  $T2_i$  为横向弛豫时间常数;  $g_j$  为回波幅度。如果仪器噪声为  $\mu_j$ , 上式写成方程组的形式:

$$\begin{cases} x_1 e^{-t_1/T2_1} + x_2 e^{-t_1/T2_2} + \dots + x_m e^{-t_1/T2_m} = g_1 + \mu_1 = y_1 \\ x_1 e^{-t_2/T2_1} + x_2 e^{-t_2/T2_2} + \dots + x_m e^{-t_2/T2_m} = g_2 + \mu_2 = y_2 \\ \dots \\ x_1 e^{-t_n/T2_1} + x_2 e^{-t_n/T2_2} + \dots + x_m e^{-t_n/T2_m} = g_n + \mu_n = y_n \end{cases}$$

用矩阵的形式表达为:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{g} + \boldsymbol{\mu} = \mathbf{Y} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{A} = e^{-t_j/T2_i} = e^{-j \cdot TE/T2_i}$  是  $n \times m$  阶矩阵,  $i = 1, \dots, m$ ,  $j = 1, \dots, n$ ;  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  是  $m$  维列向量;  $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T$ ,  $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T$ ,  $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$  是  $n$  维列向量;

在核心矩阵  $\mathbf{A}$  确定的情况下,根据核磁共振测井仪器测得的原始回波数据  $\mathbf{Y}$ ,要得到表现岩石物理特性和流体特性的  $\mathbf{X}$ ,需要求解矩阵方程。

矩阵  $\mathbf{A}$  可以分解为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}_r^T \quad (4)$$

式中:  $r$  是矩阵  $\mathbf{A}$  的秩;  $\mathbf{U}$  是  $n \times r$  阶矩阵,  $\mathbf{S}$  是矩阵  $\mathbf{A}$  的  $r$  个奇异值组成的  $r \times r$  阶对角矩阵,  $\mathbf{V}$  是  $m \times r$  阶矩阵。则方程的解为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{V}_r \mathbf{S}_r^{-1} \mathbf{U}_r^T \mathbf{Y} \quad (5)$$

矩阵  $\mathbf{A}$  的条件数很大,常呈病态,当测得的回波数据有微小的测量误差,方程的解就会发生很大的变化,可以采用截断法解决。截断法根据测井仪器信噪比和核心矩阵的最大奇异值,确定截断值,把小于截断值的奇异值置位零,保证解的稳定性<sup>[8-9]</sup>。通常情况下,方程求出的解会出现负值的情况,但是根据解的物理意义可以知道,  $x$  不可能为负值。因此,需要对方程的解进行非负性约束。

#### 3.2 SVD 反演算法在井下的应用分析

SVD 反演算法包括对系统核心矩阵  $\mathbf{A}$  的奇异值分解、截断值比较和矩阵相乘。在井下地层流体分析模块的硬件条件下,完成 SVD 反演算法所需的时间为:

$$t = \frac{18n^3 + 4n^2 + P_2 + 2m^2n + 2nm^2 + 2n^2 - 2m - 2n}{f \times 10^6} \quad (6)$$

式中:  $n$  为回波个数,  $m$  为布点数,  $f$  为 DSP 工作频率,  $P_2$  为截断时所需要的指令数。假设 DSP 的工作频率为  $f$  为 100 MHz,布点数为  $m$  为 256,采集的回波个  $n$  为 1 000,通过计算,可以得到算法总共执行的时间将近 10 s<sup>[10]</sup>。在实际测井过程中,如果一次测量体极化时间是 6 s、回波间

隔 0.6 ms、回波个数是 1 000,完成一次测量所需要的时间是 6.6 s。以 DSP 为主要硬件平台的井下地层流体分析模块在 6.6 s 时间内无法完成 T2 谱反演,需要减少井下硬件平台的运算时间。

在反演之前,需要进行测井参数的设置,包括设置回波间隔 TE、布点数  $m$ 、回波个数  $n$  等。根据核心矩阵  $A = e^{-j \cdot TE/T_2}$  的公式可以知道,当测井参数设置完成后,核心矩阵  $A$  也能够唯一确定。根据反演的需求,确定测井参数,得到核心矩阵  $A$ ,在地面完成矩阵  $A$  的求逆运算,并把截断后的逆矩阵存储在井下测井仪器中的非易失性存储芯片中。井下地层流体分析模块在反演时,首先读取存储在井下存储芯片中的逆矩阵,再与经过处理后的回波衰减矩阵  $Y$  相乘,得到 T2 谱。

通过存储矩阵的方式,井下反演所需要的时间分为 DSP 从井下存储芯片中读取逆矩阵的时间、和测量的回波衰减矩阵  $Y$  相乘的时间,即:

$$t = \frac{32 \times m \times n}{f_1 \times 10^6} + \frac{n \times m + (n-1) \times m}{f \times 10^6} \quad (7)$$

式中:  $f_1$  为数据传输速率,  $n$  为回波个数,  $m$  为布点数,  $f$  为 DSP 工作频率。在井下硬件平台上,以最大的运算量进行假设: DSP 的工作频率为  $f$  为 100 MHz,布点数为  $m$  为 256,采集的回波个  $n$  为 1 000,数据读取速率为 10 Mbit/s,通过计算,可以得到算法总共执行的时间 1.33 s,满足井下反演需求。

回波间隔和回波个数是回波数据采集的重要控制参数,对反演效果影响较大,需要根据实际情况选择合适的回波间隔和回波个数;布点数对 T2 谱的影响较小,在不使方程过分病态的情况下,可以根据需要选取<sup>[11]</sup>。

## 4 硬件电路实现及实验

### 4.1 硬件电路设计

井下地层流体分析模块主控电路通过测井仪器总线实现与地面系统的数据和命令的交互功能,其典型工作流程是将模式时序表信息下发到事件控制电路,将采集到的辅助参数信息和采集处理电路获得的回波信息经过反演处理后上传给地面系统。主控电路采用 DSP+FPGA 框架,其中的 DSP 负责与地面系统的通信转发、与事件电路通信和接收数据的处理和反演等, FPGA 则主要是实现与存储芯片的通信,将核心矩阵  $A$  的逆矩阵和测得的回波数据存储在存储芯片中。该框架之间能够准确、高速和实时通讯,充分发挥 DSP 的高速计算和 FPGA 的复杂逻辑控制能力,发挥各自的优势<sup>[12-13]</sup>。主控电路的结构如图 4 所示。

测井前,将不同参数设置下核心矩阵  $A$  的逆矩阵存储在存储芯片 M25P64 中。井下反演时,主控电路的 DSP 首先接收事件电路采集到的回波数据,经过数据处理后得到回波衰减数据,然后再读取存储芯片里的逆矩阵,最后再让两者相乘,得到反映储层流体的 T2 谱数据,等待上位

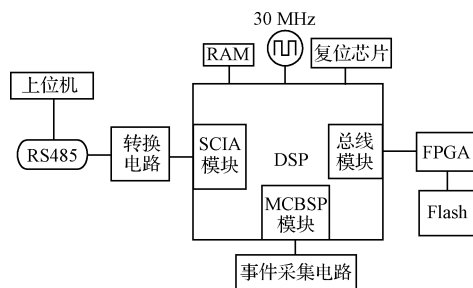


图4 主控电路结构

机读取。井下地层流体模块的主控电路如图 5 所示。

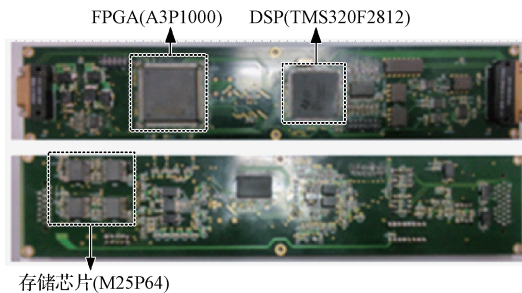


图5 地层流体模块的主控电路

### 4.2 测试实验

1)对柴油样品实验。仪器参数设置如表 1。

表 1 井下流体分析模块参数设置表

参数(Parameter)	值(Value)	参数(Parameter)	值(Value)
工作频率/kHz	4 320	回波个数 NE	1 500
90°脉/μs	22	等待时间 TW/ms	3 000
180°宽/μs	44	布点数	64
回波间隔 TE/μs	600	PAPS 个数	10

核磁流体分析模块测得的回波衰减曲线如图 6 所示。将测井仪器所测数据,分别在井下和井上进行反演得到的结果如图 7 所示。

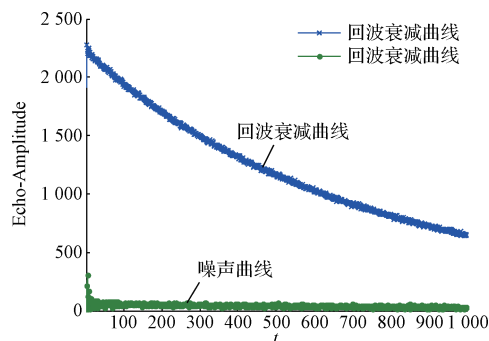


图6 柴油的回波衰减曲线

2)对柴油、硅油、无水硫酸铜 3 种样品进行实验。仪器参数设置如表 1 所示,实验结果如图 8、9 所示。

从图 7 中可以看出,对柴油样品进行的井上反演和井

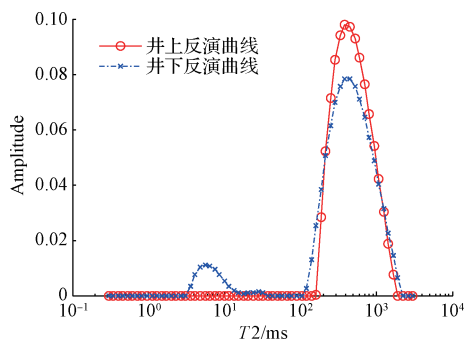


图7 柴油的反演曲线

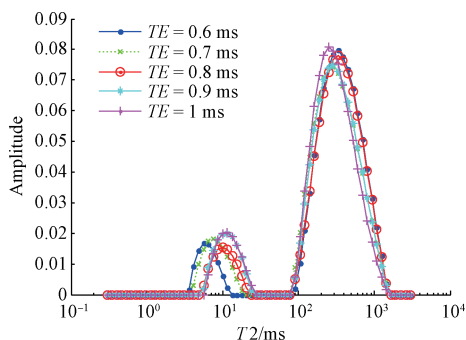


图10 回波间隔不同的反演

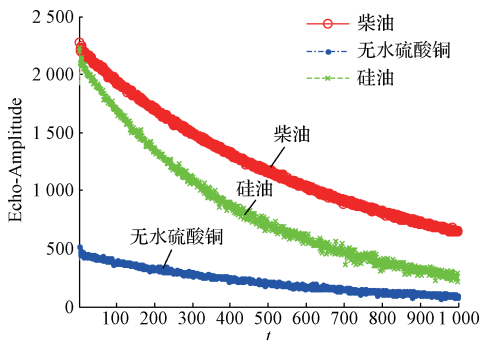


图8 3种不同样品的回波衰减曲线

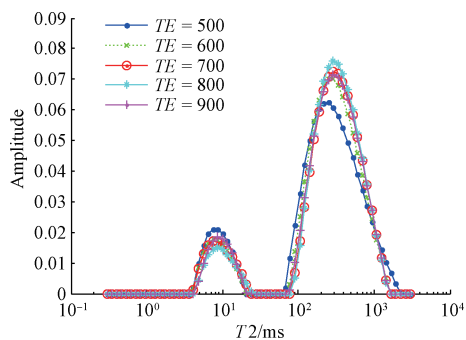


图11 回波个数不同的井下反演

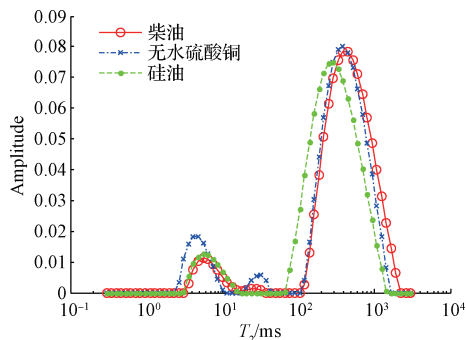


图9 3种不同样品的井下反演曲线

下反演的  $T_2$  谱虽然在 3~15 ms 处有一个突起,但是大部分重叠在一起,主要分布 160~2 000 ms。经过计算,两条曲线的相关系数为 0.981 9。如果将井上反演的  $T_2$  谱作为标准谱,井下反演与标准谱的误差的标准差为 0.78%。受限于井下硬件平台的数据处理精度和速度,井下反演会出现一定的误差,但是在误差允许的范围内,能够基本符合井上反演的结果,能够满足井下快速反演的需求。

3)对于硅油样品进行实验。改变回波间隔 TE 和回波个数 NE,其他参数设置如表 1 所示,得到的反演结果如图 10 和 11 所示。

图 10 和图 11 为在不同的反演参数设置下,对硅油样品进行测试得到相应设置下的  $T_2$  谱曲线。图 10 可以看出在不同的回波间隔下,长组分的  $T_2$  谱基本重合,但是短弛豫组分的会出现一些差异。图 11 可以看出在不同的回

波间隔下,  $T_2$  谱基本重合在一起,但是当回波间隔为 500 的时候,差异比较明显。所以,在反演时,回波间隔和回波个数对反演影响较大,需要进行合理参数设置。

## 5 结论

根据井下地层流体核磁分析模块的应用需求,需要在井下完成 SVD 反演算法。根据算法应用特点,在地面提前求解反演时所需核心矩阵  $A$  的逆,并在测井前将逆矩阵存储在井下存储芯片中。实验结果表明,通过多矩阵存储的方式,井下硬件平台能够在规定时间内完成井下反演算法,使得数据量满足带宽传输要求,该方法可以适用于井下地层流体分析模块。

## 参考文献

- [1] 刘英明. 地层测试器 RDT 原理分析与推广实践[J]. 石油仪器, 2016, 2(3):58-61.
- [2] ZHU K, SONG Y, WANG J. Working principle and application of the modular reservoir description tool RDT[J]. World Well Logging Technology, 2013.
- [3] 杨兴琴,王书南,周子皓. 地层测试与井下流体取样分析技术进展[J]. 测井技术,2012,36(6):551-558.
- [4] 褚晓冬. 地层测试器自动控制的设计与实现[J]. 油气井测试,2015,24(1):71-73.
- [5] 张伟,师奕兵. 声波测井数据压缩的一种 SPIHT 改进算法[J]. 电子测量与仪器学报,2008,22(1):15-19.

(下转第 59 页)